國立臺灣大學理學院地質科學研究所

碩士論文

Department of Geosciences College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

海岸山脈馬達吉達溪剖面之碎屑鋯石及磷灰石

核飛跡定年研究-探討源區山脈之剝蝕歷史

Detrital zircon and apatite fission-track dating of

Madajidachi section in the Coastal Range, Taiwan -

Implications for the exhumation history of source area

許庭慈

Ting-Cih Syu

指導教授:朱美妃 博士

陳文山 博士

Advisor: Mei-Fei Chu, Ph.D.

Wen-Shan Chen, Ph.D.

中華民國 112 年 08 月

August, 2023

國立臺灣大學碩士學位論文

口試委員會審定書

MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

海岸山脈馬達吉達溪剖面之碎屑鋯石及磷灰石核 飛跡定年研究—探討源區山脈之剝蝕歷史 Detrital zircon and apatite fission-track dating of Madajidachi section in the Coastal Range, Taiwan – Implications for the exhumation history of source area

本論文係許庭慈(R08224103)在國立臺灣大學地質科學系暨 研究所完成之碩士學位論文,於民國112年07月03日承下列 考試委員審查通過及口試及格,特此證明。

The undersigned, appointed by the Department / Institute of Geosciences on 03/07/2023 have examined a Master's thesis entitled above presented by Ting-Cih Syu (R08224103) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.



i

致謝

光陰似箭,歲月如梭,不知不覺也在臺大地質度過了四年青春。四年前的我, 懵懂無知又徬徨。幸運的是,這一路走來受到許多貴人的幫忙與提攜。陳文山老 師不僅是我進入研究所後第一位認識的老師,也是我研究生涯十分重要的恩師。 老師看似灑脫的個性,其實內心十分細膩,對於學生的一舉一動都看在眼裡,並 適時給予指導與關心。四年來,在老師身邊學到的不僅是專業知識,更多的是邏 輯思維與待人處事的道理。感謝老師給予我足夠的空間與時間,讓我能夠同時兼 顧學業與工作;感謝老師在野外授予我們的寶貴經驗與知識,真的是獲益良多; 感謝老師在研究上細心指導,每每與老師討論總能激發我更多想法,並指引我研 究的方向,也因為老師的耐心督促之下,才能讓我如期完成這篇論文。感謝陳文 山老師的教導,您的諄諄教誨,學生會銘記在心。

同時,我也要向朱美妃老師、黃韶怡老師,以及顏君毅老師致上敬意。感謝 老師們在百忙之中,願意撥空閱讀這篇落落長的論文,並且親臨口試給予指正。 三位老師不僅提供許多研究上的建議,還十分細心的為我修飾論文中的用字遣詞, 更重要的是,老師們在問問題時都願意耐心等我思考並回覆,也知道我理解的速 度比較慢而放慢語速向我表明問題所在。由衷感謝三位口試委員們的用心與肯定, 讓我能夠順利完成口試,並獲得許多實用的想法與建議。

這篇論文的產出還有兩位大功臣,就是形軒學長與政熹學長!在我剛開始接 觸核飛跡定年的時候,政熹毫不猶豫的把所有相關文獻都給我,並且親自教導我 核飛跡的實驗流程。形軒則在軟體的使用上,一步步指引我如何操作,也時不時 地關心我的實驗進度。在論文寫作時,兩位學長都不厭其煩地陪我一起腦力激盪, 甚至願意幫我修改論文。如果碩士論文也可以掛共同作者,兩位絕對是不二人選。

還沒進入研究所之前,感謝采薇學姐與清淵學長提供我許多申請入學的建議, 讓我在準備考試的時候更游刃有餘;感謝小青學姐在我考上研究所後幫忙與老師 聯繫,也時常關心我的近況。進入研究所之後,原本感到非常徬徨無助且沒有歸 屬感的我,因為有林淑芬老師的鼓勵與關懷,才逐漸敞開心房,真的很謝謝老師。 感謝傅衣健老師與劉家瑄老師對我做報告能力的肯定,提升了我在日後每一堂課 的自信。感謝王昱老師詳細教授了ArcGIS的使用技巧,讓我在繪圖上更得心應手。 感謝鄧茂華老師、李紅春老師、曾泰琳老師、陳宏宇老師、宋聖榮老師、羅立老

ii

師、吳逸民老師、王國龍老師、許鶴瀚老師在系上課程中的教導,也非常感謝鄧 屬予老師與吳樂群老師在青年論壇時,對我的研究給予良好的建議。

核飛跡實驗的部分更是受到許多人的幫忙,首先感謝王昱老師願意將 129 實驗室借我們使用,讓我們擁有專屬的實驗室可以專心做實驗。同時要感謝政熹接 下實驗場所申請的重擔,讓我們有個能夠安心做實驗的地方,也非常感謝釋賢學 長在實驗室管理方面提供許多協助。另外,十分感謝宋聖榮老師與頭大學姐,以 及海研所的蘇志杰老師與張堯禮學姐願意借用抽風櫃,讓我們得以完成重要的溶 蝕步驟,感謝小四學姐在疫情嚴峻時還願意來學校只為了借我們抽真空機。最後

能夠加入阿山研究室這個大家庭,我覺得非常的幸運。大家不但能夠提供專 業協助,也是苦悶研究生活的解藥。特別感謝阿彰、清淵、政熹與彤軒學長們願 意聽我抱怨,並且給予我許多鼓勵支撐我完成碩士論文。感謝吳琮壬學長百忙之 中無私教導我們寶石相關知識,讓我們受用無窮;感謝阿志與士捷學長在岩象薄 片方面給予很多幫助;感謝緯豪學長願意在我報告結束後,主動告訴我可以改進 的地方;感謝秋蓮學姐、嘉佳學姐、紹伊學姐、時全學長、紹安學長、文祥學長、 孝承學長願意和我聊天。同時要感謝我的好戰友們—尚榮和品萱,和你們一起當 助教、帶野外、為論文奮鬥的這些日子,都非常難得且難忘,感謝你們常常幫忙 處理研究室的事務,很開心能夠在碩士遇到你們並一起努力。

除了研究室的夥伴們之外,我也要感謝我的朋友們,為我的碩士生活增添許 多光彩。感謝雅容一直以來的陪伴,在我無助、情緒低落的時候,你總會像太陽 一樣給我許多正能量,能夠認識你真好。感謝大學同學展弘、柏叡、喜絃、家倫、 緯鈞、于傑、易霖、玟璇、恩婷常常陪我一起玩樂,感謝研究所認識的益增、育 廷、佳芸、許堯、家皓,能夠認識你們很幸運。感謝菁英的工作夥伴 Chloe、Sana、 Ginny、Cathy、Jayce、Kevin、Sally、Elsie、Frank、Renee、Dora、Miles、Leo 以 及前同事們,在我需要代班的時候都會義不容辭地幫忙。感謝所有在我低落時曾 給過我鼓勵的人,是你們讓我堅定了繼續走下去的信念。

最後,我要感謝我的媽媽永遠都支持我做的決定,在我壓力大時給予包容, 並且總是讚美我、鼓勵我,讓我在充滿愛的環境中成長並勇往直前。我也要感謝 智祥,陪我走過風風雨雨,開心不開心你都在,是我最棒的精神支柱。

這篇論文獻給我最愛的大家,並獻上我最誠摯的感謝與祝福。

iii

摘要

中期中新世以來,歐亞大陸隱沒至菲律賓海板塊之下形成一系列火山島弧, 隨著大陸與島弧碰撞,山脈也逐漸抬升剝蝕,大量沉積物堆積於造山帶周邊的盆 地中。從現今山脈岩層的熱定年結果可以推估近期山脈的剝蝕歷史,但是欲了解 早期造山山脈早期的剝蝕歷史,則必須從盆地中的碎屑沉積物的定年資料,才可 以探究此結果。本研究於南段海岸山脈泰源盆地中的馬達吉達溪剖面採集12 個砂 岩與1 個礫石樣本,利用磷灰石 (AFT)、鋯石核飛跡定年 (ZFT) 和砂岩岩象分 析探討源區山脈與盆地間的源-匯關係,以及脊樑山脈早期的造山演化史。

砂岩的 AFT 與 ZFT 定年結果顯示,源區山脈出露岩層的最高變質溫度大多介 於 200~260℃之間,而分別在蕃薯寮層與八里灣層頂部出現變質溫度高於 260℃ 的變質岩岩屑,則指示山脈逐漸出露埋藏較深的岩層。其中,最底部的砂岩樣本 含大量火成岩岩屑,因此本研究將磷灰石細分為島弧及造山帶來源,並分別計算 AFT 年代,結果指出火山碎屑可能來自成廣澳火山,而變質岩屑可能來自玉里帶 上覆硬頁岩層。唯一的礫石樣本採集自崩積礫岩層,在沉積於泰源盆地前曾短暫 堆積於北段海岸山脈的水璉礫岩層,因此本研究比對此礫石與鹽寮坑溪礫石的 AFT 與 ZFT 年代,發現兩者定年結果相近,均來自變質溫度 200~260℃的岩層。

根據砂岩的 AFT 遲滯時間變化可知,2 Ma 時遲滯時間突然由 0~1 m.y.增加 至 2~4 m.y.,指示源區可能有新的來源開始剝蝕,且該岩層的冷卻速率較慢。本 研究提出三種可能的新來源岩層,分別是複背斜翼部的板岩層、中段脊樑山脈玉 里帶西側的太魯閣帶,以及山脈較南側的岩體。綜合前人及本研究結果推測後前 淵盆地的碎屑物主要來自玉里帶上覆岩層,且 AFT 遲滯時間顯示玉里帶剝蝕歷史 從初始抬升(~12 Ma)、加速剝蝕階段,到~3 Ma 達到與現今相同的冷卻速率, 並於 2~1.2 Ma 之後趨於穩定剝蝕,冷卻速率自 15 ℃/m.y.增加至 200~400 ℃/ m.y. 並持續至今。

關鍵字:核飛跡定年、蕃薯寮層、八里灣層、脊樑山脈、剝蝕歷史

iv

Abstract

Taiwan orogen has been developing since middle Miocene due to the subduction of South China Sea Plate and the arc-continent collision of the Eurasian Plate and the Philippine Sea Plate, which is called the Penglai Orogeny. As the orogen exhumed, those detritus filled into the basins around the orogenic belt. In order to reconstruct the early stage of the orogeny and the source-to-sink relationship of the orogenic belt and basins, we collected 12 sandstones and 1 boulder from Madajidachi-section in retro-foredeep basin, then analyzed with Apatite (AFT), Zircon Fission Track (ZFT) Dating, and also the petrography of sandstones.

The dating results of AFT and ZFT show that most of the source rocks experienced the highest metamorphic temperature between $200 \sim 260$ °C, while part of them experienced even higher than 260°C, which indicates the deeper formation has been gradually exhumed. The petrography analysis reveals a source change from arc to orogen between 3.5~4 Ma. Compiling the AFT and ZFT ages of the sandstone samples at the base of the profile, our results suggest that the arc-derived detritus may be derived from the Chengkuang'ao volcano, while the orogen-derived detritus may come from the argillite formation on the Yuli Belt. The only boulder sample between Fanshuliao and Paliwan Formation is recognized as the colluvium from the Shuelien Conglomerate Formation in the northern Coastal Range, and the AFT and ZFT dating results indicate that the protolith experienced the highest metamorphic temperature between 200~260°C.

Based on the trend of AFT lag time, there exists an increase from $0 \sim 1$ m.y. to $2 \sim 4$ m.y. around 2 Ma, indicating a new source in the provenance which presented lower cooling rate. We suggest that the new source might be the slate formation on the limb of the multi-anticline, the Tailuko Belt on the west side of Yuli Belt, or the southern terrain on the orogenic belt. In conjunction with previous studies, we argue that the detritus in retro-foredeep basin are mainly derived from the cover of the Yuli Belt on the middle Backbone Range, and the change of AFT lag time suggests that Yuli Belt has experienced acceleration stages since the initial uplift ~12 Ma, and gradually approached the highest cooling rate at ~3 Ma, then finally reached the steady state between $2 \sim 1.2$ Ma. The cooling rate of the Yuli Belt increased from 15 °C/m.y. to 200 ~ 400 °C/m.y., and remained as the highest cooling rate until now.

Keywords: Fission Track Dating, orogenic belt, retro-foredeep basin, exhumation history, Yuli Belt

目錄	*
口試委員審定書	ir
致謝	ii
摘要	iv
Abstract	v
目錄	vii
圖目錄	xi
表目錄	XV
式目錄	xvi
第一章 緒論	
1-1 前言	
1-2 前人研究	
1-3 研究動機與目的	
第二章 區域地質背景	
2-1 海岸山脈地質概述	
2-2 地層概述	
2-2-1 奇美火成雜岩	
2-2-2 都鑾山層	
2-2-3 港口石灰岩	
2-2-4 蕃薯寮層	
2-2-5 八里灣層	
2-2-6 卑南山礫岩等晚更新世礫岩層	
2-3 研究區域	
第三章 研究方法	
3-1 核飛跡定年法	

	22 E	
	3-1-1 核飛跡的形成	26
	3-1-2 核飛跡的癒合	27
	3-1-3 核飛跡年代所代表的地質意義	31
	3-1-4 核飛跡年代的計算	33
	3-1-5 中子通量計算	36
	3-1-6 Zeta 校正法(Zeta-calibration method)	37
	3-1-7 核飛跡年代誤差與卡方檢定	38
	3-1-8 核飛跡年代統計	40
	3-1-9 核飛跡年代測定法	42
	3-1-10 實驗流程	44
3-2	砂岩岩象分析	51
	3-2-1 臺灣造山帶各岩性之岩象特徵	51
	3-2-2 岩象分析	57
	3-2-3 岩象特徵組合	63
3-3	樣本採集	64
第四章	研究結果	66
4-1	核飛跡定年結果	68
	4-1-1 砂岩	68
	4-1-2 礫石	71
4-2	砂岩岩象分析結果	76
第五章	討論	83
5-1	沉積物來源及源區核飛跡年代判別標準	83
	5-1-1 馬達吉達溪剖面沉積物來源	84
	5-1-2 源區熱定年年代	85
	5-1-2-1 華南古陸熱定年研究結果	86
	5-1-2-2 火山島弧熱定年研究結果	87

	港臺
5-1-3 樣本核飛跡年代的意義	
5-1-3-1 未癒合年代	
5-1-3-2 完全癒合年代	
5-1-3-3 部分癒合年代	
5-1-4 源區出露岩性判別依據	
5-2 砂岩核飛跡年代意義	
5-2-1 砂岩源區分析	
5-2-2 樣本 MDJ-01 源區分析	
5-3 礫石核飛跡年代意義	115
5-4 遲滯時間	120
5-4-1 遲滯時間的定義與應用	120
5-4-1-1 遲滯時間的分布與隱示	120
5-4-1-2 冷卻速率與剝蝕速率	125
5-4-1-3 遲滯時間等時線	127
5-4-2 後前淵盆地碎屑沉積物的遲滯時間變化	128
5-5 源區山脈剝蝕冷卻歷史	137
5-5-1 沉積年代 2 Ma 之前的源區分析	
5-5-2 沉積年代2Ma之後的樣本源區分析	145
5-5-3 玉里帶的剝蝕冷卻歷史	154
5-6 綜合討論	
5-6-1 源區山脈與後前淵盆地的源-匯關係	
5-6-2 中段脊樑山脈剝蝕歷史	
5-6-3 利用沉積盆地碎屑物探討臺灣造山演化的限制	
第六章 結論	169
參考文獻	171
附錄	

附錄一	磷灰石核飛跡 BINOMFIT 參數	
附錄二	鋯石核飛跡 BINOMFIT 參數	
附錄三	岩象分析數據	
附錄四	Age2Edot 參數設定	

		圖目錄
圖	1-1	臺灣地理位置圖。3
圖	1-2	臺灣大地構造演化圖。4
圖	1-3	反剝蝕示意圖。4
圖	1-4	臺灣變質相圖。5
圖	1-5	水連礫岩中變質砂岩礫石之熱歷史。8
圖	1-6	臺灣山脈核飛跡定年資料與完全癒合帶界線。8
圖	1-7	透過熱動力模型計算臺灣山脈的剝蝕速率。9
圖	1-8	利用磷灰石與錯石核飛跡年代計算中央山脈剝蝕及冷卻速率。9
圖	1-9	臺灣中央山脈低海拔樣本之時間-溫度模型。10
圖	1-1()臺灣六個剖面採集之樣本及其核飛跡年代。10
圖	1-11	海岸山脈後前淵盆地錯石核飛跡遲滯時間。11
圖	2-1	海岸山脈兩個主要構造時期。14
圖	2-2	海岸山脈岩性地層、生物地層、磁地層年代對照。14
圖	2-3	海岸山脈各剖面地層年代對比。18
圖	2-4	研究區域及採點位置圖。22
圖	2-5	泰源盆地主要構造。
圖	2-6	馬達吉達溪剖面生物地層年代。24
圖	2-7	馬達吉達溪剖面磁、生物地層年代對比。
圖	3-1	核飛跡形成示意圖。
圖	3-2	錯石核飛跡穩定度隨溫度與加熱時間的變化。
圖	3-3	核飛跡封存溫度與滯留時間及冷卻速率的關係。
圖	3-4	磷灰石氯含量與核飛跡年代關係圖。
圖	3-5	三種冷卻路徑示意圖。
圖	3-6	核飛跡長度、年代分布與癒合程度的關係。

_	米 護 董 送
圖	3-7 常見的核飛跡年代測定法。
圖	3-8 EDM 實驗流程圖。
圖	3-9 自發與誘發核飛跡的外框、內框與計數點位。
圖	3-10 計數範圍避免框到缺陷處。 50
圖	3-11 不建議採用之礦物顆粒。 50
B	3-12 因雲母片未密貼導致誘發核飛跡發散。
圖	3-13 臺灣地質分區和變質相圖。 54
圖	3-14 劈理分類。
B	3-15 砂岩岩象薄片顯微鏡照片。61
圖	4-1 馬達吉達溪地層剖面與樣本年代對比。 67
B	4-2 砂岩磷灰石核飛跡年代頻譜。74
B	4-3 砂岩鋯石核飛跡年代頻譜。75
圖	4-4 礫石磷灰石(左)與鋯石核飛跡(右)年代頻譜。
圖	4-5 砂岩組成與 AFT P1 百分比縱向變化圖。 78
圖	4-6 砂岩樣本三角圖分析結果。 79
圖	4-7 各砂岩樣本顯微鏡照片。80
圖	5-1 華南古陸各時期花崗岩分布。 89
圖	5-2 核飛跡年代與其相對應之癒合程度。
圖	5-3 海岸山脈後前淵盆地碎屑鋯石鈾-鉛與ZFT 年代對照。
B	5-4 單一定年法與雙重定年法之差異。
圖	5-5 變質相、出露岩性、埋藏溫度及核飛跡癒合程度對照。
圖	5-6 樣本 MDJ-02 利用 AFT 與 ZFT 對應源區出露岩層岩性。
圖	5-7 砂岩樣本的源區岩層埋藏深度與岩性對照。104
圖	5-8 脊樑山脈冷卻路徑與出露岩性變化圖。105
圖	5-9 ZFT 年代與鋯石鈾濃度分布圖。105
圖	5-10 樣本 MDJ-01 的 AFT 與 ZFT P1 年代。 108

圖	5-11	樣本 MDJ-01 的 AFT 年代計算流程圖。 108
圖	5-12	海岸山脈火山分布範圍。111
圖	5-13	樣本 MDJ-07 最高變質溫度區間。116
圖	5-14	礫石樣本 MDJ-07 來源示意圖 (來自北段海岸山脈)。
圖	5-15	遲滯時間示意圖。123
圖	5-16	典型與非典型遲滯時間分布示意圖。124
圖	5-17	遲滯時間分布影響原因示意圖。125
圖	5-18	源區岩層自 ZFT 封存溫度至地表的冷卻路徑示意圖。126
B	5-19	遲滯時間的變化趨勢及其涵義。127
圖	5-20	本研究砂岩樣本 AFT 與 ZFT 遲滯時間分布圖。129
圖	5-21	本研究砂岩與礫石樣本 AFT P1 遲滯時間分布圖。130
B	5-22	海岸山脈後前淵盆地 AFT P1 遲滯時間分布圖。131
圖	5-23	逆斷層上下盤岩層冷卻速率示意圖。133
圖	5-24	臺灣造山帶 ZFT 年代分布圖。135
圖	5-25	背斜軸部與翼部冷卻速率差異示意圖。136
圖	5-26	脊樑山脈東翼 AFT 與 ZFT 年代分布。136
圖	5-27	沉積年代 2 Ma 之前的砂岩與礫石 AFT 遲滯時間分布。140
圖	5-28	沉積年代 2 Ma 之前的砂岩 ZFT 遲滯時間分布。 141
圖	5-29	玉里帶 2 Ma 之前的冷卻路徑圖。143
圖	5-30	沉積年代 2 Ma 之前的源區山脈冷卻路徑圖。144
圖	5-31	沉積年代 2 Ma 之後的砂岩與礫石 AFT 遲滯時間分布。148
圖	5-32	臺灣地質分區與河流分布圖。151
圖	5-33	造山系統的四種穩定態。159
圖	5-34	利用居禮深度計算臺灣地溫梯度分布。160
圖	5-35	中段脊樑山脈玉里帶剝蝕歷史。161
圖	5-36	後前淵盆地砂岩岩象與 AFT P1 年代縱向百分比變化圖。 164



表目錄

		表目錄
表	2-1	樣本採樣位置。
表	3-1	不同岩性及礦物所需計算的礦物顆粒數量。40
表	3-2	岩象特徵分類。64
表	3-3	樣本詳細資訊。65
表	4-1	所有樣本之磷灰石與鋯石核飛跡定年結果。
表	4-2	所有砂岩樣本之岩象分析結果。78
表	5-1	臺灣造山帶地層碎屑錯石鈾-鉛定年年代族群。
表	5-2	樣本 MDJ-01 重新計算的 AFT 年代。109
表	5-3	北段海岸山脈鹽寮坑溪砂岩與礫石 AFT 和 ZFT 年代。 139
表	5-4	沉積年代2Ma之前的砂岩與礫石冷卻速率。143
表	5-5	中段海岸山脈秀姑巒溪與烏漏溪砂岩與礫石 AFT 和 ZFT 年代。 149
表	5-6	磷灰石核飛跡 Age2Edot 計算結果。158

	式目錄	
式	3-1 放射性同位素衰變公式 (1)	• X4
式	3-2 放射性同位素衰變公式(2)34	1919
式	3-3 放射性同位素衰變公式(3)34	
式	3-4 樣本鈾濃度計算公式	
式	3-5 核飛跡年代公式(1)34	
式	3-6 自發核飛跡密度公式35	
式	3-7 誘發核飛跡密度公式35	
式	3-8 核飛跡年代公式(2)35	
式	3-9 核飛跡年代公式(3)35	
式	3-10 中子通量計算公式(1)	
式	3-11 中子通量計算公式(2)	
式	3-12 Zeta 校正法公式	
式	3-13 Zeta 校正值計算公式	
式	3-14 核飛跡年代公式(使用 Zeta 校正)	
式	3-15 核飛跡年代相對誤差公式計算	
式	3-16 卡方檢定計算公式	
式	3-17 F 值計算公式 (F 檢定) 41	
式	5-1 遲滯時間計算公式120	
式	5-2 冷卻速率計算公式125	
式	5-3 剥蝕速率計算公式126	

第一章 緒論

1-1 前言



臺灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊交界處(圖 1-1),南中國海板塊於中期中 新世(~15 Ma)停止張裂,並向東隱沒至菲律賓海板塊之下,形成一系列火山島 弧,稱為北呂宋島弧,而隱沒的混同層約於12 Ma 受到擠壓而逐步抬升隆起(Chen et al., 2019)。隨著菲律賓海板塊向西北方向移動,島弧與大陸邊緣斜向碰撞,導 致山脈由北向南抬升。自板塊隱沒(~15 Ma)到弧陸碰撞(~6 Ma)至今的構造活 動,即稱為蓬萊造山運動(Penglai Orogeny)(圖 1-2)。

山脈抬升過程,同時也受到剝蝕,因此現今所見山脈出露的岩層,於碰撞前 是被埋藏在地底,其原本上覆的地層,受剝蝕成為碎屑物,被搬運堆積在山脈周 圍的前陸盆地中。最初被剝蝕岩層之碎屑物會深埋在盆地的最下層,隨著山脈持 續抬升與剝蝕,盆地中的碎屑物逐漸向上疊加,使得沉積盆地中碎屑沉積物的岩 性組成與其原本在山脈出露的岩層序列相反,稱為反剝蝕序列(unroofing)(Graham et al., 1983)(圖1-3)。臺灣前陸盆地透過沉積物進行岩象分析(Teng, 1979;Dorsey, 1988;Chen et al., 2019)、黏土礦物分析(Dorsey et al., 1988;Buchovecky and Lundberg, 1988;Yao et al., 1988;張宏浩, 2018;陳立凱, 2019)、重礦物分析(Liew and Lin, 1974)、同位素定年(劉聰桂, 1982;Liu et al., 2000;Liu et al., 2001;Willett et al., 2003;Fuller et al., 2006;Lee et al., 2006;Kirstein et al., 2010;Kirstein et al., 2013;Geng et al., 2018;景紹伊, 2020;陳彤軒, 2021;李政熹, 2021)等研究, 可得知原始山脈之抬升剝蝕歷史。本文則透過臺灣東部海岸山脈後前淵盆地 (retro-foredeep basin)中的碎屑鋯石與磷灰石的核飛跡定年,回推來源山脈之剝 蝕歷史。

核飛跡定年屬熱定年法,當礦物埋藏溫度低於其封存溫度時,鈾原子分裂形成之軌跡稱為核飛跡(fission track)。若礦物受到高於其封存溫度之熱事件時,核飛跡會逐漸癒合,之後礦物冷卻至低於封存溫度時,核飛跡之地質時鐘便會開啟。

核飛跡定年法即利用受熱癒合之特性,由礦物上特定面積之核飛跡數量,來計算 出該顆粒年代。值得注意的是,核飛跡年代並非結晶年代,而是代表礦物受熱後 冷卻通過封存溫度之年代,故可計算礦物之冷卻速率,進而探討源區山脈之剝蝕 抬升演化。

根據臺灣變質相圖可知,臺灣出露岩層最高變質度主要為綠色片岩相(300~ 500℃),僅部分出露角閃岩相地層(>500℃)(陳肇夏與王京新,1995)(圖1-4), 搭配反剝蝕序列可推測山脈早期已被剝蝕之岩層,其受到造山運動的變質溫度應 低於500℃,而鋯石與磷灰石核飛跡定年法之封存溫度低於300℃,因此可有效訂 定礦物在低於變質溫度下的冷卻年代。且本研究使用之定年礦物為鋯石及磷灰石, 皆為岩石中常見之副礦物,更有利於樣本採集。

前人已於臺灣各地層進行詳細的核飛跡定年研究,然而,其研究範圍大多集 中於造山山脈上出露的基盤岩層(bedrock),僅能探討山脈近期的活動歷史,針對 已被剝蝕之碎屑沉積物(detritus)則少有研究。透過前陸盆地中的碎屑沉積物研 究,將得以更詳細了解造山初期的剝蝕冷卻過程。因此,本研究將針對海岸山脈 南段泰源盆地的馬達吉達溪剖面,進行砂岩採樣,分析其磷灰石與鋯石之核飛跡 年代,以探討沉積物來源與源區山脈之剝蝕歷史。



圖 1-1 臺灣地理位置圖。



圖 1-2 臺灣大地構造演化圖。(Chen et al., 2019)



圖 1-3 反剝蝕示意圖。(Graham et al., 1983)



圖 1-4 臺灣變質相圖。(陳肇夏與王京新,1995)

1-2 前人研究

臺灣的核飛跡定年最早可追溯至劉聰桂(1982)針對脊樑山脈的地層進行核 分裂飛跡(簡稱核飛跡)定年的研究,同時也針對臺灣的造山環境提出適當的磷 灰石、鋯石與榍石的有效封存溫度,分別為135±20℃、235±50℃以及285±50℃。 周南與劉聰桂(1997)也特別針對核飛跡定年法的原理及使用方法詳細的介紹。

建立了臺灣核飛跡定年研究的標準後,陸續有許多研究以核飛跡定年法來探 討蓬萊造山運動的歷史。大多數文獻皆著重探討造山山脈的熱歷史,包括利用造 山帶岩層的核飛跡年代計算山脈的剝蝕或冷卻速率(Liu et al., 2000; Lee et al., 2006; Hsu et al., 2016; Chen et al., 2019), 並探討剝蝕速率的變化 (Lee et al., 2006; Hsu et al., 2016),同時亦透過核飛跡年代於南北向的差異,計算弧陸碰撞由北向南的 移動速率約 50~60 km/m.y.(Liu et al., 2001; Willett et al., 2003; Fuller et al., 2006)。 前人所計算得到之剝蝕速率不盡相同,例如 Liu et al. (2000)利用大南澳片岩中的 源頭山片麻岩進行鋯石核飛跡定年,認為過去4 Ma 以來中央山脈剝蝕速率為 2.5 ~4.6 mm/yr. (圖1-5); Willett et al. (2003)則利用熱模型劃分磷灰石與鋯石核飛 跡完全癒合帶界線,並計算得到臺灣造山帶自1Ma以來的剝蝕速率為4~6mm/yr. (**圖 1-6**); Fuller et al. (2006) 建立臺灣的熱動力模型,並推算在東部中央山脈的 剝蝕速率為 3.3 mm/yr.,而臺灣全島之剝蝕速率為 2.3 mm/yr. (圖 1-7)。上述文獻 所計算之剝蝕速率,皆以單一階段碰撞為前提假設,但造山運動並非一直維持相 同速度,因此後續有文獻提出臺灣造山運動有加速的趨勢:Lee et al. (2006)認為 6~1 Ma 山脈的剝蝕速率為<1 mm/yr., 1 Ma 以後加速至 4~10 mm/yr. (圖 1-8); Hsu et al.(2016)透過年代高程的計算,認為2~1.5 Ma前的剝蝕速率約0.1 mm/yr., 2~1.5 Ma 至 0.5 Ma 的剝蝕速率為 2~4 mm/yr., 0.5 Ma 至今的剝蝕速率又更加快 至 4~8 mm/yr.,呈現持續加速剝蝕的趨勢 (圖 1-9)。

然而,對於臺灣的造山歷史一直存在兩套理論。一部分的學者認為,臺灣的造山帶是由北向南逐漸抬升,核飛跡年代亦能表現由北向南變年輕的證據(Liu et

al., 2001; Willett et al., 2003; Fuller et al., 2006)(圖1-7、1-8、1-10);而另一部份 的學者則認為,臺灣造山帶是南北同時抬升,從核飛跡定年結果來看,南段中央 山脈出現 5.49 Ma 的完全癒合磷灰石核飛跡年代,因此 Lee et al. (2006)認為全段 中央山脈皆於 6 Ma 開始抬升,碰撞過程可分為兩階段,第一階段是因南中國海板 塊隱沒導致增積岩體變形,第二階段則是弧陸碰撞,而造成山脈南北段出露岩層 變質度不同的原因在於,北段中央山脈歷經較久的碰撞歷史,因此出露岩層之變 質度較高(圖1-8)。

透過現今山脈岩層的定年研究,僅能了解近期的造山活動歷史,但還無法建 構造山早期的演化。因此,針對盆地的碎屑沉積物進行核飛跡定年,可以回推初 始山脈的剝蝕歷史。Liu et al. (2000)針對海岸山脈北段及中段之變質砂岩礫石進 行鋯石核飛跡定年(圖 1-5),但由於該研究僅採集兩個礫石樣本,僅能對該樣本 的源區地層進行簡單的探討,還無法了解整個造山帶的造山歷史。較完整的碎屑 沉積物核飛跡定年開始於Kirstein et al. (2010, 2013)在海岸山脈一系列的後前淵 盆地中,進行鋯石核飛跡、鈾-釷-氦,以及鋯石鈾-鉛定年研究,探討造山初期的 剝蝕歷史。在沉積盆地當中的核飛跡定年,首要考量的問題為「是否有沉積後癒 合」,Kirstein et al. (2010)於全段海岸山脈採集的樣本,其核飛跡年代皆老於沉 積年代,沒有沉積後癒合,代表該年代反映源區山脈的熱歷史。該研究計算出臺 灣造山帶於 2 Ma 的剝蝕速率約為 3.6 mm/yr,與現今山脈剝蝕速率相當,因此推 論造山帶自 2.3~3.2 Ma 之間開始加速,並已和現今的高剝蝕速率相當(圖 1-11)。

綜觀前人研究,可發現臺灣目前的核飛跡定年研究大多集中於造山山脈中的 基盤地層,由於現今山脈上最老的核飛跡完全癒合年代為6 Ma,因此對於6 Ma 至今的山脈剝蝕歷史已有較完整的資料。雖然對於剝蝕速率尚無定論,但可見造 山運動後期有加速剝蝕的趨勢。至於造山運動初期的山脈剝蝕歷史,由於前人的 數據顯示後前淵盆地中的核飛跡年代未受沉積後癒合影響,因此本研究透過反剝 蝕概念,針對後前淵盆地中的碎屑沉積物進行核飛跡定年研究,期望能更加瞭解 造山初期的構造演化。



圖 1-5 水璉礫岩中變質砂岩礫石之熱歷史。(Liu et al., 2000)



■ 1-6 臺灣山脈核飛跡定年資料與完全癒合帶界線。(A)該研究引用劉聰桂(1982)鋯石核飛跡年代(灰色,無底線),並加入新的磷灰石核飛跡年代(黑色)與鋯石 核飛跡年代(灰色,有底線),繪製磷灰石(ARZ)與鋯石核飛跡完全癒合帶(ZRZ)之界線;(B)利用多種熱定年數據建構之熱模型預測之磷灰石與鋯石完全癒合帶界線,實線與虛線分別代表假設山脈剝蝕速率為5mm/yr.的情況下,磷灰石與鋯石 核飛跡透過熱模型計算得到之完全癒合年代,灰色陰影區域則代表假設碰撞向南移動速率為60mm/yr.,由南向北的距離對應完全癒合年代區間。(Willett *et al.*, 2003)



圖 1-7 透過熱動力模型計算臺灣山脈的剝蝕速率。黑色實線為臺灣造山帶的剝蝕 速率變化,灰色虛線為造山帶東翼的剝蝕速率變化。(Fuller *et al.*, 2006)



圖 1-8 利用磷灰石與鋯石核飛跡年代計算中央山脈剝蝕及冷卻速率。(A) 南段中 央山脈剝蝕冷卻速率;(B) 北段中央山脈剝蝕冷卻速率。(Lee *et al.*, 2006)



圖 1-9 臺灣中央山脈低海拔樣本之時間-溫度模型。(A)北部中央山脈;(B)東 南部中央山脈。由兩條剖面可見,山脈剝蝕冷卻速率約於 2~1.5 Ma 開始加速,且 0.5 Ma 剝蝕速率再度加速。(Hsu *et al.*, 2016)



■ 1-10 臺灣六個剖面採集之樣本及其核飛跡年代。(A)該研究於六個剖面的採 樣位置分布、樣本之錯石核飛跡年代分布及年代高程圖;(B)樣本錯石核飛跡年 代與水平距離,由南北錯石核飛跡年代差與距離可計算出碰撞向南移動速率約為 50 km/m.y.。(Liu *et al.*, 2001)



圖 1-11 海岸山脈後前淵盆地鋯石核飛跡遲滯時間。(Kirstein et al., 2010)

1-3 研究動機與目的

脊樑山脈約於 12 Ma 開始隆起 (Chen et al., 2019),被剝蝕的地層堆積於造山 帶周圍之前前陸盆地 (pro-foreland basin)與後前淵盆地 (retro-foredeep basin)中, 最早被剝蝕的物質會被埋藏於盆地最底部,之後剝蝕的碎屑沉積物則陸續堆疊於 盆地的上部,形成反剝蝕序列。因此,我們可透過盆地中的碎屑沉積物,回推已 被剝蝕山脈的熱歷史,意即造山運動初期山脈的抬升與剝蝕歷史。

核飛跡定年屬於熱定年法,由於核飛跡主要受溫度影響(Wagner et al., 1979), 且封存溫度較低,因此能夠觀察較後期的熱歷史。同時,因為封存溫度低,所以 較容易偵測到變質溫度較低的熱事件,也能精準了解樣本所經歷的溫度變化。

前人大多於造山山脈基盤岩層進行核飛跡定年研究,此乃針對山脈於近期的 熱歷史研究,但對於造山山脈周圍前陸盆地中的碎屑沉積物則鮮有著墨,較完整 的研究為 Kirstein et al. (2010, 2013)對於全段海岸山脈的磷灰石與鋯石核飛跡定 年研究。這兩篇研究皆於海岸山脈多個剖面進行少量採樣,由於採樣位置的沉積 年代沒有良好控制,且該研究針對單一樣本分析磷灰石及鋯石顆粒數量不足 100 顆,可能造成年代偏差與缺失,因而導致數據解釋不易。因此本研究針對海岸山 脈南段泰源盆地馬達吉達溪單一剖面的砂岩密集採樣,並進行碎屑磷灰石核飛跡 (AFT)與鋯石核飛跡(ZFT)定年。同時配合砂岩岩象分析,期望能進一步釐清 岩屑比例與核飛跡年代之關係。值得一提的是,馬達吉達溪出露完整的蕃薯寮層, 得以詳細記錄初期的造山運動歷史,有助於更深入探討造山初期的山脈演化。因 此本研究將著重的討論如下:

- 後前淵盆地之源匯關係:盆地沉積物來源是否隨著時間有所改變?能否從 核飛跡年代與砂岩岩象中判斷可能的源區岩性?
- 造山山脈的剝蝕歷史:透過分析核飛跡年代與樣本沉積年代之間的關係(遲 滞時間),探討造山山脈剝蝕冷卻速率的演化,以及山脈出露岩性隨時間的 變化。

第二章 區域地質背景

2-1 海岸山脈地質概述

海岸山脈位於臺灣東部菲律賓海板塊上,其西側與位於歐亞板塊的脊樑山脈 以縱谷斷層相接。海岸山脈之構造演化大致可區分為兩個主要時期,分別是中期 中新世至早期上新世的板塊隱沒期,以及晚期中新世至晚期更新世的弧陸碰撞期 (陳文山,2009;陳文山,2020)(圖2-1)。

中期中新世(~15 Ma),南中國海海殼停止張裂後,菲律賓海板塊向西北移 動,使得南中國海板塊向東隱沒,並於菲律賓海板塊西緣形成一系列火山島弧, 為板塊隱沒期(陳文山,2009;陳文山等,2016)(圖 2-1A)。弧前與弧後盆地堆 積的火山層序,可反映島弧由深海相逐漸演化成陸相的過程,該層序由下至上可 區分為奇美火成雜岩(Yen, 1967)、都鑾山層(陳文山與王源, 1996; Chen and Wang, 1988a; Song and Lo, 1988),以及港口石灰岩(Chang 1967, 1968, 1969)。

隨著菲律賓海板塊逐漸向西北方推移,北段海岸山脈於早期上新世脫離隱沒 带,停止火山活動,並與歐亞板塊產生碰撞,使得海岸山脈向西仰衝至歐亞板塊 之上,而原本的弧前與弧後盆地也因弧陸碰撞而轉變成後前淵盆地,為弧陸碰撞 期 (陳文山,2009) (圖 2-1B)。此時,歐亞板塊前緣因受到擠壓而形成造山帶, 造山活動使得大量造山帶碎屑沉積物向東、西兩側堆積於前陸盆地中。透過分析 前陸盆地中的沉積物組成變化,可知碰撞盆地環境由深變淺,並可從中回推造山 山脈的剝蝕歷史。弧陸碰撞期於前陸盆地中形成一系列沉積層序,由下至上分別 為蕃薯寮層、八里灣層 (Chang, 1968; Teng, 1979; Chen and Wang, 1988b),以及 卑南山礫岩等晚期更新世礫岩層(Chi et al., 1983; 陳文山與王源, 1996)(圖 2-2)。 板塊隱沒期約始於15 Ma,結束於8.6~5.6 Ma之間,而弧陸碰撞期則始於約6 Ma 並持續至今。



圖 2-1 海岸山脈兩個主要構造時期。(A)板塊隱沒期(15~5.6 Ma);(B)弧陸碰撞期(6 Ma至今),FSL為蕃薯寮層,PLW為八里灣層。(陳文山,2020)



圖 2-2 海岸山脈岩性地層、生物地層、磁地層年代對照。Tls 為都鑾山層,Kk 為港口石灰岩,Fsl 為蕃薯寮層,Plw1 為八里灣層水璉段,Plw2 為八里灣層泰源段,Pns 為卑南山礫岩。(陳文山,2009)

2-2 地層概述

2-2-1 奇美火成雜岩



奇美火成雜岩之標準剖面位於秀姑巒溪,為海岸山脈最老的火成岩地層,依 產狀可細分為灣潭熔岩流與天港山侵入岩。

灣潭熔岩流

產狀以溢流式溶岩流為主,夾少量火山碎屑岩(Song and Lo, 1988; Chen, 1997a)。岩石種類包括普通輝石安山岩、普通輝石-角閃石安山岩,以及角閃石安 山岩。由產狀可知,其形成環境位於揮發性氣體爆裂深度(水深約 500 公尺)以 下,因上覆水壓較大,岩漿以熔岩流方式噴發。前人透過鋯石鈾-鉛定年推測其噴 發年代約 15~9 Ma(陳文山, 2009; Shao *et al.*, 2015)。

天港山侵入岩

岩體厚度約 100~150 公尺。其岩石種類為輝綠岩,岩體中存在許多岩脈及氣孔,岩脈多由細粒輝石安山岩組成,孔洞則填充安山岩 (Wang and Yang, 1974)。

2-2-2 都鑾山層

都鑾山層依據岩性與產狀,可由下往上區分為石門火山角礫岩、石梯坪凝灰岩,以及鱉溪再積火山碎屑岩(陳文山與王源,1996; Chen, 1997a; Chen and Wang, 1988a; Song and Lo, 1988),其地層年代為晚期中新世至早期上新世。

石門火山角礫岩

產狀以基質支持之火山角礫岩為主,其岩石種類包括兩輝安山岩以及角閃石-普通輝石安山岩。由產狀可知,此時火山口已發展至揮發性氣體爆裂深度以上, 上覆水壓減少,火山以爆發式噴發為主。爆發產生的火山角礫與火山灰,由重力 流搬運堆積於海底火山島裙斜坡上。

石梯坪凝灰岩

產狀為白色熔結凝灰岩,夾塑性變形的火山角礫,岩石種類包含兩輝-角閃石

安山岩,以及兩輝-角閃石-黑雲母安山岩。由產狀可知火山口已發展至海平面以上, 而石梯坪凝灰岩整合於石門火山角礫岩之上。

根據鋯石鈾-鉛定年結果,前人認為石門火山角礫岩與石梯坪凝灰岩形成於 8.0 ~4.5 Ma(Shao et al., 2012),而後者部分地層含超微化石 Discoaster quinqueramus, 屬於 NN11 帶(圖 2-2)。

鱉溪再積火山碎屑岩

產狀為基質支持之火山礫岩,其中的礫石已被磨圓,代表有受到搬運作用。 岩石種類包括安山岩礫石、凝灰質砂岩、鈣質岩塊、再積石灰岩,以及現地石灰 岩(Chen et al., 1997a)。其沉積環境,依據岩相可細分為下部火山島裙相及上部火 山島裙相。前者由重力流堆積形成砂頁互層,具薄層濁流岩、基質支持結構的礫 岩及崩移層;後者包含淺海相的厚層凝灰質砂岩與礫岩,含生物碎屑。根據超微 化石研究,下部火山島裙相含 NN11 的超微化石 Discoaster quinqueramus,屬於晚 期中新世;上部火山島裙相則含有孔蟲化石 Sphaeroidinella dehiscens s.l.,屬於早 期上新世(Chi et al., 1980)(圖 2-2)。鱉溪再積火山碎屑岩整合於石梯坪凝灰岩之 上,部分呈犬牙交錯關係,而其上部火山島裙相則與部分港口石灰岩呈犬牙交錯 關係(Chen, 1997a; Lai et al., 2021)。

2-2-3 港口石灰岩

港口石灰岩泛指海岸山脈所有的石灰岩,屬於火山活動後期的產物。不同地 區的石灰岩,形成環境亦不相同,例如港口石灰岩與東河石灰岩形成於火山周圍 的環礁,鱉溪石灰岩與六階鼻石灰岩為崩移的石灰岩塊,屬於鱉溪再積火山碎屑 岩,而貓山石灰岩則是位於利吉層中的外來岩塊。其形成時代也有區域性差異, 但都屬於早期上新世。由於晚期中新世的鱉溪再積火山碎屑岩中含大量崩積石灰 岩塊,所以港口石灰岩最早可能形成於晚中新世(陳文山,2009;陳文山等,2016)。

2-2-4 蕃薯寮層

碰撞盆地中的沉積層序首先由徐鐵良(1956)根據岩相差異劃分為奇美層(礫 岩與砂岩相)及大港口層(砂頁互層相),何春蓀(1986)認為兩種岩相呈犬牙交 錯關係,將所有沉積層序合稱為大港口層。Chang(1968)則依據有孔蟲化石,將 下部大港口層命名為蕃薯寮層,上部大港口層命名為八里灣層。然而目前使用的 命名,是由 Teng(1979)與 Chen and Wang(1988b)根據岩性及砂岩組成差異, 重新定義蕃薯寮層與八里灣層的岩石地層單位。但兩者對於蕃薯寮層之岩性組成 的認定稍有差異,前者認為蕃薯寮層岩性以島弧火山碎屑為主,後者則認為其岩 性以西側造山帶碎屑物為主。

蕃薯寮層之標準剖面位於花蓮縣水璉村蕃薯寮坑,整合於都鑾山層之上。該 地層主要由泥岩與砂頁互層組成,偶夾厚層砂岩與崩積層,為具有鮑馬層序之濁 流岩,沉積環境為中至下部深海沖積扇。根據砂岩岩象分析可知,砂岩有兩種組 成,一種是來自西側造山帶的碎屑沉積物,另一種則是來自東側火山島弧的火山 碎屑。由於南段沉積盆地西側較深、東側因較接近火山錐體,為地形高區,因此 蕃薯寮層在南段盆地西側沉積層較厚,東側沉積層較薄甚至沒有堆積(陳文山, 2009)(圖 2-3)。而北段沉積盆地則出露厚度大於 1000 公尺的蕃薯寮層,未受到 盆地地形影響。

依據生物地層研究, 蕃薯寮層於北部及南部的沉積年代不盡相同,但皆沉積 於上新世, 沉積年代介於 5.2~3.35 Ma (圖 2-2)。北段蕃薯寮層的頂部與底部年代 皆老於南段蕃薯寮層, 前人推測可能原因如下 (陳文山, 2009):

- 1. 北部盆地較深,堆積地層較厚,因此底部年代較老。
- 2. 北部盆地較早開始接收來自造山帶的沉積物。
- 3. 北段蕃薯寮層受到崩移作用影響,使得含有 Gr. tosaensis 的上部蕃薯寮層及下部八里灣層崩移,因此北段蕃薯寮層上部缺失,導致其頂部年代較老。而南段蕃薯寮層沒有大規模崩移,保留含有 Gr. tosaensis 的部分,因

此頂部年代較年輕。





圖 2-3 海岸山脈各剖面地層年代對比。由圖可見南段盆地西側蕃薯寮層較厚,東 側蕃薯寮層較薄甚至沒有堆積,作者推測可能是因盆地地形東高西低的差異導致。

(陳文山,2009)

2-2-5 八里灣層

標準剖面位於花蓮縣豐濱鄉八里灣溪(Chang, 1968),整合於蕃薯寮層之上。 可依岩性再細分為水連礫岩段與泰源段(陳文山與王源, 1996),前者以厚層礫岩 與砂岩為主,偶夾砂頁互層與泥岩,後者岩性屬於砂頁互層,且砂頁比率由北往 南遞減,整體的沉積環境屬於深海沖積扇環境。分布於海岸山脈北段的水連礫岩, 具基質與顆粒支持結構,以及平行層理與交錯層理,屬於深海上部沖積扇河道環 境;而分布於南段八里灣層與蕃薯寮層交界面的礫岩層,具基質支持結構且夾捲 曲的崩移岩層,其中包含來自火山島弧的凝灰岩與石灰岩岩塊,因此前人推測此 礫岩層為碰撞時期受地震引發崩移之堆積物(陳文山等,2006с)。泰源段古水流 方向由北向南,且沉積環境向南變深,屬於中至下部深海沖積扇環境(Chen and Wang, 1988b)。泰源段出露厚度不一,西剖面較厚,東剖面較薄,為沉積物超覆堆 積於起伏的火山地形所致(陳文山與王源,1996;陳文山,2009)。八里灣層砂岩 屬於岩屑質雜砂岩,岩屑種類包括板岩、變質砂岩、石英,以及蛇綠岩,顯示其 源區包含兩種不同岩性,一為西側古中央山脈板岩層,另一為火山島弧與混同層 (Chen and Wang, 1988b)。

生物地層研究顯示, 八里灣層底部含有孔蟲化石 Globorotalia tosaensis, 屬於 N21 帶 (Chang, 1967, 1968, 1969), 而超微化石包含 small Gephyrocapsa 以及 Pseudoemiliania lacunosa, 八里灣層底部可對應至上部 NN16帶, 屬於晚期上新世。 因此八里灣層沉積年代為晚期上新世至中期更新世 (Chen and Wang, 1988b; 陳文 山, 1988;陳文山, 2009) (圖 2-2)。

2-2-6 卑南山礫岩等晚更新世礫岩層

整合於八里灣層之上的礫岩層包括卑南山礫岩(大江二郎,1939)、米崙礫岩 (宇佐美衛,1939a)、舞鶴礫岩(王源等,1992),以及初鹿礫岩(紀權窅,2007), 岩性組成皆為厚層礫岩偶夾砂岩。礫岩中的礫石主要來自脊樑山脈大南澳片岩帶,
包括片岩、板岩、變質石灰岩、變質砂岩,以及變質基性火成岩,少部分來自海岸山脈的安山岩與蛇綠岩系岩石。沉積環境由淺海至陸相河流,各地礫岩層厚度不一,最厚可超過3000公尺。由超微化石可指示年代為更新世(Chi et al., 1983),但由沉積物組成認為此礫岩層沉積時間應晚於八里灣層,屬於晚期更新世(Chi et al., 1983;陳文山與王源, 1996)(圖2-2)。

2-3 研究區域

本研究的研究區域位於海岸山脈南段泰源盆地西側的馬達吉達溪剖面(表 2-1, 圖 2-4), 剖面厚度近 4000 公尺, 出露早期上新世都鑾山層、上新世蕃薯寮層, 以 及晚期上新世至早期更新世八里灣層。

泰源盆地北起花蓮縣富里鄉,南至臺東縣東河鄉都蘭村。盆地中的主要結構 由西向東分別為:都鑾山斷層、泰源向斜,以及都鑾山背斜(王源與陳文山,1993) (圖2-5)。本文2-2節提及,陳文山(2009)觀察地層出露厚度,認為盆地火成岩 基盤呈東高西低的地形,導致西側堆積的沉積岩層較厚,東側較薄。而盆地當中 的沉積層序,自火山活動結束後開始堆積來自造山帶的碎屑物質,首先形成的是 蕃薯寮深海沖積扇,其上、中部沖積扇沉積物位於大陸斜坡,後因碰撞活動遭破 壞而不復存在,僅保留下部沖積扇的沉積層,即為目前所見之蕃薯寮層(陳文山, 1988)。隨後約3Ma,由於弧陸碰撞導致地震頻繁,使得大量岩塊崩移並堆積於南 段沉積盆地中,形成現今所見蕃薯寮層與八里灣層交界面之厚層崩積礫岩層(陳 文山,1988),該礫岩層中礫石的岩性以變質砂岩為主,是來自中央山脈亞變質岩 帶(賴序衡與鄧屬予,2016)。此時開始發育水璉與磯碕深海沖積扇,並持續沉積 至更新世,形成現今所見之八里灣層泰源段(陳文山,1988)。

馬達吉達溪剖面位於泰源盆地西側,由於出露剖面完整,被認為是蕃薯寮層 與八里灣層的輔助標準剖面(陳文山,1988;陳文山與王源,1996)。前人亦於此 進行諸多磁、生物地層研究,使該剖面的沉積年代得以獲得良好的控制。李德貴

與紀文榮(1990)以及 Horng and Shea(1996)發現八里灣層沉積於 Matuyama 磁 世代,同時記錄完整的 Olduvai 磁事件 (1.95~1.77 Ma),可大致確定八里灣層年 代,但蕃薯寮層因含許多崩移層,沉積年代不易訂定,須透過生物地層研究進一 步確認。該剖面都鑾山層頂部的鋯石鈾-鉛定年年代最年輕為 4.3±0.3 Ma (Chen et al., 2023),因此推測蕃薯寮層底部年代應小於4.3 Ma。目前透過生物地層所能訂 定此剖面蕃薯寮層的最老年代為 Pseudoemiliania lacunosa 始現面 (FO. 3.82 Ma) (Lai et al., 2021) (圖 2-6), 但蕃薯寮層底部因無磁、生物年代對比而無法確認沉 積時間,至於蕃薯寮層頂部的年代仍存在爭議。陳文山(1988)整合前人有孔蟲 化石研究,配合超微化石,認為蕃薯寮層與八里灣層之間應採用 Gr. tosaensis 始現 面(3.35 Ma)作為分界;然而,Horng and Shea(1996)於蕃薯寮層中段發現少量 (rare) Gr. tosaensis 化石,且根據有孔蟲 Dentoglobigerina altispira 的末現面(LO. 3.09 Ma), 認為蕃薯寮層頂部應落在 Kaena 磁事件中。過去磁地層研究並未於此剖 面的蕃薯寮層發現正向磁紀錄, Horng and Shea (1996) 則利用化石資料推測 Mammoth 磁事件的上下兩個正極磁事件,應分別存在於其所劃分的岩性單位 Unit I及 Unit II 頂部 (圖 2-7)。陳文山 (2009) 透過此對比法所計算得到的沉積速率快 的不合常理,認為蕃薯寮層頂部可能存在 Gauss 磁世代頂部的正向磁事件,但因 崩移作用而不復存在。另外,Horng and Shea(1996)發現 Dentoglobigerina altispira 末現面(3.09 Ma)與 Pulleniatina 右旋轉左旋事件面(2.13 Ma)皆位於該剖面蕃 薯寮層與八里灣層交界面的崩積礫岩層中,因而推測此崩積礫岩層存在約1Ma的 地層缺失。

表 2-1 樣本採樣位置。				
Sample no.	Field no.	Longitude (°E) *	Latitude (°N) *	
MDJ01	20170817-03	121.228404	23.007167	
MDJ02	20170817-04	121.232977	23.006131	
MDJ03	20170817-05	121.233806	23.005696	
MDJ04	20170817-06	121.23398	23.005199	
MDJ05	20170817-07	121.235151	23.005468	
MDJ06	20170817-08	121.237218	23.00458	
MDJ07	20170817-10	121.237245	23.003117	
MDJ08	20170817-11	121.237684	23.003351	
MDJ09	20170817-13	121.239622	23.001235	
MDJ10	20170817-15	121.242345	23.002432	
MDJ11	20170817-18	121.246258	23.003221	
MDJ12	20170817-20	121.249678	23.000588	
MDJ13	20170817-21	121.252968	23.002109	

*採樣點位以 TWD97 經緯度表示。



圖 2-4 研究區域及採點位置圖。(A)海岸山脈地質圖及本研究區域位置;(B)馬 達吉達溪流域地質圖及採樣點位分布。



圖 2-5 泰源盆地主要構造。(賴序衡與鄧屬予,2016)



圖 2-6 馬達吉達溪剖面生物地層年代。(Lai et al., 2021)



圖 2-7 馬達吉達溪剖面磁、生物地層年代對比。(Horng and Shea, 1996)

第三章 研究方法

3-1 核飛跡定年法

核飛跡定年法為熱定年法之一,主要是透過計算礦物中特定面積的核飛跡密度,來估算該礦物通過核飛跡封存溫度的年代。核飛跡為「核分裂飛跡」的簡稱, 亦可稱為「裂變徑跡」, 顧名思義是原子核分裂所形成的軌跡。

3-1-1 核飛跡的形成

自然形成的核飛跡稱為「自發核飛跡」(spontaneous fission track),自發核飛 跡的形成主要是質量大的錒系元素(原子序 \geq 90,原子量 \geq 230),其原子核於自然 界處於不穩定態,會分裂成兩個質量相近的帶正電粒子,並釋放中子及約210 MeV 的能量,以達到穩定態。當電介質固體(dielectric solid)中的原子核分裂,兩個帶 正電粒子會往相反方向運動,並破壞礦物晶格而留下其運動軌跡,此軌跡即稱作 「核飛跡」(fission track)。錒系元素中, \pounds -232(²³²Th)以及鈾的三種同位素(²³⁴U、 ²³⁵U、²³⁸U)為主要形成核飛跡的不穩定核種,其中又因²³⁴U及²³⁵U於自然界中的 豐度相對於²³⁸U較低,而²³⁵U及²³²Th 的半衰期相對於²³⁸U較長,因此在核飛跡 定年法中所認定的自發核飛跡,可視為由²³⁸U衰變產生而成的核飛跡(Fleischer *et al.*, 1975)。

原子核分裂後,帶電粒子朝相反方向運動,其能量會隨著運動的距離而減弱, 減速的過程可大致分為兩階段:(1)高速時:帶電粒子會透過「使目標原子的電 子剝離」、「使粒子本身的電子剝離」、「激發礦物晶格電子」等三種方式減速;(2) 低速時:粒子與礦物晶格產生彈性碰撞後失去能量。然而,礦物晶格形成與保存 核飛跡的機制目前尚未定論,最廣為接受的理論為「Ion explosion spike 模型」 (Fleischer *et al.*, 1965a),該理論認為核飛跡的形成主要經過三個步驟(**圖 3-1**):

- **離子化(Ionization):**帶電粒子沿著其運動軌跡剝離晶格電子,使晶格原子失去電子後形成帶正電的離子(圖 3-1A)。
- 2. 庫倫排斥力 (Coulomb repulsion): 晶格中帶正電的離子因靜電排斥而移

動,形成裂縫及空缺(**圖 3-1B**)。

 3. 彈性應變 (Elastic strain):應力區域因彈性鬆弛,使得周圍未受影響的 晶格重新排列,並於粒子運動的軌跡留下缺陷帶,此缺陷帶即為核飛跡 (圖 3-1C)。

需注意,自然產生的核飛跡在未經處理的情況下,因寬度太細(數埃Å),僅 能用電子顯微鏡觀察,此狀態的核飛跡稱作「隱痕」(latent track)。為了便於使用 光學顯微鏡觀察,須使用化學藥劑進行溶蝕(etching),將隱痕寬度溶至方便觀察 的大小,關於溶蝕的步驟會於 3-1-10 節詳細說明。



圖 3-1 核飛跡形成示意圖。(A)離子化;(B)庫倫排斥力;(C)彈性應變。(Fleischer *et al.*, 1975)

3-1-2 核飛跡的癒合

礦物晶格中累積的核飛跡在尚未溶蝕之前,並不會永久保存,可能會因許多因素影響而自行密合,包括時間、溫度、壓力等(Wagner and van den Haute, 1992)。 Fleischer *et al.* (1965b)將礦物及雲母透過實驗的方式,模擬其可能受到的地質因 素並觀察核飛跡的變化,實驗結果認為「加熱時間」及「溫度」是影響核飛跡閉 合的主要因素(**圖 3-2**),而核飛跡受熱癒合的特性稱為「癒合作用」(annealing)。

癒合作用發生於礦物被加熱到高於一定的溫度,礦物中的核飛跡會因周圍晶 格原子活化,使得原本受到核分裂影響而移位的晶格原子,逐漸回歸到原本排列 整齊的位置,而該臨界溫度即為「封存溫度」(closure temperature / blocking temperature)。然而,礦物中的鈾原子並不會因為溫度升高而停止分裂,在核飛跡 同時形成與癒合的情況下,普遍將核飛跡癒合程度介於 10~90%的區間稱作「部 分癒合帶」(partial annealing zone, PAZ)。而 Haack (1977)透過實驗定義了「有效 封存溫度」(effective closure temperature),意即當核飛跡癒合程度達 50%以上的溫度,而通過此溫度的年代則被視為礦物通過核飛跡封存溫度的冷卻年代。

不同礦物的封存溫度不同,即便是同一種礦物,也可能受到其他因素影響導 致封存溫度不同,包括定年系統的冷卻速率、晶格受到輻射破壞的程度,以及礦 物的化學成分:

- 冷卻速率:當定年系統的冷卻速率越快,礦物停留於部分癒合帶的時間 越短,核飛跡癒合所需的溫度便會越高(Tagami and O'Sullivan, 2005)(圖 3-3A)。
- 2. 輻射破壞程度:以錯石為例,天然錯石中的鈾原子隨時間產生 α 衰變使 得礦物晶格被擾亂,擾亂的程度越高,礦物的狀態變得越不穩定。因此 越老或鈾濃度越高的錯石,受到輻射破壞的程度越高,其封存溫度較低 (Kasuya and Naeser, 1988; Tagami and O'Sullivan, 2005)(圖 3-3B)。換 句話說,越老或鈾濃度越高的錯石越容易因溫度升高而癒合。
- 3. 礦物的化學成分:以磷灰石為例,磷灰石的化學式為 Ca₅(PO₄)₃(OH,F,Cl), 每個磷灰石顆粒的 OH、F、Cl 比例不同,若 Cl 含量較高,則該磷灰石核 飛跡的封存溫度較高 (Green *et al.*, 1985) (圖 3-4)。一般以氟磷灰石最常

見,由於氟磷灰石抗癒合能力較差,因此其封存溫度相對較低。

臺灣造山帶目前正處於加速剝蝕冷卻階段,透過 Chen et al. (2019) 統整前人 研究所計算得到的冷卻速率,配合 Reiners and Brandon (2006) 的部分癒合帶隨滯 留時間的關係圖,本研究將磷灰石部分癒合帶溫度區間定在 80~135℃,而鋯石部 分癒合帶溫度區間則定在 200~260℃。



■ 3-2 鋯石核飛跡穩定度隨溫度與加熱時間的變化。左上角的灰色三角形區域為 鋯石核飛跡完全癒合區域(TAZ),此區域中的核飛跡形成後處於不穩定狀態,很 快就會癒合;右下角的灰色區域為鋯石核飛跡穩定區域(TSZ),此區域中的核飛 跡處於熱穩定狀態,並且會隨著時間而累積;中間白色區域即為鋯石核飛跡的部 分癒合帶(PAZ),此區域中的核飛跡處於亞穩定態,會隨時間緩慢的縮短或癒合。 黑色虛線代表的是鋯石核飛跡長度的等值線,數據點包含四個鑽井資料(右上角) 以及癒合實驗結果(中間)。(Tagami and O'Sullivan, 2005)



■ 3-3 核飛跡封存溫度與滯留時間及冷卻速率的關係。(A)部分癒合帶溫度區間 隨滯留時間的變化,可見滯留時間越長,部分癒合帶溫度區間越低;(B)有效封 存溫度隨冷卻速率的變化,可見當冷卻速率增加,有效封存溫度亦會增加。(Reiners and Brandon, 2006)



圖 3-4 磷灰石氯含量與核飛跡年代關係圖。由圖可知,同一個樣本中,氯含量較高的磷灰石年代較老,代表癒合程度較低,即抗癒合能力較佳。(Green *et al.*, 1985)

3-1-3 核飛跡年代所代表的地質意義

當礦物受到高於封存溫度的熱事件時,其原本所累積的核飛跡會完全癒合, 直到礦物冷卻至封存溫度以下,核飛跡的地質時鐘便會開啟,之後若未再經過其 他熱事件影響,則礦物會保留最後一次熱事件的冷卻年代(cooling age)。實際上, 地層的溫度變化可能受到多種因素影響,如岩脈入侵、熱液、構造活動等,而導 致礦物當中原本已累積的核飛跡有機會被癒合。這種複雜的冷卻路徑,可能導致 核飛跡年代解釋上的困難。Wagner et al. (1972)將核飛跡冷卻路徑分成三類(圖 3-5),分別是快速冷卻、緩慢冷卻,以及複雜型冷卻,前兩種屬於單一冷卻路徑, 核飛跡年代可代表礦物通過有效封存溫度的時間,而複雜型冷卻因受到不只一次 的熱事件影響,其所記錄的核飛跡年代便無法反映真實的地質意義。三種冷卻路 徑詳細描述如下:

- 快速冷卻(圖 3-5,路徑 A):礦物溫度快速通過部分癒合區間並降溫至 封存溫度以下,通常發生於火山噴出岩類,其所記錄的年代可代表火山 噴發的年代,意即熱事件發生的年代或礦物形成的年代。
- 2. 緩慢冷卻 (圖 3-5,路徑 B):礦物溫度於部分癒合區間滯留時間較長, 冷卻速率較慢,常見於深成岩類或緩慢抬升之岩體。由於停留在部分癒 合帶的時間較長,原有的核飛跡可能會癒合,與此同時亦有新的核飛跡 生成,因此可能導致核飛跡年代峰值 (peak age)跨度較廣。
- 3. 複雜型冷卻(圖 3-5,路徑 C):礦物歷經多次熱事件影響,使得礦物冷卻至核飛跡穩定態後,又因升溫至部分癒合帶,導致較老的核飛跡可能被癒合,同時又有新的核飛跡形成。複雜的冷卻路徑可能導致核飛跡年代無法明確反映過去的冷卻歷史,因此經過複雜型冷卻的礦物,其核飛跡年代屬於混合年代(mixed age)。此現象可能發生於沉積盆地,礦物因深埋作用而升溫,使得核飛跡再次被癒合,稱為「沉積後癒合作用」(post-depositional annealing)。



圖 3-5 三種冷卻路徑示意圖。(A)快速冷卻;(B)緩慢冷卻;(C)複雜型冷卻。 (修改自 Wagner *et al.*, 1992)

除了可以透過計算單位面積的核飛跡密度估算冷卻年代,亦可透過核飛跡長度的統計推測其冷卻歷史。根據前人對於核飛跡長度統計的研究,核飛跡長度與 年代的分布可以反映礦物的核飛跡癒合程度(圖 3-6),以下將根據不同癒合程度 進行說明:

- 未癒合 (non-annealing) (圖 3-6A):礦物所經歷的熱事件低於封存溫度 的下限,核飛跡處於穩定狀態未被癒合,仍保留初始形成的核飛跡型態, 長度變化不大,因此核飛跡長度分布會成單一峰值,其核飛跡年代亦保 留原始紀錄。
- 2. 部分癒合 (partial annealing) (圖 3-6B):礦物所經歷的熱事件溫度達到 部分癒合區間,使得部分核飛跡癒合或縮短,並同時有核飛跡生成,導 致核飛跡長度變化較大,因此核飛跡長度分布廣,其所計算得到的核飛 跡年代也較混亂且地質意義模糊。
- 3. 完全癒合 (total annealing) (圖 3-6C): 礦物所經歷的熱事件溫度高於封存溫度的上限,核飛跡被大量癒合,冷卻後再形成新的核飛跡,因此核飛跡長度分布呈單一峰值,跨度小,且核飛跡年代為熱事件的冷卻年代。



圖 3-6 核飛跡長度、年代分布與癒合程度的關係。(A)未癒合;(B)部分癒合; (C)完全癒合。(Tagami, 2005)

3-1-4 核飛跡年代的計算

核飛跡由放射性核種自然衰變所形成,衰變機制不受外在因素影響,因此適 用一級反應的放射性衰變公式。放射性核種在任意時間內(t),由母元素(N_p) 衰變為子元素(N_D),其中λ為衰變常數,代表單位時間內的衰變機率。放射性同 位素衰變公式如下:

$$N_D = N_P (e^{\lambda t} - 1) \tag{$\color \lambda - 1$}$$

然而,²³⁸U的衰變除了自發核分裂(spontaneous fission)之外,同時還伴隨 α 衰變的發生。但核飛跡定年主要判別的依據為自發核飛跡總數,須將 α 衰變的部 分排除,因此要將自發核分裂的部份獨立探討。透過計算自發核飛跡的數量(N_S) 與樣本鈾濃度(^{238}N),搭配自發核分裂衰變常數(λ_f)與 238 U總衰變常數(λ_d) 的比值可將式 3-1 轉換為下式:



$$N_S = \frac{\lambda_f}{\lambda_d}^{238} N \left(e^{\lambda t} - 1 \right)$$

其中,核飛跡總衰變常數 $(\lambda_d$,約1.551×10⁻¹⁰)同時包含自發核分裂衰變 常數 (λ_f) 與衰變常數 (λ_{α}) ,而 λ_f (約6.85×10⁻¹⁷)與 λ_{α} (約1.55×10⁻¹⁰)的 值相差甚大,因此 λ_d 可視為 λ_{α} 。將式 3-2 經過移項後可得到初步的年代公式:

$$\mathbf{t} = \frac{1}{\lambda_{\alpha}} \ln \left[\left(\frac{\lambda_{\alpha}}{\lambda_{f}} \right) \left(\frac{N_{S}}{2^{38}N} \right) + 1 \right] \qquad (\vec{\mathbf{x}} \ 3-3)$$

從式 3-3 可知,由於 $\lambda_f 與 \lambda_{\alpha}$ 皆為定值,因此主要影響年代的參數為樣本的自發 核飛跡數量(N_S)及其 ²³⁸U 濃度(²³⁸N)。自發核飛跡數量可直接透過顯微鏡觀察, 而鈾濃度則必須使用儀器測量(如 ICP-MS),亦或是用 ²³⁵U 濃度進行推算。由於 ²³⁵U 與 ²³⁸U 於自然界中的含量比值為定值($I, ^{235}N/^{238}N = 7.252 \times 10^{-3}$)(Ritcher *et al.*, 1999; Ritcher *et al.*, 2007),因此在實驗流程中,會將樣本與已知鈾濃度的標 準玻璃一併放入核子反應爐進行固定通量的慢中子照射(φ),誘發樣本與標準玻 璃中的 ²³⁵U 分裂形成核飛跡,稱為「誘發核飛跡」(induced fission track)。透過誘 發核飛跡的數量(N_I)便可計算樣本鈾濃度(²³⁸N),兩者關係式如下:

$$N_I = {}^{238} N I \sigma \varphi \qquad (\vec{\mathfrak{x}} \ 3-4)$$

 σ : ²³⁵U 受慢中子照射誘發核分裂之截面積常數=580 × 10⁻²⁴ cm²

由式 3-4 計算得到之樣本鈾濃度,代入式 3-3 即可得到以下公式:

$$\mathbf{t} = \frac{1}{\lambda_{\alpha}} \ln \left[\left(\frac{\lambda_{\alpha}}{\lambda_{f}} \right) \left(\frac{N_{s}}{N_{I}} \right) I \sigma \varphi + 1 \right] \qquad (\vec{\mathfrak{K}} \ 3-5)$$

在計算核飛跡年代時,會將單位體積的核飛跡數量 $(N_S \times N_I)$ 轉換成特定平 面面積的核飛跡密度 $(\rho_S \times \rho_I)$ 進行計算。由於維度不同,所以在計算密度時須考 量多方面因素,包括礦物內部特定表面積大小、溶蝕效應的影響、幾何因素,以 及人為誤差等。因此,由核飛跡數量轉換成核飛跡密度的公式,須加入下列因子 一併計算: $g_S \times g_I$ 分別為自發與誘發核飛跡的幾何參數; $R_S \times R_I$ 分別為自發與誘 發核飛跡的可溶蝕長度; $\eta_S \times \eta_I$ 分別為自發與誘發核飛跡的溶蝕效率; $f(t)_S \times f(t)_I$ 分別為自發與誘發核飛跡的溶蝕時間; $q_S \times q_I$ 為人為判別誤差,公式如下:

$$\rho_S = g_S N_S R_S \eta_S f(t)_S q_S \qquad (\vec{\mathfrak{x}} \ 3-6)$$

$$\rho_I = g_I N_I R_I \eta_I f(t)_I q_I \qquad (\sharp 3-7)$$

將式 3-6 與式 3-7 進行移項後,分別代入式 3-5 的N_s和N₁,即可得到以下年代 公式:

$$\mathbf{t} = \frac{1}{\lambda_{\alpha}} \ln\left[\left(\frac{\lambda_{\alpha}}{\lambda_{f}} \right) \left(\frac{\rho_{S}}{\rho_{I}} \right) I \sigma \varphi + 1 \right] \qquad (\sharp 3-8)$$

最後再帶入幾何參數 G(= g_1/g_s),幾何參數為特定平面可接收到核飛跡的角 度範圍,主要分成 4 π 與 2 π 。而雲母片因為是接收來自單一方向(來自樣本或標準 玻璃)的核飛跡,所以 g_1 通常為 2 π 。至於樣本的核飛跡會因檢測方式不同,導致 幾何參數 g_s 可能為 4 π 或 2 π ,因此G的值通常為1或0.5。本研究所採用的實驗方 法為外部檢測法(EDM),故G值為0.5。另外,核飛跡樣本前處理可能導致實驗 誤差,因此加入實驗誤差參數 Q(= $R_s\eta_sf(t)_sq_s/R_1\eta_1f(t)_1q_1$)加以校正,即可得 到核飛跡年代公式:

$$\mathbf{t} = \frac{1}{\lambda_{\alpha}} \ln \left[\left(\frac{\lambda_{\alpha}}{\lambda_{f}} \right) \left(\frac{\rho_{s}}{\rho_{I}} \right) QGI\sigma\varphi + 1 \right] \qquad (\vec{\mathbf{x}} \ 3-9)$$

3-1-5 中子通量計算

由式 3-4 可知,計算樣本鈾濃度時,須透過誘發核飛跡的數量進行換算。而誘 發 ²³⁵U 分裂的方式,是將樣本和已知鈾濃度的標準玻璃分別與雲母片貼合,一同 放入核子反應爐進行固定通量的慢中子照射,因此中子通量(*φ*)便成為影響核飛 跡年代的因素之一。標準玻璃主要由美國國家標準暨技術研究所(National Institute of Standards and Technology,簡稱 NIST)訂定,不同的礦物樣本會與其相近鈾濃 度的標準玻璃一併照射,以確保最小誤差,因此本研究對於鋯石核飛跡樣本採用 的標準玻璃為 SRM-610(鈾濃度=461.5 ppm),對於磷灰石核飛跡樣本則採用標準 玻璃 SRM-612(鈾濃度=37.38 ppm)(Pearce *et al.*, 2007)。中子通量的計算公式如 下:

$$\varphi = \frac{2\rho_{IM}}{NC_u\sigma_f IR} \qquad (\not \exists 3-10)$$

 ρ_{IM} :雲母片所記錄的標準玻璃誘發核飛跡密度(核飛跡數量/cm²)

N:標準玻璃每立方公分所含的原子數

 C_u :標準玻璃鈾原子濃度(鈾原子/原子總數)

 σ_{f} : ²³⁵U 受慢中子照射誘發核分裂之截面積常數(580×10⁻²⁴ cm²)

1:標準玻璃的鈾同位素比值²³⁵U/²³⁸U

R:核飛跡長度(約10µm)

由於中子通量的誤差與誘發核飛跡的密度息息相關,透過 Hurford and Green (1982)所提出的 Zeta 校正法可藉由標準玻璃的誘發核飛跡密度進行中子通量的 校正,因此可將 Zeta 校正法的經驗常數(B)帶入中子通量公式,使式 3-10 簡化 成下式:

$$\varphi = \mathbf{B} \times \rho_{IM} \qquad (\vec{\mathfrak{L}} \ 3-11)$$

不同的標準玻璃,B值亦不同,標準玻璃 SRM-610的B值為4.54×10⁸ 中子/核飛跡,而標準玻璃 SRM-612的B值為5.6×10⁹中子/核飛跡。

3-1-6 Zeta 校正法(Zeta-calibration method)

一般來說,核飛跡年代公式中的 λ_f 是常數,應為定值,但由於人為對核飛跡的辨認稍有誤差,導致 λ_f 的值在各實驗室間不盡相同,目前文獻中可見 λ_f 數值差異介於6.9×10⁻¹⁷ (Fleischer and Price, 1964)至8.7×10⁻¹⁷ (Wagner *et al.*, 1975)之間。由式 3-9 可知, λ_f 也是影響核飛跡年代的因素之一。同時,Q(實驗誤差參數)以及 φ (中子通量)也普遍難以精準測量。為解決人為因素所帶來的誤差,Hurford and Green (1982)提出 Zeta 校正法,以經驗公式進行校正,其定義如下:

$$\zeta \equiv B \frac{I\sigma_f}{\lambda_f} \qquad (\vec{\mathfrak{K}} \ 3-12)$$

ζ:標準玻璃校正常數

B:經驗校正常數

I: 標準玻璃的鈾同位素比值 ²³⁵U/²³⁸U $\sigma_f : {}^{235}U 受慢中子照射誘發核分裂之截面積常數(580 × 10⁻²⁴ cm²)$ $\lambda_f : 自發核分裂衰變常數$

Zeta 校正法除了使用標準玻璃的誘發核飛跡計算中子通量之外,需再使用已 知年代的標準樣本 (standard sample,以下簡稱標準樣),與核飛跡樣本及標準玻 璃一同放入核子反應爐進行慢中子照射,並計算出 Zeta 校正值 (ζ),計算公式如 下:

$$\zeta = \frac{\left(e^{\lambda_{\alpha}t_{S}} - 1\right)}{\lambda_{\alpha}\left(\frac{\rho_{S}}{\rho_{I}}\right)_{s}G\rho_{d}} = \frac{QI\sigma B}{\lambda_{f}} \qquad (\vec{\mathfrak{K}} \ 3-13)$$

式 3-13 中, $(\rho_S/\rho_I)_S$ 為標準樣的自發核飛跡與誘發核飛跡比值, t_S 則是標準樣 的年代。本研究對於磷灰石與結石核飛跡分別採用 Durango apatite 以及 Fish Canyon Tuff zircon 作為標準樣本,前者的標準年代為 31.4±0.7 Ma (Mcdowell and Keizer, 1977),後者的標準年代為 27.9±0.7 Ma(Steven *et al.*, 1967;Hurford and Green, 1983; Wagner *et al.*, 1992)。由於各實驗室的實驗流程不同,導致 Zeta 校正值亦存在人為 差異,本研究使用 SRM-612 搭配 Durango apatite 的 Zeta 值應介於 339±5 之間 (Hurford and Green, 1983),而 SRM-610 搭配 Fish Canyon Tuff zircon 的 Zeta 值應 介於 34.8~35.7 之間。最後,將式 3-13 代入核飛跡年代公式 (式 3-9),即可得到 未知年代 ($t_{unknown}$) 樣本的核飛跡年代公式:

$$t_{unknown} = \frac{1}{\lambda_{\alpha}} \ln \left[\lambda_{\alpha} \left(\frac{\rho_{s}}{\rho_{I}} \right) \rho_{IM} G\zeta + 1 \right] \qquad (\vec{\mathfrak{x}} \ 3-14)$$

3-1-7 核飛跡年代誤差與卡方檢定

天然鈾原子衰變皆為獨立且隨機事件,故單位時間裡發生核分裂的事件分布 主要由機率控制。若母元素於單位體積中的衰變是隨機的,則該單位體積中所記 錄的事件次數(核飛跡數量)亦為隨機的。當礦物中的鈾濃度完全均勻分布,則 核飛跡數量呈泊松分布(Poisson distribution)。泊松分布為不對稱且不連續的分布, 僅由平均數(µ)來表現,其變異數(s_p^2)與平均數相等($s_p^2 = \mu$),也就是其標 準差為平均數的0.5 次方($s_p = \sqrt{\mu}$),相對標準差則為 C_p (=1/ $\sqrt{\mu}$)。若平均數越 大,則泊松分布會越接近常態分布(Wagner *et al.*, 1992)。

本研究採用的核飛跡測定法屬於各粒法(grain-by-grain method)當中的外部 檢測法(external detector method,簡稱 EDM),各粒法是將樣本中的每一個礦物顆 粒分別計算得到其核飛跡年代。在計算各顆粒年代時,前提假設為各顆粒的鈾濃 度皆均勻分布。其中,用於計算樣本核飛跡年代重要參數之一的核飛跡密度,其 誤差呈泊松分布,因此當單位面積內產生的核飛跡數量(意即單位面積內發生核 分裂的次數)為N,則N代表礦物中核分裂事件的平均數,變異數即為N,標準差 為 \sqrt{N} ,相對標準差為 $1/\sqrt{N}$ 。然而,核飛跡年代誤差須考慮自發核飛跡數量(N_S)、 誘發核飛跡數量(N_I)、標準玻璃誘發核飛跡數量(N_D),以及校正人為因素的zeta 值(ζ)。當各誤差皆符合泊松分布,其總和亦符合泊松分布,因此可將上述變因 合併代入核飛跡年代相對誤差(relative error)公式計算:

$$\frac{\sigma(t)}{t} \approx \sqrt{\frac{1}{N_S} + \frac{1}{N_I} + \frac{1}{N_D} + \frac{\sigma(\zeta)}{\zeta}} \qquad (\vec{x} \ 3-15)$$

另外,使用各粒法時需注意,由於不同顆粒間的鈾濃度差異並不會影響個別 顆粒的自發與誘發核飛跡密度比值(ρ_s/ρ_l),所以並沒有辦法直接從泊松分布得到 各顆粒的鈾濃度分布。Galbraith (1981)提出卡方檢定 (chi-square test),透過各 顆粒間的鈾濃度差異,加以辨別所有顆粒是否皆來自單一來源,其計算公式如下:

$$x^{2} = \Sigma_{j} \left[\frac{\left(N_{sj} - \widehat{N}_{sj} \right)^{2}}{\widehat{N}_{sj}} + \frac{\left(N_{ij} - \widehat{N}_{ij} \right)^{2}}{\widehat{N}_{ij}} \right] \qquad (\neq 3-16)$$

其中, N_{sj} 和 N_{ij} 分別代表第j個礦物顆粒實際計算得到的自發與誘發核飛跡數 量,而 \hat{N}_{sj} 和 \hat{N}_{ij} 則分別代表第j個礦物顆粒預期的自發與誘發核飛跡數量。 \hat{N}_{sj} 和 \hat{N}_{ij} 是分別透過 N_sN_j/N 以及 N_iN_j/N 得到,其中N代表所有顆粒的自發和誘發核飛跡總 數($N_s + N_i$),而 N_j 則代表第j個礦物顆粒的自發和誘發核飛跡總數($N_{sj} + N_{ij}$)。 卡方檢定屬於右尾檢定,在泊松分布中, x^2 以右的區域為拒絕域。前人經常用顯 著水準($\eta = 0.05$)進行判別,而 η 即代表拒絕域面積占總面積的比例。P(x)可視 為拒絕域面積占總面積的百分比,當P(x)大於5%,則代表各顆粒鈾濃度分布均勻, 可以視作單一來源,意即樣本受到完全癒合;反之,當P(x)小於5%,則代表各顆 粒可能來自不同來源,樣本可能為未癒合或部分癒合。因此,通常砂岩樣本的 P(x) 會小於 5%,而完全癒合的礫石樣本,其 P(x)則會大於 5%,代表該樣本當中的所 有礦物顆粒可合併為一個礦物進行計算。

3-1-8 核飛跡年代統計

由於核飛跡的生成機率低,且單顆粒年代誤差較大,因此在計算樣本核飛跡 年代時,會計算足夠的礦物顆粒,以達到有意義的年代峰值。本研究樣本包含砂 岩及變質砂岩礫石,用於分析核飛跡年代的礦物包含鋯石及磷灰石。以鈾濃度而 言,鈾濃度越高的礦物,單顆粒年代的可信度越高,而鋯石的鈾濃度較磷灰石高, 因此鋯石所需計算的顆粒數量較少,磷灰石則較多。以岩性而言,因礫石可直接 代表單一母岩的年代,其中的礦物大多歷經相同的溫壓變化,因此礫石需計算的 礦物較少;砂岩則因其岩屑可能來自不同地層,單一砂岩樣本當中的礦物可能歷 經不同程度的溫壓變化,因此砂岩樣本所需計算的礦物顆粒較多。本研究對於不 同岩性的樣本及不同礦物,所計算的顆粒數量標準如表 3-1。

表 3-1 不同岩性及礦物所需計算的礦物顆粒數量(參考 Hurford *et al.*, 1984; Garver abd Brandon, 1994)。

Mineral Lithology	Apatite (grains)	Zircon (grains)
Sandstone	100~120	80~100
Boulder	80~100	60~80

計算一定數量的礦物顆粒後,得到的單顆粒核飛跡年代需進行適當的統計, 才能得到有意義的地質年代。本研究所使用的核飛跡年代統計軟體為 Trackkey (Dunkl, 2002)以及 Binomfit (Brandon, 2002),使用前者的目的在於輸出顆粒年

代檔案(.ftz)以利投入 Binomfit 進行年代峰值計算;使用後者的目的在於,將顆 粒年代進行統計,並計算該樣本峰值數量及各峰值年代。對於兩種統計軟體的使 用與說明如下:

- Trackkey:依序輸入樣本各顆粒的自發核飛跡數量、誘發核飛跡數量、 計算核飛跡的面積以及 Zeta 值,並選擇標準玻璃和標準樣,軟體會自動 計算樣本的單顆粒核飛跡年代及誤差、各顆粒的鈾濃度、樣本集合年代 (包括平均年代 central age、加權平均年代 pooled age)、顆粒年代分散度 (dispersion),以及 P(x)值,並且繪製年代徑向圖 (radial plot)、各顆粒 自發/誘發核飛跡密度比值圖,以及年代頻譜。透過軟體計算得到的 P(x) 值可確認該樣本中的礦物能否視作單一來源。
- 2. Binomfit:將 Trackkey 輸出的顆粒年代檔案(.ftz)輸入 Binomfit 軟體中, 程式會先根據輸入的年代進行初步的分析,並猜測可能的峰值數量及年 代,接著透過二項峰值擬合法(binomial peak-fitting method, Galbraith and Green, 1990)計算出最適當的峰值數量及年代。其計算方式是先猜測可 能的年代,再由1開始逐步增加峰值數量,並以迭代法(iteration)計算 各峰值數量及其對應的年代。最後會透過F檢定(F test)確認計算得到 的峰值年代是有意義的而非雜訊,假設峰值數量為m與m+1,則峰值擬 合的品質為x²m和x²m+1,可進一步計算F值如下:

$$F = \frac{(m+1)(x_m^2 - x_{m+1}^2)}{x_m^2} \qquad (\vec{\mathfrak{x}} \ 3-17)$$

P(F)為F值分布的機率,隨著峰值數量增加,計算得到的P(F)值會不同, 當峰值數量增加到P(F)>5%時,該數量即為最理想的峰值數量,而峰值 年代即為迭代法所計算得到的年代。

兩種軟體皆可計算出樣本核飛跡年代,但由於計算方式不同,故得到的年代

會有些許差異。以磷灰石為例,臺灣的磷灰石多屬於高鈾濃度低自發核飛跡的類型(Resentini et al. 2020),因此本研究在進行核飛跡計數時,時常可見零自發核飛跡(N_S = 0)的顆粒,若使用年代公式計算(式 3-14),會得到 0 Ma 的結果,Trackkey 會將 0 Ma 的顆粒年代直接進行統計並擬合峰值年代。但 0 Ma 的意義為「距離樣 本溫度低於封存溫度至今僅經過 0 m.y.」,並不符合真實的地質意義,因此本研究 採用 Binomfit 透過二項演算法計算得到的中位數年代及信賴區間,作為樣本核飛 跡年代及其誤差值。

3-1-9 核飛跡年代測定法

計算核飛跡年代的主要參數為自發核飛跡密度 (ρ_s)、誘發核飛跡密度 (ρ_I) 與中子通量 (φ),其中自發與誘發核飛跡密度,可透過許多不同的測定方法進行 計算。過去曾有測定法是將樣本計算自發核飛跡後,再度破壞樣本並計算誘發核 飛跡,例如再拋光法 (re-polish method) 或再溶蝕法 (re-etch method),但此方法 將使得薄片無法反覆確認,因此現今已不再採用此測定法。另外也有減去法 (subtraction method) 是將樣本分成兩部分,一部分進行輻照並計算 $\rho_s n \rho_I$,另一 部份不輻照,直接溶蝕並計算 ρ_s ,再將兩者相減得到 ρ_I ,但此方法可能因顆粒間的 性質差異,導致結果產生較大誤差,故此測定法也已不敷使用。為了讓核飛跡樣 本薄片具備可以重複確認的特性,並降低顆粒間性質差異造成的誤差,現今大多 使用下列三種核飛跡年代測定法 (Malusà and Fitzgerald, 2019,**圖 3-7**):

 集團法 (Population Method, PM):將所有礦物顆粒分成兩部分製作成薄 片,並打磨拋光。其中一片直接溶蝕後計算自發核飛跡密度 (ρ_S),另一 片要先將薄片加熱,使其中的所有自發核飛跡完全癒合後,再進行輻照 誘發²³⁵U 分裂產生誘發核飛跡,之後再進行溶蝕並計算誘發核飛跡密度 (ρ_I)。由於此方法的自發與誘發核飛跡是使用同一樣本但不同礦物顆粒 計算得到,因此適用此方法的礦物,必須是鈾濃度分布均匀,且顆粒間 年代相近的樣本,如快速噴發之火成岩類等。

- 2. 外部檢測法 (External Detector Method, EDM):將礦物顆粒製作成薄片並抛光至出露 4π 面,利用化學藥劑將樣本溶蝕至自發核飛跡在光學顯微鏡下清楚可見,之後便將拋光面與雲母片密接,同時將標準樣與標準玻璃一同包裝後進行輻照,以誘發樣本中的²³⁵U 分裂,並於雲母片上記錄誘發核飛跡。輻照完將雲母片與薄片分離,並使用氫氟酸溶蝕雲母片,使誘發核飛跡在光學顯微鏡下清楚可見,薄片則不再溶蝕。最後再於薄片上計算自發核飛跡密度(ρ_s),並在雲母片上計算誘發核飛跡密度(ρ_l)。此方法為目前最盛行的核飛跡年代測定法,因為薄片具有可重複檢視的特性,且不論計算自發或誘發核飛跡密度,皆使用同一個礦物顆粒,因此顆粒間性質的差異較不影響定年結果。同時,由於外部檢測法屬於各粒法的一種,是將各個礦物顆粒分別計算年代與鈾濃度後,再透過統計計算其真實年代,故此方法也適用於各種岩性,以及各礦物顆粒間鈾濃度不同的樣本。本研究因樣本為碎屑性物質,故採用此測定法。
- 3. LA-ICP-MS (鐳射剝蝕感應耦合電漿質譜術):此方法優點在於可以精準 測定樣本礦物顆粒的鈾濃度,因此不需透過誘發核飛跡來計算顆粒鈾濃 度,只需計算自發核飛跡密度即可 (ρ_S)。如此一來可免除誘發核飛跡的 計算誤差,以及輻照的中子通量誤差,但此方法不適用於鈾濃度不均的 礦物顆粒。



圖 3-7 常見的核飛跡年代測定法。黑字為現今常用之核飛跡年代測定法, 灰字則 為現今不再使用之核飛跡年代測定法。灰色底的部分為多顆粒法, 是將所有礦物 顆粒視為單一來源進行計算。(Malusà and Fitzgerald, 2019)

3-1-10 實驗流程

從野外採集回來的樣本,需先經過壓碎、浮選、磁選等步驟,將所需定年的 礦物分選出來,之後便開始進行一系列的薄片製作過程。本研究採用外部檢測法, 實驗流程參考 Tagami *et al.* (1988)、周南與劉聰桂 (1997)。以下為礦物經過分選 後的實驗流程,流程圖請參閱**圖 3-8**:

- 1. 排列 (Arranging):
 - 磷灰石:先將塑膠模具(外框邊界 2cm*2cm,內框邊界 1.5cm*1.5cm, 厚度約 0.1cm)黏貼於載玻片上,再將磷灰石以矩陣方式整齊排列於 塑膠模具中。需注意塑膠模具不可太厚,以免影響薄片在顯微鏡下 的能見度。因為磷灰石鈾濃度低,需分析較多顆粒,因此每個模具 中約排列 100~200 顆磷灰石。
 - **皓**石:由於本研究樣本分選得到的鋯石數量較多,因此盡量挑選晶型良好、透明度佳、顏色為無色之鋯石,並以矩陣方式整齊排列於載玻片上。排列時需特別注意,因鋯石 c 軸為結構弱面,為避免打磨時造成鋯石沿 c 軸方向破裂,故排列時需將所有顆粒以同方向排列。挑選顆粒時,同一片薄片中的鋯石也要盡量挑選大小相近的顆粒,以免在打磨時無法均勻磨出 4π 面。另外,因鋯石不易控制溶蝕時間,故本研究每片薄片僅排列約 50~100 顆鋯石,以分散風險。
- 2. 膠埋/壓埋 (Mounting):
 - 磷灰石膠理:調配環氧樹脂(環氧樹脂:硬化劑 = 4:1),並將其抽 真空,以避免氣泡影響核飛跡觀察。將調配好的環氧樹脂,從薄片 正中央緩慢倒入塑膠模具中,以免擾亂顆粒排列。灌膠至膠液與模 具齊平即可,接著使用另一片載玻片覆蓋於模具上,使薄片頂部平 整。膠埋後靜置約2~3日即可將薄片與塑膠模具分離,並刻寫薄片 編號。
 - **鋯石壓理**:將排列鋯石的載玻片放置於加熱板上加熱至 300°C,靜置約 10 分鐘,同時剪取適當大小(約 2cm*2cm)的 PFA 鐵氟龍片(PFA Teflon)。將鐵氟龍片一側先壓在載玻片上待其軟化,當鐵氟龍片充分熔融之後,再夾取另一個乾淨的載玻片覆蓋於鐵氟龍片上,並用力將載玻片向下壓埋。待鐵氟龍片將所有鋯石顆粒包覆後,便可關閉加熱器使其冷卻。當薄片溫度降至室溫後,將薄片放入裝有常溫

自來水的燒杯中,使載玻片與鐵氟龍片分離,約靜置1~2天後即可 完成。取出薄片後,需在背面刻寫薄片編號。

- 3. 打磨/抛光 (Polishing):
 - 打磨(預磨,grinding/pre-polish):將礦物用#1500的砂紙,先將薄 片磨至礦物出露4π內面。通常磨除的厚度至少需達到核飛跡一半長 度,不同礦物的核飛跡長度不同,磷灰石約需磨除約8µm (Gleadow *et al.*, 1986),錯石需磨除約6µm (Krishnaswami *et al.*, 1974)。
 - 抛光:將打磨後的薄片,依序使用 6 μm、3 μm、1 μm 的鑽石膏,在 絨布上進行抛光。最後使用 0.3 μm 鑽石膏收尾,直到看不見前一次 抛光的刮痕為止。
 - 磷灰石:從砂紙更換至鑽石膏,以及拋光階段每更換一次鑽石膏粒徑時,皆需以超音波震盪清洗薄片2分鐘共兩次,以免前一階段的碎屑殘渣或鑽石膏殘留,使得薄片受到不均匀的粒徑拋光,也避免不同粒徑的鑽石膏汙染。另外,為便於觀察前一階段的刮痕是否完全消除,在進到下一階段的粒徑時,需將薄片旋轉90°再進行拋光。
 - **錯石**:每更換一次砂紙或鑽石膏粒徑,皆需以超音波震盪清洗薄片2
 分鐘共兩次。由於鋯石 c 軸為結構弱面,可能在打磨或抛光時產生
 破裂,為避免此狀況發生,鋯石打磨與抛光皆需垂直 c 軸方向進行。
- 4. 溶蝕 (Etching):
 - 磷灰石:將薄片放入裝有 5M HNO3 溶液的玻璃燒杯中,維持 20°C, 每片溶蝕 20 秒 (Gleadow and Lovering, 1978)。溶蝕完畢需將薄片以 超音波震盪清洗,避免化學藥劑殘留。
 - **鋯石**:將化學藥劑(濃度比 NaOH: KOH: LiOH=6:14:1)放入氧
 化鋁坩堝中進行調配,調配完畢後蓋上蓋子並放入坩堝加熱器,加
 熱至 230°C,靜置約1小時待藥劑融化成液體。隨後將薄片磨出礦物
 內面的部分,向下浸泡於溶液中,使其充分溶蝕。由於鋯石會隨時

間累積 α 衰變,使礦物晶格受到破壞,而晶格破壞程度是影響錯石 溶蝕效率的關鍵因素之一,晶格破壞程度越高,溶蝕所需時間越短, 反之亦然。因此,本研究於每個樣本先各取兩片薄片,其中一片測 試其最短溶蝕時間(最早開始出露核飛跡的時間),另一片則測試其 最長溶蝕時間(所有核飛跡皆可見且過度溶蝕)。剩餘的薄片則根據 該樣本最短及最長溶蝕時間的範圍,以不同時間進行溶蝕。本研究 所有鋯石薄片的溶蝕時間大約介於 5~39 小時之間。溶蝕完畢後, 需使用超音波震盪清洗薄片,去除殘留的化學藥劑。

5. 包裝 (Packing):

將樣本與標準樣薄片出露礦物內面的部分,與雲母片密接,並以膠 帶綑綁固定。再將樣本和樣本之間,以相同方向堆疊,並用膠帶綑綁固 定。標準玻璃亦需和雲母片密貼,並分別置於樣本的上、中、下方,以 平衡照射管的上中下方中子通量的些微差異。需要特別注意的是,雲母 片的大小要小於薄片的大小,否則可能因包裝過程,使得雲母片翹起或 破碎,導致雲母片無法清楚記錄誘發核飛跡(發散、不易觀察等)。

6. 輻照 (Irradiation):

本研究將薄片送至國立清華大學水池式反應器(THOR)進行慢中子 照射,磷灰石照射功率為1MW,照射40分鐘;鋯石照射功率為1.2MW, 照射6分鐘。輻照後將薄片靜置,待輻射值降至背景值時再取出。

7. 雲母片溶蝕 (Mica etching):

在薄片還貼合雲母片時,先將雲母片四角打洞,需刺穿雲母片並於 薄片上同時留下打洞痕跡,以利後續使用計數軟體的薄片對位。打洞後 在雲母片上刻寫薄片編號,並放入裝有 48% HF 的鐵氟龍杯中,將溫度控 制在 20°C。溶蝕 15 分鐘後將雲母片取出,並用大量純水清洗,洗完用酸 鹼試紙檢測,若呈中性便可拿出,最後需使用超音波震動將殘留的化學 藥劑清除,即完成雲母片溶蝕。

8. 計數 (Counting):

將薄片與雲母片用膠水固定於載玻片上,黏貼時需注意兩片應呈鏡 像對稱排列,兩片之間需留縫隙並用奇異筆畫上十字,十字的中心即為 薄片對位的基準點。製作完薄片後,將薄片放置於光學顯微鏡下觀察, 本研究使用的顯微鏡為 Olympus BX51 研究級正立光學顯微鏡,在 500~ 1000 的倍率下使用穿透光與反射光觀察並計算核飛跡數量。而薄片對位 則使用 Trakscan 載台及其控制軟體,進行薄片的移動以及薄片和雲母片 之間的位置對照。在進行樣本核飛跡計數前,需先計算標準樣的自發與 誘發核飛跡,以及標準玻璃的誘發核飛跡,將數據輸入 Binomfit 軟體計 算當次照射的 zeta 值。確認 zeta 值在合理範圍內 (磷灰石:310~360; 鋯石:~28),方可開始計算樣本的自發與誘發核飛跡。

本研究先將所有礦物顆粒拍照轉向後,再將照片輸入 Image Pro 軟體 進行計數。首先將礦物邊緣以多邊形框出,接著將 4π 面以多邊形框出, 外框與內框間距至少需大於 10 μm (Donelick *et al.*, 2005),最後將 4π 面 當中核飛跡的位置利用點狀工具將其標示點位,並記錄自發核飛跡數量 (圖 3-9 左)。隨後,需在雲母片上相對應的位置,畫出全等的外框與內 框,並計數內框中的誘發核飛跡(圖 3-9 右)。在框出 4π 面時需注意,若 礦物內面有大範圍破裂,應盡量避免將破裂區域劃入框內,否則可能造 成計數結果不準確(圖 3-10)。另外,若礦物內面過於破碎(圖 3-11 左)、 過度溶蝕或核飛跡分布太密(圖 3-11 右),導致核飛跡不易辨識,則不得 採用該顆粒進行計數;若雲母片與薄片未緊密貼合,可能導致誘發核飛 跡分布過度發散(圖 3-12),使薄片上的自發核飛跡的計數面積(4π 面) 無法與雲母片上的誘發核飛跡完全對應而造成計數結果不準確,此類型 的顆粒應避免使用,而此情形常發生於薄片邊緣的顆粒。所有顆粒計算 完畢後,將各顆粒的自發、誘發核飛跡數量以及計數面積(4π 面)輸入 Trackkey 軟體中,匯出.ftz 檔後匯入 Binomfit 軟體計算峰值年代。



圖 3-8 EDM 實驗流程圖。



圖 3-9 自發與誘發核飛跡的外框、內框與計數點位。左圖為礦物顆粒的外框、內 框邊界,圖中黃色點為自發核飛跡位置;右圖為雲母片上相對應顆粒的誘發核飛 跡,其內外框尺寸和左圖的內外框全等,圖中黃色點為誘發核飛跡位置。



圖 3-10 計數範圍避免框到缺陷處。左圖將缺陷處畫在計數範圍內(內框)為錯誤 示範,右圖內框則避開缺陷處為正確做法。



圖 3-11 不建議採用之礦物顆粒。左圖為礦物顆粒破碎,右圖為核飛跡過度溶蝕。



圖 3-12 因雲母片未密貼導致誘發核飛跡發散。左圖為礦物顆粒及其框線;右圖為 雲母片上的誘發核飛跡分布,框線大小與左圖框線全等,可見並非所有誘發核飛 跡皆位於框線中。

3-2 砂岩岩象分析

透過沉積盆地中的碎屑沉積物分析,得以還原源區山脈的剝蝕歷史。因此本研究透過砂岩樣本的岩象分析,確認源區可能出露的岩性,以及各岩性在不同樣本間是否有含量差異。

3-2-1 臺灣造山帶各岩性之岩象特徵

前人研究認為, 位於海岸山脈的後前淵盆地, 其源區主要為盆地西側的造山帶, 部分為東側的島弧火山 (Teng, 1979; Chen and Wang, 1988b)。藉由觀察源區山脈出露岩性之岩象薄片, 有助於快速分辨砂岩樣本中的碎屑沉積物。隨著山脈的抬升剝蝕,造山帶將依序出露變質度由低至高的岩層,以下將針對臺灣造山帶已出露岩層分別進行說明:

1. 沉積岩(西部麓山帶):

西部麓山帶(Western foothill, **圖 3-13**)位於海岸平原及雪山山脈之 間,其地層年代屬漸新世至更新世。此地質區可細分為內麓山帶和外麓 山帶,前者位於東側,後者位於西側。內麓山帶出露地層為中新統砂岩, 砂岩粒度向南逐漸變細,泥質含量增加,基質以泥或碳酸鈣為主。此地 層已受到成岩作用(diagenesis),膠結狀況良好,但並未受到深埋變質作 用影響,變質溫度未達 200℃(陳肇夏與王京新,1995),且碎屑物外型 未改變。

2. 極低度變質岩/硬頁岩 (雪山山脈地質區):

雪山山脈地質區(Hsueshan Range, **圖 3-13**)出露岩層包括硬頁岩與 變質砂岩,年代越老的地層,變質度越高。變質度範圍甚廣,自成岩相 至綠色片岩相皆有。

硬頁岩部分以大桶山層為例,大桶山層岩性為厚層硬頁岩夾薄層砂 岩(陳文山等,2016)。硬頁岩為泥質岩受初始變質作用變硬而成,板劈 理尚未發育,但已可見微弱葉理,且條狀礦物已成定向排列,此現象稱 為初始葉理。

變質砂岩部分以四稜砂岩為例,四稜砂岩以厚層含礫質石英砂岩為 主,與硬頁岩及變質砂岩互層(陳文山等,2016)。其岩象薄片使用平光 觀察時,可見石英顆粒間基質較少,以顆粒支持為主;正交偏光下,由 於壓溶作用(pressure solution)的影響,基質少部分變質成絹雲母,石英 岩(變質砂岩)的礦物顆粒邊界呈鑲嵌狀或縫合線狀緊密相連(圖 3-14), 石英顆粒具波狀消光。

3. 低度變質岩/板岩 (脊樑山脈地質區盧山板岩帶):

廬山板岩帶(Lushan Slate Belt,圖 3-13)以板岩為主要岩性,部分 地層夾千枚岩、變質砂岩、硬頁岩、砂岩等。其變質度較雪山山脈高, 變質度包括葡萄石-綠纖石相(200~300℃)及綠色片岩相(300~400℃)。

板岩部分以大禹嶺層為例,大禹嶺層岩性以厚層板岩為主,夾薄層 或厚層(10公尺)變質砂岩(陳文山等,2016)。其岩象薄片顯示在帶狀 劈理領域(cleavage domain)中,劈理連續且呈平板狀無前理劈理(smooth disjunctive cleavage),其中的石英顆粒有拉長現象(elongated),並呈強 定向排列,劈理方向具少許鬚狀結晶(beard overgrowth);夾質領域 (microlithon domain)中,未見劈理領域之特徵,反之,石英顆粒未被拉 長,排列僅呈無定向至弱定向排列(圖 3-14)。

低度變質砂岩則以黑岩山層為例,黑岩山層岩性主要為厚層板岩, 夾薄層至厚層(10~30公尺)變質砂岩(陳文山等,2016)。其砂岩組成 以碎屑狀(clastic texture)石英為主,片狀礦物較少,因此劈理不發達且 呈斷續狀無前理劈理(rough disjunctive cleavage),而石英也無壓扁現象, 呈散亂狀分布(**圖 3-14**)。

4. 中度變質岩/片岩 (脊樑山脈地質區大南澳片岩帶):

大南澳片岩帶 (Tananao Schist Belt, **圖 3-13**) 主要出露於脊樑山脈 東翼,山脈稜線以西緊鄰廬山板岩帶。其岩性以片岩為主,另有部分大 理岩出露,整體變質度介於低綠色片岩相至高綠色片岩相之間。

中度變質砂岩以碧綠層為例,碧綠層岩性主要為千枚岩、變質砂岩 以及石英岩(陳文山等,2016)。其中,貫入變質砂岩的石英脈具良好的 結晶並呈多邊狀組織(polygonal texture),石英脈以外的石英顆粒仍保持 碎屑狀組織,但有平行劈理的拉長現象,且礦物末端有鬚狀結晶。碎屑 狀石英顆粒間的片狀礦物大多呈定向排列,並形成間距劈理(spaced cleavage)(圖 3-14)。

石英雲母片岩中,石英已再結晶(recrystallization)呈多邊狀組織, 並有平行劈理的拉長現象,其葉理多呈夾皺劈理(crenulation cleavage)。 劈理領域中多為片狀矽酸鹽礦物(白雲母),呈順向性排列,整體呈全定 向排列(**圖 3-14**)。



圖 3-13 臺灣地質分區和變質相圖。臺灣地質分區由西向東分別為海岸平原、西部 麓山帶、雪山山脈、脊樑山脈廬山板岩帶、脊樑山脈大南澳片岩帶、海岸山脈。變質相則以不同圖樣填充表示,此變質相圖修改自陳肇夏與王京新(1995)。



再排列構造類別。(Powell, 1979; 楊昭男, 1986)


圖 3-14 (續) 劈理分類。(A) 劈理分類;(B) 夾皺劈理分類;(C) 無前理劈理 分類;(D) 再排列構造類別。(Powell, 1979; 楊昭男, 1986)

3-2-2 岩象分析

本研究為了解造山山脈隨時間出露岩性的變化,並欲釐清各樣本之間不同岩 屑的含量是否影響核飛跡年代,因此本節將著重說明砂岩岩象分析中,碎屑物岩 性的判斷依據。本研究針對每一薄片大小平均分配計數點位,一片共計數400點。 傳統的計點法認為顆粒大小和岩屑組成相關,因此在計點時需反覆確認岩屑大小, 才能判斷岩性,較耗時且效率低;Gazzi-Dickinson 計點法則不需考慮顆粒大小, 在計點時不必反覆切換倍率確認岩屑粒徑,只需觀察顯微鏡中央十字所指示的岩 屑即可(Ingersoll et al., 1984)。同時,傳統計點法較適用於未膠結或膠結度較差的 砂岩,需將砂粒先進行過篩後再計點,而Gazzi-Dickinson 計點法因不需考慮顆粒 大小,故河砂與已成岩的砂岩皆適用。本研究岩象分析樣本屬於已成岩的砂岩, 可直接磨成薄片觀察並計點,因此採用Gazzi-Dickinson 計點法。

1. 單晶質石英 (Qm):

單一個石英顆粒即為一個晶體,平行偏光下呈白色,正交偏光下有 部分石英顆粒呈波狀消光。(圖 3-15A、B)

2. 多晶質石英 (Qp):

單一個石英顆粒中有多個晶體存在,平行偏光下呈白色,外圍輪廓 明顯可見,但內部晶體之間界線不可見;正交偏光下單一顆粒內部有多 個石英結晶,晶體間無其他礦物填充。本研究將燧石(Ch)歸納為此類 別。(圖 3-15G)

3. 長石 (F):

長石類包括正長石與斜長石,但因本研究區域長石含量不多,故未 加以細分。平行偏光下,長石呈白色;正交偏光下,單一顆粒常見雙晶 構造,顏色呈灰白相間。(圖 3-15F)

4. 方解石 (Ca):

可能為碎屑顆粒,亦可能呈生物碎屑形狀,部分為基質。若為碎屑

顆粒,則平行偏光下可見一組解理,若為生物碎屑或基質則少見解理。 平行偏光下,方解石呈無色;正交偏光下,方解石呈乳白色,且具高干 涉色。

5. 角閃石 (Hbl):

普通角閃石顆粒在平行偏光下偶可見兩組解理(約120°),顏色為棕
色或綠色;正交偏光下,角閃石顆粒呈二級黃色的干涉色。(圖 3-15E)
6. 砂岩岩層(Ls):

顆粒邊界較模糊且鬆散,單顆粒內部含細粒石英與基質,其中基質 可能為泥質(Ls1)或鈣質(Ls0),本研究並未細分。因砂岩通常未受變 質作用,故不具葉理。平行偏光下,單一岩屑顆粒中常見多個白色細顆 粒,即為細粒石英,通常岩屑內部的石英顆粒較碎屑石英(Qm、Qp)小, 可用於區分砂岩岩屑與其它石英顆粒;正交偏光下則呈現白色細粒石英 顆粒,石英顆粒間若為泥質充填則基質呈深棕色至黑色,若為鈣質充填 則基質呈乳白色且具高干涉色。(圖 3-15B)

7. 極低度變質砂岩岩屑(Lms1):

平行偏光下,顆粒邊界較砂岩岩屑明顯,且較緻密。單顆粒內含細 粒石英與基質,正交偏光下,若基質含量較高,則可能出現極少量的絹 雲母,石英邊界尚清楚可見;若基質含量較少,則石英顆粒間呈矽質膠 結,偶見壓溶構造使邊界呈縫合線狀。(圖 3-15D)

8. 低度變質砂岩岩屑(Lms2):

此類別主要是石英質淨砂岩(quartz arenite)經過未完全再結晶和壓 溶作用變質而成。變質度較高,顆粒邊界明顯。平行偏光下和 Qp 相似, 看似單一個石英顆粒,主要差別在於 Qp 內部的石英結晶界線於平行偏光 下不可見,但 Lms2 可見內部礦物(通常是石英)晶體之間的界線。正交 偏光下,岩屑中的礦物顆粒間因壓溶作用而呈鑲嵌狀緊密相接,石英顆 粒多呈波狀消光,泥質基質則多變質為絹雲母。(圖 3-15F) 9. 泥岩與頁岩岩屑 (Sh):

泥質成分多,於砂岩樣本中多已被風化侵蝕,不易觀察,且膠結較 鬆散。平行偏光下呈褐色至深褐色,可見極細粒石英;正交偏光下呈深 褐色至黑色,亦可見極細粒石英顆粒。

10. 硬頁岩岩屑 (Ag):

硬頁岩由頁岩變質而來,僅受極低度變質作用影響,因此具有初始 葉理但不明顯。其中礦物顆粒極細,無法明確分辨,但可見少部分泥質 已變質為絹雲母。平行偏光下,顆粒呈長條狀,且長軸多平行葉理,邊 界較Sh明顯,顏色呈深褐色;正交偏光下,顏色呈深褐色至黑色,偶可 見極細粒石英顆粒,其中礦物呈弱定向排列。(圖 3-15C)

11. 具葉理之變質砂岩岩屑 (Fms):

與板岩岩屑相似,但葉理較板岩微弱。岩屑邊界明顯,顆粒內部多 呈斷續狀至粗板狀的無前理劈理。平行偏光下可見內部礦物顆粒較板岩 粗大,拉長現象與板岩相比較不明顯,但仍可見變形且呈弱定向排列; 正交偏光下可見部分基質已變質為絹雲母。(圖 3-15A)

12. 板岩岩屑 (SI):

邊界明顯,岩屑呈長條狀,長軸與葉理平行,已形成明顯連續劈理 或板劈理。平行偏光下,劈理領域成黑色帶狀,夾細小絹雲母,礦物顆 粒已有明顯拉長現象,並呈弱至強定向排列;正交偏光下,岩屑呈黑色, 可見絹雲母的高干涉色,亦可見石英呈白色長條狀。(圖 3-15A)

13. 片岩岩屑 (Sch):

片理明顯, 絹雲母已變質成白雲母, 結晶較佳且大。平行偏光下可 見片理呈細長黑色線條, 岩屑顏色呈灰白色, 石英顆粒呈全定向排列; 正交偏光下可見石英多呈粒狀變晶, 且再結晶作用明顯。(圖 3-15H)

14. 火成岩岩屑 (Lv):

岩屑多呈斑狀結構 (porphyritic texture),且岩基大多已風化為綠泥

石,因此平行偏光下可見火成岩岩屑呈淡綠色,正交偏光下則可見細顆 粒斑晶構造。(圖 3-15G)

15. 其他 (X):

包括不透光礦物、雲母、蝕變礦物,以及無法辨識之礦物。 16. 基質與膠結物 (Mt):

包括泥質、碳酸鹽質或鐵質等,充填於碎屑物間的不規則填充物。



圖 3-15 砂岩岩象薄片顯微鏡照片。左側大寫英文字母為正交偏光,右側小寫字母 為平行偏光。



圖 3-15 (續) 砂岩岩象薄片顯微鏡照片。左側大寫英文字母為正交偏光,右側小 寫字母為平行偏光。

3-2-3 岩象特徵組合

跟據 Dickinson (1970)提出的 Q、F、L 三角成分分析法,可由三種成分比例 推測該樣本源區之構造環境,其中 Q 為石英、F 為長石、L 為岩屑。當砂岩中石英 和長石含量佔比較高,則源區屬於穩定大陸地塊源區 (continental block provenances);當砂岩中長石和岩屑含量占比較高,則源區屬於再次造山帶來源 (recycled orogeny provenances)。陳文山 (1988)透過砂岩岩象分析,認為蕃薯寮 層及八里灣層中的 Q 和 L 佔比較高,且岩屑數量隨著地層年代變年輕有增加的趨 勢,因此源區應屬於再次造山帶來源。

造山帶的剝蝕,又以變質度低的岩石先被剝蝕,隨後逐漸出露變質度高的岩 石。然而,對於變質度的觀察,砂岩變質系列(砂岩→極低度→低度→中度變質 砂岩)除了石英本身的變化(波狀消光)與結晶顆粒間的壓溶作用外,並不容易 明確觀察或定義其變質度。相反的,頁岩變質系列(頁岩→硬頁岩→板岩→片岩) 反而可以透過劈理、片理的形成,以及雲母的變化(絹雲母的形成、絹雲母變質 成白雲母),得以較明確的觀察並定義其變質程度。因此本研究砂岩岩象分析主要 透過頁岩變質系列的分類,並搭配砂岩變質系列的觀察,進行岩象特徵組合,以 探討造山帶源區出露的岩層變質度變化。另外,由於蕃薯寮層含少量來自島弧火 山的碎屑物,而都鑾山層中的安山岩多含角閃石及輝石,西側造山帶來源則以石 英顆粒為主,因此本研究將角閃石歸類於火成岩岩屑。本研究對於各岩象特徵的 分類如表 3-2。

表 3-2	岩象特徵分類。	
代號	分類	碎屑物種類
Q	石英	Qm + Qp
F	長石	F
Ls	沉積岩岩屑	Ls0 + Ls1 + Sh
Lvms	極低度變質岩岩屑	Lms1
Lms	低度變質岩岩屑	Lms2
Ag	硬頁岩岩屑	Ag
S1	板岩岩屑	Sl + Fms
Sch	片岩岩屑	Sch
Lv	火成岩岩屑	Lv + Hbl
T t	山尼纳和	Ls0 + Ls1 + Sh + Lms1 + Ag + Lms2 + Sl + Fms
Ll	石角總和	+ Sch $+$ Lv $+$ Hbl

註:方解石 (Cal)、其他類 (X)、基質 (Mt) 皆不屬於任一分類

3-3 樣本採集

本研究地點位於馬達吉達溪北支流 (圖 2-4),採集地層自蕃薯寮層底部,至 八里灣層中段,沉積年代約介於 3.87~1.64 Ma 之間。本研究共採集 12 個砂岩樣 本,以及1個變質砂岩礫石樣本,並送至中國河北省廊坊進行礦物分選,後續樣 本前處理及薄片製作則於國立臺灣大學地質科學系進行。採點位置詳見表 2-1 與圖 2-4, 樣本詳細資訊請見表 3-3。

XILI

101019	NOLOLOLOT	
1910-123		
X	X	
N 7-	K.	
S 251	NK -	10
a at C	01	Real I

Sample	Dook type Lithe (1) Formation		Sepera	ated grains ⁽²⁾	Analysis			
no.	коск туре	Litno.	Formation	Zircon	Apatite	AFT	ZFT	Petro.
MDJ01	sandstone	SS	Fanshuliao	10 mg	>600 grains	0	0	0
MDJ02	sandstone	SS	Fanshuliao	80 mg	>1000 grains	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
MDJ03	sandstone	SS	Fanshuliao	150 mg	10 mg	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
MDJ04	sandstone	SS	Fanshuliao	100 mg	>600 grains	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
MDJ05	sandstone	SS	Fanshuliao	20 mg	130 grains	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
MDJ06	sandstone	SS	Fanshuliao	100 mg	500 grains	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
MDJ07	boulder	MS	Paliwan	10 mg	>500 grains	\bigcirc	\bigcirc	
MDJ08	sandstone	SS	Paliwan	50 mg	>1000 grains	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
MDJ09	sandstone	SS	Paliwan	10 mg	300 grains	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
MDJ10	sandstone	SS	Paliwan	80 mg	>1000 grains	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
MDJ11	sandstone	SS	Paliwan	60 mg	>500 grains	\bigcirc	0	
MDJ12	sandstone	SS	Paliwan	40 mg	1000 grains	\bigcirc	\bigcirc	
MDJ13	sandstone	SS	Paliwan	10 mg	>500 grains	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc

表 3-3 樣本詳細資訊。

⁽¹⁾ 岩性:SS 為岩屑砂岩、MS 為變質砂岩。

⁽²⁾ 本研究採集的砂岩樣本重量不同,因此洗選後得到的礦物量皆不同,表中的數 值為估計值,僅供參考。

第四章 研究結果

本研究共分析 12 個砂岩以及 1 個變質砂岩礫石,6 個砂岩樣本屬於蕃薯寮層 (MDJ-01~06),其餘樣本屬於八里灣層(MDJ-07~13)。各樣本的沉積年代採用 前人的磁、生物地層研究訂定的絕對年代,以及火山碎屑的鋯石鈾鉛定年年代 (Horng and Shea, 1996;陳文山,2009;Lai et al., 2021;Chen et al., 2023),進行 內插法得到。本研究採用之年代控制點包括 P. Lacunosa 始現面 (FO. 3.92 Ma)、 Gilbert 上界 (3.60 Ma)、Gr. tosaensis 始現面 (FO. 3.35 Ma)、Discoasters tamalis 末現面 (LO. 2.78 Ma)、D. altispita s.l.末現面 (LO. 3.05 Ma)、Pulleniatina (dextral→sinistral)(LO. 2.13 Ma)、Gr. truncatuninoides 末現面 (LO. 2.0 Ma)、 Olduvai 下界 (1.95 Ma)、Olduvai 上界 (1.77 Ma)、Gephyrocapsa oceanica 始現面 (FO. 1.70 Ma)、Large Gephyrocapsa spp.始現面 (FO. 1.57 Ma)(圖 4-1)。本研究 針對每一個樣本皆進行磷灰石及鋯石核飛跡定年,而砂岩樣本除了 MDJ-11 和 MDJ-12 外,其餘皆有進行砂岩岩象分析。



(1996),生物地層年代參考 Horng and Shea (1996)、陳文山 (2009)、Lai et al.
(2021)。

4-1 核飛跡定年結果

核飛跡定年透過 BINOMFIT 軟體 (Brandon, 2002) 擬合峰值年代,以砂岩而言,該年代可透過源區的地質背景加以區分為「完全癒合年代」以及「部分癒合或未癒合年代」,分類依據將於第五章詳細說明。擬合峰值年代由年輕到老依序編號為 P1 (peak 1)、P2 (peak 2)、P3 (peak 3)、P4 (peak 4)、P5 (peak 5)。

4-1-1 砂岩

- 様本 MDJ-01: 位於蕃薯寮層底部,沉積年代由外插法得到約 4.00 Ma, AFT 共分析 116 顆磷灰石,其中 36 顆自發核飛跡數量為零,P1 年代為 10.2^{-1.0}_{+1.2} Ma (91.0%), P2 年代為 67.0^{-8.7}_{+9.9} Ma (9.0%); ZFT 共分析 203 顆鋯石,其中 112 顆 (55%) 無法計算,P1 年代為 8.5^{-1.0}_{+1.1} Ma (16.0%), P2 年代為 35.1^{-2.5}_{+2.7} Ma (44.2%), P3 年代為 104.1^{-9.8}_{+10.8} Ma (39.8%)。
- **2. 樣本 MDJ-02**:沉積年代由內插法得到約 3.47 Ma,AFT 共分析 132 顆磷 灰石,其中 18 顆自發核飛跡數量為零,P1 年代為 5.2^{-0.6}_{+0.6} Ma (53.0%),P2 年代為 18.7^{-2.7}_{+3.1} Ma (21.2%),P3 年代為 47.4^{-5.9}_{+6.7} Ma (19.7%),P4 年代為 156.0^{-16.7}_{+18.7} Ma (6.2%);ZFT 共分析 128 顆鋯石,其中 40 顆(31%) 無法計算,P1 年代為 26.0^{-10.6}_{+18.0} Ma (0.8%),P2 年代為 61.3^{-14.7}_{+19.3} Ma (9.6%),P3 年代為 131.3^{-11.4}_{+12.4} Ma (64.9%),P4 年代為 299.0^{-37.2}_{+42.4} Ma (24.8%)。
- 3. 樣本 MDJ-03: 沉積年代由內插法得到約 3.42 Ma, AFT 共分析 127 顆磷 灰石,其中 32 顆自發核飛跡數量為零,P1 年代為 3.9^{-0.5}_{+0.6} Ma(72.3%), P2 年代為 11.9^{-2.3}_{+2.9} Ma(13.3%),P3 年代為 60.7^{-7.4}_{+8.1} Ma(14.4%);ZFT 共分析 266 顆鋯石,其中 183 顆(69%)無法計算,P1 年代為 10.6^{-3.2}_{+4.5} Ma (1.5%),P2 年代為 34.1^{-3.3}_{+3.6} Ma(4.7%),P3 年代為 82.6^{-6.4}_{+7.0} Ma (50.6%),P4 年代為 169.0^{-16.7}_{+18.5} Ma(43.2%)。

- 4. 樣本 MDJ-04:沉積年代由內插法得到約 3.40 Ma,AFT 共分析 113 顆磷 灰石,其中 30 顆自發核飛跡數量為零,P1 年代為 4.6^{-0.4}_{+0.5} Ma(89.3%),P2 年代為 64.0^{-11.4}_{+13.9} Ma(10.7%);ZFT 共分析 131 顆鋯石,其中 49 顆 (37%)無法計算,P1 年代為 63.9^{-6.1}_{+6.8} Ma(20.9%),P2 年代為 133.4^{-10.4}_{+11.3} Ma(57.0%),P3 年代為 323.8^{-33.7}_{+37.5} Ma(22.1%)。
- 5. 樣本 MDJ-05:沉積年代由內插法得到約 3.35 Ma,由於樣本洗選得到的 磷灰石顆粒數較少,因此AFT 僅分析 37 顆磷灰石,其中 19 顆自發核飛 跡數量為零,P1 年代為 4.0^{-0.7}/_{+0.9} Ma (94.4%),P2 年代為 32.2^{-19.2}/_{+47.0} Ma (5.6%);ZFT 共分析 163 顆錯石,其中 81 顆 (50%) 無法計算,P1 年 代為 32.4^{-4.3}/_{+4.9} Ma (5.2%),P2 年代為 71.9^{-6.5}/_{+7.1} Ma (30.7%),P3 年代為 131.8^{-11.0}/_{+12.0} Ma (51.6%),P4 年代為 283.5^{-52.8}/_{+64.5} Ma (12.5%)。
- 6. 樣本 MDJ-06:位於蕃薯寮層頂部,沉積年代由內插法得到約 3.25 Ma, AFT 共分析 113 顆磷灰石,其中 40 顆自發核飛跡數量為零,P1 年代為 3.8^{-0.4}_{+0.5} Ma (88.6%),P2 年代為 61.2^{-5.7}_{+6.3} Ma (11.4%);ZFT 共分析 183 顆鋯石,其中 101 顆(55%)無法計算,P1 年代為 8.0^{-1.1}_{+1.2} Ma(10.2%), P2 年代為 19.5^{-1.7}_{+1.9} Ma (16.7%),P3 年代為 47.9^{-2.8}_{+3.0} Ma (41.8%),P4 年代為 103.3^{-8.5}_{+9.3} Ma (31.3%)。
- 7. 樣本 MDJ-08: 位於八里灣層泰源段底部,沉積年代由內插法得到約 2.03 Ma,由於樣本洗選得到的磷灰石顆粒數較少,因此 AFT 僅分析 69 顆磷 灰石,其中 11 顆自發核飛跡數量為零,P1 年代為 4.7^{-0.8}_{+0.9} Ma (44.4%),P2 年代為 14.6^{-1.8}_{+2.0} Ma (30.8%),P3 年代為 47.5^{-5.3}_{+6.0} Ma (18.2%),P3 年代為 126.6^{-26.0}_{+32.6} Ma (6.6%);ZFT 共分析 166 顆鋯石,其中 84 顆(51%) 無法計算,P1 年代為 53.5^{-5.5}_{+6.1} Ma (5.3%),P2 年代為 137.7^{-12.9}_{+14.3} Ma (36.5%),P3 年代為 250.2^{-32.9}_{+37.7} Ma(36.3%),P4 年代為 699.4^{-134.1}_{+163.9} Ma (21.8%)。

- **8. 樣本 MDJ-09**:沉積年代由內插法得到約 2.00 Ma,AFT 共分析 100 顆磷 灰石,其中 31 顆自發核飛跡數量為零,P1 年代為 4.5^{-0.6}/_{+0.7} Ma (71.7%),P2 年代為 26.9^{-2.8}/_{+3.1} Ma(22.6%),P3 年代為 114.8^{-10.8}/_{+11.9} Ma(5.7%);ZFT 共分析 172 顆鋯石,其中 90 顆(52%)無法計算,P1 年代為 62.1^{-6.1}/_{+6.8} Ma (13.8%),P2 年代為 164.8^{-16.1}/_{+17.8} Ma(65.2%),P3 年代為 322.8^{-76.9}/_{+100.2} Ma (21.0%)。
- 9. 樣本 MDJ-10:沉積年代由內插法得到約 1.94 Ma,AFT 共分析 121 顆磷 灰石,其中 24 顆自發核飛跡數量為零,P1 年代為 4.1^{-0.5}_{+0.6} Ma(52.3%),P2 年代為 15.1^{-1.6}_{+1.8} Ma(26.1%),P3 年代為 58.4^{-6.2}_{+6.9} Ma(12.7%),P4 年代為 112.7^{-13.1}_{+1.4} Ma(8.9%);ZFT 共分析 156 顆鋯石,其中 82 顆(53%) 無法計算,P1 年代為 7.0^{-1.0}_{+1.2} Ma(10.8%),P2 年代為 46.8^{-2.9}_{+3.1} Ma(30.8%),P3 年代為 128.5^{-10.0}_{+10.8} Ma(58.4%)。
- 10. 樣本 MDJ-11:沉積年代由內插法得到約 1.76 Ma,AFT 共分析 120 顆磷 灰石,其中 18 顆自發核飛跡數量為零,P1 年代為 4.7^{-0.5}_{+0.5} Ma (62.3%),P2 年代為 24.9^{-2.3}_{+2.5} Ma(30.9%),P3 年代為 126.3^{-14.3}_{+16.2} Ma(6.8%);ZFT 共分析 139 顆鋯石,其中 50 顆(36%)無法計算,P1 年代為 17.7^{-5.4}_{+7.8} Ma (2.1%),P2 年代為 36.0^{-10.1}_{+13.9} Ma (2.6%),P3 年代為 67.2^{-10.5}_{+12.5} Ma (11.1%),P4 年代為 125.6^{-10.9}_{+12.0} Ma(47.7%),P5 年代為 305.3^{-37.9}_{+43.1} Ma (36.5%)。
- 11. 樣本 MDJ-12:沉積年代由內插法得到約 1.70 Ma,AFT 共分析 123 顆磷 灰石,其中 31 顆自發核飛跡數量為零,P1 年代為 3.8^{-0.4}_{+0.4} Ma (77.9%),P2 年代為 74.3^{-6.0}_{+6.6} Ma(22.1%);ZFT 共分析 170 顆鋯石,其中 81 顆(48%) 無法計算,P1 年代為 6.6^{-1.7}_{+2.2} Ma(2.7%),P2 年代為 26.5^{-3.1}_{+3.5} Ma(8.3%),P3 年代為 75.7^{-7.6}_{+8.4} Ma (53.5%),P4 年代為 167.4^{-30.0}_{+36.5} Ma (35.6%)。
- 12. 樣本 MDJ-13: 位於馬達吉達溪剖面八里灣層頂部,沉積年代由內插法得 到約 1.64 Ma,AFT 共分析 107 顆磷灰石,其中 37 顆自發核飛跡數量為

零,P1年代為 3.7^{-0.5}_{+0.6} Ma (78.3%),P2年代為 28.5^{-5.9}_{+7.5} Ma (15.7%), P3 年代為 156.8^{-45.9}_{+64.5} Ma (6.0%);ZFT 共分析 105 顆鋯石,其中 27 顆 (26%) 無法計算,P1 年代為 8.6^{-0.6}_{+0.7} Ma (42.8%),P2 年代為 40.3^{-3.9}_{+4.3} Ma (19.5%),P3 年代為 158.3^{-12.9}_{+14.0} Ma (37.8%)。

蕃薯寮層的砂岩樣本 (MDJ-01~06), AFT P1 年代大致向上變年輕;八里灣 層的砂岩樣本 (MDJ-08~13) 雖沉積年代皆比蕃薯寮層的砂岩年輕,但大部分樣 本的 AFT P1 年代卻老於蕃薯寮層頂部樣本 MDJ-06 的 AFT P1,以整個剖面的核 飛跡年代變化來說,此現象不符合反剝蝕序列所應呈現的核飛跡年代變化趨勢。

4-1-2 礫石

本研究僅採集一個礫石樣本 MDJ-07,岩性為變質砂岩,採自八里灣層底部的 崩積礫岩層,沉積年代由內插法計算得到約 2.04 Ma。AFT 共計算 89 顆,其中 31 顆自發核飛跡為零,此樣本通過卡方檢定 ($\mathcal{P}(x^2) > 5\%$),代表該礫石當中所有 磷灰石顆粒可視為單一來源,為完全癒合年代,核飛跡年代為 $2.8^{-0.3}_{+0.4}$ Ma(100.0%), 屬於集合年代;ZFT 共計算 116 顆,其中 37 顆 (32%) 無法計算,卡方檢定並未 通過,代表此樣本的 ZFT 年代屬於部分癒合或未癒合年代,系統擬合出四個峰值, 分別為18.6^{-2.2} Ma(10.0%)、39.7^{-5.9} Ma(11.9%)、90.3^{-5.6} Ma(50.0%)、180.3^{-15.5} Ma (28.2%)。

本研究所有樣本之核飛跡年代皆大於沉積年代,代表所有樣本堆積於盆地後, 並未因深埋而導致核飛跡產生癒合,換言之,樣本皆保留源區之核飛跡特性。所 有樣本之核飛跡定年結果詳見表 4-1,砂岩磷灰石核飛跡年代頻譜請見圖 4-2,砂 岩鋯石核飛跡年代頻譜請見圖 4-3,礫石磷灰石及鋯石核飛跡年代頻譜請見圖 4-4。

表 4-1 所有樣本之磷灰石與鋯石核飛跡定年結果。

Sample	T ;46	Depo.	NAFT	zeta		AFT best	-fit peaks (±1o	5)	nzft	n _{un}	zeta	ZFT best-fit peaks (±1σ)				
sample	LIIN.	age	(n ₀)	(irra.)	peak 1	peak 2	peak 3	peak 4	(%)	(%)	(irra.)	peak 1	peak 2	peak 3	peak 4	peak 5
1DJ-13	SS	1.64	107	332.51	3.7 ^{-0.5} _{+0.6}	28.5 ^{-5.9} _{+7.5}	156.8 ^{-45.9} _{+64.5}		78	27	43.68	8.6 ^{-0.6} _{+0.7}	40.3 ^{-3.9} _{+4.3}	158.3 ^{-12.9} _{+14.0}		· 學 (制)
			(37)	(D)	(78.3%)	(15.7%)	(6.0%)		(74%)	(20%)	(C)	(42.8%)	(19.5%)	(37.8%)		
/IDJ-12	SS	1.70	123	332.51	3.8 ^{-0.4} _{+0.4}	74.3 ^{-6.0} _{+6.6}			89	81	40.70	6.6 +2.2	26.5 ^{-3.1} _{+3.5}	75.7 ^{-7.6} _{+8.4}	167.4 ^{-30.0} _{+36.5}	
			(31) (b)	(b)	(77.9%)	(22.1%)			(52%)	(48%)	(b)	(2.7%)	(8.3%)	(53.5%)	(35.6%)	
1DJ-11	SS	1.76	120	350.98	4.7 ^{-0.5} _{+0.5}	24.9 ^{-2.3} _{+2.5}	126.3 ^{-14.3} _{+16.2}		89	50	43.68	17.7 ^{-5.4} _{+7.8}	36.0 ^{-10.1} _{+13.9}	67.2 ^{-10.5} _{+12.5}	125.6 ^{-10.9} _{+12.0}	305.3 ^{-37.5} _{+43.}
			(18)	(c)	(62.3%)	(30.9%)	(6.8%)		(64%)	(36%)	(c)	(2.1%)	(2.6%)	(11.1%)	(47.7%)	(36.5%)
[DJ-10	SS	1.94	121	347.02	4.1 ^{-0.5} _{+0.6}	15.1 ^{-1.6} _{+1.8}	58.4 ^{-6.2} _{+6.9}	112.7 ^{-13.1} _{+14.9}	74	82	40.70	7.0 ^{-1.0} _{+1.2}	46.8 ^{-2.9} _{+3.1}	128.5 ^{-10.0} _{+10.8}		
			(24)	(a)	(52.3%)	(26.1%)	(12.7%)	(8.9%)	(47%)	(53%)	(b)	(10.8%)	(30.8%)	(58.4%)		
IDJ-09	SS	2.00	100	350.98	4.5 ^{-0.6} _{+0.7}	26.9 ^{-2.8} _{+3.1}	114.8 ^{-10.8} _{+11.9}		82	90 (52%)	43.68	62.1 ^{-6.1} _{+6.8}	164.8 ^{-16.1} +17.8	322.8 ^{-76.9} _{+100.2}		
			(31)	(0)	(71.7%)	(22.6%)	(5.7%)		(48%)	(52%)	(C)	(13.8%)	(65.2%)	(21.0%)		
1DJ-08	SS	2.03	69	350.98	4.7 ^{-0.8} _{+0.9}	14.6 ^{-1.8} _{+2.0}	47.5 ^{-5.3} _{+6.0}	126.6 +32.6	60	84	43.68	53.5 ^{-5.5} _{+6.1}	139.9 ^{-12.8} _{+14.1}	265.3 ^{-29.3} _{+32.8}		
			(11)	(c)	(44.4%)	(30.8%)	(18.2%)	(6.6%)	(42%)	(58%)	(c)	(7.3%)	(52.3%)	(40.3%)		
IDJ-07	MS	2.04	89	332.51	2.8 ^{-0.3} _{+0.4}				79	37	40.70	18.6 ^{-2.2} _{+2.5}	39.7 ^{-5.9} _{+7.0}	90.3 ^{-5.6} +5.9	180.3 ^{-15.5} _{+16.9}	
			(31)	(b)	(100%)				(68%)	(32%)	(b)	(10.0%)	(11.9%)	(50.0%)	(28.2%)	

		Depo.	naft	zeta		AFT best-fi	t peaks (±1σ	;)	NZFT	n _{un}	zeta		ZFT b	est-fit peaks	(±1σ)									
Sample Lith.	Lith.	age	(n ₀)	(irra.)	peak 1	peak 2	peak 3	peak 4	- (%)	(%)	(irra.)	peak 1	peak 2	peak 3	peak 4	peak 5								
MDJ-06	SS	3.25	113	332.51	3.8 ^{-0.4} _{+0.5}	61.2 ^{-5.7} _{+6.3}			82	101	40.70	8.0 ^{-1.1} _{+1.2}	19.5 ^{-1.7} _{+1.9}	47.9 ^{-2.8} _{+3.0}	103.3 -8.5 +9.3	· # 14								
			(40)	(b)	(88.6%)	(11.4%)			(45%)	(55%)	(b)	(10.2%)	(16.7%)	(41.8%)	(31.3%)									
MDJ-05	SS	3.35	37	350.98	4.0 ^{-0.7} _{+0.9}	32.2 ^{-19.2} _{+47.0}			82	81	43.68	32.4 ^{-4.3} _{+4.9}	71.9 ^{-6.5} _{+7.1}	131.8 ^{-11.0} _{+12.0}	283.5 ^{-52.8} _{+64.5}									
											(19)	(0)	(94.4%)	(5.6%)			(30%)	(30%)	(0)	(5.2%)	(30.7%)	(51.6%)	(12.5%)	
MDJ-04	SS	3.40	113	350.98	4.6 +0.5	64.0 ^{-11.4} _{+13.9}			82	49	43.68	63.6 ^{-6.1} +6.8	133.4 ^{-10.4} _{+11.3}	323.8 ^{-33.7} _{+37.5}										
					(30)	(30)	(30)	(0)	(89.3%)	(10.7%)			(03%)	(37%)	(0)	(20.9%)	(57.0%)	(22.1%)						
MDJ-03	SS	3.42	127	332.51	3.9 ^{-0.5} _{+0.6}	11.9 ^{-2.3} _{+2.9}	60.7 ^{-7.1} +8.1		83	183	40.70	10.6 +4.5	34.1 ^{-3.3} _{+3.6}	82.6 ^{-6.4} _{+7.0}	169.0 ^{-16.7} _{+18.5}									
						(32)	(0)	(72.3%)	(13.3%)	(14.4%)		(31%)	(09%)	(0)	(1.5%)	(4.7%)	(50.6%)	(43.2%)						
MDJ-02	SS	3.47	132	347.02	5.2 ^{-0.6} _{+0.6}	18.7 ^{-2.7} _{+3.1}	47.4 ^{-5.9} _{+6.7}	156.0 ^{-16.7} _{+18.7}	88	40	40.70	26.0 ^{-10.6} _{+18.0}	61.3 ^{-14.7} _{+19.3}	131.3 ^{-11.4} _{+12.4}	299.0 -37.2 +42.4									
			(18)	(a)	(53.0%)	(21.2%)	(19.7%)	(6.2%)	(69%)	(31%)	(b)	(0.8%)	(9.6%)	(64.9%)	(24.8%)									
MDJ-01	SS	4.00	115	332.51	10.5 ^{-1.1} _{+1.2}	67.4 ^{-8.7} _{+10.0}			91	112	40.70	8.5 ^{-1.0} _{+1.1}	35.1 ^{-2.5} _{+2.7}	104.1 ^{-9.8} _{+10.8}										
			(35)	(b)	(91.2%)	(8.8%)			(45%)	(33%)	(b)	(16.0%)	(44.2%)	(39.8%)										

主 11(值) 化去洋土力瑞士工的纠工技派财空生外里

Lith. = Lithology, SS means sandstone, MS means meta-sandstone boulder

Depo. age = sample deposition age determined by interpolation of magnetobiostratigraphy age data (Ma)

 n_{AFT}/n_{ZFT} = the amount of counted grains of apatite (include n_0) / zircon (exclude n_{un})

 n_0 = the amount of zero-track apatite grains

 n_{un} = the amount of the uncountable grains of zircon (high density or over-etched grains)

zeta value (irra.) = zeta value of different irradiation

irra. = all samples were seperated into three times for irridation, which is numbered as (a), (b), and (c), and the zeta value is counted separately

best-fit peaks = the peaks age computed through BINOMFIT program (Ma)



圖 4-2 砂岩磷灰石核飛跡年代頻譜。灰色柱狀圖為顆粒年代分布,深灰色實線為 機率密度曲線,紅色峰值為完全癒合年代,藍色峰值為部分癒合或未癒合年代, 綠色虛線與數字為沉積年代,年代單位皆為 Ma,橫軸以 log scale 繪製。



圖 4-3 砂岩鋯石核飛跡年代頻譜。灰色柱狀圖為顆粒年代分布,深灰色實線為機率密度曲線,紅色峰值為完全癒合年代,藍色峰值為部分癒合或未癒合年代,綠 色虛線與數字為沉積年代,年代單位皆為 Ma,橫軸以 log scale 繪製。



圖 4-4 礫石磷灰石(左)與鋯石核飛跡(右)年代頻譜。灰色柱狀圖為顆粒年代 分布,深灰色實線為機率密度曲線,紅色峰值為完全癒合年代,藍色峰值為部分 癒合或未癒合年代,綠色虛線與數字為沉積年代,年代單位皆為 Ma,橫軸以 log scale 繪製。

4-2 砂岩岩象分析結果

本研究透過砂岩岩象分析,觀察各樣本之間的岩屑種類和含量變化,以期能 對於核飛跡年代以及砂岩源區有更進一步的解釋。所有砂岩樣本之岩象數據詳見 表 4-2,碎屑物含量變化圖請見圖 4-5,岩象分析三角圖請見圖 4-6,各砂岩樣本 顯微鏡照片請見圖 4-7。

Dickinson(1970)提出的 Q-F-L 三角圖可用於劃分碎屑物源區的大地構造, 其中 Q 為石英、F 為長石、L 為岩屑。若碎屑物組成以石英和長石為主,則代表 源區可能為穩定大陸地塊(continental block);若以石英和岩屑為主,則代表源區 可能為再次造山帶來源(recycled orogeny);若以長石和岩屑為主,則代表源區可 能為岩浆火山島弧(Magmatic arc)(Dickinson, 1970;Dickinson and Suczek, 1979)。 本研究將各砂岩樣本進行 Q-F-L 三角圖分析,結果如圖 4-6A 和圖 4-6B,可見僅 樣本 MDJ-01 屬於長石質雜砂岩(feldspathic litheranite),其餘砂岩樣本皆屬於岩 屑質雜砂岩(litharenite)(圖 4-6A),而樣本 MDJ-01 所對應的源區為岩浆火山島 弧,其餘砂岩樣本的源區則可能為造山帶(圖 4-6B),與前人研究結果吻合(Teng, 1979;陳文山, 1988)。其中,石英含量皆小於 50%,以岩屑為主。 另外,Dickinson and Suczek (1979)將多晶質石英(Qp)歸類為岩屑(L), 並利用 Qm-F-L 三角圖劃分碎屑物來源,本研究將砂岩樣本進行 Qm-F-L 分析, 其推測的樣本來源與 Q-F-L 三角圖分析推測的來源相同(圖 4-6C)。除了上述兩 種判別碎屑物來源的方法之外,由於本研究大多數的砂岩樣本皆屬於造山帶來源, 為了近一步了解造山帶出露岩層的變質程度變化,本研究參考陳文山(1988)繪 製 Ls-Lvms-Lms 三角圖,Ls 為沉積岩岩屑,Lvms 為極低度變質岩岩屑,Lms 為 低度變質岩岩屑。分析結果如圖 4-6D,由圖可見所有砂岩樣本皆集中於 Lvms 與 Lms,代表此時源區山脈出露的岩層大多為極低度至低度變質岩層。值得注意的 是,由砂岩樣本的沉積年代與對應的源區變質度可知,源區出露岩層的變質度並 沒有隨著時間產生規律的變化。

若源區山脈(造山帶)穩定剝蝕,則變質岩岩屑含量應隨沉積年代越年輕而 增加,且岩屑變質度應越高,但本研究並無觀察到此趨勢,且岩屑變化不規律。 因此,除了上述的三角圖分析法之外,本研究綜合岩屑含量百分比與砂岩樣本沉 積時間,繪製岩屑百分比縱向變化圖,用以觀察各種岩屑含量隨時間的變化。由 岩屑百分比縱向變化圖可知(圖4-5),石英(Q)、沉積岩岩屑(Ls/Lt)、低度變 質岩岩屑(Lms/Lt)、硬頁岩岩屑(Ag/Lt)、火成岩岩屑(Lv/Lt)皆大致呈現向 上減少的趨勢;極低度變質岩岩屑(Lvms/Lt)、片岩岩屑(Sch/Lt)則呈現向上 增加的趨勢;板岩岩屑(Sl/Lt)則尤為特殊,其含量於蕃薯寮層中呈現向上增加 的趨勢,進入八里灣層後含量反而減少,但在最頂部的樣本板岩岩屑則大量增加。

表 4-2 所有砂岩様本之岩象分析結果。															
sample	depo. age	Q	F	Ls	Lvms	Lms	Ag	SI	Sch	Lv	Cal	X			
MDJ-13	1.64	29%	0%*	0%	7%	6%	7%	31%	7%	2%	2%	10%			
MDJ-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-				
MDJ-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
MDJ-10	1.94	42%	1%	3%	26%	3%	7%	5%	1%	4%	2%	7%			
MDJ-09	2.00	29%	1%	4%	15%	11%	10%	8%	1%	11%	2%	9%			
MDJ-08	2.03	30%	0%*	4%	15%	9%	5%	12%	1%	5%	2%	18%			
MDJ-06	3.25	28%	0%	4%	12%	6%	9%	19%	1%	2%	1%	20%			
MDJ-05	3.35	37%	0%	3%	17%	6%	6%	8%	1%	6%	2%	16%			
MDJ-04	3.40	31%	1%	4%	14%	12%	4%	11%	0%*	7%	0%	18%			
MDJ-03	3.42	39%	0%	3%	14%	8%	12%	5%	1%	5%	2%	13%			
MDJ-02	3.47	45%	1%	6%	8%	14%	6%	2%	0%	3%	2%	14%			
MDJ-01	4.00	45%	2%	1%	1%	10%	5%	1%	3%	9%	1%	24%			

表 4-2 所有砂岩樣本之岩象分析結果	20
---------------------	----

Depo. age = sample deposition age determined by interpolation of magnetobiostratigraphy age data (Ma) *Over 0% but below 1% after rounded



圖 4-5 砂岩組成與 AFT P1 百分比縱向變化圖。



圖 4-6 砂岩樣本三角圖分析結果。(A)Q-F-L 三角圖,用以區分砂岩種類;(B) Q-F-L 三角圖,用以區分源區;(C)Qm-F-L 三角圖,用以區分源區;(D) Ls-Lvms-Lms 三角圖,用以觀察源區出露岩層的變質程度。(Dickinson and Suczek, 1979;陳文山,1988)



 圖 4-7 各砂岩樣本顯微鏡照片。左側大寫字母為正交偏光,右側小寫字母為平行 偏光。(A,a) MDJ-01;(B,b) MDJ-02;(C,c) MDJ-03;(D,d) MDJ-04。



圖 4-7 (續 1) 各砂岩樣本顯微鏡照片。左側大寫字母為正交偏光,右側小寫字 母為平行偏光。(E,e) MDJ-05;(F,f) MDJ-06;(G,g) MDJ-08;(H,h) MDJ-09。



圖 4-7 (續 2) 各砂岩樣本顯微鏡照片。左側大寫字母為正交偏光,右側小寫字 母為平行偏光。(I,i) MDJ-10; (J,j) MDJ-13。

第五章 討論

欲了解造山運動初期活動歷史,可以透過初始造山時期的山脈岩層進行分析, 但如今山脈已被大量剝蝕,並出露原來埋藏較深且變質程度較高的岩層。透過現 今山脈岩層的熱定年研究僅能得知上新世以來的活動史,而造山運動初期出露地 表的岩層,早已被剝蝕並堆積於山脈周圍的前陸盆地中。因此,本研究針對造山 帶東側的後前淵盆地進行核飛跡定年分析及岩象分析,以期能夠回溯蓬萊造山運 動初期的剝蝕歷史,並進一步描繪臺灣造山帶的演化。本章節將依序進行以下討 論:透過前人研究(岩象、錯石鈾-鉛定年、核飛跡定年等)分析後前淵盆地沉積 物之來源,並界定樣本核飛跡年代所代表的癒合程度與相對應的埋藏溫度(5-1 節);本研究共進行12個砂岩樣本的核飛跡年代與岩象分析,探討沉積物來源與 山脈岩層出露的時間(5-2節);本研究唯一的礫石樣本定年結果,與前人數據相 互比較,推測來源(5-3節);觀察樣本的遲滯時間變化,並探討造成變化的原因 (5-4節);將源區出露岩層的變化分別對應至實際的地質構造或地質帶(5-5節); 討論後前淵盆地之源-匯關係,揭示源區山脈的剝蝕歷史,建構臺灣造山帶的演化 歷史(5-6節)。

5-1 沉積物來源及源區核飛跡年代判別標準

本文於 4-1 節提到,由於核飛跡年代皆大於樣本沉積年代,代表樣本自源區 被搬運至盆地深埋後,並沒有因為深埋變質導致 AFT 與 ZFT 受熱癒合,意即未 違沉積後癒合。因此,本研究所有樣本的核飛跡年代以及定年結果所代表的癒合 程度與深埋溫度,皆可反映源區山脈的熱歷史。為了解樣本沉積物來源與源區岩 層的冷卻年代和變質溫度,本節將結合前人研究結果與本研究岩象分析結果進行 探討(5-1-1節),統整前人於源區岩層的熱定年結果(5-1-2節),以利界定癒合 程度(5-1-3節)並估算源區岩層經歷最高變質溫度區間(5-1-4節)。

5-1-1 馬達吉達溪剖面沉積物來源

前人於馬達吉達溪剖面進行砂岩岩象分析,發現有兩個來源,分別來自西側 的造山帶,以及東側的火山島弧(Teng, 1979;Chen and Wang, 1988b;Dorsey, 1988; Chen et al., 2019)。本文於 2-2-4 節提及,前人對於蕃薯寮層砂岩源區見解不盡相 同:Teng(1979)認為蕃薯寮層砂岩岩屑組成以東側島弧火山碎屑為主,Chen and Wang(1988b)則認為是以造山帶來源為主。雖然兩者對於主要源區看法有異, 但雙方皆認為火山來源的物質比例隨時間越來越少,且來自造山帶的岩屑比例逐 漸增加。

火山島弧(都鑾山層)岩性主要為兩輝安山岩、角閃石-普通輝石安山岩和黑 雲母-角閃石-兩輝安山岩(Song and Lo, 1988;陳文山, 1988;陳文山與王源, 1996), 若樣本岩象薄片中可見大量角閃石、輝石或火山碎屑,則代表該樣本中的沉積物 以火山島弧為主。本研究岩象分析結果顯示,僅最底部樣本 MDJ-01 發現較多角 閃石或輝石,且大多晶形良好,代表其源區應位於盆地不遠處,致使礦物受到搬 運侵蝕影響較小,來源應為盆地東側的火山島弧。其餘樣本砂岩岩象較少見火山 碎屑物質,以石英及變質岩岩屑為主,顯示主要源區為盆地西側的造山帶。另外, 前人砂岩岩象分析結果可見少量蛇綠岩套 (ophiolite-suite)碎屑物質,可能來自 於脊樑山脈玉里帶或利吉混同層,但由於占比不高(約2~3%)(徐士捷, 2017; Chen et al., 2019),因此本研究並未將其視為主要來源之一。

根據前人古水流研究可知,馬達吉達溪所處的泰源盆地,其古水流方向大致 為由北向南(Chen and Wang, 1988b; Lai *et al.*, 2021),代表沉積物源並沒有太大 的改變。同時,以現今河流流域分布來看,可發現脊樑山脈東翼河流之源頭均未 溯及西翼,因此本研究推測後前淵盆地沉積物中的造山帶來源碎屑物質,應剝蝕 自脊樑山脈東翼的岩層。

欲了解脊樑山脈的構造歷史,需先釐清其沉積物來源。脊樑山脈是由一系列 不同變質度的變質岩層所組成,包含大南澳片岩與廬山板岩帶,其西側緊鄰雪山

山脈與西部麓山帶,皆屬於臺灣造山山脈,包含中生代基盤岩、始新世-漸新世 地層,以及中新世-上新世地層。前人於造山山脈進行鋯石鈾-鉛定年分析,發現 鋯石鈾-鉛年代與華南古陸(South China Block)岩漿活動事件年代可相互對應(劉 丞浩,2013;黃奕彰,2015; Chen *et al.*,2016; Chen *et al.*,2017),因此推測臺灣 造山帶岩層的沉積物來源應來自西側的華南古陸(表 5-1)。

由此可知,後前淵盆地中的沉積物主要來自脊樑山脈東翼與盆地東側的火山 島弧,而脊樑山脈的物質又是來自華南古陸,因此欲還原盆地沉積物源區(脊樑 山脈)的剝蝕歷史,需進一步了解華南古陸之構造活動史,將於下一節(5-1-2 節)進行說明。

Orogeny	Wutai	Luliang	Sibao	Jinning	Caledonian	Indosinian	Yanshanian	Himalayan
A as Danulation	2.6~2.4	1.9~1.7	1.0~0.9	0.85~0.7	450~400	250~200	200~65	65~8
Age Population	Ga	Ga	Ga	Ga	Ma	Ma	Ma	Ma
Cretaceous		1~17%				7~26%	45~100%	
Tailuko belt	-	(8%)	-	-	-	(13%)	(63%)	-
Eocene-Oligocene	2~6%	1~8%	2~9%	1~11%	5~15%	3~11%	26~41%	0~7%
strata	(4%)	(5%)	(5%)	(6%)	(7%)	(8%)	(31%)	(2%)
Miocene	5~12%	10~25%	1~5%	5~21%	3~10%	6~14%	9~18%	0~1%
strata	(10%)	(15%)	(3%)	(11%)	(5%)	(8%)	(11%)	(0%)
Yuli belt	2~19%	4~24%	0~4%	2~13%	0~10%	4~20%	8~46%	0~7%

表 5-1 臺灣造山帶地層碎屑鋯石鈾-鉛定年年代族群。(Chen et al., 2017)

Note. The numbers in the parenthesis indicate the average percentage.

5-1-2 源區熱定年年代

本節將統整前人對於後前淵盆地沉積物源區的熱定年研究結果,以利後續進 行樣本核飛跡年代意義的闡釋。上述提及盆地沉積物的主要源區包含脊樑山脈東 翼與火山島弧,而脊樑山脈東翼的物質則是由華南古陸而來,因此以下將針對華 南古陸(5-1-2-1節)與火山島弧(5-1-2-2節)的熱定年年代進行討論。

5-1-2-1 華南古陸熱定年研究結果

華南古陸 (South China Block)由揚子陸塊 (Yangtze Block)及華夏陸塊 (Cathaysia Block)組合而成,各時期花崗岩分布如圖 5-1,其歷經八個構造活動 期由古至今依序為 (黃奕彰, 2015; Chen *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2017):

- 1. 五台運動 (2.6~2.4 Ga): 原始華南古陸生成。
- 2. 吕梁運動 (1.9~1.7 Ga): 華夏陸塊快速且大量形成。
- 四堡運動(1.0~0.9 Ga): 揚子陸塊與華夏陸塊碰撞形成羅迪尼亞大陸 (Rodinia)。
- 晉寧運動(0.85~0.7Ga):揚子陸塊與華夏陸塊脫離羅迪尼亞大陸,造 成羅迪尼亞大陸分裂與花崗岩入侵。
- 加里東運動(450~400 Ma):揚子陸塊與華夏陸塊再次碰撞,華夏陸塊
 的岩漿活動與大規模褶皺造成區域性的交角不整合。
- 6. 印支運動(250~200 Ma):古特提斯洋關閉,加上華北陸塊、印支地塊 以及華夏陸塊之間的碰撞,造成區域性的交角不整合,並伴隨岩漿入侵 形成大量花崗岩體,依據花崗岩種類可將印支運動期細分為印支早期(S 型花崗岩)與晚期(A型花崗岩)。
- 7. 燕山運動 (200~65 Ma):印支運動後的張裂作用,古太平洋板塊隱沒於華夏陸塊之下,導致華南地區產生大範圍岩漿活動並形成大量火成岩體。根據活動時間可再細分為早燕山期(侏儸紀)和晚燕山期(白堊紀)。
- **喜馬拉雅運動(65~8 Ma):**燕山運動後的岩漿活動導致華夏陸塊東部 邊緣分離。

鋯石鈾-鉛定年封存溫度可達 700°C以上(Ghent et al., 1988),與岩漿冷卻形成固態岩石的溫度(600~700°C)相近,故多以鋯石鈾-鉛定年年代代表火成岩形成年代。由於華南地區火成岩以花崗岩為主,其冷卻速度較緩慢,所以不論是利用單一礦物進行多種熱定年法分析,抑或是使用不同礦物進行同一種熱定年法分

析,會因為封存溫度的不同,導致獲得的年代有所差距,因此在劃分樣本的核飛 跡年代所代表的癒合程度時,應以封存溫度相近的熱定年結果作為劃分癒合程度 的依據。根據華夏陸塊花崗岩熱定年研究,可發現單一樣本的錯石鈾-鉛定年年代、 ZFT 年代,以及 AFT 年代相差懸殊。錯石鈾-鉛定年年代大約介於 164~118 Ma 之間,而 ZFT 年代大約介於 120~85 Ma 之間,AFT 年代則介於 60~25 Ma 之間 (Chen et al., 2020; Wang et al., 2020; Wang et al., 2022)。其中,錯石鈾-鉛定年 及 ZFT 的封存溫度較高,且定年結果相近,皆可能代表固態岩石形成的年代,但 AFT 封存溫度較低,且年代較年輕,推測應屬於後期的剝蝕冷卻年代。因此,若 臺灣造山帶中出現 AFT 或 ZFT 年代老於 25 Ma 的樣本,代表該樣本仍保留其源 區 (華夏陸塊)的核飛跡年代,意即樣本中的核飛跡未受造山運動的深埋作用而 產生癒合,屬於未癒合年代。

5-1-2-2 火山島弧熱定年研究結果

火山島弧與華夏陸塊中的花崗岩最大的差異為前者是噴發後快速冷卻,後者 為岩漿緩慢冷卻,故兩者於不同的熱定年結果中亦有不同的表現。過去針對火山 島弧的熱定年研究多為鉀氫定年,但計算得到的年代範圍都相當廣,約介於 4~ 30 Ma (Ho, 1969; Juang and Bellon, 1984; Richard *et al.*, 1986)。Lan (1982)透 過礦物及岩石學分析,認為奇美火成雜岩曾經歷 530~200°C的熱液換質作用(Lo *et al.*, 2002),代表岩石中的氫可能因高溫而逸散,因此本研究認為鉀氫定年年代 須謹慎使用。

然而,先前提到應以封存溫度相近的定年法界定樣本核飛跡年代所代表的意義。Yang et al. (1988)於奇美地區針對都鑾山層整合下覆之奇美火成雜岩進行核飛跡定年,其 ZFT 與 AFT 定年結果相近,核飛跡年代跨度小,介於 15.4~16.4 Ma 之間。但是熱液換質作用的溫度已高於核飛跡封存溫度,因此該研究的核飛跡年 代應代表火山噴發後,岩石經過熱液換質的冷卻年代,並非火山噴發年代。Yang

et al. (1995)於全段海岸山脈的火成岩進行 ZFT 定年研究,並發現海岸山脈最年輕的火成岩 ZFT 年代出現於東河地區,該年代為 1.5 Ma; Yang et al. (2003)則 針對奇美地區的兩個岩脈進行 ZFT 分析,並計算得到其 ZFT 年代分別為 1.9±0.4 Ma 與 0.5±0.1 Ma,作者推測海岸山脈於 1 Ma 仍有殘餘的火成活動。後續亦有其 他熱定年研究結果發表,Shao et al. (2015)針對奇美火成雜岩進行錯石鈾-鉛定 年分析,其定年結果為 9.0±0.4 Ma 與 14.2±0.4 Ma,Lai et al. (2016)則是以全岩 氫氫定年區分四個火山最後的噴發年代,分別是 7.2 Ma (月眉火山)、4.2 Ma (奇 美火山)、6.2 Ma (成廣澳火山),以及 8.5 Ma (都鑾山火山)。另外,透過石灰岩 及凝灰質砂岩的超微化石與有孔蟲的沉積年代可知,港口石灰岩應形成於晚中新 世超微化石帶 NN11晚期 (>5.6 Ma)。綜上所述,火山最後噴發年代應至少>4.2 Ma,但 ZFT 年代卻遠小於 4.2 Ma,因此本研究認為過去的 ZFT 年代(1.9±0.4 Ma, 0.5±0.1 Ma)是否能用於界定樣本核飛跡年代所代表的癒合程度,仍有待商榷。

根據都鑾山層的鋯石鈾-鉛定年研究可知,其年代介於 17~5 Ma 之間,其中 14~8 Ma 所佔比例較高,顯示火山活動於此期間內較為活躍 (Shao et al., 2015; Geng et al., 2018)。另外,馬達吉達溪底部之都鑾山層,其鋯石鈾-鉛定年年代約 4.2~8.0 Ma (Chen et al., 2023)。考量到島弧火山快速噴發冷卻的特性,若噴發後 未受變質作用影響,則單一樣本的鋯石鈾-鉛定年年代、ZFT 年代,以及 AFT 年 代應相差不大。因此本研究認為,若樣本中核飛跡年代介於 4.2~14 Ma 之間,且 岩象薄片中火山碎屑於岩屑含量的佔比較高,則不排除該砂岩樣本的主要源區可 能包含火山島弧。



圖 5-1 華南古陸各時期花崗岩分布。(Wang et al., 2020)

5-1-3 樣本核飛跡年代的意義

本文於 5-1-1 節提到,本研究所有樣本的核飛跡年代皆未受到沉積後深埋的 癒合,故該年代反映源區山脈剝蝕過程的冷卻歷史。5-1-2 節則統整前人於源區山 脈的定年研究,用以判定樣本核飛跡年代代表的來源與癒合程度。因此,在未受 到沉積後癒合的前提下,本節將針對各樣本的核飛跡年代,區分為未癒合(5-1-3-1 節)、完全癒合(5-1-3-2 節),以及部分癒合(5-1-3-3 節)的年代。

5-1-3-1 未癒合年代

若樣本的核飛跡年代屬於未癒合年代,指示源區岩層在深埋受熱時未超過該 礦物的封存溫度,導致核飛跡癒合。海岸山脈馬達吉達溪的後前淵盆地,其沉積 物的源區包含脊樑山脈以及火山島弧。換言之,當砂岩樣本的核飛跡年代呈現未 癒合年代,則代表脊樑山脈的岩層或火山島弧的火成岩岩體,並未受到高於封存 溫度的變質熱事件影響。

都鑾山層火成岩核飛跡年代若為未癒合年代,是代表火山噴發年代,意即火成岩的形成年代,而 5-1-2-2 節已整合前人的都鑾山層熱定年結果,認為若樣本核飛跡峰值年代介於 14~4.2 Ma 之間,可能代表沉積物來自火山島弧 (圖 5-2)。

脊樑山脈屬於臺灣造山帶的一部分,是由來自華南古陸的碎屑物堆積而成, 經過深埋後的造山運動而形成的山脈。造山過程的初期,因南中國海板塊的俯衝, 將大陸邊緣沉積層帶入隱沒帶,使大陸邊緣的岩層產生變質作用,形成變質岩層, 之後因弧陸碰撞作用而逐漸成為山脈(Chen et al., 2019)。由於俯衝作用導致岩層 溫度升高,使得脊樑山脈岩層中的 AFT 與 ZFT 產生癒合。若脊樑山脈岩層的 AFT 和 ZFT 年代屬於未癒合年代,代表該岩層於造山運動過程中,並未被加熱至核飛 跡封存溫度以上,也就代表該年代反映的是華南古陸火成岩形成或冷卻年代。 Kirstein et al.(2010)亦針對海岸山脈後前淵盆地的碎屑錯石進行鈾-鉛定年分析, 其年代結果可對應華南古陸的構造活動期,也呼應了後前淵盆地沉積物的原始來 源是來自華南古陸(圖 5-3)。根據 5-1-2-1 節對於華南古陸的熱定年研究統整, 本研究認為當樣本 AFT 或 ZFT 峰值年代大於 25 Ma (華南古陸的 AFT 最年輕峰 值年代),即代表沉積物來源可能為脊樑山脈的未癒合岩層(圖 5-2)。

5-1-3-2 完全癒合年代

若樣本的核飛跡年代屬於完全癒合年代,其地質意義代表源區山脈岩層於最 後一次熱事件被加熱至核飛跡封存溫度之上,待其冷卻過程低於封存溫度時所記 錄的年代。由於都鑾山層於火成岩形成後並未有變質作用,因此最後一次熱事件 代表火山噴發年代。

至於脊樑山脈,由於造山運動的影響,使得最後一次熱事件為造山運動所導 致的高溫變質作用。而脊樑山脈岩層核飛跡完全癒合年代則代表岩層受到造山運 動的影響,使得 AFT 與 ZFT 受熱而重置消失,隨後冷卻至封存溫度以下,代表

造山運動過程的冷卻年代。前人研究多認為 6 Ma 為蓬萊造山運動的起始年代, 故先前的核飛跡定年研究多以 6 Ma 作為完全癒合年代與部分癒合年代的分界年 代(Liu et al., 2001; Willett et al., 2003; Lee et al., 2006; Kirstein et al., 2010; Kirstein et al., 2013; Huang et al., 2022)。然而, Chen et al. (2019)透過前陸盆地的砂岩 岩象分析並結合前人的熱定年研究結果,認為整個臺灣造山帶最早抬升出露的岩 層為脊樑山脈玉里帶,其初始抬升的年代約 12 Ma,換言之,造山帶達到最高變 質溫度的時間點亦為 12 Ma,隨後便開始抬升降溫。目前造山山脈出露變質度最 高的岩層,其變質溫度可達 550°C (變質程度為高綠片岩相)(陳肇夏與王京新, 1995; Tsai et al., 2013; Baziotis et al., 2017; Zhang et al., 2020),此溫度足以使 AFT 和 ZFT 完全癒合,因此盆地中亦有可能出現完全癒合的 AFT 或 ZFT 樣本。 本研究認為,若樣本核飛跡年代小於 12 Ma,則代表沉積物來源可能為脊樑山脈 的完全癒合岩層(圖 5-2)。

5-1-3-3 部分癒合年代

若樣本的核飛跡年代屬於部分癒合年代,其地質意義代表源區山脈岩層所經 歷的最高變質溫度介於AFT與ZFT部分癒合帶(partial annealing zone,簡稱PAZ) 的溫度之間。PAZ介於完全癒合帶與未癒合帶之間,當變質溫度低於PAZ的溫度 下界時,因溫度不足而無法使礦物的核飛跡產生癒合;反之,當變質溫度高於PAZ 的溫度上界,礦物中的核飛跡將受熱而癒合,使核飛跡定年的地質時鐘重置。變 質溫度僅達到PAZ的岩層,其溫度不足以使樣本礦物的核飛跡癒合,僅部分不穩 定的核飛跡產生癒合,因此稱為部分癒合。在不清楚礦物於PAZ停留的時間,以 及礦物在受熱癒合前的核飛跡數量的條件下,無法明確指示部分癒合所代表的地 質意義。

根據上述對於完全癒合帶與未癒合帶的界定,按理說部分癒合帶介於完全癒 合帶與未癒合帶之間,因此部分癒合年代也應介於兩者之間(12~25 Ma)。然而,
未癒合年代雖訂定為>25 Ma,但並非>25 Ma的樣本皆來自未癒合的岩層,可能 是原本未癒合的岩層受熱時間不夠長,抑或是進入 PAZ 的時間太短,使得癒合程 度較低,導致核飛跡年代稍微變年輕,但還是>25 Ma。因此本研究認為,部分癒 合年代界線並無上限,意即只要樣本核飛跡年代>12 Ma,其中的沉積物便可能來 自脊樑山脈的部分癒合岩層(圖 5-2)。



圖 5-2 核飛跡年代與其相對應之癒合程度。



■ 5-3 海岸山脈後前淵盆地碎屑鋯石鈾-鉛與ZFT 年代對照。(A)水母丁溪樣本 SM6 的碎屑鋯石鈾-鉛定年與鋯石核飛跡定年年代對照圖,可見鈾-鉛定年年代與 核飛跡年代之間差距甚大;(B)圖A核飛跡年代 0~1000 Ma/鈾-鉛年代 0~1000 Ma 年代對照圖,可見鋯石鈾-鉛定年與華南古陸構造期火成岩年代相互對應。 (Kirstein *et al.*, 2013)

5-1-4 源區出露岩性判別依據

樣本獲得 AFT 與 ZFT 年代後,可以透過源區岩層特性辨別核飛跡年代所代 表的癒合程度(5-1-3節)。了解源區岩層的核飛跡癒合程度,便可藉由 AFT 與 ZFT 封存溫度推估該岩層經歷的最高變質溫度範圍。若對單一樣本只使用單一種 定年法,僅能將變質溫度畫分成三個範圍,但若使用兩種以上的定年法,則可以 更細分岩層受變質的溫度範圍,進而對於岩層的最高變質溫度有更精準的制約(圖 5-4)。

本文於 3-1-2 節提及冷卻速率會影響核飛跡 PAZ 溫度範圍,根據 Chen et al. (2019)計算的造山帶冷卻速率,對應 Reiners and Brandon (2006)的 PAZ 溫度 與冷卻速率關係圖(圖 3-3),本研究認為 AFT 的 PAZ 溫度為 80~135℃。另外, Liu et al.(2001)認為臺灣造山山脈的 ZFT 部分癒合帶和完全癒合帶的地理界線, 與葡萄石-綠纖石相和綠片岩相的界線相近,變質作用使得變質岩中的伊萊石轉變 成雲母,指示兩變質相之間的變質溫度約為 260℃ (Hoffman and Hower, 1979), 作者因而將 ZFT 封存溫度訂為 260±20℃。因此本研究認為 ZFT 的 PAZ 溫度範圍 應為 200~260℃ (圖 5-5)。訂定 PAZ 溫度範圍後,即可用於推測源區岩層可能 達到的最高變質溫度區間,判斷方式如下:首先判定樣本核飛跡年代所代表的癒 合程度,接著透過癒合程度推估源區岩層可能經歷的最高變質溫度區間。舉例來 說,當樣本 AFT 年代為完全癒合年代,ZFT 年代為未癒合年代,則代表源區岩層 的最高變質溫度介於 135℃ (AFT 的 PAZ 溫度上界)與 200℃ (ZFT 的 PAZ 溫度 下界)之間,依此類推 (圖 5-5)。

確定源區岩層經歷的最高變質溫度區間後,可進一步透過變質相溫度界線、 岩象學分析、熱定年研究等方法,建立不同變質程度的變質岩間的變質溫度界線, 以利推估源區出露岩層的岩性。本研究參考徐士捷(2017)與葉家志(2017)界 定岩性溫度範圍的準則,以下將詳細說明(**圖 5-5**):

1. 沉積岩 (Sedimentary rock):西部麓山帶沉積岩屬於成岩相,變質溫度

小於 200℃。根據前人熱定年研究,僅底部的地層(早期中新世)AFT 年代完全癒合,變質溫度應介於 135~200℃之間。雪山山脈屬於極低度 變質岩與硬頁岩層,大部分變質程度屬於葡萄石-綠鐵石相,少部分屬於 成岩相與綠色片岩相,其鋯石(U-Th)/He 定年結果多為部分重置或未重 置,僅少數為完全重置,故推測硬頁岩變質溫度可下推至 190℃,加上 其 AFT 年代為完全癒合,代表沉積岩與硬頁岩之間的過渡溫度應介於 135~190℃之間,因此本研究認為源區變質溫度若低於 160℃,則可對 應出露岩層的岩性為沉積岩。

- 2. 極低度變質岩、硬頁岩 (Argillite):由上述可知極低度變質岩與硬頁岩的變質溫度下界為 160°C,上界則須透過板岩的熱定年結果加以制定。 脊樑山脈板岩帶的變質相涵蓋葡萄石-綠纖石相以及綠色片岩相,代表板 岩帶的變質溫度應大於 200°C,前人研究核飛跡年代顯示葡萄石-綠纖石 相的 ZFT 屬於部分癒合,而綠片岩相的 ZFT 屬於完全癒合,代表板岩 帶變質溫度可達 ZFT 封存溫度約 260°C以上,故硬頁岩變質成板岩的過 渡溫度應介於 200~260°C之間,因此將極低度變質岩與硬頁岩的變質溫 度上界訂定為 230°C。本研究認為,樣本源區的變質溫度若介於 160~ 230°C之間,則代表可能出露岩層的岩性為極低度變質岩或硬頁岩。
- 3. 低度變質岩、板岩 (Slate):上述訂定低度變質岩與板岩的變質溫度下 界為 230℃,上界則須透過片岩的變質溫度加以制定。片岩變質程度可 達到綠片岩相,代表其最低變質溫度應高於 300℃以上。而 Ernst(1983) 針對片岩中的變質礦物進行岩象學研究,並發現片岩帶中出現硬綠泥石, 但缺乏石榴石與十字石,因此認為片岩帶的變質溫度應介於 325~425℃ 之間。隨後,Warneke and Ernst (1984)利用相同方法對於綠色片岩相 東側的片岩帶進行分析,並認為其變質溫度應高於 400℃。因此本研究 認為板岩變質成片岩的過渡溫度為 400℃,故樣本源區的變質溫度若介 於 230~400℃之間,則代表可能出露岩層的岩性為低度變質岩或板岩。

4. 中度變質岩、片岩 (Schist):根據 Ernst (1983)與 Warneke and Ernst (1984)研究結果,本文認為中度變質岩與片岩的變質溫度下界可訂於 400°C。而由於本研究並未發現比片岩變質度更高的岩屑,同時也因為 本研究所使用的 AFT 和 ZFT 所能界定的溫度極限只能到 260°C,因此未 針對片岩的變質溫度上界加以訂定。

界定各岩性的變質溫度範圍後,便可用於回推源區山脈可能出露的岩性。回 推方式如下:首先辨別單一樣本 AFT 和 ZFT 代表的癒合程度(5-1-3節),接著 綜合兩者的癒合程度對應其代表的變質溫度區間,最後判斷該變質溫度區間包含 哪些岩性的變質溫度範圍,即可回推源區山脈的出露岩層之岩性(圖5-5)。需特 別注意的是,由於核飛跡的溫度區間與岩性的溫度區間並不一致,因此一個樣本 可能對應到多種岩性,故若要得到更精準的岩性比例,需進一步搭配岩象分析結 果進行解釋。



圖 5-4 單一定年法與雙重定年法之差異。單一定年法(左)僅能將變質溫度區分為三個溫度範圍(15~80℃、80~135℃、>135℃),雙重定年法(右)可將變質溫度區分為五個溫度範圍(15~80℃、80~135℃、135~200℃、200~260℃、>260℃)。

Metamorphic grade	Lithology	Buried temperature	
15°C		ZFT non-annealing AFT non-annealing T: <80 °C	
Diagenetic facies	Sedimentary 80°C rock	ZFT non-annealing AFT partial annealing T: 80~135°C	
200°C	160°C	ZFT non-annealing AFT total annealing T: 135~200℃	
Prehnite-Pumpellite	Argillite 200°C 230°C 260°C	ZFT partial annealing AFT total annealing T: 200~260℃	
Greenschist facies	Slate	ZFT total annealing AFT total annealing T: >260 ℃	
	Schist		

圖 5-5 變質相、出露岩性、埋藏溫度及核飛跡癒合程度對照。(李政熹, 2021)

5-2 砂岩核飛跡年代意義

本章節將以核飛跡年代為主、岩象分析為輔,針對砂岩樣本的源區進行剖析。 首先判斷樣本 AFT 與 ZFT 年代的癒合程度,並對應源區最高變質溫度範圍與推 測出露岩性(5-2-1節),再針對本研究唯一含有大量火成岩屑的樣本 MDJ-01 進 行探討(5-2-2節)。

5-2-1 砂岩源區分析

本研究共分析 12 個砂岩樣本的 AFT 與 ZFT 年代,由於砂岩岩屑涵蓋來自河 流流域出露的岩層,各岩層的變質程度不一,因此單一砂岩樣本的核飛跡峰值年 代於擬合時通常不會通過卡方檢定,意即 P(F) < 5%,也就是砂岩的核飛跡數據常 擬合出多峰值年代。在多個峰值年代當中,最年輕的峰值年代(P1)通常代表最 近一次的熱事件年代,其餘的峰值年代則代表過去所經歷過的熱事件年代。砂岩 核飛跡年代的意義,是先根據各峰值年代,將該峰值年代分類為完全癒合、部分 癒合或未癒合年代(圖 5-2),之後再根據變質溫度推測可能的岩性(圖 5-5)。

舉例來說,樣本 MDJ-02 的 AFT 定年結果共擬合出 4 個峰值年代(P1~P4), 其中 P1 年代為 $5.2_{+0.6}^{-0.6}$ Ma,屬於完全癒合年代,代表其源區岩層的最高變質溫 度> 135°C,對應出露的岩層岩性可能為沉積岩、硬頁岩、板岩甚至片岩等;P2 年代為 $18.7_{+3.1}^{-2.7}$ Ma,屬於部分癒合年代,代表其源區岩層的最高變質溫度達到 $80~135°C,對應出露的岩層岩性可能為沉積岩;P3 與 P4 年代分別為 47.4_{+6.7}^{-5.9}$ Ma 與 $156.0_{+18.7}^{-16.7}$ Ma,由於年代>25 Ma 可能代表部分癒合或未癒合年代,無法進一 步細分,因此只能推測源區岩層的最高變質溫度< 135°C,而其對應可能出露的岩 層岩性為沉積岩。綜合 MDJ-02 的 AFT 所有峰值年代,可推測在 3.47 Ma 時 (MDJ-02 沉積年代),源區山脈出露的岩層一定包含沉積岩層 (P2~P4),以及 變質溫度較高的岩層 (> 135°C),可能是硬頁岩、板岩或片岩 (P1)。然而,由 AFT 的P1年代僅能得知最高變質溫度的下界是135°C,無法得知變質溫度的上界,

因此需要使用封存溫度更高的 ZFT 對於源區岩層的變質溫度進行制約。由樣本 MDJ-02 的 ZFT P1 年代(26.0^{+10.6}_{+18.0} Ma)可知,該年代屬於部分癒合或未癒合年 代,代表其最高變質溫度並未超過 260°C,藉此可推測在 3.47 Ma 時,源區出露 岩層的最高變質溫度並未超過 260°C,而出露的岩性可能為硬頁岩或板岩。至於 ZFT 的其它峰值年代(P2~P4)皆屬於部分癒合或未癒合年代,代表源區岩層最 高變質溫度皆<260°C,對應岩性可知在 3.47 Ma 時,源區可能同時出露沉積岩、 硬頁岩或板岩層(圖 5-6)。綜合 AFT 與 ZFT 的定年結果後,可知樣本 MDJ-02 接收到來自源區山脈沉積岩、硬頁岩或板岩層的碎屑物質。

Metamorphic grade	Lithology	Buried temperature	AFT	ZFT	Source
15℃		ZFT non-annealing AFT non-annealing T: <80 °C	P3 P4	P1 P2 P3 P4	
Diagenetic facies	Sedimentary 80°C rock	ZFT non-annealing AFT partial annealing T: 80~135 °C	P2		Sedimentary rock
2007	160°C	ZFT non-annealing AFT total annealing T: 135~200 ℃	Id		
Prehnite-Pumpellite	Argillite 2000 2300 2600	ZFT partial annealing AFT total annealing T: 200~260°C			Argillite
facies 300°C Slate Greenschist facies Schist	ZFT total annealing AFT total annealing			Slate	
	Schist	1: -200 C			Schist

■ 5-6 樣本 MDJ-02 利用 AFT 與 ZFT 對應源區出露岩層岩性。P1~P4 代表軟體 BINOMFIT 擬合的最佳峰值 (best-fitting peak),紅色長條代表完全癒合年代對應 的變質溫度及岩性,黃色長條代表部分癒合年代對應的變質溫度及岩性,藍黃色 漸層長條代表該年代可能屬於部分癒合或未癒合年代,其所對應的變質溫度及岩 性,最右側紫色區塊為樣本 MDJ-02 綜合 AFT 與 ZFT 定年結果推測源區可能出露 的岩層岩性。 表 4-1 的樣本峰值年代表顯示,所有樣本的 AFT P1 年代皆<12 Ma,屬於完 全癒合年代,代表源區岩層最高變質溫度> 135℃(圖 5-7);然而僅部份樣本的 ZFT P1 年代<12 Ma,其餘大多樣本的 ZFT P1 年代屬於部分癒合或未癒合年代, 代表大部分源區岩層所經歷的最高變質溫度<260℃,但因為無法明確區分部分癒 合及未癒合年代,因此推測當時主要出露的源區岩層經歷最高變質溫度範圍介於 135~260℃之間(MDJ-02、03、04、05、08、09、11、12),對應到源區岩層的 岩性可能是沉積岩、硬頁岩或板岩;部分剝蝕到較深的岩層(ZFT P1 屬於完全癒 合年代),其經歷的最高變質溫度可能> 260℃(MDJ-01、06、10、13),對應源 區岩層的岩性可能為板岩或片岩(圖 5-7)。值得注意的是,樣本 MDJ-03 及 MDJ-12 的 ZFT P1 年代雖然<12 Ma,但 P1 峰值所佔百分比太低,換算成顆粒數僅 1~2 顆,不具統計意義,因此本研究仍將此二樣本歸類於 ZFT 部分癒合或未癒合年代。 另外,所有砂岩樣本 AFT 與 ZFT 除了 P1 以外的 P2、P3、P4、P5 峰值年代,皆 屬於部分癒合或未癒合年代,代表源區岩層的變質溫度應<135℃,對應其源區岩 層的岩性應屬於沉積岩。

由於各砂岩樣本皆含有 AFT 與 ZFT 部分癒合或未癒合的岩層(P2~P5),因 此本研究認為從 3.47 百萬年前至 1.64 百萬年前(MDJ-01~13 沉積年代),源區 仍有沉積岩地層出露。而砂岩樣本 AFT P1 年代皆屬於完全癒合年代,大部分樣 本 ZFT P1 年代屬於部分癒合或未癒合年代,因此源區岩性應存在有沉積岩、硬 頁岩與板岩,代表源區岩層於 3.47 百萬年前至 1.64 百萬年前應出露沉積岩層、硬 頁岩層或板岩層,其中分別在 3.25 Ma (MDJ-06 沉積年代)、1.94 Ma (MDJ-10 沉積年代)及 1.64 Ma (MDJ-13 沉積年代)時,因 ZFT P1 年代屬於完全癒合年 代,代表源區有較多板岩出露。透過岩象分析結果可見,自 3.47 百萬年前至 1.64 百萬年前皆可觀察到沉積岩、硬頁岩與板岩岩屑,其中沉積岩岩屑(Ls/Lt)的佔 比較少,且呈向上逐漸減少的趨勢;硬頁岩(Ag/Lt)於岩屑中的佔比較沉積岩岩 屑高;板岩岩屑(Sl/Lt)則分別在 3.25 Ma 與 1.64 Ma 時佔比較高,甚至在 1.64 Ma 開始出現少量的片岩岩屑(Sch/Lt)(圖 4-5)。

此外,本研究對於砂岩樣本的 AFT 年代與岩象分析結果發現,每個砂岩樣本 都具有硬頁岩與板岩岩屑,兩者含量隨時間變化並不規律,有時硬頁岩岩屑較多, 有時板岩岩屑較多(圖 4-5;表 4-2)。若砂岩中的碎屑沉積物皆來自同一個源區, 照理說同一個源區的硬頁岩層會先通過 AFT 封存溫度,而板岩層則較晚通過 AFT 封存溫度,因此板岩層記錄的 AFT 年代應比硬頁岩層記錄的 AFT 年代年輕。換 言之,砂岩樣本中應同時存在兩個 AFT 完全癒合的峰值年代,但本研究所有砂岩 的 AFT 峰值都只有一個完全癒合年代(表 4-1)。針對此現象,本研究提出三個可 能的原因:

- (A1)AFT P1 年代僅代表某一種岩性的年代:假設源區各種岩性所供應的礦物比率相等,當砂岩樣本中某種岩性的岩屑含量較高,使得該岩性的AFT 訊號較強,其他岩性的AFT 訊號較弱,甚至可能被覆蓋。因此樣本在經過計算擬合後所得到的AFT 峰值年代,可能僅代表接近含量較多的岩性的AFT 年代。
- (A2)AFT P1 為混合年代:當山脈抬升速率較快,岩層的冷卻速率也較快, 可能造成各岩性通過封存溫度的時間相差不大。若磷灰石的單顆粒年代 誤差較大,且不同岩性的碎屑物 AFT 年代相近,就可能導致計算時將相 近的年代擬合成單一峰值。
- (A3)AFT P1 代表變質溫度 200~260℃岩層的冷卻年代:根據上述推估源區 岩層最高變質溫度應介於 200~260℃之間(圖 5-7),由於此溫度區間為 硬頁岩變質成板岩的過渡帶,因此可將此岩層視為單一母岩,而砂岩樣

本的AFT P1 年代則代表母岩的冷卻年代,可用於計算母岩的冷卻速率。 第一個推測原因(P1 代表單一岩性年代,A1)需要透過各岩性的礦物豐度

以及沉積物供應量才能得到證實,沉積物供應量可由砂岩岩象分析得知,但礦物 豐度僅能透過各岩性岩層的礦物豐度進行驗證。本研究的砂岩岩象分析結果顯示, 硬頁岩岩屑占整體比例(Ag)約4~11%,板岩岩屑占整體比例(SI)約1~31%, 扣除極端值則板岩岩屑占比的變化幅度約5~19%(表4-2),可見不同變質程度 的岩屑占比變化並不大,代表岩屑占比並非導致 AFT 只有一個完全癒合峰值年代 的主因,因此需要進一步了解硬頁岩層和板岩層的磷灰石礦物豐度,確認是否為 某一種岩性岩層的礦物豐度較高,使得該岩層的 AFT 訊號較強而抑制了另一種岩 性的 AFT 訊號。Resentini et al. (2020)利用現生河砂回推各河流集水區的磷灰石 與鋯石礦物豐度,以脊樑山脈東翼的礦物豐度來看,可發現磷灰石與鋯石豐度較 高的集水區皆位於中段脊樑山脈,北段與南段脊樑山脈的則較低。然而現今脊樑 山脈東翼出露的岩層主要是板岩(南段)和片岩(北、中段),若是以整個集水區 來計算礦物豐度,無法細分何種岩性岩層的礦物豐度較高,應直接觀察源區各岩 性岩層的礦物豐度。目前少有文獻針對造山山脈的岩層計算其礦物豐度,因此無 法確認是否僅代表單一岩性的年代。僅能大致推測,中段脊樑山脈的 AFT 與 ZFT 訊號,應較北段與南段脊樑山脈的 AFT 與 ZFT 訊號強。

第二個推測原因(P1 為混合年代,A2)可透過前人計算得到的剝蝕冷卻速 率以及AFT 的年代跨度加以驗證。Chen et al. (2019)統整前人對於造山帶岩層 的熱定年年代,計算雪山山脈與脊樑山脈的冷卻路徑與各岩性的冷卻速率。以脊 樑山脈硬頁岩層與板岩層的冷卻速率來看,在北、中、南段脊樑山脈板岩剛開始 出露時的冷卻速率分別約110°C/Ma、27°C/Ma、150°C/Ma(圖5-8)。另外,根 據 Resentini et al. (2020)將磷灰石顆粒區分為三種類型,分別為:低鈾濃度且無 自發核飛跡(U-poor zero-track grains)、高鈾濃度且無自發核飛跡(U-rich zero-track grains),以及含有自發核飛跡的磷灰石顆粒(grains with fission track),而臺灣現 生河砂中大多屬於前兩種類型的磷灰石顆粒(grains with fission track),而臺灣現 生河砂中大多屬於前兩種類型的磷灰石顆粒,且該研究認為磷灰石顆粒缺乏自發 核飛跡是因抬升速率太快所致。然而AFT 年代的解析度取決於自發核飛跡的數量, 自發核飛跡越多則年代誤差範圍越小,解析度亦越高(Walter, 1989)。本研究砂 岩樣本的磷灰石約有15~50%的無自發核飛跡磷灰石顆粒(zero-track grains),可 能是因為磷灰石低鈾濃度的特性,再加上冷卻速率快,累積核飛跡的時間較短, 造成自發核飛跡密度低且單顆粒年代的誤差較大,使得AFT 解析度不足以區分硬 頁岩與板岩年代,導致兩者的AFT 年代合併計算成單一峰值年代,因此推測本研

究砂岩樣本的 AFT P1 峰值可能為混合年代。導致混合年代的因素如下:

- (1) 由於臺灣造山帶抬升冷卻速率快,且變質程度屬於連續變化,硬頁岩與板岩記錄的 AFT 年代可能非常相近,使得兩者的 AFT 年代在計算時被擬合成一個峰值。雖然由岩象薄片可以區分硬頁岩與板岩岩屑,但由AFT 並不能判斷哪些磷灰石是來自硬頁岩層或板岩層,所以 AFT 的 P1 雖然是完全癒合年代,卻因為是混合兩種岩性的年代而不具地質意義。
- (2)本研究砂岩樣本的磷灰石顆粒中,無自發核飛跡(n₀,表 4-1)的磷灰石 顆粒多,由於自發核飛跡數量是決定單顆粒年代誤差的重要因素,自發 核飛跡數量越少,可能導致磷灰石單顆粒年代誤差越大(Walter, 1989), 即便算出來的年代屬於完全癒合年代,其誤差值可能使不同來源的AFT 年代在計算時被擬合成一個峰值。

針對第三個推測原因(P1 代表變質溫度 200~260℃岩層的冷卻年代,A3), 本研究認為即便根據前人在不同變質岩的熱定年資料,訂定了硬頁岩變質成板岩 的溫度界線為 230℃,但變質過程屬於連續變化,硬頁岩變質成為板岩之間應存 在一段過渡期,此時期可能同時存在硬頁岩與板岩岩屑。若將此過渡期視為單一 岩層,則樣本 AFT P1 年代所代表的意義為「變質溫度介於 200~260℃之間的岩 層通過 AFT 封存溫度的冷卻年代」。也因為該年代僅代表單一岩層的冷卻年代, 因此可以利用 P1 年代計算該岩層的冷卻速率,甚至剝蝕速率。

至於 ZFT 的峰值年代大多屬於部分癒合或未癒合年代,僅少數樣本的 P1 年 代為完全癒合年代。依照理想狀況,若碎屑沉積物的來源包含硬頁岩層和板岩層, 應有一個 ZFT 完全癒合年代與一個 ZFT 部分癒合年代,抑或是兩個 ZFT 部份癒 合的年代。首先必須了解部分癒合年代的意義,本文於 5-1-3-3 節已針對部分癒合 年代進行說明,可知部分癒合年代是不具地質意義的,因為鋯石鈾濃度或α破壞 的程度不同,可能導致軟體擬合出多個部分癒合年代,所以即便 ZFT 有多個部份 癒合的峰值年代,亦無法區分何者是來自硬頁岩層或板岩層,也可能被系統擬合 成單一峰值,故無法對於 ZFT 部份癒合年代的來源進行更進一步的劃分或解釋,

僅得以用來推測變質溫度的範圍(ZPAZ 200~260°C)。而由於部分癒合年代與未 癒合年代兩者無法細分,因此未癒合年代更無法進行說明,只能配合 AFT 或岩象 分析輔助解釋。然而,對於「所有樣本的板岩岩屑占比與硬頁岩岩屑占比並無太 大差異,卻不是每個樣本的 ZFT 都有完全癒合年代峰值」的問題,本研究提出以 下三種解釋:

- (Z1)板岩岩屑來自變質溫度較低的板岩層:本研究根據前人數據所界定的變質溫度與岩性對照表中,板岩最低變質溫度約為230°C(圖5-5),而ZFT部分癒合帶的溫度為200~260°C,因此即便ZFT峰值年代屬於部分癒合年代,亦可能是來自板岩層。所以利用AFT與ZFT推測源區岩層的岩性,需配合岩象分析結果共同解釋,才能對於源區出露岩性有較精確的了解。
- (Z2) ZFT P1 為混合年代:由圖 5-5 可看出板岩的 ZFT 年代可能有部分癒合 或完全癒合兩種狀況,若 ZFT 完全癒合的板岩岩屑含量不多,可能導致 其年代峰值被 ZFT 部分癒合年代覆蓋,所以最後擬合出來的結果便會是 部分癒合年代。
- (Z3)溶蝕因素導致誤差: 結石各顆粒之間α破壞程度不同以及鈾濃度的差異, 使得結石易受到溶蝕過程影響而導致核飛跡計數上的誤差(Bernet and Garver, 2005;圖 5-9),當砂岩中混合各種年代的鋯石時,即便針對各個 薄片(每片約 50~100 顆鋯石)設定不同的溶蝕時間,仍可能無法呈現 所有年代族群(Naeser et al., 1987),因此導致最年輕的 ZFT 年代未被擬 合出獨立的峰值年代。

綜上所述,本研究推測自約 3.5 Ma 以來,源區主要出露的岩層岩性為沉積岩 層與硬頁岩。同時亦有板岩出露,透過砂岩岩象分析,認為板岩岩屑具有一定的 含量,因此排除出露面積小與供應量不穩定等因素,認為應該是出露的板岩層的 變質溫度較低,使得盆地接收到 ZFT 完全癒合的訊號較少(Z1)。直至 1.64 Ma, 源區才開始大量出露變質溫度較高的板岩與片岩。至於砂岩樣本 AFT 皆只有一個 完全癒合峰值年代(P1),本研究認為 AFT 的 P1 年代可能為混合年代(A1、A2), 亦可能僅代表單一岩層的冷卻年代(A3),然而是否全部樣本的 AFT P1 年代都代 表相同的意義,詳細說明請見 5-4 節。

Metamorphic facies	Lithology	Buried temperature	Sample source	
15℃		ZFT non-annealing AFT non-annealing T: <80°C	,12	
Diagenetic facies	Sedimentary ^{80°C} rock 135°C	ZFT non-annealing AFT partial annealing T: 80~135℃	,08,09,11	
200°C	160℃	ZFT non-annealing AFT total annealing T: 135~200℃	2,03,04,05 10,13	
Prehnite- Pumpellite	Argillite 200°C 230°C 260°C	ZFT partial annealing AFT total annealing T: 200~260 ° C	MDJ-0,06,	
actes 300℃ Slat	Slate			
Greenschist	400°C	ZFT total annealing AFT total annealing T: >260 ℃		
facies	Schist			

圖 5-7 砂岩樣本的源區岩層埋藏深度與岩性對照。右側紫色區域為各樣本綜合 AFT 與 ZFT 各峰值年代所代表的癒合程度,對應其源區岩層變質溫度區間以及可 能出露的岩性。



圖 5-8 脊樑山脈冷卻路徑與出露岩性變化圖。左圖為北段脊樑山脈(太魯閣帶) 的冷卻路徑,現今出露片岩;中間圖為中段脊樑山脈(玉里帶)的冷卻路徑,現 今出露片岩;右圖為南段脊樑山脈的冷卻路徑,現今出露板岩。(Chen *et al.*, 2019)



圖 5-9 ZFT 年代與錯石鈾濃度分布圖。左下角區域沒有資料點是由於這些錯石顆粒鈾濃度低且年代較年輕,累積的α破壞較少,需要較長的溶蝕時間才可觀察,常使得此類型的錯石因溶蝕不全而無法計算;右上角區域沒有資料點則是因為這些錯石顆粒鈾濃度高且年代較老,累積的α破壞較多,常因溶蝕後核飛跡過度密集導致無法觀察與計數。(Bernet and Garver, 2005)

5-2-2 樣本 MDJ-01 源區分析

本研究於馬達吉達溪剖面最底部採集的樣本 MDJ-01,其 AFT 的 P1 年代為 10.5 Ma, ZFT 的 P1 年代為 8.5 Ma (表 4-1、圖 5-10)。一般而言,由於 ZFT 封存 溫度較 AFT 封存溫度高,同一個樣本的 ZFT 年代應大於 AFT 年代,然而此樣本 並不符合正常情況,反而是 AFT 年代較 ZFT 年代老,因此本節將針對樣本 MDJ-01 進行源區分析並推測可能的地質解釋。

首先,透過岩象薄片分析結果可知,MDJ-01 的岩屑組成含有較多的火成岩 岩屑(Lv),含量約23%,且長石含量也高達26%,相較於其他砂岩樣本的長石 含量(0~1%)高出許多(圖 4-5),因此不排除 AFT 與 ZFT 年代可能代表火成 岩年代。蕃薯寮層之下的都鑾山層錯石鈾-鉛定年年代約為4.3~8.0 Ma(Chen et al., 2023),因此本研究推測都鑾山層之上沉積岩的 AFT 與 ZFT 年代,若沉積物含有 來自都鑾山層的火成岩岩屑,其年代應接近4.3~8.0 Ma。然而,由岩象分析結果 可知,樣本 MDJ-01 同時含有來自火山島弧和造山帶的碎屑沉積物,因此其碎屑 熱定年可能涵蓋火山島弧以及造山帶兩個來源的岩層,故 AFT 與 ZFT 的各個峰 值年代在解讀時需特別注意。

根據前人推測盆地與造山帶和火山島弧之間的地理位置演化,可見 5~3 Ma 時盆地距離火山島弧較近,距離造山帶較遠 (Chen and Wang, 1988b),且來自造 山帶的碎屑物因經過多次搬運,其礦物顆粒可能較破碎且較細,而來自火山島弧 的碎屑物受到的磨損較少、礦物顆粒較完整。因此本研究將 AFT 薄片中的磷灰石 顆粒,先以顆粒年代劃分,再以外型區分為「晶型較好」與「晶型較破碎」兩個 群體,分別計算火山島弧來源與造山帶來源兩個族群的 AFT 年代。

但是在 ZFT 的部分,由於鋯石硬度高且不易受到搬運過程磨損,且在製作礦 物薄片時已經先挑選晶型較佳的鋯石作為定年材料,因此無法透過外型區分來源。 再加上鋯石容易因為各顆粒受到α破壞程度不同、鈾濃度不同、年代不同等因素, 讓鋯石在溶蝕過程中可能產生崩壞或核飛跡密度太高,以致於無法計數等狀況,

導致最終計算得到的年代與現實有所偏差而無法反映真實的熱歷史(Malusà et al., 2013)。而本研究雖然已對於單一樣本製作多個薄片(4~13 片),並針對不同薄 片採用不同溶蝕時間,期待能分析出各年代群的礦物顆粒(Naeser et al., 1987), 由於碎屑錯石經過多次搬運,容易受到溶蝕特性影響(Malusà et al., 2013),因此 本研究主要使用 AFT 進行詳細的探討。綜上所述,本研究無法進一步將 MDJ-01 的 ZFT 年代再更細分成造山帶或火山島弧來源,僅能搭配 AFT 與岩象分析結果 進行解析。由於其他大多數年輕於 MDJ-01 的砂岩樣本,其 ZFT P1 年代皆屬於部 分癒合或未癒合年代,以反剝蝕序列來說, MDJ-01 的 ZFT P1 年代應為部分癒合 或未癒合年代(>12 Ma),但實際上 MDJ-01 的 ZFT P1 年代應為部分癒合 或未癒合年代(8.5 Ma)可能代表火山島弧的 ZFT 年代,而其餘的峰值年代則 可能混合造山帶與火山島弧的年代,但無法將兩者進一步劃分。

火山島弧開始噴發的時間最早可追溯至 16~15 Ma (Shao *et al.*, 2015),因此 本研究先將樣本 MDJ-01 所有磷灰石顆粒分別計算單顆粒年代,再以 16 Ma 為界 線,將<16 Ma 的磷灰石單獨挑出,接著根據磷灰石外型,將單顆粒年代<16 Ma 的磷灰石顆粒進一步區分為「晶型良好」與「晶型較破碎」兩大群體,前者外型 呈角狀且可見六角柱狀晶型,後者除了邊角被磨圓,顆粒外型也較為破碎,無法 看到完整的柱狀結晶,最後將「晶型良好」與其它顆粒分別計算 AFT 年代(**圖** 5-11)。

計算後的結果如表 5-2,經過年代與晶型篩選後,認為可能來自火山島弧的 碎屑磷灰石共 27 顆,AFT 年代為 5.7 Ma,屬於單峰值年代;可能來自造山帶的 碎屑磷灰石共 88 顆,AFT 的 P1 年代為 12.0 Ma, P2 年代為 65.7 Ma,以下將各 別針對島弧來源與造山帶來源的部分進行闡釋。



圖 5-10 樣本 MDJ-01 的 AFT 與 ZFT P1 年代。



圖 5-11 樣本 MDJ-01 的 AFT 年代計算流程圖。

表 5-2 樣本 MDJ-01 重新計算的 AFT 年代。					X- 10 X		
Sample	Lith.	Depo. age	n _{AFT}	n ₀	zeta (irra.)	AFT best-fit peak 1	peaks (±1σ) peak 2
from volcanic arc	SS	4.00	35	18	332.51 (b)	6.8 ^{-1.1} +1.4 (100.0%)	4 2 · 4 W
from orogenic belt	SS	4.00	80	17	332.51 (b)	12.0 ^{-1.3} _{+1.5} (84.9%)	65.7 ^{-8.6} +9.9 (15.1%)

表 5-2 樣本 MDJ-01 重新計算的 AFT 年代。

Lith. = Lithology, SS means sandstone.

Depo. age = sample deposition age determined by interpolation of magnetobiostratigraphy age data (Ma)

 n_{AFT} = the amount of counted grains of apatite (include n_0)

 n_0 = the amount of zero-track apatite grains

zeta value (irra.) = zeta value of different irradiation

irra. = all samples were seperated into three times for irridation, which is numbered as (a), (b), and (c), and the zeta value is

counted separately

best-fit peaks = the peaks age computed through BINOMFIT program (Ma)

島弧來源碎屑沉積物 AFT 與 ZFT 年代

上述提及島弧來源的 AFT 年代應介於 4.3~8.0 Ma 之間, 而樣本 MDJ-01 在 經過重新計算後,認為可能是島弧來源的碎屑磷灰石 AFT 年代為 6.8 Ma,確實在 島弧年代的範圍內。然而,本文於 5-1 節曾提到,由於火山島弧的火成岩噴發後 快速冷卻,因此若為同一次噴發事件形成的火成岩,其 AFT 與 ZFT 年代應相仿。 可是 MDJ-01 代表島弧來源的 AFT 年代(6.8 Ma),以及 ZFT 的 P1 年代(8.5 Ma), 兩者之間差距約2Ma,本研究認為AFT與ZFT年代都有可能是混合年代,包括 火山島弧前後兩期年代的混合(7~8 Ma 與 4.2 Ma), 抑或是島弧來源與造山帶來 源的碎屑物混合。

首先,AFT 年代可能為混合年代的原因,本研究認為和不同火山噴發年代混 合有關。都鑾山層再積火山碎屑岩(epiclastic sandstone)的鋯石鈾-鉛定年年代包 含兩個年代,分別是 4.3±0.3 Ma 與 8.0±0.9 Ma (Chen et al., 2023),代表在 8.0 百 萬年前至 4.3 百萬年前之間可能都有火山活動發生,因此 AFT 年代(6.8 Ma)可 能是綜合多起火山噴發事件的年代。另一種可能為磷灰石無自發核飛跡磷灰石顆 粒(no)多所導致,本研究總共挑出 35 顆島弧來源的磷灰石顆粒,其中有 18 顆 無自發核飛跡磷灰石顆粒,佔比高達 50% (表 5-2)。本文於 5-2-1 節提及,自發 核飛跡的數量會影響年代誤差,因此 MDJ-01 的島弧來源 AFT 年代,可能受到年 代誤差大影響,導致 4.3 Ma 與 8.0 Ma 的磷灰石年代在計算時被擬合成 6.8 Ma。

至於 ZFT 年代可能為混合年代的推測如下:本文於 5-2-1 節提及馬達吉達溪 所有砂岩樣本的 ZFT P1 年代可能都是屬於造山帶來源的混合年代,此混合年代 包括少量的完全癒合年代與較大量的部分癒合或未癒合年代。然而,MDJ-01 樣 本和其他砂岩樣本 (MDJ-02~13) 不同的是,前者含有較多來自火山島弧的碎屑 (Lv+F)(49%),後者主要為造山帶來源的碎屑物,幾乎沒有島弧來源的物質, 因此在解釋核飛跡年代時需考量沉積物來源。依據火山岩「AFT 年代與 ZFT 年代 應相近」的基礎,樣本 MDJ-01 中島弧來源的 AFT 年代為 6.8 Ma,代表火山碎屑 的 ZFT 年代應接近 6.8 Ma。以造山帶來源的核飛跡癒合程度來說,6.8 Ma 屬於完 全癒合年代(圖 5-2),因此本研究推測島弧來源的 ZFT 年代可能跟造山帶來源的 完全癒合 ZFT 年代相近,而在 BINOMFIT 擬合成一個混合年代 (P1)。若此推測 成立,則樣本 MDJ-01 的 ZFT P1 年代代表的意義為:造山帶來源的完全癒合 ZFT 年代,以及島弧來源的 ZFT 年代,兩者混合的峰值年代。

另一種可能性為溶蝕效應,根據 Shao et al. (2015)對於奇美火成雜岩進行錯 石鈾-鉛定年與鉿同位素 (Hf)分析,認為除了來自北呂宋島弧的鋯石之外,尚有 來自華夏陸塊的繼承鋯石,前者年代較年輕且鈾濃度較低,後者年代較老且鈾濃 度較高。以溶蝕時間來說,前者所需的溶蝕時間較長,後者若溶蝕時間太長則可 能導致顆粒崩解而無法觀察計數。由於在製作薄片時,無法用肉眼區分岩漿鋯石 與繼承鋯石,可能一個鋯石薄片當中就混雜了兩種鋯石,所以即便對於單一樣本 製作多個薄片,並分配不同的溶蝕時間,也可能難以計算到所有年代群的 ZFT 年 代 (Naeser et al., 1987)。因此,可能是溶蝕效應導致較年輕的年代族群未能被觀 察到,抑或是較老的年代族群較顯著,導致 ZFT P1 年代產生偏差。

若 AFT 年代 6.8 Ma 為火山碎屑年代,則代表火山噴發事件發生於 6.8 Ma。 Lai et al. (2016)統整全段海岸山脈的 ³⁹Ar/⁴⁰Ar 定年年代,將海岸山脈劃分成四

個火山並推估其最年輕的噴發年代,由北而南分別是月眉火山(7.2 Ma)、奇美火山(4.2 Ma)、成廣澳火山(6.2 Ma)以及都鑾山火山(8.5 Ma)。然而, Chen et al. (2023)於泰源盆地北側的鱉溪剖面採集再積性火山碎屑岩(樣本編號 0914-1),並分析其錯石鈾-鉛年代。該樣本的岩漿錯石(≤15 Ma)有兩個鈾-鉛年代,分別是4.3±0.3 Ma(n=7, MSWD=1.1)與8.0±0.9 Ma(n=6, MSWD=3.2),其餘皆為繼承錯石(>15 Ma)(Chen et al., 2023),因此將成廣澳火山最年輕噴發年代修正為4.3 Ma。本研究樣本 MDJ-01位於泰源盆地中,根據Lai et al. (2016)對於四座火山的區域劃分,泰源盆地周圍的火山包含成廣澳火山以及較南側的都 鑾山火山(圖 5-12)。而泰源盆地的古水流向大致呈由北向南(Lai et al., 2021), 且都鑾山火山的最年輕噴發年代為8.5 Ma,不足以提供6.8 Ma的火成岩,因此本研究認為 MDJ-01的火山碎屑應該是來自成廣澳火山。



圖 5-12 海岸山脈火山分布範圍。灰底斜體字代表火山最年輕的噴發年代。(修改

自 Lai et al., 2016)

造山帶來源碎屑沉積物 AFT 與 ZFT 年代

造山帶來源的碎屑沉積物 AFT 有兩個峰值年代,PI 為 12.0 Ma,屬於完全癒 合年代,P2 為 65.7 Ma,屬於部分癒合或未癒合年代。首先,由癒合程度可以知 道,源區當時出露岩層的最高變質溫度> 135°C,同時也有< 135°C的岩層出露, 對照圖 5-5 可知當時出露的岩層岩性包括沉積岩、硬頁岩、板岩。砂岩岩象分析 結果顯示,佔比較多的岩屑為硬頁岩岩屑(7%)與火成岩岩屑(Lv+F)(49%), 沉積岩岩屑(2%)與板岩岩屑(1%)含量較少(表 4-2)。AFT 的 P2 屬於部分癒 合或未癒合年代,代表其源區岩性應為沉積岩層。至於 P1 年代雖然屬於完全癒 合年代,但和 MDJ-02 的 P1 年代(5.2 Ma)相比,兩樣本沉積年代僅相差 0.5 Ma, 但兩者的 AFT P1 年代差距達 7 Ma 之多。若以蕃薯寮層其他砂岩樣本(MDJ-02 ~06)之間的沉積年代與 AFT P1 年代來看,即便 MDJ-02 與 MDJ-06 的沉積年代 相差約 0.2 Ma,但兩者的 AFT P1 年代來看,即便 MDJ-02 與 MDJ-06 的沉積年代 相差約 0.2 Ma,但兩者的 AFT P1 年代也僅相差約 1.4 Ma。因此,MDJ-01 的 AFT P1 年代為何與其他砂岩樣本的 AFT P1 年代差距較大,以下將對於此定年結果提 出三種解釋:

(1) AFT P1 僅代表硬頁岩年代:本文於 5-2-1 節提到,本研究砂岩樣本的 AFT P1 年代可能是混合年代,是由硬頁岩與板岩的 AFT 年代擬合而成 的峰值年代(5-2-1 節,A2),因此可能會因為岩屑的比例而導致計算結 果產生偏差。由砂岩岩象分析的結果來看,MDJ-01 的硬頁岩(7%)含 量較板岩(1%)多(表 4-2),但此時板岩含量甚少,可能使得板岩的 AFT 年代族群不夠顯著,而無法單獨被軟體擬合成一個峰值年代。另外, 由於硬頁岩岩屑有時可觀察到初始葉理,而硬頁岩與板岩的變質程度又 是屬於連續漸變的關係,因此僅用肉眼觀察有時難以區分葉理較明顯的 硬頁岩與板岩岩屑,可能導致在岩象分析時,將具有明顯葉理的硬頁岩 岩屑歸納為板岩岩屑,使得板岩岩屑的比例被高估。由此推測,MDJ-01 的 AFT P1 年代(12.0 Ma)可能僅代表硬頁岩的 AFT 年代,和其他砂岩 樣本的 P1 屬於混合年代不同。

- (2) AFT P1 受部分癒合年代影響:根據反剝蝕定律,越底部的樣本 AFT 年代應越老,因此 MDJ-01 造山帶來源的 AFT 年代應老於 MDJ-02 的 AFT P1 年代(5.2 Ma)。另外,相較於其他砂岩樣本收集到最高變質度的岩屑為板岩,此樣本含有最高變質度的岩屑為硬頁岩,代表源區岩層出露的變質度相對較低,因此部分癒合的年代可能佔比相對較高。原本 MDJ-01 的 AFT 年代就應該比其他砂岩樣本的 AFT 年代老,再加上岩屑的變質溫度較低,部分癒合年代比例可能較高,導致 AFT 年代(12.0 Ma) 亦可能受到部分癒合年代的影響,使得完全癒合年代值產生偏移。
- (3) 晶型無法明確區分礦物來源:雖然島弧距離盆地較近,但在搬運過程中 亦可能發生礦物破裂的情況;同時,由於本研究將砂岩樣本送至中國河 北省廊坊進行分選,礦物的分選過程中會使用到壓碎機,可能導致礦物 晶體破碎,因此若只用晶型分辨礦物來源,可能無法良好區分島弧來源 與造山帶來源的磷灰石。所以即便使用晶型將磷灰石進行細分,仍可能 有部分島弧來源的磷灰石沒有被挑出來,使得 P1 為兩個來源的混合年 代而導致年代值偏移。

若 12.0 Ma 僅代表硬頁岩的 AFT 年代,由於 AFT 的封存溫度約 135°C,而硬 頁岩的變質溫度約 160~230°C,可見硬頁岩的變質溫度略高於 AFT 的封存溫度, 代表 AFT 年代接近山脈初始抬升的年代。Chen et al. (2019)利用砂岩岩象分析 與前人熱定年數據回推脊樑山脈的冷卻路徑,發現脊樑山脈玉里帶的初始抬升時 間約為 12.2±0.5 Ma,脊樑山脈太魯閣帶的初始抬升時間約為 11.1±0.7 Ma(圖5-8), 而本研究砂岩樣本記錄到最老的 AFT 完全癒合年代約為 12.0 Ma,與 Chen et al. (2019)估計的山脈初始抬升時間相近。由 MDJ-01 的岩象分析結果可知,沉積 盆地在 4.0 Ma 時 (MDJ-01 沉積年代)已經接收到硬頁岩岩屑,但尚未收到大量 的板岩岩屑。觀察脊樑山脈在 4 Ma 時出露的岩層,可知當時僅在中段脊樑山脈 (玉里帶)有硬頁岩層出露,且板岩層亦逐漸開始出露,而北段脊樑山脈(太魯

閣帶)仍出露沉積岩層,南段脊樑山脈可能尚未開始抬升(Chen et al., 2019;圖 5-8)。因此本研究認為樣本 MDJ-01 接收到的硬頁岩應來自脊樑山脈玉里帶,且 可能記錄臺灣造山帶初始抬升年代。

5-3 礫石核飛跡年代意義

礫石的核飛跡癒合程度判別和砂岩有所不同,與形成的機制有關。砂岩是收 集來自河流流域中,所有被侵蝕岩層的碎屑物,所以砂岩樣本中含有來自不同岩 層的碎屑物,而不同岩層的熱歷史也不盡相同,故砂岩熱定年的結果反映多個岩 層混合的年代,因此砂岩是以年代作為區分依據(5-2節)。礫石是來自母岩侵蝕 後沉積於盆地中的大岩塊,因此礫石的熱定年年代可以直接反映母岩的冷卻與剝 蝕歷史(Malusà and Fitzergald, 2019)。由於礫石反映單一母岩的特性,故其核飛 跡癒合程度的判斷方式和岩層(bedrock)核飛跡的判斷方式相同,除了根據年代 值進行劃分之外(圖5-2),尚需要考慮顆粒年代的分散程度。若擬合結果呈現單 一峰值,即代表礫石的母岩受到單一熱事件影響且為完全癒合,如果此峰值年代 <12 Ma,該年代屬於完全癒合年代;若擬合結果呈現多峰值年代分布,則代表該 礫石的母岩受到熱事件產生部分癒合。

本研究僅於馬達吉達溪剖面的八里灣層底部的崩積礫岩層當中,採集一顆變 質砂岩礫石來進行 AFT 與 ZFT 定年,樣本編號為 MDJ-07。此樣本的 AFT 定年 結果呈單一峰值年代分布,屬於完全癒合年代為 2.8 Ma; ZFT 定年結果呈多峰值 年代分布(表 4-1),且 P1 年代介於 12~25 Ma 之間,代表該礫石的母岩在蓬萊 造山運動的變質過程中僅達到 ZFT 部分癒合帶 (PAZ),也就是該礫石經歷的最 高變質溫度大約介於 200~260°C之間(圖 5-13)。

前人研究認為,馬達吉達溪八里灣層底部的礫岩層具基質支持結構,夾捲曲 的崩移岩層,且部分岩塊與沉積物來自東側火山島弧,因此推斷是地震導致崩移 作用的堆積物(陳文山等,2006c)。陳文山(2009)依據海岸山脈沉積岩沉積時 間的南北差異,推測北段海岸山脈的蕃薯寮層可能因為距離造山帶較近,較早接 收到造山帶的碎屑沉積物,導致其沉積年代比南段的蕃薯寮層還老。且北段蕃薯 寮層不含 Gr. tosaensis,但南段蕃薯寮層中可以發現 Gr. tosaensis,因此該研究推 測南段海岸山脈八里灣層底部的崩積礫岩層沉積物源可能來自大陸斜坡至上部深

海沖積扇的環境(陳文山,2009)。此時的古水流方向由北向南,代表該礫石應該 是來自泰源盆地以北的地區,根據當時盆地的相對地理位置(圖 5-14),本研究 推測樣本 MDJ-07 可能原本剝蝕自脊樑山脈的岩層,但由於此礫石層曾堆積於北 段海岸山脈深海上部沖積扇河道的礫岩層(水璉礫岩),因此以下將與北段海岸山 脈的礫石 AFT 和 ZFT 定年結果相互比對。

Metamorphic grade	Lithology	Buried temperature	Sample
15℃		ZFT unreset AFT unreset T: <80 ℃	
Diagenetic facies	Sedimentary 80°C rock	ZFT unreset AFT partial reset T: 80~135℃	
200℃	160°C	ZFT unreset AFT total reset T: 135~200°C	
Prehnite-Pumpellite	230°C 230°C	ZFT partial reset AFT total reset T: 200~260°C	★ MDJ-07
facies	260°C		
Greenschist facies 500℃	400°C	ZFT total reset AFT total reset T: >260°C	
	Schist		

圖 5-13 樣本 MDJ-07 最高變質溫度區間。

陳形軒(2021)於北段海岸山脈鹽寮坑溪剖面採集多顆變質砂岩礫石與砂岩 進行 AFT 與 ZFT 分析,該研究礫石樣本的 AFT 年代皆屬於完全癒合年代,ZFT 年代皆屬於部分癒合年代,與本研究 MDJ-07 礫石樣本的 AFT 和 ZFT 定年結果相 近。MDJ-07 的沉積年代約 2.04 Ma,由於此礫石層崩落自北段海岸山脈的礫岩層, 代表礫石樣本應該於 2.04 Ma 之前就已經自源區岩層剝蝕並堆積於北段海岸山脈 的水璉礫岩層中,換言之,MDJ-07 真正的沉積年代應該老於 2.04 Ma。根據前人 與本研究的 AFT 和 ZFT 結果可知,海岸山脈沉積盆地中的沉積岩並沒有受到沉 積後癒合(陳彤軒,2021;李政熹,2021;Kirstein et al.,2010;Kirstein et al.,2013), 所以礫石的 AFT 和 ZFT 年代可以代表母岩的熱歷史。由 AFT 年代可知,礫石的 母岩於 2.8 Ma 時通過 AFT 封存溫度(135°C),代表 2.8 Ma 時此礫石尚未被剝蝕, 因此本研究推測樣本 MDJ-07 真正的沉積年代應介於 2.8~2.04 Ma 之間。對比北 段海岸山脈在 2.8~2.04 Ma 之間沉積的礫石樣本 (YL-05、07、08),可見其 AFT 年代大致介於 3.1~2.8 Ma 之間(陳彤軒,2021),與 MDJ-07 的 AFT 年代(2.8 Ma) 相近,因此本研究認為樣本 MDJ-07 應崩落自北段海岸山脈的礫石層,且兩者應 來自脊樑山脈上相同的岩層。

陳形軒(2021)計算礫石與砂岩的剝蝕冷卻速率,發現兩者的冷卻路徑不同。 礫石的源區岩層冷卻速率在 3~4 Ma 以前較慢,大約於 3~4 Ma 時開始加速;砂 岩的源區岩層冷卻速率在 2.7 Ma 以前約 25~60 °C/m.y., 2.7 Ma 以後開始加速。 砂岩源區岩層的冷卻路徑與 Chen et al., (2019) 推算脊樑山脈玉里帶的冷卻路徑 相似,而礫石冷卻路徑由於初期抬升速率較慢,以及出露岩性變質度較低等因素, 因此該研究推測礫石可能來自脊樑山脈太魯閣帶的上覆岩層,砂岩則來自脊樑山 脈玉里帶的上覆岩層(陳形軒,2021)。若樣本 MDJ-07 與北段海岸山脈礫石層的 來源一致,根據陳形軒(2021)的推測, MDJ-07 的來源亦可能是來自太魯閣帶 的上覆岩層。

MDJ-07 的真實沉積年代應介於 2.8~2.04 Ma 之間,假設其沉積於北段海岸 山脈的年代為 2.42 Ma (2.8~2.04 Ma 中間值),且地表溫度為 15°C,則此礫石母 岩在 2.8~2.42 百萬年前之間的冷卻速率約為 316 °C/m.y.,與陳彤軒 (2021)礫 石樣本的冷卻速率相近。對照脊樑山脈冷卻速率與出露岩性的變化,可知在 2.8 ~2.42 百萬年前之間北段與中段脊樑山脈冷卻速率與出露岩性並不相同。以冷卻 速率來看,北段脊樑山脈的冷卻速率約 19 °C/m.y.,中段脊樑山脈的冷卻速率約 27 °C/m.y. (Chen et al., 2019; **圖 5-8**),可以發現礫石的冷卻速率遠大於脊樑山脈 的冷卻速率。本研究認為可能是因為臺灣造山帶抬升速率快,且礫石距離源區較

近、搬運時間較短等因素,使得沉積年代無法良好控制,只要稍有偏差就可能導 致極大的冷卻速率變化,因此本研究將不採用冷卻速率作為判斷源區的依據。透 過脊樑山脈出露岩性來看,北段剛出露硬頁岩層,推測其變質溫度應大致介於 160 ~230°C之間,而中段則是剛出露板岩層,推測其變質溫度應大致介於 230~260°C 之間。樣本 MDJ-07 歷經的最高變質溫度應介於 200~260°C之間,對比脊樑山脈 當時出露的岩層變質溫度,應較符合中段脊樑山脈的變質溫度,也就是玉里帶的 變質溫度。然而,陳彤軒(2021)推測礫石來源為太魯閣帶,與上述推論不符。 由於本研究僅採集一顆礫石進行定年,且此礫石位於崩積礫岩層中,不僅統計數 量不足,沉積年代的控制也較困難,因此我們僅能得知此變質砂岩礫石應該是來 自脊樑山脈,但無法得知其確切的來源為玉里帶或太魯閣帶的上覆岩層。

綜上所述,礫石最一開始剝蝕自脊樑山脈的變質岩層,約於2.8 百萬年至2.04 百萬年之間先堆積於北段海岸山脈的沉積盆地中,後因地震活動頻繁,導致礫石 自北段海岸山脈的沉積盆地崩落,並堆積至南段海岸山脈的沉積盆地中(圖5-14)。 然而,由於本研究僅採集一顆礫石,且該礫石位於崩積礫岩層中,統計數量不足 以提供較明確的剝蝕冷卻歷史,因此本研究提供上述推測以供參考。



圖 5-14 礫石樣本 MDJ-07 來源示意圖(來自北段海岸山脈)。藍色區域為古臺灣 造山帶,橘色區域為火山島弧(現今海岸山脈與綠島、蘭嶼),紅色星號為北段海 岸山脈鹽寮坑溪位置,綠色星號為南段海岸山脈泰源盆地位置,黃色箭頭代表礫 石搬運路徑。左圖為3 Ma 以前的礫石搬運路徑,可見礫石由造山帶剝蝕並堆積 於北段海岸山脈;右圖為2~3 Ma 之間的礫石搬運路徑,此時因地震頻繁,導致 原本堆積於北段海岸山脈的礫石崩落並堆積於南段海岸山脈中。(修改自 Chen and Wang, 1988b)

5-4 遲滯時間

5-4-1 遲滯時間的定義與應用



遲滯時間(Lag time)概念被廣泛運用於碎屑熱定年的研究(Garver *et al.*, 1999; Bernet *et al.*, 2001),所謂的遲滯時間是指「岩體抬升時,自埋藏溫度開始低於封 存溫度之後,隨之經過抬升、剝蝕、搬運至沉積於盆地中的這段時間」,也就是自 岩體通過封存溫度的時間(AFT/ZFT age; t_c),隨後被抬升至出露地表的時間(t_e), 到剝蝕形成碎屑沉積物並堆積於盆地中的沉積年代(Depositional age; t_d)(式 5-1)。 然而,由於搬運時間相對於抬升時間較微不足道,尤其臺灣山脈地形陡峭,碎屑 物搬運到盆地堆積的時間,可能僅數萬至數百年,搬運時間皆小於定年年代的誤 差,因此遲滯時間的計算通常可將搬運時間忽略不計($t_e=t_d$)(**圖 5-15**)。

 $Lag time = t_c - t_d \qquad (\exists 5-1)$

5-4-1-1 遲滯時間的分布與隱示

根據 Malusà and Fitzgerald (2019) 統整遲滯時間的應用方法與實例研究,該研究對於理想的遲滯時間分布共歸納出7個前提假設,分別如下:

- 1. 碎屑物的熱定年年代反應源區山脈的冷卻歷史。
- 2. 封存溫度等溫線應於岩體剝蝕期間保持固定。
- 盆地中碎屑物應來自單一源區,剝蝕過程中來源沒有改變。
- 4. 單一源區或流域中的礦物豐度(Fertility)應一致,沒有區域性的差異。
- 沉積物均勻混合,顆粒年代分布不受水力淘選影響。
- 6. 搬運時間忽略不計。
- 7. 碎屑沉積物熱定年年代應保留源區山脈的年代特性。

當盆地符合上述7個條件時,盆地中碎屑沉積物隨著沉積年代越年輕,熱定年年 代也會越年輕(圖 5-16A)。反之,只要有一個條件不符合,則熱定年年代隨沉積 年代的變化可能會變得比較不規律(圖 5-16B、C、D)。以下將7項假設整理並 提出可能造成遲滯時間分布不規律的原因與結果(Malusà and Fitzgerald, 2019):

- (L1)河流流域改變(圖 5-16B):當河流流域改變時,可能導致河流侵蝕的岩層不同,進一步影響盆地中的碎屑沉積物遲滯時間分布。由於不同岩層所經歷的熱歷史不盡相同,造成盆地中連續剖面的熱定年年代向上變化不規律。
- (L2)斷層活動(圖 5-16B):源區的斷層活動可能導致剝蝕的岩層改變,進而 使得盆地中碎屑沉積物的遲滯時間分布不規律。例如逆斷層活動將使得 其它岩層逆衝至原本的岩層之上,導致遲滯時間分布紊亂。
- (L3)源區增加(圖 5-16B):當沉積物來源增加,不同岩層的碎屑物剝蝕進入 盆地,也就代表著不同熱歷史的訊號集合於盆地當中,就會導致單一砂 岩樣本記錄著不同源區的熱定年年代。假設原本只有一個沉積物來源, 後來又新增了一個沉積物來源,則樣本的熱定年年代可能會向新增的源 區山脈熱定年結果偏移。舉例來說,原本的源區岩層熱定年結果較年輕, 後來新增的源區岩層熱定年結果較老,則盆地中的碎屑沉積物原本只呈 現較年輕的熱定年年代,在新的源區加入後,兩者的碎屑物混合會導致 碎屑沉積物的熱定年年代偏老。
- (L4)礦物豐度差異(圖 5-17A):此情形易發生於混合源區,當一個盆地所接 收到的碎屑沉積物是來自於多個源區時,不同源區岩層的礦物豐度會影 響熱定年分析結果。舉例來說,當A源區的鋯石含量較多,B源區的鋯 石含量較少,在兩個源區碎屑物供應量相近的情況下,盆地中的碎屑熱 定年結果會以A源區的訊號為主,B源區的訊號較弱,可能導致顆粒年 代的擬合結果產生偏移,或產生B源區的年代訊號被覆蓋的情況(Malusà et al., 2017)。
- (L5) 封存溫度等溫線改變(圖 5-17B):山脈抬升或斷層活動時,突然的地形 變動會造成地溫等溫線短暫的移動,待地形穩定時,等溫線會逐漸回歸,

而移動的等溫線可能造成同一個岩層的溫度有所變化,進而導致熱定年 結果受到影響,使得該岩層所剝蝕的碎屑物堆積於盆地中會造成遲滯時 間分布不規律。

- (L6)碎屑物供應量:此情形易發生於混合源區,當一個盆地所接收到的碎屑 物是來自於多個源區時,碎屑物供應量較多的源區,其熱定年年代訊號 較清楚,反之,碎屑物供應量較少的源區,其熱定年年代訊號容易被覆 蓋,使得碎屑樣本定年年代無法真實反映源區山脈的熱歷史。
- (L7)水力淘選影響:單一樣本使用多重定年法時必須注意,由於源區的顆粒年代和顆粒大小相關,而礦物受到水力淘選會因顆粒大小與形狀而有所不同,會因此導致沉積盆地中不同礦物的定年結果產生偏差。舉例來說, 錯石或磷灰石是以推移(Bed load)的方式搬運,而雲母因平板狀結構會以懸浮(Suspended load)方式搬運,前者沉降速率快,後者沉降速率慢,因此同一個連續剖面的砂岩樣本中,相同的熱事件訊號,會較早反應於錯石與磷灰石的熱定年年代,而雲母的熱事件訊號則較晚出現。
- (L8)源區有火成岩侵入:當源區有岩漿岩侵入,則不論是岩漿岩抑或是圍岩, 都可能因為侵入事件而導致年代重置,相對的,距離侵入岩較遠的岩層 則保留原本的冷卻年代,因此在盆地碎屑物的遲滯時間分布圖當中,可 以發現一個穩定峰值(熱定年年代不隨沉積年代變化;Stationary peak), 該穩定峰值即代表火成岩侵入的年代,至於其它變動峰值(熱定年年代 隨沉積年代變化;Moving peak)則代表未受侵入事件影響的岩體冷卻年 代。
- (L9)沉積後癒合(圖 5-16C):當沉積物深埋於盆地底部,可能因埋藏溫度較高而導致底部的礦物受熱癒合,待其冷卻後才會逐漸降溫並記錄冷卻年代,此時該剖面的樣本遲滯時間分布將呈現向上變年輕的趨勢,且受熱癒合的樣本熱定年年代會年輕於樣本的沉積年代。
- (L10) 再積沉積物加入(圖 5-16D):當原本的沉積層序因為斷層活動而抬

升,並受到河流侵蝕而供應碎屑物進入沉積盆地中,則盆地中的碎屑沉 積物隨著沉積時間越年輕,熱定年年代會越來越老,形成相反的遲滯時 間分布趨勢。值得注意的是,沉積後癒合的岩層也是向上變老的遲滯時 間分布,兩者之間的差異在於,受到沉積後癒合樣本,其熱定年年代會 年輕於樣本沉積年代,反之,再積沉積物的加入,由於沒有受到沉積後 加熱的影響,所以仍保留源區岩層特性,因此其熱定年年代仍老於樣本 沉積年代。



圖 5-15 遲滯時間示意圖。(Bernet and Garver, 2005)



■ 5-16 典型與非典型遲滯時間分布示意圖。(A)理想型;(B) 樣本熱定年年代 突然變老,可能是河流流域改變或斷層活動導致;(C) 樣本熱定年年代年輕於沉 積年代,且越往上越老,代表沉積岩可能受到沉積後癒合影響;(D) 樣本熱定年 年代向上先變年輕再變老,且年代皆老於沉積年代,代表可能有再積性的碎屑沉 積物。



■ 5-17 遲滯時間分布影響原因示意圖。(A)源區礦物豐度的差異將影響碎屑熱 定年訊號:紅色與藍色山脈分別為A與B源區,當兩者礦物豐度相等時(case 1), 盆地中的碎屑物將同時出現兩個源區的熱定年訊號,反之,若A源區的礦物豐度 較B源區低(case 2),當A、B源區供應等量的沉積物至盆地中,由於A源區供 應的礦物量較B源區少,因此碎屑沉積物熱定年結果中,A源區熱定年訊號較不 明顯,僅出現B源區的熱定年年代,可能導致數據的誤解;(B)斷層活動導致封 存溫度等溫線撓曲:(a)為逆斷層,(b)為正斷層,左圖為斷層突然移動時,地 溫等溫線隨著斷層移動方向撓曲,待地層穩定不動後,等溫線會逐漸回歸至靜止 狀態的位置如右圖。(Malusà and Fitzergald, 2019)

5-4-1-2 冷卻速率與剝蝕速率

將樣本計算得到的遲滯時間(式 5-1),加入封存溫度(T_c)、地表溫度(T_e) 與地溫梯度(Geothermal gradient)後,可以分別計算岩層的冷卻速率 R_c (式 5-2)與剝蝕速率 R_e (式 5-3)。

$$R_{c} = \frac{(T_{c} - T_{e})}{(t_{c} - t_{d})}$$
 (£ 5-2)





以礫石而言,由於礫石反映單一母岩的特性,因此利用礫石的完全癒合年代 所計算得到的遲滯時間、冷卻速率以及剝蝕速率,均可直接反應源岩 (protolith) 的剝蝕冷卻歷史。但砂岩因為匯聚了流域範圍內所有岩層的岩屑,利用其完全癒 合年代所計算得到的遲滯時間、冷卻速率以及剝蝕速率,都只能代表源區整體的 平均剝蝕冷卻速率,而非單一源岩的剝蝕冷卻速率 (Bernet, 2019)。

如針對單一樣本使用兩種不同封存溫度的熱定年法(例如 AFT 與 ZFT),便 可推算源岩自 ZFT 封存溫度冷卻至 AFT 封存溫度(260~135℃)的冷卻速率, 以及自 AFT 封存溫度冷卻至地表(135~15℃)的冷卻速率。如此一來,可以進 一步觀察源岩在不同溫度範圍內,是否經歷不同的冷卻速率,並且可以分辨源區 岩層在出露地表前是加速、減速,抑或是等速冷卻(圖 5-18)。



圖 5-18 源區岩層自 ZFT 封存溫度至地表的冷卻路徑示意圖。藍色圓點代表樣本 ZFT 年代,橘色圓點代表樣本 AFT 年代,綠色圓點代表樣本沉積年代。(A)樣 本自 5 Ma 以來皆呈等速冷卻;(B) 樣本在約 4 Ma 時冷卻速率降低;(C) 樣本在 約 2 Ma 時冷卻速率增加。由圖可知,多了 AFT 年代可以較精準的還原源岩在 260 ~135℃之間,以及 135~15℃之間的冷卻速率變化。

5-4-1-3 遲滯時間等時線

上述可知,由遲滯時間可計算源區山脈剝蝕速率,且兩者呈反比。因此繪製 樣本的遲滯時間圖之後,可以透過遲滯時間隨層序的變化,與遲滯時間等時線相 互比對,並且探討源區山脈的剝蝕速率變化(圖 5-19, Malusà and Fitzgerald, 2019)。

- 遲滯時間隨層序向上縮短:源區山脈的冷卻剝蝕速率加快,通常被認為 是發育中的造山帶特徵。
- 遲滯時間不隨層序變化(平行等時線):源區山脈的冷卻速率不變,代 表造山帶可能處於穩定剝蝕態。
- 遲滯時間隨層序向上增加:源區山脈的冷卻剝蝕速率減慢,指示造山運 動後期,造山帶抬升速率趨緩。

遲滯時間變化趨勢僅適用於單一源區,且定年年代並非混合年代的情況。若 碎屑物來自多個源區,除非能夠辨識出各個源區的年代訊號,否則無法使用上述 方法辨別源區山脈的剝蝕速率變化;若定年年代屬於混合年代,則該年代不具地 質意義,除非使用其他證據輔助說明(其他定年資料等),否則僅能觀察大概的剝 蝕速率變化,較難明確辨別出個別來源的剝蝕冷卻歷史。



圖 5-19 遲滯時間的變化趨勢及其涵義。左圖為遲滯時間示意圖(圖 5-15),右圖 為遲滯時間變化趨勢示意圖,紅色箭頭代表加速剝蝕,藍色箭頭代表剝蝕穩定態, 綠色箭頭代表減速剝蝕。
5-4-2 後前淵盆地碎屑沉積物的遲滯時間變化

本研究以馬達吉達溪砂岩與礫石樣本 AFT 和 ZFT 的 P1 年代為橫軸, 沉積年 代為縱軸, 將遲滯時間進行投圖, 發現樣本的整體 AFT 年代並沒有向上變年輕, 而是在沉積年代約2 Ma 時, 樣本 AFT 年代突然變老且遲滯時間增加, 之後才又 逐漸向上變年輕(圖 5-20、圖 5-21), 代表 5-4-1-1 節提及的7 個假設中, 至少有 一個條件不符合,本節將針對各種可能造成遲滯時間分布不規則的原因進行探 討。

首先, 樣本的 ZFT 年代多屬於未癒合或部分癒合年代, 因為無法有效區分樣 本的癒合程度,且部分癒合的年代不具地質意義,以及鋯石各顆粒之間α破壞程 度不同以及鈾濃度的差異,使得鋯石易受到溶蝕過程影響而導致核飛跡計數上的 誤差 (Bernet and Garver, 2005; **圖 5-9**),因此本研究便以 AFT 年代來觀察並解析 砂岩遲滯時間的變化原因。

AFT P1 年代皆屬於完全癒合年代,保留源區山脈的熱歷史訊號,因此可用於 探討源區岩層的冷卻歷史。單看砂岩樣本的 AFT P1 年代,可見 MDJ-02~MDJ-06 以及 MDJ-08~MDJ-13 共 11 個樣本的 AFT 年代皆介於 3~5 Ma 之間,若 AFT 年代大致介於一定範圍內且不隨沉積年代向上變化,則源區可能有火成岩體出露 而成為其中一個來源 (5-4-1-1 節, L8)。但是在砂岩岩象分析結果中,上述的 11 個樣本火成岩岩屑 (Lv) 與長石 (F) 含量都很低,因此沉積物是來自造山帶變 質岩層的碎屑物為主 (表 4-2),所以首先排除源區有火成岩侵入的可能性,意即 砂岩樣本的遲滯時間皆反映了源區山脈變質岩的剝蝕冷卻歷史。

自 MDJ-02 (沉積年代 3.47 Ma) 至 MDJ-06 (沉積年代 3.25 Ma), AFT 年代 由 5.2 Ma 向上變年輕至 3.8 Ma,呈現向上變年輕的趨勢,樣本遲滯時間亦由 1.7 m.y.減少至 0.6 m.y.,呈現向上減少的趨勢(圖 5-21)。而沉積年代 3~2 Ma 之間 存在崩積礫岩層,本研究並未採集該礫岩層的基質砂岩,僅採集一顆礫石 (MDJ-07),其 AFT 屬於完全癒合,且年代為 2.8 Ma。但在崩積礫岩層之上的砂

岩樣本 MDJ-08 則呈現了不同的趨勢,該樣本的沉積年代約 2.03 Ma,但AFT 年 代約為 4.7 Ma,相較於礫岩層之下的蕃薯寮層砂岩樣本的 AFT 年代更老,且遲滯 時間增加至約 2.7 m.y.(圖 5-21)。MDJ-08 (AFT P1 4.7 Ma)、MDJ-09 (AFT P1 4.5 Ma)、MDJ-10 (AFT P1 4.1 Ma)的 AFT 年代則呈現向上變年輕的趨勢,但到了 MDJ-11 (沉積年代 1.76 Ma),其 AFT 年代又再度變老為 4.7 Ma,隨後才又向上 變年輕(圖 5-21)。由遲滯時間分布圖可觀察到,自沉積年代 2 Ma 以後,不僅 AFT 年代突然變老 (由 3.8 Ma 變成 4.7 Ma),遲滯時間也突然增加 (由 0.6 m.y. 增加至 2.7m.y.)(圖 5-21)。



圖 5-20 本研究砂岩樣本 AFT 與 ZFT 遲滯時間分布圖。灰色區域為沉積後癒合年 代範圍,紅色區域為完全癒合年代範圍,黃色區域為部分癒合年代範圍,藍色區 域為部分或未癒合年代範圍。



圖 5-21 本研究砂岩與礫石樣本 AFT P1 遲滯時間分布圖。灰色區域為沉積後癒 合,紅色區域為完全癒合年代範圍,圓形為本研究的砂岩樣本,三角形為本研究 的礫石樣本,黑色虛線箭頭代表遲滯時間的變化趨勢。

由於馬達吉達溪的樣本多為砂岩,而砂岩又容易因為匯集多個岩層的岩屑, 導致 AFT 年代解釋上的困難,因此本研究加入前人的砂岩與礫石 AFT 年代一同 探討後前淵盆地的遲滯時間變化(圖 5-22)。由圖 5-22 的遲滯時間分布可觀察到 幾個現象:(1)約在沉積年代3.5 Ma 時才有較年輕(< 6 Ma)的 AFT 完全癒合 年代出現;(2)約在沉積年代2 Ma 以後開始出現 AFT 年代較老的砂岩且遲滯時 間呈現增加的趨勢;(3)沉積年代2 Ma 以前的遲滯時間分布較單一(AFT 年代 向上變年輕),2 Ma 以後的遲滯時間分布較混亂(AFT 年代隨時間變化不規律)。 整體的 AFT P1 遲滯時間分布在沉積年代2 Ma 開始有較明顯的差異,因此本研究 認為源區山脈可能在2 Ma 時受到地質事件影響,使得碎屑物在剝蝕或沉積的過 程與過去有所不同。

根據5-4-1-1節整理10項造成遲滯時間分布不規律的原因與結果(L1~L10), 後前淵盆地碎屑物 AFT 的遲滯時間變化趨勢較接近圖 5-16B 的分布,因此推測造 成遲滯時間在2 Ma 時明顯增加的可能原因包括流域改變(L1)、斷層活動(L2),

抑或是有新的沉積物來源注入盆地中(L3)。礦物豐度(L4)與封存溫度線的撓曲(L5)也可能影響遲滯時間分布,但以目前的資訊並無法推測過去山脈的封存 溫度線分布,以及源區山脈的礦物豐度。因此以下將針對「流域改變」、「斷層活動」以及「沉積物源的增加」三個面向進行探討。



圖 5-22 海岸山脈後前淵盆地 AFT P1 遲滯時間分布圖。灰色區域代表沉積後癒 合年代範圍,粉紅色區域代表完全癒合年代範圍,黃色區域代表部分癒合年代範 圍,圓形代表砂岩樣本,三角形代表礫石樣本,灰色點為 Kirstein *et al.*(2010,2013) 數據,綠色點為陳形軒(2021)數據,藍色點為李政熹(2021)數據,紅色點為 本研究數據。

流域改變

根據前人研究推測盆地的地理位置演化,泰源盆地於早上新世時應位於古臺 灣島的南方,而盆地東側則一直緊鄰呂宋島弧 (Chen and Wang, 1988b)。隨著菲 律賓海板塊向北推移,泰源盆地於晚更新世關閉。透過泰源盆地的古水流方向研 究可知,盆地中的古水流方向一直以來皆由北向南 (Chen and Wang, 1988b; Lai et al., 2021),盆地沉積期間古水流方向並未有重大的改變,因此本研究認為河流流 域並沒有太大的改變,主要的碎屑物應來自脊樑山脈東翼。另外,過去對於後前 淵盆地的砂岩岩象分析指出,後前淵盆地的沉積物大多來自脊樑山脈東翼的玉里 帶 (Chen et al., 2019),並且本研究針對砂岩樣本的岩象分析亦顯示,大部分的岩 屑皆屬於造山帶剝蝕而來的碎屑沉積物(表 4-2)。再者,以現今的河流分布來看, 位於造山帶東翼的河流流向大致呈向東的流向,且河流源頭均未溯及脊樑山脈西 側,尚未侵蝕雪山山脈以及西部麓山帶的岩層,因此本研究認為流域改變並非造 成遲滯時間分布不規律的主要原因。

斷層活動

透過砂岩岩象分析可見沉積年代 3.5~3 Ma 之間,板岩岩屑(Sl/Lt)有向上 增加的趨勢(由~5%增加到~35%),到了約2 Ma 時(MDJ-08)板岩岩屑突然 減少(~23%),2 Ma 之後的岩屑比例變化較不規律,但整體上的岩屑變質度呈 現向上增加的趨勢。對應 AFT 的 P1 年代峰值占比,發現3 Ma 以前的 P1 占比向 上遞增(由~53%遞增至~89%),2 Ma 時 P1 占比突然驟降(44%)後才又向上 遞增(圖 4-5)。對比岩屑比例與 AFT P1 年代百分比變化趨勢,本研究認為兩者 皆於2 Ma 時有明顯的轉折,因此推測樣本 AFT 年代可能受到不同岩屑占比影響, 當變質度較高的岩屑佔比高, AFT P1 百分比亦較高,而樣本 AFT 年代也較年輕。

對於沉積盆地中的岩屑變化,本研究提出一個可能的解釋為:4~3 Ma之間 應由同一個源區岩層剝蝕,至2 Ma 時源區可能有逆斷層活動,導致變質度較低 的岩層逆衝至原本的岩層之上,成為另一個新的來源提供部分癒合年代,使得碎

屑沉積物的 AFT 年代變老,且 P1 峰值年代百分比驟減。然而,以逆斷層的上下 盤冷卻速率而言,上盤的冷卻速率應較下盤快(圖 5-23)。若源區發生逆斷層活 動,則注入盆地中的碎屑物遲滯時間應較短,冷卻速率應較快,與本研究遲滯時 間的變化趨勢(變長)不符。因此本研究認為,斷層活動並非影響遲滯時間分布 的主要原因。



圖 5-23 逆斷層上下盤岩層冷卻速率示意圖。左圖為斷層未活動的狀態,上下盤 岩體皆以相同速率抬升;右圖為逆斷層發生後,上盤抬升速率相對較快,且提供 冷卻速率較快的碎屑物。

沉積物源的增加

沉積物源的增加可能導致兩個不同冷卻速率的岩體,同時提供碎屑物至沉積 盆地中,使得沉積盆地的遲滯時間分布不規律。沉積物源增加的可能原因包括: 流域改變、斷層活動、褶皺構造、山脈抬升時間不同,上述已排除流域改變與斷 層活動兩種可能性,因此以下將針對褶皺構造與山脈抬升時間進行說明。

首先,褶皺構造(如背斜)可能導致源區山脈軸部與翼部抬升冷卻速率不同, 因此當源區存在褶皺構造,可能使得不同冷卻速率的岩體同時剝蝕,並提供碎屑 物至沉積盆地中,使得沉積盆地中沉積物的遲滯時間分布不規律。大南澳片岩帶 整體為一複背斜構造(陳文山等,2016)。由脊樑山脈的 ZFT 年代分布可知,軸 部的 ZFT 年代較年輕且屬於完全癒合年代,翼部的 ZFT 年代較老且有部分癒合 帶的岩層出露(圖 5-24)。因此軸部可能出露變質度較高且冷卻速率較快的岩層,

翼部則出露變質度較低且冷卻速率較慢的岩層(圖 5-25)。

至於山脈初始抬升時間不同則可對應至目前脊樑山脈玉里帶與太魯閣帶,兩 者初始抬升時間與冷卻速率不盡相同(Chen et al., 2019),因此盆地可能在不同時 間接收到兩者所剝蝕的碎屑物,而記錄了不同的冷卻路徑。玉里帶約12.2 Ma 開 始抬升,而太魯閣帶則約11.1 Ma 才開始抬升(Chen et al., 2019),前者較早出露 AFT 完全癒合岩層。因此,造成2 Ma 以後遲滯時間增加的可能原因之一即為太 魯閣帶岩屑的加入。

除了上述可能的原因之外,菲律賓海板塊與歐亞板塊以順時針方向斜向碰撞, 導致造山帶由北向南發育(Suppe, 1981),也可能導致沉積物源的增加。透過前人 於現今脊樑山脈的 AFT 與 ZFT 定年研究可發現,脊樑山脈的 AFT 與 ZFT 年代由 北向南逐漸變老,代表北側的脊樑山脈較早出露剝蝕,越往南則越晚出露剝蝕(圖 5-26)。因此沉積盆地可能先接收到來自較北側脊樑山脈的碎屑物,之後造山帶逐 漸向南發育,使得盆地中來自山脈不同區域的碎屑沉積物混合,進而促使 AFT 年 代產生偏移,以至於樣本遲滯時間變化不符合理想的反剝蝕序列。



圖 5-24 臺灣造山帶 ZFT 年代分布圖。利用前人 ZFT 年代數據較密集的五個剖面 分別繪製 ZFT 年代分布,大多區域在脊樑山脈分水嶺以東的 ZFT 呈完全癒合年 代,且越東側的 ZFT 年代越年輕,顯示軸部出露變質度較高的岩層,而翼部出露 變質度較低的岩層。ZFT 年代數據引用自 Liu *et al.* (2001)、Willett *et al.* (2003)、 Fuller *et al.* (2006)、Hsu *et al.* (2016)、Shen *et al.* (2020)、Lee *et al.* (2022)。



圖 5-25 背斜軸部與翼部冷卻速率差異示意圖。背斜軸部冷卻速率快,較早出露 變質度較高的岩層,翼部冷卻速率較慢,出露岩層的變質度較軸部低。



圖 5-26 脊樑山脈東翼 AFT 與 ZFT 年代分布。藍色圓點為 AFT 定年樣本,橘色 圓點為 ZFT 定年樣本,左圖臺灣中間的黑色線條為臺灣東西側河流的分水嶺,右 圖則呈現脊樑山脈東翼(左圖黑色線條以東)的核飛跡樣本年代隨緯度的變化。 由右圖可見,越南側的脊樑山脈核飛跡年代越老,代表其較晚冷卻抬升。

5-5 源區山脈剝蝕冷卻歷史

後前淵盆地中沉積層序的遲滯時間大約在2 Ma 時明顯增加,根據 5-4-2 節的 推測,可能是由沉積物源的增加,或是河流侵蝕等因素導致。因此,本節將後前 淵盆地碎屑沉積物的遲滯時間分為兩部分來討論,分別是沉積年代 2 Ma 之前 (5-5-1 節)與2 Ma 之後(5-5-2 節),並且探討玉里帶的剝蝕冷卻歷史(5-5-3 節)。

5-5-1 沉積年代 2 Ma 之前的源區分析

由於砂岩的年代解釋需要考量較多因素(例如粒徑大小、水力淘選、混合年 代等),因此可以利用變質砂岩礫石的年代來建構源區可能出露的岩層。沉積年代 2 Ma 之前的礫石 AFT P1 年代數據皆來自陳彤軒(2021)於北段海岸山脈採集水 建礫岩中的礫石樣本(圖 5-27B),該研究採集的礫石沉積年代大約介於 3.4~1.8 Ma 之間,且 AFT 年代皆屬於完全癒合年代,ZFT 皆屬於部分癒合(表 5-3)。礫 石反映的是單一母岩的特性,代表當時源區岩層的變質溫度應大致介於 200~ 260°C之間。礫石的 AFT 年代大致向上逐漸變年輕(由 4.1 Ma 變年輕至 2.1 Ma)。 礫石的遲滯時間大都介於 0~1 m.y.之間,並無明顯變化,因此本研究推測老於 2 Ma 的礫石應該都來自單一來源,此來源的遲滯時間都介於 0~1 m.y.之間(圖 5-27B)。

沉積年代2 Ma 以前的砂岩樣本包括本研究的蕃薯寮層砂岩樣本(MDJ-01~ MDJ-06)、陳形軒(2021)的 YL-01 與 YL-06,以及 Kirstein et al.(2010)的 SM1、 SM4、HK1和 Kirstein et al.(2013)的 SH1、SH2(圖 5-27C)。由圖可見砂岩的 AFT 年代大致可以區分成兩群,第一群是位於 AFT 年代 12 Ma 附近的砂岩樣本 (MDJ-01、SM1、SM4、SH1、SH2),第二群是 AFT 年代小於6 Ma 的砂岩(圖 5-27C)。兩群砂岩的 AFT 年代差距甚大,第一群砂岩中的 MDJ-01 已於本文 5-2-2 節說明,認為該年代僅代表硬頁岩的冷卻年代,抑或是受到部分癒合年代的影響, 導致其 AFT 年代較其他砂岩樣本老,其變質溫度可能介於 160~230°C之間(圖

5-5)。其餘第一群砂岩的樣本皆為 Kirstein 等人的研究結果,該研究由於磷灰石 洗選結果不佳,計算顆粒較少,使得 AFT 年代誤差範圍較大,且可能受到部分癒 合年代的影響,導致其年代值偏老。該研究亦沒有針對樣本進行其他分析,因此 本研究認為該年代可能屬於混合年代而不具地質意義。

第二群砂岩的 AFT 年代大致介於 2~6 Ma 之間,且呈現隨層序向上變年輕的 趨勢(圖 5-27C)。在探討遲滯時間變化前,應先確認砂岩 AFT P1 年代是否代表 單一來源的年代(5-2-1節,A3)。若砂岩 AFT P1 年代代表單一來源的冷卻年代, 則應符合以下特徵:完全癒合年代的峰值百分比向上增加、碎屑物來源岩層的最 高變質溫度逐漸升高、岩屑變質度應向上增加。

首先,第二群砂岩的 AFT P1 年代峰值百分比逐漸向上增加,由約 50%增加 至 90%(圖 4-5),代表 AFT 完全癒合的岩層出露面積逐漸增加。接著,由砂岩 的 ZFT P1 年代可知,約於 3.25 Ma (MDJ-06 沉積年代)後開始出現 ZFT 完全癒 合的年代(圖 5-28),代表源區可能開始出露變質溫度高於 260°C的岩層。最後, 由砂岩岩象分析的縱向百分比變化可知,板岩岩屑的含量向上逐漸增加,表示源 區出露板岩層的面積越來越大(圖 4-5)。透過上述三個現象,分別是 AFT 完全癒 合年代百分比向上增加、逐漸出現 ZFT 完全癒合年代峰值、板岩岩屑隨層序向上 增加,本研究推測砂岩樣本皆來自同一個源區,且 AFT P1 年代可以代表單一來 源的冷卻年代,而非混合年代。

综合砂岩的 AFT、ZFT 年代以及岩象薄片分析結果可知,源區山脈於 4 Ma 時(MDJ-01 沉積年代)出露硬頁岩層,其最高變質溫度大致介於 160~230°C之 間。隨著埋藏較深的岩層出露,盆地中的板岩岩屑逐漸增加,且碎屑物的 AFT P1 年代呈完全癒合、ZFT P1 年代呈部分癒合,反映源區山脈出露岩層的最高變質溫 度已達 200~260°C之間。直到 3.25 Ma (MDJ-06 沉積年代)之後,源區山脈便開 始逐漸出露變質溫度高於 260°C的岩層,且板岩岩屑增加至 19%。由此可知,源 區山脈於 4~2 百萬年前之間,逐漸出露埋藏較深的變質岩層。值得注意的是,沉 積年代 3.25~2 Ma 之間,僅部分砂岩樣本出現完全癒合 ZFT P1 年代,可能是變

質溫度高於 260℃的岩層碎屑物供應量不穩定,或是鋯石受α破壞程度不同導致 (5-2-1節)。

上述可知,源區山脈約於 3.25 Ma 後開始出露變質溫度高於 260°C的岩層, 然而沉積年代 2 Ma 以前的礫石變質溫度皆介於 200~260°C之間,並沒有發現變 質溫度高於 260°C的礫石。本研究認為可能是因為變質溫度高於 260°C的岩層出 露面積不多。由於砂岩匯集流域中經過岩層的碎屑物,因此可以蒐集到不同變質 溫度岩層的碎屑物,但礫石僅來自單一特定岩層,換言之,流域範圍內可能出露 變質溫度 200~260°C以及 260°C以上的岩層,而礫石是來自變質溫度 200~260°C 的岩層。

表 5-3 北段海岸山脈鹽寮坑溪砂岩與礫石 AFT 和 ZFT 年代。(陳彤軒, 2021)

	sample	lith.	depo. age (Ma)	n _{AFT} -	AFT best-fit peak (Ma)				ZFT best-fit peak (Ma)			
study					peak 1	peak 2	peak 3	- n _{ZFT}	peak 1	peak 2	peak 3	peak 4
Chan (2021)	YL09	MS	1.8	56	2.1 ^{-0.3} _{+0.3} (100.0%)			52	19.9 ^{-2.5} +2.5 (11.0%)	65.7 ^{-3.9} +3.9 (89.0%)		
Chan (2021)	YL08	MS	2.3	52	$\begin{array}{c} 2.8 \\ \mathbf{-0.4} \\ \mathbf{+0.4} \\ (100.0\%) \end{array}$							
Chan (2021)	YL06	SS	2.5	40	$2.7 \begin{array}{c} -0.4 \\ +0.4 \end{array}$	9.8 ^{-7.3} +7.3 (3.0%)		43	4.9 $^{-0.5}_{+0.5}$ (33.0%)	$16.4 \begin{array}{c} ^{-1.4} \\ ^{+1.4} \\ (31.0\%) \end{array}$	46.8 ^{-3.3} +3.3 (36.0%)	
Chan (2021)	YL07	MS	2.6	50	2.7 ^{-0.7} +0.7 (100.0%)							
Chan (2021)	YL05	MS	2.7	72	3.1 ^{-0.4} +0.4 (100.0%)			54	$12.5 \begin{array}{c} ^{-1.1} \\ ^{+1.1} \\ (19.0\%) \end{array}$	40.7 ^{-2.7} +2.7 (37.0%)	$71.0 \begin{array}{c} ^{-4.6} \\ _{+4.6} \\ (44.0\%) \end{array}$	
Chan (2021)	YL04	MS	3.0	41	$\begin{array}{c} \textbf{3.5} & \stackrel{-0.6}{+0.6} \\ (100.0\%) \end{array}$			52	6.2 ^{-0.5} _{+0.5} (55.0%)	$11.9 \begin{array}{c} -0.9 \\ +0.9 \\ (43.0\%) \end{array}$	248.2 ^{-164.6} +164.6 (2.0%)	
Chan (2021)	YL03	MS	3.1	50	$\begin{array}{c} \textbf{3.2} & \stackrel{-0.5}{\scriptstyle +0.5} \\ (100.0\%) \end{array}$							
Chan (2021)	YL02	MS	3.3	83	$\begin{array}{c} \textbf{4.1} & \overset{-0.5}{+0.5} \\ (100.0\%) \end{array}$			46	41.6 ^{-4.0} +4.0 (29.0%)	102.9 ^{-6.8} +6.8 (71.0%)		
Chan (2021)	YL01	SS	3.4	50	6.6 ^{-1.4} +1.4 (50.0%)	22.0 ^{-3.7} +3.7 (35.0%)	102.7 ^{-14.6} +14.6 (15.0%)	64	7.6 ^{-3.9} +3.9 (2.0%)	37.3 ^{-4.4} +4.4 (16.0%)	68.6 ^{-7.9} +7.9 (39.0%)	120.8 ^{-11.2} +11.2 (44.0%)

Lith. = Lithology, SS means sandstone, MS means meta-sandstone boulder

Depo. age = sample deposition age determined by interpolation of magnetobiostratigraphy age data (Ma)

 n_{AFT}/n_{ZFT} = the amount of counted grains of apatite / zircon

best-fit peaks = the peaks age computed through BINOMFIT program (Ma)



圖 5-27 沉積年代2Ma之前的砂岩與礫石AFT 遲滯時間分布。橘色虛線圓圈代 表第一群砂岩樣本(AFT 年代約12Ma),紫色虛線圓圈代表第二群砂岩樣本(AFT 年代<6Ma)。(A) 沉積年代2~4Ma的砂岩與礫石樣本遲滯時間分布;(B) 礫 石遲滯時間分布;(C) 砂岩遲滯時間分布,年代誤差範圍為±1SD。



圖 5-28 沉積年代2 Ma 之前的砂岩 ZFT 遲滯時間分布。灰色區域為沉積後癒合 年代範圍;粉紅色區域為完全癒合年代範圍;黃色區域為部分癒合年代範圍;藍 色區域為部分癒合或未癒合年代範圍;灰色圓圈為 Kirstein *et al.* (2010, 2013)砂 岩樣本;綠色圓圈為陳彤軒(2021)砂岩樣本;紅色圓圈為本研究砂岩樣本,年 代誤差範圍為±1 SD。

沉積年代2Ma之前的砂岩與礫石皆來自同一個源區,得以觀察AFTP1遲滯時間變化,以下將推測砂岩與礫石可能的源區及其冷卻路徑與冷卻速率變化。

根據前人繪製脊樑山脈的冷卻路徑可知,4~2 百萬年前之間北段(太魯閣帶) 與中段脊樑山脈(玉里帶)出露岩層的岩性不同,前者岩性為沉積岩至硬頁岩, 後者岩性為板岩(Chen et al.,2019,圖 5-8)。上述提及,砂岩中板岩岩屑的含量 向上增加,代表源區山脈已出露板岩層。北段脊樑山脈(太魯閣帶)此時尚未出 露板岩層,僅中段脊樑山脈(玉里帶)有板岩層出露。同時,前人研究認為中段 脊樑山脈(玉里帶)出露板岩的時間約4.3±0.9 Ma(Chen et al.,2019),而後前淵 盆地開始出現板岩岩屑的時間約為3.5 Ma,兩者年代相近,更加說明了砂岩與礫 石來自中段脊樑山脈(玉里帶)的可能性。因此本研究認為沉積年代2 Ma 之前 的碎屑物皆來自中段脊樑山脈,碎屑物熱定年年代則反映中段脊樑山脈(玉里帶) 的冷卻歷史。

沉積年代3 Ma之前,砂岩的遲滯時間約2 m.y.,沉積年代4 Ma的砂岩遲滯時間甚至長達8 m.y.;沉積年代3 Ma之後,砂岩與礫石的遲滯時間便縮短至0~ 1 m.y.之間。上述可知,在沉積年代3~4 Ma之間,砂岩 AFT 遲滯時間快速向上 減少,代表此時源區山脈正處於造山初期快速發育的階段(圖 5-19)。由整體的 遲滯時間分布可知,造山帶於3 Ma 前冷卻速率快速增加,3 Ma 以後冷卻速率仍 在加速但逐漸趨於穩定(圖 5-29)。

假設地表溫度為 15°C,AFT 封存溫度為 135°C,利用冷卻速率公式(式 5-2) 可計算得到岩體的冷卻速率(表 5-4,圖 5-30)。岩體的冷卻速率在 12~4 Ma 之 間(MDJ-01 AFT P1 年代~沉積年代)約為 15 °C/m.y.,到了約 5.2~3.47 Ma (MDJ-02 AFT P1 年代~沉積年代)之間增加至約 70 °C/m.y.,隨後便逐漸增加至 約 300 °C/m.y.。對照 Chen et al. (2019)計算北段(太魯閣帶)與中段脊樑山脈 (玉里帶)的冷卻速率變化,後前淵盆地沉積物在 3.4 Ma 以前的冷卻路徑與中段 脊樑山脈(玉里帶)較相似(圖 5-30)。3.4 Ma 以後的冷卻速率加速至 200~400 °C/m.y.之間,而中段脊樑山脈(玉里帶)的冷卻速率亦加速至 200 °C/m.y.以上, 因此本研究認為沉積年代 2 Ma 之前的後前淵盆地沉積物皆來自玉里帶上覆岩層, 而玉里帶的冷卻速率自 12 Ma 以來逐漸加速,直到約 3.5~3 Ma 開始逐漸趨於穩 定冷卻(圖 5-29、圖 5-30)。

doi:10.6342/NTU202303814

表 5-4 沉積年代 2 Ma 之前的砂岩與礫石冷卻速率。(鹽寮坑溪數據 YL 引用自陳

彤軒,2021)

sample	Depo. age (Ma)	AFT P1 age (Ma)	cooling rate (°C/m.y.)		
YL08	2.3	2.8	240		
YL06	2.5	2.7	600		
YL07	2.6	2.7	1200		
YL05	2.7	3.1	300		
YL04	3	3.5	240		
YL03	3.1	3.2	1200		
MDJ06	3.25	3.8	218		
YL02	3.3	4.1	150		
MDJ05	3.35	4	185		
YL01	3.4	6.6	38		
MDJ04	3.4	4.6	100		
MDJ03	3.42	3.9	250		
MDJ02	3.47	5.2	69		
MDJ01	4	12	15		



圖 5-29 玉里帶 2 Ma 之前的冷卻路徑圖。箭頭代表玉里帶的冷卻路徑,箭頭中灰 色代表硬頁岩層,紫色代表板岩層,年代誤差範圍為±1 SD,可見玉里帶由硬頁 岩層逐漸剝蝕至板岩層,且遲滯時間向上減少並於約 3 Ma 後逐漸趨於穩定。



圖 5-30 沉積年代 2 Ma 之前的源區山脈冷卻路徑圖。黑色線為後前淵盆地的砂岩 與礫石冷卻路徑,其中實線代表 AFT 或 ZFT 屬於完全癒合年代,虛線代表 ZFT 屬於部分或未癒合年代,綠色線與數字分別為玉里帶(MBR)的冷卻路徑及冷卻 速率,橘色線與數字分別為太魯閣帶(NBR)的冷卻路徑及冷卻速率。

5-5-2 沉積年代 2 Ma 之後的樣本源區分析

根據 5-4-2 節與 5-5-1 節的推論,後前淵盆地在 2 Ma 以前主要接收來自玉里帶上覆岩層剝蝕的碎屑物,而 2 Ma 以後可能因沉積物源的增加,導致砂岩整體 遲滯時間增加且分布不規律。由於砂岩的 AFT P1 可能屬於混合年代(5-2-1 節, A1、A3),因此先透過變質砂岩礫石建構源區山脈可能出露的岩層岩性與變質溫度。

首先,2 Ma 以後的礫石數據主要是引用自李政熹(2021)於中段海岸山脈的 秀姑巒溪與烏漏溪採集的樣本,樣本沉積年代大致介於 0.8~1.56 Ma 之間(表 5-5), 另外尚有一個礫石為陳形軒(2021)在北段海岸山脈採集的 YL-09 樣本,沉積年 代為 1.8 Ma (表 5-3)(圖 5-31B)。李政熹(2021)將礫石利用 AFT 與 ZFT 年代 峰值分布,進一步劃分為 T型(完全癒合且單一峰值年代)、M型(完全癒合但 有兩個年輕峰值年代)、P型(部分癒合且多峰值年代)以及 N型(未癒合),由 於T型和 M型可能僅代表鋯石組成的差異以及磷灰石在洗選或核飛跡判定上的人 為誤差(李政熹,2021),對於數據解釋並無太大影響,因此本研究將 T型與 M 型礫石皆視為完全癒合的礫石(表 5-5)。

由礫石 AFT 年代可知,所有礫石的 AFT 年代皆屬於完全癒合年代,代表源 區岩層最高變質溫度超過135°C,但並非所有礫石的 ZFT 年代皆呈完全癒合(表 5-3、表 5-5)。AFT 與 ZFT 皆完全癒合的礫石(WL-06、HKL-02、HKL-03、HKL-07) 應來自變質溫度高於 260°C的岩層,對照圖 5-5 可知該岩層岩性可能為板岩或片 岩;而 AFT 完全癒合但 ZFT 部分癒合的礫石(YL-09、WL-02、WL-03、HKL-06) 應來自變質溫度介於 200~260°C之間的岩層,可能屬於硬頁岩或板岩。WL-05 和 HKL-05 則因為磷灰石洗選後數量不足,而沒有分析 AFT 年代(李政熹,2021), 但是兩個樣本的 ZFT P1 皆小於 12 Ma,屬於部分癒合年代,因此推測這兩個礫石 應該也是來自變質溫度介於 200~260°C之間的岩層,其岩性屬於硬頁岩或板岩層

透過礫石的 ZFT 年代可知源區出露兩種不同變質程度的岩層,分別是變質溫 度高於 260°C的岩層,以及變質溫度介於 200~260°C的岩層。而砂岩因匯集了流 域所有岩層的岩屑,因此砂岩樣本的 AFT 年代應含有兩個不同岩層的年代。然而, 砂岩樣本的 AFT 皆只有一個完全癒合年代,因此本研究認為沉積年代 2 Ma 以後 的砂岩樣本 AFT P1 屬於混合年代 (5-2-1 節, A1、A2)。換言之,砂岩的 AFT P1 遲滯時間不能用於計算單一岩層的剝蝕冷卻速率,僅能用於計算整個源區山脈的 平均剝蝕冷卻速率 (Bernet, 2019)。

至於砂岩的 ZFT P1 則可看出明顯的差異,在沉積年代約 1.7 Ma 以前,砂岩 樣本的 ZFT P1 多屬於部分或未癒合年代,1.7 Ma 之後的砂岩樣本 ZFT P1 皆屬於 完全癒合年代,ZFT P1 的百分比也向上增加。透過岩象分析可知,板岩岩屑約在 1.7 Ma (MDJ-13 沉積年代)以後逐漸增加,甚至到了約 1.37 Ma (HKL-01 沉積 年代)開始出現片岩岩屑 (李政熹,2021),代表源區山脈在約 1.7 Ma 之後才逐 漸大量出露變質溫度 260°C以上的岩層。

根據 5-5-1 節的推測,沉積年代 2 Ma 之前的碎屑物應主要由玉里帶上覆岩層 提供,而砂岩樣本 MDJ-06(沉積年代 3.25 Ma)的 ZFT P1 屬於完全癒合年代(8.0 Ma;表 4-1),以及該樣本板岩岩屑佔比高(19%)(表 4-2),可知玉里帶於 3.25 Ma 時已出露板岩,且冷卻速率趨於穩定,其遲滯時間介於 0~1 m.y.之間,與現今玉 里帶出露岩層的 AFT 遲滯時間相近(~0.5 m.y.; Willett *et al.*, 2003; Fuller *et al.*, 2006),代表玉里帶可能自 2 Ma 之後逐漸趨於穩定剝蝕。因此 2 Ma 以後,玉里 帶來源的碎屑物 AFT P1 遲滯時間也應介於 0~1 m.y.之間,所以本研究認為遲滯 時間介於 0~1 m.y.之間的礫石(YL-09、WL-02、WL-03、WL-06、HKL-02、HKL-03) 應來自玉里帶上覆岩層(圖 5-31),意即沉積年代 2 Ma 以前玉里帶冷卻路徑的延 伸。

值得注意的是,李政熹(2021)利用礫石 ZFT、AFT 與沉積年代畫出冷卻路徑,並將礫石區分為兩種冷卻路徑,根據該研究提出的四個模型,認為冷卻路徑 I 的礫石(WL-02, WL-03, HKL-02, HKL-03)可能來自太魯閣帶的上覆岩層,冷

doi:10.6342/NTU202303814

卻路徑 II 的礫石 (WL-06, HKL-06, HKL-07) 可能來自玉里帶的上覆岩層 (李政 熹,2021)。然而,以 AFT 遲滯時間而言,HKL-06 與 HKL-07 的遲滯時間較長, 介於 1~2 m.y. (圖 5-31),且與同屬冷卻路徑 II 的礫石樣本 WL-06 相比,遲滯時 間呈現向上增加的趨勢,此趨勢應出現於後造山時期的減速剝蝕 (5-4-1-3 節,圖 5-19),與現今脊樑山脈穩定剝蝕的情形不符 (Fuller et al., 2006; Hsu et al., 2016; Chen et al., 2023)。然而,礫石的 ZFT 遲滯時間變化卻不如 AFT 反常,ZFT 遲滯 時間呈現向上減少的趨勢,該研究推論可能是因為礫石快速冷卻且沉積時間較不 確定,可能導致來自不同層位的礫石堆積至盆地的時間誤差大 (AFT 年代與沉積 年代誤差大)(李政熹,2021),因此礫石樣本 HKL-06 與 HKL-07 是否同樣來自 玉里帶的上覆岩層,仍需謹慎考慮。

由砂岩遲滯時間在 2 Ma 時突然增加可知,若玉里帶為其中一個來源,則必 有另一個來源提供較老的 AFT 年代。從砂岩岩象分析結果也可看出,板岩岩屑在 3.25 Ma 增加至 19%,但在 2.03 Ma 卻突然減少至 12%,直到 1.64 Ma 才增加至 31%(表 4-2、圖 4-5),顯示源區可能發生改變。Chim et al. (2018)利用拉曼光 譜碳質物(RSCM)計算源區山脈與後前淵盆地中的碎屑物最高變質溫度,研究 結果顯示馬達吉達溪剖面在沉積年代 2~3 Ma 之間的崩積礫岩層中,其基質砂岩 的最高變質溫度可分為兩群,一群約 100~200°C,另一群則約 200~300°C,證 明了盆地中確實有變質溫度較低的碎屑物匯入。根據 5-4-2 節的推測,造成遲滯 時間突然增加的原因可能是沉積物源的加入,而新來源的加入可能是因為背斜軸 部翼部差異、山脈初始抬升時間差異、造山活動由北向南演育等原因導致,因此 以下將分別針對這三種可能的原因,探討新加入的沉積物源可能為何。



圖 5-31 沉積年代2Ma之後的砂岩與礫石AFT遲滯時間分布。(A)沉積年代2Ma 以後的砂岩與礫石遲滯時間分布;(B)礫石遲滯時間分布;(C)砂岩遲滯時間分 布,年代誤差範圍為±1SD。

表 5-5 中段海岸山脈秀姑巒溪與烏漏溪砂岩與礫石 AFT 和 ZFT 年代。(李政熹,

2021)

study	sample	lith.	depo. age (Ma)	n _{AFT} -	AFT best-fit peak (Ma)			Age		ZFT best-fit peak (Ma)				Age
					peak 1	peak 2	peak 3	type	n _{ZFT} –	peak 1	peak 2	peak 3	peak 4	type
Lee (2021)	HKL08	66	0.80	78	1.4 ^{-0.4}	106.2 -89.8	3		110	3.0 ^{-0.2}	9.2 -1.8	83.4 ^{-11.6}		
		55	0.00		(98.7%)	(1.3%)				(83.2%)	(7.0%)	(9.8%)		
Lee (2021)	HKL07	MS	1.12	72	2 4 -0.5	24.2 -16.7		М	38	4 2 -0.4	/			Т
					+0.6	+53.5				+0.5				
. ,					(98.5%)	(1.5%)				(100%)	7.2	0.1		
Lee (2021)	HKL06	MS	1.15	88	2.4 +0.6			Т	31	5.9 +8.2	34.1 +9.3	68.0 +10.5		Р
					(100.0%)					(3.2%)	(34.8%)	(62.0%)		0.0
Lee										4.0 -0.8	9.4 -1.1	24.4 -11.7		
(2021)	HKL05	MS	1.15						50	+0.9	+1.3	22.5		Р
<u> </u>										(39.6%)	(57.2%)	(3.1%)		
Lee	HKI 03	MS	1.17	75	1.6 $^{-0.4}_{\pm 0.5}$			т	48	2.8 +1.5	3.9 +1.5			м
(2021)	HKL05	IVI.5	1.17	15	(100.0%)			1	40	(53.0%)	(47.0%)			IVI
					-0.8	-19.3				-0.3	-1.2	-6.7		
Lee	HKL04	SS	1.17	69	4.1 +1.0	142.0 +22.2			120	2.7 +0.3	7.2 +1.4	58.3 +7.5		
(2021)					(96.2%)	(3.8%)				(71.3%)	(16.2%)	(12.5%)		
Lee				South	1.5 -0.4	9.0 -6.0				3.2 -0.5	4.7 ^{-1.7}			
(2021)	HKL02	MS	1.19	74	+0.5	+18.1		Μ	49	+0.6	+2.7			М
					(96.9%)	(3.1%)	66 Q			(80.8%)	(19.2%)	(0)	12.2	
Lee	HKL01	SS	1.37	125	3.6 +1.0	20.5 +26.6	64.8 +301.0		122	4.0 +0.4	13.6 +2.3	52.7 -6.9	182.6 45.2	
(2021)					(74.8%)	(18.6%)	(6.6%)		122	(62.1%)	(15.3%)	(14.0%)	(8.5%)	
					-0.4	-5.1	()			-0.6	()	(()	
(2021)	WL06	MS	1.41	85	+0.5	9.6 +10.9		Μ	29	5.0 +0.7				Т
(2021)					(94.8%)	(5.2%)				(100.0%)				
Lee		1.10							20	6.0 -3.6	21.7 -3.6	68.0 -8.6		
(2021)	WL05	MS	1.41						29	+8.8	+4.3	+9.8		Р
					-0.5	-3.2	-20.2			(3.376)	(33.776)	-7.2		
Lee	WL04	SS	1.48	121	2.2 +0.6	14.2 +4.2	93.3 +25.8		109	5.4 +0.6	19.0 +3.2	72.0 +8.0		
(2021)					(66.9%)	(23.3%)	(9.7%)			(48.0%)	(16.7%)	(35.3%)		
Las					15 -0.3	12 4 -7.5				47 -1.1	12 1 -1.6	20 8 -2.7	80 3 -32.0	
(2021)	WL03	MS	1.56	84	+0.4	+18.7		Μ	31	+1.3	+2.3	+3.0	+53.0	Р
(=)					(98.5%)	(1.5%)				(41.2%)	(33.1%)	(19.4%)	(6.2%)	
Lee (2021)	WL02	MS	1.56	82	1.7 -0.4			Т	31	11.3 -5.2	29.7 -9.2	73.5		D/M
					+0.5					(3.3%)	+13.4	(87.0%)		1/11
					-0.5	-17.7				0.5	-3.1	-11.9		
Lee (2021)	WL01	SS	1.56	6 130	3.2 +0.6	72.8 +23.4			118	5.3 _{+0.5}	15.0 +4.0	88.8 +13.8		
					(93.3%)	(6.7%)				(67.3%)	(14.4%)	(18.3%)		

Lith. = Lithology, SS means sandstone, MS means meta-sandstone boulder

Depo. age = sample deposition age determined by interpolation of magnetobiostratigraphy age data (Ma)

 n_{AFT}/n_{ZFT} = the amount of counted grains of apatite / zircon best-fit peaks = the peaks age computed through BINOMFIT program (Ma)

Age type = T(total annealing with single peak), M(total annealing with more than one young peaks), P(partial annealing), N(non-annealing)

背斜軸部翼部差異

以現今太魯閣帶與玉里帶(大南澳片岩)的分布,兩者皆位於複背斜軸部, 屬於較快的冷卻路徑,因此另一個來源岩層可能是位於脊樑山脈翼部的岩層。依 地理位置而言,盆地位於造山帶的東側,因此最早開始剝蝕的岩層應位於造山帶 東側的翼部,之後再逐漸侵蝕至軸部的岩層。由現今中北段脊樑山脈上的ZFT 年 代可發現,中北段脊樑山脈東翼的ZFT 年代全部屬於完全癒合年代(圖 5-24;Fuller et al., 2006),且 ZFT 年代向東遞減(圖 5-24 及其參考資料)。中北段大南澳片岩 東側也已無板岩層出露,顯示背斜東翼的板岩層已剝蝕殆盡(圖 3-13)。

若兩個來源分別是背斜軸部與翼部的岩層,則盆地中的碎屑物熱定年年代應 該先出現冷卻速率較慢的岩層訊號(背斜東翼),再出現冷卻速率較快的岩層訊號 (軸部),之後再出現冷卻速率較慢的岩層訊號(背斜西翼)。由 AFT 遲滯時間分 布來看,MDJ-01(樣本沉積年代4Ma)的遲滯時間較長約8m.y.,根據上述背斜 軸部翼部的遲滯時間變化,砂岩遲滯時間在4Ma與3.5Ma之間突然減少至2m.y. (圖 5-22),可能也是背斜東翼變質度較低的岩層被侵蝕殆盡的證據。換言之, MDJ-01的AFT P1代表的也可能是翼部岩層的冷卻年代,隨後侵蝕至軸部(玉里 帶),導致約3.5Ma時遲滯時間突然減少(8m.y.減少至2m.y.;圖 5-22)。

至於沉積年代2Ma時的遲滯時間增加,則可能是因為背斜西翼開始被侵蝕, 變質度較低的岩層出露所導致。由現今造山帶東翼的河流流域分布圖可知,分水 嶺以東的區域已出露大規模片岩層,部分地區有板岩帶出露。雖然東側河流並未 溯及脊樑山脈西側,但已有部分河流侵蝕到廬山板岩帶或東側的板岩帶(圖5-32), 因此不排除有變質度較低的碎屑物注入盆地中,而導致砂岩樣本AFT年代突然變 老,遲滯時間增加。



圖 5-32 臺灣地質分區與河流分布圖。圖中黑色實線為分水嶺,由圖可見東側河 流有部分已侵蝕到片岩帶(紫色區域)西側的板岩帶(深綠色區域)。

山脈初始抬升時間的差異

脊樑山脈北段與中段的初始抬升時間不同,前者約11.1 Ma 開始抬升,後者約12.2 Ma 開始抬升。以 2 Ma 時山脈出露的岩層而言,中段脊樑山脈已剝蝕至板岩層,而北段脊樑山脈才剛出露硬頁岩層(圖 5-8; Chen et al., 2019)。雖然 Chen et al. (2019)利用玉里帶的熱定年年代繪製中段脊樑山脈的冷卻路徑,利用太魯閣帶的熱定年年代繪製北段脊樑山脈的冷卻路徑,然而太魯閣帶在中南段脊樑山脈缺乏較高溫的熱定年資料,僅能得知太魯閣帶在北段脊樑山脈開始抬升的時間,對於中南段太魯閣帶的初始抬升時間推算仍有諸多限制。根據現今大南澳片岩帶的分布可知,中段脊樑山脈除了玉里帶之外,其西側尚有太魯閣帶,兩者以壽豐斷層為界 (Yen, 1963)。現今壽豐斷層兩側的 ZFT 年代並無太大差異,約為 1.5~2 Ma (曹恕中等,1996; Liu et al., 2001),代表玉里帶與太魯閣帶可能在 2 Ma 時已共同抬升。若盆地中的碎屑物皆來自中段脊樑山脈,則無法進一步細分太魯閣帶與玉里帶的冷卻路徑。

另外,造成盆地中碎屑物沉積時間 2 Ma 以後的遲滯時間增加,是否為接收 到北段脊樑山脈的碎屑物所致?雖然泰源盆地的古水流方向皆為由北向南(Chen and Wang, 1988b; Lai et al., 2021),但是位於泰源盆地北邊的秀姑巒溪剖面古水 流方向卻大致呈由西向東(Chen and Wang, 1988b)。秀姑巒溪剖面底部的沉積年 代約 1.7 Ma,前人由古地磁推測,中段海岸山脈在 2.1 Ma 以前的旋轉角度維持約 19°,在 1.7 Ma 以後的旋轉角度維持約 4°,顯示中段海岸山脈於 2.1~1.7 Ma 之間 完成碰撞(Lee et al., 1991),而古水流方向由西向東指示了奇美沖積扇由西向東 發育(陳文山,1988),因此秀姑巒溪剖面應主要接收來自中段脊樑山脈的碎屑物。 雖然馬達吉達溪剖面的古水流方向並無太大改變,皆呈由北向南,但若秀姑巒溪 剖面的碎屑物皆來自中段脊樑山脈,則秀姑巒溪以南的地區(泰源盆地)在 1.7 Ma 後應不再接收北段脊樑山脈的碎屑物。然而,在無法重現古河道流域的情況下, 無法進一步確認 2 Ma 之後,北段脊樑山脈是否提供變質度較低的碎屑物至盆地 中,導致盆地中碎屑沉積物的遲滯時間增加。但是根據造山帶由北向南演育的理

論,若北段脊樑山脈的太魯閣帶在 3.1 Ma 才開始出露硬頁岩層,則中段脊樑山脈 的太魯閣帶可能在 3.1 Ma 之後才出露硬頁岩層,因此不排除新增的沉積物源可能 來自中段脊樑山脈的太魯閣帶,而非北段脊樑山脈的太魯閣帶。

造山活動由北向南演育

由現今脊樑山脈的 AFT 與 ZFT 年代分布可看出, AFT 與 ZFT 完全癒合年代 由北向南逐漸變老(圖 5-26),反映了遲滯時間由北向南增加的趨勢,亦代表冷 卻速率由北向南遞減。透過前人計算現今出露於脊樑山脈上岩層的冷卻路徑可知, 自 2 Ma 以來的冷卻速率變化,皆為北段的脊樑山脈較快,越往南則越慢(Fellin et al., 2017),與上述冷卻速率由北向南遞減的推測相符。AFT 與 ZFT 完全癒合帶的 橫向寬度由北向南遞減(Fuller et al., 2006),更加指示了山脈由北向南發育的趨 勢。另外,由脊樑山脈出露的岩層岩性亦可發現,北段至中段大致出露片岩帶, 且片岩帶東側已無板岩出露,中段至南段的片岩帶東側仍有大量板岩帶出露,且 板岩帶出露範圍越往南越多(圖 5-32)。以上諸多證據再再說明了造山山脈由北 向南發育的趨勢,因此,盆地中出現遲滯時間突然增加的現象,可能是因為較南 側的脊樑山脈較晚才開始抬升,使得變質度較低的岩屑進入沉積盆地中,進而影 響遲滯時間分布。

綜上所述,沉積盆地在 2 Ma 以後的沉積物源,除了原本中段脊樑山脈(玉 里帶)以外,尚有新的來源注入。根據上述三種不同原因,分別對應新的來源可 能為:片岩帶西側的板岩層(背斜翼部)、中段脊樑山脈太魯閣帶(較晚出露硬頁 岩與板岩層),以及中南段脊樑山脈(造山帶由北向南發育)。

5-5-3 玉里帶的剝蝕冷卻歷史

由前面討論的結果可知,自4 Ma 開始(馬達吉達溪剖面底部沉積年代)接 收到玉里帶上部岩層的碎屑物,當時源區主要出露硬頁岩層,其變質溫度大致介 於160~230°C,AFT P1 遲滯時間約8 m.y.。到了約3.5 Ma(MDJ-02 沉積年代), AFT P1 遲滯時間縮短至約2 m.y.,且從砂岩岩象分析可見板岩岩屑增加,顯示玉 里帶逐漸出露板岩層,且源區岩層的變質溫度介於200~260°C。在3.5~3 Ma之 間,砂岩與礫石的遲滯時間逐漸縮短至0~1 m.y.,並且以接近平行遲滯時間等時 線的冷卻路徑向上變化。直至現今,玉里帶出露岩層的AFT 遲滯時間亦大致介於 0~1 m.y.之間,因此本研究認為,玉里帶及其上覆岩層約在3 Ma 開始維持等速 的冷卻速率。然而,等速冷卻是否代表玉里帶已達到穩定剝蝕,應藉由其他證據 輔助解釋。

造山山脈達到穩定剝蝕可透過四種方式進行驗證,分別是通量穩定態(flux steady state)、地形穩定態(topography steady state)、熱穩定態(thermal steady state) 與剝蝕穩定態(exhumational steady state)(Willett and Brandon, 2002)。通量穩定 態代表源區加積通量與剝蝕通量相等;地形穩定態代表源區山脈在一特定範圍中 的長波長地形(long-wavelength topography)不隨時間變化;熱穩定態代表溫度 場(temperature field)不隨時間變化,意即熱定年法的封存溫度等溫線不隨時間 變化;而剝蝕穩定態代表在特定範圍中,同一種熱定年法的年代不隨時間變化, 也就是剝蝕冷卻速率不變,並且山脈若達剝蝕穩定態,不同熱定年法的完全癒合 帶界線應呈巢狀(nested)分布(圖 5-33; Willett and Brandon, 2002)。

造山帶在達到剝蝕穩定態之前,應依序先達到地形穩定態以及熱穩定態 (Willett and Brandon, 2002)。而達到熱穩定態之前,速度場應先達到穩定態,也 就是等速抬升,否則封存溫度等溫線會受到熱平流(heat advection)影響而產生 撓曲(Willett and Brandon, 2002)。根據 Suppe(1981)與 Deffontaines *et al.*(1994) 研究認為,臺灣造山山脈在 23°N 以北的區域已經達到地形穩定態。再者,由 AFT

與 ZFT 完全癒合帶的分布可知,前者在 23°00'N~24°00'N 之間幾乎維持一定寬度,後者在 23°20'N~24°00'N 之間幾乎維持一定寬度,且兩完全癒合帶呈巢狀分布,顯示北段至中段脊樑山脈已經達到熱穩定態 (Fuller *et al.*, 2006)。

在造山山脈已經分別達到地形穩定態以及熱穩定態後,仍需判斷山脈是否維 持穩定的冷卻速率。首先,由後前淵盆地碎屑物的遲滯時間來看,玉里帶來源碎 屑物的AFT遲滯時間約於3.5~3 Ma開始縮短至0~1 m.y.並持續至今(5-5-2節), 代表玉里帶上覆岩層自3.5~3 Ma以來,持續出露冷卻速率較快的岩體。根據造 山山脈達到穩定剝蝕的過程,應於山脈上先出露一高速剝蝕的岩體,且該岩體已 達到山脈最快的冷卻速率(t4,圖5-33C),隨著山脈逐漸抬升,該岩體的出露範 圍越來越大,且範圍內的冷卻速率皆相等,並達到穩定剝蝕態(t5,圖5-33C)。 由碎屑物的遲滯時間來看,玉里帶上覆岩層約於3.5~3 Ma 達到最快冷卻速率約 200~400 °C/m.y.之間(t4,圖5-33C),但尚未達到穩定剝蝕態。

本文於 5-4-1 節提到, 剝蝕速率可利用冷卻速率與地溫梯度計算得到(式 5-3)。 然而,由於山脈在未達穩定抬升的狀態下,岩體的熱平流作用(heat advection) 可能會影響地溫梯度、封存溫度、封存深度等,因此在計算剝蝕速率時需考量岩 體熱構造與封存溫度的變化(Reiner and Brandon, 2006; Malusà and Fitzergald, 2019)。本研究提供兩種計算方法,分別是直接將地溫梯度帶入公式計算,以及利 用 Age2Edot 軟體計算山脈在不同的熱構造環境下可能的剝蝕速率。

首先,Hsieh et al. (2014)利用居禮深度計算得到臺灣地溫梯度的分布(圖 5-34),根據玉里帶在 0.8 Ma (HKL-08 沉積年代)以前尚處於加速剝蝕狀態,可 將其比擬為現今正在加速剝蝕南段脊樑山脈,地溫梯度約 68 ℃/km。因此由後前 淵盆地的砂岩與礫石冷卻速率可以計算得到,玉里帶自 3.5~3 Ma 以來的剝蝕速 率約介於 2.94~5.88 km/m.y.之間(式 5-3, 5-4-1 節)。

接著,本研究利用 Age2Edot 軟體計算得到的結果如表 5-6,沉積年代 3.5~3 Ma 之間的樣本 AFT 遲滯時間約介於 0.5~1.0 m.y.之間,對應剝蝕速率約為 1.6~3.6 km/m.y.(表 5-6)。軟體擬合的結果與直接利用地溫梯度計算得到的結果不盡相同,

前者的剝蝕速率略低,可見若未考量岩體的熱平流影響,將使得剝蝕速率被高估。

Chen et al.(2023)利用造山山脈周圍的前前陸盆地以及後前淵盆地沉積速率, 探討造山山脈剝蝕速率演化。該研究認為不論是前前陸盆地或後前淵盆地,在2.0 ~1.5 Ma 之間皆存在沉積速率增加的趨勢,其中後前淵盆地約於2.0~1.2 Ma 維 持高沉積速率5.14 km/m.y.,因此推論源區山脈(脊樑山脈和雪山山脈)自2.0~ 1.5 Ma 至 1.2 Ma 之間到達穩定剝蝕狀態(Chen et al., 2023)。Hsu et al.(2016) 針對中央山脈北、中、南段以及玉山進行 ZFT、鋯石與磷灰石鈾-釷-氦定年,並 利用年代-高程圖與熱反演模型探討山脈的剝蝕冷卻速率變化。該研究認為東部中 央山脈在北中南段皆呈相同的階段性加速剝蝕:2.0~1.5 Ma 以前剝蝕速率約0.1 km/m.y.; 2.0~1.5 Ma 與 0.5 Ma 之間為第一階段加速剝蝕,剝蝕速率增加至2~4 km/m.y.; 0.5 Ma 之後為第二階段加速剝蝕,剝蝕速率增加至4~8 km/m.y.(Hsu et al., 2016)。Kirstein et al.(2010)利用後前淵盆地的砂岩 ZFT 與鋯石鈾-釷-氦年代 計算源區山脈剝蝕歷史,認為山脈剝蝕速率在3.2~2.3 Ma 之間由 0.5 km/m.y.m 速至 3.6 km/m.y.。

上述提及,玉里帶約在3.5~3 Ma 開始出露剝蝕速率較快的岩層(t4,圖5-33C), 且尚未達到穩定剝蝕,因此源區山脈整體的剝蝕速率仍在加速。Kirstein et al.(2010) 認為源區山脈於3.2~2.3 Ma 之間加速剝蝕至3.6 km/m.y.,而 Hsu et al.(2016) 與Chen et al.(2023)則認為源區山脈在2.0~1.5 Ma之間加速剝蝕至約5 km/m.y., 由此可知整體源區山脈在3 Ma 以後尚未達到穩定剝蝕,並持續加速。

然而,由沉積速率變化可知,源區山脈約於 2.0~1.5 Ma 至 1.2 Ma 之間達到 穩定剝蝕(Chen et al., 2023)。因此本研究推論,玉里帶可能於 3 Ma 至 2.0~1.5 Ma 之間仍處於加速剝蝕階段,但是在 2.0~1.5 Ma 至 1.2 Ma 之間達到穩定剝蝕態 (Steady state,圖 5-33C)。至於是否有第二階段的加速,根據 Hsu et al. (2016) 認為 0.5 Ma 之後才出現山脈再次加速的現象,但後前淵盆地接收到最年輕的碎屑 物只到 0.8 Ma (HKL-08 沉積年代),無法確認 0.5 Ma 是否有二度加速剝蝕的情 況。若針對中更新世 (< 0.8~0.7 Ma) 沉積的卑南山礫岩進行分析,或許能進一

步確認是否有二次加速的事件發生。

總而言之,經過後前淵盆地與山脈岩層的定年結果對比,可描繪中段脊樑山 脈玉里帶的剝蝕歷史如下:自12 Ma 開始抬升至4~3.5 Ma 之間,冷卻速率由15 °C/m.y.增加至70°C/m.y.; 3.5~3.0 Ma 之間加速至最快冷卻速率約200~400 °C/m.y.; 3.0 Ma至2.0~1.5 Ma之間,最高冷卻速率的岩體出露面積逐漸擴大; 2.0~1.5 Ma至1.2 Ma之間,玉里帶達到穩定剝蝕態(圖5-35)。

表 5-6 磷灰石核飛跡 Age2Edot 計算結果。





 ■ 5-33 造山系統的四種穩定態。(A)地形穩定態,最右圖的長波長地形不隨時間改變;(B)通量穩定態,FA為物質加積通量,FE為剝蝕通量;(C)熱穩定態, 同一種定年法在不同時期出露的年代變化,分別是山脈初始抬升時(t1)、尚未出 露完全癒合年代時(t2)、出露完全癒合年代時(t3)、開始出露最快剝蝕速率岩層 (t4)、最快剝蝕速率岩層逐漸出露(t5),以及年代不再改變的穩定態(Steady state);
(D)剝蝕穩定態,不同定年法的完全癒合年代呈巢狀分布(Willett and Brandon, 2002)。



圖 5-34 利用居禮深度計算臺灣地溫梯度分布。正在加速剝蝕的南段脊樑山脈地 溫梯度較高,約60~68 ℃/km (Hsieh *et al.*, 2014)。



圖 5-35 中段脊樑山脈玉里帶剝蝕歷史。

5-6 綜合討論



5-6-1 源區山脈與後前淵盆地的源-匯關係

欲建立山脈與盆地之間的源-匯關係,可以透過盆地的砂岩岩象變化(岩屑開始出現與消失的時間點、岩屑比例變化)、沉積物源區岩層的變質溫度(AFT、ZFT 定年結果),以及古水流方向共同探討。

首先由後前淵盆地中的砂岩岩象可觀察到(圖 5-36),在盆地最底部的砂岩 樣本當中(MDJ-01,沉積年代4 Ma),火山碎屑(Lv+F)比例皆遠高於其他砂 岩樣本,同時亦存在變質岩岩屑,代表此時碎屑物來源為火山島弧及造山帶等兩 處。隨後約 3.5 Ma 開始出現板岩岩屑,且含量逐漸增加,代表在 4~3.5 Ma 之間 有明顯的源區轉換,火山島弧已不再明顯供應碎屑物至盆地中,碎屑物主要來自 造山帶。至於硬頁岩岩屑的比例變化不大,皆維持約 10%的含量,代表源區山脈 尚有硬頁岩層出露。但變質度最低的沉積岩岩屑含量有向上減少的趨勢,且在沉 積年代 1.5 Ma 之後的砂岩幾乎不含沉積岩岩屑,代表源區山脈的沉積岩層已剝蝕 殆盡。直到約 1.37 Ma 開始接收到片岩岩屑,顯示造山山脈逐漸剝蝕到變質度較 高的岩層。

根據徐士捷(2017)利用砂岩岩象探討造山帶與盆地的源-匯關係,該研究認 為海岸山脈盆地中的碎屑物皆來自脊樑山脈玉里帶,成岩相(沉積岩)岩層與極 低度變質岩(硬頁岩)層在 5 Ma 前已經出露,且在盆地中的岩屑含量逐漸減少, 顯示兩岩層已逐漸剝蝕殆盡;低度變質岩(板岩)層在 3 Ma 以後大量出露;中 度變質岩(片岩)層則在 1.25 Ma 以後逐漸出露,與本研究分析結果相似。

接著,依據碎屑物的 AFT 與 ZFT 定年結果,可大致描繪源區山脈出露岩層 的變質溫度。盆地中接收到的碎屑物來源,最高變質溫度逐漸由 160~230°C、200 ~260°C增加至高於 260°C (5-5-1 節)。源區岩層變質溫度逐漸增加,代表出露岩 層的變質度越來越高。然而,由砂岩的 AFT 遲滯時間變化可知,約於 2 Ma 時源 區有冷卻速率較低的岩體出露,指示有新的來源加入 (5-4-2 節)。由於 2 Ma 之後

的樣本皆含有 ZFT 部分癒合的年代,可知新來源岩層的最高變質溫度應介於 200 ~260°C之間,可能屬於硬頁岩或板岩,因此由整體砂岩岩象分析可能看不出太 明顯的改變,但透過熱定年分析便能更明確的觀察到碎屑物源區岩層變質度的變 化。

透過古水流方向可知,北段海岸山脈與南段海岸山脈的古水流向皆呈由北向 南,而中段海岸山脈的古水流向則是由西向東。而北段海岸山脈的沉積年代約介 於 3.40~1.69 Ma 之間,南段海岸山脈的沉積年代約介於 3.92~1.58 Ma 之間,中 段海岸山脈的沉積年代約介於 1.69~0.78 Ma 之間。將古水流向對應至沉積年代 可知,在約 1.7 Ma 之前,源區主要位於後前淵盆地北側,且蕃薯寮、水璉、磯崎 沖積扇皆由西北向東南發展,1.7 Ma 之後,源區位於盆地西側,奇美沖積扇由西 向東發展(陳文山,1988),與現今脊樑山脈東翼河流流向一致。前人研究認為, 海岸山脈沉積盆地位於火山島弧之上(陳文山,1988),而菲律賓海板塊以 7~8 mm/yr.的速度向西北方移動(Seno,1993;Yu et al., 1997;Hsu et al., 2009),因此 盆地亦跟隨火山島弧由南向北移動,源區與盆地之間的距離逐漸縮短(陳文山, 1988)。

綜合上述資訊可知,後前淵盆地約於 3.5 Ma 開始接收到大量造山帶的沉積物, 因為盆地向北移動所致。而源區出露岩層最高變質溫度由 160~230℃、200~ 260℃逐漸增加至> 260℃,盆地中開始接收到硬頁岩、板岩與片岩岩屑的時間分 別是> 5 Ma、3.5 Ma、1.4 Ma,顯示源區山脈逐漸出露埋藏較深、變質溫度較高 的岩層。源區山脈的冷卻速率亦由 15 ℃/m.y.逐漸增加至 70 ℃/m.y.,並在約 3.5 ~3 Ma 之後達到與現今相同的冷卻速率約 200~400 ℃/m.y.直至今日。然而在 2 Ma 時,盆地接收到另一個冷卻速率較慢的岩層,該岩層可能為片岩帶西側的板 岩層、中段脊樑山脈太魯閣帶,抑或是山脈較南側的岩層 (5-5-2 節),在沒有更 多資料佐證之前,無法排除任何一種可能性(圖 5-37、圖 5-38)。


圖 5-36 後前淵盆地砂岩岩象與 AFT P1 年代縱向百分比變化圖。



■ 5-37 造山帶與後前淵盆地的源匯關係。(A)5 Ma 以前源區山脈出露沉積岩與 硬頁岩層,山脈剝蝕速率自 15 °C/m.y.加速至 70 °C/m.y.;(B)3 Ma 開始源區出 露板岩層,山脈逐漸增加至最快冷卻速率;(C)2 Ma 時,山脈最快冷卻速率岩層 逐漸出露,且此時有新的來源加入,因沒有足夠證據而無法畫出確切位置;(D) 1.4 Ma 時,山脈沉積岩層剝蝕殆盡,並開始出露片岩層,且盆地位於山脈東側, 古水流方向轉為由西向東。(修改自 Chen and Wang, 1988b)

5-6-2 中段脊樑山脈剝蝕歷史

根據前人建構的山脈剝蝕冷卻歷史,再加上盆地的碎屑沉積物熱定年與砂岩 岩象分析,得以進一步描繪中段脊樑山脈較早期的剝蝕歷史(圖 5-38)。 隱沒及變形楔型體抬升(15~6 Ma)

南中國海板塊約於 15 Ma 開始隱沒,大陸邊緣堆積大量來自華夏陸塊的碎屑 物。增積岩體與大陸邊緣隨著板塊隱沒而變質,約於 12 Ma 時隱沒導致變質楔形 體(metamorphic wedge)受擠壓而隆起,即為中段脊樑山脈玉里帶(Chen *et al.*, 2019)。隱沒導致玉里帶在初始抬升時有較快的冷卻速率(96 °C/m.y.),隨後才趨 緩至約 15 °C/m.y. (Chen *et al.*, 2019)。之後便進入山脈初始發育階段,剝蝕冷卻 速率逐漸增加。由源區山脈的冷卻路徑顯示,中段脊樑山脈可能在 10.9 Ma 開始 出露硬頁岩層(**圖 5-8**; Chen *et al.*, 2019)。

弧陸碰撞與加速剝蝕階段(6~2 Ma)

現今普遍認為弧陸碰撞約始於晚期中新世(Dorsey, 1988; Liu et al., 2001; Beyssac et al., 2007; Chen et al., 2023),導致山脈加速抬升。後前淵盆地隨著火山 島弧由南向北移動,與造山山脈之間的距離逐漸縮短,此時造山帶東側的大陸斜 坡形成多個深海沖積扇,後前淵盆地的碎屑物來源也由火山島弧逐漸轉移為造山 山脈(玉里帶上覆岩層)。山脈出露岩層的最高變質溫度約介於 200~260°C之間, 並逐漸出露變質溫度高於 260°C的岩層,而板岩層亦於 4~3.5 Ma 之間逐漸出露。 中段脊樑山脈仍處於加速剝蝕階段,並且出露與現今相同冷卻速率的岩層 (200~400°C/m.y.),此岩層的出露面積也隨時間增加。

加速至穩定剝蝕階段(2~0 Ma)

中段脊樑山脈玉里帶已有部分岩層到達與現今相同的冷卻速率,而山脈整體 仍屬於加速剝蝕狀態,大約在2.0~1.2 Ma之間進入穩定剝蝕態。此時玉里帶出露 岩層的最高變質溫度已達260°C以上,且片岩層(變質溫度>400°C)也在大約1.4 Ma 開始出露。達到穩定態之後,玉里帶的冷卻速率也維持在200~400 °C/m.y.之

間直至今日。此時,中段脊樑山脈出露一冷卻速率較慢的岩體,而該岩體可能為太魯閣帶、片岩帶西翼的板岩帶,抑或是較南側的變質岩層。然而現今山脈上的熱定年資料分布不均,以及盆地中碎屑物熱定年結果尚不完善,無法確認該岩體為何。



圖 5-38 中段脊樑山脈與後前淵盆地演化史。白底黑字為中段脊樑山脈的剝蝕冷 卻歷史;黑底白字為後前淵盆地的演化史與沉積物組成變化;右邊的 AFT 與 ZFT 表示盆地中碎屑物 AFT 與 ZFT 的 P1 癒合程度變化,藍色代表未癒合、黃色代表 部分癒合、粉紅色代表完全癒合。

5-6-3 利用沉積盆地碎屑物探討臺灣造山演化的限制

本研究嘗試以後前淵盆地的碎屑沉積物 AFT 與 ZFT 定年回推源區山脈初期 的剝蝕抬升歷史,且採樣地點已盡量選在輔助標準剖面,仍對於數據的解釋仍有 諸多限制,尚有許多無法解決的問題。以下為本研究遇到的問題以及未來可以進 一步加強的方向:

- 由於本研究樣本多為砂岩,砂岩又匯集流域所經岩層剝蝕的碎屑物,其 組成成分較複雜,不如礫石單一,單看 AFT 與 ZFT 的分析結果對年代 變化的解釋有限。因此應同時針對樣本進行岩象分析,除了可以解釋年 代的變化之外,也可以了解到源區岩層是否有改變(火成岩、出露岩性 變化、岩層變質度增加、新源區加入等)。
- 2. 雖然礫石在核飛跡年代的解釋上不如砂岩複雜,指示單一母岩冷卻路徑, 但因礫石搬運距離以及沉積時間較短,可能導致上下層位的錯亂。在較 大時間尺度下的礫石沉積年代得以獲得較好的控制,若兩礫石樣本沉積 年代只差 0.1 Ma,則較難認定礫石進入盆地的順序為何,導致後續在觀 察遲滯時間變化的困難。
- 3. 由於臺灣造山帶在一千兩百萬年之間快速抬升,剝蝕速率(3~5 km/m.y.)、冷卻速率(200~400 °C/m.y.),與盆地堆積速率皆快(~5 km/m.y.),在如此快速抬升剝蝕的情況下,使用碎屑物熱定年探討山脈 的剝蝕歷史容易因不同變質溫度岩層的年代相近,而導致混合年代的問題。在沒有礫石與山脈熱定年年代的輔助解釋下,無法明確指示砂岩的 AFT或ZFT年代是否為混合年代。然而,礫石又因搬運距離與時間較難 掌握,若沒有足夠的資訊,可能導致後續解釋上的困難。因此本研究認為,欲探討快速抬升的山脈剝蝕歷史,使用碎屑沉積物作為研究材料需 考量較多因素,例如水力淘選、混合年代、岩屑組成等,皆可能造成熱 定年年代偏移,因此較不適合用於探討臺灣的造山歷史。

第六章 結論

本研究於南段海岸山脈馬達吉達溪剖面採集砂岩與礫石,並加入前人於北段 與中段海岸山脈的砂岩與礫石樣本,利用 AFT 與 ZFT 年代及砂岩岩象分析,共 同探討盆地碎屑物來源的變化,以及脊樑山脈東翼的剝蝕冷卻歷史。

- 1. 由馬達吉達溪的砂岩樣本 AFT 與 ZFT 年代可知,源區出露岩層的最高 變質溫度大致介於 200~260°C之間。由砂岩岩象分析可觀察到,每個樣 本中皆有板岩與硬頁岩岩屑,但 AFT 皆只有一個完全癒合峰值,因此認 為 AFT 的 P1 可能為混合年代;而對比 ZFT 年代時發現,幾乎每個樣本 都有板岩岩屑,但並非每個樣本都有完全癒合的 ZFT 年代,推測可能是 因為來自變質溫度較低的板岩層。
- 2. 馬達吉達溪最底部的砂岩樣本(MDJ-01)AFT P1年代小於ZFT P1年代, 此現象不符合地質邏輯。岩象分析後發現樣本中含有約30%的火山碎屑, 代表此時碎屑物來源包括火山島弧與造山帶。本研究利用 AFT 單顆粒年 代(16 Ma)以及晶型良好與否,將磷灰石分成兩群並個別計算年代。 其中火山島弧來源的 AFT 年代為 6.8 Ma,ZFT 年代為 8.5 Ma,本研究 認為其來源應為盆地北側的成廣澳火山;造山帶來源的 AFT P1年代則 為 12.0 Ma,可能代表初始造山年代,亦可能因為受到部分癒合年代影響而導致年代較老。
- 3. 馬達吉達溪的礫石採自崩積礫岩層,前人認為該礫岩層崩積自北段海岸山脈的水連礫岩層。因此與北段海岸山脈的礫石 AFT 與 ZFT 定年結果比對後,認為兩者皆來自相同岩層,該岩層的最高變質溫度應介於 200~260℃之間。
- 4. 透過 AFT 遲滯時間的變化可觀察到,沉積年代 4~2 Ma 之間的碎屑物冷 卻路徑一致,砂岩與礫石的 AFT 完全癒合年代皆向上變年輕,遲滯時間 縮短至 0~1 m.y.之間,指示碎屑物僅來自單一源區,而砂岩的 AFT P1

則可代表單一源區的年代,非混合年代;然而沉積年代2 Ma 之後,礫 石的 AFT 遲滯時間仍維持在 0~1 m.y.之間,但砂岩的 AFT P1 遲滯時間 則增加至 2~4 m.y.之間,因此本研究認為源區山脈在 2 Ma 時出露一 AFT 年代較老且冷卻速率較慢的岩層。

- 5. 根據脊樑山脈的冷卻路徑與出露變質岩屑的時間,本研究認為沉積年代 4 Ma 開始,盆地造山帶來源的碎屑物主要是剝蝕自中段脊樑山脈玉里帶 上覆岩層。玉里帶在 4 Ma 以前出露硬頁岩層,3 Ma 開始逐漸出露板岩 層,1.4 Ma 開始逐漸出露片岩層。玉里帶在 3.5 Ma 之前所有岩層皆屬於 加速剝蝕階段,在 3.5~3 Ma 之間,冷卻速率最快的岩體開始出露(200 ~400 ℃/m.y.),隨後其出露面積逐漸擴大,並於 2.0~1.2 Ma 之後,玉 里帶進入穩定剝蝕階段。最高變質溫度的變化則由 160~230℃(4 Ma 前)、200~260℃(3.5~2 Ma)增加至高於 260℃(2 Ma 之後)
- 6. 根據 AFT 遲滯時間的變化,本研究認為 2 Ma 以後遲滯時間突然增加的 原因可能是有新的沉積物源加入。透過山脈上的熱定年年代以及變質岩 層分布,本研究推測此岩層可能是背斜翼部、較晚開始抬升的山脈、較 南側的造山山脈,而三種岩體對應至脊樑山脈分別為「片岩帶西側的板 岩層」、「中段脊樑山脈太魯閣帶」、「中南段脊樑山脈岩層」。
- 7. 本研究認為,對於臺灣後前淵盆地的碎屑物研究,單純透過AFT與ZFT 年代無法對於脊樑山脈的演化詳細討論,需加入岩象分析或其他研究方 法共同討論,才能獲得較好的解釋。且臺灣屬於快速抬升的造山帶,短 時間內沉積的碎屑物AFT與ZFT年代可能因通過封存溫度的時間相近, 而被擬合成單一混合年代,導致年代解釋上的困難,其中砂岩更是容易 受到混合年代的影響。而礫石也因其沉積特性(如搬運時間與距離等), 在解釋上也會受到諸多限制。因此,本研究認為以臺灣造山帶快速抬升 的特性,利用盆地碎屑物探討造山歷史需要考量較多因素,建議針對單 一樣本進行多種分析,以確認各種因素之間是否互相牽連而互相影響。

參考文獻

- 大江二郎 (1939) 台東圖幅及說明書(十萬分之一)。臺灣總督府殖產局出版第 608 號,共26頁。
- 王源、楊昭男、陳文山 (1992) 玉里圖幅與說明書,五萬分之一臺灣地質圖第48 號。經濟部中央地質調查所,共81頁。
- 王源、陳文山 (1993) 海岸山脈地質圖幅 (十萬分之一)。經濟部中央地質調查所 出版。
- 宇佐美衛 (1939a) 花蓮圖幅說明書 (五萬分之一)。臺灣總督府殖產局出版第 863 號。
- 李政熹 (2021) 海岸山脈秀姑巒溪剖面八里灣層之錯石及磷灰石核飛跡定年研究 探討源區山脈的剝蝕演化。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文,共166 頁。
- 李德貴、紀文榮 (1990) 海岸山脈沈積岩地層的古地磁年代。經濟部中央地質調 查所特刊,第4號,第271-294頁。

何春蓀 (1986) 臺灣地質概論(第二版)。經濟部中央地質調查所出版,共164頁。 呆紹伊 (2020)從晚中新世里龍山層磷灰石核飛跡定年研究探討恆春半島隆起的

起始年代。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文,共145頁。

周南 (1993) 海岸山脈沉積岩鋯石核飛跡定年研究。國立臺灣海洋大學海洋科學

研究所碩士論文,共99頁。

周南與劉聰桂 (1997) 核飛跡(FT)定年法。地質,第16卷,第97-111頁。

紀權窅 (2007) 南段花東縱谷斷層之新期構造研究-利吉斷層與鹿野斷層的活動

特性。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文,共84頁。 徐士捷(2017)晚中新世以來沉積岩岩象分析探討臺灣南部山脈剝蝕歷史。國立

臺灣大學地質科學研究所碩士論文,共145頁。

徐鐵良 (1956) 臺灣東部海岸山脈地質。臺灣省地質調查所彙刊,8號,第15-41

頁。

- 張宏浩 (2018) 海岸山脈南段泰源盆地之有機地化特徵。國立中央大學應用地質 研究所碩士論文,共96頁。
- 陳文山 (1988) 台灣海岸山脈沈積盆地之演化及其在地體構造上之意義。國立台 灣大學地質科學研究所博士論文,共 344 頁。
- 陳文山 (2009) 海岸山脈火山島弧與碰撞盆地的地層架構與年代。西太平洋地質 科學,第9卷,第67-98 頁。
- 陳文山 (2020) 海岸山脈火山弧與前陸盆地之層序架構。經濟部中央地質調查所 彙刊,第33號,第83-95頁。
- 陳文山、王源 (1996) 台灣東部海岸山脈地質。經濟部中央地質調查所,台灣地 質系列,第7號。
- 陳文山、方中權、劉力豪、楊小青、顏一勤、黃能偉、楊志成、陳勇全、龔慧敏、 賴慈華、費立沅 (2006) 台灣地區上新世至全新世的沉積同時變形構造—

地震岩的沉積環境。西太平洋地質科學,第6卷,第191-220頁。

陳文山、俞何興、俞震甫、鍾孫霖、林正洪、林啟文、游能悌、吴逸民、王國龍 (2016)

台灣地質概論。社團法人中華民國地質學會出版,共204 頁。

陳立凱 (2019) 弧前盆地埋藏訊號以及造山帶剝蝕訊號—以東部海岸山脈為例。

國立中央大學地球科學系博士論文,共163頁。

- 陳形軒 (2021) 利用水連礫岩的砂岩與礫石之核飛跡定年研究探討上-更新世脊樑 山脈剝蝕歷史。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文,共123 頁。
- 陳肇夏、王京新 (1995)台灣變質相圖說明書,第二版。經濟部中央地質調查所特 刊,第2 期,共51 頁。
- 曹恕中、樓望東、何信昌、李元希、江威德、陳正宏 (1996) 台灣中央山脈變質 泥岩鉀氫年代之地質意義。經濟部中央地質調查所彙刊,第11號,第37-84 頁。

黃奕彰 (2015) 利用碎屑鋯石鈾鉛定年探討大南澳片岩的地層年代與構造演化。

國立台灣大學地質科學研究所碩士論文,共199頁。

葉家志 (2017) 晚中新世以來沉積岩岩象分析探討臺灣中北部山脈剝蝕歷史。國

立臺灣大學地質科學研究所碩士論文,共104頁。

- 劉丞浩 (2013) 大南澳片岩太魯閣帶的碎屑錯石鈾鉛定年研究。國立台灣大學地 質科學所碩士論文,共142頁。
- 劉聰桂 (1982) 臺灣磷灰石、鋯石、榍石之核飛跡研究與其在大地構造上之意義。 國立臺灣大學地質科學研究所博士論文,共 95 頁。
- 賴序衡與鄧屬予 (2016) 海岸山脈南段泰源盆地的地層與構造。經濟部中央地質 調查所彙刊,第 29號,第 45-76頁。
- Baziotis, I., Tsai, C. H., Ernst, W. G., Jahn, B. M., & Iizuka, Y. (2017) New P–T constraints on the Tamayen glaucophane-bearing rocks, eastern Taiwan:
 Perple_X modelling results and geodynamic implications. *Journal of Metamorphic Geology*, 35(1), 35-54. doi: https://doi.org/10.1111/jmg.12218
- Bernet, M. (2019). Exhumation studies of mountain belts based on detrital fission-track analysis on sand and sandstones. *Fission-track thermochronology and its application to geology*, 269-277.
- Bernet, M., & Garver, J. I. (2005) Fission-track Analysis of Detrital Zircon. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1), 205-237. doi: 10.2138/rmg.2005.58.8
- Bernet, M., Zattin, M., Garver, J. I., Brandon, M. T., & Vance, J. A. (2001) Steady-state exhumation of the European Alps. *Geology*, 29(1), 35-38. doi: https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0035:Sseote>2.0.Co;2
- Brandon, M. T. (2002) Decomposition of mixed grain age distributions using Binomfit. *On track, 24*(8), 13-18.
- Buchovecky, E. J., & Lundberg, N. (1988) Clay Mineralogy of Mudstones From the Southern Coastal Range, Eastern Taiwan: Unroofing of the Orogen Versus In-Situ Diagenesis. Acta geologica taiwanica, 26, 247-261.

- Chang, L. S. (1967) A biostratigraphic study of the Tertiary in the Coastal Range, eastern Taiwan, based on smaller foraminifera. (I. Southern Part) Proceedings of the Geological Society of China, 10, 64-76.
- Chang, L. S. (1968) A biostratigraphic study of the Tertiary in the Coastal Range, eastern Taiwan, based on smaller foraminifera.(II. Northern Part) *Proceedings of the Geological Society of China*, 11, 19-33.
- Chang, L. S. (1969) A biostratigraphic study of the Tertiary in the Coastal Range, eastern Taiwan, based on smaller foraminifera.(III. Middle Part) *Proceedings of the Geological Society of China*, 12(89-101)
- Chen, C. H., Lee, C. Y., Tien, J. L., Xiang, H., Walia, M., & Lin, J. W. (2020)
 Post-orogenic thermal reset of the Pingtan-Dongshan metamorphic belt (SE
 China): Insights from zircon fission track and U-Pb double dating. *Journal of Asian Earth Sciences*, 201, 104512. doi: https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104512
- Chen, T. W., Chu, M. F., Chen, W. S., Chung, S. L., Lee, H. Y., & Iizuka, Y. (2023) Retro-Foredeep Basin Evolution in Taiwan: Zircon U-Pb and Hf Isotope Constraints From the Coastal Range. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems,* 24(3), e2022GC010787. doi: https://doi.org/10.1029/2022GC010787
- Chen, W. S. (1997) Lithofacies analysis of the arc-related sequence in Coastal Range, eastern Taiwan. *Journal of the Geological Society of China, 40.*
- Chen, W. S., Chung, S. L., Chou, H. Y., Zugeerbai, Z., Shao, W. Y., & Lee, Y. H. (2017) A reinterpretation of the metamorphic Yuli belt: Evidence for a middle-late Miocene accretionary prism in eastern Taiwan. *Tectonics*, 36(2), 188-206. doi: https://doi.org/10.1002/2016TC004383
- Chen, W. S., Huang, Y. C., Liu, C. H., Feng, H. T., Chung, S. L., & Lee, Y. H. (2016) UPb zircon geochronology constraints on the ages of the Tananao Schist Belt

and timing of orogenic events in Taiwan: Implications for a new tectonic evolution of the South China Block during the Mesozoic. *Tectonophysics*, 686, 68-81. doi: https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.07.021

- Chen, W. S., & Wang, Y. (1988a) Volcaniclastic and biogenic sequence of the Tuluanshan Formation, Coastal Range, Taiwan. *Field Guide Book, 6*, 1-6.
- Chen, W. S., & Wang, Y. (1988b) Development Of Deep-Sea Fan Systems In Coastal Range Basin, Eastern Taiwan. *Science Reports of the National Taiwan University ACTA Geologica Taiwanica, 26*, 37-56.
- Chen, W. S., Yeh, J. J., & Syu, S. J. (2019) Late Cenozoic exhumation and erosion of the Taiwan orogenic belt: New insights from petrographic analysis of foreland basin sediments and thermochronological dating on the metamorphic orogenic wedge. *Tectonophysics*, 750, 56-69. doi: https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.09.003
- Chi, W. R., Huang, H. M., & Wu, J. (1983) Ages of the Milun and Pinanshan Conglomerates and their Bearings on the Quaternary movement of Eastern Taiwan. *Proceedings of the Geological Society of China*, 26, 67.
- Chi, W. R., Namson, J., & Mei, W. W. (1980) Calcareous Nannoplankton Biostratigraphy Of The Late Neogene Sediments Exposed Along The Hsiukuluanchi In The Coastal Range, Eastern Taiwan. *Petroleum Geology of Taiwan*, 17, 75-87.
- Chim, L. K., Yen, J. Y., Huang, S. Y., Liou, Y. S., & Tsai, L. L. Y. (2018) Using Raman spectroscopy of carbonaceous materials to track exhumation of an active orogenic belt: an example from eastern Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences, 164*, 248-259. doi: https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.06.030
- Deffontaines, B., Lee, J. C., Angelier, J., Carvalho, J., & Rudant, J. P. (1994) New geomorphic data on the active Taiwan orogen: a multisource approach. *Journal*

of Geophysical Research: Solid Earth, 99(B10), 20243-20266.

- Dickinson, W. R., & Suczek, C. A. (1979) Plate Tectonics and Sandstone Compositions1. *AAPG Bulletin*, 63(12), 2164-2182. doi: https://doi.org/10.1306/2f9188fb-16ce-11d7- 8645000102c1865d
- Donelick, R. A., O'Sullivan, P. B., & Ketcham, R. A. (2005) Apatite Fission-Track Analysis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1), 49-94. doi: https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.3
- Dorsey, R. J. (1988) Provenance evolution and unroofing history of a modern arc-continent collision; evidence from petrography of Plio-Pleistocene sandstones, eastern Taiwan. *Journal of Sedimentary Research*, 58(2), 208-218. doi: https://doi.org/10.1306/212f8d5a-2b24-11d7-8648000102c1865d
- Dorsey, R. J., Buchovecky, E. J., & Lundberg, N. (1988) Clay mineralogy of Pliocene-Pleistocene mudstones, eastern Taiwan: Combined effects of burial diagenesis and provenance unroofing. *Geology*, 16(10), 944-947. doi: https://doi.org/10.1130/0091-7613(1988)016<0944:Cmoppm>2.3.Co;2
- Dunkl, I. (2002) TRACKKEY: a Windows program for calculation and graphical presentation of fission track data. *Computers & Geosciences*, 28(1), 3-12. doi: https://doi.org/10.1016/S0098-3004(01)00024-3
- Ernst, W. G. (1983) Mineral parageneses in metamorphic rocks exposed along Tailuko Gorge, Central Mountain Range, Taiwan. *Journal of Metamorphic Geology*, 1(4), 305-329. doi: https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1983.tb00277.x
- Fleischer, R.L., Price, P.B. and Walker, R.M. (1965a) Ion explosion spike mechanism for formation of charged particle tracks in solids. *Journal of Applied Physics*, 36, 3645-3652. doi: https://doi.org/10.1063/1.1703059
- Fleischer, R., Price, P., & Walker, R. (1965b) Effects of temperature, pressure, and ionization of the formation and stability of fission tracks in minerals and

glasses. Journal of Geophysical Research, 70(6), https://doi.org/10.1029/JZ070i006p01497

Fleischer, R. L., Price, P. B., & Walker, R. M. (1975) Nuclear Tracks in Solids. Principles and Applications: University of California Press.

1497-1502.

doi:

- Fuller, C. W., Willett, S. D., Fisher, D., & Lu, C. Y. (2006) A thermomechanical wedge model of Taiwan constrained by fission-track thermochronometry. *Tectonophysics*, 425(1), 1-24. doi: https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.05.018
- Galbraith, R. F., & Green, P. F. (1990) Estimating the component ages in a finite mixture. International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 17(3), 197-206. doi: https://doi.org/10.1016/1359-0189(90)90035-V
- Garver, J. I., Brandon, M. T., Roden-Tice, M., & Kamp, P. J. J. (1999) Exhumation history of orogenic highlands determined by detrital fission-track thermochronology. *Geological Society, London, Special Publications, 154*(1), 283. doi: https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.154.01.13
- Geng, W., Zhang, X. H., & Huang, L. (2018) Arc-continent collision of the Coastal Range in Taiwan: Geochronological constraints from U-Pb ages of zircons. *Journal of Marine Systems, 180*, 182-190. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.11.014
- Ghent, E. D., Stout, M. Z., and Parrish, R. R. (1988) Determination of metamorphic pressure-temperature-time (P-T-t) paths, in E.G. Nisbet and C.M.R. Fowler, eds., Heat, metamorphism and tectonics. *Mineralogical Association of Canada Short Course, 14*, 155-188.
- Gleadow A. J. W., Duddy I. R., Green P. F., and Lovering J. F. (1986) Confined fission track lengths in apatite: a diagnostic tool for thermal history analysis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 94, 405- 415.

- Gleadow, A. J. W., & Lovering, J. F. (1978) Fission track geochronology of King Island, Bass Strait, Australia: Relationship to continental rifting. *Earth and Planetary Science Letters*, 37(3), 429-437. doi: https://doi.org/10.1016/0012-821X(78)90058-4
- Graham, S. A., Tolson, R. B., DeCelles, P. G., Ingersoll, R., Bargar, E., Caldwell, L. M.,
 Cavazza, W., Edwards, D. P., Follo, M. F., & Handschy, J. F. (1986)
 Provenance modeling as a technique for analyzing source terrane evolution and
 controls on foreland sedimentation. *Foreland Basins*, *8*, 425-436.
- Green, P. F., Duddy, I. R., Gleadow, A. J. W., Tingate, P. R., & Laslett, G. M. (1985) Fission-track annealing in apatite: track length measurements and the form of the Arrhenius plot. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements (1982), 10*(3), 323-328. doi: https://doi.org/10.1016/0735-245X(85)90121-8
- Ho, C. S. (1969) Geologic significance of potassium-argon ages of the Chimei Igneous Complex: Bulletin of Geological Survey, Taiwan, 20, 63-74.
- Hoffman, J., & Hower, J. (1979) Clay mineral assemblages as low grade metamorphic geothermometers: application to the thrust faulted disturbed belt of Montana, USA. *The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 26*, 55-79.
- Horng, C. S., & Shea, K. S. (1996) Dating of the Plio-Pleistocene rapidly deposited sequence based on integrated magneto-biostratigraphy: A case study of the Madagida-chi Section, Coastal Range, eastern Taiwan. *Journal of the Geological Society of China, 39*, 31-58.
- Hsieh, H.H., Chen, C.H., Lin, P.Y., Yen, H.Y. (2014) Curie point depth from spectral analysis of magnetic data in Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 90, 26-33.
- Hsu, W. H., Byrne, T. B., Ouimet, W., Lee, Y. H., Chen, Y. G., Soest, M. v., & Hodges,K. (2016) Pleistocene onset of rapid, punctuated exhumation in the eastern

Central Range of the Taiwan orogenic belt. *Geology*, 44(9), 719-722. doi: https://doi.org/10.1130/g37914.1

- Huang, S. Y., Lee, Y. H., Mesalles, L., Horng, C. S., Lu, H. Y., Tsai, Y. L., Wu, Y. J., Chen, F. Y. & Tan, X. B. (2022) Plio-Pleistocene fluvial dynamics in the pro-foreland basins of Taiwan: Thermochronological constraints and tectonic implications from the syn-orogenic deposits. *Tectonophysics*, 838, 229486. doi: https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229486
- Hurford, A. J., & Green, P. F. (1983) The zeta age calibration of fission-track dating. *Chemical Geology*, 41, 285-317. doi: https://doi.org/10.1016/S0009-2541(83)80026-6
- Juang, W. S., Bellon, H., (1984) The potassium-argon dating of andesites from Taiwan. Proceedings of the Geological Society of China, 27, 86-100.
- Kasuya, M., & Naeser, C. W. (1988) The effect of α-damage on fission-track annealing in zircon. International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 14(4), 477-480. doi: https://doi.org/10.1016/1359-0189(88)90008-8
- Kirstein, L. A., Carter, A., & Chen, Y. G. (2013) Impacts of arc collision on small orogens: new insights from the Coastal Range detrital record, Taiwan. *Journal* of the Geological Society, 171(1), 5-8. doi: https://doi.org/10.1144/jgs2013-046
- Kirstein, L. A., Fellin, M. G., Willett, S. D., Carter, A., Chen, Y. G., Garver, J. I., & Lee,
 D. C. (2010) Pliocene onset of rapid exhumation inTaiwan during arc-continent collision: new insights from detrital thermochronometry. *Basin Research, 22*, 270-285. doi: https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2009.00426.x
- Krishnaswami, S., Lal, D., Prabhu, N., & Macdougall, D. (1974) Characteristics of fission tracks in zircon: applications to geochronology and cosmology. *Earth* and Planetary Science Letters, 22(1), 51-59.

- Lai, L. S. H., Dorsey, R. J., Horng, C. S., Chi, W. R., Shea, K. S., & Yen, J. Y. (2021) Polygenetic mélange in the retrowedge foredeep of an active arc-continent collision, Coastal Range of eastern Taiwan. *Sedimentary Geology*, 418, 105901. doi: https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2021.105901
- Lan, C.Y. (1982) Mineralogy, petrology and hydrothermal alteration of the Chimei igneous complex, Hualien, Taiwan: *MRSO Report*, 193, 60.
- Lee, T. Q., Kissel, C., Barrier, E., Laj, C., & Chi, W. R. (1991) Paleomagnetic evidence for a diachronic clockwise rotation of the Coastal Range, eastern Taiwan. *Earth* and Planetary Science Letters, 104(2-4), 245-257.
- Lee, Y. H., Byrne, T. B., Lo, W., Wang, S. J., Tsao, S. J., Chen, C. H., Yu, H. C., Tan, X., Soest, M., Hodges, K., Mesalles, L., Robinson, H., & Fosdick, J. C. (2022)
 Out of sequence faulting in the backbone range, Taiwan: Implications for thickening and exhumation processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 594, 117711. doi: https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117711
- Lee, Y. H., Chen, C. C., Liu, T. K., Ho, H. C., Lu, H. Y., & Lo, W. (2006) Mountain building mechanisms in the Southern Central Range of the Taiwan Orogenic Belt—From accretionary wedge deformation to arc-continent collision. *Earth* and Planetary Science Letters - EARTH PLANET SCI LETT, 252, 413-422. doi: https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.09.047
- Liew Y. C., & Lin C. C. (1974) Heavy mineral association in the Neogene formation of the southern part of Coastal Range, east Taiwan. *Acta geologica taiwanica*, 17, 23-36.
- Liu, T. K., Chen, Y. G., Chen, W. S., & Jiang, S. H. (2000) Rates of cooling and denudation of the Early Penglai Orogeny, Taiwan, as assessed by fission-track constraints. *Tectonophysics*, 320, 69-82. doi: https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00028-7

- Liu, T. K., Hsieh, S., Chen, Y. G., & Chen, W. S. (2001) Thermo-kinematic evolution of the Taiwan oblique-collision mountain belt as revealed by zircon fission track dating. *Earth and Planetary Science Letters, 186*(1), 45-56. doi: https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00232-1
- Lo, C. H., Chang, S. C., Chen, W. S., & Song, S. R. (2002) Cold basin in Coastal Range, Eastern Taiwan: inferred from argon retention in zeolite and altered glass during burial heating. *Western Pacific Earth Sciences*, 2(2), 223-238.
- Malusà, M. G., Carter, A., Limoncelli, M., Villa, I. M., & Garzanti, E. (2013) Bias in detrital zircon geochronology and thermochronometry. *Chemical Geology*, 359, 90-107. doi: https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.09.016
- Malusà, M. G., & Fitzgerald, P. G. (2019) From cooling to exhumation: setting the reference frame for the interpretation of thermochronologic data. *Fission-track thermochronology and its application to geology*, 147-164. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-89421-8_8
- Malusà, M. G., Wang, J., Garzanti, E., Liu, Z. C., Villa, I. M., & Wittmann, H. (2017) Trace-element and Nd-isotope systematics in detrital apatite of the Po river catchment: Implications for provenance discrimination and the lag-time approach to detrital thermochronology. *Lithos*, 290, 48-59. doi: https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.08.006
- McDOWELL, F. W., & Keizer, R. P. (1977) Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango city and Mazatlán, Mexico. *Geological Society of America Bulletin, 88*(10), 1479-1487. doi: https://doi.org/10.1130/0016-7606(1977)88%3C1479:TOMVIT%3E2.0.CO;2
- Naeser, N. D., Zeitler, P. K., Naeser, C. W., & Cerveny, P. F. (1987) Provenance studies by fission-track dating of zircon-etching and counting procedures. *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks*

and Radiation Measurements, 13(2), 121-126. doi: https://doi.org/10.1016/1359-0189(87)90022-7

- Reiners, P. W., & Brandon, M. T. (2006) Using thermochronology to understand orogenic erosion. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 34, 419-466. doi: https://doi.org/10.1146/annurev.earth.34.031405.125202
- Resentini, A., Malusa, M. G., & Garzanti, E. (2020) Ongoing exhumation of the Taiwan orogenic wedge revealed by detrital apatite thermochronology: The impact of effective mineral fertility and zero-track grains. *Earth and Planetary Science Letters, 544*, 13. doi: https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116374
- Richard, M., Bellon, H., Maury, R. C., Barrier, E., Juang, W. S. (1986) Miocene to recent calc-alkaline volcanism in eastern Taiwan: K-Ar ages and petrography. *Tectonophysics*, 125, 87-102
- Richter, S., Alonso, A., De Bolle, W., Wellum, R., & Taylor, P. D. P. (1999). Isotopic "fingerprints" for natural uranium ore samples. *International Journal of Mass Spectrometry*, 193(1), 9-14. doi: https://doi.org/10.1016/S1387-3806(99)00102-5
- Richter, S., Alonso, A., Truyens, J., Kühn, H., Verbruggen, A., & Wellum, R. (2007).
 Evaluating the status of uranium isotope ratio measurements using an inter-laboratory comparison campaign. *International Journal of Mass Spectrometry*, 264(2-3), 184-190. doi: https://doi.org/10.1016/j.ijms.2007.04.013
- Shao, W. Y., Chung, S. L., Chen W. S. (2012) Old continental crust beneath young oceanic arc, eastern Taiwan: New Data and Interpretation Related to Taiwan Orogeny. Abstract to Geol. Soc. China Annual Meeting, Chung-Li, p. 234.
- Shao, W. Y., Chung, S. L., Chen, W. S., Lee, H. Y., & Xie, L. W. (2015) Old continental zircons from a young oceanic arc, eastern Taiwan: Implications for

Luzon subduction initiation and Asian accretionary orogeny. *Geology*, 43(6), 479-482. doi: https://doi.org/10.1130/g36499.1

- Shen, T. T., Liu, T. K., Huang, S. Y., Hsieh, P. S., & Wu, C. Y. (2019) Post-collisional exhumation and geotherm pattern in northern Tananao Complex, northeastern Taiwan. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*. doi: https://doi.org/10.3319/TAO.2019.04.06.01
- Simoes, M., Avouac, J. P., Beyssac, O., Goffé, B., Farley, K. A., & Chen, Y. G. (2007) Mountain building in Taiwan: A thermokinematic model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 112*(B11). doi: https://doi.org/10.1029/2006JB004824
- Song, S. R., & Lo, H. J. (1988) Volcanic Geology Of Fongpin-Takangkou Area, Coastal Range Of Taiwan. Symposium on the Arc-Continent Collision and Orogenic Sedimentation in Eastern Taiwan and Ancient Analogs, Handbook, Taiwan, ROC.
- Song, T. R. A., Ma, K. F., Byrne, T. B., & Liu, C. S. (2002) Estimation of the thermal structure of a young orogenic belt according to a model of whole-crust thickening. *Geology and geophysics of an arc-continent collision, Taiwan, 358*, 121-136. doi: https://doi.org/10.1130/0-8137-2358-2.121
- Steven, T., Mehnert, H., & Obradovich, J. (1967) Age of Volcanic activity in the San Juan Mountains, Colorado, USGS Prof. Paper, 575-D. D47–D55.
- Suppe, J. (1981) Mechanics of mountain building and metamorphism in Taiwan. Memoir of the Geological Society of China (Taiwan), 4, 67-89.
- Tagami, T. (2005) Zircon fission-track thermochronology and applications to fault studies. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1), 95-122. doi: https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.4
- Tagami, T., Lal, N., Sorkhabi, R. B., Ito, H., & Nishimura, S. (1988) Fission track

dating using external detector method. *Memoirs of the Faculty of Science, Kyoto University, Series of Geology and Mineralogy,* 53(1-2), 1-30.

- Tagami, T., & O'Sullivan, P. B. (2005) Fundamentals of fission-track thermochr-onology. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 58(1), 19-47. doi: https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.2
- Teng, L. S. (1979) Petrographical study of Neogene sandstones of the Coastal Range, eastern Taiwan (1. Northern Part) Science Reports of the National Taiwan University ACTA Geologica Taiwanica, 20, 129-156.
- Tsai, C. H., Iizuka, Y., & Ernst, W. G. (2013) Diverse mineral compositions, textures, and metamorphic P–T conditions of the glaucophane-bearing rocks in the Tamayen mélange, Yuli belt, eastern Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 63, 218-233. doi: https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.09.019
- Wagner, G. A., Miller, D. S., & Jäger, E. (1979) Fission track ages on apatite of Bergell rocks from Central Alps and Bergell boulders in Oligocene sediments. *Earth* and Planetary Science Letters, 45, 355. doi: https://doi.org/10.1016/0012-821x(79)90136-5
- Wagner, G. A., & Reimer, G. M. (1972) Fission track tectonics: The tectonic interpretation of fission track apatite ages. *Earth and Planetary Science Letters*, 14, 263-268.
- Wagner, G. A., van den Haute, P. (1992) Fission-Track Dating. Solid earth sciences library, vo;. 6. In: Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 285p.
- Walter, R. C. (1989) Application and limitation of fission-track geochronology to Quarternary tephras. *Quaternary International, 1*, 35-46.
- Wang, H. L., Zhu, L., & Chen, H. W. (2010) Moho depth variation in Taiwan from teleseismic receiver functions. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(3), 286-291. doi: https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2009.08.015

- Wang, Y., Wang, Y., Li, S., Seagren, E., Zhang, Y., Zhang, P., & Qian, X. (2020)
 Exhumation and landscape evolution in eastern South China since the Cretaceous: New insights from fission-track thermochronology. *Journal of Asian Earth Sciences, 191*, 104239. doi: https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104239
- Wang, Y., & Yang, C. N. (1974) Geology and copper deposits of Chimei area, Coastal Range, Taiwan. Proceedings of the National Science Council, Republic of China, 7(1), 1-23.
- Wang, Y., Zuo, R., Cao, K., Xu, X., & Zattin, M. (2022) Late Mesozoic to Cenozoic exhumation of the SE South China Block: Constraints from zircon and apatite fission-track thermochronology. Tectonophysics, 838, 229518. doi: https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229518
- Warneke, L. A., & Ernst, W. G. (1984) Progressive Cenozoic Metamorphism Of Rocks Cropping Out Along The Southern East-West Cross-Island Highway, Taiwan. *Memoir of the Geological Society of China (Taiwan)*, 6, 105-132.
- Willett, S. D., & Brandon, M. T. (2002) On steady states in mountain belts. *Geology,* 30(2), 175-178. doi: https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0175:Ossimb>2.0.Co;2
- Willett, S. D., Fisher, D., Fuller, C., Yeh, E. C., & Lu, C. Y. (2003) Erosion rates and orogenic-wedge kinematics in Taiwan inferred from fission-track thermochronometry. *Geology*, 31(11), 945-948. doi: https://doi.org/10.1130/g19702.1
- Yang, T. F., Chen, C. H., Tien, R. L., Song, S. R., & Liu, T. K. (2003) Remnant magmatic activity in the Coastal Range of East Taiwan after arc–continent collision: fission-track data and ³He/⁴He ratio evidence. *Radiation Measurements, 36*(1-6), 343-349. doi:

https://doi.org/10.1016/S1350-4487(03)00149-5

- Yang, T. F., Tien, J. L., Chen, C. H., Lee, T., & Punongbayan, R. S. (1995)
 Fission-track dating of volcanics in the northern part of the Taiwan-Luzon Arc:
 eruption ages and evidence for crustal contamination. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 11*(2), 81-93. doi:
 https://doi.org/10.1016/0743-9547(94)00041-C
- Yang, T. Y., Liu, T. K., Chen, C. H. (1988) Thermal event records of the Chi-mei Igneous Complex: constraint on the ages of magma activities and the structural implication based on fission track dating. *Acta Geol. Taiwan.* 26, 237-246.
- Yao, T. M., Tien, P. L., Wang-Lee, C. (1988) Clay mineralogical studies on the Neogene formations, Taiyuan basin, southern Coastal Range of Taiwan. Acta Geologica Taiwanica, 26, 263-277.
- Yen, T. P. (1963) The metamorphic belts within the Tananao schist. Bulletin of Geological Survey, Taiwan, 7, 47-50.
- Yen T. P. (1967) Volcanic geology of the Coastal Range, eastern Taiwan. *Proceedings* of the Geological Society of China, 6, 72-74
- Zhang, Y., Tsai, C. H., Froitzheim, N., & Ustaszewski, K. (2020) The Yuli Belt in Taiwan: Part of the suture zone separating Eurasian and Philippine Sea plates. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences, 31*(4). doi: https://doi.org/10.3319/TAO.2020.06.28.01

附錄



附錄一 磷灰石核飛跡 BINOMFIT 參數

MDJ-01

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2) : 4.40E+05 Relative error (%) : 1.37 Effective uranium content of monitor (ppm) : 37.38 Zeta factor and standard error (yr cm2) : 332.51 22.20 Size of counter square (cm2) : 1.00E-08

Grain no.	RhoS	Na	RhoI	NI;	Squares	Urani	ium	Gr	ain age	(Ma)
Gram no.	(cm ⁻²)	115	(cm ⁻²)	INI	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ	Age	95	% CI
1	2.40E+04	2	2.04E+05	17	8347	17	8	9.2	1	36.2
2	2.17E+04	2	1.41E+05	13	9214	12	7	12	1.2	49.6
3	0.00E+00	0	2.62E+05	4	1525	22	21	13.8	0.5	110
4	1.60E+04	1	1.60E+05	10	6248	14	8	8.3	0.2	51.3
5	0.00E+00	0	8.82E+04	6	6806	7	6	9	0.3	61.9
6	9.59E+04	8	5.64E+05	47	8338	48	14	12.7	5.1	26.6
7	0.00E+00	0	1.00E+05	1	997	9	14	72.8	1.9	2363.8
8	6.65E+04	2	1.66E+05	5	3009	14	12	30.5	2.8	176.5
9	2.30E+04	1	3.68E+05	16	4346	31	15	5.2	0.1	29.4
10	0.00E+00	0	8.07E+04	3	3717	7	7	19	0.6	174.8
11	0.00E+00	0	6.74E+04	2	2967	6	7	30.3	0.9	378.5
12	2.93E+04	1	2.63E+05	9	3416	22	15	9.2	0.2	58.5
13	2.50E+04	1	1.25E+05	5	3997	11	9	16.2	0.3	129.6
14	2.27E+04	1	6.81E+04	3	4403	6	6	26.5	0.5	297
15	0.00E+00	0	1.22E+05	3	2459	10	11	19	0.6	174.8
16	3.96E+05	16	3.04E+06	123	4043	258	47	9.6	5.3	16.1
17	8.33E+04	1	3.33E+05	4	1201	28	27	20.2	0.4	182.4
18	0.00E+00	0	1.63E+05	5	3076	14	12	10.9	0.4	79.4
19	0.00E+00	0	8.89E+04	3	3376	8	8	19	0.6	174.8
20	1.34E+05	7	1.42E+06	74	5221	120	28	7.1	2.7	15
21	2.75E+04	2	1.92E+05	14	7281	16	9	11.1	1.2	45.4
22	0.00E+00	0	1.73E+05	2	1156	15	19	30.3	0.9	378.5
23	2.20E+05	8	6.04E+05	22	3643	51	22	26.9	10.2	61.8

GRAIN AGES IN ORIGINAL ORDER

									00000	010101010
24	0.00E+00	0	1.45E+05	10	6915	12	8	5.3	0.2	32.6
25	5.92E+04	2	1.18E+05	4	3376	10	9	37.8	3.3	250.5
26	0.00E+00	0	9.95E+04	5	5023	8	7	10.9	0.4	79.4
27	1.47E+05	6	1.96E+05	8	4074	17	11	55	15.7	178
28	2.03E+05	3	5.42E+05	8	1476	46	32	28.3	4.7	113.4
29	0.00E+00	0	8.59E+04	6	6981	7	6	9	0.3	61.9
30	7.66E+03	1	4.60E+04	6	13054	4	3	13.6	0.3	99.8
31	9.99E+04	4	1.25E+05	5	4006	11	9	58.7	11.6	266.6
32	2.02E+04	1	1.42E+05	7	4945	12	9	11.7	0.2	80.9
33	1.57E+05	5	6.29E+04	2	3180	5	7	172.9	29.9	1682.4
34	2.72E+05	10	3.40E+06	125	3678	289	52	5.9	2.7	11.1
35	2.76E+04	1	6.08E+05	22	3618	52	22	3.8	0.1	20.6
36	5.28E+04	1	1.06E+05	2	1892	9	11	38.8	0.6	667.5
37	1.46E+04	1	7.30E+04	5	6846	6	5	16.2	0.3	129.6
38	2.51E+06	72	2.82E+06	81	2867	240	54	64.8	46.5	90
39	0.00E+00	0	4.11E+05	6	1461	35	27	9	0.3	61.9
40	0.00E+00	0	5.33E+04	2	3750	5	6	30.3	0.9	378.5
41	3.21E+04	1	3.53E+05	11	3113	30	18	7.5	0.2	45.6
42	2.73E+05	4	1.16E+06	17	1463	99	47	17.7	4.2	52.6
43	3.87E+04	1	1.16E+05	3	2583	10	11	26.5	0.5	297
44	0.00E+00	0	1.54E+05	6	3901	13	10	9	0.3	61.9
45	5.70E+04	2	4.84E+05	17	3511	41	20	9.2	1	36.2
46	0.00E+00	0	6.61E+05	19	2876	56	25	2.7	0.1	15.7
47	8.22E+04	1	3.29E+05	4	1217	28	26	20.2	0.4	182.4
48	1.17E+05	2	4.11E+05	7	1703	35	25	22	2.1	109
49	1.93E+05	6	1.54E+06	48	3117	131	38	9.4	3.2	21.4
50	3.37E+04	5	1.14E+05	17	14852	10	5	22	6.2	60.5
51	3.92E+04	1	7.83E+04	2	2553	7	8	38.8	0.6	667.5
52	1.40E+04	1	1.40E+05	10	7142	12	7	8.3	0.2	51.3
53	1.87E+05	1	1.31E+06	7	535	111	81	11.7	0.2	80.9
54	1.49E+05	2	3.73E+05	5	1340	32	27	30.5	2.8	176.5
55	6.37E+04	1	4.46E+05	7	1570	38	28	11.7	0.2	80.9
56	3.70E+04	1	7.41E+05	20	2700	63	28	4.2	0.1	22.9
57	2.55E+04	1	1.02E+05	4	3927	9	8	20.2	0.4	182.4
58	6.64E+04	1	1.99E+05	3	1506	17	18	26.5	0.5	297
59	1.89E+05	3	8.83E+05	14	1585	75	39	16.3	2.9	56
60	4.25E+04	1	8.51E+04	2	2351	7	9	38.8	0.6	667.5

									101010101	010101010
61	7.50E+04	1	5.25E+05	7	1333	45	33	11.7	0.2	80.9
62	1.67E+04	1	1.50E+05	9	5993	13	8	9.2	0.2	58.5
63	6.53E+04	3	2.83E+05	13	4592	24	13	17.5	3.1	61.2
64	2.83E+05	5	1.19E+06	21	1770	101	44	17.8	5.1	47.4
65	6.59E+04	1	2.64E+05	4	1517	22	21	20.2	0.4	182.4
66	0.00E+00	0	2.49E+05	5	2008	21	18	10.9	0.4	79.4
67	0.00E+00	0	1.39E+05	4	2877	12	11	13.8	0.5	110
68	6.97E+04	1	1.39E+05	2	1434	12	15	38.8	0.6	667.5
69	4.05E+05	7	2.55E+06	44	1728	216	65	11.9	4.4	26
70	3.63E+05	3	7.26E+05	6	827	62	48	37.4	5.9	169.2
71	0.00E+00	0	3.96E+05	10	2523	34	21	5.3	0.2	32.6
72	9.38E+04	1	3.75E+05	4	1066	32	30	20.2	0.4	182.4
73	1.78E+05	5	1.78E+05	5	2807	15	13	72.8	16.8	310.6
74	0.00E+00	0	1.18E+05	6	5073	10	8	9	0.3	61.9
75	5.03E+04	3	8.38E+04	5	5966	7	6	44.7	6.8	222
76	1.38E+05	3	2.76E+05	6	2177	23	18	37.4	5.9	169.2
77	2.13E+04	1	1.28E+05	6	4684	11	9	13.6	0.3	99.8
78	0.00E+00	0	2.00E+05	4	2000	17	16	13.8	0.5	110
79	0.00E+00	0	2.76E+05	6	2172	23	18	9	0.3	61.9
80	7.05E+04	4	1.59E+05	9	5675	13	9	33.2	7.3	115.6
81	9.98E+04	5	5.99E+05	30	5008	51	18	12.5	3.7	31.7
82	1.06E+04	1	1.06E+05	10	9419	9	6	8.3	0.2	51.3
83	7.03E+04	5	1.12E+05	8	7116	10	7	46.1	11.8	156.8
84	0.00E+00	0	1.31E+05	4	3065	11	10	13.8	0.5	110
85	0.00E+00	0	1.16E+05	4	3438	10	9	13.8	0.5	110
86	2.11E+04	1	1.48E+05	7	4732	13	9	11.7	0.2	80.9
87	9.44E+04	3	1.70E+06	54	3177	144	39	4.3	0.8	12.5
88	2.70E+05	4	1.75E+06	26	1484	149	58	11.6	2.9	32.4
89	0.00E+00	0	1.20E+05	6	4986	10	8	9	0.3	61.9
90	4.19E+04	1	2.10E+05	5	2386	18	15	16.2	0.3	129.6
91	4.19E+04	2	1.89E+05	9	4771	16	10	17.2	1.7	78.2
92	4.34E+04	2	1.09E+05	5	4605	9	8	30.5	2.8	176.5
93	1.60E+05	1	4.80E+05	3	625	41	44	26.5	0.5	297
94	0.00E+00	0	1.44E+05	4	2777	12	12	13.8	0.5	110
95	1.55E+06	59	1.34E+06	51	3796	114	32	84.1	56.9	124.6
96	0.00E+00	0	2.06E+05	9	4362	18	11	5.9	0.2	37
97	1.76E+05	2	1.49E+06	17	1138	127	61	9.2	1	36.2

									101010101	01010101010
98	0.00E+00	0	3.12E+05	4	1284	26	25	13.8	0.5	110
99	0.00E+00	0	5.56E+04	4	7196	5	4	13.8	0.5	110
100	0.00E+00	0	1.09E+05	5	4571	9	8	10.9	0.4	79.4
101	0.00E+00	0	8.15E+04	7	8585	7	5	7.6	0.3	50.6
102	0.00E+00	0	1.06E+05	3	2840	9	10	19	0.6	174.8
103	3.94E+04	1	1.18E+05	3	2537	10	11	26.5	0.5	297
104	0.00E+00	0	1.52E+05	2	1316	13	16	30.3	0.9	378.5
105	1.17E+05	2	6.41E+05	11	1715	54	32	14.1	1.4	60.7
106	2.75E+05	19	1.39E+06	96	6920	118	24	14.6	8.3	23.9
107	0.00E+00	0	6.38E+04	2	3133	5	7	30.3	0.9	378.5
108	1.36E+05	2	4.07E+05	6	1474	35	27	25.6	2.4	135.1
109	4.52E+04	1	3.17E+05	7	2211	27	20	11.7	0.2	80.9
110	1.03E+05	1	3.10E+05	3	967	26	28	26.5	0.5	297
111	4.52E+04	1	9.04E+04	2	2211	8	10	38.8	0.6	667.5
112	0.00E+00	0	9.64E+04	1	1038	8	13	72.8	1.9	2363.8
113	2.87E+04	1	2.58E+05	9	3488	22	14	9.2	0.2	58.5
114	6.32E+04	1	1.90E+05	3	1582	16	17	26.5	0.5	297
115	1.56E+05	5	1.88E+05	6	3199	16	12	61	14.7	235.6
POOLED	8.41E+04	354	3.61E+05	1520	420843	31	2	17	14.3	20.3

PARAMETERS FOR BEST-FIT PEAKS

Standard error for peak age includes group error

Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

Peak	Peak age	680	6 CI	050	6 CI	W(7)	Frac(%)	SF %	Count	
no.	(Ma)	00 /	0 01	7570 CI		W(Z)	F14C(70)	3E , 70	Count	
1	10.5	-1.1	+1.2	-2.0	+2.5	0.92	91.2	3.8	104.9	
2	67.4	-8.7	+10.0	-16.0 +20.9		0.41	8.8	3.8	10.1	

Log-likelihood for best fit : -174.010

Chi-squared value for best fit : 98.377

Reduced chi-squared value : 0.878

Probability for F test : 0%

Condition number for COVAR matrix : 12.02

Number of iterations : 18

MDJ-02

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2) : 5.61E+05

Relative error (%) : 1.39

Effective uranium content of monitor (ppm) : 36.50

Zeta factor and standard error (yr cm2) : 347.02 26.64 Size of counter square (cm2) : 1.00E-08



Grain no.	RhoS	Na	RhoI	NI:	Squares i –	s Uranium		Grain age (Ma)		
Grain no.	(cm ⁻²)	INS	(cm ⁻²)	INI	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ	Age	95%	6 CI
1	0.00E+00	0	2.21E+05	6	2720	14	11	11.9	0.4	82.1
2	6.92E+05	30	1.27E+06	55	4338	83	22	53	32.7	83.8
3	6.15E+04	3	3.89E+05	19	4880	25	12	16	2.9	52
4	2.14E+05	21	1.26E+06	124	9818	82	15	16.6	9.8	26.3
5	3.66E+04	1	2.56E+05	7	2729	17	12	15.6	0.3	107.3
6	2.21E+04	2	4.75E+05	43	9060	31	9	4.9	0.5	17.4
7	5.43E+05	17	1.69E+06	53	3133	110	30	31.3	16.9	54.6
8	1.94E+04	1	7.97E+05	41	5144	52	16	2.7	0.1	14
9	4.64E+04	6	5.02E+05	65	12936	33	8	9.2	3.2	20.6
10	2.95E+04	1	1.27E+06	43	3387	83	25	2.6	0.1	13.3
11	0.00E+00	0	8.10E+05	12	1481	53	30	5.8	0.2	34.9
12	7.29E+04	2	2.99E+06	82	2745	195	43	2.6	0.3	8.8
13	5.06E+04	3	9.79E+05	58	5927	64	17	5.3	1	15.4
14	7.79E+04	1	1.09E+06	14	1284	71	37	7.9	0.2	45.5
15	0.00E+00	0	1.42E+05	2	1408	9	12	40.2	1.2	498.3
16	0.00E+00	0	4.62E+05	7	1517	30	22	10.1	0.4	67.2
17	1.77E+05	6	6.79E+05	23	3388	44	18	25.8	8.4	63.8
18	1.21E+05	2	6.68E+05	11	1647	43	26	18.8	1.9	80.6
19	4.14E+05	33	8.65E+05	69	7974	56	14	46.5	29.7	71.1
20	1.91E+05	3	3.19E+05	5	1568	21	18	59.3	9.1	293.3
21	5.60E+04	2	6.44E+05	23	3573	42	17	9	1	34.2
22	1.67E+05	2	8.36E+05	10	1197	54	34	20.6	2.1	90.7
23	7.10E+04	4	2.16E+06	122	5637	141	26	3.3	0.9	8.4
24	1.93E+05	5	1.93E+05	5	2585	13	11	96.6	22.3	409.5
25	1.05E+06	18	8.20E+05	14	1708	53	28	123.6	58.5	266.3
26	4.80E+04	1	5.76E+05	12	2082	38	21	9.2	0.2	54.6
27	3.97E+04	2	1.59E+06	80	5037	103	23	2.6	0.3	9.1
28	1.67E+06	27	2.23E+06	36	1612	145	48	72.7	42.4	122.5
29	1.22E+05	3	3.24E+05	8	2466	21	15	37.5	6.2	150.3
30	6.60E+04	1	2.77E+06	42	1516	180	56	2.6	0.1	13.6
31	2.99E+05	13	1.26E+06	55	4351	82	22	23.2	11.5	42.5

GRAIN AGES IN ORIGINAL ORDER

									1010101010	10101010
32	5.78E+04	7	7.92E+05	96	12119	52	11	7.2	2.8	15.2
33	1.80E+05	20	3.24E+05	39	11106	21	7	54	29.6	95.3
34	5.33E+05	14	9.13E+05	24	2628	59	24	56.8	27.1	113.3
35	5.23E+04	2	1.33E+06	51	3826	87	24	4.1	0.4	14.5
36	4.69E+04	2	2.11E+05	9	4261	14	9	22.9	2.3	103.6
37	3.12E+05	2	1.87E+06	12	641	122	69	17.2	1.8	72.5
38	2.41E+05	7	6.87E+05	20	2910	45	20	34.5	12.1	83.3
39	1.68E+05	15	3.88E+06	346	8912	253	28	4.3	2.3	7.1
40	1.97E+05	2	3.94E+05	4	1015	26	24	50.2	4.4	330.8
41	0.00E+00	0	2.48E+05	8	3220	16	11	8.8	0.3	56.8
42	4.06E+05	4	5.08E+05	5	985	33	28	77.9	15.4	351.9
43	2.08E+04	1	2.91E+05	14	4812	19	10	7.9	0.2	45.5
44	0.00E+00	0	4.46E+05	5	1120	29	25	14.5	0.5	105.3
45	5.51E+04	1	3.85E+05	7	1816	25	18	15.6	0.3	107.3
46	2.76E+04	2	5.39E+05	39	7239	35	11	5.4	0.6	19.3
47	2.19E+05	4	1.64E+05	3	1825	11	11	126.9	21.9	829.9
48	6.28E+04	1	4.40E+05	7	1592	29	21	15.6	0.3	107.3
49	1.69E+05	4	5.83E+06	138	2367	380	65	2.9	0.8	7.4
50	1.04E+05	2	2.61E+05	5	1914	17	15	40.5	3.7	233.5
51	1.26E+05	4	7.24E+05	23	3176	47	19	17.5	4.3	49.4
52	4.71E+04	3	1.62E+06	103	6373	105	21	3	0.6	8.5
53	1.77E+04	1	4.08E+05	23	5638	27	11	4.8	0.1	26
54	4.81E+05	43	7.50E+05	67	8935	49	12	62.2	41.4	92.4
55	8.31E+05	30	2.85E+06	103	3611	186	37	28.4	18.2	42.8
56	0.00E+00	0	2.07E+06	28	1353	135	51	2.4	0.1	13.7
57	2.94E+05	9	1.53E+06	47	3065	100	29	18.9	8	38.4
58	0.00E+00	0	4.30E+05	12	2793	28	16	5.8	0.2	34.9
59	3.12E+05	15	3.64E+06	175	4803	237	36	8.4	4.6	14.1
60	2.64E+05	15	1.14E+06	65	5692	74	18	22.6	11.9	39.7
61	0.00E+00	0	2.98E+05	18	6049	19	9	3.8	0.1	22.1
62	1.47E+06	90	7.34E+05	45	6132	48	14	191.3	133	279
63	2.34E+05	6	4.69E+05	12	2559	31	17	49.1	15	138.6
64	8.88E+04	2	2.89E+06	65	2252	188	47	3.2	0.4	11.3
65	8.65E+04	4	1.06E+06	49	4625	69	20	8.2	2.1	21.6
66	3.46E+04	2	4.33E+05	25	5774	28	11	8.3	0.9	31.2
67	2.11E+05	3	1.41E+06	20	1419	92	41	15.2	2.8	49
68	0.00E+00	0	4.16E+05	13	3128	27	15	5.3	0.2	31.9

									0000000	10101010
69	5.13E+05	32	3.30E+06	206	6242	215	30	15.2	10.1	22
70	0.00E+00	0	9.94E+05	49	4928	65	18	1.4	0.1	67.6
71	1.80E+05	11	3.07E+06	187	6100	200	30	5.8	2.8	10.5
72	1.53E+06	22	4.18E+06	60	1434	272	70	35.7	20.8	58.8
73	4.49E+04	2	2.89E+06	129	4458	188	34	1.6	0.2	5.6
74	3.55E+05	14	2.54E+06	100	3940	165	33	13.7	7.2	23.9
75	6.61E+04	2	8.26E+05	25	3025	54	21	8.3	0.9	31.2
76	1.08E+06	25	3.83E+06	89	2321	250	53	27.4	16.8	42.9
77	0.00E+00	0	3.49E+05	11	3156	23	13	6.3	0.2	38.7
78	1.04E+05	5	5.39E+05	26	4821	35	14	19.2	5.6	49.3
79	1.01E+05	1	3.03E+05	3	991	20	21	35.2	0.6	391.8
80	7.98E+04	3	5.06E+05	19	3758	33	15	16	2.9	52
81	4.09E+04	1	6.95E+05	17	2447	45	22	6.5	0.1	36.4
82	6.74E+04	2	1.01E+06	30	2967	66	24	6.9	0.8	25.5
83	2.08E+05	8	3.64E+05	14	3845	24	12	55.8	20.2	140.5
84	1.94E+04	1	4.66E+05	24	5150	30	12	4.6	0.1	24.8
85	7.11E+05	55	5.81E+05	45	7740	38	11	117.7	78.2	178.1
86	2.18E+06	130	1.32E+06	79	5966	86	19	158	118.8	211.3
87	4.41E+04	2	4.85E+05	22	4540	32	13	9.5	1	35.9
88	1.21E+05	5	1.21E+05	5	4127	8	7	96.6	22.3	409.5
89	2.52E+05	7	1.84E+06	51	2775	120	34	13.6	5.1	29.5
90	2.00E+05	7	4.00E+05	14	3498	26	14	49	16.6	127.6
91	3.88E+05	5	4.73E+06	61	1290	308	79	8.2	2.5	19.6
92	1.42E+05	15	1.61E+06	170	10572	105	16	8.7	4.7	14.6
93	2.66E+04	1	1.33E+05	5	3756	9	7	21.6	0.4	171.6
94	1.52E+05	7	4.77E+05	22	4610	31	13	31.4	11.2	74.6
95	1.91E+04	1	3.64E+05	19	5222	24	11	5.8	0.1	32.1
96	1.81E+05	4	1.31E+06	29	2210	85	32	13.9	3.4	38.1
97	7.49E+04	2	3.75E+05	10	2669	24	15	20.6	2.1	90.7
98	1.84E+06	40	3.40E+06	74	2177	221	52	52.5	34.7	77.9
99	3.43E+04	2	3.09E+05	18	5828	20	9	11.5	1.2	45
100	4.04E+05	10	1.13E+06	28	2473	74	28	35	15	73.3
101	1.40E+04	1	3.78E+05	27	7141	25	9	4.1	0.1	21.8
102	2.21E+04	1	3.53E+05	16	4527	23	11	6.9	0.1	39
103	1.17E+05	1	5.86E+05	5	853	38	33	21.6	0.4	171.6
104	2.49E+04	2	2.37E+05	19	8017	15	7	10.9	1.2	42.3
105	9.33E+04	1	4.48E+06	48	1072	291	84	2.3	0.1	11.8

									10 33	
106	5.72E+05	13	6.16E+06	140	2271	401	69	9.1	54.7	16
107	2.32E+05	7	4.64E+05	14	3017	30	16	49	16.6	127.6
108	7.27E+04	6	8.60E+05	71	8254	56	13	8.4	2.9	18.8
109	6.98E+05	18	4.65E+06	120	2579	303	56	14.7	8.4	24
110	7.11E+05	39	6.01E+05	33	5489	39	14	113.9	70	186.1
111	1.34E+05	5	1.20E+06	45	3745	78	23	11.1	3.3	27.1
112	0.00E+00	0	2.10E+06	113	5373	137	26	0.6	0	3.2
113	1.89E+06	23	2.30E+06	28	1218	150	56	79.5	43.8	142.4
114	1.04E+05	2	1.04E+06	20	1931	67	30	10.4	1.1	39.9
115	0.00E+00	0	5.30E+05	5	944	34	29	14.5	0.5	105.3
116	2.58E+05	18	4.36E+06	304	6979	284	33	5.8	3.4	9.3
117	1.63E+06	33	4.09E+06	83	2030	266	59	38.7	25	58.3
118	2.38E+04	1	2.62E+05	11	4197	17	10	10	0.2	60.6
119	9.24E+04	3	1.17E+06	38	3245	76	25	8	1.5	24.2
120	2.35E+04	1	8.93E+05	38	4256	58	19	2.9	0.1	15.1
121	0.00E+00	0	5.62E+05	24	4271	37	15	2.9	0.1	16.1
122	1.18E+05	8	3.25E+05	22	6766	21	9	35.7	13.6	82
123	0.00E+00	0	3.85E+05	12	3118	25	14	5.8	0.2	34.9
124	8.71E+04	3	1.74E+06	60	3446	113	29	5.1	1	14.9
125	7.17E+05	9	1.51E+06	19	1255	99	45	46.4	18.3	106.1
126	3.08E+06	61	1.11E+06	22	1983	72	31	263	161.1	445.9
127	0.00E+00	0	3.69E+05	16	4333	24	12	4.3	0.2	25.2
128	0.00E+00	0	5.01E+05	14	2792	33	17	4.9	0.2	29.3
129	9.00E+04	4	1.35E+06	60	4446	88	23	6.7	1.7	17.5
130	2.96E+05	8	1.85E+05	5	2703	12	10	152	44.7	578.2
131	3.87E+05	16	1.16E+06	48	4133	76	22	32.6	17.2	57.9
132	1.94E+04	1	6.42E+05	33	5141	42	14	3.4	0.1	17.6
POOLED	2.37E+05	1234	1.16E+06	6022	521097	75	3	19.9	16.9	23.5

PARAMETERS FOR BEST-FIT PEAKS

Standard error for peak age includes group error

Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

Peak	Peak age	68% CI		050	6 CI	$\mathbf{W}(\mathbf{Z})$	Frac(%)	SF %	Count	
no.	(Ma)	007	00 % CI		0.01	W(L)	F1ac (70)	51,70	Count	
1	5.2	-0.6	+0.6	-1.0	+1.3	0.71	53.0	5.6	69.9	
2	18.7	-2.7	+3.1	-4.9	+6.6	0.43	21.2	6.2	27.9	



MDJ-03

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2) : 4.40E+05 Relative error (%) : 1.37 Effective uranium content of monitor (ppm) : 37.38 Zeta factor and standard error (yr cm2) : 332.51 22.20 Size of counter square (cm2) : 1.00E-08

Grain no.	RhoS	Na	RhoI	NI:	Squares	Urar	nium	Gra	in age (Ma)
Grain no.	(cm ⁻²)	INS	(cm ⁻²)	INI	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ	Age	95 9	% CI
1	2.15E+05	3	3.58E+05	5	1395	30	26	44.7	6.8	222
2	4.99E+05	8	1.06E+06	17	1602	90	43	34.7	12.8	83.7
3	1.54E+05	1	6.16E+05	4	649	52	49	20.2	0.4	182.4
4	0.00E+00	0	4.04E+05	18	4455	34	16	2.9	0.1	16.6
5	1.44E+05	2	7.19E+05	10	1390	61	38	15.5	1.6	68.4
6	2.26E+05	3	1.96E+06	26	1329	166	65	8.8	1.6	27.5
7	1.57E+05	1	3.14E+05	2	637	27	34	38.8	0.6	667.5
8	0.00E+00	0	7.95E+05	16	2012	68	33	3.2	0.1	19
9	0.00E+00	0	1.67E+06	14	838	142	75	3.7	0.1	22
10	1.60E+05	2	2.00E+06	25	1251	170	67	6.3	0.7	23.5
11	4.12E+04	1	1.15E+06	28	2426	98	37	3	0.1	15.8
12	7.37E+04	1	2.21E+06	30	1358	188	68	2.8	0.1	14.7
13	4.56E+05	14	1.07E+06	33	3072	91	32	31.2	15.3	59.4
14	1.11E+05	2	4.60E+06	83	1806	390	86	1.9	0.2	6.6
15	0.00E+00	0	4.57E+05	8	1752	39	27	6.6	0.2	42.8
16	6.63E+04	1	5.97E+05	9	1508	51	33	9.2	0.2	58.5
17	0.00E+00	0	4.13E+05	11	2664	35	21	4.8	0.2	29.1
18	6.01E+05	9	4.67E+05	7	1498	40	29	93	31.1	290.9
19	2.11E+05	3	2.11E+05	3	1420	18	19	72.8	9.8	524.8

GRAIN AGES IN ORIGINAL ORDER

									010101010	10101010
20	1.27E+05	1	2.53E+05	2	790	21	27	38.8	0.6	667.5
21	0.00E+00	0	5.91E+05	31	5244	50	18	1.7	0.1	9.2
22	9.57E+04	1	2.87E+06	30	1045	244	89	2.8	0.1	14.7
23	5.07E+04	1	1.37E+06	27	1971	116	44	3.1	0.1	16.4
24	4.65E+04	1	2.79E+06	60	2148	237	61	1.4	0	7.1
25	0.00E+00	0	7.27E+05	4	550	62	58	13.8	0.5	110
26	0.00E+00	0	1.69E+06	22	1306	143	60	2.3	0.1	13.4
27	5.89E+04	1	1.00E+06	17	1697	85	41	4.9	0.1	27.4
28	1.40E+05	3	1.87E+06	40	2143	158	50	5.8	1.1	17.2
29	5.41E+04	1	5.41E+05	10	1850	46	28	8.3	0.2	51.3
30	1.51E+05	4	1.81E+06	48	2650	154	44	6.3	1.6	16.7
31	0.00E+00	0	3.00E+05	3	1001	25	27	19	0.6	174.8
32	0.00E+00	0	5.41E+05	6	1109	46	36	9	0.3	61.9
33	3.29E+05	3	1.86E+06	17	913	158	76	13.5	2.4	44.5
34	0.00E+00	0	1.37E+06	13	950	116	63	4	0.1	24
35	1.12E+05	2	2.29E+06	41	1789	195	61	3.8	0.4	13.7
36	1.04E+05	1	1.97E+06	19	963	168	76	4.4	0.1	24.2
37	4.20E+04	1	2.52E+05	6	2381	21	17	13.6	0.3	99.8
38	6.06E+04	2	3.94E+05	13	3302	33	18	12	1.2	49.6
39	8.20E+04	1	2.38E+06	29	1220	202	75	2.9	0.1	15.2
40	4.46E+04	1	2.68E+05	6	2240	23	18	13.6	0.3	99.8
41	1.09E+06	18	1.52E+06	25	1645	129	51	52.6	27	99.9
42	3.39E+04	1	9.83E+05	29	2950	83	31	2.9	0.1	15.2
43	0.00E+00	0	3.96E+05	4	1009	34	32	13.8	0.5	110
44	1.44E+06	48	9.33E+05	31	3322	79	28	112.2	70.2	181.8
45	8.37E+04	2	2.93E+05	7	2389	25	18	22	2.1	109
46	3.29E+04	1	9.22E+05	28	3036	78	29	3	0.1	15.8
47	0.00E+00	0	2.15E+05	8	3713	18	13	6.6	0.2	42.8
48	2.27E+05	4	2.95E+06	52	1765	250	69	5.8	1.5	15.3
49	0.00E+00	0	3.74E+05	7	1873	32	23	7.6	0.3	50.6
50	2.98E+04	1	6.25E+05	21	3360	53	23	4	0.1	21.6
51	2.78E+05	14	1.73E+06	87	5031	147	32	11.9	6.2	20.8
52	0.00E+00	0	3.41E+05	7	2054	29	21	7.6	0.3	50.6
53	5.72E+04	1	8.00E+05	14	1749	68	36	5.9	0.1	34.3
54	4.84E+04	1	2.90E+05	6	2066	25	19	13.6	0.3	99.8
55	2.95E+04	1	5.89E+05	20	3393	50	22	4.2	0.1	22.9
56	0.00E+00	0	4.95E+05	5	1010	42	36	10.9	0.4	79.4

									门门	12
57	9.99E+04	2	6.00E+05	12	2002	51	29	13	1.3	54.6
58	0.00E+00	0	1.14E+06	35	3068	97	33	1.5	0.1	8.1
59	4.03E+04	1	2.42E+05	6	2484	21	16	13.6	0.3	99.8
60	3.14E+04	1	2.51E+05	8	3183	21	15	10.3	0.2	67.9
61	4.90E+04	1	1.03E+06	21	2041	87	38	4	0.1	21.6
62	3.77E+04	1	1.51E+06	40	2655	128	40	2.1	0	10.8
63	9.83E+04	2	2.95E+05	6	2034	25	20	25.6	2.4	135.1
64	9.33E+05	16	1.52E+06	26	1715	129	50	45.1	22.5	86.7
65	0.00E+00	0	1.10E+06	8	725	94	64	6.6	0.2	42.8
66	0.00E+00	0	3.27E+05	10	3059	28	17	5.3	0.2	32.6
67	0.00E+00	0	1.19E+06	14	1176	101	53	3.7	0.1	22
68	8.91E+04	3	6.83E+05	23	3368	58	24	10	1.8	31.5
69	7.57E+04	1	3.03E+05	4	1321	26	24	20.2	0.4	182.4
70	3.42E+05	10	2.97E+06	87	2927	252	54	8.5	3.9	16.2
71	1.09E+05	4	1.58E+06	58	3682	134	35	5.2	1.3	13.6
72	3.40E+05	6	5.10E+05	9	1765	43	28	49	14.3	151.8
73	1.39E+05	5	1.66E+05	6	3604	14	11	61	14.7	235.6
74	4.09E+04	1	8.19E+04	2	2443	7	9	38.8	0.6	667.5
75	1.11E+05	1	8.92E+05	8	897	76	52	10.3	0.2	67.9
76	9.94E+04	2	1.49E+06	30	2012	127	46	5.2	0.6	19.2
77	5.84E+04	1	3.50E+05	6	1713	30	23	13.6	0.3	99.8
78	2.04E+05	3	1.56E+06	23	1470	133	55	10	1.8	31.5
79	4.65E+04	2	6.97E+04	3	4303	6	6	49.8	4.1	412.7
80	0.00E+00	0	2.42E+05	3	1241	21	22	19	0.6	174.8
81	1.25E+06	52	6.72E+05	28	4169	57	21	134.2	83.7	220
82	1.36E+05	5	1.30E+06	48	3688	110	32	7.8	2.4	19
83	1.06E+05	1	1.58E+06	15	947	134	68	5.5	0.1	31.7
84	6.90E+05	43	3.92E+06	244	6231	332	43	12.9	9.1	17.9
85	4.01E+04	1	6.42E+05	16	2491	55	27	5.2	0.1	29.4
86	2.85E+04	1	8.28E+05	29	3504	70	26	2.9	0.1	15.2
87	4.31E+04	2	2.05E+06	95	4642	174	36	1.7	0.2	5.7
88	2.68E+04	1	4.01E+05	15	3736	34	17	5.5	0.1	31.7
89	2.29E+05	19	5.41E+05	45	8311	46	14	31	17	53.7
90	0.00E+00	0	2.12E+05	3	1416	18	19	19	0.6	174.8
91	0.00E+00	0	1.48E+05	4	2701	13	12	13.8	0.5	110
92	2.19E+04	1	6.57E+05	30	4566	56	20	2.8	0.1	14.7
93	5.04E+04	1	1.76E+06	35	1985	150	50	2.4	0.1	12.4

0.4	0.005.00	0	0.000	6	20.40	17	1.4	0	XOR	(1.0
94	0.00E+00	0	2.03E+05	6	2949	17	14	9	0.3	61.9
95	1.02E+04	2	2.36E+05	6	2543	20	16	25.6	2.4	135.1
96	1.93E+05	3	7.07E+05	11	1555	60	35	20.7	3.0	15.2
97	7.39E+04	2	5.91E+05	16	2708	50	25	9.8		38.8
98	0.00E+00	0	2.60E+05	3	1154	22	24	19	0.6	1/4.8
99	6.92E+04	2	1.66E+06	48	2890	141	41	3.3	0.4	11.6
100	1.98E+05	10	2.99E+06	151	5053	254	42	4.9	2.3	9.2
101	2.19E+05	1	2.19E+06	10	456	186	115	8.3	0.2	51.3
102	1.71E+04	1	1.71E+05	10	5838	15	9	8.3	0.2	51.3
103	8.43E+04	1	7.58E+05	9	1187	64	42	9.2	0.2	58.5
104	0.00E+00	0	3.88E+05	23	5933	33	14	2.2	0.1	12.7
105	0.00E+00	0	4.08E+05	17	4171	35	17	3	0.1	17.7
106	0.00E+00	0	2.82E+05	8	2834	24	16	6.6	0.2	42.8
107	4.08E+04	2	4.90E+05	24	4901	42	17	6.5	0.7	24.5
108	3.90E+04	1	4.68E+05	12	2566	40	22	6.9	0.1	41.1
109	3.83E+05	19	4.03E+05	20	4959	34	15	69.2	35	135.9
110	4.75E+05	23	7.02E+05	34	4847	60	20	49.4	27.8	86.1
111	2.74E+04	1	3.57E+05	13	3644	30	17	6.4	0.1	37.4
112	5.45E+04	2	3.54E+05	13	3670	30	16	12	1.2	49.6
113	5.58E+05	14	5.58E+05	14	2511	47	25	72.8	32.3	163.7
114	1.44E+04	1	1.29E+05	9	6953	11	7	9.2	0.2	58.5
115	2.11E+04	1	6.74E+05	32	4749	57	20	2.6	0.1	13.7
116	7.44E+04	3	6.70E+05	27	4030	57	22	8.5	1.6	26.4
117	7.14E+04	1	3.64E+06	51	1401	309	87	1.6	0	8.4
118	0.00E+00	0	1.33E+05	6	4495	11	9	9	0.3	61.9
119	4.27E+04	1	2.18E+06	51	2344	185	52	1.6	0	8.4
120	0.00E+00	0	1.96E+05	6	3068	17	13	9	0.3	61.9
121	1.62E+05	2	8.88E+05	11	1238	75	45	14.1	1.4	60.7
122	0.00E+00	0	1.76E+05	4	2276	15	14	13.8	0.5	110
123	5.29E+04	3	2.10E+06	119	5666	178	33	1.9	0.4	5.5
124	1.42E+05	5	2.83E+05	10	3529	24	15	37.1	9.8	116.5
125	4.65E+04	1	1.40E+05	3	2148	12	13	26.5	0.5	297
126	0.00E+00	0	3.83E+05	15	3919	32	17	3.5	0.1	20.4
127	1.05E+05	4	6.55E+05	25	3816	56	22	12.1	3	33.9
POOLED	1.40E+05	463	9.14E+05	3016	329967	78	4	11.2	9.5	13.2

PARAMETERS FOR BEST-FIT PEAKS

Standard error for peak age includes group error

Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60										
Peak	Peak age	68% CI		95% CI W(Z)			Frac(%)	SE %	Count	
no.	(Ma)	00 /	0.61	75 70 CI		((<i>L</i>)	11ac(70)	51,70	Count	
1	3.9	-0.5	+0.6	-1.0	+1.3	1.08	72.3	8.7	91.9	
2	11.9	-2.3	+2.9	-4.1	+6.4	0.54	13.3	8.4	16.9	
3	60.7	-7.1	+8.1	-13.2	+16.9	0.42	14.4	3.8	18.3	

Log-likelihood for best fit : -248.282

Chi-squared value for best fit : 109.836

Reduced chi-squared value : 0.900

Probability for F test : 1%

Condition number for COVAR matrix : 81.38

Number of iterations : 9

MDJ-04

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2): 4.13E+05

Relative error (%) : 1.36

Effective uranium content of monitor (ppm): 36.50

Zeta factor and standard error (yr cm2): 350.98 22.08

Size of counter square (cm2) : 1.00E-08

Grain no.	RhoS	NIa	RhoI	NI:	Squares	Uranium		Grain age (Ma)		
	(cm ⁻²)	INS	(cm ⁻²)	NI	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ	Age	95%	% CI
1	3.10E+05	26	3.22E+05	27	8398	28	11	69.4	39	123.1
2	2.21E+04	1	1.54E+05	7	4534	14	10	11.6	0.2	80.1
3	1.67E+05	3	1.79E+06	32	1792	158	56	7.1	1.3	21.7
4	2.91E+05	13	2.40E+06	107	4467	212	41	8.9	4.5	15.7
5	1.83E+05	8	2.06E+05	9	4374	18	12	64.2	21.6	185.3
6	4.13E+04	1	1.16E+06	28	2421	102	38	2.9	0.1	15.6
7	5.69E+04	1	7.96E+05	14	1758	70	37	5.9	0.1	33.9
8	2.89E+04	1	1.16E+05	4	3455	10	10	19.9	0.4	180.4
9	2.85E+04	2	2.00E+05	14	7006	18	9	11	1.1	44.9
10	0.00E+00	0	3.40E+05	9	2644	30	20	5.8	0.2	36.6
11	0.00E+00	0	1.27E+05	3	2355	11	12	18.8	0.6	172.9
12	1.20E+05	3	7.22E+05	18	2492	64	30	12.6	2.3	41.2
13	4.32E+04	1	6.05E+05	14	2316	53	28	5.9	0.1	33.9
14	7.46E+04	2	1.31E+06	35	2682	115	39	4.4	0.5	16.1
15	3.51E+04	1	1.40E+05	4	2848	12	12	19.9	0.4	180.4

GRAIN AGES IN ORIGINAL ORDER
									101010101	01010101010
16	5.28E+04	3	7.57E+05	43	5681	67	20	5.3	71	15.8
17	5.92E+05	12	6.42E+05	13	2026	57	31	66.6	27.8	157.1
18	6.48E+04	3	4.32E+05	20	4632	38	17	11.3	2.1	36.5
19	1.84E+05	4	9.20E+04	2	2175	8	10	138.2	20.7	1430.3
20	0.00E+00	0	1.59E+05	4	2520	14	13	13.7	0.5	108.8
21	0.00E+00	0	2.42E+05	6	2478	21	17	8.9	0.3	61.2
22	4.18E+04	1	1.09E+06	26	2395	96	37	3.2	0.1	16.9
23	8.76E+04	2	8.76E+04	2	2283	8	10	72	5.2	928.9
24	0.00E+00	0	8.39E+05	10	1193	74	46	5.2	0.2	32.2
25	1.82E+05	9	8.28E+05	41	4950	73	23	16.1	6.8	33.1
26	5.75E+04	3	3.83E+05	20	5217	34	15	11.3	2.1	36.5
27	9.71E+04	4	2.09E+06	86	4119	185	40	3.5	0.9	8.9
28	0.00E+00	0	4.54E+05	13	2862	40	22	4	0.1	23.7
29	0.00E+00	0	3.97E+05	9	2265	35	23	5.8	0.2	36.6
30	7.37E+04	2	2.95E+05	8	2715	26	18	19.1	1.9	90.1
31	1.50E+05	5	4.19E+05	14	3339	37	20	26.3	7.3	75.6
32	5.44E+05	16	6.79E+04	2	2944	6	8	521.2	134.7	3809.9
33	7.21E+04	3	2.04E+06	85	4160	181	39	2.7	0.5	7.7
34	0.00E+00	0	2.99E+05	16	5357	26	13	3.2	0.1	18.8
35	3.71E+04	1	2.63E+06	71	2696	233	55	1.2	0	5.9
36	2.06E+05	4	7.73E+05	15	1940	68	35	19.8	4.7	60.4
37	9.93E+04	3	4.96E+05	15	3022	44	22	15.1	2.7	51
38	2.00E+05	9	1.29E+06	58	4502	114	30	11.4	4.9	22.8
39	1.90E+05	6	2.53E+06	80	3165	224	50	5.6	1.9	12.3
40	2.11E+04	2	9.47E+04	9	9501	8	5	17	1.7	77.3
41	0.00E+00	0	3.98E+05	9	2260	35	23	5.8	0.2	36.6
42	3.33E+04	1	2.30E+06	69	3004	203	49	1.2	0	6
43	1.48E+05	2	3.70E+05	5	1350	33	28	30.2	2.8	174.6
44	0.00E+00	0	4.27E+05	10	2344	38	23	5.2	0.2	32.2
45	0.00E+00	0	5.35E+05	17	3179	47	23	3	0.1	17.5
46	0.00E+00	0	4.63E+05	14	3025	41	22	3.7	0.1	21.8
47	4.67E+04	4	2.92E+05	25	8562	26	10	12	2.9	33.5
48	4.58E+04	2	2.75E+05	12	4366	24	14	12.8	1.3	54
49	1.05E+05	3	2.41E+06	69	2866	213	51	3.3	0.6	9.6
50	3.06E+04	1	3.98E+05	13	3264	35	19	6.3	0.1	37
51	0.00E+00	0	1.18E+06	22	1860	105	44	2.3	0.1	13.2
52	0.00E+00	0	1.49E+05	6	4038	13	10	8.9	0.3	61.2

									000000	01010101010
53	2.81E+04	1	1.21E+06	43	3553	107	33	1.9	50	9.9
54	0.00E+00	0	3.01E+05	6	1992	27	21	8.9	0.3	61.2
55	0.00E+00	0	4.19E+05	7	1670	37	27	7.5	0.3	50.1
56	1.04E+05	7	3.48E+06	235	6747	308	41	2.2	0.9	4.5
57	3.14E+04	2	6.28E+04	4	6368	6	5	37.4	3.3	247.9
58	6.95E+04	2	1.81E+06	52	2879	160	44	3	0.3	10.6
59	0.00E+00	0	9.36E+05	7	748	83	61	7.5	0.3	50.1
60	5.24E+04	2	5.50E+05	21	3819	49	21	7.4	0.8	28.2
61	0.00E+00	0	3.52E+05	12	3405	31	18	4.3	0.2	26
62	4.73E+04	1	1.47E+06	31	2115	130	46	2.7	0.1	14
63	0.00E+00	0	5.38E+05	11	2043	48	28	4.7	0.2	28.8
64	0.00E+00	0	3.05E+05	3	982	27	29	18.8	0.6	172.9
65	4.39E+04	2	2.64E+05	12	4551	23	13	12.8	1.3	54
66	1.63E+05	11	2.38E+05	16	6729	21	10	49.8	20.8	113.3
67	2.36E+04	1	5.67E+05	24	4231	50	20	3.4	0.1	18.5
68	5.84E+04	3	3.43E+06	176	5138	303	46	1.3	0.3	3.7
69	2.46E+04	1	1.72E+06	70	4061	152	37	1.2	0	6
70	2.24E+05	10	4.70E+06	210	4464	416	58	3.5	1.6	6.5
71	7.61E+03	1	1.60E+05	21	13141	14	6	3.9	0.1	21.4
72	2.14E+05	7	1.72E+06	56	3265	152	41	9.2	3.5	19.9
73	4.47E+04	1	8.94E+05	20	2236	79	35	4.1	0.1	22.6
74	0.00E+00	0	4.46E+05	7	1571	39	29	7.5	0.3	50.1
75	2.73E+05	5	1.59E+06	29	1830	140	52	12.8	3.8	32.6
76	2.73E+04	2	9.55E+04	7	7332	8	6	21.8	2.1	107.8
77	2.57E+05	9	2.57E+05	9	3497	23	15	72	25.4	202.8
78	1.27E+05	5	1.53E+05	6	3923	14	11	60.4	14.5	233.1
79	4.86E+05	5	1.36E+06	14	1029	120	63	26.3	7.3	75.6
80	0.00E+00	0	1.11E+05	2	1804	10	12	29.9	0.9	374.6
81	5.81E+04	1	1.34E+06	23	1721	118	49	3.6	0.1	19.4
82	1.20E+05	4	4.22E+05	14	3321	37	20	21.2	5	65.6
83	6.34E+04	2	3.14E+06	99	3154	278	56	1.6	0.2	5.4
84	4.92E+04	1	3.44E+05	7	2034	30	22	11.6	0.2	80.1
85	0.00E+00	0	6.30E+05	27	4285	56	21	1.9	0.1	10.6
86	5.30E+04	1	1.06E+05	2	1888	9	12	38.4	0.6	660.6
87	4.52E+04	1	1.36E+05	3	2210	12	13	26.2	0.5	293.9
88	1.23E+05	1	1.10E+06	9	815	98	63	9.1	0.2	57.8
89	4.22E+04	1	4.22E+05	10	2371	37	23	8.2	0.2	50.7

									10	
90	1.45E+04	1	4.20E+05	29	6900	37	14	2.8	0.1	15.1
91	9.12E+04	2	5.01E+05	11	2194	44	26	14	1.4	60.1
92	9.79E+04	4	5.63E+05	23	4084	50	21	13	3.2	36.8
93	1.91E+05	3	7.05E+06	111	1574	624	119	2.1	0.4	5.9
94	1.75E+04	1	2.71E+06	155	5718	240	39	0.5	0	2.6
95	1.37E+05	4	6.50E+05	19	2924	57	26	15.7	3.8	45.7
96	2.76E+04	1	1.66E+05	6	3622	15	12	13.5	0.3	98.8
97	1.88E+05	11	2.41E+06	141	5855	213	36	5.7	2.8	10.4
98	2.04E+05	5	9.39E+05	23	2450	83	34	16.1	4.7	42.2
99	0.00E+00	0	7.38E+05	6	813	65	51	8.9	0.3	61.2
100	9.45E+04	3	1.51E+06	48	3173	134	39	4.7	0.9	14
101	0.00E+00	0	3.34E+05	10	2994	30	18	5.2	0.2	32.2
102	0.00E+00	0	6.77E+05	15	2215	60	30	3.4	0.1	20.2
103	1.87E+04	1	5.81E+05	31	5340	51	18	2.7	0.1	14
104	0.00E+00	0	1.06E+06	9	846	94	61	5.8	0.2	36.6
105	3.82E+05	10	3.89E+06	102	2620	344	69	7.2	3.3	13.6
106	0.00E+00	0	1.19E+05	5	4210	11	9	10.8	0.4	78.6
107	0.00E+00	0	2.14E+05	9	4210	19	12	5.8	0.2	36.6
108	5.65E+04	1	2.09E+06	37	1771	185	61	2.2	0	11.6
109	0.00E+00	0	6.02E+05	13	2158	53	29	4	0.1	23.7
110	2.02E+05	3	7.40E+05	11	1487	65	39	20.5	3.5	74.4
111	3.36E+05	3	1.01E+06	9	894	89	58	24.9	4.2	96
112	9.41E+04	2	1.74E+06	37	2126	154	50	4.2	0.5	15.2
113	3.22E+04	1	2.90E+05	9	3105	26	17	9.1	0.2	57.8
POOLED	8.22E+04	314	9.00E+05	3438	381997	80	3	6.6	5.6	7.8

Standard error for peak age includes group error

Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

Peak no.	Peak age (Ma)	68%	68% CI		6 CI	W(Z)	Frac(%)	SE,%	Count
1	4.6	-0.4	+0.5	-0.8	+1.0	0.83	89.3	3.6	100.9
2	64	-11.4	+13.9	-20.5	+30.0	0.55	10.7	3.6	12.1

Log-likelihood for best fit : -242.480

Chi-squared value for best fit : 121.038

Reduced chi-squared value : 1.100

Probability for F test : 0%

Condition number for COVAR matrix : 32.30

Number of iterations : 27

MDJ-05

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2) : 4.13E+05 Relative error (%) : 1.36 Effective uranium content of monitor (ppm) : 36.50

Zeta factor and standard error (yr cm2) : 350.98 22.08

Size of counter square (cm2) : 1.00E-08



Grain no.	RhoS	NI.	RhoI	NI.	Squares	Urai	nium	Gı	ain ag	e (Ma)
Grain no.	(cm ⁻²)	INS	(cm ⁻²)	INI	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ	Age	9	5% CI
1	6.34E+04	1	2.54E+05	4	1577	22	21	19.9	0.4	180.4
2	0.00E+00	0	1.48E+06	12	811	131	74	4.3	0.2	26
3	0.00E+00	0	2.23E+06	51	2291	197	55	1	0	5.4
4	3.68E+04	1	2.17E+06	59	2719	192	50	1.4	0	7.1
5	0.00E+00	0	5.00E+05	3	600	44	47	18.8	0.6	172.9
6	4.24E+04	2	4.24E+05	20	4721	37	17	7.7	0.8	29.8
7	1.49E+05	3	1.29E+06	26	2019	114	44	8.7	1.6	27.2
8	1.52E+05	2	2.28E+05	3	1318	20	22	49.2	4	408.3
9	0.00E+00	0	2.53E+06	25	987	224	89	2	0.1	11.5
10	4.63E+04	2	1.18E+06	51	4321	104	29	3.1	0.3	10.8
11	2.95E+04	1	1.12E+06	38	3395	99	32	2.2	0	11.3
12	0.00E+00	0	7.10E+05	10	1409	63	39	5.2	0.2	32.2
13	5.82E+04	2	2.04E+05	7	3438	18	13	21.8	2.1	107.8
14	0.00E+00	0	1.54E+05	5	3252	14	12	10.8	0.4	78.6
15	0.00E+00	0	2.04E+05	7	3424	18	13	7.5	0.3	50.1
16	0.00E+00	0	7.69E+05	8	1041	68	47	6.6	0.2	42.3
17	5.41E+04	1	2.16E+05	4	1849	19	18	19.9	0.4	180.4
18	2.90E+05	3	3.86E+05	4	1036	34	32	54.8	7.9	313.4
19	5.43E+04	1	5.97E+05	11	1842	53	31	7.4	0.2	45.2
20	1.63E+05	2	8.15E+05	10	1227	72	45	15.3	1.5	67.6
21	0.00E+00	0	7.58E+05	12	1584	67	38	4.3	0.2	26
22	6.62E+05	14	5.91E+06	125	2114	523	94	8.2	4.3	14.1
23	0.00E+00	0	1.82E+05	5	2748	16	14	10.8	0.4	78.6
24	0.00E+00	0	7.25E+05	3	414	64	69	18.8	0.6	172.9
25	0.00E+00	0	2.54E+06	18	708	225	105	2.8	0.1	16.5
26	6.98E+05	2	2.44E+06	7	287	216	158	21.8	2.1	107.8

									00101-1	
27	0.00E+00	0	1.20E+06	12	997	106	60	4.3	0.2	26
28	1.29E+05	1	1.93E+06	15	776	171	87	5.5	0.1	31.3
29	4.66E+04	1	4.66E+05	10	2144	41	25	8.2	0.2	50.7
30	6.82E+04	1	1.30E+06	19	1466	115	52	4.3	0.1	23.9
31	0.00E+00	0	4.05E+05	11	2717	36	21	4.7	0.2	28.8
32	0.00E+00	0	7.69E+05	3	390	68	73	18.8	0.6	172.9
33	0.00E+00	0	6.27E+05	6	957	55	44	8.9	0.3	61.2
34	0.00E+00	0	1.03E+05	1	971	9	15	72	1.9	2342.3
35	0.00E+00	0	8.07E+05	19	2355	71	32	2.7	0.1	15.5
36	5.17E+04	2	1.70E+06	66	3871	151	37	2.4	0.3	8.2
37	0.00E+00	0	2.34E+05	6	2559	21	16	8.9	0.3	61.2
POOLED	5.97E+04	42	9.90E+05	696	70333	88	7	4.4	3.1	6

Standard error for peak age includes group error

Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

Peak no.	Peak age (Ma)	68% CI		95%	⁄₀ CI	W(Z)	Frac(%)	SE,%	Count
1	4.0	-0.7	+0.9	-1.3	+1.9	1.15	94.4	7.2	34.9
2	32.2	-16.2	+47.0	-26.7	+154.9	0.97	5.6	7.2	2.1

Log-likelihood for best fit : -50.192

Chi-squared value for best fit : 37.198

Reduced chi-squared value : 1.094

Probability for F test : 0%

Condition number for COVAR matrix : 230.95

Number of iterations : 15

MDJ-06

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2) : 4.40E+05 Relative error (%) : 1.37 Effective uranium content of monitor (ppm) : 37.38 Zeta factor and standard error (yr cm2) : 332.51 22.20

Size of counter square (cm2) : 1.00E-08

GRAIN AGES IN ORIGINAL ORDER

Grain no.	RhoS	Na	RhoI	NI:	Squares	Uranium		Grain age (Ma)		
	(cm ⁻²)	INS	(cm ⁻²)	Ni	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ	Age	95	% CI
1	2.55E+04	1	6.89E+05	27	3917	59	22	3.1	0.1	16.4

51616167a

									1010101	010101010
2	1.13E+05	4	3.40E+05	12	3527	29	16	25	5.7	80.1
3	0.00E+00	0	3.63E+05	23	6328	31	13	2.2	0.1	12.7
4	4.16E+04	2	2.37E+06	114	4802	202	38	1.4	0.2	4.7
5	7.92E+04	2	2.77E+06	70	2524	235	56	2.2	0.2	7.8
6	1.30E+04	1	3.64E+05	28	7696	31	12	3	0.1	15.8
7	1.94E+04	1	9.70E+04	5	5154	8	7	16.2	0.3	129.6
8	1.64E+06	62	3.47E+06	131	3780	294	52	34.6	25.1	47.1
9	7.51E+04	1	2.25E+05	3	1332	19	20	26.5	0.5	297
10	5.12E+04	1	2.00E+06	39	1953	170	54	2.1	0	11.1
11	4.83E+04	2	6.28E+05	26	4139	53	21	6	0.6	22.5
12	1.99E+04	1	3.99E+05	20	5016	34	15	4.2	0.1	22.9
13	0.00E+00	0	3.44E+05	11	3193	29	17	4.8	0.2	29.1
14	0.00E+00	0	1.63E+06	38	2332	138	45	1.3	0	7.5
15	8.82E+04	2	1.01E+06	23	2267	86	36	6.8	0.7	25.7
16	0.00E+00	0	2.16E+05	8	3699	18	13	6.6	0.2	42.8
17	3.98E+04	1	2.39E+05	6	2512	20	16	13.6	0.3	99.8
18	0.00E+00	0	4.21E+05	38	9032	36	12	1.3	0	7.5
19	3.69E+04	1	1.62E+06	44	2712	138	41	1.9	0	9.8
20	5.40E+04	1	1.30E+06	24	1852	110	45	3.5	0.1	18.7
21	5.96E+04	1	4.77E+05	8	1677	41	28	10.3	0.2	67.9
22	0.00E+00	0	1.10E+06	13	1182	93	51	4	0.1	24
23	4.45E+04	3	7.57E+05	51	6739	64	18	4.5	0.9	13.3
24	3.03E+04	1	3.93E+05	13	3306	33	18	6.4	0.1	37.4
25	1.14E+05	3	1.14E+05	3	2628	10	10	72.8	9.8	524.8
26	8.05E+04	5	6.44E+05	40	6208	55	17	9.4	2.8	23.2
27	2.33E+05	5	9.32E+05	20	2145	79	35	18.7	5.4	50.1
28	7.85E+04	1	2.12E+06	27	1274	180	69	3.1	0.1	16.4
29	0.00E+00	0	1.07E+06	11	1024	91	54	4.8	0.2	29.1
30	2.39E+04	1	1.29E+06	54	4178	110	30	1.5	0	7.9
31	6.63E+04	1	2.45E+06	37	1509	208	68	2.3	0	11.7
32	3.12E+05	6	1.72E+06	33	1923	146	51	13.6	4.6	32.1
33	0.00E+00	0	1.31E+05	7	5353	11	8	7.6	0.3	50.6
34	3.68E+04	1	4.41E+05	12	2720	37	21	6.9	0.1	41.1
35	4.77E+04	3	3.18E+05	20	6291	27	12	11.5	2.1	36.9
36	2.91E+04	1	2.91E+05	10	3432	25	15	8.3	0.2	51.3
37	4.85E+05	8	2.91E+06	48	1650	247	71	12.4	5	26
38	1.67E+04	1	5.35E+05	32	5985	45	16	2.6	0.1	13.7

									610101	0101010101
39	1.28E+06	63	1.24E+06	61	4909	105	27	75.2	52	108.5
40	0.00E+00	0	5.94E+05	9	1514	50	33	5.9	0.2	37
41	0.00E+00	0	4.80E+05	5	1041	41	35	10.9	0.4	79.4
42	8.01E+04	3	1.41E+06	53	3748	120	33	4.3	0.8	12.8
43	6.22E+04	2	3.42E+05	11	3217	29	17	14.1	1.4	60.7
44	2.14E+05	6	3.17E+06	89	2805	269	57	5.1	1.8	11.2
45	2.23E+05	3	3.42E+06	46	1344	291	86	5	0.9	14.8
46	9.58E+04	2	1.49E+06	31	2087	126	45	5.1	0.5	18.5
47	0.00E+00	0	1.76E+06	42	2381	150	46	1.2	0	6.7
48	0.00E+00	0	6.99E+05	13	1859	59	32	4	0.1	24
49	3.92E+04	1	2.31E+06	59	2554	196	51	1.4	0	7.2
50	0.00E+00	0	3.56E+06	39	1096	302	96	1.3	0	7.3
51	2.53E+04	1	1.57E+06	62	3945	133	34	1.3	0	6.8
52	0.00E+00	0	1.81E+05	3	1658	15	16	19	0.6	174.8
53	5.39E+04	2	1.89E+05	7	3708	16	12	22	2.1	109
54	0.00E+00	0	6.18E+05	10	1618	52	32	5.3	0.2	32.6
55	2.65E+04	2	1.21E+06	91	7549	102	22	1.7	0.2	6
56	0.00E+00	0	7.04E+04	2	2840	6	8	30.3	0.9	378.5
57	5.72E+05	7	3.35E+06	41	1224	284	89	12.7	4.7	28.1
58	6.01E+04	2	3.00E+05	10	3330	25	16	15.5	1.6	68.4
59	0.00E+00	0	3.37E+05	10	2970	29	18	5.3	0.2	32.6
60	3.27E+05	2	2.12E+06	13	612	180	98	12	1.2	49.6
61	0.00E+00	0	2.84E+06	27	951	241	92	1.9	0.1	10.7
62	5.04E+04	2	4.54E+05	18	3967	39	18	8.7	0.9	33.9
63	1.48E+05	2	2.22E+05	3	1352	19	20	49.8	4.1	412.7
64	0.00E+00	0	6.18E+05	16	2589	52	26	3.2	0.1	19
65	0.00E+00	0	3.42E+05	9	2631	29	19	5.9	0.2	37
66	9.72E+04	3	9.72E+05	30	3087	83	30	7.7	1.4	23.5
67	0.00E+00	0	6.85E+05	17	2481	58	28	3	0.1	17.7
68	1.48E+05	2	4.29E+06	58	1353	364	96	2.7	0.3	9.5
69	3.45E+06	104	3.29E+06	99	3013	279	56	76.4	57.5	101.7
70	1.45E+05	3	1.94E+05	4	2064	16	16	55.4	8	316.7
71	0.00E+00	0	8.12E+04	1	1232	7	11	72.8	1.9	2363.8
72	1.33E+05	3	2.43E+06	55	2263	206	56	4.2	0.8	12.3
73	3.59E+04	1	7.18E+05	20	2787	61	27	4.2	0.1	22.9
74	2.72E+06	88	1.79E+06	58	3234	152	40	110	78.3	155.8
75	7.90E+04	3	1.58E+05	6	3796	13	11	37.4	5.9	169.2

									00000	010101010
76	2.80E+05	14	1.74E+06	87	4996	148	32	11.9	6.2	20.8
77	4.89E+04	1	2.15E+06	44	2047	183	55	1.9	0	9.8
78	0.00E+00	0	7.84E+05	14	1785	67	35	3.7	0.1	22
79	3.72E+05	3	8.68E+05	7	806	74	54	32.2	5.2	136
80	2.59E+04	1	2.59E+05	10	3861	22	14	8.3	0.2	51.3
81	0.00E+00	0	3.50E+05	23	6574	30	12	2.2	0.1	12.7
82	0.00E+00	0	2.49E+05	7	2806	21	15	7.6	0.3	50.6
83	0.00E+00	0	2.24E+05	6	2684	19	15	9	0.3	61.9
84	0.00E+00	0	6.51E+05	7	1075	55	40	7.6	0.3	50.6
85	1.65E+05	2	4.11E+05	5	1215	35	30	30.5	2.8	176.5
86	0.00E+00	0	8.59E+05	27	3143	73	28	1.9	0.1	10.7
87	0.00E+00	0	1.99E+06	77	3868	169	39	0.7	0	3.6
88	0.00E+00	0	5.59E+05	29	5187	47	18	1.8	0.1	9.9
89	9.66E+04	2	4.83E+05	10	2070	41	25	15.5	1.6	68.4
90	0.00E+00	0	1.59E+06	53	3330	135	37	1	0	5.3
91	0.00E+00	0	2.91E+05	8	2745	25	17	6.6	0.2	42.8
92	2.40E+05	8	1.20E+06	40	3336	102	32	14.9	5.9	31.7
93	4.48E+04	1	2.73E+06	61	2234	232	59	1.4	0	6.9
94	7.80E+04	2	7.80E+05	20	2562	66	29	7.8	0.8	30.1
95	0.00E+00	0	2.52E+05	7	2775	21	16	7.6	0.3	50.6
96	0.00E+00	0	7.60E+05	14	1843	64	34	3.7	0.1	22
97	5.49E+04	1	2.75E+05	5	1820	23	20	16.2	0.3	129.6
98	6.47E+04	1	1.42E+06	22	1545	121	51	3.8	0.1	20.6
99	5.28E+04	1	1.32E+06	25	1895	112	44	3.3	0.1	17.9
100	7.70E+04	2	8.47E+05	22	2597	72	30	7.1	0.8	27
101	1.25E+05	2	6.89E+05	11	1598	58	35	14.1	1.4	60.7
102	3.50E+06	32	4.93E+06	45	913	418	125	51.9	31.9	83.3
103	0.00E+00	0	1.56E+06	13	835	132	72	4	0.1	24
104	0.00E+00	0	4.02E+06	45	1120	341	102	1.1	0	6.3
105	7.46E+05	13	1.78E+06	31	1742	151	54	30.9	14.7	60.2
106	6.61E+04	2	1.49E+06	45	3026	126	38	3.5	0.4	12.5
107	1.21E+05	4	2.32E+06	77	3317	197	45	3.9	1	10.1
108	5.84E+05	17	4.13E+05	12	2909	35	20	102.5	46.5	233.8
109	0.00E+00	0	2.93E+05	4	1367	25	23	13.8	0.5	110
110	0.00E+00	0	5.15E+05	9	1749	44	28	5.9	0.2	37
111	0.00E+00	0	7.82E+05	15	1918	66	34	3.5	0.1	20.4
112	2.63E+04	1	1.37E+06	52	3799	116	32	1.6	0	8.2



Standard error for peak age mendees group error

Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

Peak	Peak age	68%	o CI	95%	o CI	W(Z)	Frac(%)	SE,%	Count
1	3.8	-0.4	+0.5	-0.8	+0.9	0.99	88.6	3.3	100.1
2	61.2	-5.7	+6.3	-10.7	+12.9	0.29	11.4	3.3	12.9

Log-likelihood for best fit : -243.242

Chi-squared value for best fit : 104.372

Reduced chi-squared value : 0.949

Probability for F test : 0%

Condition number for COVAR matrix : 7.27

Number of iterations: 7

MDJ-06

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2): 4.40E+05

Relative error (%) : 1.37

Effective uranium content of monitor (ppm): 37.38

Zeta factor and standard error (yr cm2): 332.51 22.20

Size of counter square (cm2) : 1.00E-08

Grain no.	RhoS	NT.	RhoI	NI!	Squares	Urai	nium	Gr	ain age	(Ma)
Grain no.	(cm ⁻²)	INS	(cm ⁻²)	INI	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ	Age	95	% CI
1	0.00E+00	0	5.24E+05	7	1335	45	33	7.6	0.3	50.6
2	0.00E+00	0	3.41E+05	10	2934	29	18	5.3	0.2	32.6
3	0.00E+00	0	2.10E+05	5	2385	18	15	10.9	0.4	79.4
4	4.24E+04	1	9.33E+05	22	2358	79	33	3.8	0.1	20.6
5	0.00E+00	0	5.34E+05	7	1311	45	33	7.6	0.3	50.6
6	0.00E+00	0	4.33E+06	48	1108	368	106	1.1	0	5.8
7	0.00E+00	0	4.63E+05	6	1297	39	31	9	0.3	61.9
8	0.00E+00	0	3.75E+05	6	1598	32	25	9	0.3	61.9
9	3.72E+04	1	3.72E+05	10	2688	32	20	8.3	0.2	51.3
10	0.00E+00	0	2.67E+06	30	1122	227	82	1.7	0.1	9.6
11	3.28E+04	1	7.22E+05	22	3047	61	26	3.8	0.1	20.6

									10101010	010101010
12	8.69E+04	2	2.69E+06	62	2301	229	58	2.5	0.3	8.9
13	0.00E+00	0	1.98E+05	6	3035	17	13	9	0.3	61.9
14	0.00E+00	0	4.09E+05	16	3916	35	17	3.2	0.1	19
15	3.73E+04	1	6.71E+05	18	2685	57	27	4.6	0.1	25.7
16	1.28E+05	2	7.04E+05	11	1562	60	35	14.1	1.4	60.7
17	3.22E+04	2	1.77E+05	11	6202	15	9	14.1	1.4	60.7
18	6.40E+04	1	1.92E+05	3	1562	16	17	26.5	0.5	297
19	6.18E+04	1	2.47E+05	4	1618	21	20	20.2	0.4	182.4
20	0.00E+00	0	1.14E+06	48	4221	97	28	1.1	0	5.8
21	0.00E+00	0	3.33E+05	15	4500	28	14	3.5	0.1	20.4
22	3.58E+04	1	3.94E+05	11	2795	33	20	7.5	0.2	45.6
23	0.00E+00	0	9.97E+04	14	14039	8	4	3.7	0.1	22
24	8.51E+04	3	1.98E+05	7	3527	17	12	32.2	5.2	136
25	2.80E+04	1	3.92E+05	14	3573	33	17	5.9	0.1	34.3
26	0.00E+00	0	3.45E+05	18	5213	29	14	2.9	0.1	16.6
27	0.00E+00	0	1.28E+06	55	4303	109	29	0.9	0	5.1
28	0.00E+00	0	3.05E+05	19	6227	26	12	2.7	0.1	15.7
29	6.07E+04	2	3.34E+05	11	3293	28	17	14.1	1.4	60.7
30	0.00E+00	0	2.28E+05	16	7008	19	10	3.2	0.1	19
31	5.40E+04	2	9.72E+05	36	3703	83	27	4.4	0.5	15.8
32	3.73E+04	1	5.59E+05	15	2684	47	24	5.5	0.1	31.7
33	1.29E+05	6	2.40E+06	112	4657	204	39	4	1.4	8.8
34	0.00E+00	0	9.61E+05	24	2497	82	33	2.1	0.1	12.2
35	5.83E+04	1	7.58E+05	13	1716	64	35	6.4	0.1	37.4
36	0.00E+00	0	5.02E+05	6	1196	43	33	9	0.3	61.9
37	4.49E+04	2	1.46E+06	65	4451	124	31	2.4	0.3	8.5
38	0.00E+00	0	1.52E+05	5	3296	13	11	10.9	0.4	79.4
39	4.35E+04	1	1.83E+06	42	2297	155	48	2	0	10.3
40	0.00E+00	0	6.32E+05	8	1267	54	37	6.6	0.2	42.8
41	0.00E+00	0	3.08E+06	46	1492	262	77	1.1	0	6.1
42	2.53E+04	1	6.33E+05	25	3948	54	21	3.3	0.1	17.9
43	4.61E+04	1	3.23E+05	7	2170	27	20	11.7	0.2	80.9
44	0.00E+00	0	9.01E+05	15	1664	77	39	3.5	0.1	20.4
45	8.58E+04	6	2.07E+06	145	6993	176	30	3.1	1.1	6.8
46	5.35E+04	1	2.03E+06	38	1870	173	56	2.2	0	11.4
47	4.57E+04	1	3.20E+05	7	2190	27	20	11.7	0.2	80.9
48	1.48E+05	6	2.44E+06	99	4056	207	42	4.5	1.6	10

									101010101	01010101010
49	1.19E+05	10	2.00E+06	168	8406	170	27	4.4	2.1	8.2
50	4.25E+04	1	3.83E+05	9	2352	32	21	9.2	0.2	58.5
51	9.26E+04	4	1.46E+06	63	4319	124	31	4.8	1.2	12.5
52	1.41E+04	2	6.13E+05	87	14201	52	11	1.8	0.2	6.3
53	0.00E+00	0	2.59E+05	5	1930	22	19	10.9	0.4	79.4
54	2.14E+04	1	3.63E+05	17	4680	31	15	4.9	0.1	27.4
55	0.00E+00	0	2.28E+05	5	2192	19	17	10.9	0.4	79.4
56	1.71E+04	2	9.39E+05	110	11716	80	15	1.4	0.2	4.9
57	3.19E+04	1	1.05E+06	33	3131	89	31	2.5	0.1	13.2
58	7.08E+04	1	4.25E+05	6	1413	36	28	13.6	0.3	99.8
59	0.00E+00	0	4.13E+05	12	2902	35	20	4.4	0.2	26.3
60	1.30E+04	1	9.10E+05	70	7688	77	19	1.2	0	6
61	3.86E+04	1	3.43E+06	89	2591	292	62	0.9	0	4.7
62	2.61E+04	1	1.23E+06	47	3832	104	30	1.8	0	9.1
63	7.37E+04	1	1.77E+06	24	1358	150	61	3.5	0.1	18.7
64	8.66E+04	2	9.96E+05	23	2310	85	35	6.8	0.7	25.7
65	0.00E+00	0	6.85E+05	8	1167	58	40	6.6	0.2	42.8
66	0.00E+00	0	4.06E+05	16	3938	34	17	3.2	0.1	19
67	0.00E+00	0	3.07E+05	18	5872	26	12	2.9	0.1	16.6
68	2.92E+04	1	7.00E+05	24	3427	59	24	3.5	0.1	18.7
69	0.00E+00	0	1.70E+05	4	2353	14	14	13.8	0.5	110
70	0.00E+00	0	3.68E+05	13	3537	31	17	4	0.1	24
71	1.35E+04	1	1.21E+05	9	7427	10	7	9.2	0.2	58.5
72	6.92E+04	2	5.19E+05	15	2890	44	22	10.4	1.1	41.9
73	0.00E+00	0	1.67E+06	24	1439	142	57	2.1	0.1	12.2
74	0.00E+00	0	3.48E+05	17	4880	30	14	3	0.1	17.7
75	2.38E+04	1	5.95E+05	25	4205	50	20	3.3	0.1	17.9
76	6.75E+04	2	4.18E+06	124	2964	355	64	1.3	0.1	4.4
77	1.20E+05	8	2.86E+06	191	6668	243	36	3.1	1.3	6.2
78	8.44E+04	2	1.10E+06	26	2371	93	36	6	0.6	22.5
79	6.85E+04	5	1.11E+06	81	7304	94	21	4.7	1.4	11
80	5.52E+04	1	1.27E+06	23	1811	108	45	3.6	0.1	19.6
81	2.46E+04	1	4.92E+05	20	4068	42	18	4.2	0.1	22.9
82	5.78E+04	1	4.63E+05	8	1729	39	27	10.3	0.2	67.9
83	6.34E+04	3	1.96E+06	93	4734	167	35	2.5	0.5	7.1
84	0.00E+00	0	7.97E+05	8	1003	68	46	6.6	0.2	42.8
85	4.39E+04	1	3.51E+05	8	2279	30	20	10.3	0.2	67.9

									1010	
86	0.00E+00	0	1.23E+06	21	1703	105	45	2.5	0.1	14
87	3.93E+04	1	6.69E+05	17	2542	57	27	4.9	0.1	27.4
88	3.60E+04	1	2.88E+05	8	2775	24	17	10.3	0.2	67.9
89	1.68E+04	1	2.36E+05	14	5942	20	11	5.9	0.1	34.3
POOLED	3.39E+04	108	8.85E+05	2823	318960	75	4	2.8	2.2	3.5

Standard error for peak age includes group error

Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

Peak	Peak age	680/	CI	050/	CI	W(7)	Frag(9/.)	SE 0/	Count	
no.	(Ma)	00 /0		33/0		W (<i>L</i>)	F1aC(70)	SE, 70	count	
1	2.8	-0.3	0.4	-0.6	0.7	1.08	100	0	89	
Log-likel	lihood for be	est fit : -1	.09.092							
Chi-squa	red value fo	r best fit	: 100.12	28						

Reduced chi-squared value : 1.138

Probability for F test : 0%

Condition number for COVAR matrix : 1.00

Number of iterations : 5

MDJ-08

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2) : 4.13E+05 Relative error (%) : 1.36 Effective uranium content of monitor (ppm) : 36.50 Zeta factor and standard error (yr cm2) : 350.98 22.08 Size of counter square (cm2) : 1.00E-08

Grain no.	RhoS	Na	RhoI So Ns Ni	Squares	Urai	nium	Gra	in age (Ma)	
Grain no.	(cm ⁻²)	INS	(cm ⁻²)	INI	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ	Age	959	% CI
1	5.70E+05	34	3.17E+06	189	5970	280	41	13.1	8.7	18.8
2	1.05E+06	29	2.40E+06	66	2755	212	52	31.8	19.8	49.8
3	4.83E+04	2	7.97E+05	33	4141	70	24	4.7	0.5	17.1
4	8.06E+05	10	5.65E+05	7	1240	50	36	101.9	35.4	312.6
5	3.84E+04	3	4.10E+05	32	7811	36	13	7.1	1.3	21.7
6	1.62E+05	2	3.98E+06	49	1232	352	100	3.2	0.3	11.3
7	3.68E+04	2	2.94E+05	16	5434	26	13	9.7	1	38.4
8	1.10E+06	21	1.20E+06	23	1915	106	44	65.8	34.7	123.8
9	6.13E+05	17	2.85E+06	79	2772	252	57	15.7	8.6	26.5

									101010101	10101010
10	0.00E+00	0	2.21E+06	26	1178	195	76	2	0.1	11
11	2.78E+04	2	3.48E+05	25	7184	31	12	6.2	0.7	23.2
12	1.33E+05	7	8.56E+05	45	5254	76	23	11.5	4.3	25.1
13	7.28E+05	27	8.63E+05	32	3707	76	27	60.9	35.1	104.5
14	1.54E+05	17	2.11E+06	233	11019	187	25	5.3	3	8.6
15	8.20E+04	3	1.34E+06	49	3660	118	34	4.7	0.9	13.7
16	0.00E+00	0	1.10E+06	8	724	98	67	6.6	0.2	42.3
17	3.86E+05	13	4.45E+05	15	3370	39	20	62.6	27.4	139.9
18	2.17E+05	4	1.30E+06	24	1844	115	47	12.5	3	35.1
19	5.65E+04	1	2.82E+05	5	1771	25	21	16.1	0.3	128.2
20	8.55E+05	45	5.32E+05	28	5261	47	18	115.1	70.6	191
21	1.59E+05	5	5.40E+05	17	3149	48	23	21.7	6.1	59.9
22	0.00E+00	0	1.27E+06	13	1025	112	61	4	0.1	23.7
23	3.12E+05	4	5.46E+05	7	1282	48	35	41.9	8.9	160.8
24	0.00E+00	0	4.38E+05	10	2283	39	24	5.2	0.2	32.2
25	0.00E+00	0	5.09E+05	4	786	45	42	13.7	0.5	108.8
26	1.17E+05	2	2.34E+05	4	1711	21	20	37.4	3.3	247.9
27	0.00E+00	0	2.86E+06	49	1713	253	72	1	0	5.7
28	2.17E+05	7	1.30E+06	42	3228	115	35	12.3	4.6	27.1
29	2.68E+04	1	1.02E+06	38	3727	90	29	2.2	0	11.3
30	1.56E+05	2	9.34E+05	12	1285	83	47	12.8	1.3	54
31	2.09E+04	1	4.39E+05	21	4781	39	17	3.9	0.1	21.4
32	1.48E+05	6	7.40E+05	30	4053	65	24	14.8	4.9	35.3
33	2.56E+05	7	2.12E+06	58	2738	187	49	8.9	3.4	19.2
34	0.00E+00	0	3.97E+05	8	2015	35	24	6.6	0.2	42.3
35	5.53E+05	28	2.47E+06	125	5060	219	39	16.3	10.3	24.6
36	1.48E+05	3	1.39E+06	28	2022	123	46	8.1	1.5	25.1
37	3.17E+04	1	3.81E+05	12	3151	34	19	6.8	0.1	40.7
38	0.00E+00	0	3.53E+05	11	3119	31	18	4.7	0.2	28.8
39	6.98E+05	7	3.99E+05	4	1003	35	33	123.5	32.1	565
40	7.37E+04	2	2.95E+05	8	2712	26	18	19.1	1.9	90.1
41	2.29E+04	1	3.90E+05	17	4361	34	17	4.8	0.1	27.1
42	1.12E+06	20	3.36E+06	60	1785	297	77	24.2	13.8	40.5
43	1.02E+06	27	3.02E+05	8	2651	27	18	236.6	107	594.5
44	9.40E+04	1	3.76E+05	4	1064	33	31	19.9	0.4	180.4
45	1.60E+05	7	5.04E+05	22	4367	45	19	23.4	8.3	55.6
46	1.46E+05	3	3.90E+05	8	2051	35	24	28	4.6	112.2

17	0.00F±00	0	5.03E±05	9	1788	45	29	5.8	102	36.6
47	2.25E+06	75	4.25E+06	08	2206	276	76	55.0	40.2	75.2
40	3.23E+00	75	4.23E+00	90	2300	570	70	33.2	40.5	75.5
49	2.90E+05	4	7.24E+05	10	1381	64	40	29.6	6.6	99.7
50	9.47E+04	2	3.79E+05	8	2111	34	23	19.1	1.9	90.1
51	7.84E+04	2	1.49E+06	38	2552	132	43	4.1	0.4	14.7
52	1.13E+06	39	2.27E+06	78	3437	201	46	36.2	23.9	53.7
53	3.31E+05	7	1.89E+05	4	2116	17	16	123.5	32.1	565
54	2.64E+05	3	2.64E+05	3	1136	23	25	72	9.7	519.3
55	7.12E+04	2	3.20E+05	9	2811	28	18	17	1.7	77.3
56	0.00E+00	0	5.22E+05	5	958	46	39	10.8	0.4	78.6
57	1.35E+05	2	8.80E+05	13	1477	78	42	11.9	1.2	49
58	3.42E+05	6	4.50E+06	79	1754	398	90	5.6	2	12.5
59	4.97E+04	1	6.96E+05	14	2012	62	32	5.9	0.1	33.9
60	3.81E+04	1	7.61E+04	2	2628	7	9	38.4	0.6	660.6
61	2.73E+05	15	2.55E+05	14	5486	23	12	77.1	34.8	171.3
62	8.83E+04	2	1.32E+05	3	2265	12	13	49.2	4	408.3
63	0.00E+00	0	2.13E+05	6	2817	19	15	8.9	0.3	61.2
64	4.52E+04	1	1.81E+05	4	2213	16	15	19.9	0.4	180.4
65	1.00E+05	1	3.41E+06	34	998	301	103	2.4	0.1	12.7
66	4.77E+04	2	1.26E+06	53	4190	112	31	2.9	0.3	10.4
67	4.51E+04	1	4.51E+05	10	2216	40	25	8.2	0.2	50.7
68	9.05E+04	1	4.52E+05	5	1105	40	34	16.1	0.3	128.2
69	3.75E+04	2	4.69E+05	25	5336	41	16	6.2	0.7	23.2
POOLED	2.71E+05	543	1.06E+06	2128	200457	94	5	18.4	15.8	21.6

Standard error for peak age includes group error

Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

Peak	Peak age	680	4 CI	95% CI		W(7)	Free(0/.)	SF 0/	Count
no.	(Ma)	00 /	0 01			W (L)	Flac(70)	SE, 70	count
1	4.7	-0.8	+0.9	-1.4	+2.0	0.84	44.4	9.5	30.6
2	14.6	-1.8	+2.0	-3.3	+4.3	0.48	30.8	9.8	21.2
3	47.5	-5.3	+6.0	-9.8	+12.4	0.35	18.2	6.5	12.5
4	126.6	-26.0	+32.6	-45.9	+71.6	0.43	6.6	4.2	4.6

Log-likelihood for best fit : -175.847

Chi-squared value for best fit : 68.893

Reduced chi-squared value : 1.111

Probability for F test : 0%

Condition number for COVAR matrix : 104.55 Number of iterations : 12

MDJ-09

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2) : 4.13E+05 Relative error (%) : 1.36 Effective uranium content of monitor (ppm) : 36.50 Zeta factor and standard error (yr cm2) : 350.98 22.08 Size of counter square (cm2) : 1.00E-08



Grain no.	RhoS	Na	RhoI	0I -2) Ni	Squares	Urai	nium	Gr	ain age ((Ma)
Grain no.	(cm ⁻²)	INS	(cm ⁻²)	INI	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ	Age	95 9	% CI
1	9.09E+04	1	2.64E+06	29	1101	233	86	2.8	0.1	15.1
2	1.18E+05	8	2.80E+05	19	6790	25	11	30.8	11.5	72.6
3	6.48E+04	1	6.48E+05	10	1544	57	35	8.2	0.2	50.7
4	5.21E+05	10	7.81E+05	15	1921	69	35	48.4	19.4	113.9
5	7.78E+04	2	7.78E+05	20	2571	69	30	7.7	0.8	29.8
6	3.49E+04	1	1.74E+05	5	2868	15	13	16.1	0.3	128.2
7	1.22E+05	2	1.52E+06	25	1644	135	53	6.2	0.7	23.2
8	4.32E+04	1	3.02E+05	7	2314	27	20	11.6	0.2	80.1
9	5.47E+04	2	6.02E+05	22	3657	53	22	7	0.8	26.7
10	5.50E+04	3	3.66E+05	20	5459	32	14	11.3	2.1	36.5
11	2.23E+05	8	5.42E+06	194	3582	479	70	3	1.3	6
12	0.00E+00	0	5.71E+04	3	5254	5	5	18.8	0.6	172.9
13	7.89E+04	5	7.73E+05	49	6337	68	20	7.6	2.3	18.4
14	2.68E+04	1	1.61E+05	6	3738	14	11	13.5	0.3	98.8
15	7.04E+05	27	3.39E+05	13	3837	30	16	147.7	74.5	310.1
16	0.00E+00	0	3.35E+05	7	2090	30	22	7.5	0.3	50.1
17	6.20E+04	1	4.96E+05	8	1612	44	30	10.2	0.2	67.2
18	0.00E+00	0	6.69E+05	6	897	59	46	8.9	0.3	61.2
19	1.94E+05	4	3.87E+05	8	2065	34	24	36.8	8	133.8
20	3.94E+04	1	5.52E+05	14	2535	49	26	5.9	0.1	33.9
21	7.54E+04	1	4.52E+05	6	1327	40	31	13.5	0.3	98.8
22	6.23E+05	14	1.25E+06	28	2248	110	41	36.3	17.6	70.8
23	1.55E+05	3	1.03E+05	2	1933	9	12	105.2	12.4	1184.9
24	5.60E+04	1	1.68E+05	3	1786	15	16	26.2	0.5	293.9
25	0.00E+00	0	2.64E+05	6	2277	23	18	8.9	0.3	61.2

									101010101	010101010
26	4.74E+04	1	3.32E+05	7	2110	29	21	11.6	0.2	80.1
27	0.00E+00	0	1.83E+05	2	1092	16	20	29.9	0.9	374.6
28	1.31E+05	6	1.02E+06	47	4592	91	26	9.5	3.2	21.6
29	0.00E+00	0	5.81E+05	8	1376	51	35	6.6	0.2	42.3
30	1.59E+05	3	7.93E+05	15	1891	70	36	15.1	2.7	51
31	1.06E+05	5	9.93E+05	47	4735	88	26	7.9	2.4	19.3
32	0.00E+00	0	1.54E+05	9	5830	14	9	5.8	0.2	36.6
33	6.26E+04	1	1.13E+06	18	1598	100	46	4.6	0.1	25.4
34	0.00E+00	0	5.64E+05	8	1419	50	34	6.6	0.2	42.3
35	5.60E+04	1	2.80E+05	5	1786	25	21	16.1	0.3	128.2
36	9.53E+05	35	2.40E+06	88	3671	212	45	28.8	18.8	43
37	2.61E+05	7	6.70E+05	18	2685	59	28	28.5	9.9	70.3
38	0.00E+00	0	3.92E+04	1	2549	3	6	72	1.9	2342.3
39	0.00E+00	0	3.32E+05	13	3919	29	16	4	0.1	23.7
40	8.57E+04	3	1.66E+06	58	3499	147	39	3.9	0.8	11.5
41	0.00E+00	0	4.41E+05	9	2040	39	25	5.8	0.2	36.6
42	4.14E+04	1	2.07E+05	5	2417	18	16	16.1	0.3	128.2
43	3.99E+05	17	2.21E+06	94	4262	195	40	13.2	7.3	22.1
44	0.00E+00	0	6.71E+05	10	1490	59	37	5.2	0.2	32.2
45	3.68E+04	1	5.51E+05	15	2720	49	25	5.5	0.1	31.3
46	2.38E+04	1	5.48E+05	23	4197	48	20	3.6	0.1	19.4
47	3.22E+04	1	2.57E+05	8	3109	23	16	10.2	0.2	67.2
48	2.33E+05	8	3.21E+05	11	3432	28	17	52.7	18.4	142.2
49	3.71E+04	1	4.08E+05	11	2694	36	21	7.4	0.2	45.2
50	2.20E+04	1	1.41E+06	64	4544	125	31	1.3	0	6.5
51	1.93E+05	5	1.39E+06	36	2592	123	41	10.3	3.1	25.7
52	0.00E+00	0	1.22E+05	1	816	11	18	72	1.9	2342.3
53	0.00E+00	0	9.27E+04	3	3238	8	9	18.8	0.6	172.9
54	2.67E+04	2	2.67E+05	20	7484	24	10	7.7	0.8	29.8
55	0.00E+00	0	1.24E+05	7	5663	11	8	7.5	0.3	50.1
56	3.41E+04	1	1.36E+05	4	2933	12	11	19.9	0.4	180.4
57	1.02E+05	4	1.20E+06	47	3926	106	31	6.4	1.6	16.8
58	2.06E+05	8	5.66E+05	22	3888	50	21	26.6	10.1	61.2
59	0.00E+00	0	2.54E+05	10	3939	22	14	5.2	0.2	32.2
60	0.00E+00	0	3.87E+05	14	3616	34	18	3.7	0.1	21.8
61	0.00E+00	0	1.04E+06	23	2209	92	38	2.2	0.1	12.6
62	3.06E+04	1	2.75E+05	9	3272	24	16	9.1	0.2	57.8

									0010101	01010101010
63	0.00E+00	0	5.63E+05	21	3729	50	22	2.4	0.1	13.9
64	1.33E+06	16	3.91E+06	47	1201	346	101	24.8	13	44.2
65	2.55E+05	6	5.11E+05	12	2349	45	26	36.6	11.1	103.5
66	0.00E+00	0	6.29E+05	19	3020	56	25	2.7	0.1	15.5
67	2.48E+05	5	2.48E+05	5	2018	22	19	72	16.6	307.3
68	0.00E+00	0	1.88E+06	26	1385	166	65	2	0.1	11
69	5.75E+06	277	2.72E+06	131	4817	241	42	150.8	118.6	191.6
70	1.89E+06	57	4.67E+06	141	3022	413	70	29.3	21.1	40
71	2.76E+05	6	2.76E+05	6	2175	24	19	72	19.3	265.4
72	0.00E+00	0	2.14E+05	5	2331	19	16	10.8	0.4	78.6
73	0.00E+00	0	4.74E+05	22	4642	42	18	2.3	0.1	13.2
74	1.46E+04	1	1.17E+05	8	6862	10	7	10.2	0.2	67.2
75	0.00E+00	0	3.49E+05	15	4301	31	16	3.4	0.1	20.2
76	6.04E+04	1	1.87E+06	31	1655	166	59	2.7	0.1	14
77	1.35E+06	73	1.15E+06	62	5396	102	26	84.7	59.6	120.6
78	5.14E+04	1	5.66E+05	11	1945	50	30	7.4	0.2	45.2
79	3.01E+04	1	4.81E+05	16	3323	43	21	5.1	0.1	29.1
80	3.33E+04	1	3.33E+05	10	3006	29	18	8.2	0.2	50.7
81	3.53E+04	1	2.47E+05	7	2834	22	16	11.6	0.2	80.1
82	4.11E+06	87	3.78E+06	80	2115	335	75	78.3	57.1	107.3
83	7.83E+04	3	3.39E+05	13	3830	30	16	17.4	3.1	60.6
84	2.19E+05	6	8.75E+05	24	2744	77	31	18.4	6	45.3
85	0.00E+00	0	2.42E+05	8	3303	21	15	6.6	0.2	42.3
86	0.00E+00	0	1.85E+05	12	6478	16	9	4.3	0.2	26
87	0.00E+00	0	1.37E+05	7	5103	12	9	7.5	0.3	50.1
88	0.00E+00	0	6.54E+05	26	3978	58	23	2	0.1	11
89	0.00E+00	0	2.14E+05	3	1401	19	20	18.8	0.6	172.9
90	6.65E+04	3	7.09E+05	32	4514	63	22	7.1	1.3	21.7
91	1.55E+04	1	5.28E+05	34	6434	47	16	2.4	0.1	12.7
92	8.10E+04	2	1.05E+06	26	2469	93	36	6	0.6	22.2
93	6.72E+04	1	1.34E+05	2	1488	12	15	38.4	0.6	660.6
94	8.06E+05	21	1.34E+06	35	2606	119	40	43.4	24	76.4
95	3.43E+04	2	2.92E+05	17	5831	26	12	9.1	1	35.8
96	0.00E+00	0	2.42E+05	6	2478	21	17	8.9	0.3	61.2
97	2.98E+04	1	7.44E+05	25	3358	66	26	3.3	0.1	17.7
98	8.14E+04	4	7.73E+05	38	4916	68	22	7.9	2	21.1
99	0.00E+00	0	3.37E+05	4	1188	30	28	13.7	0.5	108.8



Standard error for peak age includes group error

Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

Peak	Peak age	68%	4 CI	95%	4 CI	$\mathbf{W}(\mathbf{Z})$	Frac(%)	SF %	Count	
no.	(Ma)	007	0.01	107	0.01	(1 (2)	F1ac(70)	512,70		
1	4.5	-0.6	+0.7	-1.1	+1.4	1.09	71.7	5.6	71.7	
2	26.9	-2.8	+3.1	-5.2	+6.4	0.43	22.6	5.5	22.6	
3	114.8	-10.8	+11.9	-20.2	+24.4	0.21	5.7	2.7	5.7	

Log-likelihood for best fit : -207.540

Chi-squared value for best fit : 94.782

Reduced chi-squared value : 0.998

Probability for F test : 3%

Condition number for COVAR matrix : 44.48

Number of iterations : 15

MDJ-10

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2): 5.61E+05

Relative error (%) : 1.39

Effective uranium content of monitor (ppm): 36.50

Zeta factor and standard error (yr cm2): 347.02 26.64

Size of counter square (cm2) : 1.00E-08

Grain no. RhoS	NT.	RhoI	NI.	Squares	Uran	ium	Gra	in age (Ma)	
Grain no.	(cm ⁻²)	INS	(cm ⁻²)	NI	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ	Age	959	% CI
1	3.87E+05	8	3.24E+06	67	2068	211	52	11.8	4.8	24.2
2	8.13E+04	1	4.88E+05	6	1230	32	25	18.1	0.4	132.3
3	1.35E+05	4	2.89E+06	86	2974	188	41	4.7	1.2	12
4	1.56E+05	7	2.27E+06	102	4493	148	29	6.8	2.6	14.3
5	4.10E+06	102	6.87E+06	171	2489	447	69	57.6	43.2	76.8
6	1.04E+06	57	7.10E+05	39	5489	46	15	140.4	92.2	216
7	6.88E+04	4	1.72E+05	10	5814	11	7	39.7	8.9	133.6
8	4.95E+04	1	1.24E+06	25	2021	81	32	4.4	0.1	23.7
9	1.33E+04	1	6.25E+05	47	7524	41	12	2.4	0.1	12.1
10	1.89E+05	11	1.20E+06	70	5816	78	19	15.5	7.3	29

									1010101010	10101010
11	0.00E+00	0	8.31E+04	3	3609	5	6	25.2	0.8	231.3
12	3.67E+05	17	2.79E+06	129	4629	181	32	12.9	7.2	21.3
13	1.12E+05	3	1.12E+05	3	2670	7	8	96.6	13	688.4
14	5.37E+04	3	1.92E+06	107	5583	125	24	2.9	0.6	8.2
15	4.50E+04	1	1.84E+06	41	2223	120	37	2.7	0.1	14
16	5.63E+04	3	1.88E+05	10	5332	12	8	30.2	5.2	112.4
17	4.05E+05	24	4.89E+05	29	5925	32	12	80.1	44.7	141.8
18	1.44E+05	4	3.61E+06	100	2768	235	47	4	1	10.3
19	0.00E+00	0	6.91E+04	3	4340	5	5	25.2	0.8	231.3
20	0.00E+00	0	2.27E+05	6	2649	15	12	11.9	0.4	82.1
21	0.00E+00	0	3.95E+05	19	4810	26	12	3.6	0.1	20.8
22	3.40E+04	3	1.93E+05	17	8811	13	6	17.9	3.2	59.1
23	1.76E+05	12	4.06E+06	277	6824	264	33	4.3	2.1	7.5
24	0.00E+00	0	4.89E+05	27	5524	32	12	2.5	0.1	14.2
25	1.67E+04	1	1.67E+05	10	5992	11	7	11	0.2	68
26	3.03E+04	1	2.72E+05	9	3304	18	12	12.2	0.2	77.6
27	7.21E+05	21	1.30E+06	38	2914	85	27	53.7	29.9	93.4
28	1.49E+05	3	3.47E+05	7	2017	23	17	42.8	7	180.2
29	1.49E+06	37	3.27E+06	81	2476	213	48	44.4	29.2	66.1
30	1.57E+05	10	1.42E+06	90	6352	92	20	11	5	20.8
31	2.99E+04	2	2.24E+05	15	6695	15	7	13.8	1.4	55.6
32	1.63E+05	9	3.25E+05	18	5537	21	10	48.9	19.2	113.1
33	0.00E+00	0	4.20E+05	14	3330	27	14	4.9	0.2	29.3
34	1.63E+04	1	2.28E+05	14	6145	15	8	7.9	0.2	45.5
35	0.00E+00	0	9.79E+05	31	3167	64	23	2.2	0.1	12.3
36	1.34E+05	6	1.59E+06	71	4463	104	25	8.4	2.9	18.8
37	8.12E+04	3	5.41E+05	20	3695	35	16	15.2	2.8	49
38	9.54E+04	1	1.91E+05	2	1049	12	16	51.6	0.8	872.7
39	1.70E+05	2	8.48E+05	10	1179	55	34	20.6	2.1	90.7
40	7.17E+04	2	4.16E+06	116	2789	271	51	1.8	0.2	6.2
41	0.00E+00	0	8.18E+05	35	4281	53	18	1.9	0.1	10.8
42	2.11E+04	1	6.34E+05	30	4729	41	15	3.7	0.1	19.5
43	0.00E+00	0	4.79E+05	29	6060	31	12	2.4	0.1	13.2
44	1.17E+06	38	1.26E+06	41	3252	82	26	89.6	56.1	142.3
45	0.00E+00	0	1.13E+06	23	2031	74	30	3	0.1	16.9
46	0.00E+00	0	1.25E+05	5	4011	8	7	14.5	0.5	105.3
47	3.75E+04	2	2.17E+06	116	5339	141	27	1.8	0.2	6.2

									60000	1010101
48	4.27E+05	47	4.45E+05	49	11020	29	8	92.7	60.8	140.8
49	3.82E+05	21	2.36E+05	13	5498	15	8	154.5	74.6	333
50	2.93E+05	12	2.20E+05	9	4096	14	9	127.9	49.9	339.6
51	3.71E+04	2	3.16E+05	17	5385	21	10	12.2	1.3	48.1
52	2.48E+04	1	1.24E+05	5	4037	8	7	21.6	0.4	171.6
53	1.69E+05	6	1.69E+05	6	3548	11	9	96.6	25.9	354.1
54	4.26E+04	3	9.79E+05	69	7050	64	15	4.4	0.9	12.9
55	0.00E+00	0	6.08E+05	18	2962	40	18	3.8	0.1	22.1
56	4.33E+04	1	3.90E+05	9	2308	25	16	12.2	0.2	77.6
57	2.29E+04	1	3.21E+05	14	4368	21	11	7.9	0.2	45.5
58	1.20E+05	10	2.50E+06	209	8361	163	23	4.7	2.2	8.7
59	0.00E+00	0	4.19E+05	16	3816	27	13	4.3	0.2	25.2
60	1.26E+05	9	1.26E+05	9	7170	8	5	96.6	34.1	270.9
61	0.00E+00	0	3.23E+05	8	2474	21	14	8.8	0.3	56.8
62	1.33E+05	4	1.46E+06	44	3009	95	29	9.2	2.3	24.3
63	1.39E+05	6	5.31E+05	23	4329	35	14	25.8	8.4	63.8
64	5.92E+04	4	2.81E+06	190	6761	183	27	2.1	0.6	5.3
65	5.45E+04	2	9.81E+05	36	3669	64	21	5.8	0.6	21
66	1.76E+06	82	1.22E+06	57	4655	80	21	138.3	97.7	197
67	3.69E+04	1	3.32E+05	9	2713	22	14	12.2	0.2	77.6
68	1.40E+05	9	2.48E+06	160	6442	162	26	5.6	2.5	10.7
69	1.78E+04	1	1.03E+06	58	5620	67	18	1.9	0	9.7
70	0.00E+00	0	3.31E+06	85	2568	216	47	0.8	0	4.3
71	0.00E+00	0	2.10E+05	7	3326	14	10	10.1	0.4	67.2
72	4.95E+04	2	1.14E+06	46	4041	74	22	4.5	0.5	16.2
73	1.23E+05	5	1.30E+06	53	4077	85	23	9.4	2.9	22.8
74	3.47E+04	1	3.12E+05	9	2880	20	13	12.2	0.2	77.6
75	6.01E+05	22	3.25E+06	119	3662	212	39	18.1	10.8	28.5
76	1.87E+04	1	2.99E+05	16	5349	19	10	6.9	0.1	39
77	7.59E+05	28	1.22E+06	45	3687	79	24	60.4	36.2	98.5
78	2.78E+04	2	3.89E+05	28	7191	25	10	7.4	0.8	27.5
79	6.48E+04	3	1.36E+06	63	4627	89	22	4.9	0.9	14.2
80	4.88E+04	3	8.78E+05	54	6153	57	16	5.7	1.1	16.6
81	3.12E+05	12	2.44E+06	94	3851	159	33	12.6	6.2	22.7
82	1.68E+04	1	4.20E+05	25	5948	27	11	4.4	0.1	23.7
83	1.80E+04	1	3.61E+05	20	5543	23	10	5.5	0.1	30.4
84	1.30E+05	13	1.31E+06	131	9968	86	15	9.8	5	17.1

									101010101	10101010
85	2.65E+05	8	1.39E+06	42	3021	91	28	18.8	77.5	39.9
86	2.45E+05	11	1.56E+06	70	4498	101	24	15.5	7.3	29
87	0.00E+00	0	1.12E+06	48	4301	73	21	1.4	0.1	7.8
88	1.72E+05	12	1.41E+06	98	6957	92	19	12	5.9	21.7
89	0.00E+00	0	5.92E+05	17	2871	39	18	4	0.1	23.5
90	0.00E+00	0	3.98E+05	10	2511	26	16	7	0.2	43.3
91	0.00E+00	0	5.02E+05	15	2990	33	17	4.6	0.2	27.1
92	7.91E+05	43	4.16E+06	226	5433	271	37	18.5	13	25.7
93	3.46E+04	3	7.62E+05	66	8665	50	12	4.6	0.9	13.5
94	3.82E+04	2	4.39E+05	23	5238	29	12	9	1	34.2
95	1.97E+04	1	1.77E+05	9	5077	12	7	12.2	0.2	77.6
96	7.56E+03	1	5.14E+05	68	13232	33	8	1.6	0	8.2
97	1.61E+06	69	2.31E+06	99	4294	150	30	67.5	48.9	92.6
98	1.89E+06	14	1.75E+06	13	742	114	62	103.8	45.5	237.8
99	4.43E+05	28	4.43E+05	28	6323	29	11	96.6	55.2	168.4
100	0.00E+00	0	3.84E+05	12	3125	25	14	5.8	0.2	34.9
101	2.36E+05	14	3.56E+06	211	5922	232	33	6.5	3.5	11.1
102	1.64E+05	10	2.13E+05	13	6109	14	8	74.7	29.3	182.2
103	3.79E+05	11	6.21E+05	18	2899	40	19	59.5	25.3	131.6
104	4.35E+04	2	2.61E+06	120	4599	170	31	1.7	0.2	6
105	8.52E+04	8	2.98E+05	28	9393	19	7	28.1	10.9	62.3
106	1.17E+06	40	9.95E+05	34	3418	65	22	113.4	70.2	183.9
107	0.00E+00	0	9.26E+04	6	6483	6	5	11.9	0.4	82.1
108	3.18E+04	1	2.55E+05	8	3142	17	11	13.7	0.3	90.1
109	3.46E+04	1	2.43E+05	7	2886	16	12	15.6	0.3	107.3
110	9.20E+04	4	8.05E+05	35	4349	52	18	11.5	2.9	31
111	1.35E+05	11	4.56E+05	37	8119	30	10	29.2	13.3	57.7
112	3.86E+04	2	9.64E+04	5	5185	6	5	40.5	3.7	233.5
113	6.45E+04	3	6.24E+05	29	4649	41	15	10.5	2	32.4
114	7.11E+05	52	1.26E+06	92	7315	82	17	54.8	38.2	77.7
115	1.78E+05	21	3.18E+06	375	11778	207	22	5.5	3.3	8.5
116	0.00E+00	0	5.29E+05	21	3968	34	15	3.3	0.1	18.7
117	8.52E+04	3	1.48E+06	52	3521	96	27	5.9	1.1	17.3
118	1.52E+05	7	3.47E+05	16	4607	23	11	43	14.8	108.5
119	0.00E+00	0	2.23E+05	9	4038	15	9	7.8	0.3	49.1
120	6.89E+04	3	3.68E+05	16	4353	24	12	19	3.4	63.4
121	6.45E+05	48	3.36E+06	250	7440	219	28	18.7	13.4	25.5

POOLED	2.02E+05	1155	1.10E+06	6268	572038	71	3	
--------	----------	------	----------	------	--------	----	---	--

17.9 15.2 21.1

PARAMETERS FOR BEST-FIT PEAKS

Standard error for peak age includes group error

Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

Peak	Peak age	68% CI		95%	6 CI	W(Z)	Frac(%)	SE,%	Count	
no.	(Ma)					~ /	. ,	,		
1	4.1	-0.5	+0.6	-0.9	+1.2	0.76	52.3	6.2	63.3	
2	15.1	-1.6	+1.8	-3	+3.7	0.43	26.1	6	31.6	
3	58.4	-6.2	+6.9	-11.6	+14.4	0.29	12.7	4.1	15.4	
4	112.7	-13.1	+14.9	-24.3	+31	0.31	8.9	3.5	10.7	

Log-likelihood for best fit : -321.844

Chi-squared value for best fit : 114.615

Reduced chi-squared value : 1.005

Probability for F test : 0%

Condition number for COVAR matrix : 37.23

Number of iterations : 16

MDJ-11

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2) : 4.13E+05 Relative error (%) : 1.36 Effective uranium content of monitor (ppm) : 36.50 Zeta factor and standard error (yr cm2) : 350.98 22.08 Size of counter square (cm2) : 1.00E-08

Grain no.	RhoS	NT.	RhoI	NT!	Squares	Uran	ium	Gra	nin age (l	Ma)
Grain no.	(cm ⁻²)	INS	(cm ⁻²)	NI	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ	Age	95%	6 CI
1	4.44E+04	1	9.33E+05	21	2250	83	36	3.9	0.1	21.4
2	0.00E+00	0	1.73E+05	3	1739	15	16	18.8	0.6	172.9
3	1.67E+05	8	3.34E+05	16	4784	30	15	36.5	13.4	89.1
4	1.46E+04	1	3.93E+05	27	6864	35	13	3.1	0.1	16.3
5	5.63E+04	2	2.03E+06	72	3554	179	42	2.2	0.2	7.5
6	1.91E+05	8	5.00E+05	21	4199	44	19	27.9	10.6	64.5
7	9.52E+04	4	2.55E+06	107	4203	225	44	2.8	0.7	7.1
8	8.38E+04	2	3.35E+05	8	2386	30	20	19.1	1.9	90.1
9	4.66E+04	3	2.64E+05	17	6439	23	11	13.3	2.4	44.1
10	1.90E+05	11	1.36E+06	79	5804	120	27	10.2	4.8	19

									10101010	10101010
11	8.17E+04	2	1.23E+06	30	2448	108	39	5.2	0.6	19
12	5.44E+04	2	1.09E+05	4	3675	10	9	37.4	3.3	247.9
13	4.51E+05	5	2.34E+06	26	1109	207	81	14.3	4.2	36.8
14	7.48E+04	3	5.49E+05	22	4011	49	21	10.3	1.9	32.8
15	3.13E+05	28	6.03E+05	54	8950	53	15	37.5	22.8	60.1
16	2.08E+05	4	1.56E+06	30	1920	138	50	10	2.5	27.4
17	7.58E+04	3	6.06E+05	24	3959	54	22	9.5	1.7	29.8
18	5.00E+04	1	1.50E+05	3	2001	13	14	26.2	0.5	293.9
19	7.71E+05	56	1.97E+06	143	7267	174	29	28.3	20.4	38.8
20	2.30E+05	6	6.52E+05	17	2606	58	28	25.9	8.2	67.6
21	2.02E+05	2	2.02E+05	2	989	18	23	72	5.2	928.9
22	2.49E+04	1	7.21E+05	29	4020	64	24	2.8	0.1	15.1
23	3.81E+05	13	4.40E+05	15	3408	39	20	62.6	27.4	139.9
24	1.07E+06	26	1.36E+06	33	2430	120	42	56.9	32.7	97.7
25	2.01E+05	10	8.24E+05	41	4976	73	23	17.9	7.9	35.8
26	5.25E+04	1	4.73E+05	9	1903	42	27	9.1	0.2	57.8
27	2.96E+04	1	1.01E+06	34	3383	89	30	2.4	0.1	12.7
28	3.40E+04	1	2.72E+05	8	2940	24	17	10.2	0.2	67.2
29	3.45E+04	1	7.59E+05	22	2900	67	28	3.7	0.1	20.3
30	4.41E+04	1	7.06E+05	16	2267	62	31	5.1	0.1	29.1
31	1.36E+05	5	2.29E+06	84	3675	202	44	4.4	1.4	10.5
32	1.08E+05	3	3.25E+05	9	2767	29	19	24.9	4.2	96
33	4.03E+04	1	8.06E+05	20	2482	71	32	4.1	0.1	22.6
34	0.00E+00	0	6.02E+05	12	1993	53	30	4.3	0.2	26
35	0.00E+00	0	6.95E+05	17	2447	61	29	3	0.1	17.5
36	8.69E+05	36	5.31E+05	22	4145	47	20	117.1	67.4	208.2
37	1.56E+05	5	2.03E+06	65	3200	180	45	5.7	1.7	13.7
38	3.75E+06	217	1.21E+06	70	5781	107	26	220.3	168.3	292
39	4.35E+04	1	1.48E+06	34	2298	131	45	2.4	0.1	12.7
40	9.97E+05	14	2.14E+06	30	1404	189	69	33.9	16.5	65.4
41	9.52E+04	4	2.88E+06	121	4203	255	47	2.5	0.6	6.3
42	8.00E+05	26	7.07E+05	23	3251	63	26	81.3	44.7	148.5
43	0.00E+00	0	2.58E+05	9	3490	23	15	5.8	0.2	36.6
44	1.28E+05	9	2.00E+06	141	7047	177	30	4.7	2.1	9
45	0.00E+00	0	1.31E+05	13	9929	12	6	4	0.1	23.7
46	0.00E+00	0	4.05E+05	17	4193	36	17	3	0.1	17.5
47	2.49E+04	1	3.49E+05	14	4014	31	16	5.9	0.1	33.9

									1010101010	10101010
48	1.19E+05	6	2.37E+05	12	5060	21	12	36.6	11.1	103.5
49	5.29E+05	21	1.01E+06	40	3966	89	28	38	21.2	65.7
50	7.19E+04	3	8.63E+05	36	4171	76	25	6.3	1.2	19.1
51	1.25E+05	8	2.09E+06	133	6377	184	32	4.4	1.8	8.8
52	7.70E+04	2	5.78E+05	15	2597	51	26	10.3	1.1	41.4
53	9.37E+05	20	7.96E+05	17	2135	70	34	84.5	42.2	171
54	1.17E+05	3	1.94E+06	50	2573	172	49	4.6	0.9	13.4
55	1.65E+04	1	5.78E+05	35	6058	51	17	2.4	0.1	12.3
56	0.00E+00	0	6.47E+05	7	1083	57	42	7.5	0.3	50.1
57	0.00E+00	0	6.83E+05	10	1464	60	37	5.2	0.2	32.2
58	1.28E+06	79	5.51E+06	341	6186	488	54	16.7	12.7	22
59	0.00E+00	0	6.09E+05	15	2461	54	27	3.4	0.1	20.2
60	2.50E+04	2	4.12E+05	33	8004	36	13	4.7	0.5	17.1
61	8.23E+04	8	1.61E+06	157	9725	143	23	3.8	1.6	7.5
62	1.87E+05	4	1.26E+06	27	2144	111	43	11.1	2.7	30.7
63	1.64E+05	7	1.64E+05	7	4278	14	11	72	21.6	237.6
64	3.54E+05	22	8.54E+05	53	6210	76	21	30.1	17.4	50.1
65	3.26E+04	2	1.79E+05	11	6131	16	9	14	1.4	60.1
66	2.31E+04	1	9.00E+05	39	4334	80	25	2.1	0	11
67	6.45E+04	12	1.45E+05	27	18596	13	5	32.3	14.8	65.4
68	1.82E+05	8	1.16E+06	51	4401	103	29	11.5	4.7	24.1
69	1.39E+05	5	3.06E+05	11	3593	27	16	33.4	9	102
70	3.08E+04	1	6.17E+05	20	3243	55	24	4.1	0.1	22.6
71	1.53E+05	4	2.34E+06	61	2612	207	53	4.9	1.3	12.8
72	1.12E+05	3	1.38E+06	37	2676	122	40	6.2	1.2	18.5
73	3.65E+04	2	2.37E+05	13	5484	21	11	11.9	1.2	49
74	1.31E+05	4	8.81E+05	27	3064	78	30	11.1	2.7	30.7
75	5.17E+05	10	7.24E+05	14	1933	64	34	51.8	20.5	124.1
76	9.22E+04	3	2.46E+05	8	3252	22	15	28	4.6	112.2
77	2.71E+05	3	1.17E+06	13	1107	104	57	17.4	3.1	60.6
78	1.74E+05	25	2.69E+06	387	14404	238	25	4.7	3	7
79	0.00E+00	0	3.60E+05	12	3332	32	18	4.3	0.2	26
80	1.62E+05	7	1.66E+06	72	4327	147	35	7.2	2.7	15.3
81	0.00E+00	0	3.82E+05	7	1835	34	25	7.5	0.3	50.1
82	0.00E+00	0	7.04E+05	13	1848	62	34	4	0.1	23.7
83	8.70E+04	6	1.31E+05	9	6895	12	7	48.5	14.1	150.2
84	4.32E+05	15	5.47E+05	19	3471	48	22	57	27	117.7

									10 12	
85	3.00E+04	1	1.08E+06	36	3337	95	32	2.3	5-0	11.9
86	4.07E+05	6	9.51E+05	14	1473	84	44	31.4	9.8	85.4
87	2.78E+04	1	1.95E+05	7	3593	17	13	11.6	0.2	80.1
88	1.97E+05	3	1.84E+06	28	1522	163	61	8.1	1.5	25.1
89	8.43E+04	6	3.51E+05	25	7121	31	12	17.7	5.8	43.3
90	3.25E+04	2	1.30E+05	8	6158	11	8	19.1	1.9	90.1
91	0.00E+00	0	2.01E+05	7	3484	18	13	7.5	0.3	50.1
92	7.19E+04	2	4.32E+05	12	2780	38	22	12.8	1.3	54
93	1.89E+04	1	2.64E+05	14	5296	23	12	5.9	0.1	33.9
94	8.36E+04	2	8.78E+05	21	2392	78	34	7.4	0.8	28.2
95	7.60E+04	4	1.27E+06	67	5264	113	28	4.5	1.1	11.6
96	1.79E+04	1	3.58E+05	20	5594	32	14	4.1	0.1	22.6
97	9.67E+04	4	2.90E+05	12	4137	26	15	24.7	5.7	79.2
98	7.19E+04	4	2.52E+05	14	5566	22	12	21.2	5	65.6
99	3.61E+04	1	1.01E+06	28	2773	89	34	2.9	0.1	15.6
100	5.86E+04	2	5.27E+05	18	3414	47	22	8.6	0.9	33.5
101	0.00E+00	0	4.31E+05	12	2786	38	22	4.3	0.2	26
102	0.00E+00	0	2.41E+05	5	2078	21	18	10.8	0.4	78.6
103	1.22E+05	3	2.43E+05	6	2467	22	17	37	5.9	167.4
104	1.31E+06	52	1.13E+06	45	3973	100	30	83.1	54.8	126.5
105	8.33E+04	2	1.75E+06	42	2400	155	48	3.7	0.4	13.2
106	0.00E+00	0	7.40E+05	24	3244	65	27	2.1	0.1	12
107	1.88E+04	1	1.88E+05	10	5319	17	10	8.2	0.2	50.7
108	5.54E+04	3	4.06E+05	22	5416	36	15	10.3	1.9	32.8
109	0.00E+00	0	2.83E+05	7	2470	25	18	7.5	0.3	50.1
110	9.23E+04	3	2.77E+05	9	3252	24	16	24.9	4.2	96
111	2.93E+05	7	2.93E+05	7	2389	26	19	72	21.6	237.6
112	0.00E+00	0	2.57E+05	14	5452	23	12	3.7	0.1	21.8
113	2.06E+04	1	1.85E+05	9	4858	16	11	9.1	0.2	57.8
114	2.61E+04	3	1.12E+06	129	11492	99	18	1.8	0.3	5
115	7.39E+04	3	3.20E+05	13	4057	28	15	17.4	3.1	60.6
116	5.08E+04	4	5.08E+05	40	7880	45	14	7.5	1.9	20
117	2.14E+04	1	1.28E+05	6	4680	11	9	13.5	0.3	98.8
118	1.08E+06	38	8.85E+05	31	3503	78	28	88.1	53.5	146
119	6.35E+05	29	2.34E+06	107	4565	207	40	19.7	12.5	29.8
120	3.07E+04	2	3.53E+05	23	6509	31	13	6.7	0.7	25.4
POOLED	2.04E+05	1018	8.74E+05	4365	499430	77	3	16.9	14.6	19.5



Standard error for peak age includes group error

Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

Peak	Peak age	680	4 CI	059/	4 CI	$\mathbf{W}(7)$	Frag(0/2)	SF 0/	Count	
no.	(Ma)	00 /	0 CI	937	0 CI	W (L)	Flac(70)	SE, 70		
1	4.7	-0.5	+0.5	-0.9	+1.1	0.76	62.3	5.4	74.7	
2	24.9	-2.3	+2.5	-4.3	+5.2	0.4	30.9	5.4	37.1	
3	126.3	-14.3	+16.2	-26.6	+33.6	0.27	6.8	2.7	8.2	

Log-likelihood for best fit : -318.517

Chi-squared value for best fit : 109.944

Reduced chi-squared value : 0.956

Probability for F test : 0%

Condition number for COVAR matrix : 34.44

Number of iterations : 8

MDJ-12

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2) : 4.40E+05

Relative error (%): 1.37

Effective uranium content of monitor (ppm) : 37.38

Zeta factor and standard error (yr cm2): 332.51 22.20

Size of counter square (cm2) : 1.00E-08

Grain no.	RhoS	NT	RhoI	N .7.	Squares	Urani	ium	Gr	ain age (Ma)
Grain no.	(cm ⁻²)	INS	(cm ⁻²)	NI	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ	Age	95%	∕₀ CI
1	1.20E+04	1	8.38E+04	7	8357	7	5	11.7	0.2	80.9
2	0.00E+00	0	1.75E+05	7	4001	15	11	7.6	0.3	50.6
3	1.75E+06	86	1.26E+06	62	4905	107	27	100.7	71.9	141.7
4	3.18E+04	1	3.49E+05	11	3149	30	18	7.5	0.2	45.6
5	9.13E+05	76	9.85E+05	82	8326	84	19	67.5	48.8	93.3
6	1.30E+04	1	1.04E+05	8	7714	9	6	10.3	0.2	67.9
7	0.00E+00	0	1.78E+05	5	2815	15	13	10.9	0.4	79.4
8	1.15E+05	8	1.18E+06	82	6956	100	22	7.3	3	14.7
9	6.59E+05	43	1.99E+05	13	6528	17	9	235.7	126.5	473.3
10	9.90E+04	8	3.71E+05	30	8083	32	11	19.8	7.7	43.5
11	1.57E+05	7	3.82E+05	17	4453	32	16	30.5	10.6	76.1
12	1.63E+05	7	1.95E+06	84	4299	166	36	6.2	2.4	13.1

									101010101	A0101010101
13	0.00E+00	0	1.22E+06	59	4842	103	27	0.9	50	4.7
14	2.83E+05	3	1.89E+05	2	1061	16	20	106.4	12.6	1196.7
15	7.35E+04	6	9.80E+04	8	8165	8	6	55	15.7	178
16	1.21E+05	2	3.22E+06	53	1648	273	75	3	0.3	10.5
17	2.22E+04	2	1.44E+05	13	9028	12	7	12	1.2	49.6
18	2.43E+04	1	5.82E+05	24	4122	49	20	3.5	0.1	18.7
19	1.48E+04	1	2.22E+05	15	6743	19	10	5.5	0.1	31.7
20	0.00E+00	0	4.80E+05	32	6664	41	14	1.6	0.1	8.9
21	2.11E+06	85	1.44E+06	58	4030	122	32	106.3	75.4	150.9
22	5.09E+04	2	1.71E+06	67	3927	145	35	2.3	0.3	8.2
23	1.15E+05	5	1.75E+06	76	4352	148	34	5	1.5	11.7
24	0.00E+00	0	2.16E+05	17	7853	18	9	3	0.1	17.7
25	1.40E+05	10	4.06E+06	290	7139	345	42	2.6	1.2	4.7
26	0.00E+00	0	6.14E+05	24	3910	52	21	2.1	0.1	12.2
27	1.69E+04	1	1.52E+05	9	5930	13	8	9.2	0.2	58.5
28	3.74E+04	2	4.49E+05	24	5349	38	15	6.5	0.7	24.5
29	0.00E+00	0	4.03E+05	24	5955	34	14	2.1	0.1	12.2
30	1.59E+04	1	1.43E+05	9	6274	12	8	9.2	0.2	58.5
31	6.18E+04	2	2.47E+05	8	3234	21	14	19.3	1.9	91.1
32	2.44E+06	152	1.82E+06	113	6222	154	29	97.3	73.9	128.1
33	4.74E+04	1	1.09E+06	23	2111	92	38	3.6	0.1	19.6
34	2.31E+04	1	1.04E+06	45	4334	88	26	1.9	0	9.5
35	7.42E+05	16	3.24E+05	7	2158	28	20	163.1	64.8	464
36	1.11E+05	4	4.74E+05	17	3588	40	19	17.7	4.2	52.6
37	0.00E+00	0	3.88E+05	15	3866	33	17	3.5	0.1	20.4
38	0.00E+00	0	7.16E+04	5	6983	6	5	10.9	0.4	79.4
39	0.00E+00	0	4.65E+05	27	5801	40	15	1.9	0.1	10.7
40	1.91E+04	1	9.55E+05	50	5235	81	23	1.7	0	8.5
41	3.13E+04	1	5.32E+05	17	3193	45	22	4.9	0.1	27.4
42	1.71E+05	8	6.41E+05	30	4681	54	20	19.8	7.7	43.5
43	3.74E+04	2	1.76E+06	94	5352	149	31	1.7	0.2	5.8
44	5.87E+04	2	1.76E+05	6	3408	15	12	25.6	2.4	135.1
45	0.00E+00	0	1.01E+06	51	5066	85	24	1	0	5.5
46	0.00E+00	0	2.23E+05	4	1795	19	18	13.8	0.5	110
47	1.01E+06	153	9.53E+05	144	15110	81	14	77.1	59.3	100.1
48	0.00E+00	0	3.44E+05	11	3196	29	17	4.8	0.2	29.1
49	0.00E+00	0	8.36E+04	2	2393	7	9	30.3	0.9	378.5

									19 33	
50	0.00E+00	0	1.69E+06	35	2072	143	48	1.5	0.1	8.1
51	1.46E+05	6	1.94E+05	8	4114	17	11	55	15.7	178
52	4.55E+05	22	5.37E+05	26	4839	46	18	61.7	33.4	112.8
53	7.32E+04	3	2.93E+05	12	4096	25	14	19	3.3	67.5
54	3.30E+05	19	6.03E+06	347	5757	512	57	4	2.4	6.4
55	0.00E+00	0	3.14E+05	11	3499	27	16	4.8	0.2	29.1
56	9.93E+04	3	1.99E+05	6	3023	17	13	37.4	5.9	169.2
57	5.91E+04	3	2.54E+06	129	5078	216	38	1.8	0.3	5.1
58	3.71E+04	3	8.66E+04	7	8085	7	5	32.2	5.2	136
59	5.35E+04	2	1.07E+05	4	3736	9	9	37.8	3.3	250.5
60	1.28E+05	6	6.00E+05	28	4670	51	19	16	5.3	38.5
61	0.00E+00	0	4.03E+05	12	2976	34	19	4.4	0.2	26.3
62	0.00E+00	0	2.45E+05	10	4079	21	13	5.3	0.2	32.6
63	6.46E+04	5	8.01E+05	62	7740	68	17	6.1	1.9	14.5
64	0.00E+00	0	3.11E+05	20	6437	26	12	2.6	0.1	14.8
65	7.73E+04	3	1.24E+06	48	3880	105	30	4.8	0.9	14.2
66	2.21E+04	1	2.24E+06	101	4518	190	38	0.8	0	4.1
67	1.38E+04	1	3.44E+05	25	7271	29	12	3.3	0.1	17.9
68	8.49E+04	2	5.09E+05	12	2356	43	24	13	1.3	54.6
69	0.00E+00	0	1.83E+05	10	5470	16	10	5.3	0.2	32.6
70	2.22E+05	16	2.64E+05	19	7200	22	10	61.5	29.6	125.4
71	1.53E+04	1	2.60E+05	17	6544	22	11	4.9	0.1	27.4
72	0.00E+00	0	2.48E+05	7	2818	21	15	7.6	0.3	50.6
73	1.84E+04	1	2.28E+06	124	5444	193	35	0.7	0	3.4
74	6.69E+04	2	2.68E+05	8	2988	23	16	19.3	1.9	91.1
75	0.00E+00	0	3.19E+05	18	5638	27	13	2.9	0.1	16.6
76	5.77E+04	1	4.04E+05	7	1733	34	25	11.7	0.2	80.9
77	1.52E+05	4	2.27E+05	6	2640	19	15	49.2	10.1	202.7
78	2.87E+04	1	5.74E+05	20	3482	49	22	4.2	0.1	22.9
79	3.47E+04	2	2.25E+05	13	5771	19	10	12	1.2	49.6
80	3.74E+04	1	2.09E+06	56	2673	178	48	1.5	0	7.6
81	0.00E+00	0	3.75E+05	9	2397	32	21	5.9	0.2	37
82	4.92E+04	2	2.39E+06	97	4064	203	41	1.6	0.2	5.6
83	1.65E+05	12	2.44E+06	178	7285	207	32	5	2.5	8.8
84	5.74E+04	3	1.20E+06	63	5230	102	26	3.7	0.7	10.7
85	2.02E+06	104	2.69E+06	138	5138	228	39	54.8	41.1	72.9
86	2.23E+05	14	3.82E+05	24	6284	32	13	42.8	20.4	85.4

									101010101	10101010101010101010101010101010101010
87	6.11E+04	2	1.53E+05	5	3274	13	11	30.5	2.8	176.5
88	7.11E+04	4	3.34E+06	188	5624	284	42	1.6	0.4	4.1
89	4.37E+05	12	4.37E+05	12	2743	37	21	72.8	30	175.8
90	0.00E+00	0	5.16E+05	15	2906	44	22	3.5	0.1	20.4
91	2.32E+04	1	5.56E+05	24	4319	47	19	3.5	0.1	18.7
92	3.26E+05	11	5.64E+05	19	3370	48	22	42.5	18.2	93.1
93	4.61E+04	3	1.06E+06	69	6503	90	22	3.3	0.6	9.7
94	1.71E+05	5	2.06E+05	6	2917	17	14	61	14.7	235.6
95	1.64E+04	1	4.09E+05	25	6112	35	14	3.3	0.1	17.9
96	7.28E+04	1	2.91E+05	4	1373	25	23	20.2	0.4	182.4
97	0.00E+00	0	5.14E+05	13	2527	44	24	4	0.1	24
98	1.53E+05	4	8.04E+05	21	2611	68	30	14.4	3.5	41.2
99	8.62E+04	7	3.40E+06	276	8119	289	36	1.9	0.7	3.9
100	8.80E+04	4	2.11E+06	96	4544	179	37	3.2	0.8	8.1
101	3.79E+04	2	4.74E+05	25	5276	40	16	6.3	0.7	23.5
102	1.75E+04	1	4.03E+05	23	5709	34	14	3.6	0.1	19.6
103	6.62E+04	3	1.17E+06	53	4530	99	27	4.3	0.8	12.8
104	0.00E+00	0	2.49E+05	9	3615	21	14	5.9	0.2	37
105	7.81E+04	2	3.91E+05	10	2559	33	20	15.5	1.6	68.4
106	1.71E+05	4	7.26E+05	17	2340	62	30	17.7	4.2	52.6
107	0.00E+00	0	5.50E+05	13	2362	47	25	4	0.1	24
108	4.13E+05	6	2.75E+05	4	1454	23	22	107.5	26	508.6
109	0.00E+00	0	1.96E+05	5	2550	17	14	10.9	0.4	79.4
110	0.00E+00	0	4.93E+05	12	2432	42	24	4.4	0.2	26.3
111	7.28E+04	4	2.18E+05	12	5493	19	11	25	5.7	80.1
112	3.24E+04	1	7.12E+05	22	3089	60	26	3.8	0.1	20.6
113	1.71E+05	7	4.65E+05	19	4084	39	18	27.3	9.6	66.7
114	2.12E+04	1	2.75E+05	13	4721	23	13	6.4	0.1	37.4
115	0.00E+00	0	3.64E+05	7	1925	31	23	7.6	0.3	50.6
116	0.00E+00	0	2.62E+05	8	3058	22	15	6.6	0.2	42.8
117	4.55E+05	28	5.36E+05	33	6153	46	16	61.9	36	105.2
118	3.38E+05	11	1.42E+06	46	3250	120	35	17.7	8.2	34.2
119	2.31E+04	1	2.77E+05	12	4333	24	13	6.9	0.1	41.1
120	8.09E+04	3	4.23E+06	157	3709	359	58	1.5	0.3	4.2
121	3.67E+04	1	7.35E+04	2	2722	6	8	38.8	0.6	667.5
122	1.16E+05	5	5.78E+05	25	4325	49	19	15	4.4	38.8
123	2.55E+05	15	2.81E+06	165	5881	238	38	6.7	3.6	11.3

POOLED 1	1.93E+05	1095	8.92E+05	5063	567840	76	3	15.8	13.6	18.3
		PAR	RAMETE	RS F()R BEST	г-гіт рғ	CAKS			9)

Standard error for peak age includes group error

Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

Peak no.	Peak age (Ma)	68%	6 CI	95%	6 CI	W(Z)	Frac(%)	SE,%	Count
1	3.8	-0.4	+0.4	-0.7	+0.8	0.79	77.9	4	95.8
2	74.3	-6.0	+6.6	-11.4	+13.4	0.29	22.1	4	27.2

Log-likelihood for best fit : -328.321

Chi-squared value for best fit : 103.741

Reduced chi-squared value : 0.865

Probability for F test : 0%

Condition number for COVAR matrix : 3.46

Number of iterations : 8

MDJ-13

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2) : 4.40E+05

Relative error (%) : 1.37

Effective uranium content of monitor (ppm): 37.38

Zeta factor and standard error (yr cm2) : 332.51 22.20

Size of counter square (cm2) : 1.00E-08

Dhaf Dha Causing Unopium Causin ago (Ma)										
Crain no	RhoS	Na	RhoI	NI:	Squares	Uran	ium	Gra	ain age	(Ma)
Grain no.	(cm ⁻²)	INS	(cm ⁻²)	INI	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ	Age	95	% CI
1	0.00E+00	0	5.15E+05	16	3106	44	22	3.2	0.1	19
2	7.18E+04	4	5.93E+05	33	5568	50	17	9.2	2.3	24.9
3	1.77E+04	1	1.95E+05	11	5644	17	10	7.5	0.2	45.6
4	1.35E+05	5	4.55E+06	168	3690	387	60	2.2	0.7	5.2
5	3.29E+05	4	8.21E+04	1	1217	7	11	260.2	28.9	7572.9
6	1.08E+05	3	8.29E+05	23	2775	70	29	10	1.8	31.5
7	0.00E+00	0	6.79E+04	2	2947	6	7	30.3	0.9	378.5
8	0.00E+00	0	4.25E+04	1	2355	4	6	72.8	1.9	2363.8
9	4.88E+05	20	7.56E+05	31	4101	64	23	47.2	25.4	85
10	6.23E+04	2	3.12E+04	1	3208	3	4	136.1	7.6	5480.8
11	7.42E+04	3	2.47E+05	10	4041	21	13	22.7	3.9	84.8
12	9.61E+04	2	3.36E+05	7	2082	29	21	22	2.1	109

									0000	010101010
13	4.05E+04	1	6.08E+05	15	2467	52	26	5.5	0.1	31.7
14	8.02E+04	2	5.21E+05	13	2493	44	24	12	1.2	49.6
15	0.00E+00	0	5.02E+05	10	1993	43	26	5.3	0.2	32.6
16	2.75E+04	1	1.10E+05	4	3638	9	9	20.2	0.4	182.4
17	3.08E+04	1	9.25E+04	3	3242	8	8	26.5	0.5	297
18	4.20E+05	4	3.15E+05	3	953	27	29	95.7	16.5	634.3
19	2.24E+05	5	1.16E+06	26	2234	99	38	14.4	4.2	37.2
20	1.43E+05	5	5.70E+04	2	3506	5	6	172.9	29.9	1682.4
21	0.00E+00	0	1.07E+05	1	938	9	15	72.8	1.9	2363.8
22	7.11E+04	2	1.81E+06	51	2813	154	43	3.1	0.3	10.9
23	1.37E+05	10	3.97E+05	29	7301	34	12	25.5	11	53.1
24	5.93E+04	1	2.07E+06	35	1687	176	59	2.4	0.1	12.4
25	0.00E+00	0	3.15E+05	7	2220	27	20	7.6	0.3	50.6
26	8.80E+04	1	8.80E+04	1	1136	7	12	72.8	0.9	4108.9
27	6.60E+04	3	4.40E+05	20	4546	37	17	11.5	2.1	36.9
28	0.00E+00	0	8.28E+05	22	2657	70	30	2.3	0.1	13.4
29	2.75E+04	1	2.66E+06	97	3642	226	46	0.9	0	4.3
30	7.11E+04	2	4.62E+05	13	2813	39	21	12	1.2	49.6
31	9.63E+04	2	5.78E+05	12	2078	49	28	13	1.3	54.6
32	0.00E+00	0	2.69E+05	5	1856	23	20	10.9	0.4	79.4
33	0.00E+00	0	5.57E+05	6	1077	47	37	9	0.3	61.9
34	2.55E+05	7	2.33E+06	64	2750	198	50	8.2	3.1	17.5
35	1.24E+05	2	9.32E+05	15	1609	79	40	10.4	1.1	41.9
36	2.73E+04	1	8.18E+04	3	3666	7	7	26.5	0.5	297
37	0.00E+00	0	4.07E+04	1	2456	3	6	72.8	1.9	2363.8
38	6.83E+04	2	8.54E+05	25	2926	73	29	6.3	0.7	23.5
39	0.00E+00	0	2.12E+05	5	2356	18	15	10.9	0.4	79.4
40	0.00E+00	0	3.63E+05	6	1654	31	24	9	0.3	61.9
41	0.00E+00	0	1.16E+06	15	1289	99	50	3.5	0.1	20.4
42	5.95E+04	2	2.11E+06	71	3364	179	43	2.2	0.2	7.7
43	0.00E+00	0	6.62E+04	1	1511	6	9	72.8	1.9	2363.8
44	5.31E+04	1	1.27E+06	24	1883	108	44	3.5	0.1	18.7
45	0.00E+00	0	2.19E+05	2	913	19	24	30.3	0.9	378.5
46	1.02E+05	1	2.04E+05	2	982	17	22	38.8	0.6	667.5
47	0.00E+00	0	3.27E+05	5	1530	28	24	10.9	0.4	79.4
48	1.74E+05	3	3.43E+06	59	1723	291	76	3.9	0.7	11.4
49	1.09E+05	1	5.45E+05	5	917	46	40	16.2	0.3	129.6

									00000	010101010
50	2.62E+06	20	1.05E+06	8	763	89	61	178.3	76.7	463.5
51	3.00E+04	1	5.40E+05	18	3332	46	21	4.6	0.1	25.7
52	0.00E+00	0	2.93E+05	5	1704	25	21	10.9	0.4	79.4
53	0.00E+00	0	4.35E+05	19	4363	37	17	2.7	0.1	15.7
54	1.11E+05	2	5.56E+05	10	1799	47	29	15.5	1.6	68.4
55	3.31E+04	2	1.19E+06	72	6037	101	24	2.2	0.2	7.6
56	0.00E+00	0	1.81E+05	5	2768	15	13	10.9	0.4	79.4
57	7.03E+04	1	1.55E+06	22	1422	131	55	3.8	0.1	20.6
58	6.82E+04	1	7.50E+05	11	1467	64	38	7.5	0.2	45.6
59	1.23E+05	8	4.75E+05	31	6530	40	14	19.1	7.5	41.9
60	0.00E+00	0	1.48E+05	3	2033	13	13	19	0.6	174.8
61	0.00E+00	0	3.39E+05	17	5015	29	14	3	0.1	17.7
62	3.26E+04	1	4.57E+05	14	3066	39	20	5.9	0.1	34.3
63	0.00E+00	0	2.65E+05	6	2267	22	18	9	0.3	61.9
64	0.00E+00	0	6.91E+05	19	2748	59	27	2.7	0.1	15.7
65	3.45E+05	6	1.15E+05	2	1739	10	12	205.9	39.1	1911.7
66	4.54E+04	2	1.82E+05	8	4406	15	11	19.3	1.9	91.1
67	5.94E+04	2	2.70E+06	91	3365	230	48	1.7	0.2	6
68	3.80E+04	1	4.95E+05	13	2629	42	23	6.4	0.1	37.4
69	3.42E+05	14	6.84E+05	28	4091	58	22	36.7	17.8	71.6
70	0.00E+00	0	1.43E+05	8	5599	12	8	6.6	0.2	42.8
71	0.00E+00	0	2.73E+05	2	733	23	29	30.3	0.9	378.5
72	0.00E+00	0	1.31E+06	12	919	111	63	4.4	0.2	26.3
73	0.00E+00	0	5.94E+05	9	1515	50	33	5.9	0.2	37
74	3.95E+04	1	5.54E+05	14	2529	47	25	5.9	0.1	34.3
75	6.59E+04	1	1.98E+05	3	1518	17	18	26.5	0.5	297
76	2.95E+05	4	3.68E+05	5	1358	31	27	58.7	11.6	266.6
77	7.18E+04	6	3.34E+06	279	8358	283	35	1.6	0.6	3.5
78	0.00E+00	0	1.00E+06	19	1895	85	39	2.7	0.1	15.7
79	2.13E+05	5	8.50E+04	2	2352	7	9	172.9	29.9	1682.4
80	0.00E+00	0	2.34E+05	4	1709	20	19	13.8	0.5	110
81	0.00E+00	0	8.58E+05	8	933	73	50	6.6	0.2	42.8
82	7.87E+04	1	8.65E+05	11	1271	73	43	7.5	0.2	45.6
83	6.45E+04	3	1.48E+06	69	4654	126	30	3.3	0.6	9.7
84	0.00E+00	0	3.75E+05	8	2131	32	22	6.6	0.2	42.8
85	0.00E+00	0	8.40E+04	3	3572	7	8	19	0.6	174.8
86	1.08E+05	1	5.38E+05	5	929	46	39	16.2	0.3	129.6

									10 53	
87	4.08E+04	1	1.31E+06	32	2449	111	39	2.6	0.1	13.7
88	7.16E+04	1	5.01E+05	7	1397	43	31	11.7	0.2	80.9
89	7.48E+04	3	6.98E+05	28	4011	59	22	8.2	1.5	25.4
90	7.93E+04	1	8.73E+05	11	1261	74	44	7.5	0.2	45.6
91	9.71E+04	2	4.85E+05	10	2061	41	25	15.5	1.6	68.4
92	7.95E+04	3	1.22E+06	46	3772	104	30	5	0.9	14.8
93	4.01E+04	1	8.43E+05	21	2492	72	31	4	0.1	21.6
94	1.18E+05	6	8.23E+05	42	5106	70	22	10.7	3.6	24.7
95	2.39E+04	1	2.15E+05	9	4182	18	12	9.2	0.2	58.5
96	5.35E+04	2	2.94E+05	11	3736	25	15	14.1	1.4	60.7
97	0.00E+00	0	2.62E+05	5	1906	22	19	10.9	0.4	79.4
98	0.00E+00	0	2.15E+05	2	929	18	23	30.3	0.9	378.5
99	0.00E+00	0	3.52E+05	23	6540	30	12	2.2	0.1	12.7
100	6.09E+04	2	1.52E+05	5	3284	13	11	30.5	2.8	176.5
101	9.52E+04	2	5.71E+05	12	2102	48	27	13	1.3	54.6
102	1.62E+05	8	1.82E+05	9	4940	15	10	64.9	21.8	187.4
103	0.00E+00	0	8.13E+05	24	2952	69	28	2.1	0.1	12.2
104	3.93E+04	1	1.30E+06	33	2543	110	38	2.5	0.1	13.2
105	4.73E+04	1	1.89E+05	4	2114	16	15	20.2	0.4	182.4
106	2.30E+04	1	1.84E+05	8	4357	16	11	10.3	0.2	67.9
107	0.00E+00	0	1.23E+05	5	4073	10	9	10.9	0.4	79.4
POOLED	7.54E+04	224	7.37E+05	2192	297275	63	3	7.5	6.2	9.1

Standard error for peak age includes group error

Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

Peak	Peak age	68%	68% CI		6 CI	$\mathbf{W}(\mathbf{Z})$	Frac(%)	SF %	Count
no.	(Ma)	007	0 01	107	0.01	((2)	F1ac(70)	512,70	Count
1	3.7	-0.5	+0.6	-0.9	+1.2	1.1	78.3	6.5	83.8
2	28.5	-5.9	+7.5	-10.4	+16.4	0.62	15.7	6.4	16.8
3	156.8	-45.9	+64.5	-77.3	+150.7	0.79	6.0	2.9	6.4

Log-likelihood for best fit : -188.415

Chi-squared value for best fit : 97.760

Reduced chi-squared value : 0.958

Probability for F test : 0%

Condition number for COVAR matrix : 315.22

Number of iterations : 21

附錄二 鋯石核飛跡 BINOMFIT 參數

MDJ-01

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2) : 1.04E+06 Relative error (%) : 1.01 Effective uranium content of monitor (ppm) : 36.50 Zeta factor and standard error (yr cm2) : 40.70 1.37

Size of counter square (cm2) : 1.00E-08





									160101	0/0/0/07
26	4.83E+06	60	8.86E+05	11	1242	31	18	113.5	60.1	240
27	5.29E+06	17	1.87E+06	6	322	65	51	58.9	22.6	183.9
28	6.45E+06	46	2.81E+05	2	713	10	12	439.6	126.5	3207.6
29	1.06E+07	106	2.99E+05	3	1003	10	11	677.1	245.2	2923.2
30	4.62E+06	11	1.26E+06	3	238	44	47	74.6	20.5	420.9
31	2.59E+06	19	6.81E+05	5	734	24	20	78.4	29.1	270.9
32	3.79E+06	24	6.32E+05	4	633	22	21	122.2	43.6	486.7
33	4.07E+05	3	6.79E+05	5	736	24	20	13	2	65.2
34	4.30E+06	48	3.31E+06	37	1117	116	38	27.5	17.5	43.4
35	2.74E+06	13	2.11E+05	1	474	7	12	239.4	41.3	6685.4
36	4.27E+06	25	6.83E+05	4	586	24	23	127.2	45.7	504.8
37	1.91E+06	20	8.57E+05	9	1050	30	19	46.6	20.5	116.7
38	7.04E+06	28	2.76E+06	11	398	97	57	53.4	26	119.3
39	4.65E+06	32	3.05E+06	21	688	107	46	32.2	18.1	58.8
40	9.56E+05	7	3.28E+06	24	732	115	46	6.3	2.3	14.8
41	1.19E+06	9	1.72E+06	13	755	60	33	14.8	5.5	37.1
42	1.23E+06	15	2.62E+06	32	1219	92	32	10	5	18.9
43	6.85E+05	7	1.37E+06	14	1022	48	25	10.7	3.6	28.1
44	3.81E+06	57	2.20E+06	33	1498	77	27	36.5	23.4	57.9
45	4.58E+06	27	3.90E+06	23	590	136	56	24.9	13.7	45.4
46	1.08E+06	9	3.37E+06	28	831	118	44	6.9	2.8	14.9
47	3.55E+06	35	1.12E+06	11	986	39	23	66.6	33.5	145.9
48	1.15E+06	19	2.35E+06	39	1656	82	26	10.4	5.6	18.3
49	5.86E+06	55	4.90E+06	46	939	171	50	25.3	16.8	38.3
50	4.31E+06	37	1.05E+06	9	858	37	24	85.6	41.3	202.6
51	6.59E+06	54	2.20E+06	18	819	77	36	63	36.7	114.5
52	4.02E+06	22	2.56E+06	14	548	89	47	33.2	16.3	70.2
53	4.34E+05	4	5.43E+05	5	921	19	16	17.1	3.4	78.5
54	3.82E+06	26	2.06E+06	14	680	72	38	39.1	19.8	81.3
55	4.07E+05	6	1.97E+06	29	1474	69	25	4.5	1.5	10.8
56	5.79E+06	92	3.59E+06	57	1589	125	33	34.2	24.3	48.4
57	1.97E+06	16	9.84E+05	8	813	34	24	41.9	17.1	113.7
58	6.05E+06	74	1.31E+06	16	1223	46	23	96.7	56.4	178.3
59	1.74E+06	34	1.38E+06	27	1952	48	18	26.7	15.6	46
60	3.92E+06	22	1.25E+06	7	561	44	32	65.4	27.5	182.5
61	2.10E+06	10	4.20E+05	2	476	15	19	99.4	22.6	927.2
62	6.25E+06	44	7.11E+05	5	704	25	21	179.2	73.9	577.6

									101 :43	125 COA
63	3.58E+05	7	2.00E+06	39	1954	70	22	3.9	1.4	8.6
64	4.06E+06	37	2.63E+06	24	912	92	37	32.6	19	57
65	4.09E+06	31	4.35E+06	33	758	152	53	19.9	11.8	33.5
66	1.52E+06	11	1.66E+06	12	721	58	33	19.5	7.8	48
67	4.30E+06	75	2.64E+06	46	1745	92	27	34.5	23.6	51
68	5.34E+06	46	1.28E+06	11	862	45	26	87.3	45.2	187.5
69	4.63E+06	15	2.47E+06	8	324	86	59	39.3	15.8	107.6
70	2.75E+06	36	2.07E+06	27	1307	72	28	28.2	16.7	48.4
71	4.07E+06	34	1.32E+06	11	835	46	27	64.7	32.4	142.1
72	4.50E+06	30	2.70E+06	18	667	94	44	35.2	19.1	67.1
73	2.09E+06	16	7.85E+05	6	764	27	22	55.5	21	174.4
74	5.34E+05	4	1.07E+06	8	749	37	26	10.8	2.3	39.5
75	4.84E+06	30	2.90E+06	18	620	101	47	35.2	19.1	67.1
76	3.38E+06	45	1.43E+06	19	1330	50	23	49.9	28.8	90.5
77	6.74E+05	10	1.75E+06	26	1483	61	24	8.2	3.5	17.5
78	5.26E+06	76	2.63E+06	38	1444	92	30	42.3	28.3	64.2
79	4.44E+06	27	3.29E+06	20	608	115	51	28.6	15.5	53.7
80	2.82E+06	19	1.34E+06	9	673	47	30	44.3	19.3	111.6
81	3.36E+06	16	1.26E+06	6	476	44	35	55.5	21	174.4
82	1.38E+06	12	1.60E+06	14	873	56	29	18.2	7.7	42.3
83	5.80E+06	76	2.14E+06	28	1311	75	28	57.2	36.8	91.8
84	7.07E+06	26	1.63E+06	6	368	57	45	89.6	36.9	267.9
85	2.54E+06	19	4.00E+05	3	749	14	15	127.6	39.5	673.6
86	4.59E+06	44	1.46E+06	14	959	51	27	65.9	35.8	130.6
87	5.93E+06	44	4.31E+06	32	743	151	53	29.1	18.1	47.4
88	5.61E+06	29	1.55E+06	8	517	54	37	75.5	34.2	192.1
89	6.30E+06	100	2.71E+06	43	1588	95	29	49.1	34.1	72
90	2.83E+06	23	1.23E+06	10	811	43	27	48.2	22.3	114
91	2.37E+06	17	6.98E+05	5	716	24	21	70.3	25.5	245.7
POOLED	3.71E+06	2984	1.78E+06	1433	80381	62	4	44.1	40.2	48.4

Standard error for peak age includes group error Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60
Peak no.	Peak age (Ma)	68%	% CI	95%	% CI	W(Z)	Frac(%)	SE,%	Count
1	8.5	-1	+1.1	-1.8	+2.3	0.46	16	4.4	14.5
2	35.1	-2.5	+2.7	-4.8	+5.6	0.33	44.2	7.4	40.2
3	104.1	-9.8	+10.8	-18.3	+22.1	0.44	39.8	7.2	36.2

Log-likelihood for best fit : -309.256

Chi-squared value for best fit : 88.111

Reduced chi-squared value : 1.025

Probability for F test : 0%

Condition number for COVAR matrix : 10.77

Number of iterations : 16

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2) : 1.04E+06 Relative error (%) : 1.01 Effective uranium content of monitor (ppm) : 36.50 Zeta factor and standard error (yr cm2) : 40.70 1.37



Size of counter square (cm2) : 1.00E-08

Crain no	RhoS	Na	RhoI	NI;	Squares	Urani	ium	Gi	rain age	(Ma)
Grain no.	(cm ⁻²)	18	(cm ⁻²)	INI	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ	Age	95	% CI
1	5.79E+06	85	1.23E+06	18	1468	43	20	98.8	59.5	175
2	9.54E+06	52	1.83E+05	1	545	6	10	900.8	187	13322.5
3	2.20E+07	90	3.91E+06	16	409	137	67	117.4	69.3	214.5
4	1.08E+07	228	1.33E+06	28	2106	46	17	169.9	115.4	260.9
5	7.76E+06	51	2.13E+06	14	658	74	39	76.3	42	149.7
6	4.26E+06	42	4.06E+05	4	985	14	13	211.8	80.4	804.4
7	8.54E+06	181	1.75E+06	37	2118	61	20	102.7	72.2	150.6
8	8.44E+06	79	1.50E+06	14	936	52	27	117.7	67	225.3
9	7.63E+06	63	1.57E+06	13	826	55	30	101.1	55.8	200.9
10	1.01E+07	80	1.26E+06	10	796	44	27	165.4	87.2	358
11	6.01E+06	164	9.16E+05	25	2728	32	13	137.1	90.5	218
12	6.97E+06	47	1.33E+06	9	675	47	30	108.4	53.5	252.6
13	1.04E+07	115	1.72E+06	19	1104	60	27	126.4	78.2	217.7
14	2.66E+06	10	2.66E+05	1	376	9	15	185.6	30.1	5724.8
15	5.77E+06	48	4.81E+05	4	832	17	16	241.3	92.7	906.9
16	7.80E+06	84	4.64E+05	5	1077	16	14	337.4	145.3	1039.5
17	6.14E+06	138	8.90E+05	20	2247	31	14	143.9	90.7	242.9
18	1.01E+07	52	1.75E+06	9	513	61	40	119.8	59.6	277.4
19	1.04E+07	73	1.86E+06	13	701	65	35	117	65.3	230.6
20	7.97E+06	27	2.07E+06	7	339	72	53	80.1	34.7	219.2
21	7.92E+06	145	7.10E+05	13	1830	25	14	230.1	132.9	440.5
22	9.14E+06	88	1.14E+06	11	963	40	24	165.6	89.8	343.7
23	2.70E+06	20	6.76E+05	5	739	24	20	82.5	30.9	283.5
24	9.52E+06	176	1.19E+06	22	1848	42	18	166.7	107.8	272.5
25	1.05E+07	63	1.49E+06	9	602	52	34	144.8	73.1	331.6
26	1.08E+07	57	7.56E+05	4	529	26	25	285.4	111	1057.6
27	5.61E+06	46	4.88E+05	4	819	17	16	231.5	88.6	872.9
28	1.48E+07	51	8.70E+05	3	345	30	33	335.2	115.7	1594.9

									01010	0101010101
29	2.49E+06	17	2.05E+06	14	682	72	38	25.7	12	56.3
30	1.78E+07	84	8.47E+05	4	472	30	28	416	165.7	1489.6
31	5.17E+06	68	3.04E+05	4	1314	11	10	339	133.3	1237.1
32	5.80E+06	166	3.84E+05	11	2862	13	8	308.7	172.2	623.8
33	5.67E+06	56	4.05E+05	4	988	14	13	280.6	109	1041
34	8.16E+06	92	2.22E+06	25	1127	78	31	77.3	49.6	125.8
35	6.15E+06	87	2.83E+05	4	1414	10	9	430.3	171.8	1535.9
36	9.71E+06	56	5.20E+05	3	577	18	19	367	127.6	1727.6
37	9.56E+06	275	2.08E+05	6	2878	7	6	885	427.1	2239.1
38	8.33E+06	201	9.11E+05	22	2414	32	13	190	123.5	309.3
39	7.92E+06	131	4.84E+05	8	1654	17	12	332.6	169.1	774.5
40	5.42E+06	63	1.03E+06	12	1163	36	20	109.4	59.3	223.4
41	8.24E+06	152	1.08E+06	20	1845	38	17	158.4	100.1	266.4
42	5.86E+06	52	6.76E+05	6	888	24	19	177.4	78.6	504.5
43	4.11E+06	34	6.04E+05	5	828	21	18	139.1	55.9	456.7
44	1.09E+07	160	1.09E+06	16	1466	38	19	207.1	125.6	370
45	5.60E+06	103	6.53E+05	12	1838	23	13	177.7	99.2	354.6
46	9.35E+06	229	1.14E+06	28	2449	40	15	170.6	116	262
47	1.02E+07	116	7.03E+05	8	1138	25	17	295.4	149.4	692.2
48	7.79E+06	87	7.17E+05	8	1116	25	17	222.9	111.2	529.8
49	2.05E+06	44	1.40E+05	3	2147	5	5	290.3	99.1	1404.3
50	9.00E+06	116	1.55E+06	20	1289	54	24	121.2	75.8	205.9
51	7.95E+06	316	6.04E+05	24	3975	21	9	272.1	181.9	428.8
52	7.36E+05	7	4.21E+05	4	950	15	14	36.5	9.4	170.9
53	2.19E+06	67	1.63E+05	5	3061	6	5	270.7	115	847.2
54	7.72E+06	229	8.77E+05	26	2965	31	12	183.4	123.2	286.3
55	2.29E+06	56	2.46E+05	6	2444	9	7	190.8	85	540.1
56	2.69E+06	73	4.79E+05	13	2712	17	9	117	65.3	230.6
57	5.62E+06	116	8.72E+05	18	2065	30	14	134.5	82.3	234.9
58	6.17E+06	77	5.61E+05	7	1249	20	14	224.9	107.2	574.4
59	2.47E+06	50	9.88E+04	2	2025	3	4	476.3	138	3417.5
60	4.51E+06	65	1.60E+06	23	1441	56	23	59.5	36.7	100.5
61	5.97E+06	70	1.36E+06	16	1172	48	24	91.6	53.2	169.3
62	1.04E+07	114	4.12E+06	45	1092	144	43	53.5	37.7	77.4
63	7.74E+06	115	1.82E+06	27	1485	64	24	89.4	58.8	141.7
64	2.59E+06	69	4.14E+05	11	2660	14	9	130.3	69.6	273.5
65	1.03E+07	91	2.71E+06	24	887	95	38	79.7	50.7	130.8

									10101010	0101010101010
66	8.14E+06	66	1.48E+06	12	811	52	29	114.5	62.3	233.3
67	3.21E+06	37	1.47E+06	17	1154	51	25	45.8	25.3	87
68	2.69E+06	76	6.02E+05	17	2825	21	10	93.6	55.3	169.3
69	9.39E+06	132	1.42E+06	20	1406	50	22	137.8	86.6	232.9
70	7.24E+06	76	8.57E+05	9	1050	30	19	174.2	89	395.1
71	1.02E+07	130	8.60E+05	11	1279	30	18	243.1	134.3	496
72	7.20E+06	70	2.78E+06	27	973	97	37	54.6	34.8	88.8
73	6.84E+06	90	8.37E+05	11	1315	29	17	169.3	92	351
74	5.74E+06	96	1.38E+06	23	1671	48	20	87.6	55.5	144.9
75	9.34E+06	43	2.39E+06	11	460	84	49	81.6	42	176.2
76	1.25E+07	64	2.74E+06	14	510	96	50	95.5	53.6	184.9
77	8.03E+06	101	1.19E+06	15	1258	42	21	140.2	82.2	259.8
78	9.41E+06	95	1.88E+06	19	1009	66	30	104.6	64.1	181.7
79	1.18E+07	95	1.73E+06	14	808	61	32	141.2	81.3	268.1
80	1.13E+07	78	2.02E+06	14	693	71	37	116.2	66.1	222.7
81	2.59E+06	34	5.34E+05	7	1310	19	14	100.5	44.9	270.2
82	9.08E+06	54	6.73E+05	4	595	24	22	270.8	104.9	1007.7
83	1.83E+06	29	3.79E+05	6	1581	13	10	99.8	41.7	295.7
84	6.47E+06	82	3.95E+05	5	1267	14	12	329.6	141.8	1017.2
85	1.47E+06	14	5.25E+05	5	952	18	16	58	20.2	207.7
86	4.50E+06	46	3.91E+05	4	1022	14	13	231.5	88.6	872.9
87	9.98E+06	182	2.14E+06	39	1823	75	24	98.1	69.4	142.5
88	2.13E+06	47	2.27E+05	5	2207	8	7	191.2	79.3	613.4
POOLED	6.67E+06	7996	9.52E+05	1141	119828	33	2	147.1	134.2	161.2

Standard error for peak age includes group error

Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

Peak	Peak age	680	68% CI		4 CI	W(7)	Free(0/.)	SF %	Count	
no.	(Ma)	00 /	0070 01		0 01	W (L)	Flac(70)	SE, 70	Count	
1	27.1	-11.1	+18.7	-17.4	+48.6	0.42	0.8	1.4	0.7	
2	63.8	-15.3	+20.1	-26.5	+45.2	0.29	9.6	7.4	8.4	
3	136.6	-11.7	+12.8	-22.0	+26.2	0.33	64.9	8.7	57.1	
4	310.9	-38.5	-38.5 +43.8		+91.5	0.46	24.8	7.9	21.8	

Log-likelihood for best fit : -276.644

Chi-squared value for best fit : 88.957

Reduced chi-squared value : 1.098

Probability for F test : 0%

Condition number for COVAR matrix : 1826.87 Number of iterations : 11

MDJ-03

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2) : 1.04E+06 Relative error (%) : 1.01 Effective uranium content of monitor (ppm) : 36.50 Zeta factor and standard error (yr cm2) : 40.70 1.37

Size of counter square (cm2) : 1.00E-08



Cusin us	RhoS	Na	RhoI S Ns Ni	Squares	Urani	ium	Gı	rain age	(Ma)	
Grain no.	(cm ⁻²)	INS	(cm ⁻²)	INI	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ	Age	95	% CI
1	3.27E+06	45	7.28E+05	10	1374	25	16	93.7	47.3	209.4
2	6.31E+06	72	1.58E+06	18	1141	55	26	83.9	49.9	149.7
3	7.55E+06	175	8.63E+05	20	2317	30	13	182	115.7	304.7
4	7.84E+06	133	1.24E+06	21	1696	43	19	132.3	83.9	220.8
5	1.04E+07	150	1.25E+06	18	1441	44	20	173.3	107.3	299.9
6	2.55E+06	56	5.92E+05	13	2197	21	11	90	49.2	180
7	1.67E+07	118	1.42E+06	10	706	50	31	242.4	130.2	515.4
8	5.99E+06	66	1.09E+06	12	1102	38	22	114.5	62.3	233.3
9	5.28E+06	56	1.23E+06	13	1061	43	23	90	49.2	180
10	7.27E+06	61	1.91E+06	16	839	67	33	79.9	45.9	148.8
11	3.57E+06	34	6.29E+05	6	954	22	17	116.7	49.8	341.7
12	9.91E+06	132	8.56E+06	114	1332	299	56	24.5	18.9	31.7
13	6.31E+06	153	8.66E+05	21	2425	30	13	151.9	97	252.4
14	7.68E+06	71	6.49E+05	6	925	23	18	240.8	109	671.9
15	1.31E+06	24	4.91E+05	9	1832	17	11	55.8	25.4	137.1
16	3.78E+06	68	1.67E+06	30	1801	58	21	47.8	30.8	76.3
17	6.45E+06	215	3.24E+06	108	3334	113	22	42	33	53.4
18	9.08E+06	111	1.23E+06	15	1222	43	22	153.9	90.6	284.1
19	7.54E+06	47	1.28E+06	8	624	45	31	121.6	58.2	298.9
20	5.50E+06	73	1.58E+06	21	1326	55	24	73	44.8	125.2
21	2.77E+06	58	1.91E+05	4	2093	7	6	290.3	113	1074.1
22	8.29E+06	28	2.96E+06	10	338	104	64	58.6	28	135.9
23	2.88E+06	89	9.38E+05	29	3092	33	12	64.6	42.3	102.1
24	6.95E+06	79	1.41E+06	16	1136	49	24	103.2	60.5	189.7
25	2.77E+06	47	7.07E+05	12	1697	25	14	81.9	43.3	170.1

									61010	010101010
26	6.38E+06	35	9.12E+05	5	548	32	27	143.1	57.7	468.9
27	6.20E+05	12	1.24E+06	24	1934	43	18	10.7	4.8	22.1
28	1.04E+07	70	1.64E+06	11	672	57	34	132.2	70.7	277.2
29	6.56E+06	65	1.92E+06	19	990	67	30	71.8	42.9	127.1
30	1.06E+07	98	2.05E+06	19	925	72	33	107.9	66.2	187.1
31	4.66E+06	82	3.41E+05	6	1761	12	9	277.2	126.5	766.9
32	4.44E+06	66	3.37E+05	5	1485	12	10	266.7	113.3	835.7
33	5.52E+06	104	1.70E+06	32	1883	59	21	68.4	45.9	105.3
34	3.02E+06	23	1.18E+06	9	763	41	27	53.5	24.2	132
35	5.28E+06	41	1.29E+06	10	777	45	28	85.5	42.8	192.2
36	9.33E+06	46	2.03E+05	1	493	7	12	803.4	164.7	12651.2
37	1.20E+07	62	1.55E+06	8	516	54	37	159.8	78.1	386.5
38	8.52E+06	78	1.75E+06	16	915	61	30	101.9	59.7	187.4
39	7.79E+06	47	2.32E+06	14	604	81	43	70.4	38.5	138.8
40	4.98E+06	66	3.77E+05	5	1326	13	11	266.7	113.3	835.7
41	1.01E+07	65	2.17E+06	14	645	76	40	97	54.5	187.6
42	7.81E+06	97	1.85E+06	23	1242	65	27	88.5	56.1	146.4
43	1.49E+06	13	6.86E+05	6	874	24	19	45.2	16.3	146.1
44	6.30E+06	162	1.52E+06	39	2570	53	17	87.4	61.6	127.4
45	3.99E+06	30	9.32E+05	7	751	33	24	88.9	39.1	241.1
46	5.13E+06	59	8.70E+05	10	1149	30	19	122.5	63.3	269.2
47	1.30E+07	100	2.46E+06	19	772	86	39	110.1	67.6	190.7
48	5.94E+06	39	3.05E+05	2	656	11	13	374.8	106.3	2822.9
49	1.70E+06	18	4.73E+05	5	1057	17	14	74.3	27.3	258.3
50	4.99E+06	26	3.84E+05	2	521	13	17	252.8	68.8	2041.3
51	6.04E+06	25	1.21E+06	5	414	42	36	102.7	39.8	345.9
52	8.10E+06	98	3.22E+06	39	1211	113	36	53	36.4	79.1
53	1.88E+06	35	3.76E+05	7	1861	13	10	103.5	46.3	277.4
54	5.98E+06	45	5.32E+05	4	752	19	18	226.6	86.5	855.8
55	3.92E+06	40	4.90E+05	5	1021	17	15	163.2	66.7	529.5
56	1.55E+06	7	2.21E+05	1	453	8	13	131.3	19.1	4595.5
57	4.82E+06	18	2.68E+05	1	374	9	15	328.1	60.1	8023.8
58	3.14E+06	44	5.71E+05	8	1400	20	14	113.9	54.2	281.2
59	5.47E+06	60	7.29E+05	8	1097	25	17	154.7	75.4	374.9
60	7.06E+06	49	1.01E+06	7	694	35	26	144.2	66.6	378
61	4.42E+06	24	5.53E+05	3	543	19	21	160.5	51.4	826.6
62	8.75E+06	49	2.68E+06	15	560	94	48	68.5	38.1	131.9

									(0101010) \$\$\$	01010101010
63	3.63E+06	33	9.91E+05	9	908	35	22	76.4	36.4	182.5
64	4.06E+06	52	3.91E+05	5	1279	14	12	211.2	88.2	672.7
65	5.04E+06	25	1.01E+06	5	496	35	30	102.7	39.8	345.9
66	4.72E+06	30	1.89E+06	12	636	66	37	52.5	26.3	113
67	5.78E+06	75	6.16E+05	8	1298	22	15	192.7	95.3	461.4
68	3.37E+05	2	6.74E+05	4	593	24	22	11	1	73.7
69	5.14E+06	37	6.95E+05	5	719	24	21	151.2	61.3	493.2
70	9.76E+06	46	2.33E+06	11	472	82	48	87.3	45.2	187.5
71	4.47E+06	36	6.21E+05	5	806	22	19	147.1	59.5	481.1
72	4.26E+06	21	2.84E+06	14	493	99	52	31.7	15.4	67.4
73	5.11E+06	73	1.12E+06	16	1428	39	19	95.5	55.6	176.1
74	1.52E+06	14	3.26E+05	3	921	11	12	94.5	27.6	516.9
75	7.47E+06	66	1.13E+06	10	883	40	24	136.8	71.2	299
76	8.52E+06	97	2.90E+06	33	1138	101	35	61.9	41.5	95.1
77	8.96E+06	86	2.08E+06	20	960	73	32	90.1	55.4	155.1
78	6.03E+06	108	4.47E+05	8	1790	16	11	275.5	138.9	647.8
79	8.00E+06	31	1.03E+06	4	387	36	34	157.2	57.9	612.1
80	6.89E+06	47	2.35E+06	16	682	82	40	61.7	34.6	116.9
81	3.95E+06	33	4.79E+05	4	835	17	16	167.1	62	647.5
82	5.70E+06	77	9.63E+05	13	1350	34	18	123.3	69	242.4
83	7.47E+06	51	8.79E+05	6	683	31	24	174	77	495.5
POOLED	5.59E+06	5199	1.27E+06	1185	92968	45	3	92.5	84.3	101.5

Standard error for peak age includes group error

Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

Peak	Peak age	68%	68% CI		6 CI	W(Z)	Frac(%)	SE.%	Count	
no.	(Ma)	007	0070 CI				1140(70)	51,70	count	
1	10.6	-3.2	+4.5	-5.3	+10.6	0.45	1.5	1.5	1.2	
2	34.1	-3.3	+3.6	-6.1	+7.5	0.19	4.7	2.9	3.9	
3	82.6	-6.4	+7.0	-12.1	+14.2	0.34	50.6	10.1	42	
4	169	-16.7	+18.5	-31.2	+38.2	0.43	43.2	10.2	35.9	

Log-likelihood for best fit : -255.519

Chi-squared value for best fit : 79.974

Reduced chi-squared value : 1.052

Probability for F test : 0%

Condition number for COVAR matrix : 592.91

Number of iterations : 14

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2) : 9.35E+05 Relative error (%) : 1.01 Effective uranium content of monitor (ppm) : 36.50 Zeta factor and standard error (yr cm2) : 43.68 1.57



Size of counter square (cm2) : 1.00E-08

C	RhoS ain no.	NT-	RhoI Ns		Squares	Urani	Uranium		Grain age (Ma)		
Grain no.	(cm ⁻²)	INS	(cm ⁻²)	NI	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ	Age	95%	∕₀ CI	
1	2.93E+06	13	1.58E+06	7	444	62	45	37.4	14	111.3	
2	9.07E+06	60	1.06E+06	7	662	41	30	169.2	79.4	438.6	
3	5.35E+06	66	1.54E+06	19	1234	60	27	70.1	41.9	124	
4	5.18E+06	36	4.32E+05	3	695	17	18	229.5	76.9	1137	
5	2.27E+06	41	9.40E+05	17	1809	37	18	48.8	27.3	91.8	
6	5.59E+06	24	2.10E+06	9	429	82	53	53.6	24.4	131.7	
7	8.19E+06	88	1.40E+06	15	1074	55	28	117.6	68.4	219.3	
8	1.05E+07	53	1.19E+06	6	504	47	37	173.7	77.1	494	
9	6.96E+06	46	7.56E+05	5	661	30	25	180	74.4	578.9	
10	2.57E+06	24	5.36E+05	5	934	21	18	94.8	36.5	320.7	
11	6.35E+06	44	1.73E+06	12	692	68	38	73.7	38.7	153.9	
12	3.21E+06	42	4.58E+05	6	1309	18	14	138.2	60.1	398.8	
13	1.03E+07	58	1.61E+06	9	560	63	41	128.3	64.4	295.2	
14	7.59E+06	54	2.25E+06	16	711	88	43	68	38.7	127.7	
15	4.72E+06	37	6.38E+05	5	783	25	21	145.3	58.9	474.6	
16	2.55E+06	58	3.08E+05	7	2270	12	9	163.6	76.6	425	
17	1.11E+07	42	2.11E+06	8	379	82	57	104.6	49.5	259.1	
18	1.06E+07	71	3.29E+06	22	669	129	54	65.2	40.2	110.7	
19	6.48E+06	52	1.12E+06	9	802	44	28	115.2	57.3	266.7	
20	9.55E+06	39	1.22E+06	5	408	48	41	153	62.4	497.9	
21	7.74E+06	122	1.14E+06	18	1577	45	21	135.8	83.4	236.9	
22	4.89E+06	173	5.94E+05	21	3535	23	10	164.9	105.7	272.8	
23	2.87E+05	5	1.72E+05	3	1744	7	7	33.3	6.6	215.5	
24	8.52E+06	33	7.74E+05	3	387	30	32	210.8	70	1053.4	
25	6.35E+06	36	5.29E+05	3	567	21	22	229.5	76.9	1137	
26	4.93E+06	129	1.15E+06	30	2615	45	16	86.8	58.3	134	
27	3.39E+06	166	1.51E+06	74	4900	59	14	45.3	34.2	60.1	

									101010101	10101010
28	8.78E+06	168	3.66E+05	7	1914	14	10	462.2	228.4	1132
29	4.67E+06	68	9.61E+05	14	1457	38	20	97.5	55	188.2
30	4.02E+06	64	1.13E+06	18	1594	44	21	71.7	42.3	128.9
31	4.82E+06	99	6.81E+05	14	2055	27	14	141.3	81.5	268.1
32	3.33E+06	77	3.03E+05	7	2312	12	9	216.2	103	552.8
33	7.82E+06	383	4.08E+05	20	4899	16	7	376.6	244.7	617
34	4.03E+06	99	2.44E+05	6	2456	10	7	320.3	147.6	877.5
35	7.51E+06	214	4.91E+05	14	2850	19	10	301.4	179.3	555.9
36	6.00E+06	140	2.57E+05	6	2332	10	8	448.3	209.9	1201
37	2.78E+06	101	2.75E+05	10	3632	11	7	200	106.7	428.5
38	5.57E+06	197	6.22E+05	22	3537	24	10	179.1	116.3	291.8
39	1.62E+06	75	2.81E+05	13	4627	11	6	115.5	64.5	227.4
40	4.95E+06	79	3.76E+05	6	1596	15	12	257	117	713.6
41	3.57E+06	105	2.04E+05	6	2938	8	6	339.2	156.7	925.9
42	3.20E+06	49	1.31E+05	2	1529	5	6	449.4	129.9	3261.8
43	1.62E+06	31	1.57E+05	3	1910	6	7	198.3	65.4	997.1
44	3.55E+06	114	4.99E+05	16	3208	19	10	142.6	85.2	257.9
45	7.66E+06	62	4.94E+05	4	809	19	18	297.9	116.4	1098.6
46	2.79E+06	90	8.99E+05	29	3226	35	13	62.8	41.1	99.2
47	6.09E+06	129	1.79E+06	38	2119	70	23	68.7	47.7	101.6
48	6.95E+06	167	7.08E+05	17	2403	28	13	195.8	120.3	343.3
49	2.30E+06	53	1.04E+06	24	2307	41	16	44.8	27.3	75.9
50	5.21E+06	107	3.89E+05	8	2054	15	10	262.5	132.2	618.2
51	5.39E+06	113	7.63E+05	16	2098	30	15	141.3	84.4	255.7
52	5.60E+06	61	7.35E+05	8	1088	29	20	151.1	73.8	366.1
53	4.31E+06	216	2.99E+05	15	5016	12	6	284.6	171.9	513.5
54	1.08E+07	61	1.60E+06	9	563	62	41	134.8	67.9	309.4
55	7.14E+06	267	2.94E+05	11	3739	11	7	470.8	266.7	933.8
56	8.32E+06	126	1.45E+06	22	1514	57	24	115.1	73.5	190.4
57	6.96E+06	63	1.10E+06	10	906	43	27	125.6	65.2	275.2
58	7.46E+06	80	5.59E+05	6	1073	22	17	260.2	118.5	721.9
59	1.01E+07	173	1.45E+06	25	1721	57	22	138.9	91.8	220.6
60	3.73E+06	113	8.59E+05	26	3026	34	13	87.7	57.2	140.1
61	5.27E+06	97	3.26E+05	6	1840	13	10	314	144.5	861.3
62	1.51E+06	22	3.42E+05	5	1460	13	11	87	33.1	296.7
63	2.89E+06	27	7.49E+05	7	935	29	21	76.9	33.4	210.7
64	2.12E+06	36	4.71E+05	8	1697	18	13	89.8	41.8	224.8

65	4.72E+06	112	1.10E+06	26	2372	43	17	86.9	56.7	139
66	8.16E+06	92	1.42E+06	16	1128	55	27	115.3	68.2	210.5
67	2.55E+06	90	1.70E+05	6	3524	7	5	291.9	133.9	804.2
68	6.68E+06	116	1.21E+06	21	1737	47	20	111.1	70	186.4
69	4.26E+06	37	1.15E+06	10	868	45	28	74.2	36.7	168.1
70	2.61E+06	46	3.98E+05	7	1760	16	11	130.2	59.8	342.9
71	5.64E+06	54	1.15E+06	11	957	45	26	98.3	51.6	209.2
72	3.49E+06	76	1.01E+06	22	2179	39	17	69.8	43.2	118
73	5.52E+06	216	8.18E+05	32	3912	32	11	135.7	94	203.4
74	6.47E+06	186	7.66E+05	22	2873	30	13	169.2	109.6	276.2
75	1.07E+07	125	6.86E+05	8	1166	27	18	305.6	155	714.1
76	2.62E+06	43	9.74E+05	16	1642	38	19	54.3	30.2	103.5
77	9.08E+06	282	1.58E+06	49	3105	62	18	116.1	85.8	160.6
78	7.71E+06	48	1.61E+06	10	622	63	39	96	48.7	213.7
79	3.95E+06	16	2.47E+05	1	405	10	16	281.5	50.5	7344.5
80	1.43E+06	40	2.14E+05	6	2801	8	7	131.7	57.1	381.3
81	4.01E+06	18	6.68E+05	3	449	26	28	116.3	35.6	618.5
82	1.19E+07	61	2.15E+06	11	512	84	49	110.9	58.7	234.3
POOLED	4.97E+06	7396	7.39E+05	1099	148807	29	2	135.9	123.4	149.5

Standard error for peak age includes group error

Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

Peak	Peak age	690	CI	050	(CI	$\mathbf{W}(7)$	$\mathbf{Free}(0/1)$	SE 0/	Count	
no.	(Ma)	007	0 CI	937	0 CI	W (Z)	Frac(70)	SE, 70	Count	
1	63.6	-6.1	+6.8	-11.5	+14.0	0.29	20.9	7.1	17.2	
2	133.4	-10.4	+11.3	-19.7	+23.1	0.35	57	8.3	46.7	
3	323.8	-33.7	+37.5	-62.9	+77.6	0.43	22.1	6.3	18.1	

Log-likelihood for best fit : -255.133

Chi-squared value for best fit : 77.907

Reduced chi-squared value : 1.012

Probability for F test : 0%

Condition number for COVAR matrix : 12.78

Number of iterations : 15

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2): 9.35E+05 Relative error (%) : 1.01 Effective uranium content of monitor (ppm) : 36.50 Zeta factor and standard error (yr cm2) : 43.68 1.57

Size of counter square (cm2) : 1.00E-08



		GI	RAIN AGH	ES IN	ORIGIN	AL OR	DER	
Cusin na	RhoS	Na	RhoI	NI:	Squares	Uran	ium	
Grain no.	(cm ⁻²)	INS	(cm ⁻²)	INI	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ	Ā
1	1.98E+06	60	3.97E+05	12	3026	15	9	10
2	1.16E+07	128	3.45E+06	38	1101	135	44	6
3	8.28E+06	280	1.04E+06	35	3380	40	14	1

0	RhoS	NT	RhoI	NT!	Squares	Urani	um	Gı	rain age (Ma)	
Grain no.	(cm ⁻²)	INS	(cm ⁻²)	INI	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ	Age	95	% CI
1	1.98E+06	60	3.97E+05	12	3026	15	9	100.2	54.1	205.2
2	1.16E+07	128	3.45E+06	38	1101	135	44	68.2	47.3	100.8
3	8.28E+06	280	1.04E+06	35	3380	40	14	160.6	113.6	235
4	3.82E+06	109	7.37E+05	21	2850	29	12	104.4	65.6	175.7
5	2.87E+06	46	6.23E+04	1	1605	2	4	773.7	158.3	12429.7
6	2.79E+06	25	7.81E+05	7	896	31	22	71.3	30.6	196.6
7	8.88E+06	139	1.66E+06	26	1565	65	25	107.7	71	170.7
8	4.06E+06	75	5.41E+05	10	1848	21	13	149.2	78.3	324
9	7.67E+06	163	5.18E+05	11	2124	20	12	291.6	162.5	590.2
10	7.75E+06	104	1.57E+06	21	1342	61	26	99.7	62.5	168
11	5.78E+06	158	3.29E+05	9	2736	13	8	343	181.4	752.7
12	6.52E+06	40	1.14E+06	7	613	45	33	113.4	51.5	301.5
13	1.09E+07	182	3.40E+06	57	1677	133	35	64.7	47.9	88.8
14	1.16E+07	54	1.71E+06	8	467	67	46	134	64.8	326.9
15	1.16E+07	134	1.64E+06	19	1159	64	29	141.3	88	242.1
16	6.46E+06	31	6.25E+05	3	480	24	26	198.3	65.4	997.1
17	2.88E+06	66	4.80E+05	11	2293	19	11	119.8	63.9	252.3
18	4.77E+06	133	6.46E+05	18	2786	25	12	147.9	91.1	257.2
19	1.10E+07	127	2.24E+06	26	1159	88	34	98.4	64.6	156.6
20	6.16E+06	110	1.23E+06	22	1786	48	20	100.7	63.8	167.4
21	3.91E+06	73	1.07E+06	20	1865	42	19	73.6	44.7	127.8
22	9.59E+06	165	8.14E+05	14	1721	32	17	233.7	137.8	434.9
23	1.86E+06	40	1.39E+05	3	2155	5	6	254.4	86.1	1246.7
24	7.41E+06	180	1.07E+06	26	2431	42	16	139	92.6	218.6
25	1.18E+07	112	1.05E+06	10	952	41	25	221.4	118.7	472.2
26	5.76E+06	66	1.22E+06	14	1145	48	25	94.6	53.3	183
27	1.09E+07	183	1.07E+06	18	1683	42	19	202.6	126.4	348.5

									101010101	201010101010
28	5.36E+06	91	1.30E+06	22	1697	51	21	83.4	52.3	139.8
29	8.29E+06	231	1.15E+06	32	2787	45	16	145	100.7	216.9
30	9.60E+06	80	3.84E+06	32	833	150	53	50.7	33.4	79
31	9.52E+06	49	5.83E+05	3	515	23	24	310	106.7	1486.9
32	1.08E+07	133	1.14E+06	14	1233	44	23	189.1	110.6	354.5
33	3.52E+06	20	7.04E+05	4	568	28	26	98.2	34.1	398.1
34	9.74E+06	107	5.46E+05	6	1099	21	17	345.5	159.8	941.9
35	7.70E+06	164	1.41E+06	30	2129	55	20	110.1	74.8	168.5
36	5.46E+06	159	5.83E+05	17	2914	23	11	186.5	114.5	327.6
37	1.19E+06	12	1.09E+06	11	1012	42	25	22.2	9	55.5
38	8.22E+06	97	7.63E+05	9	1180	30	19	212.9	110.2	477.5
39	5.23E+06	75	6.97E+05	10	1434	27	17	149.2	78.3	324
40	9.47E+06	92	2.06E+06	20	972	80	36	92.6	57.1	158.9
41	3.27E+06	111	2.53E+06	86	3397	99	21	26.2	19.6	34.9
42	2.53E+06	63	7.23E+05	18	2488	28	13	70.6	41.6	127
43	6.76E+06	112	1.27E+06	21	1657	49	21	107.3	67.5	180.3
44	2.33E+06	59	4.35E+05	11	2527	17	10	107.3	56.7	227.2
45	4.75E+06	83	1.54E+06	27	1749	60	23	62.2	40.1	100.1
46	2.47E+06	22	3.37E+05	3	890	13	14	141.6	44.8	737.4
47	7.92E+06	96	4.13E+05	5	1212	16	14	369.4	160.2	1129.6
48	6.48E+06	72	9.00E+05	10	1112	35	22	143.3	75	311.9
49	9.49E+06	110	3.36E+06	39	1159	131	42	57.2	39.5	84.7
50	7.30E+06	155	2.17E+06	46	2123	85	25	68.2	49	97.1
51	6.72E+06	127	1.85E+06	35	1890	72	24	73.4	50.4	110.1
52	9.89E+06	142	3.48E+05	5	1436	14	12	538.9	238.1	1597.7
53	7.97E+06	119	2.34E+06	35	1493	92	31	68.8	47.1	103.5
54	9.81E+06	114	1.29E+06	15	1162	50	26	151.9	89.5	280.2
55	6.15E+06	71	3.55E+06	41	1154	139	43	35.2	23.7	53.1
56	6.09E+06	102	1.61E+06	27	1674	63	24	76.3	49.8	121.5
57	8.03E+06	56	2.44E+06	17	697	95	46	66.4	38.4	122.3
58	1.33E+07	134	3.18E+06	32	1006	124	44	84.6	57.5	128.7
59	1.12E+07	60	9.35E+05	5	535	37	31	233.6	98.5	737.9
60	4.96E+06	98	9.61E+05	19	1977	38	17	103.7	63.6	179.8
61	7.48E+06	79	2.46E+06	26	1056	96	37	61.5	39.2	99.9
62	8.74E+06	74	1.42E+06	12	847	55	31	123.3	67.5	249.7
63	8.28E+06	44	1.32E+06	7	531	51	38	124.6	57.1	329.1
64	8.85E+06	133	1.40E+06	21	1503	55	24	127.2	80.7	212.3

									0101010	(010101010)
65	1.61E+06	13	2.48E+05	2	808	10	12	123.4	30	1109.8
66	1.03E+07	140	1.62E+06	22	1356	63	27	127.8	81.9	210.5
67	9.44E+06	95	4.37E+06	44	1007	171	51	43.8	30.4	64.2
68	6.34E+05	7	3.62E+05	4	1105	14	13	35	9.1	164.3
69	5.82E+06	77	8.32E+05	11	1322	32	19	139.6	75.1	291.5
70	7.82E+06	113	1.52E+06	22	1445	59	25	103.4	65.6	171.7
71	2.93E+06	42	6.98E+05	10	1432	27	17	84.1	42.2	188.9
72	9.51E+06	43	1.99E+06	9	452	78	50	95.4	46.7	223.7
73	1.04E+07	152	2.86E+06	42	1467	112	34	73.2	51.9	105.8
74	7.15E+06	46	2.02E+06	13	644	79	43	71.2	38.2	144.1
75	1.20E+07	53	1.82E+06	8	440	71	49	131.6	63.5	321.3
76	6.45E+06	51	1.14E+06	9	791	44	29	113	56.1	261.9
77	4.54E+06	86	9.51E+05	18	1893	37	17	96.1	57.9	170.1
78	8.66E+06	57	4.25E+06	28	658	166	62	41.3	25.9	67.5
79	2.96E+06	79	4.12E+05	11	2667	16	10	143.1	77.1	298.6
80	7.66E+06	144	9.05E+05	17	1879	35	17	169.2	103.4	298.1
81	3.84E+06	62	1.05E+06	17	1614	41	20	73.5	42.8	134.5
82	5.86E+06	35	1.00E+06	6	597	39	31	115.4	49.3	337.4
POOLED	6.41E+06	7824	1.26E+06	1533	122070	49	3	103.3	94.3	113.1

Standard error for peak age includes group error

Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

Peak	Peak age	680	4 CI	050	/ CI	$\mathbf{W}(7)$	Free(0/.)	SF 0/	Count	
no.	(Ma)	00 /	0 CI	937	0 01	W (L)	Flac(70)	SE, 70	Count	
1	32.4	-4.3	+4.9	-7.9	+10.4	0.23	5.2	3.1	4.2	
2	71.9	-6.5	+7.1	-12.2	+14.6	0.26	30.7	8.3	25.2	
3	131.8	-11.0	+12.0	-20.7	+24.6	0.32	51.6	9.3	42.4	
4	283.5	-52.8	+64.5	-94.3	+139.8	0.43	12.5	6.5	10.2	

Log-likelihood for best fit : -277.008

Chi-squared value for best fit : 79.620

Reduced chi-squared value : 1.062

Probability for F test : 5%

Condition number for COVAR matrix : 94.93

Number of iterations : 29

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2) : 1.04E+06 Relative error (%) : 1.01 Effective uranium content of monitor (ppm) : 36.50 Zeta factor and standard error (yr cm2) : 40.70 1.37

Size of counter square (cm2) : 1.00E-08



GRAIN AGES IN ORIGINAL ORDER

C	RhoS	NT.	RhoI	N .T.	Squares	Ura	nium	Gı	ain age (Ma)
Grain no.	(cm ⁻²)	INS	(cm ⁻²)	INI	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ	Age	95	% CI
1	4.18E+06	52	1.29E+06	16	1243	45	22	68.2	38.7	128.3
2	5.72E+06	49	7.01E+05	6	856	24	19	167.3	73.8	477.6
3	3.99E+06	106	5.27E+05	14	2656	18	10	157.3	91.1	297.4
4	7.98E+06	92	1.56E+06	18	1153	55	25	106.9	64.7	188.6
5	4.58E+05	9	1.42E+06	28	1965	50	19	6.9	2.8	14.9
6	2.11E+06	36	1.52E+06	26	1707	53	21	29.3	17.2	50.6
7	4.74E+06	51	5.57E+05	6	1076	19	15	174	77	495.5
8	7.74E+06	39	1.98E+05	1	504	7	11	687.8	138.7	11767.9
9	2.83E+06	21	1.35E+06	10	741	47	29	44.1	20.1	105.3
10	4.23E+06	121	2.48E+06	71	2860	87	21	36.1	26.7	49.1
11	2.28E+06	16	4.28E+05	3	702	15	16	107.8	32.3	580
12	3.01E+06	62	7.76E+05	16	2062	27	13	81.2	46.7	151.1
13	4.65E+06	97	1.82E+06	38	2084	64	21	53.9	36.8	80.7
14	1.71E+06	27	2.53E+06	40	1580	89	28	14.4	8.5	23.9
15	5.19E+06	28	1.67E+06	9	539	58	38	65	30.2	157.3
16	1.37E+06	16	2.66E+06	31	1168	93	33	11	5.6	20.6
17	1.88E+06	21	1.70E+06	19	1116	60	27	23.4	12	46
18	2.84E+06	10	1.14E+06	4	352	40	37	51.7	15.3	228
19	1.69E+06	82	1.53E+06	74	4841	53	12	23.5	16.9	32.6
20	1.80E+06	13	5.54E+05	4	722	19	18	66.9	21.3	284.4
21	1.40E+06	21	7.35E+05	11	1497	26	15	40.2	18.7	92.5
22	4.45E+06	59	1.66E+06	22	1325	58	25	56.5	34.3	97
23	6.13E+05	6	4.08E+05	4	979	14	13	31.4	7.6	151.8
24	2.97E+06	58	8.20E+05	16	1951	29	14	76	43.5	142
25	4.63E+06	75	9.87E+05	16	1622	34	17	98	57.2	180.6
26	1.82E+06	28	2.92E+06	45	1540	102	30	13.2	7.9	21.6
27	1.12E+06	16	1.75E+06	25	1425	61	24	13.6	6.8	26.4

									10101010	(010101010) (010101010)
28	2.14E+06	16	1.34E+06	10	749	47	29	33.7	14.5	83.3
29	6.03E+06	80	3.39E+06	45	1326	119	35	37.6	25.8	55.5
30	7.02E+06	120	3.92E+06	67	1711	137	33	37.9	27.9	51.9
31	6.13E+06	123	9.96E+05	20	2008	35	15	128.5	80.5	217.7
32	3.84E+05	9	1.24E+06	29	2342	43	16	6.7	2.7	14.3
33	5.89E+06	130	1.99E+06	44	2208	70	21	62.3	44.1	89.9
34	3.83E+06	89	9.47E+05	22	2322	33	14	84.9	53.2	142.5
35	4.33E+06	55	1.34E+06	17	1269	47	22	67.9	39.2	125.2
36	6.69E+06	62	2.05E+06	19	927	72	32	68.5	40.8	121.7
37	4.22E+06	28	1.81E+06	12	663	63	36	49	24.4	106.2
38	6.39E+05	11	5.81E+05	10	1722	20	13	23.3	9	61.1
39	9.83E+06	85	1.50E+06	13	864	53	29	136	76.6	266.1
40	8.37E+05	12	1.88E+06	27	1434	66	25	9.5	4.4	19.3
41	1.14E+06	22	3.00E+06	58	1936	105	27	8.1	4.7	13.4
42	6.30E+06	55	2.18E+06	19	873	76	35	60.9	35.8	108.9
43	6.49E+06	90	1.59E+06	22	1387	55	23	85.9	53.8	144
44	4.39E+06	50	4.13E+06	47	1138	144	42	22.6	14.8	34.3
45	3.28E+06	70	1.08E+06	23	2135	38	16	64	39.7	107.7
46	2.56E+06	53	6.27E+05	13	2072	22	12	85.2	46.4	171
47	2.86E+06	49	1.69E+06	29	1713	59	22	35.7	22.2	58.7
48	1.60E+06	30	3.90E+06	73	1874	136	32	8.8	5.5	13.5
49	3.77E+06	44	6.86E+05	8	1167	24	16	113.9	54.2	281.2
50	4.49E+06	53	2.12E+06	25	1182	74	29	44.7	27.4	75.2
51	5.43E+06	77	5.57E+06	79	1418	195	44	20.7	14.9	28.7
52	2.68E+06	34	7.09E+05	9	1269	25	16	78.7	37.6	187.6
53	4.36E+05	9	2.91E+06	60	2062	102	26	3.2	1.4	6.5
54	5.74E+05	15	8.04E+05	21	2613	28	12	15.2	7.3	30.8
55	2.47E+06	19	5.59E+06	43	769	195	59	9.4	5.2	16.4
56	7.00E+06	87	3.30E+06	41	1243	115	36	44.8	30.7	66.7
57	1.03E+06	34	1.31E+06	43	3287	46	14	16.8	10.4	26.9
58	7.01E+06	85	4.37E+06	53	1212	153	42	33.9	23.8	48.8
59	3.88E+06	64	1.88E+06	31	1648	66	23	43.6	28.1	69.4
60	5.12E+06	107	1.96E+06	41	2090	69	21	55.1	38.2	81.1
61	1.29E+06	12	1.29E+06	12	929	45	26	21.2	8.7	51.5
62	5.15E+06	67	1.92E+06	25	1301	67	27	56.5	35.4	93.5
63	1.27E+06	23	1.71E+06	31	1815	60	21	15.8	8.8	27.9
64	6.89E+06	158	1.66E+06	38	2294	58	19	87.5	61.3	128.2

									10 × 13	
65	2.73E+06	38	5.75E+05	8	1392	20	14	98.6	46.2	245.7
66	2.38E+06	29	4.92E+05	6	1218	17	14	99.8	41.7	295.7
67	2.79E+06	57	1.27E+06	26	2040	45	17	46.3	28.7	76.8
68	8.66E+06	114	4.41E+06	58	1316	154	40	41.6	30.1	58.1
69	3.61E+06	40	8.13E+05	9	1107	28	18	92.5	44.9	217.7
70	3.32E+06	62	1.39E+06	26	1866	49	19	50.3	31.5	83
71	7.29E+06	60	2.07E+06	17	823	72	35	74	43	135.7
72	5.03E+06	50	1.21E+06	12	994	42	24	87	46.3	180.1
73	1.52E+06	31	1.52E+06	31	2039	53	19	21.2	12.5	36.1
74	2.92E+06	53	4.40E+05	8	1816	15	11	136.9	66.1	334.1
75	3.71E+06	37	1.50E+06	15	997	53	27	51.9	28	102
76	5.45E+05	9	3.63E+05	6	1652	13	10	31.5	10.1	107.9
77	2.19E+06	51	2.58E+05	6	2329	9	7	174	77	495.5
78	7.56E+06	198	2.71E+06	71	2620	95	22	58.6	44.4	77.3
79	2.59E+06	46	1.07E+06	19	1779	37	17	51	29.5	92.3
80	9.24E+06	63	1.32E+06	9	682	46	30	144.8	73.1	331.6
81	1.55E+06	23	1.28E+06	19	1479	45	20	25.6	13.4	49.8
82	3.36E+06	33	1.83E+06	18	983	64	30	38.7	21.3	73.1
POOLED	3.43E+06	4332	1.67E+06	2116	126367	59	3	43.3	39.8	47.2

Standard error for peak age includes group error

Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

Peak	Peak age	690	(CI	050		$\mathbf{W}(7)$	$\mathbf{Free}(0/0)$	SE 0/	Count
no.	(Ma)	007	0 CI	937	0 CI	W (Z)	FTac (70)	SE, 70	Count
1	8.0	-1.1	+1.2	-2.0	+2.6	0.34	10.2	3.9	8.3
2	19.5	-1.7	+1.9	-3.2	+3.8	0.28	16.7	5.0	13.7
3	47.9	-2.8	+3.0	-5.4	+6.0	0.27	41.8	7.1	34.3
4	103.3	-8.5	+9.3	-16.0	+19.0	0.36	31.3	6.6	25.6

Log-likelihood for best fit : -310.356

Chi-squared value for best fit : 83.223

Reduced chi-squared value : 1.110

Probability for F test : 2%

Condition number for COVAR matrix : 24.39

Number of iterations : 35

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2) : 9.35E+05

Relative error (%) : 1.01

Effective uranium content of monitor (ppm) : 36.50

Zeta factor and standard error (yr cm2): 43.68 1.57

Size of counter square (cm2) : 1.00E-08



									10 34	
28	7.57E+06	140	9.73E+05	18	1850	38	18	155.6	96.1	270.1
29	1.93E+06	35	4.41E+05	8	1814	17	12	87.3	40.6	219.1
30	8.60E+06	156	4.41E+05	8	1813	17	12	379.1	194	876.1
31	2.22E+06	46	5.32E+05	11	2069	21	12	83.9	43.4	180.3
32	7.38E+06	54	1.09E+06	8	732	43	29	134	64.8	326.9
33	4.83E+06	114	6.78E+05	16	2360	26	13	142.6	85.2	257.9
34	2.14E+06	59	2.90E+05	8	2755	11	8	146.3	71.2	355
35	9.10E+06	99	7.36E+05	8	1087	29	20	243.3	122.1	575
36	7.60E+06	108	1.27E+06	18	1420	50	23	120.4	73.5	211
37	6.29E+06	116	9.22E+05	17	1844	36	17	136.7	82.8	242.7
38	5.47E+06	97	5.08E+05	9	1772	20	13	212.9	110.2	477.5
39	4.83E+06	173	3.07E+05	11	3581	12	7	309.1	172.6	624.1
40	7.24E+06	50	2.46E+06	17	691	96	46	59.4	33.9	110.1
41	5.59E+06	157	8.19E+05	23	2807	32	13	137	88.9	222.5
42	1.21E+07	218	1.27E+06	23	1805	50	21	189.4	124.4	304.5
43	9.20E+06	122	9.05E+05	12	1326	35	20	201.8	113.5	400.1
44	4.86E+06	64	4.56E+05	6	1316	18	14	209.1	94	587.8
45	4.07E+06	166	1.96E+05	8	4081	8	5	402.6	206.6	927.5
46	3.97E+06	94	6.75E+05	16	2370	26	13	117.8	69.7	214.8
47	8.69E+06	192	4.98E+05	11	2209	19	11	342.1	191.7	687.9
48	7.85E+06	97	7.29E+05	9	1235	28	18	212.9	110.2	477.5
49	1.16E+07	118	2.45E+06	25	1019	96	38	95.1	61.8	153.1
50	6.65E+06	190	4.55E+05	13	2857	18	10	288.3	168	546.9
51	3.95E+06	123	6.75E+05	21	3113	26	11	117.7	74.4	197.1
52	9.25E+06	152	6.70E+05	11	1643	26	15	272.4	151.4	552.8
53	1.07E+07	109	1.18E+06	12	1021	46	26	180.6	101.1	359.7
54	7.44E+06	56	7.98E+05	6	752	31	24	183.4	81.7	519.7
55	4.01E+06	194	3.93E+05	19	4839	15	7	203.5	128.5	344.5
56	2.93E+06	57	6.17E+05	12	1945	24	14	95.2	51.2	195.6
57	9.14E+06	193	1.56E+06	33	2113	61	21	117.8	81.6	176
58	6.95E+06	115	3.02E+05	5	1656	12	10	440	192.5	1327.1
59	3.51E+06	85	2.07E+05	5	2419	8	7	328.2	141.4	1012.4
60	7.66E+06	104	1.18E+06	16	1358	46	23	130.2	77.5	236.4
POOLED	5.87E+06	6721	7.43E+05	851	114514	29	2	159.1	143.8	176

Standard error for peak age includes group error

Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

								10 × 3	
Peak no.	Peak age (Ma)	68%	% CI	95%	% CI	W(Z)	Frac(%)	SE,%	Count
1	53.5	-5.5	+6.1	-10.3	+12.7	0.23	7.3	3.7	4.4
2	139.9	-12.8	+14.1	-24.0	+28.9	0.32	52.3	13.1	31.4
3	265.3	-29.3	+32.8	-54.4	+68.1	0.39	40.3	13.1	24.2

Log-likelihood for best fit : -189.626

Chi-squared value for best fit : 54.743

Reduced chi-squared value : 0.995

Probability for F test : 0%

Condition number for COVAR matrix : 24.91

Number of iterations : 24

MDJ-09

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2) : 9.35E+05 Relative error (%) : 1.01 Effective uranium content of monitor (ppm) : 36.50

Zeta factor and standard error (yr cm2): 43.68 1.57

Size of counter square (cm2) : 1.00E-08

C	RhoS	NT	RhoI	NI!	Squares	Uran	ium	Gra	ain age	(Ma)
Grain no.	(cm ⁻²)	INS	(cm ⁻²)	INI	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ	Age	95	% CI
1	1.16E+06	8	7.27E+05	5	688	28	24	32.2	9.4	125.7
2	1.07E+07	151	8.54E+05	12	1406	33	19	248.8	141.2	489.3
3	7.31E+06	132	3.32E+05	6	1806	13	10	423.5	197.8	1139.2
4	4.29E+06	33	1.30E+05	1	769	5	8	565	111.8	10690.7
5	9.73E+06	108	1.17E+06	13	1109	46	25	165.6	94.4	320.7
6	1.95E+06	26	5.99E+05	8	1335	23	16	65.1	29.1	167.4
7	6.63E+06	106	2.94E+06	47	1599	115	33	45.8	32.3	66.1
8	1.02E+07	145	5.64E+05	8	1417	22	15	353.1	180.2	819.1
9	5.52E+06	83	6.65E+05	10	1504	26	16	164.9	87	356.4
10	1.30E+06	14	2.78E+05	3	1078	11	12	90.9	26.5	497.3
11	6.24E+06	62	1.91E+06	19	994	75	34	65.9	39.2	116.9
12	9.52E+06	90	1.48E+06	14	945	58	30	128.6	73.8	245
13	3.09E+06	43	1.30E+06	18	1390	51	24	48.3	27.5	89.2
14	9.14E+06	84	1.09E+05	1	919	4	7	1347.5	292.6	15816.6
15	6.15E+06	49	7.53E+05	6	797	29	23	160.8	70.9	459.5
16	9.81E+06	122	1.29E+06	16	1243	50	25	152.4	91.4	275

GRAIN AGES IN ORIGINAL ORDER

apipipipipi

									16[0][0]	01010101
17	2.93E+06	39	9.00E+05	12	1333	35	20	65.4	33.9	137.7
18	4.42E+06	22	1.81E+06	9	498	71	46	49.2	22	122
19	5.34E+06	39	1.37E+05	1	730	5	9	662.2	133.3	11551.8
20	6.39E+06	133	7.69E+05	16	2081	30	15	166	99.9	298.5
21	9.99E+06	90	1.22E+06	11	901	48	28	162.8	88.4	337.6
22	1.53E+06	7	2.19E+05	1	457	9	14	126.2	18.3	4465.1
23	6.88E+06	46	8.97E+05	6	669	35	27	151.1	66.3	433.6
24	4.42E+06	30	4.42E+05	3	679	17	18	192	63.1	968.8
25	1.30E+07	88	7.36E+05	5	680	29	25	339.5	146.5	1044.6
26	9.28E+06	32	2.90E+05	1	345	11	18	548.7	108.2	10535.3
27	3.06E+06	104	1.18E+05	4	3400	5	4	491.7	198	1730.2
28	4.09E+06	69	4.15E+05	7	1688	16	12	194.1	91.9	499.3
29	3.93E+05	6	6.54E+04	1	1528	3	4	108.7	14.8	4048.6
30	3.33E+06	58	4.01E+05	7	1744	16	11	163.6	76.6	425
31	2.93E+06	24	7.33E+05	6	818	29	22	79.5	32.4	239.7
32	6.29E+05	8	3.14E+05	4	1273	12	12	39.9	10.9	182.7
33	4.05E+06	77	6.31E+05	12	1902	25	14	128.2	70.4	259.2
34	6.81E+06	46	8.88E+05	6	676	35	27	151.1	66.3	433.6
35	5.76E+06	63	8.23E+05	9	1094	32	21	139.2	70.3	318.9
36	5.20E+06	58	9.86E+05	11	1116	39	23	105.5	55.7	223.6
37	6.32E+06	43	7.35E+05	5	680	29	24	168.4	69.3	544.3
38	7.10E+06	39	7.28E+05	4	549	28	27	189.3	71.4	724.6
39	2.70E+06	52	6.76E+05	13	1923	26	14	80.4	43.7	161.5
40	8.39E+06	142	1.18E+06	20	1692	46	20	142.3	89.7	240
41	7.45E+06	40	1.68E+06	9	537	65	43	88.8	43.2	209.2
42	7.17E+06	48	7.47E+05	5	669	29	25	187.7	77.9	601.9
43	5.40E+06	45	7.20E+05	6	834	28	22	147.9	64.8	424.9
44	4.07E+06	53	7.67E+05	10	1304	30	19	105.9	54.2	234.3
45	5.76E+06	120	4.80E+05	10	2083	19	12	236.9	127.3	503.8
46	7.23E+06	170	9.36E+05	22	2350	37	15	154.8	100	253.4
47	9.19E+06	82	1.23E+06	11	892	48	28	148.5	80.2	309.3
48	7.38E+06	105	6.32E+05	9	1424	25	16	230.1	119.6	514.3
49	1.37E+07	195	3.93E+06	56	1425	154	41	70.5	52.3	96.8
50	3.73E+06	88	2.54E+05	6	2361	10	8	285.6	130.8	787.9
51	6.43E+06	86	4.48E+05	6	1338	18	14	279.2	127.7	771.4
52	3.35E+06	15	1.34E+06	6	448	52	41	50	18.7	158.6
53	5.63E+06	41	1.37E+05	1	728	5	9	694.2	140.4	11815.1

									1000	
54	9.01E+06	60	4.51E+05	3	666	18	19	377.4	131.8	1768.9
55	5.49E+06	144	8.76E+05	23	2625	34	14	125.8	81.4	204.8
56	6.25E+06	62	5.04E+05	5	992	20	17	241.2	102	760.3
57	7.15E+06	132	5.96E+05	11	1846	23	14	237.2	131.1	484.1
58	4.90E+06	61	4.81E+05	6	1246	19	15	199.5	89.4	562.4
59	8.13E+06	134	1.15E+06	19	1649	45	20	141.3	88	242.1
60	3.65E+06	62	2.36E+05	4	1697	9	9	297.9	116.4	1098.6
61	5.22E+06	64	6.53E+05	8	1225	26	18	158.5	77.6	382.9
62	6.57E+06	35	1.31E+06	7	532	51	38	99.4	44.5	266.7
63	4.97E+06	36	6.90E+05	5	724	27	23	141.4	57.2	462.9
64	7.98E+06	139	6.89E+05	12	1742	27	15	229.4	129.7	452.5
65	4.85E+06	60	8.89E+05	11	1238	35	20	109.1	57.7	230.7
66	3.83E+06	38	2.02E+05	2	992	8	10	351.5	99.4	2677.1
67	3.74E+06	113	1.65E+05	5	3024	6	6	432.6	189.1	1306.6
68	9.59E+06	88	1.09E+06	10	917	43	26	174.7	92.5	376.5
69	1.09E+07	90	7.25E+05	6	827	28	22	291.9	133.9	804.2
70	4.75E+06	57	5.00E+05	6	1201	20	15	186.6	83.2	528.3
71	2.92E+06	25	5.85E+05	5	855	23	19	98.7	38.3	332.7
72	5.03E+06	30	6.70E+05	4	597	26	25	146.3	53.7	572
73	5.53E+06	39	9.93E+05	7	705	39	28	110.6	50.1	294.5
74	5.22E+06	77	2.03E+05	3	1476	8	8	480.2	170.4	2181.8
75	6.80E+06	268	6.59E+05	26	3944	26	10	205.9	138.9	320.1
76	7.56E+06	49	1.39E+06	9	649	54	35	108.6	53.8	252.4
77	5.82E+05	14	1.66E+05	4	2406	6	6	69.1	22.4	291.4
78	6.35E+06	48	5.29E+05	4	756	21	19	232	89	873.5
79	3.97E+06	30	6.62E+05	5	755	26	22	118.2	46.9	392.2
80	1.17E+07	52	4.50E+05	2	444	18	22	475.8	138.2	3412.5
81	4.92E+06	97	5.07E+05	10	1971	20	12	192.2	102.3	412.6
82	6.10E+06	64	1.05E+06	11	1048	41	24	116.3	61.8	245.1
POOLED	5.68E+06	5827	7.32E+05	751	102596	29	2	156.4	140.9	173.5

Standard error for peak age includes group error Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

Peak no.	Peak age (Ma)	68%	% CI	95%	% CI	W(Z)	Frac(%)	SE,%	Count
1	62.3	-6.1	+6.8	-11.4	+14.0	0.32	14	5	11.5
2	168.1	-14.9	+16.4	-28.1	+33.6	0.42	68.7	12.2	56.3
3	347.7	-84.1	+110.0	-145.9	+246.7	0.56	17.3	11.9	14.2

Log-likelihood for best fit : -228.098

Chi-squared value for best fit : 81.265

Reduced chi-squared value : 1.055

Probability for F test : 4%

Condition number for COVAR matrix : 75.81

Number of iterations : 17

MDJ-10

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2) : 1.04E+06 Relative error (%) : 1.01 Effective uranium content of monitor (ppm) : 36.50

Zeta factor and standard error (yr cm2): 40.70 1.37

Size of counter square (cm2) : 1.00E-08

0	RhoS	NT	RhoI	NĽ	Squares	Uran	ium	Gr	ain age ((Ma)
Grain no.	(cm ⁻²)	INS	(cm ⁻²)	INI	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ			
1	1.03E+07	213	3.57E+06	74	2074	125	29	60.5	46.1	79.3
2	9.96E+06	66	3.32E+06	22	663	116	49	63.1	38.7	107.6
3	8.21E+06	99	4.56E+06	55	1205	160	43	38.1	27.2	54
4	1.38E+07	57	1.21E+06	5	414	42	36	231.1	97.2	731.4
5	7.47E+06	64	3.97E+06	34	857	139	47	39.8	25.9	62.3
6	5.85E+06	39	6.00E+05	4	666	21	20	196.9	74.3	752.5
7	6.76E+06	35	1.93E+06	10	518	67	42	73.1	35.9	166.3
8	7.51E+06	131	3.44E+05	6	1744	12	9	437	204.1	1173.7
9	6.45E+06	85	1.44E+06	19	1317	50	23	93.7	57	163.5
10	4.64E+06	125	1.08E+06	29	2696	38	14	90.5	60.4	140.8
11	9.65E+04	3	3.86E+05	12	3110	13	8	5.5	1	19.7
12	1.08E+07	218	4.94E+05	10	2024	17	11	440.6	242.4	912.1
13	8.52E+06	74	1.38E+06	12	868	48	27	128.2	70.3	259.7
14	9.01E+06	96	2.07E+06	22	1065	72	30	91.5	57.6	153
15	1.20E+07	37	3.57E+06	11	308	125	74	70.3	35.6	153.5
16	1.63E+06	30	3.25E+05	6	1843	11	9	103.2	43.3	304.9

GRAIN AGES IN ORIGINAL ORDER

									60101	010101010
17	1.81E+06	21	2.76E+06	32	1160	96	34	14	7.6	24.9
18	3.28E+06	48	1.37E+06	20	1465	48	21	50.5	29.6	90.1
19	4.66E+06	73	1.15E+06	18	1566	40	19	85	50.7	151.7
20	1.47E+06	18	7.36E+05	9	1223	26	17	42	18.1	106.5
21	2.63E+06	59	6.24E+05	14	2244	22	11	88.1	49.2	171.4
22	4.84E+06	108	5.82E+05	13	2232	20	11	172.2	98.2	333.5
23	3.57E+06	112	1.09E+06	34	3133	38	13	69.4	47.1	105.2
24	1.74E+06	66	7.39E+05	28	3791	26	10	49.7	31.6	80.5
25	5.14E+06	133	1.78E+06	46	2590	62	18	61	43.5	87.3
26	6.10E+06	76	5.62E+05	7	1246	20	14	222	105.8	567.5
27	6.06E+06	151	1.08E+06	27	2491	38	14	117.2	78	183.7
28	3.97E+06	50	9.52E+05	12	1260	33	19	87	46.3	180.1
29	6.51E+06	222	1.64E+06	56	3409	57	15	83.5	62.2	114.1
30	8.61E+06	178	1.31E+06	27	2068	46	17	137.9	92.4	215
31	1.24E+06	32	8.11E+05	21	2588	28	12	32.2	18.1	58.8
32	5.91E+06	110	1.18E+06	22	1862	41	17	104.7	66.4	174.1
33	5.92E+06	85	1.39E+05	2	1437	5	6	788.9	237.9	5010.5
34	9.00E+06	119	9.08E+05	12	1322	32	18	204.8	115.1	406.3
35	2.26E+06	71	7.64E+05	24	3142	27	11	62.3	38.9	103.6
36	3.28E+06	102	7.40E+05	23	3109	26	11	93	59.2	153.5
37	6.80E+06	75	1.09E+06	12	1103	38	22	130	71.3	263
38	9.01E+06	79	2.40E+06	21	877	84	36	79	48.7	134.8
39	1.35E+07	242	2.62E+06	47	1797	91	27	108.2	79.2	151.2
40	4.52E+06	198	3.68E+06	161	4378	129	20	26	20.9	32.3
41	7.56E+05	29	1.98E+06	76	3835	69	16	8.1	5.1	12.6
42	1.05E+05	2	4.19E+05	8	1909	15	10	5.6	0.5	26.6
43	7.48E+06	107	1.68E+06	24	1431	59	24	93.5	60.1	152.5
44	7.61E+06	154	2.32E+06	47	2022	81	24	69.1	49.7	98
45	2.64E+06	24	3.29E+05	3	911	12	12	160.5	51.4	826.6
46	1.15E+07	192	3.00E+05	5	1668	10	9	746	334.6	2142.7
47	1.12E+07	105	1.50E+06	14	934	52	28	155.8	90.2	294.7
48	3.29E+06	18	2.74E+06	15	548	96	49	25.4	12.1	54.1
49	7.73E+06	26	2.38E+06	8	336	83	57	67.7	30.3	174.1
50	1.19E+07	67	8.90E+05	5	562	31	27	270.7	115	847.2
51	8.18E+06	72	3.07E+06	27	881	107	41	56.2	35.8	91.1
52	8.34E+06	77	1.19E+06	11	923	42	25	145.2	78.2	303.1
53	5.76E+06	80	1.08E+06	15	1388	38	19	111.3	64.4	208.5

									10 53	
54	7.96E+06	89	3.58E+06	40	1118	125	39	47	32.1	70.1
55	6.50E+05	4	3.41E+06	21	616	119	52	4.2	10	612
56	5.08E+06	58	8.76E+05	10	1142	31	19	120.4	62.1	265
57	9.01E+06	77	1.99E+06	17	855	70	33	94.8	56.1	171.4
58	5.58E+06	81	2.68E+06	39	1453	94	30	43.9	29.7	66.1
59	6.39E+06	71	1.08E+06	12	1110	38	21	123.1	67.3	249.9
60	5.09E+06	100	3.56E+06	70	1964	125	30	30.3	22.1	41.7
61	3.30E+06	56	1.06E+06	18	1696	37	17	65.4	38.2	118.4
62	8.59E+06	89	2.03E+06	21	1036	71	31	88.9	55.2	150.9
63	3.19E+05	9	1.17E+06	33	2820	41	14	5.9	2.4	12.4
64	1.73E+06	50	6.48E+06	187	2886	227	33	5.7	4.1	7.8
65	2.05E+06	30	1.09E+06	16	1466	38	19	39.5	21	77.8
66	1.76E+06	28	5.65E+05	9	1594	20	13	65	30.2	157.3
67	1.53E+07	191	2.41E+06	30	1244	84	31	133.3	91	202.9
68	3.60E+06	65	8.32E+05	15	1803	29	15	90.7	51.7	171.6
69	1.57E+06	29	3.25E+05	6	1849	11	9	99.8	41.7	295.7
70	8.37E+06	138	2.00E+06	33	1648	70	24	87.9	60.1	132.8
71	3.32E+06	54	1.04E+06	17	1628	36	17	66.7	38.4	123
72	8.57E+06	240	7.50E+05	21	2800	26	11	236.7	153.3	387.8
73	1.62E+07	147	2.76E+06	25	905	97	38	123.1	80.8	196.4
74	1.15E+06	20	2.86E+06	50	1746	100	28	8.5	4.8	14.5
POOLED	5.16E+06	6379	1.59E+06	1967	123594	56	3	68.5	62.9	74.6

Standard error for peak age includes group error

Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

Peak no.	Peak age (Ma)	68%	6 CI	95%	6 CI	W(Z)	Frac(%)	SE,%	Count
1	7	-1.0	+1.2	-1.8	+2.5	0.32	10.8	3.6	8
2	46.8	-2.9	+3.1	-5.6	+6.3	0.23	30.8	6.2	22.8
3	128.5	-10.0	+10.8	-18.9	+22.1	0.31	58.4	6.5	43.2

Log-likelihood for best fit : -334.043

Chi-squared value for best fit : 72.965

Reduced chi-squared value : 1.057

Probability for F test : 0%

Condition number for COVAR matrix : 18.92

Number of iterations : 24

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2) : 9.35E+06 Relative error (%) : 1.01 Effective uranium content of monitor (ppm) : 36.50 Zeta factor and standard error (yr cm2) : 43.68 1.57



Size of counter square (cm2) : 1.00E-08

Cusin na	RhoS	Na	RhoI	NI:	Squares	Urani	ium	Gı	rain age	(Ma)
Grain no.	(cm ⁻²)	INS	(cm ⁻²)	INI	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ	Age	95	% CI
1	4.89E+06	26	1.69E+06	9	532	66	43	58	26.7	141.5
2	3.73E+06	51	5.12E+05	7	1368	20	15	144.2	66.8	377.3
3	5.07E+06	156	8.78E+05	27	3074	34	13	116.3	77.5	182.1
4	3.52E+06	46	3.82E+05	5	1308	15	13	180	74.4	578.9
5	1.10E+07	164	1.81E+06	27	1494	71	27	122.2	81.6	191.1
6	2.27E+06	97	1.87E+05	8	4274	7	5	238.5	119.6	564.2
7	8.54E+06	102	1.00E+06	12	1194	39	22	169.2	94.4	337.9
8	3.63E+06	88	2.06E+05	5	2423	8	7	339.5	146.5	1044.6
9	7.80E+06	49	1.43E+06	9	628	56	36	108.6	53.8	252.4
10	6.11E+06	92	1.06E+06	16	1506	41	20	115.3	68.2	210.5
11	4.15E+06	83	8.49E+05	17	2002	33	16	98.1	58.4	176.8
12	4.31E+06	47	2.75E+05	3	1091	11	11	297.7	102.1	1434.3
13	5.24E+06	110	1.05E+06	22	2099	41	17	100.7	63.8	167.4
14	6.26E+06	80	3.13E+05	4	1278	12	12	381.7	151.5	1376.9
15	5.84E+06	98	2.03E+06	34	1677	79	27	58.4	39.3	89.1
16	5.58E+05	11	1.52E+05	3	1970	6	6	71.7	19.7	404.9
17	6.82E+06	93	3.67E+05	5	1364	14	12	358.2	155.1	1097.8
18	2.09E+06	34	7.38E+05	12	1627	29	16	57.1	29.1	121.5
19	5.08E+06	32	4.77E+05	3	630	19	20	204.5	67.7	1025.3
20	6.04E+05	21	1.44E+05	5	3477	6	5	83.1	31.4	284.7
21	3.31E+05	7	9.46E+04	2	2115	4	5	67.4	13.6	669
22	6.61E+06	41	3.23E+05	2	620	13	16	378.4	107.7	2841.9
23	6.85E+06	71	1.45E+06	15	1036	57	29	95.1	54.6	179.2
24	6.62E+06	52	6.36E+05	5	786	25	21	203	84.8	647.5
25	8.21E+06	204	1.37E+06	34	2484	53	18	120.8	84.3	179.3
26	5.68E+06	82	5.54E+05	8	1443	22	15	202.2	100.5	482.4
27	5.30E+06	46	1.15E+05	1	867	5	7	773.7	158.3	12429.7

									6101010	010101010
28	4.96E+06	36	5.51E+05	4	727	22	20	175	65.5	674.1
29	9.08E+06	133	2.25E+06	33	1465	88	30	81.4	55.6	123.3
30	9.58E+06	166	2.02E+06	35	1733	79	27	95.7	66.5	142.2
31	6.38E+06	63	9.11E+05	9	988	36	23	139.2	70.3	318.9
32	5.49E+06	86	1.02E+06	16	1566	40	20	107.9	63.5	197.5
33	8.38E+06	73	6.89E+05	6	871	27	21	237.9	107.8	663.6
34	7.12E+05	20	7.84E+05	22	2807	31	13	18.5	9.6	35.6
35	1.56E+06	43	2.18E+05	6	2754	9	7	141.4	61.7	407.5
36	8.85E+06	80	1.33E+06	12	903	52	29	133.1	73.3	268.7
37	4.40E+06	48	2.75E+05	3	1092	11	11	303.9	104.4	1460.7
38	1.24E+07	40	1.87E+06	6	322	73	57	131.7	57.1	381.3
39	4.41E+06	78	1.30E+06	23	1769	51	21	68.5	42.8	114.5
40	4.50E+06	32	9.84E+05	7	712	38	28	91	40.3	245.8
41	2.49E+06	12	2.07E+05	1	482	8	13	213	36.1	6219.7
42	1.41E+06	27	6.29E+05	12	1909	25	14	45.4	22.5	98.8
43	5.26E+06	119	5.75E+05	13	2263	22	12	182.2	104.3	351.5
44	2.68E+06	48	3.35E+05	6	1790	13	10	157.6	69.4	450.9
45	6.96E+06	53	6.56E+05	5	762	26	22	206.9	86.5	658.9
46	1.34E+07	63	2.55E+06	12	470	100	56	105.1	57	214.8
47	6.00E+06	59	5.09E+05	5	983	20	17	229.8	96.8	726.7
48	6.85E+06	88	1.01E+06	13	1285	39	22	135.3	76.3	264.3
49	5.98E+06	86	7.65E+05	11	1438	30	18	155.6	84.3	323.4
50	5.42E+06	96	1.30E+06	23	1772	51	21	84.2	53.4	139.3
51	5.19E+06	137	1.63E+06	43	2642	64	19	64.5	45.7	93.3
52	3.48E+06	83	6.28E+05	15	2388	25	12	111	64.3	207.5
53	2.50E+06	58	8.62E+05	20	2319	34	15	58.6	35	103.1
54	7.31E+06	80	1.83E+05	2	1095	7	9	717.5	215.1	4671.2
55	3.07E+06	51	2.41E+05	4	1661	9	9	246.2	94.9	922.4
56	8.64E+06	85	3.05E+05	3	983	12	13	528	188.5	2367.3
57	1.10E+07	113	9.76E+05	10	1025	38	24	223.3	119.7	476.2
58	3.39E+06	31	2.19E+06	20	915	85	38	31.5	17.4	58.3
59	3.28E+06	65	5.54E+05	11	1984	22	13	118	62.8	248.7
60	6.28E+05	7	3.59E+05	4	1114	14	13	35	9.1	164.3
61	9.70E+06	58	8.37E+05	5	598	33	28	226	95.1	715.4
62	4.91E+06	66	2.98E+05	4	1344	12	11	316.6	124.2	1161.5
63	6.65E+06	84	2.38E+05	3	1263	9	10	522	186.2	2344.4
64	2.90E+06	39	7.43E+04	1	1345	3	5	662.2	133.3	11551.8

65 8.32E+06 102 2.45E+05 3 1226 10 10 628.4 226.8 2744. 66 6.71E+06 138 1.22E+06 25 2055 48 19 111.1 72.8 177.3 67 3.85E+06 66 8.18E+05 14 1712 32 17 94.6 53.3 183 68 9.33E+06 49 9.52E+05 5 525 37 32 191.5 79.6 613.3 69 8.01E+06 173 1.02E+06 22 2160 40 17 157.5 101.8 257.3 70 3.64E+06 59 4.32E+05 7 1621 17 12 166.4 78 431.8 71 1.53E+06 28 1.64E+05 3 1832 6 7 179.4 58.6 911.7 72 8.73E+06 136 5.14E+05 8 1557 20 14 331.8 168.9 772.1 73 3.81E+06 38 7.02E+05 7 997
66 6.71E+06 138 1.22E+06 25 2055 48 19 111.1 72.8 177.7 67 3.85E+06 66 8.18E+05 14 1712 32 17 94.6 53.3 183 68 9.33E+06 49 9.52E+05 5 525 37 32 191.5 79.6 613.7 69 8.01E+06 173 1.02E+06 22 2160 40 17 157.5 101.8 257.7 70 3.64E+06 59 4.32E+05 7 1621 17 12 166.4 78 431.8 71 1.53E+06 28 1.64E+05 3 1832 6 7 179.4 58.6 911.7 72 8.73E+06 136 5.14E+05 8 1557 20 14 331.8 168.9 772.1 73 3.81E+06 38 7.02E+05 7 997 27 20 107.8 48.7
67 3.85E+06 66 8.18E+05 14 1712 32 17 94.6 53.3 183 68 9.33E+06 49 9.52E+05 5 525 37 32 191.5 79.6 613.5 69 8.01E+06 173 1.02E+06 22 2160 40 17 157.5 101.8 257.5 70 3.64E+06 59 4.32E+05 7 1621 17 12 166.4 78 431.8 71 1.53E+06 28 1.64E+05 3 1832 6 7 179.4 58.6 911.7 72 8.73E+06 136 5.14E+05 8 1557 20 14 331.8 168.9 772.1 73 3.81E+06 38 7.02E+05 7 997 27 20 107.8 48.7 287.6 74 4.31E+06 73 1.18E+05 2 1692 5 6 657.9 195.9 4378. 75 5.08E+06 64 4.76E+05 6 1260
68 9.33E+06 49 9.52E+05 5 525 37 32 191.5 79.6 613.2 69 8.01E+06 173 1.02E+06 22 2160 40 17 157.5 101.8 257.3 70 3.64E+06 59 4.32E+05 7 1621 17 12 166.4 78 431.8 71 1.53E+06 28 1.64E+05 3 1832 6 7 179.4 58.6 911.7 72 8.73E+06 136 5.14E+05 8 1557 20 14 331.8 168.9 772.1 73 3.81E+06 38 7.02E+05 7 997 27 20 107.8 48.7 287.6 74 4.31E+06 73 1.18E+05 2 1692 5 6 657.9 195.9 4378.5 75 5.08E+06 64 4.76E+05 6 1260 19 15 209.1 94 587.8 76 2.75E+06 47 1.76E+05 3 1706
69 8.01E+06 173 1.02E+06 22 2160 40 17 157.5 101.8 257.5 70 3.64E+06 59 4.32E+05 7 1621 17 12 166.4 78 431.8 71 1.53E+06 28 1.64E+05 3 1832 6 7 179.4 58.6 911.7 72 8.73E+06 136 5.14E+05 8 1557 20 14 331.8 168.9 772.1 73 3.81E+06 38 7.02E+05 7 997 27 20 107.8 48.7 287.6 74 4.31E+06 73 1.18E+05 2 1692 5 6 657.9 195.9 4378. 75 5.08E+06 64 4.76E+05 6 1260 19 15 209.1 94 587.8 76 2.75E+06 47 1.76E+05 3 1706 7 7 297.7 102.1
70 $3.64E+06$ 59 $4.32E+05$ 7 1621 17 12 166.4 78 431.8 71 $1.53E+06$ 28 $1.64E+05$ 3 1832 6 7 179.4 58.6 911.7 72 $8.73E+06$ 136 $5.14E+05$ 8 1557 20 14 331.8 168.9 772.1 73 $3.81E+06$ 38 $7.02E+05$ 7 997 27 20 107.8 48.7 287.6 74 $4.31E+06$ 73 $1.18E+05$ 2 1692 5 6 657.9 195.9 $4378.$ 75 $5.08E+06$ 64 $4.76E+05$ 6 1260 19 15 209.1 94 587.8 76 $2.75E+06$ 47 $1.76E+05$ 3 1706 7 7 297.7 102.1 $1434.$ 77 $3.89E+06$ 32 $7.29E+05$ 6 823 28 22 105.7 44.7 210.6
71 1.53E+06 28 1.64E+05 3 1832 6 7 179.4 58.6 911.7 72 8.73E+06 136 5.14E+05 8 1557 20 14 331.8 168.9 772.1 73 3.81E+06 38 7.02E+05 7 997 27 20 107.8 48.7 287.6 74 4.31E+06 73 1.18E+05 2 1692 5 6 657.9 195.9 4378. 75 5.08E+06 64 4.76E+05 6 1260 19 15 209.1 94 587.8 76 2.75E+06 47 1.76E+05 3 1706 7 7 297.7 102.1 1434.
72 8.73E+06 136 5.14E+05 8 1557 20 14 331.8 168.9 772.1 73 3.81E+06 38 7.02E+05 7 997 27 20 107.8 48.7 287.6 74 4.31E+06 73 1.18E+05 2 1692 5 6 657.9 195.9 4378. 75 5.08E+06 64 4.76E+05 6 1260 19 15 209.1 94 587.8 76 2.75E+06 47 1.76E+05 3 1706 7 7 297.7 102.1 1434. 77 3.89E+06 32 7.29E+05 6 823 28 22 105.7 44.7 210.6
73 3.81E+06 38 7.02E+05 7 997 27 20 107.8 48.7 287.6 74 4.31E+06 73 1.18E+05 2 1692 5 6 657.9 195.9 4378. 75 5.08E+06 64 4.76E+05 6 1260 19 15 209.1 94 587.8 76 2.75E+06 47 1.76E+05 3 1706 7 7 297.7 102.1 1434. 77 3.89E+06 32 7.29E+05 6 823 28 22 105.7 44.7 210.6
74 4.31E+06 73 1.18E+05 2 1692 5 6 657.9 195.9 4378. 75 5.08E+06 64 4.76E+05 6 1260 19 15 209.1 94 587.8 76 2.75E+06 47 1.76E+05 3 1706 7 7 297.7 102.1 1434. 77 3.80E+06 32 7.20E+05 6 823 28 22 105.7 44.7 210.6
75 5.08E+06 64 4.76E+05 6 1260 19 15 209.1 94 587.8 76 2.75E+06 47 1.76E+05 3 1706 7 7 297.7 102.1 1434. 77 3.89E+06 32 7.29E+05 6 823 28 22 105.7 44.7 210.6
76 2.75E+06 47 1.76E+05 3 1706 7 7 297.7 102.1 1434. 77 3.80E+06 32 7.20E+05 6 823 28 22 105.7 44.7 210.6
77 2 805+06 22 7 205+05 6 822 28 22 105 7 44 7 210
$11 5.07 \pm 100 52 1.27 \pm 103 0 625 26 22 103.1 44.1 510.5$
78 3.06E+05 5 5.51E+05 9 1633 22 14 11.5 3 37.6
79 3.34E+06 32 5.22E+05 5 958 20 17 125.9 50.3 415.8
80 6.74E+06 106 3.18E+05 5 1574 12 11 406.7 177.2 1234.
81 8.56E+06 89 2.88E+05 3 1040 11 12 551.7 197.5 2458.
82 8.35E+06 61 5.47E+05 4 731 21 20 293.2 114.5 1082.
83 7.51E+06 147 1.07E+06 21 1957 42 18 140.4 89.4 233.6
84 3.65E+06 48 2.28E+05 3 1315 9 10 303.9 104.4 1460.
85 6.24E+06 66 3.78E+05 4 1059 15 14 316.6 124.2 1161.
86 6.31E+06 96 6.57E+05 10 1522 26 16 190.3 101.2 408.6
87 5.67E+06 45 1.64E+06 13 794 64 35 69.6 37.3 141.3
88 2.63E+06 50 1.37E+06 26 1901 53 21 39 23.9 65.4
89 7.50E+06 82 6.40E+05 7 1094 25 18 230 110 586
POOLED 4.84E+06 6321 7.26E+05 949 130648 28 2 134.5 121.8 148.5

Standard error for peak age includes group error

Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

Peak no.	Peak age (Ma)	68%	5 CI	95%	o CI	W(Z)	Frac(%)	SE,%	Count
1	17.7	-5.4	+7.8	-9.1	+18.6	0.43	2.1	1.9	1.9
2	36	-10.1	+13.9	-17.1	+32.4	0.34	2.6	2.7	2.3
3	67.2	-10.5	+12.5	-19.1	+26.6	0.3	11.1	5.7	9.9
4	125.6	-10.9	+12.0	-20.6	+24.5	0.36	47.7	9.1	42.5
5	305.3	-37.9	+43.1	-69.9	+90.0	0.56	36.5	8.6	32.5

Log-likelihood for best fit : -270.898

Chi-squared value for best fit : 85.468 Reduced chi-squared value : 1.068 Probability for F test : 5% Condition number for COVAR matrix : 537.52 Number of iterations : 26



MDJ-12

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2) : 1.04E+06 Relative error (%) : 1.01 Effective uranium content of monitor (ppm) : 36.50 Zeta factor and standard error (yr cm2) : 40.70 1.37 Size of counter square (cm2) : 1.00E-08

C	RhoS	NT	RhoI	Ni	Squares	Urani	ium	Gr	ain age ((Ma)
Grain no.	(cm ⁻²)	INS	(cm ⁻²)	INI	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ	Age	95%	∕₀ CI
1	2.20E+06	54	1.18E+06	29	2459	41	15	39.3	24.7	64.1
2	8.31E+06	125	2.06E+06	31	1504	72	26	84.8	57.1	130.1
3	1.20E+07	205	1.11E+06	19	1714	39	18	223.5	141.4	377.5
4	4.56E+06	83	2.75E+05	5	1820	10	8	333.5	143.6	1028.3
5	6.84E+06	62	2.21E+06	20	906	77	34	65.2	39.1	114.2
6	1.48E+06	28	4.24E+05	8	1889	15	10	72.9	32.9	186.1
7	4.43E+06	51	7.83E+05	9	1150	27	18	117.5	58.4	272.4
8	5.11E+06	44	1.28E+06	11	861	45	26	83.5	43	180
9	6.33E+06	54	3.05E+06	26	854	106	41	43.8	27.1	73
10	3.95E+06	44	2.97E+06	33	1113	104	36	28.2	17.6	45.8
11	6.66E+06	116	1.55E+06	27	1743	54	21	90.2	59.3	142.9
12	9.01E+06	148	9.74E+05	16	1643	34	17	191.8	116	343.6
13	6.90E+06	67	1.03E+06	10	971	36	22	138.9	72.4	303.2
14	6.09E+05	7	1.04E+06	12	1149	37	21	12.5	4.1	34.1
15	8.39E+06	103	7.33E+05	9	1228	26	17	234.8	122	525
16	6.18E+05	9	2.40E+06	35	1456	84	28	5.5	2.3	11.6
17	8.78E+06	88	2.29E+06	23	1003	80	33	80.4	50.7	133.5
18	1.37E+07	140	1.76E+06	18	1025	61	29	161.9	100	280.9
19	1.13E+07	126	3.50E+06	39	1113	123	39	68.1	47.4	100.3
20	9.12E+06	128	4.99E+05	7	1404	17	13	369.3	180.6	917.5
21	6.27E+06	178	2.47E+05	7	2838	9	6	507.9	251.7	1236.9
22	6.66E+06	151	2.12E+06	48	2268	74	21	66.3	47.8	93.9

									0010101	010101010
23	1.51E+06	49	1.35E+06	44	3254	47	14	23.6	15.4	36.3
24	3.24E+06	123	5.00E+05	19	3799	17	8	135.1	83.8	232.1
25	4.05E+06	84	7.72E+05	16	2073	27	13	109.7	64.5	200.9
26	3.65E+06	135	1.22E+06	45	3702	43	13	63.3	45	90.8
27	8.10E+06	150	2.21E+06	41	1852	77	24	77	54.4	111.7
28	9.23E+06	321	1.84E+06	64	3478	64	16	104.9	79.7	137.9
29	1.96E+06	140	8.52E+05	61	7160	30	8	48.5	35.7	66.7
30	4.87E+06	103	1.14E+06	24	2114	40	16	90.1	57.7	147.1
31	4.04E+06	70	1.38E+06	24	1734	48	20	61.4	38.4	102.3
32	3.52E+06	129	8.99E+05	33	3670	31	11	82.2	56	124.6
33	2.44E+06	58	9.66E+05	23	2382	34	14	53.1	32.4	90.4
34	3.18E+06	115	3.87E+05	14	3616	14	7	170.5	99.1	321.2
35	1.00E+07	324	2.82E+06	91	3232	98	21	74.8	58.8	95.1
36	7.51E+06	89	2.45E+06	29	1185	86	32	64.6	42.3	102.1
37	4.55E+06	37	1.11E+06	9	813	39	25	85.6	41.3	202.6
38	7.69E+06	124	2.73E+06	44	1613	95	29	59.5	42	86
39	6.87E+06	136	2.02E+06	40	1980	71	22	71.6	50.2	104.7
40	5.75E+06	140	2.38E+06	58	2434	83	22	51	37.4	70.6
41	2.02E+07	246	3.70E+06	45	1218	129	38	114.8	83.6	161.4
42	3.20E+06	81	1.11E+06	28	2530	39	15	60.9	39.4	97.4
43	7.15E+06	248	2.62E+06	91	3469	92	19	57.3	44.7	73.5
44	7.71E+06	211	2.67E+06	73	2737	93	22	60.7	46.2	79.8
45	1.63E+06	47	1.18E+06	34	2882	41	14	29.3	18.5	46.9
46	1.62E+06	22	1.62E+06	22	1358	57	24	21.2	11.2	40.1
47	9.62E+06	429	1.84E+06	82	4461	64	14	109.6	85.9	139.7
48	1.15E+07	230	1.90E+06	38	2003	66	21	126.9	90.2	183.8
49	3.80E+06	65	1.23E+06	21	1711	43	19	65.1	39.5	112.3
50	2.00E+06	43	1.25E+06	27	2153	44	17	33.7	20.4	56.7
51	7.65E+06	139	1.76E+06	32	1817	62	22	91.3	62.1	138.7
52	3.92E+05	9	1.22E+06	28	2297	43	16	6.9	2.8	14.9
53	1.17E+07	390	1.08E+06	36	3326	38	13	225.2	161.2	325.3
54	6.11E+06	152	1.77E+06	44	2490	62	19	72.8	51.9	104.4
55	1.24E+07	71	8.73E+05	5	573	31	26	286.4	122.2	893
56	6.72E+06	200	1.14E+06	34	2975	40	14	123.3	85.9	183
57	4.62E+06	80	9.24E+05	16	1731	32	16	104.5	61.3	191.9
58	1.23E+07	106	1.85E+06	16	863	65	32	138	82.2	250.4
59	7.52E+05	17	8.85E+04	2	2261	3	4	166.9	42.7	1438.6

									101	
60	6.93E+06	136	2.19E+06	43	1962	77	23	66.7	47.2	96.4
61	9.67E+06	129	2.92E+06	39	1333	102	33	69.7	48.6	102.5
62	7.52E+06	95	1.11E+06	14	1263	39	20	141.2	81.3	268.1
63	4.66E+06	33	1.13E+06	8	709	39	27	85.7	39.6	216
64	3.49E+06	94	5.20E+05	14	2693	18	10	139.7	80.4	265.5
65	1.13E+07	139	1.30E+06	16	1234	45	22	180.4	108.8	323.7
66	3.37E+06	57	9.45E+05	16	1694	33	16	74.7	42.7	139.7
67	6.99E+05	11	3.18E+05	5	1575	11	9	45.8	15	169.4
68	7.11E+06	117	2.19E+06	36	1646	76	25	68.5	47	102.6
69	7.53E+06	116	1.10E+06	17	1540	39	18	142.2	86.1	252.5
70	9.84E+06	122	1.61E+06	20	1240	56	25	127.4	79.8	216.1
71	6.06E+06	119	1.32E+06	26	1964	46	18	96	62.9	153.2
72	8.79E+06	234	2.59E+06	69	2663	91	22	71.2	54	93.6
73	6.99E+06	99	1.91E+06	27	1417	67	25	77.1	50.2	122.9
74	1.92E+06	41	4.22E+05	9	2133	15	10	94.7	46.2	222.7
75	8.18E+06	207	1.66E+06	42	2529	58	18	103.5	74.4	148
76	4.88E+06	137	1.42E+06	40	2808	50	16	72.1	50.6	105.5
77	3.29E+06	78	4.64E+05	11	2369	16	10	147.1	79.2	306.8
78	4.88E+06	112	7.84E+05	18	2296	27	13	129.9	79.4	227.2
79	8.24E+06	186	1.82E+06	41	2258	63	20	95.4	68	137.3
80	1.11E+07	107	1.35E+06	13	962	47	26	170.7	97.2	330.6
81	2.05E+06	55	2.61E+05	7	2682	9	7	161.6	75.3	420.6
82	5.37E+06	52	1.14E+06	11	968	40	23	98.5	51.5	210.1
83	1.20E+06	20	1.62E+06	27	1671	56	22	15.8	8.4	29.1
84	5.45E+06	155	5.27E+05	15	2845	18	9	213.8	127.7	389.9
85	8.84E+06	82	1.62E+06	15	928	57	29	114.1	66.1	213.4
86	7.53E+06	123	4.89E+05	8	1634	17	12	312.8	158.6	730.7
87	1.36E+06	44	2.16E+05	7	3243	8	6	129.7	59.4	342.2
88	9.49E+06	196	1.60E+06	33	2065	56	19	124.5	86.3	185.8
89	6.10E+06	77	3.96E+05	5	1262	14	12	310	132.9	961
POOLED	5.70E+06	10297	1.35E+06	2447	180639	47	2	88.8	81.8	96.3

Standard error for peak age includes group error

Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

								10 163	
Peak no.	Peak age (Ma)	68%	% CI	95%	CI	W(Z)	Frac(%)	SE,%	Count
1	6.6	-1.7	2.2	-2.8	5	0.45	2.7	1.8	2.4
2	26.5	-3.1	3.5	-5.7	7.2	0.29	8.3	3.2	7.4
3	75.7	-7.6	8.4	-14.2	17.4	0.22	53.5	11.7	47.6
4	167.4	-30	36.5	-53.8	78.9	0.31	35.6	12.1	31.6

Log-likelihood for best fit : -356.241

Chi-squared value for best fit : 87.593

Reduced chi-squared value : 1.068

Probability for F test : 0%

Condition number for COVAR matrix : 275.76

Number of iterations: 47

MDJ-13

Effective track density for fluence monitor (tracks/cm2): 9.35E+05

Relative error (%) : 1.01

Effective uranium content of monitor (ppm) : 36.50

Zeta factor and standard error (yr cm2): 43.68 1.57

Size of counter square (cm2) : 1.00E-08

a :	RhoS	ът	RhoI	RhoI Ni	Squares	Urani	ium	Gr	ain age ((Ma)
Grain no.	(cm ⁻²)	INS	(cm ⁻²)	NI	(cm ⁻²)	+2σ	-2σ	Age	959	% CI
1	6.30E+05	10	1.26E+05	2	1586	5	6	95.5	21.7	893.2
2	3.88E+06	18	1.29E+06	6	464	51	40	59.9	23.2	185.8
3	9.77E+06	113	6.91E+05	8	1157	27	19	276.9	139.8	650.3
4	1.31E+07	128	1.12E+06	11	978	44	26	230.2	127.1	470.3
5	2.24E+06	26	8.62E+04	1	1161	3	5	449.8	86.6	9514.9
6	1.25E+06	12	6.24E+05	6	962	24	19	40.2	14.2	131.2
7	4.64E+05	6	3.09E+05	4	1294	12	11	30.2	7.3	145.9
8	2.41E+06	24	2.31E+06	23	995	90	37	21.3	11.5	39.4
9	4.11E+06	31	7.96E+05	6	754	31	24	102.4	43.2	302.1
10	5.07E+06	86	3.24E+06	55	1696	127	34	31.8	22.4	45.5
11	8.61E+05	14	1.41E+06	23	1627	55	23	12.5	5.9	25.2
12	1.06E+06	16	2.05E+06	31	1512	80	29	10.6	5.4	19.8
13	5.44E+06	90	9.06E+05	15	1655	35	18	120.2	70	224
14	1.80E+06	34	2.65E+05	5	1884	10	9	133.7	53.8	439.4
15	5.58E+05	11	8.12E+05	16	1970	32	16	14.1	5.9	32.1

GRAIN AGES IN ORIGINAL ORDER

									101010101	101010101010
16	9.23E+05	14	5.94E+05	9	1516	23	15	31.5	12.8	82.6
17	4.32E+05	9	7.68E+05	16	2082	30	15	11.6	4.5	27.5
18	4.18E+05	8	7.83E+05	15	1915	31	16	11	4	27.3
19	1.18E+06	16	4.43E+05	6	1355	17	14	53.3	20.2	167.7
20	7.61E+05	9	2.12E+06	25	1182	83	33	7.4	3	16.3
21	7.34E+05	18	1.02E+06	25	2451	40	16	14.7	7.5	28
22	3.86E+06	50	6.95E+05	9	1294	27	18	110.8	55	257.2
23	3.17E+05	8	1.19E+06	30	2528	46	17	5.5	2.2	12.1
24	7.02E+05	11	7.66E+05	12	1567	30	17	18.7	7.5	46.2
25	1.33E+06	13	6.13E+05	6	979	24	19	43.5	15.7	140.4
26	6.13E+06	101	9.70E+05	16	1649	38	19	126.5	75.1	229.9
27	8.92E+06	61	1.75E+06	12	684	69	39	101.8	55.1	208.4
28	6.36E+05	8	1.43E+06	18	1257	56	26	9.2	3.4	21.9
29	2.07E+05	7	1.30E+06	44	3389	51	15	3.3	1.2	7.3
30	7.95E+06	99	1.20E+06	15	1245	47	24	132.1	77.4	245.1
31	5.56E+05	15	5.19E+05	14	2700	20	11	21.8	9.8	48.7
32	1.09E+07	99	2.09E+06	19	908	82	37	104.8	64.3	181.6
33	8.18E+06	95	5.17E+05	6	1161	20	16	307.7	141.5	845
34	8.88E+06	93	2.58E+06	27	1048	101	38	69.6	45.2	111.4
35	4.60E+05	4	4.60E+05	4	870	18	17	20.4	3.8	108.7
36	4.02E+06	67	1.80E+05	3	1668	7	8	419.9	147.7	1942.1
37	7.20E+05	5	1.01E+06	7	694	39	29	14.7	3.6	53.2
38	2.63E+06	31	4.06E+06	48	1181	159	46	13.2	8.1	21.1
39	1.59E+05	3	1.06E+06	20	1892	41	18	3.2	0.6	10.3
40	2.95E+06	21	8.42E+05	6	713	33	26	69.7	27.8	212.8
41	1.19E+06	6	1.59E+06	8	504	62	43	15.4	4.4	50.1
42	3.80E+05	11	8.29E+05	24	2897	32	13	9.4	4.1	19.8
43	2.79E+06	66	6.55E+06	155	2366	256	41	8.7	6.4	11.7
44	3.32E+06	40	2.16E+06	26	1206	84	33	31.3	18.7	53.4
45	5.65E+05	14	1.69E+06	42	2480	66	20	6.9	3.4	12.7
46	1.46E+06	22	2.65E+05	4	1507	10	10	107.8	38	433.3
47	2.75E+06	25	3.30E+05	3	908	13	14	160.6	51.7	825.1
48	2.57E+05	6	1.20E+06	28	2338	47	18	4.5	1.5	10.8
49	8.93E+06	119	4.28E+06	57	1332	167	44	42.4	30.7	59.3
50	7.78E+05	20	1.24E+06	32	2571	49	17	12.8	6.9	23
51	3.77E+06	38	4.96E+05	5	1009	19	17	149.2	60.7	486.2
52	3.61E+06	44	2.46E+05	3	1219	10	10	279.2	95.2	1354.6

									10	
53	5.53E+05	8	7.61E+05	11	1446	30	18	14.9	5.2	40.4
54	2.11E+05	3	7.03E+05	10	1423	27	17	6.3	1.1	23.7
55	4.96E+06	39	1.78E+06	14	786	70	37	56.2	30.1	112.4
56	9.18E+06	32	1.43E+06	5	349	56	48	125.9	50.3	415.8
57	9.23E+06	97	1.24E+06	13	1051	48	26	148.9	84.4	289.8
58	2.23E+05	6	5.94E+05	16	2693	23	11	7.8	2.5	20.6
59	7.94E+06	43	1.85E+05	1	542	7	12	726.1	147.6	12068
60	3.82E+06	23	9.98E+05	6	601	39	31	76.3	30.9	230.8
61	4.76E+05	9	1.06E+06	20	1892	41	18	9.3	3.7	21.1
62	7.75E+06	84	9.22E+05	10	1084	36	22	166.8	88.1	360.4
63	8.59E+06	74	2.09E+06	18	862	82	38	82.8	49.4	147.6
64	2.70E+06	24	1.35E+06	12	890	53	30	40.4	19.6	89
65	8.64E+06	173	4.99E+05	10	2002	20	12	338.7	184.7	709.2
66	5.39E+06	25	2.16E+05	1	464	8	14	433.2	83	9327.8
67	5.81E+05	8	1.45E+05	2	1377	6	7	76.8	16.3	744.6
68	7.64E+04	1	5.35E+05	7	1308	21	15	3.3	0.1	22.7
69	6.93E+05	27	2.70E+06	105	3896	105	21	5.3	3.3	8.1
70	4.45E+05	8	1.72E+06	31	1797	67	24	5.3	2.1	11.7
71	1.24E+06	15	3.39E+06	41	1209	133	41	7.5	3.8	13.8
72	2.97E+05	9	7.59E+05	23	3031	30	12	8.1	3.3	17.9
73	8.11E+05	21	1.89E+06	49	2589	74	21	8.8	5	14.9
74	1.35E+06	14	2.32E+06	24	1035	91	37	12	5.7	23.9
75	3.21E+06	54	4.17E+05	7	1680	16	12	152.5	71	397.8
76	7.79E+05	8	8.76E+05	9	1027	34	22	18.2	6.1	52.8
77	3.68E+06	44	6.68E+05	8	1197	26	18	109.5	52	270.4
78	4.27E+05	5	2.48E+06	29	1171	97	36	3.6	1.1	9.2
POOLED	2.38E+06	2749	1.29E+06	1493	115363	51	3	37.5	34	41.2

Standard error for peak age includes group error

Peak width is for PD plot assuming a kernel factor = 0.60

Peak	Peak age	690	(CI	050	(CI	$\mathbf{W}(7)$	$\mathbf{Free}(0/1)$	SE 0/	Count	
no.	(Ma)	007	0 CI	937	0 CI	W (Z)	Frac(70)	SE, 70	Count	
1	8.6	-0.6	+0.7	-1.2	+1.3	0.39	42.8	5.9	33.3	
2	40.3	-3.9	+4.3	-7.3	+8.9	0.34	19.5	5.3	15.2	
3	158.3	-12.9	+14.0	-24.3	+28.6	0.44	37.8	5.9	29.5	

Log-likelihood for best fit : -280.284

Chi-squared value for best fit : 75.467

Reduced chi-squared value : 1.034 Probability for F test : 0% Condition number for COVAR matrix : 5.94 Number of iterations : 10



附錄三	岩象分析數	懅
	ロタリリース	豚



	depo.																
sample	Age	Q	F	Ls	Lms1	Lms2	Fms	Ag	Sl	Sch	Lv	Hbl	Pyr	Cal	X	Lt	Total
	(Ma)																
MDJ-13	1.64	115	1	0	26	25	12	28	113	28	7	0	0	7	38	239	400
MDJ-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MDJ-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MDJ-10	1.94	169	3	12	103	13	2	27	16	3	16	0	0	8	28	192	400
MDJ-09	2.00	115	3	17	61	44	1	39	30	4	44	0	0	6	36	240	400
MDJ-08	2.03	119	1	17	58	36	5	19	42	5	19	0	0	8	71	201	400
MDJ-06	3.25	111	0	16	47	25	9	35	65	4	7	0	0	3	78	208	400
MDJ-05	3.35	147	0	13	67	24	4	23	28	2	24	0	0	6	62	185	400
MDJ-04	3.40	123	2	14	57	49	12	14	30	1	27	0	0	0	71	204	400
MDJ-03	3.42	155	0	11	56	30	8	46	13	2	20	0	0	6	53	186	400
MDJ-02	3.47	178	5	23	32	54	5	25	4	0	13	0	0	7	54	156	400
MDJ-01	4.00	124	104	9	14	5	0	29	3	7	70	7	13	6	9	144	400

附錄四 Age2Edot 參數設定

Fluroapatite: default FT annealing parameters:

Activation energy for 50% annealing Annealing parameter Beta

Thermal Parameters:

Layer depth to constant temperature Thermal diffusivity Internal heat production Surface temperature Temperature at base of layer 9.83E+11 1/s^b

44.6 kcal/mole^a

30 km^c 30 km²/m.y.^d 18 °C/m.y.^e 15°C 500 °C

Estimates assuming steady-state heat flux and no erosion:

Surface thermal gradient	25.16667 °C/km
Estimated volumeteric heat production)	1.694045 microwatts m ⁻³
Estimate for thermal conductivity	2.823409 watts/(meter-kelvin)
Surface heat flux	71.05578 milliwatt m^{-2}
Estimates assume density	2700 kg m ⁻³
Estimates thermal conductivity	1100 J kg ⁻² K ⁻¹
Note: ^{a,b} Fluorapatite (default) ; ^c Crustal thickness (Wang et al.,	2010) ; ^d 10 ⁻⁶ m^2/s (Simoes et al., 2007) ;
^e 1.711 μW/m3 (Song and Ma, 2002)	