

國立臺灣大學地質科學系

碩士論文

Department of Geosciences

College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

菲律賓明多洛島之岩石地球化學與定年分析結果  
及其在地質構造演化上之隱示

Geochemical data and dating results from  
Mindoro, Philippines and their tectonic implications

陳皇伶

Huang-Lin Chen

指導教授：楊燦堯 博士

Advisor: Tsanyao Frank Yang, Ph.D.

國立台灣大學地質科學研究所碩士學位論文考試

題目：菲律賓明多洛島之岩石地球化學與定年分析結果及其在地質構造演化上之隱示

Geochemical data and dating results from

Mindoro, Philippines and their tectonic implications

考試委員：

楊燦堯

劉聰桂

林蔚

葉品芳

指導教授：楊燦堯 博士

研究生：陳皇伶

中華民國一百年四月

## 誌謝

研究所的學習，與在這之前的學習大不相同，我首先要感謝的是我的指導教授，楊燦堯老師。老師提供了我們一個自由學習發揮的環境，雖然我的研究，大多數的實驗須借助其他研究室的幫忙，老師提供了許多協助與建議，讓我在實驗與研究方面，能夠順利進行，並且十分關心我們研究室各個成員，每星期四的午餐，老師都不忘關心每個人的近況，因此我身為楊老師的學生，感到十分的幸福。此外，非常感謝劉聰桂教授，藍晶瑩老師與林蔚博士百忙之中抽空來參加我的論文口試，您們所給予的寶貴意見與指正，不僅促使我的論文更加完整，也提醒了我研究時該注意的地方與細節。並感謝劉聰桂教授在核飛跡定年方法上的指導，李寄嶼博士及鍾孫霖教授與其研究室提供的我在地球化學實驗上的協助，羅清華教授及其研究室在氫氫定年上的幫助，讓我的實驗能夠順利的進行並得到結果。

另外，非常謝謝訪問學者 Ulrich Knittel，在我的研究上提供各方面的資源及討論，總是非常熱情的提供想法及意見，在我的研究中，提供非常大的協助。

進入楊燦堯老師的實驗室以來，非常感謝研究室夥伴們的陪伴，每當我有困難的時候，大家總是不吝惜的提供意見與協助，曉芬、德芳、瑋立、佩娟、小州、鈞元、乃禎、心怡、筱琪、阿笨、Monika 等等的學長姐的幫忙，還有艾荻、俊銘、宣文的切磋鼓勵，還有謝謝佳菱總是非常熱心的幫忙我們。另外，謝謝滿足、韶怡、承穎學長姐在低溫定年上提供的協助與討論。

最後，非常謝謝在生活上總是支持著我陪伴著我的旭偉，還有給我非常大的自由，總是讓我自己選擇我想做的事情的父母親。

## 摘要

明多洛島位於巴拉望陸塊 (Palawan Continental Terrane) 和菲律賓活動帶 (Philippine Mobile Belt) 上兩個陸塊之間，本研究在兩板塊交界的縫合帶上及其附近採樣，進行地球化學以及定年分析，包括：核飛跡定年、氫氫定年及鈾鉛定年，以進一步探討明多洛島上之縫合帶特性。縫合帶上蛇綠岩套系樣本之化學分析結果顯示，一些樣本中有屬於中洋脊玄武岩之特色，由其稀土元素含量，又可區分成 LREE 富集的 E-MORB、以及 LREE 虧損的 N-MORB 的樣本；其中在明多洛島西北角的火成岩樣本，呈現洋島玄武岩 (OIB) 之地球化學特徵。另外，本島變質岩區之火成岩樣本、變質岩樣本以及沉積岩樣本，則具有島弧岩漿特性之高場力鍵結元素虧損的現象。

由西北部變質岩區的變質火成岩鈾鉛定年與低度變質的閃長岩氫氫定年分析結果指示了本地區兩次的岩漿活動時期：250 Ma 左右與中國南方海南島有關的島弧岩漿活動，以及 83 Ma 左右屬於區域性的岩漿活動，而流域中河砂之鋯石鈾鉛定年結果也顯示了這兩個年代之來源。角閃岩中角閃石之氫氫定年分析結果，則指示了一個在 29 Ma 左右的熱變質作用年代，可能為一次碰撞事件；磷灰石核飛跡定年則顯示了在 5 Ma 至 0.6Ma 間，巴拉望陸塊與菲律賓活動帶的碰撞抬升所造成的剝蝕作用年代。

中文關鍵字：地球化學 鈾鉛定年 核飛跡定年 氫氫定年 明多洛島

## ABSTRACT

The Mindoro is located between Palawan Continental Terrane and Philippine Mobile Belt. We collected the samples near the suture zones and conducted geochemical analysis and dating for these samples to discuss the affinity of suture zone. The basalts from the ophiolite belt show two different affinities. Some samples show the signature of E-MORB with LREE enrichment; meanwhile, the other sample exhibits N-MORB signature with LREE depletion. On the other hand, samples from NW part of the island show the OIB signature. The volcanic rocks, metamorphic rocks and sedimentary rocks from Mindoro metamorphics show characteristics of HFSE depletion, which infer those samples were products of island arc.

The volcanic samples from northwest Mindoro show that there were two major volcanic events in this area. First event was 250 Ma of U-Pb dating and hornblende Ar-Ar dating for granodiorite and diorite, respectively. This volcanic event can correlate with Permian magmatism occurred in South China. The U-Pb dating of rhyolite sample shows the thermal event record of 83 Ma, which may represent a local volcanic event. A date of 29 Ma was obtained from the amphibolite samples by hornblende Ar-Ar dating technique. It infers that a collision event occurred during this period. Fission track data show the exhumation age of Palawan Continental Terrane and Philippine Mobile belt from 5 Ma until 0.6 Ma.

keyword : geochemistry, U-Pb dating, fission track dating, Ar-Ar dating, Mindoro

# 目錄

口試委員審定書.....	
誌謝.....	I
摘要.....	II
Abstract.....	III
第一章 緒論.....	1
1.1 地質背景.....	1
1.2 前人研究.....	3
1.3 研究目的.....	5
第二章 研究原理與方法.....	6
2.1 標本採集位置.....	6
2.2 全岩地球化學分析.....	11
2.2.1 主要元素.....	11
2.2.2 稀土元素和微量元素.....	11
2.3 定年方法.....	13
2.3.1 鋯石鈾鉛定年.....	13
2.3.2 氬氬定年.....	14
2.3.3 核飛跡定年法 ( Fission Track Dating, FTD ).....	16
第三章 分析結果.....	24
3.1 化學分析資料結果.....	24
3.1.1 明多洛島火成岩主要元素分析結果.....	24
3.1.2 明多洛島微量元素分析結果.....	28
3.2 定年結果.....	34
3.2.1 鈾鉛定年結果.....	34
3.2.2 氬氬定年法.....	35

3.2.3 磷灰石核飛跡定年法 .....	38
第四章 綜合討論.....	41
4.1 明多洛島地球化學資料討論.....	41
4.2 由定年資料探討明多洛島之構造演化 .....	41
第五章 結論.....	49
參考文獻.....	50
附錄二 主要元素分析資料.....	65
附錄三 微量元素含量表.....	67
附錄四 氫氫定年分析數據.....	72
附錄五 磷灰石核飛跡定年分析數據.....	76

## 圖目

圖 1-1、明多洛島位置圖 .....	1
圖 1-2 明多洛島東北西南剖面 .....	4
圖 2-2、鋇石與磷灰石分礦過程 .....	13
圖 2-3 熱中子照射 $^{235}\text{U}$ 核分裂碎片大小統計圖 .....	18
圖 2-4 核飛跡形成示意圖 .....	19
圖 2-5 各定年系統之各種礦物的封存溫度比較圖。 .....	19
圖 3-1 明多洛島火成岩全鹼值對二氧化矽做圖 .....	25
圖 3-2 明多洛島火成岩全鹼值對二氧化矽做圖 .....	26
圖 3-3 明多洛島火成岩之主要元素對二氧化矽圖 .....	27
圖 3-4 火成岩 Th-Hf-Ta 三角分類圖 .....	30
圖 3-5 火成岩 Th-Hf-Ta 三角分類圖 .....	31
圖 3-6 左列為岩石樣本對 MORB 標準化之蛛網圖 .....	32
圖 3-7 左列為岩石樣本對 MORB 標準化之蛛網圖 .....	33
圖 3-8 Min6A 在 Pagbahan 河流河砂樣本之鋇石鈾鉛定年年代機率分布圖 .....	34
圖 3-9、Min6B 閃長岩之角閃石單顆雷射定年 .....	35
圖 3-10 Min32B 角閃岩之角閃石階段定年 .....	37
圖 3-11 Min40B1 角閃岩之角閃石階段定年 .....	37
圖 3-12 明多洛島樣本 Min12B 之磷灰石年代分布圖及放射狀年代分佈圖 .....	40
圖 3-13 明多洛島樣本 Min20B 之磷灰石年代分布圖及放射狀年代分佈圖 .....	40
圖 4-1 Min17B 與海南島樣本之花崗岩分類圖及蛛網圖比較 .....	42
圖 4-2 ASI v.s. $\text{Al}_2\text{O}_3/([\text{Na}_2\text{O}] + [\text{K}_2\text{O}])$ 圖 .....	43
圖 4-3 樣本 Min20B 對花嶼流紋岩之 REE pattern .....	44
圖 4-4 巴拉望碰撞構造圖 .....	46
圖 4-5 菲律賓中部島嶼地質圖 .....	47



## 表目

表 2-1 標本清單 .....	8
表 2-2 鈾同位素放射化學數據 .....	18



# 第一章 緒論

## 1.1 地質背景

明多洛島位於呂宋島弧的中部，是菲律賓活動帶的西界，與巴拉望陸塊相鄰，（圖 1-1），由於此島位於板塊碰撞交界處(Sarewitz and Karig, 1986a)，因此許多不同來源的岩層被保存在此島上。

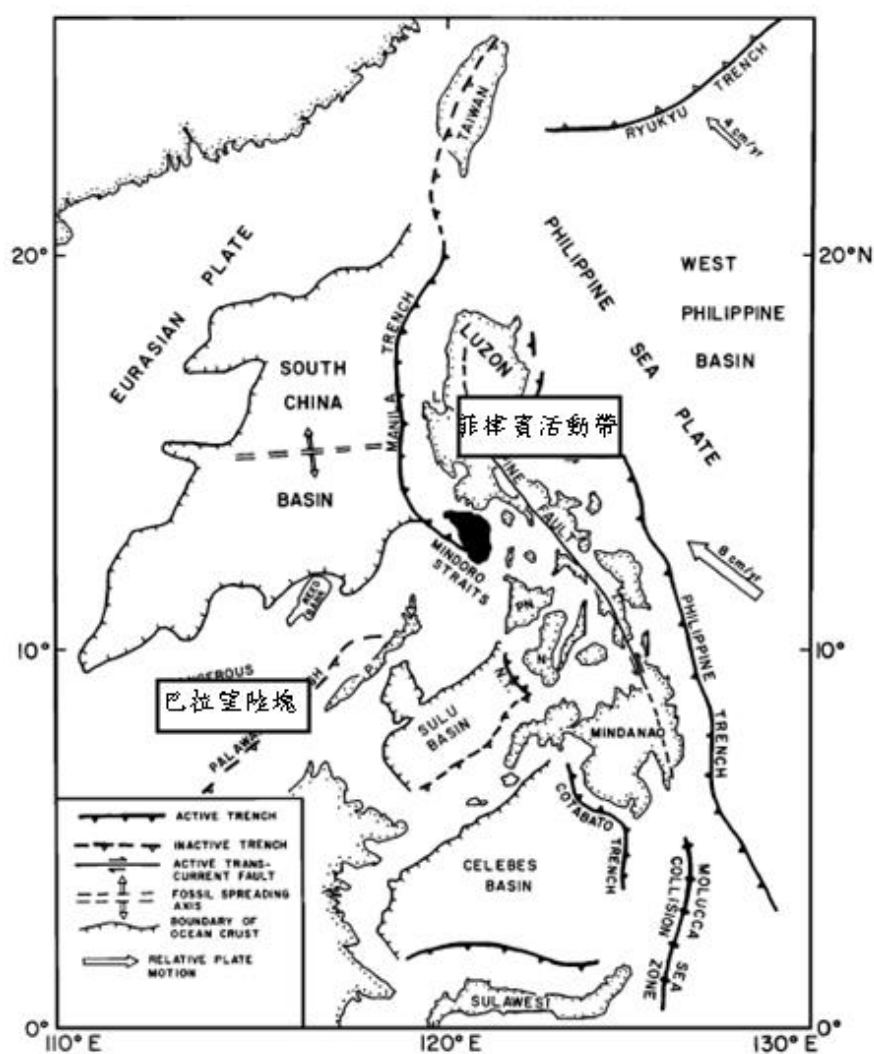


圖 1-1、明多洛島位置圖，由圖上可看出，此島位於巴拉望陸塊與菲律賓活動帶之交界處。(Sarewitz and Karig, 1986b)

明多洛島西北部最老的基盤岩層是侏羅紀的變質岩(Mindoro Metamorphics)，此岩層遍佈明多洛島的西北部(Hashimoto, 1964; Teves, 1954)，其主要是綠泥石、石英、雲母、滑石組成之片岩；和次要的千枚岩相變質沉積岩。此區的變質火成岩之變質度為綠片岩相(Caagusan, 1966; Sarewitz and Karig, 1986a)。白堊紀的蛇綠岩套(Mangyan Ophiolite)自島的西北部至東南部的方向橫過此島(Yumul et al., 2009a)，此蛇綠岩套上遍佈著受強烈剪切作用的蛇紋岩化斜方輝綠橄欖岩(serpentinized harzburgites)、輝長岩、片狀岩脈以及枕狀熔岩。在侏羅紀變質岩不整合面之上的地層為始新世 Lasala Formation 的沉積岩層，主要是砂泥岩互層中間夾雜些次要的玄武岩、礫岩及石灰岩，此沉積岩是明多洛島西北部最老的沉積岩層，其沉積年代早於巴拉望陸塊碰撞菲律賓活動帶之年代。在侏羅紀變質岩帶及始新世沉積岩層西南方，為漸新世中期蛇綠岩套(Amnay Ophiolite)，分佈在明多洛島西北方至中南方，此地層上包含海洋岩石圈之產物，有殘餘的橄欖岩、輝石岩，輝長岩、岩脈、枕狀熔岩及海洋沉積物，因為其年代及所在位置，此蛇綠岩套被認為是南中國海之產物(Jumawan et al., 1998; Rangin et al., 1985; Yumul et al., 2009b)。

明多洛島之東北角處為上新世火成岩；而西南部主要是新生代沉積岩，此區來自巴拉望陸塊(Holloway, 1982; Karig, 1983)，Sarewitz and Karig (1986b)認為，由於晚中新世巴拉望陸塊與菲律賓活動帶在此島西南部發生碰撞，縫合帶為漸新世中期蛇綠岩套(Amnay Ophiolite)，為巴拉望陸塊與北部具島弧岩漿特性陸塊之碰撞帶。而在第四紀時在此島中央山脈東側產生一條右移斷層，斷層東方是上新世至第四紀之沉積岩。

## 1.2 前人研究

明多洛島大致上可以分為三個部分，西南部屬於巴拉望陸塊（Palawan Continental Terrane）(Holloway, 1982; Sarewitz and Karig, 1986a)，西北部為明多洛陸塊(Mindoro Block)，交界帶為縫合帶(Amnay Ophiolite)(Sarewitz and Karig, 1986a)，東部大多為上新世至第四紀之沉積岩覆蓋。(Sarewitz and Karig, 1986b)。

前人對於明多洛島西北部之明多洛陸塊，研究對此陸塊來源有不同說法，有些學者認為，此處應屬於菲律賓活動帶的一部分 (Karig, 1983)；或是屬於海洋板塊 (the West Philippine Block) (Charvet et al., 1994; Faure et al., 1989)；另外也有些學者認為，此處應屬於中國東南方陸塊的一部分(Holloway, 1982; Knittel and Daniels, 1987; Knittel et al., 2010)。此外，Knittel (2011)對此岩層中流紋岩所做的鋯石鈾鉛定年結果為 83 Ma，由於在巴拉望陸塊上並未發現這個火成岩年代，因此推測為本島區域性在白堊紀的一次島弧岩漿事件。

關於明多洛島碰撞事件，Yumul et al.(2009a)認為在明多洛島上，存在三條蛇綠岩套，最北方為始新世的 Puerto Galera Metaophiolitic Unit，中部白堊紀的 Mangyan Ophiolite，以及漸新世中期的 Amnay ophiolite。在中部較老的基性岩區 Mangyan Ophiolite，此白堊紀蛇綠岩套，被認為是古老在菲律賓活動帶中部碰撞所造成的縫合帶；而北部的 Puerto Galera Metaophiolitic Unit 為中新世早期菲律賓活動帶與巴拉望陸塊碰撞的結果；南部的 Amnay ophiolite 則被認為是中新世晚期菲律賓活動帶與巴拉望陸塊碰撞的結果(Yumul Jr et al., 2003)（圖 1-2）。

Queano et al. (2007) 依據古地磁資料重建出古板塊關係，認為現在的菲律賓島弧在 50 Ma 時，還位於赤道以南之位置，始新世中期才開始慢慢往西北部移動，連同現今明多洛島東北部地塊，於約中新世晚期撞上位於巴拉望陸塊上的明多洛島西南部地塊。

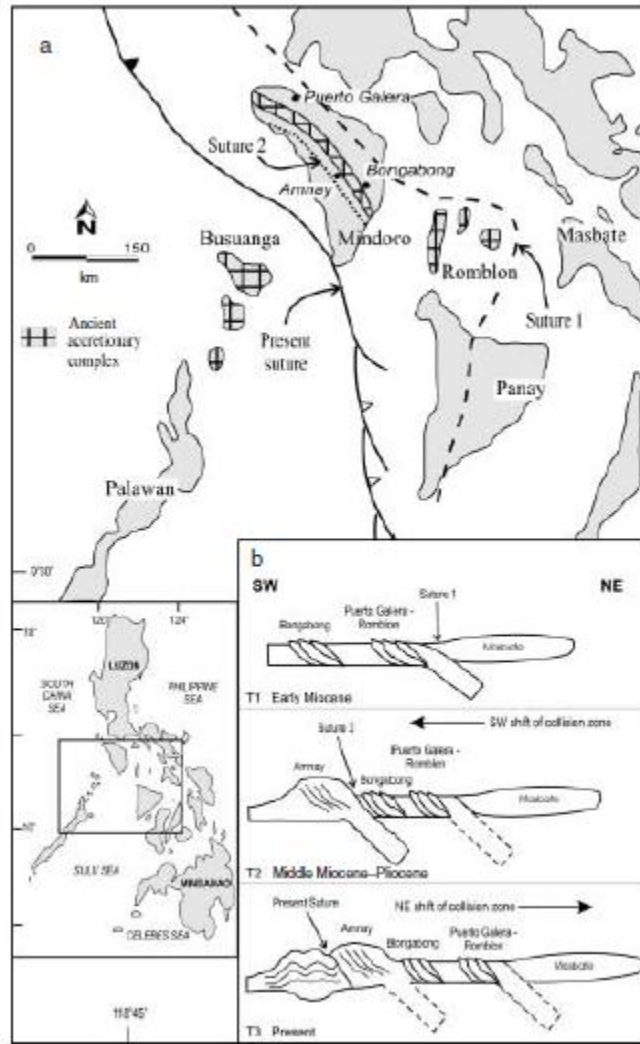


圖 1-2 明多洛島東北西南剖面。(Yumul Jr et al., 2003)

本研究區域著重在兩條縫合帶 (Amnay Ophiolite 以及 Mangyan Ophiolite)，期望藉由鋯石鈾鉛定年探討其原始來源，並以低溫定年的氬氬定年及核飛跡定年進一步討論在明多洛島的構造歷史。

### 1.3 研究目的

明多洛島位於巴拉望陸塊與菲律賓活動帶的板塊交界處，造成其地質背景複雜，雖然前人對於此島之碰撞及來源感興趣，但受限於各種因素，本島尚未有系統的全岩地球化學分析資料。

明多洛島西南部之來源，普遍被認為屬於巴拉望陸塊的一部分(Holloway, 1982; Karig, 1983; Yumul Jr et al., 2003)。而明多洛島西北部之陸塊，稱為明多洛陸塊 (Mindoro Block)，前人研究對此區域的來源有不同說法，Holloway (1982)認為本區域是由於南中國海的張裂而隆起的中國東南方之陸塊；Yumul Jr et al. (2003)認為菲律賓活動帶與巴拉望陸塊碰撞所殘留的縫合帶為 Amnay Ophiolite，以北屬於菲律賓活動帶，以南為巴拉望陸塊；Karig (1983)認為中部右移斷層帶以東為菲律賓活動帶，西南為巴拉望陸塊，西北方稱之為明多洛陸塊其來源作者尚未下定論。

本研究希望藉由在兩條可能縫合帶上的樣本，利用地球化學分析資料探討其組成；由定年資料：包括核飛跡定年及角閃岩氩氩定年資料，探討此島之碰撞歷史；而西北部沿海河川及露頭所採的河砂及變質火成岩樣本，以鋯石鈾鉛定年 (Knittel, 2011; Knittel et al., 2010)，及低度變質閃長岩之角閃石氩氩定年，探討此部分陸塊之原始來源，藉此重建此島重要地質事件。

## 第二章 研究原理與方法

### 2.1 標本採集位置

明多洛島位於板塊交界帶，許多學者曾對本島做過調查而有不同版本的地質圖，本研究使用 Yumul et al. (2009b)之地質圖。

本研究第一次的野外，採樣點主要在明多洛島之西北部，於圖 2-1 上採樣點 Min1 至 Min21，共 33 個岩石樣本，及 13 個沉積物樣本，接近明多洛島西岸的樣本 Min1~Min10，前人研究認為位於巴拉望陸塊上，Min7 至 Min10 是接近縫合帶的樣本，此區域之樣本多為基性及超基性岩，Min11 為輝長岩露頭，許多淡色岩脈侵入此基性岩體，並且有閃長岩包裹體在此基性岩體中；Min12 與 Min13 則屬於始新世沉積岩(Lasala Formation)，但在大部分地質圖上尚未標示此岩體；沿著明多洛島北部海岸線之採樣點 Min14 至 Min22 則是位於明多洛島變質岩帶上，有低度到中度變質的片岩，也有高度變質的片麻岩，在 Puerto Galera 西緣的區域採樣點 Min20、Min21，有屬於明多洛變質岩帶的大理岩。另外，在西部與北部河流及沙灘，亦採集沉積物樣本。

本研究第二次野外，採樣點主要集中在中部之斷層帶附近，圖 2-1 上採樣點 Min31 至 Min42，共 17 個岩石樣本，及 8 個沉積物樣本，樣本 Min32 至 Min38 之樣本採集於 Magasawangtubig 河以及 Ibalò 河河岸，屬於明多洛變質岩帶，樣本 Min32 為富含石榴子石之角閃岩，另外，樣本包含砂岩 (Min36B)、片岩 (Min36A)、石英岩 (Min37A、Min37B)，亦採集河砂沉積物樣本；沿著斷層線至南方，沉積物樣本 Min39A 採集於 Acliang 河，樣本 Min40 採集於 Bongabong 河，由於此區域大多被新生代沉積物覆蓋，並沒有非常良好之露頭，因此於河谷採樣，樣本 Min40B 為角閃岩樣本，在河谷中亦有來自其流域的斜方輝綠橄欖岩、綠簾岩、燧石及砂岩等等，樣本 Min40C 為變質砂岩；於明多洛島東北方的 Naujan 湖北側，採集新世代之火山帶之樣本 Min34A。

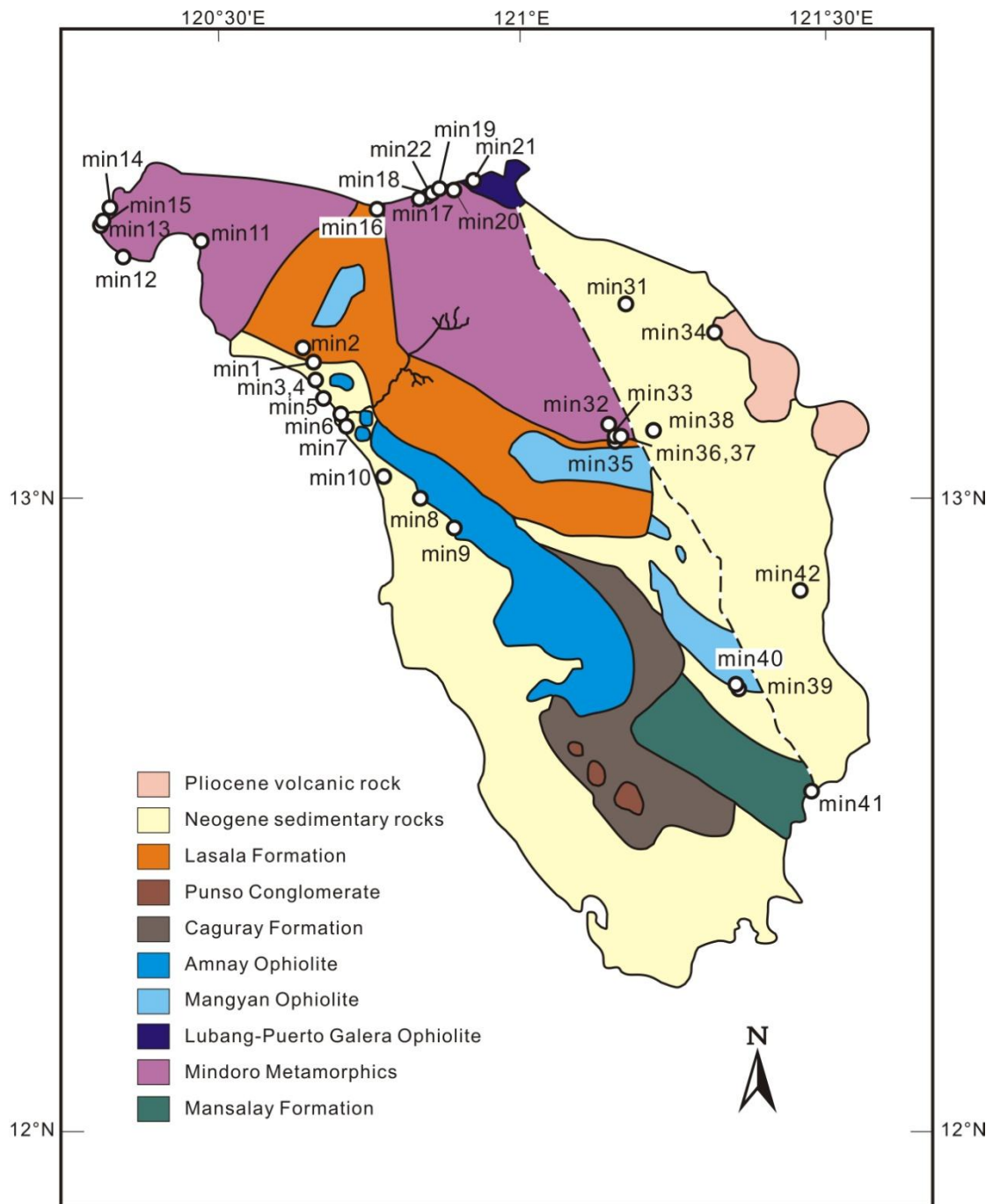


圖 2-1 明多洛島之地質圖與採樣點(Yumul et al., 2009b)，虛線為島上右移斷層線。



表 2-1 標本清單

No.	岩性	岩層
1A	蛇紋岩化超基性岩	Lasala Formation
1B	輝石岩	Lasala Formation
1C	砂泥岩	Lasala Formation
1D	砂岩	Lasala Formation
2A	枕狀玄武岩	Lasala Formation
3A	石灰岩	Neogene Sedimentary rocks
4A	斜方輝橄岩	Neogene Sedimentary rocks
4B	蛇紋岩化超基性岩	Neogene Sedimentary rocks
6B	變質閃長岩	Mindoro Metamorphics
7A	玄武岩質角礫岩	Amnay Ophiloite
8A	蛇紋岩化玄武岩	Amnay Ophiloite
10A	塊狀玄武岩	Amnay Ophiloite
11A	白色火成岩脈	Mindoro Metamorphics
11B	擄獲岩	Mindoro Metamorphics
11C	輝長岩	Mindoro Metamorphics
11D	基性火成岩脈	Mindoro Metamorphics
11E	基性岩脈中的結核	Mindoro Metamorphics
12A	安山岩	Mindoro Metamorphics
12B	砂岩	Lasala Formation
12C	砂岩	Lasala Formation
12D	結核	Mindoro Metamorphics
13A	砂岩	Lasala Formation
14B	黑色片岩	Mindoro Metamorphics
14C	玄武岩	Mindoro Metamorphics
14D	綠色片岩	Mindoro Metamorphics
15B	變質火成岩	Mindoro Metamorphics
15C	蛇紋岩	Mindoro Metamorphics
17B	片麻岩	Mindoro Metamorphics
17C	閃長岩	Mindoro Metamorphics
18B	角閃岩	Mindoro Metamorphics
20B	變質流紋岩	Mindoro Metamorphics
22B	變質輝長岩	Mindoro Metamorphics
23A	片麻岩	Mindoro Metamorphics

32A	變質砂岩	Mindoro Metamorphics
32B	角閃岩	Mangyan Ophiolite
32C	角閃岩	Mangyan Ophiolite
33A	玄武岩質角礫岩	Mindoro Metamorphics
34A	新生代火成岩	Pliocene Volcanic rocks
36A	片岩	Mindoro Metamorphics
36B	變質砂岩	Mindoro Metamorphics
37A	石英岩	Mindoro Metamorphics
37B	大理岩	Mindoro Metamorphics
37C	玄武岩質火成岩岩脈	Mindoro Metamorphics
37E	蛇紋岩	Mindoro Metamorphics
38A	花崗閃長岩	Mindoro Metamorphics
38B	條帶狀花崗閃長岩	Mindoro Metamorphics
40B1	角閃岩	Mangyan Ophiolite
40B2	角閃岩	Mangyan Ophiolite
40C	變質砂岩	Mangyan Ophiolite
41B	砂岩	Mansalay Promotion

SEDIMENT SAMPLES	
No.	附註
5A	beach
6A	Pagbahan River
9A	Amnany River
11F	Paluan Beach
14A	river/beach sand Calangnian Pt
15A	beach sand, Cape Calavite
16A	beach sand, Abra de Ilog Harbour
17A	beach sand, Matabang Village
18A	beach sand, W' Odalo River
19A	river/beach sand, Camarong River
20A	beach sand, Lucutan
21A	beach sand, Talipanan Point (7 km E' Puerto Galera)
22A	river/beach sand, Odalo river

31A	Pulangtung Tubig
32D	Magaswang Tubig
35A	un-named creek of Ibalong River
37D	Ibalong River
39A	Acliang River, Bongabong tributary
40A	Bongabong River
41A	Mansalay River
42A	Bansud River



## 2.2 全岩地球化學分析

### 2.2.1 主要元素

全岩之主要元素以 X 光螢光分析法分析之，分析步驟如下：

- (1) 將樣本放至於剛玉研鉢，使用研磨機將樣本磨細。
- (2) 取磨細之後的樣本 0.5 克，再加入 5 克助熔劑四硼酸鋰（Lithium tetraborate； $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ），均勻混合後倒入白金坩鍋（95%Pt-5%Au），置於高溫爐中，製成玻璃餅。
- (3) 利用本所的日本理學 X 光分析儀（Rigaku X-ray Fluorescence）測定  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\Sigma\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  等十個主要元素氧化物之全岩含量。詳細分析步驟條件精確度及準確度估計請參閱李寄嶼等（1997）。

### 2.2.2 稀土元素和微量元素

利用安捷倫公司所屬 7500s 感應耦合電漿質譜儀（Agilent-7500s Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer），微量元素之處理有兩種，使用岩石粉末以及利用主要元素分析時所製作的玻璃餅酸溶稀釋，本次研究使用玻璃餅酸溶稀釋，其處理步驟如下：

- (1) 將玻璃餅敲碎，秤取約 40mg 碎塊至入乾淨的鐵氟龍燒杯中，並精確記錄淨重。
- (2) 依序加入約 6:5 的硝酸和氫氟酸，再置於電熱板上加熱約兩小時以上，待樣品充分熔解。

(3) 再將酸蒸乾，加入約兩毫升 1:2 的硝酸後，置於加熱板上放置隔夜後準備稀釋。

(4) 以 2% 的硝酸稀釋到 500 倍，在以內標準溶液，即 10 ppb 銻 (Rhodium; Rh) 與鉍 (Bismuth; Bi) 稀釋至 1500 倍後待 ICP-MS 測量，以相同的方法製備 USGS 標準樣溶液。

樣本前處理之後，以 ICP-MS 測量微量元素，AGV-1、BHVO-1 及 AGV-2 為外標準樣 (external standard) 建立檢測線，而分析標本時除上述標準樣外，再加上 G-2 及 GSP-1，兩者均以銻和鉍做為內標準樣 (internal standard) 以控制靈敏度飄移 (sensitivity shift)，在測量樣品同時亦將 AGV-1、BHVO-1、AGV-2、BCR-1、G-2、GSP-1 及 BIR-1 等 USGS 岩石標準樣測兩次取其平均，以監控測量精準度。

朱秋紅(2005)所測量之安捷倫 7500s 型感應耦合電漿質譜儀，其大部分測量元素 RSD 均小於 3%，

詳細分析步驟條件精確度及準確度估計請參閱朱秋紅 (2005)。

## 2.3 定年方法

### 2.3.1 鋯石鈾鉛定年

鋯石鈾鉛定年標本製備步驟如下：

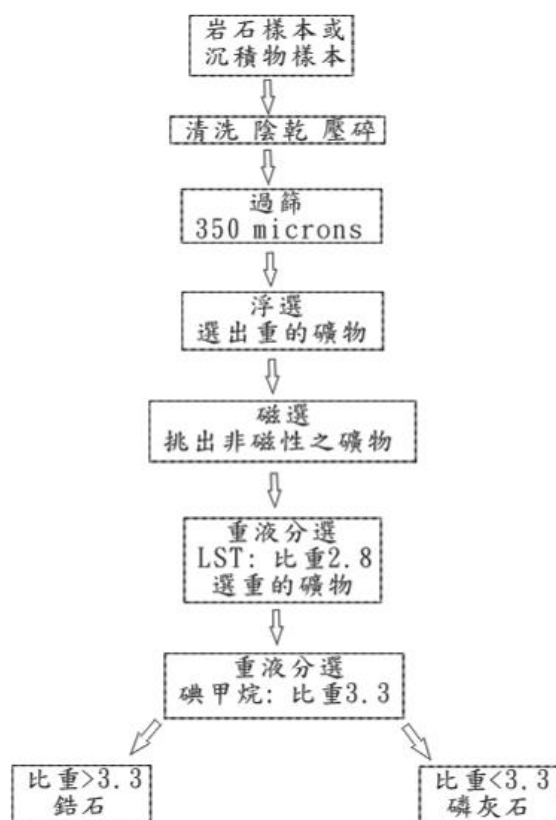


圖 2-2、鋯石與磷灰石分礦過程。

顯微鏡下挑選出鋯石，將其排列在黏貼於玻璃片之雙面膠上，埋入環氧樹脂 (epoxy) 固定成一直徑 2.5 公分的標靶餅，將鋯石顆粒磨出適當平面並拋光，即可進行鋯石定年分析。分析前先利用中央研究院地球科學研究所之 JOEL JSM-6360LV 掃描式電子顯微鏡 (scanning electron microscope-SEM) 及附加的 Gatan Mini-CL 陰極發光影像系統，拍攝鋯石標本上的陰極發光照片 (cathodoluminescence image-CL 影像)，從陰極發光照片上可以觀察到鋯石的內

部構造，例如：有無繼承鋯石核心、增生環帶，甚至是包裹體，幫助選擇適當的分析位置。本研究的鋯石鈾鉛定年，利用雷射感應耦合電漿質譜儀 (laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry - LA-ICP-MS) 完成。台灣大學使用的 7500s 感應耦合電漿質譜儀 (Agilent-7500s inductively coupled plasma mass spectrometer)；雷射為 New Wave Research/Mervhamtek 公司出產之 UP213 型剝蝕進樣系統。

### 2.3.2 氬氬定年

氬氬同位素定年法衍生自鉀氬同位素定年法。自然界中之  $^{40}\text{K}$  為一不穩定同位素，會隨著時間衰變為穩定之  $^{40}\text{Ar}^*$ ，如果這些衰變反應而來的  $^{40}\text{Ar}^*$  能被封存於礦物內，則礦物中的  $^{40}\text{Ar}^*$  同位素含量就會隨著時間而增加。其蛻變方程式為：

$$^{40}\text{Ar}^* = \frac{\lambda_e}{\lambda} ^{40}\text{K}(e^{\lambda t} - 1) \dots \dots \dots (1)$$

式 (1) 中， $\lambda_e$  與  $\lambda$  為  $^{40}\text{K}$  之衰變常數 ( $\lambda = 5.543 \times 10^{-10} \text{yr}^{-1}$ )， $^{40}\text{K}$  與  $^{40}\text{Ar}^*$  分別為礦物內衰變源  $^{40}\text{K}$  與衰變產物  $^{40}\text{Ar}^*$  的含量， $t$  為樣品的年齡， $^{40}\text{K}$  與  $^{40}\text{Ar}^*$  可由實驗室測量得到，代入式 (1) 即可算出樣品年齡。

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  同位素定年法則利用圓子爐內之快中子 (Fast neutron) 先將樣本中穩定同位素  $^{39}\text{K}$ ，依  $^{39}\text{K}(n, p)^{39}\text{Ar}$  反應激發成不穩定態同位素  $^{39}\text{Ar}$ ，再將中子照射後之樣本置於氣態質譜儀中，分析樣本內之成  $^{37}\text{Ar}$ 、 $^{38}\text{Ar}$ 、 $^{36}\text{Ar}$ 、 $^{39}\text{Ar}$ 、 $^{40}\text{Ar}$  等氬同位素的含量，再由實驗室測得之  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  比值算出式 (1) 中  $^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{K}$ 。

然而在中子照射過程中  $^{39}\text{Ar}$  與  $^{39}\text{K}$  含量關係並非定值，常隨原子反應爐內之中子流量而改變，因此在實際操作中，利用已知年齡之標準礦物 (Standard

mineral)，做為照射時監視器（Neutron irradiation monitor），與欲測定年代之樣本一起放入原子爐中接受照射，以求得快中子流有關的常數（J 值）。

本研究選用岩石樣品中之角閃石作為氬氬定年分析材料；首先將挑好的礦物標本送至原子爐照射，待樣本之放射性強度降至安全範圍之後，即可進行氬氬定年之分析。其中鈣及氯等原子亦會被激發成  $^{37}\text{Ar}$ 、 $^{38}\text{Ar}$ 、 $^{36}\text{Ar}$ 、 $^{39}\text{Ar}$ 、 $^{40}\text{Ar}$  等原子，而在氬氬定年分析中成為干擾同位素（interfering isotopes），所幸這些干擾同位素都有一定比例關係，因此可由干擾校正消除。

完成氬氣分析之後，經過干擾校正、背景及照射時間校正，就可以算出樣品年齡，在氬氬定年中，我們常以下列幾種方式分析和表示樣品年齡及其可信度。

- 總和年代（Integrated date）：這是以各階段加溫所得到放射源氬氣（ $^{40}\text{Ar}^*$ ）的總量及經中子照射而產生  $^{39}\text{Ar}$  總量來計算年代，理論上如果沒有回彈（Recoil effect）效應的話，其年代應與鉀氬定年法所得之年代相同。
- 坦原年代（Plateau date）：其定義為利用各相鄰溫階（Step）之年代，其年代相互誤差不超過兩個標準差（Standard deviation）所連接而在圖上顯示出一“平坦階”，其所涵蓋的範圍超過  $^{39}\text{Ar}$  總累積含量的百分之五十以上，且須由大於或等於三個溫階所組成，再以此平坦階內的  $^{40}\text{Ar}^*$  總量及  $^{39}\text{Ar}$  總量計算而得到的年代。而此年代的算法可以避免標本內氬氣氣不均，所造成的超氬氣成分或是氬氣減損的現象，相對於總合年代準確，但是對於標本內部氬氣的放氣來源卻無法了解，若標本當時形成時所包裹的氬氣與現今大氣成分並不相同，那麼所計算出的年代必定與真實年代產生某種程度的誤差。所以我們可借助反等時線圖（Inverse isochron or Corrchron diagram）來進一步討論氬氣的放氣過程。



- 反等時線年代 (Inverse isochron or Corrchron date)：把分析所得到的資料點放入以  $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  為縱座標， $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  為橫座標的圖中，若齊資料點成線性 (Linear array)，則將其各點做線性回歸，而得一線性關係式：

$$\frac{^{36}\text{Ar}}{^{40}\text{Ar}} = a + b \times \frac{^{39}\text{Ar}}{^{40}\text{Ar}} \dots\dots\dots (2)$$

我們以縱軸截距 a 的倒數  $\frac{1}{a} = \left(\frac{^{40}\text{Ar}}{^{36}\text{Ar}}\right)_0$  代表標本內所包裹非放射來源的同位素比值，此比值並可用來驗證與正常大氣成分是否相同，藉此來確認總和年代及坦原年代的準確度，及標本內所包裹的氬氣為大氣成分的假設是否正確。並將橫軸  $\left(\frac{^{39}\text{Ar}}{^{40}\text{Ar}}\right)$  截距的值代入式 (1)，則可得到由縱軸氬氣初始值校正後的年代，由此可以較容易判別氬氣的來源及成分，而探討非放射性源氬氣所造成的影響，也因此較能準確的估計標本的年代。

本研究包含三個樣本以氬氬雷射單礦物定年法分析，以及三個樣本以氬氬階段加溫定年法分析。詳細分析步驟條件精確度及準確度估計請參閱許芳瑞 (2000)。

### 2.3.3 核飛跡定年法 (FISSION TRACK DATING, FTD)

核飛跡定年法屬於放射性定年法的一種，此技術發展約始於 1960 年代。Price and Walker (1962) 在雲母片上發現了經由氫氟酸 (HF) 溶蝕出來的核飛跡，從此揭開了各種不同材質中自然產生核飛跡之研究的序幕。

核飛跡定年法屬於放射性定年法的一種，此法中最常用的礦物 ( 鋁石與磷灰石 ) 的封存溫度分別為 210°C~240°C (Naeser, 1979) 與 100°C~135°C (Zaun and Wagner, 1985)，比氬氬定年法一般定年礦物 (如鉀長石、黑雲母、與角閃石) 之封存溫度低，因此核飛跡定年分析能解析出岩體熱歷史紀錄中更後期的熱

事件。利用熱定年法中礦物能記錄其通過封存溫度之年代特性，結合不同熱定年方法可以利用高溫到低溫的序列來解釋一個地區岩體冷卻的歷史與地形抬升之演化過程。

核飛跡 (fission track) 的生成，是原子核裂變後其破裂片彈飛經過的軌跡。自然界中自發性的核裂變只會產生在原子序  $Z \geq 90$ 、原子量  $A \geq 230$  的核種中，而只有鈾系的兩種同位素，鈾-238 ( $^{238}\text{U}$ )、鈾-235 ( $^{235}\text{U}$ ) 和釷-232 ( $^{232}\text{Th}$ ) 產生的核裂變才是重要且能被量測到的，以  $^{235}\text{U}$  為例，其不穩定的原子核會分裂成兩個質量約 95 與 140 的帶電粒子，並放出約 200 MeV 的能量。這兩個核裂片會以相反的方向彈飛，而在礦物晶格內留下一道正電性的區域。該區域內的正電離子會互相排斥而進入附近的晶格之間，形成一道結晶晶格的缺陷帶軌跡，此缺陷帶即稱核飛跡，只有數個埃 ( $\text{\AA}$ ) 寬，10~20 微米長，可在絕緣性固體中穩定的保留下來，經過化學溶蝕法處理後，研究者能在顯微鏡下觀察到。

絕緣性物質中的核飛跡一旦生成，可在某一溫度下保持穩定，一旦溫度升高，固體中原子的震動易增大，核飛跡附近被移位的離子乃擴散回到原來的位置，使晶格的缺陷縮短或者消失，此種作用稱為「癒合作用 (annealing)」。此癒合作用主要受到溫度與受熱時間控制，一般來說並不易受到環境中其他物理或化學因素影響。若礦物受熱的溫度夠高或者受熱的時間夠長，則能將礦物內所有晶格內的缺陷帶全部癒合，稱完全癒合 (total annealing)；若只有部分的核飛跡被癒合，則稱部分癒合 (partial annealing)。部分癒合的程度會反應在核飛跡長度的分不上。不同礦物或玻璃其有效封存溫度各異，例如鋯石的核飛跡有效封存溫度約為 210–240°C，磷灰石的核飛跡有效封存溫度約為 100–135°C。這種性質使得核飛跡定年法能解析出較  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年法更低溫的熱事件。

表 2-2 鈾同位素放射化學數據

	Relative abundance (compared to $^{235}\text{U}$ )	Total half-life (years)	Spontaneous fission half-life (years)
$^{232}\text{Th}$	551.2	$1.40 \times 10^{10}$ <sup>b</sup>	$1.0 \times 10^{21}$ <sup>d</sup>
$^{235}\text{U}$	1.0	$7.04 \times 10^8$ <sup>b</sup>	$1.0 \times 10^{19}$ <sup>c</sup>
$^{238}\text{U}$	137.8 <sup>a</sup>	$4.47 \times 10^9$ <sup>b</sup>	$8.2 \times 10^{15}$ <sup>c</sup>

<sup>a</sup>Geochemical average. <sup>b</sup>Steiger and Jager (1977). <sup>c</sup>Holden (1989). <sup>d</sup>Baard et al (1989)

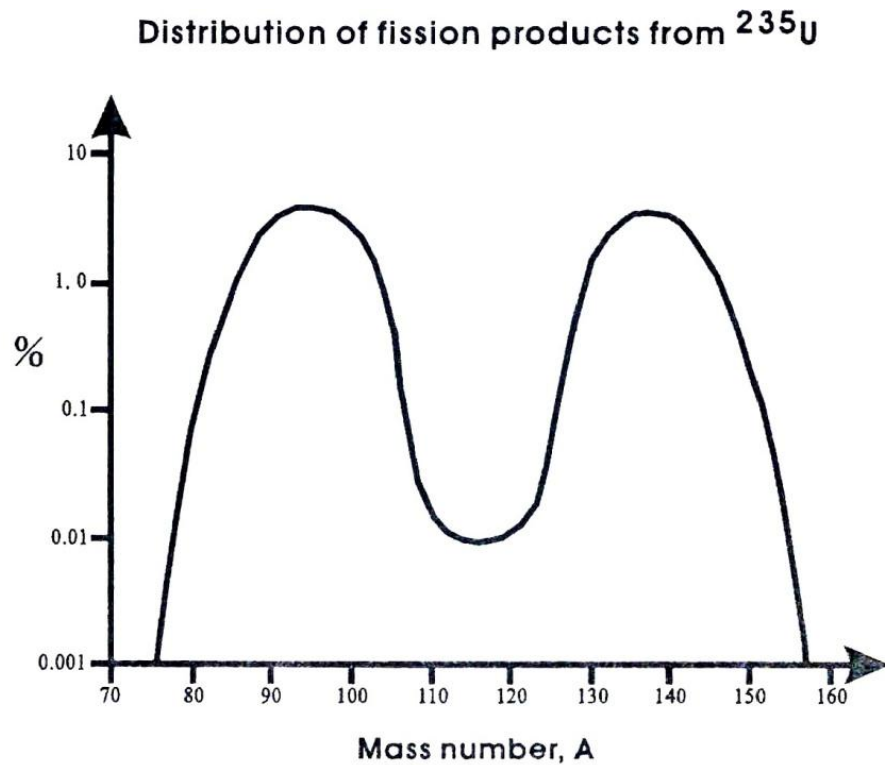


圖 2-3 熱中子照射  $^{235}\text{U}$  核分裂碎片大小統計圖。碎片大小集中在質量 95 與 140。

(修改自(Fleischer et al., 1965))

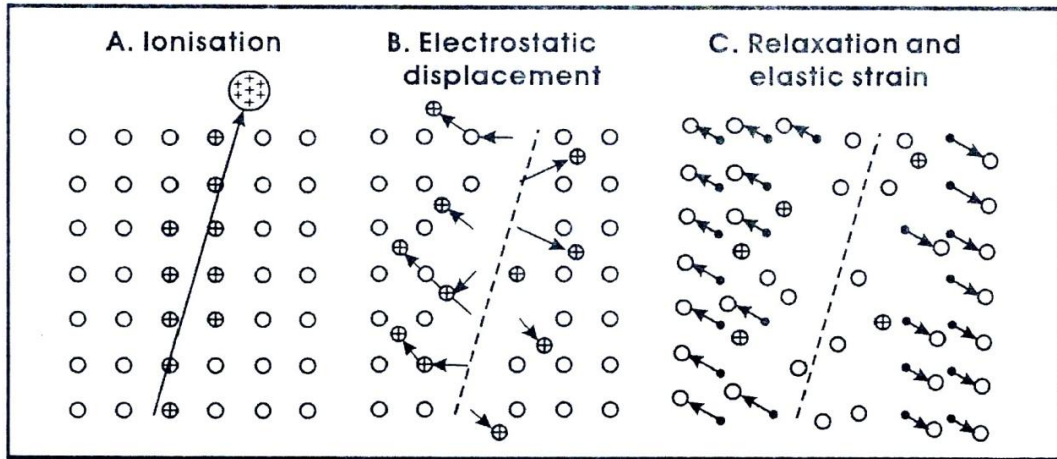


圖 2-4 核飛跡形成示意圖 (A) 離子化 (B) 靜電排斥 (C) 彈性應變。(修改自(Fleischer et al., 1965))

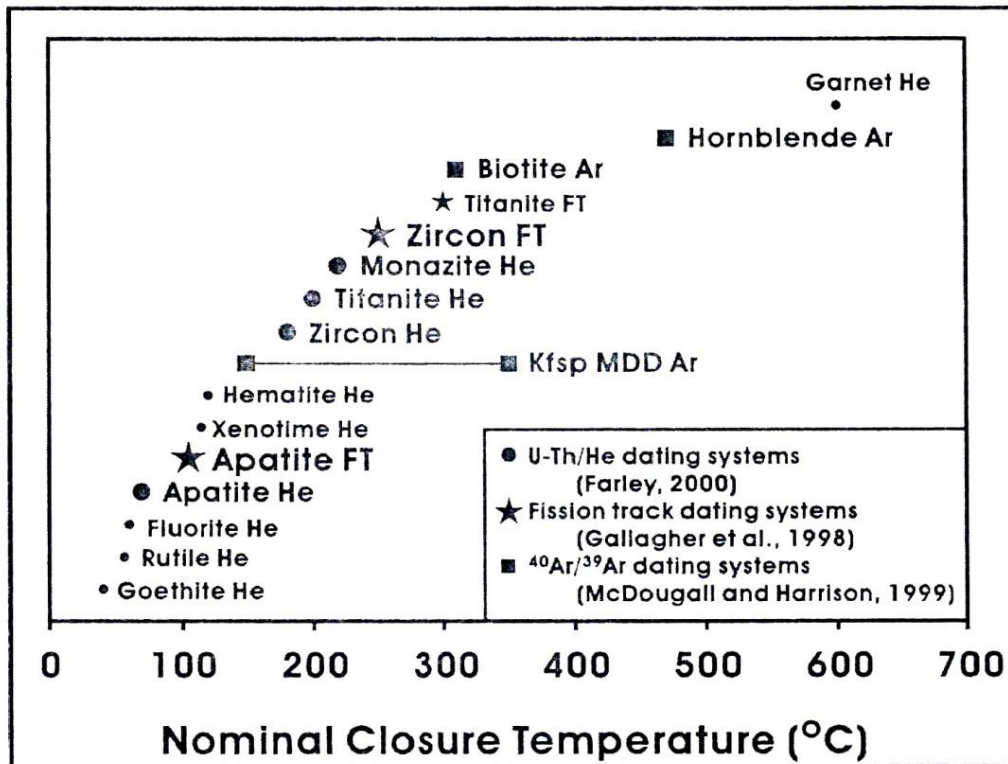


圖 2-5 U-Th/He (鈾-鈷/氦) 定年系統、核飛機定年系統與氬氬定年系統之各種礦物的封存溫度比較圖。可看出氬氬定年系統(McDougall and Harrison, 1999)的封存溫度較高，核飛跡定年系統(Gallagher et al., 1998)次之，鈾-鈷/氦定年系統最低(Farley, 2000)。

自然界中  $^{238}\text{U}$  的自發核分裂速率一定，在礦物通過其封存溫度開始冷卻之後，自發性核飛跡的數量會隨著時間慢慢累積，但核飛跡產生的數量除了與礦物通過其封存溫度的年代有關，也與本身鈾含量高低有關，同時間通過封存溫度的礦物顆粒，鈾濃度含量高者會產生較多的核飛跡，因此研究者除了要計數每單位面積內的自發性核飛跡密度外，還需要有一已知鈾濃度的標準樣品來較正每顆礦物顆粒的鈾濃度。

礦物顆粒的鈾濃度可利用熱中子撞擊  $^{235}\text{U}$  發生誘發性核分裂的方式求得，根據自發性核飛跡與誘發性核飛跡密度之比值，以及照射之中子通量，即可算出年代(Fleischer and Price, 1964)。核飛跡年代計算公式如下：

$$T = \frac{1}{\lambda_d} \times \ln \left( 1 + \frac{\lambda_d}{\lambda_f} \times \frac{\rho_s}{\rho_i} \times \frac{R_i}{R_s} \times GI\sigma_f\phi \right)$$

其中

$T$  = 測定年代 (年)

$\lambda_d = ^{238}\text{U}$  蛻變常數

$$= 1.55123 \times 10^{-10} \quad (/年) \quad (\text{Steiger and Jager, 1977})$$

$\lambda_f = ^{238}\text{U}$  自發核分裂蛻變常數

$$= 6.85 \times 10^{-17} \quad (/年) \quad (\text{Fleischer and Price, 1964})$$

$\sigma_f = ^{235}\text{U}$  受熱中子照射誘發核分裂之截面常數

$$= 580 \times 10^{-24} \quad (\text{釐米}^2)$$

$I$  = 現今鈾同位素比值 ( $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ )

$$= 7.252 \times 10^{-3}$$

$\rho_s$  = 樣本自發核飛跡密度 (核飛跡數/釐米<sup>2</sup>)

$\rho_i$  = 樣本誘發核飛跡密度 (核飛跡數/釐米<sup>2</sup>)

$R_s$  = 可溶蝕的自發核飛跡長度 (微米)

$R_i$  = 可溶蝕的誘發核飛跡長度 (微米)

$G$  = 幾何因子，取決於是以外部探測法 (external surface,  $G = 1$ ) 或是內部探測法 (internal surface,  $G = 0.5$ ) 來測量，本文是以內部探測法來進行。

$\psi$  = 熱中子通量 (中子數/釐米<sup>2</sup>)

中子通量 ( $\psi$ ) 通常用以之鈾濃度的標準玻璃來測定。中子通量的計算公式如下：

$$\psi = B \times \rho_{im} ; \text{其中 } B = \frac{\xi \lambda_f}{\sigma I}$$

$\rho_{im}$  = 標準玻璃的誘發核飛跡密度 (核飛跡數/釐米<sup>2</sup>)

本研究之磷灰石樣本採用美國國家標準局的標準玻璃 NBS-612，鈾濃度為 37.38ppm， $B$  值為  $5.6 \times 10^9$ 。

由於各實驗室所測得之  $\lambda_f$  值差異很大，使用的值從  $6 \times 10^{-17} \text{a}^{-1}$  到  $10 \times 10^{-17} \text{a}^{-1}$  不等，為使各實驗室所測得的年代能夠互相比較，Hurford and Green (1983) 提出 Zeta 校正法 ( $\xi$ - calibration method)，用已知年代的標準樣本與已知鈾含量的標準玻璃做校正，求得標準玻璃的  $\xi$  值，以取代  $\lambda_f$ 、 $\sigma$ 、 $I$ 、 $\psi$  等值， $\xi$  之計算公式如下：

$$\xi = \frac{e^{\lambda_d T_{\text{std}}} - 1}{\lambda_d \left( \frac{\rho_s}{\rho_i} \right)_{\text{std}} \rho_{im}}$$

因此年代公式可以改寫如下：

$$T = \frac{1}{\lambda_d} \times \ln \left( 1 + \lambda_d \times \frac{\rho_s}{\rho_i} \times \frac{R_i}{R_s} \times G \sigma_{im} \xi \right)$$

其中

$T$  = 測定年代 (年)

$\lambda_d$  =  $^{238}\text{U}$  蛻變常數

$$= 1.55123 \times 10^{-10} \text{ ( /年 ) (Steiger and Jager, 1977)}$$

$T_{\text{std}}$  = 標準岩樣年代 (年)

$$= 6.85 \times 10^{-17} \text{ ( /年 ) (Fleischer and Price, 1964)}$$

$\xi$  = Zeta 校正值

$\rho_s$  = 樣本自發核飛跡密度 (核飛跡數/釐米<sup>2</sup>)

$\rho_i$  = 樣本誘發核飛跡密度 (核飛跡數/釐米<sup>2</sup>)

$R_s$  = 可溶蝕的自發核飛跡長度 (微米)

$R_i$  = 可溶蝕的誘發核飛跡長度 (微米)

$G$  = 幾何因子

本文採用  $\xi$  (NBS-612) =  $340 \pm 12$  ( $1\sigma$ ) (Liu et al., 2000)

實驗步驟如下：

- (1) 由圖 2-2 的分礦方法，將鋯石磷灰石分別挑出。
- (2) 膠埋 (mounting)

磷灰石是以環氧樹脂 (epoxide resin) 與硬化劑 (hardener) 以 5:1 比例混合的混合物來膠埋，在載玻片中間畫個圓，將磷灰石平均散布其中，再將攪拌均勻的混合物緩慢倒於其上，等待 8 至 10 小時使其硬化後，取出將兩面以砂紙磨平，有礦物的那一面以 800 篩目的碳化矽砂紙研磨至大部分顆粒皆出露。

(3) 拋光 (polishing)。

以 6 微米、3 微米、1 微米與 0.3 微米的鑽石膏依序在 Texmet 絨布上拋光，最後以 0.05 微米的鋼玉粉在 Metcloth 絨布上拋光。

(4) 溶蝕 (etching)。

拋光完成的樣本，在室溫 (27°C) 下放入裝有 4%  $\text{HNO}_3$  的燒杯中，搖晃 30 秒進行溶蝕，溶蝕條件參考 Saini et al.(1978)。

(5) 將溶蝕好的樣本密合上外部檢測材料(雲母貼片)，與標準玻璃 NBS-612 一起送至國立清華大學原子反應器組照射熱中子。核子反應爐照射熱中子與計數核飛跡。

(6) 待輻射冷卻之後，將外部檢測材料雲母貼片以 48% 的 HF 溶蝕 15 分鐘 (Price and Walker, 2009)，以得到誘發性核飛跡。

(7) 溶蝕完成之後同時計數自發核飛跡數目與誘發核飛跡數目。

詳細分析步驟條件精確度及準確度估計請參閱鍾靈 (2006)。



## 第三章 分析結果

### 3.1 化學分析資料結果

#### 3.1.1 明多洛島火成岩主要元素分析結果

明多洛島岩石樣本的全岩主要元素含量與灼失量如附錄一之表格，採樣地點見圖 2-1。

由灼失量大小可以知道樣品受風化影響之大小，除了樣本 Min14C 與樣本 Min37B 灼失量較大（各是 9%wt 與 17%wt）受風化作用影響較大之外，其它樣本灼失量皆小於 5%wt。

將其中的火成岩樣本，依據 Le Maitre et al. (1989) 全鹼值對二氧化矽作圖，如圖 3-1，在 Amnay Ophiolite 上之火成岩樣本（Min7A、Min10A），分布在基性的範圍，Mangyan Ophiolite 上之火成岩樣本（Min33A、Min37C），亦分布在基性的範圍。

另外，將明多洛島角閃岩、深成岩以及流紋岩樣本依據 Le Maitre et al. (1989) 全鹼值對二氧化矽作圖，如圖 3-2，則角閃岩位於基性範圍，深成岩則落於中酸性至酸性範圍，流紋岩樣本分部於酸性範圍。

由主要元素對二氧化矽作圖中（圖 3-3），可知岩漿是否受結晶分化作用所控制。以鐵鎂礦物所控制的元素（ $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ ）與  $\text{SiO}_2$  的關係，並非均呈現明顯的負相關，表是岩漿活動非由結晶分異作用控制。

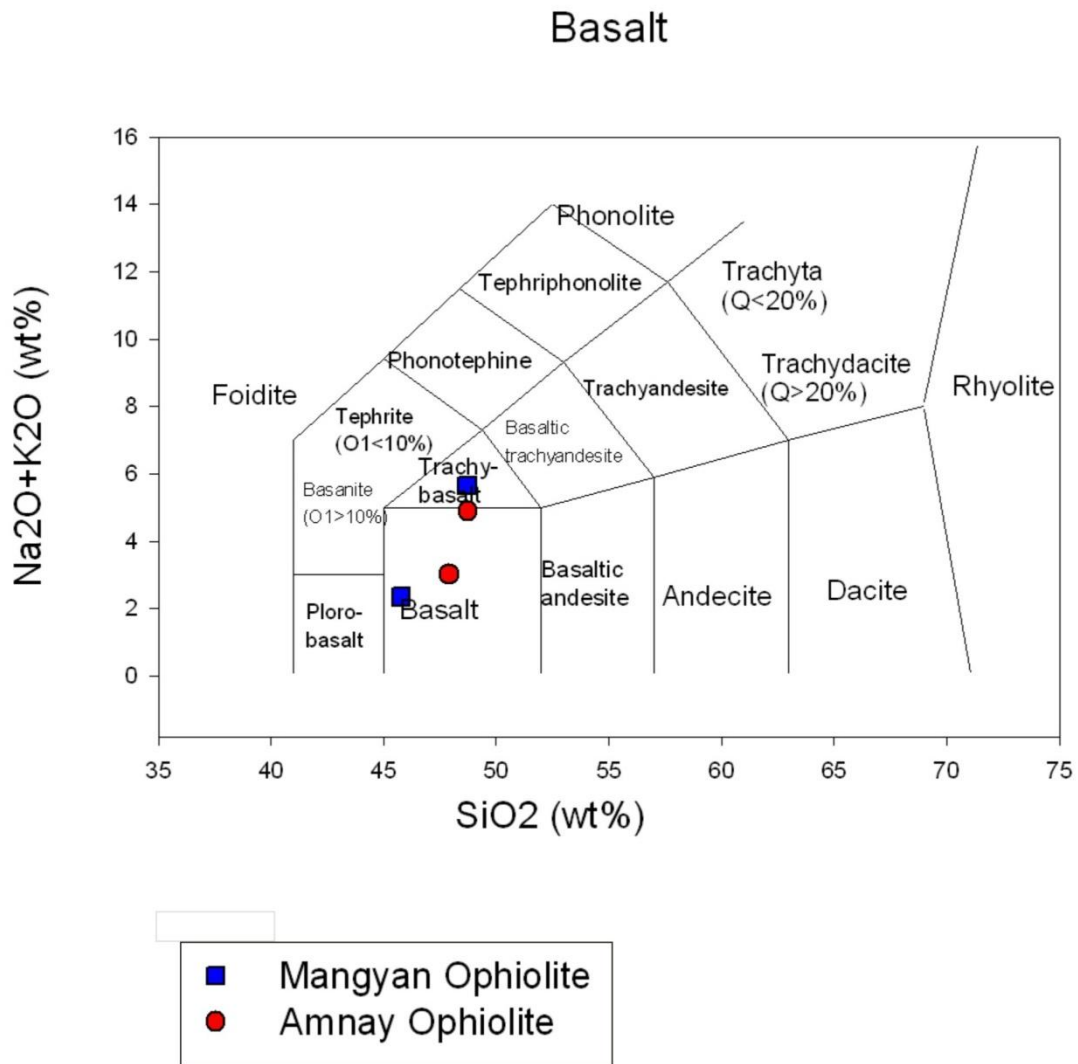


圖 3-1 明多洛島火成岩全鹼值對二氧化矽做圖。圓形圖例為 Amnay Ophiolite 上之玄武岩樣本，方形圖例為 Mangyan Ophiolite 上之玄武岩樣本。此圖岩性分類範圍依據 Le Maitre et al.(1989)。

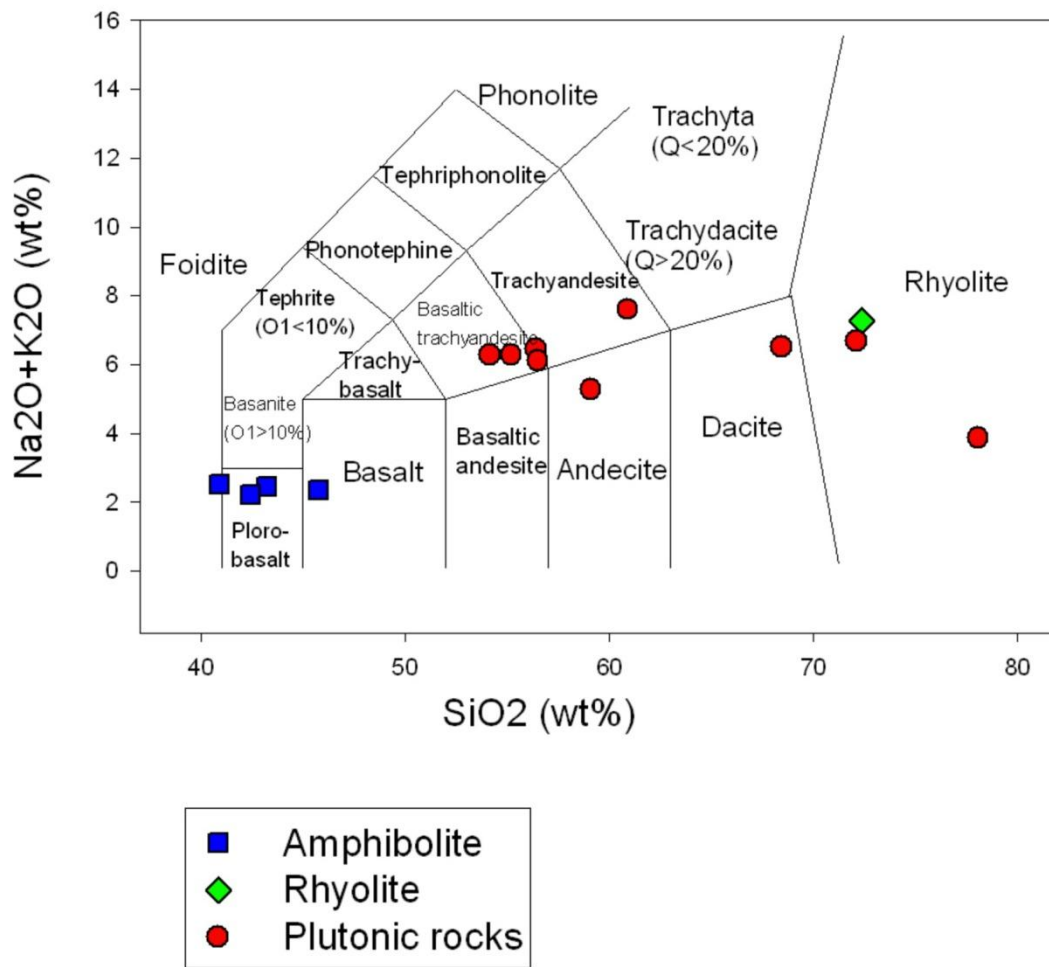


圖 3-2 明多洛島火成岩全鹼值對二氧化矽做圖。方形圖例為角閃岩樣本，菱形圖例為流紋岩樣本，圓形圖例為深成岩樣本。此圖岩性分類範圍依據 Le Maitre et al.(1989)。

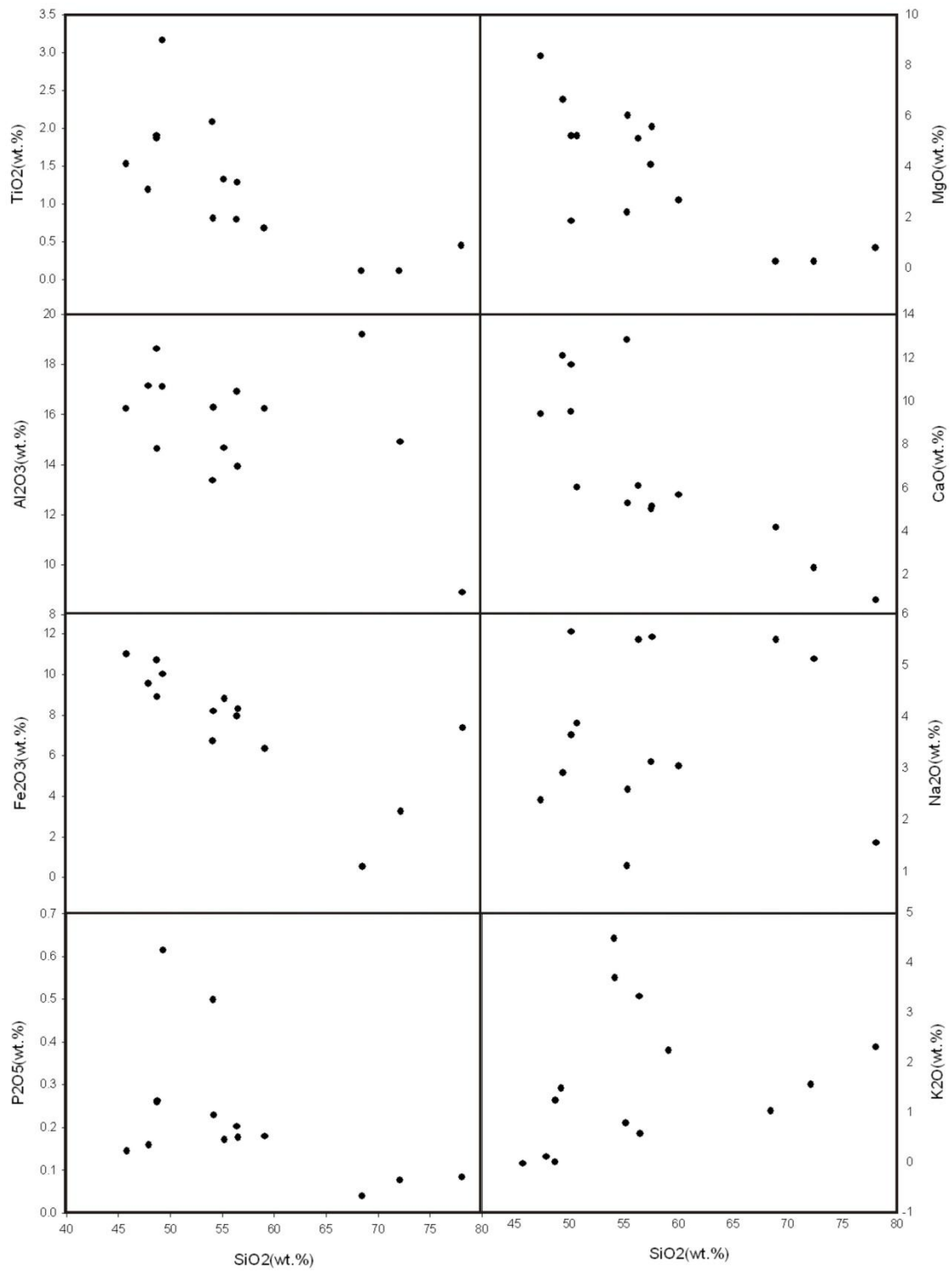


圖 3-3 明多洛島火成岩之主要元素對二氧化矽作圖。

### 3.1.2 明多洛島微量元素分析結果

明多洛島兩條蛇綠岩帶之玄武岩樣本，畫在火成岩三角分類圖中(圖 3-4)，可以看出無論是 Amnay Ophiolite 或是 Mangyan Ophiolite 上的玄武岩，大致上都是位於 E-type MORB 上的，只有 Min37C 位於 N-type MORB 和 E-type MORB 之交界處；將明多洛島之深成岩、流紋岩、角閃岩、沉積岩以及變質岩畫在火成岩三角分類圖中(圖 3-5)，可以看出角閃岩樣本大至上位於 N-type MORB 的範圍，而其他深成岩、流紋岩、沉積岩以及變質岩樣本，則落在島弧岩漿特性的範圍之內。

將明多洛島火成岩微量元素對 MORB 標準化作蛛網圖，圖 3-6A、a 為 Amnay Ophiolite 玄武岩樣本；圖 3-6B 和 b 為明多洛島中部玄武岩之樣本；圖 3-6C 和 c 為 Mindoro Metamorphic 中的變質火成岩樣本；圖 3-6D 和 d 為 Mindoro Metamorphic 中的變質流紋岩樣本；E 和 e 為西北部玄武岩之樣本。

Amnay Ophiolite 與 Mangyan Ophiolite 中的玄武岩樣本對 MORB 標準化的蛛網圖(圖 3-6A)，其中不相容性元素(incompatible elements)與 MORB 相近且平行，且由火成岩 Th-Hf-Ta 三角分類圖(圖 3-4)，可以看出標本除了 Min37C 屬於 N-type MORB 之外，其餘樣本皆屬於 E-type MORB 之範圍內，可以說明此處之玄武岩為中洋脊玄武岩(MORB)之來源，亦表示此玄武岩之來源為海洋板塊。

明多洛島變質岩區之火成岩樣本對 MORB 標準化的蛛網圖(圖 3-6C)，整體而言具有大離子岩石圈元素(large ion lithosphere element, LILE; Rb、Ba)富集，與高場力鍵結元素(high field strength element, Ta、Nb、Ti)虧損的現象。大離子岩石圈元素容易受到液相岩漿或蝕變的影響，導致這些元素的富集或虧損，但是由隕石標準化稀土元素分布圖中(圖 3-6c)，並無鈰元素虧損現象，因此此區火成岩標本不受海水蝕變之影響，故其富集現象應與隱沒帶岩漿作用有關。相

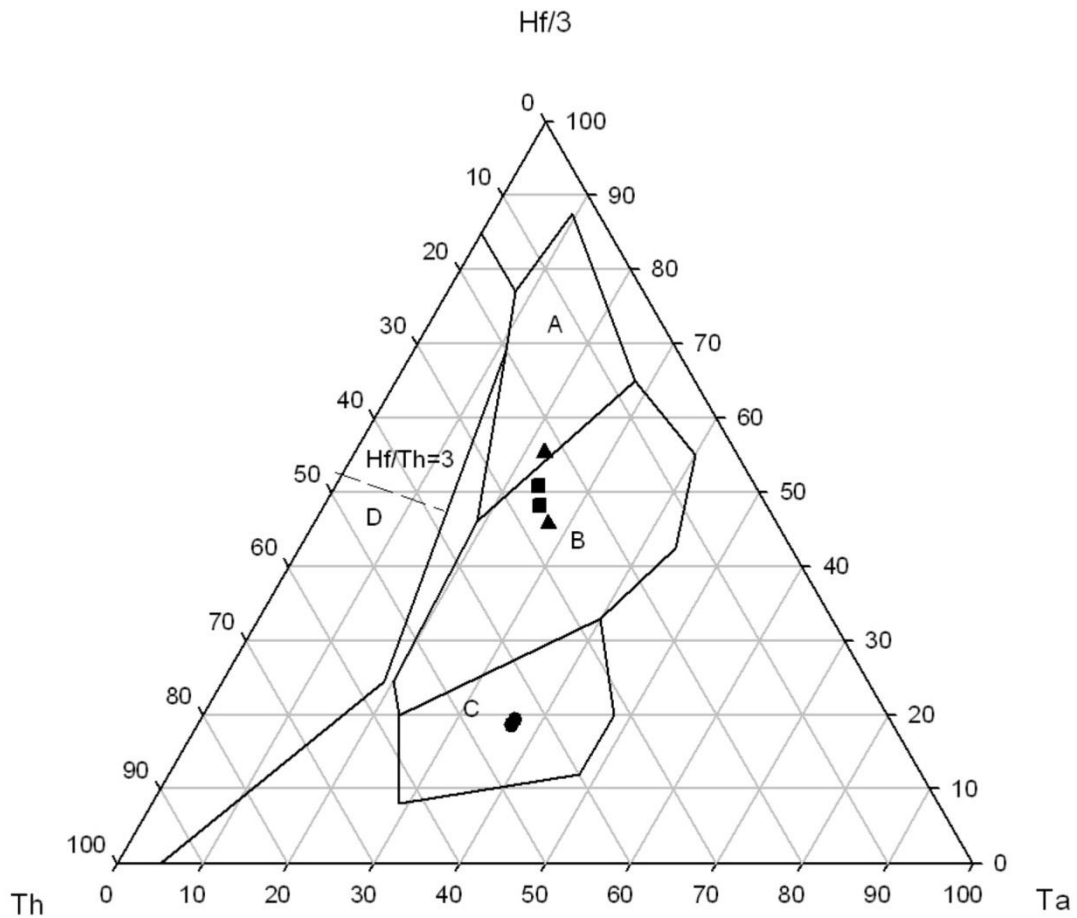
對於高遷移性的大離子岩石圈元素，高場力鍵結元素不易受液體影響，他們的濃度受控於源區的化學性質及熔融的過程，島弧環境的火山岩和其他構造環境的火山岩最大的區別，即是高場力鍵結元素虧損之特徵，因此此處的變質火成岩，其來源應為島弧岩漿。

明多洛島西北角之火成岩樣本蛛網圖（圖 3-6E），則呈現各元素富集的洋島玄武岩特性，由隕石標準化稀土元素分布圖中（圖 3-6e），樣本具有輕稀土元素富集現象，因此此區之火成岩，具有洋島玄武岩之特徵。

圖 3-7 為沉積岩、角閃岩以及變質岩的蛛網圖與稀土元素圖表，其中沉積岩及變質岩樣本具有高場力鍵結元素虧損之特徵，且具有輕稀土元素富集現象，並有 Eu 負異常之現象，因此樣本具有島弧岩漿特性；而角閃岩樣本具有輕稀土元素虧損的現象，以及在圖 3-5 三角圖中位於 N-type MORB 的範圍，具有 N-type MORB 的特性。



### Th-Hf-Ta discrimination diagram



- |  |  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>● 12A1, 12D</li> <li>■ 7A, 10A</li> <li>▲ 33A, 37C</li> </ul> | <p>A: N-type MORB<br/>                 B: E-type MORB and within-plate tholeiites<br/>                 C: alkaline within-plate basalts<br/>                 D: volcanic-arc basalts<br/>                 Hf/Th&gt;3: island-arc tholeiites<br/>                 Hf/Th&lt;3: calc-alkaline basalts</p> |
|--|--|

圖 3-4 火成岩 Th-Hf-Ta 三角分類圖。方形圖例為 Amnay Ophiolite 上之玄武岩樣本，三角形圖例為 Mangyan Ophiolite 上之玄武岩樣本，圓形圖例為西北部具有 OIB 特性之火成岩樣本。

Th-Hf-Ta discrimination diagram

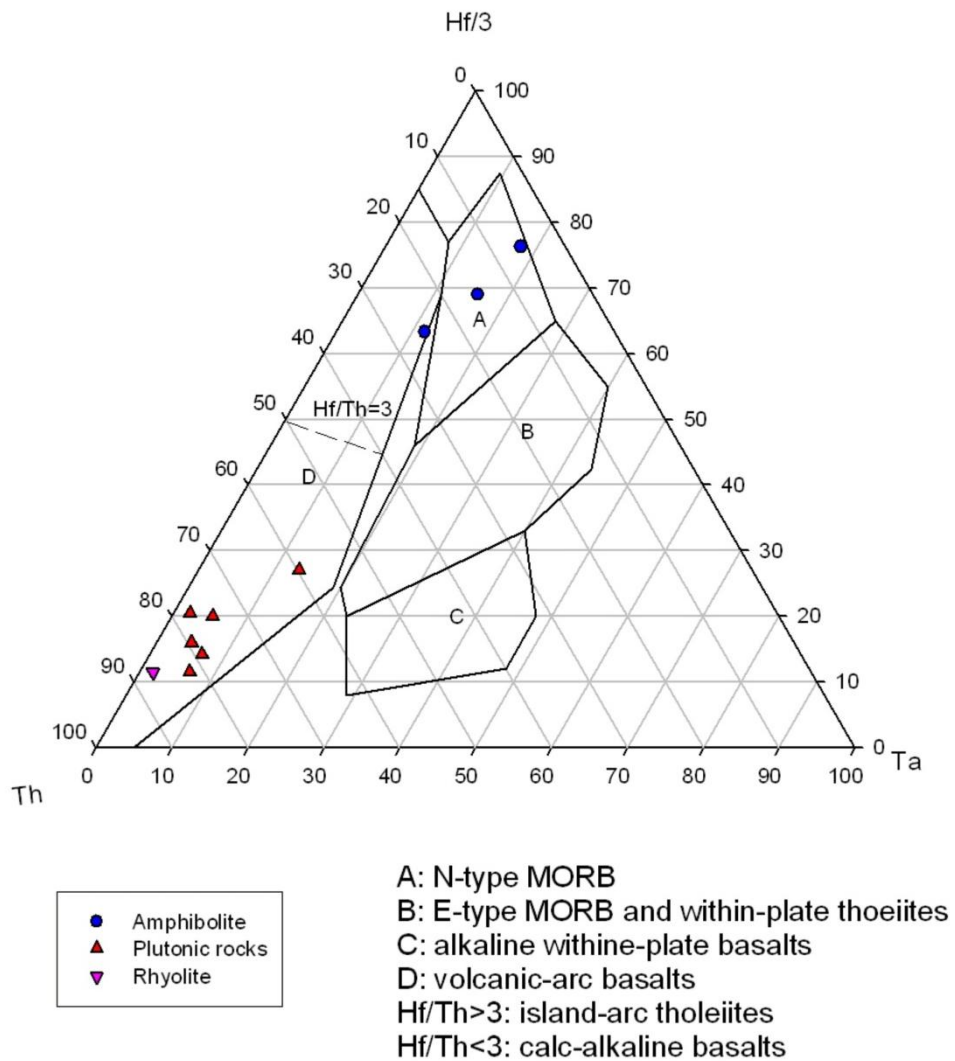


圖 3-5 火成岩 Th-Hf-Ta 三角分類圖。圓形圖例為角閃岩樣本，正三角形圖例為深成岩樣本，倒三角形圖例為流紋岩樣本。



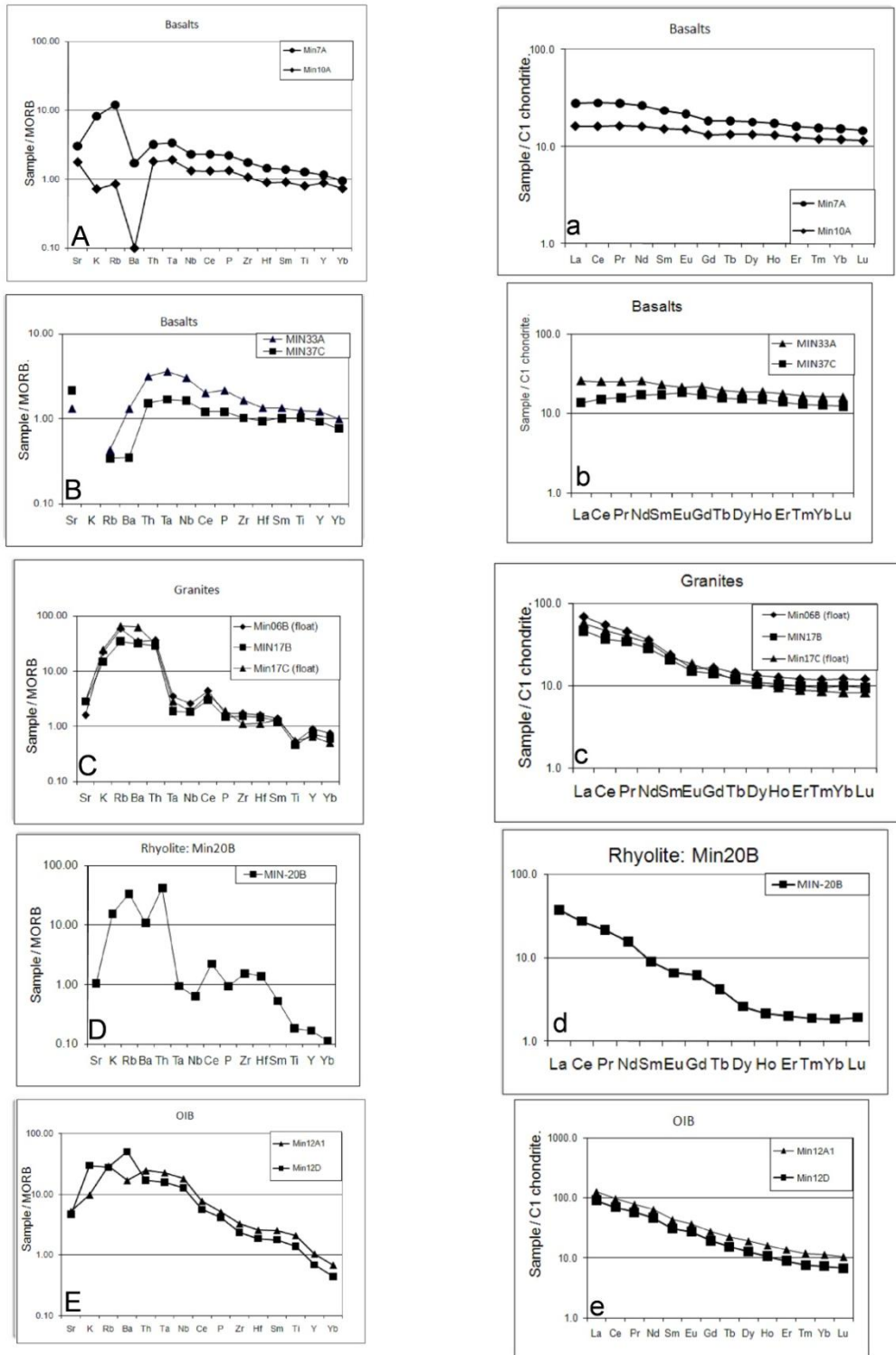


圖 3-6 左列為岩石樣本對 MORB 標準化之蛛網圖。原始地幔值參考(Pearce, 1983)。

右列為岩樣本之隕石標準化稀土元素分布圖。C1 chondrite 值參考(Boynton,

1984)。

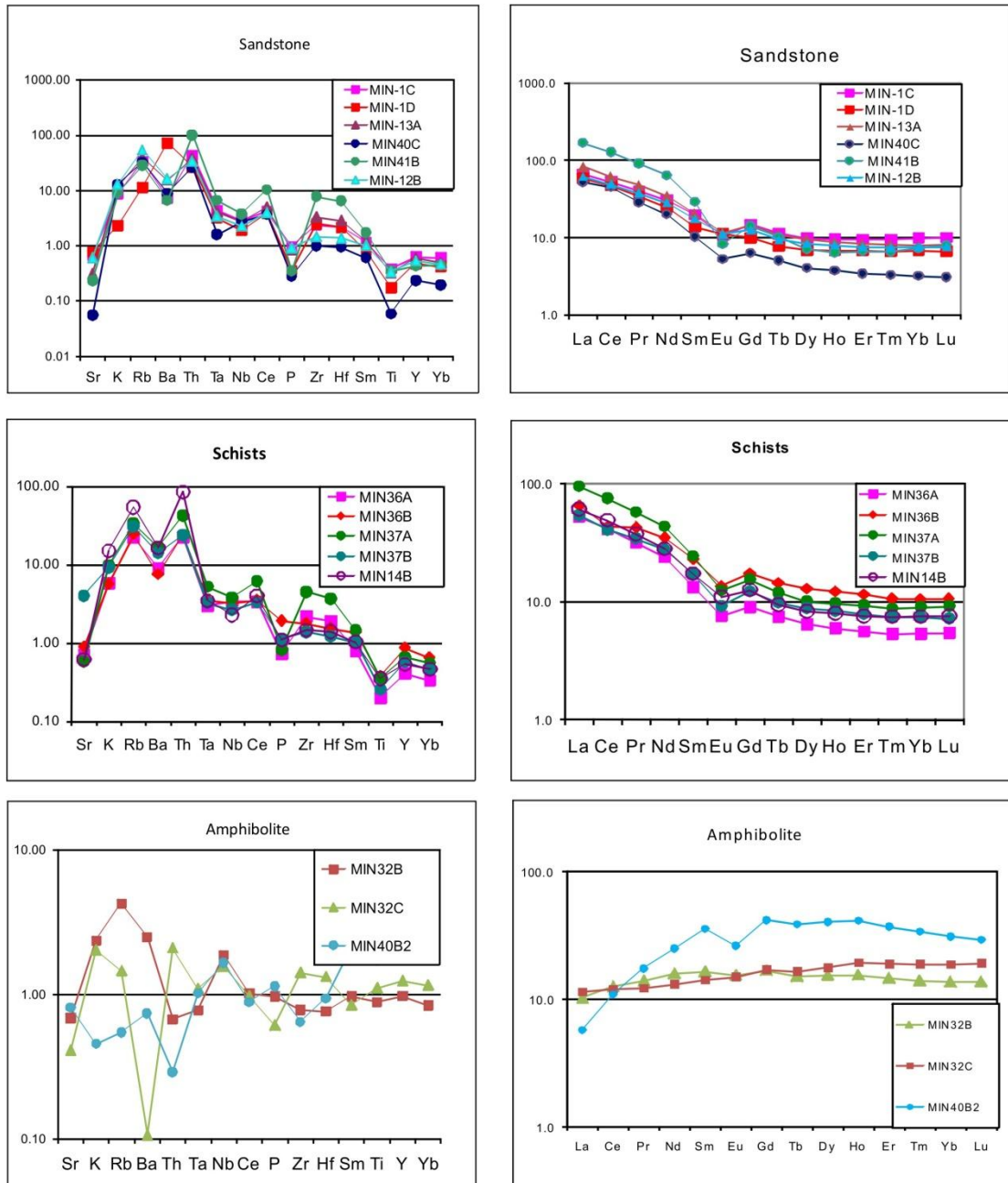


圖 3-7 左列為岩石樣本對 MORB 標準化之蛛網圖。原始地幔值參考(Pearce, 1983)。右列為岩樣本之隕石標準化稀土元素分布圖。C1 chondrite 值參考(Boynton, 1984)。

## 3.2 定年結果

### 3.2.1 鈾鉛定年結果

樣本 Min6A 採樣自 Pagbahan 河流沉積物，此河流域包含變質岩帶 (Mindoro Metamorphics) 和 Lasala Formation 沉積岩帶，沉積物具有多種來源，因此由年代機率分布圖中可以看出數個峰值 (圖 3-8)，藉此可以猜測此流域岩石可能的來源年代，其中在 250~260 Ma 有一個明顯高峰值。

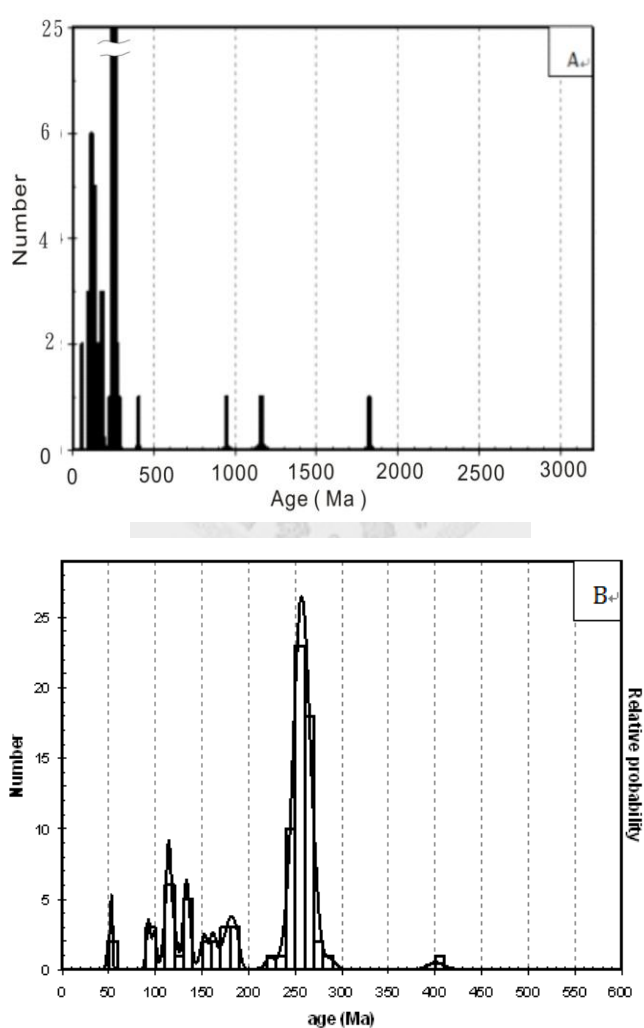


圖 3-8 Min6A 在 Pagbahan 河流河砂樣本之鋁石鈾鉛定年年代機率分布圖。(A) 全部樣本之年代分布。(B) 600 Ma 以來之年代分布。可以看到在 250~260 Ma 有一個高峰值。

### 3.2.2 氬氬定年法

#### 3.2.2.1 單顆雷射氬氬定年法 Min 6B :

Min6B 角閃石樣本之單顆雷射氬氬定年代，經由反等時線圖校正所得到的截距年代為  $256 \pm 5$  Ma (圖 3-9)， $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  的初始值為  $319 \pm 42$ ，正常大氣比值在其誤差範圍內，應無超氬的成分存在，因此此年代應具有地質意義。由於角閃石氬氬定年之封存溫度大約是五百度左右，因此在此只受到低度變質作用之閃長岩樣本 Min6B 所測的年代  $256 \pm 5$  Ma，可做為岩漿冷卻至氬氬定年角閃石封存溫度之年代。

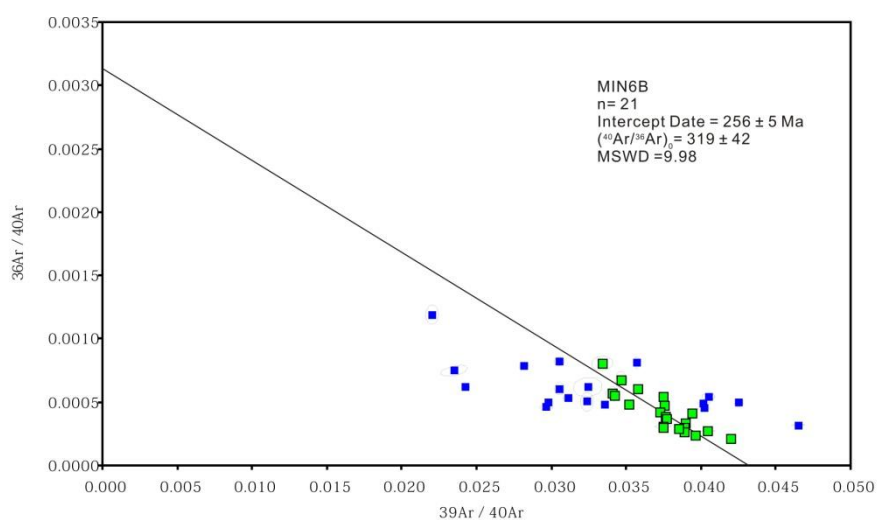


圖 3-9、Min6B 閃長岩之角閃石單顆雷射氬氬定年。反等時線校正後年代為  $256 \pm 5$  Ma。

### 3.2.2.2 階段加溫氬氬定年法：

樣本 Min32B 角閃石階段加溫氬氬定年，所得的年代譜（圖 3-10），低溫階段氬氣可能有部分流失現象，年代大略規律的分布，隨著實驗加溫的過程，大約自第六溫階（925°C）之後，形成一個略不平坦的高原，第十一個溫階 1200°C 時表徵年代突然升高隨後下降，此樣本  $^{39}\text{Ar}$  之高原年代為  $28.95 \pm 3.43\text{Ma}$ （925°C~1500°C），經反等時線回歸得到的  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  截距比值為  $308.4 \pm 11.8$ ，正常大氣成分比值在其誤差範圍中，年代是可以接受的。 $28.95 \pm 3.43\text{Ma}$  為角閃石冷卻至其封存溫度之年代。

樣本 Min40B1 角閃石階段加溫氬氬定年，所得的年代譜（圖 3-11），第一個溫階有超氬（excess argon）現象，自第六個溫階（950°C）開始顯示為非常規則之年代分布，第六至十四溫階（950°C~1300°C）之表徵年代（apparent age）皆在兩個誤差範圍之內，呈現相當平整之年代分布，此樣本  $^{39}\text{Ar}$  之高原年代為  $28.85 \pm 0.74\text{Ma}$ ，此階段  $^{39}\text{Ar}$  的釋出量大於  $^{39}\text{Ar}$  量的 90%，得到反等時線  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  截距比值為  $305.2 \pm 43.1$ ，正常大氣成分比值在其誤差範圍中。 $28.85 \pm 0.74\text{Ma}$  代表角閃石冷卻至其封存溫度之年代。

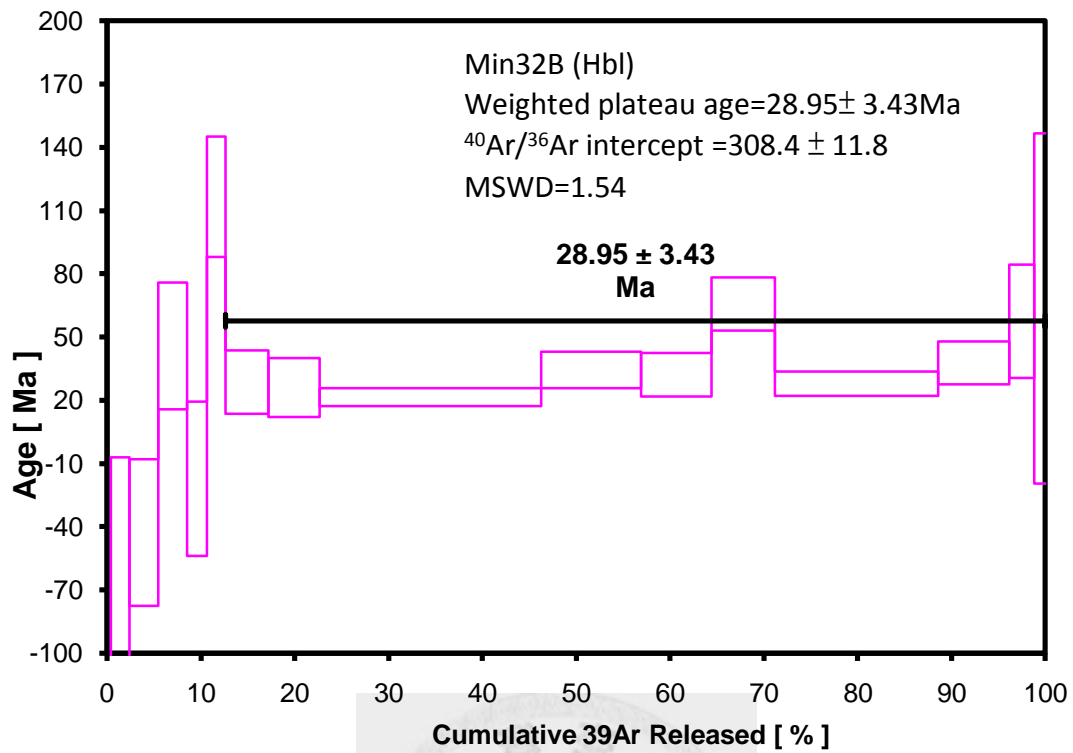


圖 3-10 Min32B 角閃岩之角閃石階段定年，坦原年代為  $29.0 \pm 3.4$  Ma。

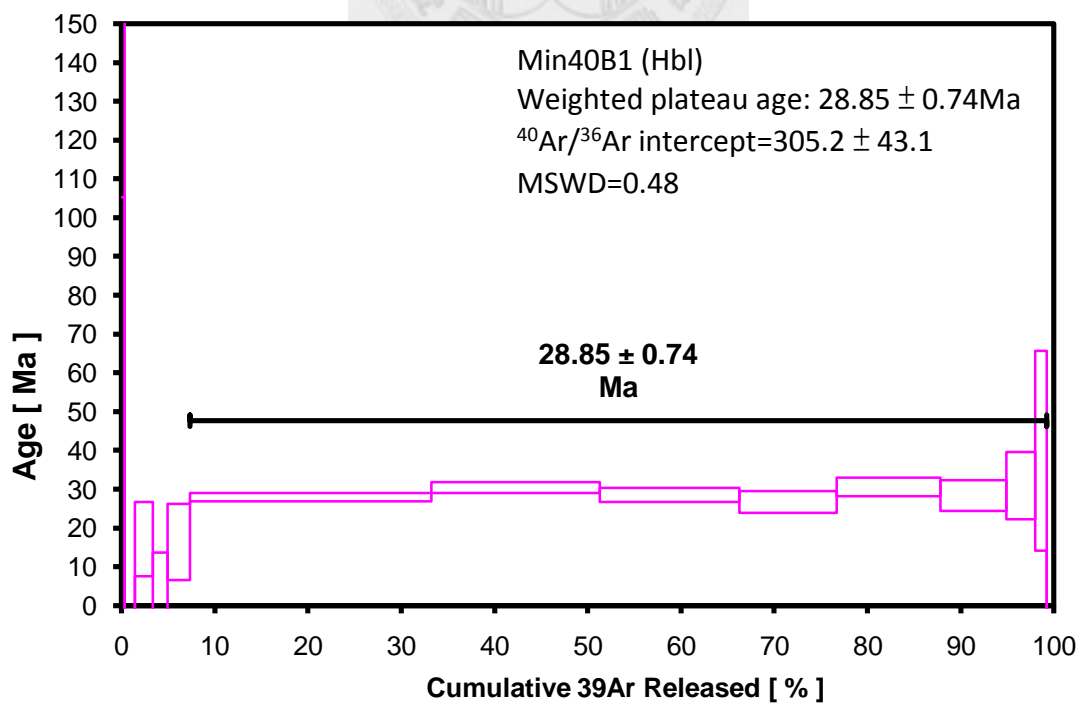


圖 3-11 Min40B1 角閃岩之角閃石階段定年，坦原年代為  $28.9 \pm 0.7$  Ma。

### 3.2.3 磷灰石核飛跡定年法

本研究中的數據是以 BINOMFIT 與 ZETAAGE 程式來進行計算(Brandon, 1992, 1996)，分析結果見圖 3-12、圖 3-13，圖 3-12、圖 3-13 為樣本磷灰石礦物年代機率分布直方與曲線圖 (Probability-Density Plot) 及放射狀年代分佈圖 (Radial Plot) (Brandon, 1996)。

年代機率分布直方與曲線圖之橫軸代表年代，縱軸代表年代機率。圖中粉紅色的直條圖與紅色曲線皆表示樣本之年代機率分布，直條圖的總面積以標準化至 100%，故每一直條所對應的 Y 軸數值代表此年代 (X 軸所對應之年代) 在樣本中所佔的百分率。

放射狀年代分布圖為 Galbraith (1988) 所發展出來之核飛跡年代結果表示圖。由於年代機率分布圖是把所有單顆礦物之年代統整於一個曲線圖內，因此無法辨別出單顆礦物的年代資訊，許多單顆礦物的個別訊息會被隱藏在這種表示方法之下，且從年代機率分布圖上無法看出單顆礦物所得年代之標準差，故 Galbraith (1988) 所發展的放射狀年代分布圖，彌補年代機率分布圖之不足，此圖 X 軸表示精確度 (愈往 X 軸右方標準差愈小，故精度愈高)；左方 Y 軸表示經標準化之變異數、右方 Y 軸表示年代。任一礦物之年代是由左方 Y 軸所代表之年帶來表示。可根據圖上資料點的離散情況來分辨樣本中的礦物年代是否有集中於某一年代的趨勢。此種圖示能同時表示所分析礦物的年代與精確度。

樣本 Min12B 採自明多洛島西北部之變質砂岩，其磷灰石核飛跡的單顆粒年代分布範圍為 0.5~ 64.4 Ma，總和年代為  $0.1 \pm 0.0$  Ma，中央年代為  $0.1 \pm 0.0$  Ma，卡方年代為  $0.1 \pm 0.0$  Ma (圖 3-12)。由 BINOFIT 程式計算出兩個可能的年代群分別為  $0.6 \pm 0.1$  Ma (70.1%) 與  $3.0 \pm 0.4$  Ma (29.9%)，其中最年輕之年代  $0.6 \pm 0.1$  Ma

的礦物數目所佔比率為 70.1%，因此本文以此年代來代表此樣本磷灰石核飛跡所經歷最後一次熱事件之年齡。

樣本 Min20B 採自明多洛島北方變質流紋岩樣本，其磷灰石核飛跡的單顆粒年代分布範圍為 1.6~ 77.1 Ma，總和年代為  $7.1 \pm 0.8$  Ma，中央年代為  $6.5 \pm 1.6$  Ma，卡方年代為  $5.1 \pm 0.7$  Ma（圖 3-13）。三個年代值相近，單顆粒的年代分布呈現對稱分布。本文以卡方年代  $5.1 \pm 0.7$  Ma 來代表本樣本所經歷的最後一次熱事件年齡。在 65 Ma 左右的年齡峰值，則表示未被癒合之顆粒年齡。





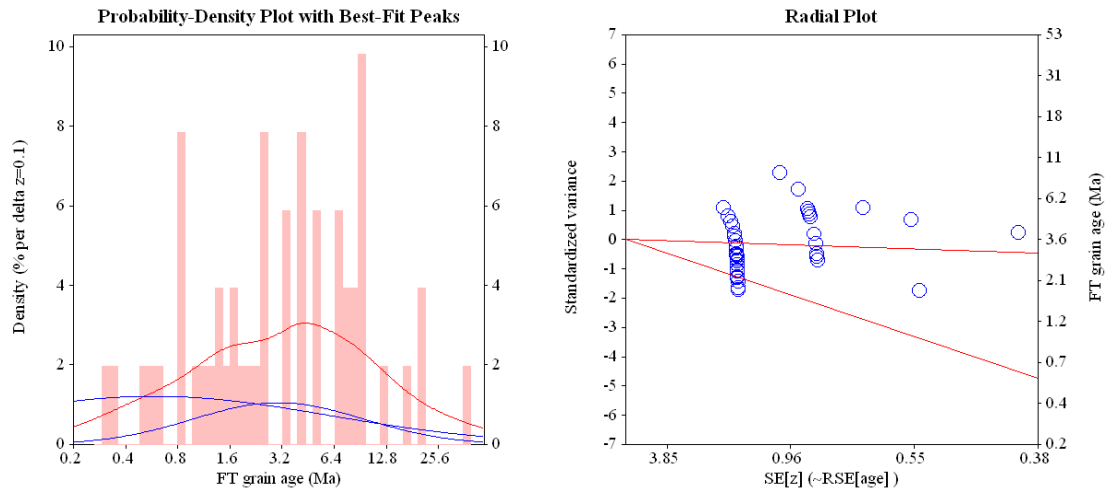


圖 3-12 明多洛島西北部樣本 Min12B 之磷灰石礦物年代機率分布直方與曲線圖及放射狀年代分佈圖。

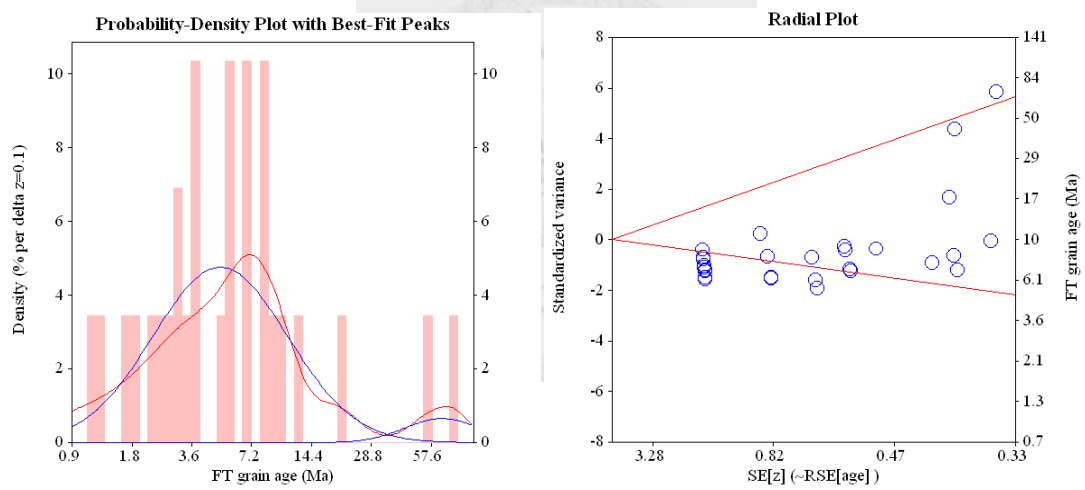


圖 3-13 明多洛島西北部樣本 Min20B 之磷灰石礦物年代機率分布直方與曲線圖及放射狀年代分佈圖。

## 第四章 綜合討論

### 4.1 明多洛島地球化學資料討論

在 Amnay Ophiolite 以及 Mangyan Ophiolite 上之玄武岩樣本，具有中洋脊玄武岩 E-MORB 之訊號，而 Mangyan Ophiolite 上之角閃岩，具有中洋脊玄武岩 N-MORB 之訊號，Yumul et al.(2009b)認為 Amnay Ophiolite 為巴拉望陸塊與菲律賓活動帶之縫合帶，此蛇綠岩套來自南中國海，而 Mangyan Ophiolite 則為來自菲律賓活動帶之縫合帶。由本次的地球化學資料以及蛛網圖，明多洛島西北部之變質岩帶之標本，皆具有島弧岩漿之地球化學特徵，Yumul et al.(2009a)認為此島弧岩漿作用與菲律賓活動帶有關，因為巴拉望陸塊主要為大陸板塊之特徵。Knittel et al.(2010)將本島島弧岩漿特性之樣本，與海南島之火成岩樣本比較，具有類似的島弧岩漿特徵，因此此變質岩帶之來源，亦有可能為大陸東南方之來源。

### 4.2 由定年資料探討明多洛島之構造演化

Min17B 變質的花崗閃長岩之鋯石鈾鉛定年結果，表示岩石岩漿生成年代  $251 \pm 2.6$  Ma，而沉積物之鋯石鈾鉛定年也可以看得出，在流域範圍之岩層，有一個大約在二疊紀晚期 247~279 Ma 左右年代之高峰(Knittel et al., 2010)；而本研究在 Pagbahan 河流下游的閃長岩樣本 Min6B，其角閃石氩氩定年，所得的年代為  $259 \pm 5$  Ma，由於變質度低，因此此年代應同樣為此角閃岩之生成年代，且此樣本之化學特性與鋯石鈾鉛定年之花崗閃長岩樣本的化學性質相近，可能為相同來源。綜合以上資料，明多洛島西北部在大約 250 Ma 有一次岩漿事件。近年來大陸東南方海南島火成岩之鋯石鈾鉛定年結果，亦指出了 262-267 Ma 之岩漿來源年代 (Li et al., 2006)，而菲律賓活動帶上並沒有這麼老的岩漿紀錄，並且地球化學蛛網圖以及花崗岩分類圖，指示 Min17B 樣本與海南島樣本具有類似的島弧岩

漿特性，因此推測此時期之岩漿活動應該與大陸華南的火成活動有關(Knittel et al., 2010)。

Knittel et al. (2010) 以鋯石鈾鉛定年所做出的閃長岩年代為  $251.0 \pm 1.6$  Ma，且此火成岩與海南島之火成岩(Li et al., 2006)具有相似特性(圖 4-1)，故推測此變質岩基層之來源，較可能來自中國大陸東南方來的巴拉望陸塊。

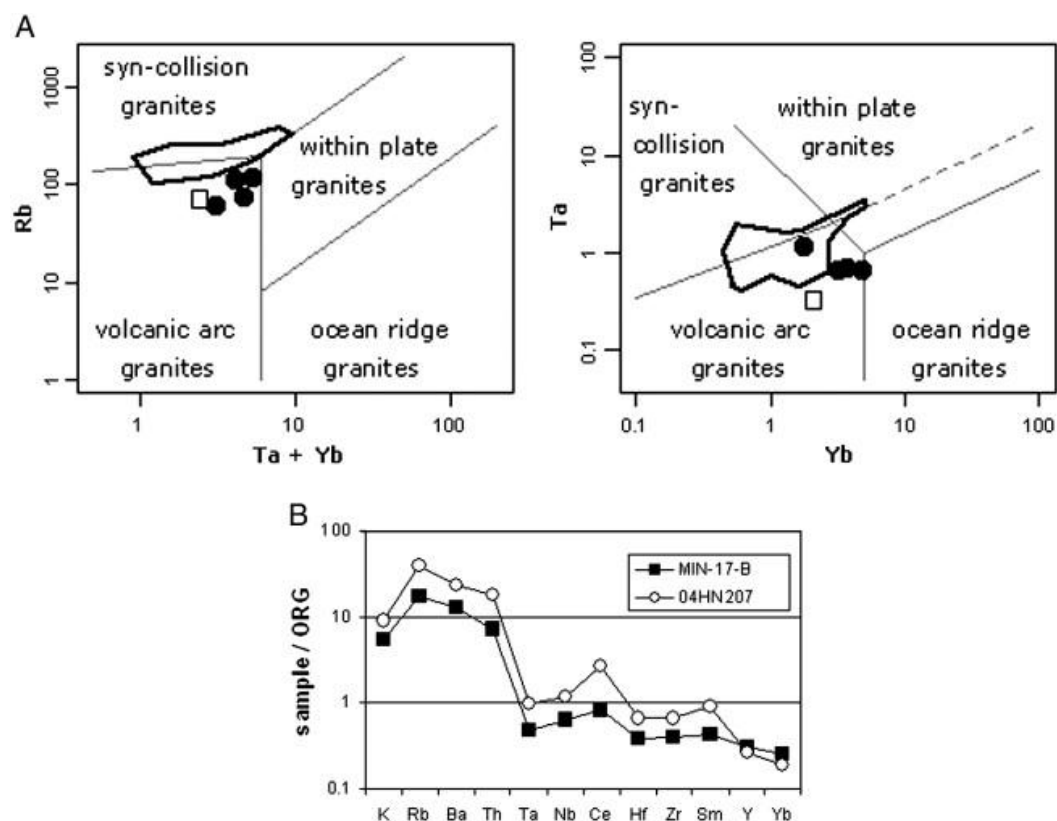


圖 4-1 Min17B 與海南島樣本之花崗岩分類圖及蛛網圖比較。(Knittel et al., 2010)

明多洛島北部流紋岩樣本鈾鉛定年所得結果為  $82.9 \pm 0.9$  Ma，而明多洛島北部河砂鋯石鈾鉛年代也有此年代紀錄(Knittel, 2011)，因此在 83 Ma 左右明多洛島有一次岩漿活動。在菲律賓活動帶上目前並沒有這個時期的岩漿活動紀錄；大陸華南地區的燕山期火成活動大約從 180 Ma 至 67 Ma (Zhou et al., 2006)，將 Min20B 與福建浙江之流紋岩樣本的 ASI v.s.  $Al_2O_3 / ([Na_2O] + [K_2O])$  圖可以看得出來(圖 4-2)，Min20B 位於福建浙江之流紋岩範圍內，ASI 與  $Al_2O_3 / ([Na_2O]$

+ [K<sub>2</sub>O]) 的值都很高，Chen et al.(2008)認為如此高的值，代表是在低壓的狀況下產生的岩漿，將此樣本 Min20B 之地化分析與楊小青（1989）澎湖花嶼流紋岩樣本的 REE 做比較，則看出此樣本之重稀土元素（HREE）明顯低於花嶼之流紋岩樣本（圖 4-3），暗示大量石榴子石為殘餘礦物，且此樣本沒有燕山期張裂型火成岩特殊的 Eu 負異常現象，因此本次岩漿活動事件應為區域性岩漿活動事件。

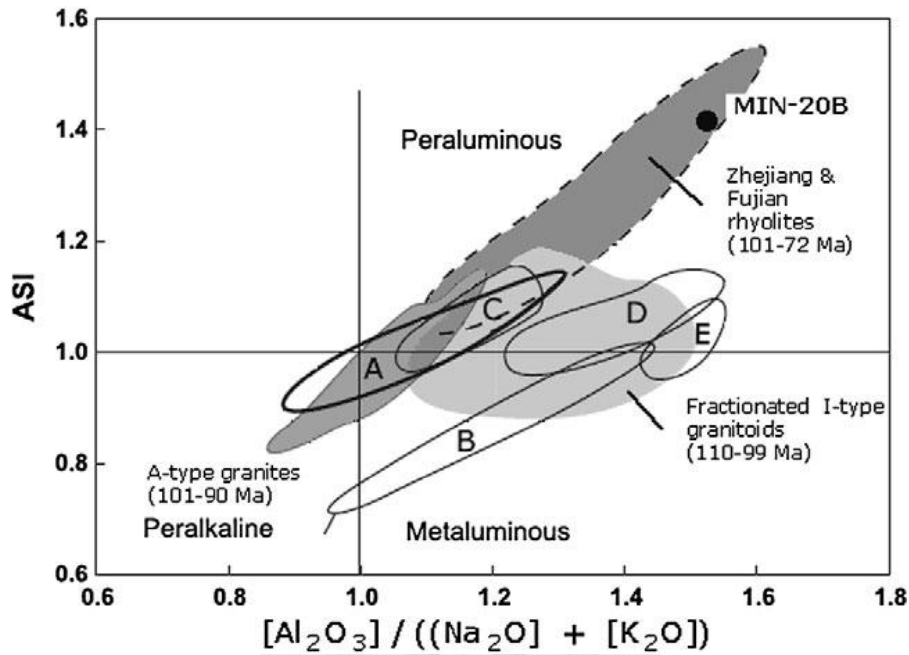


圖 4-2 ASI v.s.  $Al_2O_3/([Na_2O] + [K_2O])$ ，浙江福建流紋岩樣本區域範圍位於虛線框格內，樣本 Min20B 則位於此範圍右上角(Knittel, 2011)。ASI (Alumina saturation index):  $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ 。(Knittel, 2011)

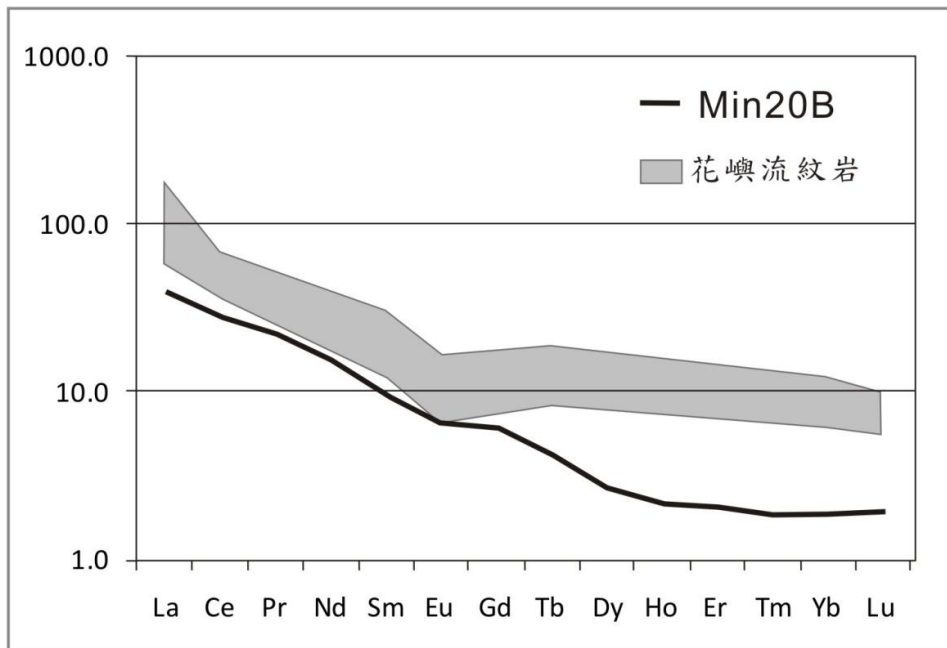


圖 4-3 樣本 Min20B 對花嶼流紋岩之 REE pattern，灰色區域為花嶼之樣本，黑色線條為樣本 Min20B。

在 Mangyan Ophiolite 上角閃岩之角閃石氬氫階段加溫定年，南北兩個樣本皆得到接近 29 Ma 的年代，此蛇綠岩套之沉積年代為白堊紀 (Hashimoto, 1981)，若是要到達角閃岩相變質度，至少要超過 500 °C，若以地溫梯度 25 °C/Km 計算，至少要深埋至地表下 20 Km~ 30 Km，角閃石氬氫定年的封存溫度大約也是在 500 °C，而此二樣本之角閃石氬氫定年年代較此蛇綠岩套系之沉積年代晚，因此推論此 29 Ma 氬氫年代為變質事件年代。

在菲律賓中部地區上至少有五次的碰撞事件，其中第四期之事件為白堊紀蛇綠岩套系 (Mangyan Ophiolite) 被疊置至明多洛島年代之事件 (Yumul et al., 2009a)。Yumul Jr et al. (2003) 認為此蛇綠岩套，是古老在菲律賓活動帶中部碰撞所造成的縫合帶。

南中國海板塊張裂的時期為 32 Ma 至 17 Ma (Encarnacion et al., 1995; Holloway, 1982)，Encarnacion et al. (1995) 在菲律賓巴拉望島之蛇綠岩套做的研究，

以氩氩定年定角閃岩中角閃石，得到接近 35 Ma 的年代，並認為此年代為碰撞發生最早期，海洋板塊隱沒所造成的（圖 4-4）。巴拉望陸塊與菲律賓活動帶碰撞的時間，前人研究則有不同說法，Yumul Jr et al.(2003)認為碰撞始於漸新世早期，結束於上新世；Queano et al.(2007)則認為碰撞發生於中新世晚期。

McCabe et al (1985)歸納前人研究資料，認為明多洛島西北部至中部的範圍，屬於巴拉望陸塊的一部分，是巴拉望陸塊與菲律賓活動帶之碰撞前緣，組成較為混雜，並且可以延伸至東南方 Panay 島之西部，而中部活動斷層以東為菲律賓活動帶的範圍。

Walia et al. (2011)在明多洛島東南方的 Panay 島之西北方，所做的火山角礫岩角閃石氩氩定年，亦得到一個接近 28Ma 之岩漿噴出年代。

因此本研究對 Mangyan Ophiolite 之角閃岩中角閃石氩氩定年所得到 29 Ma 年之年代，有可能是在菲律賓活動帶上所造成之碰撞事件(Queano et al., 2007; Yumul Jr et al., 2003)；或是明多洛島上巴拉望陸塊與菲律賓活動帶碰撞初期的事件。由本研究前述資料推論，西北方之明多洛陸塊來源，是與巴拉望陸塊同是大陸東南方之陸塊，而非來自菲律賓活動帶之來源，故而推論本次 29 Ma 碰撞事件應為巴拉望陸塊與菲律賓活動帶碰撞初期之事件。

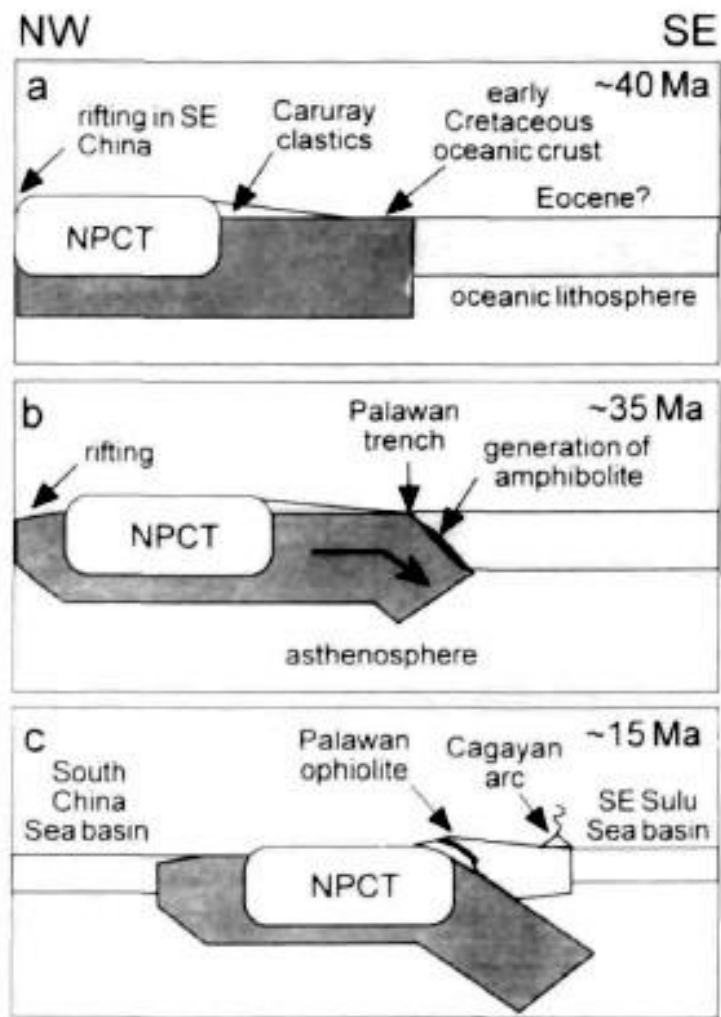


圖 4-4 巴拉望碰撞構造圖 (Encarnacion et al., 1995)。

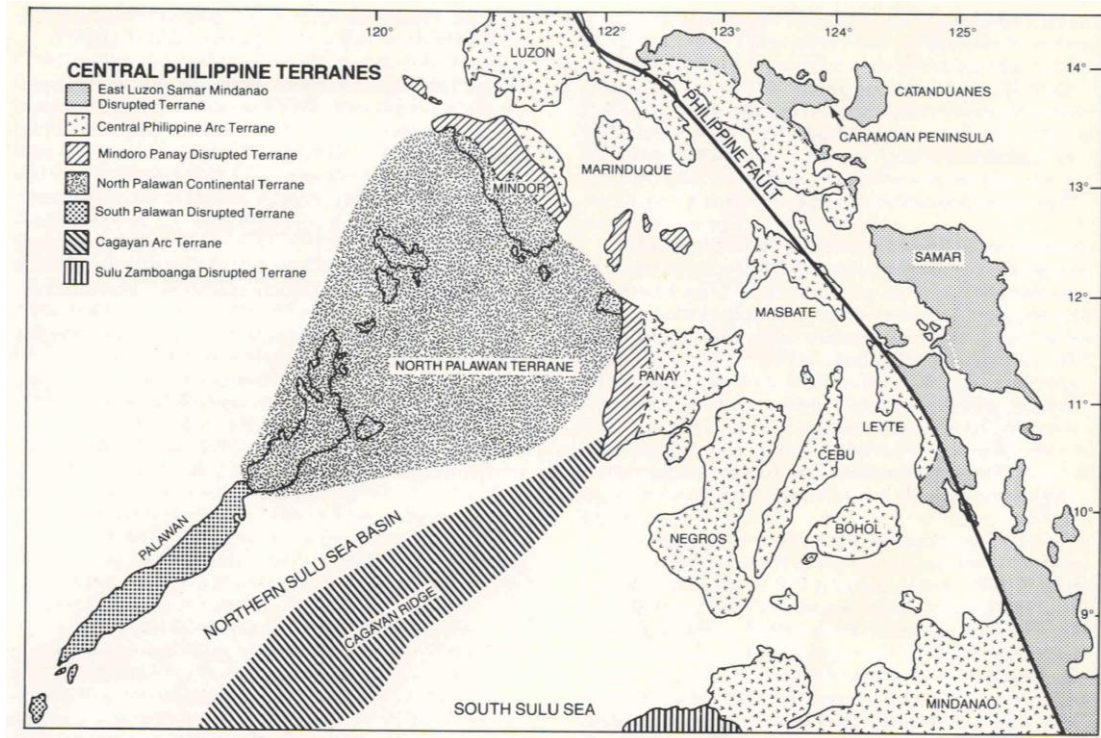
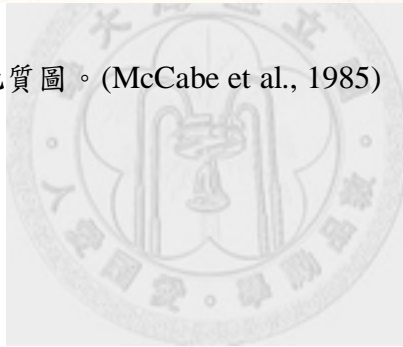


圖 4-5 菲律賓中部島嶼地質圖。(McCabe et al., 1985)





本研究流紋岩樣本 Min20B 的磷灰石核飛跡定年結果顯示，除了一個主要的 5.2 Ma 年代之外，還有一個繼承磷灰石 65 Ma 的年代，為一部分癒合 (partial annealing) 之樣本；此外，本樣本之鋁石鈾鉛定年為 83 Ma，磷灰石核飛跡定年之年代明顯晚於此流紋岩之生成年代，而巴拉望陸塊與菲律賓活動帶碰撞的時期於中新世末期(Lee and Lawver, 1995; Sarewitz and Karig, 1986a)，因此此樣本受碰撞造成的變質作用，在 5.2 Ma 有最後期的一次熱變質事件，其溫壓條件還不足以讓此樣本之磷灰石完全癒合。另一個位於此島西北角之變質砂岩 Min12A 的磷灰石核飛跡定年結果有 0.6 Ma 及 3.0 Ma 兩個峰值年代，然而本樣本之鋁石鈾鉛定年則顯示了自 70 Ma 至 2600 Ma 不等的來源資料，磷灰石核飛跡定年結果明顯年輕於鋁石鈾鉛定年結果，故此磷灰石核飛跡年代應與此島最後期抬升作用所造成的剝蝕作用有關，且至 0.6 Ma 仍持續抬升。

綜合蛇綠岩套上之角閃岩角閃石氬氬定年以及磷灰石核飛跡定年之結果，巴拉望陸塊與菲律賓活動帶碰撞初期大約可以回推到 29 Ma，至 0.6 Ma 左右明多洛島抬升剝蝕作用持續進行。

## 第五章 結論

本研究在明多洛島上的兩條縫合帶位置所採的樣本，經過地球化學分析，其資料顯示了其原始來源為中洋脊玄武岩之特徵，因此有可能為縫合帶，然而關於明多洛島西北部變質岩帶，岩石樣本呈現島弧岩漿之化學特徵，且由定年結果顯示，此區域的來源為大陸東南方陸塊，而非菲律賓活動帶之來源。

綜合本研究得到的年代結果，大致上有以下四個事件：

(1) 鋯石鈾鉛定年結果與閃長岩之角閃石氬氬定年結果，250Ma 左右之年代，為一次島弧岩漿作用，其來源為大陸東南方華南地區。

(2) 鋯石鈾鉛定年結果 83Ma 左右，此時期的島弧岩漿作用，為區域的火成作用。

(3) 角閃岩之角閃石氬氬定年 29Ma 左右，此年代為之熱變質作用，應為巴拉望陸塊與菲律賓活動帶碰撞初期之事件。

(4) 磷灰石核飛跡年代，指示了 5 Ma 與小於 5 Ma 的年代，為最後一期巴拉望陸塊與菲律賓活動帶碰撞之抬升剝蝕作用。

## 參考文獻

- 朱秋紅 (2005) 龜山島高美安山岩之岩漿成因。國立台灣大學地質科學研究所碩士論文，共 99 頁。
- 李寄嶠、蔡榮浩、何孝恒、楊燦堯、鍾孫霖和陳正宏 (1997) 應用 X 光螢光分析儀從事岩石樣品之定量分析 (I) 主要元素。中國地質學會八十六年年會暨學術研討會論文摘要，第 418-420 頁。
- 許瑞芳 (2000) 雲南高黎貢山剪切帶之熱定年學研究。國立台灣大學地質學研究所碩士論文，共 86 頁。
- 楊小青 (1989) 澎湖縣花嶼火山岩之地球化學與核飛跡定年研究。國立台灣大學地質學研究所碩士論文，共 116 頁。
- 鍾靈 (2006) 西藏東部嘉黎斷裂帶熱歷史之核飛跡定年證據及其大地構造之隱示。國立台灣大學地質科學研究所碩士論文，共 71 頁。
- Baard, J., Zijp, W., and Nolthenius, H., 1989, Nuclear data guide for reactor metrology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Boynton, W., 1984, Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies: Rare earth element geochemistry, p. 63-114.
- Brandon, M.T., 1992, Decomposition of fission-track grain-age distributions: American Journal of Science, v. 292, p. 535-535.
- Brandon, M.T., 1996, Probability density plot for fission-track grain-age samples: Radiation Measurements, v. 26, p. 663-676.
- Caagusan, N., 1966, Petrography of the metamorphic rocks of Northern Mindoro: Bull. Inst. Fil. Geol, v. 1, p. 22-46.
- Charvet, J., Lapierre, H., and Yu, Y., 1994, Geodynamic significance of the Mesozoic volcanism of southeastern China: Journal of Southeast Asian Earth Sciences, v. 9, p. 387-396.

- Chen, C., Lee, C., Lu, H., and Hsieh, P., 2008, Generation of Late Cretaceous silicic rocks in SE China: Age, major element and numerical simulation constraints: *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 31, p. 479-498.
- Encarnacion, J., Essene, E., Mukasa, S., and Hall, C., 1995, High-Pressure and-Temperature Subophiolitic Kyanite; Garnet Amphibolites Generated during Initiation of Mid-Tertiary Subduction, Palawan, Philippines: *Journal of Petrology*, v. 36, p. 1481.
- Farley, K., 2000, Helium diffusion from apatite: General behavior as illustrated by Durango fluorapatite: *Journal of Geophysical Research*, v. 105, p. 2903-2914.
- Faure, M., Marchadier, Y., and Rangin, C., 1989, Pre-Eocene synmetamorphic structure in the Mindoro-Romblon-Palawan area, west Philippines, and implications for the history of Southeast Asia: *Tectonics*, v. 8, p. 963-979.
- Fleischer, R., and Price, P., 1964, Decay constant for spontaneous fission of U238: *Phys. Rev.*, v. 133, p. 1363-1364.
- Fleischer, R., Price, P., and Walker, R., 1965, Ion explosion spike mechanism in formation of charged particle tracks in solids: *Jour. of Appl. Phys.*, v. 36, p. 3645-3652.
- Galbraith, R., 1988, Graphical display of estimates having differing standard errors: *Technometrics*, v. 30, p. 271-281.
- Gallagher, K., Brown, R., and Johnson, C., 1998, Fission track analysis and its applications to geological problems: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 26, p. 519-572.
- Hashimoto, W., 1964, Geologic development of the Philippines: *Geology and palaeontology of Southeast Asia*, p. 83.
- Holden, N., 1989, Total and spontaneous fission half-lives for uranium, plutonium, americium and curium nuclides: *Pure Appl. Chem.*, v. 61, p. 1483.
- Holloway, N., 1982, North Palawan block, Philippines-its relation to Asian mainland and role in evolution of South China Sea: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 66, p. 1355-1383.
- Hurford, A., and Green, P., 1983, The zeta age calibration of fission-track dating: *Chemical Geology*, v. 41, p. 285-317.
- Jumawan, F., Yumul Jr, G., and Tamayo Jr, R., 1998, Using geochemistry as a tool in determining the tectonic setting and mineralization potential of an exposed upper mantle-crust sequence: Example from the Amnay


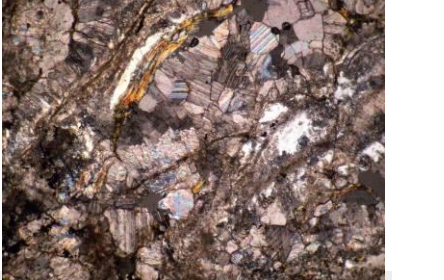
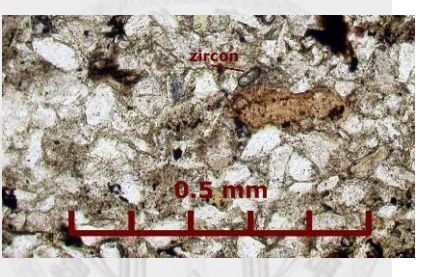
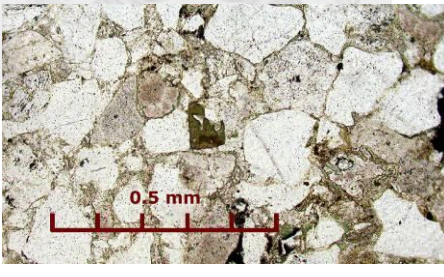

- ophiolitic complex in occidental Mindoro, Philippines: *Journal of the Geological Society of the Philippines*, v. 53, p. 24-48.
- Karig, D.E., 1983, Accreted terranes in the northern part of the Philippine archipelago: *Tectonics*, v. 2, p. 211-236.
- Knittel, U., 2011, 83 Ma rhyolite from Mindoro – evidence for Late Yanshanian magmatism in the Palawan Continental Terrane (Philippines): *Island Arc*, p. no-no.
- Knittel, U., and Daniels, U., 1987, Sr-isotopic composition of marbles from the Puerto Galera area (Mindoro, Philippines): Additional evidence for a Paleozoic age of a metamorphic complex in the Philippine island arc: *Geology*, v. 15, p. 136.
- Knittel, U., Hung, C.H., Yang, T.F., and Iizuka, Y., 2010, Permian arc magmatism in Mindoro, the Philippines: An early Indosinian event in the Palawan Continental Terrane: *Tectonophysics*, v. 493, p. 113-117.
- Le Maitre, R.W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre, J., Le Bas, M., Sabine, P., Schmid, R., Sorensen, H., and Streckeisen, A., 1989, *A classification of igneous rocks and glossary of terms*, Blackwell Scientific Oxford.
- Lee, T.-Y., and Lawver, L.A., 1995, Cenozoic plate reconstruction of Southeast Asia: *Tectonophysics*, v. 251, p. 85-138.
- Li, X., Li, Z., Li, W., and YUEJUN, W., 2006, Initiation of the Indosinian orogeny in South China: evidence for a Permian magmatic arc on Hainan Island: *The Journal of geology*, v. 114, p. 341-353.
- Liu, T., Chen, Y., Chen, W., and Jiang, S., 2000, Rates of cooling and denudation of the Early Penglai Orogeny, Taiwan, as assessed by fission-track constraints: *Tectonophysics*, v. 320, p. 69-82.
- McCabe, R., Almasco, J.N., and Yumul, G., 1985, Terranes of the central Philippines: Tectonostratigraphic terranes of the circum-Pacific region, p. 421;V436.
- McDougall, I., and Harrison, T.M., 1999, *Geochronology and Thermochronology by the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Method*, Oxford University Press, USA.
- Naeser, C., 1979, Fission track dating and geologic annealing of fission tracks: *Lectures in isotope geology*, v. 10, p. 154-169.
- Pearce, J., 1983, Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins: *Continental basalts and mantle xenoliths*, v. 249.
- Price, P., and Walker, R., 2009, Observations of Charged Particle Tracks in Solids: *Journal of Applied Physics*, v. 33, p. 3400-3406.

- Price, P.B., and Walker, R.M., 1962, Observations of charged-particle tracks in solids: *Journal of Applied Physics*, v. 33, p. 3400-&.
- Queano, K.L., Ali, J.R., Milsom, J., Aitchison, J.C., and Pubellier, M., 2007, North Luzon and the Philippine Sea Plate motion model: Insights following paleomagnetic, structural, and age-dating investigations: *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, v. 112.
- Rangin, C., Stephan, J., and Muller, C., 1985, Middle Oligocene oceanic crust of South China Sea jammed into Mindoro collision zone (Philippines): *Geology*, v. 13, p. 425.
- Saini, H., Sharma, O., Parshad, R., and Nagpaul, K., 1978, Fission track annealing characteristics of epidote: Applications to geochronology and geology: *Nuclear Track Detection*, v. 2, p. 133-140.
- Sarewitz, D., and Karig, D., 1986a, Geologic evolution of western Mindoro Island and the Mindoro suture zone, Philippines: *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, v. 1, p. 117-141.
- Sarewitz, D., and Karig, D., 1986b, Processes of allochthonous terrane evolution, Mindoro Island, Philippines: *Tectonics*, v. 5, p. 525-552.
- Steiger, R., and Jager, E., 1977, Subcommittee on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology: *Earth and planetary science letters*, v. 36, p. 359-362.
- Teves, J., 1954, The pre-Tertiary geology of southern Oriental Mindoro, National Research Council of the Philippines, p. 481.
- Yumul, G.P., Dimalanta, C.B., Marquez, E.J., and Queano, K.L., 2009a, Onland signatures of the Palawan microcontinental block and Philippine mobile belt collision and crustal growth process: A review: *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 34, p. 610-623.
- Yumul, G.P., Jumawan, F.T., and Dimalanta, C.B., 2009b, Geology, geochemistry and chromite mineralization potential of the Amnay Ophiolitic Complex, Mindoro, Philippines: *Resource Geology*, v. 59, p. 263-281.
- Yumul Jr, G.P., Dimalanta, C.B., Tamayo Jr, R.A., and Maury, R.C., 2003, Collision, subduction and accretion events in the Philippines: A synthesis: *Island Arc*, v. 12, p. 77-91.
- Zaun, P., and Wagner, G., 1985, Fission-track stability in zircons under geological conditions: *Nuclear Tracks and Radiation Measurements (1982)*, v. 10, p. 303-307.


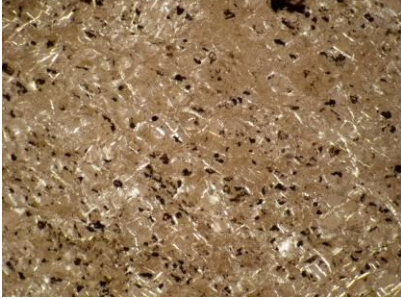
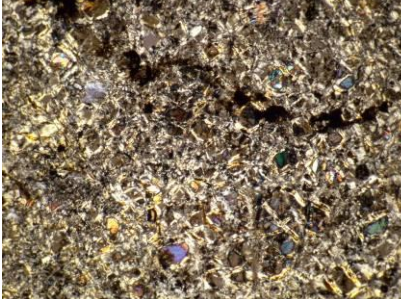

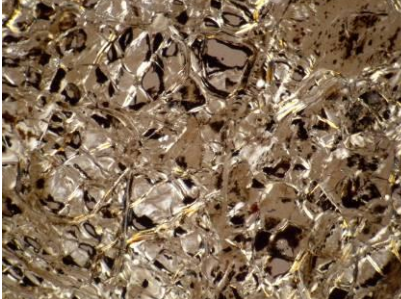
Zhou, X.M., Sun, T., Shen, W.Z., Shu, L.S., and Niu, Y.L., 2006, Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution: Episodes, v. 29, p. 26-33.

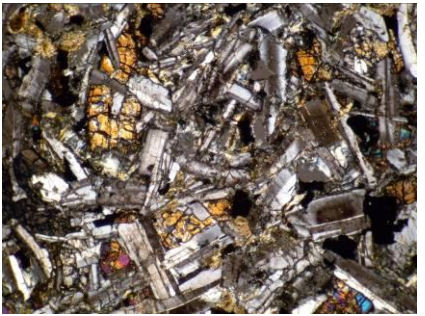
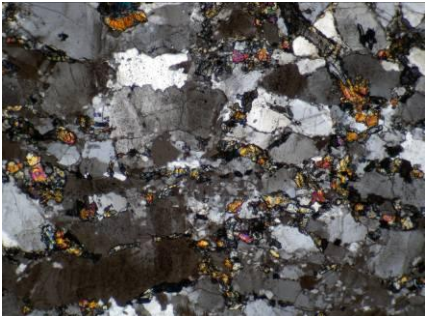
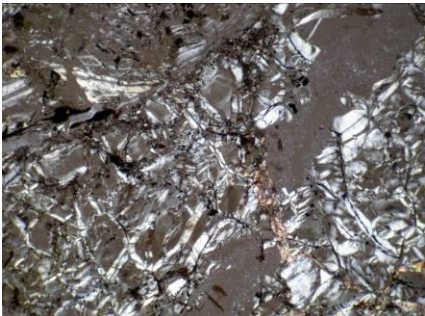
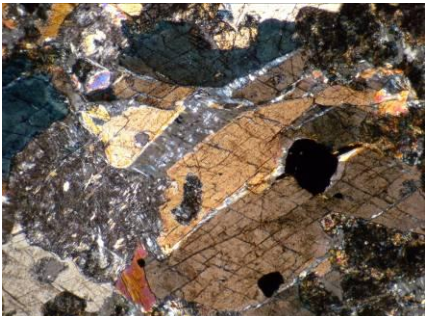
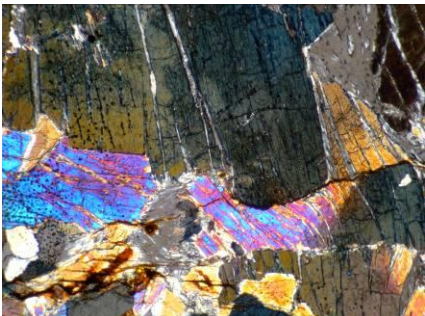


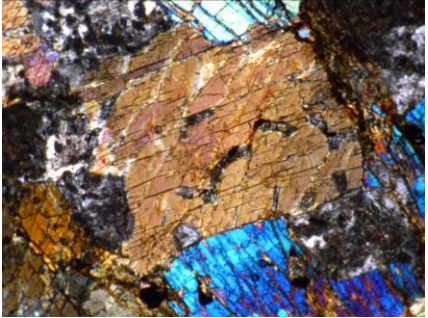
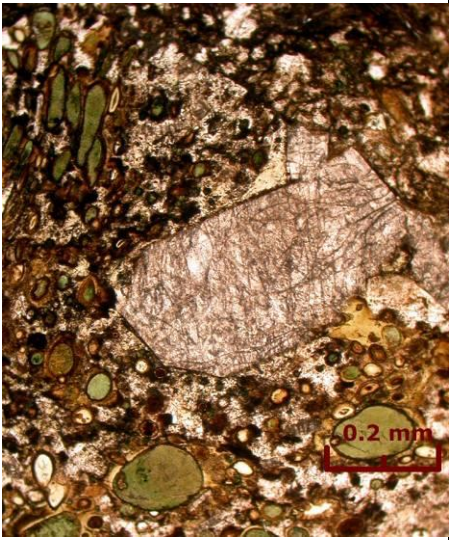
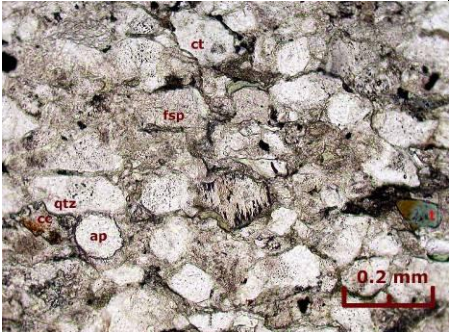
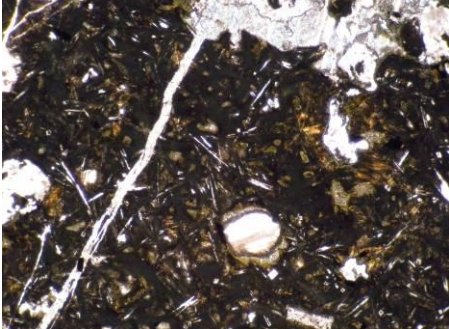
附錄一 本研究樣品岩性描述

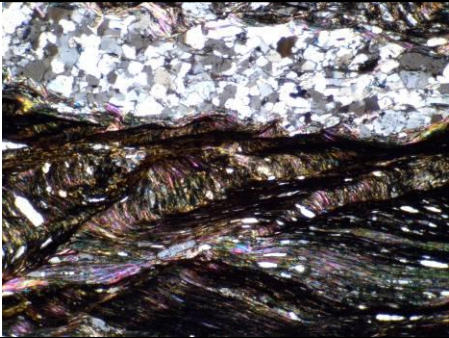
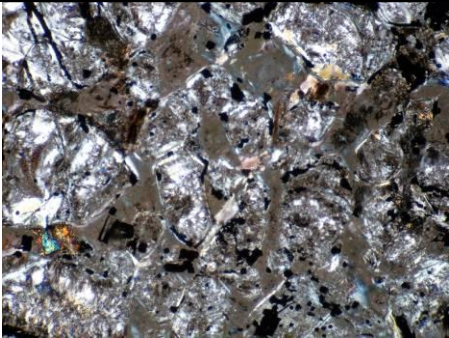

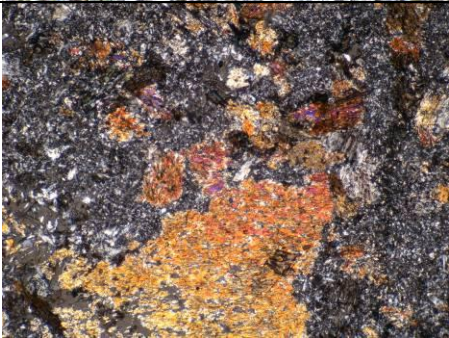
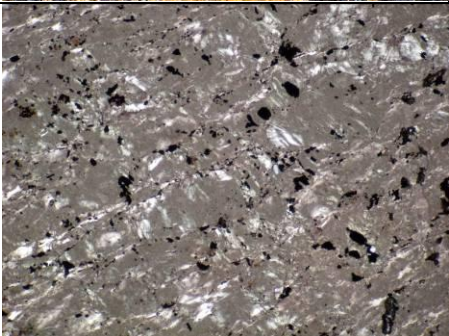
No.	岩性		
1A	蛇紋岩化超基性岩		主要礦物是橄欖石，受蛇紋岩化作用。
1B	輝石岩		主要礦物為輝石，另外還有一些黑雲母、鉀長石。
1C	砂泥岩		主要礦物為石英，亦可以看到鋯石。
1D	砂岩		主要礦物為石英，另外還有一些斜長石。
2A	枕狀玄武岩		有橄欖石，及具有針狀構造之磁鐵礦及斜長石，代表此樣本為快速冷卻之噴發岩。

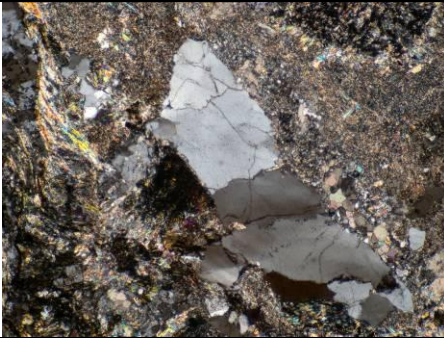


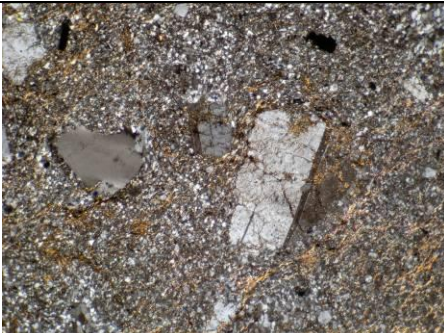




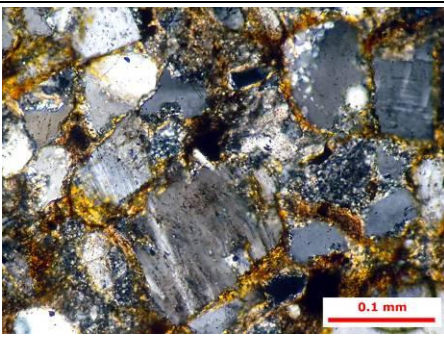
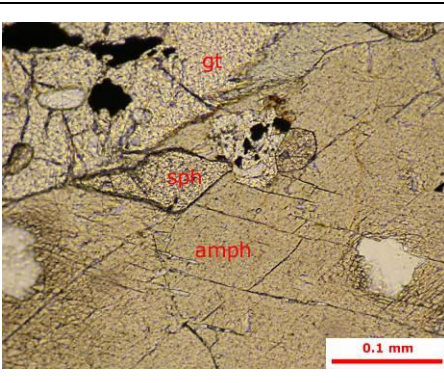
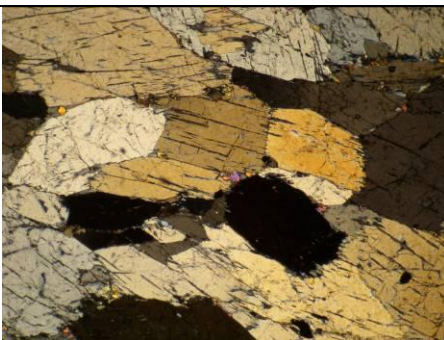
3A	石灰岩		礦物幾乎為方解石，且方解石具有受變質作用之 twinning 的現象。
4A	斜方輝橄岩		此岩石受蛇紋岩化作用。
4B	蛇紋岩化超基性岩		橄欖石受蛇紋岩化作用。
7A	玄武岩質角礫岩		此岩石具有針狀構造之斜長石，且含有許多氣泡，應為快速冷卻之結果。
8A	蛇紋岩化玄武岩		橄欖石受蛇紋岩化作用。


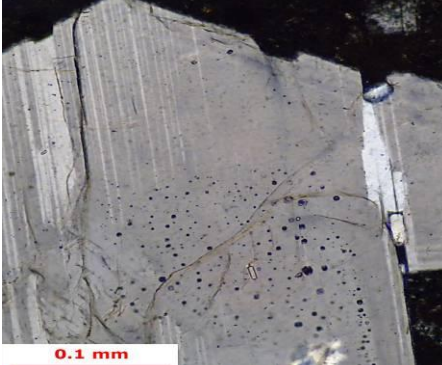
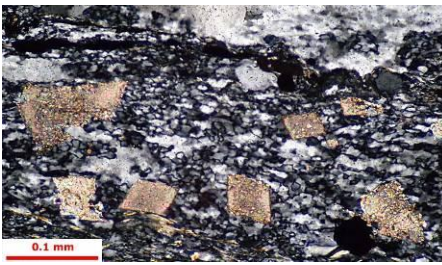
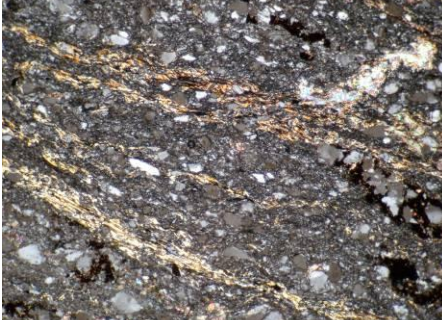
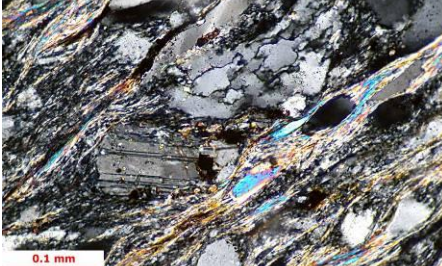
10A	塊狀玄武岩		有許多長條狀之斜長石。
11A	白色火成岩脈		礦物大部分為石英。
11B	擄獲岩		具蛇紋岩化之橄欖石及輝石。
11C	輝長岩		礦物包含輝石、長石、角閃石等等。
11D	基性火成岩脈		主要礦物為角閃石。

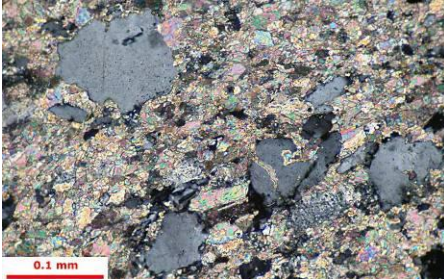
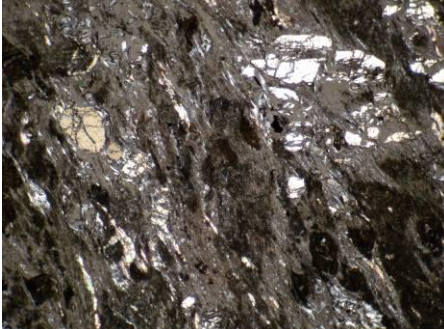
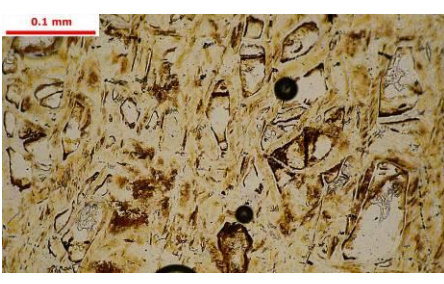
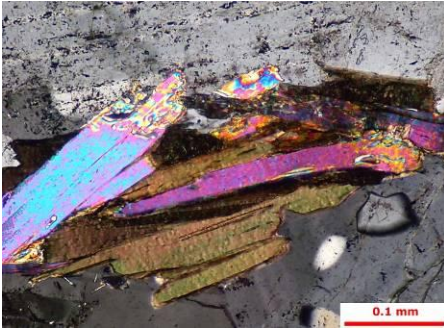

11E	基性岩脈中的結核		有許多橄欖石。
12A	安山岩		
12B	砂岩(float)		主要礦物組成為石英、方解石、斜長石。
12D	結核		有針狀構造之長石以及氣泡。

14B	黑色片岩 float		<p>顆粒多為石英，基質為黑雲母，且有很強烈的變形。</p>
14C	玄武岩 float		<p>受蛇紋岩化作用。</p>
14D	綠色片岩 from outcrop		<p>有些石英顆粒排列具有方向性，但幾乎都是基質，有很漂亮的線理。</p>
15B	變質火成岩		<p>有許多破碎的角閃石。</p>
15C	蛇紋岩		<p>幾乎所有顆粒受到蛇紋岩化作用。</p>

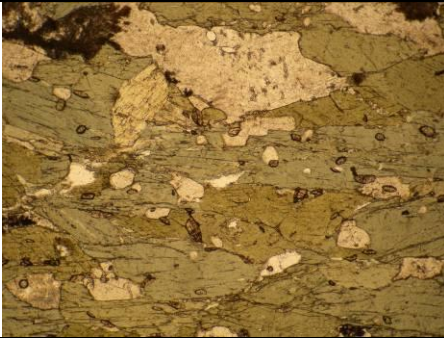
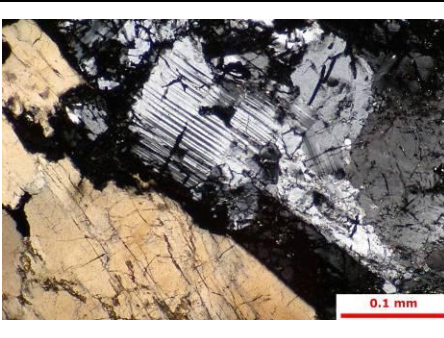
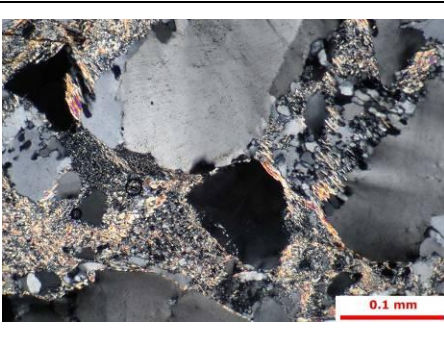
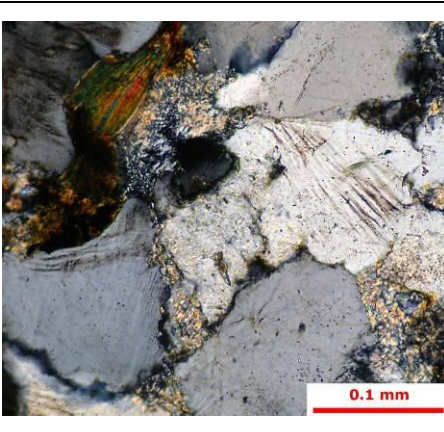
17B	片麻岩 on outcrop		有石英顆粒，且邊界被小顆粒鑲嵌，有許多基質。
17C	閃長岩		許多角閃石，以及斜長石。
18B	角閃岩		有許多被切碎的角閃石，大多為基質。
20B	變質流紋岩		有一些斜長石、石英顆粒，大多為基質。

22B	變質輝長岩		有一些石英、角閃十碎塊，有些顆粒排列具有方向性。
23A	片麻岩		幾乎為石英，許多小顆粒鑲嵌在顆粒邊界。
32A	砂岩		主要礦物是鉀長石及石英。
32B	角閃岩		此角閃岩內含石榴子石，大部分為角閃石，另外還有楣石、斜長石分布其中。
32C	角閃岩		礦物組成幾乎是角閃石，有少部分的綠簾石以及磷灰石。

33A	玄武岩質角礫岩		<p>礦物組成有斜長石、橄欖石、磁鐵礦，磁鐵礦呈針狀，並且此岩石據有許多氣泡，代表此岩石為快速冷卻之噴出岩。</p>
34A	新生代火成岩		<p>斜長石具有 twing 的現象，表示具有島弧岩漿訊號，另外還有黑雲母、角閃石等礦物。</p>
36A	片岩		<p>高度受力剪切的樣本，可以看到石英被拉成眼鏡狀，圖中褐色菱型的礦物是 euhedro carbonate。</p>
36B	砂岩		<p>大多為石英的基質填充，礦物主要為石英。</p>
37A	石英岩		<p>大部分的礦物為石英，有一些斜長石，基質為雲母。</p>

37B	大理岩		由於變質作用的影響，具有 carbonate twinning 的現象，及石英礦物邊界則鑲嵌許多基質或小顆粒礦物。
37C	玄武岩質火成岩岩脈		此岩石具有線性構造，且受到換質作用影響。
37E	蛇紋岩		此岩石中的橄欖石及輝石受液體換質後，具有蛇紋岩化之現象。
38A	花崗閃長岩		此岩主要礦物有長石、石英和雲母。
38B	條帶狀花崗閃長岩		主要礦物是長石、石英，因為受岩漿交代變質作用，有些石英與長石共生具有蠕狀結構 (Myrmekite)。



40B1	角閃岩		<p>主要礦物為角閃石，有許多榭石，另外還有綠簾石。</p>
40B2	角閃岩		<p>主要礦物為大顆粒角閃石，另外還有一些變質的斜長石。</p>
40C	變質砂岩		<p>主要礦物是石英，因為再結晶，在顆粒邊界有許多小顆粒鑲嵌。</p>
41B	砂岩		<p>主要礦物有石英、斜長石、黑雲母及白雲母。</p>

## 附錄二 主要元素分析資料

### 明多洛島西北部主要元素分析資料

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	Sum
MIN2A1	56.50	1.29	13.92	8.31	0.14	5.59	5.17	5.54	0.57	0.18	1.80	99.00
MIN2A2	55.19	1.33	14.68	8.80	0.14	5.12	6.09	5.50	0.78	0.17	2.17	99.95
MIN6A	56.42	0.80	16.92	7.96	0.17	4.10	5.05	3.12	3.32	0.20	1.39	99.44
MIN 7A	48.74	1.90	14.64	8.89	0.16	5.23	11.67	3.64	1.24	0.26	3.93	100.31
MIN10A	47.91	1.19	17.15	9.55	0.16	6.66	12.10	2.92	0.11	0.16	1.39	99.29
MIN11C	45.87	0.62	17.88	10.26	0.15	8.49	12.46	1.61	0.11	0.08	0.81	98.35
MIN11D	49.38	0.28	7.92	9.41	0.13	18.79	9.75	0.54	0.03	0.05	0.83	97.12
MIN11E	47.39	0.72	15.13	10.62	0.20	9.76	10.29	2.27	0.23	0.04	0.81	97.47
MIN12A1	49.27	3.17	17.12	10.01	0.12	5.22	6.04	3.87	1.48	0.62	3.82	100.74
MIN12B	78.19	0.51	9.91	2.81	0.05	1.35	1.20	1.62	1.94	0.11	2.01	99.70
MIN12D	54.09	2.09	13.36	6.73	0.12	2.22	12.82	1.11	4.48	0.50	0.55	98.07
MIN13A	82.08	0.48	9.52	2.29	0.01	0.53	0.11	1.60	1.74	0.10	0.93	99.39
MIN14B	74.45	0.52	12.42	4.51	0.04	1.63	0.52	1.59	2.23	0.13	2.37	100.40
MIN14C	37.75	0.43	4.95	16.54	0.21	29.61	2.19	0.00	0.01	0.07	9.45	101.19
MIN14D	55.97	0.61	17.32	7.99	0.12	5.42	6.06	2.44	1.10	0.10	3.58	100.71
MIN17B	59.09	0.68	16.23	6.33	0.12	2.69	5.67	3.04	2.24	0.18	4.81	101.08
MIN17C	54.17	0.81	16.29	8.19	0.26	6.04	5.30	2.59	3.69	0.23	0.49	98.05
MIN20B	72.36	0.27	15.77	1.18	0.02	0.88	0.47	4.96	2.32	0.11	0.97	99.30

明多洛島東部主要元素分析資料

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI	TOTAL
MIN32B	43.23	1.32	15.05	14.53	0.20	9.65	12.51	2.10	0.35	0.12	0.18	99.22
MIN32C	40.90	1.65	15.00	15.27	0.24	11.44	11.57	2.21	0.30	0.07	0.65	99.31
MIN33A	48.72	1.87	18.62	10.70	0.16	1.87	9.52	5.65	0.00	0.26	3.01	100.38
MIN34A	60.89	0.50	17.78	4.62	0.10	2.06	4.55	4.26	3.34	0.32	0.70	99.11
MIN36A	81.67	0.30	6.27	4.96	0.07	0.57	1.63	1.88	0.86	0.09	1.27	99.58
MIN36B	72.56	0.55	9.34	5.95	0.15	1.42	2.47	3.05	0.84	0.23	3.35	99.90
MIN37A	80.76	0.52	9.08	3.63	0.03	0.68	0.35	2.30	1.46	0.10	1.33	100.23
MIN37B	47.74	0.38	7.41	3.35	0.11	1.48	21.87	1.31	1.37	0.14	17.46	102.61
MIN37C	45.78	1.53	16.24	11.01	0.17	8.37	9.41	2.38	-0.03	0.15	4.77	99.77
MIN38A	68.45	0.12	19.20	0.53	0.02	0.28	4.18	5.50	1.02	0.04	0.39	99.71
MIN38B-W	72.12	0.12	14.90	3.25	0.03	0.27	2.32	5.12	1.56	0.08	-0.40	99.35
MIN38B-B	78.08	0.45	8.89	7.37	0.06	0.82	0.84	1.56	2.31	0.08	-0.47	99.97
MIN40B2	42.44	2.57	12.30	15.07	0.17	10.81	12.60	2.14	0.07	0.14	0.77	99.06
MIN40C	87.00	0.09	6.13	4.91	0.03	0.17	0.12	0.00	1.90	0.03	-0.19	100.20
MIN41B	82.78	0.52	9.21	2.26	0.02	0.24	0.17	1.78	1.34	0.04	1.40	99.77

## 附錄三 微量元素含量表

明多洛島玄武岩微量元素含量表

Sample Name	Min2A1	Min2A2	Min7A	Min10A	Min12A1	Min12D	MIN33A	MIN37C
Rb	8.1	10.7	23.9	1.7	58.5	55.8	0.854	0.681
Cs	0.09	0.09	1.09	0.03	5.97	0.4	0.103	0.912
Sr	52.7	55.9	361.7	210.6	630.8	564.0	158	257
Ba	53	71	34	2	340	1015	26.2	6.96
Th	1.09	1.03	0.64	0.36	4.97	3.4	0.630	0.304
Nb	4.7	4.6	8.1	4.6	63.8	44.7	10.7	5.74
Ta	0.35	0.34	0.61	0.34	4.1	2.86	0.649	0.304
Zr	92.4	89.8	156.2	95.4	295.8	212.0	149	91.9
Hf	2.25	2.23	3.47	2.14	6.22	4.51	3.23	2.26
Y	25.7	26.1	34.6	26.4	31.6	20.8	36.4	27.8
Ni	34	27	37	56	58	80	88.7	100
Cr	102	99	125	243	111	151	179	152
V	230	253	271	177	167	148	230	227
Co	32	26	43	37	30	26	40.1	42.6
Sc	40	37.1	41.4	35	6.55	21.5	17.2	20.1
Ga	16	18	17	17	20	44	21.1	18.8
La	6.40	6.11	8.75	5.05	38.80	28.00	7.90	4.21
Ce	15.4	14.5	22.9	13.1	77.6	56.5	20.1	12.1
Pr	2.21	2.10	3.42	1.99	9.49	7.00	3.04	1.90
Nd	10.3	9.86	16.0	9.70	38.4	27.7	15.2	10.2
Sm	3.063	3.00	4.59	2.98	8.41	5.917	4.44	3.35
Eu	1.063	1.035	1.596	1.108	2.710	1.988	1.56	1.33
Gd	3.46	3.41	4.78	3.43	7.13	5.01	5.57	4.41
Tb	0.641	0.624	0.869	0.635	1.063	0.726	0.911	0.727
Dy	4.23	4.13	5.77	4.30	6.09	4.04	6.00	4.83
Ho	0.916	0.904	1.252	0.947	1.146	0.757	1.34	1.06
Er	2.50	2.42	3.40	2.62	2.86	1.86	3.67	2.91
Tm	0.373	0.351	0.503	0.388	0.382	0.246	0.538	0.419
Yb	2.38	2.25	3.21	2.48	2.33	1.52	3.37	2.61
Lu	0.353	0.332	0.471	0.370	0.331	0.217	0.514	0.391

明多洛島花崗岩、流紋岩之微量元素含量表

Sample Name	MIN38 A	MIN38B-W	MIN38B-B	MIN17 B	Min17C	Min06 B	MIN-20 B	MIN34 A
Rb	36.4	38.0	94.8	69	131	117	67	118
Cs	2.10	0.940	2.54	2.8	3.30	2.65	5.4	7.29
Sr	608	521	190	338	343	191	125	1252
Ba	156	469	636	632	1253	683	214	1343
Th	1.36	2.47	9.08	5.8	6.32	7.16	8.3	24.2
Nb	2.71	6.58	16.4	6.4	6.6	9.0	2.2	8.56
Ta	0.303	0.180	0.254	0.34	0.509	0.626	0.17	0.670
Zr	78.3	81.0	340	138	99.7	154.3	138	189
Hf	1.84	1.98	7.21	3.5	2.68	3.85	3.3	4.67
Y	4.54	6.42	12.9	22	19.5	26.87	5	16.2
Ni	2.54	7.37	16.3	7	59	18	4	20.6
Cr	7.71	16.7	56.1	28	189	56	22	29.9
V	9.30	10.2	44.5	88.5	168	141	14.2	76.2
Co	1.19	2.57	6.80	13	28	22	3	11.5
Sc	1.09	0.534	14.1	20.6	11.4	26.5	5.7	5.30
Ga	16.1	14.7	12.9	17.1	19.7	18.85	19.4	20.6
La	4.89	8.45	35.9	14.3	17.7	21.1	11.6	46.9
Ce	9.13	17.6	73.9	29.8	37.4	43.8	22.1	87.0
Pr	0.958	2.08	8.41	4.16	4.85	5.49	2.64	9.67
Nd	3.46	8.02	31.4	17.01	19.9	21.3	9.32	35.5
Sm	0.656	1.51	5.65	4.03	4.326	4.593	1.74	6.03
Eu	0.651	0.726	0.963	1.100	1.343	1.179	0.483	1.64
Gd	0.615	1.31	4.37	3.58	3.81	4.22	1.59	4.47
Tb	0.0973	0.187	0.588	0.570	0.560	0.678	0.199	0.587
Dy	0.645	1.06	2.88	3.49	3.33	4.25	0.836	3.01
Ho	0.153	0.226	0.501	0.739	0.679	0.898	0.154	0.580
Er	0.46	0.612	1.18	2.05	1.84	2.50	0.419	1.56
Tm	0.0747	0.0904	0.147	0.308	0.274	0.380	0.061	0.220
Yb	0.553	0.570	0.854	2.06	1.711	2.520	0.385	1.40
Lu	0.0937	0.0862	0.130	0.301	0.262	0.381	0.062	0.217

明多洛島變質岩之微量元素含量表

Sample Name	MIN14B	MIN14D	MIN36A	MIN36B	MIN37A	MIN37B
Rb	108	27.3	44.7	48.7	66.8	61.1
Cs	7.62	2.45	3.41	4.14	5.59	4.78
Sr	73.1	147	85.1	106	69.3	479
Ba	328	63	179	149	333	281
Th	16.9	0.762	4.50	4.64	8.37	4.71
Nb	7.97	1.03	11.9	11.3	13.2	9.30
Ta	0.621	0.084	0.542	0.636	0.946	0.585
Zr	132	55.3	195	158	405	124
Hf	3.33	1.62	4.55	3.67	8.77	2.93
Y	16	15.3	12.2	25.7	19.8	17.1
Ni	19.4	29.3	22.0	51.4	63.8	32.5
Cr	42.5	22.3	30.9	91.7	152	51.9
V	81.1	202	22.6	53.81	30.3	39.8
Co	7.7	6.1	5.90	8.48	6.69	6.30
Sc	9.2	21.7	2.40	6.03	2.99	6.66
Ga	14	15.8	6.81	9.63	10.5	9.23
La	18.90	3.33	16.4	20.3	29.6	16.8
Ce	39.60	8.57	33.7	35.2	61.1	33.2
Pr	4.58	1.29	3.86	5.22	7.03	4.20
Nd	16.90	6.19	14.4	21.1	26.1	16.7
Sm	3.37	1.93	2.61	4.49	4.78	3.37
Eu	0.81	0.68	0.555	1.00	0.918	0.677
Gd	3.26	2.19	2.34	4.53	4.00	3.19
Tb	0.45	0.38	0.357	0.686	0.567	0.468
Dy	2.68	2.51	2.09	4.18	3.24	2.84
Ho	0.57	0.56	0.429	0.885	0.695	0.602
Er	1.59	1.58	1.18	2.43	1.96	1.66
Tm	0.24	0.24	0.173	0.345	0.285	0.242
Yb	1.57	1.58	1.12	2.20	1.88	1.55
Lu	0.24	0.24	0.175	0.343	0.296	0.232

明多洛島角閃岩之微量元素含量表

Sample Name	MIN-18A	MIN32B	MIN32C	MIN40B2
Rb	63	8.49	2.90	1.09
Cs	2.00	0.497	0.287	0.0962
Sr	260	82.2	49.2	97.2
Ba	659	49.7	2.13	14.8
Th	3.3	0.135	0.417	0.0578
Nb	3.0	6.53	5.41	5.77
Ta	0.21	0.140	0.195	0.183
Zr	74	70.3	127	58.0
Hf	2.08	1.83	3.16	2.24
Y	23.5	29.2	37.0	77.1
Ni	18	114	209.2	98.6
Cr	40	302	271	23.7
V	283	270	362	437
Co	26	46.9	63.2	47.8
Sc	6.4	23.5	28.8	46.6
Ga	18.1	17.2	22.8	15.7
La	13.4	3.20	3.57	1.77
Ce	27.9	10.2	9.69	8.84
Pr	3.58	1.70	1.49	2.13
Nd	15.3	9.48	7.90	15.0
Sm	3.78	3.19	2.77	6.94
Eu	1.170	1.13	1.10	1.93
Gd	3.71	4.35	4.44	10.8
Tb	0.612	0.718	0.786	1.83
Dy	3.94	4.98	5.71	13.0
Ho	0.871	1.11	1.39	2.95
Er	2.42	3.06	3.98	7.78
Tm	0.377	0.453	0.612	1.10
Yb	2.46	2.85	3.91	6.48
Lu	0.374	0.440	0.618	0.937

明多洛島沉積岩之微量元素含量表

Sample Name	MIN-1C	MIN-1D	MIN-12B	MIN-13A	MIN40C	MIN41B
Rb	67.20	22.90	108.00	79.10	65.39	57.15
Cs	3.90	1.41	7.62	3.99	2.00	1.07
Sr	81.60	92.60	73.10	37.70	6.58	28.20
Ba	147.00	1451.00	328.00	302.00	175.40	132.40
Th	8.62	5.35	6.74	7.64	5.21	20.15
Nb	9.87	6.65	7.97	9.60	9.62	13.23
Ta	0.80	0.57	0.62	0.74	0.29	1.20
Zr	215.00	226.00	132.00	296.00	89.91	699.10
Hf	5.24	5.20	3.33	6.85	2.27	15.55
Y	19.00	14.30	16.00	17.90	7.02	12.89
Ni	30.00	25.40	19.40	8.44	6.36	4.21
Cr	60.00	42.30	42.50	38.80	16.20	14.61
V	75.90	35.40	81.10	48.20	5.07	10.53
Co	13.20	9.50	7.67	2.94	2.82	1.24
Sc	9.01	6.08	9.20	9.67	4.92	17.90
Ga	12.90	5.59	14.00	10.10	6.44	9.43
La	20.30	18.20	18.90	25.80	16.03	51.89
Ce	42.50	38.20	39.60	49.80	36.56	103.50
Pr	4.90	4.16	4.58	5.84	3.49	11.12
Nd	18.30	14.70	16.90	20.80	12.01	38.26
Sm	3.85	2.67	3.37	3.95	2.01	5.68
Eu	0.78	0.82	0.81	0.85	0.39	0.60
Gd	3.80	2.58	3.26	3.76	1.64	3.69
Tb	0.54	0.36	0.45	0.52	0.24	0.48
Dy	3.18	2.21	2.68	3.08	1.30	2.27
Ho	0.69	0.49	0.57	0.64	0.27	0.46
Er	2.00	1.42	1.59	1.77	0.72	1.39
Tm	0.31	0.22	0.24	0.27	0.11	0.21
Yb	2.06	1.43	1.57	1.67	0.67	1.52
Lu	0.32	0.21	0.24	0.26	0.10	0.26



## 附錄四 氩氩定年分析數據

### 單顆雷射氩氩定年分析數據

MIN6A, HBL	36Ar(air)	37Ar(ca)	38Ar(cl)	39Ar(k)	40Ar(r)	Age ± 1sd (Ma)	40Ar(r) (%)
MAR2314	0.000386	0.25342	0.001555	0.056476	1.099847	218.09 2	90.59
MAR1910	0.000137	0.061073	0.000354	0.011743	0.235591	224.28 2.78	85.37
MAR2208	0.000197	0.081444	0.000418	0.014661	0.303825	231.22 3.16	83.93
MAR2205	0.000274	0.062391	0.000463	0.01203	0.255914	236.97 3.76	75.98
MAR2210	0.000341	0.147892	0.000883	0.028025	0.596522	237.09 2.57	85.53
MAR2212	0.000349	0.151561	0.000907	0.031021	0.668427	239.83 2.59	86.62
<i>MAR2206</i>	0.0006	0.293601	0.001709	0.057732	1.286877	247.55 1.93	87.89
<i>MAR2303</i>	0.000272	0.304032	0.001427	0.054194	1.21038	248.01 1.64	93.75
<i>MAR2202</i>	0.000178	0.073788	0.000348	0.012321	0.27599	248.68 2.5	83.96
<i>MAR2306</i>	0.000448	0.317885	0.001866	0.066195	1.504366	252.07 2.67	91.91
<i>MAR1907</i>	0.000157	0.047268	0.000228	0.006516	0.14866	252.99 7.53	76.18
<i>MAR2211</i>	0.000258	0.126642	0.000652	0.020701	0.474856	254.27 1.52	86.16
<i>MAR2207</i>	0.00031	0.11757	0.000544	0.018489	0.424952	254.74 2.88	82.25
<i>MAR1911</i>	0.000105	0.034826	0.000167	0.005415	0.125067	255.9 6.4	80.05
<i>MAR2309</i>	0.000103	0.059636	0.000409	0.012217	0.282917	256.53 2.21	90.3
<i>MAR1906</i>	0.000169	0.102613	0.00063	0.021934	0.51335	259.08 2.37	91.12
<i>MAR2302</i>	0.00009	0.072892	0.00037	0.015279	0.358921	259.97 2.01	93.09
<i>MAR2213</i>	0.000365	0.178858	0.001052	0.032564	0.765567	260.17 2.81	87.66
<i>MAR2312</i>	0.000787	0.398393	0.002316	0.07744	1.826209	260.91 1.44	88.69
<i>MAR2313</i>	0.000417	0.224186	0.001284	0.042655	1.007468	261.29 2.35	89.09
<i>MAR2203</i>	0.000242	0.208512	0.001045	0.035674	0.845363	262.1 1.54	92.2
<i>MAR1901</i>	0.000103	0.072695	0.000401	0.013633	0.323597	262.5 2.41	91.38
<i>MAR2308</i>	0.000177	0.112601	0.000633	0.021401	0.518596	267.6 3.95	90.84
<i>MAR2304</i>	0.000246	0.160918	0.000834	0.031513	0.767427	268.83 1.6	91.34
<i>MAR2307</i>	0.000557	0.211147	0.001268	0.040731	0.99217	268.9 2.46	85.76
<i>MAR2305</i>	0.00009	0.029765	0.000221	0.005394	0.131607	269.29 5.43	83.16
<i>MAR2311</i>	0.0001	0.033308	0.000261	0.006159	0.150587	269.85 4.75	83.64
MAR2204	0.000132	0.053631	0.000255	0.004924	0.122152	273.51 4.37	75.73
MAR1902	0.00013	0.035519	0.000219	0.006803	0.171372	277.41 10.7	81.7
MAR2209	0.00045	0.187985	0.00097	0.031271	0.798677	280.98 1.35	85.72

MIN6A, HBL	36Ar(air)	37Ar(ca)	38Ar(cl)	39Ar(k)	40Ar(r)	Age $\pm$ 1sd		40Ar(r) (%)
						(Ma)		
MAR2301	0.000047	0.017419	0.000119	0.002998	0.078845	288.66	7.84	85.12
MAR1905	0.000114	0.034389	0.000219	0.005729	0.154073	294.72	5.76	82.11
MAR1909	0.000156	0.054452	0.000313	0.009176	0.248698	296.83	3.89	84.31
MAR2214	0.000366	0.094919	0.00059	0.013106	0.357174	298.34	4.44	76.76
MAR1912	0.000366	0.133401	0.000623	0.021838	0.625274	312.21	1.77	85.26
MAR2201	0.000106	0.05127	0.00028	0.006834	0.199039	317.15	5.01	86.39
MAR1904	0.000119	0.014725	0.000131	0.002194	0.064553	320.11	11.5	64.82
MAR1908	0.000202	0.049076	0.000229	0.006337	0.210015	356.82	15.3	77.89
MAR1903	0.000192	0.043045	0.000301	0.007535	0.253593	361.85	4.26	81.68

J value= 0.0065818  $\pm$  0.0000540

Total Fusion Age=259  $\pm$  2 Ma

n=39



階段加溫氬氫定年分析數據

	<b>Min-32B</b>						Age ± 1 sd	40Ar(r)
	<b>HBL</b>	36Ar(a)	37Ar(ca)	38Ar(cl)	39Ar(k)	40Ar(r)	(Ma)	(%)
DEC2301	650 °C	0.000221	0.009878	0.000000	0.000439	0.010959	373.33 ± 242.82	20.21
DEC2302	750 °C	0.000839	0.029026	0.000000	0.002114	0.009373	60.87 ± 53.77	3.93
DEC2303	800 °C	0.000900	0.041664	0.000000	0.003249	0.010178	42.80 ± 34.82	3.98
DEC2304	850 °C	0.000504	0.053372	0.000000	0.003235	0.011088	45.69 ± 30.05	6.92
DEC2305	875 °C	0.000324	0.049134	0.000000	0.002256	0.002862	17.20 ± 36.66	3.08
DEC2306	900 °C	0.000147	0.074763	0.000000	0.002115	0.018874	116.63 ± 28.50	30.30
<b>DEC2307</b>	925 °C	0.000191	0.262355	0.000000	0.004851	0.010380	28.66 ± 15.09	15.47
<b>DEC2308</b>	950 °C	0.000197	0.344514	0.000000	0.005812	0.011272	25.99 ± 14.09	16.17
<b>DEC2309</b>	975 °C	0.000483	1.586248	0.000000	0.025112	0.040171	21.47 ± 4.33	21.87
<b>DEC2310</b>	1000 °C	0.000224	0.723689	0.000000	0.011370	0.029181	34.32 ± 8.71	30.53
<b>DEC2311</b>	1050 °C	0.000204	0.537560	0.000000	0.007958	0.019093	32.11 ± 10.37	23.95
<b>DEC2312</b>	1100 °C	0.000110	0.492156	0.000000	0.007219	0.035789	65.72 ± 12.63	52.29
<b>DEC2313</b>	1200 °C	0.000579	1.301843	0.000000	0.018538	0.038487	27.81 ± 5.86	18.31
<b>DEC2314</b>	1300 °C	0.000361	0.550965	0.000000	0.008005	0.022600	37.72 ± 10.15	17.44
<b>DEC2315</b>	1400 °C	0.000411	0.194027	0.000000	0.002886	0.012509	57.58 ± 26.87	9.34
<b>DEC2316</b>	1500 °C	0.000700	0.077328	0.000000	0.001251	0.005992	63.55 ± 83.08	2.81

J = 0.00746570 ± 0.00005823

Weighted plateau age=28 ± 3.43

階段加溫氬氬定年分析數據

Min-41B1 HBL		36Ar(a)	37Ar(ca)	38Ar(cl)	39Ar(k)	40Ar(r)	Age ± 1 sd (Ma)	40Ar(r) (%)
DEC2401	650 °C	0.000144	0.007848	0.000000	0.001131	0.014310	163.22 ± 57.92	25.19
DEC2402	750 °C	0.000512	0.024384	0.000000	0.004128	0.009321	30.74 ± 21.19	6.56
DEC2403	800 °C	0.000501	0.039988	0.000000	0.006906	0.008807	17.14 ± 9.52	5.61
DEC2404	850 °C	0.000318	0.078072	0.000000	0.005666	0.001753	4.18 ± 17.90	1.90
DEC2405	900 °C	0.000259	0.234365	0.000000	0.008634	0.010513	16.36 ± 9.77	12.04
<b>DEC2406</b>	950 °C	0.000388	1.689130	0.000000	0.093067	0.194141	27.95 ± 1.10	62.33
<b>DEC2407</b>	1000 °C	0.000193	1.210027	0.000000	0.065104	0.148169	30.47 ± 1.41	71.59
<b>DEC2408</b>	1050 °C	0.000184	1.049353	0.000000	0.053787	0.114354	28.48 ± 1.80	67.15
<b>DEC2409</b>	1100 °C	0.000156	0.722723	0.000000	0.037716	0.075211	26.72 ± 2.83	61.50
<b>DEC2410</b>	1150 °C	0.000141	0.756997	0.000000	0.039877	0.091135	30.59 ± 2.38	68.11
<b>DEC2411</b>	1200 °C	0.000168	0.480244	0.000000	0.025480	0.053788	28.28 ± 3.95	51.57
<b>DEC2412</b>	1250 °C	0.000117	0.207510	0.000000	0.011063	0.025538	30.90 ± 8.60	42.30
<b>DEC2413</b>	1300 °C	0.000173	0.083738	0.000000	0.004474	0.013355	39.86 ± 25.78	20.64
DEC2414	1400 °C	0.000403	0.035724	0.000000	0.001972	0.014443	101.66 ± 52.89	13.78
DEC2415	1500 °C	0.000674	0.015135	0.000000	0.000871	0.013987	230.90 ± 132.78	7.56

J = 0.00746570 ± 0.00005823

Weighted plateau age = 28 ± 0.74

## 附錄五 磷灰石核飛跡定年分析數據

Min12B-Ap											
No.	$\rho_s$	(Ns)	$\rho_i$	(Ni)	Grain Age (Ma)			$P(\chi^2)$	Sum Age (Ma)		
	( $10^6 \text{cm}^{-2}$ )		( $10^6 \text{cm}^{-2}$ )		Age	--95% CI--		Age	--95% CI--		
1	0	0	2.08	100	0.5	0	2.4	100	0.5	0	2.4
2	0	0	1.32	90	0.5	0	2.7	100	0.2	0	1.3
3	0	0	2.87	66	0.7	0	3.7	100	0.2	0	0.9
4	0	0	1.37	56	0.8	0	4.4	100	0.1	0	0.8
5	0	0	1.35	54	0.8	0	4.6	100	0.1	0	0.7
6	0	0	1.67	40	1.1	0	6.3	100	0.1	0	0.6
7	0	0	0.81	39	1.2	0	6.4	100	0.1	0	0.5
8	0	0	1.41	38	1.2	0	6.6	100	0.1	0	0.5
9	0	0	1.41	38	1.2	0	6.6	100	0.1	0	0.5
10	0.1	3	5.45	158	1.3	0.2	3.7	37.1	0.3	0.1	0.8
11	0	0	0.48	30	1.5	0.1	8.5	41.4	0.3	0.1	0.8
12	0	0	1.38	29	1.6	0.1	8.8	45.6	0.3	0.1	0.8
13	0.05	1	2.47	47	1.6	0	8.1	51.2	0.3	0.1	0.9
14	0.03	1	1.45	42	1.8	0	9.1	55.2	0.4	0.1	0.9
15	0	0	0.46	25	1.8	0.1	10.3	58.9	0.4	0.1	0.9
16	0.03	1	1.08	39	1.9	0	9.9	62	0.4	0.2	1
17	0	0	0.4	23	2	0.1	11.3	65.4	0.4	0.2	0.9
18	0	0	1.05	20	2.3	0.1	13.1	69	0.4	0.2	0.9
19	0	0	0.31	19	2.4	0.1	13.9	72.5	0.4	0.1	0.9
20	0.03	1	0.94	29	2.5	0.1	13.5	69.2	0.5	0.2	1
21	0	0	1.8	18	2.5	0.1	14.8	72.4	0.5	0.2	0.9
22	0	0	0.34	17	2.7	0.1	15.7	75.4	0.5	0.2	0.9
23	0.07	1	1.47	22	3.3	0.1	18.3	67.3	0.5	0.2	1
24	0	0	0.28	13	3.5	0.1	21.3	70.8	0.5	0.2	1
25	0.2	6	3.47	104	3.8	1.3	8.5	16.6	0.8	0.4	1.3
26	0	0	0.48	12	3.9	0.1	23.3	18.8	0.8	0.4	1.3
27	0	0	0.67	12	3.9	0.1	23.3	21	0.8	0.4	1.3
28	0.09	3	1.27	42	4.8	0.9	14.5	10.2	0.9	0.5	1.5
29	0	0	0.31	9	5.2	0.2	32.8	11.8	0.9	0.5	1.5
30	0	0	0.3	9	5.2	0.2	32.8	13.6	0.9	0.5	1.4
31	0.02	1	0.32	13	5.6	0.1	33.2	12.4	0.9	0.5	1.5

No.	$\rho_s$	(Ns)	$\rho_i$	(Ni)	Grain Age (Ma)			$P(\chi^2)$	Sum Age (Ma)			
	( $10^6 \text{cm}^{-2}$ )		( $10^6 \text{cm}^{-2}$ )		Age	--95% CI--		(%)	Age	--0.95%CI--		
32	0.04	1	0.5	12	6.1	0.1	36.5	11	1	0.6	1.5	
33	0.03	2	0.29	21	6.6	0.7	25.3	6.1	1.1	0.6	1.6	
34	0.11	1	1.22	11	6.6	0.1	40.5	5.6	1.1	0.7	1.7	
35	0.05	1	0.58	11	6.6	0.1	40.5	5.3	1.1	0.7	1.7	
36	0	0	0.19	7	6.7	0.2	44.9	6.2	1.1	0.7	1.7	
37	0	0	1.4	7	6.7	0.2	44.9	7.2	1.1	0.7	1.7	
38	0.02	1	0.24	10	7.3	0.1	45.5	6.4	1.2	0.7	1.8	
39	0	0	1	6	7.9	0.3	54.9	7.5	1.2	0.7	1.8	
40	0	0	0.22	6	7.9	0.3	54.9	8.7	1.2	0.7	1.8	
41	0	0	0.17	4	12.2	0.4	97.5	10.1	1.2	0.7	1.7	
42	0	0	0.13	4	12.2	0.4	97.5	11.7	1.2	0.7	1.7	
43	0.04	1	0.21	5	14.4	0.3	115	5.5	1.2	0.8	1.8	
44	0	0	0.11	3	16.8	0.5	155	6.5	1.2	0.8	1.8	
45	0	0	0.27	3	16.8	0.5	155	7.7	1.2	0.8	1.8	
46	0	0	0.12	3	16.8	0.5	155	9	1.2	0.8	1.8	
47	0	0	0.2	3	16.8	0.5	155	10.5	1.2	0.8	1.8	
48	0	0	0.1	2	26.8	0.8	336.1	12.2	1.2	0.8	1.8	
49	0.13	1	0.25	2	34.3	0.5	594.1	1.2	1.2	0.8	1.8	
50	0	0	0.02	1	64.4	1.7	2130%	.3	1.5	1.2	0.8	1.8
51	0	0	0.07	1	64.4	1.7	2130%	.3	1.9	1.2	0.8	1.8
POOL	0.02	26	0.86	1375				1.9	1.2	0.8	1.8	

Pooled Age :  $0.1 \pm 0.0$  Ma      礦物：磷灰石 (Apatite)       $\zeta$  校正値 :  $340 \pm 12$  ( $\text{yr} \cdot \text{cm}^2$ )  
Central Age :  $0.1 \pm 0.0$  Ma      標準玻璃種類：NBS612  
 $\chi^2$  Age :  $0.1 \pm 0.0$  Ma      標準玻璃又發合飛機數目：2348  
平均 U 濃度 (ppm) :  $44.4 \pm 5.0$  ( $2\sigma$ )      標準玻璃核飛機密度： $4.696 \cdot 10^5$  ( $\text{tracks}/\text{cm}^2$ )

## Min20B-Ap

No.	$\rho_s$ ( $10^4\text{cm}^{-2}$ )	(Ns)	$\rho_i$ ( $10^4\text{cm}^{-2}$ )	(Ni)	Grain Age (Ma)			Sum Age (Ma)		
					Age	--95% CI--	$P(\chi^2)$ (%)	Age	--0.95CI--	
1	0	0	4.87	28	1.6	0.1 9.1	100	1.6	0.1	9.1
2	0	0	2.99	25	1.8	0 4.7	100	0.9	0	4.7
3	0.12	1	3.83	33	2.2	0 4.3	45.5	0.9	0	4.3
4	0.05	1	1.74	32	2.3	0.1 4.1	65.7	1.2	0.1	4.1
5	0	0	5.33	18	2.5	0.1 3.5	70.8	1	0.1	3.5
6	0.25	2	6.68	53	2.6	0.4 3.6	78.5	1.4	0.4	3.6
7	0	0	3.53	17	2.7	0.3 3.3	80.8	1.3	0.3	3.3
8	0.26	2	5.59	43	3.2	0.6 3.5	83.6	1.6	0.6	3.5
9	0.36	2	7.73	43	3.2	0.8 3.6	88	1.8	0.8	3.6
10	0	0	2.02	14	3.3	0.7 3.4	89.2	1.7	0.7	3.4
11	0	0	5.47	13	3.5	0.7 3.3	90.4	1.7	0.7	3.3
12	0.4	1	6.4	16	4.6	0.8 3.4	91.9	1.8	0.8	3.4
13	0.33	3	4.74	43	4.7	1 3.7	88.6	2.1	1	3.7
14	0.34	3	4.65	41	5	1.3 3.9	87.4	2.3	1.3	3.9
15	0	0	1.89	9	5.2	1.2 3.8	89	2.3	1.2	3.8
16	0.34	2	4.04	24	5.8	1.4 4	88.8	2.5	1.4	4
17	0	0	1.16	8	5.9	1.4 3.9	90.4	2.4	1.4	3.9
18	0.36	7	3.84	74	6.2	1.8 4.4	79.7	2.9	1.8	4.4
19	0.59	6	5.83	59	6.7	2.2 4.8	73.5	3.3	2.2	4.8
20	0.36	3	3.27	27	7.5	2.3 5	73	3.5	2.3	5
21	0.8	7	6.74	59	7.8	2.7 5.3	64.6	3.8	2.7	5.3
22	1.31	4	10.8	33	8.1	2.8 5.5	63.8	4	2.8	5.5
23	0.29	3	2.44	25	8.1	3 5.6	65.6	4.1	3	5.6
24	0	0	3.48	5	9.6	2.9 5.6	68.7	4.1	2.9	5.6
25	0.86	9	5.75	60	9.8	3.4 6.1	52.6	4.5	3.4	6.1
26	0.2	1	1.38	7	10.3	3.4 6.1	56.7	4.6	3.4	6.1
27	1.29	8	4.36	27	19.4	3.8 6.6	12	5.1	3.8	6.6
28	1.24	12	1.45	14	55.3	4.6 7.6	0	5.9	4.6	7.6
29	3.24	18	2.7	15	77.1	5.6 9	0	7.1	5.6	9
POOL	0.44	95	4.01	865			0	7.1	5.6	9

Pooled Age:  $7.1 \pm 0.8$  Ma

礦物：磷灰石 (Apatite)

 $\zeta$  校正値： $340 \pm 12$  (yr · cm<sup>2</sup>)Central Age:  $6.5 \pm 1.6$  Ma

標準玻璃種類：NBS612

 $\chi^2$  Age:  $5.1 \pm 0.7$  Ma

標準玻璃又發合飛機數目：2348

平均 U 濃度 (ppm):  $1.3 \pm 2$  ( $2\sigma$ )標準玻璃核飛機密度： $4.696 \times 10^5$  (tracks/cm<sup>2</sup>)

