

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

亞美尼亞及高加索造山帶火成岩的

地球化學特性與岩石成因

Geochemical Characteristics and Petrogenesis of Pre- to  
Post-collisional Igneous Rocks in Armenia and Caucasian regions



林俞青

Yu-Chin Lin

指導教授：鍾孫霖 博士

Advisor: Sun-Lin Chung, Ph.D.

中華民國 100 年 7 月

July, 2011

## 中文摘要

阿拉伯與歐亞大陸板塊的碰撞造山，包含數個小地塊的拼貼或增積，因此被稱為土耳其式造山運動。此造山帶主要由高加索、伊朗以及安納托利亞高原所組成(簡稱為 CIA 地區)，碰撞前後均有廣泛分布的火成岩，前者為新特提斯洋向北隱沒所造成，後者約從 11 Ma 開始，形成機制多所爭議，本研究首先針對亞美尼亞境內的碰撞前與碰撞後火成岩進行地球化學與定年分析，討論岩石成因，再比對其他 CIA 地區碰撞後火成岩之地化性質與時空變化，綜合探討整個地區的碰撞後岩漿活動與地體構造演化。

本研究共分析採自亞美尼亞的 12 個碰撞前火成岩與 35 個碰撞後火成岩標本。結果顯示前者的形成年代介於 57.5-26.5 Ma 之間，屬中鉀鈣鹼性系列；後者的形成年代小於 4.4 Ma，屬高鉀鈣鹼性系列。兩期火成岩皆具有輕稀土與其他高不相容元素的富集、高場力鍵結元素的虧損、並具有相似的鋇釷同位素組成( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \approx 0.7040$  to  $0.7047$ ;  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \approx 0.5127$  to  $0.5129$ )。然而，碰撞後火成岩的鉀質與高不相容元素富集的程度明顯較高，根據稀土元素模擬計算，碰撞後火成岩之部份熔融程度(3-6%)較碰撞前火成岩(8-10%)來得小，但兩者的地函源區均為尖晶石至石榴子石二輝橄欖岩過渡帶，約 60-80 公里深，且受過隱沒作用的富集，與其他 CIA 地區碰撞後火成岩之源區類似。

CIA 地區的碰撞後岩漿活動不但普遍造成高鉀鈣鹼性系列岩石，還造成了埃達克岩與超鉀質岩。超鉀質岩目前只在伊朗西北部 Saray 火山被發現，噴發於 11 Ma，具有相對富集的鋇釷同位素組成( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \approx 0.7078$ ;  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \approx 0.5125$ )、由含金雲母之富集岩石圈地函發生小程度部份熔融而形成。埃達克岩分布較廣泛，約從 6Ma 肇始，由東安納托利亞經亞美尼亞到大高加索地區形成向東北逐漸年輕的噴發趨勢，並在伊朗西北部造成 Sahand 和 Sabalan 兩大火山，其鋇釷同位素組成均勻( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \approx 0.7041$  to  $0.7050$  and  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \approx 0.5127$  to  $0.5128$ )，與其他碰撞後鈣鹼性火山岩無異、應屬碰撞增厚的基性底侵下地殼熔融所造成。

整個 CIA 地區之碰撞後鈣鹼性岩漿活動約始於 11 Ma，有先向南再向東遷移的時空變化趨勢，推測是由於大陸碰撞起始地區東安納托利亞之下的新特提斯洋岩

石圈先向南退卻(slab roll-back)、接著向東撕裂(tear migration, 約自 6 Ma 開始)、最後拆解(slab break-off, 約自 2 Ma 開始)的結果。此一地體構造改變，導致軟流圈上湧並造成岩漿活動的廣泛分布及時空變化。此外，CIA 西南部的火山活動從 2 Ma 左右終止，推測是受到該地區岩石圈增厚的抑制，增厚的機制除了和碰撞相關的構造增厚之外，可能還包含新的岩石圈地函形成，後者為早期碰撞後岩漿活動在軟流圈頂部的熔融殘餘、具有耐熔的特性。因此，基於阿拉伯與歐亞兩大陸塊的異時斜向碰撞，碰撞後岩漿活動預期將會沿著札格羅斯縫合帶(Zagros suture)，向東南方向逐漸發展。



## ABSTRACT

Armenia is located in the Arabia-Eurasia continental collision zone that has also been considered as the product of the “Turkic-type” orogeny involving accretion of a number of terranes. Cenozoic magmatism in this zone, named CIA (Caucasus-Iran-Anatolia) province in this study, took place in two main stages that, respectively, pre- and post-date the Arabia-Eurasia collision. Whereas the pre-collisional magmatism has been generally ascribed to the Neotethyan subduction, how was the cause or mechanism of the voluminous post-collisional volcanism formed has long been an issue of debates.

This study reports new ages and geochemical data of the pre- and post-collisional igneous rocks from Armenia. All the studied rocks are calc-alkaline and characterized by enrichment in LREE and other highly incompatible trace elements (e.g., Rb, Ba, Th, U), and depletions in the high field strength elements (e.g., Nb, Ta, Ti). These geochemical features, similar to those of coeval magmatic rocks from the CIA province, support the existence of a subduction-modified mantle that prevails throughout the Cenozoic. In Armenia, however, post-collisional rocks are more enriched in potassium and highly incompatible trace elements than pre-collisional ones. Post-collisional basalts [La=24-63 ppm;  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 5.8-20$ ], for example, are more LREE-enriched than pre-collisional basalts [La=15-28 ppm;  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  of 3.5-7.9]. All the Armenian rocks show rather uniform Sr-Nd isotopic ratios ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \approx 0.7040$  to  $0.7047$ ;  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \approx 0.5127$  to  $0.5129$ ), similar to the isotopic compositions reported in other CIA magmatic provinces. REE modeling suggests that Armenian pre- to post-collisional basaltic magmas were derived from a common mantle source that is located in spinel- to garnet-lherzolite transition region at ~60-80 km depth, with melting degrees being larger in the former (8-10 %) and smaller in the latter (3-6 %).

The Armenian results, combined with our data from other parts of the CIA province and literature information from E. Anatolia, allow us to better constrain the temporal, spatial and geochemical variations in the CIA province. The post-collisional volcanism began at ca. 11 Ma, and it shows change in time and space, prevailing during 9-6 Ma in E. Anatolia or the southwestern part of the CIA volcanic province and then

migrating eastward. No volcanism occurred in the southwestern CIA province since ~2 Ma. Along with the predominant calc-alkaline rocks, adakites and ultrapotassic rocks are observed in the CIA volcanic province. The adakites are small-volume but widespread, erupting with a northeastward-younging trend from E. Anatolia to the Greater Caucasus. They have uniform Sr-Nd isotope ratios ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \approx 0.7041$  to  $0.7050$  and  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \approx 0.5127$  to  $0.5128$ ), similar to those of the other CIA post-collisional volcanics, suggesting a common mantle source. The ultrapotassic rocks that were emplaced in Saray, NW Iran, as one of the earliest eruptions (~11 Ma), have more “radiogenic” Sr-Nd isotope ratios ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \approx 0.7078$ ;  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \approx 0.5125$ ). The adakites are interpreted as partial melts of eclogitized lower crust, formed by basaltic underplating during the Neotethyan subduction and thickened by the collision, and the ultrapotassic rocks as small-degree melts of the metasomatized lithospheric mantle.

The driving force of the CIA post-collisional volcanism may be attributed to roll-back and then break-off of the subducted Neotethyan slab that, assuming an oblique/diachronous collision between Arabia and Eurasia, may have started from the northwest, i.e., beneath the southwestern CIA province, and propagated southeastward. Volcanism thus produced may later be ceased owing to the formation of new lithospheric mantle from below, as the melting residue, and subsequent crustal/lithospheric thickening caused by the continued collision. Under this framework, it is predictable that the post-collisional magmatism will eventually migrate southeastward along the Zagros suture zone.

# 目錄

中文摘要 .....	i
英文摘要 .....	iii
目錄 .....	v
圖目 .....	viii
表目 .....	x
<b>Chapter 1 緒論.....</b>	<b>1</b>
1.1 前言 .....	1
1.2 前人研究 .....	2
1.2.1 區域地質背景 .....	2
1.2.2 CIA 地區的岩漿活動 .....	4
1.3 研究動機與目的 .....	9
1.3.1 研究動機 .....	9
1.3.2 研究目的 .....	9
<b>Chapter 2 研究方法 .....</b>	<b>10</b>
2.1 野外調查與採樣 .....	10
2.2 岩象觀察 .....	12
2.3 全岩主量元素含量分析 .....	12
2.4 全岩微量元素含量分析 .....	13
2.4.1 標本前處理 .....	13
2.4.2 USGS 標準樣分析結果 .....	14
2.5 鋇-釷同位素組成分析 .....	19
2.5.1 標本前處理 .....	19
2.5.2 鋇-釷同位素化學分離流程 .....	19
2.5.3 標準樣分析結果 .....	22
2.6 全岩氫-氫定年分析 .....	23
2.6.1 標本前處理 .....	24
2.6.2 標本分析流程 .....	24

2.7	鋁石鈾-鉛定年分析 .....	25
2.7.1	樣品靶(target)的製備 .....	25
2.7.2	儀器配置與分析方法 .....	26
<b>Chapter 3</b>	<b>亞美尼亞火成岩分析結果 .....</b>	<b>28</b>
3.1	野外觀察 .....	28
3.2	岩象觀察 .....	29
3.2.1	碰撞前火成岩 .....	29
3.2.2	碰撞後火成岩 .....	29
3.3	定年結果 .....	32
3.3.1	全岩氫-氫定年 .....	33
3.3.2	鋁石鈾-鉛定年 .....	34
3.4	主量元素 .....	44
3.5	微量元素 .....	44
3.6	鋇-釷同位素 .....	55
<b>Chapter 4</b>	<b>亞美尼亞火成岩之岩石成因與綜合討論 .....</b>	<b>58</b>
4.1	亞美尼亞地區 .....	58
4.1.1	地函源區性質 .....	58
4.1.2	岩石成因 .....	59
4.2	其他 CIA 地區碰撞後火成岩數據 .....	62
4.2.1	前人研究 .....	62
4.2.2	相關數據 .....	65
4.3	CIA 地區構造背景與地塊邊界 .....	69
4.3.1	Reilinger et al., 2006 .....	69
4.3.2	Moix et al., 2008 .....	70
4.3.3	Sengor et al., 2003 .....	70
<b>Chapter 5</b>	<b>CIA 地區碰撞後岩漿活動 .....</b>	<b>74</b>
5.1	地球化學特性與岩石成因 .....	74
5.1.1	地函源區組成 .....	74
5.1.2	部份熔融程度 .....	77

5.1.3	地殼混染與結晶分化作用 .....	82
5.2	CIA 地區超鉀質岩與埃達克岩 .....	83
5.2.1	超鉀質岩 .....	83
5.2.2	埃達克岩 .....	87
5.2.3	時空分布與岩石成因 .....	90
5.3	CIA 地區岩漿活動之時空變化 .....	93
5.4	CIA 岩石成因與地體構造演化模型 .....	99
5.4.1	碰撞前岩漿活動 .....	99
5.4.2	碰撞後岩漿活動 .....	100
<b>Chapter 6</b>	<b>結論.....</b>	<b>104</b>
<b>致謝</b>	<b>.....</b>	<b>106</b>
<b>參考文獻</b>	<b>.....</b>	<b>107</b>



## 圖目

圖 1-1	歐亞大陸板塊邊上的三個碰撞造山帶 .....	1
圖 1-2	高加索-伊朗-安納托利亞地區火成岩地質圖 .....	3
圖 1-3	東安納托利亞高原碰撞後火成岩年代分布 (Keskin, 2003) .....	5
圖 1-4	埃達克岩形成之地體構造與岩漿特性 (Moyen, 2009) .....	8
圖 2-1	亞美尼亞地質圖與採樣點 .....	10
圖 2-2	USGS 標準樣之精準度與準確度對各微量元素作圖 (岩石粉末) .....	16
圖 2-3	USGS 標準樣之精準度與準確度對各微量元素作圖 (玻璃餅) .....	18
圖 2-4	第一分離柱沖提圖 .....	20
圖 2-5	鋇純化分離柱沖提圖 .....	20
圖 2-6	第二分離柱沖提圖 .....	21
圖 2-7	Neptune-MC-ICP-MS 長期測量標準樣之結果 .....	22
圖 2-8	亞美尼亞前人之定年結果 .....	23
圖 2-9	鋳石定年分析結果 (Chiu et al., 2009) .....	27
圖 3-1	玄武岩標本(09ARM26-1)岩象照片 .....	30
圖 3-2	玄武岩質安山岩標本(09ARM26-2)岩象照片 .....	30
圖 3-3	凝灰岩標本(09ARM24)岩象照片 .....	30
圖 3-4	輝長岩標本(09ARM30-1)岩象照片 .....	30
圖 3-5	安山岩標本(09ARM02-1)岩象照片 .....	31
圖 3-6	黑曜岩標本(09ARM03-2)岩象照片 .....	31
圖 3-7	玄武岩質粗面安山岩標本(09ARM12)岩象照片 .....	31
圖 3-8	亞美尼亞火成岩之定年結果 .....	32
圖 3-9	亞美尼亞碰撞前火成岩之全岩氫-氦定年結果 .....	35
圖 3-10	亞美尼亞碰撞後火成岩之全岩氫-氦定年結果 .....	36
圖 3-11	亞美尼亞之鋳石鈾鉛定年協和圖與 CL image .....	39
圖 3-12	亞美尼亞全岩 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 對 $\text{SiO}_2$ 作圖 .....	46
圖 3-13	亞美尼亞全岩 $\text{K}_2\text{O}$ 對 $\text{SiO}_2$ 作圖 .....	46
圖 3-14	亞美尼亞全岩主量元素 Harker 圖 .....	47
圖 3-15	亞美尼亞碰撞前火成岩之隕石標準化稀土元素分布圖 .....	51
圖 3-16	亞美尼亞碰撞後火成岩之隕石標準化稀土元素分布圖 .....	52

圖 3-17	亞美尼亞碰撞前火成岩之原始地函標準化整體不相容元素分布圖 .....	53
圖 3-18	亞美尼亞碰撞後火成岩之原始地函標準化整體不相容元素分布圖 .....	54
圖 3-19	(a)、(b) 鋁-鈹同位素值分別對全岩二氧化矽含量作圖 .....	56
圖 3-20	鈹同位素對鋁同位素作圖 .....	56
圖 4-1	亞美尼亞地區火山岩之全岩 Th/Yb 對 Ta/Yb 作圖 .....	61
圖 4-2	亞美尼亞地區火成岩之全岩 Nb/Zr <sub>(n)</sub> 對 Zr 作圖 .....	61
圖 4-3	CIA 地區碰撞後火山岩之全岩 Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O 對 SiO <sub>2</sub> 作圖 .....	64
圖 4-4	CIA 地區碰撞後火山岩之全岩 K <sub>2</sub> O 對 SiO <sub>2</sub> 作圖 .....	64
圖 4-5	地塊邊界模型 (Reilinger et al., 2006) .....	69
圖 4-6	地塊邊界模型 (Moix et al., 2008) .....	70
圖 4-7	安那托利亞高原東部地塊邊界 (Sengor et al., 2003) .....	71
圖 4-8	CIA 地區碰撞前火成岩分布圖 .....	71
圖 5-1	以稀土元素模擬計算部份熔融來源深度 .....	76
圖 5-2	CIA 地區岩石圈剖面 (Angus et al., 2006) 。 .....	76
圖 5-3	以稀土元素模擬計算部份熔融程度 .....	79
圖 5-4	CIA 地區火成岩部份熔融程度與其鈣鹼序列 .....	79
圖 5-5	CIA 埃達克岩與超鉀質岩地球化學分析(a) K <sub>2</sub> O vs. SiO <sub>2</sub> .....	85
圖 5-6	CIA 埃達克岩與超鉀質岩地球化學分析(b) K <sub>2</sub> O vs. Na <sub>2</sub> O .....	85
圖 5-7	CIA 埃達克岩與超鉀質岩地球化學分析(c) MgO vs. SiO <sub>2</sub> .....	86
圖 5-8	CIA 超鉀質岩與埃達克岩之鋁鈹同位素組成 .....	86
圖 5-9	CIA 埃達克岩之 Sr/Y vs. Y .....	88
圖 5-10	CIA 埃達克岩之(a)整體不相容元素圖與(b)稀土元素分布圖 .....	88
圖 5-11	CIA 地區地殼厚度圖 .....	91
圖 5-12	CIA 超鉀質岩與埃達克岩之定年結果與時空分布 .....	92
圖 5-13	CIA 地區碰撞後火山岩之時空變化 .....	94
圖 5-14	隱沒之海洋岩石圈拆解模式 (Wortel and Spakman, 2000) .....	97
圖 5-15	CIA 地區兩百萬年來之地體構造模型 .....	97
圖 5-16	CIA 地區斷層攝影影像 (Maggi and Priestley, 2005) .....	98
圖 5-17	CIA 地區斷層攝影影像 (Hafkenscheid et al., 2006) .....	98
圖 5-18	CIA 地區之地體構造模型 .....	103

## 表目

表 2-1	亞美尼亞採樣點標本描述與分析項目 .....	11
表 2-2	USGS 標準樣以 ICP-MS 測量之結果(岩石粉末標準樣, n=3).....	15
表 2-3	USGS 標準樣以 ICP-MS 測量之結果(玻璃餅標準樣, n=3).....	17
表 3-1	亞美尼亞定年結果整理 .....	32
表 3-2	全岩氫-氦定年結果整理 .....	34
表 3-3	亞美尼亞碰撞前火成岩之全岩氫-氦定年分析結果 .....	37
表 3-4	亞美尼亞碰撞後火成岩之全岩氫-氦定年分析結果 .....	38
表 3-5	亞美尼亞碰撞後噴出岩之鋯石鈾-鉛定年結果 .....	41
表 3-6	亞美尼亞碰撞前噴出岩之鋯石鈾-鉛定年結果 .....	42
表 3-7	亞美尼亞碰撞前侵入岩之鋯石鈾-鉛定年結果 .....	43
表 3-8	亞美尼亞全岩主量元素、微量元素及鋨-釷同位素分析結果 .....	48
表 3-9	鋨-釷同位素分析結果 .....	57
表 5-1	稀土元素計算模擬使用之尖晶石/石榴子石-二輝橄欖岩礦物組成與 La、 Sm、Yb 之分配係數與含量 .....	75
表 5-2	稀土元素計算模擬計算結果 .....	78
表 5-3	CIA 地區碰撞後之基性火山岩之稀土元素模擬結果與鈣鹼序列 .....	80
表 5-4	CIA 地區埃達克岩與超鉀質岩之地球化學與年代數據 .....	84

# Chapter 1 緒論

## 1.1 前言

陸-陸碰撞造山帶中以各種形式記錄了陸與陸聚合的過程，然而從陸與陸之間海洋岩石圈的隱沒一直到兩者碰撞、造山，這一系列的過程中往往伴隨著岩漿活動，火成岩的地球化學特徵記錄了它形成的機制與環境，因此藉由地球化學分析及定年分析，了解岩石成因，便可以推測地體構造的演化。

歐亞大陸上兩個主要的造山帶分別是由印度板塊、阿拉伯板塊與歐亞大陸碰撞所造成(圖 1-1)，前者為傳統陸-陸碰撞造山模式，後者為由許多微地塊、島弧及增積岩體拼貼而成的土耳其式造山(Turkic-type orogeny, Sengor and Natal'in, 1996)，為本研究之研究區域(Caucasus-Iran-Anatolia/Armenia，簡稱 CIA)，阿拉伯與歐亞大陸板塊碰撞開始的時間在晚始新世至早中新世之間，在這之前的島弧岩漿活動稱為碰撞前岩漿活動，在這之後的碰撞後岩漿活動則要到中新世晚期才開始，但是成因及模式仍存在許多討論空間，過去的研究多集中在土耳其境內，在亞美尼亞、喬治亞及伊朗地區則缺乏良好的地球化學分析結果，使得該地區的討論多侷限在各國之內，沒有整合性的討論。

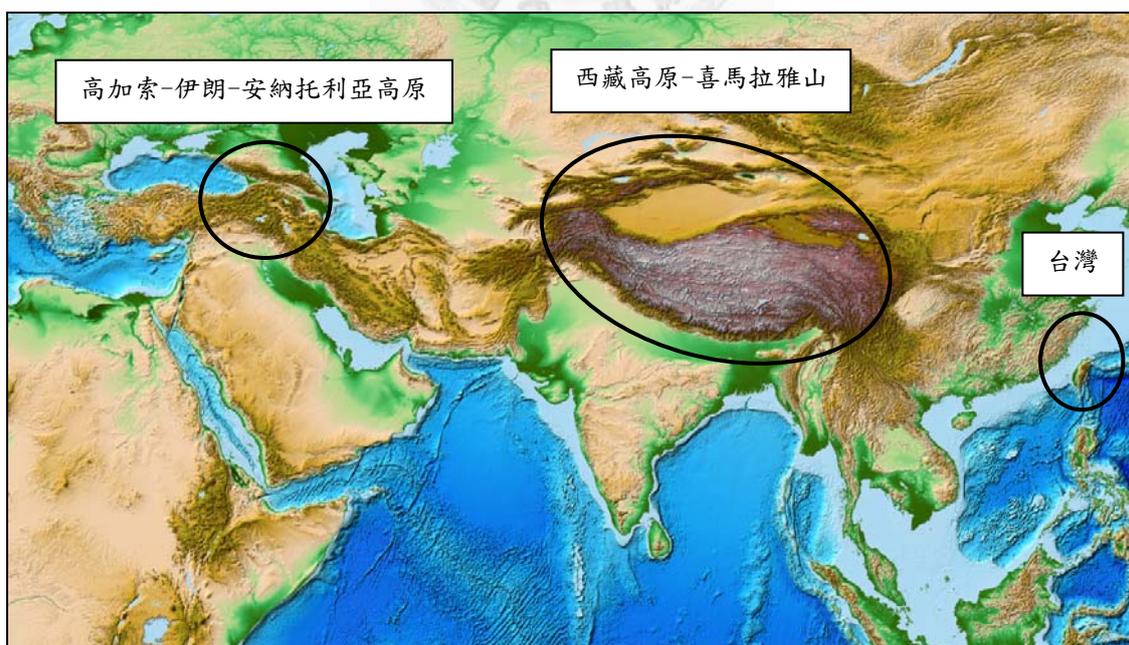


圖 1-1 歐亞大陸板塊邊上的三個碰撞造山帶，分屬於不同時期的造山階段

## 1.2 前人研究

### 1.2.1 區域地質背景

高加索-伊朗-安納托利亞高原地區(簡稱 CIA 地區)為阿拉伯板塊向北移動與歐亞大陸板塊碰撞形成的造山帶，其聚合速率與聚合時間較西藏高原-喜馬拉雅山地區來得慢與晚，前者自 25 Ma 陸-陸碰撞後的聚合速率約為 18-25 mm/yr，後者則自 45 Ma 以來約為 50-60 mm/yr (Hatzfeld and Molnar, 2010)。阿拉伯與歐亞大陸板塊間新特提斯洋所遺留的蛇綠岩套在伊朗地區發現最年輕的約為 35 Ma，代表該地區隱沒作用至少一直持續到此年代(Agard et al., 2005)，而陸-陸開始碰撞時間從海洋關閉的年代推測約是在晚始新世至早中新世之間(Koop et al., 1982)，兩陸塊間的海洋沉積物約持續到中新世中期(Gelati, 1975)，代表 CIA 地區至少在 12 Ma 時便已經開始抬升、海洋漸次消失(Pearce et al., 1990; Sengor et al., 2003)，並伴隨著北安納托利亞斷層(North Anatolian Fault, NAF)的形成與廣泛分布的碰撞後岩漿活動(Sengor et al., 2005; Faccenna et al., 2006)，抬升後的 CIA 地區現今海拔高度約 2 公里，土耳其東部為穹隆狀的隆起，根據地殼均衡學說應有 55 公里厚的地殼來支持這樣的高度(Sengor, 1980)，但震測分析指出此地的地殼厚度平均僅約 45 公里，且岩石圈地函相當薄甚至不存在，因此認為 CIA 地區的地殼是由熱的軟流圈所支持(Sengor et al., 2003; Angus et al., 2006)。

CIA 地區被廣泛的火成岩體所覆蓋，若以阿拉伯與歐亞大陸板塊碰撞作為事件的分界點，可以將這地區的火成岩成因分為碰撞前岩漿活動與碰撞後岩漿活動；碰撞前岩漿活動在這裡所指的是陸-陸碰撞前，兩陸塊之間的新特提斯洋向北隱沒至歐亞大陸板塊下造成的島弧岩漿噴發與侵入活動(Sengor and Yilmaz, 1981)；碰撞後岩漿活動則是指陸-陸碰撞之後，由於板塊的增厚、抬升等因素讓地體構造產生改變，而讓岩漿得以形成，進而噴發至地表或侵入至岩體中。但為何在這個區域擁有如此廣泛分布的碰撞後岩漿活動，以至碰撞開始時間、地體構造的演化等，都尚有許多討論的空間。

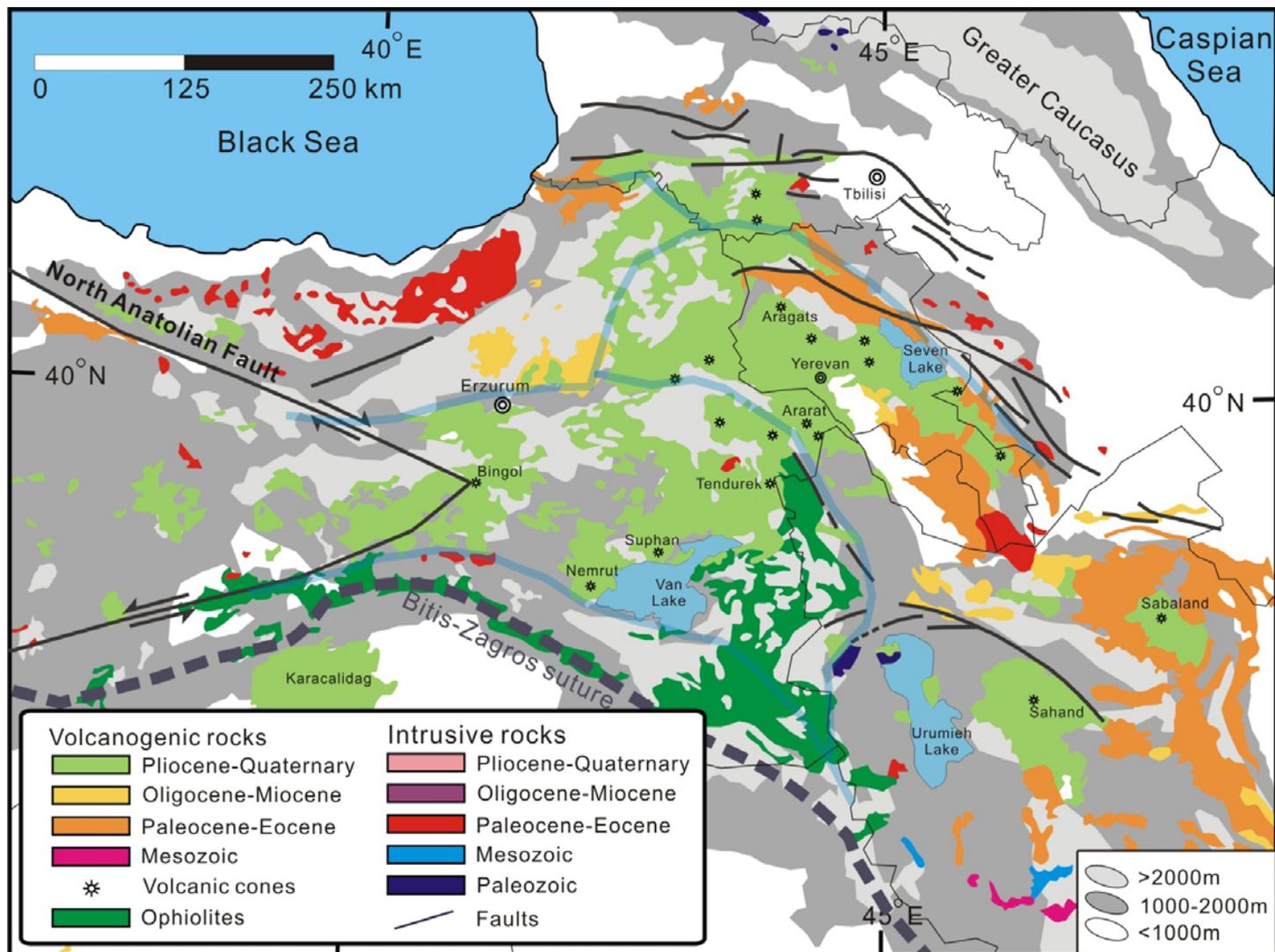


圖 1-2 高加索-伊朗-安納托利亞地區火成岩地質圖，藍色線條為 Sengor 等人於 2003 所定的地塊邊界，灰底為依據等高線所繪高度。(以中東地質圖重繪)

## 1.2.2 CIA 地區的岩漿活動

CIA 地區的岩漿活動主要可以分為始新世與中新世晚期以來，分別為圖 1-2 中的橘色與淺綠色火成岩分布，陸-陸碰撞時間介於這兩者之間，因此前者稱為碰撞前岩漿活動，後者稱為碰撞後岩漿活動，但在前人文獻中仍有些爭議，並在下面章節作介紹。

### 1.2.2.1 碰撞前岩漿活動

CIA 地區的碰撞前岩漿活動主要活動年代為始新世，在前人文獻中主要分為兩大區塊，區塊之間為文獻較少的亞美尼亞、亞塞拜然以及喬治亞等國，兩區塊分別為位於土耳其北邊、黑海南邊的 Pontides (Eastern Pontide magmatic arc) 以及位於伊朗的 UDMA (Urumieh-Doktar magmatic arc)，這兩者地球化學分析結果皆為鈣鹼性的島弧岩漿，是由新特提斯洋向北隱沒至歐亞大陸板塊下所造成 (Sengor and Yilmaz, 1981; Berberian et al., 1982; Boztug et al., 2006)。前者的岩漿活動一直持續到古新世晚期-始新世早期，安納托利亞地塊與該地塊碰撞、縫合後停止；後者的岩漿活動則是因為阿拉伯與歐亞大陸板塊的異時斜向碰撞，而在各地區有不同的碰撞前岩漿活動停止時間，伊朗西北部-亞美尼亞地區較伊朗東南部早開始陸-陸碰撞，因此岩漿活動較早停止，末期的事件為漸新世晚期至中新世早期的侵入岩體 (Chiu et al., 2010)。

### 1.2.2.2 碰撞後岩漿活動

CIA 地區從中新世晚期(約 11 Ma, 圖 1-3 中間)以來的岩漿活動一般被認為為碰撞後岩漿活動，主要為分布廣泛的鈣鹼性火山岩 (Pearce et al., 1990)。碰撞後岩漿活動是由於造山帶演化後期，地體構造在陸-陸碰撞不斷的擠壓之後改變，地溫梯度改變或軟流圈上湧使得岩漿得以再次形成、噴發，這一過程所造成的地溫梯度驟增和後碰撞拉張作用，往往能引起岩石圈內富集地函的小程度部份熔融，形成造山型高鉀質岩漿，此類岩漿具有與島弧岩漿類似的地球化學特性，如高場力鍵結元素虧損，甚至是以鈣鹼質岩漿的特性產出，但這些岩漿活動的同時，其地體構造已非隱沒作用的環境，這些岩漿之所以會具有島弧岩漿的特性，是因為其地函源區受碰撞前隱沒作用的影響，發生地函交代變質作用 (mantle metasomatism)

所造成；地體構造的改變可能是因為造山帶在陸-陸碰撞後發生了海洋岩石圈的拆解(slab break-off)或是下部地殼的拆層(delamination)等作用使得軟流圈上湧、產生碰撞後岩漿活動(Pearce et al., 1990; Keskin, 2003)，以下將 CIA 各地區碰撞後岩漿活動的前人研究作簡單的介紹。

Keskin (2007)中針對土耳其東部的碰撞後岩漿活動整理出十餘種模型，根據該地的斷層分布、碰撞與抬升速率、沉積相分布、斷層分布與類型、大地構造、火山時間與空間的變化等資訊，而認為地函柱(mantle plume)、岩石圈地函大規模的拆層(delamination of lithospheric mantle)、微地塊的逃逸等模型皆不是造成此地區大量碰撞後岩漿活動的原因。他們發現碰撞後岩漿活動大約在 11 Ma 於北邊的 Erzurum-Kars plateau 開始，之後向南方移動(圖 1-3)，岩漿的地球化學性質亦有由北向南轉變的現象，如從鈣鹼質轉變為鹼質、隱沒組份減少甚至沒有、岩漿與地殼間的結晶分化混染作用增加等(Pearce et al., 1990; Keskin, 2003)，而認為 East Anatolian Accretionary Complex (EAAC, 圖 1-3 中間區域)下海洋岩石圈的向南退後、下沉及斷離(slab roll-back、steeping & break-off)，使得軟流圈上湧造成上部地函的部份熔融，才是這地區碰撞後岩漿廣泛分布的成因。

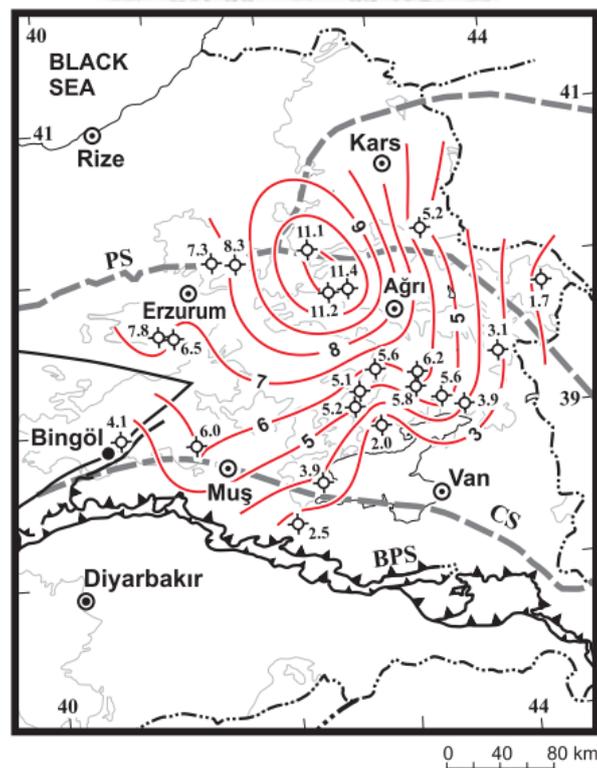


圖 1-3 東安納托利亞高原碰撞後火成岩年代分布(Keskin, 2003)

Kheirkhah 等人(2009)分析土耳其與伊朗邊境火成岩的結果，指出含鹼量亦有由北向南下降的趨勢，且同樣具有隱沒作用影響的地球化學特性，但認為此地與 EAAC 的岩漿成因不完全相同，而是小程度的拆層作用(partial delamination)及海洋岩石圈的拆解作用共同影響其岩石成因。Yilmaz 等人(1987)則指出東安納托利亞高原的火成岩有逐漸向東移動的現象，且中新世晚期的火成岩為鹼性，中新世晚期至上新世早期的火成岩為鈣鹼性，但更新世以來的火成岩又屬於鹼性，其大地應力也逐漸從南北向的擠壓轉為東西向的伸張。在縫合帶南邊的阿拉伯前陸盆地中也有介於這個時期內的岩漿活動，但地球化學分析結果指出那些拉斑質玄武岩的成因與洋島玄武岩相似，於較深的軟流圈形成；岩石成因與縫合帶北邊 CIA 地區明顯不同(Pearce et al., 1990; Kheirkhah et al., 2009)。

此外，在伊朗地區也有許多模型去做中新世晚期開始的岩漿成因解釋，如 Azizi 與 Moinevaziri (2009)提出伊朗西北部在白堊紀與中新世之間的岩漿活動間斷(magmatism gap)是由於弧後盆地的發生，而中新世以來的岩漿活動是由於隱沒作用所造成的島弧岩漿。亞塞拜然境內亦分布始新世以來的岩漿活動，Dilek 等人(2009)文中認為其始新世火成岩是由於伊朗地塊/南亞美尼亞地塊與歐亞大陸板塊間的隱沒的海洋岩石圈發生斷離作用所造成，13 Ma 以來的岩漿活動則是因為岩石圈地函的拆層作用導致。亞美尼亞境內中新世以來的岩漿活動約從 17.5 Ma 開始，廣泛分布的酸性火成岩是由於此地區在張裂環境下快速抬升造成之地殼深熔作用，岩漿延著西北至東南方向的走向滑移斷層形成一系列的火山，且在岩漿庫中沒有經歷明顯的結晶作用(Karapetian et al., 2001)。

若從模擬海洋岩石圈拆解作用的結果來看(van Hunen and Allen, 2011)，阿拉伯與歐亞大陸板塊間從陸-陸碰撞開始到海洋岩石圈發生拆解之間約需要 20-25 Myr 的時間，因此他們認為陸-陸開始碰撞的時間約為 35 Ma，板塊拆解作用則是在 10-15 Ma 之間發生。此外亦有從特提斯洋隱沒體積的估算(Hafkenscheid et al., 2006)來推測 CIA 地區海洋岩石圈拆解作用發生的年代，他們認為阿拉伯中部地區在 30 Ma 時最早開始發生海洋岩石圈拆解作用；之後向兩邊撕裂，12 Ma 時才造成土耳其東部以及伊朗東南部的海洋岩石圈拆解作用。

從以上幾篇前人文獻回顧來看，可以發現在鄰近地區，如亞美尼亞、亞塞拜然以及伊朗，就存在許多種模型去解釋碰撞後岩漿活動的形成機制，是否全都合適需要整合性的去探討與了解這地區一系列的岩石成因及地體構造演化。此外，在 CIA 地區我們發現碰撞後岩漿活動有超鉀質岩以及埃達克岩的分布(Keskin et al., 2006)，其特殊的形成環境可以為地體構造提供一些控制因子，因此以下對這兩種岩性做介紹。

### (1) 超鉀質岩 (ultrapotassic rocks)

超鉀質岩是根據地球化學特徵命名的一類岩石，根據 Foley 等人(1987)的定義為具有  $K_2O > 3\%$ 、 $MgO > 3\%$  以及  $K_2O/Na_2O > 2$  的全岩地球化學特徵；由於此類岩石僅由有限的指標所定義，因此此類岩石實際上包含了多種岩石類型，具有不同的產狀、礦物組合、化學組合和構造背景。超鉀質岩可以大略分為鉀鎂煌斑岩 (lamproite)、鉀霞橄黃長岩 (kamafugite) 和造山帶超鉀質岩三種基本類型(Foley et al., 1987)，不同類型的超鉀質岩具有不同的岩石成因。其中造山帶超鉀質岩具有高 CaO 與  $Al_2O_3$  含量，結晶分化作用造成低的 Mg#，但主要的岩漿擁有地函來源的特性；此岩性於活動造山帶與古老造山帶皆有出現，其地球化學特徵一般被認為與低鹼性島弧岩漿相似，Ti、Nb 與 Ta 的虧損是因為隱沒作用中，鈦酸岩相礦物不傾向於進入部份熔融岩漿中，使岩漿中這些元素的虧損，高的  $K_2O$  含量則是從隱沒的地殼物質或成熟島弧底下地函的富集作用中得來，高 CaO 與  $Al_2O_3$  含量則來自於難熔物質的熔融(Foley et al., 1987)。在 McKenzie 於 1989 年對於地函中小程度部份熔融岩漿移動的研究中指出：這些含鉀量高的熔融物在岩石圈形成，但在上升的過程中因這種小程度的部份熔融的體積太小而無法傳遞太多熱量，在到達熔融溫度的穩定態地溫梯度後便會凝固，也就是說在到達地表前便會成為固態；這些物質的組成與鉀鎂煌斑岩、金柏利岩以及火成碳酸岩漿類似，包含有至少 1% 的  $K_2O$ ，而這些鉀質在凝固時會進入金雲母或角閃石中，當這些熔融物質在機械邊界層 (Mechanical boundary layer) 中時，鋇鉍同位素的分化作用使得上部地函具有相對大異常的鋇鉍同位素組成；且因為地溫梯度是位於其固溶線上，只要發生輕微的溫度提高或張裂作用，造成減壓或加熱事件，他們將非常容易重熔而得以上升至地表，形成超鉀質岩。

## (2) 埃達克岩 (adakites)

埃達克岩是根據地球化學特徵命名的一類岩石，此類岩石原指年輕而溫度較高的海洋岩石圈隱沒後，海洋岩石圈本身熔融所產生的中酸性岩漿，具有  $\text{SiO}_2 > 56\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$ 、 $\text{MgO} < 3\%$  (很少  $> 6\%$ )、低 HREE ( $\text{Yb} < 1.9 \text{ ppm}$ ) 和  $\text{Y} (< 18 \text{ ppm})$ 、高 Sr (很少  $< 400 \text{ ppm}$ )、高的 Sr/Y 和 La/Yb 比值等地球化學特徵(Defant and Drummond, 1990)。關於埃達克岩的定義及成因其實仍有些爭論(Martin et al., 2005)，但其特殊的岩石成因仍可以為該地的地體構造提供一些資訊。從實驗岩石學的結果來看，基性岩如榴輝岩相或石榴子石相，發生部份熔融便會留下石榴子石為殘餘物，使得其岩漿 Sr 含量提高而 HREE 含量虧損，形成埃達克質岩漿(Rapp et al., 1991)。然而，這種岩性不僅只出現於海洋岩石圈熔融這種地體構造，還可能出現於增厚的下部地殼熔融(Chung et al., 2003)、海洋岩石圈上沉積物的熔融(Wang et al., 2008)、拆層岩石圈地函的熔融(Kay and Kay, 2002)、或是這類熔融的物質與地函交互作用再產生的岩漿等(Wang et al., 2008)；圖 1-4 為埃達克岩之形成環境及其岩漿性質之整理(Moyen, 2009)。

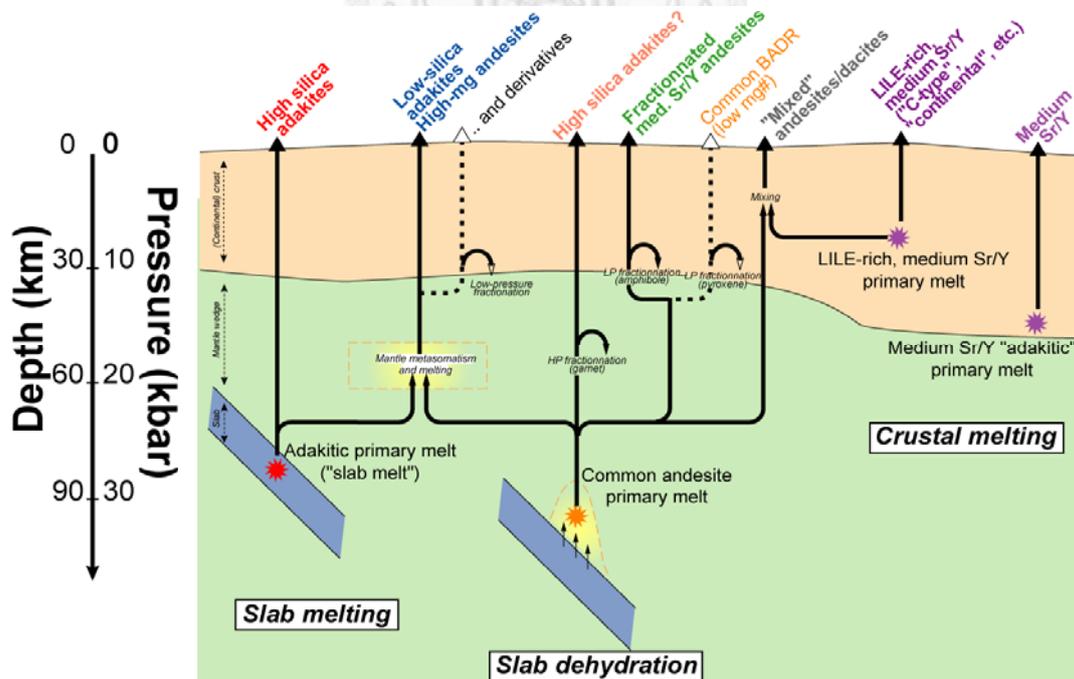


圖 1-4 埃達克岩形成之地體構造與岩漿特性 (Moyen, 2009)

## 1.3 研究動機與目的

### 1.3.1 研究動機

本研究主要研究區域亞美尼亞位於阿拉伯與歐亞大陸板塊聚合的造山碰撞帶，也就是高加索-伊朗-安納托利亞地區(CIA)；碰撞前與碰撞後兩期的岩漿活動在亞美尼亞境內皆有廣泛分布，且前人研究中對於亞美尼亞的研究並不完善，僅有少量的文獻發表，欠缺地球化學分析，CIA 地區大部份的研究集中在土耳其及伊朗地區，因此我們希望藉由亞美尼亞火成岩的地球化學與定年分析，進一步與 CIA 地區的火成岩體做比較與整合；並著重在碰撞後岩漿活動，了解其地球化學特性、地函源區性質及所受的交代變質作用、岩石成因及熱源機制，並嘗試合理的解釋熱源機制與地體構造的演化關聯，了解這種由許多地塊拼貼縫合的土耳其式造山帶的地體構造演變。

### 1.3.2 研究目的

- (1) 對亞美尼亞新生代以來碰撞前、後火成岩，建立完整且精確的全岩主量、微量元素以及鋁-鈹同位素組成、全岩氫-氦定年分析及鋁石鈾-鉛定年分析。
- (2) 探討亞美尼亞碰撞前與碰撞後火成岩的地球化學特性、地函源區性質及所受的交代變質作用、與岩石成因，了解此地區岩漿性質與地體構造的演變。
- (3) 從 CIA 地區碰撞後火成岩中的埃達克岩與超鉀質岩指示的岩石成因，配合其形成年代與地點，為架構 CIA 地區地體構造提供一些控制因子。
- (4) 從前人研究土耳其東部與伊朗西北地區碰撞後火成岩的地球化學與定年分析，配合我們所作的亞美尼亞的分析結果以及台大地質系地球化學與岩石成因實驗室在鄰近區域的新工作與未發表資料，檢視前人對於 CIA 地區後碰撞岩漿生成機制的模型，探討碰撞後岩漿性質隨著時間與空間的演變。
- (5) 深入探討阿拉伯與歐亞大陸碰撞造山帶中 CIA 地區的地體構造演化。

## Chapter 2 研究方法

### 2.1 野外調查與採樣

為探討亞美尼亞碰撞前與碰撞後兩期火成岩之地球化學性質與岩石成因，我們於亞美尼亞的西北部份別對碰撞前與碰撞後的火成岩做採集，共計採集岩樣 36 個，並有當地地質學家所提供的岩石樣本及粉末樣本共 11 個，根據前人研究、地質圖、野外觀察以及定年結果判斷，本研究分析的樣本為碰撞後噴出岩 35 個、碰撞前噴出岩 8 個、碰撞前侵入岩 4 個，見圖 2-1 與表 2-1。

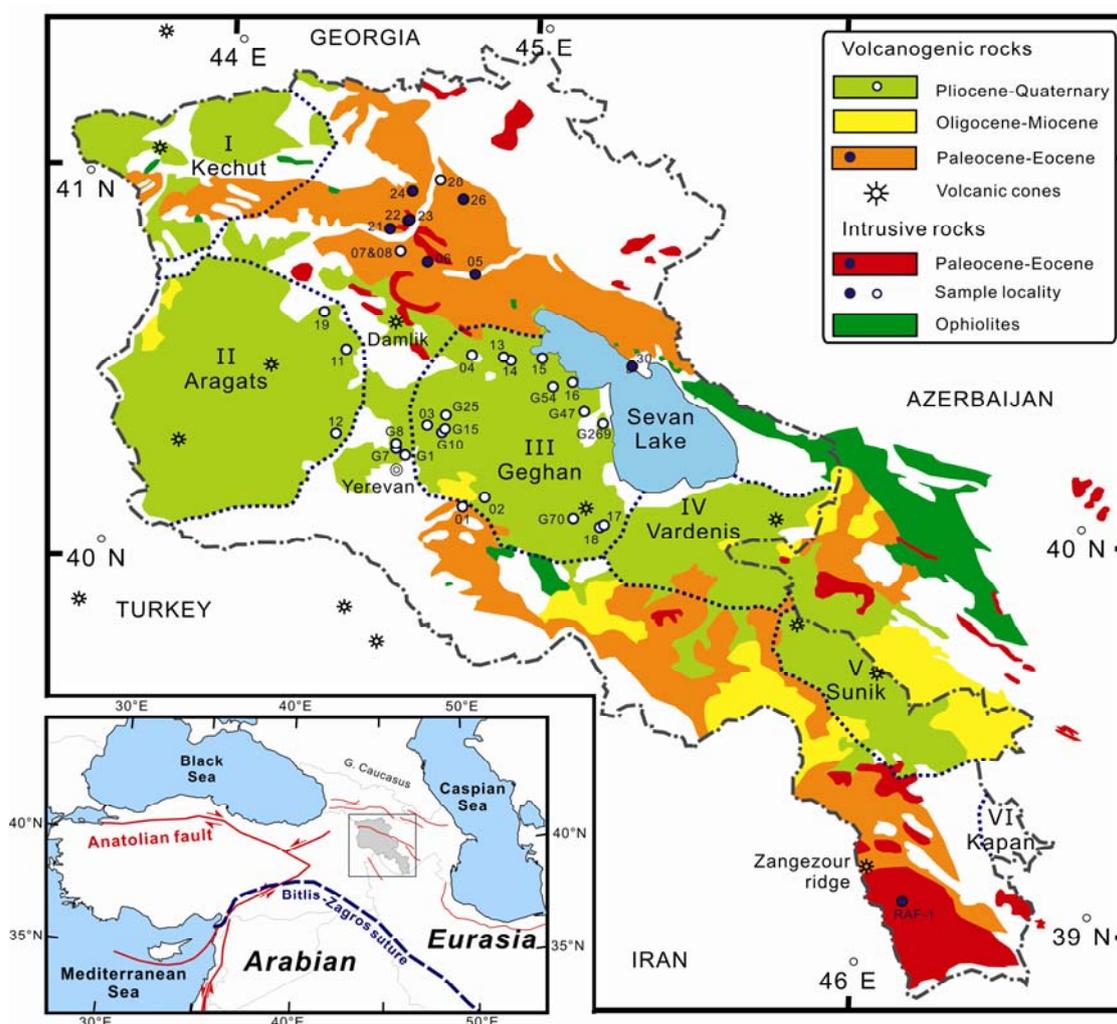


圖 2-1 亞美尼亞地質圖與採樣點，圖中將自行出野外採得樣本的“09ARM”做省略，僅以數字表示，空心圓圈代表碰撞後的年輕火成岩，實心圓圈代表碰撞前火成岩。亞美尼亞火成岩根據(Badalian et al., 2001)可畫為六個分區，如圖中 I~VI。(修改自亞美尼亞國家地圖集一書(Lemvel, 2007))

表 2-1 亞美尼亞採樣點標本描述與分析項目

	sample no.	brief description	major elements	trace elements	Sr-Nd isotope	zircon U-Pb dating	thin section	Ar-Ar dating
post-collisional extrusive rocks	G1	Basalt	◆	☆				
	G7	Basalt	◆	☆	◆			
	G8	Trachybasalt	◆	☆				
	G15	Rhyolite (obsidian)	◆	☆	◆			
	G25	Trachyandesite	◆	☆				
	G47	Trachybasalt	◆	☆	◆			
	G54	Trachyandesite	◆	☆				
	G70	Trachybasalt (scoria)	◆	☆				
	G105	Basaltic trachyandesite (scoria)	◆	☆				
	G269	Trachyandesite	◆	☆				
	09ARM01	Basaltic trachyandesite (columnar joint)	◆	☆	◆		◆	◇
	09ARM02-1	Andesite	◆	☆	◆	▲	◆	
	09ARM02-2	Basaltic trachyandesite	◆	☆			◆	
	09ARM02-3	Andesite	◆	☆			◆	
	09ARM03-1-1	Rhyolite (perlite)	◆	★			◆	
	09ARM03-1-2	Rhyolite (perlite)	◆	★	◆		◆	◆
	09ARM03-2-1	Rhyolite (obsidian)	◆	★			◆	
	09ARM03-2-2	Rhyolite (obsidian)	◆	★	◆		◆	
	09ARM04	Basaltic trachyandesite (porous)	◆	★			◆	◇
	09ARM07	Trachyandesite (lava flow)	◆	★	◆	▲	◆	
	09ARM08	Trachyandesite	◆	★			◆	◆
	09ARM11-1	Basalt (lava flow, fine-grained)	◆	★	◆		◆	
	09ARM11-2	Trachyandesite (course-grained)	◆	★			◆	◇
	09ARM12	Basaltic trachyandesite	◆	★			◆	◆
	09ARM13	Basaltic trachyandesite (scoria)	◆	☆	◆		◆	
	09ARM14	Trachyandesite	◆	☆	◆	△	◆	
	09ARM15	Trachyandesite (porous)	◆	☆			◆	◇
	09ARM16	Trachyandesite (porous)	◆	☆			◆	
09ARM17-1	Trachyandesite (scoria)	◆	☆	◆		◆	◇	
09ARM17-2	Trachyandesite	◆	☆			◆		
09ARM17-3	Trachyandesite	◆	☆			◆		
09ARM18	Trachyandesite (porous)	◆	☆			◆		
09ARM19-1	Trachydacite	◆	★			△	◆	
09ARM19-2	Trachydacite	◆	★	◆	△	◆	◇	
09ARM28	Basalt (lava flow, columnar joint)	◆	★	◆		◆	◆	
pre-collisional extrusive rocks	09ARM05-1	Basalt (fine-grained)	◆	★			◆	
	09ARM05-2	Basalt (course-grained)	◆	★	◆	△	◆	◆
	09ARM06	andesite (altered, off fault gauge)	◆			▲	◆	
	09ARM21	Basaltic andesite (low metamorphic tuff)	◆	★	◆	▲	◆	
	09ARM23-1	Dacite (tuff, fine-grained)	◆	★	◆		◆	
	09ARM24	Dacite (tuff)	◆	★	◆	▲	◆	
	09ARM26-1	Basalt (massive lava flow)	◆	★			◆	◆
	09ARM26-2	Basaltic andesite (pillow lava)	◆	★			◆	◆
pre-collisional intrusive rocks	09ARM22	diorite	◆	★	◆	▲	◆	
	09ARM30-1	gabbro	◆	★	◆	▲	◆	
	09ARM30-2	gabbro dike	◆	★			◆	◆
	RAF-1	granite	◆	★	◆	▲		

◆&▲: sample analyzed in this work; dissolved from glass disc(★) or powder(☆); △: zircon number <100; ◇: fail to do Ar-Ar dating

## 2.2 岩象觀察

本研究中除粉末樣本或快速冷卻、破碎的顆粒未做薄片，剩下的 32 個樣本製成岩石薄片後利用偏光顯微鏡作岩象觀察，使用的儀器為西德 Leitz 廠的偏光顯微鏡。

## 2.3 全岩主量元素含量分析

本研究共對 46 個岩樣進行主量元素含量測定，分析方法如下：

- (1) 將岩石表面的風化部份切除，再將剩餘的岩樣切成小塊、晾乾。
- (2) 以德國 Retsch 公司的 BB100 顎式研磨機將岩樣碾成小塊狀，挑除風化部份及次生礦物後裝於瑪瑙岩鉢中，以德國製行星式球磨機(FRITCH Planetary Ball Mill Pulverisette 5)磨細至大約 200 篩目(mesh)。
- (3) 將岩石粉末精確秤重  $0.4 \pm 0.01$  g 與  $4 \pm 0.5$  g 的四硼酸鋰(Lithium tetraborate;  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ )助溶劑均勻混合後倒入白金坩鍋(95% Pt - 5% Au)，至於高溫爐中製成均勻的玻璃餅(glass disc)。
- (4) 使用本系日本 Rigaku 公司所產 RIX 型 X 光螢光分析儀(X-Ray Fluorescence, XRF)，測定  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  及  $\text{P}_2\text{O}_5$  等十個元素氧化物，各氧化物準確度皆在 5%之內(李寄嶼 et al., 1997)。
- (5) 為估計岩石樣本揮發性物質(e.g.,  $\text{H}_2\text{O}^+$ 、 $\text{H}_2\text{O}^-$ 、 $\text{CO}_2$ )所佔重量百分比，稱取適量岩樣粉末約 0.6 g 置於陶瓷坩鍋中，放入高溫爐加熱，設定一小時半內升溫至  $900^\circ\text{C}$ 、且持續高溫加熱兩小時半，待冷卻至約  $200^\circ\text{C}$  後，將坩鍋放置於乾燥皿，冷卻至室溫後測量岩樣所減少的質量，計算其燒失量(Loss of ignition, L.O.I)，燒失量之計算公式如下：

$$\text{L.O.I. (\%)} = \frac{\text{揮發物總重(g)}}{\text{岩樣總重(g)}} \times 100$$

## 2.4 全岩微量元素含量分析

本實驗利用安捷倫公司所出的 7500s 感應耦合電漿質譜儀(Agilent-7500s Inductively coupled plasma mass spectrometer ; ICP-MS)，樣品分析時間平均單一標本需時十分鐘，一個工作天內可完成四至五十個標本分析，並可於短時間內獲得微量元素之濃度值；微量元素分析前之標本前處理工作，皆於本系無塵室中完成。

### 2.4.1 標本前處理

標本製備的過程中，由於年輕的粉末岩樣較容易溶解，因此我們將岩樣中已知屬於年輕的樣品直接以粉末去溶解(n=22)，其餘的樣品則是使用測量主量元素時製備的玻璃餅去做溶樣(n=24)，以下為兩種不同樣品形式的前置處理過程：

#### (1) 岩石粉末：

- I. 稱取約 20 mg 岩石粉末樣品置入乾淨的鐵氟龍燒杯中，並精確記錄粉末之淨重。
- II. 依序加入體積比約為 3:5 的硝酸和氫氟酸，以超音波震盪約一小時，直到實驗樣品呈現澄清透明。
- III. 置於電熱板上，以約 100°C 加熱一個晚上後將酸蒸乾。
- IV. 再依序加入體積比約 3:8 的硝酸和氫氟酸，以超音波震盪約 40 分鐘後，放置於電熱板上以 100°C 加熱七天以上，直至樣品充分溶解。
- V. 將鐵氟龍容器中的酸蒸乾，加入約一毫升 1:2 硝酸後，置於加熱板上放置隔夜後準備稀釋。
- VI. 根據稱重時所記錄之粉末淨重，將待稀釋溶液以 2% 的硝酸稀釋到 2000 倍，再以 10 ppb 銻(Rh)與鉍(Bi)的內標準溶液稀釋至 4000 倍，來校正訊號飄移，置入試管後待 ICP-MS 測量，並以相同方法製備 USGS 標準樣溶液。
- VII. 標準樣溶液與待測標本同時上機測量，標準樣溶液需測量兩次以上，以利於建立檢測線(calibration curve)，計算濃度。

#### (2) 玻璃餅：

- I. 將玻璃餅敲碎，稱取約 40 mg 碎塊置入乾淨的鐵氟龍燒杯中，並精確記錄淨重。

- II. 依序加入體積比約 6:5 的硝酸和氫氟酸，再置於電熱板上加熱 2 小時以上，待樣品充分溶解。
- III. 將酸蒸乾，加入約 2 毫升 1:2 的硝酸後，置於加熱板上放置隔夜準備稀釋。
- IV. 以 2% 的硝酸稀釋到 500 倍，再以 10 ppb 銨與鉍的內標準溶液稀釋至 1500 倍，來校正訊號飄移，置入試管後待 ICP-MS 測量，並以相同方法製備 USGS 標準樣溶液。

## 2.4.2 USGS 標準樣分析結果

研究分析微量元素含量時，以 AGV-2 以及 BHVO-2 作為外標準樣(external standard)建立檢測線，加上 GSP-2，並以銨及鉍作為內標準樣(internal standard)，用以校正訊號之靈敏度飄移(sensitive shift)，並於測量樣品的同時，將 USGS 岩石標準樣：AGV-2、BCR-2、BHVO-2、BIR-1、DNC-1 以及 W-2 等一同測量兩次並取平均值，觀察控制測量的精準度與準確度之計算如下：

- (1) 精準度(precision)：指儀器對元素所測量之信號強度，濃度及比值在短期間之重現性，即相對標準差(Relative Standard Deviation)，通常以 RSD 來表示 (CPS=Counts Per Second)：

$$RSD (\%) = \frac{\text{CPS standard deviation}}{\text{CPS average value}} \times 100$$

- (2) 準確度(accuracy)：表示儀器測量值與文獻發表之推薦值兩者間之差異度。

$$\text{Accuracy} (\%) = \frac{\text{average} - \text{literature value}}{\text{literature value}} \times 100$$

於標本分析期間，同時分析 USGS 標準樣之各元素含量平均值、精準度及準確度，其數據如下表列，由於標本分批以岩石粉末(表 2-2)與玻璃餅(表 2-3)做溶樣，因此兩次測量之結果分別列表，並以 AGV-2、BHVO-2 及 BCR-2 做代表，前者代表安山岩標準樣，後兩者為玄武岩標準樣。由 USGS 標準樣之精準度及準確度對微量元素作圖，大部份微量元素之 RSD 值皆小於 3%，且與推薦值(Govindaraju, 1994; Eggins et al., 1997)比較後，其差異程度亦小於 5%(岩石粉末:圖 2-2；玻璃餅:圖 2-3)，顯示本研究在樣品的測量方面，有良好的精準度及準確度。

表 2-2USGS 標準樣以 ICP-MS 測量之結果(岩石粉末標準樣，n=3)

岩石粉末 Element	AGV-2				BHVO-2				BCR-2			
	Average value (ppm)	Precision (%)	Literature value (ppm)	Accuracy (%)	Average value (ppm)	Precision (%)	Literature value (ppm)	Accuracy (%)	Average value (ppm)	Precision (%)	Literature value (ppm)	Accuracy (%)
P	2039	1.04	2138	-4.63	1172	1.02	1191	-1.60	1589	0.83	1571	1.15
Sc	12.0	0.43	12.2	-2.05	30.94	0.76	31.8	-2.70	32.73	0.82	32.6	0.40
Ti	5913	0.58	6294	-6.05	16070	0.98	16244	-1.07	13610	0.38	13427	1.36
V	113	0.22	121	-6.61	303	0.27	320	-5.28	416	0.38	405	2.77
Cr	14.6	0.48	10.1	44.16	281	0.43	289	-2.73	15	0.42	16.0	-5.56
Mn	724	0.49	697	3.82	1256	0.26	1301	-3.46	1524	0.99	1394	9.33
Co	15.0	0.50	15.3	-2.22	42.8	0.57	45.0	-4.96	36.9	0.65	37.0	-0.19
Ni	17.0	0.48	16.0	6.50	111	0.56	120	-7.83	12	0.64	13.0	-7.31
Cu	51.2	0.31	60.0	-14.63	126	0.77	136	-7.50	22	0.77	19.0	13.21
Zn	81.3	0.14	88.0	-7.61	102	0.53	105	-3.14	131	1.09	129	1.55
Ga	21.0	0.41	20.0	5.00	21.6	0.96	21.0	2.86	23.2	0.56	22.0	5.45
Ge	1.00	1.84	1.30	-23.08	1.68	0.53	1.60	4.94	1.99	1.07	1.50	32.40
Rb	66.7	1.17	68.0	-1.99	9.2	0.51	10.0	-8.50	49.2	0.84	46.9	4.93
Sr	652	0.63	660	-1.20	385	0.68	390	-1.18	347	0.31	330	5.15
Y	19.8	0.25	20.0	-1.20	26.0	0.10	28.0	-7.00	37.6	0.12	35.0	7.29
Zr	230	0.49	225	2.13	166	0.84	175	-5.09	194	0.71	187	3.64
Nb	14.1	0.12	14.0	1.00	18.1	0.62	19.5	-7.03	13.1	0.50	12.5	4.72
Cs	1.13	0.70	1.25	-9.36	0.090	2.24	0.100	-9.60	1.157	0.37	0.956	21.03
Ba	1137	0.73	1200	-5.25	135	0.34	133	1.80	694	0.20	675	2.87
La	34.4	2.03	39.0	-11.82	14.4	0.18	15.5	-7.35	26.2	0.55	24.9	5.22
Ce	65.8	0.73	70.0	-6.06	35.6	1.00	38.0	-6.24	55.3	0.66	53.6	3.17
Pr	7.89	0.04	8.00	-1.39	5.16	0.31	5.45	-5.28	7.17	0.90	6.80	5.46
Nd	29.4	0.27	32.0	-8.03	23.7	0.08	24.7	-4.21	29.5	0.53	28.8	2.36
Sm	5.45	0.34	5.90	-7.61	6.02	0.89	6.17	-2.50	6.92	0.43	6.59	4.99
Eu	1.59	0.57	1.55	2.45	1.99	0.63	2.06	-3.35	2.04	0.59	1.98	2.93
Gd	4.55	0.76	4.70	-3.15	6.02	0.50	6.22	-3.17	6.94	1.26	6.72	3.29
Tb	0.641	0.77	0.700	-8.49	0.908	0.28	0.990	-8.27	1.071	1.07	1.13	-5.22
Dy	3.43	0.91	3.80	-9.68	5.17	0.43	5.25	-1.60	6.49	0.20	6.42	1.04
Ho	0.676	0.38	0.700	-3.41	0.99	0.18	1.00	-0.63	1.37	0.35	1.35	1.11
Er	1.84	0.43	1.90	-3.42	2.49	0.86	2.56	-2.89	3.70	0.32	3.70	0.00
Tm	0.259	0.78	0.28	-7.50	0.332	0.83	0.335	-0.84	0.543	0.75	0.513	5.91
Yb	1.64	0.33	1.75	-6.34	2.00	1.26	1.98	1.21	3.46	0.43	3.38	2.31
Lu	0.250	1.24	0.27	-7.52	0.280	0.82	0.278	0.65	0.516	0.80	0.499	3.49
Hf	5.04	0.33	5.17	-2.51	4.19	0.56	4.3	-2.53	4.80	0.81	4.97	-3.40
Ta	0.877	0.56	0.900	-2.58	1.19	0.81	1.20	-0.92	0.82	0.73	0.810	1.63
Pb	13.5	0.47	37.0	-63.51	1.52	0.50	3.30	-54.06	10.21	0.65	13.5	-24.37
Th	6.28	0.10	6.50	-3.38	1.21	0.58	1.26	-4.21	6.00	0.34	5.91	1.56
U	1.90	0.40	1.90	-0.16	0.40	0.62	0.42	-4.36	1.68	0.39	1.70	-1.47

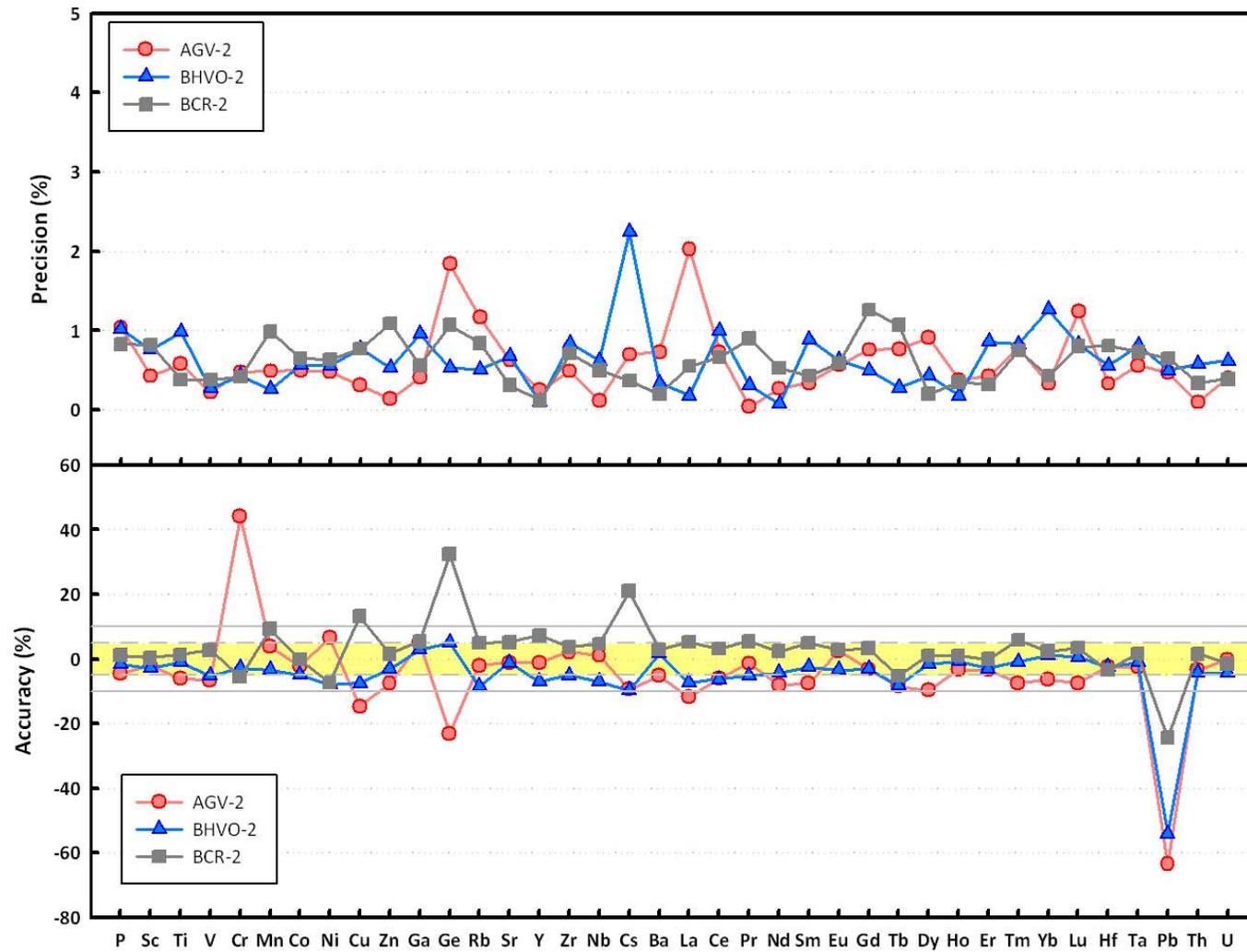


圖 2-2 USGS 標準樣之精準度與準確度對各微量元素作圖 (測量岩石粉末時之標準樣)

表 2-3 USGS 標準樣以 ICP-MS 測量之結果(玻璃餅標準樣，n=3)

玻璃餅 Element	AGV-2				BHVO-2				BCR-2			
	Average value (ppm)	Precision (%)	Literature value (ppm)	Accuracy (%)	Average value (ppm)	Precision (%)	Literature value (ppm)	Accuracy (%)	Average value (ppm)	Precision (%)	Literature value (ppm)	Accuracy (%)
P	2100	0.45	2138	-1.78	1211	0.71	1191	1.68	1563	1.02	1571	-0.51
Sc	12.5	1.85	12.2	2.46	31.5	1.20	31.8	-0.94	33.2	0.57	32.6	1.84
Ti	6295	0.67	6294	0.02	16330	0.41	16244	0.53	13170	0.74	13427	-1.91
V	113	0.13	121	-6.94	319	0.11	320	-0.41	409	0.61	405	0.86
Cr	15.4	1.87	10.1	52.57	281	0.13	289	-2.63	16	1.78	16.0	1.06
Mn	756	0.66	697	8.52	1297	0.71	1301	-0.31	1482	1.17	1394	6.31
Co	15.5	0.42	15.3	1.44	44.1	0.39	45.0	-2.00	35.5	0.45	37.0	-4.19
Ni	16.9	0.69	16.0	5.81	114	0.64	120	-5.17	13	0.37	13.0	2.92
Cu	53.4	0.06	60.0	-11.00	132	0.51	136	-2.87	23	0.13	19.0	22.05
Zn	108	0.30	88.0	22.95	103	0.40	105	-1.52	137	0.55	129	6.05
Ga	20.7	0.40	20.0	3.50	21.7	0.84	21.0	3.33	21.9	0.54	22.0	-0.45
Ge	0.771	1.58	1.30	-40.69	1.37	3.39	1.60	-14.13	1.65	2.66	1.50	9.87
Rb	67.5	0.46	68.0	-0.81	9.4	0.34	10.0	-6.36	46.9	0.43	46.9	-0.04
Sr	636	0.41	660	-3.64	389	0.48	390	-0.18	331	0.96	330	0.42
Y	19.9	0.33	20.0	-0.75	26.5	0.10	28.0	-5.29	35.6	0.75	35.0	1.60
Zr	227	1.53	225	0.93	173	0.07	175	-1.37	182	0.36	187	-2.51
Nb	14.5	0.92	14.0	3.29	18.7	0.23	19.5	-4.00	12.2	0.05	12.5	-2.40
Cs	1.11	1.23	1.25	-11.12	0.102	4.61	0.100	1.80	1.103	2.70	0.956	15.38
Ba	1039	0.86	1200	-13.42	121	0.66	133	-8.72	653	0.66	675	-3.21
La	38.7	0.44	39.0	-0.90	15.1	0.25	15.5	-2.32	23.9	0.16	24.9	-4.10
Ce	70.3	0.88	70.0	0.39	37.2	0.29	38.0	-2.13	50.5	0.40	53.6	-5.82
Pr	8.36	0.29	8.00	4.54	5.37	0.23	5.45	-1.56	6.62	0.72	6.80	-2.63
Nd	30.7	0.36	32.0	-4.09	24.3	0.98	24.7	-1.62	27.6	0.40	28.8	-4.20
Sm	5.72	0.24	5.90	-3.02	6.34	0.71	6.17	2.82	6.54	1.15	6.59	-0.73
Eu	1.64	1.56	1.55	5.81	2.10	1.16	2.06	1.80	1.96	0.98	1.98	-1.11
Gd	4.74	1.51	4.700	0.77	6.31	0.87	6.22	1.38	6.62	0.47	6.72	-1.50
Tb	0.659	0.41	0.700	-5.93	0.937	1.50	0.990	-5.35	1.035	1.50	1.13	-8.41
Dy	3.57	0.86	3.80	-6.03	5.38	0.85	5.25	2.50	6.27	0.14	6.42	-2.32
Ho	0.704	1.65	0.700	0.56	1.03	0.97	1.00	3.30	1.32	0.14	1.35	-2.52
Er	1.87	0.18	1.90	-1.68	2.55	0.92	2.56	-0.35	3.58	0.91	3.70	-3.30
Tm	0.271	3.79	0.28	-3.32	0.346	1.30	0.335	3.25	0.531	1.60	0.513	3.41
Yb	1.68	0.14	1.75	-4.11	2.04	1.05	1.98	3.03	3.35	1.29	3.38	-0.77
Lu	0.258	1.68	0.27	-4.63	0.287	2.73	0.278	3.24	0.502	0.99	0.499	0.54
Hf	5.09	1.07	5.17	-1.49	4.35	0.51	4.30	1.21	4.62	0.76	4.97	-7.00
Ta	0.920	1.18	0.900	2.19	1.26	0.28	1.20	4.92	0.81	1.10	0.810	0.25
Pb	13.4	0.37	37.0	-63.68	1.16	3.27	3.30	-64.91	10.79	0.51	13.5	-20.07
Th	6.33	0.73	6.50	-2.69	1.25	1.14	1.26	-0.71	5.97	0.51	5.91	1.05
U	1.92	1.63	1.90	1.16	0.43	0.49	0.42	2.40	1.65	0.47	1.70	-2.88

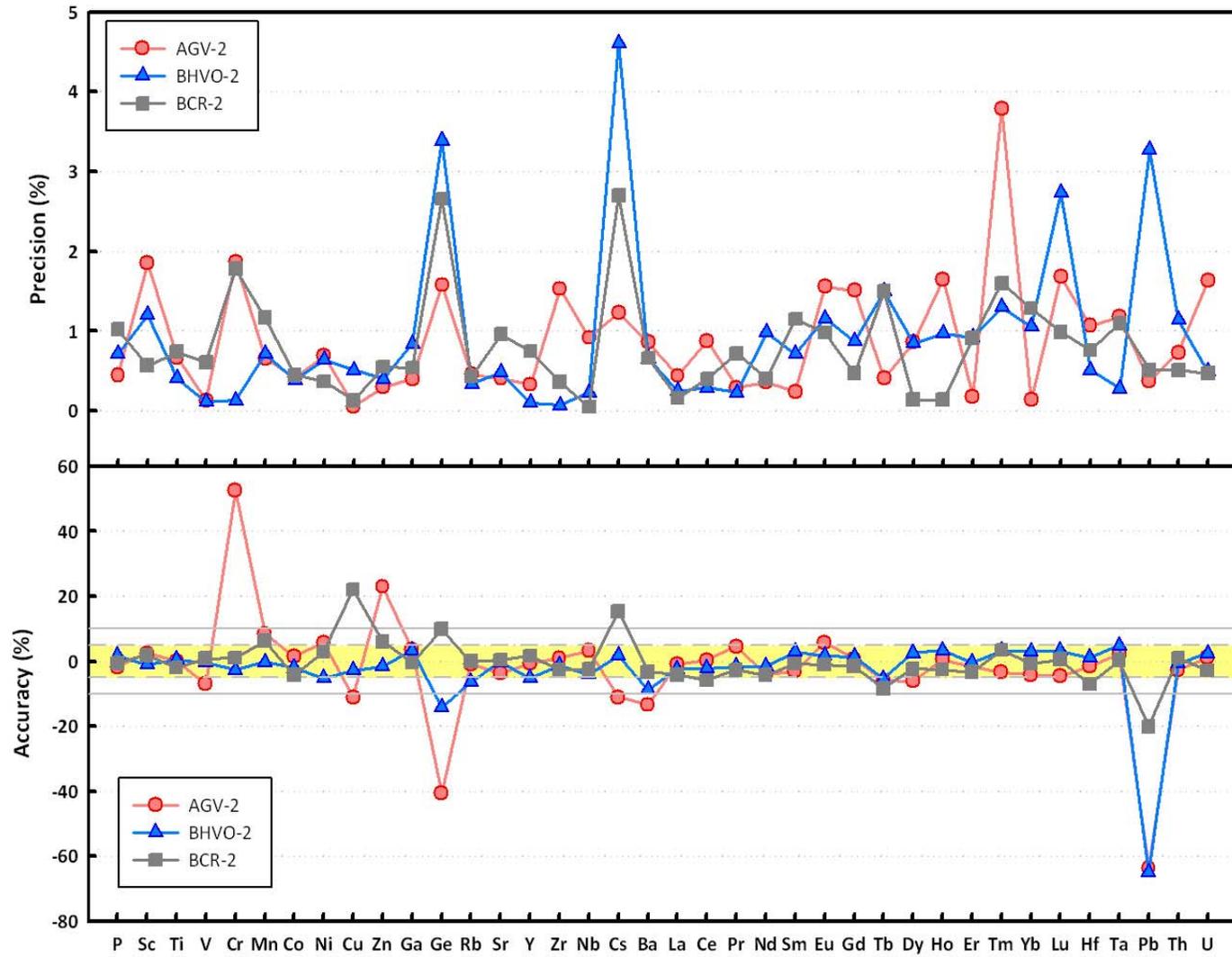


圖 2-3 USGS 標準樣之精準度與準確度對各微量元素作圖 (測量玻璃餅時之標準樣)

## 2.5 鋇-釷同位素組成分析

本研究共選取 14 個碰撞後噴出岩、4 個碰撞前噴出岩以及 3 個碰撞前侵入岩進行鋇-釷(Sr-Nd)同位素分析工作，岩石粉末的前置處理包括進入樹脂分離柱之前的處理步驟、樹脂柱的元素化學分離工作，皆於本系無塵室中完成。

### 2.5.1 標本前處理

- (1) 參考標本的鋇、釷含量，秤取適量的岩石粉末(約 150 mg)置入鐵氟龍燒杯。
- (2) 以 1:1 的比例加入硝酸及氫氟酸後將杯蓋蓋緊，置於加熱板上以約 145°C 加熱兩天，打破其化學鍵並溶解岩石粉末。
- (3) 開蓋將鐵氟龍燒杯中之酸蒸乾(約 175°C)，加入 4N 的鹽酸後再次將酸蒸乾，再重複一次此步驟，標本會轉成氯化物結晶，冷卻十分鐘後加入 1N 的鹽酸 2 毫升，再置於離心機離心 12 分鐘。
- (4) 吸取離心後澄清的標本上層液，置入另一乾淨的鐵氟龍燒杯中。
- (5) 原始鐵氟龍燒杯中殘餘之沉澱固體與液體，蒸乾後重複步驟(2)-(3)，將二次吸取的上層液與初次吸取的上層液置於同一鐵氟龍燒杯，蒸乾後即完成前置處理步驟。
- (6) 若有難溶的岩樣，須放置於電熱板較長時間、重複離心和萃取上層澄清液的動作，以盡量減少樣本流失量。

### 2.5.2 鋇-釷同位素化學分離流程

本實驗使用日本 Muromac minicolumn 公司所生產的鐵氟龍分離柱，第一分離柱(First column)和鋇純化分離柱(Sr resin)中所使用的樹脂為 AG50W-X8、200-400 篩目的陽離子交換樹脂，第二分離柱(Second column)使用的為 Ln Spec 樹脂。分離柱經校正後可直接進行化學分離流程，第一分離柱可將鋇元素和稀土元素分離出來(圖 2-4，第一分離柱沖提圖)，接著使用鋇純化分離柱將前者分離出之鋇元素再純化(圖 2-5，鋇純化分離柱沖提圖)。使用第二分離柱將前者分離出之稀土元素中的釷元素收集出來(圖 2-6，第二分離柱沖提圖)，沖提圖皆由朱秋紅(2009)提供。

Sr-Nd (1st column, 2.5ml AG50W-X8, AGV-2, 2009.07.08)

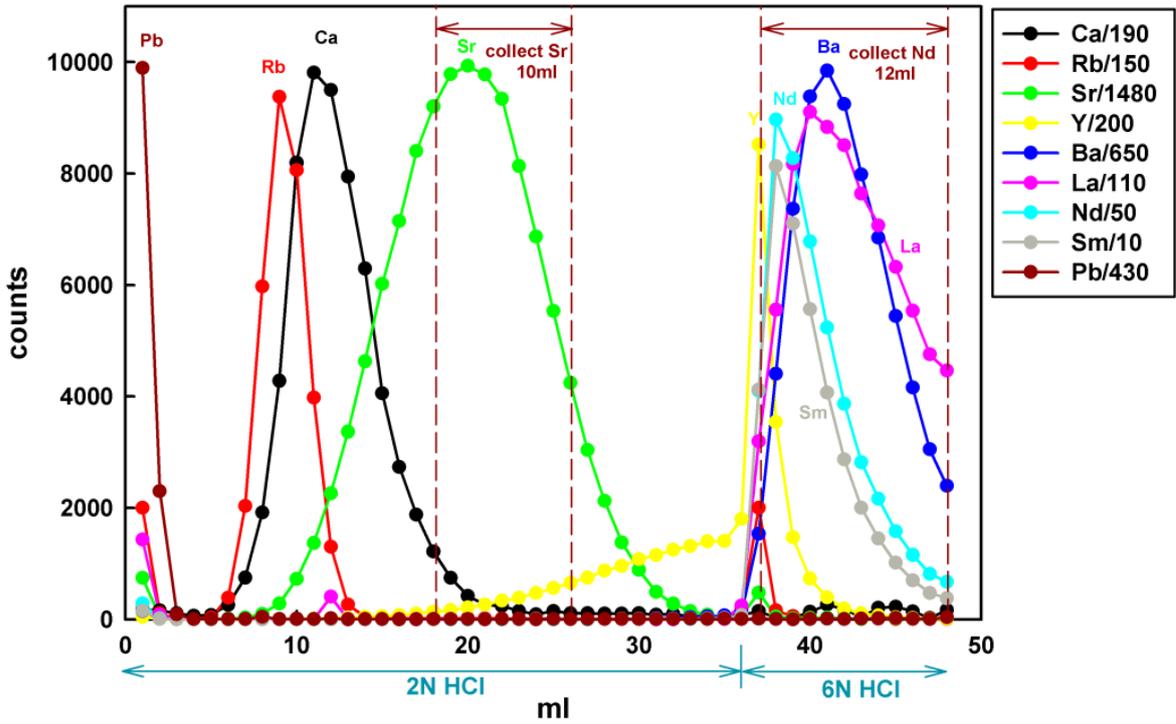


圖 2-4 第一分離柱沖提圖

Sr-Nd (Sr column, Sr-spec resin, AGV-2, 2009.07.08)

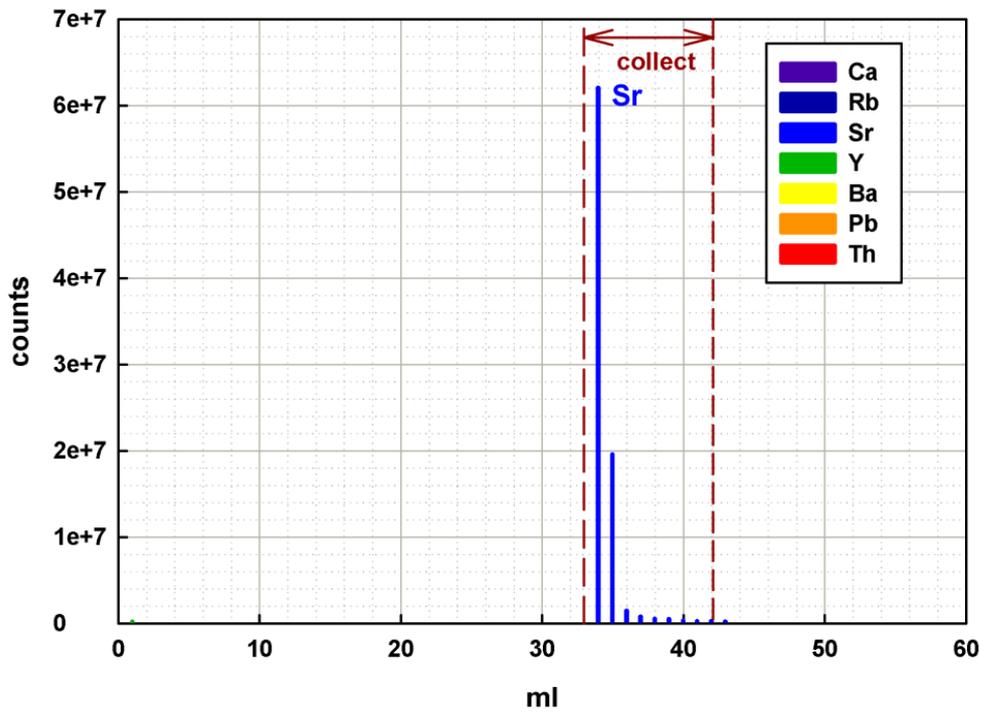


圖 2-5 鋇純化分離柱沖提圖

Sr-Nd (2nd column, 1ml Ln resin, AGV-2, 2009.07.03)

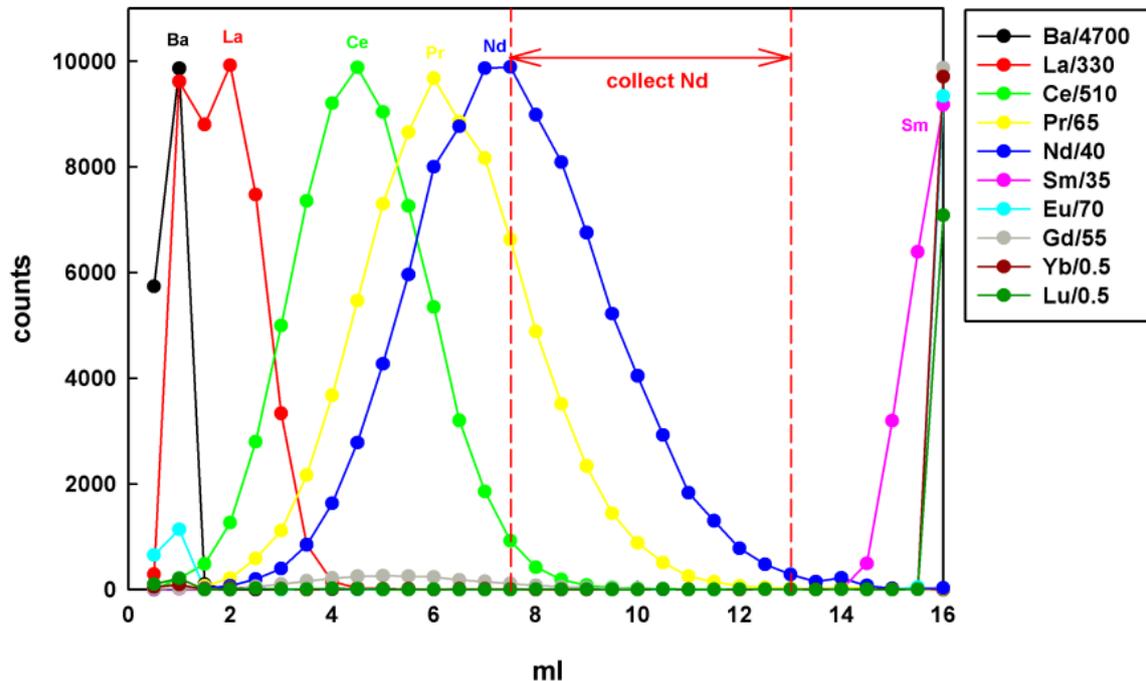


圖 2-6 第二分離柱沖提圖

(1) 第一分離柱分離流程：

- I. 進行分離前先使用純水將分離柱潤洗，之後加入 8 毫升 2N 鹽酸平衡，使樹脂處於 2N 鹽酸的環境。
- II. 在前置處理完成、已蒸乾的標本中加 1 毫升 2N 鹽酸，搖晃均勻後注入第一分離柱。
- III. 分段加入共 18 毫升的 2N 鹽酸沖洗後，加入 10 毫升的 2N 鹽酸收集鋇元素。
- IV. 用 9 毫升 2N 鹽酸及 1 毫升 6N 鹽酸沖洗後，再加入 12 毫升 6N 鹽酸收集稀土元素。

(2) 鋇純化分離柱分離流程：

- I. 將第一分離柱收集的鋇元素樣本溶液蒸乾後，為使其轉為硝酸環境，加入硝酸一滴並蒸乾、進行此步驟三次後，加入 3N 硝酸 5.4 毫升至鐵氟龍燒杯中。
- II. 分離前使用 3N 鹽酸 7 毫升將分離柱潤洗兩次，使樹脂處於 3N 鹽酸環境。
- III. 將步驟 I 的標本注入鋇純化分離柱，分段加入 31 毫升 3N 的硝酸與 1 毫升 0.1% 硝酸沖洗，接著加入 10 毫升 0.1% 硝酸收集純化的鋇元素。
- IV. 將收集後的鋇元素蒸乾，加入過氯酸 1 滴後蒸乾、再重複兩次，加入硝酸 1 滴後蒸乾、同樣重複兩次，最後加入 2 毫升 3% 的硝酸。

V. 測量前再將樣本全數倒入試管中待測，使用台大之 Neptune-MC-ICP-MS 設備進行測量。

(3) 第二分離柱分離流程：

- I. 將第一分離柱收集的稀土元素標本溶液蒸乾後，加入 0.1 毫升 0.2N 鹽酸。
- II. 進行分離前先使用 6N 鹽酸清洗分離柱，之後加入 6 毫升 0.2N 鹽酸潤洗，使樹脂處於 0.2N 鹽酸的環境。
- III. 將步驟 I 的標本注入第二分離柱，分段加入 7 毫升 0.2N 的鹽酸沖洗，接著加入 6 毫升 0.2N 的鹽酸收集釷元素。
- IV. 將收集後的溶液蒸乾，加入過氯酸 1 滴後蒸乾、再重複兩次後，加入硝酸 1 滴後蒸乾、同樣重複兩次，最後加入 2 毫升 3% 的硝酸。
- V. 測量前再將樣本全數倒入試管中待測，使用台大之 Neptune-MC-ICP-MS 設備進行測量。

### 2.5.3 標準樣分析結果

在以 Neptune-MC-ICP-MS 測量待測標本之前後，需進行鋇及釷標準樣的測量，進樣系統為 CETAC Aridus；本研究所使用的鋇標準樣為 SRM(NBS)987、釷標準樣為日本地質調查所的 JNdi-1，前者的報導文獻推薦值為  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710242$ ，後者為  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512115$  (Tanaka et al., 2000)，而在本系實驗室長期測量結果的平均值分別為  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710288 \pm 20$  ( $2\sigma$ ;  $n=65$ ) 與  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512121 \pm 20$  ( $2\sigma$ ;  $n=40$ )，如圖 2-7，分析數值以指數函數及  $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.375209$  與  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$  分別做校正，長期測量的結果與方法可參閱(Lee et al., 2011 (submitted))。

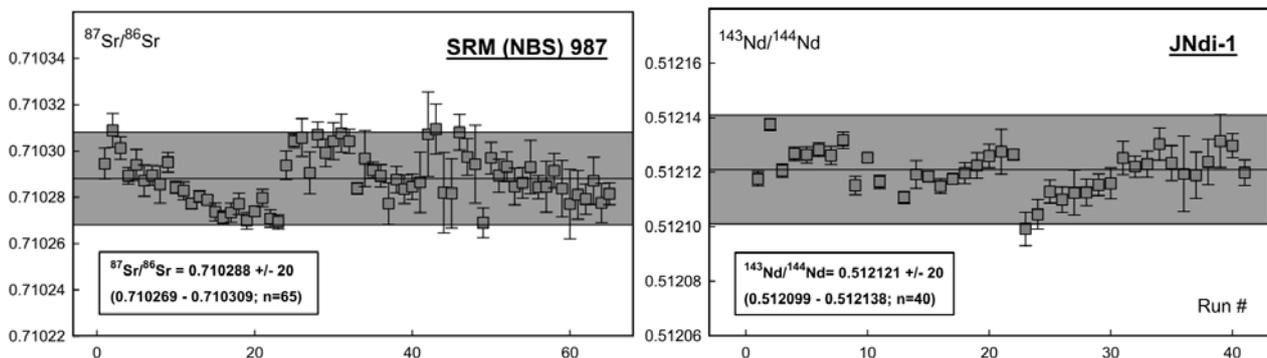


圖 2-7 Neptune-MC-ICP-MS 長期測量標準樣之結果

## 2.6 全岩氫-氫定年分析

亞美尼亞境內廣泛分布年輕火成岩並有許多活火山，前人曾對亞美尼亞地區考古遺址中的黑曜岩作核飛跡定年(Oddone et al., 2000; Badalian et al., 2001)，另有亞美尼亞流紋岩的鉀-氫定年結果(Karapetyan, 1968; Karapetyan, 1972)；圖 2-8 中將各火成岩分區的定年結果標示(以最老的表示)出來，同一個地區的定年結果相近，但沒有碰撞前火成岩的定年資料。本研究挑選 10 個碰撞後噴出岩、3 個碰撞前噴出岩以及 1 個碰撞前侵入岩做氫-氫定年(表 2-1)，以獲得亞美尼亞地區火成岩的年齡控制。

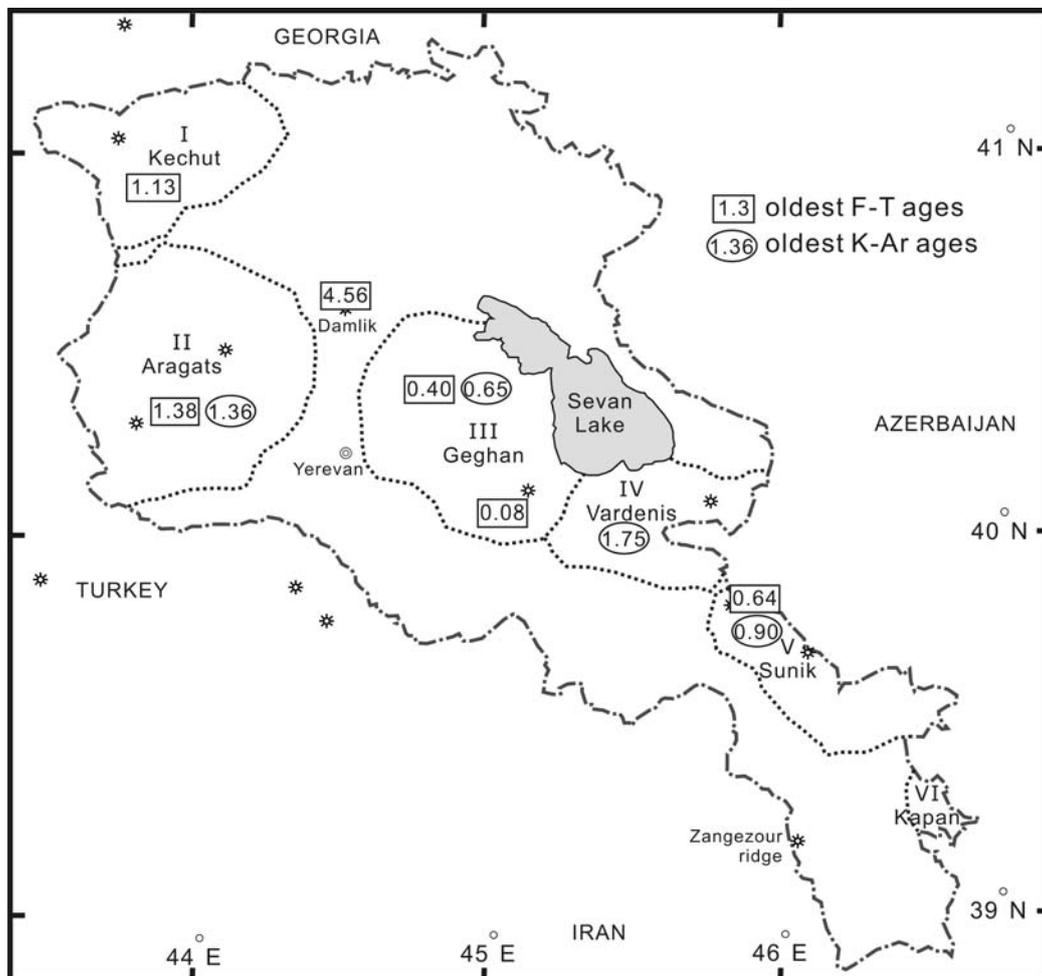


圖 2-8 亞美尼亞前人之定年結果。核飛跡定年結果以方形表示，鉀氫定年結果以圓形表示，並將各火成岩區中定年結果中最老的年代記錄標示於圖中；可發現除了亞美尼亞年輕火成岩約從 4.56 Ma 開始。

### 2.6.1 標本前處理

- (1) 將岩石標本未受蝕變的部份以岩鉢壓碎後，過篩選出粒度 20~40 篩目的岩石顆粒。
- (2) 以去離子水清洗並震盪岩石樣本數次，直至液體澄清，代表岩樣已洗淨，之後將岩石樣本放入烘箱中烘乾。
- (3) 秤取 150 mg 的岩石樣本，包入兩公分見方的鋁箔紙並呈短柱狀，進行中子照射 30 小時，並放置三個月以上使放射性強度減至安全範圍後待測。

### 2.6.2 標本分析流程

氫-氫定年技術的進樣系統稱之為萃取系統(Extraction line)，標本於高溫爐加熱所產生的氣體先以液態氮降溫並去除水分，之後利用 720°C 的鈦綿(Ti-sponge)、400°C 以及 25°C 的鉻鋁合金吸附劑除去氣體中的氮氣、碳氫化合物及二氧化碳等活性氣體分子，進行氫氣純化的步驟。最後將純化過的氣體用壓力差送入 1200s 型氣體質譜儀，進行氣體分析及測量。分析流程如下：

- (1) 將標本放入之後，需將機體以 1600°C 高溫加熱一個晚上，使系統中前次分析殘留的氣體以及混入的大氣成分活化並脫離管壁、而易於被抽除。
- (2) 機體冷卻後，測量質譜儀背景值(mass background)、萃取系統背景值(pre-line background)、大氣中標準空氣值(air shot)，不丟入標本測量一空白值，分析系統設定階段加溫從 400°C 開始，每階段 30 分鐘並增加 100°C，最後達 1500°C，共 12 個溫階。
- (3) 測量標本時，測完背景值與空氣值並計算當日空氣比值後，將標本投入高溫爐，進行氫氣萃取與分析，階段加溫由 400°C 開始，每階段 30 分鐘並升溫 50 或 100°C，直到 1500°C，共計 15 個溫階。
- (4) 分析所得的數據經由程式校正背景值、同位素衰變以及干擾效應後，便可計算出年代，並繪製年代譜圖(age spectra)以及反等時線圖(corr-isochron diagram)。詳細的分析原理及方法可參閱(Lee et al., 2009)，因中子照射而產生的干擾效應之校正參數可參閱(Lo and Lee, 1994)。

## 2.7 鋯石鈾-鉛定年分析

本研究使用台大地質系中安捷倫公司所屬的 7500s 感應耦合電漿四極桿質譜儀搭配 New Wave UP213 雷射進樣系統，簡稱 LA-ICP-QMS。本研究挑選 5 個碰撞後噴出岩、4 個碰撞前噴出岩以及 3 個碰撞前侵入岩做鋯石鈾-鉛定年。

### 2.7.1 樣品靶(target)的製備

將欲進行分析的岩樣擊碎、磨細、過篩，以重液集中重礦物後挑選出鋯石，並且參考(宋彪 et al., 2002)製作 SHRIMP 樣品靶的鋯石黏貼、環氧樹脂灌注、打磨拋光以及顯微照相等製備流程，來製作本研究的樣品靶。

#### (1) 鋯石的黏貼

- I. 將雙面膠平貼於已用乙醇擦拭過的平坦玻璃板上，黏貼過程中盡量避免氣泡，以使黏貼鋯石的膠面能處於同一平面。
- II. 製做樣品靶的模型為底面直徑 1 英吋的圓柱體，因此在預設樣品靶的位置中央預先畫出 1 公分的圓周範圍。
- III. 將待分析的岩樣顆粒在 1 公分圓圈內黏貼成長條狀，為了接下來打磨與拋光方便，不同樣本間的粒度盡量接近並且將顆粒較大者固定置於一側。
- IV. 沾黏過程中將鋯石平放略施力固定於雙面膠上，由於本研究中樣本屬於岩漿鋯石，因此盡量挑選具有良好晶形的礦物顆粒。
- V. 樣品鋯石黏貼完畢後，在同一樣品靶上黏貼來自西藏曲水岩體的鋯石樣本 T210B，作為 LA-ICP-QMS 定年分析實驗的次要標準鋯石。

#### (2) 環氧樹脂的配置與灌注

- I. 將內徑 1 英吋的聚四氯乙烯空心圓柱鑄膜內表面塗抹凡士林，用力垂直壓置於以黏貼鋯石樣本的雙面膠上，使鋯石樣本位於空心柱中心。
- II. 環氧樹脂由 1.4:10 的 EPIPEZ HARDENER 與 EPIPEZ COMPOUND 調配而成，此兩種物質在玻璃燒杯內小心輕攪拌避免注入太多空氣，混合均勻後緩慢灌入空心圓柱。
- III. 放入真空機中抽取樹脂內的空氣，避免樹脂凝固後有氣泡殘留。
- IV. 放置於 50°C 的電熱板上過夜。

### (3) 打磨與拋光

- I. 將放置隔夜的樣品靶從玻璃板上取下，放置 70-80°C 的烘箱約 30-60 分鐘使其乾燥。
- II. 使用乙醇擦拭去樣品靶上的凡士林及雙面膠，並且維持樣品靶在厚度 5-6 公分，若厚度超過則須切除。
- III. 將未黏貼銦石的另一面打磨成平面，方便將來使用透射光觀察銦石以及平穩的放置於顯微鏡載物台上。
- IV. 以 8 字型的運動軌跡在防水細砂紙(P2000)上打磨樣品靶，讓靶各方向受力均勻。
- V. 在顯微鏡下觀察銦石樣本的反射光與透射光，兩者陰影面積大致相同時，表示打磨程度恰當。
- VI. 接著使用 1  $\mu\text{m}$  與 3  $\mu\text{m}$  的拋光砂讓樣品靶表面的擦痕變少、變淺。

### (4) 樣品靶的顯微照相

本研究的銦石樣品靶在定年分析前，利用台灣大學地質系的 JOEL JSM-6360LV 掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope-SEM)，與附加的 Gatan Mini-CL 陰極發光影像系統，來拍攝銦石樣本的陰極發光圖像(cathodoluminescence image，簡稱 CL image)，此圖像可以幫助我們了解單顆銦石的內部環帶狀態、有無繼承銦石核心與包裹體等現象，在進行 LA-ICP-QMS 分析時，透過 CL image 可以更方便挑選適合的分析位置。

## 2.7.2 儀器配置與分析方法

當樣本前置作業完成後即進入定年分析階段，LA-ICP-QMS 以 Ar 與 He 為載氣，另外配合 New Wave UP213 雷射進樣系統( $\lambda=213\text{ nm}$ )做分析，ICP 代表感應耦合電漿質譜儀之離子源，氫氣在三層同心石英管所組成的 torch 中受到磁場感應產生游離，其溫度可達絕對溫度一萬度左右的高溫，使樣品游離成離子態，進入質譜儀分析。QMS 則是使用四極桿為質量分析器的質譜儀。銦石標準樣 91500 與 MT 的長期測量結果可見圖 2-9，相關分析流程請參考(Chiu et al., 2009)。

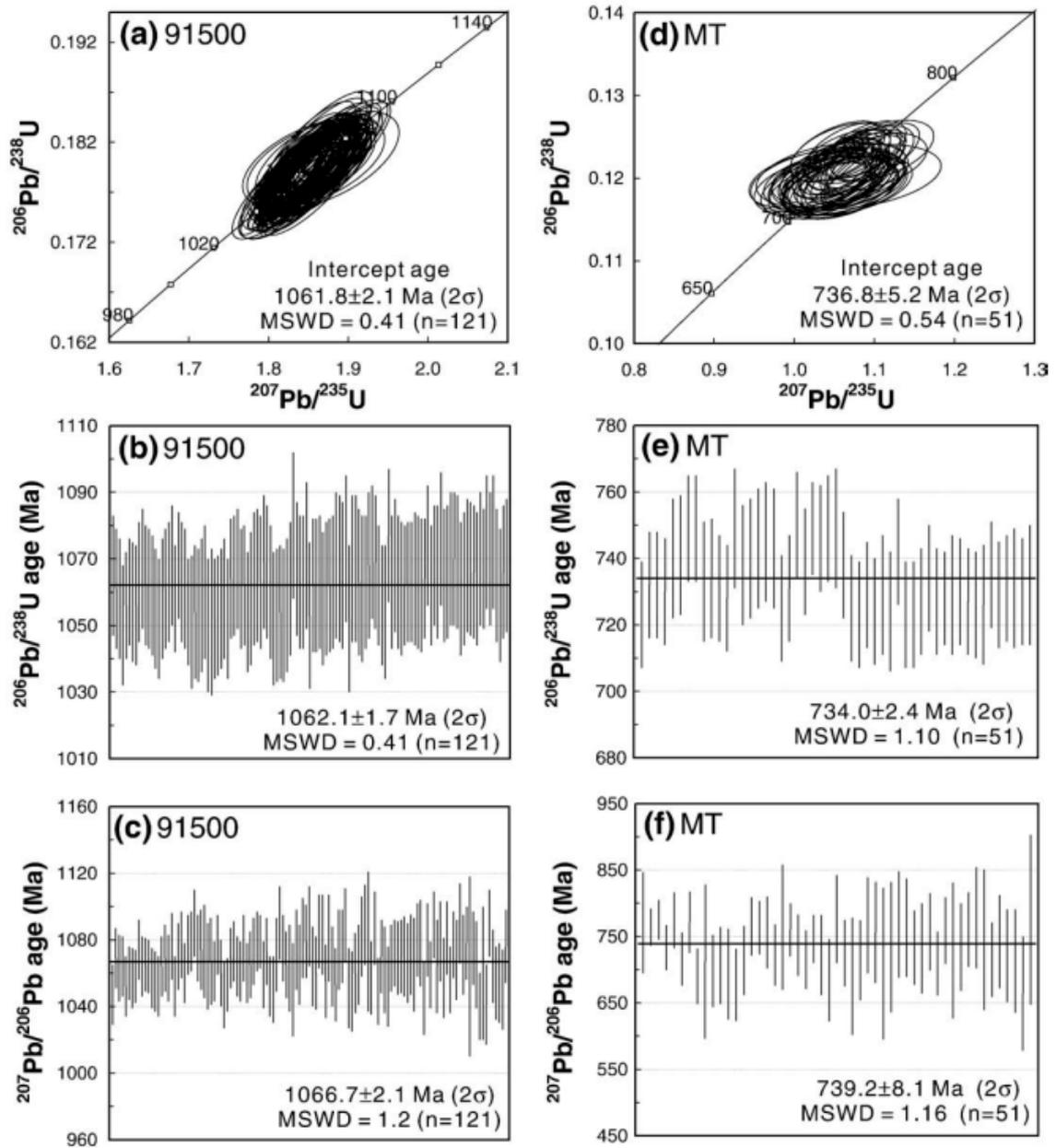


圖 2-9 鋯石定年分析結果。(a)(d): 鋯石定年分析標準樣 91500 與 MT 的 U-Pb 協和圖; (b)(e): 標準樣 91500 與 MT 長期測量結果與平均權重  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年齡; (c)(f): 標準樣 91500 與 MT 長期測量結果與平均權重  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年齡 (Chiu et al., 2009)

## Chapter 3 亞美尼亞火成岩分析結果

### 3.1 野外觀察

亞美尼亞境內新生代火成岩主要可以分為兩期，分別為始新世以及第四紀，野外工作主要針對這兩期火成岩作採樣，依照前人研究發表的陸-陸碰撞年代及後碰撞岩漿活動開始年代，配合帶回實驗室後的全岩氫-氫定年與鋯石鈾-鉛定年結果，將此兩期火成岩定義為碰撞前與碰撞後火成岩，採樣點標示於圖 2-1 中。

碰撞前火成岩主要分布於亞美尼亞的北側，產狀大多為塊狀熔岩與凝灰岩，部份地區可見到枕狀熔岩，如 09ARM26-2，在同一露頭剖面另有塊狀熔岩標本 09ARM26-1，這露頭顯示了火山活動從水下至水上的過程；此外這一期的侵入岩最後形成年代可以幫助了解碰撞前火山活動的終止，我們於 Sevan Lake 的東側採得輝長岩標本，並從當地學者那獲得亞美尼亞東南部大型侵入岩體的花崗岩標本 RAF-1，其餘碰撞前火成岩皆採自亞美尼亞北部，主要位於公路邊以及車子可到達的河谷或小路中。

碰撞後火成岩則是呈西北-東南走向的分布於亞美尼亞境內，主要的採樣地點位於亞美尼亞中部 Sevan Lake 西邊的 Geghan 火山區以及 Aragats 火山位於公路邊的落石，產狀有玄武岩質浮石、黑曜岩、珍珠岩、以及柱狀玄武岩等，在同一個露頭若細顆粒與粗顆粒的產狀皆有則各採一個做分析。亞美尼亞境內的斷層以走向滑移斷層為主，擁有許多拉張盆地(pull-apart basin)，境內年輕火山岩的分布便與這些構造有著密不可分的關係(Karakhanian et al., 2002)，柱狀玄武岩標本 09ARM01 即採自於 Garni Fault 這一走向滑移斷層造成的河谷中；Geghan 火山區則位於一拉張盆地，是我們採集碰撞後火山岩的主要區域，如標本 09ARM13 為玄武岩質浮石，而 09ARM17 與 18 採集於同一座火山的不同位置，但僅有 09ARM17-3 為現地，其餘三者為不同產狀的落石。亞美尼亞首都葉勒凡(Yerevan)北邊有一黑曜岩與珍珠岩的採石場，於該露頭可見黑曜岩與珍珠岩互層的情形，且部份黑曜岩呈褐色，在此露頭為了瞭解其地球化學性質是否均一，因此黑曜岩與珍珠岩各採集兩顆做分析。09ARM02-1~3 三顆標本是於河流中採集的卵石，此外 09ARM07 與 09ARM08 這兩顆標本採集於同一地方，在地質圖上的位置雖位於始新世的地層

中，但當地學者指出此露頭為年輕的標本(後期產物)，從地球化學分析結果來看，與 09ARM02-1 與 09ARM02-3 同屬於埃達克岩，其餘標本的產狀描述於表 2-1 中。

## 3.2 岩象觀察

### 3.2.1 碰撞前火成岩

碰撞前的噴出岩從基性至酸性皆有，包含玄武岩、玄武岩質安山岩、安山岩以及石英安山岩，基性岩如 09ARM26-1 隱晶質之基質已綠泥石化，在正交偏光(close nicol)下為綠色、平行偏光(open nicol)下則呈現土黃色，以斜長石和斜輝石斑晶為主，斜輝石多為他型；09ARM26-2 與 26-1 採於同一露頭，前者為水下噴發快速冷卻的枕狀熔岩流，於岩石薄片可見其氣孔中填充了次生礦物-方解石，其餘基質由於快速冷卻而呈現玻璃質；09ARM24 為一石英安山岩質凝灰岩，從岩石薄片可以看到其長石結晶外緣有經過磨圓，是受搬運、沉積的結果。碰撞前侵入岩及其中的岩脈皆為輝長岩，如 09ARM30-1 與 30-2，可見輝綠結構，以斜長石為主而斜輝石在其間隙間充填之結構，兩種礦物共生，條狀長石與粗粒不規則之輝石應是同時在岩漿中結晶。

### 3.2.2 碰撞後火成岩

碰撞後噴出岩亦是從基性至酸性皆有，包含玄武岩、粗面玄武岩、玄武岩質安山岩、安山岩、粗面安山岩以及流紋岩，礦物出現的種類可以與二氧化矽含量做良好的對比，顯示一包溫反應序列的結果。安山岩標本如 09ARM02-1 ( $\text{SiO}_2 = 63\%$ )含有自型的斜長石、角閃石及黑雲母斑晶，並且有少量他型的石英顆粒；09ARM03-2 為黑曜岩標本，快速結晶下而呈現玻璃質，可看到流紋構造；在玄武岩質粗面安山岩 09ARM12 中亦可見到岩漿流動造成的流紋構造，並且具有輝綠結構，以斜長石為主，夾帶有少量的斜輝石；玄武岩質安山岩 09ARM15 中則可見約 0.5 公厘大的斜輝石斑晶，基質礦物則以斜輝石為主，含有的斑晶可能是早期深部結晶時形成，細粒或玻璃質的基質礦物則是岩漿轉移至淺處或地表後由於溫度下降形成。

(1) 碰撞前火成岩薄片：

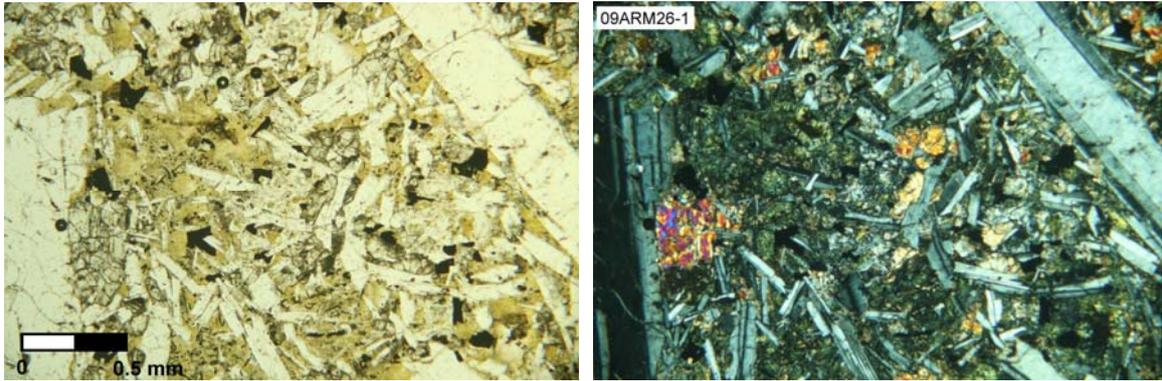


圖 3-1 玄武岩標本(09ARM26-1)岩象照片

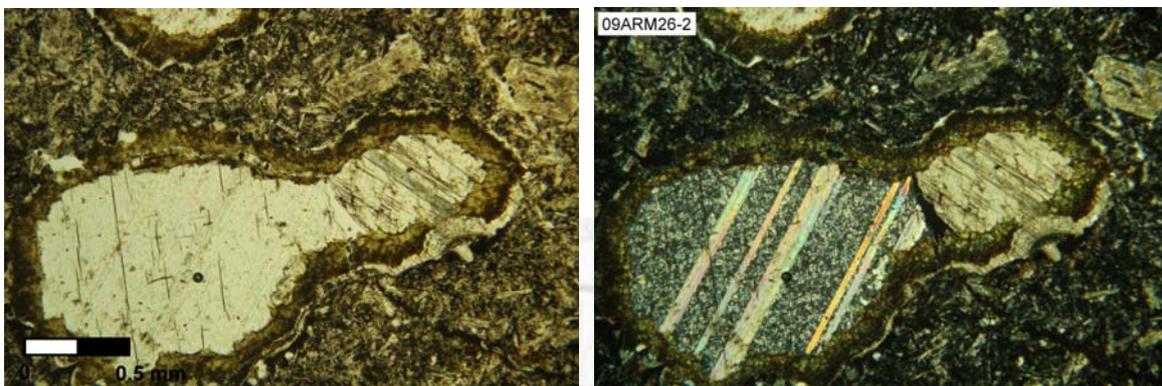


圖 3-2 玄武岩質安山岩標本(09ARM26-2)岩象照片

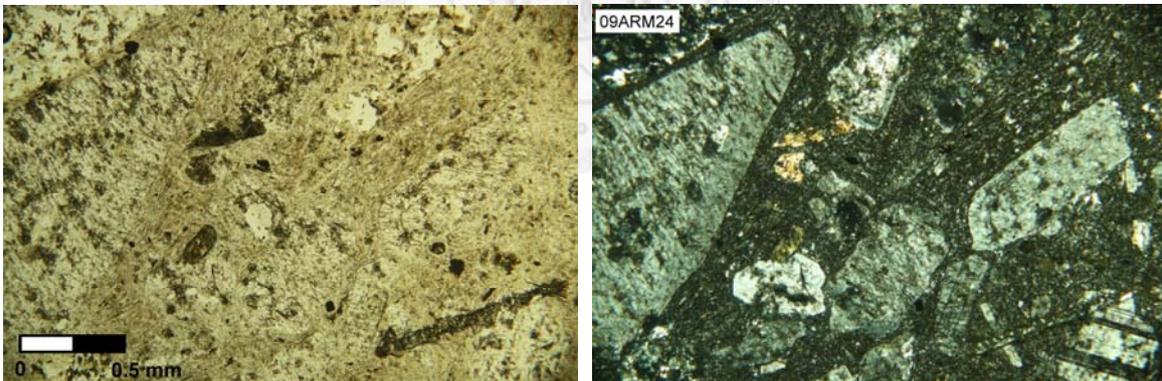


圖 3-3 凝灰岩標本(09ARM24)岩象照片

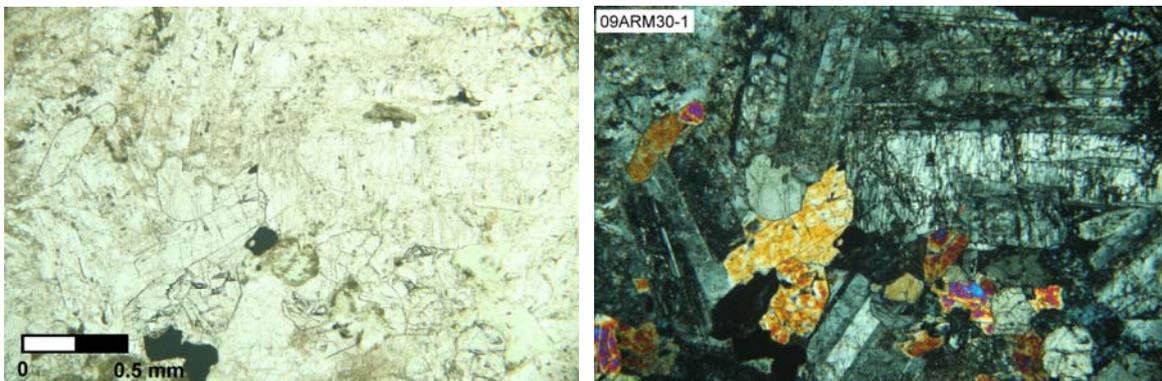


圖 3-4 輝長岩標本(09ARM30-1)岩象照片

(2) 碰撞後火成岩薄片：

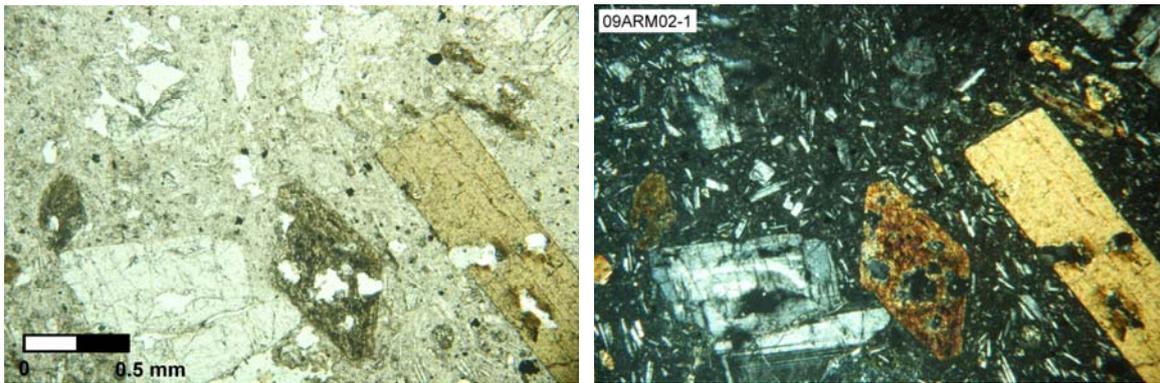


圖 3-5 安山岩標本(09ARM02-1)岩象照片

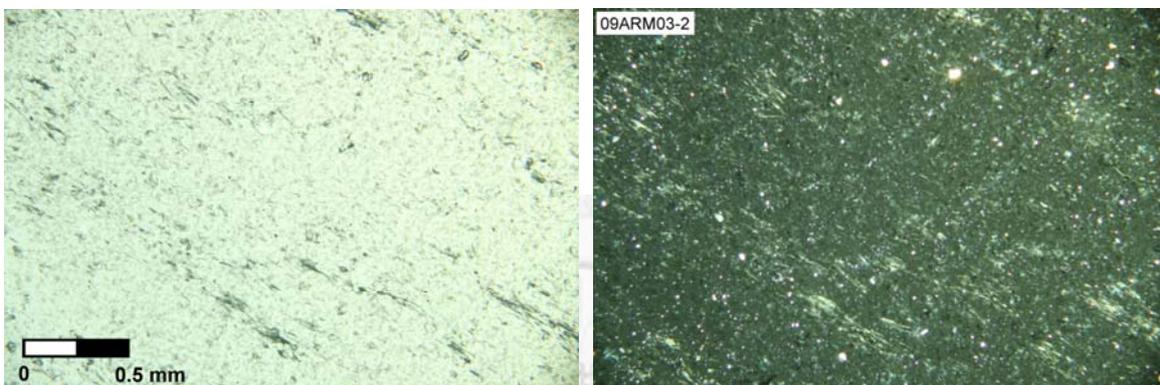


圖 3-6 黑曜岩標本(09ARM03-2) 岩象照片

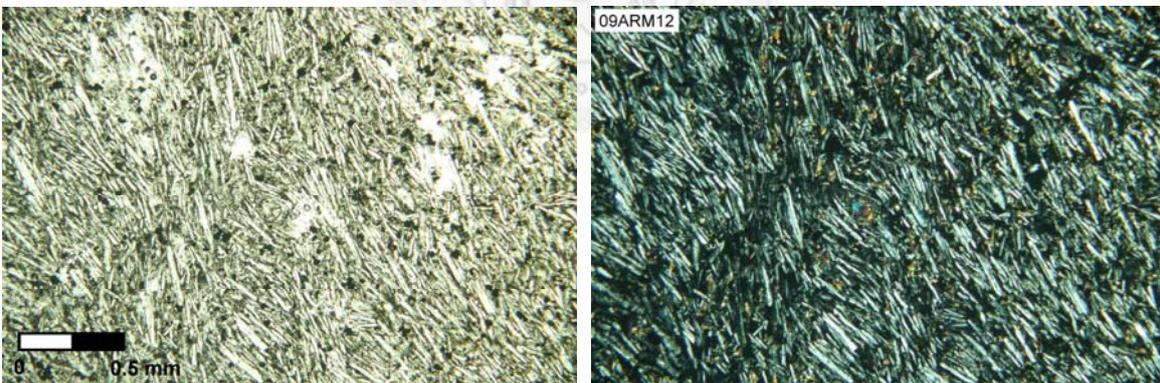


圖 3-7 玄武岩質粗面安山岩標本(09ARM12) 岩象照片

### 3.3 定年結果

本研究中以全岩氩-氬定年與鋯石鈾-鉛定年方法，共獲得 6 個碰撞後噴出岩、6 個碰撞前噴出岩以及 4 個碰撞前侵入岩的年齡(如表 3-1 與圖 3-8)，碰撞前後火成岩之定年結果與前人研究 CIA 地區碰撞前後岩漿活動的年代範圍符合。

表 3-1 亞美尼亞定年結果整理

summary of whole-rock  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating results & zircon U-Pb dating results

	pre-collisional extrusive rocks		pre-collisional intrusive rocks		post-collisional extrusive rocks			
	Ar-Ar	zircon U-Pb		Ar-Ar	zircon U-Pb			
09ARM05-2	46.2 ± 1.0		09ARM30-2	40.7 ± 0.8		09ARM08	4.2 ± 0.3	
09ARM26-1	51.6 ± 2.7		09ARM22		41.4 ± 0.4	09ARM12	0.24 ± 0.38	
09ARM26-2	57.5 ± 0.7		09ARM30-1		46.9 ± 0.8	09ARM28	1.7 ± 0.3	
09ARM06		42.2 ± 0.6	RAF-1		26.5 ± 0.2	09ARM03-1-2	0.13 ± 0.26	
09ARM21		43.5 ± 0.6				09ARM02-1		4.2 ± 0.1
09ARM24		41.7 ± 0.5				09ARM07		4.4 ± 0.1

\* Ar-Ar dating : plateau age (Myr ± 2σ) ; zircon U-Pb dating:  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age (Myr ± 2σ)

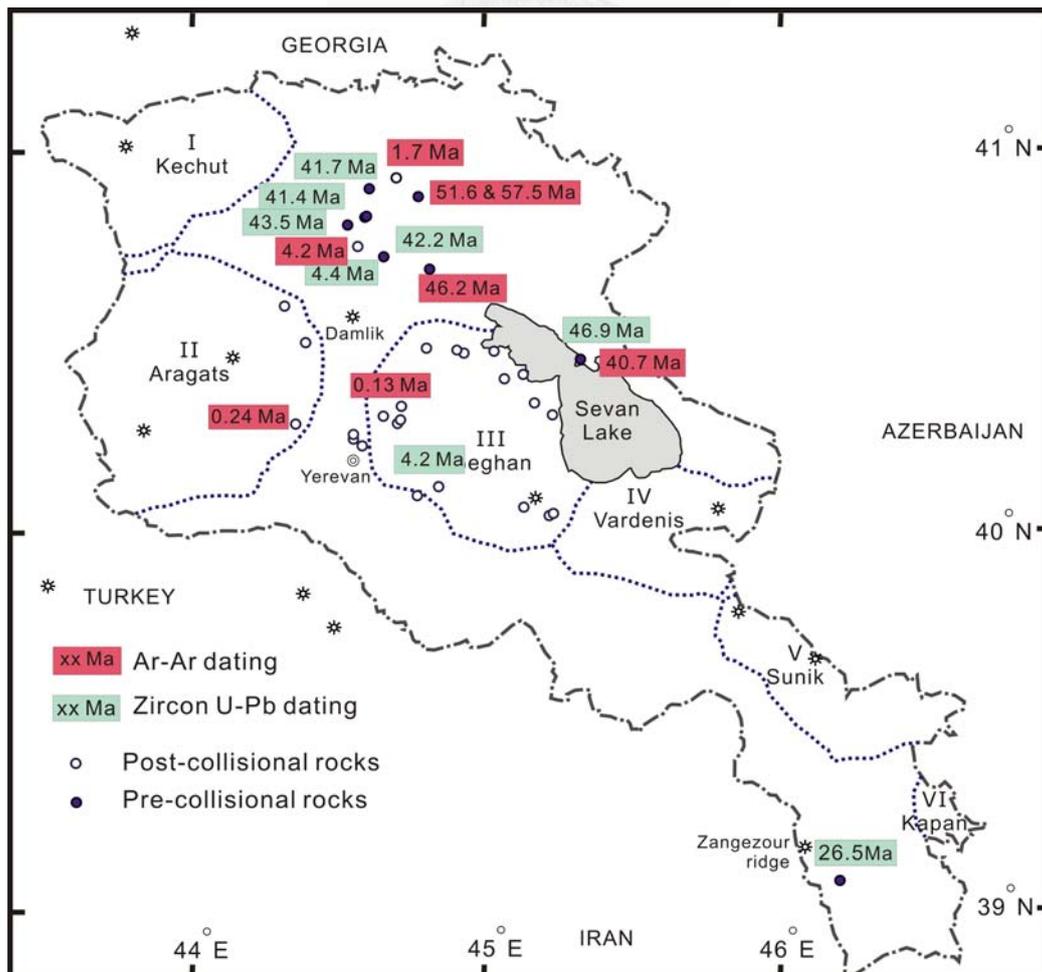


圖 3-8 亞美尼亞火成岩之定年結果，深紅色底為全岩氩氬定年結果，淺綠色底為鋯石鈾鉛定年結果

亞美尼亞碰撞前噴出岩從 57.5 Ma 開始一直持續到 40.7 Ma 皆有岩石記錄，從亞美尼亞的地形來看，其地勢向東北方逐漸降低，在始新世火成岩之下即侏羅紀的沉積岩，而我們的定年結果中可以看到最老的碰撞前噴出岩出現於亞美尼亞東北角(09ARM26-2: 57.5±0.7 Ma)，這也就代表了在地勢較低的地方其火成岩年代較老，層序位置較低，且在 09ARM26-1 標本形成(51.6±2.7 Ma)時此地已由水下環境轉為水上環境，可能是由於地勢的抬升或是火山本身高度超出水面所造成；亞美尼亞南方大型侵入岩體的標本 RAF-1 (花崗岩，26.5 Ma)為 CIA 地區目前發現最年輕的碰撞前火成岩標本，可能為岩漿演化末期的產物。

亞美尼亞碰撞後火成岩的年代則是從 4.4 Ma 開始，一直到現在都還有火山活動，但根據我們地球化學分析結果，可以發現三個 4 Ma 左右的標本，皆擁有埃達克岩的地球化學特性，在這之後的年輕標本(< 2 Ma)則屬於碰撞後岩漿活動中較常見的高鉀鈣鹼性岩石。

### 3.3.1 全岩氩-氬定年

本研究中共選取亞美尼亞碰撞後噴出岩 10 顆、碰撞前噴出岩 3 顆與碰撞前侵入岩 1 顆做全岩氩-氬定年，但部份碰撞後火成岩(09ARM01、09ARM04、09ARM11-1、09ARM15、09ARM17-1 以及 09ARM19-2)由於太過於年輕而無法以全岩氩-氬定年的方式來分析，但我們仍可以以此為依據，知道其年代非常年輕，其餘分析結果如表 3-2。所有標本反等時線圖所計算出的  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  初始值介於 283 至 303 之間，與現今的空氣比值  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar} = 295.5$  差異不大，顯示本實驗所得之年代合理並可信；但分析結果中 09ARM03-1-2 標本的反等時線年代為負值，可能是因為此標本的年代相當年輕所造成；本研究以坦原年代(plateau age)做為其形成年代，可以避免使用較不準確的反等時線年代。

本實驗標本的總和年代(integrated age)、坦原年代(plateau age)、反等時線年代(intercept age)圖表於 35 至 38 頁，其中圖 3-9、表 3-3 與圖 3-10、表 3-4 分別為亞美尼亞碰撞前與碰撞後火成岩之定年結果，左圖為年代譜圖、右圖為反等時線圖。

表 3-2 全岩氩-氩定年結果整理

Summary of whole-rock  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating results.

Sample	Total gas age		Plateau plot			Isotope correction		
	(Myr $\pm$ 2 $\sigma$ )	N (steps)	$^{39}\text{Ar}$ proportion (%)	Plateau age (Myr $\pm$ 2 $\sigma$ )	MSWD	Intercept age ( $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ) <sub>0</sub> (Myr $\pm$ 2 $\sigma$ )	$\pm$ 1 $\sigma$	MSWD
<b>pre-collisional extrusive rocks</b>								
09ARM05-2	45.6 $\pm$ 1.0	11	93.8	46.2 $\pm$ 1.0	5.1	42.9 $\pm$ 6.1	296 $\pm$ 2	2.2
09ARM26-1	55.1 $\pm$ 2.6	8	78.3	51.6 $\pm$ 2.7	1.5	57.4 $\pm$ 5.6	292 $\pm$ 4	1.1
09ARM26-2	60.3 $\pm$ 0.8	7	93.8	57.5 $\pm$ 0.7	5.1	52.3 $\pm$ 1.1	304 $\pm$ 3	1.3
<b>pre-collisional intrusive rocks</b>								
09ARM30-2	38.6 $\pm$ 0.6	9	84.4	40.7 $\pm$ 0.8	8.7	44.2 $\pm$ 3.0	288 $\pm$ 4	1.7
<b>post-collisional extrusive rocks *</b>								
09ARM08	3.5 $\pm$ 0.2	4	88.1	4.2 $\pm$ 0.3	2.0	4.6 $\pm$ 0.3	283 $\pm$ 34	1.7
09ARM12	-1.2 $\pm$ 0.4	5	84.3	0.24 $\pm$ 0.38	0.15	0.48 $\pm$ 0.02	295 $\pm$ 1	0.34
09ARM28	1.5 $\pm$ 0.4	7	80.0	1.7 $\pm$ 0.3	1.8	1.2 $\pm$ 0.3	299 $\pm$ 8	1.1
09ARM03-1-2	0.2 $\pm$ 0.2	5	82.1	0.13 $\pm$ 0.26	1.1	-0.46 $\pm$ 0.33	297 $\pm$ 1	0.44

\* Some post-collisional rocks (e.g., 09ARM01、09ARM04、09ARM11-1、09ARM15、09ARM17-1、09ARM19-2) are too young to date.

### 3.3.2 鋯石鈾-鉛定年

本研究中共選取亞美尼亞碰撞後噴出岩 5 顆、碰撞前噴出岩 4 顆與碰撞前侵入岩 3 顆做鋯石鈾-鉛定年，其中 09ARM14、09ARM18、09ARM19-2 與 09ARM05-2 由於鋯石數目過少而無法做定年分析；鋯石數量足夠的標本則可作單顆鋯石鈾-鉛定年分析。從其陰極亮度影像(CL image)來看，可發現這些鋯石標本多屬於原生岩漿鋯石，部份具有良好結晶與明顯環帶，無明顯繼承鋯石的出現，各標本皆選取約 20 顆鋯石做分析，扣除訊號不佳的分析點後，留下約十幾個分析點，由於本研究中標本的年代皆未大於 1000 Ma，因此經過普通鉛含量校正後使用其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年齡代表形成年代，協和圖以及 CL image 為圖 3-11，定年結果列表為表 3-5 至表 3-7。

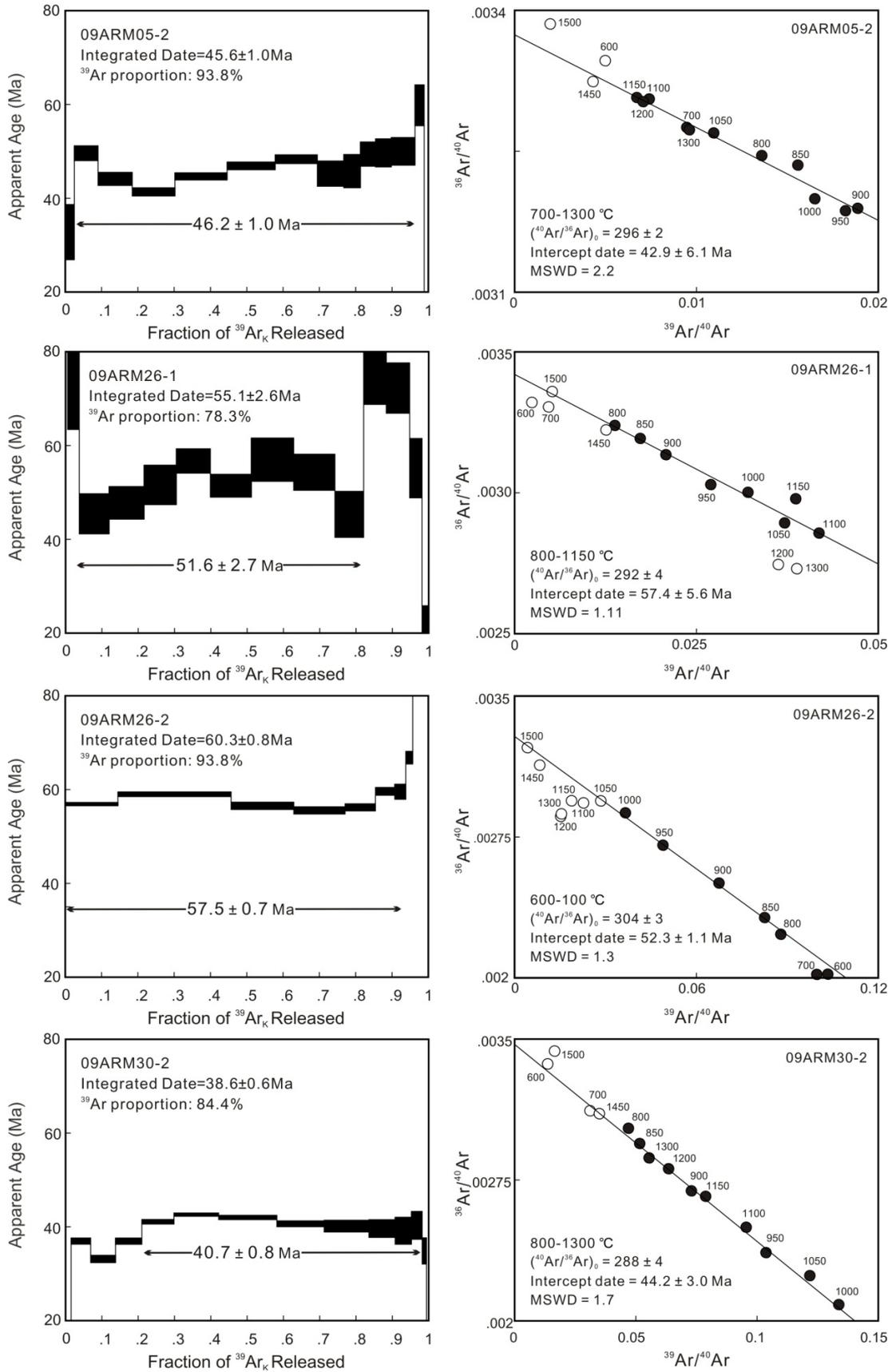


圖 3-9 亞美尼亞碰撞前火成岩之全岩氩-氫定年結果

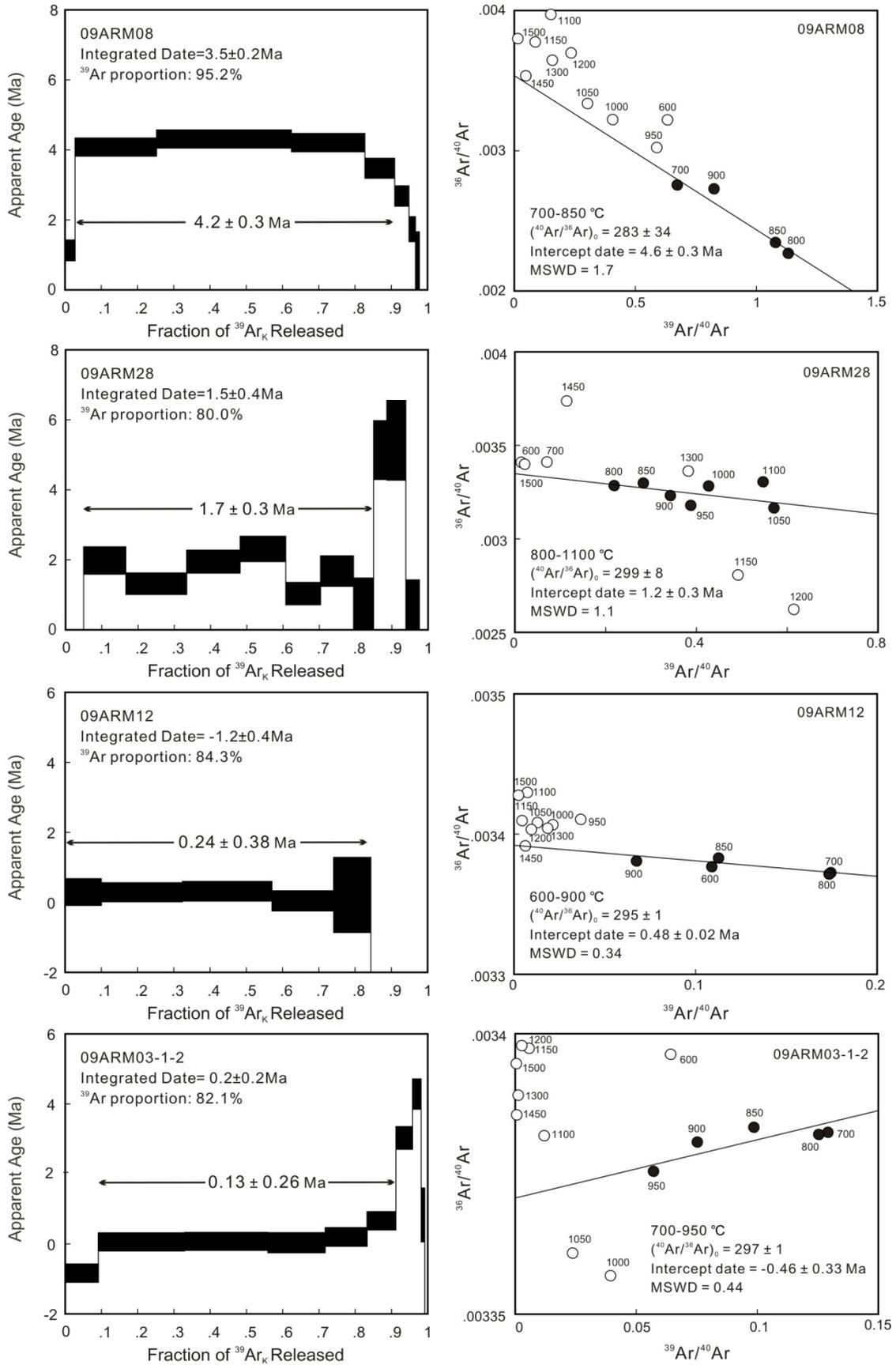


圖 3-10 亞美尼亞碰撞後火成岩之全岩氩-氩定年結果

表 3-3 亞美尼亞碰撞前火成岩之全岩氩-氦定年分析結果

Detailed  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating results of the pre-collisional volcanic rocks from Armenia.

T(°C)	Cum. $^{39}\text{Ar}_k(\%)$	Atmos.	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	Date (Ma) $\pm 1\sigma$
<b>09ARM05-2</b>								
600	0.025	98.889	0.671000	3.6540	0.13440	200.300	298.4	32.8 $\pm$ 5.9
700	0.09	96.789	0.346300	7.0140	0.07792	105.200	303.8	49.6 $\pm$ 1.6
800	0.185	95.904	0.239600	8.4580	0.05703	73.200	305.5	44.1 $\pm$ 1.4
850	0.302	95.604	0.208500	6.5040	0.05147	63.960	306.8	41.4 $\pm$ 0.9
900	0.446	94.245	0.169800	4.8930	0.04581	52.860	311.4	44.7 $\pm$ 0.8
950	0.578	94.168	0.175800	4.5470	0.04721	54.830	311.9	46.9 $\pm$ 0.8
1000	0.694	94.545	0.194700	6.9710	0.05341	60.330	309.8	48.3 $\pm$ 0.9
1050	0.767	96.616	0.299300	11.0100	0.07500	90.710	303.1	45.2 $\pm$ 2.7
1100	0.813	97.685	0.446000	15.0000	0.10280	133.800	300.0	45.8 $\pm$ 3.6
1150	0.855	97.73	0.491000	20.1900	0.11320	146.900	299.3	49.4 $\pm$ 2.6
1200	0.898	97.599	0.466400	21.4600	0.10350	139.600	299.3	49.7 $\pm$ 3.0
1300	0.963	96.714	0.341300	20.0800	0.08029	102.700	301.0	50.0 $\pm$ 3.0
1450	0.989	98.231	0.766200	19.4900	0.15150	229.000	298.9	59.8 $\pm$ 4.4
1500	1.000	*****	1.715000	18.4300	0.34680	505.100	294.6	-3.3 $\pm$ 3.7
Integrated date = 45.6 $\pm$ 1.0 Ma								
Plateau date = 46.2 $\pm$ 1.0 Ma (700°C ~ 1300°C)								
J-value = 0.008216866 $\pm$ 0.000035435								
<b>09ARM26-1</b>								
600	0.006	98.132	1.365000	47.1000	0.27940	407.400	298.5	112 $\pm$ 12.1
700	0.038	97.662	0.695300	58.5200	0.13490	205.900	296.1	72.7 $\pm$ 9.3
800	0.12	95.722	0.238400	32.5700	0.05373	71.060	298.1	45.4 $\pm$ 4.3
850	0.216	94.358	0.188600	27.6100	0.04769	56.870	301.6	47.8 $\pm$ 3.5
900	0.305	90.271	0.151300	23.8600	0.03739	47.580	314.4	68.3 $\pm$ 3.2
950	0.398	89.518	0.116100	20.6700	0.03692	36.610	315.4	56.7 $\pm$ 2.6
1000	0.511	90.329	0.098850	18.5300	0.03340	30.820	311.8	44.1 $\pm$ 2.5
1050	0.628	84.118	0.080770	19.9900	0.02895	26.610	329.5	62.3 $\pm$ 2.6
1100	0.742	84.435	0.074280	28.5200	0.02894	23.480	316.1	54.3 $\pm$ 3.9
1150	0.821	88.324	0.085390	39.3900	0.02895	25.240	295.5	44.2 $\pm$ 4.9
1200	0.883	81.141	0.086410	51.8900	0.02686	26.680	308.7	75.5 $\pm$ 6.7
1300	0.948	80.704	0.079220	42.2000	0.02645	25.090	316.8	72.3 $\pm$ 5.4
1450	0.982	95.248	0.260100	42.1100	0.05785	77.380	297.5	55.2 $\pm$ 6.3
1500	1.000	99.273	0.642400	40.9500	0.13010	188.100	292.9	20.7 $\pm$ 5.1
Integrated date = 55.1 $\pm$ 2.6 Ma								
Plateau date = 51.6 $\pm$ 2.7 Ma (800°C ~ 1150°C)								
J-value = 0.008216866 $\pm$ 0.000035435								
<b>09ARM26-2</b>								
600	0.145	59.687	0.019610	0.2872	0.01570	9.702	494.7	56.9 $\pm$ 0.4
700	0.457	59.651	0.020970	3.0040	0.01575	10.040	478.6	59.0 $\pm$ 0.5
800	0.63	65.963	0.026790	5.8000	0.01758	11.370	424.3	56.5 $\pm$ 0.8
850	0.771	68.59	0.029490	5.7430	0.01765	12.100	410.4	55.6 $\pm$ 0.8
900	0.854	74.015	0.038450	5.7120	0.02005	14.800	384.9	56.2 $\pm$ 0.8
950	0.908	79.974	0.056510	5.6820	0.02306	20.370	360.5	59.6 $\pm$ 0.8
1000	0.938	85.065	0.079860	5.5960	0.02888	27.270	341.5	59.5 $\pm$ 1.6
1050	0.957	86.938	0.104400	5.2110	0.03363	35.060	335.8	66.8 $\pm$ 1.4
1100	0.971	86.626	0.129600	4.6590	0.04251	43.850	338.2	85.1 $\pm$ 1.7
1150	0.98	86.96	0.157200	4.1850	0.04583	53.080	337.7	100 $\pm$ 2.8
1200	0.985	84.507	0.188100	3.6510	0.05829	65.480	348.1	144 $\pm$ 2
1300	0.994	84.898	0.186200	2.3860	0.05452	64.630	347.1	139 $\pm$ 2.2
1450	0.998	92.558	0.377500	2.6940	0.08427	120.300	318.8	128 $\pm$ 1.9
1500	1.000	95.322	0.758800	2.4640	0.17610	235.100	309.8	156 $\pm$ 0.9
Integrated date = 60.3 $\pm$ 0.8 Ma								
Plateau date = 57.5 $\pm$ 0.7 Ma (600°C ~ 1000°C)								
J-value = 0.008216866 $\pm$ 0.000035435								
<b>09ARM30-2</b>								
600	0.015	99.526	0.247100	3.6790	0.05501	73.130	295.9	5.1 $\pm$ 0.8
700	0.069	92.162	0.100900	3.6220	0.03209	32.100	318.0	37.0 $\pm$ 0.7
800	0.138	89.403	0.065380	4.3780	0.02394	21.270	325.3	33.2 $\pm$ 0.8
850	0.21	87.006	0.057850	3.6090	0.02231	19.360	334.7	37.0 $\pm$ 0.7
900	0.299	79.558	0.037490	2.4750	0.01942	13.720	365.9	41.1 $\pm$ 0.5
950	0.422	69.846	0.023160	1.4950	0.01602	9.665	417.3	42.6 $\pm$ 0.4
1000	0.582	61.67	0.016060	1.8380	0.01531	7.499	467.0	42.0 $\pm$ 0.5
1050	0.712	66.228	0.019490	4.4500	0.01548	8.217	421.7	40.7 $\pm$ 0.6
1100	0.836	73.838	0.028510	9.8620	0.01715	10.430	365.9	40.2 $\pm$ 1.3
1150	0.908	78.697	0.037250	14.7800	0.01861	12.600	338.2	39.6 $\pm$ 1.9
1200	0.952	83.037	0.048770	19.9700	0.01960	15.570	319.3	39.2 $\pm$ 2.9
1300	0.982	84.74	0.056540	21.8900	0.02140	17.800	314.8	40.3 $\pm$ 3.0
1450	0.994	91.701	0.093130	21.9700	0.02221	28.230	303.2	34.9 $\pm$ 2.8
1500	1.000	*****	0.211100	21.8800	0.03139	59.820	283.4	-14.0 $\pm$ 2.8
Integrated date = 38.6 $\pm$ 0.6 Ma								
Plateau date = 40.7 $\pm$ 0.8 Ma (850°C ~ 1300°C)								
J-value = 0.008216866 $\pm$ 0.000035435								

Note:

The apparent date is obtained by using the following equations:

$$\text{Age} = \frac{1}{\lambda} \ln \left( 1 + J \frac{^{40}\text{Ar}^*}{^{39}\text{Ar}_k} \right), \text{ and}$$

$$\frac{^{40}\text{Ar}^*}{^{39}\text{Ar}_k} = \frac{[^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}]_{\text{Ca}} - 295.5 \left[ \frac{^{36}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}} \right]_{\text{Ca}} + 295.5 \left[ \frac{^{36}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}} \right]_{\text{K}} \left[ \frac{^{37}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}} \right]_{\text{Ca}}}{1 - \left[ \frac{^{36}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}} \right]_{\text{Ca}} \left[ \frac{^{37}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}} \right]_{\text{K}}} - \left[ \frac{^{40}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}} \right]_{\text{K}}$$

where [ ]<sub>Ca</sub> and [ ]<sub>K</sub> = isotope ratios of argon extracted from irradiated calcium and potassium salts) and [ ]<sub>m</sub> = isotope ratio of argon extracted from irradiated unknown.

表 3-4 亞美尼亞碰撞後火成岩之全岩氩-氩定年分析結果

Detailed  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating results of the post-collisional volcanic rocks from Armenia.

T(°C)	Cum. $^{39}\text{Ar}_k(\%)$	Atmos.	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	Date (Ma) $\pm 1\sigma$
<b>09ARM08</b>								
600	0.028	95.181	0.005214	0.4923	0.01494	1.609	308.5	1.1 $\pm$ 0.3
700	0.252	81.452	0.004205	0.4318	0.01300	1.514	360.1	4.1 $\pm$ 0.3
800	0.624	67.045	0.002118	0.4446	0.01254	0.912	430.7	4.3 $\pm$ 0.3
850	0.827	69.342	0.002302	0.4993	0.01270	0.955	415.0	4.2 $\pm$ 0.3
900	0.909	80.646	0.003459	0.5938	0.01338	1.241	358.7	3.5 $\pm$ 0.3
950	0.949	89.346	0.005350	0.8383	0.01480	1.727	322.9	2.7 $\pm$ 0.3
1000	0.967	95.241	0.008448	2.0510	0.01738	2.487	294.4	1.7 $\pm$ 0.4
1050	0.978	98.621	0.012610	6.3380	0.02044	3.322	263.5	0.7 $\pm$ 1.0
1100	0.982	*****	0.028490	9.1210	0.02311	6.615	232.2	-17.2 $\pm$ 2.0
1150	0.984	*****	0.045880	9.9100	0.02511	11.510	250.8	-20.0 $\pm$ 2.9
1200	0.992	*****	0.018100	9.5150	0.02310	4.266	235.7	-5.9 $\pm$ 2.1
1300	0.997	*****	0.025420	9.1810	0.02568	6.357	250.1	-7.3 $\pm$ 1.8
1450	0.999	*****	0.076230	9.1650	0.03765	20.930	274.6	-14.0 $\pm$ 2.3
1500	1.000	*****	0.263400	8.9570	0.05240	68.730	261.0	-130 $\pm$ 4.3
Integrated date = 3.5 $\pm$ 0.2 Ma								
Plateau date = 4.2 $\pm$ 0.3 Ma (700°C ~ 900°C)						J-value = 0.008216866 $\pm$ 0.000035435		
<b>09ARM12</b>								
600	0.1	99.783	0.031050	0.2215	0.02106	9.208	296.5	0.3 $\pm$ 0.4
700	0.324	99.660	0.019480	0.6360	0.01801	5.756	295.5	0.3 $\pm$ 0.3
800	0.571	99.628	0.019630	0.8507	0.01753	5.788	294.8	0.3 $\pm$ 0.3
850	0.741	99.967	0.030250	0.9515	0.01938	8.900	294.2	0.0 $\pm$ 0.3
900	0.843	99.904	0.050350	1.0960	0.02341	14.840	294.7	0.2 $\pm$ 1.1
950	0.894	*****	0.093080	1.4710	0.03108	27.210	292.3	-3.2 $\pm$ 0.3
1000	0.923	*****	0.159800	3.4970	0.04419	46.680	292.1	-4.6 $\pm$ 0.5
1050	0.94	*****	0.264500	7.7450	0.06256	77.050	291.3	-8.2 $\pm$ 1.0
1100	0.949	*****	0.467000	9.0640	0.10080	135.500	290.2	-27.5 $\pm$ 3.0
1150	0.955	*****	0.769400	8.2550	0.15440	225.100	292.5	-25.5 $\pm$ 1.8
1200	0.967	*****	0.356200	5.4860	0.07979	104.300	292.8	-8.8 $\pm$ 2.3
1300	0.99	*****	0.184500	5.9950	0.04747	53.790	291.5	-4.8 $\pm$ 0.8
1450	0.997	*****	0.544100	5.8380	0.11340	160.000	294.1	-5.3 $\pm$ 1.0
1500	1.000	*****	1.390000	5.5870	0.26690	405.200	291.5	-79.5 $\pm$ 3.9
Integrated date = -1.2 $\pm$ 0.4 Ma								
Plateau date = 0.24 $\pm$ 0.38 Ma (600°C ~ 850°C)						J-value = 0.008216866 $\pm$ 0.000035435		
<b>09ARM28</b>								
600	0.005	*****	0.244300	2.7110	0.05417	71.490	292.6	-8.1 $\pm$ 5.7
700	0.05	*****	0.048550	1.0870	0.02027	14.180	292.1	-1.7 $\pm$ 0.3
800	0.166	97.075	0.015330	1.2800	0.01470	4.597	299.8	2.0 $\pm$ 0.4
850	0.334	97.482	0.012000	1.3550	0.01410	3.560	296.8	1.3 $\pm$ 0.3
900	0.481	95.492	0.009785	1.4150	0.01402	2.945	301.0	1.9 $\pm$ 0.3
950	0.607	93.950	0.008548	1.3800	0.01404	2.607	304.9	2.3 $\pm$ 0.4
1000	0.703	97.015	0.008093	1.6040	0.01390	2.369	292.7	1.0 $\pm$ 0.3
1050	0.794	93.537	0.006273	2.8920	0.01363	1.778	283.3	1.7 $\pm$ 0.4
1100	0.85	97.672	0.007205	4.6170	0.01312	1.852	257.1	0.6 $\pm$ 0.9
1150	0.886	82.947	0.007353	6.5330	0.01381	2.055	279.4	5.1 $\pm$ 0.8
1200	0.939	77.516	0.006498	8.8370	0.01304	1.647	253.4	5.4 $\pm$ 1.1
1300	0.976	99.372	0.011140	9.3800	0.01412	2.631	236.1	0.2 $\pm$ 1.2
1450	0.992	*****	0.034960	9.3920	0.01674	8.742	250.0	-13.6 $\pm$ 2.6
1500	1.000	*****	0.159300	9.3240	0.04141	46.180	289.9	-3.2 $\pm$ 2.6
Integrated date = 1.5 $\pm$ 0.4 Ma								
Plateau date = 1.7 $\pm$ 0.3 Ma (800°C ~ 1100°C)						J-value = 0.008216866 $\pm$ 0.000035435		
<b>09ARM03-1-2</b>								
600	0.091	*****	0.052920	0.1125	0.02301	15.600	294.8	-0.8 $\pm$ 0.3
700	0.33	99.951	0.026210	0.1078	0.01822	7.770	296.4	0.1 $\pm$ 0.3
800	0.559	99.94	0.027000	0.1086	0.01826	8.004	296.4	0.1 $\pm$ 0.3
850	0.717	99.977	0.034350	0.1081	0.01970	10.170	296.2	0.0 $\pm$ 0.3
900	0.833	99.9	0.044970	0.1098	0.02166	13.320	296.3	0.2 $\pm$ 0.3
950	0.912	99.745	0.059110	0.1101	0.02416	17.530	296.6	0.7 $\pm$ 0.3
1000	0.958	99.196	0.085310	0.1159	0.02940	25.430	298.1	3.0 $\pm$ 0.3
1050	0.982	99.315	0.141800	0.1195	0.03974	42.220	297.7	4.3 $\pm$ 0.4
1100	0.992	99.933	0.282600	0.1301	0.06548	83.590	295.8	0.8 $\pm$ 0.8
1150	0.996	*****	0.593300	0.1562	0.12090	174.700	294.4	-10.2 $\pm$ 0.6
1200	0.998	*****	1.250000	0.1875	0.23800	367.800	294.3	-22.4 $\pm$ 3.7
1300	0.999	*****	2.714000	0.2341	0.50420	800.900	295.1	-17.5 $\pm$ 9.2
1450	1.000	*****	5.525000	0.5883	1.03500	1632.000	295.4	-10.4 $\pm$ 11.8
1500	1.000	*****	7.605000	0.8474	1.43000	2240.000	294.6	-107 $\pm$ 15.5
Integrated date = 0.2 $\pm$ 0.2 Ma								
Plateau date = 0.13 $\pm$ 0.26 Ma (700°C ~ 950°C)						J-value = 0.008216866 $\pm$ 0.000035435		

Note:

Atmos. (%) =  $[1 - 40\text{Ar}^*/(^{40}\text{Ar}^* + ^{40}\text{Ar}_{\text{at}})] \times 100$ , \* = radiogenic  $^{40}\text{Ar}$

J-value: Weighted mean of three fusions of irradiation standard LP-6 biotite having a  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age of 128.5  $\pm$  0.5 Ma, relative to the 28.03  $\pm$  0.08 Ma FC sanidine primary standard (Jourdan and Renne, 2007, GCA vol. 71, p.p. 387-402).

Age (Ma) = the date calculated using the following decay constants:  $\lambda_{\alpha} = 0.581 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$ ;  $\lambda_{\beta} = 4.962 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$ ;  $\lambda = 5.543 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$ ;  $^{40}\text{K}/\text{K} = 0.01167 \text{ atom } \%$  (Steiger and Jäger, 1977).

The quoted error is one standard deviation and includes the error in the J-value, the standard error, but not for the error in the interference corrections.

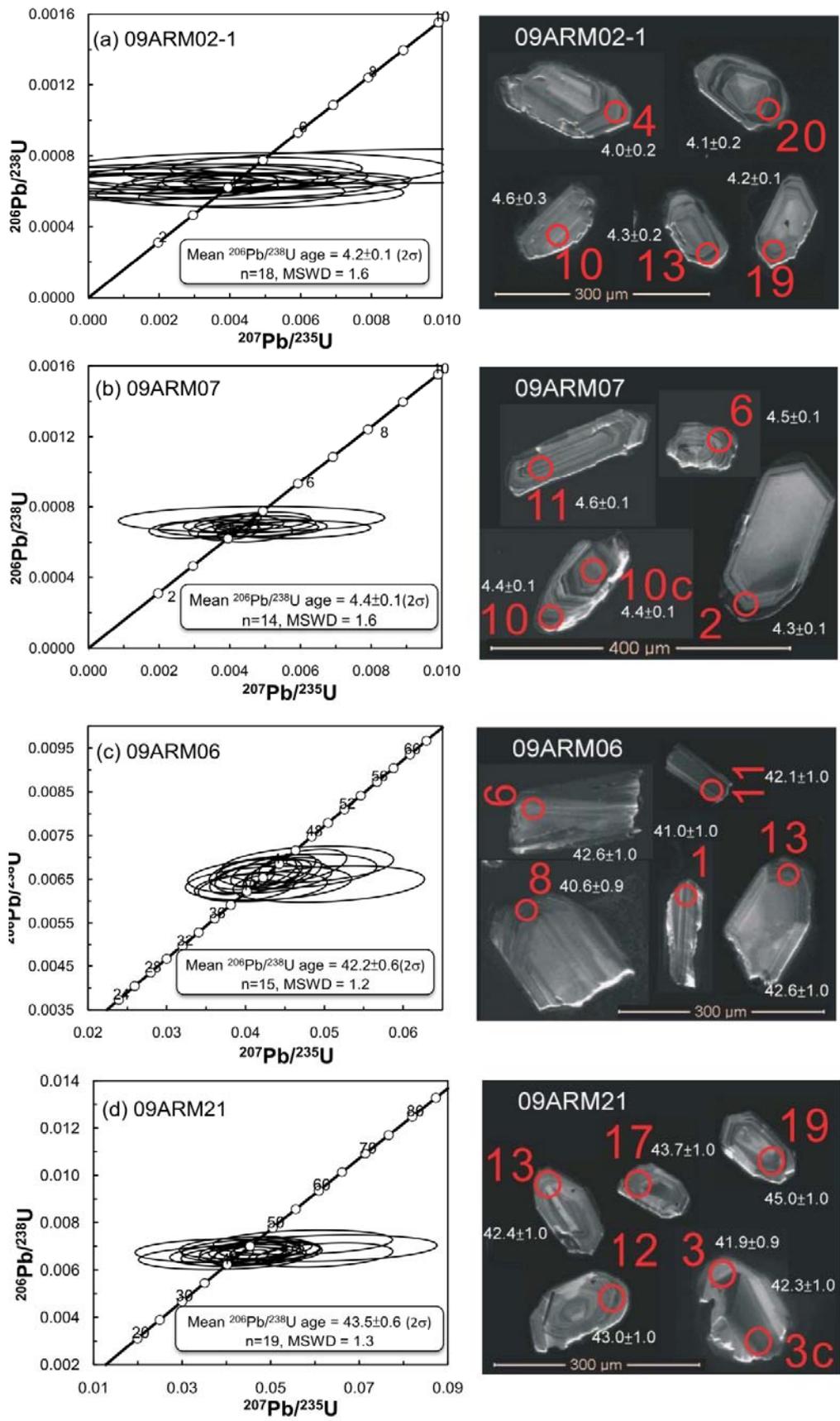


圖 3-11 亞美尼亞之鋯石鈾鉛定年協和圖與 CL image

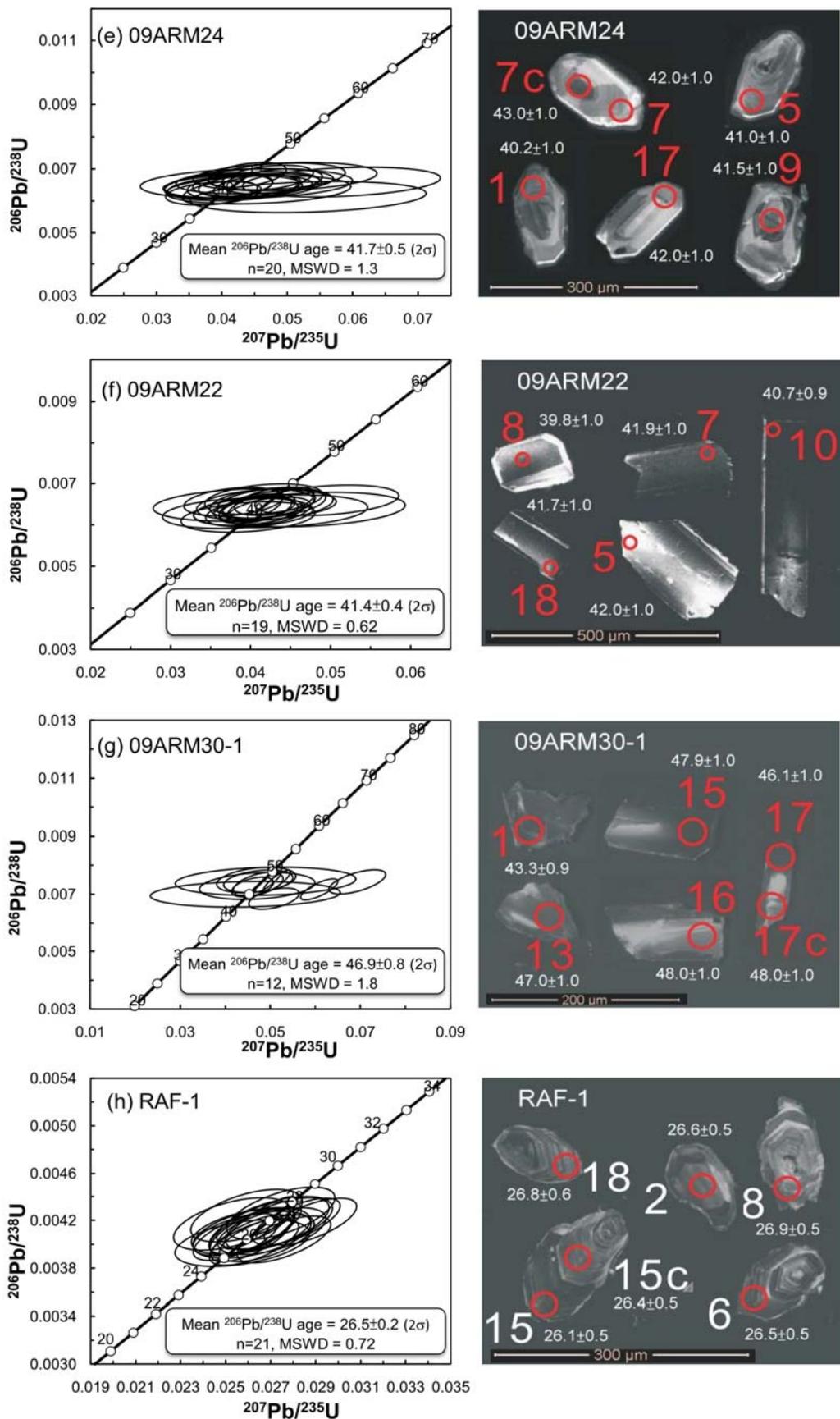


圖 3-11 (續)亞美尼亞之鋯石鈾鉛定年協和圖與 CL image

表 3-5 亞美尼亞碰撞後噴出岩之鋯石鈾-鉛定年結果

Spot	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	error corr.	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age (Ma $\pm 1\sigma$ )	
<b>09ARM02-1</b>										
ARM02-01	0.67	0.0462	0.0161	0.0006	0.0000	0.0037	0.0014	0.1317	3.8	0.2
ARM02-02	0.56	0.0441	0.0123	0.0007	0.0000	0.0044	0.0014	0.1319	4.6	0.2
ARM02-03	0.80	0.0450	0.0082	0.0006	0.0000	0.0040	0.0008	0.1498	4.1	0.1
ARM02-04	0.63	0.0146	0.0154	0.0006	0.0000	0.0013	0.0014	0.0438	4.0	0.2
ARM02-05	0.53	0.0306	0.0167	0.0007	0.0000	0.0028	0.0016	0.0775	4.3	0.2
ARM02-06	0.50	0.0871	0.0222	0.0007	0.0000	0.0089	0.0027	0.1786	4.8	0.3
ARM02-08	0.71	0.0372	0.0087	0.0007	0.0000	0.0034	0.0009	0.1164	4.3	0.1
ARM02-09	0.48	0.0562	0.0171	0.0006	0.0000	0.0049	0.0017	0.1373	4.1	0.2
ARM02-10	0.43	0.0460	0.0209	0.0007	0.0000	0.0046	0.0023	0.1104	4.6	0.3
ARM02-12	0.61	0.0463	0.0084	0.0007	0.0000	0.0043	0.0009	0.2134	4.3	0.2
ARM02-13	0.46	0.0038	0.0201	0.0007	0.0000	0.0003	0.0018	0.0086	4.3	0.2
ARM02-14	0.60	0.0375	0.0213	0.0006	0.0000	0.0032	0.0020	0.0779	4.1	0.2
ARM02-15	0.58	0.0647	0.0168	0.0006	0.0000	0.0052	0.0015	0.1748	3.7	0.2
ARM02-16	0.50	0.0269	0.0189	0.0007	0.0000	0.0025	0.0019	0.0593	4.4	0.2
ARM02-17	0.62	0.0647	0.0127	0.0007	0.0000	0.0059	0.0013	0.1357	4.3	0.1
ARM02-18	0.49	0.0409	0.0160	0.0007	0.0000	0.0039	0.0017	0.1023	4.4	0.2
ARM02-19	0.51	0.0462	0.0049	0.0007	0.0000	0.0041	0.0005	0.2535	4.2	0.1
ARM02-20	0.63	0.0179	0.0188	0.0006	0.0000	0.0016	0.0016	0.0473	4.1	0.2
<b>wt. mean age=4.2<math>\pm</math>0.1 Ma (2<math>\sigma</math>, n=18)</b>										
<b>09ARM07</b>										
ARM07-01	0.53	0.0411	0.0032	0.0007	0.0000	0.0038	0.0004	0.2851	4.3	0.1
ARM07-02	0.61	0.0639	0.0074	0.0007	0.0000	0.0059	0.0008	0.2111	4.3	0.1
ARM07-04	0.52	0.0316	0.0045	0.0007	0.0000	0.0029	0.0005	0.1773	4.3	0.1
ARM07-05	0.49	0.0440	0.0016	0.0007	0.0000	0.0041	0.0002	0.3052	4.3	0.1
ARM07-06	1.28	0.0491	0.0061	0.0007	0.0000	0.0047	0.0007	0.1927	4.5	0.1
ARM07-08	0.48	0.0528	0.0035	0.0007	0.0000	0.0047	0.0004	0.3294	4.2	0.1
ARM07-09	0.35	0.0458	0.0009	0.0007	0.0000	0.0045	0.0002	0.6964	4.6	0.1
ARM07-10	0.48	0.0548	0.0055	0.0007	0.0000	0.0052	0.0007	0.2335	4.4	0.1
ARM0710C	0.82	0.0462	0.0031	0.0007	0.0000	0.0044	0.0004	0.1810	4.4	0.1
ARM07-11	1.47	0.0494	0.0046	0.0007	0.0000	0.0049	0.0006	0.2388	4.6	0.1
ARM07-12	0.64	0.0428	0.0050	0.0007	0.0000	0.0041	0.0006	0.2025	4.5	0.1
ARM07-13	1.22	0.0451	0.0087	0.0007	0.0000	0.0042	0.0009	0.1341	4.4	0.1
ARM07-15	0.56	0.0439	0.0028	0.0007	0.0000	0.0040	0.0004	0.3350	4.3	0.1
ARM07-16	0.53	0.0462	0.0141	0.0007	0.0000	0.0046	0.0015	0.1233	4.7	0.2
<b>wt. mean age=4.4<math>\pm</math>0.1 Ma (2<math>\sigma</math>, n=14)</b>										

表 3-6 亞美尼亞碰撞前噴出岩之鉛-鈾-鉛定年結果

Spot	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	± 1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	± 1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	± 1σ	error corr.	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U age (Ma ± 1σ)	
<b>09ARM06</b>										
ARM06-1	0.77	0.0574	0.0044	0.0064	0.0002	0.0506	0.0050	0.2706	41.0	1
ARM06-2	0.85	0.0484	0.0010	0.0067	0.0001	0.0448	0.0017	0.5628	43.2	0.9
ARM06-3	0.65	0.0486	0.0040	0.0064	0.0002	0.0429	0.0043	0.2487	41.0	1
ARM06-4	0.86	0.0481	0.0032	0.0063	0.0001	0.0420	0.0034	0.2697	40.7	0.9
ARM06-5	0.91	0.0461	0.0017	0.0065	0.0001	0.0415	0.0022	0.4063	42.0	0.9
ARM06-6	0.73	0.0491	0.0012	0.0066	0.0002	0.0448	0.0020	0.5176	42.6	1
ARM06-7	0.73	0.0504	0.0035	0.0067	0.0002	0.0465	0.0042	0.2673	43.0	1
ARM06-8	0.99	0.0461	0.0022	0.0063	0.0001	0.0401	0.0025	0.3308	40.6	0.9
ARM06-9	0.65	0.0462	0.0011	0.0067	0.0001	0.0423	0.0017	0.5237	42.7	0.9
ARM06-10	0.77	0.0485	0.0011	0.0066	0.0001	0.0441	0.0018	0.5313	42.4	0.9
ARM06-11	1.08	0.0461	0.0034	0.0066	0.0002	0.0418	0.0037	0.2722	42.2	1
ARM06-12	0.88	0.0442	0.0011	0.0065	0.0001	0.0396	0.0017	0.5046	41.8	0.9
ARM06-13	0.52	0.0452	0.0018	0.0066	0.0002	0.0413	0.0024	0.3862	42.6	1
ARM06-14	0.63	0.0503	0.0015	0.0068	0.0002	0.0473	0.0023	0.4559	43.8	1
ARM06-15	0.72	0.0508	0.0038	0.0068	0.0002	0.0479	0.0045	0.2669	44.0	1
wt. mean age=42.2±0.6 Ma (2σ, n=15)										
<b>09ARM21</b>										
ARM21-1	1.27	0.0544	0.0032	0.0068	0.0002	0.0511	0.0041	0.3116	44.0	1
ARM21-3	2.08	0.0501	0.0012	0.0065	0.0001	0.0450	0.0018	0.5281	41.9	0.9
ARM213C	1.32	0.0455	0.0013	0.0066	0.0002	0.0412	0.0019	0.4846	42.3	1
ARM21-04	0.60	0.0466	0.0049	0.0068	0.0002	0.0437	0.0056	0.2171	44.0	1
ARM21-5	0.81	0.0580	0.0069	0.0072	0.0002	0.0573	0.0083	0.2029	46.0	1
ARM21-6	0.53	0.0465	0.0053	0.0069	0.0002	0.0444	0.0061	0.1984	45.0	1
ARM21-7	0.60	0.0658	0.0087	0.0069	0.0002	0.0628	0.0102	0.2055	44.0	1
ARM21-8	0.91	0.0679	0.0051	0.0066	0.0002	0.0621	0.0063	0.3102	43.0	1
ARM21-9	0.60	0.0467	0.0057	0.0066	0.0002	0.0426	0.0063	0.1941	43.0	1
ARM21-10	0.90	0.0435	0.0074	0.0065	0.0002	0.0390	0.0077	0.1556	42.0	1
ARM21-11	0.61	0.0545	0.0033	0.0068	0.0002	0.0510	0.0042	0.3049	44.0	1
ARM21-12	0.70	0.0478	0.0036	0.0068	0.0002	0.0445	0.0043	0.2599	43.0	1
ARM21-13	1.11	0.0484	0.0037	0.0066	0.0002	0.0440	0.0042	0.2387	42.4	1
ARM21-14	0.63	0.0461	0.0046	0.0066	0.0002	0.0417	0.0049	0.2198	42.0	1
ARM21-15	0.67	0.0500	0.0029	0.0069	0.0002	0.0476	0.0037	0.3134	44.0	1
ARM21-16	0.53	0.0406	0.0071	0.0068	0.0002	0.0381	0.0077	0.1463	44.0	1
ARM21-17	0.65	0.0478	0.0031	0.0068	0.0002	0.0448	0.0036	0.2745	43.7	1
ARM21-18	0.63	0.0534	0.0041	0.0067	0.0002	0.0495	0.0050	0.2679	43.0	1
ARM21-19	0.47	0.0493	0.0016	0.0070	0.0002	0.0477	0.0025	0.4440	45.0	1
wt. mean age=43.5±0.6 Ma (2σ, n=19)										
<b>09ARM24</b>										
ARM24-01	0.63	0.0461	0.0021	0.0063	0.0002	0.0397	0.0023	0.4072	40.2	0.9
ARM24-02	0.62	0.0521	0.0053	0.0064	0.0002	0.0456	0.0058	0.2235	41.0	1
ARM24-03	0.64	0.0520	0.0034	0.0068	0.0002	0.0485	0.0043	0.2860	43.0	1
ARM24-04	0.74	0.0487	0.0029	0.0065	0.0002	0.0432	0.0035	0.3082	41.0	1
ARM24-05	0.64	0.0444	0.0028	0.0065	0.0002	0.0395	0.0034	0.2906	41.0	1
ARM24-06	0.50	0.0485	0.0061	0.0065	0.0002	0.0438	0.0066	0.1918	42.0	1
ARM24-07	0.57	0.0494	0.0044	0.0066	0.0002	0.0450	0.0049	0.2215	42.0	1
ARM2407C	0.83	0.0533	0.0050	0.0068	0.0002	0.0497	0.0058	0.2300	43.0	1
ARM24-08	0.66	0.0514	0.0032	0.0065	0.0002	0.0458	0.0038	0.2951	42.0	1
ARM24-09	0.85	0.0477	0.0045	0.0065	0.0002	0.0424	0.0047	0.2113	41.5	0.9
ARM24-10	0.61	0.0476	0.0039	0.0064	0.0002	0.0420	0.0042	0.2508	41.1	1
ARM24-11	0.65	0.0525	0.0023	0.0066	0.0002	0.0478	0.0031	0.3745	42.0	1
ARM24-12	0.78	0.0631	0.0069	0.0061	0.0002	0.0532	0.0074	0.2360	39.0	1
ARM24-13	0.57	0.0503	0.0034	0.0065	0.0002	0.0453	0.0040	0.2793	42.0	1
ARM24-14	0.85	0.0507	0.0021	0.0067	0.0002	0.0470	0.0029	0.3913	43.0	1
ARM24-15	1.30	0.0467	0.0017	0.0068	0.0002	0.0439	0.0025	0.4205	44.0	1
ARM24-16	0.63	0.0511	0.0021	0.0065	0.0002	0.0454	0.0027	0.3869	41.4	1
ARM24-17	0.61	0.0443	0.0028	0.0065	0.0002	0.0395	0.0034	0.2888	42.0	1
ARM24-18	0.53	0.0641	0.0052	0.0066	0.0002	0.0583	0.0062	0.2715	42.0	1
ARM24-19	0.62	0.0450	0.0026	0.0062	0.0002	0.0387	0.0030	0.3112	40.1	1
wt. mean age=41.7±0.5 Ma (2σ, n=20)										

表 3-7 亞美尼亞碰撞前侵入岩之鋯石鈾-鉛定年結果

Spot	Th/U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	± 1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	± 1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	± 1σ	error corr.	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U age (Ma ± 1σ)	
<b>09ARM22</b>										
22B-01	1.03	0.0462	0.0019	0.0063	0.0001	0.0402	0.0024	0.3781	40.5	0.9
22B-02	0.76	0.0540	0.0043	0.0064	0.0002	0.0474	0.0049	0.2585	41.0	1
22B-03	0.88	0.0456	0.0024	0.0066	0.0002	0.0416	0.0030	0.3134	42.5	1
22B-04	0.88	0.0473	0.0022	0.0065	0.0002	0.0426	0.0028	0.3506	42.0	1
22B-05	0.83	0.0439	0.0043	0.0065	0.0002	0.0393	0.0047	0.2072	42.0	1
22B-06	0.90	0.0419	0.0020	0.0066	0.0001	0.0379	0.0025	0.3194	42.2	0.9
22B-07	0.94	0.0462	0.0021	0.0065	0.0002	0.0415	0.0027	0.3537	41.9	1
22B-08	0.87	0.0465	0.0030	0.0062	0.0002	0.0397	0.0034	0.2804	39.8	1
22B-09	0.83	0.0545	0.0030	0.0066	0.0002	0.0495	0.0037	0.3064	42.3	1
22B-10	0.83	0.0485	0.0016	0.0063	0.0001	0.0423	0.0021	0.4372	40.7	0.9
22B-11	1.06	0.0458	0.0009	0.0064	0.0001	0.0405	0.0014	0.5858	41.3	0.8
22B-13	0.89	0.0455	0.0023	0.0063	0.0001	0.0397	0.0028	0.3138	40.7	0.9
22B-14	0.75	0.0487	0.0022	0.0065	0.0002	0.0434	0.0028	0.3566	41.6	1
22B-15	0.98	0.0462	0.0013	0.0064	0.0001	0.0406	0.0019	0.4795	40.9	0.9
22B-16	0.85	0.0444	0.0035	0.0063	0.0002	0.0384	0.0038	0.2387	40.4	1
22B-17	0.89	0.0474	0.0014	0.0066	0.0001	0.0430	0.0020	0.4510	42.2	0.9
22B-18	0.71	0.0454	0.0025	0.0065	0.0002	0.0406	0.0030	0.3126	41.7	1
22B-19	0.93	0.0462	0.0014	0.0064	0.0001	0.0408	0.0020	0.4574	41.2	0.9
22B-20	0.83	0.0501	0.0040	0.0063	0.0002	0.0438	0.0045	0.2485	41.0	1
<b>wt. mean age=41.4±0.4 Ma (2σ, n=19)</b>										
<b>09ARM30-1</b>										
ARM30-01	2.50	0.0488	0.0058	0.0067	0.0001	0.0454	0.0060	0.1560	43.3	0.9
ARM30-04	1.22	0.0461	0.0024	0.0075	0.0002	0.0474	0.0031	0.3239	48.0	1
ARM30-05	1.61	0.0482	0.0005	0.0075	0.0002	0.0496	0.0012	0.8527	47.8	1
ARM30-06	1.11	0.0461	0.0014	0.0073	0.0001	0.0461	0.0019	0.4681	46.6	0.9
ARM30-07	3.57	0.0461	0.0081	0.0070	0.0002	0.0445	0.0086	0.1327	45.0	1
ARM30-08	1.27	0.0538	0.0015	0.0069	0.0002	0.0508	0.0023	0.4881	44.0	1
ARM30-11	1.45	0.0461	0.0027	0.0081	0.0002	0.0514	0.0035	0.2912	52.0	1
ARM30-12	2.04	0.0477	0.0071	0.0075	0.0002	0.0490	0.0081	0.1536	48.0	1
ARM30-13	1.04	0.0469	0.0045	0.0073	0.0002	0.0471	0.0053	0.2203	47.0	1
ARM30-15	2.13	0.0501	0.0005	0.0075	0.0002	0.0515	0.0012	0.8488	47.9	1
ARM30-16	0.98	0.0454	0.0025	0.0075	0.0002	0.0469	0.0036	0.3139	48.0	1
ARM30-17	2.38	0.0616	0.0008	0.0072	0.0002	0.0609	0.0017	0.7533	46.1	1
ARM3017C	1.33	0.0677	0.0013	0.0074	0.0002	0.0693	0.0026	0.6149	48.0	1
ARM30-18	1.75	0.0461	0.0034	0.0066	0.0002	0.0420	0.0036	0.2801	42.0	1
ARM30-19	1.23	0.0468	0.0013	0.0073	0.0002	0.0473	0.0023	0.4849	47.0	1
<b>wt. mean age=46.9±0.8 Ma (2σ, n=12)</b>										
<b>RAF-1</b>										
RAF-01	0.58	0.0468	0.0006	0.0041	0.0001	0.0261	0.0007	0.7071	26.1	0.5
RAF-02	0.43	0.0461	0.0008	0.0041	0.0001	0.0263	0.0008	0.6809	26.6	0.6
RAF-03	0.34	0.0487	0.0007	0.0042	0.0001	0.0282	0.0008	0.6803	27.0	0.5
RAF-04	0.41	0.0477	0.0010	0.0041	0.0001	0.0271	0.0010	0.5375	26.4	0.5
RAF-05	0.38	0.0456	0.0007	0.0041	0.0001	0.0255	0.0008	0.6434	26.1	0.5
RAF-05C	0.36	0.0444	0.0010	0.0042	0.0001	0.0259	0.0010	0.5450	27.3	0.6
RAF-06	0.41	0.0461	0.0007	0.0041	0.0001	0.0262	0.0008	0.6610	26.5	0.5
RAF-08	0.43	0.0461	0.0005	0.0042	0.0001	0.0265	0.0007	0.8529	26.9	0.5
RAF-09	0.50	0.0473	0.0007	0.0040	0.0001	0.0263	0.0008	0.6452	25.9	0.5
RAF-09C	0.37	0.0472	0.0010	0.0042	0.0001	0.0272	0.0011	0.5573	26.9	0.6
RAF-10	0.31	0.0498	0.0007	0.0042	0.0001	0.0288	0.0008	0.6539	27.0	0.5
RAF-11	0.38	0.0463	0.0007	0.0041	0.0001	0.0262	0.0008	0.6639	26.4	0.5
RAF-12	0.38	0.0461	0.0014	0.0041	0.0001	0.0261	0.0011	0.4708	26.4	0.5
RAF-12C	0.41	0.0467	0.0009	0.0043	0.0001	0.0275	0.0010	0.5918	27.4	0.6
RAF-13	0.42	0.0466	0.0015	0.0040	0.0001	0.0257	0.0012	0.4209	25.8	0.5
RAF-15	0.33	0.0480	0.0008	0.0041	0.0001	0.0268	0.0009	0.6163	26.1	0.5
RAF-15C	0.45	0.0456	0.0009	0.0041	0.0001	0.0258	0.0009	0.5526	26.4	0.5
RAF-16	0.38	0.0465	0.0012	0.0041	0.0001	0.0262	0.0011	0.4798	26.2	0.5
RAF-17	0.43	0.0495	0.0008	0.0040	0.0001	0.0276	0.0009	0.6427	26.0	0.5
RAF-17C	0.61	0.0440	0.0011	0.0042	0.0001	0.0253	0.0011	0.5147	26.8	0.6
RAF-18	0.43	0.0475	0.0008	0.0042	0.0001	0.0273	0.0009	0.6268	26.8	0.6
<b>wt. mean age=26.5±0.2 Ma (2σ, n=21)</b>										

### 3.4 主量元素

亞美尼亞碰撞前與碰撞後火成岩的全岩主量元素含量列於表 3-8，以全鹼值對二氧化矽含量作圖( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  v.s.  $\text{SiO}_2$ ，圖 3-12)判讀岩性；圖中紅色圓形為碰撞後火成岩，藍色方形為碰撞前火成岩，從圖中讀出亞美尼亞碰撞前火成岩的岩性為玄武岩、玄武岩質安山岩、安山岩以及石英安山岩，二氧化矽含量從 49.1 至 65.8 wt%；碰撞後火成岩則有玄武岩、粗面玄武岩、玄武岩質安山岩、安山岩、粗面安山岩以及流紋岩，二氧化矽含量從 49.2 至 73.9 wt%；不論前後期岩性均相當分異，基性、中性與酸性皆有。若從鉀含量對二氧化矽做圖來看( $\text{K}_2\text{O}$  v.s.  $\text{SiO}_2$ ，圖 3-13)，可明顯的發現碰撞後火成岩的鉀含量較碰撞前火成岩來得高，前者屬於高鉀的鈣鹼性系列，後者則是中鉀的鈣鹼性系列。

從各主量元素氧化物對二氧化矽作圖(Harker 圖，圖 3-14)中我們可以看到各主量元素隨著二氧化矽含量提高而有不同的變化趨勢， $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$  以及  $\text{P}_2\text{O}_5$  為隨之降低， $\text{K}_2\text{O}$  隨之上升， $\text{Na}_2\text{O}$  在碰撞後火成岩大致維持定值、且較碰撞前火成岩含量來得高。這些隨著二氧化矽的含量提高而變化的趨勢在火成岩中顯示包溫反應序列下結晶分化作用的結果。從圖中可發現碰撞前火成岩的  $\text{TiO}_2$  與  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量較碰撞後火成岩來的低，顯示岩漿活動從島弧系統轉為碰撞相關岩漿系統之中；在岩漿結晶分化的過程中，二氧化矽含量不斷增加，全鐵量則會因屬於矽質玄武系列或鈣鹼性系列而有所不同，圖中所見全鐵量隨著岩漿分化減少即是鈣鹼性系列的特徵。此外，與上部地函成份平衡的原始岩漿定義為  $\text{SiO}_2$  含量小於 50 wt%、 $\text{Mg}\#$  大於 70，但亞美尼亞地區碰撞前與碰撞後火成岩的鎂含量皆在 6.6 wt% 以下，全岩鎂值( $\text{Mg}\# = \text{Mg}^{2+}_{\text{mol}} / (\text{Mg}^{2+}_{\text{mol}} + \text{Fe}^{2+}_{\text{mol}})$ ) 皆小於 60，因此我們的標本皆非原始岩漿組成。

### 3.5 微量元素

亞美尼亞碰撞前與碰撞後火成岩的全岩微量元素含量同樣列於表 3-8。如將碰撞前噴出岩、侵入岩及碰撞後噴出岩分別以 C1 球粒隕石值以及原始地函值做標準化(Sun and McDonough, 1989)後，做稀土元素分布圖(REE pattern)以及整體不相容元素圖(spider diagram)，並且根據二氧化矽含量 56 wt% 以及 63 wt% 做區分，分

別代表基性、中性以及酸性之火成岩，繪於不同圖中，如圖 3-15 至圖 3-18。

亞美尼亞的火成岩皆非原始岩漿的組成(從主量元素結果得知)，但相較於酸性岩，基性岩受地殼混染與結晶分化的影響已較小，因此本研究以岩漿分化程度較低的基性噴出岩( $\text{SiO}_2 < 56 \text{ wt}\%$ )探討地函源區的性質；從稀土元素分布圖中基性的部份(圖 3-15a 與圖 3-16a)來看，碰撞前與碰撞後基性噴出岩皆沒有 Eu 的虧損，碰撞前噴出岩的輕稀土元素鐳(La)約為 6.5-16 ppm，標準化之輕稀土元素鐳對重稀土元素鐳的比值 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 介於 3.5-5.8 之間，碰撞後噴出岩則是  $\text{La} = 23-63 \text{ ppm}$ ， $(\text{La}/\text{Yb})_N = 5.8-20.1$ ，可以發現碰撞前與碰撞後火成岩的輕稀土元素均相當富集，但碰撞後岩漿的輕稀土元素富集程度明顯高於碰撞前岩漿，我們已知輕稀土元素在小程度部份熔融時，其富集程度會差異非常大，越小程度的部份熔融會造成越大量的輕稀土元素富集，因此亞美尼亞地區碰撞後岩漿活動的部份熔融程度應小於碰撞前之部份熔融程度。

從整體不相容元素圖(圖 3-17a 以及圖 3-18a)可以看到亞美尼亞地區碰撞前與碰撞後火成岩都具有大離子半徑元素(LILE，如：銣(Rb)、鋇(Ba)、釷(Th)和鈾(U)等元素)富集、高場力鍵結元素 (HFSE，如：鈮(Nb)、鉭(Ta)、鈦(Ti)等元素)虧損(TNT depletion)的現象，是島弧岩漿常見的地球化學特徵，由於大離子半徑元素之活性(mobility)通常也大，因此在含水之島弧岩漿的環境下，大離子半徑元素易從海洋岩石圈中隨著流體進入地函源區，造成大離子半徑元素富集；高場力鍵結元素則是相對穩定的元素，不容易隨著流體移動，且隱沒的海洋岩石圈中之含鈦礦物-金紅石( $\text{TiO}_2$ )會將 Ti (以及具有相似地球化學特性的 Nb、Ta)留在海洋岩石圈之中而不進入地函楔，造成地函源區之 TNT depletion (Stern, 2002)，顯示亞美尼亞地區火成岩之地函源區曾直接或間接的受島弧岩漿所影響，使得其岩漿具有這些特徵。

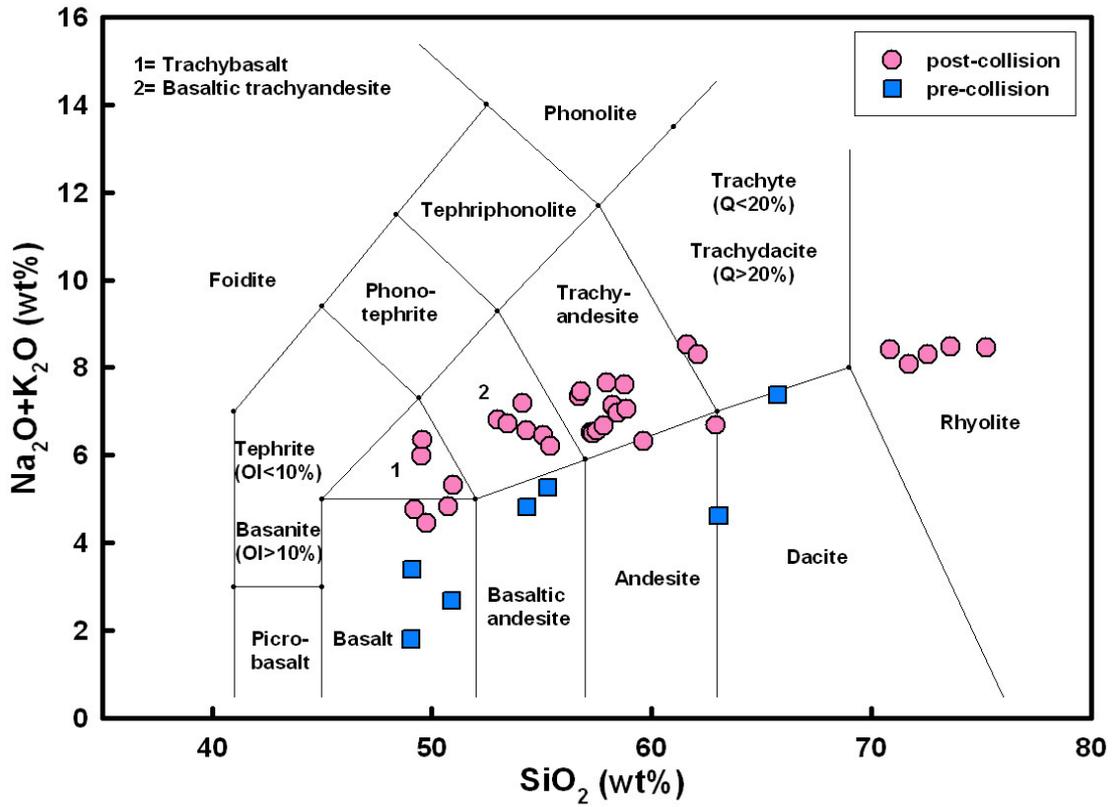


圖 3-12 亞美尼亞全岩  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  對  $\text{SiO}_2$  作圖

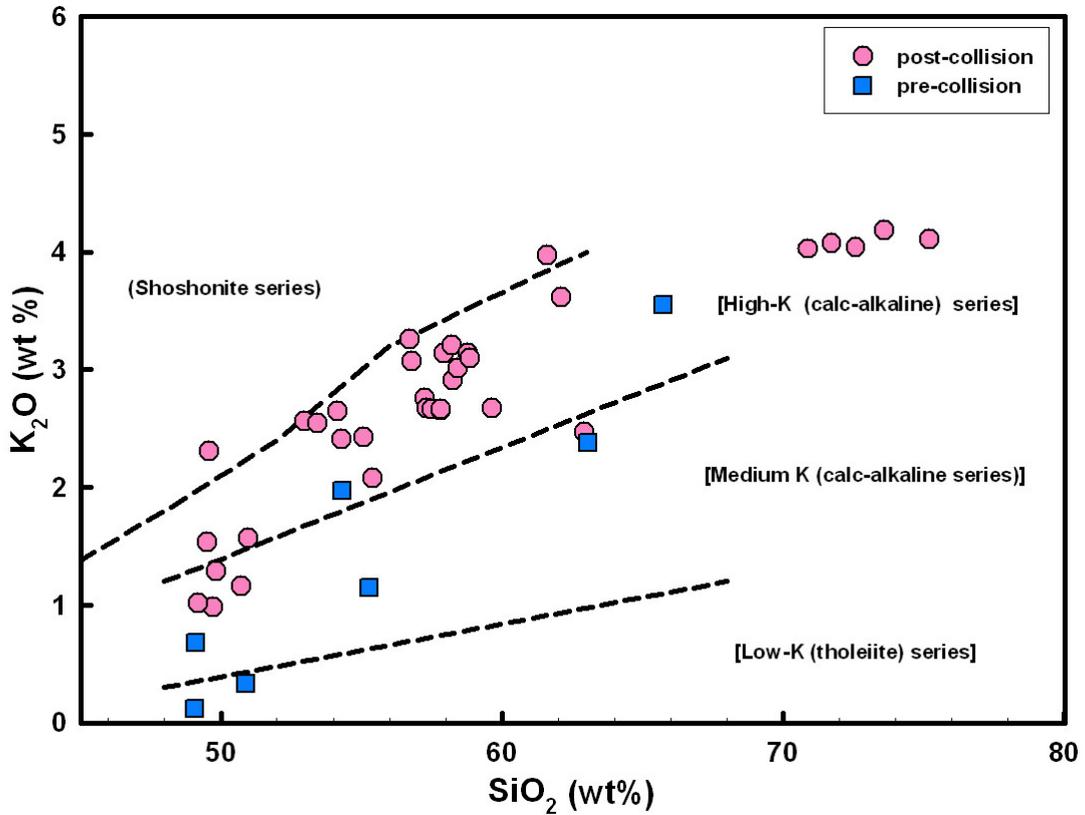


圖 3-13 亞美尼亞全岩  $\text{K}_2\text{O}$  對  $\text{SiO}_2$  作圖

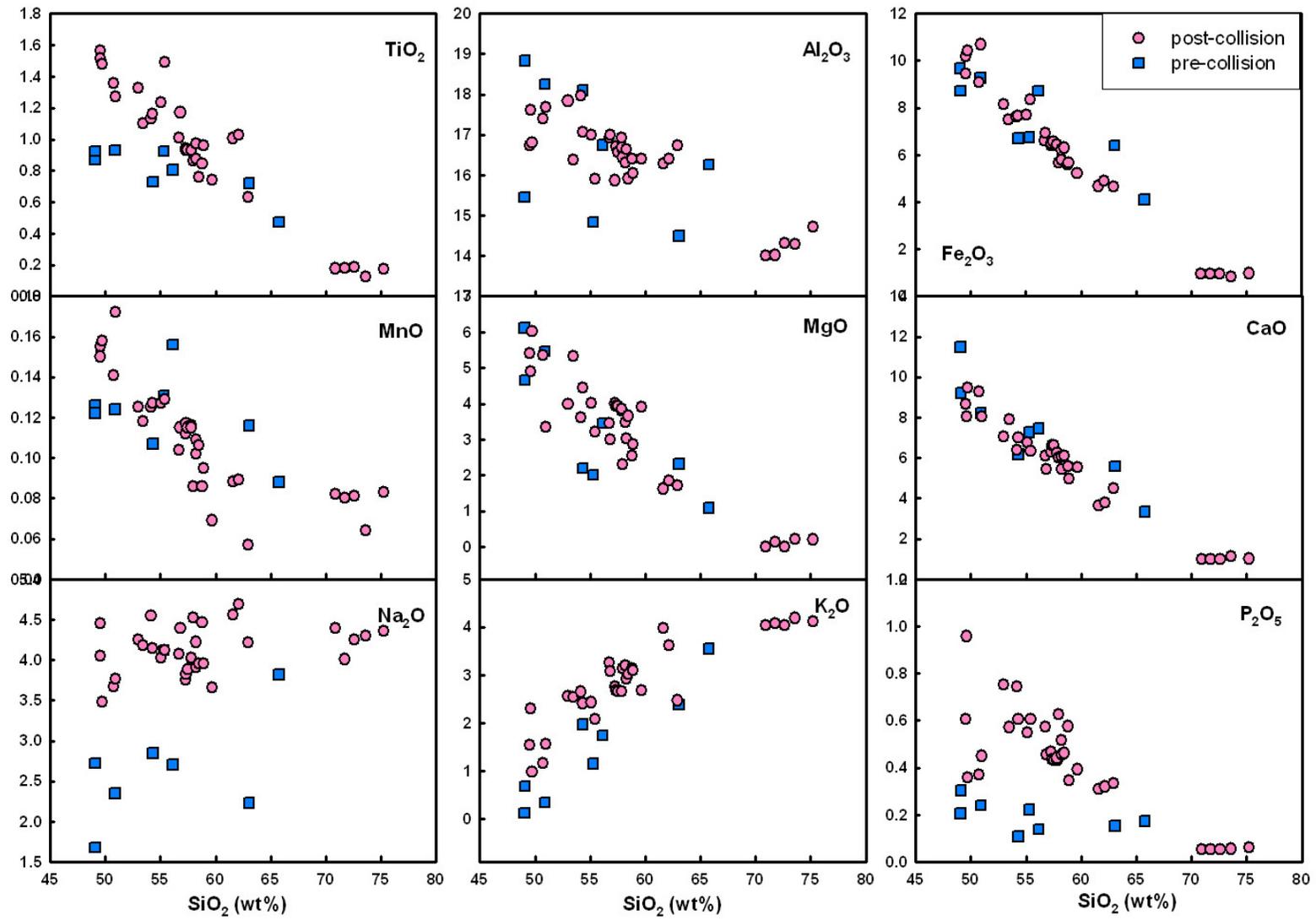


圖 3-14 亞美尼亞全岩主量元素 Harker 圖

表 3-8 亞美尼亞全岩主量元素、微量元素及鋇-釷同位素分析結果

Post-collisional volcanic rocks of Armenia															
	G1	G7	G8	G15	G25	G47	G54	G70	G105	G269	09ARM01	09ARM02-1	09ARM02-2	09ARM02-3	09ARM03-2-1
latitude(° N)											40.11475	40.13992	40.13992	40.13992	40.33825
longitude(° E)											44.74156	44.81900	44.81900	44.81900	44.63419
major element (%)															
SiO <sub>2</sub>	49.7	50.7	51.0	73.6	56.8	49.5	58.5	49.6	54.2	56.7	53.0	62.9	53.4	62.0	73.5
TiO <sub>2</sub>	1.48	1.36	1.27	0.12	1.17	1.56	0.76	1.52	1.13	1.01	1.32	0.63	1.10	0.75	0.19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.8	17.4	17.7	14.3	17.0	16.7	15.9	17.6	18.0	16.9	17.8	16.7	16.4	17.0	14.4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.43	9.09	10.69	0.82	6.93	10.18	6.30	9.45	7.62	6.59	8.14	4.67	7.51	5.24	0.91
MnO	0.16	0.14	0.17	0.06	0.12	0.16	0.11	0.15	0.13	0.10	0.13	0.06	0.12	0.07	0.07
MgO	6.01	5.35	3.35	0.22	3.01	5.41	3.65	4.90	3.60	3.45	3.99	1.72	5.33	3.85	0.28
CaO	9.45	9.27	8.05	1.12	5.45	8.66	6.10	8.05	6.39	6.11	7.06	4.48	7.91	5.49	0.98
Na <sub>2</sub> O	3.48	3.67	3.76	4.29	4.39	4.46	3.95	4.05	4.55	4.07	4.25	4.22	4.18	3.67	4.36
K <sub>2</sub> O	0.98	1.16	1.56	4.18	3.07	1.53	3.02	2.31	2.65	3.26	2.56	2.47	2.54	2.67	4.14
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.36	0.37	0.45	0.06	0.46	0.61	0.46	0.96	0.75	0.57	0.75	0.33	0.57	0.40	0.03
LOI	0.25	0.30	1.36	0.66	0.77	0.05	0.42	1.02	0.65	0.18	0.53	1.20	0.46	1.21	0.94
total	98.9	98.5	97.9	98.8	98.4	98.8	98.7	98.6	98.9	98.8	99.0	98.2	99.1	101.1	99.0
Mg#	53.3	53.8	38.3	34.3	46.2	51.3	53.4	50.7	48.4	50.9	49.3	42.2	58.4	59.3	37.6
trace element (ppm)															
Sc	24.0	23.3	7.76	3.42	11.1	18.6	13.6	17.1	13.6	13.5	14.2	8.48	18.8	2.2	25.6
V	173	163	161	6.05	116	162	120	181	144	129	161	88.7	163	101.1	5.18
Cr	182	141	91.8	26.4	47.1	106	122	94.2	60.0	76.7	67.3	42.3	140	163	8.87
Co	37.3	31.6	47.9	1.03	17.6	31.8	19.1	34.3	22.5	19.2	24.9	10.9	27.1	16.3	0.864
Ni	78.3	59.1	57.3	13.9	34.8	57.6	55.7	61.9	50.7	48.2	58.5	23.5	102.0	84.7	4.01
Cu	149	82.7	141	3.66	48.0	58.0	114	67.7	37.2	50.3	45.9	25.2	28.9	47.4	5.81
Zn	103	79.2	86.8	39.1	84.2	96.3	77.4	103	85.9	131	91.9	74.6	74.7	82.5	41.4
Ga	18.3	19.3	18.8	14.9	20.2	19.3	18.2	19.7	20.3	20.1	20.8	19.0	18.2	18.0	17.4
Rb	19.1	19.6	18.8	100	75.9	21.3	60.8	30.2	43.1	70.2	43.3	56.3	46.8	27.2	178
Sr	546	599	720	121	654	880	922	1450	1174	1047	1231	806	1070	663	127
Y	30.4	28.6	21.2	15.1	25.7	29.3	18.5	26.6	23.6	22.1	25.6	11.4	22.1	9.62	23.1
Zr	166	178	185	90.1	297	205	191	186	215	256	229	87.1	168	184	166
Nb	11.8	13.2	17.2	22.4	28.0	19.6	20.7	25.8	26.7	28.3	25.3	15.8	20.8	18.2	39.5
Cs	0.345	0.152	0.278	3.962	1.038	0.254	1.014	0.358	0.744	1.391	0.591	1.706	0.925	0.113	7.449
Ba	318	363	500	544	763	492	806	785	827	856	813	704	790	699	443
La	24.4	26.5	30.9	25.9	55.8	41.6	54.1	62.7	62.4	62.2	61.8	38.1	54.5	32.1	30.9
Ce	48.3	51.5	60.9	43.2	103	80.9	99.4	124	116	114	119	66.5	99.0	63.8	54.2
Pr	5.93	6.19	6.65	4.37	11.1	9.50	10.8	14.8	13.1	12.5	13.9	7.06	11.2	6.67	5.46
Nd	23.5	24.0	24.5	13.6	37.7	35.2	36.6	52.9	44.9	42.3	49.2	23.4	39.1	23.0	17.0
Sm	5.13	5.18	4.87	2.49	6.41	6.70	5.80	8.73	7.09	6.76	8.20	3.74	6.49	3.83	3.08
Eu	1.68	1.70	1.56	0.597	1.81	2.05	1.67	2.49	2.09	1.89	2.32	1.17	1.91	1.16	0.572
Gd	5.32	5.21	4.60	2.19	5.44	5.98	4.48	6.74	5.64	5.27	6.34	2.81	5.15	3.02	2.91
Tb	0.834	0.811	0.704	0.363	0.807	0.897	0.633	0.939	0.805	0.758	0.890	0.399	0.731	0.438	0.514
Dy	5.11	4.93	4.18	2.20	4.42	5.14	3.25	4.82	4.14	3.87	4.61	2.01	3.88	2.28	3.34
Ho	1.08	1.04	0.869	0.468	0.901	1.05	0.646	0.950	0.829	0.769	0.907	0.391	0.778	0.451	0.726
Er	3.03	2.86	2.41	1.38	2.53	2.88	1.81	2.54	2.29	2.13	2.47	1.06	2.14	1.23	2.08
Tm	0.443	0.414	0.355	0.221	0.371	0.420	0.257	0.357	0.322	0.298	0.343	0.150	0.301	0.171	0.353
Yb	2.82	2.67	2.24	1.55	2.39	2.63	1.68	2.24	2.07	1.93	2.19	0.96	1.89	1.09	2.43
Lu	0.435	0.401	0.341	0.237	0.364	0.399	0.256	0.337	0.310	0.289	0.332	0.144	0.286	0.161	0.371
Hf	3.47	3.70	3.76	2.71	5.96	4.15	4.14	3.80	4.37	5.27	4.65	2.09	3.47	3.97	4.39
Ta	0.608	0.667	0.815	1.95	1.44	0.903	1.09	1.09	1.22	1.38	1.14	0.896	1.00	0.881	3.18
Pb	6.44	5.74	7.39	20.8	14.6	6.93	13.9	9.20	12.1	14.8	10.2	14.2	10.6	12.4	21.5
Th	3.08	3.62	2.54	16.3	15.9	4.14	10.0	3.67	6.27	13.9	6.09	10.3	8.44	2.63	17.9
U	0.814	0.833	1.56	7.89	3.49	0.962	2.53	0.785	1.79	2.98	1.52	3.02	1.80	2.23	8.90
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr <sub>(norm)</sub>		0.704185		0.704188		0.704319					0.704530	0.704474			
<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd <sub>(norm)</sub>		0.512851		0.512822		0.512839					0.512785	0.512807			
εNd		4.2		3.6		3.9					2.9	3.3			

表 3-8(續)

亞美尼亞全岩主量元素、微量元素及鋇-釷同位素分析結果

	09ARM03-1-2	09ARM03-1-1	09ARM03-2-2	09ARM04	09ARM07A	09ARM08	09ARM11-1	09ARM11-2	09ARM12	09ARM13	09ARM14A	09ARM15	09ARM16	09ARM17-1	09ARM17-2
latitude(° N)	40.33825	40.33825	40.33825	40.49783	40.78267	40.78267	40.529	40.52936	40.30569	40.50124	40.50023	40.50904	40.43303	40.06855	40.06855
longitude(° E)	44.63419	44.63419	44.63419	44.78617	44.54475	44.54475	44.388	44.38778	44.37047	44.92024	44.92369	45.00283	45.10678	45.21157	45.21157
major element (%)															
SiO <sub>2</sub>	71.7	72.6	73.9	55.1	58.0	58.8	49.2	58.9	55.4	54.3	58.2	58.2	57.3	57.8	57.8
TiO <sub>2</sub>	0.18	0.19	0.19	1.24	0.86	0.85	1.67	0.96	1.49	1.16	0.97	0.88	0.94	0.93	0.93
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.0	14.3	14.3	17.0	16.4	16.4	16.9	16.0	15.9	17.1	16.6	16.3	15.9	16.7	16.9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.96	0.95	0.90	7.69	5.68	5.57	10.32	5.66	8.34	7.66	6.21	5.80	6.39	6.42	6.43
MnO	0.08	0.08	0.07	0.13	0.09	0.09	0.16	0.10	0.13	0.13	0.11	0.10	0.11	0.12	0.12
MgO	0.14	0.00	0.29	4.01	2.31	2.54	6.01	2.86	3.22	4.45	3.02	3.49	4.00	3.81	3.85
CaO	0.99	1.00	0.98	6.77	6.00	5.57	9.17	4.98	6.36	7.00	5.45	6.04	6.30	6.25	6.23
Na <sub>2</sub> O	4.01	4.25	4.29	4.02	4.52	4.47	3.74	3.96	4.12	4.15	4.22	3.90	3.75	4.02	4.02
K <sub>2</sub> O	4.07	4.04	4.23	2.43	3.14	3.14	1.01	3.10	2.08	2.41	2.91	3.21	2.76	2.66	2.66
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	0.05	0.04	0.55	0.63	0.58	0.38	0.35	0.61	0.61	0.46	0.52	0.47	0.43	0.44
LOI	2.94	2.69	0.68	0.48	0.80	0.63	0.02	0.61	0.59	0.69	0.18	0.72	0.65	0.79	0.45
total	96.2	97.5	99.2	98.9	97.6	98.0	98.6	96.9	97.6	98.9	98.2	98.5	97.9	99.1	99.4
	22.6	0.0	38.5	50.8	44.6	47.4	53.6	50.0	43.3	53.5	49.1	54.4	55.3	54.0	54.3
trace element (ppm)															
Sc	39.4	27.8	34.3	36.6	33.5	28.2	46.2	38.9	45.5	17.3	13.9	13.7	16.2	11.6	15.9
V	5.43	3.30	4.09	141	108	105	173	108	183	155	122	124	130	129	126
Cr	9.20	9.01	11.0	97.1	54.0	56.8	142	47.2	47.4	113	26.2	80.3	94.0	104	122
Co	0.851	0.915	0.863	22.3	14.6	14.1	36.0	15.8	19.9	24.5	17.8	18.9	21.3	23.6	20.8
Ni	4.22	4.12	4.74	56.5	36.0	34.9	68.2	40.9	35.9	68.5	27.1	55.9	61.7	66.3	75.4
Cu	2.30	3.57	3.45	45.5	43.2	43.6	21.2	43.6	21.9	47.7	89.7	30.1	50.9	41.4	47.0
Zn	32.4	34.3	33.2	73.9	82.3	70.6	82.6	70.8	89.8	102	68.8	67.3	71.4	91.9	71.3
Ga	17.0	16.9	16.5	18.2	18.6	18.8	18.5	18.3	19.1	19.4	18.3	18.4	18.1	18.7	18.6
Rb	174	173	170	52.8	73.5	76.5	20.3	88.9	50.3	41.8	53.9	59.6	58.6	53.8	59.8
Sr	125	124	122	840	1156	1054	561	501	563	963	693	990	733	718	722
Y	22.6	22.5	22.1	24.0	17.1	17.5	29.2	24.9	26.6	23.8	21.3	18.3	22.1	21.5	23.0
Zr	163	162	158	202	196	204	195	294	206	210	193	184	183	191	196
Nb	38.8	38.5	37.7	19.3	25.1	25.5	12.1	22.9	17.1	20.0	20.2	20.8	21.6	22.3	22.2
Cs	7.283	7.240	7.020	1.245	0.979	1.035	0.307	2.169	1.192	0.580	0.794	0.998	1.092	1.088	1.226
Ba	424	420	415	718	1042	995	254	655	562	798	652	819	667	662	668
La	30.5	30.5	29.6	51.6	60.6	62.0	22.5	49.1	40.9	52.2	49.7	54.5	45.5	45.4	47.1
Ce	53.3	53.5	51.8	93.5	105	106	46.3	88.9	74.5	98.5	91.7	102	83.6	85.2	86.9
Pr	5.40	5.42	5.20	10.3	11.2	11.2	5.77	9.63	8.48	11.0	10.0	11.4	9.22	9.28	9.53
Nd	16.7	16.6	16.2	35.9	37.7	37.5	23.2	33.3	30.8	38.4	33.7	39.3	31.9	32.0	32.6
Sm	3.10	3.07	2.99	6.17	5.93	5.87	5.29	5.74	5.87	6.46	5.69	6.13	5.50	5.56	5.72
Eu	0.571	0.588	0.575	1.85	1.72	1.70	1.71	1.50	1.73	1.98	1.63	1.76	1.58	1.58	1.61
Gd	2.86	2.90	2.80	5.23	4.50	4.50	5.42	4.94	5.41	5.35	4.58	4.65	4.60	4.63	4.75
Tb	0.506	0.503	0.501	0.759	0.627	0.619	0.834	0.750	0.807	0.774	0.674	0.646	0.682	0.688	0.709
Dy	3.26	3.25	3.24	4.17	3.14	3.15	5.08	4.31	4.69	4.16	3.67	3.27	3.74	3.86	3.94
Ho	0.700	0.697	0.684	0.843	0.601	0.600	1.06	0.873	0.957	0.849	0.749	0.648	0.764	0.787	0.810
Er	2.07	2.06	2.03	2.32	1.61	1.65	2.94	2.48	2.60	2.34	2.08	1.79	2.14	2.18	2.24
Tm	0.343	0.341	0.330	0.343	0.224	0.225	0.426	0.373	0.377	0.329	0.302	0.250	0.308	0.316	0.324
Yb	2.42	2.44	2.34	2.21	1.45	1.44	2.80	2.48	2.45	2.12	1.96	1.63	2.02	2.07	2.10
Lu	0.363	0.364	0.350	0.334	0.219	0.218	0.419	0.381	0.361	0.322	0.299	0.252	0.308	0.309	0.318
Hf	4.32	4.29	4.13	4.13	4.13	4.22	4.04	6.41	4.37	4.36	4.10	4.06	3.95	4.08	4.22
Ta	3.16	3.13	3.04	0.999	1.23	1.23	0.655	1.28	0.895	0.96	1.05	1.11	1.18	1.24	1.24
Pb	20.7	21.3	20.1	10.9	13.4	14.3	4.40	12.8	9.74	13.3	12.7	14.1	11.6	13.2	13.1
Th	17.6	17.5	16.9	7.00	11.5	11.8	2.82	11.2	6.32	6.51	9.20	10.3	9.67	7.04	8.85
U	8.72	8.72	8.39	1.74	2.63	2.66	0.606	3.25	1.66	1.57	2.22	2.54	2.72	2.72	2.76
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr <sub>(norm)</sub>	0.704284		0.704208		0.704247		0.703909		0.704278		0.704237			0.704315	
<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd <sub>(norm)</sub>	0.512830		0.512828		0.512817		0.512870		0.512806		0.512812			0.512816	
εNd	3.7		3.7		3.5		4.5		3.3		3.4			3.5	

表 3-8(續) 亞美尼亞全岩主量元素、微量元素及鋇-釷同位素分析結果

	Pre-collisional volcanic rocks of Armenia										Pre-collisional intrusive rocks of Armenia					
	09ARM17-3	09ARM18	09ARM19-1	09ARM19-2	09ARM28	09ARM05-1	09ARM05-2	09ARM21	09ARM23-1	09ARM24	09ARM26-1	09ARM26-2	09ARM22	09ARM30-1	09ARM30-2	RAF-1
latitude (° N)	40.06855	40.06822	40.65023	40.65023	40.96736	40.71550	40.71550	40.816	40.85767	40.91822	40.9145	40.9145	40.84017	40.46261	40.46261	39.14343
longitude (° E)	45.21157	45.20643	44.30308	44.30308	44.68106	44.77006	44.77006	44.52139	44.5792	44.62171	44.74014	44.74014	44.56726	45.28014	45.28014	46.16159
major element (%)																
SiO <sub>2</sub>	57.3	57.5	61.6	62.1	49.8	50.9	49.1	54.3	63.1	65.8	49.1	55.3	56.2	48.4	47.7	71.4
TiO <sub>2</sub>	0.93	0.93	1.01	1.03	1.37	0.93	0.93	0.73	0.72	0.47	0.87	0.93	0.81	0.80	1.54	0.23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.7	16.6	16.3	16.4	15.7	18.3	18.8	18.1	14.5	16.3	15.5	14.8	16.8	23.1	15.6	14.8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.48	6.55	4.67	4.88	9.14	9.26	8.72	6.70	6.40	4.10	9.66	6.75	8.72	5.53	9.98	1.67
MnO	0.12	0.12	0.09	0.09	0.14	0.12	0.12	0.11	0.12	0.09	0.13	0.13	0.16	0.08	0.16	0.05
MgO	3.93	3.94	1.62	1.84	6.49	5.45	4.66	2.19	2.32	1.09	6.12	2.01	3.46	4.07	6.60	0.66
CaO	6.61	6.61	3.63	3.76	8.39	8.20	9.21	6.17	5.59	3.32	11.48	7.26	7.45	11.9	10.9	2.01
Na <sub>2</sub> O	3.82	3.89	4.55	4.69	3.36	2.35	2.72	2.85	2.23	3.82	1.68	4.12	2.70	3.19	2.99	4.37
K <sub>2</sub> O	2.67	2.66	3.97	3.61	1.29	0.34	0.68	1.97	2.38	3.55	0.12	1.15	1.74	0.30	0.76	4.03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.44	0.43	0.31	0.32	0.41	0.24	0.30	0.11	0.15	0.17	0.21	0.22	0.14	0.17	0.23	0.12
LOI	0.72	0.63	0.83	0.33	1.63	3.75	3.54	6.91	0.94	1.23	4.36	8.11	0.71	3.04	3.20	
total	99.0	99.2	97.7	98.7	96.2	96.1	95.3	93.2	97.5	98.6	94.8	92.7	98.1	97.5	96.5	99.4
	54.5	54.4	40.7	42.8	58.4	53.8	51.4	39.3	41.8	34.5	55.6	37.1	44.0	59.3	56.7	44.1
trace element (ppm)																
Sc	16.3	16.2	42.3	30.6	44.6	38.0	31.0	36.4	47.8	32.7	54.8	43.8	47.1	25.2	62.4	5.8
V	130	129	89.3	86.0	157	199	209	182	138	67.2	294	210	210	117	284	35
Cr	86.7	104	17.7	27.4	175	57.1	56.4	26.6	137	55.2	205	37.0	20.6	62.4	73.4	40.6
Co	21.1	21.8	9.65	10.4	33.2	22.6	18.9	17.4	14.6	6.46	35.8	15.8	23.0	22.1	36.6	4.0
Ni	59.7	67.5	14.4	19.4	146	32.6	32.0	12.9	63.6	27.5	73.3	19.2	14.5	40.3	34.2	21.7
Cu	28.4	47.4	13.9	11.4	46.7	49.9	56.5	66.1	25.0	19.0	159	19.3	63.5	12.1	66.0	3.3
Zn	70.0	69.8	67.8	62.1	87.9	73.4	73.8	48.5	56.7	67.6	76.9	114	68.9	73.9	91.6	20.5
Ga	18.7	18.9	18.6	19.1	17.4	20.5	21.2	15.8	15.7	15.3	17.1	12.7	17.1	16.4	16.1	16.2
Rb	56.0	58.6	104	104	24.8	7.32	14.4	47.8	96.9	112	1.38	35.3	55.9	7.30	18.5	191
Sr	728	727	427	446	511	523	588	246	239	368	370	137	309	767	518	604
Y	23.1	23.4	29.9	30.2	26.6	19.4	20.1	12.7	26.2	16.4	19.0	20.3	25.8	14.8	24.9	8.6
Zr	192	191	358	363	179	109	121	49.6	184	152	82.1	83.1	116	85.0	120	121
Nb	22.1	21.6	28.4	28.7	14.2	6.23	7.62	2.08	8.04	8.39	4.28	3.78	5.08	3.46	3.64	14.4
Cs	1.107	1.162	2.456	1.623	0.276	0.833	0.373	3.043	3.568	1.834	0.194	0.853	2.266	0.184	0.167	4.10
Ba	671	681	781	820	342	176	310	127	364	722	147	187	551	59.4	80.6	846
La	45.9	44.6	51.9	59.2	28.4	15.1	16.2	6.53	18.5	26.5	15.2	11.8	12.4	7.26	9.02	38.2
Ce	83.5	81.8	93.9	102	55.1	31.7	34.9	14.2	37.2	45.0	29.5	24.5	26.2	17.0	22.6	64.1
Pr	9.26	9.13	10.3	11.3	6.50	4.16	4.66	1.90	4.55	4.86	3.64	3.26	3.39	2.34	3.31	6.33
Nd	32.1	31.8	35.0	38.5	24.8	17.6	19.7	8.41	17.9	17.0	14.9	13.9	14.1	10.1	15.0	20.9
Sm	5.60	5.56	6.12	6.78	5.23	4.11	4.42	2.23	4.12	3.24	3.54	3.39	3.67	2.55	4.02	3.16
Eu	1.60	1.64	1.56	1.77	1.61	1.37	1.52	0.797	0.991	1.06	1.07	1.05	1.07	0.930	1.40	0.96
Gd	4.73	4.76	5.24	5.88	5.13	3.88	4.14	2.39	4.24	2.92	3.55	3.62	4.00	2.75	4.47	2.95
Tb	0.697	0.719	0.810	0.881	0.775	0.566	0.598	0.378	0.660	0.437	0.545	0.547	0.654	0.415	0.700	0.30
Dy	3.92	3.99	4.62	5.10	4.70	3.35	3.60	2.32	4.18	2.56	3.31	3.45	4.22	2.60	4.48	1.46
Ho	0.802	0.811	0.968	1.052	0.974	0.682	0.744	0.489	0.897	0.551	0.681	0.734	0.912	0.538	0.906	0.287
Er	2.23	2.29	2.76	2.96	2.69	1.86	2.05	1.35	2.53	1.63	1.90	2.10	2.59	1.46	2.45	0.81
Tm	0.323	0.332	0.418	0.443	0.398	0.274	0.305	0.205	0.404	0.254	0.278	0.312	0.399	0.211	0.364	0.121
Yb	2.09	2.14	2.80	2.95	2.59	1.79	2.01	1.33	2.66	1.73	1.86	2.10	2.61	1.36	2.32	0.83
Lu	0.320	0.328	0.431	0.453	0.395	0.263	0.304	0.198	0.410	0.272	0.275	0.315	0.402	0.200	0.333	0.134
Hf	4.07	4.15	7.02	7.58	3.86	2.66	2.96	1.33	4.56	3.49	2.16	2.22	3.06	1.73	2.60	2.96
Ta	1.22	1.22	1.39	1.50	0.724	0.374	0.450	0.129	0.556	0.634	0.224	0.214	0.376	0.217	0.243	1.12
Pb	12.6	12.9	13.6	16.1	6.37	3.58	4.76	5.46	15.6	19.6	4.00	7.43	7.57	0.761	1.875	15.0
Th	8.68	8.70	11.3	12.3	3.48	2.40	2.63	0.951	7.29	8.68	3.55	2.45	4.68	0.761	1.014	23.0
U	2.61	2.72	3.12	3.32	0.487	0.612	0.706	0.276	1.82	2.30	0.815	0.602	0.907	0.258	0.311	3.76
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr <sub>(norm)</sub>				0.704263	0.704141			0.704013	0.704700	0.704106	0.704527		0.704130	0.703599		0.704040
<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd <sub>(norm)</sub>				0.512832	0.512815			0.512809	0.512826	0.512713	0.512861		0.512891	0.512891		0.512812
εNd				3.8	3.5			3.3	3.7	1.5	4.3		4.9	4.9		3.4

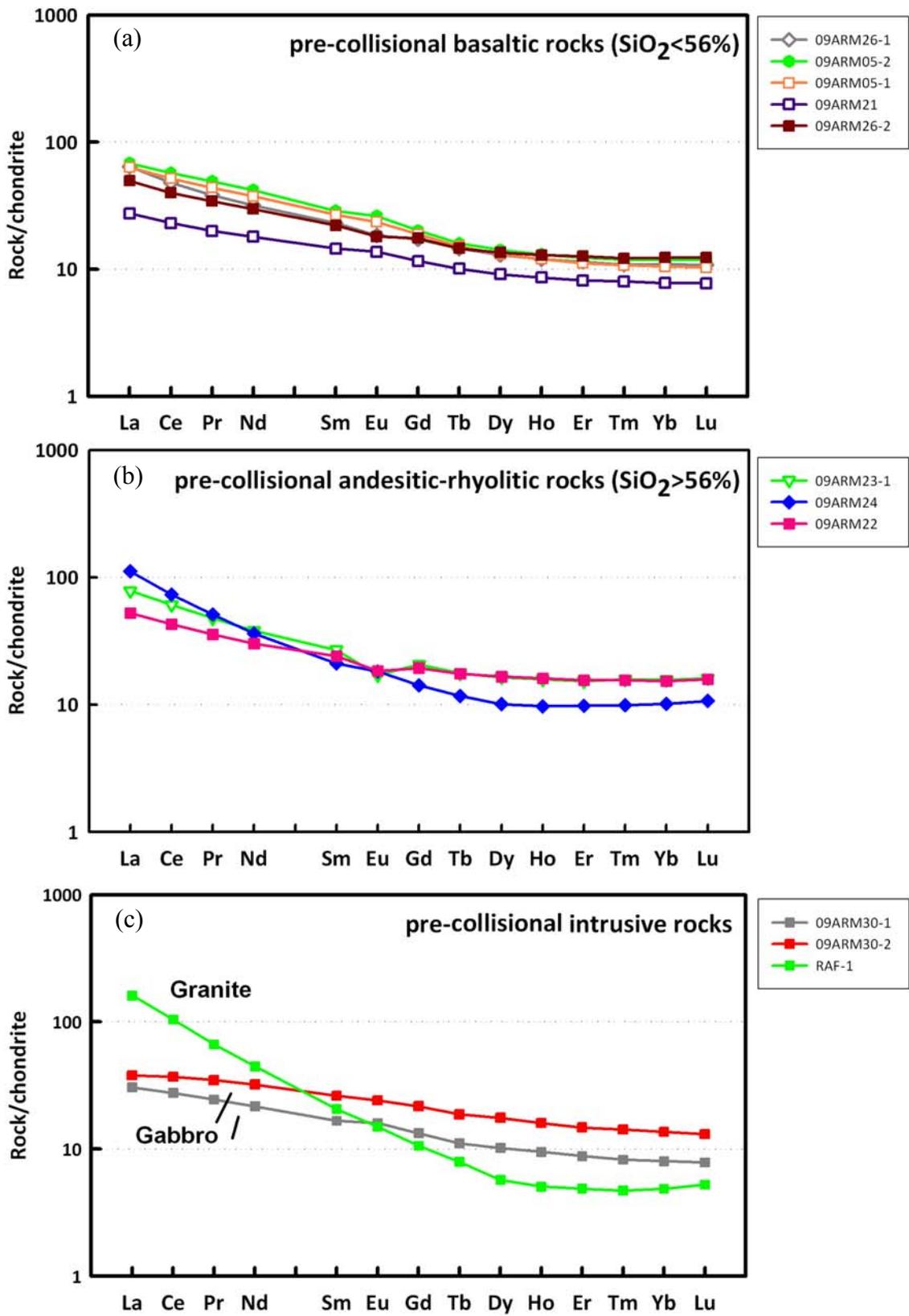


圖 3-15 亞美尼亞碰撞前火成岩之隕石標準化稀土元素分布圖

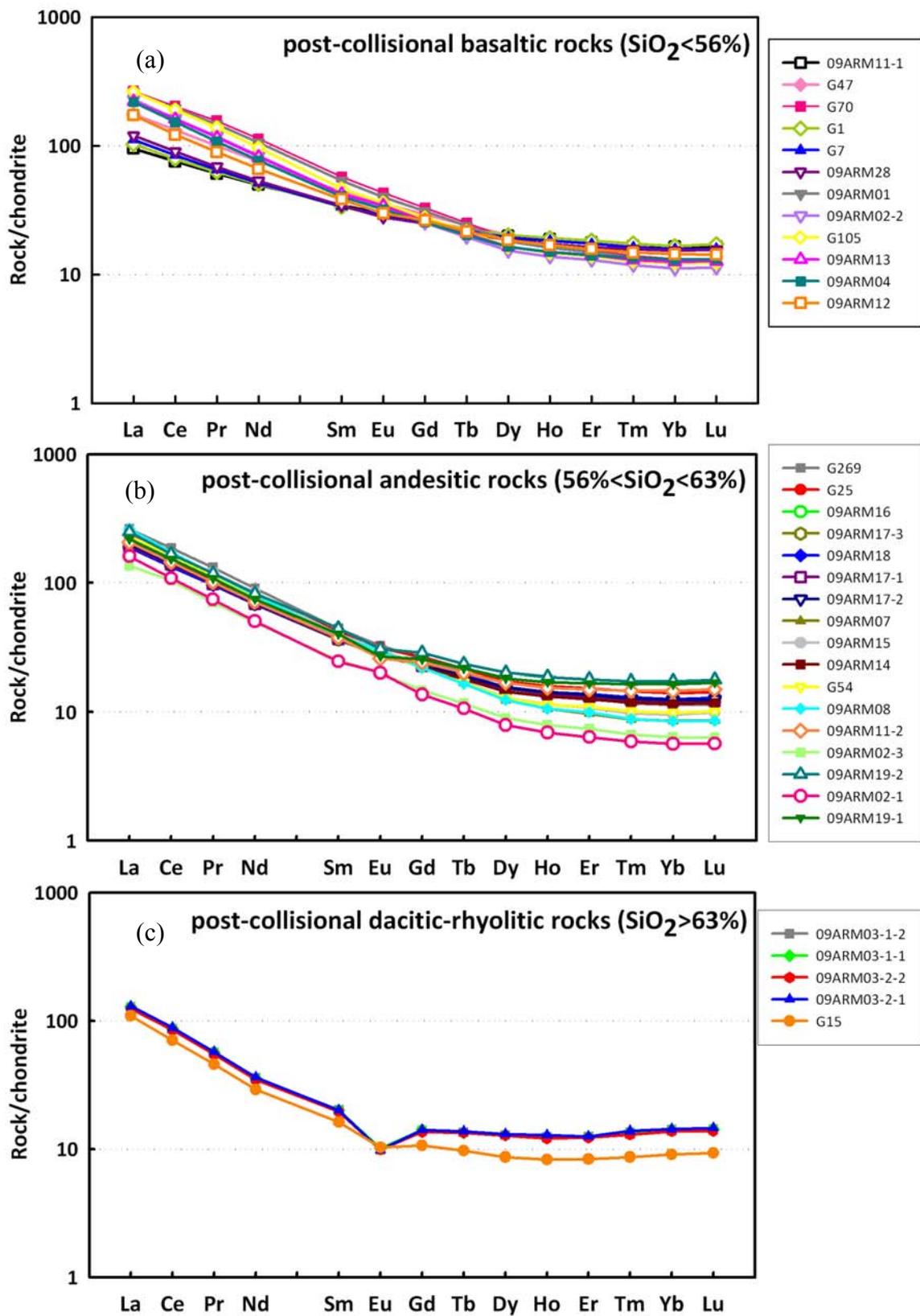


圖 3-16 亞美尼亞碰撞後火成岩之隕石標準化稀土元素分布圖

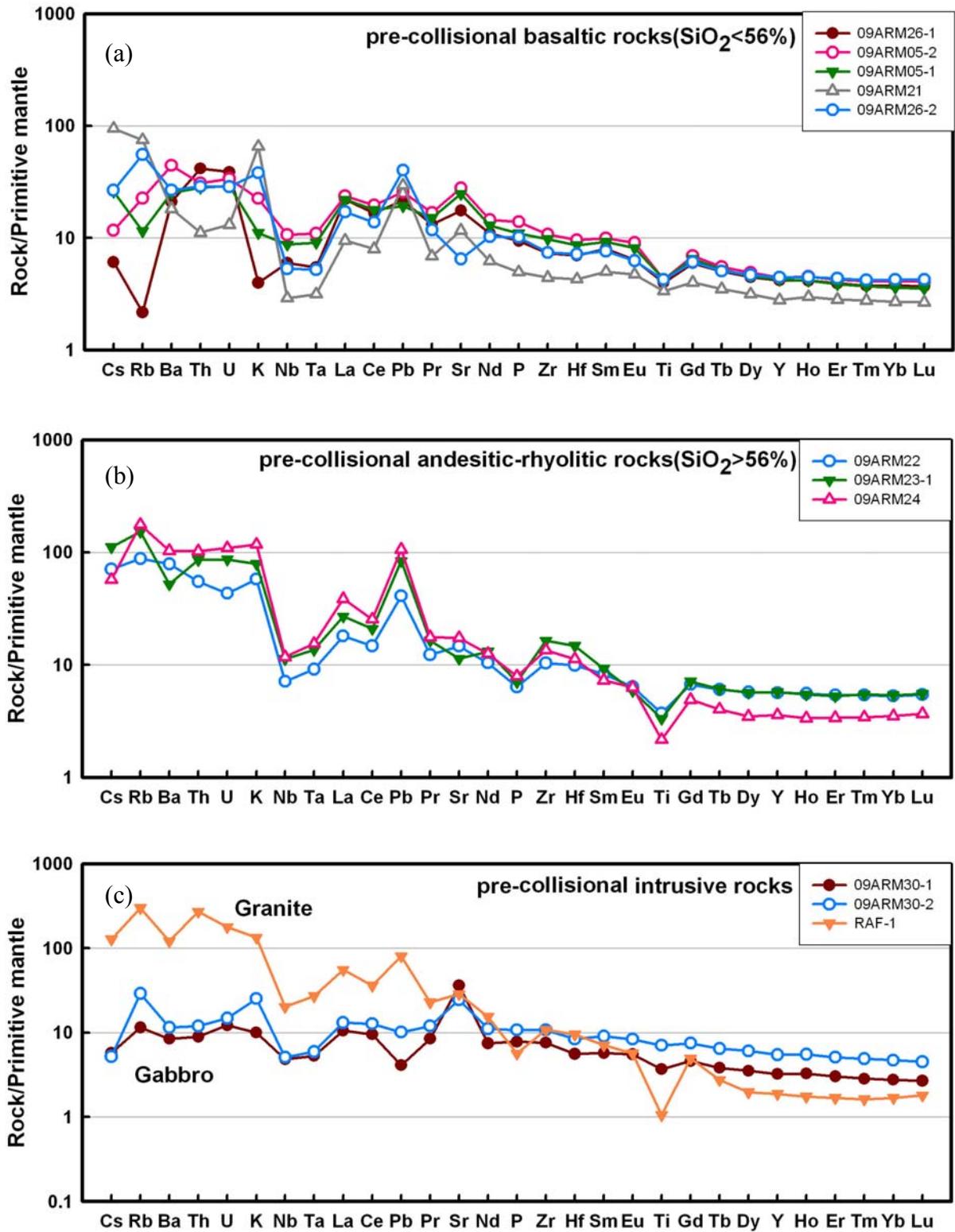


圖 3-17 亞美尼亞碰撞前火成岩之原始地函標準化整體不相容元素分布圖

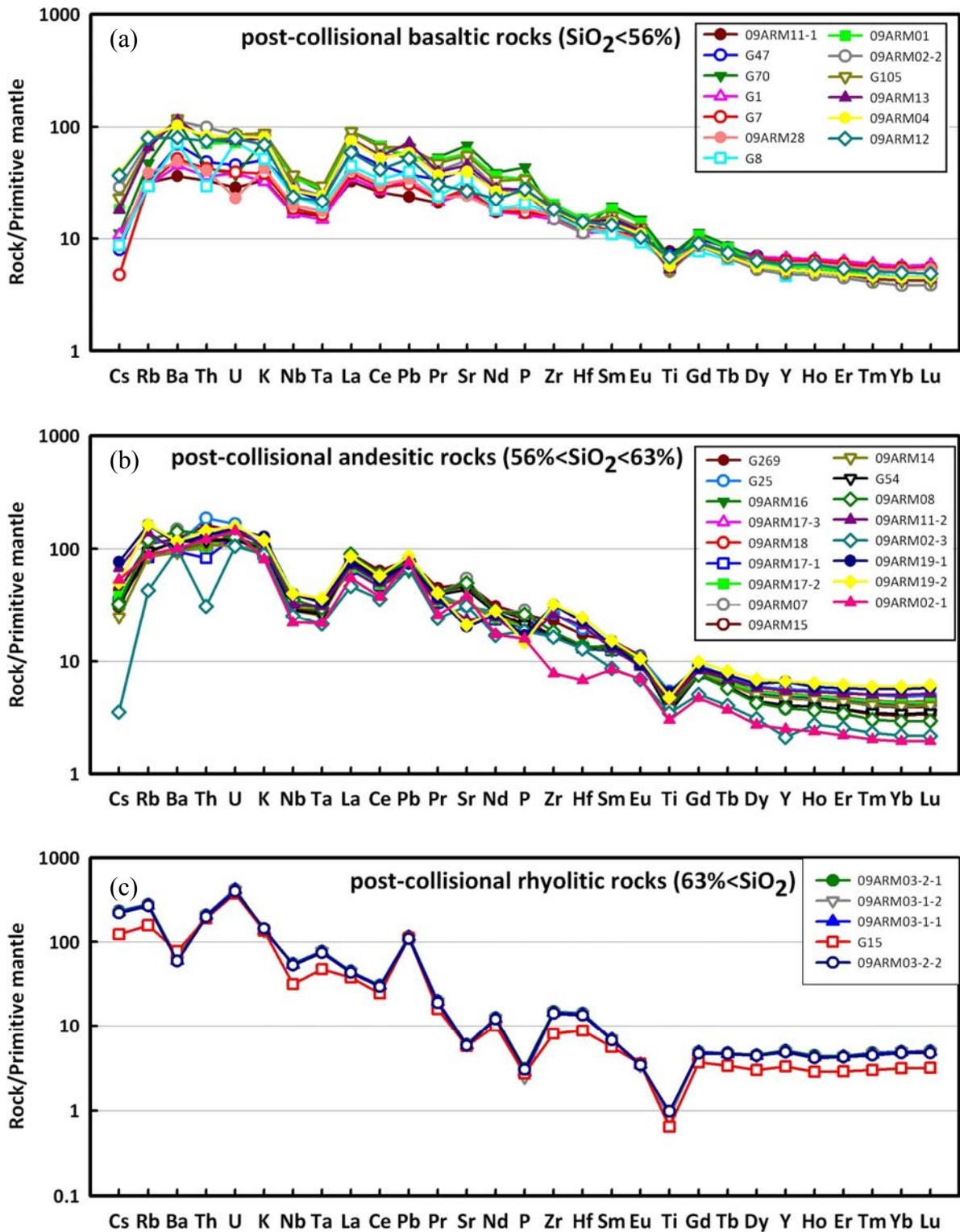


圖 3-18 亞美尼亞碰撞後火成岩之原始地函標準化整體不相容元素分布圖

### 3.6 鋇-釷同位素

本研究在全岩鋇-釷同位素分析結果同樣列於表 3-8 中，表 3-9 為詳細之分析數據。碰撞前火成岩的分析標本中若有定年分析則使用其定年結果做年代校正，無定年分析的標本則以該露頭附近的標本點年代為依據，如 09ARM23-1 的採樣點與 09ARM22 相當近，因此取近似值 41 Ma 做年代校正；碰撞後火成岩的年代雖只有部份定年結果，但從地球化學組成、露頭位置以及前人文獻等可以推測年代應非常年輕，且年代小於 10 Ma 的標本做年代校正不會對結果有太大的影響，因此便不作年齡校正。

碰撞前火成岩之  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  介於 0.7036-0.7047 之間， $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  介於 0.5127-0.5129 ( $\epsilon\text{Nd} = 1.5-4.9$ ) 之間；碰撞後火成岩之  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  介於 0.7039-0.7045 之間， $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  介於 0.5128-0.5129 ( $\epsilon\text{Nd} = 2.9-4.5$ ) 之間，顯示碰撞前、後火成岩之鋇-釷同位素組成與 CIA 地區之碰撞後火成岩相似(Pearce et al., 1990; Keskin et al., 2006; Kheirkhah et al., 2009)，皆為富集地函來源。

圖 3-19 分別將鋇同位素與釷同位素對全岩二氧化矽含量作圖，圖 3-20 則是釷同位素對鋇同位素作圖；在這些圖中將土耳其西部的碰撞後火成岩分析結果(Aldanmaz et al., 2000; Aldanmaz et al., 2006)放入作比對，從圖中可以看到該地區的中酸性岩漿具有較富集的鋇-釷同位素組成高  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、低  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ，而基性岩漿的鋇-釷同位素組成則位於地函來源區間(圖 3-20)，Aldanmaz 等人指出其中酸性岩漿的富集鋇釷同位素是受到了地殼混染與結晶分化作用(Assimilation-Fractional Crystallization, AFC process)的影響，而從圖 3-19 中，我們可以發現亞美尼亞碰撞前與碰撞後火成岩之鋇同位素並不隨著二氧化矽的含量增加而有改變，且碰撞前與碰撞後火成岩的分析結果大致均勻，因此可能未受到老的大陸地殼混染影響，而可能是混染鋇同位素相似的年輕地殼，或主要受到結晶分化作用(Fractional Crystallization, FC process)的影響而有這樣的鋇同位素結果(Pearce et al., 1990)。

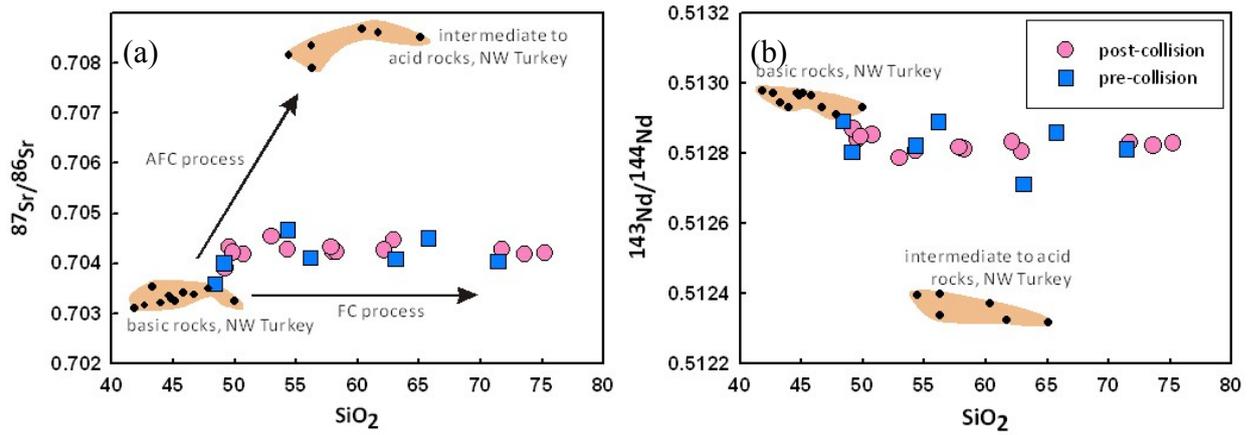


圖 3-19 (a)、(b) 鋇-鈹同位素值分別對全岩二氧化矽含量作圖，NW Turkey (Aldanmaz et al., 2000; Aldanmaz et al., 2006) 中性至酸性標本受地殼混染所影響，放入作比較可發現亞美尼亞之同位素組成大致均勻。

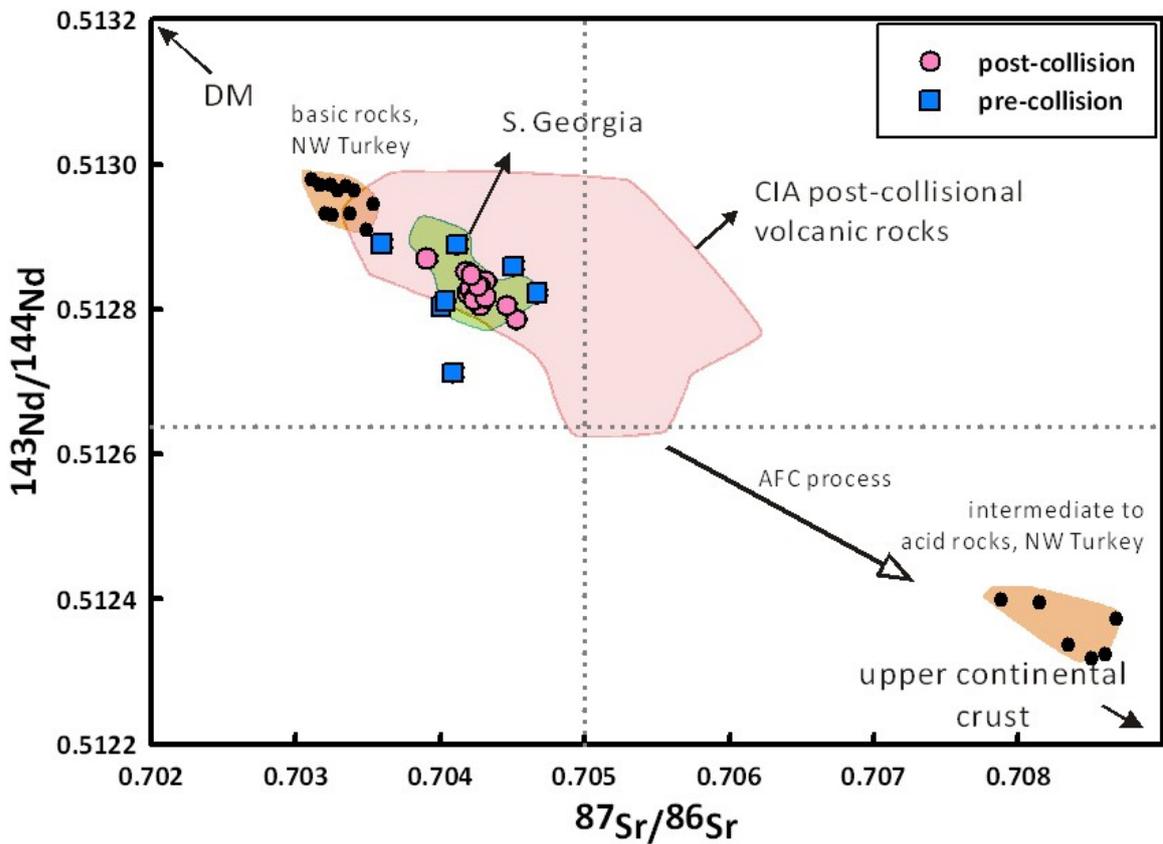


圖 3-20 鈹同位素對鋇同位素作圖，亞美尼亞之鋇-鈹同位素組成顯示為富集地函來源。CIA 地區碰撞後火山岩數據自 (Pearce et al., 1990; Keskin et al., 2006; Kheirkhah et al., 2009)；土耳其西北部 (Aldanmaz et al., 2000; Aldanmaz et al., 2006)；喬治亞南部 (Chung et al., unpubl. Data)。

表 3-9 鋁-鈷同位素分析結果， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(n)}$ 與 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(n)}$ 為對同次測定之標準樣作標準化的值， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(i)}$ 與 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(i)}$ 則是做年代校正後的值。

Sample no.	Rock type	SiO <sub>2</sub> (%)	Age* (Ma)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(n)}$	2σ	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(i)}$ **	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(n)}$	2σ	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(i)}$ **	ε <sub>Nd</sub> ***
<b>pre-collisional extrusive rocks</b>																
09ARM05-2	Basalt	49.1	46.2	14.4	588	0.071	0.704053	5.2E-06	0.7040	4.42	19.7	0.136	0.512845	2.5E-06	0.5128	3.2
09ARM21	Basaltic andesite (tuff)	54.3	43.5	47.8	246	0.562	0.705019	3.2E-06	0.7047	2.23	8.41	0.160	0.512868	4.3E-06	0.5128	3.6
09ARM22	diorite	56.2	41.4	55.9	309	0.524	0.704427	7.0E-06	0.7041	3.67	14.1	0.157	0.512932	6.5E-06	0.5129	4.9
09ARM23-1	Dacite (tuff)	63.1	(41)	96.9	239	1.175	0.704774	2.8E-06	0.7041	4.12	17.9	0.140	0.512750	6.0E-06	0.5127	1.5
09ARM24	Dacite (tuff)	65.8	41.7	112	368	0.884	0.705029	2.7E-06	0.7045	3.24	17.0	0.115	0.512891	5.8E-06	0.5129	4.3
<b>pre-collisional intrusive rocks</b>																
09ARM30-1	gabbro	48.4	46.9	7.30	767	0.028	0.703617	1.0E-05	0.7036	2.55	10.1	0.152	0.512937	5.8E-06	0.5129	4.9
RAF-1	granite	71.4	26.5	191	604	0.916	0.704384	8.1E-06	0.7040	3.16	20.9	0.091	0.512827	1.7E-06	0.5128	3.4
<b>post-collisional extrusive rocks</b>																
G7	Basalt	50.7	(0)	19.6	599	0.095	0.704185	1.2E-05		5.18	24.0	0.130	0.512851	4.2E-06		4.2
G15	Rhyolite (obsidian)	73.6	(0)	100	121	2.396	0.704188	4.1E-06		2.49	13.6	0.111	0.512822	1.5E-06		3.6
G47	Trachybasalt	49.5	(0)	21.3	880	0.070	0.704319	6.2E-06		6.70	35.2	0.115	0.512839	9.1E-07		3.9
09ARM01	Basaltic trachyandesite	53.0	(0)	43.3	1231	0.102	0.704530	5.5E-06		8.20	49.2	0.101	0.512785	1.6E-06		2.9
09ARM02-1	Andesite	62.9	4.2	56.3	806	0.202	0.704474	5.9E-06		3.74	23.4	0.097	0.512807	3.5E-06		3.3
09ARM03-1-2	Rhyolite (perlite)	71.7	0.13	174	125	4.030	0.704284	7.5E-06		3.10	16.7	0.112	0.512830	1.5E-06		3.7
09ARM03-2-2	Rhyolite (obsidian)	75.2	(0)	170	122	4.048	0.704208	5.9E-06		2.99	16.2	0.112	0.512828	4.2E-06		3.7
09ARM07	Trachyandesite	58.0	4.4	73.5	1156	0.184	0.704247	1.9E-05		5.93	37.7	0.095	0.512817	3.0E-06		3.5
09ARM11-1	Basalt (lava flow)	49.2	(0)	20.3	561	0.105	0.703909	6.5E-06		5.29	23.2	0.138	0.512870	3.5E-06		4.5
09ARM13	Basaltic trachyandesite (scoria)	54.3	(0)	41.8	963	0.126	0.704278	6.2E-06		6.46	38.4	0.102	0.512806	2.5E-06		3.3
09ARM14	Trachyandesite	58.2	(0)	53.9	693	0.225	0.704237	7.0E-06		5.69	33.7	0.102	0.512812	3.4E-06		3.4
09ARM17-1	Trachyandesite (scoria)	57.8	(0)	53.8	718	0.217	0.704315	7.7E-06		5.56	32.0	0.105	0.512816	2.0E-06		3.5
09ARM19-2	Trachydacite	62.1	(0)	104	446	0.677	0.704263	7.3E-06		6.78	38.5	0.106	0.512832	3.2E-06		3.8
09ARM28	Basalt	49.8	1.7	24.8	511	0.141	0.704221	6.5E-06		5.23	24.8	0.127	0.512848	5.0E-06		4.1

\* Sampled not dated are calculated with the referenced age (T) in the bracket

\*\*  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(i)} = (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) - (^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}) \times (e^{\lambda T} - 1)$ ,  $\lambda_{\text{Rb-Sr}} = 0.0142\text{Ga}^{-1}$ ,  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = (\text{Rb}/\text{Sr}) \times 2.8956$

$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(i)} = (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}) - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}) \times (e^{\lambda T} - 1)$ ,  $\lambda_{\text{Sm-Nd}} = 0.00654\text{Ga}^{-1}$ ,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = (\text{Sm}/\text{Nd}) \times 0.60456$

\*\*\*  $\epsilon_{\text{Nd}} = [((^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(i)}) - 0.512638) / 0.512638] \times 10000$

## Chapter 4 亞美尼亞火成岩之岩石成因與綜合討論

本章將從亞美尼亞地區火成岩的分析結果探討亞美尼亞地函源區性質隨著時間的變化，並探討其岩石成因；為了全面性的討論 CIA 地區碰撞後岩漿活動，除了前人研究較完整的土耳其東部以及本研究分析的亞美尼亞地區，喬治亞以及伊朗西北部地區的碰撞後火成岩亦是其中重要的一環，因此在本章也綜合作討論。最後，綜合亞美尼亞的分析結果與 CIA 地區做比對，進一步探討 CIA 地區之地塊結構，了解其可能的地體構造改變。

### 4.1 亞美尼亞地區

一般認為阿拉伯與歐亞大陸板塊碰撞的年代介於~35 至~23 Ma 之間(Hatzfeld and Molnar, 2010)，分析結果顯示，亞美尼亞境內一約 26.5 Ma 的花崗岩體，可能代表了碰撞前岩漿活動最末期的產物(Chiu et al., 2010)，在這之後岩漿活動進入歇止期，陸-陸持續碰撞、增厚，直至碰撞後岩漿的形成，CIA 地區之碰撞後岩漿活動約於 11 Ma 開始，亞美尼亞則是到約 4 Ma 才開始有活動記錄。

#### 4.1.1 地函源區性質

噴出於地表之岩漿大多源自上部地函，上部地函又可分為軟流圈地函(asthenospheric mantle)與岩石圈地函(lithospheric mantle)，岩石圈地函主要由耐熔的殘餘地函(residue mantle)構成，因此不但鐵、鋁和鈦等玄武質成分相對虧損，其固熔點溫度也較軟流圈地函高，然而後期交代變質作用通常可以造成其不相容微量元素富集的富集地函(EM)，尤其當交代變質的介質為流體時，將會形成含水礦物(如雲母、角閃石)，顯著降低其固熔溫度，而成為岩漿的重要源區，且由於岩石圈地函不像軟流圈地函可以透過對流作用促成地球化學性質的均質化，因此岩石圈地函將會記錄不同時期所受的交代變質作用。

亞美尼亞之碰撞前與碰撞後火成岩皆可以看到大離子半徑元素(LILE)以及高場力鍵結元素(HFSE)的虧損，一般認為這兩種地球化學特徵是由隱沒作用所造成，也就是說地函源區(包含軟流圈地函與岩石圈地函)受到隱沒作用影響、造成 LILE 富集的過程中，會攜帶許多的 Th 元素進入岩漿，而非攜帶 Ta 或 Yb；但是

Th/Yb 對上 Ta/Yb 的比值可以發現在主要結晶礦物為輝石及長石時幾乎不會受到結晶分化作用(Fractional Crystallization, FC process)或部份熔融的影響，而是維持一定值(一定斜率)，並且可以看到地殼混染的變化趨勢(Pearce et al., 1990)。因此，從這兩個比值的作圖(after Pearce, 1982)，圖 4-1 中可以看到地函源區受隱沒作用影響時 Th/Yb 比值的提升(Suduction Zone Effect, SZE)；未受到隱沒作用影響的火成岩 Th/Yb 比值則會沿著地函交代變質作用(Mantle Metasomatism)的趨勢變化，顯示為板內岩漿的特性(如位於 Bitlis Suture 南邊的 Karacalidag 火山(圖 1-2))。此外結晶分化作用不論是否受到地殼混染(Assimilation-Fractional Crystallization, AFC process)的影響都會造成 Th/Yb 的提升，微量元素的成分很難區分這兩種作用，但我們可以从鋇同位素是否隨著二氧化矽含量變化來判斷是否受到地殼混染(Pearce et al., 1990)；從圖 3-19a 可以看到亞美尼亞碰撞前與碰撞後火成岩之鋇同位素不隨著二氧化矽含量增加而增加，代表在結晶分化作用的過程中，鋇同位素大致維持一定值，沒有鋇同位素較高的地殼物質混染進去，或是僅混染到年輕的(鋇同位素尚未因衰變而提高)地殼物質，因此亞美尼亞之碰撞前與碰撞後岩漿活動主要以結晶分化作用為主並且受到隱沒作用的影響。

#### 4.1.2 岩石成因

亞美尼亞之碰撞前與碰撞後火成岩皆屬於鈣鹼性系列，鈣鹼質岩漿特性一般被認為是島弧岩漿所具有，根據 CIA 地區前人研究中指出，碰撞前火成岩成因為新特提斯洋隱沒造成的島弧岩漿，以往的研究多在亞美尼亞西邊土耳其境內安納托利亞高原東部的 Pontide arc 以及亞美尼亞東邊伊朗境內的 Urumieh-Doktar magmatic arc (Sengor and Yilmaz, 1981; Berberian et al., 1982; Boztug et al., 2006)，介於這兩地區之間的亞美尼亞境內始新世火成岩則缺少地球化學與定年資料。根據我們的定年結果與全岩主量及微量元素分析，我們認為亞美尼亞始新世的火成岩與 Pontide 與 Urumieh-Doktar 島弧具有相似的地球化學特性及空間上的連續性，同樣屬於新特提斯洋向北隱沒至歐亞大陸板塊下所造成的島弧岩漿。

同為鈣鹼質並具有隱沒作用訊號的碰撞後火成岩則是因為其地函源區曾受到早期(碰撞前)的隱沒作用影響，發生交代變質作用，使得碰撞後岩漿具有相似的地球化學特性，從圖 4-2 的岩石成因判別圖 Nb/Zr<sub>(n)</sub>對 Zr 作圖(after Thieblemont and

Tegyey, 1994), 可以看到碰撞前岩漿活動的分析結果落在隱沒作用相關的區間, 而碰撞後岩漿活動的結果則落在碰撞作用相關以及板內岩漿活動的範圍內, 顯示亞美尼亞碰撞後岩漿活動是由於後碰撞造山運動所引起的岩漿活動, 並有部份標本是在張裂環境下形成; 這也顯示了從碰撞前到碰撞後岩漿活動之間, 軟流圈的上湧導致地函源區隱沒物質的成份減少、軟流圈地函物質的增加(Dilek et al., 2009)。在亞美尼亞所觀察到的碰撞後岩漿活動鉀質含量提高(圖 3-13), 可能導因於地函來源深度較深、岩漿的部份熔融程度較小、含水成分減少、或是富含鉀質的成分混入, 如上部地殼混染或是隱沒沉積物的影響(Conticelli and Peccerillo, 1992)等因素。

將亞美尼亞碰撞前與碰撞後火成岩的地球化學與定年分析結果與高加索-伊朗-安納托利亞火成岩區(CIA volcanic province, 簡稱 CIA)的火成岩作比較, 結果顯示他們具有大致相同的地球化學特性, 如鈣鹼性序列、地函源區組成及受過隱沒作用影響等; 且從亞美尼亞鋇-鈷同位素之分析結果來看, 如圖 3-20, 圖中將 CIA 地區以及喬治亞南部的碰撞後火成岩數據放入作比較, 可以發現亞美尼亞碰撞前與碰撞後火成岩的鋇-鈷同位素組成與 CIA 地區碰撞後火山岩無太大差異; 且亞美尼亞碰撞後火成岩與喬治亞南部碰撞後火成岩的鋇-鈷同位素值幾乎相同, CIA 地區(指土耳其東部)的分析結果分布範圍廣泛(Pearce et al., 1990)可能是因為其分析年代較早(西元 1990 年), 當時的分析精度較不理想。綜合以上的地球化學特性比對, 可以認為 CIA 地區(包含亞美尼亞)碰撞後火成岩的具有相似的地函源區與岩石成因, 皆來自於富集的地函源區。

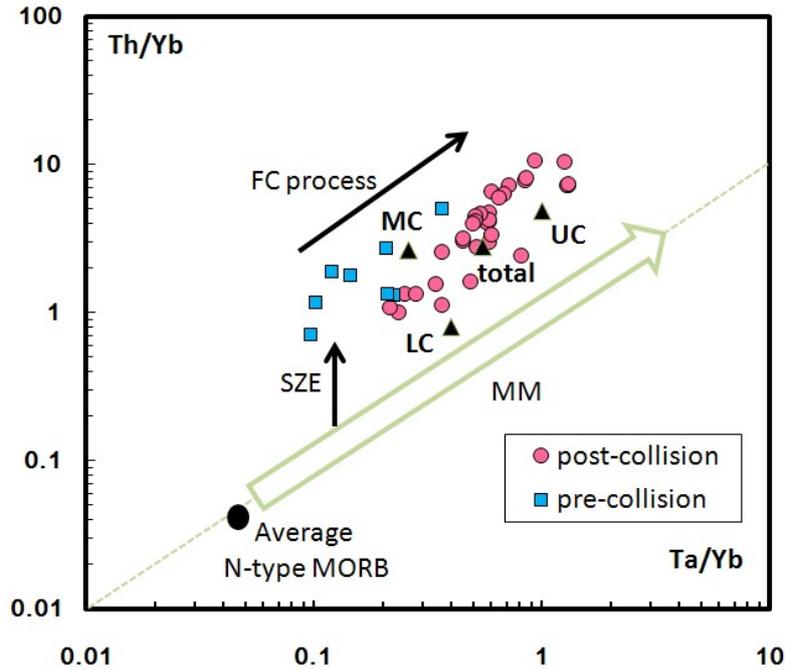


圖 4-1 亞美尼亞地區火山岩之全岩 Th/Yb 對 Ta/Yb 作圖(after Pearce, 1982), 顯示亞美尼亞碰撞前與碰撞後岩漿活動皆受到隱沒作用的影響(SZE), 且受到結晶分化作用的影響(FC process)。MM: Mantle Metasomatism; UC: Upper Crust; MC: Middle Crust; LC: Lower Crust; total: average of crust。

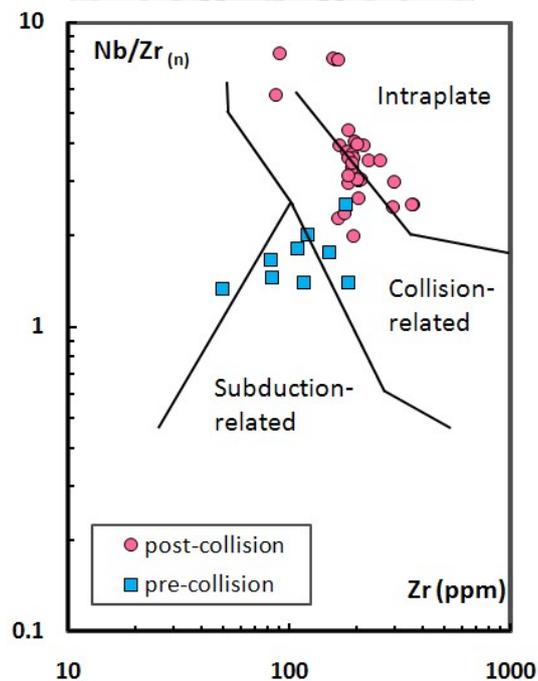


圖 4-2 亞美尼亞地區火成岩之全岩 Nb/Zr<sub>(n)</sub>對 Zr 作圖(after Thieblemont and Tegyey, 1994), 碰撞前岩漿活動為隱沒作用相關, 碰撞後岩漿活動則是由後碰撞造山運動以及張裂之環境所引起。

## 4.2 其他 CIA 地區碰撞後火成岩數據

為了比對 CIA 地區 11 Ma 以來的碰撞後岩漿活動時空變化，本研究中將前人研究中土耳其東部、亞塞拜然的分析結果以及本系地球化學與岩石成因實驗室在喬治亞南部及伊朗西北部採樣分析的結果(Chung et al., unpublished data)一併做討論，主要為鈣鹼性火山岩，在部份地區發現有超鉀質岩及埃達克岩(圖 4-3 及圖 4-4)，以下分別做介紹。

### 4.2.1 前人研究

#### (1) 土耳其東部火成岩(Pearce et al., 1990)：

- ◇ **Kars 高原**：具有年代分布由 7 至 1.5 Ma 火山岩構成的剖面，岩性從基性至中性皆有，分布範圍廣泛，在(Keskin et al., 1998; Keskin et al., 2006)兩文中有詳細討論。
- ◇ **Mus 盆地**：為東西向的盆地，含有許多碰撞後岩漿活動較早期的火山噴發，由玄武岩及玄武岩質安山岩所構成，玄武岩之定年結果為  $6.0 \pm 1.0$  Ma 與  $4.4 \pm 0.8$  Ma。
- ◇ **Bingol 火山**：破火山口，由玄武岩質安山岩與流紋岩構成，玄武岩質安山岩之定年結果為  $3.6 \pm 0.6$  Ma 與  $2.6 \pm 0.2$  Ma。
- ◇ **Tendurek 火山**：複式火山，主要為玄武岩及粗面安山岩，最老的噴發記錄為 2.5 Ma，之後的火山活動則沿著 Caldian 斷層。
- ◇ **Nemrut 火山**：複式層狀火山，具有一次以上的破火山口陷落，為唯一具有噴發歷史記錄的火山(1441 AD)，玄武岩至流紋岩皆有，定年結果為  $1.18 \pm 0.23$  Ma 與  $< 0.7$  Ma。
- ◇ **Suphan 火山**：複式層狀火山，玄武岩至流紋岩皆有，但以中性岩為主，基底為 5.8 Ma 的火山岩，後期噴發的定年結果介於 0.7 至 0.23 Ma 之間。
- ◇ **Ararat 火山**：複式雙錐層狀火山，位於拉張盆地中，由基性至中性火成岩構成，定年結果為  $1.15 \pm 0.19$  Ma 與 0.5 Ma。
- ◇ **Karacalidag 火山**：位於縫合帶南邊阿拉伯板塊上，為板內噴發玄武岩，與 CIA 地區其他碰撞後鈣鹼性火山岩明顯不同。

## **(2) Erzurum-Kars plateau (EKP, Keskin et al., 1998; Keskin et al., 2006)**

此區域介於 Erzurum 與 Kars 之間，具有完整的地層剖面，文中共有七根地層柱搭配定年結果做討論，11-6 Ma 期間的噴發為基性-中性以及酸性岩所構成，最早的記錄為 11 Ma 裂隙噴發的玄武岩，可能是受區域性的地殼張裂所影響，火山活動最活躍的時期為 7-6 Ma，以流紋岩為主；6-5 Ma 期間的噴發轉為以安山岩及石英安山岩為主，並且具有低 Y 含量的地球化學特徵；5 Ma 之後的噴發向東移動，在 5-3.5 Ma 間的噴發為基性至中性的熔岩流，3.5-2.7 Ma 間則是基性熔岩流所構成。

## **(3) 土耳其與伊朗邊境火山(Kheirkhah et al., 2009)**

此文獻中之採樣點從北到南約兩百公里分別為 Ararat、Tendurek、Siah Cheshmeh、Yigit Dagi、Salmas 及 Gonbad，其中 Ararat、Tendurek、Yigit Dagi 為複式火山(前兩者在 Pearce et al., 1990 文中亦有標本分析)，此文中之標本皆為玄武岩質至安山岩質，Siah Cheshmeh 為拉張盆地中的裂隙噴發，包含玄武岩及中長玄武岩，Salmas 及 Gonbad 為玄武岩質至安山岩質之火山渣錐，文中無定年資料，但根據進行中的定年分析應為非常年輕的標本(Allen et al., unpublished data)

## **(4) 亞塞拜然(Dilek et al., 2009)**

研究區域位於亞美尼亞 Sevan Lake 之東南方，碰撞後岩漿活動可分為兩個時期與地區，Kelbajar Trough 為中新世晚期至更新世早期之中性至酸性火成岩，且多為埃達克岩，Gochass Synclinorium 為更新世晚期至全新世早期之基性至酸性火成岩，三個標本為埃達克岩，較靠近亞美尼亞，但此文獻中缺乏準確的微量元素成分與定年資料分析，因此數據僅供比較用，此外，在亞塞拜然境內亦有全新世火山出露。

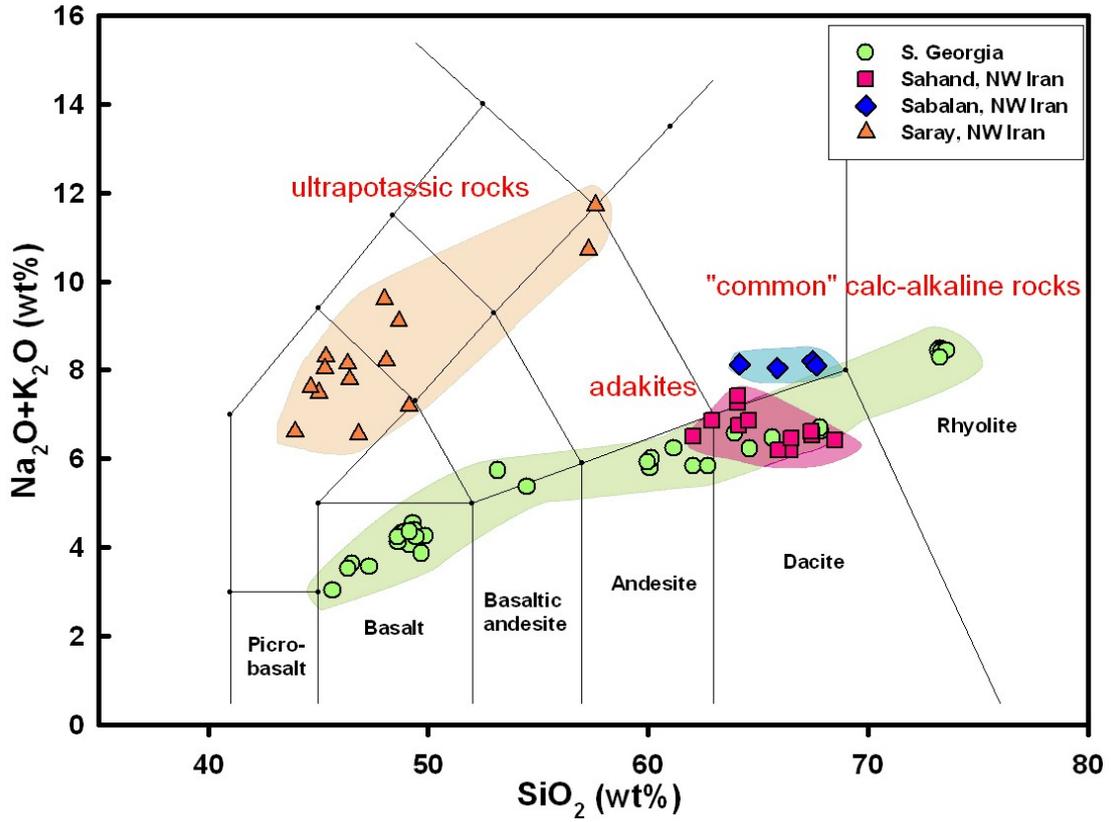


圖 4-3 CIA 地區碰撞後火山岩之全岩 Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O 對 SiO<sub>2</sub> 作圖

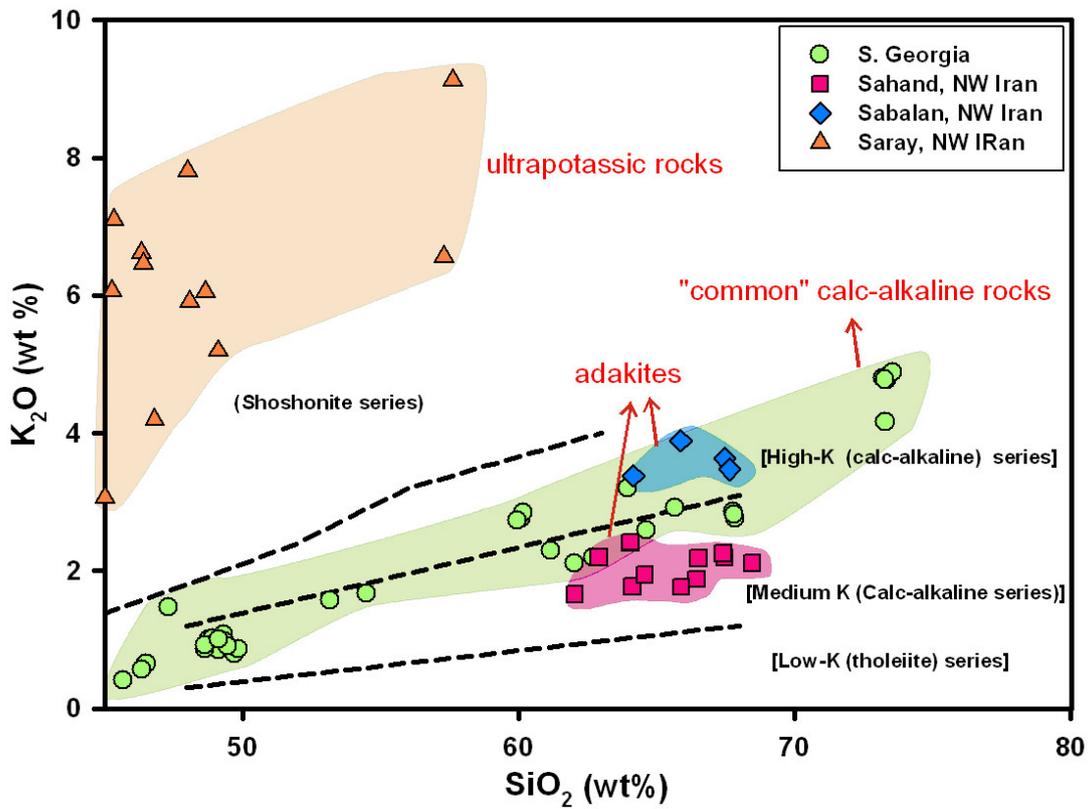


圖 4-4 CIA 地區碰撞後火山岩之全岩 K<sub>2</sub>O 對 SiO<sub>2</sub> 作圖

#### 4.2.2 相關數據

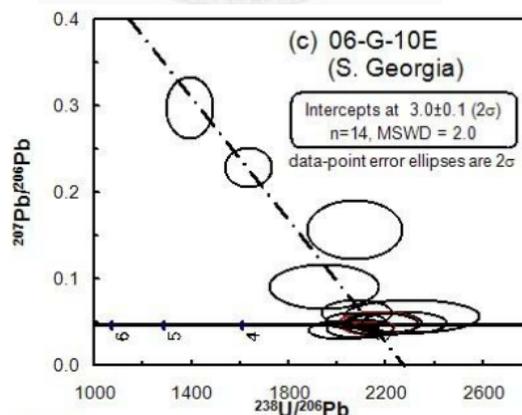
由本系地球化學與岩石成因實驗室採樣與分析(Chung et al., unpublished data), 包含喬治亞南部、伊朗西北部三座火山等碰撞後火山岩, 綜合土耳其東部的數據後可對 CIA 地區之碰撞後火成岩作較全面性的討論。主量元素的作圖如圖 4-3 及圖 4-4, 其中伊朗的 Saray 火山為超鉀質岩、Sahand 及 Sabalan 火山為埃達克岩, 喬治亞南部則是在 CIA 地區常見的碰撞後高鉀鈣鹼性火山岩, 超鉀質岩與埃達克岩定年結果如下:

##### (1) 大高加索南部

本研究中包含 3 個標本, 均為年輕的埃達克岩, 全岩氫-氫定年的結果不佳, 年代應小於 1 Ma。

##### (2) 喬治亞南部

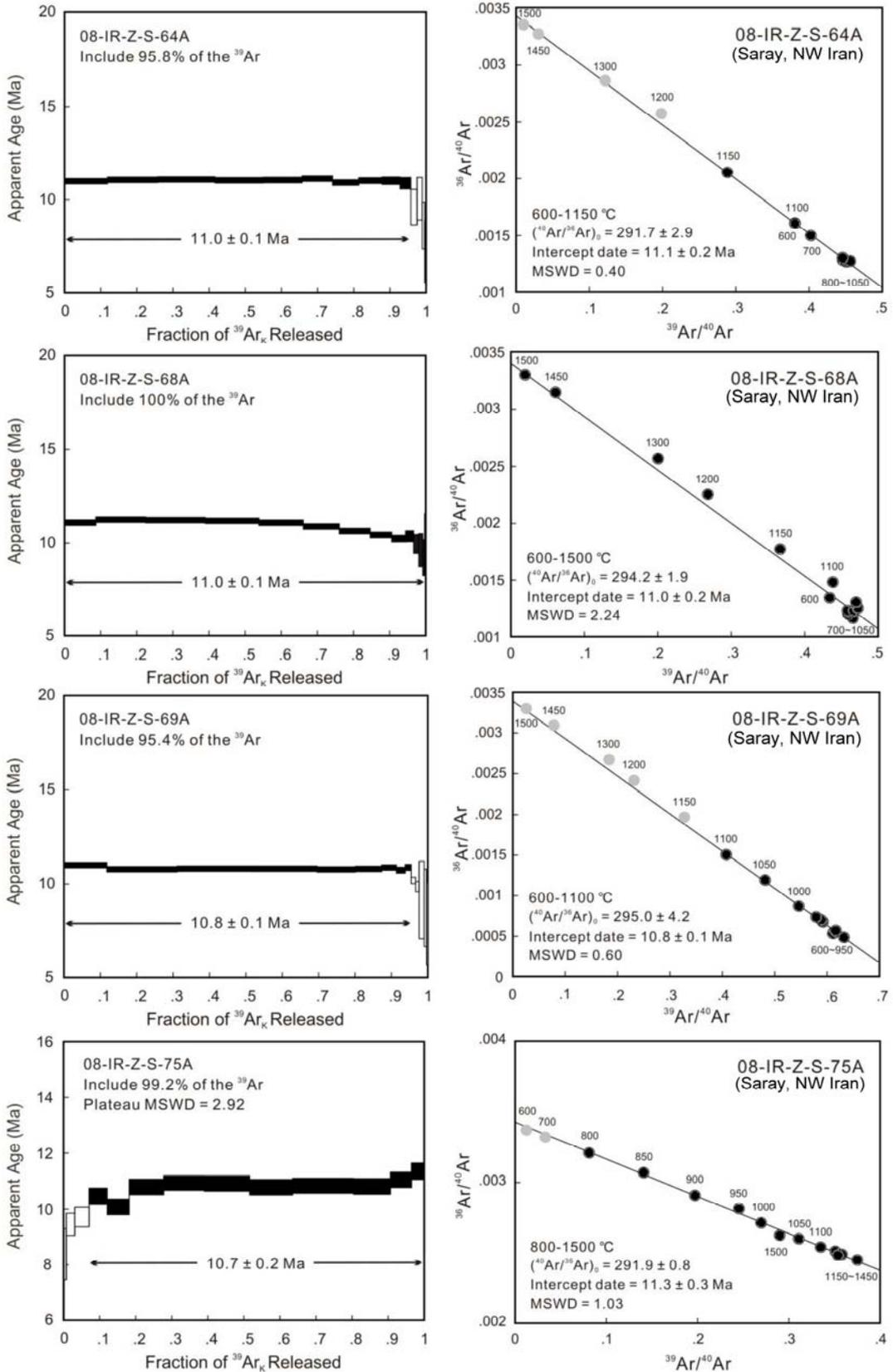
本研究包含 35 個標本, 岩性為玄武岩至流紋岩, 缺乏中性火山岩, 可能為雙模式火山岩, 屬於鈣鹼性系列(見圖 4-3 與圖 4-4 中 S. Georgia 部份), 其中有 10 個為埃達克岩, 基性岩( $\text{SiO}_2 < 56 \text{ wt}\%$ )之輕稀土元素  $\text{La} = 10.5\text{-}35.2 \text{ ppm}$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 3.2\text{-}22.7$ , 富集程度較亞美尼亞低, 僅有一埃達克岩之鋳石鈾-鉛定年結果 (06-G-10E: 3.0 Ma), 但已知喬治亞具有全新世( $< 1.8 \text{ Ma}$ )之火成岩(Goguitchaichvili and Pares, 2000)。



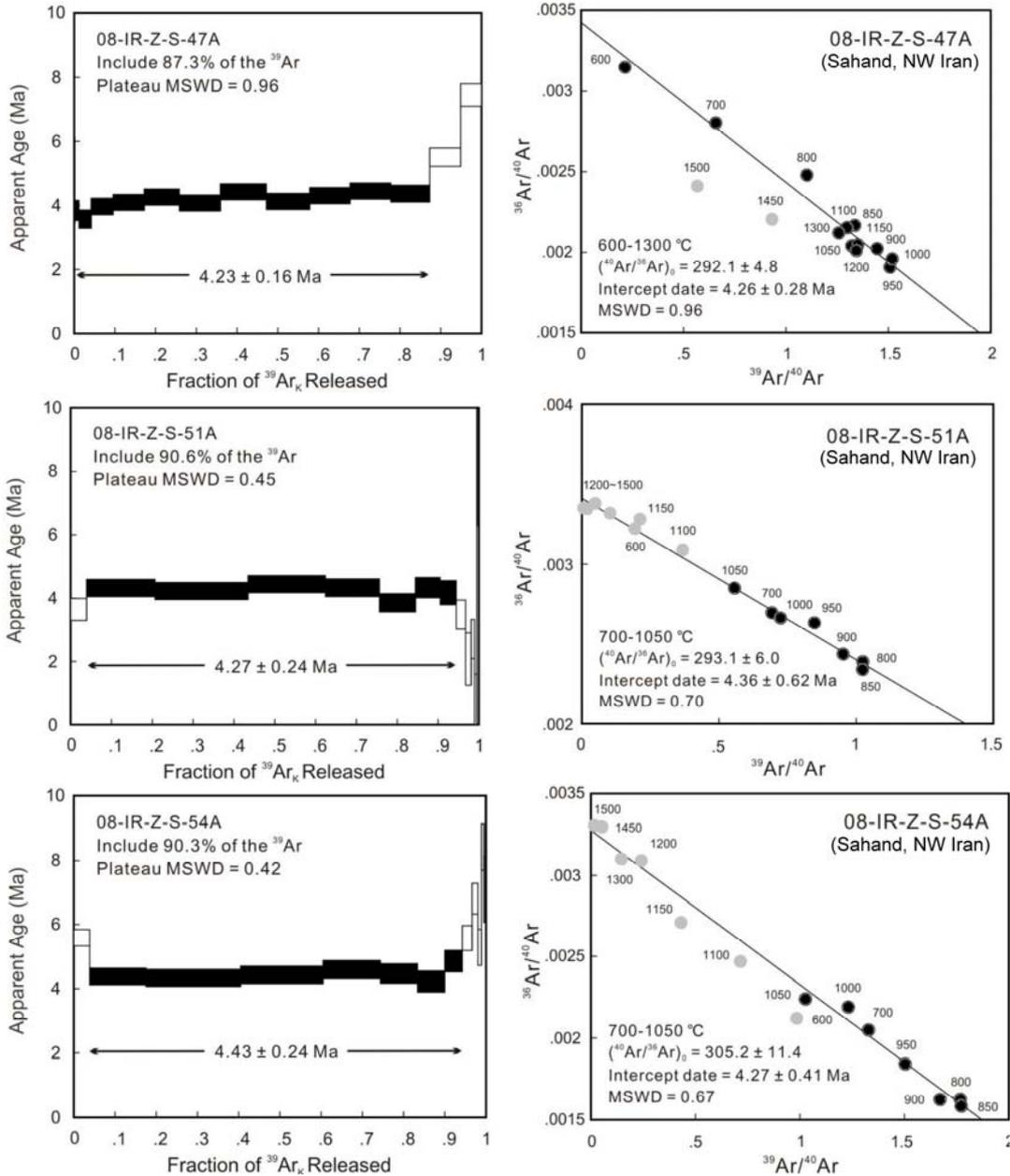
##### (3) 伊朗西北部

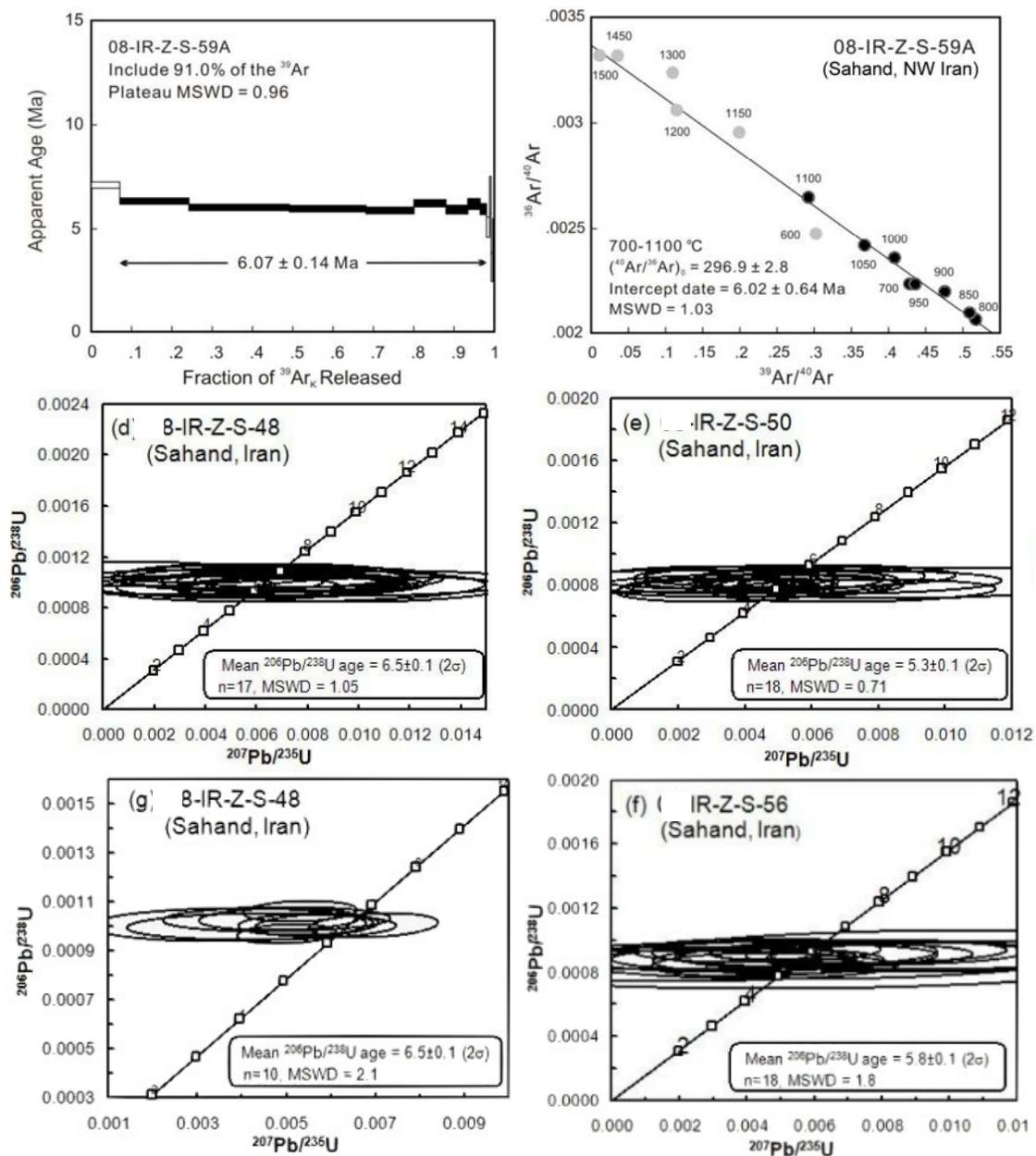
主要火山岩為三座火山, 由於分別為超鉀質岩與埃達克岩, 其岩性與成因於 5.2 節討論, 定年結果如下:

- Saray 火山：全岩氩-氩定年之坦原年代介於 10.7-11.0 Ma 之間，為 CIA 地區最早的碰撞後岩漿活動之一，為超鉀質岩。

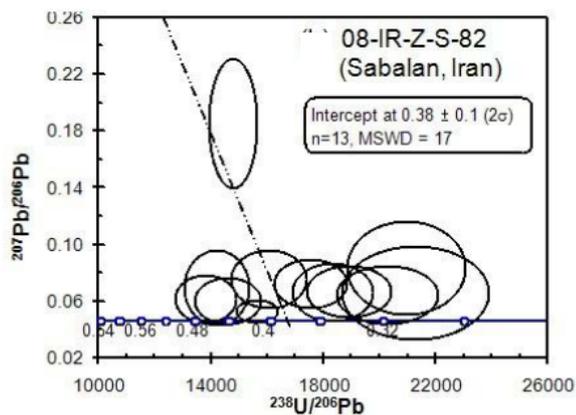


- Sahand 火山**：全岩氩-氩定年之坦原年代介於 4.2-6.1 Ma 之間(4 個標本)，鉛石鈾-鉛定年為 5.3 與 6.5 Ma(4 個標本)，統整即約 4-6 Ma。前人研究中指出 Sahand 火山岩之鉀氩定年年代為 5.3-11.7 Ma (Moine-Vaziri, 1985)，但為(Azizi and Moinevaziri, 2009)中所整理出來，無原文文獻提供查證。





- **Sabalan** 火山：為非常年輕之埃達克岩，位於 Sahand 火山之東北方，以北京 Cameca SIMS 所做之鉛-鈾定年結果為 0.38 Ma。



### 4.3 CIA 地區構造背景與地塊邊界

亞美尼亞位於土耳其與伊朗之間，以往的研究多分別在各國內做討論，缺乏對比研究；綜合前兩節的討論，CIA 地區新生代以來的岩漿活動有較完整的研究，可以進一步檢視前人對於此地區碰撞前與碰撞後岩漿活動成因解釋的模型，並特別著重於形成機制多所爭議的碰撞後岩漿活動。然而，在討論 CIA 地區的碰撞後岩漿活動之前，須先了解 CIA 地區的地塊邊界與組成，從岩漿活動分布的型態亦可以與此相互做對照，此處將文獻中三種地塊邊界模型列出做討論，分別做介紹如下，最後採用的為 Sengor 等人(2003)所提出的模型：

#### 4.3.1 Reilinger et al., 2006

此地塊邊界模型是以 GPS 以及活動斷層分布所決定(圖 4-5)，圖中雙白線為地塊邊界，黑線為較不確定的地塊邊界，CIA 地區主要由 CA 及 CIB 所組成；但此模型未將具有地質意義的蛇綠岩套等考慮進去，且討論範圍較大，對於此地區的描述可能較不精確。

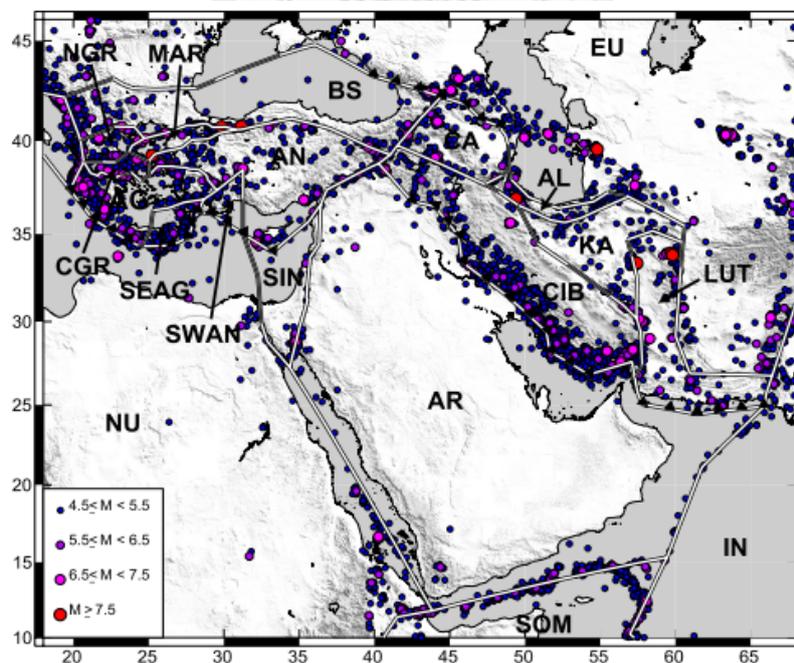


圖 4-5 地塊邊界模型(Reilinger et al., 2006)，圖中英文縮寫為各地塊名稱，主要為 Anatolian (AN), Arabian (AR), Black Sea (BS), Caucasus (CA), Central Iran block (CIB), Eurasian (EU)。

### 4.3.2 Moix et al., 2008

此文章主要探討範圍為安納托利亞高原(圖 4-6)，以各地地層柱及蛇綠岩套分布定義地塊邊界，從圖中可發現 CIA 地區碰撞後岩漿活動主要分布在 Sanandaj-Sirjan terrane；但可惜此文章主要是在探討安納托利亞高原中部與西部的地區，東部地區著墨不多，且未涵蓋伊朗地區。

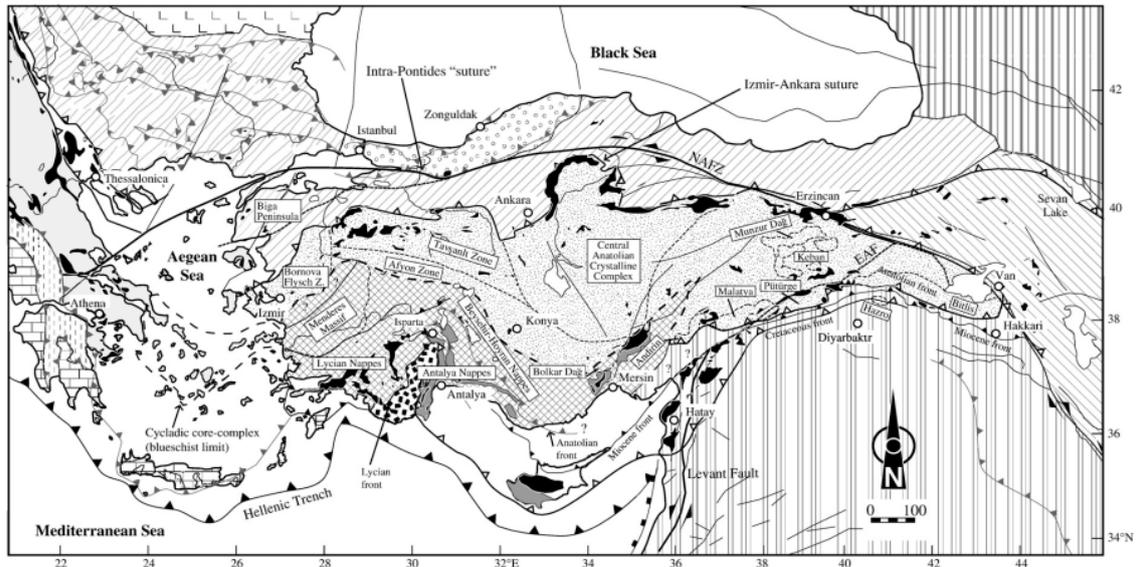


圖 4-6 地塊邊界模型(Moix et al., 2008)

### 4.3.3 Sengor et al., 2003

此文以岩石圈結構、蛇綠岩套分布、地震分布等定義地塊邊界(圖 4-7)，各地塊的歷史與板塊重建模擬對應合理(Stampfli et al., 1991)，並與 Keskin 等人(2006) 以鉛同位素結果發現一火成岩標本具有兩地塊的成分來源，而得出的 PONTIDE、IRAN 地塊邊界相吻合。另外前一節提過，亞美尼亞碰撞前火成岩的年代與 PONTIDE 地塊上的 Pontide arc 以及 IRAN 地塊上的 UDMA 年代可以相對應，此三者連接在一起即 CIA 地區碰撞前的島弧岩漿活動，主要形成年代為始新世，這一連串的島弧岩漿平行於 EAAC 的北緣(見圖 4-8)，這更加說明了於此篇文獻中所提出的地塊邊界及模型是合理且適用的，往後的討論我們便以此作依據，以下分別對此四地塊作介紹：

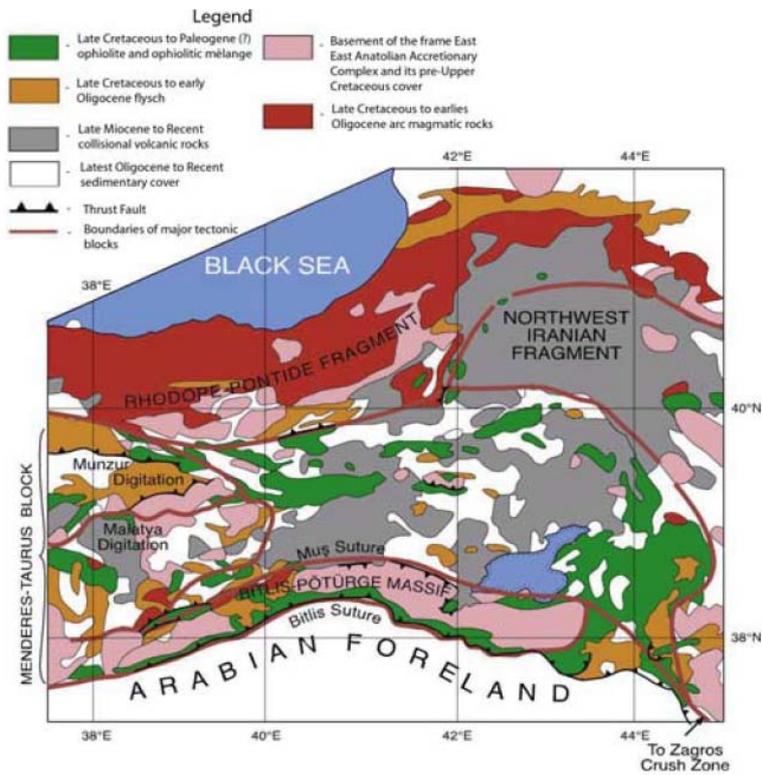


圖 4-7 安那托利亞高原東部地塊邊界 (Sengor et al., 2003)

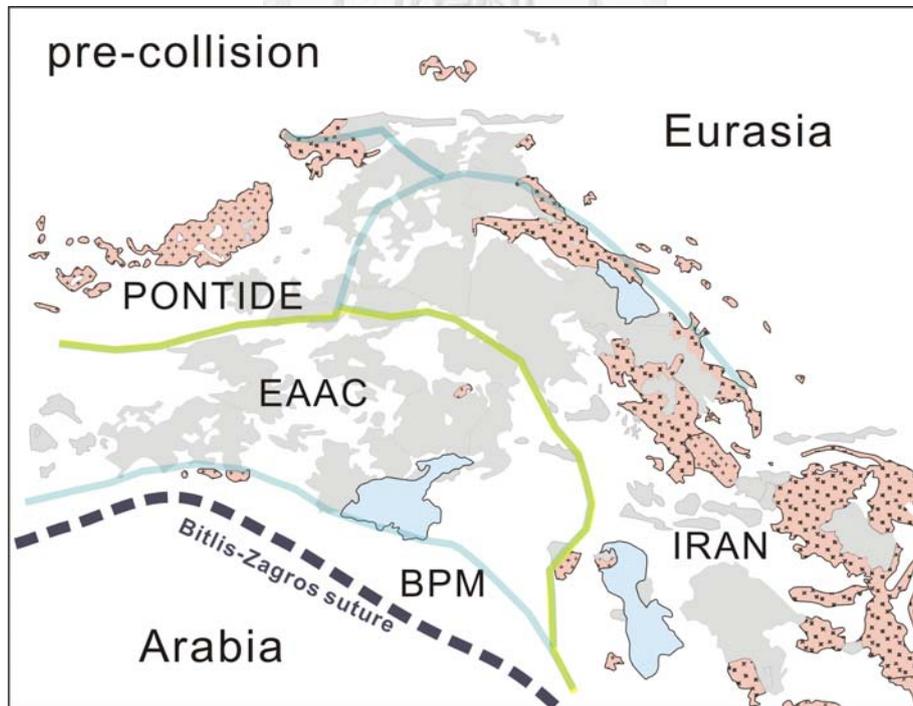


圖 4-8 CIA 地區碰撞前火成岩分布圖(地塊邊界根據 Sengor et al., 2003)。年代約為始新世，+代表侵入岩；x為噴出岩，可看出此島弧岩漿活動大致平行 EAAC 北緣。

### **(1) The Eastern Rhodope-Pontide Fragment (簡稱 PONTIDE 地塊) :**

基底是由泥盆紀的高度變質岩、早石炭紀的花岡閃長岩與石英安山岩、晚石炭紀-早二疊紀的淺海-陸緣沉積岩、以及外來的二疊紀-三疊紀的變質基性岩-千枚岩-大理石單元所構成(Okay and Sahinturk, 1998)。從白堊紀晚期開始，由於新特提斯洋向北隱沒而在 PONTIDE 地塊上形成鈣鹼性系列的島弧岩漿，侵入或覆蓋住了大部份的基底岩石(Sengor and Yilmaz, 1981; Robinson et al., 1995; Yilmaz et al., 1997)，此岩漿活動一直持續到始新世晚期，南方的 East Anatolian Accretionary Complex (EAAC)與此地塊碰撞後才停止(Dewey et al., 1986)。

### **(2) The Northwest Iranian Fragment (簡稱 IRAN 地塊) :**

此地塊在晚二疊紀時因 Permotethys 的張裂而與阿拉伯板塊分開(Stampfli et al., 1991)，其基底露頭出現於亞美尼亞的 Tsakhkuniats 地區，由奧長花崗岩、千枚岩、鈉長石-斜長花崗岩、斜長花崗岩、花崗混合岩所組成(Karapetian et al., 2001)，此地塊與 EAAC 間可以 Van Lake 東邊的蛇綠岩套來畫定邊界，其餘大部份的區域皆被第四紀火成岩覆蓋，而沒有明顯的構造邊界存在；Keskin 等人(2006)從鉛與氧同位素的分析結果而判斷其邊界位於土耳其東部的 Erzurum-Kars plateau 南邊。此地塊北界與歐亞大陸板塊間殘餘之蛇綠岩位於亞美尼亞 Sevan Lake 東北邊，該海洋在白堊紀晚期時便已經關閉、縫合(Galoyan et al., 2007)。此地塊在其他文獻中應可與 Sanandaj-Sirjan terrane 做對應。

### **(3) The Bitlis-Poturge massif (簡稱 BPM) :**

由前寒武紀的變質岩構成基底，其上覆蓋有古生代至三疊紀的變質石灰岩以及古生代至中生代晚期的花崗岩(Dilek and Altunkaynak, 2009)，在基底岩塊上有新特提斯洋殘餘的蛇綠岩套以及鑲嵌在蛇綠岩套中的白堊紀晚期至始新世早期火山島弧塊體，接著便是始新世中期的弧後盆地沉積物，此塊體在始新世晚期便與阿拉伯板塊縫合(Yilmaz, 1993)。

### **(4) The East Anatolian Accretionary Complex (簡稱 EAAC) :**

廣泛分布第四紀火成岩，在火成岩之下是由白堊紀晚期的蛇綠岩、蛇綠混雜岩以及複理層 (flysch) 沉積物所構成的基底，混雜岩向北傾沒且夾雜著較年輕

的複理層，沉積環境由北向南變淺而復理石的年代有從北邊的白堊紀至南邊的漸新世演變的趨勢(Tuysuz and Erlor, 1995)，中新世中期至晚期則沉積了陸源沉積物，之後則因斷層與褶皺的作用而抬升(Saroglu and Yilmaz, 1986)。在 CIA 地區由於由多個地塊合併，但各地塊間不是平整的縫合，因此 Sengor 與 Yilmaz (1981) 認為 EAAC 是由殘存的海洋地殼與其上的增積岩體受擠壓抬升所形成。另外從震測的資料顯示這個地方的 Moho 深度約為 30~55 公里，岩石圈與軟流圈的交界 (Lithosphere-Asthenosphere Boundary) 則在 60~80 公里之間(Angus et al., 2006)，顯示其岩石圈地函相當薄或不存在，因此地殼與地函幾乎直接接觸(Sengor et al., 2003)。

決定地塊邊界的同時，也可以探討前人研究中的地體構造模型，說明了這地方在阿拉伯與歐亞大陸板塊碰撞前屬於土耳其式造山(Turkic-type orogeny, Sengor and Natal'in, 1996)，碰撞後岩漿活動成因與西藏高原的傳統造山、山根崩解模型(Chung et al., 2005)不相同，否定了 Pearce 等人(1990)所提出的增厚的岩石圈拆層作用導致碰撞後岩漿活動的說法，且於 Pearce 等人的模型中，碰撞前岩漿活動應與 Bitlis-Zagros suture 有大致平行的關係(圖 4-8)。因此我們認為 Keskin 等人(2003)與 Sengor 等人(2003)所提出的海洋岩石圈退後、拆解(Slab roll-back、steepening & break-off)導致軟流圈上湧，產生大規模岩漿活動，為 CIA 地區較為可能的碰撞後岩漿活動成因。

## Chapter 5 CIA 地區碰撞後岩漿活動

本章綜合亞美尼亞、喬治亞、伊朗西北部以及土耳其東部的碰撞後火成岩分析結果，探討 CIA 地區碰撞後火成岩的地球化學特性隨著時空的變化，了解地函源區的組成，並進一步探討岩漿活動的成因；此外，CIA 地區之碰撞後岩漿活動除了普遍分布的高鉀鈣鹼性火成岩外，另外發現部份地區具有特殊岩石成因的埃達克岩與超鉀質岩，在此將其時空變化放入一同討論；最後再從岩漿活動之時空變化去架構地體構造的演化。

### 5.1 地球化學特性與岩石成因

火成岩的地球化學特性會記錄其地函源區特性，因此若以各個不同的元素去計算、作圖，便可以推測該火成岩的地函源區特性、噴發過程等岩石成因，進一步去了解地體構造環境。以下就針對不同的特性去做討論。

#### 5.1.1 地函源區組成

地函的礦物相主要是由橄欖石-斜方輝石-單斜輝石及含鋁礦物相(Olivine-OPX-CPX-Al phase)所組成，其中含鋁礦物相在不同深度以不同的穩定礦物相存在，由淺至深分別為斜長石、尖晶石與石榴子石，在各礦物相間會有一過度帶存在，斜長石與尖晶石的過度帶約在 25-30 公里，尖晶石與石榴子石的過度帶約在 60-80 公里之間(McKenzie and O'nions, 1991)，過度範圍之內為兩礦物相共存。

此外，不同元素在不同礦物相中會有不同的性質，因此會具有不同的分配係數(partition coefficient,  $K_d$ )，重稀土元素(HREE)在石榴子石(garnet)礦物相時的分配係數相當的高(如：Yb)，見表 5-1，親岩石性強烈，因此若岩漿來源的熔融受此礦物所影響，重稀土元素不偏好進入岩漿，便可以看到岩漿的重稀土元素富集程度較中稀土元素(如：Sm)來的低；而稀土元素對於尖晶石礦物相則分配係數相似，如 La、Sm、Yb 的分配係數都相同(表 5-1)，便不容易在岩漿中看出此其富集程度的不同。因此我們根據地函礦物相隨深度不同以及稀土元素表現的不同，可以以稀土元素計算模擬(REE modeling)岩漿來源深度，由於稀土元素計算模擬需要岩漿來源的地函值，但 CIA 地區尚無包裹體的發現，沒有可以使用的地函值作計算，

但由於 CIA 地區火成岩鋁-鈹同位素組成無明顯差異，因此本研究中參考 Aldanmaz 等人(2000)於土耳其西部稀土元素計算模擬中所使用的地函值，並使用非模型漸次熔融(non-modal batch melting)來做模擬，如式 5.1，其中計算所需的地函礦物組成(尖晶石二輝橄欖岩(Kinzler, 1997)與角閃石二輝橄欖岩(Walter, 1998))、分配係數(McKenzie and O'nions, 1991)以及稀土元素之不同原始地函值、中洋脊玄武岩值(Sun and McDonough, 1989)、虧損地函值(McKenzie and O'nions, 1991)以及安納托利亞地函值(Anatolia Mantle, Aldanmaz et al., 2000))皆列於表 5-1 中，計算的數據則於表 5-2 中，之後我們選取亞美尼亞碰撞前火成岩以及 CIA 地區碰撞後火山岩中受結晶分化作用影響較小的基性岩( $\text{SiO}_2 < 52\%$ )之分析結果，代表該地之地函源區成分(表 5-3)，並投於圖 5-1 中。

從圖 5-1 中，可以發現 CIA 地區火成岩分析結果皆位於石榴子石-二輝橄欖岩(grt-lherzolite)以及尖晶石-二輝橄欖岩(sp-lherzolite)的範圍之間，與 grt+sp-lherzolite 的部份熔融趨勢位於同樣的區域，代表這些火成岩的來源深度是位於這兩礦物相之間的過渡帶，也就是 60-80 公里之間，指示亞美尼亞碰撞前島弧岩漿活動的地函楔的位置以及 CIA 地區碰撞後岩漿活動時岩石圈的結構，而這結果也與前人研究中指出的現今 EAAC 地區岩石圈厚度大約 60-80 公里，岩漿源自於岩石圈底部恰恰吻合(Angus et al., 2006)，見圖 5-2，圖中 39°N 及 42°E 剖面的位置可參考圖 5-4 中虛線位置。

表 5-1 稀土元素計算模擬使用之尖晶石/石榴子石-二輝橄欖岩礦物組成與 La、Sm、Yb 之分配係數，以及 PM (primitive mantle); N-MORB (normal-mid ocean ridge basalt); E-MORB (enriched-MORB); DMM (depleted MORB mantle); AM (Anatolia mantle)之含量(ppm)

Spinel-lherzolite (Ol-Opx-Cpx-Sp)						Mode (0.53-0.27-0.17-0.03), Melt mode (-0.06-0.28-0.67-0.11)				
Garnet-lherzolite (Ol-Opx-Cpx-Grt)						Mode (0.6-0.2-0.1-0.1), Melt mode (-0.03-0.16-0.78-0.09)				
Kd	Ol	Opx	Cpx	Sp	Grt	PM	N-MORB B	E-MORB	DMM	AM
La	0.0004	0.002	0.054	0.01	0.01	0.687	2.5	6.3	0.206	1.5
Sm	0.013	0.01	0.26	0.01	0.217	0.444	2.63	2.6	0.299	0.6
Yb	0.015	0.049	0.28	0.01	4.03	0.493	3.05	2.37	0.347	0.64

◆ non-modal batch melting (Shaw, 1970) :

$$C_L = C_O / [D_O + F(1 - P)] \dots\dots\dots(式 5.1)$$

$C_O$ 、 $C_L$  : 全岩中各元素之初始物質及熔融液體的濃度

$D_O$  : 初始物質中元素的總分配係數

F : 熔融程度

P : 熔融的岩漿中依照礦物相的比例所計算之總分配係數

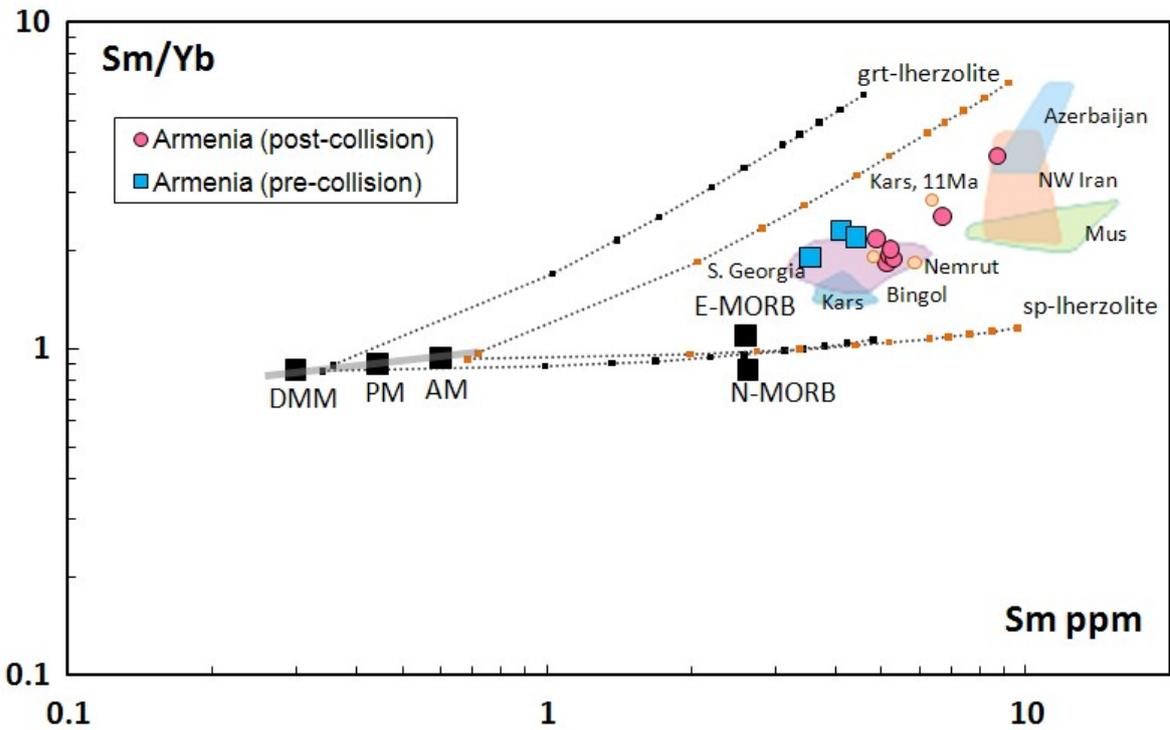


圖 5-1 以稀土元素模擬計算部份熔融來源深度，可見亞美尼亞碰撞前與後火成岩及 CIA 地區碰撞後火成岩之地函源區皆為尖晶石-石榴子石二輝橄欖岩。

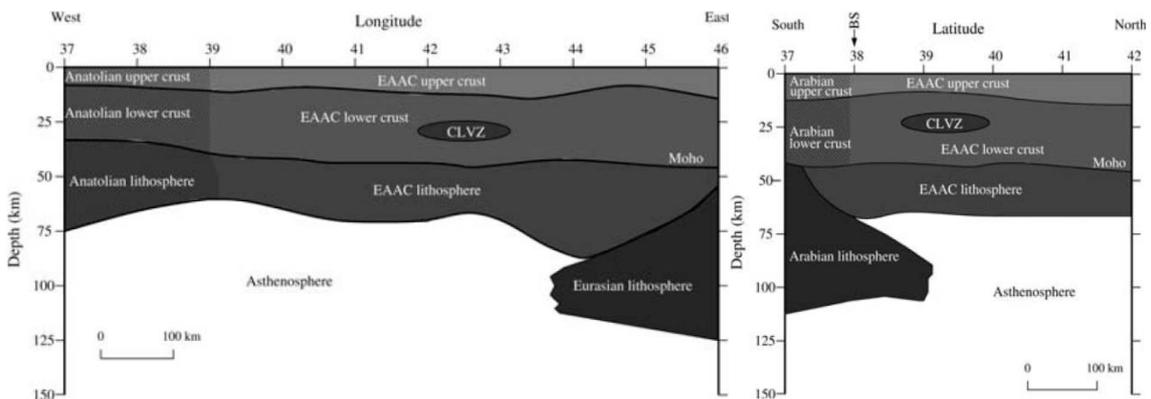


圖 5-2 CIA 地區岩石圈剖面(a)北緯 39 度；(b)東經 42 度(Angus et al., 2006)。

### 5.1.2 部份熔融程度

大離子半徑元素(LILE)、輕稀土元素(LREE)以及鉀元素(K)的分配係數非常小(partition coefficient,  $K_d \ll 1$ )，因此地函源區小程度部份熔融會造成岩漿中這些元素的富集，富集程度越高代表其部份熔融程度越低，因此從這些元素的含量，我們可以去計算其部份熔融程度，在這裡我們輕稀土元素以 La 元素代表來看其富集程度，其餘計算式與地函礦物組成等與前一節相同，如式 4-1 與表 5-1，計算之後同樣將 CIA 地區各標本組成放入圖中，便可讀取其部份熔融程度，La 含量在非常小程度部份熔融時只要有一點變化便會反應在部份熔融程度上，但到約 5%的部份熔融程度以上時，讀值便不會那麼精確，如圖 5-3。可以看出 CIA 地區火成岩是由富集地函(即 Anatolia Mantle)部份熔融而來，標本點位置分布於該線附近，而非位於虧損地函(DMM)的部份熔融變化線。

圖 5-3 中僅將亞美尼亞的標本點繪出，其餘的以範圍表示，其中 Kars 火山的標本 MK144 (11 Ma, Keskin et al., 2006)為 CIA 地區碰撞後火山岩最早的標本之一，其部份熔融程度與其他該地區的結果(<5.7 Ma)明顯不同，因此單獨表示在圖中；喬治亞南部的火山岩則是可以從 La 含量明顯看到分為兩群，沒有精確的年代控制，但可能為不同成因，因此亦分開表示。此外在表中我們根據各火山岩地區之  $K_2O$  和  $SiO_2$  含量作圖結果定義其岩漿序列，然而由於 K 的遷移度(mobility)高，測量結果不一定代表其原始的數值，因此另外再配合上各標本的 La 含量去決定其岩漿序列，並列於表中(series, 表 5-3)，以便於探討部份熔融程度與其岩漿特性等是否有時間與空間上的規律。

碰撞後火成岩之地質圖上標示部份熔融程度(圖 5-4)，不同的底色代表不同的序列，粉紅色底為中鉀鈣鹼序列、黃色底為高鉀鈣鹼序列、藍色底為鉀玄武岩序列，並另外標出亞美尼亞碰撞前火成岩的部份熔融程度。此外 CIA 地區的地塊邊界(Sengor et al., 2003)以淡藍色線表示於圖上方便討論，EAAC 代表新特提斯洋板塊上增積岩體受擠壓碰撞增厚的地塊，僅有相當薄的岩石圈地函，PONTIDE 與 IRAN 代表較早便與歐亞大陸縫合的兩微地塊，BPM 也是在早期便與阿拉伯板塊縫合的微地塊，擁有正常的岩石圈地函，如圖 5-2 (Angus et al., 2006)。

表 5-2 稀土元素計算模擬計算(使用 non-model batch melting)結果，DMM 為虧損地函，AM 為安納托利亞地函

spinel-lherzolite <i>F</i>	$C_L/C_0$	DMM	AM	$C_L/C_0$	DMM	AM	$C_L/C_0$	DMM	AM	DMM			AM		
		La <sub>L</sub>	La <sub>L</sub>		Sm <sub>L</sub>	Sm <sub>L</sub>		Yb <sub>L</sub>	Yb <sub>L</sub>	La/Yb	La/Sm	Sm/Yb	La/Yb	La/Sm	Sm/Yb
100%	1.00	0.206	1.50	1.00	0.299	0.600	1.00	0.347	0.640	0.689	0.689	0.862	2.34	2.50	0.938
30%	3.35	0.689	5.02	3.32	0.994	1.99	3.24	1.12	2.07	0.613	0.694	0.884	2.42	2.52	0.962
20%	4.93	1.02	7.40	4.57	1.37	2.74	4.37	1.52	2.80	0.670	0.743	0.902	2.65	2.70	0.981
15%	6.47	1.33	9.70	5.63	1.68	3.38	5.30	1.84	3.39	0.725	0.791	0.917	2.86	2.87	0.998
10%	9.39	1.94	14.1	7.33	2.19	4.40	6.71	2.33	4.30	0.831	0.883	0.941	3.28	3.20	1.02
7.5%	12.1	2.50	18.2	8.64	2.58	5.18	7.75	2.69	4.96	0.929	0.968	0.960	3.67	3.51	1.04
5%	17.1	3.53	25.7	10.5	3.14	6.30	9.17	3.18	5.87	1.11	1.12	0.986	4.38	4.08	1.07
4%	20.5	4.23	30.8	11.5	3.44	6.90	9.90	3.43	6.34	1.23	1.23	1.00	4.86	4.46	1.09
3%	25.6	5.27	38.4	12.7	3.80	7.62	10.75	3.73	6.88	1.41	1.39	1.02	5.58	5.04	1.11
2%	33.9	6.99	50.9	14.2	4.24	8.51	11.76	4.08	7.53	1.71	1.65	1.04	6.76	5.98	1.13
1%	50.4	10.4	75.6	16.0	4.80	9.63	12.98	4.50	8.30	2.30	2.16	1.07	9.10	7.85	1.16

garnet-lherzolite <i>F</i>	$C_L/C_0$	DMM	AM	$C_L/C_0$	DMM	AM	$C_L/C_0$	DMM	AM	DMM			AM		
		La <sub>L</sub>	La <sub>L</sub>		Sm <sub>L</sub>	Sm <sub>L</sub>		Yb <sub>L</sub>	Yb <sub>L</sub>	La/Yb	La/Sm	Sm/Yb	La/Yb	La/Sm	Sm/Yb
100%	1.00	0.206	1.50	1.00	0.299	0.600	1.00	0.347	0.640	0.594	0.689	0.862	2.34	2.50	0.938
30%	3.40	0.701	5.10	3.44	1.03	2.07	1.74	0.605	1.12	1.16	0.681	1.70	4.57	2.47	1.85
20%	5.04	1.04	7.56	4.70	1.41	2.82	1.88	0.652	1.20	1.59	0.739	2.15	6.29	2.68	2.34
15%	6.64	1.37	9.96	5.75	1.72	3.45	1.95	0.678	1.25	2.02	0.796	2.53	7.96	2.89	2.76
10%	9.74	2.01	14.6	7.40	2.21	4.44	2.04	0.707	1.30	2.84	0.907	3.13	11.2	3.29	3.41
7.5%	12.7	2.61	19.0	8.64	2.58	5.18	2.08	0.722	1.33	3.62	1.01	3.58	14.3	3.67	3.89
5%	18.2	3.75	27.3	10.4	3.10	6.23	2.13	0.738	1.36	5.09	1.21	4.21	20.1	4.39	4.58
4%	22.1	4.55	33.1	11.3	3.38	6.78	2.14	0.744	1.37	6.11	1.35	4.54	24.1	4.89	4.94
3%	28.0	5.76	42.0	12.4	3.70	7.43	2.16	0.751	1.38	7.68	1.56	4.93	30.3	5.65	5.36
2%	38.2	7.87	57.3	13.7	4.09	8.22	2.18	0.758	1.40	10.4	1.92	5.40	41.0	6.98	5.88
1%	60.2	12.4	90.3	15.3	4.58	9.19	2.20	0.764	1.41	16.2	2.71	5.99	64.1	9.83	6.52

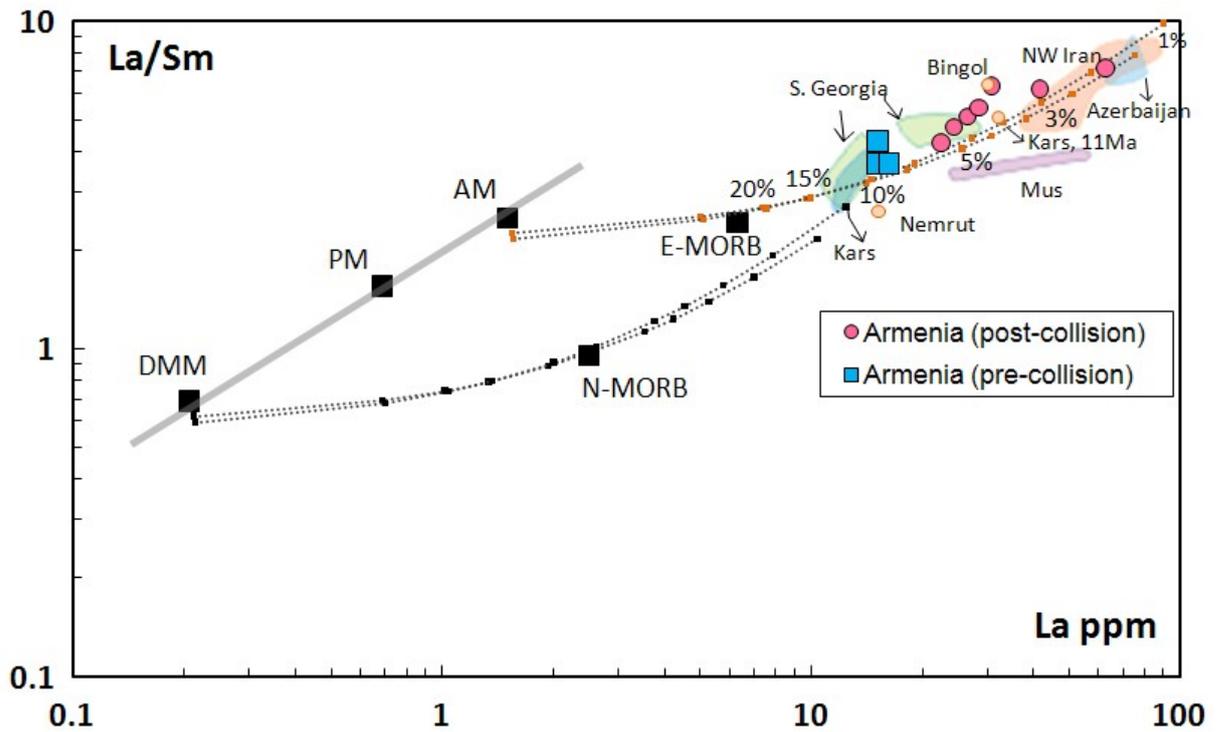


圖 5-3 以稀土元素模擬計算部份熔融程度

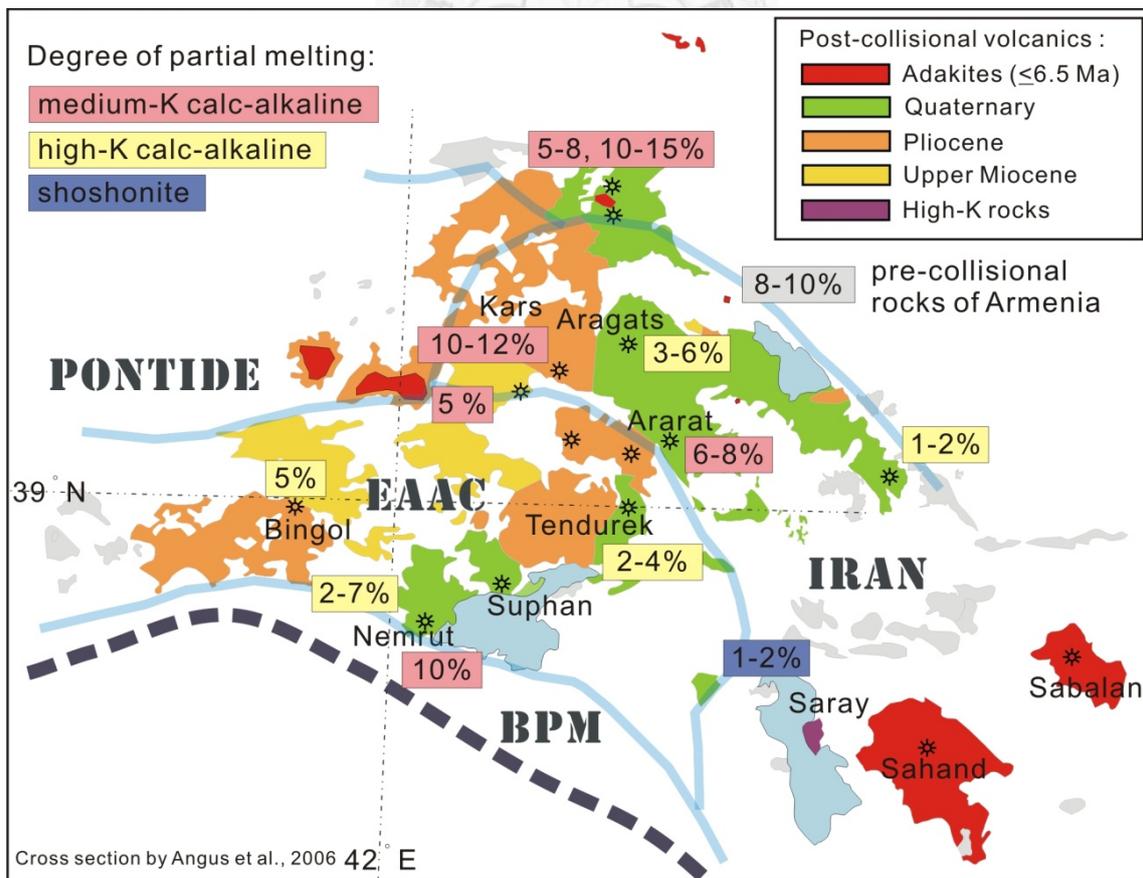


圖 5-4 CIA 地區火成岩部份熔融程度與其鈣鹼序列

表 5-3 CIA 地區碰撞後之基性火山岩之稀土元素模擬結果與鈣鹼序列

sample location	sample name	Age (Ma)	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	La	Sm	Yb	La/Sm	Sm/Yb	series*	degree of partial melting**	reference
Ararat, E. Anatolia	Mu 18.25		49.0	0.55	11.1	4.19	2.40	2.64	1.75	CA		Kheirkhah et al., 2009
Ararat, E. Anatolia	Mu 20.26		49.6	1.06	20.8	5.19	2.61	4.01	1.99	CA	6~8% (#=3)	Kheirkhah et al., 2009
Ararat, E. Anatolia	3132	1.51	51.4	0.86	18.9	5.17	2.46	3.66	2.10	CA		Pearce et al., 1990
Nemrut, E. Anatolia	2362	1.18	47.7	0.68	14.4	5.56	3.04	2.58	1.83	CA	10% (#=1)	Pearce et al., 1990
Kars, E. Anatolia	2821	3.6	50.6	0.84	11.2	4.23	3.03	2.65	1.40	CA		Pearce et al., 1990
Kars, E. Anatolia	Hora (MK135)	ca. 4	50.0	0.69	11.0	4.07	2.62	2.70	1.55	CA	10~15% (#=4)	Keskin et al., 1998
Kars, E. Anatolia	Hora (MK139)	ca. 4	49.7	0.73	13.5	3.64	2.37	3.71	1.54	CA		Keskin et al., 1998
Kars, E. Anatolia	Kara (MK289)	7	49.1	0.51	12.3	3.64	2.61	3.38	1.39	CA		Keskin et al., 1998
Kars, E. Anatolia	Kotek (MK144)	11	48.8	1.08	30.6	6.14	2.18	4.98	2.82	CA	5% (#=1)	Keskin et al., 1998
S. Georgia	06-G-03		48.8	1.01	10.5	3.46	1.74	3.03	1.99	CA		Chung et al., unpubl.
S. Georgia	06-G-07A		46.5	0.66	11.8	4.08	2.58	2.90	1.58	CA	10~15% (#=4)	Chung et al., unpubl.
S. Georgia	06-G-16		45.7	0.41	11.8	3.85	2.30	3.06	1.67	CA		Chung et al., unpubl.
S. Georgia	06-G-07B		46.3	0.57	11.9	4.21	2.71	2.82	1.55	CA		Chung et al., unpubl.
S. Georgia	06-G-06D		49.7	0.79	17.3	3.67	2.21	4.70	1.66	CA		Chung et al., unpubl.
S. Georgia	06-G-06C	<2.5	48.6	0.92	19.3	4.52	2.54	4.28	1.78	CA		Chung et al., unpubl.
S. Georgia	06-G-04		48.9	1.02	22.0	4.77	2.58	4.62	1.85	CA		Chung et al., unpubl.
S. Georgia	06-G-05D		48.6	0.86	21.1	4.82	2.70	4.38	1.79	CA	5~8% (#=8)	Chung et al., unpubl.
S. Georgia	06-G-08		49.9	0.87	21.2	4.61	2.47	4.59	1.87	CA		Chung et al., unpubl.
S. Georgia	06-G-10F		49.2	1.00	22.8	4.71	2.64	4.85	1.78	CA		Chung et al., unpubl.
S. Georgia	06-G-05C		49.4	0.98	23.6	5.18	2.81	4.56	1.84	CA		Chung et al., unpubl.
S. Georgia	06-G-02		47.3	1.48	26.1	5.63	2.91	4.63	1.93	CA		Chung et al., unpubl.
Bingol, E. Anatolia	2213	3.6	55.4	2.04	28.5	4.61	2.43	6.19	1.90	HCK	5% (#=1)	Pearce et al., 1990
Mus, E. Anatolia	2113	4.4	47.5	1.00	23.5	7.07	3.07	3.32	2.30	HCK		Pearce et al., 1990
Mus, E. Anatolia	2112	6.0	50.1	1.32	28.6	8.45	4.00	3.38	2.11	HCK	2~7% (#=4)	Pearce et al., 1990
Mus, E. Anatolia	2114		52.0	2.00	41.9	11.2	5.54	3.73	2.03	HCK		Pearce et al., 1990
Mus, E. Anatolia	2115		51.2	2.40	54.5	14.3	5.16	3.82	2.77	HCK		Pearce et al., 1990
Armenia	09ARM11-1		49.2	1.01	22.5	5.29	2.80	4.26	1.89	HCK		this study
Armenia	G1	very young	49.7	0.98	24.4	5.13	2.82	4.75	1.82	HCK		this study
Armenia	G7		50.7	1.16	26.5	5.18	2.67	5.11	1.94	HCK		this study
Armenia	09ARM28	1.7	49.8	1.29	28.4	5.23	2.59	5.44	2.02	HCK	3~6% (#=7)	this study
Armenia	G8		51.0	1.56	30.9	4.87	2.24	6.34	2.18	HCK		this study
Armenia	G47	very young	49.5	1.53	41.6	6.70	2.63	6.21	2.54	HCK		this study
Armenia	G70		49.6	2.31	62.7	8.73	2.24	7.18	3.90	HCK		this study
Azerbaijan	134		48.1	1.73	62.0	9.10	2.20	6.81	4.14	HCK		Dilek et al., 2009
Azerbaijan	132		48.9	1.92	63.0	9.80	2.40	6.43	4.08	HCK		Dilek et al., 2009
Azerbaijan	129	very young	48.4	1.96	65.0	9.50	2.70	6.84	3.52	HCK	1~2% (#=6)	Dilek et al., 2009
Azerbaijan	19/P		50.5	2.90	73.5	8.40	2.35	8.75	3.57	HCK		Dilek et al., 2009
Azerbaijan	21		51.8	2.92	76.0	10.0	1.80	7.60	5.56	HCK		Dilek et al., 2009
Azerbaijan	57		49.4	2.48	77.0	11.0	1.90	7.00	5.79	HCK		Dilek et al., 2009
Tendurek, NW Iran	Mu 11.16	very young	50.4	1.59	37.1	7.49	3.31	4.95	2.26	HCK		Kheirkhah et al., 2009
Tendurek, NW Iran	Mu 12.17		50.1	1.63	39.9	7.72	3.41	5.16	2.26	HCK	2~4% (#=4)	Kheirkhah et al., 2009
Tendurek, NW Iran	3121	2.5	48.9	1.56	50.6	10.3	4.75	4.90	2.18	HCK		Pearce et al., 1990
Siah Cheshmeh, NW Ir	Mu 13.18		49.0	1.36	54.8	8.50	2.15	6.45	3.95	HCK		Kheirkhah et al., 2009
Yigit Dagi, NW Iran	Mu 16.23	very young	46.0	1.99	61.3	7.92	2.29	7.73	3.46	SH		Kheirkhah et al., 2009
Salmas, NW Iran	Mu 15.20		48.1	2.01	66.1	8.18	1.89	8.08	4.33	SH	1~2% (#=3)	Kheirkhah et al., 2009
Gonbad, NW Iran	RK 4		48.2	2.99	82.0	9.91	2.25	8.28	4.40	SH		Kheirkhah et al., 2009
Armenia (pre-collision)	09ARM05-1		50.9	0.34	15.1	4.11	1.79	3.67	2.30	CA		this study
Armenia (pre-collision)	09ARM05-2	46.2	49.1	0.68	16.2	4.42	2.01	3.67	2.20	CA	8~10% (#=3)	this study
Armenia (pre-collision)	09ARM26-1	51.6	49.1	0.12	15.2	3.54	1.86	4.29	1.90	CA		this study

\* CA: calc-alkaline series; HCK: high K calc-alkaline series; SH: shoshonite series.

\*\* # = sample number

### (1) 亞美尼亞地區之碰撞前與碰撞後火成岩：

碰撞前岩漿活動部份熔融程度為 8-10%，碰撞後岩漿活動則是 1-6%，可以看出明顯的部份熔融程度降低的現象，碰撞前火成岩 8-10%的部份熔融程度符合島弧岩漿活動應有的結果，碰撞後岩漿活動的部份熔融程度降低可能是由於地函源區較深或是含有的水份減少所致，但已知前者在此處碰撞前與碰撞後之地函源區皆在 60-80 km 之間，因此可能是地函源區中之水份減少、不易造成大程度的部份熔融。

### (2) CIA 地區之碰撞後火成岩：

最早的碰撞後火成岩於 Kars (~11 Ma) 形成，其部份熔融程度約為 5%，接著 11-6 Ma 之間的火成岩雖然可供投圖的基性岩標本數不多，僅在 Kars 擁有標本，但可發現其部份熔融程度變高，約為 13% 左右。6-2 Ma 期間的標本數較多，Kars 地區的部份熔融程度與前一期相似，但在 Bingol、Mus 等地的部份熔融程度較低約為 2-7%，其位置處於 CIA 地區的西南端。2 Ma 以來的話則大部份數據來自於喬治亞、亞美尼亞以及亞塞拜然地區，數據量較多，Ararat 火山最後一期噴發的定年結果約為 0.5 Ma，在表中之標本為較早期噴發的結果，約為 1.51 Ma，三個標本具有相似的部份熔融程度，大約為 6-8%；位於 CIA 南端的 Nemrut 火山的部份熔融程度約為 10%；S. Georgia 的結果則可以看到明顯兩群 La 含量的不同，分別為 5-8% 及 10-15%；Armenia 約為 3-6%；Azerbaijan 約為 1-2%；接著西北伊朗的標本大多位於土耳其與伊朗邊界，部份熔融程度約為 1-4%。

整體來說，CIA 地區碰撞後火山岩的部份熔融程度與鈣鹼度隨著空間與時間沒有一個明顯的系統性變化，可能是由於各地塊岩石圈結構不同，因此在這裡我們僅就各地區的成因做討論，然而由於 CIA 地區碰撞後火山岩的鋁同位素組成大致均勻(圖 3-20)，因此我們認為其岩漿來源皆為岩石圈底部，約 60-80 公里深處(重稀土元素模擬獲得的結果)，大程度的部份熔融來自於岩石圈較薄處、小程度部份熔融來自於岩石圈較厚處，若與現今岩石圈剖面對照來看(圖 5-2)，可以發現小程度部份熔融(< 2%) 都是位在岩石圈較厚的地方，如 IRAN 地塊上之亞塞拜然以及伊朗與土耳其交界處之火山岩；但大程度部份熔融(> 10%) 不一定發生在岩石圈較薄的地方，如 Kars 南部最早期的碰撞後火山岩、Nemrut 火山以及喬治亞南部火山

岩，從主量元素分析結果可以發現他們都呈現雙模式火山岩的型態，缺乏中性火山岩，指示該處可能處於一局部張裂的地體構造，使得岩漿活動雖然在較厚的岩石圈仍可擁有較大程度的部份熔融。

### 5.1.3 地殼混染與結晶分化作用

CIA 地區是否受到地殼混染與結晶分化作用(AFC process)有著地域性的差別，前人研究中認為 Ararat 以南的火山受到不同程度 AFC 作用的影響，以北的 Kars-Ararat 則沒有明顯的訊號(Pearce et al., 1990)，該報導中認為增厚地殼釋放出的熱造成下部地殼溫度升高，進而導致廣泛的 AFC 作用，前一章亞美尼亞鋁銨同位素的結果我們發現亞美尼亞碰撞前與碰撞後岩漿活動主要受到 FC process (圖 4-1a)，而非 AFC process，這結果亦符合 Ararat 火山以北的地區較少受到 AFC process 的影響，顯示在 Ararat 火山以南的岩漿演化系統較為開放，容易受到圍岩的影響，以北的則是較封閉的系統，主要受結晶分化作用的影響。



## 5.2 CIA 地區超鉀質岩與埃達克岩

超鉀質岩與埃達克岩的定義及形成原因已在第一章中介紹，兩者皆為從地球化學性質所定義出的岩性，CIA 地區碰撞後岩漿活動除了廣泛分布的高鉀鈣鹼性火成岩外(如圖 5-5 至圖 5-8 中灰色標本點)，在少部份地區發現有超鉀質岩與埃達克岩，包含伊朗西北部 Saray 火山、Sahand 火山、以及 Sabalan 火山；土耳其 Kars 南方的 Dumlu 區域(Keskin et al., 1998)、亞美尼亞、喬治亞南部以及大高加索山南部(Chung et al., unpublished data)。本研究中討論的 CIA 超鉀質岩與埃達克岩之數據及定年結果於 4.2 節。

### 5.2.1 超鉀質岩

超鉀質岩的定義為全岩地球化學  $K_2O > 3 \text{ wt}\%$ 、 $K_2O/Na_2O > 2$  以及  $MgO > 3 \text{ wt}\%$  (Foley et al., 1987)，這些特徵可以在圖 5-5 至圖 5-7 中 Saray 火山標本點看到，僅有四個標本可能受到岩漿分異作用的影響而不符合定義，其餘的標本都具有這些特徵，因此 Saray 火山的岩性為超鉀質岩，噴發年代約為 11 Ma，擁有富集的鋇鉍同位素組成(圖 5-8)。一般認為超鉀質岩為受過早期交代變質作用的岩石圈地函部份熔融形成，早期岩漿事件中生成的熔體和/或流體往往具有高不相容元素和揮發組分及高 Rb/Sr、Nd/Sm 比值(容易使岩石具有高 Sr、低 Nd 的同位素組成)(McKenzie, 1989)，交代熔體冷卻後在岩石圈地函中呈脈狀展布，多富含金雲母和鉀質鹼性角閃石等，這些早期的岩漿活動很可能是碰撞前岩漿活動、也就是新特提斯洋隱沒形成的島弧岩漿活動(Sengor and Yilmaz, 1981)，接著在 11 Ma 的時候後碰撞造山運動使得地溫梯度改變，岩石圈地函小程度的部份熔融使得超鉀質岩漿小規模的噴發形成。但在 CIA 地區還未發現其他超鉀質岩，可能是因為極小程度部份熔融( $< 1 \text{ wt}\%$ )的岩漿在前次事件後被保存在岩石圈地函中，而這些岩漿只需小程度的熱擾動便可以再被熔融，因此 Saray 火山底下的熱事件可能程度相當小只造成岩石圈地函的部份熔融，產生超鉀質岩漿，而未造成其他的岩漿活動，若在碰撞後岩漿活動活躍的地區，這種體積稀少的超鉀質岩漿會被其他鈣鹼質之碰撞後岩漿所混和，而難以分辨是否具有超鉀質岩漿的存在。

表 5-4 CIA 地區埃達克岩與超鉀質岩之地球化學與年代數據

sample locality	sample name	Lat (N)	Long (E)	SiO <sub>2</sub>	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Mg#	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	La	Yb	La/Yb	Yb(n)	La/Yb(n)	Sr	Y	Sr/Y	Age (Ma)	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd
Greater Caucasus <sup>#</sup>	GR10and	42.68569	43.72585	67.0	3.12	1.38	46.8	4.91	1.95	3.32	0.54	26.2	0.80	32.7	1.62	23.5	380	10.2	37.3	Quaternary*		
	GR10bst	42.68536	43.73063	66.2	3.54	1.69	48.5	4.82	2.01	3.45	0.62	25.7	0.84	30.6	1.70	21.9	379	10.4	36.5	Quaternary*		
	GK15CL	42.67494	44.63804	61.7	5.24	3.12	54.1	4.61	1.90	4.97	0.86	26.8	1.08	24.8	2.19	17.8	584	12.9	45.1	0.13±0.12*		
S. Georgia (high Y) <sup>#</sup>	06-G-01A	41.84680	43.40602	61.2	5.17	2.48	48.7	3.95	2.29	5.35	0.77	40.1	1.25	32.1	2.54	23.0	512	13.6	37.8	0.704236	0.512792	
	06-G-01B	41.84680	43.40602	62.0	5.04	2.37	48.2	3.74	2.11	5.22	0.75	21.7	1.04	20.9	2.11	15.0	590	13.0	45.5			
	06-G-06B	41.48035	43.28369	62.7	3.64	2.10	53.3	3.65	2.20	4.68	0.58	32.6	0.88	37.0	1.78	26.6	605	9.84	61.5	0.704346	0.512829	
	06-G-09B	41.40960	43.49244	64.6	3.77	1.52	44.4	3.65	2.59	4.21	0.52	37.1	1.33	27.9	2.70	20.0	471	15.0	31.5			
S. Georgia <sup>#</sup>	06-G-12A	41.29471	43.73590	60.2	5.33	3.32	55.3	3.16	2.85	5.23	0.72	37.6	1.76	21.4	3.57	15.3	417	17.8	23.5	0.704365	0.512815	
	06-G-12B	41.29471	43.73590	60.0	5.37	3.48	56.2	3.19	2.73	5.22	0.70	36.6	1.68	21.8	3.41	15.6	425	16.8	25.3			
	06-G-10A	41.39946	43.49432	67.8	1.99	0.62	38.3	3.75	2.87	2.78	0.30	30.1	0.44	68.4	0.89	49.1	505	5.57	90.7	0.704135	0.512789	
	06-G-10B	41.39946	43.49432	67.8	1.99	0.64	39.1	3.86	2.76	2.70	0.31	28.9	0.45	64.2	0.91	46.1	512	5.69	90.0			
	06-G-10C	41.39946	43.49432	67.8	1.97	0.61	38.1	3.89	2.81	2.68	0.29	29.6	0.42	70.6	0.85	50.6	510	5.62	90.8			
	06-G-10E	41.39946	43.49432	65.7	1.91	0.63	39.3	3.56	2.91	4.20	0.29	26.6	0.43	61.9	0.87	44.4	483	5.48	88.2	3.0±0.1**	0.704295	0.512789
NW Aemania (high Y)	09ARM07	40.78267	44.54475	58.0	5.68	2.31	44.6	4.52	3.14	6.00	0.86	60.6	1.45	41.7	2.95	29.9	1156	17.1	67.6	4.4±0.1**	0.704247	0.512817
	09ARM08	40.78267	44.54475	58.8	5.57	2.54	47.4	4.47	3.14	5.57	0.85	62.0	1.44	42.9	2.93	30.8	1054	17.5	60.3			
	09ARM02-1	40.13992	44.81900	62.9	4.67	1.72	42.2	4.22	2.47	4.48	0.63	38.1	0.96	39.7	1.95	28.5	806	11.4	70.8	4.2±0.1**	0.704474	0.512807
NW Aemania (this study)	09ARM02-3	40.13992	44.81900	62.0	5.24	3.85	59.3	3.67	2.67	5.49	0.75	32.1	1.09	29.5	2.20	21.2	663	9.62	68.9			
Erzurum, E. Turkey (Middle stage, Keskin, 1998)	MK243	Gungormez fm.	58.0	6.24	3.81	54.7	3.88	1.83	6.84	0.94	27.4	1.39	19.7	2.82	14.1	565	17	33.2	ca. 7.3-6.5			
	MK237	Gungormez fm.	56.5	6.63	4.16	55.4	3.91	1.35	7.33	0.99	30.1	1.55	19.4	3.14	13.9	564	17	33.2	ca. 7.3-6.5			
	MK215	Gungormez fm.	58.5	6.27	3.41	51.9	4.14	1.67	6.82	0.94	26.3	1.38	19.1	2.80	13.7	563	16	35.2	ca. 7.3-6.5			
	MK49	Mt. Dumlu	66.3	3.85	1.89	49.3	3.88	2.85	4.04	0.61	33.9	1.36	24.9	2.76	17.9	318	16	19.9	ca. 5.5	0.704556	0.512754	
	MK93	Mt. Dumlu	63.5	4.71	2.43	50.5	3.58	2.76	4.86	0.75	38.5	1.35	28.5	2.74	20.5	443	15	29.5	ca. 5.5	0.704717	0.512722	
	MK251	Mt. Dumlu	65.1	4.56	2.17	48.5	4.21	2.35	4.82	0.70	33.1	1.04	31.8	2.11	22.8	454	14	32.4	ca. 5.5	0.704593	0.512720	
	MK265	Mt. Kargapazari	63.9	4.40	3.65	62.2	3.53	2.73	4.97	0.61	31.4	1.14	27.5	2.31	19.8	453	16	28.3	ca. 7	0.704537	0.512733	
	MK277	Mt. Kargapazari	60.6	5.22	4.08	60.8	4.11	2.18	6.10	0.80	28.1	1.33	21.1	2.70	15.2	489	16	30.6	ca. 6	0.704322	0.512781	
	MK268	Mt. Kargapazari	65.5	3.91	2.03	50.7	3.92	3.27	3.95	0.63	29.2	1.37	21.3	2.78	15.3	350	15	23.3	ca. 6	0.704524	0.512756	
	MK375	Tuzlu fm.	70.1	3.19	0.57	26.1	3.59	2.92	3.43	0.47	28.9	1.53	18.9	3.10	13.6	370	15	24.7				
	MKI54	Pasinler	66.9	3.17	1.62	50.3	4.41	2.50	3.68	0.42	30.5	0.60	50.8	1.22	36.5	522	9	58.0	ca. 6	0.704786	0.512723	
MKI32	Pasinler	64.2	4.53	1.48	39.3	4.48	2.44	4.71	0.65	39.6	1.19	33.3	2.41	23.9	699	15	46.6	ca. 4.1	0.704786	0.512786		
Sahand, NW Iran <sup>#</sup>	08-IR-Z-S-47	64.1	3.85	1.39	41.7	4.86	2.40	3.96	0.51	40.6	0.77	53.0	1.55	38.0	834	10.2	82.0	4.3±0.3*				
	08-IR-Z-S-48	66.5	3.30	1.47	46.9	4.31	1.88	4.28	0.42	21.0	0.69	30.3	1.40	21.8	512	8.17	62.6	6.5±0.1**				
	08-IR-Z-S-49	68.5	3.07	1.25	44.6	4.30	2.11	3.88	0.42	25.5	0.65	39.2	1.32	28.1	484	7.97	60.8					
	08-IR-Z-S-50	64.1	3.95	1.42	41.6	5.02	2.41	4.24	0.54	43.0	0.79	54.5	1.60	39.1	847	9.80	86.5	5.3±0.1**	0.704916	0.512725		
	08-IR-Z-S-51	65.9	3.21	1.31	44.7	4.44	1.76	4.18	0.44	27.3	0.65	41.7	1.33	29.9	497	8.04	61.9	4.4±0.6*				
	08-IR-Z-S-53	66.5	2.98	1.21	44.5	4.29	2.18	3.72	0.40	28.5	0.78	36.6	1.58	26.2	447	8.80	50.8					
	08-IR-Z-S-54	67.5	2.99	1.23	44.8	4.35	2.19	3.76	0.40	27.7	0.74	37.4	1.50	26.8	448	8.60	52.1	4.3±0.4*				
	08-IR-Z-S-55	67.4	2.95	0.87	36.9	4.35	2.26	3.38	0.41	29.0	0.74	39.2	1.50	28.1	436	8.70	50.1					
	08-IR-Z-S-56	62.9	4.22	1.91	47.3	4.66	2.20	4.76	0.56	34.4	0.74	46.3	1.50	33.2	784	9.76	80.3	5.8±0.1**	0.705012	0.512698		
	08-IR-Z-S-57	64.1	3.11	2.07	56.8	4.99	1.77	5.12	0.44	32.5	0.60	54.2	1.22	38.9	897	7.20	125					
	08-IR-Z-S-58	64.6	3.17	1.99	55.4	4.92	1.94	4.90	0.44	31.2	0.59	53.0	1.19	38.0	884	7.48	118					
	08-IR-Z-S-59	62.0	3.11	1.90	54.8	4.86	1.66	6.78	0.43	32.9	0.59	55.8	1.20	40.0	903	7.20	125	6.0±0.6*				
	Sabalan, NW Iran <sup>#</sup>	08-IR-Z-S-82	64.2	2.94	1.24	45.5	4.75	3.38	2.96	0.51	42.4	0.71	60.2	1.43	43.2	850	8.33	102	0.38±0.1**		0.512767	
08-IR-Z-S-83		65.9	2.93	1.19	44.6	4.16	3.89	2.92	0.52	43.1	0.68	63.3	1.38	45.4	837	8.55	97.9					
08-IR-Z-S-84		67.5	2.65	1.04	43.7	4.57	3.63	2.71	0.45	39.7	0.65	60.9	1.32	43.7	781	7.99	97.8					
08-IR-Z-S-85		67.7	2.70	1.05	43.5	4.63	3.47	2.81	0.44	40.4	0.65	62.2	1.32	44.6	759	8.16	93.1					
Saray, NW Iran <sup>#</sup>	08-IR-Z-S-61	45.4	9.86	6.78	57.7	1.21	7.09	11.2	1.14	93.2	3.19	29.2	6.48	20.9	1955	51.2	38.2					
	08-IR-Z-S-62	45.3	9.45	8.17	63.1	1.96	6.07	12.0	1.12	87.4	2.64	33.1	5.35	23.8	1151	41.0	28.1					
	08-IR-Z-S-63	46.3	10.10	6.44	55.8	1.54	6.61	11.3	1.14	94.7	3.28	28.8	6.66	20.7	1614	51.7	31.2					
	08-IR-Z-S-64	46.8	9.32	7.13	60.3	2.36	4.20	11.9	1.20	55.9	2.12	26.4	4.30	18.9	1066	32.4	32.9	11.0±0.1*	0.707793	0.512469		
	08-IR-Z-S-65	43.9	9.17	8.86	65.7	0.83	5.77	13.1	1.12	72.6	2.02	36.0	4.10	25.8	1098	33.5	32.8					
	08-IR-Z-S-67	49.1	8.02	5.98	59.6	2.00	5.19	9.96	1.16	37.9	1.94	19.6	3.93	14.1	1006	25.5	39.4					
	08-IR-Z-S-68	48.1	7.82	6.07	60.6	2.31	5.91	9.49	1.14	35.9	1.93	18.5	3.92	13.3	939	25.0	37.5	11.0±0.1*				
	08-IR-Z-S-69	46.4	8.87	7.48	62.6	1.32	6.46	10.2	1.28	56.2	2.15	26.2	4.35	18.8	1242	31.6	39.4	10.8±0.1*	0.707784	0.512471		
	08-IR-Z-S-70	45.0	9.45	6.51	57.7	4.42	3.07	10.9	1.17	79.6	2.77	28.8	5.61	20.6	1774	42.9	41.4					
	08-IR-Z-S-71	44.6	9.92	7.57	60.2	2.25	5.37	12.6	1.16	72.2	2.25	32.1	4.56	23.0	1185	36.2	32.7					
	08-IR-Z-S-72																					

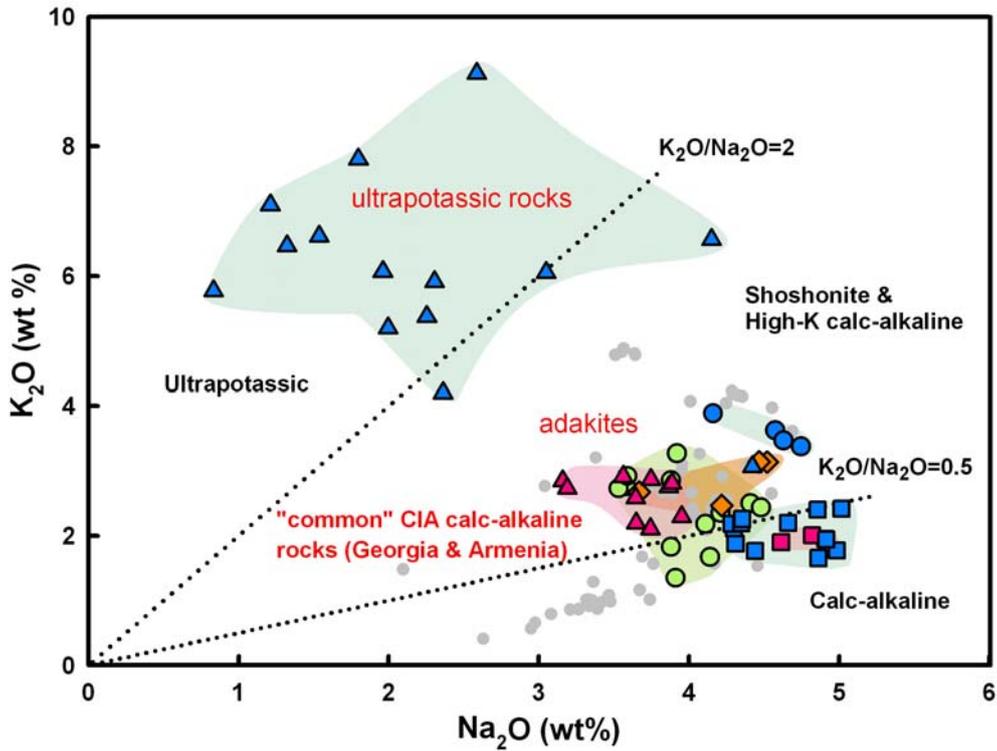


圖 5-5 CIA 埃達克岩與超鉀質岩地球化學分析(a)  $K_2O$  vs.  $SiO_2$ ，埃達克岩的  $SiO_2$  大於 56 wt%，同樣屬於鈣鹼序列，超高鉀值的 Saray 為超鉀質岩。

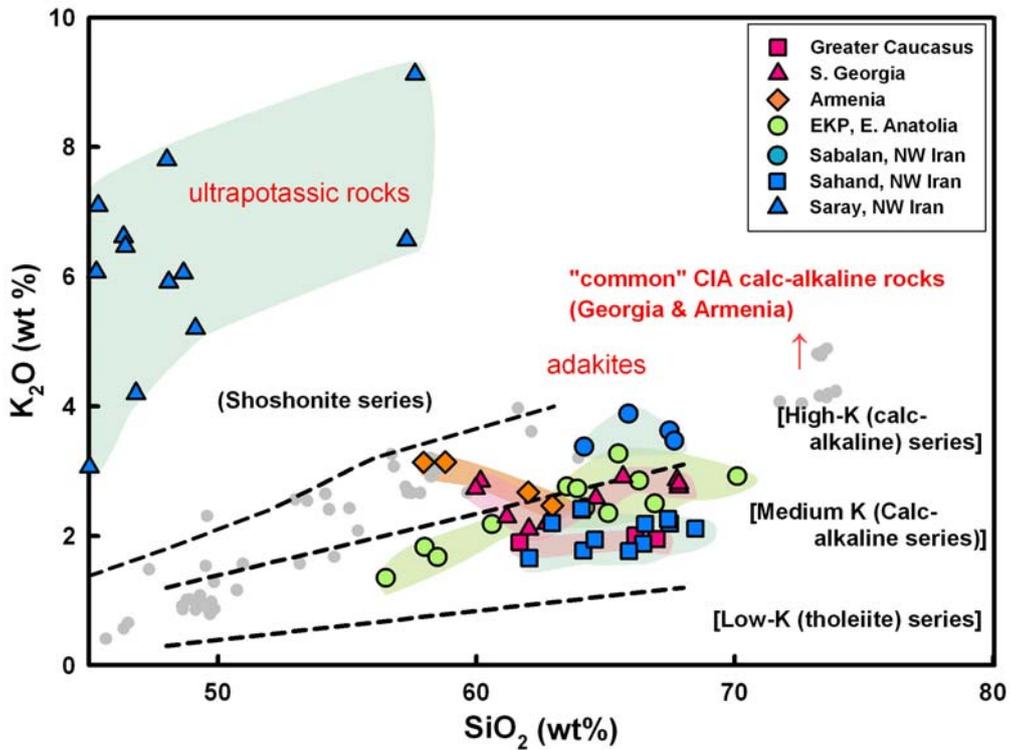


圖 5-6 CIA 埃達克岩與超鉀質岩地球化學分析(b)  $K_2O$  vs.  $Na_2O$ ，圖中可見超鉀質岩的  $K_2O/Na_2O > 2$ 。

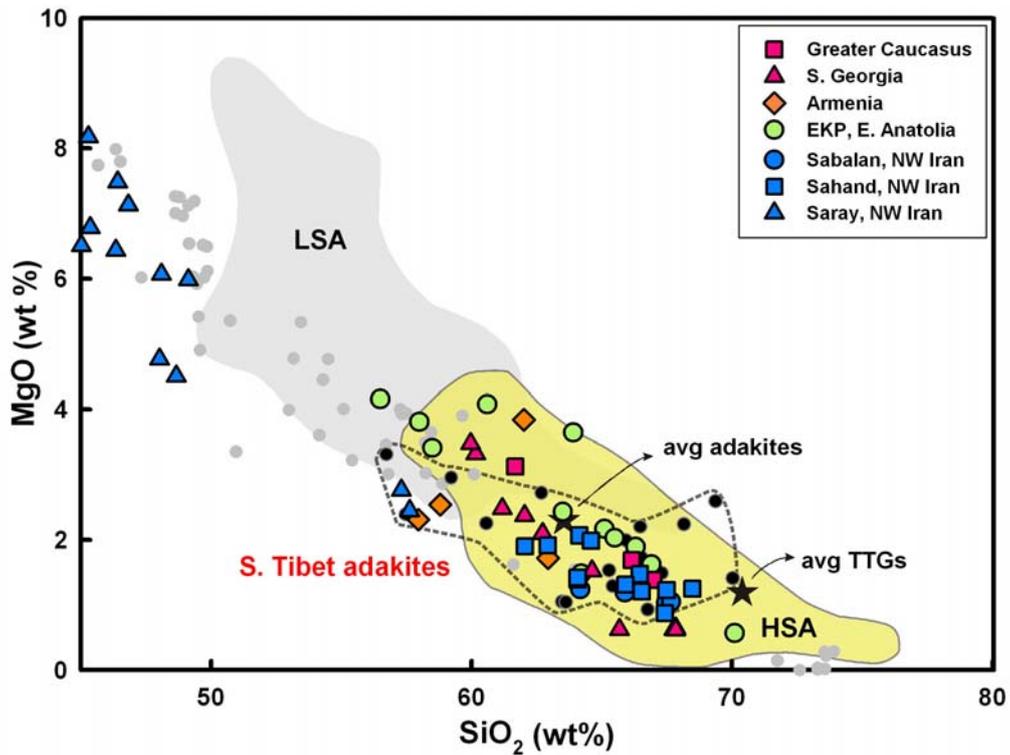


圖 5-7 CIA 埃達克岩與超鉀質岩地球化學分析(c) MgO vs. SiO<sub>2</sub>，超鉀質岩之 MgO > 3 wt %，埃達克岩則屬於 High Silica Adakites (Martin et al., 2005)，且與西藏南部埃達克岩具有相似的分佈範圍。

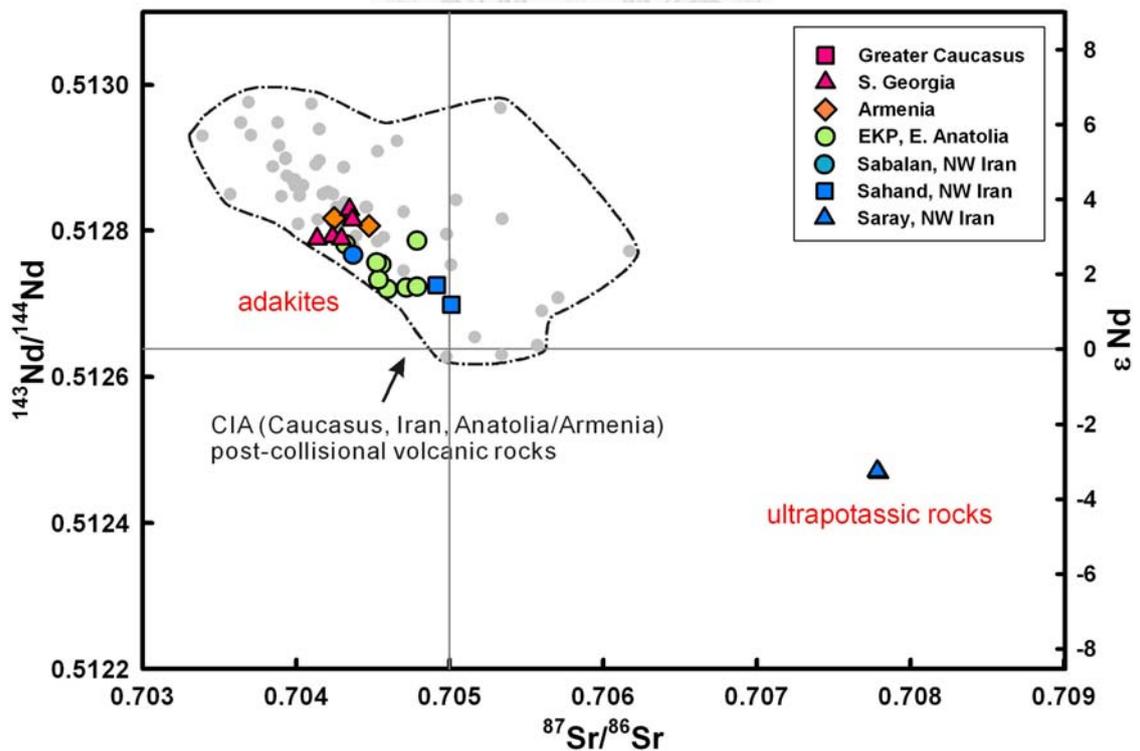


圖 5-8 CIA 超鉀質岩與埃達克岩之鋇鉍同位素組成

## 5.2.2 埃達克岩

埃達克岩的定義為全岩地球化學  $\text{SiO}_2 > 56\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$ 、 $\text{MgO} < 3\%$  (很少  $> 6\%$ )、低重稀土含量(如  $\text{Yb} \leq 1.9 \text{ ppm}$ )和  $\text{Y} (\leq 18 \text{ ppm})$ 、高  $\text{Sr}$  (很少低於  $400 \text{ ppm}$ )、高的  $\text{Sr}/\text{Y}$  和  $\text{La}/\text{Yb}$  比值等(Defant and Drummond, 1990)，在 CIA 地區鈣鹼質火山岩中有部份為埃達克岩，其中土耳其 Kars 南方的 Dumlu 區域取自前人文獻，原作者是將該期低  $\text{Y}$  含量的地球化學特性解釋為此岩漿在岩漿庫的結晶分化作用受到石榴子石的影響所造成，但該地區同期的火山岩皆具有  $\text{SiO}_2$  含量皆大於  $56 \text{ wt}\%$  的特性，且地球化學特性亦符合埃達克岩的定義，雖然高  $\text{Sr}/\text{Y}$  比是結晶分化作用受石榴子石影響或埃達克岩形成的作用所影響很難去做區分(Moyen, 2009)，在本研究中我們將他當作埃達克岩來做討論，年代約為  $6\text{-}5 \text{ Ma}$  (Keskin et al., 1998)；其餘標本的定年結果見 3.3 節亞美尼亞定年結果(09ARM02-1:  $4.2 \text{ Ma}$ 、09ARM07:  $4.4 \text{ Ma}$ 、09ARM08:  $4.2 \text{ Ma}$ )以及 4.2 節 CIA 地區埃達克岩定年結果，綜合來看，喬治亞南部約為  $3.0 \text{ Ma}$ ；大高加索山脈為  $< 1 \text{ Ma}$ ；伊朗西北部的 Sahand 火山為  $6\text{-}4 \text{ Ma}$ 、Sabalan 火山為  $0.3 \text{ Ma}$ 。

然而，不同地體構造形成的埃達克岩具有些微不同的地球化學特徵；早期埃達克岩的定義由 Defant 與 Drummond (1990)所提出，為高二氧化矽含量的埃達克岩(High Silica Adakites, HSA)，而非低二氧化矽含量埃達克岩(LSA)，見圖 5-7 (Martin et al., 2005)。此外，埃達克岩最普遍的地球化學特徵：高  $\text{Sr}/\text{Y}$  比、低  $\text{Y}$  含量可在圖 5-9 (After Wang et al., 2008)中清楚看見，CIA 地區埃達克岩的  $\text{Sr}/\text{Y}$  比介於  $20\text{-}120$  之間，屬於中的  $\text{Sr}/\text{Y}$  比；從圖中可以看出埃達克岩與一般島弧岩漿分布範圍的不同，而埃達克岩的範圍與中洋脊玄武岩部份熔融留下榴輝岩為耐熔殘餘體的微量元素變化曲線 A (Stern and Kilian, 1996)相符，曲線 B 則是結晶分化所造成的微量元素變化(Rapp et al., 1999)。從稀土元素分布圖與整體不相容元素圖(圖 5-10 a、b)，可看到埃達克岩之重稀土元素含量較 CIA 地區其他碰撞後火山岩來得低，且同樣具有大離子半徑元素的虧損(TNT depletion)。

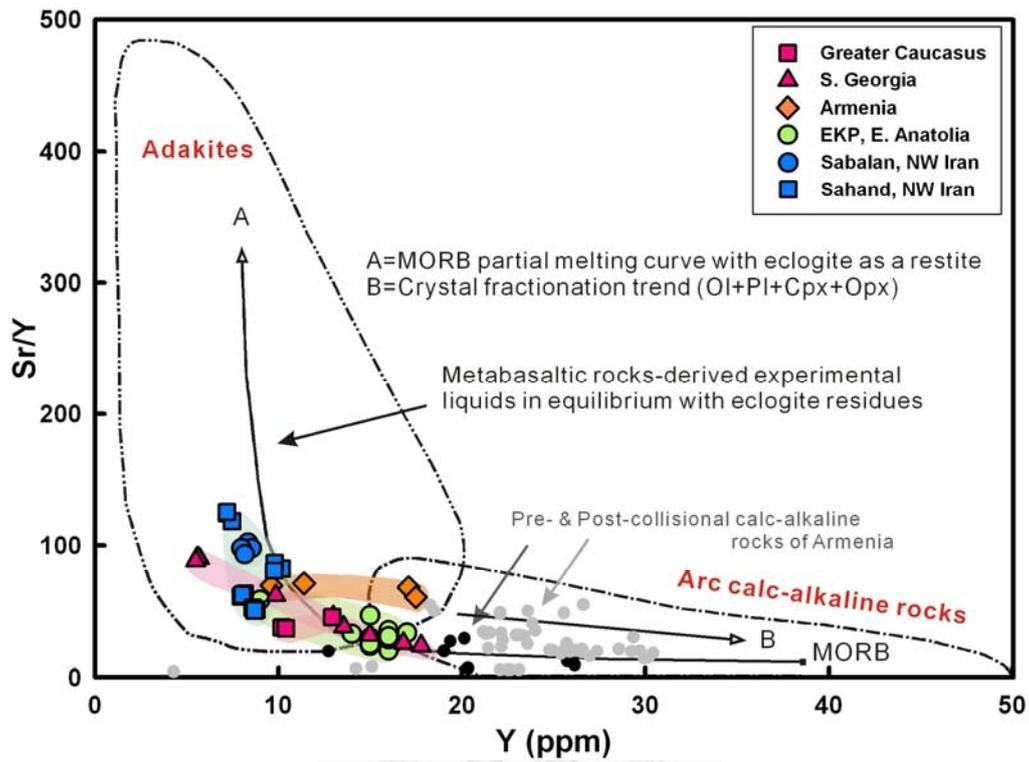


圖 5-9 CIA 埃達克岩之 Sr/Y vs. Y，埃達克岩具有高 Sr/Y、低 Y 的地球化學特徵，島弧岩漿則無。

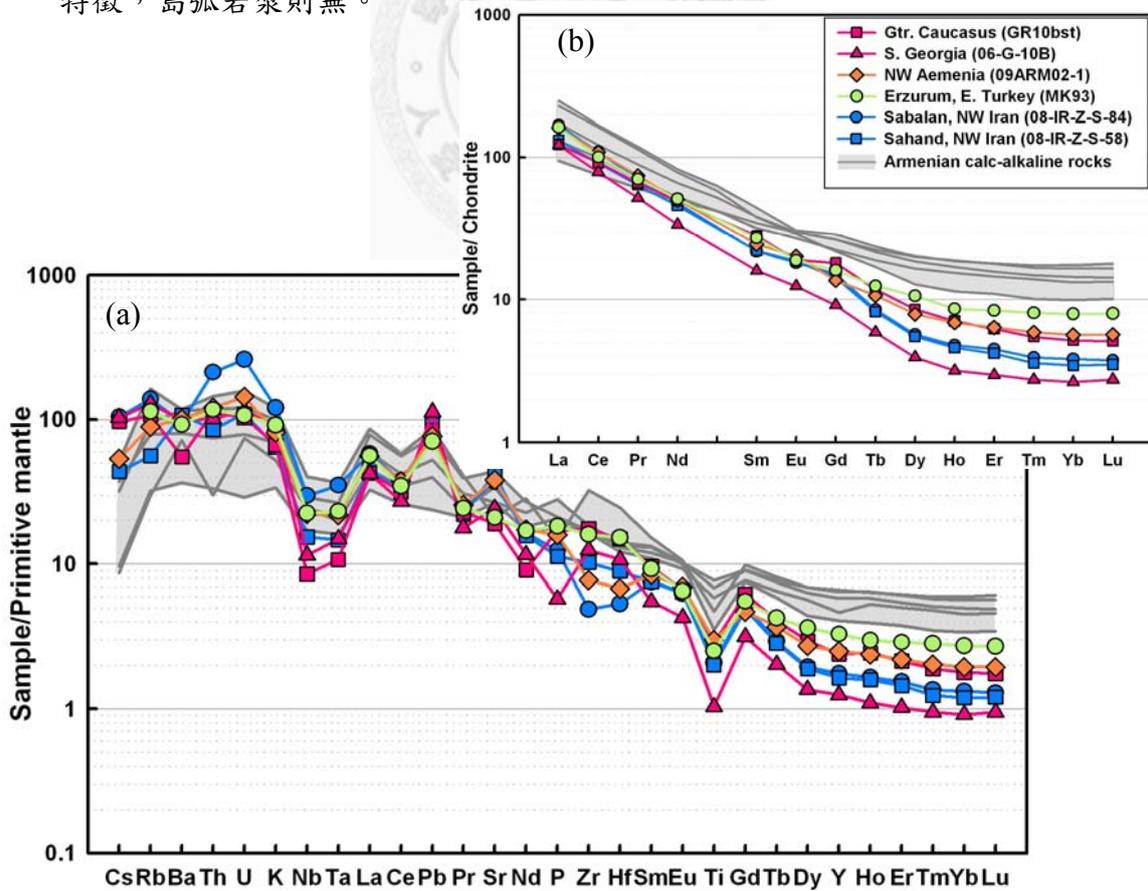


圖 5-10 CIA 埃達克岩之(a)整體不相容元素圖與(b)稀土元素分布圖

綜合以上 CIA 埃達克岩的地球化學特性以及 CIA 地區碰撞後岩漿活動的地體構造，探討 CIA 埃達克岩成因，埃達克岩的成因有許多種不同的模式，但最重要的作用就是岩漿殘餘具有石榴子石相，使得其重稀土元素虧損並造成 Sr 元素的富集，這可能來自兩種主要的地體構造：(1) 海洋岩石圈本身產生部份熔融；(2) 增厚、變質成榴輝岩(eclogite)的基性下地殼重熔(Defant and Drummond, 1990; Chung et al., 2003; Moyen, 2009)，但若為海洋岩石圈重熔環境下產生的埃達克岩很少與玄武岩或玄武安山岩共同出現(Castillo, 2006)，然而 CIA 地區這些岩性皆有出現。此外，從圖 5-7 中 CIA 埃達克岩與西藏南部埃達克岩的比較來看，他們的分布範圍非常相似，西藏南部的埃達克岩成因為下地殼重熔融形成(Chung et al., 2003)。CIA 埃達克岩與其他鈣鹼性岩石具有相似的鋁-鈦同位素( $\epsilon\text{Nd} = +3 - +4$ ，圖 5-8)，若是海洋岩石圈本身重熔會具有更高的  $\epsilon\text{Nd}$  ( $\sim +10$ )；若是海洋岩石圈重熔並與地函楔發生作用，則其鎂質(Mg#)會提高(Wang et al., 2008)，皆與 CIA 地區的埃達克岩不符。從 Sr/Y 比來看(圖 5-9)，埃達克岩的比值皆小於 120，與 Moyen (2009)的研究中指出下地殼重熔所造成的 Sr/Y 比約為 50-100 大致吻合，若是海洋地殼重熔則此比值會提高更多。接著從 CIA 地區現在的地體構造震測剖面來看(圖 5-11a)，EAAC 地區的地殼約 45 公里厚，岩石圈地函相當薄，向北進入 PONTIDE 以及 IRAN 地塊則有 50 公里厚的地殼以及 20 公里厚以上的岩石圈地函(Sengor et al., 2003; Zor, 2008)，伊朗西北部雖然沒有震測剖面的結果，但在伊朗中部的震測結果(圖 5-11b)顯示在 Sanandaj-Sirjan 變質帶 (SSZ)以及 Urumieh-Dokhtar 島弧 (UDMA)下的地殼厚度為 50 公里左右，並有較厚的岩石圈地函(Paul et al., 2010)，這些都指出 CIA 地區已不再是隱沒系統，且經過了陸-陸碰撞、地殼增厚而達到目前的地殼厚度。

最後從埃達克岩的分布位置來看(圖 5-12)，目前發現有埃達克岩的位置都在 PONTIDE、IRAN 地塊以及歐亞大陸板塊上，其地殼厚度皆在 45 公里以上，可能曾達到 50 公里厚，地殼的增厚除了陸-陸碰撞的擠壓縮短外，也可能是因為碰撞前岩漿活動上升的過程中，在地殼底部留下基性的底鍍層(mafic underplates)所增厚，

而這也是 CIA 埃達克岩所必須具備的條件，由於 CIA 埃達克岩與 CIA 地區其他碰撞後岩漿以及亞美尼亞碰撞前火成岩具有相似的鋁-鈹同位素組成(圖 5-8)，說明了他們具有相仿的岩漿來源，前期活動留下的基性底鍍層在地殼增厚到 50 公里厚變質為榴輝岩相，於碰撞後岩漿活動時重熔，形成埃達克質岩漿。

### 5.2.3 時空分布與岩石成因

由於超鉀質岩與埃達克岩分別指示不同的岩石圈結構與歷史，因此從他們分布的位置與年代，可以幫助重建當時的地體構造，圖 5-12 為 CIA 超鉀質岩與埃達克岩之時空分布。伊朗西北部的碰撞後岩漿活動沒有像土耳其等地分布廣泛，但主要的三座火山：Saray 火山為~11 Ma 之超鉀質岩，Sahand 火山與 Sabalan 火山各為 6-4 Ma 與 0.4 Ma 之埃達克岩，幾乎沒有 CIA 地區普遍出現的碰撞後鈣鹼性火山岩；但在 Kars 南部(6-5 Ma)、亞美尼亞(~4 Ma)以及喬治亞(~3 Ma)的埃達克岩分布位置則仍有其餘鈣鹼性火山岩存在，若從他們形成先後時間來看的話，亞美尼亞與喬治亞南部的埃達克岩年代較一般的碰撞後鈣鹼性火山岩早，此兩國內一般的碰撞後鈣鹼性火山岩年代均小於 2 Ma；Kars 南部的露頭在埃達克岩前有 CIA 地區發現最早的碰撞後火山岩(11.1 Ma、9.94 Ma)，之後也有一般的碰撞後鈣鹼性火山岩(5.73 – 2.72 Ma) (Keskin et al., 2006)，但 Kars 南部最早的碰撞後岩漿活動成因被認為是該處底下的岩石圈地函發生小程度的拆層作用(partial delamination)，處於一局部張裂的環境，軟流圈上湧所造成。若 Kars 南部最後期的岩漿活動以及亞美尼亞、喬治亞等地普遍出現的碰撞後岩漿活動是導因於其他地體構造改變(於下節討論)，而與最早期的岩漿活動的成因不同，那麼可以說埃達克岩的形成早於這些地方的碰撞後岩漿活動。接著從埃達克岩年代分布圖中我們可以發現埃達克岩於 6 Ma 左右開始形成後，具有一個向東北方變年輕的趨勢：土耳其-亞美尼亞-喬治亞(6 Ma - 4 Ma - 3 Ma - <1 Ma)以及伊朗西北部(6-4 Ma – 0.4 Ma)。

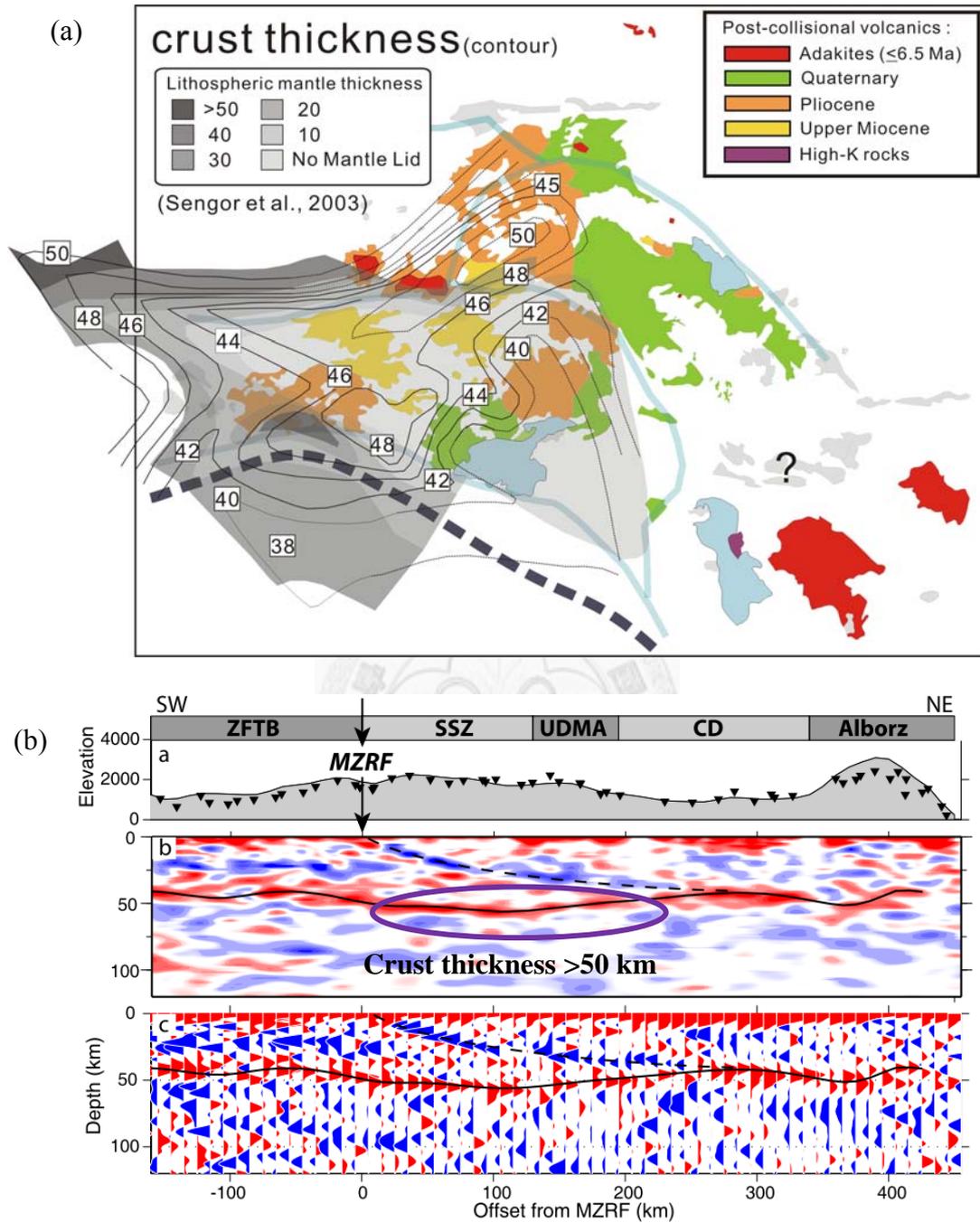


圖 5-11 CIA 地區地殼厚度圖(a)土耳其地區地殼與岩石圈地函厚度 (modified from Sengor et al., 2003) ; (b) 伊朗中部地殼厚度剖面圖(Paul et al., 2010) , 可看到部份地區地殼厚度大於 50 公里厚, 變質成榴輝岩相後若發生部份熔融則會形成埃達克質岩漿。

PONTIDE 地塊以及 IRAN 地塊由於其岩石圈地函存在且其下具有碰撞前岩漿活動所增生的基性底鍍層，雖然 EAAC 下的海洋地殼已開始退後(slab roll-back, 11 Ma, Keskin, 2003)，阿拉伯板塊仍持續向北移動，失去了海洋岩石圈隱沒的拉力之後，此兩地塊會持續增厚，這使得增厚的底鍍層在大於 50 公里後變質為榴輝岩相，密度大於岩石圈底下的軟流圈地函(Chung et al., 2003)，而海洋岩石圈向南退後空出的空間造成熱的軟流圈上湧，加熱 PONTIDE 地塊與 IRAN 地塊的岩石圈，熱量向北傳遞、在約 6 Ma 之後向東北方向逐漸發生熱侵蝕事件(thermal erosion, Chung et al., 1994)或小程度的拆層作用(partial delamination)，造成榴輝岩相的下部地殼發生部份熔融(Kay and Kay, 2002)，產生埃達克質的岩漿，在拆層之後，地殼厚度小於 50 公里，因此埃達克質岩漿結束，接著一般的碰撞後鈣鹼性岩漿才因其其他熱源機制而形成。

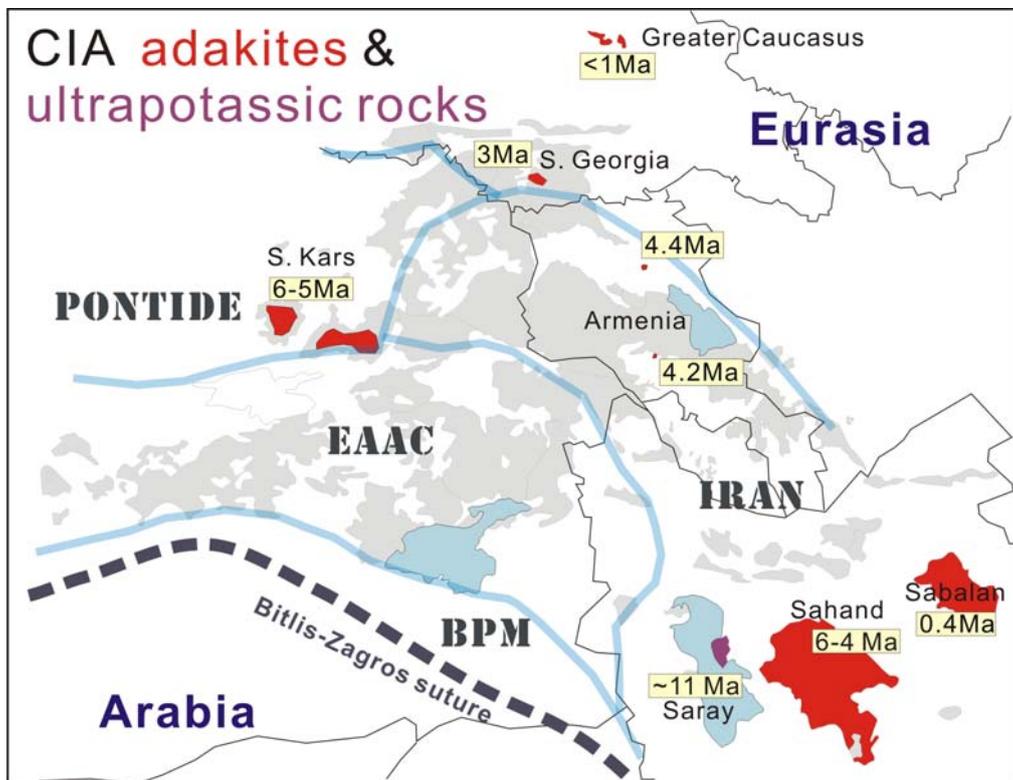


圖 5-12 CIA 超鉀質岩與埃達克岩之定年結果與時空分布

若將埃達克岩與其餘鈣鹼性火成岩的出現歸類為同一次事件所造成，那麼可能是海洋岩石圈在 11 Ma 開始向後退卻(slab roll-back)，軟流圈上湧、碰撞後鈣鹼性岩漿形成、噴發。在退卻至大約 6 Ma 之後，海洋岩石圈在不深的地方開始發生拆解(shallow slab break-off, Van de Zedde and Wortel, 2001)，造成大規模的岩漿活動，這熱足以使軟流圈地函以及下部地殼產生部份熔融(Lee et al., 2009)，造出鈣鹼質岩漿以及埃達克岩岩漿。

### 5.3 CIA 地區岩漿活動之時空變化

CIA 地區碰撞後火山岩約於 11 Ma 開始形成，在 6 Ma 之後開始廣泛分布，2Ma 以來則是在 Van Lake 西北方有一系列東北-西南向的活火山，繼續向北則是在亞美尼亞境內亦存在許多活火山，伊朗西北部也有幾座活火山的存在，顯示這裡的碰撞後岩漿活動仍相當活躍。過去的研究中，Yilmaz 等人(1987)認為 CIA 地區碰撞後岩漿活動有向東移動的趨勢，Keskin 等人(2003)則指出碰撞後火成岩於 11 Ma 從 Kars 開始形成，之後有向南移動的趨勢(圖 1-3)，但這兩研究中皆未將亞美尼亞地區廣泛分布的第四紀火山加入考慮，因此在本研究中，將亞美尼亞的分析結果、喬治亞以及伊朗西北部的第四紀火山放入綜合作討論。

為了比對 CIA 地區碰撞後火成岩時空與空間上的關係，我們依據噴發年代、位置(圖 1-3)以及廣泛程度(Yilmaz et al., 1987; Pearce et al., 1990; Keskin, 2003)等，將 CIA 地區碰撞後火成岩分為四個階段： $\sim 11$ 、9-6、6-2、 $< 2$  Ma，如圖 5-13，埃達克岩以及超鉀質岩則分別以紅色及紫色表示。CIA 地區碰撞後岩漿活動大約於 11 Ma 時在 Kars 南部(Keskin et al., 1998)、亞美尼亞的 Kabakh canyon (Karapetian et al., 2001)以及伊朗西北部的 Saray 火山有活動記錄，其中 Saray 火山為超鉀質岩；9-6 Ma 期間，火山活動向 Kars 南方的地區開始廣泛分布，同時在伊朗西北部的 Sahand 火山以及 Kars 南部同一露頭剖面中有埃達克岩(6-4 Ma)的發現；6-2 Ma

期間碰撞後火山活動分布更為廣泛，其分布範圍向其四周擴散，但可以發現幾乎沒向西北側發展，埃達克岩則於~4 Ma 時在亞美尼亞、~3 Ma 時在喬治亞南部有發現；接著 2 Ma 以來，可以發現火山活動向東推移，安納托利亞地區有一東北-西南向的火山列並且延伸進入亞美尼亞、喬治亞南部廣泛分布，在伊朗西北部的 Sabalan 有 0.4 Ma 形成的埃達克岩。

超鉀質岩與埃達克岩的岩石成因與地球動力於 5.2.3 節討論過，因此此處僅討論一般碰撞後鈣鹼性岩漿活動的時空變化，從圖 5-13 中可以看到 CIA 碰撞後岩漿活動一開始有向南的趨勢，但接著是向四周廣泛的分布，最後則是向東發展，以下討論為何碰撞後火山岩會有這樣子時空上的變化。

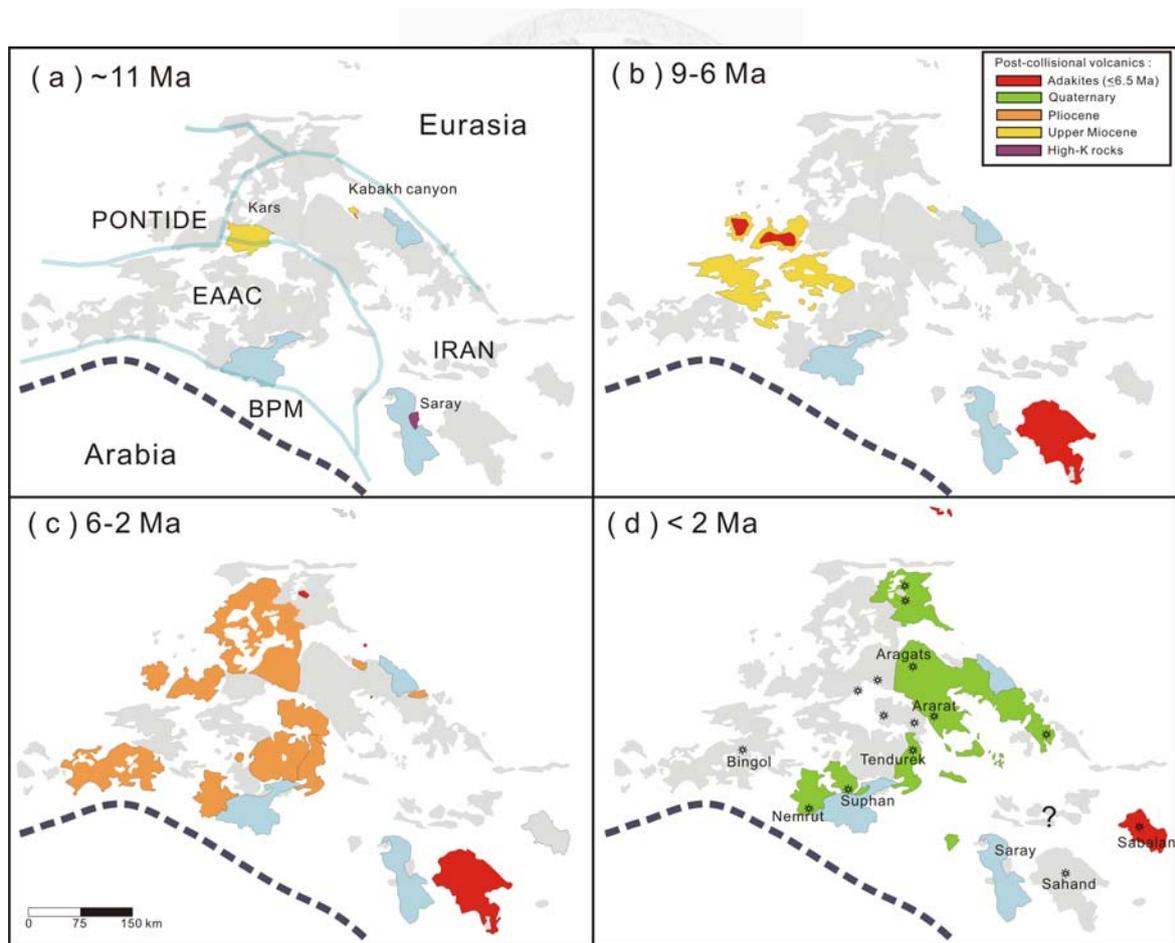


圖 5-13 CIA 地區碰撞後火山岩之時空變化

Keskin 等人(2003)的文章中將土耳其東部(EAAC)所見的岩漿活動向南發展的現象解釋為 EAAC 下海洋岩石圈向後退卻(slab roll-back)、北邊 PONTIDE 及 IRAN 地塊下溫暖的軟流圈跟著向南流入造成岩漿活動向南移，之後海洋岩石圈發生拆解作用(slab break-off)，但若看 CIA 碰撞後火山岩從 11 Ma 到現在整體的變化，更明顯可見的趨勢其實是一個向南再向東移動的現象，且西部的火山活動似乎已經停止，此向東的趨勢與 Yilmaz 等人(1987)的觀察相似，但該文獻中並未探討其成因，因此此處將以 Keskin (2003)與 Sengor 等人(2003)的模型為基礎，綜合這兩種觀察來做更詳細的討論。

我們認為碰撞後岩漿活動之所以會有向東移動的趨勢可能導因於阿拉伯板塊與歐亞大陸板塊間的異時斜向碰撞(Chiu et al., 2010)，一般來說陸-陸碰撞在自然界很難是兩陸塊平行的聚合在一起，而是會有一端先碰到、接著才陸續縫合，如台灣便是一正在進行縫合的斜碰撞系統(Teng, 1990)；先碰撞的北台灣已進入拉張崩毀的階段，台灣中南部則仍在擠壓的環境中，因此形成台灣北部火山活動帶(Wang et al., 1999)。陸-陸斜碰撞會導致海洋岩石圈拆解(slab break-off)從張力最大的一端或從海洋岩石圈的那一端開始發生(van Hunen and Allen, 2011)；地中海北側隱沒作用的研究中亦指出隱沒的海洋岩石圈以撕裂的方式沿著大陸岩石圈邊緣向另一側拆解，軟流圈熱流便隨之流動，且向下的拉力使得隱沒的海洋岩石圈會斷離成許多塊(Wortel and Spakman, 2000)，如圖 5-14b 之虛線處，圖中之星號處為應力集中、地震活躍處。

阿拉伯與歐亞大陸兩陸塊間的異時斜向碰撞，導致 CIA 地區可能是最先發生碰撞的地方，之後沿著 Zagros 縫合帶向東南方逐漸縫合，使得阿拉伯板塊呈現一逆時針方向的旋轉(Reilinger et al., 2006)，因此 CIA 地區除了陸-陸碰撞增厚外還多了一些張力作用，使得底下海洋岩石圈開始拆解，且從西方開始逐漸向東。Hunen 與 Allen (2011)認為海洋岩石圈之水平拆解速率主要是由海洋岩石圈的年代所決

定，90 Myr 的拆解速率約為 125 mm/yr、35 Myr 的則可達到 800 mm/yr，但老於 90 Myr 的海洋岩石圈性質則與 90 Myr 的相似，阿拉伯板塊與伊朗地塊/歐亞大陸板塊間新特提斯洋大約於二疊紀晚期開始張裂(Sengor et al., 1988)，代表最晚隱沒至 IRAN 地塊下的海洋岩石圈年代(約 200 Myr)，CIA 地區碰撞後火山岩分布東西方向上寬約五百公里，因此若海洋岩石圈的拆解是由西向東、以 125 mm/yr 的速率來做計算的話，大約需要 4 百萬年的時間，若 CIA 地區海洋岩石圈從 11 Ma 開始向南退後，6 Ma 左右時(開始廣泛分布的年代)西 CIA 地區處之海洋岩石圈開始撕裂、拆解(圖 5-14a)，導致軟流圈上湧，產生大規模岩漿活動，接著持續向東拆解(圖 5-14b)；2 Ma 以來拆解至東 CIA 地區，造成該處地震活動頻繁(圖 5-15)，如圖 4-5 地震分布圖中 45°E、35-40°N 處之東北-西南向地震分布。綜合以上推論，可以知道岩漿活動隨著海洋岩石圈拆解、軟流圈之熱流移動而由西向東發展的結果。

從 CIA 地區之斷層攝影影像來看，如圖 5-16 中之 A-A' 剖面(Maggi and Priestley, 2005)，可見東 CIA 地區仍有高速的物質存在底下，可能為尚未斷離的海洋岩石圈或厚的岩石圈；或是從新特提斯洋隱沒板塊研究的斷層攝影影像來看，如圖 5-17 中 55°E 的剖面仍可見未斷離完的海洋岩石圈，35°E 的剖面中則可見海洋岩石圈完全拆解完畢、下沉(Hafkenscheid et al., 2006)，都似乎指示了海洋岩石圈的拆解是從 CIA 西部開始、接著向東部發展的現象。此外，CIA 西部火山活動在 2 Ma 後停止的原因，推測是受到該地區岩石圈增厚的抑制，增厚的機制除了和碰撞相關的構造增厚之外，可能還包含新的岩石圈地函形成，可能是因為早期碰撞後岩漿活動的同時，熔融殘餘殘留在軟流圈頂部，形成底鍍層，也就是新的岩石圈地函形成，這些岩漿殘餘的物質具有難熔的特性，增厚岩石圈的同時亦減弱了岩漿活動(Keskin, 2007)，因此在先發生海洋岩石圈拆解、岩漿活動的 CIA 西部火山活動便先停止。

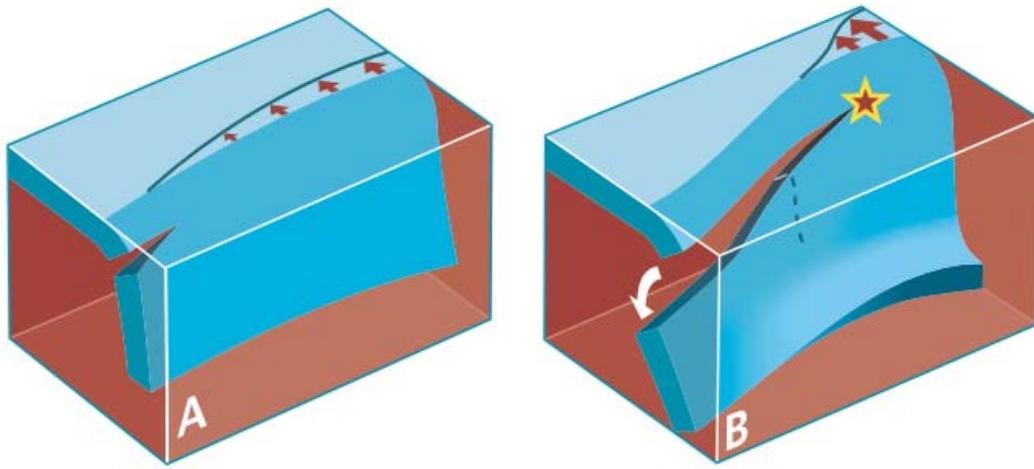


圖 5-14 隱沒之海洋岩石圈拆解模式 (Wortel and Spakman, 2000)

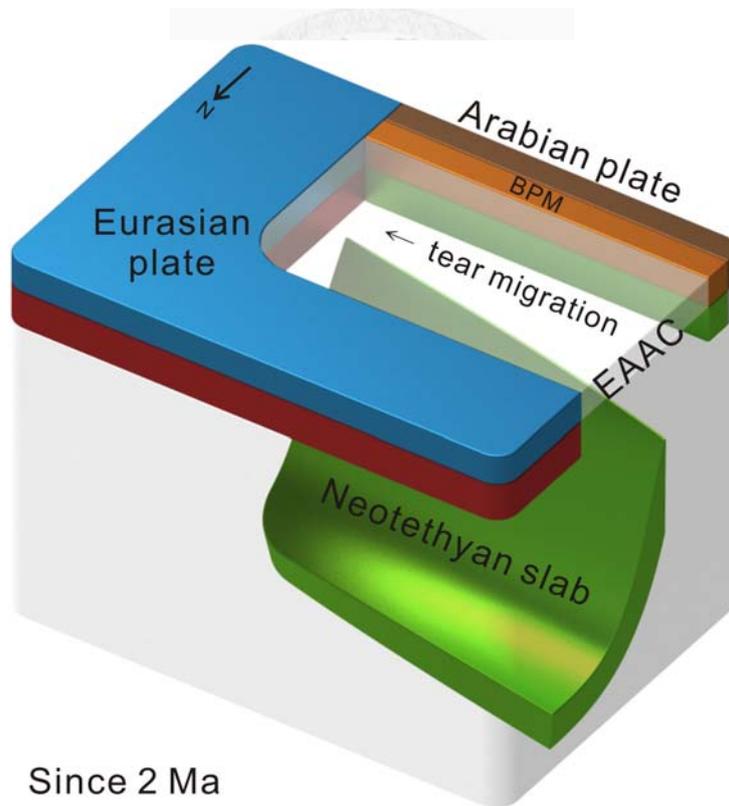


圖 5-15 CIA 地區兩百萬年來之地體構造模型(modified from Wortel and Spakman, 2000)，海洋岩石圈完全拆解，並可見 CIA 地區的地體構造。

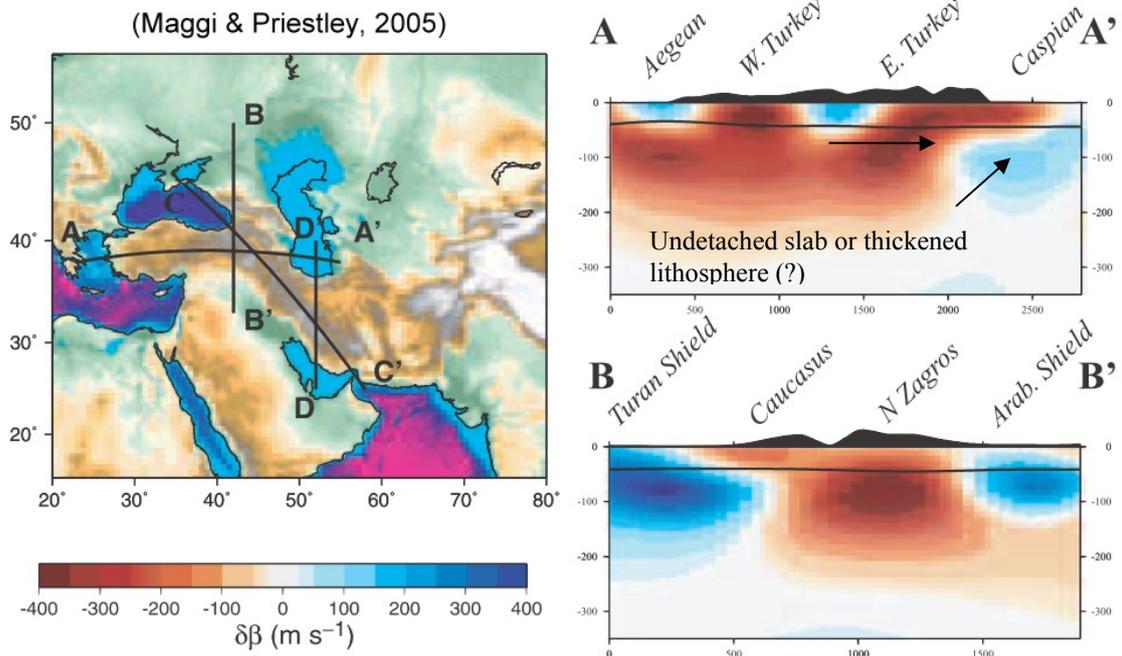


圖 5-16 CIA 地區斷層攝影影像 (Maggi and Priestley, 2005)

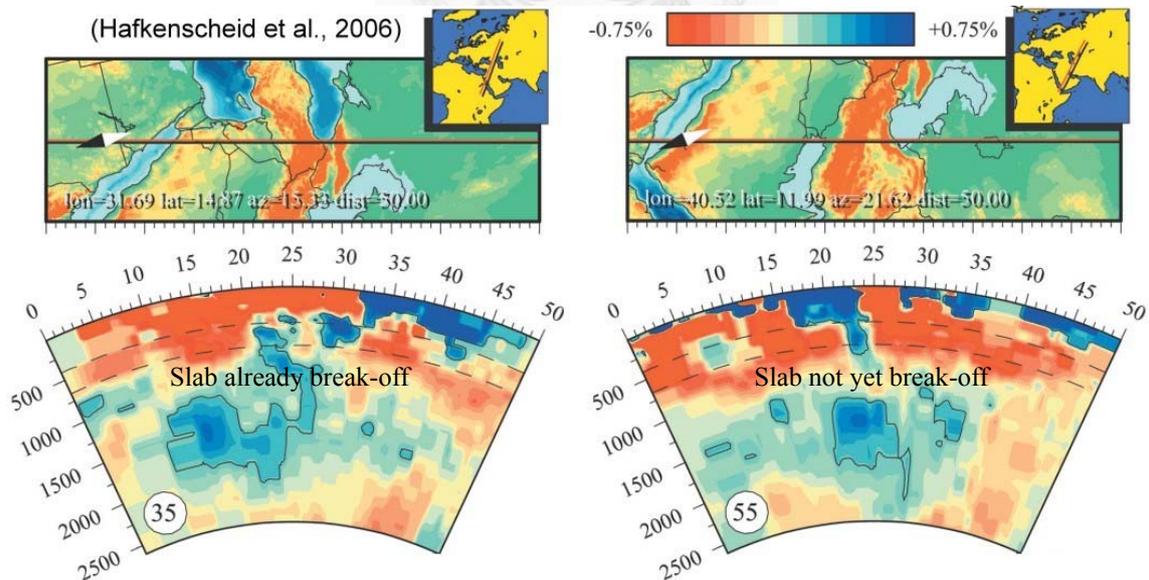


圖 5-17 CIA 地區斷層攝影影像 (Hafkenscheid et al., 2006)

## 5.4 CIA 岩石成因與地體構造演化模型

地體構造改變會使得岩石成因的地球動力學改變，岩漿的地球化學組成記錄了不同的岩石成因，因此可以推測形成時的地體構造。本節綜合 CIA 地區的地球化學組成與定年結果，嘗試架構此地區碰撞前至碰撞後岩漿活動期間地體構造模型(圖 5-18)。然而由於 CIA 地區曾屬於土耳其式造山，部份地區為增積岩體所構成(如土耳其東部 EAAC)，部份地區為較傳統的陸-陸碰撞(如伊朗地區)，本文針對這兩種不同的碰撞模式作南北向剖面，探討地體構造的演變；然而由於阿拉伯與歐亞大陸板塊之碰撞為一斜碰撞的形式，造成增積岩體下之海洋岩石圈退卻具有東西方向上的差異，為了表達此差異，切過 EAAC 處之剖面我們以西邊的為 profile 1、東邊的為 profile 2，更東邊切過伊朗地區的則是 profile 3，前兩者以 Keskin (2003) 之模型為基礎，深入探討 11 Ma 來碰撞後岩漿活動地體構造演變，在 11 Ma 前則因兩者之地體構造演變相似，且非本論文探討之重點，僅以切過亞美尼亞境內的 profile 2 表示；profile 3 以 Agard 等人(2005)之模型為基礎，探討伊朗西北部超鉀質岩與埃達克岩形成之地體構造，剖面之深度與地表寬度的比例為一比一。

剖面中由於 CIA 地區之 IRAN 地塊/PONTIDE 地塊與 BPM 在始新世前便分別和歐亞大陸板塊與阿拉伯板塊縫合，而本文的地體構造演化模型著重在 11 Ma 以來的碰撞後岩漿活動，並從碰撞前岩漿活動末期開始(漸新世)討論；因此，便不對那些邊界多做描述。

### 5.4.1 碰撞前岩漿活動

阿拉伯板塊前方的新特提斯洋向北隱沒至歐亞大陸板塊下，在伊朗地區的陸-陸碰撞時間約為 35 Ma (van Hunen and Allen, 2011)，PONTIDE 地塊與 BPM 之間的海洋(EAAC 上之特提斯洋)則是在始新世時關閉(Sengor et al., 2003)，碰撞前的島弧活動產生鈣鹼性的岩漿，岩漿上升的同時造成岩石圈地函的交代變質作用，並在

地殼底下形成基性底鍍層，火山活動分布在 EAAC 北緣的 PONTIDE 地塊、IRAN 地塊(皆已與歐亞大陸縫合)之上，並且在陸-陸碰撞之後仍有岩漿活動的殘存，在地殼中形成深成岩，如亞美尼亞南部之花崗岩體，代表碰撞前岩漿活動至少一直持續到 26.5 Ma (Chiu et al., 2010)，如圖 5-18 中 profile 2 與 3 第一欄剖面，在這之後進入了岩漿活動的休止期(magmatism gap)，直到碰撞後岩漿活動開始，於 Hunen & Allen (2011)文中經由模擬結果認為老的海洋地殼在陸-陸碰撞後約經 20-25 Myr 後會開始發生海洋岩石圈拆解的作用(slab break-off)，此地區約 35 Ma 開始陸-陸碰撞，碰撞後岩漿活動約在 10-15 Ma 期間開始有碰撞後岩漿活動，符合該文獻之模擬結果。

#### 5.4.2 碰撞後岩漿活動

CIA 地區碰撞後岩漿活動約自 11 Ma 開始，一直持續到現在，在碰撞前岩漿活動停止到碰撞後岩漿活動開始的這段期間，伊朗境內的 Zagros 山脈持續增厚，但由於伊朗地區數據可靠的英文文獻不多，尤其地球化學方面，且解釋完整的模型不多(Agard et al., 2005)，因此這段期間便留白不多做推測；EAAC 亦持續增厚，使得底下的海洋岩石圈除了隱沒作用停止之外，也逐漸的冷卻、加重，最後開始下沉、引發碰撞後岩漿活動(Keskin, 2003)。本研究將 profile 1 與 2 分為三個階段，分別為 11-6 Ma、6-2 Ma 以及 2 Ma 以來，profile 3 位於伊朗地區，主要在於解釋碰撞後岩漿活動中超鉀質岩與埃達克岩之岩石成因。

##### 5.4.2.1 CIA 西部剖面(Profile 1 與 Profile 2)

###### 1. 11-6 Ma

大約 11 Ma 時(圖 5-13a)，EAAC 下之海洋岩石圈開始向南退卻，同時引發 Kars 南部岩石圈地函小程度的拆層作用(Keskin, 2003)，軟流圈上湧、使得該地處於一局部張裂的環境，形成雙模式火山岩，具有隱沒物質的地球化學訊號(Keskin

et al., 1998); 推測是由於碰撞前岩漿活動造成地函源區的交代變質作用，之後海洋岩石圈自 EAAC 之西北緣開始向南退卻，軟流圈上湧、向南流入，使得地溫梯度提高，上部地函產生部份熔融，因此火山活動隨之南移，隱沒物質的訊號越南越微弱。

## 2. 6-2 Ma

在 Kars 南部地區發生小程度的拆層作用之後，軟流圈上湧造成 PONTIDE 地塊與 IRAN 地塊岩石圈地函的加熱，而此熱逐漸向東北遷移，造成岩石圈地函的熱侵蝕(thermal erosion)，導致增厚至 50 公里以上的下部地殼榴輝岩相發生部份熔融、形成埃達克岩(Chung et al., 1994)，因此我們可以見到埃達克岩向東北變年輕的趨勢，且此熱能未造成上部地函的部份熔融，因此在 PONTIDE 地塊與 IRAN 地塊中尚未見到廣泛分布的碰撞後鈣鹼性火山岩。接著從圖 5-13c 中可見 EAAC 中 CIA 西部 (profile 1) 較 CIA 中部的火山活動活躍(profile 2)，推測是由於向南退卻之海洋岩石圈在西部較先發生撕裂(tear, Wortel and Spakman, 2000; van Hunen and Allen, 2011)，造成更大規模的軟流圈上湧，並沿著大陸地殼的邊緣逐漸向東撕裂(tear migration, 圖 5-14)，使得岩漿活動東移，在岩漿活動的同時，也造成了新的岩石圈地函的形成，逐漸抑制了較早開始岩漿活動的 CIA 西部(Keskin, 2007)。

## 3. 2 Ma 以來

2 Ma 時海洋岩石圈的撕裂到了 EAAC 與 IRAN 地塊的邊界之後就開始東北-西南向的海洋岩石圈拆解，除沿線地震活躍外，還造成地表一系列的拉張盆地，提供岩漿上升的管道，伴隨一系列的火山活動，如 Ararat 火山與亞美尼亞境內多座火山；在 Nemrut 火山與喬治亞南部則可能發生小程度的拆層作用，而處於一局部張裂的環境，形成雙模式火山岩。在這段期間，岩漿活動活躍於 CIA 的中部，也就是 profile 2 所切過的地區與亞美尼亞境內，此時 CIA 西部的火山活動則已停止。

#### 5.4.2.2 CIA 東部剖面(Profile 3)

在伊朗地區的 profile 3 為阿拉伯板塊與 IRAN 地塊/歐亞大陸板塊的縫合，可能較類似傳統的陸-陸碰撞造山模式，在 11 Ma 的超鉀質岩形成之前，是否發生過與西藏高原地區類似的海洋岩石圈拆解、下部地殼拆層等作用則未見到一完善的模型，Agard 等人(2005)的模型中也未多作交代，本研究的數據亦無法提出一合理的解釋。漸新世中期至中新世晚期間(23-11 Ma)，伊朗西北部缺乏火山活動記錄 (Azizi and Moinevaziri, 2009)，接著由 11 Ma 時超鉀質岩的形成判斷當時該地具有岩石圈地函；從 6 Ma 開始形成的埃達克岩判斷當時下部地殼厚度可達到 50 公里厚；另外參考現在的斷層攝影法之結果，繪出當時可能的地體構造模型，而這些岩漿活動的熱源機制可能是由西南向東北傳遞的熱侵蝕事件，分別造成岩石圈地函與增厚下部地殼的熔融，但此熱源仍不足使上部地函產生大規模的部份熔融，因此幾乎不見一般的碰撞後鈣鹼性火山活動。

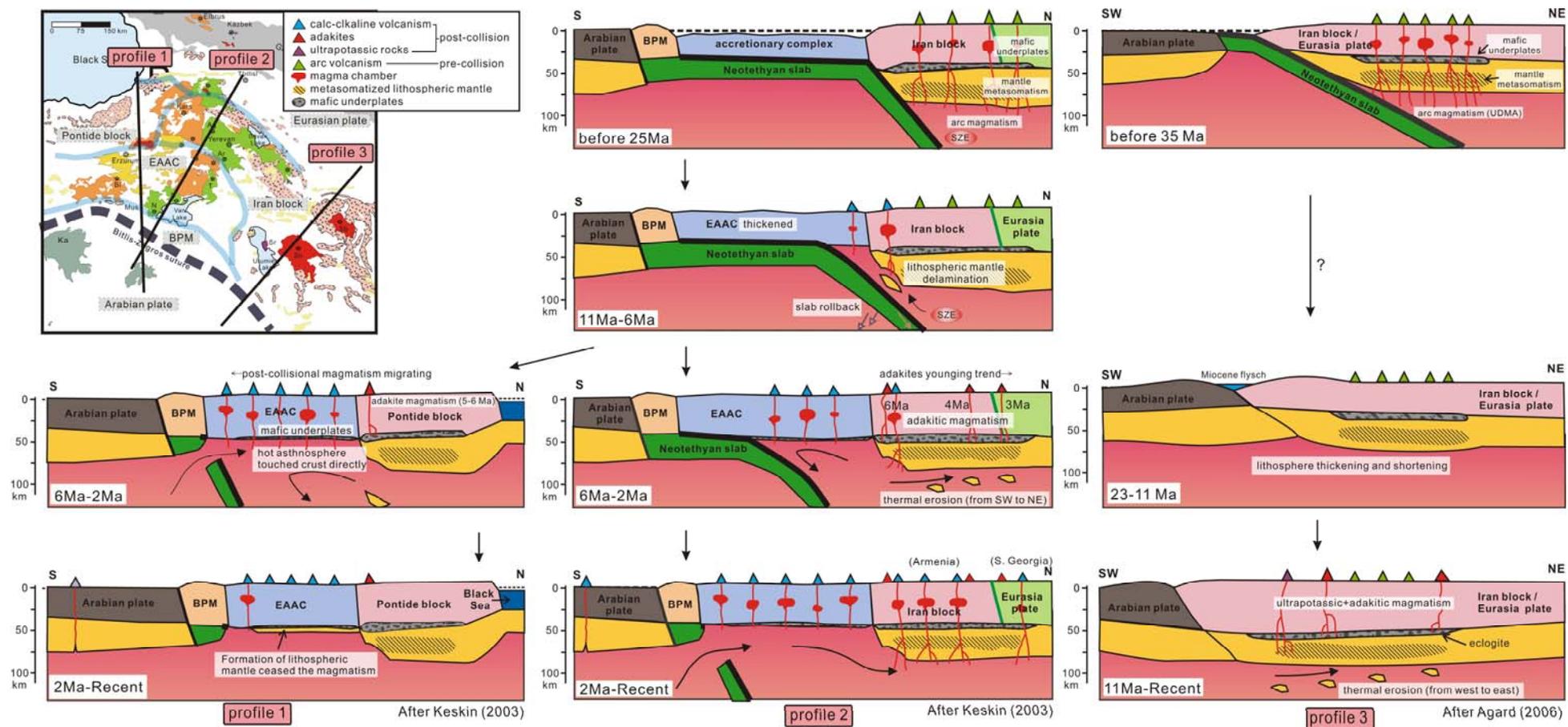


圖 5-18 CIA 地區之地體構造模型

## Chapter 6 結論

本論文之研究對象為位於阿拉伯板塊與歐亞大陸板塊陸-陸碰撞造山帶中之亞美尼亞新生代兩期火成岩，藉由地球化學之主量元素、微量元素及鋇釷同位素分析，以及全岩氫-氦定年、鋯石鈾-鉛定年，探討前後兩期火成岩的地球化學特性和岩石成因，並與此碰撞造山帶(Caucasus-Iran-Anatolia = CIA 地區)中 11 Ma 以來的碰撞後火成岩做比較，綜合探討 CIA 地區之岩漿活動與地體構造演化。本研究得出以下幾點主要結論：

1. 亞美尼亞的新生代岩漿活動分為碰撞前與碰撞後兩期。碰撞前火成岩年代介於 58.5-26.5 Ma 之間，為玄武岩至石英安山岩所構成的中鉀鈣鹼性岩系；碰撞後火山岩從 4.4 Ma 開始迄今，主要為玄武岩至流紋岩所構成的高鉀鈣鹼性岩系。
2. 亞美尼亞碰撞前與碰撞後火成岩具有相似的稀土元素與整體不相容元素分布形態，其輕稀土元素、大離子半徑元素及高度不相容元素均呈富集，高場力鍵結元素則都虧損，表示前後兩期岩石的地函源區均曾受到新特提斯洋隱沒作用的影響。
3. 亞美尼亞火成岩的鋇釷同位素組成均勻，不隨矽含量變化，代表其岩漿分異主要受到結晶分化作用的影響，地殼混染非主要的機制。此外，亞美尼亞與其鄰區火成岩具有相似的鋇釷同位素組成，指示 CIA 地區岩漿的地函源區的同位素成分大致均勻。
4. 根據基性岩的稀土元素模擬結果，CIA 地區碰撞前後之岩漿來源皆為尖晶石至石榴子石二輝橄欖岩之過度帶，應位在上部軟流圈地函，指示岩石圈的厚度約 60-80 公里厚。此外，碰撞前岩漿形成的部份熔融程度約為 8-10%，符合島弧岩漿應有之熔融程度；碰撞後岩漿為 3-6%，部份熔融程度的減小推測可能與地函源區含水量的減少有關。
5. 整個 CIA 地區的碰撞後火成岩主要是由高鉀鈣鹼性岩石組成，此外，還有超鉀質岩與埃達克岩兩種特殊岩類。超鉀質岩目前只在伊朗西北部之 Saray 火山被發現，噴發於 11 Ma 左右；埃達克岩的分布較為廣泛，約始於 6 Ma，且從東

安納托利亞經亞美尼亞至大高加索地區以及伊朗之 Sahand 及 Sabalan 火山，形成向東北逐漸年輕的噴發趨勢。

6. CIA 超鉀質岩具有相對富集的鋇釷同位素組成，為含金雲母礦物相的富集岩石圈地函發生小程度部份熔融形成；CIA 埃達克岩之鋇釷同位素組成與其他碰撞後鈣鹼性岩石無異，為增厚的基性底侵下地殼熔融形成。下地殼之基性底侵與岩石圈地函之交代富集，均與碰撞前的島弧岩漿活動有關。
7. CIA 地區碰撞後岩漿活動始於 11 Ma 左右，最主要的高鉀鈣鹼性岩漿活動具有先向南再向東遷移的時空變化趨勢，解釋為在碰撞起始地區-東安納托利亞之下的新特提斯洋板塊先向南退卻(slab roll-back)、接著向東撕裂(tear migration, 約自 6 Ma 開始)、最後拆解(slab break-off, 約自 2 Ma 開始)的結果。上述地體構造的改變導致軟流圈的上湧和岩石圈的熱侵蝕、造成岩漿活動的廣泛分布與時空變化。
8. CIA 西南部的火山活動在 2 Ma 之後終止，推測可能是受到該地區岩石圈增厚的抑制，增厚的機制除了和碰撞相關的構造增厚之外，可能還包含新的岩石圈地函形成，後者為早期碰撞後岩漿活動在軟流圈頂部的熔融殘餘、具有耐熔的特性。

## 致謝

首先，在此誠摯的感謝指導教授鍾孫霖博士，在 2009 年的夏天帶我進入了亞美尼亞這個神祕的地區，與高加索的愛恨情仇是我這兩年美好的回憶；在這兩年的歲月中，老師您淵博的知識、悉心的教誨以及在我離開時總是亮著的燈光，是我學習上的榜樣，引領著我一步步向前，而得以完成這本論文。

接著我要感謝我的口試委員們，謝謝江博明教授一次又一次對於我的研究提出問題並與我討論、給予我方向；謝謝羅清華教授不時的關懷我的實驗與我的手臂，他們都十分的完好！謝謝李通藝教授給予我論文非常多的建議與修正，也讓我對於踏入人生另一個階段不會感到那麼的徬徨；最後謝謝王國龍學長在這兩年溫暖的關懷與建議，幫助我的論文更趨完善。

實驗工作上，感謝陳正宏教授與陳文山教授提供偏光顯微鏡；感謝李寄喻技正提供儀器分析主量元素；謝謝小紅、IJ、小四、曉明、德嫻學姐、好羊、ricky 學長以及阿忠哥在我繁忙的實驗中的幫助與教導，讓我可以順利的完成實驗；謝謝大媽悉心照料打理實驗室的一切；謝謝 yoyo 與小花在平常的日子裡與我一起打拚、一起唉唉叫，有你們在真好！謝謝實驗室的夥伴們：小彭、小紀、阿波學長、興麟學姐、番茄、宥甄、忠孝、小湯，在生活上與精神上的支持，在此一併感謝。

另外 237 研究室的同伴們伴我度過兩年多來的每一天，不論何時都有人陪伴，待到很晚也不寂寞，即使你們是以電動相隨……有你們一起努力、一起向前是我研究生生活的重要過程；謝謝晏陞、惠雯、張小明及 yoyo 總是與我一同走出舟山路買飯逛街，沒有你們我就只能跟鹿鳴堂相處了…另外謝謝山大王讓我有機會當上墾丁地調二的助教，使我可以在忙碌的日子中偷閒跟隨著海霸王布魯斯以及曾泰琳老師去台灣南端上山下海、四處玩樂。

最後我要感謝 b94 的好同學們，劭璿、小黃、尚庭……以及數不清的同學們，以後一定還有機會一起出門去走走踏踏的！也要謝謝台大女排的學姐學妹們，尤其恩翠總在我陷入低潮發慌的時候陪著我一起走過；謝謝台大及各球場的球友們，我喜歡與你們一同曬太陽揮灑青春的日子，因為打球，我認識了你們，這是我在台大這六年很大的收穫之一！謝謝大家！

## 參考文獻

### 中文部份：

- 宋彪、張玉海、萬渝生和簡平，2002，鋯石 SHRIMP 樣品靶製作、年齡測定及有關現象討論。地質評論，48：第 26-30 頁。
- 李寄嶼、蔡榮浩、何孝桓、楊燦堯、鍾孫霖和陳正宏，1997，應用 X 光螢光分析儀從事岩石揚本之定量分析(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

### 英文部份：

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L. and Mouthereau, F., 2005. Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation. *International Journal of Earth Sciences*, 94(3): 401-419.
- Aldanmaz, E., Koprubasi, N., Gurer, O., Kaymakci, N. and Gourgaud, A., 2006. Geochemical constraints on the Cenozoic, OIB-type alkaline volcanic rocks of NW Turkey: Implications for mantle sources and melting processes. *Lithos*, 86(1-2): 50-76.
- Aldanmaz, E., Pearce, J., Thirlwall, M. and Mitchell, J., 2000. Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 102(1-2): 67-95.
- Angus, D., Wilson, D.C., Sandvol, E. and Ni, J., 2006. Lithospheric structure of the Arabian and Eurasian collision zone in eastern Turkey from S wave receiver functions. *Geophysical Journal International*, 166(3): 1335-1346.
- Azizi, H. and Moinevaziri, H., 2009. Review of the tectonic setting of Cretaceous to Quaternary volcanism in northwestern Iran. *Journal of Geodynamics*, 47(4): 167-179.
- Badalian, R., Bigazzi, G., Cauvin, M.C., Chataigner, C., Jrbashyan, R., Karapetyan, S., Oddone, M. and Poidevin, J.L., 2001. An international research project on Armenian archaeological sites: fission-track dating of obsidians. *Radiation Measurements*, 34(1-6): 373-378.
- Berberian, F., Muir, I., Pankhurst, R. and Berberian, M., 1982. Late Cretaceous and early Miocene Andean-type plutonic activity in northern Makran and Central Iran. *Journal of Geological Society*, 139(5): 605-614.
- Boztug, D., Ercin, A.I., Kurucelik, M.K., Goc, D., Komur, I. and Iskenderoglu, A., 2006. Geochemical characteristics of the composite Kackar batholith generated in a Neo-Tethyan convergence system, Eastern Pontides, Turkey. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(3): 286-302.
- Castillo, P.R., 2006. 埃達克岩成因回顧。科學通報，51(6): 617-627.

- Chiu, H.Y., Chung, S.L., Wu, F.Y., Liu, D., Liang, Y.H. and Lin, I., 2009. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints from eastern Transhimalayan batholiths on the precollisional magmatic and tectonic evolution in southern Tibet. *Tectonophysics*, 477(1-2): 3-19.
- Chiu, H.Y., Zarrinkoub, M.H., Chung, S.-L., LIN, I.-J., Yang, H.-M., Lo, C.-H., Mohammadi, S.S. and Khatib, M.M., 2010. Zircon U-Pb Age and Geochemical Constraints on the Magmatic and Tectonic Evolution in Iran, in *Tectonic Crossroads: Evolving Orogens of Eurasia-Africa-Arabia*, October 4-8, 2010, Ankara, Turkey.
- Chung, S.L., Chu, M.F., Zhang, Y., Xie, Y., Lo, C.H., Lee, T.Y., Lan, C.Y., Li, X., Zhang, Q. and Wang, Y., 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism. *Earth-Science Reviews*, 68(3-4): 173-196.
- Chung, S.L., Liu, D., Ji, J., Chu, M.F., Lee, H.Y., Wen, D.J., Lo, C.H., Lee, T.Y., Qian, Q. and Zhang, Q., 2003. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet. *Geology*, 31(11): 1021-1024.
- Chung, S.L., Sun, S., Tu, K., Chen, C.H. and Lee, C., 1994. Late Cenozoic basaltic volcanism around the Taiwan Strait, SE China: product of lithosphere-asthenosphere interaction during continental extension. *Chemical Geology*, 112(1-2): 1-20.
- Conticelli, S. and Peccerillo, A., 1992. Petrology and geochemistry of potassic and ultrapotassic volcanism in central Italy: petrogenesis and inferences on the evolution of the mantle sources. *Lithos*, 28(3-6): 221-240.
- Defant, M.J. and Drummond, M.S., 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662-665.
- Dewey, J., Hempton, M., Kidd, W., Saroglu, F. and Sengor, A., 1986. Shortening of continental lithosphere: The neotectonics of eastern Anatolia--a young collision zone. *Geological Society London Special Publications*, 19(1): 1-36.
- Dilek, Y. and Altunkaynak, S., 2009. Geochemical and temporal evolution of Cenozoic magmatism in western Turkey: mantle response to collision, slab break-off, and lithospheric tearing in an orogenic belt. *Geological Society London Special Publications*, 311(1): 213-233.
- Dilek, Y., Imamverdiyev, N. and Altunkaynak, 2009. Geochemistry and tectonics of Cenozoic volcanism in the Lesser Caucasus (Azerbaijan) and the peri-Arabian region: collision-induced mantle dynamics and its magmatic fingerprint. *International Geology Review*, 52(4): 536-578.
- Eggins, S., Woodhead, J., Kinsley, L., Mortimer, G., Sylvester, P., McCulloch, M., Hergt, J. and Handler, M., 1997. A simple method for the precise determination of  $\geq 40$  trace elements in geological samples by ICPMS using enriched isotope internal standardisation. *Chemical Geology*, 134(4): 311-326.

- Faccenna, C., Bellier, O., Martinod, J., Piromallo, C. and Regard, V., 2006. Slab detachment beneath eastern Anatolia: A possible cause for the formation of the North Anatolian fault. *Earth and Planetary Science Letters*, 242(1-2): 85-97.
- Foley, S., Venturelli, G., Green, D. and Toscani, L., 1987. The ultrapotassic rocks: characteristics, classification, and constraints for petrogenetic models. *Earth-Science Reviews*, 24(2): 81-134.
- Galoyan, G., Rolland, Y., Sosson, M., Corsini, M. and Melkonyan, R., 2007. Evidence for superposed MORB, oceanic plateau and volcanic arc series in the Lesser Caucasus (Stepanavan, Armenia). *Comptes Rendus Geosciences*, 339(7): 482-492.
- Gelati, R., 1975. Miocene marine sequence from Lake Van. Eastern Turkey: *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 81: 477–490.
- Goguitchaichvili, A. and Pares, J.M., 2000. A recognition palaeomagnetic study of volcanic and sedimentary rocks from Dmanissi (Caucasus): implications for the oldest human occupation in Europe. *Earth and Planetary Sciences*, 331: 183-186.
- Govindaraju, K., 1994. compilation of working values and sample description for 383 geostandards. *Geostandards Newsletter*, 18 (Special Issue): 158 pp.
- Hafkenscheid, E., Wortel, M. and Spakman, W., 2006. Subduction history of the Tethyan region derived from seismic tomography and tectonic reconstructions. *Journal of Geophysical Research*, 111(B8): B08401.
- Hatzfeld, D. and Molnar, P., 2010. Comparisons of the kinematics and deep structures of the Zagros and Himalaya and of the Iranian and Tibetan plateaus and geodynamic implications. *Reviews of Geophysics*, 48(2): RG2005, 48 PP.
- Karakhian, A., Djrbashian, R., Trifonov, V., Philip, H., Arakelian, S. and Avagian, A., 2002. Holocene-historical volcanism and active faults as natural risk factors for Armenia and adjacent countries. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113(1-2): 319-344.
- Karapetian, S., Jrbashian, R. and Mnatsakanian, A.K., 2001. Late collision rhyolitic volcanism in the north-eastern part of the Armenian Highland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 112(1-4): 189-220.
- Karapetyan, S.G., 1968. On the age and stratigraphic position of the most recent liparitic and liparitodacite rocks of the ArmSSR. *Izvestia AN ArmSSR, Nauki o Ziemi* 1-2: 60-71.
- Karapetyan, S.G., 1972. Structural and Compositional Features of Young Rhyolitic Volcanoes in the Armenian SSR., National Academy of Sciences of the Armenian SSR, Yerevan, pp. 195.
- Kay, R. and Kay, S., 2002. Andean adakites: three ways to make them. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 303-311.

- Keskin, M., 2003. Magma generation by slab steepening and breakoff beneath a subduction-accretion complex: An alternative model for collision-related volcanism in Eastern Anatolia, Turkey. *Geophysical Research Letters*, 30(24): 8046-8049.
- Keskin, M., 2007. Eastern Anatolia: A hotspot in a collision zone without a mantle plume. *Geological Society of America Special Papers*, 430: 693-722.
- Keskin, M., Pearce, J. and Mitchell, J., 1998. Volcano-stratigraphy and geochemistry of collision-related volcanism on the Erzurum-Kars Plateau, northeastern Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85(1-4): 355-404.
- Keskin, M., Pearce, J.A., Kempton, P.D. and Greenwood, P., 2006. Magma-crust interactions and magma plumbing in a postcollisional setting: Geochemical evidence from the Erzurum-Kars volcanic plateau, eastern Turkey. *Postcollisional tectonics and magmatism in the Mediterranean region and Asia*: 475-505.
- Kheirkhah, M., Allen, M. and Emami, M., 2009. Quaternary syn-collision magmatism from the Iran. Turkey borderlands: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 182: 1–12.
- Kinzler, R.J., 1997. Melting of mantle peridotite at pressures approaching the spinel to garnet transition: Application to mid-ocean ridge basalt petrogenesis. *Journal of Geophysical Research*, 102(B1): 853-874.
- Koop, W., Stoneley, R., Ridd, M., Murphy, R., Osmaston, M. and Kholief, M., 1982. Subsidence History of the Middle East Zagros Basin, Permian to Recent [and Discussion]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 305(1489): 149-168.
- Lee, H.Y., Chung, S.L., Ji, J., Qian, Q., Gallet, S., Low, P., Lee, T.Y. and Zhang, Q., 2011 (submitted). Geochemical and Sr-Nd isotope constraints on the genesis of the Cenozoic Linzizong volcanic successions, southern Tibet. *JAES Special Issue: Tibetan Orogenic Evolution*.
- Lee, H.Y., Chung, S.L., Lo, C.H., Ji, J., Lee, T.Y., Qian, Q. and Zhang, Q., 2009. Eocene Neotethyan slab breakoff in southern Tibet inferred from the Linzizong volcanic record. *Tectonophysics*, 477(1-2): 20-35.
- Lemvel, V., 2007. Armenia National Atlas. Centre for Geodesy and Cartography, 232 pp.
- Lo, C.H. and Lee, C.Y., 1994.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  method of K-Ar age determination of geological samples using Tsing-Hua Open-Pool Reactor (THOR) *Geological Society of China*, 37: 143-164.
- Maggi, A. and Priestley, K., 2005. Surface waveform tomography of the Turkish–Iranian plateau. *Geophysical Journal International*, 160(3): 1068-1080.

- Martin, H., Smithies, R., Rapp, R., Moyen, J.F. and Champion, D., 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79(1-2): 1-24.
- McKenzie, D., 1989. Some remarks on the movement of small melt fractions in the mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 95(1-2): 53-72.
- McKenzie, D. and O'Nions, R., 1991. Partial melt distributions from inversion of rare earth element concentrations. *Journal of Petrology*, 32(5): 1021-1091.
- Moine-Vaziri, H., 1985. *Volcanisme tertiaire et quaternaire en Iran*, These d'Etat. Universite Paris-Sud, ORSAY, 290 pp.
- Moix, P., Beccaletto, L., Kozur, H.W., Hochard, C., Rosselet, F. and Stampfli, G.M., 2008. A new classification of the Turkish terranes and sutures and its implication for the paleotectonic history of the region. *Tectonophysics*, 451(1-4): 7-39.
- Moyen, J.F., 2009. High Sr/Y and La/Yb ratios: The meaning of the. *Lithos*, 112(3-4): 556-574.
- Oddone, M., Bigazzi, G., Keheyan, Y. and Meloni, S., 2000. Characterisation of Armenian obsidians: Implications for raw material supply for prehistoric artifacts. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 243(3): 673-682.
- Okay, A.I. and Sahinturk, O., 1998. Geology of the eastern Pontides. *Memoirs-American Association of Petroleum Geologists*: 291-312.
- Paul, A., Hatzfeld, D., Kaviani, A., Tatar, M. and Pequegnat, C., 2010. Seismic imaging of the lithospheric structure of the Zagros mountain belt (Iran). *Geological Society, London, Special Publications*, 330(1): 5-18.
- Pearce, J., 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. *Andesites*. Wiley, Chichester: 525-548.
- Pearce, J., Bender, J., De Long, S., Kidd, W., Low, P., Guner, Y., Saroglu, F., Yilmaz, Y., Moorbath, S. and Mitchell, J., 1990. Genesis of collision volcanism in Eastern Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 44(1-2): 189-229.
- Rapp, R., Shimizu, N., Norman, M. and Applegate, G., 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160(4): 335-356.
- Rapp, R.P., Watson, E.B. and Miller, C.F., 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites. *Precambrian Research*, 51(1-4): 1-25.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., Ozener, H., Kadirov, F., Guliev, I. and Stepanyan, R., 2006. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research*, 111(B5): B05411.

- Robinson, A., Banks, C., Rutherford, M. and Hirst, J., 1995. Stratigraphic and structural development of the Eastern Pontides, Turkey. *Journal of Geological Society*, 152(5): 861-872.
- Saroglu, F. and Yilmaz, Y., 1986. Geological evolution and basin models during neotectonic episode in the Eastern Anatolia. *Bulletin Mineral Research and Exploration Institute of Turkey*, 107: 61-83.
- Sengor, A., Altiner, D., Cin, A., Ustaomer, T. and Hsu, K., 1988. Origin and assembly of the Tethyside orogenic collage at the expense of Gondwana Land. *Geological Society, London, Special Publications*, 37(1): 119-181.
- Sengor, A., Ozeren, S., Genc, T. and Zor, E., 2003. East Anatolian high plateau as a mantle-supported, north-south shortened domal structure. *Geophysical Research Letters*, 30(24): 8045-8048.
- Sengor, A., Tuysuz, O., Imren, C., Sakinc, M., Eyidogan, H., Gorur, N., Le Pichon, X. and Rangin, C., 2005. The North Anatolian fault: A new look. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33: 37-112.
- Sengor, A. and Yilmaz, Y., 1981. Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75(3-4): 181-190.
- Sengor, A.M.C., 1980. Turkiye'nin Neotektoniginin Esaslari: *Turk. Jeol. Kur. Konf. Serisi*, 2: 40 pp.
- Sengor, A.M.C. and Natal'in, B.A., 1996. Turkic-type orogeny and its role in the making of the continental crust. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 24(1): 263-337.
- Shaw, D.M., 1970. Trace element fractionation during anatexis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 34(2): 237-243.
- Stampfli, G., Marcoux, J. and Baud, A., 1991. Tethyan margins in space and time. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 87(1-4): 373-409.
- Stern, C.R. and Kilian, R., 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(3): 263-281.
- Stern, R.J., 2002. Subduction zones. *Reviews of Geophysics*, 40(4): 1012-1050.
- Sun, S. and McDonough, W., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society London Special Publications*, 42(1): 313-345.
- Tanaka, T., Togashi, S., Kamioka, H., Amakawa, H., Kagami, H., Hamamoto, T., Yuhara, M., Orihashi, Y., Yoneda, S. and Shimizu, H., 2000. JNdi-1: a neodymium isotopic reference in consistency with LaJolla neodymium. *Chemical Geology*, 168(3-4): 279-281.
- Teng, L.S., 1990. Geotectonic evolution of late Cenozoic arc-continent collision in Taiwan. *Tectonophysics*, 183(1-4): 57-76.

- Thieblemont, D. and Tegye, M., 1994. Une discrimination géochimique des roches différenciées témoin de la diversité d'origine et de la situation tectonique des magmas. Comptes Rendus de l'Académie des sciences, Paris, 319(II): 87-94.
- Tuysuz, N. and Erler, A., 1995. Geology and geotectonic implications of Kazikkaya area, Kagizman-Kars (Turkey): In *Geology of the Black Sea Region, Proceedings of the International symposium on the Geology of the Black sea Region*. In: T.E. A. Erler, E. Bingol, and S. Orcen (Editor), General Directorate of Mineral Research and Exploration and Chamber of Geological Eng., Ankara, Ankara, Turkey, pp. 76-81.
- Van de Zedde, D. and Wortel, M., 2001. Shallow slab detachment as a transient source of heat at midlithospheric depths. *Tectonics*, 20(6): 868–882.
- van Hunen, J. and Allen, M.B., 2011. Continental collision and slab break-off: A comparison of 3-D numerical models with observations. *Earth and Planetary Science Letters*, 302(1-2): 27-37
- Walter, M.J., 1998. Melting of garnet peridotite and the origin of komatiite and depleted lithosphere. *Journal of Petrology*, 39(1): 29-60.
- Wang, K.L., Chung, S.L., Chen, C.H., Shinjo, R. and Yang, T.F., 1999. Post-collisional magmatism around northern Taiwan and its relation with opening of the Okinawa Trough. *Tectonophysics*, 308(3): 363-376.
- Wang, Q., Wyman, D.A., Xu, J., Dong, Y., Vasconcelos, P.M., Pearson, N., Wan, Y., Dong, H., Li, C. and Yu, Y., 2008. Eocene melting of subducting continental crust and early uplifting of central Tibet: Evidence from central-western Qiangtang high-K calc-alkaline andesites, dacites and rhyolites. *Earth and Planetary Science Letters*, 272(1-2): 158-171.
- Wortel, M. and Spakman, W., 2000. Subduction and slab detachment in the Mediterranean-Carpathian region. *Science*, 290(5498): 1910-1917.
- Yilmaz, Y., 1993. New evidence and model on the evolution of the southeast Anatolian orogen. *Geological Society of America Bulletin*, 105(2): 251-271.
- Yilmaz, Y., Saroglu, F. and Guner, Y., 1987. Initiation of the neomagmatism in East Anatolia. *Tectonophysics*, 134(1-3): 177-199.
- Yilmaz, Y., Tuysuz, O., Yigitbas, E., Genc, C. and Sengor, A., 1997. Geology and tectonic evolution of the Pontides, in *Regional and Petroleum geology of the Black Sea and Surrounding Region*. American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Memoir, 68: 183-226.
- Zor, E., 2008. Tomographic evidence of slab detachment beneath eastern Turkey and the Caucasus. *Geophysical Journal International*, 175(3): 1273-1282.