

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

山東省蓬萊及臨淄地區新生代玄武岩之地化特性與岩石成因
Geochemical characteristics and petrogenesis of Cenozoic basalts
from Penglai and Lintzu areas, Shandong province

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC91-2116-M-002-018

執行期間：91年8月1日至92年7月31日

計畫主持人：陳汝勤教授，國立台灣大學海洋研究所

計畫參與人員：李永棠，國立台灣大學海洋研究所

許朱男，博精公司

執行單位：國立台灣大學海洋研究所

中華民國 92 年 8 月 16 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

山東省蓬萊及臨淄地區新生代玄武岩之地化特性與岩石成因

Geochemical characteristics and petrogenesis of Cenozoic basalts from Penglai and Lintzu areas, Shandong province

計畫編號：NSC91-2116-M-002-018

執行期間：91年8月1日至92年7月31日

計畫主持人：陳汝勤教授，國立台灣大學海洋研究所

計畫參與人員：李永棠，國立台灣大學海洋研究所

許朱男，博精公司

一、中英文摘要

山東省蓬萊及臨淄地區新生代玄武岩主要包含碧玄岩及鹼性橄欖玄武岩。區域內玄武岩類常為斑狀、在斜輝石、橄欖石、斜長石、不透光礦物及玻璃質的石基中含有橄欖石、及斜輝石的斑晶。在鹼性玄武岩中，透長石及霞石也可能出現在石基中。值得注意的是，蓬萊地區碧玄岩較蓬萊鹼性橄欖玄武岩及臨淄鹼性橄欖玄武岩含有較高的 Na、P、Sr、Ba、Zr、Hf、Nb、Ta、Th、U 及稀土元素。臨淄地區鹼性橄欖玄武岩則較其它玄武岩類含有較高的 Mg、Ti、Cr、Ni 及 V。一般言之，山東地區之玄武岩在珠網圖中與 OIB 之分布型態相似但蓬萊碧玄岩在珠網圖中顯示出正的 Nb 異常。蓬萊地區之碧玄岩及鹼性橄欖玄武岩可能來自同一地函源經不同程度之部份熔融而形成。鋇—鈹同位素資料顯示臨淄地區玄武岩之地函源可能由虧損型之 DMM 與富化型之 EM1 混合方可解釋此區玄武岩之同位素特性。

關鍵詞：地球化學、新生代玄武岩、山東省蓬萊臨淄地區

Abstract

Cenozoic basaltic rocks found in Penglai and Lintzu areas, Shandong province are composed mainly of basanites and alkali olivine basalts. The basaltic rocks are usually porphyritic with phenocrysts of olivine and clinopyroxene enclosed in a matrix composed of clinopyroxene, olivine, plagioclase, opaques and glassy material. In the alkali basalts sanidine and nepheline may also occur in the matrix. It should be noted that Penglai basanite contains higher Na, P, Sr, Ba, Zr, Hf, Nb, Ta, Th, U and REEs than Penglai and Lintzu alkali olivine basalt. The Lintzu alkali olivine basalt is higher in Mg, Ti, Cr, Ni and V than other types of basalts. Generally

speaking, Shandong basaltic rocks show similar patterns to those of OIB in the spidergram, however, the penglai basanite peaks at Nb. Penglai basanites and alkali olivine basalts may be derived from a similar mantle source through different degree of partial melting. Sr-Nd isotopic data indicate that the mantle source of Cenozoic basaltic rock in Lintzu area may represent a mixture of DMM and EM1.

Key words: Geochemistry, Cenozoic basaltic rocks, Penglai and Lintzu areas, Shandong province

二、計畫緣由與目的

中國東部的火山岩主要由與北北東向活動斷裂帶有關的中生代及晚第三紀至第四紀玄武岩所組成(Zhi et al., 1995)；這些斷裂帶之中最為重要的是位於山東省的郟廬斷裂系統，郟廬斷裂帶延伸達 2,000km 為典型的大陸張裂系統(Yang and Yang, 1985)。

黃邦強等人(1990)指出郟斷裂帶控制了山東省東西兩側地體構造的發展，因而在斷裂帶兩側的深層構造基盤及岩漿活動等方面可能均有明顯的差異。

山東地區新生代火山岩之分布主要與區域構造線有關(Wu et al., 1985)，火山岩分布於三個地區：1. 臨淄地區；火山岩沿著斷裂帶分布，位於山東省中部。2. 蓬萊地區於山東省東北部。3. 無棣地區，位於山東省北部，該地區火山岩的出露面積較臨淄、蓬萊地區來的小。臨淄及蓬萊地區火山群皆有多期、多次的噴發，包括中新、上新世和早更新世玄武岩，在臨淄地區玄武岩覆蓋面積約為 700km²，火山岩位於第三紀凝灰岩層之上，且與中新世沉積岩包括頁岩及硅藻土等為互層(Dostal et al., 1991)。

山東東部蓬萊地區的火山群熔岩流面積約為 200km²；這些火山熔岩直接覆蓋於二疊系基盤之上。鉀氬定年結果(Wang, 1981; Chen and Peng, 1985; Jin, 1985)顯示山東地區玄武岩的火山作用之年代為中新世到上新世，而臨淄地區火山岩之 K-Ar 定年介於 4 Ma 到 17 Ma 之間，蓬萊地區玄武岩則介於 4 Ma ~ 8 Ma 之間(Chen and Peng, 1985)。本文所研究的標本主要採自山東省中部的臨淄(91LJ01~91LJ07)及東部蓬萊地區(91PL01~91PL05)(圖 1)。

本研究之重點在於探討山東蓬萊及臨淄地區玄武岩之地球化學，由主要元素、微量元素、稀土元素及 Sr-Nd 同位素等資料討論此等玄武岩之岩石成因及控制玄武岩化學變化的分化過程，此外對研究區地函源之特性亦加以探討。

三、結果與討論

山東蓬萊玄武岩標本中 SiO₂ 含量的變化範圍介於 43.89%~47.63%之間，臨淄地區岩樣 SiO₂ 含量則介於 43.67%~48.01%之間。蓬萊及臨淄地區玄武岩標準礦物含量中，霞石的含量介於 0.56~12.8 之間，部分標本不含霞石。臨淄地區玄武岩較蓬萊地區玄武岩有較低的 Σ FeO、P₂O₅ 及 Na₂O，但較高之 MgO、Mg 值及 TiO₂/P₂O₅ 的比值，其它主要元素則未具有明顯的差異。

山東地區玄武岩中共容元素或過渡元素(Cr、Ni、V、Sc 及 Zn)的含量與其他大陸鹼性玄武岩系列(Wedepohl, 1985; Zhi et al., 1990)相似。臨淄地區玄武岩較蓬萊地區玄武岩有較高的 Ni、Cr、Co、Li、V 及 Sc 等元素(圖 2 及圖 3)。蓬萊地區玄武岩中較低的 Ni (156~221ppm)及 Cr (200~218ppm)含量，且其 Ni、Cr、Co 與鎂值呈正變的關係，可說明蓬萊地區玄武岩可能歷經低壓的橄欖石及斜輝石的結晶分化。臨淄地區玄武岩具有較高的 Ni (233-297ppm)及 Cr (297-362ppm)

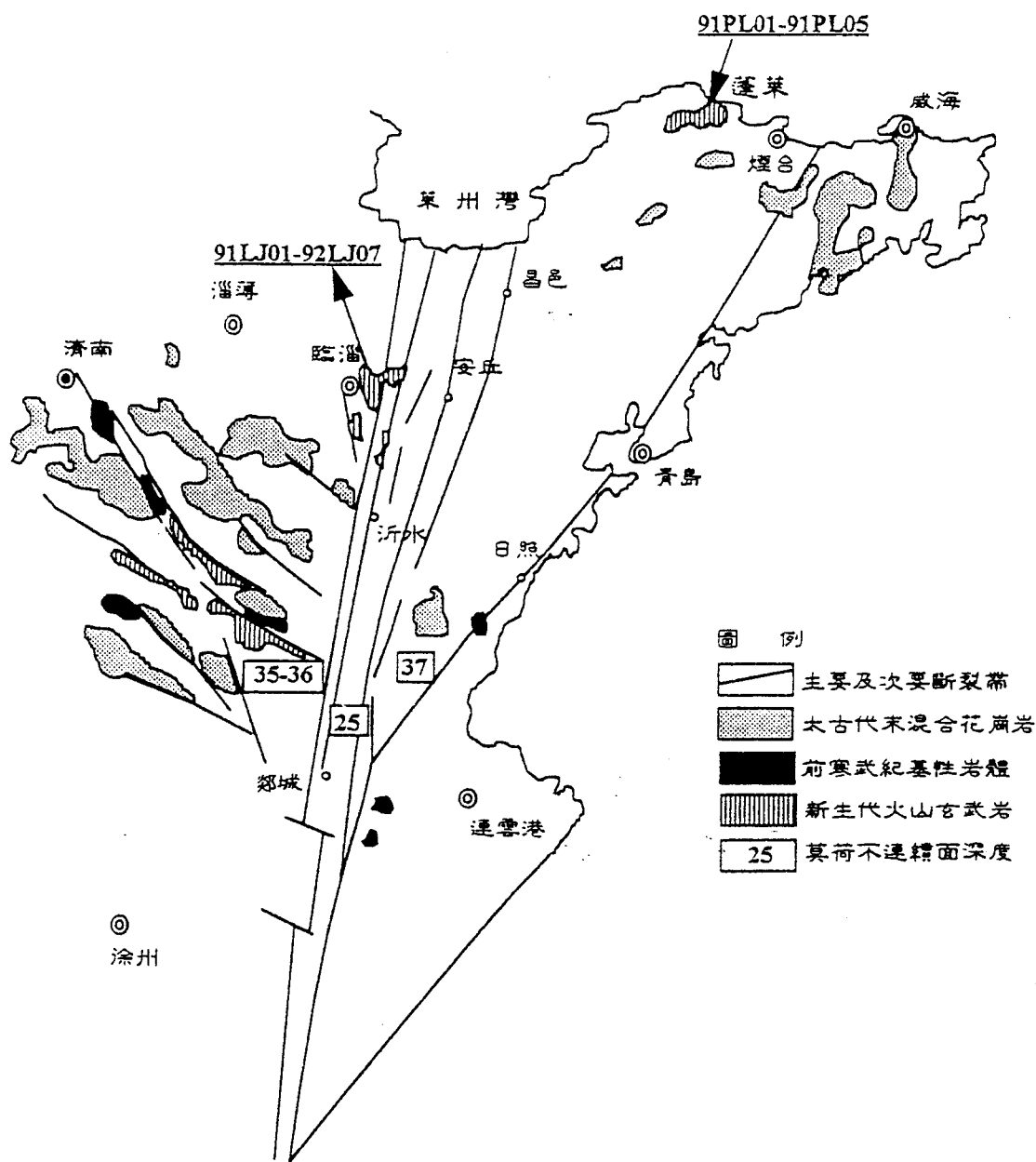


圖 1 山東省之構造環境及火成岩之分布圖(依據黃汲清, 1979) 及本文採樣位置圖。

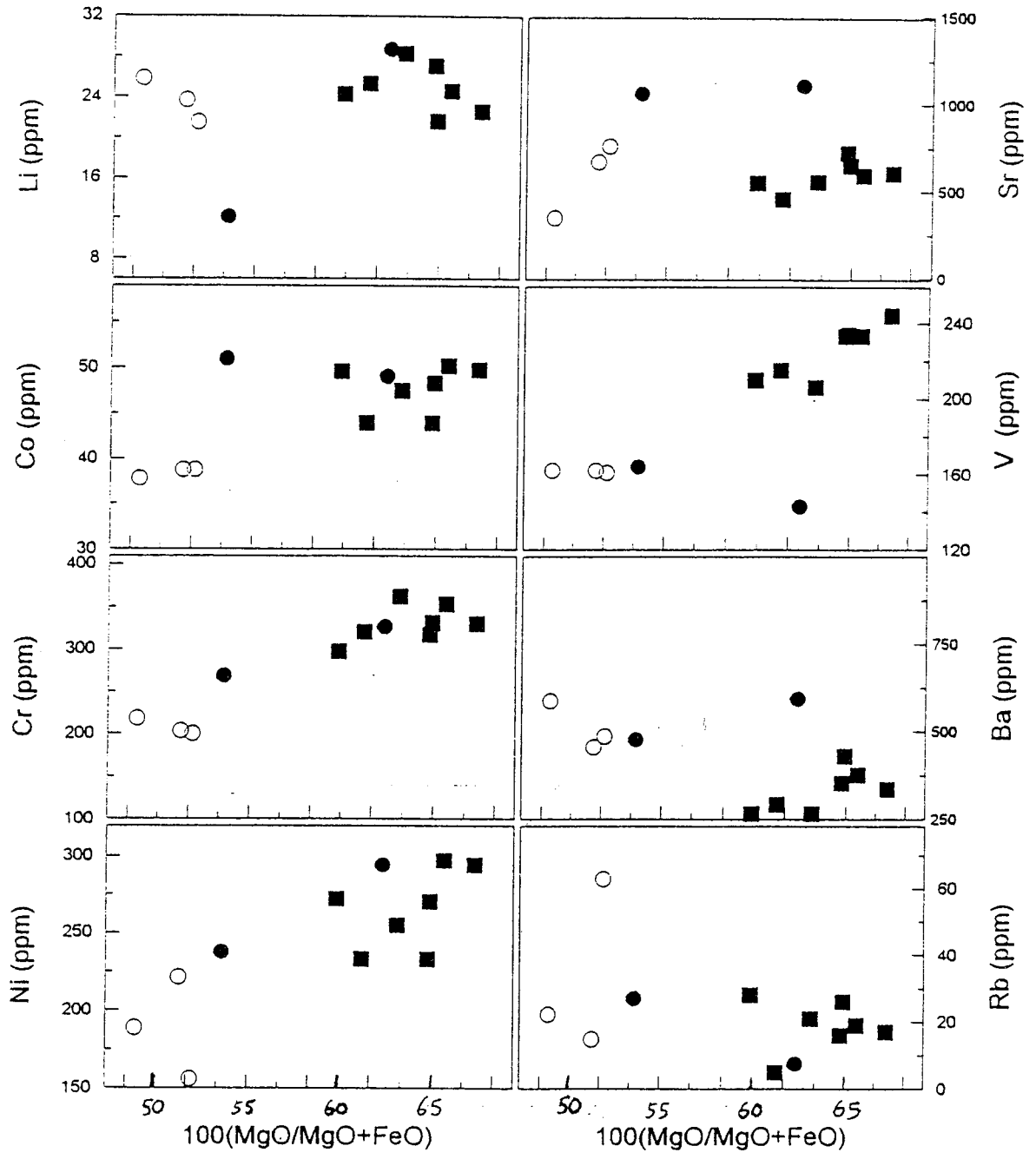
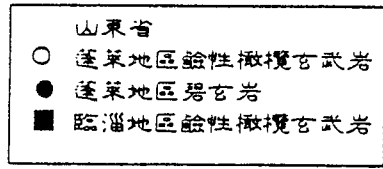


圖2 山東省蓬萊及臨淄地區玄武岩標本中Ni, Cr, Co, Li, Rb, Ba, V及Sr對 $100(\text{MgO}/(\text{MgO}+\text{FeO}))$ 之作圖

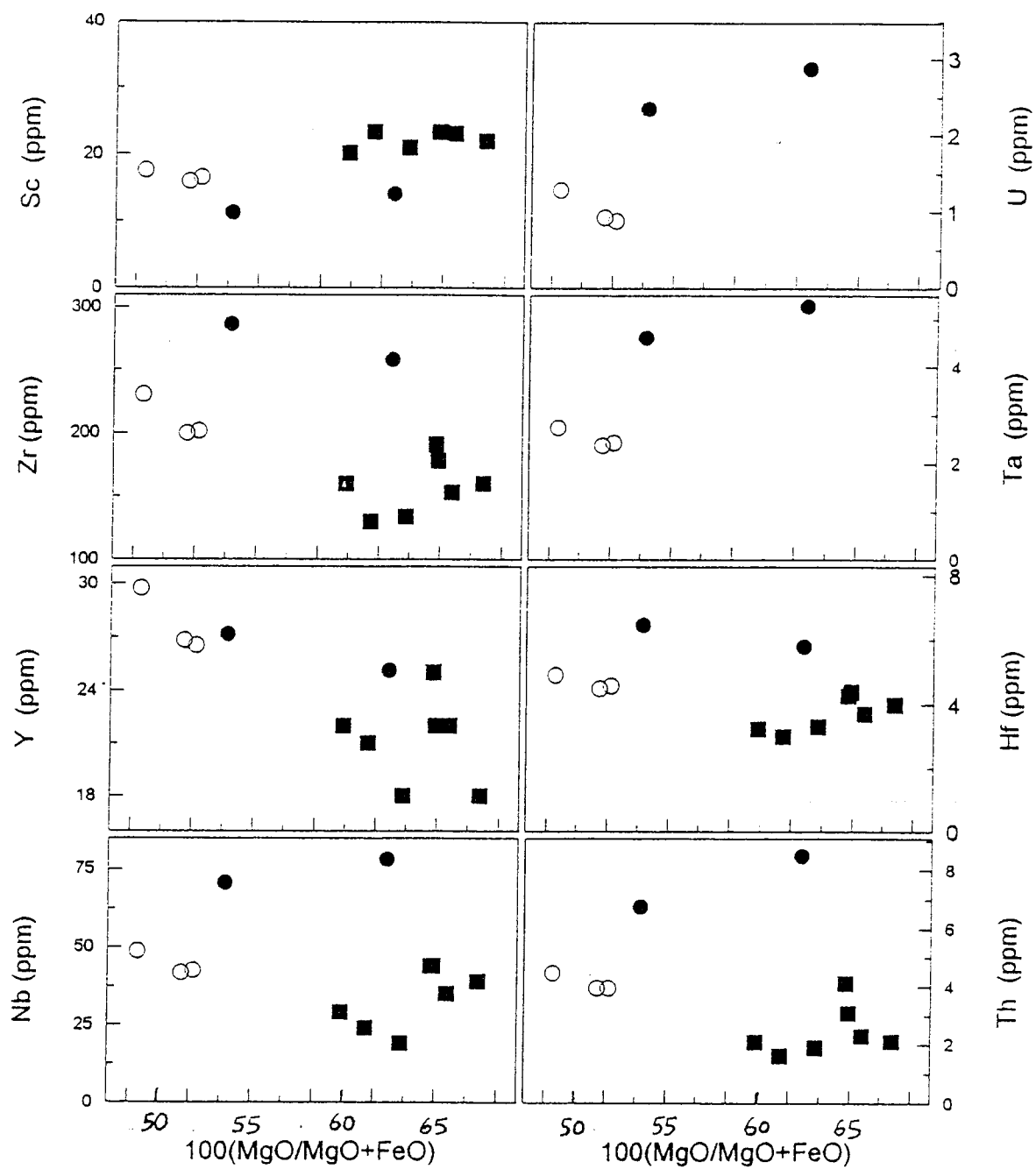


圖3 山東省蓬萊及臨淄地區玄武岩標本中Nb, Zr, Y, Sc, Th, Hf, Ta及U對 $100(\text{MgO}/(\text{MgO}+\text{FeO}))$ 之作圖。

及 Mg 值可能比較接近原始岩漿的組成。在山東地區玄武岩中 Ti/V 比值(蓬萊地區 = 70, 臨淄地區 = 68)與其他地區大陸鹼性橄欖玄武岩(Frey et al., 1978)相似;由於蓬萊與臨淄地區玄武岩之 TiO₂ 的含量相近,所以蓬萊地區較臨淄地區具有較高的 Ti/V 比值係由於玄武岩中具有較低的 V 含量所致。在圖 2、圖 3 中,蓬萊地區 V 及 Sc 與 Mg 值之作圖並未呈明顯的變化關係。但在臨淄地區玄武岩中 V 與 Mg 值呈正變的關係,顯示蓬萊地區玄武岩歷經較少對 V、Sc 有較大分配係數之礦物(如鈦鐵氧化物等)之分化。山東蓬萊及臨淄地區玄武岩中 Ti/V 之比值可能接近原始岩漿之 Ti/V 值。

山東蓬萊及臨淄地區玄武岩中不共容元素與 Mg 值之作圖示於圖 2 及圖 3,就同一岩性而言,蓬萊地區較臨淄地區鹼性橄欖玄武岩有較高的 Hf、Th、Zr、Y、Nb、Ba 及 Rb 等不共容元素;而蓬萊地區碧玄岩顯然較鹼性橄欖玄武岩有較高的不共容性元素(Sr, Ba, Zr, Nb, U, Ta, Hf, Th and REE)。除了蓬萊地區玄武岩中含 Sr 含量與 Mg 值呈正變關係外,其他不共容元素與鎂值大部份並未有明顯變化關係;顯示結晶分化作用對本區玄武岩中部共容性元素之影響不大。而蓬萊地區玄武岩中 Sr 與 Mg 值之正變關係,可能與鹼性玄武岩中少量的斜長石結晶分化有關。

表 1 為山東地區玄武岩中 Th/La、Zr/Nb、Hf/Sm 及 La/Ce 之比值與原始地函及洋島玄武岩(OIB)(Sun and McDonough, 1989)平均值之比較;表中顯示蓬萊地區碧玄岩較鹼性橄欖玄武岩有較高的 Th/La、Nb/Y 比值,較低的 Zr/Nb 比值;由於 Zr 在玄武岩岩漿中的分配係數可能較 Nb 大,因此在碧玄岩中有較低的 Zr/Nb 比值可能係由於部分熔融程度的差異所致。蓬萊地區鹼性橄欖玄武岩較臨淄地區鹼性橄欖玄武岩有較高的 La/Ce、Nb/Y 之比值,較低的 Hf/Sm、Zr/Nb 比值。蓬萊及臨淄地區玄武岩中 Th/Nb、Hf/Sm 與原始地函組成相近,但 Nb/La 及 Nb/Y 的比值較原始地函來的高,此一 Nb 較輕稀土元素及 Th 富化的特性,與 Clague and Frey (1983), Hofmann (1986), Dostal et al. (1988)等人對其它板塊內鹼性玄武岩之研究所獲致之結果相同。蓬萊地區碧玄岩(La/Yb)_N 之比值平均為 28.0,蓬萊地區鹼性橄欖岩平均為 15.0,臨淄地區鹼性橄欖玄武岩平均為 10.0,說明蓬萊地區玄武岩較臨淄地區玄武岩具有較高程度的輕稀土元素富化;且蓬萊地區碧玄岩又較鹼性玄武岩具有較高程度的輕稀土元素富化。

圖 4 為山東臨淄蓬萊地區玄武岩經球粒隕石(Sun and McDonough, 1989)標準化之分布圖。圖中顯示本區玄武岩稀土元素之分布型態自 La 到 Lu 平滑下降,未又 Eu 負異常的現象,而且自圖中可發現在本區玄武岩中輕稀土元素之變化範圍較重稀土元素(HREE)來的大,且不論是蓬萊地區或臨淄地區,也不論是碧玄岩或鹼性橄欖岩皆有相似的重稀土元素含量,顯示其地函原可能有石榴子的存在(Dostal et al., 1991)。

圖 5 及圖 6 為臨淄及蓬萊地區玄武岩中 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 對 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 及 ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 對 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb (資料依據陳道公及彭子成 1985, 1988 之作圖),圖中顯示二者之同位素值皆與大陸鹼性玄武岩及洋島玄武岩相似,但是二

表1 山東省蓬萊及臨淄地區玄武岩中不共容元素之比值與原始地函及洋島玄武岩(Sun and McDonough, 1989)之比較

標 本	Th/La	Nb/La	Nb/Y	Zr/Nb	Hf/Sm	La/Ce
蓬萊鹼性橄欖 玄武岩	0.11	1.21	1.60	4.75	0.59	0.64
蓬萊碧玄武岩	0.13	1.32	2.86	3.68	0.60	0.59
臨淄鹼性橄欖 玄武岩	0.11	1.50	1.14	5.42	0.72	0.42
Primitive Mantle	0.12	1.04	0.16	15.70	0.70	0.39
OIB	0.11	1.30	1.66	5.83	0.78	0.46

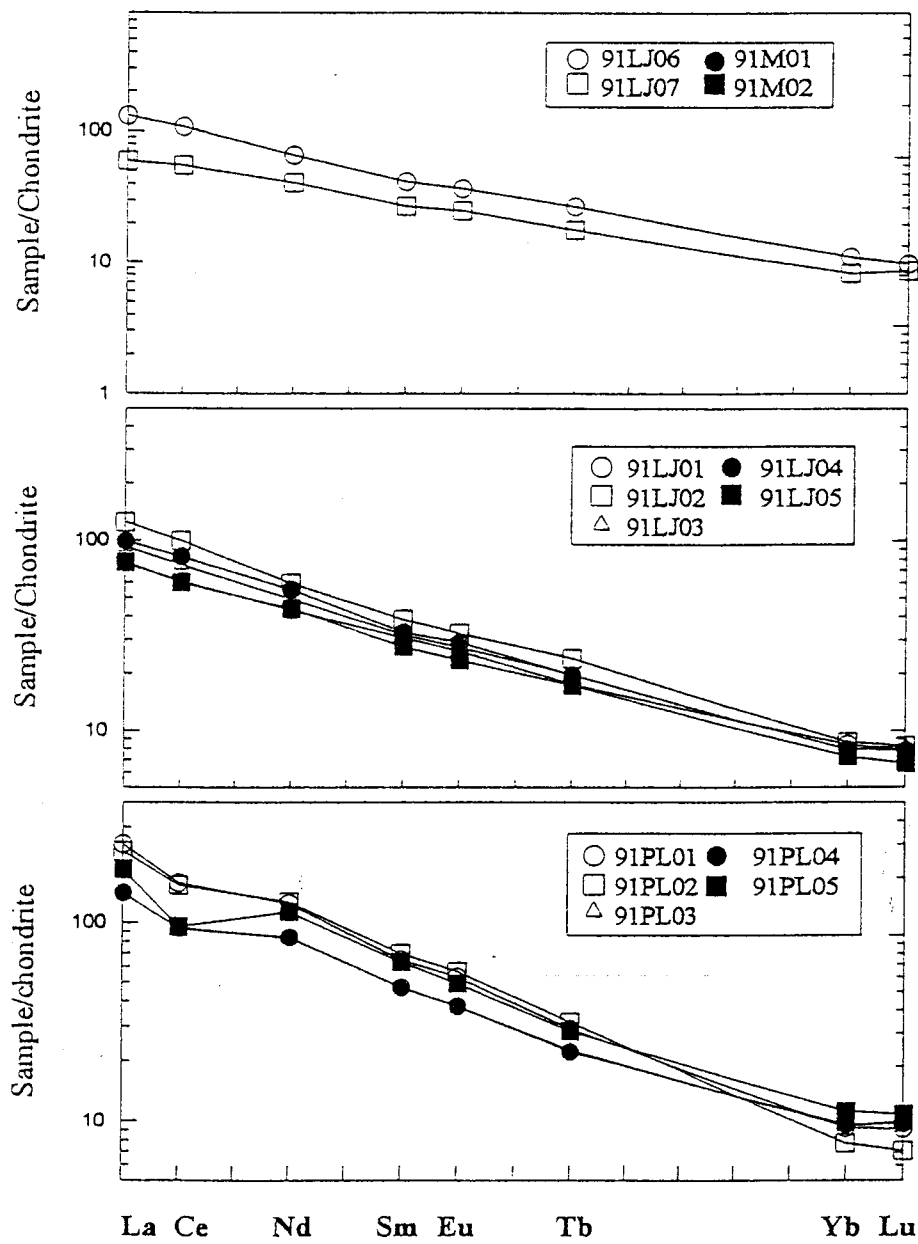


圖4 山東省蓬萊及臨淄地區玄武岩標本中的稀土元素經球粒隕石標準化之分布圖；球粒隕石之資料根據 Sun and McDonough(1989)。

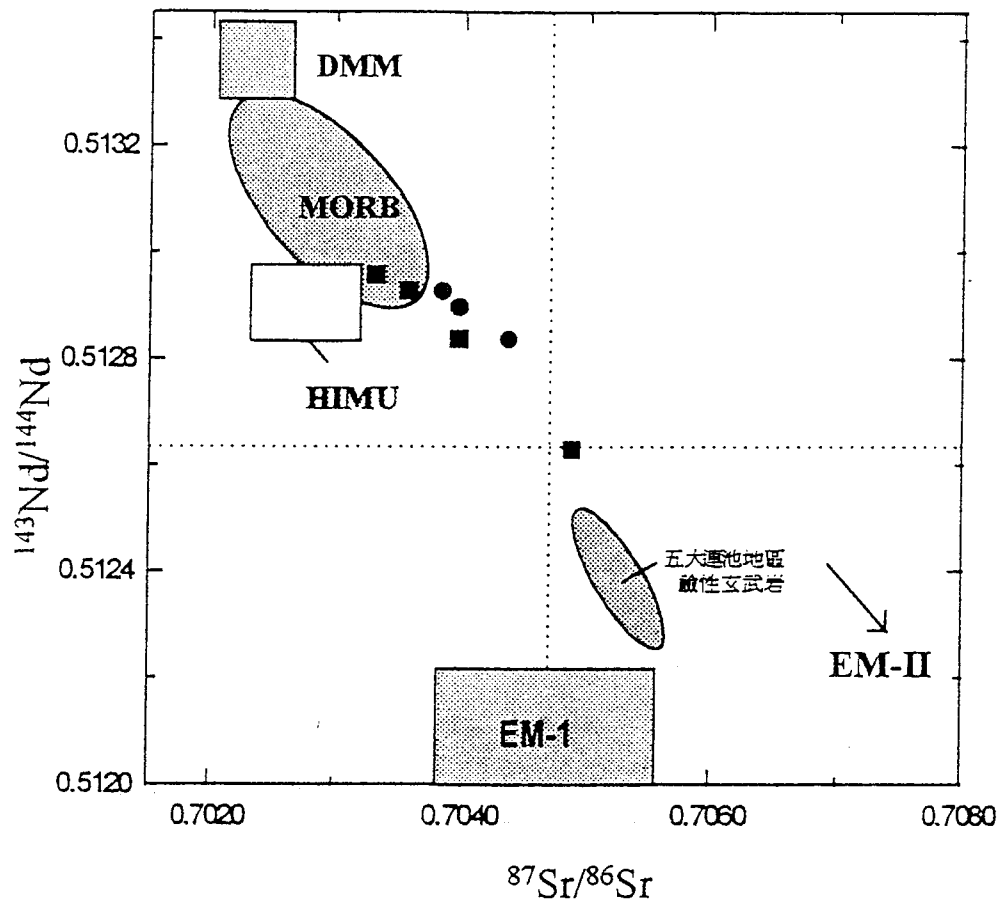


圖5 山東省蓬萊(●)及臨淄地區(■)玄武岩標本鋯鈾同位素之分布圖，圖中五大連池地區玄武岩之資料根據王俊文及解廣轟(1992)；EMI，EMII，DMM，HIMU之資料根據 Zindler and Hart(1986)及Menzies(1990)。

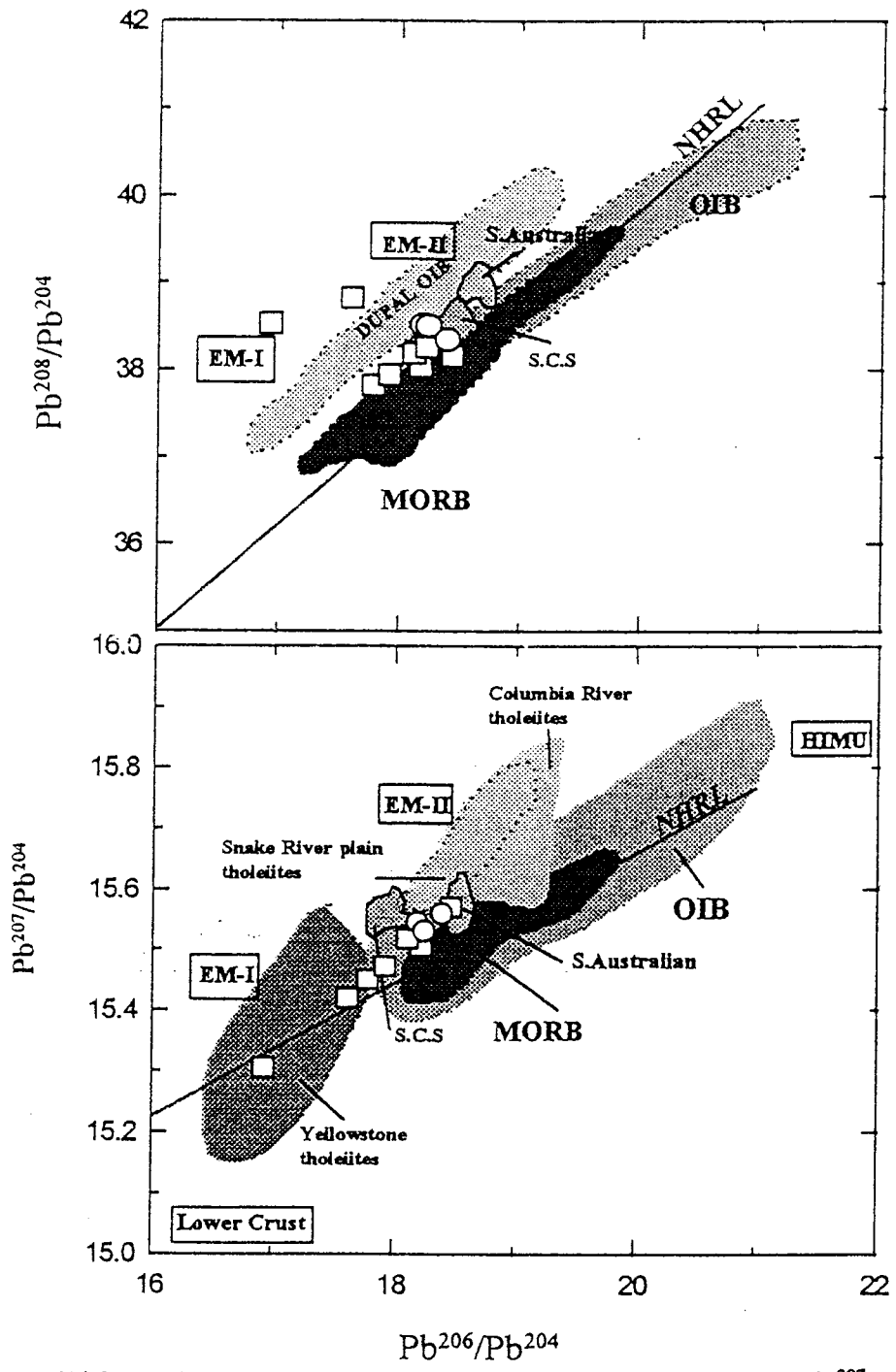


圖6 山東省蓬萊(○)及臨淄地區(□)玄武岩標本中 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 對 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 之作圖，圖中北半球參考線(NEHL)根據Hart(1984)；EM-I，EM-II，DMM，HIMU之資料根據Zindler and Hart(1986)及Menzies(1990)，S.C.S(South China Sea)根據Tu et al(1992)；S.Australian根據McDonough et al(1985)；Columbia River根據Doe et al(1982)；Yellowstone根據Church(1985)。

者之間卻有不同之同位素比值。其中蓬萊地區同位素組成較為均一，與虧損型洋島玄武岩之地函源組成，如(Kerguelen Island; White, 1985)相似；且較臨淄地區有較高的 Pb、Sr 同位素，與較低 Nd 同位素組成。與中國東北其他地區比較，山東臨淄及蓬萊地區皆具有較低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 及較高的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 同位素組成。

由圖 5 可知本區玄武岩中，尤其是臨淄地區 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 對 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 的線性關係；顯示其地函源可能為具有同位素組成不同的二個端成分混合而成，而此一混合模式可能至少需要虧損型地函(DMM)與富化型地函(EMI; Zindler and Harta, 1986; Basu et al., 1991; Chung, 1999; Chung et al., 2001)二者混合，才能解釋臨淄區玄武岩(即斷裂帶中部)之同位素的特性。

主要元素及共容元素之分析結果顯示，蓬萊地區碧玄岩及鹼性玄武岩可能經過橄欖石、斜輝石及少量斜長石之結晶分化，而臨淄地區因具較高的 Mg 值、Ni 及 Cr 含量可說明其歷經結晶分化的程度較小，較為接近原始岩漿。Meschede (1986)，認為玄武岩中 Y、Zr、Ti 及 Nb 等元素，不易受到變質作用或低溫蝕變作用而發生遷移，因此可利用來判定岩漿型態及其生成構造環境。以 Zr/Y 對 Zr 作圖，依據 Pearce and Norry (1979)對構造環境的分區，蓬萊地區及臨淄地區之玄武岩皆落於板塊內玄武岩之範圍內。

圖 7 及圖 8 為本區碧玄岩、鹼性玄武岩中不共容元素經原始地函標準化之分布圖及玄武岩的化學平均值與洋島玄武岩及中洋脊玄武岩(Sun and McDonough, 1989)之比較，圖中顯示本區鹼性玄武岩中除碧玄岩外，其分佈型態與洋島玄武岩及其他大陸或海洋板塊內的鹼性玄武岩(Zhi et al., 1990)相似。所以山東地區玄武岩，可能來自類似大陸及洋島鹼性玄武岩之地函源。在圖 8 中蓬萊地區碧玄岩之不共容元素之分布具有正 Nb 及負 K 的現象。但蓬萊地區及臨淄地區鹼性玄武岩並未具有此一現象。且碧玄岩中 Ba/La 之比值(8.8 及 10.1)，較鹼性玄武岩來得低(蓬萊地區或臨淄地區)(13.4~20.6)；因此可說明蓬萊地區玄武岩之地函源可能具有使 Rb、K、Ba 與 LREE 分化之礦物相存在，此一礦物相可能為金雲母(Philpotts and Schnetzler, 1970)，但在鹼性玄武岩中並未有此一現象可說明在蓬萊地區隨著碧玄岩漿分離後，殘留於地函源中金雲母含量可能逐漸減少。

依據陳道公與彭子成(1985, 1988)之數據可知蓬萊地區玄武岩中同位素組成均一，此區碧玄岩及鹼性玄武岩可能來自同一地函源，經不同程度的部分熔融所形成，即碧玄岩可能較鹼性玄武岩經較低程度的部分熔融。

利用 Chauvel and Jahn (1984)之部分熔融模式但假設地函源之富化值為 $(\text{La}/\text{Yb})_N = 7$ $(\text{Yb})_N = 3$ 可發現蓬萊地區玄武岩可落入具不同殘餘礦物比例地函之熔融曲線內，同時也說明碧玄岩可能由富化地函經 8%左右的部分熔融而形成(圖 9)，而鹼性橄欖玄武岩可能為由同一富化地函經較大程度(約為 15~10%)左右的部分熔融而形成。山東西部臨淄地區部分鹼性橄欖玄武岩可能經過更大(20~30%)之部分熔融而形成。

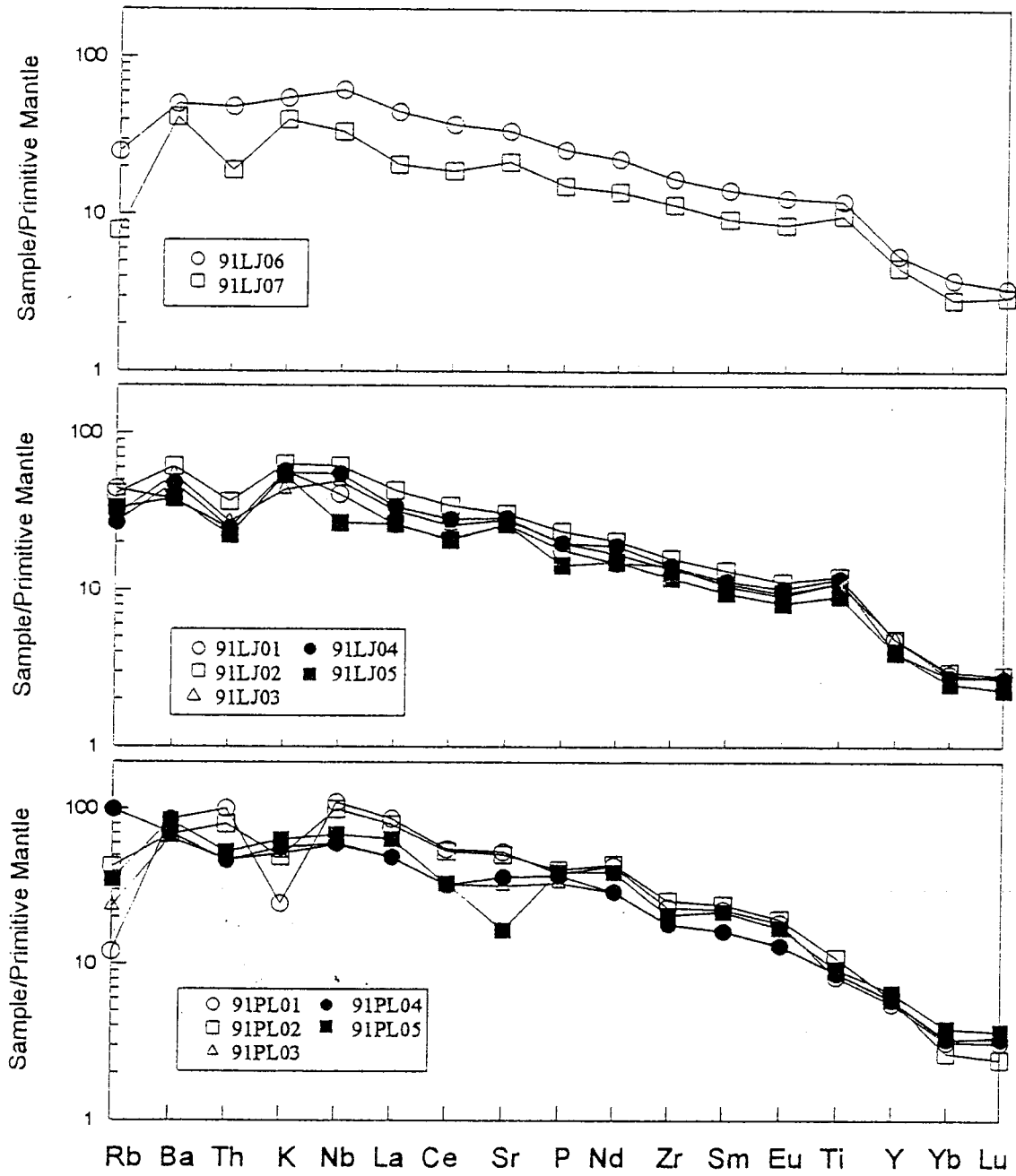


圖7 山東省蓬萊及臨淄地區玄武岩標本中不共容元素經原始地函標準化之分布圖；其中原始地函之資料根據 Sun and McDonough (1989)。

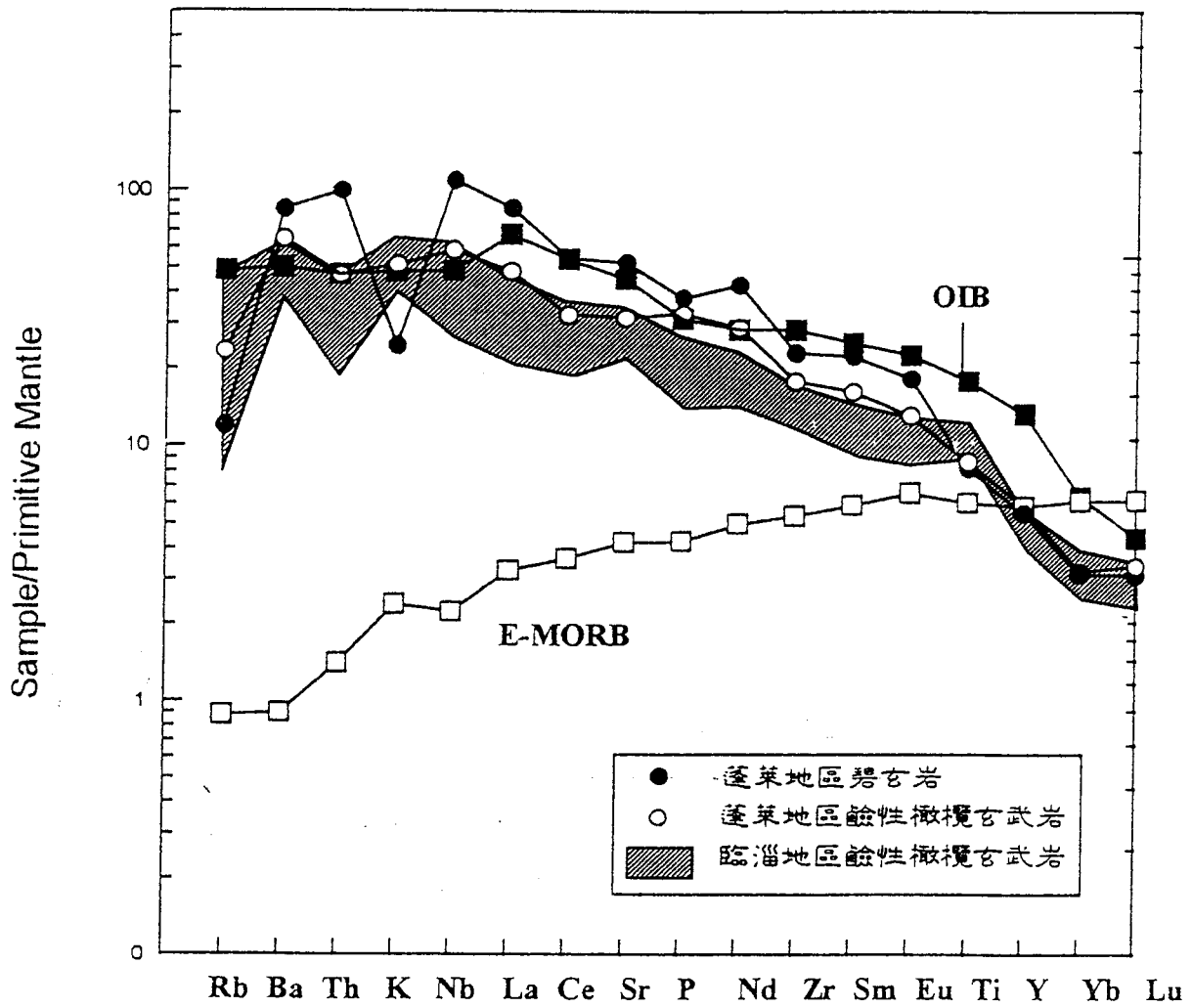


圖8 山東省蓬萊及臨淄地區玄武岩、海島玄武岩(OIB)及中洋脊玄武岩(MORB)中不共容元素經原始地函標準化之分布圖；其中原始地函、海島玄武岩(OIB)及中洋脊玄武岩(MORB)之資料根據Sun and McDonough (1989)。

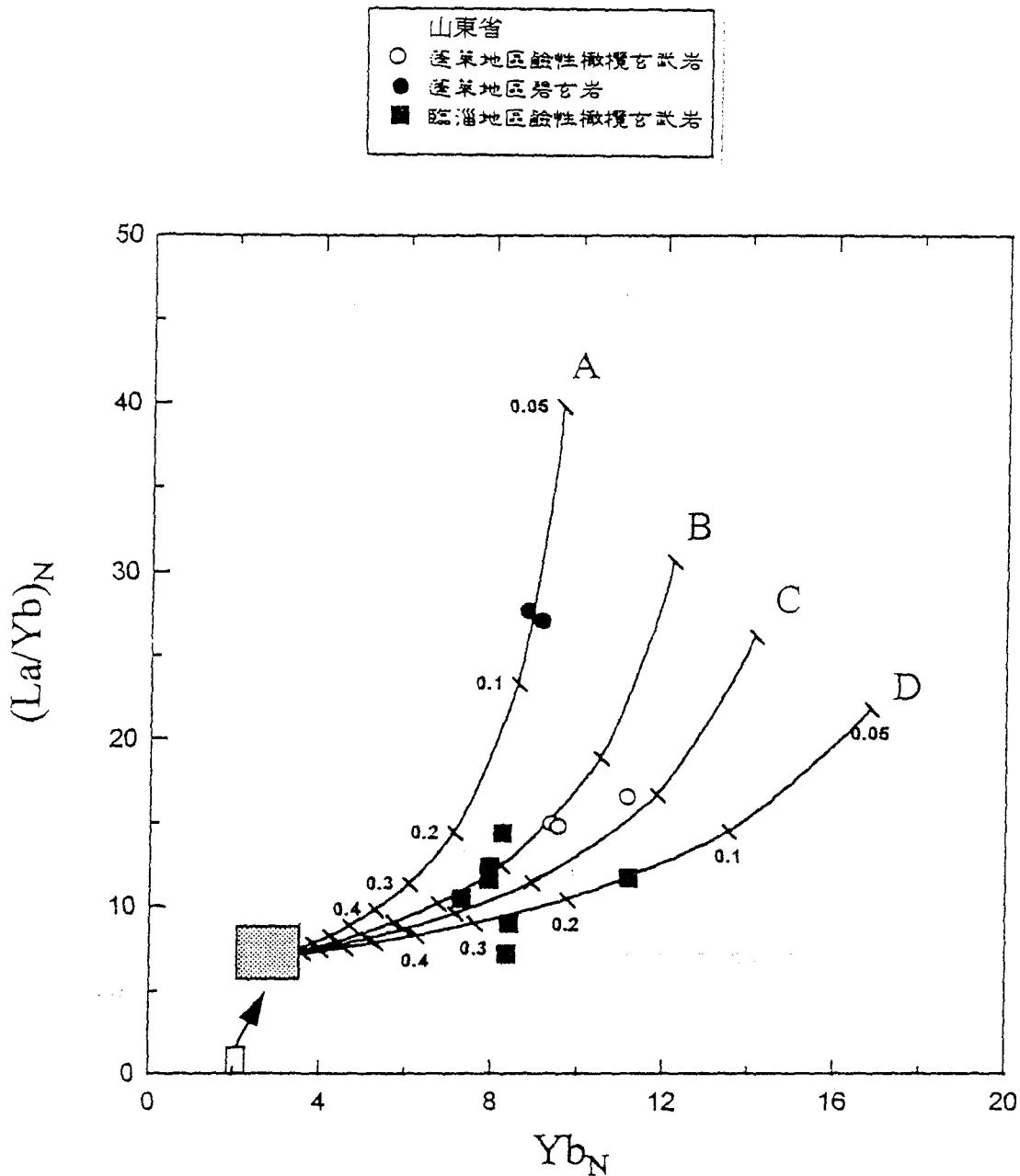


圖9 山東省蓬萊及臨淄地區玄武岩標本中 $(La/Yb)_N$ 對 Yb_N 之作圖；圖中實心方框為假設 $(La/Yb)_N=7$ ， $Yb_N=3$ 之富化地函；A,B,C,D分別代表不同組成之地函殘留體經不同比例的部份熔融之曲線（圖符同圖2）。模式依據 Chauvel and Jahn, 1984。

山東蓬萊地區玄武岩具有不共容元素富化特徵(包括輕稀土元素)，但此等玄武岩亦具有相當高的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512850 \sim 0.512924$, 陳道公及彭子成, 1985, 1988), 造成了同位素與不共容元素資料不相符的現象。可能的解釋為岩石圈地函受到較近期的流體換質作用(mantle metasomatism)所致; 即流體換質發生於熔融事件之前不久。

在山東西部的臨淄地區，由於玄武岩同位素組成具有非均質性，似乎介於 EMI 及 DMM 二個端成分之間; 因此其岩石成因可能係由於 EMI 之地函及虧損型地函的混合而成。

山東臨淄地區位於郟盧斷裂帶之上，且其岩石圈厚度較山東東部蓬萊地區來的薄，而臨淄地區玄武岩與中國東北部位於主要斷裂帶上的火山岩(如鏡泊湖、龍岡)同樣具有同位素組成非均一的特性。山東蓬萊地區與中國東北部五大連池地區，同位於較厚的大陸岩石圈之下，且皆遠離主要斷裂帶，產出之玄武岩的同位素組成較為均一。但源自非均質地函源的玄武岩常位於深斷裂帶之內且郟盧斷裂自古生代以來即已經開始活動(許志琴, 1980; 高唯明等人, 1980)。由於斷裂帶之平行位移及張裂作用的影響，可能有利於不同的端成分發生混合。

山東臨淄地區火山岩與黑龍江省鏡泊湖地區、吉林省龍岡地區同位於斷裂帶之上，因此筆者以山東臨淄地區與黑龍江省鏡泊湖地區及吉林龍岡地區鹼性橄欖玄武岩(Hsu et al., 2000)作一比較，就同一鎂值而言，山東地區較中國東北玄武岩有較低的 SiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 、 Al_2O_3 、Rb、Sr、Ba、Hf、Nb、Th 及 REE，較高的 MgO、CaO 及 Ni、Cr、Co、V 等，臨淄地區較龍岡及鏡泊湖地區玄武岩有較高的 Zr/Nb、Zr/Hf、Ce/Pb，較低的 Th/Nb、Ba/Nb 及 Ba/La。臨淄及蓬萊地區玄武岩中的 SiO_2 含量較中國東北玄武岩為低，但其 Ni、Cr、Co、V 等元素則較高。山東地區玄武岩較東北地區玄武岩具有較低的不共容元素(含稀土元素)及 Na_2O 及 K_2O ，亦說明了山東地區地函源富化的程度可能較東北地區為小。另一可能為虧損型地函與富化型地函混合時，虧損型地函所佔之混合比例較大，此可由山東地區除少數標本具較高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ，較低 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 之外，大部分標本均落於虧損型地函的端成分上看出。

四、計畫成果自評

本計畫已按預定研究內容完成並獲得下列結論。

1. 由主要元素及共容元素之分析結果顯示，蓬萊地區碧玄岩及鹼性橄欖玄武岩可能經過橄欖石、斜輝石及少量斜長石之結晶分化，而臨淄地區玄武岩尤具較高的 Mg 值、Ni 及 Cr 含量可說明其歷經結晶分化的程度較小，較為接近原始岩漿。蓬萊地區及臨淄地區之玄武岩皆為大陸板塊內部斷裂帶所引發之玄武岩。
2. 山東地區玄武岩，可能來自不共容元素成分類似大陸及洋島鹼性玄武岩之地函源，山東東部(蓬萊地區)與西部(臨淄地區)玄武岩中同位素組成及不共容元

- 素比值的差異，可說明二者可能來自不同的地函源，蓬萊地區玄武岩同位素組成均一，此區碧玄岩及鹼性玄武岩可能由同一經近期流體換質富化之地函源，經不同程度的部分熔融所形成。山東西部臨淄地區之玄武岩，其同位素組成具有非均質的特徵，可能係由 EMI 之地函源及虧損型地函原混合而成。
3. 由於斷裂帶之平行位移及張裂作用的影響，可能有利於不同的地函源端成分發生混合，因而造成山東地區位於斷裂帶內的火山岩具有同位素組成的非均一性；而大陸內遠離張裂中心之火山岩，可能具有較為均一的同位素組成。
 4. 山東地區玄武岩較中國東北火山岩具有較低的不相容元素、稀土元素及 Na_2O 、 K_2O 之含量，說明了山東地區地函源富化的程度可能較東北地區為小，另一可能為虧損型地函與富化型地函混合時，虧損型地函所佔之比例可能較大。

五、參考文獻

- 高維明、李家發、孫竹友 (1980) 沂述大裂谷的生成與演化，地震地質，第 3 期，11-24 頁。
- 許志琴 (1980) 談談裂谷。地質評論，第 26 卷，第 3 期，21-34 頁。
- 陳道公、彭子成 (1985) 山東新生代火山岩 K-Ar 年齡和 Pb-Sr 同位素特徵。地球化學，第 4 期，6-14 頁。
- 陳道公、彭子成 (1988) 蘇皖若干生代火山岩的鉀氬年齡和鉛鋇同位素特徵。岩石學報，第 2 期，3-12 頁。
- 黃汲清 (1979) 對中國大地構造若干特點的一些認識並著重討論地槽褶皺帶的多旋迴發展。地質學報，第 53 卷，第 2 期，。
- 黃邦強、張朝文、金以鐘 (1990) 大地構造學基礎及中國區域構造概要。地質出版社，共 212 頁。
- Basu, A.R., Wang, J., Huang, W., Xie, G. and Tatsumoto (1991) Major element, REE and Pb, Nd and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of Eastern China: implications for their origin from suboceanic-type mantle reservoirs. *Earth Planet. Sci. Letters* 105, 149-169.
- Chauvel, A.L. and Jahn, B.M. (1984) Nd-Sr isotope and REE geochemistry of alkali basalts from the massif central, France. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48, 93-110.
- Chen, D. and Peng, Z. (1985) K-Ar age and Pb and Sr isotopic characteristics of Cenozoic volcanic rocks in Shandong, China. *Geochimica*, 5, 293-303.
- Chung, S.L. (1999) Trace element and isotope characteristics of Cenozoic basalts around the Tanlu fault with implications for the eastern plate boundary between North and South China. *J. Geol.* 107, 301-312.
- Chung, S.L. Sun, S.S. and Crawford A.J. (2001) Indian Ocean type convecting

- mantle underlies East Asia: A consequence of Gondwana break up and reassembly. *West Pacific Earth Sci.*, 1, 1-18.
- Church, S.G. (1985) Genetic interpretation of Lead-isotopic data from the Columbia River basalt group. Oregon. Washington and Idaho. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 97, 676-690.
- Clague, D.A. and Frey, F.A. (1982) Petrology and trace element geochemistry of the Honolulu volcanics, Oahu: Implications of the oceanic mantle below Hawaii. *Jour. Petrol.*, 23, 447-504.
- Doe, B.R., Leeman, W.P., Christiansen, R.L., and Hedge, C.E. (1982) Lead and strontium isotopes and related trace elements as genetic tracers in the upper Cenozoic rhyolite- basalt association of the Yellowstone Plateau volcanic field. *Jour. Geophys. Res.*, 87, 4785-806.
- Dostal, J., Dupuy, D., Zhai, M. and Zhi, X. (1988) Geochemistry and origin of Pliocene alkali basaltic lavas from Anhui-Jiangsu, eastern China. *Geochem. Jour.*, 22, 165-176.
- Dostal, J., Zhi, X., Muehlenbaches K., Dupuy, C. and Zhai, M. (1991) Geochemistry of Cenozoic alkali basaltic lavas from Shangdong provinces, eastern China. *Geochem. Jour.*, 25, 1-16.
- Frey, F.A. Green, D.H. and Roy, S.D. (1978) Integrated models of basaltic petrogenesis: a study of quartz tholeiites to olivine melilites from southeastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data. *J. Petrol.*, 19, 463-513.
- Hofmann, A.W. (1986) Nb in Hawaiian magmas: Constraints on source composition and evolution. *Chem. Geology*, 57, 17-30.
- Hsu, C.N., Chen, J.C. and Ho, K.S. (2000) Geochemistry of Cenozoic volcanic rocks from Kirin province, NE China. *Geoch. J.* 34, 33-58.
- Jin, L. (1985) K-Ar ages of Cenozoic volcanic rocks in the middle segment of the Tancheng-Lujiang Fault Zone and stages of related volcanic activity. *Geological Review*, 31, 309-315.
- McDonough, W.F., McCulloch, M.T. and Sun, S.S. (1985) Isotopic and geochemical systematics in Tertiary-Recent basalts from southeastern Australia and implications for the evolution of the sub-continental lithosphere. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 49, 2051-2067.
- Menzies, M.A. (1990) Effects of small volume melts. *Nature*, 343, 312-313.
- Meschede, M. (1986) A method of discriminating between different types of Mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chem. Geology*, 56, 207-218.
- Pearce, J.A. and Norry, M.J. (1979) Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb

- variation in volcanic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 69, 33-47.
- Philpotts, J.A. and Schnetzler, C.C. (1970) Phenocryst-matrix partition coefficients for K, Rb, Sr and Ba with application to anorthosite and basalt genesis. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 34, 307-322.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes. In: A.D. Saunders and M.J. Norry (eds.), "Magmatism in the Ocean Basins". *Geol. Soc., Sp. Pub.*, 42, 313-345.
- Tu, K., Flower, M.F.J., Carlson, R.W., Xie, G.H., Chen, C.Y., and Zhang, M. (1992) Magmatism in the South China Basin, 1. Isotopic and trace element evidence for an endogenous Dupal mantle component. *Chem. Geol.*, 97, 47-63.
- Wang, H.F. (1981) A study of K-Ar isotopic ages of Cenozoic basalts from Linju area, Shandong Province. *Geochimica*, 4, 321-328.
- Wedepohl, K.H. (1985) Origin of the Tertiary basaltic volcanism in the Hessian depression. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 89, 122-143.
- White, W.M. (1985) Source of oceanic basalts: Radiogenic isotopic evidence. *Geology*, 13, 115-118.
- Wu, L., Zhai, M., Zheng, X., Yang, R. and Huang, Z. (1985) Cenozoic volcanic rocks in eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 1, 1-23.
- Yang, S. and Yang, W. (1985) *Geotectonic of China*. Geology Publishing House, Beijing, 310p.
- Zhi, X., Chen, D.G. and Yang, J. (1995) Petrogenesis and geochemistry of Neogene basalts in eastern China. *Acta Geol. Sinica* 69, 156-168 (in Chinese).
- Zhi, X., Song, Y., Frey, F.A., Feng, J. and Zhai, M. (1990) Geochemistry of Hannuoba basalts, Eastern China: Constraints on the origin of continental alkalic and tholeiitic basalts. *Chem. Geology*, 88, 1-33.
- Zindler, A. and Hart, S.R. (1986) Chemical geodynamics, *An. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14, 493-571.