

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

南京附近新生代玄武岩之地球化學與岩石成因
Geochemistry and petrogenesis of Cenozoic basalts
from Nanking area

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC92-2116-M-002-012

執行期間：92年8月1日至93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：陳荷薪、李永棠，國立台灣大學海洋研究所

執行單位：國立台灣大學海洋研究所

中華民國93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

南京附近新生代玄武岩之地球化學與岩石成因
Geochemistry and petrogenesis of Cenozoic basalts
from Nanking area

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC92-2116-M-002-012

執行期間：92年8月1日至93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：陳荷薪、李永棠，國立台灣大學海洋研究所

執行單位：國立台灣大學海洋研究所

中華民國93年8月16日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

南京附近新生代玄武岩之地球化學與岩石成因 Geochemistry and petrogenesis of Cenozoic basalts from Nanking area

計畫編號：NSC92-2116-M-002-012

執行期間：92年8月1日至93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：陳荷薪、李永棠，國立台灣大學海洋研究所

一、中英文摘要

本文分析了江蘇省南京附近之新生代玄武岩（包括六合縣泉水、瓜埠山、靈岩山、竹鎮白揚採石場、練山採石場以及江寧方山與句容方山）之化學成分。此等玄武岩以熔岩流和火山碎屑出露，其中瓜埠山和練山採石場屬中心式噴發，其餘均屬裂隙式溢流噴發。研究區域內之玄武岩可概分為矽質玄武岩、橄欖玄武岩和鹼性玄武岩；岩象上以橄欖石、輝石及斜長石為主要斑晶；早期形成之玄武岩內含有較多之斜輝石斑晶，但後期形成之玄武岩斜輝石含量則減少。

根據玄武岩之化學成分，推斷本區玄武質母岩漿在演化過程中，可能經歷以橄欖石及斜輝石為主的結晶分化作用。由模擬結晶分化的計算結果得知，研究區內之玄武質母岩源在演化過程中，經歷 7.57%橄欖石和 11.93%斜輝石之結晶分化，而殘餘 80.50%之衍生岩漿。

本文研究之玄武岩其輕稀土元素 $[(La/Yb)_N]$ 比值矽質玄武岩為 13.6~14.6、橄欖玄武岩 13.2~15.9、鹼性玄武岩 13.0~28.4] 及不共容元素呈現富集具有類似洋島玄武岩(OIB)之地化特性。此現象顯示研究區域內之玄武岩可能是由地函經小比例之部分熔融而形成的。利用 Shaw (1970)之計算公式，得知研究區內地函源經大約 5%之部分熔融形成玄武質母岩漿。

筆者推測在南海停止張裂後，岩漿之熱中心可能向北經過華南，再延伸到江蘇省境內，此遷移作用可能造成郟廬斷裂帶之再活動，上部地函因此發生部分熔融，形成江蘇省境內之各類玄武岩。綜合本文之結果筆者推斷本區內玄武岩源自虧損地函，原始岩漿(JK-1)在經歷了橄欖石和斜輝石之結晶分化作用後形成殘餘衍生岩漿(JJ2)。

關鍵詞：玄武岩、地球化學、岩石成因、南京地區

Abstract

Cenozoic basaltic rocks sampled in Nanking area have been geochemically analyzed. These basaltic rocks occur as lava flows and pyroclastics. Both central eruption and fissure eruption have been found. The basaltic rocks can be divided into tholeiite, olivine basalt and alkali basalt; with olivine pyroxenes and plagioclase as the major phenocrysts. The early formed basalts contain more clinopyroxene than the later one. Based on the chemical compositions of the basalts, we suggest that the parental magma has experienced olivine and clinopyroxene fractionation during magma evolution. Simulating calculations indicated that parental basaltic magma has fractionated 7.57% olivine and 11.93% clinopyroxene and left 80.50% residual magma. The $(La/Yb)_N$ ratios for the tholeiite, olivine basalt and alkali basalts are 13.6-14.6, 13.2-15.9 and 13.0-28.4 respectively. The incompatible elements are enriched and show spidergrams similar to ocean island basalts (OIB). The parental basaltic magma may be formed through 5% partial melting of the mantle source based on the model of Shaw (1970).

We suggested that after the cessation of spreading of the South China Sea, the thermal centers might have migrated through southern China to Kiangsu province which caused the reactivation of Tan-Lu fracture zone. Based on the geochemical data collected we suggest that the parental basaltic magma (JK-1) was derived from a depleted mantle source and has experienced the fractionation of olivine and clinopyroxene to form the residual magma (JJ2).

Key words: basalts, geochemistry, petrogenesis, Nanking area

二、計畫緣由與目的

新生代時期歐亞大陸板塊之仰衝促使中國東部沿海地區岩石圈抬升，陸殼在拉張應力作用下，不但發育了黃海、東海及南海等陸緣海，並在中國東部形成眾多之斷陷盆地和裂谷。由於此等裂谷和斷裂帶深達岩石圈，造成地函源之玄武岩漿大量且頻繁地噴出地表，在中國東部形成了一系列的新生代玄武岩(鄂莫嵐與趙大升，1987；劉若新，1992；黃邦強等人，1990；陳道公，1992)。

中國東部的活動斷裂中以郟廬斷裂帶規模最大，切割最深(許志琴，1980；高維明等人，1980)，其延伸長度可達2000公里，南起湖北廣濟，經安徽廬江到山東郟城，穿越渤海後，一支經過遼東半島直達老爺嶺(即撫順—密山斷裂帶)，另一隻沿著鴨綠江西岸，經圖門江西岸進入蘇聯地區(即鴨綠江—暉春裂谷)，一般相信中國東部與東北地區之火山活動與郟廬斷裂帶息息相關。江蘇、安徽一帶分佈著新生代(古新世至更新世)玄武岩，其中早第三紀(Paleogene)以矽質玄武岩為主，主要分佈在蘇北盆地和江蘇—安徽交界處，呈熔岩流出現；晚第三紀(Neogene)中新世是火山活動的主要時期，以鹼性玄武岩為主；更新世的火山活動則出現在安徽女山等地，呈火山錐，岩性為碧玄岩、霞石岩等。

江蘇省境內玄武岩之分佈，除了盱眙地區和隱伏於蘇北盆地內的玄武質岩石外，可概分為兩個岩帶：

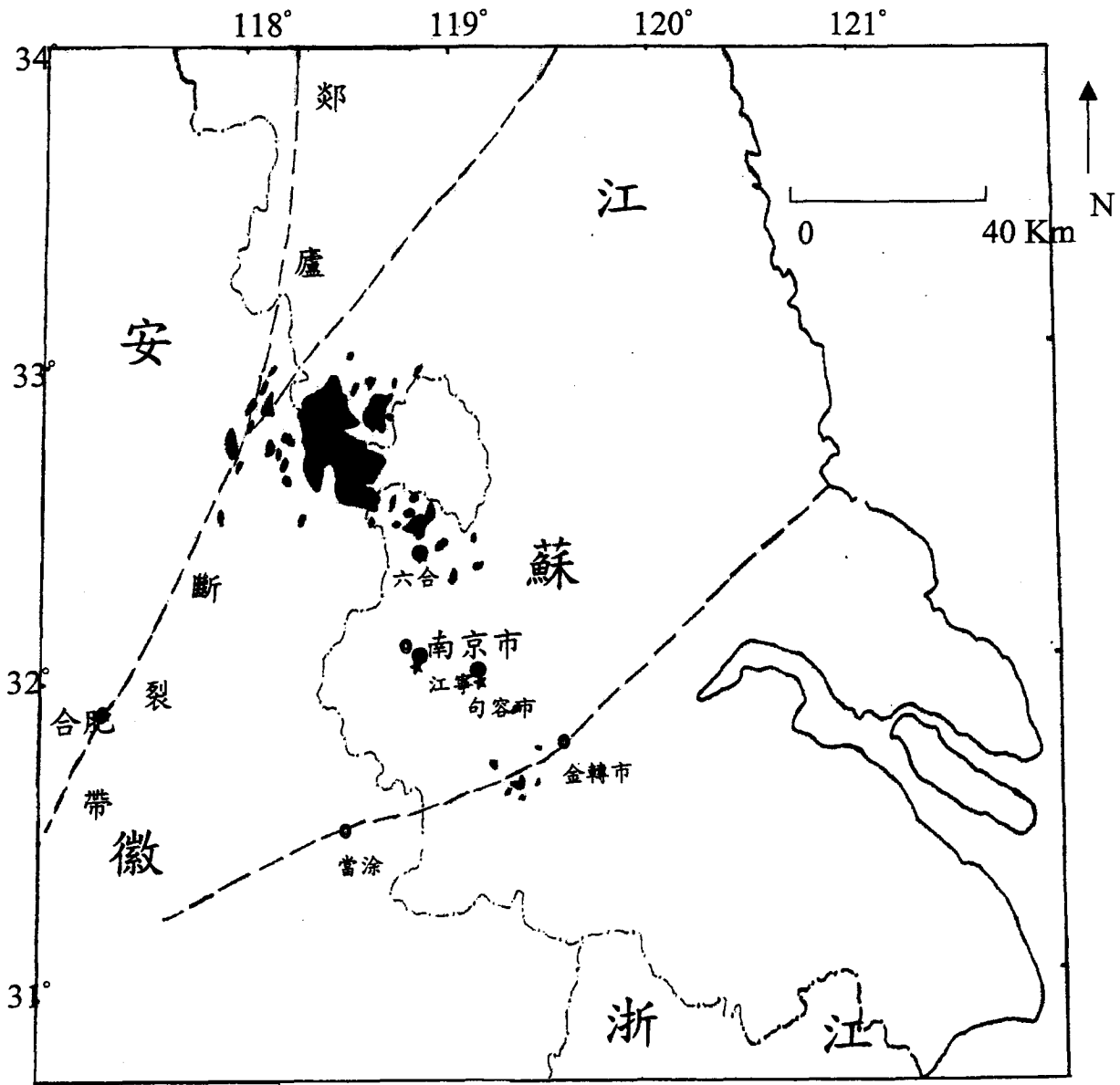
- (1) 東北向岩帶—小丹陽至江寧方山帶，北以江寧—句容一線為界，南至安徽涇縣—宣城一線，西抵長江沿岸，東達茅山西麓。該岩帶以上新世玄武岩為主，從北至南主要出露於南京附近的西善橋，經方山、腰永、南山頭、句容赤山、浮山至斧山等地。這些玄武岩明顯地受控於長江破碎帶以及與其平行的小丹陽—江寧斷裂帶，以中心式噴發為主。玄武岩的主要噴發發生於中心統洞玄關組之後，更新統兩花台組之前，其典型代表為江寧方山玄武岩，自下而上可分為三個組，兩個噴發循環(根據江蘇、安徽地質局，1974，1977)。第一噴發循環(又稱為下方山玄武岩組)，以鹼性橄欖玄武岩為主，厚度數十米；第二噴發旋回(又稱為上方山玄武岩組)，以橄欖矽質玄武岩為主，其厚度可達百餘米，晚期以鹼性橄欖輝綠岩的岩頸或岩牆產出。在第一和第二噴發循環之間沈積了黃崗祖的凝灰質砂礫岩。
- (2) 近東西向岩帶—大致西起巢縣，經六合、儀徵、揚州至鎮江的長江沿岸。該岩帶也可視為女山至古城的北西向岩帶的東延部分，以上新世玄武岩為主，主要出露於江埔、六合塔山、瓜埠山、黃崗、儀徵等。按其岩性特徵也可分為與北東向岩帶類似的兩個循環(根據江蘇工業局區測隊1970之區域地質調查報告)：第一噴發循環為小盤山玄武岩組(相當於下方山玄武岩組)，以鹼性橄欖玄武岩和碧玄岩為主；第二噴發循環為橄欖矽質玄武岩和鹼性橄欖玄武岩的尖山玄武岩組(相當於上方山玄武岩組)；在上述兩循環之間為褐黃、淺綠色含礫凝灰質砂岩，偶夾玄武岩薄層(相當於黃崗組)。

本文分析江蘇省南京市附近：(包括六合縣泉水、瓜埠山、竹嶺、練山、靈岩山江寧縣方山和句容市方山，圖一) 新生代玄武岩之主要、微量及稀土元素，結合文獻中之 Sr 及 Nd 同位素資料，探討玄武岩之成因、岩漿演化、岩漿源區的性質以及與地體構造環境之關係。

三、結果與討論

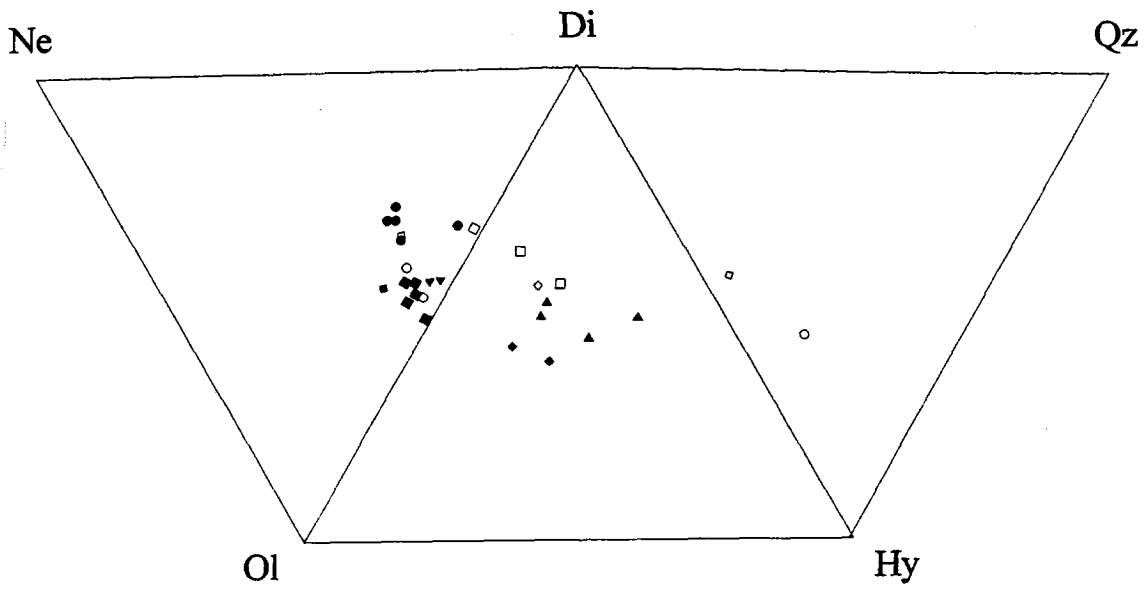
本研究區內之玄武岩以鹼性玄武岩為主，在外觀上多呈現濃黑色(與石基中之含鐵礦物有關)，少數標本呈淡褐色(矽質玄武岩)。其岩石組織以斑狀為主，部分岩樣具有典型的聚晶構造，主要之斑晶為橄欖石、輝石及斜長石，石基則以微晶之斜長石、輝石和不透光礦物(磁鐵礦和鈦鐵礦)為主。部分岩樣之橄欖石具有明顯的環帶構造，顯示橄欖石在結晶分化過程中，並未與母岩漿達到平衡。此種斑晶大部分可能是早期結晶的產物，但少部分可能是玄武質岩漿捕獲來的捕撈晶，早期形成之玄武岩內含有大量之橄欖石和斜輝石斑晶，而斜長石主要存在於石基中，但後期形成之玄武岩其橄欖石和斜輝石含量則減少，而斜長石斑晶則明顯的增加。此現象顯示區內玄武質岩漿在演化過程中，可能有經歷過橄欖石和斜輝石的結晶分化作用。

圖二為本研究區域內新生代玄武岩類應存礦物投影圖，根據本圖之分類法，可將區內之玄武岩區分為石英矽質玄武岩、橄欖玄武岩和鹼性玄武岩三大類。圖三為本研究區域內玄武岩主要元素對 SiO_2 作圖，圖中可見 Al_2O_3 與 SiO_2 呈正變關係，此現象可能是斜長石在後期集中所造成的；而 MgO 、 FeO 、 CaO 、 MnO 和 TiO_2 與 SiO_2 呈負變關係，顯示在岩漿演化過程中，曾經歷橄欖石和輝石等鐵鎂礦物的結晶分化作用。而 Na_2O 、 K_2O 與 SiO_2 間缺乏良好的相關性，顯示沒有明顯的鹼性長石類結晶分化。另外， P_2O_5 與 SiO_2 呈負變關係之現象，可能與不同比例之部分熔融有關。圖四為玄武岩微量元素對 SiO_2 作圖，由圖中可見除了 Rb 外，Ba、Co、Cr、Cu、Hf、Li、Nb、Ni、Sc、Sr、Ta、Th、U、V、Y、Zn 和 Zr 均隨 SiO_2 含量增加而漸減，主要原因如下：(1) Ni 在玄武岩漿系統內屬於高度相容性元素，易進入橄欖石晶格內，因此在橄欖石結晶分化過程中，會造成 Ni 含量之改變；(2) Cr 亦屬於相容元素，易進入斜輝石晶格中，分配係數為 10 (Cox et al., 1979)，如斜輝石在岩漿分化後期減少則會造成 Cr 含量與 SiO_2 呈負變關係，此外 Sc 易進入斜輝石中，故亦隨 SiO_2 含量之增加呈遞減之趨勢；(3) Sr 隨 SiO_2 含量之變化可歸因於斜輝石與斜長石之結晶分化，但由圖三中， Na_2O 及 K_2O 並未隨 SiO_2 呈明顯變化趨勢來看，在岩漿演化過程中，鹼性長石之結晶分化可能並不明顯；(4) Ba (1.43 Å)、Sr (1.27 Å)、Ca (1.06 Å) 離子半徑相近可互相取代，故斜輝石之結晶分化亦會造成 Ba 含量之改變；(5) Hf (0.78 Å)、Nb (0.69 Å)、Ta (0.68 Å) 和 Zr (0.79 Å) 之離子半徑與 Ti 離子半徑 (0.68 Å) 相似，可能互相取代，此等元素之變化亦可能與斜輝石之結晶分化有關；(6) Th (1.02 Å)、U (0.97 Å) 與 Ca (1.06 Å) 的離子半徑很近似，可進入含 Ca 礦物中(如斜輝石)，又 Li、V 及

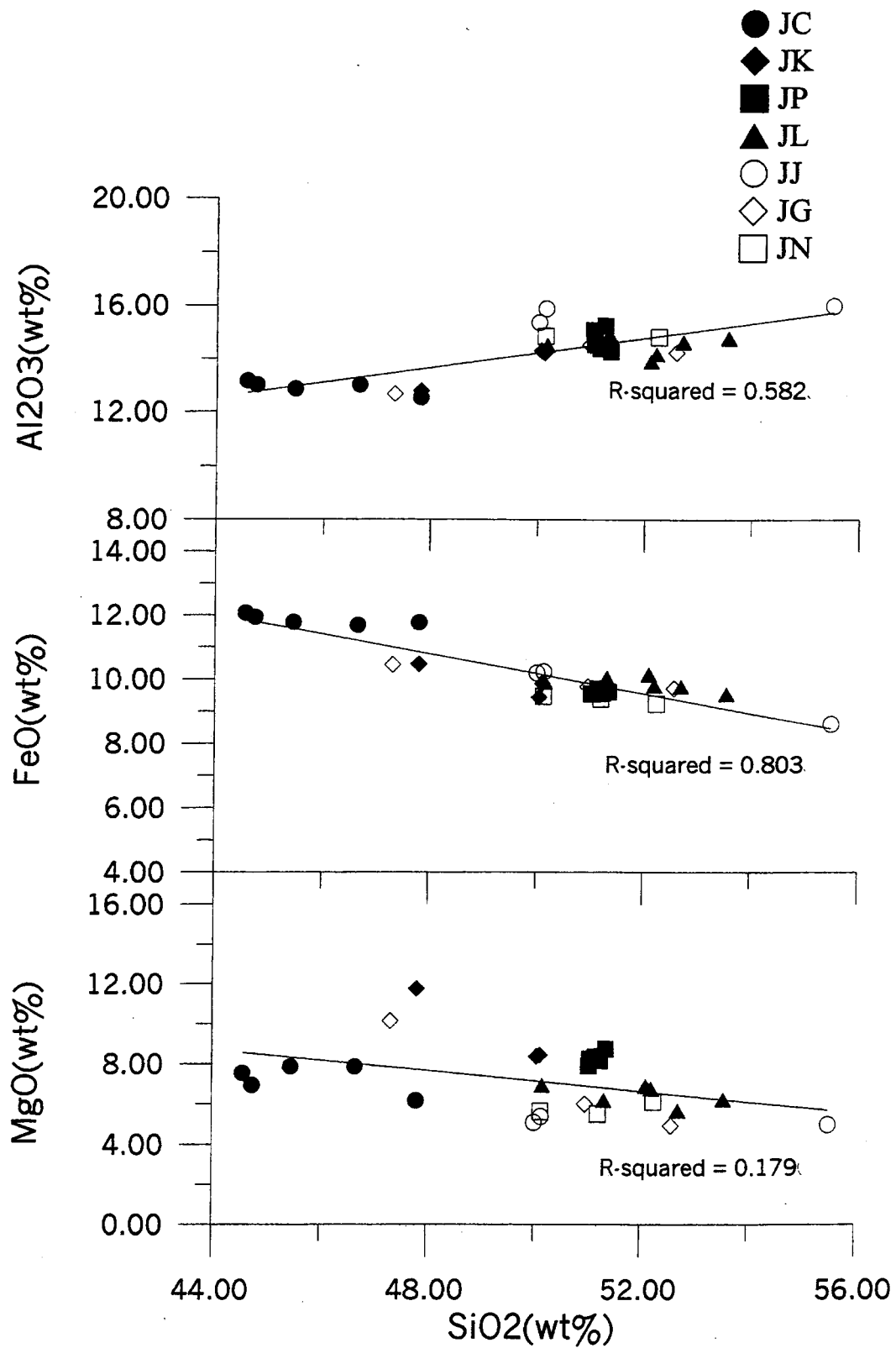


圖一 江蘇省南京市附近新生代玄武岩之採樣位置圖
 ★ 採樣點；黑色部分為新生代玄武岩之分佈區

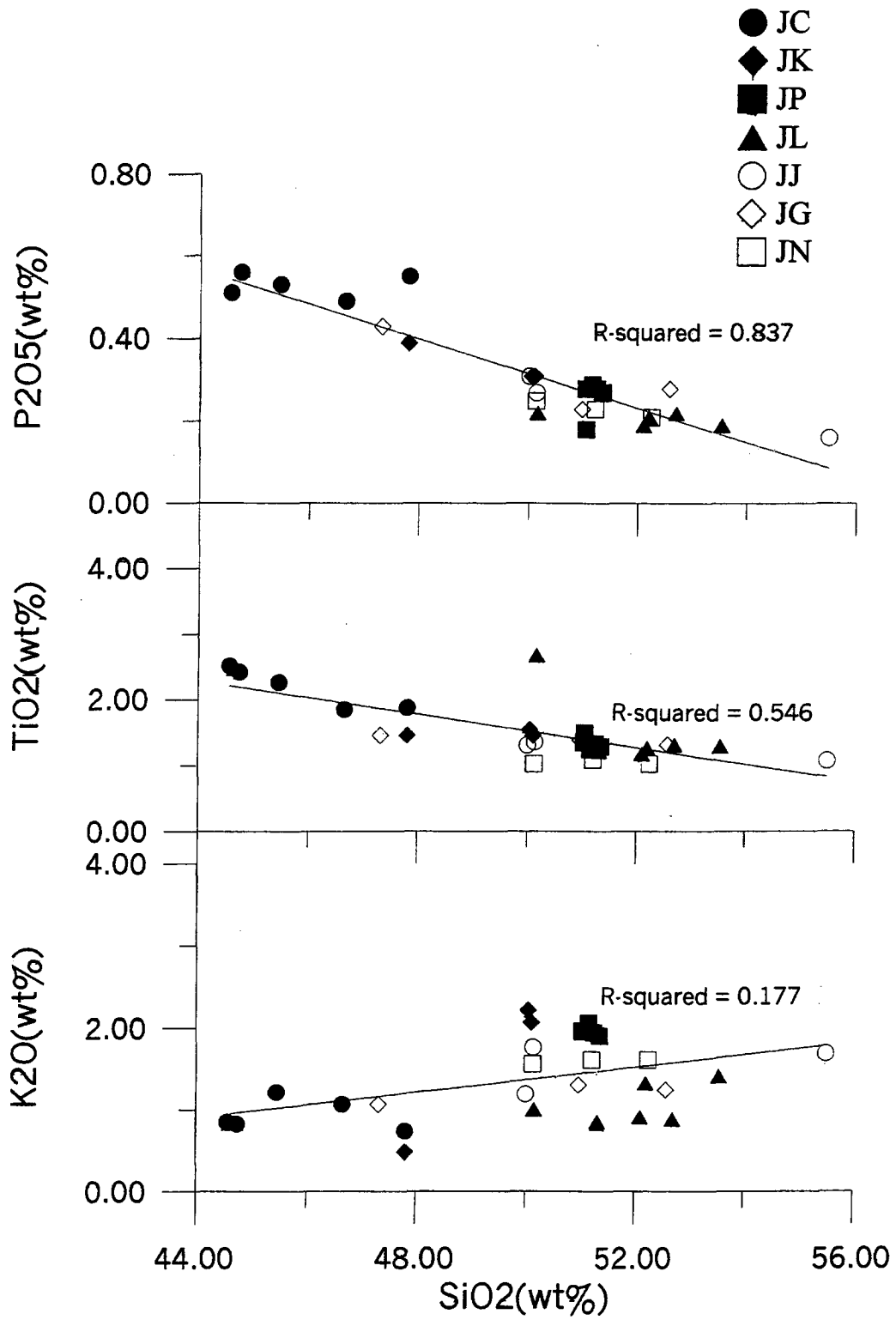
- JC (江蘇省六合縣泉水)
- ◆ JK (江蘇省六合縣瓜埠山)
- JP (江蘇省六合縣竹鎮)
- ▲ JL (江蘇省六合縣練山採石場)
- JJ (江蘇省江寧縣方山)
- ◇ JG (江蘇省句容方山)
- JN (江蘇省六合縣靈岩山)



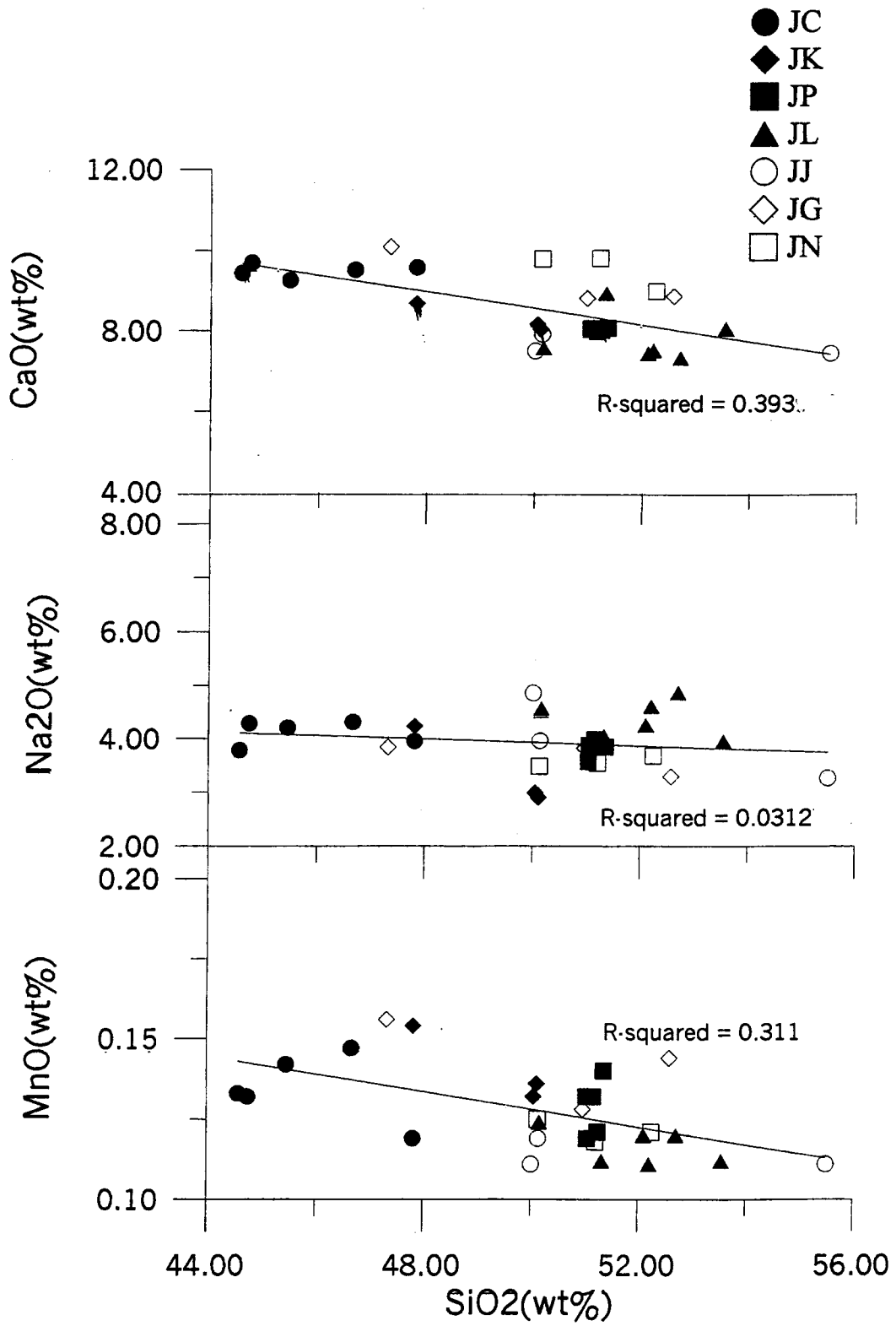
圖二 江蘇省新生代玄武岩應存礦物投影圖。



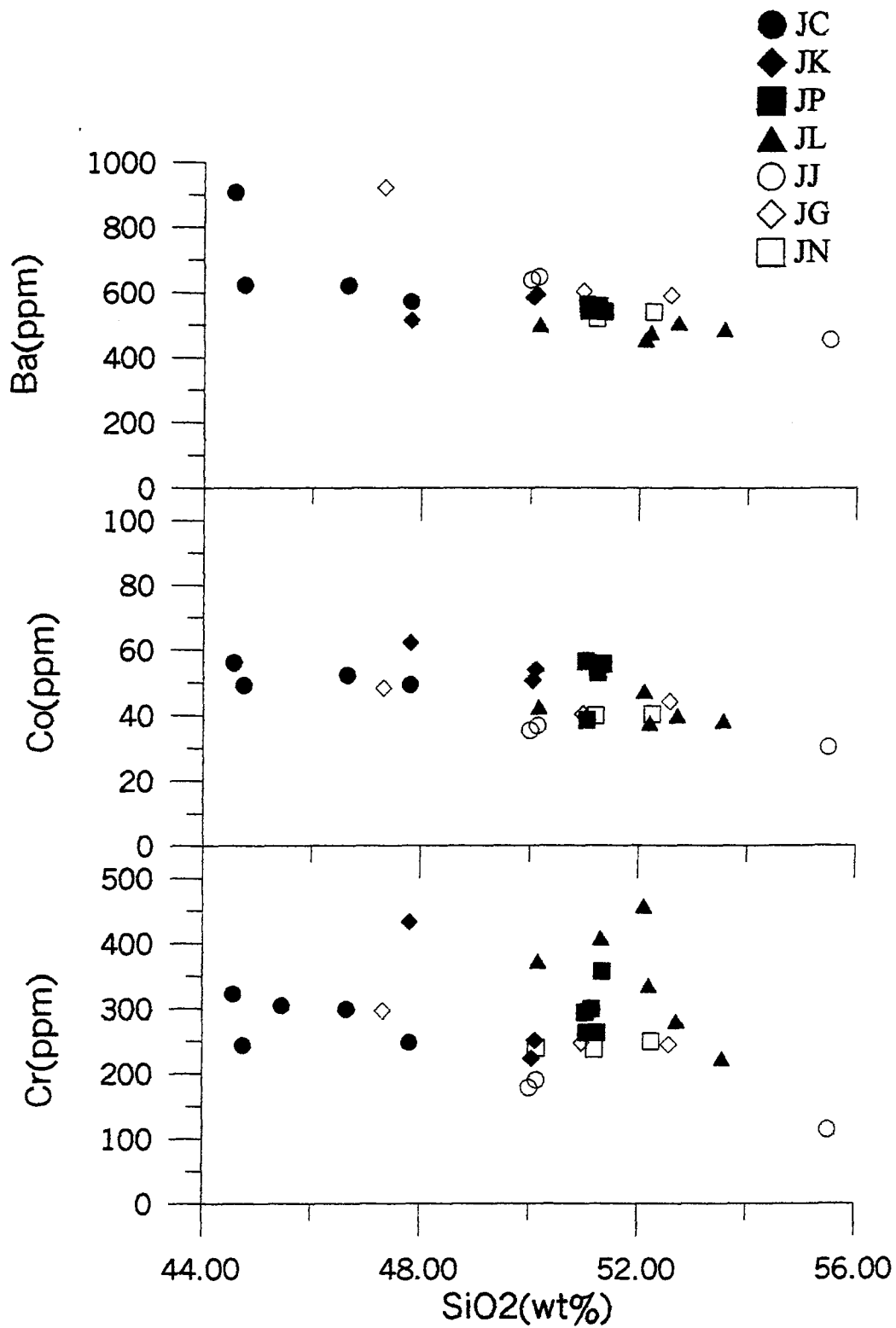
圖三 江蘇省新生代玄武岩主要元素對SiO₂作圖。



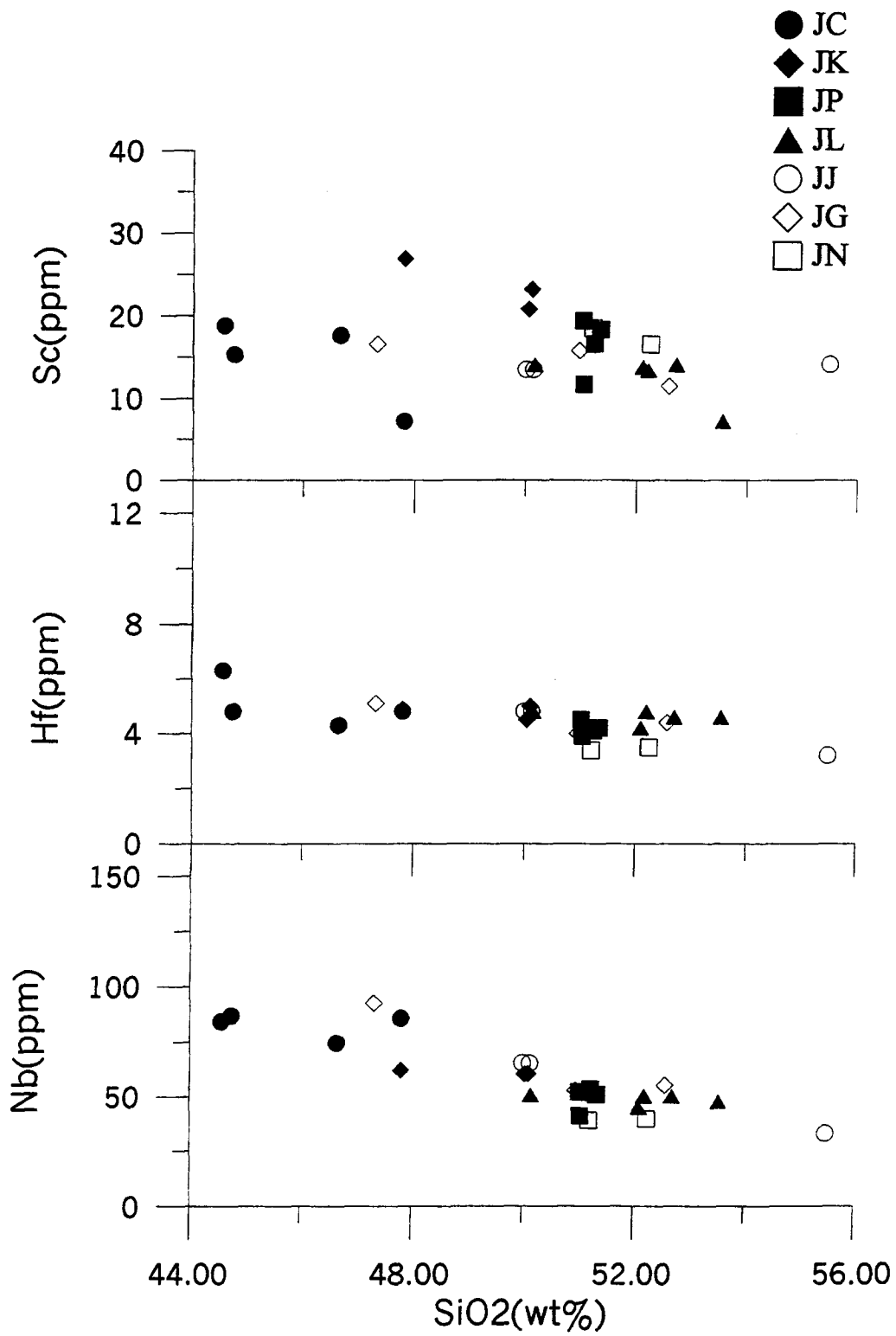
圖三 江蘇省新生代玄武岩主要元素對SiO₂作圖。(續)



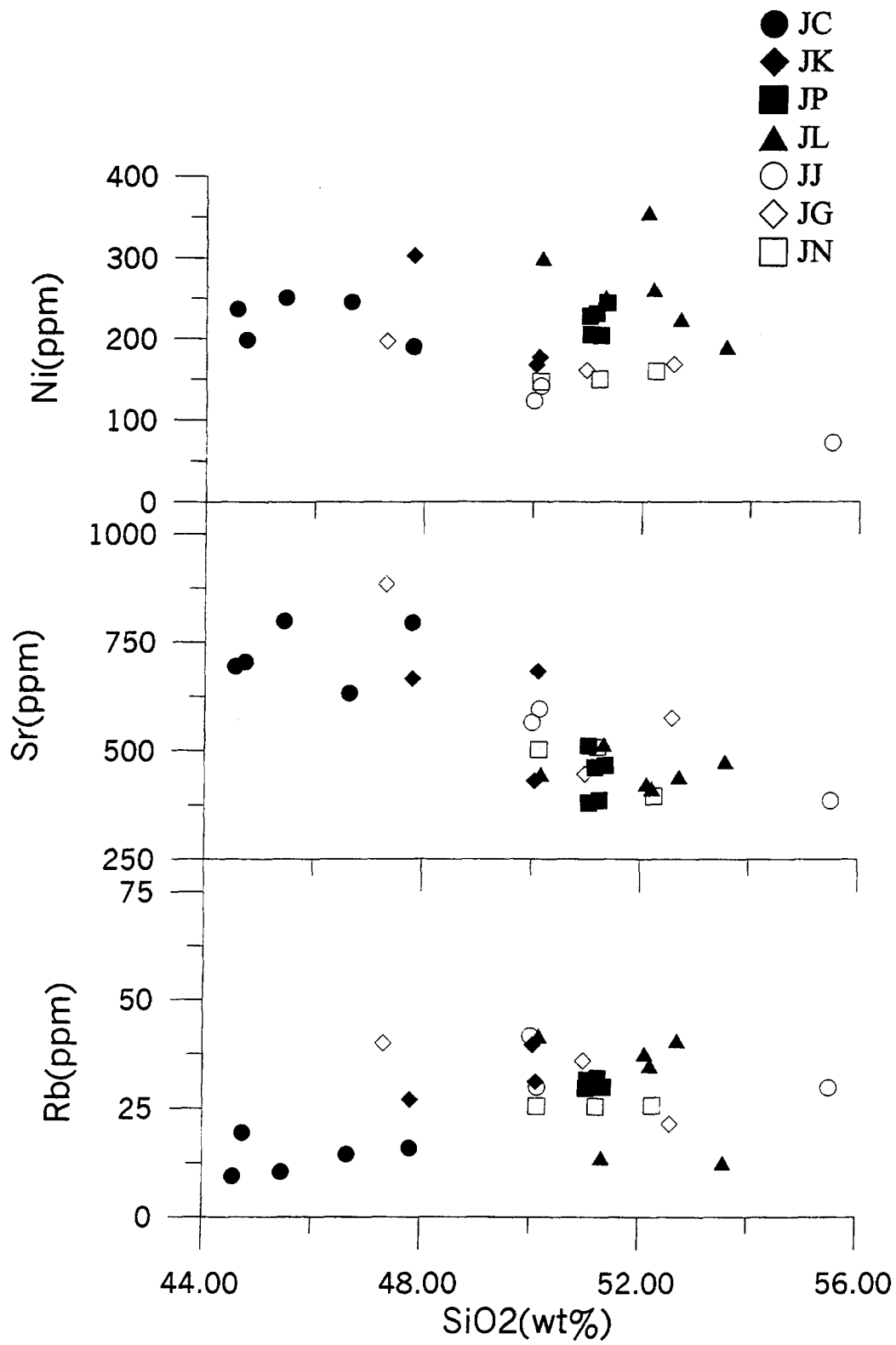
圖三 江蘇省新生代玄武岩主要元素對SiO₂作圖。(續)



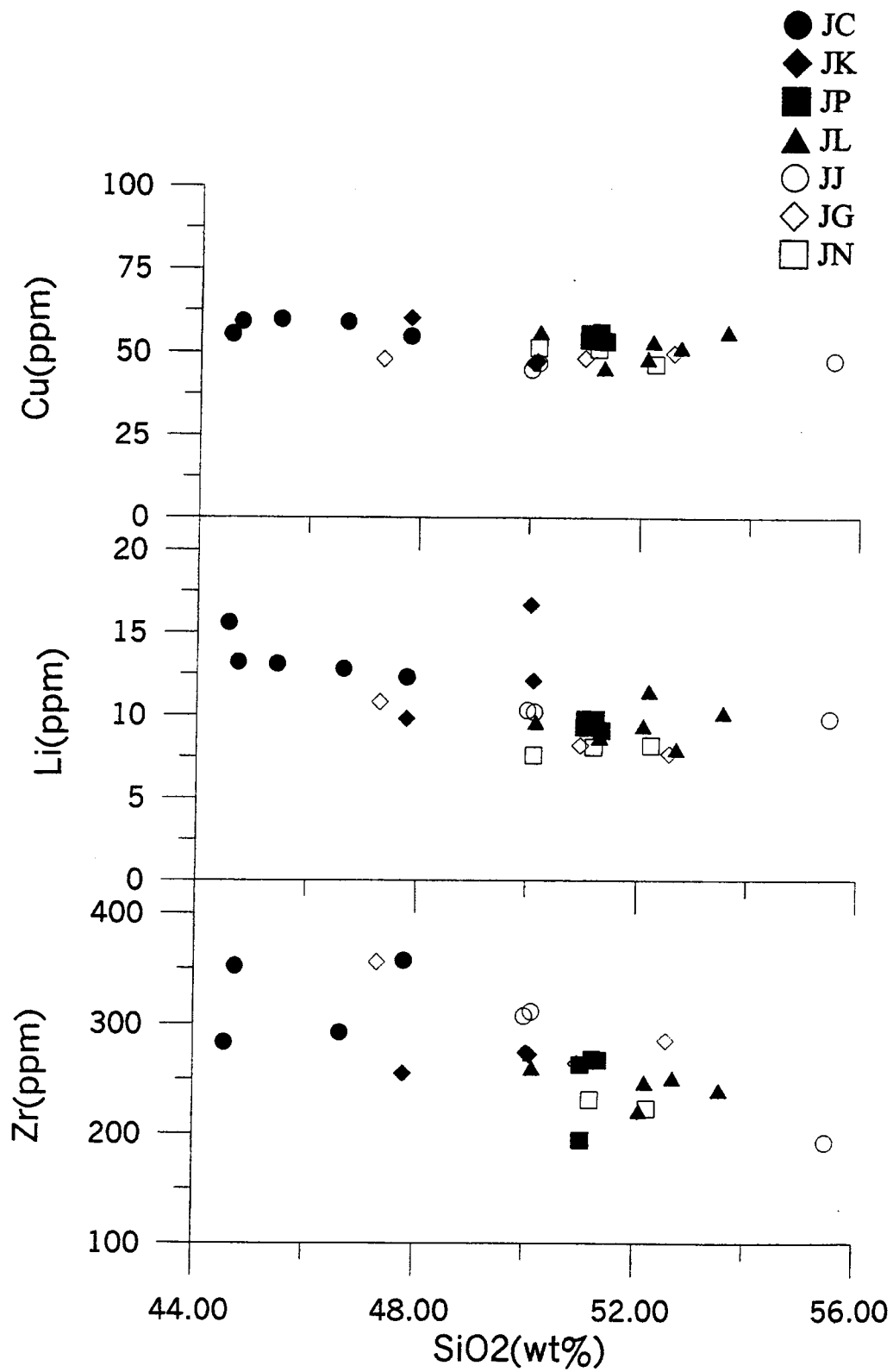
圖四 江蘇省新生代玄武岩微量元素對SiO₂作圖。



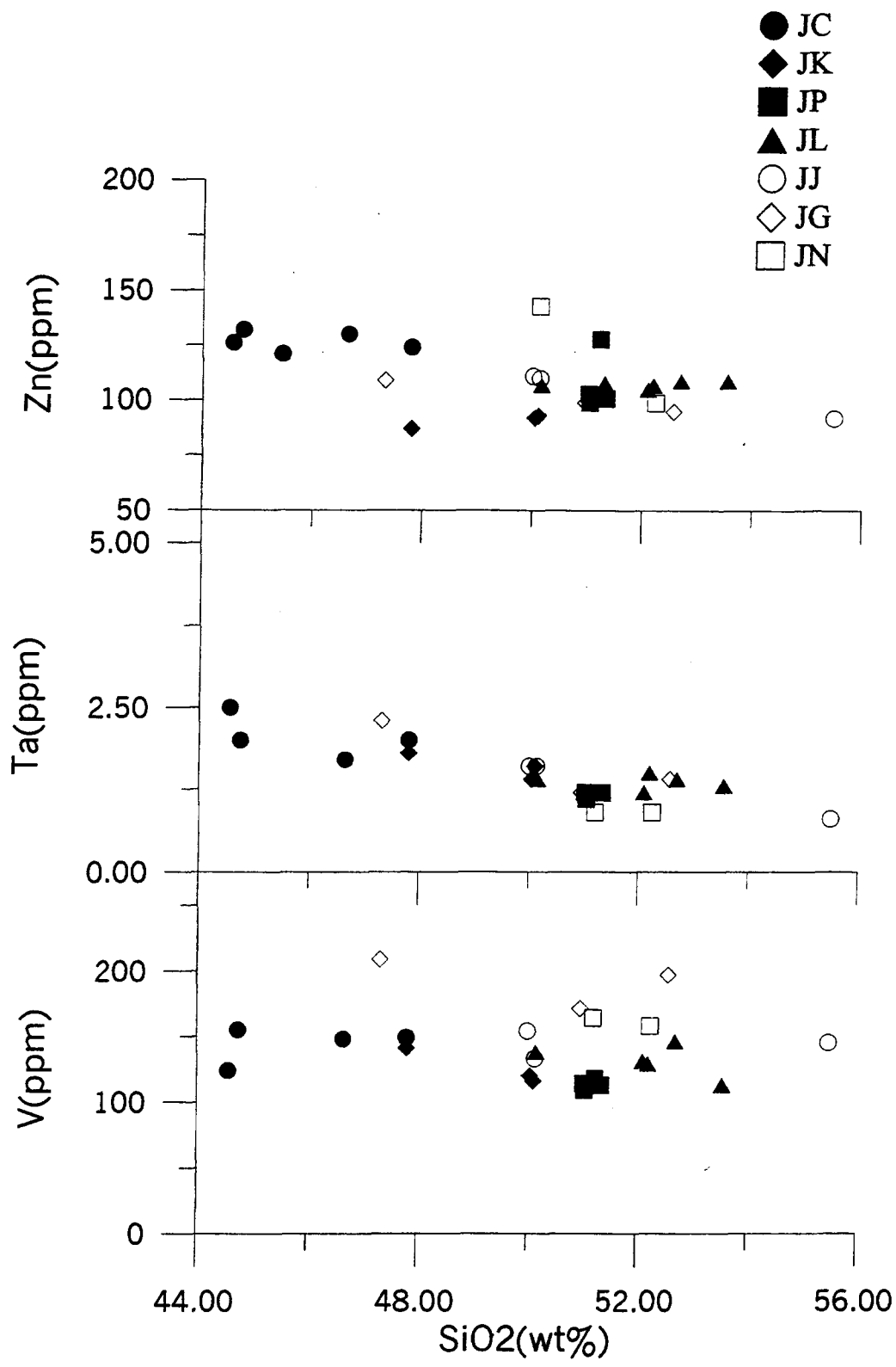
圖四 江蘇省新生代玄武岩微量元素對SiO₂作圖。(續)



圖四 江蘇省新生代玄武岩微量元素對SiO₂作圖。(續)



圖四 江蘇省新生代玄武岩微量元素對SiO₂作圖。(續)



圖四 江蘇省新生代玄武岩微量元素對SiO₂作圖。(續)

Zn 隨 SiO_2 含量之增加而減少可能與橄欖石與斜輝石之結晶分化有關 (Li 可取代 Mg 之位置); (7) Rb 屬於不相容元素會於岩漿演化後期集中, 故隨 SiO_2 含量之增加而增大。

Sun and McDonough (1989) 依據洋島玄武岩(OIB)中微量元素不相容性之大小, 再經原始地函標準化後之分佈型態圖, 來探討岩漿來源和岩漿演化之機制。圖五為南京附近玄武質岩類不相容元素之平均含量經原始地函標準化後的分佈型態圖。圖中顯示區內之玄武質岩類都表現出不相容元素富化的現象, 除了 Rb、K 和 P 等部分元素外, 其分佈型態均呈左高右低, 即不相容性愈強的元素, 其富化程度愈大。

區內大部分玄武岩類中有 K 元素負異常現象, 顯示其裂谷環境之特性, 另外無明顯 Nb 負異常, 表示研究區域之玄武質岩漿在噴發至地表的過程中, 受到地殼混染的程度並不明顯。

南京附近新生代玄武岩類不相容元素之平均值經原始地函標準化後與洋島玄武岩(OIB)、正常中洋脊玄武岩(N-MORB)和富化型中洋脊玄武岩(E-MORB)比較後顯示區內玄武質岩類不相容元素之分佈型態與洋島玄武岩(OIB)較相似, 而與正常中洋脊玄武岩(N-MORB)和富化型中洋脊玄武岩(E-MORB)則有明顯之差異。

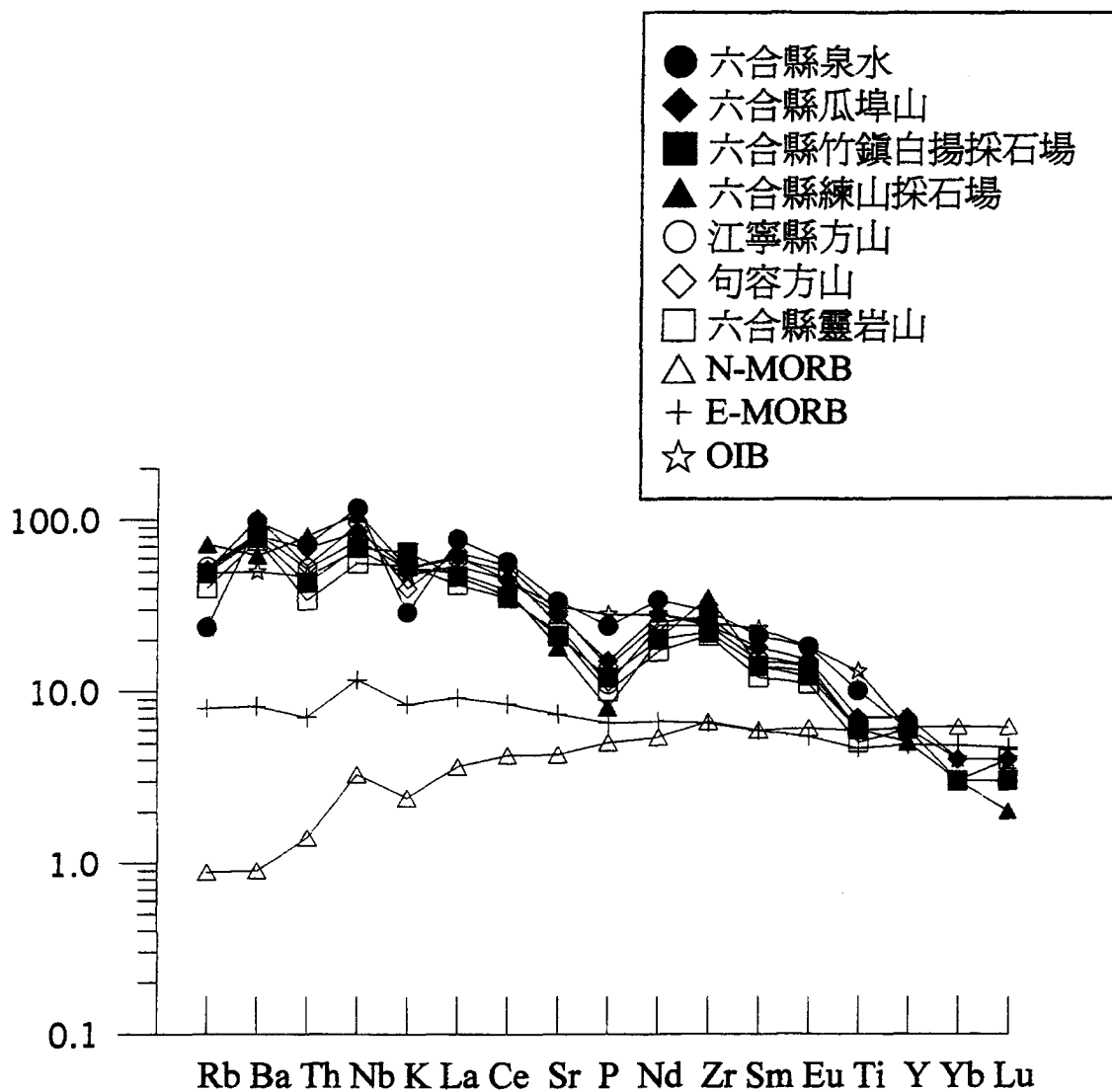
玄武岩中不相容元素的含量會受到地函源區之礦物組成及化學性質所影響, 此外, 部分熔融的程度也控制著玄武岩中不相容元素之含量。

圖六為南京附近玄武質岩類的稀土元素平均含量經球粒隕石(Sun and McDonough, 1989)標準化後的分佈圖形, 大致上本研究區域之玄武質岩類均呈現左高右低, 即輕稀土元素富化的現象, 顯現大陸玄武岩的特性。以 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值檢視輕稀土元素富化的程度, 區內矽質玄武岩為 13.6~14.6(平均 14.1)、橄欖玄武岩 13.2~15.9(平均 14.5)、鹼性玄武岩 13.0~28.4 (平均 20.6), 顯示隨著岩石 SiO_2 之減少輕稀土元素富集的程度有逐漸增強的趨勢, 且與正常中洋脊玄武岩及富化型中洋脊玄武岩(E-MORB)有明顯的不同。

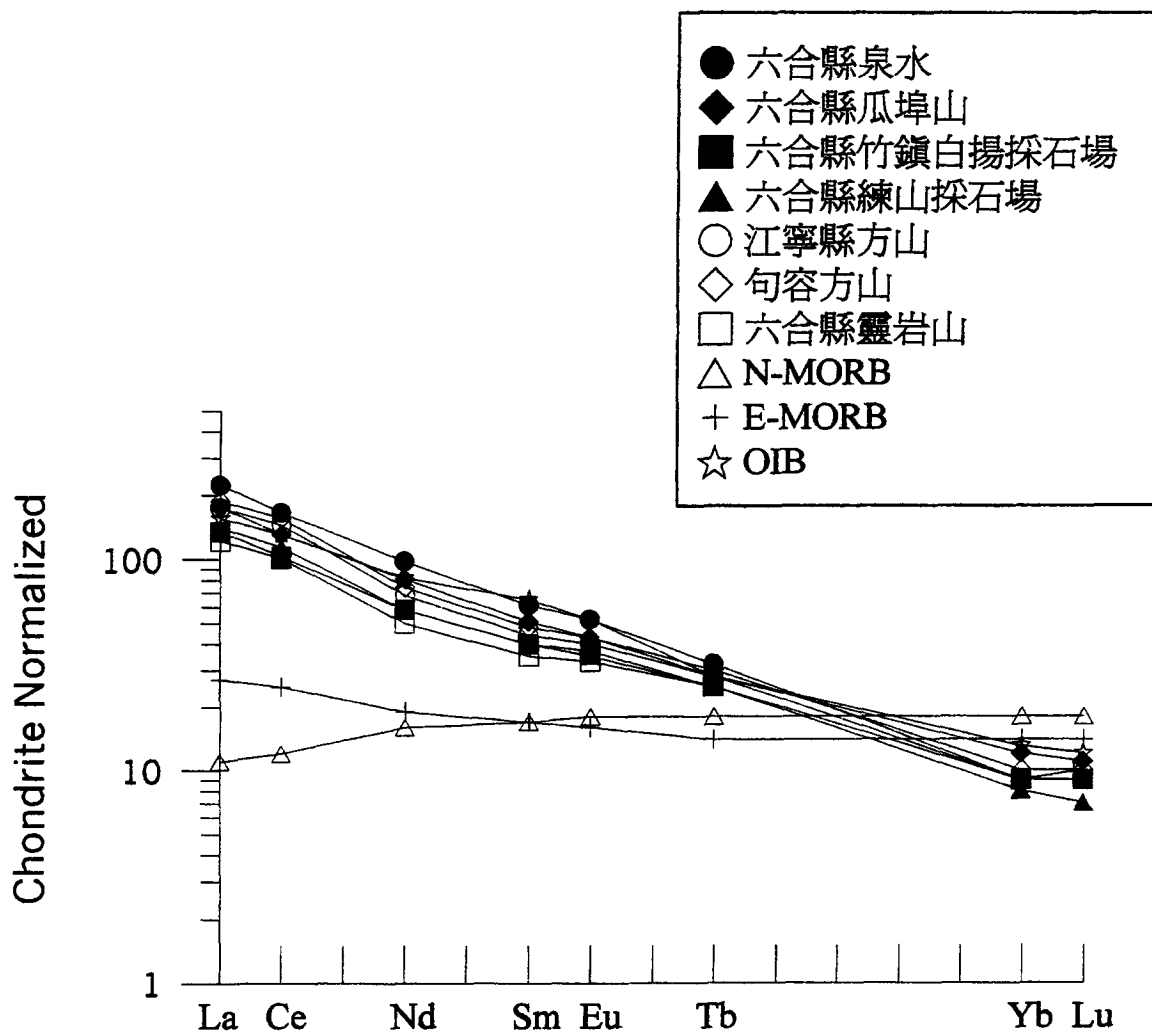
陳道公與彭子成(1985, 1988)對江蘇地區新生代玄武岩以 K—Ar 法定年其結果為 7.58~16.27Ma。在新生代時南海停止擴張後岩漿熱中心向北遷移可能延伸至江蘇省境內, 此遷移作用可能造成郟廬斷裂帶之再活動, 郟廬斷裂帶在燕山運動時(約 100Ma 前)即已活動(畢慶昌, 1982), 此斷層延伸長度達數千公里, 因此其再活動可造成上部地函知部分熔融, 而在江蘇省境內形成一系列之新生代玄武岩。

陳道公等人(1990)指出, 在華東地區玄武岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 對 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 作圖中, 晚期鹼性玄武岩比早期矽質玄武岩有較高的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和較低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, 前者 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值集中在 0.5128-0.5129 之間, 而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 則小於 0.7040; 但早期形成之矽質玄武岩其 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 低於 0.5128, 而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 則大於 0.7040, 即出現在負 .Nd, 正 .Sr 的區域。

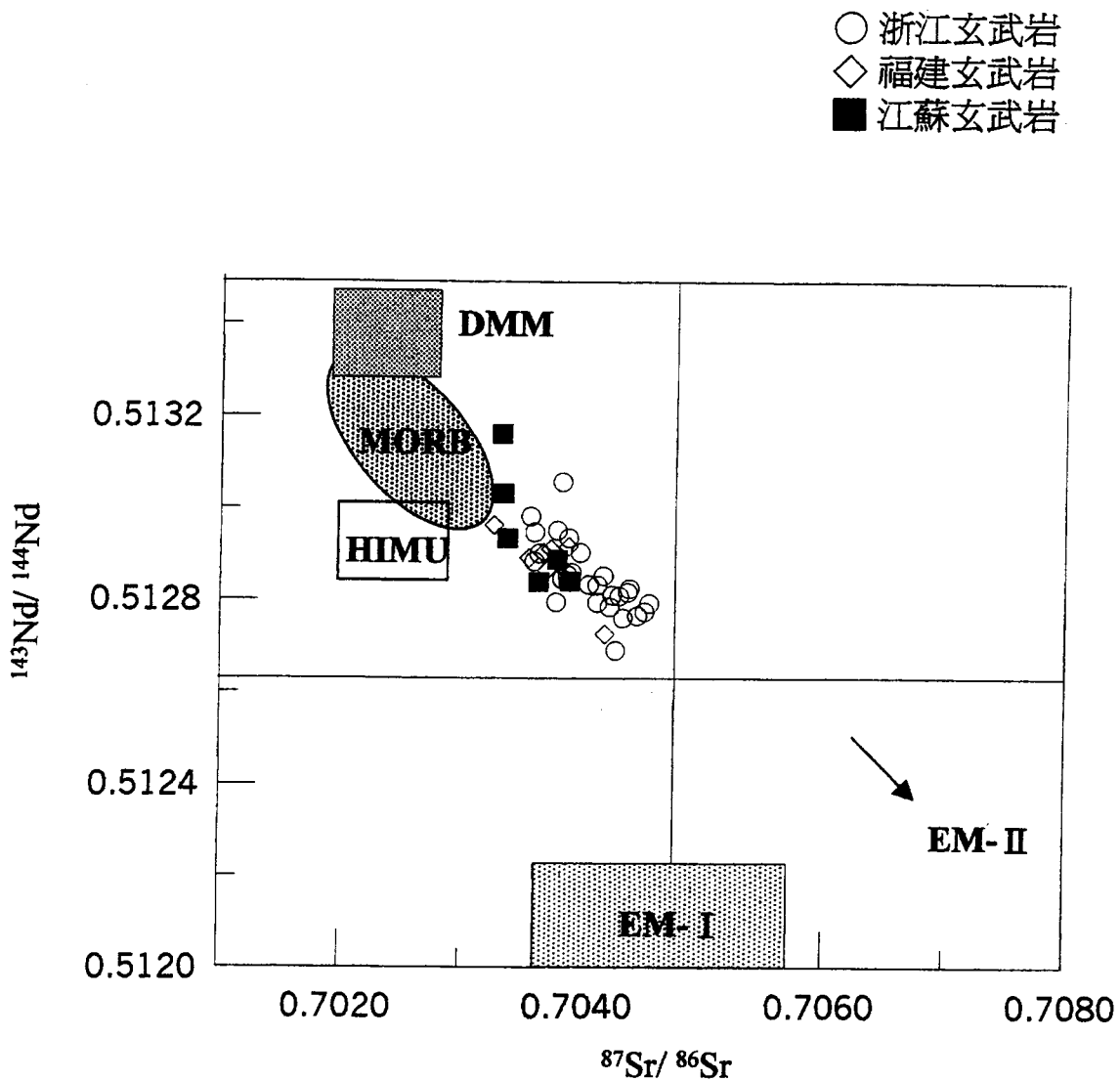
在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 對 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 作圖中(圖七), 江蘇、浙江和福建地區之玄武質



圖五 江蘇地區玄武質岩類不共容元素之平均值經原始地函標準化後與洋島玄武岩(OIB)、正常中洋脊玄武岩(N-MORB)和富化型中洋脊玄武岩(E-MORB)之比較圖。
 資料來源：OIB、N-MORB、E-MORB (Sun and McDonough, 1989)。



圖六 江蘇地區玄武質岩類稀土元素之平均值含量經球粒隕石標準化後與洋島玄武岩(OIB)、正常中洋脊玄武岩(N-MORB)和富化型中洋脊玄武岩(E-MORB)之比較圖。
 資料來源：OIB、N-MORB、E-MORB (Sun and McDonough, 1989)。



圖七 江蘇、浙江與福建地區新生代玄武岩 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 對 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 作圖。

資料來源：浙江地區—何恭算（1998）

福建地區—趙海玲（1990）；Basu et al.(1991)；

張劍波和陳道公（1992）；Lan et al.

（1994）；何恭算（1998）

江蘇地區—陳道公（1990）；劉廣強等人（1995）

岩類均落入第二象限中，尤其江蘇地區玄武岩之落點相當接近於 MORB，此現象顯示本研究區內玄武質岩類可能源於虧損地函。

檢視本文 28 個分析岩樣結果，以樣品編號 JK-1 玄武岩的 MgO (11.74%) 和鎂值 (MG=67) 最高，其 Ni (302ppm)、Cr (433ppm) 亦高，顯示其可能最趨近原始岩漿組成 (Wilkison and La Maitre, 1987)。圖八為 MgO 對 $100 \cdot \text{FeO}/(\text{MgO} + \text{FeO})$ 作圖，圖中線段分別代表橄欖石、橄欖石+斜輝石、橄欖石+斜輝石+斜長石的結晶分化趨勢 (Brook and Nielsen, 1982)，由圖中標本落點可見本研究之玄武岩大致落在橄欖石+斜輝石的結晶分化趨勢線上；另外標本 JK-1 落在結晶分化線上最左側，而標本 JJ2、JJ3 和 JG2 落在最右側，顯示標本 Jk-1 可能代表最原始之岩漿，而 JJ2、JJ3 和 JG2 則為原始岩漿經橄欖石和斜輝石之結晶分化後所衍生之殘餘岩漿。

本文試圖利用岩石主要元素資料以 Stormer 和 Nicholls (1978) 所發展的結晶分化計算程式，模擬可能參與結晶分化的礦物及其含量，探討經由此過程所得到的結果是否與實測值吻合。在模擬過程中，本文假設 JK-1 為原始岩漿，JJ2、JJ3 和 JG2 之平均值為衍生之殘餘岩漿，斑晶礦物橄欖石和斜輝石則是參與結晶分化作用的主要礦物。

表一列出 M-1 衍生岩漿的計算成分。由表中可見原始岩漿 (JK-1) 結晶出 7.57% 橄欖石和 11.93% 斜輝石後，殘餘岩漿成為原始岩漿的 80.50%。接下來利用 Rayleigh 分化公式計算經不同程度之結晶分化後衍生岩漿中稀土元素含量的變化，以驗證模擬結果的合理性。Rayleigh 分化公式如下：

$$C_{\text{liq}} = C_0 \cdot F^{(D-1)}$$

C_0 = 母岩漿中元素的濃度

C_{liq} = 衍生岩漿中元素的濃度

F = 衍生岩漿佔母岩總量的比值

D = 元素的總分配係數

$$D = \sum_i \alpha_i \cdot Kd_i$$

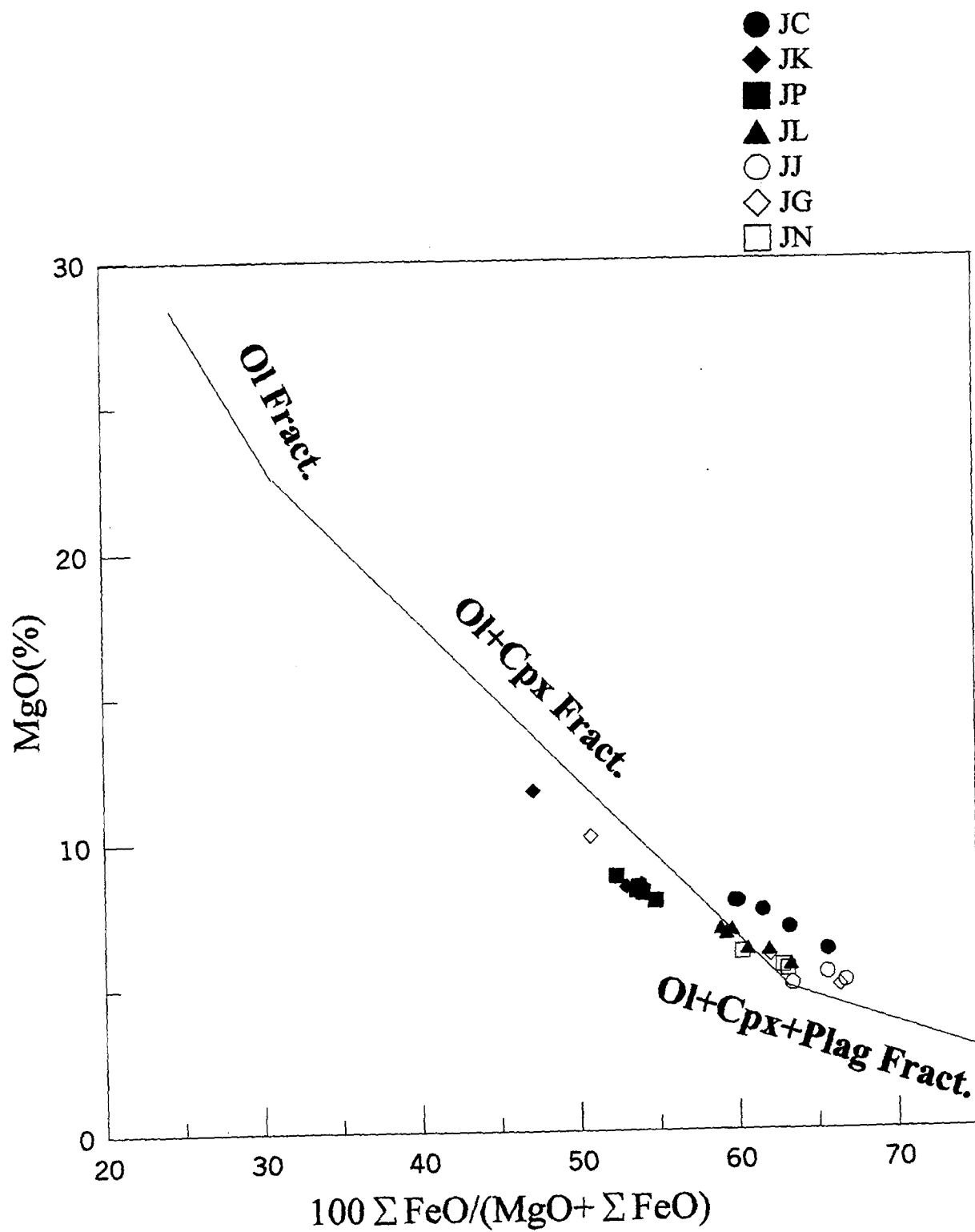
$$\text{其中 } \sum_i \alpha_i = 1$$

α_i 表礦物相 i 所佔百分比

Kd_i 表元素對礦物相 i 的分配係數

表二列出稀土元素對於橄欖石及斜輝石的分配係數以及經由 Rayleigh 公式計算後之結果。圖九顯示計算值和樣品實測值經球粒隕石標準化後之比較，可見經由 Rayleigh 公式計算所得結果與樣品實際測量值 (JJ2、JJ3 和 JG1 平均值) 之稀土元素分佈型態相似，尤其以標本 JJ2 更為相近，另外由表三可見計算之 V、Cr、Nb 和 Ba 含量與 JJ2 實測值相當吻合，強烈顯示本研究區域內之原始玄武岩漿應為 JK-1，而此岩漿演化過程中經歷了 7.57% 橄欖石與 11.93% 斜輝石之結晶分化作用後，衍生出 JJ2 岩漿。

綜合微量元素及同位素的研究，可探討岩漿源區之化學性質 (Chung et al.,



圖八 江蘇地區玄武質岩類MgO對 $100 \Sigma \text{FeO} / (\text{MgO} + \Sigma \text{FeO})$ 作圖。
 線段部分取自Brook and Nielsen (1982)。

表一 玄武岩漿JK-1經結晶分化後形成衍生岩漿（M-1）之計算結果

wt%	JK-1	M-1	OL	CPX
SiO ₂	47.81	52.74	36.46	48.19
Al ₂ O ₃	12.80	15.38	0.10	2.60
Σ FeO	10.48	9.18	30.32	13.24
MgO	11.74	5.1	32.49	13.95
CaO	8.69	8.09	0.36	17.93
Na ₂ O	4.24	3.5	0.16	0.57
K ₂ O	0.48	1.57	0.08	0.15
TiO ₂	1.46	1.25	0.05	1.86
MnO	0.154	0.12	0.48	0.11

計算結果： OL：7.57%

CPX：11.93%

衍生岩漿（即M-1）：80.50%

OL：Olivine CPX：Clinopyroxene

OL、CPX之化學成份依據鄂莫嵐和趙大升（1987）

表二 原始玄武岩漿 (JK-1) 經結晶分化形成衍生岩漿計算過程中所使用之稀土元素分配係數及計算結果 (M-1)

	OL	CPX	Bulk D	C ₀ (ppm)	C _{M-1} (ppm)
La	0.0067	0.056	0.037	51	36.4
Ce	0.0060	0.092	0.059	97.1	78.67
Nd	0.0059	0.230	0.143	45.2	29
Sm	0.0070	0.445	0.275	8.53	6.37
Eu	0.0074	0.474	0.293	2.54	2.21
Yb	0.0491	0.542	0.351	2.01	1.52
Lu	0.4540	0.506	0.486	0.27	0.24

OL : Olivine CPX : Clinopyroxene

OL : CPX = 0.39 : 0.61

REE在OL及CPX之分配係數值取自Fujimaki et. al. (1984)

C₀為原始岩漿以JK-1之值代表

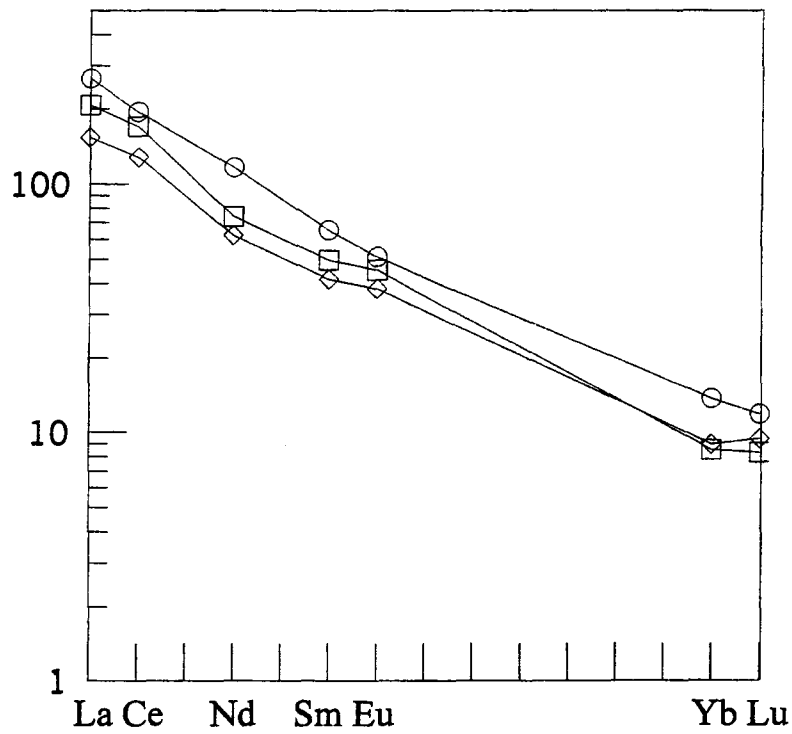
Bulk D = $\sum \alpha_i \times Kd_i$

其中 $\sum \alpha_i = 1$

α_i 表礦物相i所佔百分比

Kd_i表元素對礦物相i的分配係數

- 衍生岩漿 (M1) 之計算值
- ◇ 玄武岩之實測值 (JJ2, JJ3, JG2 三個標本之平均)
- JJ2



圖九 衍生岩漿 (M1) 中稀土元素之計算值和玄武岩標本實測值經球粒隕石標準化後之比較圖

表三 部分微量元素在玄武岩 (JJ2、JJ3和JG2) 中之實測值與理論衍生岩漿 (M-1) 之計算值之比較

ppm	計算值 (M-1)	JJ2	JJ3	JG2
Ba	635	646	456	591
Cr	166	189	114	244
Nb	77	65	33	55
V	145	133	145	197

1994; Chung, 1999; Hguyen et al., 1996; Ho et al., 2000a, 2000b; Hsu et al., 2000; Juang and Chen, 1992; Zhang et al., 1996)。不共容性愈高的元素，其含量之變化主要受控於地函源之部分熔融程度，再加上高度不共容元素間之地化特性相似，因此，玄武岩內高度不共容元素之比值，可能接近地函源區之比值，故可用來探討岩漿源區的化學性質。另外岩漿內的同位素比值（Sr、Nd 和 Pb 同位素），因不受部分熔融程度及結晶分化作用等因素影響，故可代表岩漿源區的同位素組成。Zindler and Hart (1986)利用 Sr、Nd 和 Pb 同位素特徵，將地函區分為 DMM (depleted MORB mantle)、HIMU (high U/Pb)、EMI (enriched mantle I)、EMII (enriched mantle II)和 PREMA (PREvalent MAntle)五個可能地函端成分，並認為中洋脊和洋島玄武岩可經由這五種端成分的兩個或兩個以上的混合作用來解釋其同位素地球化學特徵。

由圖五和圖六可知，本研究區域內玄武岩值岩類之不共容元素及稀土元素的含量與洋島玄武岩(OIB)類似，且均具有富化的特性。

由 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 對 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 作圖（圖七）得知本研究區域玄武質岩類源區之化學特徵接近於中洋脊玄武岩(MORB)，也就是說具有虧損地函之特性。但不共容元素和輕稀土元素含量卻顯示區內之玄武岩具有類似洋島玄武岩之地化特性，顯示本研究區內之玄武質岩類可能是源自貧乏之地函經由相當小程度之部分熔融而產生，所以可以造成不共容元素和輕稀土元素在玄武岩內富集，而具有類似洋島玄武岩(OIB)之地化特性。

本文利用 Shaw (1970)之計算公式，推算研究區內地函源區之部分熔融程度，其公式如下：

$$C_L/C_0 = 1/D + F(1-D)$$

C_L ：原始岩漿中元素之含量

C_0 ：地函源之元素含量

F：部分熔融之程度

D：總分配係數

本文取江蘇省當地之捕獲岩即尖晶石二輝橄欖岩（鄂莫嵐和趙大升，1987）作為地函源之成分，其橄欖石(ol)：正輝石(opx)：斜輝石(cpx)：尖晶石(sp) = 62:25:10:3；各礦物之分配係數列於表四，以 JK-1 代表原始岩漿之成分，利用 Shaw 之公式計算後，得到地函源經大約 5% 之部分熔融，產生了江蘇南京地區之玄武質岩漿。結合前面討論之結果，筆者對區內玄武岩成因作了以下之推論：本研究區內之地函源（尖晶石二輝橄欖岩）經由 5% 之部分熔融，產生 JK-1 原始岩漿，此岩漿在演化過程中結晶出 7.57% 橄欖石和 11.93% 斜輝石，最後形成了 JJ2 衍生岩漿。

Pearce and Cann (1971, 1973)最先提出利用化學成分推論岩漿起源的大地構造背景，他們利用地球化學方法區別產生於不同大地構造的玄武岩，並建立了構造—岩漿判別圖 (tectonic-magmatic discrimination diagram)。此判別圖之建立主要利用為高場勢元素 (high field strength elements)，包括 Ti、Zr、Nb 和 Y 等元

表四 橄欖石 (OL)、直輝石 (OPX)、斜輝石 (CPX) 和尖晶石 (SP) 之稀土元素分配係數

	OL	OPX	CPX	SP	Bulk D
La	0.0067	0.0023	0.056	0.01	0.011
Sm	0.0070	0.089	0.445	0.0064	0.071
Eu	0.0074	0.086	0.474	0.0061	0.074
Yb	0.0491	0.92	0.542	0.0076	0.315
Lu	0.0454	1.4	0.506	0.0213	0.429

et al.

OL、CPX根據Fujimaki *et al.* (1984)

OPX根據Dunn and Sen (1994)

SP根據Nagasawa *et al.* (1980)

$$\text{Bulk D} = \sum_i \alpha_i \times Kd_i$$

其中 $\sum_i \alpha_i = 1$

α_i 表礦物相i所佔百分比

Kd_i 表元素對礦物相i的分配係數

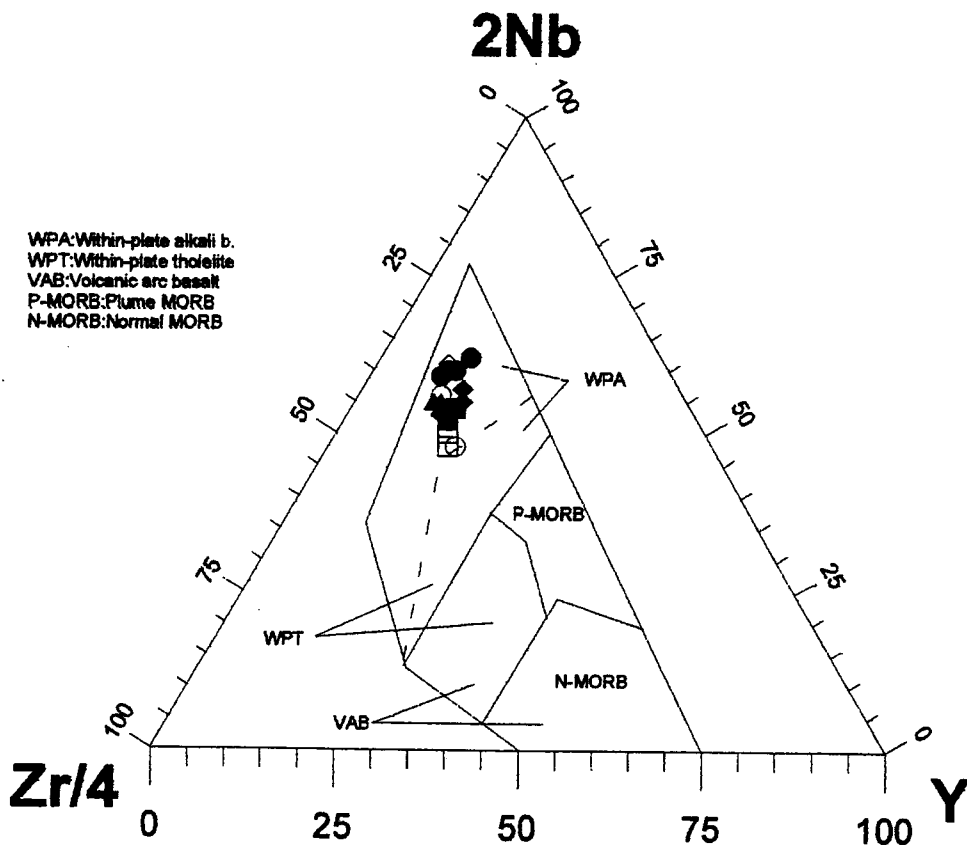
素，此等元素不易受到變質作用或低溫蝕變作用所影響，屬於較穩定之元素，故可用來判別火山岩是在何種地體構造環境下產生。在 $2\text{Nb-Zr}/4\text{-Y}$ 之地體構造判別圖（圖十）中，研究區內之玄武質岩類均落在板塊內部玄武岩(WPA-WPT)的範圍內，筆者認為區內玄武質岩類在構造上是屬於接近大陸邊緣之板塊內部火山活動的產物。儘管目前對郟廬斷裂帶之形成和發展仍有爭議，但學者們（Chung, 1999; Griffin et al., 1992, 1998; Lin, 1995; Menzies et al., 1993; Okay and Sengor, 1992; Yin and Nie, 1993）均相信它目前仍處於裂谷型的拉張環境中，而位於郟廬斷裂帶兩側之火山活動主要受控於此大陸裂谷型的深斷裂作用。現有資料（Basu et al., 1991; Chung, 1999; Griffin et al., 1992, 1998; Ma, 1987; Xu et al., 1996, 1997; Zhang et al., 1995），顯示郟廬斷裂帶是一個地函隆起區，地函的上隆常會促使源於深部之「地函柱式岩漿活動」產生，此岩漿上升進入上部地函可導致上部地函發生部分熔融，產生原始的玄武質岩漿，此原始玄武岩漿再經過結晶分化作用形成了其它各類的玄武岩。

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. 本研究區域內之玄武岩可概分為矽質玄武岩、橄欖玄武岩和鹼性玄武岩；岩象上以橄欖石、斜輝石及斜長石為主要斑晶；早期形成之玄武岩內含有較多之斜輝石斑晶，但後期形成之玄武岩斜輝石含量則大量減少。
2. 本區玄武岩主要、微量和稀土元素與 SiO_2 間呈負變關係而利用 Brooks and Nielsen (1982)所建立的結晶分化模式亦顯示，本區玄武質母岩漿在演化過程中，可能經歷以橄欖石及斜輝石為主的結晶分化作用。
3. 由模擬結晶分化的計算結果中得知，研究區內之玄武質母岩源在演化過程中，經歷 7.57%橄欖石和 11.93%斜輝石之結晶分化作用，而殘餘 80.50%之衍生岩漿。
4. 本區之玄武質岩類其輕稀土元素及不共容元素呈現富集具有類似洋島玄武岩(OIB)之地化特性。
5. 筆者推測在南海停止張裂後，岩漿之熱中心可能向北經過華南，再延伸到江蘇省境內，此遷移作用可能造成郟廬斷裂帶之再活動，上部地函因此發生部分熔融，形成江蘇省境內之各類玄武岩。
6. 用 Shaw (1970)之計算公式，得知研究區內地函源經大約 5%之部分熔融形成玄武質母岩漿。
7. 在 $2\text{Nb-Zr}/4\text{-Y}$ 岩漿地體構造判別圖中，研究區之玄武岩均落入板塊內部玄武岩的範圍。
8. 本區內玄武岩源自虧損地函，由於郟廬斷裂帶之張裂，上部地函發生約 5%之部分熔融，產生原始岩漿(JK-1)，此岩漿在經歷了 7.57%橄欖石和 11.93%斜輝石之結晶分化作用後殘餘了 80.50%之衍生岩漿(JJ2)。

● JC ◆ JK ■ JP ▲ JL ○ JJ ◇ JG □ JN



圖十 江蘇省新生代玄武岩 2Nb-Zr/4-Y 成分變化圖，分區資料引自 Meschede (1986)。

五、參考文獻

中文部分：

- 江蘇工業局區測隊 (1970) 1/20 萬 (揚州幅) 區域地質調查報告。
- 江蘇地質局 (1974) 1/20 萬 (馬鞍山幅) 區域地質調查報告。
- 安徽地質局 (1977) 1/20 萬 (南京幅) 區域地質調查報告。
- 何恭算 (1988) 華南地區新生代玄武岩之岩石學與地球化學研究。國立台灣大學海洋研究所博士論文，共 580 頁。
- 高維明、李家發、孫竹友 (1980) 沂沭大裂谷的生成與演化。地震地質，第 3 期，11-24 頁。
- 畢慶昌 (1982) 中國山系內的華夏系。華夏月刊，第 126 期，1-24 頁。
- 許志琴 (1980) 談談裂谷。地質評論，第 26 卷，第 3 期，22-34 頁。
- 陳道公、周海濤、楊杰東、王銀喜 (1990) 魯、皖、蘇、新生代火山岩成因及地幔源特徵的同位素證據。中國上地幔特徵與動力學論文集，地震出版社，124-131 頁。
- 陳道公 (1982) 鄭廬斷裂帶中南段新生代玄武岩地球化學。中國新生代火山岩年代學與地球化學 (劉若新主編)，地震出版社，171-209 頁。
- 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。
- 張劍波、陳道公 (1992) 福建省龍海和明溪地區玄武岩地球化學。中國新生代火山岩年代學與地球化學 (劉若新主編)，地震出版社，第 246-268 頁。
- 鄂莫嵐、趙大升 (1987) 中國東部新生代玄武岩及深源包體岩石。科學出版社，共 490 頁。
- 趙海玲 (1990) 東南沿海地區晚第三紀—第四紀大陸裂谷型火山作用及深部作用過程。中國地質大學出版社，共 163 頁。
- 劉若新 (1992) 中國新生代火山岩年代學與地球化學。地震出版社，共 427 頁。
- 劉廣強、解廣彝、增田彰正 (1995) 中國東部新生代玄武岩的地球化學(II) Sr、Nd、Ce 同位素組成。地球化學，第 24 卷，第 3 期，第 203-214 頁。

英文部分：

- Basu, A.R., Wang, J.W., Huang, W.K., Xie, G.H. and Tatsumoto, M (1991) Major element, REE and Pb, Nd and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of eastern China: implication for their origin from sub-oceanic type mantle reservoirs. *Earth Planet. Sci. Lett.* 105, 149-168.
- Brooks, C.K. and Nielsen, T.F.D. (1982) The East Greenland continental margin: a transition between oceanic and continental magmatism. *J. Geol. Soc. London*, 39, 265-275.
- 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., Tu, K., Chen, C.H. and Lee, C.Y. (1994) Late Cenozoic basaltic volcanism around the Taiwan Strait, SE China: product of lithosphere-asthenosphere interaction during continental extension. *Chem. Geol.* 112, 1-20.
- Cox, K.G., Bell, J.D. and Pankhurst, R.J. (1979) *The interpretation of igneous rocks.* Allen and Unwin Publ., London, 450P.
- Dunn, T. and Sen, C. (1994) Mineral/matrix partition coefficients for orthopyroxene, plagioclase, and olivine in basaltic to andesitic systems: a combined analytical and experimental study: *Geochim. Cosmochim. Acta* 58, 717-733.
- Fujimaki H., Tatsumoto, M. and Aoki, K., (1984) Partition coefficients of Hf, Zr and REE between phenocrysts and groundmasses. *Proceedings of the fourteenth lunar and planetary science conference, Part 2. J. Geophys. Res.*, 89, Suppl. B662-B672.
- Griffin, W.L., O'Reilly, S.Y., and Ryan, C.G. (1992) Composition and thermal structure of the lithosphere beneath south Africa, Siberia and China: proton microscope studies. *Int. symp. on Cenozoic volcanic rocks and deep-seated xenoliths in China and its environ (Beijing, September 8-10, 1992).* Abstr., p.65-66.
- Griffin, W.L., Zhang, A.D., O'Reilly, S.Y., and Ryan, C.G. (1998) Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton. In Flower, M.F.J., Chung, S.L., Lo, C.H., and Lee, T.Y., eds. *Mantle dynamics and plate interactions in East Asia.* *Am. Geophys. Union Geodyn. Ser.* 27, 107-126.
- Huyen, H., Flower, M.F.J., and Carlson, R.W. (1996) Major, trace element and isotopic compositions of Vietnamese basalts: interaction of hydrous EM I – rich asthenosphere with thinned Eurasian lithosphere. *Geochim. Cosmochim. Acta* 60, 4329-4352.
- Ho, K.S., Chen, J.C., Smith, A.D., and Juang, W.S. (2000a) Petrogenesis of two groups of pyroxenite from Tungchihsu, Penghu Islands, Taiwan Strait: implications for mantle metasomatism beneath SE China. *Chem. Geol.* 167, 355-372.
- Ho, K.S., Chen, J.C. and Juang, W.S. (2000b) Geochronology and geochemistry of late Cenozoic basalts from the Leiqiong area, southern China. *J. Asian Earth Sci.*, 18, 307-324.
- Juang, W.S., and Chen, J.C. (1992) Geochronology and geochemistry of Penghu basalt, Taiwan Strait and their tectonic significance. *J. Southeast Asian Earth Sci.*, 7 (2-3), 185-193.
- Lan, C.Y., Chung, S.L., Mertzman, S.A. and Hsu, W.Y. (1994) Petrology, geochemistry and Nd-Sr isotope of late Miocene basalts in Liehyu and Chinmen,

- Fujian. *J. Geol. Soc. China*, 37 (3), 309-334.
- Lin, S.F. (1995) Collision between the North and South China blocks: a crustal-detachment model for suturing in the region east of the Tanlu fault. *Geology*, 23, 574-575.
- Ma, X.Y. (1987) Lithospheric dynamic map of China and adjacent seas (1 : 4,000,000) and explanatory notes, 53 pp., Publishing House of Geology, Beijing.
- Menzies, M.A., Fan, W.M., and Zhang, M. (1993) Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120km of Archean lithosphere, Sino-Korean Craton, China. In Prichard, H.M., Alabaster, T., Harris, N.B.W., and Neary, C.R., eds. *Magmatic processes and plate tectonics*. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 76, 71-81.
- 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. Geol.* 56, 207-218.
- Nagasawa H., Schreiber, H. and Morris, R. (1980) Experimental mineral/liquid partition coefficients of the rare earth elements (REE), Sc and Sr for perovskite, spinel and melilite. *Earth Planet. Sci. Lett.* 46, 431-437.
- Okay, A.I., and Sengor, A.M.C. (1992) Evidence for intracontinental thrust-related exhumation of the ultra-high-pressure rocks in China. *Geology* 20, 411-414.
- Pearce, J.A. and Cann, J.R. (1971) Ophiolite origin investigated by discriminant analysis using Ti, Zr and Y. *Earth Planet. Sci. Lett.* 12, 339-349.
- Pearce, J.A. and Cann, J.R. (1973) Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analysis. *Sci. Lett.* 19, 290-300.
- Shaw, D.M. (1970) Trace element fractionation during anatexis. *Geochim. Cosmochim. Acta* 34, 237-243.
- Stormer, J.C. and Nicholls, J., (1978) XLFRAC: a program for the interactive testing of magmatic differentiation models, *Computers & Geosciences* 4: 143-159.
- Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *J. Geol. Soc. London Spec. Pub.* 42, 313-345.
- Wilkinson, J.F.G. and LeMaitre, R.W. (1987) Upper mantle amphiboles and micas and TiO₂, K₂O, and P₂O₅ abundances and 100Mg/(Mg+Fe²⁺) ratios of common basalts and andesites: implications for modal mantle metasomatism and undepleted mantle compositions. *J. Petrol.* 28, 37-73.
- Xu, X., O'Reilly, S.Y., Zhou, X. and Griffin, W.L. (1997) The nature of the Cenozoic lithosphere at Nushan, eastern China. In Flower, M.F.J., Chung, S.L., Lo, C.H. and Lee, T.Y., eds. *Mantle dynamics and plate interactions in East Asia*. *Am. Geophys. Union Geodyn. Ser.* 27: 167-195.
- Yin, A. and Nie, S.Y. (1993) An indentation model for the North and South China

collision and the development of the Tan-lu and Honam fault systems, eastern Asia. *Tectonics*, 12, 801-813.

Zhang, M., Suddaby, P., Thompson, R.N., Thirlwall, M.F. and Menzies, M.A. (1995) Potassic volcanic rocks in NE China: Geochemical constrains on mantle source and magma genesis. *J. Petrol.*, 36, 1275-1303.

Zhang, M., Tu, K., Xie, G., Flower, M.F.J. (1996) Subduction-modified subcontinental mantle in south China: Trace element and isotope evidence in basalts from Hainan Island. *Chinese Journal of Geochemistry* 15, 1-19.

Zindler, A. and Hart, S.R. (1986) Chemical geodynamics. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 14, 493-571.