

# 行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

※※※

※ 廣東茂名所產似曜岩類之地化特性與成因 ※

※ Geochemical characteristics and origin of tektites ※

※ from Maoming, Guangdong province ※

※※※

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC90-2116-M-002-006

執行期間：90年8月1日至91年7月31日

計畫主持人：陳汝勤教授，國立臺灣大學海洋研究所

計畫參與人員：蘇郁雅，國立臺灣大學海洋研究所

執行單位：國立臺灣大學海洋研究所

中華民國 91 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

## 廣東茂名所產似曜岩類之地化特性與成因

### Geochemical characteristics and origin of tektites from Maoming, Guangdong province

計畫編號：NSC90-2116-M-002-006

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：陳汝勤教授，國立臺灣大學海洋研究所

計畫參與人員：蘇郁雅，國立臺灣大學海洋研究所

#### 一、中英文摘要

本研究分析了澳亞散佈區廣東茂名地區、菲律賓呂宋黎薩地區 (Rizal) 地區 (Philippinite) 似曜岩類的主要元素、微量元素、稀土元素及同位素成份，以探討似曜岩類之母岩物質，並計算出母岩物質可能之混合模式，此外並分析了中歐捷克 Bohemia 地區 (Moldavite) 和利比亞撒哈拉沙漠東部地區之 Libyan glass，以比較不同散佈區之似曜岩類。似曜岩類之折射率隨  $\text{SiO}_2$  含量的增大而減小，同一散佈區似曜岩類之化學成份相近，而似曜岩類之母岩物質為控制似曜岩類化學成份的主要因素；根據似曜岩類之微量元素比值 (Ba/Rb、Th/Sm、Sm/Sc、Th/Sc) 和稀土元素經球粒隕石標準化後的分布圖顯示，廣東茂名及呂宋黎薩地區之似曜岩類的原始物質是源自於後太古代上部大陸地殼沉積岩。

根據 Rb-Sr 同位素資料 (Blum et al., 1992)，澳亞散佈地區似曜岩原始物質的沉積年代應在 170 Ma (侏羅紀)，在中歐散佈區的似曜岩類 (Moldavite) 之母岩物質之沉積年代比澳亞散佈區的來得晚。

本文推測似曜岩類之母岩物質源於後太古代上部大陸地殼沉積岩，利用後太古代沉積岩之化學成份，依不同比例混合計算出最適合呂宋及廣東茂名地區似曜岩類的比例如下，呂宋地區似曜岩類由：54%頁岩 + 15%混濁砂岩 + 31%石英岩；廣東茂名地區似曜岩類則由：40%頁岩 + 30%混濁砂岩 + 30%石英岩混合而成。

關鍵詞：似曜岩、地球化學、成因、混合模式、廣東茂名

## Abstract

Tektites from Maoming, Guangdong province and Rizal, the Philippines have been analyzed for the major, trace and rare earth elements and isotopic compositions in order to deduce their parental materials and calculate the possible mixing model. In addition, moldavite from Bohemia, Czechoslovak, central Europe and Libyan glass from eastern Sahara desert have also been analyzed in order to compare the chemical compositions from different strewn field. We conclude that the index of refraction of the tektites decreases as their SiO<sub>2</sub> content increases. The chemical compositions of tektites from the same strewn field are similar and the parental material is the most important factor controlling the chemistry of the tektites.

Based on trace elements ratios i.e., Ba/Rb, Th/Sm, Sm/Sc; Th/Sc and chondrite - normalized REE patterns we suggest that tektites from Maoming, Guangdong province and Rizal, the Philippines were derived from post - Archean upper crustal materials. Based on Rb-Sr isotopic data we suggest that the original sedimentation age of the parental materials for Australasian strewn field is 170 Ma (Jurassic), while the sedimentation age for the parental materials of moldavite is relatively younger. Based on the chemical compositions of post - Archean sedimentary rocks and various tektites analyzed in the present study we conclude that the best mixing model for Maoming tektite is 40% shale + 30% graywacke + 30% quartzite while the best model for Rizal philippinite is 54% shale + 15% graywacke + 31% quartzite.

Key words: tektites, geochemistry, origin, mixing model, Maoming, Guangdong province

## 二、計畫緣由與目的

似曜岩類是一種富含矽酸鹽之玻璃物質(平均 SiO<sub>2</sub> 含量為 75%)，外觀和黑曜岩相似，所以稱之為似曜岩，似曜岩的來源仍有爭議，有些學者認為其為月球火山來源(O'Keefe, 1976)，但現在大部份學者(如 Faul, 1966; Taylor, 1973; King, 1977; Glass, 1990; Wasson, 1991; Koeberl, 1990, 1992)，根據整體的化學和物理特性，認為似曜岩是由慧星或巨大隕石快速撞擊，經撞擊熔融陸源岩石或沉積物岩層所形成。

似曜岩類在好幾世紀前已被人類所發現，其所發現地點，不侷限在陸地上，在深海鑽井的岩心中，學者就發現了微似曜岩(microtektites)，其大小大約小於1mm;而在陸地上所發現的，可分為三類:(Koeberl, 1992)

(1) 正常或飛濺型似曜岩類(normal or splash-form tektites):外型呈球狀、水滴狀、啞鈴狀，重量約1~100克。

(2) 受大氣動力作用而成之似曜岩類(aerodynamically shaped tektites)：外型呈鈕扣狀，外表有磨蝕現象(推測為在大氣中傳輸，經大氣磨蝕所形成的)，重量約1~100克。

(3) Muong Nong 型似曜岩類 (Muong Nong-type tektites or layered tektites):外型呈塊狀，重量可達24kg，因其具特有的層狀構造，所以又名為layered tektites。

似曜岩類在地球上分佈的地區稱為散佈區，而世界上主要的四個散佈區，分別為(1)北美(2)中歐(3)象牙海岸(4)澳亞散佈區。

本研究之似曜岩類標本採自中國廣東茂名地區、菲律賓呂宋 Rizal 地區 (Philippinite)、捷克 Bohemia 地區(Moldavite)，此外尚包括利比亞撒哈拉沙漠東邊地區之 Libyan glass，其中前兩者屬澳亞散佈區，而 Moldavite 則屬中歐散佈區。

本文研究目的如下：

- 1.利用其物理化學資料來比較不同散佈區之似曜岩類是否有所差異。
- 2.利用似曜岩類之稀土元素經球類隕石標準化後與上、下部大陸地殼、海洋地殼及原始地函比較，以尋求母岩線索。
- 3.利用鋁同位素比值，判斷似曜岩是否源自大陸地殼物質，並推斷母岩之沉積年齡。
- 4.依據主要、微量和稀土元素之含量，利用不同母岩混合推估母岩組成比率。

### 三、結果與討論

此次研究共分析了 27 個標本，包括 12 個廣東茂名似曜岩類、9 個呂宋地區似曜岩類(Philippinite)、3 個捷克地區的似曜岩類(Moldavites)及 3 個利比亞沙漠的 Libyan glass，其主要元素、微量元素、及稀土元素的特性如下：

廣東茂名似曜岩類和呂宋地區似曜岩類的  $\text{SiO}_2$  平均含量為 75.4% 及 75.3%，捷克地區的似曜岩類  $\text{SiO}_2$  平均含量為 80.5%，利比亞沙漠(Libyan glass)  $\text{SiO}_2$  平均含量高達 98.8%，廣東茂名似曜岩類較不均質，其  $\text{SiO}_2$  含量最高達 80.61%，最低者為 71.06%。在  $\text{SiO}_2$  含量和其他主要元素的關係方面，大部份元素(除了  $\text{CaO}$ )和  $\text{SiO}_2$  含量的相關係數是小于 0，也就是呈現負變關係，尤其是  $\text{MgO}$ 、 $\Sigma\text{FeO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  最為明顯。

爲了了解廣東茂名似曜岩類和呂宋地區似曜岩類之間的關係，及其來源物質，我們採用中南半島飛濺式似曜岩類(Indochinite)和 Muong Nong-type 似曜岩類之平均成份(表 1)來和本研究作比較，我們可以看出廣東茂名似曜岩類和呂宋地區似曜岩類之主要元素含量是比較相近的，此外廣東茂名似曜岩類及呂宋地區的似曜岩類與中南半島 splash form Indochinite 及 Muong Nong-type 似曜岩類之平均組成較為相似，初步推測廣東茂名似曜岩類及呂宋地區似曜岩類的來源物質和中南半島 splash form Indochinite 及 Muong Nong-type 似曜岩類可能相似，而和捷克地區的似曜岩類 moldavites 就有所差別，和利比亞玻璃(Libyan glass)的差距就更大了。

在不同的散佈區中，似曜岩類的主要元素含量可能會有所不同，那是因爲不同散佈區中的似曜岩類，其母岩物質有所不同所造成(Taylor and Maureen, 1969)。廣東茂名似曜岩類及呂宋地區似曜岩類含有較高含量的鐵鎂物質；捷克地區的似曜岩類之  $\text{CaO}/\text{TiO}_2$  的比值變化較大，而廣東茂名似曜岩類及呂宋地區似曜岩類  $\text{CaO}/\text{TiO}_2$  的比值呈現比較穩定的現象(廣東茂名似曜岩類  $\text{CaO}/\text{TiO}_2=3$ ，呂宋地區似曜岩類  $\text{CaO}/\text{TiO}_2=6$ )，我們可以由這個比值來推測是否來自相似的母岩物質。廣東茂名似曜岩類及呂宋地區似曜岩類的主要元素和平均 splash form Indochinite、Muong Nong-type 似曜岩類及上部大陸地殼做比較示於圖 1，在圖中廣東茂名似曜岩類、呂宋地區似曜岩類與 splash form Indochinite 及 Muong Nong-type 似曜岩類非常的接近，而相較於平均大陸上部地殼的成份，廣東茂名似曜岩類的  $\text{CaO}$  是較貧乏的，推測可能是因爲母岩物質含有較少的碳酸

標本編號 主要元素	Avg. Philippin- ite	Avg. Maoming tektite	Avg. Moldavite	Avg. Libyan glass	Avg. Indo- chinite	Avg. Muong- Nong type tektite
%SiO <sub>2</sub>	75.27	75.38	80.49	98.76	72.70	78.93
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.61	9.46	8.60	0.00	13.37	10.19
MgO	2.85	2.45	2.07	0.03	2.14	1.43
ΣFeO	5.46	5.30	1.88	0.28	4.85	3.75
CaO	4.69	3.06	4.10	0.00	1.98	1.21
Na <sub>2</sub> O	1.63	1.33	0.50	0.06	1.05	0.92
K <sub>2</sub> O	2.52	2.34	2.41	1.07	2.62	2.42
MnO	0.11	0.11	0.09	0.11	0.08	0.08
TiO <sub>2</sub>	0.81	0.79	0.30	0.18	0.78	0.63
Total	99.94	100.22	100.44	100.49	99.57	99.56

表 1A 平均 Philippinite、Maoming tektite、Moldavite、Libyan glass(本文)及 Indochinite(splash form)和 Muong Nong-type tektite(Koeberl, 1992)之主要元素含量

標本編號 主要元素	Avg. Philippin -ite	Avg. Maoming tektite	Avg. Moldavite	Avg. Libyan glass	Avg. Indo- chinite	Avg. Muong Nong-type tektite
ppmBa	607	444	761	42	360	341
Co	30.3	24.3	0.0	0.0	11.0	12.6
Cr	103	69.3	16.7	0.0	63.0	60.6
Cs	9.90	6.32	14.44	0.04	6.50	5.09
Ga	24.0	18.0	21.2	14.0	8.2	24.2
Hf	12.9	8.64	6.66	8.57	6.95	8.13
Li	61.3	55.8	52.1	7.47	47.1	42.1
Nb	39.5	23.3	10.3	4.28	-	-
Rb	115	103	128	0.66	130	110
Sc	38.7	16.7	6.22	0.00	10.5	7.70
Sr	190	144	161	28.0	90	135
Ta	1.82	1.30	0.64	0.26	1.60	1.17
Th	27.2	16.8	12.5	4.73	14.0	11.1
U	4.52	2.25	2.66	1.18	2.07	2.48
V	680	107	38.8	4.19	63.0	72.3
Y	91.6	45.2	29.0	9.25		
Zn	26.0	15.9	20.1	5.03	5.70	66.7
Zr	1000	397	332	417	252	280
稀土元素						
ppmLa	86.7	47.7	34.3	15.7	36.5	28.2
Ce	158	93.6	66.9	31.3	73.1	60.7
Nd	51.5	39.3	28.2	11.3	33.2	29.1
Sm	9.32	7.30	4.97	1.86	6.60	4.85
Eu	0.69	0.60	0.51	0.13	1.22	1.01
Gd	6.89	6.40	3.46	1.66	5.24	4.30
Tb	0.99	0.81	0.43	0.18	0.85	0.75
Yb	3.97	3.04	1.63	0.66	2.90	2.71
Lu	0.70	0.49	0.27	0.13	-	0.42

表 1B 平均 Philippinite、Maoming tektite、Moldavite、Libyan glass(本文)及 Indochinite(splash form)和 Muong Nong-type(Koeberl, 1992)微量及稀土元素含量

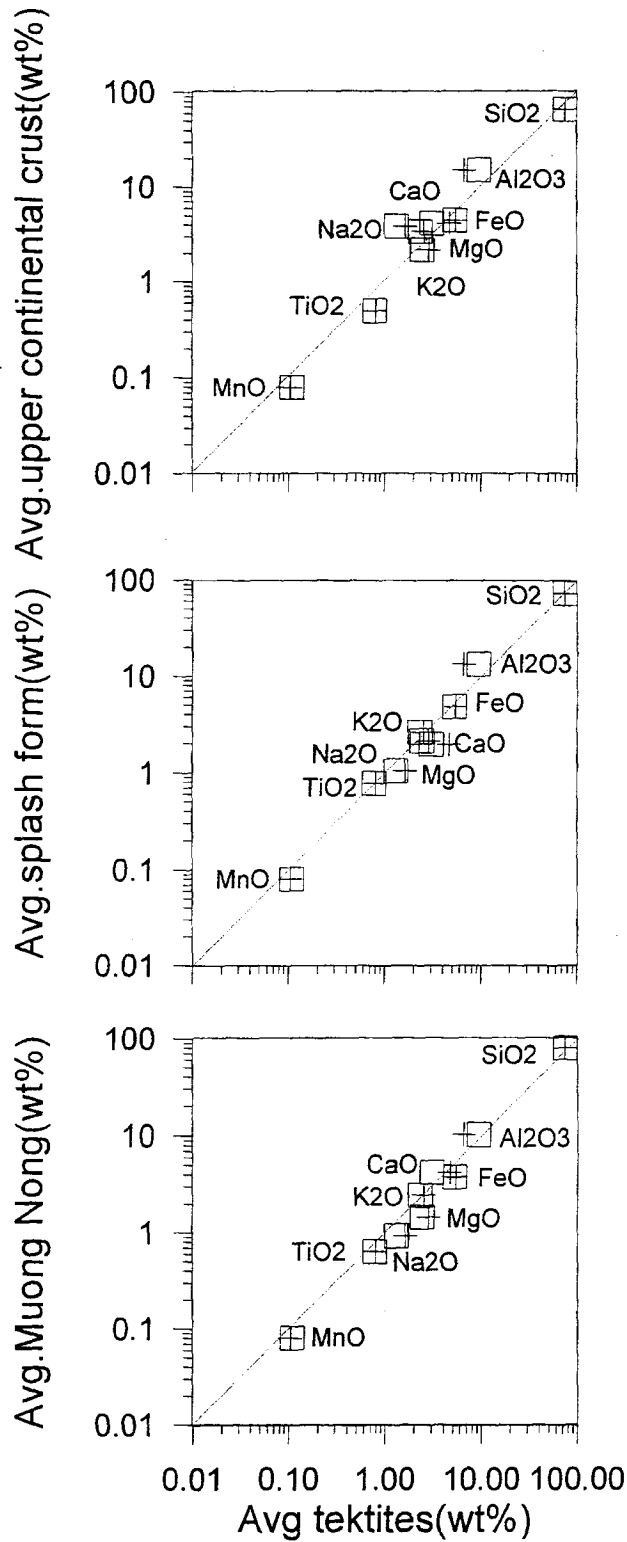


圖 1 廣東茂名(□)和呂宋Rizal(+ )似曜岩類之主要元素與中南半島似曜岩類和上部大陸地殼之比較

Avg.splash-form Indochinite(Taylor and McLennan,1979)

Avg.Muong Nong tectites(Koeberl,1992)

Avg upper continental crust(Taylor and McLennan,1985)



鈣(如石灰岩);在利比亞沙漠玻璃(Libyan glass)中，含有非常高的  $\text{SiO}_2$ ( $\approx 98\%$ )，而其他主要元素偏低，推測其母岩物質，應該是來自石英砂岩。

由於在不同的散佈區，母岩的組成物質有所不同，所以經撞擊後產生的似曜岩類的成份也有所差異;從主要元素的資料，我們發現廣東茂名似曜岩類、呂宋地區似曜岩類與 splash form Indochinite 及 Muong Nong-type 似曜岩相近，而和捷克地區的似曜岩類(moldavite)及利比亞沙漠玻璃(Libyan glass)有所差別。

廣東茂名的似曜岩類的微量元素較為均質，含量變化不大，呂宋地區似曜岩類和捷克似曜岩類則多呈現單獨的群體，利比亞沙漠玻璃(Libyan glass)，由於含量高之  $\text{SiO}_2$ ，所以微量元素含量較低；在廣東茂名似曜岩類、呂宋似曜岩類與 splash form Indochinite、Muong Nong-type 似曜岩及上部大陸地殼比較時，均見有一定程度的相關性。

微量元素可以用來推測似曜岩類是否來自同一散佈區及其母岩性質，吾人可利用揮發性元素與耐熔元素的比值、兩個不共容元素的比值或者是共容元素與不共容元素的比值來探討。在 Rb 對 Ba 含量的作圖中，我們可以看到似曜岩類的落點是落在陸源物質的範圍內，所以我們排除，似曜岩類是源自於月球火山噴發所形成的(Koeberl et al., 1986); 廣東茂名似曜岩類、呂宋地區似曜岩類中平均 Th/U 的比值分別為 6.02 及 8.16。在沉積岩中 Th/U 的比值( $>6$ )比火成岩還高(McLennan and Taylor, 1980)，所以廣東茂名似曜岩類和呂宋地區似曜岩類中的 Th/U 比值，顯示其母岩物質應為沉積物；在廣東茂名似曜岩類、呂宋地區似曜岩類中 Th/Sc 的比值分別為 1.1 及 0.7，La/Sc 的比值分別為 3.2 及 2.2，與平均上部大陸地殼的 Th/Sc 及 La/Sc 比值分別為 0.97 及 2.7，相當接近，而沉積岩中及 La/Sc 平均比值大約為 1 及 3，而在地函及海洋地殼中的 Th/Sc 分別為 0.05、0.5 (Koeberl, 1990)，以上數據明顯的指出，似曜岩是源自於上部大陸地殼沉積岩。

稀土元素(REE)可用來解釋似曜岩類的起源，因為稀土元素是非常耐熔的元素，其含量不會因熔融或變質作用而改變；之前許多學者利用稀土元素來解釋似曜岩類的起源(如 Taylor and Maureen, 1969；Schnetler, 1992)。在呂宋似曜岩類中，輕稀土元素(LREE)比廣東茂名似曜岩類來的富化，但在重稀土元素中則沒這種現象；在經球粒隕石標準化後的分布圖中，同一地區之似曜岩類，其分布型

態幾乎完全相同。

在和 splash form Indochinite、Muong Nong-type 似曜岩及平均上部大陸地殼經球粒隕石標準化後分布圖(圖 2)比較時，呂宋似曜岩類和廣東茂名似曜岩類的稀土元素含量有較高的現象，利比亞沙漠(Libyan glass)則較低，所有的似曜岩和上部地殼都有輕稀土元素較富化和 Eu 負異常的現象，所以它們的分布趨勢與上部大陸地殼物質的分布是相似的。

從 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素的研究，我們可以了解母岩物質演化的年齡；每一種似曜岩類，都有其均一的 Nd 模式年齡，Shaw and Wasserburg (1982)利用 Nd 模式計算，澳洲似曜岩類為 1.15 Ga，象牙海岸似曜岩類為 1.91 Ga，Moldavites 為 0.9 Ga，北美似曜岩類為 0.65 Ga，這個年齡為母岩沉積物之組成物質從地函演化出來的年齡，而 Rb-Sr 模式年齡，可用來提供沉積岩原始物質沉積年代訊息，在澳亞似曜岩類為 250 Ma，象牙海岸似曜岩類為 950 Ma，中歐似曜岩類為 10 Ma (Schnetzer et al., 1969)。Blum et al., (1992) 將澳洲似曜岩類、中南半島似曜岩類、爪哇和菲律賓似曜岩類，利用 Sr 模式年齡對富化因子倒數( $f_{Rb/Sr}$ )作圖， $f_{Rb/Sr}$  計算公式如下：

$$({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_M = I(T) + ({}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr}) * \lambda_{Rb} * T$$

此式中 M 為  ${}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr}$  測量的值，而  $\lambda_{Rb} = 1.42 * 10^{-11} \text{yr}^{-1}$  為  ${}^{87}\text{Rb}$  的半衰期。

這個模式年齡是利用地函均一存庫(Uniform Reservoir)的推算值( ${}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr}$ ) $_{UR} = 0.0827$  來計算， $I_{UR}(0) = 0.7045$  為今日  ${}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}$  的比值。這個模式存量的時間從下式導得

$$I_{UR}(T) = I_{UR}(0) - ({}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr}) * \lambda_{Rb} * T$$

模式年齡為

$$T_{UR}^{Sr} = \Sigma^{Sr}(0) / (Q^{Sr} * f^{Rb/Sr}) \text{ (Shaw and Wasserburg, 1982)}$$

$$Q^{Sr} = 10^4 * \lambda_{Rb} * ({}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr})_{UR} / I_{UR}(0) = 16.67 \text{AE}^{-1}$$

而富集係數定義為

$$f_{Rb/Sr} = [ ({}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr})_M / ({}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr})_{UR} - 1 ]$$

由  $T_{UR}^{Sr}$  對  $1/f_{Rb/Sr}$  作圖中(圖 3)，這些資料呈一個 V 型的收斂的現象，這樣

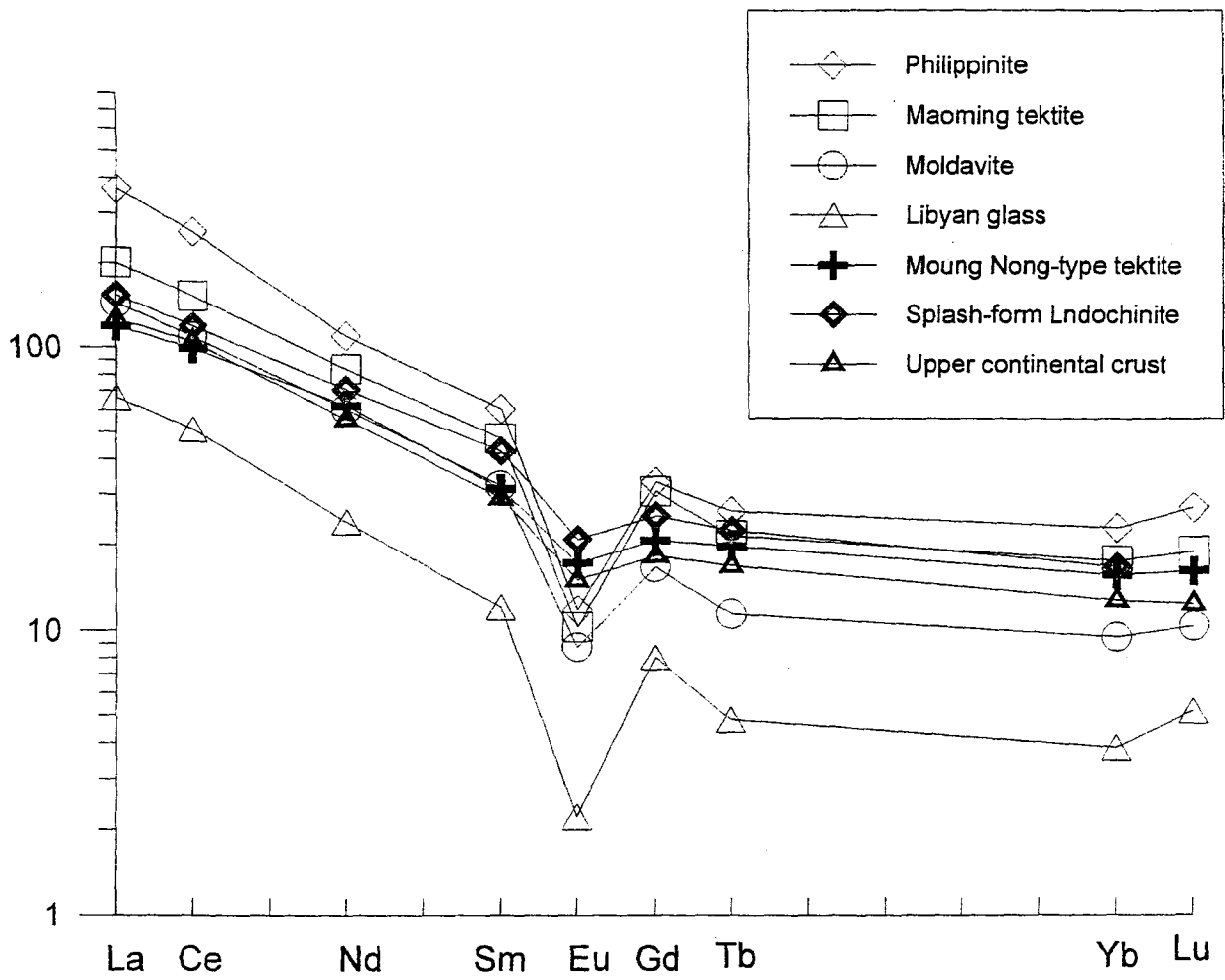


圖 2 呂宋黎薩、廣東茂名地區似曜岩類、捷克地區Moldavite、利比亞沙漠玻璃及平均splash-form Indochinite(Taylor and McLennan,1979)、Muong Nong-type tektite(Koeberl,1992)、上部大陸地殼(Taylor and McLennan,1985)稀土元素經球粒隕石標準化後分布圖

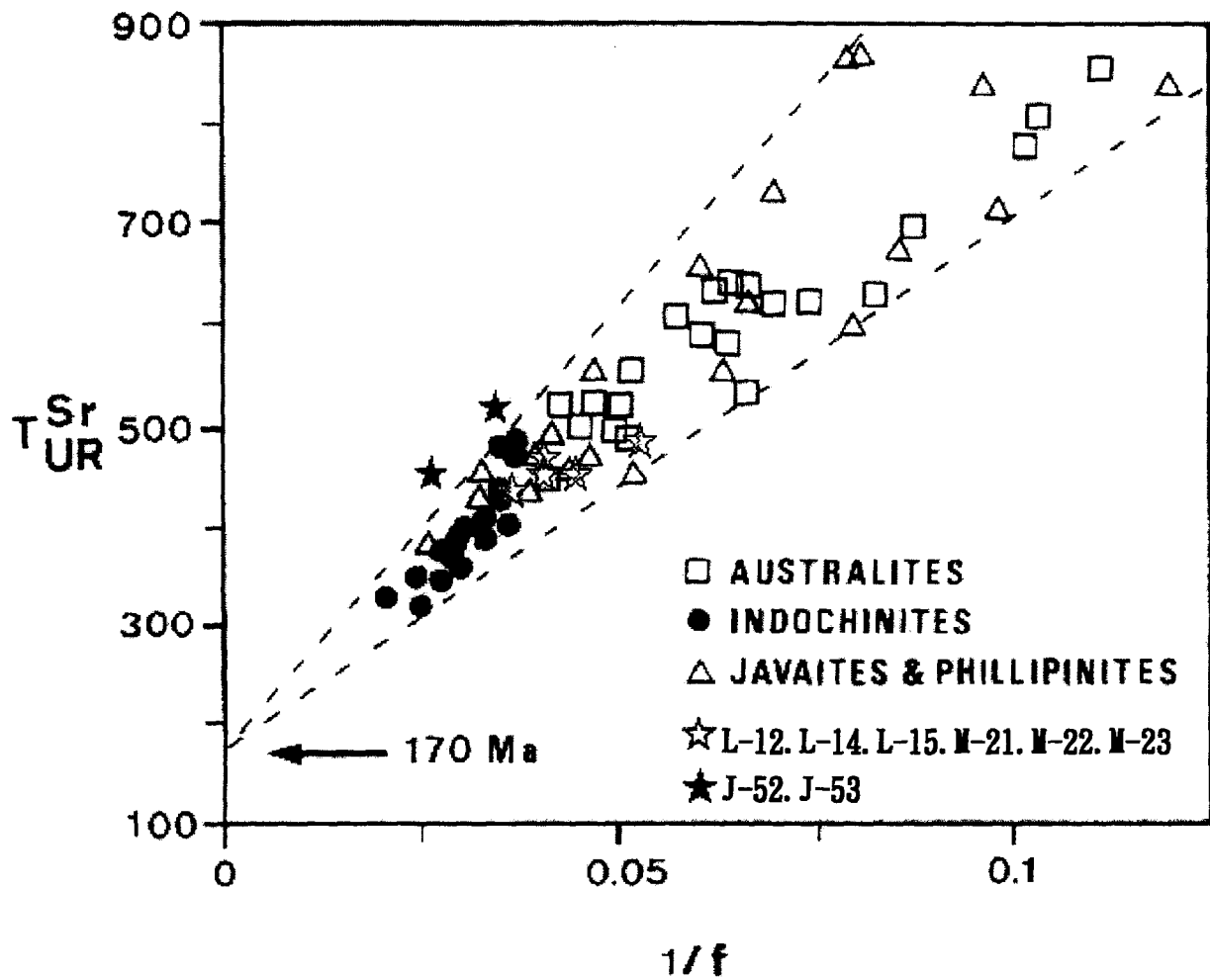


圖3 Sr模式年齡 ( $T_{UR}^{Sr}$ ) 對富化因子的倒數 ( $1/f$ ) 作圖  
 星號 (☆、★) 為本文分析之似曜岩  
 其他資料來源: Blum et al.(1992)

的現象證明澳亞散佈區的似曜岩類應該來自同一個母岩物質，Blum et al., (1992) 認為圖上 Y 軸之截距(170 Ma)，為母岩物質沉積的時間，也就是在侏羅紀；本文分析之 Rb-Sr 同位素之數據繪入圖 3 後，發現澳亞散佈區之標本(L-12、L-14、L-15、M-21、M-22、M-23)皆落在 V 字型的範圍內，而中歐散佈區(J-52、J-53)則沒有落在這個範圍，顯示中歐散佈區母岩沉積年齡和澳亞散佈區母岩沉積年齡不同。

在大陸地殼中，Sr 的同位素是非常不均的，其原因是因為年代不同和地殼中 Rb/Sr 的比值(McCulloch and Wasserburg, 1978)皆不同所造成的，圖 4 為中南半島似曜岩類、澳洲似曜岩、本文研究資料和各種不同陸源岩石比較的柱狀圖，從 Sr 同位素的資料來看，很多學者(如 Shaw and Wasserburg, 1982； Blum et al., 1992) 都排除似曜岩是來自近期內由地函演化的大陸物質，因為地函的  $\epsilon^{Sr}(0)$  接近 0，而且也排除為來自海洋地殼(如中洋脊玄武岩其  $\epsilon^{Sr}(0)$  為 -20~-30)，而本文所分析結果也支持這個結論。除此之外，Wasson (1987, 1991)推測現代年輕的沉積物(如紅土或土壤)可能為似曜岩之來源物質，但因紅土的 Sr 同位素成份呈現很均質的狀態(Taylor et al., 1983)，在似曜岩中的 Sr 同位素卻是多變的(Blum et al., 1992)，且在紅土中，會在 Ce 正異常的現象，而在似曜岩中卻沒有，所以紅土等年輕沉積物不是似曜岩類的來源物質。

澳亞散佈區之形成之模式，有些學者認為單一撞擊所造成(Stauffer, 1978; Hartung and Rivolo, 1979; Barnes, 1989; Burns and Glass, 1989; Schnetzler, 1992; Hartung and Koeberl, 1994)，也有學者認為是多坑撞擊(Wasson, 1987)所形成的，曾被提出之撞擊坑位置如下：Elgygytgyn crater (Dietz, 1977)；Zhamanshin crater (Glass, 1979)；柬埔寨東北方之構造盆地(Hartung and Rivolo, 1979)；Wilkes Land (Schmidt, 1962)；湄公河三角洲(Stauffer, 1978)；柬埔寨之金邊湖(Hartung, 1990)；越南之重力負異常區(Schnetzler et al., 1988)；寮國、柬埔寨和泰國之邊界(Schnetzler, 1992)；散佈在中南半島之多數小撞擊坑(Wasson, 1987)，但正確之撞擊坑位置仍未被確定。

由化學性質來看，不同地區之地質背景不同，所以受到隕石撞擊後，所產生似曜岩類之化學特性應有所不同，而澳亞散佈區之似曜岩類，其化學成份和 Nd、Sr 同位素變化，很清楚看出，澳亞散佈區之似曜岩不像在好幾個地方經熔

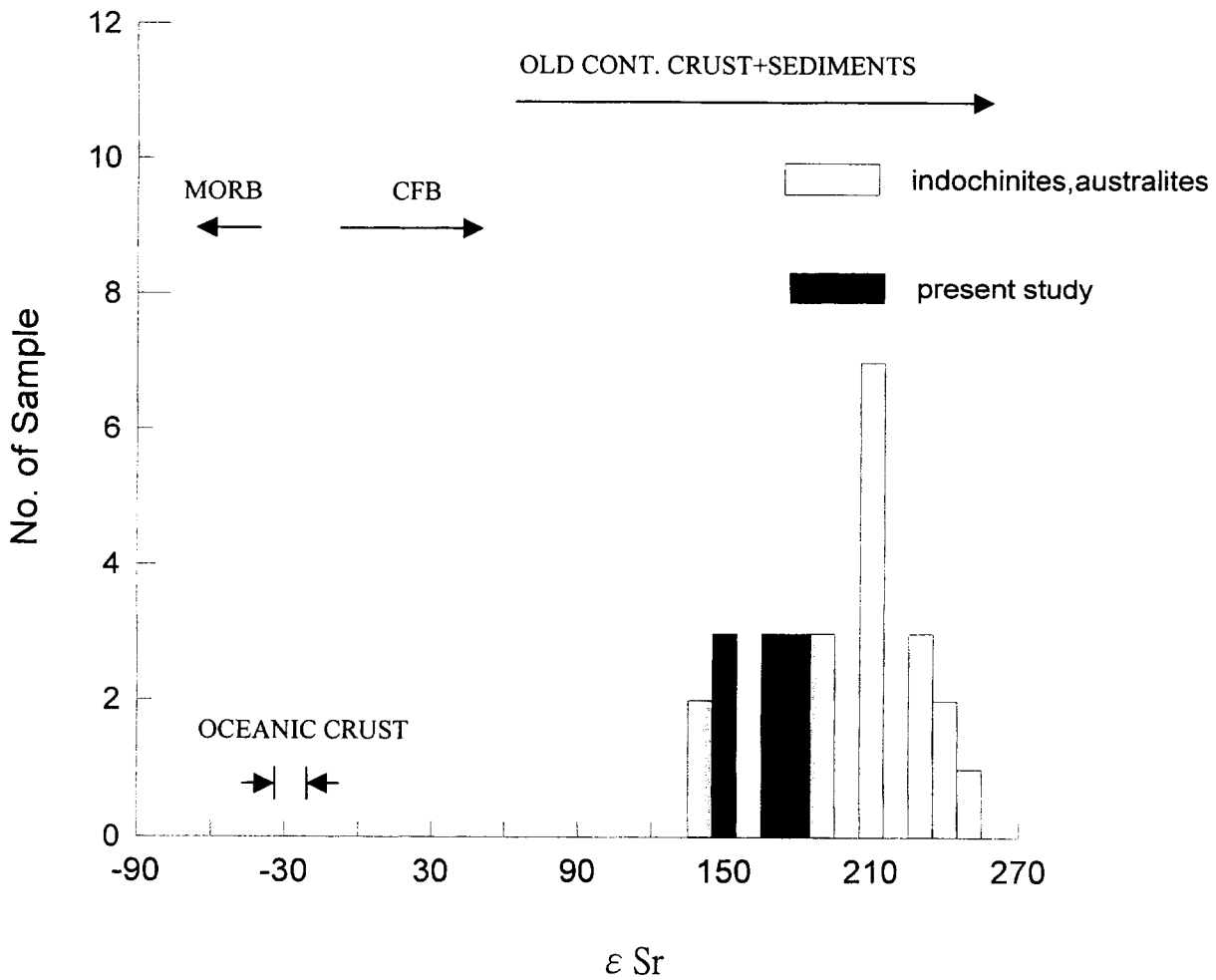


圖4 似曜岩類Sr同位素成分的柱狀圖  
 (L-12, L-14, L-15, M-21, M-22, M-23, J-52, J-53  
 為本文分析結果)  
 其他資料來源：Shaw and Wasserburg (1982)；  
 Blum et al., (1992)

融所形成的(Koeberl, 1992; Schnetzler, 1992), 由本研究中, 也看出同樣的結論; 由於前文我們所推測似曜岩類的來源物質為源自於上部大陸地殼後太古代(Post Archean)沉積岩, 在寮國、柬埔寨和泰國之邊界, 存有一大範圍侏羅紀非海相碎屑狀岩石, 主要為砂岩、板岩、頁岩、泥岩和礫岩和石灰岩(Ridd, 1978; Sato, 1992), 所以本文認為澳亞散佈區之撞擊坑可能為寮國、柬埔寨和泰國之邊界, 由於此地地質資料不多, 沒有明確之母岩化學資料可利用, 所以目前本文使用可用來代表上部大陸地殼後太古代沉積岩的 4 個岩石成份來做混合模式的計算, 其中包括後太古代澳大利亞頁岩(average post-Archean Australian shales)、平均的顯生代砂岩(average Phanerozoic sandstones)、平均中生代至新生代之混濁砂岩(Meso-Cenozoic Greywackes)(Condie, 1993)和塔斯曼尼亞的石英岩(quartzite in Tasmania, Australia)(Meisel et al., 1990)。

計算出來之結果列於表2, 在兩組不同的混合模式中, 呂宋地區似曜岩類最適合的混合比例為54%頁岩+15%混濁砂岩+31%石英岩, 而廣東茂名地區為40%頁岩+30%混濁砂岩+30%石英岩, 在圖5中可看出並不是每一個元素皆完全相符混合模式, 有些主要元素( $Al_2O_3$ 、 $MgO$ 、 $CaO$ )及微量元素(如Zr、Y、Nb、Co、Th)略有差異, 不同的原因可能是因為母岩物質還有其他岩型存在。

#### 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. 似曜岩類為陸源沉積岩經撞擊熔融所形成。根據 Rb/Ba 的比值, 似曜岩類並非源於月球之火山玻璃; 相較於地球上的酸性火山岩物質, 似曜岩類有較高  $SiO_2$  含量, 在相同  $SiO_2$  含量時, 似曜岩類有較高的折射率及較高的  $MgO$ 、Co、Cr、V 含量, 所以似曜岩類並非由地球酸性火山岩物質所造成。

2. 不同散佈區之似曜岩類, 因母岩物質不同, 化學成份有所差異。在同一散佈區, 呂宋黎薩地區似曜岩類有較高的  $CaO$ 、 $MgO$ 、 $Na_2O$ , 廣東茂名地區似曜岩類有含量較高的  $Al_2O_3$ , 而  $SiO_2$  含量相差不多, 但與不同散佈區的捷克 Moldavite 比較時, Moldavite 比呂宋黎薩和廣東茂名地區似曜岩類含有較高的  $SiO_2$ , 較低的  $MgO$ 、 $TiO_2$ , 利比亞沙漠玻璃母岩可能為石英砂岩或為沙漠砂,

表 2 呂宋Philippinite及廣東茂名地區似曜岩類平均化學成份  
與混合模式成份之比較

	L	M	PAAS	APSS	AMCG	AQTZ	M1	M2
%SiO <sub>2</sub>	75.3	75.4	62.8	91.5	66.3	92.7	72.5	72.9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.61	9.46	18.9	3.62	15.5	4.18	13.9	13.4
MgO	2.85	2.45	2.20	0.45	2.00	0.42	1.62	1.60
FeO	5.46	5.30	6.50	1.13	6.20	0.11	4.49	4.48
CaO	4.69	3.06	1.30	0.31	3.20	0.06	1.21	1.50
Na <sub>2</sub> O	1.63	1.33	1.20	0.42	3.10	0.06	1.14	1.43
K <sub>2</sub> O	2.52	2.34	3.70	0.91	2.30	1.15	2.71	2.50
TiO <sub>2</sub>	0.81	0.79	1.00	0.25	0.72	0.44	0.79	0.75
Total	99.8	100	97.6	98.6	99.3	99.1	98.3	98.6
ppmBa	607	444	650	150	650	133	491	494
Co	30.3	24.3	23.0	2.50	15.0	1.10	15.1	13.9
Cr	103	69.3	110	30.0	70.0	86.0	96.6	90.6
Hf	12.9	8.64	5.00	3.10	3.90	18.0	8.82	8.60
Nb	39.5	23.3	19.0	4.00	10.0	-	11.8	10.5
Rb	115	103	160	25.0	100	67.0	122	114
Sc	38.7	16.7	16.0	2.00	14.0	3.10	11.7	11.5
Sr	190	144	200	35.0	280	-	151	164
Ta	1.82	1.30	1.20	0.30	0.85	1.00	1.09	1.03
Th	27.2	16.8	14.6	4.00	8.50	6.20	11.1	10.2
U	4.52	2.25	3.10	1.10	1.80	2.50	2.72	2.52
V	680	107	150	15.0	130	-	101	98.5
Y	91.6	45.2	27.0	6.80	28.0	-	18.9	19.1
Zr	1000	397	210	105	145	634	330	319
ppmLa	86.7	47.7	38.0	10.3	28.0	17.0	30.0	28.6
Ce	158	93.6	80.0	22.3	61.0	25.7	60.5	57.8
Nd	51.5	39.3	32.0	8.40	26.0	9.80	24.3	23.5
Sm	9.32	7.30	5.60	1.63	4.90	2.00	4.39	4.30
Eu	0.69	0.60	1.10	0.34	0.90	0.40	0.85	0.83
Gd	6.89	6.40	4.70	1.44	4.34	0.00	3.20	3.17
Tb	0.99	0.81	0.77	0.21	0.66	0.50	0.67	0.65
Yb	3.97	3.04	2.80	0.61	2.20	2.20	2.53	2.44
Lu	0.70	0.49	0.43	0.11	0.38	0.40	0.41	0.41

L: 呂宋黎薩地區Philippinite之平均成份; M: 廣東茂名地區似曜岩類之平均成份; PAAS: 平均後太古代澳洲頁岩 (Condie, 1993); APSS: 平均顯生代砂岩 (Condie, 1993); AMCG: 平均的中生代至新生代混濁砂岩 (Condie, 1993); AQTZ: 塔斯曼尼亞石英岩 (Meisel et al., 1990)

M1: 54%PAAS + 15%AMCG + 31%AQTZ

M2: 40%PAAS + 30%AMCG + 30%AQTZ



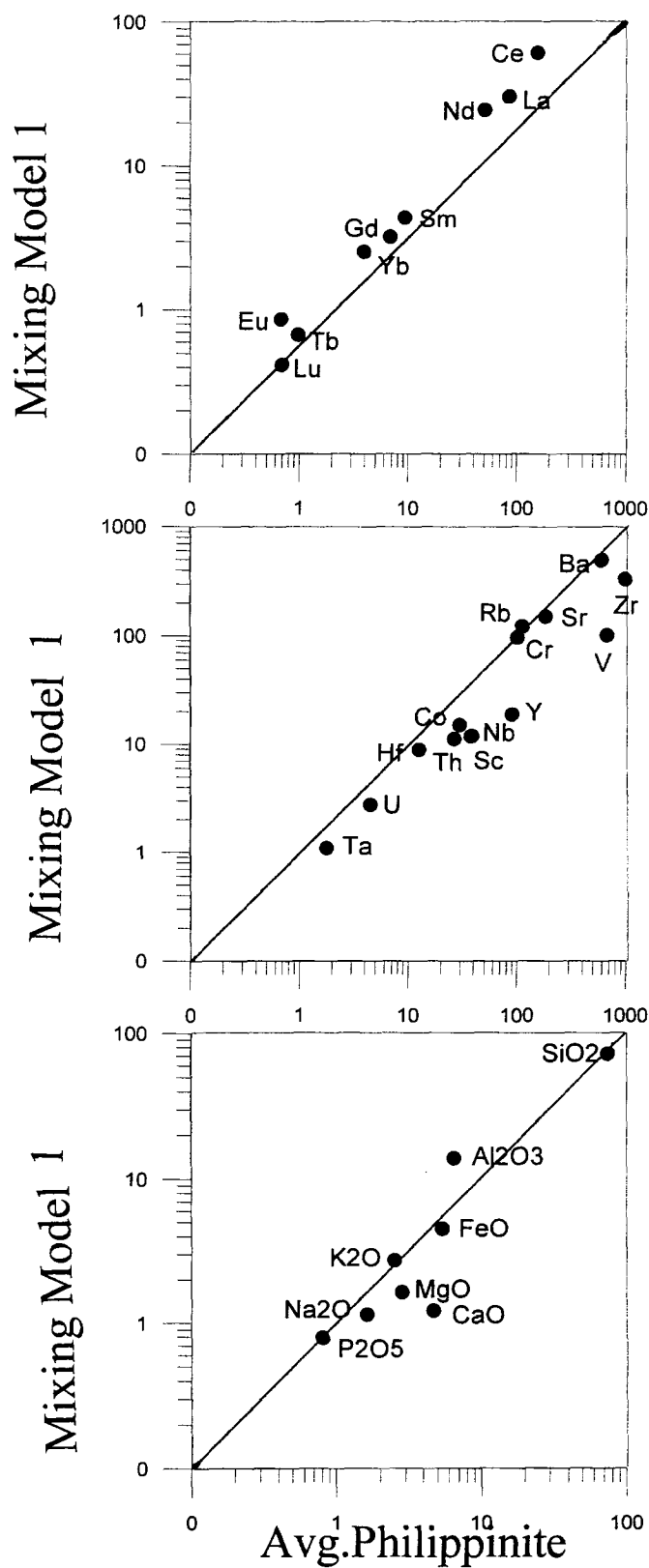


圖5A 平均呂宋地區似曜岩類之成份和混合模式(M1)之比較：  
54%頁岩，15%混濁砂岩，31%石英岩

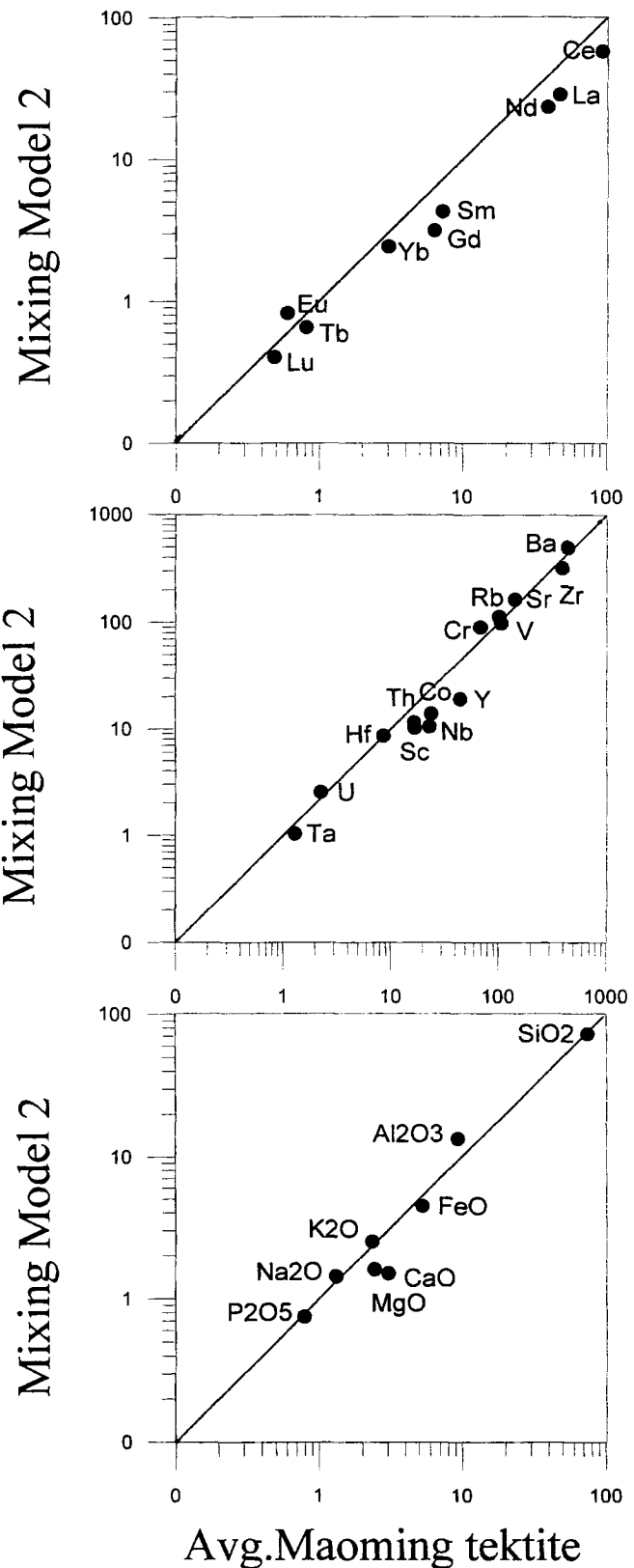


圖5B 平均廣東茂名地區似曜岩類之成份和混合模式(M2)之比較：  
40%頁岩，30%混濁砂岩，30%石英岩

所以 SiO<sub>2</sub> 含量高達 98%，其他元素因為 SiO<sub>2</sub> 稀釋作用的影響，含量都小於 1% (除 K<sub>2</sub>O=1.07%)。

3. 在不同似曜岩類中，稀土元素經球粒隕石標準化後的分布圖所呈現趨勢相似。不同的似曜岩類中，稀土元素的含量雖有所差異，但經球粒隕石標準化後的分布圖所呈現趨勢相似(皆有輕稀土元素較重稀土元素富化，Eu 富異常的現象)。

4. 似曜岩類之原始物質源自於後太古代上部大陸地殼之沉積岩。似曜岩類微量元素比值(Ba/Rb、Th/Sm、Sm/Sc、Th/Sc)及稀土元素分布圖的特性(輕稀土元素富化及 Eu 負異常)顯示，似曜岩類之原始物質應源自於後太古代上部大陸地殼之沉積岩。

5. 鋇同位素資料顯示，呂宋黎薩及廣東茂名地區似曜岩類的原始物質並非源自海洋地殼或上部地函。鋇同位素資料顯示似曜岩類之  $\epsilon$  Sr(0) 和海洋地殼及上部地函不同，但與地殼沉積岩相似，所以排除似曜岩類源自海洋地殼或上部地函，且似曜岩類之鋇同位素比值分布較廣，而現代沉積物中鋇同位素比值較為均質，所以似曜岩類並非源於現代年輕的沉積物。

6. 由混合模式計算可推論母岩物質之混合比例。混合模式計算出，最適合呂宋地區似曜岩類母岩之混合比例為：54%頁岩+15%混濁砂岩+31%石英岩；而廣東茂名地區則為：40%頁岩+30%混濁砂岩+30%石英岩。

## 五、參考文獻

Barnes, V. E. (1989) Origin of tektites. *Texas J. of Sci.* 41, 5-33.

Blum, J. D., Papanastassiou D. A., Koeberl C., and Wasserburg G. J. (1992) Nd and Sr isotopic study of Australasian tektites: New constraints on the provenance and age of target material. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56, 483-492.

Burns, C. A. and Glass, B. P. (1989) Source region for the Australasian tektite strewn field. *Meteoritics* 24, 257.

Condie, K. C. (1993) Chemical composition and evolution of the upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales. *Chem. Geol.* 104, 1-37.

- Dietz, R. S. (1977) Elgygytgyn Crater: Source of Australasian tektites (and bediasites from Popigai). *Meteoritics* 12, 205-206.
- Faul, H. (1966) Tektites are terrestrial. *Science* 152, 1341-1345.
- Glass, B. P. (1979) Zhamanshin crater, a possible source of Australasian tektites,. *Geology* 7, 351-353.
- Glass, B. P. (1990) Tektites and microtektites: key facts and inferences. *Tectonophysics* 171, 393-404.
- Hartung, J. B. (1990) Australasian tektite source crater? Tonle Sap, Cambodia, *Meteoritics*, 25, 369-370.
- Hartung, J. B. and Koeberl, C. (1994) In search of the Australasian tektite Source crater : The Tonle Sap hypothesis. *Meteoritics* 29, 411-416.
- Hartung, J. B. and Rivolo A. R. (1979) A possible source in Cambodia for Australasian tektites. *Meteoritics* 14, 153-159.
- King, E. A. (1977) The origin of tektites : A brief review. *Am. Sci.* 65, 212-218.
- Koeberl, C. (1990) The geochemistry of tektites : an overview. *Tectono -physics* 171, 405-422.
- Koeberl, C. (1992) Geochemistry and origin of Muong Nong-type tektites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 56, 1033-1064.
- Koeberl, C., Kluger, F. and Kiesl, W. (1986) Trace element correlation as clues to the origin of tektites and Impactites. *Chem. Erde* 45,1-21.
- McCulloch, M.T. and Wasserburg, G.J. (1978) Sm-Nd and Rb-Sr chronology of continental crust formation. *Science* 260, 1003
- McLennan, S. M. and Taylor, S. R. (1980) Th and U in sedimentary rocks : crustal evolution and sedimentary recycling. *Nature* 285, 621-624.
- Meisel, T., Koeberl, C. and Ford, R. J. (1990) Geochemistry of Darwin impact glass and target rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta* 54, 1463-1474.
- O'Keefe, J. A. (1976) Tektites and their Origin, 254 pp. *Elsevier*, Amsterdam.
- Ridd, M. F. (1978) The Mesozoic :Thailand. In *The Phanerozoic Geology of the*

World II, 145-161. *Elservier*.

Sato, T. (1992) Regional geology and stratigraphy: Southeast Asia and Japan. In *The Jurassic of the Circum-Pacific* (Edited by Westermann G.E.G.), pp. 26-36, *Elservier*.

Schmidt, R. A. (1962) Australites and antarctics, *Science*, 138, 443-444.

Schnetzler, C. C. (1992) Mechanism of Muong Nong-type tektite formation and speculation on the source of Australasian tektites. *Meteoritics* 27, 154-165.

Schnetzler, C. C., Philpotts J.A. and Pinson W.H. (1969) Rubidium-strontium correlation study of moldavites and Ries Crater material. *Geochim. Cosmochim. Acta* 33,1015

Schnetzler, C. C., Walter, L. S. and Marsh, J. G. (1988) Source of the Australasian tektite strewn field: a possible offshore impact site. *Geophys. Res. Lett.* 15, 357-360.

Shaw, H.F. and Wasserburg, G. J. (1982) Age and provenance of the target materials for tektites and possible impactites as inferred from Sm-Nd and Rb-Sr systematic. *Earth Planet. Sci. Lett.* 60, 155-177.

Stauffer, P. H. (1978) Anatomy of the Australasian tektite strewnfield and the probably site of its source crater. In: *Proc. of the 3rd Regional Conf. on Geology and Mineral Resources of Southeast Asia, Bangkok, Thailand*. pp. 285-289.

Taylor, S. R. (1973) Tektites : a post-Apollo view. *Earth Sci. Rev.* 9, 101-123.

Taylor, S. R. and Maureen, K. (1969) Genetic significance of the chemical composition of tektites : A review. *Geochim. Cosmochim. Acta* 33,1083-1100.

Taylor, S. R. and McLennan, S. M. (1979) Chemical relationships among irghizites, Zhamanshinites, Australasian tektites and Henbury impact glasses. *Geochim. Cosmochim. Acta* 43, 1551-1565.

Taylor, S. R. and McLennan, S. M. (1985) The continental crust : its composition and evolution, 312 pp. *Blackwell, London*.

Taylor, S. R., McLennan, S. M. and McCulloch, M. T. (1983) Geochemistry of loess, continental crust composition and crustal model ages. *Geochim. Cosmochim. Acta*

47, 1897-1905.

Wasson, J. T. (1987) A multiple-impact origin of southeast Asian tektites. *Lunar Planet. Sci.* 18, 1062-1063.

Wasson, J. T. (1991) Layered tektites : a multiple impact origin for the Australasian tektites. *Earth Planet. Sci. Lett.* 102, 95-109.