

大屯橋附近土石流災害地質鑽探 岩石元素等分析工作報告

計畫主持人：宋聖榮

內政部營建署陽明山國家公園管理處委託
中 華 民 國 國 家 公 園 學 會

中華民國八十九年四月

陽明先生全集

摘 要

利用小油坑地區所鑽獲的三口岩芯，研究其火山岩層序、岩性和地球化學特徵，結果顯示小油坑地區主要是由角閃石兩輝安山岩和兩輝角閃石安山岩兩層熔岩流，在約 24—22 萬年前由七星山火山口噴發所形成的。火山噴發停止後，多餘的熱和火山氣體累積於小油坑地底下，發生蒸氣噴發，形成火山爆裂口。而後酸性的火山氣體與安山熔岩反應，減低熔岩的強度。故每在大雨過後，陡峭的小油坑爆裂口，容易發生山崩土石流，擴大變成崩塌口地形。

在酸性熱水溶液環境的換質作用過程中，安山岩的斜長石礦物最先被溶蝕，然後依次為角閃石和輝石。而在岩石化學成分方面，隨著換質作用的增強，岩石中的 SiO_2 含量會增加； TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 P_2O_5 、Zr、Nb、Hf、Pb、Th、U、Rb、Sr、Ba 和 Y 等成分含量變化不大，或稍微增加，而 MgO、MnO、CaO、 Na_2O 、Cr、和 Ni 等成分含量則遞減。

陽明先生全集

目 錄

壹、前言.....	4
貳、工作內容.....	5
參、分析方法.....	6
肆、分析結果.....	8
(一) 岩心分析	
(二) 岩心岩象學	
(三) 主要元素分析	
(四) 微量元素分析	
(五) 稀土元素分析	
伍、重建小油坑的地質環境.....	42
陸、岩心展示規劃.....	49

圖 目 錄

圖一：小油坑鑽井岩芯位置圖。

圖二：小油坑一號鑽井岩芯岩性柱狀圖。

圖三：小油坑二號鑽井岩芯岩性柱狀圖。

圖四：小油坑三號鑽井岩芯岩性柱狀圖。

圖五：SiO₂ 對 TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O 和 P₂O₅ 等主要元素的投影圖。

圖六：SiO₂ 對 MnO, MgO, CaO 和 Na₂O 等主要元素的投影圖。

圖七：小油坑鑽井岩芯的整體不相容元素分布圖。原始地函(primordial mantle) 標準值依據 Sun and McDonough (1989)。

圖八：SiO₂ 對 Cr, Ni, Rb, Sr, Ba, Y, Zr, Nb, La, Ce, Hf, Pb, Th 和 U 等微量元素元素的投影圖。

圖九：小油坑鑽井岩芯的隕石標準化稀土元素分布圖。隕石含量取自 Sun and McDonough (1989)。

圖 目 錄

表一：分析樣本的編號及深度。

表二：分析樣本的礦物組成。

表三：小油坑三口鑽井岩芯主要元素成分分析結果。

表四：小油坑三口鑽井岩芯微量和稀土元素成分分析結果。

一、 前 言

小油坑地區及其下游大屯橋附近，地形相當陡峭，岩壁經年累月的受到地底下噴出、含大量硫酸液體和氣體的熱水換質等侵蝕作用，使岩壁原有的火山岩發生質變，減低岩石強度，故在大雨後，常發生嚴重的山崩或土石流，造成人員傷亡及道路損壞。民國八十七年十月瑞伯颱風所帶來的豪雨，使大屯橋上方小油坑地區的岩壁，發生了山崩，產生大量的土石流，沿著河谷沖刷而下至陽金公路上，把經過的小客車衝離車道，這是此一地區不可避免會發生山崩的自然現象。

陽明山國家公園管理處鑒於園區內此種山崩土石流的災害，為了解小油坑地區鄰近的地質及發生此種自然災害的原因，由台灣威士盟大地工程顧問公司在小油坑附近鑽探了三口岩芯，委託中華民國國家公園學會進行岩象學和主要、微量及稀土元素的地球化學分析，希望能重建小油坑地區的地質環境，及探討發生山崩土石流的原因。

二、工作內容

本研究計劃的主要工作內容，為針對台灣威士盟大地工程顧問公司在小油坑附近鑽探的三口岩芯進行分析工作，工作內容包括了：

- 1、大屯橋鄰近三口共 200 公尺鑽井岩芯，取 48 個岩石樣本做岩象學和主要、微量及稀土元素的地球化學分析。
- 2、重建小油坑地質環境。
- 3、鑽井岩心的規劃展示。

三、 分 析 方 法

本研究計劃的主要工作包括：岩象學和主要、微量及稀土元素的地球化學分析等工作。在岩象學方面，用偏光顯微鏡分析岩芯中的主要礦物組成和其組織，以了解小油坑地區的安山岩，在熱水換質作用過程中，組成礦物和岩石組織的變化。

在主要元素方面，將用 X 光螢光分析法分析岩石中的主要元素組成；首先選取岩芯中的樣本，烘乾後磨成岩石粉末，然後秤重製成透明玻璃餅，再用 X 光螢光分析儀分析 SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 MnO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 和 P_2O_5 等十種岩石中的主要組成成分。

微量元素和稀土元素則用感應耦合電漿質譜儀(ICP-MS)分析。分析步驟為取已磨成粉末的岩石樣本約 50 毫克，寄到中國大陸廣州中國科學院地化研究所，利用該所的感應耦合電漿質譜儀分析岩樣中的 Sc、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Rb、Sr、Y、Zr、Nb、Cs、Ba、Hf、Ta、Pb、Th 和 U 等 20 種微量元素，和 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb 和 Lu 等 14 種稀土元素。

主要、微量和稀土元素的分析，是用以探討小油坑地區的安山岩，在熱水換質作用中，元素的遷移變化等作用。

小油坑地區三口鑽井岩芯的樣本採集及深度如表一。

表一：分析樣本的編號及深度。

一號鑽井		二號鑽井		三號鑽井	
標本編號	深度(m)	標本編號	深度	標本編號	深度
HYK0101	2.50	HYK0201	6.60	HYK0301	3.80
HYK0102	5.50	HYK0202	11.60	HYK0302	7.70
HYK0103	9.30	HYK0203	15.20	HYK0303	9.60
HYK0104	15.60	HYK0204	18.50	HYK0304	13.70
HYK0105	16.60	HYK0205	21.80	HYK0305	18.60
HYK0106	23.70	HYK0206	26.40	HYK0306	22.40
HYK0107	25.30	HYK0207	29.20	HYK0307	26.60
HYK0108	28.80	HYK0208	32.30	HYK0308	29.30
HYK0109	34.30	HYK0209	36.70	HYK0309	43.10
HYK0110	37.10	HYK0210	42.40	HYK0310	45.60
HYK0111	41.40	HYK0211	45.40	HYK0311	49.90
HYK0112	45.10	HYK0212	48.70		
HYK0113	51.40				
HYK0114	54.40				
HYK0115	58.70				
HYK0116	62.30				
HYK0117	66.40				
HYK0118	68.80				
HYK0119	73.70				
HYK0120	75.80				
HYK0121	82.20				
HYK0122	85.80				
HYK0123	89.80				
HYK0124	93.50				
HYK0125	99.80				

四、分析結果

(一)、岩芯分析

小油坑位於七星山西麓，屬於七星山火山亞群的一部份，主要是由火山熔岩所組成，含少量的火山角礫岩（陳肇夏、吳永助，1971；黃鑑水，1988）。台灣威士盟大地工程顧問公司在小油坑附近鑽探的三口岩芯，分別位於小油坑停車場旁（一號井）、大屯橋旁（二號井）及頂湖（三號井）等三地（圖一），鑽井深度分別為：100公尺、50公尺和50公尺。其岩芯柱狀圖為圖二、圖三和圖四。

一號井岩芯上部約28公尺，主要是由崩積層和風化土壤所組成；28~47公尺則是由火山角礫岩和凝灰質砂岩所組成，受中度的熱水換質作用的影響；47公尺以下則是由安山熔岩流夾薄層的凝灰岩所組成，且大部分的安山熔岩流，受到中度至強烈的熱水換質作用的影響，有些火山岩的原有組織已不復見了。

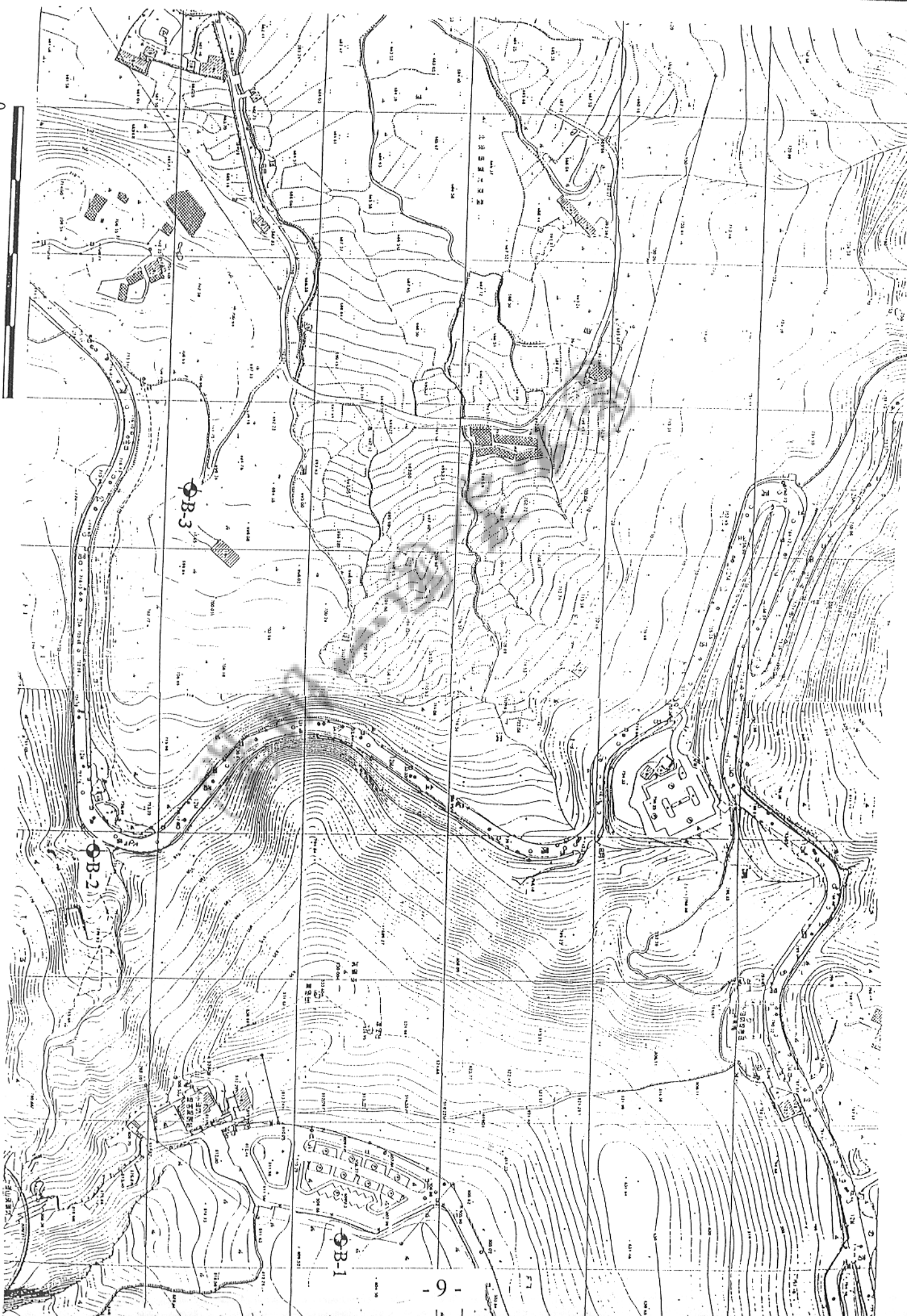
二號井岩芯上部約9公尺，主要是由崩積層和風化土壤所組成；9~26公尺則是由熱水換質作用極嚴重，已不復見原來的火山岩產狀和組織的黃色硫磺晶體和白色換質礦物所組成，由殘餘的產狀來判斷，其原先可能是火山角礫岩層。26~50公尺則是由

圖一：小油坑鑽井岩芯位置圖。

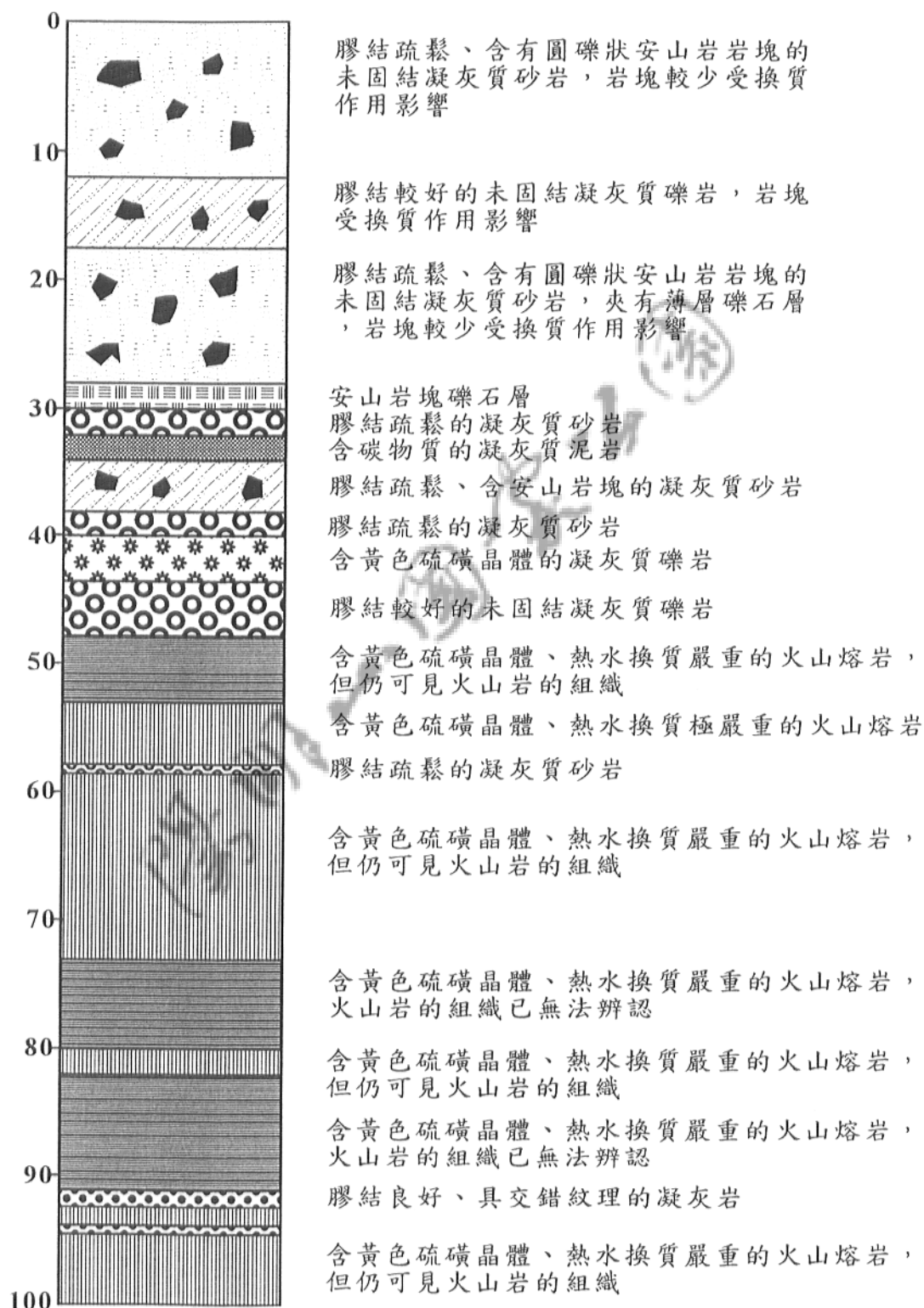
200

100

0

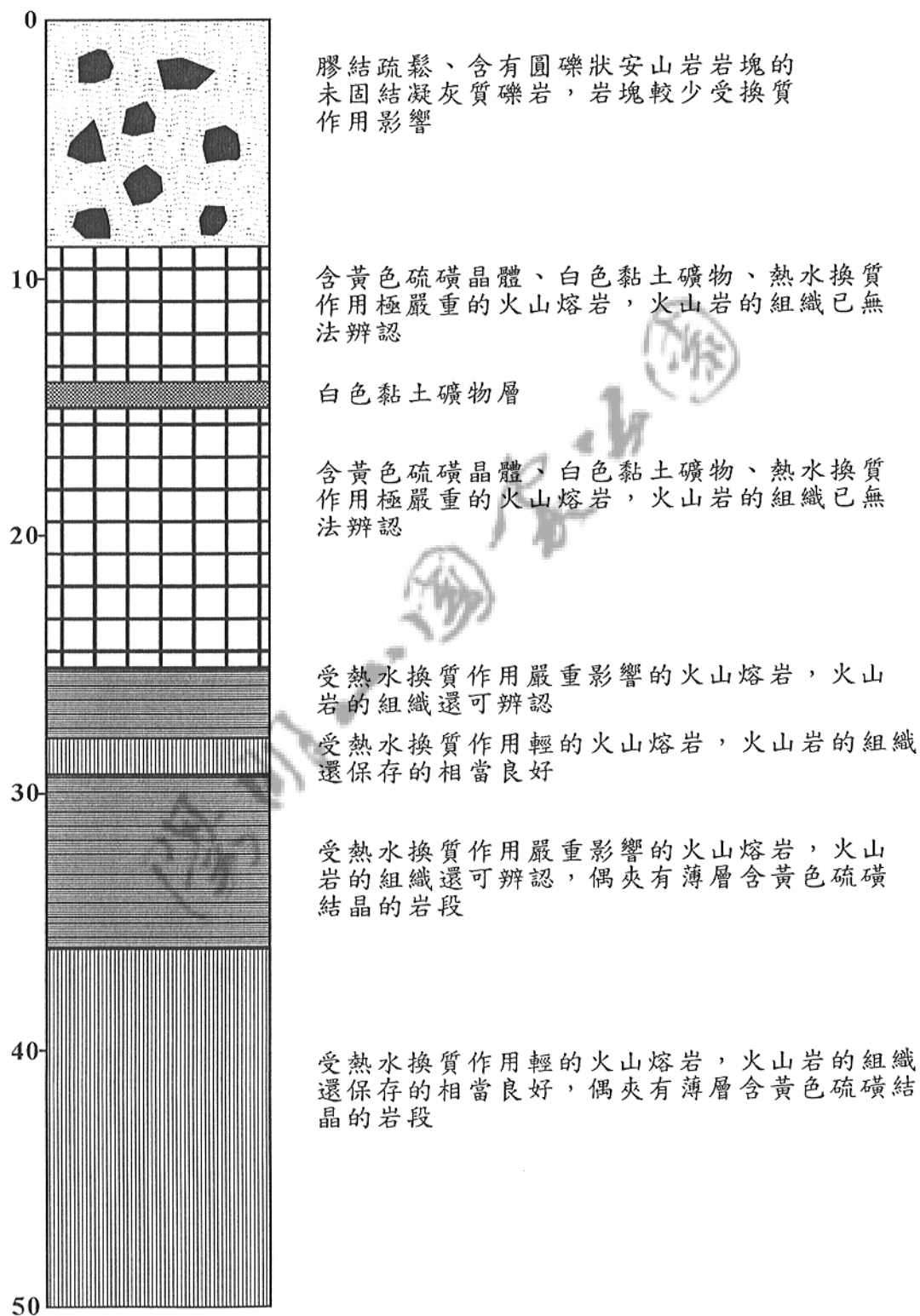


小油坑鑽探一號井



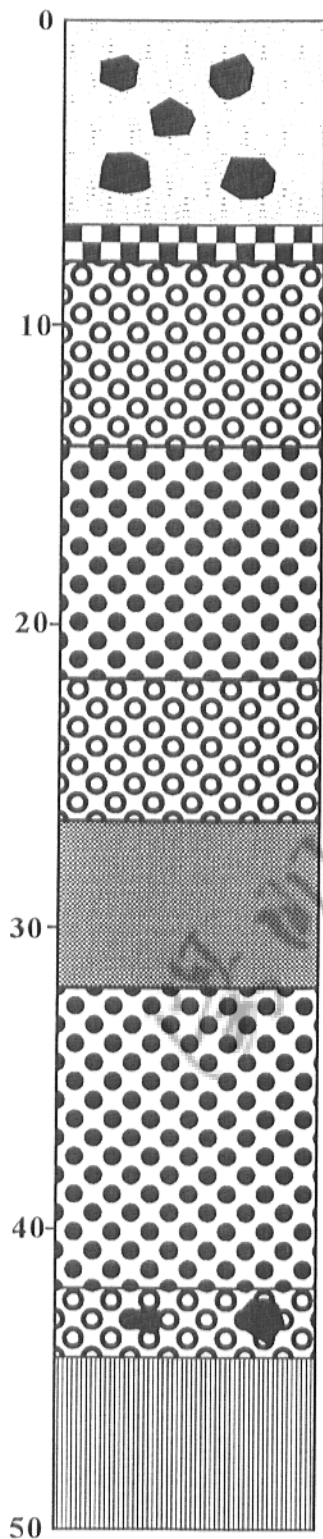
圖二：小油坑一號鑽井岩芯岩性柱狀圖。

小油坑鑽探二號井



圖三：小油坑二號鑽井岩芯岩性柱狀圖。

小油坑鑽探三號井



膠結疏鬆、含有圓礫狀安山岩岩塊的未固結凝灰質礫岩，岩塊較少受換質作用影響

灰色膠結疏鬆的礫岩層，含有5~10公分的安山岩岩礫，岩塊較少受換質作用影響

褐色膠結疏鬆的凝灰質砂岩，含有3~5公分的安山岩岩礫，岩塊較少受換質作用影響，偶夾有薄層蝕變較嚴重的岩段

膠結疏鬆的凝灰質砂岩，含有10~20公分的安山岩岩礫，岩塊較少受換質作用影響，偶夾有薄層蝕變較嚴重的岩段

褐色膠結疏鬆的凝灰質砂岩，含有3~5公分的安山岩岩礫，岩塊較少受換質作用影響，偶夾有薄層蝕變較嚴重的岩段

灰色膠結疏鬆的凝灰質砂岩，含有3~5公分的安山岩岩礫，岩塊較少受換質作用影響

膠結疏鬆的凝灰質砂岩，含有3~5公分的安山岩岩礫，岩塊較少受換質作用影響

膠結疏鬆的凝灰質礫岩，岩塊較少受換質作用影響

受熱水換質作用輕的火山熔岩，火山岩的組織還保存的相當良好，偶夾有薄層含黃色硫磺結晶的岩段

圖四：小油坑三號鑽井岩性柱狀圖。

安山熔岩流所組成，且大部分的安山熔岩流，受到中度至強烈的熱水換質作用的影響，有些火山岩的原有組織已不復見了。

三號井岩芯上部約 7 公尺，主要是由崩積層和風化土壤所組成；7~44 公尺則是由膠結疏鬆的火山角礫岩、凝灰質礫岩和砂岩的互層所組成，受輕微熱水換質作用的影響；44 公尺以下則是由安山熔岩流所組成，且大部分的安山熔岩流，受到中度至強烈的熱水換質作用的影響，有些火山岩的原有組織已不復見了。

(二)、岩芯岩象學

岩象學的研究，是用偏光顯微鏡觀察小油坑三口岩芯岩石樣本的礦物組成、岩石組織和換質作用對岩石的影響等，並計算各礦物組成的百分比，其結果列於表二。

從分析結果顯示，小油坑地區的岩石主要的礦物組成為斜長石、角閃石、紫蘇輝石、普通輝石和磁鐵礦等。依火山岩中的鐵鎂礦物組成的多寡，可把小油坑的火山岩分為兩輝角閃石安山岩和角閃石兩輝安山岩，前者角閃石為主要的鐵鎂礦物組成，而後者則是輝石為主要的鐵鎂礦物組成。在一號和三號鑽井岩芯中只見到有兩輝角閃石安山岩的出露，而二號鑽井上部為兩輝角閃石安山岩，而下部則是角閃石

兩輝安山岩，故從三口岩芯的岩性分布，可知兩輝角閃石安山岩是蓋在角閃石兩輝安山岩之上。對照李淑芬（1996）的研究，上部的兩輝角閃石安山岩可對照其 C10 的岩性，噴發的年代約為 22 萬年前，而下部的角閃石兩輝安山岩可對照其 C9 的岩性，噴發的年代約為 24 萬年前。

三口岩芯除了有熔岩流的出露外，還有角礫岩、凝灰岩和凝灰質砂岩的出露。不過因熱水換質作用的影響，大部分的岩石組織都已難分辨。

小油坑的安山岩因受到強度不等的熱水換質作用影響，使得組成礦物發生很大的改變。受較輕度或未受換質作用的岩樣，其礦物組成還保持原有的外型和種類，但受到較強烈換質作用的岩樣，其原有的礦物組成已不復見，部份或全部轉變為黏土礦物、石膏或方矽石等。另從顯微鏡下觀察礦物變化的順序，發現在受強烈換質作用的岩樣，其斜長石皆已不見，而角閃石次之，最後才是紫蘇輝石和普通輝石。這和實驗室用純硫酸溶液在高溫下與安山岩岩石反應相似（方建能等人，1999）。

表二：分析樣本的礦物組成。

標本編號	角閃石 (Hb)	紫蘇輝 石(Hy)	普通輝 石(Au)	斜長石 (Pl)	磁鐵礦 (Mg)	石英 (Qz)	岩基 (Gm)	備註
HYK0101	6.0	7.5	3.5	40.0	1.5	0.0	41.5	M
HYK0102	6.0	5.0	3.5	35.5	2.0	0.0	48.0	T,L
HYK0103	10.5	5.5	4.0	48.5	1.5	0.0	30.0	R
HYK0104	5.0	3.5	1.5	20.0	1.0	0.0	69.0	T,L
HYK0105	8.5	5.0	2.5	31.5	1.5	0.0	51.0	R
HYK0106	0.0	0.0	0.0	8.0	0.0	0.0	92.0	T,H
HYK0107	11.0	5.0	3.5	45.5	2.0	0.0	33.0	R
HYK0108	10.5	3.0	5.5	40.0	1.5	0.0	39.5	R
HYK0109	3.5	2.0	5.5	35.5	3.0	0.0	50.5	T,R
HYK0110	3.0	0.0	2.0	10.0	1.0	0.0	84.0	T,L
HYK0111	12.5	5.0	2.5	40.0	3.0	0.0	37.0	M
HYK0112	15.5	3.5	3.0	35.5	2.5	0.0	40.0	L
HYK0113	13.5	6.5	3.5	45.0	1.5	0.0	30.0	H
HYK0114	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.0	92.0	T,VH
HYK0115	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.0	86.0	T,VH
HYK0116	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	95.0	T,VH
HYK0117	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.0	96.0	T,VH
HYK0118	0.0	3.5	2.5	0.0	1.5	0.0	1.0	VH
HYK0119	15.5	3.5	5.5	45.5	2.0	0.0	28.0	L
HYK0120	12.0	3.0	3.0	22.5	1.0	0.0	68.5	M
HYK0121	18.0	8.5	5.5	30.5	3.0	0.0	34.5	L
HYK0122	10.0	8.0	3.5	41.5	2.0	0.0	35.0	R
HYK0123	13.5	3.5	3.0	45.5	1.5	0.0	33.0	M
HYK0124	10.0	2.5	3.0	35.0	1.0	0.0	48.5	M
HYK0125	8.0	2.5	2.0	36.5	1.5	0.0	49.5	H

T：凝灰岩； R：稀少換質作用； L：輕度換質作用

M：中度換質作用； H：高度換質作用； VH：強烈換質作用

表二(續)：分析樣本的礦物組成。

標本編號	角閃石 (Hb)	紫蘇輝 石(Hy)	普通輝 石(Au)	斜長石 (Pl)	磁鐵礦 (Mg)	石英 (Qz)	岩基 (Gm)	備註
HYK0201	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	VH
HYK0202	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	VH
HYK0203	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	VH
HYK0204	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	VH
HYK0205	8.5	5.0	2.5	15.5	2.5	0.0	37.0	H
HYK0206	9.5	5.0	4.5	45.5	1.5	0.0	31.0	L
HYK0207	18.0	5.5	3.5	48.0	2.0	0.0	23.0	R
HYK0208	12.5	3.0	2.5	46.5	1.5	0.0	34.0	M
HYK0209	3.0	5.0	12.5	38.0	1.5	0.0	40.0	R
HYK0210	4.0	3.5	8.5	43.5	2.0	0.0	38.5	L
HYK0211	3.5	4.0	9.5	38.5	2.0	0.0	42.5	L
HYK0212	3.0	5.5	15.0	35.5	2.0	0.0	39.0	L
HYK0301	17.5	5.5	3.0	39.5	2.0	0.0	32.5	M
HYK0302	10.0	4.0	3.5	36.5	1.5	0.0	44.5	L
HYK0303	18.0	3.5	2.0	42.0	2.0	0.0	32.0	L
HYK0304	15.5	5.0	3.5	43.0	1.5	0.0	31.5	L
HYK0305	21.0	3.0	2.5	38.5	2.5	0.0	36.0	M
HYK0306	13.5	4.5	3.0	35.5	2.0	0.0	41.5	M
HYK0307	10.5	5.5	4.5	44.0	1.5	0.0	34.0	L
HYK0308	9.5	6.0	6.5	32.5	2.0	0.0	43.5	M
HYK0309	6.5	8.0	5.5	35.5	2.0	0.0	42.5	L
HYK0310	8.0	7.5	5.5	36.5	1.5	0.0	41.0	L
HYK0311	6.0	8.5	5.5	38.5	2.0	0.0	39.5	L

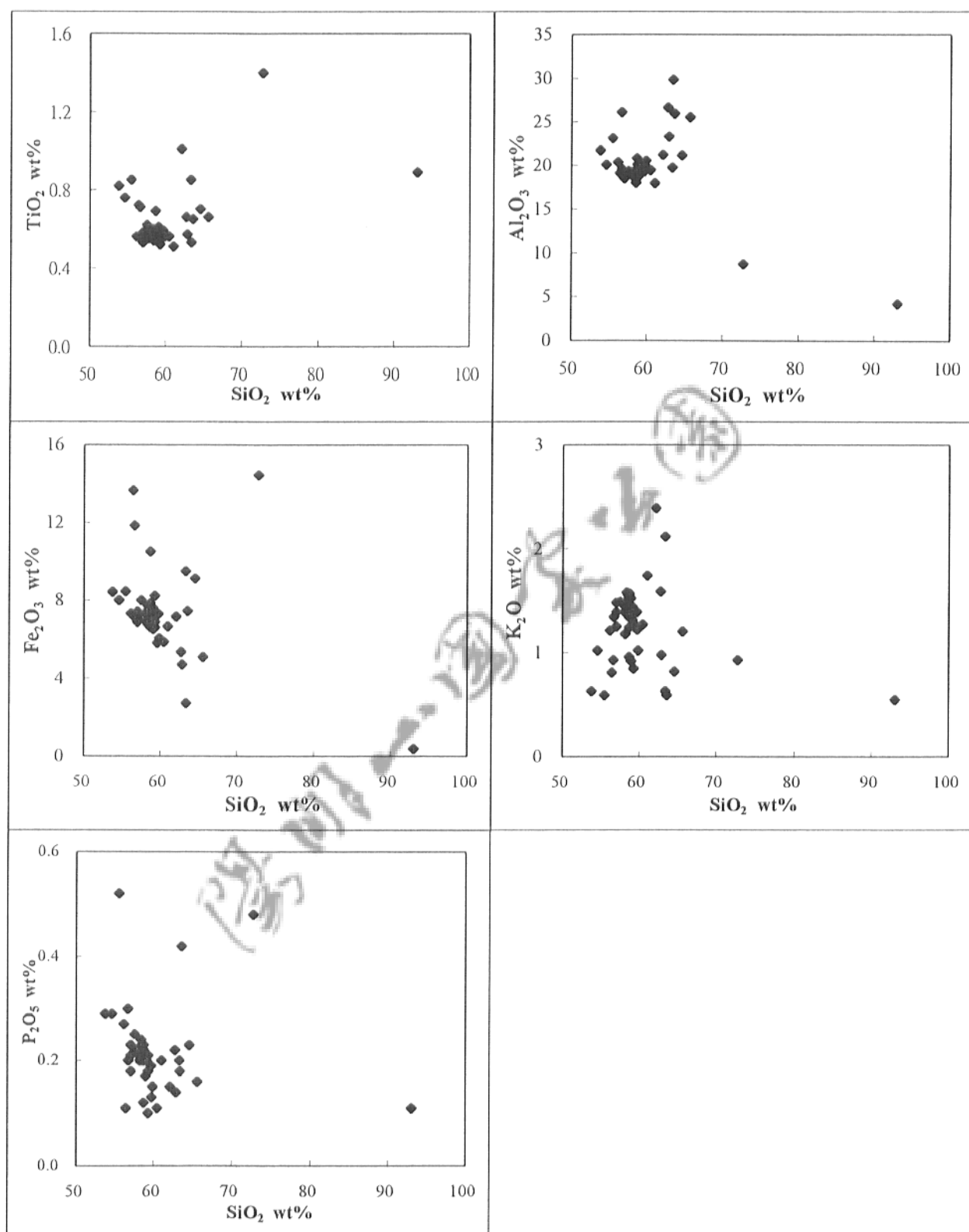
T：凝灰岩； R：稀少換質作用； L：輕度換質作用

M：中度換質作用； H：高度換質作用； VH：強烈換質作用

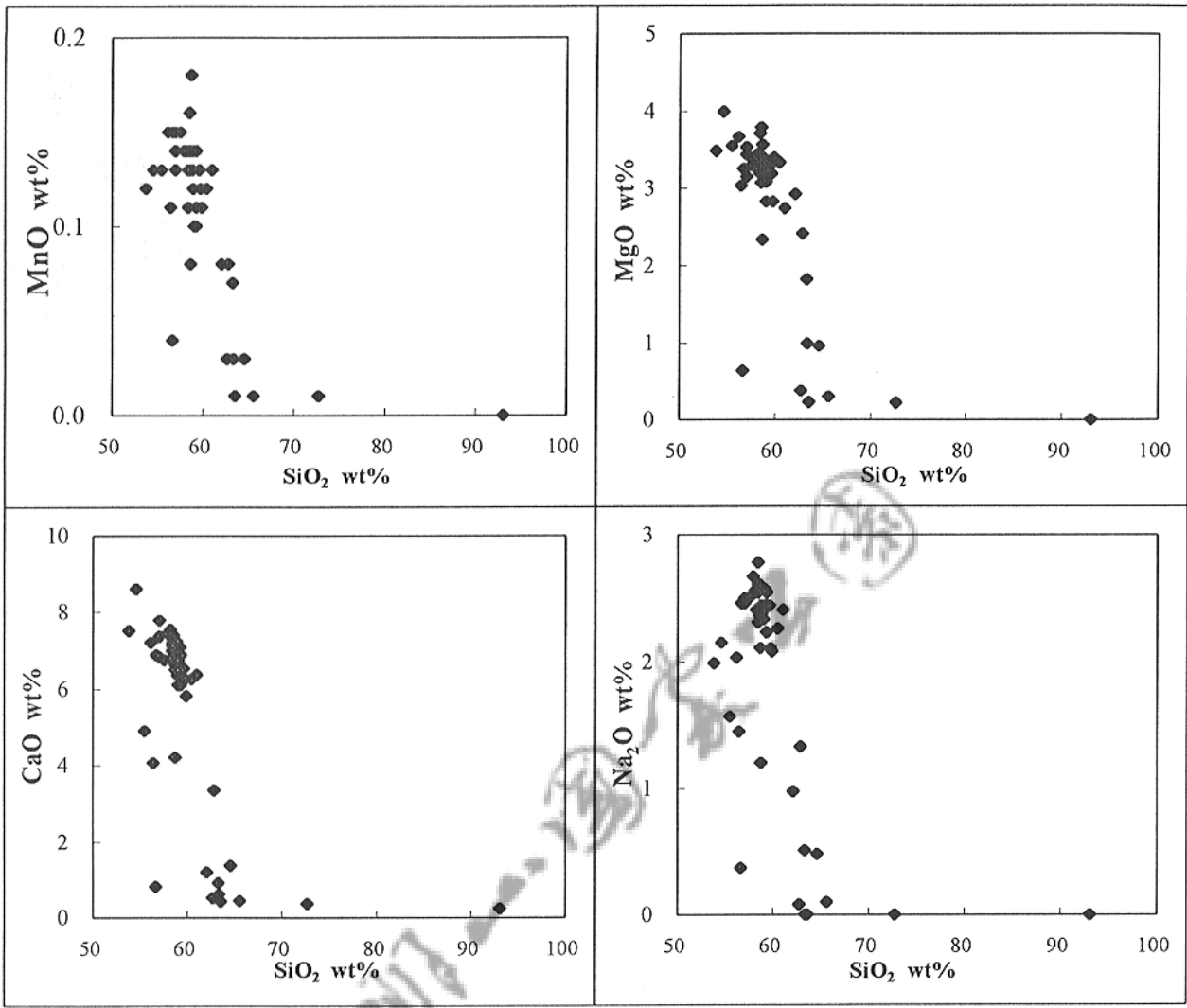
(三)、主要元素分析

用 X 光螢光分析法分析 48 個小油坑三口岩芯樣本中的 SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 MnO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 和 P_2O_5 等十種岩石中的主要組成成分，其分析結果如表三。由分析結果顯示，大部分火山岩的 SiO_2 成分落於 55~60% 之間，少部分大於 60%，其中標本 HYK0201 的 SiO_2 值，更高於 93%。從岩芯標本和岩象學的觀察，可知這三口岩芯中的火山岩，原來應是同一熔岩流的產物，其原來岩石中的礦物組成是相同的，現顯出不同的外觀和礦物組成，乃是因長時間的熱水換質作用所形成的。因 SiO_2 成分較不容易溶解於酸性的溶液中，而小油坑的熱水為含硫酸根離子的強酸性溶液，當其與安山岩反應時，會留下 SiO_2 ，而把其他元素帶走，使得受熱水換質越嚴重的安山岩，其 SiO_2 值會越高，故小油坑三口岩芯中的安山岩，因受熱水換質作用的影響，顯現出 SiO_2 值有大範圍的變化。

由 SiO_2 對其他主要元素的作圖中，可發現主要有兩種變化。一是隨著 SiO_2 的增加，其元素含量變化不大，或稍微增加，如 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 K_2O 和 P_2O_5 等五種元素（圖五）。另一種是隨著 SiO_2 的增加，而快速的遞減，如 MgO 、 MnO 、 CaO 和 Na_2O 等四種元素（圖六）。此種岩石中的主要元素變化趨勢，乃是在熱水換質作用過程中，前五種元素較不容易溶解於酸性的溶液中，所以被留在換質後的岩石中，



圖五：SiO₂ 對 TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O 和 P₂O₅ 等主要元素的投影圖。



圖六： SiO_2 對 MnO , MgO , CaO 和 Na_2O 等主要元素的投影圖。

而後四種元素較容易溶解於酸性的溶液中，而被熱水所帶走，於是在岩石中這些元素急遽的減少。

(四)、微量元素分析

利用感應耦合電漿質譜儀(ICP-MS)分析岩芯樣本中的 20 個微量元素，包括了 Sc、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Rb、Sr、Y、Zr、Nb、Cs、Ba、Hf、Ta、Pb、Th 和 U 等，結果列於表四。

圖七是 48 個樣本的分析值對原始地函之比值的 (spidergram)，大部份均呈現了大離子半徑岩石圈元素 (large ion lithophile elements; LILE) (如銫(Cs)、銣(Rb)、和鋇(Ba)等) 的高度富集、輕稀土元素富集和明顯的鉛正異常的現象，以及高場力元素 (high field strength elements; HFSE) (如鈮(Nb)、鉭(Ta)、鈦(Ti)等) 的負異常，這些都是與過去發表有關大屯火山群火山岩的地化特徵相似。其中，小油坑岩芯一號井中的大部分樣本 (HYK0101~HYK0120) 的銻(Hf)呈現正異常的現象，可能是因其是較不容易受熱水換質作用的影響。另從圖中可看出有些樣本整體不相容元素分布的蛛網圖，呈現相當的凌亂，可能是受到熱水換質作用的影響，使其微量元素呈現不規則的變化。

圖八是 SiO_2 對岩石微量元素的作圖，可發現到有三種變化。一是隨著 SiO_2 的增加，其元素含量變化不大，或稍微增加，如 Zr、Nb、

表四：小油坑三口鑽井微量和稀土元素成分分析結果

	HYK0101	HYK0102	HYK0103	HYK0104	HYK0105	HYK0106	HYK0107	HYK0108
Sc	22.83	11.08	20.89	31.55	26.37	16.74	19.80	22.83
V	215.68	139.19	178.52	293.92	243.16	177.42	176.18	189.63
Cr	8.72	11.82	6.92	10.86	7.87	56.26	10.81	38.06
Co	19.58	14.32	17.32	25.94	24.39	13.75	16.13	16.60
Ni	8.49	2.92	3.74	15.43	11.35	19.28	7.36	11.50
Cu	64.56	67.93	126.48	83.06	74.01	71.59	65.17	69.99
Zn	104.56	163.46	99.62	109.56	82.59	43.96	146.84	72.87
Ga	18.58	15.32	20.01	19.50	18.02	22.47	21.11	16.56
Rb	59.18	9.75	75.03	32.54	44.25	220.59	92.97	72.81
Sr	455.40	309.75	401.64	428.05	467.44	153.16	549.40	375.52
Y	17.43	8.79	15.70	20.84	16.95	18.08	16.47	14.60
Zr	68.30	48.44	67.18	72.48	68.23	103.12	77.86	48.94
Nb	5.21	3.39	4.51	5.81	5.56	11.41	7.78	4.86
Cs	2.11	2.90	5.78	3.78	3.88	10.24	4.30	5.58
Ba	468.76	342.49	445.95	408.83	398.60	477.10	501.82	465.55
La	14.76	6.83	13.33	17.38	14.84	25.52	22.13	12.21
Ce	28.62	15.20	27.03	35.51	30.07	62.74	40.57	23.47
Pr	3.68	1.80	3.30	4.43	3.87	6.22	4.94	2.99
Nd	14.73	6.95	13.27	17.88	15.89	21.50	18.05	12.42
Sm	2.95	1.58	2.76	3.78	3.19	4.40	3.47	2.61
Eu	0.91	0.56	0.84	1.18	0.99	0.97	1.02	0.84
Gd	2.89	1.70	2.83	3.65	3.08	4.12	3.52	2.48
Tb	0.45	0.28	0.46	0.55	0.47	0.63	0.50	0.39
Dy	2.72	1.82	2.78	3.38	2.77	3.75	2.88	2.39
Ho	0.56	0.39	0.59	0.69	0.57	0.77	0.64	0.49
Er	1.65	1.12	1.66	2.07	1.67	2.19	1.81	1.45
Tm	0.25	0.18	0.26	0.32	0.25	0.32	0.27	0.23
Yb	1.77	1.28	1.82	2.15	1.74	2.17	1.85	1.54
Lu	0.28	0.20	0.30	0.32	0.26	0.34	0.29	0.24
Hf	2.05	1.48	2.02	2.20	2.05	3.08	2.39	1.75
Ta	0.31	0.22	0.30	0.34	0.32	0.86	0.47	0.31
Pb	8.09	6.45	8.66	11.00	9.46	24.13	10.37	8.87
Th	5.66	2.16	5.66	5.88	5.53	12.40	8.89	5.34
U	1.65	1.33	1.85	1.80	1.61	2.87	2.94	1.94

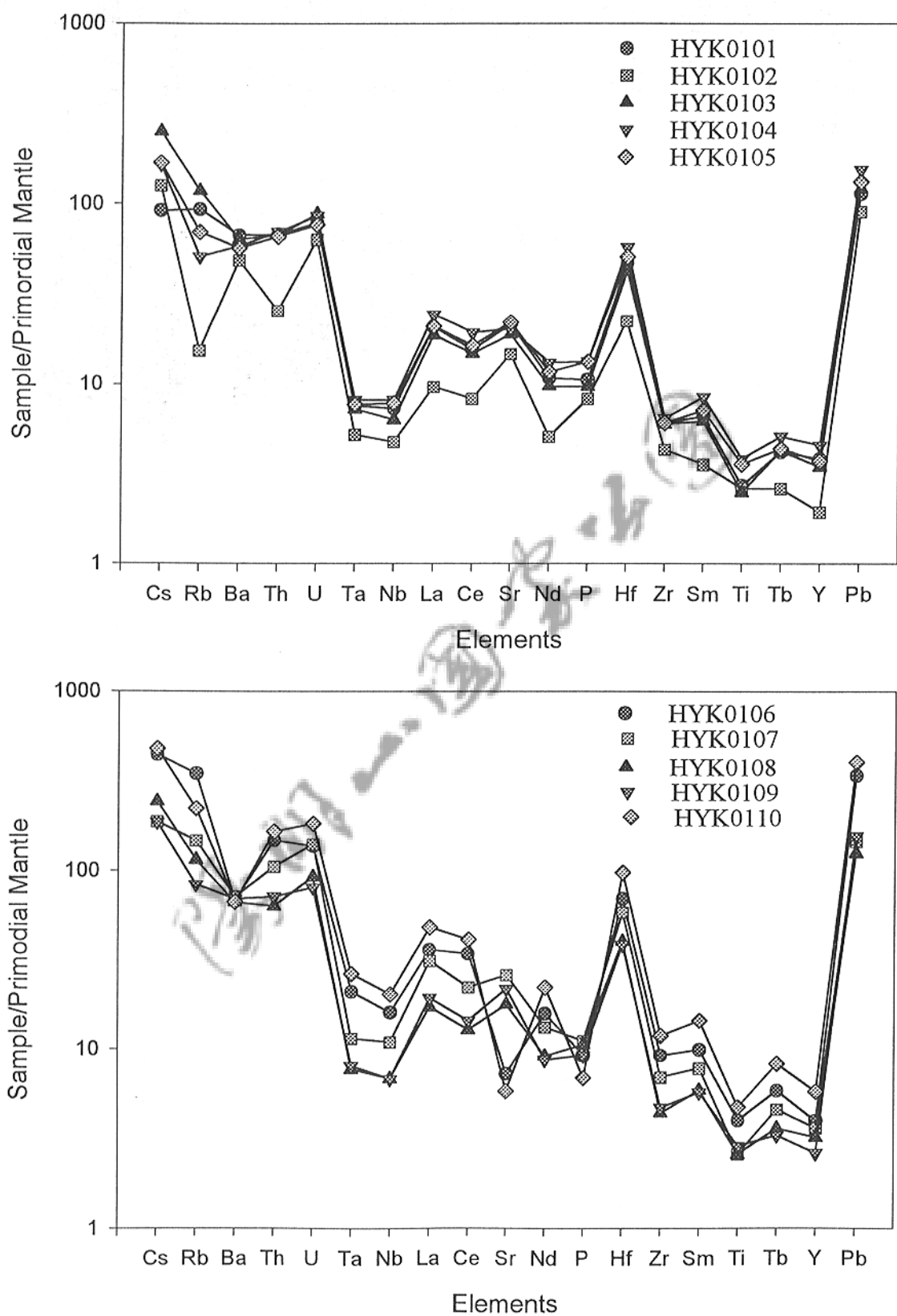
	HYK0109	HYK0110	HYK0111	HYK0112	HYK0113	HYK0114	HYK0115	HYK0116
Sc	23.98	20.37	24.42	21.08	43.55	21.79	20.07	18.67
V	192.41	186.84	193.51	154.16	262.75	237.78	188.97	185.43
Cr	23.10	87.86	17.46	14.95	58.87	38.74	25.80	16.85
Co	13.03	18.49	18.46	14.79	17.46	16.12	14.49	20.98
Ni	4.24	34.77	9.44	7.53	12.67	7.60	3.02	5.14
Cu	63.84	55.46	63.28	110.16	58.44	62.23	107.54	42.45
Zn	34.74	189.36	97.23	61.43	94.58	82.38	83.69	2.12
Ga	20.60	26.37	17.92	17.33	20.29	20.26	71.71	20.40
Rb	53.21	140.92	55.64	49.60	27.40	36.81	36.85	73.57
Sr	457.82	122.60	399.84	369.45	363.83	157.64	899.95	475.46
Y	11.93	26.34	17.41	14.89	20.37	5.10	14.80	4.24
Zr	52.77	132.60	60.74	53.62	72.15	51.71	105.09	56.67
Nb	4.84	14.38	5.28	5.13	5.90	4.43	11.85	4.67
Cs	4.27	11.02	5.76	3.19	4.87	3.52	2.64	6.73
Ba	486.70	469.14	410.21	508.70	1145.92	667.45	800.74	585.07
La	13.71	34.17	12.13	12.26	16.12	12.25	47.66	15.00
Ce	26.43	75.49	22.57	23.62	32.55	24.78	89.23	27.71
Pr	3.30	8.70	3.02	3.03	4.20	2.77	9.53	3.03
Nd	11.87	30.13	12.71	12.11	17.31	10.49	29.05	9.06
Sm	2.54	6.42	2.66	2.53	3.40	1.97	4.48	1.26
Eu	0.82	1.36	0.81	0.80	1.01	0.59	1.09	0.26
Gd	2.42	6.40	2.69	2.53	3.14	1.75	4.05	1.06
Tb	0.36	0.90	0.43	0.39	0.50	0.23	0.55	0.15
Dy	2.13	5.20	2.72	2.39	3.09	1.20	2.93	0.80
Ho	0.47	1.05	0.55	0.50	0.64	0.24	0.59	0.17
Er	1.31	2.92	1.66	1.42	1.89	0.66	1.73	0.51
Tm	0.20	0.45	0.27	0.23	0.29	0.09	0.26	0.08
Yb	1.39	3.02	1.82	1.56	1.93	0.63	1.74	0.60
Lu	0.22	0.45	0.29	0.24	0.30	0.10	0.27	0.10
Hf	1.82	3.94	2.01	1.85	2.46	1.81	3.45	2.04
Ta	0.33	1.08	0.34	0.34	0.41	0.33	0.75	0.34
Pb	11.12	28.70	9.53	7.03	6.95	9.92	19.61	10.61
Th	6.01	13.84	6.10	5.81	7.76	6.19	15.45	7.95
U	1.69	3.82	1.80	1.85	1.87	1.45	3.90	2.61

	HYK0117	HYK0118	HYK0119	HYK0120	HYK0121	HYK0122	HYK0123	HYK0124
Sc	20.19	18.42	24.30	21.26	23.35	21.63	22.87	40.90
V	178.56	152.40	137.24	202.91	190.03	188.19	182.66	184.65
Cr	8.48	16.00	23.20	26.92	9.64	13.34	7.29	10.74
Co	15.59	13.35	8.35	15.01	16.01	16.66	16.54	13.98
Ni	6.47	1.29	1.10	4.72	3.71	3.48	6.75	2.38
Cu	40.08	37.76	34.95	30.20	47.79	29.06	38.83	38.20
Zn	153.17	62.99	53.71	174.18	104.25	121.00	98.64	147.01
Ga	17.30	18.86	19.29	17.05	19.89	20.45	17.09	19.92
Rb	65.05	27.23	27.73	33.63	59.06	53.36	23.77	26.33
Sr	350.25	207.22	212.35	236.22	385.17	405.52	368.21	338.05
Y	36.44	11.57	4.53	14.93	17.20	15.47	15.98	13.47
Zr	54.63	55.18	51.60	43.95	53.49	55.91	54.98	55.35
Nb	4.90	4.27	4.07	4.21	4.51	4.57	4.81	4.48
Cs	5.23	2.05	1.84	2.13	4.56	3.76	1.72	1.65
Ba	476.83	427.32	426.63	310.61	330.16	450.06	435.06	455.94
La	11.52	8.95	14.07	11.29	13.25	13.46	12.50	10.99
Ce	23.50	17.86	26.58	22.83	27.83	27.23	23.97	21.10
Pr	3.22	2.20	3.19	3.02	3.54	3.53	3.37	2.78
Nd	14.05	7.92	11.45	11.58	14.17	13.09	13.32	10.74
Sm	3.37	1.73	1.90	2.55	3.07	2.77	2.78	2.41
Eu	1.21	0.61	0.46	0.77	0.86	0.86	0.86	0.84
Gd	4.20	1.91	1.48	2.58	3.14	2.85	2.69	2.39
Tb	0.72	0.30	0.18	0.40	0.49	0.45	0.43	0.40
Dy	4.96	1.84	0.93	2.50	3.01	2.68	2.59	2.42
Ho	1.11	0.44	0.18	0.57	0.66	0.58	0.55	0.55
Er	3.28	1.27	0.50	1.59	1.91	1.65	1.63	1.54
Tm	0.51	0.19	0.07	0.26	0.29	0.26	0.25	0.24
Yb	3.30	1.32	0.48	1.70	1.99	1.81	1.75	1.61
Lu	0.51	0.22	0.08	0.27	0.31	0.29	0.26	0.26
Hf	1.83	1.85	1.69	1.43	1.80	1.82	1.85	1.91
Ta	0.32	0.32	0.31	0.26	0.32	0.33	0.31	0.34
Pb	8.28	7.83	10.33	9.02	8.92	8.90	8.98	10.29
Th	5.72	5.90	6.86	4.59	5.33	5.87	5.69	6.02
U	1.89	1.80	1.21	1.48	1.83	2.17	1.79	2.00

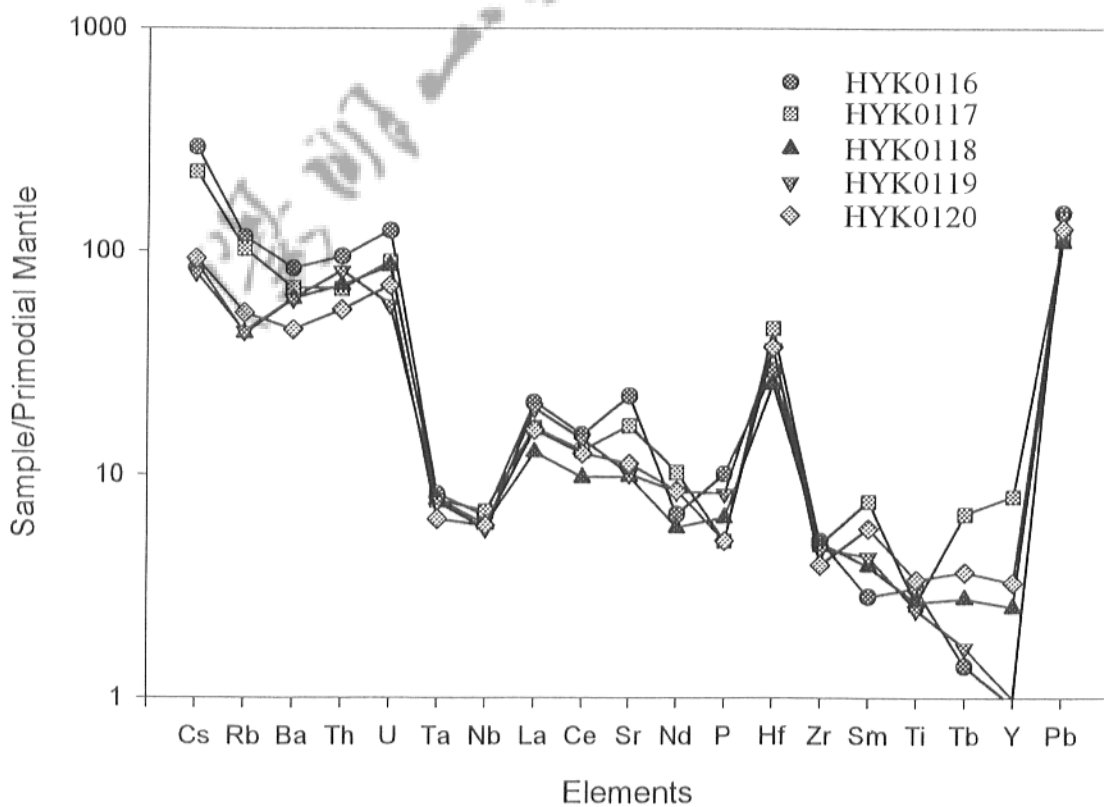
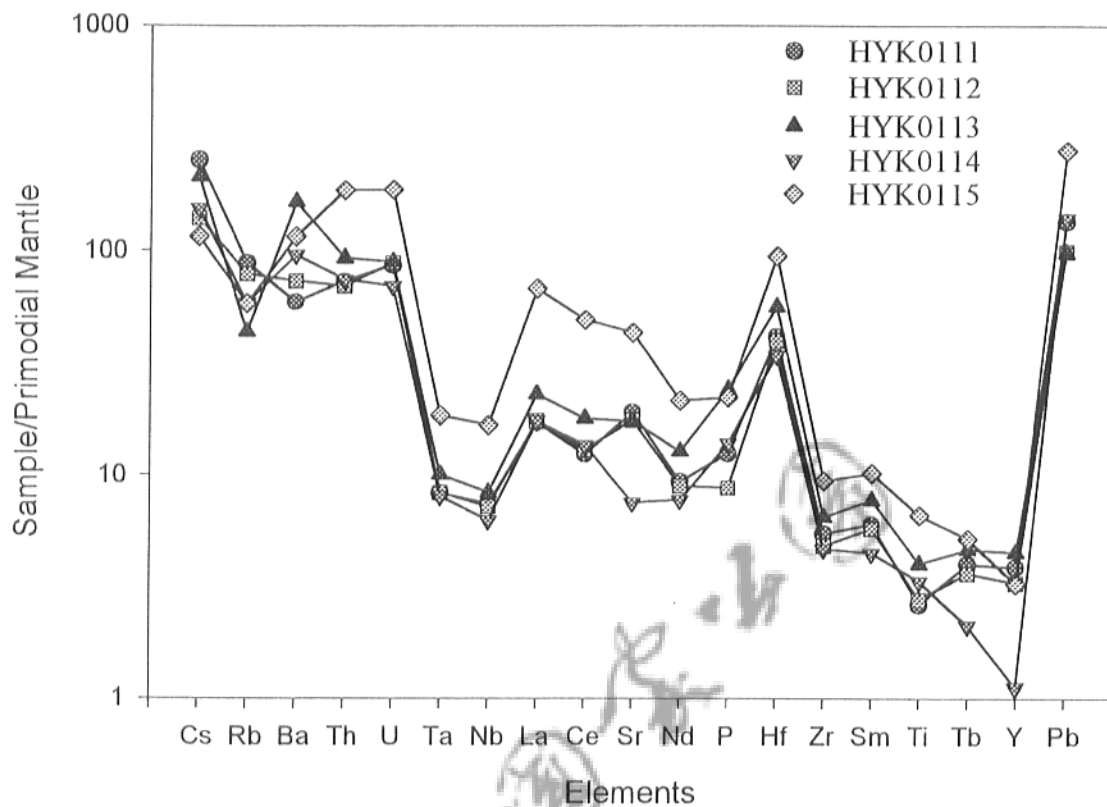
	HYK0125	HYK0201	HYK0202	HYK0203	HYK0204	HYK0205	HYK0206	HYK0207
Sc	19.19	11.79	24.90	26.59	22.76	21.23	22.16	22.12
V	172.05	34.86	163.84	204.73	148.94	167.09	180.54	191.58
Cr	9.58	4.54	16.09	11.96	7.39	7.82	6.26	5.74
Co	12.42	1.45	16.76	15.63	17.10	14.05	16.95	16.37
Ni	1.92	1.07	7.09	0.92	(0.28)	0.84	6.76	6.80
Cu	25.17	12.27	96.73	82.19	167.22	75.47	85.83	50.84
Zn	107.04	37.09	100.69	125.97	39.50	43.35	99.61	104.52
Ga	17.95	6.54	21.02	20.67	15.65	18.83	17.55	17.27
Rb	18.50	42.67	66.31	63.21	26.22	49.52	58.42	48.72
Sr	357.37	70.00	413.64	367.80	889.72	310.76	364.20	404.54
Y	11.84	4.57	13.95	8.32	6.62	16.30	20.99	18.14
Zr	52.66	99.47	57.50	64.07	59.64	68.36	64.10	65.66
Nb	4.23	7.00	4.02	4.57	4.19	4.64	4.41	4.66
Cs	0.96	6.72	5.28	5.87	3.09	5.87	5.98	4.40
Ba	415.83	156.13	400.59	476.56	516.37	469.52	415.14	448.56
La	10.42	8.06	10.31	12.66	26.14	17.18	12.20	13.45
Ce	20.32	15.70	20.10	25.07	48.11	31.00	23.89	26.13
Pr	2.42	1.70	2.58	3.30	5.81	3.95	3.01	3.39
Nd	9.69	6.24	10.10	12.41	20.58	14.41	12.64	14.05
Sm	2.11	0.98	2.32	2.49	3.69	2.63	2.63	2.73
Eu	0.76	0.15	0.81	0.68	1.09	0.81	0.85	0.86
Gd	2.12	0.91	2.37	2.17	3.23	2.70	2.71	2.90
Tb	0.34	0.13	0.39	0.31	0.39	0.44	0.46	0.45
Dy	2.11	0.74	2.52	1.73	1.80	2.64	3.06	2.74
Ho	0.47	0.16	0.55	0.36	0.29	0.62	0.64	0.59
Er	1.36	0.50	1.58	1.00	0.77	1.76	2.04	1.76
Tm	0.22	0.08	0.25	0.15	0.10	0.28	0.33	0.28
Yb	1.45	0.57	1.68	1.04	0.64	1.98	2.33	1.88
Lu	0.24	0.09	0.27	0.18	0.10	0.33	0.38	0.28
Hf	1.82	3.43	1.87	2.16	1.95	2.20	2.08	2.12
Ta	0.30	0.49	0.27	0.32	0.29	0.32	0.31	0.31
Pb	8.37	11.14	8.39	13.29	10.95	14.79	8.45	7.68
Th	5.67	4.59	5.08	5.74	5.75	5.79	5.39	5.49
U	1.85	1.68	1.53	1.86	1.41	1.83	1.78	1.61

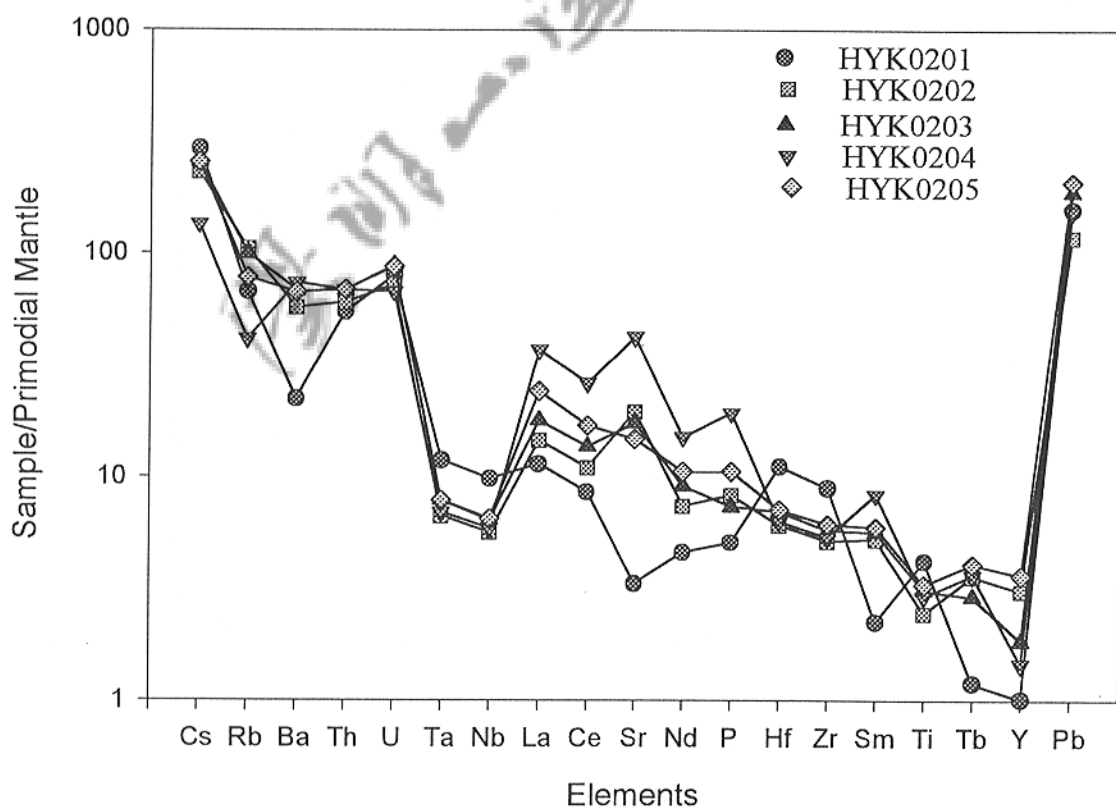
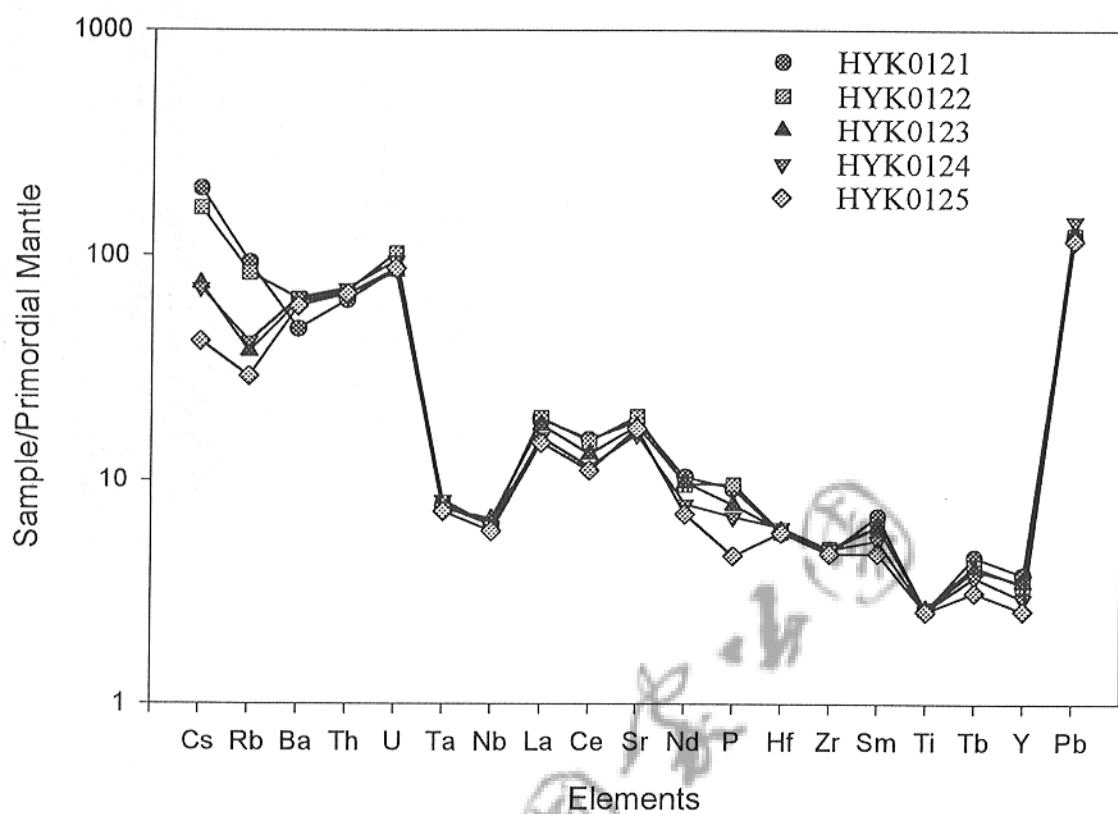
	HYK0208	HYK0209	HYK0210	HYK0211	HYK0212	HYK0301	HYK0302	HYK0303
Sc	22.88	26.19	27.14	22.88	22.23	22.17	21.66	21.58
V	182.52	226.74	205.75	192.68	195.01	207.62	166.42	175.09
Cr	5.70	46.84	63.90	33.67	44.83	6.70	5.63	4.48
Co	16.46	18.44	19.95	20.92	20.20	17.56	16.07	15.25
Ni	6.68	12.89	15.66	11.70	12.59	3.11	7.33	6.23
Cu	78.80	103.73	58.55	79.12	82.02	62.78	88.68	53.58
Zn	110.59	75.12	115.42	196.40	127.59	82.84	114.13	87.54
Ga	17.25	16.89	16.51	15.85	16.60	22.53	16.83	17.56
Rb	36.95	53.62	68.94	68.31	66.97	71.47	56.00	63.17
Sr	377.99	356.36	361.31	386.76	416.38	478.34	412.88	398.47
Y	16.52	15.48	19.87	24.98	17.54	16.30	16.43	16.87
Zr	62.92	56.43	45.47	31.54	38.68	68.96	64.69	64.20
Nb	4.69	7.10	5.04	4.85	4.90	4.58	4.54	4.70
Cs	4.29	4.28	9.30	5.92	4.44	5.95	4.44	5.72
Ba	436.36	499.13	422.56	426.63	436.42	466.09	464.93	438.37
La	11.91	21.62	13.57	16.28	14.44	14.52	12.53	12.39
Ce	23.55	42.39	26.67	33.53	29.36	29.76	24.49	24.62
Pr	3.12	5.22	3.80	4.49	3.77	3.63	3.18	3.01
Nd	12.89	20.58	15.65	18.39	15.50	14.28	12.84	12.73
Sm	2.65	3.87	3.27	3.82	3.02	2.93	2.55	2.54
Eu	0.87	0.88	1.00	1.07	0.90	0.90	0.82	0.83
Gd	2.67	3.54	3.31	4.26	3.10	3.14	2.71	2.72
Tb	0.42	0.48	0.51	0.63	0.46	0.46	0.41	0.41
Dy	2.64	2.77	3.11	3.71	2.79	2.91	2.61	2.56
Ho	0.57	0.53	0.67	0.81	0.57	0.63	0.55	0.55
Er	1.69	1.58	1.93	2.27	1.65	1.82	1.65	1.63
Tm	0.27	0.24	0.30	0.34	0.26	0.28	0.25	0.26
Yb	1.81	1.55	2.00	2.22	1.70	1.99	1.71	1.75
Lu	0.27	0.23	0.30	0.33	0.27	0.32	0.26	0.27
Hf	2.03	1.94	1.66	1.30	1.47	2.16	1.98	2.02
Ta	0.30	0.54	0.32	0.32	0.33	0.32	0.29	0.30
Pb	7.93	11.65	7.48	8.48	7.48	10.35	7.79	7.95
Th	5.54	8.19	5.20	4.75	5.20	5.90	5.28	5.08
U	1.59	1.90	1.63	1.71	1.47	1.93	1.53	1.61

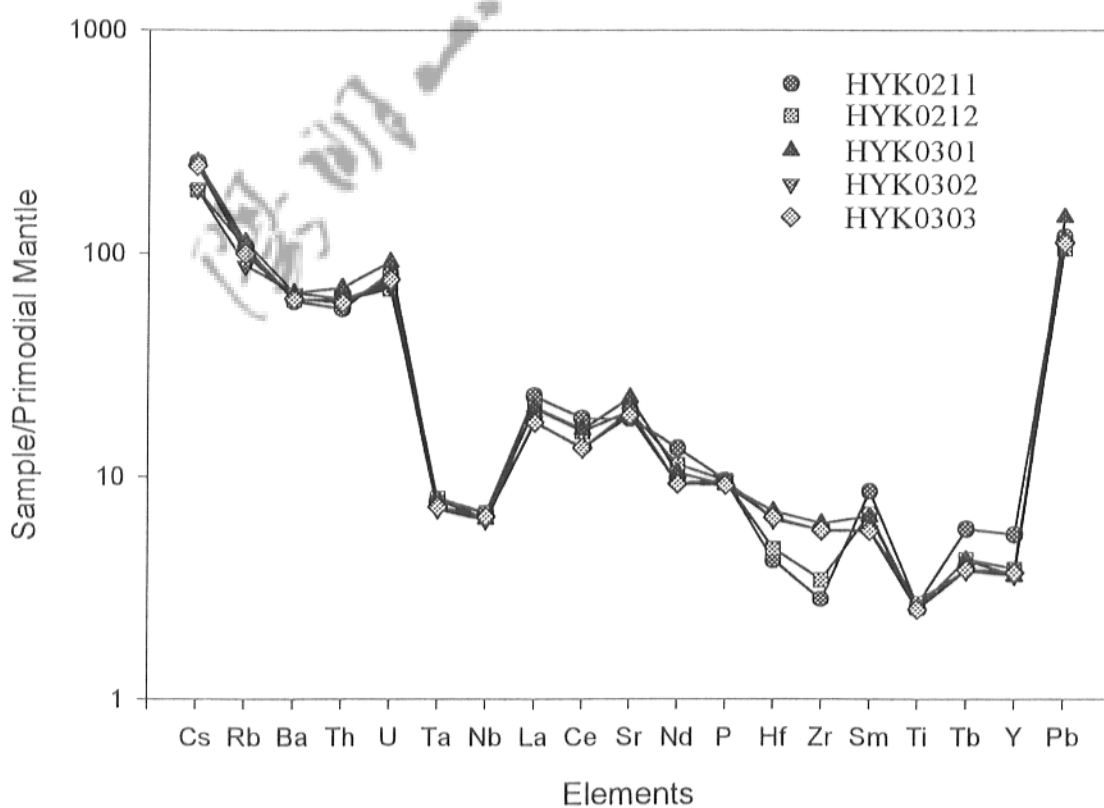
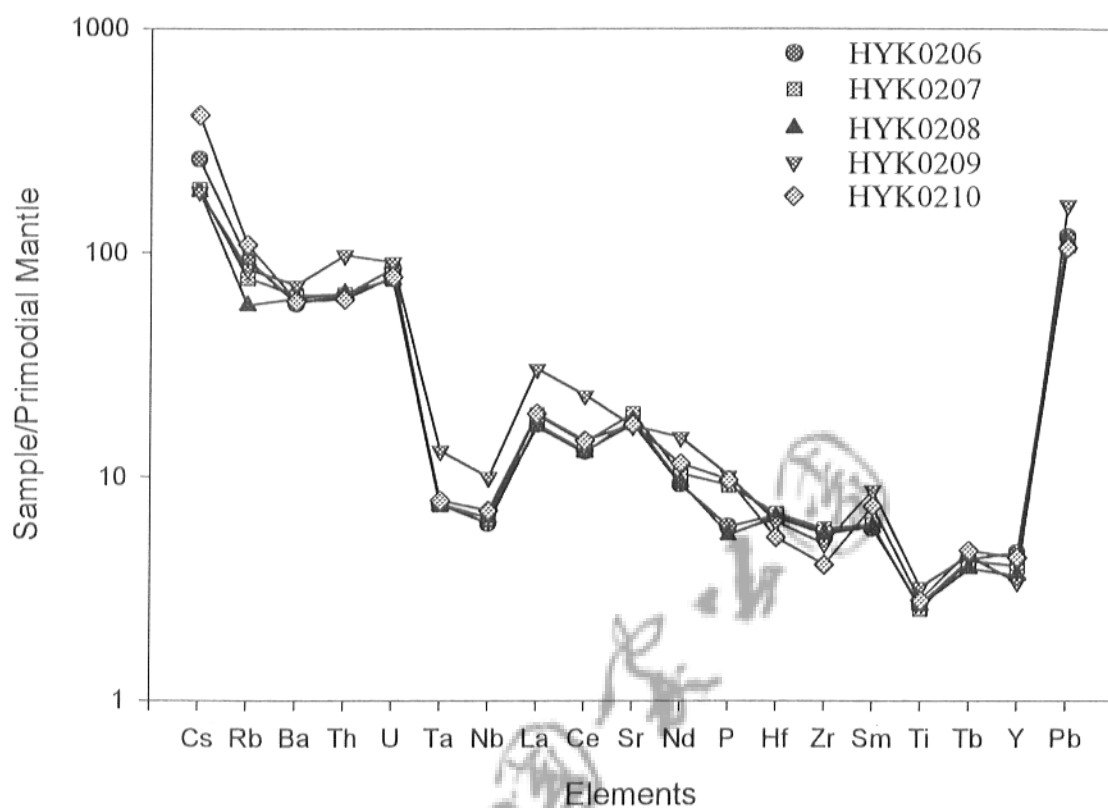
	HYK0304	HYK0305	HYK0306	HYK90307	HYK0308	HYK0309	HYK0310	HYK0311
Sc	21.98	21.57	20.24	20.86	22.40	21.57	21.47	20.02
V	176.54	183.56	166.13	200.12	204.66	215.43	186.17	175.17
Cr	4.26	5.55	5.92	6.13	5.39	7.78	6.70	6.60
Co	15.99	17.63	17.52	16.93	16.53	18.62	16.66	15.95
Ni	6.68	2.70	6.78	7.15	2.05	9.30	3.57	8.07
Cu	88.14	199.22	80.38	84.95	88.78	47.85	78.61	64.07
Zn	117.33	61.24	105.87	123.63	38.11	101.23	32.77	102.91
Ga	16.92	20.42	17.03	17.04	21.13	16.91	19.84	16.95
Rb	57.51	58.36	63.34	53.64	70.16	59.02	90.86	61.52
Sr	413.18	386.99	388.98	394.51	420.69	390.47	402.89	421.78
Y	17.53	14.91	15.31	18.26	16.61	17.32	15.85	15.79
Zr	66.92	62.99	64.06	71.30	63.51	64.40	52.84	62.81
Nb	4.82	4.40	4.73	4.67	4.36	4.93	4.67	4.43
Cs	5.29	4.49	3.95	4.41	5.45	3.19	3.57	3.58
Ba	444.33	443.89	453.96	461.89	464.38	500.25	488.08	470.41
La	13.05	12.28	12.33	13.63	14.21	14.26	14.67	13.25
Ce	25.81	24.60	24.07	26.55	27.27	29.21	29.64	25.83
Pr	3.22	3.05	3.21	3.39	3.52	3.59	3.70	3.36
Nd	13.53	11.61	12.74	13.62	13.33	15.07	13.99	13.26
Sm	2.72	2.70	2.60	2.72	2.81	2.99	2.99	2.67
Eu	0.82	0.87	0.85	0.85	0.89	0.94	0.95	0.81
Gd	2.75	2.56	2.55	2.89	2.79	3.12	2.92	2.66
Tb	0.42	0.43	0.39	0.42	0.45	0.44	0.46	0.40
Dy	2.69	2.54	2.47	2.74	2.87	2.70	2.76	2.43
Ho	0.54	0.56	0.51	0.57	0.61	0.56	0.62	0.51
Er	1.60	1.64	1.56	1.70	1.78	1.73	1.73	1.52
Tm	0.27	0.25	0.24	0.26	0.27	0.26	0.27	0.24
Yb	1.77	1.79	1.68	1.79	1.86	1.80	1.84	1.57
Lu	0.27	0.29	0.26	0.27	0.31	0.28	0.29	0.25
Hf	2.03	2.06	2.00	1.85	2.04	1.96	1.78	1.91
Ta	0.30	0.30	0.29	0.29	0.30	0.31	0.33	0.29
Pb	11.55	34.18	7.17	19.44	15.62	6.87	7.11	7.33
Th	5.25	5.46	5.17	5.29	5.79	5.50	5.76	5.47
U	1.65	1.49	1.42	1.75	1.85	1.60	1.69	1.61

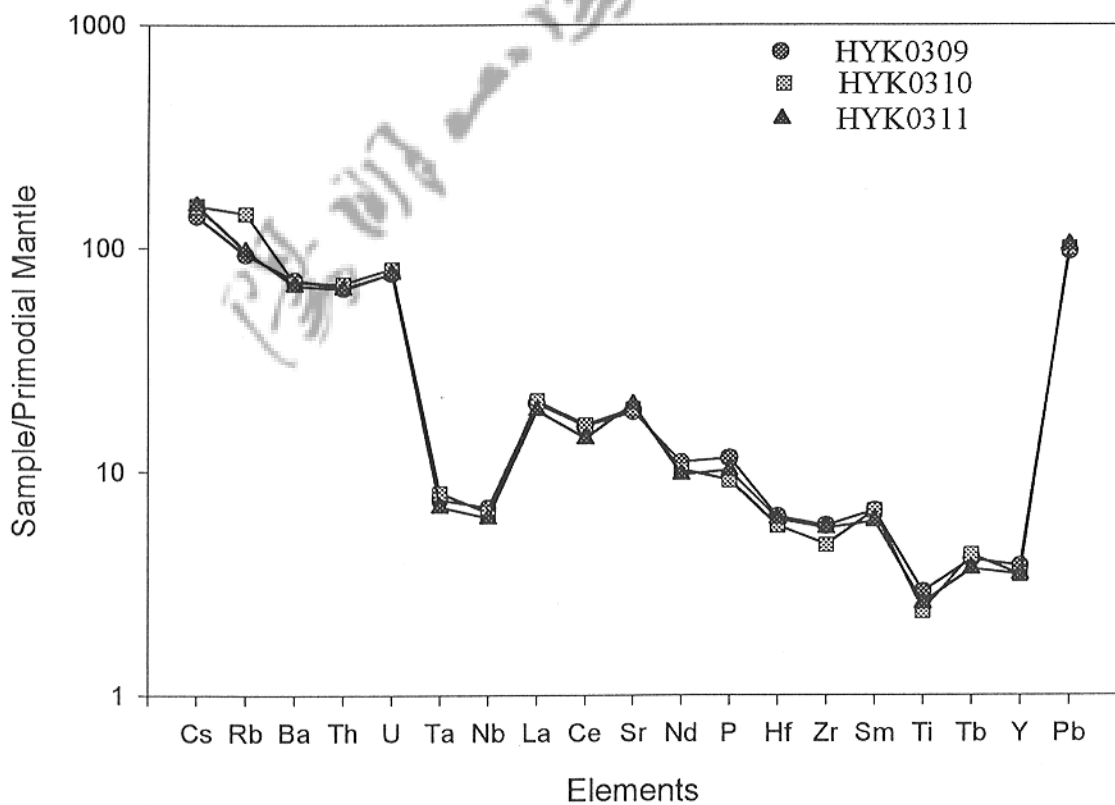
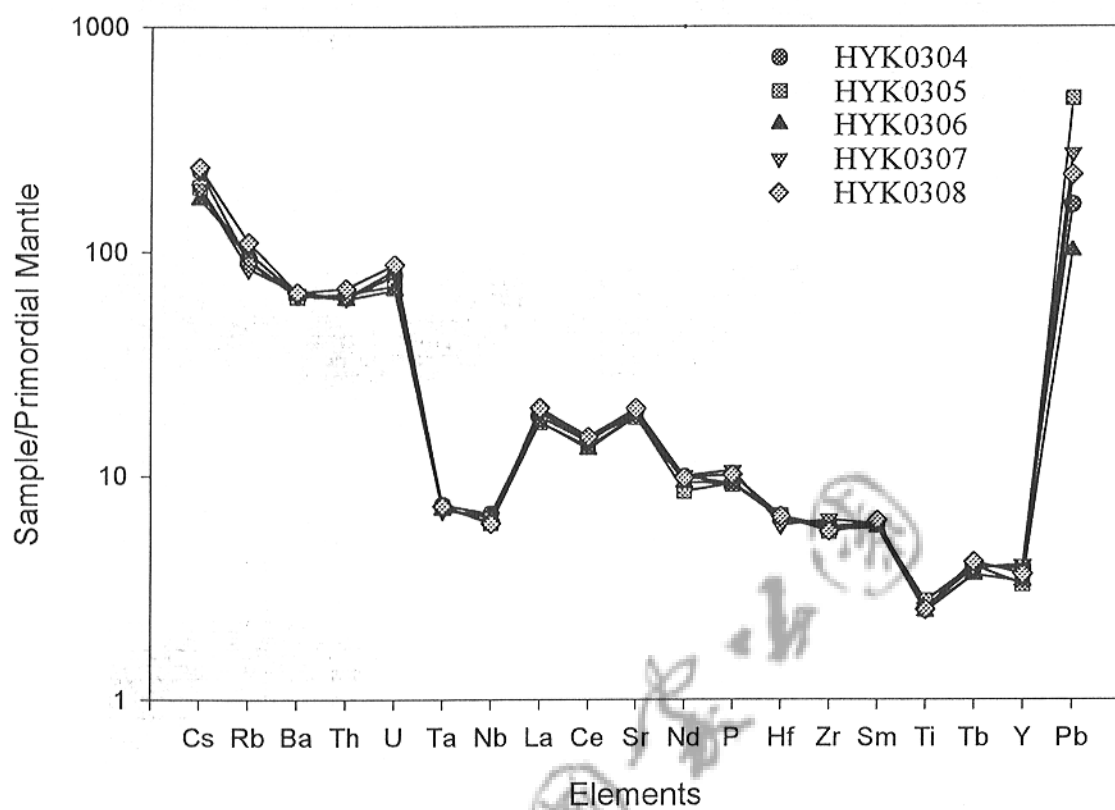


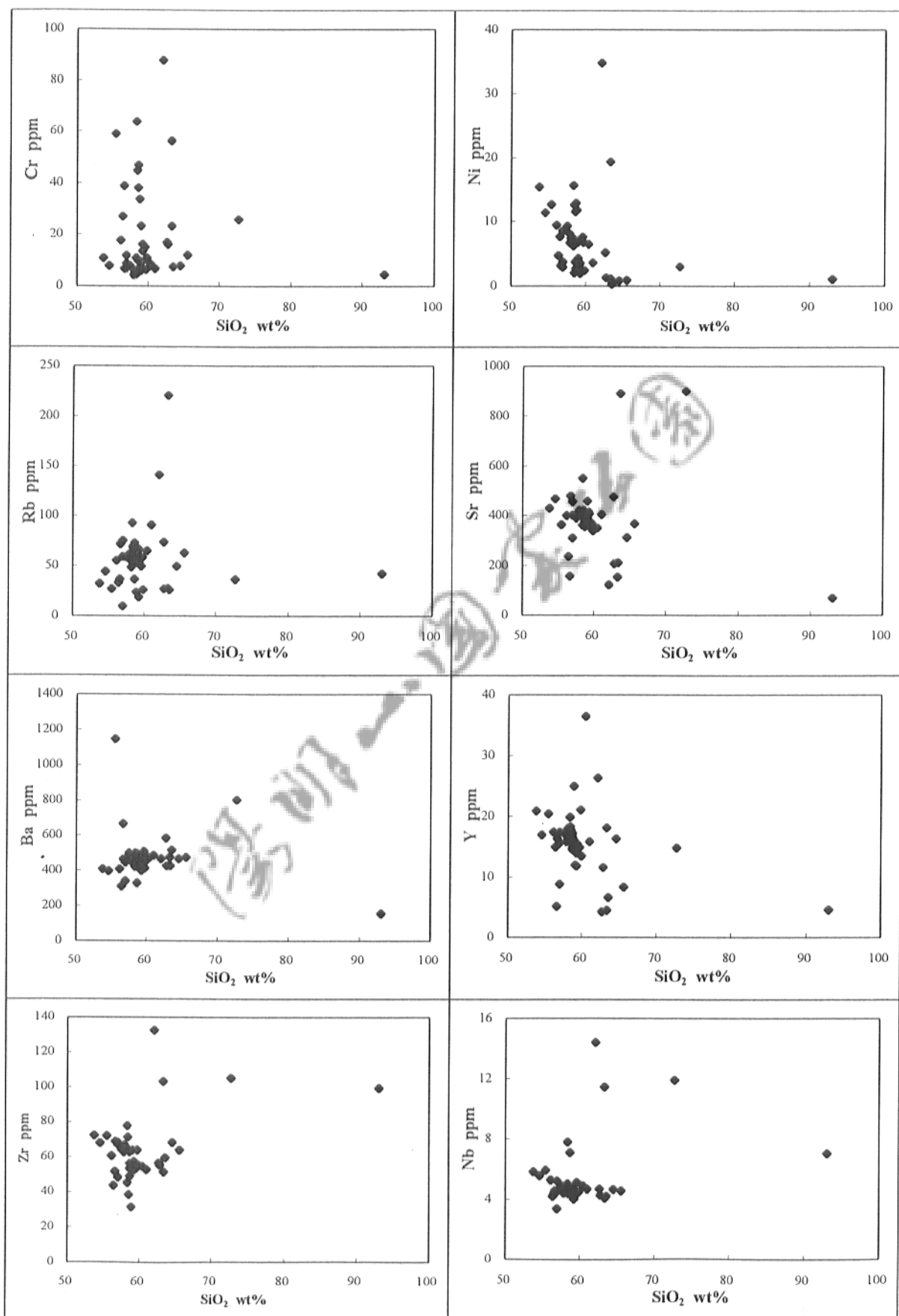
圖七：小油坑鑽井岩芯的整體不相容元素分布圖。原始地函(primordial mantle) 標準值依據 Sun and McDonough (1989)。





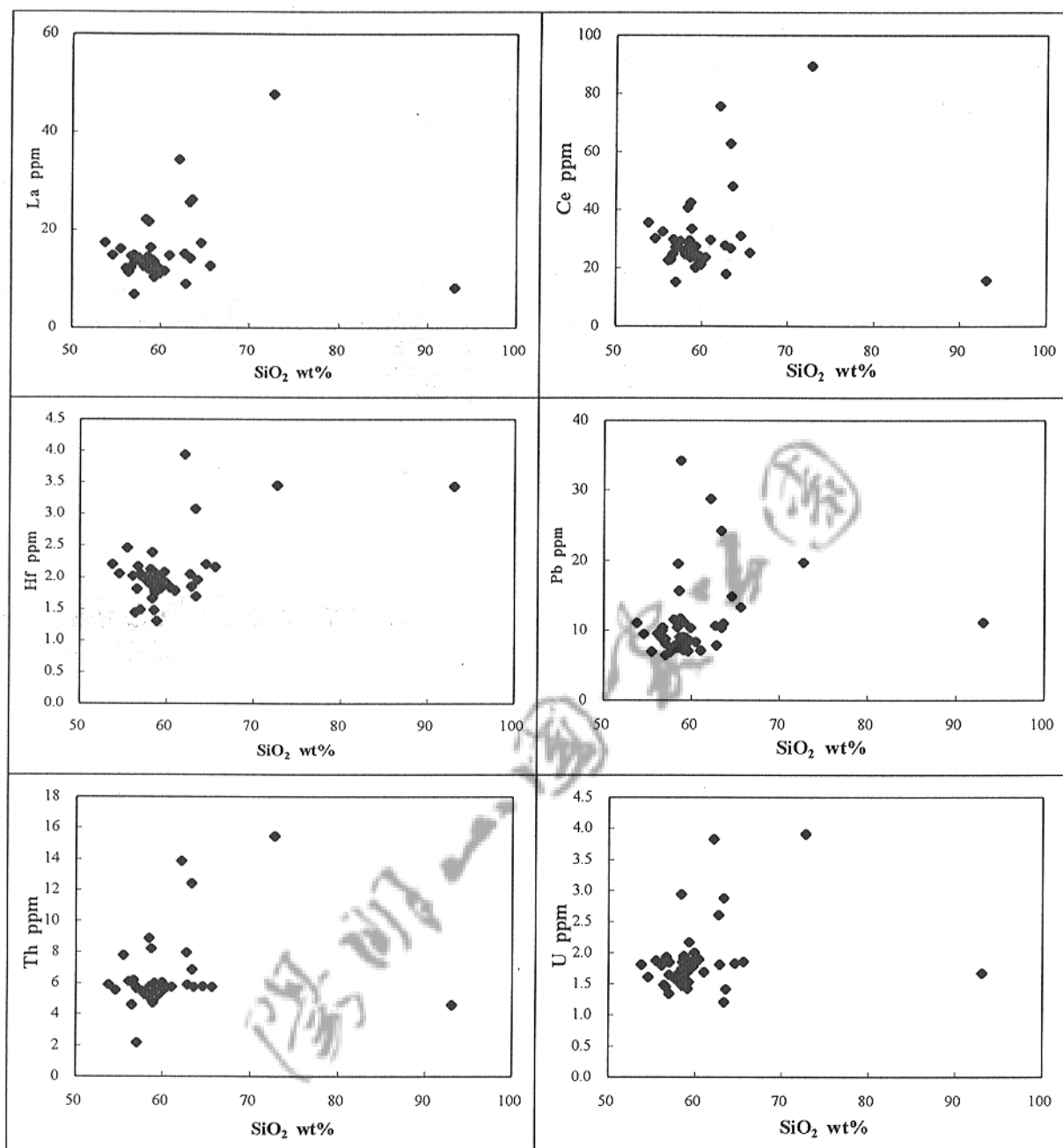






圖八：SiO₂ 對 Cr, Ni, Rb, Sr, Ba, Y, Zr, Nb, La, Ce, Hf, Pb, Th 和 U 等

微量元素的投影圖。



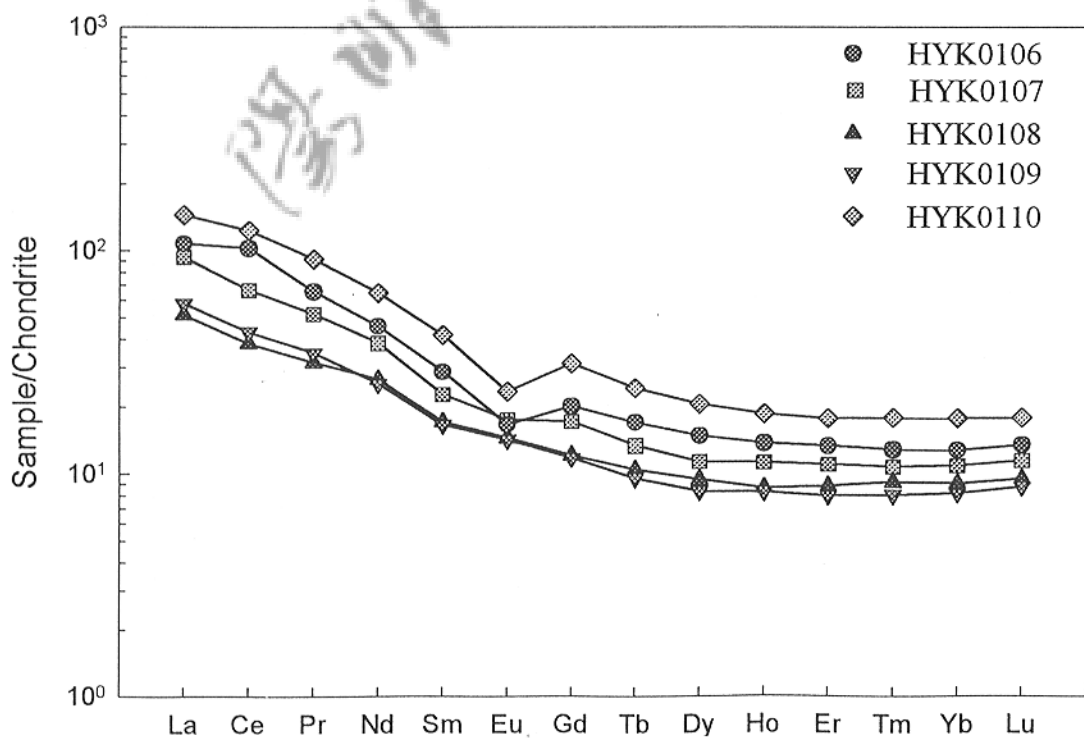
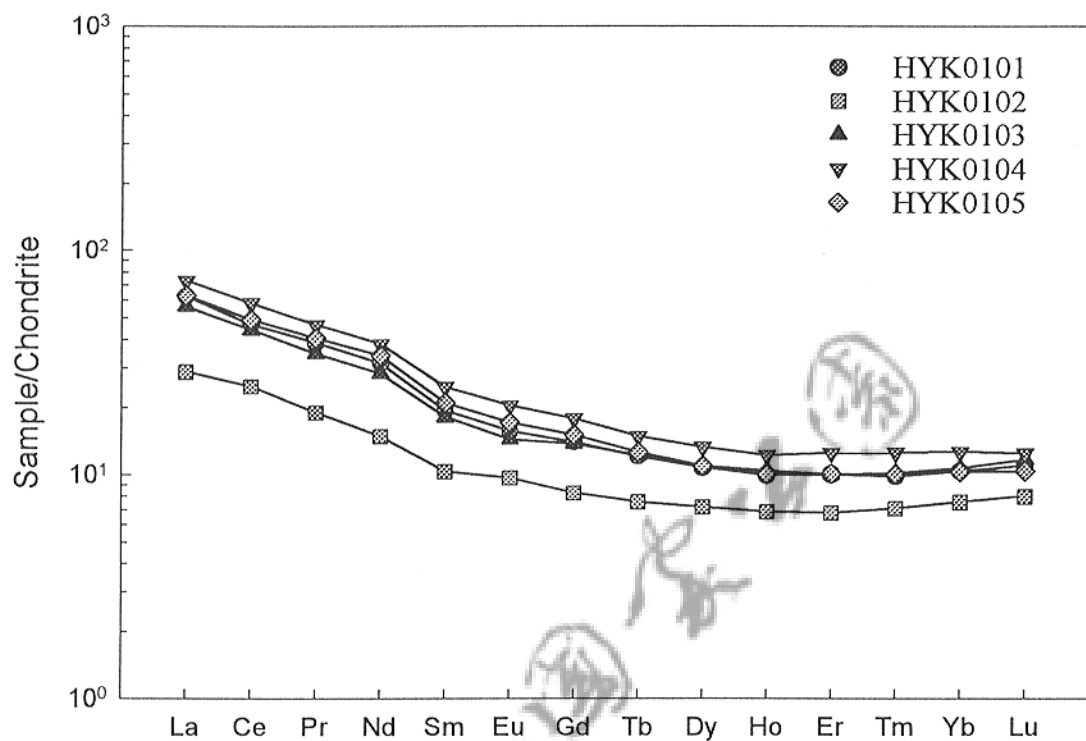
Hf、Pb、Th、U 等六種元素。第二種是隨著 SiO_2 的增加，而快速的遞減，如 Cr、和 Ni 等兩種元素。第三種是隨著 SiO_2 的增加，變化不明顯，如 Rb、Sr、Ba、Y 等四種元素。此種岩石中微量元素的變化趨勢，乃是在熱水換質作用過程中，有些元素較不容易溶解於酸性的溶液中，所以被留在換質後的岩石中，而有些元素較容易溶解於酸性的溶液中，而被熱水所帶走，於是在岩石中這些元素急遽的減少。

(五)、稀土元素分析

利用感應耦合電漿質譜儀(ICP-MS)分析岩芯樣本中的 14 種稀土元素微量元素，包括了 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb 和 Lu 等，結果列於表四。

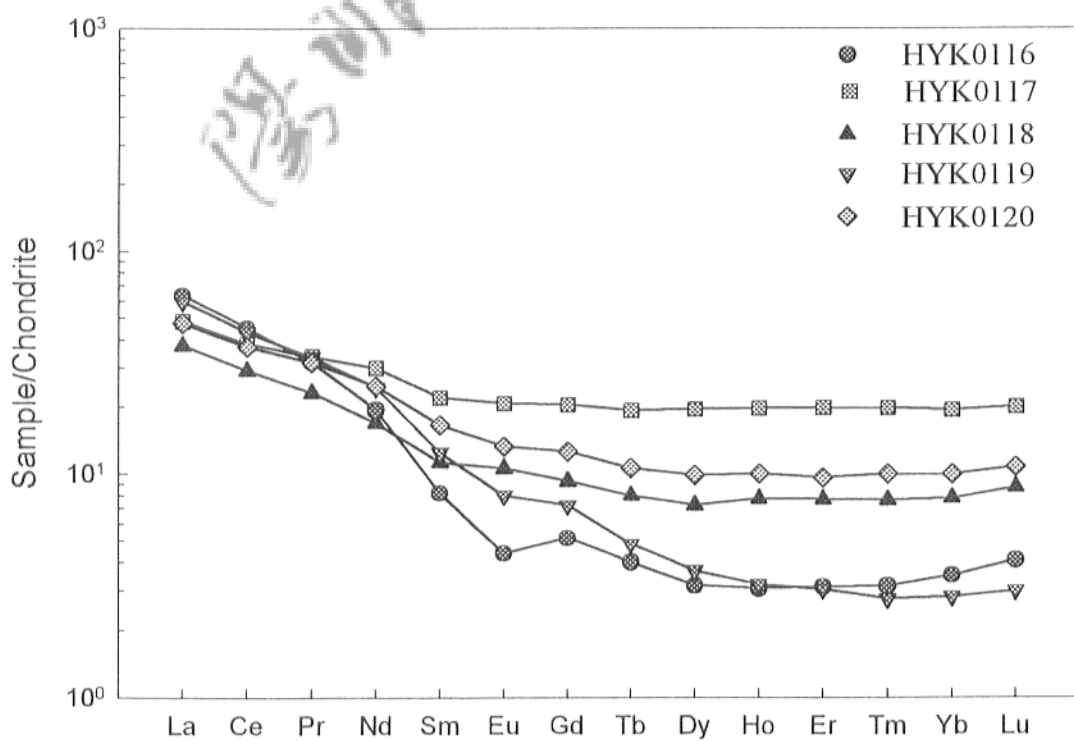
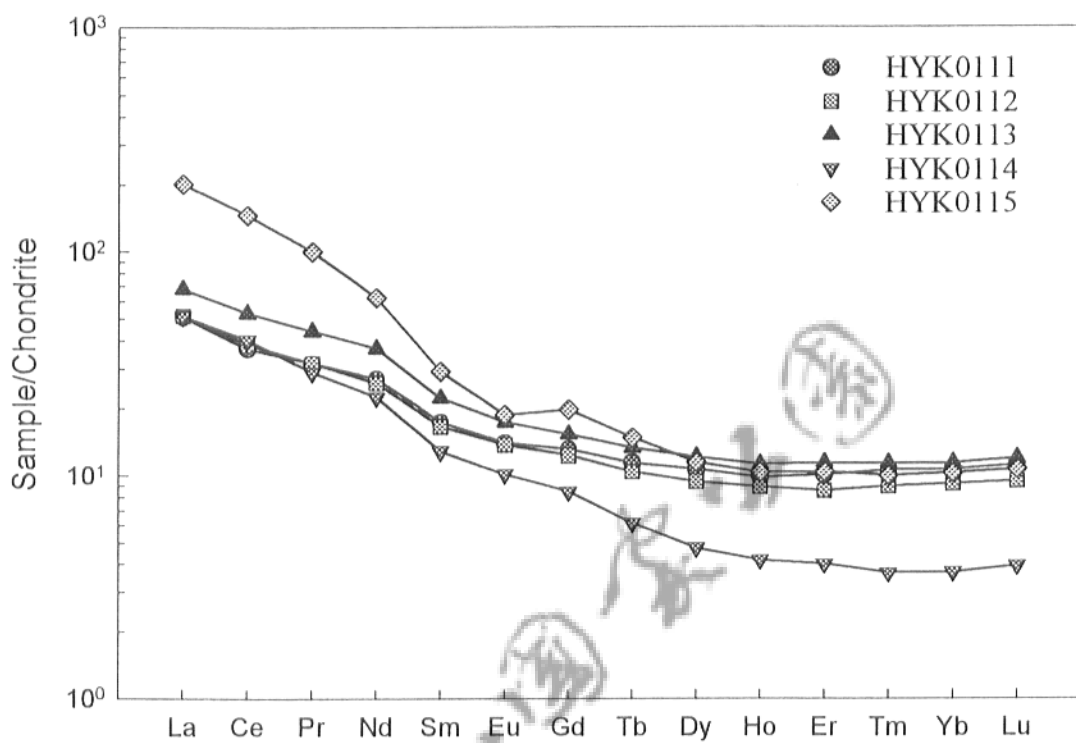
圖九是 48 個分析岩石樣本的隕石標準化稀土元素分布圖，大部分都呈現輕稀土元素富集的型態，偶有幾個樣本呈現 Eu 負異常的型態分布，可能是因斜長石較容易被酸性的熱水所侵蝕崩毀，以至於進入斜長石結晶構造的 Eu 離子被熱液帶走，而造成 Eu 負異常的型態分布。

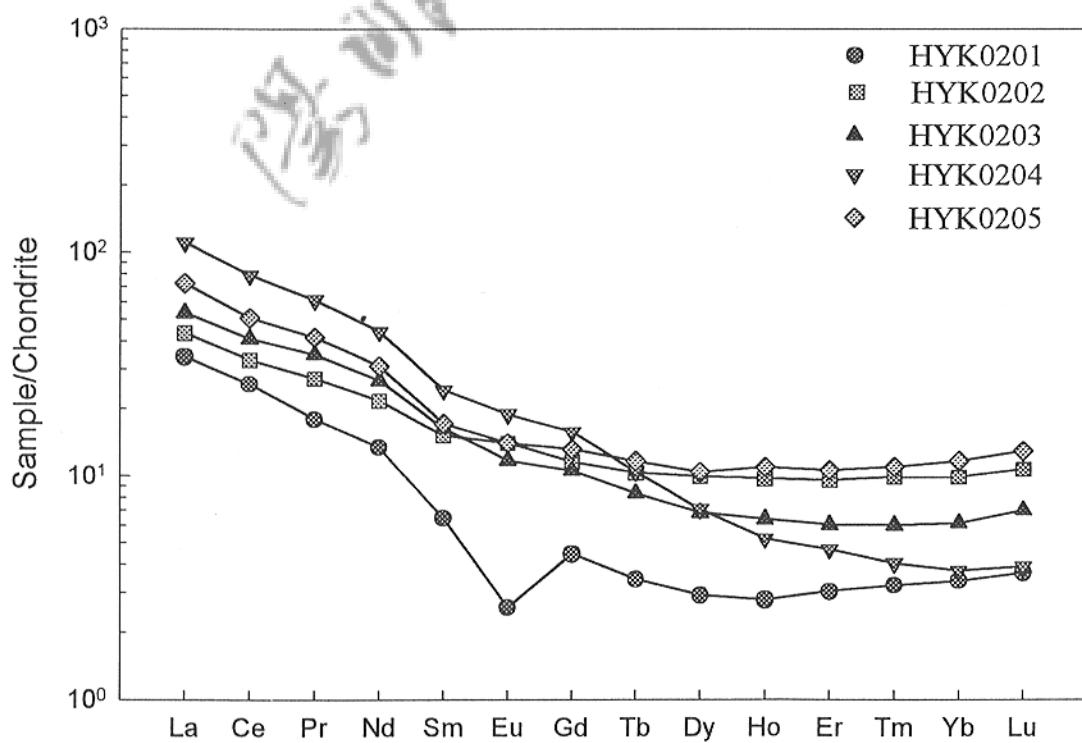
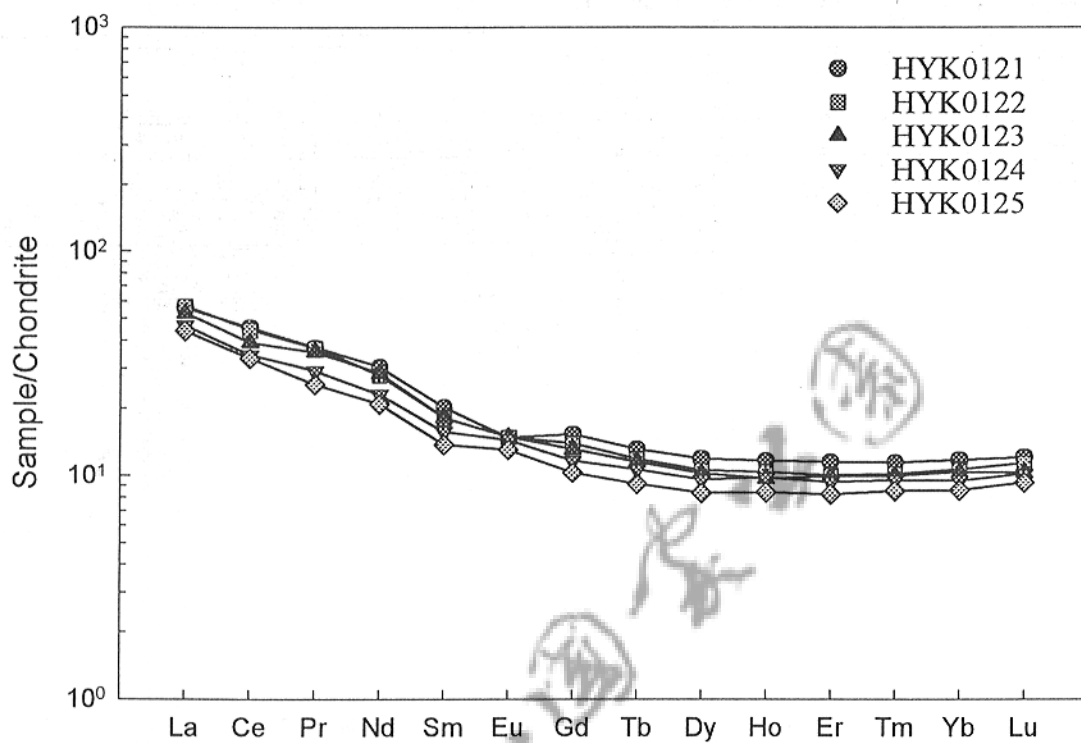
SiO_2 對岩石稀土元素中的 La 和 Ce 作圖(圖八)，顯現出隨著 SiO_2 的增加，其元素含量變化不大，或稍微增加，此種結果可能是稀土元素在熱水環境中，是屬於較不容易移動的元素。

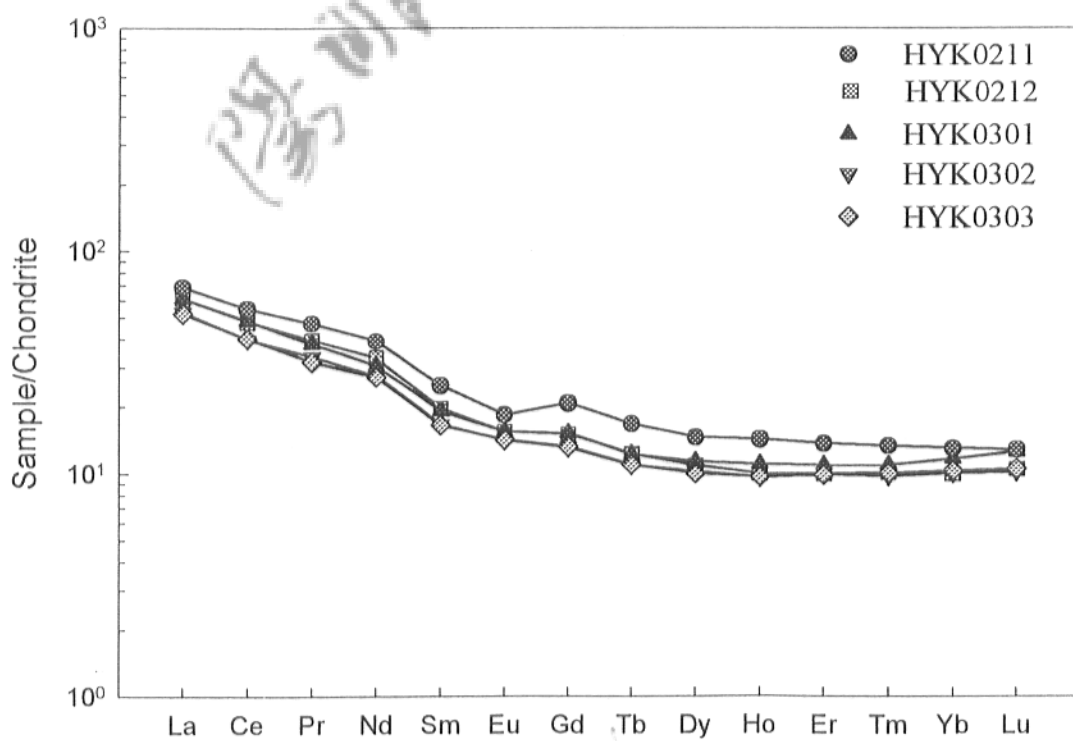
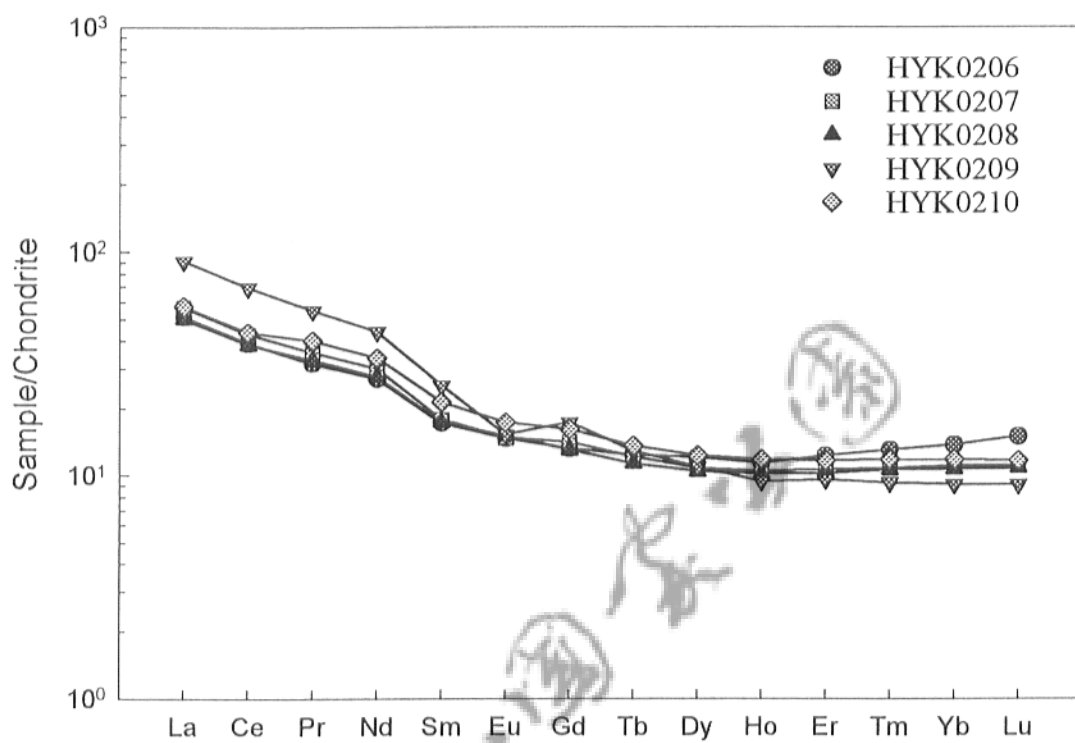


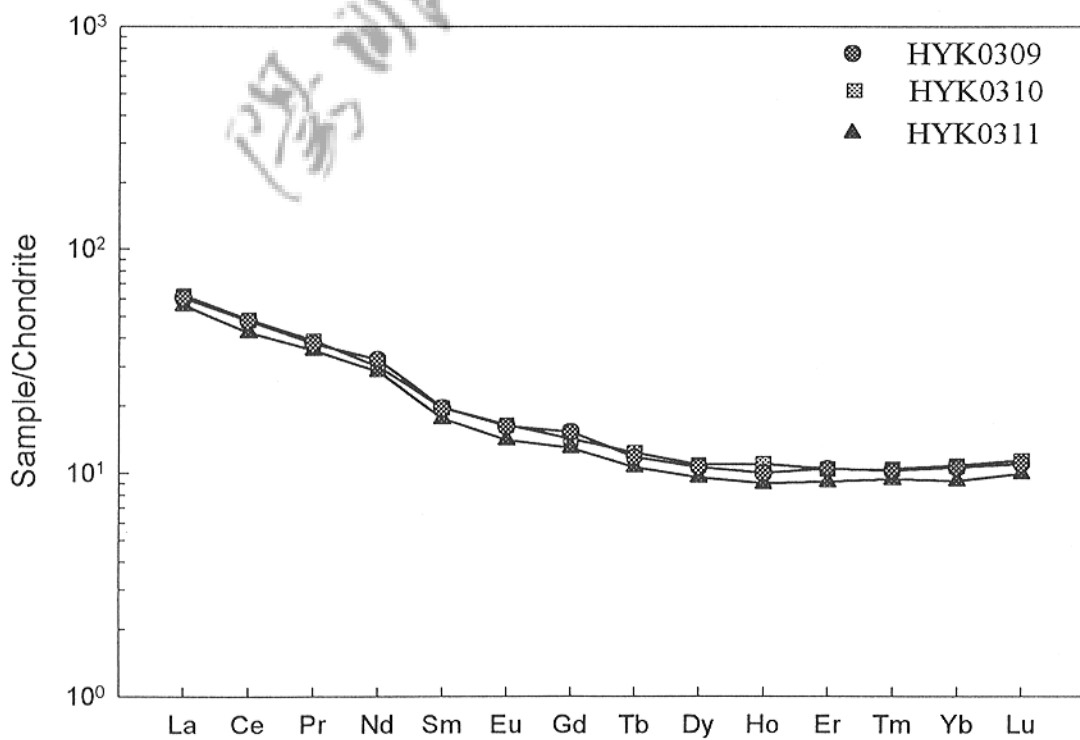
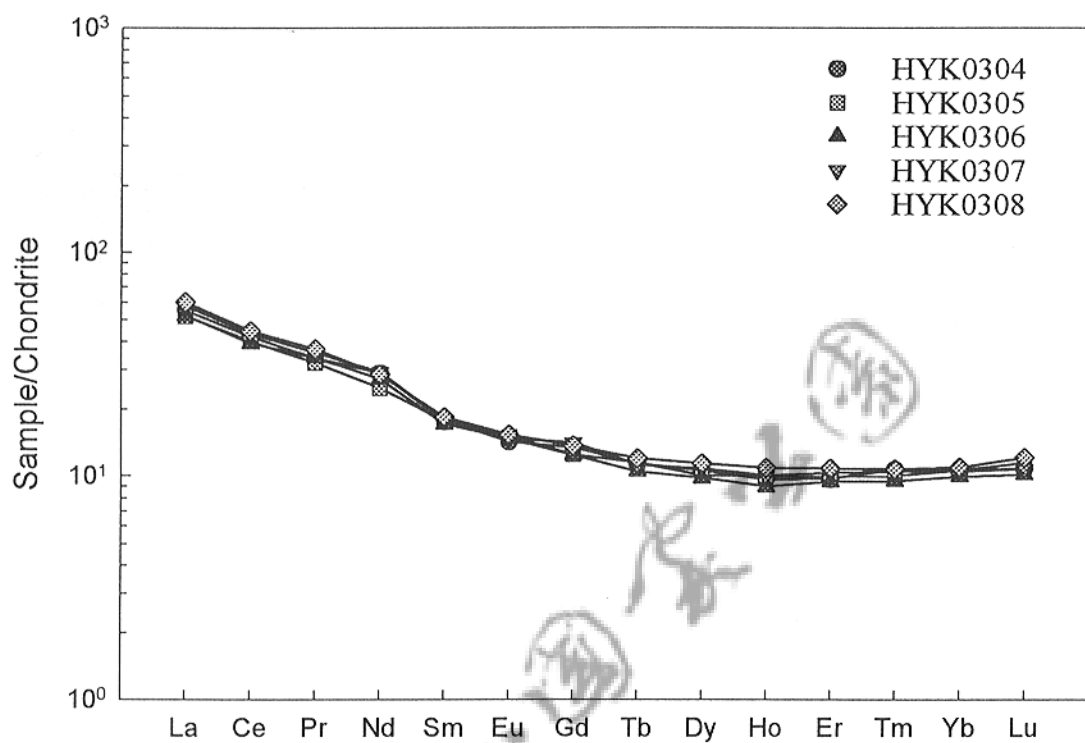
圖九：小油坑鑽井岩芯的隕石標準化稀土元素分布圖。隕石含量取自

Sun and McDonough (1989)。









五、重建小油坑的地質環境

(一)、小油坑地區的火山噴發史

小油坑崩塌地位於七星山層狀火山的西北翼。從過去的研究顯示（李淑芬，1996），七星山火山和其周遭的寄生火山，從一百五十萬年至二十萬年前的期間，共噴發了 16 層火山熔岩流。其中，在七星山西北翼出露的熔岩流，可能有約 24 萬年前噴發的 C9（角閃石兩輝安山岩）和約 22 萬年前噴發的 C10（兩輝角閃石安山岩）的火山岩。

由三口鑽井岩芯的岩性和地球化學分析特徵，以及野外露頭的觀察，發現在一號和三號鑽井岩芯所出露的熔岩流，岩性都是兩輝角閃石安山岩，而在二號鑽井岩芯上部出露的是兩輝角閃石安山岩，下部約 20 公尺所出露的則是角閃石兩輝安山岩，對照李淑芬（1996）的研究，顯示上部的兩輝角閃石安山岩可對照其 C10 的岩性，噴發的年代約為 22 萬年前，而下部的角閃石兩輝安山岩則可對照其 C9 的岩性，噴發的年代約為 24 萬年前，和地表所出露的岩性一致。所以，小油坑地區的安山岩主要是在 24 到 22 萬年前，由七星山火山頂所噴發的熔岩流所形成的。

在離小油坑最遠且較下游的三號鑽井岩芯上部，發現大量的火山再搬運堆積的火山碎屑沉積物，又可稱為火山泥流堆積物。火山泥流

堆積物岩塊的岩性，主要為兩輝角閃石安山岩，並未發現有角閃石兩輝安山岩的岩塊，且火山岩塊受到程度不等的熱水換質作用影響，使岩性變得較為軟弱，容易發生崩塌。故推測這些火山岩礫主要是由小油坑崩塌所產生的，顯示小油坑崩塌的時間應晚於 22 萬年前 C10 熔岩流噴發的時間。

(二)、小油坑崩塌的原因探討

山崩是發生在山坡地的災害，為一種塊體運動或崩落現象。重力是造成山崩的基本因素，促使岩石物體沿著山坡發生運動的能量，主要是來自地心引力，其他的因素還包括水分及坡度的變陡。當滲入地表岩層內的水分，增加岩層垂直重力且超過摩擦力時，可以促使岩層發生運動，產生山崩，因此山崩常發生在大雨或暴雨過後數天內。此外，坡度的突然變陡，使岩層往下滑動的重力大於摩擦力，也會促使岩層發生運動，產生山崩，如人為的不當開發山坡地，砍斷坡腳，使坡度變陡，尤其是在順向坡的地方，最容易引發山崩。故從以上發生山崩的因素歸納得知，造成一穩定岩層發生山崩的原因主要可分為兩種：外發因素和內在因素。

外發因素包括：1、側方支持力的移走，如風化侵蝕作用、早期的山崩、斷層的發生和人工挖土方等。2、荷力過重，如天然降雨量

或積雪突然增加的荷重，或人為的堆積廢土、建築物的重壓等。3、突然性的區域應力增加，如地震發生於飽含水的岩層中。4、下部支持物的移除，如河流、冰川、海浪等在坡腳侵蝕作用，或人為的砍斷坡腳等。5、橫壓力的增加，如岩層裂縫、水的凍結和黏土的膨脹等。6、火山噴發或岩漿在地底下活動等。這些外發因素有自然的現象，也有人為的因素。

而內在的因素，主要是自然的因素所造成，包括有：1、原來岩石的成分、組織和構造性質軟弱欠佳，如風化疏鬆的岩層或岩層中多節理或破碎帶等。2、風化或其他物理和化學作用所發生的變化，如頁岩的軟化和水化、黏土的乾裂和粒狀岩石的裂解等。3、因岩石孔隙中水分增加而產生的孔隙水壓力，如雨水的滲入、地下水面的上升和水流的滲出等。4、火山地區的火山岩層，受後火山作用的酸性噴氣或溫泉的影響，產生蝕變作用，使堅硬的岩石發生質變，減弱強度。這些因素雖主要是自然的作用，但人為的不當開發，則會加速這些內在因素的進行。

火山區域的山崩發生因素則較非火山區域複雜，所產生的災害也較大。因其岩層不僅會受到曝露於地表的風化侵蝕影響，減弱岩石強度，引發山崩；還會受到來自地底下岩漿作用的影響，如熱水換質作用減弱岩石強度、岩漿上升造成地形拱起變陡、岩漿移動對地層擠壓

造成地震使岩層產生剪力破壞、或岩漿噴發使上覆地層被破壞等，這些都會在火山地區造成嚴重的山崩及土石流問題。如 1980 年美國華盛頓州的聖海倫斯火山(Mt. St. Helens)的噴發，在岩漿上升噴發前，引發火山體北坡整個崩塌，產生大量的火山泥流堆積物，淹沒了河谷和平地，造成約三、四十人的傷亡及約 27 億美元的財產損失。另一例子為 1985 年哥倫比亞的 Nevado del Ruiz 火山的噴發，其噴發威力雖甚小，但因此一火山在不活動時，熱液和溫泉等後火山作用相當強烈，熱水換質的影響，使火山岩層的強度減低，加上火山噴發、岩漿上升過程中所引發的地震，使原來未固結的火山灰和減弱的火山岩層不穩；再加上原來覆蓋在山頂的積雪，因岩漿的高熱，使之融化產生大量的水，和火山灰或火山岩層混合，引發大量的火山泥流堆積物，沿著河谷奔騰而下，把下游的 Armero 鎮整個淹沒，造成約 25,000 人的死亡及無數的財產損失。這兩個例子是火山地區，因火山噴發再加上脆弱的岩層或火山灰，引發山崩最典型的例子。但還有甚多的例子是火山未噴發，但因熱水換質作用減低岩層強度，每隔一段時間就會發生山崩，陽明山國家公園內的小油坑崩塌，即為此一類型。

從筆者對小油坑地區的三口鑽井岩芯的研究、前人的研究工作和實際野外的調查，知小油坑崩塌口可能的形成過程為：七星山火山口噴出最後一期的兩輝角閃石安山岩熔岩流後，殘餘在地底下的岩漿仍

然處於高溫的狀態中，且持續的釋放出熱量和火山氣體。當天降的雨水沿著裂縫進入地底下時，被岩漿所釋放出的高溫和火山氣體加熱變成氣體，累積在由小油坑熔岩流所構成封閉系統的環境中，直到累積的氣體壓力超過上覆熔岩流所能承受的壓力時，就產生了所謂的蒸氣噴發（只有氣體爆炸，炸碎岩石，而無岩漿物質噴出的一種火山噴發方式），在七星山西北側翼形成了火山爆裂口。而後持續的有酸性火山氣體和高溫的熱水從小油坑火山爆裂口冒出，與原有爆裂口邊緣或內部的熔岩流發生熱水換質作用，使堅硬的安山岩質熔岩流崩解，形成較軟的換質岩石，再加上連續的豪雨，使岩層飽含水分，垂直重力增加，超過岩層的負荷，就容易發生山崩，產生大量的土石流。最典型的例子為：民國八十七年十月的瑞伯颱風，下了大量的豪雨，使得小油坑發生了規模不小的山崩，產生大量的土石流，沿著河谷沖刷而下至陽金公路上，把經過的小客車衝離車道，幸及時逃離，未釀成傷亡。檢視此一山崩事件，在小油坑地區，並未有人為的開發，但地形因早期曾發生崩塌而甚陡峭，且噴氣和溫泉等後火山作用相當強烈，熱水換質作用的影響，減弱火山岩層的強度，再加上颱風帶來的豪雨，使岩層飽含水分，最終無法承載而引發山崩，產生大量的土石流，可能是此次山崩和土石流發生最大的原因。

檢視陽明山國家公園內，容易發生山崩的地方有很多處，除了小

油坑外，還有硫磺谷、龍鳳谷、大油坑、馬槽、四磺坪及庚子坪等地區，這些區域共同的現象，是其噴氣和溫泉的後火山作用相當強烈，使得原來的火山岩層或沉積岩層，受到熱水蝕變的影響，岩石強度減弱，再加上連續豪雨，使岩層飽含水分，垂直重力增加，超過岩層的負荷，就容易發生山崩，產生大量的土石流。民國七十五年十一月二十八日磺溪在馬槽橋上游附近，發生山崩及土石流，除將一輛路過小客車衝入泥流中，致使三個人死亡，並將原有的馬槽橋和在其下游1.07 公里之翠林橋沖毀，且馬槽橋北側之民宅也有毀損。探究此次山崩及土石流發生的基本原因有：1、馬槽橋上游地區為一高度熱水換質作用的區域，岩石強度低，且河谷兩岸地形陡峭，平常就易發生小規模的落石，堆積於大坡降的河床中。2、在河床堆積物的底部岩層，因熱水換質作用的影響，形成一厚層具高度潤滑性的青黑色黏土，上覆岩層或河床堆積物易沿此層面滑動。3、馬槽橋引道及橋墩之攔阻作用造成橋上下游之高差。4、民國七十五年十一月十五日發生強烈地震，可能使部分噴氣口受到阻塞，令大量高壓氣體受制於地下，當其突圍而出，足以增加黏土層之孔隙壓力，甚或形成氣墊，而促使河床上的堆積物發生移動。5、在民國七十五年十一月，陽明山區連續降雨，雨量高達 970 公釐以上，破了四十年來的紀錄，使位於河床堆積物下方的熱水換質帶的黑色黏土層充份吸收水份而為之軟化，形成

一易移動的潤滑層。這五項因素，造成民國七十五年馬槽橋上游地區發生大規模的山崩。但追根究底，山崩之所以發生的主要因素，是熱水換質作用減弱岩層強度，並且在岩層或河床堆積物底下，形成一厚層具高度潤滑性的青黑色黏土的緣故。

陽明山國家公園內，或整個大屯火山群周遭的較老地層中，尤其是在陽明山國家公園北邊的海邊(從跳石到石門)或磺溪的兩側階地，皆可發現大量的再積性火山泥流堆積物。堆積物中含有大量被熱水換質後的火山岩礫或黏土成分，顯示在大屯火山群內的火山岩層，因噴氣和溫泉等的後火山換質作用，減低火山岩層強度，引發山崩和產生土石流的頻率相當平常，和世界上火山仍在噴發的地區相似，為一自然的現象。

六、岩芯展示規劃

從小油坑三口鑽井岩芯的研究結果，來規劃小油坑地區地質展示的重點應包含兩部分：一是小油坑崩塌口的形成歷史，另一則是鑽井岩芯的岩性特徵。

(一)、小油坑崩塌口的形成歷史（用模型展示說明）

小油坑崩塌口形成的歷史可簡述如下：

- A、七星山層狀火山在 24~22 萬年前的最後兩次活動，噴發兩輝角閃石安山岩和角閃石兩輝安山岩的熔岩流，分布堆積於七星山西側和西北側的山麓上。
- B、存在於七星山火山底下的岩漿庫仍保有很高的溫度，且持續的在釋出熱量和酸性的火山氣體。因天降的雨水沿著裂縫滲透入地底深處，被蒸發成氣體累積於七星山西側熔岩流所構成的不透氣層中。
- C、當累積的氣體壓力超過上覆熔岩流所能承受的壓力時，即發生蒸氣火山噴發，形成了小油坑爆裂口。
- D、小油坑爆裂口形成後，提供地底下酸性火山氣體溢出的管道。含 SO_2 、 SO_3 和 H_2S 的火山氣體溢出後遇水即變成硫酸，與爆裂口岩壁的安山岩發生了熱水換質作用，把堅硬的熔岩

流轉變成鬆軟的換質岩石和礦物。

E、豪雨沖刷侵蝕小油坑爆裂口周遭陡峭鬆軟的換質岩石和礦物，或滲入岩石裂縫中，增加重量，導致發生山崩土石流，使得小油坑爆裂口慢慢地擴大，變成了崩塌口。

(二)、岩芯實體展示

岩芯實體展示包括岩芯部分，以及利用圖片、文字來輔助說明。岩芯部分需展示兩層不同岩性（角閃石安山岩和角閃石兩輝安山岩）的安山岩流，從新鮮樣本到熱水換質後的樣本。然後藉由文字和圖表的說明，讓參觀者一目了然。

參 考 文 獻

- 陳肇夏、吳永助 (1971) 台灣北部大屯地熱區之火山地質。中國地質學會會刊，第十四號，5~20 頁。
- 黃鑑水 (1988) 台灣地質圖幅第四號：台北圖幅及說明書。經濟部中央地質調查所出版，46 頁。
- 李淑芬 (1996) 大屯火山群七星山火山亞群熔岩流層序之研究。國立台灣大學地質學研究所碩士論文，136 頁。
- 方建能、羅煥記、宋聖榮、陳耀麟、林義傑 (1999) 安山岩酸性熱液蝕變作用初步研究。中國地質學會年會論文摘要，168~169。
- Sun, S.-s., and McDonough, W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process. In: Magmatism in the ocean basalts, eds. Saunders, A.D. and Norry, M.J., Geological Society of London Special Publication 42, 313-345.

陽明先生全集