

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 地球與行星科學科

第三名

051911

巨晶的前世今生—關西馬武督鎔石定年及地質
意義之探究

學校名稱： 臺中市立臺中女子高級中等學校

作者：

高二 任咨羽

高二 曾馨霈

指導老師：

游明珠

關鍵詞： 鎔石、馬武督、玄武岩

摘要

本研究主要探討新竹關西馬武督地區鋯石巨晶的形成年代、生成機制與地質意義。該地區鋯石具有高達 3 至 5 毫米的巨晶，不同於台灣其他地區以微米級為主的鋯石。透過採集與分析樣本，結合玄武岩的微量元素及鋯石的鈴同位素分析，揭示馬武督地區鋯石的來源與形成環境。研究結果顯示，鳳山溪上游的玄武岩脈提供發現鋯石的有利條件，而馬武督鋯石巨晶的生成與長時間結晶、緩慢冷卻速度及捕獲外來晶體的地質條件密切相關。根據定年結果、微量元素蛛網圖、鈴同位素分析結果，推論認為：馬武督鋯石巨晶並非直接在玄武岩中生成，而是被鹼性玄武岩漿捕獲後保存下來。本研究加深對鋯石在玄武岩中形成機制的理解，對此區地質演化研究提供一個良好的解釋機制。

壹、前言

一、研究動機

隨著科技的進步與天然礦物資源的逐漸減少，人工合成材料的研究與應用越來越受到重視。其中，單晶氧化鋯（俗稱蘇聯鑽）因其與鑽石相似的光學性質，已廣泛用於珠寶業和其他工業領域。在查找資料的閱讀中，我們了解到，單晶氧化鋯的主要金屬元素——鋯元素，與天然鋯石的組成成分密切相關。這一發現不僅引發了我們對鋯石特性與形成機制的濃厚興趣，更促使我們深入探討這一礦物的地質背景及成因。

透過文獻查閱，我們發現台灣境內的鋯石晶體大多以微米級尺寸為主，肉眼難以辨識。然而，在新竹關西鎮馬武督地區，卻存在台灣目前已知唯一的鋯石巨晶，其晶體尺寸可達 3 至 5 毫米，遠超其他地區的鋯石規模。這一罕見的現象引發我們對馬武督鋯石生成環境及其背後地質機制的強烈好奇心。雖然前人也曾試著追溯馬武督鋯石的來源與成因，猜測鋯石巨晶極有可能來自玄武岩，但仍未有直接證據，此推論亦與玄武岩缺乏鋯石以及僅有少量微小的鋯石晶體之常理不符。加上目前並無馬武督鋯石鈾鉛年代的正式報導，因此本研究嘗試針對馬武督地區的鋯石巨晶進行鈾鉛定年，再針對該地區的玄武岩進行地球化學分析，以釐清鋯石巨晶的形成年代、是否來自玄武岩。若鋯石巨晶真的來自玄武岩，則進一步探討其生成機制與地質意義。馬武督鋯石的特徵顯示，它可能受到特殊的地質條件影響，例如長時間的結晶過程與緩慢的冷卻速度，提供充分的晶體生長條件。

研究馬武督鋯石的生成機制不僅有助於了解其地質背景，還能為稀有礦物的科學研究與資源開發提供參考。同時，這一研究對於探討天然與人工材料之間的異同，也具有潛在的學術與實際應用價值。因此，我們決定以馬武督地區的鋯石巨晶為研究對象，深入探索其獨特形成機制與地質意義，期望能為台灣鋯石研究提供更多貢獻。

二、研究目的

- (一) 整合新竹關西馬武督當地地質及找出最佳採集地點。
- (二) 定出鋯石之年代並探究其來源及成因。
- (三) 檢視馬武督地區玄武岩之年代及成因。
- (四) 探討鋯石與玄武岩形成的先後關係並推測形成過程的地質機制。

三、文獻回顧

(一) 顏滄波 (1957) ——《臺灣馬武督的鋯石》

此文提及玄武岩中鋯石晶體的形成原因可分為以下三類：

1. 鋯石晶體產於玄武岩中的橄欖石結晶團塊。
2. 鋯石晶體產於玄武岩熔岩。
3. 鋯石晶體產於玄武岩凝灰岩團塊。

本文實地探查在沙床中發現了一些鋯石巨晶。常見鋯石晶體的顏色有粉紅色、棕紅色，少數則為棕色、無色，有些晶體有微弱的分區，大多數晶體是透明至半透明。馬武督地區目前發現的最大晶體為 13 毫米，而大多數小於 3 毫米，比重為 4.66。顏滄波利用 lead- α 定年得到的結果為此地鋯石生成於 4 千 6 百萬年前 (46Ma)。

研究顯示如果鋯石在比玄武岩老的岩石中結晶，則鋯石在融於玄武岩岩漿時可能流失部分鉛元素，則定出的年代將介於鋯石原結晶時間和玄武岩結晶時間之間，因此可推測玄武岩中的鋯石可能是捕獲晶。

(二) Takeshi Ichimura (1943) —— Zircon and Corundum Deposits in the Mabutoku-Mahuku District, Sintiku Prefecture, Taiwan

此文中提及第一個被發現的沉積鋯石在四分溪流旁，年代為新生代第三紀(66-2.58 Ma)。文中多次提及鋯石來源無疑是玄武岩，但很難找到嵌入本區玄武岩的鋯石晶體樣本，因為它們很少直接存在於玄武岩中。若鋯石存於其中，則它很可能在玄武質岩漿冷卻的最早階段就已結晶。

(三) 陳正宏 (1990) ——《臺灣之火成岩》(p.137)

陳正宏在研究中指出，關西馬武督地區的玄武質岩經核飛跡定年法測定，其初步結果為 9.5 ± 1.0 百萬年 (Ma)。此研究由經濟部中央地質調查所出版，詳見該書第 137 頁。

貳、研究設備及器材

表 1. 研究設備及其用途（本表照片由第一作者拍攝）

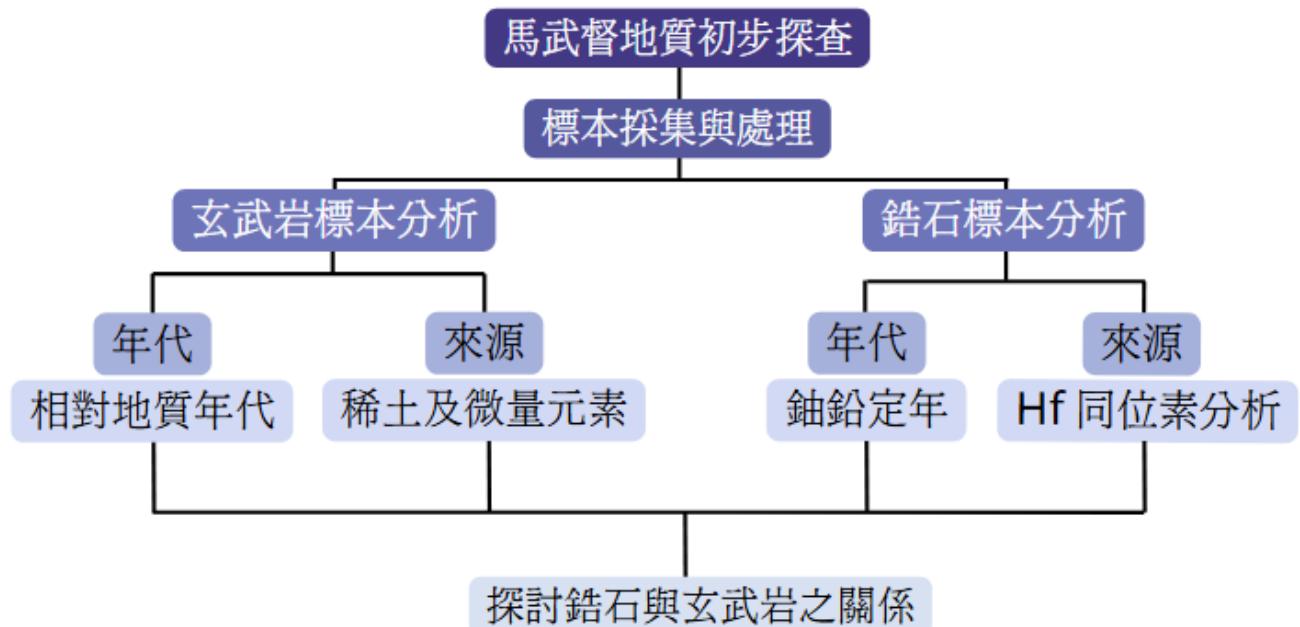
			
1-1 篩網（註 1）	1-2 淘金盤	1-3 放大鏡	1-4 地質槌
			
1-5 標本袋	1-6 地圖	1-7 燒杯	1-8 超音波清洗機
			
1-9 相機	1-10 立體顯微鏡	1-11 重液粉（註 2）	

註 1：篩網篩孔大小由大至小分別為 4.000mm、2.000mm、850 μm 。

註 2：重液粉成分为聚鈮酸鈉(Sodium Polytungstate)，廠牌為 TC-Tungsten Compounds，加入去離子水可調配成比重為 3 的重液。

參、研究過程與方法

一、研究架構圖(出處詳圖片來源 1)



二、採集與標本處理

(一)事前準備

1. 運用地質資料整合查詢系統查看馬武督地區的地質與岩層結構。
2. 利用 Google Earth Pro 和地質資料整合查詢系統，查看街道與河流交界處，結合街景功能，確認可實地探查之確切位址。
3. 製作馬武督地理位置圖、地質圖幅及採集地圖（圖一、圖二）。

(二)鋯石採集

1. 至馬武督鳳山溪一帶採集鋯石。
2. 將鳳山溪內取得的河砂過篩三次，留下顆粒較小者，透過淘金盤將輕礦物與雜質甩出，留下重礦物。
3. 初步於河流內清洗河砂，除去其中泥土與雜質，將重礦物裝入標本袋並帶回實驗室。
4. 利用超音波清洗機二度清洗河砂中的雜質與泥土。
5. 將清洗過後之河沙拿至烘箱烘乾，以利後續分離作業。

6. 由於河砂中磁鐵礦的含量不少，且比重高達 5.18，與鋯石同屬重礦物，不僅會增加挑選鋯石的難度，還容易與重液發生反應，導致重液變色與消耗，因此先使用強力磁鐵將磁鐵礦移除。再使用去離子水重複清理樣本三次，再烘乾。
7. 利用比重為 3 的重液進行鋯石的純化。由於鋯石的比重為 4.68，能在重液中沉降，因此可有效分離出鋯石。河砂的主要成分为二氧化矽，其比重為 2.65，使用此重液可去除大部分非目標物質，從而提高鋯石的相對濃度。由於河砂的礦物組成主要是石英、長石，比重皆約為 2.6，而鋯石的比重為 4.68，因此可使用比重為 3 的重液將輕礦物與重礦物分離，以便於挑選鋯石。將重礦物以去離子水沖洗乾淨後，烘乾。
8. 利用鑷子挑選出肉眼可見的鋯石，再使用立體顯微鏡以針尖將粒徑較小的鋯石沾黏至雙面膠上，再使用模具與環氧樹脂（Epoxy resin）將其加工為鋯石靶，並進行打磨拋光，使適當的鋯石橫切面露出。
9. 使用金相顯微鏡拍攝鋯石的反射光、穿透光影像，以觀察鋯石型態及有無包裹礦物。再使用掃描式電子顯微鏡（Scanning Electron Microscope, SEM）拍攝鋯石的陰極射線影像，以觀察鋯石的型態與震盪環帶（oscillatory zoning）。

(三)玄武岩採集

1. 至馬武督鳳山溪一帶岩脈附近的採集火成岩。
2. 用鐵鎚敲開觀察新切面，利用放大鏡觀察是否為玄武岩。
3. 清洗所採集之岩石，標號後裝入標本袋並帶回。
4. 將部分岩石磨成粉末，送至美國華盛頓州立大學（WSU）地質分析實驗室(Peter Hooper GeoAnalytical Lab)進行元素分析。

三、定出鋯石之年代並探究其來源及成因

- (一) 絶對年代定年：將鋯石靶寄送至北京 SHRIMP 中心進行鈾鉛定年。
- (二) 數據處理與作圖：利用 IsoplotR 製作鋯石的諧和圖（Concordia diagram），計算鋯石的加權平均年齡（Weighted mean age），並製作年代頻譜圖（Age spectrum）。
- (三) 鋯石之物質來源：將鋯石靶進行鈦同位素分析，取得 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 與 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 數據，並

計算 $\varepsilon \text{Hf(t)}$ 數值，探討其來源。

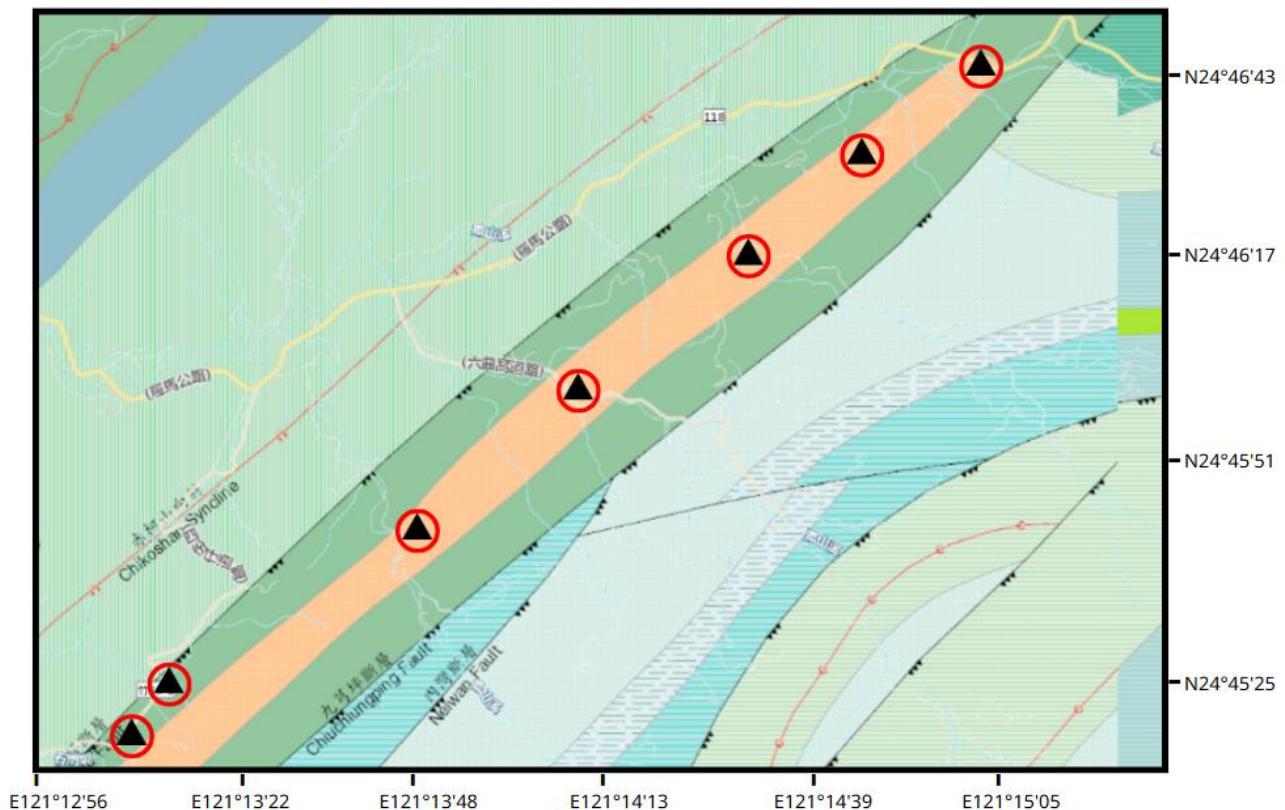
四、檢視馬武督地區玄武岩之年代及成因

(一) 形成年代：利用地質資料整合查詢系統確認其相對形成年代，並結合文獻資料比對其實際形成年代

(二) 主要及微量元素分析：利用關西馬武督玄武岩及標準參考物質的鑭系稀土元素 (REE) 與微量元素對球粒隕石比值數據繪製稀土元素分布圖以及微量元素蛛網圖，並探討其來源。



圖一：新竹關西馬武督地理位置圖(本圖片引自 Google Earth Pro，並由作者加註)



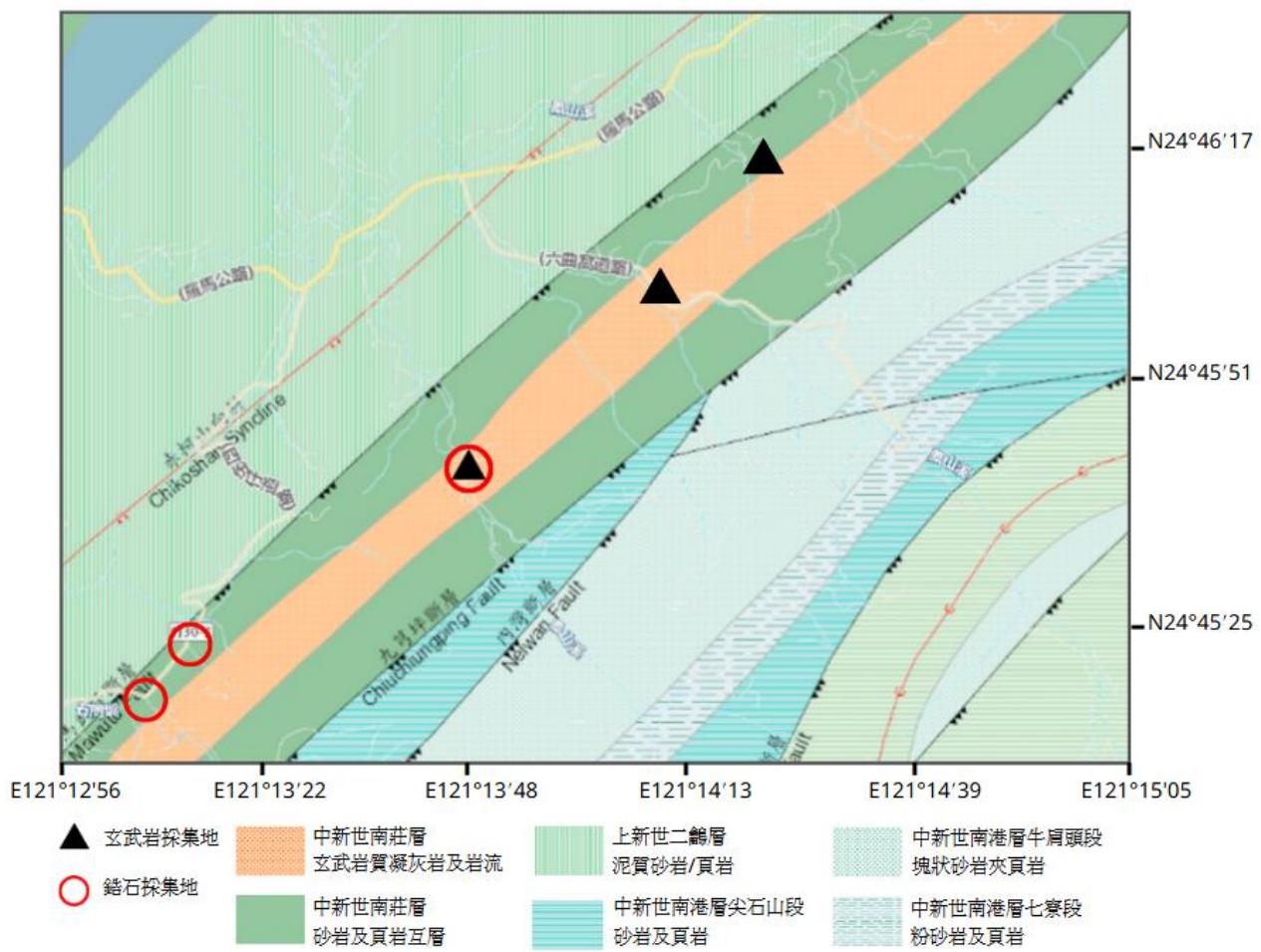
圖二：馬武督地質圖幅及預計採集點(出處詳圖片來源 3)

肆、研究結果

一、整合新竹關西馬武督當地地質及找出最佳採集地點

(一) 馬武督地質結構

1. 火山活動背景：馬武督地區的玄武岩為中新世的火山活動產物。
2. 河流源頭的地質影響：鳳山溪上游位於地圖中玄武岩分布的區域附近，暗示該溪流的源頭或流經地區可能直接受到玄武岩的影響。



圖三：馬武督地質相對年代與實際採集地圖(出處詳圖片來源 3)

(二)地質探察與實際採集（圖三）

1. 玄武岩：至而完窩採集一塊，採石道路採集兩塊，六曲窩採集五塊（圖四、圖五）。
2. 鋸石：至採石道路上游採集一袋泥沙（編號：3-a、3-b），下游採集二袋（編號：1、2），與四分道路上游採集一袋（編號：5），下游採集一袋（編號：-a、4-b、4-c-1、4-c-2）。
3. 製作鋸石標靶：用編號：4-a、4-b、5 製作標靶。



圖四：而完窩之玄武岩(出處詳圖片來源 1)



圖五：六曲窩之玄武岩(出處詳圖片來源 1)

二、定出鋯石之年代並探究其來源及成因

(一) 鋯石之鈾鉛定年結果

定年前，先拍攝待測定鋯石之反射光、穿透光、掃描式電子顯微鏡陰極發光影像(圖六)。反射光影像可以觀察鋯石表面是否乾淨、平整；穿透光影像則是用以觀察鋯石內部是否含有包裹礦物；掃描式電子顯微鏡陰極發光影像 (SEM-CL) 則是看鋯石內部成分變化、有無震盪環帶 (Oscillatory zoning)，因為晶體太大，掃描式電子顯微鏡影像視野不夠大，故需拍多張才可拼出一顆鋯石。

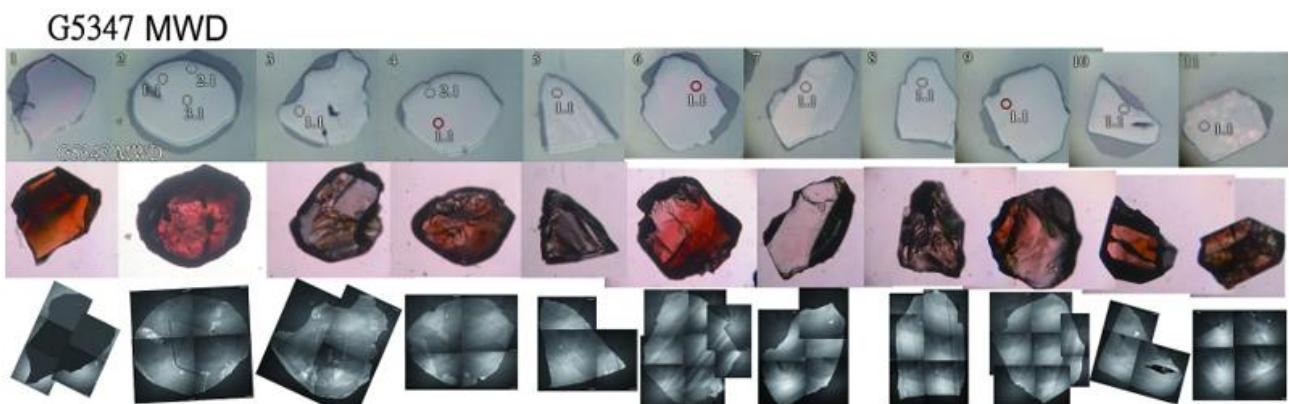
編號 1 矿物因其陰極發光影像全黑，表示其並非是鋯石。在其他 10 顆鋯石上共進

行 13 個測點。在編號 2 鎢石礦物上進行 3 個測點、在編號 4 矿物上進行 2 個測點，其他 8 顆鎢石巨晶皆進行 1 個測點。

完成鎢石鈾鉛定年分析後，檢視分析所得的數據，確認數據經過普通鉛校正，再將數據進一步利用 IsoplotR 分析作圖。首先先進行諧和圖分析（圖七），確認鎢石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 與 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年代的一致性。有兩筆數據落於諧和線上，計算所得的諧和年齡為 9.95 ± 0.21 百萬年(Ma)。另有兩筆數據則遠離諧和線，推測是因為這些鎢石非常年輕，其子同位素 ^{207}Pb 含量太低，接近儀器偵測極限，造成測得的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 差異大、誤差也大。故宜使用它們的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年代作為推定年代，這 13 筆數據的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年代為 9.0 ± 2.2 與 14.2 ± 1.6 百萬年之間。

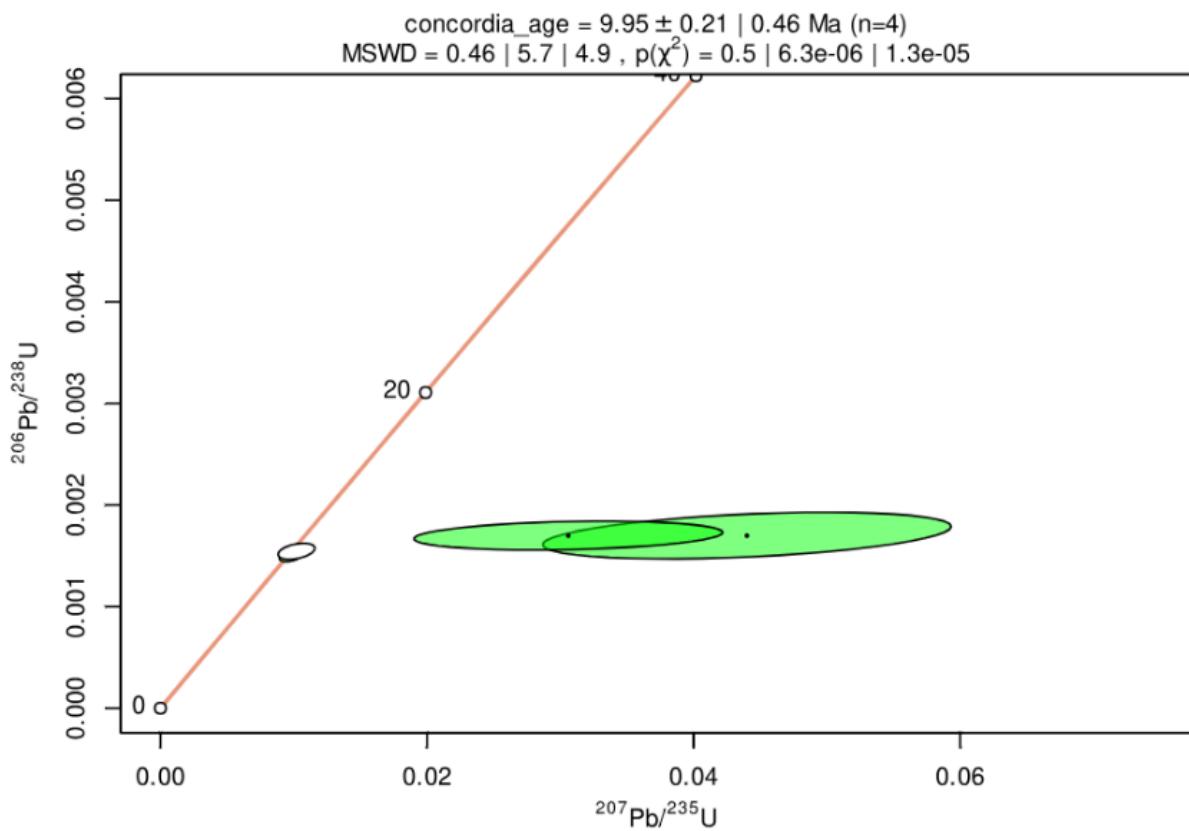
接著計算這 13 筆鎢石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年代加權平均值（圖八），為 10.51 ± 0.18 百萬年，MSWD (Mean Square of Weighted Deviates) = 1.9，通常 MSWD 小於 3 表示數據一致性高。雖然這些年代可說是相當一致，但似乎有三筆比起其他數據稍老些。因此再製作這些數據的年代頻譜圖 (Age spectrum)，以檢視年代分布情形。

年代頻譜圖是針對這些數據進行統計分析，製作直方圖與進行核密度估計 (Kernel Density Estimation, KDE) (圖九)。從圖九中可以看出，這些數據具有兩個峰值，第一個峰值約在 10.5 百萬年，第二個峰值約為 13.8 百萬年，顯示這些鎢石很有可能形成於這兩期火成事件中，兩期(10 及 13 百萬年前)皆屬於角板山期火山活動。

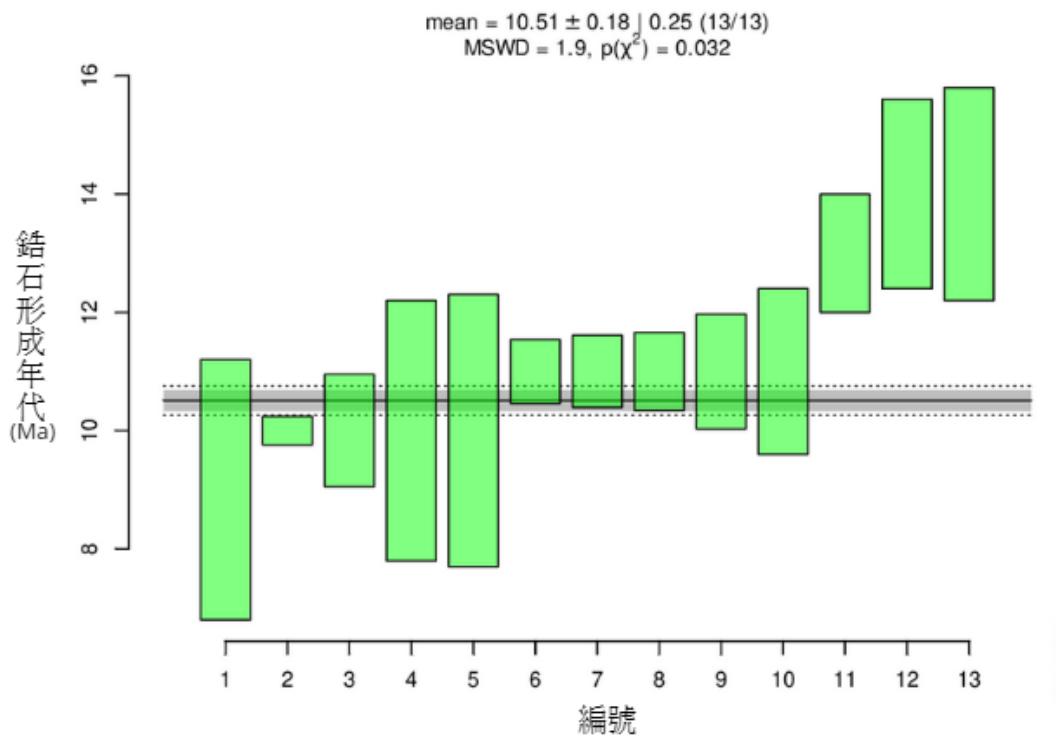


圖六：馬武督鎢石之反射光影像（上）、穿透光影像（中）、

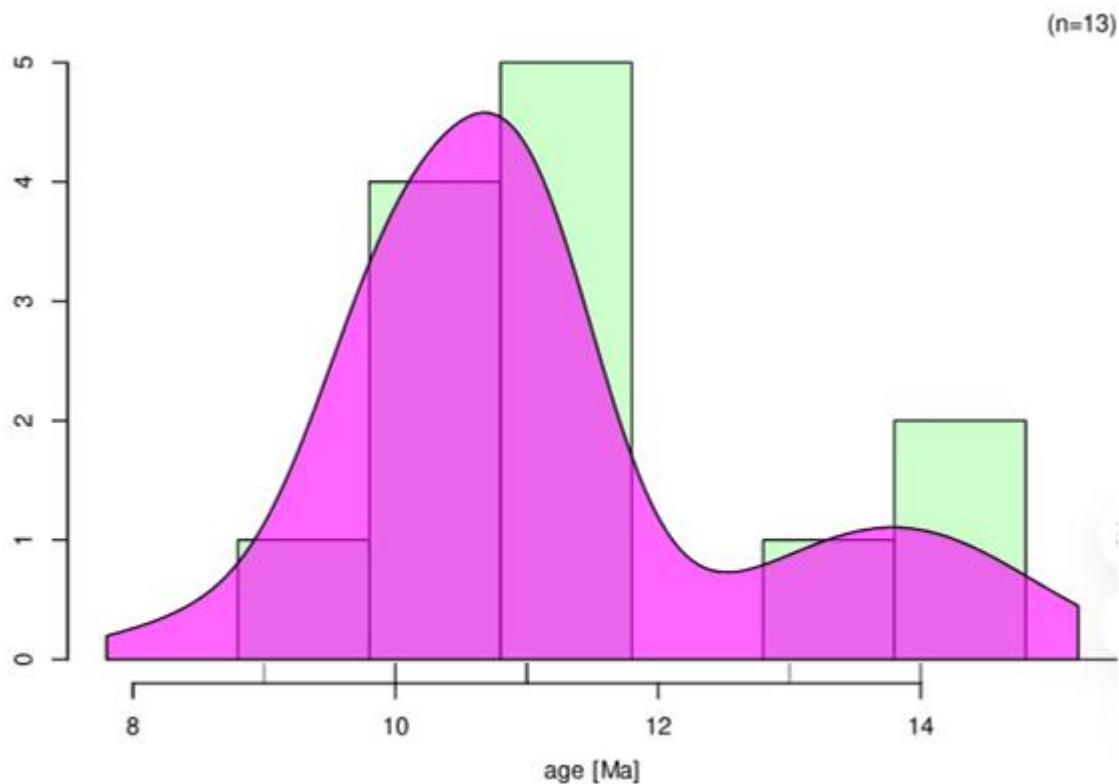
掃描式電子顯微鏡陰極發光影像（下）(出處詳圖片來源 2)



圖七：馬武督鋯石鈾鉛同位素之諧和圖(出處詳圖片來源 1)



圖八：馬武督鋯石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年代之加權平均(出處詳圖片來源 1)



圖九：馬武督鋯石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年代之年代頻譜圖(出處詳圖片來源 1)

(二)鋯石之物質來源

1. $\varepsilon \text{ Hf}(t)$ 數值的意義

由於鈦同位素之原始比值差異極微，約為 10^{-6} 的量級，故在地球化學研究中，常將其轉換為 $\varepsilon \text{ Hf}$ 值以便於比較與解釋。 $\varepsilon \text{ Hf}(t)$ 數值為正表示鋯石來源具有虧損地函的特性；數值為負則顯示其可能來源為地殼物質的部分熔融

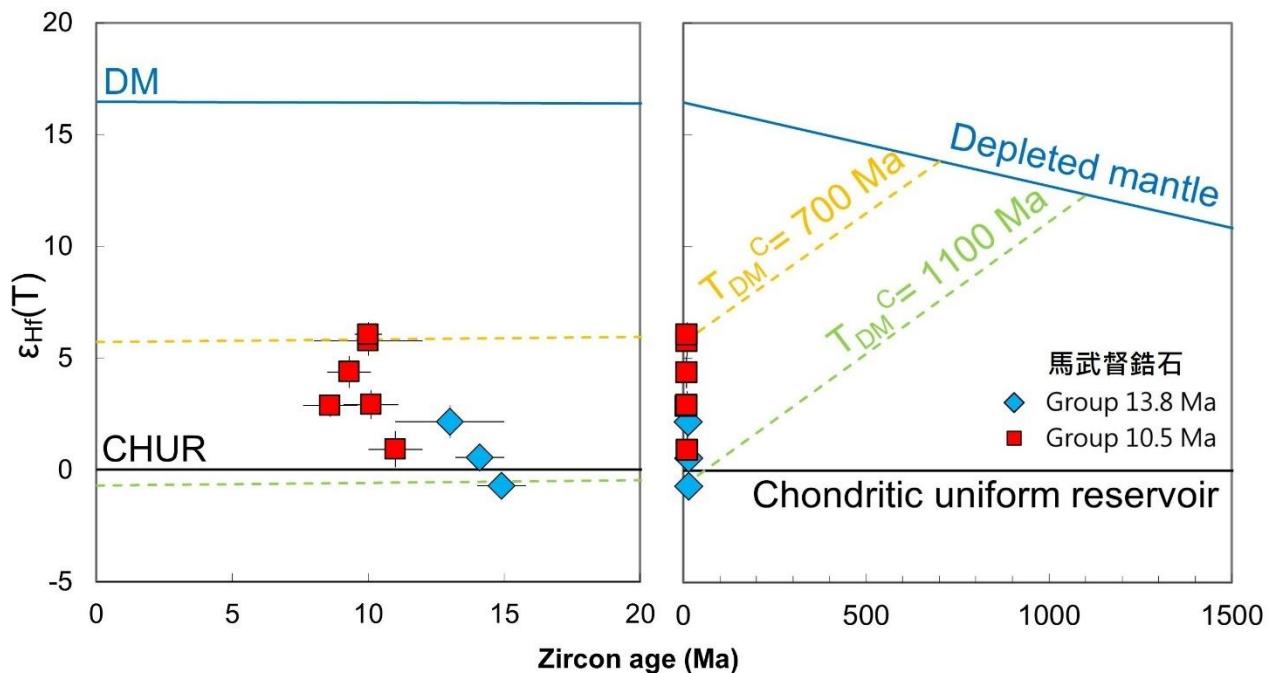
2. 鈦同位素原始值轉換為 $\varepsilon \text{ Hf}(t)$ 值之公式

$$\varepsilon \text{ Hf}(t) = ((\text{176Hf} / \text{177Hf})_{\text{S}} - (\text{176Lu} / \text{177Hf})_{\text{S}} \times (e^{\lambda t} - 1)) / ((\text{176Hf} / \text{177Hf})_{\text{CHUR},0} - (\text{176Lu} / \text{177Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)) - 1 \times 10000$$

3. 10 百萬年期與 13 百萬年期岩漿作用的比較與解釋（圖十）

- (1) 13 百萬年期的鋯石 $\varepsilon \text{ Hf}(13 \text{ Ma})$ 較低 (-0.5 ~ 2.2)，顯示岩漿受到了較多地殼物質混染。
- (2) 10 百萬年期的鋯石 $\varepsilon \text{ Hf}(10 \text{ Ma})$ 較高 (1.4 ~ 6.5)，顯示地函成分較純，地殼混染減少。

(3) 計算結果中，無論是 10 百萬年還是 13 百萬年期， $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 皆為正值，這表示岩漿具有虧損地涵的特性，而非完全由地殼物質熔融形成。



圖十：10 百萬年與 13 百萬年鋯石的鈦同位素演化圖(左側為局部放大圖) (出處詳圖片來源 2)
三、檢視馬武督地區玄武岩之年代及成分

(一)形成年代

根據地質資料整合系統所繪製的地質年代圖顯示，玄武質凝灰岩及玄武岩岩流位於砂岩與頁岩互層的南莊層之中，這表明玄武岩的形成年代應為中新世（23-5.33 Ma）。而陳正宏在研究中指出，關西馬武督地區的玄武質岩經核飛跡定年法測定，其結果為 9.5 ± 1.0 百萬年 (Ma)。

(二)主要元素分析

1. 鑑別玄武岩：根據岩石的細緻顆粒特徵，推測其為火成岩中的噴發岩類型。再結合其深色的外觀，進一步判定為玄武岩（圖十一）。
2. 鑑別為基性玄武岩：根據化學成分分析（表 3），採集到的玄武岩樣本中，二氧化矽 (SiO_2) 含量約為 44% 至 47%。此範圍符合基性玄武岩 (SiO_2 含量為 45%-52%) 及超基性玄武岩 (SiO_2 含量小於 45%) 的標準，推測該岩石為偏基

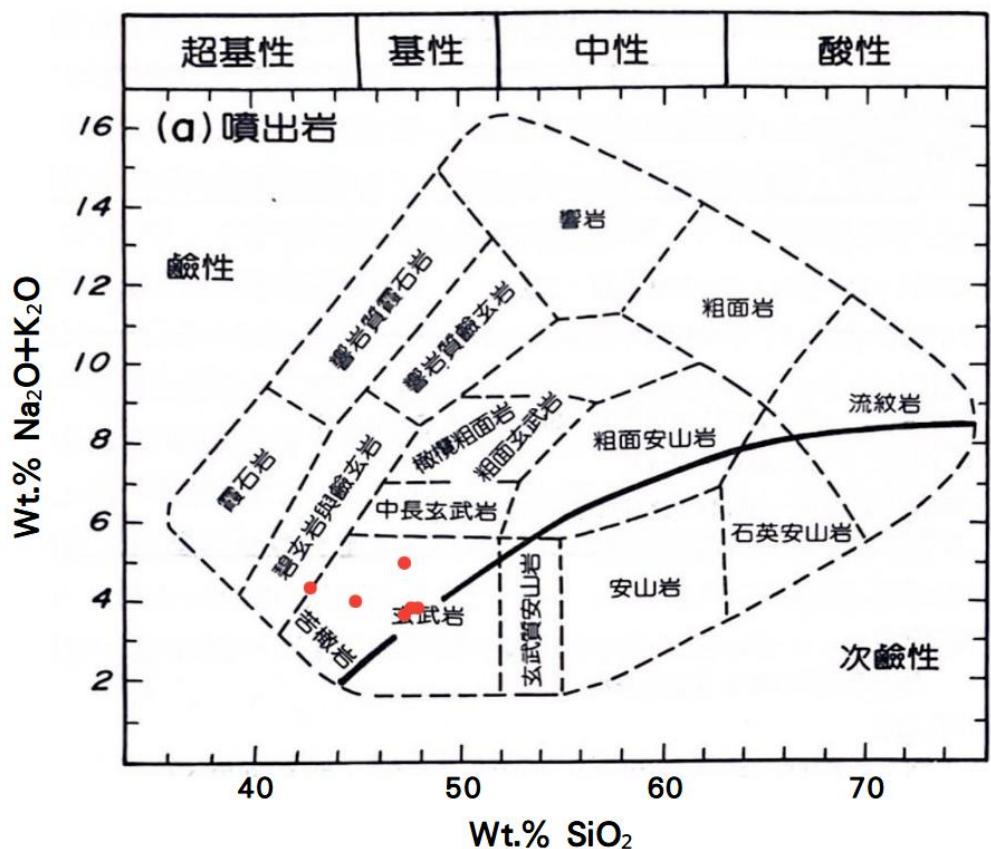
性的玄武岩，而非酸性或中性岩石。

3. 鑑別為鹼性玄武岩：根據圖十四)二氧化矽 (Wt.%) 與氧化鈉與氧化鉀之和 (Wt.%) 的分類標準，可以區分鹼性玄武岩 (AK) 與亞鹼性玄武岩 (TH)，其中鹼性玄武岩位於較高氧化鈉與氧化鉀之和含量的區域，而亞鹼性玄武岩則分布於較低氧化鈉與氧化鉀之和含量範圍，兩者由一條曲線作為分界。圖十三紅色點代表本研究所採集之玄武岩樣本，這些紅點均落於玄武岩區域內，且其氧化鈉與氧化鉀之和含量約為 4% 以上，顯示其位置位於鹼性玄武岩 (AK) 分類範圍內，未進入亞鹼性玄武岩 (TH) 的區域。因此，根據圖示與化學成分分析結果，可判定這些紅點代表的玄武岩樣本屬於鹼性玄武岩。

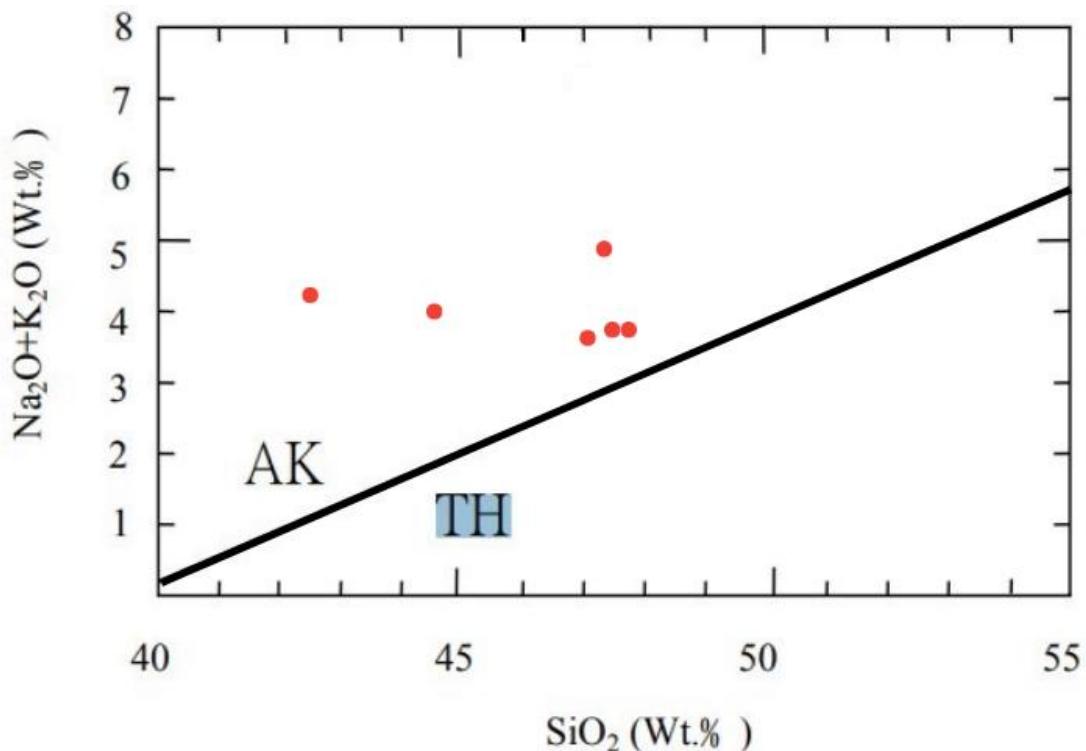


圖十一：玄武岩之結晶面(出處詳圖片來源 1)

臺灣之火成岩



圖十二：火成岩之分類圖(本圖片引自 Wilson, 1989 第 8 頁，並由作者加註)



圖十三：玄武岩之 SiO₂ 對 Na₂O+K₂O 圖(本圖片引自李寄嶧 1994，並由作者加註)

表 2. 玄武岩化學成分分析（本表由第二作者繪製整理）

	KAT P020783	KAT MWD-3	KAT MWD-4	KAT MWD-5	KAT MWD-6	KAT MWD-7	KAT MWD-8
Unnormalized Major Elements (Weight %):							
SiO₂	71.79	47.56	47.68	42.58	44.68	47.39	46.94
TiO₂	0.307	2.248	2.258	3.201	3.321	2.172	2.301
Al₂O₃	14.6	13.62	13.59	12.4	13.93	13.73	13.42
FeO*	1.92	10.59	10.52	12	11.78	9.49	10.92
MnO	0.027	0.139	0.135	0.175	0.159	0.148	0.162
MgO	0.88	8.31	8.12	12	8.69	8.7	9.42
CaO	1.35	9.1	9.24	9.24	9.08	8.66	9.61
Na₂O	8.38	2.58	2.57	3.24	3.35	2.93	2.38
K₂O	0.05	1.24	1.23	1.09	0.72	2.04	1.29
P₂O₅	0.052	0.613	0.62	0.812	0.642	0.647	0.562
Sum	99.36	96	95.97	96.74	96.35	95.9	97.02
LOI%	0.31	3.46	3.44	2.55	3.05	3.42	2.38

(三) 鑪系微量元素分析（圖十四）

1. 左側濃度較高，右側濃度較低，顯示輕稀土元素（LREE）富集、重稀土元素（HREE）平坦。
2. 銳負異常：銳的值低於預期，形成明顯的凹陷，這可能是斜長石分離結晶的證據，因為斜長石富集銳。
3. 演化程度：曲線的輕稀土元素與重稀土元素的斜率差異，結合銳異常，指示源區可能經歷了中等程度的部分熔融以及後期岩漿的演化。
4. 玄武岩幾乎與地殼平均成分相同，顯示關西鹼性玄武岩是有極多地殼混染。

表3. 關西馬武督玄武岩 (KAT MWD-3~8) 及標準參考物質的鑭系稀土元素 (REE) 原始濃度數據表

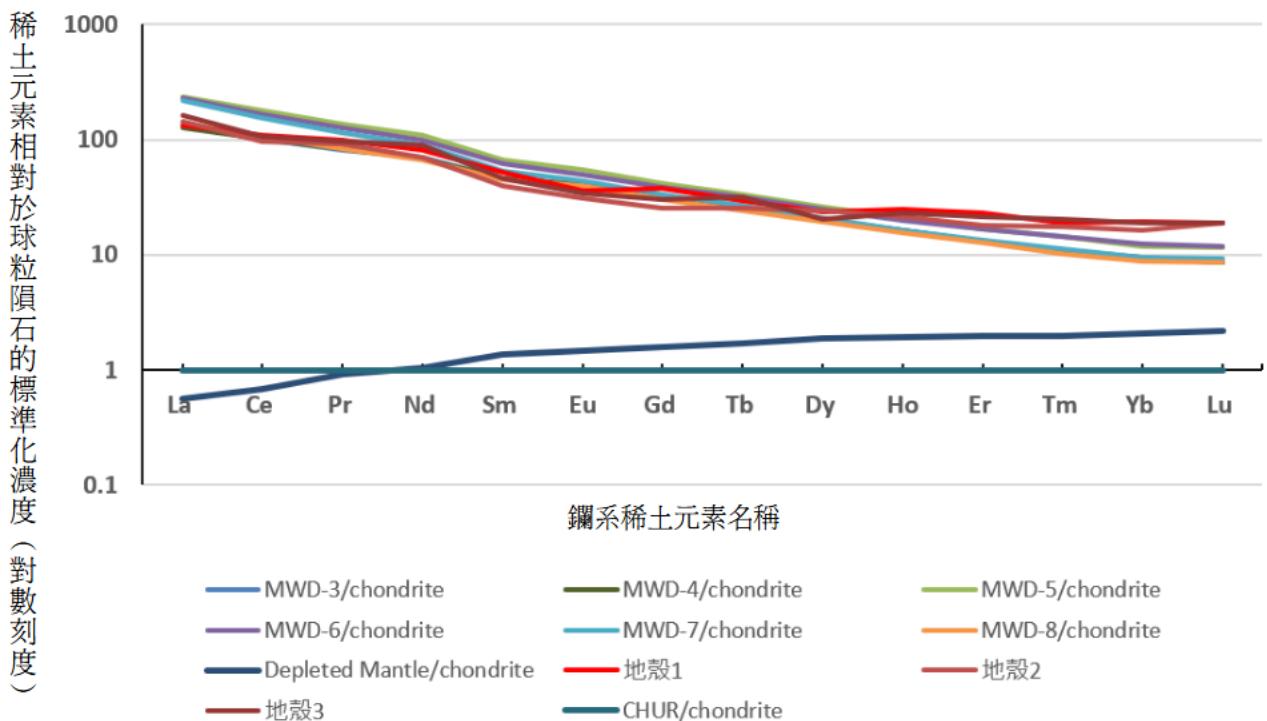
(本表由第二作者繪製整理)

Sample ID(ppm)	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
CI chondrite	0.237	0.621	0.095	0.467	0.153	0.058	0.2055
Depleted Mantle	0.134	0.421	0.087	0.483	0.21	0.086	0.324
地殼 1	32	68	9.5	38	7.9	2.1	7.7
地殼 2	34	60	8.7	33	6	1.8	5.2
地殼 3	39	66.5	9.2	41.5	7.05	2	6.2
KAT MWD-3	30.58	62.94	7.79	32.39	7.03	2.38	6.36
KAT MWD-4	30.47	62.85	7.87	32.30	6.99	2.37	6.48
KAT MWD-5	56.17	110.87	13.10	51.43	10.24	3.17	8.66
KAT MWD-6	54.09	103.63	12.03	46.14	9.37	2.87	8.05
KAT MWD-7	51.41	96.30	10.96	41.51	8.13	2.56	6.84
KAT MWD-8	33.51	66.09	7.89	31.53	6.84	2.29	6.16
Sample ID(ppm)	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
CI chondrite	0.0374	0.254	0.0566	0.1655	0.0255	0.170	0.0254
Depleted Mantle	0.064	0.471	0.108	0.329	0.05	0.348	0.056
地殼 1	1.1	6	1.4	3.8	0.48	3.3	0.4829
地殼 2	0.94	6.2	1.2	3	0.45	2.8	0.483
地殼 3	1.2	5.2	1.3	3.5	0.52	3.2	0.483
KAT MWD-3	0.93	5.05	0.92	2.16	0.28	1.57	0.22
KAT MWD-4	0.94	5.16	0.91	2.14	0.28	1.59	0.22
KAT MWD-5	1.24	6.67	1.19	2.78	0.37	2.03	0.29
KAT MWD-6	1.17	6.35	1.14	2.78	0.37	2.09	0.30
KAT MWD-7	1.00	5.33	0.93	2.22	0.29	1.62	0.23
KAT MWD-8	0.90	4.88	0.87	2.09	0.26	1.51	0.22

表 4. 關西馬武督玄武岩 (MWD-3~8) 及標準參考物質的鑭系稀土元素對球粒隕石比值數據表

(本表由第二作者繪製整理)

Sample ID	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
	1	1	1	1	1	1	1
CHUR/chondrite	1	1	1	1	1	1	1
Depleted Mantle/chondrite	0.5654	0.6779	0.9158	1.0343	1.3725	1.4828	1.5766
地殼 1	135.02	109.50	100.00	81.37	51.63	36.21	37.47
地殼 2	143.46	96.62	91.58	70.66	39.22	31.03	25.30
地殼 3	164.56	107.09	96.84	88.87	46.08	34.48	30.17
MWD-3/chondrite	129.045	101.35	81.978	69.367	45.959	41.045	30.946
MWD-4/chondrite	128.583	101.21	82.81	69.168	45.707	40.854	31.539
MWD-5/chondrite	237.017	178.54	137.87	110.12	66.944	54.589	42.14
MWD-6/chondrite	228.24	166.87	126.66	98.799	61.228	49.436	39.15
MWD-7/chondrite	216.928	155.07	115.35	88.893	53.141	44.054	33.277
MWD-8/chondrite	141.409	106.42	83.09	67.51	44.728	39.408	29.997
Sample ID	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
	1	1	1	1	1	1	1
CHUR/chondrite	1	1	1	1	1	1	1
Depleted Mantle/chondrite	1.7112	1.8543	1.9081	1.9879	1.96078	2.0471	2.2047
地殼 1	29.41	23.62	24.73	22.96	18.82	19.41	19.01
地殼 2	25.13	24.41	21.20	18.13	17.65	16.47	19.02
地殼 3	32.09	20.47	22.97	21.15	20.39	18.82	19.02
MWD-3/chondrite	24.85	19.875	16.28	13.081	11.029	9.2376	8.6939
MWD-4/chondrite	25.265	20.324	16.114	12.921	10.909	9.381	8.5237
MWD-5/chondrite	33.115	26.267	21.019	16.827	14.335	11.938	11.55
MWD-6/chondrite	31.401	24.994	20.069	16.783	14.327	12.294	11.898
MWD-7/chondrite	26.683	20.98	16.374	13.392	11.237	9.5497	9.1523
MWD-8/chondrite	24.033	19.2	15.426	12.616	10.303	8.8544	8.5592



圖十四：玄武岩稀土元素（REE, Rare Earth Elements）的球粒隕石（chondrite）標準化模式分布圖（本表由第二作者製作整理）

(四) 微量元素分析（圖十五）

1. 大離子親石元素（LILE）富集

在鋨、鈦、鈇等大離子親石元素上，關西鹼性玄武岩的標準化濃度顯示出明顯的富集趨勢，這通常是地殼混染的典型特徵，因為地殼物質相對於地函物質具有較高的大離子親石元素含量。

2. 高場強元素（HFSE）分布模式與地殼一致

鋯、鉭、鋫、鈴等高場強元素的標準化分布與地殼標準成分相似，顯示出其來源並非純地函，而是受到地殼物質混染影響。

3. 與地殼標準成分趨勢高度吻合

(1) 關西鹼性玄武岩與地殼標準成分的曲線幾乎重疊，特別是在大離子親石元素和高場強元素區域，表明這些玄武岩的成分與地殼極為相似。

(2) 這種趨勢通常出現在地殼混染強烈的岩漿系統，例如上地殼物質被部分熔融或地函岩漿與地殼物質有大量交互作用的情況。

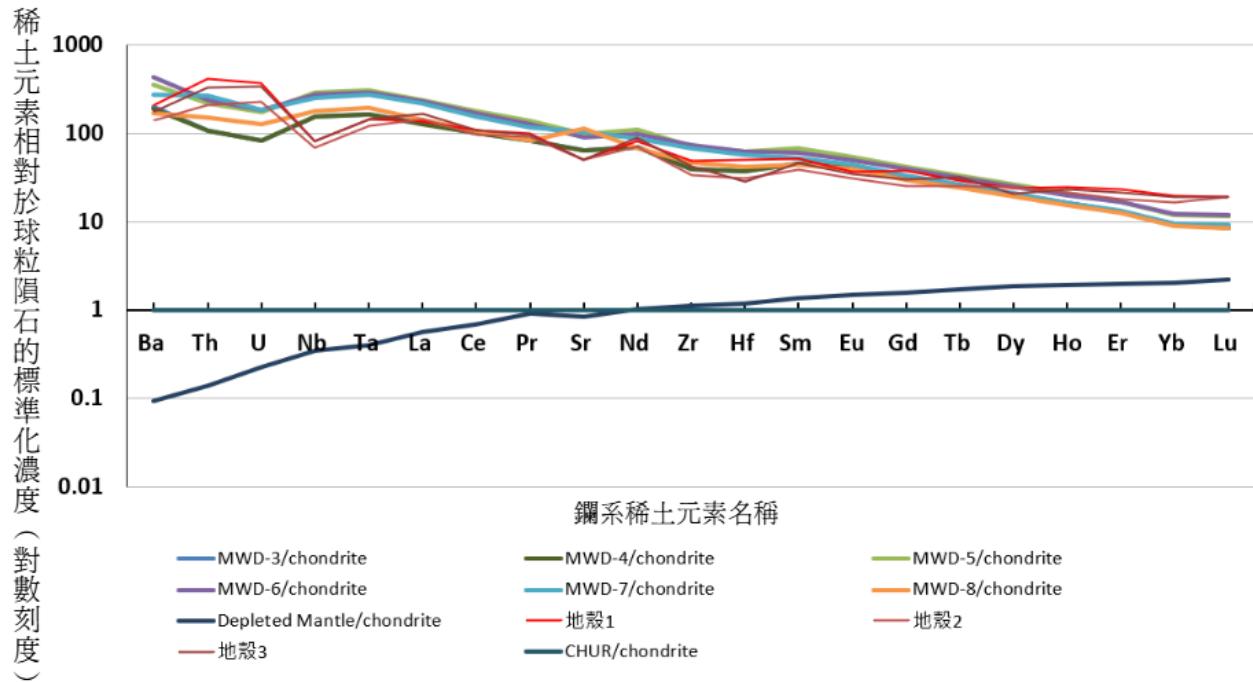
表 5. 關西馬武督玄武岩 (MWD-3~8) 及標準參考物質的微量元素濃度數據表 (本圖由第二作者繪製整理)

Sample ID(ppm)	Ba	Th	U	Nb	Ta	La	Ce
CI chondrite	2.41	0.029	0.008	0.246	0.014	0.237	0.621
Depleted Mantle	0.227	0.004	0.0018	0.0864	0.0056	0.134	0.421
地殼 1	500	12	3	20	2	32	68
地殼 2	340	6	2	17	2	34	60
地殼 3	425	10	3	20	2	39	67
KAT MWD-3	484	3.12	0.66	38.20	2.27	30.58	62.94
KAT MWD-4	456	3.09	0.66	38.28	2.29	30.47	62.85
KAT MWD-5	851	6.38	1.39	71.15	4.36	56.17	110.87
KAT MWD-6	1042	6.99	1.49	66.86	4.11	54.09	103.63
KAT MWD-7	653	7.69	1.48	62.24	3.86	51.41	96.30
KAT MWD-8	404	4.35	1.01	43.62	2.74	33.51	66.09
Sample ID(ppm)	Pr	Sr	Nd	Zr	Hf	Sm	Eu
CI chondrite	0.095	7.26	0.467	3.87	0.1066	0.153	0.058
Depleted Mantle	0.087	6.092	0.483	4.269	0.127	0.21	0.086
地殼 1	9.5	370.0	38.0	190.0	5.3	7.9	2.1
地殼 2	8.7	360.0	33.0	130.0	3.3	6.0	1.8
地殼 3	9.2	370.0	41.5	165.0	3.0	7.1	2.0
KAT MWD-3	7.79	459	32.39	154	3.94	7.03	2.38
KAT MWD-4	7.87	471	32.30	154	3.95	6.99	2.37
KAT MWD-5	13.10	722	51.43	279	6.71	10.24	3.17
KAT MWD-6	12.03	647	46.14	288	6.67	9.37	2.87
KAT MWD-7	10.96	752	41.51	265	6.08	8.13	2.56
KAT MWD-8	7.89	823	31.53	183	4.44	6.84	2.29
Sample ID(ppm)	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu
CI chondrite	0.2055	0.0374	0.254	0.0566	0.1655	0.170	0.0254
Depleted Mantle	0.324	0.064	0.471	0.108	0.329	0.348	0.056
地殼 1	7.7	1.1	6.0	1.4	3.8	3.3	0.5
地殼 2	5.2	0.9	6.2	1.2	3.0	2.8	0.5
地殼 3	6.2	1.2	5.2	1.3	3.5	3.2	0.5
KAT MWD-3	6.36	0.93	5.05	0.92	2.16	1.57	0.22
KAT MWD-4	6.48	0.94	5.16	0.91	2.14	1.59	0.22
KAT MWD-5	8.66	1.24	6.67	1.19	2.78	2.03	0.29
KAT MWD-6	8.05	1.17	6.35	1.14	2.78	2.09	0.30
KAT MWD-7	6.84	1.00	5.33	0.93	2.22	1.62	0.23
KAT MWD-8	6.16	0.90	4.88	0.87	2.09	1.51	0.22

表6. 關西馬武督玄武岩 (MWD-3~8) 及標準參考物質的微量元素對球粒隕石比值數據表

(本表由第二作者製作整理)

Sample ID(ppm)	Ba	Th	U	Nb	Ta	La	Ce
CHUR/chondrite	1	1	1	1	1	1	1
Depleted Mantle/chondrite	0.09419	0.1379	0.225	0.35122	0.4	0.565401	0.6779
地殼 1	207.469	413.79	375	81.30081	142.86	135.0211	109.5
地殼 2	141.079	206.9	225	69.10569	121.43	143.4599	96.618
地殼 3	176.349	331.03	337.5	81.30081	142.86	164.557	107.09
MWD-3/chondrite	200.875	107.44	82.352	155.2913	161.91	129.0446	101.35
MWD-4/chondrite	189.412	106.5	82.725	155.6195	163.44	128.5829	101.21
MWD-5/chondrite	353.206	219.86	173.16	289.2292	311.63	237.0174	178.54
MWD-6/chondrite	432.423	240.92	186.49	271.8023	293.49	228.2398	166.87
MWD-7/chondrite	271.141	265.29	185.5	253.0179	275.54	216.928	155.07
MWD-8/chondrite	167.477	150.01	126.23	177.2998	195.43	141.4093	106.42
Sample ID(ppm)	Pr	Sr	Nd	Zr	Hf	Sm	Eu
CHUR/chondrite	1	1	1	1	1	1	1
Depleted Mantle/chondrite	0.9158	0.83912	1.03426	1.103101	1.1914	1.37255	1.482759
地殼 1	100	50.9642	81.3704	49.09561	49.719	51.634	36.2069
地殼 2	91.579	49.5868	70.6638	33.59173	30.957	39.2157	31.03448
地殼 3	96.842	50.9642	88.8651	42.63566	28.143	46.0784	34.48276
MWD-3/chondrite	81.978	63.2218	69.367	39.89318	36.937	45.9586	41.04527
MWD-4/chondrite	82.81	64.8733	69.1682	39.72435	37.097	45.7066	40.8541
MWD-5/chondrite	137.87	99.4689	110.123	72.00031	62.922	66.9437	54.5894
MWD-6/chondrite	126.66	89.0879	98.7987	74.53813	62.615	61.2282	49.43644
MWD-7/chondrite	115.35	103.553	88.893	68.53908	57.004	53.1407	44.05412
MWD-8/chondrite	83.09	113.403	67.5096	47.30681	41.674	44.7275	39.40839
Sample ID(ppm)	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu
CHUR/chondrite	1	1	1	1	1	1	1
Depleted Mantle/chondrite	1.576642	1.71123	1.85433	1.90813	1.98792	2.04706	2.20472
地殼 1	37.46959	29.4118	23.622	24.735	22.9607	19.4118	19.0157
地殼 2	25.30414	25.1337	24.4094	21.2014	18.1269	16.4706	19.0157
地殼 3	30.17032	32.0856	20.4724	22.9682	21.148	18.8235	19.0157
MWD-3/chondrite	30.94631	24.85	19.8745	16.2796	13.0814	9.2376	8.69394
MWD-4/chondrite	31.53922	25.2648	20.3235	16.1143	12.9206	9.38105	8.52365
MWD-5/chondrite	42.14014	33.115	26.267	21.019	16.8274	11.9377	11.55
MWD-6/chondrite	39.15023	31.4013	24.9941	20.0687	16.7831	12.2936	11.8976
MWD-7/chondrite	33.27735	26.683	20.9797	16.3744	13.3923	9.5497	9.15229
MWD-8/chondrite	29.99672	24.033	19.2002	15.4261	12.6159	8.85442	8.55919



圖十五：馬武督玄武岩樣本（MWD-3~8）微量元素蛛網圖（本圖由第二作者繪製）

伍、討論

一、探討鋯石與玄武岩形成的先後關係並推測形成過程的地質機制

(一) 凤山溪與玄武岩脈

本區玄武岩脈通常分布於地勢較高的區域，經長期風化與侵蝕，其內部所含的鋯石晶體逐漸被釋出並進入鄰近的鳳山溪河流系統。由於鋯石的比重大，相較於其他同粒徑的輕礦物，更容易在河流動能較弱的河段沉積堆積，因此在溪流下游可見其集中分布，鳳山溪的地形特徵正提供了此一搬運與沉積的有利條件。本研究透過重液分離技術，成功自鳳山溪河砂樣本中提取鋯石，進一步提升了這些鋯石可能源自上游玄武岩脈的可能性。

此外，玄武岩屬於火成岩，而火成岩正是鋯石常見的生成環境之一。鋯石是一種耐風化且穩定的礦物，常在火成岩中產出。因此，在缺乏其他明確來源的情況下，初步認為這些鋯石可能與上游唯一的火成岩也就是玄武岩的火成作用有關。這一推測隨後也將結合更多地球化學與年代學的資料加以驗證。

(二) 鎔石與玄武岩形成年代比較

根據陳正宏（1990）在《臺灣之火成岩》中報導，馬武督地區玄武岩的形成年代約為 9.5 百萬年，符合由地質資料整合系統顯示之相對年代（23-5.33 百萬年）然而，本研究通過鈾鉛定年法對鎔石樣本進行分析，結果顯示鎔石的形成年代大多早於 9.5 百萬年。這一年代上的差異，加上鎔石巨晶形成的特殊條件，提供了重要線索來探討鎔石與玄武岩的地質關係。

鎔石巨晶的形成需要較長的結晶時間，通常伴隨緩慢的冷卻速率與穩定的物理化學條件。然而，玄武岩的細密顆粒結構顯示其岩漿冷卻速度較快，這與巨晶的形成條件並不相符。因此，我們推測，馬武督地區的鎔石巨晶並非直接在玄武岩中結晶生成，而是最初形成於比玄武岩更古老的岩石環境。這些鎔石在玄武岩漿的運動或演化過程中被捕獲，進而嵌入玄武岩中。

此推論與文獻中的相關研究相一致。顏滄波（1957）指出，玄武岩中的鎔石可能作為捕獲晶體存在於岩漿中，其來源或與比玄武岩更早期的地層相關。而 Takeshi Ichimura（1943）也提到，鎔石可能在地殼深部的高溫條件下結晶，後來隨岩漿上升被帶入地表的玄武岩中。

綜合形成年代、結晶條件綜合分析以及鎔石的地球化學特徵，可推定馬武督地區的鎔石巨晶主要是玄武岩的捕獲礦物，被鹼性玄武岩漿捕獲後，最終隨玄武岩冷卻而保存下來。這些鎔石反映了玄武岩漿上升過程中與地殼物質的相互作用，而非單純的岩漿結晶過程。未來研究可進一步通過鎔石的微量元素分析及其包裹體特徵，揭示其形成環境與捕獲機制，並探索其對區域性地殼演化歷史的指示意義。

(三) 鎔石與玄武岩來源比較

本研究結果顯示，關西馬武督地區的鹼性玄武岩具有明顯的地殼混染特徵，從其玄武岩稀土元素分布圖（REE pattern）可以看出，該玄武岩的微量元素特徵幾乎與地殼平均成分相同，顯示岩漿在上升過程中經歷了顯著的地殼物質混合。這表明該玄武岩來自上部地函，並在快速結晶後固結成岩。同樣從玄武岩微量元素蛛網圖可以看出，關西鹼性玄武岩的蛛網圖趨勢與地殼標準成分幾乎重疊，表明其元素組

成極為相似。

相較之下，鋯石巨晶的鈾鉛定年結果顯示，其形成年代較玄武岩古老，並且其陰極發光影像（CL）顯示典型的岩漿鋯石特徵，包括震盪環帶（oscillatory zoning）與扇形分帶結構（sector zoning）。這些結構的形成需要較穩定的物理化學條件，通常代表有較長時間的結晶過程。此外，鋯石巨晶的 Th/U 比值（0.65-2.2）遠大於 0.4，這與典型的岩漿鋯石特徵一致，進一步支持其形成於深部岩漿環境。

鋯石的 Hf 同位素分析顯示，其 ε Hf(t) 數值偏正，接近虧損地函（Depleted Mantle）的範圍，顯示其主要來源於地函，而非純地殼熔融物質。然而，相較於玄武岩，鋯石的地殼混染程度較低，說明其形成環境較為穩定，並未受到過多的外來物質影響。

由於玄武岩的結晶速度較快，而鋯石需要較長時間結晶，因此鋯石不太可能是在玄武岩岩漿中直接形成的。綜合這些證據，我們推測馬武督鋯石巨晶可能來自更深層的地函環境，並在隨後的地質演化過程中上升至地殼，最終在玄武岩漿作用期間被捕獲並保存在岩石中。

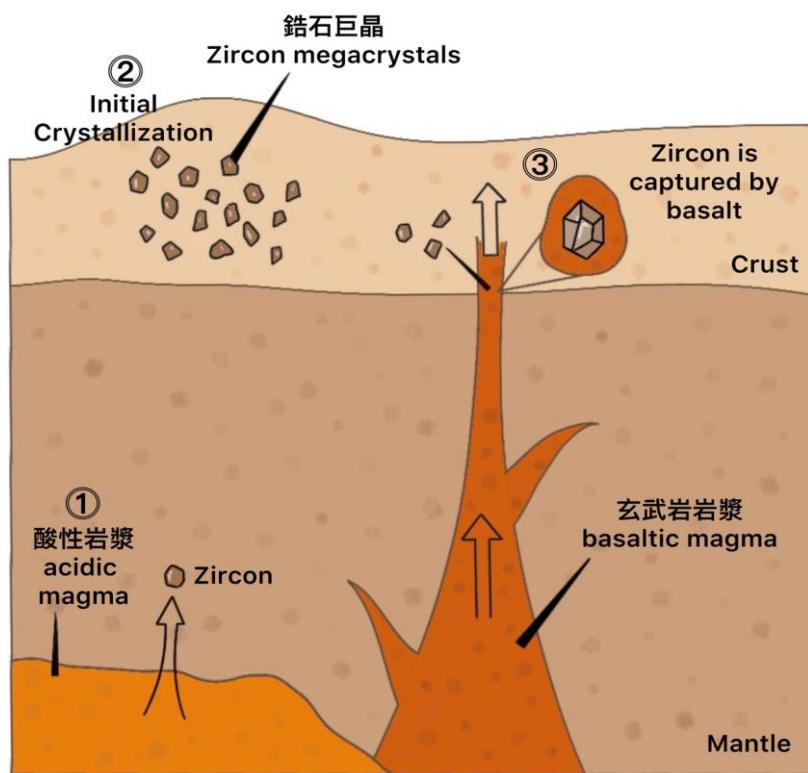
這種捕獲晶（xenocryst）的形成機制可以解釋為：鋯石在深部結晶後，經歷某種構造或岩漿活動被帶入淺部地殼，當玄武岩漿上升時，這些鋯石被岩漿包裹並攜帶至地表。在玄武岩漿冷卻凝固後，鋯石便作為捕獲晶被保留下來，這與其他研究中關於玄武岩捕獲晶的形成機制相符。

陸、結論

一、鳳山溪中發現大顆粒結晶鋯石的有利條件，來自其上游玄武岩岩脈的存在。玄武岩為鋯石上游唯一的火成岩，推測其與下游鋯石之形成密切相關。玄武岩岩脈內部的鋯石，經過風化與侵蝕後，被釋放並沿溪流運輸，使其分布於鳳山溪河岸。

二、經鋯石鈾鉛定年結果顯示，鋯石巨晶的形成年代為 9.0 至 14.2 百萬年之間，早於玄武岩（約 9.5 百萬年）。這表明鋯石巨晶在更古老的地質環境中結晶，被後期上升的鹼性玄武岩漿捕獲。玄武岩的快速冷卻環境與鋯石巨晶需要的緩慢冷卻條件不符，支持鋯石屬於捕獲晶的特性。

三、本研究討論之玄武岩的稀土元素地球化學分析數據與微量元素蛛網圖顯示其與地殼平均成分相似，說明岩漿在上升過程中經歷了顯著的地殼混染。因此，該玄武岩主要來自上部地函，且結晶速度較快。此外，鋯石巨晶的 Th/U 比值（0.65-2.2）與鋯石的鈦同位素分析顯示，其 ϵ Hf(t) 數值偏正，接近虧損地函（Depleted Mantle）的數值，顯示其岩漿來源雖有地殼的訊號，但仍以地函為主。這些證據支持鋯石來自較深部的地函環境，經歷長時間結晶後，最終被上升的玄武岩漿捕獲並保存在岩石中（圖十六）。



圖十六：鋯石巨晶生成模式示意圖（本圖由第一作者繪製）

四、未來展望

本研究對馬武督地區鋯石巨晶的年代與來源進行了詳細探討，為玄武岩漿與捕獲晶相互作用的研究提供了實例支持。未來可結合鋯石包裹體分析、同位素研究及玄武岩漿流動模擬，深入探討鋯石捕獲的動態過程與玄武岩源區特徵。此外，將鋯石巨晶的特徵與其他地區的鋯石進行比較，或可揭示更多台灣及周邊地區地殼演化的共同特性。

在應用層面，鋯石的生成與保存機制研究對於理解稀有礦物的形成條件與分布具有重要啟示，未來可將研究成果拓展至資源評估與開發領域。

柒、參考文獻資料

一、顏滄波（1957）。臺灣馬武督的鋯石。

<file:///C:/Users/User/Downloads/%E8%87%BA%E7%81%A3%E9%A6%AC%E6%AD%A6%E7%9D%A3%E7%9A%84%E9%8B%AF%E7%9F%B3.pdf>。

二、Ichimura, T. (1943). *Zircon and Corundum Deposits in the Mabutoku-Mahuku District, Sintiku Prefecture, Taiwan.*

[file:///C:/Users/User/Downloads/Zircon%20And%20Corundum%20Deposits%20In%20The%20Mabutoku-Mahuku-District,%20Sintiku%20Prefecture,%20Taiwan\(1\).pdf](file:///C:/Users/User/Downloads/Zircon%20And%20Corundum%20Deposits%20In%20The%20Mabutoku-Mahuku-District,%20Sintiku%20Prefecture,%20Taiwan(1).pdf).

三、陳正宏（1990）。臺灣之火成岩。第 137 頁。

四、Hu, L., Pan, S., Lu, R., Zheng, J., Dai, H., Guo, A., Yu, L., & Sun, H. (2022). Origin of gem-quality megacrysts in the Cenozoic alkali basalts from the Muling area, northeastern China. *LITHOS*, 422-423, 106720. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106720>

五、Sun, S.-s., & McDonough, W. F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1), 313-345. <https://chooser.crossref.org/?doi=10.1144%2FGSL.SP.1989.042.01.19>

六、Workman, R. K., & Hart, S. R. (2005). Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM). *Earth and Planetary Science Letters*, 231(1), 53-72.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0012821X04007101?via%3Dihub>

七、圖片來源

1. 本圖片或表格由作者親自拍攝或製作
2. 本圖片由指導老師協助拍攝或製作
3. 本圖片引自地質資料整合查詢系統，並由作者加註，網址

<https://geomap.gsmma.gov.tw/gwh/gsb97-1/sys8a/t3/index1.cfm>

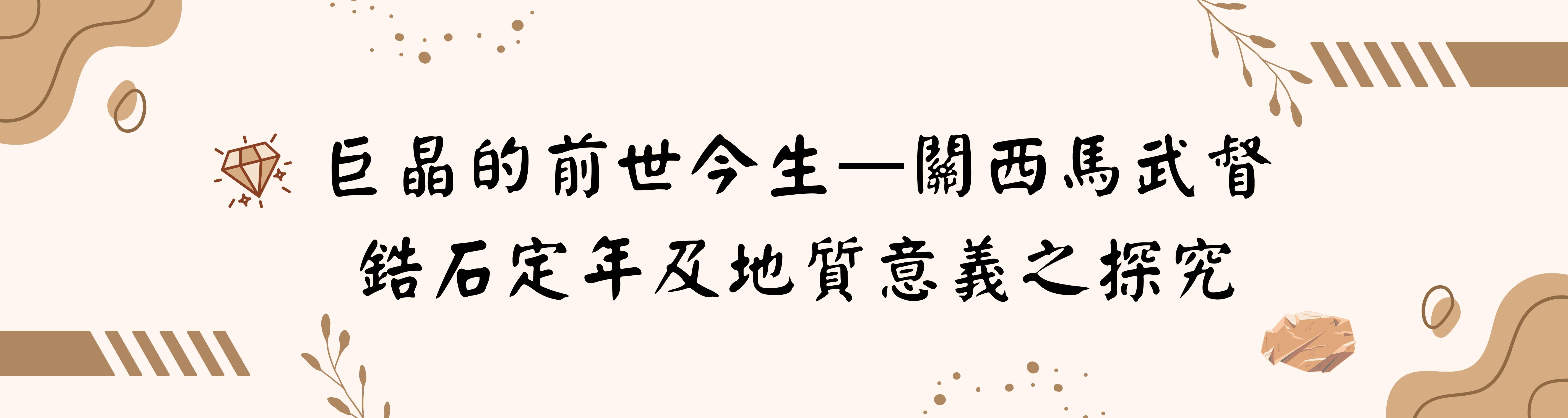
【評語】051911

研究主要探討新竹關西馬武督地區鋯石巨晶的形成年代、生成機制與地質意義。該地區鋯石具有高達 3 至 5 毫米的巨晶，不同於台灣其他地區以微米級為主的鋯石。透過採集與分析樣本，結合玄武岩的微量元素及鋯石的鈦同位素分析，揭示馬武督地區鋯石的來源與形成環境。研究結果顯示，鳳山溪上游的玄武岩脈提供發現鋯石的有利條件，而馬武督鋯石巨晶的生成與長時間結晶、緩慢冷卻速度及捕獲外來晶體的地質條件密切相關。根據定年結果、微量元素蛛網圖、鈦同位素分析結果，推論認為：馬武督鋯石巨晶並非直接在玄武岩中生成，而是被鹼性玄武岩漿捕獲後保存下來。本研究加深對鋯石在玄武岩中形成機制的理解，對此區地質演化研究提供一個良好的解釋機制。

研究可照相攝影採樣地區之地形地貌，以支持其研究成果與結論。從前人研究、文章目標、研究方法至討論與結論，都有完整且詳細的論述。從鋯石與玄武岩，進行兩套的地球化學分析，並藉由地化與年代資料，提出簡單的區域演化模型，值得肯定。如果可以強化圖例的說明，圖片的解析度，以及採樣地點的標示，將更具有科研的說服力，例如：圖二與圖三共用一個圖例，

但圖二並無標示；圖六之影像過小；圖十四與圖十五不同組的曲線是否可以選擇不同的色系，以方便進行跨組之間的比較。另外，P15，鑑別為鹼性玄武岩，對應圖十二、圖十三，內文誤植為圖十四。P9 共採集數個泥沙樣本以製做鋯石標靶，研究中可以說明為何僅利用其中三個製做標靶。

作品海報



巨晶的前世今生——關西馬武督 鎔石定年及地質意義之探究

摘要

本研究主要探討新竹關西馬武督地區鋯石巨晶的形成年代、生成機制與地質意義。該地區具有高達3至5毫米的鋯石巨晶，不同於台灣其他地區以微米級為主的鋯石。透過採集與分析樣本，結合玄武岩的微量元素及鋯石的鈦同位素分析，揭示馬武督地區鋯石的來源與形成環境。研究結果顯示，鳳山溪上游的玄武岩脈提供發現鋯石的有利條件，而馬武督鋯石巨晶的生成與長時間結晶、緩慢冷卻速度及捕獲外來晶體的地質條件密切相關。根據定年資料、微量元素蛛網圖、鈦同位素分析等結果，推論馬武督鋯石巨晶並非直接在玄武岩中生成，而是被鹼性玄武岩漿捕獲後保存下來。本研究對鋯石在玄武岩中形成機制的理解與此區地質演化研究提供一個良好的解釋模型。

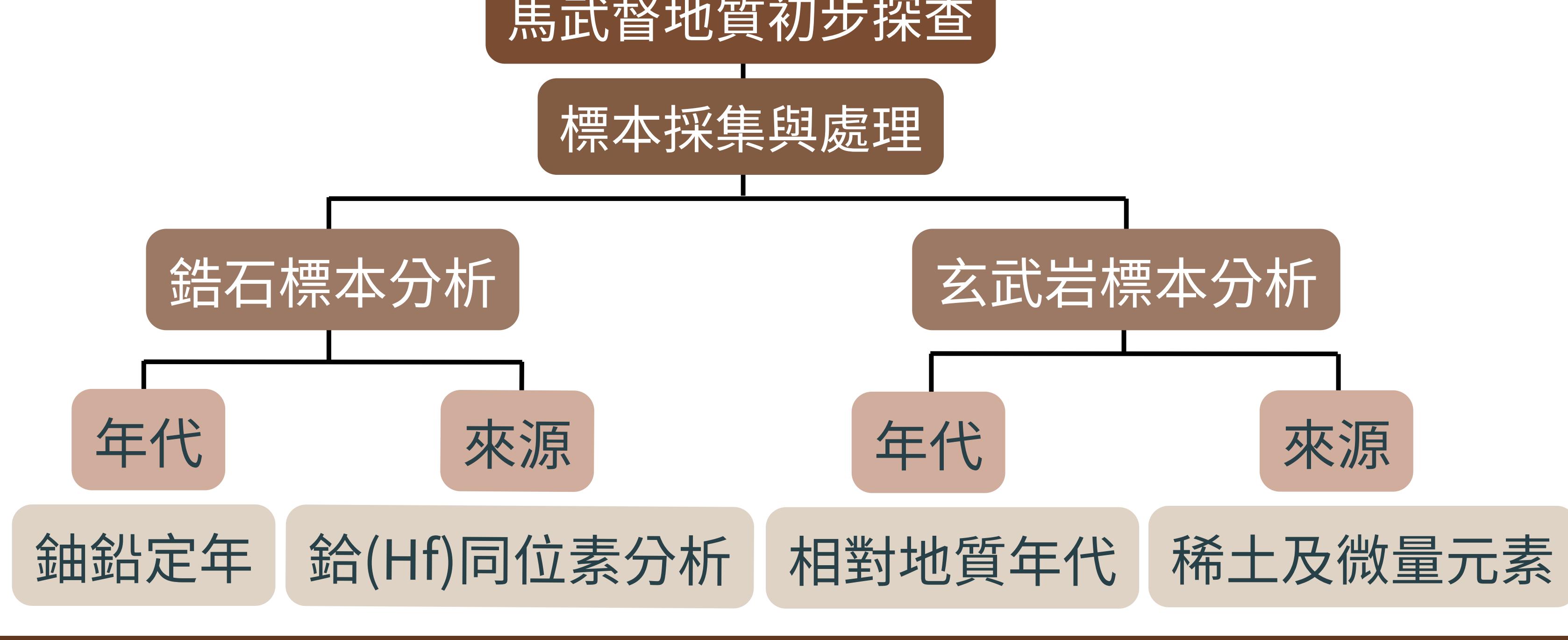
壹、研究動機

隨著科技的進步與天然礦物資源的逐漸減少，人工合成材料的研究與應用越來越受到重視。其中，單晶氧化鋯（俗稱蘇聯鑽）因其與鑽石相似的光學性質，已廣泛用於珠寶業和其他工業領域。在查找資料的閱讀中，我們了解到，單晶氧化鋯的主要金屬元素——鋯元素，與天然鋯石的組成成分密切相關。這一發現不僅引發了我們對鋯石特性與形成機制的濃厚興趣，更促使我們深入探討這一礦物的地質背景及成因。透過文獻查閱，我們發現台灣境內的鋯石晶體大多以微米級尺寸為主，肉眼難以辨識。然而，在新竹關西鎮馬武督地區，卻存在台灣目前已知唯一的鋯石巨晶，其晶體尺寸可達3至5毫米，遠超其他地區的鋯石規模。根據前人文獻，鋯石巨晶最可能源自當地的鹼性玄武岩中，但目前仍缺乏直接證據，亦尚未有關於這些鋯石巨晶形成年代與成因的系統性研究，因此引起我們的好奇心。

貳、研究目的

- 一、整合新竹關西馬武督當地地質及找出最佳採集鋯石晶體的地點。
- 二、定出鋯石之年代並探究其來源及成因。
- 三、檢視馬武督地區玄武岩之年代及成因。
- 四、探討鋯石與玄武岩形成的先後關係並推測形成過程的地質機制。

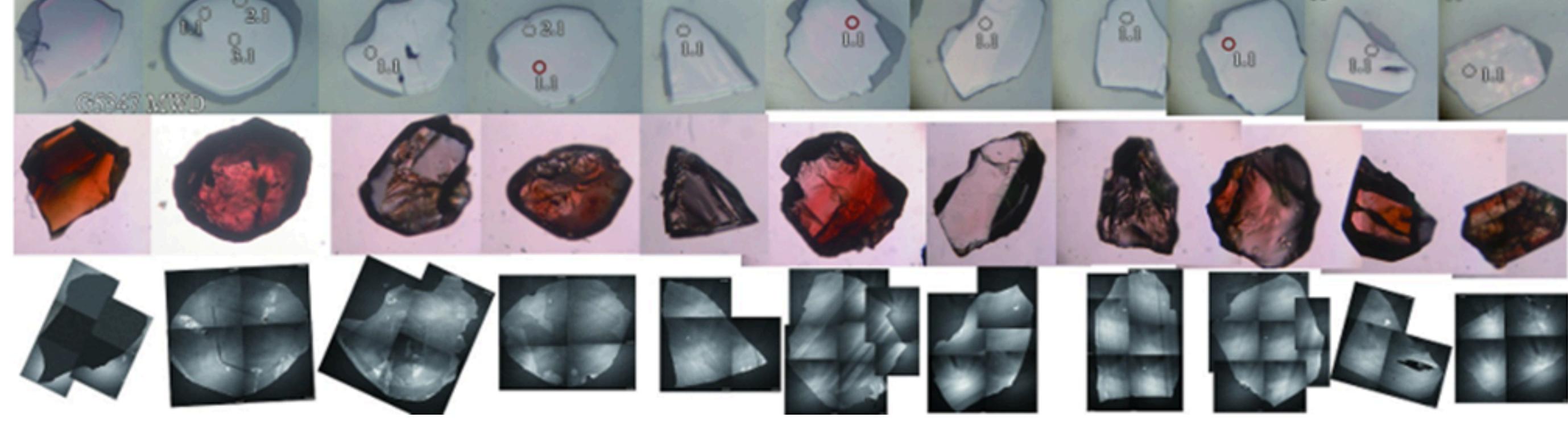
參、研究過程與方法



肆、研究結果

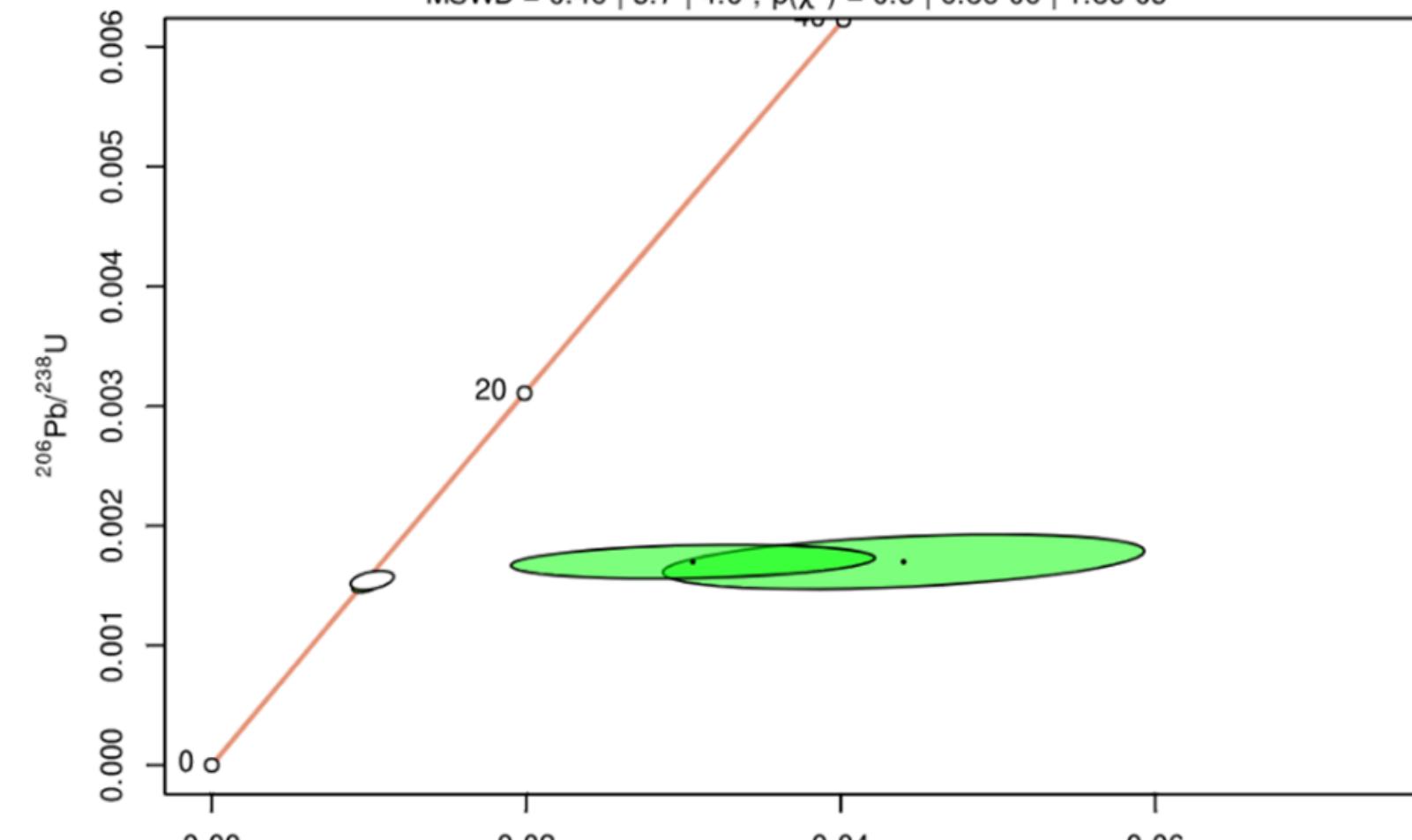
一、定出鋯石之年代並探究其來源及成因

(一) 鋯石之鈾鉛定年結果

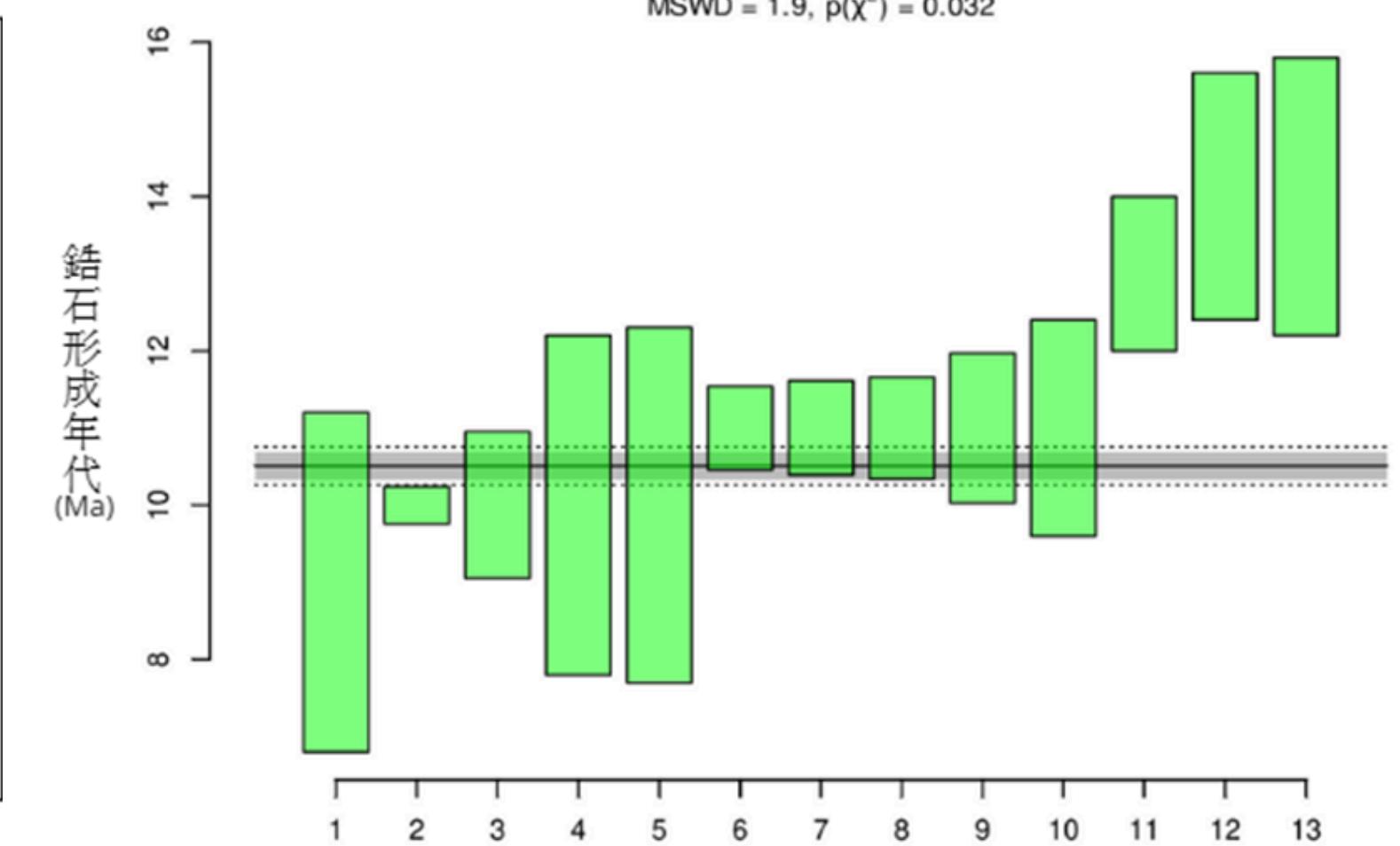


圖一、馬武督鋯石之反射光影像（上）、穿透光影像（中）、掃描式電子顯微鏡陰極發光影像（下）（本圖片由指導老師協助拍攝或製作）

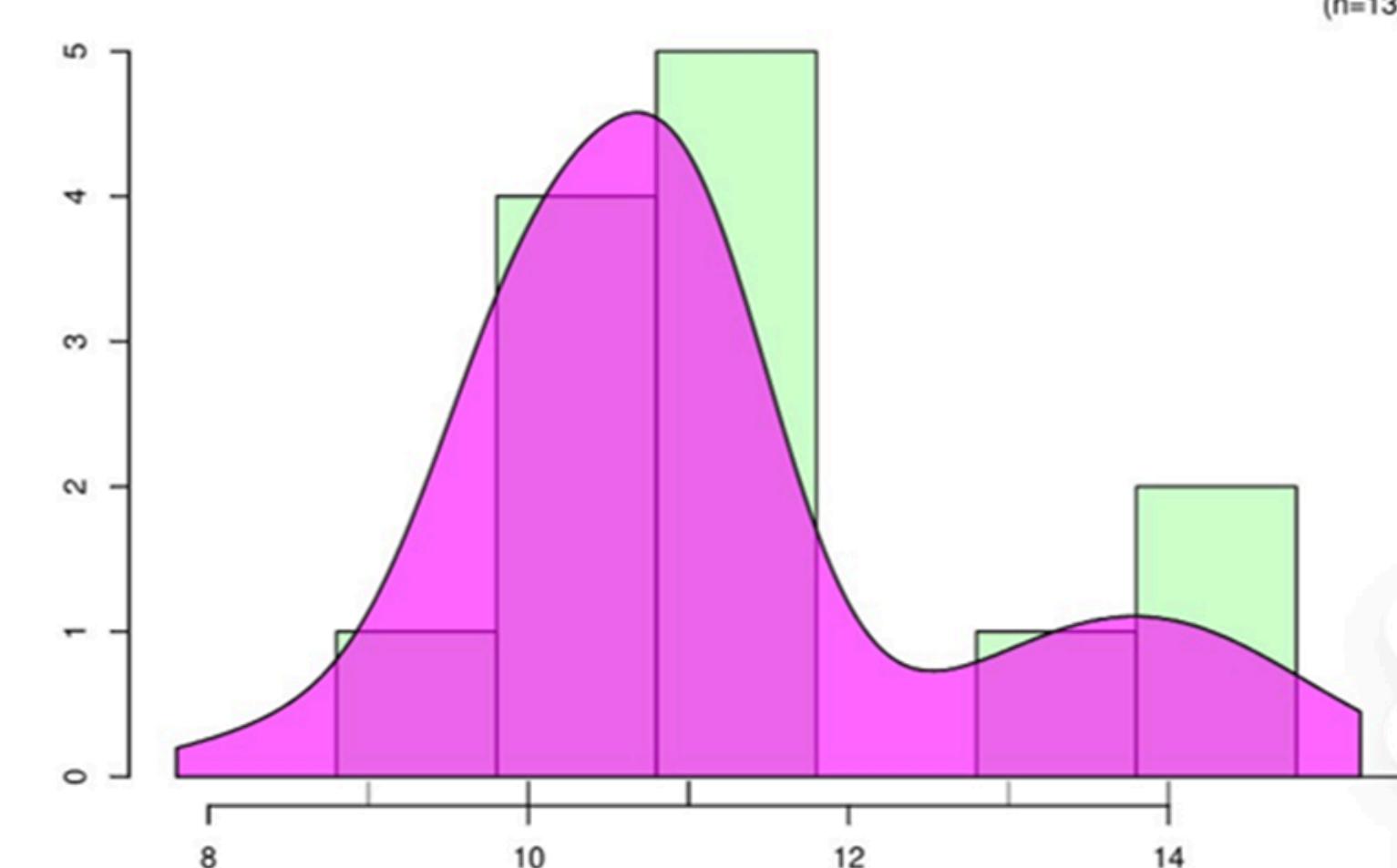
在進行鋯石定年分析前，先拍攝其反射光、穿透光與掃描式電子顯微鏡陰極發光影像（SEM-CL）（圖一），分別用來檢視鋯石表面狀況、內部包裹體及成分變化（如震盪環帶）。由於採集的鋯石晶體較大，需拼接多張影像。編號1礦物因SEM-CL影像全黑，確認並非鋯石（石榴子石）；其餘10顆鋯石共進行13個測點分析，包括編號2鋯石3點、編號4鋯石2點，其他編號各1點。



圖二、馬武督鋯石鈾鉛同位素之諧和圖
(本圖片由作者親自製作)



圖三、馬武督鋯石²⁰⁶Pb/²³⁸U年代之加權平均圖
(本圖片由作者親自製作)

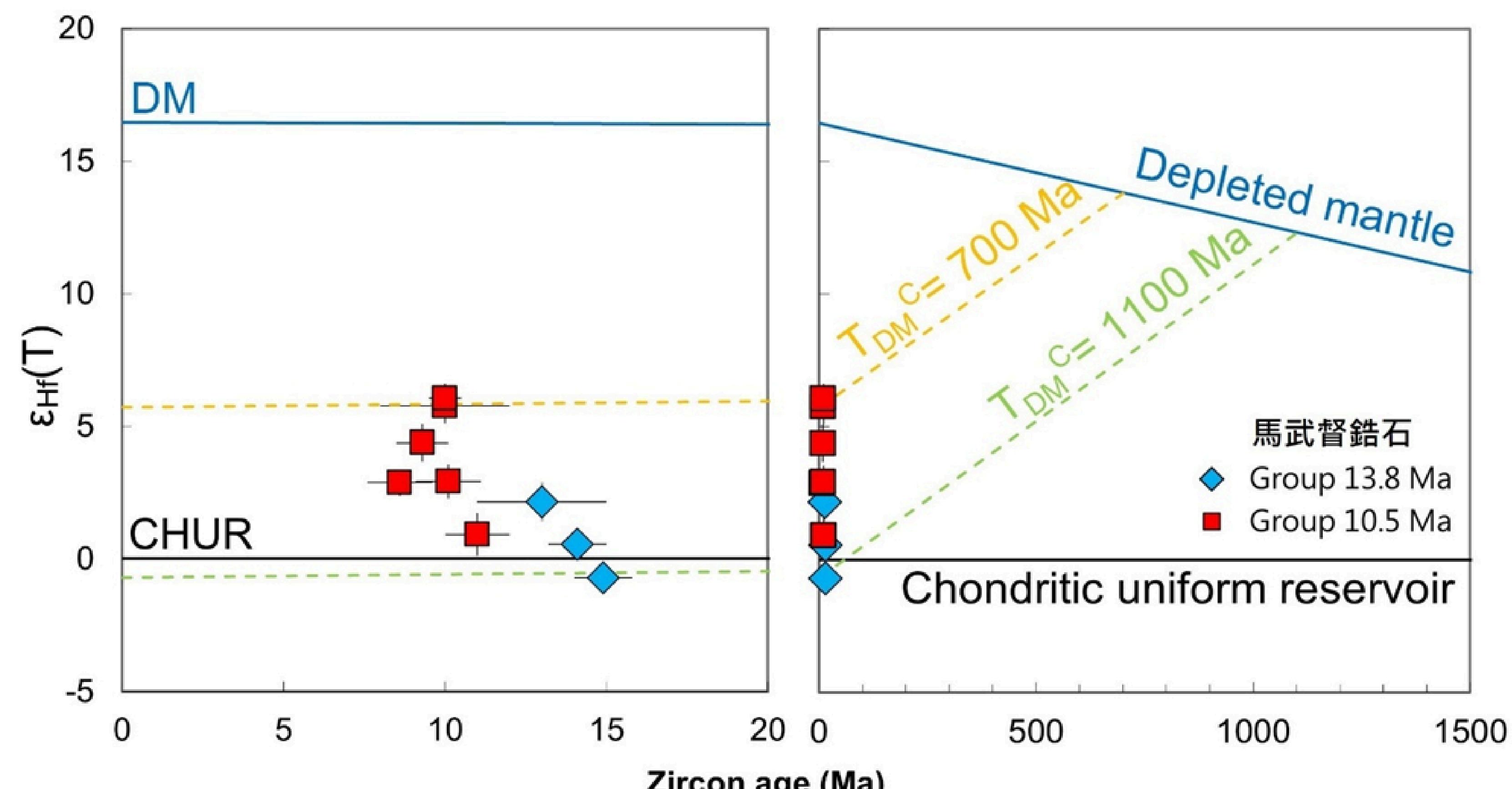


圖四、馬武督鋯石²⁰⁶Pb/²³⁸U年代之頻譜圖
(本圖片由作者親自製作)

完成鋯石鉻鉛定年並將數據經普通鉛校正後，以IsoplotR繪製諧和圖（圖二）。其中兩筆數據落於諧和線，計算出諧和年齡 9.9 ± 0.2 百萬年（Ma）；另兩筆因 ^{207}Pb 含量低，誤差較大，故採用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年代，範圍為 9.0 ± 2.2 至 14.2 ± 1.6 Ma。

計算 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年代加權平均值（圖三），得 10.5 ± 0.2 Ma，MSWD=1.9，顯示數據一致性高。然而部分數據（11-13）稍顯偏老，再透過年代頻譜圖（圖四）與核密度估計（KDE）分析之後，發現有兩個峰值：分別為10.5 Ma與13.8 Ma，因此推測鋯石形成於這兩期的火成事件，皆屬角板山期火山活動。

（二）鋯石之物質來源



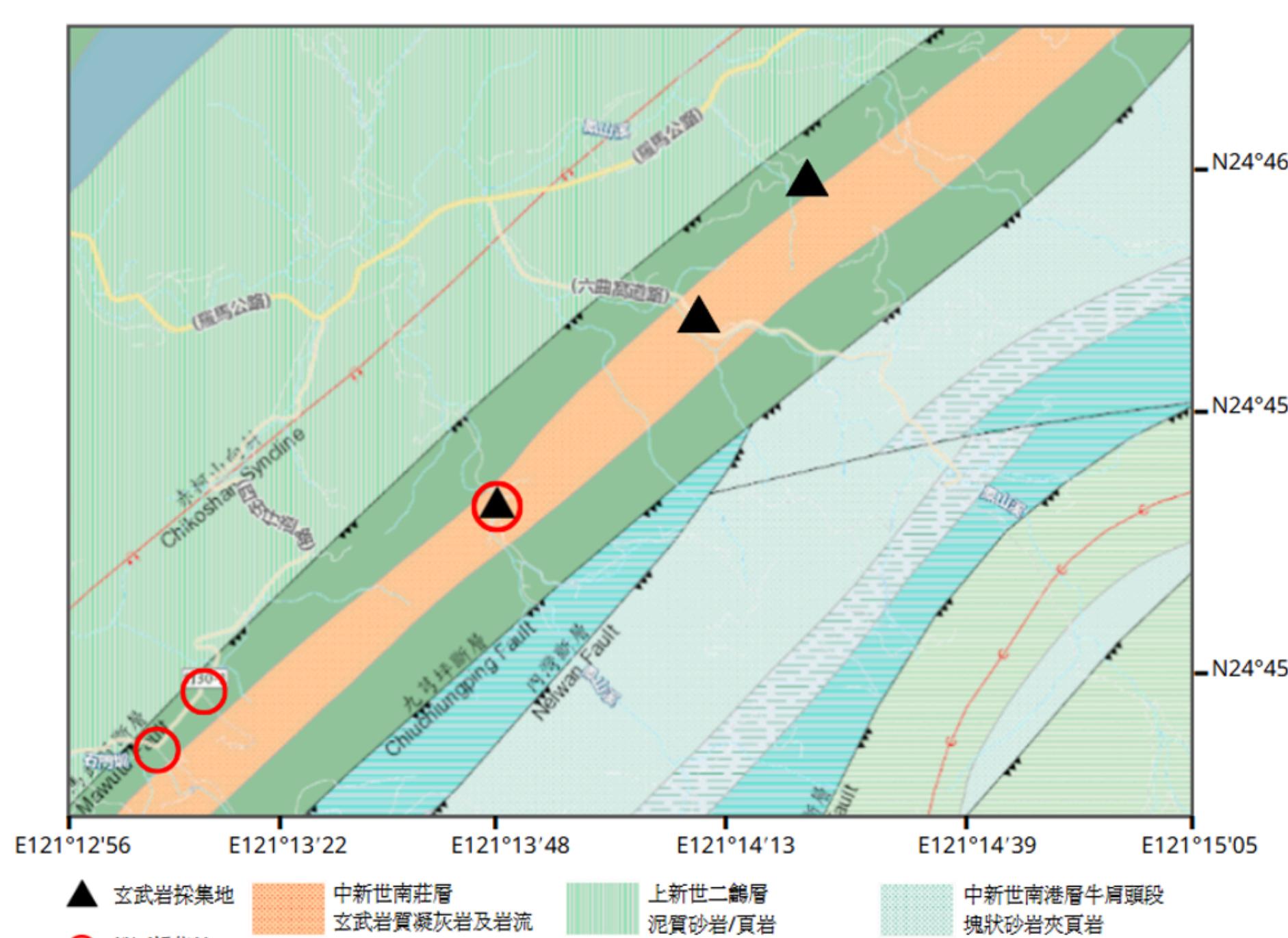
圖五、10.5 百萬年與13.8 百萬年鋯石的鈦同位素演化圖（本圖片由指導老師協助製作）

由於樣本中的鈦同位素之原始比值差異極微，約為 10^{-6} 的量級，故在地球化學研究中，常將其轉換為 ϵ_{Hf} 值以便於比較與解釋。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 數值為正時，表示鋯石具虧損地函成分特性；負值則代表具地殼物質熔融混雜。13.8 百萬年期鋯石（圖中藍點）的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 介在 -0.5 到 2.2 之間，顯示岩漿相對受到較多地殼物質混染；而 10.5 百萬年期鋯石（圖中紅點）的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 介在 1.4 到 6.5 之間，則顯示地函成分較純，地殼混染較少。本研究中，無論是 10.5 Ma 或 13.8 Ma 的樣本，其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 大部分皆為正值，顯示岩漿具虧損地函成分特性，並非完全由地殼物質熔融形成。

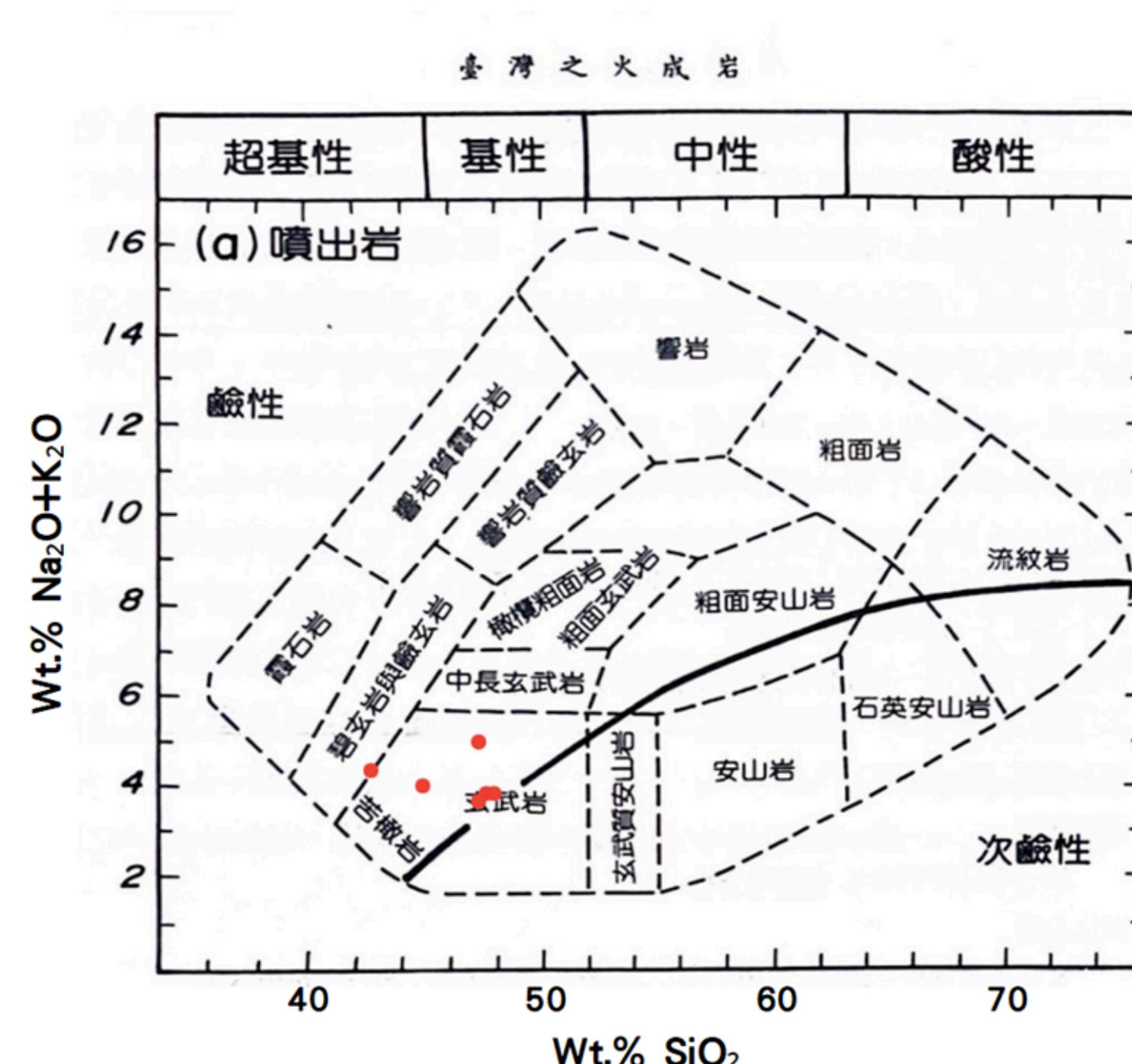
二、檢視馬武督地區玄武岩之年代及成分

（一）形成年代

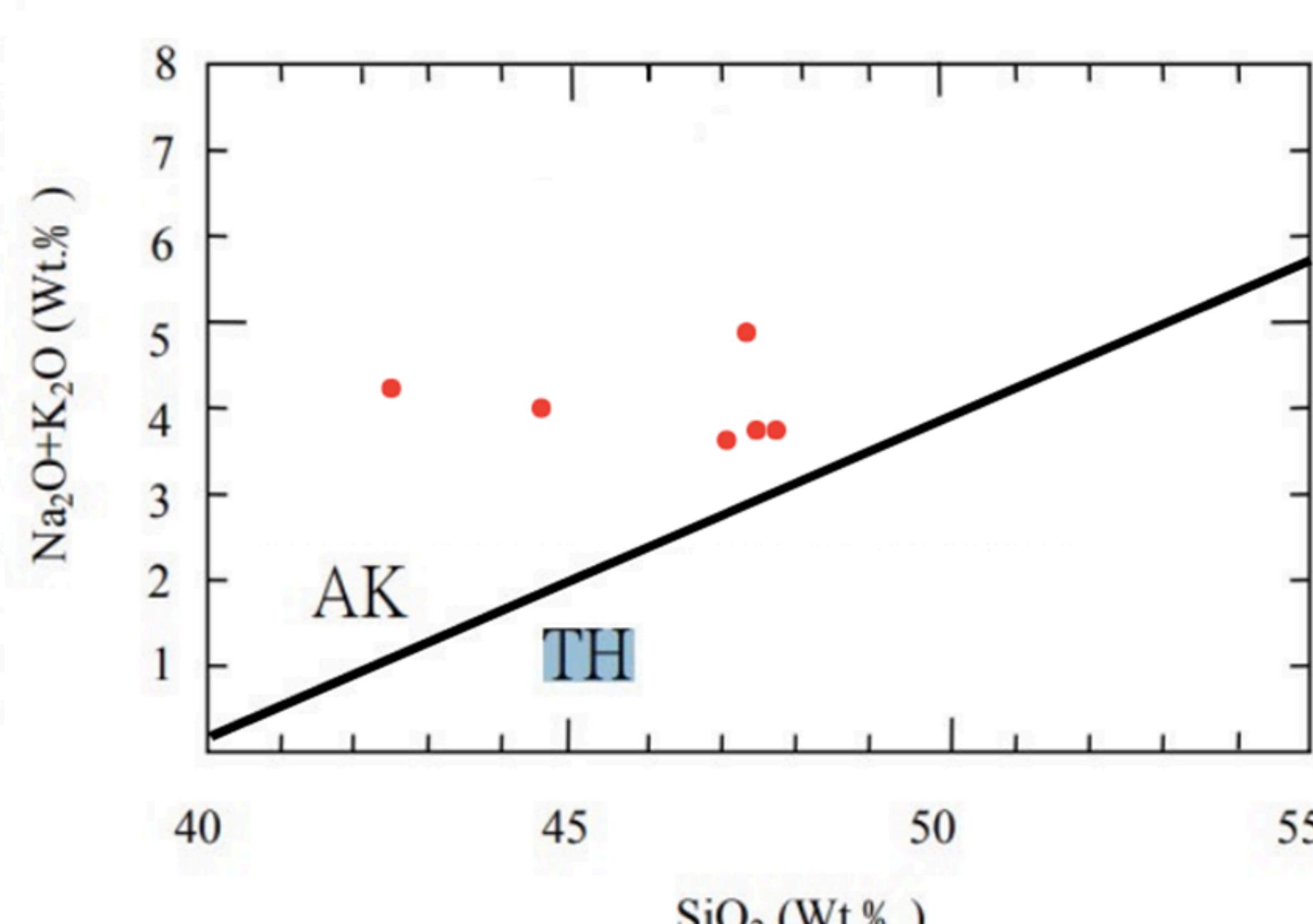
根據地質資料整合系統繪製的地質年代圖（圖六），玄武質凝灰岩及玄武岩岩流位於南莊層的砂岩與頁岩互層中，顯示其形成年代應屬於中新世（23-5.33 Ma）。根據陳正宏（1990）的研究中，利用核飛跡定年法測定關西馬武督地區的玄武質岩年齡，定年結果為 9.5 ± 1.0 Ma，顯示此區玄武岩形成於中新世。



圖六、馬武督地質圖幅及實際採集點
(使用地質資料整合查詢系統所繪製)



圖七、玄武岩主要元素分析與火成岩分類之對應圖（本圖片摘譯自Wilson, 1989，並由作者加註）

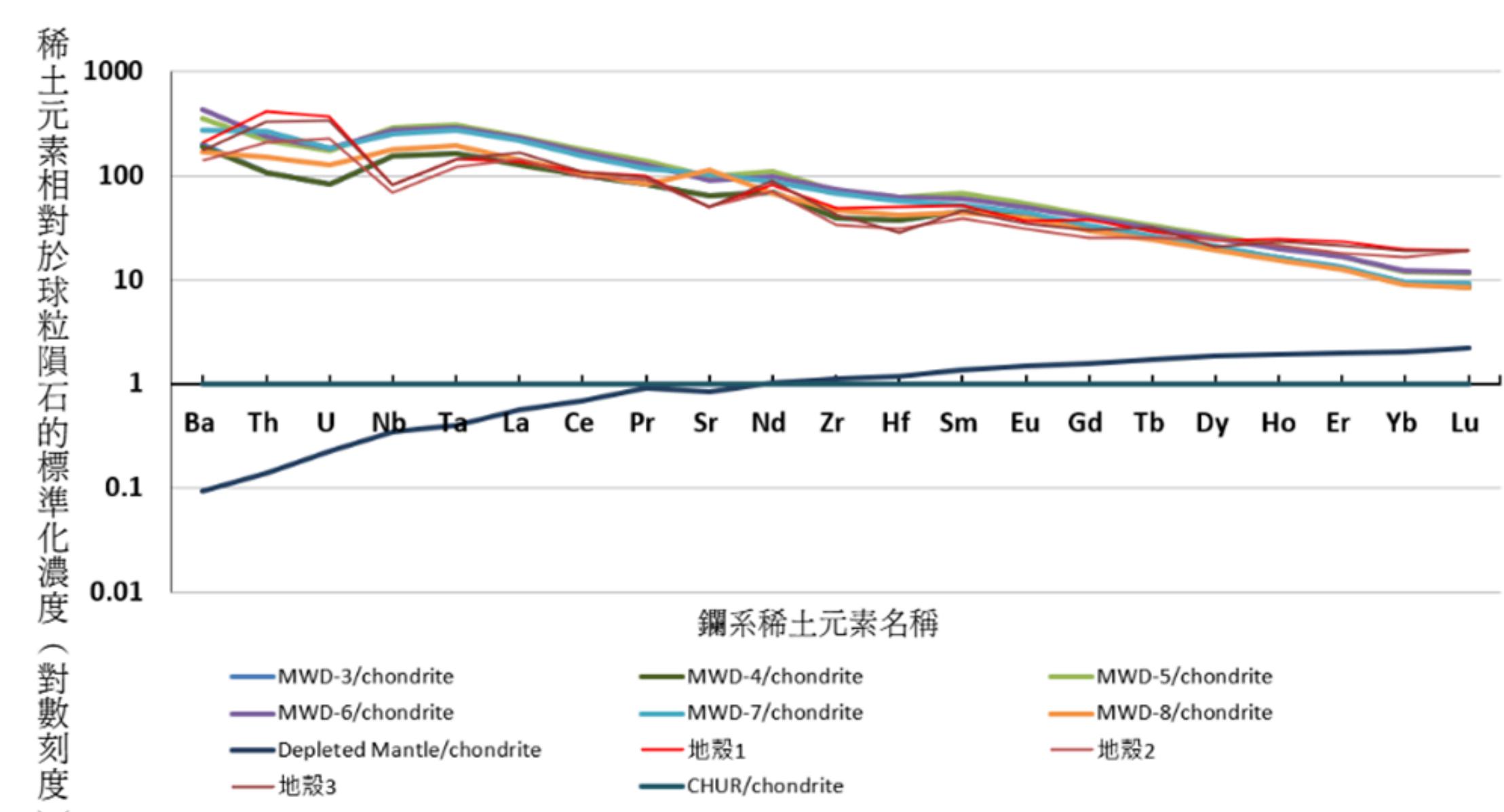


圖八、玄武岩之 SiO_2 對 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 圖
(本圖片摘譯自Wilson, 1989，並由作者加註)

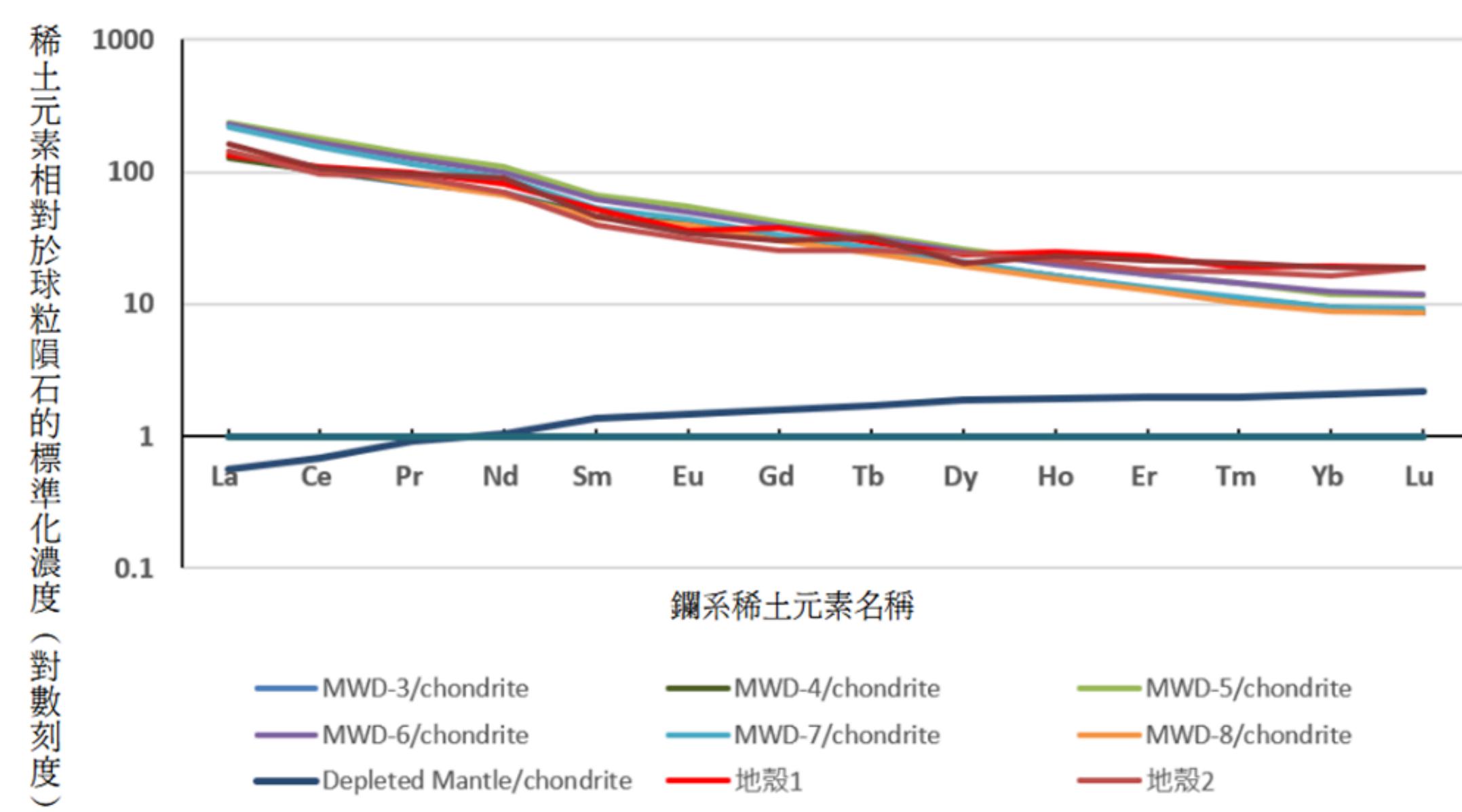
（二）主要元素分析

化學分析顯示玄武岩標本 SiO_2 含量約44%-47%，符合基性玄武岩（45%-52%）及超基性玄武岩（<45%）範圍，將其繪於火成岩分類圖後（圖七），顯示其為偏基性玄武岩。再依據玄武岩 SiO_2 （Wt.%）與 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ （Wt.%）分類標準（圖八），樣本紅點落於鹼性玄武岩（AK）區域，且氧化鈉與氧化鉀之和超過4%，顯示其屬於鹼性玄武岩，未進入亞鹼性玄武岩（TH）範圍。

（三）微量元素分析



圖九、玄武岩稀土元素（Rare Earth Elements）的球粒隕石（chondrite）標準化模式分布圖（本圖片由作者親自製作）



圖十、馬武督玄武岩樣本（MWD-3~8）微量元素蛛網圖（本圖片由作者親自製作）

鑑系稀土元素（圖九）與微量元素分析（圖十）皆顯示本實驗研究之玄武岩標本與地殼標準成分（三段紅色線段）趨勢高度吻合，且和虧損地函（Depleted Mantle）曲線（底部之深藍色線段）差異甚大，顯示關西鹼性玄武岩是有極多地殼混染，並非來自深成岩漿。

五、討論

一、鳳山溪鋯石來源與玄武岩脈之關係

由地質圖可知，馬武督鳳山溪區域的玄武岩脈主要分布於較高地勢，且為鋯石上游唯一的火成岩，推測其與下游鋯石之形成密切相關。經長期風化與侵蝕，玄武岩內部鋯石釋出並進入鳳山溪河流系統。由於鋯石比重大，相較於輕礦物，更易在下游堆積而不被沖走，因此鳳山溪的地形特徵恰提供了有利條件，促成鋯石的沉積與累積。

二、鋯石與玄武岩形成年代比較

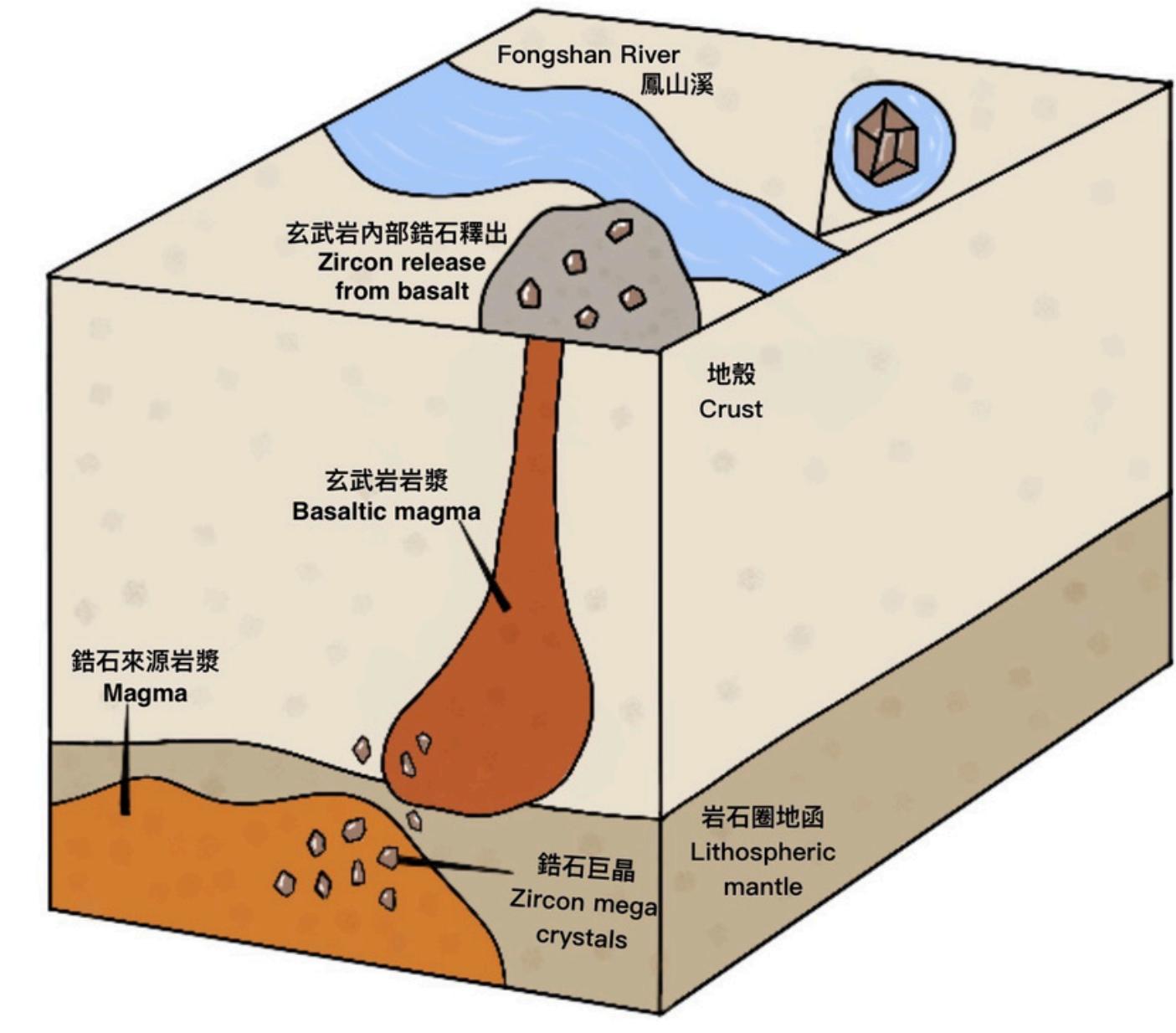
根據陳正宏(1990)的研究，馬武督地區玄武岩形成年代約為 9.5 Ma，符合地質資料顯示的5.33到23 Ma 範圍。然而，本研究的鈾鉛定年法顯示，鋯石形成年代（10.5 Ma及13.8 Ma）大多稍早於 9.5 Ma，推測鋯石巨晶並非在玄武岩中結晶，而是最初形成於更古老的岩石環境，後來被玄武岩漿捕獲並隨其冷卻保存。此推論與顏滄波(1957)文獻中的觀點一致，顯示鋯石巨晶可能來自較早形成的圍岩，並反映了玄武岩漿上升過程中與地殼物質的相互作用。

三、鋯石與玄武岩來源比較

本研究顯示，關西馬武督地區鹼性玄武岩的微量元素分布幾乎與地殼平均成分相同，反映岩漿上升過程中經歷了顯著的地殼物質混合。鋯石的Hf同位素分析顯示其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 數值偏正，主要來源偏向於岩石圈地函。

鋯石巨晶的鈾鉛定年顯示其形成年代較玄武岩古老，且陰極發光影像 (CL) 具有典型的岩漿鋯石特徵，如震盪環帶與扇形分帶結構，這些結構形成需要較長的結晶時間和穩定的物理化學條件，而玄武岩為噴發出地表急速冷卻形成，結晶速度快，因此鋯石不太可能直接在玄武岩岩漿中形成。

綜合以上證據，我們推測馬武督鋯石巨晶的物質來源較偏向岩石圈地函環境中的岩漿，並在後續地質演化過程中上升，最終在地殼結晶並被玄武岩漿捕獲與保留，與捕獲晶 (xenocryst) 的形成機制相符。



圖十一、鋯石巨晶生成模式圖
(本圖片由作者親自製作)

六、結論

- 一、鳳山溪中發現大顆粒結晶鋯石的有利條件，來自其上游玄武岩岩脈的存在。玄武岩岩脈內部的鋯石，經過風化與侵蝕後，被釋放並沿溪流運輸，使其分布於鳳山溪河岸。
- 二、經鈾鉛定年結果顯示鋯石巨晶的形成年代稍早於玄武岩。這表明鋯石巨晶在更古老的地質環境中結晶，被後期上升的鹼性玄武岩漿捕獲，支持鋯石屬於捕獲晶的特性。
- 三、關西玄武岩岩漿來源主要為地殼深部，受張裂作用上升並在其過程中受地殼混染，且玄武岩結晶速度快。鋯石來源為岩石圈地函的岩漿，於下部地殼歷經較長時間形成巨晶後，被上升的玄武岩漿捕獲並保存在岩石中。

四、未來展望

本研究對馬武督地區鋯石巨晶的年代與來源進行詳細探討，為玄武岩漿與捕獲晶相互作用的研究提供了實例支持。未來希望可結合包裹體分析、同位素研究及岩漿流動模擬，深入探討鋯石捕獲機制與玄武岩源區特徵。對臺灣中新世中晚期火成作用的時空分布進行比較，並探討其岩漿成因與演化過程，將有助於深入理解臺灣地體構造的形成歷史與地殼演化機制。值得注意的是，馬武督地區河床沉積物中亦發現藍寶石，此為臺灣罕見的寶石礦物，其成因推測與鋯石巨晶相似，均與鹼性玄武岩漿捕獲作用有關，深具岩石學及礦物成因之研究價值。

七、參考文獻

- 1.陳正宏 (1990)。臺灣之火成岩。經濟部中央地質調查所出版，共137頁。
- 2.Hu, L., Pan, S., Lu, R., Zheng, J., Dai, H., Guo, A., Yu, L., & Sun, H. (2022). Origin of gem-quality megacrysts in the Cenozoic alkali basalts from the Muling area, northeastern China. LITHOS, 422-423, 106720.
- 3.Ichimura, T. (1943). Zircon and Corundum Deposits in the Mabutoku-Mahuku District, Sintiku Prefecture, Taiwan.
- 4.Sun, S.-s., & McDonough, W. F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications, 42(1), 313-345.
- 5.Workman, R. K., & Hart, S. R. (2005). Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM). Earth and Planetary Science Letters, 231(1), 53-72. 7.7
- 6.Wilson, M. (1989) Igneous petrogenesis: Unwin Hyman, London, 466p.
- 7.Yen, T. (1957). Zircon From Mawutu, Taiwan. The Formosan Science, 11(3), 105–107.