

中華民國第 52 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

高中組 地球科學科

最佳(鄉土)教材獎

040506

關西隕石坑？四寮石成因之探討

學校名稱：國立新竹高級中學

作者： 高二 謝心耘 高二 林岳謙 高二 劉皓宇	指導老師： 林清和 蕭崇毅
-----------------------------------	---------------------

關鍵詞：隕石坑、關西、四寮石

## 摘要

本研究根據前人對關西隕石坑的研究，初步以尋找隕石坑的確切位置出發。透過實地調查並比較地層結構、研究岩石的成分及製作薄片標本，探討關西隕石坑的諸項性質。從一連串的研究結果發現，當初疑似 **Suevite** 的岩石事實上與四寮石十分相近，因此無法當作關西的隕石坑存在的證明，必須尋找其他相關證據以便確認。然而，這些類似 **Suevite** 的岩石，或稱四寮石，僅出現在四寮一事，仍顯是關西地質的獨特性。本研究對此類岩石的成分進行初步的研究與探討，並推論出其可能的成因，讓我們對四寮石為何會出現在此地有更深入的了解。

## 壹、研究動機

全球已經被證實的隕石坑數量並不多，約略 150 個左右。某一次上地科課時我們發現到，由隕石撞擊所產生的能量可以製造出一個異常高溫高壓的區域，進而促使一些較為特殊的地質形成。台灣也有一份科展報告，提到關於新竹關西有類似隕石坑的足跡。從這份報告，我們了解到其隕石坑與一般所知道的狀況有些許差異，因為隕石坑被發現的數量非常少，吸引我們對它產生高度的興趣，因此決定對這個隕石坑，進一步的研究與探討。

此外關西這個區域一直以來都是玩石玩家眼中的重鎮，這顯示此區一定盛產許多產狀特殊的岩石，例如關西的四寮石就相當特別，外觀有些與眾不同，也只有關西這個地區才有，這也吸引了我們想要對四寮石進行更進一步的分析。

本次研究，希望透過野外採集與室內實驗，驗證我們對該隕石坑及其所產生的地質景觀的假設，並能找出造成這些特殊景觀的原因。同時對於先前隕石坑地點，也將進一步透過實地調查、來確認其可能的位置。並探討隕石坑與四寮石的存在之間是否有所相關。

## 貳、研究目的

- 一、循著之前對隕石坑的探勘，尋找撞擊點的可能位置
- 二、探討隕石坑的特性，比較關西隕石坑與其他隕石坑的不同
- 三、探討關西地質的特殊構造與四寮石可能的成因。

## 參、研究工具與設備

筆、紙、砂輪機、各號砂紙、不同顆粒大小金剛砂、複式顯微鏡、偏光顯微鏡、照像機、攝影機、等高線地形圖、GPS 衛星定位系統、電子地圖軟體、電子秤、高斯計、微量天平、振動式磁力機、標本研磨機、標本餅高壓機、X-射線繞射儀、X-射線螢光分析儀。

## 肆、研究過程

一、研究架構流程圖，如圖 4-1：

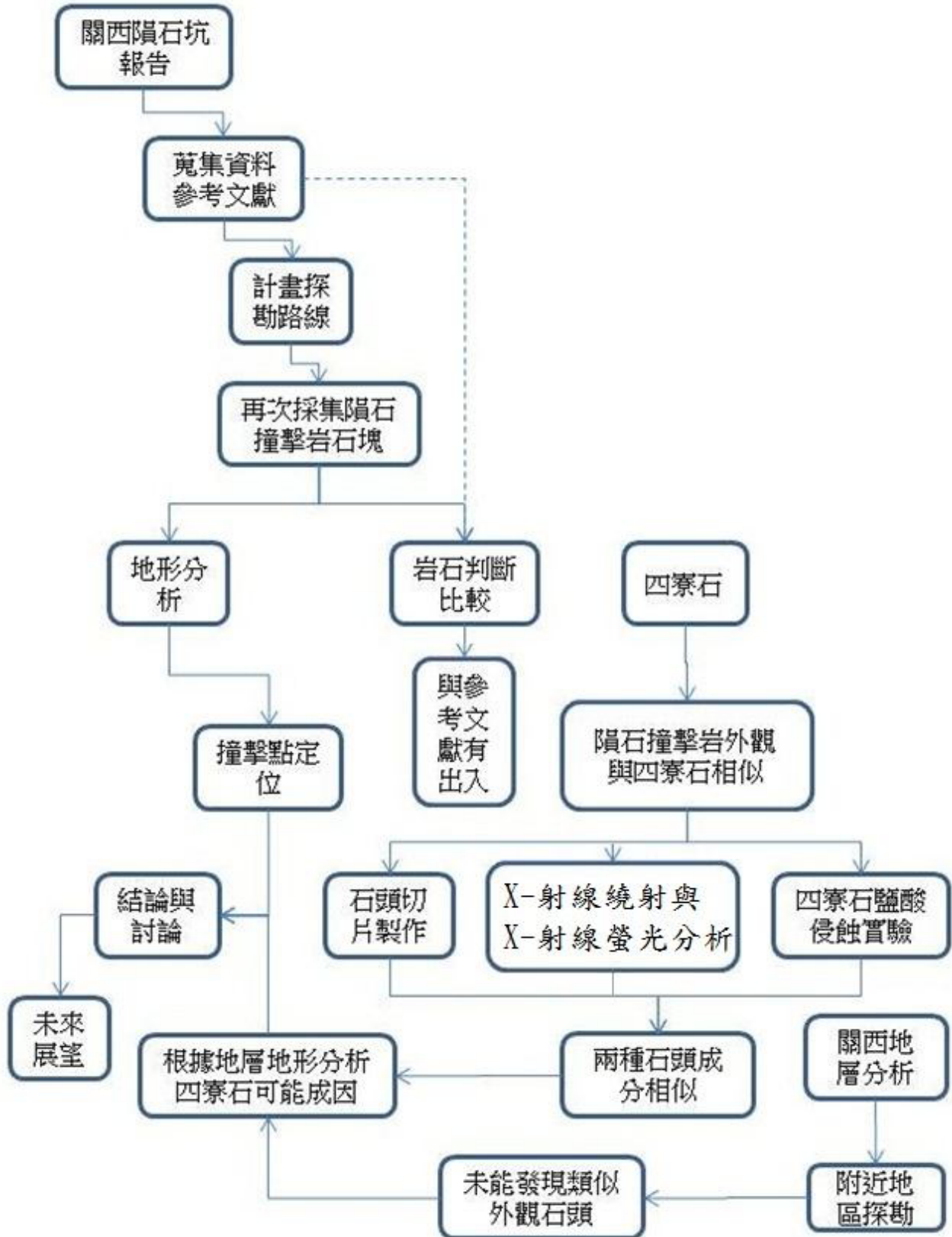


圖 4-1 本研究之架構流程圖

## 二、文獻資料

### (一) 隕石坑：

#### 1. 國際通用的隕石坑證據

國際上用下列這些項目來認定找到的隕石坑，一般隕石坑應該可以發現下列幾種撞擊石英：斯氏石英(**Stishovite**)，科氏石英(**Coesite**)等等，以及 **Suevite** 跟破裂錐 (**Shatter cone**)等現象也是重要的隕石坑證據。

#### 2. 參考的科展報告所提及的證據

##### (1). 撞擊石英

撞擊石英又稱衝撞石英，是因撞擊的震波在石英裡破壞其分子結構，可在顯微鏡下發現石英晶體中的平行線條或氣泡。若存在一組平行線條則稱其為 **PF**，而多組為 **PDFs**。如下圖 4-2 為 **PDFs**

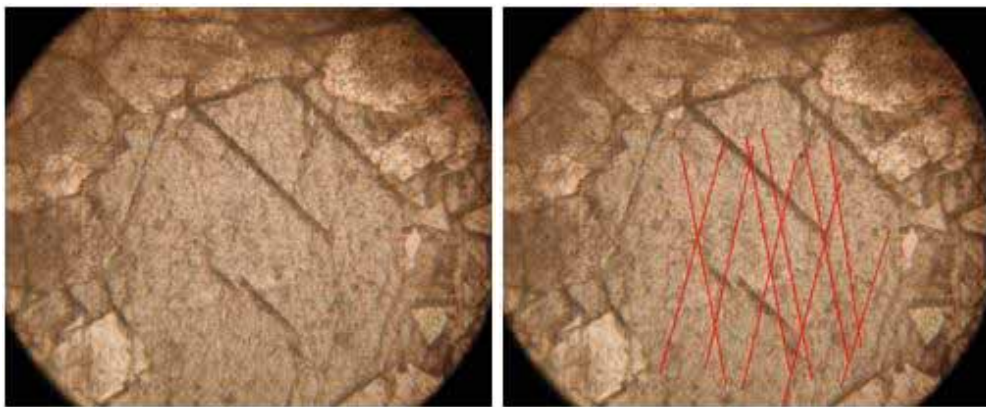


圖 4-2 撞擊石英中的 PDFs

(資料來源：<http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/47/senior/040501>)

##### (2). SUEVITE

隕石坑標準模型中可發現撞擊後隕石坑底有許多熔岩與角礫，這些熔岩混雜角礫凝固而成的角礫岩即為 **Suevite**，如圖 4-3。不同於一般的角礫岩，這些礫岩間的填充物為火成岩而非沉積岩。



圖 4-3 隕石坑底的 Suevite

(資料來源：<http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/47/senior/040501>)

### (3). 科氏、斯氏石英

此類石英是由撞擊的高壓，將石英的分子結構改變後所產生。為一種密度極高的石英。

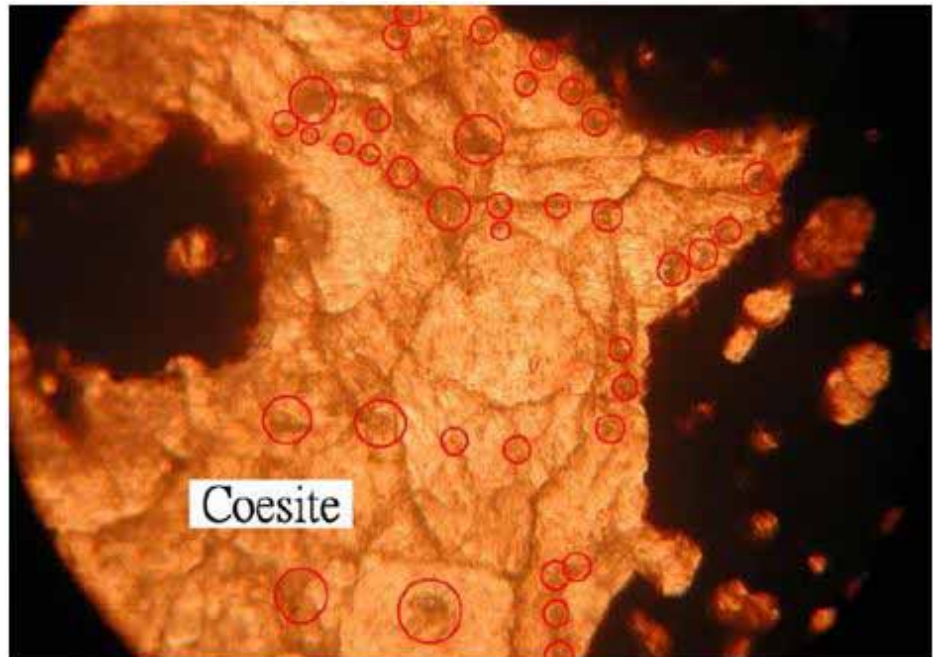


圖 4-4 科氏石英

(資料來源：<http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/47/senior/040501>)



圖 4-5 斯氏石英

(資料來源：<http://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/47/senior/040501>)

### (二) 四寮石：

四寮石盛產於四寮溪，外觀可見粗大的白色礦物，因為平整地切面並拋光後會出現白色的脈狀紋絡，頗有美感，因此民間收藏家常喜歡蒐集四寮石。但是針對四寮石的研究，目前所能蒐集到的資料仍非常有限。

### 三、野外實地調查

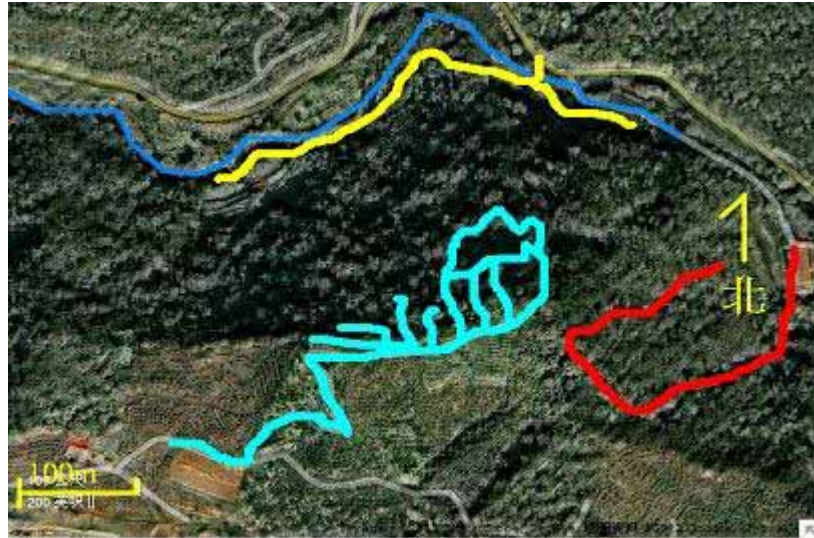


圖 4-6 關西鎮湖肚之野外勘查路線圖

(第一次野外調查：黃色；第二次野外調查：紅色；第三至六次野外調查：藍色)

野外探勘調查的目的在於取得岩石標本與紀錄當地地質特徵，實驗過程中我們多次外出到關西鎮湖肚來取得標本與資料：

#### (一) 第一次調查：(100 年 10 月 9 日)

我們到四寮溪河床勘查，此地有許多鄰近山坡沖刷下來的岩石。河岸與河床都存在著一種質地緻密的岩石，並且都具有鐵磁性，能被我們所攜來的鈹鐵硼磁鐵吸引。他們的表面都具有小孔，顏色雖由淺到深不一，但大多呈褐黑色，並且夾雜一些小顆粒角礫。可能原為角礫岩，但表面經河流侵蝕而變圓滑。這些岩石長度大者達數公尺，小則僅數公分。外觀判斷有可能為 **Suevite**，如下圖 4-7：



圖 4-7 四寮溪河床附近的岩石

#### (二) 第二次調查：(100 年 10 月 15 日)

沿著第一次探勘之河道向上游移動。附近廟宇林立，且許多廟門口都豎立著如同河裡所見到的褐黑色石塊，亦有鐵磁性。如下圖 4-8。而從廟後方前往山頂調查，沿途山壁中岩石具類似受壓條紋，表面已經受到嚴重風化。如圖 4-9：



圖 4-8 四寮溪附近廟宇內的褐黑色石塊，有鐵磁性



圖 4-9 四寮溪附近廟宇之後山山壁

### (三) 第三次調查：(100 年 10 月 29 日)

這次探勘，我們發現從另外一個路徑可以到達隕石坑附近的山上，因此這次開始從另一面沿已開闢的橘子園上去，在橘園中有一種外觀類似前幾次觀察到的岩石，但質地非常疏鬆。以地質槌敲開觀察內部後，發現大小礫岩並非均勻分布，大顆粒在下小顆粒在上，如圖 4-10。此類岩石在越靠近山稜處數量越多。



圖 4-10 橘園內之岩石

### (四) 第四次調查：(100 年 11 月 7 日)

我們來到橘子園的山頂，翻過稜線從另一邊的斜坡下去，由於坡陡，因此我們利用綁在樹腰上的繩子慢慢緩降。與橘園中相同的岩石在此坡面上大量分布，如圖 4-11、4-12，我們採集了標本回實驗室研究。



圖 4-11 山坡上疑似 Suevite 的岩石



圖 4-12 山坡上疑似 Suevite 的岩石

#### (五) 第五次調查：(100 年 11 月 26 日)

同第四次路線再加以延伸。由於第四次採集之標本經回去研究後，發現其存在著細小的孔洞。而在進一步製作岩石薄片後，發現此種岩石的角礫間填充物，看起來像是經火成作用下的產物，我們原先假設它可能就是一—Suevite。因此這次我們在山壁上來回探勘，想了解這些岩石的分布範圍。圖 4-13 為 Suevite 碎片在解剖顯微鏡下 45 倍之照片。

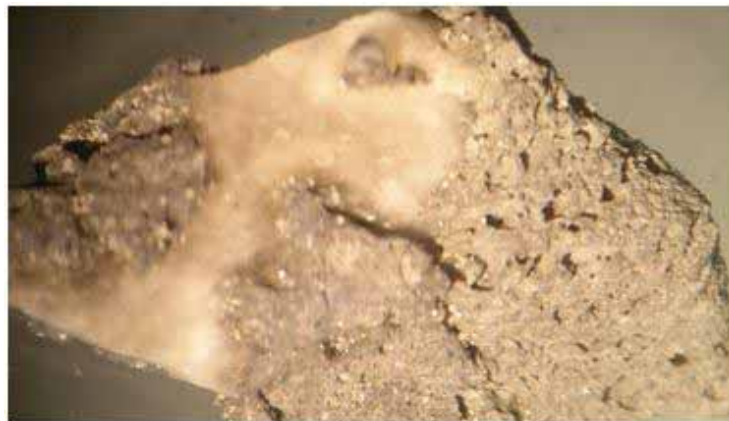


圖 4-13 類似 Suevite 碎片在解剖顯微鏡下 45 倍之照片

#### (六) 第六次調查：(100 年 12 月 4 日)

本次調查路線與第五次相同，但是這回我們以 GPS 定位出採集到岩石的位置。再透過這些數據將採集地一一在地圖上標記出來。以此可以有如同空照般的效果，岩石在山壁上的分布狀態便一目瞭然了，如下圖 4-14。同時，我們更帶了許多標本回實驗室做進一步研究。



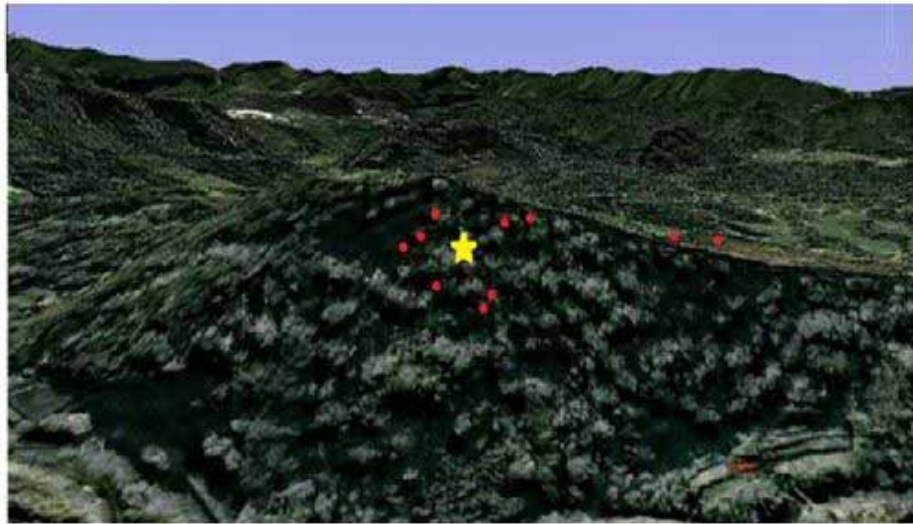


圖 4-14 關西鎮湖肚野外調查的採集點立體分布圖(紅點位置)

(七) 第七次調查：(101 年 02 月 19 日)

在前幾次帶回來的岩石，經分析及與探討之後，似乎與先前認知處有些差異。我們懷疑是否該岩石是由湖肚的地層所產生，而可能不是 **Suevite**。因此前往地質條件相似的附近地區，即同時具火山作用地層與南港層的地區，進行探勘，嘗試找尋類似的岩石。這次是往四寮溪的更上游—七寮、八寮地區推進。然而，上游地區大多出露的是沉積岩，並沒有類似四寮溪所看到的四寮石，如左下圖 4-15。



圖 4-15 四寮溪上游地區的沉積岩



圖 4-16 內灣河內地區的沉積岩

(八) 第八次調查：(101 年 02 月 28 日)

本次目的與第七次相同。我們前往內灣河內地區探勘，其結果與前次相近，附近的岩石多半是屬於沉積岩。如右上圖 4-16。

#### 四、地質圖資料

我們的野外探查位置是在關西鎮的湖肚地區，當地四寮溪邊的山丘。而隕石坑的位置則標記在圖中紅圈處。如下圖 4-17 所示：

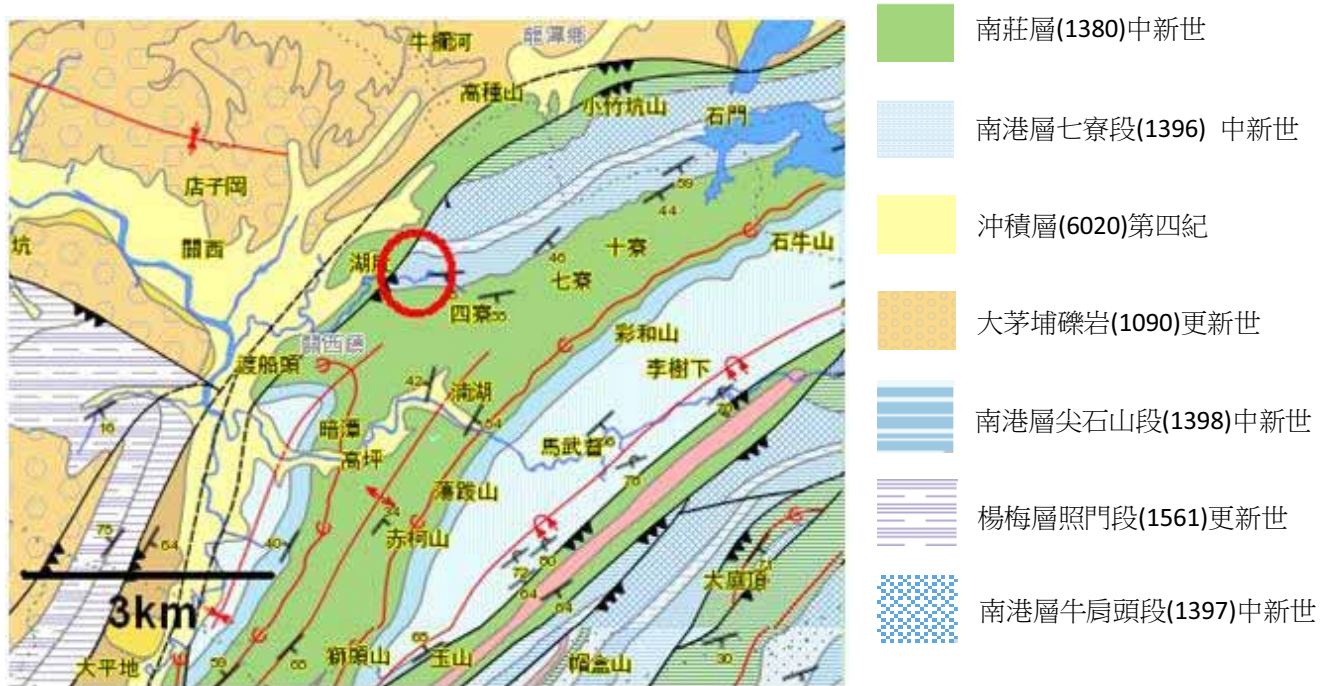


圖 4-17 關西鎮湖肚地區的地質圖

#### 五、利用鹽酸浸泡岩石

由於四寮石(圖 4-18)的白色礦物疑似是石英或方解石，最簡單的驗證方法，就是將之用稀釋的鹽酸浸泡，結果發現白色礦物的確是方解石。而將方解石酸蝕掉後，其外貌類似之前認為是隕石撞擊之後所產生的 Suevite，如圖 4-19。



圖 4-18 酸蝕前的四寮石



圖 4-19 酸蝕後的四寮石

## 六、磁性分析

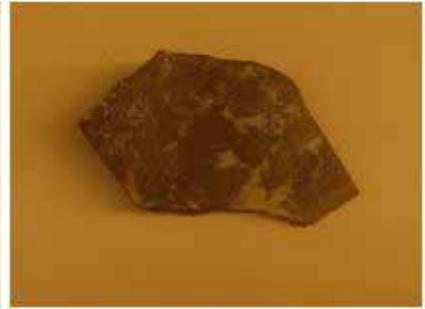
從關西湖肚地區帶回的岩石標本，拿釹鐵硼磁鐵一靠近，即被吸引過去，因此我們想比較它和四寮溪凝灰岩、四寮溪玄武岩的磁性大小。



圖 4-20 凝灰岩圖



4-21 玄武岩圖



4-22 四寮石

## 七、岩石薄片標本製作

### (一) 岩石的前置處理—灌膠

在野外採集到的岩石常因遭到風化而結構鬆散，切割及磨片時常會造成標本的碎裂。以 **AB 膠**(膠水與硬化劑 **2:1** 混合)再加入酌量的二甲苯當溶劑混合後，將岩石標本浸入溶液中，等待 **8 小時**讓它們乾燥。經過灌膠的前置處理後，接下來的磨片過程才不至於太容易碎裂。

### (二) 岩石切片及製作黏著面

灌膠完成後，利用鋸片機切取岩石內部一塊符合載玻片大小的岩石標本，如左下圖 **4-23**：



圖 4-23 用鋸片機將岩石切薄



圖 4-24 將岩石拋光出平整的光滑面

### (三) 岩石標本拋光

以磨石機把標本上殘留的 **AB 膠**磨去，再持續進行拋光步驟，製造出一個光滑平面，以利於標本與玻片間的黏著，如右上圖 **4-24**。

#### (四) 超音波震盪

將標本放入超音波震盪器中除去雜質和岩屑約 1 分鐘後，再用清水沖洗。

#### (五) 加熱烘乾標本並上加拿大膠

將玻片與岩石放置於加熱台上烘乾並加熱至 100°C，約 30 分鐘，使岩石表面溫度足以融化固態狀的加拿大膠，如左下圖 4-25。



圖 4-25 烘乾岩石與載玻片



圖 4-26 用加拿大膠黏著岩石平整面與載玻片

將標本與玻片均勻塗抹加拿大膠，然後黏合，若有氣泡產生則上下移動玻片趕走氣泡。黏著後將玻片移至陰涼處待其冷卻，並在玻片角落以鑽石筆寫上標本編號，如右上圖 4-26。

#### (六) 玻片薄化

接下來再以磨石機小心地將黏在玻片上的岩石標本均勻磨薄，以手指按壓較厚或不透光的區域，同時需注意不要磨穿標本，直到燈光下可透光的程度為止，此時厚度約剩 100 $\mu$ m，如左下圖 4-27。



圖 4-27 將玻片上的岩石磨到可透光為止



圖 4-28 用 1500 mesh 的金剛砂手動磨片

最後手動地用 1500 號(mesh)的金剛砂將標本磨成厚度約剩 30 $\mu$ m 左右，但實際上須視薄片

的透光性而決定何時可以停止，如右上圖 4-28：

### (七) 蓋上蓋玻片

用刀片刮除玻片邊緣的岩石標本，留下略大於蓋玻片的中間區塊，接著以膏狀加拿大膠均勻塗抹於載玻片及蓋玻片上，在酒精燈上過熱後黏合，這個步驟主要是為了保護薄片，避免日後脫落或碰撞刮傷。黏合後的玻片先以加熱過後的刀片刮除多餘的膏狀加拿大膠，再放入 95%酒精中浸泡，使多餘的膏狀加拿大膠分離。當殘膠都去除之後，薄片的製作即可告一段落。

### (八) 觀察與紀錄

岩石薄片的觀察無法使用一般的解剖顯微鏡或複式顯微鏡，而是必須使用具有偏光效果的偏光顯微鏡。這是因為不同的礦物結晶構造、原子或分子結構都不同，因此在偏光顯微鏡下旋轉載物台，藉由晶形、平行解理或是色澤變化的觀察，而得知與分辨薄片中的礦物種類。

## 八、XRD 與 XRF 分析

### (一) X-射線繞射分析儀(XRD)礦物分析

經過偏光顯微鏡觀察岩石薄片後發現，岩石的風化程度相當高，使得能夠辨認的礦物更為有限。我們已經知道四寮石是以玄武岩質為主的岩石，因此我們將四寮石，以及四寮當地的玄武岩和凝灰岩進行 X-射線繞射分析，以鑑定其所含礦物，其過程如下：

#### 1. 挑取與研磨樣品

在進行 XRD 分析之前須要將樣本研磨成粉，因此需要將樣本擊碎成細小顆粒。其中四寮石因為已經知道白色部分為方解石，在選取細小岩石顆粒時選擇黑灰色部分。接著將岩石放入研鉢中並使用研磨機研磨 30 秒，研磨 2 次，使其粒徑小於  $100\ \mu\text{m}$ ，如下圖 4-29、4-30、4-31 所示：

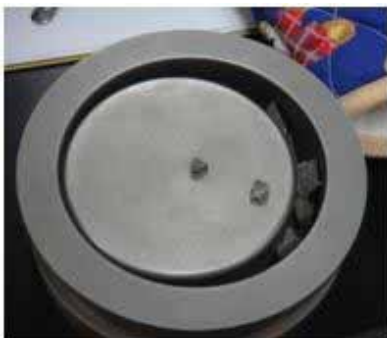


圖 4-29 碎岩放進研鉢中

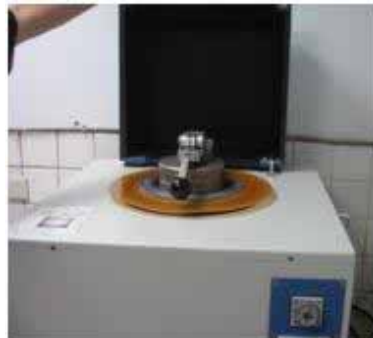


圖 4-30 將研鉢放入研磨機

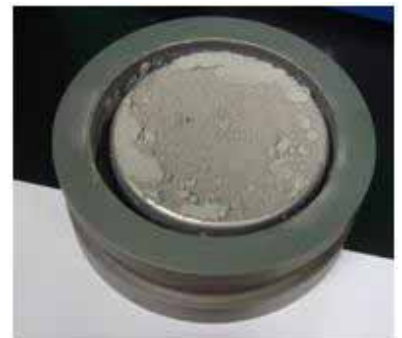


圖 4-31 研磨後的岩石粉末

## 2. 標本製作

取少量粉末置於 XRD 的標本載臺上，並使用玻片將之鋪平。我們的樣品都是用零背景值的載臺，因此不需要將載臺的中央部分全部填滿。由於 XRD 是透過檢測 X 射線的繞射角度判斷礦物種類，因此粉末的平整度十分重要，必須特別注意以減少誤差的產生。如下圖 4-32、4-33：

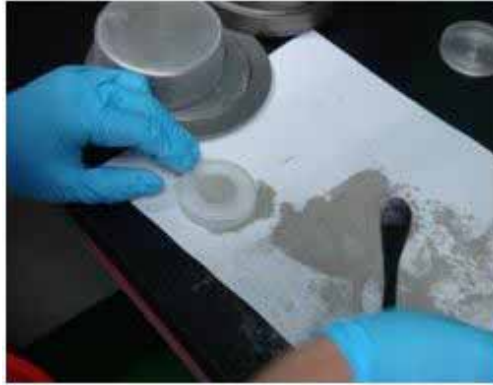


圖 4-32 將研石粉末鋪上載臺

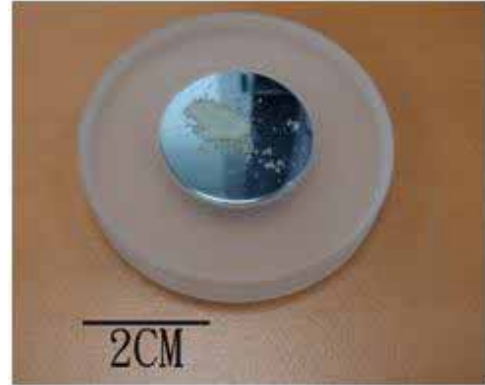


圖 4-33 放入儀器前的標本

## 3. 將標本送入 XRD 分析

製作好標本後，將標本放進 X-射線繞射分析儀中進行檢測。我們設定檢測角度從  $5.00^\circ$  至  $60.00^\circ$ ，解析度為  $0.02^\circ$  且同一個角度的偵測器停留時間為 2 秒鐘，如下圖 4-34、4-35 所示：

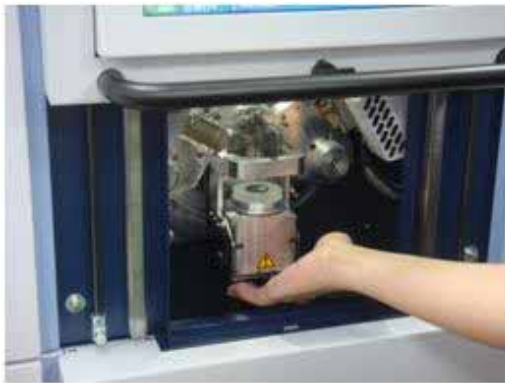


圖 4-34 將樣本送入 XRD 中



圖 4-35 XRD 正在分析

## (二) X 射線螢光元素分析儀(XRF)成分分析

XRD 所得到的結果事實上是礦物的晶格，利用晶格可以推算出一些特定礦物，但多種礦物可能有相同的晶格，因此我們使用 XRF 做成分分析，以確定礦物的種類。其過程如下：

### 1. 標本製作

同樣將岩石研磨成小於  $100\ \mu\text{m}$  的粉末後，取 9 公克粉末，2.7 公克凝固劑，以質量比 10 : 3 放入研磨機中研磨、混合。接著取混合物 10 公克利用高壓製成岩石標本薄餅，過程與成品如下圖 4-36、4-37 所示：



圖 4-36 製作樣本餅的儀器

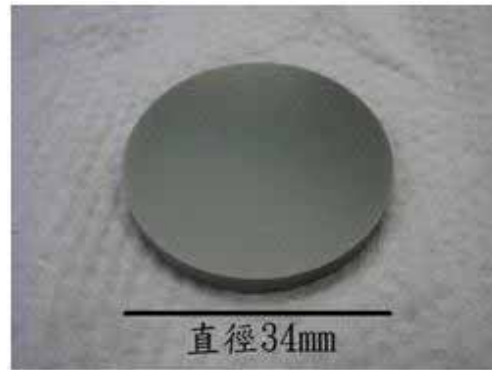


圖 4-37 XRF 的樣本餅

## 2. 將標本送入 XRF 分析

製作好標本後，將標本放進 X-射線螢光元素分析儀中進行檢測。如下圖 4-38、4-39：



圖 4-36 XRF 儀器



圖 4-37 將樣本放入 XRF 的樣本臺

## 伍、研究結果與討論

### 一、撞擊點的討論

我們的野外探查位置是在關西鎮的湖肚鄉，當地四寮溪邊的山上，而隕石坑的位置則標記在圖中黃圈處。如下圖 5-1 所示：



圖 5-1 關西鎮湖肚區域的航照圖

我們在當地找到了肉眼觀察像是 **Suevite** 的岩石，我們將在當地發現的類似岩石座標定位在 3D 衛星影像圖上，用來推測出隕石坑的大略撞擊位置，如下圖 5-2。黃色星號處，圖上的紅色點則為類似 **Suevite** 岩石的分佈。

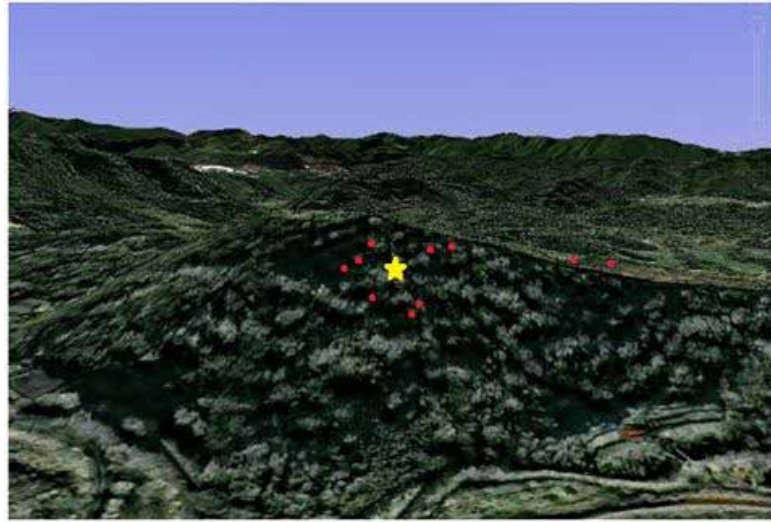


圖 5-2 關西鎮湖肚區域的航照圖

從圖 5-2 中可以看到除了大部份的類似 **Suevite** 岩石 (紅色點)分布在隕石坑邊緣呈環型排列之外，有少部分則出現在山的另外一側。為了掌握隕石坑與異側山坡上岩石之間的空間關係，我們先選了一張關西鎮四寮溪附近具有等高線的地質圖。將撞擊位置描繪到等高線地形圖上，並取一條地形剖面線，如圖 5-3a、5-3b：

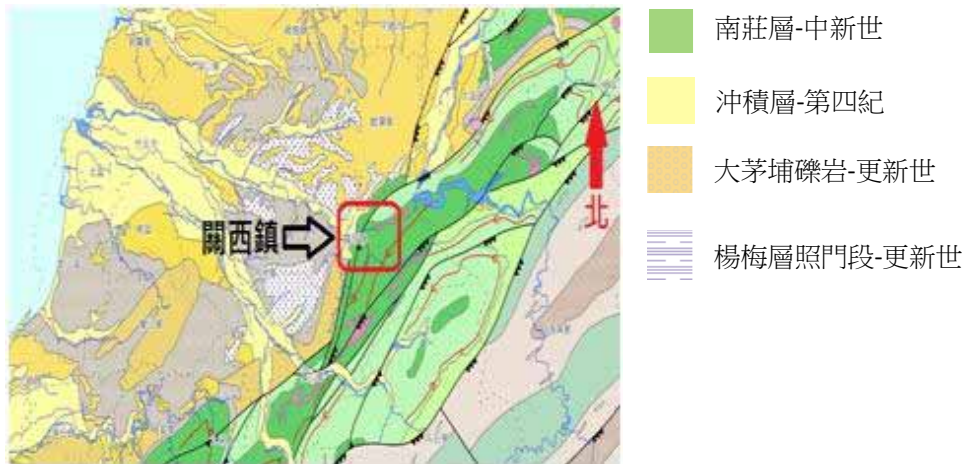


圖 5-3a 關西鎮四寮溪附近的地質圖

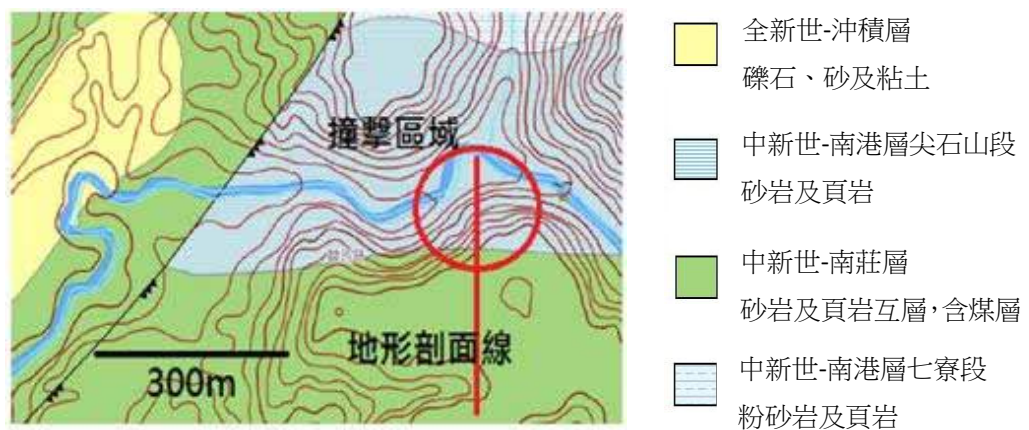




圖 5-3b 關西鎮四寮溪附近的等高線地形圖

把通過隕石撞擊點與異側 Suevite 的地形剖面線用等高線地形圖繪出地形剖面圖，如下圖 5-4 所示，剖面圖黑色星號代表撞擊點，而橘色點代表發現疑似 Suevite 岩石之處，透過圖 5-2、5-3 及圖 5-4，我們就可以藉此思考其可能的撞擊位置及方向。

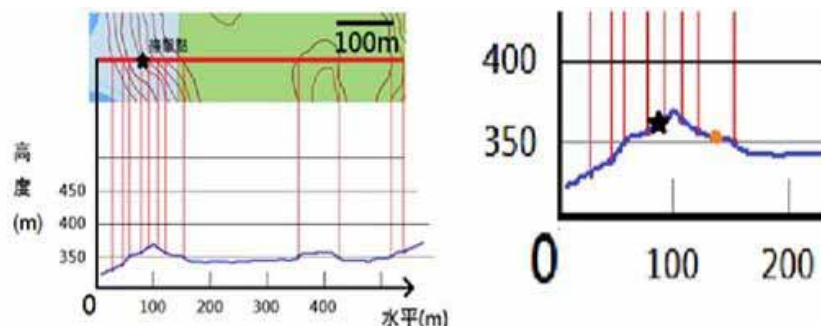


圖 5-4 圖 5-3b 中紅線位置之地形剖面圖

## 二、岩石分析

我們將其中一塊四寮石，用稀釋的鹽酸(0.05M)侵蝕(48 小時)之後，岩石的方解石部分被侵蝕掉，可以看到岩石外觀被改變之後，其形狀類似之前認為是隕石撞擊之後所產生的 Suevite，其結果如下幾張圖。

	酸蝕後的四寮石	當地似乎為 Suevite 的岩石
方解石凹陷	<p>圖 5-5</p>	<p>圖 5-6</p>
氣孔	<p>圖 5-7</p>	<p>圖 5-8</p>

### 三、磁性分析結果

使用高斯計測岩石標本的磁性強度。首先先把探棒歸零，再沿標本各點測出數值，它會受環境影響而數值不停跳動，於是再使用振動式磁力機進行比較，把岩石樣本敲出碎屑後用雙面膠包住放入振動式磁力機，得到 emu 值，其結果如下表：

	高斯計		振動式磁力機		磁性比較
	標本質量(g)	磁性範圍(G)	標本質量(g)	磁性(emu)	
1 凝灰岩 (四寮溪)	833	0.2~0.5	0.018	0.35718	中等
2 玄武岩	796	0.3~0.4	0.005	0.89438	最強
3 溪邊四寮石	9	0.28~0.3	0.021	0.13578	弱

標本各點磁性不同，因此高斯計測出一個最大值與最小值的範圍，玄武岩的磁性範圍（0.3~0.4 高斯）是最大且穩定，可見整塊石頭磁性均質性高；而從溪邊凝灰岩的磁性次之，變動值也較大(0.2~0.5)；而四寮石所測得的磁性最小（0.28~0.3）。

分析振動式磁力機做出的各岩石 emu 值，玄武岩最大(0.89438 emu)，而四寮溪邊撿到的四寮石（0.13578 emu）則磁性最弱，這個結果與高斯計測得的數值相符。四寮石磁性最弱，可能是風化作用使其磁性減弱。

下面的曲線圖，橫軸為磁場強度，縱軸為 emu 值除以質量：

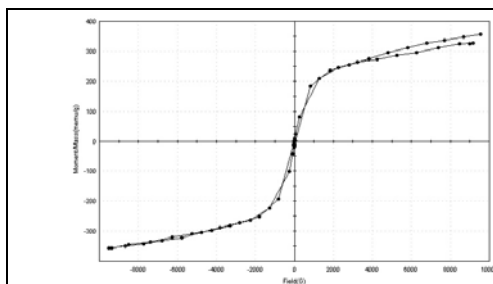


圖 5-9 凝灰岩曲線圖

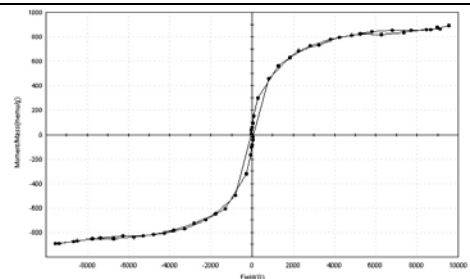


圖 5-10 玄武岩曲線圖

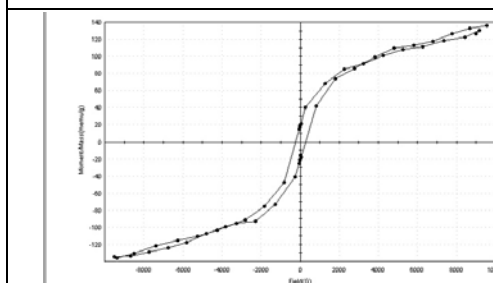



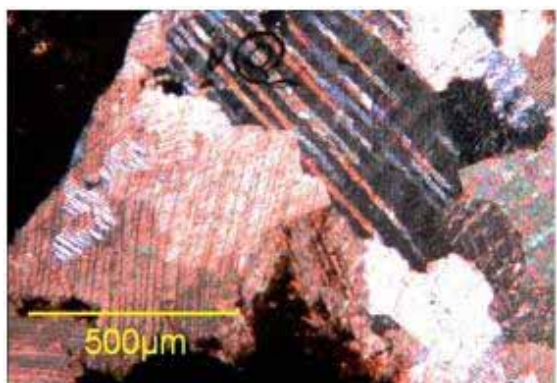


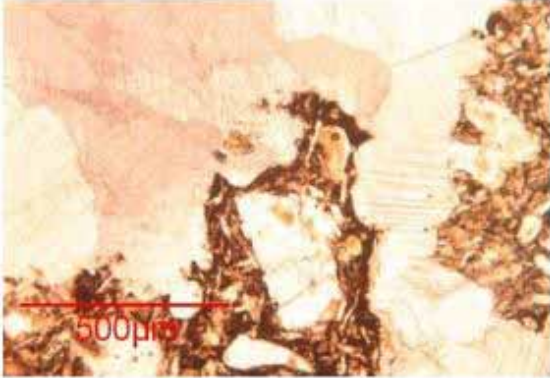


圖 5-11 四寮石曲線圖

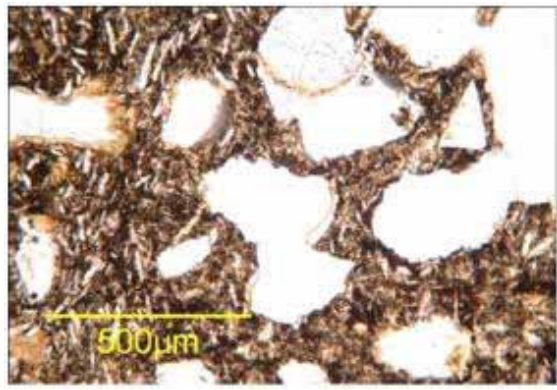
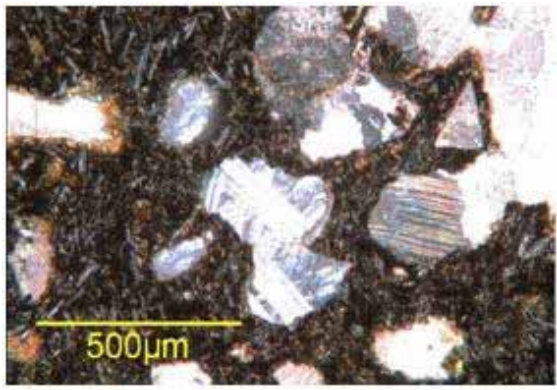
#### 四、磨片結果



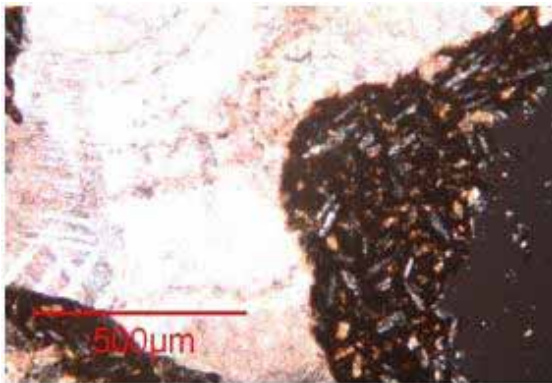
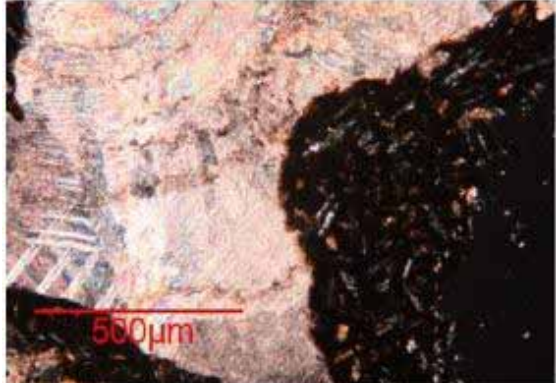
我們將前述疑似 **Suevite** 的岩石與四寮石薄片標本在偏光顯微鏡下，利用正交 (Cross Nicol) 與平行 (Open Nicol) 偏光以確認礦物種類，其結果如下：



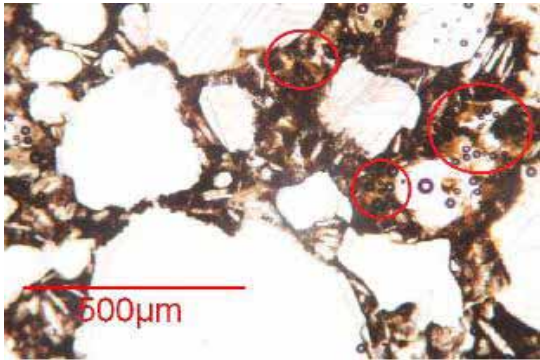
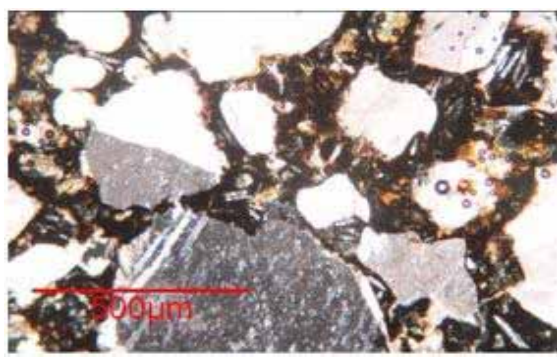
標本名稱	山坡上疑似 <b>Suevite</b> 的岩石 (標本編號：11)		
採集位置	 <p style="text-align: center;">圖 5-12</p>	樣本外觀	 <p style="text-align: center;">圖 5-13</p>
偏光模式	平行偏光(Open Nicol)		正交偏光(Cross Nicol)
顯微照片	 <p style="text-align: center;">圖 5-14</p>	 <p style="text-align: center;">圖 5-15</p>	
標本說明	<p>圖片中，淺白色區域在平行偏光下呈現許多組平行線的構造，其樣貌與 PF、PDFs 十分相似。但在正交偏光下，平行線的顏色會因為標本的旋轉而改變，與 PF、PDFs 的黑色明顯不同。經鑑定後發現此類白色礦物為方解石，平行線條則為方解石的平行解理構造。</p>		

標本名稱	山坡上疑似 Suevite 的岩石 (標本編號：10)		
採集位置	 圖 5-16	樣本外觀	 圖 5-17
偏光模式	平行偏光(Open Nicol)		正交偏光(Cross Nicol)
顯微照片	 圖 5-18	 圖 5-19	
標本說明	此標本同樣可見方解石的平行解理存在，中央深色的部分為黏土礦物。而夾雜在黏土礦物中的長條狀晶體為斜長石與輝石，均屬於基性岩漿中常見的產物。		

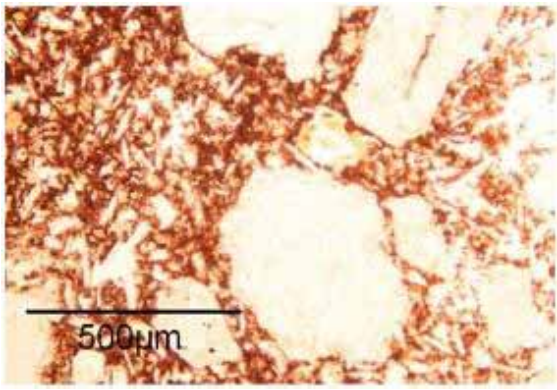
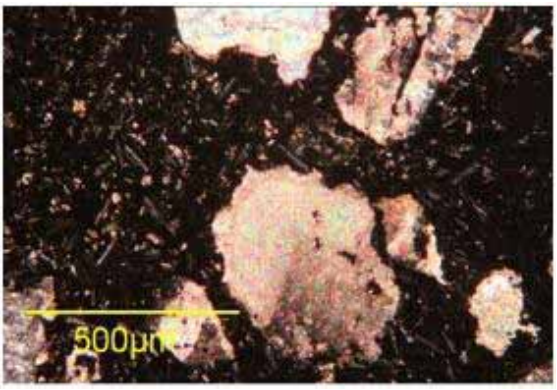
標本名稱	河床邊疑似 Suevite 的岩石 (標本編號：13)		
採集位置	 圖 5-20	樣本外觀	 圖 5-21
偏光模式	平行偏光(Open Nicol)		正交偏光(Cross Nicol)

顯微照片		
	圖 5-22	圖 5-23
標本說明	本圖片的拍攝位置為四寮石中的深色部分，仍然可見到方解石與平行解理構造的存在。標本中的長條狀斜長石、輝石數量相較於前述標本更為豐富。	

標本名稱	山坡上疑似 Suevite 的岩石 (標本編號：12)		
採集位置		樣本外觀	
	圖 5-24		圖 5-25
偏光模式	平行偏光(Open Nicol)		正交偏光(Cross Nicol)
顯微照片			
	圖 5-26	圖 5-27	
標本說明	黏土礦物中包含的斜長石、輝石結晶大小較大，同時部分方解石的平行解理線條間距也較大。照片中的最右邊可以看到顏色非常黯淡的區域。因為不透光，無法進一步以岩石薄片來了解其成分。		

標本名稱	山坡上疑似 Suevite 的岩石 (標本編號：2)	
採集位置	 圖 5-28	 圖 5-29
偏光模式	平行偏光(Open Nicol)	正交偏光(Cross Nicol)
顯微照片	 圖 5-30	 圖 5-31
標本說明	<p>此標本中，方解石的平行解理數量明顯稀少許多，如中下方的方解石為一整塊晶體，當載物臺旋轉時，整塊晶體會同時改變顏色。另外圖中的黏土礦物中可以看見部分已經風化的橄欖石，如圖中紅色圓圈所示。而黏土礦物的其餘部分仍存在許多長條狀斜長石與輝石。</p>	

標本名稱	山坡上疑似 Suevite 的岩石 (標本編號：12)	
採集位置	 圖 5-32	 圖 5-33
偏光模式	平行偏光(Open Nicol)	正交偏光(Cross Nicol)

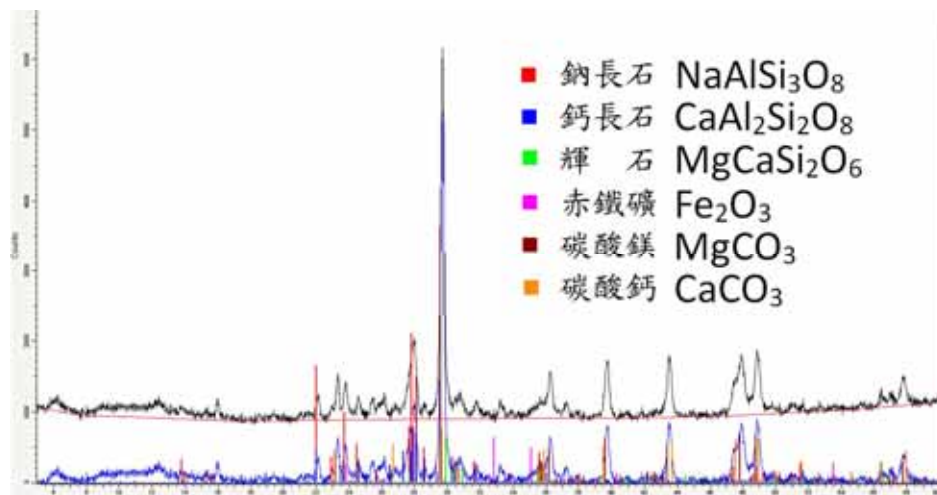
顯微照片	 <p style="text-align: center;">圖 5-34</p>	 <p style="text-align: center;">圖 5-35</p>
標本說明	<p>此標本較為不同，白色區域為石英。在平行偏光下呈現顏色均勻的米黃色，而在正交偏光下，隨著載物臺旋轉，會有波狀消光的現象。石英中並沒有疑似 PF 與 PDFs 的平行條紋存在。</p>	

## 五、X-射線分析

### (一) XRD 分析

#### 1. 四寮石：

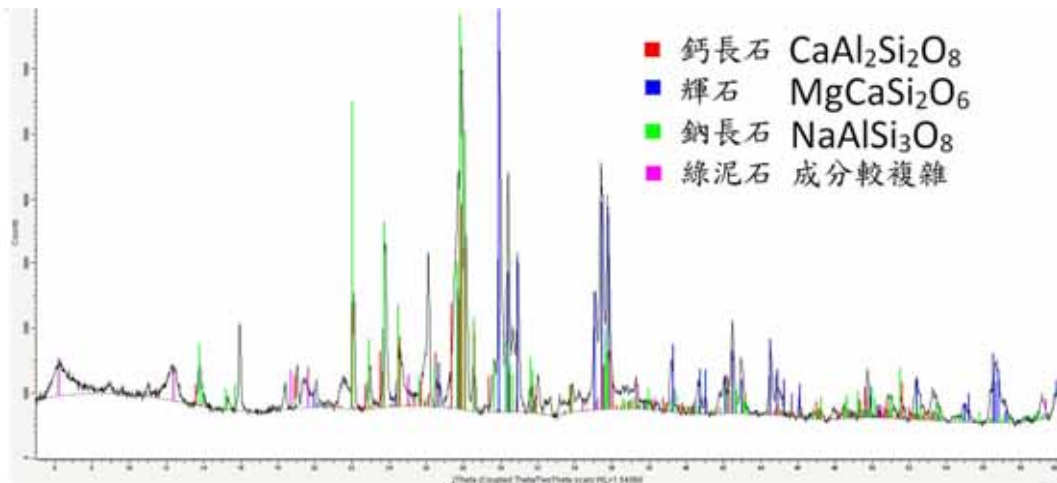
從下圖 5-36，XRD 的頻譜圖中可以看到有許多輝石與斜長石，它們是經常出現在基性火成岩中的礦物，而強度最大的峰值為碳酸鹽類。此結果與岩石薄片在偏光顯微鏡下所得到的結果是十分吻合的。



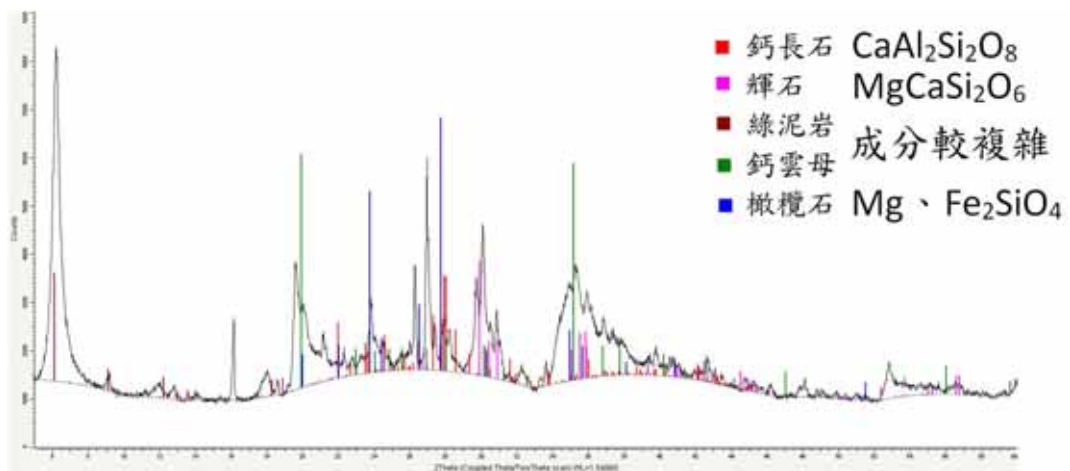
5-36 四寮石 XRD 的頻譜圖

#### 2. 玄武岩與凝灰岩

玄武岩與凝灰岩的分析結果大致與四寮石相同，如下圖 5-37、5-38，唯不同在於兩種岩石含有的碳酸鹽類十分低，不過由於凝灰岩的風化極為嚴重，許多礦物已經受到破壞，因此相較於其他樣本，凝灰岩的 XRD 頻譜圖背景值顯得出乎許多，而峰值處也較低，顯示岩石中的結晶狀況不佳。



5-37 玄武岩 XRD 的頻譜圖



5-38 凝灰岩 XRD 的頻譜圖

## (二) XRF 分析結果

XRF 的分析結果為元素，但是會以氧化態顯示，我們將 XRD 分析出來的礦物套用在某些元素上，設法增加對應率至 100。

### 1. 四寮石：

四寮石中的碳酸鈣含量極為豐富，由下圖 5-39 中的碳酸鈣含量為 45.25% 便可知道，但實際值為較此值為低，因為部分的鈣實際上存在於鈣長石等其他礦物。

元素氧化物	濃度	最低檢量	標準差	元素氧化物	濃度	最低檢量	標準差
SiO <sub>2</sub>	29.00%	109.6 PPM	0.21%	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04%	110.9 PPM	7.70%
CaCO <sub>3</sub>	45.25%	436.5 PPM	0.11%	ZrO <sub>2</sub>	0.04%	18.8 PPM	0.66%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.50%	125.5 PPM	0.35%	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02%	60.4 PPM	4.10%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.14%	99.7 PPM	0.12%	NiO	0.02%	19.1 PPM	2.64%
MgO	2.20%	250.0 PPM	0.64%	Cl	0.01%	43.1 PPM	7.51%
TiO <sub>2</sub>	1.92%	66.4 PPM	0.49%	ZnO	0.01%	14.1 PPM	2.90%
Na <sub>2</sub> O	1.78%	382.8 PPM	1.12%	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	61 PPM	11.6 PPM	3.36%
SO <sub>3</sub>	1.66%	58.5 PPM	0.55%	CuO	55 PPM	16.0 PPM	6.13%
K <sub>2</sub> O	1.50%	36.8 PPM	0.43%	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23 PPM	11.1 PPM	7.05%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.48%	75.6 PPM	1.37%	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21 PPM	12.2 PPM	11.60%
MnO	0.27%	31.4 PPM	0.71%	Rb <sub>2</sub> O	18 PPM	9.9 PPM	7.83%
SrO	0.10%	8.8 PPM	0.36%	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17 PPM	14.5 PPM	16.30%
BaO	0.05%	236.8 PPM	5.14%				
		總和：	100.00%	對應率：	99.71%		

5-39 四寮石 XRF 的分析表



2. 玄武岩與凝灰岩：

兩者的相似度相當高，與四寮石相較之下，凝灰岩與玄武岩的二氧化矽含量明顯高出許多，而碳酸鈣與碳酸鎂的含量則較低，如下圖 5-40、5-41。

元素氧化物	濃度	最低檢量	標準差	元素氧化物	濃度	最低檢量	標準差
SiO2	50.50%	298.6 PPM	0.17%	V2O5	0.05%	111.0 PPM	6.30%
Al2O3	13.37%	164.1 PPM	0.29%	SO3	0.04%	59.4 PPM	4.72%
Fe2O3	11.11%	94.6 PPM	0.09%	Cr2O3	0.03%	57.3 PPM	2.94%
CaO	8.71%	64.4 PPM	0.21%	ZrO2	0.03%	17.4 PPM	0.61%
MgO	8.36%	329.2 PPM	0.32%	NiO	0.03%	19.4 PPM	2.01%
TiO2	2.50%	66.7 PPM	0.39%	ZnO	0.01%	13.9 PPM	2.60%
Na2O	2.45%	455.9 PPM	0.94%	Cl	86 PPM	45.3 PPM	12.10%
K2O	1.54%	37.9 PPM	0.47%	Nb2O5	84 PPM	11.5 PPM	2.48%
P2O5	0.82%	85.0 PPM	1.17%	CuO	77 PPM	15.7 PPM	4.52%
BaO	0.24%	231.3 PPM	1.99%	Y2O3	35 PPM	10.9 PPM	4.67%
MnO	0.14%	30.9 PPM	0.98%	Rb2O	24 PPM	9.4 PPM	6.14%
SrO	0.08%	8.5 PPM	0.42%	Ga2O3	17 PPM	14.6 PPM	16.40%
		總和：	100.00%		對應率：	99.34%	

5-40 玄武岩 XRF 的分析表

元素氧化物	濃度	最低檢量	標準差	元素氧化物	濃度	最低檢量	標準差
SiO2	55.00%	128.7 PPM	0.18%	NiO	0.07%	17.5 PPM	0.98%
MgO	15.22%	323.9 PPM	0.28%	Cr2O3	0.05%	48.5 PPM	2.19%
Fe2O3	8.73%	86.8 PPM	0.10%	ZrO2	0.03%	12.4 PPM	0.68%
CaCO3	8.53%	103.9 PPM	0.29%	V2O5	0.03%	87.3 PPM	9.30%
Al2O3	8.02%	131.1 PPM	0.43%	SrO	0.02%	7.8 PPM	0.93%
TiO2	1.45%	56.6 PPM	0.52%	ZnO	0.01%	12.9 PPM	2.80%
K2O	1.30%	37.0 PPM	0.54%	Nb2O5	77 PPM	10.5 PPM	2.65%
P2O5	0.53%	87.2 PPM	1.61%	Rb2O	75 PPM	8.1 PPM	2.31%
Na2O	0.41%	410.2 PPM	3.69%	CuO	41 PPM	14.7 PPM	7.88%
SO3	0.26%	62.1 PPM	1.79%	Y2O3	26 PPM	11.2 PPM	4.46%
MnO	0.15%	29.0 PPM	0.91%	Ga2O3	16 PPM	13.1 PPM	16.30%
BaO	0.11%	183.1 PPM	3.15%	As2O3	13 PPM	11.0 PPM	16.90%
		總和：	100.00%		對應率：	102.31%	

5-41 凝灰岩 XRF 的分析表

(三) 比較

岩石名稱	XRD	XRF	結論
四寮石	鈉長石、鈣長石、輝石、碳酸鈣、碳酸鎂	碳酸鈣極高 二氧化矽含量少	四寮石比其他岩石多增加了許多碳酸鹽類，而二氧化矽可能是因為碳酸鹽類而相對百分比降低。因此可以推斷四寮石為當地的玄武岩或凝灰岩風化變質而成。
四寮玄武岩	輝石、鈣長石、鈉長石、綠泥石	碳酸鹽量少 二氧化矽多	
四寮凝灰岩	鈣長石、鈉長石、輝石、綠泥石、橄欖石、鈣雲母	碳酸鹽量少 二氧化矽多	

## 六、四寮石的探討

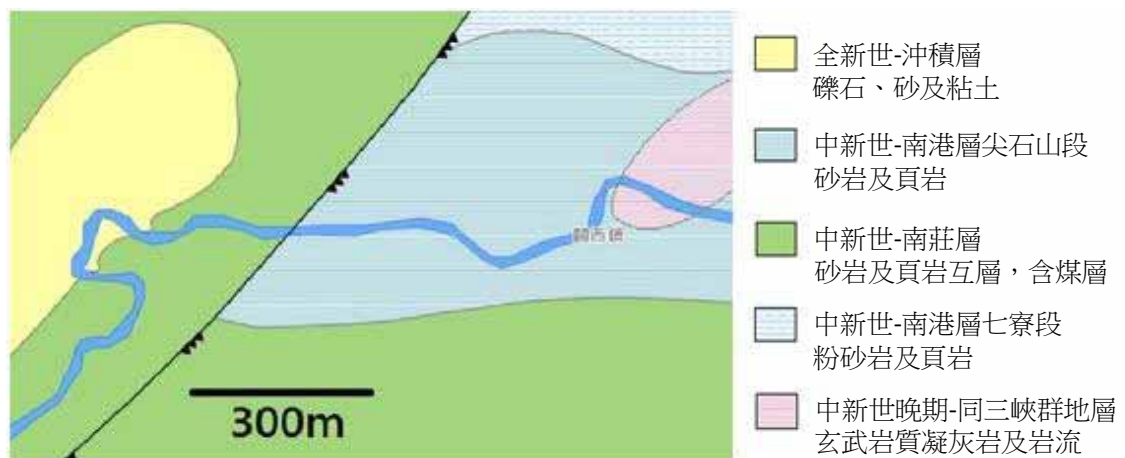
經實驗後發現，這些我們當初以為是 **Suevite** 的岩石實際上極為可能是經嚴重風化的四寮石。

四寮石為一種灰色緻密岩石，有時會存在白色花紋，我們定義它們分別為岩石的暗帶與明帶。在綜合多次野外調查的結果、各項實驗、以及製作成岩石薄片的礦物分析。我們可以歸納出四寮石的明、暗帶在成分上分別具有以下幾項特性：

- 明帶：為方解石所構成，在微觀上具有平行解理結構。
- 暗帶：是風化嚴重的基性火成岩，主成分為玄武岩，夾雜部分橄欖石與少部分斜長石、輝石。而暗帶中亦存在許多方解石，且亦有平行解理結構。

### (一) 四寮石成因探討

從四寮石的成分，我們推論它原本是一種基性的玄武質火成岩，因機械力作用造成裂縫或破碎，經過碳酸鈣的充填後，最終形成四寮石。於是我們透過當地的地質圖可以發現，四寮溪所切過的中新世-南港層本身就具有許多頁岩、砂岩，以及石灰岩的互層。如下圖 5-42。



度偏尚的么此石。

圖 5-42 四寮河流域附近出露地層

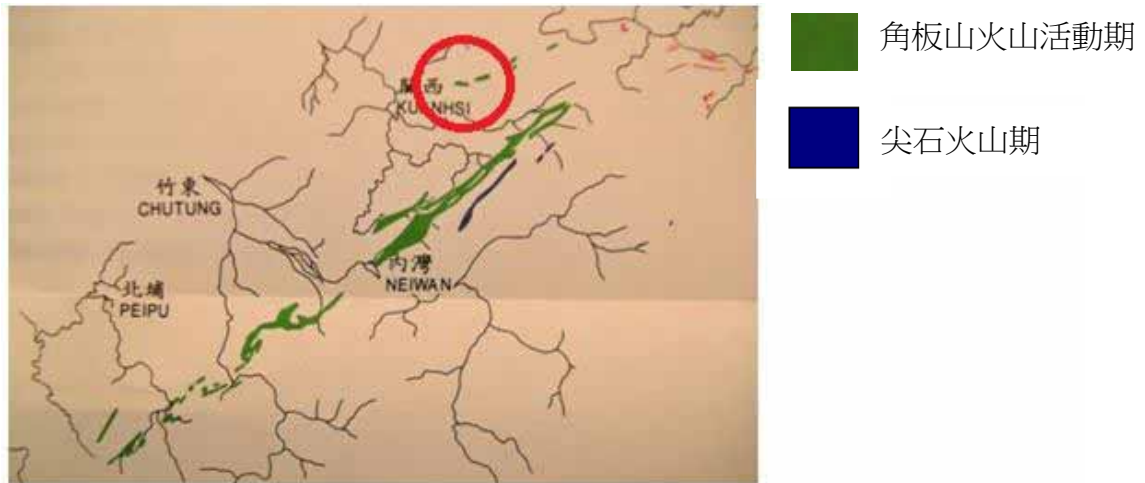


圖 5-43 關西竹東地區地質研究之火成岩分布。

於是我們猜測四寮石中的火成岩部分就是來自中新世的火山活動，而方解石成分則可能是來自南港層的石灰岩。

為確認不同種岩石間的相關性，我們將四寮石的暗帶，即火成岩部分和當地的玄武岩、凝灰岩進行比較，其結果如下表：

	玄武岩	四寮石的暗帶	凝灰岩
主成分	玄武質	玄武質	玄武質
岩石緻密度	最大	次中	極鬆散
斷面顏色	灰黑	灰	最黑
是否含方解石	否	是	否
岩石風化程度	普通	高	高

從表中我們可以發現，四寮石中的火成岩部分，與當地單純的火成岩有一定程度上的差異。我們推測四寮石中的火成岩部分，原本為玄武質凝灰岩，由於結構鬆散具有空隙，在河水或地下水夾帶碳酸鈣等離子，經過沉澱作用使得方解石得以結晶析出。而碳酸鈣將空隙充填也使得凝灰岩膠結得更为緻密，於是形成了四寮石。因為由方解石填充，顏色會略淺且緻密程度不如玄武岩，破碎後更多的碳酸鈣填入，便形成具有白花紋的四寮石。

假若四寮石的成因正如我們所推斷，那麼其他相同有火山活動與石灰岩地層的地方，如下圖 5-44 馬福、南河、白石下、大山背山等地方應當也有條件形成四寮石。然而在最後幾次野外調查中，我們前往當地卻沒有看到類似岩石的存在，此部分有待我們進一步研究。

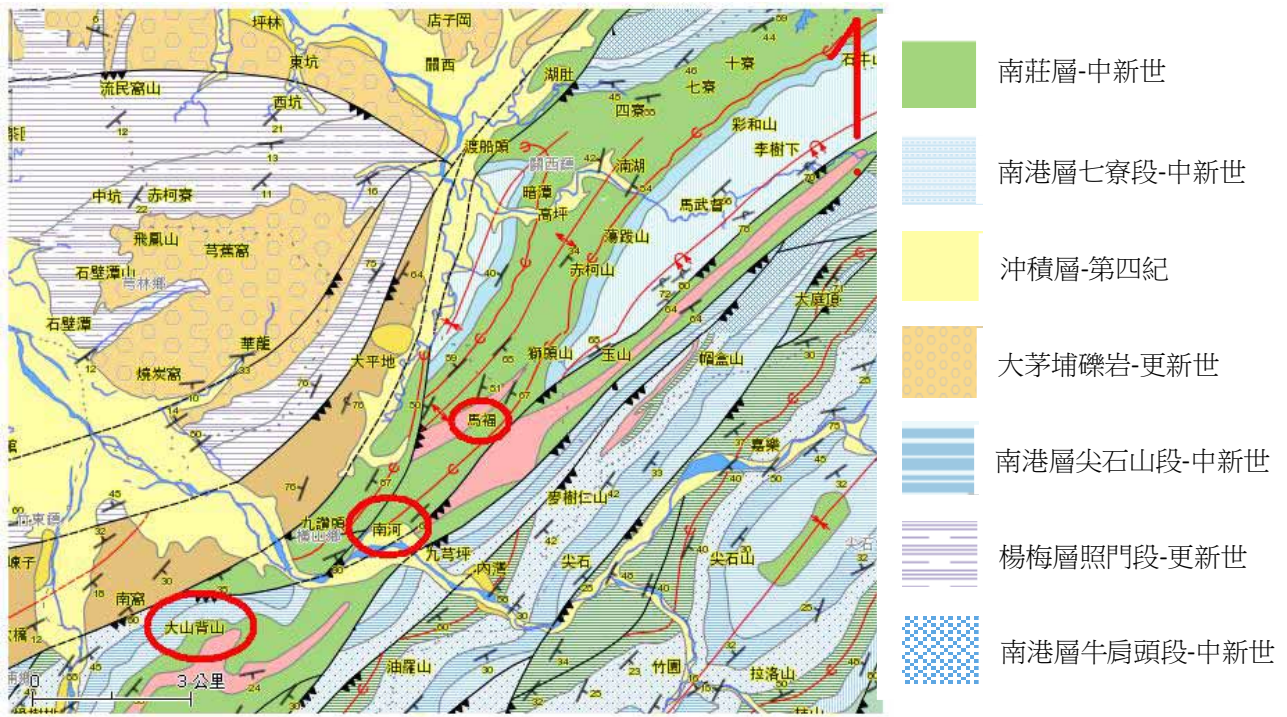


圖 5-44 關西鎮與其鄰近地區之地質圖

## (二) 探討異側山背上四寮石的成因

雖然四寮石絕大多數在河床中發現，但經驗證我們所認為的 **Suevite** 即為四寮石後，前述的 3D 岩石分布圖說明了四寮石亦可能出現在山坡上。但是我們的採樣點是由砂岩所構成的山坡，僅底層具有玄武岩露頭，如下圖 5-45 所示：

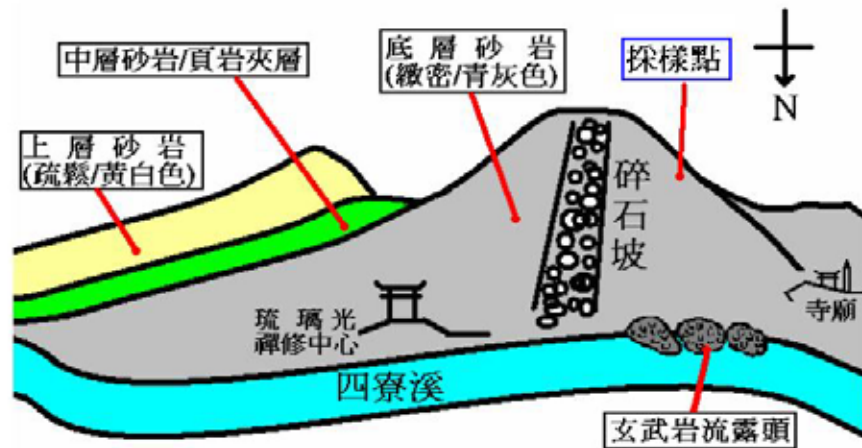


圖 5-45 探勘地點的地層示意圖

由於四寮石所含的成分為基性火成岩，但在採樣點的地區卻只見到砂岩層，是必有其他因素造成此結果，於是我們有以下三種推論。

### 1. 岩脈入侵

在湖肚採集點的山遭受到玄武岩脈的入侵，而岩脈的露頭位於山坡的頂端附近，因此能在山頂附近形成四寮石。

### 2. 地層構造

關西在地層上為背斜構造的一側，而屬於沉積作用產生的玄武岩凝灰岩層為其中的一層。在較容易侵蝕的地區易產生凝灰岩層的露頭，如下圖 5-47 所示。

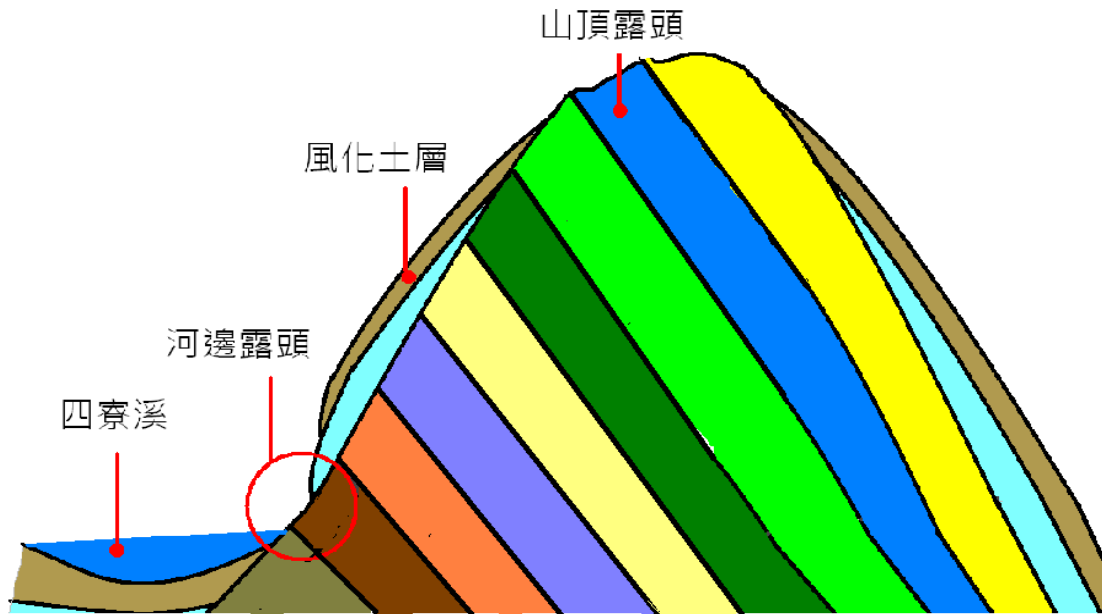


圖 5-47 背斜地層之示意圖

### 3. 撞擊

假設當隕石撞擊到山坡底部石，飛濺出的岩石碎片便可能含有玄武質，形成今天所看到的樣貌。

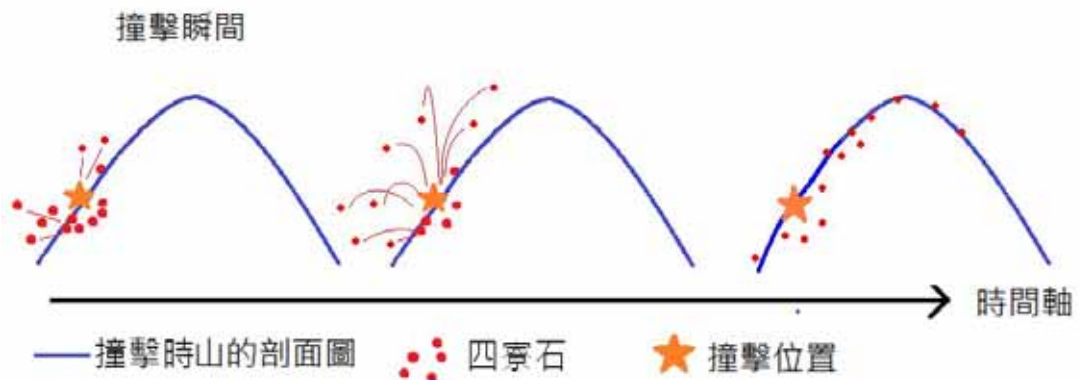


圖 5-48 隕石撞擊底層玄武岩示意圖

## 陸、結論

- 一、從這次地形探勘，根據當初所認為類似隕石撞擊產生的岩石分布，我們大致定位出原先認為隕石坑撞擊的 **Suevite** 位置
- 二、然而從這些探勘岩石的搜集分析，以及切片觀察，發現原先所認定的多種岩石，其組成成分和一般國際所認定的隕石撞擊坑地質岩石有所差異。這些關西岩石的組成成分和其他地區的岩石成份差異並不大。一般認定撞擊所產生的地質岩石的特殊存在也是比較缺乏
- 三、另外從地層的分析，很有可能是關西地層露頭出現之後，岩石露出、崩落，並與當地氣候水質... 等等影響而產生這種相當特殊的岩石。以至於我們對於這個關西可能的隕石坑，從最初的認為是，到最後從各種的試驗，產生了更多的懷疑。或許如果要能夠再次確認關西可能有的隕石坑，需要往後能找到更多直接與有力的佐證，才能確立
- 四、透過顯微鏡觀察與專業地質研究員的協助判定，這些岩石中間充滿了常見的平行解理，長石，橄欖石及方解石填充物。我們將外觀較為一般且平滑的岩石，利用稀釋鹽酸將方解石侵蝕之後，這些岩石的外觀除了顏色因為鹽酸侵蝕而有不同之外，形狀極其類似。推估其外觀顏色可能經過風化之後會類似這些特別的岩石。
- 五、我們經由岩石切片的顯微鏡觀察、X-射線的礦物與元素分析、火成岩分佈，可以了解四寮石之主要成份及初步推估其成因。至於這些看起來與其他地方不同的岩石，是如何讓它產生這種變異，以至於看起來如此與眾不同，則還有待進一步了解。

## 柒、未來展望

- 一、我們對於原來認為疑似隕石坑的地點做了更進一步的訪查，確認這些特殊岩石的分布位置。這些岩石位置及可能和關西地區的火成岩與其露頭相關，經過自然力量作用之後產生這些較為奇特景觀的岩石，至於如何因為地層與環境作用，而產生這種岩石，值得往後更進一步的探討。
- 二、經過岩石切片與分析，以及化學過程實驗反應。我們初步排除了這些岩石可能是隕石撞擊之後所產生的地質與岩石 (**Suevite**) 的可能性，至於岩石分布與是否為隕石坑，仍需要在往後的研究裡，做更詳盡的探討。
- 三、隕石撞擊後經常造成當地重力值的異常。我們期望在往後的研究中，針對關西地帶的重力異常進行研究。

## 捌、參考資料

- [1] 中央地質調查所—地質資料整合查詢  
<http://gis.moeacgs.gov.tw/gwh/gsb97-1/sys8/index.cfm>
- [2] 何春蓀 (民 86)。台灣地質概論—台灣地質圖說明書(二版三刷)。台北縣：經濟部中央地質調查所。
- [3] 陳泓維 (民 96)。石破天驚—隕石撞關西。第 47 屆中小學科學展覽會—地球科學科作品說明書，未出版。

- [4] Bevan M. French (1998) 。 *Traces Of Catastrophe*. Washington DC 。
- [5] O. Richard. Norton (2002) 。 *Meteorite*. New York : Cambridge 。
- [6] 黃怡禎(2000)譯，C。Klein & C。S。Hurlbut，Jr。原著。礦物學 (Manual Of Mineralogy  
21<sup>th</sup> ed。 )。地球科學文教基金會
- [7] 吳文雄等 (2005)。台灣的岩石－台灣地理百科。台北縣：遠足文化

## 【評語】 040506

隕石坑與四寮石的成因探討是很有趣的研究題目。雖然結論無法提出很具體的證據來證實隕石坑存在的推論，但過程很具科學研究的精神，以成份分析推論結構與特性，對學生是好的科學訓練。這是典型的傳統地質課題，野外採樣及實驗室實作豐富，分析的結果可釐清過去對關西殞石坑的不足與誤解，團隊合作精神佳，鄉土性高。