

國立中央大學

應用地質研究所

碩士論文

Graduate Institute of Applied Geology

National Central University

Master Thesis

利用曾文溪沿岸階地及碳14定年法分析臺灣西南部崙後
斷層及口宵里斷層之活動特性

Analyzing the Holocene activity of the Lunhou fault
and Kouhsiaoli fault in southwestern Taiwan based on
the Tsengwen River terraces

研究生：石智偉

Student: Jhih-Wei Shih

指導教授：波玫琳 博士

黃文正 博士

Advisor: Maryline Le Béon, Ph.D.

Wen-Jeng Huang, Ph.D.

中華民國 壹百壹拾壹年 陸月

June, 2022

國立中央大學圖書館學位論文授權書

填單日期：111 / 08 / 19

2019.9 版

授權人姓名	石智偉	學 號	108624003
系所名稱	應用地質研究所	學位類別	<input checked="" type="checkbox"/> 碩士 <input type="checkbox"/> 博士
論文名稱	利用曾文溪沿岸階地及碳 14 定年法分析臺灣西南部崙崙後斷層及口宵里斷層之活動特性	指導教授	波攻琳 黃文正

學位論文網路公開授權

授權本人撰寫之學位論文全文電子檔：

- 在「國立中央大學圖書館博碩士論文系統」
 - 同意立即網路公開
 - 同意 於西元_____年_____月_____日網路公開
 - 不同意網路公開，原因是：_____
- 在國家圖書館「臺灣博碩士論文知識加值系統」
 - 同意立即網路公開
 - 同意 於西元_____年_____月_____日網路公開
 - 不同意網路公開，原因是：_____

依著作權法規定，非專屬、無償授權國立中央大學、台灣聯合大學系統與國家圖書館，不限地域、時間與次數，以文件、錄影帶、錄音帶、光碟、微縮、數位化或其他方式將上列授權標的基於非營利目的進行重製。

學位論文紙本延後公開申請 (紙本學位論文立即公開者此欄免填)

本人撰寫之學位論文紙本因以下原因將延後公開

- 延後原因
 - 已申請專利並檢附證明，專利申請案號：_____
 - 準備以上列論文投稿期刊
 - 涉國家機密
 - 依法不得提供，請說明：_____

• 公開日期：西元_____年_____月_____日

※繳交教務處註冊組之紙本論文(送繳國家圖書館)若不立即公開，請加填「國家圖書館學位論文延後公開申請書」

研究生簽名： 石智偉 指導教授簽名： 黃文正

*本授權書請完整填寫並親筆簽名後，裝訂於論文封面之次頁。

國立中央大學碩士班研究生

論文指導教授推薦書

應用地質研究所石智偉研究生所提之論文 利用曾文溪沿岸階地及碳14定年法分析臺灣西南部崙後斷層及口宵里斷層之活動特性 係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授 波致琳 (簽章)

指導教授 翁文正 (簽章)

2021 年 12 月 29 日

國立中央大學碩士班研究生
論文口試委員審定書

應用地質 學系/研究所 石智偉 研究生

所提之論文

利用銻文選沿岸階地及碳14定年法分析臺灣西南部
崙後斷層及口宵里斷層之活動特性

經本委員會審議，認定符合碩士資格標準。

學位考試委員會召集人

委

員

李元希

李元希

波致琳

謝志福

陳文山

蕭文正

中華民國 2022 年 1 月 7 日

中文摘要

崙後斷層與其東側的口宵里斷層位於台灣西南部的台南嘉義一帶，兩者為比鄰的南北走向逆移斷層，前者向東傾，後者向西傾。該區的 InSAR 影像解析結果顯示跨兩斷層每年約有 20 毫米的垂直變位量，因此本研究利用流貫本區的曾文溪，其沿岸的階地對比分析，探討崙後斷層及口宵里斷層的構造關係及活動性對此抬升量的可能貢獻。進行的步驟方法有兩項，其一藉由高精度數值模型進行地形判釋，再輔以野外調查及 ^{14}C 定年相互對比繪製河階圖，其二是透過地質資料，繪製出地質剖面，將兩者結合分析與解釋，藉此瞭解兩條斷層之關聯與活動特性。本研究於野外調查時，藉由全站儀和 VBS-RTK 與無人機(DJI Mavic 2 pro)測量河階階面、基岩頂部的侵蝕面、採樣樣本之海拔高程以及所獲得之 ^{14}C 定年結果及前人定年資料分析將河階階面依海拔高程的高低分成十一階，由老至年輕分別為 T0 (15-18ka)、T1a (8 ka)、T1b、T2a、T2b、T3 (3-4 ka)、T4a、T4b (2 ka)、T4c、T4d、T5，由西向東至烏山頭背斜河流階地地表變形逐漸抬升，並且將測量到的高程資料與定年資料進行下切速率的計算，可見研究區最西邊與最東邊之 T3 階地其下切速率相近，這代表著兩側的 T3 階地沉積環境相當，且根據河階變形判釋與下切速率的分布，視為未變形區，崙後斷層上盤 T4b 階地年代為 1998 -1878 cal BP，下盤 T4b 階地年代為 1867-1615 cal BP，且階地高程相似，故推斷崙後斷層可能在 2 千年以來無活動跡象。口宵里斷層上盤新社 T3 階地(年代為 3820-3584 cal BP)，與下盤劉陳灣 T3 階地(年代為 4219-3926 cal BP)，階地高程差約 30 公尺，且於劉陳灣露頭可見口宵里斷層切穿上覆河階沉積物，於下盤處河階沉積物內由西向東採集到四個樣本，分別為近口宵里斷層基岩侵蝕面的 15256-14854 cal BP 和 18480-17887 cal BP，以及距口宵里斷層東側約 260 公尺處上部細粒料內採集到的 8976-8595 cal BP 與 3212-3005 cal BP，造成上述四個樣本皆沉積於同一處河階的原因，可能是下盤因口宵里斷層的活動導致基岩抬升，致使曾文溪流向改變由西向東遷，或是此處沉積相當穩定，河階不斷地沉積、侵蝕於同一處，致使底部

較頂層的樣本老。根據定年樣本以及河階的基岩侵蝕面之河拔高，是有助於計算下切速率，計算下切速率後可以觀察到距口宵里斷層西側約 6 公里的頭社 T3 河階其下切速率為 6.0-8.4 mm/yr 與口宵里斷層東側的劉陳灣 T3 河階其下切速率為 3.8-5.3 mm/yr，兩者的下切速率相當，但於兩者之間的新社 T3 河階下切速率卻是 15.0-21.0 mm/yr，下切速率快於前兩者許多，主要原因是新社的 T3 河階應該是受構造活動影響。根據以上野外調查以及下切速率對比以及定年結果的解釋，都說明口宵里斷層至少於 3-4 千年內有活動跡象，這也說明著口宵里斷層可能為第一類活動斷層。綜合以上所述得已知曉兩條斷層的活動性，因此本研究欲探討兩斷層之間的關係以及該區的變形貢獻，故將繪製完成之河階階面的座標投影於 N75°W 的剖面上，並結合 Lu et al. 的 InSAR 資料(2020)分析研究區之地表變形與垂直變位量，可發現河階分布呈不對稱的背斜形 (antiform) 且口宵里斷層西側至少 6 公里內皆有向上抬升的跡象，為解釋構造對於該區的影響，本研究提出兩種可能的解釋，其一為崙後斷層因淺部傾角過高而鎖住無法繼續活動，形成口宵里背衝斷層向東逆衝；另一為緊鄰崙後斷層西側的烏山頭背斜因曲滑褶皺作用持續地增長，然而背斜於地表下一、兩公里的範圍，兩翼過度緊密而鎖住，致使層間滑動面於背斜西翼的反曲點，順勢往上擴展截切背斜東翼及崙後斷層並切穿地表河階沉積物，形成向東逆衝的口宵里斷層。由本研究的河階剖面，可觀察到口宵里斷層以西，跨崙後斷層及烏山頭背斜，約六公里的範圍，相對口宵里斷層東側的下盤區，有明顯的抬升，呈現背斜形的變位，且最大抬升量約在烏山頭背斜軸跡的位置，故本研究認為口宵里斷層為一逆移斷層，截切烏山頭背斜與崙後斷層，烏山頭背斜的增長及口宵里斷層活動使得口宵里斷層以西的地表不斷抬升，故根據野外調查與河階對比及河流下切速率，證明口宵里斷層為第一類活動斷層，而斷層的活動性，於烏山頭背斜西側新社 T3 階地的相對抬升速率為 13.7-15.7 mm/yr，而新社和劉陳灣的 T3 之相對抬升速率差異，搭配劉陳灣的口宵里斷層露頭的斷層傾角 42°，可推得最大的斷層滑移速率為 20.0-23.0 mm/yr。

Abstract

The Lunhou fault (LHF) dips to the east and Kouhsiaoli fault (KSLF), which is to the east from LHF, dips to the west. These two faults are striking north-south and are located in southwestern Taiwan through Chiayi and Tainan area. InSAR Images show 20 mm/yr of uplift across these two faults. Therefore, this study aims to reveal if LHF and KSLF have any contribution to this vertical component, based on the river terraces along the Tsengwen River. Firstly, we used a 5m DEM and a Lidar DTM for terrain interpretation and terrace mapping. Then, we conducted field investigations to measure the elevation of terrace surface, terrace strath and dated samples using total station, VBS-RTK and UAV, and to collect samples for ^{14}C dating to complete the terrace correlation. Secondly, we draw a geological profile based on geological data. We integrated these two approaches to better analyze and explain the structural relationship and activity of these two faults. Eleven levels of terraces, which are T0 (15-18 ka), T1 (8 ka), T1b, T2a, T2b, T3 (3-4 ka), T4a, T4b (2 ka), T4c, T4d and T5 from oldest to youngest, have been classified according to their elevation difference from the modern river, and radiocarbon dating. In the field, the LHF dip angle is high and the KSLF dip angle is 42° . Combining ^{14}C ages from this study and previous studies, we found that the age of the terrace T4b on the hanging wall of LHF is 1998-1878 cal BP and the age of the terrace T4b on the footwall is 1867-1615 cal BP. Additionally, the strath elevation of T4b on both sides of LHF are similar. This indicates that LHF has been inactive since 2 thousand years. The age of the terrace T3 on the hanging wall of KSLF is 3-4 ka, which is similar to the footwall, but the elevation difference of the strath between them is 30 m. These results suggest that KSLF is active. The activity of the KSLF is further demonstrated by our observation of the Liuchenwan outcrop, where the KSLF cut through the river deposit. There, four ^{14}C samples were collected from west to east in the river terrace sediments on the footwall of the KSLF. Ages of 15256-14854 cal BP and 18480-17887 cal

BP were obtained near the strath, and 8976-8595 cal BP and 3212-3005 cal BP were obtained in the upper fine-grain part of the terrace deposits at the east side of fault at about 260 m distance. These four samples are all deposited in the same terrace sequence and we have two explanations for that. First, the fault activity led the bedrock to uplift, which caused the path of the Tsengwen River to migrate towards the east. Second, the riverbed here was quite stable, with limited incision and deposition between 18 ka and 3ka. The terrace and age dataset were also used to calculate river incision rates. For the terrace T3, we observed fairly similar incision rates of 6.0-8.4 mm/yr 6 km west of KSLF and of 3.8-5.3 mm/yr 500 m east of KSLF. But the terrace T3 located 2.2 km west of KSLF shows a faster incision rate of 15.0-21.0 mm/yr that indicates that this area is affected by tectonic activity. Therefore, our observations indicate that the KSLF has been active since at least 3-4 ka, and we can classify it as a type I active fault. In a next step, we project the coordinates of the river terrace surface on the N75°W section and analyze the study area in combination with existing InSAR data. From our terrace deformation profile the distribution of river terraces exhibits an asymmetrical antiformal geometry, and there are signs of uplift within at least 6 km to the west of the KSLF. This study proposes two possible explanations. First, the LHF is locked because of the high dip angle at its shallow part and hence it cannot continue to move, forming the KSLF back thrust toward the east; Second, Wushantou anticline (WSTA) is adjacent to the west of the LHF. However, the anticline is 1 or 2 km below the surface, and the two limbs are too tight and locked, so that the interlayer sliding is at the flexural point of the anticline western limb. The KSLF expanded and cut through the LHF and terrace deposits. From the terrace section of this study, it can be clearly observed that the KSLF hanging wall uplifts relative to the footwall with a range of about 6 km across WSTA and LHF. To summarize, this study revealed that the KSLF is a reverse fault that cut through the WSTA and the LHF. The WSTA growth and KSLF activity generate surface uplift to the

west of KSLF. According to the correlation of river terraces and the incision rate, the relative uplift rate between terrace T3 near the WSTA and terrace T3 east of KSLF is 13.7-15.7 mm/yr. Using the relative uplift rate of terrace T3 across the KSLF, the fault dip angle (42°) of the KSLF outcropping in Liuchenwan, we inferred the maximum fault slip rate to be 20.0-23.0 mm/yr.

目錄

中文摘要	i
Abstract	iii
目錄	vi
圖目錄	viii
表目錄	ix
第一章 緒論	1
1-1 前言	1
1-2 研究動機與目的	5
第二章 區域概況	7
2-1 地形概況	7
2-2 地質概況	10
2-2-1 地層	10
2-2-2 地質構造	13
第三章 前人文獻回顧	17
3-1 研究區的斷層活動性及構造特性	17
3-1-1 大地測量	17
3-1-2 崙後斷層與口宵里斷層的構造特性與活動性	25
3-2 曾文溪地區河階相關研究	27
第四章 研究方法	33
4-1 野外調查	33
4-2 河階判釋與分析	37
4-2-1 河階圈繪	37
4-2-2 河階對比	37
4-2-3 階地地表、基岩頂部侵蝕面、及採樣樣本	39
4-2-4 碳十四定年	40
4-2-5 河階分析	42
第五章 研究結果	44
5-1 野外調查結果	44
5-1-1 烏山頭背斜	46
5-1-2 崙後斷層南段	49
5-1-3 口宵里斷層	51
5-2 階地調查與分析結果	60
5-2-1 階地沉積物	60
5-2-2 碳十四定年結果	70
5-3 階地對比、分布與分析	78

第六章 討論.....	88
6-1 構造活動性.....	88
6-1-1 階地變形推演構造運動.....	88
6-1-2 下切速率比對.....	92
6-1-3 長期滑移速率.....	92
6-2 烏山頭背斜、崙後斷層與口宵里斷層之地下結構.....	96
第七章 結論.....	100
參考文獻.....	102
附錄 A: 野外露頭空照 3D 建模.....	109
附錄 B: 劉陳灣河階空照.....	110
附錄 C: 標本定年年代校正結果.....	111

圖目錄

圖 1 台灣地體構造圖	2
圖 2 嘉南地區 GPS 之水平速度場	3
圖 3 構造抬升和河流下切導致河流階地發育示意圖	4
圖 4 台灣活動斷層分布圖	6
圖 5 烏山頭背斜與崙後斷層南段及口宵里斷層的地形圖	9
圖 6 西部麓山帶曾文溪流域地質圖	15
圖 7 西部麓山帶曾文溪流域的岩性地質圖	16
圖 8 時間序列比較與北門至楠西測線水準高程變化圖	19
圖 9 北門-楠西測線的精密水準測量	21
圖 10 嘉南一帶的 InSAR 影像分析結果	23
圖 11 玉井地區跨烏山頭背斜與崙後斷層及口宵里斷層地質剖面圖	26
圖 12 玉井地區曾文溪階地分布及放射性碳定年	31
圖 13 空拍執行流程	34
圖 14 本研究使用的無人機-DJI Mavic 2 pro	34
圖 15 地面控制點佈設工作照	35
圖 16 以 VBS-RTK 量測地面控制點之工作照	35
圖 17 崙後斷層南段及口宵里斷層影像資料分區及品質報告	36
圖 18 河階圈繪的相關圖	38
圖 19 量測絕對高程	39
圖 20 斷層關聯褶皺導致的河流階地變形示意圖	43
圖 21 曾文溪沿岸斷層露頭點位置	45
圖 22 曾文溪北岸於走馬瀨橋西側之烏山頭背斜野外調查成果	47
圖 23 曾文溪北岸走馬瀨橋北端東側的斷層帶露頭	50
圖 24 走馬瀨農場南方裂開路面的露頭	51
圖 25 灣潭地區露頭	53
圖 26 劉陳灣地區曾文溪兩岸露頭狀況	54
圖 27 劉陳灣廢棄河道露頭狀況	55
圖 28 槽溝 KSLT-02-N(北牆)影像及測繪圖	56
圖 29 槽溝 KSLT-02-S(南牆)影像及測繪圖	56
圖 30 槽溝南牆 4~6 公尺處未切穿河流階地礫石層的剪切帶	57
圖 31 槽溝北牆 8~11 公尺處的剪切帶及被截斷的砂岩層	57
圖 32 位於劉陳灣之口宵里露頭	58
圖 33 口宵里斷層露頭中構造特徵	59
圖 34 沿崙後斷層與口宵里斷層之潛在河階探坑挖掘位置圖	61
圖 35 探坑 LKP-01 沉積物分層	61
圖 36 探坑 LKP-02 沉積物分層	62
圖 37 探坑 LKP-03 沉積物分層	62
圖 38 曾文溪河階河拔高及野外觀察圈繪之河階分布圖	64
圖 39 唶子坑 T1 階地與岩性柱狀圖	65
圖 40 濁水坑 T2 階地與岩性柱狀圖	66

圖 41	新社 T3 階地與岩性柱狀圖.....	67
圖 42	劉陳灣 T3 階地與岩性柱狀圖.....	68
圖 43	劉陳灣東側 T3 階地與岩性柱狀圖.....	68
圖 44	走馬瀨農場內 T4 階地與岩性柱狀圖.....	69
圖 45	曾文溪沿岸以河拔高圈繪之初步河階分布圖.....	71
圖 46	唶子坑 T1 採樣點.....	72
圖 47	濁水坑 T2 採樣點.....	73
圖 48	新社 T3 採樣點.....	74
圖 49	走馬瀨農場內 T4 採樣點.....	74
圖 50	劉陳灣 T3 採樣點.....	75
圖 51	曾文溪沿岸河階投影剖線與河階階地露頭.....	79
圖 52	大內區至玉井區河階剖面.....	80
圖 53	灣潭地區口宵里斷層附近露頭照。.....	81
圖 54	灣潭地區跨口宵里斷層的地形陰影圖及地形剖面圖.....	82
圖 55	沿玉井區至大內區 A-A' 剖線投影之下切速率位置.....	85
圖 56	大內區至玉井區之下切速率與相對抬升速率投影至河階剖面.....	86
圖 57	劉陳灣地區口宵里斷層東側之採樣樣本.....	89
圖 58	劉陳灣地區口宵里斷層古河道重建.....	90
圖 59	劉陳灣地區口宵里斷層緊鄰下盤之階地沉積.....	91
圖 60	楠西區口宵里斷層的地形崖.....	94
圖 61	楠西區至玉井區河階剖面.....	95
圖 62	玉井區至大內區之大地測量與河階剖面.....	98
圖 63	曾文溪一帶之構造剖面解釋.....	99

表目錄

表 1	前人研究的碳 14 定年結果.....	32
表 2	河階分析與碳 14 定年結果.....	76
表 3	曾文溪沿岸各基岩侵蝕面之下切速率.....	87

第一章 緒論

1-1 前言

台灣位處於歐亞板塊與菲律賓海板塊交界處，兩板塊長期的碰撞，形成一個約略南北走向之板塊聚合帶(圖 1)，根據全球定位系統(Global positioning system, 簡稱 GPS)的監測，菲律賓海板塊每年以 8.2 公分的速率持續朝西北方與歐亞板塊聚合(Yu et al., 1997)，如此活躍的地殼變形，使得台灣西部地區約略每隔三十年就會有一次規模七級以上的災害性地震(鄭世楠等，2011；鄭世楠、葉永田，2004、1989)，規模六的週期更是短。

就台灣西南部麓山帶的前緣區，單就 GPS 水平位移速率場而言，在一、二十公里的距離，就有超過 20 mm/yr 的變化量，由東邊的外麓山帶約 30 mm/yr 的速率，降至西邊的平原區約 7.5 mm/yr (景國恩等，2018) (圖 2)，顯示此區的地殼變形相當顯著，而這一區在台南大內玉井一帶，分布著三個彼此相鄰的北北東走向的地質構造，由西往東分別為烏山頭背斜、崙後斷層與口宵里斷層，為曾文溪流貫，河流階地沿河道分布兩側。

這些河流階地是沖積沉積物堆積形成的地貌，它們記錄了一個河流的歷史包括活動構造和海水面變遷與氣候變化，因此它們是河流系統調整過程的形態沉積學之呈現(圖 3)。這些調整是由發生在截然不同的時間和空間尺度上的各種機制引起的，這些機制可分為內在原因(內部河流系統動態變化)和外部原因(外部變量的變化，例如氣候、構造或基準面)。內在變化往往發生在相對較短的時間範圍內，並產生小的和局部的地貌變化與沉積物堆積；外在變化所造成的影響時間尺度相對較長，因此可產生連續和規模較大的河流階地。

本論文將關注河流階地的變化與活動構造之間的關係，欲藉由跨越此三個構造且廣泛分布的曾文溪沿岸河階，找出曾文溪河流階地序列，利用同年代卻有著不同河拔

高的河階，推測崙後斷層與口宵里斷層的活動速率與特性，再搭配地質剖面，探討這兩斷層之間的關聯性。

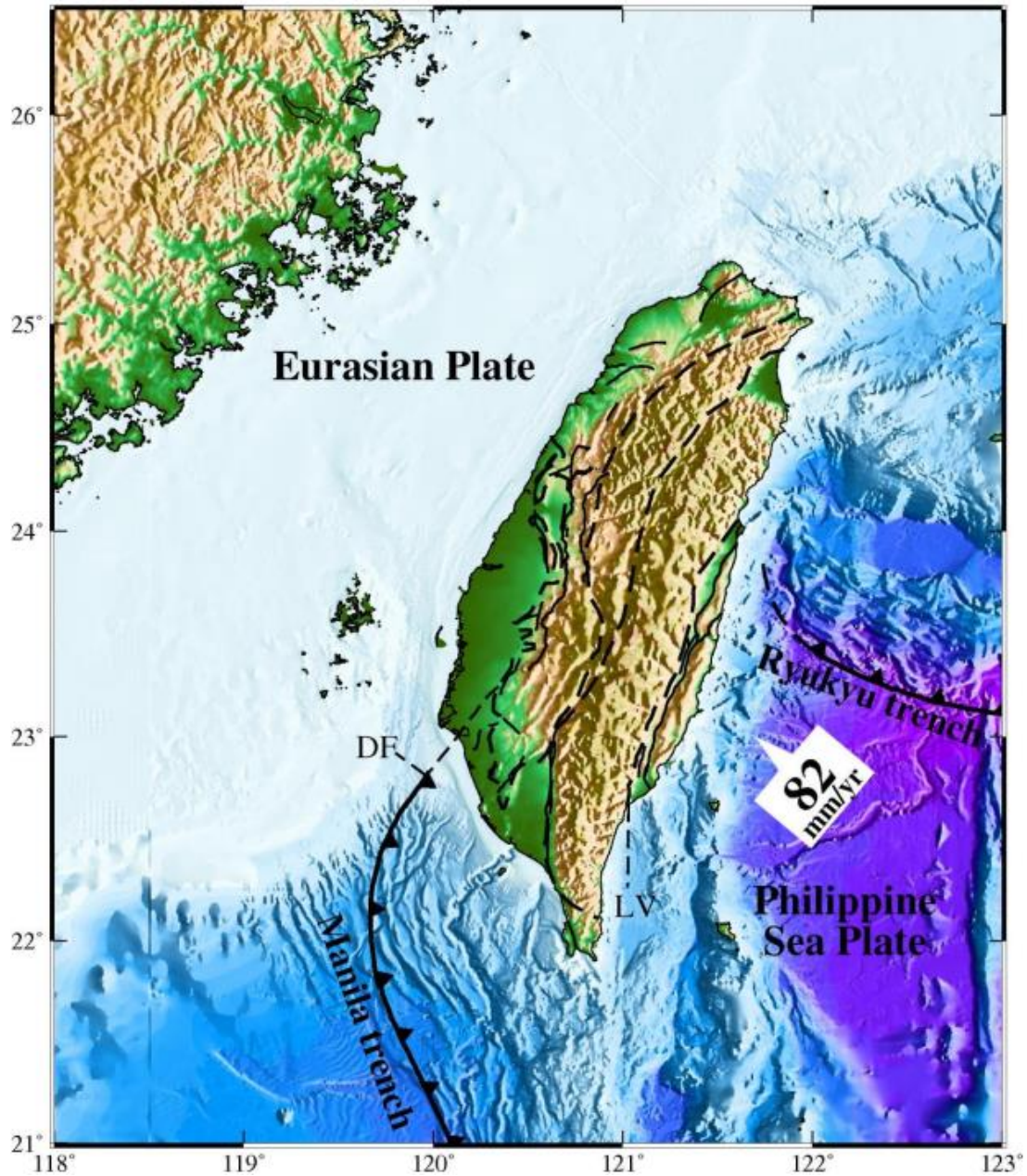


圖 1 台灣地體構造圖。台灣地處歐亞板塊及菲律賓海板塊交界(圖摘錄自樂錯·祿璞峻岸等，2018)。

Figure 1. Schematic diagram of the plate tectonic setting in Taiwan (樂錯·祿璞峻岸等，2018). Taiwan is located at the convergent boundary between the Eurasian plate and the Philippine Sea Plate.

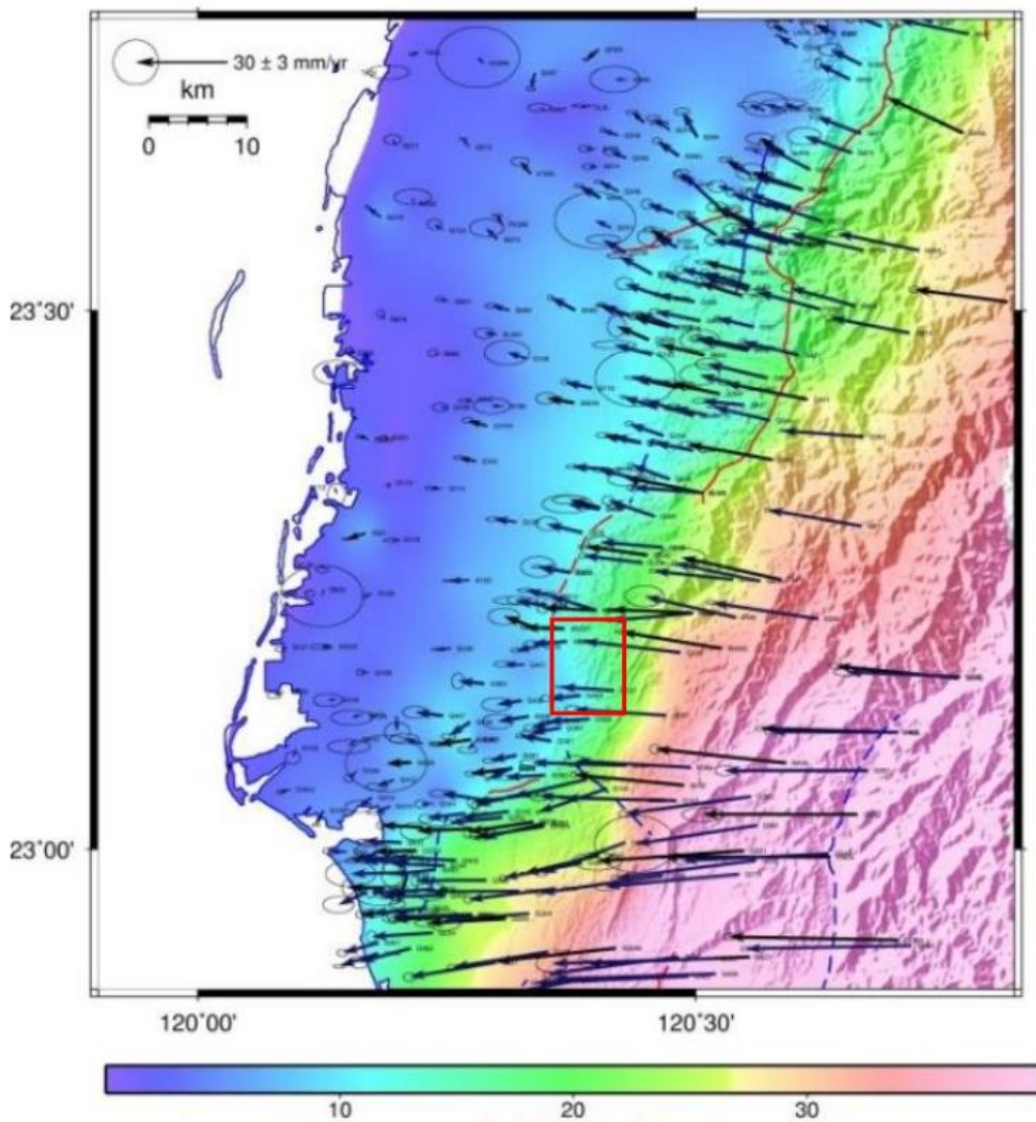


圖 2 嘉南地區 GPS 之水平速度場。水平速度場相對於澎湖白沙站(S01R)之 2010-2017 GPS 水平方向速度場(景國恩等，2018)。紅色方框為研究區域。

Figure 2. GPS horizontal velocity field in the Jianan area during 2010-2017 relative to the Penghu Paisha Station (S01R) (Ching et al., 2018). The red rectangle is the study area.

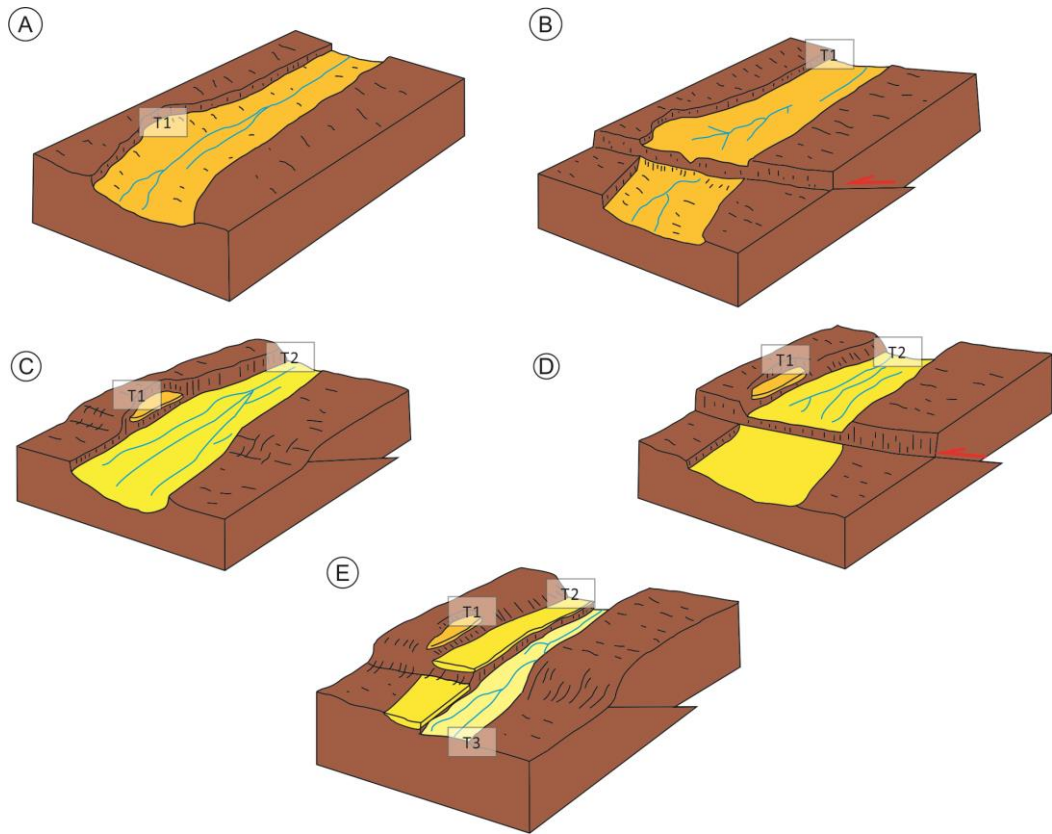


圖 3 構造抬升和河流下切導致河流階地發育示意圖(修改自 Ryerson et al., 2006)。(A) 河道形成沖積層 T1；(B) 逆衝斷層的構造活動抬升上盤的 T1；(C) 河階 T1 和沖積層 T2 的形成。河階 T1 因河流下切而廢棄，新的沖積層 T2 沿新河道堆積；(D) 斷層再次錯動抬升上盤的河階 T1 和沖積層 T2；(E) 接續的河流下切形成階地 T2 及沖積層 T3。沖積層 T3 沿新河道堆積，完整保留在斷層兩側；階地 T2 為斷層錯動，同時出現在上下盤，可用於量化構造變形。

Figure 3. Development of river terraces due to tectonic uplift and river incision (modified from Ryerson et al., 2006). (A) Channel T1 is formed; (B) Tectonic activity on the thrust fault uplifts T1 on the hanging wall; (C) Channel T1 is abandoned due to river incision: formation of terrace T1 and of a new channel T2; (D) Tectonic activity uplifts T1 and T2 on the hanging wall; (E) Subsequent river incision leads to the formation of a new channel (T3) and of terrace T2, preserved on both sides of the fault: T2 can be used to quantify tectonic deformation.

1-2 研究動機與目的

近一、二十年的大地測量，包括 GPS 速度場(Yu et al., 1997; 景國恩等，2018)與水準垂直速度場(景國恩等，2018)及 InSAR 資料(Pathier et al., 2015 and Lu et al., 2020)同時顯示，研究區域的地表變形跡象顯著。然而早在於 2002 年 Hsieh & Knuepfer 的報導以河流階地於曾文溪分布的特徵與定年結果分析指出研究區域具有至少 1 cm/yr 向上抬升的活動性，於 2003 年陳文山的報導也提出，根據 Yu & Chen (1997)的 GPS 觀測資料，其水平滑移速率推論出崙後斷層仍具有活動性的看法，這兩組研究團隊，基於有限的定年數據與早期的大地測量結果，提出了一個向上的抬升區域，此區顯示該範圍涵蓋烏山頭背斜與崙後斷層以及口宵里斷層，然而僅有口宵里斷層被歸類於第二類活動斷層，收錄於地調所 2021 年的活動斷層公告裡(經濟部中央地質調查所，2021)(圖 4)，因此本研究欲以新期構造的變形，彌補野外露頭的稀缺以及定年樣本連續分布的不足，釐清該抬升是僅受崙後斷層影響，亦或是其他構造的活躍所致，倘若此抬升非僅受崙後斷層影響，而是同時也受口宵里斷層影響，那麼這兩條斷層之間的構造關係與滑移速率為何?此外，烏山頭背斜又扮演什麼樣的角色呢?這三個構造的活動性及關係又是如何?

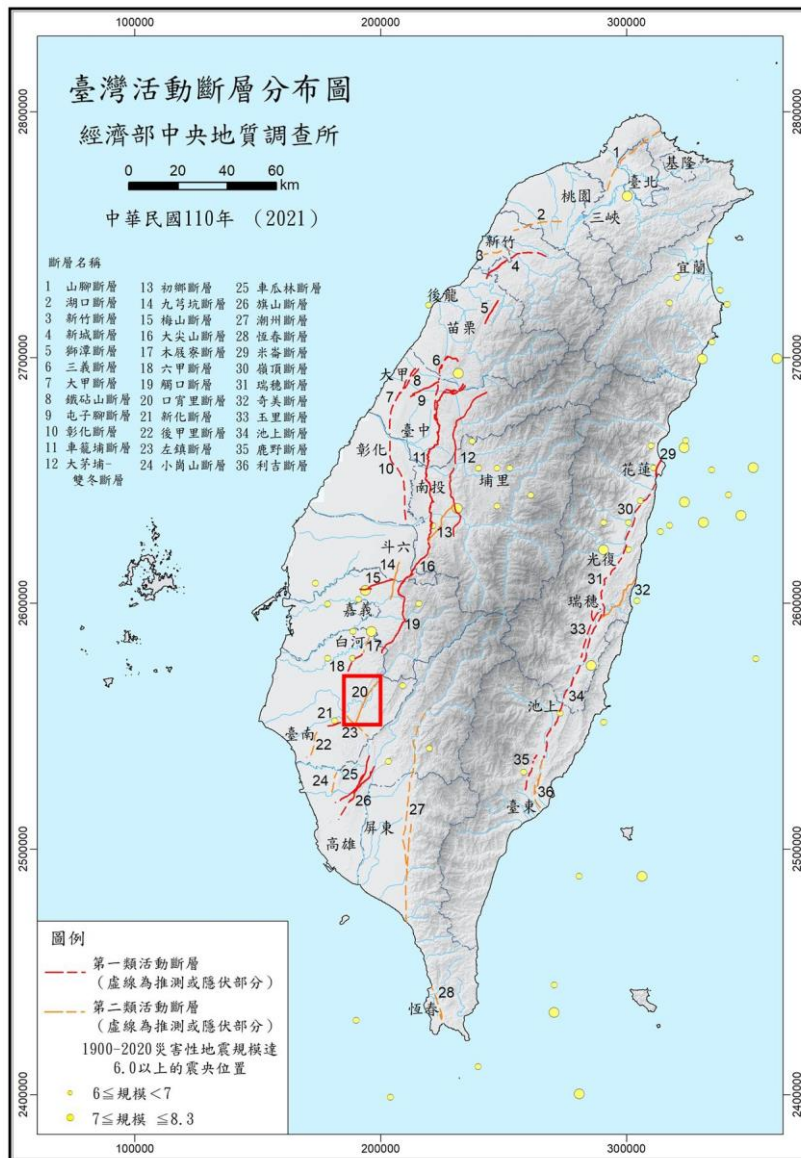


圖 4 台灣活動斷層分布圖(經濟部中央地質調查所，2021)。紅框處為研究範圍。

Figure 4. Map of active faults in Taiwan (Central Geological Survey, 2021). Red rectangle is the study area.

第二章 區域概況

2-1 地形概況

本研究區域在台南玉井大內一帶，由東往西包括山地、丘陵、及平原(圖 5)，三種主要的地形區，區域內亦有曾文溪流貫，河道兩側及鄰近處則散布不同河拔高的階地，除了東北側及東南側出現少數海拔高度超過 600 公尺以上的山嶺以外，其餘地區的海拔高度多在 200 公尺以下，並呈現東高西低，地形面向西緩降之特徵。研究區東側的山地為阿里山山脈區，雖劃屬山地地形區，卻大半是山間沖積平原，亦即玉井河蝕盆地，盆地西北邊緊鄰的是北北東向高程約 200-800 公尺的西烏山嶺山脈，此山脈的西邊及南邊皆為丘陵區，以曾文溪為界，北稱嘉義丘陵，南名新化丘陵，烏山頭水庫即建築在此區的嘉義丘陵裡，丘陵地的西側緊鄰平緩的嘉南平原(林朝榮，1957)。本區水系的發育亦受岩層位態及構造影響，灌流於丘陵區之各大小溪谷均呈顯著之掘鑿曲流，如菜寮溪、後掘溪、曾文溪等，尤其本研究區之最曾文溪，全長 138.5 公里，發源於嘉義縣阿里山的東水山最後流入台灣海峽，因其為流經本區最大且最長的河流，故其所流經之地皆保留較大且較完整的河流階地堆積層。底下針對的三個主要地質構造之地形概況，分別敘述如下：

(一)烏山頭背斜

烏山頭背斜緊鄰南北走向的西烏山嶺列西側山脈山腰，由北向南逐漸變低約 200~260 公尺左右，山脈南端終止於內豐地區的西北側，於西烏山嶺山列西側與其相鄰的丘陵地，屬於嘉義丘陵的一部分，海拔高程約在 150~180 公尺左右 (何信昌等，2005)。

(二)崙後斷層南段

崙後斷層南段自檳榔宅至走馬瀨曾文溪以北的區間，崙後斷層東側為南北走向的西烏山嶺山列，海拔約在 400~800 公尺左右，山脈高程由北向南逐漸變低，山脈南端終止於內豐地區的西北側，於西烏山嶺山列西側與其相鄰的丘陵地，屬於嘉義丘陵的

一部分，海拔高程約在 150~180 公尺左右，於檳榔宅至楠西隧道之間，山脈地形與丘陵地形的交界處，具有坡度明顯的變化，為崙後斷層跡的大致位置。此交界處為山脈的前緣，可見崩積物所形成堆積，其中有為數不少的巨型(公尺級)砂岩塊分布於其中，推測這些砂岩塊應為構成山脈嶺脊的糖恩山砂岩自山頂滾落。

曾文溪走馬瀨以南至蘆芝坑溝之間，劉陳灣西側緊鄰曾文溪主流處，為南北走向的山脈，其海拔高程約為 150 公尺，其中高程最高處為口宵里山，海拔高程 184 公尺，山脈的西側較為平坦的區域，為曾文溪的河流階地地形。

蘆芝坑溝以南則屬新化丘陵的一部分，為惡地地形。崙後斷層最南端約接近菜寮溪的榮和村，河流階地與新化丘陵之間有約南北向的地形線形，從地圖視角觀察，河流階地與丘陵交界的線形較為曲折，西側河流階地中亦有觀察到約 10 公尺高，延伸方向為約 N40°E 方向，與崙後斷層大約同向的地形崖，從空載光達地形來看，此地形崖的線形十分的平直，可追蹤約 600 公尺。

(三)口宵里斷層

口宵里斷層自曾文水庫南側至照興地區一帶鄰近曾文溪的西岸，為河流階地地形，由空載光達數值地形影像及野外調查結果，鄰近口宵里斷層處，有 2 道大約與斷層方向同向的地形崖，東側的地形崖高程差約 10 公尺，西側的地形崖高程差約 3 公尺，其中後者的西側高起處，可觀察到風化度較高的岩層，而東側低處，則只觀察到階地堆積層。照興地區至灣潭地區，緊鄰西烏山嶺山列的東側，海拔高程約為 200~250 公尺之間，其中於灣潭處，曾文溪西岸的階地，有一延伸方向約與口宵里斷層同向的地形崖，崖坡高程差約 40 公尺，此地形崖的線形十分的平直，可追蹤約 700 公尺。內豐地區東側為凸出的山坡地，其中以斗六山標高最高，西側為平坦的河流階地，鄰近斷層的階地中，出現數道約南北走向的地形崖，地形崖高程差皆約 3~5 公尺，若以地圖視角觀察這些地形崖，地形崖的線形較為崎嶇。位於曾文溪北岸劉陳灣地區，則為平坦的河流階地地形，階地中地形並無受斷層影響的特徵。曾文溪以南則為新化丘陵，為惡地地形，平均地形高程約為 100~170 公尺左右。

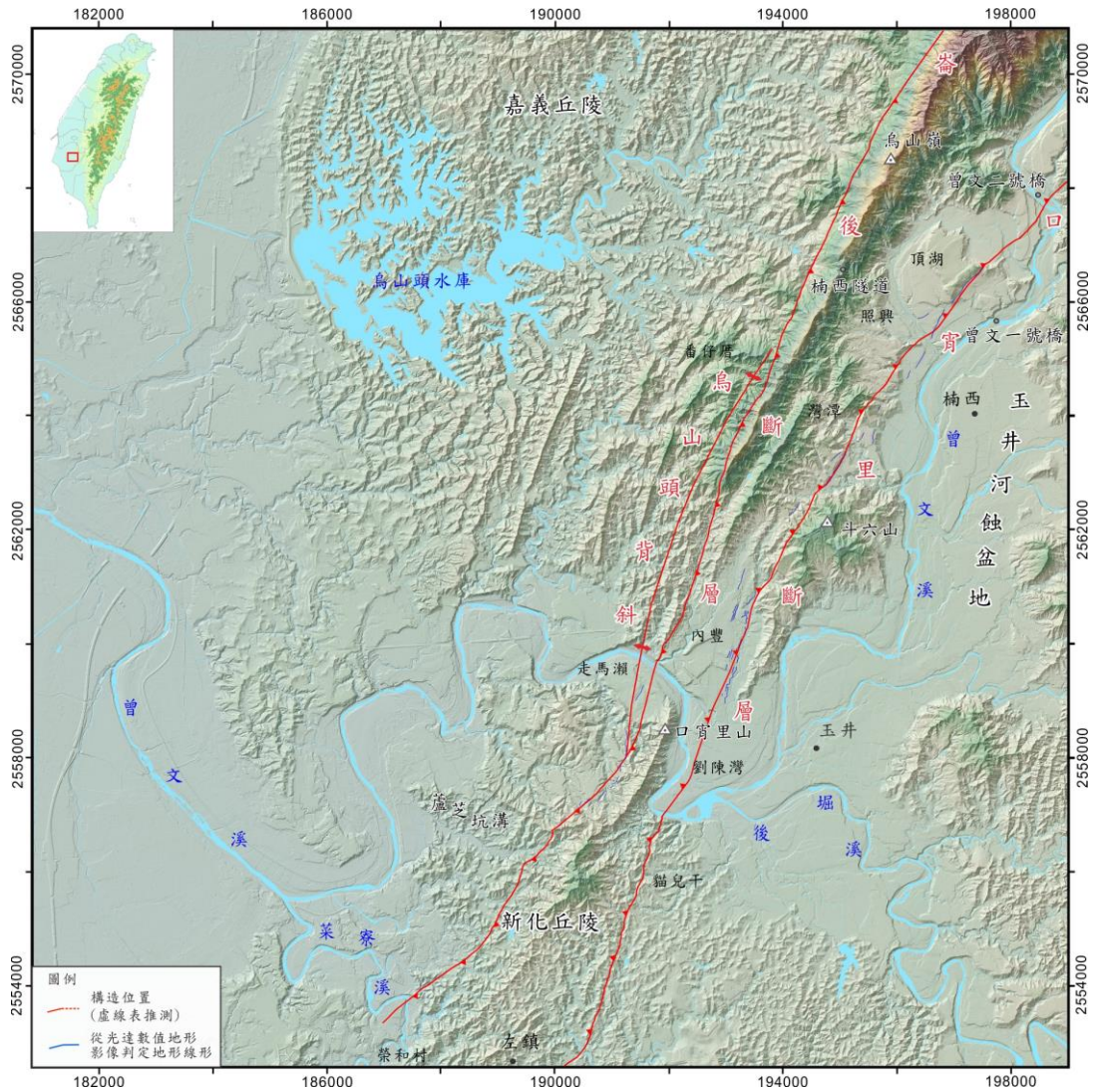


圖 5 烏山頭背斜與崙後斷層南段及口宵里斷層的地形圖 (黃文正等, 2020)。

Figure 5. Topographic map of the study area, including the Wushantou anticline and the fault trace for the southern part of Lunhou fault and for the Kouhsiaoli fault (Huang et al., 2020). Red line: observed fault trace; red dashed line: inferred fault trace; black line: other active faults; blue lines: scarps identified in LiDAR 1-m DEM that may or may not be related to fault activity.

2-2 地質概況

本研究區主要位處台灣西部麓山帶(何春蓀, 1986), 出露的地層皆為沉積岩或沉積物, 包括有中新統、上新統、更新統及全新世的階地堆積層及沖積層(圖 6)。除地形因素外, 這些岩層的分布主要受控於北北東走向的斷層及褶皺, 這些構造由西往東主要有烏山頭背斜、崙後斷層、口宵里斷層、及玉井背斜, 岩層的分布大致上也呈北北東走向, 其中最老的沉積岩為中新世的糖恩山砂岩出露在崙後斷層的東側(上盤), 有顯著的巨厚砂岩層, 構成西烏山嶺山脈的嶺脊, 上新統及更新統主要以頁岩或泥岩夾砂岩為主, 除更新世的六雙層主要由砂岩組成。

根據經濟部中央地質調查所與中油所繪製的地質圖, 烏山頭背斜的軸跡僅位於澗水溪層中; 崙後斷層南段下盤(西側)地層由西向東地層年代漸老, 出露地層依序為六雙層、二重溪層、崙下寮層、六重溪層、澗水溪層; 崙後斷層南段及口宵里斷層上盤由西向東地層年代趨於年輕, 出露露頭依序為糖恩山砂岩、鹽水坑頁岩、隘寮腳層、茅埔頁岩、竹頭崎層; 口宵里斷層下盤由西向東地層年代趨向年輕, 出露地層依序為北寮頁岩、鏡面砂岩、玉井頁岩(圖 7)。

2-2-1 地層

(一)崙後斷層下盤

1. 六雙層(Liushuang Formation):

本層主要分布在牛山背斜西翼地區, 向南延展經烏山頭水庫地區及大內、蒙正至左鎮斷層以北, 而於曾文溪剖面出露的六雙層, 底部為一厚達 70 公尺之砂岩, 往上則為砂質泥岩和數層 10-40 公尺之砂岩相繼出現, 並分析於本層富有的貝類化石、底棲性有孔蟲與超微化石, 六雙層之化石帶可能大部分仍在超微化石帶 NN19C 上部, 年代約在 60 至 45 萬年的更新世(謝凱旋, 1991)。

2. 二重溪層(Erchungchi Formation):

本層由烏山頭水庫向南延經燒灰山及燒灰子, 南端終為崙後斷層所截切。本層以

塊狀泥質砂岩和泥岩相互交替出現為主，局部有透鏡狀石灰岩出露。砂岩膠結疏鬆，普遍含貝類化石，常呈密集帶出現，泥岩則富含豐富微體化石和部份貝類化石，洪崇勝(1991)在曾文溪剖面磁地層之研究顯示二重溪層上段已進入布倫期(Brunhes)正向範圍，下段則屬松山期最上部反向範圍，因此可確定布倫期和松山期介面在本層中上段通過，此界面時代為 78 萬年 (Berggren et al., 1995)。

3. 崙下寮層(Kanhsialiao Formation):

曾文溪以南延伸約 4 公里後為崙後斷層所截，其底部由數公尺厚之礫石及厚層之中粒砂岩為主，以暗灰色泥岩為主，偶夾薄層細砂岩，向上由厚層灰色泥質砂漸變成巨厚黑色泥質砂岩偶夾細砂岩。崙下寮層含浮游性有孔蟲、超微化石，於曾文溪剖面，崙下寮層下段屬於超微化石帶 NN19b，上段為超微化石帶 NN19c，時代屬更新世(洪崇勝，1991)。

4. 六重溪層(Liuchungchi Formation):

分布於崙後斷層西側，向南分布延跨至曾文溪以南，終為崙後斷層所截。在曾文溪剖面，六重溪層的厚度約 1 公里，下段以粉砂岩和泥質粉砂岩為主，夾有數層灰色厚層細粒砂岩，中段以上的砂岩明顯增多，以粉砂質泥岩和細至中粒砂岩夾層為主。砂岩中偶有貝類、海膽、珊瑚化石、浮游性有孔蟲、超微化石，而 *Gephyrocapsa oceanica* (Kamptner)於本層中部首次出現，因此其下段屬超微化石帶 NN18，上段則為超微化石帶 NN19，時代為更新世。

5. 澗水溪層(Yunshuichi Formation):

崙後斷層下盤之烏山頭背斜兩側，延番仔厝以南至走馬瀨一帶，呈帶狀分布。於曾文溪剖面本層下部和上部則以泥岩為主，砂岩在中部較為發育，且向北砂岩夾層逐漸增多，形成烏山頭背斜西翼於走馬瀨以北明顯的山脊發育。洪崇勝(1991)在曾文溪剖面本層頂部發現有谷地磁正向岩段，且含 *Globorotalia truncatulinoides* (D'Orbigny) 指準化石，推論此古地磁應屬松山期之奧都威 (Olduvai) 事件，時代為更新世。因此，澗水溪層的時代屬更新世範圍之內。

(二) 崙後斷層及口宵里斷層上盤

1. 糖恩山砂岩(Tangenshan Sandstone):

於曾文溪以北烏山嶺至烏山頭一帶出露，但下部為崙後斷層所截。糖恩山砂岩標準剖面以青灰色細粒緻密砂岩與泥質砂岩為主，夾有深灰色頁岩及砂質頁岩，砂岩富含雲母片，黑斑點顯著，堅緻多呈塊狀。泥質砂岩中泥質與砂質部分常混雜相交，無法細分(張錫齡與鍾振東，1957)。本層屬中新世晚期，常含斧足類化石和底棲性有孔蟲化石，及棕櫚樹葉化石(張錫齡與鍾振東，1957)。

2. 鹽水坑頁岩(Yenshuikeng Shale):

出露於崙後斷層上盤，自曾文新村向南至曾文溪北側烏山頭附近，呈帶狀分布。以深灰色頁岩或砂質頁岩為主，偶夾薄層至厚層粉砂岩凸鏡體。本層岩石粒度向南漸細，成為以灰黑色或黑色頁岩為主的地層。黃敦友(Huang, 1977, 1984)以浮游性有孔蟲分布認為本層應屬上新世早期；超微化石研究結果(紀文榮，1978；吳榮章，1982)顯示本層時代屬於上新世之最早期。

3. 隘寮腳層(Ailiaochiao Formation):

出露於崙後斷層上盤，自頂湖一帶向南至曾文溪北側，呈帶狀分布。隘寮腳層為灰色或黃灰色細粒砂岩或泥質砂岩與暗灰色頁岩所組成之厚薄不一之互層，頁岩多含砂質，有時砂質部分與泥質部分呈不規則交雜或呈薄互層，含些許深黑色炭質物。超微化石則根據黃廷章與丁志興(1981)之研究，顯示本層仍應在超微化石帶 NN13-NN15，故兩者皆指世本層時代為上新世早期。

4. 茅埔頁岩(Maopu Shale):

出露於崙後斷層上盤，自頂湖一代向南至曾文溪北側，呈帶狀分布。茅埔頁岩以暗灰色頁岩為主，夾有灰色或黃灰色質砂岩或細粒砂岩薄層。頁岩有時略為砂質。根據黃廷章與丁志興(1981)之研究，認為超微化石之末現面位於本層之中，顯示超微化石帶 NN15 之上界在茅埔頁岩層內，時代上其下部屬於上新世，上部為晚上新世。

5. 竹頭崎層(Chutochi Formation):

自曾文水庫向南延展至左鎮並於近口宵里斷層處位態多呈 60°-65° 東南傾。本層以灰色，細至中粒之泥質砂岩為主，夾數層暗灰色頁岩，並與灰色頁岩及砂岩形成厚薄不一的互層。根據黃廷章與丁志興(1981)之研究，超微化石之資料顯示本層在超微化石帶 NN16-NN18 範圍內，故本層時代應屬更新世。

(三)口宵里斷層下盤

1.北寮頁岩(Peiliao Shale):

口宵里斷層東側，包括灣潭以南地區及玉井東側鹿陶洋山、龜丹至北寮地區。以暗灰色或青灰色頁岩和砂質頁岩為主，偶夾薄層黃褐色泥質砂岩，砂岩層時有不規則之變化，地層層面不易判斷。超微化石則根據紀文榮(Chi, 1978) 和吳榮章(1982) 之研究，*Gephyrocapsca oceanica* Kamptner 之首現面起至本層中上部，顯示本層中上部已進入超微化石帶 NN19，也確定上新世/更新世界面位在本層之內，亦即本層之時代為更新世。

2.鏡面砂岩(Jingmian sandstone):

標準剖面位於玉井東北曾文溪支流之龜丹溪，為北寮頁岩之上部出現凸鏡狀的灰色或灰黃色厚層疏鬆砂岩，張錫齡與鍾振東(1957)。

3.玉井頁岩(Yuching Shale):

玉井向斜翼部，向北至楠西附近圈合，向楠為左鎮斷層所截。以厚層之泥岩和砂質泥岩為主，層理不明顯，夾有薄層或凸鏡狀之粉砂岩，局部可見甚為微細之貝類化石碎片及有孔蟲化石，並根據指準化石與超微化石帶之 NN19 顯示，本層時代屬更新世。

2-2-2 地質構造

研究區主要的地質構造由西往東，有烏山頭背斜、崙後斷層南段、口宵里斷層、及玉井向斜，皆通過曾文溪。

(一)烏山頭背斜(Wushantou Anticline):

烏山頭背斜為緊密直立褶皺(tight upright fold)，位於崙後斷層下盤，褶皺軸為北北東走向，與崙後斷層約略平行，兩翼地層為澗水溪層，岩層皆以 70-80 高角度傾斜，曾文溪南岸軸跡不明確。

(二)崙後斷層(Lunhou Fault):

崙後斷層為一北北東走向的逆移斷層，由嘉義觸口東方向西南延伸至台南市左鎮區榮和里，長約 48 公里(中國石油公司，1989)。一般認為崙後斷層是觸口斷層的南向延伸(中國石油公司，1989；張徽正，1998；林啟文，2000c)，又稱烏山頭斷層(何信昌，2005)。崙後斷層也是分隔台灣西部外麓山帶與內麓山帶的主要斷層。於研究區範圍的崙後斷層南段橫跨東山區、楠西區、玉井區及左鎮區，北側始於臺南市東山區的檳榔宅附近鹿寮溪。

(三)口宵里斷層(Kouhsiaoli Fault):

口宵里斷層則位於崙後斷層東側約 2~3 公里處，範圍跨過楠西區、玉井區及左鎮區，為一北北東走向的斷層，北端始於曾文水庫南側，向南延伸至頂湖一帶，並跨越曾文溪劉陳灣，向南延伸至左鎮，南端為左鎮斷層所截切本斷層最早由烏居敬造(1932)於台南州新化油田地質圖提出，何信昌等(2005)指出斷層的西側地層為竹頭崎層，岩層傾角多在 60 度以上，東側岩層之傾角較小，僅 25 度以下，並根據斷層露頭及兩側岩層的化石時代，認定為一背向逆斷層。

(四)玉井向斜(Yujing Syncline)

位在研究區的東側，南北延展十餘公里，為一開闊向斜構造。向斜軸大致呈北 30 度東走向，軸部通過玉井，北至楠西一帶轉為東北向，南至菜寮河流域消失。

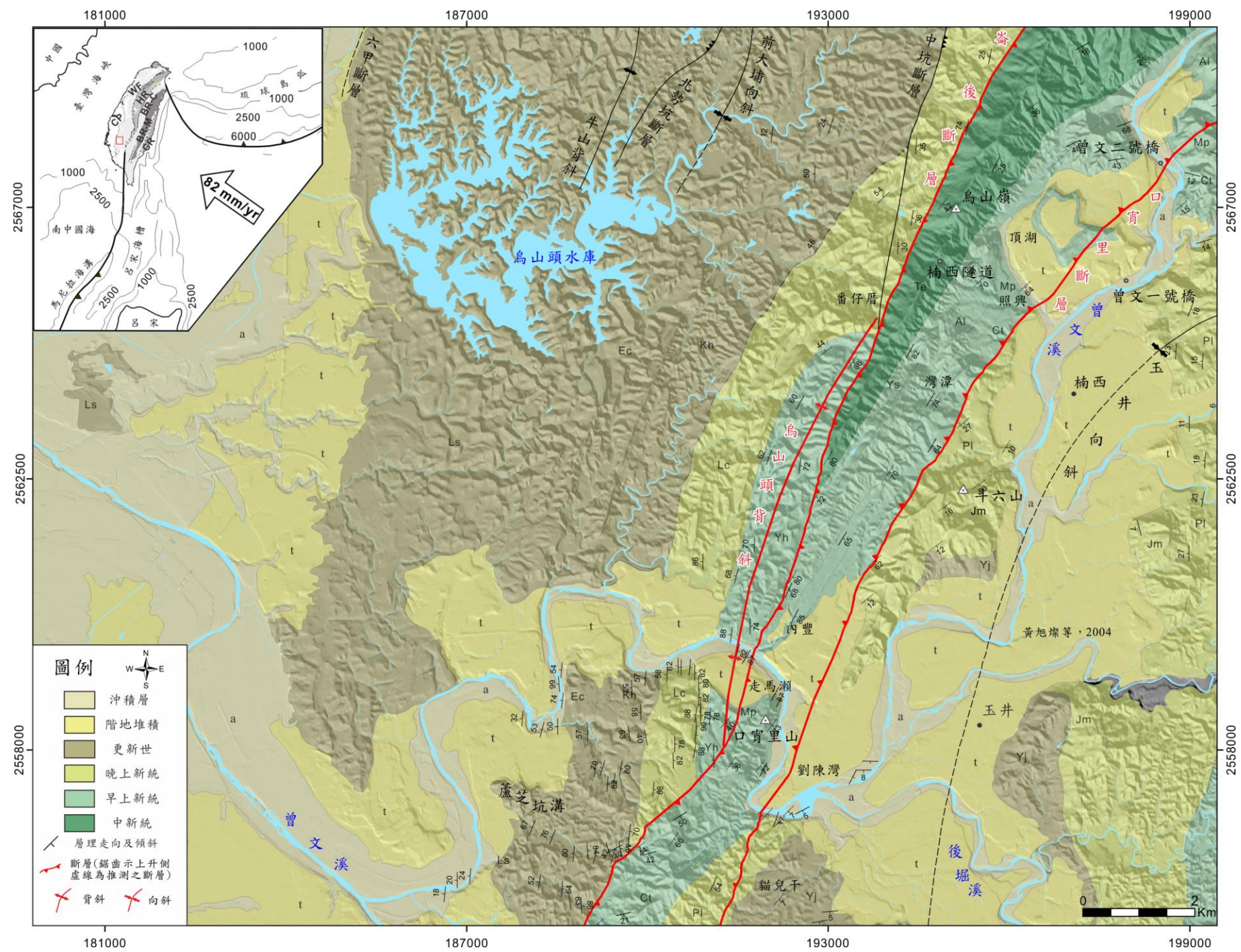


圖 6 西部麓山帶曾文溪流域地質圖。以不同顏色區分年代不同地層，此圖改繪自何信昌等(2005)。左上角的台灣地體圖-CP:濱海平原；WF:西部麓山帶(褶皺逆衝帶)；HR 雪山山脈(新生代板岩帶)；BR-C:脊梁山脈(新生代板岩帶)；BR-M:脊梁山脈(先三疊紀變質雜岩)；CR:海岸山脈。

Figure 6. Geological maps of the study area, including the Wushantou anticline and the fault trace for the southern part of Lunhou fault and for the Kouhsiaoli fault (modified from Ho et al., 2005). The color of geological map is classified by age. Index map- CP: Coastal Plain; WF: Western Foothills (fold and thrust belt); HR: Hsuehshan Range Cenozoic slate belt; BR-C: Backbone Range (Cenozoic slate belt); BR-M: Backbone Range (Pre-Tertiary metamorphic complex); CR: Coastal Range.

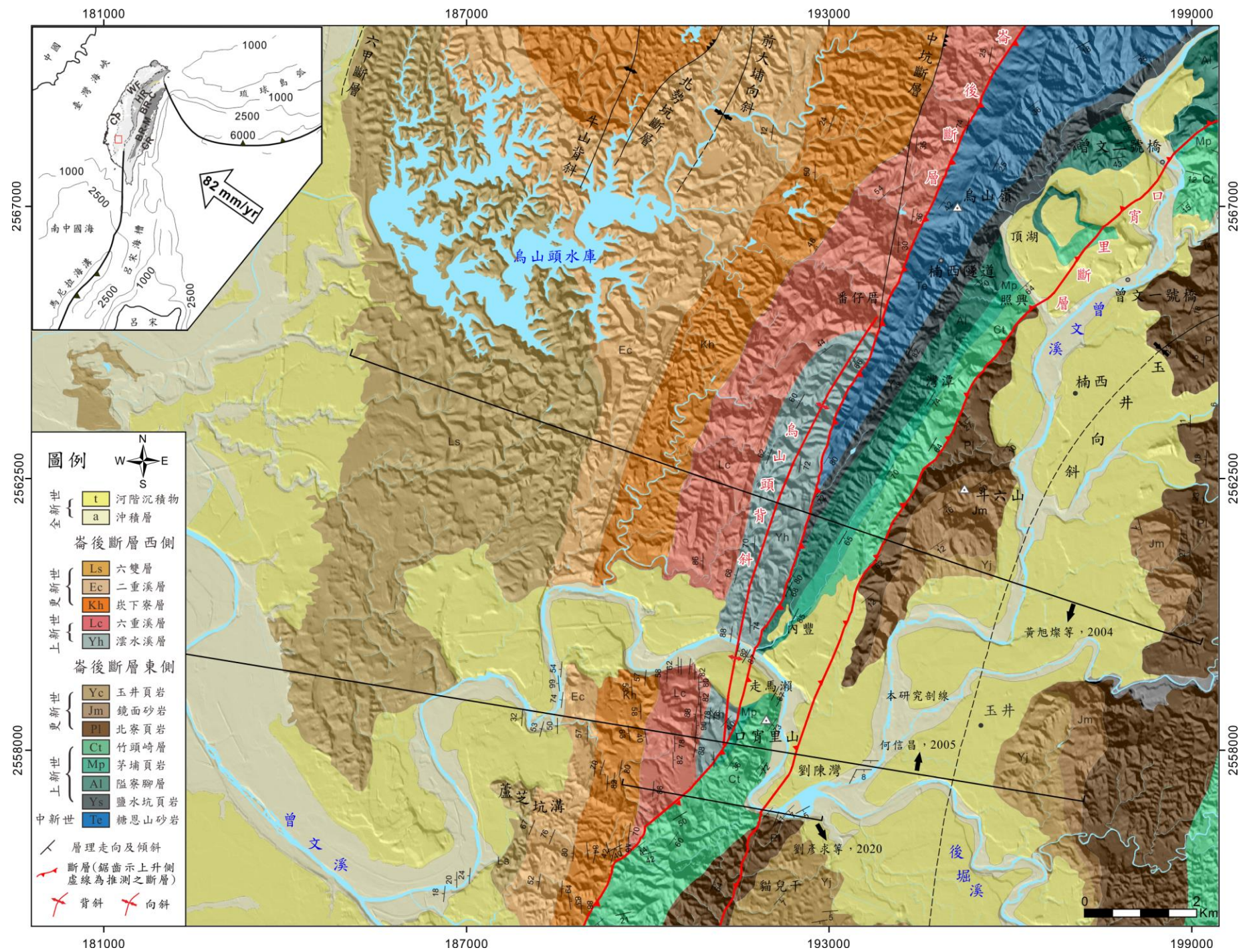


圖 7 西部麓山帶曾文溪流域的岩性地質圖。圖改繪自何信昌等(2005)，約略東西向的黑實線為前人文獻之剖面位置。左上角的台灣地圖-CP:濱海平原；WF:西部麓山帶(褶皺逆衝帶)；HR:雪山山脈(新生代板岩帶)；BR-C:脊梁山脈(新生代板岩帶)；BR-M:脊梁山脈(先三疊紀變質雜岩)；CR:海岸山脈。

Figure 7. Geological maps of the study area, including the Wushantou anticline and the fault trace for the southern part of Lunhou fault and for the Kouhsiaoli fault. In the geological map also shows the geological projection line of previous studies. Index map- CP: Coastal Plain; WF: Western Foothills (fold and thrust belt); HR: Hsuehshan Range Cenozoic slate belt; BR-C: Backbone Range (Cenozoic slate belt); BR-M: Backbone Range (Pre-Tertiary metamorphic complex); CR: Coastal Range.

第三章 前人文獻回顧

本章將細說前人的研究重點，以了解崙後斷層與口宵里斷層的野外位置、和河階分布與定年資料，助於崙後斷層與口宵里斷層之活動特性的探討。

3-1 研究區的斷層活動性及構造特性

3-1-1 大地測量

本研究欲快速掌握與了解研究區內兩條斷層於數十年間可能的活動性與活動範圍，故參考與大地測量相關的報導與數據。

景國恩等(2018)分析台灣全島近十數年來的 GPS 連續站、GPS 移動站、精密水準測線及 PS-InSAR 資料，提供全台地表速度場並透過斷層模型，推估斷層短期滑移速率。於報導中提及的北門-楠西測線橫跨崙後斷層與口宵里斷層，測線長約 40 公里(投影至剖面的長度)，從 2003 年至 2018 年共計有 15 次施測。此測線以 GPS 連續測站 GS44 之垂直速率(5.9 mm/yr)，作為約制點來校正水準點 I088 相對於 GPS 測站澎湖白沙站 S01R 之垂直速率。各時間分段之水準平均抬升速率(圖 8)中，綠色為 2003 年 10 月至 2010 年 3 月甲仙地震震前垂直速度，藍色為 2010 年 3 月至 2018 年 4 月之垂直速度，崙後斷層以西約五公里的高程地形變化雖較和緩，但垂直速率卻有逐步抬升的趨勢(約-16.0-4.0 mm/yr)，在通過崙後斷層西側有達 10.0 mm/yr 以上的垂直抬升速度。由於此測線自崙後斷層以西約五公里，點位的地形變化趨勢變得較顯著，顯示自進入丘陵區，地表垂直運動活動性增加，而沿此測線可明顯區分為沿海沉陷與山區抬升現象，平均垂直速度分別為-10 mm/yr 與 7 mm/yr，於 2003-2010 與 2010-2020 台南山區的平均垂直分量約為 7.3 mm/yr (由景國恩提供，2020)(圖 9)。

Lu et al. (2020)使用升、降軌進行影像解析，指出烏山頭背斜西側相對於口宵里斷層東側的相對垂直變位量約有 20 mm/yr (圖 10A)。Pathier et al. (2015)對 2007-2011 年台南曾文溪一帶以 ALOS-1 的衛星觀測角度(Line of sight)與垂直方向夾 40°，方位約 80°E 的影像資料解析(圖 10B)，口宵里斷層東側近斷層的四公里範圍，相對於嘉南

平原呈現抬升現象，相對抬升速度約 16 mm/yr，而往西通過口宵里斷層，越西抬升量越大，在烏山頭背斜軸的兩、三公里處達到最大值，相對抬升速度約 18 mm/yr，再往西，在西部麓山帶的前緣驟降。

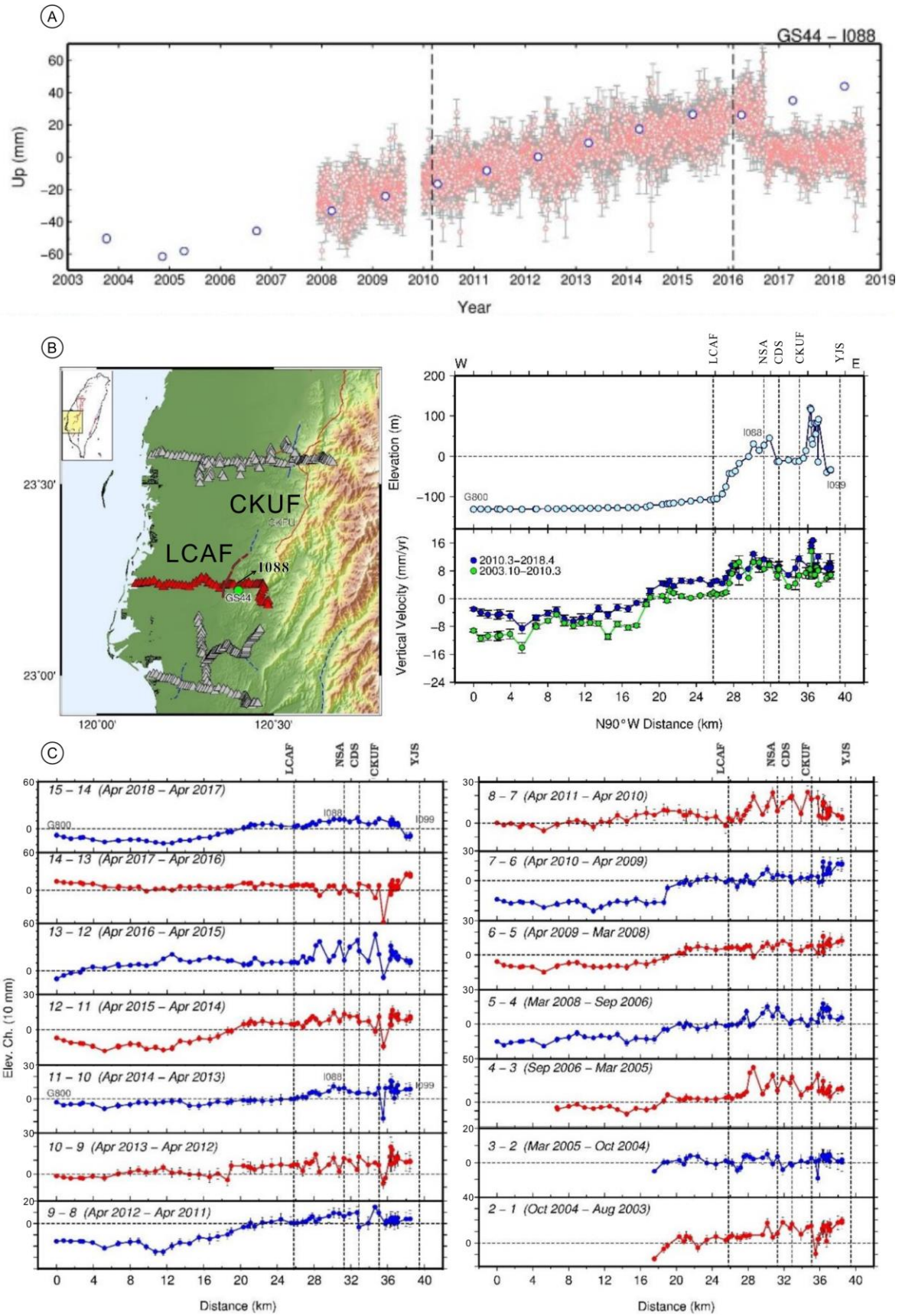


圖 8 時間序列比較與北門至楠西測線水準高程變化圖 (景國恩等, 2018)。(A)水準點

為 I088 與連續測站 GS44 之時間序列比較，兩者相距 0.9 公里，虛線分別為 2010 年 3 月 4 日甲仙地震及 2016 年 2 月 6 日美濃地震；(B)上欄左側為高程地形變化，上欄右側為各時間分段之水準平均抬升速率，綠色為 2003-2010 年甲仙地震震前垂直速度，藍色為 2010 至 2018 之垂直速度；(C)下欄中各條線為高程變化曲線，下欄中每個刻度代表 10 mm 的變化量；垂直虛線標示主要地質構造之地表出露位置，橫軸為投影於垂直斷層剖面之距離；LCAF:六甲斷層 NSA:牛山背斜、CDS:前大埔向斜、CKUF:觸口斷層、YJS:玉井向斜。

Figure 8. Crustal deformation observed by precise leveling along the Beimen to Nanxi survey line (Ching et al., 2018). (A) Time series comparison between leveling benchmark I088 and the continuous GPS station GS44, distant by 0.9 km (see location on panel B). The dotted lines are the Jiaxian earthquake on March 4, 2010 and the Meinong earthquake on February 6, 2016; (B) Location map of the Beimen-Nanxi leveling survey line (in red), topographic profile along this survey line, and vertical velocity before and after the Jiaxian earthquake: from 2003 to 2012, in green, and from 2010 to 2018, in blue; (C) Elevation changes between each survey. The interval between each tick on the vertical axis represents 10 mm; Similarly to B, the vertical dotted lines indicate the main geological structures. The horizontal axis is the distance along the E-W direction. Vertical dotted lines indicate the main geological structures: LCAF: Liujia fault, NSA: Niushan anticline, CDS: Qiandapu syncline, CKUF: Chukou fault, YJS: Yujing syncline.

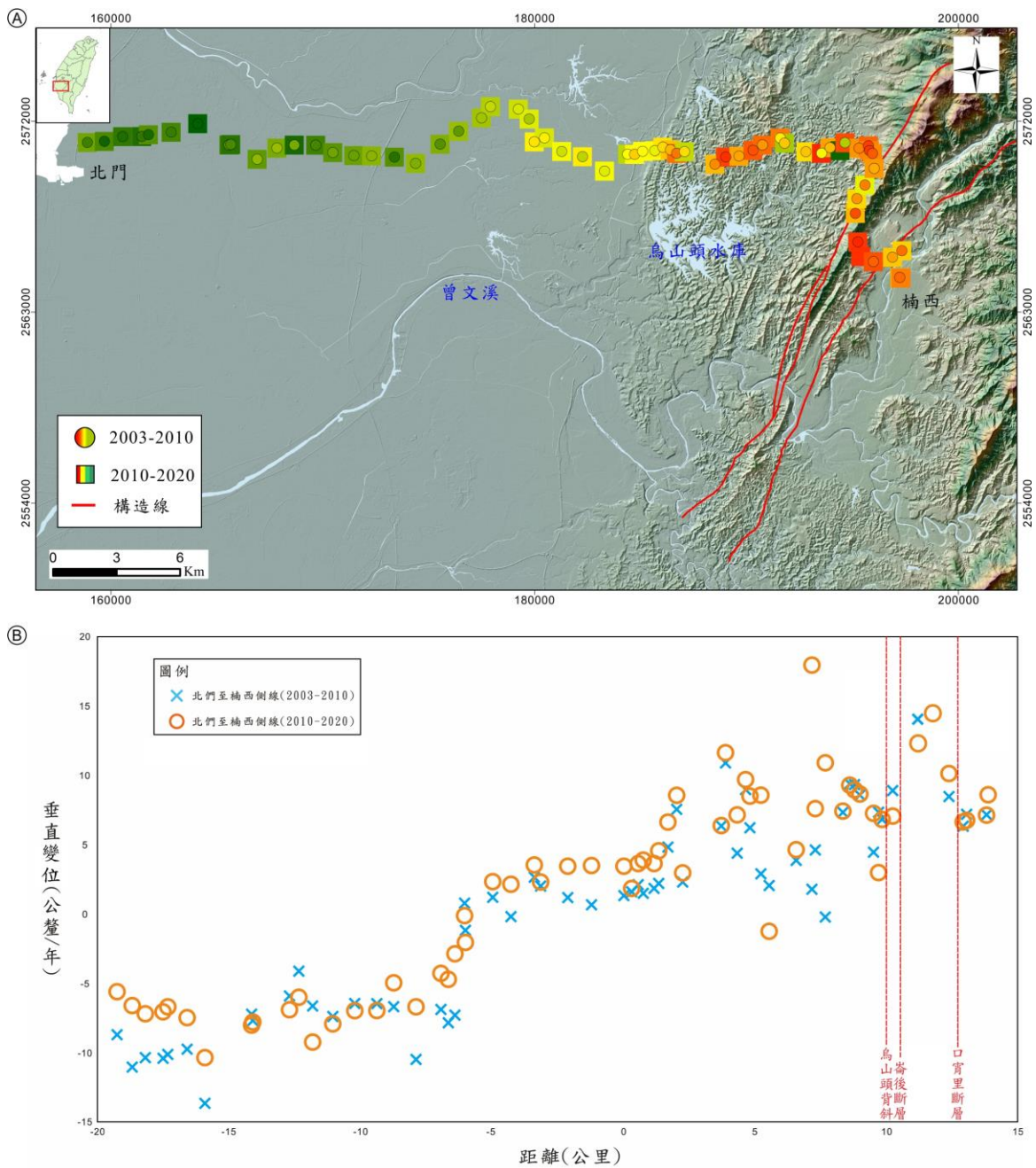


圖 9 北門-楠西測線的精密水準測量 (由景國恩提供, 2020)。(A)水準垂直速度場分布圖；(B)投影於垂直區域構造方向的垂直變位量分布圖。叉號: 2003-2010 年；圓圈: 2010-2020 年。

Figure 9. Precise leveling measurements (Courtesy of Ching Kuo-En, 2020). (A) Vertical velocity field relative to Penghu, Baisha, based on precise leveling measurements and GPS observations along the Beimen-Nanxi survey line; (B) Vertical velocities across the foothills

section of the leveling route (within the white dashed-line rectangle), before and after the 2010 Jiaxian earthquake: 2003-2010 (Blue cross) and 2010-2020 (Orange circle). The horizontal axis shows distance along the survey line, with benchmark locations projected parallel to the strike of geological structures.

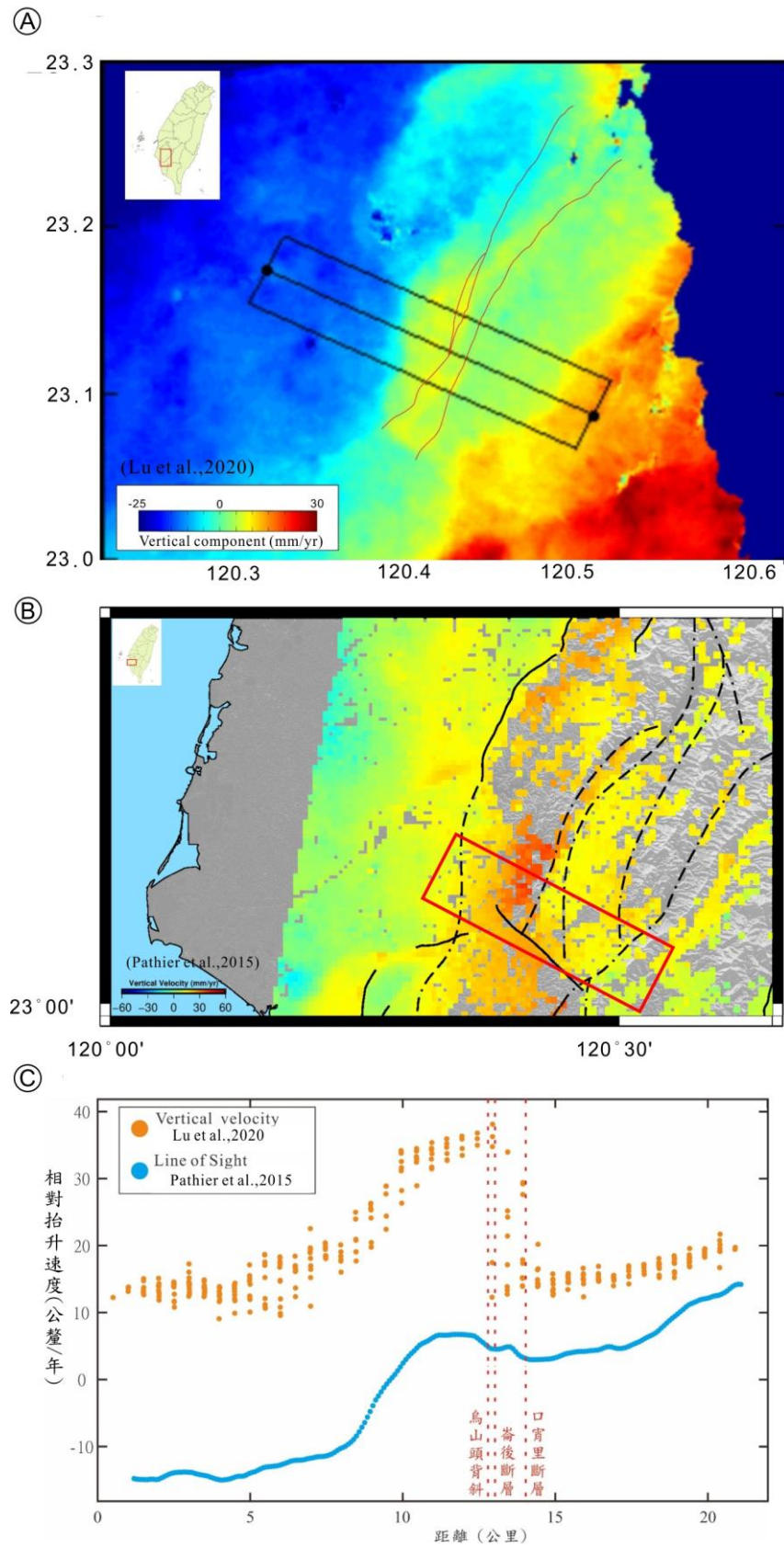


圖 10 嘉南一帶的 InSAR 影像分析結果。(A) 基於 2007-2010 年 ALOS-1 影像所得的

地殼變位圖(Pathier et al., 2015)。其衛星觀測方向(Line of Sight, LOS)與垂直方向夾 40° ，方位約 80°E ；(B) 2020 年 Lu et al. 所測量的垂直平均速度；(C) 投影於西北西方向的垂直變位圖。藍色圓點為 Pathier 於 2015 年的 InSAR 垂直分量(提取範圍自圖 10A 之黑色方框)，橘色圓點為 Lu et al. 於 2020 年的 InSAR 垂直分量(提取範圍自圖 10B 雙紅色方框)。

Figure 10. Results from InSAR studies. (A) Line-of-sight (LOS) velocity map based on ALOS-1 images during 2007-2010 (Pathier et al., 2015). The line of sight has an angle of about 40° from vertical and about 80°E ; (B) Map of vertical mean velocity measured by Lu et al. in 2020; (C) InSAR measurements along the same transect across the study area: blue dots are Pathier's data, extracted from the black rectangle in fig. 10A; orange dots are Lu's data, extracted from the red rectangle in fig. 10B.

3-1-2 崙後斷層與口宵里斷層的構造特性與活動性

崙後斷層於陳文山(2003)報導中提到楠西隧道以北斷層露頭皆受崩塌層所覆蓋，楠西隧道以南地形較為平緩，斷層露頭較易發現，崙後斷層向南延伸至曾文溪的位置大致在走馬瀨，但經過曾文溪後的斷層可能被走馬瀨河階所覆蓋，地形來看崙後斷層沒有截切走馬瀨南岸河階。走馬瀨南岸河階可以分為三階，河拔高分別為 20 公尺、30 公尺、40 公尺，走馬瀨北岸河階以分為 40 公尺與 50 公尺，而北岸河拔 40 公尺的河階年代為 1867-1615 yr BP (Hsieh & Knuepfer, 2002)，可以推論崙後斷層至少在 1867-1615 yr BP 就沒有活動跡象。陳文山(2003)也指出崙後斷層的上盤晚全新世河階高度相對下盤為高，推測其可能還具有活動性。

黃旭燦等(2004)利用平衡剖面方法，進行構造特徵對比及構造回復分析，繪製崙後與口宵里斷層的構造剖面(圖 11A)，指示出口宵里斷層為正斷層；烏居敬造(1932)與何信昌等(2005)(圖 11B)以及劉彥求等(2020)(圖 11C)，皆認為口宵里斷層為北北東走向，斷層面向西傾斜之逆斷層，且其為崙後斷層之背衝斷層(backthrust)。推測崙後斷層與口宵里斷層皆為活動斷層，且於 2020 年劉彥求等的報導中，提到口宵里斷層於曾文溪劉陳灣之露頭，出露斷層逆衝至階地礫石之上，且階地礫石的定年結果為 12710-12630 yr BP(表 1)，因此認為口宵里斷應屬於第二類活動斷層，上述前人研究的剖面位置參考圖 7。

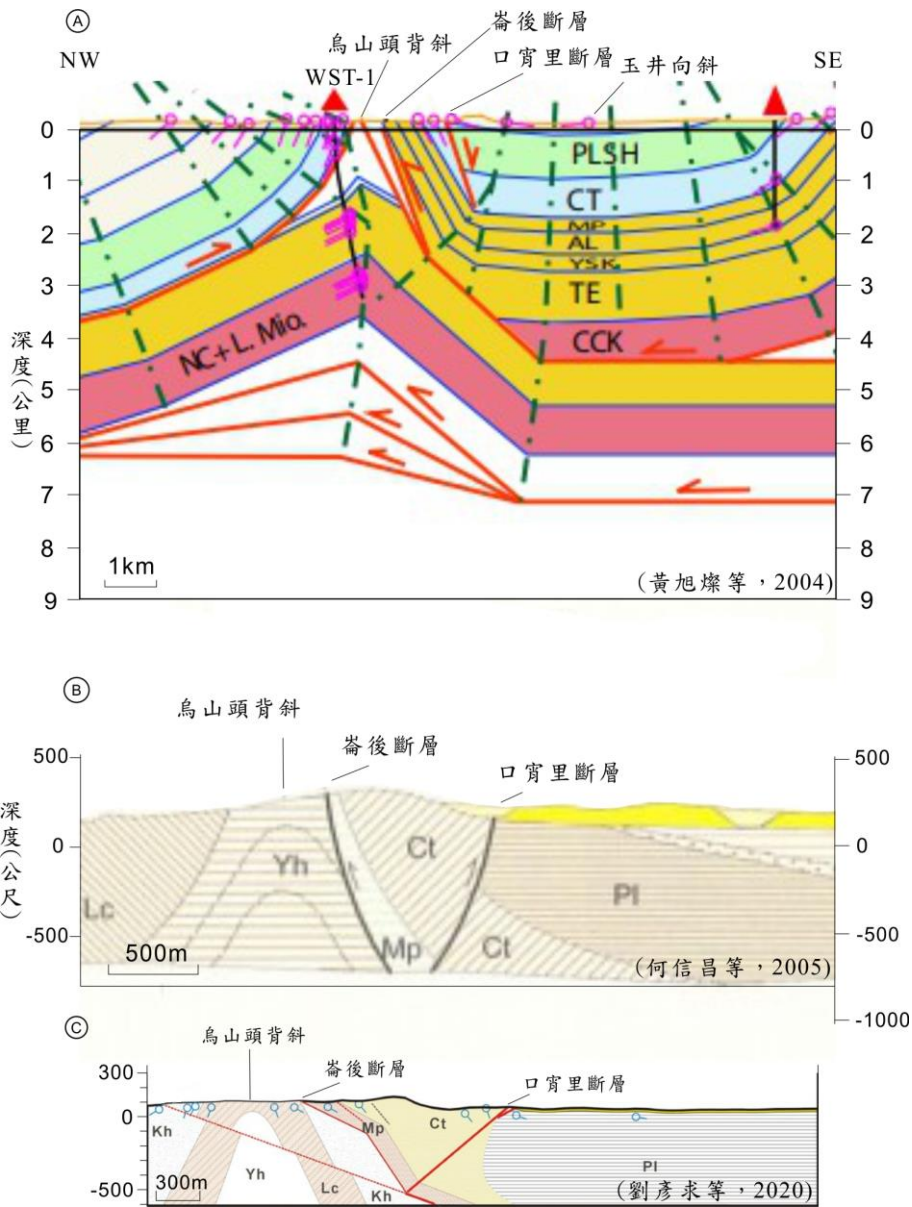


圖 11 玉井地區跨烏山頭背斜與崙後斷層及口宵里斷層地質剖面圖。剖面位置參考圖 7。(A)擷取自黃旭燦等(2004)的剖面；(B)擷取自何信昌等(2005)的剖面；(C)擷取自劉彥求等(2020)的剖面。

Figure 11. Geological profile across the Wushantou anticline and the southern part of the Lunhou fault and Kouhsiaoli fault, Yuching area and the scale between distance and elevation is 1:1 (modified from Ho et al., 2005) (see location on Fig. 7). (A) Geological section from 黃旭燦等(2004) ; (B) Geological section from 何信昌等(2005) ; (C) Geological section from 劉彥求等(2020).

3-2 曾文溪地區河階相關研究

本研究以 Hsieh & Knuepfer(2002)的曾文溪地區河階研究為出發點，快速地掌握曾文溪沿岸河階分布地概況，並參考其研究方法與觀點輔以較為近期的技術，將於第四章研究方法中說明，再與本研究所採集到的定年標本，以更多的資料解釋崙後斷層與口宵里斷層的活動性及關聯性，尋求更多的突破。以下將介紹 Hsieh & Knuepfer 於 2002 年報導中的研究方法與其最後的結論(圖 12)。

Hsieh & Knuepfer(2002)採用傳統的地貌學研究方法，首先通過立體鏡從航空照片中找出河流階地，繪製在台灣農林部發布的五千分之一地形圖上，每個階地表面的高程直接從這些地圖中確定，亦或參考地圖上現今河道的高程予以決定，因為地圖有五米的等高線間隔，所以在兩條等高線之間的任何位置的高程都有五米的不確定性，因此必須在現場檢查階地沉積物和下伏基岩，同時測量或估計沉積物的厚度和一些特定目標(年代測定的樣品、基岩表面)的相對高度，通常相對於當地的特定基準(例如，現代河床面)，所尋得的階地沉積物中的木材或植物碎片將進行放射性碳測年，使用 Stuiver and Reimer (1993) 的方法將放射性碳年齡校準為當前日曆年(cal BP)，確定河階年代後，將形成年代相當的破碎河階對比(correlation)起來，這裡所謂的破碎河階亦即現今分布於河道兩側相對小規模的河階。他們利用以下的五個程序，進行河階的對比：

1. 連續性相對較好的河流階地的對比。如確定沿曾文溪的 YC(位於玉井地區)階地為幾乎連續的階地表面就是一個很好的例子，在圖 11A 中 YC 階地很明顯可以確定，其原本為連續的階地表面，但向下游或上游發散到多個階地表面，特別是往下游被支流或主幹河道中斷，而造就破碎河流階地 YC₁、YC₂ 和 YC₃。

2. 連續性相對較差的破碎階地的對比。這種對比是利用航拍照片基於階地幾何形狀(型態和高差)，可以去相比對的兩個相鄰的破碎階地，它們的相對高差必須小於五米，且大多數情況下，相隔離的河谷間距小於五百公尺。當多個不同位階的階地彼

此緊鄰有類似的高程及河谷位置時，比對的方式將可能不再唯一，在這種情況下 Hsieh & Knuepfer 會先暫時將這些破碎階地對比到一個平滑的長剖面上，同時識別出大部分古洪氾平原的蜿蜒特徵，然而這樣的比對若出現相鄰破碎階地有明顯的間距時，將就此打住。

3. 使用放射性碳定年來檢查步驟 2 中的關聯性是否合理。如果不是必須修改其關聯性，以尋求可靠的放射性碳年代和破碎階地的明顯連續性之間的一致性，然而在解釋放射性碳年代時，必須了解來自基底礫石的年代可能與從同一階地的越岸堆積物 (overbank deposit) 中獲得的年代不同 (Merritts et al., 1994)。

4. 從步驟 1 到步驟 3 的結果解釋構造。

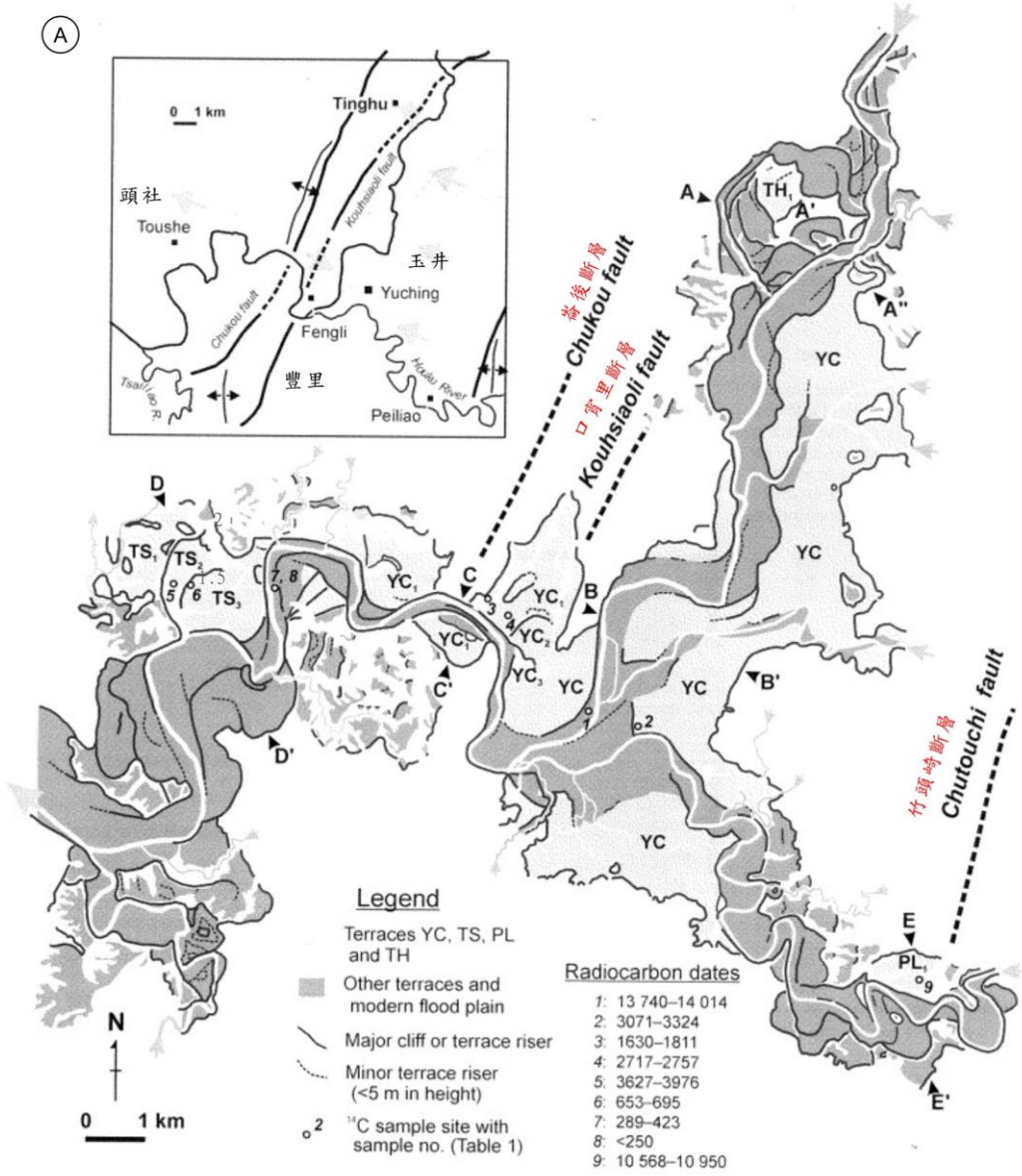
5. 將剩餘的破碎階地根據推斷的構造模式，連結起來以便觀察出地形與河階是如何受到構造影響並抬升。

於 Hsieh and Knuepfer (2002) 的報導中， ^{14}C 定年結果一共 7 組 (表 1)，崙後斷層西側頭社地區的 TS_2 階地，採集到的樣本有一組，其校正後的年代為 3660-3380 cal BP；口宵里斷層東側的劉陳灣階地，採集到的樣本有二組，其一校正後的年代為 15070-14830 cal BP，另一組為 7940-7860 cal BP；崙後斷層東側與口宵里斷層西側內豐里的 YC_1 ，採集到的樣本有兩組，其校正後的年代為 1860-1760 cal BP，另一組校正後的年代為 2650-2530 cal BP；於口宵里斷層東側和睦的 T5 階地，採集到樣本有兩組，其校正後的年代為 11970-11830 cal BP，另一組為 3068-2934 cal BP。

圖 12B 為 Hsieh and Knuepfer (2002) 繪製的沿曾文溪投影的河階剖面圖，圖中最顯著的特徵是橫跨豐里-頭社的背斜形構造。該背斜的西翼表現為階地 TS_1 和 TS_2 向西北傾斜，與古水道方向相反。階地 TS_1 也比 TS_2 陡峭，顯示了階地 TS_1 表面在 TS_2 形成過程中的累積傾斜，相關階地 TS_3 - YC 的長剖面表明，該背斜是不對稱的且東翼較陡西翼較緩 (圖 12A)，東翼如此陡峭顯然不影響流經與這條背斜軸線平行的曾文溪，該背斜的頂部位於豐里以西約 1 公里處，與崙後斷層跡的位置雷同，較陡的東翼則跨過口宵里斷層跡，因此這種背斜很可能與口宵里斷層的活躍有關，並且藉由基岩侵蝕

面的河拔差，除以階地的年代，計算後得到的下切速率為 15.0-28.0 mm/yr，基岩下切的初始可能明顯晚於階地的年代，而基岩下切量應大於現生河道上方的基岩高度，且 YC₁ 的樣本均採集於河階沉積物最底部，因此計算的下切速率是最小的，所以這個下切速率表明背斜頂部的岩石隆升速率至少為 10 mm/yr(圖 12B)。根據樣本 9 估算出崙後斷層下游的後堀溪流域的基岩下切速率為 4.8-5.0 mm/yr(圖 12B)相比之下，玉井西側自更新世以來的基岩下切速率幾乎為零(樣本 1)，認為這種下切速率的差異主要是由於構造傾斜造成的，廣泛分布在竹頭崎斷層的西坡，正如 YC 階地的不對稱性所暗示的那樣(圖 12A)，因此這個谷的東側沒有大型沖積扇可能有構造活動將主河道逼到現在的位置使其不對稱。

(A)



(B)

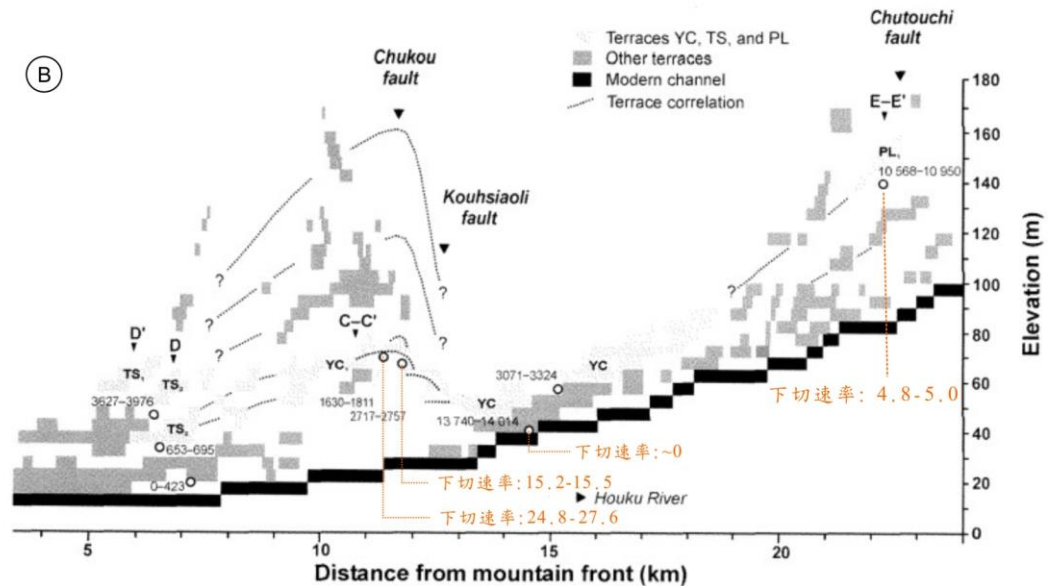


圖 12 玉井地區曾文溪階地分布及放射性碳定年 (Hsieh and Knuepfer, 2002)。(A)圖中顯示更新世構造、主要城鎮、和推測的全新世構造;放射性碳定年範圍為 $\pm 1\sigma$ ，單位為 cal BP(定年年代使用 1993 年 Stuiver 和 Reimer 的校正曲線進行定年校正);(B)沿曾文溪河階剖面 and 放射性碳定年分布。

Figure 12. Distribution and long profile along the Tsengwen River. (A) Map of river terraces of the Tsengwen River in the Yuching area and radiocarbon dates and sampling sites (Hsieh and Knuepfer, 2002). Radiocarbon dates were calibrated based on Stuiver and Reimer (1993) and are shown with 1σ uncertainty, in cal BP. Inset map locates Pleistocene structures, major towns, and inferred Holocene structures. The fault labeled Chukou fault corresponds to the Lunhou fault; (B) River terrace longitudinal profiles along the Tsengwen River and distribution of radiocarbon dates. Orange numbers are incision rates provided in Hsieh and Knuepfer (2002).

表 1 前人研究的碳 14 定年結果

Table 1. ¹⁴C dating results of previous studies

ID (the number used on the maps)	樣本來源 Source	實驗室編 號 Lab label	河階 Terrace	經度 (TWD97) Longitude (TWD97)	緯度 (TWD97) Latitude (TWD97)	常規年齡(年) Conventional age (yr B.P.)	定年結果 (年) Calibrated age (2- sigma cal BP)	採樣位置 Sample site	基岩侵蝕 面 (公尺) Strath elevation (m)	採樣高 程 (公 尺) Sample elevation (m)
I(a)	Hsieh & Knuepfer (2002)	NTU2322	T4b	192081.541	2559744.823	1810±50	1630(1715)1811	厝尾 Cuowei	70	70
II(a)	Hsieh & Knuepfer (2002)	WK6135	T4b	192280.772	2559559.823	2590±60	2717(2740)2757	厝尾 Cuowei	67	67
III(a)	Hsieh & Knuepfer (2002)	WK5136	T3	186591.727	2559920.763	3520±140*	3627(3740, 3750, 3770, 3790, 3830 3976)	頭社 Toushe	39	47
IV(a)	Hsieh & Knuepfer (2002)	WK6130	T3	194546.63	2557614.131	3001±67*	3071(3170, 3190, 3210)3324	和睦 Hemu	55	57
V(b)	Yen-Chiu Liu et al., 2020	-	T0	191874.367	2556956.976	12670±40	X	劉陳灣 Liuch-enwan	59	59
VI(c)	Hsieh Meng- Long (2022)	Hsieh Meng- Long (2022)	T0	191956.945	2556945.284	14950±120	18480-17887	劉陳灣 Liuchenwan	60	60
VII(c)	Hsieh Meng- Long (2022)	Hsieh Meng- Long (2022)	T1a	192071.628	2556904.266	7900±40	8976-8595	劉陳灣 Liuch-enwan	64	67
VIII(a)	Hsieh & Knuepfer (2002)	NTU2323	T0	193866.887	2558139.666	11900±70	13740(13870) 14014	和睦 Hemu	37	41

(1) Sample number assigned at dating laboratory: BETA=Beta Analytic Testing Laboratory; NTU= National Taiwan University; WK= the University of Waikato.

(2) Calibrated by using program and calibration curve(s) of Stuiver and Reimer (1993). Value(s) in parentheses is (are) median values.

(3) Calculated by dividing height of bedrock above the modern channel by the calibrated age with 1σ range (only the ages derived from the samples located no higher than 3 m above the bedrock surface are calculated).

(4) Measured by accelerator mass spectrometry.

(5) (5) Source: (a) Hsieh and Knuepfer (2002); (b) Yen- Chiu Liu, Jon-Wei Hsu and Chii-Wen Lin (2020); (c) Hsieh Meng-Long, personal communication, 2022.

第四章 研究方法

本研究為調查研究區內構造的相對關係，運用二種方法對其進行詳細的調查與研究，而這二種方法分別為，野外調查、河階判釋與分析，以藉由地形、地質以及定年資料對構造特性與活動進一步的分析與解釋。

4-1 野外調查

曾文溪沿岸地質調查將結合空拍機先行在野外調查露頭，再由人員對於可抵達露頭進行詳細地質調查，若為無法抵達露頭，則利用空拍機進入，以不同的拍攝角度，多次近拍露頭，以利記錄及判釋。本研究區曾文溪以南多半為泥岩區的露頭，泥岩區中的斷層帶或剪碎帶(shear zone)通常較泥岩深色，利用空拍的影像判釋，將有利於斷層帶及剪碎帶的追蹤，若是無人機飛進入含砂岩層的露頭，也可利用空拍影像大略判定岩層傾角大小及傾向，或是藉由影像觀察岩層是否有受構造擾動。本研究攝影測繪(空拍)的步驟如圖 13 所示，首先於空拍範圍內，選擇通透度良好的位置均布數個地面控制點(圖 15)，地面控制點的尺寸應使其可直接於影像上辨識為原則，並採用即時動態定位(VBS-RTK)的方法測量地面控制點(圖 16)，取得地面控制點高精度的座標。下一步是飛行計畫執行的部分，航線規劃以棋盤式飛行為原則，逐步完成斷層跡沿線兩側以及河流階地露頭的空拍，本研究的空拍飛航規劃中，前一張與後一張原始空照的相片重疊率介於 80%~85%之間，相鄰的兩個航帶相片重疊率介於 60%~72%之間，飛行計畫執行的下一步驟為影像資料處理，將量測的地面控制點座標及航拍照片匯入 PiX4Dmapper pro 專業測繪軟體進行，PiX4Dmapper pro 首要步驟為利用軟體內建相機初始參數進行率定，再透過影像匹配和空中三角測量，解算匹配後點雲的座標，接續進行點雲密集化、3D 貼圖網格生成等，最終成品為彩色正射影像(圖 17)，並從中獲取精細的野外露頭座標如河階階面高程、基岩侵蝕面高程等，組建完成之模型請參考附錄 A。

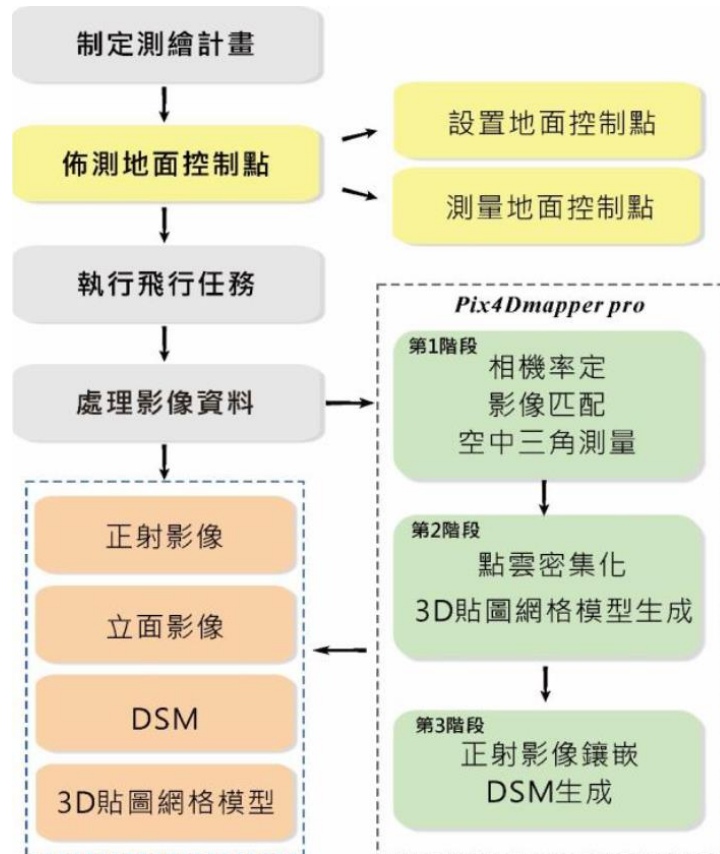


圖 13 空拍執行流程 (引用自謝承恩等，2016)。

Figure 13. Workflow chart of aerial photograph acquisition and derivative products for this project (quote from 謝承恩等，2016).



圖 14 本研究使用的無人機-DJI Mavic 2 pro。

Figure 14. Drones used in this study- DJI Mavic 2 pro.



圖 15 地面控制點佈設工作照。

Figure 15. Set-up of a ground control point.



圖 16 以 VBS-RTK 量測地面控制點之工作照。

Figure 16. Measurement of the location of a ground control point using VBS-RTK.

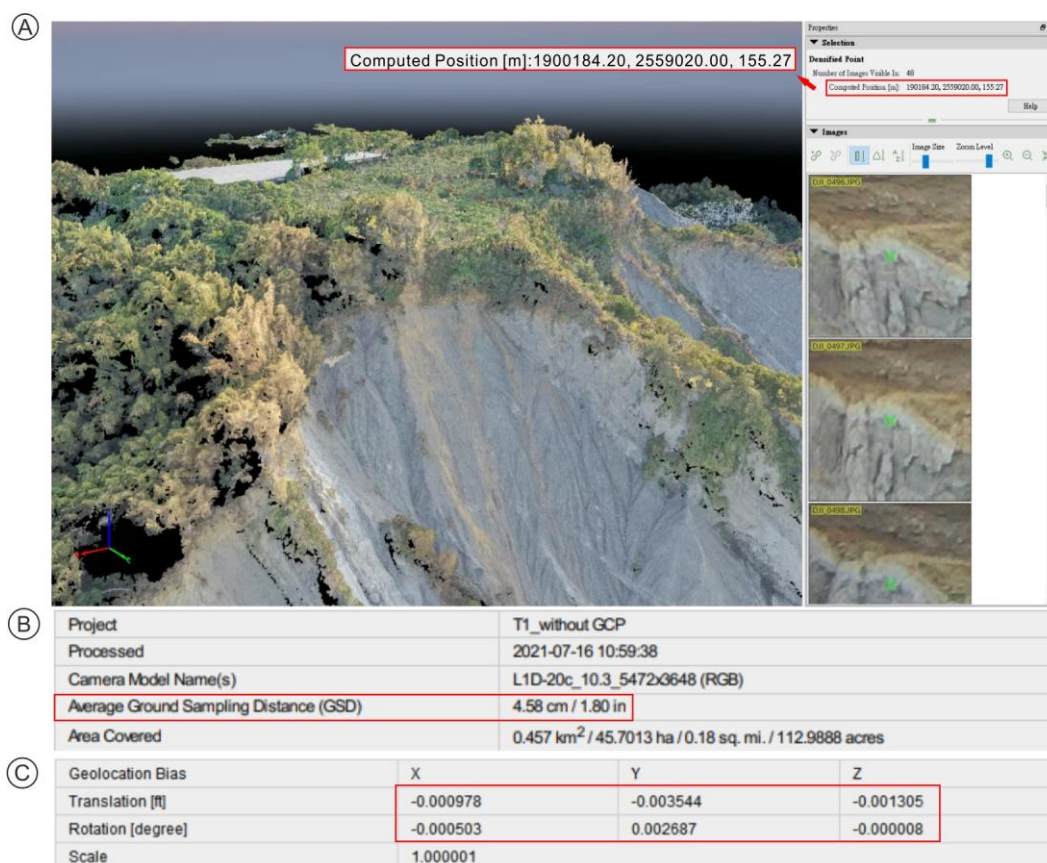


圖 17 崙後斷層南段及口宵里斷層影像資料分區及品質報告。(A)3D 影像合成與座標；(B)空拍影像地面解析度；(C)地理位置誤差:定義輸出座標中給定的圖像初始和計算的地理位置之間的偏差。

Figure 17. Index map of aerial images along the southern part of the Lunhou and Kouhsiaoli faults and quality report from Pix4D. (A) Point cloud (left image) dataset, where we can target a point along the strath to obtain its coordinates (see in the red rectangle on the upper right) and visualize drone photographs that include this point (see images on the right, where the green cross is the selected position); (B) Calculated average ground sampling distance: 1 pixel represents 4.58 cm, on average; (C) Geolocation bias: It defines the bias between initial image (without ground control point) and computed geolocation (with ground control point) given in the output coordinate system.

4-2 河階判釋與分析

為便於野外調查河階以及最終統整資料與對比，本研究使用 5 m×5 m 的數值地形模型、陰影圖與坡度圖以及等高線，針對沿曾文溪之烏山頭背斜、崙後斷層與口宵里斷層的河階加以繪製，再輔以各河階相對於現生河道之高程，將各河階分類，最後再以野外調查結果與定年結果修改野外調查前所繪製之河階。統整所有河階階面、基岩侵蝕面、定年樣本的資料後，即可將河階投影至一垂直剖面上，以利於觀察跨斷層的河階變位，求得上下盤的下切速率，藉此計算出相對抬升速率，若已知斷層傾角，則可進一步推估斷層的滑移速率。

4-2-1 河階圈繪

河階為河流廢棄的河漫灘、沖積扇或氾濫平原所形成的，意味著河階於地表地形的形貌，是為較平緩且平行於河道並沿著河道發育。因此可以使用陰影圖(如圖 18A)與坡度圖(如圖 18B)，易於判釋研究區內沿曾文溪較為平緩或近水平的區域，並將其繪製成河階，但因曾文溪沿岸周圍擁有許多支流，因此須再藉由等高線的分布及走向(如圖 18C)判定所繪製之河階是否源於曾文溪主流，最後繪製源於曾文溪主流的河階分布圖。

4-2-2 河階對比

同一條河流，於不同的時間，將形成不同的河階，長期下來，將造就不同河拔高的河階序列，因此將前一步驟繪製出的河階，依照各河階的階面與現生河道的高程差，進行分階，並依河拔的不同，由高到低進行區分，就可定義出各處的河階序列，並對比出相同的河階(如圖 18D)。然而實際的情況是，河階會有規模、連續性及區性性的差異，加上構造作用穿插於其中，相同的河階，很可能其河拔高將不再雷同，因此須有階地定年的資料，才能真正地確認是否為相同的河階，亦即形成年代相同的河階。

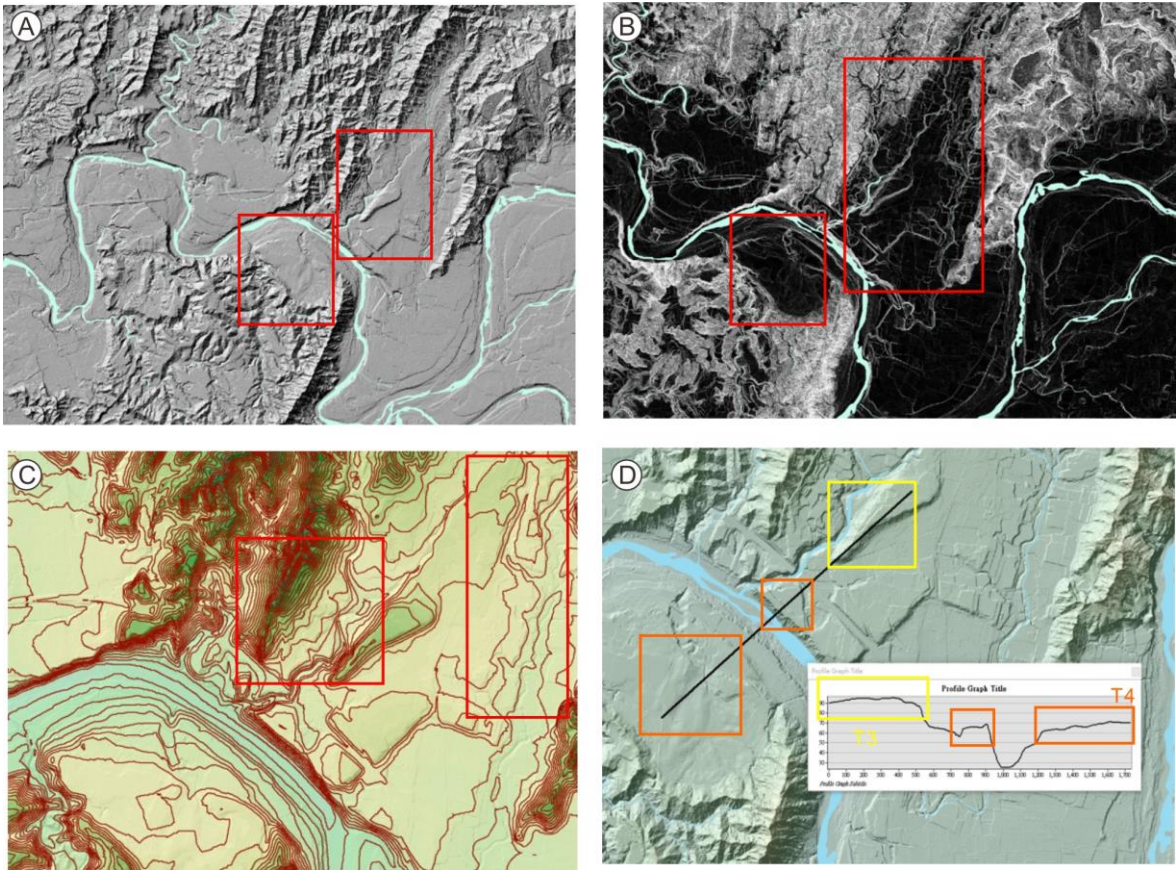


圖 18 河階圈繪的相關圖。(A)陰影圖；(B)坡度圖；(C)5 米等高線；(D)DEM 高程比對。

Figure 18. Data and principles used to classify the river terraces. (A) Shaded map; (B) Slope map; (C) Topographic contour lines, with 5 m interval; (D) Elevation comparison based on digital elevation model.

4-2-3 階地地表、基岩頂部侵蝕面、及採樣樣本

本研究針對崙後斷層及口宵里斷層上下盤周圍之階地進行河階露頭調查，以無人機與 VBS-RTK 及全站儀，測量河階階面、階地沉積物與基岩之侵蝕界面(strath)及定年標本高程(圖 19)。

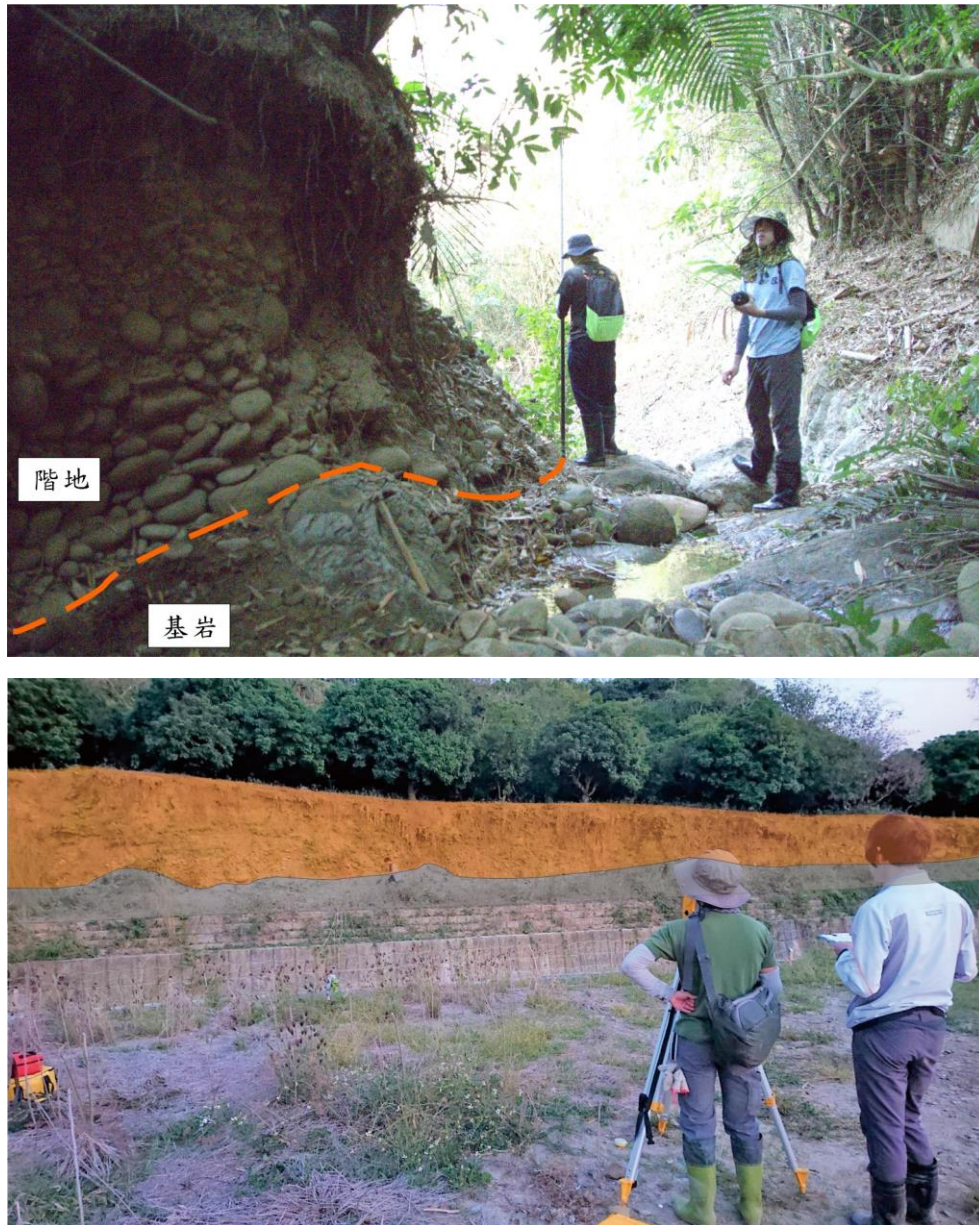


圖 19 量測絕對高程。以 VBS-RTK(上圖)與全站儀(下圖)量測高程。

Figure 19. Measurements of the absolute elevation of the strath, using VBS-RTK (upper photograph), and using total station (lower photograph).

4-2-4 碳十四定年

本研究欲野外調查時於河階階地沉積物內，尋找可供定年且證實其年代的沉積樣本，並藉由碳十四定年法得知該樣本所處河階之可能的沉積年代。

自然界中碳有 3 種同位素：99%的碳原子量 12 的碳十二(^{12}C)，1%為原子量 13 的碳十三(^{13}C)；原子量為十四的碳十四(^{14}C)非常微量，僅約為兆分之 1.2。碳十二與碳十三為穩定同位素；碳十四具有放射性，故稱為放射性碳，會進行 β 衰變，蛻變為氮十四(^{14}N)，而放射性碳測試被稱為常規放射性碳年(CRA)。有三種主要技術用於測量任一樣品的碳十四含量，分別為氣體正比計數、液體閃爍計數和加速器質譜儀。(一)氣體正比計數：指計算樣品發射的 β 粒子，是一種傳統放射性定年技術。 β 粒子是放射性碳衰變的產物。在此方法中，碳樣品首先轉換成二氧化碳氣體，然後才在氣體正比計數器上進行測量。(二)液體閃爍計數：樣品為液體形式，並添加閃爍體。當閃爍體與 β 粒子相互作用時會產生閃光。一個裝有樣品的小瓶在兩個光電倍增管之間通過。只有當兩個設備都有閃光，才能計數。(三)加速器質譜儀(AMS)：是一種現代化的放射性碳定年法，被認為是衡量樣品放射性碳含量較為有效的方法。在此方法中，直接測量碳十四與碳十二和碳十三的相對含量。該方法不計算 β 粒子，而是計算樣品中存在的碳原子數量以及同位素的比例。

本研究選定美國邁阿密 Beta Analytic 實驗室的加速質譜儀(AMS)對比輻射測試方法定年，因為 AMS 放射性碳定年最大的優點就是樣品量小。實驗步驟將 CO_2 使用鈷催化劑進行氫還原，製成石墨靶後放入 AMS 儀器中完成測試。樣品在 800°C ，100% 氧氣環境下燃燒釋放 CO_2 。釋放出的 CO_2 先用甲醇/乾冰乾燥，然後用液態氮收集起來進行隨後的石墨化反應。為了確保化學系統性，對於參考標準、內部品質控制(QA)樣品和背景樣品也會進行相同的化學反應。透過測量樣品 $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$ 對比 Oxalic Acid II (NIST-4990C)的 $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比例得出最後結果(BP” or “pMC”)，所有測試都通過實驗室內部 SNICS 離子源粒子加速器完成。品質控制樣品和未知樣品一起進行測試，並單獨

出具“品質保證報告”。在報告被檢測樣品的結果前，我們會檢查品質控制樣品的測試結果是否符合已知樣品的相關數據。實驗室會將一小部分石墨化樣品放入元素分析儀(EA)並透過穩定同位素質譜儀(IRMS)計算 $\delta^{13}\text{C}$ 值，該值將用于同位素分餾校正。元素分析儀將有機質氧化為 CO_2 ，水及碳酸鹽在氣體分析器內酸化以產生 CO_2 ，EA 及氣體分析器皆與 IRMS 相連，而穩定同位素質譜儀將不同質量碳區分開、計算 CO_2 質量(44、45 及 46)並算出樣品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。

由於本研究的定年結果由 Beta Analytic 實驗室以 IntCal13 (Reimer et al., 2013) 進行校正，而前人研究的校正方法則是以程序與 Stuiver and Reimer (1993)的校正曲線對樣本進行校正，為了能將前人研究與本文的定年結果互相參照，故使用牛津大學的 ORAU-OxCal 網站將前人研究的定年結果以 IntCal13 (Reimer et al., 2013) 進行校正，這包括於 Hsieh and Knuepfer (2002)的 ^{14}C 定年結果一共 7 組及劉彥求等(2020)的 1 組，校正後的定年結果請參閱表 2。

4-2-5 河階分析

同一個河階面，原則上為同一時期形成，若有正移或逆移斷層截切過同一時期形成階面，會造成斷層兩側的階面高程的差異，本研究於口宵里斷層東側(下盤)、口宵里斷層與崙後斷層之間(兩條斷層的上盤)、崙後斷層西側(下盤)河流階地尋找定年的材料，並配合合適的定年方法，於斷層上下盤之間進行河階的年代對比，若斷層兩側有找尋到可配對到相同年代的河流階地，則利用同一階面受斷層活動影響產生之高程差計算所有的定年樣本於各個河階形成時的下切速率，藉以判釋氣候與海水面變遷時對於河階的影響以及推估河階的相對抬升速率，並透過斷層傾角估算出斷層的滑移速率(圖 20)。

河階的高程與年代是計算下切速率與相對抬升速率的變量，且在實際工作中某些未知量不可能或不便於測量以及計算，導致觀測值不可避免地包含有系統誤差與隨機誤差的數據。

為統計實驗過程中產生的誤差本研究使用誤差傳播定律(propagation of uncertainty)，將所得之數據及誤差進行 1994 統計。

當測量時，高程與時間的個別誤差將影響最後結果的誤差，因此本研究將野外所測得之高程與定年結果的年代各自平均後相除，即可求得下切速率(其中高程與年代為兩不同物理量故為線性獨立，因此共變異數為零)。如下列公式(黃福坤，2011)所述：

$$I=f(e,a,\dots)$$

$$\bar{I} = f(\bar{e}, \bar{a}, \dots)$$

$$I_i - \bar{I} = f(e, a, \dots) - f(\bar{e}, \bar{a}, \dots)$$

$$= \left[f(e, a, \dots) + \left(\frac{\partial f}{\partial e} \right) (e_i - \bar{e}) + \left(\frac{\partial f}{\partial a} \right)_{\bar{a}} (a_i - \bar{a}) + \dots \right] - f(\bar{e}, \bar{a}, \dots)$$

$$= \left(\frac{\partial f}{\partial e} \right) (e_i - \bar{e}) + \left(\frac{\partial f}{\partial a} \right)_{\bar{a}} (a_i - \bar{a}) + \dots$$

$$= \left(\frac{\partial I}{\partial e} \right)_{\bar{e}} (e_i - \bar{e}) + \left(\frac{\partial I}{\partial a} \right)_{\bar{a}} (a_i - \bar{a}) + \dots$$

$$\begin{aligned}
\sigma_I^2 &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2 \\
&= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial I}{\partial e} \right)_{\bar{e}} (e_i - \bar{e}) + \left(\frac{\partial I}{\partial a} \right)_{\bar{a}} (a_i - \bar{a}) + \dots \right]^2 \\
&= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial I}{\partial e} \right)_{\bar{e}}^2 (e_i - \bar{e})^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial a} \right)_{\bar{a}}^2 (a_i - \bar{a})^2 + 2 \left(\frac{\partial I}{\partial e} \right)_{\bar{e}} \left(\frac{\partial I}{\partial a} \right)_{\bar{a}} + \dots \right] \\
&= \sigma_e^2 \left(\frac{\partial I}{\partial e} \right)_{\bar{e}}^2 + \sigma_a^2 \left(\frac{\partial I}{\partial a} \right)_{\bar{a}}^2 + 2\sigma_{ea} \left(\frac{\partial I}{\partial e} \right)_{\bar{e}} \left(\frac{\partial I}{\partial a} \right)_{\bar{a}} + \dots \quad (4-1)
\end{aligned}$$

I 為下切速率； \bar{I} 為下切速率之樣本分布的平均值；e 為河階的基岩之高程； \bar{e} 為河階的基岩之高程之樣本分布的平均值；a 為河階之年代； \bar{a} 為河階年代之樣本的平均值。

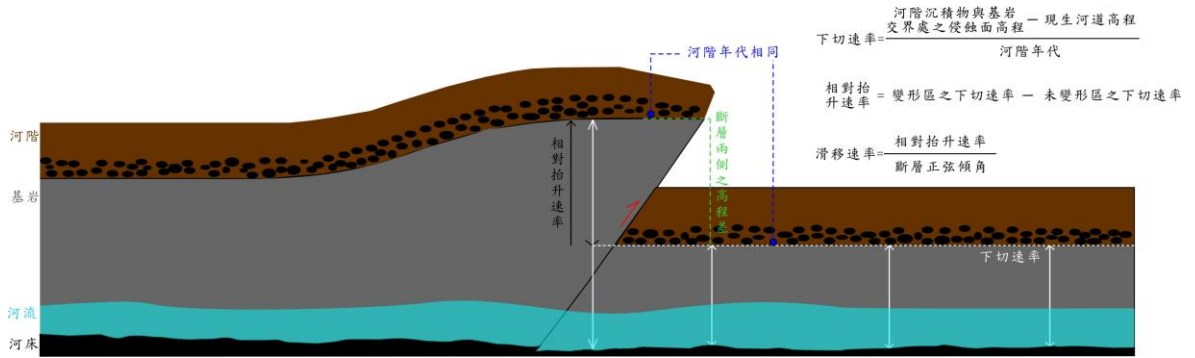


圖 20 斷層關聯褶皺導致的河流階地變形示意圖。

Figure 20. River terrace analysis. Sketch of a deformed river terrace due to fault-related folding: The relative uplift rate associated to the fold and fault can be estimated based on the river incision rates near the fold axis, across the fault, and in the non-deformed area, upstream and downstream the fold and fault. The incision rate is calculated as the elevation difference between the strath and the modern river divided by the age of terrace; the relative uplift rate is the difference in incision rate between the deformed area and the non-deformed area; the fault slip rate is calculated as the relative uplift rate divided by the sine of the fault dip angle.

第五章 研究結果

5-1 野外調查結果

崙後斷層南段及口宵里斷層鄰近的區域地質圖如圖 21，本研究沿曾文溪主流完成烏山頭背斜與崙後斷層南段及口宵里斷層沿岸的野外調查，底下先就三個主要構造的重要露頭擇要說明，再報導各別構造於不同地點的野外記錄。

烏山頭背斜:褶皺帶寬度約 900 公尺，於走馬瀨橋西方出露較為完整，沿走馬瀨橋往西沿路位態呈高角度 70-90°東西傾不斷變化，根據岩層上下判斷後得知，烏山頭背斜的核心具有兩個次級的背斜與一個向斜，褶皺內具有數條百米長的剪裂帶。

崙後斷層: 崙後斷層於曾文溪北岸出露的地方在走馬瀨橋北端東側的小溝，小溝的南北兩面皆有露頭出露，露頭高度約 25 公尺，寬度約 100 公尺，兩側的露頭基岩侵蝕面高程並無太大變化，露頭觀察到寬度約 15~20 公尺的斷層帶(fault zone)。

口宵里斷層: 曾文溪河岸劉陳灣地區北岸皆有較為完整的露頭出露，北岸的河流階地東西向廢棄河道處出露較大片的露頭，層面位態約為走向 N46°E，傾角 67°E，露頭的東側岩層面的位態約為走向 N35°E，傾角 22°E，曾文溪南岸岩壁出露寬約 1 公里、高度約 50 公尺的完整露頭，此處可觀察到完整的斷層露頭，斷層約 42°向西傾斜，露頭中斷層帶寬度約 32 公尺，斷層帶東側的界面可明顯觀察到斷層截切過階地礫石層，斷層東側下盤處層面約 20°向東傾斜，西側上盤層面則約 70°向東傾斜。

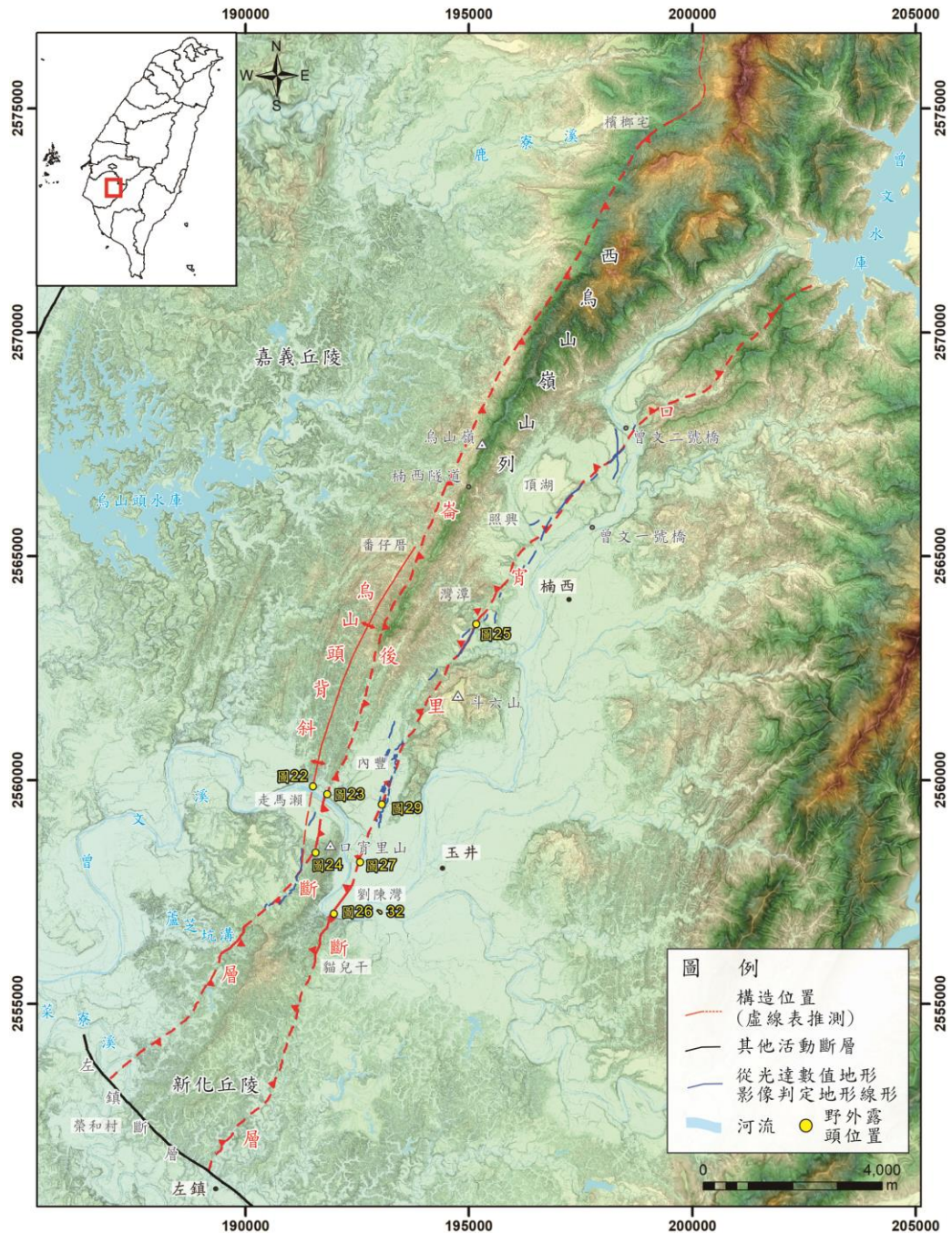


圖 21 曾文溪沿岸斷層露頭點位置。烏山頭背斜與崙後斷層南段及口宵里斷層沿線區域地質圖，底圖引自地調所五萬分之一地質圖。(何信昌等，2005；宋國城等，2000；邵屏華等，2009；張憲卿等，2008)。

Figure 21. Field observations of Lunhou fault and Kouhsiaoli fault along the Tsengwen River (yellow small dots). The basemap consists in geological maps at the scale 1 to 50000 published by CGS (Ho et al., 2005; Sung et al., 2000; Shao et al., 2009; Chang et al., 2008).

5-1-1 烏山頭背斜

走馬瀨橋往西約 830 公尺範圍的岩性與位態的變化，及與烏山頭背斜的關係記述如下。在走馬瀨橋往西約 200 公尺的範圍為厚砂質泥岩層偶夾薄細砂層，位態為 87° 往東傾；200 到 500 公尺間，岩性由巨厚泥岩轉變為砂質泥岩層偶夾薄細砂層，越往西砂岩層漸厚，位態由 88° 西傾轉為 76° 東傾；500 到 830 公尺岩性由巨厚砂質泥岩偶夾厚砂層轉為巨厚層泥岩夾薄砂層，此區段岩性的變化處，亦為湮水溪層與六重溪層的分界(何信昌等，2005)，約在 830 公尺處測得一位態為 74° 西傾 (圖 22A)。在這 830 公尺範圍內的位態變化，本研究認為較似位在烏山頭背斜的核心或樞紐區(Hinge zones) 所形成 M 型次生褶皺(parasitic fold)所致。再者，距走馬瀨橋約 400 公尺處的路頭，亦可追跡到一道長約 200 公尺的斷層，此斷層由數條剪裂帶密集匯聚而成，並截切數道砂岩(圖 22C、D、及 E)。藉由野外調查本研究認為烏山頭背斜的核心具有 M 型褶皺的特徵，且在褶皺的西翼上亦有明顯的逆斷層現象，這可能都是因為背斜的持續發育，致使兩翼過於緊密，進而產生的調適構造。

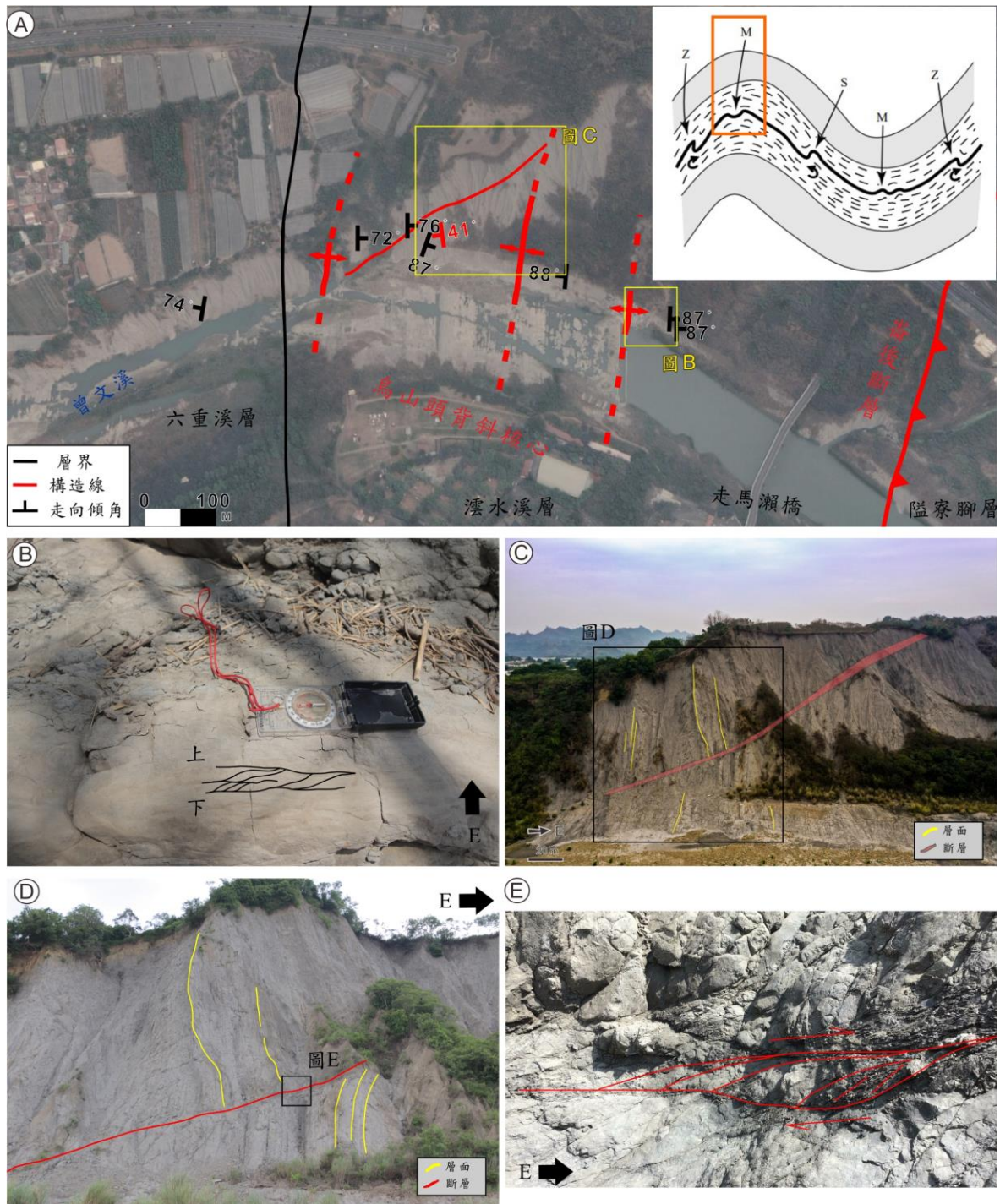


圖 22 曾文溪北岸於走馬瀨橋西側之烏山頭背斜野外調查成果，露頭位置參考圖 21。
 (A)位態量測結果，烏山頭背斜是 M 型褶皺 (右上圖取自 Roland et al, 2013); (B)交錯層;
 (C、D)小斷層由數條黑色剪裂帶組成; (E)剪裂帶。

Figure 22. Geological survey along the north bank of the Tsengwen River, near the Wushantou anticline fold axis, west of Tsoumalai bridge (see location on Fig. 21). (A)

Attitude measurements of bedding (black) and shear zone (red). Wushantou anticline is a M fold (The parasitic folds figure is taken from Roland et al, 2013); (B) Cross bedding structures, used to determine the top and base of the bed; (C & D) Minor fault evidenced by numerous shear bands and show bedding deformation (yellow line is bedding); (E) and shear sense (E: thrust fault).

5-1-2 崙後斷層南段

(一)走馬瀨-曾文溪河床

於走馬瀨橋下方東側的小溝，斷層帶寬度約為 15~20 公尺，斷層帶東側上盤處的薄層砂岩層位態為 N25°E，傾角 70°E，斷層西側下盤處的砂岩位態為 N5°W，傾角 75°E，斷層帶的組成為分布密集的剪切帶或小斷層，剪切帶或小斷層的傾角呈約 70°-80°的高角度，露頭中可觀察到薄砂岩層被小斷層錯斷成數小段，位於斷層帶的上方，觀察到斷層帶兩側岩盤露頭的上方皆可看到覆蓋了厚度約 3~10 公尺的河階堆積礫石層且基岩侵蝕面的高程皆為 65~70 公尺，且兩側的礫石層都是顆粒支持，礫石成分為石英砂岩，並無太大差異(圖 23)。

(二)走馬瀨農場南方

曾文溪走馬瀨農場南方，所找到露頭岩性為厚層泥岩偶夾薄層細粒砂岩，岩層傾角約 40°~70°向東南傾斜，於走馬瀨南側的小徑路面裂開處，可觀察到岩層被剪切帶截斷的現象(圖 24)。

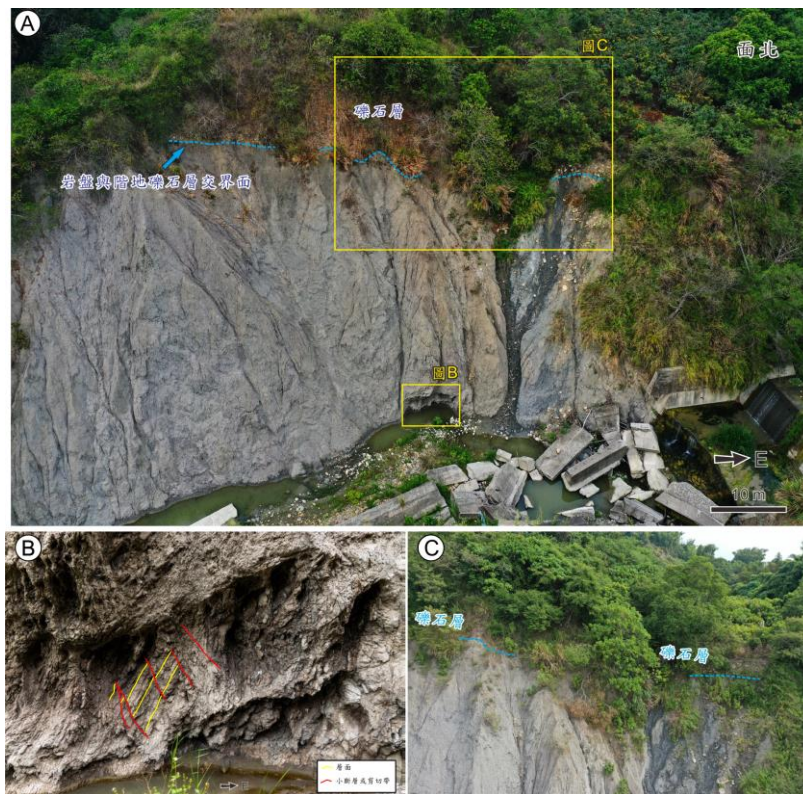


圖 23 曾文溪北岸走馬瀨橋北端東側的斷層帶露頭，露頭位置參考圖 21。(A)北面露頭可觀察到約 15~20 公尺厚的斷層帶；(B)北面露頭只出露斷層帶東側的界面，斷層帶東側砂岩層位態約 70°向西傾斜；(C)斷層未切穿河階。

Figure 23. Lunhou fault outcrop located east of the north end of the Tsoumalai bridge (see location fig.21). (A)15~20-m-wide fault zone can be identified on the northern wall of the outcrop (yellow rectangle B); (B)The outcrop on the northern wall only shows the east boundary of the fault zone. The dip angle of the sand layers east of the fault zone is 70° to west; (C) The fault didn't cut through the terrace.



圖 24 走馬瀨農場南方裂開路面的露頭，露頭位置參考圖 21。剪切帶(紅色線處)截切過薄砂岩層。

Figure 24. Outcrop on the cracked road, south of the Tsoumalai farm (See location fig.21). The shear band(red line)cut through the thinly bedded sandstone.

5-1-3 口宵里斷層

(一)照興、灣潭地區

灣潭地區有數條曾文溪東西走向的支流及小溝，其中位於具明顯平行於斷層的地形崖北側小溪溝，出露較良好的露頭，位於地形崖坡的附近，出露的兩處露頭層面差異十分明顯，兩處露頭之間相距約 20 公尺，中間被植被覆蓋。西側露頭岩性為厚層泥岩偶夾薄層砂岩，層面的位態約 $N43^{\circ}E$ ，傾角 $71^{\circ}E$ ；東側露頭可發現一道較明顯界面，此界面以東的岩性為中層至厚層泥質砂岩偶夾薄層泥岩，層面的位態約為 $N5^{\circ}E$ ，傾角 $23^{\circ}E$ ，傾角較為平緩，界面西側岩體存在較密集的裂面，但未發現明顯的剪切構造，此界面約略位於地形崖高程變化處(圖 25)。

(二)劉陳灣地區

沿曾文溪南岸發現長約 300 公尺的野外露頭上具明顯斷層構造，並順著斷層走向沿線於北岸河流階地上廢棄河道出露約東西向長約 150 公尺、寬 40 公尺大小的斷層露頭，露頭的東側為青灰色厚層細粒砂岩夾中厚層棕色砂岩，含大量貝殼化石，棕色砂岩的位態約為走向 $N35^{\circ}E$ ，傾角 $22^{\circ}E$ ，露頭的西側則為厚層泥岩偶夾薄層砂岩，層面位態約為走向 $N46^{\circ}E$ ，傾角 $67^{\circ}E$ 。本研究選定之槽溝位置位於曾文溪南岸斷層露頭、及廢棄河道露頭中層面位態急遽變化處連線的延伸，槽溝為距北岸斷層露頭北側約 700 公尺處，且距南岸斷層露頭處約 50 公尺處(圖 26 與圖 27)，槽溝全長 20 公尺、高 2.5~3 公尺，長邊方向為 $N53^{\circ}W$ ，與曾文溪南岸口宵里斷層露頭及廢棄河道層面位態急遽轉變處連線 $N37^{\circ}E$ 之走向近乎直交，剖面內部每 0.5 公尺布設一條水平網格線，每 1 公尺布設一條垂直網格線，槽溝壁面北牆及南牆的剖面影像接合成果與立面圖測繪成果分別如圖 28 與圖 29，最後根據槽溝剖面的記錄結果，剖面東側及西側傾角明顯不同，且在 4~12 公尺處有觀察到向西的剪切帶，不過在 4~8 公尺處岩體大致完整(圖 30)，只有在 8~11 公尺處岩體被剪切帶剪切得較為破碎(圖 31)，然而這些證據無法證明口宵里斷層主斷層面的位置通過於此，本研究推測口宵里斷層於此處有兩種可能性，其一，斷層可能未切穿至地表，其二，斷層可能還在西側一點的位置。

南岸峭壁(圖 32)，露頭中可明顯辨識出斷層帶的寬度約 32.8 公尺，斷層帶內由密集的剪切帶組成，其中有數條寬度達數十公分、可從露頭最下方追蹤至最上方的剪裂帶，斷層帶內亦有幾道可追跡數公尺的薄層砂岩，而口宵里主斷層面的位置定義在剪切帶的東界，斷層面位態的量測結果為走向 $N64^{\circ}E$ ，傾角 $55^{\circ}NW$ ，截穿上伏的河流階地礫石層(圖 33)。斷層帶的兩側明顯觀察到不同的岩性，斷層上盤(西側)岩性為細粒砂岩與頁岩互層，岩層位態約為走向 $N30^{\circ}E$ ，傾角 $62^{\circ}E$ ，斷層帶西側界面以西約 20 公尺的範圍內，可見到岩層有受到撓曲或錯斷的現象，不過岩體狀態大致是完整的，斷層下盤(東側)岩性為中層至厚層泥質砂岩偶夾薄層細粒砂岩，斷層帶東側界面以東 60 公尺的範圍內，下盤變形的形式呈現類似急折褶皺，褶皺翼部較陡一側的位

態為走向 $N36^{\circ}E$ ，傾角 $32^{\circ}S$ ，較平緩一側的位態為走向 $N10^{\circ}E$ ，傾角 $13^{\circ}S$ ，位於更東側遠離褶皺的岩層，岩層位態趨近於平緩，其位態為走向 $N56^{\circ}E$ ，傾角從 $32^{\circ}S$ 往東趨於平緩的 $13^{\circ}S$ ，岩壁間偶可發現較小規模的層間斷層，小斷層呈共軛(圖 32)。



圖 25 灣潭地區露頭，露頭位置參考圖 21。(A)露頭的西側岩層較陡；(B)距離東側 20 公尺處的露頭，東側岩層較為平緩，西側有較多的裂面，並無觀察到明顯的剪切構造。

Figure 25. Outcrops in Wantan area (see location fig. 21). (A)The bedding dip angle on the western side of the fault is steep; (B) 20 meters further east, the bedding dip angle is shallow and the west side of the outcrop is densely fractured. The lack of outcrop between the two photographs prevented us from characterizing the transition between these dip domains.



圖 26 劉陳灣地區曾文溪兩岸露頭狀況，露頭位置參考圖 21。(A)曾文溪南北兩岸皆有完整露頭出露；(B)曾文溪南岸壁面密集的斷層帶帶寬度約 32 公尺，斷層帶東側岩層傾角漸緩約 30°東傾，而西側傾角陡峭約 60°東傾。

Figure 26. Outcrops on both sides of the Tsengwen River, in Liuchenwan area (see location fig. 21). (A) Overview of the outcrops that we investigated in this area; (B) The width of the Kouhsiaoli fault zone is about 32 m. The bedding dip angle is gentle east of the fault, around 30° E, and steep west of the fault, around 60° E.

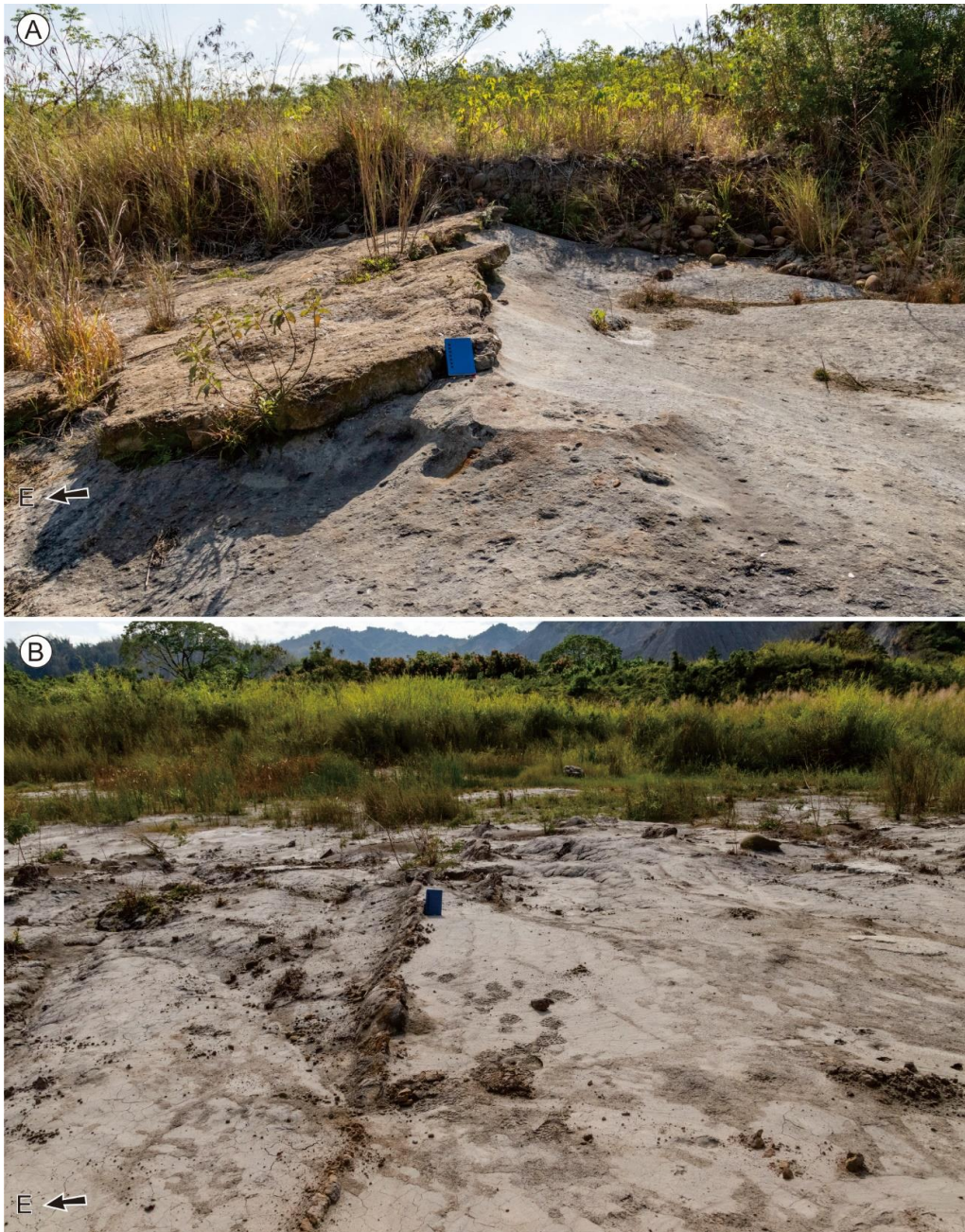


圖 27 劉陳灣廢棄河道露頭狀況，露頭位置參考圖 26。(A)東側岩層傾角較為平緩，約 20° 向東傾斜；(B)西側岩層傾角較陡，約 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 向東傾斜。

Figure 27. Outcrops along an abandoned branch of the river at Liuchenwan (see location fig. 26). The dip angle is 20° to east on the eastern part of the abandoned river (A), and $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ to the east on the western part (B).

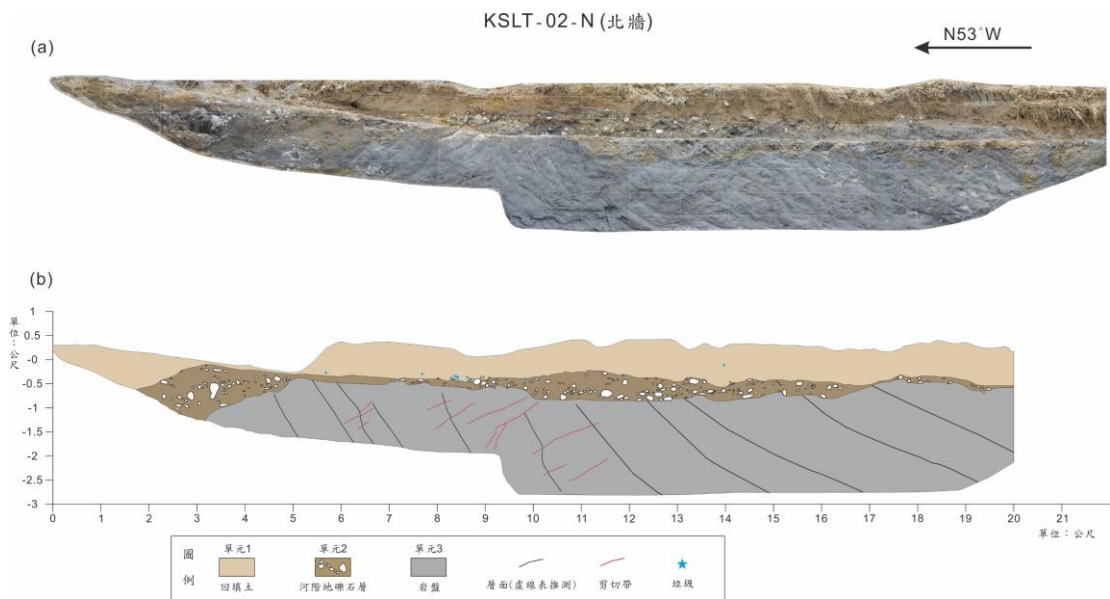


圖 28 槽溝 KSLT-02-N(北牆)影像及測繪圖。(a)北牆剖面的接合影像；(b)北牆剖面的素描圖。

Figure 28. Image and mapping at the northern wall of the trench. (a) Integrated photomosaic of the northern wall of the trench; (b) Elevation sketch of the northern wall of the trench.

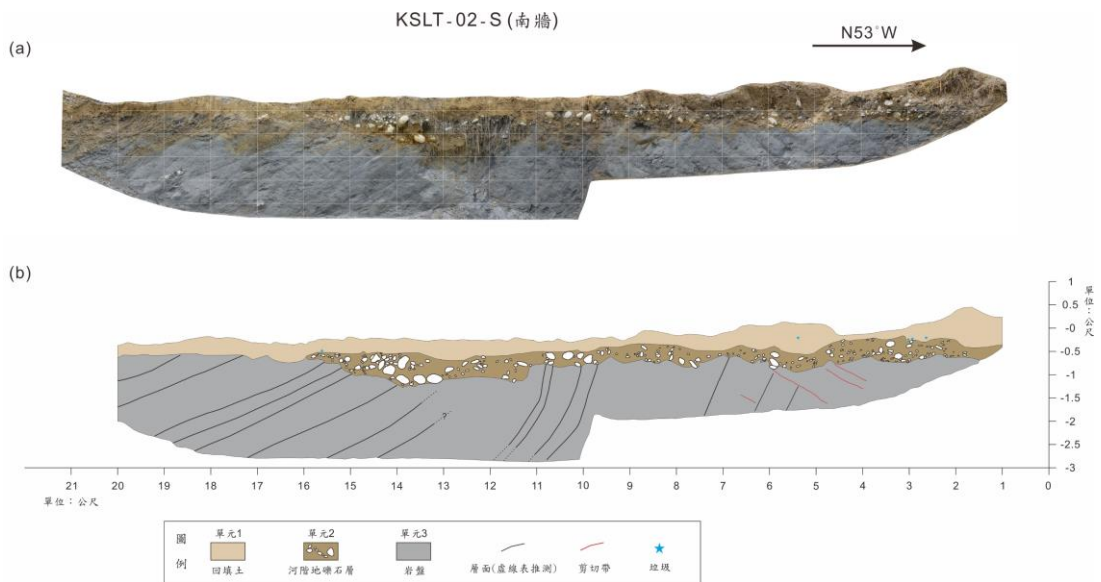


圖 29 槽溝 KSLT-02-S(南牆)影像及測繪圖。(a)南牆剖面的接合影像；(b)南牆剖面的素描圖。

Figure 29. Image and mapping at the southern wall of the trench. (a) Integrated photomosaic of the southern wall of the trench; (b) Elevation sketch of the southern wall of the trench.

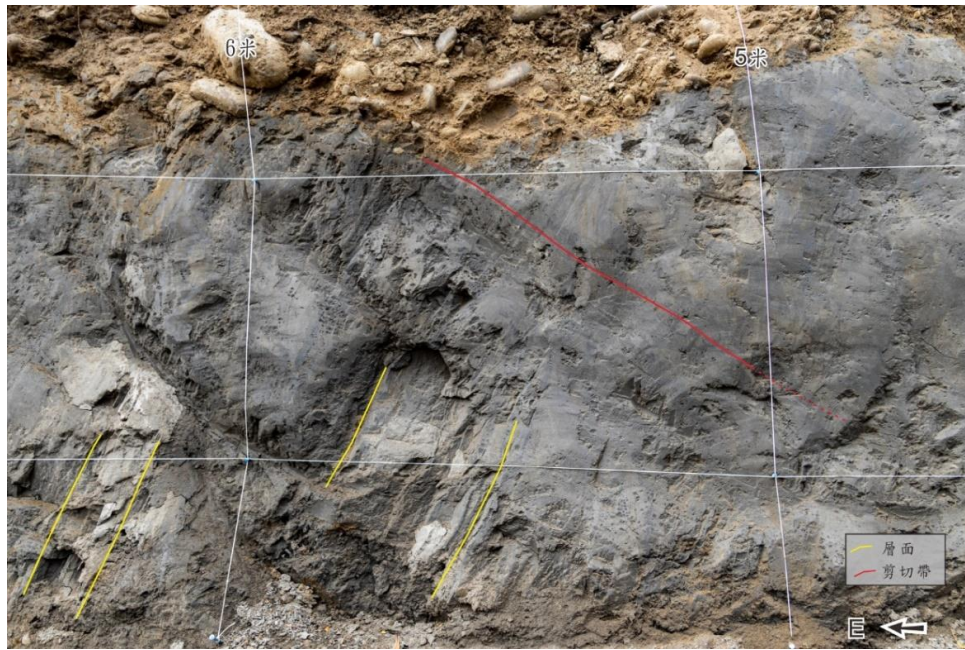


圖 30 槽溝南牆 4~6 公尺處未切穿河流階地礫石層的剪切帶。

Figure 30. Shear band (red line) capped by the conglomerate layer at 4~6 m on the southern trench wall. Yellow lines indicate bedding of bedrock strata.



圖 31 槽溝北牆 8~11 公尺處的剪切帶及被截斷的砂岩層。

Figure 31. Sandstone layers (yellow and pink lines) cut by shear bands (red line) at 8~11 m on the northern trench wall.

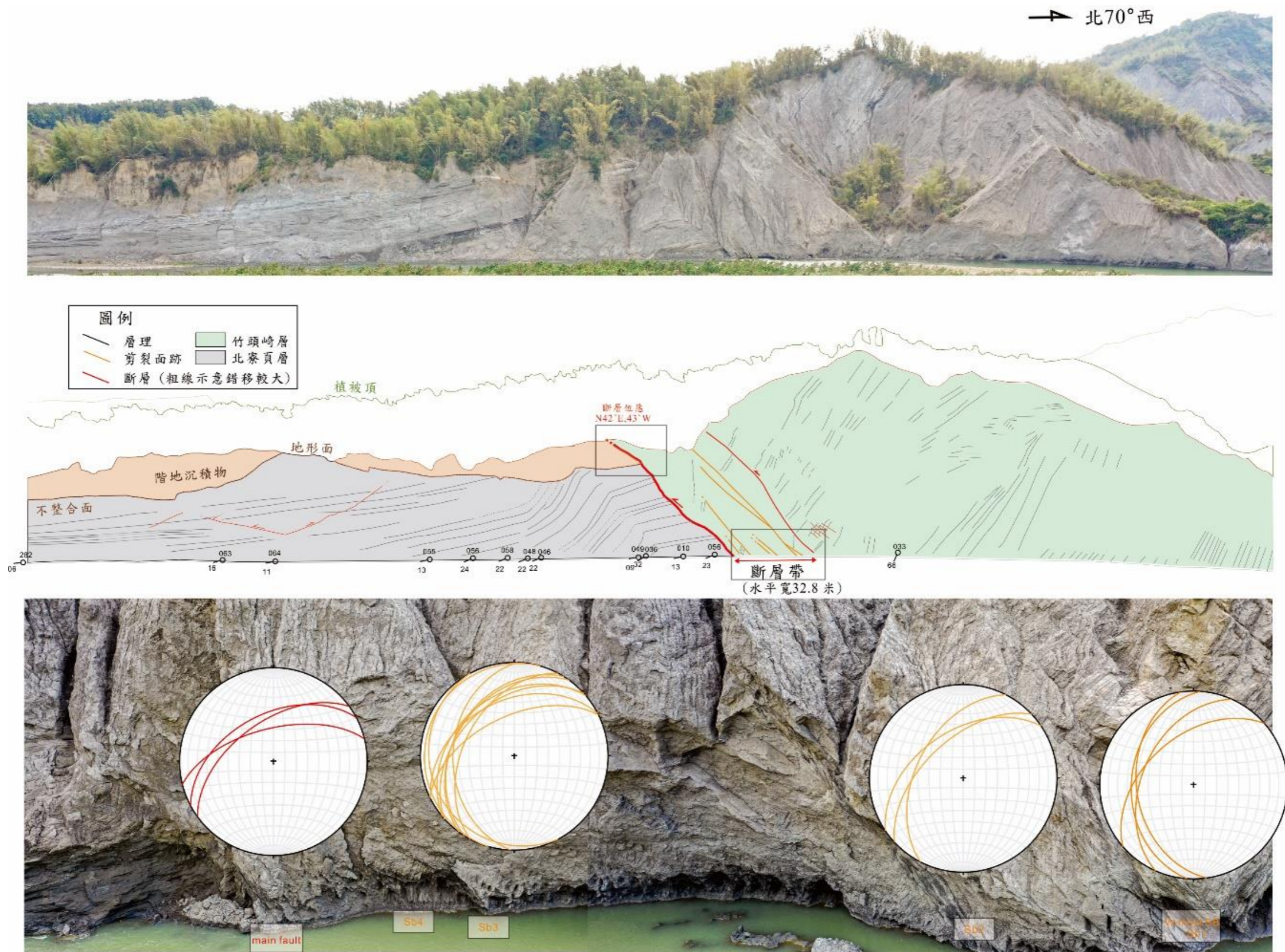


圖 32 位於劉陳灣之口宵里露頭，露頭位置參考圖 21、26。

Figure 32. Outcrop of the Kouhsiaoli fault in Liuchenwan, with structural interpretation and attitude measurements of main fault (red) and shear band (orange) (see location fig. 21, 26).

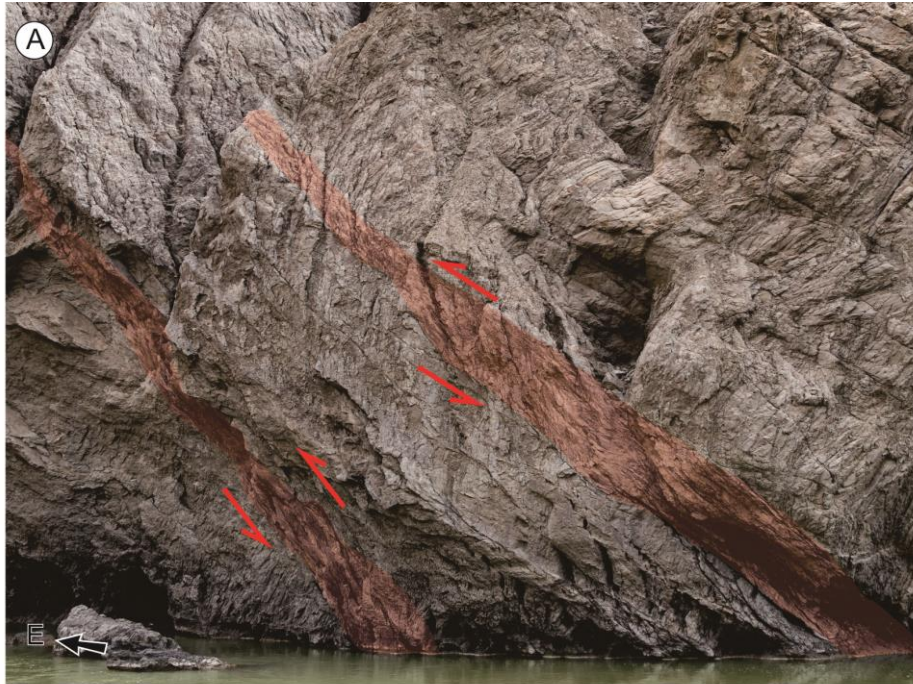


圖 33 口宵里斷層露頭中構造特徵，露頭位置參考圖 32。(A)斷層帶中的剪切構造顯示斷層逆移；(B)斷層帶東側的界面截穿河流階地礫石層。

Figure 33. Structural characteristics of the Kouhsiaoli fault zone at the Liuchenwan outcrop (see location fig. 32). (A) The fault zone shows thrust shear sense; (B) The eastern branch fault of the fault zone cuts through the conglomerate layer and brings bedrock above terrace deposits.

5-2 階地調查與分析結果

5-2-1 階地沉積物

(一)探坑挖掘

本研究針對崙後斷層及口宵里斷層上下盤周圍之階地進行河階露頭調查與定年標本採樣，但仍有多處露頭因河岸旁的垂直落差過大、植被覆蓋嚴重、無階地沉積物露頭出露等現地條件無法觸及，因此選擇使用挖土機於可能階面向下挖掘，並於探坑中採集可用之定年樣本，以期能透過定年樣本判定河階所屬年代，共計挖掘 3 處(位置點如圖 34 所示)，分別在內豐(編號 LKP-01)、走馬瀨(編號 LKP-02)、及灣潭(編號 LKP-03)三地各挖一處，各探坑皆有 3 米深，內豐及走馬瀨兩探坑皆為呈層狀的細粒料，有黏土層、粉砂層、及細砂層；灣潭探坑除細粒料，於底部出現礫石層(圖 35、36 及 37)。

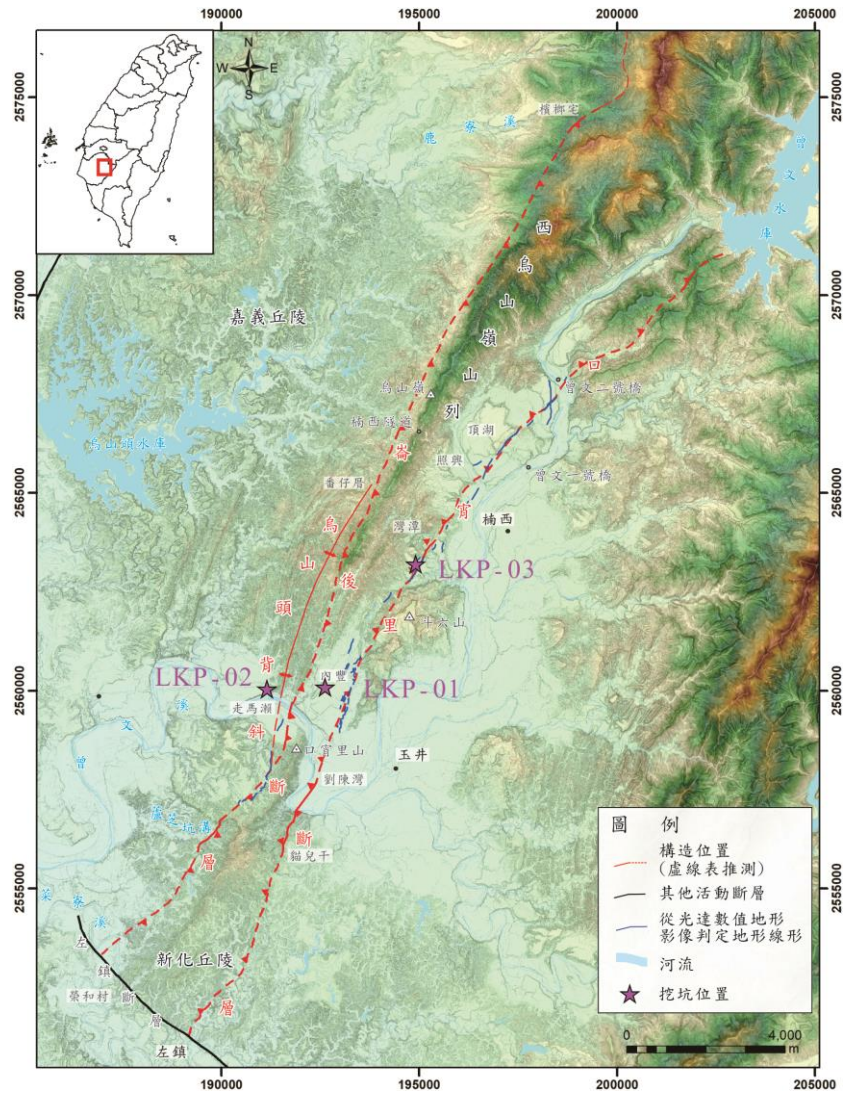


圖 34 沿崙後斷層與口宵里斷層之潛在河階探坑挖掘位置圖。

Figure 34. Potential terrace location of pits along Lunhou fault and Kouhsiaoli fault.

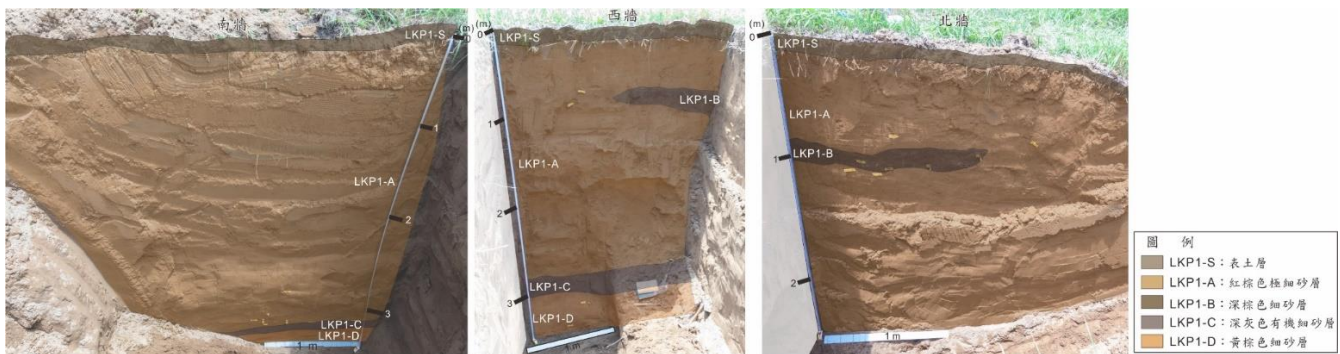


圖 35 探坑 LKP-01 沉積物分層，挖坑位置參考圖 34。

Figure 35. Stratigraphic sketch of pit LKP-01 (see location on fig. 34).

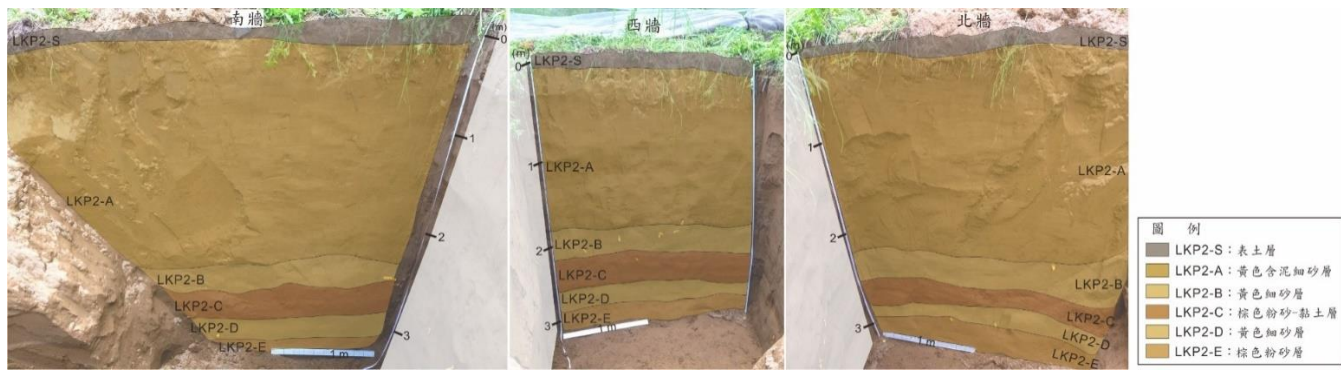


圖 36 探坑 LKP-02 沉積物分層，挖坑位置參考圖 34。

Figure 36. Stratigraphic sketch of pit LKP-02 (see location on fig. 34).



圖 37 探坑 LKP-03 沉積物分層，挖坑位置參考圖 34。

Figure 37. Stratigraphic sketch of pit LKP-03 (see location on fig. 34).

(二) 現地調查

根據階地階面的河拔高程對比，總共圈繪出 5 階河階，並從老到年輕(高至低)依序分階層為 T1、T2、T3、T4、T5(圖 38)，以下將會個別論述有採集到定年樣本的河階及其沉積物與基岩侵蝕面等記錄，而定年結果與階地分析等將會於 5-2-2 詳細論述。

於崙後斷層西側噶子坑的 T1 階地由頂部至底部分三層，其階面海拔高約 165 公尺，河流沉積物底部與基岩之侵蝕接觸處面的海拔高約 150-153 公尺(藉由無人機與全站儀測量以及 VBS-RTK 所得)，第一層 165-162.5 公尺為之橘紅色粉砂層，第二層 162.5-160 公尺為橘紅色細砂層，第三層 158-150 公尺為礫石層偶夾黃褐色細砂層，

160-158 公尺處因露頭位置陡峭且植被茂盛無法觀察 (圖 39)。

於崙後斷層西側濁水坑的 T2 階地由頂部至底部分四層，階面海拔高約 120 公尺 (藉由 VBS-RTK 所得)，河流沉積物底部與基岩之侵蝕接觸處面的海拔高約 109 公尺，第一層 120-118.13 公尺為橘紅色砂層，第二層 118.13-118.07 公尺為 2-64 毫米的礫石層，且其底部的侵蝕面指示為近代侵蝕面，第三層 118.07-117.15 公尺為深褐色細砂與黃褐色粉砂層，第四層 117.15-109 公尺為 20-400 毫米的礫石層 (圖 40)。

於崙後斷層西側新社地區的 T3 階地由頂部至底部分六層，其階面海拔高約 98 公尺 (藉由 VBS-RTK 所得)，河流沉積物底部與基岩之侵蝕接觸處面的海拔高約 84 公尺 (因此露頭位處深溝之中，無法使用 VBS-RTK 和 GPS 測量到精確之座標，故使用 5X5 數值地形模型取得)，第一層 98-97 公尺為灰色細砂層，第二層 97-95 層為 2-64 毫米的礫石層，第三層 94-92.5 公尺為橘紅色細砂層，第四層 92-89.8 為薄層褐色細砂與厚層 2-256 毫米的礫石層互層，第五層 89-88.5 公尺為 64-256 毫米的礫石層，第六層 88.5-88.3 為深褐色中砂，第六層 88.3-87 公尺為深褐色與黃褐色細砂層互層，95-94 公尺和 92.5-92 公尺以及 89.8-89 公尺因野外露頭陡峭並佈滿植被故無法調查 (圖 41)。

於口宵里斷層東側劉陳灣地區的 T3 階地由頂部至底部分兩層，其階面海拔高約 63 公尺，河流沉積物底部與基岩之侵蝕接觸處面的海拔高約 48 公尺 (藉由全站儀測量以及 VBS-RTK 所得)，第一層 63-52 公尺為黃褐色細砂層，第二層 52-48 公尺為礫石層 (圖 42)；於三元台西北側約 200 公尺的 T3 階地，其階面海拔高約 70 公尺，河流沉積物底部與基岩之侵蝕接觸處面的海拔高約 58 公尺 (藉由全站儀測量以及 VBS-RTK 所得)，70-58 公尺為黏土質粉砂層 (圖 43)，更多的口宵里斷層下盤露頭空照本研究收錄於附錄 B。

於崙後斷層西側走馬瀨農場內的 T4 階地由頂部至底部分兩層，其階面海拔高約 68 公尺，河流沉積物底部與基岩之侵蝕接觸處面的海拔高約 53 公尺 (藉由全站儀測量與 VBS-RTK 所得)，第一層 68-64 公尺為黃褐色細砂層，第二層 64-53 公尺為礫石層 (圖 44)。

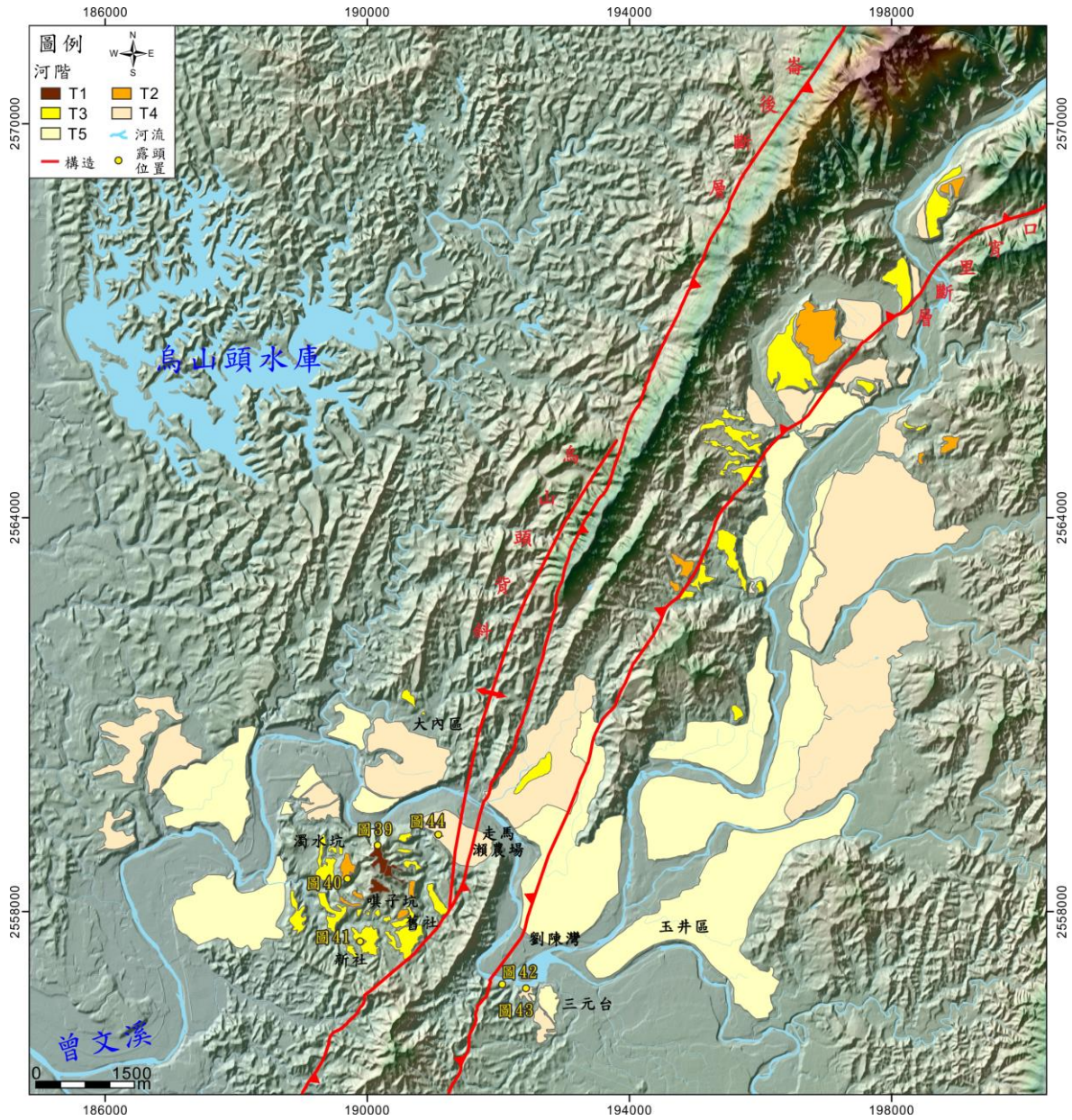


圖 38 曾文溪河階河拔高及野外觀察圈繪之河階分布圖。

Figure 38. Preliminary map of the Tsengwen River terraces based on elevation relative to the modern river.

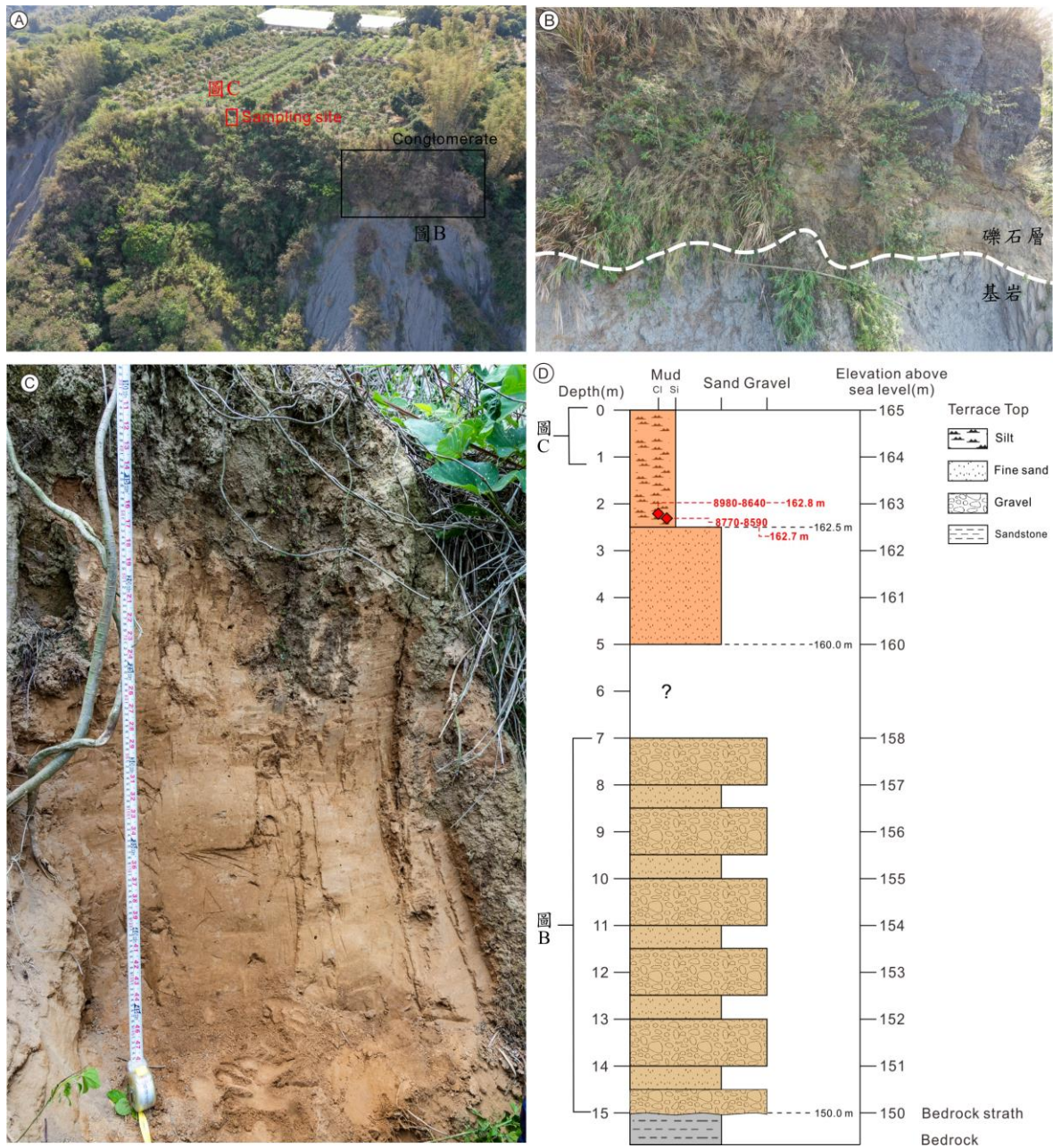


圖 39 嘸子坑 T1 階地與岩性柱狀圖。露頭位置請參照圖 38 (A)T1 階地空照；(B)礫石層；(C)粉砂層；(D)岩性柱狀圖。

Figure 39. Field observations and stratigraphic log for terrace T1 in Qizikeng (see location on fig. 38). The outcrop location is shown on fig. 38. (A) Aerial photo of T1a; (B) Contact between bedrock and terrace deposits consisting in a basal gravel layer; (C) Silt layer in the upper part of the terrace deposits; (D) Stratigraphic column. Red symbols and labels indicate the position of 14C samples, the calibrated age and the sample elevation.

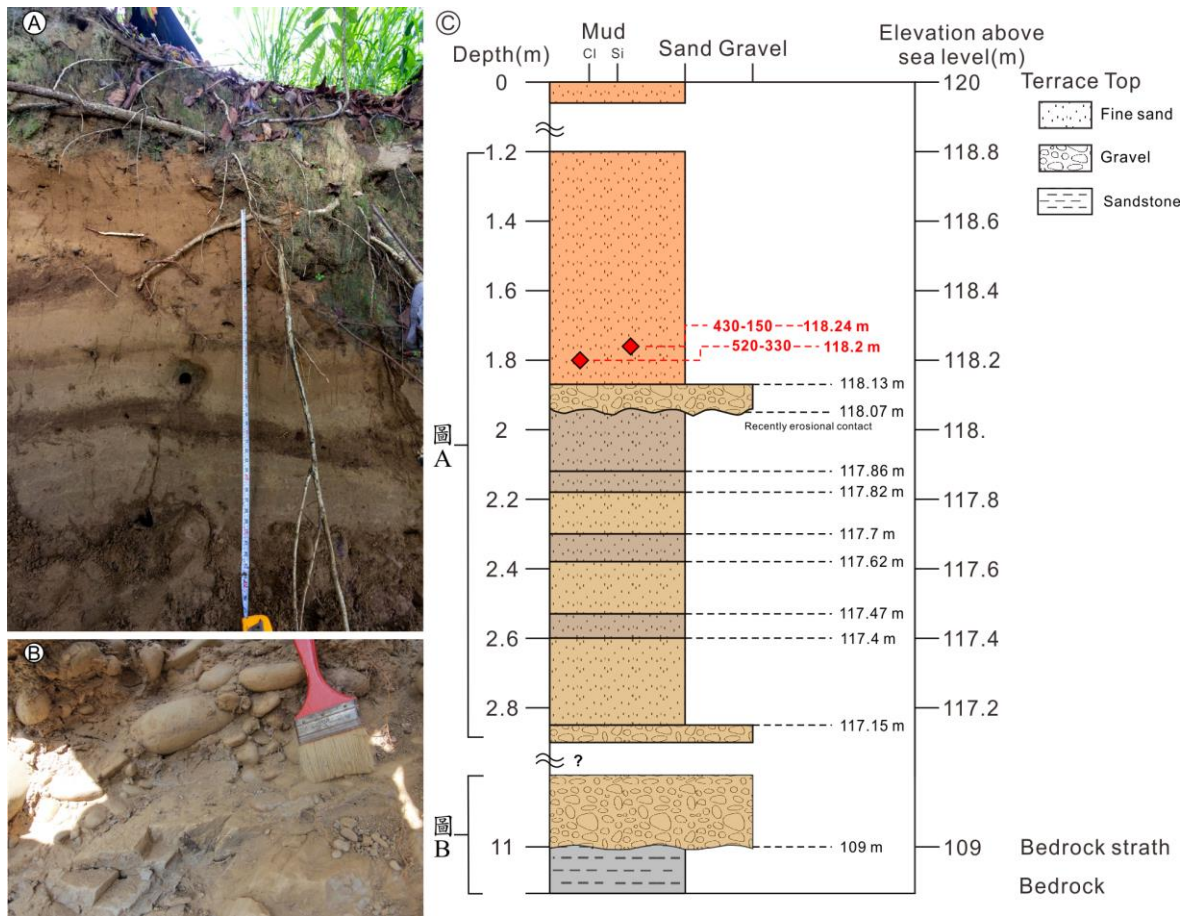


圖 40 濁水坑 T2 階地與岩性柱狀圖。露頭位置請參照圖 38 (A)細砂層；(B)礫石層；(C)岩性柱狀圖。

Figure 40. Field observations and stratigraphic log for terrace T2 in Zhuoshuikeng (see location on fig. 38). (A) Fine sand layers ;(B) Gravel layer ;(C) Lithologic column.

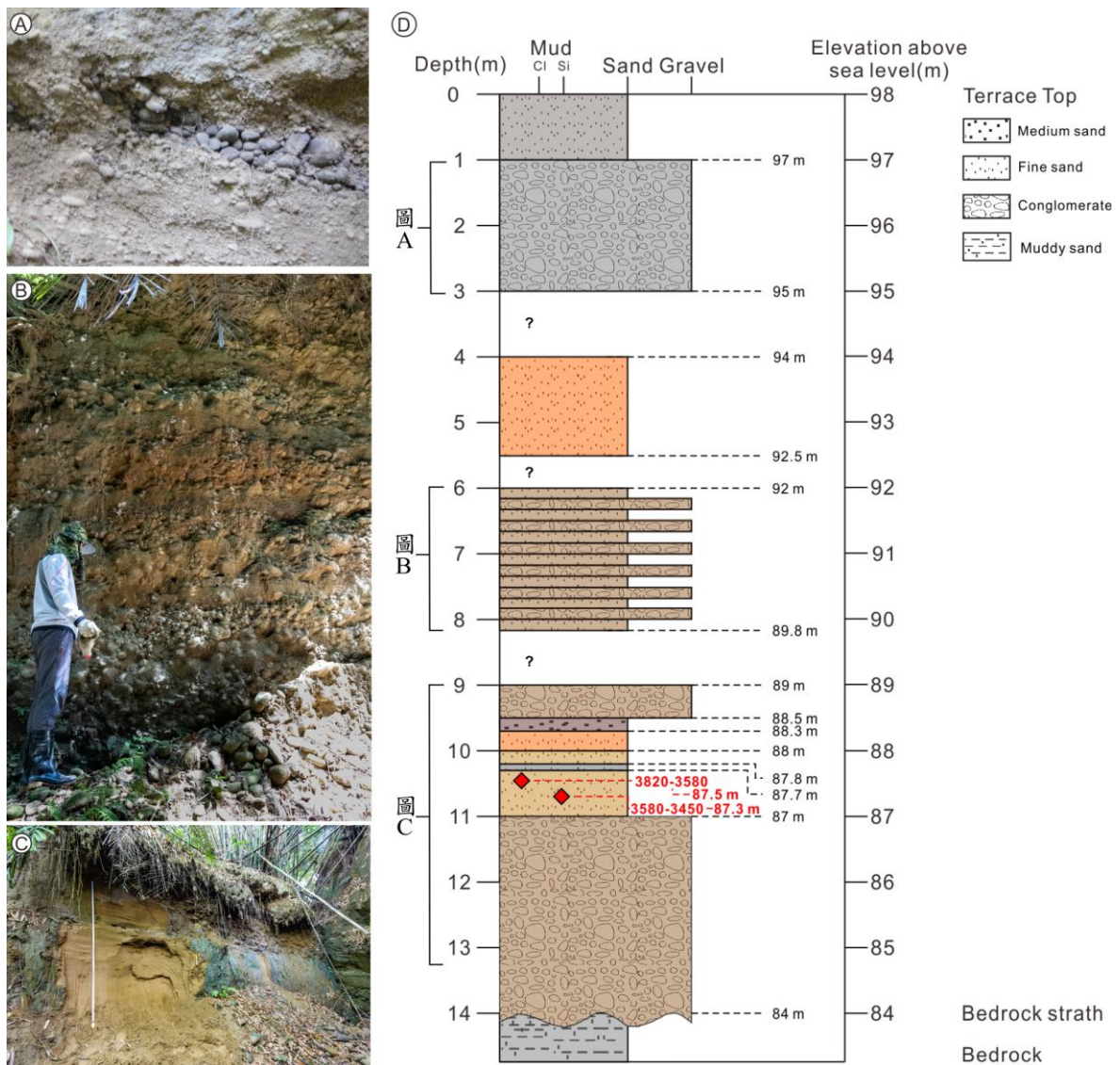


圖 41 新社 T3 階地與岩性柱狀圖。露頭位置請參照圖 38 (A)最上層的灰色細砂層與礫石層；(B)薄層細砂與厚層礫石層互層；(C)厚礫石層與細砂層；(D)岩性柱狀圖。

Figure 41. Terrace T3 in Xinshe (see location on fig. 38). (A) The top of T3 consist of a gravel layer; (B) Thin fine sand layers within a thick gravel layer; (C) Thick gravel layer then very thick gravel layer ;(D) Lithologic column.

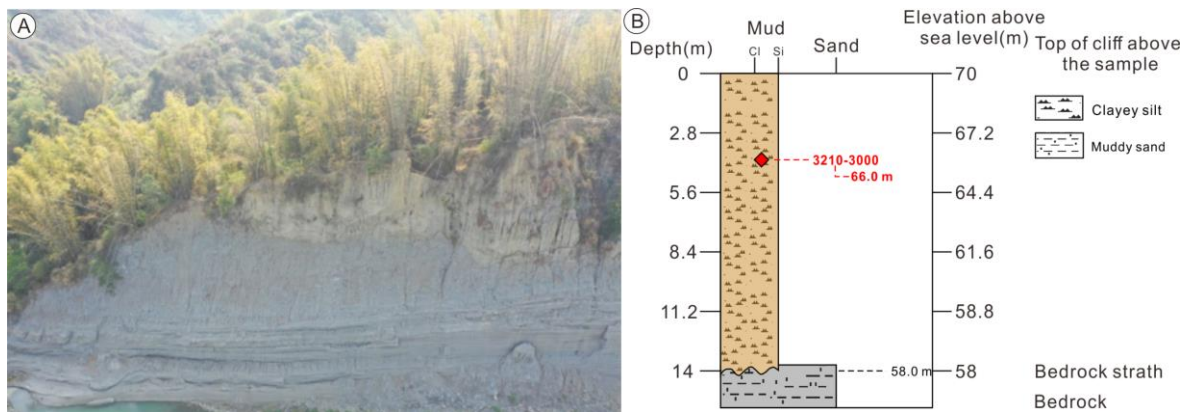


圖 42 劉陳灣 T3 階地與岩性柱狀圖。露頭位置請參照圖 38 (A)露頭空照；(B)岩性柱狀圖。

Figure 42. Terrace T3 in Liuchenwan (see location on fig. 38). (A)Aerial photo; (B) Lithologic column.

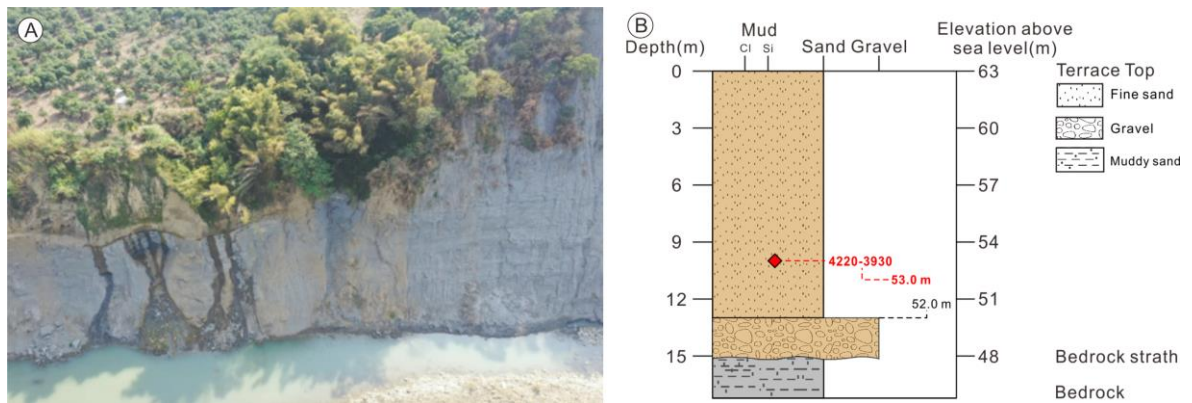


圖 43 劉陳灣東側 T3 階地與岩性柱狀圖。露頭位置請參照圖 38 (A)露頭空照；(B)岩性柱狀圖。

Figure 43. Terrace T3 in east side of Liuchenwan (see location on fig. 38). (A)Aerial photo ;(B) Lithologic column.

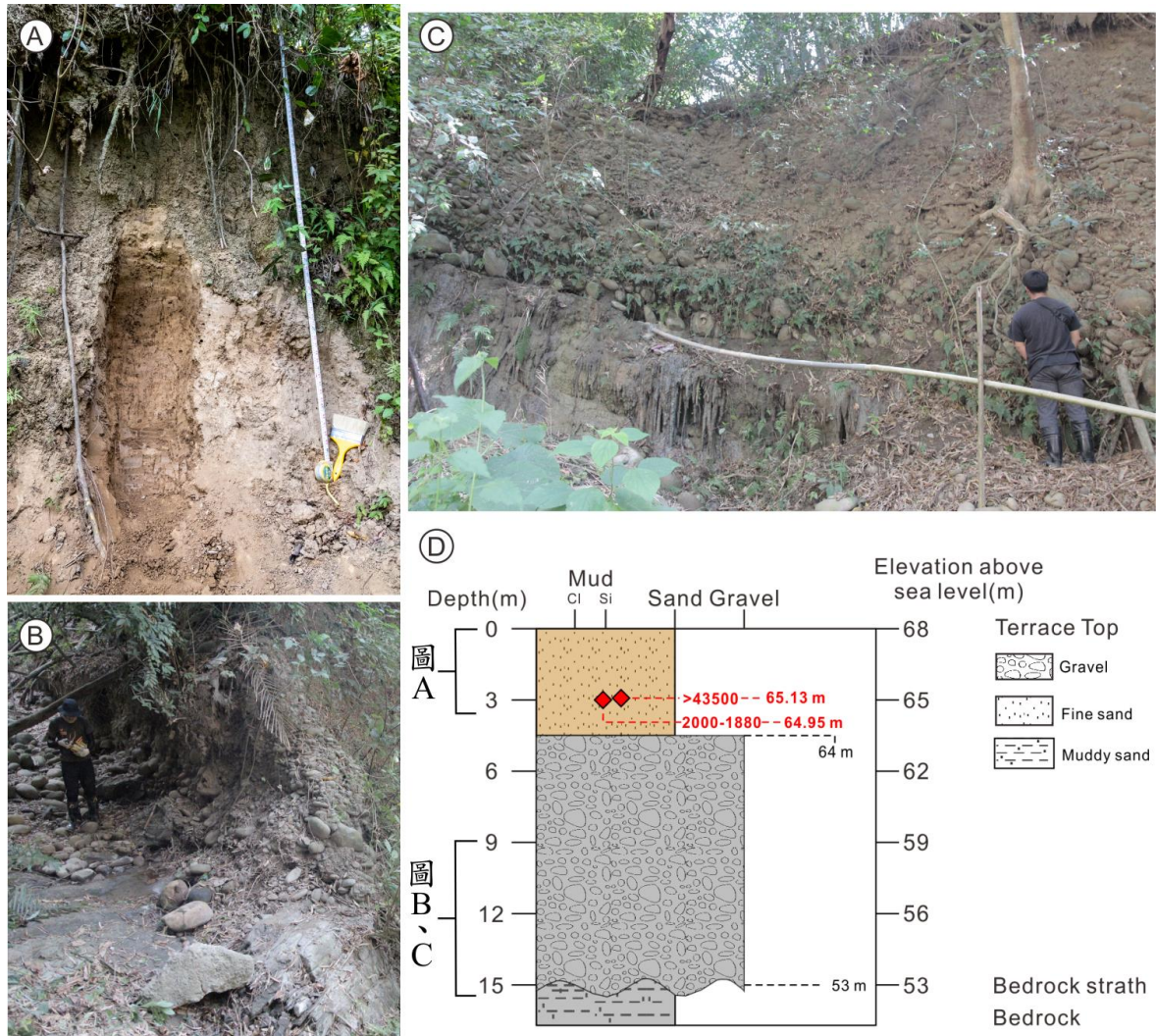


圖 44 走馬瀨農場內 T4 階地與岩性柱狀圖。露頭位置請參照圖 38 (A) 細砂層；(B、C) 礫石層；(D) 岩性柱狀圖。

Figure 44. Terrace T4 in Tsoumalai Farm (see location on fig. 38). (A) Fine sand layer; (B, C) Gravel layer; (D) Lithologic column.

5-2-2 碳十四定年結果

以下將個別論述各個樣本之採樣位置(圖 45)與定年結果，並且將前人研究之定年結果重新校正後放置表 2 以便對照。C-14 定年結果一共 10 組送至美國 BETA ANALYTIC 實驗室進行定年，定年實驗採用 AMS 法，實驗所得的測定年代將取 95.4%(兩個標準差內)的區間進行校正，使用的校正曲線為 INTCAL13(Reimer et al., 2013)，校正後的年代區間將以主要的百分比峰值區間作為代表年代，各標本的測定結果圖請參照附錄 C

於崙後斷層西側唶子坑的 T1 階地，採集到的樣本有兩組，編號 TW20-C26 樣本，校正後的年代為 8979-8642 cal BP，另一組編號 TW20-C31 樣本，其校正後的年代為 8770-8589 cal BP(圖 46)。

於崙後斷層西側曾文溪南岸濁水坑的 T2 階地，採集到的樣本有兩組，編號 TW20-C76 樣本，校正後的年代為 520-330 cal BP，另一組編號 TW20-C147 樣本，其校正後的年代為 429-149 cal BP(圖 47)，因 T2 採樣點於 119 公尺處，但上方還有一階 120 公尺處為芒果園有人居住且離採樣點不遠，並於採樣點的下方觀察到一層細礫沉積物，可能是較近代的侵蝕面，故推測 T2 採集到的樣本可能是後來沉積較近期的碳樣本。

於崙後斷層西側新社的 T3 階地，採集到的樣本有兩組，編號 TW20-C188，校正後的年代為 3578-3466 cal BP，另一組編號 TW20-C164，校正後的年代為 3820-3584 cal BP(圖 48)。

於崙後斷層西側走馬瀨農場內的 T4 階地，採集到的樣本有兩組，TW-C128 樣本，校正後的年代為 1998-1878 cal BP，另一組編號 TW20-C135 樣本，校正後的年代>43500 cal BP(圖 49)。

於口宵里斷層東側劉陳灣地區的 T3 階地，採集到的樣本有兩組，編號 TW20-C158 樣本，校正後的年代為 3212-3005 cal BP，另一組編號 TW20-C79 樣本於三元台旁，校正後的年代為 4219-3926 cal BP(圖 50)。

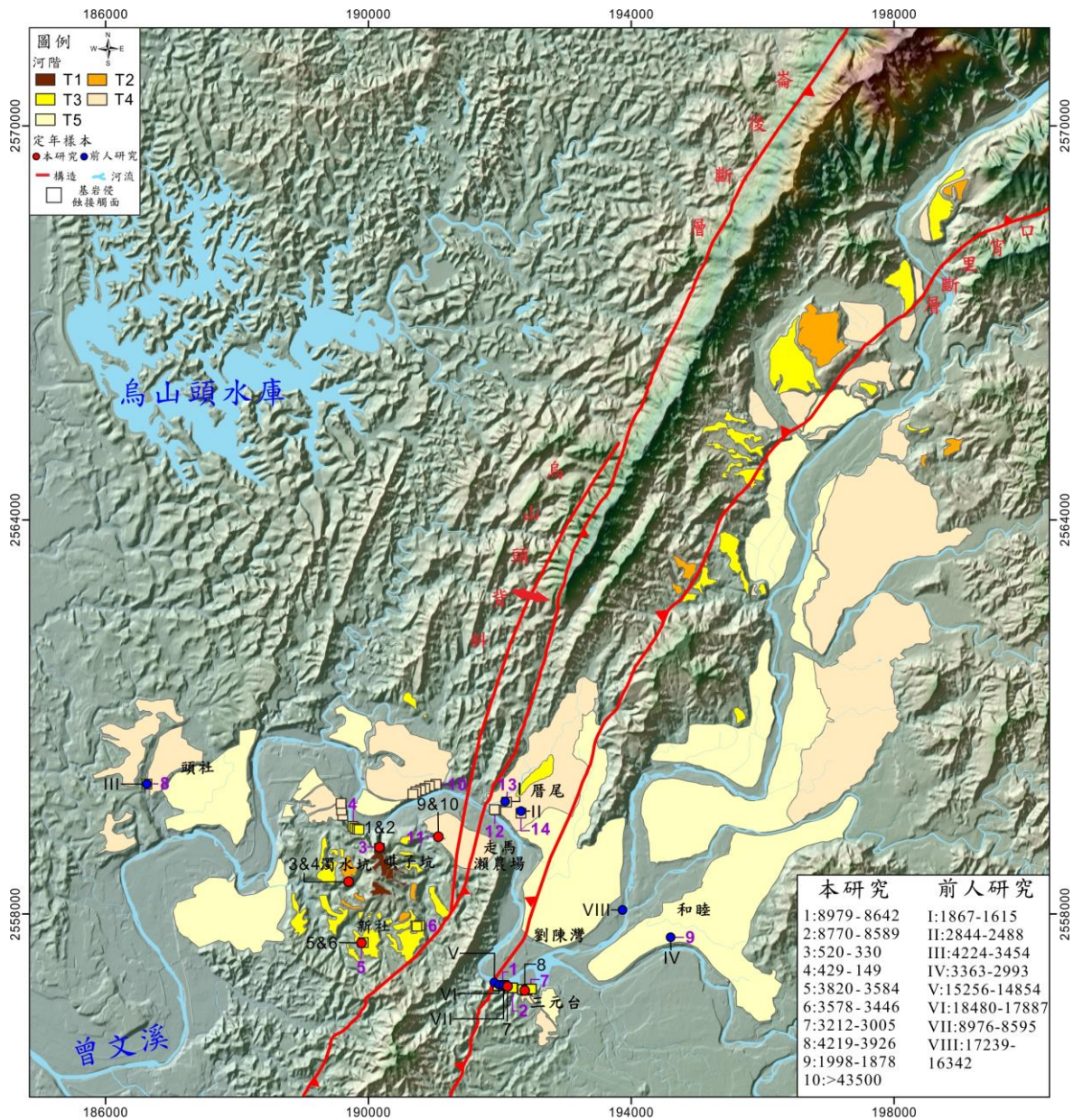


圖 45 曾文溪沿岸以河拔高圈繪之初步河階分布圖。

Figure 45. Preliminary terrace map based on elevation relative to the modern river and radiocarbon sampling sites. Red dot: our research; Blue dot: previous research; Square: strath location.



圖 46 嶼子坑 T1 採樣點，採樣位置參考圖 45。

Figure 46. Sample location of terrace T1 in Qizikeng. See location on Fig. 45.



圖 47 濁水坑 T2 採樣點，採樣位置參考圖 45。採集到的樣本可能是於 429-149 年間掩埋於此。

Figure 47. Sample location of terrace T2 in Zhuoshuikeng (see location fig. 45). There is a thin strath in this outcrop (white dash line) that presents a sedimentary event. So the samples can't present the terrace T2 age.



圖 48 新社 T3 採樣點，採樣位置參考圖 45。

Figure 48. Sample location of terrace T3 in Xinshe (see location fig. 45).



圖 49 走馬瀨農場內 T4 採樣點，採樣位置參考圖 45。

Figure 49. Sample location of terrace T4 in Tsoumalai Farm (see location fig. 45).

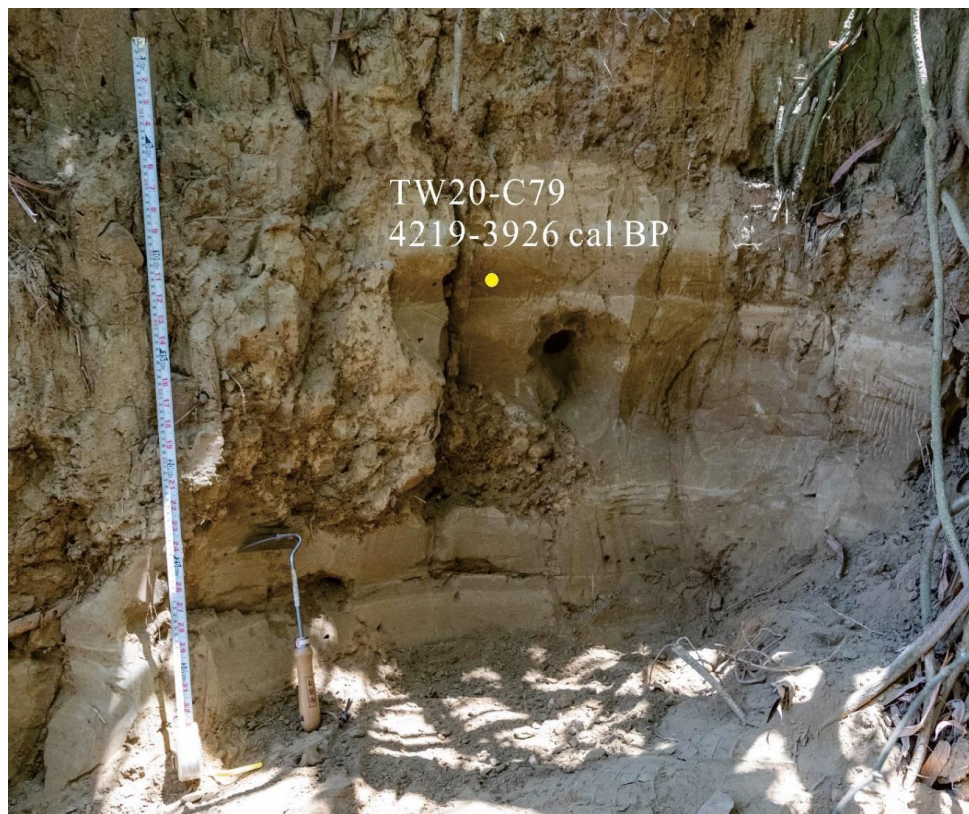
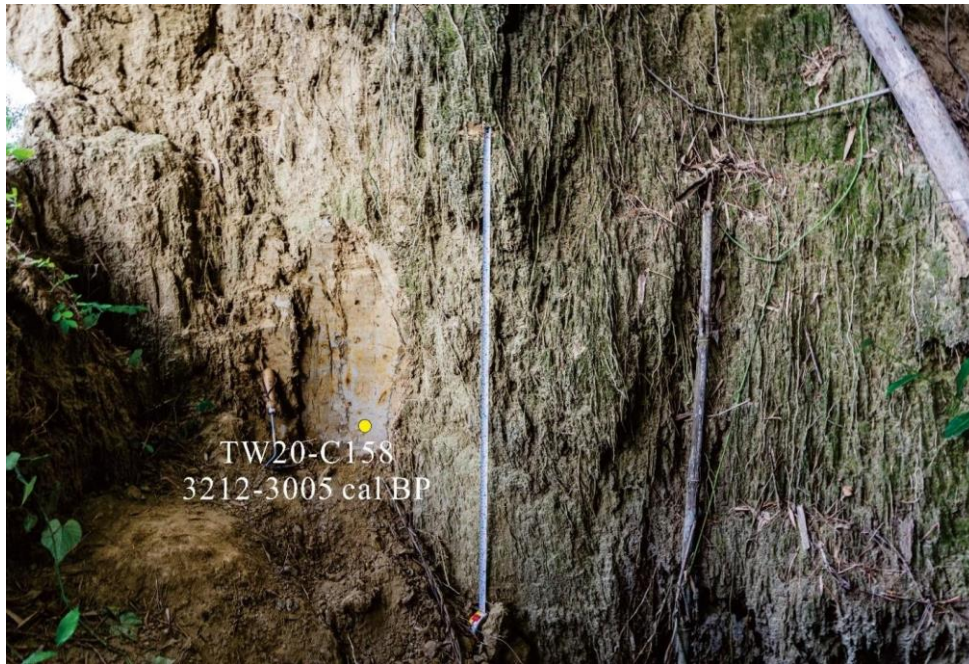


圖 50 劉陳灣 T3 採樣點，採樣位置參考圖 45。

Figure 50. Sample location of terrace T3 in Liuchenwan (see location 45).

表 2 河階分析與碳 14 定年結果

Table 2. Terrace analysis and ¹⁴C dating results

ID (the number used on the maps)	樣本編號 Sample number	實驗室編 號 Lab label	河階 Terrace	經度 Longitude	緯度 Latitude	常規年齡(年) Conventional age (yr B.P.)	定年結果 (年) Calibrated age (2-sigma cal BP)	採樣位置 Sample site	基岩侵 蝕面(公 尺) Strath elevation (m)	採樣高 程(公 尺) Sample elevation (m)
本研究 Our study										
1	TW20-C26	Beta- 557425	T1a	190144.327	2559004.423	7940±30	8979-8642	噶子坑 Qizikeng	150.0- 153.0	162.8
2	TW20-C31	Beta- 563900	T1a	190144.327	2559004.423	7870±30	8770-8589	噶子坑 Qizikeng	150.0- 153.0	162.7
3	TW20-C76	Beta- 558047	T2a	189700.889	2558479.447	410±30	520-330	濁水坑 Zhuoshuikeng	109.0	118.2
4	TW20-C147	Beta- 567242	T2a	189700.889	2558479.447	250±30	429-149	濁水坑 Zhuoshuikeng	109.0	118.2
5	TW20-C164	Beta- 569561	T3	189819.089	2557539.747	3420±30	3820-3584	新社 Xinshe	84.0-86.0	87.5
6	TW20-C188	Beta- 563904	T3	189819.089	2557539.747	3280±30	3578-3446	新社 Xinshe	84.0-86.0	87.3
7	TW20-C158	Beta- 563903	T3	192128.369	2556890.661	2960±30	3212-3005	劉陳灣 Liuchenwan	50.0-58.0	65.9
8	TW20-C79	Beta- 559505	T3	192372.334	2556830.472	3710±40	4219-3926	劉陳灣 Liuchenwan	48.0-50.0	53.0
9	TW20-C128	Beta- 563902	T4b	191052.642	2559153.079	1990±30	1998-1878	走馬瀨農場內 Tsoumalai farm	53.0-56.0	64.9
10	TW20-C135	Beta- 568101	T4b	191052.642	2559153.079	>43500	X	走馬瀨農場內 Tsoumalai farm	53.0-56.0	65.1
前人研究 Previous studies										
I(a)	Hsieh & Knuepfer (2002)	NTU2322	T4b	192081.541	2559744.823	1810±50	1867-1615	厝尾 Cuowei	70.0	70.0
II(a)	Hsieh & Knuepfer (2002)	WK6135	T4b	192280.772	2559559.823	2590±60	2844-2488	厝尾 Cuowei	67.0	67.0
III(a)	Hsieh & Knuepfer (2002)	WK5136	T3	186591.727	2559920.763	3520±140	4224-3454	頭社 Toushe	39.0	47.0

IV(a)	Hsieh & Knuepfer (2002)	WK6130	T3	194546.63	2557614.131	3001±67	3363-2993	和睦 Hemu	55.0	57.0
V(b)	Yen-Chiu Liu et al., 2020	Yen-Chiu Liu et al., (2020)	T0	191874.367	2556956.976	12670±40	15256-14854	劉陳灣 Liuchenwan	59.0	59.0
VI(c)	Hsieh Meng-Long (2022)	Hsieh Meng- Long (2022)	T0	191956.945	2556945.284	14950±120	18480-17887	劉陳灣 Liuchenwan	60.0	60.0
VII(c)	Hsieh Meng-Long (2022)	Hsieh Meng- Long (2022)	T1a	192071.628	2556904.266	7900±40	8976-8595	劉陳灣 Liuchenwan	64.0	67.0
VIII(a)	Hsieh & Knuepfer (2002)	NTU2323	T0	193866.887	2558139.666	11900±70	17239-16342	和睦 Hemu	37.0	41.0

(1) Sample number assigned at dating laboratory: BETA=Beta Analytic Testing Laboratory; NTU= National Taiwan University; WK= the University of Waikato.

(2) This report provides the results of reference materials used to validate radiocarbon analyses prior to reporting. Known-value reference materials were analyzed quasi-simultaneously with the unknowns. Results are reported as expected values vs measured values. Reported values are calculated relative to NIST SRM-4990B and corrected for isotopic fractionation. Results are reported using the direct analytical measure percent modern carbon (pMC) with one relative standard deviation. Agreement between expected and measured values is taken as being within 2 sigma agreement (error x 2) to account for total laboratory error.

(3) References to Probability Method: Bronk Ramsey, C. (2009). Bayesian analysis of radiocarbon dates. Radiocarbon, 51(1), 337-360.

(4) References to Database: INTCAL13 Reimer, et.al., 2013, Radiocarbon55(4).

(5) Source: (a) Hsieh and Knuepfer (2002); (b) Yen- Chiu Liu, Jon-Wei Hsu and Chii-Wen Lin (2020); (c) Hsieh Meng-Long, personal provide, 2021.

5-3 階地對比、分布與分析

先前根據階面的河拔高程圈繪出五階河階，但在結合野外調查與定年結果後，本研究將河階階層劃分的更加詳細，依年代與高程從老到年輕、自高到低分別歸類為，T0、T1a、T1b、T2a、T2b、T3、T4a、T4b、T4c、T4d、T5 共 11 階(圖 51)。為了更精確的繪製河階，本研究將玉井區至大內區之階地與定年樣本以及基岩侵蝕面，投影至圖 51 的 A-A' 投影線上，投影出圖 52 的河階剖面，並依照所獲得之定年結果推測出相同時期河階的現今分布，爾後將統整的定年結果與野外所得之基岩侵蝕面河拔差，進行下切速率的計算與斷層滑移速率的分析。

(一) 階地對比與分布

位於崙後斷層西側 T2 階地的兩組樣本(圖 52 中的 3&4)，其定年結果皆過於年輕，採樣位置下方仍有兩層礫石層，這說明 T2 階地樣本的材料可能為較為後期堆積事件中的沉積物，因此無法代表 T2 階地真實年代，而 T4b 階地樣本編號 TW20-C135(圖 52 中的 10)定出的年代，相較於鄰近定年結果 >43500 遠大於其他三個定年結果，此樣本可能是重新搬運過後的樣本，其餘位於崙後斷層西側樣本的定年結果，由老至年輕的排序依序為，T1a 階地：約 9 千年、T3 階地：約 3-4 千年、T4b 階地：約 2 千年，此排序也符合這三個階地高程由高至低的順序，定年結果符合階地分層之預期。

位於頭社地區的階地若依照河拔高之繪製規則，其應屬於 T4a 河階，但在 Hsieh & Knuepfer (2002) 報導中的定年結果卻顯示其為 3-4 千年的河流階地，故頭社地區的階地須更改為 T3 河階，且因其更改為 T3 河階以及周圍的河階也無定年證據，所以本研究以頭社 T3 階地為基準，將此階地之上階與下階序列繼續依照河拔高差繪製。

位於劉陳灣曾文溪南岸之河階若依照河拔高之繪製規則，其應屬於 T4c 河階，但根據本研究之定年結果，距口宵里斷層東側 260 公尺與 500 公尺處，其上覆細粒料之沉積年代為 3-4 千年，而距口宵里斷層東側 80 公尺基岩侵蝕面處前人研究中也有記

錄採集到的定年年代為 1 萬 5 千年至 1 萬八千年，故將距口宵里斷層東側 250 公尺以東之河階繪製為 T3 河階，而近口宵里斷層底部的基岩侵蝕面則繪製為 T0 河階。

位於灣潭地區鄰近口宵里斷層處，可看到明顯約走向 N30°E 的地形線形崖，地形崖的兩側皆有河流階地分布，附近的露頭岩層與礫石層呈非整合接觸，疑似是斷層截切的證據，但露頭中並未發現剪切構造(圖 53)，地形線形崖的延伸方向與口宵里斷層走向大致平行，其高程差約 40 公尺(圖 54)，持續向北仍有明顯的地形崖可追跡，若灣潭河階的確是 T3 河階，且灣潭的 T2 河階是原本的 T3 河階因口宵里斷層活動抬升，計算出的構造滑移速率便相對於新社與劉陳灣來得更精確一些。

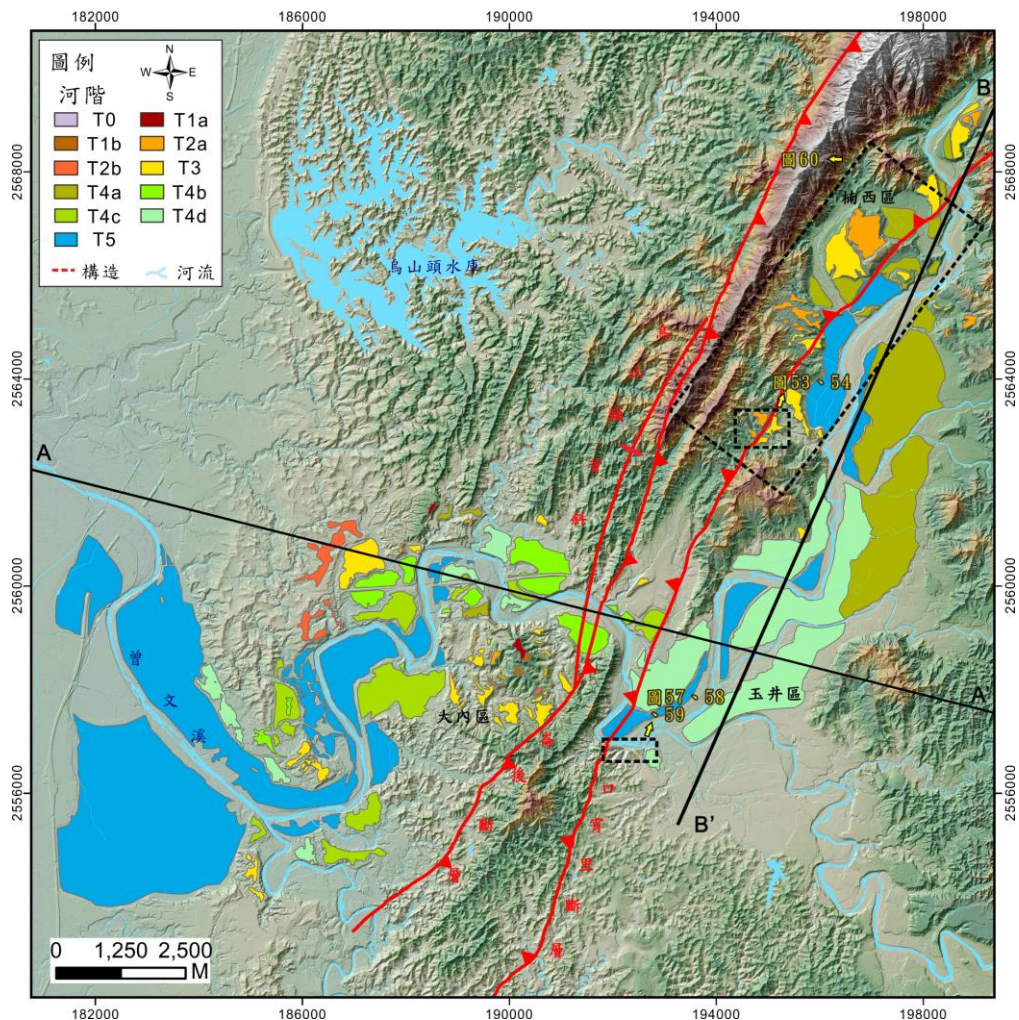


圖 51 曾文溪沿岸河階投影剖線與河階階地露頭。

Figure 51. Terrace map based on elevation to the modern river and radiocarbon ages. Black line: Projection line of river terraces. Dashed rectangle: Terraces outcrop location.

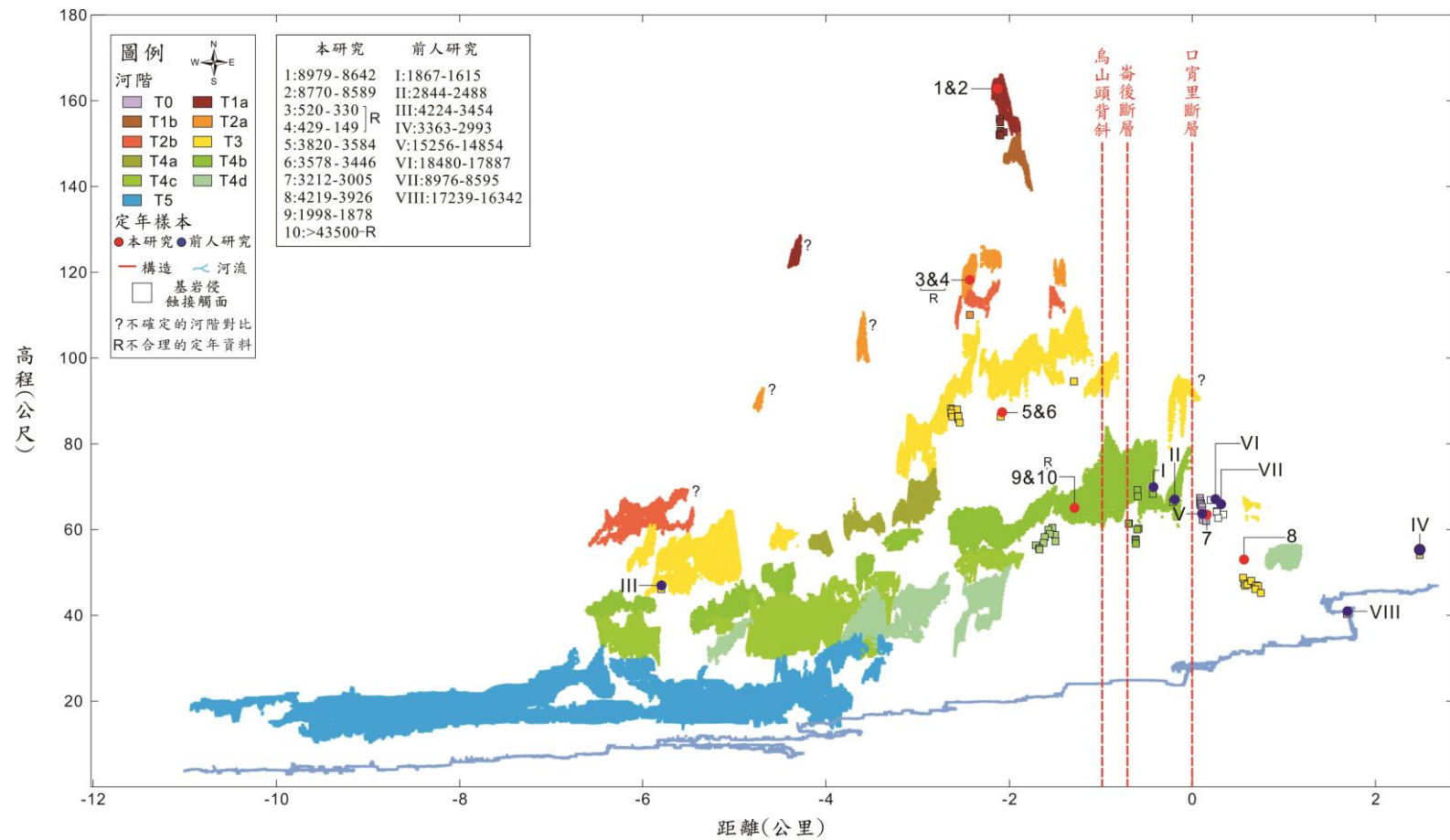


圖 52 大內區至玉井區河階剖面(剖面位置參考圖 51)。問號為定年結果與河階的形成年代不相匹配。

Figure 52. Terrace longitudinal profile from Danei to Yuching (see location on fig. 51). The 'R' indicate unreasonable dating results for the corresponding terraces; The question marks are uncertain terrace correlation.



圖 53 灣潭地區口宵里斷層附近露頭照。露頭出現疑似岩層逆衝至礫石層的現象(露頭位置參考圖 51)。

Figure 53. Outcrop of the Kouhsiaoli fault in Wantan area. The bedrock probably thrust on a conglomerate deposit (see location on fig. 51).

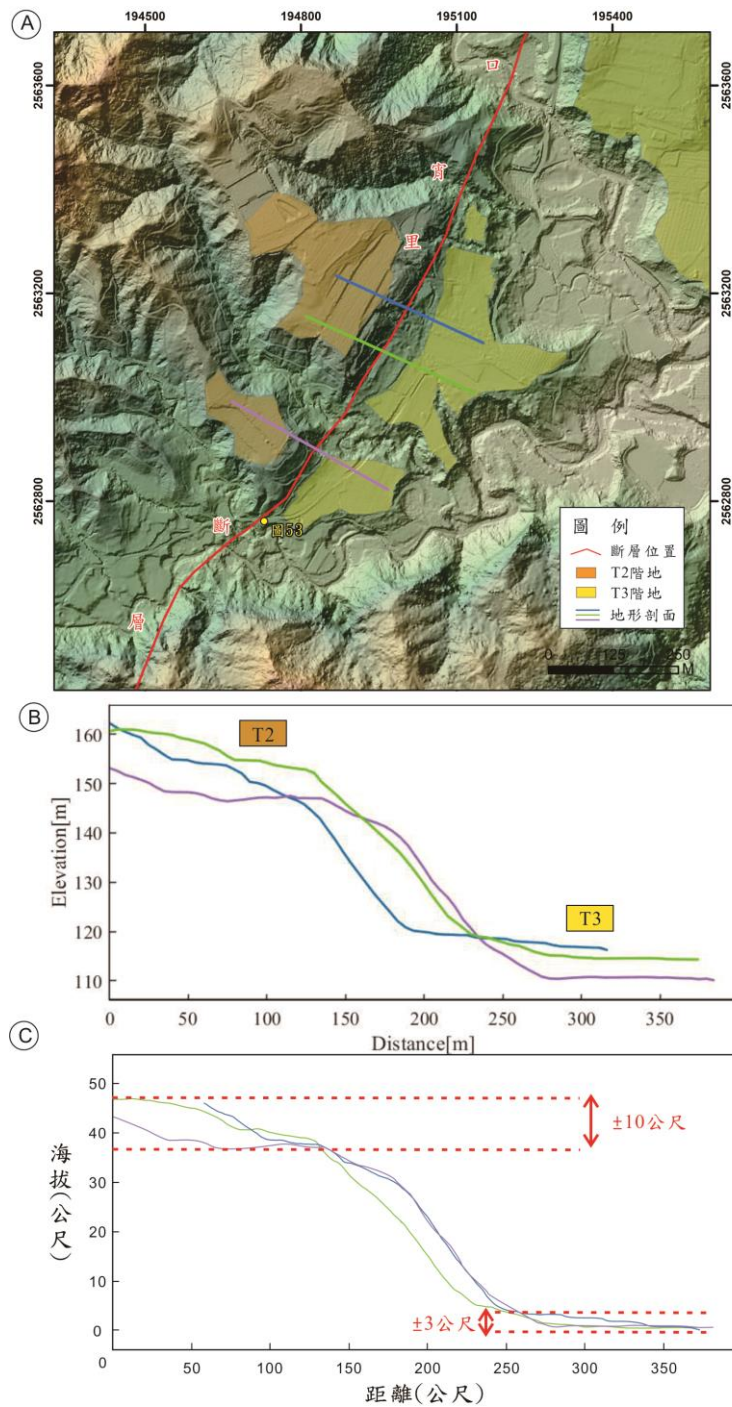


圖 54 灣潭地區跨口宵里斷層的地形陰影圖及地形剖面圖。(A)走向 N30°E 的地形線形崖與口宵里斷層走向大概平行，並根據野外觀察到的現象，可能是斷層活動造成；(B)口宵里斷層的地形剖面；(C)直接將 T2 河階的高程變化 ± 10 與 T3 河階的高程變化 ± 3 相加，得口宵里斷層兩側高程差為 40 ± 10.3 m，但我們無法找到可定年的材料來比較斷層兩側河階的年齡。

Figure 54. Shaded topography and topographic profiles across the Kouhsiaoli fault at Wantan (See location on fig. 51). (A) The N30°E escarpment is interpreted as the Kouhsiaoli fault trace, also supported by geological observations within the streams flowing across the fault. (The shaded image was produced from a 1 m Lidar DTM provided by CGS); (B) Topographic profiles across the Kouhsiaoli fault scarp; (C) Adding up the elevation uncertainty of terrace T2 to terrace T3 that will be the elevation difference across the Kouhsiaoli fault scarp is 40 ± 13 m. We were not able to find datable material to compare the age of the terraces on both sides of the fault.

(二) 階地分析

本研究區的階地由老至年輕分別為 T0 (15-18ka)、T1a (8 ka)、T1b、T2a、T2b、T3 (3-4 ka)、T4a、T4b (2 ka)、T4c、T4d、T5，以上包括本研究的定年及重新校正前人研究的定年之結果，同時也刪去無法代表階地形成年代的定年(如 T2a 過年輕與 T4b 過老之樣本)，並以基岩侵蝕面之河拔高除以年代獲得該河階之下切速率，計算所得的下切速率彙整於表 3 中。再將下切速率依其階地位置投影於如圖 51 中的 A-A' 投影線上(圖 55)，計算相對抬升速率。最後再根據斷層兩側基岩侵蝕面之河拔高差，以及斷層傾角，計算斷層的滑移速率。下切速率依河階之年代由老到年輕條列如下：

1. 於口宵里斷層東側劉陳灣的 T0 階地，基岩侵蝕面之河拔高為 38.4 公尺，下切速率為 2.5-2.6 mm/yr。

2. 於口宵里斷層東側劉陳灣的 T1a 階地，基岩侵蝕面之河拔高為 38.1 公尺，下切速率為 4.2-4.4 mm/yr。

3. 於崙後斷層西側唶子坑的 T1a 階地，基岩侵蝕面之河拔高為 132.39 公尺，下切速率為 14.7-15.4 mm/yr。

4. 於崙後斷層西側口林的 T3 階地，基岩侵蝕面之河拔高為 66.7 公尺，下切速率為 15.3-21.6 mm/yr。

5.於崙後斷層西側新社的 T3 階地，基岩侵蝕面之河拔高為 65 公尺，下切速率為 14.9-21.0 mm/yr。

6.於崙後斷層西側舊社的 T3 階地，基岩侵蝕面之河拔高為 73.5 公尺，下切速率為 16.9-23.8 mm/yr。

7.於口宵里斷層東側劉陳灣地區三元台旁的 T3 階地，基岩侵蝕面之河拔高為 16.43 公尺，下切速率為 3.8-5.3 mm/yr。

8.於崙後斷層西側頭社的 T3 階地，基岩侵蝕面之河拔高為 26 公尺，下切速率為 6.0-8.4 mm/yr。

9.於口宵里斷層東側和睦的 T3 階地，基岩侵蝕面之河拔高為 15 公尺，下切速率為 3.5-4.9 mm/yr。

10.於崙後斷層西側口林的 T4b 階地，基岩侵蝕面之河拔高為 36.7 公尺，下切速率為 17.9-22.7 mm/yr。

11.於崙後斷層西側走馬瀨農場內的 T4b 階地，基岩侵蝕面之河拔高為 45.14 公尺，下切速率為 22.3-27.6 mm/yr。

12.於崙後斷層東側厝尾的 T4b 階地，基岩侵蝕面之河拔高為 34.5 公尺，下切速率為 16.9-21.3 mm/yr。

13.於崙後斷層東側厝尾的 T4b 階地，基岩侵蝕面之河拔高為 45 公尺，下切速率為 22.3-27.6 mm/yr。

14.於崙後斷層東側厝尾的 T4b 階地，基岩侵蝕面之河拔高為 42 公尺，下切速率為 20.8-25.7 mm/yr。

將口宵里斷層下盤劉陳灣地區，T3 河階的兩個下切速率統整後得其二之平均速率，再將此平均速率與口宵里斷層上盤的新社 T3 河階之下切速率相減而得相對抬升速率為 13.7-15.7 mm/yr (圖 56)。斷層滑移速率本研究分別選用兩處於口宵里斷層兩側之河階高程差以及相對抬升速率進行計算，其一為新社與劉陳灣的 T3 階地，以其基岩侵蝕面高程差與定年結果加以計算，計算後所得之垂直滑移速率為 8.3-13.6

mm/yr，斷層滑移速率為 12.2-17.5 mm/yr，其二是使用灣潭地區斷層兩側的階面高程差與 T3 河階的定年結果加以計算，計算後所得之垂直滑移速率為 7.8-19.6 mm/yr，斷層滑移速率須小於 9.9-23.2 mm/yr，其三是利用新社與劉陳灣的 T3 階地之相對抬升速率加以計算，可得 20.0-23.0 mm/yr。

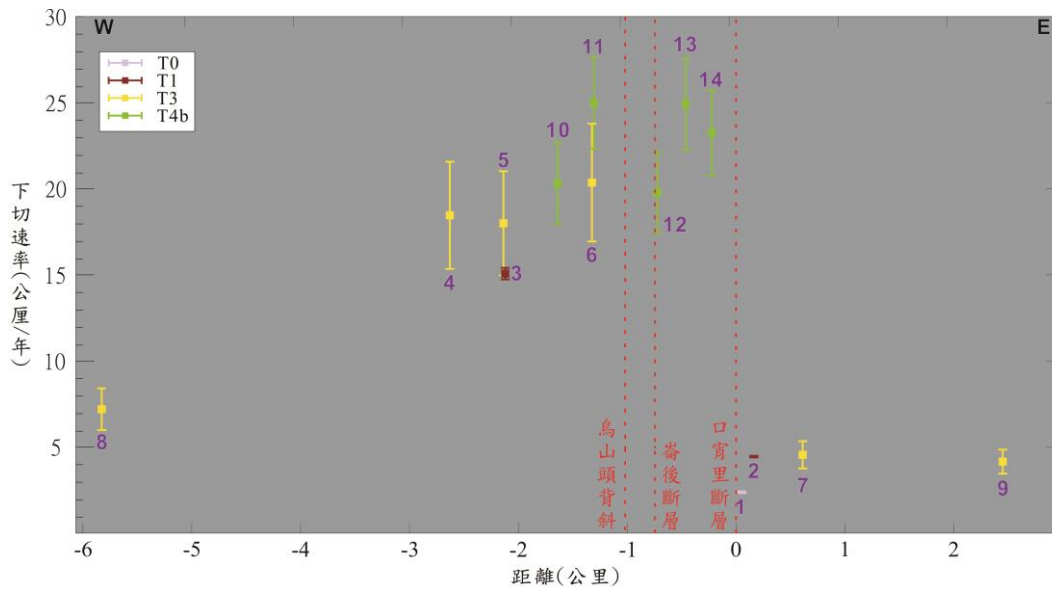


圖 55 沿玉井區至大內區 A-A' 剖線投影之下切速率位置。由基岩侵蝕面河拔高除以階地年代所得的下切速率。

Figure 55. Incision rate along A-A' projection line from Danei to Yuching. Incision rates based on bedrock strath elevations (Table 2) relative to the modern river and radiocarbon ages (see location on fig. 45).

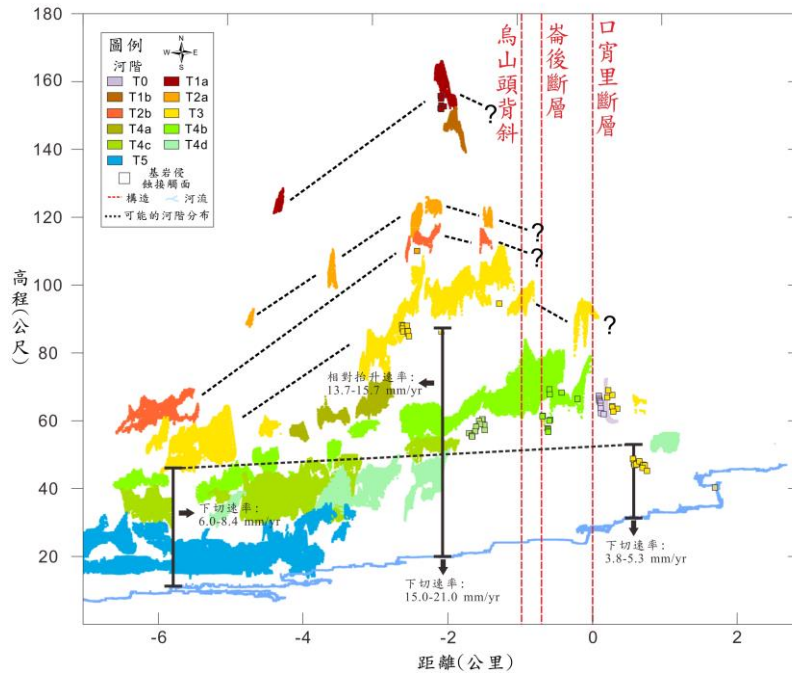


圖 56 大內區至玉井區之下切速率與相對抬升速率投影至河階剖面。將變形區與未變形區的下切速率整合比較。

Figure 56. Incision rate and relative uplift rate plot on terrace section from Danei to Yuching. Integrated comparison of incision rates in deformed and non-deformed area. Dashed line is correlation of terraces; Question mark is inferred terrace trend.

表 3 曾文溪沿岸各基岩侵蝕面之下切速率

Table 3 Incision rate of each strath along the Tsengwen River

	河階 Terrace	測點位置 Measuring point location	現生河道高 Modern channel elevation (m)	基岩侵蝕面高 Strath elevation (m)	定年結果 (年) Terrace age (yr)	下切速率 Incision rate (mm/yr)
1	T0	劉陳灣	28.0	65.6-67.4	15256-14854	2.5-2.6
2	T1a	劉陳灣	28.7	66.8	8979-8589	4.2-4.4
3	T1a	嗶子坑	20.0	151.8-152.7	8979-8589	14.7-15.4
4	T3	口林	20.0	84.8-88.2	4219-3005	15.3-21.6
5	T3	新社	20.0	85.0	4219-3005	15.0-21.0
6	T3	舊社	21.0	94.5	4219-3005	16.9-23.8
7	T3	劉陳灣	31.0	45.2-49	4219-3005	3.8-5.3
8	T3	頭社	13.0	39.0	4219-3005	6.0-8.4
9	T3	和睦	40.0	55.0	4219-3005	3.5-4.9
10	T4b	口林	21.2	55.3-60.4	1998-1615	17.9-22.7
11	T4b	走馬瀨農場內	21.2	66.2-66.5	1998-1616	22.3-27.6
12	T4b	厝尾	24.0	56.6-60.3	1998-1617	16.9-21.3
13	T4b	厝尾	25.0	70.0	1998-1617	22.3-27.6
14	T4b	厝尾	25.0	67.0	1998-1617	20.8-25.7

第六章 討論

6-1 構造活動性

6-1-1 階地變形推演構造運動

口宵里斷層於劉陳灣地區截切上伏於基岩的河流階地礫石層，於斷層東側下盤處的階地定年結果有 8976-8595 cal BP、4219-3926 cal BP 和 3212-3005 cal BP，與被斷層截切的階地，其底部採集的樣本定年結果，分別有劉彥求等(2020)報導的 12670 ± 40 BP 及謝孟龍於 2021 提供給本研究的 18480-14854 BP 相差甚大，造成差異的可能原因有二個，其一，該處靠近口宵里斷層的階地沉積年代確實為 18480-14854 BP，而其餘的定年樣本則是因口宵里斷層逆衝推擠下盤變形形成類似急折褶皺，導致底部基岩抬升促使河道變遷，隨著河道的變遷定年樣本也在不同的時期沉積於同一側的河階，以致於所有的定年樣本都可個別代表該處階地的沉積物沉積的年代(圖 57、58)，這也代表著口宵里斷層於 1.8 萬年前之後有活動過，為中央地質調查所定義的第二類活動斷層，倘若如上述解釋，河道變遷是因斷層活動所致，說明了 8 千年內斷層可能再次活動，導致河道變遷到如今採集到 3-4 千年樣本的位置(圖 58C)，故口宵里斷層也極有可能是第一類活動斷層；其二，於 3 千至 1.8 萬年前間，此處河階不斷地重複著侵蝕與沉積，致使此階地形成較為多層的假整合接處面(圖 59)，並且於空拍影像明顯看出鄰近口宵里斷層的階地，可觀察到礫石層的分層至少有兩層，且前人所採集到的定年樣本位處最底部的河階礫石層，若底層之上的另一層礫石層為不同時期所沉積的，是否代表上面一層的礫石層沉積時期至少年輕於 1.4 萬年，又或是頂部的細顆粒沉積物如圖 59 所示是與較東側 8 千年甚至是 3、4 千年同一時期沉積的，有可能年輕於一萬年內，意味著口宵里斷層於一萬年內曾經活動過，為第一類活動斷層。

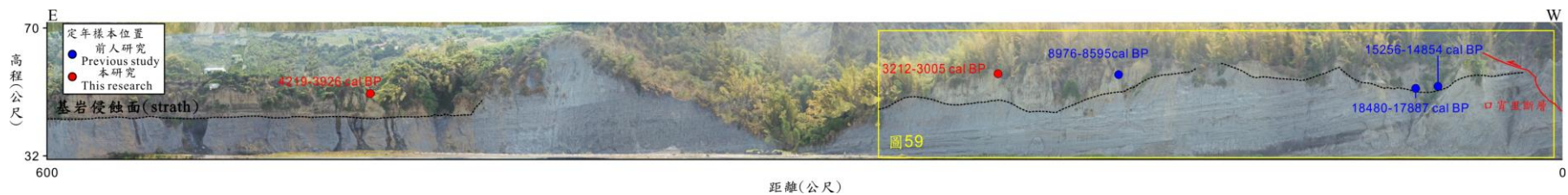


圖 57 劉陳灣地區口宵里斷層東側之採樣樣本。虛線為基岩侵蝕面。

Figure 57. Liuchenwan cliff (See location on fig. 51), on the east side of the Kouhsiaoli fault, showing the relative positions of the five radiocarbon dating results. The dotted line represents the bedrock strath. The ages are quite different because the sampling locations are different. The samples dated 15ka and 18ka were collected at the base of the terrace deposit, where the bedrock strath is slightly higher than elsewhere. The samples dated 9 ka and 3 ka were collected about 3 m and 5 m from the bedrock strath, respectively, at a place where the strath elevation is intermediate. The sample dated 4 ka was collected 8 m above the bedrock strath, where the strath elevation is the lowest. The absolute elevations of the samples are shown in Table 2. Overall, this dataset indicates that the elevation of the river at this site was quite stable from 18 to 3 thousand years ago.

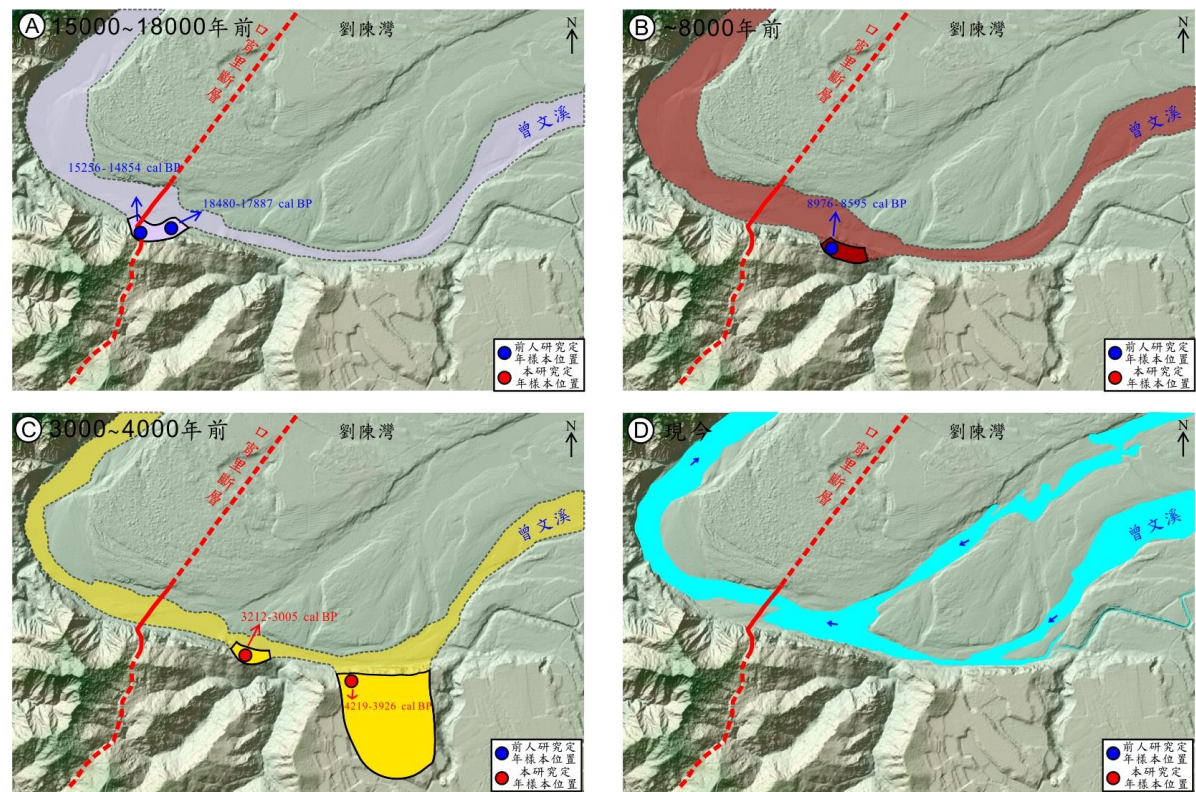


圖 58 劉陳灣地區口宵里斷層古河道重建。根據野外可以觀察到明顯的露頭剖面(圖 27、51、57)，河階底下的基岩明顯受口宵里影響有些許折曲，這說明該處河道變遷有可能是受到構造抬升的緣故所導致。

Figure 58. Reconstructions of the paleo-river channel east of the Kouhsiaoli fault in Liuchenwan area. A geological cross-section can be observed in the field (Fig. 27, 51, 57). The bedrock under the river terrace was evidently folded by the Kouhsiaoli fault, which indicates that the river channel change was caused by the Kouhsiaoli fault activity.

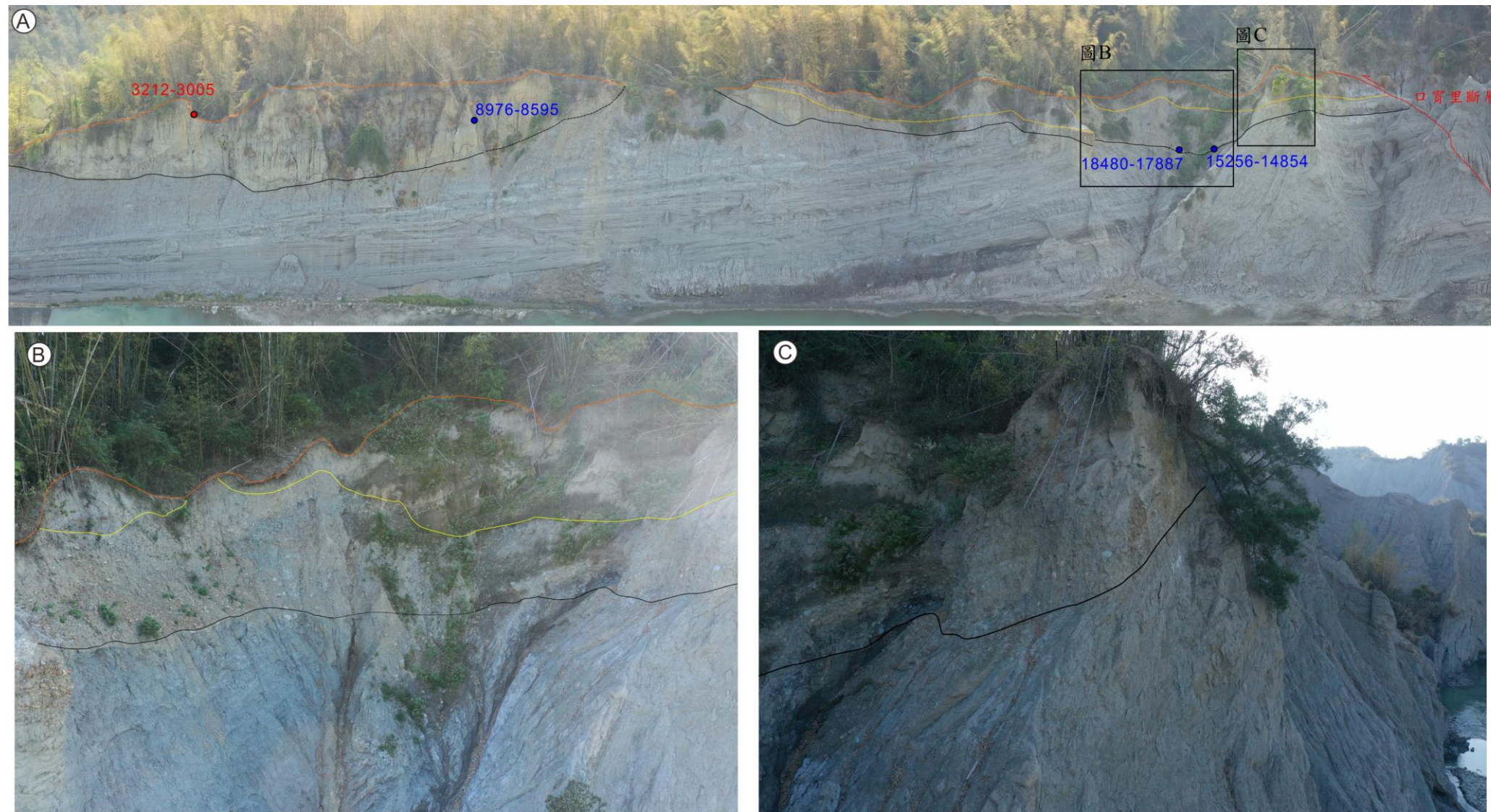


圖 59 劉陳灣地區口宵里斷層緊鄰下盤之階地沉積 (露頭位置可見圖 51、57)。(A)如圖可見劉陳灣露頭壁面，於基岩頂部覆蓋著河階沉積物，並且基於前人研究所採集到的定年標本可以得知，河階沉積物的底部沉積年代至少為 1.8 萬年內，但並沒有證據指出上覆的細粒料沉積物的沉積年代，若西側與東側的細粒料沉積物為同一時期沉積的產物，那代表著此河階沉積的時間有可能為 3 千或 8 千年，也間接的指示口宵里斷層可能活動於一萬年內視為第一類活動斷層；(B)因底部基岩急折變形，導致河階沉積環境改變；(C)因底部基岩急折變形，可見河階底部的礫石層排列方向與下方的基岩一致。

Figure 59. Terrace deposit east of the Kouhsiaoli fault in the Liuchenwan area (see Figure 51, 57 for the outcrop location). (A) As shown in the figure, the outcrop cliff of Liuchenwan is covered with river terrace sediments on the top of the bedrock. Based on the dating results collected by previous researches, it can be known that the sedimentary age of the river terrace sediments bottom is at least 18,000 years old. There is no evidence for the age of the overlying. If the fine-grained sediments on the west and east sides were deposited at the same period, it implies that the deposition of this river terrace ended. Indirectly means the Kouhsiaoli fault may active in 8,000 years as the first type of active fault; (B) Because of bedrock kink deformed, let deposit environment changed; (C) The bedrock at the bottom is sharply folded and deformed. It can be seen that the arrangement direction of the conglomerate at the bottom of the terrace is consistent with the bedrock below.

6-1-2 下切速率比對

在下切速率的彙整剖面(圖 55)中走馬瀨附近的 T4b 河階共有三筆下切速率，分別是圖 55 中的 11、13、及 14，其中有兩筆數據是相近的分別為以走馬瀨農場內樣本標號 TW-C128 估算的下切速率(亦即圖 55 中的 11)與走馬瀨農場北岸的 NTU2322(亦即圖 55 中的 13)，另一筆數據則是位於走馬瀨農場北岸的 WK6135(亦即圖 55 中的 14)，而其中 14 的下切速率低出 11 及 13，可能原因是其樣本 WK6135 被搬運過，也就是說此樣本相對較老；T3 河階的定年樣本相對充足，有定年年代的 T3 河階東西向橫跨在三個構造的兩側，於最西邊的 T3 河階樣本 WK5136(圖 55 中的 8)所求得的其下切速率與最東邊的 T3 河階 TW-C79(圖 55 中的 9)和 TW-C158(圖 55 中的 7)相近，說明這 T3 河階在這樣的範圍內，於 3-4 千年前形成時並沒有受到氣候變遷或是海水面變化而有可觀的影響，意味著 T3 河階在這段距離內下切速率應該都是相近的，但位於新社 T3 河階(圖 55 中的 5)的下切速率卻高出東西兩側許多，表示新社的 T3 河階很大機率是由構造活動使其抬升，而造成這樣的下切速率差異，此相對抬升速率應為 13.7-15.7 mm/yr。

6-1-3 長期滑移速率

崙後斷層上盤 T4b 河階的年代 NTU2322:1867-1615 cal BP(Hsieh & Knuepfer, 2002)，與斷層下盤走馬瀨地區 T4b 河階的年代 TW-C128:1998-1878 cal BP 相近，且兩處階地海拔高程大約都是 70 公尺幾乎一致，此外，曾文溪走馬瀨橋旁階地礫石層與基岩的侵蝕接觸面的高程，在跨斷層帶處並無明顯變化，因此推測崙後斷層於近 2 千年內，上下盤之間並無明顯垂直滑移量。

口宵里斷層 Hsieh & Knuepfer(2002)測得口宵里斷層上盤 T4b 階地的年代為 WK6135: 2844-2488 cal BP，下盤 T3 階地(劉陳灣地區)的年代為 TW-C79:4219-3926 cal BP，在長時間尺度下，河流下切速率可以反映地殼隆升速率，一個河流階地系統的形成，較老的階地因經歷抬升時間較長，經常會高於較年輕的階地，針對兩處地形

高程分析，口宵里斷層上盤之 2 千年的階地與口宵里斷層下盤 4 千年的階地海拔高程相近，假設口宵里斷層下盤之 4 千年階地有延續至口宵里斷層上盤，其相對位置應高於口宵里斷層上盤之 2 千年的階地，惟該階地可能已被侵蝕殆盡或因露頭不足而尚未被發現，藉此推論可間接說明口宵里斷層上盤相對於口宵里斷層下盤在 3-4 千年內是在抬升的。

根據圖 60 與 61 上游河階於口宵里斷層兩側，受斷層錯動的河階階面高程差並不一致，如圖 60 a-a' 地形剖線顯示 T2 與 T3 河階之階面高程差約為 45 公尺，但 b-b' 的地形剖線顯示 T2 與 T5 河階的高程差約為 55 公尺，換句話說 a-a' 地形剖線處的河階，原本可能是 T3 河階，但是受斷層抬升作用導致斷層上盤處的 T3 河階抬升至 T2 河階的高度，那麼 b-b' 剖線處的 T5 河階上盤受斷層抬升後最高應抬升至 T4a 河階的高度而非 T2a，故綜合上述觀點並無法直接證明斷層兩側的河階高程差是受斷層影響，且在無確切的定年證據之情況下，是不能直接使用河階高程差計算斷層的滑移速率，而斷層兩側的新社與劉陳灣河階因相聚較遠，也無法直接計算斷層地滑移速率，因此本研究的滑移量最後選新社與劉陳灣 T3 階地的相對抬升速率進行評估。

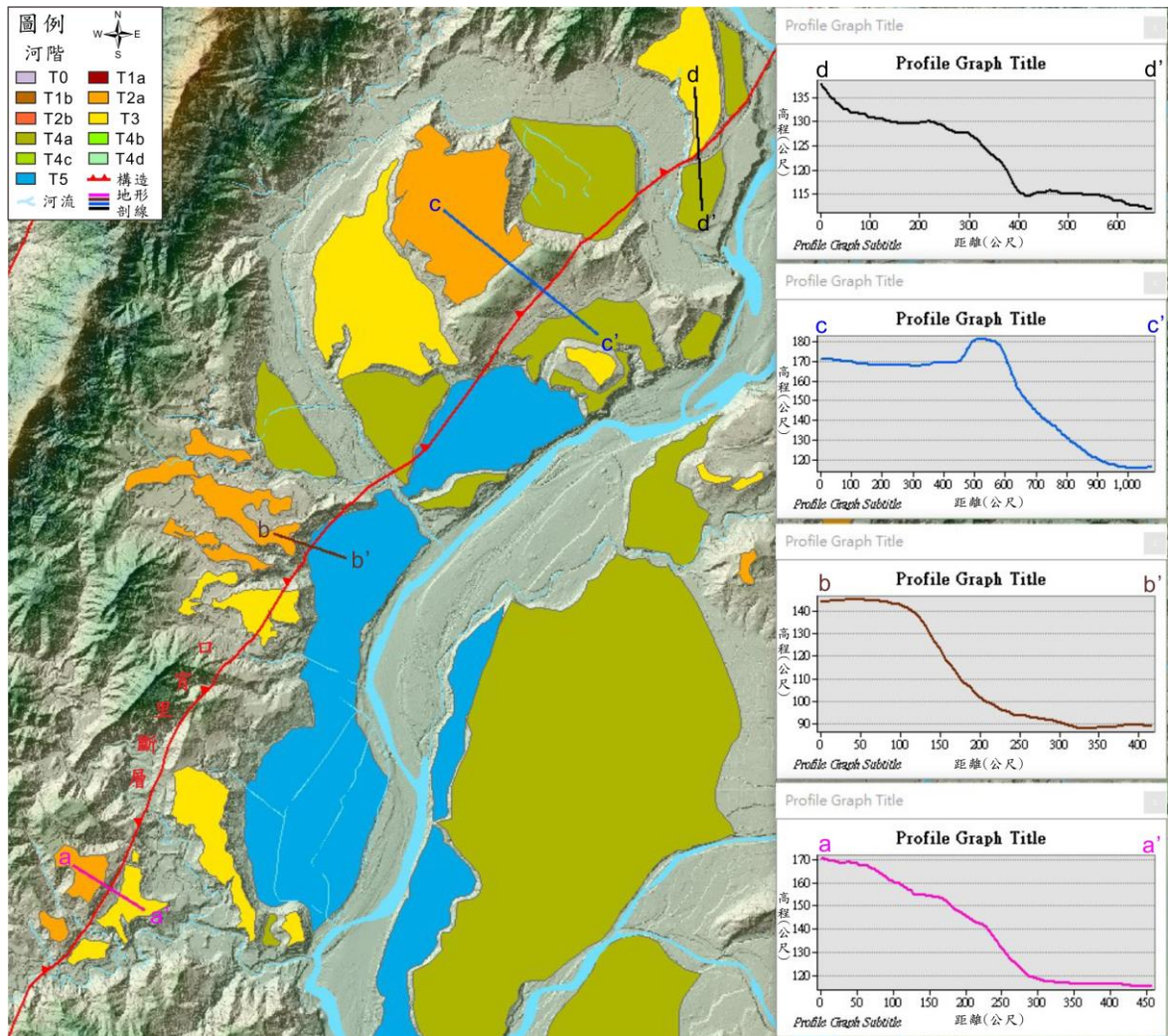


圖 60 楠西區口宵里斷層的地形崖。沿口宵里斷層可見於地形崖東西兩側的河階高程差，露頭位置參考圖 51

Figure 60. Escarpments of the Kouhsiaoli fault in Nanxi, Tainan (see location on fig. 51). Along the Kouhsiaoli fault the elevation difference of the terraces can be seen on the east and west sides of the terrain cliff.

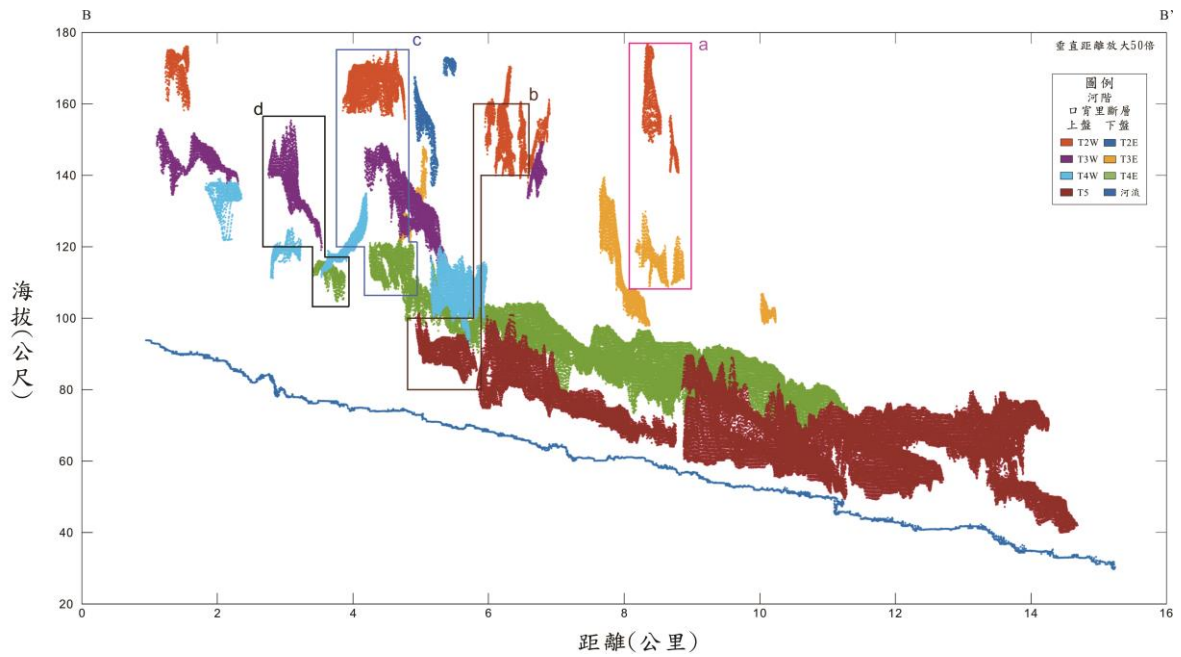


圖 61 楠西區至玉井區河階剖面，剖面位置參考圖 51 B-B'。將河階平行於口宵里斷層投影於剖面，並依斷層上下盤以不同的顏色區分，圖中選取的方框位至請參考圖 60。

Figure 61. Terrace longitudinal profile from Nanxi to Yuching (see location on fig. 51 line B-B'). The terraces are projected along a profile parallel to the Kouhsiaoli fault and the modern Tsengwen River. Terraces are distinguished by different colors according to their location on the hanging wall or footwall of the fault. See the location of selected frame in Fig. 60.

6-2 烏山頭背斜、崙後斷層與口宵里斷層之地下結構

由於 Pathier et al. (2015) 的 InSAR 資料為 ALOS-1 衛星沿著觀測方向不斷的向地球表面發射數百萬個雷達信號，傳感器指向地球表面的角度稱為偏離天底角或視角 (off-nadir angle/look angle) 其範圍是 20° 到 50° ，這種改變偏離天底角的能力對於在丘陵或山區地形(InSAR 的潛在障礙)的情況下進行調整非常重要，但是如果要觀察幾何形狀和地形坡度之間的關係並不是最佳的，故接下來的討論將會以 Lu et al. (2020) 升降軌所解算的垂直變位量為參照。於圖 62A 可以看到大地測量結果與本研究之河階剖面對比結果，將破碎河階以現有的資料推測其可能的河階連續性以虛線連接起來(圖 62B)顯示自研究區最西側往東越靠近三條構造的河階變形與垂直抬升量有漸漸上升的趨勢，至烏山頭背斜來到最高值，爾後過烏山頭背斜軸開始下降，形成一個由西向東漸升過烏山頭背斜軸後相對急促下降的不對稱背斜形變位。於河階的對比結果 Hsiseh & Knuepfer (2002) (圖 12B) 與本研究大致相同，兩研究結果都指向口宵里斷層是活動斷層，但對河階分析與構造活動之解釋卻有些許不同，前者認為在口宵里斷層下盤的下切速率幾乎為零，而上盤的下切速率為 22.3-27.6 mm/yr，造成這樣的下切速率差異以及整個背斜東翼陡峭的主要原因，是因口宵里斷層為持續活動所導致，但本研究的研究結果顯示，口宵里斷層上下盤之 T3 河階相連結，推測 T3 河階可能是連續分布的，且在口宵里斷層下盤的下切速率並非為零，而是有約 5.9 mm/yr 的下切速率，並且非如 Hsiseh & Knuepfer (2002) 所推測的於崙後斷層及口宵里斷層之間的變位那般地陡峭，但同樣地在口宵里斷層西側至少 6 公里的範圍都呈現類似背斜形的地表變位，本研究重新檢視研究區內的構造變形機制，根據野外調查結果與前人文獻(何信昌等，2005; 黃旭燦等，2004)，繪製出兩種可能的地質剖面(圖 63)，其一為口宵里斷層為崙後斷層的背衝斷層(圖 63B)，而造成抬升的原因是崙後斷層因淺部傾角過高而鎖住無法繼續活動，且因崙後斷層更深處的底滑脫面由東向西推擠，形成口宵里背衝斷層向東逆衝，這樣的作用所造成的垂直變位將集中在兩斷層之間，無法解釋至少

6 公里範圍的河階變位及大地測量的結果，亦即口宵里斷層西側至少有 6 公里的範圍的相對抬升；其二是口宵里斷層為自烏山頭背斜西翼的曲滑層面發育，且向東逆衝，截切烏山頭背斜與崙後斷層的反向斷層(antithetic faults)(圖 63C)。會造就如此的口宵里斷層可能是於褶皺逆衝帶底部之底滑脫面在本研究區有個斷坡(黃旭燦等，2004)，使得在底滑脫面上伏的岩層通過此斷坡時產生褶曲，亦即烏山頭背斜，此後在斷坡上面發育一系列似雙拼構造(duplex-like structure)，持續地頂昇上伏的岩層，使得烏山頭背斜透過層間的曲滑作用(flexure slip)持續地增長，即褶皺的振幅越大，同時可能亦有水平大地應力的側向擠壓，致使烏山頭背斜的兩翼越近地表越顯緊密，而在這樣的水平擠壓及向上推力仍持續地進行下，太過緊密的兩翼岩層，為了符合幾何空間之兼容性(compatibility)，因此於烏山頭背斜西翼沿曲滑的層面順勢發育出往東俯衝，切過烏山頭背斜、崙後斷層、及切穿河流階地的口宵里斷層，如圖 63C 所示。類似的構造發育形式在 Ramsay(1974)的書中的褶皺力學(fold mechanics)章節中也有論述。口宵里斷層自烏山頭背斜西翼的岩層層面發育，向東逆衝，同時截切崙後斷層與烏山頭背斜，且烏山頭背斜仍持續地增長，這一解釋較符合大地測量與本研究的河階剖面分析結果，顯示向上抬升量的分布是自口宵里斷層以西約六公里的範圍，且最大的抬升量約略位在烏山頭背斜軸跡的位置。

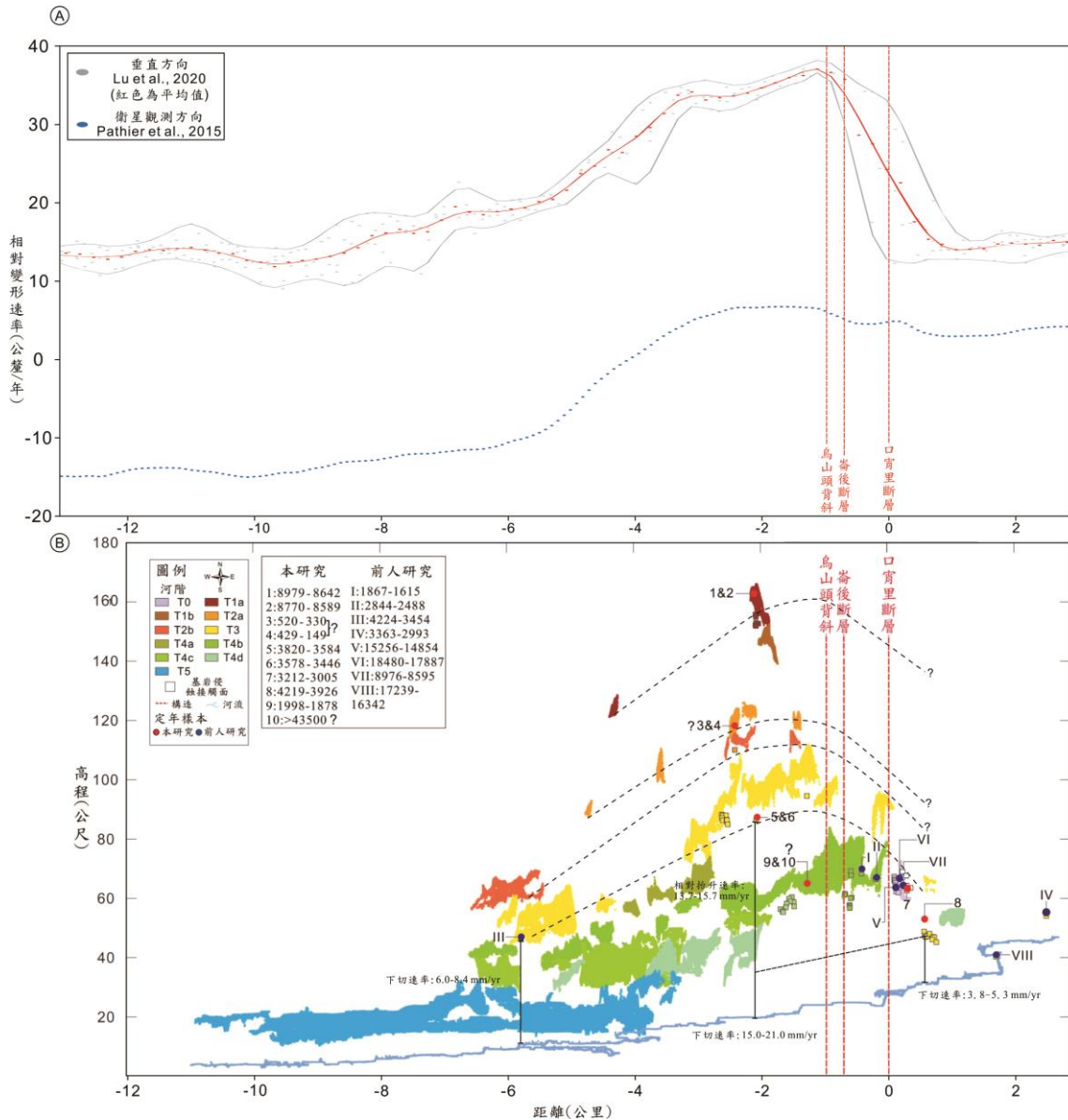


圖 62 玉井區至大內區之大地測量與河階剖面。於上圖可見河階變形與大地測量的抬升速率之趨勢相似。(A) InSAR 影像分析(Pathier et al, 2015) 和 InSAR 影像分析(Lu et al, 2020)；(B) 河階垂直於構造投影。Dash line: terraces correlation。

Figure 62. Geodesy and terrace section from Danei to Yuching. It can be seen from the figure above that the river terraces deformation coincides with the higher present-day uplift rates. (A) InSAR image analysis (Pathier et al, 2015) and InSAR image analysis (Lu et al, 2020); (B) River terraces perpendicular to the structurals projection. Dash line: terraces correlation.

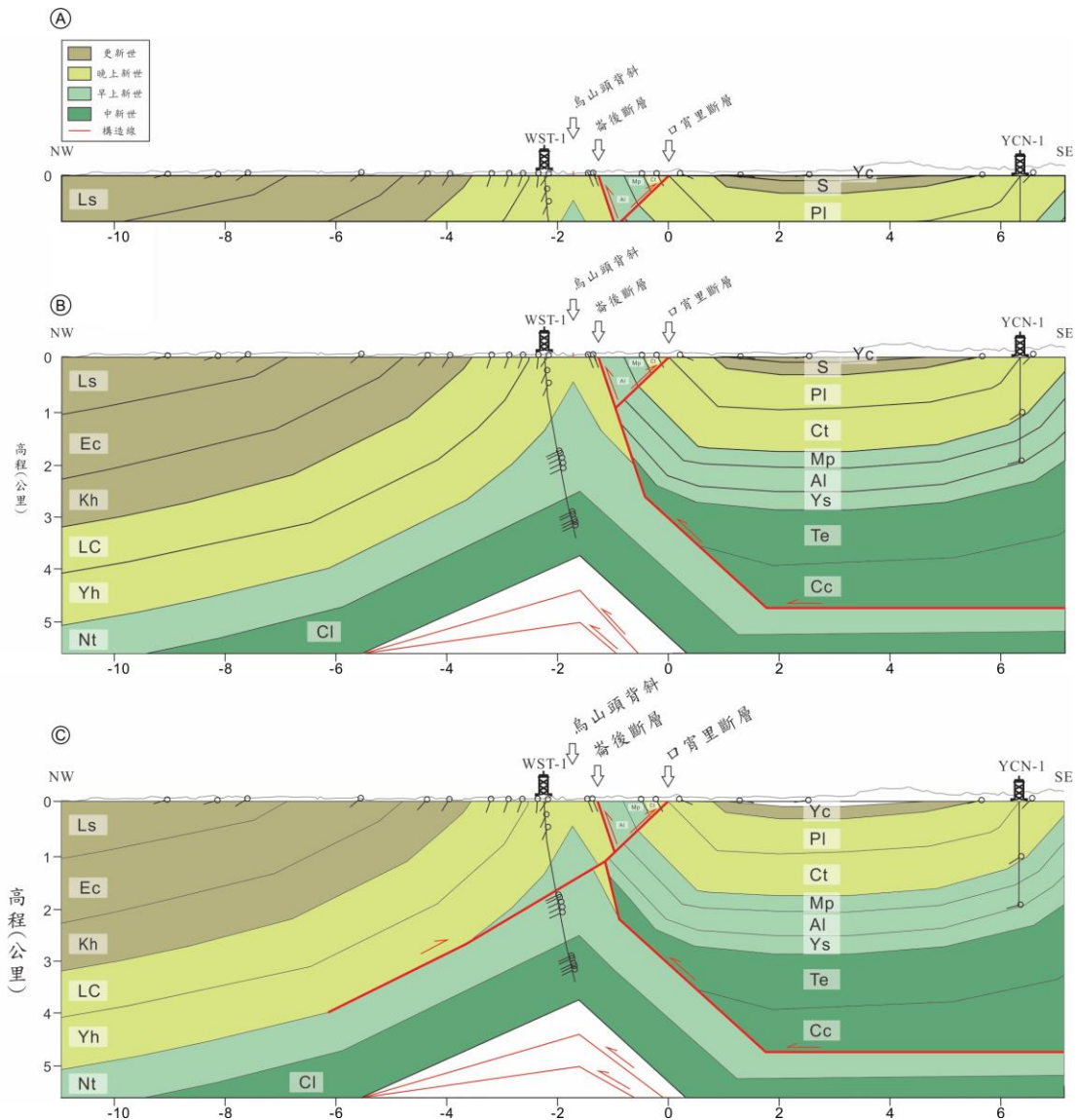


圖 63 曾文溪一帶之構造剖面解釋(結合前人與本研究之野外調查並參考黃旭燦等(2004)之構造剖面資料繪製而成)。(A)近地表構造剖面;(B)口宵里斷層為崙後斷層之背衝斷層;(C)口宵里斷層截切烏山頭背斜與崙後斷層。

Figure 63. The explanation of geological cross-section around Tsengwen River (Combined with previous and our field survey and balanced cross section (Huang et al., 2004)). (A) Near-surface geological section and two proposed versions for the interpretation at depth; (B) The Kouhsiaoli fault is a backthrust of the Lunhou fault; (C) The Kouhsiaoli fault cut through the Wushantou anticline and the Lunhou fault. The statement of the figure C is more in line with the results of the geodesy.

第七章 結論

本研究利用沿曾文溪河流階地結合野外調查結果，探討曾文溪一帶的地表變形，是否由崙後斷層或口宵里斷層主導，以及兩條斷層的地下結構。

整合定年與野外調查的比對結果，崙後斷層帶於走馬瀨曾文溪北岸露頭剖面觀察到斷層帶寬度約 15~20 公尺，斷層帶內的剪切帶為高傾角，且藉由上覆河流階地並無錯動之證據，故斷層於近兩千年內，上下盤之間無明顯垂直滑移量，這說明斷層於兩千年內並沒有活動跡象。口宵里斷層位於劉陳灣露頭處，斷層帶的寬度約 32 公尺，斷層影響帶約 110 公尺，根據上下盤河階的分析，口宵里斷層上盤相對於口宵里斷層下盤，在三至四千年內有相對抬升，並且有斷層明顯截切河階的露頭證據。

於口宵里斷層東側下盤處，劉陳灣地區階地沉積物採集到的定年結果，依其分布與構造有兩個解釋，其一為口宵里斷層下盤因上盤逆衝推擠，促使下盤基岩變形形成類似急折褶皺，導致基岩抬升使得曾文溪河道於 1.8 萬年內由西向東遷徙，隨著河道的變遷於 8 千年前及 3-4 千年前造就了不同時期的河階沉積，同時也意味口宵里斷層於 1.8 萬到 8 千年間、及 8 千到 3-4 千年間，皆有活動的跡象，其二為此處河階沉積環境相當穩定，而河階也在 1.8 萬年至 3-4 千年於同一處不斷地侵蝕、堆積，且野外露頭有全為細粒料，或最上層為細粒料，下伏一層、兩層或甚至兩層以上的礫石層，而最上層的細粒料為 8 千年亦或 3-4 千年，此細粒料的沉積物被口宵里斷層截切，綜合上述的兩個解釋皆指出口宵里斷層可能於 8 千年內有再活動的現象，應為第一類的活動斷層。

根據大地測量與河階剖面的比對，顯示出口宵里斷層以西的不對稱背斜形地表變位，且地表變位最高點位於烏山頭背斜軸，本研究認為較可能是因底滑脫面與此區底下有個斷坡，而沿著斷坡上伏發育出烏山頭背斜，且在水平擠壓及向上推力雙重作用下，導致持續增長的烏山頭背斜因為淺部的兩翼岩層太過緊密，以致於於背斜西翼沿曲滑層面順勢發展出截切崙後斷層與烏山頭背斜的口宵里斷層，故導致自口宵里斷層

以西至烏山頭背斜西側六公里內仍有明顯的抬升現象，且呈現不對稱的背斜形地表變位。

結合大地測量結果與本研究之野外觀察及河階分析，證明口宵里斷層為第一類活動斷層，而口宵里斷層的滑移速率根據本研究的河階對比與下切速率，比對新社與劉陳灣的 T3 階地，其相對抬升速率為 13.7-15.7 mm/yr，而斷層的滑移速率為 20.0-23.0 mm/yr。

參考文獻

- 中國石油公司，「臺南地質圖，比例尺十萬分之一」，中國石油公司臺灣油礦探勘總處，1989。
- 烏居敬造，「台南州新化油田調查報告」，台灣總督府殖產局，609號，29頁，1932。
- 何信昌、謝凱旋、高銘健、陳華玟，「新化地質圖幅及說明書，比例尺五萬分之一」，經濟部中央地質調查所，2005。
- 何春蓀，「臺灣地質概論—臺灣地質圖說明書」，經濟部中央地質調查所，共164頁，1986。
- 紀文榮、黃秀美，「台南縣九層林背協之超微體生物地層」，探採彙報，第5期，39-56頁，1982。
- 紀文榮，「台南泥岩區之超微體生物地層與對比研究」，石油，17卷，1期，47-65頁，1982。
- 紀文榮，「台南泥岩區之超微體生物地層與對比研究」，石油，17卷，1期，45-60頁，1978。
- 林朝榮，「臺灣地形，台灣省通志稿」，臺灣文獻委員會出版，第1卷，第1冊，共424頁，1957。
- 林朝榮，「土地志•地理篇•第一冊」，台灣省文獻委員會出版，台灣通志稿，卷一，第274-277頁，1957。
- 林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正，「台灣活動斷層概論五十萬分之一台灣活動斷層分布圖說明書」，經濟部中央地質調查所特刊，第二版，第13號，共122頁，2000。
- 景國恩、胡植慶、陳宏宇、張午龍、鄭凱謙、莊昀叡，「斷層活動性觀測研究第四階段-地表變形觀測資料處理分析與斷層模型反演評估」，經濟部中央地質調查所，共315頁，2018。

- 謝凱旋，「台南菜寮地區更新世地層層序研究」，經濟部中央地質調查所八十年度研究發展專題報告，第 1-35 頁，1991。
- 謝承恩、范書睿、林彥廷、黃文正和羅偉，「無人飛行載具搭載數位相機於地質構造判釋之應用」，*Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*，21，4，257-269 頁，2016。
- 吳榮章，「台南縣龜丹溪剖面之生物地層及其沉積環境」，探採彙報，第 5 期，地 33-51 頁，1982。
- 陳文山，「地震地質調查及活動斷層資料庫建置計畫-崙後斷層條帶地質圖」，經濟部中央地質調查所報告第 92-7 號，共 38 頁，2003。
- 陳文山、宋時驊、吳樂群、徐浩德、楊小青，「末次冰期以來台灣海岸平原的海岸線變遷」，*考古人類學刊*，第 40-55 頁，2005。
- 陳郁文，「以反射震測法研究觸口斷層及其附近構造」，國立中央大學，碩士論文，2006。
- 陳延宗，「以反射震測法研究左鎮斷層及其附近構造」，國立中央大學，碩士論文，2007。
- 劉彥求、許晉璋、林啟文，「口宵里斷層之構造特性與活動調查」，經濟部中央地質調查所特刊，第 35 號，第 29-47 頁，2020。
- 黃文正、陳建志、波玫琳、顏一勤，「活動斷層特性精細調查」，經濟部中央地質調查所，共 110 頁，2020。
- 黃旭燦、楊耿銘、吳榮章、丁信修、李長之、梅文威、徐祥宏，「台灣陸上斷層帶地質構造與地殼變形調查研究-台灣西部麓山帶地區地下構造綜合分析」，經濟部中央地質調查所報告，93-13 號，2004。
- 黃廷章、丁志興，「台灣晚新第三紀淺海沉積超微化石生物地層」，*地質*，第 3 卷，第 105-119 頁，1981。
- 黃姝琳，「台灣南部嘉義地區麓山帶構造型態轉換之研究」，國立台灣大學，碩士論文，2009。
- 黃福坤，「實驗數據的處理與分析」，2011。

- 楊志成、顏一勤、宋時驊、黃能偉、陳勇全、陳文山、陳于高、吳樂群、張徽正、侯進雄、林啟文，「六甲斷層近萬年來滑移速率之探討」，經濟部中央地質調查所特刊，第 16 號，第 1-16 頁，2005。
- 李元希、謝凱旋、黃敦友、何信昌、陳華玟、張徽正，「台灣西南部前麓盆地的演化」，經濟部中央地質調查所，1997。
- 張徽正、林啟文、陳勉銘、盧詩丁，「台灣活動斷層概論五十萬分之一台灣動斷層分布圖說明書」，經濟部中央地質調查所特刊，第 10 號，共 114 頁，1998。
- 張錫齡、鍾振東，「台南縣竹頭崎構造之地質」，台灣石油地質討論會論文專輯，中國石油公司，237-249 頁，1957。
- 張憲卿，「嘉義圖幅及說明書五萬分之一台灣地質圖」，經濟部中央地質調查所，第 44 號，共 81 頁，2008。
- 張政亮，「花東海岸地區河流階地形之比較研究-以水璉溪、水母丁溪、三仙溪為例」，臺北市立大學，碩士論文，2006。
- 宋國城、林慶偉、林偉雄、林文正，「甲仙地質圖幅及說明書，比例尺五萬分之一」，經濟部中央地質調查所，2000。
- 邵屏華、高銘健，「中埔地質圖幅及說明書，比例尺五萬分之一」，經濟部中央地質調查所，2009。
- 樂鍇、祿璞峻岸、陳雲雀、林育璿、毛重仁、黃芸瑄、顏楠庭，「南部地區地震預警系統精進及台灣地震對研究」，中華民國科技部，共 35 頁，2018。
- 鄭世楠、張建興、葉永田、辛在勤，「台灣地區歷史災害地震之研究」，中華民國地球物理學會與中華民國地質學會 100 年年會暨學術研討會，第 125 頁，2011。
- 鄭世楠、葉永田，「台灣百年來的大地震」，科學發展，373 期，第 68-75 頁，2004。
- 鄭世楠、葉永田，「西元 1604 年至 1988 年臺灣地區地震目錄」，中央研究院地球科學研究所研究報告，255 頁，1989。
- 洪崇勝，「台灣西南部曾文溪、二仁溪剖面磁性礦物與磁地層之研究」，國立台灣大學

- 海洋研究所，博士論文，1991。
- 翁淑卿，「臺南台地暨鄰近地區之臺南層及其構造活動」，國立中央大學，碩士論文，2002。
- 詹海波，「以 GPS 關測量估算嘉南地區 1996-2000 年間之地殼變形」，國立中央大學，碩士論文，2000。
- Berggren, W. A., Kent, D. V., Aubry, M. P., Hardenbol, J., Geochronology, Time Scales and Global Stratigraphic Correlation, Society for Sedimentary Geology, Volume 54, 1995.
- Brocard, G., Pieter, B., Influence of incision rate, rock strength, and bedload supply on bedrock river gradients and valley-flat widths: Field-based evidence and calibrations from western Alpine rivers (southeast France), Geological Society of America, Volume 398, 2006.
- Chen, W. S., Kenneth, D. R., Horng, C. S., Chen, Y. G., Shea, K. S., Yeh, M. G., Stratigraphic architecture, magnetostratigraphy, and incised-valley systems of the Pliocene-Pleistocene collisional marine foreland basin of Taiwan, Geological Society of America, No. 10, pages 1249-1271, 2001.
- Chen, Y. G., Liu, T. K., Sea level Changes in the Last Several Thousand Years, Penghu Islands, Taiwan Strait, Quaternary Research, Volume 45, Issue 3, pages 254-262, 1996.
- Chi, W. R., The Late Neogene Nannobiostratigraphy In The Tainan Foothills Region, Southern Taiwan, Petroleum Geology of Taiwan, No. 15, pages 89-125, 1978.
- Fuchs, M. C., Gloaguen, R., Krbetschek, M., Szulc A., Rates of river incision across the main tectonic units of the Pamir identified using optically stimulated luminescence dating of fluvial terraces, Geomorphology, Volume 216, pages 79-90, 2014.
- Gonzalez-Mieres, R., Suppe, J., Relief and shortening in detachment folds, Journal of Structural Geology, Volume 28, pages 1785-1807, 2006.
- Guzmán, O., Vassallo, R., Audemard, F., Mugnier, J. L., Oropeza, J., Yopez, S., Carcaillet,

- J., Alvarado, M., Carrillo, E., ¹⁰Be dating of river terraces of Santo Domingo river, on Southeastern flank of the Mérida Andes, Venezuela: Tectonic and climatic implications, *Journal of South American Earth Sciences*, Volume 48, pages 85-96, 2013.
- Hsieh, M.L., Knuepfer, P. L. K., Synchronicity and morphology of Holocene river terraces in the southern Western Foothills, Taiwan: A guide to interpreting and correlating erosional river terraces across growing anticlines, *Geological Society of America Special, Paper. 358*, pages 55-74, 2002.
- Lavé, J., Avouac, J. P., Active folding of fluvial terraces across the Siwaliks Hills, Himalayas of central Nepal, *Journal of geophysical research*, Vol. 105, NO.B3, pages 5735-5770, 2000.
- Le Béon, M., Suppe, J., Jaiswal, M. K., Chen, Y. G., Ustaszewski, M. E., Deciphering cumulative fault slip vectors from fold scarps: Relationships between long-term and coseismic deformations in central Western Taiwan, *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 119, pages 5943-5978, 2014.
- Le Béon, M., Huang, M. H., Suppe, J., Huang, S. T., Pathier, E., Huang, W. J., Chen, C. L., Fruneau, B., Baize, S., Ching, K. En., Hu, J. C., Shallow geological structures triggered during the Mw 6.4 Meinong earthquake, southwestern Taiwan, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences* 28(5), 2017.
- Lu, C. H., Lin, Y. S., Chuang, R. Y., Pixel offset fusion of SAR and optical images for 3D coseismic surface deformation, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Volume 18, Issue 6, Pages 1049-1053, 2020.
- Merrutts, D.J., Vicent, K.R., Wohl, E.E., Long river profiles, tectonism, and eustasy: A guide to interpreting fluvial terraces: *Journal of Geophysical Research*, v. 99, p. 14031-14050, 1994.
- Nativ, R., Turowski, J. M., Site Dependence of Fluvial Incision rate Scaling with Timescale,

Journal of Geophysical Research: Earth Surface, Volume 125, 2020.

- Pathier, E., Hu, J. C., Doin, M. P., Liao, Y. T., Johann, C., Present-day deformation of anticlines in an active foreland fold-and-thrust belt measured from ALOS-1 InSAR and GPS: The Southwestern Taiwan case. ESA Fringe 2015, Advances in the Science and Applications of SAR interferometry and Sentinel-1 InSAR workshop, 23-27 march 2015, ESA-ESRIN, Frascati, Italy, 2015
- Ramsay, J. G., Development of chevron folds. Geological Society of America Bulletin, v. 85, p. 1741-1754, 1974.
- Reimer, P. J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Blackwell, P. G., Ramsey, C. B., Buck, C. E., Cheng, H., Edwards, R. L., Friedrich, M., Grootes, P. M., Guilderson, T. P., Hafliðason, H., Hajdas, I., Hatté, C., Heaton, T. J., Hoffmann, D. L., Hogg, A. G., Hughen, K. A., Kaiser, K. F., Kromer, B., Manning, S. W., Niu, M., Reimer, R. W., Richards, D. A., Scott, E. M., Southon, J. R., Staff, R. A., Turney, C. S. M., Plicht J. V. D., Intcal13 and marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP, Radiocarbon, Vol 55, Nr 4, 2013, p. 1869-1887, 2013.
- Rowland, S. M., Duebendorfer, E. M., Schiefelbein, I. M., Structural analysis and synthesis: a laboratory course in structural geology, John Wiley & Sons, 2013.
- Ryserson F. J., Tapponnier, P., Finkel, R. C., Mériaux, A. S., Woerd, J.V. D., Lasserre, C., Chevalier, M. L., Xu, X. W., Li, H. B., King G. C. P., Applications of morphochronology to the active tectonics of Tibet, Geological Society of America, Special Paper 415, p. 61-86, 2006.
- Shyu, J. B. H., Kerry, S., Avouac, J. P., Chen, W. S., Chen, Y. G., Millennial slip rate of the Longitudinal Valley fault from river terraces: Implications for convergence across the active suture of eastern Taiwan, Journal of geophysical research, Vol. 111, 2006.
- Stuiver, M., Reimer, P. J., Extended 14C data base and revised CALIB 3.0 14C age,

Radiocarbon, Volume 35, Issue 1, pp. 215-230, 1993.

Wu, D.Y., Li, B., Lu, H., Zhao, J., Zheng, X., Li, Y., Spatial variations of river incision rate in the northern Chinese Tian Shan range derived from late Quaternary fluvial terraces, *Global and Planetary Change*, Volume 185, 2020.

Yanites, B. J., Tucker, G. E., Hsu, H. L., Chen, C.C., Chen, Y. G., Mueller K. J., The influence of sediment cover variability on long-term river incision rates: An example from the Peikang River, central Taiwan, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, 2011.

Yu, S. B., Chen, H. Y., Kuo, L. C., Velocity field of GPS stations in the Taiwan area, *Tectonophysics*, Vol. 274, pp. 41-59, 1997.

附錄 A: 野外露頭空照 3D 建模

Appendix A: 3D modeling of outcrop

唭子坑野外露頭空照 3D 建模

3D modeling of outcrop which is located in Qizikeng.



劉陳灣野外露頭空照 3D 建模

3D modeling of outcrop which is located in Liuchenwan.



附錄 B: 劉陳灣河階空照

Appendix B: Aerial photo of terrace in Liuchenwan



A. 近口宵里斷層空照
A. Aerial photo close to the KSLF



B. 口宵里斷層截切河階沉積物
B. The KSLF cut through the river deposit



C. 礫石層排列方向與基岩急折變形一致
C. The conglomerate deposit direction similar as bedrock kink folding

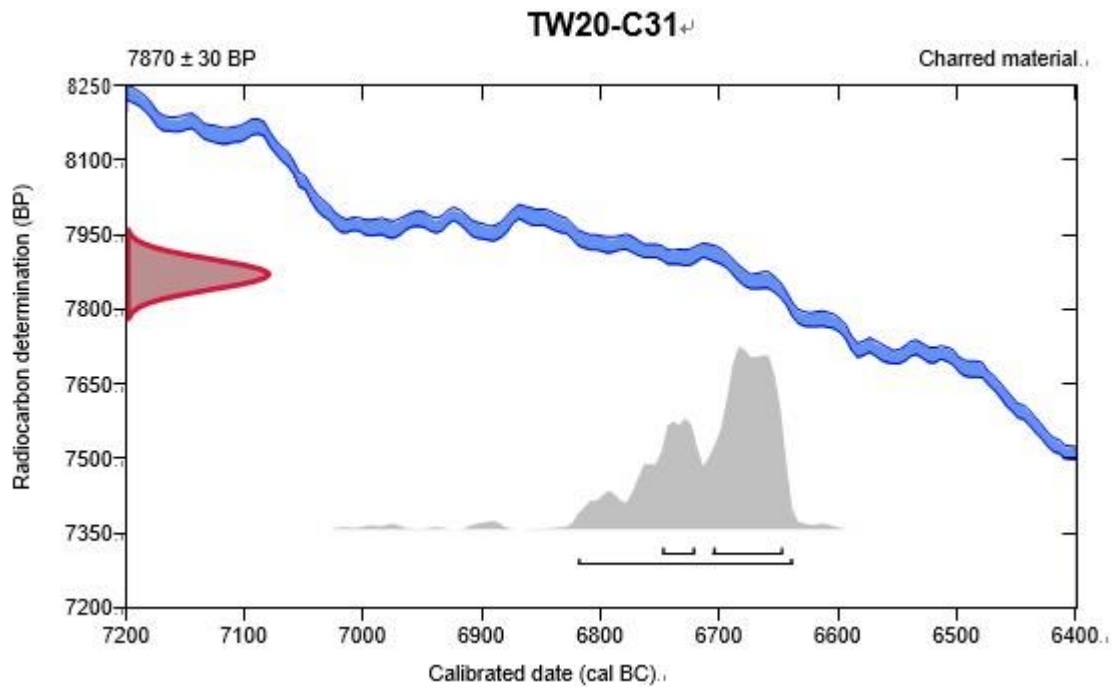
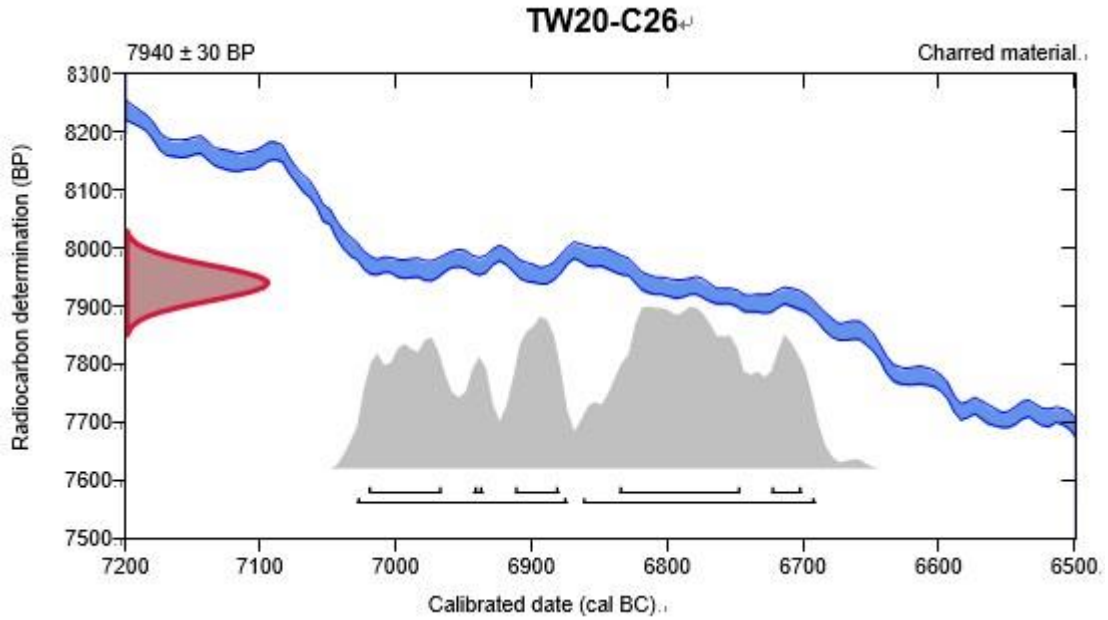


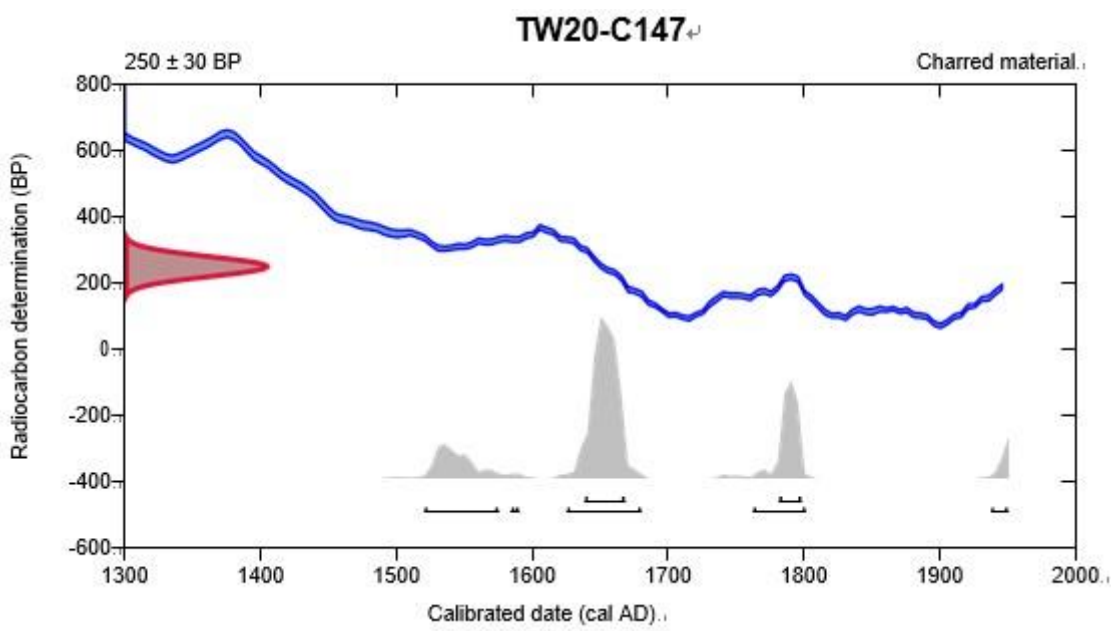
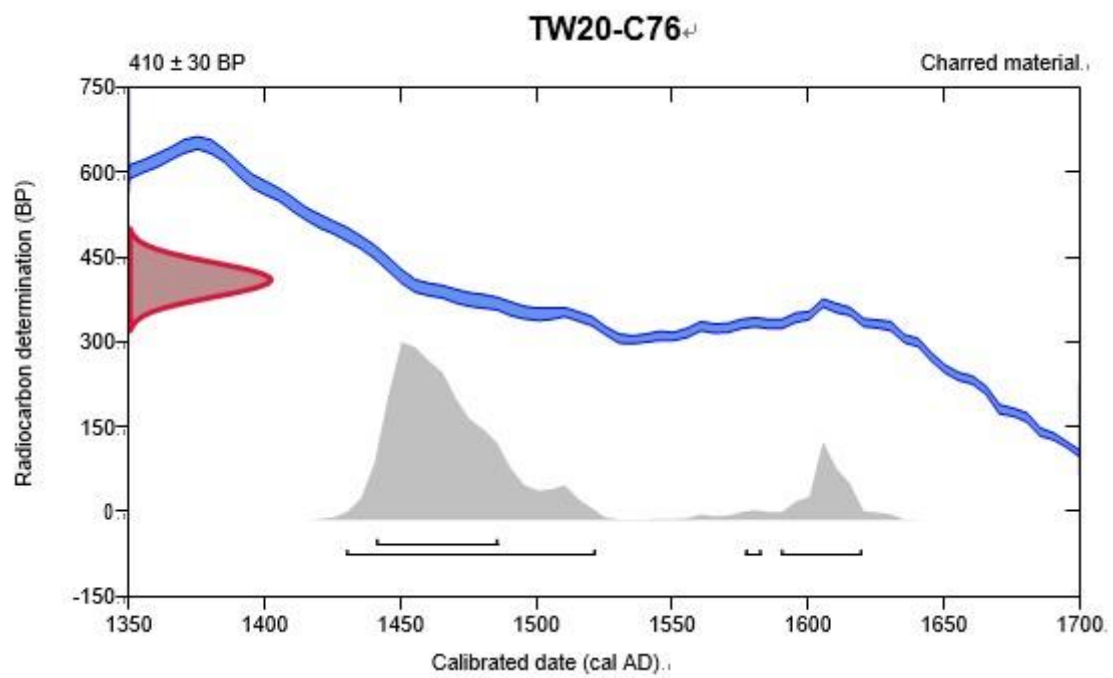
D. 礫石層假整合接觸
D. The disconformity of conglomerate

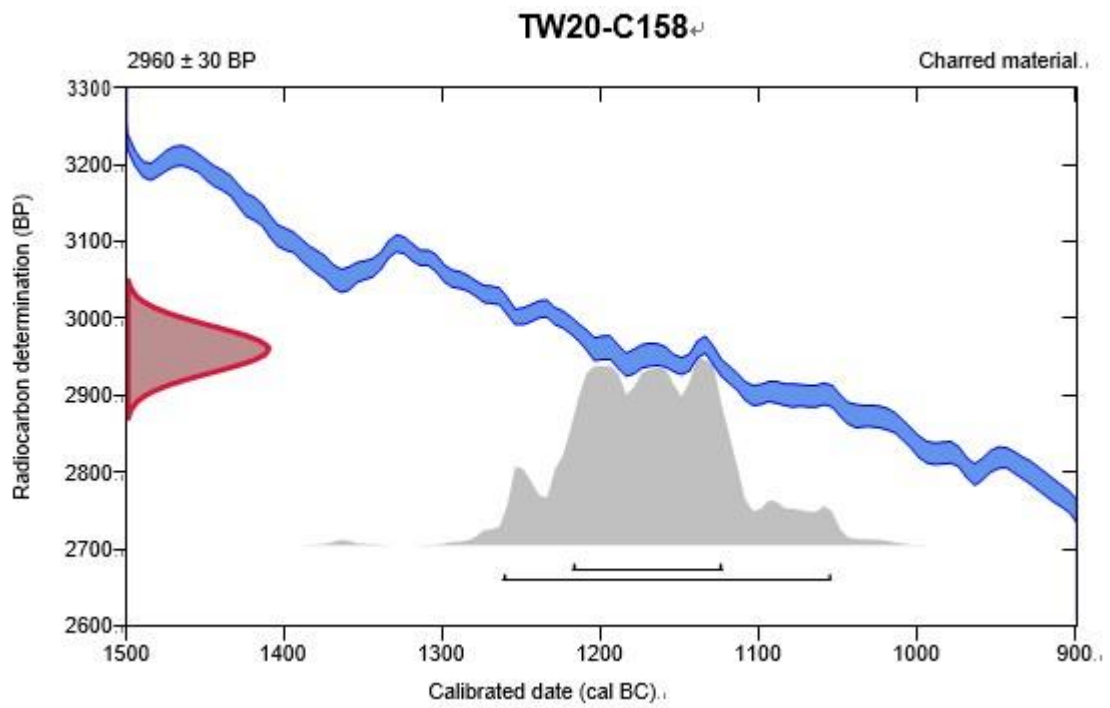
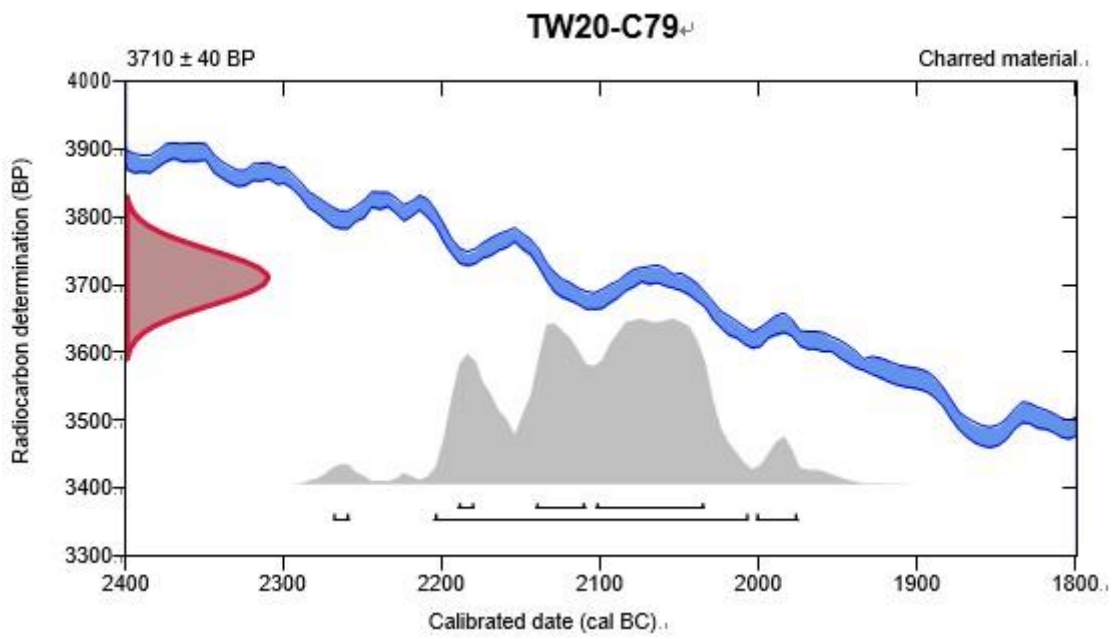


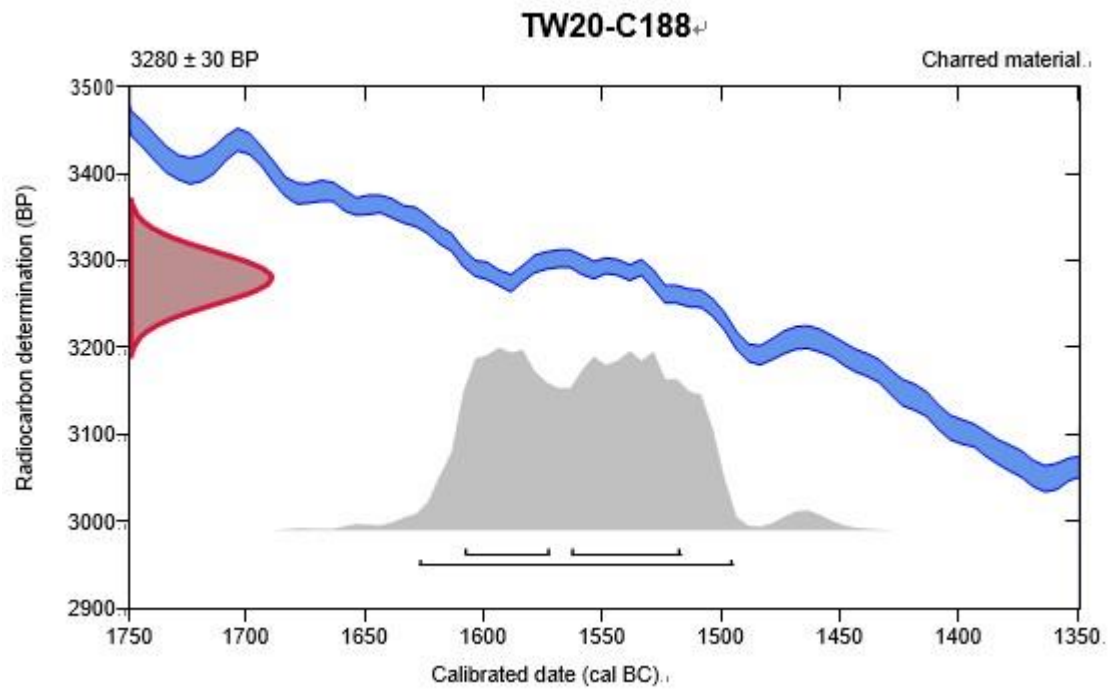
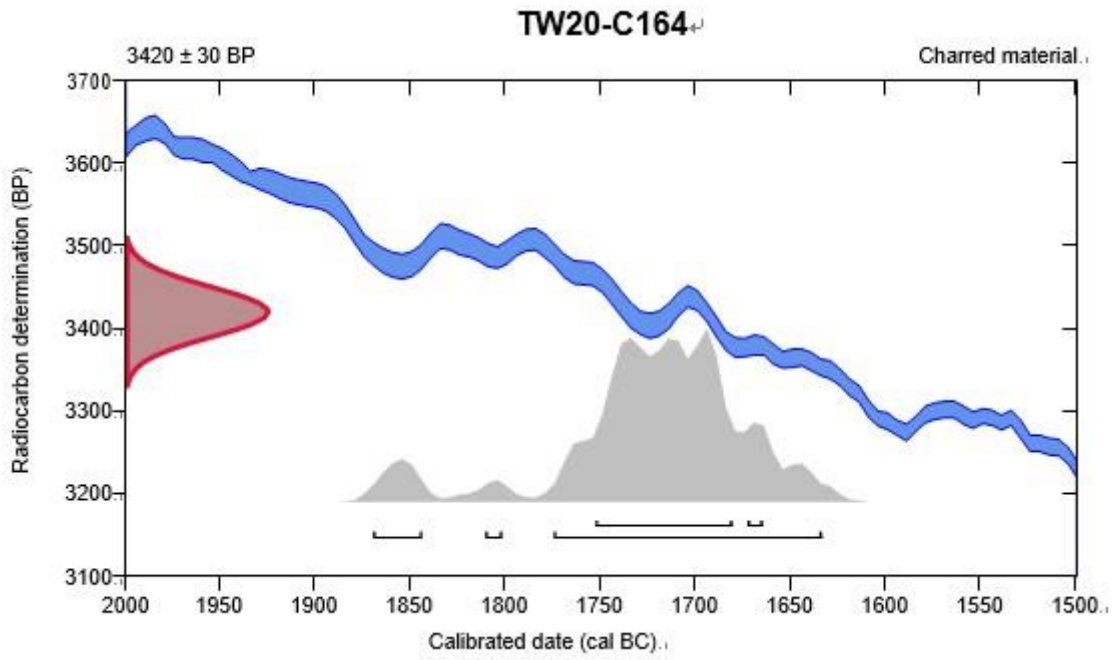
附錄 C: 標本定年年代校正結果

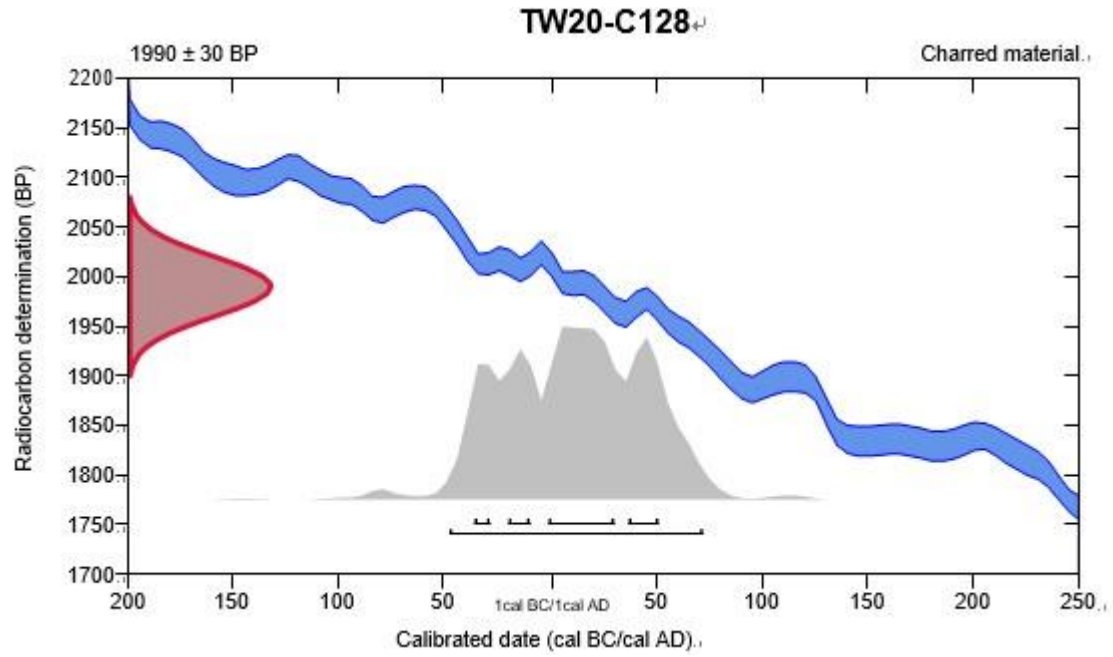
Appendix C: Calibrated age results











Laboratory Number

Sample Code Number

Conventional Radiocarbon Age (BP) or
Percent Modern Carbon (pMC) & Stable Isotopes

Calendar Calibrated Results: 95.4 % Probability
High Probability Density Range Method (HPD)

Beta - 568101

TW20-C135

> 43500 BP

IRMS $\delta^{13}C$: -27.0 o/oo

Submitter Material: Charcoal

Pretreatment: (charred material) acid/alkali/acid

Analyzed Material: Charred material

Analysis Service: AMS-Standard delivery

Percent Modern Carbon: < 0.44 pMC

Fraction Modern Carbon: < 0.0044

D14C: < -995.5 o/oo

$\Delta^{14}C$: < -995.6 o/oo (1950:2020)

Measured Radiocarbon Age: (without $\delta^{13}C$ correction): NA

Calibration: BetaCal3.21: HPD method: INTCAL13