

前言

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，台灣西南部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20 mm/yr向上抬升的垂直變速為量，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，此區域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)，因此本研究欲以分析新期構造的變形與蒐集更多的定年樣本，彌補野外露頭稀缺以及前人研究定年樣本連續性分布的不足，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?

研究區域及其地質概況

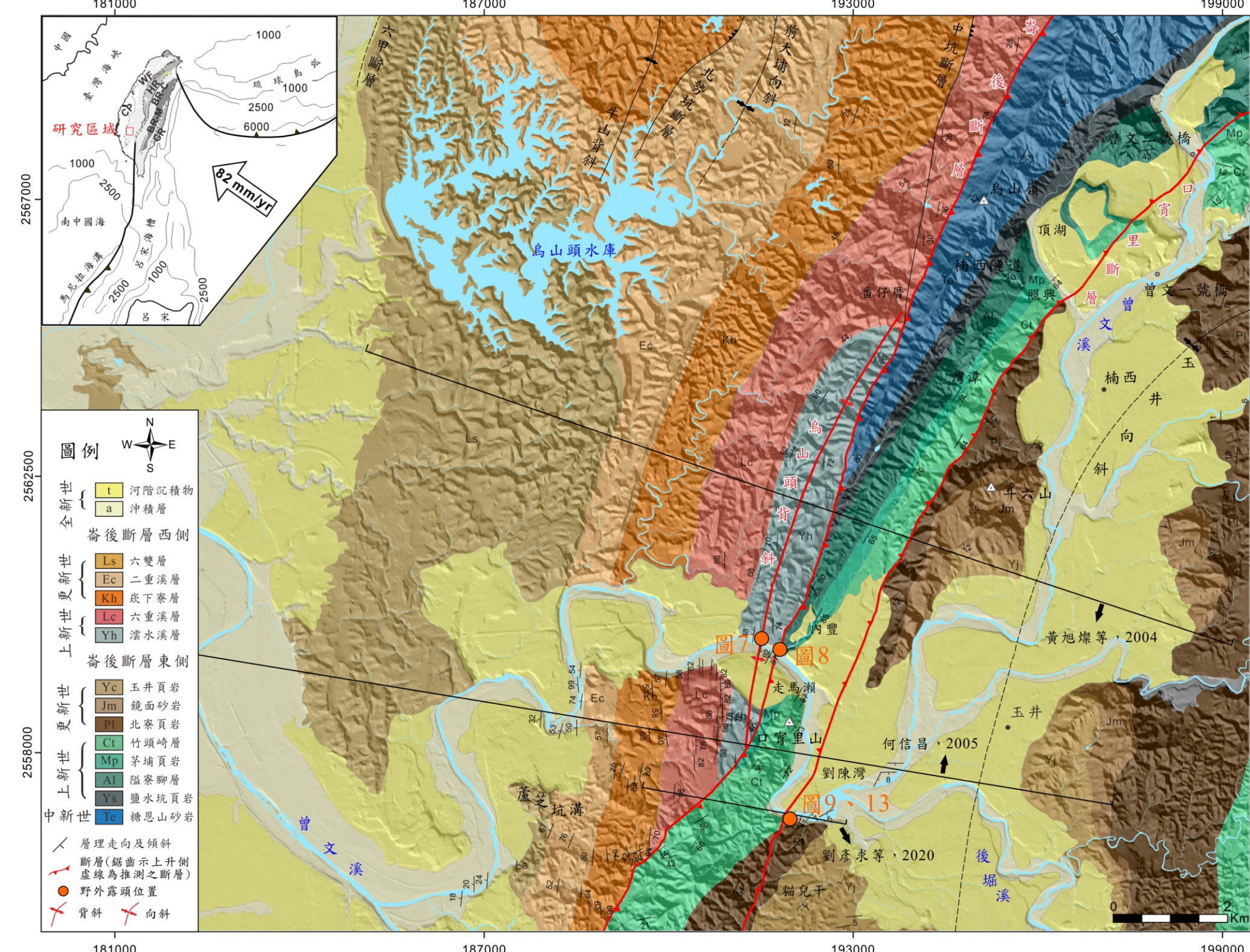


圖1、西部麓山帶曾文溪流域的岩性地質圖。圖改繪自何信昌等(2005)，約略東西向的黑實線為前人文獻之剖面位置。左上角的台灣地圖-CP:濱海平原; WF:西部麓山帶(褶皺逆衝帶); HR:雪山山脈(新生代板岩帶); BR-C:脊梁山脈(新生代板岩帶); BR-M:脊梁山脈(先三疊紀變質雜岩); CR:海岸山脈。

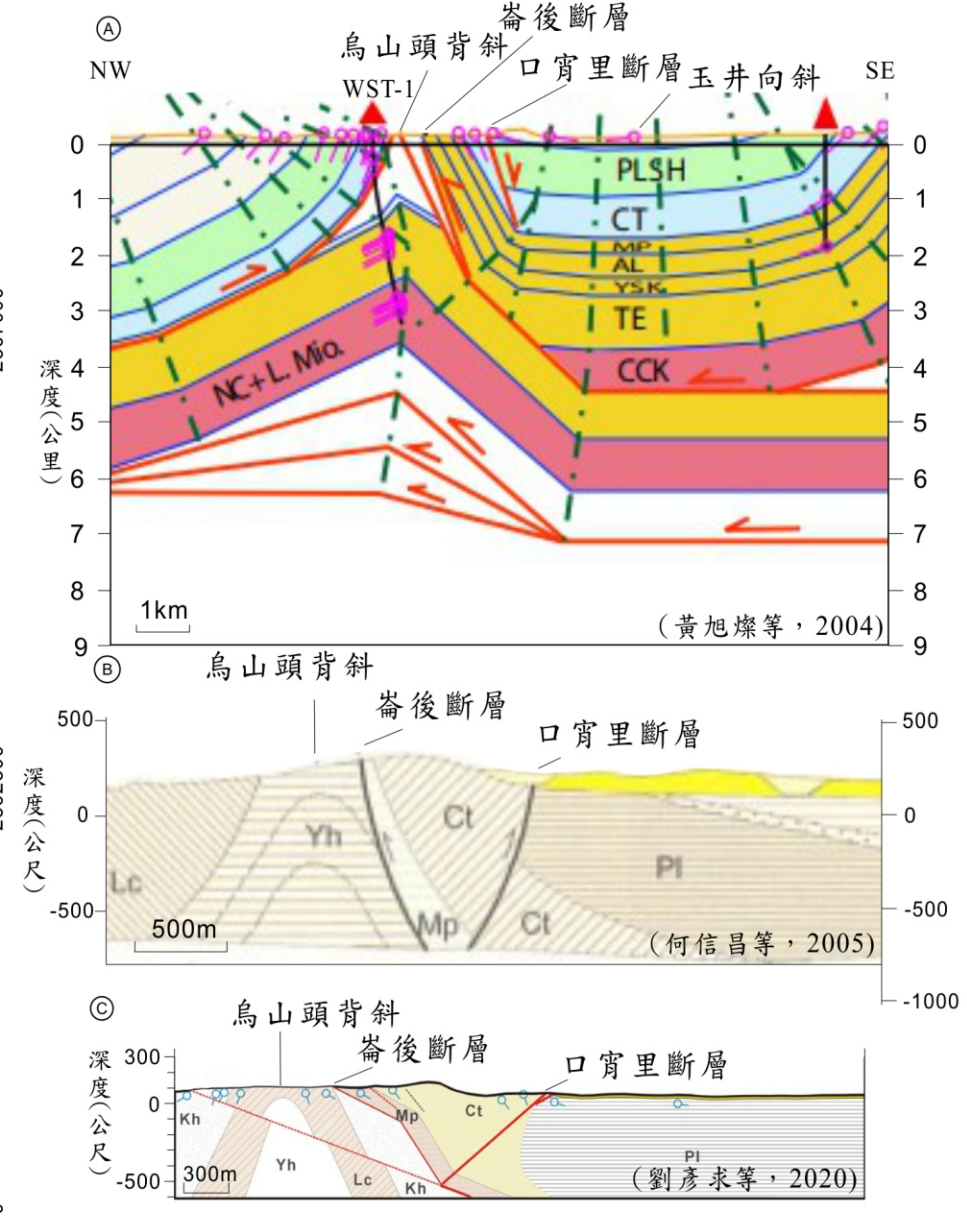


圖2、玉井地區跨烏山頭背斜與崙後斷層及口宵里斷層地質剖面圖。剖面位置參考圖1。(A)擷取自黃旭燦等(2004)的剖面;(B)擷取自何信昌等(2005)的剖面;(C)擷取自劉彥求等(2020)的剖面。黃旭燦等(2004)繪製之崙後斷層為正斷層，何信昌等(2005)與彥求等(2020)皆認為口宵里斷層為北北東走向，斷層面向西傾斜之逆斷層，且其為崙後斷層之背衝斷層(backthrust)。

研究方法

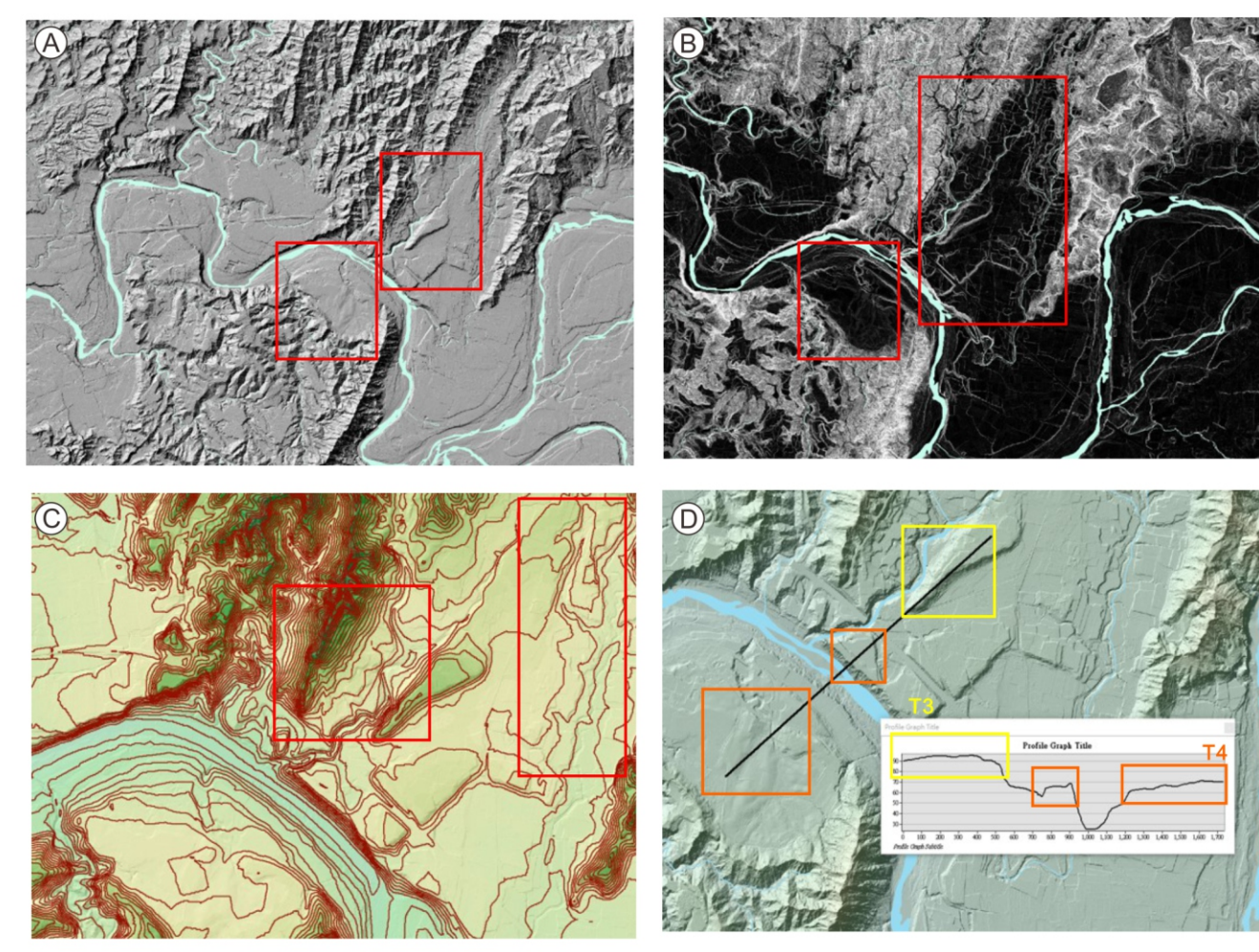


圖3、河階繪製相關圖。(A)陰影圖;(B)坡度圖;(C)等高線;(D)地形數值模型。本研究利用上述四種資料繪製、分割出曾文溪沿岸河階。

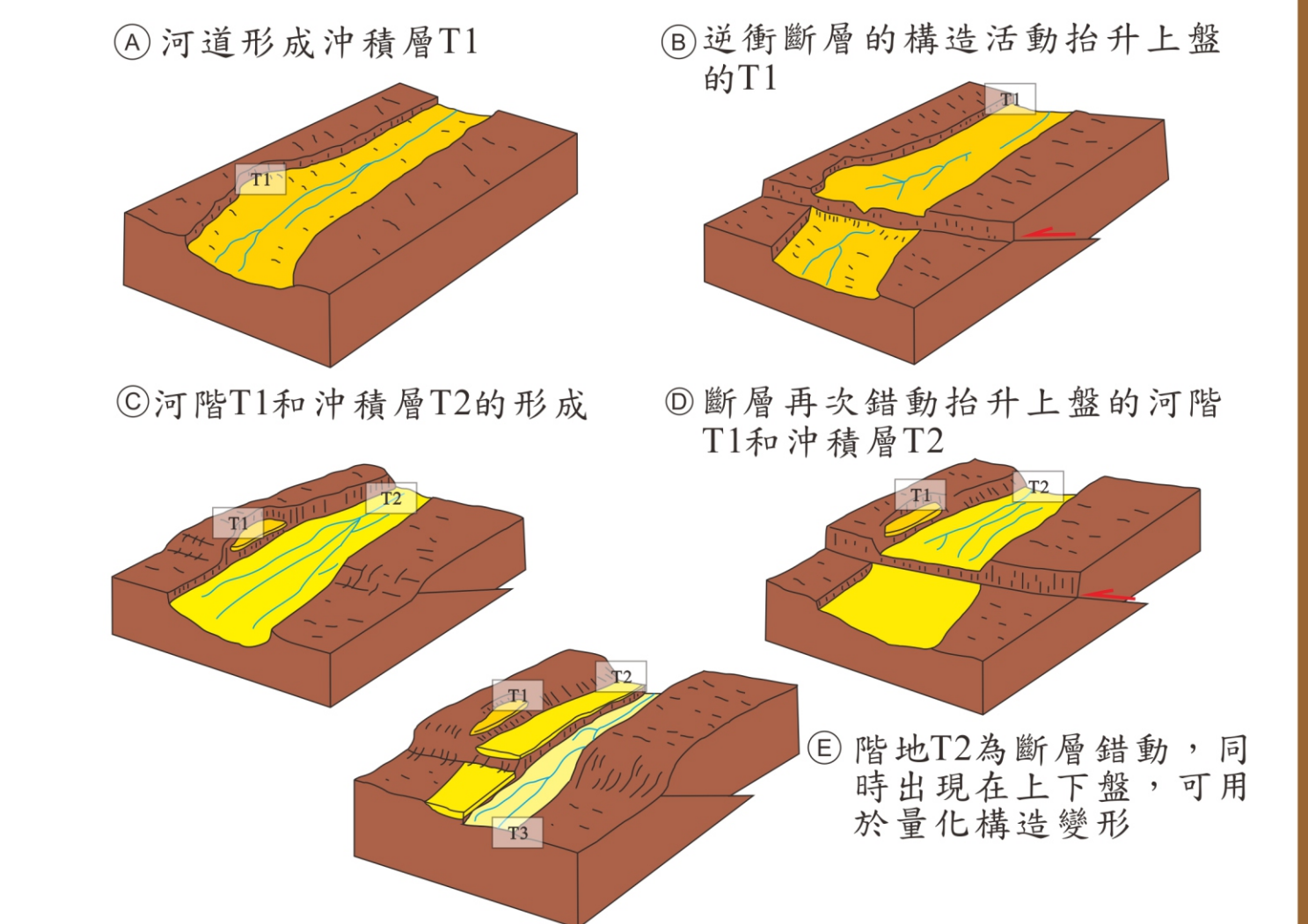


圖4、構造抬升和河流下切導致河階地發育示意圖(修改自Ryerson et al., 2006)。

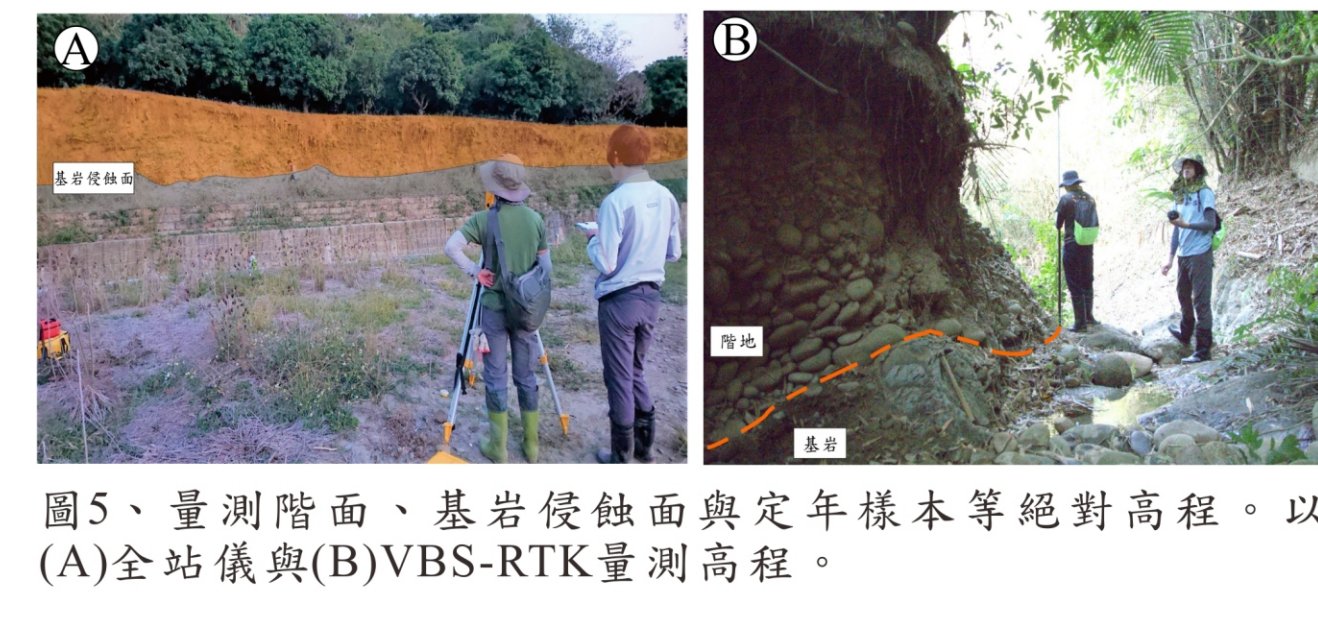


圖5、量測階地、基岩侵蝕面與定年樣本等絕對高程。以(A)全站儀與(B)VBS-RTK量測高程。

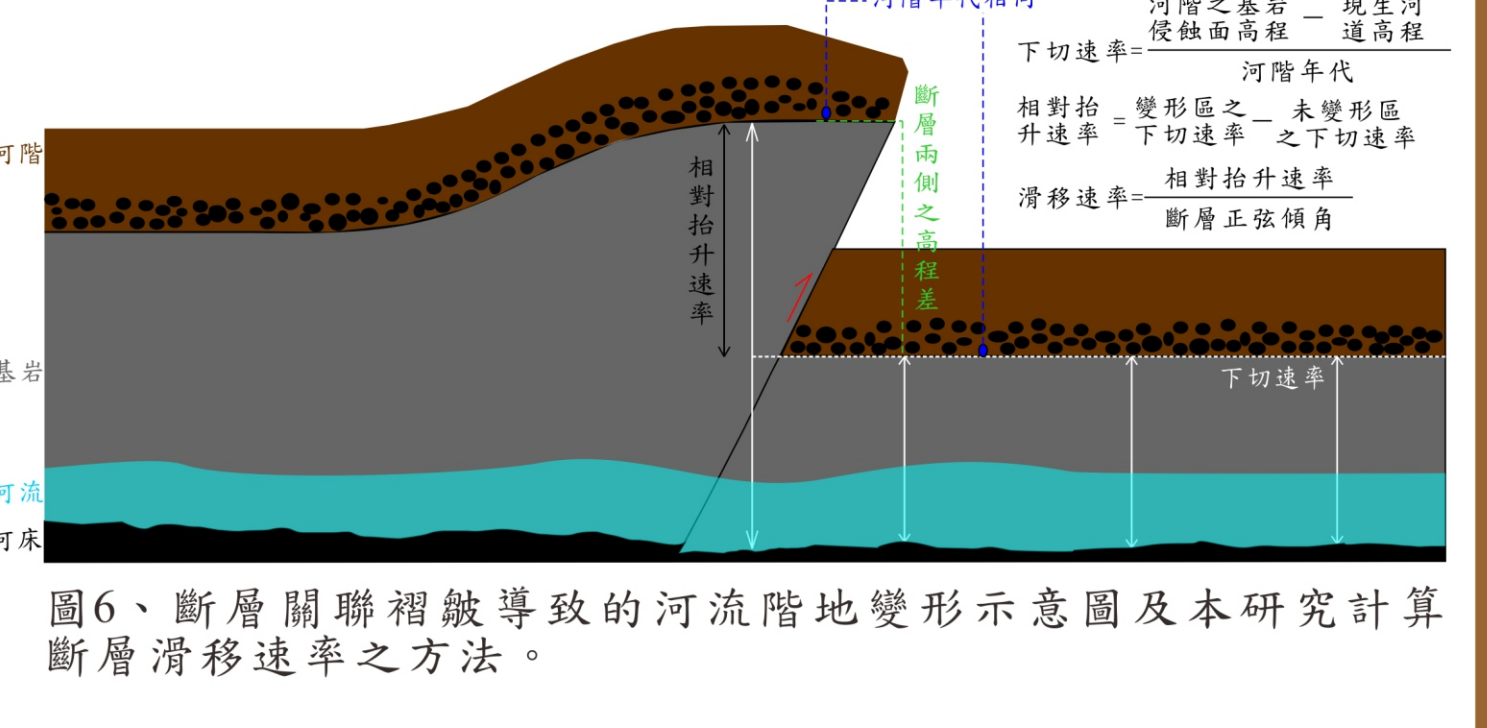


圖6、斷層關聯褶皺導致的河階地變形示意圖及本研究計算斷層滑移速率之方法。

研究結果

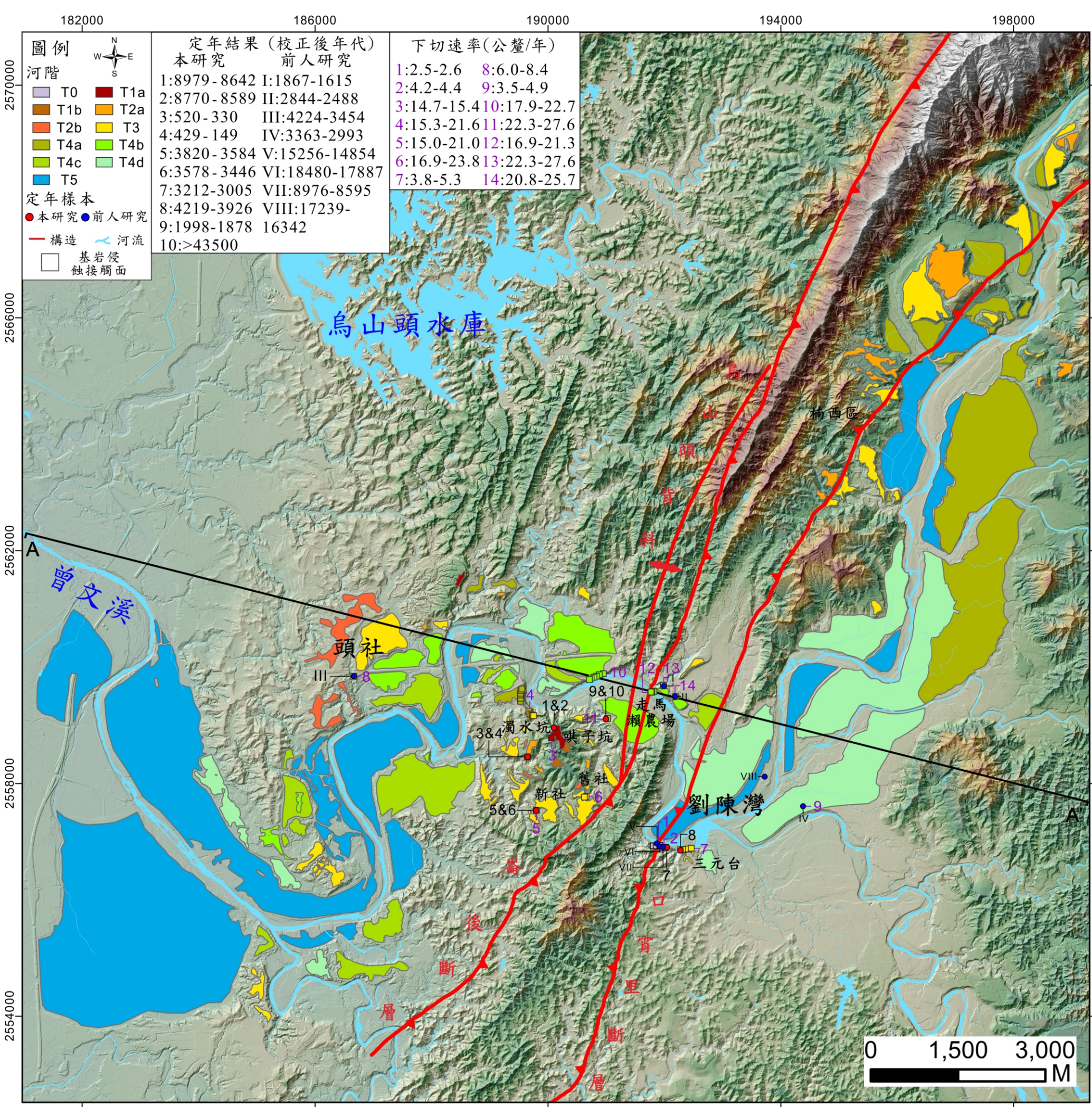


圖10、曾文溪沿岸河階與基岩侵蝕面以及定年樣本分布圖。

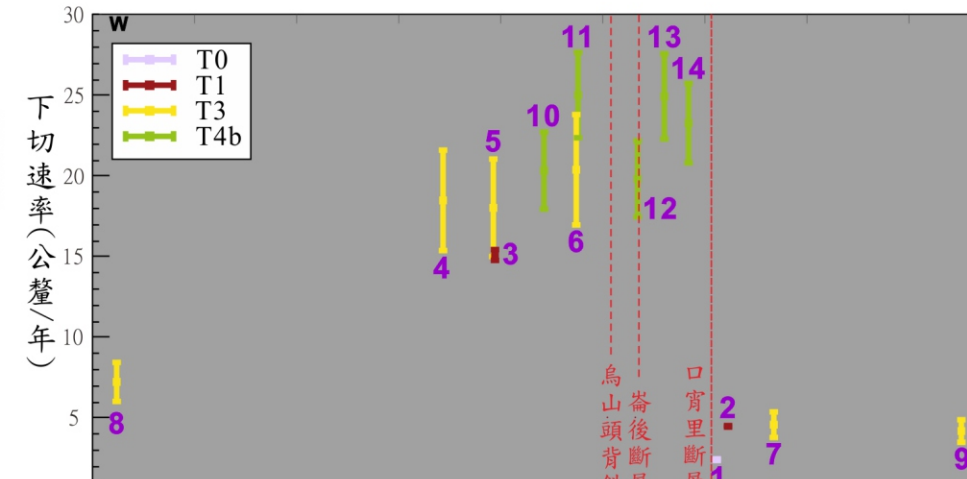


圖11、沿玉井區至大內區A-A'剖面(圖10)投影之下切速率位置。

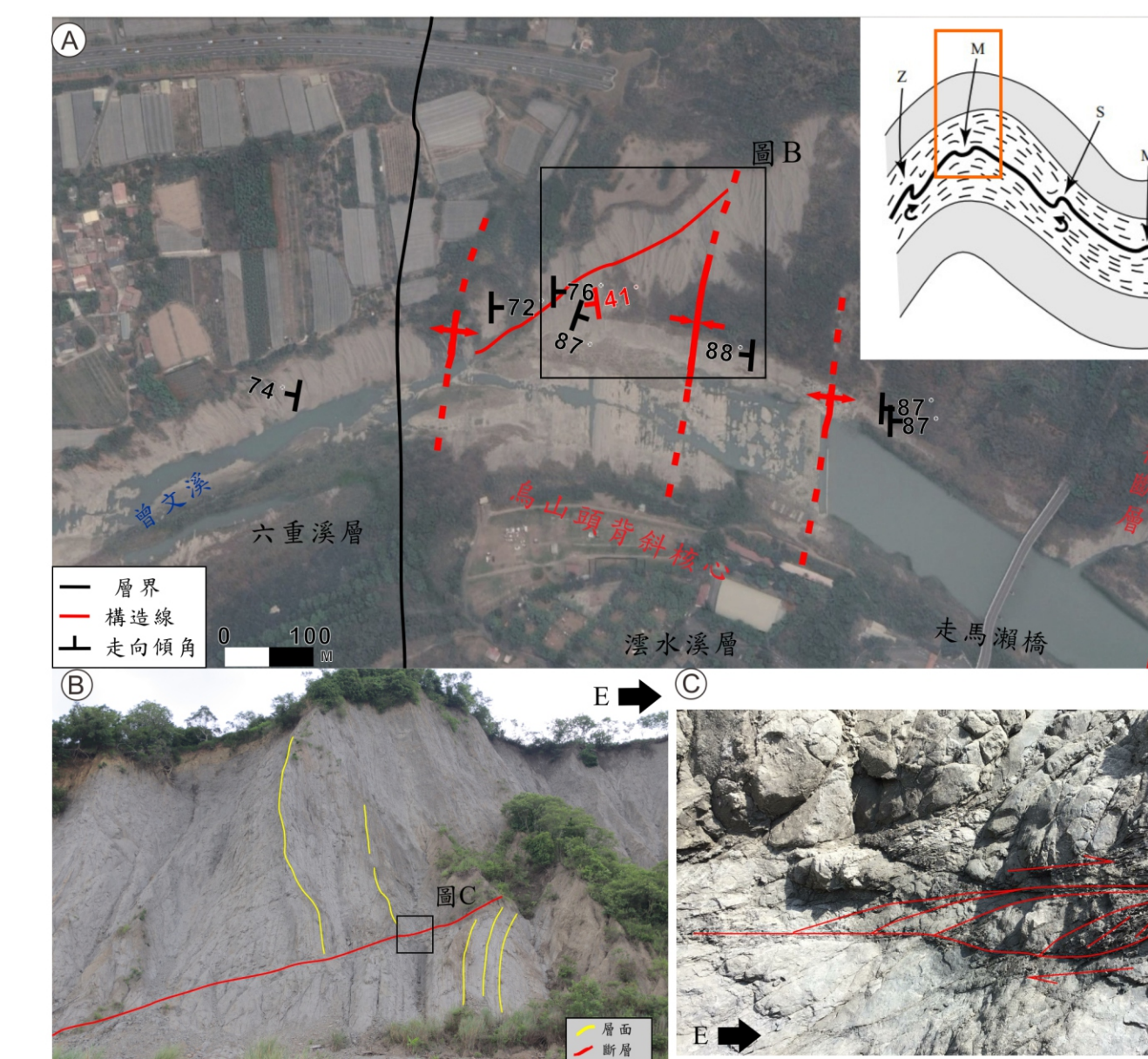


圖7、曾文溪北岸於走馬瀨橋西側之烏山頭背斜野外調查成果，露頭位置參考圖1。(A)位態量測結果，烏山頭背斜是M型褶皺(右上方圖取自Roland et al., 2013);(B)此逆斷層現象，是因背斜的持續發育，致使兩翼過於緊密，進而產生的調適構造;(C)剪裂帶。

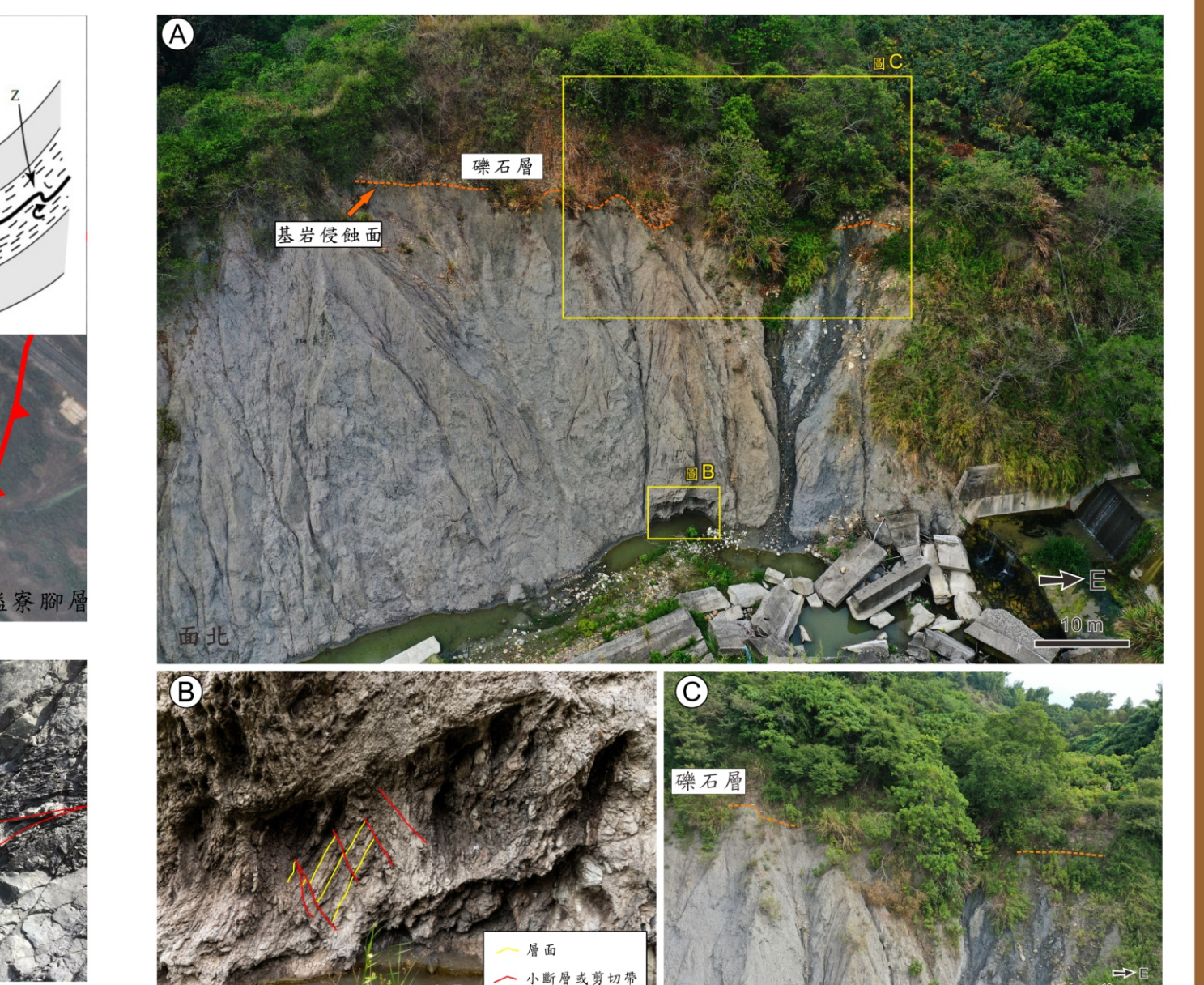


圖8、曾文溪北岸走馬瀨橋北端東側的斷層帶露頭，露頭位置參考圖1。(A)北面露頭可觀察到約15-20公尺厚的斷層帶，(B)北面露頭只露出斷層帶東側的界面，斷層帶東側砂岩層位態約70°向西傾斜;(C)斷層未切穿河階。

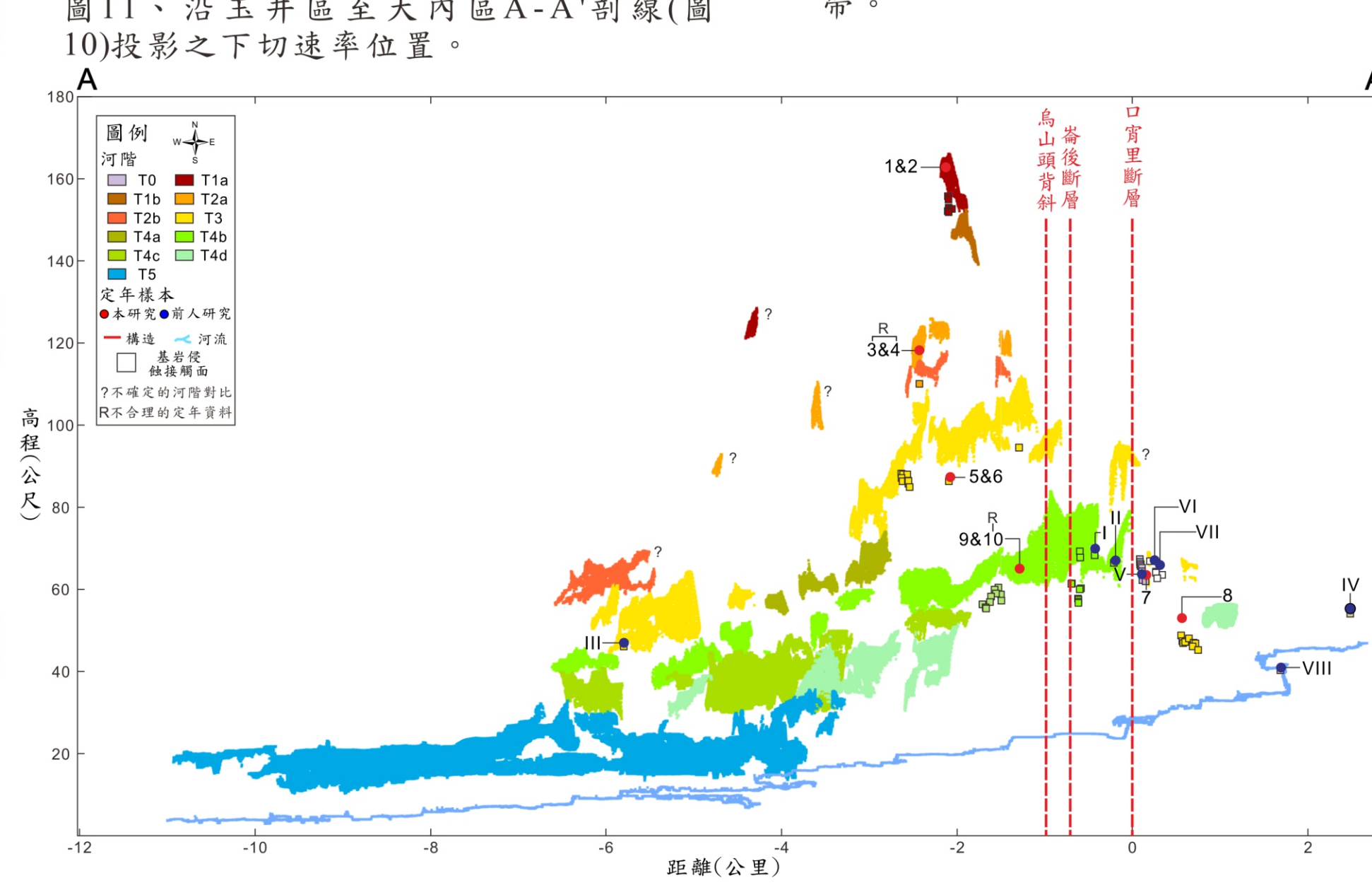


圖12、大內區至玉井區河階剖面(剖面位置參考圖10)。將本研究蒐集、測量之定年樣本與基岩侵蝕面以及前人文獻之定年結果投影於A-A'剖線上。



圖9、位於劉陳灣之口宵里露頭，露頭位置參考圖1。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，高度中斷層帶寬度約32公尺，斷層帶東側的界面可明顯觀察到斷層切割階地礫石層，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。

討論

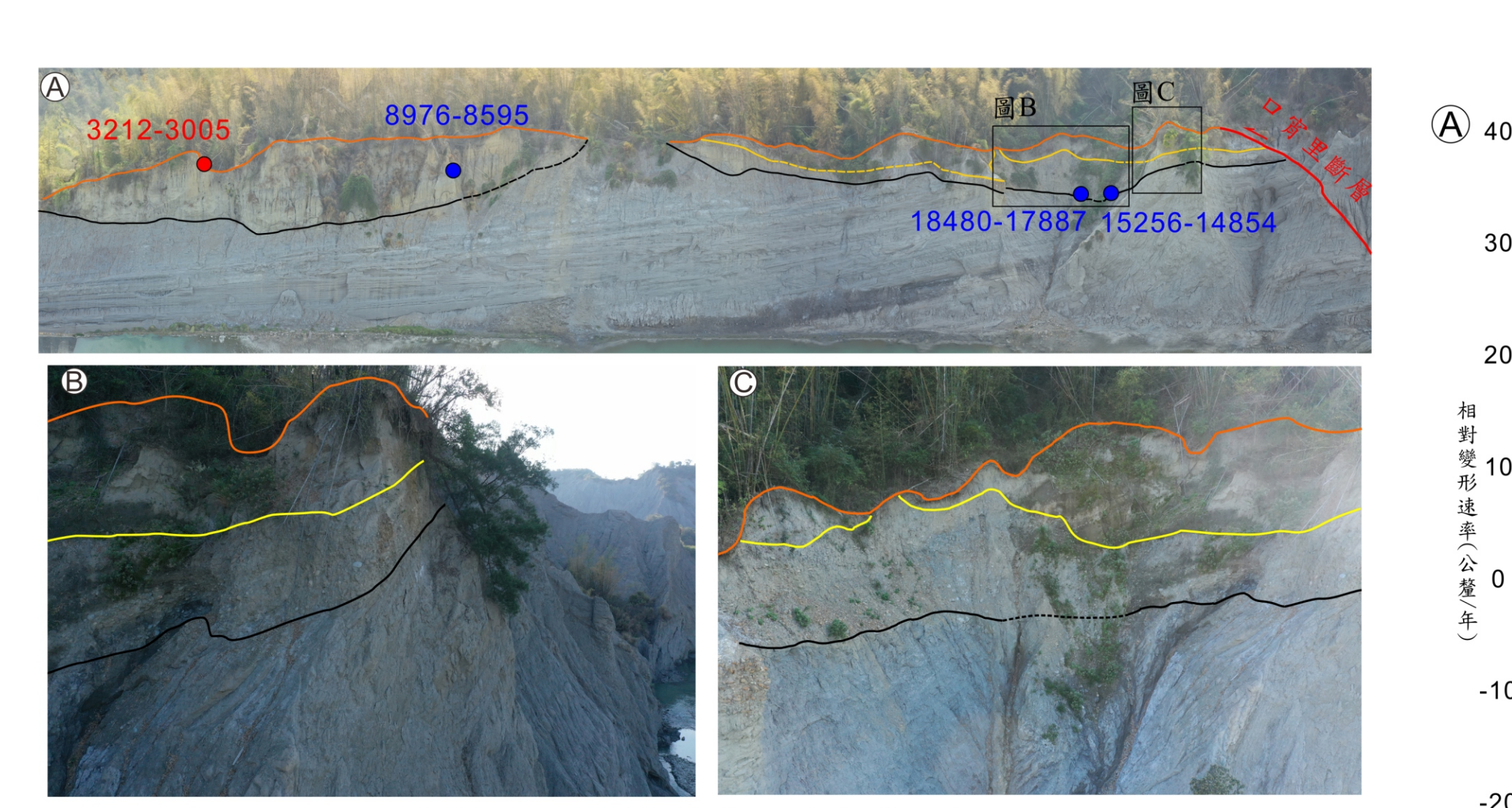


圖13、口宵里斷層東側劉陳灣地區。

1. 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(圖13)，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，不論是河道變遷或是沉積於同一側，兩種解釋都說明口宵里斷層至少於八千年內有活動的跡象，意味著口宵里斷層為第一類活動斷層。

2. 觀察研究區之地表變形與垂直變位量(圖15)，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六公里內皆有向上抬升的跡象，這顯然是因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，順勢往上擴展成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。

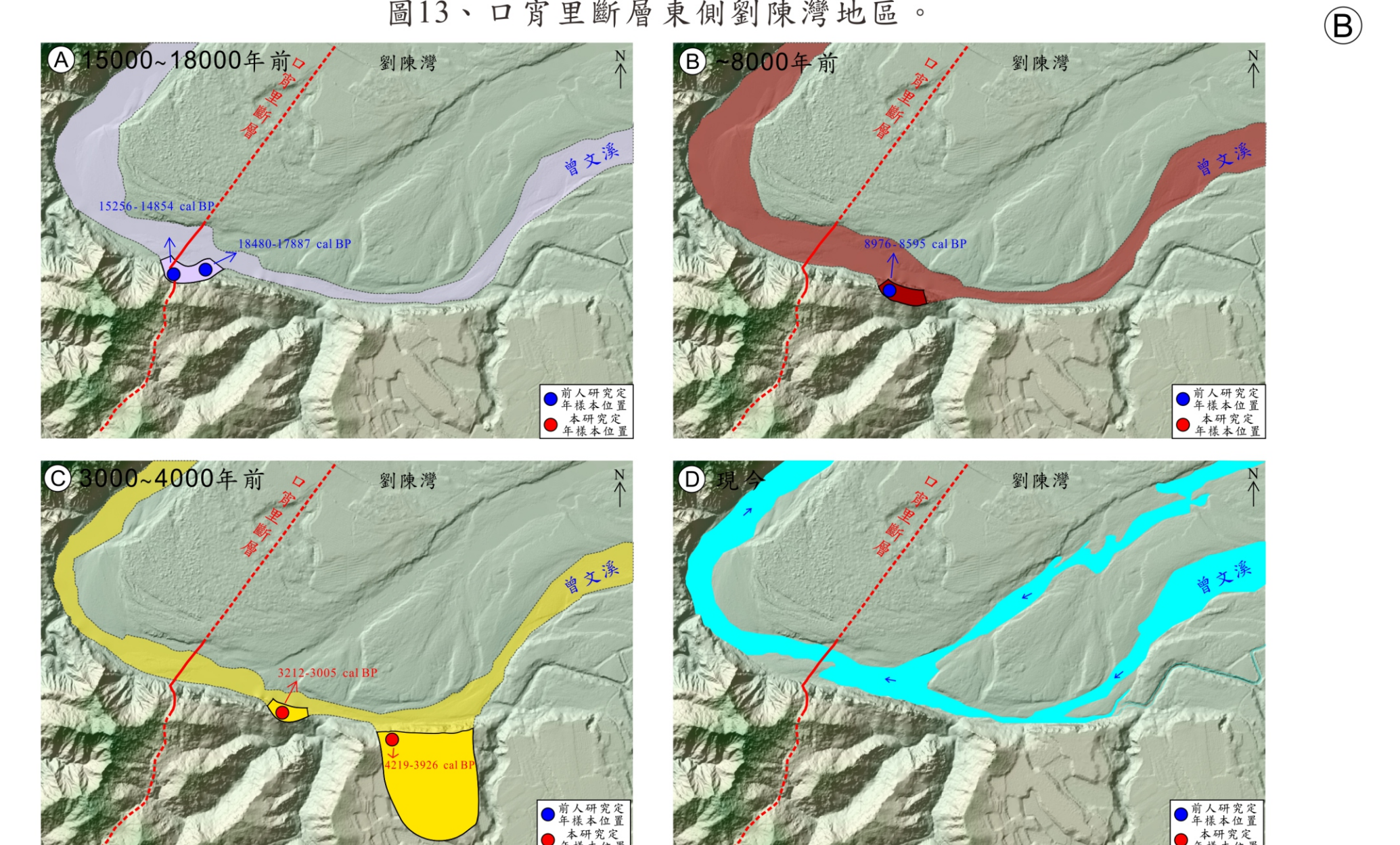


圖14、劉陳灣地區口宵里斷層古河道重建。

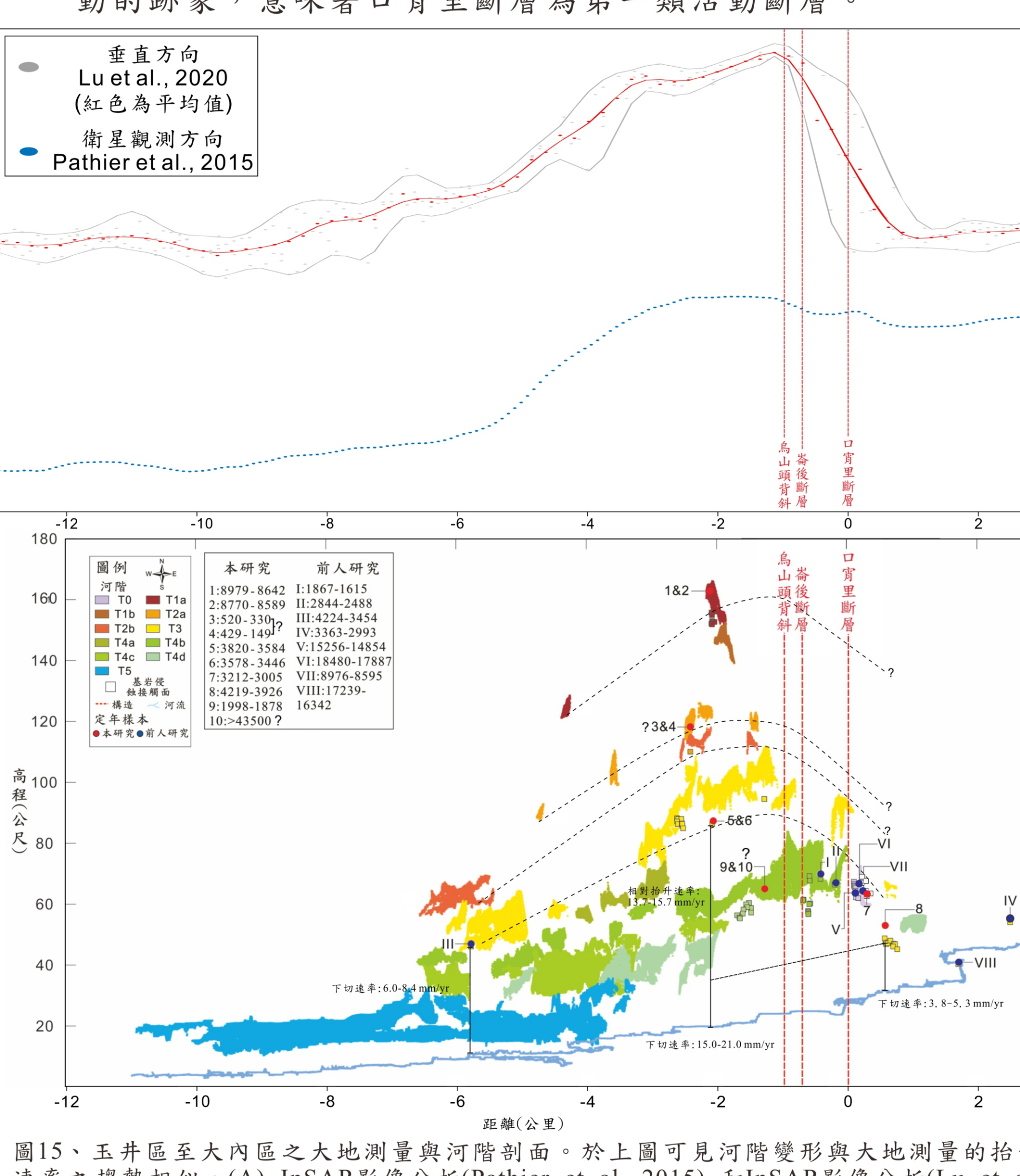


圖15、玉井區至大內區之地地測量與河階剖面。於上圖可見河階變形與大地測量的抬升速率之趨勢相似。(A) InSAR影像分析(Pathier et al., 2015)和InSAR影像分析(Lu et al., 2020);(B)河階垂直於構造投影。

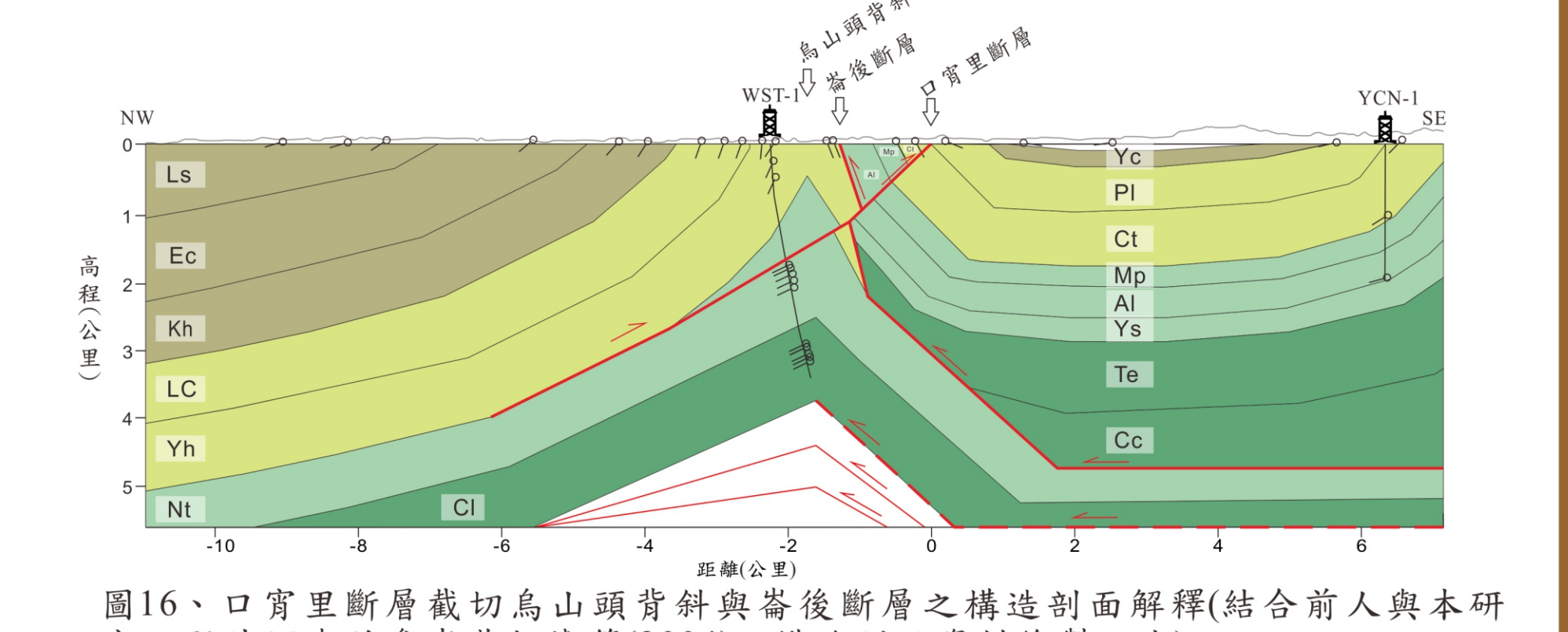


圖16、口宵里斷層切穿烏山頭背斜與崙後斷層之構造剖面解釋(結合前人與本研究的野外調查並參考黃旭燦等(2004)之構造剖面資料繪製而成)。

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。

1. 從階地變形與大地測量結果，顯示研究區約八公里的範圍，於全新世以及近幾十年內，以烏山頭背斜為中心不斷地抬升，呈一不對稱背斜型。
2. 崙後斷層上覆沉積物無明顯錯移，故其於兩千年內沒有活動跡象。
3. 口宵里斷層切穿劉陳灣地區上覆沉積物，且本研究研判此沉積物最近期的一次沉積於八千年以內，故口宵里斷層為第一類活動斷層。
4. 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切背斜後斷層與烏山頭背斜，故導致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。
5. 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。