

臺灣活動斷層調查的近期發展

林啓文¹ 劉彥求¹ 周稟珊¹ 林燕慧¹

節 要

本文說明經濟部中央地質調查所(以下簡稱地質調查所)活動斷層調查的工作與現況，包括(1)活動斷層分布圖檢討與更新，本版列有36條活動斷層。(2)活動斷層條帶地質圖測製，完成調查後的報告經專業審查，再列入活動斷層分布圖。條帶地質圖提供預期地質鑽探時岩性、地層與構造等資訊。本次增加的3條活動斷層，包括初鄉斷層、口宵里斷層、車瓜林斷層，也附條帶地質圖與地質剖面，使用者由此可以瞭解測圖地質師對地下構造的看法。(3)條帶地質圖完成後，增加控制點進行活動斷層地質敏感區的劃設。目前已公告19個活動斷層地質敏感區，位於敏感區內土地開發行為必須進行基地地質調查與地質安全評估。

臺灣歷史地震紀錄的時間較短，很少有機會瞭解一條活動斷層完整的地震循環，目前長期滑移速率或平均滑移速率的研究是採用地質方法，計算結果可能包含多次地震事件，且每次事件的時間間隔可能不一致。但是，不完美的評估總比沒有評估來得好，因此斷層長期滑移速率與平均再現週期仍為重點工作，且對於新期構造研究也有相當助益。

以山腳斷層、彰化斷層與後甲里斷層為例，本文也探討盲斷層與活動褶皺作用的問題。目前仍缺乏這些斷層尖端的深度以及滑脫面層位等資料，未來須進一步利用深鑽或震測來取得斷層的長度與傾角資料。這些斷層尚無法劃設活動斷層地質敏感區，但是斷層的長度與傾角等資料可以提供地震矩規模的評估。

關鍵詞：活動斷層分布圖、條帶地質圖、活動斷層地質敏感區、長期滑移速率、盲斷層、活動褶皺作用、初鄉斷層、口宵里斷層、車瓜林斷層

1.經濟部中央地質調查所

前　　言

人類的生活環境上，斷層破碎帶會直接影響建築物基礎的設計，歷史經驗顯示大多數破壞性地震是由斷層活動所引起。目前科學家仍無法正確地預測地震發生的規模、時間與地點，而對於活動斷層位置、分布與特性的瞭解，仍然是預防與降低災害損失的最有效方法。

活動斷層的定義，大多包含一個近期錯動的時間基準，以及強調未來再次活動的可能性；不同的定義可以參考活動斷層說明書以前版本的相關內容（林啓文等，2000）。各種活動斷層定義中，最主要差異在斷層曾經活動的年代不同，原因是各個國家所處的地體構造環境、遭遇自然災害的程度，以及文化背景的差異所致，因此對於活動斷層的認定並無共同接受的標準。中央地質調查所整理綜合各種文獻，考量臺灣所處地體構造環境而將活動斷層定義為：「更新世晚期（距今約十萬年）以來曾經活動過，未來可能再度活動的斷層」。為了野外調查辨認斷層及不同使用者的需求，以斷層活動時代作為分類基礎，將活動斷層分為2類（張徽正等，1998）：第一類活動斷層，包括：（1）全新世（距今10,000年內）曾經活動過的斷層。（2）錯移（或潛移）現代結構物的斷層。（3）與地震相伴發生的斷層（地震斷層）。（4）錯移現代沖積層的斷層。（5）地形監測證實具潛移活動性的斷層。第二類活動斷層，包括：（1）更新世晚期（距今約100,000年內）曾經活動過的斷層。（2）錯移階地堆積物或台地堆積層的斷層。

活動斷層分布圖

Bonilla（1977）首先彙整臺灣地區活動斷層的斷層跡繪在一張圖上（A4版）。徐鐵良與張憲卿（Hsu and Chang, 1979）後來也彙整了一張臺灣地區的活動斷層分布圖（B5版），上述兩張活動斷層分布圖並沒有地層相關資訊，也缺少與野外調查結果相連結。

1998年，地質調查所以當時出版的五萬分之一地質圖幅為基礎，加上其他不同比例尺地質圖、且學者認為可能的活動斷層（例如楊貴三，1983），首次以時代地層為底圖繪製臺灣活動斷層分布圖（比例尺1/500,000；A1版）（張徽正等，1998）。

2000年，地質調查所重新檢視「存疑性活動斷層」，並開始測製活動斷層條帶地質圖，九二一地震後因應工程規劃需要出版新的活動斷層分布圖（比例尺1/500,000；A1版）（林啓文等，2000），當時尚未完成所有活動斷層的檢視與更新。

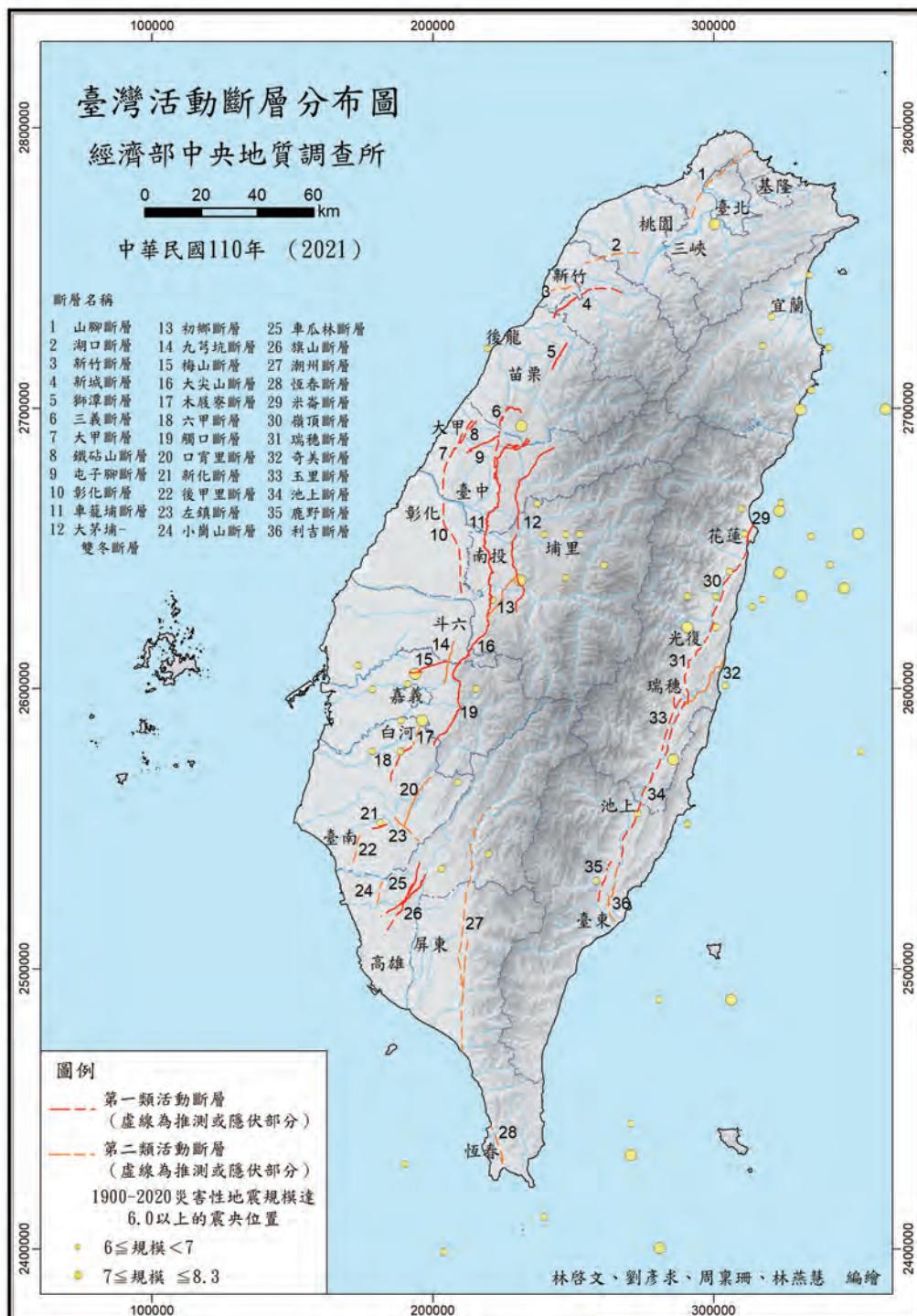


圖1 臺灣活動斷層分布圖。圖中共36條活動斷層，本次增加初鄉斷層、口宵里斷層與車瓜林斷層。註：中央地質調查所網站可以下載活動斷層分布圖與條帶地質圖。

2012年，地質調查所以當時完成的活動斷層條帶地質圖（林啓文等，2007a，2007b，2008，2009）為依據，完成「存疑性活動斷層」的存在性評估，出版新的活動斷層分布圖（比例尺1/500,000；A1版）（林啓文等，2012a）。

依據災害防救法，地質主管機關必須公布「活動斷層分布圖」，且依據地質法每5年必須檢視活動斷層調查計畫，提供防救災參考。地質調查所自2016年起開始檢視活動斷層分布圖，本版分布圖共36條活動斷層（A4版；圖1），這些活動斷層的精確度（precision）均為1/25,000，各活動斷層經最新調查結果修正斷層跡位置，但準確度（accuracy）仍然受限露頭狀況以及探查方法的精確度與解釋結果。

除了目錄上的活動斷層會進一步調查，以規劃活動斷層地質感區的劃設之外，目錄以外可能的活動斷層也會持續進行調查，以更新活動斷層分布圖；其次，以往認為是活動斷層，但缺乏岩石證據的斷層也重新檢視與調查，達到日後更新的目標。本版各活動斷層的特性如表1。

表1 臺灣活動斷層特性一覽表

編號	斷層名稱	分類	長度(km)	運動方式	傾角(度)	長期滑移速率(mm/yr)	抬升速率(mm/yr)	再現週期(yr)	最近一次活動年代(yr)	可能最大地震(M)
1	山腳斷層	二	35	正滑	>60				<11,000	(6.9)
2	湖口斷層	二	20	逆滑	40	0.2-4.1	0.3±3		<70,000	(6.6)
3	新竹斷層	二	11	逆滑兼右滑	30	0.5-1.3	1		更新世晚期	(6.3)
4	新城斷層	一	29	逆滑	25-30	0.75-0.77	1.1±0.3	2000	<300	(6.8)
5	獅潭斷層	一	11	逆滑	>70				A.D.1935	7.1
6	三義斷層	一	34	逆滑	40-60				全新世？	(6.9)
7	大甲斷層	一	30	逆滑	40-50				<30,000	(6.8)
8	鐵砧山斷層	一	13	逆滑					全新世？	(6.4)
9	屯子腳斷層	一	14	右滑					A.D.1935	7.1
10	彰化斷層	一	36	逆滑					全新世？	(6.9)
11	車籠埔斷層	一	76	逆滑	40	6.9		200-700	A.D.1999	7.3
12	大茅埔-雙冬斷層	一	69	逆滑	45				A.D.1999	(7.2)
13	初鄉斷層	二	20	逆滑	60	2.5-7.5			<13,500	(6.6)
14	九芎坑斷層	二	17	逆滑	20-30	0.7-0.9			<18,540	(6.5)
15	梅山斷層	一	16	右滑	>60				A.D.1906	7.1
16	大尖山斷層	一	30	逆滑兼右滑	>60				A.D.1999	(6.8)
17	木屐寮斷層	二	7	逆滑	30	11.2±4.0			更新世晚期	(6.1)
18	六甲斷層	一	16	逆滑兼左滑	30	11			<10,000	(6.5)
19	觸口斷層	一	27	逆滑	50-60				<10,000	(6.7)
20	口宵里斷層	二	21	逆滑	40				<12,670	(6.7)
21	新化斷層	一	6	右滑	>60		3.0-4.5		A.D.1946	6.3

編號	斷層名稱	分類	長度(km)	運動方式	傾角(度)	長期滑移速率(mm/yr)	抬升速率(mm/yr)	再現週期(yr)	最近一次活動年代(yr)	可能最大地震(M)
22	後甲里斷層	二	12	逆滑	>35	5.4-5.5			更新世晚期	(6.3)
23	左鎮斷層	二	11	左滑	>60				更新世晚期	(6.3)
24	小崙山斷層	二	9	逆滑	45	5.7±1.4			<10,850	(6.2)
25	車瓜林斷層	一	25	逆滑	30				<7,500	(6.6)
26	旗山斷層	一	27	逆滑	50		0.5-1		7,189 年前	(6.7)
27	潮州斷層	二	90	逆滑	70-80				更新世晚期	(7.3)
28	恆春斷層	二	16	逆滑	55	6.3±1.5	5.2±1.2		更新世晚期	(6.5)
29	米崙斷層	一	8	左滑兼逆滑	80		2.9-3.4		A.D.2018	7.3
30	嶺頂斷層	一	36	左滑兼逆滑			7.9±4.5		A.D.2018	(6.9)
31	瑞穗斷層	一	30	逆滑兼左滑	40-60	21.6±27.7		170-210	A.D.1951	(6.8)
32	奇美斷層	二	25	逆滑	70-80				<20,000	(6.7)
33	玉里斷層	一	23	左滑兼逆滑	30	1.9-2.2		170-210	A.D.1951	7.3
34	池上斷層	一	67	左滑兼逆滑	67	26-30		50-125	A.D.2003	6.8
35	鹿野斷層	一	18	逆移	20	5.4		2100	<2000	(6.5)
36	利吉斷層	二	25	逆滑	50	17.1±1.8	13.5±0.5		更新世晚期	(6.7)

※有關活動斷層特性表的各個欄位資料說明：

- 斷層名稱以藍色標註者，指該斷層已劃設活動斷層地質敏感區。
- 分類：分為第一類活動斷層（一）與第二類活動斷層（二）。
- 長度：資料參考活動斷層條帶地質圖說明書（林啟文等，2007a，2007b，2008，2009）以及活動斷層地質敏感區劃定計畫書，再以GIS計算而得，分支斷層長度未計入。
- 運動方式：分為正滑、逆滑及走向滑移（左滑或右滑），部分斷層兼具兩種運動方式。
- 長期滑移速率：由古地震事件分析所取得，資料採用陳文山等（2006，2010，2014）、黃文正等（2019）。
- 抬升速率：由地形面、堆積層與年代計算而得。
- 再現週期：由古地震事件分析取得，例如陳文山等（2006，2010）。
- 最近一次活動年代：採用歷史地震紀錄或被錯移的地層年代。
- 可能最大地震規模：歷史地震紀錄(M_L)摘自中央氣象局觀測資料；括號內為依據地表斷層長度，以Wellls and Coppersmith (1994) 公式計算的地震矩規模(M_w)。

活動斷層條帶地質圖

活動斷層條帶地質圖，是測製斷層兩側各約2公里範圍內的岩性、地層與構造特性的地質圖。中央地質調查所出版的地質圖幅比例尺為1/50,000，因此以圖幅為基礎進一步精細調查與修正而完成比例尺1/25,000的條帶地質圖，是本所出版比例尺最大的地質圖。（註：美國的活動斷層跡位置圖比例尺為1/24,000，日本的活動斷層跡位置圖比例尺為1/25,000。）

這些條帶地質圖是彙整活動斷層分布圖的基礎，自2009年地質調查所出版比例尺1/25,000活動斷層條帶地質圖之後，都是先完成條帶地質圖、再寫成專業報告、經專家審查出版後，再把該斷層併入新版活動斷層分布圖。本次公布的活動斷層分布圖中新增3條活動斷層摘自相關報告，包括初鄉斷層（附錄一：林啓文等，2019；黃文正等，2019）、口宵里斷層（附錄二：劉彥求等，2020；黃文正等，2020）與車瓜林斷層（附錄三：劉彥求與林啓文，2019；黃文正等，2020），也同時公布其條帶地質圖（圖A1、圖B1、圖C1）。

活動斷層條帶地質圖內容除了岩性、地層與構造等單元之外，也標示鑽孔位置、探勘測線，以及GPS連續站與水準測線等資訊，使用者可以經由上述的井位名稱、測線名稱等尋找相關的地質資料，以及已發表的文獻與連結該資料的解釋。

條帶地質圖在運用上有3個功能：第一，大地構造及地質構造研究上，使用者可以獲得該斷層兩側的地層資料（岩性特徵）、構造分布、相鄰階地與沖積層分布，為新期構造研究的基礎資料；第二，開發行為位於地質敏感區的業者或地質師，可以猜測或預期地下岩層與構造的分布，準備下一步地質調查計畫與地質安全評估；第三，很多活動斷層可能屬於會誘發地震的震源斷層，因此建築結構物進行耐震設計時，必須使用條帶地質圖中的斷層長度、傾角等資料進行地震矩規模的計算。

已經出版的條帶地質圖可以在地質調查所網站下載，未來也將持續進行條帶地質圖的更新與補充，例如此次新加入3條斷層條帶地質圖，也增加地質剖面圖，是依據地表露頭、地下鑽探與地下探勘等資料，由地質師彙整並據以繪製可能的地下構造型態，雖是主觀的見解，但能提供使用者地質調查時的參考。

活動斷層地質敏感區

活動斷層地質敏感區，是指活動斷層及兩側易受斷層錯動或地震破裂影響範圍，並經中央主管機關劃定者。它是一個涵蓋活動斷層兩側共約300公尺寬的區域，目前經濟部採用原則為：傾向滑移斷層（包括正斷層與逆斷層）採用「斷層基準線」上盤200公尺、下盤100公尺的範圍；而橫移斷層是採用「斷層基準線」兩側寬各150公尺的範圍。

所謂「斷層基準線」，若以斷層露頭而言就是「斷層核心」（fault core），若由地下探勘所求的資料，它也可能是位於斷層毀壞帶（fault damage zone），也就是有密集破裂或剪切現象的位置（圖2）；當未找到斷層核心時，也會以斷層毀壞帶作為「斷層基準線」來劃設地質敏感區。



至於地質敏感區範圍寬300公尺，是以斷層錯動時可能受到影響的範圍來界定，例如前述斷層毀壞帶的範圍（圖2：初鄉斷層上盤毀壞帶）。傾向滑移斷層的上盤採200公尺，下盤採100公尺，是因為實際案例上斷層上盤的變形範圍較下盤來得寬；而橫移斷層兩側易受斷層錯動或變形影響範圍約略對稱，因此兩側各採150公尺寬劃為地質敏感區。目前已劃設地質敏感區計有20條活動斷層，如表1斷層名稱以藍色字標註者。

活動斷層地質敏感區直接與土地開發有連結，位於特定活動斷層敏感區必須進行地質安全評估，以瞭解其對開發行為的影響。地質調查結果可能的情形，包括：場址位於斷層核心、斷層毀壞帶或未擾動圍岩等，再依地質情況評估對工程結構物的影響。位在地質敏感區的土地開發行為的地質調查，可以參考地質調查所有關該斷層的條帶地質圖，以評估或預期可以鑽探或探勘的地下地質，區域地質可以參考地質調查所出版的相關五萬分之一地質圖幅，再進行野外地質作確認調查。

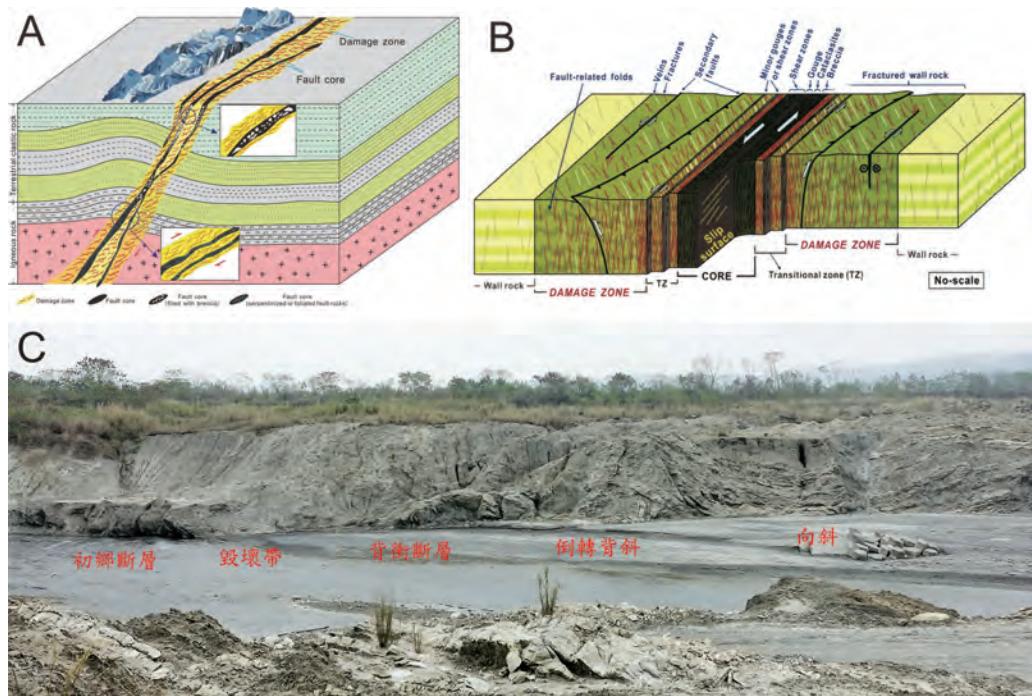


圖2 斷層核心、斷層毀壞帶與未擾動圍岩，(A)為逆斷層（摘自Liu *et al.*, 2017），(B)為橫移斷層（摘自Choi *et al.*, 2016），(C)初鄉斷層與毀壞帶（林啟文等，2019）。

斷層滑移速率與再現週期

斷層的滑移速率與再現週期，是研究古地震的兩個基本指標。滑移速率代表應變累積量，然後在一個特定時段內沿著一條斷層釋放。它可能計算經過數百萬年而涵蓋很多次地震循環，或經過數百年而僅涵蓋單一地震循環，或一個循環的局部時段（表2；摘自 McCalpin and Carver, 2009）。大多數目前已經報導的滑移速率計算，是由已定年的地形或沉積物的累積位移來計算，稱為平均滑移速率或長期滑移速率（表1；如陳文山等，2006、2010）。由地質構造、地形證據與岩層證據等不同方式可以計算滑移速率（表2）。其中地質構造涵蓋時間較長，雖然可以瞭解空間的變化，但屬於可能涵蓋多次事件的開放循環，此種計算方式比較類似新期構造研究；而由岩層證據計算出的滑移速率，可能僅涵蓋一次或很少次事件的閉合循環，即完整涵蓋一個地震循環，但不容易瞭解區域性的關聯性。

表 2 計算滑移速率的方法（摘自 McCalpin and Carver, 2009）

滑移 年代	由構造計算出 的總滑移量 (A)	由地形證據計算出的滑移量		由岩層證據計算出的 位移量 (D)
		三角切面高 (B)	地表的第四紀斷層崖 (C)	
從斷層的發生 時間 (1)	A1 例如 200公尺／20Ma			
錯移的地形面 (2)		B2	C2 崖高／該地形年代	
錯動事件的年 代 (3)				D3 開放與閉合循環 D3a 開放循環 D3b 閉合循環
	涵蓋較多的地震循環 (可以獲得空間變化)	←-----→ 涵蓋較少的地震循環 (無法獲得空間變化)		
	滑移與年代資料不精確 (測量誤差與空間變化)	←-----→ 滑移與年代資料較精確 (測量誤差與空間變化)		

決定斷層滑移速率的因素，板塊運動為主要控制因素，它影響斷層特性，包括斷層在何處，如何形成，為何停止活動，以及滑移速率有多快等，其次為斷層的成熟度與強度特性（Mueller, 2017）。就一組斷層而言，斷層交互作用、斷層的連結、小斷層死亡等，都會影響滑移速率（Nicol *et al.*, 2005）。實際調查時，平均滑移速率的不確定性，可能來自下列原因：(1) 錯移量的野外量測誤差，(2) 錯移地形與沉積物的定年誤差，(3) 每一個地震循環的滑移速率、再現週期不同，以及(4) 古地震數目少，也局限統計上的評估。所以，一般會採用時間與空間的遍歷性替代

(ergodic substitution) (McCalpin and Carver, 2009)，來檢驗短時間內一組斷層滑移速率的變化，並應用這些形式來檢驗短時間內的單一斷層。

受到活動斷層影響而變形的晚第四紀地層，若地質時間是介於10,000-100,000年內的事件是比較容易作密集的測定，也容易確認暫時性滑移速率的改變(Nicol *et al.*, 2005; Bull *et al.*, 2006; Mouslopoulou *et al.*, 2012)，例如日本有完整的火山灰層序與年代，可以確認每一循環的地震事件與滑移速率，如表2中以分離位移量(D)所計算的滑移速率；在臺灣地區，在碳十四可定年代範圍與10萬年之間，除了熱螢光與光螢光定年以外(Chen *et al.*, 2003)，並沒有很好的沉積物可供定年，因此訂定單一地震循環的滑移速率有相當的困難，而無法得到所有活動斷層的長期滑移速率資料(表1)。歷史地震可以用斷層崖(表2C)來計算滑移速率，如果有多次地震紀錄可以得到較精確的結果(Chen *et al.*, 2007)；但大多數的情形是用構造總滑移量(表2A)，若涵蓋多次地震循環，滑移速率與年代資料不足，滑移速率的計算結果也不精確。

短期滑移速率，大多藉由大地測量與衛星干涉量測方法(例如饒瑞鈞等, 2006；胡植慶等, 2012; 胡植慶等, 2016; 景國恩等, 2020)，比較適用於同震變形(co-seismic deformation)與震後變形(post-seismic deformation)分析，但受限於量測的時間段比單一地震循環小得多，例如集集地震後經過20年，大地測量結果顯示車籠埔斷層仍然處於震後變形。因此，短期滑移無法以外插方式用來取得震間變形或整個地震循環的變化，也無法替代長期滑移速率或平均滑移速率用來評估斷層活動與變形行為。

再現週期，是指任何兩次古地震之間的時段，有兩種方法可以估計：(1) 平均再現週期，結合多次地震，將這些事件的時段平均化，例如車籠埔斷層(表1; Chen *et al.*, 2007)；(2) 將每一古地震直接定年。以往曾經利用平均滑移速率除以每一次事件的滑移量，來估計古地震的再現(Wallace, 1970)。因為每一次事件的滑移量很難從調查中獲得，加上地震之間的再現週期通常是不規則的，所以地質方法評估再現週期有很大誤差(例如車籠埔斷層)，也無法瞭解事件之間的時間段變化；但即使是不完美的評估，總比沒有評估好(McCalpin, 2009)。

盲斷層

盲斷層（blind fault）有兩種不同的情況，一種是曾經出露地表，之後沉積物覆蓋其上，將於本節以山腳斷層為例；另一種盲斷層從未出露地表，且與上覆褶皺有關，將在活動褶皺作用一節說明。

山腳斷層是一條盲斷層，為第四紀沉積物所掩覆，經過20多年的鑽探與其他調查，對於此正斷層的概略位置有更多的瞭解，對於斷層運動學則須進一步探討，包括斷層是否曾經出露地表，以及斷層是否持續側向擴展（增加長度）。山腳斷層的成因可能和沖繩海槽的弧後擴張有關（Lee *et al.*, 1980; Letouzey and Kimura, 1985），臺灣北部更新世早期至中期的伸長環境（extensional regime），形成正斷層系統，其後大屯火山噴發，以及臺北盆地形成並堆積。若屬於這樣的構造史，山腳斷層形成後，沉積物覆蓋其上，斷層可能「曾經」出露地表。山腳斷層的南端止於樹林附近，北端金山附近因為斷層兩側仍有層位落差，顯示斷層仍向東海延伸，因為海床侵蝕而缺乏錯移沉積物的岩石證據（rock records）。

最近的研究顯示，臺灣—新畿褶皺帶（Wageman *et al.*, 1970）的西南端與與臺灣陸上的構造環境不同（Kong *et al.*, 2000），山腳斷層的東北端可能不再側向擴展，或不屬於擴展模式（propagating model），而可能屬於固定長度模式（constant-length fault model；Roteratn *et al.*, 2019）。一般正斷層的發展前期，很快速地擴展並達到約略目前斷層的長度，後期則以增加滑移量為主，這是特徵地震理論可以成立的原因（Walsh *et al.*, 2002；Roteratn *et al.*, 2019）。換言之，斷層的滑移方式轉為增加滑動量，例如增加斷層核心與毀壞帶寬度，或是向上發育而逐漸接近地表，甚至穿出地表（Bramham *et al.*, 2021）；目前地質調查所仍持續以精密水準測量觀測跨山腳斷層的年變化率。

依據目前整理的鑽探與地質資料，山腳斷層的上方前端還在地下深處數十公尺（圖3；例如林啓文等，2021），因此尚無法劃設活動斷層地質敏感區，也無法評估斷層若穿出的位置或易受斷層影響的範圍；但是山腳斷層的長度與傾角等資料（如表1），在耐震設計方面可以提供地震矩規模的計算。

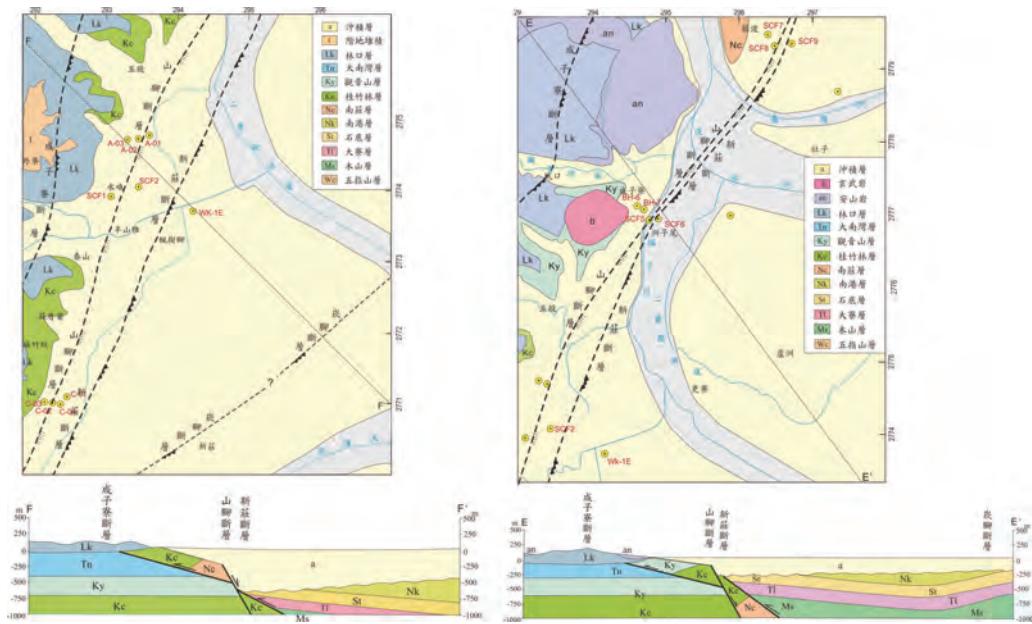


圖3 山腳斷層與可能地下構造示意圖。左圖為五股剖面，右圖為成子寮剖面。摘自林啟文等（2021）。

活動褶皺作用

活動褶皺作用（active folding）是指更新世以來仍持續進行的褶皺作用（Yeats *et al.*, 1997），而在地質名詞彙編沒有活動褶皺（active fold）的定義。現今的學者大多相信，一個褶皺構造的地下存在某種形式的斷層，斷層關連褶皺（fault-related folding）的3種模式，包括斷層彎曲褶皺、斷層擴展褶皺與滑脫面褶皺等模式，都顯示斷層-褶皺的關連與形成順序關係。地表或地下淺部的褶皺，一般會聯想到褶皺成長時，伴隨地下斷層的滑移是否也明顯增加（Dolan and Avouac, 2007），或具有誘發地震的潛勢。單一事件如車籠埔斷層的例子，集集地震後的槽溝開挖結果顯示，地下淺部斷層上方形成同震地表褶皺（陳文山等，2006；Chen *et al.*, 2007），通常範圍僅數公尺至十數公尺，可能指示弱岩因黏彈性行為（viscoelastic behavior）留下的塑性變形（plastic deformation）。偵測隱藏地下斷層是古地震的研究目標之一（McCalpin, 2009），本節探討活動斷層分布圖上的另兩個例子，彰化斷層與後甲里斷層。

經由廣域震測（一般是石油公司震測方式）與地下鑽井資料的比對，陳瑞祥（Chen, 1978）認為八卦山背斜下方有一向東傾斜的八卦山逆衝斷層（圖4），PKS-1

井深2,800m處，卓蘭層重複出現380-420m；斷層上盤地層有褶皺現象，斷層下盤為水平層態，八卦山斷層可以向上追蹤至深度1,700m處，換言之斷層未穿出地表；該斷層後來被稱為彰化斷層（楊貴三，1986；張徽正等，1998）。Simoes *et al.* (2007b) 利用變形的岩層與地形面幾何，認為八卦山背斜為一活動的斷層前端褶皺（fault-tip folding），變形發生於 62.2 ± 9.6 Ka，縮短量為 16.3 ± 4.1 mm/yr。

彰化斷層的例子指示，斷層前端雖然未出露地表，但地表的八卦山背斜持續發育。斷層未出露地表，可能是盲斷層前端的層面滑移，或是斷層前端的擴散變形等，兩者均會阻擋斷層擴展至地表（Roeing *et al.*, 1997）。褶皺若分散變形作用，因此以褶皺與斷層來分析地震行為是有困難度與爭議的，還需要瞭解下列資料：（1）地表褶皺與深部褶皺的關連，（2）逆斷層與褶皺的歷史，（3）褶皺構造是因地下盲斷層的地震而成長，還是褶皺作用屬於漸進式過程，（4）褶皺的側向擴展為何（Dolan and Avouac, 2007；McCalpin and Carver, 2009）。以目前的資料，對於彰化斷層（或八卦山斷層）的地下幾何形貌，例如滑脫面在那一層位，卓蘭層（Chen, 1978）或錦水頁岩（Simoes *et al.*, 2007）或更深的地層等，並不瞭解，而逆斷層持續滑動時向上、向前擴展的軌跡也無法預期，因此無法進行地質敏感區劃設。Simoes *et al.* (2007b) 以錯移模型反向分析，將觀察的褶皺地形面求得彰化斷層的斷層幾何以及淨滑移速率，可以初步進行地震潛勢評估，但仍存在許多假設。未來需要的資料包括斷層（前端）深度、斷層長度與傾角用以計算斷層面積，才有辦法進行地震矩規模計算。目前也持續以GPS測量與精密水準測量觀測跨彰化斷層的年變化率。

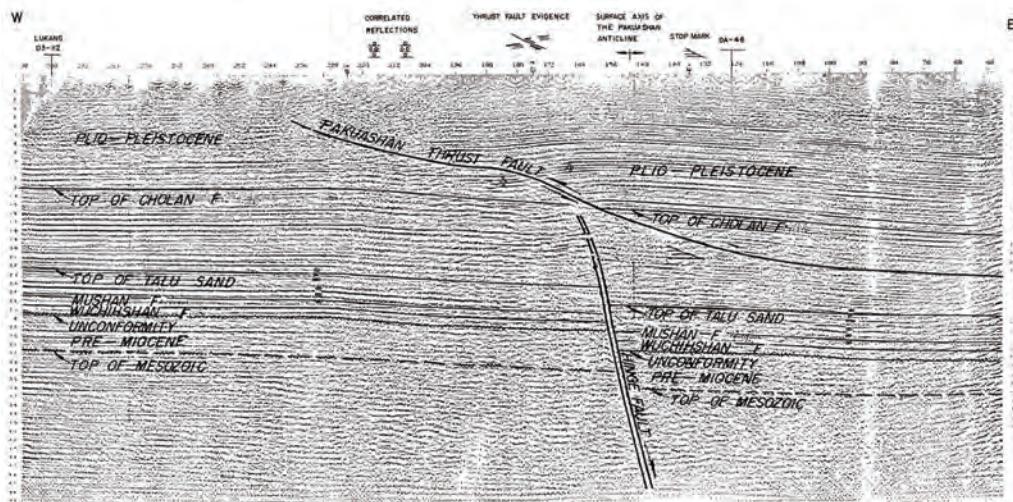


圖4 八卦山震測解釋圖，八卦山背斜下方有低傾角的八卦山逆衝斷層。摘自Chen (1978)。

台南臺地東緣以往認為有一條後甲里斷層，但一直未找到斷層露頭。由於臺地相對東側大灣低地有明顯抬升現象，Freneau *et al.* (2001) 利用短期衛星干涉影像量測地表抬升資料，提出臺地西緣下方有一條與滑脫面相關的斷坡，而位於臺地東緣的後甲里斷層是向西傾斜的背衝斷層（backthrust），臺地本身為一類似成長背斜的彈升構造（pop-up structure）；Huang *et al.* (2006) 同樣利用短期衛星干涉影像加上水準資料量測地表抬升資料，假設臺地西緣下方的斷坡（命名為臺南斷層）向東傾角30度、而後甲里斷層向西傾斜65度的模式（圖5左）。

地質調查所在臺南臺地西緣未發現有斷層，臺地東緣的槽溝開挖也未發現後甲里斷層，而地表台南層呈現近乎水平。臺南臺地西緣的鑽探結果，臺南層下方30-299m為傾斜岩層（傾角40°-60°），隨深度增加而剪裂現象增加，至井底450m均為相同傾斜岩層（可能為六雙層或相當地層）；井錄中無法判斷有斷層核心，上方台南層沒有活動褶皺作用現象。比較美國洛杉磯都會區下方有一盲斷層系統（Puente Hills Blind-Thrust System），其上方有活動褶皺作用（圖5右），經由石油公司的震測資料、鑽井，並結合地震資料比對的地下構造剖面（Shaw and Shearer, 1999; Shaw *et al.*, 2002）顯示，褶皺下方的盲斷層具有地震潛勢（Leon *et al.*, 2007），這是一個未來研究活動褶皺作用的最佳例子。以往針對臺南臺地的斷層與背斜的猜測，有待後續以類似調查方法來提供更多岩石證據，以證明這些構造是否存在。此外，目前仍持續以GPS測量與精密水準測量觀測跨後甲里斷層的年變化率。

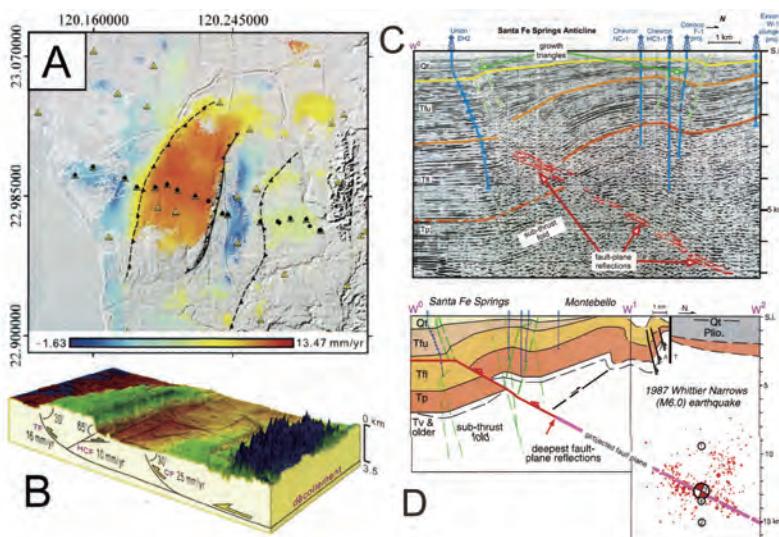


圖5 A：臺南臺地構造示意與數值地形模型；B：為地下構造猜測圖，摘自Huang *et al.* (2006)；C：美國洛杉磯Puente Hills blind-thrust system石油公司震測圖與鑽井位置圖；D：地下構造剖面，震測資料、斷層、褶皺構造與震央比對，摘自Shaw and Shearer (1999)。

總結與討論

地質調查所活動斷層調查的主要工作，包括（1）活動斷層分布圖檢討與更新，是依據災害防救法與地質法規定作定期檢討，本版活動斷層分布增加3條斷層，總計36條活動斷層。（2）活動斷層條帶地質圖是地質調查的基礎工作，完成調查後的斷層經寫成專業報告並審查後，再列入活動斷層分布圖。條帶地質圖可以提供執業地質師重要的地質資料，預期地質鑽探遇到哪些岩性、地層與構造等資訊。本次增加3條活動斷層也附有條帶地質圖與地質剖面，讓使用者瞭解測圖地質師針對地下構造的主觀看法。（3）已完成條帶地質圖的活動斷層，進一步增加控制點以進行活動斷層地質敏感區劃設。這是地質法針對土地開發者的規範，位於敏感區內的土地開發行為必須進行基地地質調查與地質安全評估。目前已劃設活動斷層地質敏感區者，共20條斷層。由於調查過程更精細，其結果可以回饋更新條帶地質圖與修正斷層位置，亦即已更新的條帶地質圖是採用新的斷層跡資料。地質敏感區內的斷層跡長度，一般比條帶地質圖的斷層跡短，主要是後者有地質師推測與盲斷層部分，且對於地震危害度評估是重要的資訊，採用斷層的可能最大長度來評估地震矩規模。

對於可能誘發地震的震源斷層，斷層滑移速率是古地震與新期構造研究的重要課題；臺灣歷史地震紀錄的時間較短，除了車籠埔斷層的南段以外，很少有機會瞭解一條斷層的完整地震循環，而目前大多數的長期滑移速率或平均滑移速率的研究是採用地質方法，即由錯移地形面或沉積層與岩層年代來計算，它可能是包含多次地震事件的開放地震循環，且每一次事件的時間段可能不一致，但是不完美的評估總比沒有評估來得好，且對於地震事件的不規則性與新期構造研究仍有相當助益，因此求得斷層滑移速率與再現週期仍是重點工作。短期滑移速率大多藉由大地測量與衛星干涉量測方法，比較適合用於分析同震變形與震後變形，但受限於量測的時間段比單一地震循環小得多，無法以外插方式用來取得震間變形或整個地震循環的變化，也無法用來作為長期滑移速率或平均滑移速率以評估斷層活動與變形行為。

斷層目錄中的山腳斷層，可能是更新世伸長環境形成的正斷層系統，被更新世晚期沉積物覆蓋，但它有可能是一條曾經出露地表的斷層。最近的研究顯示，臺灣一新畿褶皺帶的西南端與臺灣陸上的構造環境不同，因此山腳斷層的東北端可能沒有側向擴展，斷層的滑移方式轉為增加滑動量，例如增加斷層核心與毀壞帶寬度，或是向上發育而逐漸接近地表或穿出地表。依據目前整理的鑽探與地質資料，山腳斷層的上方前端還在地下深處數十公尺，無法評估斷層若穿出的位置或易受斷層影

響的範圍，因此尚無法劃設活動斷層地質敏感區，但是斷層長度與傾角等資料可以提供地震矩規模的評估。

盲斷層與上覆活動褶皺作用相關的斷層中，彰化斷層並未出露地表，其斷層前端併入地層，而上方受壓縮拱彎形成八卦山背斜；根據變動地形面研究及定年結果，開始形成背斜的時間可能是 62,000 年前，目前仍缺乏滑脫面的層位資料與斷層尖端的深度資料，未來須進一步利用深鑽或震測來取得斷層的長度與傾角資料，以計算可能的地震矩規模。

後甲里斷層曾經有學者依據台南臺地的抬升速率提出地下構造的模型，認為它是滑脫面上斷坡（台南斷層）的背衝斷層，但是目前為止的鑽探與調查結果，尚未找到台南斷層與後甲里斷層的岩石證據，未來也需要利用深鑽或震測以確認斷層的存在性。彰化斷層與後甲里斷層以目前的岩石證據，資料尚不足劃設活動斷層地質敏感區。

誌謝

國立中央大學黃文正教授閱讀手稿並提供建議，國立臺灣大學陳文山教授與另一位未具名審稿者提供許多寶貴意見，作者敬致謝忱。

參考文獻

- 中國石油公司（1989）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編印。
何信昌、謝凱旋、高銘健、陳華玟（2005）新化（圖幅及說明書）。五萬分之一臺灣地質圖，圖幅第 50 號。經濟部中央地質調查所，共 77 頁。
- 林啓文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正（2000）臺灣活動斷層概論（第二版）。經濟部中央地質調查所特刊，第13號，共122頁。
- 林啓文、盧詩丁、石同生、劉彥求、林偉雄、林燕慧（2007a）臺灣西南部的活動斷層。經濟部中央地質調查所特刊，第17號，共141頁。
- 林啓文、盧詩丁、石同生、陳致言、林燕慧（2007b）臺灣北部的活動斷層。經濟部中央地質調查所特刊，第19號，共130頁。
- 林啓文、盧詩丁、石同生、林偉雄、劉彥求、陳柏村（2008）臺灣中部的活動斷層。經濟部中央地質調查所特刊，第21號，共148頁。
- 林啓文、陳文山、劉彥求、陳柏村（2009）臺灣東部與南部的活動斷層。經濟部中央地質調查所特刊，第23號，共178頁。
- 林啓文、盧詩丁、陳文山（2012a）臺灣活動斷層分布圖第三版說明，附五十萬分之一臺灣活動斷層分布圖。經濟部中央地質調查所特刊，第 26 號，第 1-30 頁。

- 林啓文、游鎮源、洪國騰、周稟珊（2012b）臺灣南部臺南—高雄泥岩區的地質構造研究。經濟部中央地質調查所彙刊，第 25 號，第 143-174 頁。
- 林啓文（2013）旗山（圖幅及說明書）。五萬分之一臺灣地質圖，圖幅第 56 號。經濟部中央地質調查所，共 93 頁。
- 林啓文、周稟珊、張育仁（2019）臺灣中部濁水溪地區卓蘭層的構造特性及其意義。經濟部中央地質調查所特刊，第 34 號，第 1-23 頁。
- 林啓文、劉桓吉、周稟珊、蘇泰維（2021）臺北盆地西緣的斷層探討。經濟部中央地質調查所彙刊（已投稿）。
- 胡植慶、劉啟清、饒瑞鈞、李元希、鄭錦桐、張午龍、陳卉瑄、景國恩、唐昭榮（2012）斷層監測與潛勢分析研究（4/4）。經濟部中央地質調查所委託研究計畫報告，共 366 頁。
- 胡植慶、劉啟清、景國恩、鄭錦桐、陳宏宇、郭明錦、饒瑞鈞、李元希、張午龍、邵國士、林柏伸、顏銀桐、謝銘哲、李易叡、黃鐘、傅慶州（2016）斷層整合性觀測與潛勢分析。經濟部中央地質調查所委託研究計畫報告，共 439 頁。
- 陳文山、陳于高、楊小青（2006）地震地質調查與活動斷層資料庫建置計畫—槽溝開挖與古地震研究計畫總報告：新期構造、古地震與槽溝開挖研究。經濟部中央地質調查所委託研究計畫報告 95-08 號，共 133 頁。
- 陳文山、游能悌、松多信尚、楊小青（2010）地震地質與地變動潛勢分析—斷層長期滑移速率與再現週期研究總報告。經濟部中央地質調查所委託研究計畫報告 99-09 總號，共 141 頁。
- 鳥居敬造（1932）臺南州新化油田調查報告及地質圖，比例尺三萬分之一。臺灣總督府殖產局，第 609 號，共 29 頁。
- 黃文正、陳建志、波玲琳、顏一勤（2019）活動斷層特性精細調查（1/4）。經濟部中央地質調查所委託研究計畫報告 B10834 號，共 104 頁。
- 黃文正、陳建志、波玲琳、顏一勤（2020）活動斷層特性精細調查（2/4）。經濟部中央地質調查所委託研究計畫報告 B10933 號，共 107 頁。
- 景國恩、胡植慶、陳宏宇、張午龍、鄭凱謙、莊昀叡（2020）地表變形觀測資料處理分析與斷層模型反演評估總報告。經濟部中央地質調查所委託研究計畫報告，共 365 頁。
- 張徽正、林啓文、陳勉銘、盧詩丁（1998）臺灣活動斷層概論。經濟部中央地質調查所特刊，第 10 號，共 103 頁。
- 楊貴三（1986）臺灣活斷層的地形學研究—特論活斷層與地形面的關係。中國文化大學地學研究所博士論文，共 178 頁。
- 劉彥求、林啓文（2019）臺灣南部車瓜林斷層的構造特性研究。經濟部中央地質調查所特刊，第 34 號，第 53-82 頁。
- 劉彥求、許晉璋、林啓文（2020）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 29-46 頁。
- 劉桓吉、李錦發（1998）雲林（圖幅及說明書）。五萬分之一臺灣地質圖，圖幅第 38 號。經濟部中央地質調查所，共 47 頁。
- 饒瑞鈞、余致義、洪日豪、胡植慶、李建成、詹瑜璋、許麗文（2006）活動斷層監測系統計畫（5/5）。經濟部中央地質調查所委託研究計畫報告，共 256 頁。

- Bonilla, M.G. (1977) Summary of Quaternary faulting and elevation changes in Taiwan. *Mem. Geol. Soc. China*, 2, 43-56.
- Bramham, E., Wright, J.J., Paton, D.A. and Hodgson, D.M. (2021) A new model for the growth of normal faults developed above pre-existing structures. *Geology*, 49, 587-591.
- Bull, J.M., Barnes, P.M., Lamarche, G., Sanderson, D.J., Cowie, P.A., Taylor, S.K. and Dix, J.K. (2006) High-resolution record of displacement accumulation on an active normal fault: implications for models of slip accumulation during repeated earthquakes. *J. Struct. Geol.*, 28, 1146-1166.
- Chen, J.S. (1978) A comparative study of the refraction and reflection seismic data obtained on the Changhua plain to the Peikang Shelf, Taiwan. *Petrol. Geol. Taiwan*, 15, 199-217.
- Chen, W.S., Yang, C.C., Yen, I.C., Lee, L.S., Lee, K.J., Yang, H.C., Chang, H.C., Ota, Y., Lin, C.W., Lin, W.H., Shih, T.S. and Lu, S.T. (2007) Late Holocene paleoseismicity of the southern part of the Chelungpu Fault in central Taiwan: evidence from the Chushan excavation site. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 97, 1B, 1-13. doi: 10.1785/0120050161.
- Chen, Y.G., Chen, Y.W., Chen, W.S., Zhang, J.F., Zhao, H., Zhou, L.P. and Li, S.H. (2003) Preliminary results of long-term slip rates of 1999 earthquake fault by luminescence and radiocarbon dating. *Quarter. Sci. Rev.*, 22, 1231-1221. doi: 10.1016/S0277-3791(03)00037-4.
- Chen, Y.G., Lai, K.Y., Lee, Y.H., Suppe, J., Chen, W.S., Lin, Y.N., Wang, Y., Hung, J.H. and Kao, Y.T. (2007a) Coseismic fold scarps and their kinematics behavior in the 1999 Cg-CVhi earthquake Taiwan. *J. Geophys. Res.*, 112, B03S02. doi: 10.1029/2006JB004460.
- Choi, J.H., Edwards, P., Ko, K. and Kim, Y.S. (2016) Definition and Classification of fault damage zone: A review and a new methodological approach. *Earth-Science Reviews*, 152, 70-87.
- Dolan, J.P. and Avouac, J.P. (2007) Introduction to special section: Active fault-related folding: structural evolution, geomorphologic expression, paleoseismology and seismic hazards. *J. Geophys. Res.*, 112, B03S01. doi: 10.1029/2007JB004952.
- Fréneau, B., Pathier, E., Raymond, D., Deffontaines, B., Lee, C.T., Wang, H.T., Angelier, J., Rudent, J.P. and Chang, C.P. (2001) Uplift of Tainan Tableland (SW Taiwan) revealed by SAR interferometry. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3071-3074.
- Huang, M.M., Hu, J.C., Hsieh, C.H., Ching, K.E., Rau, R.J., Pathier, E., Fréneau, B. and Deffontaines, B. (2006) A growing structure near the deformation front in SW Taiwan as deduced from SAR interferometry and geodetic observation. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L12305. doi: 10.1029/2005GL025613
- Hsieh, M.L. and Knueper, P.L.K. (2002) Synchroneity and morphology of Holocene river terraces in the southern Western Foothill, Taiwan: A guide to interpreting and correlating erosional river terraces across growing anticlines. *Geol. Soc. Amer. Special Paper*, 358, 55-74.
- Hsu, T.L. and Chang, H.C. (1979) Quaternary faulting in Taiwan. *Mem. Geol. Soc. China*, 3, 155-165.
- Kong, F., Lawver, A. and Lee, T.Y. (2000) Evolution of the Southern Taiwan-Sinzi Folded Zone and opening of the southern Okinawa Trough. *J. Asian Earth Sci.*, 18, 325-341.
- Lee, C.S., Shor, G.G., Bibee, L.D., Lu, R.S. and Hilde, T.W.C. (1980) Okinawa Trough: origin of a back-arc basin. *Marine Geol.*, 35, 219-241.

- Leon, L.A., Christofferson, A.A., Dolan, J.P., Shaw, J.H. and Pratt, L. (2007) Earthquake-by-earthquake fold growth above the Puente Hills blind thrust fault, Los Angeles, California: implication for fold kinematics and seismic hazard. *J. Geophys. Res.*, 112, B03S03. doi: 10.1029/2006JB004461.
- Letouzey, L. and Kimura, M. (1985) Okinawa Trough genesis: structure and evolution of a backarc developed in a continent. *Marine and Petrol. Geol.*, 2, 111-130.
- Liu, Y., Wu, K., Wang, X., Liu, B., Guo, J. and Du, Y.K. (2017) Architecture of buried reverse fault zone in the sedimentary basin: A case study from Hong-Che Fault Zone of the Junggar Basin. *J. Struct. Geol.*, 105, 1-17. doi: 10.1016/j.jsg.2017.11.002.
- McCalpin, J.P. (2009) Applications of paleoseismic data to seismic hazard assessment and neotectonic research. In McCalpin J.P. ed. "Paleoseismology", 2nd Edition, Academic Press, USA, 493pp.
- McCalpin, J.P. and Carver, G.A. (2009) Paleoseismology of compressional tectonic environments. In McCalpin J.P. ed. "Paleoseismology", 2nd Edition, Academic Press, USA, 493pp.
- Mouslopoulou, V., Nicol, A., Walsh, J., Begg, J.G., Townsend, D.B. and Hristopuloudis, D.T. (2012) Fault-slip accumulation in an active rift over thousands to millions of years and the importance of paleoearthquake sampling. *J. Struct. Geol.*, 36, 71-80.
- Mueller, K. (2017) Variation in slip rates on active faults: natural growth or stress transients. *Geology*, 45, 287-288.
- Nicol, A., Walsh, J.J., Berryman, K. and Nodder, S. (2005) Growth of a normal fault by the accumulation of slip over millions of years. *J. Struct. Geol.*, 27, 327-342.
- Nicol, A., Walsh, J.J., Manzocchi, T. and Morewood, N. (2005) Displacement rates and average earthquake recurrence intervals on normal fault. *J. Struct. Geol.*, 27, 541-551.
- Roeing, J., Cooke, M.L. and Polard, D.D. (1997) Why blind faults do not propagate to the Earth's surface. *J. Geophys. Res.*, 102, 11901-11912.
- Roteratn, A., Jackson, A.A.L., Tvedt, A.B.M., Bell, R.E. and Blackman, I. (2019) How do normal faults grow? *J. Struct. Geol.*, 125, 174-184.
- Scholz, C.H. (2019) The Mechanics of Earthquakes and Faulting, 3rd Edition. Cambridge University Press, Cambridge, 493pp.
- Shaw, J.H. and Shearer, P.M. (1999) An elusive blind-thrust fault beneath Metropolitan Los Angeles. *Science*, 283, 1516-1518.
- Shaw, J.H., Plesch, A., Dolan, F., Pratt, T.L. and Fiore, P. (2002) An elusive blind-thrust fault beneath Metropolitan Los Angeles. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 92, 2946-2960.
- Simoes, M., Avouac, J.P. and Chen, Y.G. (2007a) Slip rates on the Chelungpu and Chushiang thrust faults inferred from a deformed strath terrace along the Dungpura river, west central Taiwan. *J. Geophys. Res.*, 112, B03S10. doi: 10.1029/2005JB004200.
- Simoes, M., Avouac, J.P., Chen, Y.G., Singhvi, A.K., Wang, C.Y., Jaiswal, M., Chan, Y.C. and Bernard, S. (2007b) Kinematic analysis of the Pakuan fault tip fold, west central Taiwan: Shortening rate and age of folding inception. *J. Geophys. Res.*, 112, B03S14. doi: 10.1029/2005JB004198.
- Wageman, J.M., Hilde, T.W.C. and Emery, K.O. (1970) Structural Framework of the East China Sea and

林啟文等：臺灣活動斷層調查的近期發展

- Yellow Sea. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 54(9), 1611-1643.
- Wallace, R. E. (1970) Earthquake recurrence intervals on the San Andreas fault. Geol. Soc. Am. Bull., 81, 2875-2890.
- Walsh, J.J., Nicol, A. and Childs, C. (2002) An alternative model for the growth of faults. J. Struct. Geol., 24, 1669-1675.
- Wells, D.L. and Coppersmith, K.J. (1994) New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bull. Seism. Soc. Am., 84, 974-1002.
- Yeats, R.S., Sieh, K. and Allen, C.R. (1997) The Geology of Earthquakes. Oxford University Press, New York, 568pp.

RECENT DEVELOPMENT OF ACTIVE FAULT INVESTIGATIONS OF TAIWAN

Chii-Wen Lin¹, Yen-Chiu Liu¹, Ping-Shan Chou¹ and Yen-Hui Lin¹

ABSTRACT

We describe the recent development of active fault investigations conducted by CGS (the Central Geological Survey), focusing on the three main aspects summarized as follows. First, the active fault map of Taiwan has been reviewed and revised to incorporate a total of 36 active faults. Secondly, a stripe map of active faults on a scale of 1/25,000 has been compiled, covering an area with a width of 2 km on both sides of each fault trace. Upon the completion of the mapping and peer-review, all recognized active faults will be included in the new active fault map. Three new stripe maps containing the geological cross-sections of the new active fault map are also available in the Appendix, as well as on the CGS website. Thirdly, controlling points of each active fault have been added in order to delineate the “Active Fault Geologically Sensitive Area” (AFGSA) based on which geological investigation and safety evaluation need to be implemented for every construction project within the delineated area in compliance with the Geology Act. 20 AFGSAs have been announced so far.

The history of earthquake records in Taiwan is too short to facilitate a comprehensive understanding of the seismic cycle of an active fault; that is, the existing earthquake record of an active fault fails to cover a period of time long enough for tracing the recurrence interval of the active fault. As a result, all the long-term slip rates of active faults in Taiwan are estimated by averaging the data obtained through geological methods, in spite of the facts that some active faults may have undergone numerous seismic events and the time span of each event is likely to be inconsistent. However, the study of long-term slip rate and recurrence interval remains an important task of CGS because not-so-perfect evaluation is better than no evaluation at all and the study is beneficial for conducting neotectonic research and detecting irregularity in seismic events.

Blind faults and active folding are also discussed, with the Sanchiao Fault, the Changhua Fault and the Houchiali Faults provided as examples. All these faults are wanting in detailed information, such as the depth of fault tip and the stratigraphic horizons of detachment planes of the latter two faults. Therefore, it is difficult to delineate the geologically

1.Cental Geological Survey, MOEA



sensitivity area in these faults; fault parameters like fault lengths and fault dips can nonetheless be used to assess moment magnitudes if possible earthquake will be generated by these blind faults.

Key words: Active fault map, stripe map of active faults, active fault geologically sensitive area, long-term slip rates, blind fault, active folding, Chuhsiang Fault, Kouhsiaoli Fault, Chekualin Fault



附錄一 初鄉斷層

林啓文 周稟珊 黃文正

初鄉斷層（劉桓吉與李錦發，2000；林啓文等，2019），為逆滑斷層，呈東北走向，北由南投縣中寮鄉廣興，向南延伸經濁水溪、東埔蚋溪至竹山南方，再併入車籠埔斷層，斷層跡長約 19.8 公里。斷層截切年代距今 13,585yr 的更新世階地堆積物（Chen *et al.*, 2003），列為第二類活動斷層。

地形與地質特性

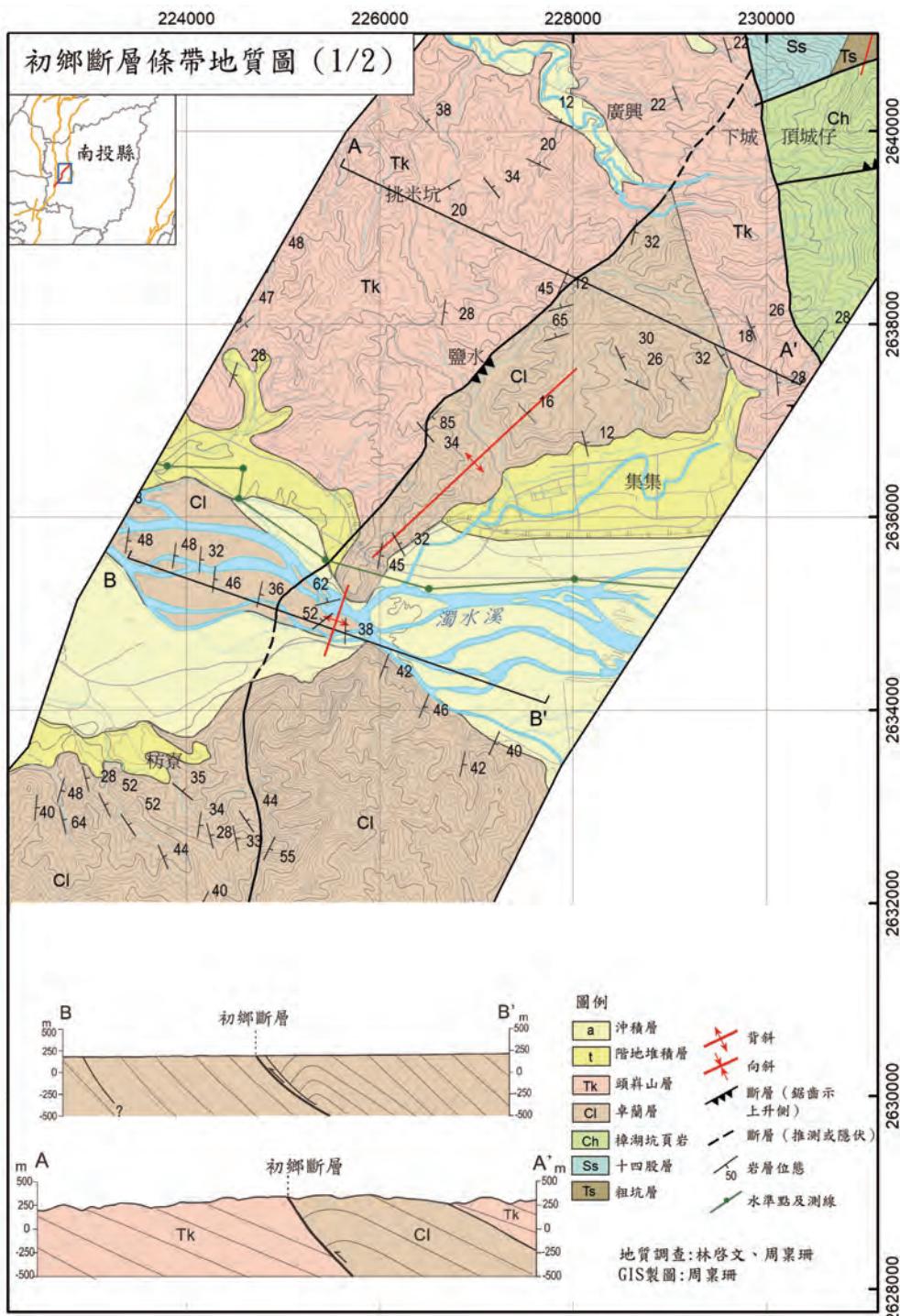
濁水溪北岸，斷層西側為階地，東側為低矮丘陵；向北至集集與中寮，斷層兩側均為低矮丘陵，斷層兩側地形特徵並未有明顯差異。濁水溪至初鄉底，斷層兩側均為山地，東側海拔較西側高 200 公尺以上，呈現南北走向的線形崖，位置約為斷層跡的延伸。東埔蚋溪南北兩側的階地，有受到斷層錯移而傾動現象，線形崖可追蹤約 800 公尺。東埔蚋溪以南，初鄉斷層併入車籠埔斷層處，線形崖兩側高程差超過 300 公尺，呈現東側高、西側低地勢。

初鄉斷層可分為兩段敘述。濁水溪以北，斷層上盤出露卓蘭層與頭嵙山層；除了濁水溪河床出露的頂溪州背斜之外，集集西北方由岩性與層態研判可能存在背斜構造（圖 A1）；斷層下盤也出露卓蘭層與頭嵙山層，但呈同斜構造。東埔蚋溪以南，斷層上盤出露桂竹林層、錦水頁岩與卓蘭層，呈同斜構造；斷層下盤出露卓蘭層，有許多小型褶皺構造。初鄉斷層在柿子林西北方併入車籠埔斷層，斷層上盤出露桂竹林層，低傾角向東傾斜，下盤出露頭嵙山層礫岩。

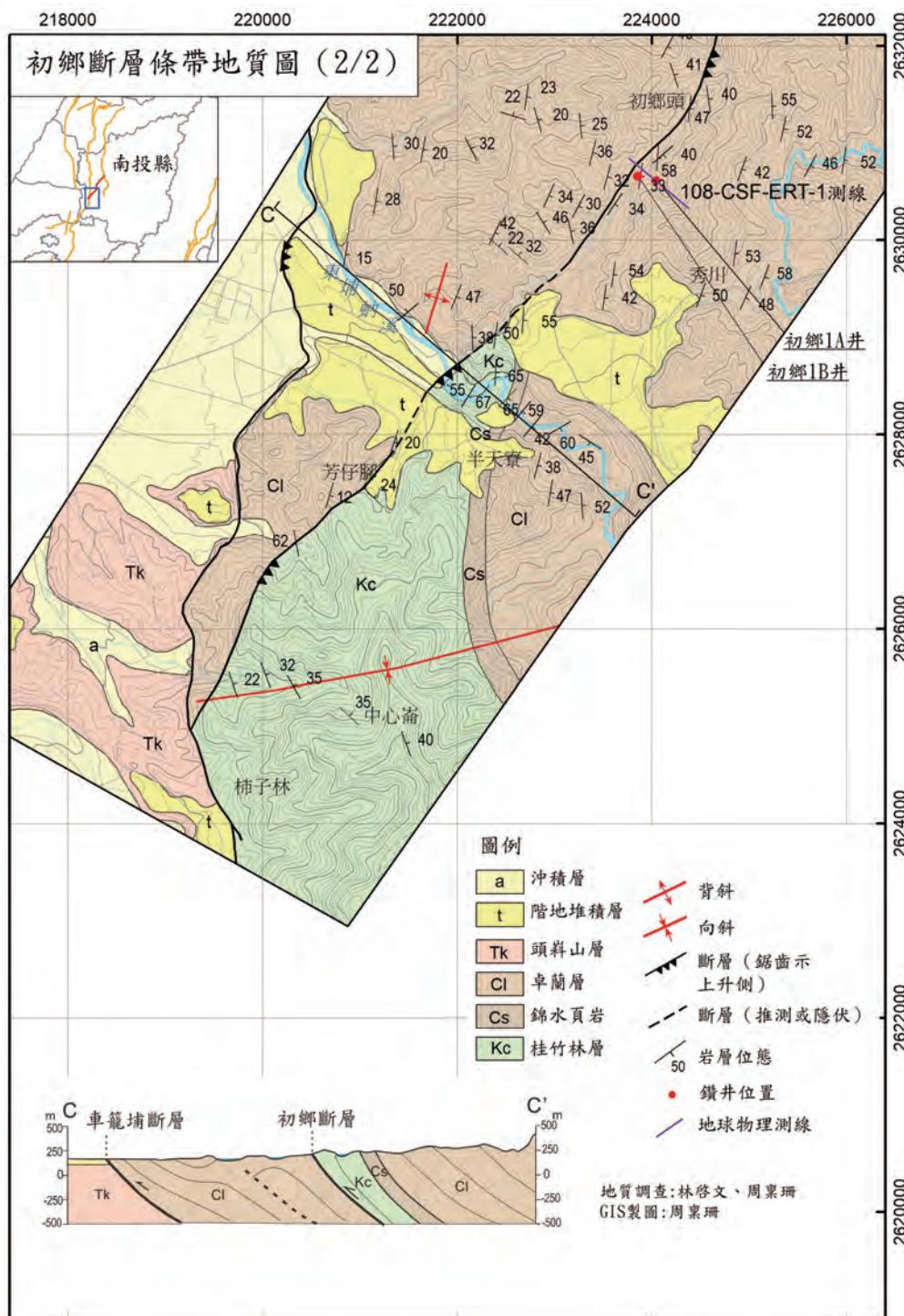
斷層特性

濁水溪以北，初鄉斷層甚少有良好出露，僅能由岩性與岩層位態來研判斷層可能通過的位置。

濁水溪名竹大橋以東，沿河床出露良好：車籠埔斷層位於名竹大橋東方約 600 公尺處，錦水頁岩逆衝於礫石層之上。濁水溪河床的初鄉斷層露頭（圖 A2），斷層核心為深黑色高度剪裂斷層泥，由南北岸延伸對照，主斷層位態為走向 N5°E，傾角 47°E。斷層下盤岩層受擾動變形的寬度僅 2-3 公尺寬；北岸緊鄰主斷層砂岩層扭曲，泥岩內有平行斷層核心的剪切面，南岸的中層砂岩為小型斷層錯斷。斷層



圖A1 初鄉斷層條帶地質圖 (1/2)。廣興以北地區，斷層為推測。原圖比例尺1/25,000。



圖A1 (續) 初鄉斷層條帶地質圖 (2/2)。原圖比例尺為1/25,000。

上盤岩層變形甚劇，寬度 100-200 公尺寬，南北兩岸皆有波長數公尺褶皺及錯動量數公尺的斷層；緊鄰主斷層 10-15 公尺範圍內變形劇烈，泥岩內有剪碎的豆莢狀砂岩，也有平行主斷層的剪切面。



圖A2 濁水溪集集攔河堰下游初鄉斷層露頭（摘自黃文正等，2019）。上圖北岸，斷層下盤（西側）出露厚層青灰色至深灰色混濁砂岩、厚層泥岩及砂頁岩互層，層態為東北走向，向東傾約25-30度；斷層上盤為厚層泥岩及薄至中層砂頁岩互層，岩層位態變化急遽。

集集攔河堰西側約 1 公里處，初鄉斷層上盤出露波長約 2 公里頂溪州背斜，褶皺軸向東北傾沒 34 度，軸部偶有小型斷層；背斜西翼岩層由近軸部的東北走向、傾角約 30-60 度，向西側逐漸轉為約東西走向，近乎垂直，岩層也相對破碎，有許多錯距數公尺的斷層。

東埔蚋溪初鄉橋東側河床，初鄉斷層上盤桂竹林層逆衝於卓蘭層與階地堆積層之上（圖 A3；林啓文等，2008）。東埔蚋溪以南，並未發現斷層露頭，但斷層兩側地形有明顯差異，此因桂竹林層與卓蘭層或頭嵙山層的岩性有明顯差異。

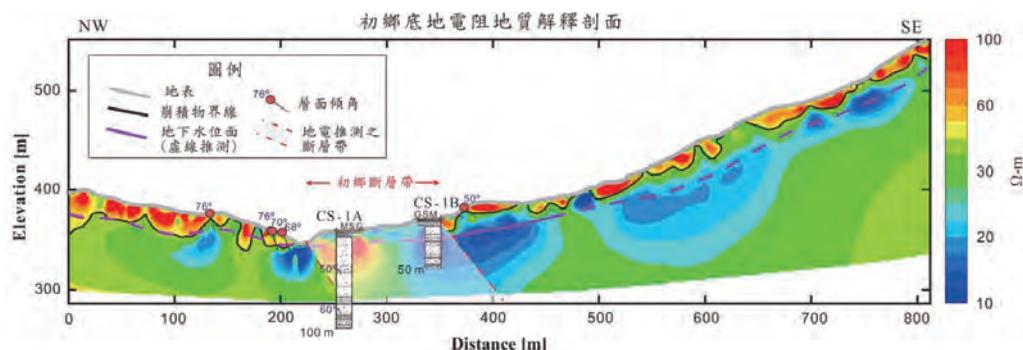
地下構造

依據野外岩層位態與構造特性所繪製的地下剖面顯示，在集集北方挑米坑剖面（圖 A1, AA' 剖面），斷層下盤為平緩向東南傾斜的頭嵙山層；而緊鄰斷層上盤，由岩層位態研判可能存在一開放背斜，背斜可能向西南延伸至濁水溪剖面。濁水溪剖面（圖 A1, BB' 剖面），斷層下盤為卓蘭層構成同斜構造，上盤為寬數

十公尺的斷層帶，緊鄰斷層帶東側出露頂溪州背斜，集集攔河堰以東為呈同斜構造的卓蘭層。東埔蚋溪剖面（圖 A1，CC'剖面），斷層上盤依序出露桂竹林層、錦水頁岩與卓蘭層而呈同斜構造，斷層下盤出露卓蘭層，由岩層位態研判有小波長褶皺與小型斷層。



圖A3 東埔蚋溪初鄉斷層露頭。斷層上盤（左側）為桂竹林層砂頁岩互層，斷層逆衝於階地礫石層之上。右圖為近拍。



圖A4 地電阻地質剖面解釋圖。地電阻測線配合CS-1A與CS-1B兩口鑽井之解釋圖。摘自黃文正等（2019）。

淺部地下構造，在東埔蚋溪北方初鄉底地區露頭不佳，因此進行一組地電阻測線進行探勘。施測結果顯示電性變化位置約位於溪谷附近，搭配初鄉 1A 的鑽井岩心於深度 67-100 公尺，同樣是以高角度傾斜的砂岩為主，推測初鄉斷層地表位置約位於溪谷。

斷層活動特性

初鄉斷層長期滑移速率的評估，採用斷層上下盤垂直抬升量與斷層傾角，以及

錯移的地形面或沉積物。Chen *et al.* (2003) 採集東埔蚋溪河階地沉積物碳標本，定年結果為 $13,585 \pm 265$ cal BP，這是目前為止初鄉斷層錯移最年輕沉積物的年代。Simoes *et al.* (2007b) 針對東埔蚋溪進行階地調查，其評估斷層滑移速率的方式採截切階地的底岩高差 28 ± 11 公尺來計算，採用斷層傾角 56 度（與層面平行），由此計算斷層滑移量為 34 ± 13 m，平均滑移速率為 2.5 ± 1.1 mm/yr。黃文正等 (2019) 採用的初鄉斷層相同的斷層傾角與階地沉積物年代，但以相同階地表面作為上下盤高差對比，推估斷層垂直抬升量 85 ± 7 m，計算出斷層滑移量為 102 ± 9 m，推估長期滑移速率約為 7.5 mm/yr。換言之，初鄉斷層的長期滑移速率可能為 2.5-7.5mm/yr。

總結與評估

初鄉斷層北段，由中寮鄉廣興向南延伸，經濁水溪向南延伸，在竹山附近併入車籠埔斷層。廣興以北斷層為推測，無法確認其是否連結雙冬斷層。初鄉斷層截切年代距今 13,585yr 的階地堆積物，列為第二類活動斷層。

附錄二 口宵里斷層

劉彥求 林啓文 周稟珊

口宵里斷層（鳥居敬造，1932），呈北北東走向，為逆斷層，斷層面向西傾斜。斷層北起臺南市楠西區，經玉井至左鎮附近，長約 21 公里。斷層截切年代 $12,670 \pm 40$ yr BP 階地堆積層，研判堆積層沉積後有 2 次事件，屬於第二類活動斷層。口宵里斷層為烏山頭斷層的背衝斷層（backthrust），均位於變動速率相對較高區域，推測烏山頭斷層可能也屬於活動斷層，惟仍需要進一步的岩層證據。

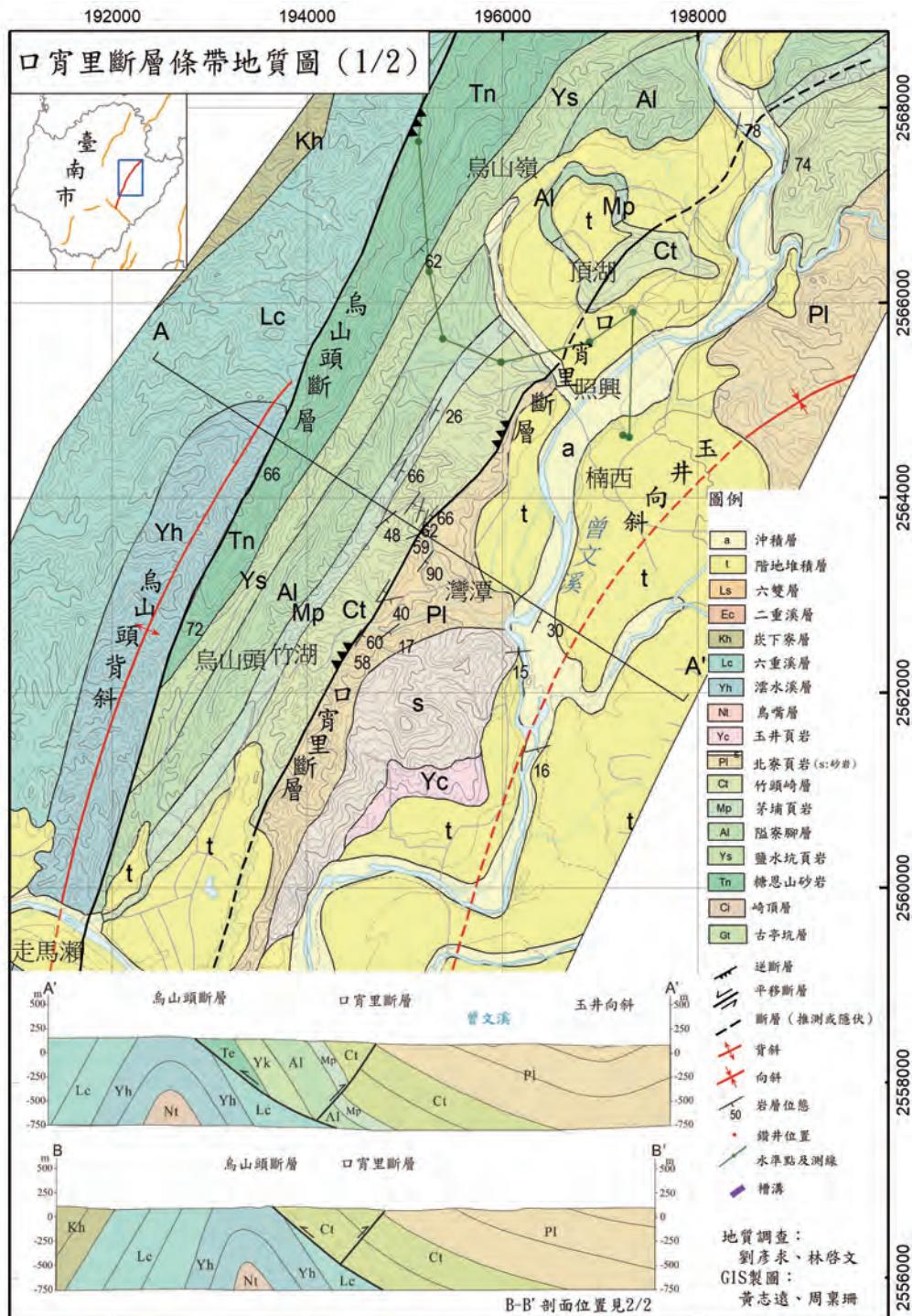
地形地質特性

口宵里斷層位於臺灣西南部玉井盆地西側，盆地呈現南北狹長的舟形，東西兩側分別以竹頭崎斷層、木柵斷層與烏山頭斷層所抬升的山脈為界，中央低凹處為玉井向斜。曾文溪主流由北而南從盆地中央蜿蜒流過，主要支流後堀溪在玉井以西匯入主流，在走馬瀨附近轉向西北流而穿出盆地。本區河道兩側有發達河階，基岩上覆厚度 2-4 公尺階地堆積層，玉井盆地西側部分階地為口宵里斷層錯移而形成線狀崖。

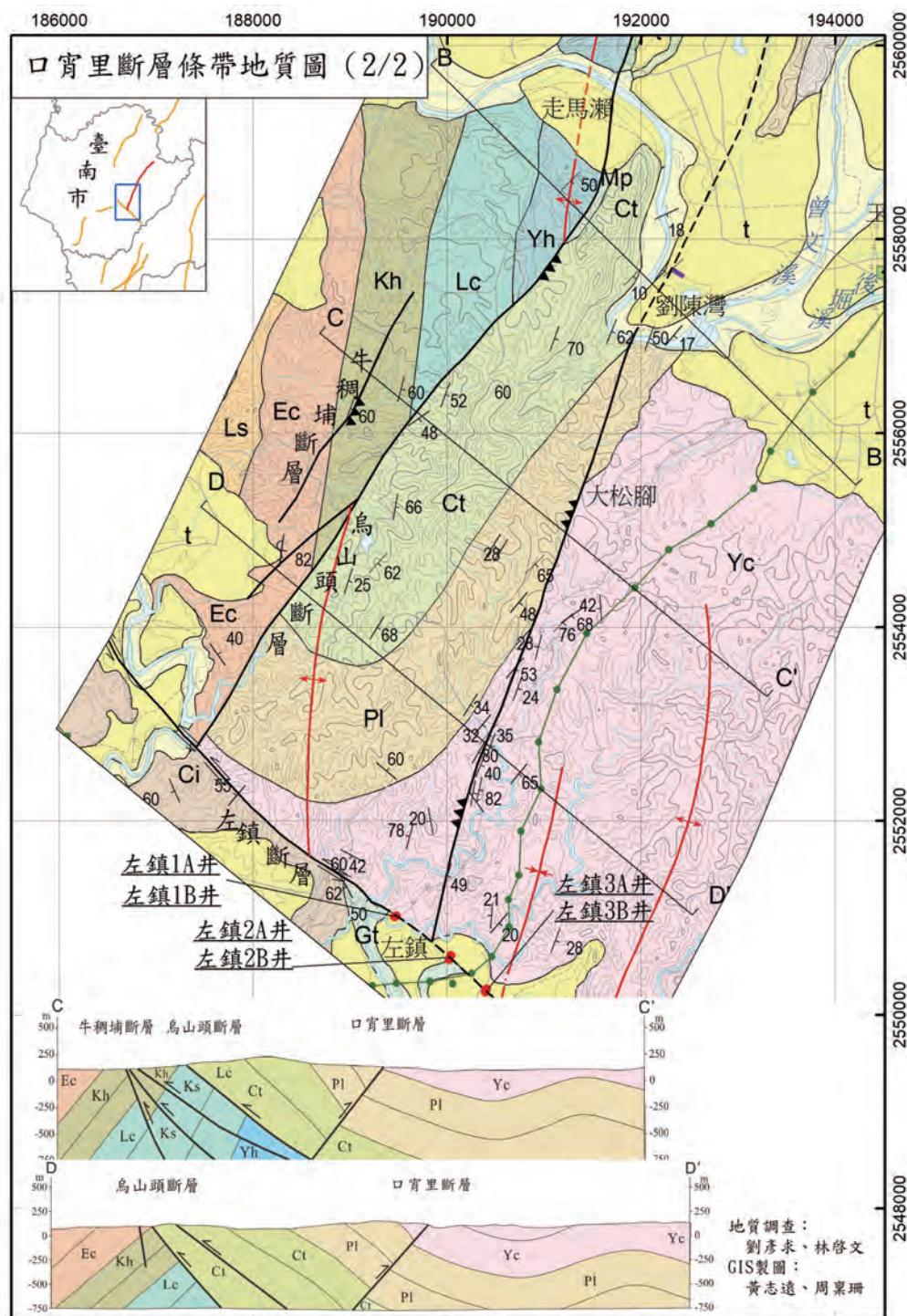
玉井地區，以曾文溪與其支流後堀溪為界，南側出露較多厚層泥岩，以北地區泥岩夾厚層砂岩的比例逐漸增加，參考新化圖幅（何信昌，2005）的地層劃分，口宵里斷層上盤出露竹頭崎層與北寮頁岩，下盤出露北寮頁岩與玉井頁岩，以及上覆階地堆積層。

斷層特性

由野外出露與斷層特性，口宵里斷層分為三段敘述：灣潭以北、灣潭至劉陳灣，以及劉陳灣至左鎮。灣潭以北：斷層沿線多階地，部分高位階面留存線狀崖，斷續延伸至曾文二號橋；橋南側岩層呈膝折形褶曲，西側為向東傾斜 60-70 度岩層，線狀崖東側為向東傾斜 10-30 度。野外調查斷層僅延伸至曾文二號橋，以北區域因缺乏露頭無法確認斷層是否繼續延伸或已經尖滅。



圖B1 口宵里斷層條帶地質圖 (1/2)。原圖比例尺為1/25,000。修改自何信昌等 (2005)。



圖B1 (續)口宵里斷層條帶地質圖(2/2)。原圖比例尺為1/25,000。修改自何信昌等(2005)。

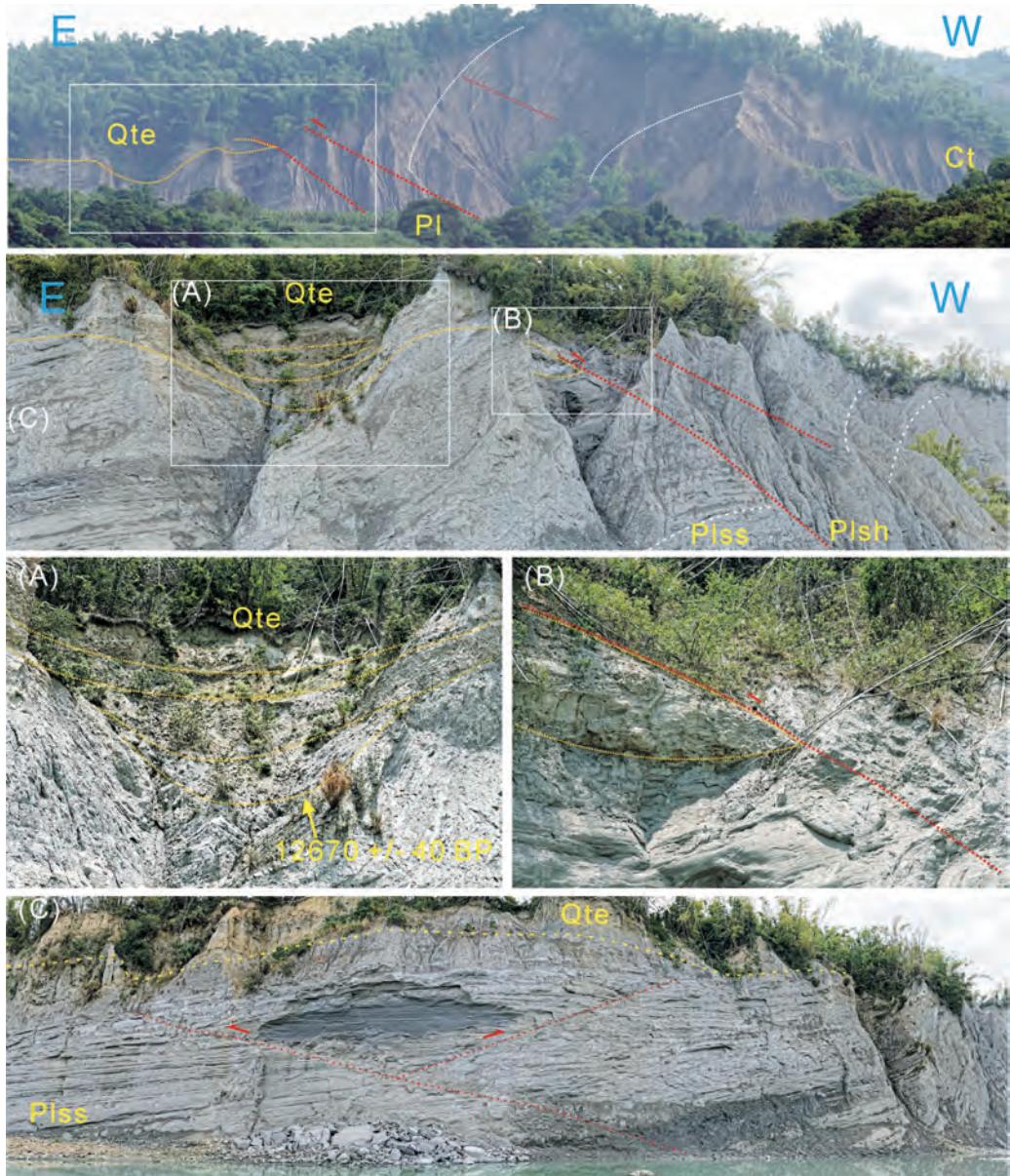
灣潭至劉陳灣：灣潭地區小溪溝的露頭有一明顯界面，西側為厚層泥岩偶夾薄層砂岩，層面位態 N43°E/71°E，西側有密集裂面，但未發現剪切構造；東側為中至厚層泥質砂岩偶夾薄層泥岩，層面位態 N5°E/23°E；此界面可能為斷層地表延伸。劉陳灣出露約 1 公里寬連續剖面，上盤厚層砂頁岩互層屬於竹頭崎層，呈高角度向東傾斜甚至倒轉，向東逆衝至北寮頁岩與階地堆積層之上，斷層位態 N2°E/38°W；下盤階地礫石受斷層錯移並撓曲，礫石層底部定年 $12,670 \pm 40$ yr BP，研判可能有 2 次事件。

劉陳灣以南至左鎮：劉陳灣斷層崖向南延伸，崖高逐漸降低與河溝侵蝕，線狀崖特徵逐漸不明顯。貓兒干地區距離曾文溪河岸約 700 公尺，有一層面傾角驟變露頭（黃文正等，2019），露頭中斷層向西傾斜約 30°-40°，斷層東側出露厚層泥岩，剪裂帶西側出露薄層砂岩與頁岩互層。另一距曾文溪河岸約 1 公里處露頭，以空拍機追蹤可觀察一小型斷層，斷層兩側岩性為泥岩層夾薄砂岩層，斷層東側層面傾角較緩，西側層面傾角較陡，約為 50°-70° 向東傾斜。左鎮附近，僅呈現單斜與軸部的向西傾斜小型斷層，推測已尖滅。

地下構造

依據野外岩性、層態與構造特性繪製的地下剖面顯示，灣潭剖面（圖 B1，AA' 剖面），口宵里斷層上盤由糖恩山砂岩、鹽水坑頁岩、隘寮腳層、茅埔頁岩與竹頭崎層構成向東傾斜的同斜構造，斷層下盤為竹頭崎層與北寮頁岩構成玉井向斜的西翼。走馬瀨—劉陳剖面（圖 B1，BB' 剖面），斷層上盤為茅埔頁岩與竹頭崎層向東傾斜構成同斜構造，斷層下盤為竹頭崎層與北寮頁岩向東緩傾斜；斷層兩側的傾角有明顯差異，曾文溪岸劉陳灣可以明顯看出斷層帶與岩層傾角的變化。大松腳剖面（圖 B1，CC' 剖面），斷層上盤為竹頭崎層與北寮頁岩構成向東傾斜的同斜構造，斷層下盤為竹頭崎層與北寮頁岩構成同斜構造；玉井以南，北寮頁岩與玉井頁岩不容易區分，以北地區兩地層之間出露砂岩透鏡體—鏡面砂岩。牛稠埔—莿桐腳剖面（圖 B1，DD' 剖面），斷層上盤竹頭崎層與北寮頁岩向東南傾斜構成同斜，斷層下盤北寮頁岩與玉井頁岩中有許多褶皺構造。

口宵里斷層可能為其西側烏山頭斷層的背衝斷層，圖 B1 的各個剖面可以發現兩條斷層的距離 1-3 公里。由地層分布與層態可以發現烏山頭斷層有幾個特性：(1) 劉陳灣剖面（圖 B1，BB'），口宵里斷層的最大斷距可能在該剖面，且可能是斷層最早發生之處，然後向兩側逐漸擴展，斷距也逐漸減小。(2) 烏山頭斷層的滑動面，在北方可能是糖恩山砂岩與長枝坑層之間，劉陳灣以南，滑動面可能在茅埔頁岩。目前為止，尚未找到烏山頭斷層在過去 10 萬年內活動的直接岩層證據與定年資料。



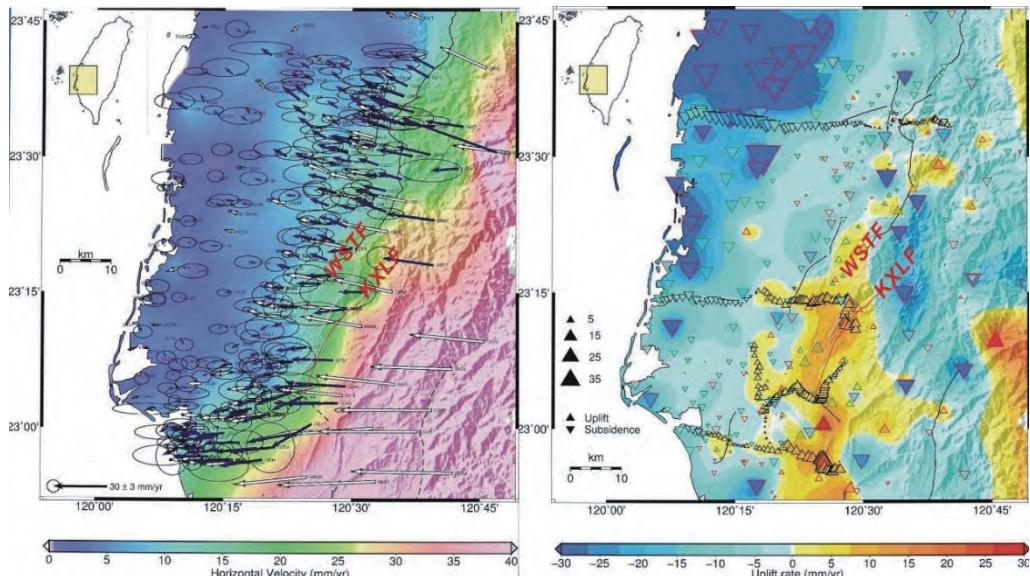
圖B2 劉陳灣剖面口宵里斷層（圖中紅色虛線）。上：竹頭崎層（Ct）向東逆衝至北寮頁岩（Pl）與階地堆積物（Qte）之上。中：斷層下盤階地堆積層遭截切（B），並受拖曳呈向斜形撓曲（C），下方為（B）、（C）近拍。下：斷層東側（下盤）為向東緩傾斜鏡面砂岩（Plss），斷層帶內為剪裂的北寮頁岩（Plsh）。

斷層活動特性

Hsieh and Knuepfer (2002) 以曾文溪沿岸河階定年估計，口宵里斷層—烏山頭斷

層之間呈現背斜形式抬升，速率為 10mm/yr。依據劉陳灣錯移階地年代 12,630-12,710 yr cal BP 計算，口宵里斷層垂直抬升速率小於 3.2mm/yr，長期滑移速率小於 4.6 mm/yr。依據黃文正等（2019）在灣潭階地採集標本年代 4,219-3,005 yr cal BP，若該階面為口宵里斷層所錯移，則斷層的垂直抬升速率小於 9.5 mm/yr，長期滑移速率小於 13.9 mm/yr。

2002 年至 2019 年全球衛星定位系統（GPS）相對澎湖白沙（S01R）結果（圖 B3；景國恩等，2020），跨越口宵里斷層—烏山頭斷層的水平速度場約 1-3mm/yr 速度差；臺南山區平均抬升速率約 7 mm/yr，口宵里斷層—烏山頭斷層沿線附近抬升速率 5-10mm/yr。



圖B3 左：嘉南地區相對澎湖白沙站（S01R）GPS水平方向速度場。右：嘉南地區相對澎湖白沙站垂直方向速度場，彩色色階為2002-2019年資料所解算之速度場分布色階圖。KXLF為口宵里斷層、WSTF為烏山頭斷層。摘自景國恩等（2020）。

總結與評估

口宵里斷層，由曾文二號橋向南延伸至左鎮區東平，長約 21 公里，曾文二號橋以北尚缺乏斷層延伸的證據。曾文溪劉陳灣斷層逆衝至階地礫石之上，研判 $12,670 \pm 40$ yr BP 階地堆積後可能有 2 次事件，口宵里斷層屬於第二類活動斷層。

口宵里斷層屬於烏山頭斷層上盤的背衝斷層，烏山頭斷層也可能屬於活動斷層，惟須進一步的岩層證據。

附錄三 車瓜林斷層

劉彥求 林啓文

車瓜林斷層，為逆移斷層，由高雄市內門區向南延伸至高雄市橋頭區，北段呈北東走向，南段轉為東北東走向，長約 25 公里。中油公司台探總處（1989）將大廈亭山以南的本斷層，連接西北走向的龍船斷層，但是此段在兩側地層、斷層特性與延伸位置與龍船斷層均有所差異，林啓文等（2012）命名為車瓜林斷層，以區別兩者。由線狀崖排鑽取樣定年結果，車瓜林斷層距今 7,500 年前內曾經活動過，屬於第一類活動斷層。

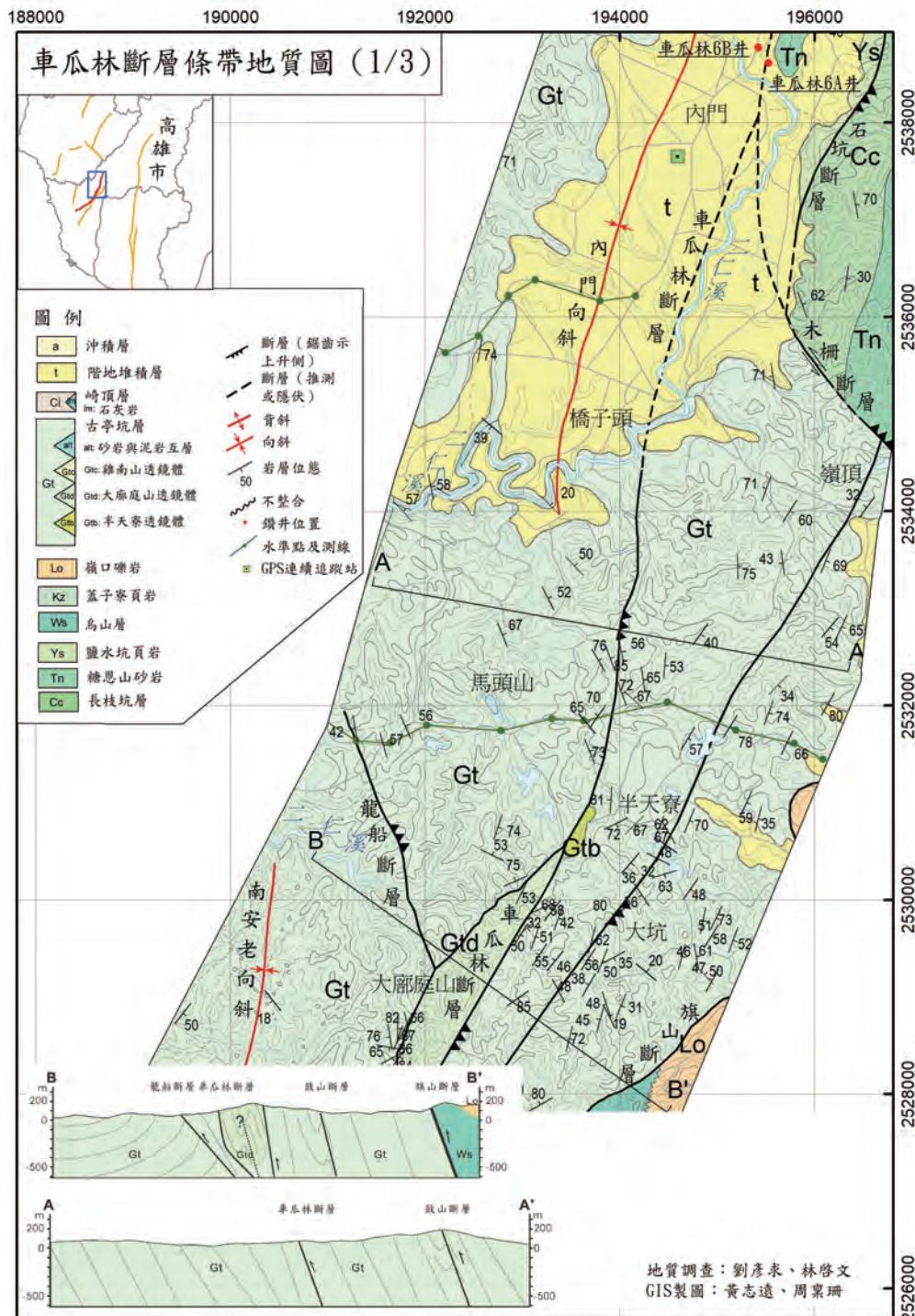
地形與地質特性

本區位於西部麓山帶南端，沿線地形以旗山斷層與木柵斷層為界，旗山斷層上盤（東側）為烏山層堅硬砂岩構成呈北北東走向的山脊，顯著突出於四周；木柵斷層出露長枝坑層與糖恩山層，構成東北部呈南北走向的山脊；斷層以西多以泥岩為主，多位在二仁溪河谷，其間有大廈亭山、馬頭山、雞南山與雞冠山等砂岩或石灰岩透鏡體構成的山脊。內門至崎溜地區未發現明顯線狀崖，崎溜以南至燕巢市區外緣有一東北走向線狀崖，可追跡約 2 公里。燕巢滾水坪以西進入沖積平原，地勢平緩。

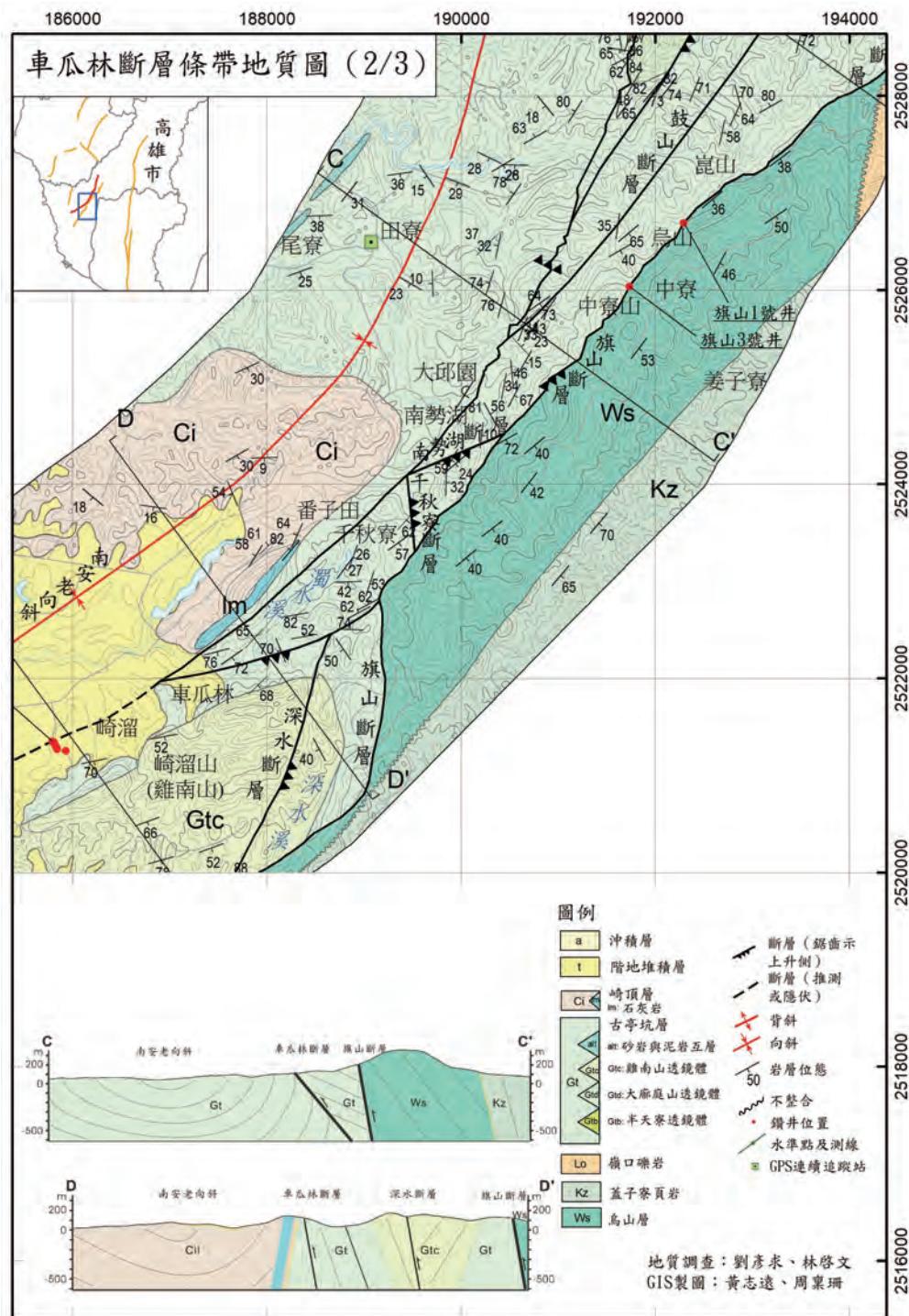
高雄地區出露厚層泥岩為主，參考旗山圖幅（林啓文，2013）的地層劃分，木柵斷層上盤出露長枝坑層、糖恩山層與鹽水坑頁岩等地層，旗山斷層上盤出露烏山層、蓋仔寮頁岩與南勢崙砂岩等地層。烏山層為厚層灰色細粒砂岩與暗色頁岩互層以及砂質頁岩，夾砂頁岩薄互層。木柵斷層與旗山斷層下盤主要出露古亭坑層，以厚層泥岩偶夾薄層砂岩至暗灰色泥岩為主，局部夾石灰岩體，時代為中新世晚期至更新世。

構造特性

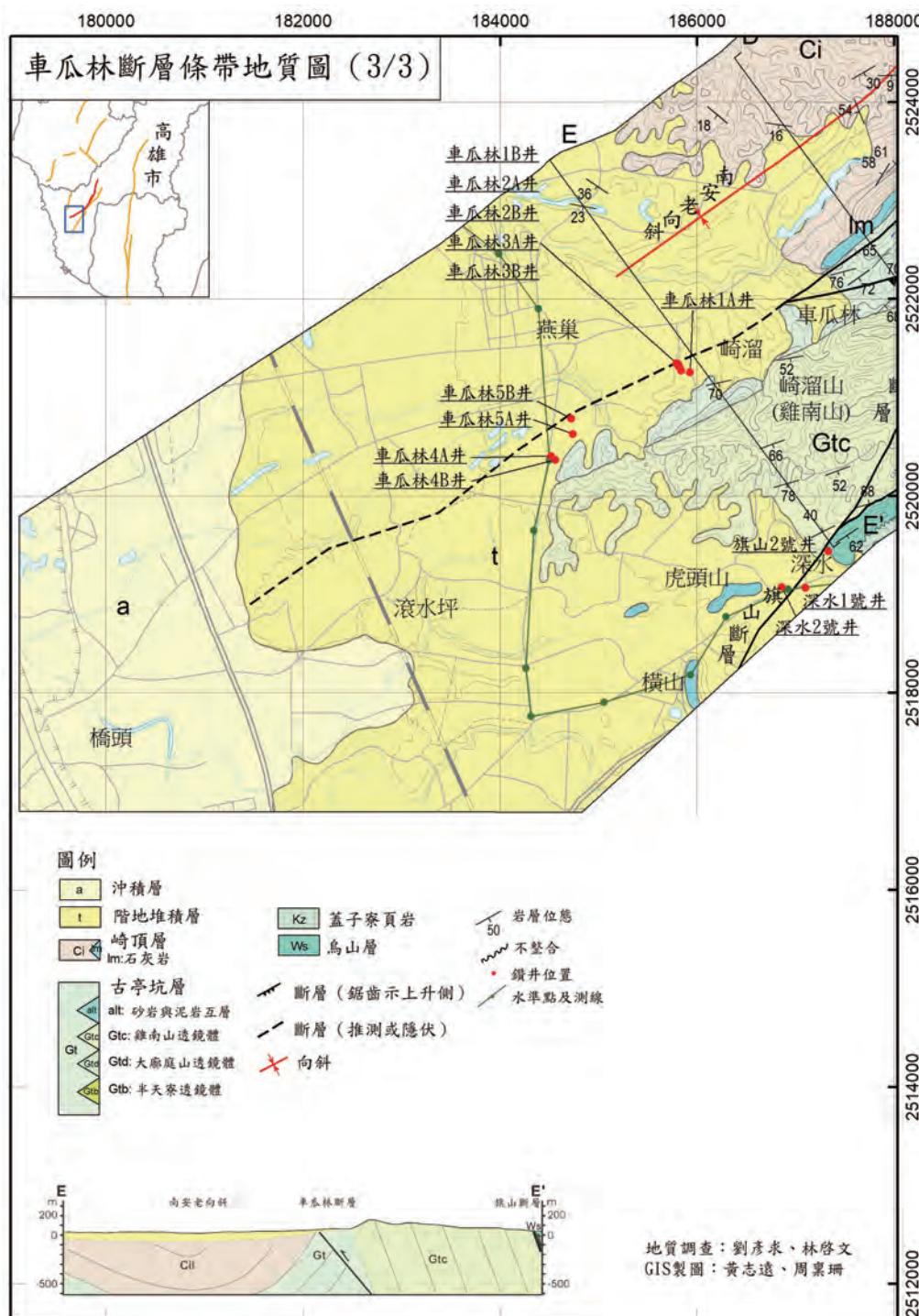
車瓜林斷層，有多處良好露頭可以追蹤，斷層帶寬約數十公尺至百餘公尺，常見數條髮辮狀斷層泥帶交織成較寬的斷層帶。由野外出露與斷層特性分為三段簡介：大廈亭山及以北區域、大廈亭山以南至車瓜林，以及車瓜林以南至橋頭。



圖C1 車瓜林斷層條帶地質圖 (1/3)。原圖比例尺為1/25,000。



圖C1 (續) 車瓜林斷層條帶地質圖 (2/3)。原圖比例尺為1/25,000。



圖C1 (續) 車瓜林斷層條帶地質圖 (3/3)。原圖比例尺為1/25,000。

大廈亭山及以北區域：大廈亭山呈現一突出於泥岩、呈北北東走向的山脊，屬於古亭坑層的透鏡體，西側出露連續的車瓜林斷層露頭。上盤為大廈亭山透鏡體，下盤為泥岩，可確認斷層向北延伸至台 28 線北側。橋子頭以北，大多為階地堆積層所掩覆，斷層可能在內門尖滅，無法得知是否連接木柵斷層。

大廈亭山以南至車瓜林區域：斷層出露連續，地表調查配合坑空拍影像比對，可以接近並追蹤斷層帶。此區斷層帶寬約 130 公尺，斷層東側（上盤）為中至高角度向東傾斜的厚層泥岩夾薄至中層砂岩；斷層西側以厚層泥岩為主，近斷層處岩層呈高角度向西傾斜並局部倒轉，向西遠離斷層帶岩層逐漸變緩，再轉為向東傾斜，斷層下盤形成一東翼陡而西翼緩的南安老向斜。

車瓜林以南至橋頭：線狀崖可追蹤至滾水坪附近，高速鐵路以西因沖積層覆蓋，尚無法得知是否繼續向西延伸或已經尖滅。由鑽探岩心定年結果，車瓜林斷層在距今 7,500 年內曾經活動過，而推測 25,000 年前至 10,500 年前期間，斷層可能有多次事件。



圖C2 車瓜林斷層露頭。A：高40線南側車瓜林斷層連續剖面，古亭坑層受擾動或剪裂，上盤有數條與主斷層平行的分支斷層，岩層傾角向東逐漸變緩（B），主斷層截切另一組更陡的向東傾斜斷層（C），下盤岩層向西高角度傾斜，並發育一組低角度向東或向南傾斜斷層帶，由數條厚約數十公分斷層泥構成。

地下構造

依據野外岩層位態與構造特性所繪製的地下剖面顯示，在馬頭山剖面（圖 C1，AA' 剖面），車瓜林斷層下盤與上盤均為高角度向東傾斜的古亭坑層，泥岩為主偶

夾薄層砂岩。大廊亭山剖面（圖 C1，BB' 剖面），緊鄰車瓜林斷層下盤為龍船斷層，其下盤為南安老向斜的東翼；在此剖面構成寬約 400 公尺斷層帶，帶內因壓縮作用形成褶皺構造，上盤向東至鼓山斷層之間，分布許多小型斷層。中寮山剖面（圖 C1，CC' 剖面），斷層下盤為南安老向斜西翼，岩層向西傾斜，上盤為向東傾斜的古亭坑層，再向南 700 公尺出露旗山斷層。車瓜林剖面（圖 C1，DD' 剖面），斷層下盤為南安老向斜西翼，岩層向西高角度傾斜，斷層上盤為高角度向東南傾斜的古亭坑層，與南方深水斷層之間有分布許多小型斷層。崎溜剖面（圖 C1，EE' 剖面），車瓜林斷層下盤為南安老向斜東翼，岩層向西呈中角度傾斜，斷層上盤古亭坑層岩層向東南呈高角度傾斜。

斷層活動特性

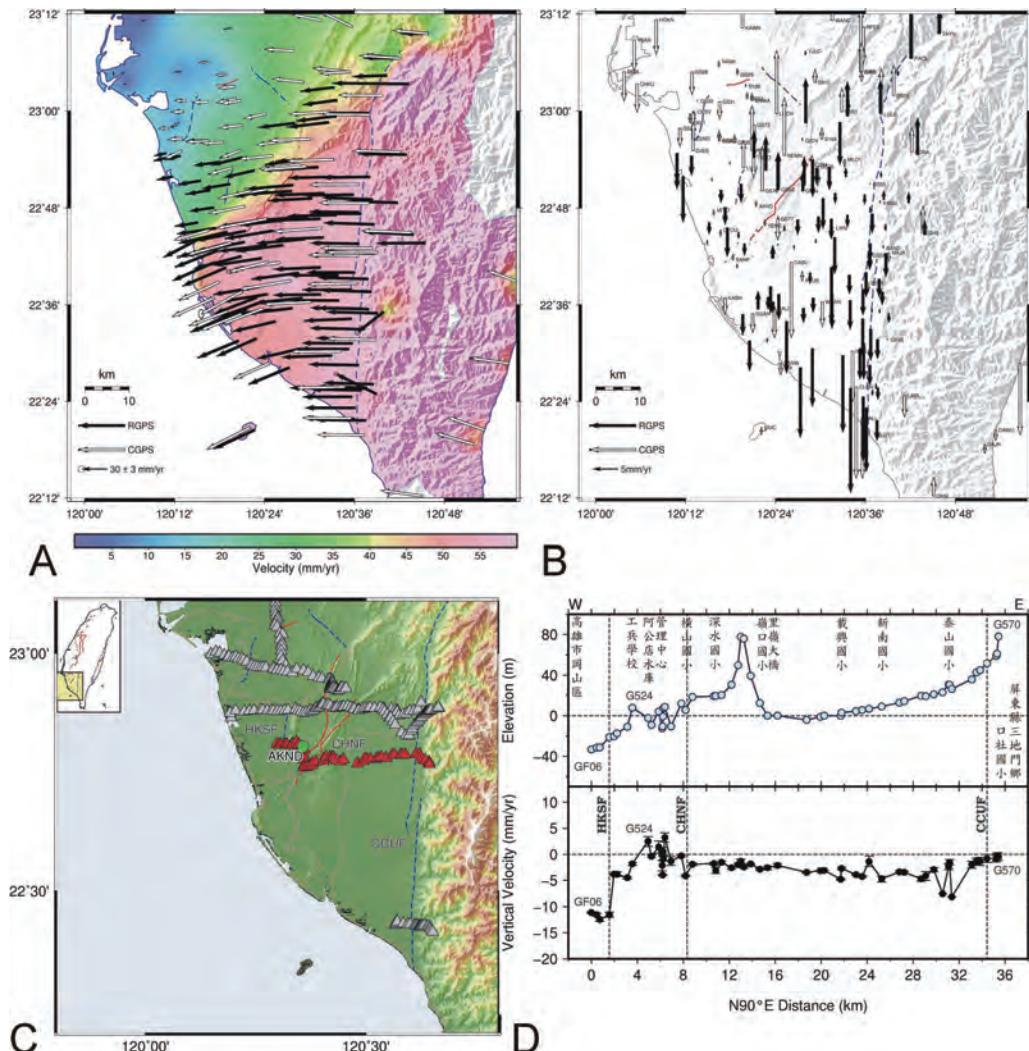
依據 2002-2016 年全球衛星定位系統(GPS)觀測本區相對於澎湖白沙(S01R)的位移分析結果（圖 C4；胡植慶等，2016），水平位移速率為 12.9-97.5mm/yr（圖 4A、B），跨越旗山斷層附近的速度場，由 50-60 mm/yr 降至小崙山斷層東側 40mm/yr，顯示旗山斷層與車瓜林斷層附近吸收 10-20 mm/yr 縮短量，並具右移分量。

台 22_岡山至安坡精密水準測線量測，橫跨小崙山斷層、車瓜林斷層、旗山斷層與潮州斷層等斷層，由 2004-2016 年間觀測結果（圖 4C、D），跨越小崙山斷層至旗山斷層之間有明顯抬升現象，約由 -12.5 mm/yr 至抬升 3.2 mm/yr；高屏地區垂直速度場在小崙山斷層、車瓜林斷層以及旗山斷層之間呈現抬升現象（胡植慶等，2016）。

總結與評估

車瓜林斷層，為逆移斷層，在南勢湖剖面以北約呈 N20°E 走向延伸至內門市區南側，由一個主斷層以及多個分支斷層組成的斷層帶，寬度約 30-130 公尺；燕巢以南，線形崖逐漸轉至 S60°W 走向延伸至橋頭東側。

由線狀崖排鑽取樣定年，車瓜林斷層距今 7,500 年以來曾經活動過，屬於第一類活動斷層。



圖C3 A：高屏地區相對於澎湖白沙站（S01R）GPS水平方向速度場，黑色箭號為2002-2016年移動站速度場，摘自胡植慶等（2016）。白色箭號為2002-2016年連續站速度場。B：為2002-2016年GPS垂直方向速度場，黑色箭號為2002-2016年移動站速度場，白色箭號為2002-2016年連續站速度場。C、D：台22_岡山至安坡測線水準高程變化圖，HKSF為小崗山斷層、CHNF為旗山斷層（接近車瓜林斷層）、CCUF為潮州斷層。