

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

利用地質剖面探討初鄉活動斷層構造特性

**Determination of Structural Characteristics of
the Chusiang Active Fault Using Geological
Cross-Sections**

研究生：張中威

Student: Chung-Wei Chang

指導教授：黃文正 博士

Advisor: Wen-Jeng Huang, Ph. D.

中華民國一百一十二年六月

June, 2023

國立中央大學圖書館學位論文授權書

填單日期：2025 / 8 / 1

2019.9 版

授權人姓名	張中威	學 號	110624003
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	利用地質剖面探討初鄉活動斷層構造特性	指導教授	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 2028 年 8 月 31 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 2028 年 8 月 31 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 2028 年 8 月 31 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：張中威

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。

國立中央大學博士班研究生

論文指導教授推薦書

應用地質研究所碩士班 學系/研究所 張中威 研
究生所提之論文 利用地質剖面探討初鄉活動斷層構
造特性 係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授 蔡文正 (簽章)

112年 6月 19日

112.06.19

國立中央大學碩士班研究生 論文口試委員審定書

應用地質研究所碩士班 學系/研究所 張中威 研究生
所提之論文 利用地質剖面探討初鄉活動斷層構造特性
經由委員會審議，認定符合碩士資格標準。

學位考試委員會召集人

林治子

委

員

林殷悅

陳文山

蕭文正

柯明

中 華 民 國

112 年

7 月

5 日

1120703

利用地質剖面探討初鄉活動斷層構造特性

中文摘要

台灣中部麓山帶的主要斷層系統是車籠埔—大尖山斷層系統，一系列的逆衝斷層被認為發育於一滑脫面，初鄉斷層位於車籠埔斷層與雙冬斷層之間，呈東北走向的活動斷層，西南側併入車籠埔斷層，東北側向雙冬斷層延伸。1999 年台灣中部的集集地震，車籠埔斷層沿線形成約 100 公里的地表破裂，根據同震地表 GPS 資料顯示，跨初鄉斷層的地表同震位移方向有顯著差異，然而未有報導指出初鄉斷層跡沿線有同震的地表變形。根據台灣機率式地震危害度分析，指出初鄉斷層在未來 50 年內有高達 37% 的機率發生規模 6 的地震，為了解初鄉斷層再活動風險，須建立初鄉斷層的三維構造幾何模型，然而，過往研究對於初鄉斷層的幾何形貌有所爭議，且在幾何上難與車籠埔斷層模型連接，無法完整解釋地表觀察到的現象，也無法解釋地層厚度在空間上的變化，因此，了解初鄉斷層與周圍構造之間的幾何關係及地層厚度變化對於地質模型至關重要。

本研究使用前人地質圖資，搭配地質鑽探與震測資料，參考前人的構造模型、集集地震同震 GPS 位移向量，建立五條地質剖面，並分析合理的區域構造推演。依據桂竹林層厚度的變化，認為集集地區地下存在一正斷層較為合理，且於桂竹林層沉積時有多次的活動，使桂竹林層沉積時於斷層上下盤有厚度上的差異；根據本研究地質剖面，初鄉斷層淺部呈高角度向東傾，深部漸緩，與車籠埔斷層相連接於同一滑脫面。

區域構造推演結果，滑脫面發育時受正斷層所影響，深度於濁水溪兩岸有所不同，進而影響逆衝斷層的發育，使濁水溪南、北岸的構造行為有所不同；初鄉斷層可能為大尖山斷層及雙冬斷層的連接型斜向斷層，作為兩者間

的空間調適，可能與大尖山斷層有相似的斷層性質，為具有左移性質的逆斷層。

關鍵詞：初鄉斷層、活動斷層、地震地質、平衡剖面

Determination of Structural Characteristics of the Chusiang Active Fault Using Geological Cross-Sections

Abstract

The main fault system in the foothills of central Taiwan is the Chelungpu-Tachien Shan Fault system, a series of thrust faults believed to develop along a detachment. The Chusiang Fault is located between the Chelungpu Fault and the Shuangtung Fault, with northeast-oriented. It merges southwestward into the Chelungpu Fault and extends northeastward toward the Shuangtung Fault. The 1999 Chi-Chi earthquake in central Taiwan caused surface ruptures along the Chelungpu Fault, spanning approximately 100 kilometers. According to coseismic GPS data, there were significant differences in the coseismic displacement directions across the Chusiang Fault. However, there have been no reports indicating coseismic surface deformation along the Chusiang Fault trace. Based on Taiwan's probabilistic seismic hazard analysis, the Chusiang Fault has up to a 37% probability of experiencing a magnitude 6 earthquake within the next 50 years. To understand the reactivation risk of the Chusiang Fault, it's essential to establish a three-dimensional geometric model of its structure. However, previous research has disputed the geometric morphology of the Chusiang Fault and struggled to connect it geometrically with the Chelungpu Fault model, thus failing to fully explain observed surface phenomena or variations in spatial layer thickness. Therefore, understanding the geometric relationship between the Chusiang Fault and surrounding structures, as well as variations in layer thickness,

is crucial for the geological model.

This study employs previous geological map data, alongside geological drilling and seismic data, referencing previous structural models, coseismic GPS displacement vectors from the Chi-Chi earthquake, to establish five geological cross-sections and create a reasonable regional structural inference. Considering the thickness variation of the Kueichoulin Formation, it is inferred that a blind normal fault exists underground in the Chi-Chi area, which was active during the deposition of the Kueichoulin Formation, leading to differences in thickness between the hanging wall and footwall during the deposition of the Kueichoulin Formation.

Based on the geological cross-sections in this study, the shallow segment of the Chusiang Fault dips steeply to the east while gradually flattening at depth, connecting to the Chelungpu Fault along the same detachment. According to the regional structural inference, the development of the detachment is influenced by the blind normal fault, with varying depths along both sides of the Zhuoshui River. This subsequently affects the development of thrust faults, resulting in differing structural behaviors on the north and south banks of the Zhuoshui River. The Chusiang Fault may serve as a connecting splay between the Tachienshan Fault and the Shuangtung Fault, acting as spatial adjustment between the two faults and possibly sharing similar faulting characteristics with the Tachienshan Fault, exhibiting a left-lateral thrust fault.

Keywords: Chusiang fault, geological model, cross-section

目錄

中文摘要	i
英文摘要	iii
目錄	vi
圖目錄	ix
表目錄	xi
第 1 章 緒論	1
1-1 前言	1
1-2 研究動機與目的	2
第 2 章 區域概況	4
2-1 地形	4
2-2 地層	9
2-3 地質構造	18
2-3-1 斷層	18
2-3-2 褶皺	21
第 3 章 文獻回顧	31
3-1 初鄉斷層	31
3-1-1 前人野外調查及斷層活動性	31
3-1-2 地球物理方法相關研究	33
3-2 前人地質資料與構造地質剖面解釋	36
3-2-1 地質鑽探	36
3-2-2 前人濁水溪震測剖面解釋	39
3-2-3 前人區域構造地質剖面模型	42
第 4 章 研究方法與資料	49
4-1 野外地質調查	49
4-2 生物地層鑑定	49
4-2-1 生物地層定年	49
4-2-2 野外岩樣採集	50
4-3 構造地質剖面	52
4-3-1 彙整地質資料	52
4-3-2 剖面位置與制約	59
4-3-3 剖面製圖	74
4-3-4 剖面回復	75
第 5 章 研究結果	77

5-1	野外調查結果.....	77
5-2	生物地層鑑定.....	85
5-2	構造地質剖面.....	88
5-2-1	剖面 AA'	88
5-2-2	剖面 BB'	94
5-2-3	剖面 CC'	98
5-2-4	剖面 DD'	104
5-2-5	剖面 EE'	108
5-2-6	構造地質剖面回復	114
第 6 章	討論.....	118
6-1	地層厚度變化的意涵.....	118
6-2	集集地區地下的正斷層與斷坡構造	119
6-3	車籠埔斷層以東的地下構造.....	121
6-4	構造演化.....	124
6-4-1	初鄉斷層與區域構造關係	124
6-4-2	構造演化	126
第 7 章	結論與未來展望.....	132
7-1	結論.....	132
7-2	未來展望.....	133
	參考文獻.....	134

圖目錄

圖 2-1 初鄉斷層沿線地形圖。	6
圖 2-2 濁水溪以南鹿谷鄉地形分析。	7
圖 2-3 筍子林尾地形判釋。	8
圖 2-4 本研究區域地質圖。	12
圖 2-5 竹山一號井井錄。	14
圖 2-6 錦水頁岩頂部深度。	15
圖 2-7 濁水溪河床路線地質圖及構造地質剖面圖。	16
圖 2-8 漸新世至中新世沉積物等厚圖。	17
圖 2-9 YUE ET AL. (2005)構造地質剖面。	23
圖 2-10 大尖山斷層地形判釋。	24
圖 2-11 桶頭震測剖面解釋圖。	25
圖 2-12 林頂茶園地表變形。	25
圖 2-13 八卦山震測測線剖面。	26
圖 2-14 HUNG AND SUPPE (2002)沿濁水溪的震測剖面。	27
圖 2-15 內林震測剖面。	28
圖 2-16 (A)平行鹿寮斷層走向的震測剖面。(B)震源剖面垂直鹿寮斷層走向 方向。	29
圖 2-17 沿濁水溪南岸的震測剖面 A 及經過湖本的震測剖面 C。	30
圖 3-1 濁水溪沿線之震測剖面。	34
圖 3-2 集集攔河堰下游北岸跨初鄉斷層(A 斷層)的地電阻剖面。	34
圖 3-3 初鄉底推測地下構造地質剖面。	35
圖 3-4 (A)WANG ET AL. (2002)對震測剖面 I 的解釋。(B)HUNG AND SUPPE (2002)對震測剖面 I 的解釋。(C)LEE AND SHIH (2011)對震測剖面 I 的解 釋。	41
圖 3-5 前人構造地質剖面與剖面資料位置圖。	45
圖 3-6 (A)剖面 AA'。(B)剖面 BB'。(C)剖面 BB'剖面回復。	46
圖 3-7 (A)WANG ET AL. (2000)修改自 SUPPE (1980)的薄皮構造模型。(B)、 (C)BROWN ET AL. (2012)構造剖面。	47
圖 3-8 YU ET AL. (2005) YY'剖面。	48
圖 4-1 超微化石岩樣採集點分布圖。	51
圖 4-2 1999 年集集地震及其餘震震源機制解。	53
圖 4-3 台灣中部鑽井位置圖。	56
圖 4-6 剖面 AA'資料彙整。	64

圖 4-7 剖面 BB'資料彙整。	66
圖 4-8 剖面 CC'資料彙整。	68
圖 4-9 剖面 DD'資料彙整。	70
圖 4-10 剖面 EE'資料彙整。	72
圖 4-11 急折法繪製地質剖面步驟示意圖。	76
圖 4-12 構造剖面平衡示意圖。	76
圖 5-1 濁水溪南岸車籠埔斷層露頭。	78
圖 5-2 濁水溪沿岸露頭出露狀況。	79
圖 5-3 濁水溪兩岸初鄉斷層露頭。	80
圖 5-4 濁水溪南岸初鄉斷層露頭。	81
圖 5-5 東埔蚋溪調查露頭位置。	82
圖 5-6 初鄉橋東側露頭。	83
圖 5-7 東埔蚋溪初鄉斷層露頭現況。	83
圖 5-8 雙溪底露頭。	84
圖 5-9 超微化石岩樣採集點分布圖及岩樣超微化石鑑定結果。	87
圖 5-10 本研究繪製之剖面 AA'構造地質剖面圖。	90
圖 5-11 本研究繪製之剖面 AA'構造地質剖面圖的地層傾角、層厚、斷層傾角及斷層錯距。	92
圖 5-12 本研究繪製之剖面 BB'構造地質剖面圖。	96
圖 5-13 本研究繪製之剖面 CC'構造地質剖面圖。	100
圖 5-14 本研究繪製之剖面 CC'構造地質剖面的地層傾角、層厚、斷層傾角及斷層錯距。與斷層平行	102
圖 5-15 本研究繪製之剖面 DD'構造地質剖面圖。	106
圖 5-16 本研究繪製之剖面 EE'構造地質剖面圖。	110
圖 5-17 本研究繪製之剖面 EE'構造地質剖面的地層傾角、層厚、斷層傾角及斷層錯距。	112
圖 5-18 本研究構造地質剖面回復圖。	112
圖 6-1 新第三紀台灣前陸盆地形成及沉積形貌演化示意圖。	122
圖 6-2 桂竹林層增厚示意圖。	122
圖 6-3 (A)1999 集集地震後量測地表斷層崖高度。(B)1999 集集地震破裂時間—空間分布每秒瞬時錯動圖。(C)集集地震孕震區構造形貌。	123
圖 6-4 逆衝斷層系統中的分支斷層型態。	125
圖 6-6 構造演化圖(A)至(E)。	128
圖 6-7 構造演化圖(F)至(I)。	130

表目錄

表 2-1 研究區域地層對照表。	16
表 3-1 鑽井地層厚度表。	38
表 4-1 臺灣中部、南部及東部中生代與新生代地層超微化石基準面、化石帶及指示化石分佈。	50
表 4-2 1999 年集集地震同震 GPS 同震位移向量。	54
表 4-3 由三點法所求得的各地層邊界位態。	57
表 4-4 剖面中各地層下邊界的趨勢角度。	57
表 4-5 本研究各剖面節點座標。	74

第1章 緒論

1-1 前言

初鄉斷層(劉桓吉與李錦發, 1998; 林啟文等, 2019)位於台灣中部西部麓山帶車籠埔斷層與雙冬斷層之間, 呈東北走向的活動斷層, 北由中寮鄉廣興, 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; 廣興以北斷層為推測, 無法確認是否連接雙冬斷層, 斷層跡長約 20 公里(林啟文等, 2021)。根據初鄉斷層截切年代距今 13,585yr 的東埔蚋溪更新世階地堆積物(Chen *et al.*, 2003), 2022 年經濟部中央地質調查所將初鄉斷層列為第二類活動斷層, 經濟部中央地質調查所定義的活動斷層為過去 10 萬年內活動過, 且未來還有再活動可能者(林啟文等, 2021), 地震災害鏈風險評估及管理研究中心於 2020 發表「台灣機率式地震危害度分析」(Chen *et al.*, 2020), 估計初鄉斷層在未來 50 年的發震機率為 0.37, 為台灣陸域孕震構造中第三高的發震機率, 可能產生規模 6.0 的地震。

為了解初鄉斷層的活動性與斷層特性, 須先建立初鄉斷層的三維幾何形貌, 以及了解區域的構造關係, 為達此目的, 本研究將利用構造地質剖面分析, 推估合理的構造演化。

1-2 研究動機與目的

前人研究對於車籠埔斷層上盤濁水溪是否出露錦水頁岩有所爭議：經濟部中央地質調查所(2004)南投地質圖幅中，車籠埔斷層上盤出露卓蘭層；中國石油公司(1982)臺中地質圖中，車籠埔斷層上盤則出露錦水頁岩，因此本研究將透過野外調查、蒐集前人地質圖資料，於濁水溪河床露頭進行生物地層定年鑑定，確認出露岩層所屬的地層，以了解車籠埔斷層於濁水溪南岸所截切的岩層。

台灣中部麓山帶的主要斷層系統是車籠埔—大尖山斷層系統。這個斷層系統大致以濁水溪為界，而初鄉斷層正位於這個界線中。為了了解斷層的活動情況，我們需要先建立區域的構造模型，過去的研究中使用了典型的斷坡—斷坪(Ramp-flat)構造模型，分別建立了濁水溪以北和以南的構造模型，但這些模型無法完整解釋地表觀察到的現象，也無法解釋地層厚度在空間上的變化，本研究將根據前人的地質圖和震測資料，建立連續的東西向構造地質剖面，以探討初鄉斷層的幾何形態和構造解釋，同時也研究斷層的幾何形態如何隨著空間的變化而改變地層。

1999 年台灣中部的集集地震，車籠埔斷層沿線形成約 100 公里的地表破裂，根據同震地表 GPS 資料顯示，跨初鄉斷層的同震位移方向有顯著差異，然而未有報導指出初鄉斷層跡沿線有同震的地表變形(李元希等，2002；林啟文等，2000)，為了解初鄉斷層，參考前人區域構造演化，利用野外調查，蒐集大地測量資料作為參考，建立區域構造演化。

本研究的目的是有以下三點：

1. 收集過往研究地質圖資料、透過野外調查與記錄，於濁水溪河床進行生物地層定年，以了解車籠埔斷層於濁水溪南岸所截切的地層。
2. 結合野外地質調查，及前人地質圖、地質鑽探及震測資料於初鄉斷

層沿線繪製構造地質剖面，觀察初鄉斷層空間中的變化，探討初鄉斷層與鄰近構造的關係；透過回復剖面，觀察地層厚度在空間上的變化趨勢。

3. 參考前人區域構造演化，建立可能的區域構造演化歷史。

第2章 區域概況

本章節針對初鄉斷層及其鄰近地區的地形、地層及構造進行介紹。初鄉斷層位於台灣中部濁水溪一帶，斷層上、下盤在不同地區所出露的地層有所分別：後寮溪以北，上、下盤皆出露頭嵙山層；後寮溪至濁水溪以北，上、下盤分別出露卓蘭層與頭嵙山層；濁水溪至東埔蚋溪，上、下盤皆出露卓蘭層；東埔蚋溪以南，上盤出露桂竹林層，斷層下盤為卓蘭層(林啟文等, 2019; 林啟文等, 2021)。

2-1 地形

地形與河階地部分參考黃文正等(2019)(圖 2-1)，初鄉斷層沿線地形及河階可分為(1)後寮溪南岸以北、(2)後寮溪南岸至濁水溪北岸、(3)濁水溪流流域、(4)濁水溪南岸至初鄉底、(5)初鄉底至東埔蚋溪以北、(6)東埔蚋溪南北岸階地、(7)東埔蚋溪以南等七部分作為探討：

- (1) 後寮溪南岸以北，可觀察到些許河階地，無明顯地形線形。
- (2) 後寮溪南岸至濁水溪北岸，斷層東、西側皆為山地，高程約 200 至 300 公尺，山地間有一約呈東北—西南向的凹谷，從 1 米空載光達中可觀察到凹谷西較東側岩層走向較為一致，岩塊也較為完整。
- (3) 濁水溪流流域，初鄉斷層出露位置附近河階地與山地地形特徵變化明顯，斷層上盤有存疑的河階地 Tz。
- (4) 濁水溪南岸至初鄉底，斷層東側山地明顯高於西側，兩側高程差可達 200 公尺以上，地形呈南北向的線形崖，延伸約 3 公里，線形崖位置約為初鄉斷層於濁水溪出露位置的延伸。
- (5) 初鄉底至東埔蚋溪以北，山地間有一凹谷，凹谷向東北—西南延伸約 3 公里，東西兩側地形陡峭，東側山地約略高於西側，約為 300 至 500 公

尺。

- (6) 東埔蚋溪的南北岸河階地根據高程大致可分為四階，從高到低分別為 Tt1 至 Tt4。南岸河階地呈現明顯的線型崖，長約 800 公尺，可能受到斷層擾動的影響。在東埔蚋溪上游的南岸 Tt1 河階地上，部分區域顯示可能受到褶皺影響，且河階地呈東南傾斜約 1 度（圖 2 中 a 剖面）；北岸的 Tt1 河階地較不明顯，僅在部分區域呈坡度變緩的情況（圖 2 中 b 剖面）。在北岸有一個存疑的 To 河階地（圖 2 中 c 剖面），疑似為褶皺脊的地形線型，呈東南傾斜約 5.2 度，而 To 則呈東南傾斜約 0.6 度；另一個存疑的 To 河階地高程剖面（圖 2 中 d 剖面）也呈現類似的地形線型，線型西北側呈東南傾斜約 23.4 度，而 To 則呈西北傾斜約 3.2 度。
- (7) 東埔蚋溪以南，為高程 300 至 500 公尺的坡地，呈東側較西側高的趨勢，在筍子林尾地區，童煜翔等(2022)利用地質鑽探，確認初鄉斷層位置；在地形上，可觀察初鄉斷層上盤有一大致與斷層平行的線形，線形西側可觀察到一向東傾的陡峭立面，推測可能為疑似的斷層三角面 (Fault triangular face)，湖仔厝圳由上游經此線形後，向左遷移，疑似有視左移的現象(圖 2-3)，假設以上推測正確，則初鄉斷層具有左移分量。

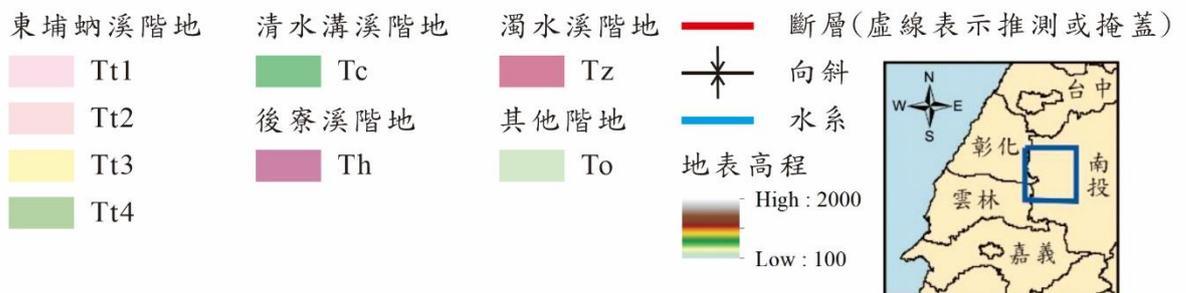
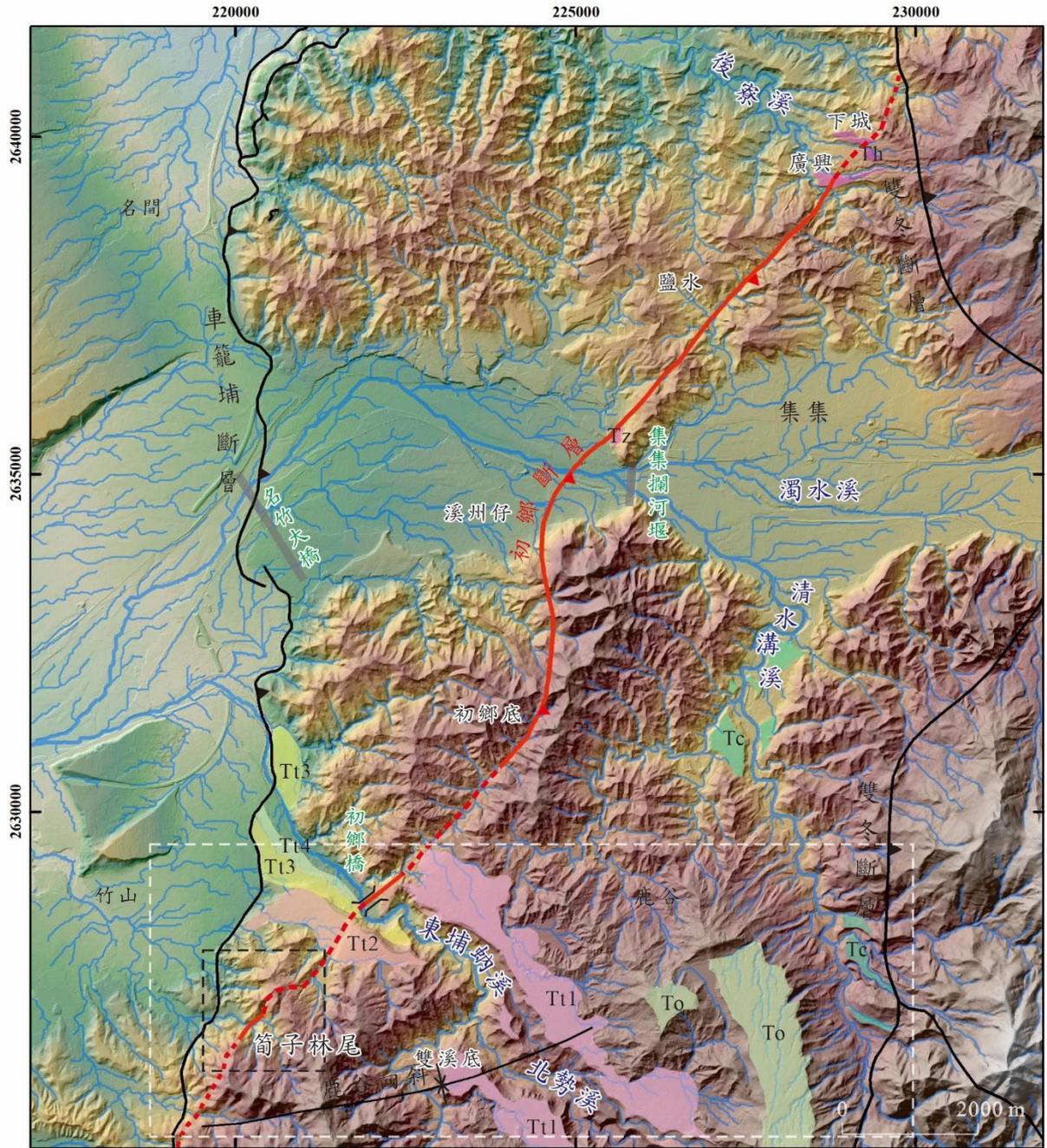


圖 2-1 初鄉斷層沿線地形圖。階地依地形判勢；白色虛線方框為圖 2-2 位置，黑色虛線方框為圖 2-3 位置。(初鄉斷層跡、東埔蚋溪、清水溝溪及後寮溪階地改繪自黃文正等[2019]；車籠埔斷層跡改繪自陳文山等[2016])

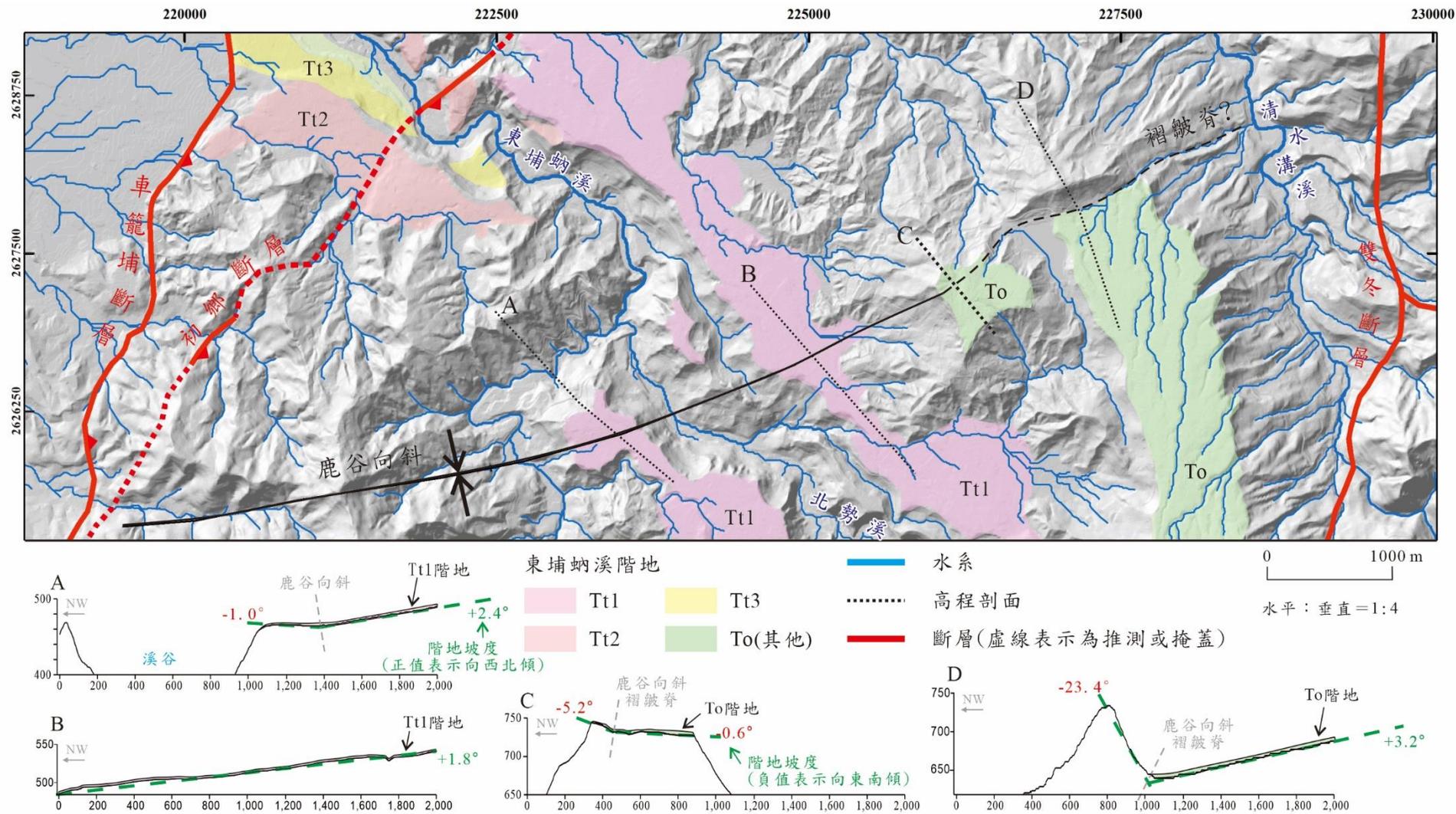


圖 2-2 濁水溪以南鹿谷鄉地形分析。階地坡度正值表示為向西北傾斜、負值表示為向東南傾斜。高程剖面 A、B、C 及 D 垂直放大 4 倍，分別通過南岸 Tt1 河階地、北岸 Tt1 河階地及存疑 To 河階地。(東埔蚶溪階地改繪自黃文正等[2019])

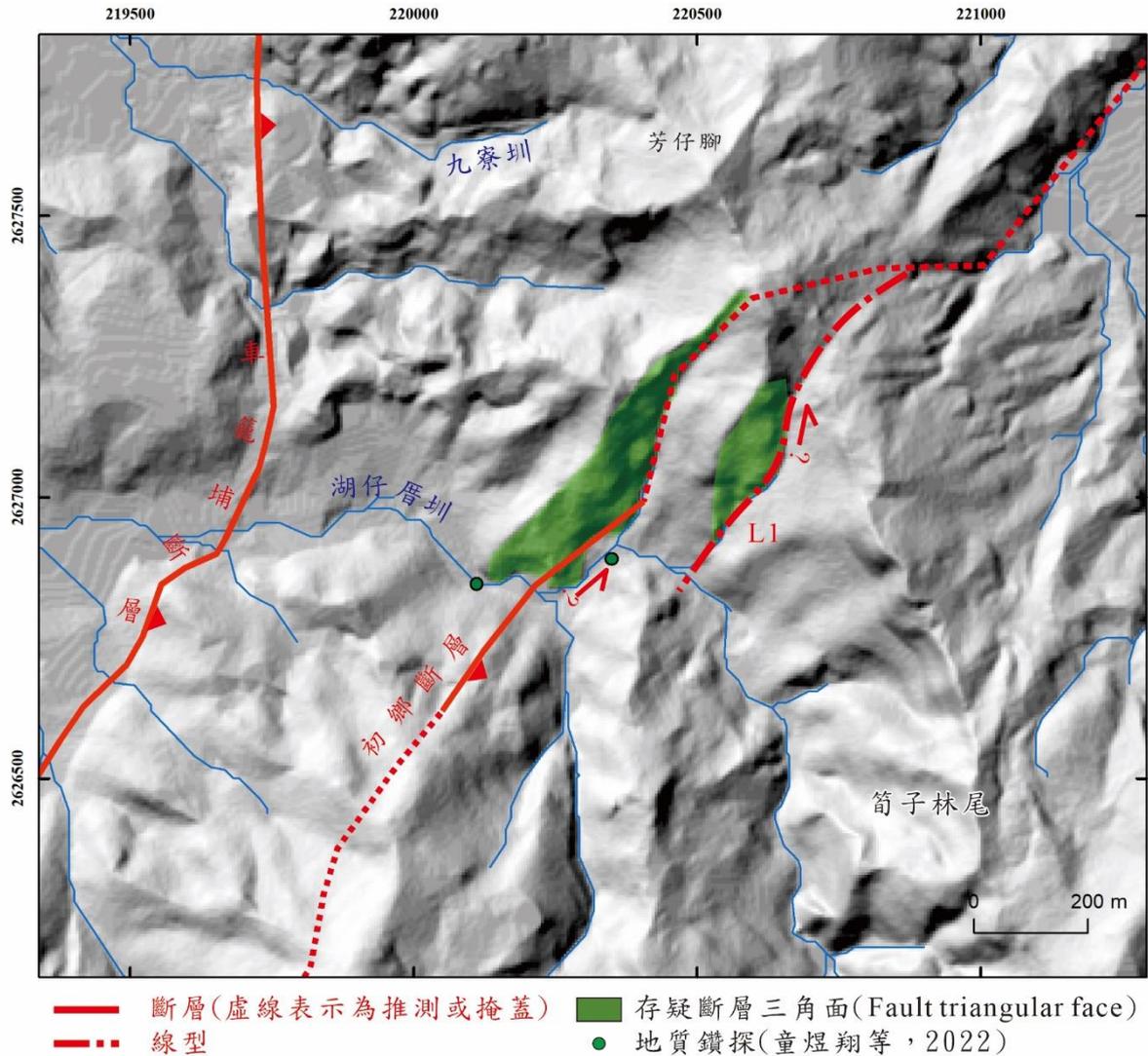


圖 2-3 筍子林尾地形判釋。初鄉斷層上盤可觀察到一線型 L1，可觀察初鄉斷層上盤有略平行斷層的線形，其西側可觀察到一向東傾的陡峭立面，推測可能為斷層三角面，湖仔厝圳由上游經此線形後，向左遷移，疑似有視左移。此圖位置可參考圖 2-1 中黑色虛線方框範圍。(地質鑽探點位取自童煜翔等 [2022]；初鄉斷層跡改繪自黃文正等[2019]；車籠埔斷層跡改繪自陳文山等 [2016])

2-2 地層

主要地質構造如研究區地質圖(圖 2-4)所示，其中本研究著重於雙冬斷層以西至彰化斷層，此節與下節描述兩者間主要的地層及地質構造。本研究區主要出露的地層由老至新為：桂竹林層、錦水頁岩、卓蘭層、頭嵙山層及階地堆積層(陳華玟等，2004；黃鑑水和陳勉銘，2000；劉桓吉等，2004；陳勉銘等，2016；林啟文等，2008；林啟文等，2021；中國石油公司，1986)，以下分別說明：

桂竹林層

竹林層可分為三個岩段，由上至下分別為大窩砂岩段、十六份頁岩段及關刀山砂岩段，本區出露為大窩砂岩段，由岩層位態估算總厚度約 1565 公尺，岩性以灰色受生物擾動之厚層泥質砂岩為主，間夾砂質頁岩及砂頁岩互層，局部層位有厚層頁岩夾薄頁狀砂岩，沉積環境屬於遠濱環境(陳文山等，2016)，與上覆錦水頁岩呈整合接觸。

TC-1(田中一號井)鑽遇桂竹林層不餘 100 公尺，而 MLN-1(梅林一號井)鑽遇也僅 200 多公尺，鑽井位置於圖 2-4 中，由此可推測桂竹林層層厚變化大，可能差異數十倍。

錦水頁岩

以深灰色厚層泥岩及薄層砂頁岩互層為主，偶夾數十公分粉砂岩或細砂岩層，屬於外遠濱環境(陳文山等，2000)，上下分別與卓蘭層及桂竹林層呈整合接觸，地層厚度約 100 至 400 公尺。林啟文等(2019)沿濁水溪河床量測地層柱，錦水頁岩層厚約 140 公尺；邱子軒(2018)沿濁水溪河床分析沉積構造與岩相，錦水頁岩層厚約 200 公尺。經濟部中央地質調查所於竹山鎮水底寮地區車籠埔斷層上盤的竹山一號井，鑽井位置如圖 2-4 所示，井深 12.35 至 391.2 公尺，且可能有地層重複的現象；井中共有 5 處剪切變形帶

(圖 2-5)，車籠埔斷層主要斷層泥帶於井深 376.7 至 391.2 公尺，有厚約 1 公尺的斷層泥帶(林啟文等，2008)。Chang(1971)根據鑽井與多條反射或折射震測剖面，繪製錦水頁岩層頂部在台中盆地的深度(圖 2-6)，在彰化斷層上盤的區域，錦水頁岩的深度大約在 3200 至 4300 公尺之間；而在車籠埔斷層北段的上盤區域，錦水頁岩的深度則介於 500 至 3500 公尺之間。

卓蘭層

以砂岩頁岩互層為主，砂頁岩比例及砂岩層單層厚度隨地層層序向上增加，砂岩主要以青灰色和淡灰色中粒至粗粒混濁砂岩為主，沉積環境屬於中上遠濱環境，以暴風砂岩為主(陳文山等，2000)，上下分別與頭嵙山層及錦水頁岩呈整合接觸，地層出露最大厚度約 2000 多公尺。

林啟文等(2019)沿濁水溪河床量測的地層柱，但其中卓蘭層中包含數條未知錯距的斷層，無法計算車籠埔斷層至初鄉斷層間其他地質構造的影響，且卓蘭層頂部被初鄉斷層所截切，因此只能量測視厚度，共 1075 公尺，無法得知卓蘭層的真实厚度(圖 2-7)；邱子軒(2018)量測卓蘭層出露厚度約 1700 公尺，頭嵙山層出露約 550 公尺厚，但未詳述卓蘭層與頭嵙山層分層準則，也未考慮斷層與褶皺對地層增厚的影響。Yue *et al.* (2011)根據 Hung and Suppe (2002)於濁水溪的震測剖面，認為彰化斷層下盤與正斷層上盤間的卓蘭層厚度約 930 公尺。楊志成(1997)研究大甲溪至濁水溪出露地層的沉積環境，以一含有礫石的 25 公尺厚層砂岩作為卓蘭層與頭嵙山層的層界，此層以下卓蘭層厚度約 1800 公尺，且此層層位由北往南升高，表示沉積環境由大甲溪向南逐漸變深，意味著卓蘭層可能向南增厚。

頭嵙山層

依岩性可分二段，下部為香山相，上部為火炎山相。整合覆於卓蘭層之上，岩性主要為厚砂岩夾砂頁岩互層，愈往上薄層礫石出現的頻率愈頻繁，

地層所出露的厚度約 200 至 2000 多公尺。香山相為厚層砂岩，沉積環境為沿岸沙洲、潮間帶及河口灣；火炎山相為厚層礫岩，沉積環境為扇洲上的辮狀河環境。(楊志成，1997)

階地堆積層

階地主要為河道礫石的堆積、砂及黏土，分別與桂竹林層、卓蘭層及頭嵒山層呈交角不整合接觸。於東埔蚋溪的河階堆積層中漂木碳十四定年結果為 13,585 年(Chen *et al.*, 2003)。

本研究構造剖面地層由老至新分為：先中新世地層、早中新世地層、桂竹林層、錦水頁岩、卓蘭層與頭嵒山層(表 2-1)，早中新世地層厚度根據 Lin *et al.* (2021)漸新世至中新世沉積物等厚圖(圖 2-8)。

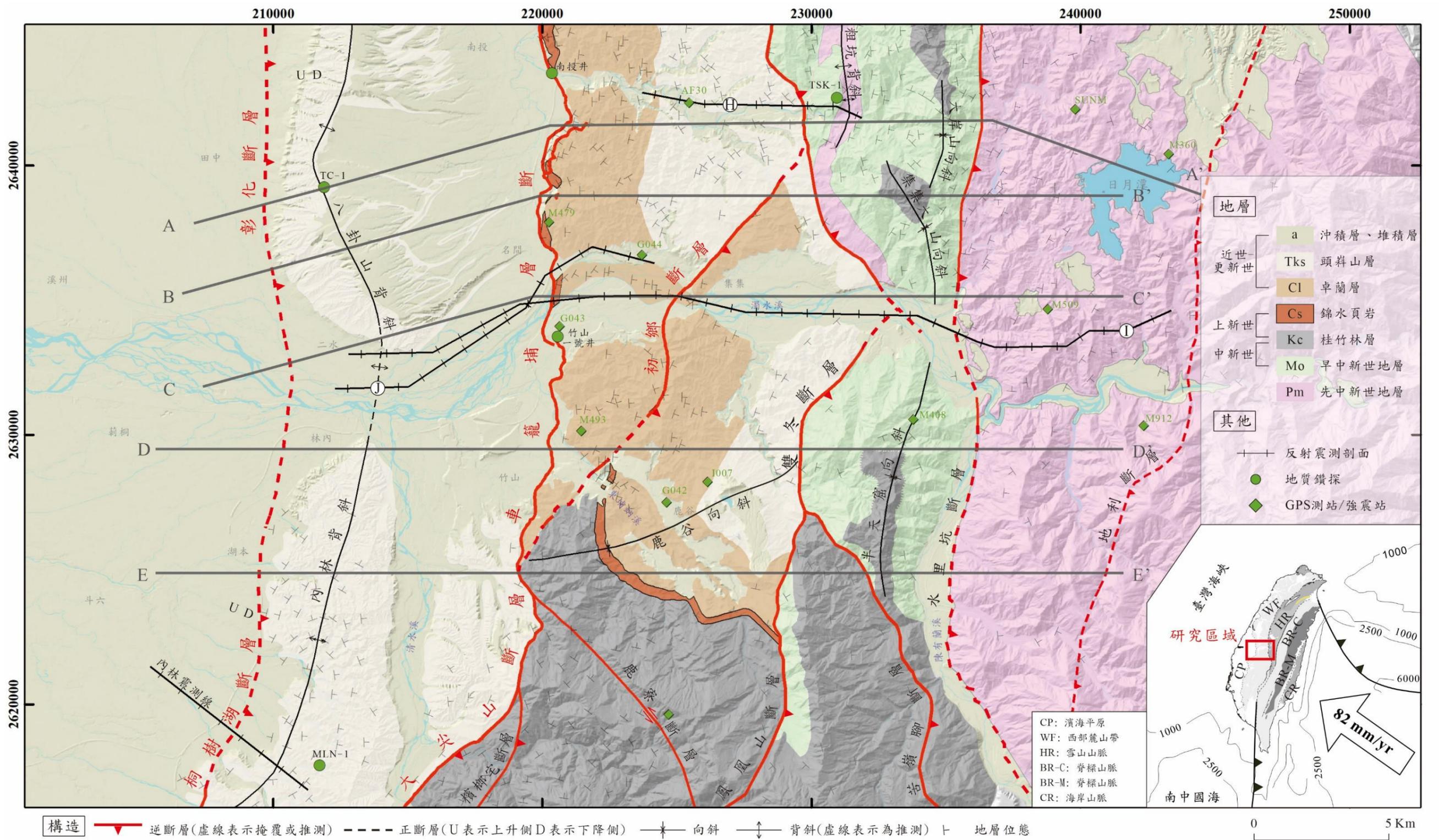


圖 2-4 本研究區域地質圖。綠色圓點為前人鑽井位置，綠色菱形為 GPS 站位置。(改繪自中國石油公司台中、嘉義圖幅；經濟部中央地質調查所南投、埔里、雲林、阿里山圖幅；林啟文等[2021]；初鄉斷層改繪自黃文正等[2019]；車籠埔、大尖山、雙冬、彰化、桐樹湖斷層繪自陳文山等[2016]；樞紐斷層繪自 Chang[1971]；GPS 站取自 Yue *et al.*[2001]；震測剖面：內林震測線取自 Chang[1971]、H 取自 Wang *et al.*[2000]、I 取自 Wang *et al.*[2002]、J 取自 Hung and Suppe[2002])

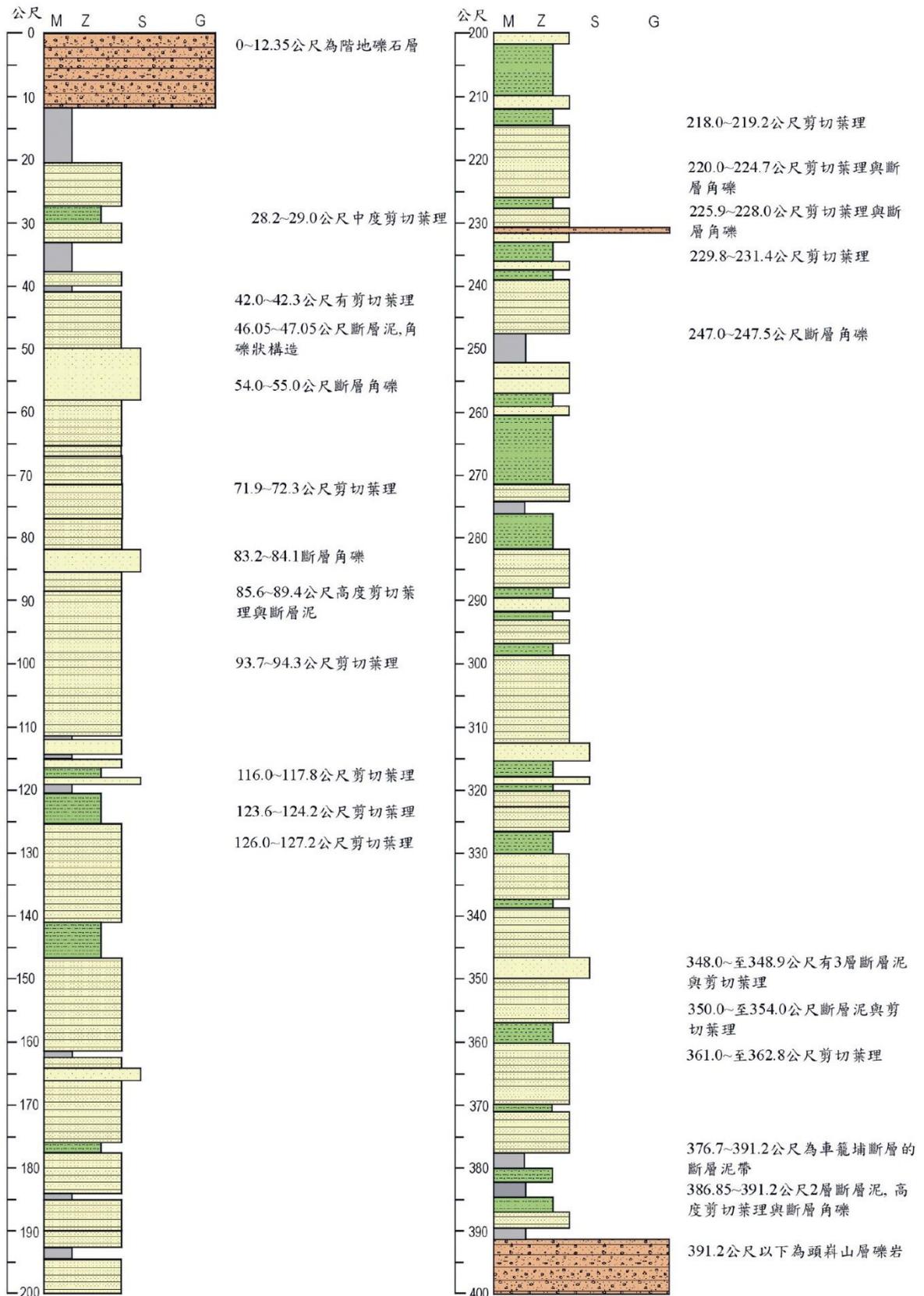


圖 2-5 竹山一號井井錄。M、Z、S 及 G 分別代表為泥岩、粉砂岩、砂岩及礫石(摘自林啟文等，2008)

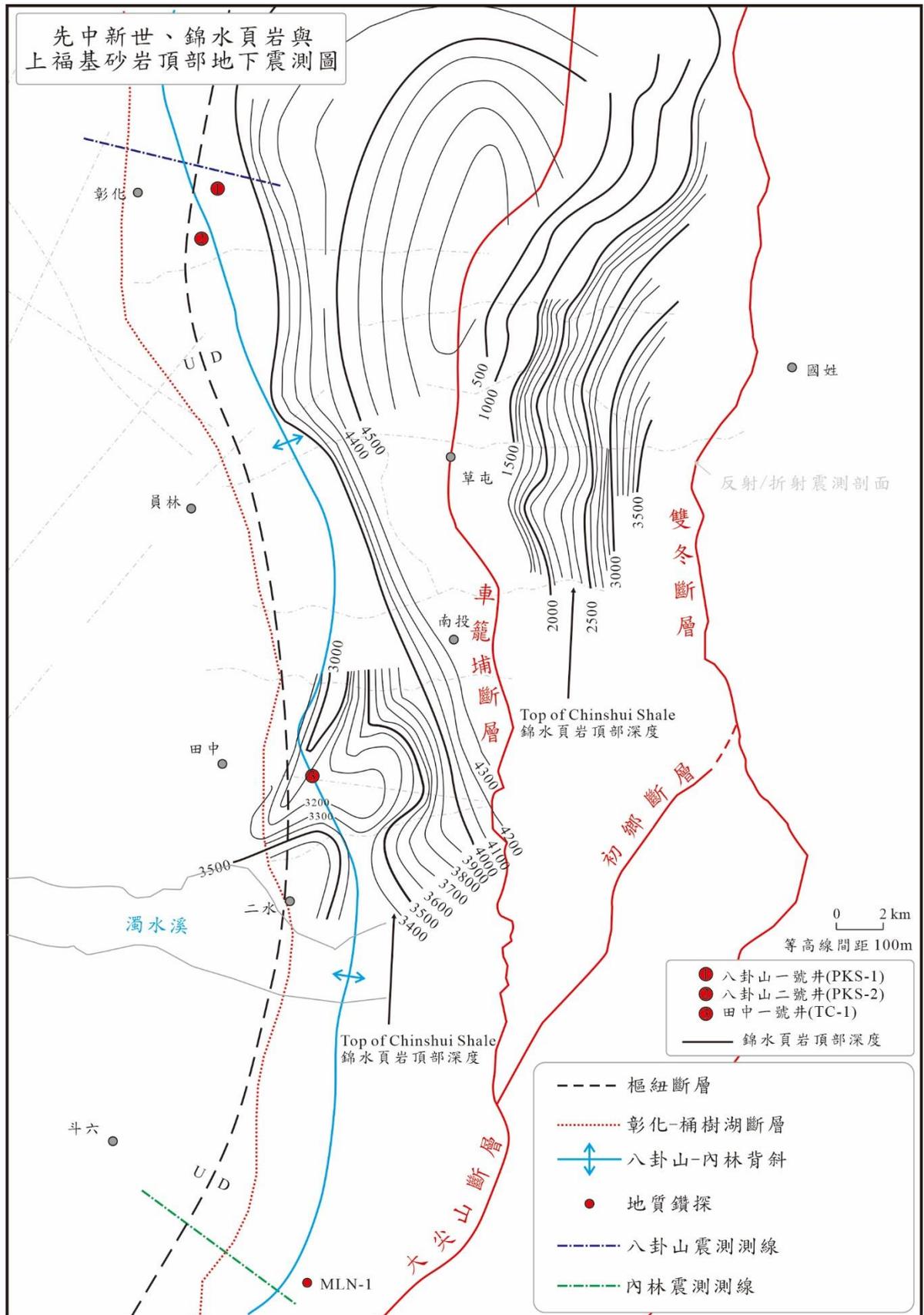


圖 2-6 錦水頁岩頂部深度。在彰化斷層至車籠埔斷層間，錦水頁岩的深度大約在 3200 至 4300 公尺之間。(改繪自 Chang, 1971)

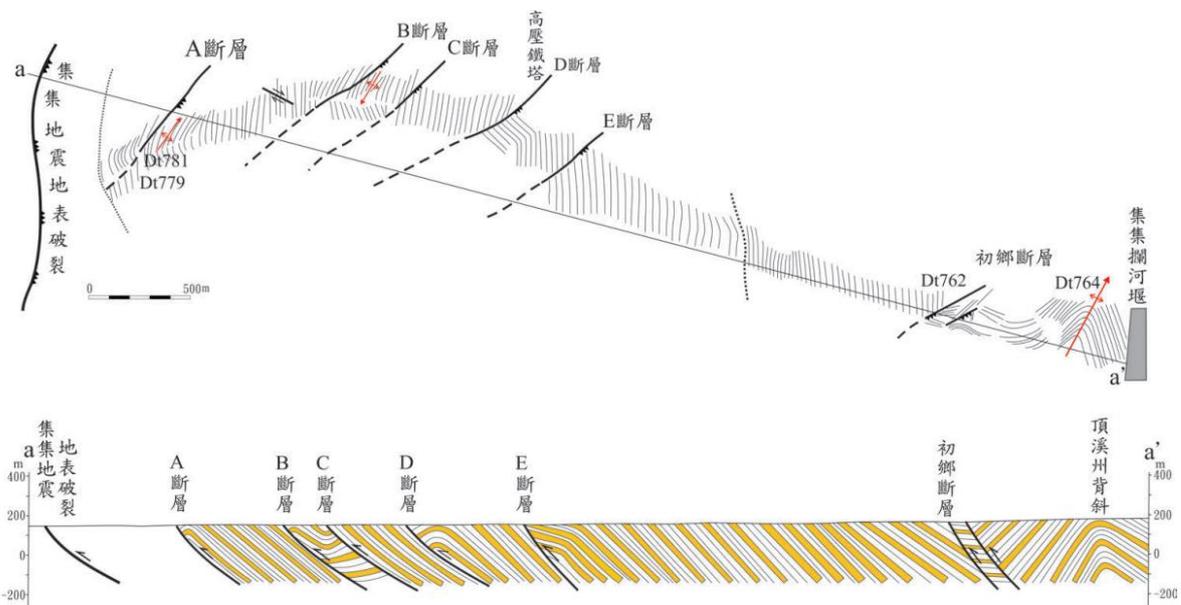


圖 2-7 濁水溪河床路線地質圖及構造地質剖面圖。無法得知小型斷層的錯距，且因逆斷層堆疊，造成地層視厚度增加，無法得知地層的真正厚度(林啟文等，2019)。(摘自林啟文等，2019)

表 2-1 研究區域地層對照表。(表彙整自陳華玟等[2004]；黃鑑水和陳勉銘[2000]；劉桓吉等[2004]；陳勉銘等[2016]；中國石油公司[1986])

年代	南投圖幅 (陳華玟等, 2004)		雲林圖幅 (劉桓吉等, 2004)		阿里山圖幅 (陳勉銘等, 2016)		台中地質圖 (中國石油公司, 1986)		本研究構造地質剖面	
	地層		地層		地層		地層		地層	
全新世	沖積層		沖積層 (0~20m)							
	面山堆積緩斜	階地堆積層	階地堆積層 (0~20m)							
更新世	八卦山層		紅土礫石層 (20~30m)		頭嵙山層				頭嵙山層	
	頭嵙山層	火災山段 香山段	頭嵙山層		卓蘭層		卓蘭層		卓蘭層	
上新世	卓蘭層		卓蘭層 (約1300m)		錦水頁岩		錦水頁岩		卓蘭層 (1075m)	
	錦水頁岩		錦水頁岩 (約150m)		桂竹林層		桂竹林層		錦水頁岩 (140m)	
中新世	桂竹林層		桂竹林層		南莊層		地層缺失		Lin等人 (2021)	
	桂竹林層		桂竹林層		南莊層		地層缺失		Sequence Set A (約0-500m)	
新先世	南莊層 (約1200m)		南莊層		深坑砂岩		觀音山砂岩		Sequence Set B+C (約300-800m)	
	南莊層		南莊層		樟湖坑頁岩		打鹿頁岩		Sequence Set D (約0-1000m)	
新先世	深坑砂岩		深坑砂岩		石門層		北寮層		老中新世地層	
	樟湖坑頁岩		樟湖坑頁岩		炭寮地頁岩		石感層			
新先世	十四股層		十四股層		和社層		大寮層		先中新世地層	
	水長流層		水長流層		和社層		木山層			
新先世	白冷層		白冷層		和社層		木山層		先中新世地層	
	粗坑層		粗坑層		和社層		木山層			

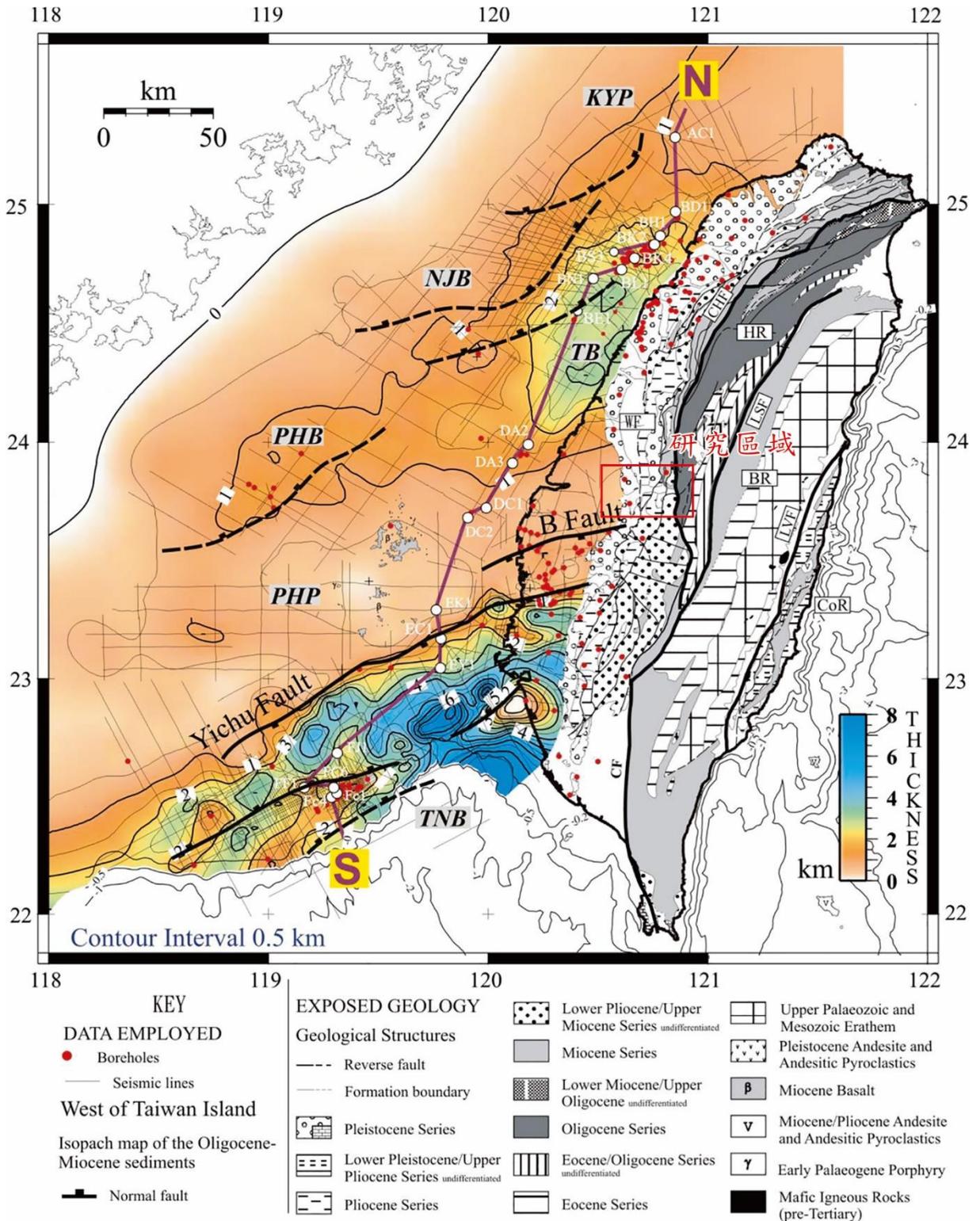


圖 2-8 漸新世至中新世沉積物等厚圖。漸新世至中新世地層的等厚線圖以彩色陰影地圖呈現。等厚線圖上，粗黑色線標示主要的正斷層，實線表示斷層截穿漸新世至中新世地層，虛線則表示為未截穿。紅色點表示鑽井資料，細黑線表示地震剖面。陸上地質資料取自 Ho(1988)。(摘自 Lin *et al.*, 2021)

2-3 地質構造

本研究區主要地質構造除初鄉斷層外，另有位於西側的彰化斷層及其上盤的八卦山背斜、桐樹湖斷層及其上盤的內林背斜、樞紐斷層、車籠埔斷層及大尖山斷層；位於東側有雙冬斷層，南側則有鹿寮斷層與鹿谷向斜。以下將針對初鄉斷層及其他主要的地質構造分別簡述：

2-3-1 斷層

初鄉斷層

初鄉斷層為一具逆移分量的走滑斷層(林啟文等，2000)，呈東北走向，於濁水溪集集攔河堰下游約 1 公里處有良好出露，斷層東側出露頂溪州背斜，褶皺軸向東北傾沒，兩翼夾角約 80 度(林啟文等，2019)。

前人(黃鑑水等，2000；林啟文等，2019)對於初鄉斷層上盤所出露的岩層劃分有所爭議，然而在野外難區分卓蘭層與頭嵙山層，卓蘭層上部與相鄰頭嵙山層下部皆以厚層砂岩與砂泥互層為主，黃鑑水等(2000)認為初鄉斷層上盤出露岩層屬於頭嵙山層，林啟文等(2019)以礫石層開始出現作為卓蘭層與頭嵙山層的層界，含礫石層的岩層歸入頭嵙山層(何春蓀與譚立平，1960；周稟珊，2013；林啟文與周稟珊，2016)，根據其野外調查結果，劃分為卓蘭層。本研究卓蘭層與頭嵙山層層界根據楊志成(1997)、林啟文與周稟珊(2016)和林啟文等(2019)的分界，將初鄉斷層上盤劃分為卓蘭層。

初鄉斷層與車籠埔斷層截切東埔蚋溪河階地，根據碳 14 定年結果，階地礫石層的年代距今約 13,000 至 14,000 年，指示初鄉斷層近期曾活動過；林啟文等(2021)依據地表斷層長度，以 Wells and Coppersmith (1994)公式計算可能的地震矩規模為 Mw6.6。

車籠埔斷層

車籠埔斷層為一逆斷層，約呈南北走向，由台中豐原區向南延伸至南投

竹山鎮嶺腳附近，竹山以南連接鹿寮斷層與大尖山斷層(林啟文等，2000)。

Yue *et al.* (2005)蒐集前人地質鑽探、震測剖面及其他地質資料，並繪製多條構造地質剖面，並建立車籠埔斷層的三維模型，斷層走向近乎平行於上盤錦水頁岩的層面，斷層上盤岩層傾角向西漸緩，呈向斜構造(圖 2-9)，斷層面呈斷坡—斷坪的幾何形貌，近地表約呈 50 度向東傾，深部連接約 5 公里深的滑脫面(décollement)。

1999 年 9 月 21 日集集地震(規模 $M_w=7.6$)，造成的地表變形有斷層崖、單斜崖與撓曲崖，並由主斷層與分支斷層(splay fault)構成的斷層寬帶(林啟文等，2008)。

大尖山斷層

大尖山斷層為具右移分量的逆斷層(林啟文等，2007)，約呈東北走向，北邊連接車籠埔斷層與鹿寮斷層，斷層上盤主要出露地層為南莊層、桂竹林層、錦水頁岩及卓蘭層。

衣德成(2004)使用航空照片做立體判釋(圖 2-10)，大尖山斷層上盤可觀察到一系列的線形，約成北偏東 40 度，與斷層走向大致相同，線型分布寬度約 2 公里，表示斷層帶上盤擾動範圍可達 2 公里，由延伸性較佳的線型 L1 可觀察到山脊線及水系有視左移，認為 L1 曾經錯動或為破碎帶，由此判斷大尖山斷層為帶有左移分量的逆斷層；李泰慶(2004)分析桶頭震測剖面(圖 2-11)，位於桶頭階地下，大尖山斷層已由逆斷層轉換為高角度走滑斷層，大尖山斷層帶寬 350 公尺，具有數條高角度分支斷層，斷層上盤受斷層擾動而有密集的小褶皺及破碎現象，而下盤所受斷層擾動較小。

1999 集集地震後，林啟文等進行地表地質調查，車籠埔斷層與大尖山斷層兩者同震變形有所不同，車籠埔斷層南段為具左移分量的逆斷層，大尖山斷層北段則為右移為主，車籠埔斷層與大尖山斷層交接帶一抄封至嶺腳未

有明顯壟升(林啟文等, 2000); 李元希等於大尖山斷層沿線, 加走寮溪北岸茶園觀察到視右移的地表變形(圖 2-12), 水平位移量 2.4 公尺, 垂直位移量小於 0.5 公尺(李元希等, 2002)。

彰化斷層

彰化斷層為於車籠埔斷層西側, 為一盲斷層, 地表並無出露, 斷層位置都以地表地形、地球物理探勘和地質鑽探研判, 此斷層仍有所爭論。

許文立(2001)透過淺層反射震測, 以斷層彎曲褶皺(Fault-bend-Fold)的構造模式來解釋八卦背斜和彰化斷層, 滑脫面可能位於卓蘭層與錦水頁岩的交界處, 由樞紐斷層作為斷坡; 謝秀華(2007)根據前人研究, 使用三維構造回復方式進行模擬, 根據其結果認為斷坡—斷坪斷層模型最符合, 推測斷層未出露地表且為北淺南深的兩段曲面逆斷層, 斷坡向東傾斜 25 度, 斷坪向東傾斜 5 度, 轉折深度為 6 至 8 公里。

Yue *et al.* (2011)基於 Yue *et al.* (2005)的研究, 彰化斷層以錦水頁岩為弱面滑移, 淺部約呈 27 度向東傾, 斷層上盤頭嵛山層為生長地層, 深部連接約 5 公里深的滑脫面, 錯距約 1600 至 1700 公尺, 並認為八卦山背斜為類似純剪(pure-shear)的斷層彎曲褶皺(圖 2-14)。

桐樹湖斷層

桐樹湖斷層位於大尖山斷層西側, 根據內林震測剖面(圖 2-15), 鄰近 MLN-1 鑽井且有良好的限制, MLN-1 位於 TC-1 南方約 21.8 公里處, 於深度約 2170 公尺處鑽遇桐樹湖斷層, 截切中新世及其上覆地層, 斷層約呈東傾 28 度, 錯距約 1200 公尺; 王乾盈等(2004)使用淺層反射震測法, 於斗六丘陵周圍進行調查, 認為彰化斷層與桐樹湖斷層有關聯, 並抬起斷層東側的內林背斜。

雙冬斷層

雙冬斷層約呈南北走向的東傾低角度逆斷層，斷層東側為中新世地層，西側為更新世地層，層位落差大，根據中國石油公司 TSK-1(粗坑一號井)推算雙冬斷層平均傾角為東傾 45 度(黃鑑水等，2000)。1999 年集集地震時，雙冬斷層有地表破裂現象，但未有明顯大量位移，但沿斷層跡有噴沙或泥現象(黃鑑水和陳勉銘，2000)；根據大地測量結果，雙冬斷層與車籠埔斷層間的地塊具有最大的垂直與水平位移量(經濟部中央地質調查所，1999)，此兩條斷層為制約此地震的主要構造(黃鑑水和陳勉銘，2000)。

鹿寮斷層

鹿寮斷層與車籠埔斷層交接於竹山地區以南、抄封至嶺腳一帶，北端截切大尖山斷層，約呈西北走向，斷層兩側出露桂竹林層，可能為一左移斷層，層位落差約 300 公尺(劉桓吉和李錦發，1998)。在 1999 年集集地震中，出現與鹿寮斷層走向平行排列的裂縫(林啟文等，2000；林啟文等，2008)；李元希(2002)等利用 3D 軟體、同震 GPS 位移向量和野外調查，認為有一系列以走向滑移斷層為主的地震沿鹿寮斷層產生(圖 2-16)，且認為鹿寮斷層在集集地震時有伴隨活動，為具拉張分量的左移斷層。

2-3-2 褶皺

八卦山背斜

八卦山背斜南北變形量差異大，北端花壇岩層抬升較緩，岩層傾角約呈 15 至 25 度；南端田中岩層抬升較陡，岩層傾角約呈 25 至 40 度，樞紐斷層位置可能更為接近西翼，可能發生沿斷坡滑動的斷層，或可能在八卦背斜下發生側斷坡(Lateral ramp)，造成八卦背斜北端地形較低且較對稱(許文立，2001；謝秀華，2007)；王乾盈等(2004)認為八卦山背斜向南延到內林背斜。

內林背斜

內林背斜位於桐樹湖斷層東側，褶皺軸大致南北走向約平行於斷層，呈不對稱褶皺，西翼岩層傾角約呈 40 至 50 度，東翼岩層傾角約呈 10 至 20 度，於背斜北段出露頭嵛山層，在南段出露較老的卓蘭層。王乾盈等(2004)使用淺層反射震測法，根據沿濁水溪南岸震測剖面(圖 2-17 中震測剖面 A)，西翼傾角約 24 度，東翼較西翼高且平，呈似單斜，傾角約 5 度；根據內林南方，通過湖本的震測剖面(圖 2-17 中震測剖面 C)，兩翼傾角向南漸陡，西翼傾角增加至約 35 度，東翼傾角增加至約 8 度。

鹿谷向斜

位於鹿寮斷層以東，約呈東北東走向，為一寬廣褶皺，鄰近褶皺軸有存疑的褶皺脊。

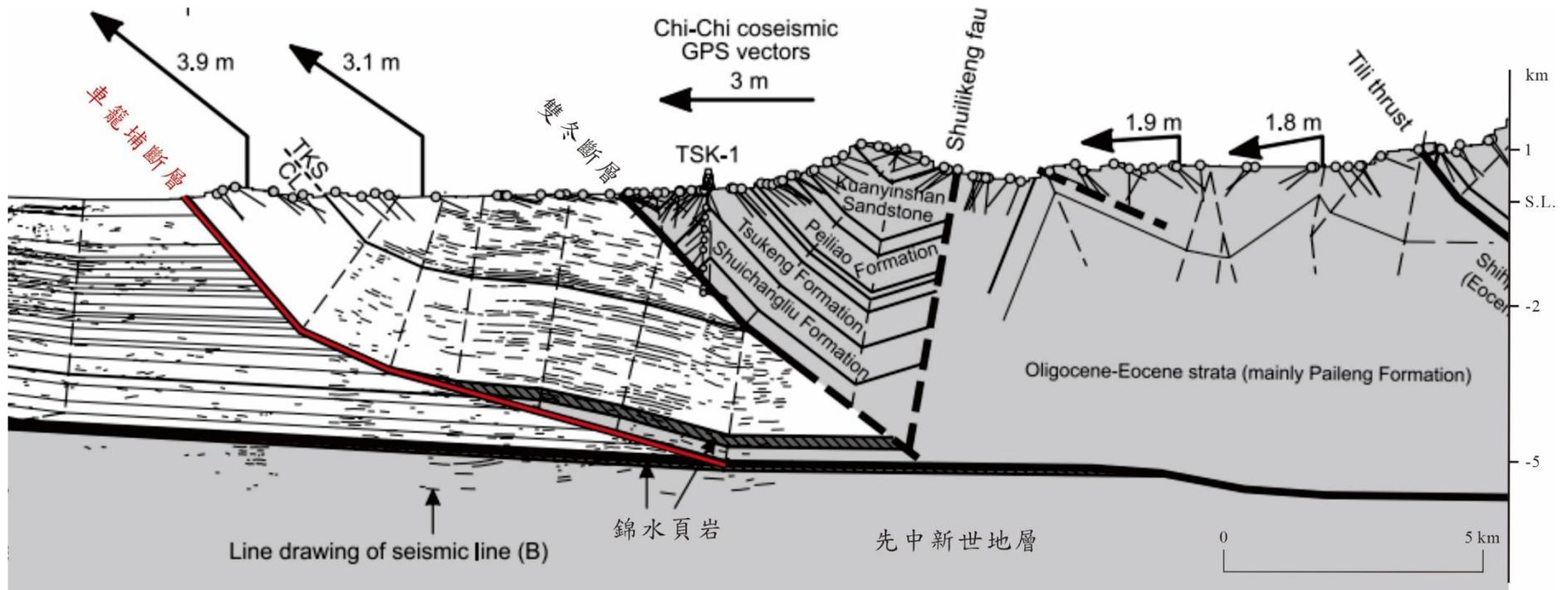


圖 2-9 Yue *et al.* (2005)構造地質剖面。車籠埔斷層上盤岩層傾角向東變緩，呈向斜構造，斷層面呈斷坡—斷坪的幾何形貌，近地表約呈 50 度向東傾，深部連接約 5 公里深的滑脫面(Decollement)。紅色實線為車籠埔斷層。TKS：頭嵙山層、Cl：卓蘭層。(摘自 Yue *et al.*, 2005)

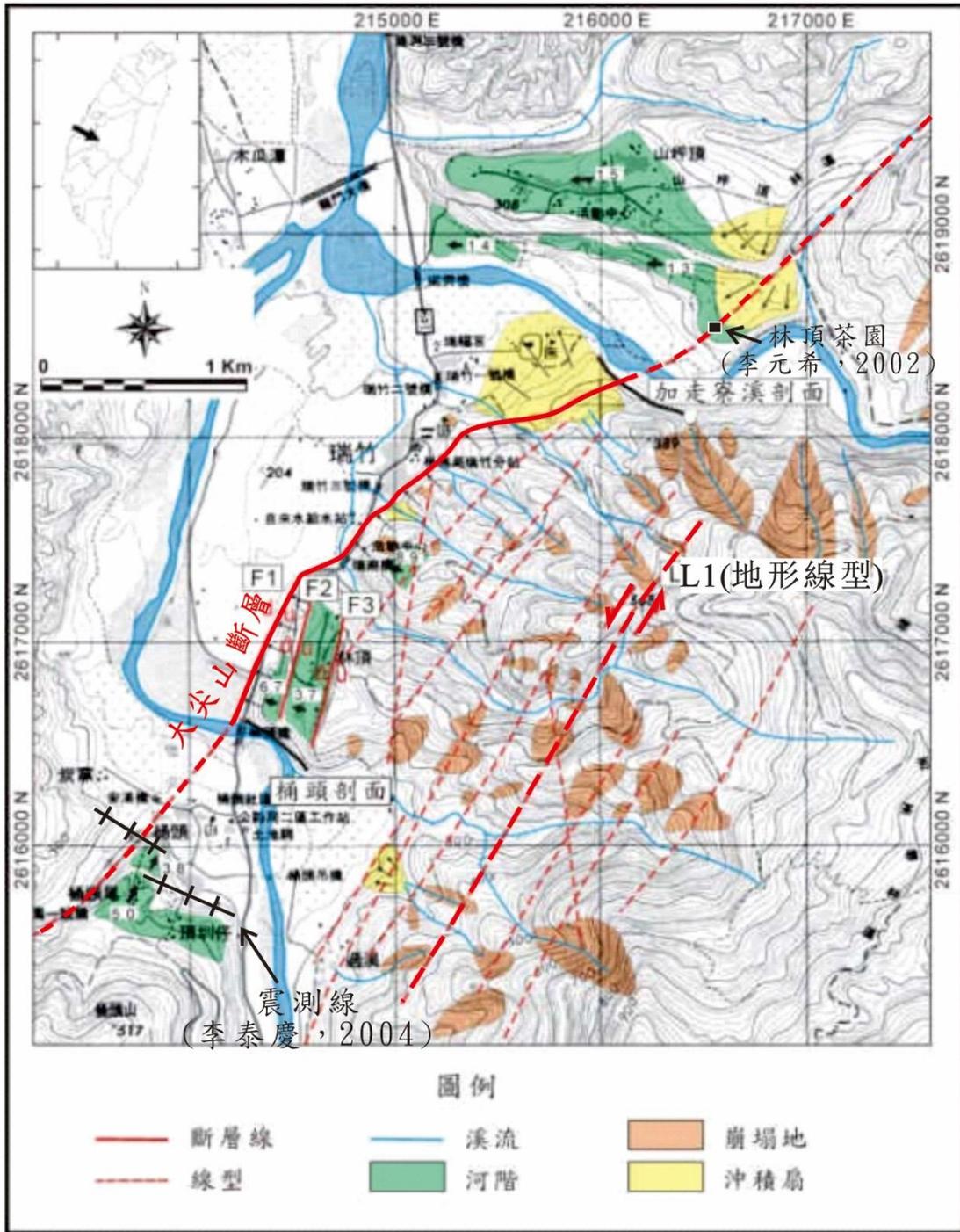


圖 2-10 大尖山斷層地形判釋。實線表示斷層沿線變動地形明確且有露頭控制，虛線表示斷層沿線地形不明確，紅色箭頭表示相對錯動方向。黑色柵狀線為李泰慶所施測的震測剖面(圖 2-11)地表位置。(摘自衣德成，2004)

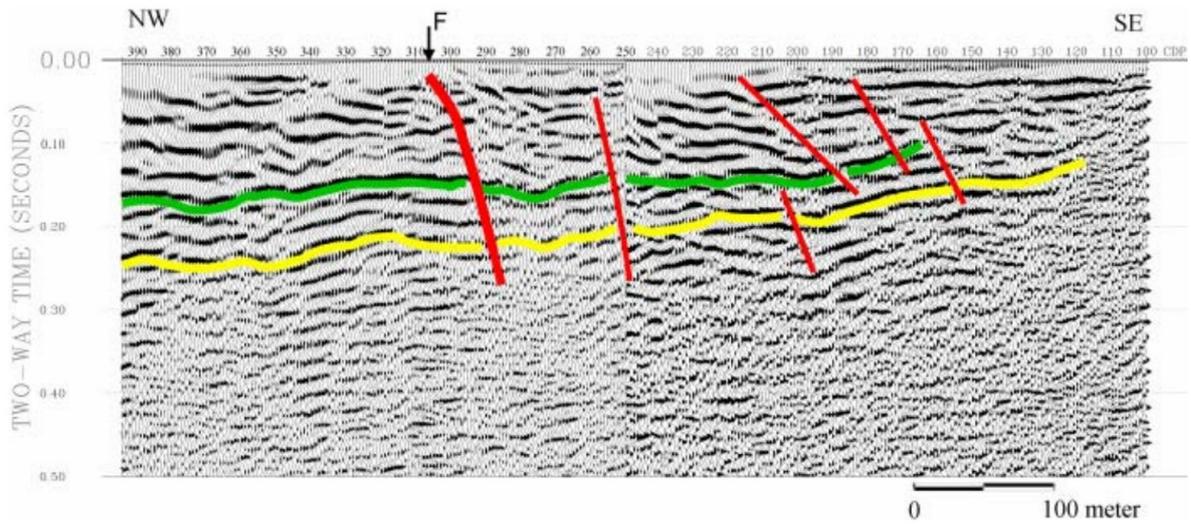


圖 2-11 桶頭震測剖面解釋圖。震測剖面地表位置見圖 2-10 中的震測線。圖中 F 位置為大尖山斷層可能位置，紅線表示判釋為斷層，綠線、黃線被解釋各為同一岩層。(摘自李泰慶，2004)



圖 2-12 林頂茶園地表變形。斷層為具右移分量的走滑斷層，斷層滑移方向為 228 度，水平位移量 2.4 公尺，地表垂直變形小於 0.5 公尺。(摘自李元希，2002)

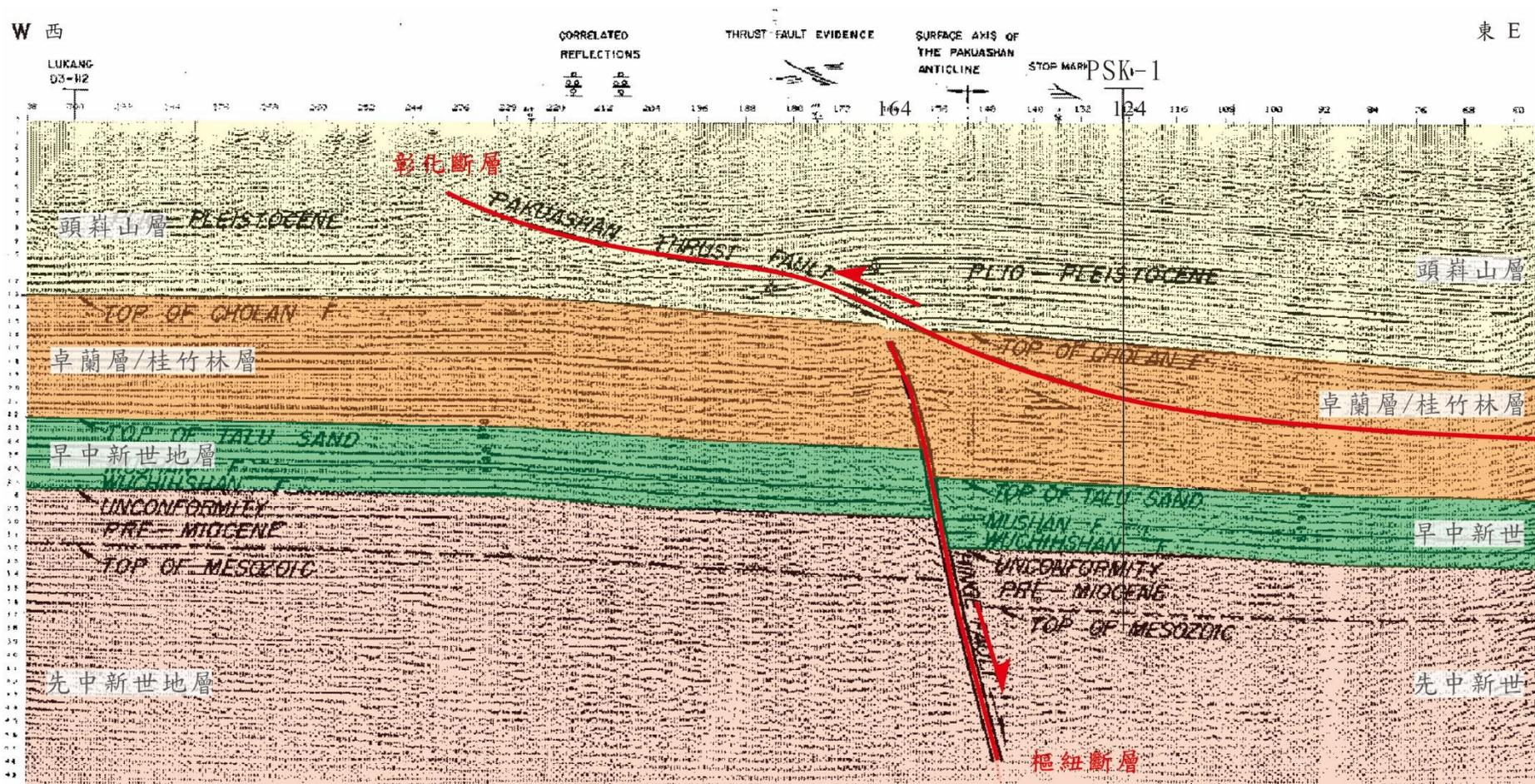


圖 2-13 八卦山震測測線剖面。震測剖面地表位置見圖 2-6，樞紐斷層向東傾斜約 70 度，先中新世地層錯距約 1000 公尺，PSK-1 鑽遇早中新世地層厚度為 1492 公尺，中新世地層錯距約 500 至 750 公尺；彰化斷層以 18 至 25 度的角度截切上新更新世和上新世地層，使卓蘭層掩覆到卓蘭層上，PSK-1 中可觀察到卓蘭層地層重複出現約 380 至 420 公尺。(摘自 Chen, 1978)

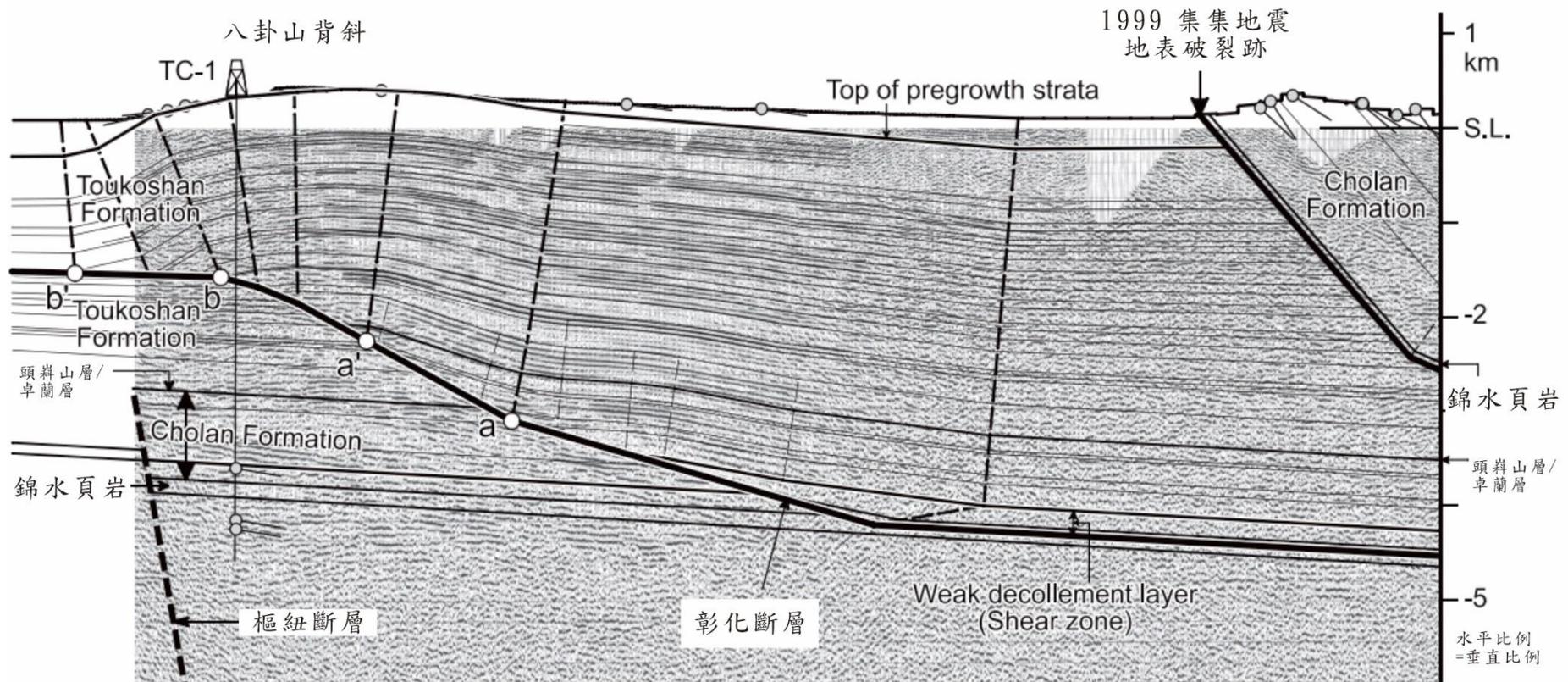


圖 2-14 Hung and Suppe (2002)沿濁水溪的震測剖面。震測剖面地表位置為圖 2-4 中震測線 J，樞紐斷層的錯距約為 300 公尺。彰化斷層以錦水頁岩為弱面滑移，淺部約呈 27 度向東傾，斷層上盤頭嵙山層為生長地層，深部連接約 5 公里深的滑脫面，錯距約 1600 至 1700 公尺，並認為八卦山背斜為類似純剪的斷層彎曲褶皺(Yue *et al.*, 2011)。(修改自 Yue *et al.*, 2011)

W 西

東 E

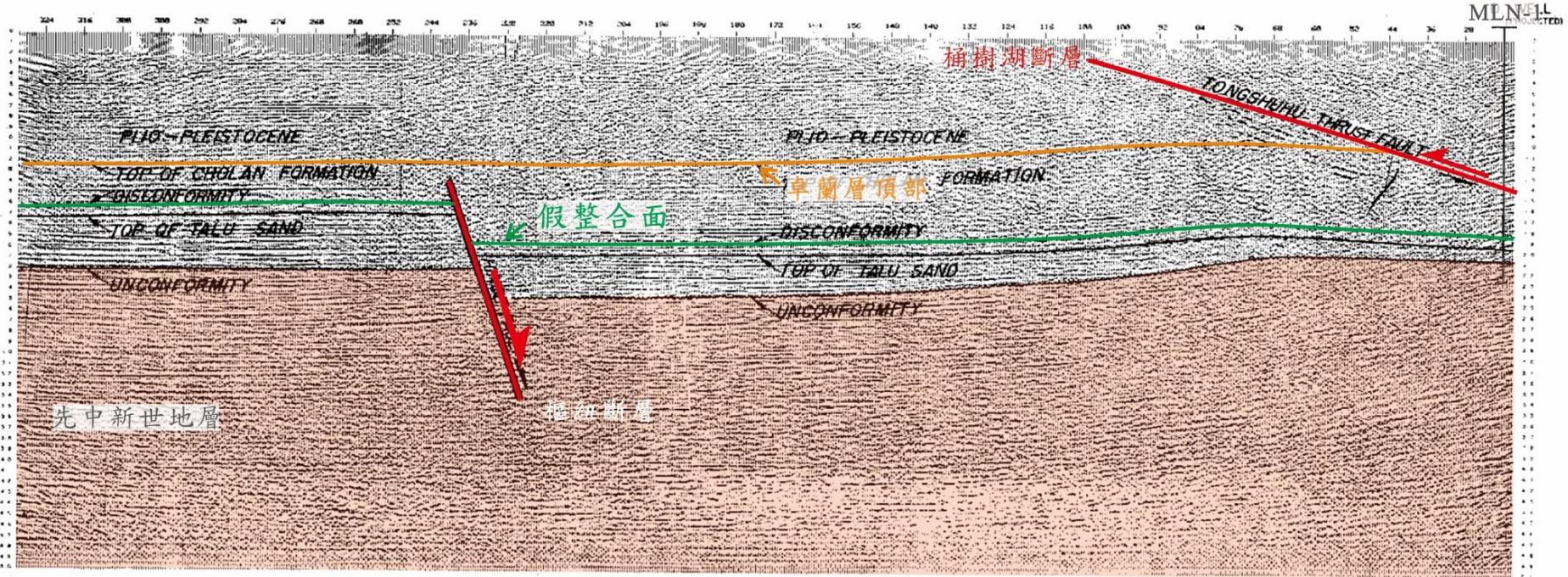


圖 2-15 內林震測剖面。震測剖面地表位置於圖 2-4 中內林震測線，MLN-1 先中新世頂部深度約 3570 公尺，於深度約 2170 公尺處鑽遇桐樹湖斷層，桐樹湖斷層東傾 28 度，截切中新世及其上覆地層，錯距約 1200 公尺；樞紐斷層向東傾約 70 度，先中新世頂部最大錯距 1616 公尺，打鹿砂岩頂部錯距減小至 1584 公尺。(摘自 Chen, 1978)

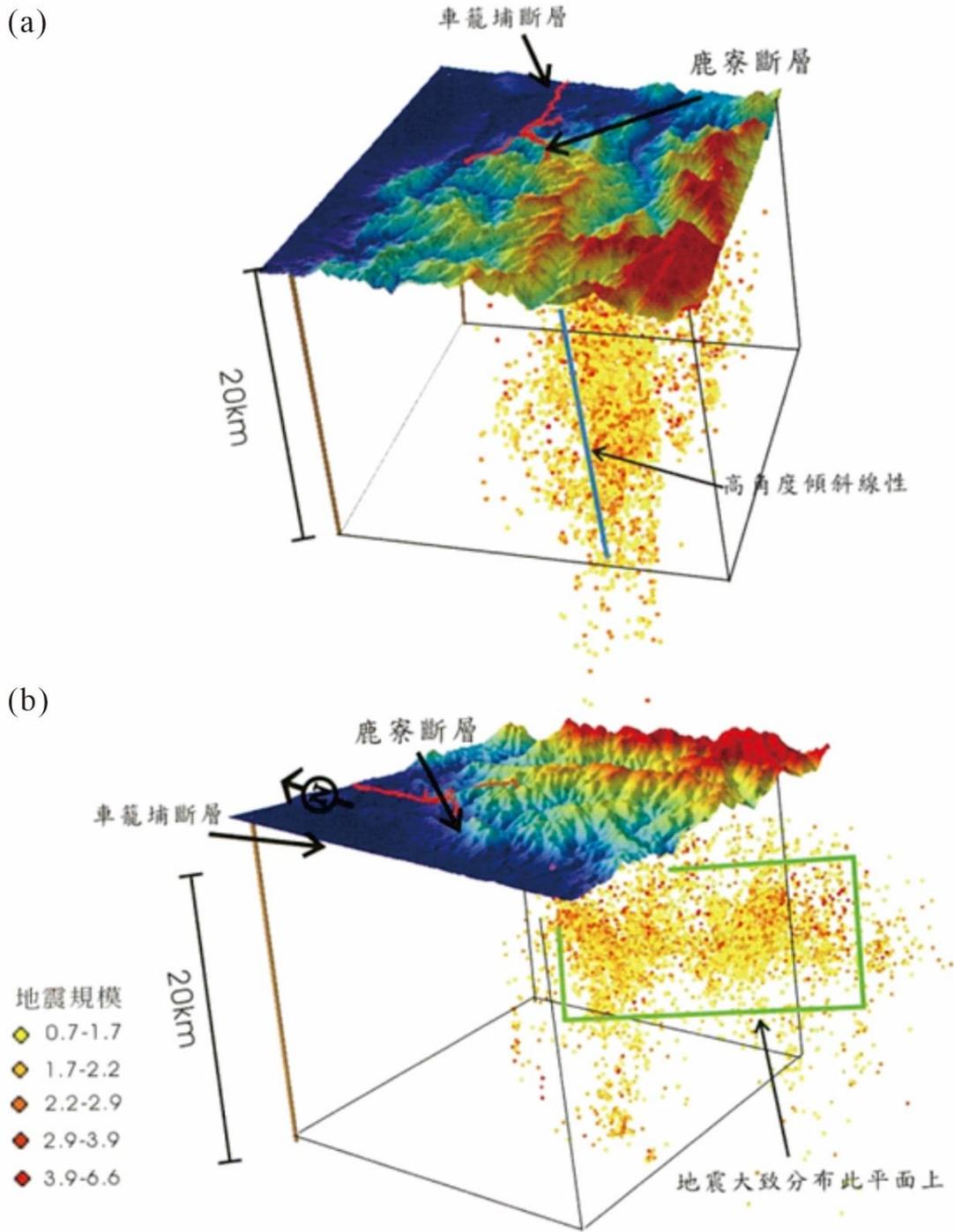


圖 2-16 (a)平行鹿寮斷層走向的震測剖面，地震呈高角度線形分布。(b)震源剖面垂直鹿寮斷層走向方向，地震大致分布於鹿寮斷層面上。(摘自李元希等，2002)

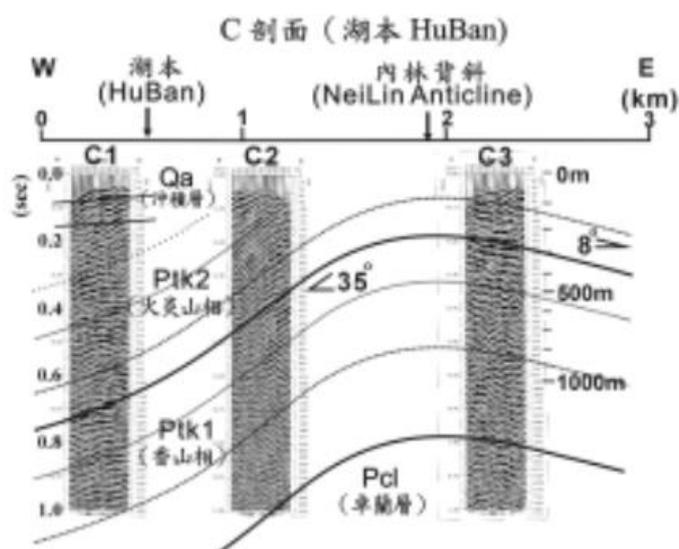
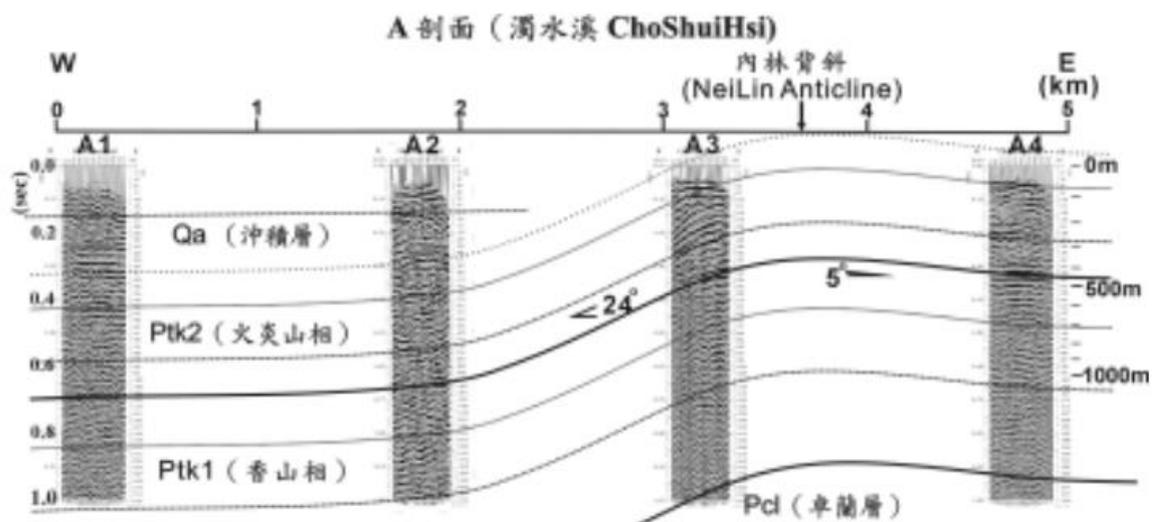


圖 2-17 沿濁水溪南岸的震測剖面 A 及經過湖本的震測剖面 C。兩震測剖面由數條短測線所組成，每條短測線間距約 1 或 1.5 公里。C 剖面中，地層的傾斜被解釋為受桐樹湖斷層所引起，但其中未見斷層錯動的現象。根據震測剖面 A，認為八卦山背斜跨越濁水溪，向南延伸。(摘自王乾盈等，2004)

第3章 文獻回顧

3-1 初鄉斷層

3-1-1 前人野外調查及斷層活動性

初鄉斷層由北至濁水溪通過下城、廣興、鹽水等地至濁水溪，從濁水溪向南依序通過溪州仔、初鄉底等地至東埔蚋溪，東埔蚋溪以南經筍仔林尾等地，併入車籠埔斷層(圖 2-1)。

下城地區初鄉斷層未出露於地表，童煜翔等(2022)於此區進行地質鑽探，認為初鄉斷層近地表為高傾角東傾，雖發現夾斷層泥的剪切帶，但未發現主斷層，推測可能為斷層擴展褶皺(fault-propagation fold)的前緣，表示初鄉斷層未截切至地表；周稟珊等根據童煜翔等(2022)的鑽井，認為初鄉斷層在此地區可能已經消失(die out)(周稟珊等，2023)。

下城至濁水溪北岸缺少斷層露頭或明顯地形線型等證據，僅能依照地表露頭位態與岩性差異，推估初鄉斷層的位置，中國石油公司出版的十萬分之一的地質圖(1982)將此段斷層跡繪為虛線，表示為推測。

濁水溪南北岸露頭狀況較佳，為前人重點調查區域(林啟文等，2019；黃文正等，2019)，初鄉主斷層出露於濁水溪河岸兩側，約在集集攔河堰下游 1.2 公里處，呈北北東走向，向東傾斜約 45 至 60 度，斷層兩側均為卓蘭層(林啟文等，2019)，緊鄰斷層的兩側岩層位態有所差異，下盤岩層走向為南北向東傾約 30 度，上盤岩層走向變化頗大，大致上為東西向高角度北傾，直到鄰近集集攔河堰處約 300 公尺處岩層轉為近水平為頂溪州背斜的軸部，再往東此為背斜西翼，岩層位態呈北北西走向東傾約 40 度左右。黃文正等(2019)進行野外地質調查，觀察到斷層上下盤變形程度相當不對稱，下盤僅緊鄰兩三公尺內的中層砂岩被扭曲，上盤擾動寬度可達一、二百公尺寬，可

觀察到公尺級的褶皺與斷層，近主斷層 10 至 20 公尺內變形相對劇烈，以泥質為基質，其中可觀察到略平行於主斷層的剪切面與被剪碎的豆莢狀砂岩，緊鄰主斷層面可觀察數公分厚、深黑色被高強度剪變的斷層泥，含水時黏塑性強，而乾燥時堅硬。

濁水溪南岸溪州仔地區至東埔蚋溪北岸無明確線型，王廷瑜(2021)，於初鄉底透過地質鑽探(顏一勤，2019)與直流地電阻探勘(ERT)探查地下地質構造(黃文正等，2019)，判釋初鄉斷層帶水平寬度約 370 公尺，主斷層位在最西緣，另有至少三條以上的分支斷層(圖 3-3)。

東埔蚋溪南北岸階地為前人(陳于高等，2002；黃文正等，2019)研究初鄉斷層活動性的主要區域，透過階地定年，階地可分為 3 至 4 階，初鄉斷層截切最低的兩個階地，其中一階存在明顯線型崖，該階地定年結果顯示為 $13,585 \pm 265$ yr，表示初鄉斷層於更新世晚期曾經活動過(陳于高等，2002)；黃文正等(2019)假設相同階地表面高差即為斷層垂直抬升量，估算斷層滑移量約為 34 至 102 公尺，推估長期滑移速率約為 2.5 至 7.5 mm/yr。

東埔蚋溪以南至斷層南端並未發現斷層露頭，但斷層上下盤岩性有所差異，上盤為桂竹林層，下盤為卓蘭層；童煜翔等(2022)在筍子林尾地區進行地質鑽探，雖未鑽遇主斷層，但有鑽遇初鄉斷層上盤的分支斷層，推測斷層傾角為 60 度。

3-1-2 地球物理方法相關研究

濁水溪沿線的震測剖面 I(Wang *et al.*, 2002)顯示，初鄉斷層(Wang *et al.* (2002)以 Tachienshan fault 稱之)約位於剖面 21 公里處，傾角約 45 度至 60 度向東傾斜，越接近地表越陡(圖 3-1)；黎明工程顧問有限公司(2013)於濁水溪北岸利用地電阻調查，探勘結果顯示電阻率的變化可明顯界定初鄉斷層與擾斷帶的邊界分佈範圍(圖 3-2)，初鄉斷層近地表呈高傾角東傾。

王廷瑜(2021)於初鄉底利用電阻率影像剖面法(Electrical Resistivity Tomography, ERT)(圖 3-3)探勘地下地質構造，並搭配地質鑽探，判釋初鄉斷層跡，具有四條分支斷層，且剪切帶水平寬度約 370 公尺寬，位於剖面西側距離約 130 至 500 公尺處，以約 55 度的傾角向東往地下深處延伸，解釋為初鄉斷層帶的範圍，電阻率剖面中電性出現不連續的區域判釋為斷層，其中的數條斷層通過初鄉 1A 井與初鄉 1B 井，可對比到岩心中劇烈剪切帶的位置。

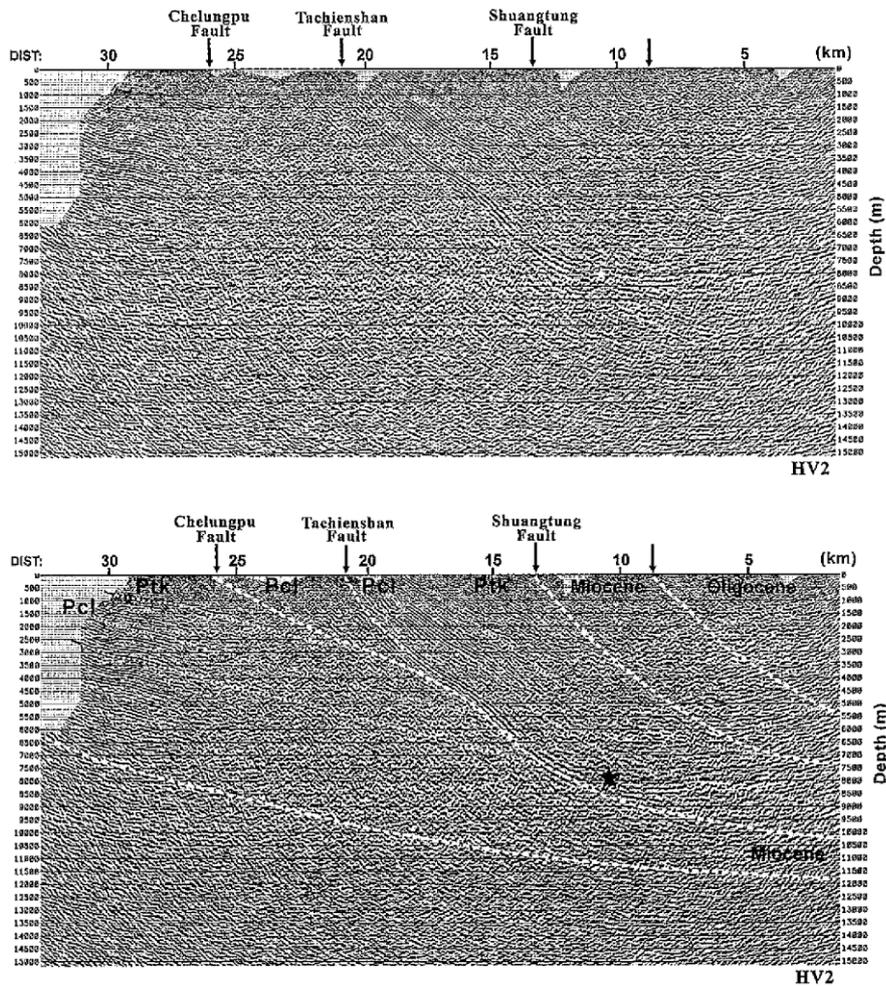


圖 3-1 濁水溪沿線之震測剖面。剖面中的 Tachienshan Fault 即本研究的初鄉斷層，黑色星狀為 1999 年集集地震震源。剖面地表位置參考圖 2-4 中震測剖面線 I。Ptk：頭嵙山層、Pcl：卓蘭層。(摘自 Wang *et al.*, 2002)

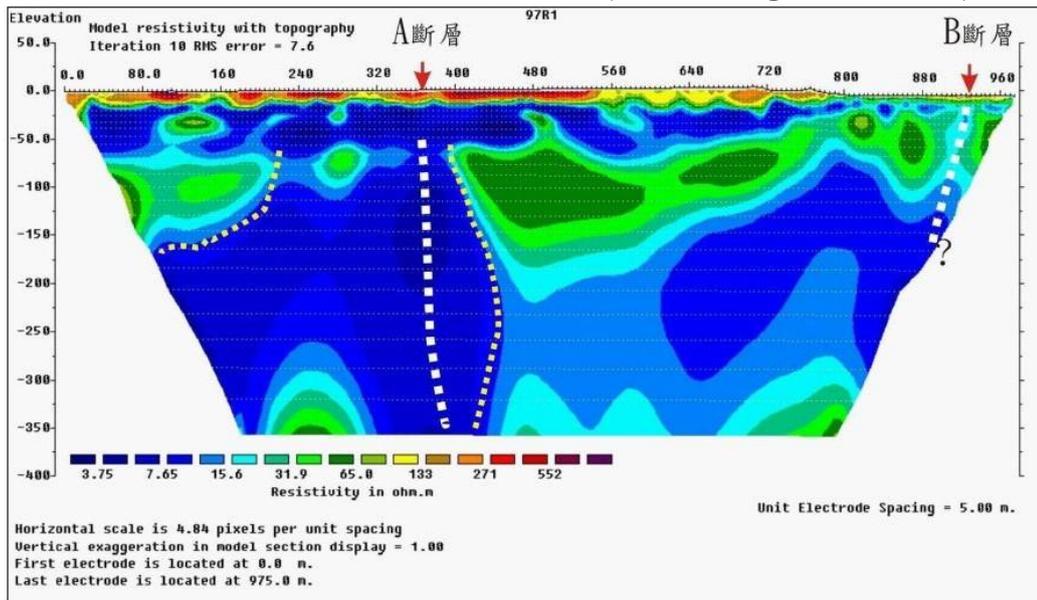


圖 3-2 集集攔河堰下游北岸跨初鄉斷層(A 斷層)的地電阻剖面。(摘自黎明工程顧問有限公司，2010)

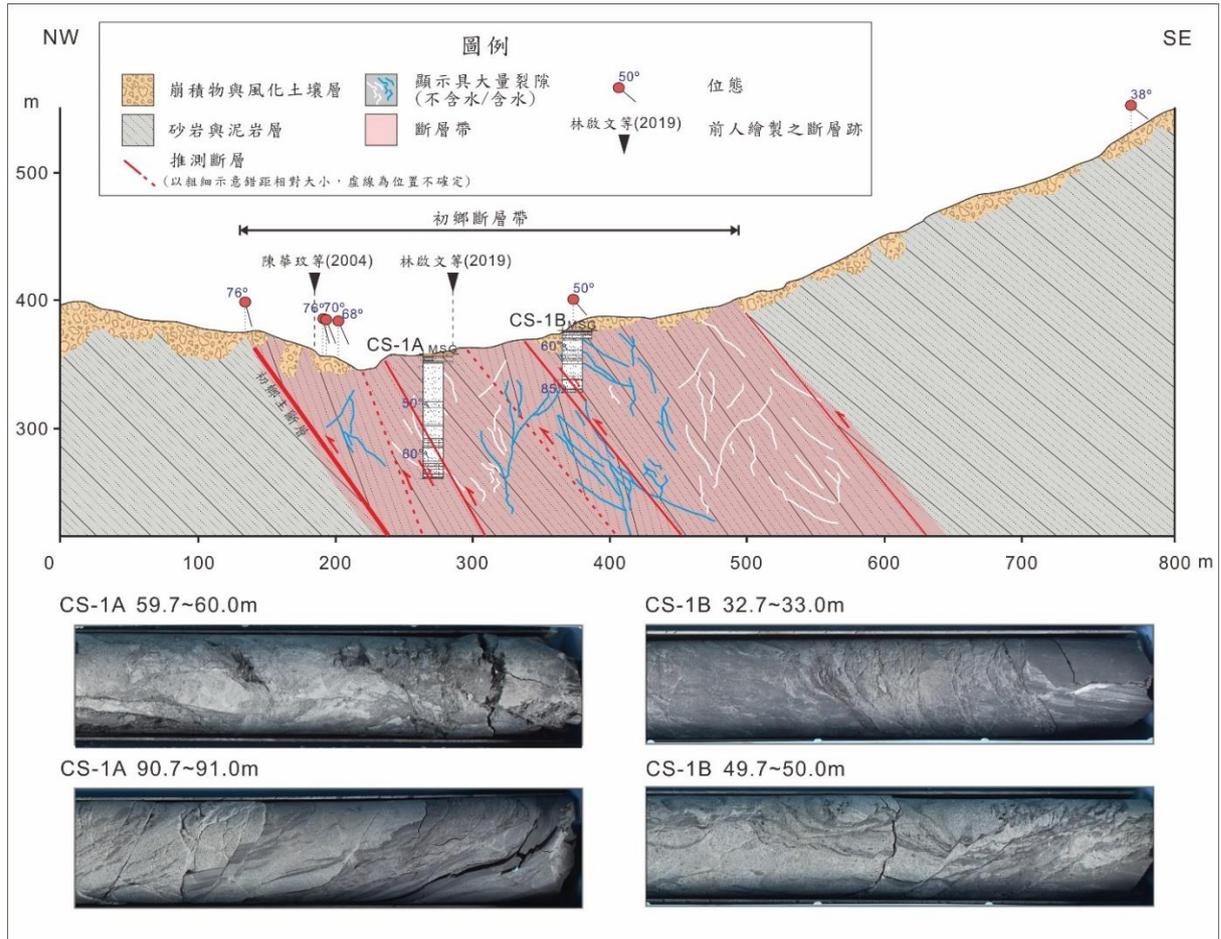


圖 3-3 初鄉底推測地下構造地質剖面。根據 ERT 及地質鑽探(CS-1A、CS-1B)所推測地下地質構造，近地表約 10~20 公尺為崩積物與風化土壤層，剖面中沿地表水平位置約 130~500 公尺處向下延伸範圍推測可能為剪切帶，初鄉主斷層位於剪切帶最西緣，上盤有數條的分支斷層。紅色箭頭表示為斷層相對運動方向，白色裂隙為尚未受水分滲流影響，藍色裂隙則為較明顯受水分滲流影響(王廷瑜，2021)。(摘自王廷瑜，2021)

3-2 前人地質資料與構造地質剖面解釋

3-2-1 地質鑽探

地質鑽探資料蒐集，以彰化、雲林、南投地區為主，鑽井點位見圖 2-4，分別為八卦山背斜的 TC-1 井、粗坑背斜的 TSK-1 井、內林背斜的 MLN-1 井、竹山一號井及南投井，以五口鑽井資料控制地層的厚度，各鑽井鑽遇各地層的深度及其厚度如表 3-1 所示。

TC-1 鑽探深度約 4800 公尺，於海平面下 4363 公尺鑽遇先中新世不整合面（表 3-1 中以鋸齒標示），井中卓蘭層下部、錦水頁岩、中新世至先中新世地層傾角低緩，其中，卓蘭層鑽厚約 1570 公尺，錦水頁岩鑽厚約 150 公尺，桂竹林層鑽厚 67 公尺，下覆中新世的觀音山砂岩、打鹿頁岩、北寮砂岩及石底層，四者總厚度 446 公尺，若將地層與八卦山北端的兩口鑽井 (PKS-1 及 PKS-2) 相對比，地層有缺失，缺失石底層下半部、大寮層、木山層及五指山層等。

TSK-1 鑽井位於雙冬斷層東側的粗坑背斜西翼、近褶皺軸部位置，鑽探深度約 2033 公尺，其中約於海平面下約 1634 公尺鑽遇雙冬斷層，若將井中斷層位置與地表判定斷層位置連線，斷層傾角約 45 度，斷層上盤為早中新世與先中新世的地層，包括粗坑層、水長流層及白冷層，岩層傾角約以 35 至 55 度向西傾斜，斷層下盤頭嵛山層岩層傾角則約為 10 度向東傾斜。

MLN-1 鑽探深度約 4000 公尺，於海平面下約 3570 公尺鑽遇先中新世不整合面（表中以鋸齒標示），其中，於海平面下約 1917 公尺鑽遇桂竹林層與下覆地層的不整合面，隨後約於海平面下約 2167 公尺鑽遇卓蘭層，判定其中鑽遇斷層—桐樹湖斷層。斷層上盤卓蘭層厚度約 1100 公尺，錦水頁岩厚度約 190 公尺，桂竹林層厚度約 230 公尺，其下覆地層厚度約 250 公尺；斷層下盤卓蘭層厚度約 520 公尺，錦水頁岩厚度約 160 公尺，桂竹林層厚

度約 210 公尺，桂竹林層底至先中新世不整合面間為南港層與石底層，兩者總厚度約 515 公尺，地層有缺失石底層下半部、大寮層、木山層及五指山層等。

南投井鑽探深度 211.9 公尺，車籠埔斷層的主剪切變形帶深度位約 176.9 至 194.3 公尺，斷層上盤錦水頁岩鑽厚約 168 公尺，斷層下盤為頭嵙山層(黃旭燦，2003)。

竹山一號井鑽探深度 407 公尺，井中有多條車籠埔斷層的剪切變形帶，井深 376.7 至 391.2 公尺，有厚約 1 米的斷層泥，若將井中剪切變形帶連結至 1999 集集地震地表破裂跡，斷層傾角約 40 度(林啟文等，2008)。

表 3-1 鑽井地層厚度表。不整合面以鋸齒狀表示，紅線表示被判定為斷層。(表中資料彙整自 Tang[1977]；黃旭燦[2003]；林啟文等[2008])

鑽井	地層	鑽遇地層深度(公尺)	鑽厚(公尺)	備註
T C - 1	頭嵙山層	0-2130	2130	
	卓蘭層	2130-3700	1570	
	錦水頁岩	3700-3850	150	
	桂竹林層	3850-3917	67	
	早中新世	3917-4363	446	
	先中新世	4363-?	未鑽穿	
M L N - 1	頭嵙山層	0-400	約400	
	卓蘭層	400-1500	約1100	
	錦水頁岩	1500-1690	190	
	桂竹林層	1690-1917	227	
	早中新世	1917-2167	250	桐樹湖斷層
	卓蘭層	2167-2683	516	
	錦水頁岩	2683-2847	164	
	桂竹林層	2847-3057	210	
	早中新世	3057-3572	515	
	先中新世	3572-?	未鑽穿	
T S K - 1	粗坑層	0-70	70	
	水長流層	70-1009	939	
	白冷層	1009-1634	625	雙冬斷層
	頭嵙山層	1634-?	未鑽穿	
井 一 竹 號 山	疏鬆礫石層	0-12.35	12.35	
	錦水頁岩	12.35-391.2	378.85	車籠埔斷層
	頭嵙山層	391.2-407	未鑽穿	
井 南 投	台地堆積	0-8.7	8.7	
	錦水頁岩	8.7-177	168.3	車籠埔斷層
	頭嵙山層	177-211.9	未鑽穿	

3-2-2 前人濁水溪震測剖面解釋

中國石油公司於 1999 年集集地震後，沿濁水溪施測長支距反射震測，該震測通過車籠埔斷層、初鄉斷層、雙冬斷層等斷層。Wang *et al.* (2002)對該震測資料進行分析，分析結果如圖 3-4(a)所示，此震測剖面約有 33 公里，東端標示為 0 公里，雖因震測線施作於濁水溪河床，河床表面的礫石層導致震測剖面的淺部訊號無法顯示太多細節，然而，於剖面 10 至 15 公里、深約 6 至 8 公里處，仍可觀察到明顯的強反射訊號，反射訊號約呈 40 度向東傾斜，其底部解釋為車籠埔斷層，該反射訊號向上下延伸，向上延伸至剖面 15 至 20 公里、深約 2 至 4 公里處，並可觀察到該反射訊號彎曲，通過 Tachienshan fault(即本研究所稱的初鄉斷層)；該反射訊號向下延伸至深約 8 公里的位置而轉向，變為近水平的傾角，集集地震的震源大約位於此轉折點(deflection point)，因此轉折點被解釋為斷坡—斷坪的轉折點，該轉折點可能累積應力而造成地震。除 Wang *et al.* (2002)外，亦有其他前人(Hung and Suppe, 2002；Lee and Shih, 2011)對此剖面有所解釋，然而，對此剖面的地質解釋略有不同的。

對比 Wang *et al.* (2002)(圖 3-4(a))與 Hung and Suppe (2002)(圖 3-4(b))對剖面的解釋，Hung and Suppe (2002)未於剖面地表標示初鄉斷層，但可見於車籠埔斷層及雙冬斷層間有一未標示名稱的斷層(本研究判斷即為初鄉斷層)，兩團隊對車籠埔斷層淺部的構造解釋不相同，前者認為車籠埔斷層與初鄉斷層交匯於深度約 4 至 5 公里處，後者則認為初鄉斷層匯入雙冬斷層；兩者對於車籠埔斷層深部的構造解釋相似，滑脫面約在 8 至 10 公里處，滑脫面下方為中新世地層，認為集集地震震源位於深度 8-9 公里處的斷坡—斷坪的轉折點。Hung and Suppe (2002)(圖 3-4(b))認為車籠埔斷層由淺至深皆

已沿錦水頁岩(Pcs)底部為滑動面，而在 Wang *et al.* (2002)(圖 3-4(a))未標示出錦水頁岩。

對比 Wang *et al.* (2002)(圖 3-4(a))與 Lee and Shih (2011)(圖 3-4(b))剖面的解釋，明顯可觀察到兩者對於車籠埔斷層及初鄉斷層的解釋有所不同，前者認為初鄉斷層與車籠埔斷層接匯於剖面 16-17 公里、深度 5000-5500 公尺處，車籠埔斷層上盤為卓蘭層，初鄉斷層上盤為卓蘭層及頭嵙山層，滑脫面截切中新世地層；後者剖面中，車籠埔斷層與初鄉斷層約接匯於剖面 11-12 公里、深度 9000 公尺處，且車籠埔斷層與初鄉斷層皆截切桂竹林層及其上覆地層，滑脫面深度大致與先中新世地層頂部深度相同；兩者的剖面中，車籠埔斷層下盤地層厚度有所不同，前者中的早中新世地層厚度約 2000 至 3000 公尺厚，而後者則未見早中新世地層，桂竹林層覆蓋在先中新世地層之上。

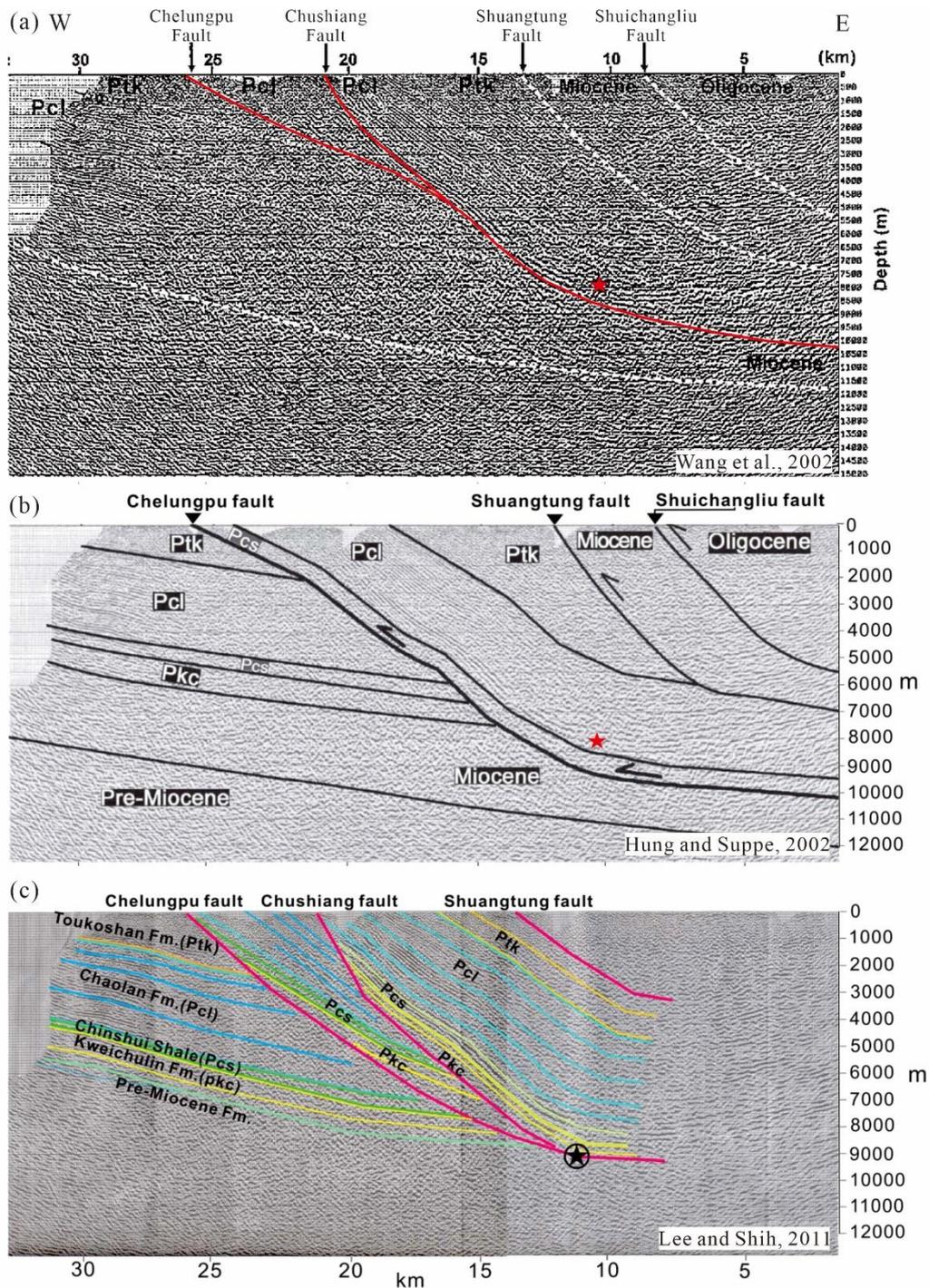


圖 3-4 (a)Wang *et al.* (2002)對震測剖面 I 的解釋。初鄉斷層與車籠埔斷層交匯深度 5-5.5 公里處，初鄉斷層上盤為 Ptk 與 Pcl，滑脫面截切中新世地層。(b)Hung and Suppe (2002)對震測剖面 I 的解釋。(c)Lee and Shih (2011)對震測剖面 I 的解釋。初鄉斷層與車籠埔斷層約接匯於剖面 11-12 公里、深度 9 公里處，車籠埔斷層與初鄉斷層皆截切 Kcl 及其上覆地層。黑色、紅色星狀表示為 1999 年集集地震震源。剖面地表位置參考圖 2-4 中震測剖面 I。Ptk：頭嵛山層、Pcl：卓蘭層、Pcs：錦水頁岩、Pkc：桂竹林層。

3-2-3 前人區域構造地質剖面模型

前人(黃旭燦, 2003; Wang *et al.*, 2002; Brown *et al.*, 2012)已在南投至竹山區域繪製了數條構造地質剖面, 構造剖面地表位置如圖 3-5 所示, 前人對於該區域的構造解釋皆有不同。

黃旭燦(2003)在台灣中部、西南部建立多條構造地質剖面, 鄰近本研究區域為剖面 BB'及剖面 CC', 兩者地表位置分別為圖 3-5 中構造剖面 3 及 4 的位置, 剖面 BB'(圖 3-6(a))位於南投名間地區, 剖面呈西北向, 通過彰化斷層、車籠埔斷層及雙冬斷層, 該剖面修改自 Suppe(1986)的構造剖面, 剖面通過 TC-1 及 TSK-1, 顯示車籠埔斷層與彰化斷層皆沿錦水頁岩底部滑移, 分別約在深度 6 公里處與滑脫面接匯, 雙冬斷層深部大致與車籠埔斷層及彰化斷層的滑脫面平行; 另一剖面 CC'(圖 3-6(b))位於竹山鎮附近, 剖面由西部平原向麓山帶延伸, 剖面在八卦山背斜以東呈東西走向, 通過多條西部平原的盲斷層、彰化斷層、初鄉斷層及哮貓斷層(雙冬斷層), 車籠埔斷層及彰化斷層的滑脫面約位於深度約 7800 公尺處, 車籠埔斷層上下盤卓蘭層厚度差異大, 認為車籠埔斷層底下存在張裂性正斷層, 初鄉斷層截切桂竹林層沿車籠埔斷層上盤的卓蘭層滑移, 其滑脫面與車籠埔斷層的滑脫面平行, 彰化斷層與剖面 BB'中沿錦水頁岩滑移的解釋不同, 剖面 CC'中彰化斷層沿先中新世不整合面滑移, 其滑脫面深度也較深(與剖面 BB'相比), 哮貓斷層、初鄉斷層及車籠埔斷層三者深部滑脫面大致平行, 剖面 CC'的回復剖面中(圖 3-6(c)), 初鄉斷層未完全回復, 無法得知初鄉斷層向東延伸是否與車籠埔斷層併入同一滑脫面。

Wang *et al.* (2000)以 Suppe (1980)的薄皮逆衝模型(thin-skinned thrust model)加入鑽井與震測, 描述西部麓山帶覆瓦狀構造(imbricated structure)(圖 3-7(a)), 其構造地質剖面地表位置為圖 3-5 中構造剖面 1 位置, 剖面呈東北

一西南走向，通過名間以北的地區，剖面中先新生代基盤受斷層與褶皺影響較小(與剖面中其餘地層相比)，先新生代滑脫面位於 10-20 公里深，坡度約 8 度；另一滑脫面在於深度約 8-10 公里，沿中新世地層滑移，車籠埔斷層、雙冬斷層與水長流斷層為其延伸的分支斷層，車籠埔斷層深部分別沿先新生代基盤滑移，淺部截切錦水頁岩，沿中新世滑移，彰化斷層沿先新生代基盤滑移，截切其上覆地層，止於卓蘭層。

Brown *et al.* (2012)根據地質圖與野外測量資料繪製兩構造地質剖面(圖 3-7(b)、圖 3-7(c))，兩剖面地表位置分別為圖 3-5 中構造剖面 2 與 5 的位置，一者(構造剖面 2)位於名間以北，剖面呈東西走向，剖面中並未標示出錦水頁岩，車籠埔斷層深部與彰化斷層匯入滑脫面，滑脫面下方為中新世地層；另一者(構造剖面 5)通過竹山地區，剖面呈東西走向，初鄉斷層位於車籠埔斷層東側，於深度約 6 公里處併入車籠埔斷層，初鄉斷層東側上盤出露卓蘭層及頭嵙山層，彰化斷層與車籠埔斷層分別於深度 6 公里處與 8-9 公里處與滑脫面合併，1999 年集集地震震源接近車籠埔斷層與滑脫面合併的位置。

Yu *et al.* (2005)根據前人地質圖、鑽井及震測資料繪製平衡的構造地質剖面(圖 3-8)，剖面約呈東西向，投影鄰近的鑽井(TC-1 及 TSK-1)及震測資料(J 及 H)作為制約，一滑脫面約位於深度 6 公里處，呈低傾角或近水平向東傾斜，滑脫面上發育至少四條的分支斷層，由東至西依序為水里坑斷層、雙冬斷層、車籠埔斷層及彰化斷層；由於車籠埔斷層滑脫面深度與 1999 年集集地震震源深度差約 2 至 3 公里，因此假設有另一滑脫面，約位於地下 9 公里處，認為震源所在滑脫面與車籠埔斷層滑脫面平行，用於解釋 1999 年的集集地震。車籠埔斷層上盤岩層傾角向西漸緩，呈同斜構造，斷層面呈斷坡—斷坪的幾何形貌，近地表約呈 50 度向東傾；彰化斷層以錦水頁岩為弱

面滑移，淺部約呈 27 度向東傾，斷層上盤頭嵛山層為生長地層，深部連接約 5 公里深的滑脫面，錯距約 1600 至 1700 公尺，並認為八卦山背斜為類似純剪的斷層彎曲褶皺。

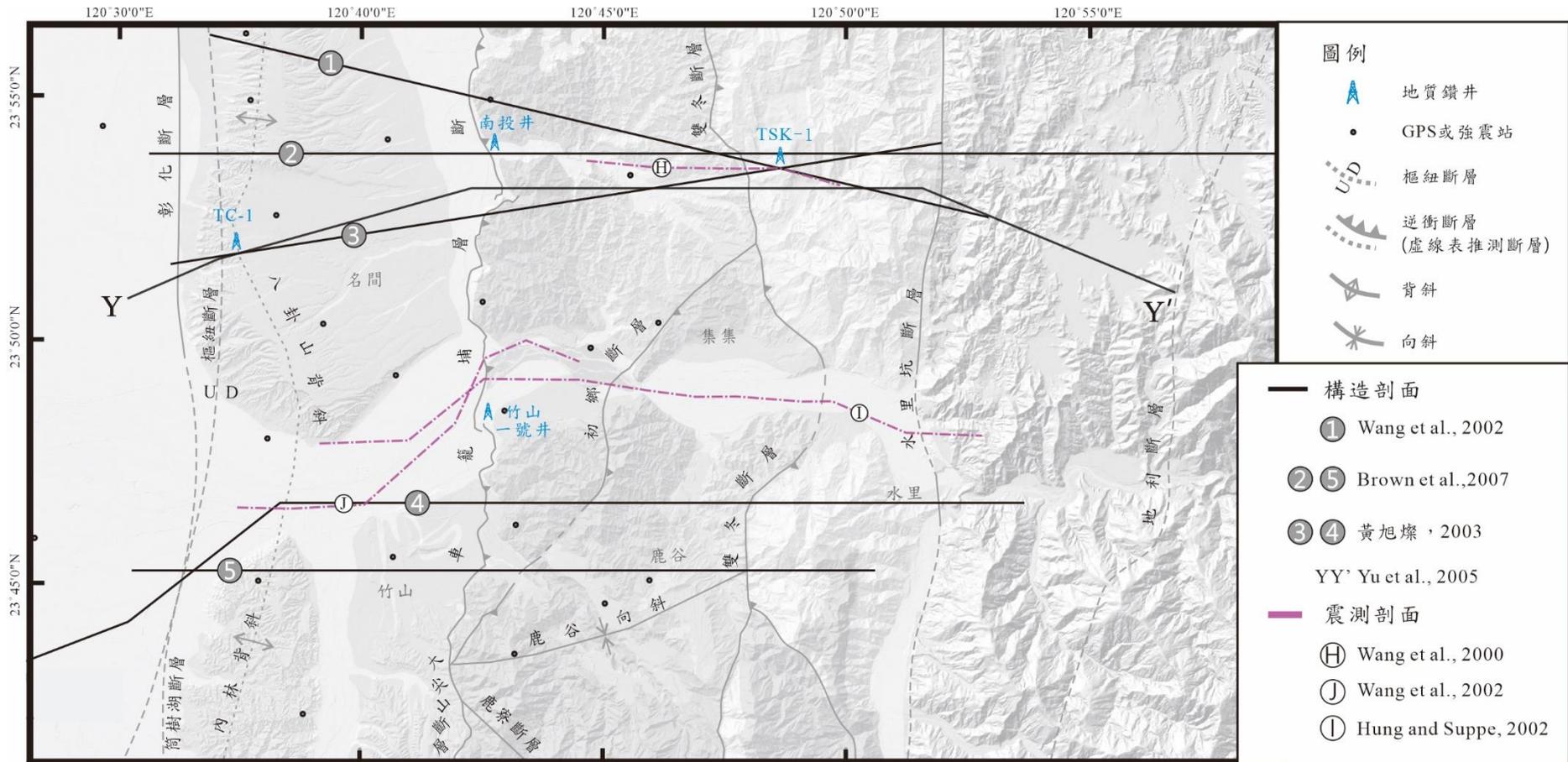


圖 3-5 前人構造地質剖面與剖面資料位置圖。(構造剖面分別摘自 Brown *et al.* [2007]; 黃旭燦[2003]; Wang *et al.* [2002]; Yu *et al.* [2005]; 震測剖面地表位置分別摘自 Wang *et al.* [2000]、Wang *et al.* [2002]、Hung and Suppe [2002])

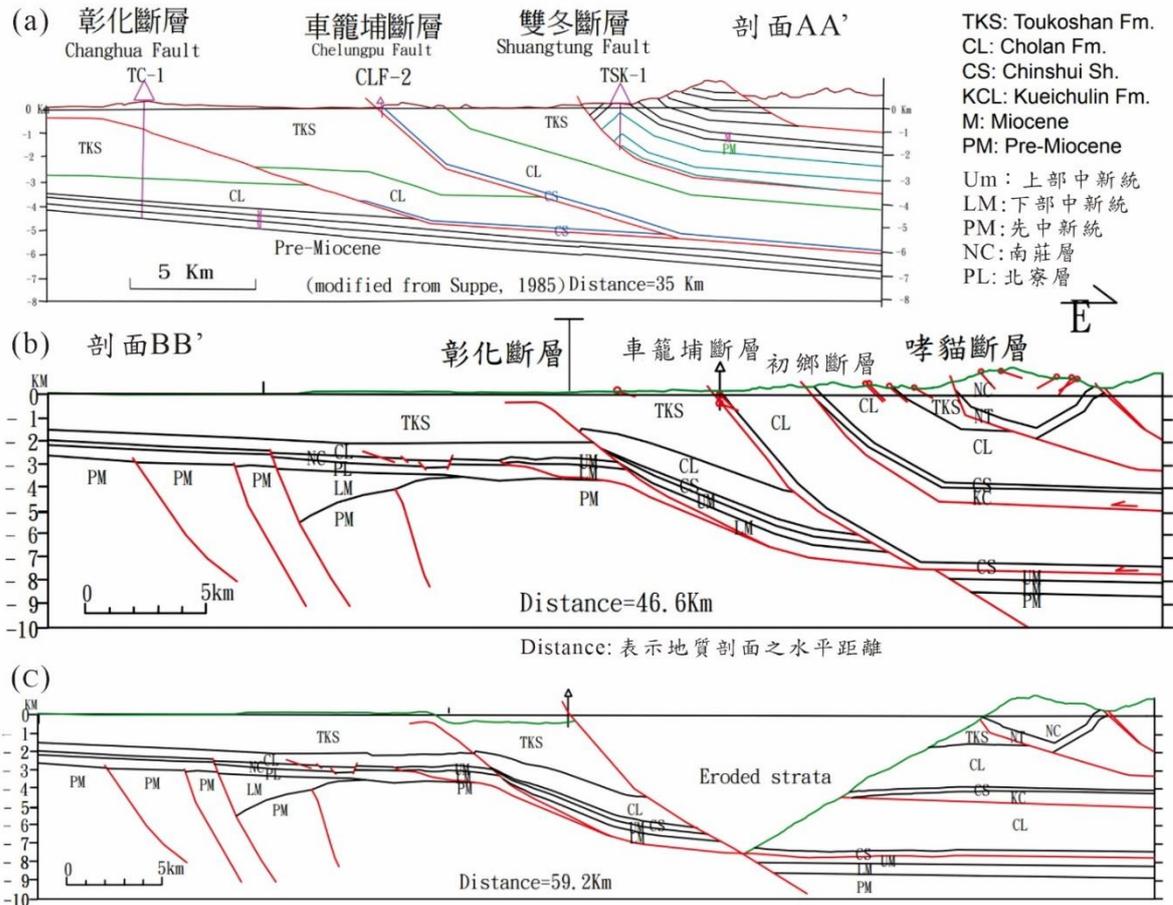


圖 3-6 (a)黃旭燦(2003)剖面 AA'，車籠埔斷層與彰化斷層皆沿錦水頁岩底部滑移，並在深度約 6 公里處相匯於滑脫面。(b)黃旭燦(2003)剖面 BB'，車籠埔斷層滑脫面較剖面 AA'深，約 7800 公尺，彰化斷層沿下部中新世(早中新世)與先中新世不整合面滑移，車籠埔斷層上下盤卓蘭層厚度差異大，初鄉斷層截切桂竹林層，沿車籠埔上盤卓蘭層滑移。(c)黃旭燦(2003)剖面 BB'剖面回復，初鄉斷層上盤地層與車籠埔斷層下盤地層厚度與層位差異大，認為車籠埔斷層底下存在正斷層。各剖面地表位置見圖 3-5 中構造剖面 3 與 6 的地表位置。紅色實線表示為斷層，地表三角形符號表示為鑽井位置，哮貓斷層本研究稱之雙冬斷層。Tks：頭嵛山層、Cl：卓蘭層、Cs：錦水頁岩、Kc：桂竹林層、M：中新世地層、Pm：先中新世地層。((a)摘自黃旭燦(2003)修改 Suppe(1986)的圖，(b)、(c)摘自黃旭燦，2003)

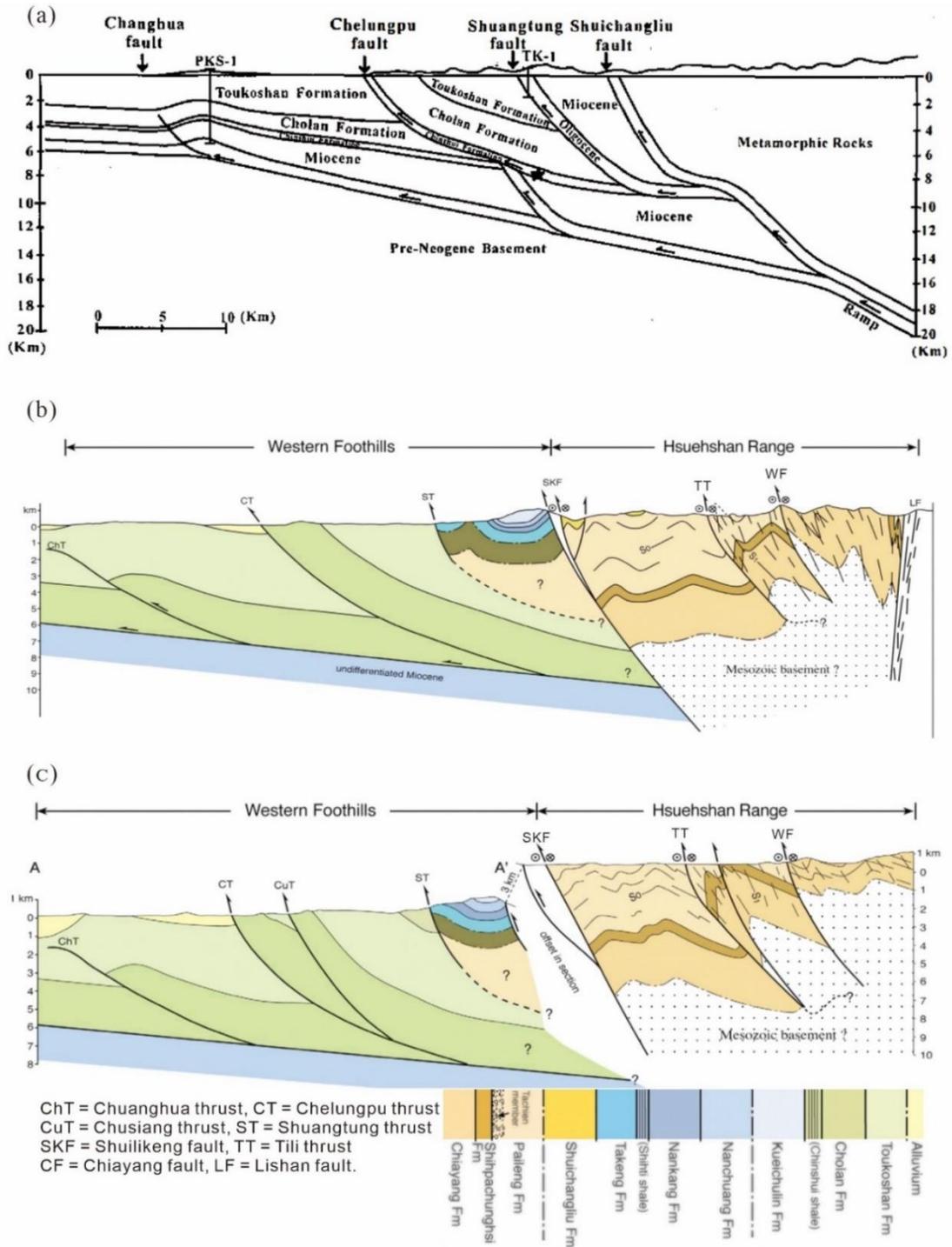


圖 3-7 (a)Wang *et al.* (2000)修改自 Suppe (1980)的薄皮構造模型，星狀符號代表集集地震震源位置，車籠埔斷層為一從滑脫面延伸的分支斷層，沿軟弱的錦水頁岩發育，直至出露於地表。(b)、(c)Brown *et al.* (2012)構造剖面，彰化斷層與車籠埔斷層分別於深度 6 公里處與 8-9 公里處與滑脫面合併，集集地震震源位於車籠埔斷層且靠近其與滑脫面合併的位置。剖面地表位置見圖 3-5((a)摘自 Wang *et al.*, 2000, (b)、(c)摘自 Brown *et al.*, 2012)

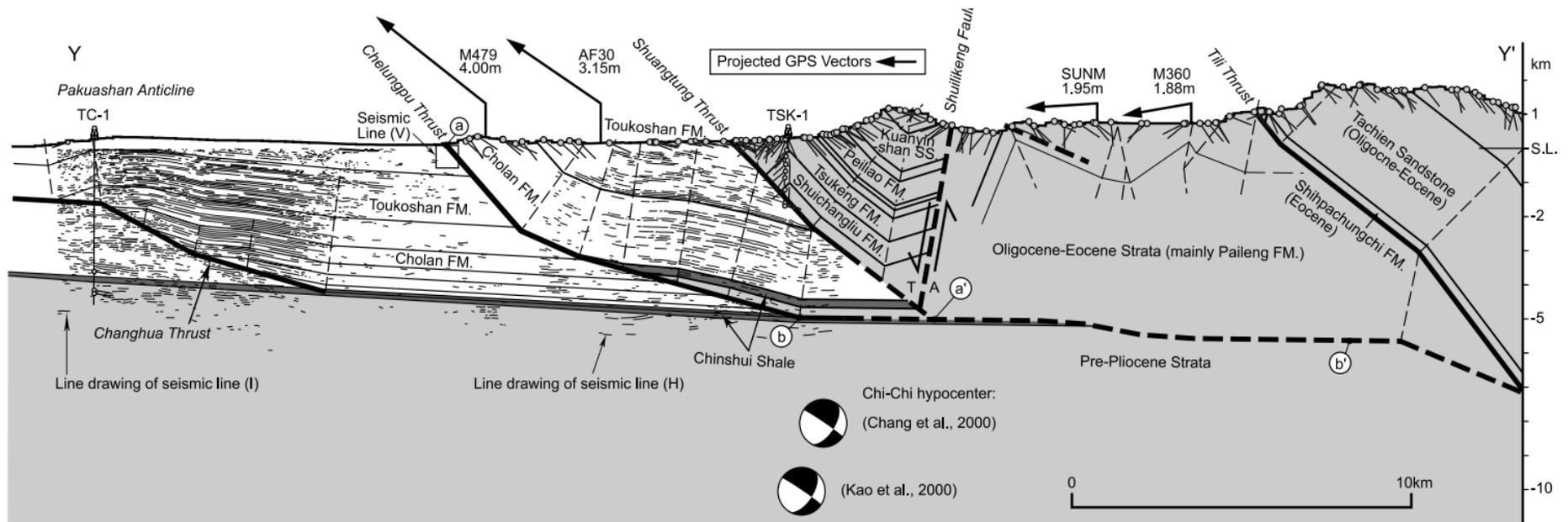


圖 3-8 Yu *et al.* (2005) YY'剖面。黑色粗線為主要斷層，斷層旁箭頭表示為相對運動方向，黑色細線表示為地層邊界，黑色細虛線為輔助線或樞紐軸，圓圈 S 表示為剪切帶，圓圈 a 與圓圈 a' 表示為構造回復位置(由 a 回復至 a')。一滑脫面約位於深度 6 公里處，呈低傾角或近水平向東傾斜，滑脫面上發育至少四條的分支斷層；車籠埔斷層滑脫面深度與 1999 年集集地震震源深度差約 2 至 3 公里，假設有另一滑脫面，與車籠埔斷層滑脫面平行，用於解釋 1999 年的集集地震。車籠埔斷層近地表約呈 50 度向東傾，斷層上盤岩層傾角向西漸緩，呈向斜構造；彰化斷層以錦水頁岩為弱面滑移，淺部約呈 27 度向東傾，斷層上盤頭嵛山層為生長地層，深部連接約 5 公里深的滑脫面，錯距約 1600 至 1700 公尺，並認為八卦山背斜為類似純剪的斷層彎曲褶皺。(修改自 Yu *et al.*, 2005)

第4章 研究方法與資料

4-1 野外地質調查

本研究野外地質調查主要目的為了解岩層出露狀況、岩性特徵及變形現象，以驗證剖面繪圖方法的合理性及可行性。野外調查範圍集中在濁水溪的名竹大橋至集集攔河堰間，及東埔蚋溪的初鄉橋東側與雙溪底等地區，並以無人空拍機協助調查岩層情況。調查名竹大橋至集集攔河堰間的岩層出露狀況，可用於後續建立沿濁水溪剖面(剖面 CC')的地層厚度。

4-2 生物地層鑑定

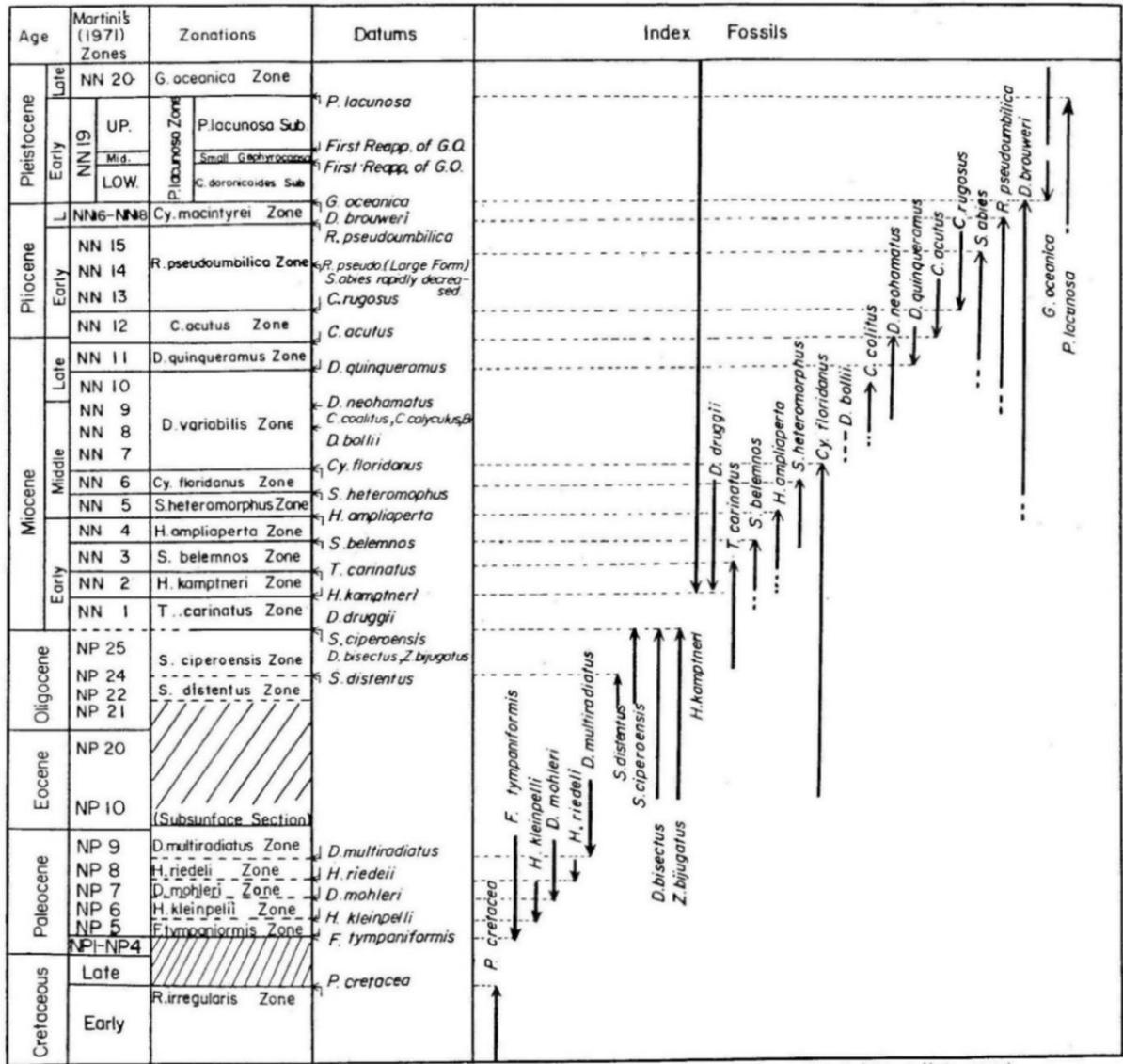
4-2-1 生物地層定年

為解決前人對於濁水溪南岸車籠埔斷層東側是否出露錦水頁岩的爭議，本研究透過生物地層對比的方法，以了解濁水溪沿岸岩層所屬的地層及地層的分布情況，而進一步能了解車籠埔斷層與地層的截切關係。地層對比常使用生物地層對比的方法，包括孔蟲化石、超微化石、花粉及孢子法等，超微化石對比法常被運用於對比海相的沉積岩。雖然超微化石與構造活動無直接關係，但透過超微化石鑑定可以推斷年代、沉積環境及二次化石來源，可以提供做為構造解釋的證據。超微化石只存在海相地層，且標本在玻璃片中無法各別挑出，僅能看到化石的單一側，無法立體呈現，因此使用穿透式偏光顯微鏡時，只能觀察光性變化及看到粗略的外觀，若要進一步的詳細觀察或結構，須借助電子顯微鏡，超微化石地層化石帶依據紀文榮(1983)(表 4-1)判定地層化石帶。

4-2-2 野外岩樣採集

本研究沿濁水溪南岸車籠埔斷層東側上盤距斷層 250 至 450 公尺間進行野外岩樣採集，確認車籠埔斷層東側上盤所出露的地層，共計 14 個岩樣，採樣位置如圖 4-1 所示，將岩樣帶回室內處理，進行超微化石鑑定。

表 4-1 臺灣中部、南部及東部中生代與新生代地層超微化石基準面、化石帶及指示化石分佈。(摘自紀文榮，1983)



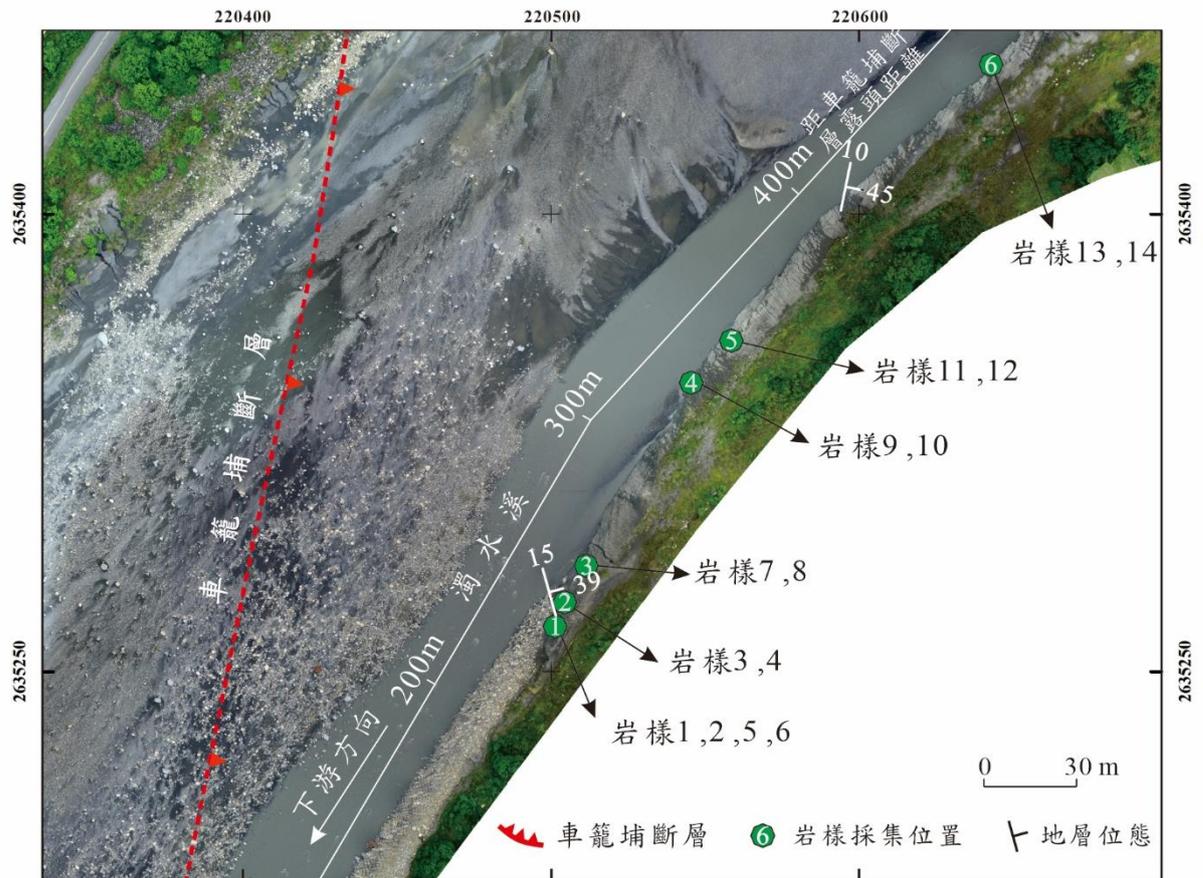


圖 4-1 超微化石岩樣採集點分布圖。(車籠埔斷層跡改繪自陳文山等[2016])

4-3 構造地質剖面

構造地質剖面流程可分為四步驟，分別為(1)彙整地質資料、(2)剖面位置與制約、(3)剖面製圖、(4)剖面回復。本研究將繪製五條構造地質剖面，由北至南分別為剖面 AA'、剖面 BB'、剖面 CC'、剖面 DD'及剖面 EE'，並將各剖面進行剖面回復，雖然初鄉斷層可能具有走向滑移分量，若要進行構造回復，須進行三維的構造回復，但藉由剖面回復，可協助審視地層變化趨勢及構造發育順序；雙冬斷層上盤除地表地質資料外，地下地質資料少，地層與斷層幾何均無法有良好的制約，因此本研究剖面著重於討論雙冬斷層以西至彰化—桐樹湖斷層。

4-3-1 彙整地質資料

彙整資料包含地表高程、地表地質資料、地質鑽探及震測剖面，地表高程利用內政部 20 公尺網格數值地形模型資料；地表地質使用前人(陳華玟等，2004；黃鑑水和陳勉銘，2000；劉桓吉等，2004；陳勉銘等，2016；林啟文等，2021；中國石油公司，1986、1982)的地表岩層位態，篩選沿剖面距離二公里內的代表位態，並計算投影至剖面的傾角；地質鑽探包含 TC-1、MLN-1、TKS-1、竹山一號井、南投井；震測剖面包含震測剖面 H(Wang *et al.* 2002)、震測剖面 J(Hung and Suppe, 2002)、震測剖面 I(Wang *et al.*, 2000)及內林震測剖面(Chen, 1978)。

車籠埔斷層地表位置根據前人(陳文山等，2016)1999 年集集地震地表破裂跡，雖然 1999 年集集地震地表破裂跡能否代表車籠埔斷層於地表的位置仍具爭議(林啟文等，2019)，依鑽遇車籠埔斷層深度與斷層跡位置，車籠埔斷層淺部傾角約東傾 45 度。

根據前人地質鑽井(童煜翔等, 2022)及地球物理方法(Wang *et al.*, 2002; 黎明工程顧問有限公司, 2013; 王廷瑜, 2021), 初鄉斷層近地表約呈 40 至 70 度向東傾, 斷層帶寬廣, 可達數百公尺以上。

Chang(1971)利用鑽井與多條震測剖面的分析結果, 錦水頁岩在彰化斷層至車籠埔斷層間, 約呈 4 度向東傾, 而在車籠埔斷層東側的錦水頁岩層態約呈 17 度向東傾, 為該研究判識的錦水頁岩頂部深度之構造等高線圖參見圖 2-6。

1999 年集集地震, 主震震源位於地下深度約 8 公里位置, Chen *et al.* (2002)的震源機制解(圖 4-2), 解釋為該主震的位置滑脫面斷坡—斷坪的轉折點, 斷層傾角為 34 度向東傾, 有一餘震約位於主震東方 15 公里處, 深度約 12 公里, 被認為此餘震與雙冬斷層有所關聯, 將此餘震與主震震源連線, 滑脫面呈近水平向東延伸; GPS 站同震位移向量可用於繪製斷層傾角, 使用 Yu *et al.* (2001)的資料, 由東西向位移及垂直向位移, 計算同震位移投影至剖面的分量及俯仰角(pitch)或傾沒角(plunge)(表 4-2)。

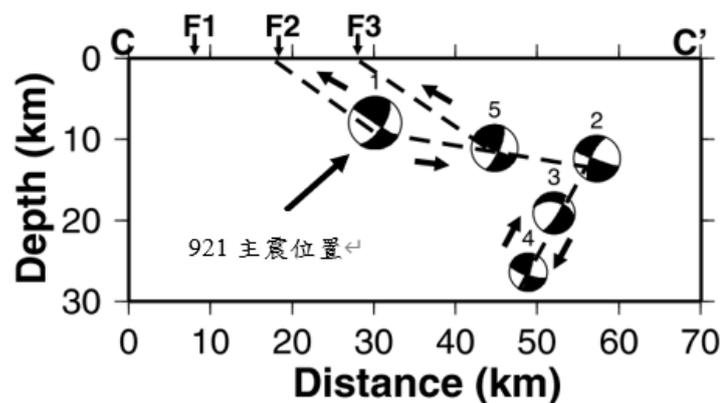


圖 4-2 1999 年集集地震及其餘震震源機制解。虛線表示為根據震源機制解及餘震分布所推測的斷層, 地表箭頭表示為斷層跡位置, F1 為彰化斷層, F2 為車籠埔斷層, F3 為雙冬斷層。車籠埔斷層約呈 34 度向東傾, 於深度 8 公里處連接滑脫面, 滑脫面以近乎水平向東延伸至深度 12.4 公里。震源機制解上方數字表示為地震發生順序。(摘自 Chen *et al.*, 2002)

表 4-2 1999 年集集地震同震 GPS 站同震位移向量。東西向淨位移與位移向量與水平夾角度由東西向水平位移及鉛直位移利用三角函數計算而得。東西向淨位移正值表示向東移動，位移向量與水平夾角度正值表示為俯仰角度，即測站抬升，負值表示為傾沒角，即測站沉陷。(資料來源: Yu *et al.* [2001])

GPS	投影至剖面分量	位移向量與水平夾角度	GPS	投影至剖面分量	位移向量與水平夾角度
AF30	3.15	+34°	M360	1.88	-11.3°
SUMN	1.95	-4.1°	M408	1.61	+5.8°
I007	1.1	+37.7°	M479	4.00	+38.2°
G042	1.4	+54.9°	M493	2.48	+22.5°
G043	4.29	+50.1°	M509	1.1	+11.5°
G044	3.18	+36.2°			

1. 各地層趨勢角度

為了解各地層於空間中的變化趨勢，未出露地層的位態常用三點法計算其岩層的位態，假設有已知的三地質鑽井(BH-1、BH-2、BH-3)，三鑽探皆鑽遇 Fm. A 與 Fm. B，且 Fm. A 整合於 Fm. B 上，則可利用 Fm. A 與 Fm. B 地層層界深度差異及三鑽井間的幾何關係，計算 Fm. A 地層下界的位態，本研究將此位態投影到剖面中的角度稱之為「趨勢角度」。

實際情況將遇到其他情況，如地層尖滅或不整合面，若地層間有不整合面，表示地層界面並非岩層的層面，不適用此方法。由於早中新世地層不整合於先中新世地層及桂竹林層，因此僅頭嵛山層至桂竹林層之間的地層計算趨勢角度。

本研究以最鄰近本研究區域的前人鑽井(G-1、TC-1、K-2A、S-1)位置(鑽井地表位置參見圖 4-3)及鑽遇地層深度，用三點法計算各地層界面的位態，但由於 S-1 未鑽遇錦水頁岩及桂竹林層，兩地層於井 S-1 與 K-2A 之間尖

減，因此錦水頁岩及桂竹林層的位態僅能由井 G-1、TC-1、K-2A 計算，結果如表 4-3 所示，可觀察到各地層邊界大致呈南北走向，平均邊界傾角約 1 至 5 度，並計算各剖面中的趨勢角度，結果如表 4-4 所示。

早中新世地層不整合覆於先中新世地層，地層趨勢角角度可能不具代表性，因此地層厚度根據 Lin *et al.* (2021) 漸新世至中新世沉積物厚度，並假設下伏於桂竹林層。

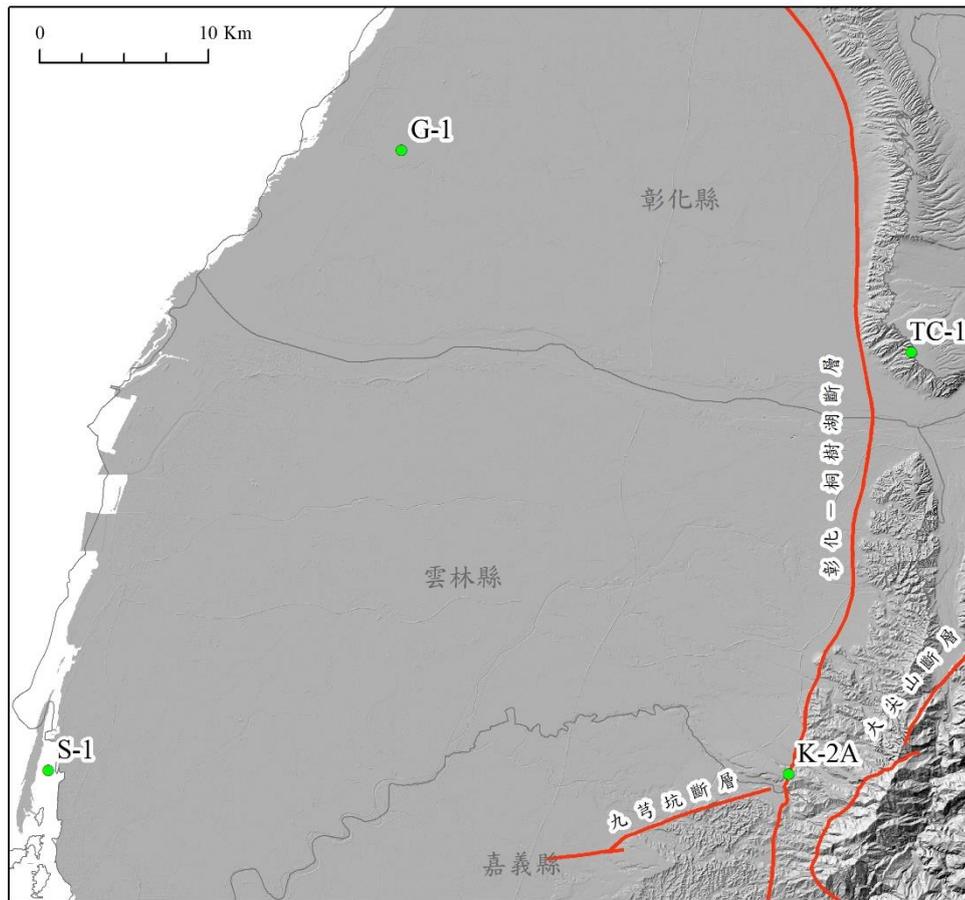


圖 4-3 台灣中部鑽井位置圖。綠點表示為鑽井位置及其名稱，紅線表示為主要的斷層。

表 4-3 由三點法所求得的各地層邊界位態。可觀察地層走向約呈南北向、1 至 5 度向東傾。

地層 \ 三點法所求得的位態	位態 1	位態 2	位態 3	位態 4	平均位態
頭嵙山層	349°/1°E	324°/2°E	359°/2°E	340°/2°E	343°/2°E
卓蘭層	348°/3°E	318°/3°E	359°/4°E	338°/5°E	341°/4°E
錦水頁岩	337°/5°E	-	-	-	-
桂竹林層	337°/5°E	-	-	-	-

表 4-4 本研究各剖面中各地層下邊界的趨勢角度。

地層	頭嵙山層	卓蘭層	錦水頁岩	桂竹林層
邊界趨勢角	2.2°	4.2°	4.5°	4.6°

2. 各斷層錯距及幾何

為較佳的制約並繪製各剖面，本研究假設斷層的幾何變化不大，且斷層錯距變化為線性變化，基於前人研究，計算樞紐斷層、彰化斷層及桐樹湖斷層在各剖面中的錯距。

彰化斷層根據 Yue *et al.* (2011)的研究結果，彰化斷層呈斷坪—斷坡—斷坪的幾何形貌，斷坡傾角約由東傾 26 度向東變緩至 15 度，彰化斷層沿錦水頁岩滑移，錯距約為 1600 公尺至 1700 公尺(圖 2-14)，因此假設剖面 AA'、剖面 BB'及剖面 CC'中錯距為 1600 至 1700 公尺；王乾盈等(2004)認為彰化斷層有向南延伸通過濁水溪，但在濁水溪南岸的淺層反射震測剖面(圖 2-11)中未觀察到斷層錯動的跡象，因此本研究假設剖面 DD'中，八卦山背斜下方的彰化斷層一則未截切卓蘭層與頭嵙山層的界面，或錯距近乎為零，在剖面中以虛線示意。

桐樹湖斷層根據內林震測剖面(圖 2-15)，斷層呈 28 度向東傾斜，王乾盈等(2004)認為濁水溪南岸的岩層彎曲(圖 2-17 A 剖面)為八卦台地構造系統(彰化斷層及八卦山背斜)的延伸，並認為湖本地區(圖 2-17 C 剖面)的岩層彎曲為桐樹湖斷層所引起，內林背斜兩側岩層傾角較陡(與圖 2-17 A 剖面中的岩層相比)，但未觀察到斷層。因此本研究假設桐樹湖斷層發育至濁水溪南岸已尖滅或錯距近乎為零，根據內林背斜兩翼岩層向南漸陡，推測桐樹湖斷層錯距向南漸增。因此假設桐樹湖斷層在濁水溪南岸錯距為零，且向南線性增加，直至內林震測中約 1200 公尺，則在剖面 EE'中斷層錯距為 645 公尺。

4-3-2 剖面位置與制約

本研究繪製五條剖面的制約(constrain)，長度約為 50 公里，包含上述所彙整的資料，各剖面地表位置參見圖 2-4，以下分別論述。

一、 剖面 AA'

本剖面位置(參見圖 2-4)同 Yue *et al.* (2005)中的 YY'剖面(圖 3-8)，但較短，起自彰化田中地區，經南投集集大山，至日月潭。剖面通過彰化斷層、樞紐斷層、八卦山背斜、車籠埔斷層、雙冬斷層、粗坑背斜、大岸山向斜及水里坑斷層。本剖面中(圖 4-4)，投影並描繪了震測剖面 J 及震測剖面 H，此兩震測剖面跨距較震測剖面 I 短，有較好的解析度。

林啟文等(2008)認為車籠埔斷層於近地表約為東傾 45 度，並於上盤出露錦水頁岩；車籠埔斷層至雙冬斷層之間，震測解釋中地層傾角與地表位態相符合，作為車籠埔斷層與雙冬斷層間的制約；TSK-1 鑽遇雙冬斷層深度與地表斷層出露位置連線，雙冬斷層近地表約呈 45 度東傾，與野外露頭所觀察相符合(黃鑑水和陳勉銘，2000)。

剖面鄰近 GPS 站 M479、AF30、SUNM 及 M360。根據各地層下介面趨勢角度，計算各地層厚度：頭嵙山層約由 2950 向東增厚至 4250 公尺，卓蘭層約由 800 公尺向東增厚至約 2500 公尺，錦水頁岩層厚變化相對較小，層厚約 130 公尺，桂竹林層約 70 公尺，早中新世地層約由 350 公尺向東增厚約至 1600 公尺，先中新世層約由 5 度增加至 6.4 度，後變緩為 4.4 度。

此剖面相較於本研究的其他構造剖面，有較多地質資料做為制約，可信度較高，並可藉本剖面與 Yue *et al.* (2005)的其他剖面向北延伸，建立濁水溪以北的車籠埔斷層模型，濁水溪以南則可與本研究其他構造地質剖面相連接，建立完整的車籠埔斷層模型。

二、 剖面 BB'

剖面 BB'的位置(參見圖 2-4)西起彰化田中，經名間、廣興，東止於日月潭，通過之構造分別有彰化斷層、八卦山背斜、車籠埔斷層、初鄉斷層、雙冬斷層、集集大山向斜、及水里坑斷層。剖面(圖 4-5)於八卦山背斜通過 TC-1 井，鄰近 GPS 站 M479 及 G044，震測剖面 J 及震測剖面 H 的反射層被投影描繪於其上。根據各地層下界面趨勢角度，計算所得的地層厚度，分別為頭嵙山層約由 2950 向東增厚至 4250 公尺，卓蘭層約由 800 公尺向東增厚至約 2500 公尺，錦水頁岩約 130 公尺，桂竹林層約 70 公尺，早中新世地層約由 400 公尺向東增厚約至 1700 公尺。先中新世地層約由 5 度增加至 6.9 度，後變緩為 5.4 度，更可藉由此剖面了解初鄉斷層北段與雙冬斷層的關係。

三、 剖面 CC'

本剖面 CC'的位置大致沿濁水溪主流，東起自彰化二水西邊，經南投竹山、集集攔河堰，至日月潭南方，剖面由西至東通過彰化斷層、八卦山背斜、車籠埔斷層、初鄉斷層、雙冬斷層及水里坑斷層。

濁水溪沿岸由竹山大橋至集集攔河堰一帶有良好且連續的岩層出露，車籠埔斷層及初鄉斷層在濁水溪河岸有出露，可用於控制剖面中兩者的地表位置，及兩斷層間地層厚度與位態。

本剖面(圖 4-6)鄰近竹山一號井，投影並描繪震測剖面 J 及震測剖面 I：震測剖面 J 解釋參考 Yue *et al.* (2011)，震測剖面 I 雖成像品質較不佳，但仍可清楚觀察到許多強反射的訊號，剖面鄰近 GPS 站 G043、G044 及 M509。

由各地層趨勢角，計算各地層厚度：頭嵙山層厚度約由 1900 向東增厚至 3300 公尺，卓蘭層厚度約由 1300 公尺向東增厚至約 2900 公尺，錦水頁岩層厚約 130 公尺，桂竹林層層厚約 70 公尺，早中新世地層厚度約由 700 公尺向東增厚約至 1500 公尺，先中新世層約呈 4.4 度。

本剖面相對於剖面 BB'、剖面 DD'、及剖面 EE'有較多的制約，可藉本剖面了解初鄉斷層中段的斷層幾何，並以此剖面作為其餘剖面的側向制約，向南北延伸。

四、 剖面 DD'

本剖面起自林內，經竹山、鹿谷以北，至水里以南。剖面由西至東通過彰化斷層、八卦山背斜、車籠埔斷層、初鄉斷層、雙冬斷層、半天窟向斜、及水里坑斷層。剖面通過東埔蚋溪，初鄉斷層有出露於東埔蚋溪河岸，且初鄉斷層以東有一系列連續露頭，斷層上盤出露地層屬於桂竹林層，斷層東側亦有出露錦水頁岩，對於地層層厚及傾角有較好的制約。

本剖面中(圖 4-7)，本剖面鄰近 GPS 站 M493、G042、I007 及 M408。根據各地層趨勢角度，計算地層厚度：頭嵙山層約由 1600 向東增厚至 2900 公尺，卓蘭層約由 1000 公尺向東增厚至約 2400 公尺，錦水頁岩約 100 至 200 公尺，桂竹林層約 100 公尺，早中新世地層厚度約由 500 公尺向東增厚約至 2200 公尺；先中新世層約由 2.4 度增加至 6.4 度，後變緩為 4.2 度。

可由此剖面了解初鄉斷層南段及車籠埔斷層南段的幾何變化，以及地層層位的變化，但相較於剖面 CC'，本剖面深部的制約較不足。

五、 剖面 EE'

本剖面起自斗六，經竹山鎮、鹿谷以南，至信義鄉。剖面由西至東通過桐樹湖斷層、內林背斜、車籠埔斷層與初鄉斷層交會位置、鹿谷斷層軸部南翼、鳳凰山斷層(雙冬斷層)、苦嶺腳斷層、半天窟向斜、水里坑斷層及地利斷層。

本剖面中(圖 4-8)，投影內林震測剖面及 MLN-1 井，兩者距離本剖面大於 5 公里，僅為參考使用；各地層底部趨勢角及厚度：頭嵙山層厚度約由 1600 向東增厚至 2900 公尺，卓蘭層厚度約由 1000 公尺厚向東增厚至約

2100 公尺厚，錦水頁岩層厚約 150 公尺，桂竹林層層厚約 100 公尺，早中新世地層厚度約由 500 公尺向東增厚約至 2200 公尺，先中新世層約由 3 度增加至 8.8 度，後變緩為 4.2 度。

此剖面通過前人研究初鄉斷層與車籠埔斷層交會位置，用以了解初鄉斷層、車籠埔斷層及大尖山斷層，三者間的幾何關聯。

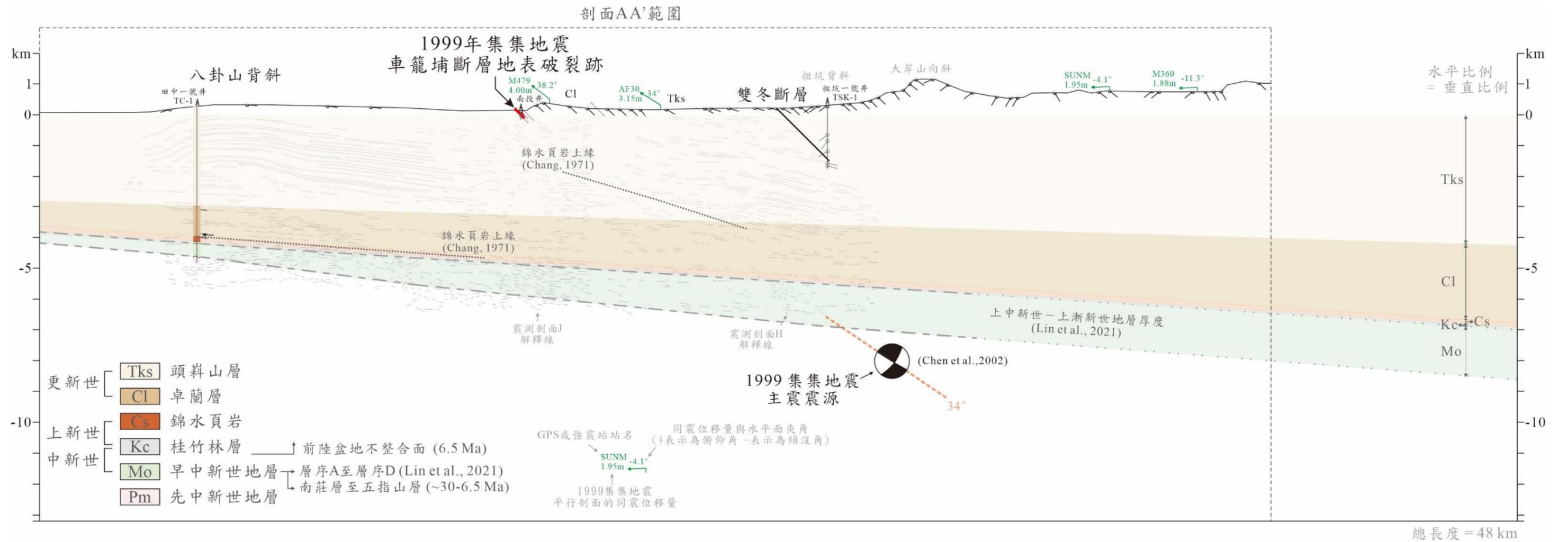


圖 4-4 剖面 AA' 資料彙整。資料彙整包含地表高程、地層位態、鑽井 (TC-1、TSK-1 及南投井)、錦水頁岩上緣深度、1999 集集地震及其餘震震源機制解、1999 集集地震同震 GPS 站位移向量、地層趨勢角度、早中新世地層厚度及震測剖面 (J 及 H)。

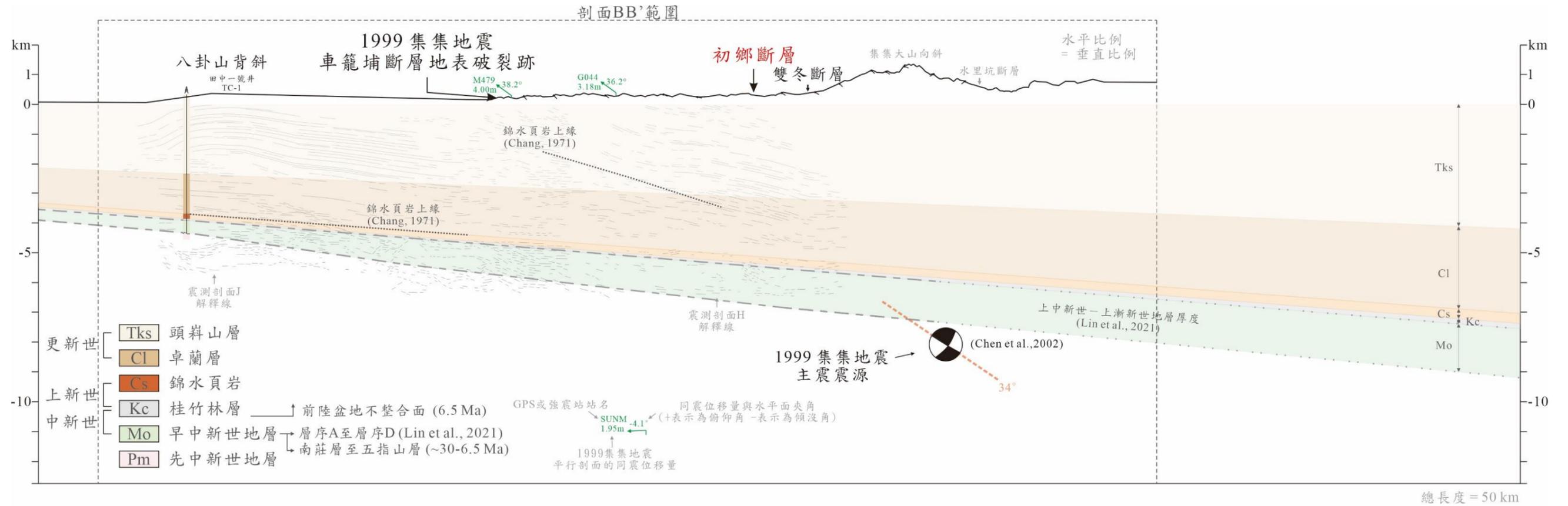
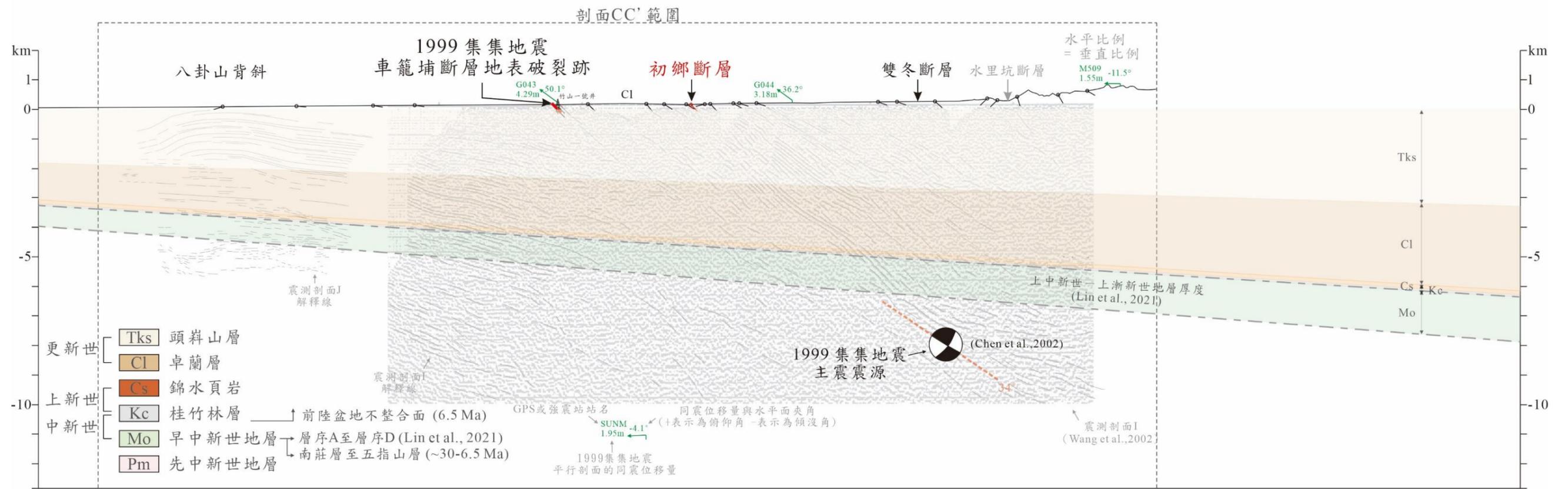


圖 4-5 剖面 BB' 資料彙整。資料彙整包含地表高程、地表位態、TC-1 井、錦水頁岩上緣深度、1999 集集地震及其餘震震源機制解、1999 集集地震同震 GPS 位移向量、地層趨勢角度、早中新世地層厚度及震測剖面(J 及 H)。



總長度 = 50 km

圖 4-6 剖面 CC' 資料彙整。資料彙整包含地表高程、地表位態、1999 集集地震及其餘震震源機制解、1999 集集地震同震 GPS 位移向量、地層趨勢角度、早中新世地層厚度及震測剖面(I 及 J)。

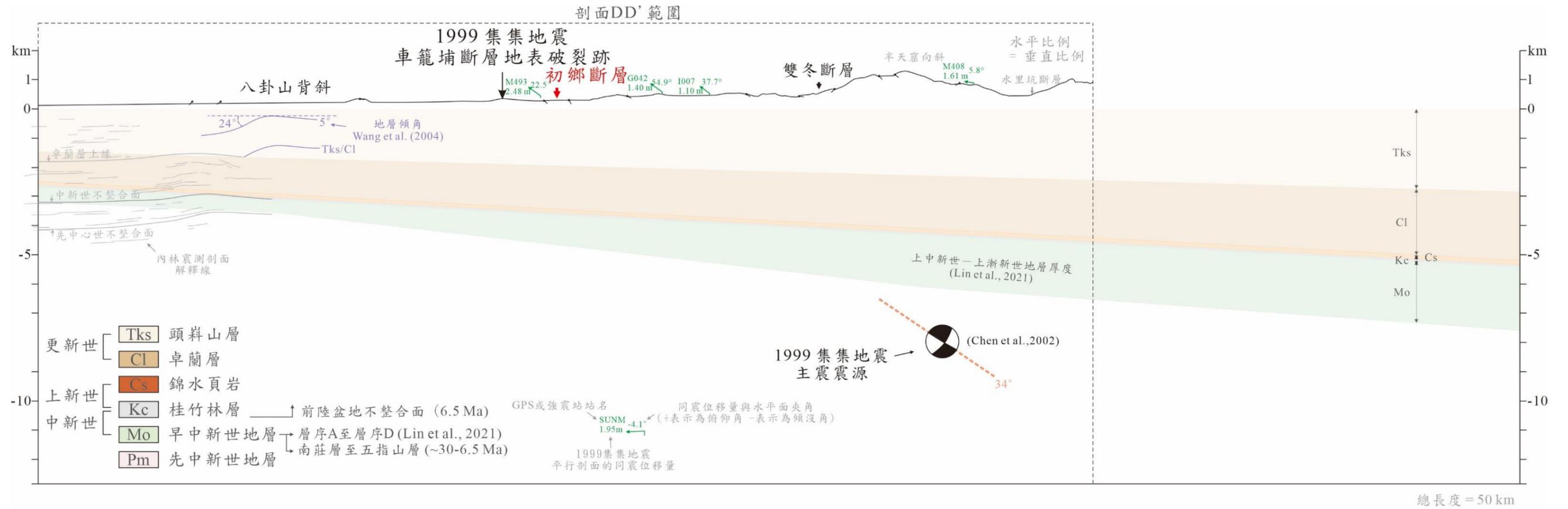


圖 4-7 剖面 DD' 資料彙整。資料彙整包含地表高程、地表位態、1999 集集地震及其餘震震源機制解、1999 集集地震同震 GPS 位移向量、地層趨勢角度、早中新世地層厚度、淺層反射震測剖面結果及內林震測剖面。

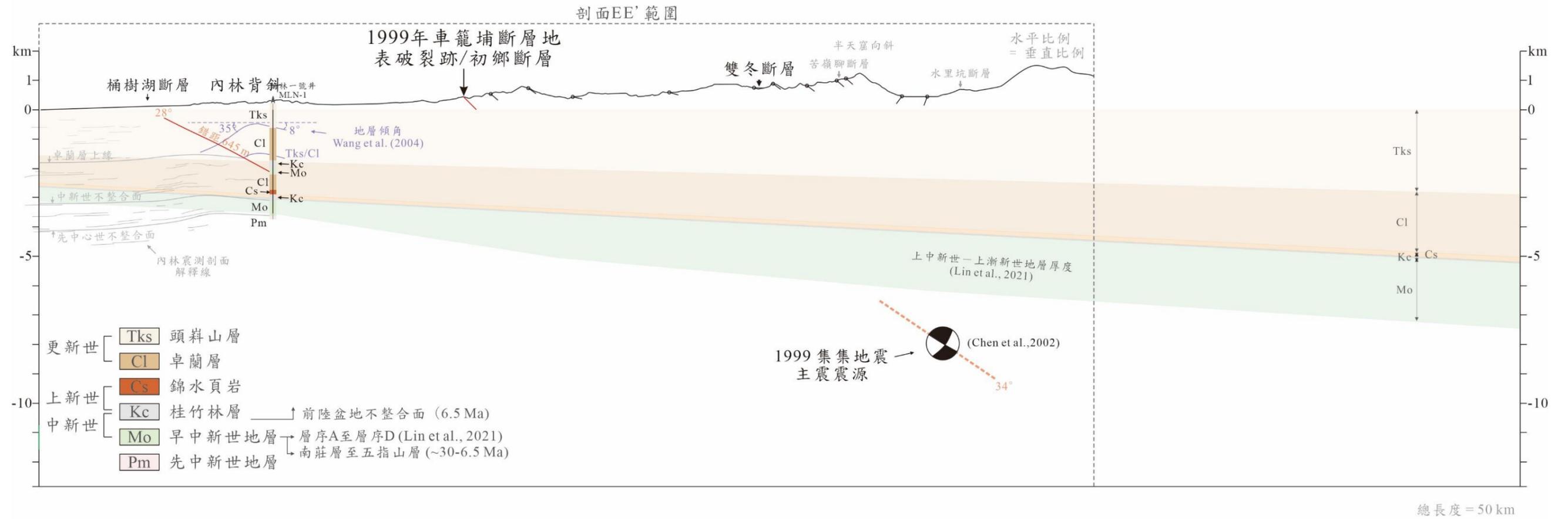


圖 4-8 剖面 EE' 資料彙整。資料彙整包含地表高程、地表位態、MLN-1 井、1999 集集地震及其餘震震源機制解、1999 集集地震同震 GPS 位移向量、地層趨勢角度、早中新世地層厚度、淺層反射震測剖面結果及內林震測剖面。

表 4-5 本研究各剖面節點座標。(座標系：TWD97)

剖面	節點 1		節點 2		節點 3		節點 4	
	X 座標	Y 座標	X 座標	Y 座標	X 座標	Y 座標	X 座標	Y 座標
AA'	207078	2637790	220220	2641484	236729	2641484	2445976	2638916
BB'	206521	2635244	219950	2638915	241745	2638915	-	-
CC'	207421	2631802	219626	2635116	241745	2635116	-	-
DD'	205638	2629538	241618	2629465	-	-	-	-
EE'	205638	2624922	241618	2624922	-	-	-	-

4-3-3 剖面製圖

根據野外地質調查，岩層傾角在各區間大體上一致，相鄰區間則在短距離內有所不同，因此本研究選擇使用急折法(kink method)繪製剖面。急折法適用於岩層位態在短距離內有急遽變化的區域，被廣泛運用於褶皺逆衝帶(fold-thrust belt)，由急折法所繪製的褶皺兩翼筆直且樞紐軸(hinge axis)角度明顯，可假設褶皺兩翼傾角由平均的岩層傾角所控，僅於樞紐軸部出現轉折，而樞紐軸位置可由兩翼岩層厚度不同而有不同的繪製方式(Marshak and Mitra, 1988)。

急折法所需的資料如圖 4-9(a)所示，包含地形、地層和位態，在地層層厚相等的情況下，將相鄰地層於剖面上的視傾角延伸，使兩延伸線相交，以相交點的角平分線畫樞紐軸，將地層 Sh 的邊界以量測的位態 B、C 做延伸，於兩延伸線的交點繪製角平分線，並繪出地層 Sh，如圖 4-9(b)所示。接著，以傾角 A 及 B 做地層邊界的延伸，並繪出地層 Ss，其餘地層邊界則依地層傾角和樞紐軸的位置繪製，最終結果如圖 4-9(c)。

4-3-4 剖面回復

平衡剖面是指構造地質剖面上的構造變形可以由幾何準則回復至原始地層未受變形前的剖面，用於檢驗剖面中幾何的合理性及可回復性，而回復平衡剖面的過程可推估構造活動先後順序，以及各構造活動所造成的縮短量，藉此推估區域的構造演化。

繪製平衡剖面須先決定固定端(pin line)及疏鬆端(loose line)，通常選擇為相對縮短量較小的一端作為固定端，在褶皺逆衝帶中，常以前陸側作為固定端，而疏鬆端即為構造剖面的另一端，其位置的決定取決於地質條件及研究目的(圖 4-10(a))。接著，根據各地層厚度與傾角建構一系列的地層作為模板，並以虛線表示變形時斷層所發育的位置(圖 4-10 (b))，由於每個位於上盤斷坡(hanging wall ramp)或上盤斷坪在下盤都需要有一個與之相對應下盤斷坪或下盤斷坡(footwall ramp or flat)，因此上盤斷坡應與下盤斷坡的長度相同，且上盤斷坪應與下盤斷坪的長度相同，依此為調整地層層長度完成剖面的平衡。若地層回復後各地層長度誤差小於 10%，則可代表剖面已達平衡；反之，若地層回復後各地層長度超過 10%的差異，則代表剖面尚未達平衡(圖 4-10(c))。

近地表岩層基本遵循脆性變形機制，變形時易產生地層間的相對滑動，生成褶皺時多以曲滑變形(flexural-slip)機制，可忽略岩層內部的變形，因此變形前後地層厚度保持不變(Suppe, 1983)。平衡剖面假設忽略因壓溶作用或構造作用擠壓而改變的岩石體積，且遵守面積守恆，地層體積於變形時保持不變，若假設變形過程中沒有非平行剖面方向的應變，則可利用等面積法(equal-area method)進行剖面回復。

平衡剖面雖在地質解釋上有較佳的合理性，或可能較符合真實，雖平衡剖面的過程符合幾何學的概念，但真實構造活動及地層變形行為極為複雜，

僅能透過一定程度的簡化與大量的假設，將導致根據繪圖者對相同的現象有不同的解釋。

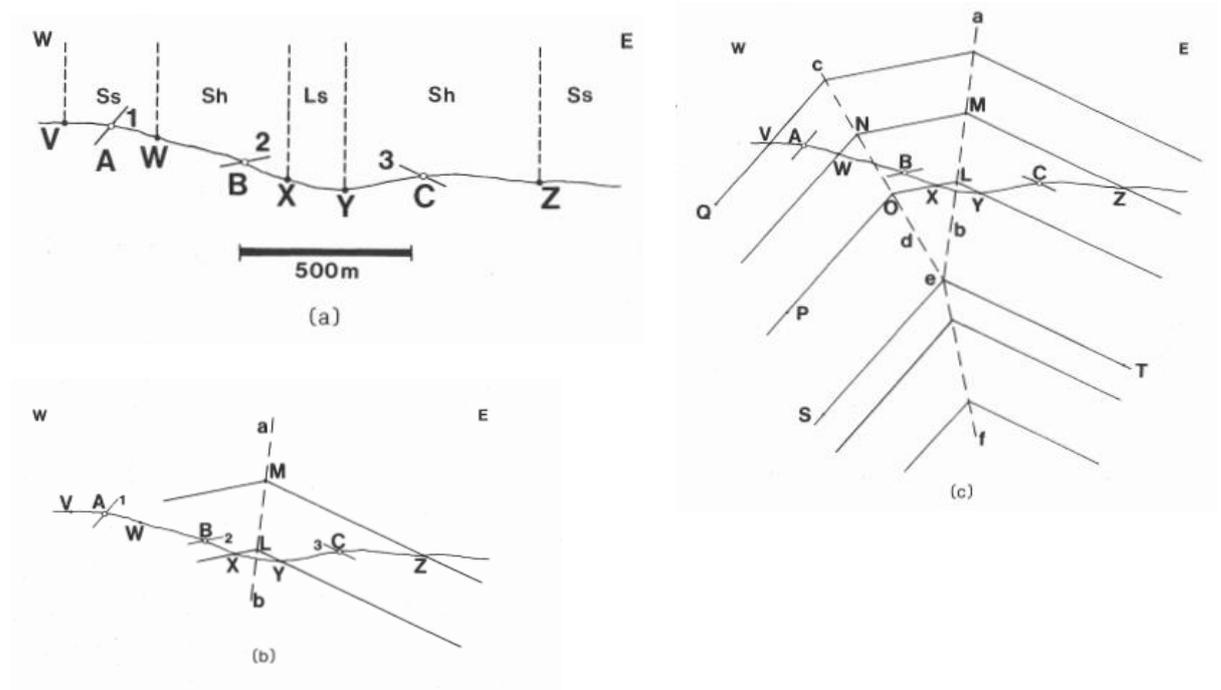


圖 4-9 急折法繪製地質剖面步驟示意圖。(a)為所需資料，包含地形、地層和位態。(b)依地層及位態，相鄰地層的視傾角延伸，使兩延伸線相交，以相交點的角平分線畫樞紐軸。(c)將剖面其他地層及位態資料繪出。(摘自 Marshak & Mitra, 1988)

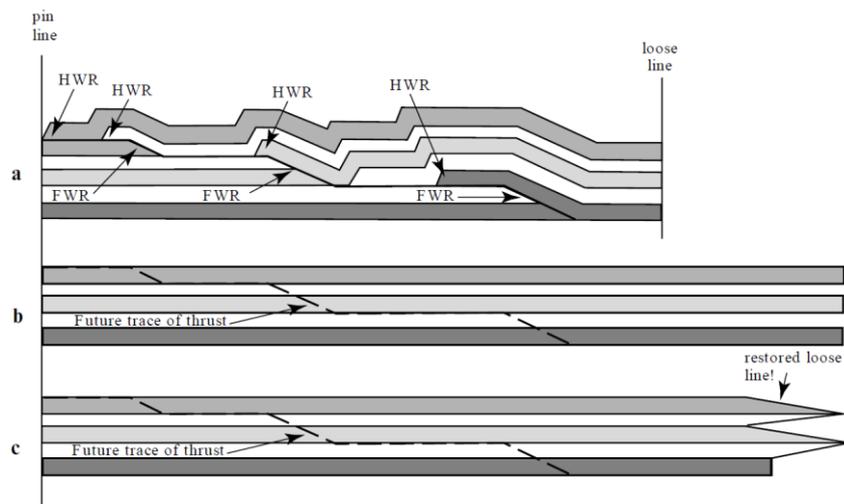


圖 4-10 構造剖面平衡示意圖。(a)所繪製經構造變形的構造剖面。(b)地層原始的狀態，虛線表示代表未來斷層發育之位置。(c)將圖 a 中變形地層回復後的狀態，若圖 c 與圖 b 不相同，代表圖 a 剖面未平衡，可接受的誤差為 5%至 10%。(摘自 Rowland *et al.*, 1986)

第5章 研究結果

5-1 野外調查結果

在濁水溪的名竹大橋至集集攔河堰間，這個區域的岩層出露連續且良好，除車籠埔斷層(圖 5-1)及初鄉斷層外，能觀察到多條錯距無法估算的斷層和露頭尺度之褶皺，出露岩性以砂岩、砂頁岩互層、泥岩及泥岩夾砂岩為主，有數道厚層砂岩及厚層泥岩，多處露頭岩層傾角在短距離內有明顯的變化(圖 5-2)。

濁水溪兩岸初鄉斷層破壞帶寬(圖 5-3)，主斷層西側出露中層至厚層砂岩與砂頁岩互層，傾角約 30 至 35 度，走向多呈南北向；主斷層東側主要出露泥岩與砂頁岩互層，岩層受劇烈擾動，可觀察到公尺級的褶皺與斷層，近主斷層 10 至 15 公尺內變形相較劇烈，主斷層面具有厚數公分的深黑色斷層泥，黏塑性強；現今(2023 年 1 月)初鄉斷層南岸已被人造建物所覆蓋(圖 5-4)，無法觀察到完整的初鄉斷層破壞帶。

東埔蚋溪的初鄉橋東側露頭(圖 5-5)，出露岩性以薄層砂岩、砂頁岩互層、泥岩及泥岩夾砂岩為主，岩層走向呈 N20°E 至 N45°E，傾角約 50 至 70 度向東傾(圖 5-6)，根據劉桓吉等的地質圖(2004)，屬於桂竹林層、錦水頁岩及卓蘭層；黃文正等(2019)判定初鄉斷層出露於東埔蚋溪的現今露頭(圖 5-7)被大量植被及崩積物覆蓋，無法觀察到斷層帶。東埔蚋溪雙溪底露頭，出露岩性以薄層至厚層砂岩、砂頁岩互層、頁岩夾砂岩為主，岩層走向約呈東北—西南向，露頭岩層傾角在短距離內有急遽變化，傾角約 35 度至近乎垂直(圖 5-8)，根據劉桓吉等的地質圖(2004)，屬於錦水頁岩及卓蘭層。



圖 5-1 濁水溪南岸車籠埔斷層露頭。斷層西側出露礫石；斷層東側出露青灰色或黃棕色厚層泥岩偶夾砂岩，岩層走向大致呈南北向，傾角約 30 至 50 度，經超微化石鑑定，屬於錦水頁岩。向南拍攝。

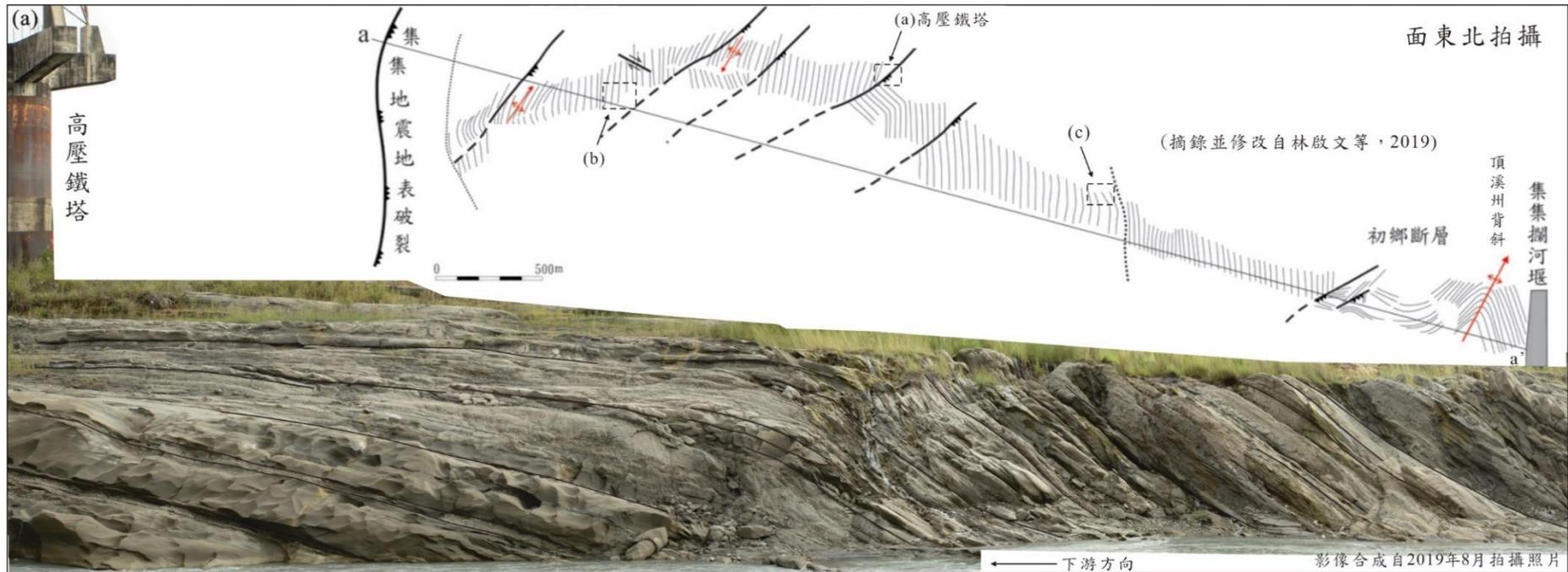


圖 5-2 濁水溪沿岸露頭出露狀況。右上圖為濁水溪河床路線地質圖，集集地震地表破裂跡至集集攔河堰間有數條未知錯距的斷層，黑色粗實線表示為斷層，細實線表示為同一岩層。(a)高壓鐵塔附近出露灰白色中厚層砂岩及砂頁岩互層，偶夾厚層泥岩，岩層傾角變化急遽。(b)出露黃棕色砂岩及砂頁岩互層。(c)出露青灰色砂岩及砂頁岩互層，一系列岩層呈向東傾斜的似同斜構造。各照片位置見右上圖。(濁水溪河床路線地質圖摘錄並修改自林啟文等，2019)



圖 5-3 濁水溪兩岸初鄉斷層露頭。上圖為北岸露頭，下圖為南岸露頭，斷層西側出露青灰色砂岩及砂頁岩互層；斷層東側為厚層泥岩及砂頁岩互層，岩層受斷層擾動範圍寬廣，岩層位態變化急遽，主斷層東側可觀察到公尺級褶皺和另一斷層。(北岸與南岸照片分別合成自邱奕維、黃文正[2019]於濁水溪所拍攝的影像)



圖 5-4 濁水溪南岸初鄉斷層露頭。初鄉斷層已被人造建物所覆蓋，無法觀察到完整的初鄉斷層破壞帶，但斷層帶中仍可觀察到豆莢狀的砂岩斷塊。照片拍攝於 2023 年 1 月，向南拍攝。

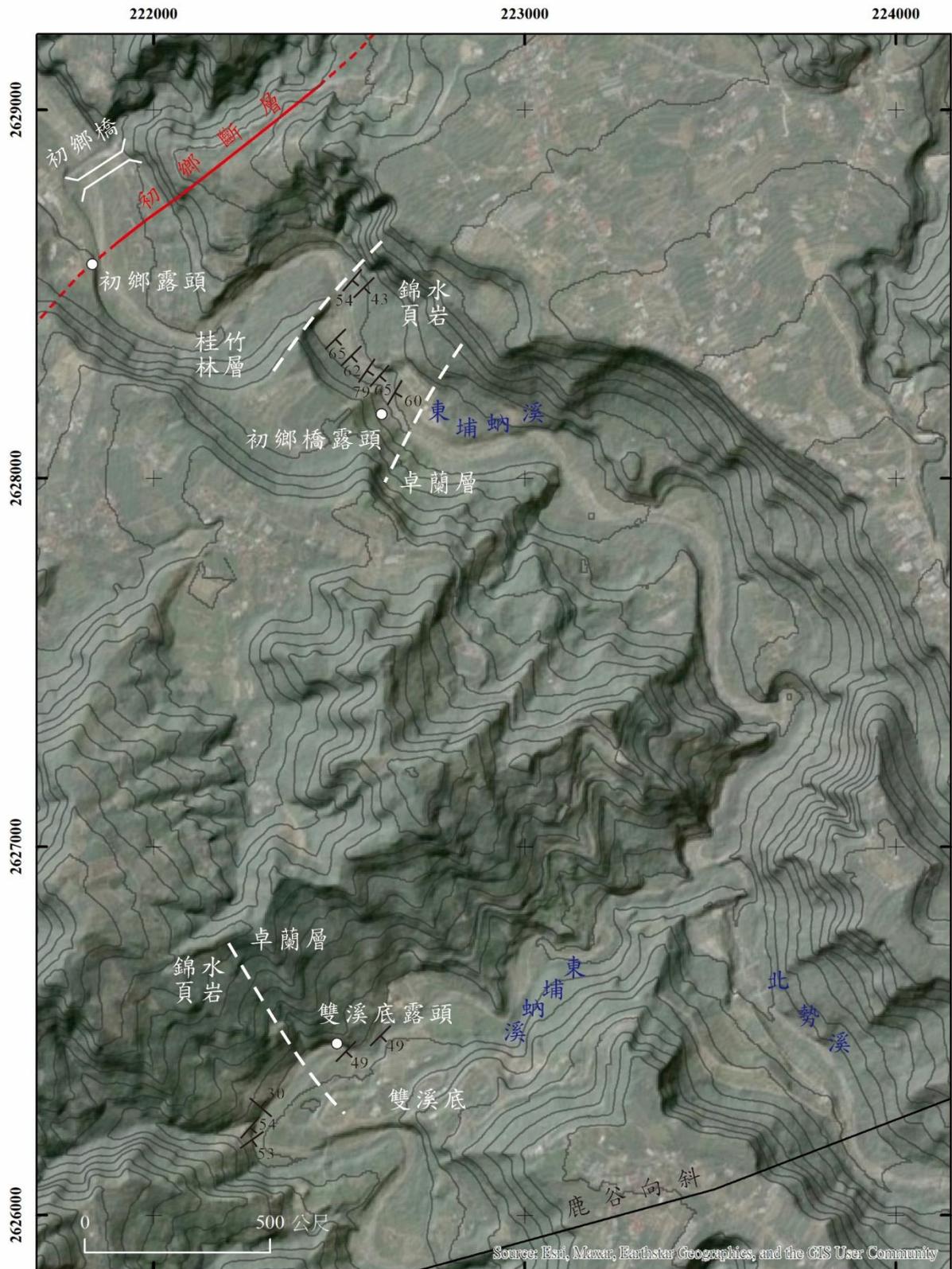


圖 5-5 東埔蚋溪調查露頭位置。岩層位態為本研究所測量結果，數字表示為傾角，白虛線表示為前人（劉桓吉等，2004）地層邊界，初鄉斷層位置繪自黃文正等[2019]，鹿谷向斜改繪自劉桓吉等[2004]。



圖 5-6 初鄉橋東側露頭。露頭位置見圖 5-5，岩性以薄層砂岩、砂頁岩互層、泥岩及泥岩夾砂岩為主，岩層走向約呈東北—西南向，向東南傾斜，傾角約 50 至 70 度。根據劉桓吉等的地質圖(2004)，屬於錦水頁岩。照片向西南拍攝。



圖 5-7 東埔蚋溪初鄉斷層露頭現況。根據前人判定的初鄉斷層露頭，露頭位置見圖 5-5，現今有大量植被及崩積物覆蓋，無法觀察到初鄉斷層。照片拍攝於 2022 年 2 月，向西南拍攝。



圖 5-8 雙溪底露頭。岩性以薄層至中層砂岩、砂頁岩互層及泥岩夾砂岩為主，岩層傾角變化急遽，岩層走向約呈東北向，傾角約 35 度至近乎垂直。根據劉桓吉等的地質圖(2004)，屬於卓蘭層。照片向東北拍攝。

5-2 生物地層鑑定

依據所採集的 14 個岩樣經化石種屬分類鑑定結果(圖 5-9)，鑑定結果如下：

1. 岩樣 1~5，屬於 NN15 *Reticulofenestra pseudumbilica* 化石帶的重要化石群有：*Reticulofenestra pseudumbilica*, *Reticulofenestra minatus*, *Pseudoeminiania lacunosa*, *Helicosphaera kamptneri*, *Cocolithus doricoides*. *Cocolithus pelagicus* and *Cocolithus sp.*
2. 岩樣 6~8 化石貧脊，無法鑑定出所屬的化石帶。
3. 岩樣 9~10，屬於 NN14-NN15 *Reticulofenestra pseudumbilica* 化石帶的重要化石群有：*Reticulofenestra pseudumbilica*, *Reticulofenestra minatus*, *Shenolithus abies*; *Pseudoeminiania lacunosa*, *Helicosphaera kamptneri*, *Helicopontosphaera sellii*, *Small Gephyrocapsa sp.* and *Cocolithus pelagicus*. *Cocolithus sp.*, *Cocolithus doricoides*. *S. moriformis*.
4. 岩樣 11 與 12 化石貧脊，無法鑑定出所屬的化石帶。
5. 岩樣 13~14，與岩樣 9~10 相比，化石較貧脊，但仍可鑑定出屬於 NN14-NN15 *Reticulofenestra pseudumbilica* 化石帶，重要化石群有：*Reticulofenestra pseudumbilica*, *Shenolithus abies*.

此外，在岩石樣本中也可以觀察到二次化石，包括中新世早期至中期的種屬，如 *Cyclicagolithus floridanus* and *Sphenolithus herteromorphythus*，Wu *et al.*(2007) 在車籠埔鑽井 TCDP-A 中也觀察到了這種現象，這些化石屬於 NN-4 至 NN-5 化石帶，代表錦水頁岩沉積物來源可能為中新世早期至中期的地層。

洪崇勝和謝凱旋(2007)認為 NN-15/NN-16 界面應在錦水頁岩與大窩砂岩之交界處，錦水頁岩應對比至 NN-16 至 NN-18 化石帶之間，而化石帶的

訂定，會因種屬鑑定觀念或認定而有所不同，在野外調查時應先依據岩性作為對比，再依據化石對比。

由初鄉斷層下盤沿濁水溪往西，岩層大致上越來越老，由卓蘭層至採樣點的岩性轉為頁岩、泥岩及泥岩夾砂岩為主，西界則為車籠埔斷層截切，往西逆掩於礫石層上，且兩者間並未觀察到有錯移量大的構造，能使錦水頁岩未出露至地表，因此推測採樣位置應屬於錦水頁岩，因此本研究認為在濁水溪以南車籠埔斷層靠近地表處，仍以錦水頁岩為滑動面。

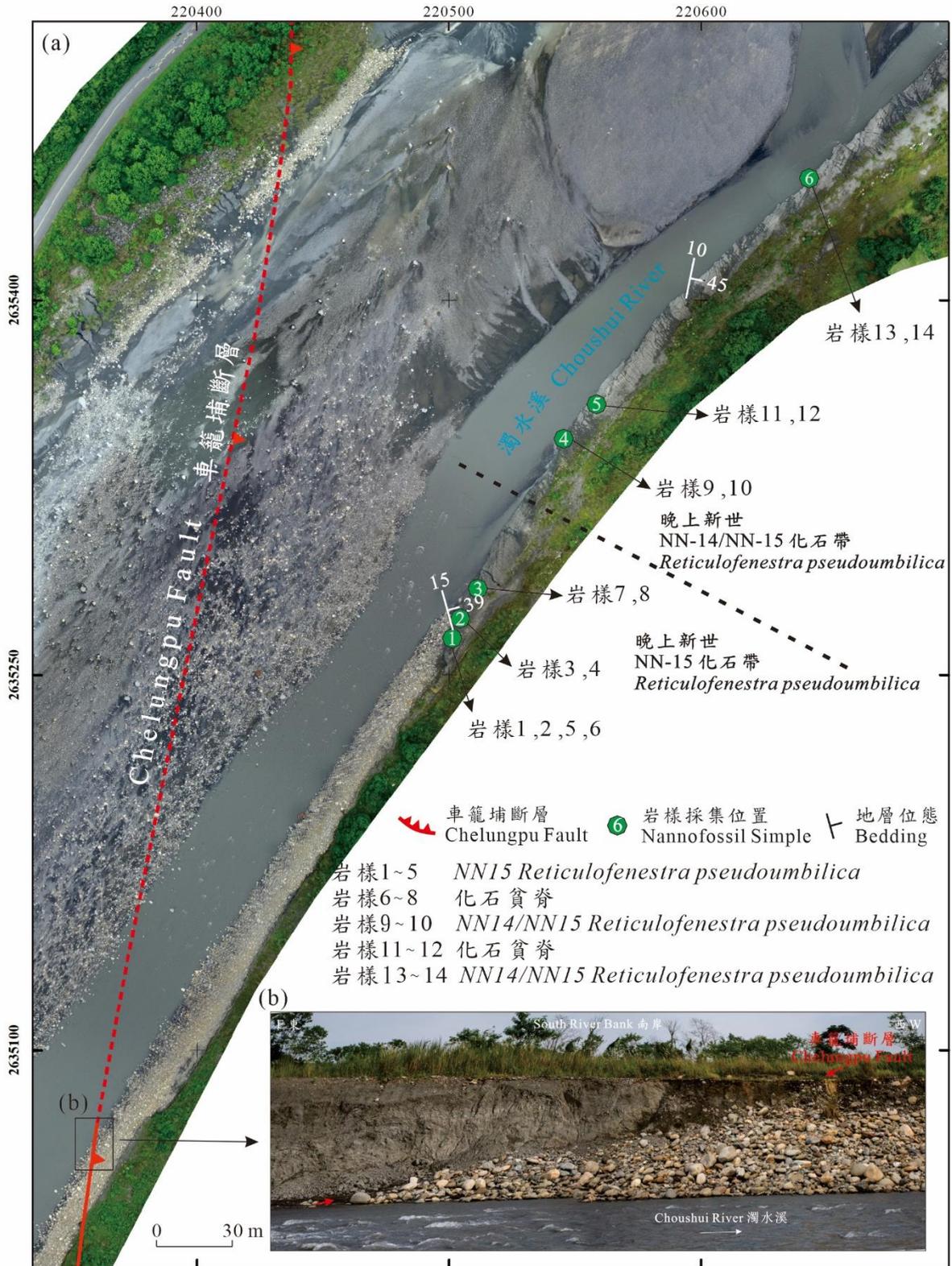


圖 5-9 超微化石岩樣採集點分布圖及岩樣超微化石鑑定結果。(a)岩樣 1 至岩樣 6 屬於晚上新世 NN-15 化石帶，岩樣 11 至岩樣 14 屬於晚上新世 NN14/NN15 化石帶。(b)車籠埔斷層露頭，車籠埔斷層上盤出露地層屬於錦水頁岩，下盤出露礫石層。(超微化石地層化石帶依據紀文榮[1983])

5-2 構造地質剖面

5-2-1 剖面 AA'

本剖面參考並修改自 Yue *et al.* (2005) 中的 YY' 剖面，結合前述地質資料所建立之構造地質剖面(圖 5-10)，總長 40.5 公里。本剖面中有一者推測正斷層，用以解釋濁水溪以南桂竹林層的層厚變化。

根據 Chang(1971) 結果，車籠埔斷層上盤的錦水頁岩約 19 度相東傾，與 GPS 站 AF30 俯仰角有所不同，推測在該區間東側車籠埔斷層截切桂竹林層，並解釋為車籠埔斷層發育時受正斷層影響，截切桂竹林層，由此決定推測正斷層於剖面中的位置。推測正斷層位於滑脫面下方，呈高角度東傾，錯距約 930 公尺，使桂竹林層沉積結束時，於斷層西側由 120 公尺增厚至於斷層東側約 765 公尺；滑脫面以推測正斷層為斷坡的上界，截切桂竹林層，沿錦水頁岩底部滑移，約呈 4 度向東傾，深度約 5 至 6 公里，由東至西依序形成雙冬斷層、車籠埔斷層及彰化斷層。雙冬斷層近地表呈 45 度向東傾，東側另有水里坑斷層，兩者先交匯後與滑脫面所連接。雙冬斷層東側上盤有兩褶皺(粗坑背斜及大岸山向斜)，地層厚度由 TSK-1 井制約，地層傾角變化急遽，粗坑背斜軸部出露先中新世地層。

車籠埔斷層近地表呈東傾約 45 度(圖 5-11)，沿錦水頁岩底部為弱面，深部截切桂竹林層，連接至滑脫面，深度約 4.5 公里。近車籠埔斷層處地層傾角與車籠埔斷層傾角大致平行，約呈 40 至 45 度向東傾，地層傾角向東減小至小於 11 度，頭嵙山層厚度約 1670 公尺，卓蘭層厚度約 2060 公尺，錦水頁岩約 170 公尺厚，桂竹林層厚度約 435 公尺；彰化斷層淺部傾角約由 27 度向東減少至 14 度並匯入滑脫面，彰化斷層以錦水頁岩為弱面，沿錦水頁岩與桂竹林層邊界滑移，錯距約 1600 至 1700 公尺，截切錦水頁岩與其上覆所有地層，未截切至地表，於上盤形成不對稱的八卦山背斜，斷層

上盤地層呈低角度東傾，頭嵴山層為生長地層(growth strata)，於彰化斷層上盤較厚，最厚約 2710 公尺，卓蘭層厚約 1910 公尺，而錦水頁岩約為 165 公尺。

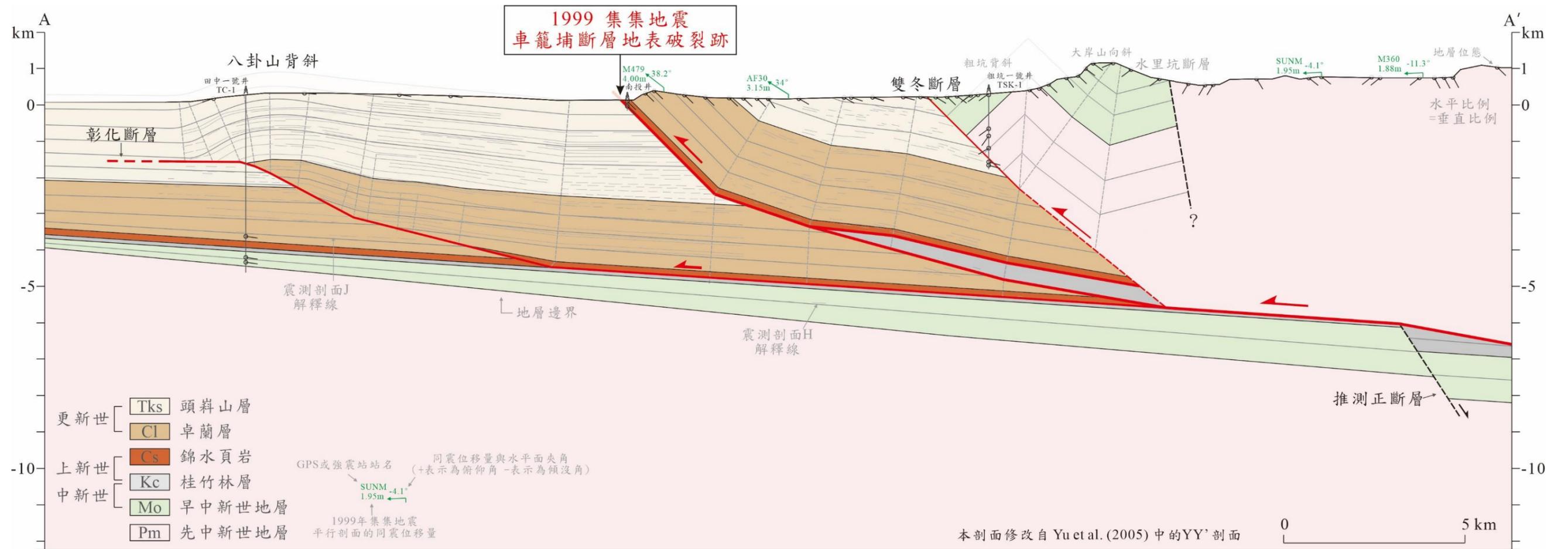


圖 5-10 本研究繪製之剖面 AA' 構造地質剖面圖。結合前述地質資料所建立之構造地質剖面，總長 40.5 公里，剖面地表位置參考圖 2-4。紅色實線為主要斷層，紅色箭頭表示為斷層相對運動方向，長虛線表示推測，黑色粗黑線或長虛線表示為斷層，黑色細線表示為地層邊界或地質鑽探深度，灰色實線為地層間輔助線或震測剖面解釋線，灰色虛線表示為樞紐軸。本剖面參考並修改自 Yue *et al.* (2011) 等人中的 YY' 剖面。本剖面中有兩正斷層，皆呈高角度向東傾；滑脫面約呈 4 度向東傾，深度約 5 至 6 公里，以兩正斷層為斷坡。雙冬斷層呈 45 度向東傾，斷層東側上盤有兩褶皺(粗坑背斜及大岸山向斜)。車籠埔斷層近地表呈東傾約 45 度，沿錦水頁岩為弱面，深部截切桂竹林層，以其底部為弱面滑移，連接至滑脫面，深度約 4.5 公里。車籠埔斷層上盤近斷層處地層傾角約呈 40 至 45 度向東傾，地層傾角向東減小。彰化斷層淺部傾角約由 27 度向東漸緩至 14 度並匯入滑脫面，彰化斷層以錦水頁岩為弱面，沿錦水頁岩底部與桂竹林層邊界滑移，錯距約 1600 至 1700 公尺，未截切至地表，於上盤形成不對稱的斷層擴展褶皺。將剖面 CC' 滑脫面投影至本剖面，以紅色短虛線表示，顯示本剖面以南的剖面 CC' 中滑脫面深度較深，約 9 公里，滑脫面斷坡呈 34 度向東傾斜，1999 年集集地震震源位於滑脫面的斷坡一斷坪轉折點，轉折點累積應力而造成地震。

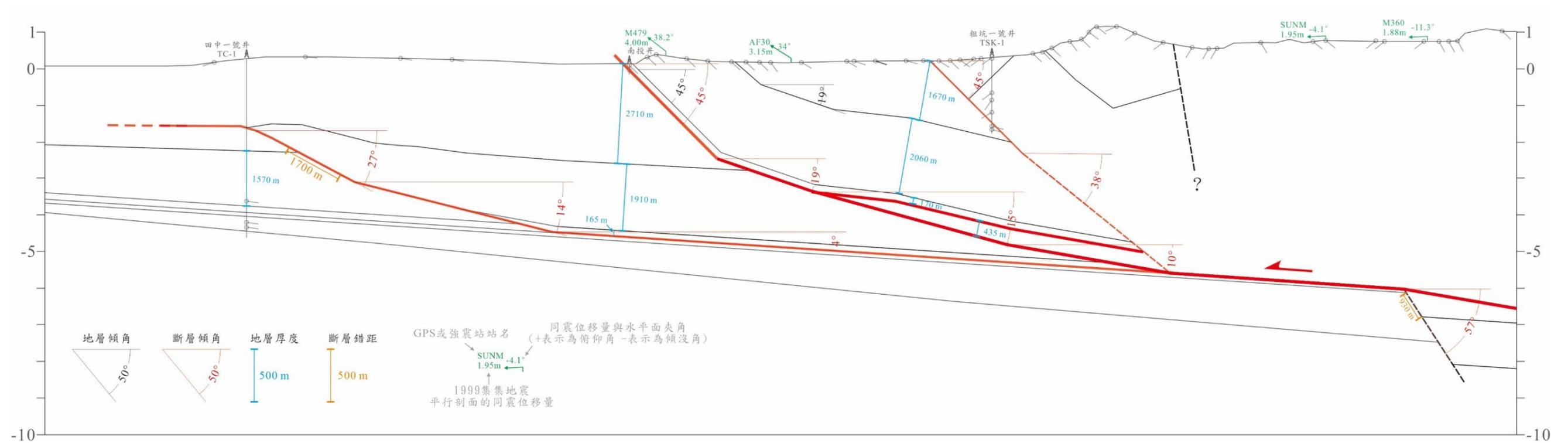


圖 5-11 本研究繪製之剖面 AA' 構造地質剖面圖的地層傾角、層厚、斷層傾角及斷層錯距。紅色實線為主要斷層，長虛線表示推測，黑色粗黑線或長虛線表示為斷層，黑色細線表示為地層邊界或地質鑽探深度。兩正斷層呈高角度向東傾，剖面東側正斷層錯距約 930 公尺。滑脫面約呈 4 度向東傾，以剖面東側的正斷層為斷坡。雙冬斷層近地表呈 45 度向東傾，深部變緩呈 38 度。車籠埔斷層近地表呈東傾約 45 度，向深部漸緩至 10 度。車籠埔斷層近斷層處地層傾角與斷層平行，呈 45 度向東傾，地層傾角向東減小。彰化斷層淺部傾角約由 27 度向東漸緩至 14 度並匯入滑脫面，錯距約 1700 公尺，斷層上盤地層呈低角度東傾。將剖面 CC' 滑脫面投影至本剖面，以紅色短虛線表示，滑脫面斷坪呈 4 度向東傾，斷坡處呈 34 度向東傾斜。

5-2-2 剖面 BB'

本剖面中(圖 5-12),初鄉斷層以西的地質與構造的分布大致與剖面 AA'相同,滑脫面沿早中新世地層與桂竹林層間不整合面滑移,斷層面約呈 5 度向東傾,以推測正斷層為斷坡上緣,截切桂竹林層,由約 7.5 公里深,變淺至約 5.5 公里深,兩者間的斷坡呈東傾 22 度,滑脫面呈斷坪—斷坡—斷坪的幾何樣貌,滑脫面的分支斷層,由東往西分別有雙冬斷層、初鄉斷層、車籠埔斷層及彰化斷層。

雙冬斷層近地表呈高角度東傾,斷層東側形成集集大山向斜及水里坑斷層,雙冬斷層與初鄉斷層併入同一滑脫面,若並非併入同一滑脫面,則在剖面回復將出現空間的異常,無法與剖面 AA'的回復剖面相連接;初鄉斷層近地表約呈高角度 64 度東傾,斷層面傾角由近地表的高角度向深部變緩至約 35 度,後變陡至約 40 度,再次變緩至約 14 度並於深度約 7.5 公里處匯入滑脫面;車籠埔斷層傾角由近地表的 45 度向東變緩至 4 度,匯入滑脫面斷坡,斷層截切深度較深(與剖面 AA'相比),截切早中新世地層,地層視傾角由西向東變緩,約由 46 至 12 度,呈斷層彎曲褶皺,斷層上盤錦水頁岩厚度約 190 公尺,卓蘭層厚度較剖面 AA'厚,厚度約 2400 公尺,早中新世地層厚度約 400 公尺;推測正斷層錯距增加至約 900 公尺,桂竹林層於其下盤增厚至約 900 公尺。

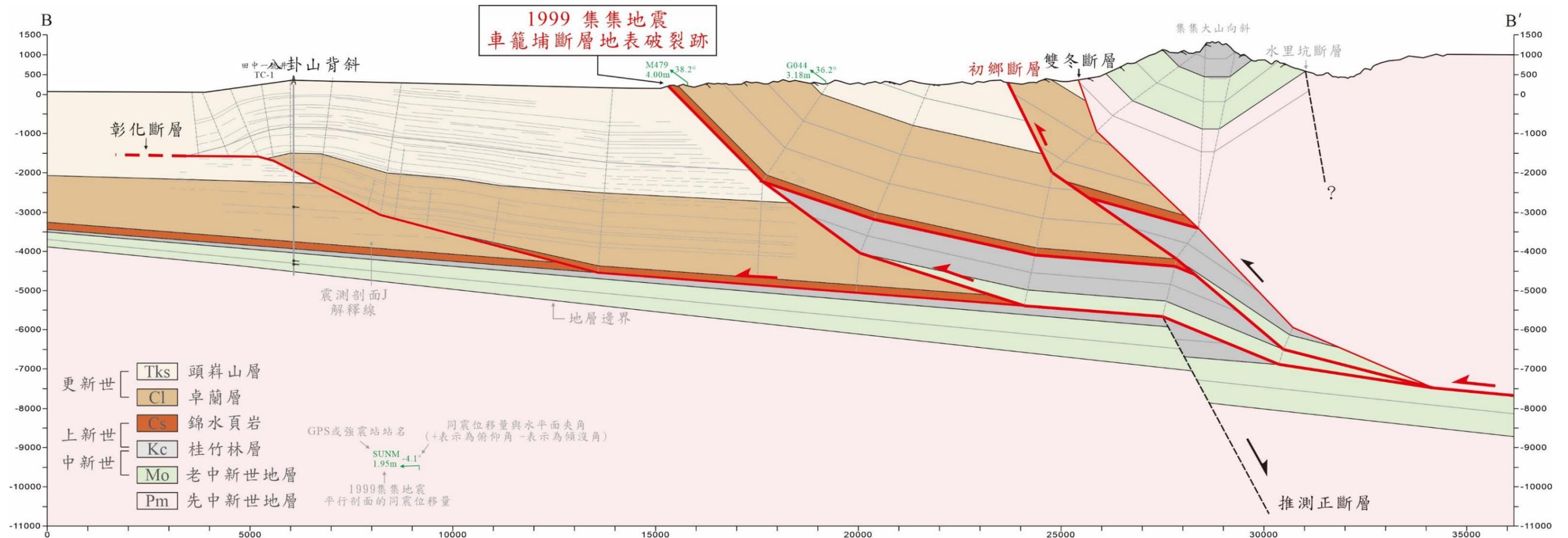


圖 5-12 本研究繪製之剖面 BB' 構造地質剖面圖。結合前述地質資料所建立之構造地質剖面，總長 36 公里，剖面位置參考圖 2-4。紅色實線為主要斷層，紅色箭頭表示為斷層相對運動方向，長虛線表示推測，黑色粗黑線或長虛線表示為斷層，黑色細線表示為地層邊界，灰色實線為地層間輔助線或震測剖面解釋線或地質鑽探深度，灰色虛線表示為樞紐軸。初鄉車籠埔斷層以西的地質與構造的分布大致與剖面 AA' 相同。滑脫面沿早中新世地層與桂竹林層間不整合面間滑移，斷層面約呈 5 度向東傾，以推測正斷層為斷坡，截切桂竹林層，由約 7.5 公里深，變淺至約 5.5 公里深，兩者間的斷坡呈東傾 22 度，滑脫面呈斷坪—斷坡—斷坪的幾何樣貌。雙冬斷層近地表呈高角度東傾，斷層東側形成集集大山向斜及水里坑斷層，雙冬斷層與初鄉斷層併入同一滑脫面。初鄉斷層近地表約呈高角度 64 度東傾，斷層面傾角由近地表的高角度向深部變緩至約 35 度，後變陡至約 40 度，再次變緩至約 14 度並於深度約 7.5 公里處匯入滑脫面。車籠埔斷層由近地表傾角約 45 度向東變緩至 4 度，匯入滑脫面斷坡，斷層截切早中新世地層，地層視傾角由西向東變緩，約由 46 至 12 度，呈斷層彎曲褶皺，斷層上盤錦水頁岩厚度約 190 公尺，卓蘭層厚度約 2400 公尺，早中新世地層厚度約 400 公尺。推測正斷層錯距增加至約 900 公尺，桂竹林層於其下盤增厚至約 900 公尺。

5-2-3 剖面 CC'

本剖面中(圖 5-13)，車籠埔斷層以西的地質與構造的分布大致與剖面 AA'及剖面 BB'兩剖面相似，推測正斷層錯距增加至約 1600 公尺，桂竹林層於其下盤增厚至 1550 公尺。

滑脫面沿早中新世地層間滑移，滑脫面向西發育時，以推測正斷層為斷坡上緣，滑脫面截穿桂竹林層，由約 8.5 公里深，變淺至約 6 公里深，兩者間有一呈東傾的斷坡東傾，並於斷坡下緣折曲處發育初鄉斷層；滑脫面的斷坡—斷坪轉折點位置根據震測剖面 I 與震源機制解，震測剖面中所判釋的強反射面轉折點與震源位置相符，轉折點位於剖面中 28 至 29 公里、深度約 8 公里處；震源機制解破裂角度與震測剖面中強反射面角度相近，震源機制解破裂面傾角約 34 度，因此繪製滑脫面斷坡以 34 度向東傾，斷坪以近水平的 4 度向東延伸。

雙冬斷層近地表呈 41 度向東傾(圖 5-14)，深部變緩至 25 度，延伸至剖面以外，斷層上盤出露早中新世地層或先中新世地層，斷層東側的水里坑斷層傾角近乎垂直；初鄉斷層呈斷坡—斷坪的幾何形貌，上盤出露卓蘭層與頭嵛山層，因兩地層邊界於河床沒有良好露頭，因此地層邊界以鄰近區域的地層邊界沿走向延伸為參考；斷層上盤部分的地層視傾角與震測剖面中所判釋的強反射訊號角度約有 20 度的差異，若依判釋的強反射訊號繪製剖面，地層厚度將急遽增厚，與前人研究有所抵觸，因此依照地層視傾角的趨勢繪製；初鄉斷層近地表處呈高傾角、非平行地層傾角，斷層傾角由近地表的高角度向深部變緩，至約 25 度，後變陡至約 41 度，並匯入滑脫面；斷層上盤卓蘭層厚度約 2500 公尺，而錦水頁岩及桂竹林層厚度大致與車籠埔斷層上盤相同，分別約為 270 公尺及 1550 公尺；斷層東側有一頂溪州背斜，其樞紐軸呈高角度西傾，背斜兩翼夾角約 120 度，兩翼地層傾角約 30 至 40 度。

車籠埔斷層近地表斷層呈 43 度向東傾斜，約於深度 5 公里併入滑脫面；斷層上盤卓蘭層厚度較北邊兩剖面厚(剖面 AA'及剖面 BB')，厚度約 2200 公尺，地層傾角由西向東變緩，約由 40 至 16 度，早中新世地層厚度約 920 公尺。

當 1999 集集地震震源位於滑脫面的斷坡—斷坪轉折點，轉折點累積應力而造成地震，滑脫面以傾角較小的斷坡滑移，淺部以車籠埔斷層釋放應變能，而初鄉斷層位於車籠埔斷層上盤，沒有明顯的同震變形行為。

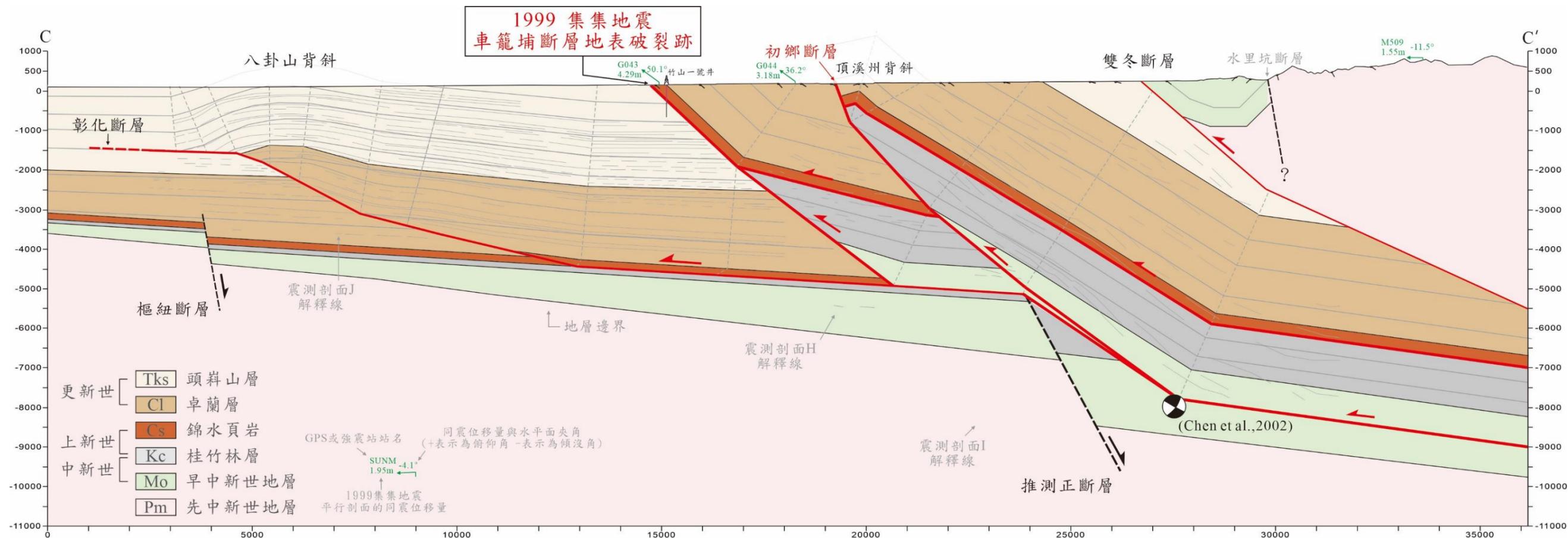


圖 5-13 本研究繪製之剖面 CC' 構造地質剖面圖。結合前述地質資料所建立之構造地質剖面，總長 36 公里，剖面位置參考圖 2-4。紅色實線為主要斷層，紅色箭頭表示為斷層相對運動方向，虛線表示推測，黑色粗黑線或虛線表示為斷層，黑色細線表示為地層邊界，灰色實線為地層間輔助線或地質鑽探深度，灰色虛線表示為樞紐軸。滑脫面沿早中新世地層間滑移，以推測正斷層為斷坡，深度由約 8.5 公里變淺至約 6 公里深，並於斷坡處發育初鄉斷層。滑脫面的斷坡一斷坪轉折點位於剖面中 28 至 29 公里、深度約 8 公里處，斷坡以 34 度向東傾，斷坪以近水平的 4 度向東延伸。雙冬斷層近地表呈 41 度向東傾，斷層東側的水里坑斷層傾角近乎垂直。初鄉斷層上盤出露卓蘭層與頭嵙山層，斷層近地表處呈高傾角、非平行地層傾角，約 70 度向東傾，斷層傾角向深部變緩，至約 25 度，後變陡至約 41 度，並匯入滑脫面；斷層東側有一頂溪州背斜，其樞紐軸呈高角度西傾，背斜兩翼夾角約 120 度，兩翼地層傾角約 30 至 40 度。車籠埔斷層近地表斷層呈 43 度向東傾斜，約於深度 5 公里併入滑脫面；斷層東側地層傾角由西向東變緩，約由 40 至 16 度，呈斷層彎曲褶皺。當 1999 集集地震發生時，滑脫面以傾角較小的斷坡滑移，淺部以車籠埔斷層釋放應變。

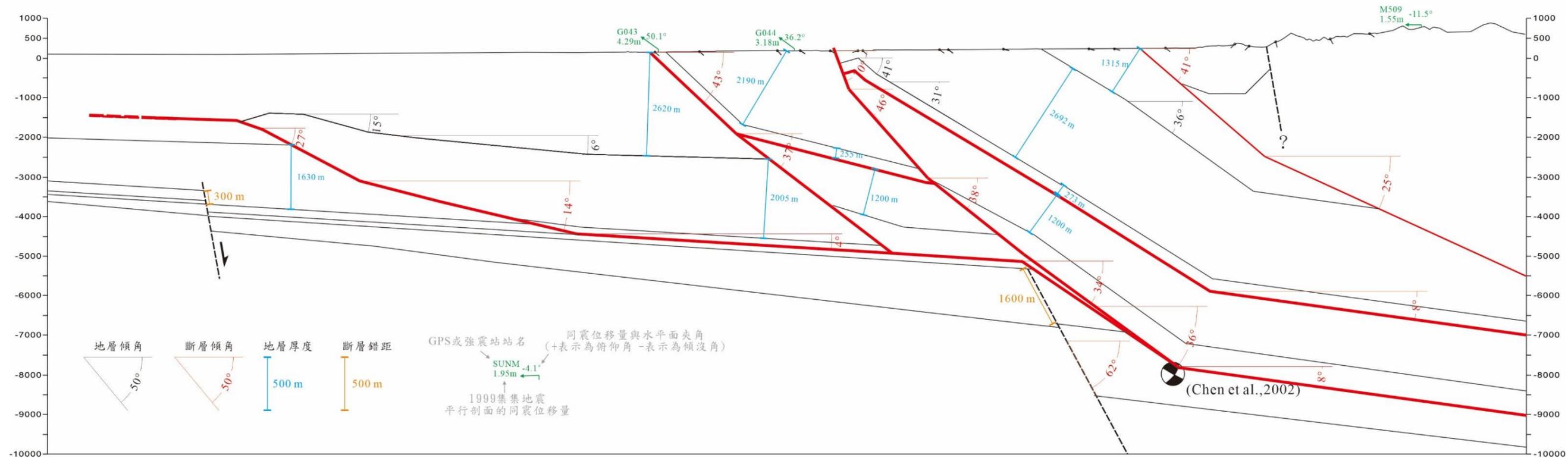


圖 5-14 本研究繪製之剖面 CC' 構造地質剖面的地層傾角、層厚、斷層傾角及斷層錯距。紅色實線為主要斷層，長虛線表示推測，黑色粗黑線或長虛線表示為斷層，黑色細線表示為地層邊界或地質鑽探深度。兩正斷層呈高角度向東傾，剖面東側正斷層錯距約 1600 公尺，剖面西側正斷層錯距約 370 公尺。滑脫面約呈 4 度向東傾，以剖面東側的正斷層為斷坡，斷坡角度為 34 度。雙冬斷層近地表呈 41 度向東傾，深部變緩。初鄉斷層近地表呈高角度 70 度向東傾斜，深部於滑脫面斷坡處匯入滑脫面，深部傾角約 41 度。車籠埔斷層近地表呈東傾約 43 度，向深部漸緩至 4 度。車籠埔斷層近斷層處地層傾角近乎與斷層平行。彰化斷層淺部傾角約由 27 度向東漸緩至 14 度並匯入滑脫面，錯距約 1700 公尺。

5-2-4 剖面 DD'

本剖面中(圖 5-15)，滑脫面以早中新世地層間滑移，呈 3 至 4 度向東傾，深度約 6.5 公里，向西發育時，受推測正斷層阻擋，該正斷層上端為斷坡的上緣，斷坡約呈 30 度向東傾，正斷層東、西側滑脫面深度有所不同，斷坡西側深度變淺至約 4 公里深，滑脫面整體呈斷坪—斷坡—斷坪的幾何樣貌。

滑脫面於斷坡處發育初鄉斷層，初鄉斷層近地表呈高角度東傾，斷層上盤呈向斜構造(鹿谷向斜)，斷層東側卓蘭層厚度約 1900 公尺，而錦水頁岩厚度約 190 公尺、桂竹林層厚度約 1400 公尺；車籠埔斷層近地表約呈 42 度向東傾，以錦水頁岩底部為滑動面，斷層傾角向東漸緩，直至匯入滑脫面，深度約 4 公里，車籠埔斷層深部截切早中新世地層；彰化斷層向南延伸過濁水溪，滑脫面錦水頁岩底部滑動，轉為於卓蘭層中，與北邊的剖面 CC' 相比，斷層東側上盤的八卦山背斜兩翼夾角變緩，背斜兩翼不對稱，東翼較西翼緩且平，西翼約呈 24 度，東翼則約呈 5 度，背斜呈一似單斜構造。在彰化斷層兩側，頭嵙山層厚度無明顯差異，兩側差異在 200 公尺內，厚度約 2000 至 2100 公尺；卓蘭層厚度在斷層兩側差約 500 公尺，厚度約在 950 至 1400 公尺之間。推測正斷層錯距約為 1400 公尺，桂竹林層於其下盤增厚至約 1250 公尺。

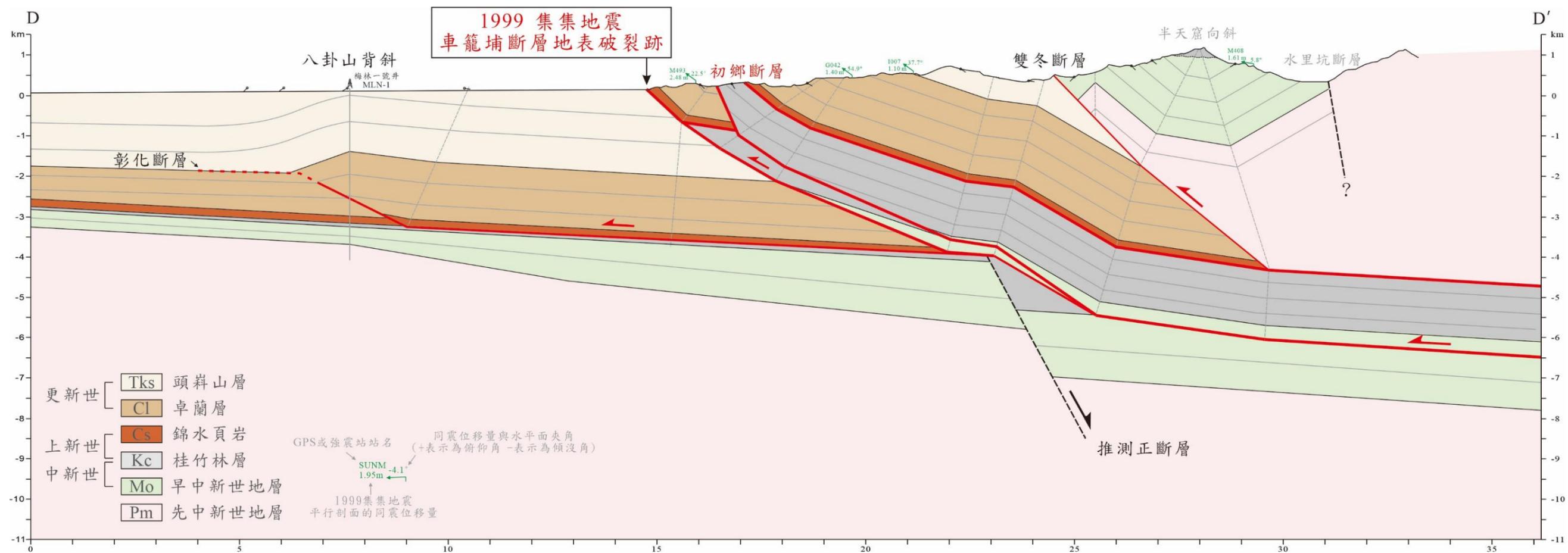


圖 5-15 本研究繪製之剖面 DD' 構造地質剖面圖。結合前述地質資料所建立之構造地質剖面，總長 36 公里，剖面地表位置見圖 2-4。紅色實線或虛線為主要斷層，紅色箭頭表示為斷層相對運動方向，黑色粗黑線或虛線表示為斷層，虛線表示推測，黑色細線表示為地層邊界，灰色實線為地層間輔助線或地質鑽探深度，灰色虛線表示為樞紐軸。滑脫面呈 3 至 4 度向東傾，向西發育受推測正斷層阻擋，以該斷層為斷坡，斷坡約呈 30 度向東傾，正斷層東、西側滑脫面深度有所不同，斷坡西側深度變淺至約 4 公里深，滑脫面呈斷坪—斷坡—斷坪的幾何樣貌。滑脫面於斷坡處發育初鄉斷層，初鄉斷層近地表呈高角度東傾，斷層上盤呈向斜構造(鹿谷向斜)。車籠埔斷層近地表約呈 42 度向東傾，斷層傾角向東漸緩。彰化斷層以錦水頁岩底部滑動，發育並停止於卓蘭層中，斷層東側上盤的八卦山背斜兩翼不對稱，東翼較西翼緩且平，西翼約呈 24 度，東翼則約呈 5 度。

5-2-5 剖面 EE'

本剖面中(圖 5-16)，推測正斷層錯距約 1245 公尺，桂竹林層於其下盤增厚至約 1475 公尺；滑脫面沿桂竹林層與早中新世不整合面滑移，以推測正斷層為斷坡上緣，截切桂竹林層，由約 6 公里深，變淺至約 5 公里深，兩者間的斷坡呈 26 度向東傾；雙冬斷層近地表呈 32 度向東傾(圖 5-17)，深部變緩，斷層東側另有一條其分支斷層(苦領腳斷層)及背衝斷層(水里坑斷層)；車籠埔斷層/初鄉斷層近地表約呈 28 度東傾，向深部變緩，後變陡，卓蘭層厚度約 1240 公尺，而錦水頁岩厚度約 260 公尺、桂竹林層厚度約 1475 公尺、早中新世地層厚度約 830 公尺；桐樹湖斷層截切早中新世地層，沿早中新世地層間滑移，斷層未切穿卓蘭層，錯距約 645 公尺，並於斷層上盤發育內林背斜，與剖面 DD' 中八卦山背斜相對比，內林背斜兩翼較不對稱，且兩翼皆變陡，西翼約呈 34 度，東翼傾角約為 12 度。

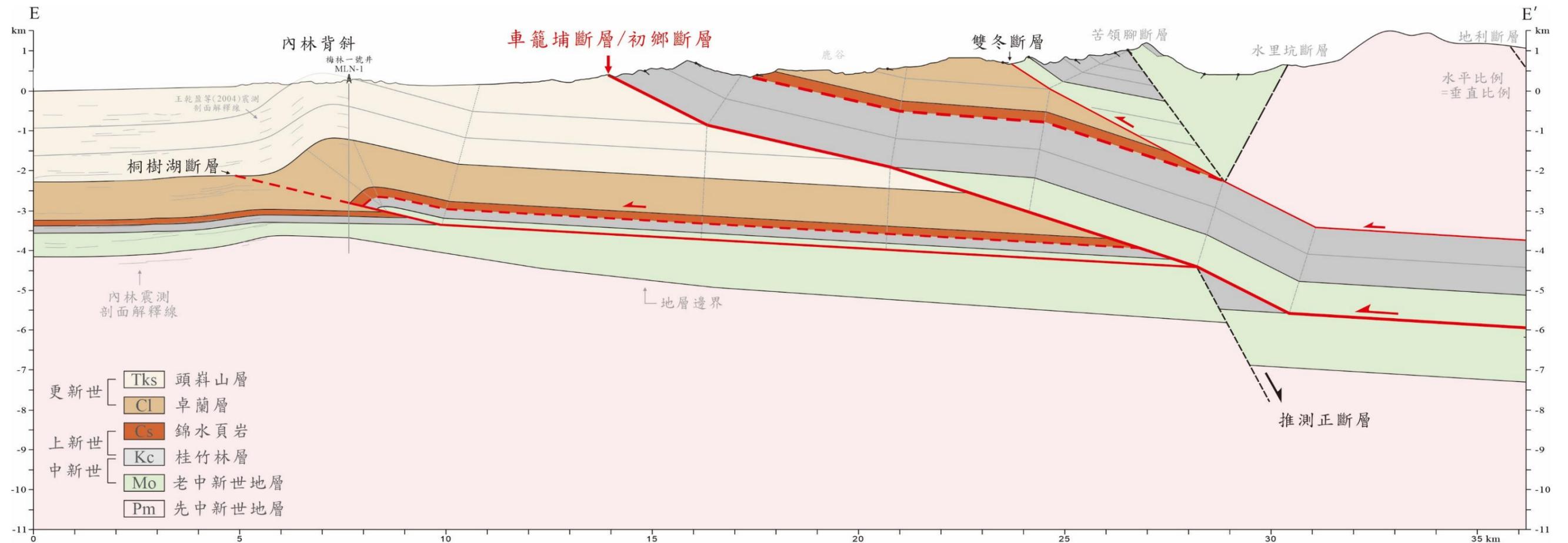


圖 5-16 本研究繪製之剖面 EE' 構造地質剖面圖。結合前述地質資料所建立之構造地質剖面，總長 36 公里，剖面位置參考圖 2-4。紅色實線或虛線為主要斷層，紅色箭頭表示為斷層相對運動方向，黑色粗黑線或虛線表示為非主要斷層，虛線表示推測，黑色細線表示為地層邊界，灰色實線為地層間輔助線或地質鑽探深度，灰色虛線表示為樞紐軸。滑脫面沿桂竹林層與早中新世不整合面滑移，以推測正斷層為斷坡，截切桂竹林層，由約 6 公里深，變淺至約 5 公里深，兩者間的斷坡呈 26 度向東傾。雙冬斷層近地表呈 32 度向東傾，深部變緩，斷層東側另有苦領腳斷層及水里坑斷層；車籠埔斷層/初鄉斷層近地表約呈 28 度東傾，向深部變緩後變陡，深部於滑脫面斷坪處匯入滑脫面，卓蘭層厚度約 1240 公尺，而錦水頁岩厚度約 260 公尺、桂竹林層厚度約 1475 公尺、早中新世地層厚度約 830 公尺。桐樹湖斷層截切早中新世地層，沿早中新世地層間滑移錯距約 645 公尺，並於斷層上盤發育內林背斜，內林背斜兩翼較不對稱，且兩翼皆變陡，西翼約呈 34 度，東翼傾角約為 12 度。

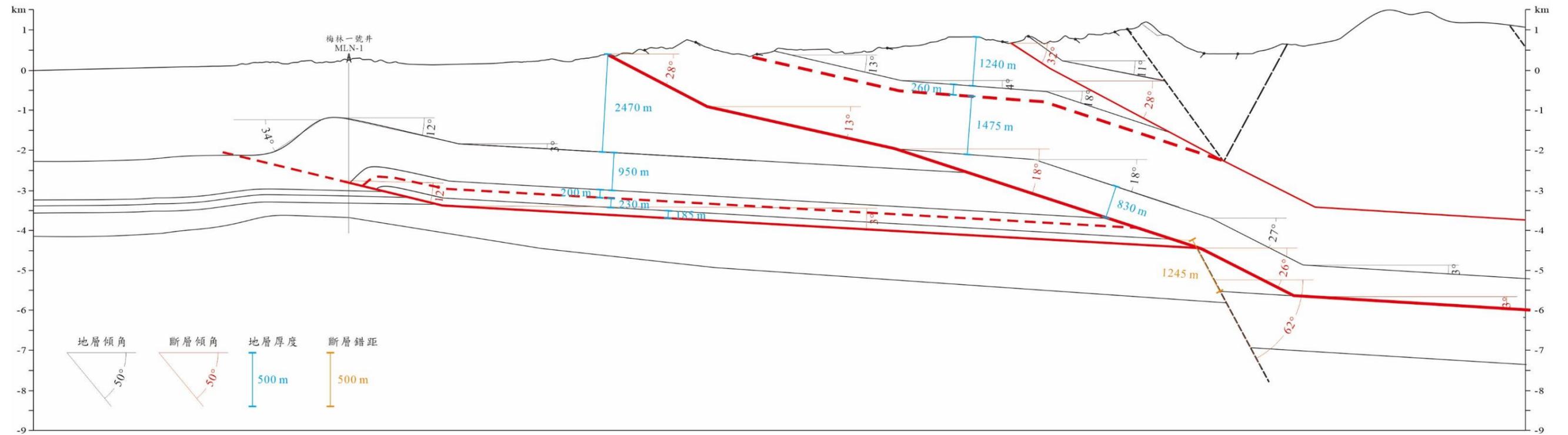


圖 5-17 本研究繪製之剖面 EE' 構造地質剖面的地層傾角、層厚、斷層傾角及斷層錯距。紅色實線為主要斷層，長虛線表示推測，黑色粗黑線或長虛線表示為非主要斷層，黑色細線或灰色細線表示為地層邊界或地質鑽探深度。兩正斷層呈高角度向東傾，剖面中推測正斷層錯距約 1245 公尺。滑脫面的斷坡呈 26 度向東傾，雙冬斷層近地表呈 32 度向東傾，車籠埔斷層/初鄉斷層近地表約呈 28 度東傾。卓蘭層厚度約 1240 公尺，而錦水頁岩厚度約 260 公尺、桂竹林層厚度約 1475 公尺、早中新世地層厚度約 830 公尺。桐樹湖斷層錯距約 645 公尺，內林背斜西翼約呈 34 度、東翼傾角約為 12 度。

5-2-6 構造地質剖面回復

各剖面回復(無考慮雙冬斷層以西的構造)後，可觀察地層厚度變化及斷層縮短量：車籠埔斷層上盤卓蘭層厚度皆高於下盤，桂竹林層於推測正斷層下盤增厚，約由 730 公尺增厚至約 1550 公尺。

從北到南觀察，車籠埔斷層的斷層位移量及縮短量有不同程度的變化，在剖面 AA'至剖面 CC'中，呈逐漸減少的趨勢；在剖面 DD'至剖面 EE'中，縮短量增加。初鄉斷層縮短量變化趨勢與車籠埔斷層不同，呈逐漸向南減少的趨勢，直至匯入車籠埔斷層。

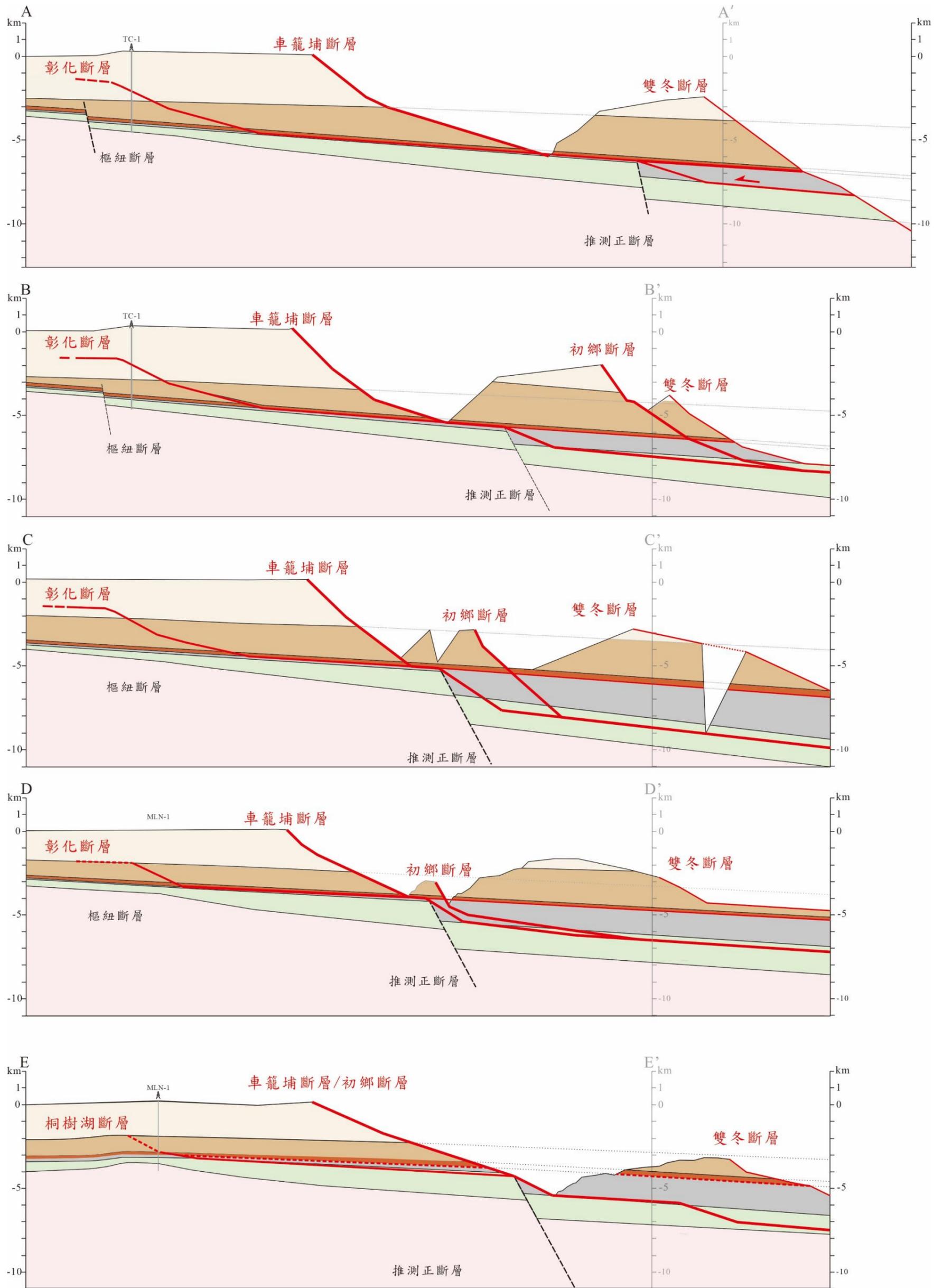


圖 5-18 本研究構造地質剖面回復圖。

第6章 討論

6-1 地層厚度變化的意涵

根據本研究剖面回復，雖對於車籠埔斷層東側的卓蘭層層厚無良好的制約，但可觀察到未變形前的車籠埔斷層上盤的卓蘭層厚度較下盤厚，上盤卓蘭層厚度約 2000 至 2400 公尺，亦較前人於車籠埔斷層至初鄉斷層間野外研究的地層厚度厚，但由於在此地區間卓蘭層上部被初鄉斷層所截切，因此無法得知卓蘭層完整地層厚度，Yu *et al.* (2005)認為集集地區地下可能存在一正斷層，使車籠埔斷層上盤卓蘭層較下盤厚。由前述推估的卓蘭層頂部地層趨勢角約 1.5 至 1.7 度計算，則可發現卓蘭層比估計值厚，本研究認為可能原因為卓蘭層上邊界的趨勢角度向前陸盆地中心(向東)變陡，原因為沉積盆地中有較多空間讓卓蘭層沉積，使得卓蘭層在車籠埔斷層東側較厚；亦可能當車籠埔斷層活動時，卓蘭層仍在沉積，於車籠埔斷層上盤形成豬背盆地 (piggyback basin)，使卓蘭層有較多的沉積空間；亦可能為正斷層在卓蘭層沉積時仍有活動，但沉積時的斷層錯距變化較小(與桂竹林層沉積時相比)。

本研究超微化石鑑定結果雖未鑑定出錦水頁岩與卓蘭層邊界，若假設錦水頁岩層序正常，無地層倒轉或重複，可估計錦水頁岩最小出露厚度，使用錦水頁岩中傾角東傾 45 度的位態計算，錦水頁岩層最小出露厚度約 210 公尺，根據前人研究錦水頁岩層厚約在 100 至 400 之間，因此剖面中假設錦水頁岩厚度大約為定值，約在 100 至 300 公尺之間。

根據前人研究(劉桓吉等，2004)，濁水溪以南桂竹林層厚度可超 1000 公尺厚，若與西部平原鑽井鑽遇的桂竹林層鑽厚相比，有數十倍的差異，由此可見桂竹林層的厚度可能隨地區而有很大的差異，本研究 CC'剖面中桂竹

林層視厚度約由 94 公尺增加至約 1550 公尺，但剖面深部沒有地質鑽探作為制約。

吳榮章(2009)認為前陸盆地始於桂竹林層關刀山砂岩段在沉積的時候，當碰撞影響前陸盆地發育，大陸邊緣快速下陷，坡度由小於 1 度快速變化至大於 1 度(圖 6-1)；桂竹林層中的魚藤坪砂岩段(大窩砂岩段)因碰撞造成前陸盆地快速下陷，大量砂體沉積(謝阜聰，2006)。根據本研究構造地質剖面回復，桂竹林層未變形前約在剖面中 29 公里處，距離梅林一號井約 20 公里，假設桂竹林層視傾角維持 3 至 4 度，若在梅林一號井東方 20 公里處增厚至約 1000 至 2000 公尺，則桂竹林層下邊界的視傾角則需增加約為 6 至 8 度(圖 6-2)，相當於其他地層趨勢角度的 1.5 至 2 倍，差異盛大，因此認為於南投集集地下有一正斷層較為合理。

6-2 集集地區地下的正斷層與斷坡構造

正斷層未出露於地表，僅能依據震測或是其他方法加以佐證，然而震測在深部的解析度不佳，無法明確觀察到正斷層的存在，僅能觀察到有一向東傾斜約 30 至 40 度的斷坡構造(Suppe, 1986)，且斷坡下盤仍有一些高角度的反射訊號，但無法分辨是否為正斷層。

根據地層厚度的巨大變化，可以得出正斷層的存在證據：根據 TC-1 和 MLN-1 井的資料，兩者鑽遇的桂竹林層厚度都不超過 250 公尺。然而，在距離 MLN-1 井東方 5 公里，大尖山斷層上盤出露的桂竹林層厚度可達 1 至 2 公里，這意味著桂竹林層增厚 4 至 8 倍；Suppe(1986)提出了大尖山斷層上下盤的桂竹林層，從大窩砂岩段到上部南莊層的厚度可以從 200 公尺增加到 2 公里，這些觀察結果支持了正斷層的存在。

根據 Chang(1971)八卦山及內林震測剖面(地表位置分別參見圖 2-4 及圖 2-6)，兩震測剖面有鄰近的深鑽井做為控制，震測剖面中可觀察到正斷

層發育停止於卓蘭層至桂竹林層中，推斷正斷層最後活動年代晚於桂竹林層，而本研究區域位於 Chang(1971)的兩震測剖面東方，集集地區地下正斷層可能於桂竹林層沉積時仍有頻繁的活動，使桂竹林層於正斷層上盤增厚。

在沿濁水溪的震測剖面中(圖 3-1)，在初鄉斷層至雙冬斷層間，可明顯觀察到約 30 至 40 度向東傾的強反射訊號，推斷為斷坡，Lee *et al.* (2003)於 1999 集集地震後量測地表斷層崖高度(圖 6-3 (a))，可觀察到於名間至竹山一帶，斷層崖高度明顯高於鄰近區域；賴家祥(2004)利用反射震測方法搭配地表地質及鑽井資料，於名間—集集地區，車籠埔斷層淺部地下有南北向的斷坡，1999 集集地震時，斷坡控制地震震波的傳遞、地震錯動量分布，亦控制區域的斷層地表破裂情形及地層分布；李憲忠(2003)利用高品質近場地震資料模擬高精確的 1999 集集地震車籠埔斷層逆推破裂時間—空間分布(圖 6-3 (b))，其結果中破裂初始位置於集集震源附近，前四秒錯動量微弱，第五秒才向北推進，於發生錯動 11 秒後才傳播到接近草屯附近，並幾乎停頓，判定草屯附近存在地栓(asperity)，李憲忠(2003)雖未提及名間—集集地區的地栓，其結果中可觀察到，破裂第四秒至第十一秒向北傳播時，破裂向北傳遞時疑似受東西向地栓阻擋，成東西向分布。

李千里(2006)利用反射震測方法廣域布線，將短剖面延伸為連續長剖面，解釋區域構造，車籠埔斷層於名間(坪林溪至濁水溪)有地下構造高區，高區頂部可對應到地表破裂峰值、斷坡底部可對應到 GPS 同震垂直位移峰值，並存在東西向構造，該構造控制斷層形貌，影響地表破裂異常分布，並將其結果與李憲忠(2003)破裂時間—空間分布套疊，主震發生 0 至 4 秒車籠埔斷層面正在累積應力，克服震源以北的名間高區，5 至 9 秒破裂開始向北傳播，向北傳播時有東西向的趨勢，並認為集集主震震源發生南北向斷坡、東西向斷坡及斷坪三者交會的三維的斷坡—斷坪轉折處(圖 6-3 (c))。

綜合上述前人研究，指出名間至集集地區有東西向及南北向的斷坡，本研究認為滑脫面發育時，受正斷層阻抗，以正斷層為斷坡，發育至正斷層上緣。

6-3 車籠埔斷層以東的地下構造

儘管於地表有相對較良好的控制，對於構造地下的幾何形貌僅能依靠地質鑽探或震測剖面解釋或地層厚度解釋：沿濁水溪有兩震測剖面，分別為 Hung and Suppe (2002) 及 Wang *et al.* (2002)，後者解析度較差，無法觀察到清楚、細節的訊號，部分反射訊號與地表位態有所不同，如初鄉斷層上盤地層反射訊號與地表位態不同。

雙冬斷層以東構造較為複雜，且無深部資料作為控制，僅於集集大山有深鑽井，車籠埔斷層及雙冬斷層兩者幾何關係，前人可基本分為兩種解釋方式，一種為車籠埔斷層與雙冬斷層發育於同一滑脫面(如 Yu *et al.*, 2005)，另一種為車籠埔斷層滑脫面與雙冬斷層滑脫面大致平行(如黃旭燦，2003)，本研究的剖面 AA' 及剖面 BB' 參考前者以兩斷層發育於同一滑脫面繪製，其餘剖面由於剖面長度的限制，須有類似後者的趨勢，但毋須做決定，實質上，並無可信的制約去判定雙冬斷層是否與車籠埔斷層相連至同一滑脫面，或兩者的滑脫面大致平行。

Tectonic Evolution of Foreland Basin Development

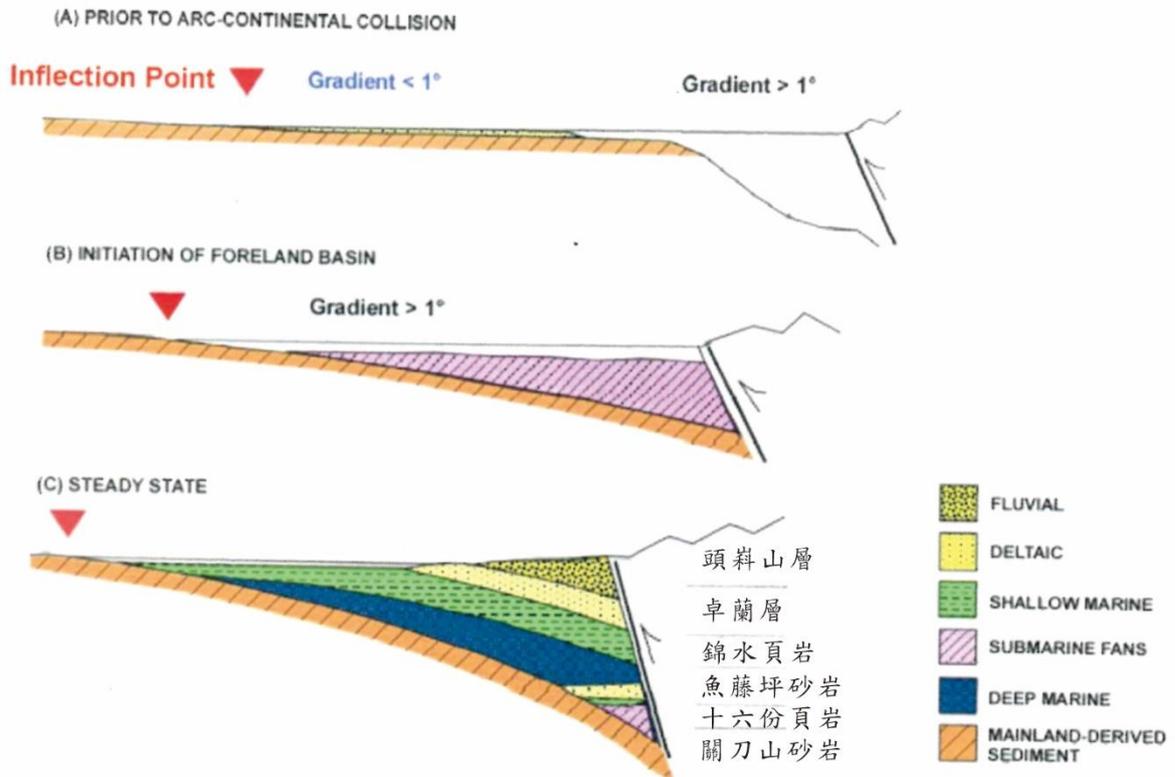


圖 6-1 新第三紀台灣前陸盆地形成及沉積形貌演化示意圖。紅色倒三角形為轉折點(Inflexion Point)位置，當碰撞影響前陸盆地發育時，大陸邊緣快速下陷，坡度由小於 1 度快速變化至大於 1 度。(摘自吳榮章，2009)

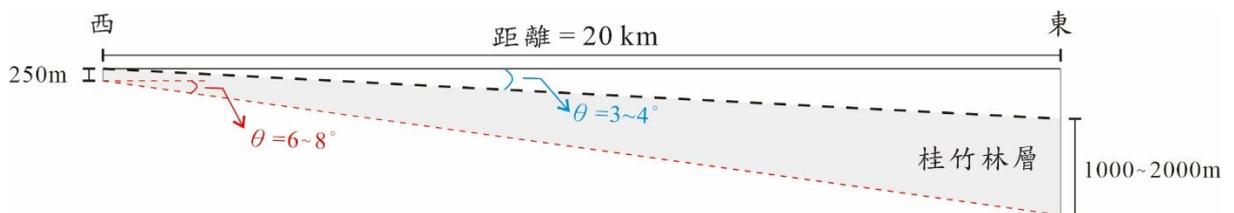


圖 6-2 桂竹林層增厚示意圖。假設桂竹林層視傾角維持 3 至 4 度，若在東方 20 公里處增厚至約 1000 至 2000 公尺，則桂竹林層下邊界的視傾角則需增加約為 6 至 8 度。

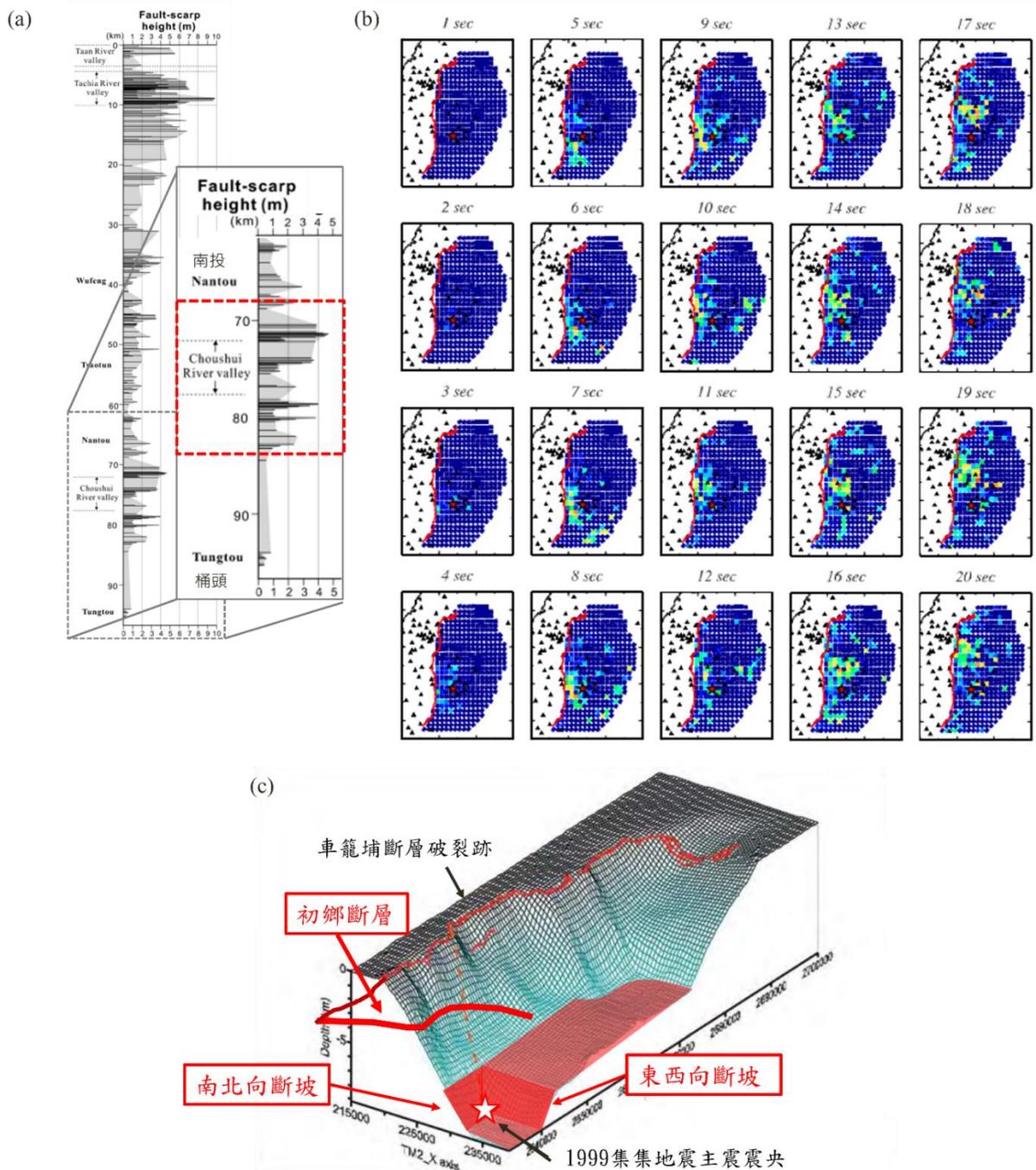


圖 6-3 (a)1999 集集地震後量測地表斷層崖高度。(b)1999 集集地震破裂時間—空間分布每秒瞬時錯動圖。紅色星號表示集集地震震源位置；車籠埔斷層以紅色粗線表示。在主震發生後 0 至 4 秒車籠埔斷層面正在累積應力，克服震源以北的名間高區，5 至 9 秒破裂開始向北傳播，向北傳播時有東西向的趨勢。(c)集集地震孕震區構造形貌。集集主震震源(紅白色星號)發生南北向斷坡、東西向斷坡及斷坪三者交會的三維的斷坡—斷坪轉折處。((a)摘自 Lee *et al.*, 2003、(b)摘自李憲忠，2003、(c)摘錄並修改自李千里，2006)

6-4 構造演化

討論本研究區的構造演化將包含初鄉斷層與區域構造關係的論述，並參考前人構造演化歷史。

6-4-1 初鄉斷層與區域構造關係

Suppe(1981)根據持續向南偏移的碰撞主力，認為台灣島是由北至南逐步抬升，陳文山等(2000)認為約在 3 Ma 時，碰撞主力已偏至中部地區，造成雪山山脈的抬升，同時形成前陸盆地；1 Ma 時主力偏向南側，區域應力以東西向壓縮為主，形成雙冬斷層，並導致前陸盆地的沉陷，在雙冬斷層下盤沉積頭嵛山層，此階段尚未發育車籠埔斷層。

初鄉斷層與大尖山斷層兩者斷層帶寬廣，且可觀察到與斷層平行的地形線型，具多條分支斷層，呈高角度，初鄉斷層與大尖山斷層兩者斷層帶的特徵相似，大尖山斷層及初鄉斷層可能為具左移分量的逆斷層；根據本研究構造地質剖面，初鄉斷層與車籠埔—大尖山斷層發育於同一滑脫面，大尖山斷層及初鄉斷層斷層上下盤層位落差較車籠埔斷層大，本研究認為初鄉斷層為大尖山斷層與雙冬斷層的連接型斜向斷層(connection splay)(圖 6-4)，調適車籠埔—大尖山斷層及雙冬斷層間的滑脫面滑移差異。

根據林啟文等(2000)和李元希等(2002)在 1999 年集集地震後的地表地質調查，大尖山斷層主要以右移斷層的形式運動，而初鄉斷層則未被報告有明顯的地表破裂，與大尖山斷層的同震行為不同。

鹿寮斷層以西與大尖山斷層以東的區域並無出露向斜構造(圖 2-4)，若鹿谷向斜為受大尖山斷層影響而產生，且形成時間早於鹿寮斷層，則應可於現今大尖山斷層上盤可觀察到向斜構造；若鹿谷向斜受大尖山斷層影響而產生，該時期大尖山斷層可能具有左移滑移分量，約呈北北西方向，所產生的褶皺軸方向應呈西北西—東南東方向，與現今褶皺軸方向有所不同，現今

褶皺軸方向雖可能受鹿寮斷層影響，鹿寮斷層可能以左移滑移分量為主，將使鹿谷向斜褶皺軸向北偏，於地圖上呈現順時鐘旋轉，亦與現今褶皺軸方位不同，綜合上述推測鹿谷向斜形成晚於鹿寮斷層。

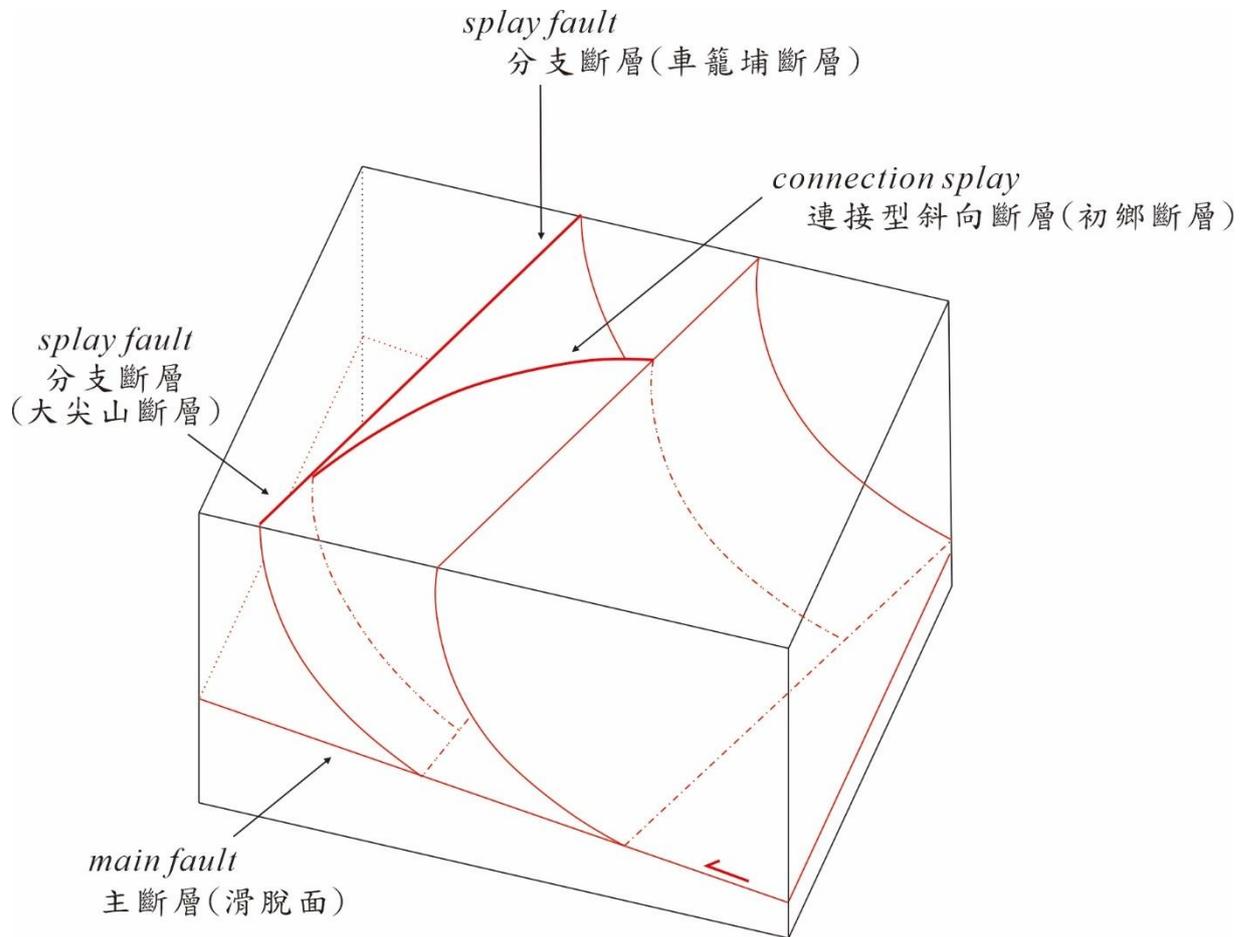


圖 6-4 逆衝斷層系統中的分支斷層型態。由主斷層(滑脫面)分叉出分支斷層(車籠埔斷層及大尖山斷層)及連接型斜向斷層(初鄉斷層)，紅色實線表示為斷層跡或斷層線，紅色虛點線表示為分支線(branch line)。(改繪自 Ramsay *et al.*, 1983)

6-4-2 構造演化

依前述地表位態、地層、斷層特性與褶皺發展模式，結合區域地層的厚度，參考前人區域構造關係，以下列過程來說明此區域可能的地質構造演化過程(圖 6-5 及圖 6-6)：

- 一、前陸盆地發育，正斷層發育並活動，桂竹林層沉積時，正斷層的活動增加沉積空間，斷層下盤有較厚的桂竹林層沉積(圖 6-5 (A))。
- 二、雙冬斷層開始發育，截切至地表，卓蘭層沉積於雙冬斷層下盤，此階段正斷層活動性下降或停止(圖 6-5 (B))
- 三、碰撞主力由北向南移，前陸盆地的沉陷，於雙冬斷層下盤沉積頭嵛山層，形成車籠埔斷層(圖 6-5 (C))，由北向南擴展，並於上盤形成褶皺。
- 四、碰撞主力持續向南移，車籠埔斷層向南擴展，開始發育車籠埔斷層大尖山段，為一逆斷層，並於斷層上盤形成褶皺(圖 6-5 (D))。車籠埔—大尖山斷層多次活動，車籠埔—大尖山斷層南北段的錯距持續增大，南段上盤出露桂竹林層，同時期，初鄉斷層由北端開始發育(圖 6-5 (E))。
- 五、初鄉斷層持續發育，並匯入大尖山斷層，地表顯示視左移(圖 6-6 (F))。
- 六、大尖山—初鄉斷層轉為高角度具逆移分量的左移斷層，斷層活動並向北發育，呈東北走向，於下城地區未截切至地表(圖 6-6 (G))
- 七、大尖山—初鄉斷層上盤發育高角度東傾左移的鹿寮斷層(圖 6-6 (H))。
- 八、鹿寮斷層持續活動，初鄉斷層呈逆移滑移，形成鹿谷向斜，斷層上盤於濁水溪發育頂溪州背斜(圖 6-6 (I))，而有局部受背斜影響的正斷層；大尖山斷層受車籠埔—鹿寮地塊的推擠，由原先的左移轉為右移。

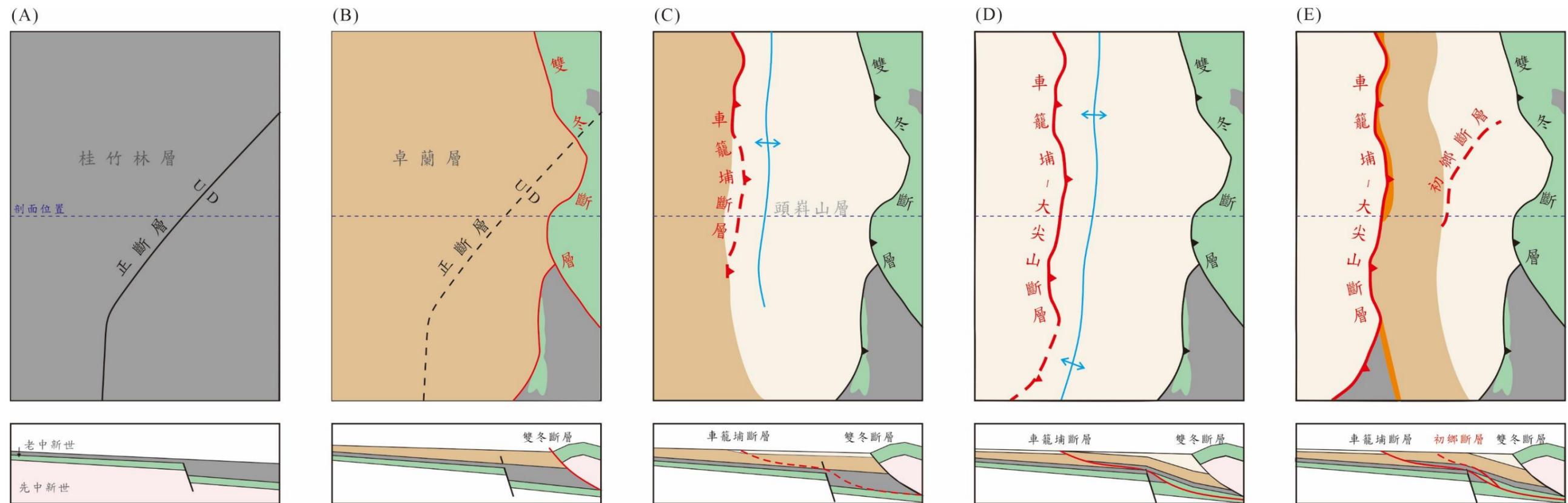


圖 6-5 構造演化圖(A)至(E)。(A)前陸盆地發育，正斷層發育並活動，桂竹林層沉積時，斷層下盤有較厚的桂竹林層沉積。(B)雙冬斷層開始發育，截切至地表，卓蘭層沉積於雙冬斷層下盤，此階段正斷層活動性下降或停止。(C)雙冬斷層下盤沉積頭崙山層，形成車籠埔斷層，由北向南擴展，並於上盤形成褶皺。(D)車籠埔斷層向南擴展，發育車籠埔斷層大尖山段。(E)車籠埔—大尖山斷層多次活動，斷層南段上盤出露桂竹林層，同時期，初鄉斷層開始由北端發育。

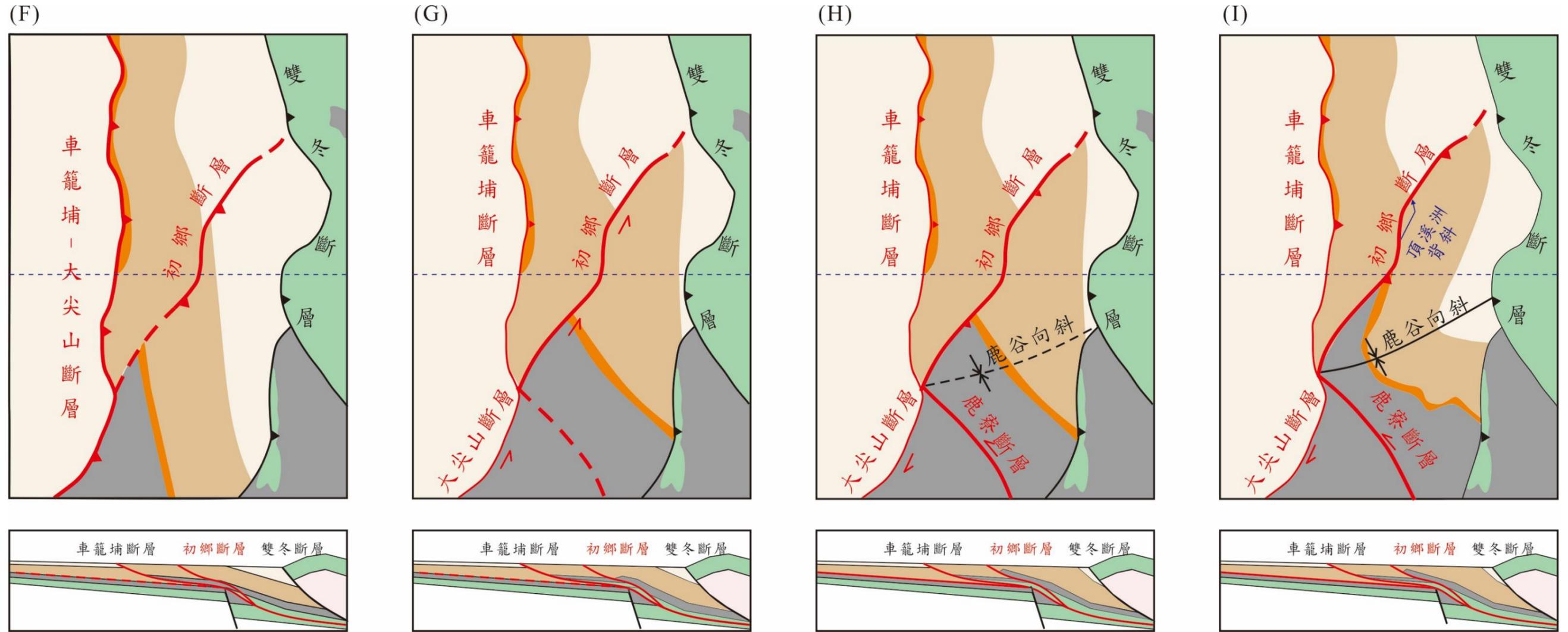


圖 6-6 構造演化圖(F)至(I)。(F)隨大尖山斷層錯距增加，斷層東側出露桂竹林層，初鄉斷層向兩側擴展，地表呈現視右移。(G)大尖山—初鄉斷層轉為高角度具逆移分量的左移斷層。(H)於大尖山—初鄉斷層上盤發育鹿寮斷層，鹿寮斷層持續發育。(I)鹿寮斷層持續活動，初鄉斷層呈逆移，形成鹿谷向斜，斷層上盤於濁水溪發育頂溪背斜，而有局部受背斜影響的正斷層；大尖山斷層受車籠埔—鹿寮地塊的推擠，轉為右滑，並於大尖山斷層西側開始發育八卦山—內林背斜。

第7章 結論與未來展望

7-1 結論

1. 根據生物地層鑑定結果，濁水溪南岸車籠埔斷層上盤所出露岩層屬於下部錦水頁岩，顯示車籠埔斷層於濁水溪以南，近地表處仍以錦水頁岩為滑動面。
2. 車籠埔斷層近地表呈東傾約 45 度，濁水溪以北沿著錦水頁岩的弱面滑移，並深切桂竹林層；濁水溪以南，則以桂竹林層或早中新地層間為主要滑脫面。
3. 滑脫面的傾角約為 4 度向東傾斜，以正斷層為斷坡，並發育車籠埔斷層、初鄉斷層及大尖山斷層。
4. 推測正斷層用於解釋濁水溪以南的地層厚度變化，位於滑脫面下方，該斷層呈高角度東傾，在斷層下盤提供桂竹林層相當的沉積空間；正斷層的存在亦對滑脫面的形成產生影響，進一步影響了逆衝斷層的發育，使得濁水溪南北兩側的構造行為有所差異。
5. 初鄉斷層為大尖山斷層及雙冬斷層的連接型斜向斷層，作為兩者間的空間調適，可能與大尖山斷層有相似的斷層性質，為具有左移性質的逆斷層。

7-2 未來展望

對於初鄉斷層是否受 2013 年 6 月 2 日南投地震的影響，我們需要謹慎評估。有可能從同震時期的庫倫破壞應力場著手，探討初鄉斷層是否被誘發的可能性。如果能夠證明初鄉斷層受到南投地震的誘發而活動，根據經濟部中央地質調查所對活動斷層的分類規則，初鄉斷層應該被歸類為第一類活動斷層。

此外，鹿谷向斜可能是一個受到初鄉斷層影響而形成。在地表上，我們觀察到一些可能是褶皺崖的地貌特徵，但需要進一步在野外進行查核，以祈望這將有助於我們對初鄉斷層有更多的了解。

參考文獻

- Brown, D., Alvarez-Marron, J., Schimmel, M., Wu, Y. M., and Camanni, G., 2012, The structure and kinematics of the central Taiwan mountain belt derived from geological and seismicity data: *Tectonics*, v. 31.
- Chan, C. H., Ma, K. F., Shyu, J. B. H., Lee, Y. T., Wang, Y. J., Gao, J. C., Yen, Y. T., and Rau, R. J., 2020, Probabilistic seismic hazard assessment for Taiwan: TEM PSHA2020: *Earthquake Spectra*, v. 36, no. 1_Suppl, p. 137-159.
- Chang, S. S., 1971, Subsurface geologic study of the Taichung basin, Taiwan: *Petroleum Geology of Taiwan*, v. 8, p. 21-45.
- Chen, J.-S., 1978, A comparative study of the refraction and reflection seismic data obtained on the Changhua Plain to the Peikang Shelf, Taiwan: *Petroleum Geology of Taiwan*, v. 15, p. 199-217.
- Chen, K. C., Huang, B. S., Wang, J. H., and Yen, H. Y., 2002, Conjugate thrust faulting associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake sequence: *Geophysical Research Letters*, v. 29, no. 8, p. 118-111-118-114.
- Hung, J.-H., and Suppe, J., 2002, Subsurface geometry of the Sani-Chelungpu Faults and fold scarp formation in the 1999 Chi-Chi Taiwan earthquake: *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- Lee, Y. H., Hsieh, M. L., Lu, S. D., Shih, T. S., Wu, W. Y., Sugiyama, Y., Azuma, T., and Kariya, Y., 2003, Slip vectors of the surface rupture of the 1999 Chi-Chi earthquake, western Taiwan: *Journal of Structural Geology*, v. 25, no. 11, p. 1917-1931.
- Lee, Y. H., and Shih, Y. X., 2011, Coseismic displacement, bilateral rupture, and structural characteristics at the southern end of the 1999 Chi-Chi earthquake

- rupture, central Taiwan: *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, v. 116, no. B7.
- Lin, A. T., Yang, C. C., Wang, M. H., and Wu, J. C., 2021, Oligocene-Miocene sequence stratigraphy in the northern margin of the South China Sea: An example from Taiwan: *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 213, p. 104765.
- Ramsay, J. G., and Huber, M. I., 1987, *The Techniques of Modern Structural Geology: Folds and Fractures*, Elsevier Science.
- Suppe, J., 1980, Imbricated structure of Western Foothills belt, southcentral Taiwan: *Petroleum Geology of Taiwan*, v. 17, p. 1-16.
- , 1981, Mechanics of mountain building and metamorphism in Taiwan: *Memoir of the Geological Society of China (Taiwan)*, v. 4, p. 67-89.
- , 1986, Reactivated normal faults in the western Taiwan fold-thrust belt: *Memoir of the Geological Society of China*, v. 7, p. 187-200.
- Tang, C. H., 1977, Late Miocene erosional unconformity on the subsurface Peikang High beneath the Chiayi-Yunlin coastal plain, Taiwan: *Memoir of the Geological Society of China*, no. 2, p. 155-167
- Wang, C. Y., Chang, C. H., and Yen, H. Y., 2000, An interpretation of the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan based on the thin-skinned thrust model: *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, v. 11, no. 3, p. 609-630.
- Wang, C. Y., Li, C. L., Su, F. C., Leu, M. T., Wu, M. S., Lai, S. H., and Chern, C. C., 2002, Structural mapping of the 1999 Chi-Chi earthquake fault, Taiwan by seismic reflection methods: *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, v. 13, no. 3, p. 211-226.
- Wells, D. L., and Coppersmith, K. J., 1994, New empirical relationships among

magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 84, no. 4, p. 974-1002.

Wu, J. C., Huang, S. T., Wang, M. H., Tsai, C. C., Mei, W. W., Hung, J. H., Lee, T. Y., Yang, K. M., and Lee, K. F., 2007, Core slabbing and nannofossil analysis on the Chelungpu fault zone, Taichung, Taiwan: *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, v. 18, no. 2, p. 295-325.

Yu, S.-B., Kuo, L.-C., Hsu, Y.-J., Su, H.-H., Liu, C.-C., Hou, C.-S., Lee, J.-F., Lai, T.-C., Liu, C.-C., and Liu, C.-L., 2001, Preseismic deformation and coseismic displacements associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 91, no. 5, p. 995-1012.

Yue, L.-F., Suppe, J., and Hung, J.-H., 2005, Structural geology of a classic thrust belt earthquake: the 1999 Chi-Chi earthquake Taiwan ($M_w=7.6$): *Journal of Structural Geology*, v. 27, no. 11, p. 2058-2083.

-, 2011, Two contrasting kinematic styles of active folding above thrust ramps, western Taiwan.

中國石油公司，1986，嘉義地質圖，比例尺十萬分之一，中國石油公司臺灣油礦探勘總處。

中國石油公司，1982，臺中地質圖，比例尺十萬分之一，中國石油公司臺灣油礦探勘總處。

王廷瑜，2021，利用地電阻影像法與室內電阻率試驗探討地下構造特性——以臺灣中部初鄉斷層為例，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。

王乾盈、郭炫佑、陳璿臣、劉耕源，2004，以反射震測法偵測桐樹湖斷層，

- 經濟部中央地質調查所特刊，第 15 號，第 23-35 頁。
- 衣德成，2004，車籠埔斷層帶組構特性與膨潤石-伊利石礦物相轉變之研究，國立成功大學地球科學研究所碩士論文。
- 何春蓀、譚立平，1960，臺灣臺中東勢至南投國姓間煤田地質，臺灣省地質調查所彙刊，第 12 號，第 19-62 頁。
- 吳榮章，2009，台灣中北部晚期中新世以來古沉積環境與前陸盆地之演變-栗林構造層序地層與生物地層之分析，國立臺灣師範大學地球科學系碩士論文。
- 李千里，2006，車籠埔斷層幾何形貌之探究，國立中央大學地球物理研究所博士論文。
- 李元希、盧詩丁、石同生、饒瑞鈞，2002，集集地震南段地表破裂的變形機制—逆斷層-走向滑移斷層-走向滑移斷層板塊(TFF)三接點模式，經濟部中央地質調查所彙刊，第 15 號，第 87-101 頁。
- 李泰慶，2004，大尖山斷層帶之淺部構造特徵，國立中正大學應用地球物理研究所碩士論文。
- 李憲忠，2003，九二一集集地震三維震源過程與震波傳遞分析，國立中央大學地球物理研究所博士論文。
- 周稟珊、林啟文，2023，臺灣中部初鄉斷層的構造研究，經濟部中央地質調查所彙刊，第 36 號，第一頁。
- 林啟文、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。
- 林啟文、張徽正、盧詩丁、石同生、黃文正，2000，臺灣活動斷層概論，五十萬分之一臺灣活動斷層分布圖說明說，第二版，經濟部中央地質調查所特刊，第 13 號，共 122 頁。

- 林啟文、劉彥求、周稟珊、林燕慧，2021，臺灣活動斷層調查的近期發展，
經濟部中央地質調查所彙刊，第 34 號，第 1-40 頁。
- 林啟文、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。
- 林啟文、盧詩丁、黃文正、石同生、張徽正，2000，臺灣中部濁水溪以南地
區的集集地震斷層與構造分析，經濟部中央地質調查所特刊，第 12 號，
第 89-111 頁。
- 林啟文、周稟珊，2016，臺灣北部苗栗地區出露地層之命名與先著權探討，
臺灣礦業，第 68 卷第 4 期，第 17-32 頁。
- 邱子軒，2018，台灣中部麓山帶晚期上新世至早期更新世前陸盆地之古沉積
環境研究，國立中央大學地球科學系碩士論文。
- 洪崇勝、謝凱旋，臺灣第四紀磁生物地層及蓬萊造山運動事件，經濟部中央
地質調查所特刊，第 18 號，第 51-83 頁，2007。
- 紀文榮，1983，臺灣中南部麓山帶及東部海岸山脈之超微化石生物地層及其
對比，石油，第 19 卷第 4 期，第 2-26 頁
- 許文立，2001，彰化斷層及其附近構造，中央大學地球物理研究所碩士論文。
- 陳于高、徐濬德、賴光胤、王昱、莊昀叡、陳文山，2002，階地變形和活動
構造：以南投東埔蚋溪為例，中國地質學會九十一年年會論文集，第 12-
14 頁。
- 陳文山等，2016，台灣地質概論，中華民國地質學會。
- 陳勉銘、謝有忠、陳棋炫，2016，五萬分之一台灣地質圖說明書，阿里山地
質圖說明書，經濟部中央地質調查所，第 39 號。
- 陳華攻、邵屏華、石同生，2004，五萬分之一台灣地質圖說明書，南投地質
圖說明書，經濟部中央地質調查所，第 31 號。

- 童煜翔、顏呈仰、尤芊翔、謝承恩、李旺儒、邱子軒，2022，110-111 年活動斷層地下地質探查(2/2)，經濟部中央地質調查所委託研究報告 B11128 號。
- 黃文正、陳建志、波玫琳、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。
- 黃旭燦，2003，台灣中南部褶皺逆衝斷層帶地質構造，國立中央大學地球物理研究所博士論文。
- 黃鑑水、謝凱旋、陳勉銘，2000，五萬分之一台灣地質圖說明書，埔里地質圖說明書，經濟部中央地質調查所，第 32 號。
- 黃鑑水、陳勉銘，2000，臺灣中部地區之雙冬斷層，經濟部中央地質調查所特刊，第 12 號，第 171-182 頁。
- 楊志成，1997，臺灣中部地區錦水頁岩、卓蘭層與頭嵙山層的沉積環境研究」，臺灣大學地質學系碩士論文。
- 經濟部中央地質調查所，1999，九二一地震地質調查報告。
- 劉桓吉、李錦發、紀宗吉，2004，五萬分之一台灣地質圖說明書，雲林地質圖說明書，經濟部中央地質調查所，第 38 號。
- 劉桓吉、李錦發，1998，五萬分之一台灣地質圖說明書，雲林地質圖說明書，經濟部中央地質調查所，第 38 號。
- 黎明工程顧問公司，2010，集集攔河堰初次使用安全併評估地質補充調查及試驗專題報告，經濟部水利署中區水資源局。
- 賴家祥，2004，車籠埔斷層面起伏構造之研究，國立中央大學地球物理研究所碩士論文。
- 謝秀華，2007，八卦山背斜之形成與彰化斷層長期滑移量研究，國立中正大學應用地球物理研究所碩士論文。

謝阜聰，2005，台灣西部新第三系層序地層學研究之初探，國立臺灣師範大學地球科學系碩士論文。

顏一勤，2019，108 年度活動斷層補充地質調查案，經濟部中央地質調查所委託研究報告。