

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

以三維地質模型探討台灣西部麓山帶濁水溪南北的地
下構造特性

**Three-Dimensional Visualization and Structural
Analysis of the Area around the Zhuoshui River in
the Western Foothill of Taiwan**

研究生：黃琮錡

Student: Tsung Chi Huang

指導教授：黃文正 博士

Advisor: Wen-Jeng Huang, Ph. D.

中華民國 一百一十三年六月

June, 2024

國立中央大學圖書館學位論文授權書

填單日期：2024 / 8 / 22

2019.9 版

授權人姓名	黃琮鈞	學號	109624003
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	以三維地質模型探討台灣西部麓山帶濁水溪南北的地下構造特性	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化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： 黃琮鈞 指導教授簽名： 黃文正

*本授權書請完整填寫並親筆簽名後，裝訂於論文封面之次頁。

國立中央大學碩士班研究生 論文指導教授推薦書

應用地質研究所碩士班 學系/研究所 黃琮錡 研究生

所提之論文 以三維地質模型探討台灣西部麓山帶濁水溪南北的
地下構造特性

係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授 黃文正 (簽章)

113 年 8 月 22 日

1130822

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 黃琮錡 研究生
所提之論文 以三維地質模型探討台灣西部麓山帶濁水溪南北的
地下構造特性

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

楊志成

委

員

賴光胤

蕭文正

中 華 民 國 113 年 7 月 10 日

1130710

以三維地質模型探討台灣西部麓山帶濁水溪南北的地下構造特性

中文摘要

本研究位於台灣西部麓山帶濁水溪南北兩側，區域西側出露車籠埔斷層，東側為雙冬斷層，初鄉斷層介於其間。西部麓山帶自更新世造山運動發生以來，受到來自東南方的動力作用向西北推擠，新近紀地層受褶曲和逆斷層的作用疊擠在一起，造成顯著的覆瓦狀斷層系統。過往研究中已有數條剖面於西部麓山帶建立典型斷坡—斷坪構造模型，然而南投丘陵區因初鄉斷層斜向截切，致使跨濁水溪南北的剖面未能良好連接，構造在空間中的連續性與相互關係並不明確。此外，鑽井資料亦顯示桂竹林層在此區域中層厚隨空間變化差異可至數十倍。

本研究使用 MOVE 軟體作為平衡剖面回復與建立三維地質模型的工具，藉由三維地質模型瞭解此區域的地下構造形貌。首先蒐集前人地質剖面，並重建於 MOVE 軟體二維環境中，進行平衡剖面回復以檢視其合理性，依據回復結果修改沿濁水溪剖面，將初鄉斷層併入車籠埔斷層的位置，由車籠埔斷層的下部斷坡底往東移 3.3 公里。隨後將地質剖面與地表地質資料共同彙整於三維空間中，並以此為基礎建立三維構造模型。依據三維模型顯示推測正斷層在濁水溪地下呈南北走向朝東傾，並在濁水溪以北約 3 至 4 公里處轉為東西至東北向，朝南傾。正斷層的轉向使車籠埔斷層在區域北方斷坪向東延伸變得更長，因此儘管剖面回復推估顯示車籠埔斷層於最北剖面有最大錯移量，然而濁水溪以南斷層上盤出露地層仍較北段古老。初鄉斷層北段錯移

量同樣較南段大，但南段上盤地層亦較北段古老，主因是斷層發育活動時地層已受車籠埔斷層錯位變形，南段上新世地層已抬升至極為接近地表，北段則仍在較深的位置，隨後初鄉斷層的錯位變形，並未能逆轉所致。

關鍵詞：初鄉斷層、車籠埔斷層、三維構造模型、平衡剖面

Three-Dimensional Visualization and Structural Analysis of the Area around the Zhuoshui River in the Western Foothill of Taiwan

Abstract

This study focuses on the area around the Zhuoshui River in the Western Foothills of Taiwan, where the Chelungpu Fault is exposed on the western side of the region, the Shuangtung Fault on the eastern side, and the Chusiang Fault in between. Since the Pleistocene orogeny, the Western Foothills of Taiwan have been subjected to northwestward compression due to forces coming from the southeast. This compression has caused the Neogene strata to fold and thrust together, forming a prominent imbricate fault system. Previous studies have established several cross-sections and create a typical ramp-flat fault model in the Western Foothills, but due to the Chusiang Fault cuts across the middle, the cross-sections at north and south of the Zhuoshui River in the Nantou Hill region do not connect well, leaving the spatial continuity and interrelations of the structures unclear. Well data also reveal that the thickness of the Kueichulin Formation varies by several tens of times across this region.

In this study, MOVE software is used as a tool for performing balanced cross-section restoration and constructing a three-dimensional geological model. The three-dimensional model helps us understand the subsurface structural morphology of this area and to connect geological

models across the Zhuoshui River. Initially, geological cross-sections from previous studies are reconstructed in the 2D environment of MOVE software, where balanced cross-section restoration is performed to verify their validity. Based on the restoration results, modifications are made to the cross-section along the Zhuoshui River, moving the connection point of the Chusiang Fault to the base of the Chelungpu Fault ramp further east. Subsequently, the geological cross-sections and ground geological data are integrated into a three-dimensional space to build a three-dimensional structural model. According to the model, it is inferred that the normal fault strikes north-south beneath the Zhuoshui River area, dipping eastward, and then turns to a northeast to east-west to direction, dipping southward, about 3 to 4 kilometers north of the Zhuoshui River. This change in the strike of the fault makes the fault flat of the Chelungpu Fault to extend eastward and become wider in the northern part of the region. Therefore, despite the largest displacement on the northernmost cross-section of the Chelungpu Fault, the strata exposed in the hanging wall south of the Zhuoshui River are still older than those in the northern section. Similarly, the displacement along the northern section of the Chusiang Fault is greater than that in the southern section. Exposed strata in the hanging wall in the southern section of the Chusiang Fault are older than those in the northern section, as well. This is mainly because the strata had already been deformed by the Chelungpu Fault. The Pliocene strata was uplifted close to the ground in the southern section while those remained in the deeper in the northern section. However, the following deformation produced by the activity of

the Chusiang fault does not reverse the status.

Keywords: Chusiang fault, Chelungpu Fault, three-dimensional geological model, balanced cross-section

目錄

中文摘要.....	i
英文摘要.....	iii
目錄.....	vi
一、緒論.....	1
1-1 前言.....	1
1-2 研究動機.....	3
二、地質背景.....	4
2-1 地形.....	4
2-2 地層.....	8
2-3 地質構造.....	10
2-3-1 主要褶皺.....	11
2-3-2 主要斷層.....	11
三、前人地質剖面與構造模型.....	15
3-1 濁水溪以北.....	15
3-2 濁水溪以南.....	19
3-3 跨濁水溪南北.....	21
3-3-1 剖面位置.....	21
3-3-2 剖面中主要斷層構造.....	23
四、研究方法與資料.....	26
4-1 平衡剖面回復.....	26
4-2 建立三維地質模型.....	28
五、研究結果.....	30
5-1 地質剖面回復.....	30
5-1-1 以 AA'剖面為例.....	31
5-1-2 以 CC'剖面為例.....	34

5-1-4 剖面回復結果.....	38
5-1-5 改繪 CC'剖面.....	39
5-2 三維地質模型.....	40
六、討論與結論.....	43
6-1 構造演化與對地層層厚的影響.....	43
6-2 斷層上盤出露地層與斷層水平錯移量之間的關係.....	48
七、結論.....	51
參考文獻.....	53

圖目錄

圖 1-1 a.台灣周遭的大地構造 b.區域地質圖	2
圖 2-1 南投濁水溪鄰近區域地形圖	5
圖 2-2 河階地地形圖	6
圖 2-3 東埔蚋溪河階，明顯線型崖位置圖	7
圖 2-4 區域地質圖	10
圖 3-1 Yue et al.(2005)研究區域、資料分布與主要剖面位置圖	16
圖 3-2 Yue et al.(2005)東西向區域剖面 XX'與 YY'	17
圖 3-3 車籠埔斷層在九二一大地震主震震源附近區域性剖面	18
圖 3-4 震測剖面位置與震測剖面比較	20
圖 3-5 前人研究地質剖面與剖面資料位置圖	22
圖 3-6 張中威(2023)初鄉斷層沿線剖面模型	25
圖 5-1 AA'剖面回復步驟	33
圖 5-2 CC'剖面回復步驟	35
圖 5-3 DD'剖面回復步驟	37
圖 5-4 剖面回復結果	38
圖 5-5 改繪之 CC'剖面	39
圖 5-6 剖面位置地圖。	40
圖 5-7 濁水溪南北三維地質模型與五條剖面位置	41
圖 5-8 基於三維地質模型，在剖面 AA'剖面至 CC'剖面之間所建立之 10 條剖面	42
圖 6-1 沿濁水溪 CC'剖面構造演化	47
圖 6-2 三維模型示意圖	49
圖 6-3 初鄉斷層開始活動時地下構造	50

表目錄

表 6-1 斷層活動於各剖面所造成水平錯移量	48
------------------------------	----

一、緒論

1-1 前言

台灣地處歐亞板塊與菲律賓海板塊聚合交界(圖 1-1 a)，自更新世蓬萊造山運動發生以來，台灣西部麓山帶內的第三紀地層就受到了褶曲和逆斷層的作用被疊擠在一起，在來自東南方的動力作用下地層向西北推擠，形成顯著的覆瓦狀斷層系統(何春蓀，1986)。板塊擠壓持續作用使西部麓山帶內斷層不斷發育演化，斷層的活動是台灣災害性地震發生的主要原因，孕震構造的調查與研究至關重要。

西部麓山帶內本研究著重探討的數條斷層，由西至東分別為彰化斷層、車籠埔斷層、初鄉斷層與雙冬斷層(圖 1-1 b)。其中彰化斷層、車籠埔斷層、及雙冬斷層大致呈南北走向，縱貫百餘里。初鄉斷層呈東北西南走向，侷限在南投縣丘陵地區，截切於車籠埔斷層與雙冬斷層之間，使得該地區的地質構造相對複雜許多，造成濁水溪南北兩側的東西向地質剖面的構造詮釋有所不同，且這些構造剖面建構之模型的相容性(compatibility)也尚不明確。為了更深入地了解西部麓山帶濁水溪一帶的構造演化與構造之活動性，重建地下地質構造是不可避免的任務。建立平衡剖面與三維地質模型將能夠使觀察地下構造的幾何形貌更快速且清晰。本研究參考前人所繪製的地質剖面，使用 MOVE 軟體作為平衡剖面回復與三維模型建構的工具，匯入包含地質圖岩層位態與斷層跡、震測剖面 and 鑽井數據等地質資料作為制約，檢視張中威(2023)繪製剖面的合理性，若發現不合理處，將其修改。並以這些平衡剖面為基礎，側向延伸建立西部麓山帶濁水溪南北的地下三維地質模型，以更全面的理解區域中構造之間的關係和斷層活動性。

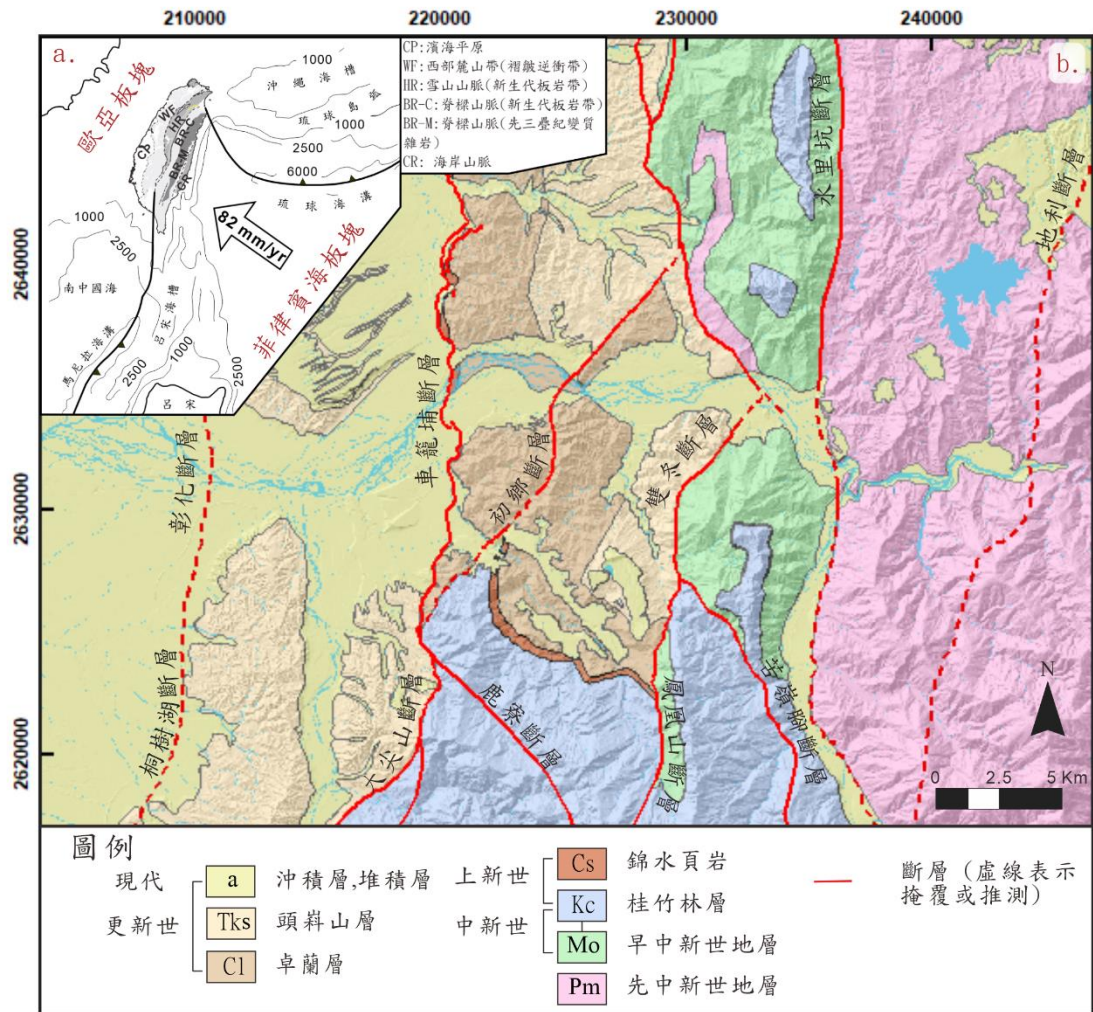


圖 1-1 a. 台灣周遭的大地構造 b. 區域地質圖

1-2 研究動機

台灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊的交界處，由於板塊聚合作用的關係地震頻繁發生。1999年集集地震(Mw 7.6)引致了廣泛的地表破裂和重大破壞，對台灣社會產生強烈的衝擊。在此次地震事件中，車籠埔斷層沿線形成約100公里的地表破裂，雙冬斷層亦有再活動的跡象(黃鑑水與陳勉銘，2000)。而集集地震中雖未觀察到初鄉斷層有明顯的地表變形，後續的調查中也發現初鄉斷層在東埔蚋溪河岸截切距今13585年前的階地礫石層(陳于高等，2002)，根據中央地質調查所對於活動斷層的定義，已於2022年收錄為活動斷層目錄中所列之第二類活動斷層。車籠埔斷層與周圍的斷層系統，包括初鄉斷層和雙冬斷層，其地震活動和地質結構儼然是重要的研究對象。為呈現西部麓山帶地下構造與活動斷層的幾何形貌，過去已有許多研究針對此區域進行探討，前人根據典型斷坪—斷坡(Ramp-flat)構造模型建立數條地質剖面，但仍然存在許多問題尚待解決。初鄉斷層斷層位在南投縣丘陵地區的車籠埔斷層與雙冬斷層之間，為東北西南走向，兼具逆衝與左移分量，使跨濁水溪南北的剖面存在差異未能良好連接。區域內的鑽井資料亦顯示桂竹林層與卓蘭層等地層厚度隨空間位置的不同存在巨大的變化(張中威，2023)。

本研究將檢視西部麓山帶濁水溪南北的東西向地質構造剖面的合理性，並建立三維地質模型，觀察車籠埔斷層、初鄉斷層與雙冬斷層的幾何關係與構造特性，以了解此區域活動構造的全貌，並提出可能的構造演化過程。

二、地質背景

2-1 地形

本研究區域中心範圍位於台灣西部麓山帶地區，東連雪山山脈與玉山山脈，西接彰化平原，地形呈現東高西低，東部地勢起伏較大，愈往西坡度遞減。濁水溪橫貫於全域中央，主流自區域東緣從上游山區出山口流出，先於水里與陳有蘭溪匯流，續往西流於集集有清水溝溪匯入，於竹山附近納入東埔蚋溪及清水溪等支流，隨後繼續向西進入彰化平原離開本區域，此範圍屬於水利署第四河川局定義之濁水溪中游段。相較於上游的險峻深邃，中游段的河谷轉為平坦開闊，沿岸地形以河階地與台地為主(圖 2-1)。

濁水溪以北地形變化明顯。集集大山以東為山地地形，地勢高聳，山嶺大致沿南北向延伸。地形向西逐漸變緩，首先進入南投丘陵，再往西為八卦台地。濁水溪以南東側山嶺最高達 3000 公尺以上，陳有蘭溪分隔玉山山脈與阿里山山脈，流域呈南北向狹長型縱谷，與雙冬斷層跡大致平行，溪谷兩側的山地坡度陡峭(圖 2-2)。東埔蚋溪與清水溝溪上游曲折蜿蜒，流經鹿谷鄉時在溪流兩岸形成發達的河階地形。

根據黃文正等(2019)調查，東埔蚋溪河階由老到新可分為四階： T_D1 、 T_D2 、 T_D3 、 T_D4 ；清水溝溪可分為 T_C1 與 T_C2 (圖 2-2)。在東埔蚋溪 T_D2 河階中，等高線分布可以觀察到明顯的線形崖，且崖面方向與初鄉斷層跡大致平行，地形變化可能受到斷層影響(圖 2-3)。

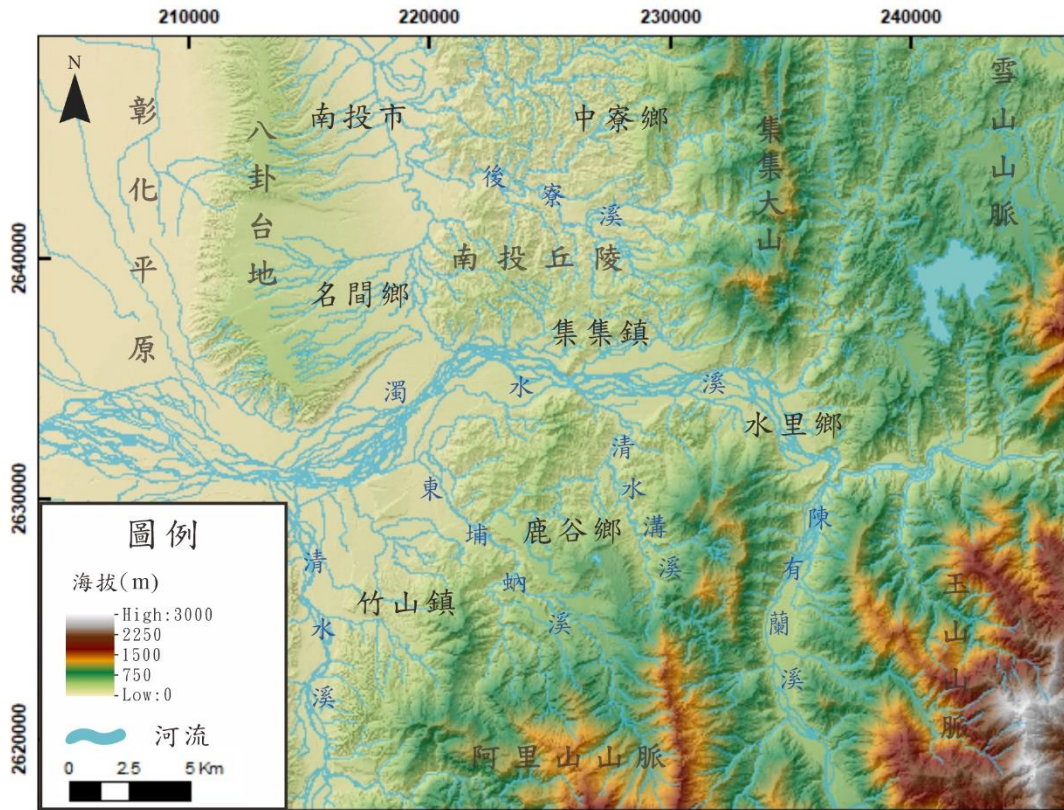


圖 2-1 南投濁水溪鄰近區域地形圖

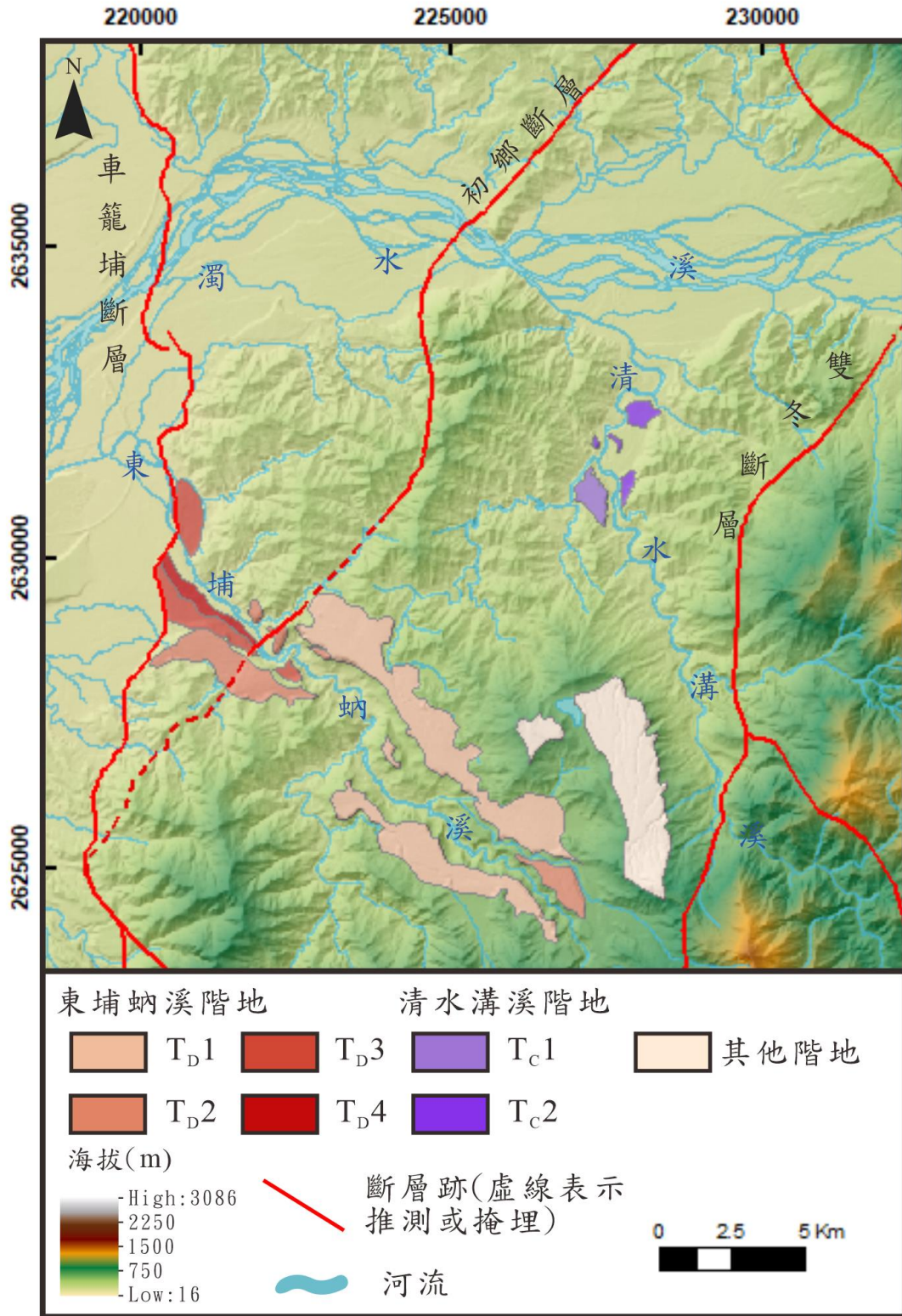


圖 2-2 河階地地形圖。階地根據地形判釋，依階地與現今河道高程變化分階。黑色虛線區間為圖 2-3 線型崖位置(改繪自黃文正等，2019)。

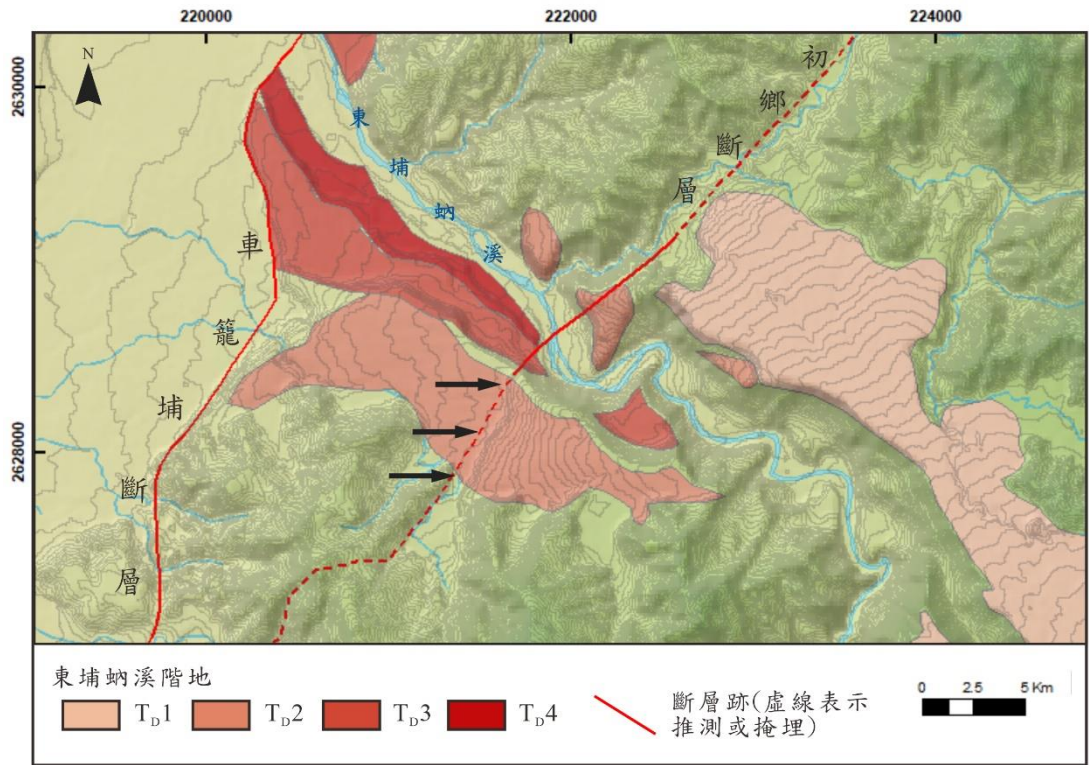


圖 2-3 東埔納溪河階，明顯線型崖位置圖。

2-2 地層

本研究區域出露地層(圖 2-4)以中新世至全新世之沉積岩為主，與本研究相關的地層，由老到新依序為中新世晚期的桂竹林層，上新世錦水頁岩，更新世的卓蘭層與頭嵙山層，現代階地堆積層與沖積層。底下各地層的說明主要參考黃鑑水等(2000)、陳華玟等(2004)、劉桓吉等(2004)、陳勉銘等(2016)、林啟文等(2019)及周稟珊等(2023)。

桂竹林層 (Kueichulin Formation)

桂竹林層主要出露於區域南部初鄉斷層上盤與雙冬斷層上盤的麓山帶。依岩性可細分為三個岩段，本研究區域出露岩段為中段十六份頁岩與上段大窩砂岩。十六份頁岩以受生物擾動之厚層泥質砂岩為主，偶夾砂質頁岩及砂頁互層；大窩砂岩以細粒砂岩與粉砂岩為主。

錦水頁岩 (Chinshui Shale)

錦水頁岩主要出露於車籠埔斷層上盤與初鄉斷層上盤，整合於卓蘭層之下。岩性以厚層深灰色泥岩為主，夾數十公分粉砂岩或細砂岩層，以及兩者互層。層中具有崩移構造。

卓蘭層 (Cholan Formation)

卓蘭層分布於麓山帶西側，整合於錦水頁岩之上、頭嵙山層香山段砂岩之下。整體岩性由砂岩、粉砂岩、泥岩及頁岩的互層組成，其中砂岩以細粒至粗粒混濁砂岩及類混濁砂岩為主，呈青灰色至褐灰色。在濁水溪區域可分為上下兩部，下部岩性為泥岩與砂岩薄互層為主，偶夾厚層砂岩與厚層泥岩；上部以薄層至中層砂岩與泥岩互層為主，砂岩偶為厚層，最上層含較多厚層砂岩。

頭嵙山層 (Toukoshan Formation)

頭嵙山層分布於車籠埔斷層下盤台地與丘陵地區以及雙冬斷層下盤麓山帶東側，覆蓋在卓蘭層之上。岩性以厚層疏鬆砂岩夾薄層頁岩為主，偶夾礫石層。依岩性可細分為香山段與火炎山段，本區出露於麓山帶東側者為下部之香山段。以厚層砂岩與薄層泥岩互層為主，偶夾礫岩層，層序向上逐漸增加砂岩夾礫岩。上部之火炎山段主要出露於車籠埔斷層西側，八卦台地與其南部丘陵。岩性以礫岩為主，間夾透鏡狀砂岩或泥岩層。

階地堆積層與沖積層 (Terrace deposits and Alluvium)

本區階地堆積層主要分布於各河流兩岸、八卦丘陵東翼以及區域西側之沖積平原。階地堆積主要由礫石、砂、黏土及泥土組成，與桂竹林層、卓蘭層及頭嵙山層呈交角不整合接觸。沖積層則為砂、礫石、粉砂及泥質沉積物組成，分布於現生河流的河床、盆地與沖積平原。

2-3 地質構造

本研究區位於褶皺逆衝帶，廣泛發育的褶皺與斷層交錯分布在區域中(圖 2-4)，主要的斷層。本章節將簡要說明為本研究地質剖面所截切之主要地質構造，包含位於區域西側的彰化斷層、桐樹湖斷層以及覆於其上的八卦山背斜與內林背斜；中央的車籠埔斷層、初鄉斷層以及頂溪州背斜；區域東側的大茅埔-雙冬斷層。區域中構造大致走向呈南北向，初鄉斷層與頂溪州背斜呈東北—西南走向。

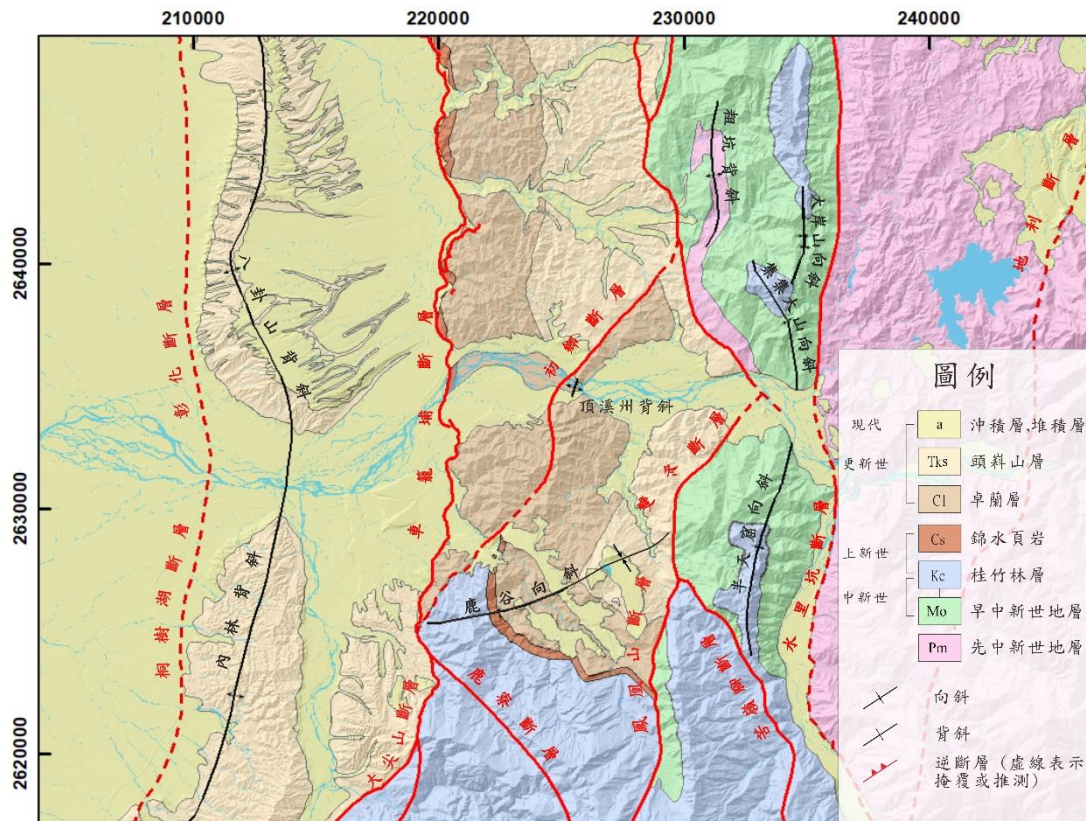


圖 2-4 區域地質圖。改繪自中國石油公司台中圖幅；經濟部中央地質調查所南投、埔里、雲林、阿里山圖幅；林啟文等(2019)；初鄉斷層改繪自黃文正等(2019)。

2-3-1 主要褶皺

八卦山背斜

八卦山背斜是造成八卦台地的重要地質構造，背斜兩翼傾角極緩且西翼較東翼陡，西翼岩層傾角介於 5~35 度，略大於東翼岩層 15 度以下的傾角，呈現西陡東緩的非對稱性開放型背斜(陳華玟，2004；謝秀華，2007)。背斜軸部呈現北北西—南南東或南北走向，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上盤，可能為岩層為調適桐樹湖斷層之空間而形成之褶皺。背斜軸線大致與桐樹湖斷層平行，呈南北走向並向東北方向傾沒，傾沒角約 10~15 度(劉錦發，2004)。內林背斜呈不對稱褶皺，西翼較陡東翼較緩。王乾盈等(2004)使用淺層反射震測法建立震測剖面，提出背斜在觸口台地呈單斜構造，東翼比西翼高；褶皺作用以梅林至圳頭坑之間為核心；向南延伸則背斜漸趨對稱且變寬變緩。

頂溪州背斜

頂溪洲背斜位於集集攔河堰西側，初鄉斷層上盤且緊鄰斷層。褶皺軸以 34 度向東北傾沒。背斜東側岩層完整，傾角介於 30 度到 50 度之間向東北傾，背斜西翼岩層相對破碎，逐漸轉為東西走向近乎垂直之高傾角(黃文正等，2019)。

2-3-2 主要斷層

彰化斷層

彰化斷層位於本研究區域西北方，目前未發現地表出露，為埋於

地下之盲斷層，斷層位置以地表地形特徵、地球物理探勘及鑽井資料判釋，無法明確指出斷層的確切位置。然而依據地表地形與地下反射震測顯示斷層上盤地層呈現斷層彎曲褶皺的形貌，背斜使地形向上抬升形成八卦台地(陳華玟，2004；王乾盈，2004)。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。

桐樹湖斷層

桐樹湖斷層位於本研究區域西南側，跨濁水溪與彰化斷層相連，掩蓋於沖積平原之下，為一盲斷層。由中油公司坪頂一號井與梅林一號井鑽探結果，劉桓吉等(2004)判斷斷層傾角約 30 度左右。王乾盈等(2004)在斗六台地建立淺層反射震測剖面，調查結果認為桐樹湖斷層應與彰化斷層有關聯，並抬起上方內林背斜，但已失去活動斷層特性。

車籠埔斷層

車籠埔斷層位於彰化斷層與桐樹湖斷層東側，南端於南投竹山地區與大尖山斷層相連。斷層約呈南北走向，大致沿丘陵與盆地交接處延展，東西兩側地形差異明顯。前人依據調查與重力探勘推斷，車籠埔斷層為低角度東傾的逆斷層，近地表傾角約 40 度。斷層上盤出露東傾的中新世到更新世地層，逆衝到現代堆積層上。本研究區域中斷層上盤出露錦水頁岩、卓蘭層與頭嵛山層。斷層位置主要依據 1999 集集地震地表變形判斷。

大尖山斷層

依據中央地調所五萬分之一雲林圖幅(劉桓吉等，2004)，大尖山斷層北端於本研究區域南方南投竹山與車籠埔斷層、鹿寮斷層相連接，

但未說明斷層之間的關係。斷層南端向南延伸出圖外，呈東北西南走向。斷層在近地表處為高角度逆斷層，上盤出露桂竹林層，下盤出露頭崙山層上部。衣德成(2004)由航空照片判釋，結果顯示大尖山斷層作用造成斷層上盤地形高聳而陡峭，並且由上盤發育的兩組線型分布的角度，判斷大尖山斷層為帶有左移分量的逆斷層。林啟文等(2000)根據 1999 集集地震後地表變形特徵指出兩斷層未有相同變形特性，大尖山斷層沿線地表破裂以視右移為主，與車籠埔斷層逆移兼具左移有所不同，且兩斷層交接位置並無明顯隆升。因此以幾何觀點兩斷層皆與鹿寮斷層連接，並以橫移之鹿寮斷層為過渡帶。

鹿寮斷層

鹿寮斷層位於本研究區域南部，斷層北端延伸南投竹山地區車籠埔斷層與大尖山斷層交接處，約呈西北走向。斷層兩側皆出露桂竹林層，斷面傾向東北而傾角不明，層位落差約 300 公尺，為一具左移性質之逆斷層(劉桓吉等，2004)。

初鄉斷層

初鄉斷層位於車籠埔斷層上盤，沿線通過南投竹山、集集、中寮等地，南端在車籠埔斷層與大尖山斷層交接處附近由車籠埔斷層分出，北端延伸至集集攔河堰東北方為雙冬斷層所截切，呈東北西南走向(林啟文等，2019)。斷層在東埔蚋溪露頭上盤出露桂竹林層，下盤出露卓蘭層；在濁水溪露頭，斷層兩側皆出露卓蘭層，且斷層上盤緊鄰斷層處可觀察到頂溪洲背斜出露。斷層於東埔蚋溪截切河階地，階地礫石層年代距今 13,585 年前(陳于高等，2002)，屬於第二類活動斷層。斷層於濁水溪河床露頭 47 度向東傾。

雙冬斷層

雙冬斷層位於研究區域東側山地，濁水溪以北呈西北走向，濁水溪南因缺乏明確證據尚無定論，黃鑑水等(2000)認為斷層轉向西南；林啟文等(2018)則認為斷層沿原東南走向繼續延伸。斷層面向東傾約40度，上盤出露中新世至先中新世地層，下盤出露更新世頭嵙山層與卓蘭層。

三、前人地質剖面與構造模型

3-1 濁水溪以北

1999 年台灣西部發生集集地震後，Yue et al. (2005)彙整前人所繪地質圖資(圖 3-1)，以其中地表岩層位態為主要依據，在車籠埔斷層沿線繪製了一系列共 47 條構造剖面(圖 3-2)，並整合這些剖面建構了一個新的車籠埔—三義系統三維模型。此模型假設斷層面上的等高線與地層走向平行，並以震測資料和地質鑽探作為制約條件進行修正。新的車籠埔—三義斷層模型符合典型的斷坡—斷坪模型，但增加了向北分支為兩條斷層的複雜性，因此可依模型將車籠埔—三義斷層分為三段，分別為車籠埔主斷層段(The Main Chelungpu Thrust)、三義斷層段(The Sanyi Thrust)及北車籠埔錦水頁岩滑脫面段(The North Chinshui Detachment)。與本研究區域相近的是車籠埔主斷層段，此段車籠埔斷層從錦水頁岩滑脫面分支並延伸至地表，近地表斷層面以約 50 度傾角向東傾斜，滑脫面位於約 6 公里深處，呈現低傾角或近水平向東延伸，接著再次轉折並在 10 至 12 公里深處匯入 Carena 等人(2002)提出的台灣主要滑脫面(Taiwan Main Detachment)。震源深度較車籠埔斷層底部沿錦水頁岩滑脫面更深 5 至 6 公里左右，Yue 等人認為地震可能發生在一個未知的、更深的小型斷層上(圖 3-3)。

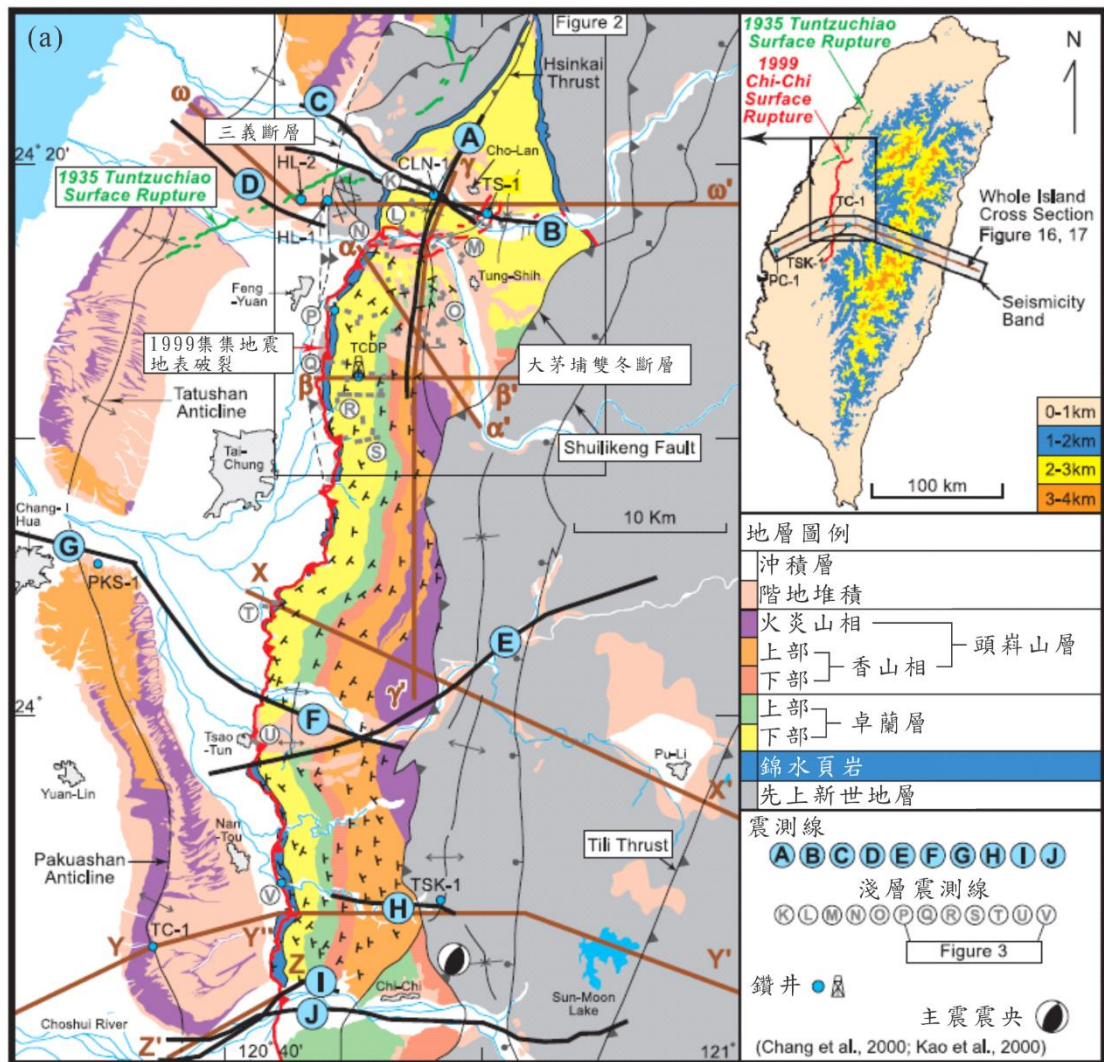


圖 3-1 Yue 等人研究區域、資料分布與主要剖面位置圖。其中紅線表示 1999 年集集大地震 (Mw 7.6) 地表破裂(擷取自 Yue et al., 2005)。

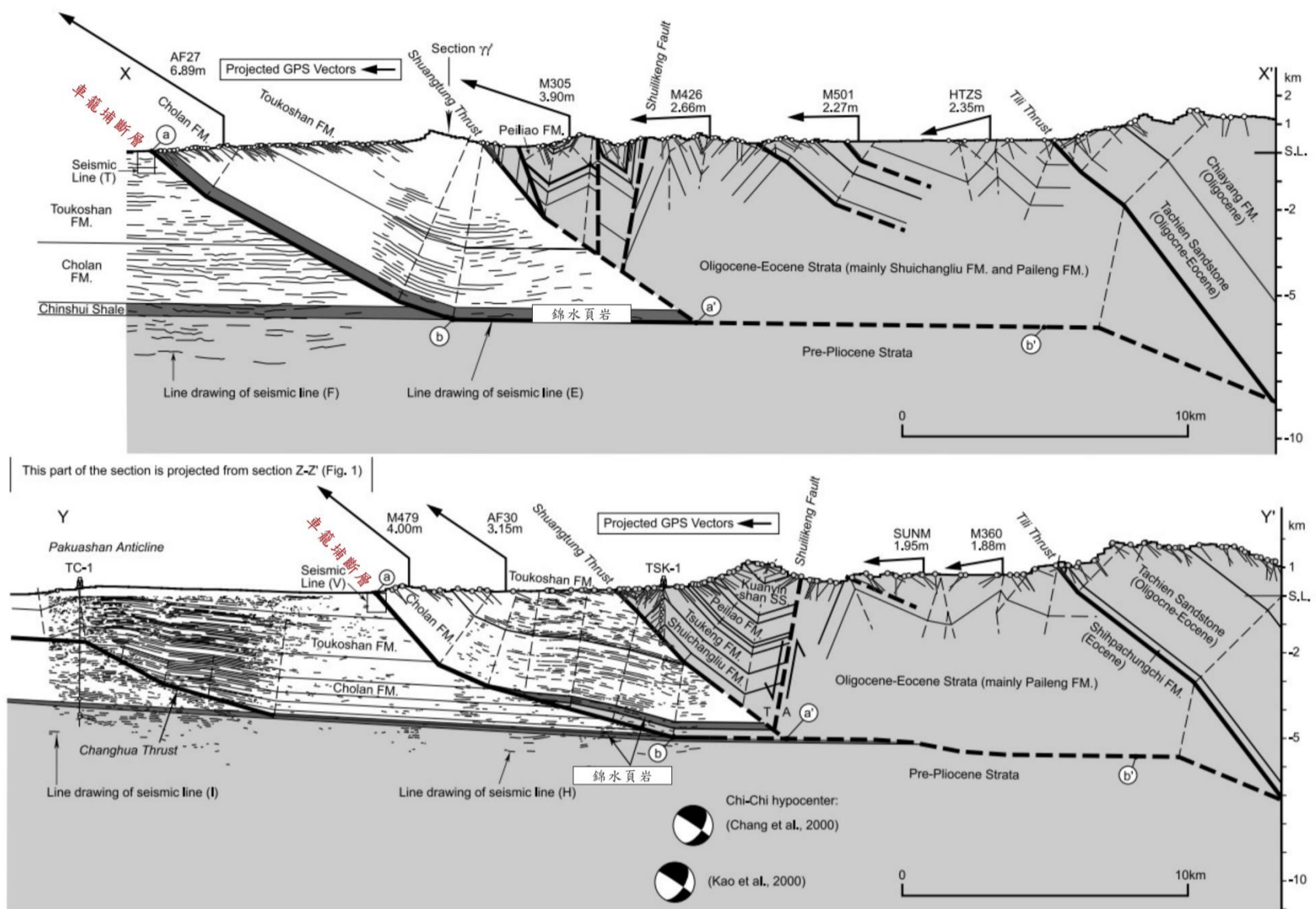


圖 3-2 東西向區域剖面 XX'與 YY'，剖面位置如圖 3-1。描線為投影自地震剖面 E、F、H 和 I 中的反射層。車籠埔斷層在 5.5 至 6 公里深處平緩地匯入至錦水頁岩滑脫面。滑脫面約位於深度 6 公里處，呈低角度向東傾(擷取自 Yue et al., 2005)。

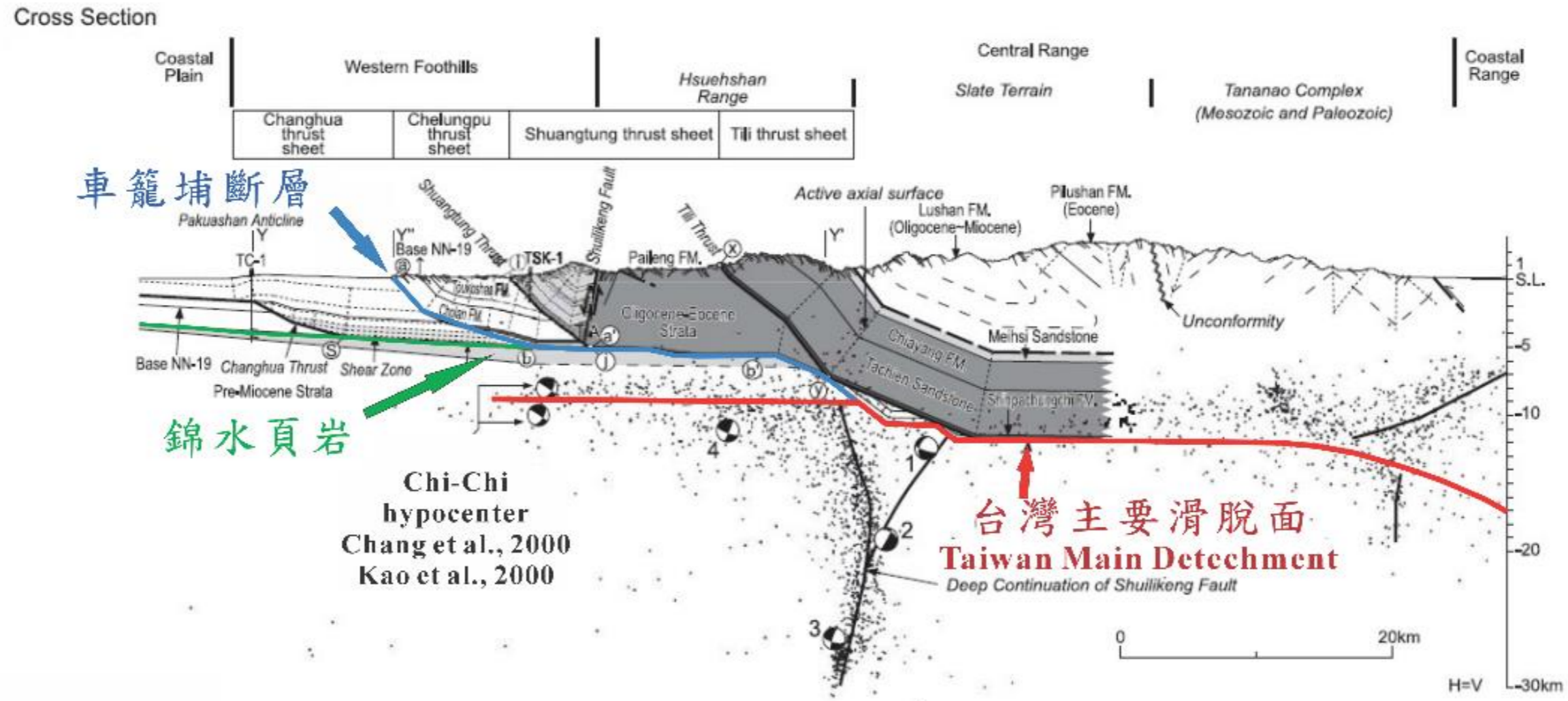


圖 3-3 車籠埔斷層在九二一大地震主震震源附近區域性剖面(沿剖面 YY' 延伸)。精算後的集集地震主震震源位置位於車籠埔逆衝斷層浸水滑脫層下方約 5-6 公里的深處，顯示了台灣主要滑脫面(Carena et al., 2002)的存在。集集地震非發生於車籠埔逆衝斷層，而是在某個未知的較深小斷層上(改繪自 Yue et al., 2005)。

3-2 濁水溪以南

Lee and Shih(2011)利用數位地籍資料(digital cadastral data)計算1999年集集地震竹山地區的同震水平位移，車籠埔斷層上盤朝220至260度位移約1.2至2.6公尺，下盤朝105度方向位移約1.4公尺。同時，Lee and Shih(2011)分析中國石油公司於集集地震後沿濁水溪施測之長支距反射震測資料，測線位置如(圖3-4a)，並與前人(Wang et al., 2002; Hung and Suppe, 2002)震測剖面判釋進行對比(圖3-4b, c)。Wang等人(2002)的解釋中，車籠埔斷層以27度向東傾，淺部截切地表地層，深部在8至10公里深切入中新世地層。初鄉斷層，Wang等人(2002)於剖面中稱其為大尖山斷層(Tachienshan fault)，平行於車籠埔斷層並沿卓蘭層滑動是一滑移斷層，在4至5公里深左右匯入車籠埔斷層。Hung and Suppe(2002)同樣認為車籠埔斷層在近地表呈27度向東傾並於深部8至10公里處切入中新世地層，斷層沿錦水頁岩滑動。剖面中並未標示出初鄉斷層，但該位置有一未命名斷層，近地表位置約30度向東傾，於6至7公里深處匯入雙冬斷層。Lee and Shih(2011)認為此結果與地表地質資訊並不一致，車籠埔斷層上盤地層傾角皆近45至50度，車籠埔斷層並不沿地層層面滑動。初鄉斷層亦非沿地層層面滑動，否則初鄉斷層上盤出露桂竹林層，剖面中應有中新世地層存在於斷層上。因此Lee and Shih(2011)提出新的解釋(圖3-4d)，車籠

埔斷層近地表傾角為 40 度向東傾，深部幾何形貌呈鏟型斷層(Listric Fault)並截切桂竹林層，於 9.2 公里深通過 1999 年集集地震震源位置。初鄉斷層呈高角度約 60 度東傾並切入中新世地層而非平行層面，於 9 公里深左右併入車籠埔斷層。

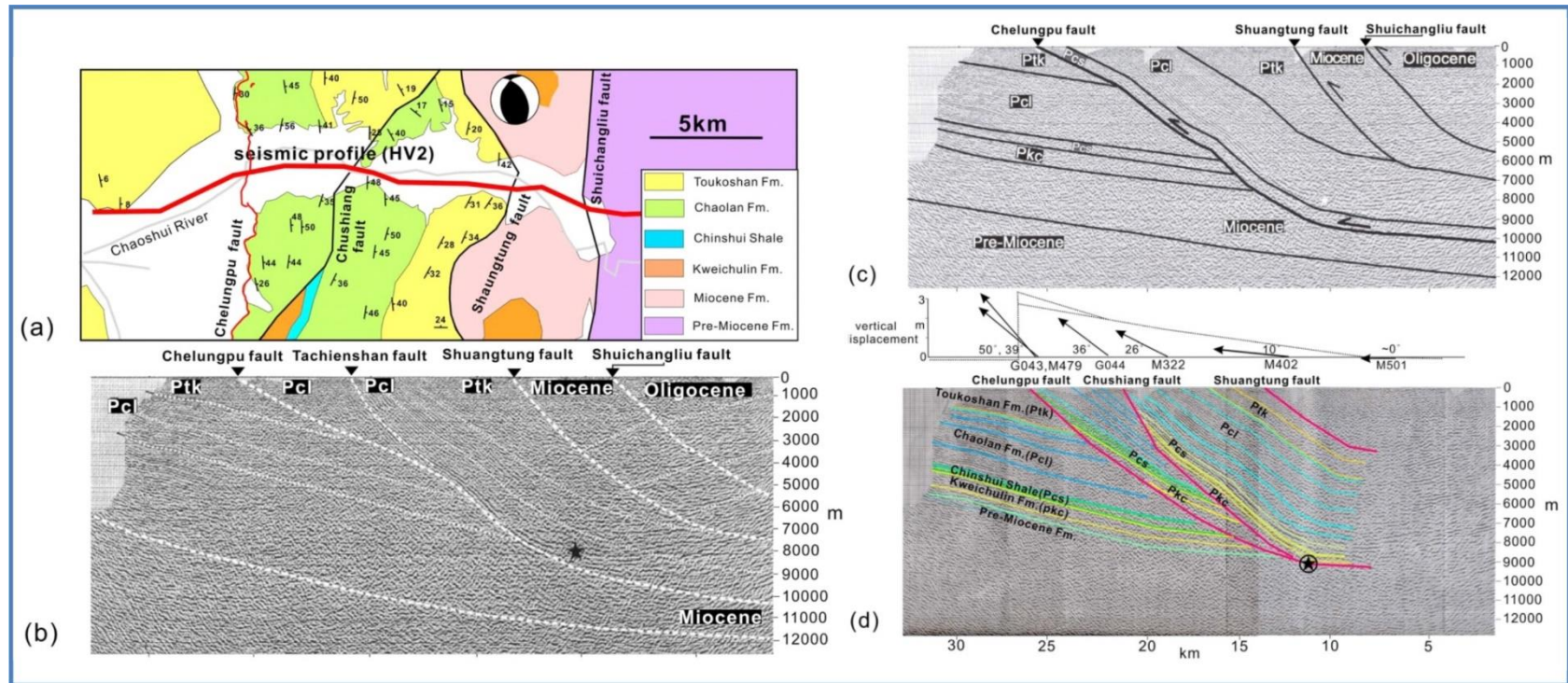


圖 3-4 震測剖面位置與震測剖面比較(擷取自 Lee and Shih, 2011)。
 (a) 濁水溪震測剖面與周遭地質圖(中國石油公司, 1982)。(b) Wang 等人(2002)震測剖面判釋。
 (c) Hung and Suppe (2002)震測剖面判釋。(d) Lee and Shih (2011)震測剖面判釋。

3-3 跨濁水溪南北

張中威(2023)彙整濁水溪南北地表地質資料、地質鑽探以及地球物理探勘結果震測剖面，在初鄉斷層沿線建立五條構造地質剖面，剖面範圍西起自彰化平原，經丘陵區延伸至西部麓山帶東側。剖面位置如圖 3-5 中所示。地質剖面模型中提出一推測正斷層，用以解釋濁水溪以南桂竹林層的層厚變化。本研究將參考此剖面模型，首先進行平衡剖面回復檢視剖面合理性並修改不合理處，並以修改後之剖面為基礎建立三維地質模型。故以下將對張中威(2023)所繪製剖面進行較詳細的說明。

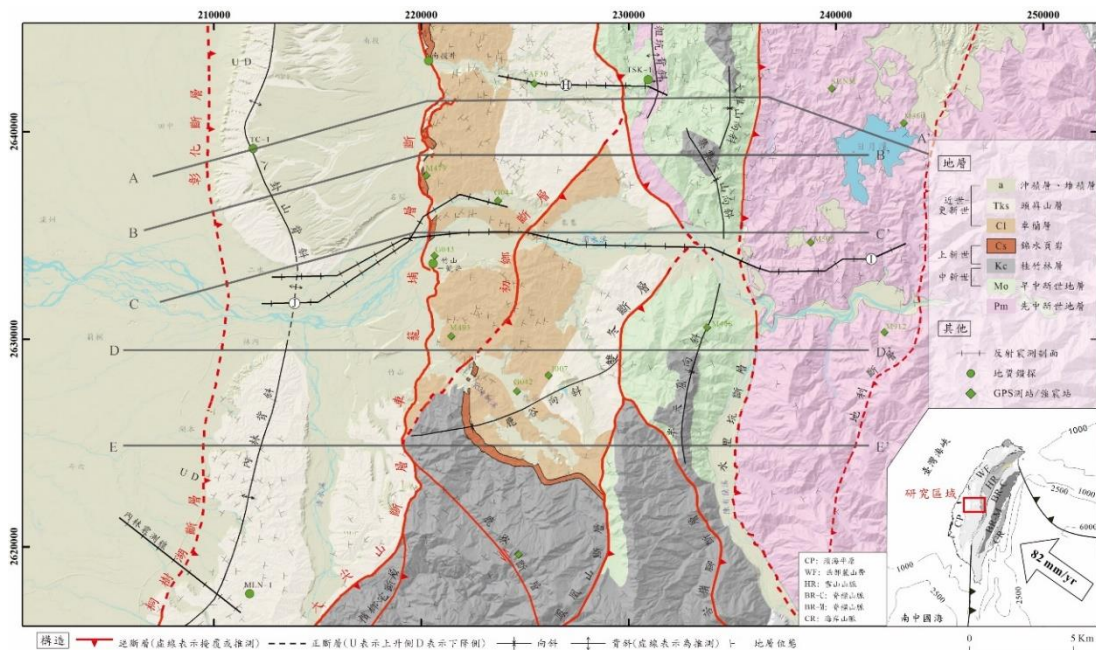
3-3-1 剖面位置

剖面 AA'與 BB'位於濁水溪以北，由八卦台地以西平原朝東北方向延伸，在車籠埔斷層前轉為東西向，經集集大山後止於日月潭，其中 AA'剖面通過水里坑斷層後再變為東南向。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、集集大山向斜及水里坑斷層。

剖面 CC'走向大致沿濁水溪主流，在車籠埔斷層以西呈東北向，並於通過車籠埔斷層前轉為東西向，穿越集集攔河堰延伸至日月潭南方為止。剖面通過彰化斷層、八卦山背斜、車籠埔斷層、初鄉斷層、

雙冬斷層及水里坑斷層。

剖面 DD'與 EE'位於濁水溪南呈東西走向。DD'剖面起自林內，經東埔蚋溪北端，至水里以南。EE'剖面起自斗六，經東埔蚋溪南端，至信義鄉。剖面通過彰化斷層、桐樹湖斷層、八卦山背斜、內林背斜、車籠埔斷層、初鄉斷層、雙冬斷層、半天窟向斜、水里坑斷層及地利斷層。



3-3-2 剖面中主要斷層構造

彰化斷層

斷層淺部由 27 度傾角錦水頁岩、卓蘭層與頭嵙山層，並未切穿至地表。斷層上盤形成不對稱的八卦山背斜，上盤地層呈低角度東傾。斷層向東延伸，傾角減少至 14 度並匯入底部滑脫面，以錦水頁岩為弱面，沿錦水頁岩與桂竹林層邊界滑移。

車籠埔—大尖山斷層

斷層近地表斷層面於濁水溪以北約以 45 度向東傾，傾角向南遞減至 E 剖面變為 28 度。斷層第二斷坪沿錦水頁岩底部為弱面，第一斷坡於 AA' 剖面截切桂竹林層，於其他剖面截切早中新世地層，並匯入底部滑脫面。近車籠埔—大尖山斷層處地層傾角與車籠埔斷層傾角大致平行，除 EE' 剖面上盤出露桂竹林層，其餘皆出露錦水頁岩。

初鄉斷層

斷層近地表為高角度東傾，約介於 64 至 70 度之間，呈斷坡—斷坪的幾何形貌。斷層上盤出露地層包含錦水頁岩、卓蘭層與頭嵙山層，並於 CC' 剖面鄰近斷層處形成頂溪洲背斜。斷層深部傾角向東逐漸變緩，至受底部滑脫面斷坡影響再次變陡後又變緩匯入滑脫面，匯入滑脫面位置隨剖面由北而南逐漸往西移接近滑脫面斷坡底部。

雙冬斷層

斷層近地表角度變化較大，於 EE' 剖面最緩約呈 32 度向東傾，於 BB' 剖面最陡約呈 70 高角度東傾，其餘剖面介於 42~45 度之間東傾。斷層上盤出露地層包含先中新世地層、早中新世地層與桂竹林層，並有數條褶皺形成，地層傾角變化明顯。東側有水里坑斷層截切，EE' 剖面另有苦苓腳斷層截切於雙冬斷層與水里坑斷層之間。

滑脫面

滑脫面沿早中新世地層與桂竹林層之間不整合面滑移，呈低角度向東傾。向西發育時受到推測正斷層阻擋，以推測正斷層上緣為斷坡截切桂竹林層，後改沿錦水頁岩底部滑移。滑脫面由東至西依序發育出雙冬斷層、車籠埔斷層、彰化斷層，初鄉斷層最晚發育於車籠埔斷層與雙冬斷層之間。

推測正斷層

斷層呈高角度東傾，位於滑脫面斷坡頂部轉折點下方，此位置根據震測剖面與震源機制解判斷之滑脫面斷坪—斷坡轉折點。由於正斷層活動，使桂竹林層沉積結束時，斷層東側地層較西側地層增厚數百公尺。推測正斷層位置根據震測剖面與震源機制解判斷之滑脫面斷坪—斷坡轉折點。

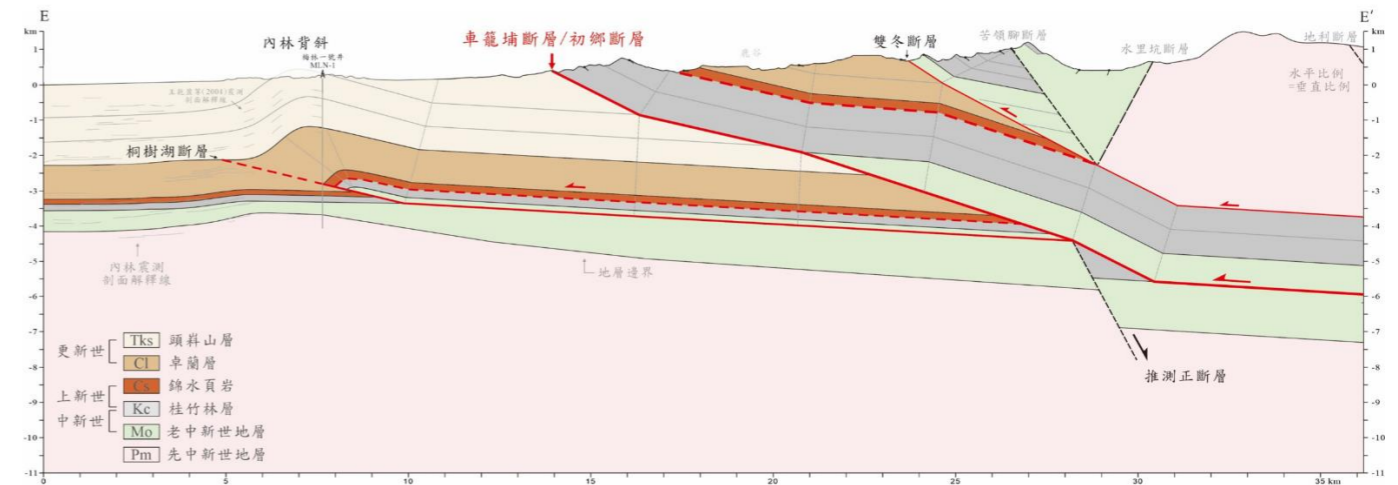
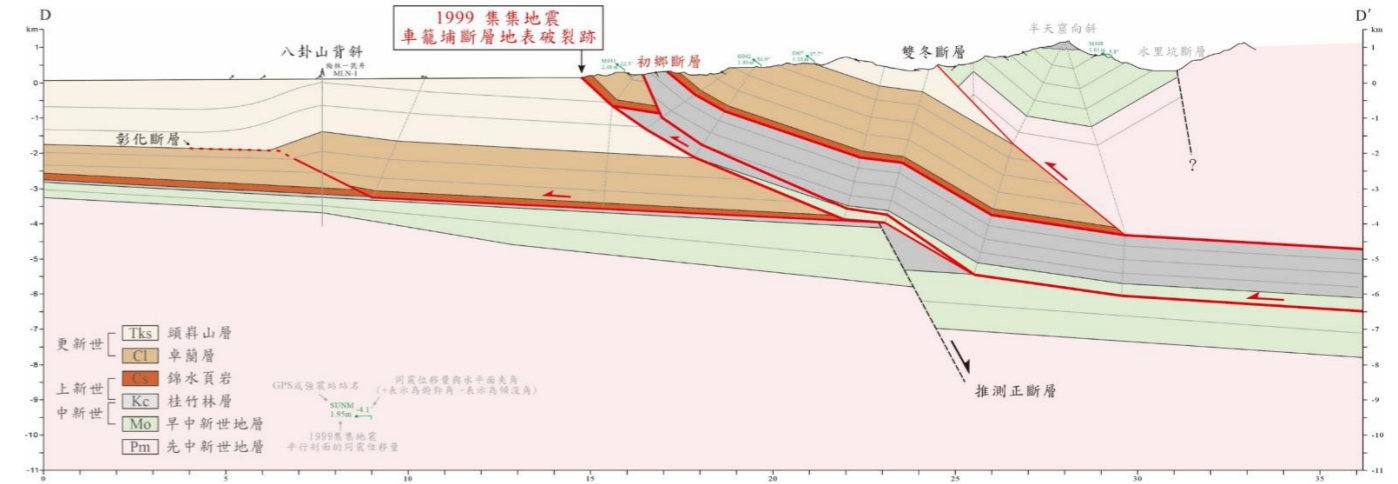
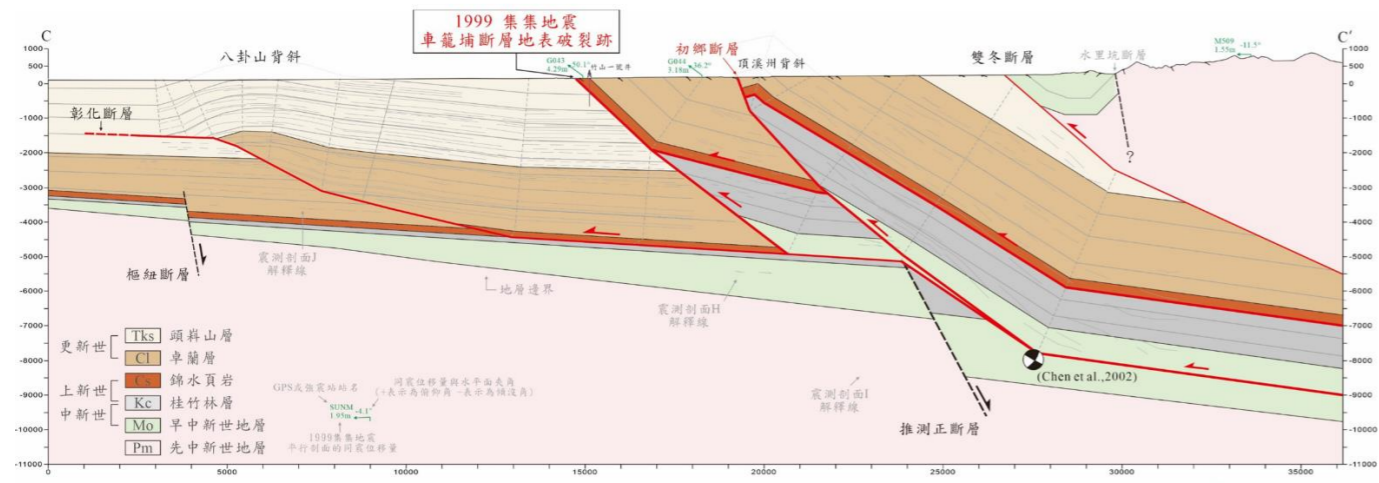
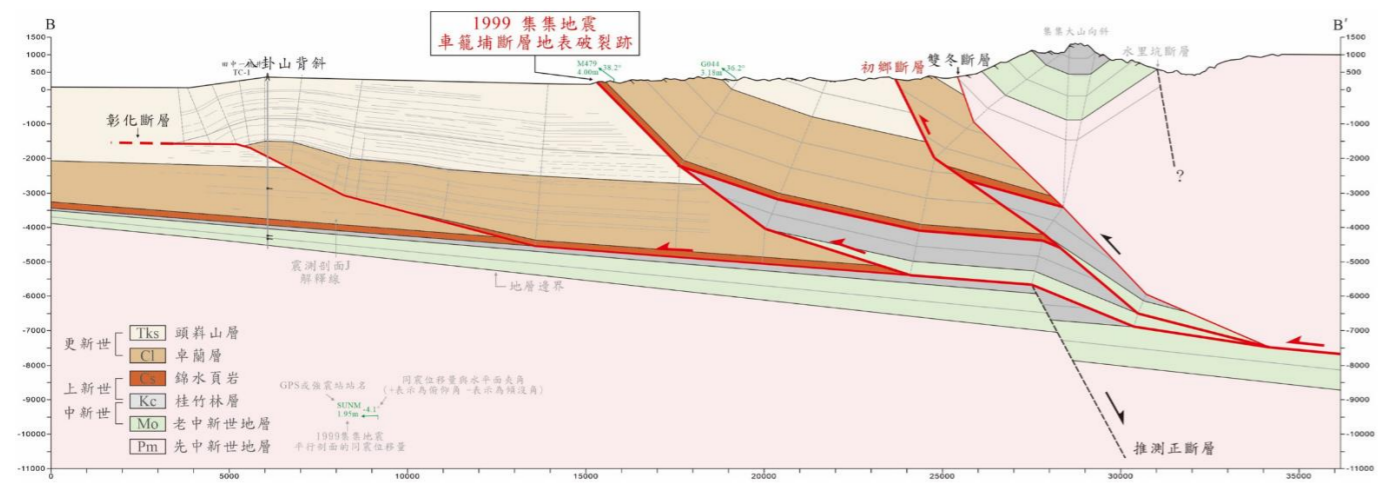
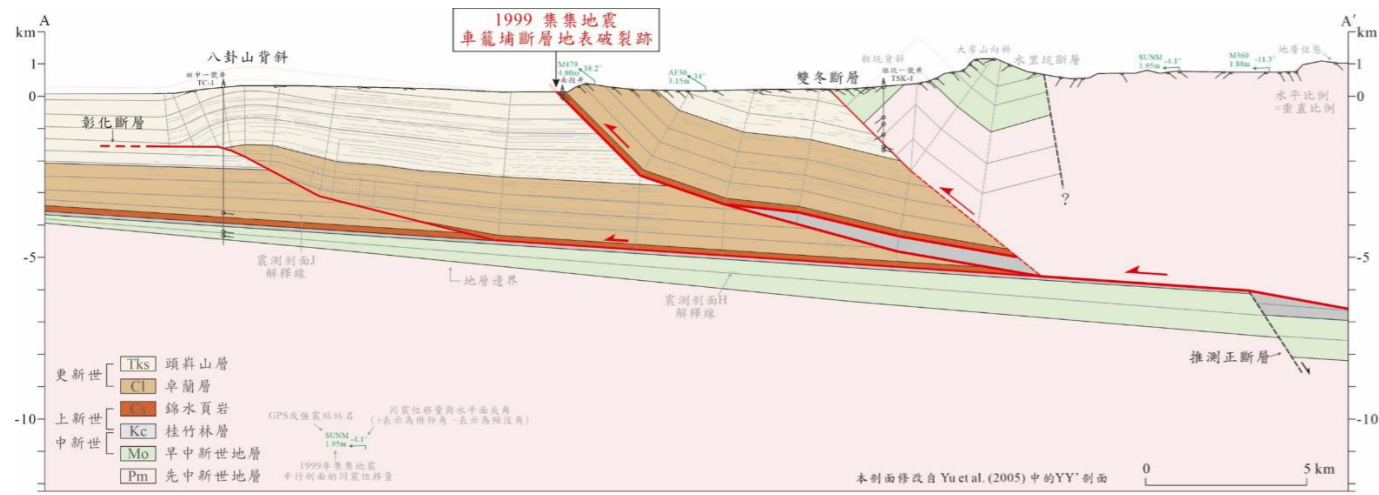


圖 3-6 張中威(2023)初鄉斷層沿線剖面模型。紅色實線為主要斷層，紅色箭頭表示為斷層相對運動方向，長虛線表示推測，黑色粗黑線或長虛線表示為斷層，黑色細線表示為地層邊界或地質鑽探深度，灰色實線為地層間輔助線或震測剖面解釋線，灰色虛線表示為樞紐軸。1999年集集地震震源位於滑脫面的斷坡—斷坪轉折點。

四、研究方法與資料

前人研究中多以二維的地質剖面來了解西部麓山帶構造的地下幾何形貌，而三維構造模型的呈現仍然缺乏。本研究將探討前人地質剖面，進行平衡剖面回復檢視剖面合理性，若有不合理之處則以區域內地質資料為制約條件修改至剖面達到平衡，並以平衡剖面為基礎，將二維的線狀資料側向延伸成三維的面，建立西部麓山帶濁水溪南北範圍的三維地質模型。本研究使用 MOVE 軟體做為平衡剖面回復與建立三維模型的工具，此軟體提供具備地理資訊定位的二維與三維環境，可分析多條平衡剖面並在空間中與地表高程資料、地表地質與地質鑽探等資料整合，使用者將能更直觀的觀察地下構造的形貌與地質資料在空間中的分布情形。

4-1 平衡剖面回復

平衡剖面是指剖面中構造的變形與變位可透過幾何準則，重建岩層在構造變形前原始狀態的剖面。藉由繪製與回復平衡剖面檢驗剖面中的幾何合理性，回復過程中可推估各構造活動的先後順序以及構造活動造成的地層縮短量，幫助了解研究區域中構造的演化過程與變形機制。

本研究使用 MOVE 軟體中的曲滑褶皺回復法(Flexural Slip

Unfolding Algorithm)與斷層平行回復法(Fault Parallel Flow Algorithm)兩種演算方法(algorithm)進行平衡剖面回復。以下依據 MOVE 軟體說明書進行說明：

曲滑褶皺回復

此演算法為一種等面積回復法，遵守地層長度守恆與面積守恆原則。進行回復時首先選擇一個沒有相對錯動的位置將其定義為固定端、選擇一個欲進行回復的線形作為模板層(template bed)，其餘則作為被動物件(passive object)。程式將建立與指定的模板層(template bed)相平行的滑移系統(slip system)，依據所設定的固定端將模板層回復至目標位置(target)，而被被動物件則由演算法以維持層厚與長度不變為原則，經過與模板層相同的計算過程移動到相對應的位置上。

斷層平行回復法

斷層平行回復法最適用於逆衝斷層與斷層擴展褶皺(fault propagation folds)的構造回復。此方法將斷層上盤褶皺的移動模擬為近似於顆粒層流(laminar particulate flow)在斷層面上的流動。使用者可選擇以連接指定斷層上下盤地層的方式進行回復，也可以給予指定的滑移量，使指定斷層上盤的地層在斷層面上移動逐步模擬褶皺與斷層的幾何形貌。斷層平行回復法同樣滿足維持上盤地層體積守恆與地層面積守恆，而地層厚度則不然。

4-2 建立三維地質模型

本研究使用 MOVE 軟體建立三維地質模型。模型的建構流程如下：

1. 彙整地質資料

- ◆ 於空間中匯入地表高程，高程資料使用內政部 20 公尺網格數值地形模型資料。
- ◆ 加入經過數化的地表地質資料，資料使用前人地質圖(中國石油公司，1982、1986；黃鑑水等，2000；陳華玟等，2004；劉桓吉等，2004；陳勉銘等，2016；林啟文等，2019；周稟珊等，2023)地表岩層位態、地層分界與構造線。
- ◆ 將平面的地表地質投影至地表高程。

2. 建立三維環境中的地質剖面

- ◆ 定義各剖面端點在三維空間中的位置，以此建立各剖面所在的平面。
- ◆ 在所建立的平面中匯入將對應的剖面圖，並將二維地質剖面數值化為具有三維地理資訊的地質資料。
- ◆ 建立完成的地質剖面資料即依照 4-1 章節所述演算法進行平衡剖面回復與修改。

3. 橫向連結剖面資料建立三維模型。

在 MOVE 軟體的三維空間中以點數據做為反映地表地形、地質

構造與其他趨勢面的資料型式，點數據的分布通常是部分採樣 (partially sampled)，即不連續的。點數據可使用任何由節點，即以 XYZ 座標系定義的零維元素，諸如地表地質、岩層位態、剖面上的岩層邊界與構造線等作為資料來源。三維模型的建立透過 MOVE 軟體兩種演算法，德勞內三角剖分法(Delaunay Triangulation Method)與普通克里金法(Ordinary Kriging Method)連結分布於空間中的點數據建立地層頂部邊界面與斷層面。

德勞內三角剖分法

德勞內三角剖分法生成表面的方式是通過將虛擬的圓或球面貼合到點數據上，使得生成的三角網格的頂點位於圓或球面的邊界上，而不會在圓或球面內部生成三角網格的頂點。這種方法的特點是最大化最小頂點的角度，因此較少產生細長的三角網格。

普通克里金法

普通克里金法為地質統計計算方法，它根據空間連續性的基本原理，即距離愈近的點數據更可能具有相似的屬性，做初步的統計分析確保點數據的空間連續性。使用存在空間關係的點數據屬性分布定義一個模型，即可用於在無資料的區域推算插值點的屬性，此屬性可以是分布於 XY 空間中的任何資料，生成表面時以 Z 方向高程作為屬性資料。

五、研究結果

5-1 地質剖面回復

本研究使用 MOVE 軟體作為回復剖面的工具，通過幾何準則將變形的地層恢復至未變形前的狀態，以檢驗剖面中的幾何合理性及可回復性。這一過程不僅能推估構造活動的先後順序，還能計算各構造活動所造成的縮短量，從而幫助推斷區域的構造演化過程。本研究以斷層平行回復法進行剖面回復，此方法將上盤褶皺以顆粒層流的形式模擬其在斷層面上的運動，可以模擬較複雜的斷層幾何形態，最適用於逆衝斷層和斷層擴展褶皺的前向模擬(forward Modeling)和構造回復。

本研究依照構造的發展順序，逐步將現今的地質形貌回復至蓬萊造山運動造成地層變形前的狀態，西部麓山帶構造大致由東向西發育，以優先回復最晚發育的構造為原則，將剖面的回復過程分為數個步驟：第零步首先回復彰化斷層及其上盤相關聯的背斜構造，然彰化斷層的錯移量在各剖面中皆小於兩公里，因此底下的回復過程不再特別記述。第一步回復初鄉斷層，以桂竹林層與錦水頁岩之交界為基準，沿斷層面移動上盤地層至其變形前的位置，使上盤地層與下盤相連接。第二步接著進行車籠埔斷層的回復，車籠埔斷層於近地表以錦水頁岩底部

為滑動面，此處以錦水頁岩下邊界作為基準回復至其變形前的狀態。

第三步雙冬斷層的回復，以早中新世與先中新世地層交界為基準。因雙冬斷層以東缺乏深部地底資料，地層與斷層幾何均無法有良好的制約，本研究僅討論車籠埔斷層至雙冬斷層之間區域，故剖面中未呈現雙冬斷層上盤地塊回復後之形貌。第四步將早中新世以上地層回復至桂竹林層沉積前的形貌，此步驟主要目的為在下一步觀察推測正斷層的活動，僅以一步概括期間的構造演化過程。最後一步處理推測正斷層的回復，以早中新世地層上邊界作為回復基準使上下盤地層相連接。

本文以 AA'剖面、CC'剖面、DD'剖面為例呈現完整回復過程。

5-1-1 以 AA'剖面為例

AA'剖面未通過初鄉斷層，回復步驟如下：

步驟一、 沿車籠埔斷層回復：剖面總長度由 29.4 公里增長為 45.5

公里，車籠埔斷層造成的水平縮短量為 16.1 公里。圖 5-1 (a)至(b)。

步驟二、 沿雙冬斷層回復：僅移除斷層上盤地層，剖面總長度維持

不變。圖 5-1 (b)至(c)。

步驟三、 早中新世以上地層與構造回復：將剖面回復至桂竹林層沉

積前的形貌，剖面總長度維持不變。圖 5-1 (c)至(d)。

步驟四、 沿推測正斷層回復：剖面總長度由 45.5 公里縮短為 45.1

公里，推測正斷層造成的水平伸長量為 0.4 公里。圖 5-1 (e)至(f)。

圖例

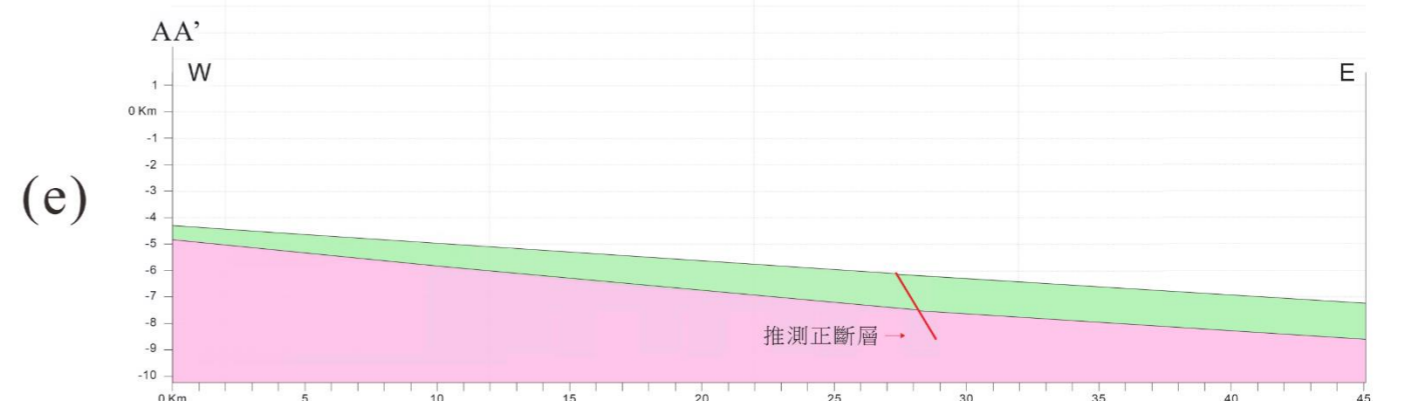
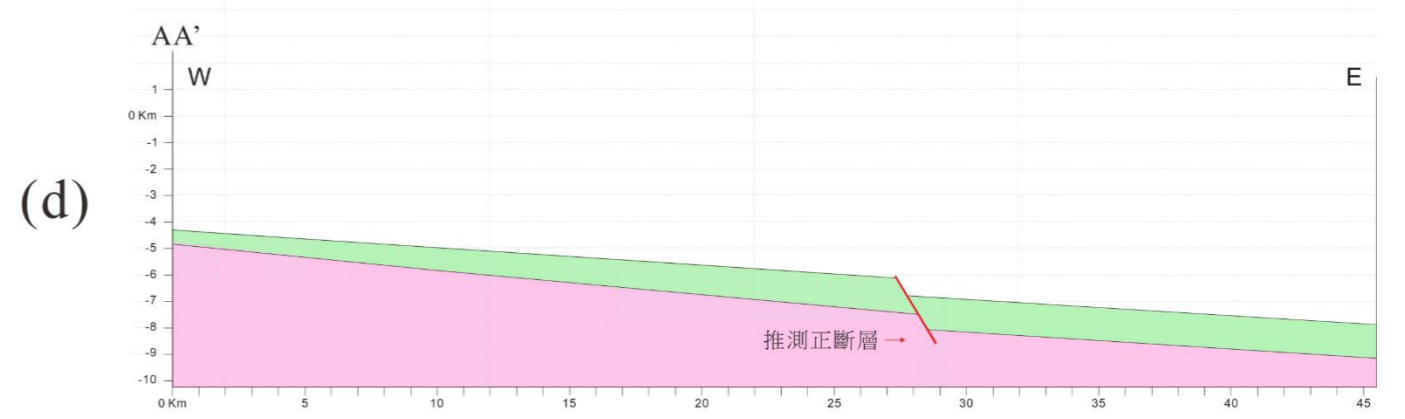
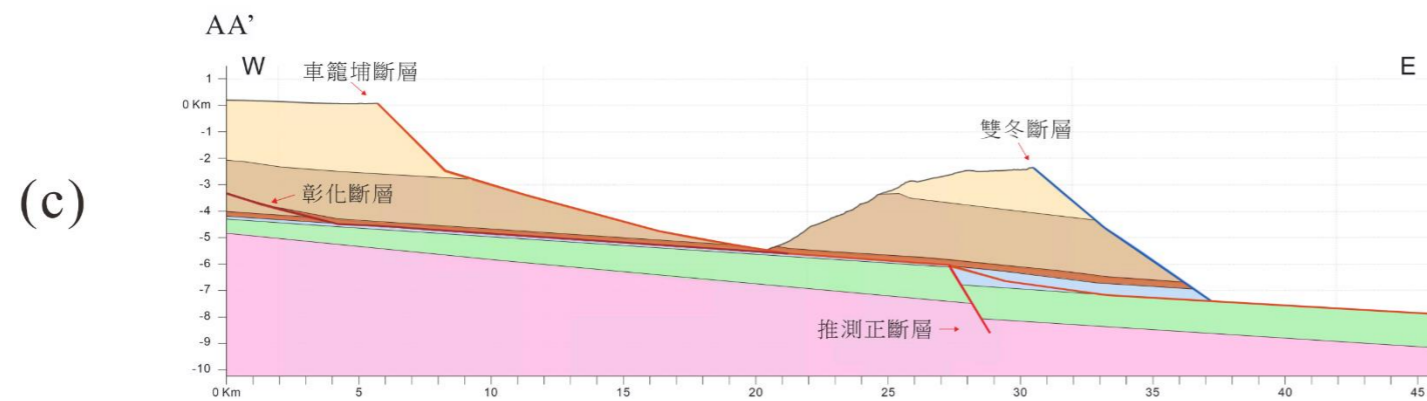
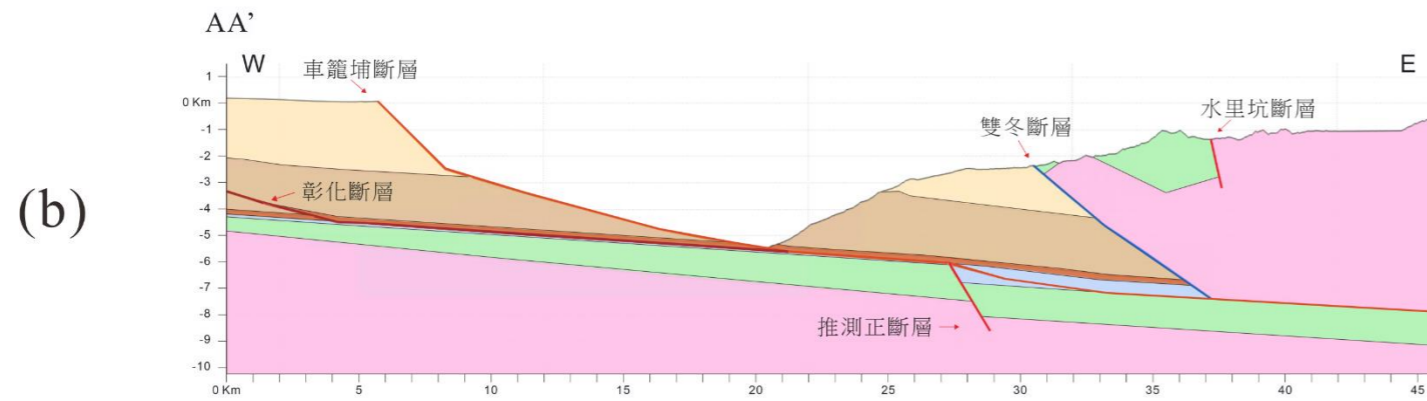
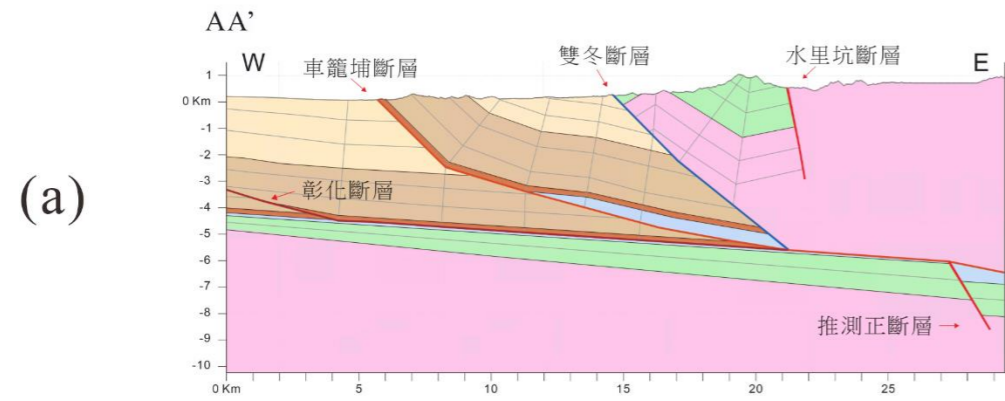
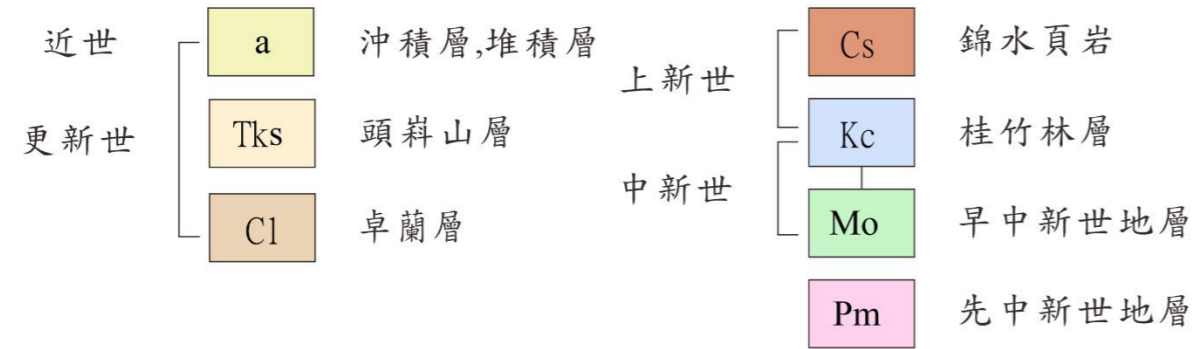


圖 5-1 剖面回復步驟：a 現今地質形貌。b 沿車籠埔斷層回復使斷層上下盤錦水頁岩下邊界相連接，剖面縮短 16.1 公里。c 沿雙冬斷層回復，雙冬斷層上盤地塊移動至剖面範圍外，剖面總長度不變。d 桂竹林層開始沉積前之地質形貌。e 沿推測正斷層回復使斷層上下盤早中新世地層與先中新世地層之交界相連接，剖面伸長 0.4 公里。

5-1-2 以 CC'剖面為例

步驟一、 沿初鄉斷層回復：剖面總長度由 21.8 公里增長為 25.6 公里，初

鄉斷層造成的水平縮短量為 3.8 公里。如圖 5-2 (a)至(b)。

步驟二、 沿車籠埔斷層回復：剖面總長度由 25.6 公里增長為 33.7 公里，

車籠埔斷層造成的水平縮短量為 8.1 公里。如圖 5-2 (b)至(c)。

步驟三、 沿雙冬斷層回復：僅移除斷層上盤地層，剖面總長度維持不變。

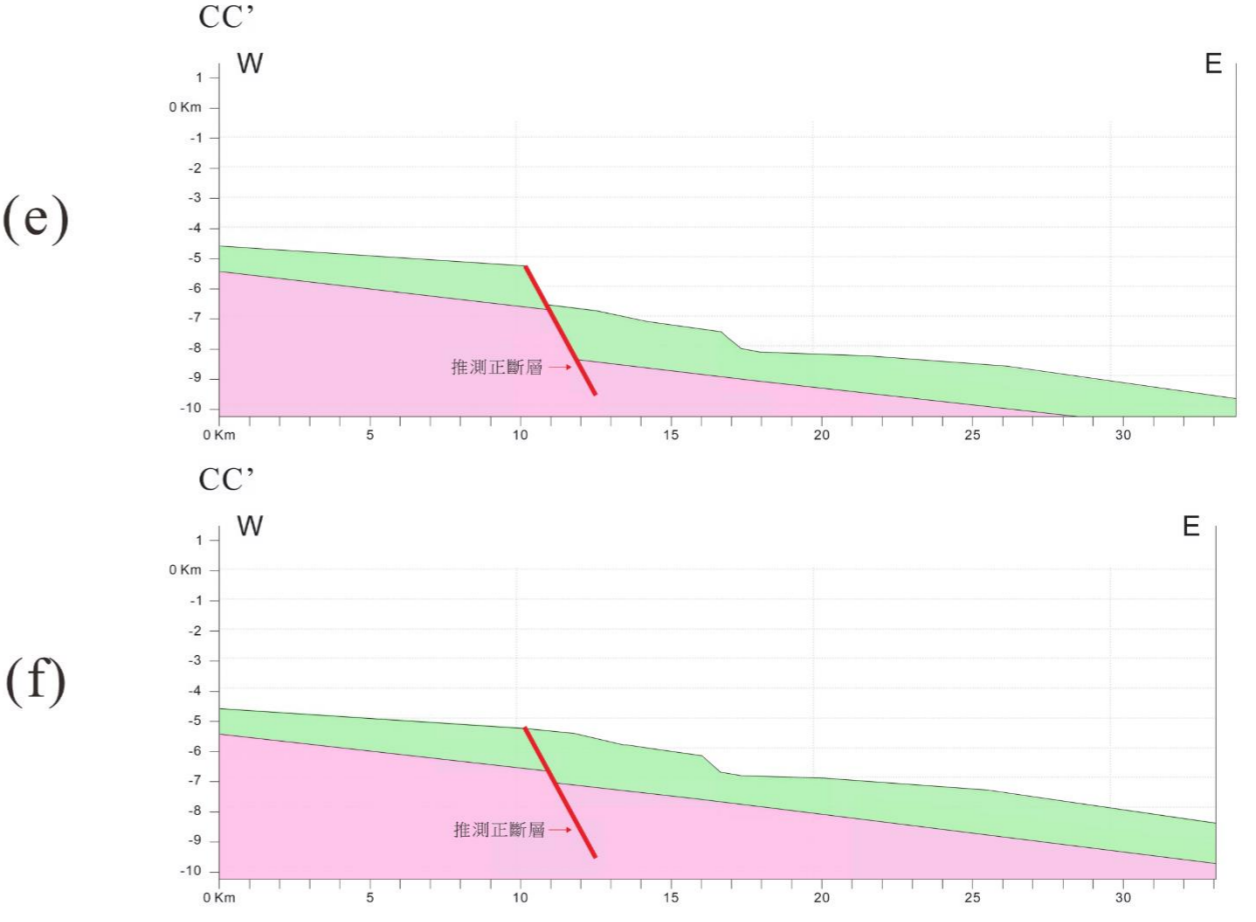
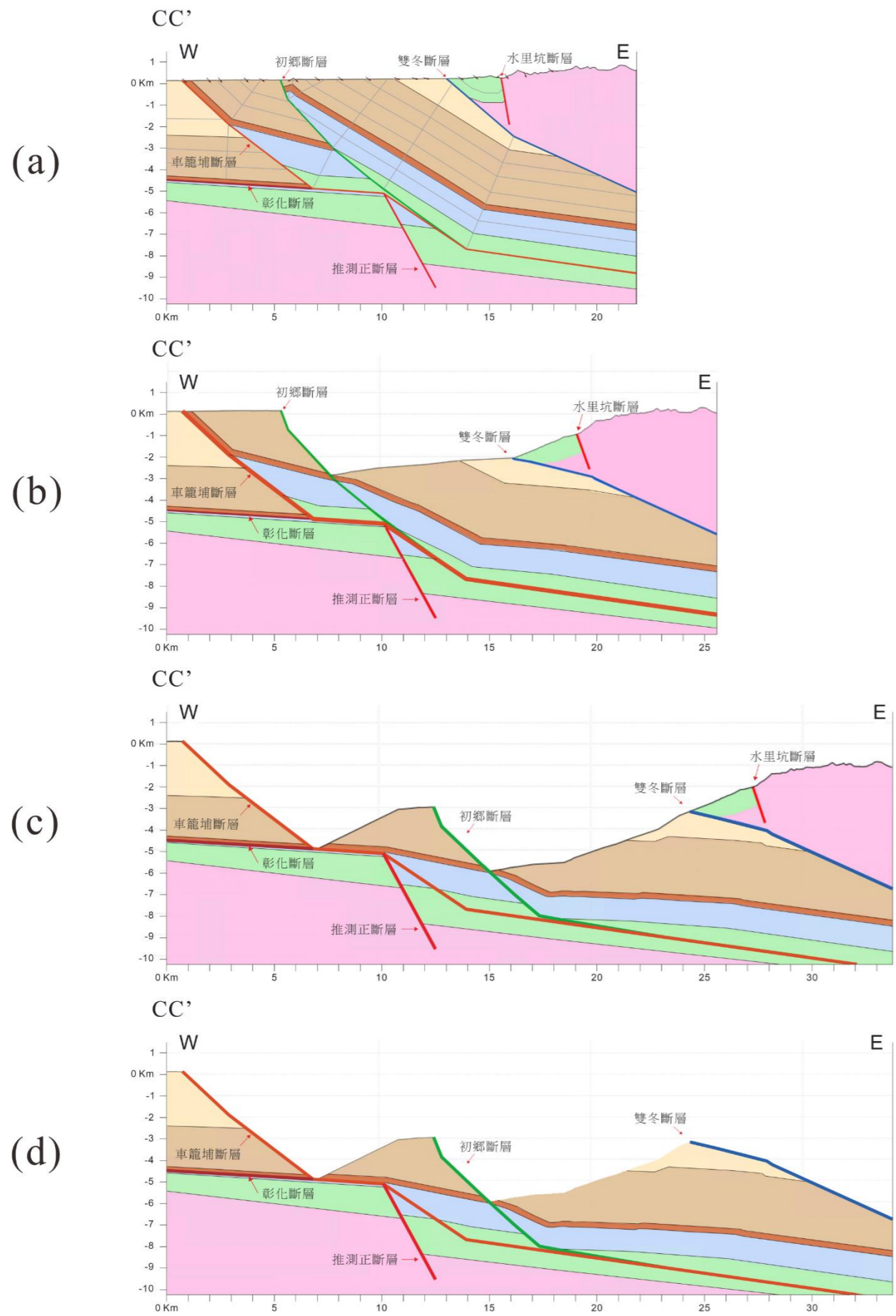
如圖 5-2 (c)至(d)。

步驟四、 早中新世以上地層與構造回復：將剖面回復至桂竹林層沉積前

的形貌，剖面總長度維持不變。如圖 5-1 (d)至(e)。

步驟五、 沿推測正斷層回復：剖面總長度由 33.7 公里縮短為 33.1 公里，

推測正斷層造成的水平伸長量為 0.6 公里。如圖 5-2 (e)至(f)。



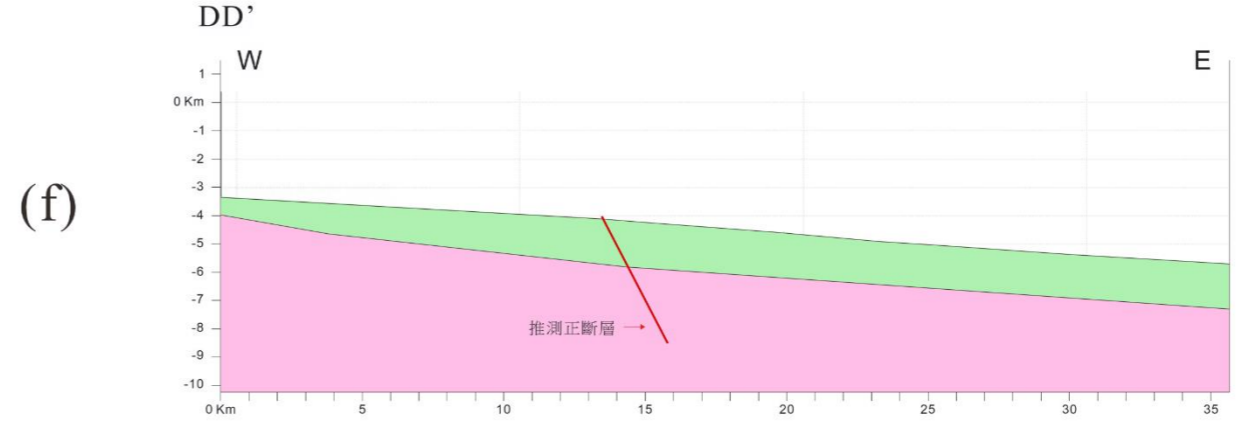
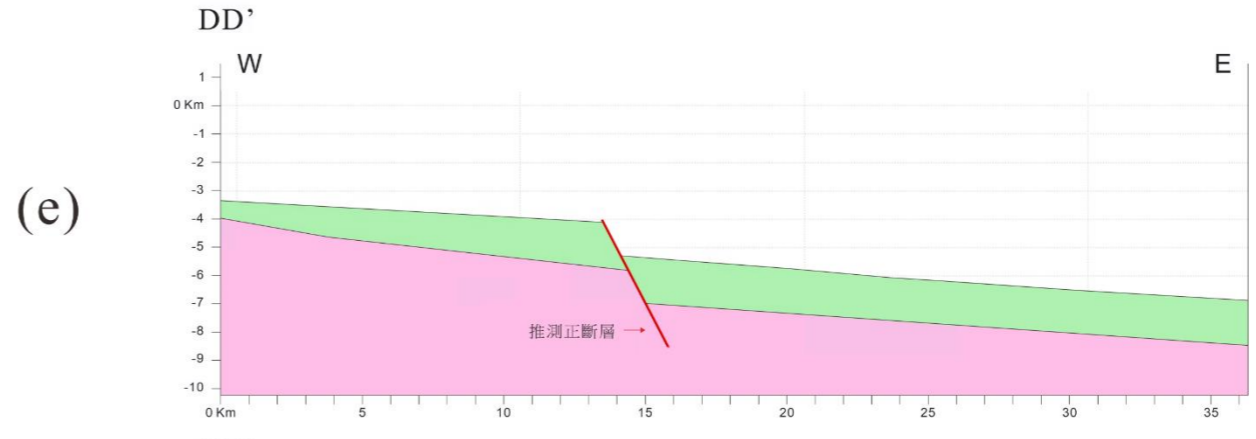
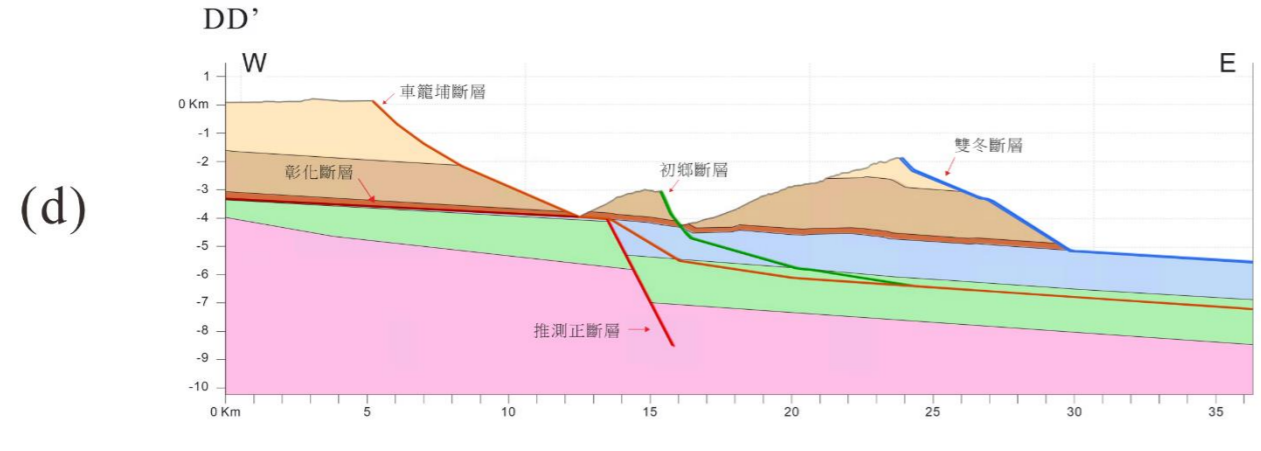
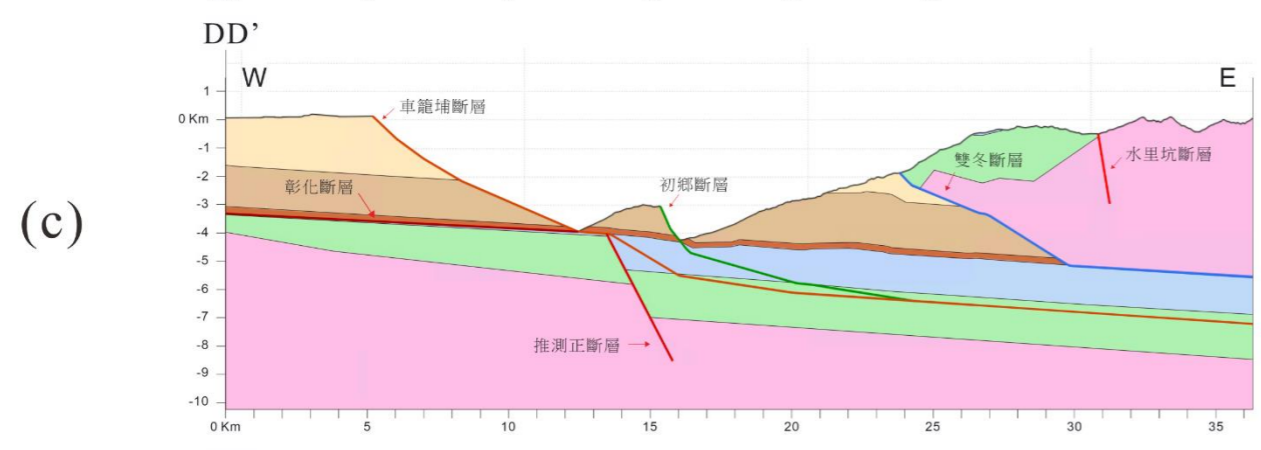
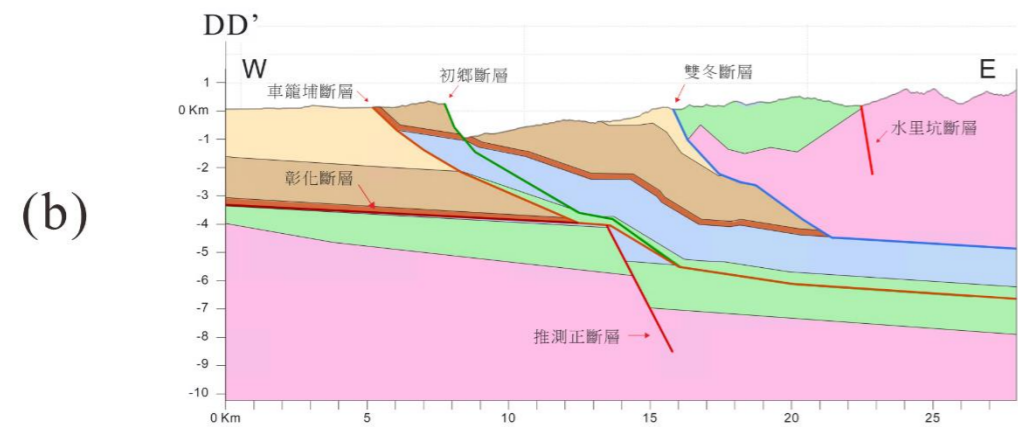
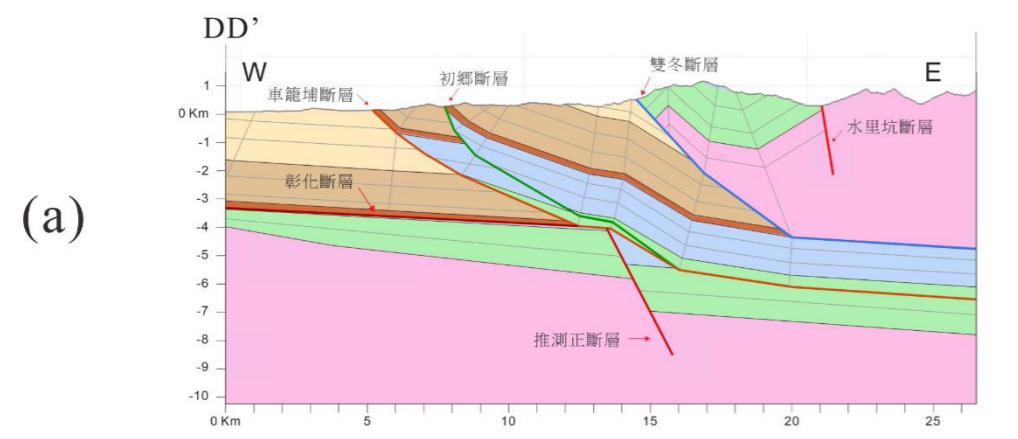
圖例

近世	a	沖積層,堆積層	上新世	Cs	錦水頁岩
更新世	Tks	頭嵙山層		Kc	桂竹林層
	Cl	卓蘭層	中新世	Mo	早中新世地層
				Pm	先中新世地層

圖 5-2 剖面回復步驟：a 現今地質形貌。b 沿初鄉斷層回復使斷層上下盤桂竹林層與錦水頁岩之交界相連接，剖面縮短 3.8 公里。c 沿車籠埔斷層回復使斷層上下盤錦水頁岩下邊界相連接，剖面縮短 8.1 公里。d 沿雙冬斷層回復，雙冬斷層上盤地塊移動至剖面範圍外，剖面總長度不變。e 桂竹林層開始沉積前之地質形貌。f 沿推測正斷層回復使斷層上下盤早中新世地層與先中新世地層之交界相連接，剖面伸長 0.6 公里。

5-1-3 以 DD'剖面為例

- 步驟一、 沿初鄉斷層回復：剖面總長度由 26.5 公里增長為 27.9 公里，初鄉斷層造成的水平縮短量為 1.4 公里。如圖 5-3 (a)至(b)。
- 步驟二、 沿車籠埔斷層回復：剖面總長度由 27.9 公里增長為 36.3 公里，車籠埔斷層造成的水平縮短量為 9.8 公里。如圖 5-3 (b)至(c)。
- 步驟三、 沿雙冬斷層回復：僅移除斷層上盤地層，剖面總長度維持不變。如圖 5-3 (c)至(d)。
- 步驟四、 早中新世以上地層與構造回復：將剖面回復至桂竹林層沉積前的形貌，剖面總長度維持不變。如圖 5-1 (d)至(e)。
- 步驟五、 沿推測正斷層回復：剖面總長度由 36.3 公里縮短為 35.6 公里，推測正斷層造成的水平伸長量為 0.6 公里。如圖 5-3 (e)至(f)。



圖例

近世	a	沖積層,堆積層	上新世	Cs	錦水頁岩
更新世	Tks	頭嵙山層	中新世	Kc	桂竹林層
	Cl	卓蘭層		Mo	早中新世地層
				Pm	先中新世地層

圖 5-3 剖面回復步驟：a 現今地質形貌。b 沿初鄉斷層回復使斷層上下盤桂竹林層與錦水頁岩之交界相連接，剖面縮短 1.4 公里。c 沿車籠埔斷層回復使斷層上下盤錦水頁岩下邊界相連接，剖面縮短 9.8 公里。d 沿雙冬斷層回復，雙冬斷層上盤地塊移動至剖面範圍外，剖面總長度不變。e 桂竹林層開始沉積前之地質形貌。f 沿推測正斷層回復使斷層上下盤早中新世地層與先中新世地層之交界相連接，剖面伸長 0.6 公里。

5-1-4 剖面回復結果

由北而南檢視回復前與回復至雙冬斷層之結果，觀察各剖面縮短量變化並檢視剖面是否平衡(圖 5-4)。CC'剖面於初鄉斷層斷坡底部連接初鄉斷層處，可觀察到早中新世地層層厚不足至使其上地層凹陷，剖面並不平衡。故本研究重新繪製 CC'剖面。

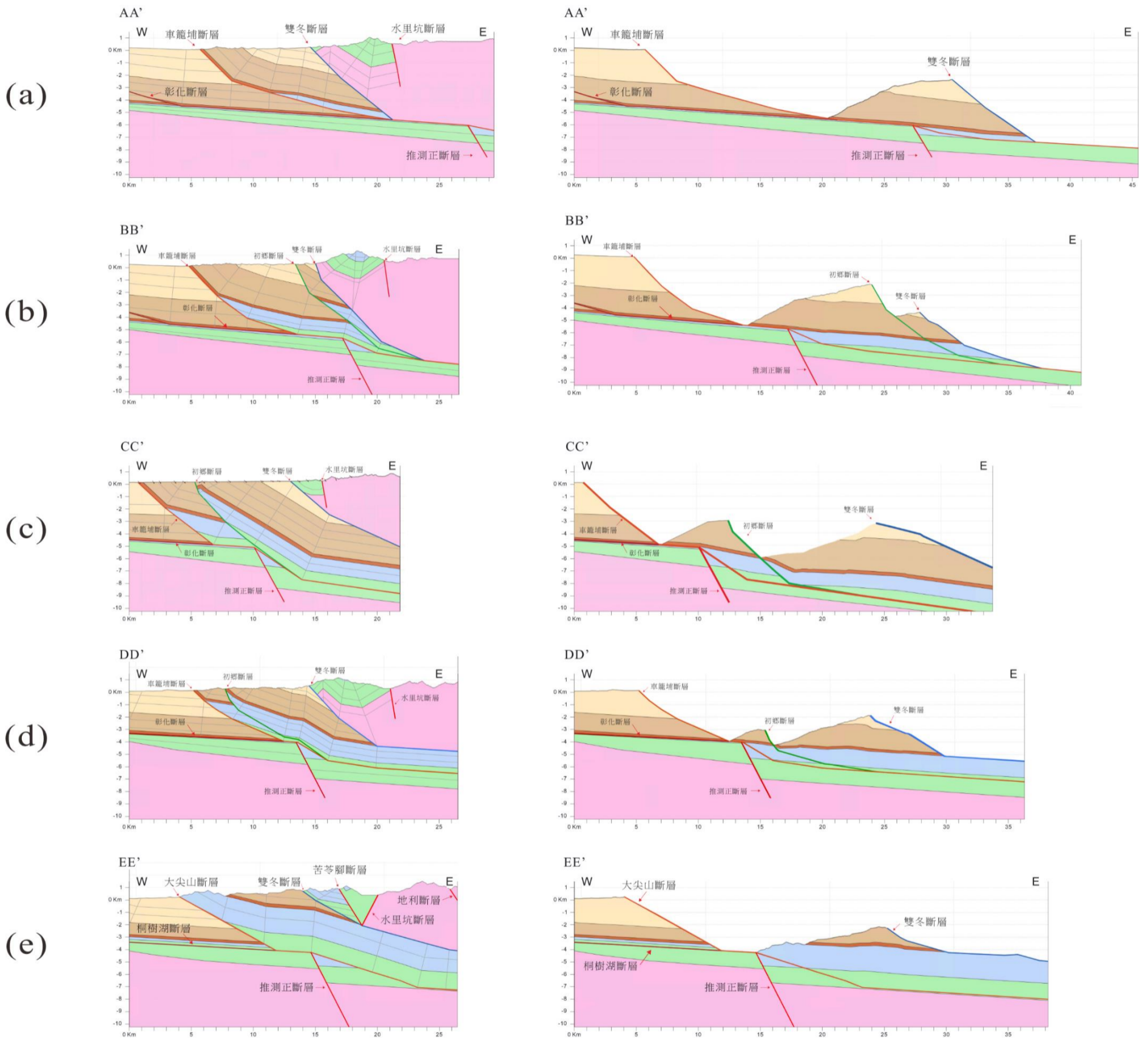


圖 5-4 剖面回復結果

5-1-5 改繪 CC'剖面

如圖 5-5 所示，改繪之 CC'剖面以平衡。初鄉斷層匯入車籠埔斷層位置向東移動 3.3 公里，空間中初鄉斷層斷坡底部與車籠埔斷層下部斷坡底部相連處由 CC'剖面往南移至 CC'剖面與 DD'剖面之間。

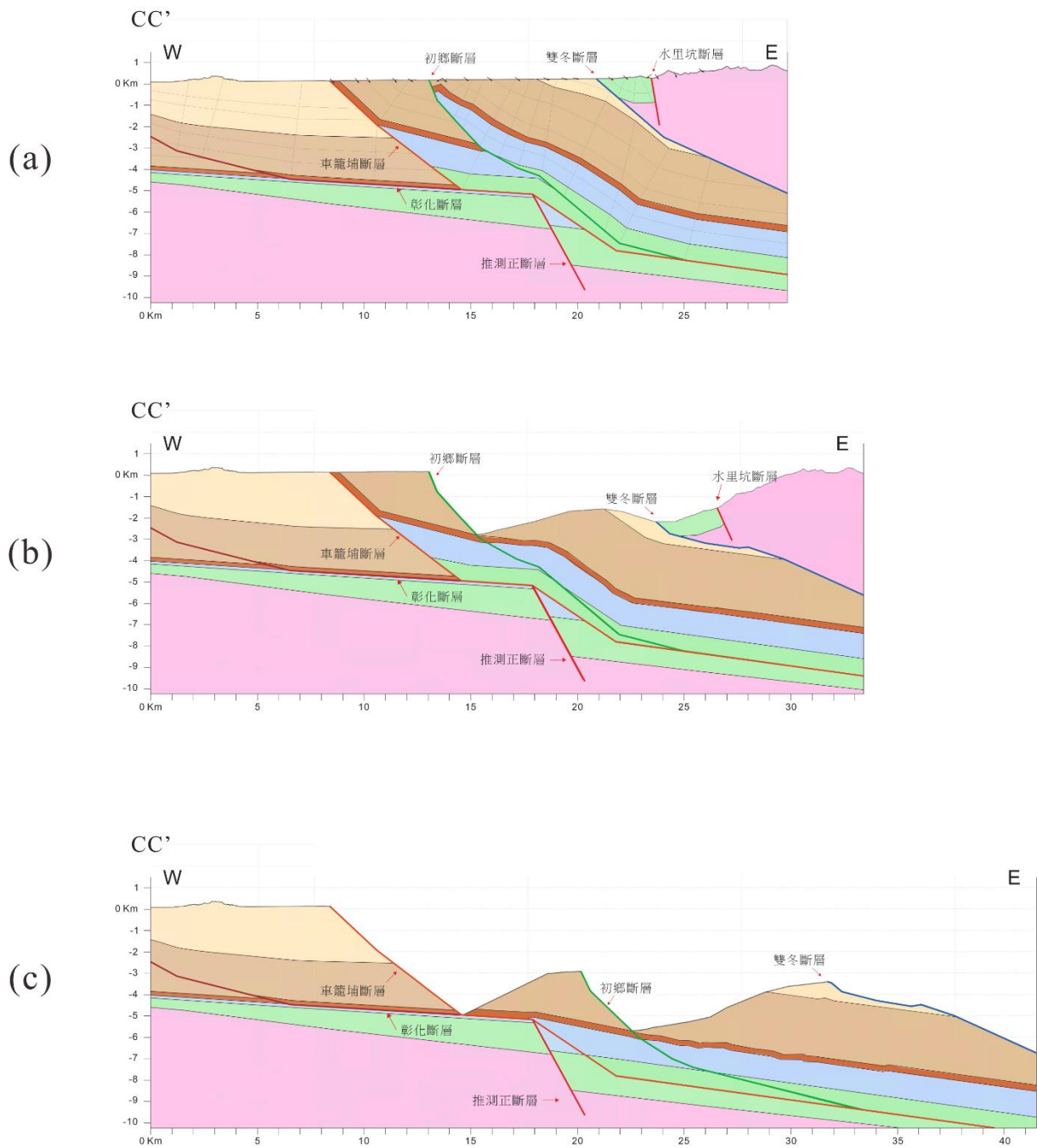


圖 5-5 改繪之 CC'剖面

5-2 三維地質模型

本研究整合濁水溪南北的地質資料，並改繪張中威(2023)所建立共五條東西向剖面，剖面位置如圖 5-6 所示，利用剖面資料進行橫向延伸並互相連結，建立三維構造模型以還原研究區域內的地下構造幾何形貌。五條剖面與三維模型相對空間關係如圖 5-7。其中初鄉斷層與車籠埔斷層的幾何關係在濁水溪底下較為複雜，同時為觀察 AA'剖面與 BB'剖面空間上的連續性，本研究於利用所建立的三維模型在 AA'至 CC'剖面之間再切出 10 條剖面，相互間隔 500 公尺(圖 5-7)。圖 5-8 中剖面 8 可見推測正斷層出現曲折，因推測正斷層斷層於 BB'剖面與 AA'剖面之間轉向後，斷層走向與剖面 8 幾近平行，斷層面起伏所致。

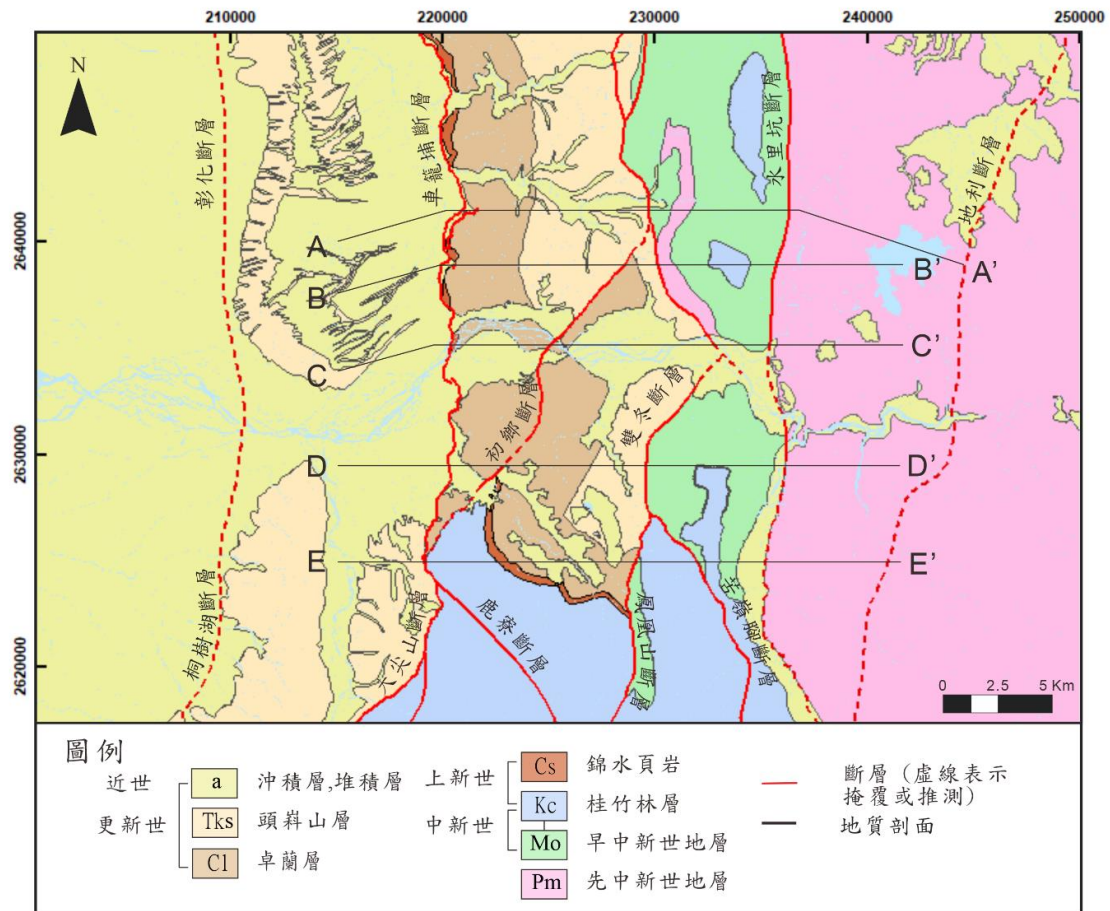


圖 5-6 剖面位置地圖。改繪自中國石油公司台中圖幅；經濟部中央地質調查所南投、埔里、雲林、阿里山圖幅；林啟文等(2019)。

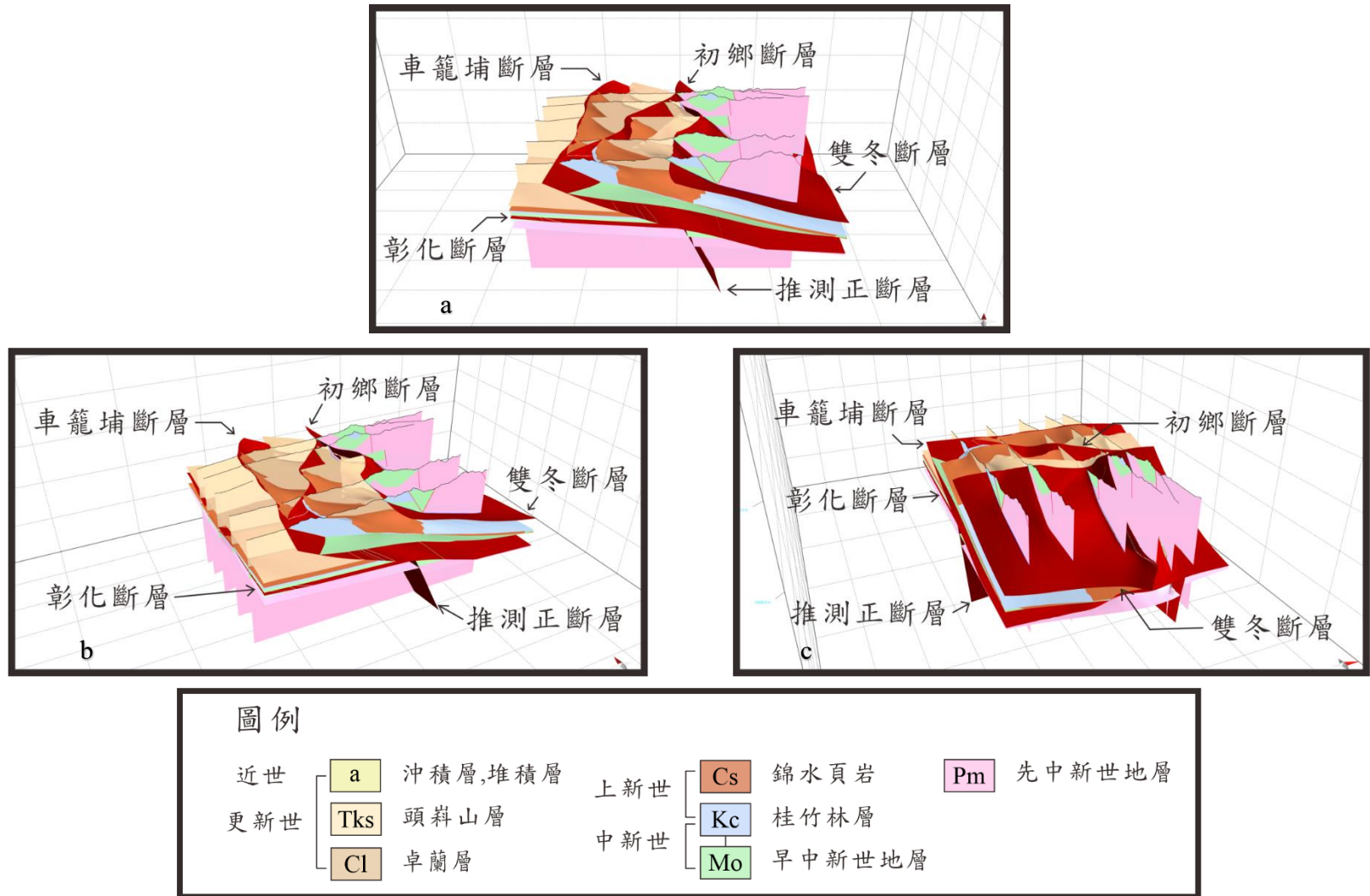


圖 5-7 濁水溪南北三維地質模型與五條剖面位置，不同顏色代表不同地層，其中紅色為主要斷層。光源自正南方 50°仰角照射產生陰影，呈現構造起伏。(a)面朝正北。(b)面朝東北。(c)面朝西北。

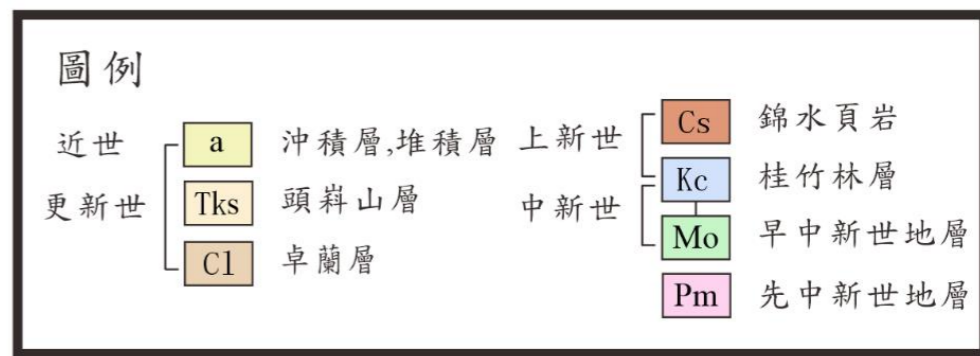
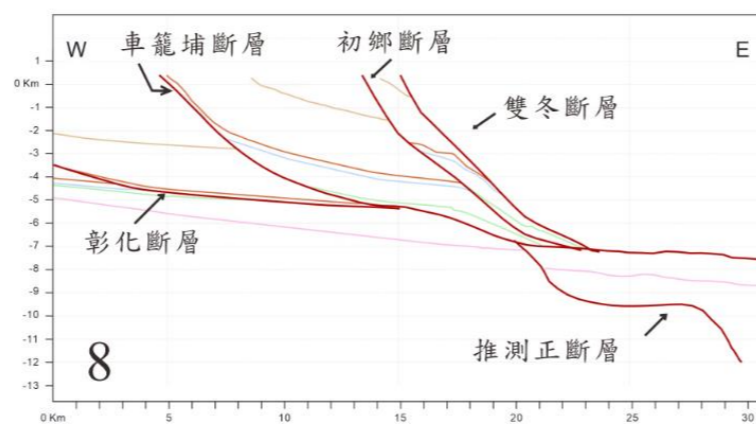
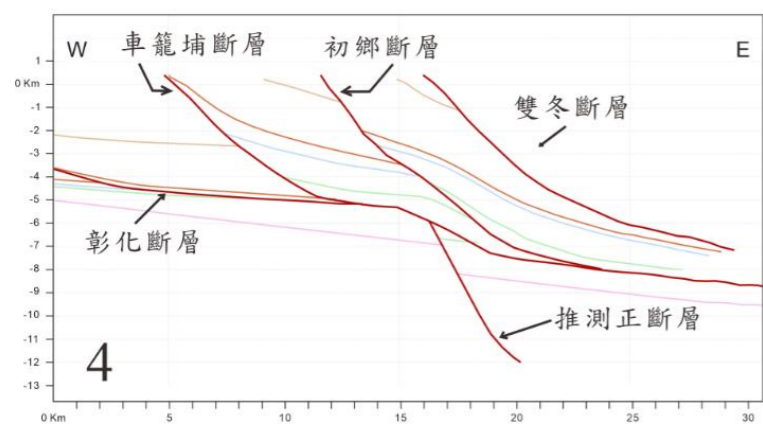
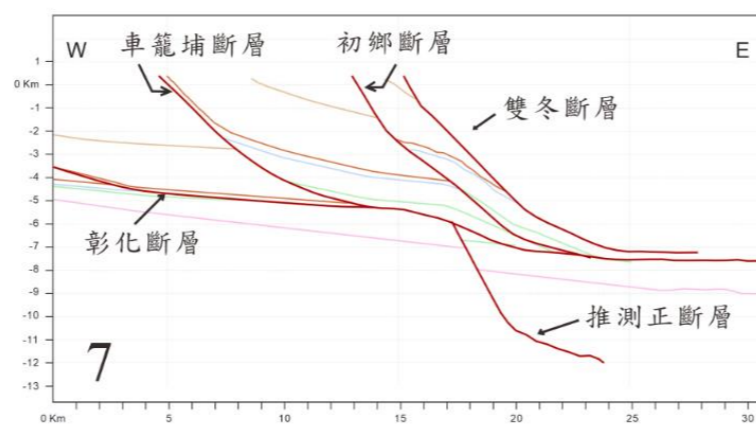
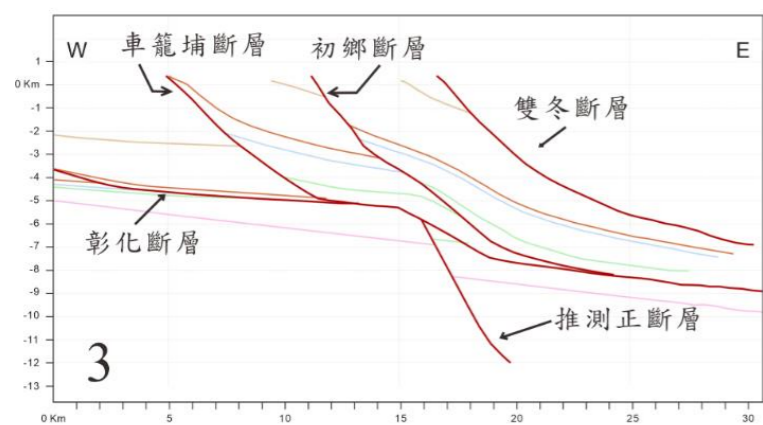
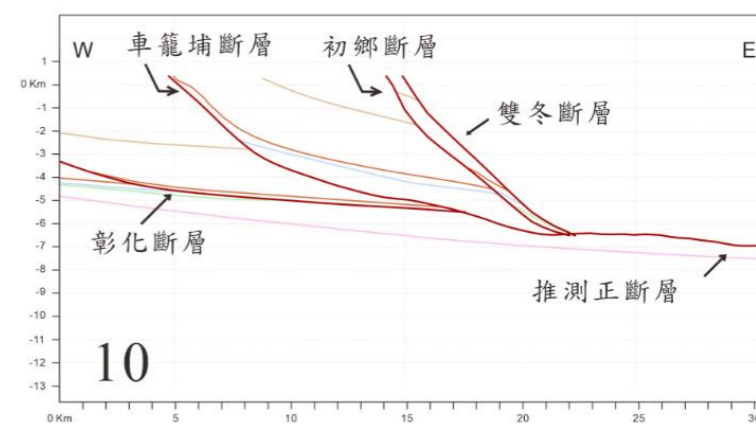
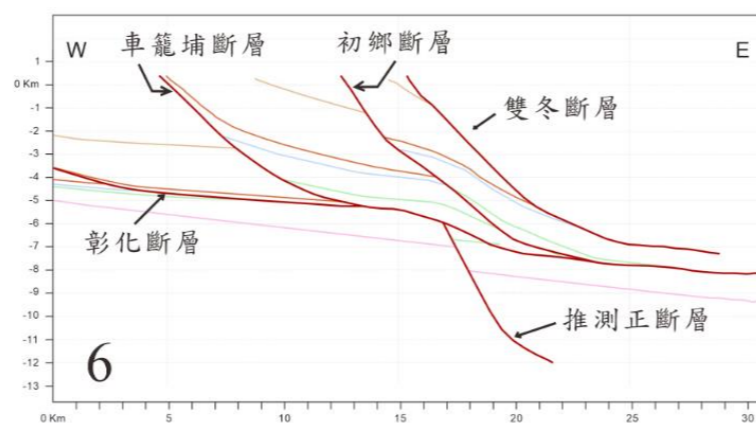
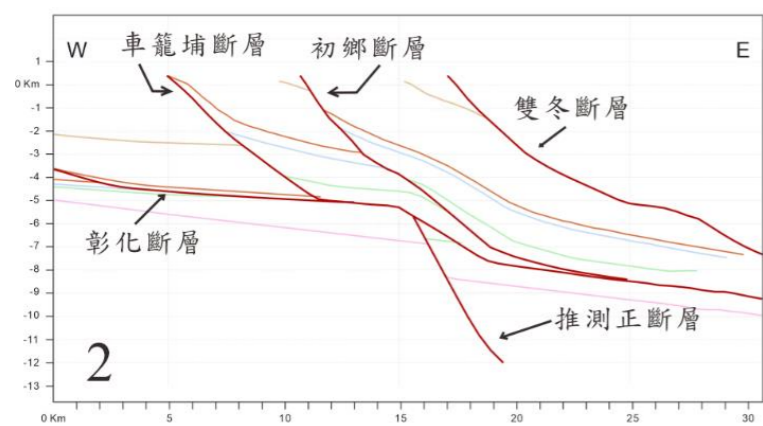
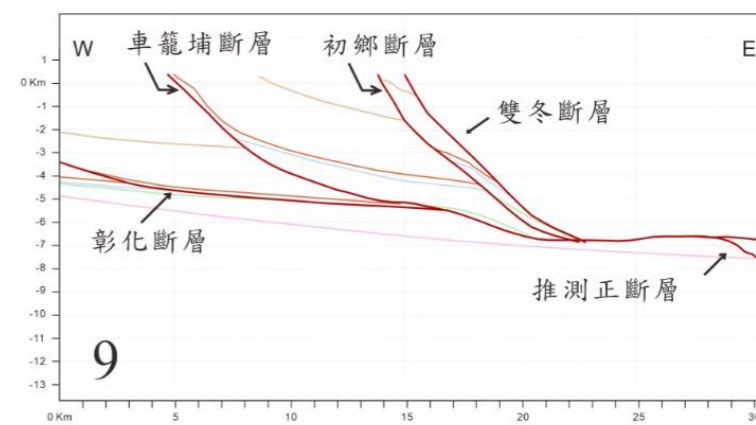
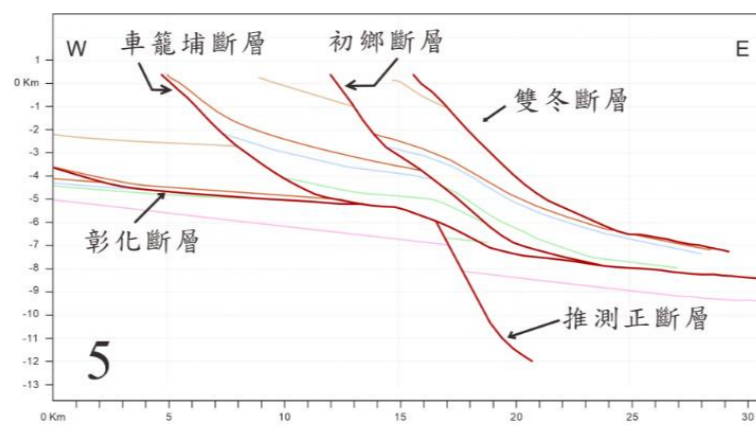
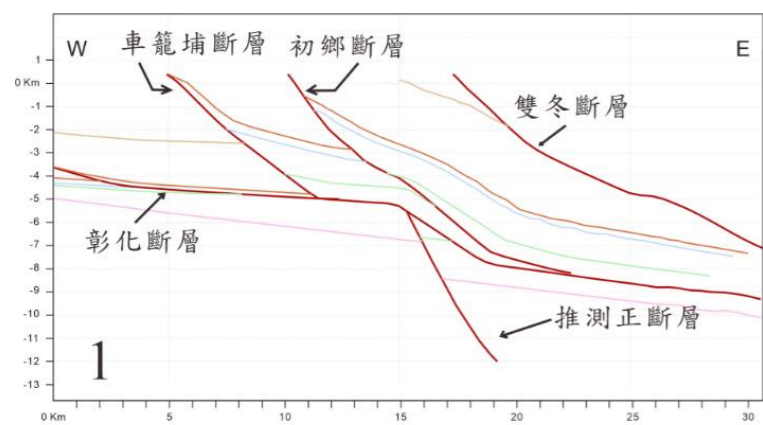


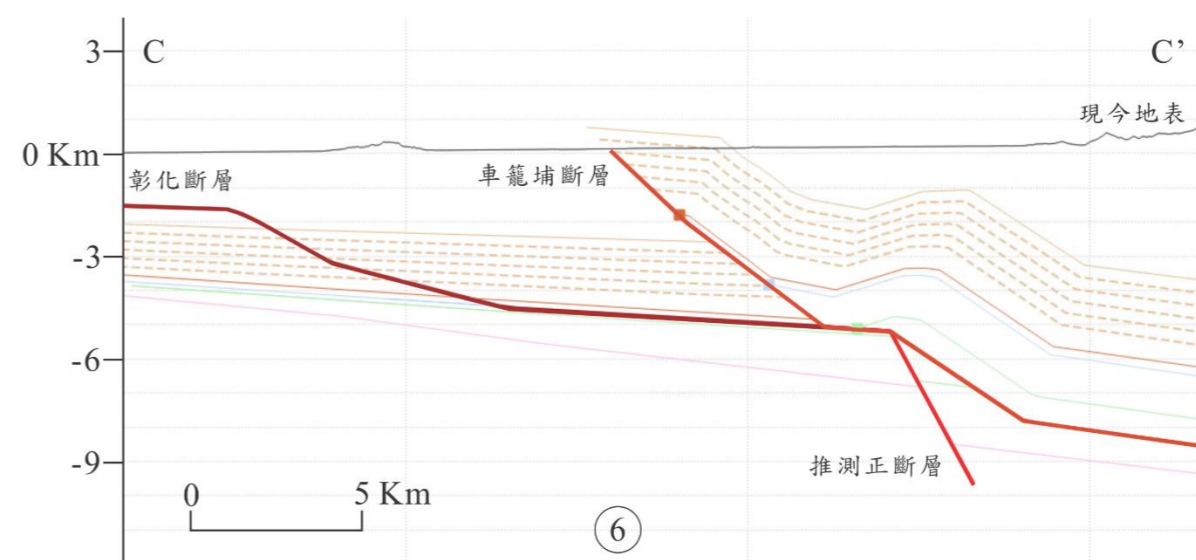
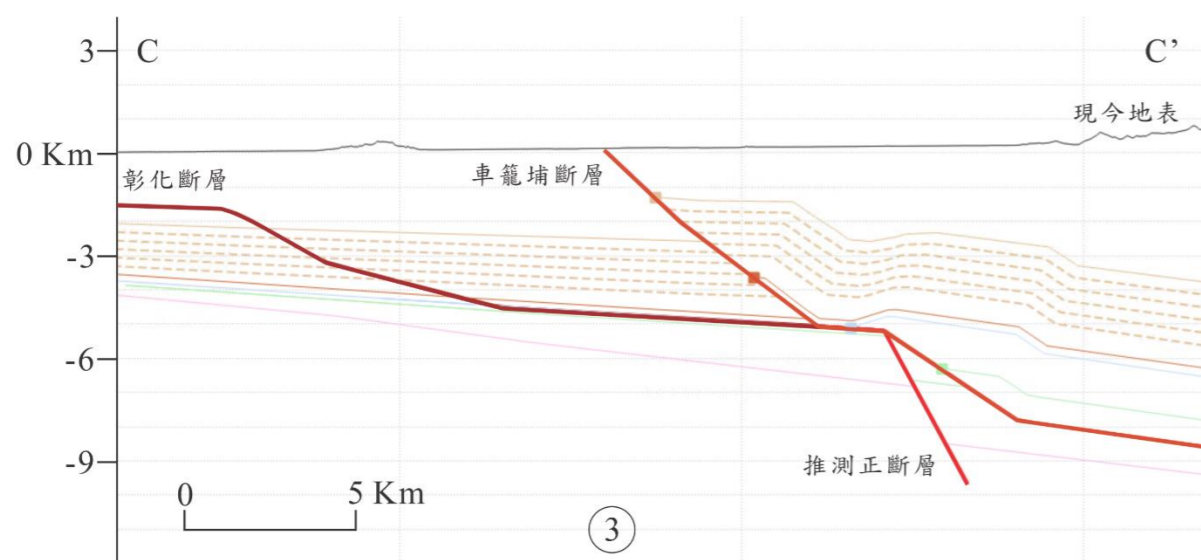
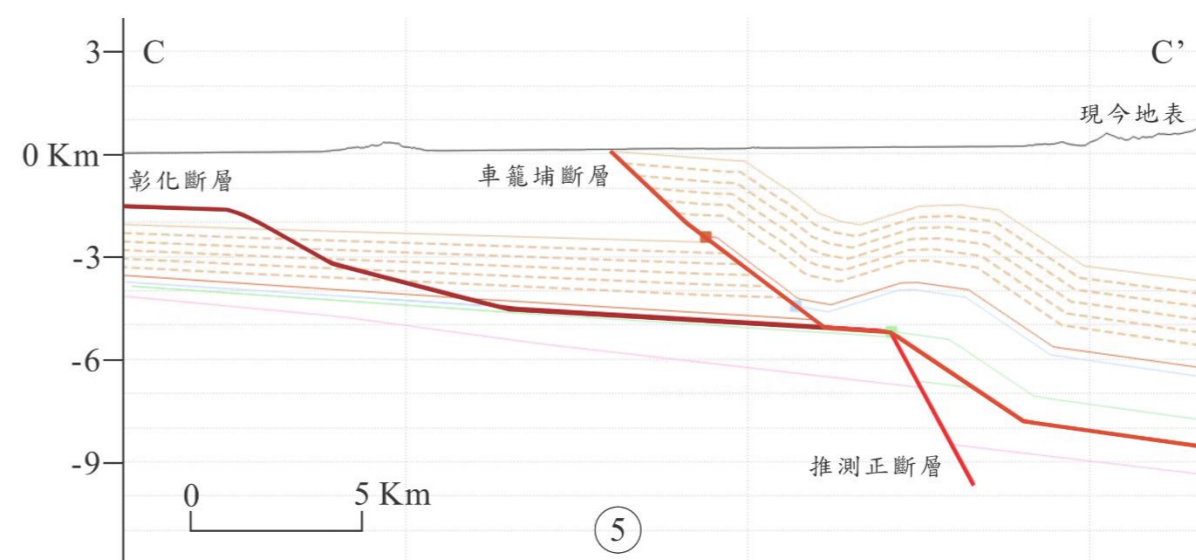
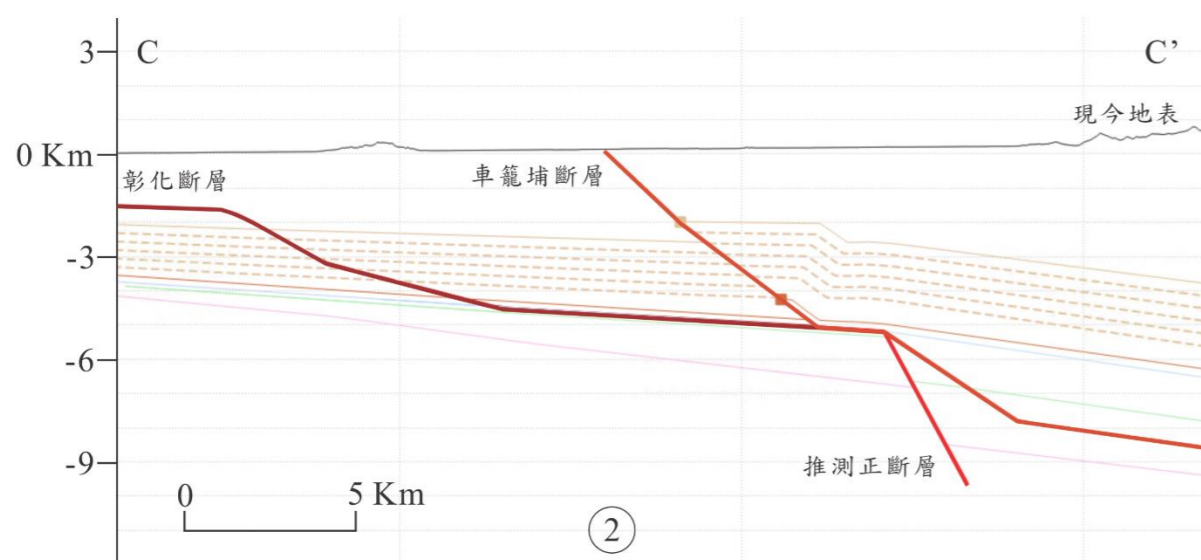
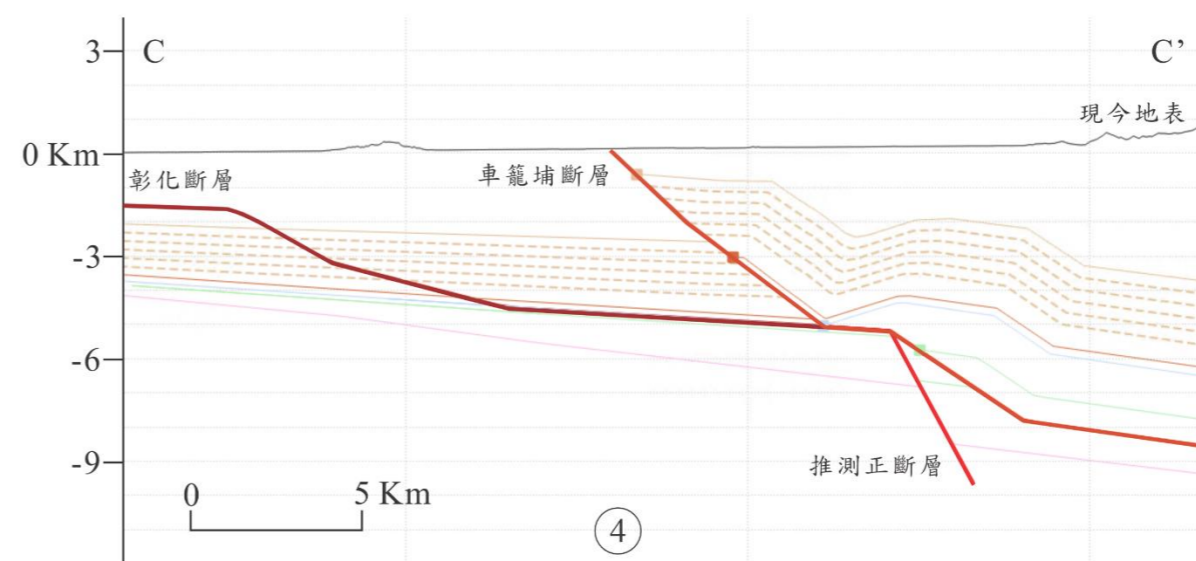
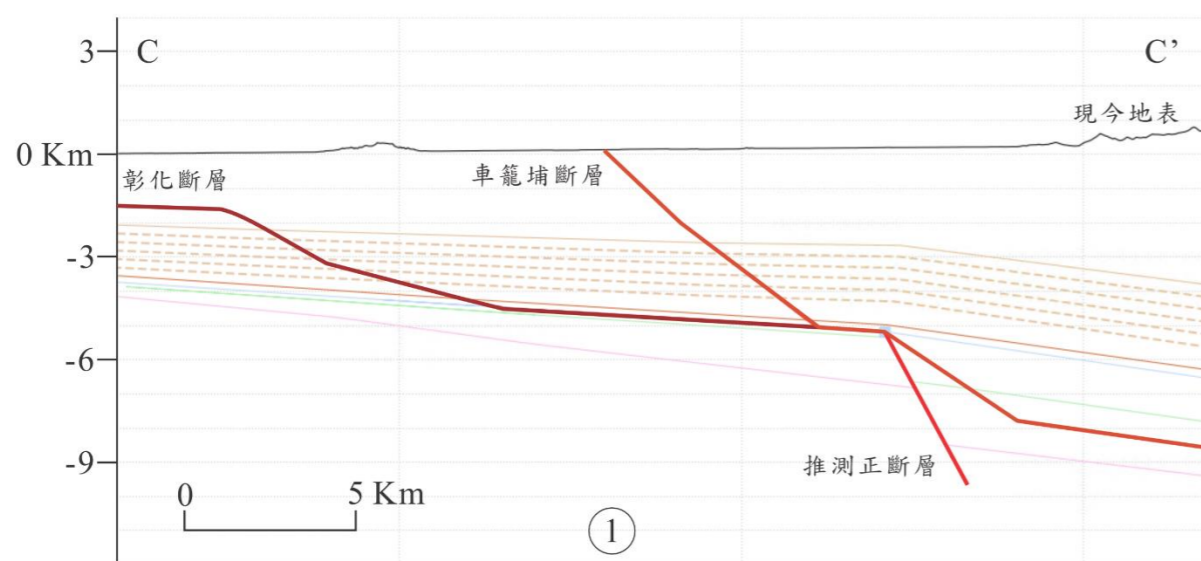
圖 5-8 基於三維地質模型，在剖面 AA'剖面至 CC'剖面之間所建立之 10 條剖面，剖面由南而北排序 1 至 10，每條剖面間隔 500 公尺。深紅色為斷層，其他顏色分別代表不同地層界面。

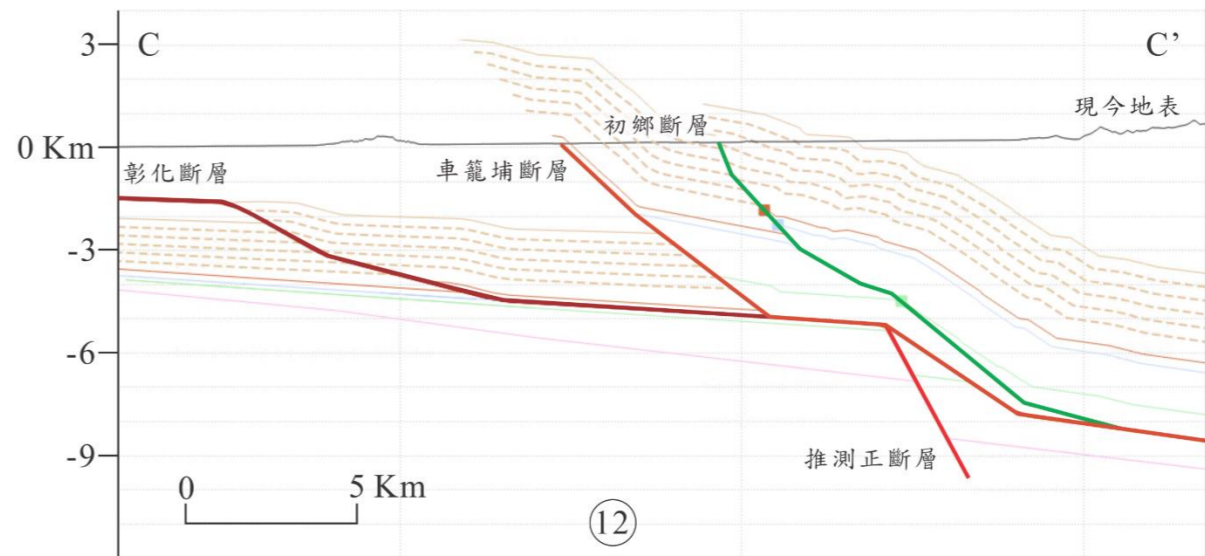
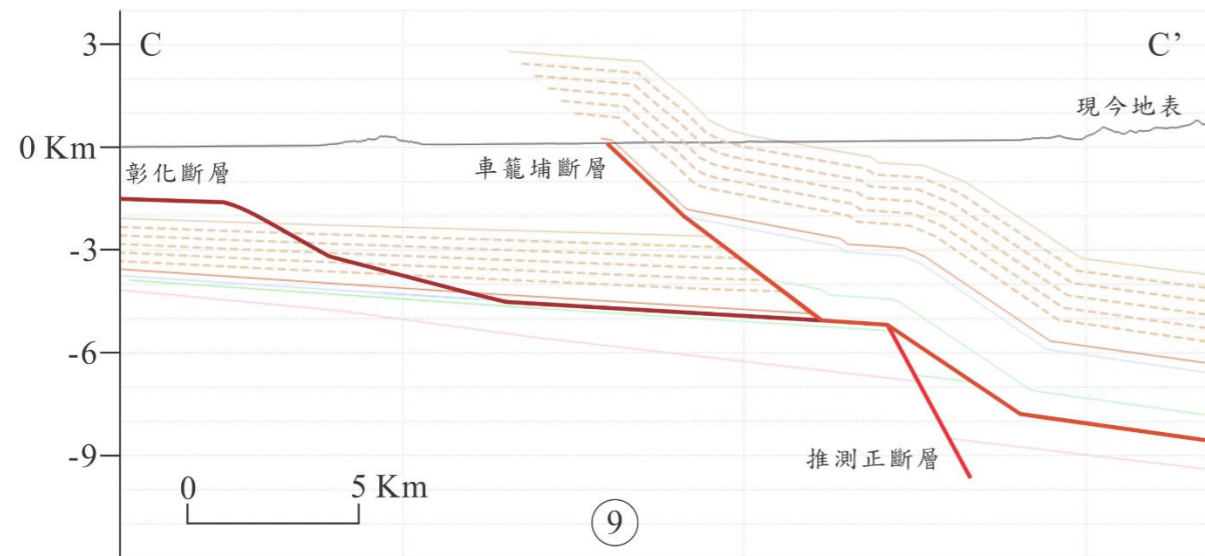
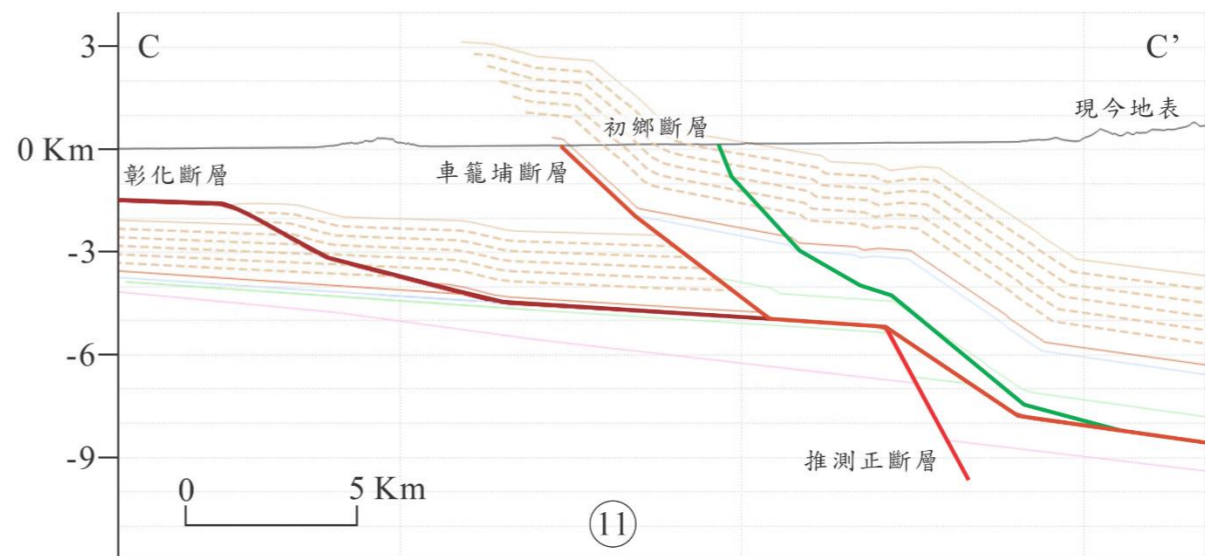
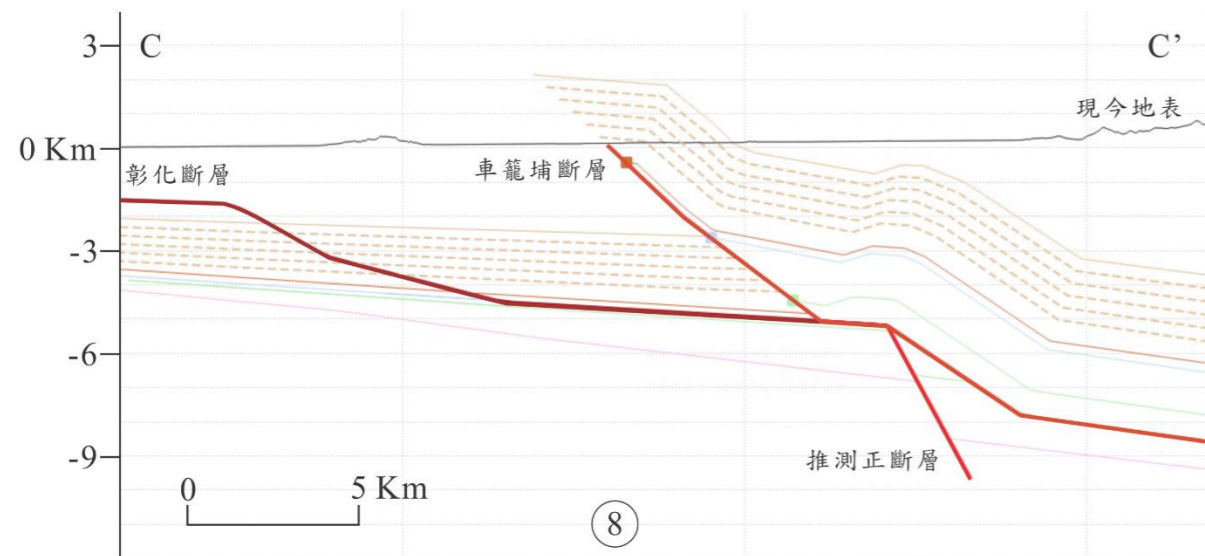
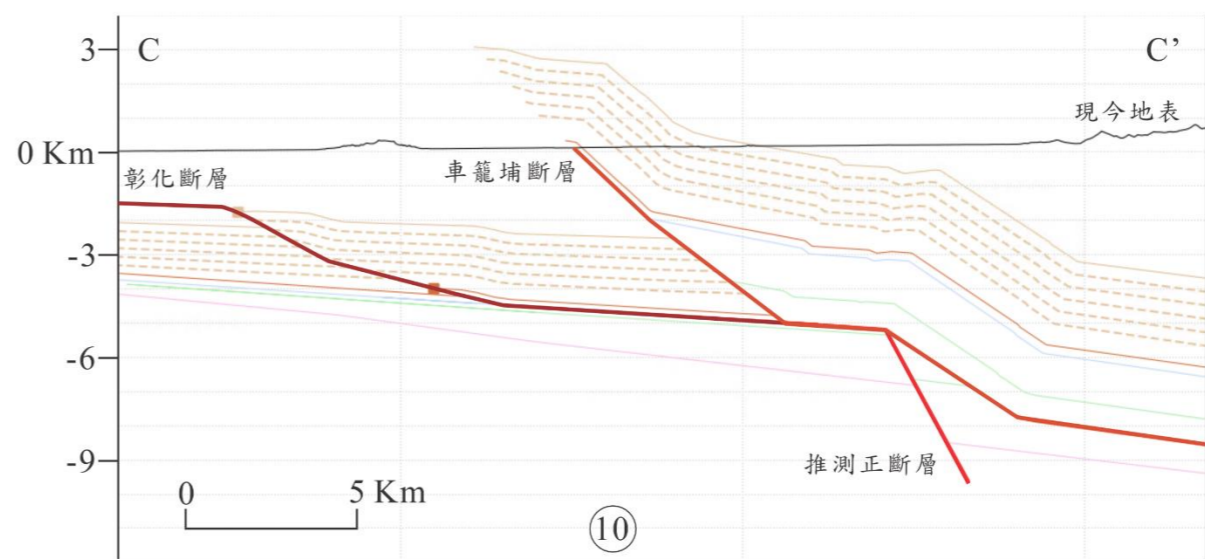
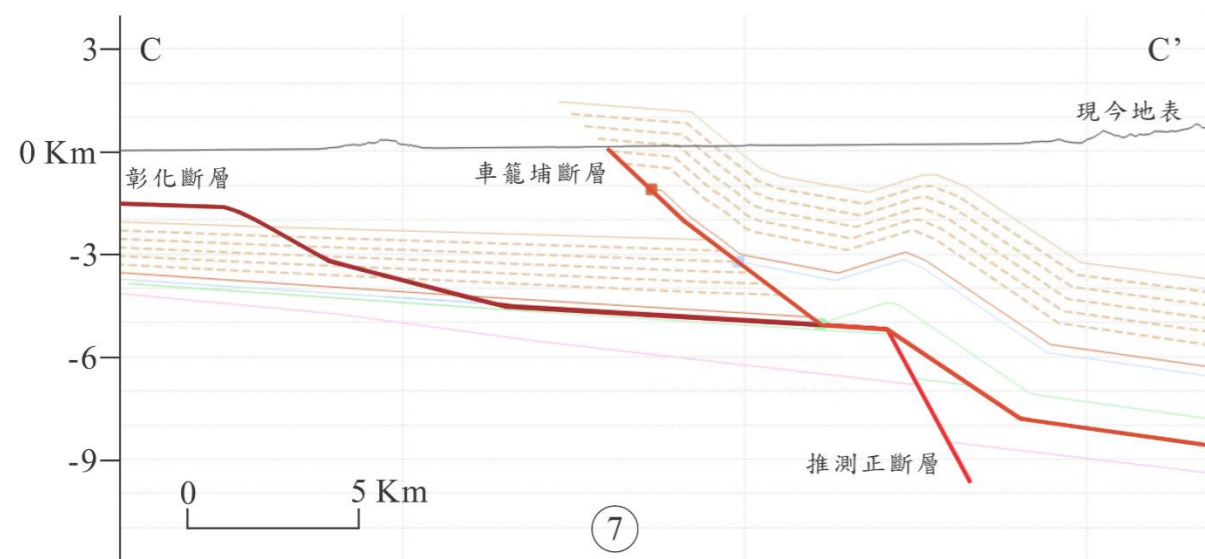
六、討論

6-1 構造演化與對地層層厚的影響

本研究以 MOVE 軟體為工具，透過地質剖面的回復與重繪，在西部麓山帶濁水溪南北一帶建立起地下三維地質模型，呈現區域中斷層深部的幾何形貌。西部麓山帶地質區的構造成顯著的覆瓦狀斷層系統，構造演化的順序大致由東而西向前陸的方向發育，惟初鄉斷層發育的時間最晚，而雙冬斷層以東並非本研究探討的範圍，故構造演化過程以車籠埔斷層→彰化斷層→初鄉斷層進行演示，透過 MOVE 軟體的協助，可逐步重現區域中構造的演化過程，以 CC'濁水溪剖面為例(圖 6-1)進行前向模擬(Forward Modeling)。根據 Yue et al.(2005)研究，1999 集集地震震源深度與車籠埔斷層底部沿錦水頁岩滑脫面有 5 至 6 公里的深度落差，震源位於地下 10 至 12 公里深處，此位置與照亮 Carena et al., (2002) 提出之台灣主要滑脫面 (Taiwan Main Detachment) 的深部微震點雲 (deep cloud of microseismicity) 相符合，Yue 等人認為地震應發生在一個更深的未知小型逆衝斷層上。張中威 (2023) 所繪剖面中於該位置附近亦提出一推測正斷層，用以解釋車籠埔斷層上盤與下盤地層厚度的差異。張中威認為可能的原因包含地層趨勢角度向東方前陸盆地中心變陡，沉積盆地提供較多沉積空間，車

籠埔斷層活動時上盤形成豬背盆地(piggyback basin)，使卓蘭層有較多的沉積空間，亦可能正斷層在卓蘭層沉積時仍有活動。圖 6-1 (1) 地層原始狀態時地層趨勢角朝前陸盆地方向傾斜。(2) 車籠埔斷層開始活動，由(3)到(6)可見在斷層上盤形成明顯豬背盆地(piggyback basin)，為上盤地層提供充足的沉積空間。此時地層主要受到東西向的擠壓，推測正斷層應已停止活動或錯移量不大。而依據地質剖面圖，推測正斷層活動時則為桂竹林層在上盤提供充足的沉積空間。





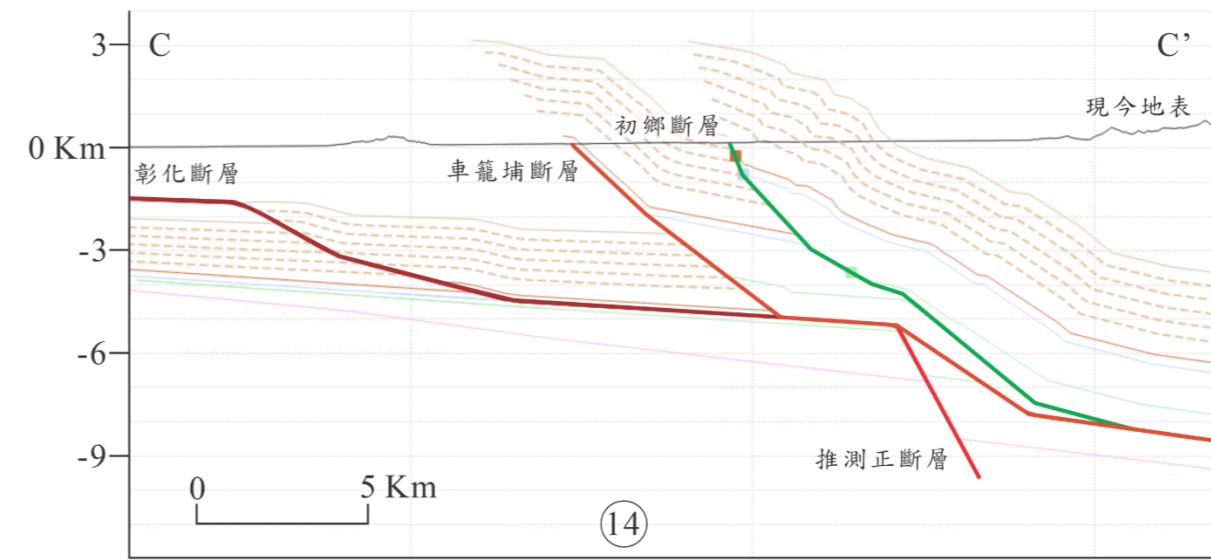
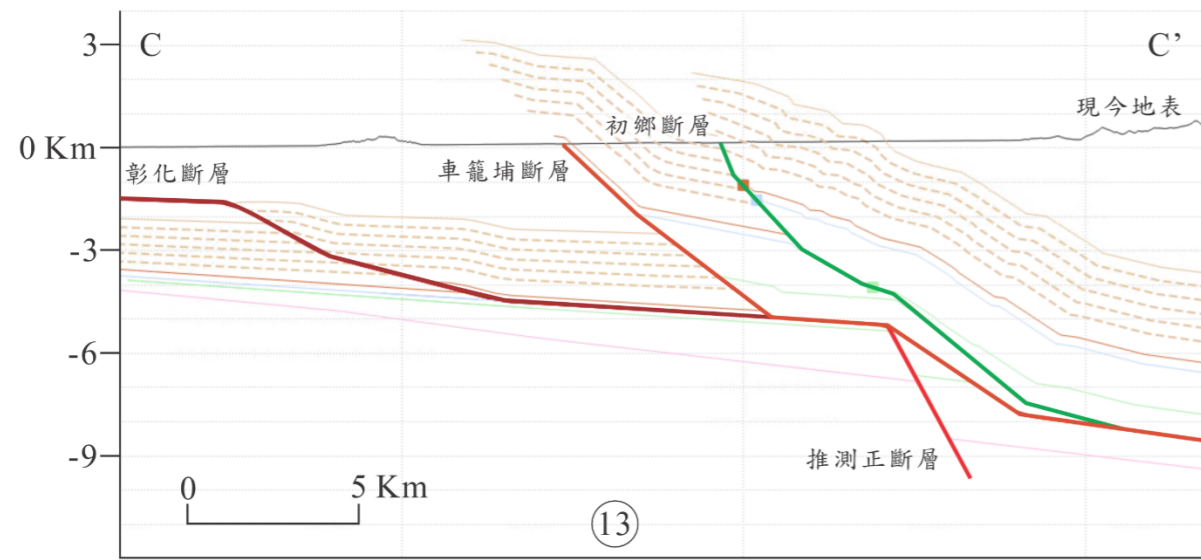


圖 6-1 沿濁水溪 CC'剖面構造演化。以 MOVE 軟體進行前向模擬(Forward Modeling)，較粗實線為斷層面，細線為地層上邊界，虛線為輔助線標示卓蘭層層面方向，黑色細線為現今地表以作參考。每階段斷層錯移量為 500 公尺。由圖 6-1(3)至(7)可見車籠埔斷層上盤形成明顯豬背盆地(piggyback basin)。圖 6-1(11)初鄉斷層開始活動。

6-2 斷層上盤出露地層與斷層水平錯移量之間的關係

根據地質圖顯示，車籠埔斷層上盤與初鄉斷層上盤在濁水溪以南出露的地層普遍較濁水溪以北更古老，然而彙整各斷層活動在濁水溪南北剖面造成的水平錯移量可發現(表 6-1)，車籠埔斷層在最北剖面的錯移量最大而在濁水溪剖面最少，通過濁水溪後往南再次逐漸增加；初鄉斷層在濁水溪剖面的錯移量最大，北段錯移量大於南段。由 AA' 剖面至 CC' 面間細分割面(圖 5-8)可見，推測正斷層在 AA' 剖面至 BB' 剖面由南北向轉為東西向(圖 6-2)，連同車籠埔斷層切入桂竹林層的斷坡位置朝東移，使桂竹林層愈出露需位移更長的距離，因此車籠埔斷層雖在 AA' 剖面有最大的水平錯移量，斷層上盤並未出露桂竹林層。

表 6-1 斷層活動於各剖面所造成水平錯移量(單位:公里)

剖面	彰化斷層	初鄉斷層	車籠埔斷層	推測正斷層
AA'	1.8	*	16.1	0.4
BB'	1.4	3.2	9.6	0.4
CC'	1.4	3.8	8.1	0.6
DD'	0.4	1.4	9.8	0.6
EE'	1.1	*	11.8	0.6

初鄉斷層上盤在濁水溪以北出露更新世地層，至濁水溪以南 DD' 剖面與 EE' 剖面之間出露上新世地層，然而由表 6-1 可見初鄉斷層北段錯移量大於南段。由三維模型可見(圖 6-3)初鄉斷層發育於車籠埔斷層上盤，上盤地層已受車籠埔斷層錯動使初鄉斷層南段位置更新世地層與錦水頁岩邊界被抬升至較北段更接近地表，故雖然初鄉斷層北段具有較大的水平錯移量，斷層南段上盤出露的地層仍較北段古老。

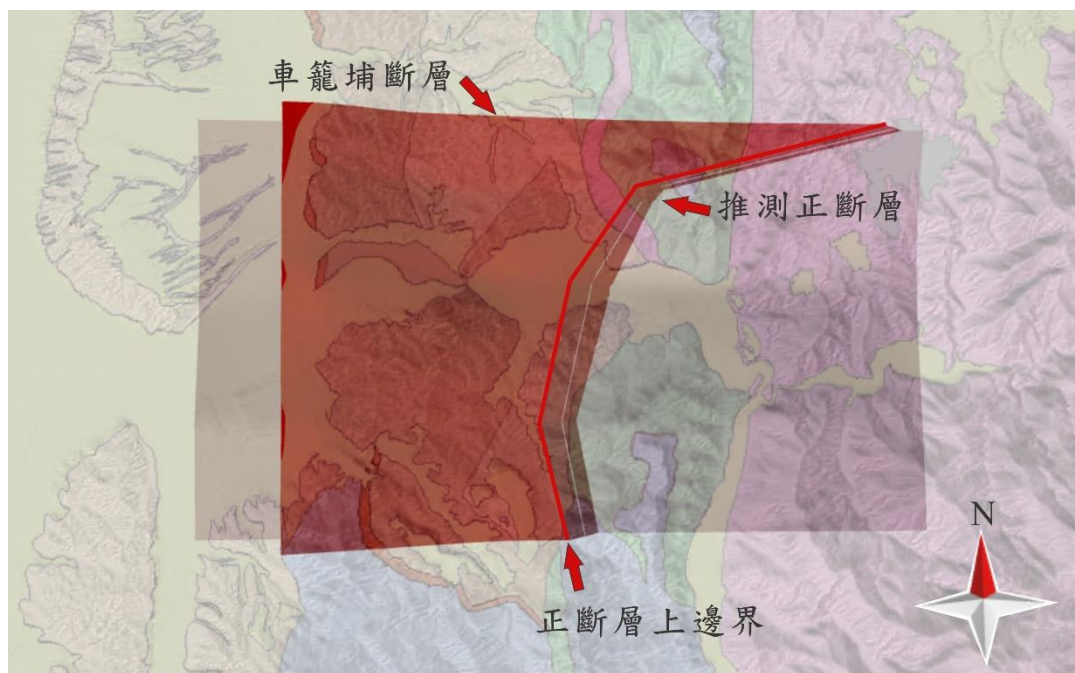


圖 6-2 三維模型俯視圖。紅色為車籠埔斷層上部斷坡與斷坪、及正斷層，正斷層於濁水溪以北由南北向轉為東西向，淺灰色為模型的範圍。

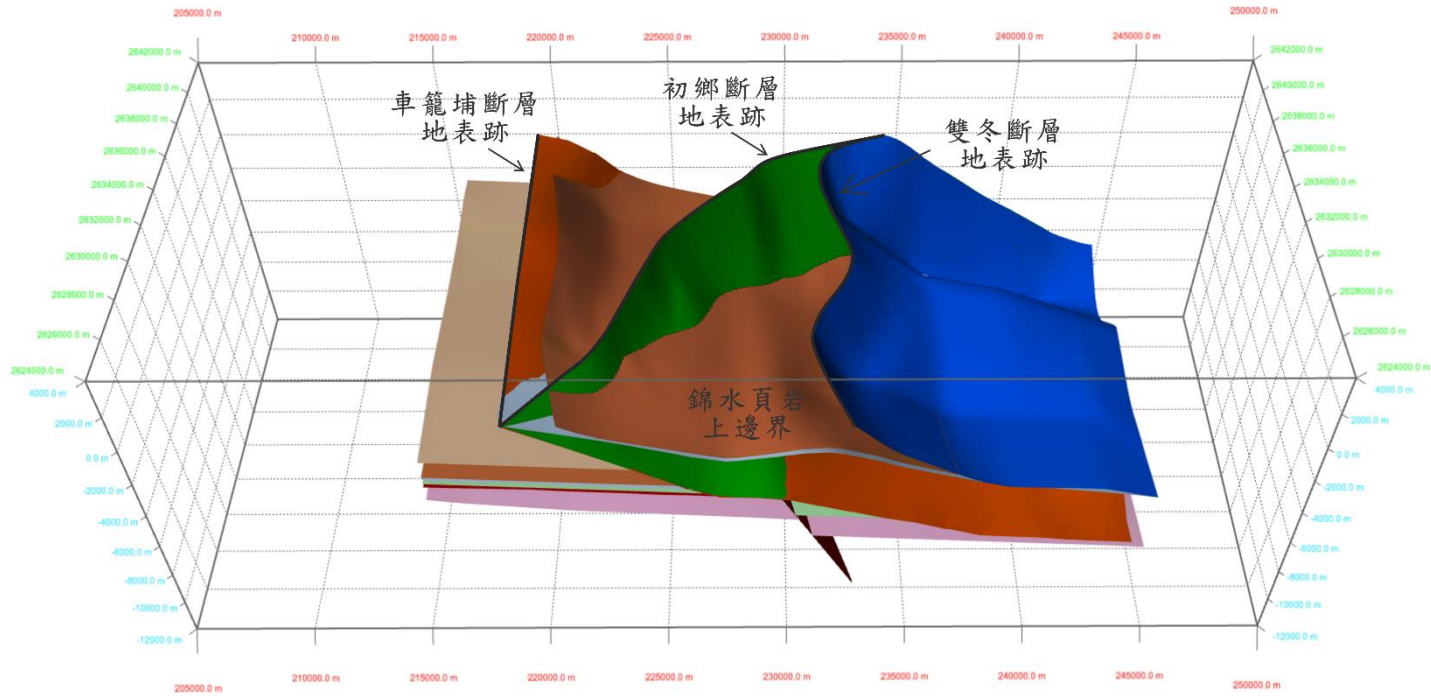


圖 6-3 初鄉斷層開始活動時地下構造。以三維模型呈現初鄉斷層活動時之原始地質形貌，東側為雙冬斷層所截切。橘色為車籠埔斷層面，綠色為初鄉斷層面，藍色為雙冬斷層面，土色為錦水頁岩上邊界，同更新世地層下邊界。由三維模型可見初鄉斷層南段更新世地層與錦水頁岩邊界受車籠埔斷層抬升至較北段更接近地表。

七、結論

本研究透過蒐集前人地質剖面進行平衡剖面回復與重建，依據地質剖面建構三維模型，呈現西部麓山帶濁水河流域地下構造的幾何形貌，並以剖面的前向模擬演示構造的演化過程。

1. 依據平衡剖面回復結果修正沿濁水溪 CC'剖面，初鄉斷層併入車籠埔斷層的位置，由原本張中威(2023)認為的下部斷坡底部，向東修正 3.3 公里於下部斷坪上的位置。
2. 依據三維模型，推測正斷層於濁水溪地下呈南北走向朝東傾，並於濁水溪以北約 3 至 4 公里處轉為東西至東北西南向，朝南傾。
3. 由剖面回復紀錄斷層所造成之水平錯移量，彰化斷層所造成錯移量均在 2 公里以下，南北並無明顯差異；初鄉斷層於濁水溪剖面有最大錯移量 3.8 公里，北段大於南段；車籠埔斷層於濁水溪剖面錯移量最小，往南北逐漸增加且北段 16.1 公里大於南段 11.8 公里。推測正斷層所造成錯移量均在 0.4 公里至 0.6 公里之間，無明顯南北差異。
4. 車籠埔斷層上盤與初鄉斷層上盤在濁水溪以南出露的地層普遍較濁水溪以北更古老，濁水溪以北較濁水溪以南年代更年輕，為受推測正斷層走向轉折影響，車籠埔斷層的上部斷坪向東延長變

寬，因此北段雖有較大錯離量，但未見桂竹林層出露於地表。

5. 初鄉斷層上盤出露地層，在濁水溪以北為更新世地層為主，濁水溪以南則有更新世至中新世的地層出露，是因初鄉斷層開始發育活動時地層已受車籠埔斷層活動變形，濁水溪以南上新世地層被抬升至接近地表，相較於濁水溪以北則在離地表較深的位置，故雖初鄉斷層北段錯移量大於南段，濁水溪以北出露地層仍較南段年輕。

參考文獻

- Carena, S., and Suppe, J., 2002. 3-D Imaging of active structures using earthquake aftershocks: the Northridge thrust, California. *Journal of Structural Geology* 24, 887–904.
- Carena, S., Suppe, J., and Kao, H., 2002. Active detachment of Taiwan illuminated by small earthquakes
- 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, *Eos Trans. AGU*, 83(47), Fall Meet. Suppl., Abstract T61B-1268.
- 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.
- 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.
- 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.
- Yue, L. F., Suppe, J., and Hung, J.H., 2011, Two contrasting kinematic styles of active folding above thrust ramps, western Taiwan.
- 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。

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。

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，1986，臺灣地質概論：臺灣地質圖說明書，增訂第二版，經

濟部中央地質調查所。

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 1-24 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、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、張育仁，2018，臺灣中部水裡坑斷層兩側地質構造

研究，經濟部中央地質調查所特刊，第 33 號，第 1-30 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。
- 張中威，2023，利用地質剖面探討初鄉活動斷層構造特性，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
- 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。
- 陳華玫、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。
- 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。

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。

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。