

國立中正大學
地球與環境科學系地震學碩士
班碩士論文

荖濃溪勤和地區全新世
河流地形演育

Holocene Landscape Evolution along the
Chin-ho Area of the Lao-nong River,
Southwestern Taiwan

研究生：陳立淳撰

指導教授：謝孟龍博士

中華民國一百零二年八月

國立中正大學碩士學位論文考試審定書

地球與環境科學系地震學碩士班

研究生陳立淳所提之論文

荖濃溪勤和地區全新世河流地形演育

經本委員會審查，符合碩士學位論文標準。

學位考試委員會
召集人 齊士沛 簽章

委員
何立德 謝志龍

指導教授 謝志龍 簽章

中華民國 102 年 7 月 26 日

誌謝

在中正大學待了六年，從學士到碩士的路上遇到各種困難，都要感謝地環系的所有老師們、同學們，不管在課業上、生活上，當我陷入困境時，給我最即時的幫助，讓我在中正大學的求學之餘，兼顧了多采多姿的生活。

首先，我要先感謝我的指導教授謝孟龍老師，謝孟龍老師是在我大四的時候進入地環系擔任教授。修了謝老師的課之後才開始了解甚麼是地質、甚麼是出野外，對於我們的問題總是不厭其煩的解說，並且鼓勵我們發問，訓練我們口頭報告的能力，讓我們對地球科學有了新的認識。進入了碩士生涯，從一開始懵懵懂懂跟著老師出野外、回答不出老師問的問題，到之後對自己的研究區域比較了解、好像講的出一些故事，真的蠻有成就感的。短短的兩年內，我能夠有如此的進步，真的很感謝謝老師的悉心指導，才能有如此的進步，雖然常常會有一些堅持難以適應，但相信那是學習過程中的必經之路。在論文撰寫的過程中，老師也給我許多建議與指導，帶我突破困境。也要感謝口試委員齊士崢老師、何立德老師對於論文給我建議和指導。

接著要感謝台大地質系張玲瑄、徐志煌、林修齊、林鼎鈞、胡宛玲、鍾先怡、陳奕維、賴序衡、陳嘉洛、陳幸萱先前在野外的調查，許多珍貴的露頭得以被記錄下來。還要感謝台大地質系黃自展、羅立、鍾令和、鄭懷杰、陳威宏、郭思廷、廖柏穎、曾邑銜、張冕先前參與荖濃溪研究的討論。因為有上述所有人的幫助，本論文才能夠順利完成。

感謝 417 一起奮鬥的夥伴們。強姊、X 拍、狗人和我一起努力、一起進步，大家一起討論才會有今天的成果。卡比、俊毅時常找我打球、運動，讓我疲憊的身心獲得一絲絲喘息。感謝野口、佳宏兩位稱職的助理，幫我看論文、告訴我哪裡可以改進，把事情交給你們真的很放心。也要感謝地震所、應地所的各位，陪

我渡過熬夜 K 書的日子。大家讓我的研究所生活增添許多色彩。感謝書暘在我受到挫折時，適時的鼓勵我、幫我打氣，讓我有動力繼續前進。

最後要感謝我的家人們，在被後默默的支持我。自從到嘉義讀書後，因為離家較遠，回家的時間比較少，爸、媽總是能體諒我，讓我無後顧之憂的往前走。姊姊們時常鼓勵我，在我人生的路上給予莫大的幫助。家是最溫暖的避風港，讓我每次回家都感覺充滿了電。也因為我的家人，我才有機會獲得碩士學位，讓我進入人生的下一個階段！



中文摘要

2009 年莫拉克颱風的豪大雨引發台灣西南部廣泛的山崩、土石流，並造成若干主流河床顯著的堆積。在荖濃溪勤和地區，這河床的堆積幅度可達三十公尺，阻絕了交通，掩埋了「曾文溪越域引水」工程的引水隧道，並帶走十多條人命。為了解這大規模堆積事件的再現週期，本研究調查了引水隧道口上游五公里內的河階剖面，試圖重建該河段河流堆積、下切的歷史。本研究將出露的沉積層分為主流礫層、主流砂層、與支流礫層，並得到 54 筆碳十四年代(41 筆落於 0-2 ka)。根據這些資料，推論近兩千年來至少有 9 次大規模的河床堆積事件(不含 2009 年事件)，其中至少 6 次幅度不小於 2009 年者；最大的事件(發生於 1.4-1.5 ka cal BP)其幅度甚至超過一百公尺。此外，至少 5.5-5.7 ka 及 8.2-8.4 ka 還有兩次堆積事件，其中 5.5-5.7 ka 事件幅度超過一百五十公尺。這些堆積事件，如同 2009 年者，都和支流大規模土石流的活動有關(在支流口形成土石扇)，惟各支流發生土石流事件的時間(或時段)並不相同。注意：研究區本就侵蝕旺盛(只有較大事件的證據才可能被保存)，且各堆積事件之間河流的下切量不明。因此，本研究所推估的堆積事件，無論是頻率或幅度，都是最保守的。換言之，雖然研究區長期以下切為主(反應地殼隆升)，短時間當頻繁發生災變性的堆積。以上河流特性當作為土地利用的參考。

關鍵字：荖濃溪、「曾文溪越域引水」計畫、土石流、河流地形變遷。

Abstract

Studies of the active mountains of Taiwan have been focused on the efficiency of erosion processes to balance the rapid tectonic uplift. However, by triggering widespread landslides/debris flows, 2009 Typhoon Morakot (7–10 August) brought aggradation of 10–30 m along much of the Lao-nong River in southwestern Taiwan, killing 14 people and causing enormous economic losses.

To understand the Holocene evolution of this river, we undertook a stratigraphy-based geomorphic study along a 5 km-long reach near Chin-Ho, in the midstream of the river (drainage area: 540 km²; mean channel gradient: 0.019; current uplift: ~1 cm/yr). This river reach exhibits 6 terraced fan systems at tributary mouths. The sediments exposed along these terraces, up to 220 m thick, were classified into 3 facies: tributary gravel, trunk-river gravel, and trunk-river sand, based on their distinct roundness, composition and/or grain size.

Totally 54 radiocarbon dates, < 8.4 ka cal BP, were obtained. Given these, we identified 8 aggradation events (with > 30 m-thick sediment deposition) in the past 2 ka. The greatest event in this period, occurring ~1.4 ka, had elevated the trunk-river bed by 100 m. More aggradation events were found around 5.5 and 8.2 ka cal BP, which had elevated the trunk-river bed by at least 150 m and 80 m, respectively. We conclude that the Lao-nong River is intrinsically subject to episodic aggradation, in association with the development of tributary-fan systems, which has greatly affected the morphology and incision of the river in response to the active tectonic uplift.

Key words : Lao-nong River; Debris flow; Tseng-wen reservoir transbasin diversion project; River evolution.

目錄

誌謝.....	ii
中文摘要.....	iv
Abstract.....	v
目錄.....	vi
圖目錄.....	viii
表目錄.....	x
第一章、緒論.....	1
1.1 源起：「曾文越域引水計畫」的爭議.....	1
1.2 研究範圍與方法.....	5
第二章、研究區地形.....	10
2.1 地質、地形背景.....	10
2.2 階地.....	13
2.2.1 概述.....	13
2.2.2 研究區階地.....	14
第三章、近期土石流與河流活動.....	20
3.1 莫拉克颱風之前.....	20
3.2 莫拉克颱風.....	24
3.3 莫拉克颱風之後.....	28
第四章沉積剖面觀察與定年結果.....	33
4.1 沉積相區分.....	33
4.2 分區描述.....	40
4.2.1 「美秀」南扇 (地點 1, 2, 13, 14).....	40
4.2.2 「美秀」北扇與美秀溪(地點 3, 15, 16, 23-25).....	42
4.2.3 PT ₂ 及其鄰近坡地(地點 5, 17).....	44
4.2.4 「布唐布那斯」南扇與 PT ₁ (地點 7-10, 18, 19).....	48
4.2.5 「布唐布那斯」北扇與 PC 階地(地點 11, 20, 21).....	53
4.2.6 「清水」扇階與其鄰近地區(地點 12, 22).....	55
4.2.7 「奇斯薩庫」扇階 (地點 26).....	57
4.2.8 勤和階地.....	61
第五章、資料分析與討論.....	62
5.1 碳十四年代的意涵.....	62
5.2 河流地形變遷與支流沖積扇的發育.....	64
5.2.1 全新世早、中期(3 ka 以前).....	64

5.2.2 全新世晚期(3ka 以後).....	66
5.2.3 研究結果的解析度與不確定性	69
5.3 河流堆積作用的意義.....	72
5.4 工程上的反思與應用.....	73
第六章、結論.....	75
參考文獻.....	76



圖目錄

圖 1 台灣西南部陰影地形圖。.....	2
圖 2 「曾文溪越域引水計畫」施工用隧道口(銜接引水隧道)，莫拉克颱風前、後的對比。.....	3
圖 3 莫拉克颱風之前，針對不同頻率洪水，荖濃溪勤和段河床下切(沖)與堆積(淤)量的模擬。.....	4
圖 4 研究區莫拉克颱風前的等高線陰影地形圖。.....	6
圖 5 研究區 1997 年航空照片。.....	7
圖 6 研究區 2007 年航空照片。.....	8
圖 7 研究區 2010 年 Google Earth 衛星影像。.....	9
圖 8 荖濃溪一帶地質圖。.....	11
圖 9 荖濃溪梅山與高中水文站 2004~2011 年的日雨量紀錄。.....	12
圖 10 研究區階地分布。.....	15
圖 11 由美秀溪口南方半公里處北望荖濃溪谷。.....	16
圖 12 由荖濃溪左岸眺望布唐布那斯溪口。.....	16
圖 13 既有「布唐布那斯」扇階系統的碳十四定年資料與解釋。.....	18
圖 14 既有「美秀」扇階與其鄰近階地的碳十四定年資料與解釋。.....	19
圖 15 布唐布那斯溪口的地形變遷。.....	22
圖 16 研究區荖濃溪縱剖面。沿溪谷中軸線。.....	23
圖 17 莫拉克颱風後研究區河床剖面的測量。.....	24
圖 18 由勤和南方之桃源階地遠眺荖濃溪溪谷。.....	25
圖 19 從勤和村北望荖濃溪溪谷。.....	26
圖 20 2010 年 2 月之前，布唐布那斯沖積扇發育及其相關之堰塞湖砂層堆積。.....	27
圖 21 2010 年 2 月之後，因布唐布那斯沖積扇發育形成之堰塞湖。.....	29
圖 22 2011 年 8 月研究區右岸全景。.....	30
圖 23 布唐布那斯沖積扇近兩年來的變遷。.....	31
圖 24 「奇斯薩庫扇」(CSK)階崖今昔。.....	32
圖 25 堆積於美秀溪口與 PT ₂ 階地之間的砂層。.....	34
圖 26 典型之支流礫層近照。.....	35
圖 27 出露於美秀溪口對岸主流階地的礫層。.....	35
圖 28 本研究定年標本採樣位置(莫拉克颱風之前)。.....	36
圖 29 本研究定年標本採樣位置(莫拉克颱風之後)。.....	37
圖 30 越域引水隧道北方之「美秀南扇」剖面(莫拉克颱風前)。.....	40

圖 31 美秀溪口南側之「美秀南扇」剖面(莫拉克颱風之後)。	41
圖 32 美秀溪口「美秀北扇」莫拉克颱風前、後景觀。	43
圖 33 「美秀北扇」剖面(莫拉克颱風之後)。位置見圖 32b。	44
圖 34 PT ₂ 階地剖面(莫拉克颱風前)。	45
圖 35 PT ₂ 階地及其南方坡地剖面(莫拉克颱風後)。	47
圖 36 PT ₂ 及其南方坡地定年採樣點一覽。	48
圖 37 「布唐布那斯」南扇剖面一景。	49
圖 38 布唐布那斯溪口南岸剖面(莫拉克颱風前)。	51
圖 39 布唐布那斯溪 PT ₁ 階地剖面一景(莫拉克颱風前)。	52
圖 40 「布唐布那斯」北扇(PT)與 PC 階地交界地帶一景(莫拉克颱風前)。	54
圖 41 遠眺「布唐布那斯」北扇(PT)與 PC 階地 (莫拉克颱風後)。	55
圖 42 清水溪右岸(南岸)「清水」扇(CS)剖面(莫拉克颱風後)。	56
圖 43 拉法阿勒吊橋北方主流礫層(G2)剖面(莫拉克颱風前)。	56
圖 44 「奇斯薩庫」扇階剖面(莫拉克颱風後，公路施工前)。	57
圖 45 「奇斯薩庫」扇階一帶地形。	58
圖 46 「奇斯薩庫」扇階剖面(公路施工中)(地點 26；圖 29)。	59
圖 47 「奇斯薩庫」扇階剖面近照(公路施工中)。	60
圖 48 勤和階地(CH)剖面(莫拉克颱風後)。	61
圖 49 研究區> 3ka 定年與沉積剖面的摘要。	65
圖 50 研究區主流右岸 3-1.3 ka 定年與沉積剖面的摘要。	67
圖 51 研究區主流右岸< 1.3 ka 定年與沉積剖面的摘要。	68
圖 52 研究區定年結果、標本比高圖。	711

表目錄

表一研究區碳十四定年資料.....	38
-------------------	----



第一章、緒論

1.1 源起：「曾文越域引水計畫」的爭議

為解決台灣西南部缺水問題，政府於 1995 年開始推行「曾文溪越域引水計畫」(以下或簡稱為「越域引水」計畫)，試圖將荖濃溪的水，透過隧道引入曾文水庫儲存。該計畫總工程費約兩百一十億台幣，包括興建兩座引水隧道，各貫穿玉山與阿里山山脈(圖 1)；並在荖濃溪勤和村北方修築攔河堰與引水渠道。這計畫已於 2003 年通過環評，2005 年開始施工，預定 2012 年完工。完工後，按照計畫，台灣西南部每天將可增加六十萬噸的供水。

該越域引水工程卻已在 2009 年莫拉克颱風後停擺。莫拉克颱風(八月七日至十日)為台灣西南部山區帶來破記錄的降雨(達 2000 mm)，並引發無數的山崩、土石流。規模最大的山崩事件發生於楠梓仙溪的小林，造成奪走四百多條人命的「滅村」事件。在荖濃溪，幾乎每條支流流域都有山崩、土石流發生，如此產生大量的岩屑導致主流河道顯著地堆積。在颱風之前，越域引水工程的攔河堰尚未興建，但引水隧道已幾乎完工。颱風造成此間河床二十多公尺的淤積，淤積的礫石完全掩埋了施工用的隧道口(圖 2)；鄰近的工作站也遭淹沒，八噸工程用的炸藥流失，14 位工作人員殉職。這大規模河床的堆積顯然超乎預期：按計畫環評書中的模擬，即使攔河堰完工後，此間兩百年周期的洪水應只造成河床兩公尺的淤積(圖 3)。

「曾文溪越域引水」本就是具爭議的工程(陳幸萱，2011)。該計畫完工後勢必影響(或改變)荖濃溪的水文與生態；該計畫未經原住民同意，似有違法與損及

原住民權益的疑慮；隧道施工時曾發生氣爆與火災，引發工安的疑慮。一些環保人士甚至將「小林滅村」歸咎於隧道施工時的爆破，認為其產生的震動足以造成小林村周遭土石的鬆動，促成爾後大規模山崩的發生。以上種種爭議間接導致該計畫的擱置。

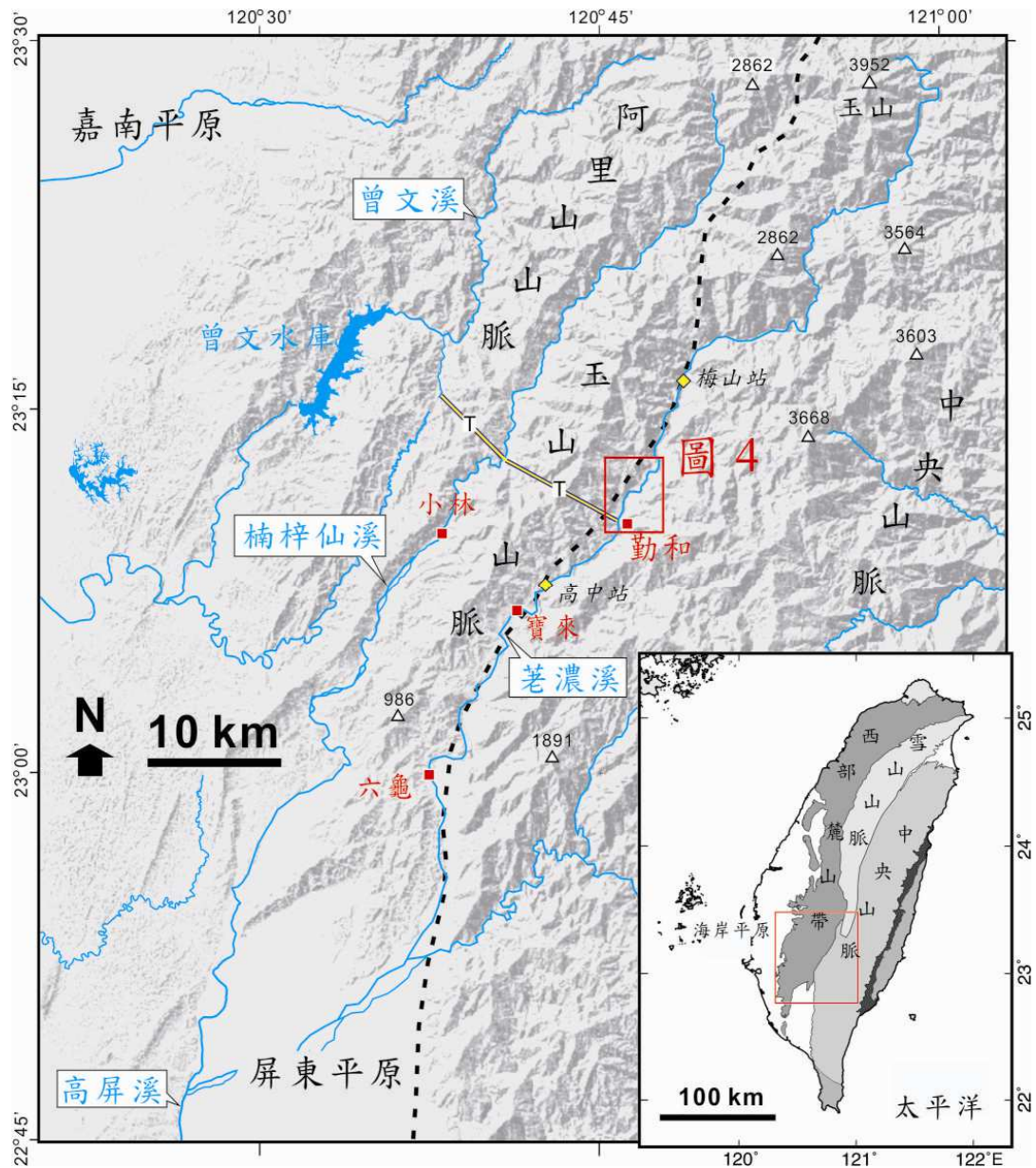


圖 1 台灣西南部陰影地形圖(位置見右下圖紅框)。虛線為潮州斷層及其向荖濃溪谷的延伸，其西邊為西部麓山帶(包含玉山和阿里山山脈)，東邊為中央山脈區。T 為「曾文溪越域引水計畫」的隧道。



圖 2 「曾文溪越域引水計畫」施工用隧道口(銜接引水隧道)，莫拉克颱風前、後的對比。(a)颱風前(攝於 2007 年 11 月)。圈出者乃作為比例尺的卡車。(b)颱風後(攝於 2009 年 12 月)。隧道已悉被土石掩埋。荖濃溪由右向左流。兩圖箭頭指出的竹林乃同一竹林。

如今，越域引水工程持續停擺中，等待進一步的環境與經濟效益評估。而其中一個重要的考量應為：在荖濃溪，如莫拉克颱風帶來的大規模河流堆積事件，究竟只是一個「特例」(千、萬年才發生一次)，還是「常態」(百年之內即可重複發生)? 若是後者，則該工程或許當選擇廢止(即使已接近完工)，因為就算工程順利完成，其未來維護、保養所花費的資源與成本，恐怕將大於預估的效益，更不消說工程牽涉的其它環境、生態、社會、與政治等問題。

以上背景孕育了本研究的動機——試圖重建全新世(過去一萬年以來)，荖濃溪勤和段河流堆積、侵蝕的歷史，以作為評估越域引水工程的參考。在台灣，百、千年來的地形變遷資料很少被應用在工程設計上，也從未作為防災、減災宣導的教材。本研究希望，藉由當前越域引水計畫的失敗，及 14 位工作人員的殉難，能喚起吾人對這長時距地形資料的重視。

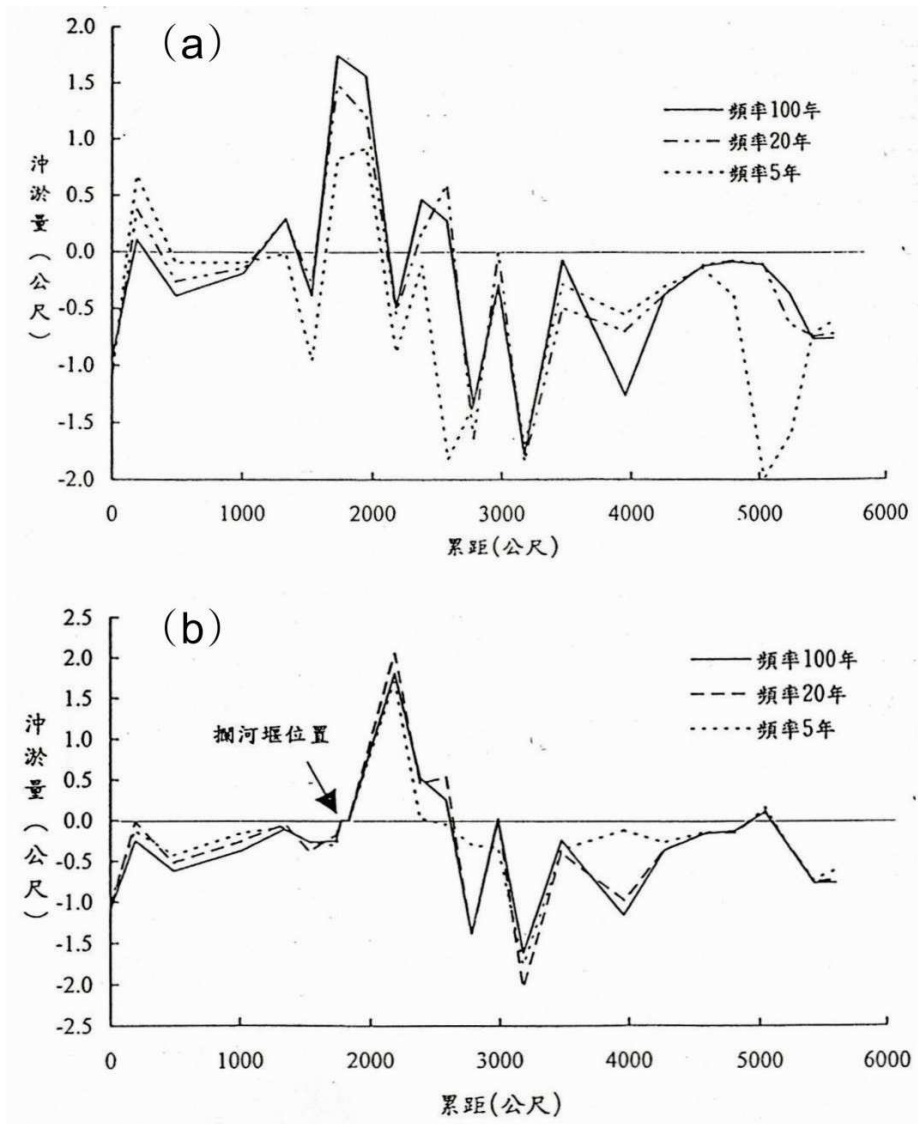


圖 3 莫拉克颱風之前，針對不同頻率洪水，荖濃溪勤和段河床下切(沖)與堆積(淤)量的模擬。(a)「曾文溪越域引水計畫」攔河堰興建之前。(b)攔河堰興建之後。橫軸為沿河床距離，零點位於下游。摘自「曾文溪越域引水計畫」環評書(經濟部水利署，2003)。

1.2 研究範圍與方法

本研究鎖定勤和以上約五公里長的河段(圖 4)，方法承襲傳統，除文獻收集外，包括室內地圖分析與野外調查；後者得助於近年來大量新剖面的出現。

地圖分析乃為初步了解研究區地形特徵(含水系，溪谷，河流形貌、坡度，及階地分布等)。所用的地圖包括:經建版兩萬五千分之一地形圖(等高線間距 10 m；2001 年出版)，內政部 40 m DEM 所生產之 10 m 等高線地形圖(圖 4)，1997 年與 2007 年航空照片(圖 5, 6)(以上用於分析莫拉克颱風前的地形)，及 2010 年 Google Earth 衛星影像(圖 7)(用於分析莫拉克颱風後之地形)。

野外觀察包括現生河流、土石流地形的變遷，以實地了解研究區地表營力的特性。該調查也針對沉積物剖面(含現生沉積物者)---檢視其幾何形貌(厚度、連續性)、定性描述其組成成分與沉積特徵(顏色、粒度、組織、構造)，劃分沉積相，並在其中尋找植物化石，作為碳十四年代測定的材料。所尋獲的植物化石經清洗、挑選後送至台大貴儀中心(>3 g 的標本)，或紐西蘭 Waikato 大學(<3 g 的標本)實驗室測定；得到的年代(單位：BP，表示 1950 年之前)再利用 CALIB 6.0 程式校正(Reimer et al., 2009)，並以一個標準差的範圍呈現(單位：cal BP)。

所觀察沉積層的比高(相對河床的高度)或厚度(沉積層上、下邊界的垂直距離)，或以皮尺或身高量測(若沉積層能夠到達)，或以雷射測距儀決定(若沉積層無法到達)，或由地形圖估計(通常運用於數值大於一百公尺者)。莫拉克颱風前的比高資料以 2004 年水利署與 2008 年台大土木系團隊全測站測量的河流縱剖面為基準(Capart et al., 2010)；莫拉克颱風後的量測基準，及其與之前基準的關聯，則參照 Cheng (2011) 一系列全測站的資料。注意：Capart et al. (2010) 與 Cheng (2011) 測量點間距常大於數十公尺，且彼量測時溪水面的位置和本研究測量時的位置並

不相同。如此，所得到的比高(及其颱風前、後基準點的轉換)或有高達數公尺的誤差。惟本研究所觀察河床高度的變化均為數十公尺甚至上百公尺，這樣的誤差當在容許範圍之內。

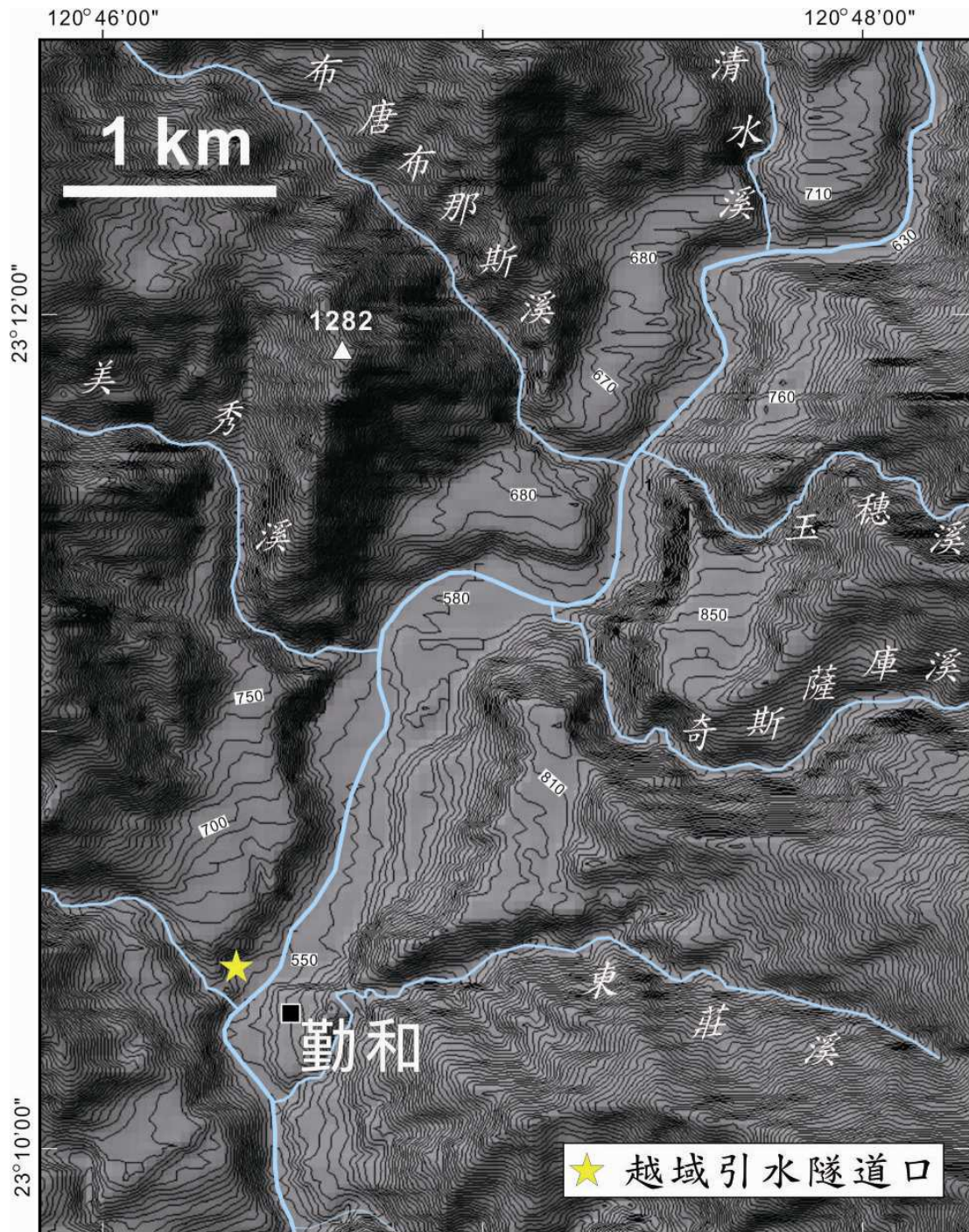


圖 4 研究區莫拉克颱風前的等高線陰影地形圖(等高線間距：10 m)。根據 40 m × 40 m DEM。位置見圖 1。

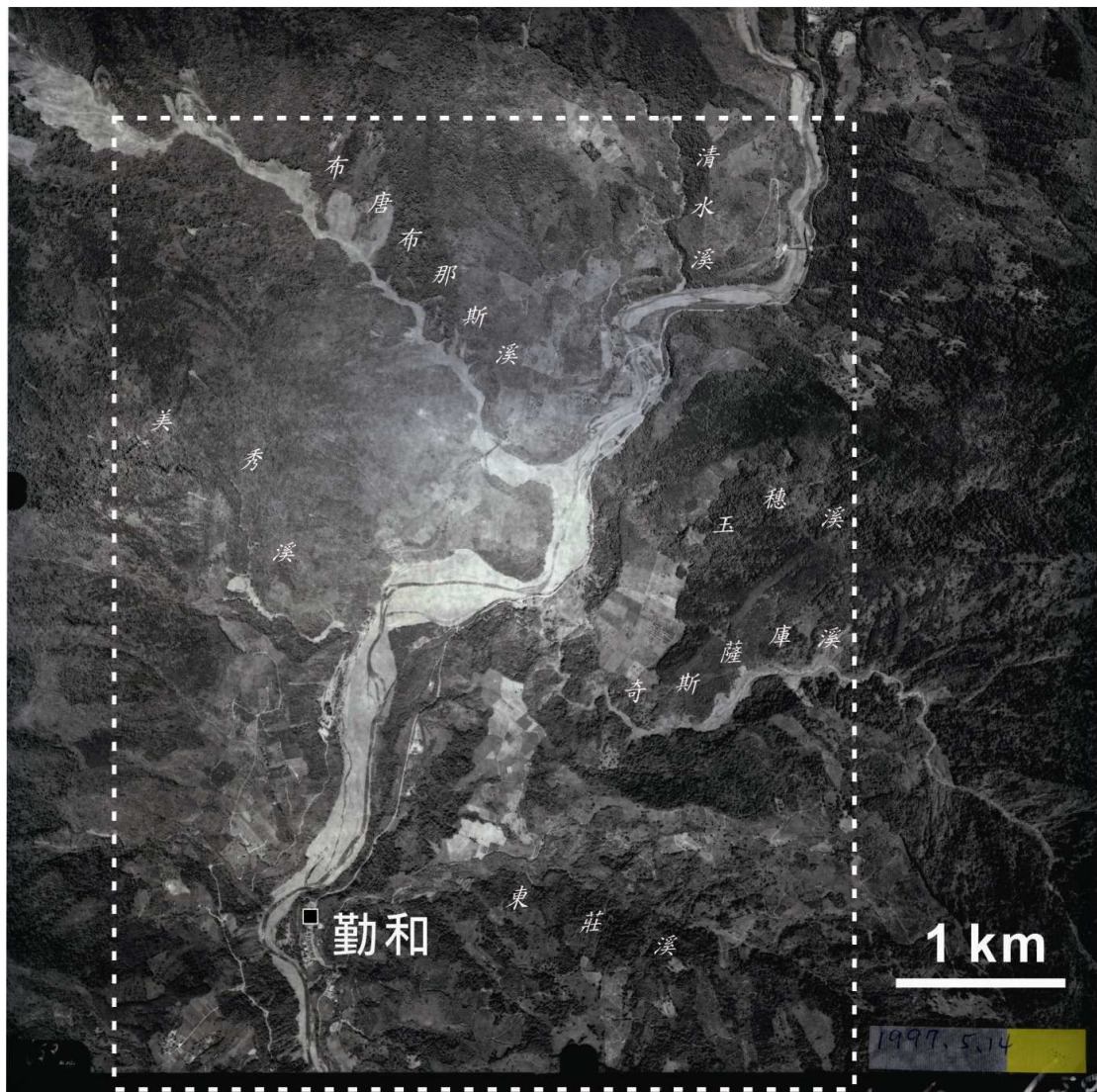


圖 5 研究區 1997 年航空照片。虛線框為圖 4 大略位置。

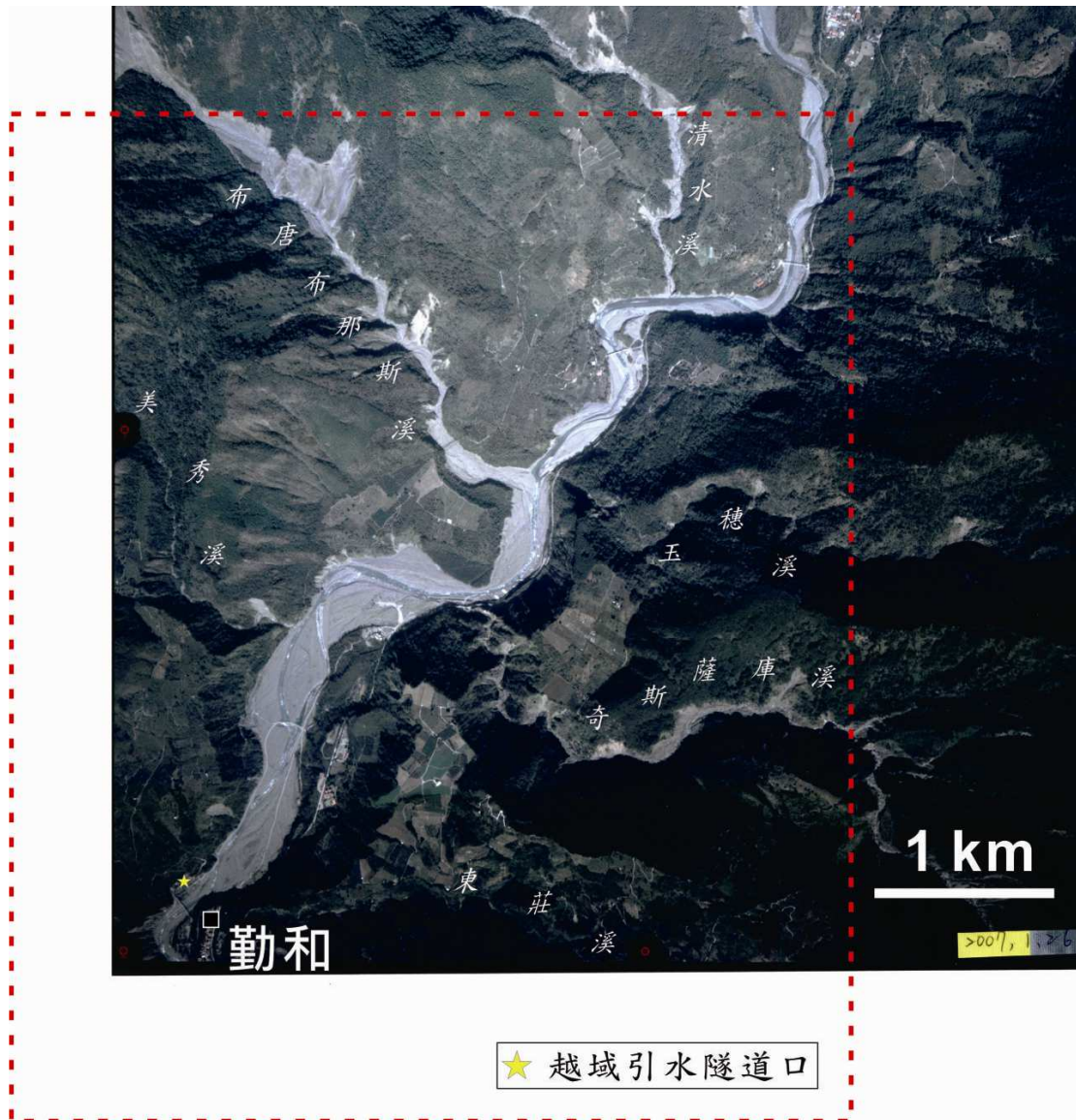


圖 6 研究區 2007 年航空照片。虛線框為圖 4 大略位置。

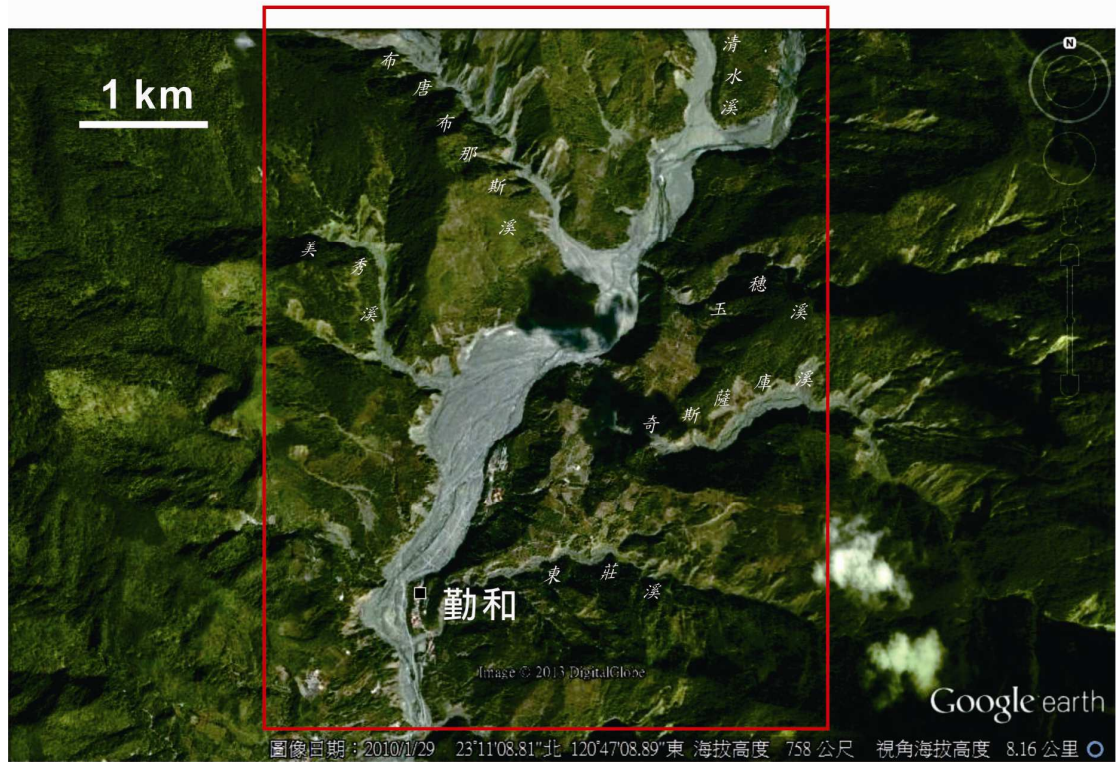


圖 7 研究區 2010 年 Google Earth 衛星影像。紅框為圖 4 位置。

第二章、研究區地形

2.1 地質、地形背景

荖濃溪為高屏溪一主要支流，源於玉山山塊(海拔最高 3952 m)，向西南流於玉山山脈(大多低於海拔兩千公尺)與中央山脈(海拔三千公尺)之間，直到進入屏東平原(圖 1)。地質上，玉山山脈屬於「西部麓山帶」，由砂、頁岩組成；與之相鄰的「中央山脈」則出露硬頁岩、板岩、千枚岩等輕度變質岩類，並夾少量玄武質火山岩(圖 8)。如此，作為一地質與地形的分界，約三分之二的荖濃溪或被認為沿斷層帶發育(林朝榮，1957)(圖 1)。此段荖濃溪溪谷，以下稱為「縱谷」，相對較直、較寬；溪床坡度也較緩。

荖濃溪位於熱帶季風區，年雨量 2500–3500 mm；這些降雨主要來自夏季季風與颱風，並常以豪大雨的型態出現(圖 9)。和台灣中、南部的其它山區一樣，荖濃溪地殼隆升快速。根據 2000 年至 2008 年的精密水準測量資料，此間溪谷(沿南橫公路)的抬升速率為每年 10–15 mm(Ching et al., 2011)。

研究區勤和村位於荖濃溪中游，海拔 570 m，距溪口(與楠梓仙溪的匯流口)六十公里，集水面積 540km²(圖 1, 4)。勤和村以上五公里長的河段共有 6 條支流匯入。右岸(東岸)，由北而南是為清水溪、布唐布那斯溪、與美秀溪；左岸(西岸)，計有玉穗溪、奇斯薩庫溪、與東莊溪匯入(圖 4)。此間主流盛行瓣狀河道；在莫拉克颱風之前，溪床寬 100~370 m，平均坡降 1.9%；基盤岩石斷續出露河岸，卻從未見於溪床面上。「曾文溪越域引水計畫」曾於 2004 年在引水隧道口旁進行鑽探，直到溪床面下二十公尺才鑽至基盤(Capart et al., 2010)。

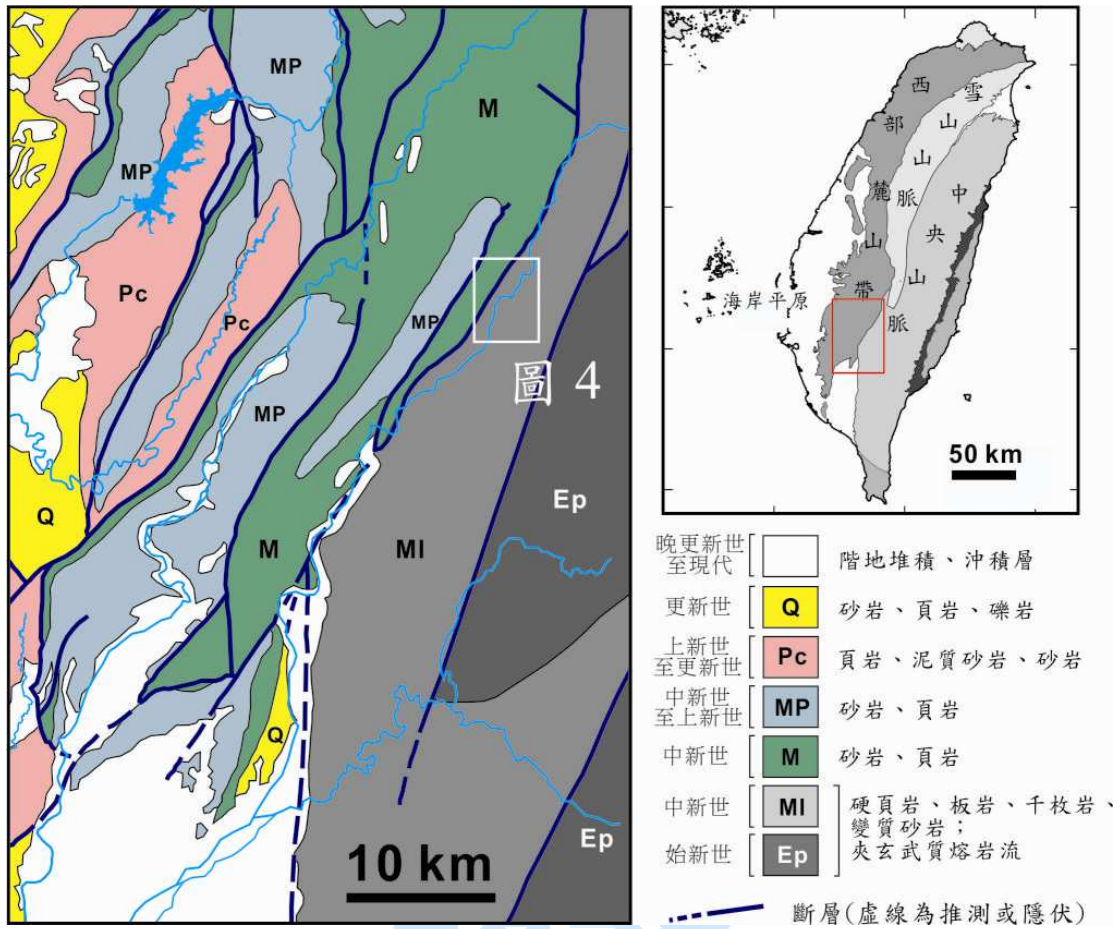


圖 8 荖濃溪一帶地質圖。研究區範圍如白框。修改自中央地質調查所(2000)。

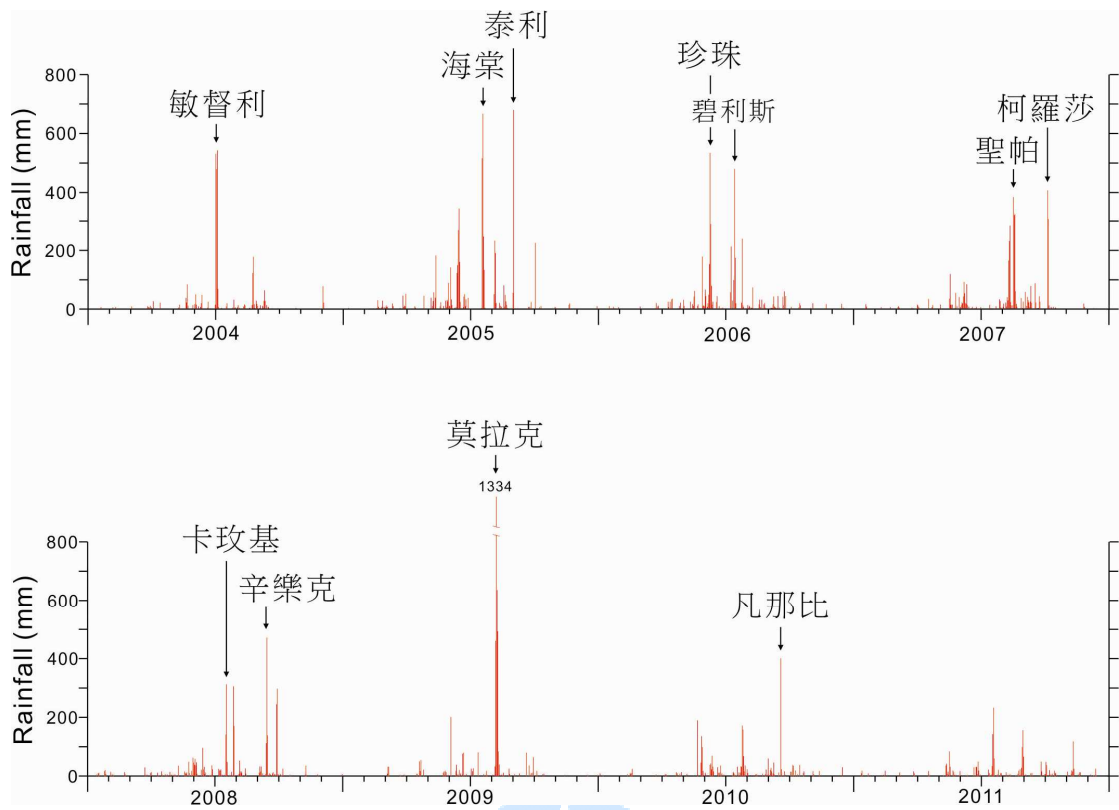


圖 9 荖濃溪梅山與高中水文站 2004-2011 年的日雨量紀錄。雨量站位置見圖 1。2008 年與 2011 年的紀錄來自梅山站，其餘來自高中站。造成豪大雨的颱風標示其中(資料來源：水利署水文年報)。

2.2 階地

2.2.1 概述

荖濃溪縱谷段早以階地地形的眾多與雄偉聞名(林朝榮,1957)。這些階地中，除了一般以河流營力為主形成的「河階」外(其階面傾斜方向約與溪谷走向一致)，還有一類位於支流匯口的階地，其階面傾斜角度較大，且方向發散，似為源於支流的沖積扇；這類型階地喚作「支流沖積扇階地」，或簡稱為「扇階」(Fan terrace or Alluvial terrace)(謝孟龍, 2007；Hsieh and Chyi, 2010)。幾乎每條進入荖濃溪縱谷的支流口都發育扇階，其中不乏寬數百公尺、比高超過一百公尺者(按：本研究定義階地的比高，乃階地「外緣」距河道的高度)。已知荖濃溪的扇階多由雜亂無章的土石流礫石組成，厚度由數十公尺至兩百多公尺；少數的扇階也已有定年資料；如位於勤和上游十二公里(梅山一帶)的「塔古夫庫拉」扇階(組成礫石厚達兩百公尺)，已產出4個三千多年前的碳十四年代(Hsieh and Chyi, 2010)。

扇階的形成反映了支流沉積物間歇性地供應(謝孟龍, 2007)。當這沉積物的供應速率超過主流的搬運能力時，河床堆積、沖積扇成長；而當支流沉積物的供應已低於主、支流的搬運能力時，河流下切，原先的沖積扇遂離水形成階地。台灣山區有不少現生扇階發育的例子，均導因於支流上源大規模山崩、土石流的活動(如第三章)：該山崩、土石流在很短的時間內大幅增加了支流土石的供應量；而當山崩、土石流停止後，支流土石的供應量又急遽地下降。如此形成的扇階——從土石的堆積到爾後河流的下切——可短至幾個月以內。現生扇階的比高常不及20 m，且在台灣河流快速的侵蝕下，壽命往往只有幾個月或幾年。如此，若要形成(與保存)更高、堆積物更厚的扇階，支流沖積扇發育時應要相伴規模更大、歷時更長的山崩、土石流事件。

2.2.2 研究區階地

研究區 6 條主要支流匯口都發育寬 >200 m 的大型扇階(圖 10)。最高者乃為位於主流左岸的「奇斯薩庫」扇階，在莫拉克颱風之前，比高可達 280 m。該扇階與梅山一帶的「塔古夫庫拉」，堪為荖濃溪最高的兩個階地。此間主流左岸的扇階整體高於右岸者：「奇斯薩庫」南方的「東莊」扇階，比高可達 220 m；北方的「玉穗」扇階，比高達 160 m。於對岸，「美秀」扇階比高最大 170 m；「布唐布那斯溪」與「清水」都為 80 m (以比高均為莫拉克颱風之前)；這三個位於主流右岸的階地因有較佳的剖面，成為本研究的重點(圖 11)。

「美秀」扇階可以美秀溪為界，分為南、北兩部分。南扇寬可達五百公尺，從溪口右岸沿主流延伸 1.3 km；越域引水的隧道口即位於該階地的最南部(莫拉克颱風之前比高約一百公尺)。「美秀」扇階的北扇大部分已因侵蝕而消失，僅殘留兩個向北傾斜(與主流流向相反)的階地，一位於美秀溪口左岸(莫拉克颱風之前比高約 150 m)，一位於更北方，與「布唐布那斯」的南扇銜接(圖 10, 11)。這兩個階地之間存有狹長階地(標示為 PT₂；圖 10)，莫拉克颱風之前比高約六十公尺。這階地可在野外辨識，但地圖與航照上並不明顯；莫拉克颱風大幅移除此間的植被後，確認該階地可向北延伸至「布唐布那斯」南扇 (圖 11)。

與「美秀」相比，「布唐布那斯」與「清水」扇階南、北較為對稱。「布唐布那斯」北扇與「清水」南扇沒入相同的階面(標示為 PC；圖 10)(即「布唐布那斯」北扇、PC、與「清水」南扇之間並無階崖相隔)。此外，在莫拉克颱風之前，沿布唐布那斯溪右岸，「布唐布那斯」南扇之下有狹長階地發育(標示為 PT₁；圖 10, 12)，比高二十多公尺(相對布唐布那斯溪)。

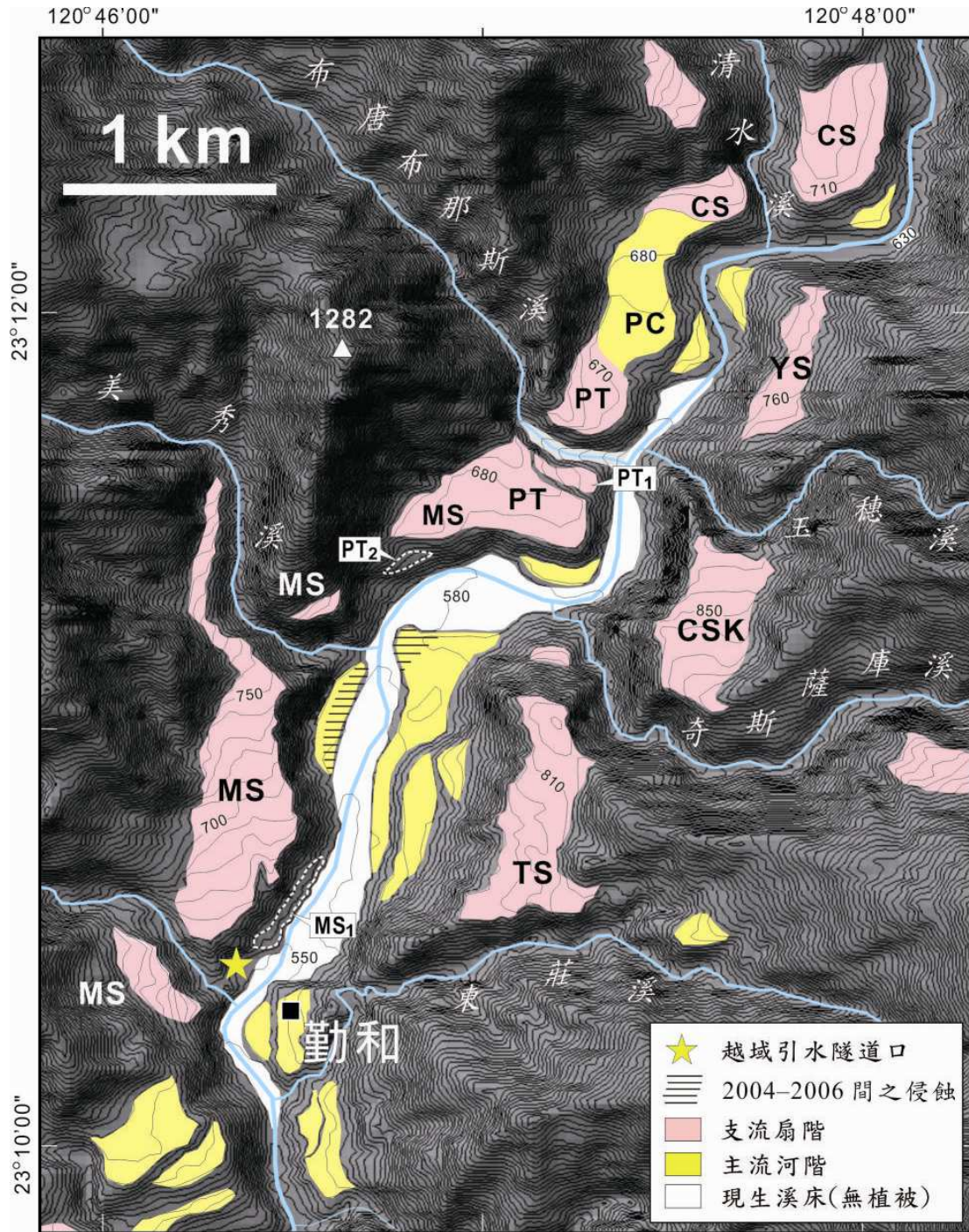


圖 10 研究區階地分布。底圖為 40 m DEM 等高線陰影圖(如圖 4)。階面之等高線(間距：10 m)已平滑化。清水溪左岸扇階(CS)之等高線根據經建版兩萬五千分之一地形圖。虛線大略圈出野外所認定，但地圖與航照上不清楚之階面(如 MS₁)。MS：「美秀」扇階；PT：「布唐布那斯」扇階；CS：「清水」扇階；TS：「東莊」扇階；CSK：「奇斯薩庫」扇階；YS：「玉穗」扇階。美秀溪口一帶主流階地 2004-2006 間的侵蝕也示於其中(新的溪床面根據 2007 年航照)。



圖 11 由美秀溪口南方半公里處北望荖濃溪谷。攝於 2006 年 10 月。扇階代號如圖 10；F:主流河階。最靠近鏡頭的兩個低位主流階地，2004 年敏督利颱風以來遭劇烈侵蝕。



圖 12 由荖濃溪左岸眺望布唐布那斯溪口。攝於 2008 年 2 月。扇階代號如圖 10。紅點為 Hsieh and Chyi(2010) 採樣點位置(編號如圖 13)。紅圈圈出站立於主流左岸的兩個人。注意:主流右岸的現生扇階(比高達 20 m;未覆植被),其礫石乃堆積於 2007 年。

前人對「美秀」、「布唐布那斯」扇階已有初步研究。黃美璇(2001)首先在 PT₁ 階地剖面得到 3760±40 BP 的碳十四年代(校正後為 4010–4230 cal BP)。同在 PT₁ 階地，Hsieh and Chyi(2010)得到 4 個年代，是為 modern (< 200 BP)、3720–3970、5610–5850、6320–6550 cal BP，其中 modern 年代與其它三個年代來自不同剖面(地點 9 與 10；圖 12, 13a)。Hsieh and Chyi(2010) 也發現，PT₁ 剖面隨時間經歷侵蝕後，出露不同的沉積相；因此認為，PT₁ 階地中存在著與剖面平行的侵蝕面——即該階地乃經歷多次下切、堆積、再下切事件而形成，且最後一次的大規模堆積發生於近兩百年內(圖 13b)。

Hsieh and Chyi(2010) 也在「美秀」南扇、北扇與 PT₂ 階地得到 4 個相近的年代：1350–1410、1350–1480、1350–1490 與 1340–1510 cal BP(地點 1–3 與 5；圖 14)；因此認為美秀沖積扇主要發育於約距今一千四百年前。且因「美秀」北扇與「布唐布那斯」南扇相連，相信後者的堆積也於距今一千四百年前結束。

除了扇階之外，研究區也不乏階面較緩、傾斜方向大致平行溪谷走向的階地。這些階地(至少其階面)顯然曾受主流作用，或稱為「主流河階」；勤和村即位於其一，比高三十多公尺(圖 10)(莫拉克颱風之前)。研究區的主流河階絕大多數低於前述六大扇階，並已有 modern (< 200 BP) 與 530–650 cal BP 兩筆定年資料發表(地點 4,6；圖 14b) (Hsieh and Chyi, 2010)。

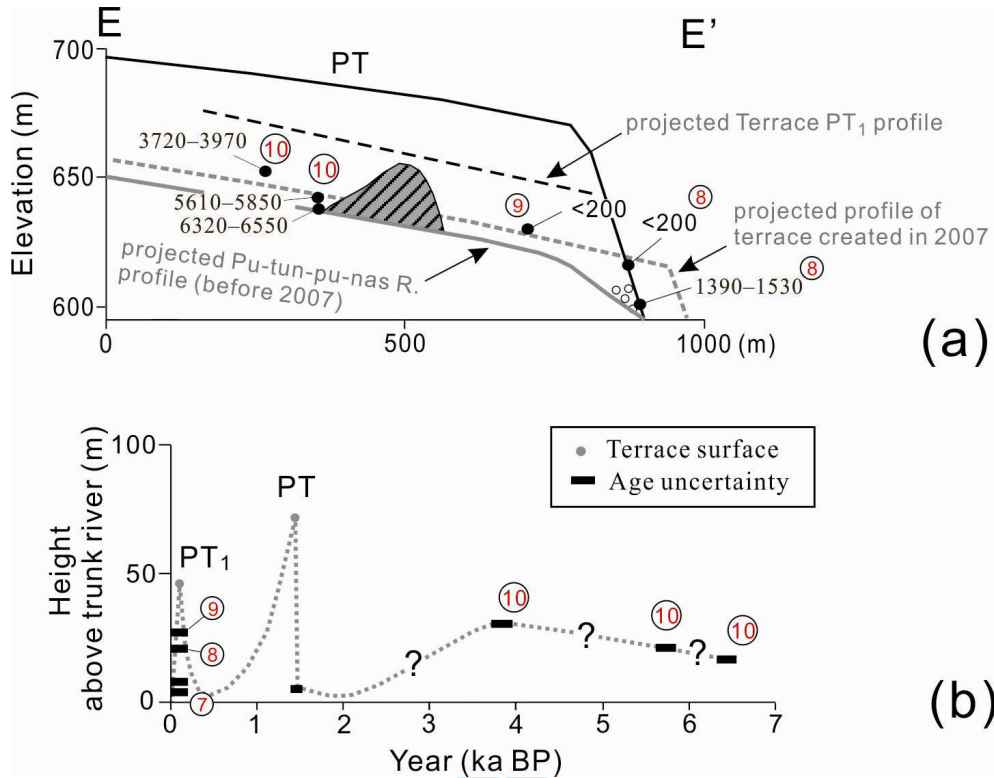


圖 13 既有「布唐布那斯」扇階系統的碳十四定年資料與解釋。修改自 Hsieh and Chyi(2010) 之 Fig. 14。(a)平行布唐布那斯溪的剖面。定年位置編號(紅色數字)已修改,使與本研究系統一致(詳細位置與進一步的描述見第四章)。(b)主流堆積、下切歷史的解釋。

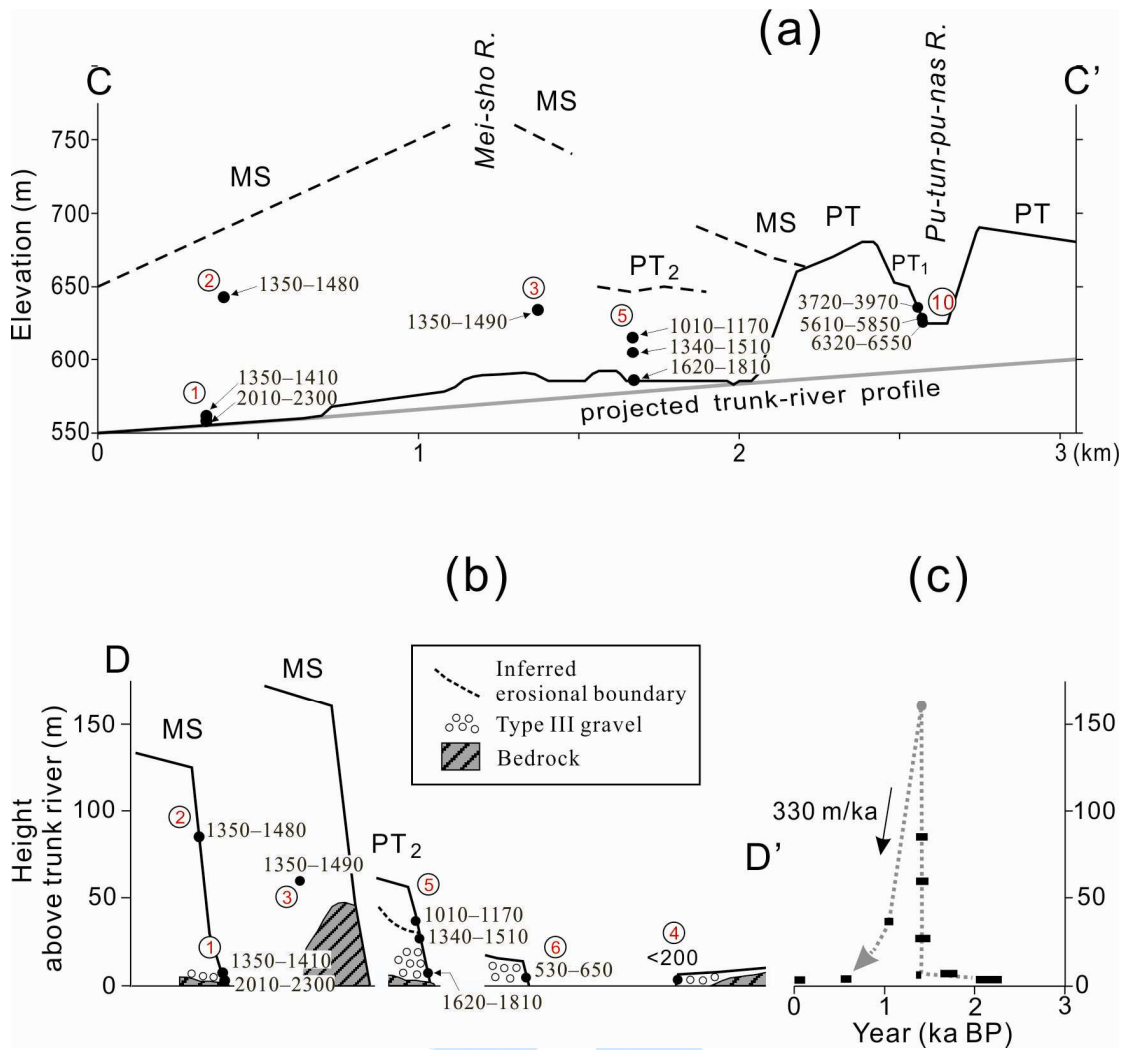


圖 14 既有「美秀」扇階與其鄰近階地的碳十四定年資料與解釋。修改自 Hsieh and Chyi(2010) 之 Fig. 13。(a)約平行主流的剖面。定年位置編號(紅色數字)已修改,使與本研究系統一致(詳細位置與進一步的描述見第四章)。PT₂在原始文獻中標記為 MS₁。(b)約垂直主流的剖面(即,將各產出定年的階地橫剖面沿主流投影至同一面上)。(c)所推論的河流堆積、下切歷史。

第三章、近期土石流與河流活動

3.1 莫拉克颱風之前

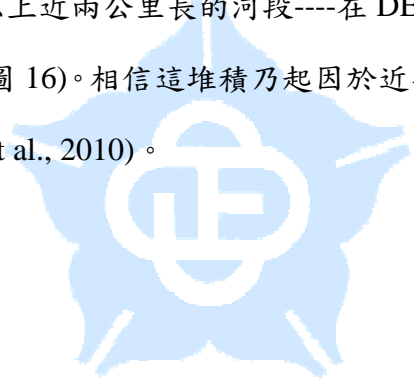
南橫公路(台 20)1972 年通車。此後的三十年之間，即使經歷了 1999 年的九二一地震，縱谷段的荖濃溪似從未傳出重大災情。這地形的穩定也反映在觀光事業的持續發展上——從寶來溫泉，勤和的少年溪遊憩區，到梅山及其以上之玉山國家公園。檢視 1970 年代與 1997 年航照也發現，當時的荖濃溪山坡植被覆蓋良好，少有山崩、土石流發生，除了布唐布那斯溪之外(圖 5)。

布唐布那斯溪應是近三十年來荖濃溪縱谷段，山崩、土石流最頻繁，且地形變遷最大的一條支流。按照日據時代手繪的圖像(富田芳郎繪；編輯於林朝榮，1957)，「布唐布那斯」扇階之下曾有寬廣的扇階發育(圖 15a)，如今這扇階早已不復存在(很可能即殘留為 PT_1 階地)。南橫公路興建後也屢遭布唐布那斯溪土石流的威脅——土石流迫使主流轉向，攻擊溪谷左岸邊坡，導致修築於其上之公路崩損(齊士崢，2002)。

縱谷段的荖濃溪似乎從 2004 年敏督利颱風開始進入了不穩定期 (Hsieh and Chyi, 2010)。該颱風重創了少年溪遊憩區；之後的幾年中，美秀溪口對岸及其南方的主流階地(曾開闢為遊憩區)均遭嚴重侵蝕(圖 10, 11)，研究區至梅山段溪谷也頻傳斷橋事件。在這段期間，布唐布那斯溪土石流的活動更加頻繁——屢屢發育沖積扇、堰塞主流河道；之後沖積扇成為扇階，扇階再被侵蝕消失，如此輪替(圖 15)。相信在洪水時，布唐布那斯溪大量土石的供應(使溪床加寬)，是導致其下游遊憩區大幅被侵蝕的主因；布唐布那斯溪沖積扇的堰塞也提高了主流洪水的水位，

似也間接促成其上游橋梁、河岸護坡的沖損。(按：本研究所謂的「堰塞」，乃指河道因沉積物的阻擋而流速顯著變緩的現象；在所觀察「主流堰塞」的案例中，主流溪水都能通過沖積扇緣繼續向下流，並未完全被阻塞；惟在通過扇緣時河道較陡，形成一遷急點。見 3.3 節之圖 21c)。

莫拉克颱風之前，布唐布那斯溪最具規模的土石流活動發生於 2007 年 9 月(或更早)(圖 15e)；所發育的沖積扇堰塞主流，生成一深達十公尺、延伸 1.5 km 的堰塞湖(Capart et al., 2010)。這堰塞湖卻在隔年二月之前潰壩消失；此時主流已下切沖積扇，留下一比高 20 m 的扇階(圖 15f)。該扇階在同年九月之前卻已幾乎被侵蝕殆盡(圖 15g)。比照 40 m DEM 資料與 2008 年 Capart et al. (2010) 的測量數據，布唐布那斯溪口以上近兩公里長的河段----在 DEM 資料製作完成後----似已有高達十公尺的堆積(圖 16)。相信這堆積乃起因於近年來布唐布那斯溪大量且持續的土石供應(Capart et al., 2010)。



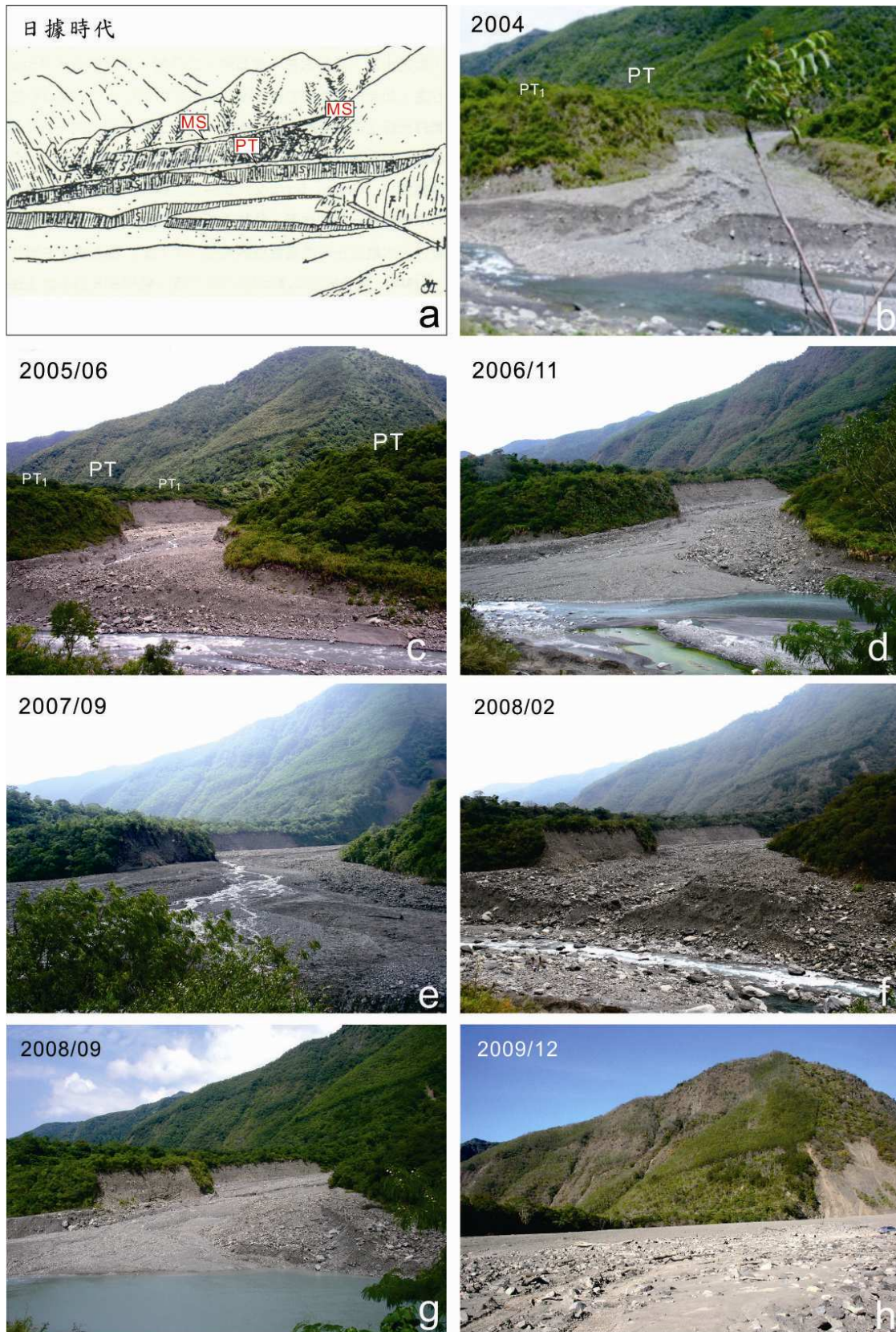


圖 15 布唐布那斯溪口的地形變遷。各圖左上標示拍攝年月或時代。圖 a 修改自林朝榮(1957)之第一六二圖(由清水扇階遙望美秀(MS)與布唐布那斯(PT)扇階)。圖 b 拍攝者為徐濤德教授(台大地質科學系)。圖 f 同圖 12。

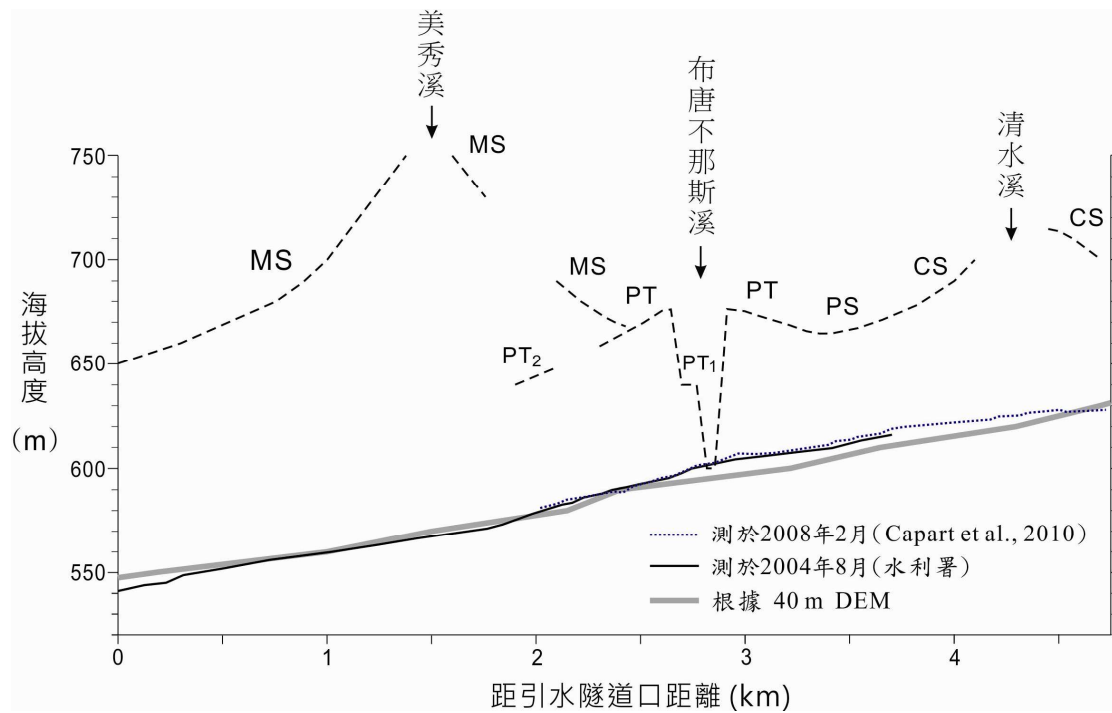


圖 16 研究區荖濃溪縱剖面。沿溪谷中軸線。背景虛線為右岸三大扇階外緣的投影。扇階代號如圖 10。



3.2 莫拉克颱風

2009 年莫拉克颱風引發荖濃溪廣泛的山崩、土石流，超量的岩屑供應並造成主流河床顯著的堆積(圖 17-20)。按 Cheng (2011)在颱風後(2010 年 2 月)的測量，研究區主流河道估計堆高了 20-30 m (圖 17)，河床也因此加寬至 150-600 m。土石流的活動也使美秀、布唐布那斯、清水三條支流溪谷顯著地變寬；布唐布那斯與清水溪口甚至發育大型沖積扇(圖 20)。位於布唐布那斯溪口的沖積扇——埋沒了 PT₁ 且扇端和「布唐布那斯」扇面僅十公尺高差(圖 15h, 20b, 20c)——很可能是全台灣山區現生沖積扇中規模最大的一個。根據當地居民的描述，當主流大幅堆積、越域引水隧道口遭礫石淹埋之後，荖濃溪水曾顯著減少甚至枯竭(於 8 月 9 日)，推測當時主河道已被布唐布那斯與清水溪口的沖積扇堰塞。同日，堰塞湖潰壩，潰流溪水形成的洪峰幾乎淹入勤和村。

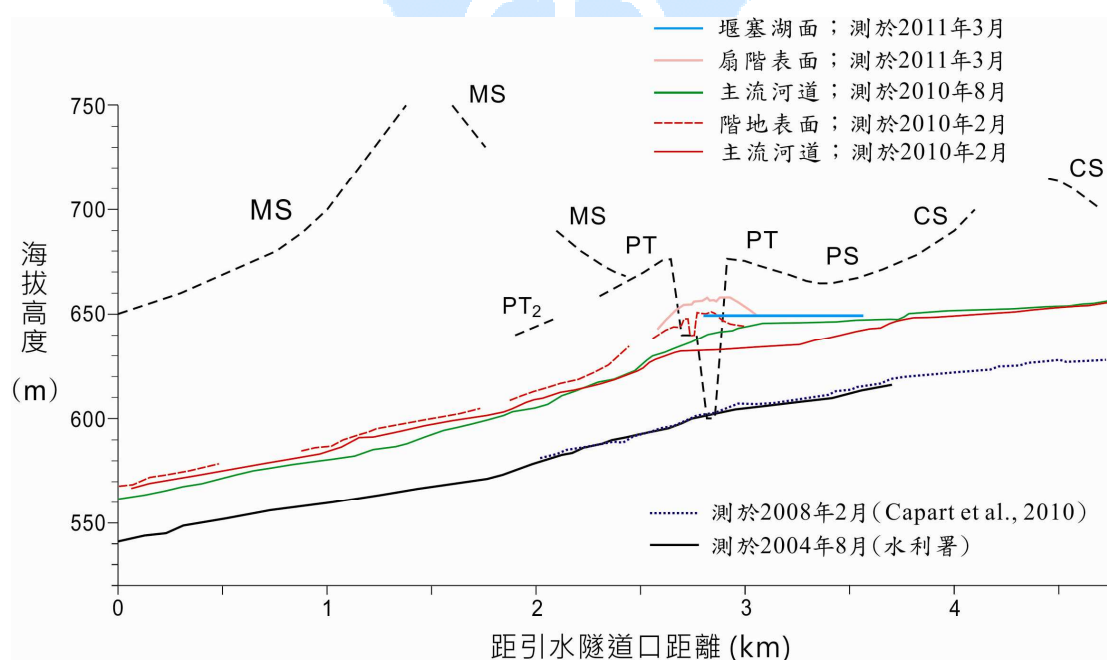


圖 17 莫拉克颱風後研究區河床剖面的測量(投影至溪谷中軸線)。修改自 Cheng (2011)。其它說明如圖 16。

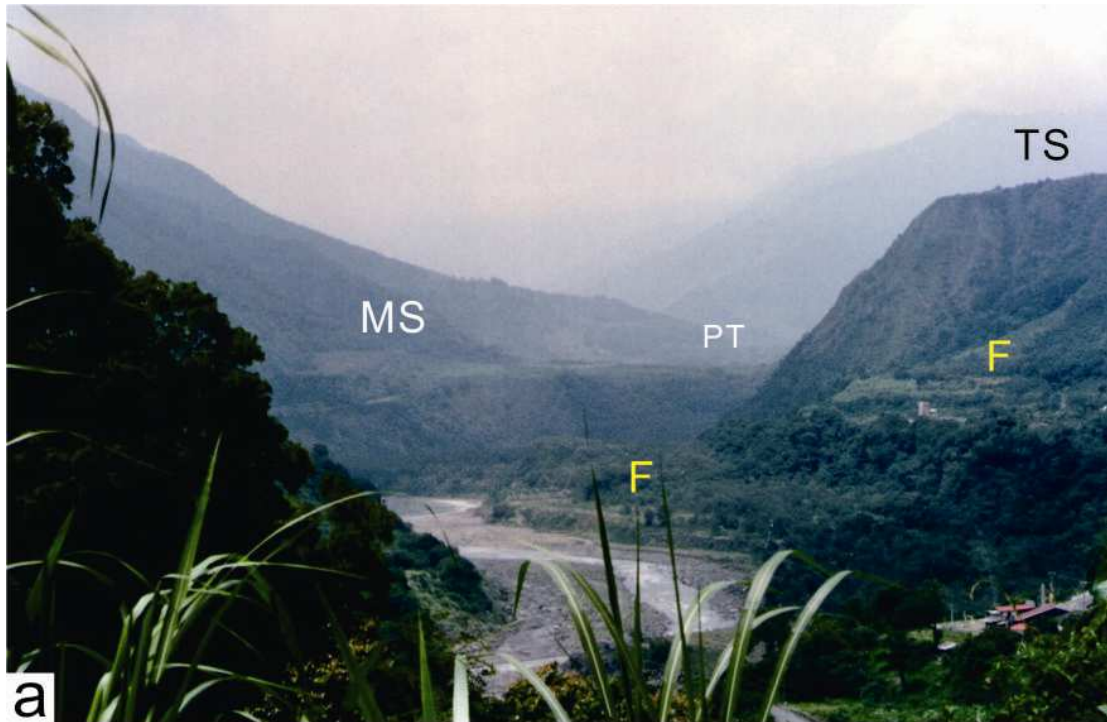


圖 18 由勤和南方之桃源階地遠眺荖濃溪溪谷(望向上游)。扇階代號如圖 10；F: 主流河階。(a)攝於 1994 年。(b)攝於 2010 年 1 月。前景的村莊為勤和。

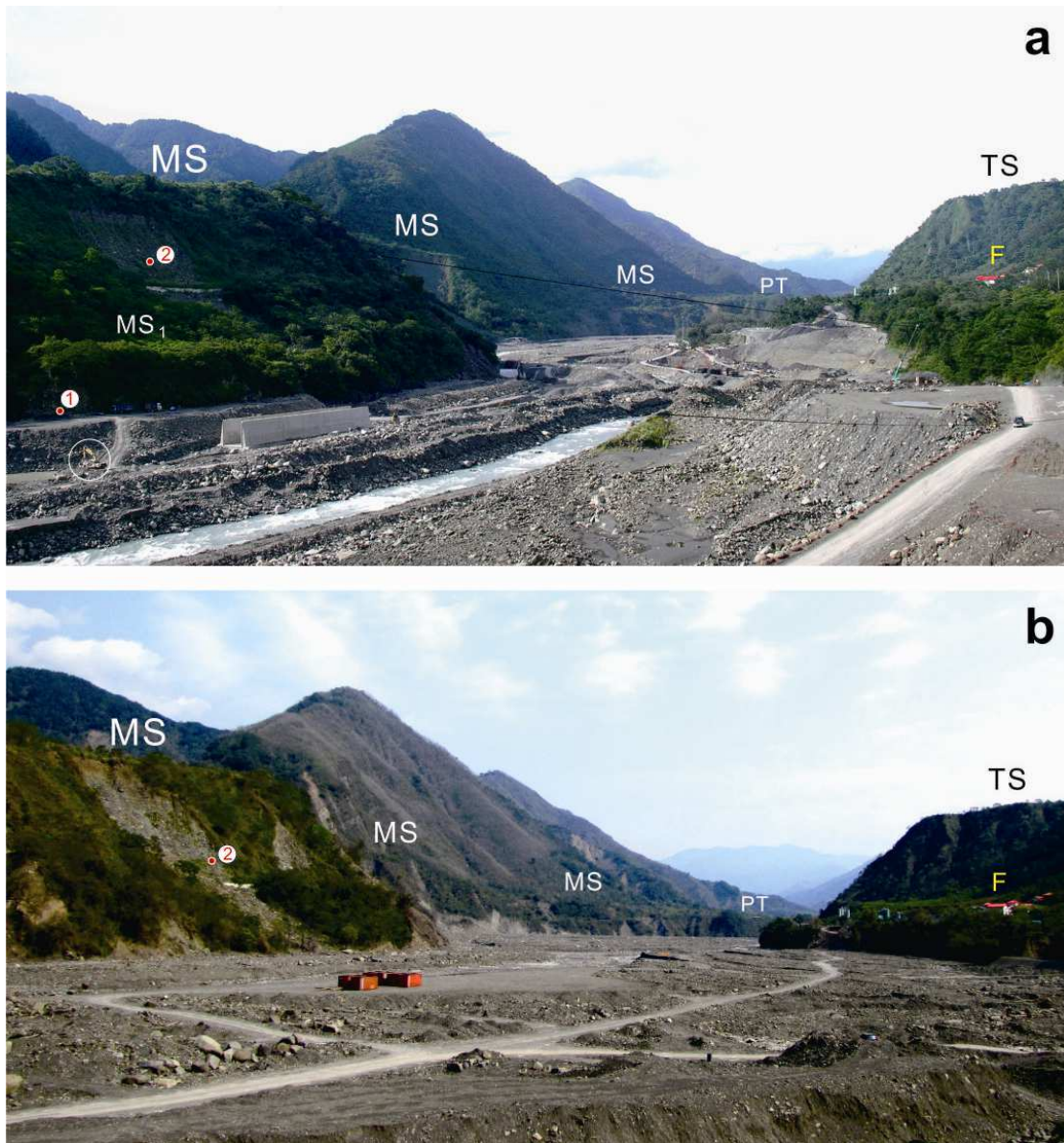


圖 19 從勤和村北望荖濃溪溪谷(望向上游)。扇階代號如圖 10；F:主流河階。(a) 攝於 2009 年 7 月 31 日(莫拉克颱風前 8 天)。當時引水道工程正施工中。圈出者乃作為比例尺的挖土機。紅點為 Hsieh and Chyi(2010) 採樣點位置(編號如圖 14)。(b)攝於 2010 年 3 月。

颱風後，主流下切。隔年二月之前，颱風時堆積的河床多已形成數公尺高的階地(圖 17, 20)。惟這段期間布唐布那斯溪仍有小規模的土石流活動，在先前的沖積扇之下形成小沖積扇(多攜帶泥與較細粒的礫石)(圖 20c)。沿主流，布唐布那斯與清水兩沖積扇上游河段均出現連續性佳的片狀砂層，間夾於粗粒礫石之中，相信這些砂層(最厚 6m)乃堆積於主流堰塞之時(圖 20)。



圖 202010 年 2 月之前，布唐布那斯沖積扇發育及其相關之堰塞湖砂層堆積。(a)~(d) 望向荖濃溪下游；(e)望向上游。階地代號如圖 10。(a)2007 年生成之堰塞湖。攝於 2007 年 9 月。箭頭指出沖積扇位置(參見圖 15e)。(b)位置同圖 a，所見之沖積扇形成於莫拉克颱風。攝於 2009 年 12 月。注意：前景廣布的砂層。(c)圖 b 之近照。攝於 2010 年 2 月。莫拉克颱風形成之沖積扇已被主流切蝕，但新的沖積扇(箭頭所指；組成物質較細粒)仍發育中。(d)沖積扇遠端剖面，露出土石流礫層與片狀砂層。(e)遠離沖積扇，砂層可厚至 6 m，呈現平行層理或低角度交錯層。圖 d 與 e 均攝於 2010 年 2 月。注意：圖 c~e 現生溪床廣布砂層，顯示莫拉克颱風之後，布唐布那斯溪新發育的沖積扇仍曾小幅度堰塞主流。

3.3 莫拉克颱風之後

莫拉克颱風過後，直到 2011 年結束，日雨量 >300 mm 的降雨僅發生於凡那比颱風(2010 年 9 月 19 日)(高中水文站紀錄；圖 9)。即使如此，土石流依然源源流出布唐布那斯溪(圖 20c)；如此中斷交通，甚至堰塞主流。本研究即目睹兩個大型堰塞湖的存在(湖面均由布唐布那斯扇緣延伸至清水溪口)：一見於 2010 年 7 月 18 日(同年 8 月 25 日之前已消失)；一見於 2011 年 4 月 22 日(同年 3 月 27 日之前即已存在；Cheng, 2011)(圖 21)。這兩個時間點之前並無大雨：2010 年 6 月 1 日至 7 月 18 日，僅 6 月 13 日雨量達 69 mm，其餘降雨天雨量均 <40 mm；2011 年三、四月之前數個月更是乾季(圖 9)。如此看來，較小的降雨(乾季)似乎比大雨(濕季)更有利堰塞湖的生成。相信這個現象乃反映：(1)乾季時主流流量(水力狀況)太小，不足以切穿沖積扇壩體；(2)以現今布唐布那斯溪流域的狀況，少量的降雨即可源源觸發土石流的發生。

莫拉克颱風之後，布唐布那斯沖積扇已經歷多次的成長、下切循環，但整體而言似仍在擴大、增積中(圖 17, 20-23)。布唐布那斯沖積扇的成長也促成其匯口上游主流河床的加積(其下游則或有下切的現象)。如根據 Cheng (2011)的測量，2010 年 2 月至 8 月間(該年 7 月所見之堰塞湖潰壩之後)，沖積扇上游近一公里的主流河段產生明顯的堆積----近沖積扇端最厚，可達十多公尺，並向上游變薄(圖 17)。

2011 年冬至隔年春天似乎是布唐布那斯溪較為穩定的時期。該溪也於 2012 年初開始進行疏濬、整治，興建攔砂壩並設置壘石護岸。2012 年 6 月 11 日，西南氣流引發的豪大雨卻又使彼沖積扇大幅成長，其扇頂土石甚至溢過「老」「布唐布那斯」扇面，致使河流改道向南，切穿「布唐布那斯」南扇(圖 23c)。從此，直到 2013 年 3 月(本研究最後一次野外調查)，布唐布那斯溪河道未再擺回原來

的扇面，而新的沖積扇也已在新溪口發育(圖 23d)。2012 年 6 月 11 日布唐布那斯沖積扇的成長應也曾堰塞主流，如此造成沖積扇上游河段廣泛的砂層堆積(最厚約 5m)。相信這堰塞的過程是短暫的，一如莫拉克颱風之時。



圖 21 2010 年 2 月之後，因布唐布那斯沖積扇發育形成之堰塞湖。階地代號如圖 10。(a)、(b)攝於 2010 年 7 月 18 日，分別望向荖濃溪下游與上游。圖 b 顯示：即使在乾季且無土石流破壞，溪床便道也常因堰塞湖的擴大而中斷。(c)攝於 2011 年 4 月 22 日；望向荖濃溪上游(立於「奇斯薩庫扇」階崖施工中的公路上)。至少三期土石流可被分辨，由老至新各形成 Fan 1, Fan 2, Fan 3 沖積扇葉。(d)俯視圖 c 的三個沖積扇葉。

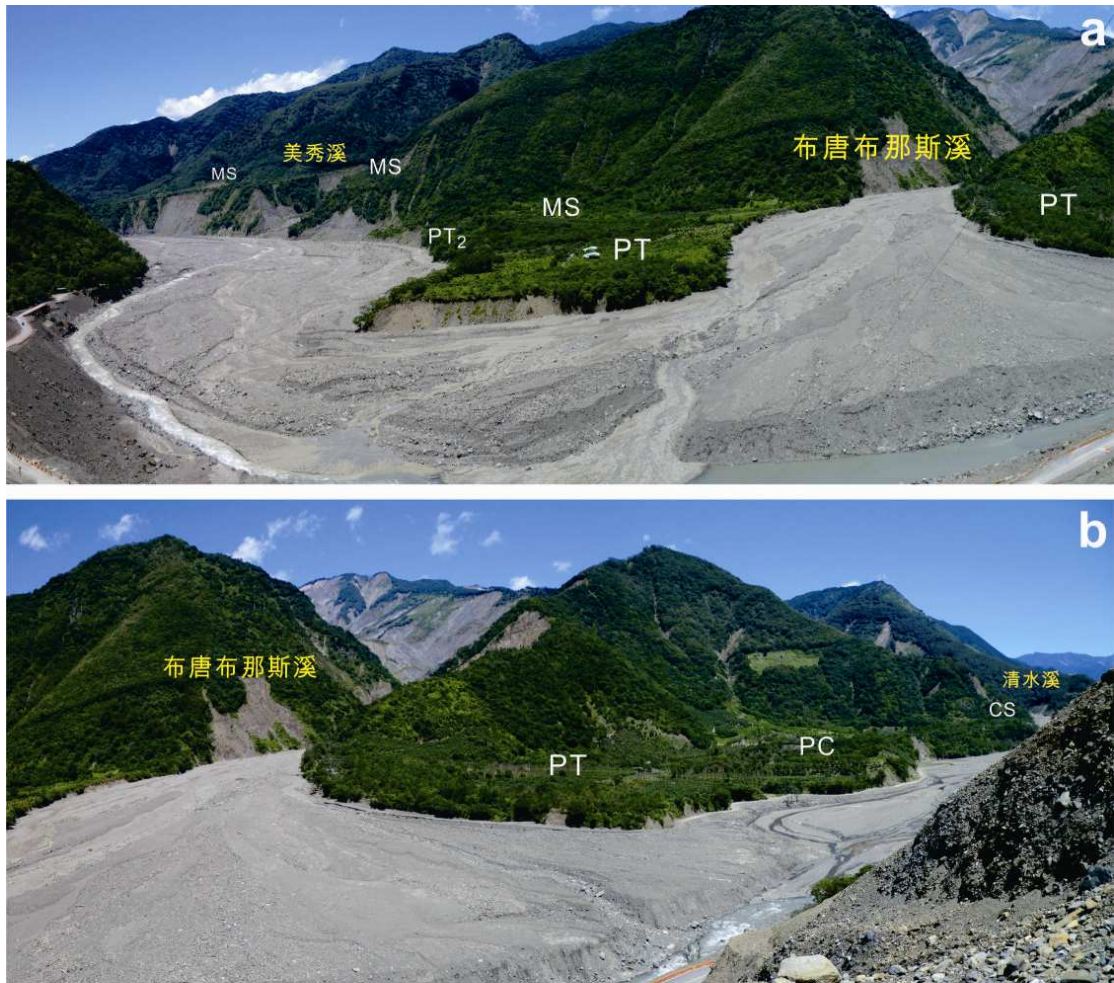


圖 22 2011 年 8 月研究區右岸全景(立於「奇斯薩庫扇」階崖拍攝)。同年 4 月所見之堰塞湖(圖 21c)已消失，主流下切。階地代號如圖 10。



圖 23 布唐布那斯沖積扇近兩年來的變遷。各圖左上標示拍攝年月。階地代號如圖 10。(a)主流下切後，新的沖積扇持續發育中(參見圖 22)。(b)沖積扇不只一次的成長、下切循環，造成多重扇階。(c)土石已溢過，並進而切過「老」布唐布那斯」扇面。(d)新溪口(面向正南)已發育新的沖積扇。

為了永久避開布唐布那斯溪沖積扇(及其產生之堰塞湖)的活動，南橫公路也曾改線，轉沿「奇斯薩庫扇」階崖重建。該公路於 2012 年初完工通車，卻毀於 2012 年 6 月的豪大雨(圖 24)。當時，大幅成長的布唐布那斯沖積扇迫使主流攻擊對岸坡腳，進而淘空路基——重演十多年前的歷史。同日，大量土石的供應(許多來自研究區上游)也使全研究區河段顯著堆積(達數公尺)，並嚴重破壞勤和一帶的南橫公路。

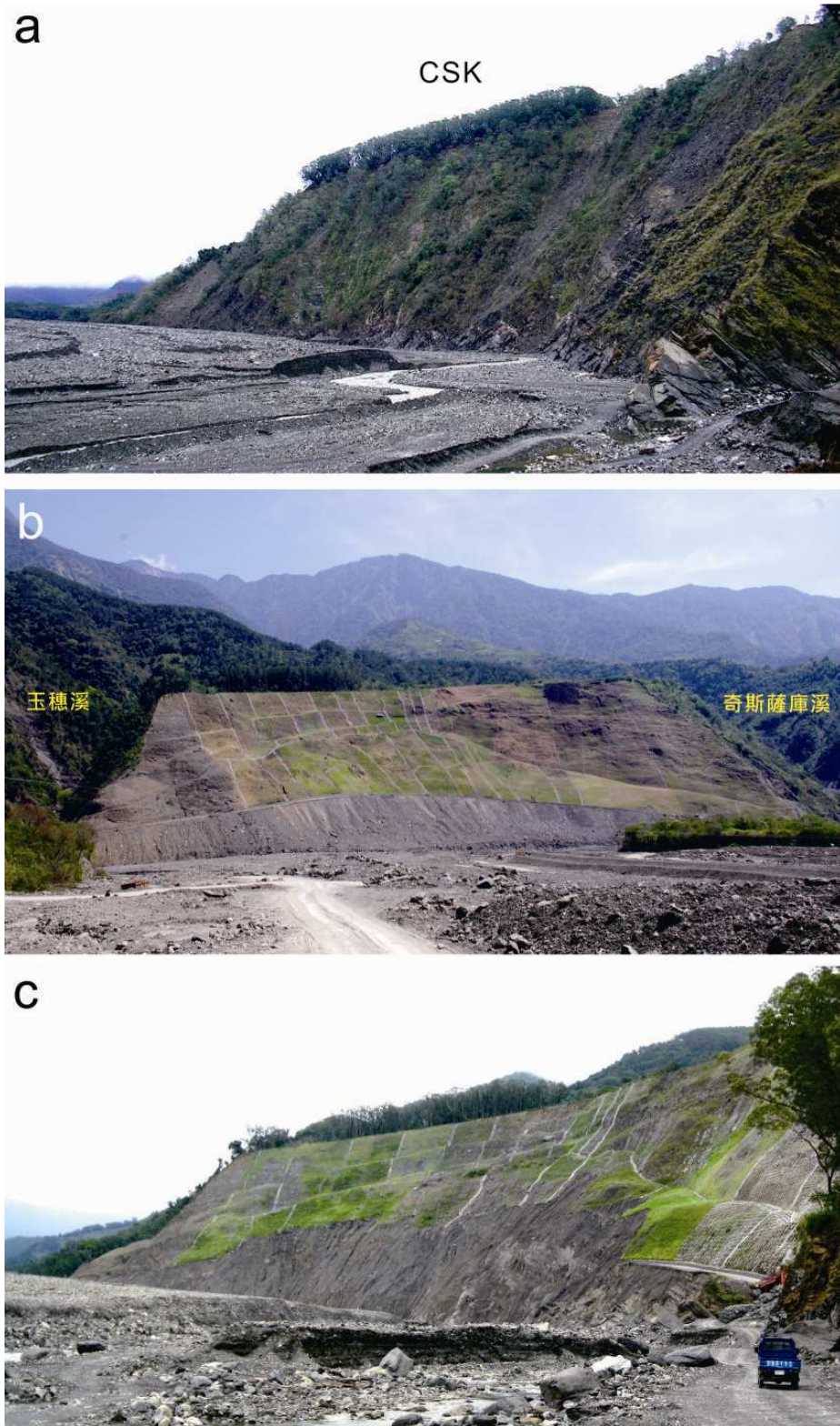


圖 24 「奇斯薩庫扇」(CSK)階崖今昔。(a)攝於 2010 年 2 月，望向荖濃溪上游。(b)攝於 2012 年 3 月，由對岸(布唐布那斯溪)遠望。沿階崖興建的公路已通車(僅剩護坡工程仍進行中)。(c)攝於 2012 年 7 月。興建完成的公路如今僅部分護坡工程殘存。

第四章、沉積剖面觀察與定年結果

4.1 沉積相區分

研究區現生溪床的沉積物，無論是主流或支流，都以中粒(cobble)、細粒(pebble)礫石為主。支流溪床與沖積扇上的礫石絕大多數呈次稜角狀(subangular)；主流溪床則含有大量圓磨(Rounded)與次圓磨(Subrounded)的礫石。主流圓磨礫石中，有部分岩性為變質岩(如變質岩砂岩或綠色岩)，這些變質岩屑則未見於美秀、布唐布那斯、清水等三條源自玉山山脈的支流。現生主流溪床也不乏連續性佳的砂層，出現於河灘高處，或砂洲之間乾枯的河道或窪地上；前者，可厚至一公尺以上，應堆積於主流堰塞之時(即高水位期間)(圖 20)；壽命較長的堰塞湖(如圖 21)乾涸後，原本的湖邊甚至出現泥層。位於溪床低處的砂層應堆積於較低水位之時(即洪水事件的末期)，其厚度可能較薄(此時沉積物的供應與搬運速率應已大幅降低)。這些砂層(有時覆蓋薄泥層)因受限於周遭地形，往往連續性差，但也有例外；如美秀溪口與 PT₂階地之間，沿溪床邊緣窪地曾堆積一連續上百公尺、向下游緩傾的砂層(圖 25)。

參照以上現生溪床的觀察，本研究將出露於「老」階地或山坡的沉積層區分為三個沉積相：支流礫層、主流礫層、與主流砂層。

[支流礫層(G1)]主要由次稜角狀的中粒、細粒礫石組成；雜亂、富含泥質基質(matrix) (圖 26a)。遠觀之，常因顏色(灰色或黃色)、粒度大小、或基質多寡而分層；單一礫層無層理，層厚數十公分至數公尺以上；層與層的界線也多模糊(漸變)。推論這些礫層主要為土石流的產物。本礫層也偶夾砂層；這些砂層多薄

(< 10 cm 厚)，呈透鏡狀；但也有厚數十公分，呈現平行層理，且側向連續百公尺以上者。相信這些砂層主要堆積於土石流結束之後的小水流。部分的砂層具有正粒級(normal grading)，或夾具正粒級的小礫層(圖 26b)，暗示其可能經由重力流堆積於小池塘中(圖 25)。本礫層廣布於研究區各支流扇階，最厚可達兩百公尺(見於「奇斯薩庫」扇階)，其中所夾之植物碎片(圖 26a)為本研究碳十四定年標本的主要來源。



圖 25 堆積於美秀溪口與 PT₂ 階地之間的砂層(表面覆蓋一薄泥層)。望向荖濃溪下游。攝於 2010 年 3 月。此地遠離主河道。主河道因大量粗粒物質的堆積而加高，遂讓此地成為一窪地(很可能曾是池塘)。攝影者：台大地質科學系徐志煌先生。

[主流礫層(G2)]與支流礫層相比，本礫層含有較多圓磨與次圓磨的礫石(有些剖面即以圓磨、次圓磨礫石為主)，其中常有變質砂岩或綠色岩礫。本礫層甚少含泥(若有基質，也多為砂質)；常因顆粒大小的不同，或夾片狀砂層，而呈現層理；單一礫層多不及數十公分厚(幾顆礫石的厚度)，呈透鏡狀，或有疊瓦狀構造。以上特徵顯示，本礫層的堆積----相較於支流礫層----受水流作用的影響較大。本礫層主要出露於主流階地(圖 27)，但也見於一些扇階的下半部。多呈黃色(氧

化顏色) (圖 27)，但也有呈灰色者，甚至含泥(未被氧化；可能是土石流，或其它快速堆積的結果)；後者或含植物碎片，作為碳十四定年之材料。



圖 26 典型之支流礫層近照。(a)出露於「美秀」南扇剖面的土石流礫層(地點 14；圖 29)。箭頭指出一小植物碎片，定年結果為 1410–1520 cal BP。(b)夾於土石流礫層中的片狀砂層(「美秀」北扇，S₁砂層；圖 32b)。注意：砂層中之正粒級(normal grading)構造。



圖 27 出露於美秀溪口對岸主流階地的礫層。攝於 2012 年 7 月。箭頭指出作為比例尺的人。

[主流砂層(S)]本砂層泛指大於(或接近)一公尺厚的片狀砂層。相信研究區以礫石為主的沉積環境中，能堆積如此厚層的砂層，必要伴隨河道的堰塞，一如

現生溪床所觀察者。本砂層主要出現於 PT₂ 及其相鄰的坡地(最厚 4 m)，銜接「布唐布那斯」北扇的 PC 階地也見其蹤。本砂層多呈灰色，富含植物碎片（如現生之堰塞砂層），為本研究碳標本的重要來源。

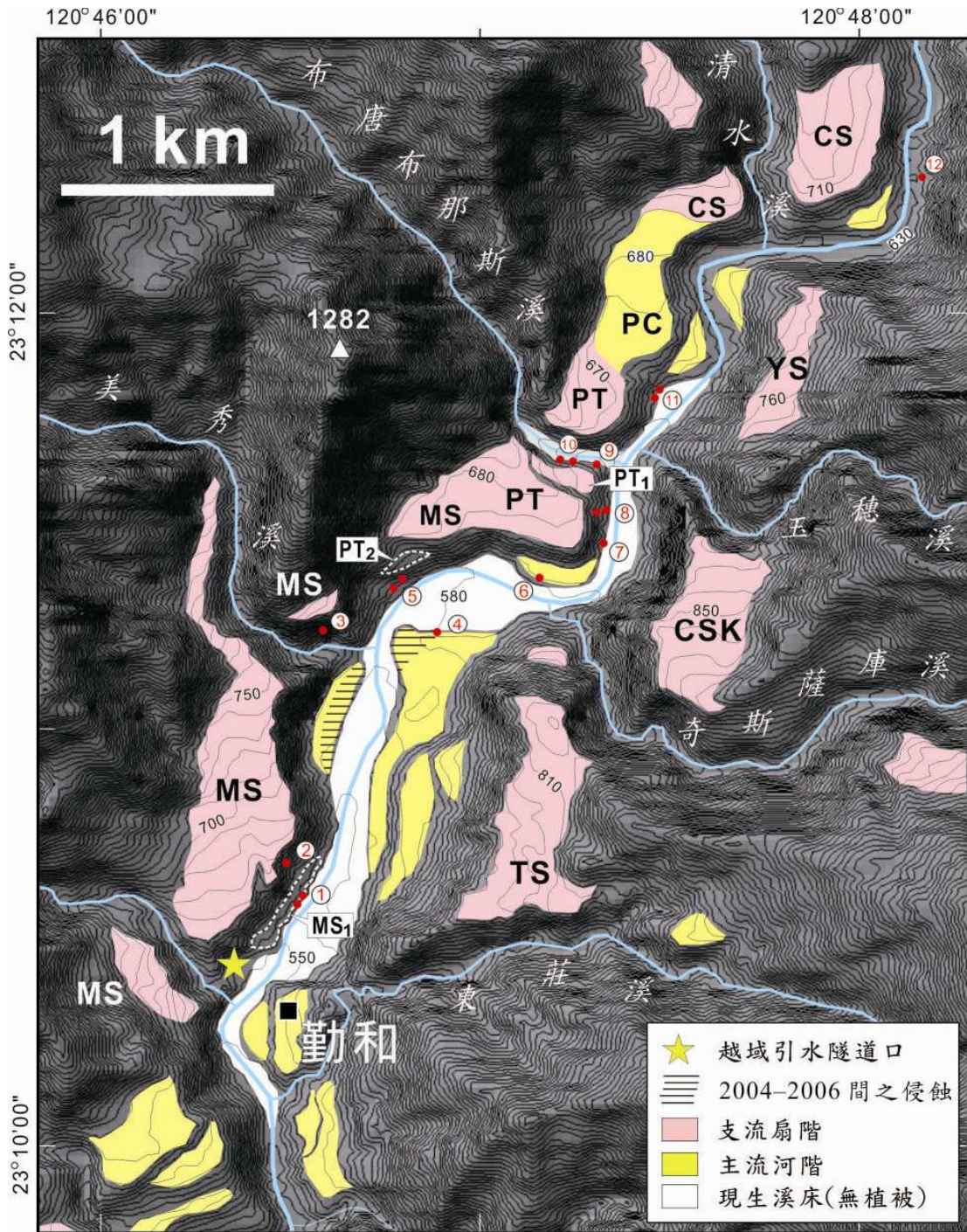


圖 28 本研究定年標本採樣位置(莫拉克颱風之前)。年代見表一。其它說明如圖 10。

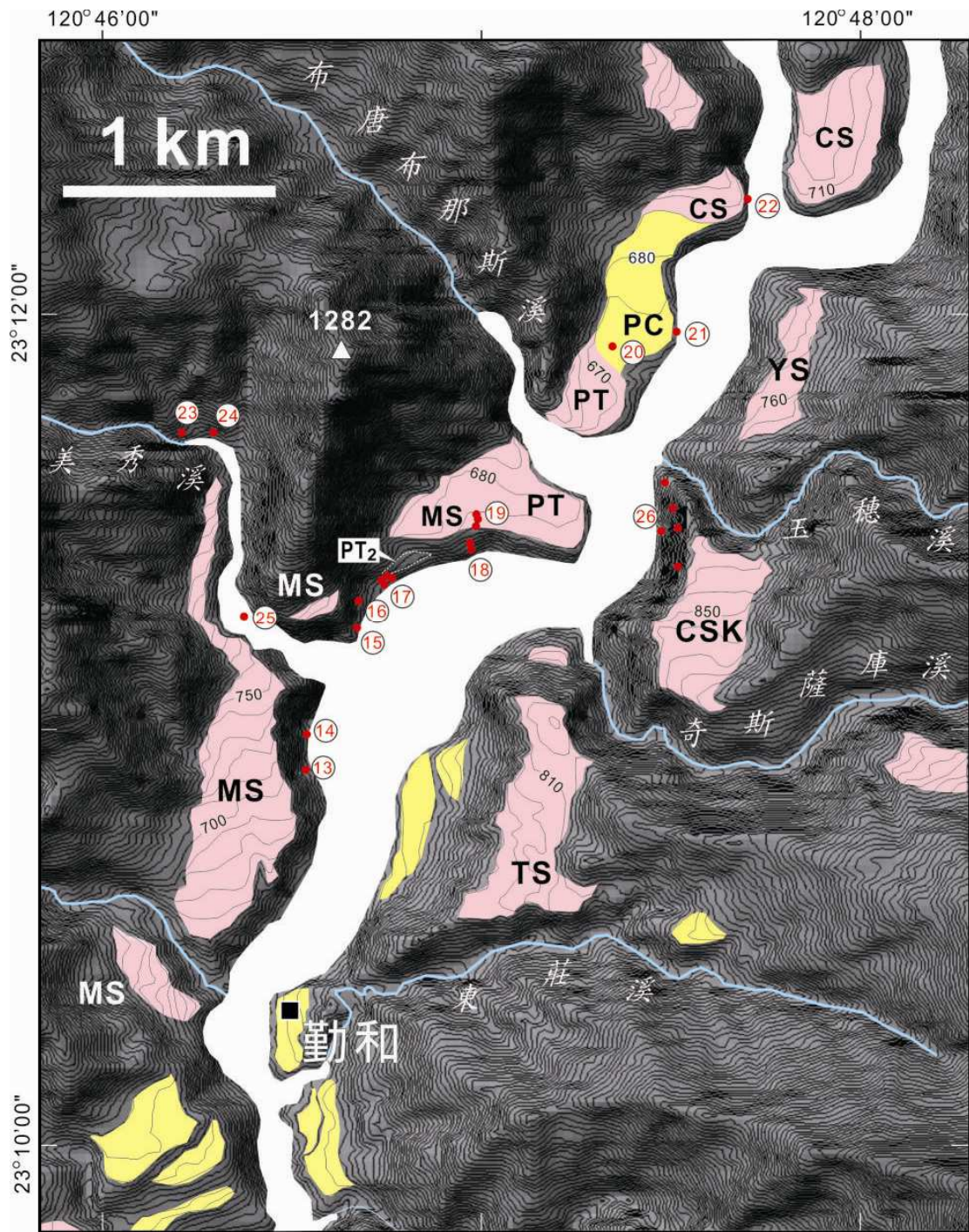


圖 29 本研究定年標本採樣位置(莫拉克颱風之後)。年代見表一。現生溪床(active river bed；白色區域)根據 2010 年 Google Earth 衛星影像(圖 7)。其它說明如圖 10。

(表一) 研究區碳十四定年資料

地點 ^a	¹⁴ C 年代 (BP)	實驗室 編號 ^b	校正年代 ^c (cal BP)	標本 種類	比高 ^d (m)	沉積相 ^e	資料來源 ^f
<u>標本採集於莫拉克颱風之前:</u>							
1	1500±30	NTU-4859	1350-1410	漂木	6	G1	A
	2140±50	NTU-4864	2010-2300	漂木	3.5	G2	A
2	1513±32	Wk-20461	1350-1480	草本植物	85	G1	A
3	1520±32	Wk-20460	1350-1490	草本植物	60	G1	A
4	modern	NTU-2190	--	漂木	5	G2	A
5	1160±40	Beta-207698	1010-1170	草本植物	37	G1	A
	1510±60	NTU-4388	1340-1510	漂木	27	S	A
	2088±32	Wk-27680	2000-2110	漂木	11	G2	本研究
	1780±70	NTU-4390	1620-1810	漂木	7	G2	A
6	580±90	NTU-4445	530-650	漂木	5	G2	A
7	modern	NTU-4387	--	漂木	8	G1	A
	modern	NTU-4449	--	漂木	4	G1	A
8	modern	NTU-4868	--	漂木	18	G1	A
	1570±70	NTU-4447	1390-1530	漂木	5	G2	A
9	modern	NTU-4869	--	漂木	20	G1	A
10	3560±70	NTU-4373	3720-3970	漂木	52	G1	A
	4970±70	NTU-4446	5610-5850	漂木	47	G1	A
	5670±80	NTU-4374	6320-6550	漂木	45	G1	A
11	380±30	NTU-4858	330-500	漂木	9	S	本研究
	333±28	Wk-32801	320-460	漂木	9	S	本研究
	270±75	NTU-4863	150-460	漂木	14	S	本研究
12	1110±40	NTU-4447	970-1060	漂木	5	G2	本研究
<u>標本採集於莫拉克颱風之後:</u>							
13	1556±29	Wk-32959	1410-1520	漂木	41	G1	本研究
14	1850±50	NTU-5449	1720-1860	漂木	32	G1	本研究
15	1580±50	NTU-5595	1410-1520	漂木	35	S	本研究
	1740±50	NTU-5594	1570-1710	漂木	35	S	本研究
16	1523±25	Wk-36249	1360-1520	漂木	70	G1	本研究
17	1521±34	Wk-32800	1350-1490	漂木	49	S	本研究
	1557±25	Wk-34855	1410-1520	漂木	48	S	本研究
	893±31	Wk-27683	740-900	草本植物	48	G1	本研究
	1484±25	Wk-36247	1340-1390	草本植物	41	S	本研究
	261±25	Wk-36248	160-420	草本植物	44	G1	本研究
	380±40	NTU-5808	330-500	草本植物	44	G1	本研究

18	1431±39	Wk-29150	1300–1350	漂木	46	S	本研究
	1598±40	Wk-27681	1420–1530	漂木	39	S	本研究
	1765±33	Wk-27682	1620–1720	漂木	37	S	本研究
19	1660±50	NTU-5423	1520–1690	漂木	36	S	本研究
	258±25	Wk-32799	160–310	草本植物	70	G1	本研究
	310±50	NTU-5437	300–450	草本植物	65	G1	本研究
20	299±30	Wk-32798	300–430	漂木	60	G1	本研究
	189±33	Wk-29152	0–290	草本植物	52	S	本研究
	1331±30	Wk-27255	1190–1300	漂木	33	G1	本研究
22	1340±40	NTU-5298	1190–1300	漂木	60	G1	本研究
23	1520±50	NTU-5371	1350–1510	漂木	5	G1	本研究
24	1460±50	NTU-5375	1310–1380	漂木	25	G1	本研究
25	1600±50	NTU-5409	1420–1530	漂木	1	G1	本研究
26	4750±30	Wk-31781	5470–5580	漂木	190	G1	本研究
	4920±50	NTU-5520	5600–5710	漂木	173	G1	本研究
	4930±50	NTU-5519	5600–5710	漂木	170	G1	本研究
	4978±38	Wk-34869	5650–5740	漂木	146	G1	本研究
	4980±50	NTU-5543	5630–5850	漂木	107	G1	本研究
	4902±27	Wk-34868	5600–5640	漂木	100	G1	本研究
	7378±37	Wk-32961	8170–8300	草本植物	80	G2	本研究
	7537±35	Wk-29154	8340–8390	漂木	50	G1	本研究

^a 標本地點參照圖 28、圖 29。

^b 定年實驗室之標本編號：NTU = 國立臺灣大學；Wk = the University of Waikato；Beta = Beta Analytic, INC.

^c 利用 CALIB 6.0 程式校正(取一個標準差之區間) (Reimer et al., 2009)。

^d 地點 23–25 相對於 2010 年支流河床的高度，其它相對於 2008 年主流河道高度。

^e 標本所在之沉積相：G1 = 支流礫層；G2 = 主流礫層；S = 主流砂層。

^f 資料來源：A = Hsieh and Chyi (2010)。

4.2 分區描述

4.2.1 「美秀」南扇 (地點 1, 2, 13, 14)

「美秀」南扇階崖的上半部，在 2006 年秋發生崩塌 (引水隧道口北方半公里處)，如此露出至少五十公尺厚的支流礫石，並截斷沿階崖修築的產業道路 (圖 30)。在此，Hsieh and Chyi(2010)得到一 1350-1480 cal BP 之定年資料 (地點 2；比高約 85 m)。

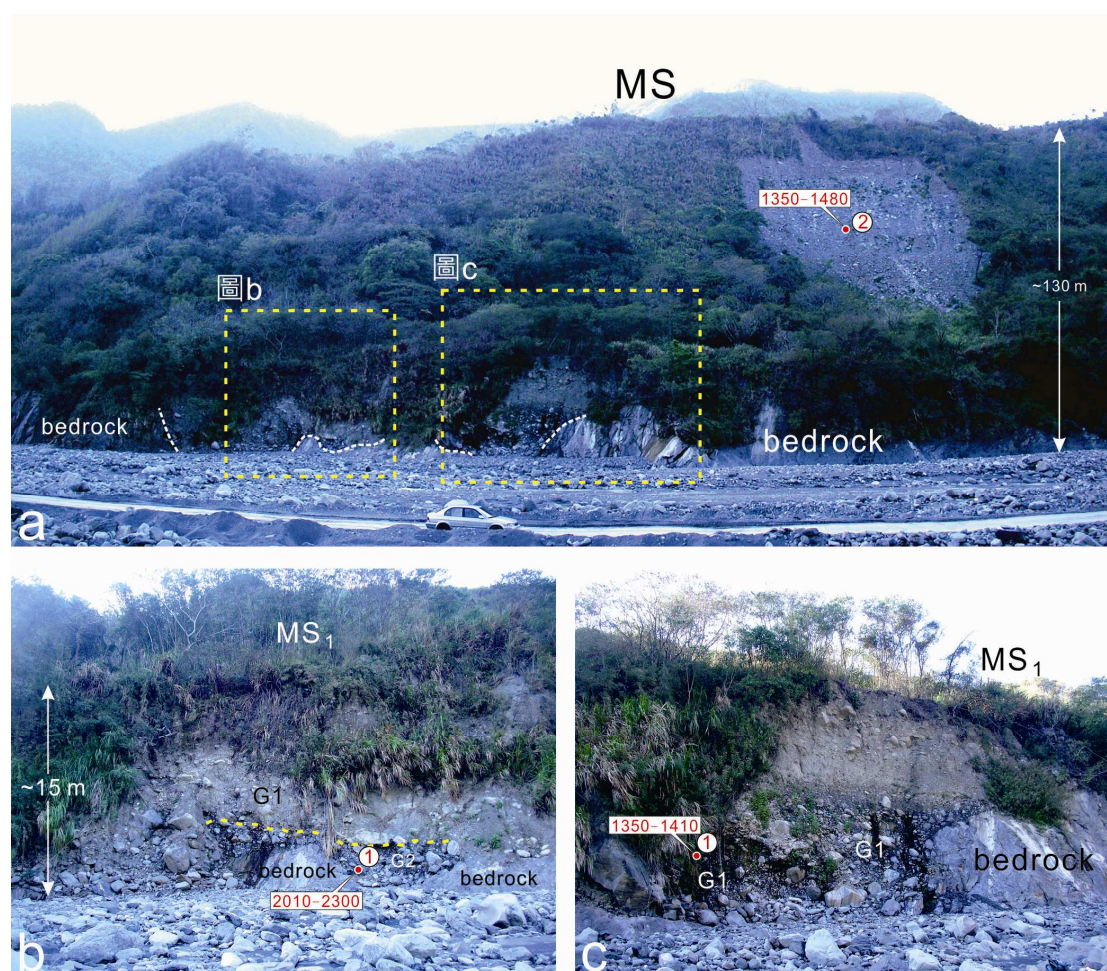


圖 30 越域引水隧道北方之「美秀南扇」剖面(莫拉克颱風前)。攝於 2008 年 2 月。
(a)於對岸遠眺。白色虛線勾繪出基盤岩石及沉積物的界線。(b)、(c)為圖 a 中黃色虛框之近照。G1：支流礫層；G2：主流礫層；兩者之界線以黃色虛線表示。紅點為碳十四定年採樣點位置(參見圖 28)。年代以紅字表示(單位：cal BP)。MS₁階地在莫拉克颱風時已遭掩埋(也參見圖 19)。

引水隧道口北方，「美秀」南扇之下有比高二十公尺的狹長階地(MS₁；地圖與航照上均不明顯)(圖 28)。此階地曾露出不規則起伏的基盤岩石，其上殘留數公尺厚的主流礫石，之上則悉為支流礫石(圖 30)。此處的主流礫石，不同於其它剖面者，乃富含泥質基質；Hsieh and Chyi(2010) 於其中得到一 2010-2300 cal BP 的年代(地點 1)，其旁之支流礫石則定年為 1350-1410 cal BP(圖 30)。以上剖面在莫拉克颱風時已悉遭掩埋(圖 19)。

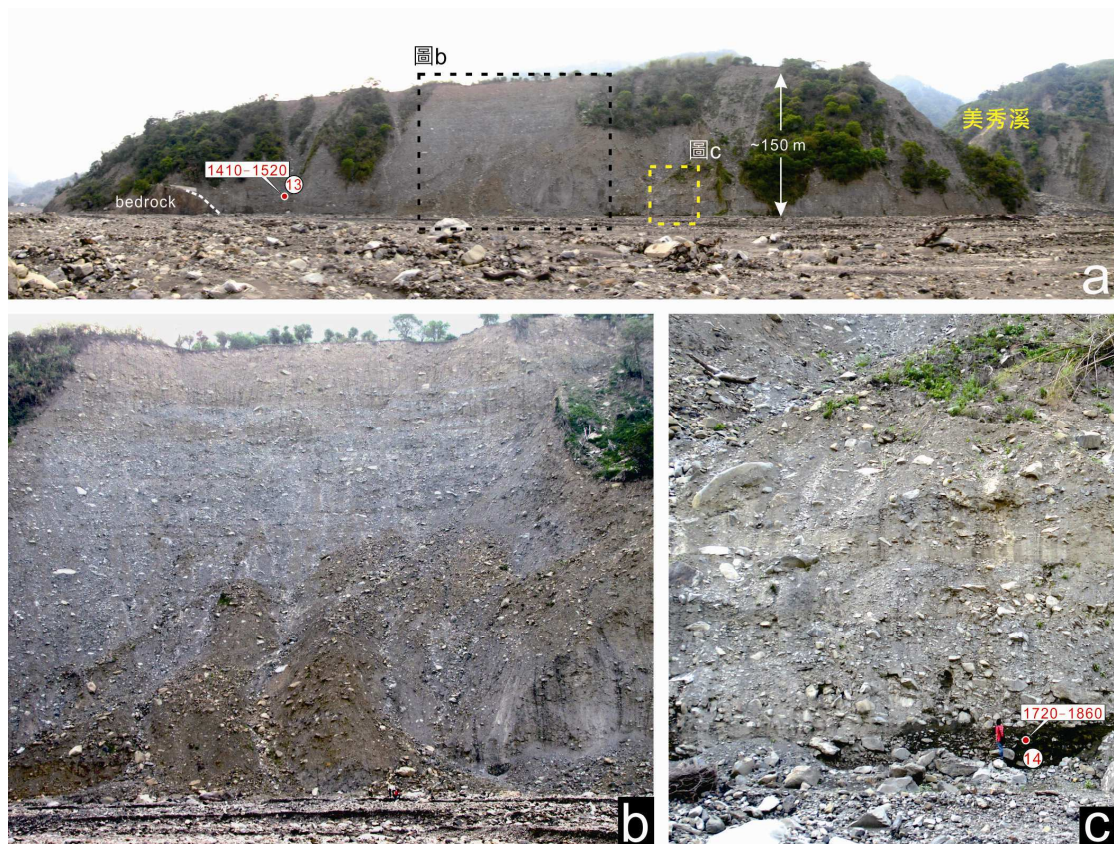


圖 31 美秀溪口南側之「美秀南扇」剖面(莫拉克颱風之後)。攝於 2010 年 3 月。(a)遠眺。白色虛線勾繪出基盤岩石及沉積物的界線。(b)、(c)為圖 a 中虛框之近照。紅點為碳十四定年採樣點位置(參見圖 28, 29)。年代以紅字表示(單位：cal BP)。採樣點 14 之近照參見圖 26。攝影者：台大地質科學系林修齊先生。

莫拉克颱風之後，廣泛而連續的剖面出現於美秀溪口南側，露出厚達 150 m

的支流礫石（圖 31）。這些礫石多為土石流的堆積，其中或間夾較層理較佳的河相砂、礫層，但未見明顯的侵蝕面。此外，出露的礫層皆呈灰色，只有在頂部(延伸至階地表面)出現黃色(氧化)的序列（圖 31b）。以上特徵或暗示，組成「美秀」南扇礫層的堆積約略是連續地。本研究在此間剖面下部採到兩個植物標本，定年結果分別為 1410-1520 cal BP(地點 13)與 1720-1860 cal BP(地點 14)(圖 31)。

4.2.2 「美秀」北扇與美秀溪(地點 3, 15, 16, 23-25)

莫拉克颱風之前，美秀溪口北岸已露出高達五十公尺的基盤岩石(一吊橋之基座即設於此)，及其旁上百公尺厚的支流礫石(沿美秀溪口北岸)(圖 32a)。Hsieh and Chyi(2010) 在此得到一筆 1350-1490 cal BP 之定年資料(地點 3；比高約 60 m)。莫拉克颱風使更多的支流礫石出現(圖 32b)。這些支流礫石夾有 < 1 m 厚的片狀砂層，其中連續性最佳者出現於主流側----由美秀溪口(約四十公尺高)向北緩斜(與扇面平行)，延伸超過一百公尺(標示為 S₁；圖 32b)。本研究在這砂層之上的土石流礫層中得到一筆定年資料，是為 1360-1520 cal BP(地點 16)(圖 33a)。S₁ 砂層之下、基盤岩石旁尚有一片狀砂層(標示為 S₂；圖 33b)。該砂層在貼近基盤岩石處轉形成一混雜小礫的袋狀砂體，沉積構造也由原本的平行層理變為塊狀(massive)(圖 33c)。相信這塊狀砂體乃重力流的堆積(源於當時的河岸)；其中一樹幹定年為 1570-1710 cal BP；其旁的小植物碎片則產出一較年輕的年代：1410-1520 cal BP(地點 15)(圖 33c)。

莫拉克颱風也為美秀溪谷帶來眾多剖面(圖 32b)。本研究於其中獲得三筆定年，各為 1350-1510 cal BP(地點 23)，1310-1380 cal BP(地點 24)，與 1420-1530 cal BP(地點 25)(圖 29)；前兩筆標本採自北岸坡地，第三筆標本在溪床尋獲----皆非來自美秀「扇階」本身。

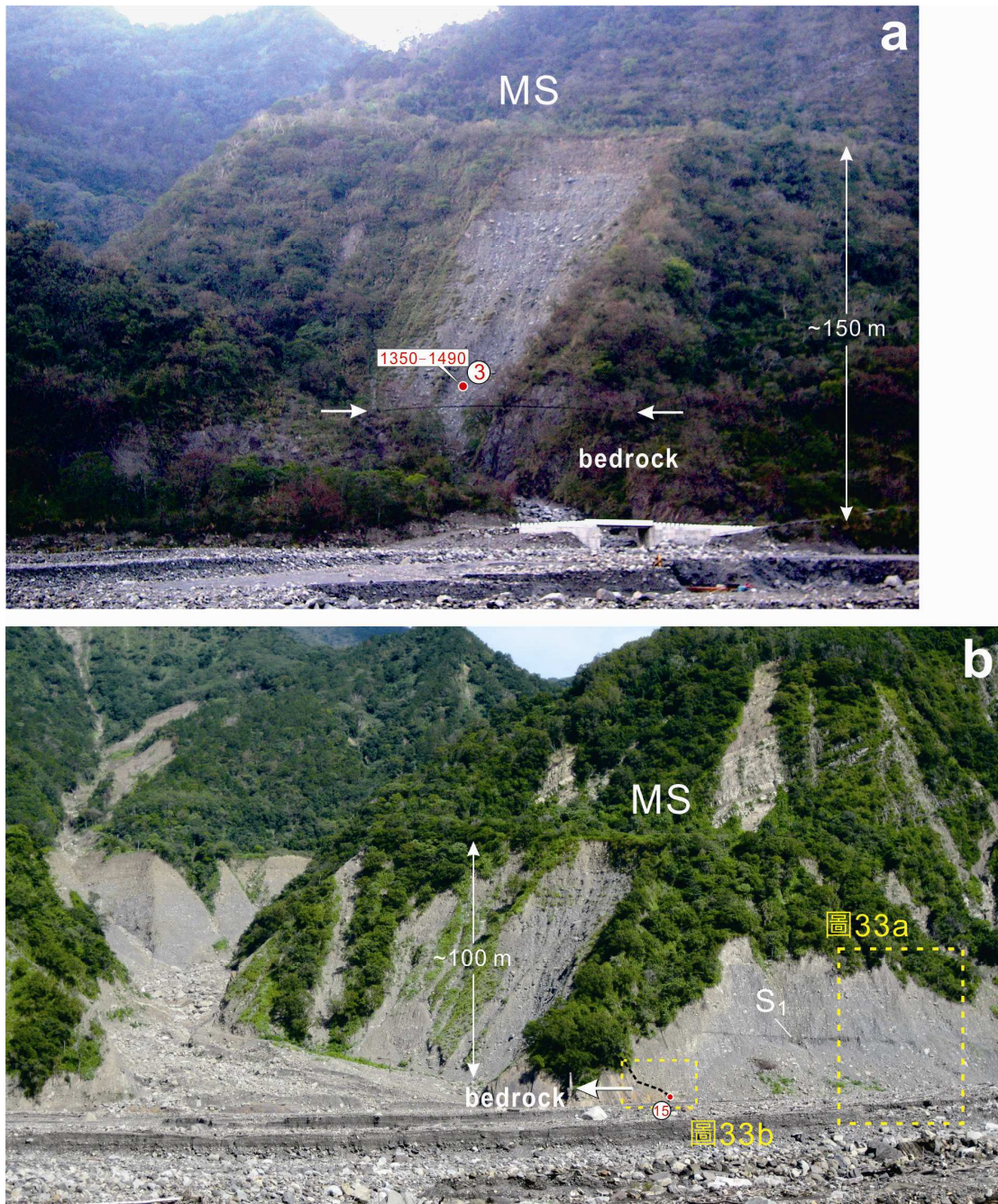


圖 32 美秀溪口「美秀北扇」莫拉克颱風前、後景觀。紅點為碳十四定年採樣點位置(參見圖 28, 29)。年代以紅字表示(單位：cal BP)。(a)莫拉克颱風前。攝於 2008 年 2 月。箭頭指處為一吊橋南、北兩端之橋基。(b)莫拉克颱風後。攝於 2010 年 8 月。原吊橋只剩北端橋基(箭頭指處)。黑色虛線勾繪出基盤岩石及沉積物的界線。

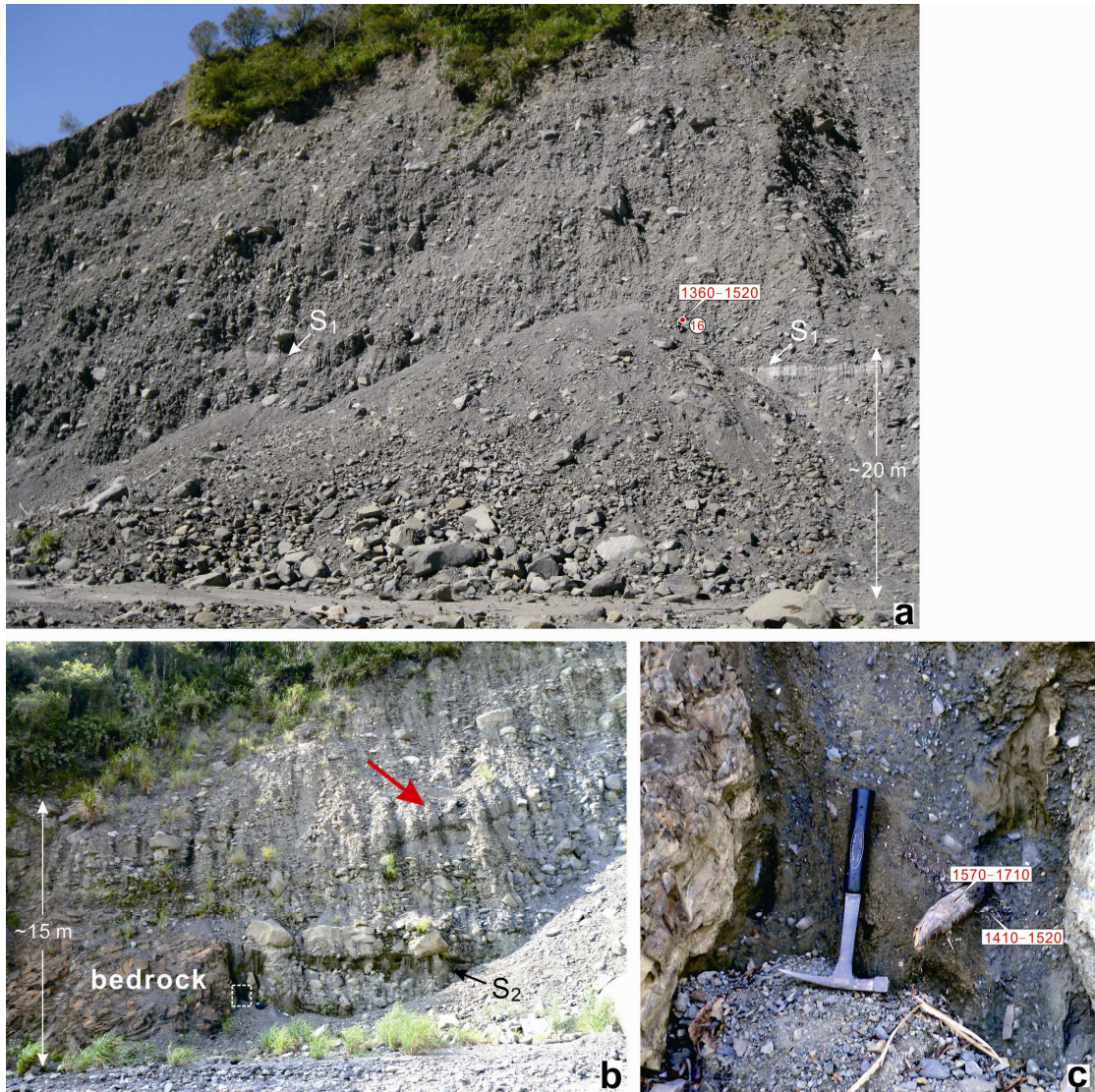


圖 33 「美秀北扇」剖面(莫拉克颱風之後)。位置見圖 32b。(a)支流礫石與其中之 S_1 砂層。攝於 2011 年 12 月。 S_1 砂層經侵蝕後已部分消失(比較圖 32b)，顯示其垂直剖面的方向上延續性不佳。紅點為定年採樣點位置(地點 16；圖 29)。年代以紅字表示(單位：cal BP)。(b)支流礫石與其中之 S_2 砂層。紅色箭頭指處乃懷疑為經過崩移的礫層。(c)圖 b 中白色虛框之近照。紅字為定年結果(地點 15)。1570-1710 cal BP 年代定自樹幹(利用傳統碳十四方法)；1410-1520 cal BP 年代來自其旁的小植物碎片(利用 AMS 方法)。

4.2.3PT₂ 及其鄰近坡地(地點 5, 17)

位於「美秀」與「布唐布那斯」扇階之間的 PT₂ 階地(及其鄰近坡地)，擁有研究區最複雜的沉積序列。莫拉克颱風之前，此地露出近二十公尺厚的主流礫石，

上覆四公尺厚的主流砂層，之上為支流礫石(圖 34)。Hsieh and Chyi(2010)在主流礫層的底部得到一 1620-1810 cal BP 的年代；主流砂層與支流礫石也各定年為 1340-1510 與 1010-1170 cal BP(地點 5；圖 28)。本研究將前人在主流礫層採樣的標本交付定年(層位高於 1620-1810 cal BP 者)，卻得到 2000-2110 cal BP 的年代(圖 34)。

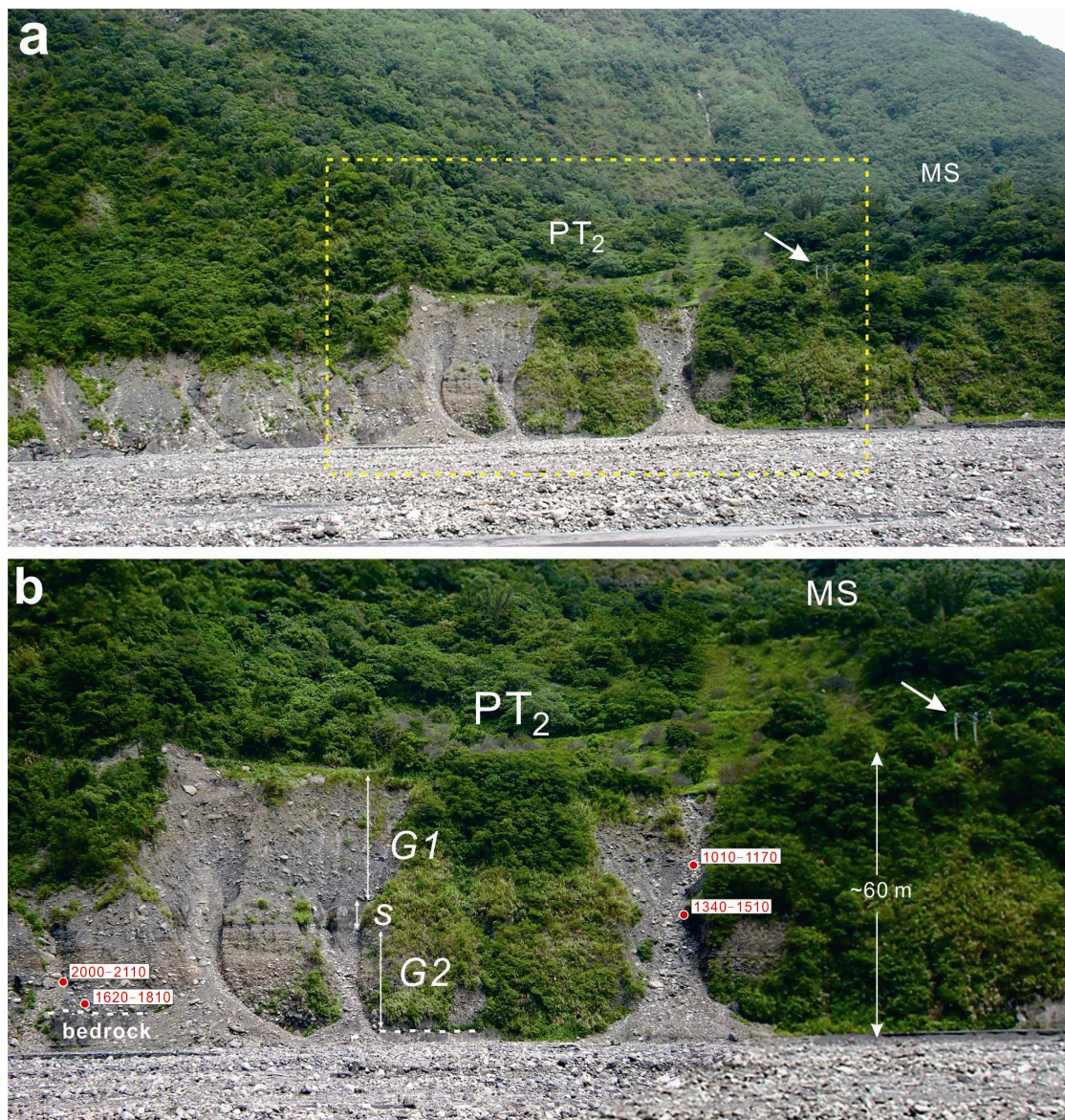


圖 34PT₂階地剖面(莫拉克颱風前)。攝於 2008 年 11 月。(a)遠眺。(b)圖 a 中黃色虛框之放大。G1：支流礫層；G2：主流礫層；S：主流砂層。白色虛線勾繪出基盤岩石及沉積物的界線。紅點為定年採樣點位置(地點 5；圖 28)。年代以紅字表示(單位：cal BP)。箭頭指出作為參考地標的電線桿。

莫拉克颱風所導致大規模的堆積應已埋沒了上述主流礫層與砂層(圖 35)。颱風大幅移除此間植被後也確認，大部分的 PT₂ 階地乃向南傾斜，之後持平，在最南端卻轉向北傾斜(圖 35a, b)。這個地形變化或暗示：組成 PT₂ 階面的沉積物主要來自布唐布那斯溪，但其最南端的沉積物則源自美秀溪。2010 年春天，本研究在 PT₂ 階地南緣得到一 740–900 cal BP 的年代(圖 35a)，來自一約三十公分厚的泥質砂層(夾於支流礫層中)。同年 8 月，該砂層已侵蝕消失，其南方十幾公尺的坡地上卻出露另一較厚的砂層(歸類為主流砂層，標示為 S₃)(圖 35b, 36a, 36b)。由於高度相仿，本研究曾將兩砂層視為相連。後續的定年卻顯示，較晚出露的 S₃ 砂層較老(1350–1490 與 1410–1520 cal BP；前者層位比後者高半公尺)，有別於先前出露於 PT₂ 南緣的砂層。

2012 年 6 月的豪大雨擴大了此間的侵蝕(圖 35c)。原本 S₃ 砂層的位置如今出露更厚的砂層(仍標示為 S₃)；該砂層之下則新出現主流砂層(標示為 S₄)，其中產出一 1340–1390 cal BP 的年代(圖 36c)。PT₂ 階地南緣也出現新露頭，呈現向北傾斜、灰色與黃色礫層交疊的支流礫層(圖 36d)。這礫層夾有成叢的草本植物遺骸(似被原地掩埋)，產出兩筆定年：330–500 與 160–420 cal BP。兩定年來自同一標本群；前者為其集合(利用傳統碳十四方法)，後者為其中之單一草莖(利用 AMS 方法)。

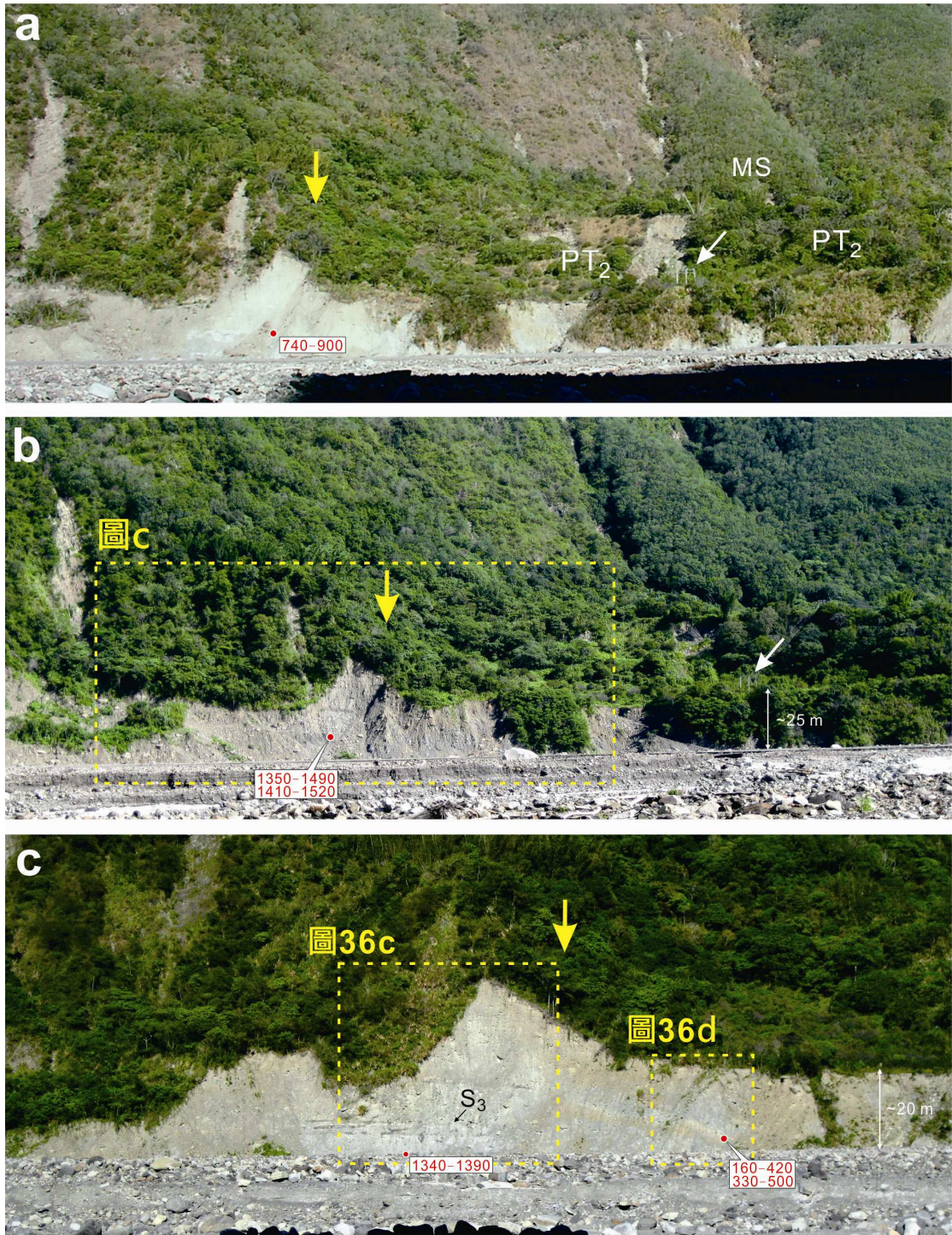


圖 35 PT₂階地及其南方坡地剖面(莫拉克颱風後)。白色箭頭指出的電線桿同圖 34 者。(a)攝於 2009 年 12 月。(b)攝於 2010 年 8 月。(c)攝於 2012 年 12 月。位置見圖 b。紅點為定年採樣點位置(地點 17; 圖 29)。年代以紅字表示(單位: cal BP)。注意:(1)2012 年 6 月的豪大雨造成主流顯著地堆積(估計 3-5 m)(比較圖 b 與 c); (2)黃色箭頭所指區域隨時間的侵蝕。



圖 36PT₂ 及其南方坡地定年採樣點一覽(地點 17; 圖 29)。年代以紅字表示(單位：cal BP)。G1：支流礫層；S：主流砂層。(a)仰望圖 35b 中定年標本所在之砂層 S₃ (約一公尺厚)。攝於 2010 年 8 月。(b)S₃ 砂層之近照。(c)圖 35c 中黃色虛框之近照。攝於 2013 年 1 月。

4.2.4 「布唐布那斯」南扇與 PT₁(地點 7-10, 18, 19)

一源於「布唐布那斯」南扇的溪溝於莫拉克颱風時大幅加寬(圖 37)，使其溪口右岸露出約五公尺厚的主流砂層(標示為 S₅)(地點 18; 圖 29)。這主流砂層可分為三個單元(由下到上標示為 S₅₋₁，S₅₋₂，與 S₅₋₃)(圖 37b)。下層(S₅₋₁)由中、細砂組成，已被傾動(傾角約二十度)(按：類似被褶曲的砂層也出現於鄰近露頭，傾角可高達四十度)。推測這砂層堆積後曾因河岸過陡而發生崩滑(按：類似主流砂層的崩滑也常見於現生河岸，起因於河流的下切或側蝕)。中層(S₅₋₂)為泥質砂，具水平與波痕狀交錯紋理，不整合覆蓋於 S₅₋₁ 之上。上層(S₅₋₃)由細砂組成，塊狀或具水平層理(部分遭扭曲)，其頂部或有如火焰(flame)的脫水構造，應起因於支流

礫石的重荷。本研究在此得到三筆年代：1620–1720 與 1520–1690 cal BP(來自下層砂 S₅₋₁)，1420–1530 cal BP(來自中層砂 S₅₋₂)(圖 37)。

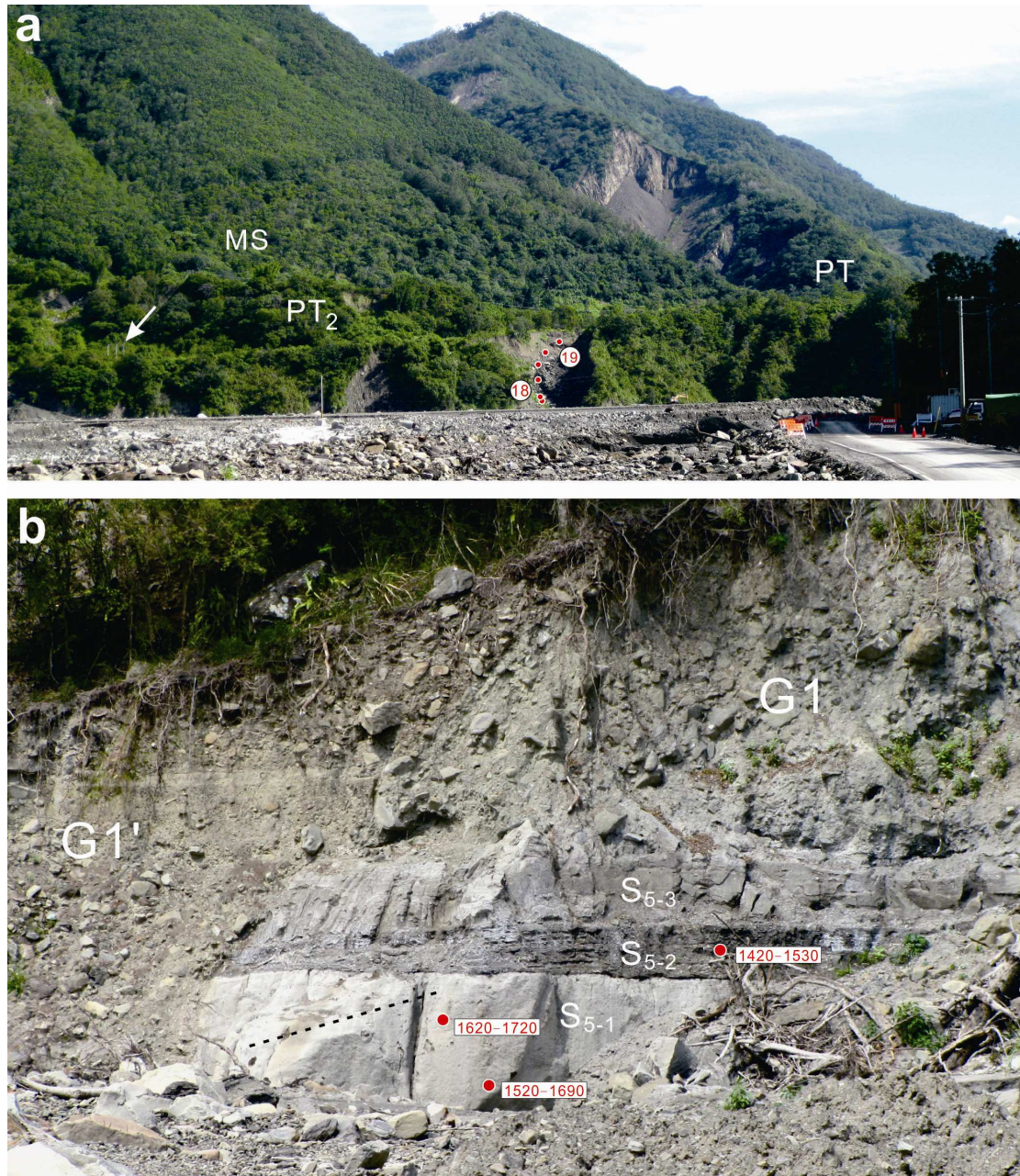


圖 37 「布唐布那斯」南扇剖面一景(地點 18；圖 29)。紅點為定年採樣點大略位置。(a)遙望剖面位置，位於一溪溝口右岸。攝於 2010 年 8 月。箭頭指出的電線桿同圖 34, 35 者。(b)剖面近照(入鏡部分高約十公尺)。攝於 2010 年 3 月。G1, G1'：支流礫層；S₅₋₁, S₅₋₂, S₅₋₃：主流砂層。S₅₋₁ 砂層的層面以虛線提示。紅字為年代(單位：cal BP)。

上述 S₅ 砂層乃被支流礫石包圍(圖 37b)。值得注意地，覆蓋在 S₅ 之上的礫層(灰色，較粗粒)和 S₅ 之旁的礫層(G1'；帶黃色，較細粒)，顯然並非同一時期的產物；兩礫層間並存有侵蝕界面。這地層的疊置關係透漏：S₄ 及其上的支流礫石堆積之後，在新期的支流礫石(G1')堆積之前，河流曾經歷大幅度的下切。這個情景----溪床不只一次地堆積、侵蝕循環，和 PT₂ 一帶所見複雜的沉積序列吻合。

S₅ 砂層之上，沿溪溝出現更多剖面(圖 37a)。一主流砂層(約一公尺厚)出現於 S₅ 之上六公尺，定年為 1300-1350 cal BP。再往上悉露出支流礫石。本研究在此得到三筆年代，由下到上依次為 300-430, 300-450, 160-310 cal BP(地點 19；圖 29)。其中層位最高者距「布唐布那斯」扇面約五公尺。

根據 Hsieh and Chyi(2010)，莫拉克颱風之前，布唐布那斯溪口南岸曾露出數公尺厚的主流礫層(定年為 1390-1530 cal BP)，其上覆蓋至少十幾公尺厚的支流礫層(定年為 modern，或 < 200 BP)(圖 38)。這些支流礫層，似與布唐布那斯溪右岸 PT₁ 中 < 200 BP 的礫層(地點 9；圖 12)，為同一期的堆積(圖 13a)。PT₁ 階地也已有 4010-4230cal BP (黃美璇，2001)，以及 3720-3970, 5610-5850, 6320-6550 cal BP (Hsieh and Chyi, 2010)等四筆年代發表(地點 10；圖 12, 13, 39)。猜測黃美璇(2001)所報導之 4010-4230cal BP 年代與 Hsieh and Chyi(2010)之 3720-3970 cal BP，乃來自同一或鄰近層位(圖 39 之 A 層)。Hsieh and Chyi(2010) 所觀察 PT₁ 沉積序列的複雜性(圖 39)，和本研究在「布唐布那斯」南扇與 PT₂ 一帶所見者一致。

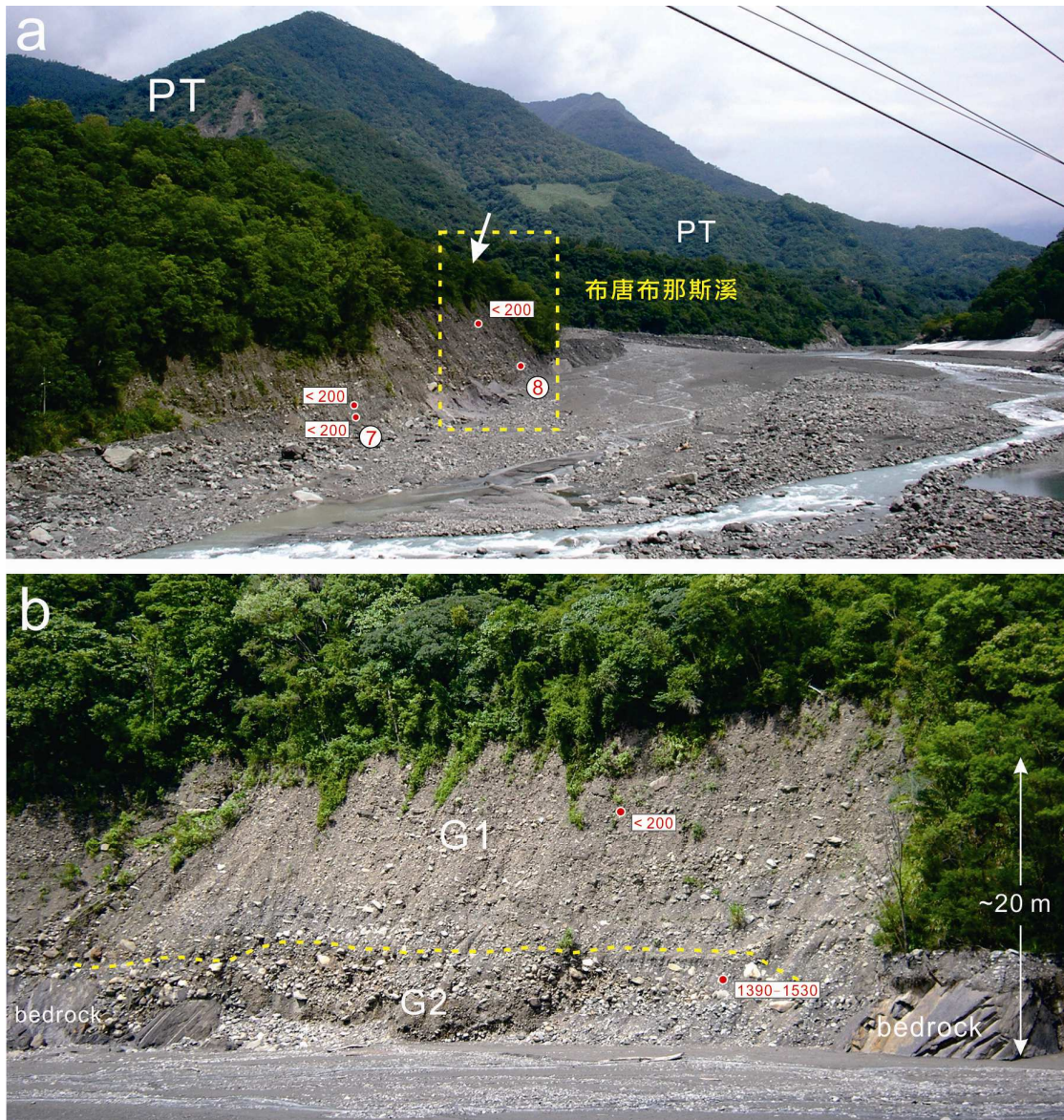


圖 38 布唐布那斯溪口南岸剖面(莫拉克颱風前)。攝於 2008 年 9 月。(a)斜望(面向荖濃溪上游)。溪口最新期的扇階形成於 2007 年(也參見圖 15g)。剖面所在之階崖,和 PT 階崖之間,似有一模糊的階面(箭頭指處;航照與地圖上均不清楚)。此階面乃 PT_1 階面向下游的延伸。(b)於對岸眺望(位置如圖 a 中黃色虛框)。G1: 支流礫層; G2: 主流礫層; 黃色虛線為其大致之界線。紅點為 Hsieh and Chyi(2010)定年標本大略位置(圖 28),紅字為年代(單位: cal BP)。

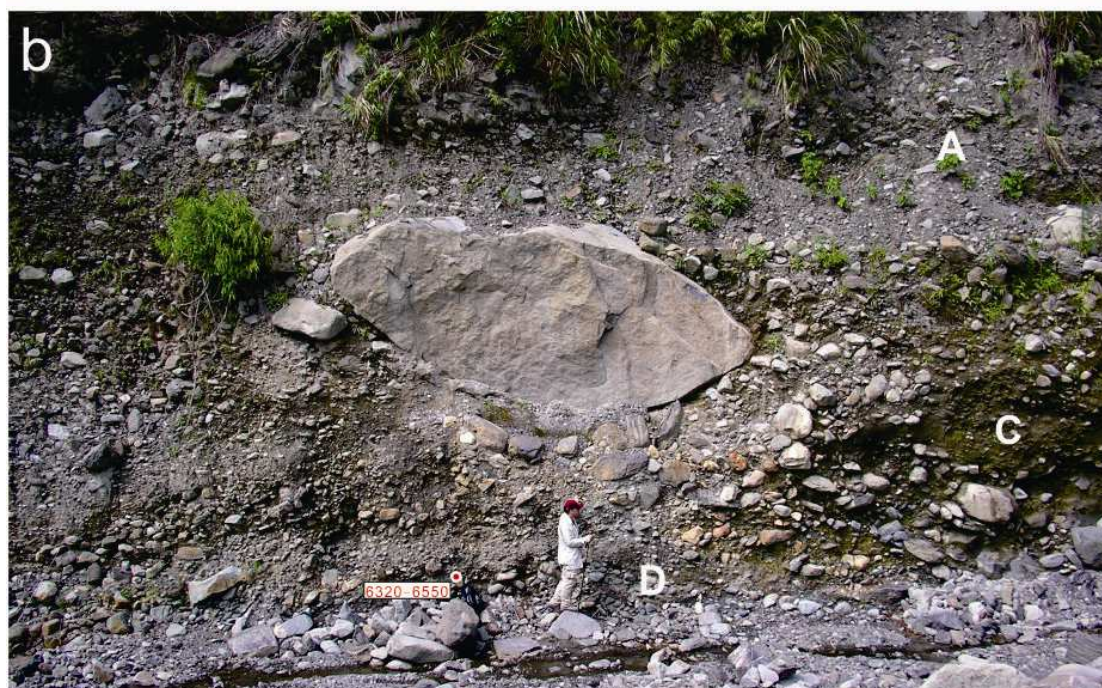
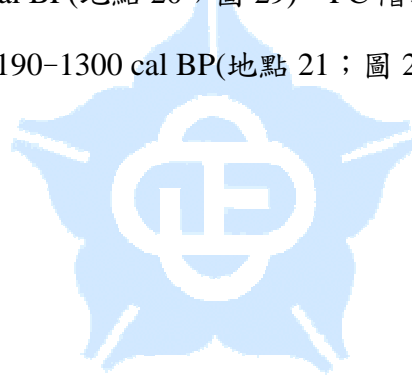


圖 39 布唐布那斯溪 PT₁ 階地剖面一景(莫拉克颱風前)(地點 10；圖 12, 28)。(a) 攝於 2005 年 9 月。白色虛線為基盤岩石與沉積物的界線。(b)圖 a 中虛框位置之近照，但攝於 2005 年 6 月。紅點為 Hsieh and Chyi(2010)定年標本大略位置，紅字為年代(單位：cal BP)。Hsieh and Chyi(2010)發表的另一個定年，3720-3970cal BP，得自 A 層(採樣點位於更上游)。修改自 Hsieh and Chyi(2010)之 Fig. 11。注意：經歷侵蝕後(由圖 b 至圖 a)，原本粗粒的土石流礫層(含巨大岩塊)已消失，新露出的是較細粒的河相礫層(B)與基盤岩石，同時溪床也淤高了約兩公尺。

4.2.5 「布唐布那斯」北扇與 PC 階地(地點 11, 20, 21)

2007 年堰塞事件之後，主流礫石與主流砂層曾零星出露於「布唐布那斯」北扇與 PC 階地階崖的下半部(圖 40)。本研究在一小溪溝口南岸的主流砂層中得到兩筆年代：330-500 與 320-460 cal BP。溝口北岸，更高位的主流砂層則定年為 150-460 cal BP(地點 11；圖 28, 40b)。這些砂層都應堆積於「布唐布那斯」沖積扇擴展、主流堰塞之時。

上述的露頭已於莫拉克颱風時遭掩埋。颱風也大幅加寬了彼間的小溪溝(圖 41)。沿溝谷而上，至少有兩主流砂層出露(其它為支流礫石)。較高的砂層(距 PC 階面 4 m)定年為 0-290 cal BP(地點 20；圖 29)。PC 階地沿主流也不乏支流礫石出現，並產出一年代：1190-1300 cal BP(地點 21；圖 29, 41)。



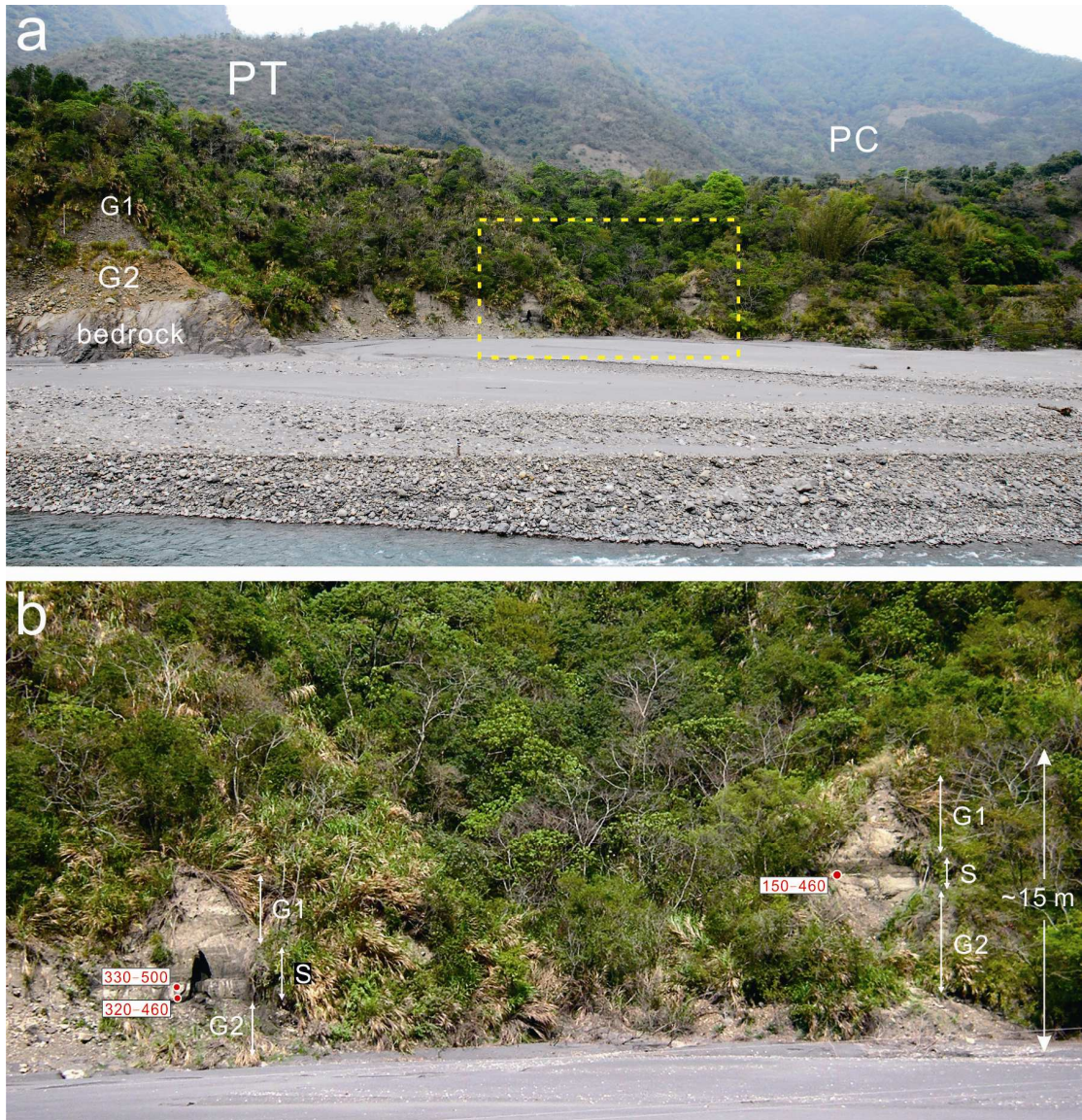


圖 40 「布唐布那斯」北扇與 PC 階地交界地帶一景(莫拉克颱風前)。攝於 2008 年 2 月。G1：支流礫層；G2：主流礫層；S：主流砂層。(a)遠眺。前景階地面砂層(最高 6 m)應堆積於 2007 年秋主流堰塞之時(也參見圖 15e, 20a)。(b)圖 a 中虛框位置之近照。紅點為定年標本採樣位置，紅字為年代(單位：cal BP)(地點 11；圖 28)。攝影：台大土木系 prof. Capart 研究室團隊。



圖 41 遠眺「布唐布那斯」北扇(PT)與 PC 階地 (莫拉克颱風後)。攝於 2011 年 8 月。箭頭指示之溪口即為圖 40b 中兩剖面之間的溪口。紅點為定年標本採樣位置，紅字為年代(單位：cal BP)(地點 21；圖 29)。

4.2.6 「清水」扇階與其鄰近地區(地點 12, 22)

莫拉克颱風使原本植被茂密的「清水」扇階出現露頭，特別是沿清水溪右岸(南岸)(圖 42)。在此，支流礫石僅出露於剖面的上半部(最厚約十五公尺)，剖面的下半部則悉為主流礫石(厚達二十公尺)。本研究在支流礫石中得到一年代：1190-1300 cal BP(地點 22；圖 29, 42)。

莫拉克颱風之前，連接南橫公路與「清水」扇階有「拉法阿勒」吊橋(該吊橋在 2007 年秋已部分損毀，莫拉克颱風後不復存在)。吊橋北方，主流左岸曾有十多公尺高、由主流礫石組成的小階地(地圖與航照上皆不明顯)。本研究在此得到一年代：970-1060 cal BP(地點 12；圖 28, 43)。

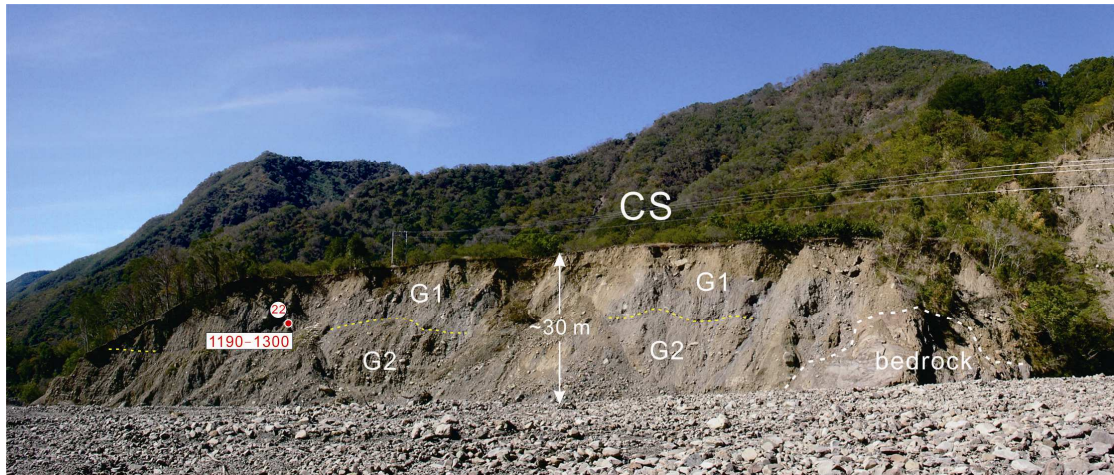


圖 42 清水溪右岸(南岸)「清水」扇(CS)剖面(莫拉克颱風後)。攝於 2009 年 12 月。
G1：支流礫層；G2：主流礫層；黃色虛線為其大略之邊界。白色虛線為基盤岩石與沉積物的界線。紅點為定年標本採樣位置，紅字為年代(單位：cal BP)(地點 22；圖 29)。

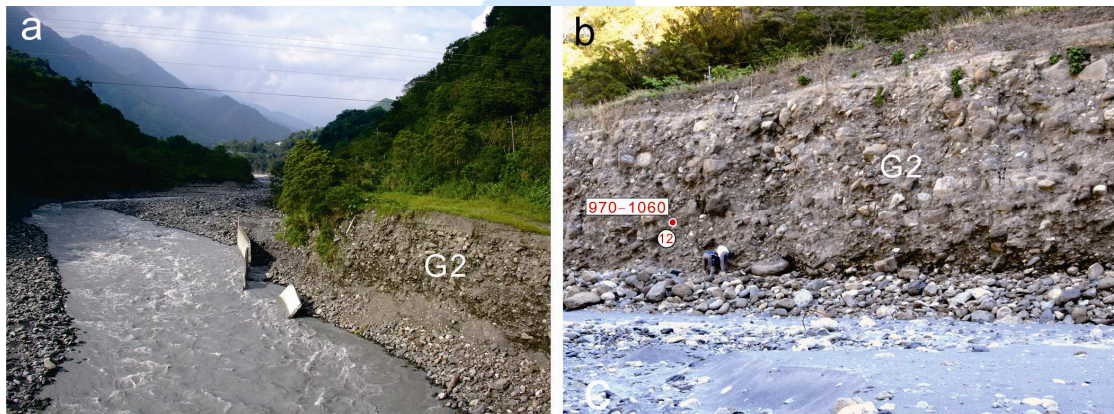


圖 43 拉法阿勒吊橋北方主流礫層(G2)剖面(莫拉克颱風前)。(a)立於吊橋上眺望(面對荖濃溪上游)。攝於 2007 年 9 月。注意：被水沖毀的河岸護牆，可能伴隨當年主流的堰塞發生。(b)露頭近照。攝於 2008 年 2 月。紅點為定年標本採樣位置，紅字為年代(單位：cal BP)(地點 12；圖 28)。

4.2.7 「奇斯薩庫」扇階 (地點 26)

本扇階前身為支流沖積扇，其組成應以砂礫為主(如，林朝榮(1957)第 116 頁之描述。按：「奇斯薩庫」扇階當時稱為 Opakar 台)。然而，莫拉克颱風之前，出露於「奇斯薩庫」(及其南方「東莊」)階崖者悉為基盤岩石，如此曾讓本研究推測：組成「奇斯薩庫」(及「東莊」)扇階的砂礫層可能僅二、三十公尺厚。直到莫拉克颱風之後，吾人才發現，「奇斯薩庫」扇面之下乃埋有「古」河道，其上堆積近兩百公尺厚的礫石(圖 44)。這「古」河道(左、右大致對稱)應為玉穗溪切蝕而成，且其形成之後曾發生大規模堆積，將原本的河道填平；伴隨這河流的堆積(或「奇斯薩庫」沖積扇的成長)，玉穗溪曾向北遷徙至今日的位置；爾後玉穗溪循此流路下切至今(圖 45)。本研究於 2010 年 7 月於該古河道底部的礫石層中尋獲植物標本，定年為 8340–8390 cal BP(圖 44b)。

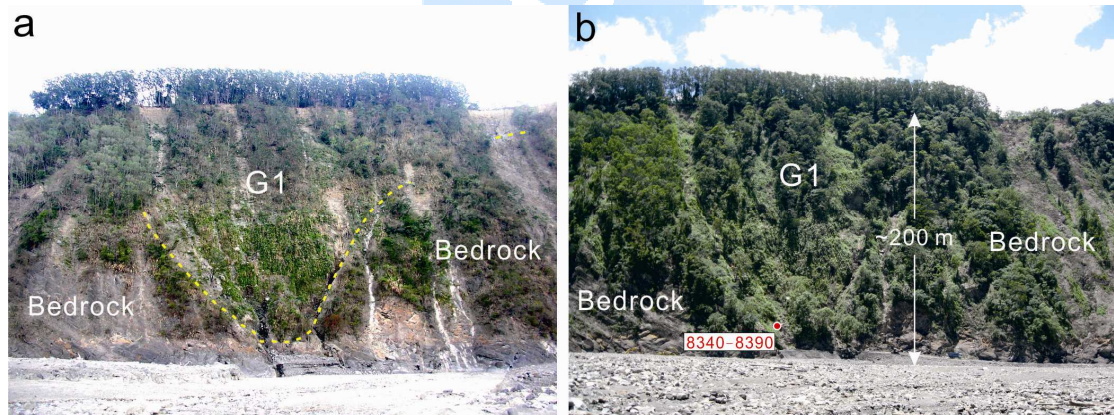


圖 44 「奇斯薩庫」扇階剖面(莫拉克颱風後，公路施工前)(地點 26；圖 29)。(a) 攝於 2010 年 2 月。莫拉克颱風曾大幅清除此間階崖上的植被，使露出堆積於古河道上的礫石(G)。黃色虛線勾繪出礫石層與基盤岩石之邊界。也參見圖 24a。(b)攝於 2010 年 7 月。植被已快速復原，但古河道的形狀仍依稀可見。紅點為定年標本採樣位置，紅字為年代(單位：cal BP)。

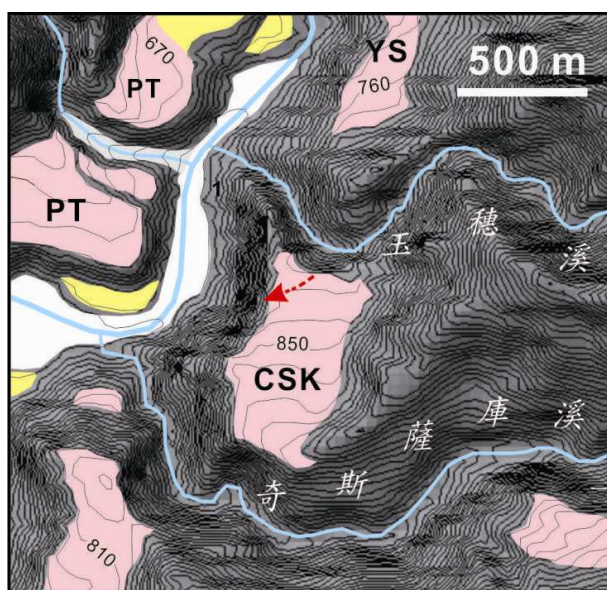


圖 45 「奇斯薩庫」扇階一帶地形(同圖 10)。紅色虛線為推論玉穗溪古河道的位
置，箭頭指向下游。該古河道的出口如圖 44 所示，入口(位於玉穗溪谷中)，
也已經由野外調查確認存在。

2011 年起南橫公路沿「奇斯薩庫」階崖重建，工程的開挖使堆積於古玉穗
溪河道(特別是其上半部)的礫石得以出露(圖 46)。調查顯示，這支流礫石由數層
黃、灰交替的礫層組成(圖 47)；多中、小礫；巨礫散佈其中(不乏圓磨的綠色岩
或石英岩類，長徑一至數公尺)。層序上半部以土石流堆積為主，含豐富泥質基
質，礫石圓磨度較差(圖 47a)；層序下半部則河流作用較為顯著，具較佳的層理(圖
47b)；兩層序的界線約位於比高一百公尺處(以調查當時的河床為基準)。本研究
也在此古支流河道序列中得到六筆年代，由下至上依次為 5600-5640, 5630-5850,
5650-5740, 5600-5710, 5600-5710, 與 5470-5580cal BP(地點 26；圖 29, 46b)。其中
層位較低、較老的五筆年代十分接近——除了層位最低的 5600-5640cal BP 外，
其它交集於 5650-5710cal BP。注意：這些年代的位置已跨越了黃、灰礫層的界
線，也涵蓋了上、下兩不同之層序，惟和先前在古河道底部得到的年代(8340-8390
cal BP；圖 44b)相差甚多。

道路工程的開挖也使玉穗溪口左岸露出至少五十公尺厚的主流礫層(圖 46, 47c)。該礫層殘留於基盤岩壁之旁，最高約一百公尺(距調查當時的河床)，其中一泥層定年為 8170–8300 cal BP(圖 46, 47c)----和先前在古河道底部得到的年代相近。



圖 46 「奇斯薩庫」扇階剖面(公路施工中)(地點 26；圖 29)。攝於 2011 年 8 月。完工後的公路可參見圖 24b。(a)遠眺。G1：支流礫層；G2：主流礫層。黃色虛線勾繪出礫石層與基盤岩石之邊界。也參見圖 44。(b)圖 a 中紅色引號所示位置之放大。紅點為定年標本採樣位置，紅字為年代(單位：cal BP)。白色矩形為圖 44b 定年的大略位置。



圖 47 「奇斯薩庫」扇階剖面近照(公路施工中)。攝於 2011 年 8 月。(a)層序上半部一景(仰望)。約圖 46b 中 5600-5710 cal BP 標本採樣點以上。(b)層序下半部一景。約圖 46b 中 5630-5850 cal BP 標本採樣點附近。(c)玉穗溪口左岸之主流礫層一景。紅點為定年標本採樣位置(位於一灰色泥中)，紅字為年代(單位：cal BP)。

4.2.8 勤和階地

莫拉克颱風之前，因主要露出基盤岩石，勤和村所在的勤和階地或被歸類為侵蝕性的「岩石階地」(Strath terrace)。颱風後，吾人方知，原來這階地也埋有荖濃溪的「古」河道，其上堆積的礫石至少十五公尺厚(圖 48)。這古河道的存在再次說明：研究區河流下切、堆積的循環----以及河流在堆積期間的改道----乃為常態。

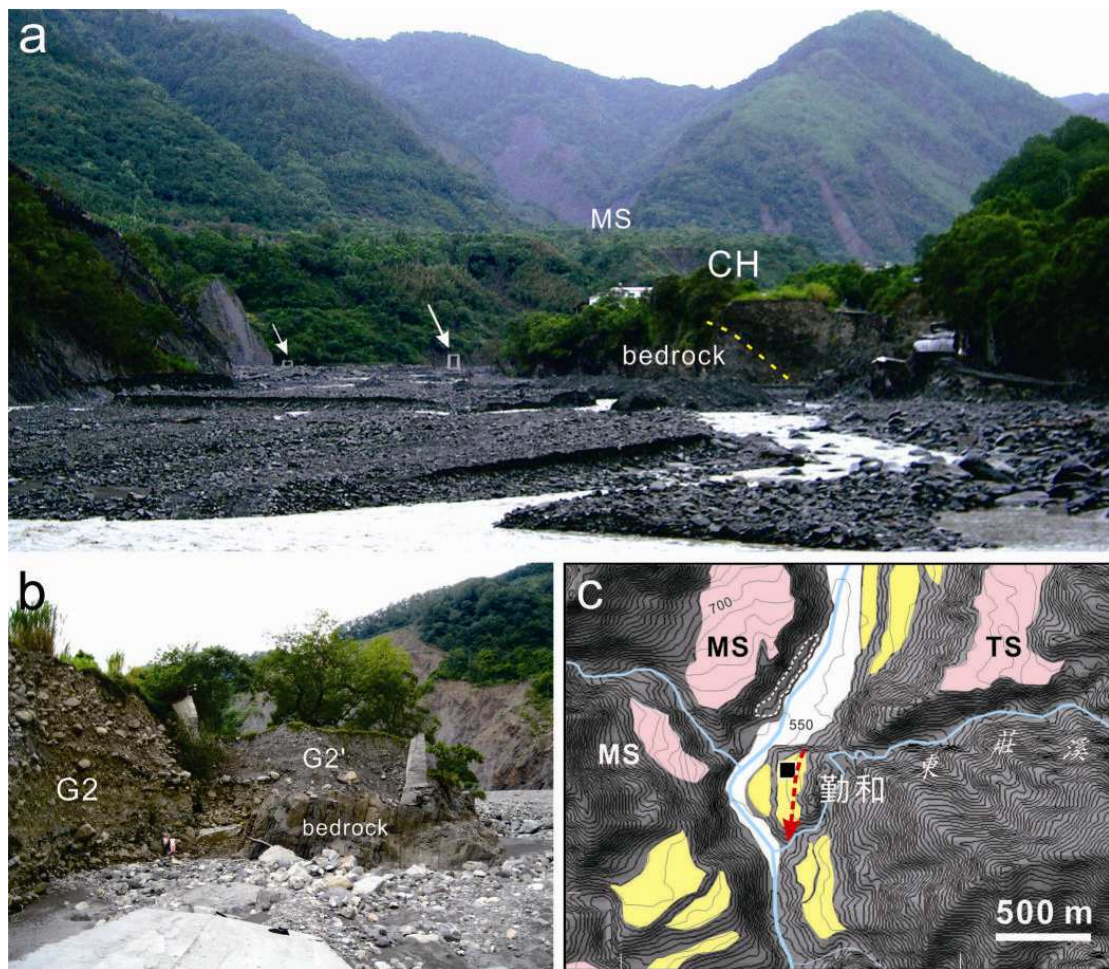


圖 48 勤和階地(CH)剖面(莫拉克颱風後)。(a)遠眺階地南緣(望向荖濃溪上流)，攝於 2009 年 9 月。黃色虛線勾繪出礫石層與基盤岩石之邊界。箭頭指出被部分掩埋的少年溪吊橋橋塔。(b)階地北緣剖面(望向荖濃溪下流)，攝於 2012 年 7 月。剖面因同年 6 月之洪水而產生。注意：G2 與 G2' 主流礫層並非同時期的堆積。(c)勤和一帶地形(同圖 10)。紅色虛線為推論荖濃溪古河道的位置，箭頭指向下游。

第五章、資料分析與討論

5.1 碳十四年代的意涵

碳十四年代為植物死亡(停止光合作用)的年代，而吾人欲利用之來推估地層沉積的年代。然而，除了 PT₂ 南緣成叢的草本植物遺骸外(定年為 330-500 與 160-420 cal BP；圖 36d)，本研究所得到的植物標本均非原地掩埋。如此，從植物死亡到其被埋藏所需要「搬運」的時間，便成為解讀碳十四地層沉積年代的一大不確定因數。所幸經過多次的測試(如，Hsieh and Chyi, 2010；Hsieh et al., 2011, 2012)，吾人已可確認，這標本「搬運」所花的時間是相對短暫的(如，百年內)，應落於其它因素所導致定年的誤差範圍之內(如標本固有碳元素吸收特性、汙染、實驗與樹輪校正之誤差等)。這個事實反映了台灣溫暖潮濕的氣候。在這樣的氣候條件下，植物死後很容易腐爛，除非能被快速地掩埋(與氧氣隔絕)，否則不易保存下來。也因此，本研究所得到的碳十四年代，絕大多數都和其層位順序吻合(即，同一沉積序列，層位在上者比在下者年輕或相當)。

即使「搬運」的時間短暫，被掩埋的植物標本卻可能因爾後的侵蝕露出地表，經過再次搬運後才被掩埋。如此標本定出來的年代，可能明顯大於其最終沉積的年代。這標本「重新搬運」(rework)所造成定年的偏差前人已有報導(Hsieh and Chyi, 2010)，也適以用來解釋本研究極少數不合理的碳十四年代。如 PT₂ 主流礫層中的 2000-2110 cal BP 年代(圖 34b)，其標本即可能曾遭二次搬運。(按：理論上，長年不歇的河流營力，本就比災變性的土石流易造成沉積物的「重新搬運」)。

「布唐布那斯」南扇 S₅ 砂層，與美秀溪口左岸 S₂ 砂層的年代序列，可作為「重新搬運」現象最好的詮釋。前者明顯記錄了兩期主流堰塞事件(圖 37b)，一期發生於 1.6-1.7 ka(1620-1720 與 1520-1690 cal BP；S₅₋₁)，一期發生於 1.4-1.5

ka(1420–1530 cal BP; S₅₋₂)(ka = 1000 cal BP)。而於 S₂ 砂層的邊緣，這兩期堰塞事件所堆積的沉積物很可能已混為一體(以重力流的方式堆積)，因此兩年代相差達兩百年的標本(1570–1710 和 1410–1520 cal BP)能比鄰出現(圖 33c)。還原當時情景：1.4–1.5 ka 主流堰塞之時，河流曾側向侵蝕河岸，讓 1.6–1.7 ka 堆積的砂層暴露並發生崩滑。在「布唐布那斯」南扇，這崩滑的砂體被後期(1.4–1.5 ka)的砂層所覆蓋(圖 37b)；於美秀溪口左岸，這崩滑的砂體已和後期堆積的砂層混合(按：類似的崩滑作用也可見於此間的支流礫層；圖 33b)。

本研究不合理的碳十四年代尚見於 PT₂ 南方，與「奇斯薩庫」扇階剖面。於 PT₂ 南方，較高位的 S₃ 砂層的兩筆年代(交集於 1410–1490 cal BP)略老於較低的 S₄ 砂層(1340–1390 cal BP)(圖 35)。由於鄰近剖面比 S₃ 層位更高的定年都與 S₃ 類似(地點 3 與 16；圖 32a, 33a)，推論 S₄ 砂層的年代有誤。於「奇斯薩庫」扇階，較低位的 5600–5640cal BP 年代略年輕於其上之四筆定年(交集於 5650–5710cal BP)(圖 46)。造成這定年層序倒置的原因仍不明，也許是較年輕的標本受到現生碳的污染。所幸的是，這些年代的誤差不超過數十年。

綜合以上，碳十四定年本身，及其與地層沉積年代之間的連結，無可避免地存在著百年尺度的誤差。本研究也無法排除，除了少數明顯不合理者外，更多的年代其實也來自「重新搬運」的標本。即使如此，吾人可確認：(1)所得到的年代必指示一堆積事件發生的年代(也就是說，即使植物並非因堆積事件而亡，但其遺骸必須因堆積而獲得保存)。(2)所得到某年代的堆積事件，其堆積位置必不低於定年標本所在位置。此乃由於：即使定年標本曾遭「重新搬運」，其原來所在之地層必不低於其最終沉積的地層。換句話說，本研究可得知某年代溪床(沉積面)最低的位置。

5.2 河流地形變遷與支流沖積扇的發育

5.2.1 全新世早、中期(3 ka 以前)

「奇斯薩庫」扇階剖面的資料顯示，研究區的荖濃溪河段至少在 8.2–8.4 ka 與 5.5–5.7 ka 兩期間曾發生大規模的堆積（圖 46, 49b）。另外，根據布唐布那斯 PT₁ 階地的數據，年代 6320–6550 與 5610–5850 cal BP 時布唐布那斯溪床乃低於奇斯薩庫 8.2–8.4 ka 兩定年的高度（圖 49。注意：當時布唐布那斯的溪口，或主流河床，勢必更低），如此，荖濃溪在 8.2–8.4 ka 堆積之後，5.5–5.7 ka 之前，必曾大幅下切。很可能地，整個出露於玉穗溪口左岸的主流礫層均堆積於八千多年前（堆積達到鼎盛時的河床比 2008 年高至少一百三十公尺），而絕大部分填積於古玉穗溪河道的礫石（近兩百公尺厚）乃堆積於五千多年前（圖 46）；後者可能起因於「奇斯薩庫」沖積扇的生長。

布唐布那斯 PT₁ 階地尚產出 3720–3970 與 4010–4230 cal BP 兩年代，顯示此間在 3.7–4.2 ka 曾有土石流的活動，惟其規模與堆積幅度仍不清楚。推測至少從五千多至三千多年前期間，研究區沖積扇的發育主要來自荖濃溪左岸的支流，如此迫使主流向右岸遷徙並侵蝕之，此岸土石流、河流的地層紀錄遂不容易保存下來。

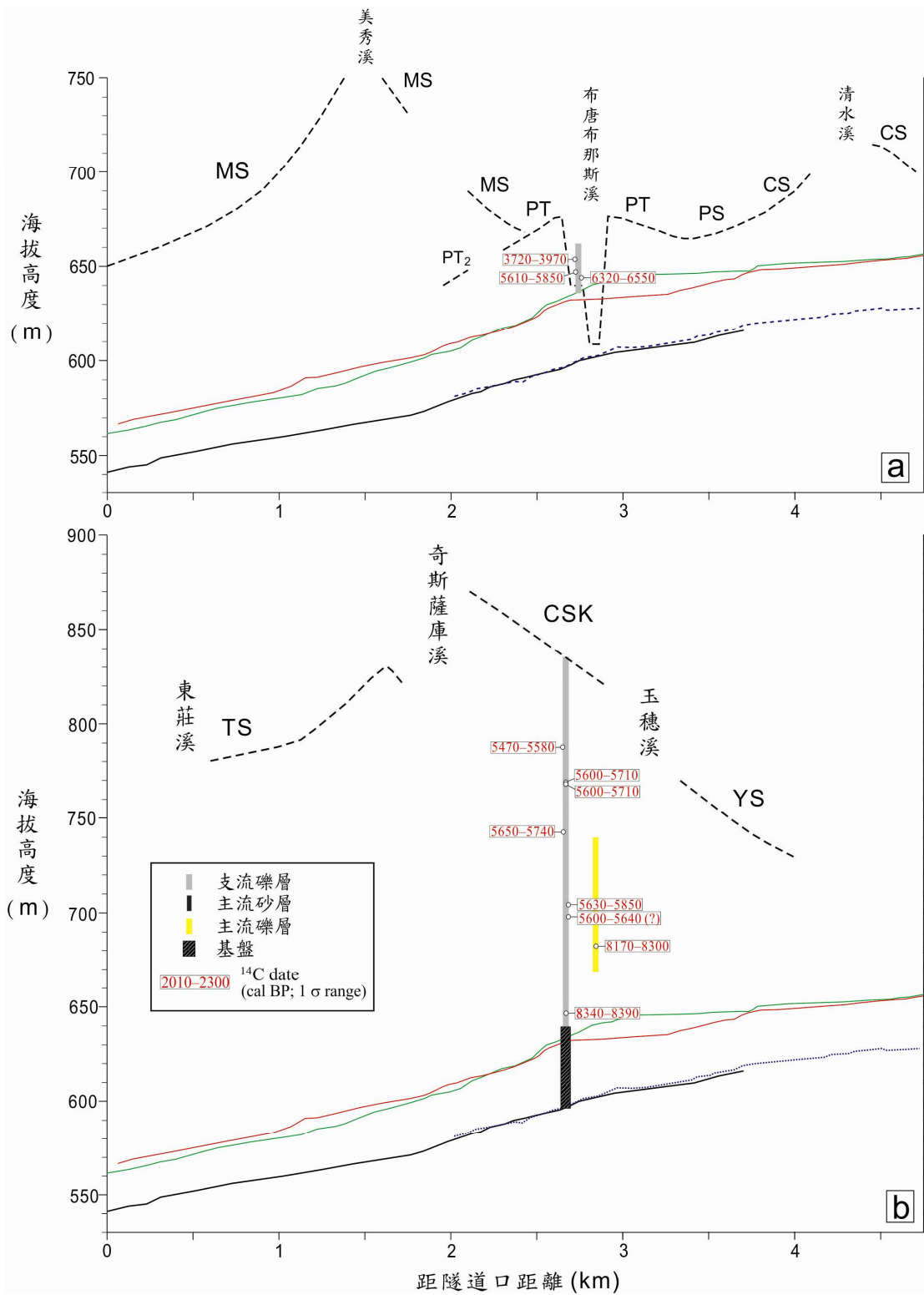


圖 49 研究區 > 3ka 定年與沉積剖面的摘要。(a)主流右岸。(b)主流左岸。河床縱剖面及其它說明如圖 16, 17。扇階代號如圖 10。

5.2.2 全新世晚期(3ka 以後)

研究區近兩千年來土石流的資料皆來自荖濃溪右岸(圖 50, 51)。首先,「美秀」南扇記錄了一 1.8ka 的土石流事件(圖 31)。其次,由 S_2 (圖 33)與 S_{5-1} (圖 37) 共三筆相近的年代得知,美秀沖積扇曾在 1.6-1.7 ka 時成長,並堰塞主流。這兩期堆積事件當時的河床均比 2008 年高至少三十公尺。

本研究在「美秀」與「布唐布那斯」扇階系統中共得到 15 筆 1.3-1.5 ka 的年代(包括 3 筆來自美秀溪者,並已扣除 S_4 不合理的 1340-1390 cal BP 年代)。這 15 筆年代中,有 12 筆交集於 1410-1480 cal BP,其它 3 筆較年輕者為:1350-1410、1300-1350、1310-1380 cal BP。如此,美秀溪於 1.3-1.5 ka 期間或曾經歷兩期大規模的土石流堆積事件(圖 50, 52a)。主要的一期發生於 1.4-1.5 ka;此時美秀沖積扇的成長來到頂峰。另一期發生於 1.3-1.4 ka,其堆積的礫石至少四十多公尺厚——由「美秀」南扇下的 MS_1 (1350-1410 cal BP;圖 30c),到「布唐布那斯」南扇的一主流砂層(1300-1350 cal BP;地點 18)。而兩堆積期之間,河流必曾快速下切,從「美秀」扇面至 2008 年的河床附近——至少一百公尺深(圖 52a)。

「清水」扇階與 PC 階地皆產出 1190-1300 cal BP 之年代(圖 41, 42),顯示在這個時間,清水溪沖積扇曾大幅發展。之後,一 1.1ka 的土石流事件記錄於「美秀」北扇與「布唐布那斯」南扇之間的 PT_2 階地(圖 34b),但該土石流的來源(「美秀」或「布唐布那斯」系統)尚無法判斷。而根據 PT_2 南緣的資料(圖 35),美秀沖積扇在近一千年內至少還有兩次的擴展:一次發生於約 0.8 ka;一次 0.3-0.4 ka (圖 52a)。

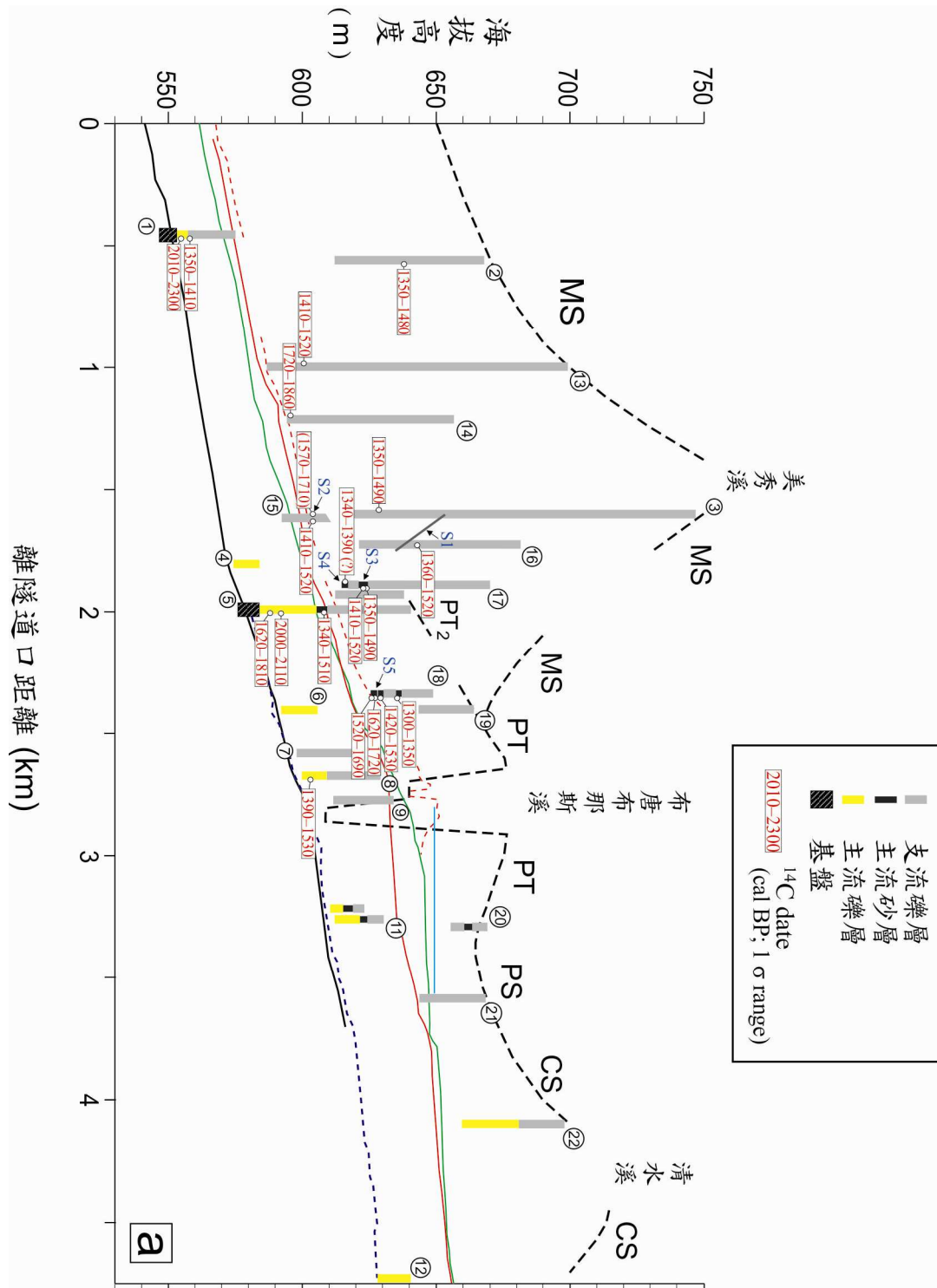


圖 50 研究區主流右岸 3-1.3 ka 定年與沉積剖面的摘要。河床縱剖面及其它說明如圖 16, 17。扇階代號如圖 10。

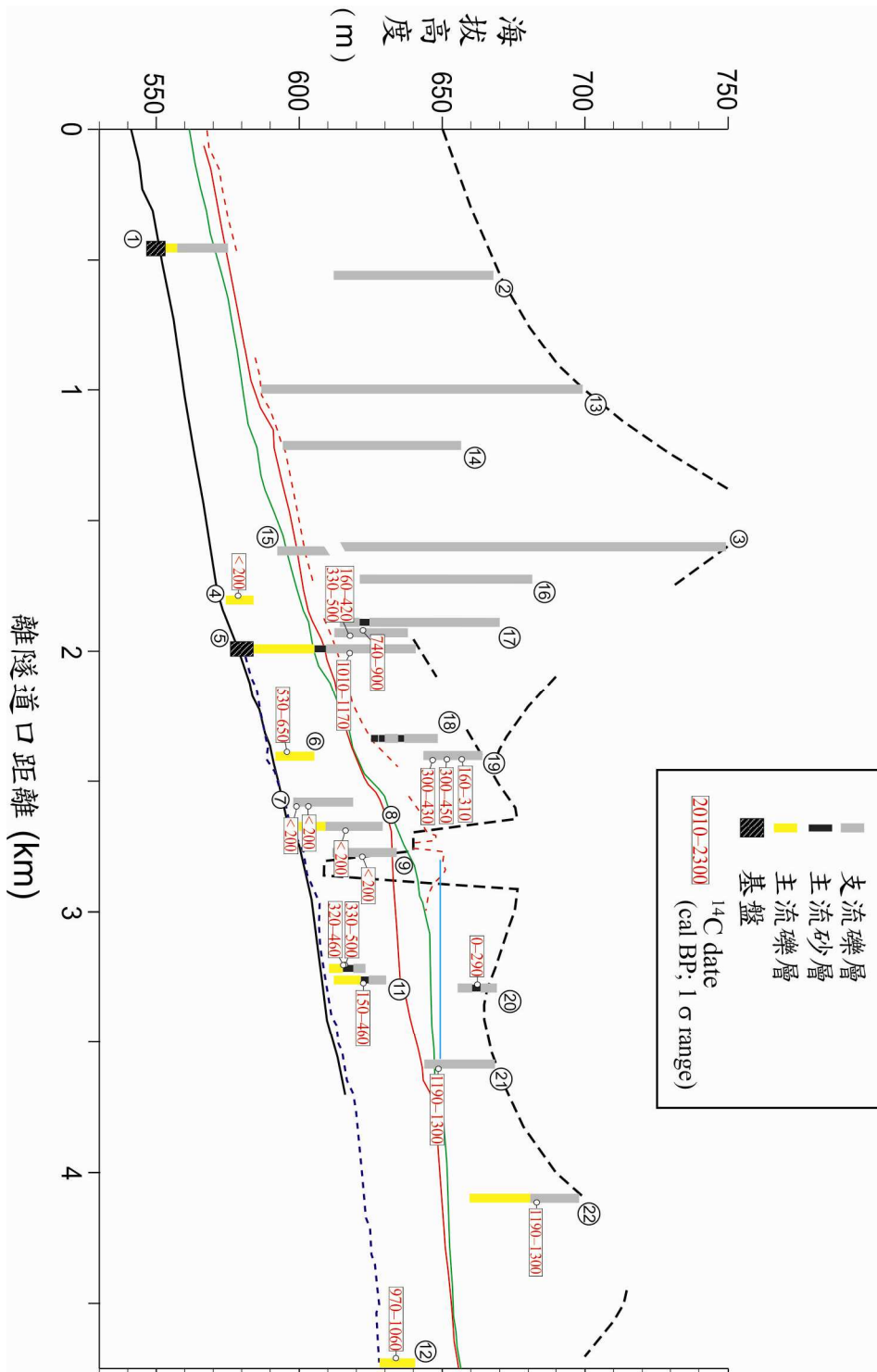


圖 511 研究區主流右岸 < 1.3 ka 定年與沉積剖面的摘要。河床縱剖面及其它說明如圖 16, 17。扇階代號如圖 10。

本研究在「布唐布那斯」扇階與 PC 階地共獲得 11 筆 < 0.5 ka 的年代 (圖 51, 52a)。其中 7 筆——最大 330–500 cal BP (來自扇階下半部; 圖 40), 最小 0–290 cal BP (距 PC 階面 4 m; 地點 20)——可與其它 4 筆 < 200 BP (modern) 的年代區分。這些年代透露, 布唐布那斯溪在過去的四、五百年間曾大幅地成長(無論其中經歷多少次堆積、下切循環), 且所見之「布唐布那斯」扇階面很可能在距今兩百年內才形成。之後, 河流急遽下切至少七十公尺 (圖 52a)——由「布唐布那斯」階面至 2008 年河床面(甚至以下)。近 < 200 BP, 布唐布那斯溪仍有沖積扇發育, 形成 PT_1 階地的前身(圖 15a)。該沖積扇的發育使主流河床淤高了至少二十公尺 (圖 13a)。

本研究也在 6 個地點, 共得到 7 筆來自主流礫層的年代: 最大 2040–2300 cal BP, 最小 < 200 BP (圖 50, 51); 比高由 3 m 到 11 m (相較於 2008 年溪床)。這些年代大部分與前述堆積期(或事件)的年代錯開, 如此驗證: 兩堆積期之間河流至少下切至接近 2008 年河床的位置 (圖 52a)。

5.2.3 研究結果的解析度與不確定性

綜合以上資料, 推論研究區近兩千年來至少經歷 9 次堆積期(或事件), 其中至少 6 次堆積的幅度不亞於(甚至顯著超過)莫拉克颱風事件 (圖 52a)。總計至少 5 次堆積事件和美秀沖積扇的擴展有關(最大的一次發生於 1.4–1.5 ka), 而近幾百年以來, 則布唐布那斯沖積扇的活動明顯影響了此間河流的堆積, 直到今日亦然。

本研究所得到的河流地形演育的歷史, 已大幅修正了 Hsieh and Chyi (2010) 的推論(比較圖 52 與圖 13b, 14c)。顯然地, 這個進步在於更多定年資料的呈現, 如此不僅精細了河流的歷史, 也說明前人將「地形面」視為「等時間面」的錯誤(按: Hsieh and Chyi (2010) 曾因「美秀」與「布唐布那斯」扇階面相連, 而相信兩階

面形成於同一時間)。在此必須強調，即使本研究已提供了大量的定年資料，但這資料不可能完備；其原因至少有二：(1)本研究絕大部分的標本只能取自於剖面的中、下半部分(其上半部難以到達)；(2)以台灣侵蝕作用之旺盛，地形與地層證據本就難以保存。一般而言，只有相對較大，或是較年輕的事件才可能被記錄下來。如此，雖然圖 52b 中， $>2\text{ka}$ 河流堆積事件的頻率明顯低於 $<2\text{ka}$ 者，但這應只是資料分布不平均造成的假象。事實很可能是：研究區河流長期以來一直經歷著高頻的堆積、下切循環；惟 2ka 之前，絕大部分河流變遷的證據已被侵蝕殆盡。

其次，須知圖 52 乃以定年標本的比高作為堆積上界(除「美秀」扇階面外)，但這些定年標本並非來自剖面的最高處(更不消說剖面以上的地層可能已被侵蝕而消失)。如此，再加上部分標本或許已經過「重新搬運」(其高程為所定年代溪床的最低限)，圖 52 所界定的「堆積上界」顯然低於實際。同樣地，由於作為基準的 2008 年溪床並無基盤出露，吾人也僅能估計兩堆積事件之間河流「最小」的下切量。也因為如此，每次堆積事件的規模並無法估算(因不知其堆積起始高度)。例如，於布唐布那斯溪，雖然形成「布唐布那斯」扇的事件(約 0.2-0.4 ka)看似大於爾後的 $<200\text{BP}$ 事件(圖 52a)，但須知 2008 年主流溪床之下尚有二十公尺厚的礫石(根據引水隧道口附近的鑽井資料)；倘若這些礫石都是在 $<200\text{BP}$ 事件時所堆積，則該事件的規模或許並不亞於 0.2-0.4 ka 事件。

以上種種，再加上碳十四定年固有的不確定性(解析度)，本研究所推論之河流堆積、下切歷史——無論是幅度或是頻率——都被大幅低估了。

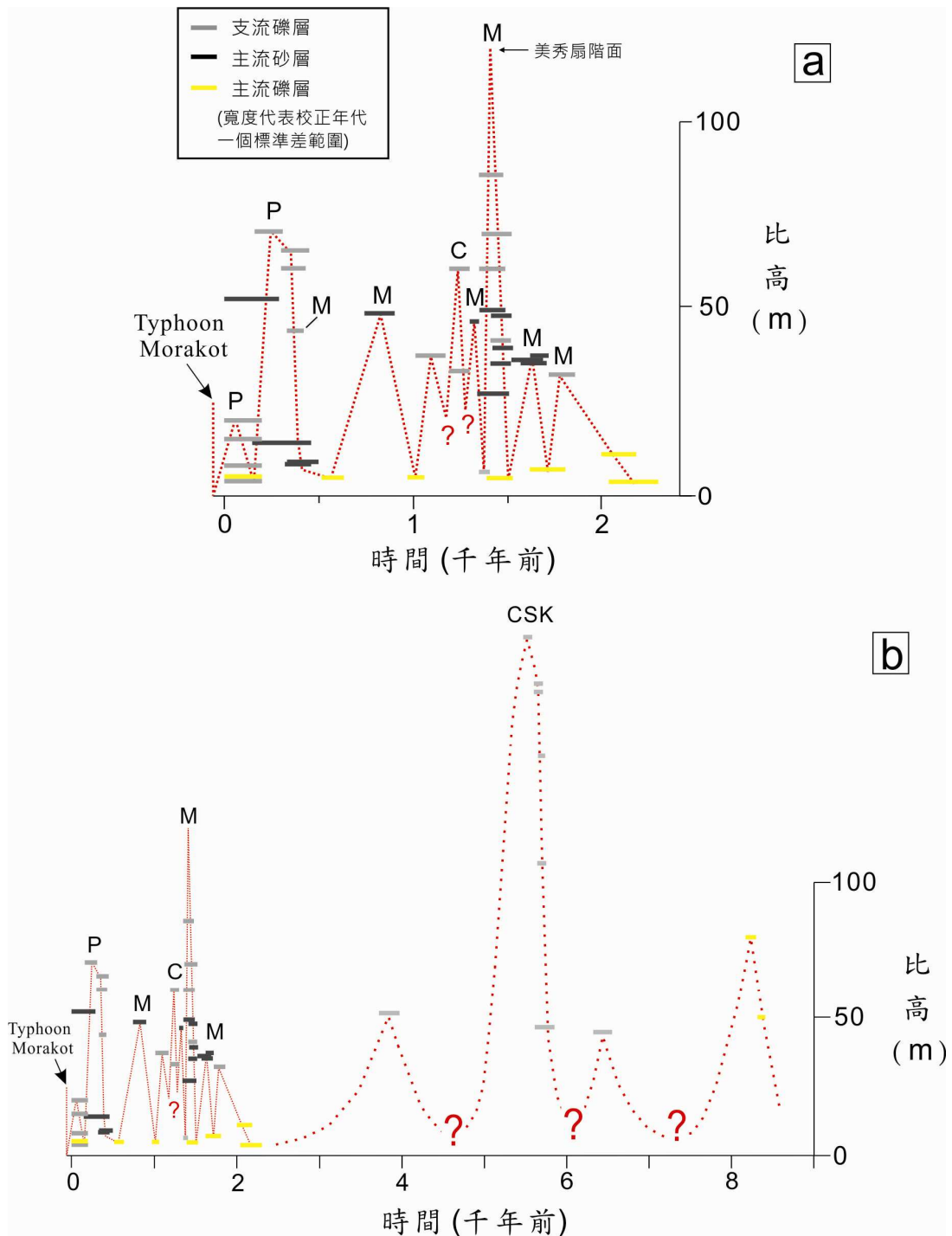


圖 52 研究區定年結果、標本比高圖。比高相對 2008 年河床。虛線為所推論之河流堆積、下切歷史。造成河流堆積的沖積扇系統：P=布唐布那斯；M=美秀；C=清水；CSK=奇斯薩庫。(a) <2.3 ka 之資料。(b) <8.4 ka 之資料，其中 <2.3 ka 的部分與圖 a 相同。注意：受限於(1)碳十四定年的解析度，(2)地層證據的保存性與代表性，(3)定年標本並非位於地層的最高點或最低點，所推論之河流堆積、下切歷史，無論是幅度或頻率，都被大幅低估了。

5.3 河流堆積作用的意義

地科界多認為，在降雨充足的背景下，台灣山區的河流應具備了強大的侵蝕與搬運能力，足以將山坡產生的岩屑快速地向平原搬運(如 Hovius et al., 2000; Dadson et al., 2003; Lin et al., 2009)。如此，數百萬年來，台灣山脈的隆升應已被侵蝕所抵銷，即達到所謂的「地形平衡」狀態(topographic steady state)(Hartshorn et al., 2002; Willett et al., 2003; Stolar et al., 2007)。然而，一如莫拉克颱風事件，台灣大規模山崩、土石流的活動，顯然能在很短的時間內大幅增加河流岩屑的供應，造成河床大規模的堆積。此外，颱風事件也證實能降低一些支流流域(如布唐布那斯溪)岩屑產生與搬運的門檻；從此，即使少量的降雨也足以使大量的沉積物源源從支流供出，造成主流持續地堆積。以上機制說明了，雖然台灣山區河流長時間以侵蝕、下切為主(反映地殼隆升)，短時間卻可能發生堆積。而由台灣山區扇階地形的普遍程度看來，這現象並非特例。

本研究提供了證據，用以檢視台灣山區河流堆積現象的重要性。一如圖 52 所示，八千多年來，研究區已經歷多次大規模的堆積活動；其幅度之大，次數之頻仍，全然無視同時期地殼隆升的存在(注意：現今地殼正以每年 10-15 mm 的速率抬升!)。顯然即使在千年、萬年的時距下(不消說更短時距)，山崩、土石流所帶來的岩屑(速率、歷時及頻率)仍是影響河流作用的最主要因素。

已知支流沖積扇的擴展將導致主流的堆積，且其「潛能」正揭示於各扇階的地層紀錄中(如圖 52)。但除此之外，吾人對這些沖積扇演育的過程(即沉積物供應的時機、速率、歷時及頻率)仍無法掌握。例如，吾人尚不知，為何有著相似的地形、地質背景，相鄰的「美秀」與「布唐布那斯」沖積扇系統卻有著截然不同的歷史？為何莫拉克颱風期間(與之後)，當布唐布那斯頻頻發生山崩、土石流，而美秀流域卻依然穩定？無論如何，研究區內計有 6 個支流沖積扇系統，其

上游則還有 8 個類似的系統(包括三千多年前發育的「塔古夫庫拉」扇)，這些沖積扇系統擴展時，直接或間接，都能造成研究區主流的堆積。在無法預知這些沖積扇未來活動性的情況下，研究區堆積事件發生的時間、頻率與規模將難以預測(甚至可能視為一混沌、隨機的現象)。

5.4 工程上的反思與應用

工程界面對台灣山區河流時，往往也僅關注水流「沖刷」帶來的問題。這個現象多少受地科界影響，但更重要的，還在於估算山區岩屑產出速率的困難(也就是說，即使已充分掌握水文、水力與地形等因子，卻仍難以預測山崩、土石流發生的時機、地點、與規模)。由於估算困難，只得引用國外經驗公式，或參考既有案例，來作為工程規範的依據。如此得到的岩屑產出速率往往被低估，特別是運用在如荖濃溪這般的山區河流中。連帶被低估的還有河流堆積的潛能與洪水位的高度(如圖 3)；被高估的則是水庫、攔河堰及防砂壩的壽命(如圖 19)。

如本研究所提供的地形、地層資料顯然能彌補上述的不足，所推論史前河流的歷史也提供了邊界條件，任何山崩、土石流、河流輸砂的假說或模型必要滿足之。地形、地層資料也顯示了河流特性隨空間的差異，或許能因此制定不同流域工程的規範。受限於所謂的「保固期」，工程設計往往只考慮五十年，最多百年週期的地表營力事件。但須知，這短期記錄的歷史未必具代表性，唯能配合更長期的資訊，則一河流真正的特性才可能被揭露。何況事實證明，無論統計上長(萬年)或短(百年)週期的事件，都可能在今年或明年的豪大雨中發生(小林山崩即為一例；Hsieh et al., 2012)。

至此，根據所推論河流的特性，本研究建議廢止「曾文溪越域引水」計畫。

廢止的原因，除了研究區河床巨大的堆積潛能外，更重要的，還在於其頻繁、劇烈、且無法預測的堆積、下切循環。這快速的河流環境變遷勢必使取水困難，或大幅提高取水的成本。具體地說，當底床沉積物量少之時，吾人或可以用傳統築堰攔水的方式取水；當沉積物量多時，則採用伏流水收集工法；然而，當河流快速堆積、下切成為常態，則任何工法都將捉襟見肘。並且，河流快速的堆積或下切可因一場破紀錄的豪大雨而「突然」引發，毫無前兆可言，莫拉克颱風事件即是一鮮活的例子。

本研究的結果也可應用於南橫公路勤和、復興段新建工程的評估。這段公路屢修屢毀，其一重要原因即為布唐布那斯沖積扇的成長(如圖 24)。本研究也曾進入布唐布那斯溪調查，目睹其流域遍布的鬆散岩屑。這些岩屑不得不予人聯想：無須幾場豪大雨，布唐布那斯沖積扇或許即可達到其兩百年前的規模，甚至朝「美秀」扇設下的「記錄」邁進。在這樣的情況下，為求一勞永逸，新建的道路宜避開溪谷，採隧道方式。惟隧道工程昂貴，在資金未到位時，則目前相對廉價、容易修補的便道仍為最佳的選擇；惟如此將限制當地旅遊、經濟的發展，政府必要對居民說明，並協助其適應(甚至遷村)。

第六章、結論

1. 雖然台灣山區河流長時間以侵蝕、下切為主（反應地殼隆升），但短時間卻可因大規模山崩、土石流的活動而發生堆積。2009 年莫拉克颱風之前，研究區（荖濃溪勤和）近兩千年來至少經歷九次堆積事件，其中至少 6 次幅度不小於二、三十公尺；最近的兩次堆積事件發生在近兩百年內；最大的事件發生於 1.4-1.5 ka cal BP，當時的河床比 2008 年者高超過一百公尺。此外，全新世以來至少在 5.5-5.7 ka 和 8.2-8.4 ka 還有兩次堆積事件，前者幅度至少 150 m。
2. 本研究受限於：(1)碳十四定年的解析度，(2)地層證據的保存性與代表性，(3)定年標本並非位於地層的最高點或最低點，所推論之河流堆積、下切歷史，無論是幅度或頻率，都應被大幅低估了。
3. 研究區的堆積和支流沖積扇的擴展(即山崩、土石流的活動)息息相關，而吾人對這些沖積扇演育的過程(即沉積物供應的時機、速率、歷時及頻率)仍無法掌握。研究區內計有 6 個支流沖積扇系統，其上游則還有 8 個類似的系統。在無法預知這些沖積扇未來活動性的情況下，研究區堆積事件發生的時間、頻率與規模將難以預測，近年來全球暖化帶來的「極端氣候」更增加了這預測的難度。
4. 根據以上河流特性(頻繁、劇烈、且無法預測的堆積、下切循環)，本研究建議廢止「曾文溪越域引水」計畫。

參考文獻

- 中央地質調查所(2000)，台灣地質圖，比例尺：五十萬分之一。
- 林朝榮(1957)，台灣地形。台灣省通志稿卷一，土地志，地理篇，第一冊，共424頁。
- 陳幸萱(2011)，科技證據與民眾信服的鴻溝—以曾文水庫越域引水工程為例。碩士論文，國立臺灣大學社會科學院新聞研究所。
- 黃美璇(2001)，荖濃河流域之河階地與地形演育。碩士論文，國立高雄師範大學地理學研究所。
- 齊士崢(2002)，台灣山地地區的主要沖積扇階地與地形災害。地理學報，32：75-87頁。
- 經濟部水利署(2003)，曾文溪越域引水計畫環評書。
- 謝孟龍(2007)，台灣河階地形研究的回顧、檢討與展望。經濟部中央地質調查所特刊，第十八號，209-242頁。
- Capart, H., Hsu, J.P.C., Lai, S.Y.J., Hsieh, M.L., 2010. Formation and decay of a tributary dammed lake, Laonong River, Taiwan. *Water Resources Research* 46, W11522.
- Cheng, H.Y., 2011. Confluence Morphodynamics with Tributary Influx and Lake Formation: Field Survey and Experiments. Master Thesis, Department of Civil Engineering, National Taiwan University.
- Ching, K.E., Hsieh, M.L., Johnson, K.M., Chen, K.H., Rau, R.J., Yang, M., 2011. Modern vertical deformation rates and mountain building in Taiwan from precise leveling and continuous GPS observations, 2000–2008. *Journal of Geophysical Research* 116, B08406.
- Dadson, S.L., Hovius, N., Chen, H., Brian Dade, W., Hsieh, M.L., Willett, S.D., Hu, J.C., Horng, M.J., Chen, M.C., Stark, C.P., Lague, D., Lin, J.C., 2003. Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogeny. *Nature* 426, 648–651.
- Hartshorn, K., Hovius, N., Dade, W.B., Slingerland, R.L., 2002. Climate-driven bedrock incision in an active mountain belt. *Science* 297, 2036–2038.

- Hovius, N., Stark, C.P., Chu, H.T., Lin, J.C., 2000. Supply and removal of sediment in a landslide-dominated mountain belt: Central Range, Taiwan. *Journal of Geology* 108, 73–89.
- Hsieh, M.L., Chyi, S.J., 2010. Late Quaternary mass-wasting records and formation of fan terraces in the Chen-yeo-lan and Lao-nung catchments, central-southern Taiwan. *Quaternary Science Reviews* 29, 1399–1418.
- Hsieh, M.L., Lai, L.S.H., Lin, C.D.J., Shyu, J.B.H., 2012. Late Quaternary landscape evolution and genesis of the 2009 catastrophic landslide in the Hsiao-lin area, southwestern Taiwan. *Geomorphology* 179, 225–239.
- Lin Z., Oguchi, T., Chen, Y.G., Saito, K., 2009. Constant-slope alluvial fans and source basins in Taiwan. *Geology* 37, 787–790.
- Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Buck, C.E., Burr, G., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hajdas, I., Heaton, T.J., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., McCormac, F.G., Manning, S.W., Reimer, R.W., Richards, D.A., Southon, J., Turney, C.S.M., van der Plicht, J., Weyhenmeyer, C., 2009. IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon* 51, 1111–1150.
- Stolar, D.B., Willett, S.D., Montgomery, D.R., 2007. Characterization of topographic steady state in Taiwan. *Earth and Planetary Science Letters* 261, 421–431.
- Willett, S.D., Fisher, D., Fuller, C., Yeh, E.C., Lu, C.Y., 2003. Erosion rates and orogenic wedge kinematics in Taiwan inferred from apatite fission track thermochronometry. *Geology* 31, 945–948.