地理學報　第三十三期：19-37(2003)
JOURNAL OF GEOGRAPHICAL SCIENCE (33) : 19-37(2003)

臺灣河階對比研究之回顧與探討

A Review of Studies of Terrace Correlation in Taiwan

黃文樹* 蔡　衡** 林登秋***
Wen-Shu Huang Heng Tsai Teng-Chiu Lin

Abstract

In the past two decades, there have been many correlational studies that have examined the relationship between river terraces and the active tectonics of Taiwan. These correlations have been based on aerial photography interpretation and geomorphic parameters such as the elevation, the relative heights above present rivers and scarp height. The ^{14}C ages for the terraces are limited by the amount of driftwood uncovered. In addition to the traditional ways of correlation, there are studies which establish terrace correlation by morphologic dating and by reconstructing fluvial behavior. In this paper, the authors review the methods used and results of previous studies and suggest soil chronosequence as the criteria for terrace correlation in future studies. The application of the index of soil development has been new to geomorphology in Taiwan, and is worthy of being studied in future.

Keywords: river terrace, terrace correlation, soil development, soil chronosequence.

* 國立彰化師範大學地理系研究生
Graduate student, Department of Geography, National Changhua University of Education.
** 國立彰化師範大學地理系副教授
Associate professor, Department of Geography, National Changhua University of Education.
***國立彰化師範大學地理系教授
Professor, Department of Geography, National Changhua University of Education.

摘　要

過去二十年來許多學者投入臺灣地區河階的研究，這些研究大多著重在階地的對比，並進而探討區域構造的活動特性。許多階地的對比研究採用傳統的階地對比法，透過航照判釋或是根據一些地形參數如海拔高度、階地面與河流的比高、崖高等來對比。碳十四定年能爲河階對比研究提供量化的資料，然受限於標本取得不易，僅有少部分研究具碳十四定年資料。除了傳統階地對比法外，亦有利用地形定年法模擬崖坡發育，取得其與時間的關係作爲對比的依據。亦有學者重建河流下切過程，將相同過程的階面對比關連起來，復原各時期河床高度與流路，探討階地的成因。本文回顧國內河階研究所採用的方法及成果，以及國外利用土壤化育程度化育指數對河階地進行相對或絕對定年的研究，建議未來可利用表層覆蓋土壤化育的程度，作爲流域內或流域間河階對比的依據。目前國內有關土壤化育指數的研究仍少，且尚未應用於河階地形的對比。若能在已有定年資料的階地，詳細調查其土壤的化育情形，將之量化爲化育指數，並將之與已知的定年資料進行迴歸分析，則未來將可利用土壤化育指數爲臺灣階地的研究開啓另一個量化的研究方法。

關鍵詞：河階、河階對比、土壤化育、土壤時間序列

前　言

河階是河川發育的階狀地形，由階面和階崖所組成，階面可由侵蝕和堆積作用形成，階崖 端賴侵蝕作用 (石再添等，1990)；而造成階崖下切侵蝕的原因包括侵蝕基準面下降、河床坡度增大 流量增加、流速集中、及搬運物質減少等，這些作用可由地殼的運動 (張瑞津等，1991、1992a、19 92b、1998、1999；楊貴三，1988；石再添等，1985a、1985b；許民陽，1984)、海準面下降 (Sung *et al.*, 1 997)、氣候變遷 (Hsieh and Knuepfer, 2001; Hsieh *et al.*, 1994; Liew and Hsieh, 2000) 、河川襲奪 (齊 士崢，1995a; Chen and Liu, 1991)、冰河引起的地表均衡變化 (Maddy and Bridgland, 2000; Colls *et al.*, 20 1) 與人類活動等因素造成。而這些作用因子往往因各地河川流域環境與演育時間長短的差異，呈現 雜多樣的特性。河階的生成可反應出地貌在時間序列中的變化情形，而階崖比高、階面規模、地層 積物組成、階序對比等河階特徵與型態則反應了古環境的變遷。

臺灣地處歐亞板塊與菲律賓海板塊的碰撞帶上，廣泛分布的河階反應了臺灣構造運動的活 ；許多河階的研究利用階地標高、比高、坡降、寬度、階數、崖高等階地特徵，以及階地沉積物質的 度、粒徑、圓磨度、風化度、覆瓦構造等特性，串連起同時期發育的階地，復原古流路，進行階面的對 (富田芳郎，1972；林朝棨，1957)。階面對比的結果更可進而推論該區域的地形演育 (許民陽，19 4；楊貴三，1988；張瑞津等，1991、1992a、1992b、1998、1999)，或是探討河流下切過程與階地成 (齊士崢，1994、1995a；齊士崢和黃美璇，2001)，並且由河川與階崖延伸方向，配合構造型態，探討區域斷層的確實度與構造的活動特性 (石再添等，1983、1985a、1985b、1986)；在從事階面對比工 時，若有碳十四定年資料可供佐證，便可得知階地的生成年代，建立流域內或流域間階地群的年代 對，再輔以古環境變遷事件如氣候變遷、海準面升降等，便可推論階地生成原因 (Chen and Liu, 1991 Hsieh

and Knuepfer, 2001; Hsieh *et al.*, 1994; Liew and Hsieh, 2000)。然因第四紀階地定年物質的缺乏，部分學者乃模擬河階階崖邊坡演育型態，亦即地形定年法，來推估河階的形成年代 (蔡衡和宋國城，2000; Sung, and You 1993; Sung *et al.*, 1995, 1997)，以彌補定年資料不足之憾，然後再進行區域階地的對比。

因此在河階的相關研究中，無論其結果是要重建區域的地形發展史，或是探求河階的成因，甚至推論古代氣候環境與變遷，針對區域內或區域間的河階面進行對比，都是一項重要的基礎工作，而這樣的區域對比還需有定年資料的支持；基於此，本文蒐集近十餘年來在國內外期刊中，曾經發表過有關臺灣河階研究之文章，討論其所採用的對比、定年方法以及相關研究成果，然後進一步探討各對比與定年方法的特性和限制，並提出未來可行的研究方法與方向。

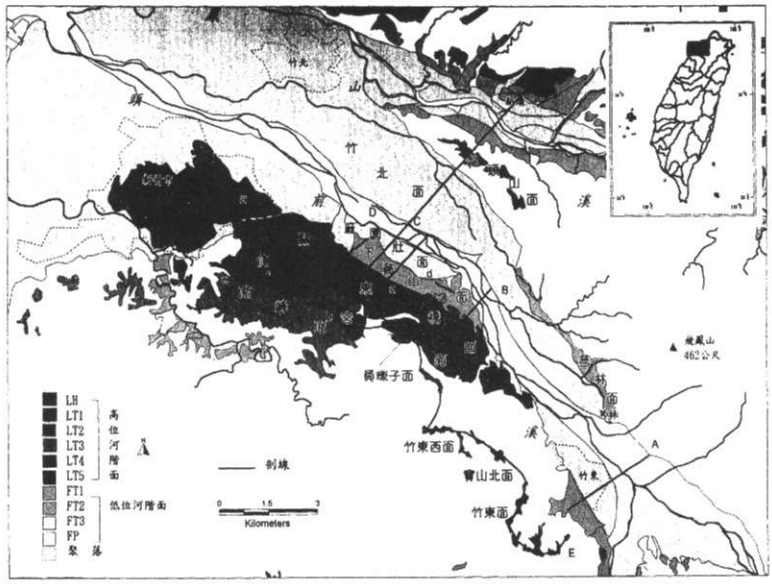
河階的對比與定年方法

目前臺灣的河階研究中，所採用的河階對比與定年方法，大致可分爲傳統河階對比法、河流下切過程法、碳十四定年法與地形定年法等，茲簡要分述如下：

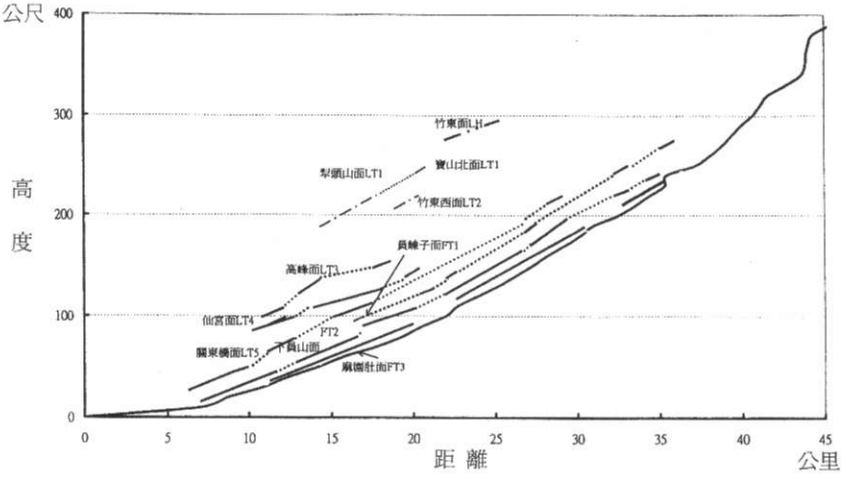
(一)傳統河階對比方法：此乃透過航照判讀，繪製河階分布圖，再依據相片基本圖、地形圖計測階地高度、坡度、階崖高度與比高等地形特徵，繪製河川階序圖與剖面圖，然後由野外實察查核階地分布情況、記錄礫石礫徑大小、覆瓦構造與方向、採集紅壤與拍照，最後於室內進行粒度分析並繪製圖表。例如張瑞津等人 (1999) 便透過此一方法繪製頭前溪階地地形特徵表、階地分布、階序分布與階地剖面圖 (圖 1)，然後根據所得的資料，以及野外實查、斷層分布特徵結果，推論該地區的地形演育和構造運動的關係。

(二)河流下切過程法：此方法首先調查個別階地面與河床的高差、階地沉積層厚度與分布特性，再進行階地對比，即依照階面與河床高差，將階地標示在河床縱剖面圖上，形成同期河床面。接著綜合相鄰高、低位階地的河床位置，探討特定河川斷面的河床變化過程，然後歸納相鄰且連續性佳的主要河階地斷面特徵，組合成一具共同演育過程的河段，最後由各河段的下切過程，配合階地面傾斜趨勢，與沉積層沿河川方向的延伸，獲得各期的古河床面，推演出區域的河川下切過程 (齊士崢，1994、1995a；齊士崢和黃美璇，2001)。藉由此一方式若還能有碳十四年代輔助，則可以作爲階地對比的依據，並計算出確切的河川下切與加積的速率，進一步探討影響河川下切的因素；另也可以配合其他區域階地研究成果，探討影響大尺度區域演育的因素。齊士崢和黃美璇 (2001) 便曾繪製荖濃溪的下切過程圖 (圖 2)，推論荖濃溪階地的生成與構造抬升導致的河川回春作用有關，然在河川下切的過程中，還伴隨著 2-3 次的河谷加積，而加積物的來源則與支流在主流河床上發育的沖積扇有關，另上游沖積層厚度與階崖高度均較下游大，顯示構造抬升量在區域間有不等的現象。

(a)



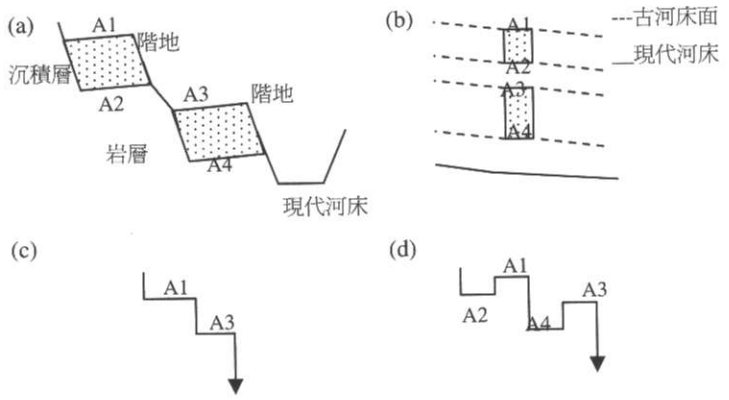
(b)



資料來源：張瑞津 (1999)。

(a)頭前溪河階分布圖，由航照判讀繪製而成；(b)頭前溪河階階序圖，透過相片基本圖　地形圖計測階地高度、坡度、階崖高度與比高等地形特徵，加以繪製。

圖 1　頭前溪河階分布圖(a)與河階階序圖(b)



(a)河谷縱剖面圖，A1 和 A3 爲沖積層上部即階面，A2 和 A4 爲沖積層底部。(b)河川縱剖面圖，A1 和 A3 表加積後河床高度，A2 和 A4 表河川下切後河床。(c)不考慮階地組成物 (沖積層) 時，河川下切的過程，A1 和 A3 表示舊河床高度。(d)考慮階地組成物 (沖積層) 時，河川下切的過程，A2 和 A4 表下切後河床，A1 和 A3 則爲下切後再堆積的河床。

資料來源：修改自齊士崢、黃美璇 (2001)。

圖 2　老濃溪的下切過程圖

(三)碳十四定年法：利用河階沖積層中的漂木、木炭、泥碳、骨頭、珊瑚、貝類或是其它可供定年的物質樣本，利用 ^{14}C 原子隨著時間的增加，生物遺骸中的 ^{14}C 就逐漸衰變而減少的特性，來測定出地層的絕對年代，目前在臺灣河階的相關研究中，利用碳十四所定的年代如表 1 所示；由於地層中可供定年的物質難以獲得，因此往往在定出樣本採集階地的年代後，必須再輔以階地的比高、沉積物的特徵和性質，定出其他階地的年代，建構階地的成因與區域的地形發育過程。例如 Chen 和 Liu (1991) 利用在大漢溪下游的低位階地採集到的漂木標本，輔以各階地崖高對比，定出大漢溪最老階地生成年代在 47,000 年前，最年輕的洪積平原(fluvial plain)則在 6,000 年前開始形成；另外在蘭陽溪、秀姑巒溪、二仁溪、立霧溪、三仙溪等地的階地亦分別有學者曾發現漂木樣本，並進行定年 (表 1)。

(四)地形定年法：地形定年法乃是利用數學模式來模擬階崖發育過程，其基礎假設是將整個邊坡視爲一連接剖面各點位置的連續曲線，沿剖面水平方向等距地切割成若干長方形單位，若水平間距極小，則這些長方形單位所組成的剖面與實際的剖面近乎相等；令長方形的面積代表邊坡剖面沉積物的量，則一單位的搬運量和堆積量應會如熱力學原理一般維持質量平衡，即搬運量等於堆積量 (圖 3)。此一搬運與堆積的過程，可由一組數學的方程式來表示，經過推導後可得以下的關係式：

$$\partial y/\partial t = k\partial^2 y/\partial x^2 y$$

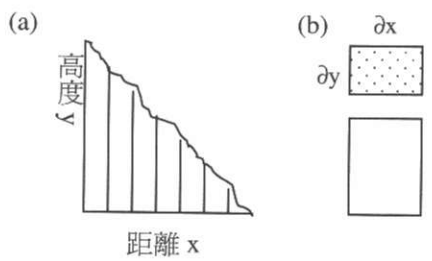
表 1　臺灣河階定年資料

河川	地點	碳十四年代 (B. P.)	出處
荖濃溪	琉球階地	3760±40*	齊士崢和黃美璇 (2001)
立霧溪	道拉斯	2400	劉志學 (1989)
	梅園	2400	劉志學 (1989)
	霍霍斯	3500	齊士崢 (1994)
	哈隆	250	齊士崢 (1994)
	魯比	Present	齊士崢 (1994)
大漢溪	三峽(FP)	375±55	Chen and Liu (1991)
	鶯歌(FT)	11600±90*	Chen and Liu (1991)
	大溪(LT)	46800±2400*	Chen and Liu (1991)
濁水溪	竹山	30400±200, 30950±290	Ota *et al.* (2002)
秀姑巒溪	掃叭階地(LT)	>50000	張瑞津等 (1992a)
二仁溪	CP**	11350±70~5840±50*	Hsieh and Knuepfer (2001)
	KT***	5155±83~1290±50*	
三仙溪	上游較高位階地	5080±50*	Hsieh *et al.* (1994)
蘭陽溪	米磨登扇階	1800~1500	齊士崢等 (1998)
	夫布爾扇階	1100~900	齊士崢等 (1998)
	美羅溪扇階	350±45*	齊士崢等 (1998)
	逸久溪扇階	104.7±%0.5* modern	齊士崢等 (1998)
	石頭溪扇階	2540±50~400±50*	齊士崢等 (1998)

*　未校正之定年。

**　二仁溪在古亭上游的高位階地。

***二仁溪在古亭下游的低位階地。



(a)將邊坡視爲一連接剖面各點位置之連續曲線，沿剖面水平方向等距地切成若干長方形的單位，若水平間距極小，則由這些長方形組成的剖面和實際的剖面量近乎相等；(b)令個別單位長方形的單位面積等於該單位中沉積物的量，則經過一段時間搬運後，沉積物量的變化等於 y 與 ∂x 的乘積。

資料來源：蔡衡、宋國城 (2000)。

圖 3　地形定年法

y 爲邊坡高度、t 爲時間、x 爲邊坡剖面的水平距離、k 爲擴散速率常數。爲了消除崖高對 k 值帶的影響，將 k 值除以崖高值，便得一單位高度的擴散常數 k'，然後透過對常數值的計算(通常利用電腦計算)，可知數值越高的邊坡，其年代越老，反之越低則越年輕，從而定出河階生成年代 (蔡衡和宋國城，2000; Sung and You; 1993; Sung *et al.*, 1995, 1997)；蔡衡 (2000) 等人便曾利用地形定年法，針對八卦臺地南部階地，計算各階地的參數值，結果顯示各階地的常數值均很相近，認爲這些階地的生成年代很相近，然後再利用構造力學的觀點，推論這些階地成因可能爲構造抬升，而非前人判定的河川沖積。Sung and You (1993) 則利用碳十四定年資料來校準地形定年法，並經線性與非線性模式模擬階崖演育後的相對年代，證明碳十四定年與地形定年間有顯著的線性關係，且進一步獲得絕對年代，肯定線性模式在地形定年上的應用。

臺灣河階研究成果

臺灣河階的生成因素相當複雜，主要有構造運動的抬升、海準面升降、氣候的變遷、湖水外洩、河川襲奪與流域複雜反應 (complex response) 等因素，惟各地河川流域環境不同，作用的因子亦各不盡相同，往往間雜多種因素；因此難以完全地建構其地形發育過程，以及探討環境變遷的現象。然而在許多研究者的努力之下，已獲得不錯的研究成果，爲臺灣河階地形的發育與整體的環境變遷，提出有力的解釋和證明。本文茲就相關研究加以整理 (表 2)，並就已於學術期刊中發表之文章，簡要敘述臺灣各區域內重要河川階地的研究成果。

(一)北部地區：本區係指大安溪以北，涵蓋宜蘭地區；區域內各河川階地成因主要受到構造抬升運動的影響，並間有河川襲奪、回春作用、氣候變遷和海準面升降等作用，例如新竹、苗栗一帶的殘餘丘陵和臺地，即是因爲地區局部的間歇構造抬升，使得頭前溪和後龍溪等主要溪流，不斷下切甚至改向，在該地區造成一連串的高位河階面與侵蝕殘餘丘陵 (張瑞津等，1998、1999)；而新店溪流域河階的形成，與更新世中期以來蓬萊造山運動使雪山山脈隆起、地盤的不等量間歇性抬升、以及臺北湖外洩的回春作用有關 (楊貴三，1988)；古大漢溪在中壢桃園間形成一系列的高位河階後，約於 3 萬年前受到古淡水河的襲奪，在鶯歌附近改向注入臺北湖，加之以全球性海準面下降，使得大漢溪持續下切，在大溪、三峽一帶形成低位河階 (Chen and Liu, 1991)。另外蘭陽溪中上游分布有爲數眾多的沖積扇階，乃因受構造抬升、氣候變動、海準面上升等作用，使得蘭陽溪支流在本流形成沖積扇，後再經河川下切而成 (齊士崢等，1998)。但亦有研究指出該溪流域部分階地的生成，反而與沖積扇堆積時造成堰塞作用，導致局部侵蝕基準面變動有關 (Sung *et al.*, 1999)。

(二)中部地區：本區南以濁水溪流域、北以大安溪流域爲界，區域內的階地成因多與構造抬升運動有關，且因構造的活躍使得區域地形複雜化，造成地形發育再建構上的困難，如古濁水溪曾以先行河之姿切過八卦臺地，後在構造抬升運動過程中，逐漸向北遷移下切，形成埔中至大莊一帶的階面後，才改由今日二水鼻子頭一帶流過 (石再添等，1985b；陳平護，1987)。然而此一假說仍有部份爭議，部份學者認爲該階地之階崖是由構造運動而非河流下切所造成 (蔡衡和宋國城，2000)，但無論確實的作用爲何，可以確認的是這些階地是構造運動頻繁的證據 (Delcaillau *et al.*, 1998)。另新社河階群階地眾多，成因主要仍是因構造的抬升 (石再添等，1986)，且因局部斷層與構造活動的影響，造成階面的傾斜，以及階地抬升量的不一致，其高位階地階崖較大溪階群來得高，反應了臺灣中部構造抬升

表 2　臺灣河階研究一覽表

區域	範圍	主要河川	作者
北部地區	以後龍溪流域爲南界，包含蘭陽溪流域	基隆河	周淑文 (1997)
		新店溪	楊貴三 (1988)
			曾士林 (1994)
			張瑞津 (2000)
			龔任義 (2000)
		大漢溪	孫林耀明 (1981)
			陳于高 (1988，1991)
			朱英茂 (1992)
			Sung and You (1993)
			譙凱英 (1995)
			黃祥慶 (1995)
			楊黃政 (1996)
		蘭陽溪	陳邦禮 (1996)
			傅炯貴 (1998)
			齊士崢等 (1998)
			趙偉智 (2001)
		頭前溪	張瑞津等 (1999)
			蔡怡真 (2002)
		後龍溪(苗栗丘陵)	張瑞津等 (1998)
中部地區	介於大安溪與濁水溪之間	大甲溪	許民陽 (1984)
			石再添等 (1986)
			Sung *et al.* (1995)
			賴光胤(2002)
			Tsai and Sung(2003)
		濁水溪	石再添等 (1985b)
			蔡衡和宋國城 (2000)
南部地區	以濁水溪流域爲北界，南部各流域	二仁溪	Hsieh and Knuepfer (2001)
		荖濃溪	黃美璇 (2001)
			齊士崢和黃美璇 (2001)
		沙漠溪	石再添和鄧國雄 (1983)
東部地區	主要介於花蓮與臺東兩縣境中河川流域	立霧溪	劉志學 (1990)
			齊士崢 (1994，1995a，199 c)
		秀姑巒溪(花東縱谷北段)	張瑞津等 (1992a)
		鹿野溪(花東縱谷南段)	張瑞津等 (1992b)
		豐濱溪等(海岸山脈東坡各溪)	楊貴三 (1986)
			高鵬飛 (1990)
			張瑞津等 (1991)
其他	研究範圍跨越兩個以上的區域或具有全臺性質者		湯振輝 (1968)
			Hsieh *et al.* (1994)
			游素雲 (1994)
			呂敏誌 (1996)
			廖俊言 (1995)
			Sung *et al.* (1997)
			吳麗娟 (2000)

量大於北部的現象 (許民陽，1984)；不過，Sung 等人 (1995) 則認爲新社階群的形成，不僅受到構造抬升的影響，該低位階地 (FT) 的生成亦導因於全球性海準面的變化，而且有部分階地是屬於大甲溪支流下切所造成，並非全爲大甲溪所致。

(三)南部地區：主要泛指濁水溪流域以南各河川階地，這些階地的成因首推構造運動，曾有系統進行研究的地區如石再添等人 (1983) 在潮州斷層所進行的活斷層研究，從其階面的比高與階面型態來探討該地斷層活動現象，並以沙漠溪兩岸的階地爲主要研究區發現，該地河川階地的生成和全臺的相對隆起運動、以及逆斷層活動引起的撓升運動有關。而且逆斷層活動產生的衝擠和引曳張力，使得大部分階面產生曲隆和扇頂斷陷的地貌特徵；而恆春西部臺地的高位階面與鄰近的低位階地，其生成亦受到構造隆起與斷層錯動的影響 (石再添等，1985a)。此外，除了構造隆升外，氣候的變遷亦影響到本區階地的生成，如齊士崢和黃美璇 (2001) 爲了解荖濃溪下切過程與流域中地形的演育，便透過該溪流域中各階地的高差對比，配合定年資料，算出最近四千年來該溪年平均下切速率約爲 5 公厘，其下切與構造抬升、全新世暖溼氣候所導致的河川回春作用有關，而河川的加積則可能起因於全新世氣候變爲乾冷；又如；Hsieh and Knuepfer (2001) 透過漂木定年，發現大部分二仁溪的階地均約在 2000 年前生成，當時海平面的升降變化已趨於穩定，而且兩岸階面範圍均廣，現代河床卻很窄，故認爲二仁溪流域河階的生成與氣候的變化有很大的關聯。

(四)東部地區：本區域階地涵蓋範圍包括立霧溪、花東縱谷內各溪流與海岸山脈東側各溪等地之流域階地。由於本地位處歐亞大陸板塊與菲律賓海板塊輻合之處，構造活動頻仍，因此地殼的隆升往往是本地區河階生成的主要因素。張瑞津等 (1992a) 從流域、階地特性與海岸山脈岩性來看，推測秀姑巒溪早在海岸山脈隆起之初，即已切過。其並配合花東海岸八仙洞-成功間海階的珊瑚碳十四定年資料 (Liew *et al.*, 1990)，與秀姑巒溪支流紅葉溪中掃叭階地的碳十四定年資料，證明花東縱谷上升量有南部大於北部的不等量現象，故河階地在縱谷北段南端比較發達，而縱谷南段河階的抬升量普遍均大；此外，縱谷內各溪流域主要階地均出現傾動、變位、背斜、斷層等構造活動現象，顯示本地區地殼活動仍在持續 (張瑞津等，1992a、1992b)。同樣地，海岸山脈東側河川之階地，其生成仍與構造隆升有關，並且具有隆升量南高於北的情況 (張瑞津等，1991)。惟 Hsieh 等人 (1994) 指出在長濱、成功一帶之河階，其下切運動始於河川加積作用結束之後。其透過三仙溪階地的漂木定年(約在 5080±50 年前)，推測河流的加積與氣候引起的水量和沉積物供應量變化有關。另外，齊士崢 (1994) 透過地形不整合現象、流域特徵的數量化、以及階地和河床沉積物等河川特徵的調查，指出立霧溪階地雖生成於大環境的地體構造隆升，但主流和支流間因沉積物堆積所導致局部流路的侵蝕基準改變(流域複雜反應)，造成了流域內各階地型態上的差異；而其支流西卡拉罕溪還曾受到襲奪作用而改道，並因侵蝕基準的改變而產生回春作用，形成岩石階地 (齊士崢，1995a)，此顯示了東部地區河階的生成因素亦非單純。

另外，除了區域內或單一流域階地生成與地形演育的研究外，尚有學者進行區域間的階地對比，以期檢討臺灣現行河階對比系統，並建構臺灣地形演育與環境變遷的原因。例如 Sung 等人 (1997) 便曾利用地形定年法輔以大溪定年資料，來對比大溪、新社、草屯、頭寮、嘉義丘陵、潮州、鹿野和花東縱谷區等地的河階群，結果顯示潮州斷層階地群之高位階地，其比高相較於其它地區有偏低的現象，因此認爲富田芳郎 (1972) 的河階對比系統不完全適用於臺灣區域間階地的對比。在階地生成方面，

各河階群中含紅土的高位階地 (lateritic terraces) 的成因可能與大規模的地體構造抬升有關，不含紅土的低位階地 (fluvial terraces) 的形成則導因於 30000 年以來的氣候變遷 (Sung *et al.*, 1997)。

討論與建議

(一)對比方法之限制

在河階的研究中，階地的對比與定年是重要的基礎工作，傳統的河階對比法利用航照判讀配合野外考察與室內分析，紀錄階地高度、坡度、階崖高度與比高、土壤顏色、階地分布情況、礫石粒徑大小、覆瓦構造與方向等地形特徵，來比對河階的階面。此法雖可觀察與描述區域的地形特徵，然而對於區域地形的演育卻多僅於推論，缺乏明確的證據加以證實；若要用在區域間的對比上，僅利用野外觀察土壤顏色和比高做爲依據，似乎有其限制 (Sung *et al.*, 1997)。其中，可以定出絕對年代，並且較受信賴的定年方法爲碳十四定年法，然而碳十四定年法需要漂木、木炭、泥碳、骨頭、珊瑚、貝類或是其他可供定年的物質樣本；在臺灣，因爲氣候溫暖潮濕，漂木等物質容易腐爛、分解，因此定年樣本甚難獲得 (Chen and Liu, 1991)，而且在地層取樣的位置，亦會影響到定年的結果與可信度 (齊士崢，1995b；齊士崢等，1998)，例如採樣深度若過於接近地表，則很有可能爲現代的沖積物質。

相對於傳統河階對比法，有學者發展出地形定年法，此法簡便、經濟，可用在區域內與區域間的階地對比，並與碳十四定年法成線性相關，可由碳十四定年資料來校準 (Sung and You; 1993; Sun *et al.*, 1995、1997)，提高地形定年法的信賴度與準確性。然而階崖的邊坡會受到人類活動的影響而減緩，階地沖積物組成也對邊坡型態有很大的影響，另雨水沖蝕、緩滑潛移等亦會影響到坡崖的發育 (徐鈴玲，1999)；這些因素均會使地形定年法產生相當大的誤差，甚至誤差會達百分之百 (Sung and You, 1993)，雖然從航空照片圖上直接量取邊坡剖面，可減少誤差，然而航空照片尺度(比例尺)的大小選擇，則容易造成剖面輪廓的差異，有時便會低估了人類活動干擾的程度 (Sung and You, 1993)。

由於前述的河階對比方法均有其限制存在，故在某些階地演育的假說建構上，往往會因採用方式的不同，造成懸而不決的爭論，例如對八卦臺地南部階地成因的討論，蔡衡和宋國城 (2000) 用地形定年法的參數值，發現各階地的數值相當接近，認爲各階地的生成年代相仿，而且在階地地層的露頭中，發現礫石的破裂，代表曾受到應力擠壓，並引用構造力學的觀點，支持富田芳郎 (1932) 野外觀察結果，認爲這些階地的形成是受構造斷層活動的影響。然 Ku (1963) 透過航照判讀的方式則認爲這些階地的階崖爲濁水溪河蝕崖，石再添等 (1985b) 採用傳統對比方法，且根據礫石的磨度與呈現南方的覆瓦方向，支持 Ku 的看法。另陳平護 (1987) 則透過電性地層資料，強化此一論點；惟除了陳平護 (1987) 採用地層電阻率測量的方式，提供定量的證據外，其餘的推論均缺乏有力的證據 (如定年資料)，來說明這些階地生成的年代或是生成速率，故其成因在傳統方法的討論下似難以定論。事實上，類似前述八卦臺地南部階地的例子，在臺灣並不罕見，例如新社河階群便是另一個備受爭議的區域，其地形演育與階地成因至今仍未有定論 (許民陽，1984；石再添等，1986; Sung *et al.*, 1995; Tsai and Sung, 2003)

(二)土壤時間序列之研究

雖然國內對階地的研究集中於前述的方法，但國外的地形學相關研究自 1960 年代末期引入土壤化育的概念，認爲土壤在地景位置 (landscape settings) 上的垂直發育，是地景元件 (landscape element) 和地形面發育的基礎，而一地的土壤發育歷史會直接和地景發育的歷史結合在一起，故可用以探究地形面的化育過程 (Mcfadden and Knuepfer, 1990)。然而土壤的化育會受到時間、母質、地形、氣候和生物等因素的影響 (Jenny, 1941)，因此應用在地形研究時，多以具有相似的母質、氣候和生物環境下的土壤爲對象，建立起土壤時間序列 (soil chronosequence) (Jenny, 1941; Harden, 1982)，在缺乏定年的地形上作爲相對年代的對比；一般而言，土壤時間序列在地形或是新構造運動 (neotectonic) 上的應用，大致上有海階、河階、沖積扇或扇階 (fluvial fan or fan terrace)、沙丘 (dune) 與冰磧丘 (moraine till)、冰川外洗扇 (outwash fan or terrace) 等地形的相對年代估測，或是由埋積土壤 (buried soil) 的化育推測崩積事件的頻率、建立斷層崖土壤序列 (soil catena) 與利用化育程度推測前次斷層活動的時間等 (Birkeland, 1990、1999)。

因此，土壤時間序列 (soil chronosequence) 若能謹慎的使用，可用來探討比對含河階在內等在第四紀生成地形的生成年代順序 (McFadden and Weldon Ⅱ, 1987; Huggett, 1998)，以及地形演育的過程和生成因素 (Harden, 1990; Mcfadden and Knuepfer, 1990; Birkeland, 1990、1999)。而且由於土壤中的某些性質十分穩定，可用於反應土壤化育過程中隨時間變化的狀態，因此相關研究常常僅用這些性質做爲指標，來判斷土壤化育程度的高低，這些性質有土壤野外型態 (field morphology)、土壤厚度、質地、黏粒膜 (clay film)、土壤顏色 (Harden, 1990)、紅化指數 (redness index)、氧化態鐵鋁 (Torrent *et al.*, 1980; Arduino *et al.*, 1984; Mcfadden and Weldon Ⅱ, 1987)、土壤礦物與土壤微型態特徵 (Birkeland, 1999) 等；部分研究甚而發展出土壤化育指數 (Soil development indices) (Bilzi and Ciolkosz, 1977; Harden, 1982; Birkeland, 1999)，數量化土壤的型態或是理化性質，並由量化的差異來定出不同土壤的化育程度。

一項在加州 San Clemente 島的研究顯示，在 20 萬年 (200ka) 以內生成的海階土壤，在分類上屬於淋溶土 (Alfisol) 或是黑沃土 (Mollisol)，具有稜柱狀構造，超過 200 ka 以上的海階土壤則屬於膨轉土 (Vertisol) 或是淋溶土，具有擦光面 (slickenslide)、裂隙 (crack)、片狀 (prismatic) 和銳角塊 (angular blocky) 等構造。該研究並發現土體的厚度、黏粒、可溶性鹽類、游離鋁、黏粒中蒙脫石 (smectite) 和雲母 (mica) 比率、矽粒部份石英 (quartz) 和斜長石 (plagioclase) 的比例等均有隨年代增加而增加的現象 (Muhs, 1982)；另一項在加州 San Luis Obispo 郡海階的研究顯示，該階地生成年代約介於 56 ka 到 12 ka 之間，階地受到地面水流侵蝕和地下水位變化的作用，階面的完整度會隨著高度與年代的增加而遞減；最低兩階的階地保留較完整的階面，黏粒和土色有隨年代增加而遞增的趨勢，而最高位的階地因侵蝕最劇已無明顯階面特徵，其土壤亦受影響，故 A 層明顯較次階土壤薄，但有 E 層的發育，並且下方土壤在氧化還原作用影響，出現了灰色的斑紋 (mottles) 特徵 (Moody and Graham, 1995)。Leigth (1996) 在美國東部 Blue Ridge Mt. 的 Brasstown Creek 河階進行研究，指出越高位的河階生成年代越早，土壤的化育也越趨向成熟，反之階面上的崩積扇，因生成年代較晚，土壤的化育便不如崩積扇下方的河階土壤；同樣地，西班牙中西部 Tormes 河所形成的河階地亦有類似情況，該地土壤屬於地中海紅壤，隨著階地越高、生成年代越早，該階地的紅壤顏色越紅、粘粒含量越高。其高位河階的顏色 (hue) 約介在 7.5R~2.5YR 間，粘粒含量最豐約在 58-72%之間，化育程度最好 (Marcos and Frances, 1997)；而在美國賓州 Susquehanna 河上下游的 Muncy 和 Marietta 階地群的研究顯示，這些階地的土壤

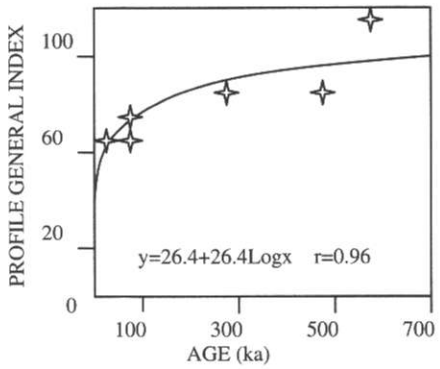
化育程度均有隨階地高度與年代而變遷的趨勢，尤其在化育層厚度 (0-180cm)、黏聚層黏粒含量 (6.1-53.4%)、游離鐵 (0.7-6.6%)、游離鋁 (0.01-0.07%)、全量鐵 (2.15-14.6%) 等均有明顯的差異 (Engel *el al.*, 1996)，此研究並利用這些土壤性質作爲上下游階地面的對比，輔以區域冰河地層 (regional glacial stratigraphy) 與沉積物定年作爲各階地相對年代的推估，結果發現上游 Muncy 階地雖然平均海拔高度較高，但是最高位的階地土壤化育程度卻不如下游 Marietta 的高位階地，因此 Muncy 階地的年代範圍約在 150 年至 300~770 ka 年，而 Marietta 階地年代則約在 150 年至 770~2400 ka (Engel *el al.*, 1996)。

Torrent 等人 (1980) 在西班牙 Guadalquivir 與 Esla 兩河的階地進行土壤採樣、分析赤鐵礦和針鐵礦的含量、萃取並測定結晶型態的氧化鐵以計算及紅色化指標，結果顯示在 Guadalquivir 河的階地序列中，氧化鐵礦物與結晶型態鐵含量、紅色化之值均有明顯增加的趨勢，而 Esla 河之階地土壤則無此一趨勢，此可能和該河階地沖積物已呈現高度風化有關。Arduino *et al.* (1984) 則於義大利波河谷地 (Po Valley) 西部 5 個集水區 (basin) 內的階地群取 19 個土壤樣本進行分析，結果顯示 pH 值、CEC 等理化性質無法反應土壤化育的時間序列，而黏粒和砂粒部礦物分析則可發現年代越早的階地所含的高嶺石 (kaolinite) 類礦物越多，且游離鐵 (Fe_d)、Fe_d/Fe_t、$(Fe_d\text{-}Fe_o)/Fe_t$ 和 $(Fe_t\text{-}Fe_o)/Fe_t$ 比率等代表土壤中鐵的結晶型態的數量指標，亦有隨年代增加而變化的趨勢。另由土壤顏色換算的紅化指數也顯示相同的趨勢，並且和 $(Fe_d\text{-}Fe_o)/Fe_t$ 和呈現高度相關，可作爲野外判定土壤化育程度的初步指標，並在其後波河西部階地的研究中，顯示土壤中的不同型態鐵的含量可作爲土壤時間序列判斷的良好指標(Arduino *et al.*, 1986)。

McFadden and Weldon II (1987) 在美國加州 Cajon Pass 谷地的研究亦證實氧化型態鐵在土壤化育中的應用。在該地之階地群中，生成年代約在 12 ka 以來的全新世階地，其土壤化育程度較差，且土壤性質深受到風積作用的影響，但土層厚度、顏色、游離鐵與全量鐵均有隨年代增加而呈現些微增厚或含量增多的現象。而生成年代老於 12 ka 的更新世階地，其土壤化育程度便明顯高於全新世，有明顯的黏粒洗入的黏聚 B 層出現，土壤顏色 (最老階地 B 層顏色 2.5 YR 4/6, 4/4)、黏粒含量(最老階地 B 層含量 34.5%) 和游離鐵等性質亦有隨年代增加而變紅或增量的趨勢。而且從 Fe_2O_{3o}/Fe_2O_{3t} 比率隨年代遞增和 Fe_2O_{3o}/Fe_2O_{3d} 的比率遞減的趨勢來看，越高位階地土壤中無定型鐵含量越少，土壤的化育程度越高，而有較多的結晶性佳的鐵氧化物生成；在加州 Santa Cruz 的 4 個海階土壤化育研究中，顯示紅色化指數在不同階地土壤 B 層中有明顯的差異 (2.7-15.0)，游離鐵會隨年代增加至最大值然後再緩慢減少，Fe_d/Fe_t 與 Feo/Fe_d 的比率同樣隨階地年代而增加或遞減，其氧化鐵礦物以針鐵礦爲主，然隨著土壤年代增加，土壤逐漸變酸，針鐵礦被鋁取代的作用亦隨之明顯(Aniku and Singer, 1990)。

Nagatsuka and Maejima (2001) 分析日本琉球 Kikai 島上海階土壤的理化性質，配合構造抬升 (tectonic uplift) 速率和冰河期變遷曲線 (glacio-eustaitc curve)，推測海階土壤化育年代約介於3.~3.9ka 到 120 ~12.5 ka，土壤化育過程爲黑沃土-黑沃土-淋溶土-淋溶土，而 Maejima 等人(2002) 則更進一步以 Kikai 島的土壤化育年代，輔以土壤氧化型態鐵的含量，以及結晶性型態鐵的比率 (如 F_d/Fe_t、$(Fe_d\text{-}Fe_o)/Fe_t$) 與年代建立迴歸方程式，然後再分析 Minami-Daito 島的氧化型態鐵與結晶態鐵比率，根據所得的值帶入迴歸方程中，推估 Minami-Daito 島的海階土壤化育年代，結果顯示最高位的兩階地的年代分別爲 500±60 ka、630±110 ka，是故 Maejima 等人 (2002) 亦認爲土壤中氧化型態鐵的含量是作爲土壤化育程度與相對年代對比的良好指標。

另外，Bockheim 等人 (1992) 針對美國奧勒岡州西南部 Cape Blanco 和 Cape Arago 兩個海階群，計算由 Harden (1982) 所發展的土壤化育指數，並且依據化育指數值對比兩個地區的階地，然後依據 Cape Blanco 低位階地的定年年代 80 ka 和 105 ka，對比出 Cape Arago 階地群的生成年代；並更進一步指出，這些海階土壤化育的序列爲淋溶土 (Spodosol) -具黏粒積聚化育層的淋溶土-極育土 (Ultisol)。雖然海階的淋溶土生成可能受到酸性母質、豐富的降雨和針葉的有機酸等因素影響，但是從黏粒的含量與洗出洗入的過程、極細砂 (100-50 μm) 部分的石英和斜長石、游離鐵鋁等性質，都可顯示土壤的化育程度隨時間的變化(Bockheim *et al.*, 1996)。Alonso 等 (1994) 曾針對西班牙 Almar 河的河階土壤，利用土壤化育指數，將 Almar 河階土壤的剖面型態特徵和理化性質進行量化，換算爲土壤化育指數 (Soil development indices)，然後與已知的河階定年資料比對，發現河階年紀越高，其化育指數越大 (圖 4)，爲河階的生成歷史探討提供一可行的佐證資料，其研究中並利用 5 種迴歸模式：線性迴歸、二次多項式、對數迴歸、potential 迴歸和對數迴歸，來評估指數的有效程度，結果發現多數的指數均達到 $p < 0.01$ 的顯著水準。



在西班牙 Almar 河的河階群中，全新世的河階土壤 (<10,000 年) 剖面化育速度相當快，然後向更新世晚期速度遞減。(Alonso *et al.*, 1994)。

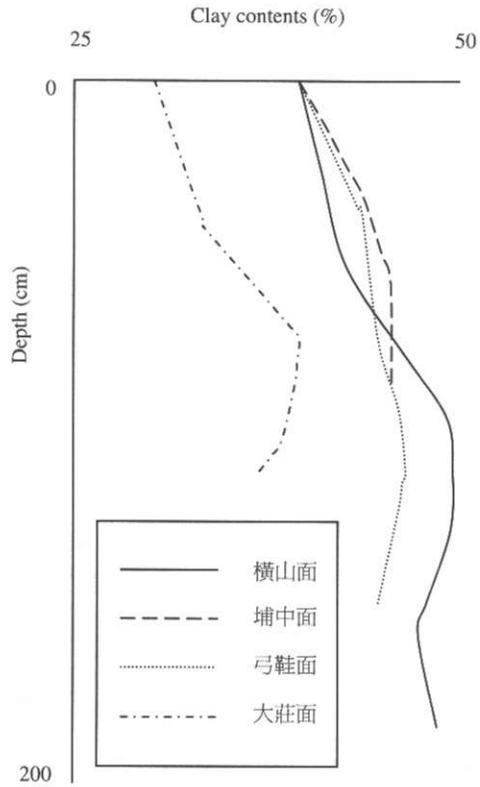
圖 4　土壤化育指數的時間函數

(三)研究方向

由前述的回顧可發現，土壤化育雖無法提供絕對年代的定年資料，但是其可作爲各階地發育相對年代的比較，在區域內或是區域間河階面的對比上，能提供一個量化分析的結果做爲參考。

以臺灣爲例，紅土階地是分布極爲廣泛的第四紀地形，這些地形的成因與地體構造、海準面升降、流域複雜反應等現象有關。然而這些階地缺乏定年物質與定年資料，因此對於各紅土階地、紅土層的生成年代與成因，至今仍尚未有一致的看法 (孟昭彝，1964；林淑芬，1991)；近年林淑芬 (1991)透過土壤化育的觀點，對桃園臺地各高位階地的紅土，進行土壤剖面型態描述、土壤礦物與化學分析，進而探討該地區土壤的成因與化育作用，其結果指出該地土壤應屬於紅壤 (lateritic soil)，而生成年代越老的階地剖面的土層、顏色、質地等形態特徵，較年輕階地剖面來得厚、紅與黏，顯示出這些階地的

土壤存有一時間序列的關係，亦即越高位階地，土壤發育程度越好。另，根據一項對八卦臺地南部階地 (橫山、埔中、弓鞋與大莊四個階地) 的分析 (黃文樹，未發表的資料) ，發現階面上土壤的黏化作用十分盛行，且土壤剖面上下層間均有明顯的洗出洗入現象，四個階面的土壤黏粒含量依序爲橫山、埔中、弓鞋和大莊等 (圖 5)，階面土壤分類依序爲氧化物土 (Oxisol) -極育土 (Ultisol) - 弱育土 (Inceptisol)-弱育土的次序，似亦具有一土壤時間序列，與林淑芬 (1991) 的研究成果相符，支持其看法。



由各土壤剖面的主要化育層 (B 層) 的黏粒量來看，以橫山面土壤的含量最多、化育程度最好，其次依序爲埔中、弓鞋和大莊等面。

圖 5　八卦臺地南部階地土壤中黏粒含量隨深度的變化

因此，若能透過對有定年資料的階地土壤的分析與分類，應可找出土壤化育程度和年代的關係。Cheng and Liu (1991) 在大漢溪兩側的氾濫平原 (FP, fluvial plain) 和低位階地 (FT, fluvial terrace) 採取到漂木樣本，利用 ^{14}C 定年方法定出生成年代約爲 400 年和 11 ka 左右，並且利用抬升量與抬升速率推估最高位的大溪階地的生成年代約爲 50 ka；研究者在新社階地群中亦曾對最高位階地的沉積物進行定年，所得的年代約爲 550 ka 年 (±12.6 ka)，其次透過階地的抬升量 (比高)，計算出新社地區平均抬

升速率約爲 2.5 m/kyr，再利用抬升速率推估次高階地與最低位階地群的升成年代分別爲 40.5 ka 年(±9.3 ka)、30.3 ka (±7 ka) (賴光胤，2002)；若能對這些已定年的階地紅土進行土壤調查分析，建立階地土壤時間序列，將有助於釐清階地紅壤的化育過程與化育時間，並進一步找出紅壤化育程度與時間的關係式，再配合桃園臺地與八卦臺地等曾進行土壤化育研究之階地的對比，將可作爲解決臺灣紅土階地生成年代與地體活動之問題的良好輔助工具。

總　結

河階是臺灣常見的地形，它反映臺灣構造運動的活躍，許多研究者透過河階的研究來重建地形的演育史、探討氣候等環境的變遷；而這些研究的基礎工作便在於河階的定年與對比。

目前臺灣常用的對比與定年方法有傳統的階地對比法、河流下切過程、碳十四定年法、地形定年法等；而多數的學者爲求研究的完整與嚴謹，會混合使用兩種以上的方式；其中，由於碳十四定年法可獲得絕對年代資料，因此最爲人所信賴，然定年物質難以獲得，而其他方法各有其限制存在，使得目前臺灣的河階研究無法有系統的展開 (Sung and You, 1993)。

從土壤化育的角度來看，若一地的地形、氣候、母質與生物作用類似，則時間因素對土壤的生成有極大的影響，時間越久土壤化育程度越佳。即在其它成土因子相同的條件下，土壤化育程度的差異，可反應出化育時間的長短，故而河階的發育可反應出地貌在時間序列中營力的變化情形，因此不同河階面土壤化育的程度，應可符合河階生成的時間順序 (林淑芬，1991; Leigth, 1996; Marcos and Frances, 1997; Huggett, 1998)，另外因爲土壤的性質亦可量化爲土壤化育指數 (Alonso, 1994)，故可提供河階研究一個客觀的科學證據；因此，日後在河階的對比與定年研究上，由土壤化育著手，可能是一極具潛力的發展方向。

引用文獻

石再添、楊貴三 (1985b) 八卦臺地的活斷層與地形面，國立臺灣師範大學地理研究報告，11: 173-186。

石再添、鄧國雄 (1983) 潮州斷層帶的活斷層與地形，國立臺灣師範大學地理學研究，7: 17-34。

石再添、鄧國雄、張瑞津、黃朝恩、石慶得、楊貴三、許民陽 (1990) 地學通論，臺北：國立空中大學。

石再添、鄧國雄、張瑞津、楊貴三 (1985a) 恆春地區的活斷層與地形面，國立臺灣師範大學地理教育，11: 1-14。

石再添、鄧國雄、楊貴三、許民陽 (1986) 新社河階群的活斷層與地形面，地學彙刊，5: 29-39。

朱英茂 (1992) 線性擴散模式應用於崖狀地形之演化模擬，國立成功大學地球科學研究所碩士論文。

吳麗娟 (2000) 臺灣北部主要河川遷急點之地形學研究，中國文化大學地學研究所碩士論文。

呂敏誌 (1996) 地形定年法應用於河階臺地區域性對比之研究，國立成功大學地球科學研究所碩士論文。

周淑文 (1997) 基隆河地形演演育過程，國立臺灣大學地理研究所碩士論文。

孟昭彝 (1964) 臺灣北部紅壤層發展，地形變化與第四紀晚期地殼變動關係之研究，石油，33: 26-52。

林淑芬 (1991) 桃園臺地群紅壤之初步研究，國立臺灣大學地質學研究所碩士論文。

林朝棨 (1957) 臺灣地形，臺灣通志稿卷一，土地誌，地理篇，南投：臺灣省文獻會。
孫林耀明 (1981) 桃園臺地群活斷層的地形學研究，國立臺灣師範大學地理研究所碩士論文。
徐美玲 (1999) 階地邊坡型態與地形作用之關係，國立臺灣大學地理學系地理學報，26: 1-12。
高鵬飛 (1990) 臺灣海岸山脈東坡南北段河階地形之比較研究——以馬武窟溪和豐濱溪為例，國立臺灣師範大學地理研究所碩士論文。
張瑞津、石再添、沈淑敏、張政亮 (1992a) 花東縱谷北段河階的地形學研究，國立臺灣師範大學地理研究報告，18: 243-293。
張瑞津、石再添、沈淑敏、張政亮 (1992b) 花東縱谷南段河階的地形學研究，地理學研究，16: 7-63。
張瑞津、石再添、曾正雄、高鵬飛、陳美鈴 (1991) 海岸山脈東坡河階的地形學研究，國立臺灣師範大學地理研究報告，17: 99-145。
張瑞津、鄧國雄、劉明崎 (1998) 苗栗丘陵河階之地形學研究，國立臺灣師範大學地理研究報告，29: 97-112。
張瑞津、鄧國雄、劉明崎 (1999) 頭前溪階地之地形學研究，國立臺灣師範大學地理研究報告，31: 61-81。
張瑞津、鄧國雄、劉明崎 (2000) 新店溪河階之地形學研究，國立臺灣師範大學地理研究報告，33: 179-197。
許民陽 (1984) 新社河階群的地形特徵與大溪河階群之比較研究，國立臺灣師範大學地理教育，10: 74-98。
陳于高 (1988) 大漢溪下游河階臺地碳十四定年與對比之研究，國立臺灣大學地質研究所碩士論文。
陳平護 (1987) 臺灣西部第四系之電性地層學研究，國立中央大學地球物理研究所博士論文。
陳邦禮 (1996) 蘭陽溪上游沖積扇的地形演育，國立臺灣大學地理研究所碩士論文。
傅炯貴 (1998) 蘭陽溪上游沖積扇河階之成因-河流反應暫時基準面的變化，國立成功大學地球科學研究所碩士論文。
富田芳郎 (1932) 八卦丘陵南部地形，地形記事，第三卷。
富田芳郎 (1972) 臺灣地形發達史之研究，東京：古今書院。
曾士林 (1994) 新店溪河階與曲流之地形學研究，中國文化大學地學研究所碩士論文。
游素雲 (1994) 河階臺地之地形定年研究，國立成功大學地球科學研究所碩士論文。
黃美璇 (2001) 荖濃溪流域之河階地與地形演育，國立高雄師範大學地理學系碩士論文。
黃祥慶 (1995) 桃園臺地群之礫石堆積層，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
楊貴三 (1986) 臺灣活斷層的地形學研究－特論活斷層與地形面的關係，中國文化大學地理研究所博士論文。
楊貴三 (1988) 新店溪中游河流地形的研究，國立臺灣師範大學地理教育，14: 85-97。
楊黃政 (1996) 大漢溪中游段河階地形研究，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。
廖俊言 (1995) 地形定年法應用於河階對比與斷層活動性之探討，國立成功大學地球科學研究所碩士論文。
趙偉智 (2001) 以擴散模式模擬河流縱剖面探討蘭陽溪扇階之演育，國立成功大學地球科學研究所碩士論文。
齊士崢 (1994) 立霧溪流域的河階地，國立臺灣大學地理學系地理學報，17: 33-46。
齊士崢 (1995a) 立霧溪流域蓮花池地區的河川襲奪，國立臺灣大學地理學系地理學報，18: 35-44。
齊士崢 (1995b) 立霧溪流域的地形演育，國立臺灣大學地理研究所博士論文。
齊士崢、宋國城、陳邦禮、謝孟龍、蔡衡、傅炯貴 (1998) 蘭陽溪上游沖積扇的地形演育，環境與世界，2: 137-150。
齊士崢、黃美璇 (2001) 荖濃溪的河階地和地形演育，環境與世界，5: 123-140。

劉志學 (1989) 立霧溪河階之沉積學研究與對比，國立臺灣大學地質學研究所碩士論文。

蔡怡真 (2002) 新竹地區活斷層之地形學研究，國立彰化師範大學地理學系碩士論文。

蔡衡、宋國城 (2000) 論八卦臺地南部階地之成因，中國地理學會會刊，28: 239-253。

謝凱英 (1995) 桃園臺地群崖地形之研究，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。

賴光胤 (2002) 新社與后里地區之地形與活動構造之研究，國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文。

龔任義 (2000) 新店溪之地形研究，國立中央大學應用地質研究所碩士論文。

Alonso, P., C. Sierra, E. Ortega, C. Dorronsoro (1994) Soil development indices of soils developed on fluvial terraces (Peñaranda de Bracamonte, Salamanca, Spain), *Catena*, 23: 295-308.

Aniku, J. R. F. and M. J. Singer. (1990) Pedogenic iron oxide trends in a marine terrace chronosequence. *Soil Science Society of American Journal*, 54: 147-152.

Arduino, E., E. Barberis, F. Carraro, M. G. Forno. (1984) Estimating relative ages from iron-oxide/total-iron ratios of soils in the western Po Valley, Italy. *Geoderma,* 33: 39-52.

Bilzi, A. F. and E. J. Ciolkosz (1977) A field morphology rating scale for evaluating pedological development, *Soil Science*, 124(1): 45-48.

Birkeland, P. W. (1990) Soil-geomorphology research - a select overview. *Geomorphology,* 3: 207-224.

Birkeland, P. W. (1999) *Soils and Geomorphology (3td ed.).* New York: Oxford.

Bockheim, J. G., H. M. Kelsey and J. G. Marshall III. (1992) Soil development, relative dating, and correlation of late Quaternary marine terraces in Southwestern Oregon. *Quaternary Research,* 37: 60-74.

Bockheim, J. G., J. G. Marshall and H. M. Kelsey. (1996) Soil forming processes and rates on uplifted marine terraces in southwestern Oregon, USA. *Geoderma,* 73: 39-62.

Chen, Y.G. and T. K. Liu (1991) Radiocarbon dates of river terraces along the lower Tahanchi, Northern Taiwan: Their Tectonic and Geomorphic Implications, *Proceedings of The Geological Society of China*, 34(4): 337-347.

Colls, A. E., S. Stolces, M. D. Blum, E. Straffin (2001) Age limits on the Late Quaternary evolution of the upper Loire River, *Quaternary Science Review*, 20: 743-750.

Delcaillau, B., B. Deffontaines, L. Floissac, J. Angelier, J. Deramond, P. Souquet, H.T. Chu, J.F. Lee (1998) Morphotectonic evidence from lateral propagation of an active frontal fold; Pakuashan anticline, foothills of Taiwan, *Geomorphology*, 24 : 263-290.

Engel, S. A., T. W. Gardner and E. J. Ciokosz. (1996) Quaternary soil chronosequence on terraces of the Susquehanna river, Pennsylvania. *Geomorphology*, 17: 273-294.

Harden, J. W. (1982) A quantirative index of soil development from field descriptions, examples from a chronosequence in Central California. *Geoderma*, 28: 1-28.

Harden, J. W. (1990) Soil development on stable landforms and implications for landscape studies. *Geomorphology,* 3: 391-398.

Hsieh, M. L. and Peter L.K. Knuepfer (2001) Middle-late Holocene river terraces in the Erhjen River Basin, southweatern Taiwan-implications of river response to climate change and active tectonic uplift, *Geomorphology*, 38: 337-372.

Hsieh, M.L., T. H. Lai and P. M. Liew (1994) Holocene climatic river terraces in an active tectonic-uplifting area, middle part of the coastal range, Eastern Taiwan, *Journal of the Geological Society of China*, 37(1): 97-114.

Huggett, R.J. (1998) Soil chronosequence, soil development, and soil evolution: a critical review, *Catena*, 32: 155-172.

Jenny, H. (1941) *Factors of soil formation.* New York: McGraw-Hill.

Ku, C. C. (1963) Photogeologic study of terraces in north-western Taiwan, *Proceedings of the Ge logical Society of China*, 4: 51-60.

Leigh, D.S. (1996) Soil chronosequence of Brasstown Creek, Blue Ridge Mountains. USA. *Cat na, 26,* 99-114.

Liew, P. M. and M. L. Hsieh (2000) Late Holocene (2 ka) sea level, river discharge and limate interrelationship in the Taiwan region, *Journal of Asian Earth Sciences*, 18: 499-505.

Liew, P. M., M. L. Hsieh and C. K. Lai (1990) Tectonic significance of Holocene marine terrace in the Coastal Range, eastern Taiwan, *Tectonophysics*, 183: 121-127.

Maejima, Y., S. Nagatsuka and T. Higashi. (2002) Application of the crystallinity ratio of free iron ox les for dating soils developed on the raised coral reef terraces of Kikai and Minami-Daito Islands, so thwest Japan. *The Quaternary Research,* 41: 485-493.

Marcos, J. M. G. and F. Santos Frances. (1997) Relationship between the characteristic of Mediterran n Red soils and the age of the geomorphological surfaces in central-western Spain. *Catena*, 28: 231-245

Mcfadden, L. D. and P. L. K. Knuepfer. (1990) Soil geomorphology: the linkage of pedology and s rficial process. *Geomorphology,* 3: 197-205.

Mcfadden, L. D. and R. J. Weldon Ⅱ. (1987) Rates and processes of soil development on Qu ernary terraces in Cajon Pass, California. *Geological Society of America, Bulletin.*, 98: 280-293.

Moody, L. E. and R. C. Graham. (1995) Geomorphic and pedogenic evolution in coastal sediments, entral California. *Geoderma,* 67: 181-201.

Muhs, D. R. (1982) A soil chronosequence on Quaternary marine terraces, San Clemente Island, Ca rnia. *Geoderma,* 28: 257-283.

Nagatsuka, S. and Y. Maejima. (2001) Dating of soil on the raised coral reef terraces of Kikai Islan in the Ryukyus, Southwest Japan, with special reference to the age of red-yellow soils. *The Qua rnary Research*, 40: 137-147.

Ota, Y., B. H. Shyu, Y. G. Chen and M. L. Hsieh (2002) Deformation and age of fluvial terraces sout of the Choushui River, central Taiwan, and their tectonic implications, *Western Pacific Earth Scienc* 2(3): 251-260.

Sung, Q. C., J. K. Fu and S. J. Chyi (1999) Genetics on the Alluvial Fan Terraces along the Lan-Yan River, Northeastern Taiwan— A River response to base level change, *Journal of the Geological So ety of China*, 42(3): 331-348.

Sung, Q. C. and S. Y. You (1993) Morphological dating of fluvial terraces along the TA-Han Hsi, n rthern Taiwan-an ergodic approach, *Journal of the Geological Society of China*, 36(4): 437-456.

Sung, Q. C., M. T. Lu, H. Tsai and P. M. Liew (1997) Discussion on the genetics and the correlation river terraces in Taiwan, *Journal of the Geological Society of China*, 40(1): 31-46.

Sung, Q. C., S. Y. You and J. Y. Liao (1995) Correlation of river terraces by Quantitative morph gical dating and it's neotectonic implications, *Journal of the Geological Society of China*, 38(1): 65-80.

Tang, C. H. (1986) Photogeological observations on the low hilly terrain and coastal plain area of H nchu, Taiwan, *Petroleum Geology of Taiwan*, 6: 71-79.

Torrent, J., U. Schwertmann and D. G. Schulze. (1980) Iron oxide mineralogy of some soils of tw river terrace sequence in Spain, *Geoderma,* 23: 191-208.

Tsai, H. and Q. C. Sung (2003) Geomorphic evidence for an active pop-up zone associated w th the

Chelungpu fault in central Taiwan, *Geomorphology*. (in press)

91 年 7 月 3 日 收稿
92 年 1 月 2 日 修正
92 年 4 月 10 日 接受