地理學報　第四十五期：1-20 (2006)
JOURNAL OF GEOGRAPHICAL SCIENCE (45) : 1-20 (2006)

土壤化育指數在濁水溪流域階地對比之應用

The Application of Soil Development Index to Terraces Correlation in Choushui River Basin Area

黃文樹[*]　蔡　衡[**]　許正一[***]

Wen-Shu Huang　Heng Tsai　Zeng-Yei Hseu

Abstract

Soil development indices (SDIs), such as the horizon index (HI), profile development index (PDI), weight-PDI (WPDI), were proposed to quantify the soil qualities and to construct soil chronosequence, relative dating, and the correlation to varied terraces. The HI and WPDI of pedons of terraces along the Choushui river, designated as CS-1, CS-2, TL-1, TL-4 and PK-1-PK-6, were calculated. The profiles morphologies and quantified values of all pedons suggest a chronological order of I (PK-1), II (PK-2), III (PK-3), IV (PK-4, CS-1, TL-1), V (PK-5, CS-2), VI (PK-6) and VII (TL-4) for the terrace correlation. Most pedons could be classified as Ultisol, except that Oxisol and Inceptisol are allocated to PK-1 and PK-6 and TL-4,

* 國立彰化師範大學地理學系博士生
Ph. D. Student, Department of Geography, National Changhwa University of Education.
** 國立彰化師範大學地理學系副教授，通訊作者 (e-mail: geotsaih@cc.ncue.edu.tw)
Associate Professor, Department of Geography, National Changhwa University of Education, Corresponding Author.
*** 國立屏東科技大學環境工程與科學系副教授
Associate Professor, Department of Environmental Science and Engineering, National Pingtung University of Science and Technology.

respectively. Therefore, a soil chronosequence for soils on the terrace in the study area could be constructed from Inceptisol to Ultisol to Oxisol. The age of the soil on oldest terraces (Oxisol) is supposed to be older than 90ka; Ultisol might not be younger than 30 ka and Incepitol should be younger than 30 ka. The result presents a good application of the pedologic degrees to correlate varied terraces in the middle-Choushui river basin area by HI and WPDI.

Keywords: soil geomorphology, horizon index (HI), weighted profile development index (WPDI), soil chronosequence, river terrace.

摘　要

土壤地形學結合土壤學和地形學的理論與方法，來解釋從單一土壤學或地形學中所無法解決的問題。而在河階地形的研究上，定年物質的缺乏常對研究過程和結果造成限制，從國外的相關研究顯示，階地土壤的性質可反應時間演進的過程，而土壤形態是其中一種簡單而便於實行的方法，並且土壤形態還可以被量化為土壤化育指數，將質性的描述轉換為數值，用來區分土壤化育程度，並應用在地形面的對比上。本研究分別採取竹山 (CS-1, CS-2)、觸口 (TL-1, TL-4) 臺地等地區共四個階地土壤樣體，配合八卦臺地南部階地的土壤資料，計算各階地樣體的化育指數 (HI 和 WPDI)，加上野外的觀察，則可將各階地土壤與階地定出生成的先後次序：I (PK-1)、II (PK-2)、III (PK-3)、IV (PK-4, CS-1, TL-1)、V (PK-5, CS-2)、VI (PK-6) 與 VII (TL-4)；並進一步結合過去的研究成果與相關的定年資料，則可將 CS-1、CS-2、TL-4 的土壤劃分為極育土綱，而 TL-4 則應為弱育土綱，並推論本研究區內的土壤化育成極育土應需要 30 ka 以上的時間，且氧化物土的生成應老於 90 ka。

關鍵字：土壤地形學、化育層指數、加權剖面化育層指數、土壤時間序列、河階

前　言

土壤地形學乃是一門分支且跨領域的學科，欲結合土壤化育作用學 (pedogenesis) 和地形學的理論與方法，協助土壤科學家或地形學家解釋某些無法從單一領域來解決的問題，其基本假設乃認為土壤的性質往往與地景 (landscape) 的特徵、演育的歷史緊密結合在一起，由於土壤的性質會受到地景上各種作用力在時間歷程中的影響而變化，因此一方面會反映出獨特的土壤性質，另一方面可以用來推斷過去地景的演育歷史 (Mcfadden and Knuepfer, 1990)；為此，Birkeland (1990) 揭櫫土壤地形學在應用上將會具有以下四種目的：第一，利用建立一個土壤時間序列的架構，來推估地形面沉積物的年代；其次，利用土壤作為地形面短期或長期穩定程度的指標；第三，利用土壤性質來推論氣候的變遷；第四，了解土壤化育時，雨水下滲、逕流、坡地侵蝕等各種作用力的交互作用。

在臺灣河階地形的研究中，受到氣候高溫多雨的影響，定年物質不容易保存在第四紀的各種沉積

環境裡，對於研究的推論與成果經常會產生限制與誤差，有時便無法獲得一致性的看法 (黃文樹等, 2003)，因此許多研究者便戮力於嘗試不同的方法，來探討階地地形與構造活動的各項議題。

又地形的生成包含了內營力與外營力的作用，而廣泛分布於地表的土壤，其許多性質與特徵往往與地形的變化有著某種程度的關聯性，地形面上的土壤化育程度，往往反映了地形在時間歷程中受到風化、侵蝕、堆積等作用的現象，因此化育程度高的土壤，即顯示其位處一個穩定的地形面上，並且經歷過一段較長的時間而未有其他地質事件的影響 (Harden, 1990; McFadden and Knuepfer, 1990)；而且在母質、地形、氣候、植被等環境因子相近的狀態之下，時間就成了控制土壤化育程度最重要的因素，因此在海階、河階、沖積扇、沙丘、冰磧丘等具不同年代地形面上的土壤，便可建構起土壤時間序列 (soil chronosequence) (Jenny, 1941; Harden, 1982)，因此若能嚴謹地避免某些環境因子、人為活動的干擾或是採樣實驗產生的誤差 (Huggeett, 1998)，則從相關的研究成果顯示，土壤時間序列將可應用在比對地形面生成的相對年代 (Bockheim *et al*., 1992)，或是在缺乏定年資料控制的條件下，作為年代估算的依據 (Colman *et al*., 1987; Birkeland, 1990; Kendrick and McFadden, 1996)，以進一步探討地形演育的過程 (Birkeland, 1990; 1999; McFadden and Knuepfer, 1990)。

然而並非所有土壤的性質都能反映出時間歷程中的變化，相關研究指出有許多常見的土壤性質，會和年代之間存有極佳的相關程度，意即能隨時間的遞增，而使得這些土壤性質在質與量均呈現增加的現象，例如土壤的野外形態特徵、黏粒含量 (Harden, 1982; Birkeland, 1990; 1999)、結晶性鐵與鐵結晶度、黏土礦物種類與含量 (Arduino *et al*., 1984; 1986; Aniku and Singer, 1990; Birkeland, 1999) 等，便能反應出不同年代的土壤化育程度；然而，多數理化性質分析項目，需花費較多的時間與成本，而土壤剖面形態特徵的描述與紀錄卻相當省時、省力，並簡易可行，然而野外土壤剖面形態的描述，雖有一定的描述名詞與規則，但是對於土壤化育程度的比較，僅能算是質性的敘述，難以有較客觀的量化參考依據 (Harden, 1982; 1990; Birkeland, 1999)，因此相關的研究者便持續地發展量化土壤形態的方法。

目前量化土壤野外形態的化育指數中，有單以顏色為主的顏色指數 (color index)，如 Buntley and Westin (1965)、Hurst (1977)、Torrent *et al*. (1980) 均按 Munsell 顏色描述方式，各自發展出公式將色彩 (hue)、明亮度 (vlue) 和彩度 (chroma) 等值予以量化成單一數值，整體而言除 Hurst 法 (Hurst, 1977) 所得的值會隨著年代遞減外，其餘者所得數值會隨著年代增加而遞增 (Birkeland, 1999)；其中 Torrent *et al*. (1980) 所發展出來的紅化指數 (redness index, RI) 曾被多次應用在相關研究上，如加州 San Timoteo Badland 地區的河階土壤的對比研究，指出不同階地的 RI 值，可顯示出相對生成年代的差異 (Kendrick and McFadden, 1996)；在臺灣，相關研究利用 RI 值，配合各階面土壤的黏粒含量，應用在桃園臺地階地群的階面對比 (陳怡葦，2003)。除前述方法外，利用顏色作為化育指數的尚有淋澱指數、黑化指數 (melanization) 等，這些指數通常用在某些特定類型的土壤，例如淋澱指數乃是應用在淋澱土 (Spodosol) 或具淋澱化作用 (Podzolization) 的土壤 (Schaetzl *et al*., 1988)；而黑化指數則同是 Harden (1982) 設計土壤化育指數時所提出，可使用在有機質含量較高之土壤的化育情形，然而黑化指數並不完全適用於各種土壤的化育程度比較 (Alonso *et al*., 1994)。

另有綜合土壤剖面形態，予以量化的形態指數 (morphological index)，如早期 Bilzi and Ciolkosz (1977) 所發展出的相對化育層明顯度指數 (relative horizon distinctness index, RHD) 與相對剖面化育

指數 (relative profile development index, RPD)，前者是比較相鄰兩個化育層的特徵與不連續性，而後者則是將土壤剖面中各化育層和母質特徵進行比較，可用來比對不同年代土壤的化育程度；曾有研究者利用該兩種指數探討加州 San Joaquin 谷地東北側的 Dry Creek 階地土壤的化育情況，結果顯示該土層可能非現地化育 (in situ) 而來，並證實了該量化方法可用在土壤化育的相對程度 (Meixner and Singer, 1981)。

隨後，Harden (1982) 結合了 10 項特徵指標，並比較化育層與母質的差異，設計出剖面化育指數 (profile development index, PDI)，可透過繪製剖面化育深度圖，顯示出剖面化育的程度；而 Birkeland (1999) 進一步修改 Harden (1982) 指數，並將各化育層的剖面化育指數加總，除上土壤剖面總深度，得一數值介於 0 和 1 之間的權重剖面化育指數 (weighted profile development index, WPDI)，可不用作圖，直接反應土壤化育差異。相關的應用研究如美國奧勒岡州 Cape Blanco 和 Cape Arago 兩個海階群的階地對比 (Bockheim *et al*., 1992; 1996)，又如研究者對加州 San Timoteo Badlands (STB) 地區中 Cajon Pass、Merced 和 Anza 的階地對比與年代推估 (Kendrick and McFadden, 1996)，均獲得不錯的成果。在臺灣，馮鈺棋 (2004) 對比嘉義地區的紅土階地群時，利用 WPDI 來輔助階地對比，支持航照判釋法所得。Tsai *et al*. (2006) 則建立八卦臺地南部階地群的土壤時間序列，並計算各土壤之 WPDI，推論階地的生成應是濁水溪在不同時期逐次下切所造成。

事實上，Alonso *et al*. (1994) 曾於西班牙 Almar 河的河階土壤，檢驗各指標與時間的關係，結果發現除了黑化和酸鹼度等項目外，其餘的指標均和時間有著極佳的相關程度。然而，土壤化育指數在使用時，仍會面臨部分方法上的限制，以及人為可能導致的誤差 (Reheis *et al*., 1989; Harden, 1990; Birkeland, 1999)，然而若能避免採樣描述時所造成的誤差，則土壤化育指數仍是一個相當簡便、可靠的方式，得以應用在土壤化育與地形相關研究上 (Birkeland, 1990)。

在臺灣，目前土壤化育指數的相關應用，較完整的僅於八卦臺地南部階地各階面土壤 (黃文樹, 2003; Tsai *et al*., 2006)，然該鄰近地區的紅土階地，仍有濁水溪南岸的竹山、林內觸口臺地等，均為濁水溪或清水溪堆積後受構造隆升下切而成 (Ota *et al*., 2002)，具有相似的母質、氣候、植生等環境，而且竹山階地群的坪頂埔面已有定年資料 (約 31ka) (Ota *et al*., 2002)，所以這將是一個極佳的機會，將土壤地形學的概念應用在臺灣的河階地形研究上，藉由階地土壤化育程度的探討，不但能了解土壤在時間過程中化育的程度，尚得以利用土壤化育相對年代作為地形面對比的依據，故本研究擬初步採用土壤化育指數 (Harden, 1982; 1990) 作為辨別土壤化育程度差異的指標，建立各階地土壤生成的相對年代與時間序列，進一步應用在各階地的對比。

材料與方法

(一) 研究區概況

本研究區位於臺灣中部濁水溪流域一帶之第四紀階地 (圖 1)，地形上分屬八卦臺地、竹山臺地與觸口臺地 (石再添與楊貴三，1985；石再添等，1996)，階面受到構造活動的影響均略有傾動，但大體來看階面上甚少起伏呈一平坦的地形面，其上之土壤樣體應具有相似的地形條件；在地質上多屬紅土

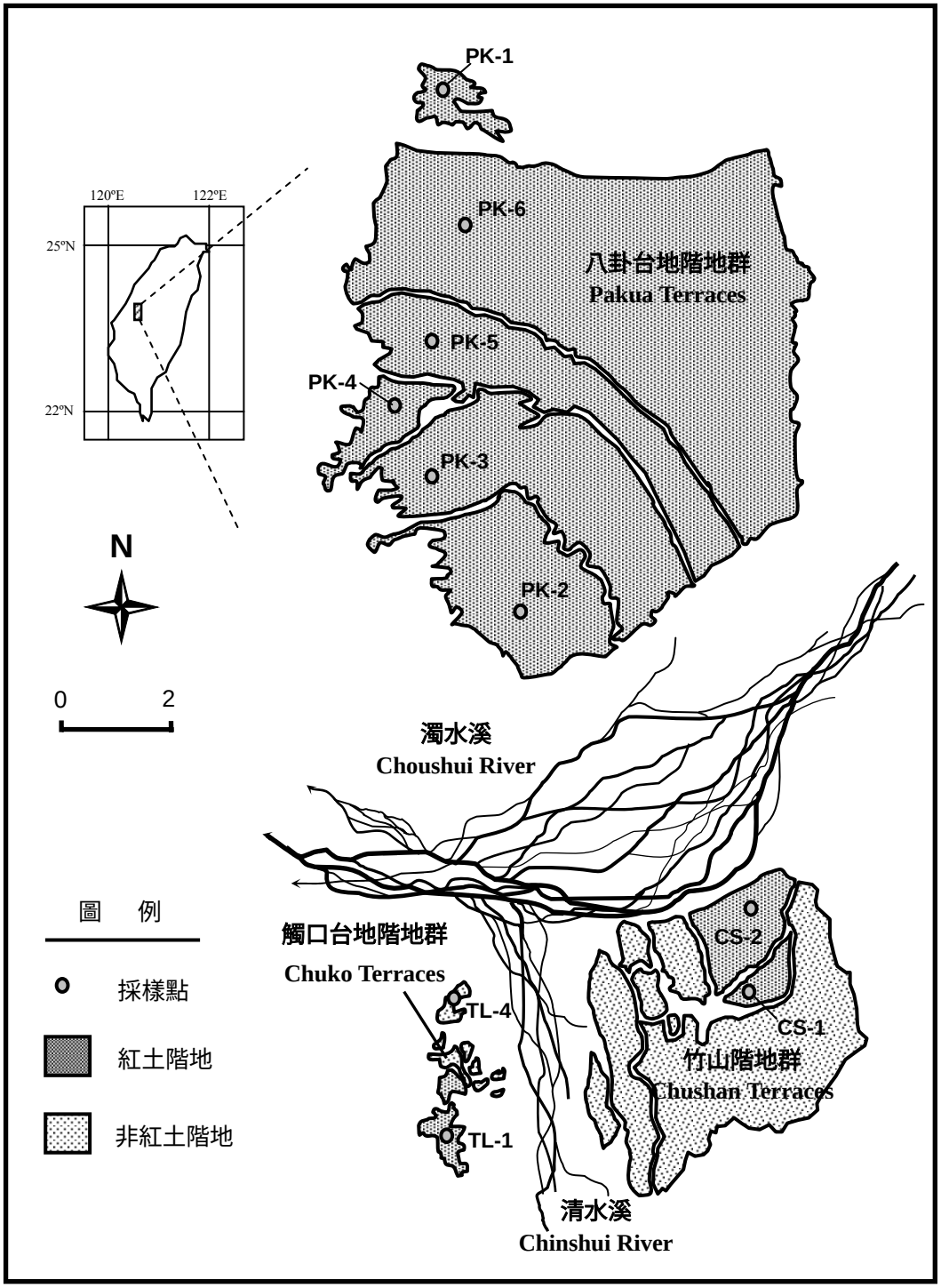


圖 1　濁水溪流域階地分布圖

臺地堆積層或是頭嵙山層 (何春蓀，1997)，成因為古濁水溪或是古清水溪沖積 (表 1)，然後受構造隆升作用次序下切而形成，然地形與構造活動之間的關聯性，以及各階地生成的相對年代和地形演育，均尚未有所定論 (Ota *et al.*, 2002；石再添與楊貴三，1985；黃文樹，2003)。

表 1　濁水溪流域階地群特徵

階　面	隆升量 (m)[a]	^{14}C 定年 (ky)	階面成因[b]	土地利用
八卦臺地				
橫山 (PK-1)	443	-	濁水溪下切	芒草、茶園、檳榔
埔中 (PK-2)	431	-	濁水溪下切	檳榔、茶園
松柏坑 (PK-3)	410	-	濁水溪下切	檳榔、茶園
弓鞋 (PK-4)	386	-	濁水溪下切	檳榔、茶園
赤水 (PK-5)	330	-	濁水溪下切	檳榔、茶園
大莊 (PK-6)	320	-	濁水溪下切	檳榔、茶園
竹　山				
照鏡山 (CS-1)	250	-	濁水溪下切	檳榔、茶園
坪頂埔 (CS-2)	190	30[c]	濁水溪下切	竹林、茶園
觸口臺地				
坪頂 1 (TL-1)	330	-	清水溪下切	竹林、檳榔、茶園
坪頂 2 (TL-4)	240	-	清水溪下切	竹林、茶園

a: 本研究所採用的隆升量，為各階面海拔最高處。

b: 根據石再添與楊貴三 (1985)、Ota *et al*. (2002)、黃文樹 (2003) 等研究整理。

c: 定年資料根據 Ota *et al*. (2002)。

本地區各階地的位置均相近，海拔高度差異也未影響到氣候上的顯著變化，整體而言本研究區各階地所經歷的氣候歷程均是一致的，意即各土壤樣體均經歷相同的氣候變化；研究區內 (1956-1985 年) 年均溫約為 23℃，最暖月 7 月均溫約為 30℃、最冷月 1 月均溫 16℃，而年平均降雨量 (1970-1999 年) 為 1,765mm，降雨特色夏雨冬乾，乾濕季分明 (中央氣象局，1990)，柯本分類法則為暖溫帶冬乾氣候 (Cwa)。

本研究區因開發甚早，受到人為開墾影響劇烈，因此幾無原始的天然植被，多數的階地皆為農地使用，土地利用上多種植茶樹、鳳梨與果園、檳榔、竹林、山藥等，少部份未開發者則為相思樹保安林或是竹林。根據氣候條件，本研究區的天然植物群落應屬於副熱帶常綠闊葉林帶，主要由榕屬、楨楠屬、鴨腳木屬等闊葉樹種所組成 (沈秀雀，1995)，常見的植物有相思樹 (*Acacia confusa*)、血桐 (*Macaranga tanarius*)、樟樹 (*Cinnamomum camphora*)、構樹 (*Broussonetia papyrifera*)、雀榕 (*Ficus wightiana*)、島榕 (*Ficus virgata*)、九芎 (*Lagerstoremia subcostata Koehne*)、刺竹 (*Bambusa stenostachya*)、五節芒 (*Miscanthus floridulus*)、姑婆芋 (*Alocasia macrorrhiza*)、蔓澤蘭 (*Mikania cordata*)、咸豐草 (*Bidens pilosa*) 等。

(二) 研究方法

由前述的研究區環境概況來看，各階地面的地形特徵、氣候條件、植被和土地利用景觀、以及母質的質地等因素，均呈現相仿的現象，因此對各階地土壤化育程度而言，會產生最明顯影響的因子，便是時間因素；透過階地土壤化育指數的計算，並比較各階地樣體的化育程度後，極可能得以建立土壤時間序列。

1. 土壤採樣與描述

在採樣上，因八卦臺地南部階地土樣已於黃文樹 (2003) 一文中詳細描述和探討，本研究將僅引用其調查描述結果，而另針對竹山、觸口臺地地區選取四個階面樣本進行採樣 (表 1)；另外，由於進行土壤化育調查研究時，尤在階地此等較穩定的地形面上，只要能避開已受侵蝕或過度干擾的地區，時間上的土壤性質變異便很可能會大於空間上的變異 (Vreeken, 1975; Huggeett, 1998; Birkeland, 1999)，所以為節省研究的時間和精力，各階面僅需慎選一個採樣點，應可足以作為代表性，採樣地點位置如圖 1 所示。採樣時，依據美國農部土壤調查手冊 (Soil Survey Staff, 1993)，進行土壤剖面的清理，使其顯示出土壤剖面的原始狀態，其次劃分各化育層，逐層觀察並描述剖面形態特徵，描述時為了能用於計算土壤化育指數，因此依美國土壤農部的土壤剖面描述方式 (Soil Survey Staff, 1993; 1999)，並按 Harden 在 1982 年提出的描述原則 (Harden, 1982; Birkeland, 1999)，稍作修正，對各階地土壤進行野外形態描述。

2. 質地分析

將攜回實驗室風乾、磨碎過篩 (<2mm) 後的土樣，秤取若干加入雙氧水去除有機物，並以 CBD 法 (Mehra and Jackson, 1960) 去除鐵氧化物，最後以吸管法 (Gee and Bauder, 1986) 進行土壤質地分析，並按砂粒、坋粒和黏粒含量，校正野外描述質地一項結果。

3. 土壤化育指標選定

因為影響土壤顏色的物質有氧化物、有機質鐵、碳酸鈣，而紅色土壤的染色物質均以各型態的鐵氧化物為主 (Torrent *et al*., 1980; Torrent and Schwertmann, 1986; Schwertmann, 1993)，一般來說在溫暖、潮濕的環境底下，土壤的化育年代越久，越容易形成結晶程度佳的鐵氧化礦物，也越容易使土色偏紅（Torrent *et al*., 1980; Arduino *et al*., 1984; García Marcos and Santos Frances, 1997）；雖地下水位變動，將會影響到土壤顏色，但若非受到極劇烈的干擾，如侵蝕等作用或長期浸潤，則土壤其他化育特徵仍會保存下來，如構造、結持度和質地、黏粒移動情形，故欲利用土壤特徵來探討地形議題時，必須要考量到土壤剖面各項性質為佳，單用顏色會造成誤判的現象，因此本研究在土壤描述後，根據 Harden (1982) 所發展的土壤化育指數計算方式，將各土壤樣體的野外形態描述加以量化。

惟 Harden 法中包含 10 項形態指標，然根據 Alonso *et al*. (1994) 針對西班牙 Almar 河階地群土壤的調查研究顯示，黑化和酸鹼值 (pH) 等指標與時間的關係程度不佳，不是一良好的指標，而且臺灣河階紅壤多半有機質含量少，土壤中氧化鐵含量高，為土色的主要染色劑，加上河階多為重要農田用地，可能會受到鄰近田地施肥影響而對酸鹼值產生干擾，因此該兩項指標也不適用於臺灣階地紅壤；另外，相關研究也指出土壤中的紅化程度、質地、結持度、構造、黏粒膜等形態，最能呈現土壤化育程度的優劣 (Meixner and Singer, 1981; Harden, 1990; Birkeland, 1999)。因此本研究選定紅化、質地、乾結持度、濕結持度、構造、黏粒膜等形態特徵指標 (Harden, 1982; Birkeland, 1999)，來量化八卦臺地、竹山、觸口臺地等階地群的化育層指數。

又 Harden (1982) 法中所列舉的特徵最大值，乃是其依美國土壤分類中化育至極致的形態特徵所擬定，難以包括世界其他地區的土壤特徵，因此在其他地區的應用時，可能會出現最大特徵值超過 Harden (1982) 法所列舉者的情況；但 Birkeland (1999) 在回顧與評論該方法的時候，曾提及 Harden 法中除以最大值的方法，乃是為了標準化，將 HI 值設定在 0-1 之間，惟現實的特徵變異大，各土壤特徵強度可能會超過 Harden 法所設定的最大值，然此不影響研究成果，Birkeland (1999) 並不認為需要修正之，故本研究採用 Birkeland (1999) 看法，將不修改 Hardnen 法的最大值。

最後，化育 B 層因洗入、澱積等作用而出現整個土壤剖面中最佳的化育程度，因此在進行土壤化育或是計算土壤化育指數時，必須使土壤剖面露出的 B 層，如此即能比較各土壤間的化育程度，因此各剖面採樣的深度並非一致，因此在比較時，可能會因為不一致的採樣深度而產生偏誤，因此為了要這樣的誤差，則按照 Birkeland (1999) 的方法，計算各土壤樣體的權重土壤剖面化育指數 (WPDI) 時，將土壤樣體深度的影響消除。

4. 形態特徵量化

由採樣、形態描述到量化的方法步驟簡述如下 (Birkeland, 1999)，計算方式如表 2 所示。

(1) 對各土壤樣體進行野外形態描述，而為避免描述上的誤差，採樣時應由同一描述者完成所有樣體的描述。

(2) 採取母質樣本，並以同土壤樣體描述的方式，進行母質描述。母質通常為土壤的 C 層，但在部分地區，土壤厚度極大，無法採取到 C 層的地區，則可用現代河川的沖積物替代；因此在本研究中母質難以獲得，再加上土壤的化育起點往往從階面離水之後便開始進，故採取濁水溪和清水溪現代河床的沉積物，作為計算的起點。

(3) 量化各土壤化育層的形態特徵和母質特徵的差異。

(4) 將所得之各形態特徵量化數值，再以理論上土壤化育特徵的最大值，予以標準化形態特徵數值。

(5) 於每個化育層中，加總所選擇的形態特徵標準量化後的值。

(6) 然後將此值除以形態特徵的數目，此值稱為化育層指數 (HI)。

(7) 將每個化育層所得之化育層指數，給予加權，乘上各化育層的厚度 (cm)。

(8) 加總每個土壤樣體剖面所得之加權後的化育層指數，此數值稱為剖面化育指數 (PDI)。

(9) 最後，將步驟 8 所得的數值再除以土壤剖面深度 (土壤剖面到母質層的厚度，或是野外採樣描述時，人力開挖的剖面深度)，此步驟乃將 PDI 再行加權平均，以求得加權平均的剖面化育指數 (WPDI)。

結果與討論

(一) 土壤剖面形態

本研究共有十個土壤樣體，各階地的土壤剖面形態特徵，以及竹山和觸口臺地階地土壤質地分析結果，如表 3 和表 4 所示；惟其中八卦臺地南部階地 (PK-1, PK-2) 六個樣體已在先前的研究中取樣、

描述並分析 (黃文樹, 2003；Tsai *et al*., 2006), 於此不另贅述, 因此僅分項詳述竹山和觸口臺地等四個階地樣體的形態特徵。

表 2　土壤剖面化育指數 (HI) 計算方式 [1]

	土壤性質的量化				
	土壤性質等級	計算公式	範例 [2]		
			化育層性質	母質性質	型態特徵量化值
rubification	hue 等級 5GY→10Y→5Y→2.5Y→10YR→7.5YR→5YR→2.5YR→10R→5R chroma 等級 0→1→2→3→4→5→6→7→8	Xr=10[(hue 差＋chroma 差)]$_{dry}$＋10[(hue 差＋chroma 差)]$_{moist}$ Xr 除以紅化特徵量化後的最大值 190 Xrn=Xr÷ (190)	2.5YR 4/8 (m) [3] 2.5YR 6/8 (d)	5GY 3/1 (m) 5GY 4/1 (d)	Xrn=[10 (7＋7)＋10 (7＋7)]÷190=1.47
total texture	質地等級 [4] S→LS→SL, Si→L, SCL→CL, SiL, SC→SiCL, C→SiC stickines 等級 so→ss→s→vs plasticity 等級 po→ps→p→vp	Xt=10[質地差＋黏性差＋黏性差] Xt 除以質地的最大值 90 Xtn=Xt÷90	SiC vs vp	S so po	Xtn=[10 (6＋3＋3)]÷90 =1.33
Dry consistence	hardness 等級 lo→so→sh→h→vh→ch	Xdc=10 (乾結持度差) Xdc 除以乾結持度最大值的兩倍 2×50=100 Xdcn=Xdc÷100	vh	lo	Xdcn=(10×4)÷100 =0.4
Moist consistence	firmness 等級 lo→vfr→fr→fir→vfir→efir	Xmc=10 (濕結持度差) Xmc 除以濕結持度最大值的兩倍 2×50=100 Xmcn=Xmc÷100	fir	lo	Xmcn=(10×3)÷100 =0.3
structure	分數 5 10 20 30 grade 1 2 3 type pl gr pr col sbk abk	僅有一種構造形態時 Xs=grade＋type 若有第二種構造形態 Xs=[(grade＋type)]1 °＋1/2[(grade＋type)]2 ° Xs 除以構造最大值 60 Xsn=Xs÷60	3 sbk	structureless	Xsn=(10×3＋10×1)÷60=0.67

表 2　土壤剖面化育指數 (HI) 計算方式 (續)[1]

	土壤性質的量化				
	土壤性質等級	計算公式	範例[2]		
			化育層性質	母質性質	型態特徵量化值
clay films	分數 (points) 10　20　30　40 數量 (amount) v1　1　2　3 明顯度 (distinctness) f　d　p 位置 (location) po　br　co　pf	僅有一種 clay film 特徵 Xcf= (amount＋distinctness＋location) 若有兩種 clay film 特徵 Xcf=[(amount＋distinctness＋location)]1 ° ＋1/2 [(amonut ＋ distinctness)]2 ° Xcf 減去 20 後(當 Xcf 的值大於 0)，除以黏粒膜特徵最大值 130 Xcfn= (Xcf-20)÷130	1dpf	no films	Xcfn=[(20 ＋ 20 ＋ 20)1 ° -20] ÷ 130=0.31

1：本表修改自 Birkeland (1999)。

2：此處以橫山 (PK-1) 土壤剖面樣體中，化育層 Bo2 層與濁水溪現代河床沖積物的形態為計算範例。

3：m 表 moist color，為野外土壤樣體出露新鮮剖面時，所呈現的顏色；d 表 dry color，為土壤採集後，經過風乾後的土色。

4：質地等級依照 Tayler (1988) 所訂。

表 3　濁水溪流域階地土壤樣體野外剖面形態之描述

Pedon	Horizon	Depth (cm)	Munsell color		Texture[1]	Structure[2]	Consistence[3]			Clay coatings[4]	HI[5]	WPDI
			moist	dry			dry	moist	wet			
PK-1												
	A1	0-30	5YR 5/8	5YR 6/8	SiC	3fm&csbk	vh	fir	vsvp	-	0.68	
	Bo1	30-70	2.5YR 4/8	2.5YR 6/8	SiC	3m&cvcsbk	vh	fir	vsvp	-	0.70	0.73
	Bo2	70-110	2.5YR 4/8	2.5YR 6/8	SiC	3mc&vcsbk	vh	fir	vsvp	1dpf	0.75	
	Bo3	110-140	2.5YR 4/6	2.5YR 6/8	SiC	s&vcsbk	vh	fir	vsvp	1dpf	0.73	
	Bo4	140-160	2.5YR 4/6	2.5YR 6/8	SiC	mc&vcsbk	vh	fir	vsvp	1dpf	0.73	
	Bo5	160-200	2.5YR 4/6	2.5YR 6/8	SiC	3mc&vcsbk	eh	vfir	vsvp	1dpf	0.76	
PK-2												
	A	0-20	7.5YR 4/6	7.5YR 6/6	SiC	3f&msbk	vh	fir	sp	2dpo	0.64	
	Bt1	20-51	7.5YR 5/8	7.5YR 5/8	SiCL	3m&csbk	vh	fir	sp	2dpo	0.66	
	Bt2	51-85	5YR 5/6	5YR 7/6	SiC	3f&mabk	vh	fir	vsvp	2dpo	0.70	0.68
	Bt3	85-120	5YR 5/6	5YR 6/6	SiC	3m&cabk	vh	fir	vsvp	2dpo	0.70	
	Bt4	120-145	5YR 5/6	5YR 6/6	SiC	3m&cabk	vh	fir	vsvp	2dpo	0.70	

表 3　濁水溪流域階地土壤樣體野外剖面形態之描述 (續)

Pedon	Horizon	Depth (cm)	Munsell color		Texture[1]	Structure[2]	Consistence[3]			Clay coatings[4]	HI[5]	WPDI
			moist	dry			dry	moist	wet			
	Bt5	>145	5YR 5/6	5YR 7/6	SiC	3m&csbk	vh	fir	vsvp	2dpo	0.70	
PK-3												
	A	0-25	7.5YR 5/6	7.5YR 6/6	SiCL	3m&fsbk	vh	fir	sspv	-	0.57	
	AB	25-55	7.5YR 5/8	7.5YR 6/8	SiCL	3m&csbk	vh	fir	sp	-	0.61	
	Bt1	55-80	7.5YR 5/8	7.5YR 6/8	CL	3m&cabk	vh	fir	vsvp	2dpo	0.68	0.64
	Bt2	80-115	5YR 4/6	5YR 5/8	C	3m&cabk	vh	fir	vsvp	2dpo	0.69	
	Bt3	115-160	5YR 5/8	5YR 6/8	CL	3c&mfabk	vh	vfir	sp	2dpo	0.67	
PK-4												
	A	0-18	7.5YR 7/8	7.5YR 7/4	SiC	3m&fsbk	sh	fr	ssps	-	0.50	
	Bt1	18-40	7.5YR 6/8	7.5YR 7/6	SiC	3m&fsbk	sh	fr	ssps	1dpf	0.57	0.58
	Bt2	40-70	7.5YR 5/8	7.5YR 6/6	C	3m&csbk	h	fr	sp	1dpf	0.61	
	Bt3	70-100	7.5YR 5/8	7.5YR 7/6	C	3m&csbk	h	fr	sp	1dpf	0.61	
PK-5												
	A	0-20	7.5YR 4/6	7.5YR 6/6	CL	2m&fsbk	sh	fr	ssps	-	0.44	
	AB	20-45	7.5YR 4/6	7.5YR 6/6	SiCL	2m&fabk	sh	fr	ssps	-	0.46	
	Bt1	45-70	5YR 5/6	5YR 6/6	SiCL	2m&cabk	h	fr	sp	-	0.53	0.53
	Bt2	70-95	5YR 4/6	5YR 6/8	CL	2m&fabk	h	fr	sp	1dpf	0.56	
	Bt3	95-140	5YR 4/6	5YR 6/8	C	2m&fabk	h	fr	sp	1dpf	0.60	
PK-6												
	A	0-35	10YR 6/6	10YR 7/4	CL	2fmg&fmsbk	sh	fr	ssps	-	0.40	
	Bw1	35-60	10YR 5/8	10YR 6/4	CL	2fm&csbk	sh	fr	ssps	-	0.42	
	Bw2	60-90	10YR 5/8	10YR 6/4	CL	2fm&csbk	sh	fr	ssps	-	0.42	0.43
	Bw3	90-114	7.5YR 5/8	7.5YR 6/6	CL	2fm&csbk	sh	fr	ssps	-	0.46	
	Bw4	>114	7.5YR 5/8	7.5YR 6/6	CL	2fm&sbk	sh	fr	ssps	-	0.46	
CS-1												
	A	0-20	10YR 4/4	10YR 5/4	CL	2f&msbk	sh	fr	ssps	--	0.39	
	Bt1	20-45	10YR 4/6	10YR 6/6	SiCL	2f&mabk	h	fir	ssps	--	0.47	0.56
	Bt2	45-85	7.5YR 6/8	7.5YR 7/6	SiC	2m&cabk	h	fir	sp	1dpf	0.61	
	Bt3	85-120	7.5YR 6/8	7.5YR 7/6	C	2m&cabk	h	fir	vsp	1dpf	0.61	
	Bt4	120-150	7.5YR 7/8	7.5YR 7/6	C	2m&cabk	h	fir	vsp	1dpf	0.61	
CS-2												
	A	0-10	10YR 6/6	10YR 6/6	CL	2f&msbk	sh	fir	ssps	--	0.44	0.49
	Btv1	10-25	10YR 5/6	10YR 7/6	CL	2f&mabk	sh	fir	ssps	--	0.44	
	Btv2	25-70	10YR 5/5 (95%) 2.5YR 6/4 (5%)	10YR 6/6	CL	2f&mabk	h	fir	ssps	1fpf	0.48	

表 3　濁水溪流域階地土壤樣體野外剖面形態之描述 (續)

Pedon	Horizon	Depth (cm)	Munsell color moist	Munsell color dry	Texture[1]	Structure[2]	Consistence[3] dry	Consistence[3] moist	Consistence[3] wet	Clay coatings[4]	HI[5]	WPDI
	Btv3	70-95	10YR 5/6 (90%) 2.5YR 6/4 (10%)	10YR 6/6	SiC	2m&cabk	sh	fr	sp	1fpf	0.53	
	Btv4	95-125	10YR 5/6 (85%) 2.5YR 6/4 (15%)	7.5YR 6/6	SiC	2m&cabk	sh	fr	sp	1fpf	0.53	
TL-1												
	A	0-35	7.5YR 5/6	7.5YR 5/4	CL	1f&msbk	sh	fr	sp	--	0.39	
	Bt1	35-65	7.5YR 4/6	7.5YR 6/4	SiCL	2f&mabk	sh	fr	sp	1fpf	0.46	
	Bt2	65-100	7.5YR 4/4	7.5YR 6/6	CL	3f&mabk	vh	fir	sp	1fpf	0.52	0.53
	Bt3	100-125	5YR 4/6	5YR 5/6	C	3f&mabk	h	fir	sp	1dpf	0.57	
	Bt4	125-155	5YR 4/4	5YR 5/6	C	3m&cabk	vh	vfir	vsvp	2dpf	0.64	
	Bt5	155-180	5YR 4/6	5YR 5/6	C	3f&mabk	vh	vfir	vsvp	2dpf	0.65	
TL-4												
	A	0-10	10YR 3/4	10YR 4/4	SL	1fgr	lo	lo	sopo	--	0.18	
	AB	10-20	10YR 3/4	10YR 4/4	SCL	1f&msbk	sh	fr	sopo	--	0.27	0.32
	Bw1	20-35	7.5YR 3/4	7.5YR 4/6	SCL	1f&msbk	sh	fr	sp	--	0.36	
	Bw2	35-55	7.5YR 3/4	7.5YR 4/4	SC	2f&msbk	sh	fr	sp	--	0.39	
FD[6]												
	-	-	5GY 3/1[7] 5Y 4/2[8]	5GY 4/1 5Y 5/2	S	o	lo	lo	sopo	-		

1: using the US system; SL=sandy loam, SCL=sandy clay loam, C=clay, CL=clay loam, SiC=silty clay.

2: o= none structure, sg=single grain. 3=strong, 2=moderate, 1=weak, f=fine, vf=very fine, m=medium, c=coarse, gr=granular, abk=angular blocky, sbk=subangular blocky, vc=very coarse.

3: lo=loose, so=soft, sh=slight hard, h=hard, vh=very hard, eh=extremely hard, fir=firm, fr=friable, v=very, w=weak, o=none, so=none sticky, ss=slight sticky, s=sticky, vs=verysticky, po=none plastic, ps=slight plastic, p=plastic, vp=very plastic.

4: 1=few, 2=common, 3=many, f=faint, d=distinct, p=prominent, pf=ped face; po=line tubular or interstitial pores.

5: Horizon Index (HI) 為土壤剖面中各化育層形態特徵量化所得的數值指標，可以看出各化育層的化育程度，在應用上多半會配合各化育層的深度，做深度曲線圖，藉以判斷整個土壤剖面的化育趨勢；其次，各化育層的 HI 值乘上化育層厚度，然後加總所得之值便是剖面化育指數 (PDI) (Harden, 1982)。

6: FD= modern fluvial deposition。

7: 濁水溪現代河床沖積物顏色。

8: 清水溪現代河床沖積物顏色。

表 4　竹山與觸口臺地階地土壤之質地分析

Pedon	Horizon	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
CS-1				
	A	25	47	28
	Bt1	18	46	36
	Bt2	14	42	44
	Bt3	16	36	48
	Bt4	17	39	44
CS-2				
	A	38	30	32
	Btv1	35	29	36
	Btv2	28	32	40
	Btv3	18	42	40
	Btv4	14	46	40
TL-1				
	A	22	50	28
	Bt1	17	47	36
	Bt2	26	42	32
	Bt3	25	35	40
	Bt4	23	33	44
	Bt5	20	32	48
TL-4				
	A	63	17	20
	AB	56	20	24
	Bw1	47	21	32
	Bw2	52	12	36
	C	-	-	-
FD[1]				
	濁水溪	90	1	10
	清水溪	88	1	12

1: FD= modern fluvial deposition

1. 母質 (現代河床沖積物)

本研究採取濁水溪和清水溪河床的現代沖積物，作為理想上的土壤化育起點，濁水溪沖積物的顏色甚黑，達 5GY 3/1，為砂質地，砂粒含量高達 90%、黏粒僅有 10% (表 4)，無明顯構造、亦無結持度；而清水溪的沖積物除顏色和濁水溪相異外 (5Y 4/2)，其餘的質地 (砂粒 88%、黏粒 12%)、構造和結持度等特徵均相仿。兩者的差異據推測可能與各溪流域上游地質狀況的影響，濁水溪上游多黑色頁岩和

板岩，故顏色偏黑，然清水溪上游多砂岩，故顏色較淺。

2. CS-1 (竹山照鏡山)

本樣體位於南投縣竹山鎮照鏡山果園，坡度小於 5%，階面最高海拔約 250m，排水良好，野外觀察所見植被多為檳榔樹、竹林、相思樹或芒草等，土地利用幾為茶園、果園、檳榔園等，樣體剖面約面向東方。樣體具一淡色表育層 (ochric epipedon)，土壤中黏粒含量介於 32-46%之間，砂粒含量表層最多 (36%)，隨深度增加而減少，坋粒量則由表層的 32%增加到底層的 53% (表 4)，顯示土壤中的砂粒受到風化而崩解成坋粒的現象、而坋粒則進一步崩解成黏粒，並有洗出、洗入的現象，故 25cm 以下為黏聚層，在 70cm 以下可觀察到黏粒膜 (clay coating)。表層土壤 (0-10cm) 的顏色為黃褐色 (10YR 4/4; yellowish brown)，次為褐黃色 (10YR 4/6; brownish yellow)，25 公分以下為強褐色 (7.5YR 6/8; strong brown)。土壤質地為黏壤土 (clay loam) 到坋質黏土 (silt clay)，質地相當細緻，故構造上多為中等到粗的角塊構造 (angular blocky)，結持度緊密，乾燥後則呈堅硬的現象，黏性和塑性在 70 公分以下均高，表層土壤的黏、塑性則較不佳。

3. CS-2 (竹山坪頂埔)

本樣體位於南投縣竹山鎮坪頂埔李勇廟旁，坡度約僅 1%，階面最高海拔為 190m，根據野外觀察結果，植被多為果園和竹林，樣體剖面面向北方。樣體具淡色表育層，25cm 以下有明顯的黏聚層，在 45cm 以下可觀察到黏粒膜；土壤中砂粒含量不高，均在 30%以下，由表層向底層減少，而坋粒則有向下增加的現象 (38-44%)，黏粒含量除表層較低 (34%)，25cm 以下均在 40%左右 (表 4)，顯示本樣體經過風化的過程，使砂粒崩解成坋粒和黏粒，質地上表層質地為黏壤土，25cm 以下則均為坋質黏土。另可能因地下水位升降的關係，出現輕微的氧化還原現象，有鐵局部濃集 (2.5YR 6/4) 和錳結核的出現 (5PB 2.5/1)；雖 Lin *et al*. (2005) 在桃園臺地的研究顯示，因有明顯人為水田干擾和地下水位變化的情況，使得該地區土壤顏色具有極大的空間變異，但相較之下，CS-2 樣體的氧化還原特徵佔總剖面的數量並不多 (表 3)，剖面主體 (matrix) 特徵與顏色均未改變，且在化育 B 層可看出明顯的化育特徵，以及黏粒聚積的現象，並未像 Lin 等 (2005) 的調查，排水不良的土壤特徵上已呈現明顯的改變，故應可將此一樣點視為該階面之代表。整體而言剖面顏色多為黃褐色 (10YR 5/6, 5/5, 6/6)；土壤構造由上層細到中度亞稜塊構造 (subangular blocky)，到下層中到強度角塊構造，結持度由緊密到易碎，乾燥後則呈堅硬到輕微堅硬的現象，85cm 以內的土壤黏、塑性均弱，下層土壤則具有普通黏性和塑性。

4. TL-1 (觸口臺地坪頂 1)

本樣體位在雲林縣林內鄉坪頂村茶園，坡度約僅 1%，階面最高海拔為 330m，植被多為檳榔樹、竹林、相思樹或芒草等，樣體剖面朝西。樣體具淡色表育層，土壤中砂粒含量低，均在 26%以下，坋粒則在 28-51%之間，黏粒則介於 34-52% (表 4)，有明顯洗出、洗入現象，有黏聚層存在，並可觀察到黏粒膜，且在 125cm 以下有較強的黏粒膜特徵，土壤質地在 65cm 以內為坋質黏壤土，65-100cm 則為黏壤土，100cm 以下為黏土；結合本樣體質地分析，可發現本樣體經歷一段明顯的風化作用。剖面的顏色在 100cm 以內多屬強褐色，彩度均為 7.5YR，100cm 以下的土壤則多為黃紅色 (5YR 4/6, 4/4)；土壤構造由表層的細到中度的亞稜塊構造，變為底層的強度角塊構造，結持度由表層易碎到下層極緊密的現象，乾燥後底層土壤則非常堅硬，黏、塑性俱佳。

5. TL-4 (觸口臺地坪頂 2)

本樣體位於雲林縣林內鄉坪頂村一處廢棄養殖場旁，坡度小於 5%，階面最高海拔為 240m，植被多為檳榔樹、竹林、相思樹或芒草等，土地利用則為茶園或棄置田地，樣體剖面朝西。樣體具淡色表育層，土壤中砂粒含量極高，由表層的 62%向下遞減到 48%，坋粒則介於 12-16%，黏粒量介於 26-42%之間 (表 4)，顯示剖面受到雨水淋洗的現象，呈現輕微的洗出、洗入現象，然剖面中無黏粒膜存在，裡土層應屬變育層 (cambic horizon)。質地上，除 55cm 以下的深度已達母質層屬於砂土外，其餘多屬砂質黏壤土和砂質黏土，然在 20-35cm 一層，可能因洗入作用影響，則為黏土質地。剖面表層顏色為黃褐色 (10YR 3/4)，底層則為深褐色 (7.5YR 3/4)；土壤構造幾屬細度到中度的亞稜塊構造，結持度由無到易碎，乾燥後則成輕微堅硬，而在黏、塑性上，除了 35-55cm 附近土壤具有輕微黏塑性外，其餘均無明顯黏、塑性。

綜合前述各階地土壤剖面的野外形態特徵的描述，雖為質性的描述，但仍可初步辨識出各階地土壤化育程度上的差異，大致來說 TL-1 和 CS-1 的化育程度相仿，其次為 CS-2，最末為 TL-4。

(二) 土壤化育指數

藉由野外土壤剖面形態特徵，本研究進一步計算了竹山與觸口臺地等階地土壤的化育層指數，並重新計算了八卦臺地南部階地六個土壤樣體的指數值 (HI, WPDI)，所得的結果如表 3 和圖 2 所示；由各樣體 HI 值的變化趨勢來看，樣體間的化育程度約可排列出一個相對次序來，化育程度最好的是 PK-1 (HI=0.68-0.76)，其次依序為 PK-2 (HI=0.64-0.70) ＞PK-3 (HI=0.57-0.69) ＞PK-4 (HI=0.50-0.61)、CS-1 (0.39-0.61)、TL-1 (0.39-0.65) ＞PK-5 (HI=0.44-0.60)、CS-2 (HI=0.44-0.53) ＞PK-6 (HI=0.40-0.46) ＞TL-4 (0.18-0.39)；進一步加權後，各階地的 WPDI 值則更清楚的顯示了彼此間的化育程度差異 (圖 3)，其次序為 PK-1 (0.73)、PK-2 (0.68)、PK-3 (0.64)、PK-4 (0.58)、CS-1 (0.56)、PK-5 (0.53)、TL-1 (0.53)、CS-2 (0.49)、PK-6 (0.43)、TL-4 (0.32)。值得注意的是，雖由 WPDI 的值可以顯示 CS-1 與 TL-1 的化育程度有差異，且 TL-1 和 PK-5 相同，但根據野外形態的觀察與 HI 值的趨勢，可以發現 CS-1 和 TL-1 的化育程度相仿，PK-5 的化育程度則和 CS-2 相似，因此綜合考量下，本研究認為各土壤的相對化育年代具有以下的次序關係：I (PK-1) ＞II (PK-2) ＞III (PK-3) ＞IV (PK-4, CS-1, TL-1) ＞V (PK-5, CS-2) ＞VI (PK-6) ＞VII (TL-4)。

(三) 土壤時間序列

雖然本研究未對竹山、觸口臺地等階地土壤樣體進行理化性質分析，無法獲得詳細的土壤分類結果，但八卦臺地南部階地六個土壤樣體已在先前的研究中獲得，分別為 PK-1 為典型簡潤氧化物土 (Typic Hapludox)，PK-2、PK-3、PK-5 為典型老育濕潤極育土 (Typic Paleudults)、PK-4 為典型簡潤極育土 (Typic Hapludult)、PK-6 為典型低鹽基濕潤弱育土 (Typic Dystrudept) (Tsai *at al*., 2006)；因此藉由本研究的土壤化育程度比對來看，由於 CS-1、TL-1、PK-4 的化育程度相仿，CS-2 和 PK-5 的化育程度一致，應可將 CS-1、CS-2、TL-1 均劃分為極育土 (Ultisol)，而 TL-4 的化育程度最差，因此可能屬於弱育土 (Inceptisol)；惟 CS-2 有輕微斑紋和錳結核等氧化還原特徵 (redoximorphic features)，因此需進一步透過理化性質分析，方能確定細部的分類。

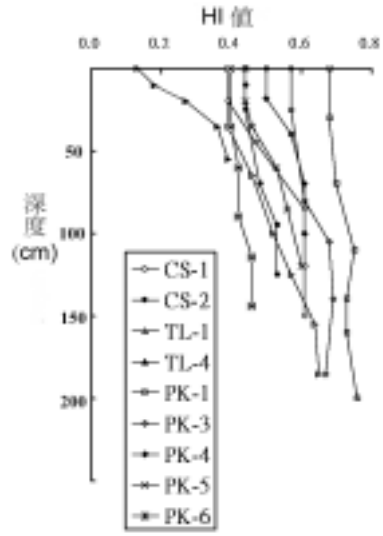


圖 2　各階地土壤 HI 值隨土壤深度散佈圖

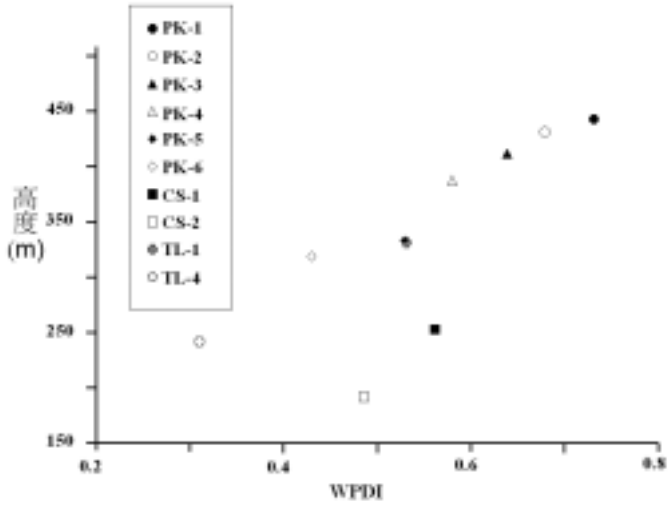


圖 3　各階地土壤 WPDI 值與階地海拔高度散佈圖

由於 Ota *et al*. (2002) 曾在竹山臺地坪頂埔階地尋獲泥炭樣本，經 ^{14}C 定年結果，發現 CS-2 的生成年代約在 30ka 左右，並假設階地的抬升量為等速的情況 (0.4m/km/kyr)，推估 CS-1 的生成年代為 92ka；而且 Tsai *et al*. (2006) 藉日本琉球喜界島海階土壤的年代資料 (Maejima *et al*., 2002)，比較喜界島海階和八卦臺地南部六個階地土壤的鐵結晶度，推估八卦臺地階地的生成年代約介於 40ka-400ka 之間。因此考慮到年代推估、定年方法的限制與誤差，以及階地年代的估算，則可推估 PK-4、CS-1、TL-1

等階地的生成年代則約 90ka，PK-1、PK-2、PK-3 則都應老於 90ka，PK-5 和 CS-2 則可能介於 30ka~90ka 之間，TL-4 則是 30ka 以來所形成年輕階地。因此，本研究區內階地土壤中，氧化物土的生成年代最少老於 90ka 以上，甚至可能需得 400ka 的時間，而極育土的化育可能須經歷 30ka 以上的時間，而弱育土則是 30ka 以內的環境所化育而成。

(四) 階地對比

在階地上的土壤，其化育通常始於河川下切後階地開始離水，此時土壤會逐漸有剖面的形態、化育層特徵、各性質的洗出、洗入作用、或是鐵的氧化與結晶 (黃文樹，2003)，理論上土壤化育的年代雖然不完全等同於河階形成年代，但兩個年代應相當接近。

因此，若將階地土壤化育程度假定為階地年代，則透過階地樣體 WPDI 值與各階地海拔高度作散佈圖 (圖 3)，則可明顯發現竹山 (CS)、觸口 (TL) 和八卦 (PK) 等階地，雖各階地海拔高度不同，但卻可發現不同高度的階地土壤卻有相近的化育程度，如 PK-4 和 CS-1 相近，PK-5 和 TL-1 一致，略高於 CS-2，但若再配合圖二各土壤剖面的化育趨勢以及各階地群的階序來看，則本研究區內各階地面比對的次序關係應與土壤化育順序相符：I (PK-1) ＞II (PK-2) ＞III (PK-3) ＞IV (PK-4, CS-1, TL-1) ＞V (PK-5, CS-2) ＞VI (PK-6) ＞VII (TL-4)；此意味著在 PK-4 時期 (約為 90ka)，濁水溪有另一分流於竹山附近，形成 CS-1，而清水溪開始在本區形成 TL-1 時，濁水溪亦形成 PK-5 和 CS-2 面，並當濁水溪形成 PK-6 後，其主流便南移到現今河道附近，最後在 30ka 以來，因清水溪的下切遷移，在竹山地區和觸口臺地間形成較低位的河階群，因此 TL-4 的生成年代應與竹山地區非紅土的最低位階地年代相當 (圖 1)。

結　論

土壤剖面形態描述的量化是較經濟、簡便的方法，可提供一個數量化的化育程度差異，可不用作圖，直接反應土壤化育差異；過去的研究顯示，該方法曾被應用於海階或河階等階地的對比，以及相對年代的推估，在缺乏定年資料的情況之下，以土壤化育程度或指數值作為地形面相對年代的比較，仍是一個相當簡便、可靠的方式。

本研究將土壤化育指數應用在濁水溪流域中游階地的對比上，結果顯示各階地土壤樣體間的化育程度，約可排列出一個相對次序來：I (PK-1) ＞II (PK-2) ＞III (PK-3) ＞IV (PK-4, CS-1, TL-1) ＞V (PK-5, CS-2) ＞VI (PK-6) ＞VII (TL-4)。藉此結果，則可建立本研究區內階地土壤化育的時間序列，土壤化育的過程乃隨著時間演進具有弱育土—極育土—氧化物土的序列；氧化物土的生成年代最少老於 90ka 以上，甚至可能需得 400ka 的時間，而極育土的化育至少須經歷 30ka 以上的時間，而弱育土則是 30ka 以內的環境所化育而成。

因此，本研究藉由土壤化育程度，對比出各階地的生成相對年代，結果顯示各階地面比對的次序關係應與土壤化育順序相符。雖然土壤化育指數在研究上有其限制，但由本研究的成果顯示，其有利於區別不同土壤化育程度，以及應用在河階等穩定地形面的對比上，因此在日後臺灣的相關研究上，土壤化育指數應能成為一初步、簡便、可行的參考工具。

謝　辭

感謝兩位匿名審查者寶貴意見，對本文修改有極大助益；其次，黃弘毅先生、范舜侑先生、郭馥瑯小姐、蕭雅文小姐、林溫惠小姐、孫稜翔先生等人協助野外採樣與實驗室分析，並承蒙國家科學委員會研究計畫經費補助 (NSC94-2116-M-018-001)，使得本研究能順利完成，謹誌謝忱。

引用文獻

中央氣象局 (1990) **中華民國臺灣地區氣候圖集，第 1、2 冊**，臺北：中央氣象局。

石再添、張瑞津、鄧國雄、黃朝恩 (1996) **重修臺灣省通志卷二土地志地形篇**，南投：臺灣省文獻會。

石再添、楊貴三 (1985) 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。

何春蓀 (1997) **臺灣地質概論**，臺北：經濟部中央地質調查所。

沈秀雀 (1995) **南投縣生物資源調查成果彙編**，南投：行政院農業委員會特有生物研究保育中心。

陳怡葦 (2003) **桃園地區活斷層與地形面之研究**，國立彰化師範大學地理系碩士論文。

馮鈺棋 (2004) **嘉義地區活斷層之地形學研究**，國立彰化師範大學地理系碩士論文。

黃文樹 (2003) **八卦臺地南部階地地形與土壤化育之研究**，國立彰化師範大學地理系碩士論文。

黃文樹、蔡衡、林登秋 (2003) 臺灣河階對比研究之回顧與探討，**地理學報**，33: 19-37。

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

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

Arduino, E. E. B., Marsan, F. A., Zanini, E. and Franchini, M. (1986) Iron oxides and clay minerals within profiles as indicators of soil age in Northern Italy, *Geoderma*, 37: 45-55.

Arduino, E. E. B., Carraro, F. and Forno, M. G. (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 Ciolkosz, E. J. (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*, 3rd ed., New York: Oxford.

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

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

Buntley, G. J. and Westin, F. C. (1965) A comparative study of developmental color in a Chestnut-Chernozem-Brunizem soil climosequence, *Soil Science Society of American Proceeding*, 29:

579-582.

Colman, S. M., Pierce, K. L. and Birkeland, P. W. (1987) Suggested terminology for Quaternary dating methods, *Quaternary Research*, 28: 314-319.

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

Gee, G. W. and Bauder, J. W. (1986) Particle-size analysis. In: Klut, A. (eds.) *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods-Agronomy Monograph No. 9*, Madison, Wisconsin: SAS and SSA, 383-411.

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.

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

Hurst,V. J. (1977) Visual estimation of iron saprolite, *Geological Society of America Bulletin*, 88: 174-176.

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

Kendrick, K. J. and McFadden, L. D. (1996) Comparison and contrast of processes of soil formation in the San Timoteo Badlands with chronosequences in California, *Quaternary Research*, 46: 149-160.

Lin, Y. S., Chen, Y. G., Chen, Z. S. and Hsieh, M. L. (2005) Soil morphological variations on the Taoyuan Terrace, northwestern Taiwan: Roles of topography and groundwater, *Geomorphology*, 69: 138-151.

Maejima, Y., Nagatsuk, S. and Higashi, T. (2002) Application of the crystallinity ratio of free iron oxides for dating soils developed on the raised coral reef terraces of Kikai and Minami-Daito Island, southwest Japan, *Quaternary Research,* 41: 485-493.

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

Mehra, O. P. and Jackson, M. L. (1960) Iron oxides removed from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate, *Clays and Clay Mineral*, 7: 317-327.

Meixner, R. E. and Singer, M. J. (1981) Use of a field morphology rating system to evaluate soil formation and discontinuities, *Soil Science*, 31 (2): 114-123.

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

Reheis, M. C., Harden, J. W., McFadden, L. D. and Shroba, R. R. (1989) Development rates of late Quanternary soils, Silver lake playa, California, *Soil Science Society of American Journal*, 53: 1127-1140.

Schaetzl, R. J., Mokma, D. L. and Delbert, L. (1988) A numerical index of podzol and podzolic soil

development, *Physic Geography*, 9: 232-246.

Schwertmann, U. (1993) Relations between iron oxides, soil color, and soil formation. In: Bigham, J. M. and Ciolkosz, E. J. (eds.) *Soil Color*, *SSSA Special Publication No. 31*, Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America, Inc..

Soil Survey Staff (1993) *Soil Survey Manual, USDA Handbook No. 18*, Washington, D. C.: U. S. Gov. Print. Office.

Soil Survey Staff (1999) *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*, 2nd ed., Washington, D. C.: USDA.

Taylor, E. M. (1988) *Instructions for the Soil Development Index Template Lotus 1-2-3*, Denver, Colorado: U.S.G.S. OFR.

Torrent, J. and Schwertmann, U. (1986) Influence of hematite on the color of red beds, *Journal of Sedimentary Petrology*, 57 (4): 682-686.

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

Tsai, H., Huang, W. S., Hseu, Z. Y. and Chen, Z. S. (2006) A river terrace soil chronosequence of the Pakua tableland in central Taiwan, *Soil Science*, 171 (2): 167-179.

Vreeken, W. J. (1975) Principal kinds of chronosequences and their significance in soil history, *Journal of Soil Science*, 26 (4): 378-394.

95 年 2 月 20 日　收稿
95 年 6 月 6 日　修正
95 年 6 月 16 日　接受