

雙環入滲及土壤理化試驗應用於 石門水庫集水區土壤沖蝕指數研訂

許振崑* 林伯勳** 冀樹勇***

摘要

臺灣地區土壤沖蝕量估算依據，一般採目前廣為使用之通用土壤沖蝕公式（USLE），其中該公式所含土壤沖蝕指數（ K_m ），過去主要藉由水土保持手冊已建立之粗略土壤沖蝕指數表獲得，而於石門水庫集水區內相關參考資料甚少且主要位於集水區下游處，若用以推算大區域集水區之土壤沖蝕量略顯粗糙，且無法區分並釐清小區域之沖蝕差異。鑑此，本研究於石門水庫集水區利用雙環入滲及土壤理化試驗，建立區內土壤沖蝕指數參考點，並藉以增加土壤沖蝕指數空間參考精度。此外，另與水土保持手冊復興水源地及復興三民內 2 處建議值，比較空間點位估算成果之合理性。結果發現，本研究空間點位估算成果確有參考價值，再透過克利金空間內插方式產製土壤沖蝕指數空間分布圖，進以研訂日後石門水庫集水區範圍內土壤沖蝕指數，以供實務應用參考。

關鍵字：土壤沖蝕指數、雙環入滲試驗、土壤理化試驗

一、前言

歷年重大風災及豪雨事件除引致石門水庫集水區大量點源式崩塌土砂來源外，受連續降雨或豪雨所致非點源式土壤沖蝕量亦十分可觀，因而衍生許多土砂災害之相關問題。近年利用遙測技術已能有效推估崩場地所引致之土砂產量，惟土壤沖蝕量，具有時空間分布不均之特性，且受水文條件（如地表逕流量）、地形特性（如坡面凸凹、坡度、坡向）、土壤結構（如顆粒大小、滲透性、有機質比例、土壤酸鹼值）、植生狀況（如植生物種、覆蓋面積）等影響，因此土壤沖

蝕量估算問題存在著許多不確定性，由於目前尚無明確的物理模式，能有效計算土壤沖蝕量，國內外學者及政府單位通常用來估算土壤沖蝕量方式，均以經驗公式為主，目前計算土壤沖蝕量之方法，一般以通用土壤沖蝕公式（Universal Soil Loss Equation, USLE）最為常用，而且過去針對石門水庫集水區有部分研究者利用現地試驗方式（梁惠儀等人，2011；何幸娟等人，2012；許振崑等人，2013），探討不同植生覆蓋邊坡及不同植生工法之土壤沖蝕量及特性分析，並與 USLE 估算結果進行比較。結果發現，經驗公式估算結果與現場實測數值常存在顯著差距，其中主要關

* 中興工程顧問社防災科技研究中心副工程師

** 中興工程顧問社防災科技研究中心環境資源監測組組長

*** 中興工程顧問社大地工程研究中心、防災科技研究中心主任

鍵因素為公式中所含土壤沖蝕性指數 (Soil Erodibility Index, K_m)，過去一般於計算時通常係以土壤質地分類查表法或利用水土保持手冊 (2005) 所收錄 280 處臺灣土壤之沖蝕性指數參考數值進行估算 (其中位於石門水庫集水區僅有下游復興水源地及復興三民等 2 處)，惟該因子屬於地區性因子且因地而異，故無法定量表示土壤抗蝕性高低，且用以推算大區域集水區之土壤沖蝕量略顯粗糙，無法區分並釐清小區域之沖蝕差異。故倘若分析石門水庫集水區範圍內任一地區之土壤沖蝕量，直接引用水土保持手冊建議值，恐僅適用於下游庫區局部區域，尚無法完全代表各集水區或整體之土壤沖蝕量值，其結果與實際將大異其趣，且易於過度預測與實際失真 (范正成，1993)。若欲改善石門水庫集水區內土壤沖蝕經驗公式適用性及釐清比較沖蝕量多寡，實有必要進行該區土壤沖蝕指數率定及建立工作 (游繁結，1987; Vaneland *et al.*, 1984; Risse *et al.*, 1993)。基此，為增加水土保持手冊中之石門水庫集水區土壤沖蝕指數的參考樣點數與改進土壤沖蝕指數空間參考精度，茲研提出二大分析工作，據以修正水土保持手冊建議採用土壤沖蝕指數使用之限制。分述以下：

(一) 增加土壤沖蝕指數空間參考點

因水土保持手冊於石門水庫集水區內之土壤沖蝕指數參考點僅有復興水源地及復興三民 2 處，且主要位於集水區下游，集水區上游並無參考資料，故本文選定 12 個子集水區，共計進行 24 組表層土壤雙環入滲及土壤理化試驗，以獲得土壤沖蝕指數之參數，進以增加該指數之空間參考點。

(二) 比較土壤沖蝕指數估算差異性

根據土壤雙環入滲及土壤理化試驗並配合 Wischmeier 公式法計算各點位所代表土壤沖蝕指

數，配合克利金空間內插方式產製石門水庫集水區土壤沖蝕指數空間分布圖，再與水土保持手冊建議於石門水庫集水區於復興水源地及復興三民內 2 處土壤沖蝕指數之參考值，比較兩者土壤沖蝕指數空間參考精度之差異性，據以說明研究成果之合理性。

本文以下依序針對土壤沖蝕公式、土壤沖蝕指數推估方法進行文獻回顧；接著，概述選定研究區域，並如何進行雙環入滲及土壤理化試驗以計算土壤沖蝕指數；最後，比較本研究估算結果之差異性，並產製土壤沖蝕指數空間分布圖，進以研訂日後石門水庫集水區範圍內土壤沖蝕指數，以供實務應用參考。

二、文獻回顧

(一) 通用土壤沖蝕公式

為確保坡地安全並減少因開發所帶來的土砂災害，故於水土保持技術規範 (2003) 中明訂，凡山坡地涉及非農業開發行為時，均需要進行開發前、中、後的土壤流失量估算，並建議採用通用土壤流失公式 USLE 之計算結果 (Wischmeier and Smith, 1978)，作為土壤流失量估算的依據 (如公式 1)。通用土壤流失公式之所以廣為使用，主要在於公式之簡單性，其中六個主要影響土壤沖蝕的因子能反應出外部因子與內涵因子對土壤沖蝕的具體影響；其中，外部因子指的是降雨沖蝕指數 (R_m)、坡度 (S) 與坡長因子 (L)、作物與管理因子 (C) 以及水土保持處理因子 (P)；而內涵因子主要是指土壤沖蝕性指數 (K_m)。土壤沖蝕性指數主要在反應土壤本身抵抗沖蝕的能力，同時也反應出土壤對於地表逕流產出量的影響，進而將該影響反應於土壤對抗地表逕流沖蝕的實質結果上。反觀通用土壤流失公式的其他因子，多以單獨的特殊型態直接於沖蝕土壤產出中呈現 (吳嘉俊，1995)。

$$A_m = R_m \times K_m \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

式(1) A_m ：每公頃之年平均土壤沖蝕量(公噸/公頃-年)； R_m ：降雨沖蝕指數(106 焦耳-毫米/公頃-小時-年)； K_m ：土壤沖蝕指數(公噸-公頃-小時-年)； L ：坡長因子； S ：坡度因子； C ：作物與管理因子； P ：水土保持處理因子。

(二) 土壤沖蝕指數推估方法

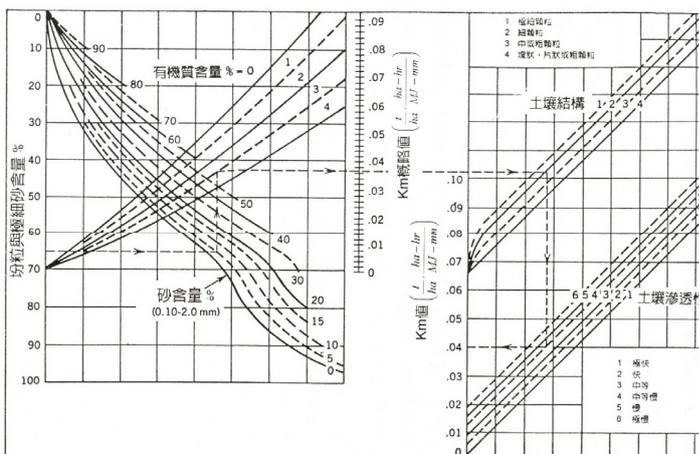
USLE 六個因子以土壤沖蝕性指數之估算最難，該指數為一種土壤抵抗沖蝕之分離及搬運力高低之量化指標。土壤抗蝕能力的高低，受土壤內在母岩風化程度及外在地形、地貌、氣候、植生覆蓋情況、開墾情形、水土保持處理及沖蝕程度等影響。土壤沖蝕性指數愈低，顯示土壤的抗蝕能力愈強，反之則愈弱(劉進金，1983；萬鑫森、黃俊義，1989)。目前最常獲得土壤沖蝕性指數之方法可分為圖解法、土壤質地分類法與公式法三種方式，分述說明如下。

1. 圖解法

Wichmeier and Smith (1978) 利用試驗所得的土壤沖蝕性指數及土壤特性參數，繪製成土壤沖蝕性指數列線圖(Nomograph)，如圖 1 所示：而該圖解法雖能快速獲得各種土壤類型之 K_m 值，但其求算過程往往借助經驗之累積，且有豐富的背景資料作參考，而台灣地區鮮少研究直接資料來佐證該圖解法所求得之 K_m 值。

2. 土壤質地分類法

盧光輝(1996)利用萬鑫森、黃俊義(1989)進行台灣地區 208 個坡地土壤沖蝕取樣點之研究成果，加以整合入土壤沖蝕性因子資料庫，並重新分析各土壤質地與 K_m 值之對應關係，最後獲得 12 個類別對應成果，如表 1 所示：



(修改自 Wichmeier and Smith, 1978)

圖 1 土壤沖蝕性指數圖解法

表 1 土壤質地與 K_m 值對應表

土壤質地			K_m 值 (ton-ha-hr-yr / ha-MJ-mm)
項次	代號	名稱	
1	S	砂土	0.012
2	LS	壤砂土	0.015
3	C	黏土	0.018
4	SiC	坩黏土	0.021
5	SL	砂壤土	0.024
6	CL	黏壤土	0.027
7	SCL	砂黏壤土	0.03
8	SC	砂黏土	0.034
9	L	壤土	0.037
10	SiCL	坩黏壤土	0.04
11	SiL	坩壤土	0.043
12	Si	坩土	0.046

(整理自：盧光輝，1996)

3. 公式法

計算土壤沖蝕性指數公式歷來有眾多學者進行分析，其公式來源皆為將不同土壤進行田間降雨實驗得其土壤流失量後反推所得之 K_m 值，進行歸納分析而得之各種經驗公式。以下彙整前人研究土壤沖蝕指數之估公式，包含 Wichmeier 公式法、EI-Swaify and Dangler 公式法、Young and Mutchler 公式法、Römken 公式法、USDA 公式法、Dino Torri 公式法，各分析方法說明整

理列於表 2。表中以 Wischmeier 公式適用性最佳（如公式 2），因公式內考慮因子較多且較能考量現地因子之變異性（如有機質含量、土壤結構、滲透速率、粒徑含量等）。

$$Km = 0.1317 \frac{2.1[d(d+e)]^{1.4}(10^{-4})(12-a)+3.25(b-2)+2.5(c-3)}{100} \quad (2)$$

式（2）中，*a*：有機質含量百分比（%）；*b*：土壤結構參數，參數值之判定如表 3；*c*：土壤滲透性參數之判別，如表 4；*d*：土壤粉粒與極細粒（粒徑 0.001 至 0.1mm）含量之百分比（%）；*e*：土壤粗砂（粒徑 0.2 至 2.0mm）含量之百分比（%）。

表 2 發展者分析說明表

發展者	年分	方法說明
Wischmeier	1971	全世界通用，公認為最準確之公式。考慮因子繁多，需包含現地與室內實驗。
El-Swaify and Dangler	1976	土壤樣本僅限於夏威夷之火山灰土壤。
Young and Mutchler	1977	適用於團粒作用強烈之土壤，需考慮團粒指數因子與離散率，實驗施作上較為不便。
Römken	1977	僅以黏土為樣本所發展之公式，不適用於其他土壤質地。
USDA	1984	使用全球土壤資料庫 250 筆土樣所發展之公式，僅考慮幾何平均粒徑，使用較為簡便，但不確定性高。
Dino Torri	1997	使用全球資料庫中 596 筆土樣資料，考慮土壤平均幾何粒徑、有機質含量及黏粒含量所迴歸分析所得之經驗式，考慮因子與 Wischmeier 公式相似並較簡便。

（摘自：水保局，2008）

表 3 土壤結構參數表

參數值	土壤	顆粒大小
1	極細顆粒	<1.0mm
2	細顆粒	1.0~2.0mm
3	中或粗顆粒	2.0~10.0mm
4	塊狀、片狀或粗顆粒	>10.0mm

（摘自：水保局，2008）

表 4 土壤滲透性參數表

參數值	滲透速度	mm/hr
6	極慢	<1.25
5	慢	1.25~5.0
4	中等慢	5.0~20.0
3	中等	20.0~62.5
2	快	62.5~125.0
1	極快	>125.0

（摘自：水保局，2008）

三、土壤沖蝕指數參考值估算

本研究為改善土壤沖蝕估算精度及釐清比較集水區沖蝕量多寡，故於石門水庫集水區由下游至上游挑選匹亞溪、蘇樂溪、卡拉溪、砂崙仔溪、泰平溪、拾耀 2 號野溪、下田埔野溪、萱源溪、把加灣山溪、新興溪、延老溪及葛樂喜溪等 12 子集水區，共進行 24 處土壤理化以及雙環入滲試驗（點位分布如圖 2），以獲得土壤沖蝕指數之參數，增加土壤沖蝕指數空間參考精度。各集水區點位編號以及植生狀況彙整如表 5，土壤沖蝕指數估算流程如圖 3 所示。以下分就「土壤沖蝕特性」以及「土壤沖蝕指數估算」等兩方面進行說明。

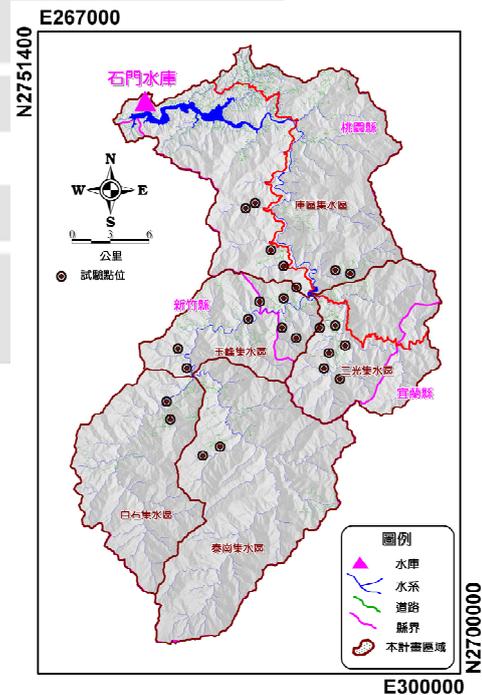


圖 2 土壤沖蝕指數試驗點位分布圖

表 5 24 組試驗點位特性資料表

子集水區	點位編號	TWD 97 坐標		植生狀況
		E	N	
匹亞溪	IA01	283241	2737316	茂密
	IA02	283233	2737321	裸露
蘇樂溪	IB01	286188	2732696	茂密
	IB02	286186	2732700	裸露
卡拉溪	IC01	291190	732520	茂密
	IC02	291415	2732097	裸露
砂崙仔溪	ID01	286199	2730125	茂密
	ID02	286235	2730105	裸露
泰平溪	IE01	284316	2729819	茂密
	IE02	284322	2729842	裸露
拾耀 2 號野溪	IF01	286559	2727780	茂密
	IF02	286500	2727612	裸露
下田埔 野溪	IG01	277940	2726090	茂密
	IG02	277750	2725790	裸露
萱源溪	IH01	289907	2727174	茂密
	IH02	290233	2727936	裸露
把加灣 山溪	II01	289749	2726632	茂密
	II02	289945	2726617	裸露
新興溪	IJ01	290209	2724834	茂密
	IJ02	290228	2724977	裸露
延老溪	IK01	277340	2720405	茂密
	IK02	277343	2720401	裸露
葛樂喜溪	IL01	279878	2717518	茂密
	IL02	279965	2717565	裸露

(一) 土壤沖蝕特性

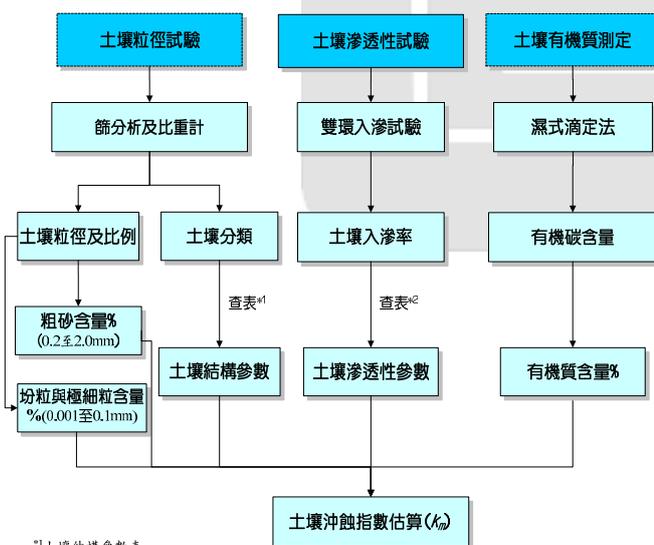
以下針對本研究土壤沖蝕性指數中之「土壤有機質測定」、「土壤粒徑試驗」、「土壤滲透性試驗」等 3 個分析結果進行個別說明。

1. 土壤有機質測定

土壤有機質含量多寡會影響土壤中養分的供應能力、粒徑結構、團粒聚合性與其保肥力。一般土壤有機質簡易的判斷方式可由土壤顏色推估，有機質通常呈現黃棕至黑的顏色，故土壤有機質越高，其顏色越黑，因此可以憑藉土壤顏色粗略研定土壤有機質的含量及土壤的排水狀況良劣與否。測定土壤有機質的方法有很多，包含比色法、滴定法及燃燒法等，有關本研究土壤有機質試驗方法參閱行政院農委會出版之土壤分析手冊及 Nelson and Sommers (1982) 之 Walkey-Black 濕式氧化法進行土壤樣本滴定，進而計算土壤有機質含量，有機質測定步驟方法流程如圖 4。經實驗分析結果顯示，分析土樣之有機質含量介於 0.27%~11.73% 之間，植生茂密相對裸露之狀況其有機質明顯較高，其含量與植物生長狀況有關，亦即土壤有機質（腐植質）含量越多，其土壤將具有較大的比表面積，保水能力亦相對增加。

2. 土壤粒徑試驗

針對現地取回之 24 組土壤試樣，於試驗室進行含水量及篩分析試驗，其篩號最大為 #4 (4.76 mm)，最小為 #200 (0.074 mm)，藉由不同篩網堆疊排列，將可得知試驗後停留於各篩網上之土壤樣品重量；此外，針對通過 200 號篩網之土壤，另根據 Stoke's Law 進行比重計分析，由土壤顆粒在水中自然沉降速度進而推估粒徑大小，再由不同沉降時間之液體單位重推估累積百分比，進而獲得細顆粒土壤粒徑分布，測定操作流程如圖 5。本研究以篩分析及鮑氏比重計分析法 (Bouyoucos Hydrometer Method) 進行土



¹土壤結構參數表
²土壤滲透性參數表

圖 3 本研究土壤沖蝕指數 (Km) 估算流程圖

壤粒徑試驗，獲得土壤結構與特定粒徑含量百分比，進以提供土壤結構參數判定之用。

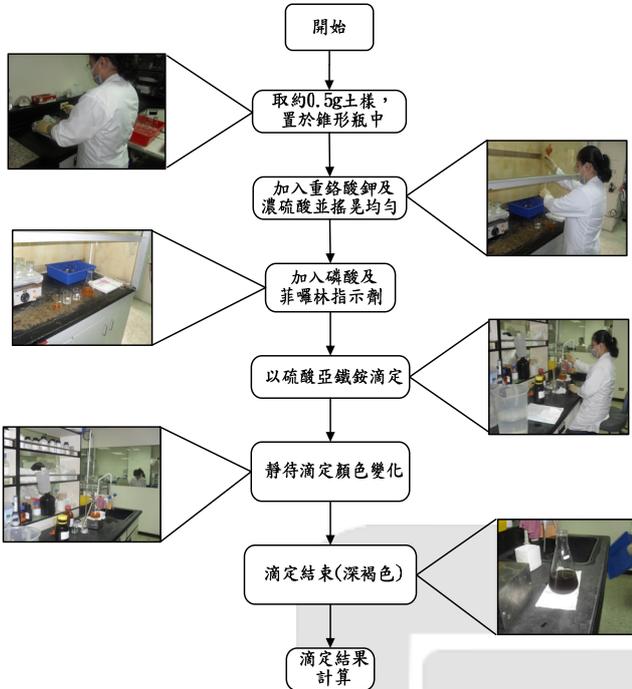


圖 4 土壤有機質含量測定方法流程

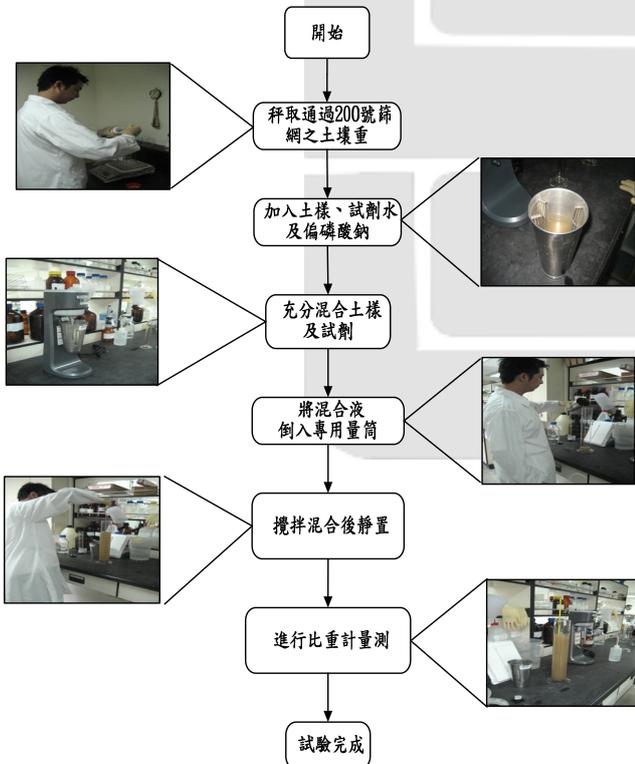


圖 5 土壤比重計分析測定操作流程圖

經由篩分析及比重計試驗所獲得土壤粒徑分布結果，可分為極細顆粒 (<1.0mm)、細顆粒 (1.0 mm~2.0 mm)、中或粗顆粒 (2.0 mm~10.0 mm)、塊狀、片狀或粗顆粒 (>10.0 mm) 等 4 種尺寸；此外，針對粒徑範圍區間之重量百分比，配合比對土壤結構參數判定表 (如表 3)，以判定各組試樣之土壤結構參數值，其各處對應參數如表 3 所示。由土壤結構參數判定紀錄結果，各組極細顆粒與片狀或粗顆粒百分比介於 4%~18% 間，其他則大多分布為細顆粒或為中、粗顆粒，土壤粗砂百分比介於 12%~65%，粉粒與極細粒百分比為 2%~15%。顯示石門水庫集水區地區主要粒徑分布仍為粗砂為主。

3. 土壤滲透性試驗

一般土壤入滲率可透過室內飽和水力傳導度之定水頭或變水頭試驗、現地雙環及現地透水等方式獲得，而本研究主要運用雙環試驗 (Double-Ring Infiltration Test)，針對 12 處子集水區內 24 組試驗區進行單向度垂直入滲速率估算，藉以瞭解降雨入滲於地表土壤特性及速率 (Infiltration Rate)，雙環試驗係藉由馬奧利特瓶中水位隨時間之變化關係估算地表土壤垂直入滲速率，並藉以繪製入滲曲線，常見之入滲推估公式包含 Kostiaikov、Horton、Philip、Huggins and Moke、Richards 等，其中以 Horton 入滲公式應用最為廣泛 (Horton, 1940)，該公式能反應地表產生積水情況下之土壤平衡入滲速率，並以指數遞減的形式表示如下：

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (3)$$

式中 f_c 為平衡入滲率 (Equilibrium Infiltration Rate)，亦可稱為飽和水力傳導係數； f_0 為起始入滲率 (Initial Infiltration Rate)； k 為入滲常數 (Coefficient of Permeability)； t 為時間。

本研究相關試驗儀器照片與規格介紹如圖 6 與表 6 所示。儀器裝置時，必須挑選約 1.2m² 以上之平整地，始於施作，此外，地表植生、岩屑亦需完全清除乾淨，並將選定施作雙環入滲試驗之地區以 GPS 定位儀定位，相關試驗流程如圖 7 所示。



(a) 改良型雙環儀 (b) 馬奧利特瓶

圖 6 雙環入滲試驗儀器照片

表 6 改良型雙環儀儀器規格

尺寸大小	直徑 (mm)	高度 (mm)	厚度 (mm)
內環	300	450	2
外環	600	500	2

本研究雙環入滲試驗結果，依據 Horton 入滲公式推算試驗區內不同地表植生狀況下之平衡入滲速率 (f_c) 值，此值亦為土壤飽和狀態下水力傳導係數，而入滲曲線繪製如圖 8，相關結果並彙整如表 7。一般而言，若其降雨量大於土壤平衡入滲量時，則形成地表逕流；當平衡入滲速率越大，代表地表水入滲量較大；反之，平衡入滲速率較小則影響表土沖蝕狀況亦相對提高，亦即地表逕流狀況越明顯。藉由本研究調查成果及所推算之 Horton 曲線得知，調查區域所獲得之平衡滲透速率值約介於 $1.53 \times 10^{-4} \sim 5.36 \times 10^{-3}$ (cm/sec) 之間，其中以下田埔野溪集水區之植生茂密處平衡入滲速率最高，新興溪集水區植生裸露地平衡入滲速率最低。此外，藉由雙環入滲試驗結果，推算各試驗區之平衡入滲速率，並依照表 4 土壤滲透性參數表所對應之滲透速度，求得各組試驗之土壤滲透參數，以提供土壤沖蝕指數分析之用。

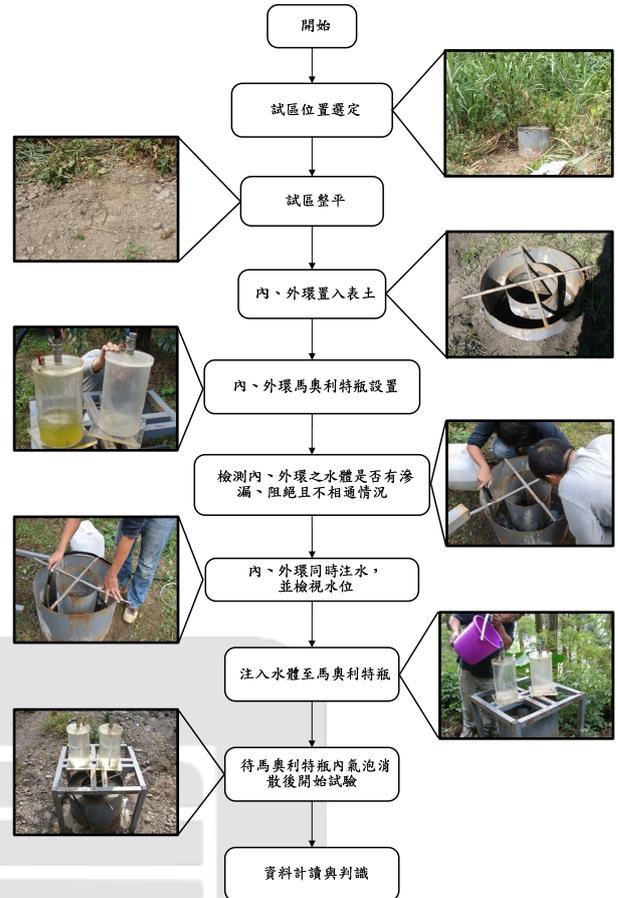


圖 7 雙環試驗流程圖

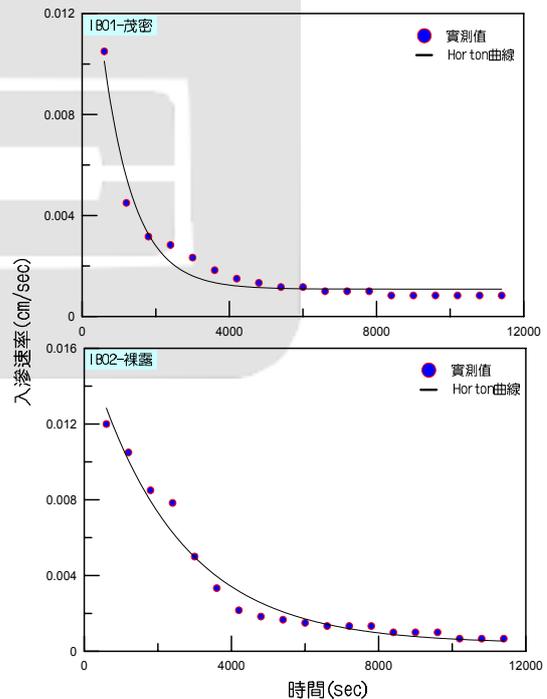


圖 8 雙環試驗入滲曲線 (以蘇樂溪為例)

表 7 24 組試驗點位 Horton 公式推估參數彙整表

子集水區	點位編號	Horton 入滲公式
匹亞溪	IA01	$Y=1.53 \times 10^{-04} + 7.01 \times 10^{-03} e^{-(0.000569x)}$
	IA02	$Y=1.66 \times 10^{-04} + 7.69 \times 10^{-03} e^{-(0.000596x)}$
蘇樂溪	IB01	$Y=4.02 \times 10^{-04} + 1.60 \times 10^{-02} e^{-(0.000417x)}$
	IB02	$Y=7.90 \times 10^{-04} + 6.43 \times 10^{-03} e^{-(0.000499x)}$
卡拉溪	IC01	$Y=2.67 \times 10^{-03} + 4.34 \times 10^{-02} e^{-(0.000299x)}$
	IC02	$Y=4.93 \times 10^{-03} + 3.51 \times 10^{-02} e^{-(0.000254x)}$
砂崙仔溪	ID01	$Y=1.57 \times 10^{-03} + 8.38 \times 10^{-03} e^{-(0.000533x)}$
	ID02	$Y=1.92 \times 10^{-03} + 1.50 \times 10^{-02} e^{-(0.000317x)}$
泰平溪	IE01	$Y=2.82 \times 10^{-03} + 4.69 \times 10^{-02} e^{-(0.001160x)}$
	IE02	$Y=3.44 \times 10^{-03} + 2.81 \times 10^{-02} e^{-(0.000290x)}$
拾耀 2 號野溪	IF01	$Y=2.57 \times 10^{-03} + 2.81 \times 10^{-02} e^{-(0.001184x)}$
	IF02	$Y=4.85 \times 10^{-03} + 2.2435 \times 10^{-02} e^{-(0.000649x)}$
下田埔野溪	IG01	$Y=4.95 \times 10^{-03} + 5.51 \times 10^{-02} e^{-(0.000748x)}$
	IG02	$Y=5.36 \times 10^{-03} + 3.11 \times 10^{-02} e^{-(0.000997x)}$
萱源溪	IH01	$Y=3.91 \times 10^{-03} + 1.43 \times 10^{-02} e^{-(0.000234x)}$
	IH02	$Y=4.28 \times 10^{-03} + 1.69 \times 10^{-02} e^{-(0.000480x)}$
把加灣山溪	II01	$Y=6.94 \times 10^{-04} + 6.88 \times 10^{-02} e^{-(0.0002718x)}$
	II02	$Y=2.35 \times 10^{-03} + 9.89 \times 10^{-03} e^{-(0.000511x)}$
新興溪	IJ01	$Y=9.76 \times 10^{-04} + 2.57 \times 10^{-02} e^{-(0.000370x)}$
	IJ02	$Y=2.55 \times 10^{-03} + 2.04 \times 10^{-02} e^{-(0.000171x)}$
延老溪	IK01	$Y=2.02 \times 10^{-03} + 5.65 \times 10^{-02} e^{-(0.000505x)}$
	IK02	$Y=2.11 \times 10^{-03} + 2.40 \times 10^{-02} e^{-(0.000330x)}$
葛樂喜溪	IL01	$Y=1.61 \times 10^{-03} + 3.90 \times 10^{-02} e^{-(0.000308x)}$
	IL02	$Y=3.23 \times 10^{-03} + 3.64 \times 10^{-02} e^{-(0.000609x)}$

(二) 土壤沖蝕指數估算

就本研究於石門水庫集水區中上游 24 處試驗點位之雙環入滲試驗調查，模擬降雨入滲土壤狀況，瞭解降雨於不同區域環境下之地表滲透行為；另針對現地土樣進行土壤理化特性分析（有機質含量測定及土壤材料粒徑判定），並根據不同的土壤組成類別與質地含量，藉以估算土壤沖蝕指數，相關試驗結果整理如表 8 所示。依此，根據試驗分析結果，利用所求出土壤有機質含量、土壤結構參數、土壤粉粒與極細粒含量、土壤粗砂含量及土壤滲透性參數等 5 項因子，配合 Wichmeier 公式法（如式 2），即可求得各處土壤沖蝕指數。經研究發現，石門水庫集水區之土壤沖蝕指數以匹亞溪子集水區為最高（0.0077），而以泰平溪以及萱源溪子集水區之土壤沖蝕指數（0.0010）為最低。

表 8 24 組試驗結果之土壤沖蝕指數參數分析表

子集水區	點位編號	土壤滲透性試驗			土壤滲透參數值	有機質含量百分比%	土壤粒徑試驗			K_m (ton-hr-yr / ha-MJ-mm)
		f_c		滲透速度			土壤結構參數值	粉粒與極細粒百分比%	土壤粗砂含量百分比%	
		(cm/sec)	(mm/hr)							
匹亞溪	IA01	1.53×10^{-04}	5.508	中等慢	4	0.7	2	7	53	0.0064
	IA02	1.66×10^{-04}	5.976	中等慢	4	0.39	2	10	46	0.0077
蘇樂溪	IB01	4.02×10^{-04}	14.472	中等慢	4	5.11	2	7	50	0.0051
	IB02	7.90×10^{-04}	28.44	中等	3	0.81	3	4	45	0.0056
卡拉溪	IC01	2.67×10^{-03}	96.12	快	2	7.32	3	7	25	0.0016
	IC02	4.93×10^{-03}	177.48	極快	1	1.35	3	12	44	0.0026
砂崙仔溪	ID01	1.57×10^{-03}	56.52	中等	3	4.99	2	6	62	0.0018
	ID02	1.92×10^{-03}	69.12	快	2	3.6	3	10	33	0.0033
泰平溪	IE01	2.82×10^{-03}	101.52	快	2	11.57	3	2	26	0.0010
	IE02	3.44×10^{-03}	123.84	快	2	10.6	3	5	34	0.0011
拾耀 2 號野溪	IF01	2.57×10^{-03}	92.52	快	2	3.79	2	13	56	0.0020
	IF02	4.85×10^{-03}	174.6	極快	1	0.81	3	12	45	0.0030
下田埔野溪	IG01	4.95×10^{-03}	178.2	極快	1	4.26	3	12	48	0.0016
	IG02	5.36×10^{-03}	192.96	極快	1	0.93	3	12	45	0.0029
萱源溪	IH01	3.91×10^{-03}	140.76	極快	2	11.73	3	7	39	0.0010
	IH02	4.28×10^{-03}	154.08	極快	1	1.51	3	9	47	0.0012
把加灣山溪	II01	6.94×10^{-04}	24.984	中等	3	1.05	2	10	43	0.0039
	II02	2.35×10^{-03}	84.6	快	2	0.5	3	8	46	0.0042
新興溪	IJ01	9.76×10^{-04}	35.136	中等	3	5.88	2	10	46	0.0023
	IJ02	2.55×10^{-03}	91.8	快	2	4.45	3	10	40	0.0035
延老溪	IK01	2.02×10^{-03}	72.72	快	2	3.99	3	15	12	0.0031
	IK02	2.11×10^{-03}	75.96	快	2	3.21	3	14	29	0.0046
葛樂喜溪	IL01	1.61×10^{-03}	57.96	中等	3	5.38	2	10	65	0.0035
	IL02	3.23×10^{-03}	116.28	快	2	0.27	3	7	46	0.0037

四、土壤沖蝕指數估算比較

本研究根據土壤雙環入滲及土壤理化試驗並配合 Wichmeier 公式法計算各點位所代表土壤沖蝕指數，配合克利金空間內插方式產製石門水庫集水區土壤沖蝕指數空間分布圖（如圖 9 所示）。經本研究指數空間分布成果，針對集水區範圍內分別擷取下游近水庫蓄水範圍之長興、中游巴陵及上游鎮西堡等土壤沖蝕指數發現，以下游長興最大（0.0061），上游鎮西堡次之（0.0036），而以下游巴陵最小（0.0023）。整體而言，石門水庫集水區之中游地區其土壤沖蝕指數相較上游及下游低，其可能與當地土壤質地與生成環境有關。此外，為比較土壤沖蝕指數空間參考點之成果合理性，故針對水土保持手冊於石門水庫集水區內之復興水源地以及復興三民等兩處建議參考值進行比較，相關比較結果如圖 10 所示。結果發現，本研究復興水源地以及

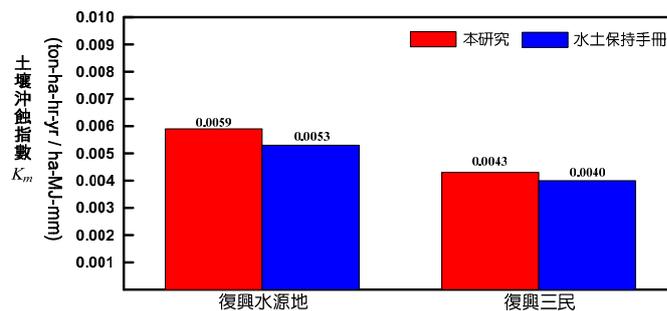


圖 10 土壤沖蝕指數估算結果比較圖

復興三民所推估之空間內插結果分別為 0.0059 及 0.0043，其與水土保持手冊點位建議值 0.0053 及 0.0040 相近，兩者相對誤差分別為 11.3% 以及 7.5%，屬為一般工程應用可接受範圍，顯示本研究估算結果，確有參考價值；據此，本研究所建立石門水庫集水區之土壤沖蝕指數空間分布圖，未來可藉以快速獲取範圍內特定局部特地區域之土壤沖蝕指數，以供日後合理估算集水區土壤沖蝕量之參用。

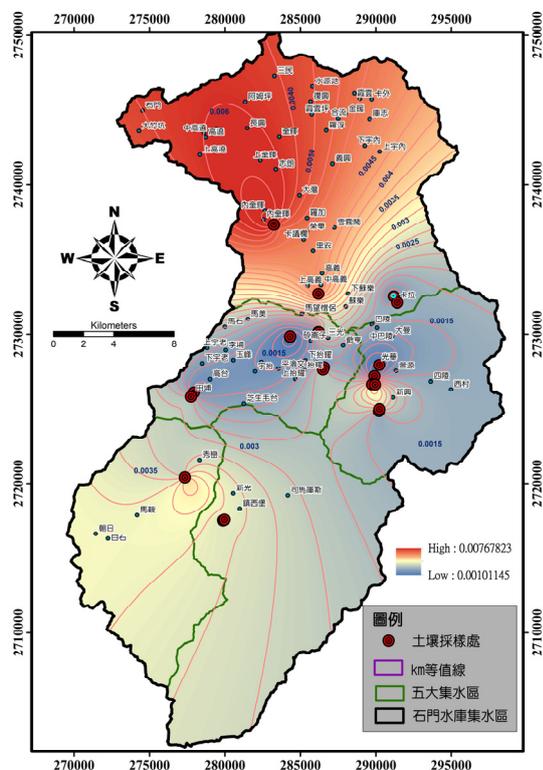


圖 9 石門水庫集水區土壤沖蝕指數空間分布等值圖

五、結 論

一般推算水庫集水區之土壤沖蝕量，均將土壤沖蝕指數假設為定值再納入公式內計算，惟此項指數深具地域變異性，各集水區地文因子及土壤理化性質不同，其個別土壤沖蝕指數亦有差異；經本研究土壤沖蝕指數估算工作，進而獲得石門水庫集水區下游至上游之土壤沖蝕指數空間分布。針對本研究具體重點結論摘錄如下：

1. 針對調查區所獲得之平衡滲透速率值約介於 $1.53 \times 10^{-04} \sim 5.36 \times 10^{-03}$ (cm/sec) 之間，並以下田埔野溪集水區之植生茂密處平衡入滲速率最高，新興溪集水區植生裸露地平衡入滲速率最低。
2. 經比較驗證結果，下游庫區義興集水區之沖蝕指數平均值與水土保持手冊建議之復興水源地（0.0053）及復興三民（0.004）相近，顯示估算結果確屬可信，且具參考價值。

3. 由於土壤沖蝕指數係為敏感性參數，因地區特性、土壤結構及風化程度具明顯相關，水土保持手冊（2005）所建議之 K_m 值於石門水庫集水區參考點過少，若依此直接引用可能將均化且忽略區域土壤沖蝕代表性，透過本研究試驗結果，將可提供日後集水區土壤沖蝕量估算時之參考，並改善土壤沖蝕估算公式適用性。

六、建 議

本研究已完成修正、增加及研訂石門水庫集水區範圍土壤沖蝕指數，並產製土壤沖蝕指數空間分布等值圖，將可藉本研究成果改善土壤沖蝕經驗公式估算結果之精確性。此外，使用各經驗式推估土壤沖蝕量時，其中降雨雨場分布及資料時間值域選取甚為重要，建議未來可針對降雨強度或集水區水文、水理條件等，進行相關參數率定，據以進一步精進土壤沖蝕經驗公式之估算結果，更可合理化估算集水區之土壤沖蝕量。

謝 誌

感謝行政院農業委員會水土保持局，提供計畫（編號 SWCB 100-102）經費補助，作者深表謝忱。

參考文獻

行政院農業委員會水土保持局（2003）水土保持技術規範
 中華水土保持學會（2005）水土保持手冊
 行政院農業委員會水土保持局（2008）石門水庫上游集水區土壤沖蝕性及水力特性資料建立與探討
 何幸娟、林伯勳、冀樹勇、尹孝元、施美琴、羅文俊（2012）神木集水區土壤沖蝕特性，中華水土保持學報，第43卷，第3期，第276-283頁
 范正成（1993）臺灣地區沖蝕預測公式之回顧、研究與展望，中華水土保持學報，第24卷，第2期，第131-152頁
 許振崑、林伯勳、賴承農、冀樹勇（2013）不同坡面治理工法對降低土壤沖蝕量之成效探討-以石門水庫集水區為例，水保技術，第8卷，第2期，第114-124頁

梁惠儀、林伯勳、王晉倫、鐘啟榮、邱世宜（2010）應用 NDVI 探討石門水庫集水區植生復育成效，第三屆水保技術研討會，彰化
 梁惠儀、林伯勳、許振崑、柯傑夫、冀樹勇、王晉倫、鐘啟榮、邱世宜（2011）石門水庫集水區土壤沖蝕推估參數率定及修正，100 年中華水土保持學會年會及學術研討會摘要集，中興大學水土保持學系，第II-67頁
 游繁結（1987）土壤沖蝕率指數 K 值之室內直接測定，中華土木水土保持學報，第19輯，第27-36頁
 萬鑫森、黃俊義（1989）台灣坡地土壤沖蝕，中華水土保持學報，第20卷，第2期，第17-45頁
 劉進金（1983）台北南港地區之土壤受蝕性與土壤厚度之研究，台灣礦業，第35卷，第2期，第58-63頁
 El-Swaify, S. A. and E. W. Dangler（1976）Erodibilities of Selected Tropical Soils in Relation to Structural and Hydrologic Parameters, Soil Erosion: Prediction and Control, Soil Conserv. Soc. Am., Ankeny, Iowa, pp. 105-114
 Horton R. E.（1940）An Approach Toward a Physical Interpretation of Infiltration Capacity, Soil Soc. Am. Proc. 5, pp. 399-417
 Nelson, D. W. and L. E. Sommers（1982）Total Carbon, Organic Carbon and Organic Matter, Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties, American Society of Agronomy, pp. 539-577
 Risse, L. M., Nearing, M. A., Nicks, A. D. and J. M. Laflen（1993）Error Assessment in the Universal Soil Loss Equation, Soil Sci. Soc. Am. J., 57（3）pp. 825-833
 Römken, M. J. M., Roth, C. B. and D. W. Nelson（1977）Erodibility of Selected Clay Subsoils in Relation to Physical and Chemical Properties, Soil Sci. Soc. Am. J., 41, pp. 954-960
 Torri, D., J. Poesen, and L. Borselli（1997）Predictability and Uncertainty of the Soil Erodibility Factor Using a Global Dataset, Elsevier Sci. B., 31, pp.1-22
 Unsaturated Soil Hydraulic Database（1984）UNSODA, Available: <http://www.ars.usda.gov/serices/software.download.htm?software=106>
 Vaneland, A., Rousseau, P., Lal, R. Gabriels, D. and B. S. Ghuman（1984）Testing the Applicability of a Soil Erodibility Nomogram for Some Tropical Soils, Challenges in African Hydrology and Water Resources IAHS, pp. 144
 Wischmeier, W. H., Johnson, C. B., and B. V. Cross（1971）A Soil Erodibility Nomograph for Farmland and Construction Sites, J. Soil and Water Conserv, 26, pp. 189-193
 Wischmeier, W. H. and D. D. Smith（1978）Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning, Agriculture Handbook No. 537, USDA/Science and Education Administration, US. Govt. Printing Office, Washington, DC., pp. 58
 Young, R. A., and C. K. Mutchler（1977）Erodibility of Some Minnesota Soils, J. Soil and Water Conserv, 32, pp. 180-182