

基於水文與地文因子建構石門水庫 集水區土壤沖蝕經驗式

林伯勳* 張德文** 林韋成*** 楊尚霖****

摘 要

本文蒐集石門水庫集水區歷年土壤沖蝕針量測數據，結合集水區依時性降雨資訊，探討水文與地文因子相互關係，從中建構含水文與地文因子土壤沖蝕經驗式，以合理化估算降雨情境引致土壤沖蝕量；為有效呈現本文建立土壤沖蝕經驗式分析流程架構之適宜性，故挑選集水區面積相對分布較廣之自然邊坡為案例，並與現地量測數據進行試算比較，顯見本文建構土壤沖蝕經驗式與實測量測結果相近，具某一程度參考價值，未來可供水庫防淤降濁策略、水土保持工程設計及土地利用管理策略之參考依據。

關鍵字：石門水庫、土壤沖蝕、水庫防淤

一、前 言

近年氣候變遷明顯異常，使得極端天氣類型頻仍多變，造成天然災害事件較往常屢見發生。目前政府及相關研究單位對於集水區管理日趨重視（梁惠儀等人，2010）。就水庫集水區而言，上游集水區由於地質脆弱，加上地勢陡峻，一遇暴雨，不僅地表冲刷劇烈，且容易形成崩塌，使大量泥沙隨逕流進入水庫，使水庫涵養水源能力降低，加速下游庫容淤積速率，甚至影響水庫正常供水，故對於水資源改善最直接之方法，就是掌握集水區土砂來源分布、體積及面積規模變化，進行分年辦理規劃治理，以控制土砂流入量，逐年達減淤降濁之標的。以石門水庫為例，曾歷經九二一地震及歷年重大風災與豪雨事件，加速上游集水區崩塌及邊坡沖蝕嚴重，尤以民國

93 年艾利颱風事件，更導致石門水庫濁度過高，影響民生供水。水保局（2010）研究報告指出，石門集水區的土砂產量來源主要由兩種構成，一種為伴隨降雨隨機產生之土壤沖蝕量，另一種為因降雨或地震等擾動產生之坡面崩塌量，而兩者所占集水區土砂量之比例，則因不同集水區之地質、地形與水文條件而異，亦受不同植生覆蓋類型而有所改變。地表沖蝕量會因豪雨誘發及地表逕流帶入河道，或經其他介質流入下游或進入水庫內，使水庫涵養水源能力降低，泥沙產量增高，加速下游水庫淤積，甚至影響水庫功能正常的運作（林伯勳等人，2011）。圖 1 及圖 2 分別為石門水庫歷年淤積量變化趨勢及歷年主要颱風累積雨量與停水事件關係圖，顯見每逢颱風或豪雨造成原水濁度飆升、水庫淤積量遽增，遂導致停水議題。此外，根據水保局（2011）比較

* 中興工程顧問社防災科技研究中心環境資源監測組組長
** 淡江大學土木工程學系教授
*** 淡江大學土木工程學系碩士
**** 淡江大學土木工程學系碩士生

近十年石門水庫集水區內之降雨有明顯增強之趨勢；尤以民國 93 年艾莉颱風後，其年平均降雨更明顯大於臺灣年平均降雨量；且約為世界平均值 973mm 之 2.47 倍，顯見近年氣候變遷所引致極端水文事件，易造成高濁度現象發生。

進行沖蝕針之佈設，以瞭解豪大雨或颱風事件對於各子集水區地表沖蝕量之影響程度以及釐清不同植生狀況下土壤沖蝕狀態（水保局，2009；水保局，2010；水保局，2011）。

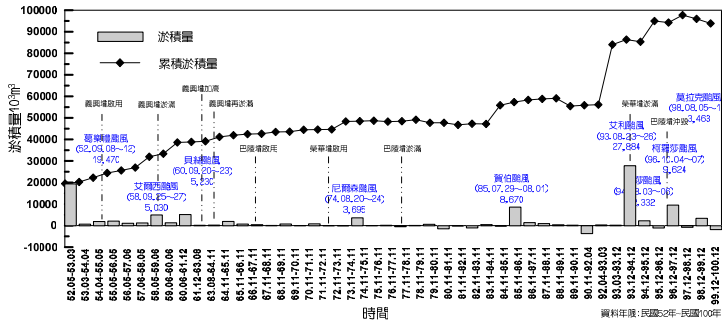


圖 1 石門水庫歷年淤積量變化趨勢

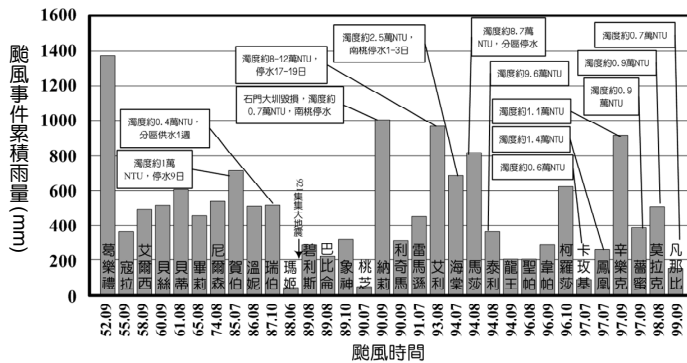


圖 2 石門水庫集水區歷年颱風累積雨量與高濁度事件

近年來利用遙測技術已能有效推估崩塌地所引致之土砂產量，惟土壤沖蝕量受降雨量及降雨強度之影響，且具時空間分布不均之特性。過去沖蝕量推估方式多採用經驗式計算，其多為整體集水區均化後之結果，無法得知局部區域之土壤在不同植生覆蓋下之沖蝕程度（水保局，2010、2011；許振崑等人，2010、2012）。臺灣自推動水土保持工作以來，因土壤沖蝕對農業、工業及民生用水影響甚鉅，故對於土壤沖蝕的研究十分重視，其中以沖蝕針量測地表沖蝕深度，最為直接；水保局曾於民國 97 年至 100 年間，於石門水庫集水區不同坡面共設置 55 處地表沖蝕深度調查點遍布全集水區（如圖 3），累積大量豐富現地實測土壤沖蝕深度資料，針對不同邊坡條件

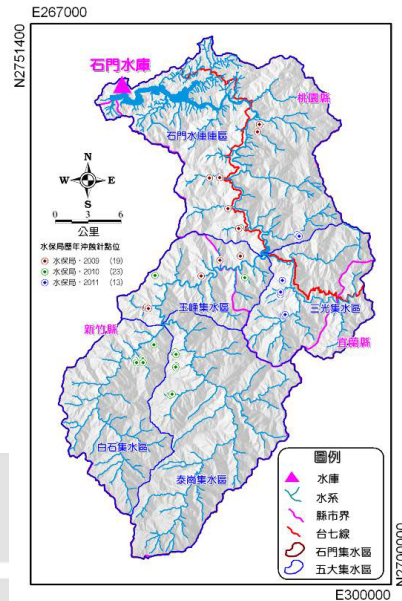


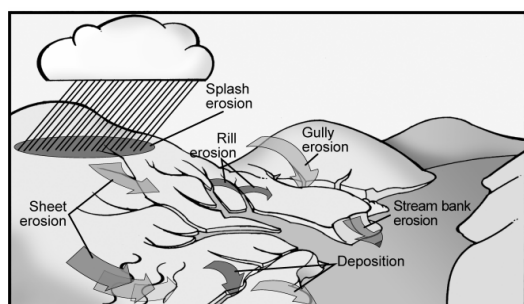
圖 3 石門水庫集水區沖蝕針點位分布圖

臺灣未來興建水庫日益困難，故加強現有水庫保育，並維護既有功能為當務之急；鑑於石門水庫對於北部地區供水占相當程度的重要性且已累積長期土壤沖蝕資料，故本文係以此區作為研究樣區，除蒐集前述歷年不同邊坡的現地土壤沖蝕監測資料，結合集水區依時性降雨資訊，探討水文與地文因子相互關係，從中建立一個簡易估算式提供使用者另一項選擇，合理化估算降雨情境引致土壤沖蝕量以及各式植生邊坡可抑制土壤沖蝕之設計量體，以有效掌握落入河道輸砂量變化，提供水庫權責管理單位進行防淤降濁策略之參考依據。

二、文獻回顧

土壤係經母岩受不同的氣候和其他因子的影響，逐漸風化而形成。土壤運動一般可分沖蝕、搬運以及堆積。而土壤沖蝕依營力來源不同，可區分自然界外力引致自然沖蝕（Natural Erosion）

以及人為因素引致加速沖蝕 (Accelerated Erosion)；就自然沖蝕而言，降雨造成的水蝕為相當重要因素，當降雨發生時，雨滴直接或間接撞擊土壤，造成表層土粒與土體分離，產生飛濺沖蝕 (Splash Erosion)；隨著降雨持續進行，地表土壤含水能力達到飽和，水體逐漸匯集成為逕流，造成層狀侵蝕 (Sheet Erosion)、紋溝侵蝕 (Rill Erosion)、及蝕溝侵蝕 (Gully Erosion) 等不同侵蝕型態；水流最後逕流匯集至河川，於河道邊坡造成衝擊而形成河岸侵蝕 (Stream Bank Erosion) 如圖 4，此一系列侵蝕現象源均始於降水，皆稱為水蝕作用 (Water Erosion) (水利署，2006)。

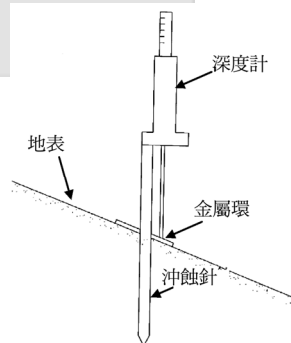


(摘自：Broz *et al.*, 2003)

圖 4 土壤沖蝕類型

Stroosnijder (2005) 經文獻回顧指出於野外土壤沖蝕量測時，就調查項目及對象，應需先釐清相關議題，包括「時空間離散性大」、「量測資料準確性」、「由小尺度區域量測資料外插至較大尺度區域應用之衍生問題」以及「不同領域之沖蝕計量單位轉換」等四大項，故針對常見土壤沖蝕類型，依其量測對象、最適量測範圍、量測儀器或方法逐一彙整，詳見表 1，其中針對坡面尺度量測，可採用沖蝕針可量測釐米級地表起伏變化，適用於瞭解表層土壤受降雨逕流影響之侵蝕面及堆積層變動程度。李建堂 (1997) 曾回顧土壤沖蝕現地量測方法相關研究，並進行一系列問題評析，研究顯示沖蝕針試驗係一種需長期性觀測土壤沖蝕量之方法且需耗費大量時間及人力，以進行土壤沖蝕資料的建立、採集及整理，此為目前唯一可確實掌握依時性表土層沖蝕深度較為可行及可信的方法。沖蝕針 (Erosion Pins)

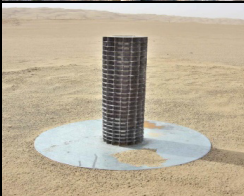
觀測法用於觀測邊坡的沖蝕狀態，並可用以推測邊坡後退速率，其原始基本設計如圖 5，本身為長 600mm，直徑 5mm 的金屬棒。Schumm (1956) 年首先使用木樁 (Wooden Stakes) 打入地面以直接量測邊坡物質的沖蝕，隨後改良成金屬樁 (Metal Stakes)，因樁徑更細相較木樁對坡面的破壞為小且較能抗腐蝕。Crouch (1987) 曾利用長達 1.5m 沖蝕針進行蝕溝沖蝕監測。林俊全 (1995) 採用沖蝕針研究臺灣不同泥岩邊坡發育特性，量化地表逕流作用下邊坡沖蝕後退率。Lawler *et al.* (1997) 利用光電子沖蝕針 (Photo-Electronic Erosion Pins) 監測河岸沖蝕動態資訊，其特性可連續記錄依時沖蝕曲線，惟光電子沖蝕針受限於地形條件且易受擾動，因此於設置時需審慎評估。許振崑等人 (2009) 為瞭解石門水庫集水區不同植生條件對於土壤沖蝕之減緩及控制效益，運用改良簡易型觀測樁來觀測土壤流失狀況；經調查分析顯示，植生復育後之邊坡相較於裸露邊坡約減少 2.1 倍土壤沖蝕量，顯示植生復育能抑制細粒料流失並減少地表逕流量。張雲岳 (2013) 曾於 2011 年 5~10 月、2012 年 5~10 月及天秤颱風事件後於南臺灣大安溪、曾文溪及其鄰近流域上游集水區內進行沖蝕針調查；結果發現現該區域不論何種土壤特性，當累積雨量增加，土壤沖蝕量亦隨之增加；另於相同觀測期間之累積雨量，當試區坡度越陡、透水速度越快、剪力強度越低時，其對應之土壤沖蝕量有增大趨勢。最後，以觀測期間之累積雨量建立單參數之土壤沖蝕經驗式，作為後續土壤沖蝕量推估應用。



(重繪自：Haigh, 1977)

圖 5 沖蝕針示意圖

表 1 不同量測尺度土壤沖蝕量測對象及量測儀器分類表

量測尺度	量測對象	量測範圍	量測儀器或方法	圖示	照片來源
特定處尺度 (Point Scale)	紋溝間/飛濺沖蝕 (Interrill/Splash Water Erosion)	1 m ²	飛濺杯漏斗 (Splash Cups and Funnels)		Stroosnijder (2005)
	潛移風蝕 (Creep in Wind Erosion)	1 m ²	埋入瓶 (Buried Bottles)		Dufková and Lackóová (2014)
小塊土地尺度 (Plot Scale)	紋溝間/紋溝沖蝕 (Rill/Interrill Water Erosion)	<100 m ²	土砂分離器 (Sediment Dividers)		Grismer (2012)
坡面尺度 (Hillslope Scale)	沖蝕及堆積 (Erosion and Sediment Deposition)	<500 m	沖蝕針 (Erosion Pins)		水保局 (2009)
田野尺度 (Field Scale)	渠道沖蝕 (Channel/Water Erosion)	<1 ha	光達技術 (LiDAR Technology)		水保局 (2012)
	跳躍風蝕 (Saltation of Wind Erosion)	<1 ha	躍移傳感器 (Saltiphone)		Stroosnijder (2005)
小集水區尺度 (Small Watershed)	水蝕互制作用 (Spatial Interaction Effects of Water Erosion)	<50 ha	自動化流槽 (Automatic Flume)		Stroosnijder (2005)

三、土壤沖蝕經驗式建構

土壤沖蝕是水與土壤之間的相互作用，土壤本身的性質與所處地形地貌條件決定其抵抗或抑制沖蝕的能力（余新曉等人，2009）；針對坡面尺度而言，就單一邊坡植被覆蓋狀況能夠改善土

壤的物理化學特性，影響坡面逕流形成及發展，改變其水力特性，進而影響沖蝕的發生（Carroll *et al.*, 2000）。若能建構一套可隨地文條件而變，並能考量降雨特性影響之土壤沖蝕經驗式，俾利工程師能快速推估土壤沖蝕量，有助於實際設計應用。

(一) 分析流程

為瞭解降雨引致土壤沖蝕特性，本文以石門水庫集水區為研究樣區，蒐集長時間累積沖蝕針測量資料，利用統計方法釐清水文與地文因子之關聯性高低，以尋求土壤沖蝕與主要顯著因子最佳組合關係，予以建構具代表性且能反應地域之土壤沖蝕經驗式，同時，進行案例比較驗證，說明土壤沖蝕推估成果之可靠性，其分析流程架構如圖 6 所示。

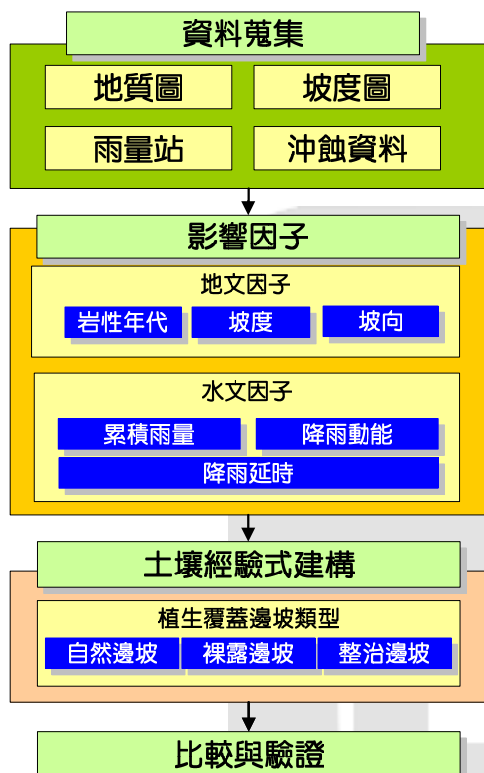


圖 6 分析流程架構

(二) 資料蒐集

水保局歷年於石門水庫集水區設置沖蝕針監測點位，其遍及石門水庫五大集水區，共計 55 處，空間分布位如圖 3 所示（水保局，2009、2010、2011）；由於不同集水區係採分年施作沖蝕針監測點位，故各處沖蝕針調查點位之監測時間並非一致，其中最長監測時間已達 2 年 4 個月，如表 2 所示。表中顯示於石門水庫境內五大集水區，以庫區集水區 13 處最多，泰崗及玉峰

集水區各 12 處次之，再者為三光集水區 10 處，最後為白石集水區 8 處。另就佈設邊坡類型而言，計有整治邊坡 18 處、裸露邊坡 14 處以及自然邊坡 23 處。此外，若將沖蝕針點位套疊石門水庫集水區坡度以及地質等圖資（如圖 7 及圖 8），將獲得相關資訊彙整於表 2、表 3 中。

表 2 水保局歷年地表沖蝕量調查相關資料表

項次	點位編號	五大集水區	子集水區	TWD 97		坡度分級	坡向	邊坡類型	岩性年代	監測時間 (年/月)	設置計畫
				E	N						
1	EA01	庫區 集水區	義興溪	288026	2742247	六級坡	西北	C	漸新世	97/09-99/12 (2 年 4 個月)	水保局 (2009)
2	EA02			287950	2742225	五級坡	東	C			
3	EA03			287776	2741558	二級坡	西	A			
4	EB01		巴亞溪	283357	2737324	三級坡	西北	A	中新世	98/08-100/10 (2 年 3 個月)	水保局 (2011 ^a)
5	EB02			284300	2737349	六級坡	南	A			
6	EC01			285093	2734463	五級坡	東南	C			
7	EC02		寶里 苦溪	285064	2734502	六級坡	東南	C	漸新世	97/09-99/12 (2 年 4 個月)	水保局 (2009)
8	ED01			286235	2732740	六級坡	東南	C			
9	ED02			286110	2732686	五級坡	南	A			
10	ED03		蘇樂溪	286061	2732682	二級坡	東南	A	中新世	99/06-100/10 (1 年 5 個月)	水保局 (2010 ^a)
11	EO01			291461	2732183	三級坡	南	C			
12	EO02			291380	2732126	三級坡	南	C			
13	EO03		卡拉溪	291579	2731976	六級坡	西北	B	中新世	97/09-99/12 (2 年 4 個月)	水保局 (2009)
14	EE01			286170	2730141	五級坡	東南	A			
15	EE02			286148	2730113	六級坡	東南	A			
16	EE03	玉峰 集水區	砂崙 仔溪	286191	2730163	六級坡	西南	B	中新世	97/09-99/12 (2 年 4 個月)	水保局 (2009)
17	EF01			286574	2728166	四級坡	南	B			
18	EF02			286613	2728200	六級坡	南	A			
19	EG01		泰平溪	284325	2729782	六級坡	西	B	中新世	98/08-100/10 (2 年 3 個月)	水保局 (2010 ^a)
20	EH01			282622	2728321	三級坡	東北	A			
21	EH02			282560	2728367	五級坡	南	A			
22	EH03		下文 光溪	282614	2728346	四級坡	東南	A	中新世	97/09-99/12 (2 年 4 個月)	水保局 (2009)
23	EI01			277493	2725425	六級坡	南	B			
24	EI02			277784	2725350	六級坡	西北	C			
25	EI03	白石 集水區	下田埔 野溪	277615	2725505	五級坡	東南	A	漸新世	98/08-100/10 (2 年 3 個月)	水保局 (2010 ^a)
26	EJ01			278412	2722055	三級坡	北	C			
27	EJ02			278300	2722064	五級坡	北	C			
28	EJ03		秀錦溪	278272	2722027	六級坡	北	B	漸新世	98/08-100/10 (2 年 3 個月)	水保局 (2010 ^a)
29	EK01			277342	2720427	六級坡	西	B			
30	EK02			277327	2720430	五級坡	西	C			
31	EK03		延老溪	277308	2720390	五級坡	西	A	漸新世	98/08-100/10 (2 年 3 個月)	水保局 (2010 ^a)
32	EK04			277205	2720654	六級坡	西南	C			
33	EK05			276820	2720656	六級坡	東北	B			
34	EL01	泰崗 集水區	泰崗 1 號溪	280167	2721174	五級坡	東北	A	漸新世	99/06-100/1 (1 年 5 個月)	水保局 (2011 ^a)
35	EL02			280203	2721175	五級坡	北	C			
36	EL03			280195	2721376	六級坡	東	B			
37	EL04		泰崗 2 號溪	280307	2721150	六級坡	北	C	漸新世	98/08-100/10 (2 年 3 個月)	水保局 (2010 ^a)
38	EM01			280234	2720043	六級坡	東南	C			
39	EM02			280195	2719787	五級坡	東北	C			
40	EM03		葛樂 喜溪	280365	2720124	六級坡	東南	C	漸新世	98/08-100/10 (2 年 3 個月)	水保局 (2010 ^a)
41	EM04			280311	2719982	五級坡	東南	B			
42	EN01			279844	2717539	六級坡	東南	A			
43	EN02	三光 集水區	宣源溪	279875	2717437	四級坡	東北	B	漸新世	99/06-100/1 (1 年 5 個月)	水保局 (2011 ^a)
44	EN03			279773	2717437	三級坡	東	C			
45	EN04			279941	2717514	三級坡	東北	B			
46	EP01		把加蘭 山溪	290077	2727955	六級坡	南	B	漸新世	99/06-100/1 (1 年 5 個月)	水保局 (2011 ^a)
47	EP02			290070	2727947	六級坡	南	A			
48	EP03			290036	2727938	四級坡	東	C			
49	EQ01		新興溪	289825	2726549	六級坡	西	C	漸新世	99/06-100/1 (1 年 5 個月)	水保局 (2011 ^a)
50	EQ02			289828	2726598	六級坡	西北	A			
51	EQ03			289760	2726636	六級坡	東	C			
52	EQ04	新興溪	新興溪	289899	2726875	六級坡	東南	B	漸新世	99/06-100/1 (1 年 5 個月)	水保局 (2011 ^a)
53	ER01			290190	2724848	六級坡	西南	C			
54	ER02			290143	2724776	六級坡	南	A			
55	ER03			290299	2724801	六級坡	南	C			

註 1：坡度分級依水土保持技術規範(2010)第二十三條，坡度分級之定義。
註 2：邊坡類型定義詳見表 3。

表 3 土壤沖蝕量調查邊坡類型及評估特性表

編號	邊坡類型	說明
A	整治邊坡	經人為整治並具植生工程之邊坡。
B	裸露邊坡	未經人為整治之裸露邊坡。
C	自然邊坡	自然植生覆蓋且未經人為整治之邊坡。

(摘自：水保局，2011)

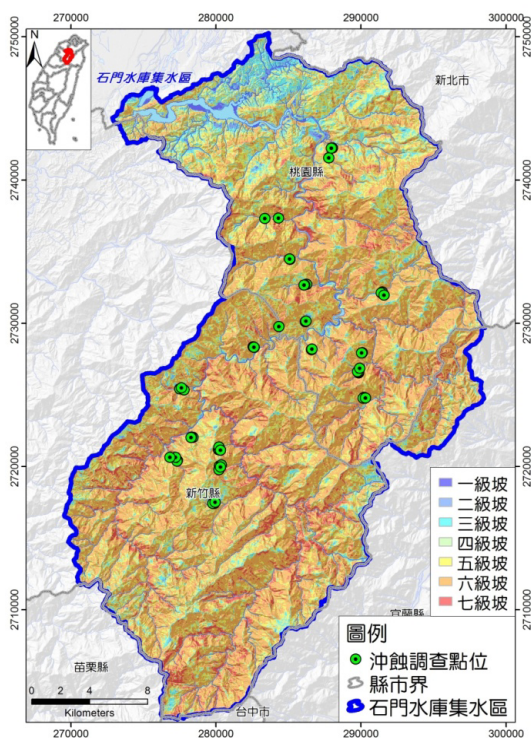


圖 7 石門水庫集水區坡度分布圖

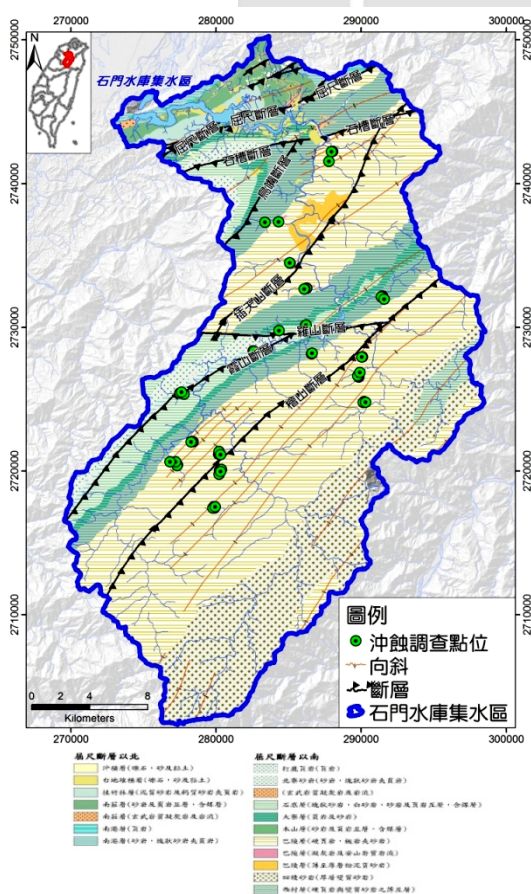


圖 8 石門水庫集水區地質分布圖

另境內雨量站資料部分，蒐集採水利署北區水資源局雨量資料網提供之 2008 至 2011 年期間石門水庫集水區內各雨量測站之每小時雨量資料。其中包括石門、巴陵、高義、嘎拉賀、霞雲、玉峰、白石、鎮西堡、西丘斯山及池端共 10 個雨量測站，測站資料如表 4 所示；其雨量站分布如圖 9。透過雨場切割方法，能將水文影響因子從雨量資料逐一萃取，利於土壤沖蝕因子關連性分析與探討。

表 4 石門水庫集水區雨量站資料表

站號	站名	TWD97 座標		標高 (m)
		E	N	
21C050	石門	274291	2744887	255
21C070	巴陵	290011	2730967	1220
21C080	高義	286596	2733833	620
21C090	嘎拉賀	290495	2726129	1260
21C110	霞雲	286910	2742823	350
21D150	玉峰	280491	2728106	780
21D160	新白石	276377	2720228	1620
21D170	鎮西堡	281076	2718601	630
21D350	西丘斯山	286864	2712954	2000
21U110	池端	298075	2727236	1150

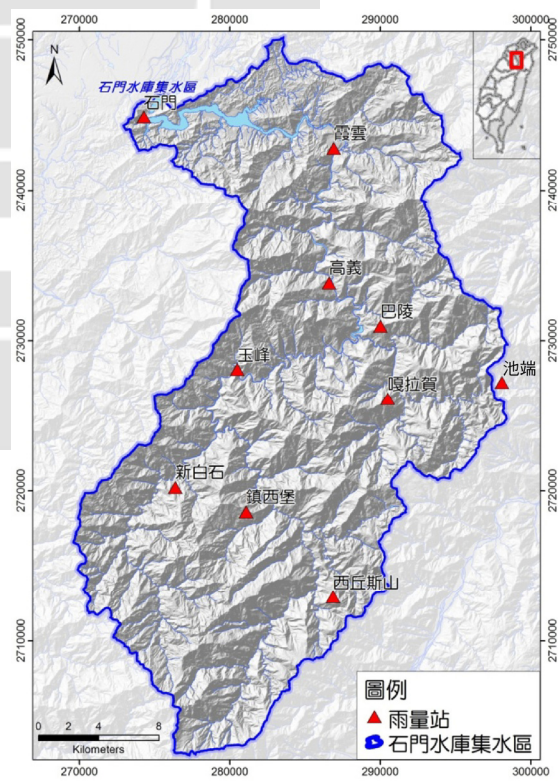


圖 9 石門水庫集水區境內雨量站分布圖

(三) 地文及水文因子萃取

根據水保局歷年土壤沖蝕針監測報告（水保局，2009、2010、2011），境內沖蝕針點位以子集水區為佈設單元，通常在颱風或豪雨事件後即刻派員調查並量測土壤沖蝕針資料。為有效率定土壤沖蝕資料與水文、地文因子之關聯性，有關地文因子，可利用 GIS 軟體配合沖蝕針點位進行空間套疊，萃取所處坡度值以及地質岩性之屬性，參見圖 7 至圖 8；圖 10 為地文因子萃取流程圖。

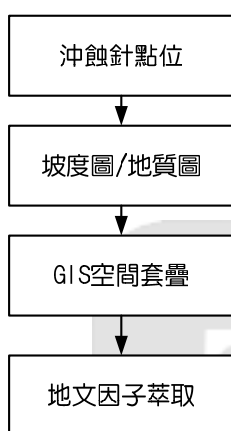


圖 10 地文因子萃取流程圖

另針對水文因子萃取流程，如圖 11，係因石門水庫境內雨量測站，散布在集水區內各個位置；由於一場雨量通常分布不均且具不確定性，無法採單一雨量測站反應子集水區之降雨情形，進而探究降雨引致土壤沖蝕之關連性，因此，透過徐昇多邊形法切割出各雨量測站對各子集水區之影響範圍（如圖 12），決定各子集水區內所具有代表性的雨量測站，且依照其雨量測站權重，決定子集水區內之平均降雨量。當獲得某一集水區內平均降雨量，即可進行雨場切割，進而萃取最大降雨強度、延時、累積雨量等水文因子，其中雨場切割定義係參考水保局（2003）：「以一場連續降雨過程中，時雨量大於 4mm/hr 視為有效降雨時間之起點，而以連續 6 小時時雨量均小於 4mm/hr 之起點視為有效降雨結束」，有效降雨起訖期間定義為「有效連續降雨」，雨場分割示意如圖 13 所示。

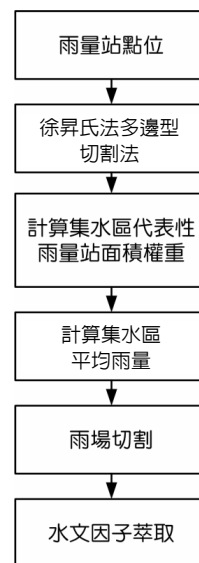


圖 11 水文因子萃取流程圖

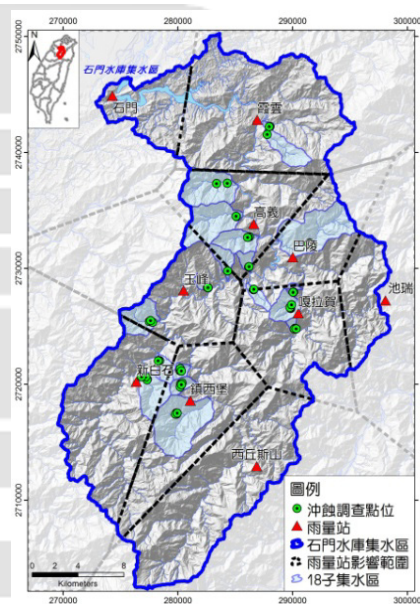


圖 12 徐昇氏法多邊型劃分圖

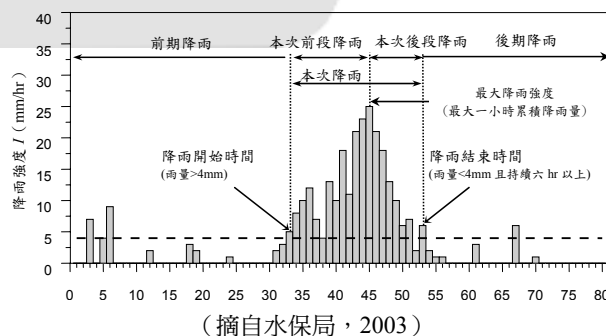


圖 13 雨場切割法示意圖

(四) 土壤沖蝕經驗式建構

為有效系統化建構土壤沖蝕經驗式，吾人可針對單一類型植生邊坡，考量集水區降雨引致水文因子特性，如累積雨量、降雨延時、降雨動能等；接著，依所處地點之地層岩性、坡度以及坡向等地文因子，運用 Minitab 統計程式以雙尾檢定判斷各因子與沖蝕深度是否有其顯著性；依照水文與地文因子之顯著性及相關性挑選為回歸式之變量，予以建構土壤沖蝕經驗式，以分組逐一進行，其土壤沖蝕經驗式建構程序，如圖 14。

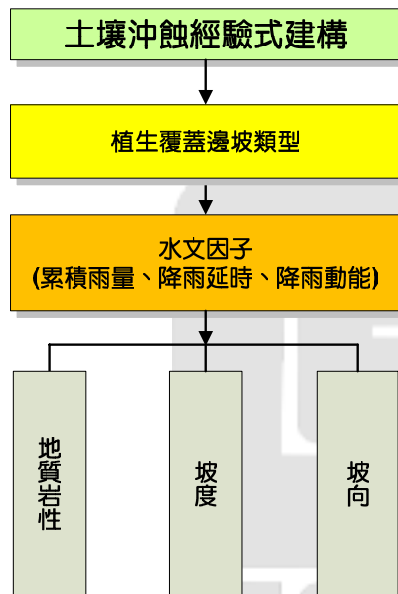


圖 14 土壤沖蝕經驗式建構流程圖

為有效呈現本文建立土壤沖蝕經驗式分析流程架構之適宜性，故挑選石門水庫集水區面積相對分布較廣之自然邊坡為案例，配合石門水庫境內雨量測站資料，其各因子之間顯著性以 P-Value 進行檢定，該檢定方式可用以瞭解樣本顯著水準，通常 P-Value 值越小，表示檢定的結果越顯著（出錯機率越小），其 P-Value 值均小於 0.05，檢定的結果為顯著差異，則將 P-Value 高於 0.05 的因子剔除，同時藉由 R^2 加以判斷其相關性高低；由於地文因子除坡度屬可量化之參數，其餘地質岩性及坡向屬於定性說明，為不可量之參數，故於土壤沖蝕經驗式建構如下：

1. 可量化參數

採用土壤沖蝕量測資料與水文、地文因子可量化參數，建構土壤沖蝕經驗式如下：

$$D_e = 0.0145V^{0.189} D^{0.399} E^{0.164} \theta^{0.085} R^2 = 0603 \quad (1)$$

其中統計個數 n 為 125， D_e 為土壤沖蝕深度、 V 為累積雨量（mm）、 D 為降雨延時（hr）、 E 為降雨動能（MJ/ha）及 θ 為坡度（Degree）。

圖 15 為若干隨機降雨事件測試結果，發現預測土壤沖蝕深度皆落於實際量測土壤深度範圍內。

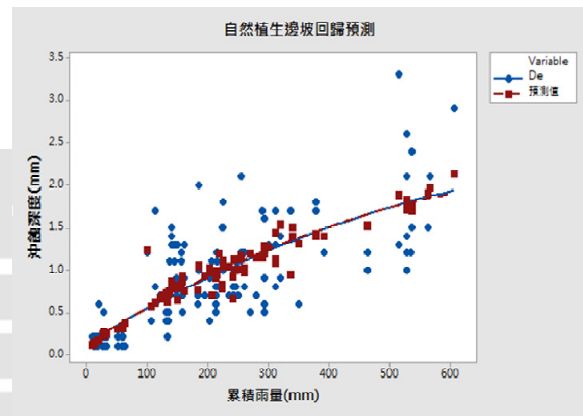


圖 15 自然邊坡土壤沖蝕之實測值與預測值比圖

2. 不可量化參數

(1) 地質岩性

地質岩性可決定母岩風化成土壤材料特性，經地層岩性圖層與位於自然植生邊坡之沖蝕點位交互套疊，可以發現其主要位於巴陵層及打鹿頁岩層，經統計分析發現土壤沖蝕深度主要累積雨量（ V ）、為降雨延時（ D ）較為相關，故以此兩項因子予以建構：

巴陵層：

$$D_e = 0.034V^{0.523} D^{0.134} R^2 = 0.52 \quad n=131 \quad (2)$$

打鹿頁岩層：

$$D_e = 0.0262V^{0.408} D^{0.236} R^2 = 0.91 \quad n=6 \quad (3)$$

圖 16 至圖 17 為若干隨機降雨事件測試結果，發現預測土壤沖蝕深度皆落於實際量測土壤深度範圍內。

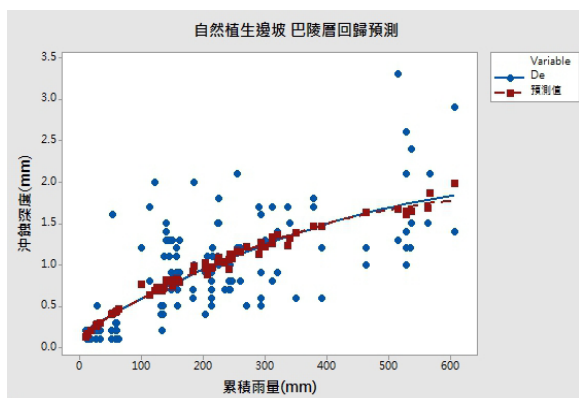


圖 16 自然邊坡於巴陵層土壤沖蝕之實測值與預測值比較圖

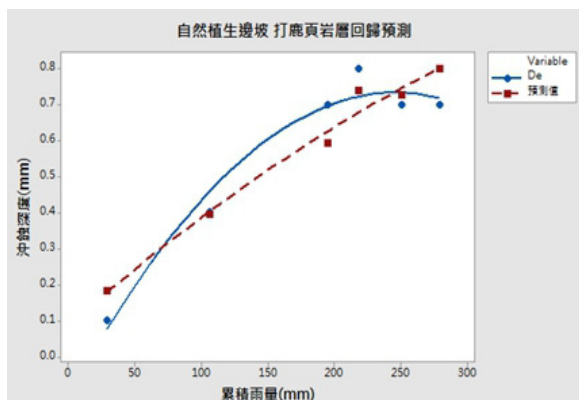


圖 17 自然邊坡於打鹿頁岩層土壤沖蝕之實測值與預測值比較圖

(2) 坡向

坡向與降雨逕流、日照多寡度有關，經坡度圖層與位於自然植生邊坡之沖蝕點位交互套疊，將坡向成分成北（N）、西（W）、西北（NW）、西南（SW）、東（E）、東北（NE）、東南（SE）以及南（S）等八大方位，如圖 18 所示；再經統計分析發現土壤沖蝕深度主要累積雨量（ V ）與降雨延時（ D ）較為相關，故以此項因子建構：

北方位：

$$D_e = 0.0052V^{0.574} D^{0.413} \quad R^2 = 0.89 \quad n=14 \quad (4)$$

西方位：

$$D_e = 0.0262V^{0.678} D^{0.017} \quad R^2 = 0.89 \quad n=17 \quad (5)$$

西北方位：

$$D_e = 0.00507V^{0.0057} D^{0.592} \quad R^2 = 0.89 \quad n=7 \quad (6)$$

西南方位：

$$D_e = 0.0223V^{0.575} D^{0.207} \quad R^2 = 0.77 \quad n=12 \quad (7)$$

東方位：

$$D_e = 0.0337V^{0.396} D^{0.289} \quad R^2 = 0.63 \quad n=10 \quad (8)$$

東北方位：

$$D_e = 0.0076V^{0.228} D^{0.841} \quad R^2 = 0.99 \quad n=5 \quad (9)$$

東南方位：

$$D_e = 0.0148V^{0.739} D^{0.062} \quad R^2 = 0.72 \quad n=41 \quad (10)$$

南方位：

$$D_e = 0.0008V^{0.742} D^{0.627} \quad R^2 = 0.77 \quad n=12 \quad (11)$$



圖 18 八大方位坡向示意圖

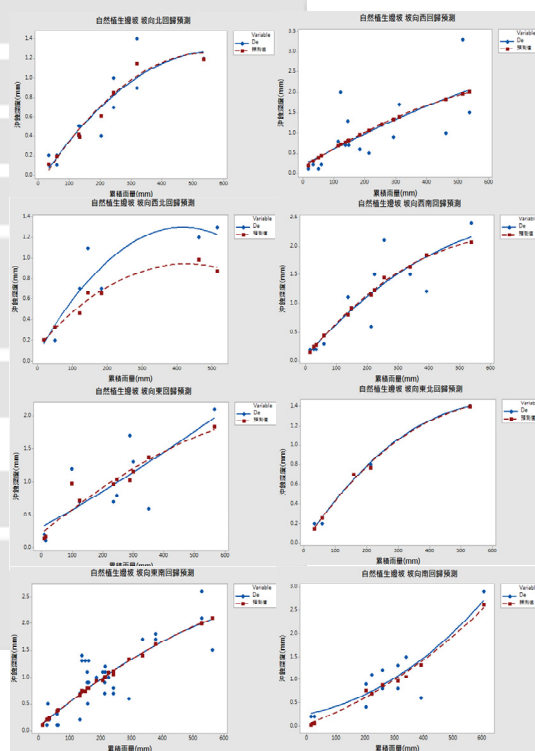


圖 19 自然邊坡於八大坡向土壤沖蝕之實測值與預測值比較圖

圖 19 為若干隨機降雨事件測試結果，發現預測土壤沖蝕深度皆落於實際量測土壤深度範圍內，與前述分析結果相符。

四、案例比較

本節以抬耀 2 號野溪自然邊坡（沖蝕監測點值 EF01）為研究案例，觀測時間為 2009 年 8 月 3 日至 2010 年 12 月，共量測 8 次土壤沖蝕深度，該研究區域位於抬耀溪集水區，該集水區位於大漢溪流域上游之玉峰溪支流上，溪流中、下游分別與產業道路、明隧道交會，集水面積約為 2.23km²，占石門水庫集水區總面積約 29%，全區呈現東南-西北向之扁平形，區域內坡度多屬六級坡（即坡度超過 55% 至 100%），全區平均坡度約為 60%，如圖 20 所示。由水保局（2011）研究報告指出本區自然植生邊坡之年平均沖蝕深度約為 5.28mm，坡度約為 17.5°，若透過本文建構含水文與地文因子土壤沖蝕經驗式建構（如公式 1），並配合雨量測資料進行推估，分析結果列於表 5。表中本文推估結果年平均土壤沖蝕深度為 4.71mm，接近實際值 89%；而其他觀測時距之推估結果，大致隨著降雨次數愈多，累積雨量愈多，沖蝕狀況愈為明顯，表示其回歸方程式在預估土壤沖蝕深度上與實際量測趨勢相同，顯示本文建構土壤沖蝕經驗式具某一程度參考價值，惟實際應用時，仍建議可考量安全因子予以合理放大，以保守估算土壤沖蝕量，便於水庫防淤降濁策略之研擬。

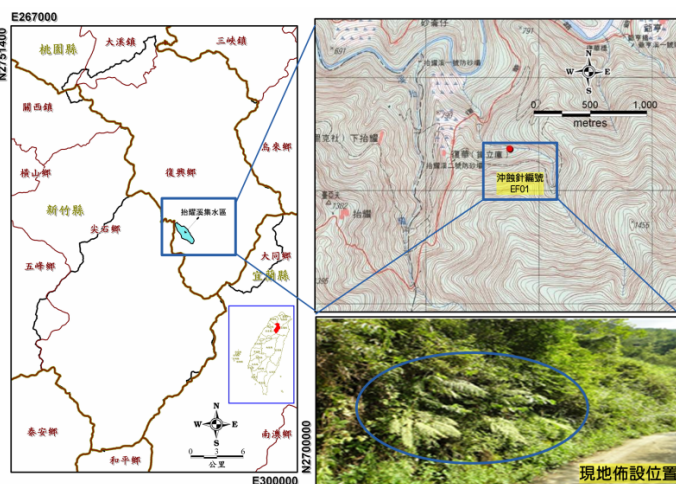


圖 20 案例區位地理位置圖

五、結論與建議

本文採用以切割雨場方法萃取其降雨特性，藉以瞭解降雨引致土壤沖蝕行為之相關因素，再利用統計方法從中篩選出高敏感度之降雨特性作為經驗回歸式之參數，並利用統計軟體進行多變量回歸分析，依各坡面植生、地質、坡度及坡向特性分組進行經驗式之回歸，以提高各組回歸式之準確性。建構經驗式之目的非取代現今發展經驗方程式或

表 5 抬耀 2 號野溪自然邊坡（沖蝕監測點位 EF01）案例試算結果比較表

量測次數	觀測時間	沖蝕針 實測值	本文推 估結果	歷經雨 場次數	累積雨量	降雨延時	降雨動能	坡度
					V (mm)	D (hr)	E (MJ/ha)	θ (Degree)
1	2009/08/03~2009/09/14	1.6	1.65	10	275	96	1787.00	21
2	2009/09/15~2009/11/10	0.6	0.69	5	90	36	389.00	
3	2009/11/11~2010/04/21	1.1	1.00	11	186	94	132.86	
4	2010/04/22~2010/07/05	2	1.02	11	292	87	139.06	
5	2010/07/06~2010/08/15	0.5	1.05	14	274	107	96.03	
6	2010/08/16~2010/09/23	0.6	0.21	3	18	21	4.41	
7	2010/09/24~2010/10/24	0.5	0.76	4	285	51	122.42	
8	2010/10/25~2010/12/20	0.4	0.12	1	12.2	7	5.15	
累積土壤沖蝕深度 (mm)		7.3	6.50	-	-	-	-	
年平均土壤沖蝕深度 (mm)		5.28	4.71	-	-	-	-	

嚴謹的物理模式套裝軟體，盼能提供簡易之預測方法供設計者參考，希冀利用此回歸方法可快速預測單一暴雨（Single Storm）、極端事件（Extreme Event）、多場降雨（Event by Event）事件或年平均降雨量下所產生之土壤沖蝕量，以供另一種預測土壤沖蝕量之方式，另需謹慎評估不同區域之代表降雨特性，以使其結果更能符合實際現況。

文中，為有效呈現本文建立土壤沖蝕經驗式分析流程架構之適宜性，故挑選集水區面積相對分布較廣之自然邊坡為案例，並與現地量測數據進行試算比較，顯見本文建構土壤沖蝕經驗式與實測量測結果相近，具某一程度參考價值，未來可供水庫防淤降濁策略、水土保持工程設計及土地利用管理策略之參考依據。

參考文獻

- 梁惠儀、許振崑、林伯勳、鄭錦桐、冀樹勇（2010）極端暴雨事件於石門水庫集水區土壤沖蝕量估算及探討，中興工程，第106期，第5-15頁
- 行政院農業委員會水土保持局（2010）石門水庫集水區豪雨誘發土砂災害之變化歷程與機制探討
- 林伯勳、梁惠儀、蕭震洋、冀樹勇、王晉倫、鍾啟榮，邱世宜（2011）石門水庫集水區土砂監測與治理成效評估，地工技術，第129期，第109-114頁
- 許振崑、林伯勳、梁惠儀、冀樹勇、黃文洲、尹孝元（2010）莫拉克颱風於石門水庫集水區土壤沖蝕量特性分析，2010 岩盤工程研討會論文集，高雄，第841-850頁
- 許振崑、林伯勳、冀樹勇（2012）多元尺度監測評估石門水庫重點治理集水區整治成效，水保技術，第七卷，第一期，第43-56頁
- 行政院農業委員會水土保持局（2011）石門水庫集水區土砂歷程調查及災害評估
- 行政院農業委員會水土保持局（2009）石門水庫集水區高精度地形量測及地形貌變化歷程之研究
- 經濟部水利署（2006）衛星災害監測及預警資料建立
- Broz, B., Pfost, D., and Thompson A. (2003) Controlling Runoff and Erosion at Urban Construction Sites, MU Extension, University of Missouri-Columbia
- Stroosnijder, L. (2005) Measurement of Erosion: Is it Possible?, CATENA, Vol. 64, pp. 162-173
- 李建堂（1997）土壤沖蝕的量測方法，國立臺灣大學地理學系地理學報，第23期，第89-106頁
- 許振崑，林伯勳，鄭錦桐，高丞璋，冀樹勇，黃文洲，尹孝元（2009）結合3S技術於石門水庫集水區不同植生坡面沖蝕量調查，水保技術，第四卷，第三期，第191-203頁
- Schumm, S. (1956) Evolution of Drainage Systems and Slopes in Badland at Perth Amboy New Jersey, Bulletin of Geological Society of America, Vol. 67, pp. 597-646
- Crouch, R. J. (1987) The Relationship of Gully Sidewall Shape to Sediment Production, Australian Journal of Soil Research, Vol. 25, pp. 531-539
- 林俊全（1995）泥岩邊坡發育模式之研究，國立臺灣大學地理學系地理學報，第18期，第45-58頁
- Lawler, D. M., Couperthwaite, J., Bull, L. J., and Harris N. M. (1997) Bank Erosion Events and Processes in the Upper Severn Basin, Hydrology and Earth System Sciences, Vol. 3, pp. 523-534
- Haigh, M. J. (1977) The Use of Erosion Pins in the Study of Slope Evolution, B.G.R.G. Technical Bulletins, 18, pp. 31-49
- 張雲岳（2013）現地沖蝕針試驗應用於集水區降雨影響土壤沖蝕之探討，長榮大學土地管理與開發學系，碩士論文
- Dufková J. K. and Lackóová L. (2014) Methods of Erosion Research Induced by Occurrence of Strong Wind, Mendel a Bioklimatologie
- 行政院農業委員會水土保持局（2009）南投縣信義鄉神木地區土砂災害機制歷程及潛勢分析
- Grismer (2012) Standards Vary in Studies Using Rainfall Simulators to Evaluate Erosion, California Agriculture, Vol. 66, No. 3, pp. 102-107
- 余新曉、張曉明、李建勞（2009）土壤侵蝕過程與機制，科學出版社，北京
- Carroll, C., Merton, L. and Burger, P. (2000) Impact of Vegetative Cover and Slope on Runoff, Erosion, and Water Quality for Field Plots on a Range of Soil and Spoil Materials on Central Queensland Coal Mines, Australian Journal of Soil Research, Vol. 38, pp. 313-327
- 行政院農業委員會水土保持局（2003）以降雨因子進行土石流警戒基準值訂定