

# 以沖蝕針量測資料評估曾文水庫集水區整治邊坡

## 土壤沖蝕抑制率

許振崑<sup>[1\*]</sup> 林伯勳<sup>[2]</sup> 賴承農<sup>[1]</sup> 簡以達<sup>[3]</sup> 蔡明發<sup>[4]</sup>

**摘 要** 民國 98 年莫拉克颱風誘使曾文水庫集水區發生大規模土砂災害，其中入庫砂源尤以細粒料土壤沖蝕為鉅，形成水庫濁度及淤積量升高之風險，甚至影響水庫供水能力。為解決嚴重之水質惡化與水庫淤砂問題，相關權責單位針對災害坡面以植生工程進行治理，增加地表覆蓋面積及防止雨滴逕流沖蝕，抑制表土流失。為量化莫拉克颱風後至 101 年間已辦理植生工程對曾文水庫減淤效益，本研究於集水區境內佈設現地沖蝕針，藉以建立並累積降雨引致土壤沖蝕深度量測數據。由量測結果分析發現，經整治邊坡相較於裸露邊坡，土壤沖蝕抑制率至少達 36.62%，顯示保育治理工程確有成效且有效抑制土壤流失。

**關鍵詞：**曾文水庫集水區、土壤沖蝕抑制率、保育治理。

## Application of Erosion Pins Measurement to Evaluate Soil Erosion Suppression Rate of Remediated Slopes in Tsengwen reservoir watershed

Chen-Kun Hsu<sup>[1\*]</sup> Bor-Shiun Lin<sup>[2]</sup> Cheng-Nung Lai<sup>[1]</sup>  
Yi-Da Chien<sup>[3]</sup> Ming-Fa Tsai<sup>[4]</sup>

**ABSTRACT** In 2009, typhoon Morakot induced massive sediment-related disasters within the Tsengwen reservoir watershed flushing large amounts of sediments into the reservoir mostly constituted of fine sediments from soil erosion. This led to increase turbidity and serious sedimentation, and severely affecting the water supply capacity of the reservoir. To solve the deterioration of water quality and reservoir sedimentation, hillslope vegetation engineering has been conducted between 2009 and 2012 on a large scale by the authorities to increase land cover area preventing heavy runoff and suppressing soil erosion. To quantify the suppressed rate of soil erosion on remediated slopes and represent the effectiveness of sedimentation reduction of Tsengwen reservoir, this study utilized the measured rainfall-induced soil erosion depth of several erosion pins embedded in remediated and non-remediated hillslopes. Based on long-term erosion pin data, soil erosion suppression rate averaged 36.62% at least in Tsengwen reservoir watershed. These results also demonstrate that remediation efforts of hillslope vegetation engineering are effective in suppressing soil erosion.

**Key Words:** Tsengwen Reservoir Watershed, Soil Erosion Suppression Rate, Conservation

- 
- [1] 中興工程顧問社防災科技研究中心 副工程師 (\* 通訊作者 E-mail: [kungbsa@sinotech.org.tw](mailto:kungbsa@sinotech.org.tw))  
Associate Engineer, Disaster Prevention Technology Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Inc. Taipei 114, Taiwan
- [2] 中興工程顧問社防災科技研究中心 正研究員兼組長  
Senior Researcher, Disaster Prevention Technology Research Center, Sinotech Engineering Consultants, Inc. Taipei 114, Taiwan
- [3] 行政院農業委員會水土保持局 副工程師  
Associate Engineer, Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Nantou 540, Taiwan
- [4] 行政院農業委員會水土保持局 科長  
Section Chief, Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture, Nantou 540, Taiwan

and Management.

## 一、前言

民國 98 年受到莫拉克颱風侵襲，誘使全台各水庫集水區發生大規模土砂災害，尤以南部地區曾文南化烏山頭水庫庫容淤積情況及災害最為慘重。以曾文水庫為例，莫拉克颱風於 5 日內於集水區降下 3,005mm 累積雨量（阿里山站），其 72 小時累積雨量為台灣歷年之冠；高強度與長延時降雨型態造成水庫土砂淤積量新增 9,108 萬立方公尺，遠大於曾文水庫原設計年淤砂量 561 萬立方公尺(如圖 1)，嚴重威脅水庫壽命。曾文水庫集水區土砂產量主要來自坡地崩塌量與地表沖蝕量，近年來國內利用遙測技術已能有效推估崩塌地所引致之土砂產量，惟土壤沖蝕量其受降雨量及降雨強度之影響，且具有於時空間分布不均之特性，因此土壤沖蝕量問題存在著許多不確定性，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沖蝕程度(水保局，2010、2011；許振崑等人，2010、2012)。故近年來多於現地以直接量測方式獲得土壤沖蝕情形，進以實際反應土壤沖蝕量之多寡(林俐玲，2008；許振崑等人，2009；林伯勳等人，2010；何幸娟等人，2012)；鑑此，本研究為探討曾文水庫集水區內不同坡面植生覆蓋類型之土壤抗沖蝕特性，故針對莫拉克颱風引致曾文水庫集水區致災野溪子集水區，以經人為復育之邊坡做為實驗組，稱為整治邊坡；以呈現裸露且未經人為復育之邊坡做為對照組，稱為裸露邊坡，分別於其坡面設置相同數量土壤沖蝕針，然後，於颱風或豪雨事件後，至現地量測土壤沖蝕深度，以量化莫拉克颱風後治理迄今坡地沖蝕抑制成效，藉以評估整治工程對於控制土壤沖蝕之效益，以供未來水庫防淤減淤策略之參考。

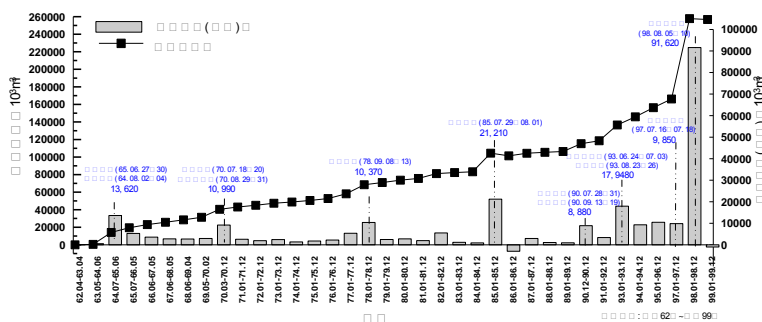


圖 1 曾文水庫歷年淤積趨勢圖

Fig 1 Annual trend of sedimentation in Tsengwen reservoir watershed

## 二、國內外文獻回顧

土壤沖蝕，屬於一種常見自然現象；係受外力(主要如雨水、逕流、風力)的剝蝕作用及地震、海浪、重力、溫度變化等衝擊後，自固結之土體分離(detach)、搬移(translocate)與沉積(deposit)的現象(如圖 2)，合稱土壤沖蝕三過程(水土保持手冊，2005)；而土壤沖蝕程度多寡，與地域性之地貌地形及氣候水文環境，深具關係，一般土壤沖蝕量之估算方式包括現地試驗法、經驗歸納法、化學元素法以及攝影量測法等四類。現地試驗法方面，Schumm 曾於 1956 年首先使用木樁打入地面以直接量測邊坡物質的沖蝕。林俊全(1995)曾採用沖蝕針作為泥岩地區沖蝕量與蝕溝量測工具；許振崑(2009、2010)運用改良式沖蝕針於水保局山坡地範圍進行不同邊坡類型之沖蝕量觀測。此外，沖蝕針亦可監測蝕溝邊坡之變遷，Crouch(1987)曾利用長達 1.5m 沖蝕針進行蝕溝邊坡之研究。另外，Lawler(1997)利用光電子沖蝕針作為河岸沖蝕之研究，其特性可連續記錄其沖蝕情況，惟光電子沖蝕針受限於地形且易受其他因素擾動研究區域，故於設置時需審慎評估。經驗歸納法方面，根據現地調查及植生狀況、土壤性質，經統計歸納後建立土壤沖蝕估算經驗模式，以美國農業部(United State Department of

Agriculture, USDA)之發展最為多元,如現今一般最廣為使用之通用土壤流失公式(USLE),但此公式雖可做為特定地區水土保持方法之決策工具,但在應用此公式時如超出此公式之設定條件,則可能誤用或做出錯誤之結論(林俐玲,2010);國內學者陳樹群等人(1998)為改善 USLE 於台灣地區之適用性,故發展土壤沖蝕指標 SEIM(Soil Erosion Index Model)模式,將 USLE 影響參數轉換成指數方式,並以指數總值配合迴歸公式求取土壤沖蝕量。化學元素法方面,李建堂(1999)利用鈾 137 元素之空間分布,建立土壤歷年沖蝕率曲線,再用以估算土壤沖蝕量;謝正倫(2008)利用鐳元素追蹤石門水庫上游可能造成濁水之細微土砂移動過程,以並瞭解進入庫區之土砂量多寡及其發生位置之空間分布。攝影量測法方面,Dirk and Mark (2005) 與 Peter et al. (2010)針對沖蝕監測區域拍攝現場照片,並利用數位攝影影像處理技術,製作高空間與時間解析度之 DEM 資料,並比較不同時間相同空間的數值高程差,以獲得土壤沖蝕速率,進以推估監測區域之土壤沖蝕量,惟此方法目前受限於攝影相機解析度,與後端影像處理技術等問題,故尚未普及。上述各分類方法整理如表 1 所示;其中沖蝕試驗係為一種需長期性觀測,以進行土壤沖蝕資料建立、採集及整理方式,但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。林韋成(2014)以沖蝕針量測數據為分析資料基礎,建構特定雨場或連續降雨引致土壤沖蝕深度經驗推估式,並與案例比對,發現趨勢結果相符,能提供工程師進行設計水土保持措施所需防砂容量,除能參考水土保持手冊,並可作為設計考量之另一選擇方案。

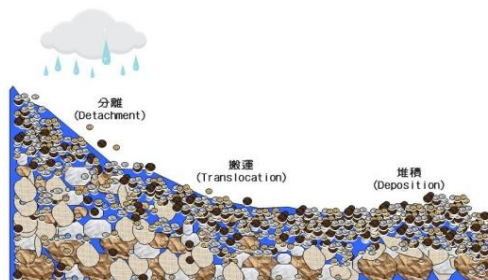


圖 2 土壤沖蝕過程示意圖

Fig 2 Illustration of soil erosion process.

表 1 土壤沖蝕評估方法彙整表

Table 1 Evaluation methods of soil erosion estimates.

評估方法	發展者	應用層面
現地 試驗法	Schumm(1956)	使用木樁打入地面以直接量測邊坡物質的沖蝕,隨後改良成金屬樁,因樁徑更細相較木樁對坡面的破壞為小且較能抗腐蝕。
	林俊全(1995)	採用沖蝕針作為泥岩地區沖蝕量與蝕溝量測工具。此外,沖蝕針亦可監測蝕溝邊坡之變遷。
	Goudie (1990)	採用不鏽鋼沖蝕針,作為量測沖蝕量工具。
	許振崑(2009、2010)	運用改良式沖蝕針於山坡地範圍進行不同邊坡類行沖蝕量觀測。
	Crouch(1987)	利用長達 1.5m 沖蝕針進行蝕溝邊坡之研究。
	Lawler(1997)	利用光電子沖蝕針作為河岸沖蝕研究。
經驗 歸納法	USLE	估算年平均土壤沖蝕量。
	MUSLE	用於單場暴雨事件土壤沖蝕量。
	RUSLE	修正 USLE 之坡度、覆蓋管理因子及沖蝕指數。
	美國 農業部 (USDA)	TUSLE 建置台灣通用土壤流失公式並估算台灣地區之土壤沖蝕量。
	AGNPS	考慮坡形因子,分成凹坡、凸坡及平坦坡。
	WEPP	物理性沖蝕模式。
	CREAMS	由化學物質之移動推估土壤沖蝕量,適用於小區域的農業用地。
	ANSWERS	適用範圍為小區域的農業用地。
化學 元素法	EPIC	經土壤沖蝕量之結果討論對生產力影響評估。
	陳樹群等人(1998)	SEIM 指標值配合迴歸公式計算土壤沖蝕量。
	陳樹群等人(2009)	TUSLE, 結合 GIS 軟體並修正土壤沖蝕因子,建置適合台灣之土壤流失模式。
	李建堂(1998)	利用鈾 137 元素之空間分布,建立土壤歷年沖蝕率曲線。
	謝正倫(2008)	利用鐳元素瞭解進入庫區之土砂量多寡及其發生位置。

	Blake et al. (1999)	利用鈹 7 元素研究短時距土壤沖蝕變化。
攝影 量測法	DirkH and Mark (2005)	利用數位攝影影像處理技術，製作高空間與時間解析度之 DEM 資料，並比較不同時間相同空間的數值高程差，以獲得土壤沖蝕速率。
	Peter et al. (2010)	利用近景攝影測量，利用數位攝影影像處理技術針對不同的結點和控制點測量，獲得數值高程的土壤侵蝕地形變化。

### 三、研究區域概述及研究資料

#### 3.1 研究區域概述

曾文水庫集水區隸屬曾文河流域，其地理位置跨越嘉義縣阿里山鄉、番路鄉、大埔鄉以及高雄市之那瑪夏區等，集水區面積約為 481km<sup>2</sup>；境內共分為樂野、里佳、新美、草山、大埔、草蘭、長谷川、中坑、伊斯基安那、茶山、塔庫布央及達邦等十二治理分區(水保局，2013)。曾文水庫集水區水系發源於阿里山脈水山(標高 2,609m)，上游段蜿蜒於山谷中，由後大埔溪往下游接長谷川溪，與伊斯基安那溪匯流成曾文溪，往下游與烏奇哈、達娜伊谷、托亞奇伊及二寮等溪匯流進曾文水庫。境內氣溫受到地形海拔較高影響，下游與上游年平均溫度差距較大，於平原地區年平均溫度約 24℃，上游年平均溫度約 11℃。全流域年平均蒸發量約 1,000mm，平均相對濕度約 80%，年平均雨量約 2,350mm，且多集中於 5 月至 9 月，約佔全年總雨量之 80%以上。

集水區狀似斜長四邊形，地勢由西南向東北方向逐漸升高，海拔高程介於 100m 至 2,700m 間。境內坡度以六級坡為主(圖 3)。自民國 98 年莫拉颱風過後，各方治理單位依據「曾文南化烏山頭水庫治理及穩定南部地區供水計畫」，針對曾文水庫集水區下游蓄水面原有淤積區域積極進行水庫清淤工作，以及進行中上游野溪整治工程，目前庫區淤積情形與崩塌災害已大幅改善，且可有效改善水庫土砂環境並減緩土砂生產，降低二次致災風險。統計水保局於曾文水庫自 98 年莫拉克後迄 103 年 8 月底已辦理，共計 340 件工程(分布如圖 4)，其中以 100 年度投入工程最多，達 151 件，整體而言，根據工程調查資料類別統計結果可知，大致以治理工程為主，植生復育為輔。

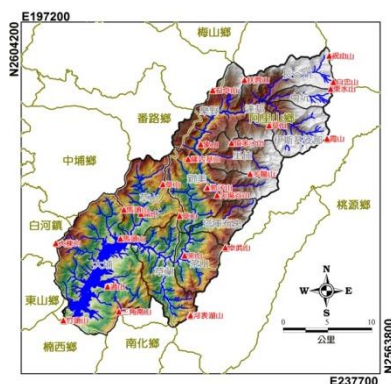


圖 3 曾文水庫集水區地理位置圖

Fig 3 Geographical maps of Tsengwen reservoir watershed



圖 4 曾文水庫集水區工程點位空間分布圖

Fig 4 Locations of conservation engineering in Tsengwen reservoir watershed

## 3.2 研究資料

為瞭解人為復育坡面於颱風或豪雨過後之土壤沖蝕抑制量，故於曾文水庫集水區內選擇經人為復育之整治邊坡與未經人為復育之裸露邊坡作為實驗組與對照組(表 2)，以進行現地邊坡土壤沖蝕針之佈設，並於每月定期或事件過後監測現地地表沖蝕量與降雨量關係，以個別調查其土壤沖蝕程度，比較不同植生復育坡面之土壤流失差異，供評估坡面植生復育成效參考。因此，於曾文水庫集水區之十二治理分區內共設置 26 處土壤沖蝕調查點位，相關佈設方式、原則及方法請參考許振崑等人(2010、2012)，沖蝕針設置示意圖與點位空間分布如圖 5 及圖 6，其相關調查作業流程如圖 7；整體監測時程約 2011 年 5 月至 2013 年 9 月，約計 2 年 5 個月；有關地表沖蝕量調查邊坡類型與評估特性，以及地表沖蝕量調查區域、地質岩性與邊坡植生狀況等資料，彙整如表 3 所示。此外，依沖蝕針佈設處植生狀況，可區分為整治邊坡與裸露邊坡等 2 種(如圖 8)，其兩者數量各佔一半。

表 2 調查邊坡類型及評估特性表

Table 2 Investigated slope types and its characteristic.

組別	邊坡類型	特性
實驗組	整治邊坡*	評估經人為整治進行坡面保護工程之整治邊坡，如種籽播種及稻草蓆敷、鋪網噴植、打椿編柵法、自由樑型框噴植，相較於未整治邊坡之抑制土壤沖蝕程度。
對照組	裸露邊坡**	評估呈現裸露之坡面且未經人為整治之裸露邊坡，因本身地質岩性及地形等自然條件，受雨淋洗發生土壤沖蝕量。

註\*：「整治邊坡」意指邊坡植生經人為或工程手段所栽植或治理之坡面。

註\*\*：「裸露邊坡」意指坡面植生經內、外營力影響，致使植被崩落或抑制生長而呈現裸露之坡面。

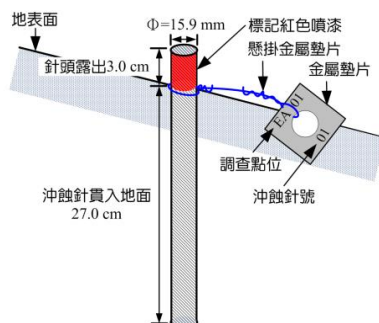




圖 5 沖蝕針設置示意圖

Fig 5 Schematic layout of setting a erosion pin.

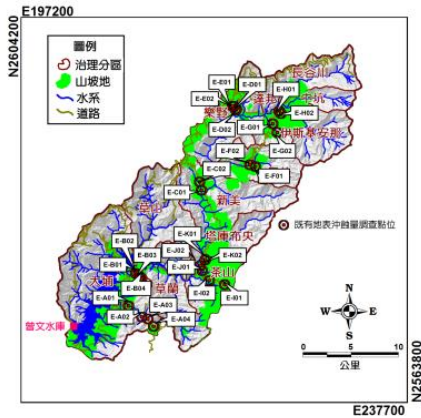


圖 6 沖蝕針佈置空間分布圖

Fig 6 Geographical maps of soil erosion measurement sites

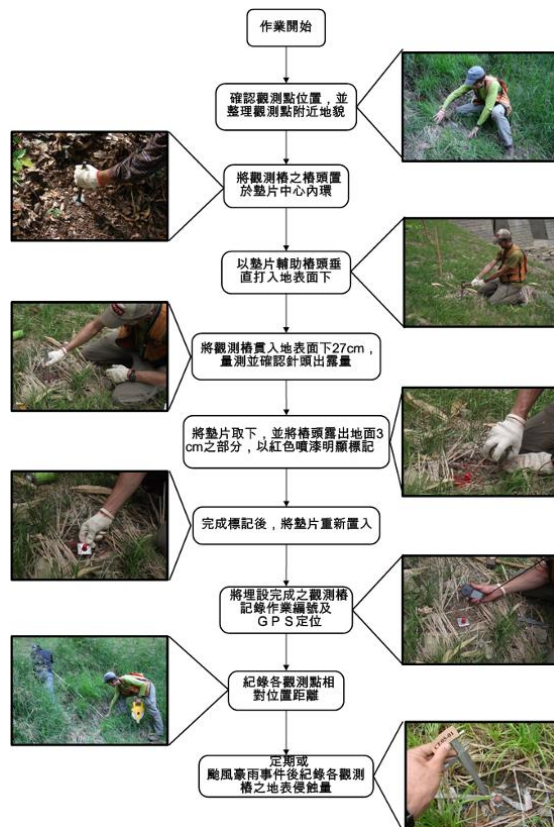


圖 7 沖蝕針埋設與量測流程圖

Fig 7 A procedure of setting erosion pins and measuring eroded depth.

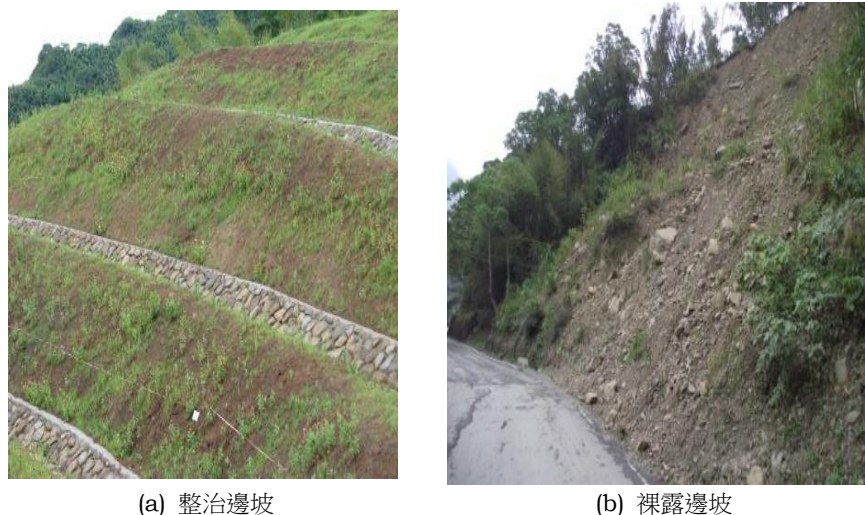


圖 8 沖蝕針佈設邊坡類型照片示意圖

Fig 8 Photos of setting erosion pins on different slopes.

表 3 地表沖蝕量調查點位相關資料彙整表

Table 3 Information of soil erosion measurement sites.

項次	治理分區	子集水區	點位編號	TWD97 坐標		地質	邊坡類型
				E	N		
1	大埔	東西坑溪	EA01	208525	2574012	沖積層	整治邊坡
2			EA02	209894	2572856	糖恩山砂岩	裸露邊坡
3			EA03	210522	2572655	鹽水坑頁岩	裸露邊坡
4			EA04	211120	2571865		整治邊坡
5	龍蛟溪		EB01	209176	2577431	隘寮腳層	整治邊坡
6			EB02	209541	2577247		裸露邊坡
7			EB03	209760	2576966		裸露邊坡
8			EB04	209870	2576864		整治邊坡
9	新美	新美 2 號	EC01	216159	2586124		整治邊坡
10		野溪	EC02	215963	2586988		裸露邊坡
11	樂野	行電橋野	ED01	219806	2594620		整治邊坡
12		溪	ED02	219733	2594537		裸露邊坡
13		樂野 3 號	EE01	219523	2594921		裸露邊坡
14		野溪	EE02	219396	2594949		整治邊坡
15	里佳	達有野溪	EF01	221797	2588607		裸露邊坡
16			EF02	221219	2588788		整治邊坡
17	達邦	達德安溪	EG01	223613	2593095	長枝坑層	裸露邊坡
18			EG02	223988	2592222		整治邊坡
19		櫻花溪	EH01	224265	2594441		裸露邊坡
20			EH02	224453	2594167		整治邊坡
21	茶山	托亞奇伊	EI01	218561	2576241		裸露邊坡
22		溪	EI02	216961	2576672		整治邊坡
23		頓阿巴娜	EJ01	216229	2577689		整治邊坡
24		溪	EJ02	216029	2578231		裸露邊坡
25		狄布尤卡	EK01	216536	2578845		整治邊坡
26		那溪	EK02	216540	2578863		裸露邊坡

#### 四、土壤沖蝕量測結果及抑制評估

本節藉由蒐集前述曾文水庫集水區內長期性土壤沖蝕調查資訊，同時蒐集調查時相關時雨量紀錄(水保局土石防災應變系統網站 <http://fema.swcb.gov.tw/>)，藉以了解新增地表沖蝕資料及對應降雨量關係。另外，加總調查期間之累積土壤沖蝕深度，並除以調查時程之時間長度，據以計算年土壤沖蝕深度，進而量化說明植生復育工程對於水庫集水區之細粒料土砂抑制效果，以下分為「新增土壤沖蝕深度與累積雨量關係」以及「年土壤沖蝕抑制評估」等兩項課題說明：

(一) 新增土壤沖蝕深度與累積雨量關係

為瞭解不同植生邊坡土壤沖蝕深度與降雨關係，針對歷次調查新增土壤沖蝕深度及對應累積事件降雨量，進行非線性迴歸，如圖 9；建立「整治邊坡」及「裸露邊坡」之新增土壤沖蝕深度(y)與累積雨量(x)關係式，如下：

a. 裸露邊坡：

$$y=0.0303x^{0.4009} \quad R^2=0.51 \quad n=260 \quad 92 \leq x \leq 1178 \quad (\text{式 } 1)$$

b. 整治邊坡：

$$y=0.0414x^{0.2755} \quad R^2=0.38 \quad n=241 \quad 92 \leq x \leq 1179 \quad (\text{式 } 2)$$

上式 y 單位為 cm；x 單位為 mm；R<sup>2</sup> 為相關係數；n 為樣本數。

依據上述公式並參考中央氣象局 93 年 11 月 25 日修訂之「大雨」、「豪雨」、「大豪雨」及「超大豪雨」24 小時累積雨量定義，若探討類似雨場事件下，評估整治邊坡相較於裸露邊坡之土壤沖蝕差異，量化說明人為復育對於土壤沖蝕抑制成效，如表 4。由表可知，隨著豪(大)雨事件之累積雨量增大，其整治邊坡與裸露邊坡之土壤沖蝕差異程度亦隨之變大，其中以超大豪雨事件時(累積雨量達 350mm)差異最大，其土壤沖蝕差異倍率最多達 1.53 倍；故透過以上實際數據之統計迴歸分析成果，顯示未來遭受豪雨或颱風件影響，整治邊坡相較於裸露邊坡，應可有效抑制土壤流失，顯見經人為治理介入後，確有成效。

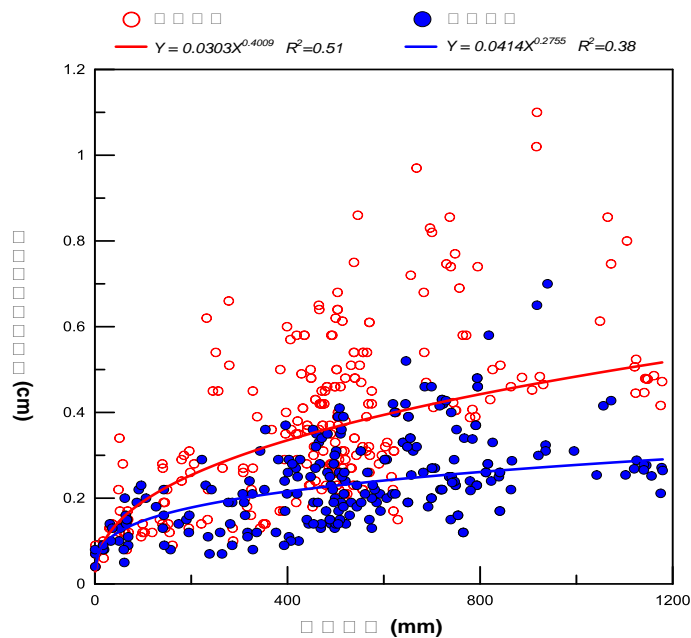


圖 9 新增土壤沖蝕深度與累積雨量圖

Fig 8 Diagram of Increment soil erosion related to accumulated rainfall

表 4 不同暴雨量之土壤沖蝕差異倍率表



**Table 4 Comparative ratios of soil erosion in different rain.**

不同降雨事件等級	大雨事件*	豪雨事件*	大豪雨事件*	超大豪雨事件*
	(累積雨量達 50mm)	(累積雨量達 130mm)	(累積雨量達 200mm)	(累積雨量達 350mm)
整治邊坡(cm)	0.12	0.16	0.18	0.21
裸露邊坡(cm)	0.15	0.21	0.25	0.32
土壤沖蝕差異倍率**	1.20	1.35	1.42	1.53

註\*：參考中央氣象局豪(大)雨事件定義。

註\*\*：土壤沖蝕差異倍率=裸露邊坡沖蝕深度/整治邊坡沖蝕深度。

## (二) 年土壤沖蝕抑制評估

彙整曾文水庫集水區內 26 處歷年土壤沖蝕量長時監測數據，將各治理分區內同一監測時程且同一植生狀況土壤沖蝕深度除以總監測時程，以轉換成年土壤沖蝕深度，如下式：

$$\text{年土壤沖蝕深度} = \frac{\text{累積沖蝕深度}}{\text{總監測時程}} \quad (\text{式 3})$$

藉由上述公式計算可知，年平均沖蝕深度以茶山治理分區最大，約達 2.91cm，以達邦治理分區之 1.82cm 最小。若比較各治理分區之不同植生邊坡類型之年平均土壤沖蝕深度，大致上各分區均以整治邊坡較小，整治邊坡與裸露邊坡之年平均沖蝕深度以里佳治理分區相差最多，約可達 2.47 倍左右，而以樂野治理分區相差最少約 1.64 倍；此與各治理分區所投入的工程施作密度具密切之關係，參見如表 5。

表 5 土壤沖蝕深度調查資料彙整表

**Table 5 Invertigated data of soil erosion on different slope types**

項次	治理分區	子集水區	邊坡情況	累積沖蝕深度(cm)	年平均沖蝕深度 (cm)		
					整治邊坡	裸露邊坡	總平均
1	大埔	東西坑溪	整治邊坡	4.04	1.79	3.06	2.43
2			裸露邊坡	7.02			
3			裸露邊坡	7.55			
4			整治邊坡	5.20			
5		龍蛟溪	整治邊坡	4.35			
6			裸露邊坡	8.02			
7			裸露邊坡	7.05			
8			整治邊坡	3.68			
9	新美	新美 2 號野溪	整治邊坡	3.15	1.30	2.51	1.90
10			裸露邊坡	6.07			
11	樂野	行電橋野溪	整治邊坡	3.87	1.62	2.66	2.14
12			裸露邊坡	6.29			
13		樂野 3 號野溪	裸露邊坡	6.55			
14			整治邊坡	3.98			
15	里佳	達有野溪	裸露邊坡	6.35	1.08	2.62	1.85
16			整治邊坡	2.61			
17	達邦	達德安溪	裸露邊坡	5.83	1.27	2.37	1.82
18			整治邊坡	3.11			
19		櫻花溪	裸露邊坡	5.62			
20			整治邊坡	3.03			
21	茶山	托亞奇伊溪	裸露邊坡	8.27	2.11	3.71	2.91
22			整治邊坡	3.96			
23		頓阿巴娜溪	整治邊坡	5.96			
24			裸露邊坡	9.62			
25		狄布尤卡那溪	整治邊坡	5.38			
26			裸露邊坡	9.04			

此外，為量化水庫集水區境內各子集水區「整治邊坡」及「裸露邊坡」等兩區年土壤沖蝕抑制百分比，參考水保局(2011)建立土壤沖蝕抑制百分比，計算方式如下：

$$\text{年土壤沖蝕抑制百分比} = \frac{\text{裸露邊坡年土壤沖蝕量} - \text{整治邊坡年土壤沖蝕量}}{\text{裸露邊坡土壤沖蝕量}} \times 100\% \quad (\text{式 4})$$

此項公式可量化整治後邊坡之表土細顆粒土壤流失減少率，若抑制百分比越高代表其相對工程控制效果越好；因此，將表 5 中不同植生覆蓋之年土壤沖蝕深度，代入公式計算；可以發現曾文水庫集水區經人為整治後邊坡約能控制至少 36.62% 之細顆粒土壤流失(如圖 10)，顯示各治理分區所增加地表覆蓋面積及防止雨滴逕流沖蝕之保育治理工程漸有成效，且能有效抑制土壤流失。

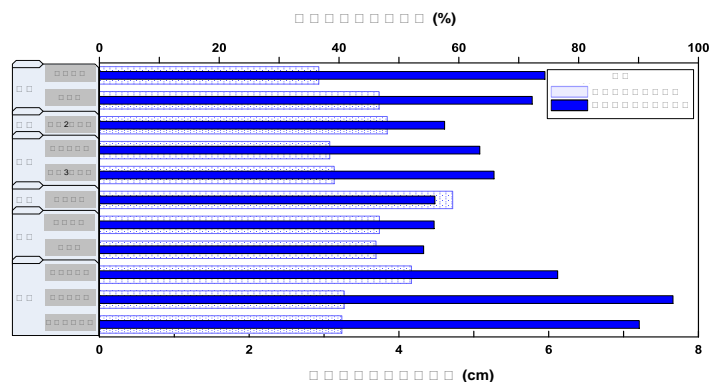


圖 10 曾文集水區累積土壤平均沖蝕深度及抑制百分比條狀圖

Fig 10 Bar charts of accumulated eroded depth and suppression rate of soil erosion in Tsengwen reservoir watershed.

## 五、結論

本研究於曾文水庫集水區內針對裸露邊坡與整治邊坡等兩種試驗環境佈設沖蝕針，藉此瞭解不同植生狀況對於土壤流失控制程度，量化說明植生復育工程對於水庫集水區之細粒料土砂抑制效果，針對具體重點結論摘錄如下：

1. 整體而言，量測結果均以裸露邊坡之土壤沖蝕深度最大，而以整治邊坡最小，整治邊坡與裸露邊坡年平均沖蝕深度最多相差可達 2.47 倍以上。顯示整治邊坡因有橫向及縱向排水等工程設施，當降雨較明顯時，其能有效疏解地表逕流量及加速排水，確保邊坡處於穩定及減緩土壤沖蝕狀況，並同時滯留細粒料土壤往下游遷移。
2. 曾文水庫集水區土壤沖蝕量抑制百分比約為 36.62%，可見歷經水庫集水區治理計畫，透過人為坡面植生復育工程，已能有效抑制並改善上游集水區之地表土壤流失狀況，確實達致減淤降濁之治理標的。
3. 目前政府部門(如地調所、水利署、林務局、水保局)針對全台重要流域進行全面性土壤沖蝕資料調查及量測，未來建議納入整合，並獲得涵蓋全台範圍之土壤沖蝕經驗推估式，以增加空間尺度適用價值，藉以建立本土化集水區土壤沖蝕量之推估方法，供水土保持需求性規劃、設計、評估及應用。
4. 由於沖蝕針屬長期監測之試驗，為達監測資料完整性建議累積長時之數據，並與經驗歸納法進行驗證，嘗試建立該集水區沖蝕量評量準則，以作為後續快速推估土壤沖蝕量之方法，供整治與水庫管理單位後續使用。

## 參考文獻

1. 水保局 (2005) 「水土保持手冊」。
2. 水保局(2011)，「石門水庫集水區土砂災害歷程分析」。

3. 水保局(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」。
4. 水保局(2011),「曾文水庫集水區多元尺度環境調查與保育治理成效評估」。
5. 李建堂(1999),「鉅 137 技術應用於土壤沖蝕研究之回顧與展望」,台灣大學地理學系地理學報,第 26 期,第 25~44 頁。
6. 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 275~283 頁。
7. 林俊全(1995),「泥岩邊坡發育模式之研究」,台灣大學地理學系地理學報,第 18 期,第 45~58 頁。
8. 林伯勳、何幸娟、陳建宏、冀樹勇、施美琴、尹孝元(2010),「神木集水區降雨引致土壤沖蝕量調查與監測」,第十九屆水利工程研討會,國立雲科技大學,台北,第 M9-M15 頁。
9. 林韋成(2014),「石門水庫集水區土壤沖蝕與水文地文影響因子研究」,淡江大學土木工程學系研究所,碩士論文
10. 林俐玲(2008),「土壤沖蝕指數估算公式之研究」,中華水土保持學報,第 39 卷,第 4 期,第 355~366 頁。
11. 林俐玲(2010),「通用土壤流失公式(USLE)之應用與誤用」,水保技術,第 5 卷,第 2 期,第 119~121 頁。
12. 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,2010 年 10 月 21 日,pp.841-850。
13. 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,1(13): 43-56。
14. 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。
15. 許振崑,林伯勳,鄭錦桐,高丞瑋,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 4 卷,第 3 期,第 191~203 頁。
16. 陳樹群、簡如宏、馮智偉、巫仲明(1998),「本土化土壤沖蝕指標模式之建立」,中華水土保持學報,第 29 期,第 3 卷,第 233~247 頁。
17. 陳樹群、吳俊毅、吳岳霖、王士豪(2009),「GIS 圖層及修正因子建置台灣通用土壤流失公式(TUSLE)-以石門水庫集水區為例」,中華水土保持學報,第 40 卷,第 2 期,第 185~197 頁。
18. 謝正倫(2008),「水庫濁水現象之研究子計劃-水庫集水區細微土砂來源之空間分布特性之分析」,國科會研究成果報告,計畫編號 NSC 95-2625-Z-006-003。
19. B. C. Peter et al. (2010) Heng<sup>1</sup>, Jim H. Chandler<sup>2</sup> and Alona Armstrong<sup>3</sup> “Applying close range digital photogrammetry in soil erosion studies” The Photogrammetric Record Volume 25, Issue 131, pages 240–265, September 2010
20. Blake, W. H., Walling, D. E., and Q. He (1999), “Using <sup>7</sup>Be as a tracer in soil erosion investigations”, Applied Radiation and Isotopes, 51, pp599-605.
21. Crouch, R. J. (1987), “The relationship of gully sidewall shape to sediment production”, Australian Journal of soil Research, 25, pp531-539.
22. Dirk H. Rieke-Zapp (2005) “DIGITAL CLOSE RANGE PHOTOGRAMMETRY FORMEASUREMENT OF SOIL EROSION” The Photogrammetric Record 20(109): 69–87 (March 2005)
23. Goudie, A. (1990), “Geomorphological Techniques”, 2ed ed., London: Unwin Hyman Inc., pp254-255. Rosgen, D. (1996), “Applied.
24. Lawler, D.M., Couperthwaite, J., Bull, L.J., and N.M. Harris (1997), “Bank erosion events and processes in the upper severn basin”, Hydrology and Earth System Sciences, 1(3), pp523-534.

25. Schumm, S. (1956), "Evolution of drainage systems and slopes in badland at Perth Amboy", New Jersey, *Bulletin of Geological Society of America*, 67: 597-646.