

## 神木集水區土壤沖蝕特性

何幸娟<sup>[1]\*</sup> 林伯勳<sup>[1]</sup> 冀樹勇<sup>[1]</sup> 尹孝元<sup>[2]</sup> 施美琴<sup>[2]</sup> 羅文俊<sup>[2]</sup>

**摘 要** 本文透過現場時雨量及相關地文資訊，搭配土壤流失經驗公式探討神木集水區年土壤沖蝕量與單場降雨事件引致土壤沖蝕量之差異程度。同時，於現地設置多處沖蝕針監測土壤沖蝕深度，探究累積降雨量與實際沖蝕量變化關係。根據 MUSLE 分析莫拉克颱風事件引致土壤沖蝕量結果得知，出水溪與愛玉子溪兩子集水區於該場事件下引致沖蝕量佔全年土壤沖蝕量 15% 以上，顯示在降雨延時長且累積降雨量大情況下，可能誘發兩子集水區產生大量非點源土砂料源。此外，透過現場沖蝕針監測資料顯示，當子集水區遭遇累積雨量大於 200mm 事件下，其新增土壤沖蝕深度將快速增加，並且以愛玉子溪之沖蝕深度較出水溪高；惟因出水溪集水區面積較愛玉子溪集水區大約 2 倍，故就整體沖蝕量體而言，仍以出水溪集水區較高。經驗公式推估結果與現地監測資料觀察現象相符。

**關鍵詞：**神木集水區、土壤沖蝕、降雨特性。

## Preliminary Study on Soil Erosion Caused by Rainfall in Shenmu Watershed

Hsing-Chuan Ho<sup>[1]\*</sup> Bor-Shiun Lin<sup>[1]</sup> Shu-Yuon Chi<sup>[1]</sup> Hsiao-Yuan Yin<sup>[2]</sup>  
Mei-Chin Shih<sup>[2]</sup> Wen-Chun Lo<sup>[2]</sup>

**ABSTRACT** This study uses hourly rainfall data, physiographic data, and the USLE and MUSLE soil erosion models as well as on site erosion pin studies to identify soil erosion rates within Shenmu watershed. Results from the MUSLE model revealed single storm erosion resulting from high rainfall intensity, and long duration rainfall events such as typhoon Morakot, can generate large volume non-point sources of sediment that is estimated to account for over 15 percent of annual erosion depths. Erosion rates measured at soil erosion pin studies revealed erosion depths were actually greater in the Aiyuzi watershed and erosion rates drastically increased once accumulated rainfall exceeded 200mm. Although measured erosion depths were higher in the Aiyuzi stream, because the area of the Chushui watershed is twice that of the Aiyuzi watershed, estimated total erosion volume based on field measurements was higher in the Chushui watershed, matching the results of the USLE model.

**Key Words :** Shenmu watershed, soil erosion, rainfall characteristics.

### 一、前 言

神木集水區除颱風所引致大量點源式土砂來源

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。目前國內外學者及政府單位常以土壤流失經驗公式推估集水區土壤沖蝕量，其中以美國農業部

[1] 中興工程顧問社防災科技研究中心  
Disaster Prevention Technology Research Center, Sinotech Engineering Consultants.

[2] 行政院農業委員會水土保持局  
Soil and Water Conservation Bureau, Council of Agriculture.

\* Corresponding Author. E-mail : hcho@sinotech.org.tw

(USDA) 所發展最多，如 USLE、EPIC、WEPP、MUSLE、RUSLE、SWRRBWQ、CREAMS、AGNPS 等；惟其無法確切得知小尺度邊坡實際沖蝕情況。故為解決此項問題，可於現地設置多處沖蝕針，定期或於颱風過後量測土壤沖蝕狀態，以補足經驗公式之缺點 (地調所，2008；水保局，2009；水保局，2010a)。

本文透過土壤流失經驗公式評估神木集水區與其上游之出水溪與愛玉子溪等兩子集水區之年與單場降雨事件土壤沖蝕量，以瞭解神木集水區內降雨空間特性對土壤沖蝕之影響。同時，我們於出水溪與愛玉子溪集水區境內佈設多處沖蝕針進行監測，探討降雨多寡對於土壤沖蝕量流失變化差異，供作後續推估非點源土砂產量之參考依據。其中，評估年土壤沖蝕量 (亦稱為長時土壤沖蝕量) 係採美國農業部土壤保持建置之土壤流失經驗公式 (Universal Soil Loss Equation, USLE)；另單場降雨事件引致土壤沖蝕量 (亦稱瞬時土壤沖蝕量) 係採 Williams and Berndt (1977) 提出之修正版土壤流失公式 (Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE) 推估之。

## 二、文獻回顧

土壤沖蝕屬於非點源污染，伴隨著降雨隨機產生，且無明確發生地點。影響土壤沖蝕的因素甚多，大致可分人為因素及自然因素。人為因素即指開發、鋪設及覆蓋等加工行為；自然因素即為氣候、地形、植被、土壤以及豪雨等大自然條件。關於地表沖蝕量調查，主要係觀測不同植生邊坡受雨沖蝕之情形，並藉以說明土壤沖蝕之變化差異及釐清何處為敏感易沖蝕區域，有助於評估集水區非點源土砂產量。近年國內外土壤沖蝕量之估算多採用經驗公式歸納，如 USLE 與 MUSLE 等。由於經驗式之估算結果仍受限地域性及降雨空間分布狀況，且僅能代表整體集水區沖蝕量均化之結果，無法得知局部區域土壤沖蝕量。鑑此本文於現地設置多處沖蝕針監測土壤沖蝕深度，探究累積降雨量與實際沖蝕量變化關係。條列有關現地試驗法以及經驗模式推估法等兩種土壤沖蝕量之估算方式，如下。

### 1. 現地試驗法

Schumm 於 1956 年首先使用木樁 (wooden stakes) 打入地面直接量測邊坡物質之沖蝕；因金屬樁徑更細且相較木樁對坡面的破壞為小且較能抗腐蝕，故後人

皆以金屬材質製作樁體 (metal stakes) 量測土壤沖蝕量，Goudie (1990) 及林俊全 (1995) 等學者皆曾採用沖蝕針作為沖蝕量之量測工具。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 et al. (1997) 利用光電子沖蝕針 (photo-electronic erosion pins) 作為河岸沖蝕之研究，其特性可連續記錄沖蝕情況，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。林伯勳等人 (2011) 以石門水庫集水區內共 55 處之歷年土壤沖蝕針監測資料，探討集水區內地表沖蝕深度與累積降雨兩特性之關係，研究成果如圖 1 所示。

### 2. 經驗模式推估法

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推估模式，如土壤流失經驗公式 (USLE、RUSLE、MUSLE)、農業非點源污染模式 (AGNPS)、水蝕推估模式 (WEPP)、EPIC、SWRRBWQ、CREAMS、ANSWERS 等。國內學者陳樹群等 (1998) 發展土壤沖蝕指標 SEIM (soil erosion index model)，以指數總值配合迴歸公式計算土壤沖蝕量，修正土壤沖蝕因子建置適合台灣地區土壤流失公式。

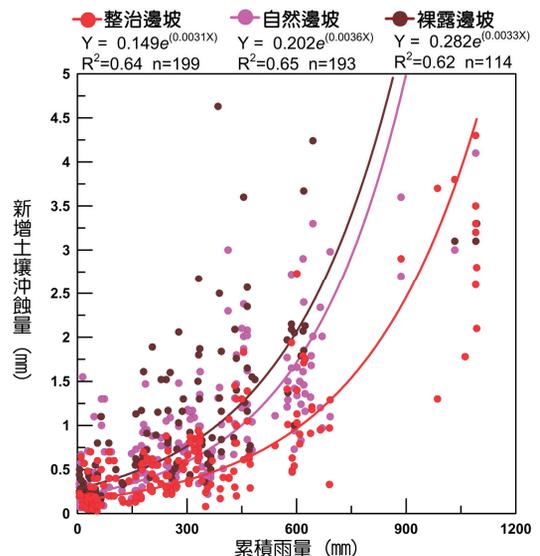


圖 1 石門水庫集水區各類型邊坡之累積雨量與新增沖蝕深度關係圖 (林伯勳等，2011)

Fig.1 Soil erosion relative to accumulated rainfall for various slope types in the Shimen reservoir watershed

### 三、神木集水區環境概述

神木集水區位於南投縣西南端角落，鄰近嘉義縣邊界，其行政區域屬信義鄉管轄之神木集水區，北與水里鄉、魚池鄉、仁愛鄉相鄰 (如圖 2)，主要聯絡道路為台 21 線。境內多山地且坡度陡峭，地勢高差最大可達 1,524m，屬西部麓山帶中之褶皺逆衝山地，土地權屬為國有林班地；土地利用前三類分別為天然闊葉樹純林 (19.6%)、天然竹針闊葉混生林 (19.4%) 以及人工竹針闊葉混生林 (16.6%)。神木集水區主要地質分布屬南莊層，其次為和社層；地質構造以褶皺為主，陳有蘭溪斷層為最重要之構造線，主要有呈東北-西南走向之和社背斜與同富向斜。在坡度部分，神木集水區境內坡度大於五級坡之面積約佔 45%，顯示地勢相當陡峻。境內坡向分布以北向居冠，約為 47.75%，其餘坡向分布相差甚微。神木集水區屬陳有蘭溪最上游流域，為和社支流水系，主要包含出水溪、霍薩溪以及愛玉子溪等子集水區，其中神木集水區總面積約為 7,216.45ha，出水溪集水區面積為 861.56ha，愛玉子溪集水區面積為 400.64ha。境內氣溫受到地形海拔較高影響，溫差大且偏低，全年氣溫介於 5.9°C~14.4°C 之間，年平均溫度為 10.9°C。透過阿里山、神木村、新高口氣象站監測資料，進行年降雨量分析。結果顯示，各測站年平均雨量介於 1,950~4,980mm 之間。近年來受到極端降雨事件影響，各測站年平均降雨量有增強趨勢，尤以阿里山站居冠，甚至 2005 年起，年平均降雨量皆超過 5,000mm (何幸娟等人, 2011; 水保局, 2010<sup>b</sup>)，係為台灣年平均雨量 (2,500mm) 之兩倍。

### 四、土壤沖蝕量分析

本文土壤沖蝕量分析包含以 USLE 推估之年土壤沖蝕量，以及 MUSLE 推估莫拉克颱風事件單場降雨事件引致土壤沖蝕量。同時，以現地沖蝕針監測成果，探討降雨多寡對於土壤沖蝕變化差異。針對各分析項目分別說明如次。

#### 1. 年土壤沖蝕量

USLE 為美國農業部之土壤保持局所建立，其估算時間以年為單位，故可用以推估年土壤沖蝕量；係為目前世界上最廣為使用之土壤沖蝕公式，亦納入國內水土保持手冊 (水保局, 2006) 中。其估算公式如下：

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

式中  $A_m$  為每公頃之年平均土壤沖蝕量 (公噸/公頃-年);  $R_m$  為降雨沖蝕指數 ( $10^6$  焦耳-毫米/公頃-小時-年);  $K_m$  為土壤沖蝕指數 (公噸-公頃-小時-年/ $10^6$  焦耳-毫米-公頃-年);  $L$  為坡長因子;  $S$  為坡度因子;  $C$  為覆蓋與管理因子;  $P$  為水土保持處理因子。

針對神木、出水溪及愛玉子溪等三個集水區，採用 USLE 公式各項影響參數選定原則如下：

- (1) 降雨沖蝕指數 ( $R_m$ ): 根據水土保持手冊 (水保局, 2006), 係採用出水溪及愛玉子溪集水區鄰近點南投站之值 (14201);
- (2) 土壤沖蝕指數 ( $K_m$ ): 根據水土保持手冊 (水保局, 2006) 查表採用南投東光站之值 (0.0158);
- (3) 坡長因子 ( $L$ ) 及坡度因子 ( $S$ ): 以水保局 (2010<sup>b</sup>) 「南投縣信義鄉神木地區土砂災害機制歷程調查及潛勢評估分析」計畫蒐集之 30m×30m DEM 資料, 求得集水區地文資訊。其中, 坡長因子 ( $L$ ) 可以式 (2) 求得; 坡度因子 ( $S$ ) 可以式 (3) 求得。

$$L = \left( \frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (2)$$

$$S = 65.4 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065 \quad (3)$$

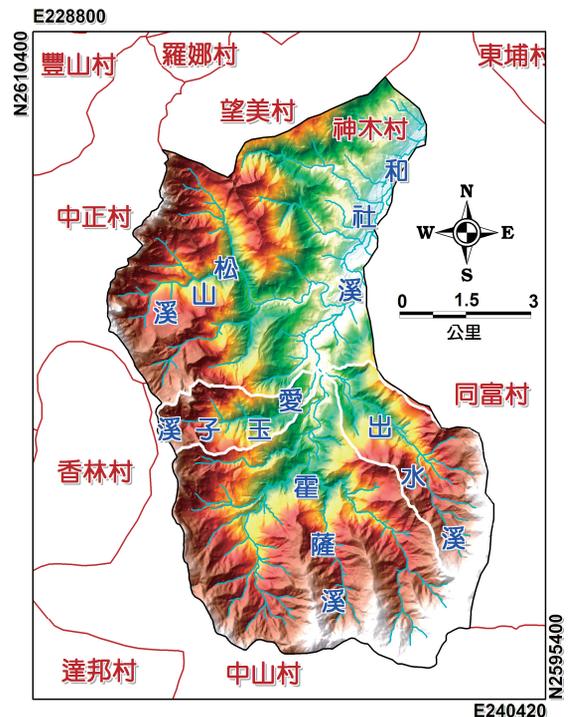


圖 2 神木集水區環境概況圖

Fig.2 The environment at Shenmu watershed

式中  $\lambda$  為坡長之水平距離 (m)，係取最高點至流入處之水平距離； $m$  隨坡地的坡度而改變 (Wischmeier and Smith, 1965)，另根據 Wischmeier and Smith (1978) 分析指出，當坡度小於 1% 時， $m=0.2$ ，當坡度介於 1% 與 3% 之間時， $m=0.3$ ，當坡度介於 3% 與 5% 之間時， $m=0.4$ ，當坡度大於 5% 時， $m=0.5$ ； $\theta$  為坡度。

- (4) 覆蓋與管理因子 (C)：係利用土地利用圖，先劃分並計算各集水區所佔之土地利用率。然後，採用水土保持手冊 (水保局，2006) 所建議覆蓋與管理因子 C 值，依各集水區所佔土地利用情況計算對應覆蓋與管理因子 C 值，再將其加權計算並加總後代表集水區之整體覆蓋與管理因子。

- (5) 水土保持處理因子 (P)：保守估算採 1。

茲將 USLE 估算神木、出水溪與愛玉子溪等子集水區年土壤沖蝕量分析結果彙整如表 1 所示。由表可知，於單位面積下以出水溪集水區之年土壤沖蝕量較愛玉子溪集水區高，兩者相差約 1.22 倍；推測原因可能來自於出水溪集水區於坡度因子相關參數中僅略低於愛玉子溪，但其覆蓋與管理因子卻明顯高於愛玉子溪，顯示子集水區植被狀況不佳情形，將導致較劇烈土壤沖蝕。另外，為比較兩集水區平均土壤沖蝕量之相對差異及對於神木集水區之貢獻度，將各集水區面積大小乘上單位面積下年平均土壤沖蝕量 ( $A_m$ )，並繪製結果如圖 3 所示。由圖可知，神木集水區上游之出水溪與愛玉子溪等兩子集水區，其年土壤沖蝕量總和約佔神木集水區之 33.7%；另統計出水溪與愛玉子溪等子集水區對神木集水區之土壤沖蝕量貢獻度，並將結果繪製如圖 3。圖中顯示以出水溪集水區之土壤沖蝕貢獻度最大 (24.41%)，其次為愛玉子溪集水區 (9.29%)，其中出水溪約為愛玉子溪的 2.63 倍。各集水區年土壤沖蝕貢獻度與其集水面積大小有關，以出水溪集水區而言，其流域面積是愛玉子溪面積之 2.15 倍，故年沖蝕貢獻度大於愛玉子溪集水區。

## 2. 單場降雨事件引致土壤沖蝕量

本文透過修正版土壤流失公式 MUSLE (如式 4)，估算莫拉克颱風事件引致出水溪以及愛玉子溪等兩子集水區之土壤沖蝕量。於 MUSLE 使用參數選定時，因神木集水區內現並無可用之流量站監測資料，故此無法驗證有效逕流歷線。本文係根據水保局土石流觀測站紀錄之時雨量資料 (如圖 4)，參考集水區地文因子，以三角形單位歷線法 (王如意、易任，2001) 推估

莫拉克颱風事件之逕流歷線 (Q，如圖 5)，進而透過式 (4) 獲得兩子集水區於莫拉克颱風影響期間之有效逕流量 ( $V_{eff}$ ) 與尖峰逕流量 ( $Q_p$ )。其餘參數選用原則如同 ULSE 推估式。彙整出水溪以及愛玉子溪等兩子集水區之有效逕流量、尖峰逕流量以及 MUSLE 估算成果，如表 2 所示。由表 2 可知，兩子集水區受到莫拉克颱風事件影響下，以出水溪集水區之沖蝕量較大，約高於愛玉子溪 2.67 倍。此外，透過表 3 MUSLE 與 USLE 土壤沖蝕推估成果比較表可知，出水溪及愛玉子溪集水區於莫拉克颱風時，其土壤沖蝕量分別約佔全年之 15% 以上，顯示此次颱風事件造成對於集水區整體土砂產量之貢獻度不可小覷。

$$V_s = 11.8(V_{eff} \cdot Q_p)^{0.56} \times K_m \times C \times P \times L \times S \quad (4)$$

$$V_{eff} = \int_{t_1}^{t_2} Q dt \quad (5)$$

式中， $V_{eff}$  為有效逕流量； $Q_p$  為尖峰逕流量； $Q$  為每小時流量； $t_1$  為事件起迄時間；其他參數同如 ULSE。

表 1 USLE 土壤沖蝕量計算表

Table 1 USLE soil erosion calculation

地文因子	集水區		
	出水溪	愛玉子溪	神木集水區
溪流長(L) (km)	6.951	4.512	16.254
高程差 (m)	1524	1234	1360
坡長水平距離( $\lambda$ ) (km)	5.293	3.681	10.89
溪流平均坡度 ( $\theta$ )	16.063	18.533	7.119
降雨逕流指數 (Rm)	14201	14201	14201
土壤沖蝕指數 (Km)	0.0158	0.0158	0.0158
坡長因子(L)	15.47	12.9	22.18
坡度因子(S)	6.33	8.12	1.63
覆蓋與管理因子(C)	0.029	0.023	0.039
水土保持處理因子 (P)	1	1	1
土壤沖蝕量( $A_m$ )(ton/ha · year)	647.2	530.3	316.7
土壤沖蝕量 ( $10^3$ ton)	557.9	212.4	2285.5

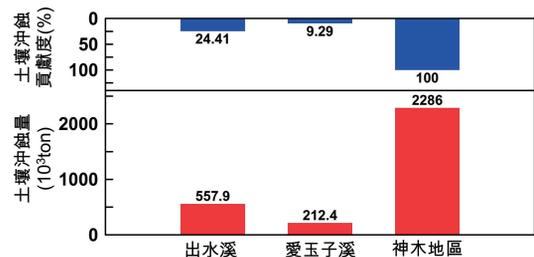


圖 3 年土壤沖蝕量與年土壤沖蝕貢獻分析結果圖

Fig.3 Annual amount of soil erosions and those contributions in Shenmu watershed

### 3. 現地沖蝕針監測

沖蝕針監測係運用改良簡易型觀測樁來觀測土壤流失狀況，其設計為 300mm 之 5 號竹節鋼筋 (直徑約 15.9mm) 套上螺絲墊片。該觀測針方便埋設人員垂直貫入施作以及日後之量測，並可防止針材挫屈變形且增加沖蝕針與土壤之握裹力，最後在鋼筋及墊片之間綁上塑膠號碼牌加以標註 (以塑膠打字條標示號碼以避免紙標籤遺失或模糊)。鋼筋頂部與地面間預留 3cm 之距離，便於例行維護管理，若有堆積現象仍可測得堆積高度。當進行地表沖蝕量調查量測時，利用精度 0.05mm 之測微尺記錄針頭與墊片間之距離，相隔一段時間後量測一次，則兩次差值即為沖蝕深度或堆積高度。

本文於莫拉克颱風過後，依上述調查施作流程於出水溪集水區佈設 4 處 (3 處為自然邊坡, 1 處為裸露邊坡), 愛玉子溪集水區佈設 2 處 (自然邊坡與裸露邊坡各 1 處), 共計 6 處, 並於 98 年 12 月至 99 年 3 月期間, 進行四次量測, 主要目的係為觀察豪大雨事件坡地沖蝕量, 為瞭解受降雨影響後不同集水區所反應土壤沖蝕特性。彙整本文沖蝕針佈設點位相關資訊與空間分佈如表 4 與圖 6 所示。由表可知, 本文沖蝕針監測區域之地質年代介於中新世早期-中期之南港層至南莊層; 坡度分級介於三至六級坡。藉由歷次量測數據可知, 神木集水區內以愛玉子溪集水區沖蝕深度 (平均約為 3.96mm) 最大, 再者為出水溪 (平均約為 3.34mm), 顯示愛玉子溪集水區較出水溪集水區沖蝕深度大約 1.2 倍, 然由於出水溪集水區面積較愛玉子溪集水區大, 故總土壤沖蝕量體係以出水溪集水區較多, 與前述土壤流失經驗公式評估成果相符。另由 4 處自然邊坡與 2 處裸露邊坡之監測數據可知, 兩子集水區之自然邊坡抗沖蝕能力均較裸露邊坡為佳 (如圖 7 至圖 8), 其中, 裸露邊坡平均沖蝕深度為 4.63mm, 約高於自然邊坡 (平均沖蝕深度為 3.0mm) 1.54 倍。

此外, 為瞭解出水溪與愛玉子溪集水區內邊坡表土沖蝕深度與累積降雨量關聯性, 本文暫時忽略沖蝕與地形及土地利用之影響, 因本研究期間只有四場大雨事件, 故僅蒐集四次量測成果; 藉此, 嘗試建立每次累積降雨量與新增土壤沖蝕深度趨勢曲線, 用以瞭解及比較兩子集水區於等降雨量影響下, 坡地沖蝕差異情況及沖蝕量遞增點; 繪製出水溪及愛玉子溪集水區新增土壤沖蝕深度與累積降雨量關係圖, 如圖 9 所示, 由圖 9 可知, 出水溪與愛玉子溪於累積雨量 100mm 以

表 2 MUSLE 估算結果 - 考量莫拉克颱風事件引致有效尖峰逕流量

Table 2 MUSLE calculation results considering effective rainfalls and peak runoff in typhoon Morakot

子集水區	莫拉克颱風事件		
	尖峰逕流量 $Q_p$ (cms)	有效逕流量 $V_{eff}$ ( $10^4 m^3$ )	土壤沖蝕量 (ton)
出水溪	154.85	3465.83	88,578
愛玉子溪	72.62	1625.45	33,195

表 3 MUSLE 與 USLE 土壤沖蝕推估結果比較

Table 3 Comparative results of estimate from MUSLE and USLE

子集水區	A (MUSLE)	B (USLE)	C=A/B
	莫拉克颱風引致 土壤沖蝕量 (ton)	年平均土壤沖 蝕量 (ton)	年沖蝕量百分 比(%)
出水溪	88,578	557,865	15.88
愛玉子溪	33,195	212,426	15.58

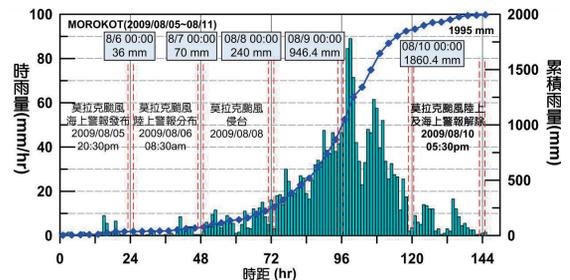


圖 4 神木集水區莫拉克颱風雨量組態圖

Fig.4 Diagram of rainfalls at Shenmu watershed during typhoon Morakot

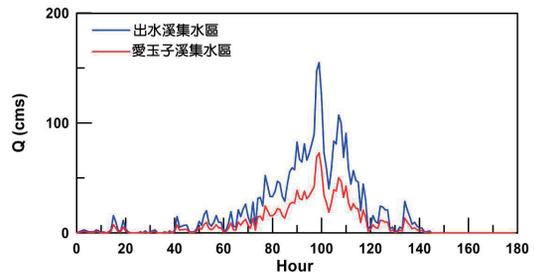


圖 5 出水溪與愛玉子溪集水區莫拉克颱風期間逕流歷程圖

Fig.5 Diagram of direct runoff at Tsushui River and Aiyuzih River by typhoon Morakot

下時，其所引致土壤沖蝕深度趨勢雷同，差異不大。然當累積雨量大於 200mm 時，於出水溪與愛玉子溪等兩子集水區，其新增土壤沖蝕深度將迅速增加。故於颱風季節期間所挾帶大量豪雨將使土壤沖蝕深度大幅增加，而愛玉子溪集水區較出水溪集水區土壤沖蝕深度為鉅。各集水區累積降雨量及新增沖蝕深度趨勢曲線公式條列如下，其中需注意本迴歸式僅可粗略估算累積降雨量 300mm 以下雨場之新增土壤沖蝕深度。

愛玉子溪集水區：

$$\log(Y) = 0.012976X + 1.8304$$

$$X \leq 300 \quad R^2 = 0.94 \quad (6)$$

出水溪集水區：

$$\log(Y) = 0.010995X + 2.2271$$

$$X \leq 300 \quad R^2 = 0.95 \quad (7)$$

式中 Y 為新增土壤沖蝕量 (mm)；X 為累積雨量 (mm)。

表 4 沖蝕針佈設點位相關資訊彙整表

Table 4 Locations and information of erosion pin

點位編號	集水區	TWD 97坐標		坡度分級 <sup>註</sup>	坡向	地質		邊坡情況	土地利用型態
		E	N			年代	地層		
E-S01	出水溪	235833	2602459	四級坡	東	中新世	南莊層	自然邊坡	草地
E-S02	出水溪	236142	2601999	四級坡	西北	中新世	南莊層	自然邊坡	草地
E-S03	出水溪	236549	2601854	六級坡	北	中新世	南莊層	自然邊坡	草地
E-S04	出水溪	235723	2602623	五級坡	西南	中新世	南莊層	裸露邊坡	裸露
E-H01	愛玉子溪	235040	2602457	三級坡	東	中新世	南莊層	自然邊坡	草地
E-H02	愛玉子溪	235038	2602433	六級坡	東	中新世	南莊層	裸露邊坡	裸露

註：坡度分級依水土保持技術規範 (2006) 第二十三條，坡度分級之定義

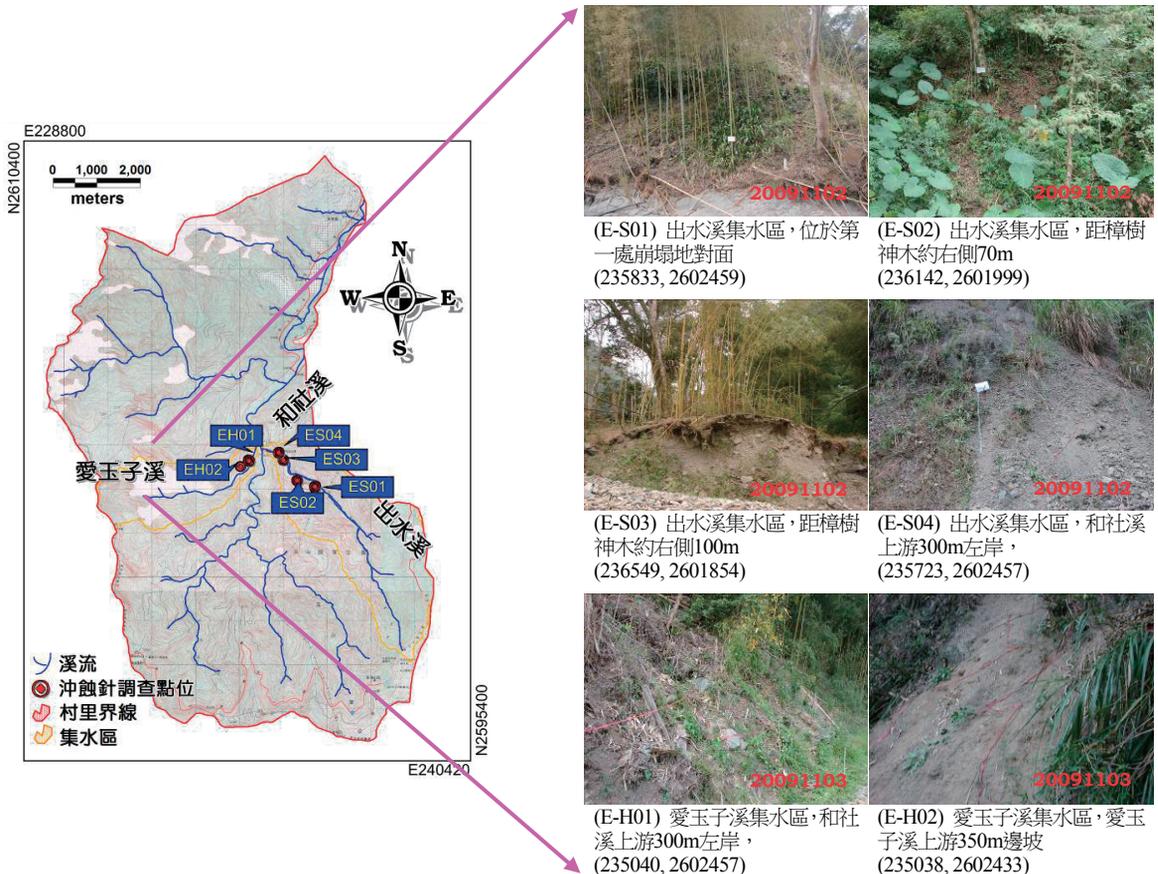


圖 6 沖蝕針佈設空間分布與現況照片圖

Fig.6 Spatial distribution of erosion pins and current photos

### 五、結 論

本文透過 USLE 分析結果顯示, 出水溪以及愛玉子溪集水區之年平均土壤沖蝕量約佔神木集水區之 33.7%, 惟該兩子集水區之總面積僅為神木集水區之 17.5%。由此可見本區域除崩塌料源外之外, 非點源土砂產量亦為流域內主要砂源區域之一。文中另以現地局部區域且不同植生狀況之土壤沖蝕針監測成果平均值, 代表出水溪與愛玉子溪等兩子集水區之土壤沖蝕情況。監測成果顯示兩子集水區土壤沖蝕情況受累積雨量影響頗大, 且兩子集水區於累積雨量大於 200mm 時, 其新增土壤沖蝕深度將快速增加, 尤其以愛玉子溪集水區之沖蝕深度較出水溪集水區高。但因出水溪集水區面積較愛玉子溪集水區大約 2 倍, 就整體沖蝕量體而言, 仍以出水溪集水區之非點源土砂量體較愛玉子溪集水區高。由於沖蝕針監測屬長期試驗, 本研究監測期程與次數偏低, 且監測期間內並無造成重大災害之降雨事件發生, 故此建議應繼續累積長期數據並定期進行現地監測, 再與土壤沖蝕量經驗式估算結果相互驗證, 進一步合理反推與率定經驗式推估因子之比率, 拓展土壤沖蝕量經驗式在實務應用價值。

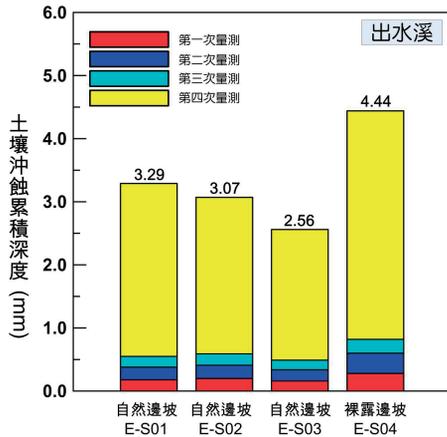


圖 7 出水溪集水區土壤累積沖蝕深度  
Fig.7 Diagram of the accumulated soil erosion depth at Tsushui watershed

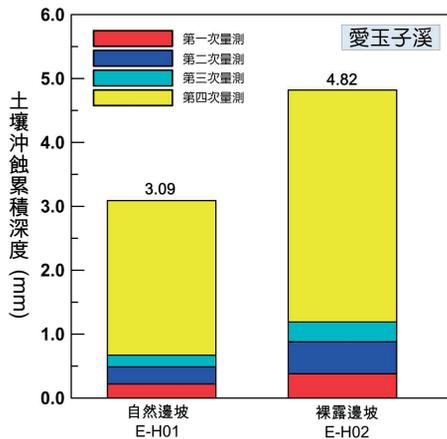


圖 8 愛玉子溪集水區土壤累積沖蝕深度  
Fig.8 Diagram of the accumulated soil erosion depth at Aiyuzih river

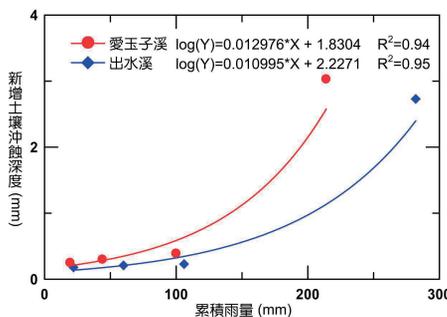


圖 9 出水溪及愛玉子溪集水區新增土壤沖蝕深度與累積雨量關係  
Fig.9 Diagram of incremental soil erosion depth and accumulated rainfalls at Tsushui and Aiyuzih watersheds

### 參考文獻

1. 水保局 (2006), 「水土保持手冊」。(Soil and Water Conservation Bureau. (2006). *Soil and Water Conservation Handbook*. Published by Soil and Water Conservation Bureau, Taiwan. (in Chinese))
2. 水保局 (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」。(Soil and Water Conservation Bureau. (2009). *Study on High Quality Terrain Measurement and Historical Migration in Shih-Men Watershed*. Published by Soil and Water Conservation Bureau, Taiwan. (in Chinese))
3. 水保局 (2010<sup>a</sup>), 「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」。(Soil and Water Conservation Bureau. (2010<sup>a</sup>). *Study on Historical Migration and Its Mechanism of Heavy Rainfall-Induced Sediment Disaster in Shih-Men Watershed*. Published by Soil and Water Conservation Bureau, Taiwan. (in Chinese))
4. 水保局 (2010<sup>b</sup>), 「南投縣信義鄉神木地區土砂災害機制歷程調查及潛勢評估分析」。(Soil and Water Conservation Bureau. (2010<sup>b</sup>). *Field Investigation of Mechanism and Potential Analysis for Sediment Dis-*

- aster in Shenmu Village, Shinyi Town, Nantou County. Published by Soil and Water Conservation Bureau, Taiwan. (in Chinese))
5. 王如意、易任 (2001), 「應用水文學」, 國立編譯館。(Wang, R.Y., and Yi, J. (2001). *Applied Hydrology*, National Institute for Compilation and Translation. (in Chinese))
  6. 地調所 (2008), 「集水區地質調查及山崩土石流調查與發生潛勢評估計畫」。(Central Geological Survey (2008). *Geological Investigation, Landslide-Debris Flow Investigation and Their Susceptibility Evaluation in a Watershed Area*. Published by Central Geological Survey, Taiwan. (in Chinese))
  7. 何幸娟、林伯勳、冀樹勇、施美琴、尹孝元、陳振宇 (2011), 「神木地區土石流發生成因初探」, 中興工程季刊, 110, 41-51。(Ho, H.C., Lin, B.S., Chi, S.Y., Shih, M.C., Yin, H, Y., and Chen, C.Y. "A Preliminary Investigation on the Debris Flow Factors in Shenmu Area." *Journal of Sinotech Engineering*, 110, 41-51. (in Chinese))
  8. 李建堂 (1999), 「銫 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, 26, 25-44。(Lee, C.T. (1999). "Application of Caesium-137 Technique in Soil Erosion Studies: A Review and Perspective." *National Taiwan University Department of Geography Journal of Geographical Science*, 26, 25-44. (in Chinese))
  9. 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, 18, 45-58。(Lin, J.C. (1995). "A Study on the Evolutionary Model of Mudrock Slope." *National Taiwan University Department of Geography Journal of Geographical Science*, 18, 45-58. (in Chinese))
  10. 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」, 土工技術, 129, 109-114。(Lin, B.S., Leung, W.Y., Hsiao, C.Y., Chi, S.Y., Wang, C. L., Chung, C.R., and Chiou, S.Y. "Sediment Monitoring and Evaluation of Management Efficiency for Shih-men Watershed." *Journal of Sinotech Engineering*, 129, 109-114. (in Chinese))
  11. 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, 29(3), 233-247。(Chen, S.C., Chien, R.H., Feng, J.W., and Wu, C.M. (1998). "Development of Soil Erosion Index Model in Taiwan Watershed." *Journal of Chinese Soil and Water Conservation*, 29(3), 233-247. (in Chinese))
  12. 謝正倫 (2008), 「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。(Shieh, C.L. (2008). "Analysis of the Source and Spatial Distribution of Fine Sand in the Watershed of a Reservoir." Nation Science Council, Report No. NSC-95-2625-Z-006-003. (in Chinese))
  13. Blake, W.H., Walling, D.E., and He, Q. (1999), "Using <sup>7</sup>Be as a tracer in soil erosion investigations." *Applied Radiation and Isotopes*, 51, 599-605.
  14. Crouch, R.J. (1987), "The relationship of gully side-wall shape to sediment production." *Australian Journal of Soil Research*, 25, 531-539.
  15. Goudie, A. (1990). *Geomorphological Techniques*. London: Unwin Hyman Inc., 254-255.
  16. 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*, 1(3), 523-534.
  17. 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.
  18. Sepúlveda, A., Schuller, P., and Walling, D.E. (2007). "Use of <sup>7</sup>Be to document erosion associated with a short period of extreme rainfall." *J. Environmental Radioactivity*, 99, 35-49.
  19. Williams, J.R., and Berndt, H.D. (1977). "Sediment yield prediction based on watershed." *Trans. Am. Soc. Agric. Engrs* 20(6), 1100-1104.
  20. Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1965). "Predicting Rainfall-Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains: Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation," *Agricultural Handbook No.282*, U.S. Department of Agricultural, Washington, D.C. 47p.
  21. Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1978). "Predicting rainfall erosion losses." *Agricultural Handbook*, 537, Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture.
  22. Yang, H., Chang, Q., Du, M., Minami, K., and Hatta, Y. (1998). "Quantitative Model of Soil Erosion Rates Using Cs137 for Uncultivated Soil." *Soil Science*, 163(3), 248-257.

---

2010年11月19日 收稿

2011年02月11日 修正

2011年11月24日 接受

(本文開放討論至 2013 年 3 月 31 日)