

# 暴雨事件整合點源及非點源之集水區土砂產量推估研究

溫惠鈺<sup>1</sup> 許世孟<sup>2\*</sup> 邱琳濱<sup>3</sup>

關鍵詞：土壤沖蝕量、坡地崩塌量、土砂產量、HSPF。

## 摘 要

集水區土砂產量推估是集水區治理與流域防災工作重要的一環，而台灣之特有地質、地形及氣候條件，常造成颱風豪雨時期集水區內之表土遭受沖刷以及上游坡地發生崩塌，使得大量土砂經由河道由集水區流出；而國內對於集水區土砂產量之推估模式，大多僅考慮非點狀來源之坡面土壤沖蝕量，較少一併考量點狀來源之崩塌土方量貢獻，故如何較精確地推估降雨期間集水區坡地崩塌及土壤沖蝕所引發之土砂產量值，是集水區治理工作之首要重點。

本研究利用美國環保署 (USEPA) 與 Hydrocomp Inc. 共同發展之 HSPF 水文模式，同時考慮坡地崩塌量與土壤沖蝕量，藉由土砂運移機制，建立一套集水區土砂產量推估模式。研究中以花蓮縣秀林鄉境內土石流潛勢溪流集水區為例，分析計算於暴雨事件下各集水區之土砂產量；分析結果顯示，在考慮坡地崩塌量情況下，各集水區之土砂產量較僅考慮坡面土壤沖蝕量時增加 1.1 ~ 14.4 倍，顯見崩塌土方量對於集水區土砂產量有顯著的貢獻。因此，利用本研究建立之集水區土砂產量推估模式，同時考慮坡地崩塌量與土壤沖蝕量，較能符合真實集水區產砂機制，如此不但能準確的進行集水區土砂產量之分析，且其結果可作為集水區防災工程設計參考，使得集水區整治更能符合經濟效益。

## WATERSHED SEDIMENT YIELD ESTIMATE WITH SOURCES OF POINT AND NON-POINT SEDIMENT DURING HEAVY RAIN PERIOD

Hui-Yu Wen Shih-Meng Hsu Lin-Bin Chiou

*Sinotech Engineering Consultants, Inc.  
Taipei, Taiwan 11071, R.O.C.*

*Key Words:* soil erosion, landslide, sediment yield, HSPF.

## ABSTRACT

The sediment yield estimate of a watershed is important in watershed management and disaster prevention. The geology, topography and meteorological conditions of Taiwan provide the essential factors for triggering soil erosion and landslides in watersheds. Most of the existing sediment yield estimation models in calculation merely take into account non-point source of sediment from erosion. For a landslide-prone watershed, landslides can be significant sources of sediment in determining the sediment yield of the watershed. How to accurately estimate the sediment yield from both soil erosion and

<sup>1</sup> 中興工程顧問社大地工程研究中心副研究員

<sup>2\*</sup> 通訊作者，中興工程顧問社大地工程研究中心組長

<sup>3</sup> 前中興工程顧問社執行長；旺洲建設有限公司董事長

landslides during rainstorms is the primary for the watershed management.

In this study, the HSPF model, which is developed by the U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) and Hydrocomp Inc. was used to establish an approach to the sediment yield estimation. The proposed method was applied to debris-flow-prone catchments in the Sioulin Township, Hualien County. The results showed that the sediment yield when considering landslides were found increasing at about 1.1 to 14.4 times than that estimated under the soil erosion conditions. It is more realistic to estimate the watershed sediment yield when considering the mechanism of landslide and soil erosion. Therefore, this approach can be used as reference in the design of disaster prevention projects, and improve the efficiency of watershed management works.

## 一、前言

民國 93 年 7 月敏督利颱風引進強烈之西南氣流，造成連日豐沛雨量，進而引起台灣多處山區發生土砂災害，尤以中部地區的台中縣及南投縣等地最為嚴重，如大甲溪流域台八縣道公路路基沖毀及交通中斷；大甲溪河道劇烈抬昇及洪水位抬高等現象，致大甲溪發電廠各分廠遭受嚴重程度災損，廠房電機設備損失無法發電；大甲溪松鶴部落受土石流及洪水重創，造成三十戶以上人家無家可歸等災情 [1,2]。於同年 8 月間之艾利颱風挾帶豪大雨導致石門水庫集水區內多處崩塌，造成石門水庫集水區取水口泥砂淤積及水質濁度過高，使得桃園地區停水達 17 日之久 [3]。

由此可知，當集水區內之土砂產量過多時，除了會造成交通結構物的受損，人民的生活不便之外，更嚴重的還可能造成生命財產之損失，故集水區土砂產量推估是集水區治理與流域防災工作中首要的一環。而因台灣之特有地質、地形及氣候條件，常造成颱風豪雨等短暫暴雨事件而導致集水區內之表土遭受沖刷以及上游坡地發生崩塌，使得大量土砂經由河道流至集水區出口；但集水區土砂產量推估常因時空因素無法合理精確進行，連帶影響集水區治理與防災工作之執行效果。為此，如何較精確地推估暴雨期間集水區坡地崩塌及土壤沖蝕所產生之土砂產量，是集水區治理工作之首要重點。

由於真實集水區土壤沖蝕機制甚為複雜，近年來之推估方法大多根據現場量測資料，再配合統計方法與迴歸分析方式建立經驗公式，如以美國農業部所開發之 USLE (Universal Soil Loss Equation, USLE) 公式進行集水區內表土沖蝕之年平均產量計算 [4-9]，或是而後發展出可計算單場降雨下土壤沖蝕量之 MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE) 公式 [10-12]，但因均屬於經驗公式，較無法符合於暴雨時序下真實之集水區產砂機制。另一方面，集水區之土砂來源除了土壤沖蝕量外，暴雨造成坡地崩塌土方量之貢獻亦相當可觀，921 地震後尤甚 [13]，顯見對於集水區土砂生產量之推估，必須同時考慮非點狀來源之坡面土壤沖蝕量與點狀來源之坡地崩塌量兩種類型。故本研究利用可考量到降雨時序，並可同時考量坡面

土壤沖蝕量及坡地崩塌量之模式來進行短暫暴雨期間 (以小時為單位) 集水區土砂產量推估之研究，以完善集水區土砂產量推估工作，且其研究成果可提供治理單位作為流域管理、集水區防災工程設計參考，使得集水區整治更能符合經濟效益。

## 二、暴雨時期集水區土砂產量推估模式建立

Fuller 等人指出，在自然界中影響河道中輸砂量的多寡主要有兩個原因，一是河流的傳輸能力，另一個是由山坡上傳輸至河道內之土砂量體變化 [14]。影響河流傳輸能力主要為降雨量所造成之地表逕流大小，而由山坡上傳輸至河道內之土砂量體來源主要來自兩方面，一是降雨產生地表逕流造成坡地土壤沖蝕，另一方面是因降雨或其他外在擾動因素所引起之坡地崩塌；故本研究認為，可完整考量集水區內土砂產量推估模式之概念應包含：(1) 具有時序性之降雨、(2) 非點狀土砂來源之坡面土壤沖蝕量、(3) 點狀土砂來源之坡地崩塌量，以及 (4) 河道輸送機制。圖 1 為本研究依據前述理論彙整擬訂之集水區土砂產量推估模式概念圖，即為以降雨—逕流、土砂生產及土砂輸送等三種機制所擬訂之集水區土砂產量推估流程。

為了能達成上述目的完整地進行集水區內之土砂產量推估，本研究利用由美國環保署 (USEPA) 與 Hydrocomp Inc. 所共同發展之 HSPF (Hydrological Simulation Program Fortran, HSPF) 模式進行集水區內之土砂產量推估。HSPF 模式之模擬原理與方法說明如下：

1. 採用運動波理論演算水由一河段移動至下一河段的計算方法，並依照水流的路徑模擬降水後經過土壤，河川至水庫或湖泊的水理和水質變化過程。
2. 水量的模擬是依質量與能量守恆，模擬降水經過植物的截留與蒸發，雪的堆積與融解，然後分配於地表逕流、中間流 (土壤層) 和地下水流的過程。
3. 沉積物的模擬包括土壤的分離、沉積物的運移、土壤再回附和河道的運移等過程，土壤的分離只考慮雨滴的衝擊，河道的運移則考慮懸浮載和底床載。

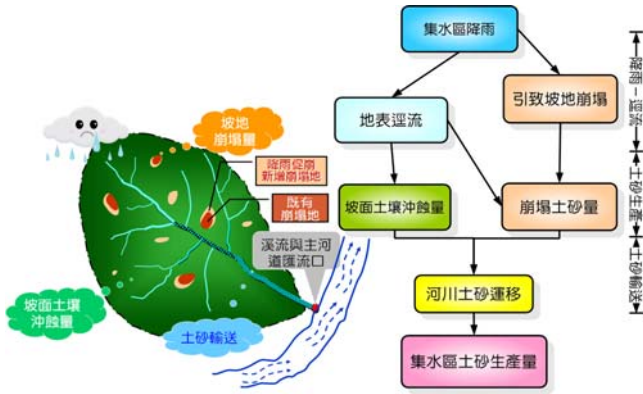


圖 1 本研究擬定之集水區土砂產量推估模式概念及流程圖

4. 集水區依地形分成不規則形狀的子集水區，河道分段，水庫或湖泊則僅是為一完全混河的水體。

HSPF 模式主要是使用連續性降雨資料，並可依空間分布加入點狀來源之崩塌量以計算河川之水文歷線及輸砂量歷線；其模式中包含許多模組，本研究主要使用透水區 (PERLND) 模組及河道 (RCHRES) 模組兩部分。其中 PERLND 模組包含集水區透水部分之逕流模擬 (PWATER 模組) 及土壤沖蝕、運移模擬 (SEDMNT 模組)，而 RCHRES 模組是將 PERLND 模組所計算之子集水區逕流量及輸砂量匯入河道，再經由河道水理演算 (HYDR 模組) 及河道輸砂演算 (SEDTRN 模組) 進行河段水理及輸砂的模擬，最後可得總逕流量及土砂產量。茲依據三種集水區土砂產量推估之機制，分別將各模組演算流程及使用參數概要說明如下。

### 2.1 降雨—逕流模擬

降雨逕流模組 (PWATER) 功能在模擬集水區內透水區之總逕流量，考慮的因子有降雨、植生截流、土壤入滲、地表窪蓄、地表漫地流、土壤之中間流、地下水流及蒸發散因子，而其水流運動匯成總流量之途徑有三種，即地表逕流、中間流和地下水流。以下針對此模組中之重要副程式進行相關說明。

#### 1. 透水區分配地表水量—副程式 SURFAC

HSPF 模式將地表水量分成地表滯蓄量、地表逕流量、入滲量、活動地下水。平均入滲量  $IBAR$  之計算，是依據菲利浦公式 (Philip's Equation, 1957)，其計算公式如下：

$$IBAR = INFILT / (LZS / LZSN)^{INFEXP} \quad (1)$$

$$IMAX = INFILD \times IBAR \quad (2)$$

$$IMIN = IBAR - (IMAX - IBAR) \quad (3)$$

$$RATIO = INTFW \times 2^{(LZS / LZSN)} \quad (4)$$

其中， $IBAR$ ：平均入滲量 ( $in/\Delta t$ )、 $INFILT$ ：滲透參數 ( $in/\Delta t$ )、 $IMAX$ ：最大入滲量 ( $in/\Delta t$ )、 $INFILD$ ：最大入滲量與平均入滲量之比值、 $IMIN$ ：最小入滲量 ( $in/\Delta t$ )、 $INTFW$ ：

中間流參數、 $RATIO$ ：中間流加入滲能力與入滲能力座標軸之比、 $LZS$ ：下層土壤名義含水量。

#### 2. 地表逕流模擬—副程式 PROUTE

利用 Chezy-Manning 公式與相對於出流深度及滯留之經驗公式，以決定地表逕流。其計算公式如下：

當  $SURSM < SURSE$  (降雨時的地表逕流)

$$SURO = DELT_{60} \times SRC \times \left\{ SURSM \times \left[ 1.0 + 0.6 \left( SURSM / SURSE \right)^3 \right] \right\}^{1.67} \quad (5)$$

當  $SURSM \geq SURSE$  (停止降雨時的地表逕流)

$$SURO = DELT_{60} \times SRC \times (SURSE \times 1.6)^{1.67} \quad (6)$$

其中， $SURSM$ ：在時間段內之平均地表滯流量 ( $in$ )、 $SURSE$ ：平衡時之地表滯留量 ( $in$ )、 $SURO$ ：地表逕流 ( $in/\Delta t$ )、 $DELT_{60}$ ：時間間格 /60 ( $in/\Delta t$ )、 $SRC = 1020 \times (SLSUR^{0.5} / NSUR \times LSRU)$ 、 $SLSUR$ ：漫地流坡度、 $NSUR$ ：漫地流之 Manning  $n$  值、 $LSUR$ ：漫地流長度 ( $ft$ )。

#### 3. 中間流模擬—副程式 INTFLW

假設中間流與蓄水量成線性關係，則中間流為退水參數、入流量和起始蓄水量之函數，可以下式表示：

$$IFWO = (IFWK1 \times INFLO) + (IFWK2 \times IFWS) \quad (7)$$

其中， $IFWO$ ：中間流出流量 ( $in/\Delta t$ )、 $INFLO$ ：中間流入流量 ( $in/\Delta t$ )、 $IFWS$ ：每個起始時間之中間流儲水量 ( $in$ )、 $IFWK1 = 1 - (IFWK2 / KIFW)$ 、 $IFWK2 = 1 - \exp(-KIFW)$ 、 $KIFW = -ALOG(IRC) \times (DELT_{60} / 24)$ 、 $IRC$ ：中間流之每日退水參數。

#### 4. 模擬地下水流—GWATER

經由下層土壤滲漏至地下水層後，水量分別注入活動地下水層及地下呆水層，活動地下水將流至河道形成河川基流。此將形成河川基流之活動地下水流量，以下式估算：

$$AGWO = KGW \times (1 + KVARY \times GWVS) \times AGWS \quad (8)$$

其中， $AGWO$ ：活動地下水出流量 ( $in/\Delta t$ )、 $KGW$ ：地下水流退參數 ( $in/\Delta t$ )、 $KVARY$ ：地下水儲存量與地下水出流量成非線性關係之參數、 $GWVS$ ：地下水坡度指數 ( $in$ )、 $AGWS$ ：地下水初始蓄水量 ( $in$ )。

### 2.2 土砂生產模擬

主要分為兩部分，為非點狀來源之坡面土壤沖蝕量及點狀來源之坡地崩塌量。

#### 2.2.1 坡面土壤沖蝕量

泥砂生成及運移模擬模組 (SEDMNT) 之功能在模擬集水區內透水區之坡面土壤沖蝕量。其主要原理為坡面上之表土在受到自然因素如風、降雨等，以及人為因素影響後造成表土剝離，再受漫地流作用而產生表土沖刷。此模組主要模擬泥砂從土體中分離 (降雨衝擊)、沖刷、附著及傳輸運移現象。以下針對此模組中之重要副程式進行相關說明。

### 1. 土壤之分離—副程式 DETACH

此副程式主要模擬雨滴對土壤體所形成之分離作用。雨滴之動能產生土壤中之顆粒分離，然後經由地表逕流，運移至溝渠，此分離量可用下式表示：

$$DET = DET_{60} \times (1 - CR) \times SMPF \times KRER \times (RAIN / DELT_{60})^{JRER} \quad (9)$$

其中， $DET$ ：分離率 ( $tones/acre/\Delta t$ )、 $DELT_{60}$ ：每個演算時距的小時數 ( $hr/\Delta t$ )、 $CR$ ：地表覆蓋百分比、 $SMPF$ ：地表操作管理因子、 $KRER$ ：土壤分離係數、 $RAIN$ ：降雨強度 ( $in/\Delta t$ )、 $JRER$ ：土壤分離指數。

### 2. 泥砂運移—副程式 SOSEDI

主要模擬分離後泥砂顆粒之流失率及水流直接對土體之沖刷率。由前面副程式 DETACH 可計算出土壤受到雨水撞擊造成之分離率，乘上演算時距後可得到分離後之土壤儲存量，受到漫地流運移能力影響可計算出土壤流失率。漫地流運移能力可以下式表示：

$$STCAP = DELT_{60} \times KSER \times ((SURS + SURO) / DELT_{60})^{JSER} \quad (10)$$

其中， $STCAP$ ：沉滓運移能力 ( $tones/acre/\Delta t$ )、 $KSER$ ：運移係數、 $SURS$ ：降雨形成漫地流儲蓄量 ( $in$ )、 $SURO$ ：地表流出量 ( $in$ )、 $JSER$ ：泥砂運移指數。

流失率之決定如下：

$$\text{當運移能力} > \text{分離土壤儲存量} \\ WSSD = DETS \times SURO / (SURS + SURO) \quad (11)$$

$$\text{當運移能力} < \text{分離土壤儲存量} \\ WSSD = STCAP \times SURO / (SURS + SURO) \quad (12)$$

其中， $WSSD$ ：流失率 ( $tones/acre/\Delta t$ )、 $DETS$ ：分離後之土壤儲存量 ( $tones/acre$ )。而  $DETS$  為  $DET$  乘上演算時距  $\Delta t$ 。

沖刷率可由下式計算：

$$SCRSD = [SURO / (SURS + SURO)] \times DELT_{60} \times KGER \times ((SURS + SURO) / DELT_{60})^{JGER} \quad (13)$$

其中， $SCRSD$ ：沖刷率 ( $tones/acre/\Delta t$ )、 $KGER$ ：沖刷係數、 $JGER$ ：沖刷指數。

總沖蝕率 = 流失率 + 沖刷率

### 3. 土壤回附—副程式 ATTACH

主要目的在計算因壓密作用而在回附於土壤體之附著率，計算公式如下：

$$DTA = DT \times (1 - AF) \quad (14)$$

其中， $DTA$ ：附著率 ( $tones/acre/\Delta t$ )、 $DT$ ：分離後之土壤儲存量 ( $tones/acre$ )、 $AF$ ：附著係數。

#### 2.2.2 坡地崩塌量

在估算集水區內坡地崩塌土砂量的方法上，目前主要可分為兩種，其一為進行既有崩塌土砂量計算，另一種為

豪雨引發之潛在崩塌量推估。既有崩塌量計算上，主要使用之方式為以遙測資料進行既有崩塌地土砂量推估 [18-21]；而於預測豪雨事件下所引發之崩塌量推估方式中，以日本打荻式統計經驗法 [22] 居多 [2,12,23,24]，但若以打荻氏統計經驗法進行坡地潛在崩塌量之推估，其公式內之參數  $K$  與  $r$  需要多期颱風事件前後之航照或衛星影像資料相互比對，如此使得預測精確度會受到遙測資料多寡之影響，並可能存在地域性問題。故本研究採用基於物理與力學概念之定率式分析法 (TRIGRS 程式, Baum 等人)，透過極限平衡法求解於不同降雨條件下廣域範圍內各邊坡單元之穩定性 (或安全係數)，來求解集水區大尺度範圍內所有邊坡單元於降雨入滲條件下之崩塌潛勢，以推估集水區內因暴雨所誘發之潛在坡地崩塌量。

而於 HSPF 模式中，可另加入如點狀來源 (Point Source) 之坡地崩塌量，同時進行土砂傳輸估算 [26]，因此本研究利用 HSPF 下之點源模組，將崩塌量分別輸入各子集水區中，建立崩塌地位置與各集水區中之空間關係後，即可模擬有多少位於集水區內之既有崩塌量進入河道輸送至下游，並可藉此探討集水區崩塌地土砂量之運移率。

### 2.3 土砂輸送模擬

HSPF 模式內之河道輸送模組包含兩部分，分別為河道水理模擬模組 (HYDR) 以及河道泥砂運移模擬模組 (SEDTRN)，說明如下。

#### 1. 河道水理模擬模組—HYDR

河道水理模擬過程係以動量方程式模擬水理行為，並利用深度、體積及流量關係，建立河段之幾何形狀，演算其水理特性。主要演算方式如下：

$$VOL - VOLS = IVOL + PRSUPY - VOLEV - ROVOL \quad (15)$$

其中， $VOL$ ：模擬時間內的最終水量 ( $ft^3$ )、 $VOLS$ ：模擬時間內之初始水量 ( $ft^3$ )、 $IVOL$ ：入流量 ( $ft^3$ )、 $PRSUPY$ ：河段區的降雨量、 $VOLEV$ ：蒸發量、 $ROVOL$ ：出流量 =  $(KS \times ROS + COKS \times ROD) \times DELTS$ 、 $KS$ ：權因子 ( $0 \leq KS \leq 0.99$ )、 $COKS = 1 - KS$ 、 $ROS$ ：模擬時距開始的河段總出流率、 $ROD$ ：模擬時距開始的最終總需求出流率、 $DELTS$ ：模擬時距 (sec)。

地表逕流水量，中間流及活動地下水量進入河段中，藉由 HSPF 模式之 RCHRES 模組下的 HYDR 模組模擬河段水理行為，HSPF 以運動波方法演算水由一河段移至下一河段的水力演算，其假設水流出的河段之橫斷面為一常數，所以應用在特殊斷面 (如堰等) 則會有演算上的困難。

#### 2. 河道泥砂運移演算模組—SEDTRN

在 HSPF 模式當中，河道中的總沉滓可分為砂 (Sand)、粉砂 (Silt) 及黏土 (Clay) 三大類，其中：

##### a. COHESV 模擬粉土與黏土之沉降、沖刷與傳輸

主要運動情況是以底床所產生之剪應力大小而決定，可決定在該河段中泥砂運行情況為沉澱或沖刷，若底床剪應力小於沉澱臨界剪應力則產生沉澱。

$$D = W \times CONC \times (1 - TAU / TAU CD) \quad (16)$$

若底床剪應力大於沖刷臨界剪應力，則產生沖刷。

$$S = M \times (TAU / TAUCS - 1) \quad (17)$$

其中， $D$ ：懸移固體沉澱率 ( $lb/ft^2/\Delta t$ )、 $W$ ：懸移固體沉降速度 ( $in/\Delta t$ )、 $CONC$ ：懸移固體濃度 ( $lb/ft^3$ )、 $S$ ：底床沖刷率 ( $lb/ft^2/\Delta t$ )、 $M$ ：底床沖刷係數、 $TAU$ ：底床剪應力 ( $lb/ft^2$ )、 $TAUCD$ ：沉澱臨界底床剪應力 ( $lb/ft^2$ )、 $TAUCS$ ：沖刷臨界底床剪應力 ( $lb/ft^2$ )。

b. SANDLD 模擬砂之沉降、沖刷與傳輸

假設攜帶容量可以速度之冪次函數計算，則其計算公式如下所示：

$$PSAND = KSAND \times AVVELE^{EXPSAND} \quad (18)$$

其中， $PSAND$ ：潛勢沉澱攜帶容量 ( $lb/ft^3$ )、 $KSAND$ ：係數項、 $AVVELE$ ：平均速度 ( $ft/sec$ )、 $EXPSAND$ ：指數項。

模擬區間中，砂的潛勢出流量表示為：

$$PROSND = SANDS \times SROVOL + PSAND \times EROVOL \quad (19)$$

其中， $ROSAND$ ：砂的潛勢出流量 ( $lb/\Delta t$ )、 $SANDS$ ：起始砂的濃度 ( $lb/ft^3$ )、 $SROVOL$ ：演算時距開始時的出流量 ( $cfs$ )、 $PSAND$ ：砂的潛勢攜帶容量 ( $lb/ft^3$ )、 $EROVOL$ ：演算時距終了時的出流量 ( $cfs$ )。

### 三、模式率定與驗證

#### 3.1 研究區域概述

本研究擇定以花蓮縣秀林鄉內之 26 條土石流潛勢溪流集水區做為研究區域。秀林鄉位於花蓮縣北部，面積約 1642 平方公里，佔花蓮縣總面積的三分之一，其地勢西高東低，如圖 2 所示，地形區塊主要可分為兩區，西邊為中央山脈區，東邊為花東縱谷區，高程分布為 0 至 3822 m 之間。其境內主要之地層為大南澳片岩，如圖 3 所示，崩塌地亦多分布於此地質區中。

秀林鄉境內之 26 條土石流潛勢溪流主要分布在太魯閣沿海河流域及花蓮溪流域，如圖 4 所示，故本研究分別針對此兩個流域進行模式參數之率定及驗證，以供各條土石流潛勢溪流進行集水區內土砂產量模擬使用。太魯閣沿海河流域內之水文觀測站為「綠水」站，花蓮溪流域內之水文觀測站為「仁壽橋」站，本研究使用此兩站之實際流量及泥砂量觀測資料來進行土壤沖蝕量模式之率定。

#### 3.2 集水區土砂產量模式率定

本研究首先利用 BASINS [27] 程式進行「綠水」站集水區及「仁壽橋」站之集水區劃設，並推求各子集水區之地文特性，劃設得此兩站之子集水區與河系分布如圖 5 所示。其中綠水集水區面積為 427.6  $km^2$ ，仁壽橋集水區面積為 416.9  $km^2$ 。

由圖 5 可知，「綠水」集水區內有中央氣象局之天祥、洛韶、慈恩雨量站，以及台灣電力公司的洛韶及合歡堰口

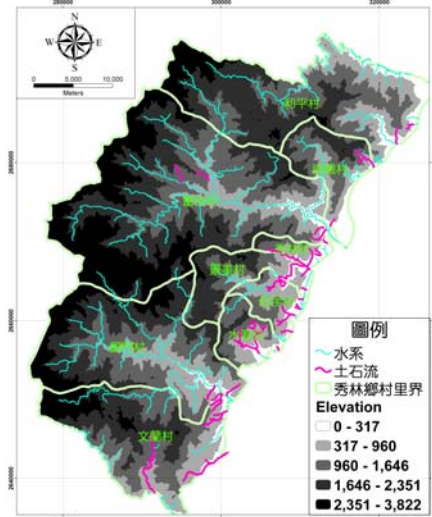


圖 2 秀林鄉高程分布圖

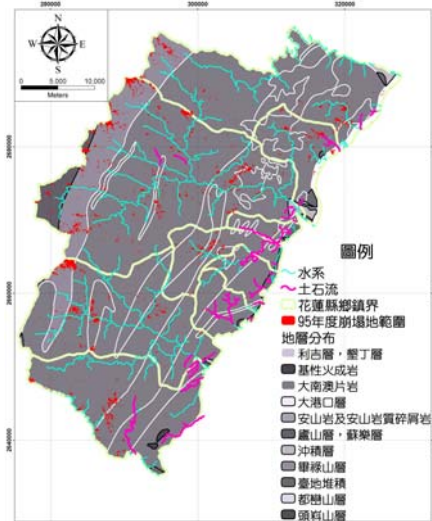


圖 3 秀林鄉地質及崩塌地分布圖

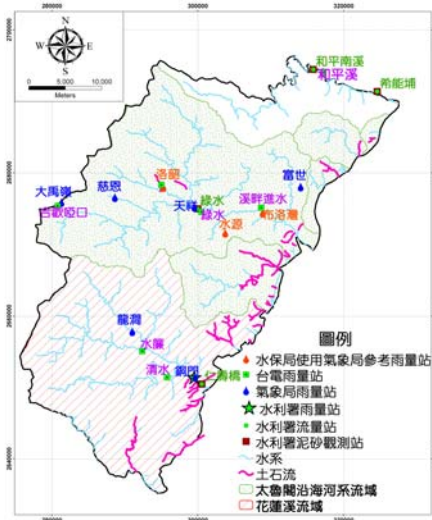


圖 4 秀林鄉境內土石流潛勢溪流及觀測站分布

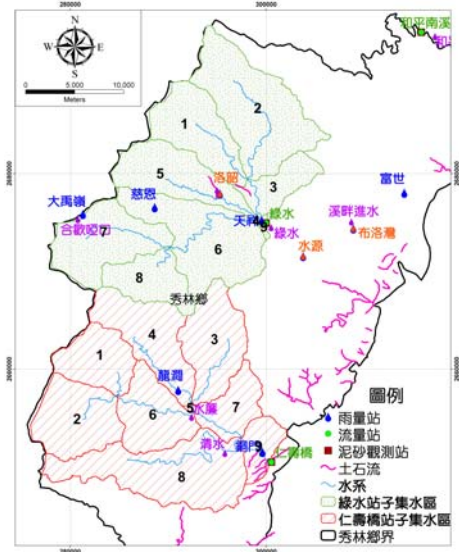


圖 5 綠水及仁壽橋集水區之子集水區及河系分布圖

雨量站共 5 站，本研究利用徐昇式多邊形網的方法來求得集水區之平均雨量，其 5 個雨量站所佔的比例如表 1 所示。而於「仁壽橋」集水區中，共有中央氣象局之銅門、龍澗雨量站，台灣電力公司的水簾及清水站，以及經濟部水利署的銅門站；唯台灣電力公司的水簾及清水站僅紀錄至 2000 年止，無較新的雨量紀錄，故本研究不採納此兩站之雨量紀錄進行資料分析，故僅使用其餘 3 個雨量站來進行徐昇氏多邊形網之計算，其 3 個雨量站所佔的比例如表 2 所示。

另本研究以「綠水」及「仁壽橋」水文觀測站之逐時流量觀測資料進行水文模式參數之率定標準，而由於缺乏逐時輸砂量之觀測資料，故分別以「綠水」及「仁壽橋」站由 1980 ~ 2005 年所觀測之流量與輸砂量迴歸曲線（以綠水站為例，如圖 6 所示）可得輸砂模式參數之率定曲線。

而為了求得於暴雨時期下集水區土砂產出之相關設定參數，故本研究於「綠水」站及「仁壽橋」站之流量紀錄中，分別各選定兩場颱風事件之實測逐時流量資料為程式模擬結果之比對依據，並調整輸入參數使模擬得到之流量歷線與實測值相近，同時控制模擬之尖峰流量值及總體流量值與實測值之差異在一般水工程式模擬上可接受之誤差值 20% 以內；而各個颱風之逐時雨量為模式中之雨量輸入條件。所選用事件及各事件之總雨量及最大降雨強度如表 3 所示。

而由於土砂生產相關模組之模擬結果受到降雨逕流模組之影響，故本研究之率定步驟為先率定降雨逕流模組之參數，確定無誤之後再調整土砂生產相關模組參數，才可獲得正確之結果；故率定之程序首要為降雨－逕流模擬，其次為土砂產量演算。

3.2.1 降雨逕流參數之敏感度分析及率定結果

利用 HSPF 模擬集水區之降雨逕流過程中，水流運動匯成總逕流量之途徑有三種，包括地表逕流 (Surface Runoff)、中間流 (Interflow) 及活動地下水 (Active

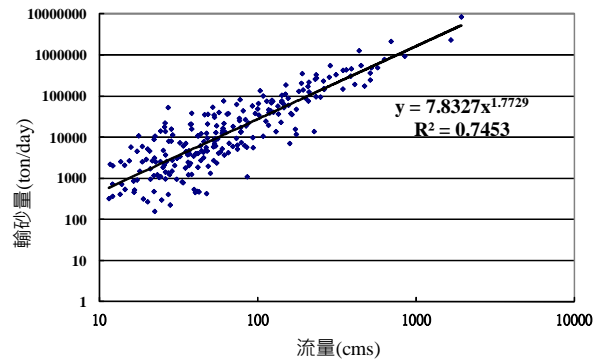


圖 6 「綠水」水文觀測站之流量與輸砂量之指數迴歸關係圖

表 1 綠水集水區內雨量站比例分配表

雨量站	徐昇氏比例
天祥	17.9%
洛韶 (氣象局)	7.4%
慈恩	28.3%
洛韶 (台電公司)	34.1%
合歡啞口	12.3%

表 2 仁壽橋集水區內雨量站比例分配表

雨量站	徐昇氏比例
銅門 (氣象局)	4.8%
龍澗	80.5%
銅門 (水利署)	14.7%

表 3 各集水區內所選用之率定颱風事件基本資料表

集水區	颱風事件名稱	雨量歷時	總降雨量 (mm)	最大降雨強度 (mm/hr)
綠水	安珀颱風	1997/08/28 ~ 1997/08/30	656.8	69.8
	碧利斯颱風	2000/08/22 ~ 2000/08/24	909.5	55.1
仁壽橋	南瑪都颱風	2004/12/03 ~ 2004/12/05	583.5	52.3
	龍王颱風	2005/10/01 ~ 2000/10/03	407.4	73.2

Groundwater Flow)。理論上在調整參數時，需要分離比較三部分流量之模擬值與實際觀測值，然而由於受限於缺乏完整資料，實際上並不容易將各種水流運動流量分別予以比較，故本研究將針對總逕流量模擬值作參數檢定之工作。

綜合前人研究 [28-32] 及本研究於參數輸入與調整時可知，集水區之降雨逕流模擬共有 INTFW (中間流入滲參數)、IRC (中間流退水率)、INFILT (入滲能力指標)、LZSN (下層土壤含水量) 及 UZSN (上層土壤含水量) 等五個參數較為敏感。其中，INTFW 及 IRC 屬於高敏感度之參數，增加 INTFW，表示進入地表下的中間流量增多，使退水段部分緩慢降低，同時亦減低尖峰流量，故可利用 INTFW 數

值之改變，來增加或降低尖峰流量，並調整退水段水量，讓模擬出來的逕流歷線可與觀測值相符。IRC 會影響逕流歷線退水段之下降速率，若使用較低的值，會有較快的退水速率，即退水段斜率較陡；反之，則有較緩的退水曲線。而 LZSN 和 INFILT 對於水量之平衡有重要之影響，增加 LZSN 將減少逕流量；增加 INFILT 即代表入滲容量增加，也將減少逕流量；另外 UZSN 可用來調整歷線之初始及上升部分，當降低 UZSN 時，上升歷線會較早陡升，反之較慢。在河道之水理演算部分，其中必須輸入河道斷面幾何特性以及河段之長度、坡度等資料，並無需要調整之參數。上述高敏感參數之率定範圍值及其對於降雨逕流模擬結果之影響如表 4 所示。

率定過程中，本研究針對上述五個高敏感度參數進行調整，並將率定目標定為程式模擬之尖峰流量值及總體流量值與實測值之差異在 20% 以內。率定結果說明如下。

一、綠水集水區

其模擬得之流量歷線與觀測值之流量歷線比較如圖 7(a) 圖 7(b) 所示；各事件模擬之尖峰流量及總體流量與觀測值之差異比例如表 5 所示。由表中可知，1997 年安珀颱風事件之流量尖峰值誤差為 8.1%，流量總體積誤差為 14.4%；2000 年碧利斯颱風事件之流量尖峰值誤差為 5.2%，流量總體積誤差為 8.2%。各事件經由率定後之降雨逕流參數總表如表 6 所示。

二、仁壽橋集水區

其模擬得之流量歷線與觀測值之流量歷線比較如圖 8(a) 及圖 8(b) 所示；各事件模擬之尖峰流量及總體流量與觀測值之差異比例如表 7 所示。由表中可知，2004 年南瑪都颱風事件之流量尖峰值誤差為 7.0%，流量總體積誤差為 11.3%；2005 年龍王颱風之流量尖峰值誤差為 9.8%，流量總體積誤差為 14.8%。各事件經由率定後之水文參數總表如表 8 所示。

3.2.2 土砂產量模組參數之敏感度分析及率定結果

HSPF 在集水區之土壤沖蝕模擬過程中包括沖擊、分離、沖刷及運移等。其沖蝕之途徑主要有二種，即分離後土壤之流失及水流對土壤之直接沖刷。

在土壤的分離模擬當中，計算使用到 JRER 此敏感度較高之參數。JRER 為土壤分離指數，其與分離率成正比關係，故增加其值，分離率增加，懸浮固體量也就增加。

在土壤的沉澱運移方面，計算上和 JSER 以及 JGER 兩個高敏感度之參數有絕對之關係。運移指數 JSER 和運移能力成正相關，故增加 JSER 即可增加模擬土壤沖蝕量，同時可用來調整其產量起始值之高低；沖蝕指數 JGER 和直接沖刷率成正相關，故增加 JGER 亦可增加模擬土壤沖蝕量。

另外敏感度較次之 SMPF 為地表管理因子，代表防止土壤沖刷措施之好壞，其值介於 0~1 之間，越接近 0 表示管理越佳，土壤流失也就較少，所以增加 SMPF 值，懸浮固體物量越大。土壤覆蓋率 (COVER) 則表示地表植被覆蓋情形，參數值愈接近 1 表示地表覆蓋愈佳，土壤不易被沖刷，產生的懸浮固體量會減少。

表 4 HSPF 水文模組高敏感度參數說明表

參數名稱 (單位)	定義	模式建議範圍值	物理意義	值增加對逕流量之影響
INTFW (無)	中間流入滲參數	0 ~ none	決定地表水傳遞成為中間流之量體	尖峰流量減少 總逕流量減少
IRC (1/day)	中間流退水率	$1 \times 10^{-30}$ ~ 0.999	1. 決定中間流成為地下水基流之量體 2. 增加其值逕流歷線退水段之下降速率變陡	總逕流量減少
LZSN (in)	下層土壤名義含水量	0.01 ~ 100	決定地下水儲水量多寡	總逕流量減少
INFILT (in/hr)	入滲能力指標	0.0001 ~ 100	決定地下水出流量多寡	總逕流量減少
UZSN (in)	上層土壤名義含水量	0.01 ~ 10	1. 決定滯留於土壤上層之含水量多寡 2. 增加其值逕流歷線初始段上升斜率較緩	總逕流量減少

表 5 綠水集水區各颱風事件之降雨逕流參數率定結果表

颱風事件	尖峰值誤差 (%)	總體積量誤差 (%)
1997年安珀颱風	8.1	14.4
2000年碧利斯颱風	5.2	8.2

表 6 綠水集水區率定後之降雨逕流參數表

參數名稱	定義	單位	範圍值	率定值
<b>PWATER 模組</b>				
LZSN	下層土壤名義含水量	in	0.01 ~ 100	$3^1 \sim 3.1^2$
INFILT	入滲能力指標	in/hr	0.0001 ~ 100	$0.2^2 \sim 0.28^1$
LSUR	漫地流長度	ft	1 ~ none	依 GIS 量測
SLSUR	漫地流坡度	-	$1 \times 10^{-7} \sim 10$	依 GIS 量測
KVARY	地下水出流參數	1/cm	0 ~ none	0
AGWRC	地下水退水率	1/day	0.001 ~ 0.999	0.98
INFEXP	入滲公式指數	-	0 ~ 10	2
INFILD	最大與平均入滲量比值	-	1 ~ 2	2
DEEPER	地下水入滲參數	-	0 ~ 1	0.1
BASETP	基流蒸發散參數	-	0 ~ 1	0.02
AGWETP	地下水流蒸發散參數	-	0 ~ 1	0
CEPSC	截流量	in	0 ~ 10	0.1
UZSN	上層土壤名義含水量	in	0.01 ~ 10	0.5
NSUR	曼寧 N 值	-	0.001 ~ 1	0.2
INTFW	中間流入滲參數	-	0 ~ none	2.5
IRC	中間流退水率	1/day	$1 \times 10^{-30} \sim 0.999$	$0.2^1 \sim 0.6^2$
LZETP	下層土壤蒸發散參數	-	0 ~ 1.5	0.1
<b>HYDR 模組</b>				
LEN	河段長度	miles	0.01 ~ none	依 GIS 量測
DELTH	河段上下游水位差	ft	0.0 ~ none	依 GIS 量測
KS	水力路徑之權因子	-	0 ~ 0.99	0.5

註：<sup>1</sup>為 1997 年安珀颱風 <sup>2</sup>為 2000 年碧利斯颱風

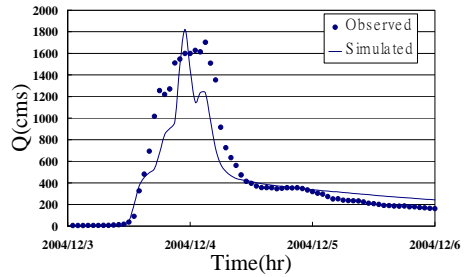
表 7 仁壽橋流域站各颱風事件之降雨逕流參數率定結果表

颱風事件	尖峰值誤差 (%)	總體積量誤差 (%)
2004 南瑪都颱風	7.0	11.3
2005 龍王颱風	9.8	14.8

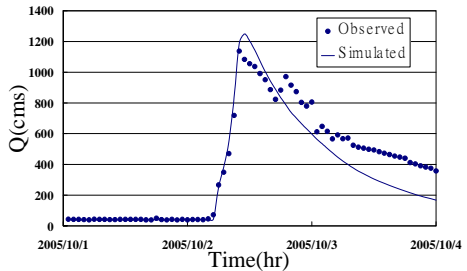
表 8 仁壽橋集水區率定後之降雨逕流參數表

參數名稱	定義	單位	範圍值	率定值
<b>PWATER 模組</b>				
LZSN	下層土壤名義含水量	in	0.01 ~ 100	3
INFILT	入滲能力指標	in/hr	0.0001 ~ 100	0.4 <sup>1</sup> ~ 0.6 <sup>2</sup>
LSUR	漫地流長度	ft	1 ~ none	依 GIS 量測
SLSUR	漫地流坡度	-	1 × 10 <sup>-7</sup> ~ 10	依 GIS 量測
KVARY	地下水出流參數	1/cm	0 ~ none	0
AGWRC	地下水退水率	1/day	0.001 ~ 0.999	0.98
INFEXP	入滲公式指數	-	0 ~ 10	2
INFILD	最大與平均入滲量比值	-	1 ~ 2	2
DEEPEP	地下水入滲參數	-	0 ~ 1	0.1
BASETP	基流蒸發散參數	-	0 ~ 1	0.02
AGWETP	地下水流蒸發散參數	-	0 ~ 1	0
CEPSC	截流量	in	0 ~ 10	0.1
UZSN	上層土壤名義含水量	in	0.01 ~ 10	0.25 <sup>1</sup> ~ 0.5 <sup>2</sup>
NSUR	曼寧 N 值	-	0.001 ~ 1	0.2
INTFW	中間流入滲參數	-	0 ~ none	2.5 <sup>1</sup> ~ 4.5 <sup>2</sup>
IRC	中間流退水率	1/day	1 × 10 <sup>-30</sup> ~ 0.999	0.2 <sup>2</sup> ~ 0.7 <sup>1</sup>
LZETP	下層土壤蒸發散參數	-	0 ~ 1.5	0.1
<b>HYDR 模組</b>				
LEN	河段長度	miles	0.01 ~ none	依 GIS 量測
DELTH	河段上下游水位差	ft	0.0 ~ none	依 GIS 量測
KS	水力路徑之權因子	-	0 ~ 0.99	0

註：<sup>1</sup>為2004年南瑪都颱風，<sup>2</sup>為2005年龍王颱風



(a) 2004 年南瑪都颱風事件



(b) 2005 年龍王颱風事件

圖 8 仁壽橋集水區颱風事件流量模擬率定結果

在河道輸砂演算方面，模式中考慮河床載（利用考慮水流平均流速之冪級數函數進行運算）之運送，必須由 SEDMNT 模組所計算出的土壤沖蝕量輸入河道當中，另於輸砂演算中，需使用到 KSAND 及 EXPSND 兩個敏感度較高之參數，此二參數和沉滓攜帶容量成正相關，故增加此二參數，皆會提高河道內之輸砂量。上述高敏感參數之率定範圍值及其對於土砂產量之影響如表 9 所示。

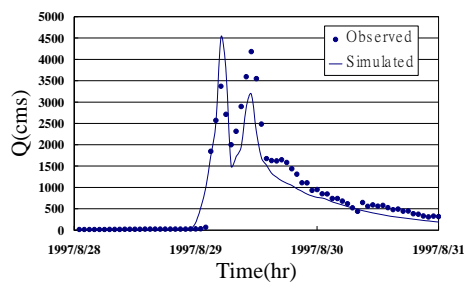
率定過程中，本研究針對上述五個高敏感度參數進行調整，同樣將率定目標定為程式模擬之尖峰流量值及總體流量值與實測值之差異在 20% 以內。率定結果說明如下。

一、綠水集水區

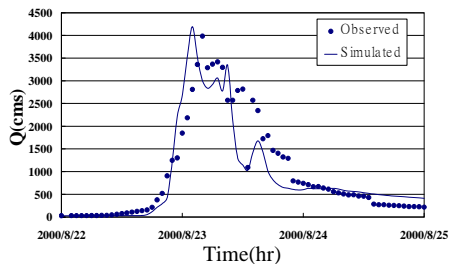
模擬得之輸砂量歷線與實測流量與輸砂量迴歸關係歷線之比較如圖 9(a) 及圖 9(b) 所示，其各事件模擬之尖峰輸砂量及總體輸砂量與「綠水」觀測站之實測流量與輸砂量迴歸關係之差異比例如表 10 所示。由表中可知，1997 年安珀颱風事件之流量尖峰誤差為 9.4%，流量總體積誤差為 16.7%；2000 年碧利斯颱風事件之流量尖峰誤差為 3.4%，流量總體積誤差為 9.8%。各事件經由率定後之土砂參數總表如表 11 所示。

二、仁壽橋集水區

模擬得之輸砂量歷線與實測流量與輸砂量迴歸關係歷線之比較如圖 10(a) 及圖 10(b) 所示，其各事件模擬之尖峰輸砂量及總體輸砂量與「仁壽橋」觀測站之流量與輸砂量迴歸關係之差異比例如表 12 所示。由表中可知，2004 年南瑪都颱風事件之流量尖峰誤差為 11.5%，流量總體積誤差為 7.9%；2005 年龍王颱風之流量尖峰誤差為 7.0%，流量總體積誤差為 2.0%。各事件經由率定後之土砂參數總表如表 13 所示。



(a) 1997 年安珀颱風事件



(b) 2000 年碧利斯颱風事件

圖 7 綠水集水區颱風事件流量模擬率定結果



表 9 HSPF 泥砂模組高敏感度參數說明表

參數名稱 (單位)	定義	模式建議 範圍值	物理意義	值增加對 土砂 產量之影響
JRER (無)	土壤分離 指數	none	決定土壤 分離量多寡	增加 土砂產量
JSER (無)	分離泥砂之 沖刷指數	none	決定泥砂運移能力	增加 土砂產量
JGER (無)	土壤沖 蝕指數	none	決定集水區泥砂 沖刷能力	增加 土砂產量
KSAND (無)	泥砂沉滓 公式 係數	0 ~ none	決定河川泥砂沉滓 攜帶容量多寡	增加 土砂產量
EXPSND (無)	泥砂沉滓 公式 指數	0 ~ none	決定河川泥砂沉滓 攜帶容量多寡	增加 土砂產量

表 10 綠水集水區各颱風事件之土砂參數率定結果表

颱風事件	尖峰值誤差 (%)	總體積量誤差 (%)
1997 年安珀颱風	9.4	16.7
2000 年碧利斯颱風	3.4	9.8

表 11 綠水集水區率定後之土砂參數表

參數名稱	定義	單位	範圍值	率定值
<b>SEDMNT 模組</b>				
SMPF	操作管理因子	-	0.001 ~ 1	0.75
KRER	土壤分離係數	-	0 ~ none	4 <sup>2</sup> ~ 5 <sup>1</sup>
JRER	土壤分離指數	-	none	2
COVER	土壤覆蓋率	-	0 ~ 1	0.88
KSER	分離泥砂之沖 刷係數	-	0 ~ none	3 <sup>2</sup> ~ 4 <sup>1</sup>
JSER	分離泥砂之沖 刷指數	-	none	1.5 <sup>1</sup> ~ 2 <sup>2</sup>
KGER	土壤沖蝕係數	-	0 ~ none	3 <sup>2</sup> ~ 4 <sup>1</sup>
JGER	土壤沖蝕指數	-	none	1.5 <sup>1</sup> ~ 2 <sup>2</sup>
<b>SEDTRN 模組</b>				
D	有效粒徑	in	0.001 ~ 100 (Sand) 0 ~ 0.003 (Silt, Clay)	1 (Sand) 0.0029 (Silt, Clay)
W	沈澱速率	in/sec	0.02 ~ 500 (Sand) 0 ~ 0.2 (Silt, Clay)	0.1 (Sand) 0.05 (Silt, Clay)
RHO	顆粒密度	gm/cm <sup>3</sup>	1 ~ 4 (Sand) 2 ~ 4 (Silt, Clay)	4 (Sand) 3 (Silt, Clay)
KSAND	泥砂承載公式 之係數	-	0 ~ none	3 <sup>1</sup> ~ 5 <sup>2</sup>
EXPSND	泥砂承載公式 之指數	-	0 ~ none	2.4 <sup>1</sup> ~ 2.8 <sup>2</sup>
TAUCD	床底之沈澱臨 界剪應力	lb/ft <sup>2</sup>	10 <sup>-10</sup> ~ none	0.1
TAUCS	床底之沖刷臨 界剪應力	lb/ft <sup>2</sup>	10 <sup>-10</sup> ~ none	0.3
M	泥砂沖蝕係數	lb/ft <sup>2</sup> /day	0 ~ none	0.5

註：<sup>1</sup>為 1997 年安珀颱風 <sup>2</sup>為 2000 年碧利斯颱風

表 12 仁壽橋集水區各颱風事件之土砂參數率定結果表

颱風事件	尖峰值誤差 (%)	總體積量誤差 (%)
2004 南瑪都颱風	11.5	7.9
2005 龍王颱風	7.0	2.0

表 13 仁壽橋集水區率定後之土砂參數表

參數名稱	定義	單位	範圍值	率定值
<b>SEDMNT 模組</b>				
SMPF	操作管理因子	-	0.001 ~ 1	0.75
KRER	土壤分離係數	-	0 ~ none	4
JRER	土壤分離指數	-	none	2
COVER	土壤覆蓋率	-	0 ~ 1	0.88
KSER	分離泥砂之沖 刷係數	-	0 ~ none	4
JSER	分離泥砂之沖 刷指數	-	none	1 <sup>1</sup> ~ 2 <sup>2</sup>
KGER	土壤沖蝕係數	-	0 ~ none	4
JGER	土壤沖蝕指數	-	none	2
<b>SEDTRN 模組</b>				
D	有效粒徑	in	0.001 ~ 100 (Sand) 0 ~ 0.003 (Silt, Clay)	1 (Sand) 0.0029 (Silt, Clay)
W	沈澱速率	in/sec	0.02 ~ 500 (Sand) 0 ~ 0.2 (Silt, Clay)	0.1 (Sand) 0.05 (Silt, Clay)
RHO	顆粒密度	gm/cm <sup>3</sup>	1 ~ 4 (Sand) 2 ~ 4 (Silt, Clay)	4 (Sand) 3(Silt, Clay)
KSAND	泥砂承載公式 之係數	-	0 ~ none	3 <sup>1</sup> ~ 5 <sup>2</sup>
EXPSND	泥砂承載公式 之指數	-	0 ~ none	2.4 <sup>1</sup> ~ 2.8 <sup>2</sup>
TAUCD	床底之沈澱臨 界剪應力	lb/ft <sup>2</sup>	10 <sup>-10</sup> ~ none	0.1
TAUCS	床底之沖刷臨 界剪應力	lb/ft <sup>2</sup>	10 <sup>-10</sup> ~ none	0.3
M	泥砂沖蝕係數	lb/ft <sup>2</sup> /day	0 ~ none	0.5

註：<sup>1</sup>為 2004 年南瑪都颱風，<sup>2</sup>為 2005 年龍王颱風

### 3.3 集水區土砂產量模式驗證

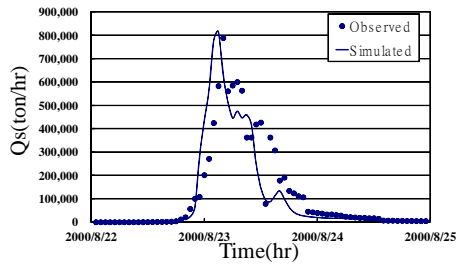
經過了上述之模式率定後，本研究分別針對綠水集水區及仁壽橋集水區各擇訂一場颱風事件來進行模式之驗證，其所選用事件及各事件之總雨量及最大降雨強度如表 14 所示。

#### 一、綠水集水區

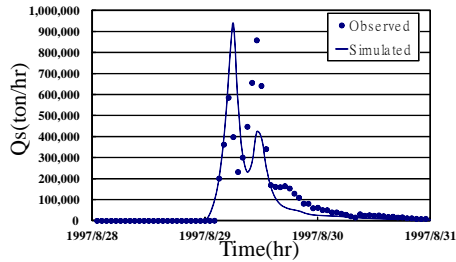
綠水集水區模擬得之流量歷線及輸砂量歷線如圖 11(a) 及圖 11(b) 所示，其模擬量體之尖峰值與總體值差異比例如表 15 所示。由表中可知，綠水集水區之水文模式所模擬之流量尖峰值與實測值之誤差為 6.0%，流量總體積值與實測值之誤差為 5.9%；土砂產量模擬之土砂量尖峰值與實測值之誤差為 2.0%，土砂量總體積值與實測值之誤差為 16.0%。驗證之降雨逕流參數及土砂參數如表 16 及表 17 所示。

#### 二、仁壽橋集水區

仁壽橋集水區模擬得之水文歷線及輸砂量歷線如圖 12(a) 及圖 12(b) 所示，其模擬量體之尖峰值與總體值差異比例如表 18 所示。由表中可知，仁壽橋集水區之水文模式

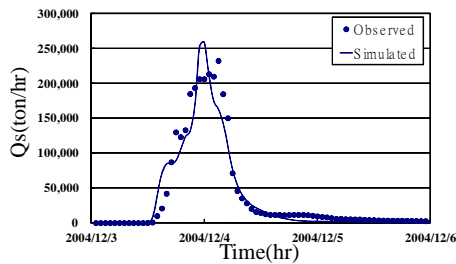


(a) 1997 年安珀颱風事件

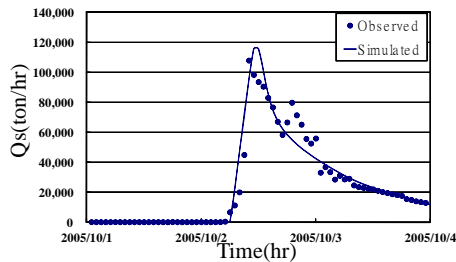


(b) 2000 年碧利斯颱風事件

圖 9 綠水集水區颱風事件輸砂量模擬率定結果



(a) 2004 年南瑪都颱風事件



(b) 2005 年龍王颱風事件

圖 10 仁壽橋集水區颱風事件輸砂量模擬率定結果

表 14 本計畫使用之驗證颱風事件基本資料表

集水區	颱風事件名稱	雨量歷時	總降雨量 (mm)	最大降雨強度 (mm/hr)
綠水	鳳凰颱風	2008/07/27 ~ 2008/07/29	497.9	42.2
仁壽橋	聖帕颱風	2007/08/17 ~ 2001/08/19	764.6	63.4

表 15 綠水集水區驗證結果表

模式類別	尖峰值差異 (%)	總體積量差異 (%)
水文模式	6.0	5.9
土砂產量模式	2.0	16.0

表 16 綠水集水區驗證之降雨逕流參數表

參數名稱	定義	單位	範圍值	率定值
<b>PWATER 模組</b>				
LZSN	下層土壤名義含水量	in	0.01 ~ 100	3
INFILT	入滲能力指標	in/hr	0.0001 ~ 100	0.25
LSUR	漫地流長度	ft	1 ~ none	依 GIS 量測
SLSUR	漫地流坡度	-	$1 \times 10^{-7} \sim 10$	依 GIS 量測
KVARY	地下水出流參數	1/cm	0 ~ none	0
AGWRC	地下水退水率	1/day	0.001 ~ 0.999	0.98
INFEXP	入滲公式指數	-	0 ~ 10	2
INFILD	最大與平均入滲量比值	-	1 ~ 2	2
DEEPER	地下水入滲參數	-	0 ~ 1	0.1
BASETP	基流蒸發散參數	-	0 ~ 1	0.02
AGWETP	地下水流蒸發散參數	-	0 ~ 1	0
CEPSC	截流量	in	0 ~ 10	0.1
UZSN	上層土壤名義含水量	in	0.01 ~ 10	0.5
NSUR	曼寧 N 值	-	0.001 ~ 1	0.2
INTFW	中間流入滲參數	-	0 ~ none	2.5
IRC	中間流退水率	1/day	$1 \times 10^{-30} \sim 0.999$	0.4
LZETP	下層土壤蒸發散參數	-	0 ~ 1.5	0.1
<b>HYDR 模組</b>				
LEN	河段長度	miles	0.01 ~ none	依 GIS 量測
DELTH	河段上下游水位差	ft	0.0 ~ none	依 GIS 量測
KS	水力路徑之權因子	-	0 ~ 0.99	0.5

表 17 綠水集水區驗證之土砂參數表

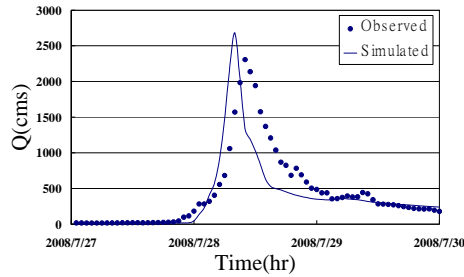
參數名稱	定義	單位	範圍值	率定值
<b>SEDMNT 模組</b>				
SMPF	操作管理因子	-	0.001 ~ 1	0.75
KRER	土壤分離係數	-	0 ~ none	4
JRER	土壤分離指數	-	none	2
COVER	土壤覆蓋率	-	0 ~ 1	0.88
KSER	分離泥砂之冲刷係數	-	0 ~ none	3
JSER	分離泥砂之冲刷指數	-	none	2
KGER	土壤冲刷係數	-	0 ~ none	3
JGER	土壤冲刷指數	-	none	2
<b>SEDTRN 模組</b>				
D	有效粒徑	in	0.001 ~ 100 (Sand) 0 ~ 0.003 (Silt, Clay)	1 (Sand) 0.0029 (Silt, Clay)
W	沈澱速率	in/sec	0.02 ~ 500 (Sand) 0 ~ 0.2 (Silt, Clay)	0.1 (Sand) 0.05 (Silt, Clay)

表 17 (續)

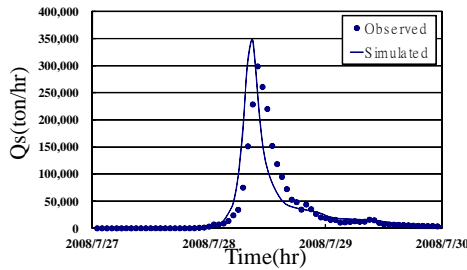
參數名稱	定義	單位	範圍值	率定值
RHO	顆粒密度	gm/cm <sup>3</sup>	1 ~ 4 (Sand) 2 ~ 4 (Silt, Clay)	4 (Sand) 3 (Silt, Clay)
KSAND	泥砂承載公式之係數	-	0 ~ none	4
EXPSND	泥砂承載公式之指數	-	0 ~ none	2.6
TAUCD	床底之沈澱臨界剪應力	lb/ft <sup>2</sup>	10 <sup>-10</sup> ~ none	0.1
TAUCS	床底之沖刷臨界剪應力	lb/ft <sup>2</sup>	10 <sup>-10</sup> ~ none	0.3
M	泥砂沖蝕係數	lb/ft <sup>2</sup> /day	0 ~ none	0.5

表 18 仁壽橋集水區驗證結果表

模式類別	尖峰值差異比例 (%)	總體積量差異比例 (%)
水文模式	4.0	3.1
土砂產量模式	3.9	6.7



(a) 流量模擬驗證結果



(b) 輸砂量模擬驗證結果

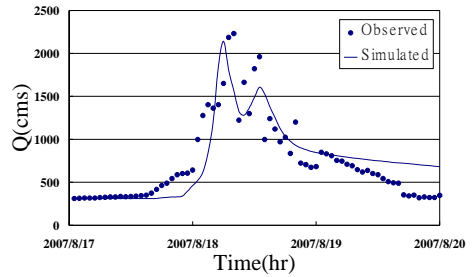
圖 11 綠水集水區 2008 年鳳凰颱風事件模擬驗證結果

所模擬之流量尖峰值與實測值之誤差為 4.0%，流量總體積值與實測值之誤差為 3.1%；土砂產量模擬之土砂量尖峰值與實測值之誤差為 3.9%，土砂量總體積值與實測值之誤差為 6.7%。驗證之降雨逕流參數及泥砂參數如表 19 及表 20 所示。

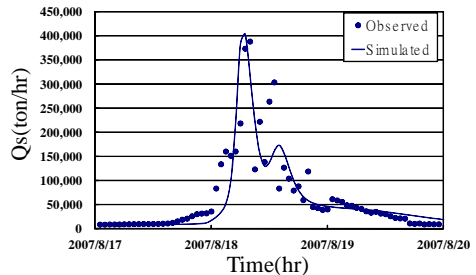
經由前述，驗證結果仍控制在誤差為 20% 之內，顯示本研究所建立之土砂產量推估模式在預測集水區土砂產量具有一定之準確度；故本研究將利用綠水站及仁壽橋站驗證完成之參數，分別使用於位於太魯閣沿海河系流域及花蓮溪流域內之土石流潛勢溪流集水區，進行其集水區土砂產量模擬。

表 19 仁壽橋集水區驗證之水文參數表

參數名稱	定義	單位	範圍值	率定值
<b>PWATER 模組</b>				
LZSN	下層土壤名義含水量	in	0.01 ~ 100	3
INFILT	入滲能力指標	in/hr	0.0001 ~ 100	0.5
LSUR	漫地流長度	ft	1 ~ none	依 GIS 量測
SLSUR	漫地流坡度	-	1 × 10 <sup>-7</sup> ~ 10	依 GIS 量測
KVARY	地下水出流參數	l/cm	0 ~ none	0
AGWRC	地下水退水率	1/day	0.001 ~ 0.999	0.98
INFEXP	入滲公式指數	-	0 ~ 10	2
INFILD	最大與平均入滲量比值	-	1 ~ 2	2
DEEPER	地下水入滲參數	-	0 ~ 1	0.1
BASETP	基流蒸發散參數	-	0 ~ 1	0.02
AGWETP	地下水流蒸發散參數	-	0 ~ 1	0
CEPSC	截流量	in	0 ~ 10	0.1
UZSN	上層土壤名義含水量	in	0.01 ~ 10	0.28
NSUR	曼寧 N 值	-	0.001 ~ 1	0.2
INTFW	中間流入滲參數	-	0 ~ none	2.8
IRC	中間流退水率	1/day	1 × 10 <sup>-30</sup> ~ 0.999	0.7
LZETP	下層土壤蒸發散參數	-	0 ~ 1.5	0.1
<b>HYDR 模組</b>				
LEN	河段長度	miles	0.01 ~ none	依 GIS 量測
DELTH	河段上下游水位差	ft	0.0 ~ none	依 GIS 量測
KS	水力路徑之權因子	-	0 ~ 0.99	0



(a) 流量模擬驗證結果



(b) 輸砂量模擬驗證結果

圖 12 仁壽橋集水區 2007 年聖帕颱風事件模擬驗證結果

表 20 仁壽橋集水區驗證之土砂參數表

參數名稱	定義	單位	範圍值	率定值
<b>SEDMNT 模組</b>				
SMPF	操作管理因子	-	0.001 ~ 1	0.75
KRER	土壤分離係數	-	0 ~ none	4
JRER	土壤分離指數	-	none	2
COVER	土壤覆蓋率	-	0 ~ 1	0.88
KSER	分離泥砂之冲刷係數	-	0 ~ none	4
JSER	分離泥砂之冲刷指數	-	none	1.5
KGER	土壤冲刷係數	-	0 ~ none	4
JGER	土壤冲刷指數	-	none	2
<b>SEDTRN 模組</b>				
D	有效粒徑	in	0.001 ~ 100 (Sand) 0 ~ 0.003 (Silt, Clay)	1 (Sand) 0.0029 (Silt, Clay)
W	沈澱速率	in/sec	0.02 ~ 500 (Sand) 0 ~ 0.2 (Silt, Clay)	0.1 (Sand) 0.05 (Silt, Clay)
RHO	顆粒密度	gm/cm <sup>3</sup>	1 ~ 4 (Sand) 2 ~ 4 (Silt, Clay)	4 (Sand) 3 (Silt, Clay)
KSAND	泥砂承載公式之係數	-	0 ~ none	4
EXPSND	泥砂承載公式之指數	-	0 ~ none	2.6
TAUCD	床底之沈澱臨界剪應力	lb/ft <sup>2</sup>	10 <sup>-10</sup> ~ none	0.1
TAUCS	床底之冲刷臨界剪應力	lb/ft <sup>2</sup>	10 <sup>-10</sup> ~ none	0.3
M	泥砂冲刷係數	lb/ft <sup>2</sup> /day	0 ~ none	0.5

#### 四、模式應用與結果分析

根據前述，本研究已建立一套暴雨時期集水區土砂產量推估模式，能同時考量非點源及點源兩種土砂來源，如此除能夠預測極端水文事件後集水區可能的土砂產出量，並探討坡地崩塌量之遞移率外，未來還可作為水庫清淤工程及集水區整治工程防砂效益之參考依據。今以秀林鄉境內之 26 條土石流潛勢溪流為例，進行在極端暴雨事件下 (100 年重現期 24 小時累積雨量，降雨量分布為 670.8 mm/day ~ 1454.7 mm/day [33])，其各集水區內土壤沖蝕量、坡地崩塌量之遞移率及集水區內之土砂總產量計算。

##### 4.1 土石流集水區坡面土壤沖蝕量推估結果

本研究利用 HSPF 模式進行秀林鄉境內 26 條土石流潛勢溪流集水區土砂產量模擬後，可得到在僅有土壤沖蝕之狀況下各集水區之土砂產量，如表 21 所示，表中之土砂懸浮比例係將集水區內之土砂產量除以集水區之單日逕流量。

由表中可知，秀林鄉境內大部分之土石流集水區土砂產量均小於 1 萬立方公尺 (20 處)，介於 1 萬至 5 萬立方公尺之土石流集水區有 2 處，介於 5 萬至 10 萬立方公尺之土石流集水區有 1 處，大於 10 萬的有 3 處。

表 21 秀林鄉境內 26 條土石流潛勢溪流坡地土壤沖蝕量推估表

項次	土石流潛勢溪流編號	村里	集水區面積 (ha)	單日逕流量 (m <sup>3</sup> /day)	集水區土砂產量 (m <sup>3</sup> /day)	土砂濃度 (1 × 10 <sup>-2</sup> )
1	花縣 DF005	文蘭村	3,837	13,009,011	54,187	0.34
2	花縣 DF006	文蘭村	501	1,180,003	7,156	0.54
3	花縣 DF007	文蘭村	1,883	4,296,407	130,190	2.72
4	花縣 DF012	水源村	2,910	6,292,959	183,445	2.69
5	花縣 DF013	水源村	37	80,309	82	0.09
6	花縣 DF020	秀林村	24	241,346	564	0.21
7	花縣 DF021	秀林村	60	589,037	26,665	4.11
8	花縣 DF022	秀林村	20	199,447	628	0.29
9	花縣 DF014	佳民村	84	192,775	3,848	1.85
10	花縣 DF015	佳民村	567	1,089,848	8,251	0.68
11	花縣 DF016	佳民村	139	479,224	3,843	0.73
12	花縣 DF017	佳民村	48	157,201	1,067	0.62
13	花縣 DF025	和平村	224	2,164,047	9,284	0.39
14	花縣 DF026	和平村	119	465,125	4,116	0.82
15	花縣 DF023	崇德村	99	958,162	4,595	0.44
16	花縣 DF024	崇德村	558	5,382,583	30,537	0.51
17	花縣 DF001	富世村	120	456,851	1,674	0.34
18	花縣 DF002	富世村	421	2,417,636	9,659	0.34
19	花縣 DF003	富世村	228	2,192,602	5,453	0.23
20	花縣 DF004	富世村	49	493,180	4,500	0.83
21	花縣 DF018	景美村	54	183,838	800	0.40
22	花縣 DF019	景美村	11,884	36,939,123	921,837	2.28
23	花縣 DF008	銅門村	274	650,830	4,503	0.62
24	花縣 DF009	銅門村	115	272,360	1,555	0.51
25	花縣 DF010	銅門村	48	126,371	1,525	1.09
26	花縣 DF011	銅門村	386	803,818	3,561	0.41

##### 4.2 土石流集水區坡地崩塌遞移量推估結果

集水區土砂來源除了非點源類型之坡地土壤沖蝕量外，還包括點源類型之坡地崩塌量，而坡地崩塌之土砂量體有多少可進入河道被河水遞移至集水區出口，往往是研究集水區土砂產量問題所關切議題之一，且依據前人研究坡地崩塌土砂量在一場颱風暴雨後並非全數進入河道中成為河川輸砂材料來源 [34]。本研究首先利用 TRIGRS 程式，進行秀林地區 100 年重現期 24 小時累積雨量下降雨促崩潛勢分析 (如圖 13)，得到秀林鄉境內 26 條土石流潛勢溪流集水區內各個降雨新增之坡地崩塌量；而後利用 HSPF 點源模式，將每條土石流潛勢溪流集水區內之崩塌量體分別輸入

對應的子集水區中，建立崩塌地位置與各集水區中之空間關係後，即可模擬有多少位於集水區內之崩塌量進入河道輸送至下游，並探討集水區崩塌地土砂量之遞移率。表 21 為秀林鄉境內 26 條土石流潛勢溪流降雨新增坡地崩塌量及遞移率推估結果。

由表 22 內之「崩塌量遞移率」欄位可知，於 100 年重現期單日降雨強度下，秀林鄉境內 26 條土石流潛勢溪流中除了景美之花縣 DF019 外，其餘土石流之崩塌量遞移率平均約為 38.4% 左右，亦即在 100 年重現期單日降雨強度下，秀林地區之土石流潛勢溪流集水區內之崩塌量會有約 38.4% 的量體被河水運移至下游集水區出口處；如此還可應用至未來新增崩塌地之土砂量運移至下游河道出口處之遞移量推斷。另外將集水區面積大小與崩塌量遞移率相互比較，如圖 14 所示，可發現集水區面積大小與崩塌量遞移率呈現一反比關係。

### 4.3 土石流集水區土砂產量推估結果

綜合上述之點源及非點源土砂來源，利用 HSPF 進行秀林鄉境內 26 條土石流潛勢溪流集水區土砂量估算，其各條土石流集水區之土砂產量如表 23 所示。

若將僅進行坡面土壤沖蝕量推估得到之土砂產量，與加入坡地崩塌量後進行土砂運移演算所得之土砂產量互相比較，可發現在加入崩塌量後，各條土石流潛勢溪流集水區土砂產量會比僅有土壤沖蝕量推估分析高了約 1.1 ~ 14.4 倍 (如表 23 中「量體倍數差異」欄位值所示)；由此可見，崩塌土方量對於集水區土砂產量有顯著的貢獻，故更加證明了進行集水區土砂生產量之推估時，同時考慮坡面土壤沖蝕與坡地崩塌兩種土砂來源的重要性。而於工程設計應用上，可避免未來新增下游整治工程構造物時之設計攔阻土砂量，出現低估流出崩塌量之情形而無法有效的攔阻集水區內之土砂量，進而造成下游保全對象之損害。

## 五、結 論

過去對於土砂生產量之估算，大多根據現場量測資料，再配合統計方法與迴歸分析方式建立經驗公式，往往忽略坡地崩塌量對集水區土砂產量所造成之影響；故本研究利用美國環保署 (USEPA) 與 Hydrocomp Inc. 所共同發展之 HSPF 模式，其可同時進行集水區內非點狀來源之坡面土壤沖蝕量，以及點狀來源之坡地崩塌土砂量所造成之集水區土砂產量，並以降雨—逕流、土砂生產及土砂輸送等三種機制，建立一套集水區土砂產量推估模式，以完整的進行集水區土砂生產之估算。

本研究以花蓮縣秀林鄉之綠水集水區及仁壽橋集水區為例，各利用 2 兩場颱風事件進行模式之率定，一場颱風事件進行模式驗證，其率定及驗證之結果與實測值之誤差比例均在 20% 內。另外，將本研究所擬定之集水區土砂產量推估模式應用於花蓮縣秀林鄉境內之 26 條土石流潛勢溪流集水區土砂產量推估上，由分析結果可知，崩塌量之遞移率平均約為 38.4%；而在崩塌量後，各條土石流潛勢溪流集水區內之土砂產量比僅有土壤沖蝕量推估時高了約 1.1 ~ 14.4 倍，由此可見，崩塌土方量對於集水區土砂產量的貢獻，有顯著之影響。另外將集水區面積大小與崩塌量遞移率相互比較，可發現集水區面積大小與崩塌量遞移率呈現一反比關係。

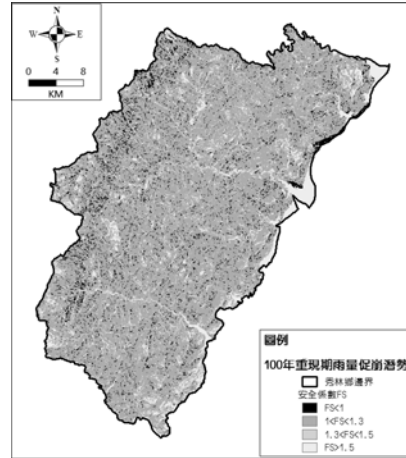


圖 13 秀林地區 100 年重現期單日累積降雨量下之降雨促崩潛勢圖

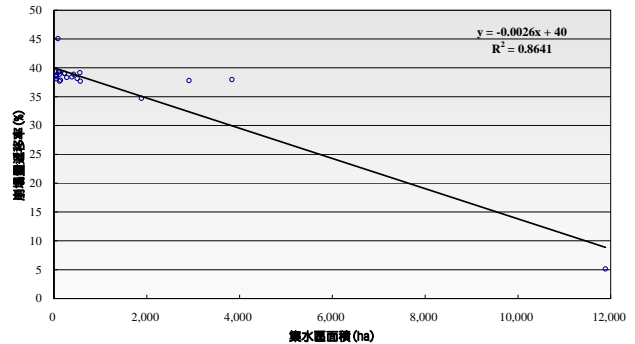


圖 14 秀林鄉境內 26 條土石流潛勢溪流集水區面積與崩塌量遞移率關係圖

表 22 秀林鄉境內 26 條土石流潛勢溪流坡地崩塌量遞移率推估表

項次	土石流潛勢溪流編號	村里	集水區面積 (ha)	單日逕流量(a) (m <sup>3</sup> /day)	集水區內新增崩塌量 (b)(m <sup>3</sup> )	遞移出之崩塌量 (c) (m <sup>3</sup> )	崩塌量遞移率 (c/b)
1	花縣 DF005	文蘭村	3,837	13,009,011	796,330	302,300	38.0%
2	花縣 DF006	文蘭村	501	1,180,003	88,838	33,881	38.1%
3	花縣 DF007	文蘭村	1,883	4,296,407	2,967	1,030	34.7%
4	花縣 DF012	水源村	2,910	6,292,959	675,646	255,302	37.8%
5	花縣 DF013	水源村	37	80,309	2,466	969	39.3%
6	花縣 DF020	秀林村	24	241,346	0	0	0
7	花縣 DF021	秀林村	60	589,037	0	0	0
8	花縣 DF022	秀林村	20	199,447	0	0	0
9	花縣 DF014	佳民村	84	192,775	19,244	8,668	45.0%
10	花縣 DF015	佳民村	567	1,089,848	161,009	60,662	37.7%
11	花縣 DF016	佳民村	139	479,224	27,125	10,267	37.9%
12	花縣 DF017	佳民村	48	157,201	8,873	3,428	38.6%

表 22 (續)

項次	土石流潛勢溪流編號	村里	集水區面積 (ha)	單日逕流量(a) (m <sup>3</sup> /day)	集水區內新增崩塌量 (b)(m <sup>3</sup> )	遞移出之崩塌量 (c) (m <sup>3</sup> )	崩塌量遞移率 (c/b)
13	花縣 DF025	和平村	224	2,164,047	39,220	15,311	39.0%
14	花縣 DF026	和平村	119	465,125	1,435	541	37.7%
15	花縣 DF023	崇德村	99	958,162	111,814	43,951	39.3%
16	花縣 DF024	崇德村	558	5,382,583	131,700	51,555	39.1%
17	花縣 DF001	富世村	120	456,851	54,284	21,355	39.3%
18	花縣 DF002	富世村	421	2,417,636	155,442	60,428	38.9%
19	花縣 DF003	富世村	228	2,192,602	43,105	16,812	39.0%
20	花縣 DF004	富世村	49	493,180	11,009	4,233	38.5%
21	花縣 DF018	景美村	54	183,838	16,811	6,518	38.8%
22	花縣 DF019	景美村	11,884	36,939,123	2,485,243	128,028	5.2%
23	花縣 DF008	銅門村	274	650,830	86,896	33,285	38.3%
24	花縣 DF009	銅門村	115	272,360	8,884	3,454	38.9%
25	花縣 DF010	銅門村	48	126,371	3,462	1,319	38.1%
26	花縣 DF011	銅門村	386	803,818	67,133	25,795	38.4%

相較於目前台灣地區針對集水區土砂產量之推估，僅利用經驗公式 (如 USLE 公式等) 估算之方式，本研究所建立之集水區土砂產量推估模式更符合真實狀況，並可針對各種不同的雨量等級而得到可能產出的土砂量。如此不但能準確的進行集水區土砂產量之分析，且其結果可作為集水區防災工程設計參考，使得集水區整治更能符合經濟效益。

### 參考文獻

1. 維基百科／颱風敏督利，<http://zh.wikipedia.org/wiki> (2004)。
2. 台灣電力公司，大甲河流域德基至馬鞍段集水區崩塌地土石流潛勢調查及因應對策研究報告書，臺北 (2006)。
3. 林昭遠、林家榮、鄭旭涵、劉昌文，「石門水庫集水區艾利颱風土砂災因之探討」，中華水土保持學報，第三十七卷，第四期，第 327-336 頁 (2006)。
4. 馬國寶，「應用地理資訊系統推估流域之土壤沖蝕量與逕流量」，國立台灣大學農業工程研究所碩士論文，臺北 (1994)。
5. 陳文欽，「二仁溪流域坡面土壤流失量推估之研究」，國立中興大學水土保持研究所碩士論文，臺中 (2000)。
6. 李炎任，「地理資訊系統推估石門水庫集水區土壤流失」，私立中原大學土木工程研究所碩士論文，中壢 (1991)。
7. 吳岳霖，「土壤沖蝕指標模式應用於石門水庫集水區土砂流失量推估之研究」，國立中興大學水土保持研究所碩士論文，臺中 (2007)。
8. 經濟部水資源局，流域土砂管理模式之研究 (1/3)，臺南 (2000)。

表 23 秀林鄉境內 26 條土石流潛勢溪流水區土砂產量推估表

項次	土石流潛勢溪流編號	村里	集水區面積 (ha)	遞移出之崩塌量 (a) (m <sup>3</sup> )	坡面土壤沖蝕量產量 (b) (m <sup>3</sup> /day)	集水區土砂產量 (c = a + b) (m <sup>3</sup> /day)	量體倍數差異 (c/b)
1	花縣 DF005	文蘭村	3,837	301,695	54,187	356,487	6.6
2	花縣 DF006	文蘭村	501	33,827	7,156	41,037	5.7
3	花縣 DF007	文蘭村	1,883	1,089	130,190	131,220	1.0
4	花縣 DF012	水源村	2,910	254,825	183,445	438,748	2.4
5	花縣 DF013	水源村	37	970	82	1,052	12.8
6	花縣 DF020	秀林村	24	0	564	564	1
7	花縣 DF021	秀林村	60	0	26,665	26,665	1
8	花縣 DF022	秀林村	20	0	628	628	1
9	花縣 DF014	佳民村	84	7,342	3,848	12,516	3.3
10	花縣 DF015	佳民村	567	60,569	8,251	68,913	8.4
11	花縣 DF016	佳民村	139	10,259	3,843	14,111	3.7
12	花縣 DF017	佳民村	48	3,426	1,067	4,496	4.2
13	花縣 DF025	和平村	224	15,307	9,284	24,595	2.6
14	花縣 DF026	和平村	119	541	4,116	4,656	1.1
15	花縣 DF023	崇德村	99	43,947	4,595	48,546	10.6
16	花縣 DF024	崇德村	558	51,451	30,537	82,092	2.7
17	花縣 DF001	富世村	120	21,356	1,674	23,030	13.8
18	花縣 DF002	富世村	421	60,395	9,659	70,087	7.3
19	花縣 DF003	富世村	228	16,802	5,453	22,265	4.1
20	花縣 DF004	富世村	49	4,232	4,500	8,733	1.9
21	花縣 DF018	景美村	54	6,518	800	7,318	9.2
22	花縣 DF019	景美村	11,884	128,972	921,837	1,049,865	1.1
23	花縣 DF008	銅門村	274	33,237	4,503	37,788	8.4
24	花縣 DF009	銅門村	115	3,452	1,555	5,009	3.2
25	花縣 DF010	銅門村	48	1,317	1,525	2,844	1.9
26	花縣 DF011	銅門村	386	25,778	3,561	29,356	8.2

9. Manoj, K.J., Surendra, K. M., and Shah, R.B., "Estimation of sediment yield and areas vulnerable to soil erosion and deposition in a Himalayan watershed using GIS," *Current Science Journal*, Vol. 98, No. 2, pp. 213-221 (2010).
10. 許振崑、林伯勳、鄭錦桐、冀樹勇、黃文洲、尹孝元，「石門水庫集水區土壤沖蝕量評估及現地試驗監測」，第十三屆海峽兩岸水利科技交流研討會，臺中 (2009)。
11. 楊錦釧、蔡東霖、張胤隆、姜世偉、蘇啟婷，「石門水庫集水區崩塌與庫區淤積風險評估研究」，石門水庫集水區保育治理委託研究計畫專題座談會，桃園，第 57-78 頁 (2008)。

12. 李鎮鍵、蔡元融、謝正倫、邱禎龍，「濁水溪侵蝕及堆積評估模式」，2008 流域地質與坡地災害研討會，台北，第 13-1-13-21 頁 (2008)。
13. Chuang, S.C., Chen, Y., Lin, G.W., Lin, C.W., and Chang, G.P., "Increase in basin sediment yield from landslides in storms following major seismic disturbance," *Engineering Geology Journal*, Vol. 103, pp. 59-65 (2009).
14. Fuller, C.W., Willett, S.D., Hovius, N., and Slingerland, R., "Erosion rates for Taiwan mountain basins: New determinations from suspended sediment records and a stochastic model of their temporal variation," *The Journal of Geology*, Vol. 111, pp. 71-87 (2003).
15. 洪毓華，「AGNPS 應用在小集水區推估土壤流失量與逕流量之探討」，國立中興大學水土保持研究所碩士論文，臺中 (1992)。
16. 邱薈霖，「德基水庫集水區農業非點源污染推估之研究」，國立中興大學水土保持研究所碩士論文，臺中 (2000)。
17. Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L., Jobs, T.H., and Donigan, A.S., *HSPF Version 12 User's Manual*, U.S. Environmental Protection Agency (2001).
18. 鄭旭涵，「九份二山地震崩塌坡面泥砂產量及植生恢復之研究」，國立中興大學水土保持研究所碩士論文，臺中 (2000)。
19. 劉邦崇、游繁結、蔡志隆，「崩塌土方量推估之研究」，中華水土保持學報，第三十二卷，第二期，第 107-114 頁 (2000)。
20. 林昭遠、陳昱豪、林家榮，「集水區泥砂產量推估之研究」，中華水土保持學報，第三十八卷，第二期，第 207-218 頁 (2006)。
21. 劉益誠，「應用衛星影像於 921 災後九九峰植生復育崩塌潛感」，國立中興大學土木工程研究所碩士論文，臺中 (2008)。
22. 荻荻珠男，「ひと雨による山腹崩壊について」，新砂防，通卷 79 號，日本 (1971)。
23. 賴志強，「台灣地區降雨及地震誘發崩塌之特性研究」，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文，臺南 (2007)。
24. 陳俞旭，「地震對崩塌與土石流發生影響之研究」，國立成功大學水利及海洋工程研究所碩士論文，臺南 (2008)。
25. Baum, Rex L., William Z. Savage, and Jonathan W. Godt, "TRIGRS—A FORTRAN program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis," *U.S. Geological Survey Open-File Report*, 02-0424 (2002).
26. U.S. Environmental Protection Agency, *BASINS/HSPF Training Exercises 9*.
27. U.S. Environmental Protection Agency, *BASINS Version 3.0 User's Manual*, (2001).
28. 張玉珊，「翡翠水庫集水區非點源污染整治區域優先順序之評估」，國立臺北科技大學環境規劃與管理研究所碩士論文，臺北 (2004)。
29. 經濟部水利署，水庫集水區非點源污染傳輸最適用模式之建立與應用 (2/2)，臺北 (2007)。
30. 林雍富，「應用 BASINS 模式於非點源污染傳輸之模擬—以霧社水庫為例」，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，臺北 (2001)。
31. 趙倬群，「石門水庫集水區崩塌土砂產量推估之研究」，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，臺北 (2004)。
32. 蔡宗賢，「水庫集水區暴雨時期崩塌土砂量推估之研究」，國立台灣大學土木工程研究所碩士論文，臺北 (2005)。
33. 溫惠鈺、趙啟宏、陳耐錦、許世孟，「集水區土砂災害分析研究」，中興工程顧問社內部研究報告，台北 (2010)。
34. Ziemer, R.R., "An approach to evaluating the long-term effects of land use on landslides, erosion, and stream channels," *Proceedings, Japan-U.S. Workshop on Snow Avalanche, Landslide, Debris Flow Prediction and Control*, Tsukuba, Japan, pp. 533-542 (1991).

---

98 年 12 月 29 日	收稿
100 年 12 月 18 日	修改
100 年 12 月 21 日	接受

