

集水區土砂產量推估之研究-以花蓮萬里溪流域為例

溫惠鈺¹ 許世孟² 陳耐錦¹

1. 中興工程顧問社大地工程研究中心 研究員
2. 中興工程顧問社大地工程研究中心 組長

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，大多僅考慮坡面土壤沖蝕量，較少一併考量崩塌土方量之貢獻，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。研究中以花蓮萬里溪流域為研究集水區，利用雨量紀錄與崩塌地分布資料，分析計算不同降雨事件下集水區之土砂產量。由研究結果可知，在考慮坡地崩塌量情況下，萬里溪流域之土砂產量增加 3~12 倍。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。

關鍵字：土壤沖蝕量、坡地崩塌量、土砂產量、HSPF。

A Study of the Sediment Yield Estimate in the Watershed: the Case of WAN-LI-CHI Watershed, Hualien

ABSTRACT

The sediment yield estimate of the watershed is important in the watershed management and disaster prevention. The geology, topography and meteorological conditions in Taiwan provide the essential condition for inducing soil erosion and landslides in the watershed. For a watershed with lots of landslide areas, the eroded soil will result in a larger sediment yield than that analyzed under surface soil erosion condition. Consequently, landslides should be considered for sediment yield in watersheds. How to accurately estimate the sediment yield from soil erosion and 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 Wan-Li-Chi watershed in Hua-Lien County. Rainfall records and landslide information were collected for sediment yield analysis. The results also showed that the sediment yield considering landslides were found increasing about 3 to 12 times than that estimated under the soil erosion conditions. It is more reality to estimate the watershed sediment yield in considering the mechanism of landslide and soil erosion. Therefore, this approach can be used as reference in the design of disaster prevention projects, and let watershed management works be more efficient.

Key Words: Soil Erosion, Landslide, Sediment Yield, HSPF.

一、前言

台灣位處菲律賓海洋板塊和歐亞大陸板塊碰撞之交界處，山地形勢陡峭、岩質脆弱、地震頻繁，加上颱風、梅雨等季節所帶來之集中性豪雨，也常引發山區大規模之山坡地土砂災害。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。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沙淤積及水質濁度過高，使得桃園地區停水達十餘日之久。

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流至集水區出口，連帶影響集水區治理與防災工作之執行效果；為此，如何較精確地推估降雨期間集水區坡地崩塌及土壤沖蝕所引發之土砂產量，是集水區治理工作之首要重點。

國內過去對於集水區土砂產量之推估，大多僅考慮坡面土壤沖蝕量，但根據現地調查分析得知，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。此外根據水土保持局於桃芝颱風後所進行土石流調查及分析顯示，土壤沖蝕量於集水區土砂產出量所佔的比例多不及崩塌土方量之貢獻，顯見對於集水區土砂生產量之推估，必須同時考慮土壤沖蝕與坡面崩塌兩種生產類型。故本研究以花蓮地區之萬里溪集水區為例，利用 HSPF (Hydrological Simulation Program Fortran) 水文分析模式，進行集水區土砂產量推估之研究；其研究成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。

二、集水區土砂產量推估模式建立

集水區的土砂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；而後坡地土壤沖蝕及坡面崩塌透過土砂輸送機制，最後成為集水區之土砂產出量。圖 1 為依據前述理論彙整得集水區土砂產出量概念，即為以降雨-逕流、土砂生產及土砂輸送等三種機制所擬訂集水區土砂產量推估流程。

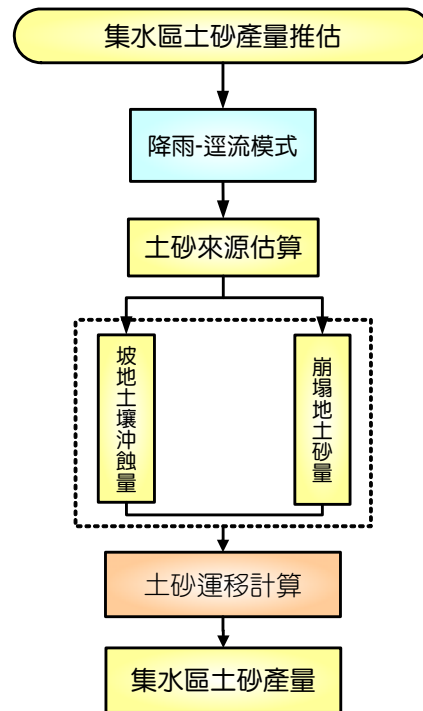


圖 1 本研究擬定之集水區土砂產量推估流程圖

2.1 土砂生產數值模式

由於真實集水區土壤沖蝕機制甚為複雜，早期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。本研究為能更符合現地狀況，故利用由美國環保署(USEPA)與 Hydrocomp Inc. 所共同發展之 HSPF 模式進行集水區內之土砂產量模擬。HSPF 係將原本各自獨立的 HSP、ARM 及 NPS 三個模式整合，並進行改良而成的模式，其中 HSP 為集水區水文模式，水文模擬功能強大且精確度高，而 ARM 和 NPS 之功能在於針對農業區之非點源污染模擬。HSPF 主要是使用連續性降雨與其他氣象資料，以計算河川水流之水文歷線。此模式可以模擬之水文現象非常廣泛，如植物截留、入滲、蒸發散，及地表逕流 (Surface Runoff)、中間流 (Interflow Outflow)、地下水流 (Groundwater Outflow) 等水文傳輸情形，可用以預測逕流量及泥砂運移量。本研究即利用此模式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土砂量之推估方式，計算集水區之土砂產量，茲將內容說明如下。

2.1.1 坡面土壤沖蝕量估算

HSPF 模式中包含許多模組，本研究使用 HSPF 模式之透水區 (PERLND) 模組及河道 (RCHRES) 模組兩部分，模擬坡面土壤沖蝕量。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輸砂量。

1. 降雨逕流模擬模組 (PWATER)

此程式之功能在模擬透水區之總逕流量，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、地下水及蒸發散因子，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，水文循環演算流程如圖 2 所示，主要需使用到的參數如表 1 所示，其詳細之計算流方程式詳見 HSPF Version 12 User's Manual [1]。

表 1 PWATER 模組參數表

參數名稱	定義	單位	範圍值
LZSN	下層土壤名義含水量	in	0.01~100
INFILT	入滲能力指標	in/hr	0.0001~100
LSUR	漫地流長度	ft	1~ none
SLSUR	漫地流坡度	-	$1 \times 10^{-7} \sim 10$
KVARY	地下水出流參數	1/in	0~ none
AGWRC	地下水退水率	1/day	0.001~0.999
INFEXP	入滲公式指數	-	0~10
INFILD	最大與平均入滲量比值	-	1~2
DEEPER	地下水入滲參數	-	0~1
BASETP	基流蒸發散參數	-	0~1
AGWETP	地下水流蒸發散參數	-	0~1
CEPSC	截流量	in	0~10
UZSN	上層土壤名義含水量	in	0.01~10
NSUR	曼寧 N 值	-	0.001~1
INTFW	中間流入滲參數	-	0~ none
IRC	中間流退水率	1/day	$1 \times 10^{-30} \sim 0.999$
LZETP	下層土壤蒸發散參數	-	0~0.999

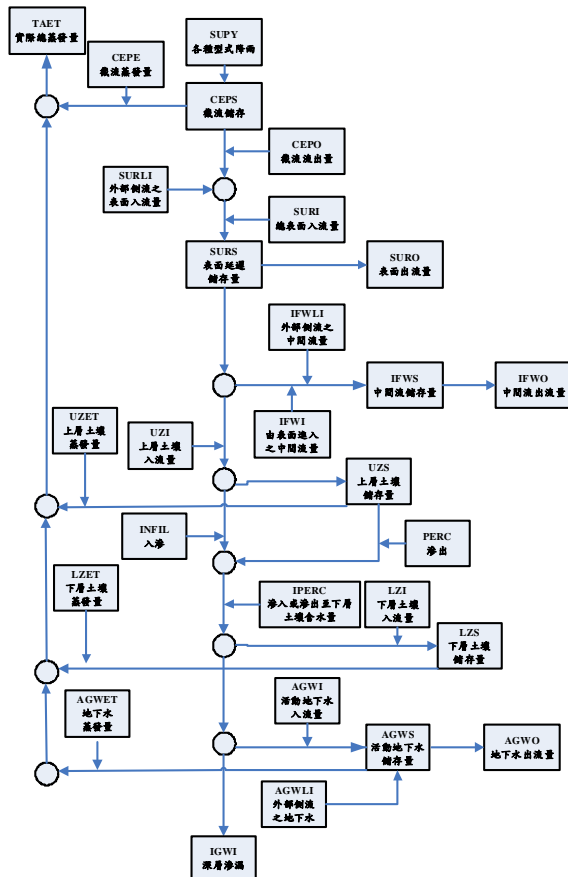


圖 2 PWATER 模組之演算流程

2. 泥砂生成及運移模擬模組 (SEDMNT)

懸浮物的運移能力主要受自然因素，如風、降雨，或人為因素所造成的分離土壤泥砂量，以及地表受漫地流作用而產生之泥砂沖刷。此模組主要模擬泥砂從土體中分離（降雨衝擊）、沖刷、附着及傳輸運移現象，其演算流程如圖 3 所示，主要需使用到的參數如表 2 所示。

表 2 SEDMNT 模組參數表

參數名稱	定義	單位	範圍值
SMPF	操作管理因子	-	0.001~1
KRER	土壤分離係數	-	0~ none
JRER	土壤分離指數	-	none
COVER	土壤覆蓋率	-	0~1
KSER	分離泥砂之沖刷係數	-	0~ none
JSER	分離泥砂之沖刷指數	-	none
KGER	土壤沖蝕係數	-	0~ none
JGER	土壤沖蝕指數	-	none

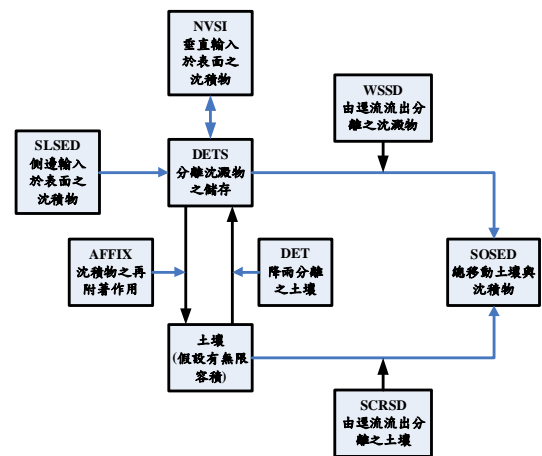


圖 3 SEDMNT 模組之演算流程

3. 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，其演算過程如圖 4 所示，主要需使用到的參數如表 3 所示。

表 3 HYDR 模組參數表

參數名稱	定義	單位	範圍值
LEN	河段長度	miles	0.01~none
DELTH	河段上下游水位差	ft	0.0~none
KS	水力路徑之權重因子	-	0~0.99

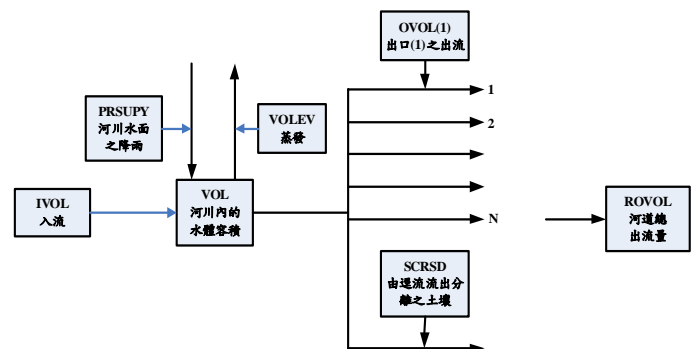


圖 4 HYDR 模組之演算流程

4. 河道泥砂運移模擬模組 (SEDTRN)

此模組主要目的在計算由集水區沖刷至河道後之沖淤情形，其計算方式分別考慮懸浮載及河床載之沖淤，如圖 5 所示，而主要需使用到的參數如表 4 所示。

表 4 SEDTRN 模組參數表

參數名稱	定義	單位	範圍值
KSAND	泥砂承載公式之係數	-	0~none
EXPSND	泥砂承載公式之指數	-	0~none
TAUCD	床底之沈澱臨界剪應力	lb/ft ²	1×10 ⁻¹⁰ ~none
TAUCS	床底之沖刷臨界剪應力	lb/ft ²	1×10 ⁻¹⁰ ~none

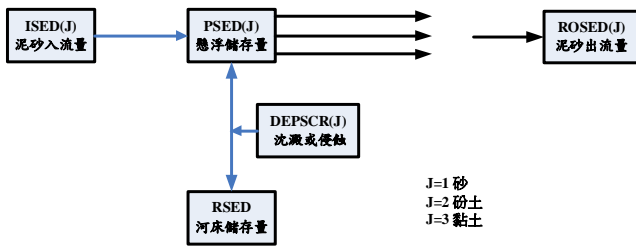


圖 5 SEDTRN 模組之演算流程

2.1.2 坡地崩塌土砂產量推估

本研究採用以現期之遙測資料進行崩塌地土砂量推估之方法進行崩塌量之估算，利用財團法人工業技術研究院能源與資源研究所之 95 年度崩塌地圖層，並配合 SPOT5 衛星影像進行崩塌地位置確認，判釋研究區內之集水區崩塌地範圍及面積；另配合崩塌地厚度，即可求得集水區內之坡地崩塌地土砂產量。

關於崩塌地厚度之決定，Khazai and Sitar(2000)提出以經驗法進行推估，其結果顯示崩塌厚度與崩塌地坡度有關，而 Delmonaco(2003)、Salciarini(2006)等人亦有相同之結論。經濟部中央地質調查所於 2008 年之「易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置—集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估」成果報告[7]中，制訂土壤厚度計算公式，即係為了可在不同坡度、地形、地質條件下得到不同環境下之土壤厚度，故針對大漢溪、大甲溪及濁水溪三大流域利用現地鑽孔採樣之方式進行土層厚度之統計分析，得到崩塌地坡地與土層厚度之相關公式，如下式所示：

$$\ln Depth = -0.0266 \times slope\ angle + 1.31 \quad (1)$$

其中 Depth 為土壤厚度(m)，slope angle 為崩塌地的平均坡度(°)。

(1)式與 Khazai and Sitar(2000)、Delmonaco(2003)、Salciarini(2006)等人結果進行比較，其結果相仿，如表 5 所示，故本研究採用(1)式進行崩塌地厚度計算。

表 5 坡度與土壤深度比較表

坡面坡度(度)	Khazai and Sitar (2000) 淺層滑動平均崩塌深度(m)	Delmonaco(2003) Salciarini(2006)	(1)式推估之土壤深度 d (m)
< 30	2.0	2.33 (30 度)	d > 1.67 (30 度)
30~40	1.5	1.80 (35 度)	d = 1.46 (35 度)
40~60	1.0	0.83 (50 度)	d = 0.98 (50 度)
> 60	0.5	0.50 (60 度)	d < 0.75 (60 度)

然而並非全部之崩塌土砂皆能夠進入河道成為河川輸砂的材料來，故還需透過土砂輸送機制來模擬崩塌地之土砂運移至到集水區下游出口之過程。

2.2 崩塌土砂運移率模擬

HSPF 程式除了可進行非點源污染(坡面土壤沖蝕)之傳輸計算外，也可加入點源污染(坡地崩塌)進行傳輸估算，因此本研究利用 HSPF 下之點源模式，將崩塌地體積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。

三、萬里河流域概述

萬里河流域位於花蓮縣中部之萬榮鄉，屬於花蓮流域之次集水區，該集水區面積約為 23766.7 公頃，地勢為西高東低，如圖 6 所示。集水區內共有三個雨量站，分別為中央氣象局所設置之「大觀」站，以及水利署所設置之「新大觀(2)」及「新高嶺(2)」兩站，另於集水區下游出口處設置一水文觀測站「萬里溪橋」站。

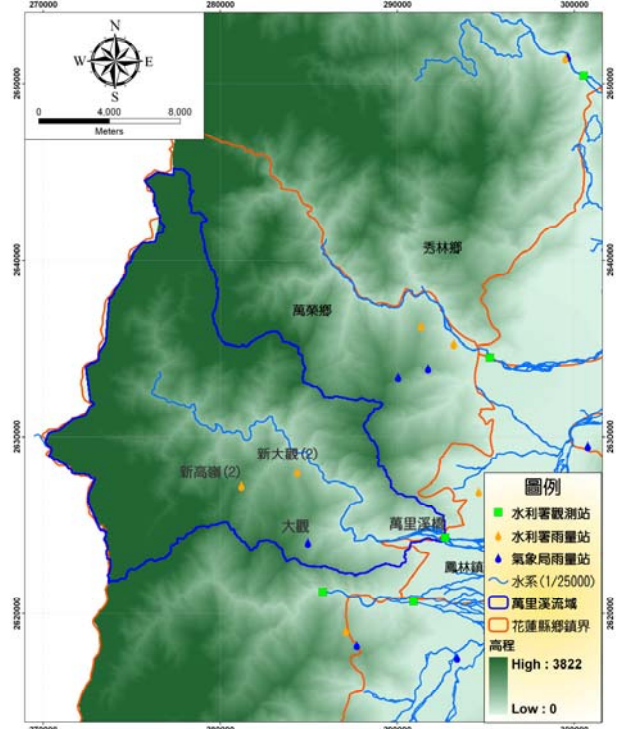


圖 6 萬里河流域高程及水文觀測站分布圖

萬里河流域內之土地利用分布如圖 7 所示，由圖中可知於流域中大部分的土地利用屬於森林用地，有少部分建築用地、農業用地及荒地等。



圖 7 萬里河流域土地利用分布圖

四、模式率定與驗證

本研究首先應用民國 69 年農林航測所建置精度為 40m×40m 之數值高程資料，利用美國環保署所開發之 BASINS 程式進行萬里溪子集水區之劃設[8]，並推求各子集水區之地文特性，劃設得之萬里溪流域子集水區分布如圖 8 所示。

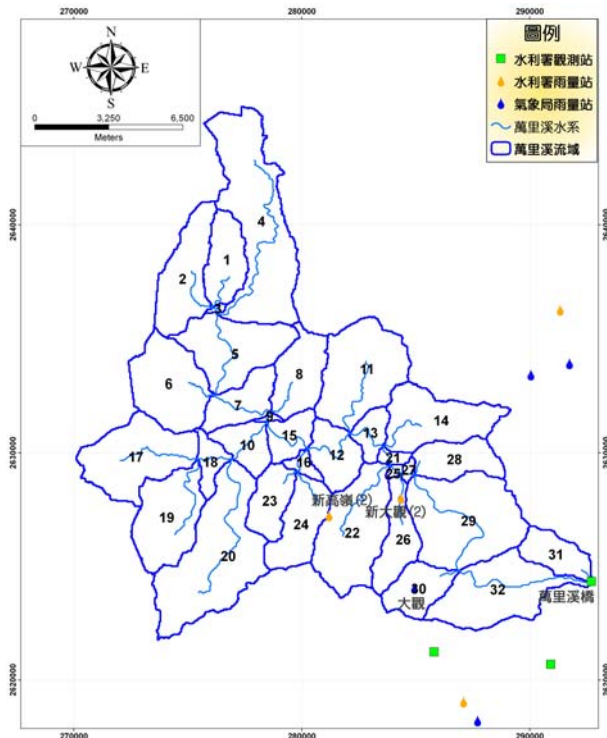


圖 8 萬里流域之子集水區分布圖

由前述可知，萬里溪流域中共有三個雨量站，本研究

利用徐昇式多邊形網的方法，可求得集水區之平均雨量，其三個雨量站所佔的比例分別為「大觀」0.15、「新大觀(2)」0.21 及「新高嶺(2)」0.64。另以萬里河流域下游之「萬里溪橋」水文觀測站之逐時逕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，故本研究以「萬里溪橋」由 1980~2005 年所觀測之流量與輸砂量迴歸曲線(如圖 9 所示)可得輸砂模式參數之率定標準。

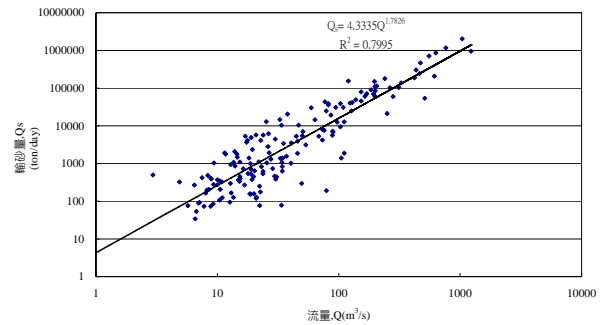


圖 9 「萬里溪橋」觀測站之流量與輸砂量之指數迴歸關係

4.1 集水區土砂產量模式率定

本研究共選定兩場颱風事件來進行模式率定，其各個颱風之逐時雨量為模式中之雨量輸入條件，而所選用事件及各事件之總雨量及最大降雨強度如表 6 所示。

表 6 本研究所選用之率定颱風事件基本資料表

颱風事件名稱	雨量歷時	總降雨量 (mm)	最大降雨強度 (mm/hr)
象神颱風	2000/10/31~ 2000/11/2	655	61
桃芝颱風	2001/7/29~ 2001/7/31	535.7	107.7

而由於土壤沖蝕模組之模擬結果受到降雨逕流模組之影響，懸浮固體量之多寡和逕流模擬之出流量成正相關，因此必須先率定降雨逕流模組之參數，確定無誤之後再調整輸砂模組之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，其次為泥砂產量演算。

4.1.1 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) 及活動地下水流 (Active 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水量增多，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之影響如表 7 所示。

表 7 HSPF 水文模組高敏感參數說明表

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	1×10^{-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

除了上述五個參數經過本研究調整，其餘均使用符合各流域之集水區及河道特性值與模式內定值。本研究將尖峰流量及總體流量率定結果誤差控制 10% 之內，在經過多次率定後，模擬而得之水文歷線與觀測值之水文歷線比較如圖 10 (象神颱風) 及圖 11 (桃芝颱風) 所示，其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 8 所示。各事件經由率定後之水文參數總表如表 9 所示。

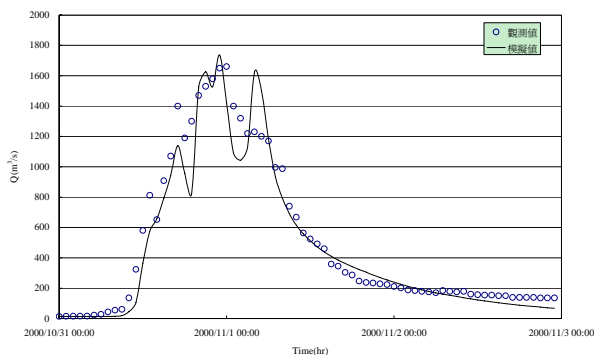


圖 10 象神颱風事件流量模擬率定結果

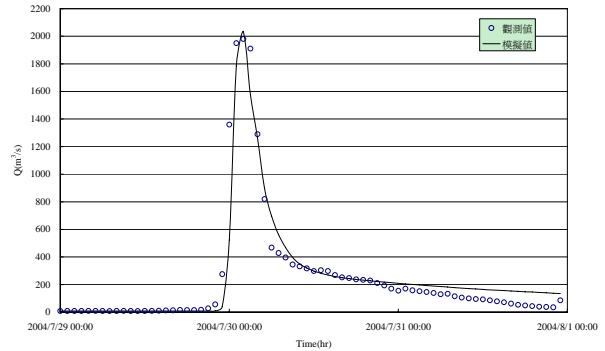


圖 11 桃芝颱風事件流量模擬率定結果

表 8 各颱風事件之水文參數率定結果表

颱風事件	尖峰值 差異比例(%)	總體積量 差異比例(%)	R ²
象神颱風	7.6	3.82	0.95
桃芝颱風	4.6	2.77	0.88

表 9 率定後之降雨逕流模擬參數表

參數名稱	定義	單位	範圍值	率定值
PWATER 模組				
LZSN	下層土壤名義含水量	in	0.01~100	3~3.1
INFILT	入滲能力指標	in/hr	0.0001~100	0.2~0.4
LSUR	漫地流長度	ft	1~ none	依 GIS 量測
SLSUR	漫地流坡度	-	1×10^{-7} ~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	$0.28^1 \sim 0.5^2$
NSUR	曼寧 N 值	-	0.001~1	0.2
INTFW	中間流入參數	-	0~ none	$2.5^1 \sim 3.1^2$
IRC	中間流退水率	1/day	1×10^{-30} ~0.999	$0.2^1 \sim 0.6^2$
LZETP	下層土壤蒸發散參數	-	0~1.5	0.1

參數名稱	定義	單位	範圍值	率定值
HYDR 模組				
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	水力路徑之權重因子	-	0~0.99	0

註：¹為象神颱風，²為桃芝颱風

4.1.2 土砂產量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。

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 SEMNT 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，此二參數和沉澱攜帶容量成正相關，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泥砂產量之影響如表 10 所示。

表 10 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	值增加對泥砂產量之影響
JRER (無)	土壤分離指數	none	決定土壤分離量多寡	增加泥砂產量
JSER (無)	分離泥砂之沖刷指數	none	決定泥砂運移能力	增加泥砂產量
JGER (無)	土壤沖蝕指數	none	決定集水區泥砂沖刷能力	增加泥砂產量
KSAND (無)	泥砂沉澱公式係數	0~none	決定河川泥砂沉澱攜帶容量多寡	增加泥砂產量
EXPSND (無)	泥砂沉澱公式指數	0~none	決定河川泥砂沉澱攜帶容量多寡	增加泥砂產量

除了上述五個參數經過本研究調整，其餘均使用符合各流域之集水區及河道特性值與模式內定值；而率定過程仍將尖峰輸砂量及總輸砂量之率定結果誤差控制在誤差比 10% 之內。經過多次率定後，模擬而得之輸砂歷線與「萬里溪橋」觀測站之流量與輸砂量迴歸關係歷線之比較如圖 12 (象神颱風) 及圖 13 (桃芝颱風) 所示，其各事件模擬之尖峰輸砂量及總體輸砂量與「萬里溪橋」觀測站之流量與輸砂量迴歸關係之差異比例如表 11 所示。各事件經由率定後之水文參數總表如表 12 所示。

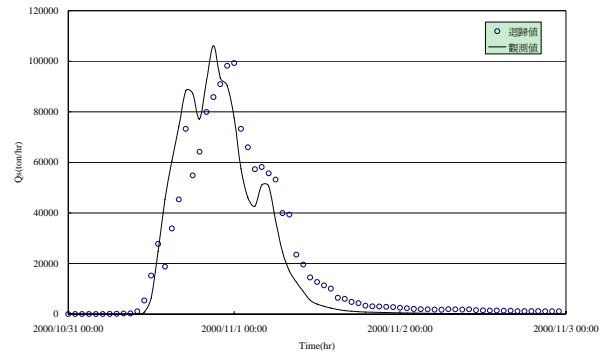


圖 12 象神颱風事件輸砂量模擬率定結果

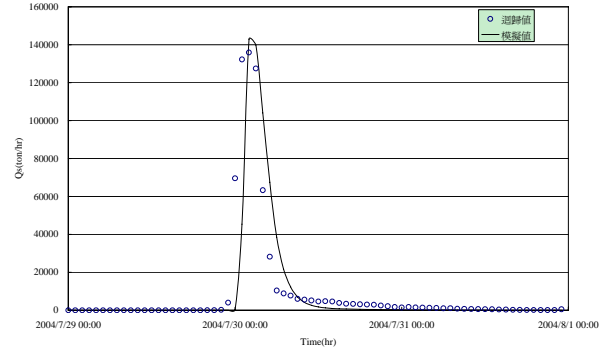


圖 13 桃芝颱風事件輸砂量模擬率定結果

表 11 各颱風事件之泥砂參數率定結果表

颱風事件	尖峰值 差異比例 (%)	總體積量 差異比例 (%)	R ²
象神颱風	6.93	7.32	0.91
桃芝颱風	5.12	9.8	0.84

表 12 各事件率定後之輸砂模擬參數表

參數名稱	定義	單位	範圍值	率定值
SEDMNT 模組				
SMPF	操作管理因子	-	0.001~1	0.75
KRER	土壤分離係數	-	0~ none	0.45
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	5
JSER	分離泥砂之沖刷指數	-	none	0.5
KGER	土壤沖蝕係數	-	0~ none	0.1
JGER	土壤沖蝕指數	-	none	2.5
SEDTRN 模組				
D	有效粒徑	in	0.001~100 (Sand) 0~0.003 (Silt, Clay)	1 (Sand) 0.0029 (Silt, Clay)
W	沉澱速率	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 ³	1~4 (Sand) 2~4 (Silt, Clay)	4 (Sand) 3 (Silt, Clay)

參數名稱	定義	單位	範圍值	率定值
SEDMNT 模組				
KSAND	泥砂承載公式之係數	-	0~none	2.9 ¹ ~5.5 ²
EXPSND	泥砂承載公式之指數	-	0~none	2.6 ¹ ~2.7 ²
TAUCD	床底之沈澱臨界剪應力	lb/ft ²	10 ⁻¹⁰ ~ none	0.1
TAUCS	床底之冲刷臨界剪應力	lb/ft ²	10 ⁻¹⁰ ~ none	0.3
M	泥砂沖蝕係數	lb/ft ² /day	0~none	0.9

註：¹為象神颱風，²為桃芝颱風

4.2 集水區土砂產量模式驗證

本研究利用 2001 年 7 月 4 日之尤特颱風事件來進行模式之驗證，該場颱風之總降雨量為 428mm，最大降雨強度為 45mm/hr，而驗證所使用之參數取自表 9 及表 12。而模擬得之降雨逕流量及土砂產量與觀測流量值及土砂產量驗證迴歸值之尖峰值及總體積量差異比例如表 13 所示，水文歷線及輸砂量歷線如圖 14 及圖 15 所示；其驗證結果仍控制在之誤差比 10% 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。

表 13 尤特颱風事件參數驗證結果表

尤特颱風	尖峰值 差異比例(%)	總體積量 差異比例(%)	R ²
降雨逕流模式	0.78	9.17	0.79
土砂產量模式	9.71	8.18	0.65

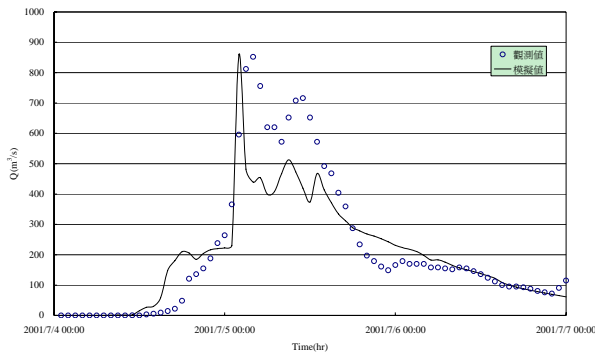


圖 12 尤特颱風事件流量模擬驗證結果

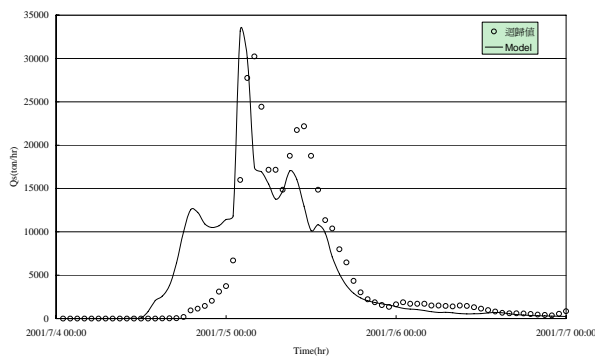


圖 13 尤特颱風事件輸砂量模擬驗證結果

五、崩塌土砂運移量估算

本研究套疊 95 年度崩塌地圖層及配合 SPOT5 衛星影像進行崩塌地位置確認後，所得萬里溪流域內之崩塌地分布如圖 14 所示，其崩塌地面積約有 619 公頃，佔萬里溪流域面積之 2.6%。

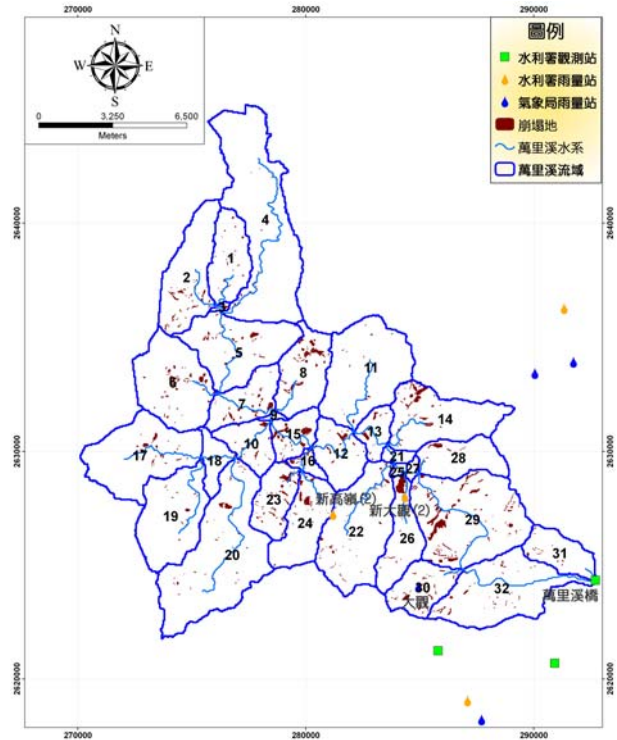


圖 14 萬里溪流域之子集水區劃分及崩塌地分布圖

另依據 2.1.2 節所述計算崩塌量之方式，利用每塊崩塌地之坡度來計算其厚度（如式(1)），計算得萬里溪流域內之崩塌地土壤厚度約介於 1m 至 2.1m 之間，再將每塊崩塌地之面積乘上崩塌地厚度，即可得到每塊崩塌地之土方量。估算得萬里溪流域中目前可能有 8,096,461m³ 之崩塌土砂量；而由前述可知，HSPF 除可模擬非點源之坡面土壤沖蝕量外，還可進行點源之坡地崩塌量運移模擬；故本研究將萬里溪流域內之崩塌體積量分別輸入各子集水區中，同時進行崩塌土砂移量及坡面土壤沖蝕量之推估，即可得到上述三個颱風事件之崩塌運移量推估結果如表 14 所示。由表中可知，集水區內之崩塌量遞移率皆小於 20%，符合 Ziemer(1991)所提及在一場暴雨下約有 20% 之崩塌土砂能夠運移至主河道，其餘留在集水區內或河道支流中之結論 [4]。

而若將每場颱風事件下，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（如表 15 所示），可發現在加入崩塌量後，萬里溪流域之土砂產量會比僅有土壤沖蝕量推估分析高了約 3~12 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，故更加證明了於集水區土砂生產量之推估，於土砂來源部分應同時考慮坡面土壤沖蝕與坡地崩塌兩種生產類型。

表 14 崩塌土砂運移量推估結果表

颱風事件	集水區內 崩塌量(a) (m ³)	流出之 崩塌量(b) (m ³)	崩塌量 遞移率(b/a) (%)
象神颱風	8,096,461	1,514,605	19.1

颱風事件	集水區內 崩塌量(a) (m ³)	流出之 崩塌量(b) (m ³)	崩塌量 遞移率(b/a) (%)
尤特颱風	8,096,461	1,525,367	19.2
桃芝颱風	8,096,461	1,467,655	18.5

表 15 不同土砂來源之土砂產量比較表

颱風事件	坡面土壤 沖蝕量(a) (m ³)	運移至集水區出口 之坡地崩塌量(b) (m ³)	坡面土壤沖蝕量與 坡地崩塌量(a+b) (m ³)
象神颱風	491,341	1,497,607	1,988,948
尤特颱風	139,255	1,695,753	1,695,753
桃芝颱風	225,493	1,545,516	1,771,009

六、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。

本研究以花蓮萬里溪流域為例，利用 2000 年 10 月之象神颱風及 2001 年 7 月之桃芝颱風進行模式之率定，2001 年 7 月之尤特颱風進行模式驗證，其率定及驗證之結果與實測值之誤差比例均在 10% 內。另外，除了利用 HSPF 之非點源污染傳輸模式進行集水區之坡面土壤沖蝕估算外，還利用其點源污染傳輸模式進行坡地崩塌之運移量估算，由分析結果可知，崩塌量之遞移率約小於 20%；而在加入崩塌量後，萬里溪流域之土砂產量會比僅有土壤沖蝕量推估時高了約 3~12 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。

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] Brian R. B., John C. I., John L. K., Thomas H. J., Anthony S. D., HSPF Version 12 User's Manual, United States Environmental Protection Agency (2001).
- [2] BASINS Technical Note 6, United States Environmental Protection Agency (2000)
- [3] BASINS Technical Note 8, United States Environmental Protection Agency (2006).
- [4] 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, pp533-542(1991).

- [5] ANNE A. SHIRINIAN-ORLANDO, and CHRISTOPHER G. UCHRIN, "Modeling the Hydrology and water quality using BASINS/HSPF for the upper Maurice River watershed, New Jersey," *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, No. 42, pp. 289-303 (2007).
- [6] 蔡宗賢，「水庫集水區暴雨時期崩塌土砂量推估之研究」，碩士論文，國立臺灣大學土木工程學研究所碩士論文，台北 (2005)。
- [7] 中興工程顧問社，「易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置—集水區水文地質對坡地穩定性影響之調查評估計畫」，經濟部中央地質調查所成果報告，經濟部中央地質調查所 (2008)。
- [8] 中興工程顧問社，「花蓮集水區土砂影響範圍及災損評估分析結果」，行政院農業委員會水土保持局花蓮分局成果報告，行政院農業委員會水土保持局花蓮分局 (2008)。