

集水區泥砂總量模式推估之研究

陳鴻烈⁽¹⁾ 蔡大偉⁽²⁾

摘要

本研究是以南投縣水里溪集水區為研究對象，運用集水區總量管理模式模擬整體泥砂總量之推估，藉此建立總量資料，以協助集水區總量管理策略的制定。研究中主要是使用美國環保署集水區管理模式來進行模擬，模擬分為兩部分進行，第一部分先針對坡地泥砂產量進行模擬，模擬過程中又將坡地分為可滲透與非滲透兩區，最後計算結果為 63,642 ton，與相關研究比較後證實為合理。第二部分進行河道懸浮質之模擬，以坡地泥砂產量運移至河道部分為依據來進行，最後模擬結果與實測值比較，校正後其誤差平方和為 603.617，驗證後發現模擬值亦大部分符合實測值。

(**關鍵詞**：總量管理、泥砂產量、水里溪集水區)

A Simulation Study of Total Maximum Daily Sediment Load in Shuili Creek Watershed

Paris Honglay Che⁽¹⁾, David D-W. Tsai⁽²⁾

Professor, Graduate Student, Department of Soil and Water Conservation,
National Chung-Hsing University, Taichung 402, Taiwan

ABSTRACT

This study divided into two parts was to simulate total maximum daily load (TMDL) of sediment in Shuili Creek watershed, Nantou county, by TMDL model. The US EPA's BASINS model was used to simulate the results of watershed sediment load. The first part was to simulate sediment load on slopeland, including both the pervious and impervious land. It is reasonable that final results of sediment TMDL are 63,642 ton after comparing with relative references. The second part was to simulate river suspended solids. The simulation results were calibrated and validated by the observed values. Validation results indicated that simulated values matched the observed values.

(**Keywords** : TMDL Management, Sediment TMDL, Shuili-Stream Watershed)

(1) 國立中興大學水土保持學系教授

(2) 國立中興大學水土保持學系博士班研究生

前言

台灣近年來在經濟起飛之後，工商業快速發展，因而逐漸衍生山坡地開發過度的問題，致使坡地泥砂產量大增，再加上 921 大地震的影響，土石鬆動情形加劇，因此如何進行山坡地有效管理開發，將成為未來重要課題之一。

本研究主要是使用美國官方之總量管理模式來進行集水區整體泥砂量之推估 (林鎮洋, 2003)，藉由模擬結果建立日後進行總量管理時所需之基本資料。

本研究是以南投縣水里溪集水區為樣區，將泥砂總量模擬分為兩部分，第一部分先模擬坡地所產生之泥砂運移量，在經過相關參數校正後，計算出運移至河道之泥砂量。以坡地泥砂運移量的計算結果為基礎，第二部分則針對河道中懸浮質進行模擬，最後再經過校正與驗證後，模擬出集水區總量。

理論分析

本研究主要目的是使用總量管理模式模擬計算泥砂產量，模式中將集水區分為坡地與河道兩大部分進行模擬 (Donigian, 2002a)。另外，在坡地模擬部份，由於本研究缺乏現地沖蝕量之觀測值，因此將採用另一美國坡地沖蝕量估算工具 TMDL USLE 來模擬，並將該模擬值視為校正標準，來與總量管理模式作比較。因此，相關研究理論可參考吳嘉俊等(1996)、林昭遠等(2006)、Foster et al. (1981)、USEPA (2004a、2004d、2004f)。

研究方法

本研究主要目的是模擬集水區泥砂總產量，藉此做為研擬適當管理策略之基礎。研究中以南投縣水里溪集水區為例，所使用的模式為美國官方使用之集水區總量管理模式之 WinHSPF 模式來進行模擬 (USEPA, 2004c)。首先蒐集集水區相關基本資料，模擬集水區水文現象，主要是針對逕流量的模擬，經過模式校正與驗證後，可得知集水區逕流變化情形，並藉此確定地表特徵參數、河川特性參數、氣象參數等，以建立集水區特性基本資料庫，得到模擬泥砂總量的基礎參數 (陳鴻烈、蔡大偉, 2007a)。

在完成水文參數模擬與校正後，接著針對模擬泥砂總量相關參數進行探討與輸入。模式將泥砂產量分為 3 部分進行模擬，即可滲透地、非滲透地與河道。

一、可滲透地

在這一部分中，泥砂產量的模擬由模式中 SEDMNT 模組所控制，模組中所需輸入的參數包含基本設定參數，藉此控制參數輸入格式與選擇模擬模式。其中，土壤分離量參數是控制坡面土壤分離的產量；而土壤沖蝕量參數主要是控制坡面因水流而造成之沖蝕量；至於初始沖蝕量參數，則給予初始泥砂產量。

二、非滲透地

非滲透地部分是藉由 SOLIDS 模組來模擬，由於水分無法滲透，因此主要泥砂產量為水流沖刷所造成。輸入參數包括基本設定參數，藉此控制參數格式與模擬模式。其中，土壤沖刷量參數是用來模擬地面沖刷量；初

始沖刷量參數則給予初始泥砂沖刷量。

三、河道

在河道模擬部分，主要著眼於水中無機懸浮質的模擬，模式中以 SEDTRN 來控制，所需要的參數為基本設定參數，藉此控制參數格式與模擬模式，而河川基本參數之功能則是用來描述河川基本特性。模組將水中懸浮質分為砂粒、粉粒與粘土三類，此外，因懸浮機制不同，故將其分為砂粒、粉粒模組與粘土模組兩種分別進行模擬。砂粒、粉粒及粘土相關參數是分別用來控制砂粒、粉粒及粘土之特性與懸浮量；而初始懸浮質參數是用來輸入初始模擬量；初始底床性質參數則是用來描述河床特性。

完成模式參數輸入後，進行模擬可得到初始坡面沖蝕量與河道懸浮質，接著進行模式的校正工作。由於集水區位於南投縣，遭受 921 地震的影響甚大，因此為避免大地震的影響，校正時間選在 1998 年，校正工作先針對坡面泥砂產量進行。由於本研究並未於現地進行監測，因此無實際觀測值可進行校正，故使用 TMDL USLE 工具進行坡面泥砂產量模擬，再藉此模擬值來校正模式參數 (USEPA, 2004c)。至於此模擬值之合理性分析方面，將蒐集 USLE 相關校正方法文獻後，進行此集水區之土壤流失量估算，其後再將估算結果與 TMDL USLE 模擬值進行比較。另外，亦將模擬值與前人針對此集水區之推估結果進行比較，以確定使用 TMDL USLE 模擬值作為校正依據之合理性。

模式參數校正的主要目的在於校正模擬控制方程式之主要參數，但在校正之前，必須盡量使基本參數值合理化，使之最符合現

地狀況，減少模擬誤差。在蒐集相關資料後發現，基本參數中之地表覆蓋率 (COVER)、大氣泥沙沉降量 (NVSI)、初始沖蝕量 (DET) 等 3 個參數仍有修正空間，因此，在進行主要參數校正前，會先進行這 3 個參數之校正探討。在完成所有校正工作，使坡面泥砂產量相關參數更為接近現地情形後，接著將針對河道懸浮質進行校正，此部份則以水里溪實測值進行。

經過模式校正後，接著使用模式模擬值進行驗證，為避開 921 大地震的影響，驗證時間選用 1999 年 1 月 1 日到 9 月 19 日，最後藉由模式驗證結果來討論模式之合理性與適用性，整個研究的流程如圖 1 所示。

結果與討論

一、集水區基本資料

為了模擬整體集水區總量，必須先蒐集集水區相關基本資料。所需基本資料包括集水區 DEM、土地利用分布、土地利用特性、土地利用相對滲透率、水系分佈、河川特性、氣象資料、水文資料、水質資料等 (陳鴻烈、蔡大偉, 2007a)。

二、水文參數模擬與校正

在進行集水區總量模擬之前，首先必須針對集水區水文特性進行模擬與校正，藉此將集水區特性相關參數調整至最符合現地的狀態，以建立未來模擬總量之基礎，並提昇其準確度 (USEPA, 2004c)。模式中水文模擬的主要目標是逕流量模擬，藉此檢視整體集水區之水收支平衡。經過水文模擬與校正後，1998 年逕流總量誤差約為 10%，準確度

甚高，而使用 1999 年觀測值之驗證結果得知模式模擬情形甚佳，僅在夏季期間驗證結果受到暴雨的影響，模擬結果較不理想 (陳鴻烈、蔡大偉，2007b)。

三、泥砂產量參數輸入

模式中將集水區分為 3 大部分來模擬泥砂產量，包含 (1) 可滲透區、(2) 非滲透區，及 (3) 河道。

(一) 可滲透區

可滲透區泥砂總產量由模式中 SEDMNT 模組所控制，模組中分別就不同土壤運動行為進行模擬，包括 (1) 土壤累積與聚合、(2) 土壤分離、(3) 土壤運移，及 (4) 土壤沖刷。而模組中參數又可分為以下 4 組：(1) 基本設定參數、(2) 土壤分離量參數、(3) 土壤沖蝕量參數，及 (4) 初始沖蝕量參數。其中，土壤累積與聚合和土壤分離作用相關參數包含於土壤分離量參數中，而土壤運移與土壤沖刷作用相關參數則包含於土壤沖蝕量參數中。

1. 基本設定參數

基本設定參數的功能為決定參數輸入的格式與選定模擬模式，這個參數組中又包含 CRVFG、VSIVFG、SDOPFG 等 3 個參數。CRVFG 與 VSIVFG 是控制地表覆蓋率與淨垂直方向泥砂沉降量的輸入格式，由於本研究區缺乏這兩項資料，因此輸入格式採單一數值代表，無法以逐月變化形式表示。SDOPFG 參數是選擇地表泥砂產量模式，本研究根據操作手冊選擇應用最廣泛的 ARM 與 NPS 模

式進行模擬 (USEPA，2004f)。

2. 土壤分離量參數

土壤分離量參數是模擬因降雨衝擊、風蝕、人為開發等因素所造成之土壤分離量，包括 SMPF、KRER、JRER、AFFIX、COVER、NVTI 等 6 個參數。

(1) SMPF

SMPF 為集水區管理因子，用來模擬因水土保持措施所減少的沖蝕量，類似 USLE 公式中的 P 值，與集水區坡度與管理措施相關 (USEPA，2004e)。由於本研究並未進行現地沖蝕試驗，無法確認管理措施效益，因此採用參數值為 1，假設無水土保持措施作為初始模擬值。

(2) KRER、JRER

KRER 與 JRER 為泥砂分離量模擬公式中之係數值，其中 JRER 為指數值，這兩個係數為泥砂分離量之重要校正參數，在完成初始模擬後，進入校正工作時之主要校正目標。美國建議初始值可使用 USLE 公式中的 K 值 (USEPA，2004d)，本研究集水區範圍內有兩個 K 值測點，分別是魚池茶場與魚池新城 (萬鑫森、黃俊義，1989)，研究採兩點平均值 0.21 英噸-英畝-小時/每百英畝-英呎-英噸力-英吋輸入，而 JRER 值則是以 2 作為初始值。

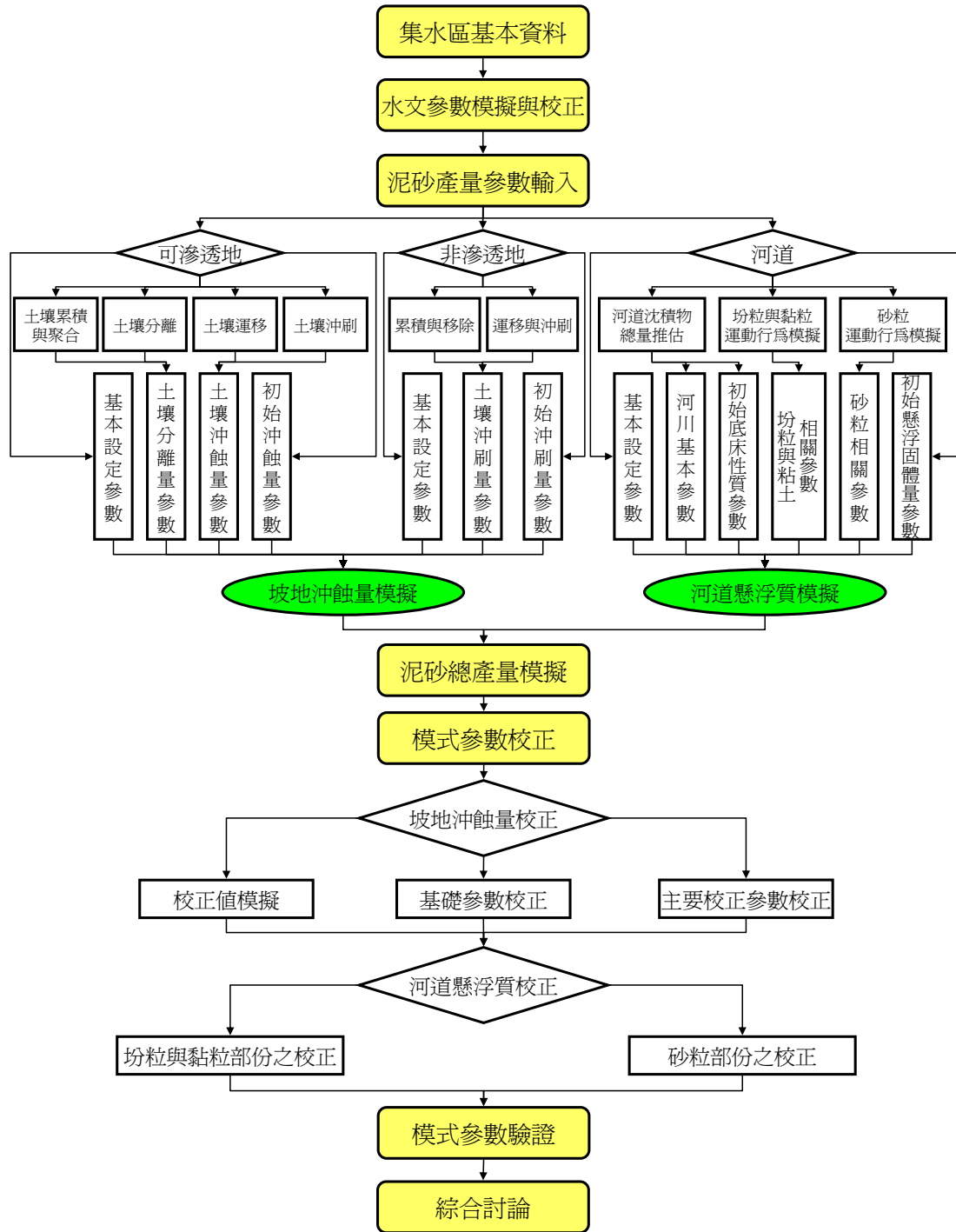


圖 1. 研究流程圖

Figure 1 . Overview of research method.

(3) AFFIX

AFFIX 參數代表因土壤固結或壓密作用所造成之土壤分離量減少比率，用來模擬土壤自然固結、土壤顆粒交互作用與因沖蝕移動造成壓密作用的影響。本研究採用美國之參數建議值，森林地採用 0.002，農業與都市則採用 0.01 (USEPA, 2004c)。

(4) COVER

COVER 代表地表之覆蓋率，功能為模擬因植生覆蓋所減少之土壤分離量。在缺乏現場實驗之情況下，可先行採用 USLE 公式中之 C 值來估算，覆蓋率等於 1-C，但通常此方法會高估，因 C 值之考量並非僅有覆蓋率，而是一代表沖蝕減少比率之綜合指標。因此，本研究之 COVER 值在參照水土保持手冊（水保局，2005）與美國建議值 (USEPA, 2004c) 之後，依照土地利用情形分別輸入：森林 0.99，農地 0.9，都市 0.85。

(5) NVSI

NVSI 代表來自大氣之泥砂沉降量，可視集水區風蝕情形而調整，亦可用負數代表風蝕嚴重地區。由於同樣缺乏現地觀測資料，因此初始值採用美國針對不同土地利用之建議分別給定：森林 2、農地 1、都市 2 lb/acre/day 作為起始值 (USEPA, 2004c)。

3. 土壤沖蝕量參數

此組參數主要目的為模擬因水流而造成之土壤沖蝕量，包括 KSER、JSER、KGER、JGER 等 4 個參數。

(1) KSER、JSER

KSER 與 JSER 為控制地表土壤運移量方程式之係數，其中 JSER 為指數係數，此兩參

數為泥砂沖蝕量校正之主要目標，初始值根據美國建議，森林地為 0.2，農地 0.9，都市 0.1 (USEPA, 2004c)。

(2) KGER、JGER

KGER 與 JGER 為模擬坡面蝕溝沖刷量方程式之係數，其中 JGER 為指數係數，若確認坡面有明顯蝕溝時，需加以模擬其所產生之沖蝕量。由於本研究無法確認蝕溝的規模與數量，因此初始模擬將忽略蝕溝的影響，因此採用 KGER=0，JGER=1。

4. 初始沖蝕量參數

初始沖蝕量參數為 DETS，此參數用來設定初始沖蝕量，以作為初始兩個月之模擬值，藉此使模擬結果更為穩定。初始值同樣暫採美國之建議值，亦即森林地 0.1，農地 0.5，都市 0.4，單位為 ton/acre (USEPA, 2004c)。

(二) 非滲透區

非滲透區之泥砂總產量模式中是以 SOLIDS 模組控制，模組中分別模擬區域中的累積與移除、運移與沖刷作用。而其中參數可分為基本設定參數、土壤沖刷量參數、初始沖刷量參數等 3 組。至於累積與移除、運移與沖刷作用等相關參數則是含括在土壤沖刷量參數中。

1. 基本設定參數

基本設定參數用來決定重要參數輸入形式與模擬模式，包括 VASDFG、VRSDFG、SDOPFG 等 3 個參數。其中 VASDFG 決定泥砂累積率為定值或呈月變化，VRSDFG 選擇泥砂單位去除率是否為定值，因本研究缺乏實際觀測數據，故暫定此兩參數均為定值。

此外，SDOPFG 是選定模擬非滲透地泥砂產量之模式，本研究是以 NPS 模式進行模擬。

2. 土壤沖刷量參數

此組參數為模擬累積/去除率模式與土壤沖刷量模擬模式之參數，包含 ACCSDP、REMSDP、KEIM、JEIM 等 4 個參數。

(1) ACCSDP、REMSDP

ACCSDP 為累積率，本研究於初始模擬時先使用美國建議值 0.0005 ton/acre/day；REMSDP 為去除率，同樣採用美國建議值，0.03 (USEPA, 2004c)。

(2) KEIM、JEIM

KEIM 為相乘係數，JEIM 則是指數係數，兩者均為未來主要的校正標的。初始值亦採用美國的建議值：KEIM=0.1 及 JEIM=2 (USEPA, 2004c)。

3. 初始沖刷量參數

初始沖刷量參數 SLDS 乃決定模擬過程之初始沖刷量，先暫定為 0.005 ton/acre (USEPA, 2004b)。

(三) 河道

河道部分的模式主要重點在模擬水中懸浮質，此部分是以 SEDTRN 模組進行，可模擬河道沉積物總量推估、坊粒與黏粒運動行為及砂粒運動行為。模組中將參數分為基本設定參數、河川基本參數、初始底床性質參數、坊粒與粘土相關參數、砂粒相關參數、初始懸浮質參數等 6 組。其中，河川基本參數與初始底床性質參數可推估河道沉積物總量，坊粒與粘土相關參數可模擬坊粒與黏粒運動行為，而砂粒相關參數則可進行砂粒運

動行為之模擬。

1. 基本設定參數

SANDFG 可決定用來模擬河道中砂粒運動的方法，本研究是採用應用最廣泛的 power function 進行模擬。

2. 河川基本參數

此組參數包含 BEDWID、BEDWRN、POR 等，主要功能為描述河川特性。其中，BEDWID 為河道斷面寬，BEDWRN 為河床深，POR 則為河床孔隙率，根據美國建議採用 0.5 (USEPA, 2004e)。

3. 初始底床性質參數

此組參數可用來代表底床之初始狀況，BEDDEP 為初始河床質深度，在考慮河川基本參數中之河床深後，定為 0.3 ft。SANDFR、SILTFR、CLAYFR 分別代表砂、坊、粘粒之含量比例，由於水里溪以砂粒含量最多，因此暫時採用 SANDFR=0.8、SILTFR=0.1、CLAYFR=0.1 為初始模擬值。

4. 坊粒與粘土相關參數

此組參數可模擬坊粒與粘土之運移情形，決定兩者之沉澱量或運移量，共含有 D、W、RHO、TAUCD、TAUCS、M 等 6 個參數，其中 D、W、RHO 之意義及選擇與砂粒參數相同，本研究參數輸入值 (USEPA, 2004c) 如下：

$$D_{\text{silt}} = 0.0006 \text{ in}$$

$$W_{\text{silt}} = 0.003 \text{ in/sec}$$

$$RHO_{\text{silt}} = 2.3 \text{ gm/cm}^3$$

$$D_{\text{clay}} = 0.0001 \text{ in}$$

$$W_{\text{clay}} = 0.00005 \text{ in/sec}$$

$$RHO_{\text{clay}} = 2 \text{ gm/cm}^3$$

此外，TAUCD 代表沉澱臨界剪力，TAUCS 代表沖刷臨界剪力，M 則是沖蝕係數，三者可決定傳輸到河道之泥砂為沉澱或是被帶走，因此，這三個參數為主要校正目標，美國建議初始值 (USEPA, 2004c) 為

$$\text{TAUCD} = 0.1 \text{ lb/ft}^2$$

$$\text{TAUCS} = 0.3 \text{ lb/ft}^2$$

$$M = 0.01 \text{ lb/ft}^2 \cdot \text{d}$$

5. 砂粒相關參數

此參數群中包括 D、W、RHO、KSAND、EXPSND 等 5 個參數，其中 D (粒徑)、W (沉降速度)、RHO (顆粒密度) 為描述砂粒特性的參數。因本研究未進行現地採樣實驗，故採用美國建議值：D=0.01 in、W=0.4 in/sec、RHO=2.6 gm/cm³，是一般情形下最常見的數值。KSAND 與 EXPSND 參數為 power function 之係數，藉此方程式模擬砂粒的運動情形，其初始值分別為 KSAND=0.1、EXPSND=2 (USEPA, 2004c)。

6. 初始懸浮質參數

參數群中以 SSED1、SSED2、SSED3 分別代表砂粒、粉粒、粘粒初始懸浮量，同樣採用美國建議初始值進行模擬，亦即 SSED1 = 5 mg/l、SSED2 = 25 mg/l、SSED3 = 25 mg/l (USEPA, 2004c)。

四、泥砂總產量模擬

本研究之泥砂總產量分為兩個部分進行模擬，先模擬集水區坡地沖蝕量，以校正坡面相關參數，並計算運移至河道之泥砂量；然後再模擬河道懸浮質，以了解集水區泥砂之總產量與運移情形。

(一) 坡地沖蝕量

坡地之沖蝕量是由可滲透地與非滲透地兩部分所組成，在輸入前述之各參數值後，可得到沖蝕模擬總量，由結果得知沖蝕量主要來自森林，因其所佔面積最大，其次為都市區，農地最少，此結果與沖蝕率排序相反，是以面積影響最大，故合理性有待探討，必須加以校正。而初步坡地沖蝕量模擬總量為 11,314 ton。

(二) 河道懸浮質

在輸入相關參數值後，模式即可模擬各個支流河道的懸浮質，而各個支流分布情形透過 GIS 軟體分析 (陳錦媽, 2003) 後如圖 2 所示。因本研究所採用之水里流量測站位於第 15 號子集水區，故主要將模擬此一集水區之懸浮質，以利後續校正工作的進行，而所採用的懸浮質實測值為距離流量測站最近之明湖抽蓄電廠下池 B2 測站與鉅工電廠排放口下游 D1 測站 (台電, 1998~2003)。第 15 號子集水區初始懸浮質模擬值與 1998 年 6 筆量測紀錄進行比對，模擬結果得知河道中懸浮質主要集中於 2~4 月間，然模擬結果於 8、10、12 月秋冬之際較為吻合，故此結果尚需進一步校正。

五、模式參數校正

校正工作同樣將坡地泥砂產量與河道懸浮質分開進行，先針對坡面產量進行校正，然後計算泥砂運移量；接著再進行懸浮質校正 (Donigian, 2002b)。

(一) 坡地泥砂產量校正

1. 校正值模擬

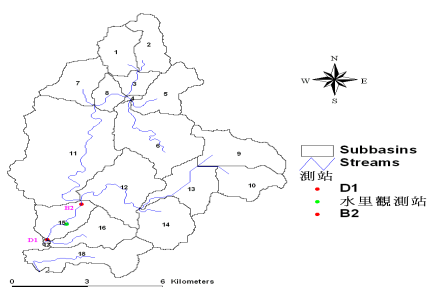


圖 2. 集水區水系分布與測站位置圖

Figure 2. Watershed river system and station locations.

由於本研究並未於集水區內進行現地泥砂沖蝕實驗，因此為了進行校正工作，必須先決定一合理之校正值。根據美國環保署建議，可使用坡地沖蝕量模擬工具 TMDL USLE 之模擬值來進行校正 (USEPA, 2004c)，此工具主要是依據 USLE 公式來推估坡面沖蝕量，雖無法準確模擬，但可作為校正之參考值 (USEPA, 2004a)。USLE 公式由 R、K、LS、C、P 等參數構成，各參數值參考水土保持手冊 (水保局, 2005) 及 TMDL USLE 工具操作手冊與相關文獻輸入如下：

(1) R 值

在水里溪集水區中使用 R 值觀測點為日月潭測點，以此作為集水區之代表值，轉換成英制後為 759.9 hundreds of ft-tonf-in/acre-hr-yr (盧昭堯等, 2005)。

(2) K 值

同 KRER 參數值，輸入值為 0.21 ton×acre/hundreds of acre×ft-tonf×in。

(3) LS 值

LS 值在 TMDL USLE 工具中需要依據土地利用類型予以劃分，因此必須分別計算各種土地利用之坡長與坡度。其中，森林平均

坡長為 150 ft、平均坡度為 15.09%，農地坡長為 150 ft、坡度為 20.15%，都市坡長為 200 ft、坡度為 14.69%。另外，在 TMDL USLE 工具中會依據土地利用類型對造成蝕溝之敏感度進行校正，其中，森林與都市屬低度敏感，農地為中度敏感 (USEPA, 2004a)，故最後 LS 輸入值為森林 2.7、農地 4.4、都市 2.92。

(4) C 值

C 值主要參考水土保持手冊 (水保局, 2005) 中的建議值，森林為 0.01，農地則依不同作物耕種面積做為加權係數來計算 (表 1)，最後計算結果為 0.096。都市部分由於台灣尚未建立統一的標準，因此暫時以美國建議值 0.15 輸入 (USEPA, 2004c)。

(5) P 值

P 值的輸入是參照水土保持手冊 (水保局, 2005) 之計算方法，假設均為等高耕犁的情形下，各類土地利用依照其坡度與坡長條件計算之，計算結果為森林地 0.8，農地 0.9，都市 0.8。

最後 USLE 公式中各個參數之輸入值與計算結果如表 2，而最後計算出來之坡面泥砂產量分別為森林 3.53、農地 61.94 及都市 57.19 ton/acre，在分別乘上其面積後即可得到坡面泥砂總產量為 251,821 ton。另外，為了計算坡面運移至河道的數量，必須估算泥砂遞移率，將集水區面積帶入公式計算後，可得到第 15 號子集水區以上之代表泥砂遞移率為 0.253，因此，運送到河道之泥砂總量為 63,642 ton。

本研究在蒐集台灣使用 USLE 公式來推估坡地土壤流失量之應用與修正方法後，針

對本集水區進行推估，包括以下 6 種方法：

- a. 直接使用 USLE 公式推算 (水保局, 2004)。
- b. 將 USLE 推估值乘以 0.5 作為修正 (水保局, 1992)。
- c. 使用泥砂遞移率計算坡面泥砂運移至河道之泥砂量 (林文賜, 2002)。
- d. 於桃園、南投、台南地區可乘以修正係數 0.15 以符合實際值 (廖秀華, 1990)。
- e. USLE 公式推估值約為實際觀測值之 19.83 倍 (林俐玲等, 2002)。

表 1. 農地 C 值之計算

Table 1 . Calculation of C value in agriculture land.

耕種作物類型	Area (acre)	Area ratio	原始C值	加權後C值
水田	36800	0.001591	0.1	0.000159
竹林	4438400	0.191932	0.01	0.001919
旱田	1076800	0.046565	0.25	0.011641
果園	1169600	0.050578	0.2	0.010116
香蕉園	35200	0.001522	0.14	0.000213
茶園	467200	0.020203	0.15	0.003031
檳榔椰子	15900800	0.687608	0.1	0.068761
total	23124800			0.096

表 2 . TMDL USLE 工具之各項參數輸入值與計算結果

Table 2 . Parameter values and calculation results in TMDL USLE tool.

Landuse	R	K	LS	C	P
Forest	759.9	0.21	2.70	0.010	0.8
Agriculture	759.9	0.21	4.40	0.096	0.9
Urban	759.9	0.21	2.92	0.150	0.8

Landuse	Edge of field rate (ton/acre)	Segment area (acre)	Edge of field load (ton)	Delivery ratio	Edge of stream load (ton)	Edge of stream rate (ton/acre)
Forest	3.53	13581	47941	0.253	12116	0.892
Agriculture	61.94	457	28307	0.253	7154	15.654
Urban	57.19	3070	175573	0.253	44372	14.453
total			251821		63642	

- f. 此集水區之土壤容許流失量為 88,912 (車埕) – 177,824 (日月潭) (ton) (吳嘉俊等, 1996)。
- g. 本研究嘗試使用懸浮質乘以總流量來推估沖蝕量。

將各個推估值與 TMDL USLE 之模擬值

相互比較，以驗證其合理性，計算結果如表 3 所示。表 3 數據顯示 TMDL USLE 之模擬值低於 USLE 直接推估與其乘以修正係數 0.5，及使用泥砂遞移率計算的結果，顯示模擬結果明顯低於 USLE 推估值，亦即台灣若使用 USLE 直接推估會有明顯高估的現象產生。至

於結果並未符合修正係數為 0.5 之假設的原因，可能是因此一修正係數並未被證實可適用於全台灣，所以有不適用之可能。另外，模擬結果顯示低於容許土壤流失量範圍之下，表示沖蝕量偏低，有趨近土砂平衡的現象。再者，若與 USLE 乘以 0.15 或 0.05 之係數以及使用懸浮質直接推估的結果相比較，發現 TMDL USLE 模擬結果明顯較高，推測原因為適用修正係數 0.15 的區域為桃園、南投、台南，而修正係數 0.05 則是在三義試區驗證之結果，均未包含本集水區，因此不一定適合。最後本研究嘗試使用懸浮質推估結果，然可能因考慮因素最少，且未找出流量與懸浮質之關係式，因此結果明顯過低。

前人於水里溪集水區中之相關泥砂產量計算為 168,150 ton (盧光輝, 1997) 或是 206,826 ton (夏禹九、陳萱蓉, 1999)，兩者均是使用 AGNPS 模式模擬計算，而所採用的集水面積分別為 5,700 與 2,820 公頃，均較本研究 7,866 公頃為小。相關研究亦指出 AGNPS 模式之準確度雖遠較 USLE 高，但仍較實測值高約 4 倍 (林俐玲等, 2002)。經過 TMDL

USLE 工具模擬後之模擬值為 63,642 ton，推論在與本研究相同集水區範圍下使用 AGNPS 模擬之結果將會更高，由此可知 TMDL USLE 模擬結果會更接近實測值，故作為校正值尚稱合理。

2. 基礎參數校正

由於初始模擬泥砂產量為 11,314 ton，與校正值 63,642 ton 相差甚遠，因此先針對基礎參數值進行校正，討論輸入參數值之合理性。本研究將選擇 COVER、NCSI、DET 等 3 個參數進行探討。

(1) COVER

於初始模擬時，COVER 值參考 USLE 公式中之 C 值來計算，但由於 C 值計算並非僅考慮覆蓋單一因子，故使用 C 值推估易有高估的現象產生。為了校正此一現象，本研究將另外參考覆蓋指標值 (陳樹群等, 1998) 來推求覆蓋率，因此森林覆蓋率變更為 0.95，農地同樣依作物耕種面積加權計算，求得覆蓋率為 0.77 (詳細計算過程如表 4)，都市地則參考水泥地覆蓋，設為 0.9。

表 3 . TMDL USLE 模擬值驗證

Table 3 . Validation of simulated values by TMDL USLE.

土壤流失量推估 (ton)	計算方法	參考文獻
299060	USLE直接推估	水保局, 2004
149530	USLE推估值乘以0.5	水保局, 1992
75580	考量泥砂遞移率	林文賜, 2002
44859	USLE推估值乘以0.15	廖秀華, 1990
15081	USLE推估值為實際觀測值19.83倍	林俐玲等, 2002
88912-177824	88,912 (車埕) - 177,824 (日月潭)	吳嘉俊等, 1996
1495	懸浮質乘以總流量	本研究
63642	USLE模擬值	USEPA, 2004a

COVER 值修改後，坡地泥砂產量模擬結

果如表 5 所示，由表中可看出森林與農地之

年沖蝕率均有所上升，而都市地則因調高 COVER 值而造成下降的結果，但整體而言總沖蝕量由 11,314 調高至 17,088 ton，已更接近校正值。此外，森林地之泥砂產量模擬值 0.888 ton/acre 已相當接近校正值 0.892 ton/acre，但農地及都市模擬值與校正值仍有一段差距，需繼續進行校正工作。

(2) NVSI

NVSI 代表大氣中泥砂沈降量，在台灣有可能達到 20 lb/acre/day (黃佳慧，2005)，因此本研究將農地與都市之 NVSI 值調升至 20。森林部分由於已接近校正值，且台灣森林分佈大多位於高山地區，因此沈降量較低，故不再修改 NVSI 值。在修正 NVSI 值後，泥砂產量模擬值如表 6，表中數據顯示農地對於 NVSI 值改變敏感度較高，年沖蝕率由 2.74 升為 5 ton/acre；都市區僅由 1.23 提升為 1.38 ton/acre，推測原因在於面積之不同所影響，農地面積遠較都市低，造成大氣沈降量調整影響較大。最後模擬總量為 18,582 ton，有更接近校正值的趨勢。

(3) DET

DET 為坡地泥砂初始產量，於農地與都市區域，對台灣可能有偏低的情形，可考慮使用 1.2 ton/acre 為初始產量 (黃佳慧，2005)，以更符合現地情形；森林地則因模擬值吻合度高，且一般沖蝕量較低，故不再予以修改。在修改 DET 值後，模式模擬值如表 7，表中資料顯示修改 DET 值對模擬值之影響不大，主要是因修改幅度甚小，僅對面積小之農業區有較明顯的影響，對都市區則無影響，但最後坡地泥砂總產量增至 18,732 ton，還是更為接近校正值。

表 4. 農地覆蓋率之計算

Table 4. Calculation of cover ratio in agriculture land.

耕種作物類型	Area (acre)	Area ratio	覆蓋率 (%)	加權後覆蓋率 (%)
水田	36800	0.001	75	0.12
竹林	4438400	0.192	95	18.23
旱田	1076800	0.047	50	2.33
果園	1169600	0.051	60	3.03
香蕉園	35200	0.002	70	0.11
茶園	467200	0.020	70	1.41
檳榔椰子	15900800	0.688	75	51.57
Total	23124800			76.81

表 5. COVER 值修正後之坡地沖蝕量模擬
Table 5. Simulation results of erosion amount on slopeland after calibrating COVER value.

Lanuse	Edge of field rate (ton/acre)	Area (acre)	Edge of field load (ton)
Forest	0.888	13581	12059.93
Agriculture	2.74	457	1252.18
Urban	1.23	3070	3776.10
Total			17088

表 6. NVSI 值修正後之坡地沖蝕量模擬
Table 6. Simulation results of erosion amount on slopeland after calibrating NVSI value.

Lanuse	Edge of field rate (ton/acre)	Area (acre)	Edge of field load (ton)
Forest	0.888	13581	12059.93
Agriculture	5	457	2285.00
Urban	1.38	3070	4236.60
Total			18582

3. 主要校正參數校正

在現有的環境資料下，盡可能使基礎參數值合理化後，即可針對主要校正參數進行校正，這些參數主要為 KSER 與 KRER 兩個控制方程式之係數。

(1) KSER

KSER 主要為控制因水流沖蝕所造成之土壤流失量，研究中分別針對不同土地利用予以調整。森林地部分由於略小於校正值，因此將 0.2 予以微幅調高至 0.25；農地與都市部分，因兩者均距離校正值甚遠，故先嘗試使用美國建議之 KSER 最大值 (USEPA, 2004e)，二者均調升至 5，再觀察其變化情形，計算結果如表 8 所示。由表中可看出森林地部分年沖蝕率由 0.888 提高至 0.89，有更接近校正值 0.892 之趨勢；農地與都市部分亦均有所提升，農地年沖蝕率由 5.33 升高至 5.65 ton/acre，都市部分由於都市係數調升幅度較高，故變化較明顯，由 1.38 升至 4.33 ton/acre，然二者仍距校正值甚遠。

在森林部分還有調整空間，可再微調 KSER 值，使模擬值更接近校正值。經過一連串的調校後，得到最佳參數值為 0.35。當森林地 KSER=0.35 時，泥砂產量模擬值為 0.892 ton/acre，已與校正值完全符合。

(2) KRER

經過 KSER 參數校正後，森林地模擬值已符合校正值，但農地與都市區域在 KSER 已達建議最大值的情況下，泥砂產量模擬值仍與校正值差距甚大，因此必須繼續針對 KRER 進行校正。

KRER 參數代表坡地上土壤之抗蝕性，因此主要功能為控制土壤之分離總量。農地之 KRER 最後校正結果可知其最佳參數值為 1.14，此時年沖蝕率模擬結果為 15.653 ton/acre，已非常接近校正值 15.654 ton/acre。都市部分的 KRER 校正結果得知 KRER=2.37 時，坡地泥砂年產率為 14.465 ton/acre，此模擬值最接近校正值 14.453 ton/acre。

校正結果農地 KRER=1.14，都市 2.37，雖超出美國建議最大值 0.75 甚多，但在台灣的環境下最大值有可能達 9.14 (黃佳慧, 2005)，因此校正結果尚在合理範圍內。這也顯示出台灣沖蝕情形有明顯高於美國的現象，而最後坡地泥砂產量校正結果亦相當接近校正值。

表 7. DET 值修正後之坡地沖蝕量模擬
Table 7. Simulation results of erosion amount on slopeland after calibrating DET value.

Lanuse	Edge of field rate (ton/acre)	Area (acre)	Edge of field load (ton)
Forest	0.888	13581	12059.93
Agriculture	5.33	457	2435.81
Urban	1.38	3070	4236.60
Total			18732

表 8. KSER 校正

Table 8. KSER calibration process.

Landuse	KSER (original)	Edge of field rate (original) (ton/acre)	KSER (adjust)	Edge of field rate (adjust) (ton/acre)	TMDL USLE (ton/acre)
Forest	0.2	0.888	0.25	0.89	0.892
Agriculture	0.9	5.33	5	5.65	15.654
Urban	0.1	1.38	5	4.33	14.453

(二) 河道懸浮質校正

經過坡地泥砂產量校正後，即可校正坡

地相關參數，使之更符合現地狀況，並藉此計算出由坡面沖蝕至河道之泥砂總量。在完成坡地校正後，首先使用校正後之坡地參數重新計算懸浮質，計算結果如圖 3，若與校正前之初始模擬值比較，可明顯得知校正後有增加的趨勢，主要原因是校正後坡地泥砂運移量由 11,314 增至 63,642 ton。

接著進行河道懸浮質校正工作，此部分主要分為兩個階段：(1) 粉粒與黏粒之校正，及 (2) 砂粒之校正。在第一階段粉粒與黏粒的校正方面，首先校正目標為臨界剪力，在大於運移剪力情況下，泥砂即被水流輸送；在小於沈降剪力的情形下，則發生沈澱現象，藉此決定泥砂之沈降量與運移量，而代表臨界剪力之參數即為 TAUCD 與 TUCS。模式中將粉粒與黏粒兩種不同粒徑之顆粒分開進行模擬，藉此模擬不同性質之顆粒所造成的懸浮質。

第二階段的校正是針對砂粒部分，由於相關資料缺乏，因此將在完成粉粒與黏粒之校正後，嘗試依據觀測值尋找最合適之參數值，以校正砂粒運動行為，希望藉此提昇模式準確度。

1. 粉粒與黏粒之校正

要校正 TAUCD 與 TUCS 兩個參數值，必須先計算河道之最大剪力值變化，接著從剪力圖中觀察應力的變化，再依圖中變化趨勢決定臨界剪力值。另外，由於河道具有連續性，因此集水區中每一條支流均需進行臨界剪力校正，且順序應由上游往下游方向依各支流河道現地流況為基礎進行校正。

各支流河道中的最大剪力變化趨勢如圖 4，圖中以 1 號子集水區為例，其中紅線即為

最大剪力之分布，藍線為粉粒之臨界剪力 TAUCSsill 與 TAUCDsill，綠線為黏粒之臨界剪力 TAUCSclay 與 TAUCDclay。當剪力超過 TAUCS 時，泥砂顆粒被水流沖起，經水力運移成為懸浮質；而當剪力小於 TAUCS 時，則因水流力量無法將泥砂顆粒帶起，故產生沈積現象。

逐一將各支流校正後之臨界剪力值求出後，帶入模式中模擬以進行修正，模擬結果如圖 5 所示。由圖 5 可看出，與臨界剪力校正前比較 (圖 3)，懸浮質在流量較低時有明顯降低的趨勢，而在高流量時所產生之懸浮質則變化不大，推測原因為經過剪力校正後，大多數河道產生之泥砂運移與沈積的臨界剪力均有所提升，故在門檻值調升的情況下，被水流帶走的量會減少，而沈積的量會增加，因此枯水期懸浮質總量會減少，而豐水期則影響不大。為了顯示校正的成效，本研究將依據觀測值來計算模擬誤差，計算結果如表 9，由表中數據得知，經由模擬值與觀測值間之誤差平方和計算後，校正前後由 4978.126 降至 881.736，約減少 82.29% 之誤差，由此可知，經過臨界剪力校正後，模式模擬之準確度明顯上升。

2. 砂粒部分之校正

完成粉粒與黏粒部分之懸浮量模擬後，發現 2、6、8 月份之模擬值的誤差仍甚大，因此再針對砂粒部分進行參數校正，希望藉由砂粒運動行為的校正來提昇懸浮質總量之模擬準確度。

砂粒運動方程式 power function 中主要校正參數為 KSAND，此參數控制砂粒顆粒之懸浮總量，經過尋找最佳 KSAND 參數值過程

後可得知當 $KSAND=0.038$ 時，模式模擬誤差最小，代表校正前在觀測時間點時之砂粒懸浮量偏高，因此降低 $KSAND$ 參數值後有較佳之模擬結果。 $KSAND=0.038$ 時之模擬結果如圖 6 所示，將圖 6 與圖 5 相比較後，可看出模式誤差下降，主要是因 2 月 26 日之模擬值明顯下降，因此使整體誤差下降。

最後將懸浮質總量模擬校正前後之變化整理如表 10，表中數據顯示校正工作明顯降

低模式之誤差，誤差平方和由 4978.126 降至 603.617，共減少約 87.87% 之誤差。而模擬結果亦顯示 6 月 11 日與 8 月 13 日之模擬結果誤差較大，推測原因可能是研究中未對每一條支流進行詳細之調查，因此許多參數仍為未知，僅用最合適之推估值。而在本集水區內可得到的水質監測資料中，一年中為 6 個觀測值，亦未能完全展現懸浮質之變化趨勢，因此仍需進一步蒐集較完整的資料後繼續進行探討。

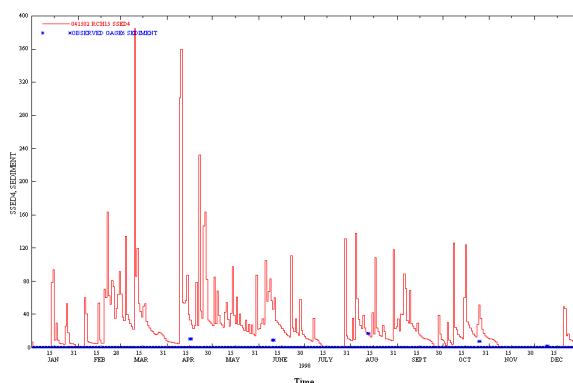


圖 3 . 河道懸浮質之模擬 (經坡地參數校正後)

Figure 3 . Simulation results of river suspended solids (after calibrating parameters of slopland).

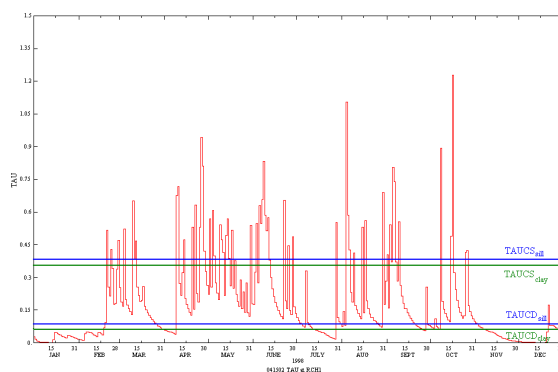


圖 4 . 支流河道中最大剪力分布 (1 號子集水區)

Figure 4 . Distribution of maximum shear stress in the branch river. (NO. 1 subbasin)

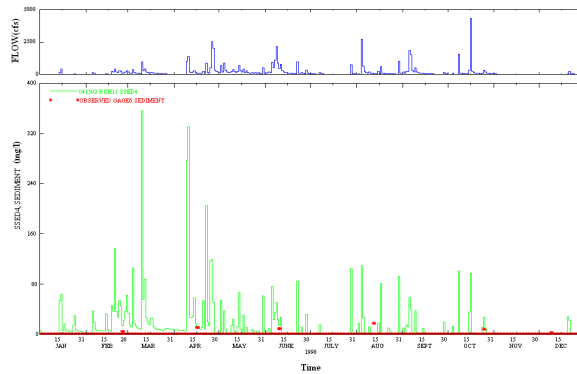


圖 5 . 臨界剪力校正後之懸浮質模擬

Figure 5 . Simulation results of suspended solids after calibrating critical shear stress.

表 9 . 臨界剪力校正前後懸浮質模擬比較

Table 9 . Simulation comparison of suspended solids before and after calibrating critical shear stress.

校正前						
觀測時間	2月26日	4月17日	6月11日	8月13日	10月26日	12月10日
模式模擬值(mg/l)	46.6249	27.2012	59.7553	13.7330	23.3774	0.0000
觀測值(mg/l)	4.1	10.3	8.6	16.8	7.4	1.6
誤差平方和	4978.126					
校正後						
觀測時間	2月26日	4月17日	6月11日	8月13日	10月26日	12月10日
模式模擬值(mg/l)	21.6849	9.0099	26.4051	0.9500	7.5975	0.0000
觀測值(mg/l)	4.1	10.3	8.6	16.8	7.4	1.6
誤差平方和	881.736					

表 10 . 模式校正前後之懸浮質總量模擬比較

Table 10 . Simulation comparison of suspended solids before and after calibrating the model.

校正前						
觀測時間	2月26日	4月17日	6月11日	8月13日	10月26日	12月10日
模式模擬值(mg/l)	46.6249	27.2012	59.7553	13.7330	23.3774	0.0000
觀測值(mg/l)	4.1	10.3	8.6	16.8	7.4	1.6
誤差平方和	4978.126					
校正後						
觀測時間	2月26日	4月17日	6月11日	8月13日	10月26日	12月10日
模式模擬值(mg/l)	10.0362	3.4238	24.3353	0.3610	6.5656	0.0000
觀測值(mg/l)	4.1	10.3	8.6	16.8	7.4	1.6
誤差平方和	603.617					

六、模式參數驗證

經模式校正後，各相關參數已盡量達最佳化之推估，接著研究中將進行驗證的工

作。驗證所採用之時間爲了避開 921 大地震的影響，將選擇 1999 年 1 月 1 日至 1999 年 1 月 19 日期間的觀測資料來進行，模式驗證結

果如圖 7 所示。圖中顯示模式在低流量時模擬結果良好，均相當接近觀測值，而在較高流量時則模擬誤差較大，但在觀測值缺乏的情況下，還是無法判斷懸浮質模擬之整體趨勢，仍需日後繼續持續監測相關資料，才能完整驗證模式。

七、綜合討論

研究中分為坡地泥砂與河道懸浮質兩大部分進行。坡地泥砂方面，由於缺乏實測值，故使用 TMDL USLE 工具進行模擬，其原理為使用 USLE 公式為基礎，再進行修正後來模擬泥砂產量，模擬結果與目前台灣相關研究比較如表 11。由表中發現 TMDL USLE 模擬結果明顯較以原始 USLE 之推估值低，表示推估結果較 USLE 合理。造成模擬結果較 USLE 合理的原因，推論主要在於針對地形因子進行修正的緣故。至於與其他 USLE 相關修正係數之適用性比較方面，則仍需進一步探討。

若將模式推估結果與使用 AGNPS 模式之模擬結果相比較，可知本研究結果均遠低

於盧光輝 (1997) 與夏禹九等 (1999) 之推估結果，推論原因可能是因夏禹九等 (1999) 所選用之集水區面積最小，集水區中坡度陡峭區位多，再加上許多土地超限利用的結果，造成沖蝕量劇增。本研究只考量土地利用情形，僅區分為森林、農地、都市等 3 類，且模擬面積最大，因此造成模擬結果相差甚多的現象。至於與盧光輝 (1997) 比較方面，其所採用之網格為 300×300m，而本研究則為 40×40m，由此推論本研究模擬結果應更為接近實測值。另外，周天穎等 (1997) 使用 RUSLE 公式推估泥砂產量，其所採用之集水面積為 7,400 公頃，與本研究最為接近，其推估結果為各子集水區之年沖蝕率，約為 0.5-3.5 ton/ha，最高為 10.83 ton/ha，推論造成其沖蝕量結果較低的原因為集水區切割之尺度不同，亦即周天穎等 (1997) 將該集水區切割為約 50 個以上之子集水區，因此較無法看出整體集水區之趨勢。

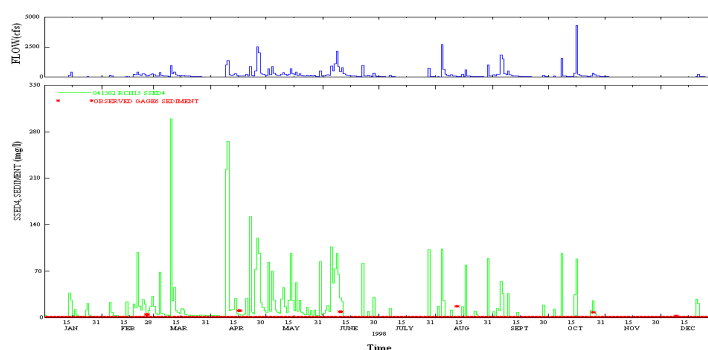


圖 6. 經 KSAND 校正後之懸浮質模擬

Figure 6. Simulation results of suspended solids after calibrating KSAND.

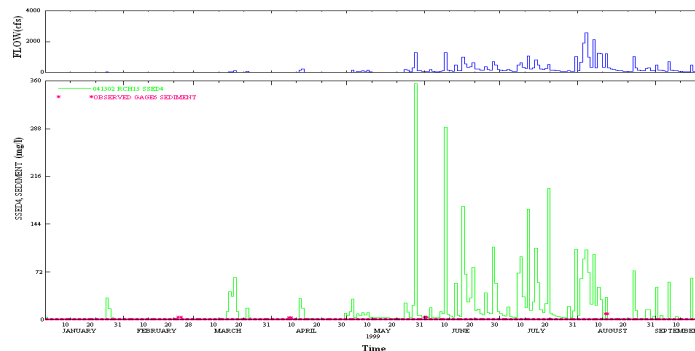


圖 7. 懸浮質模式驗證圖

Figure 7. Validation results of suspended solids.

表 11. 不同土壤流失量推估方法之比較
Table 11. Comparison of different methods
for estimating soil loss.

土壤流失量推估 (ton/ha)	參考文獻
38.640	水保局, 2004
19.320	水保局, 1992
9.765	林文賜, 2002
5.796	廖秀華, 1990
1.949	林俐玲等, 2002
10-20	吳嘉俊等, 1996
0.193	懸浮質數量與流量乘積*
8.222	USEPA, 2004a
29.500	盧光輝, 1997
73.343	夏禹九等, 1999
0.5-3.5(子集水區)	周天穎等, 1997

*: 本研究採用方法。

使用 HSPF 模式模擬, 共考慮 16 個參數, 且將坡地分為可滲透區與非滲透區, 並將都市開發區域納入考量, 因此對於土壤流失之生成機制有較詳盡的探討。在比較此集水區相關之土壤流失量模擬研究 (盧光輝, 1997; 夏禹九、陳萱蓉, 1999; 周天穎、葉美伶, 1997) 後, 將 AGNPS 與 HSPF 模式作一簡單的比較, 可知 HSPF 較佳的優點如下:

1. 模式考慮參數更為周詳
2. 可針對都市區進行模擬
3. 可模擬連續降雨
4. 可模擬基流量
5. 校正過程較嚴謹

據此推論 HSPF 模擬結果可能更接近當地自然環境, 但由於參數繁多, 詳盡之資料庫需求龐大, 而台灣目前尚未建立此大型資料庫, 建議未來可規劃逐步建立相關資料庫, 以進行更深入的模式探討。

在河道懸浮質模擬方面, 主要依照不同粒徑之顆粒特性進行模擬。研究中將坩粒與黏粒、砂粒兩組分開進行, 坩粒與黏粒的部分, 由於顆粒較小, 較易受水流之影響而懸浮, 因此主要考慮河道最大剪力之變化來決定其懸浮量; 至於砂粒部分, 由於顆粒較大, 較不易被水流帶走, 故另外使用 power function 來模擬其運動行為, 其模擬懸浮質數量時有較詳盡之考量, 且模擬結果經驗證後, 發現準確度甚高。但由於缺乏更多的河況詳細資料以及懸浮質觀測資料, 未來期能蒐集建立更完整的資料, 進一步校正並驗證此模式之適用性。

本研究進行集水區之泥砂總量模擬時，與過去研究較為不同的地方在於模擬單元之劃分是以土地利用為單位，而過去研究則是以子集水區為單元劃分。因本研究之未來目標在於進行總量管制工作，故必須針對不同土地利用之影響進行深入探討，以建立未來總量管理相關工作之研究基礎，藉以研擬總量管理策略之計畫。

來可使用此模式進行泥砂產量之模擬，可供在無實地監測值時之參考值。研究過程中發現集水區自然環境基礎相關資料仍有不足，而重要觀測點則建議設於同一地點為宜。未來在整體考量後可研擬重點觀測計畫，以建立基本環境資料庫，藉此將可進一步針對此模式作更深入之校正與驗證工作，提升總量模擬之準確度，利於推行總量管理工作。

結論與建議

本研究在使用總量管理模式模擬集水區泥砂總量後，於坡地沖蝕量部分，模擬結果為 63,642 ton，低於此集水區之土壤容許流失量，因此模擬結果是在合理範圍。與其他土壤流失量相關研究及同一集水區之土壤沖蝕模擬量相比較後，亦證實本研究模擬結果甚為合理，未來可在當地進行現地實驗以取得實測值，可進一步驗證此模式之準確度。

於河道懸浮質模擬部分，經現場實測值驗證後，發現模擬誤差甚小，其誤差平方和為 603.617，模擬結果於低流量時較為準確，高流量時誤差較大，推測原因為：

1. 模式中參數資料甚為缺乏，因此許多參數只能予以最佳推估或參考美國相關資料。
2. 由於資料缺乏，目前僅能將所有水系使用單一參數，無法顯示出所有支流之特性，故造成一定程度的誤差。
3. 目前所蒐集之資料一年僅有 6 個觀測值，對於進行模式驗證工作仍略嫌不足。
4. 水質資料與流量資料並非位於同一個地點，因此地域關係所造成之誤差無法消除。

本研究使用總量管理模式進行集水區泥砂總量模擬，結果均甚為準確，因此建議未

參考文獻

1. 台灣電力公司明潭發電廠 (1998~ 2003) 「明潭發電廠運轉期間環境監測計畫」。
2. 行政院農委會水土保持局 (1992) 「水土保持技術規範」，南投市。
3. 行政院農委會水土保持局 (2004) 「水土保持技術規範」，南投市。
4. 行政院農委會水土保持局 (2005) 「水土保持手冊」，中華水土保持學會，台北市。
5. 吳嘉俊、盧光輝、林俐玲 (1996) 「土壤流失量估算手冊」，國立屏東技術學院，屏東縣。
6. 周天穎、葉美伶 (1997) 「水里溪集水區檳榔種植對土壤沖蝕之影響及其經濟分析」，中華水土保持學報，第二十八卷，第二期，第 87~97 頁。
7. 林文賜 (2002) 「集水區空間資訊萃取及坡面泥砂產量推估之研究」，中興大學博士論文。
8. 林俐玲、杜怡德、何宜娟 (2002) 「應用農業非點源污染模式 (AGNPS) 評估坡地開發泥砂產量」，水土保持學報，第三十四卷，第三期，第 165~176 頁。
9. 林昭遠、陳昱豪、林家榮 (2006) 「集水區泥砂產量推估之研究」，水土保持學報。

10. 林鎮洋 (2003) 「集水區水質總量管理模式與控制技術之研究」, 國科會委託研究計畫期末報告。
 11. 夏禹九、陳萱蓉 (1999) 「農業非點源模式應用於集水區分析上之探討」, 88 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編。
 12. 黃佳慧 (2005) 「以 HSPF 營養鹽模組討論農業對水庫非點源污染負荷的貢獻」, 成功大學碩士論文。
 13. 陳錦嫻 (2003) 「GIS 技術與實務應用 ARCVIEW 3.X & 8.X」, 文京圖書有限公司, 台北市。
 14. 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, 第二十九卷, 第三期, 第 233~247 頁。
 15. 陳鴻烈、蔡大偉 (2007a) 「最佳集水分區模擬之研究」, 水土保持學報。
 16. 陳鴻烈、蔡大偉 (2007b) 「總量管理模式氣象模擬與水文校正之研究」, 水土保持學報。
 17. 萬鑫森、黃俊義 (1989) 「台灣坡地土壤沖蝕」, 中華水土保持學報, 第二十卷, 第二期, 第 17-45 頁。
 18. 廖秀華 (1990) 「應用地理資訊系統推估土壤沖蝕潛能」中興大學碩士論文。
 19. 盧光輝 (1997) 「水里溪集水區土壤流失量之推估」, 85 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編。
 20. 盧昭堯、蘇志強、吳藝均 (2005) 「台灣地區年等降雨沖蝕指數圖之修訂」, 中華水土保持學報, 第三十六卷, 第二期, 第 159~172 頁。
 21. Donigian, A. S. and J. T. Love (2002a) "Sediment Calibration Procedures and Guidelines for Watershed Modeling", AQUA TERRA Consultants.
 22. Donigian, A. S. and J. T. Love (2002b) "Watershed Model Calibration and Validation the HSPF Experience", AQUA TERRA Consultants.
 23. Foster, G. R., D. K. McCool, K. G. Renard, W. C. Moldenhauer (1981) "Conversion of the Universal Soil Loss Equation to SI Metric Units", *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. Nov.-Dec., pp.355~359.
 24. USEPA (2004a) "BASINS Appendix", U.S. Environmental Protection Agency.
 25. USEPA (2004b) "BASINS Case Study", U.S. Environmental Protection Agency.
 26. USEPA (2004c) "BASINS Exercises", U.S. Environmental Protection Agency.
 27. USEPA (2004d) "BASINS Lectures", U.S. Environmental Protection Agency.
 28. USEPA (2004e) "BASINS Technical Notes", U.S. Environmental Protection Agency.
 29. USEPA (2004f) "HSPF User Manual", U.S. Environmental Protection Agency.
-
- 97 年 01 月 15 日 收稿
97 年 01 月 26 日 修改
97 年 02 月 03 日 接受