

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 子計畫：崩塌區位水文地文整合分析系統之研究(I)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC94-2625-Z-216-002-

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：中華大學土木與工程資訊學系

計畫主持人：周文杰

共同主持人：蔡靜嫻

計畫參與人員：張君璋、陳伊昱

報告類型：完整報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 9 月 18 日

## 中、英文摘要及關鍵詞

### 摘要

集水區崩塌地之整體特性，尚未有學者進行整合式電腦分析系統開發，本研究提出整合性水文、地文評估系統，以植生變遷分析所計算出之成果：植群指標，用於推導網格式逕流係數，再利用集水區自動劃分技術處理數值高程模組，以便自動萃取相關地文、水文分析資訊，並在推導之理論上，計算集水區逕流歷線、洪峰流量、遞移率、沈澱產量等資訊，並推估保全對象所可能面臨之威脅及上游集水區所需整治之條件。本研究第一年度建立「地文、水文分析模組」與「河道泥砂產量推估模式」，在「地文、水文分析模組」中，可以利用GIS方式點選所要分析之集水區地文、水文相關基本資訊再採用真實水系萃取法、集水區搜尋法等演算技術進行分析。而在「河道泥砂產量推估模式」中將河道土砂災害來源主要分為二大部分：1.坡面泥砂遞移量2.崩塌地泥砂遞移量；其中總體泥砂量透過河道輸砂而產生對於保全對象之影響，則採用遞移率的觀念加以計算。在案例分析中，以土石災害集水區「陳有蘭溪」為例進行探討分析，其成果中之集水區坡面泥砂產量結果顯示極為吻合。

關鍵字：崩塌地、地理資訊系統、集水區分析、地文因子、水文因子

### ABSTRACT

Integrated landslide analysis is critical for watershed management. However, the developments on integrated computer model still need more effort. This study proposes an evaluation system for combining hydrological and geomorphological factors. From vegetation change analysis, the derived vegetation index is used for grid runoff coefficient estimation. The digital elevation model data is used for watershed automatic extraction to obtain related information. Based on the proposed theories, the hydrograph, peak discharge, sediment delivery ratio, and sediment yield can be acquired. The first year of this study established Geomorphologic and Hydrologic Analysis Modules and Sediment Yield Estimation Modules. In the first part of system, the watershed information can be obtained by GIS using real blueline extraction and watershed upstream tracing methods. In the second part of the system, the sediment yield can be obtained using slopland sediment delivery ratio and landslide sediment yield. In the case study, the Chenyulan Stream watershed resulted in a very excellent correctness.

Keywords: Landslide, Geographic Information System, Watershed Analysis, Geomorphological Factors, Hydrological Factors

## 目錄

	頁碼
中、英文摘要及關鍵詞	I
報告內容	1
一、前言	1
二、研究目的	1
三、文獻探討與研究方法	1
四、結果與討論	18
參考文獻	20
計畫成果自評	23
可供推廣之研發成果資料表	24

# 報告內容

## 一、前言

本研究第一年度建立「地文、水文分析模組」與「河道泥砂產量推估模式」，在「地文、水文分析模組」中，可以利用 GIS 方式點選所要分析之集水區地文、水文相關基本資訊再採用真實水系萃取法、集水區搜尋法等演算技術進行分析。而在「河道泥砂產量推估模式」中將河道土砂災害來源主要分為二大部分：1.坡面泥砂遞移量 2.崩塌地泥砂遞移量；其中總體泥砂量透過河道輸砂而產生對於保全對象之影響，則採用遞移率的觀念加以計算。在案例分析中，以土石災害集水區「陳有蘭溪」為例進行探討分析，其成果中之集水區坡面泥砂產量結果顯示極為吻合。

## 二、研究目的

集水區崩塌地之整體特性，尚未有學者進行整合式電腦分析系統開發，本研究提出整合性水文、地文評估系統，以植生變遷分析所計算出之成果：植群指標，用於推導網格式逕流係數，再利用集水區自動劃分技術處理數值高程模組，以便自動萃取集水區邊界檔、水系檔、流向檔、坡度檔及累積流量檔等相關地文、水文分析資訊，並在推導之理論上，計算坡面、河道、崩塌地等三項區域之沈澱產量，再整合NDVI-based的植生指標進行洪水演算，以獲得洪峰流量及遞移率，並推估保全對象所可能面臨之威脅及上游集水區所需整治之條件。同時導入國外物理型模組，例如：法國坡面沖蝕模組評估及美國具有3D網格視覺化模擬的GIS水文、水理演算軟體，與本計畫預計自行推導建置之流量歷線結合泥砂指標評估進行比較，以確立本研究之學說有效且可行。並在電腦系統中放入技術規範規定之相關降雨逕流評估及相關泥砂產量評估計算式，最後納入相關子計畫提供之植群行為與崩塌行為分析成果，整合成集水區之條件以預測崩塌地治理可能成效，提供決策參考。本研究計畫預計分三年完成，並逐年依照研究進度完成預定目標，第一年主要完成項目為：崩塌地災害評估模式子系統中的（1）泥砂系統指標評估、（2）地文因子評估、（3）水文因子評估等三項。第二年主要完成項目則包括：崩塌地災害評估模式子系統中的（1）法國坡面沖蝕模組評估、（2）美國水道試驗站輸砂模組評估、及崩塌地治理成效評估模式子系統中的（3）流量歷線結合泥砂指標評估。第三年主要完成項目包括：崩塌地災害評估模式子系統中的（1）水保技術規範相關降雨逕流評估（2）水保技術規範相關泥砂產量評估、及崩塌地治理成效評估模式子系統中的（3）集水區整治策略評估。

## 三、文獻探討與研究方法

第一年主要完成項目為：建置崩塌地災害評估模式子系統中的（1）泥砂系統指標評估、（2）地文因子評估、（3）水文因子評估等三項。本年度研究主要在於援引子計畫一「集水區崩塌地植生變遷分析」所計算出之成果：植群指標，以便於推導網格式逕流係數，再利用集水區自動劃分技術處理數值高程模組（Digital Elevation Model, DEM），以便自動萃取集水區邊界檔、水系檔、流向檔、坡度檔及累積流量檔等相關資訊，並輔以航照圖及衛星影像判釋。當基本水系網及集水區演算資料獲得後，水文分析便可展開，以計算出坡面、河道、崩塌地等三大範圍之沈澱產量，最後再整合 NDVI-based 的植生指標進行洪水演算，以獲得合理化公示之洪峰流量，並以此洪峰流量推導遞移率，以推估保全對象所可能面臨之威脅及上游集水

區所需整治之條件。其研究流程詳如下圖所示，各項工作並分述如後：

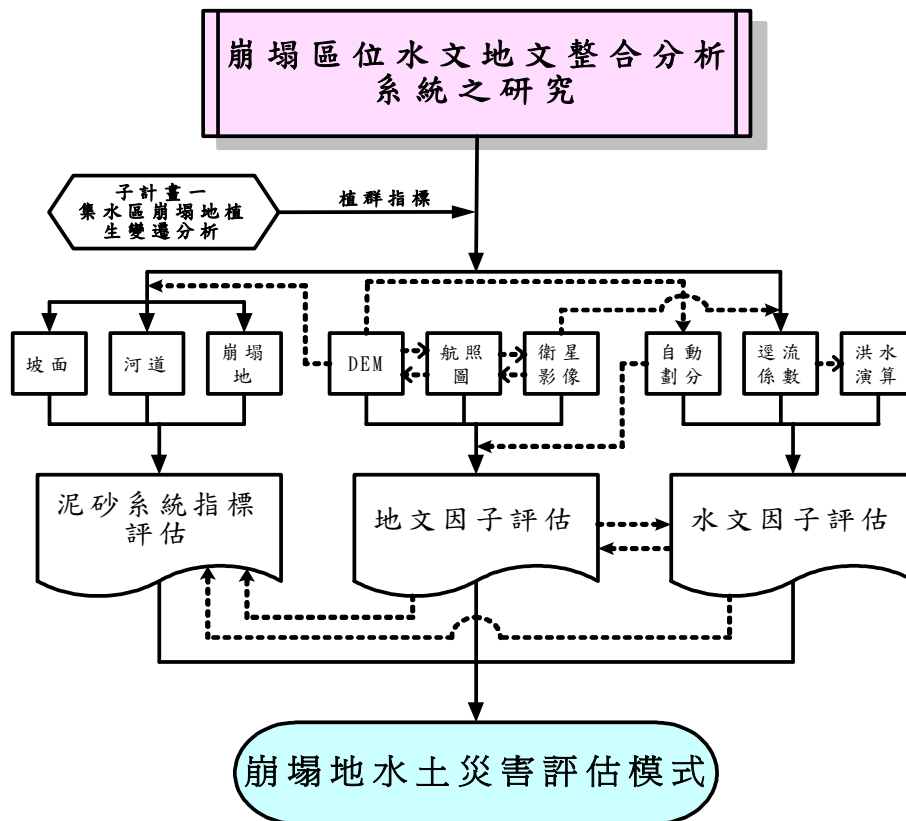


圖 1. 第一年研究流程詳示意圖

### (1) 坡面泥砂系統指標評估

土壤沖蝕為環境主要問題之一，且為泥砂來源主要管道，本研究之坡面泥砂產量推估，分為兩大主軸：一為土壤沖蝕下的流失量估算、另一為依照遞移率觀念進行推導泥砂進入河道之推估量。在整合泥砂生產與運送的全盤考量下，針對坡面泥砂產量與災害機制進行徹底瞭解，方可建立適當與確實之評估法則。

在第一部份坡面土壤沖蝕量之評估，係依照水土保持技術規範第六十二條（山坡地土壤流失量之估算）規定之估算方式計算，其採用「通用土壤流失公式」估算沖蝕量，其所謂通用土壤流失公式(Universal Soil Loss Equation, USLE)，其原理與內容詳述如下。

土壤沖蝕量的評估早自 Cook(1936)便指出土壤沖蝕的主要因素為水，Zingg 則於 1940 年將坡面之坡長與坡度為變數，提出推估公式，以推導地形因子對沖蝕之反應。稍後由 Smith 及 Whitt(1948)導出一個合理化(rational)沖蝕評估公式  $A=C*S*L*K*P$ ，並可適用於密蘇里州(Missouri State)的主要土壤。Musgrave 則在 1947 年導出包括降雨、坡度、坡長、土壤特性、以及植生覆蓋效應等因子的 Musgrave 方程式。

美國政府因土壤沖蝕預估公式效果極佳，因此便於 1954 年在普渡大學(Purdue University, West Lafayette, Indiana State)由美國農業研究服務處(Agricultural Research Service, ARS)建立國家逕流及土壤流失資料中心(National Runoff and Soil Loss Data Center)，針對全美 49 處超過每年 10,000 試區的實驗資料整合與統計分析，並於 1956 年發表一個未含降雨因子的評估公式(Renard et al., 1996)，最後由 Wischmeier 等人於 1965 年整理出土壤沖蝕通用公式(Universal Soil Loss Equation, USLE)，並出版美國農業部的第 282 號農業手冊；而其稍後修正的版本則

發表於 1978 年出版的美國農業部的第 537 號農業手冊。

現今世界各國所使用之通用土壤流失公式，一般寫為國際標準制之單位，如下(行政院農業委員會，2000)：

$$A = Rm.Km.L.S.C.P$$

式中，  $A$ ：每公頃每年平均土壤流失量（公噸/公頃-年）

$R_m$ ：年平均降雨沖蝕指數（ $10^6$  焦耳-毫米/公頃-小時-年）

$K_m$ ：土壤沖蝕性指數（公噸-公頃-小時-年/ $10^6$  焦耳-毫米-公頃-年）

$L$ ：坡長因子

$S$ ：坡度因子

$C$ ：作物管理因子

$P$ ：水土保持處理因子

各項採計因子分述如下：

#### A. $R_m$

Wischmeier (1959) 提出降雨沖蝕指數(Rainfall Erosion Index)之計算，其代表了降雨對土壤沖蝕的關係，經現場實測資料統計分析，土壤流失量與降雨總能乘該場降雨最大 30 分鐘之降雨強度成正比關係。年平均降雨沖蝕指數則以累加方式計算獲得，其方程式如下：

$$(EI)_{M/Y} = \sum_{i=1}^m (E \times I_{30})_i$$

式中，  $(EI)_{M/Y}$ ：(月/年)降雨沖蝕指數

$E$ ：每公頃單位降雨量之降雨動能(MJ/ha-mm)

$I_{30}$ ：最大 30 分鐘之降雨強度(mm/hr)

其中  $E$  值乃是根據 Laws 及 Parson (1943) 所導出之降雨動能公式，國際標準制可表示為：

$$E = 0.119 + 0.873 \log_{10} I \quad \text{when } I < 76 \text{ mm/hr}$$

$$E = 0.283 \quad \text{when } I \geq 76 \text{ mm/hr}$$

且本指數計算時是以有效的單場降雨總和，而有效的定義則為：單場降雨之累積降雨量需超過 12.7mm，且該場降雨與前場降雨之間隔需超過 6 小時以上；但若單場降雨於 15 分鐘內降下 6.35mm 以上的雨量。則該場雨應視為有效降雨，且其降雨動能仍須列入降雨總動能計算(吳嘉俊等，1996)。

台灣地區之降雨沖蝕指數( $R_m$ )常採用黃俊德(1979)分析本省八個氣象站(基隆、新竹、台中、日月潭、高雄、恆春、台東及花蓮)20 年的自記日雨量記錄，並以全台灣 200 個雨量站的月雨量資料為輔，利用這些氣象站之記錄以非線性迴歸方程式求算各地雨量與年降雨沖蝕指數的關係，建立臺灣本島的年平均降雨沖蝕指數，利用地理統計可求算台灣地區年平均降雨沖蝕指數等值圖。



圖 2. 年平均降雨沖蝕指數等值圖 (黃俊德, 1979)

B.  $K_m$

決定土壤沖蝕指數，應先經土壤分析求出下列 a、b、c、d、e 等五參數(水土保持技術規範，2001)：

a：有機質含量之百分比(%)

b：土壤結構參數之判別，如下表：

表 1. 土壤結構參數表

參數值	土壤結構	土粒大小
1	極細顆粒狀	未滿一公釐
2	細顆粒狀	一至二公釐
3	中或粗顆粒狀	超過二至十公釐
4	塊狀、片狀或整塊狀	超過十公釐

c：土壤滲透性參數之判別，如下表：

表 2. 土壤滲透性參數表

參數值	滲透速度	單位：公釐/小時
1	極快	超過 125
2	快	62.5 至 125
3	中等	20.0 至 62.5
4	中等慢	5.0 至 20.0
5	慢	1.25 至 5.0
6	極慢	未滿 1.25

d：土壤粉粒與極細砂(粒徑 0.002 至 0.1 公釐)含量之百分比(%)。

e：土壤砂粒(粒徑 0.1 至 2.0 公釐)含量之百分比(%)。

經土壤分析求出上列 a、b、c、d、e 等五參數值後以下列公式求出  $K_m$  值：

$$K_m = 0.1317\{2.1[d(d+e)]^{1.14}(10^{-4})(12-a)+3.25(b-2)+2.5(c-3)\}/100$$

台灣地區之土壤沖蝕指數( $K_m$ )常採用萬鑫森、黃俊義(1981、1989)所調查之台灣坡地土壤沖蝕指數值，利用地理統計可求算台灣地區土壤沖蝕指數等值圖。



圖 3. 土壤沖蝕指數等值圖

C.  $L$

決定坡長因子  $L$  值：應先行測出現場坡長之水平距離( $l$ )，再以下列公式求之：

$$L = (l/22013)^{0.5}$$

式中， $l$ ：坡長(公尺)。計算方式則可採用國立中興大學水土保持學系林昭遠教授所研究開發之 WinGrid 軟體之自動坡長萃取法 (Lin et al., 2002)。

D.  $S$

決定坡度因子  $S$  值：應自現場求出坡度後，以下列公式求出  $S$  值：

$$S = 65.4\sin^2\theta + 4.56\sin\theta + 0.0654$$

式中， $\theta$ ：坡度。坡度分級標準可採用水土保持技術規範第四十四條之規定如下表：

表 3. 坡度分級表

坡度級別	坡度範圍(%)
一級坡	$S \leq 5$
二級坡	$5 < S \leq 15$
三級坡	$15 < S \leq 30$
四級坡	$30 < S \leq 40$
五級坡	$40 < S \leq 55$
六級坡	$55 < S \leq 100$
七級坡	$S > 100$

E.  $C$



決定覆蓋與管理因子  $C$  值：依地上不同種類之植生、生育狀況、季節、覆蓋及敷蓋程度定，裸露地  $C$  設定為 1。適用於台灣不同地表及植被狀況的作物與管理因子  $C$  值如下表：

表 4. 台灣不同地表及植被狀況  $C$  值對照表

作物或地表覆蓋	覆蓋與管理因子 $C$ 值
百喜草(密植)	0.01
玉米	0.30
水稻	0.10
花生	0.30
柑桔	0.20
香蕉	0.14
鳳梨	0.20
林地	0.01
蔬菜類	0.39
茶	0.15
裸露地	1.00

因綠色植物因有吸收藍光、紅光及強烈反射紅外光之特性，故應用多譜資訊於植物資源之探測，使用可見光與近紅外光之比值或差值，即所謂的植生指標是一項極佳之作業方法。例如：NDVI 被廣泛應用於測定綠色植物之光合作用、植物之覆蓋率及生物量等，如黃國楨等(1996)採用法國 SPOT 衛星影像來推得常態化差異植生指標(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)之變化，進而分析評估 SPOT 衛星影像前後兩期綠色植生量之變遷。NDVI 值之計算方法如下所示：

$$NDVI = \frac{(IR - R)}{(IR + R)}$$

式中  $IR$  為近紅外光； $R$  為紅光。所求得  $NDVI$  值愈大顯示地表植物生育愈旺盛、植被覆蓋佳。由於台灣地區之  $C$  值尚無資料庫可資利用，本評估集水區之覆蓋與管理因子 ( $C$ ) 係以常態化差異植生指標經線性反向配置後產生。本研究所採用之衛星影像具有容易取得、可即時更新以及數位化資料易於處理等各項優點，對於分析計算與決策輔助的功能，皆有極大之幫助。其由衛星影像萃取之  $NDVI$  轉換出之  $C$  值之示意如下圖：

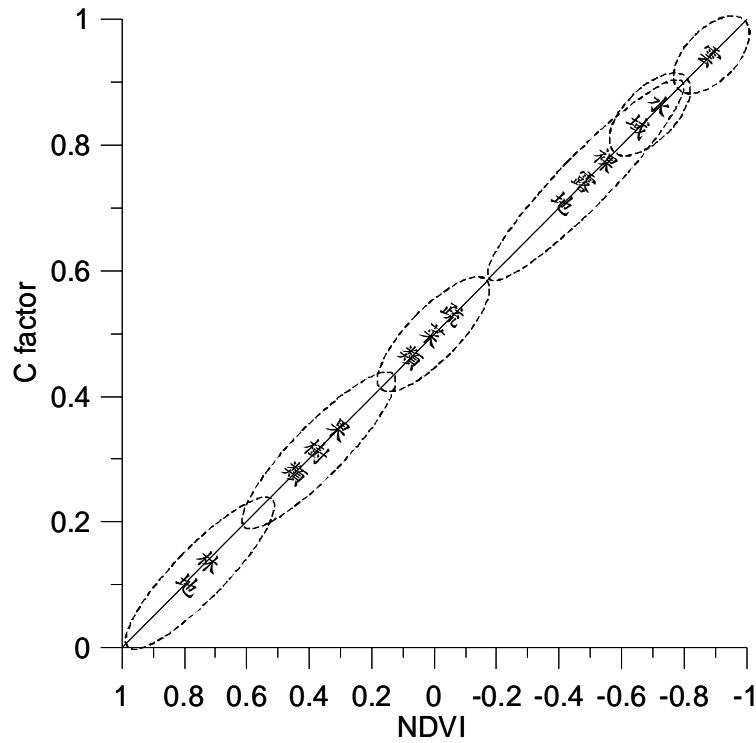


圖 4. 衛星影像萃取之 *NDVI* 轉換 *C* 值示意圖

#### F. *P*

決定水土保持處理因子 *P* 值，可依照水土保持技術規範所訂：無任何水土保持處理、或棄土場、或陸砂及農地砂石開採處，*P* 值設定為 1.0。

在第二部分，泥砂遞移率的計算方式，係考慮集水區泥砂經由沖蝕傳輸至下游出口處者，謂之集水區泥砂產量；此與集水區總沖蝕量不同。在某一時期內通過溝渠或河流某一斷面之輸砂量與該斷面以上之集水區總沖蝕量之比，稱為泥砂遞移率(Sediment Delivery Ratio; SDR)。依照 Walling(1988)針對遞移率在美國水土保持學會所出版之「土壤沖蝕研究方法」(Soil Erosion Research Methods)一書中所定義之內容則為：集水區出水口泥砂產量( $t/km^2/yr$ )與泥砂總量( $t/km^2/yr$ )之比值。

整體而言，坡面土壤沖蝕在河川輸砂之貢獻度，仍須計算遞移率，以便瞭解坡面土壤沖蝕的年沖蝕量與真正進入河道的泥砂量。其泥砂遞移率之計算常因理論過於複雜，而導致實務上無法計算或專業人員亦無法有效評估的窘境。Walling (1988)與 Walling et al. (2002)亦提到雖然有許多文獻記載泥砂遞移率可能低到 0.05~5%之間，但以集水區整體觀點而言，因存在許多不確定性，仍無法建立一套正確且客觀之泥砂遞移率之評估法則，本研究係依照 Lin et al. (2002)在「Soil Tillage & Research」期刊中所提出泥砂遞移率係以單位網格為基礎，配合土壤沖蝕量可推估集水區出口的泥砂產量之理論，進行計算。參酌國內、外學者之研究成果，對於泥砂遞移率之評估公式，整理如下表所列，由本表亦可瞭解，學者對集水區泥砂產量之推估趨勢，已由傳統之整體集水區之長度、面積、坡度等計算觀點，轉而成為以處理數位高程模組(Digital Elevation Model, DEM)，並以網格式逐步推導之理論技術建構為主，因其可更精確評估局部狀況與整合時下之地理資訊系統(GIS)之技術，以提供查詢、展示、分析等平台。

表 5. 國內外學者提出之泥砂遞移率評估公式對照表 (部分資料來源：Walling, 1988)

研究區位	評估公式	學者
Kansas, USA	$SDR = 2.962 + 0.869 \log R - 0.854 \log L$	Maner (1958)
Southern USA	$SDR = 4.5 - 0.23 \log 10A - 0.51 \log(R/L) - 2.786 \log BR$	Roehl (1962)
Texas, USA	$SDR = 0.627 SLP^{0.403}$	Williams and Berndt (1972)
Texas, USA	$SDR = 1.366 \times 10^{-11} A^{-0.100} (R/L)^{0.363} CN^{5.444}$	William (1977)
Mississippi, USA	$SDR = 0.488 - 0.006A + 0.010RO$	Mutchler (1976)
Shaanxi, China	$SDR = 1.29 + 1.37 \ln Rc - 0.025 \ln A$	Mou and Meng (1980)
Southern Italy	$SDR_i = \exp(-\beta \frac{l_{p,i}}{\sqrt{S_{p,i}}})$	Ferro and Minacapilli (1995)
Taiwan	$SDR_i = Lu_i/Lt_i$ $Lt_i = Lu_i + Ld_i$	Lin et al. (2002)

式中； $SDR$ ：泥砂遞移率、 $SDR_i$ ：網格泥砂遞移率、 $R$ ：高差、 $L$ ：集水區長度、 $A$ ：集水區面積、 $R/L$ ：高差/長度比值、 $BR$ ：分流率、 $SLP$ ：主流坡度、 $CN$ ：SCS 之  $CN$  值、 $RO$ ：年逕流量、 $Rc$ ：溝蝕密度、 $\beta$ ：係數、 $l_{p,i}$ ：坡長、 $\sqrt{S_{p,i}}$ ：坡度。

本研究所提出之坡面泥砂遞移率之計算，基於整合地理資訊系統並結合網格式計算理論與集水區自動劃分等技術，其方法論係延續 Lin et al. (2002) 所建構之理論基礎，假設坡面泥砂主要係由坡面地表水所帶動，運移至渠道(常流水)而流失，所以集水區坡面上任一格點之泥砂遞移率假設為流入該格點上游之地表水流長度和( $Lu$ ;  $Lu = \sum Li$ )與流經該格點之總地表水流長度( $Lt$ )的比值( $SDR = Lu/Lt$ ;  $Lt = Lu + Ld$ ;  $Ld$  為格點至常流渠道之地表水流長度)；意即濱水區愈靠近渠道之格點，其坡面沖蝕之泥砂愈容易進入渠道，而增加河道之泥砂產量，泥砂遞移率愈高。集水區之坡面泥砂產量( $Y_s$ )可由集水區坡面土壤流失量( $A_m$ )與坡面泥砂遞移率( $SDR$ )之乘積( $Y_s = A_m * SDR$ )來推算 (林昭遠、林文賜，2001)。

以下為整體集水區土壤沖蝕量依照水土保持技術規範評估並結合泥砂遞移率與地理資訊系統之工作流程示意圖：

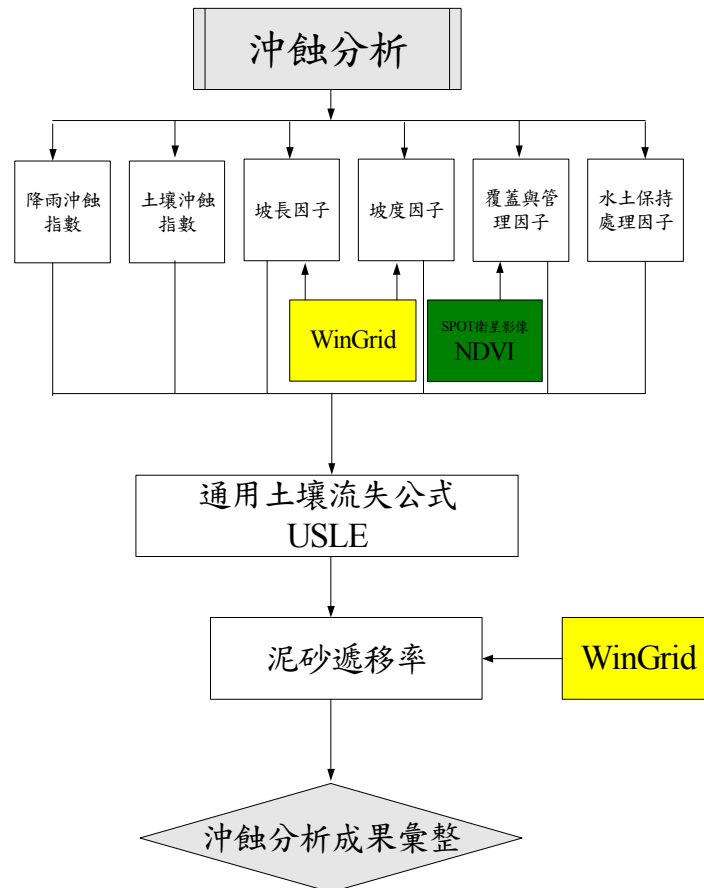


圖 5. 沖蝕量評估之工作流程示意圖

## (2) 崩塌地泥砂系統指標評估

針對崩塌地土石崩塌量之推估，依照水土保持技術規範第六十七條規定：「崩塌量調查方法，應由實測或部分配合推估實施之。新崩塌地，得利用實際勘查或利用航照圖判斷，亦可得利用衛星影像等最新科技，以進行崩塌量之調查。」

崩塌發生之原因常為土壤孔隙水壓增加，致使風化層的抵抗力小於重力作用，而導致地滑或崩塌現象之發生。當岩石碎屑伴和土壤與水分沿坡面向下移動，直到崩塌材料用盡為止方停止運動，崩塌材料常因此堆積在河道或較緩之坡面。在崩塌量之推估上，一般常用的方法為(Dymond et al., 1999)假設坡面之剪應力等於抗剪力時（參下圖），為啟動崩塌之機制瞬間，此時剪應力為  $F_g = \rho * g * \sin\theta$  而抗剪力為  $F_s = S/d$ ，因此可得崩塌深度與坡度之關係為：

$$d = S/(\rho * g * \sin\theta)$$

式中， $S$ ：剪應力、 $d$ ：崩塌深度、 $\rho$ ：土體密度、 $g$ ：重力加速度、 $\theta$ ：坡度。

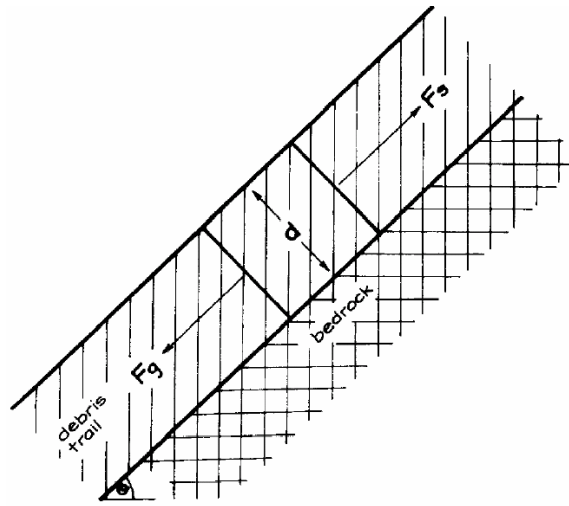


圖 6. 坡面崩塌機制示意圖

由上式應可觀察到崩塌深度與坡度之正弦呈現正比關係，但事實上並非任何坡度的邊坡皆可發生崩塌現象，崩塌常好發在某特定範圍內（歐陽元淳，2003），因為太緩和的邊坡無法促使坡面產生足夠的剪應力，而太陡邊坡則常因表土的風化層太薄，亦無法產生足夠的崩塌力量。Khazai and Sitar（歐陽元淳，2003）針對集水區內崩塌地進行評估時，依照不同的坡度範圍給定代表性的崩塌深度如下表：

表 6. 坡度與崩塌代表性深度對照表

坡面坡度（度）	崩塌平均代表深度
0-30	2m
30-40	1.5m
40-60	1m
>60	0.5m

上述是假設崩塌為風化後之岩體或崩積層，故為一經驗式，若能以現地調查則以現地調查為主，但在對大面積之集水區進行總體評估或大量之崩塌地土方量計算時，實為一簡單迅速的方法，故本研究將以坡度之代表性崩塌深度，進行評估崩塌量。至於推估出崩塌量體後，則依照遞移率觀念提出移動至河道的比率，並進行河道輸砂演算，本部分理論尚待本研究建立及驗證。

崩塌地泥砂遞移量計算，預計採崩塌地對保全對象之泥砂產量為崩塌土砂量沿河道遞移至保全對象之輸送量觀念，遞移路徑與公式如圖內說明，其輸砂通式可寫成：

$$ST_l = V_l \left( \frac{A_c}{A_b} \right) \left( \frac{A_c}{A_a} \right)^\alpha \left( \frac{P}{P_l} \right)$$

式中， $ST_l$ ：泥砂遞移量(Sediment Transport,  $ST$ )、 $V_l$ ：崩塌體積( $m^3$ )、 $A_a$ ：鄰近保全對象河道之集水區( $ha$ )、 $A_b$ ：b點之集水區面積( $ha$ )、 $A_c$ ：c點之集水區面積( $ha$ )、 $P$ ：單場雨量( $mm$ )、 $P_l$ ：年平均雨量( $mm$ )、 $\alpha$ ：輸砂衰減係數。

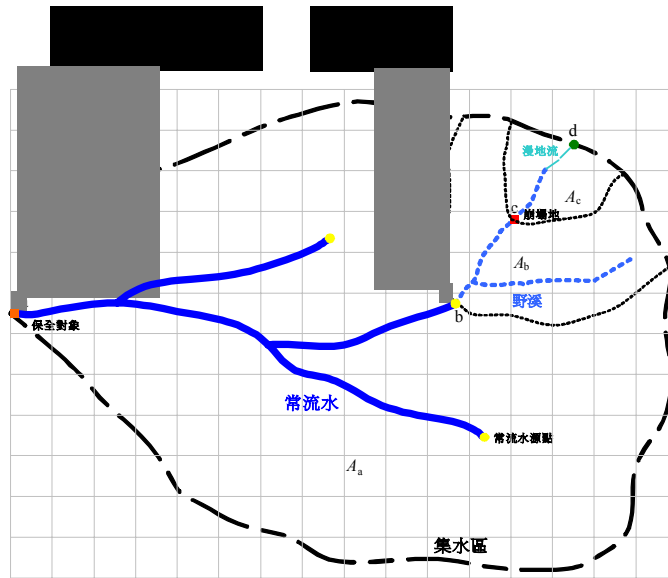


圖 7. 集水區崩塌地泥砂遞移量示意圖

### (3) 河道泥砂系統指標評估

在河道輸砂理論論述部分，依照 Yang(1996)在其所著之輸砂理論與實務(Sediment Transport: Theory and Practice)一書中所整理之河道中河床載之輸送公式，可分類如下：

#### A. 剪力法(Shear Stress Approach)

本理論基礎觀念建立於河床載之移動，係肇因於沿河床之推移力所導致之物理條件，起始運動狀態發生於推移力等於全部阻力之時。其中各家公式以 DuBoys(1879)、Shields(1936)、Kalinske(1947)、Chang et al.(1967)為代表。

#### B. 能量坡降法(Energy Slope Approach)

本法通常以大量的水工實驗所獲得之成果，建立起能量坡降之線解圖。其中各家公式以 Meyer-Peter(1934)、Meyer-Peter and Muller(1948)為代表。

#### C. 流量法(Discharge Approach)

Schoklitsch 最先探討以流量決定河床載，並發展出 1934 年公式，並在 1950 年再依據大量之水槽試驗與歐洲中部之河川現地資料，建議出一個較為簡單之通用式(Graf, 1984)，本修正通用式即為水土保持技術規範第七十一條中所使用之計算式，水土保持技術規範第七十一條中之何黃氏亦為另一以流量法為計算基準之代表式。

#### D. 流速法(Velocity Approach)

利用 BuBoy 及 Chezy 公式，推導土砂運動起始狀態之臨界流速以計算河床載，其中公式以 Donate(1929)為代表。

#### E. 河床法(Bed Form Approach)

本法利用河床型態的變化，以連續方程式的方法直接計算河床載，其中公式以 Yang(1996)為代表。

#### F. 機率法(Probabilistic Approach)

Einstein(1942)提出二個打破傳統輸砂理論的觀念：(1) 運動起始狀態之臨界值非常難以計算，因此不予納入計算之考慮。(2) 河床載與亂流波動相關較高而與流體平均作用於土砂之力量相關不高。據此理論所導出之公式以 Einstein(1942)與

Einstein-Brown(1950)為代表。

#### G. 序率法(Stochastic Approach)

Einstein(1937)提出，一個單獨土砂顆粒形成河床質移動可分為單次移動距離及休息停留時間之概念，並以此計算出河床形式之剖面及河床載之輸砂率，其中公式以 Yang and Sayre(1971)為代表。

#### H. 迴歸法(Regression Approach)

許多河床載之經驗式與半經驗式，常以實驗室的資料為基礎進行迴歸分析。例如 Rottner(1959)以迴歸分析決定相對粗糙度（50%粒徑/平均深度），以計算河床載量。

#### I. 相等移動法(Equal Mobility Approach)

Parker et al.(1982)假設礫質河道之河床載移動，係基於土砂所處之河床面之移動性所影響，其中公式以 Parker et al.(1982)為代表。

整體而言，上述九大類輸砂算法則中，所採用之公式與理論可整理如下表所列：

表 7. 常用輸砂演算法分類表

分類	計算觀點	學者	備註
剪力法	推移力與摩擦力	DuBoys Shields Kalinske Chang et al.	
能量坡降法	能量坡降	Meyer-Peter Meyer-Peter and Muller	
流量法	流量與粒徑	Schoklitsch	水土保持技術 規範採用
流速法	臨界流速	Donate	
河床法	砂質河床之孔隙率	Yang	
機率法	單次移動距離假設	Einstein Einstein-Brown	
序率法	機率密度函數	Yang and Sayre	
迴歸法	迴歸分析	Rottner	
相等移動法	無因次輸砂函數	Parker et al.	

另常被各界引用之公共模組為 1.美國陸軍兵工團水文工程中心（US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC）（USACE, 1990; USACE, 1991）所發展的 HEC-6 模組：模式可用於計算河川中各河段之沖蝕或淤積狀態，日後將會放入 HEC-RAS 模組中成為系統之單元（USACE, 2002）。其模式為擬似一維定量流動床模式，可應用於河川及水庫的輸砂演算，並可初步模擬水庫中粘性沉澱的沖淤行為。以及 2.美國內政部墾務局（United States Bureau of Reclamation, USBR）所發展的 GSTARS（Generalized Stream Tube Model Alluvial River Simulation, GSTARS）模組（常稱之為流管理論），其為墾務局技術服務中心（Technical Service Center）轄下的輸砂與水力小組（Sedimentation and River Hydraulic Group）所研發（Yang and Simões, 2001）。模式具備一般一維沖淤河川迴水演算、擬似二維

水流流體計算、擬似三維河床變形等各類泥砂運移相關之計算功能（國立交通大學防災工程研究中心，2002）。

表 8. 常用於模擬系統中之輸砂計算公式對照表

HEC-6 (美國陸軍)	GSTARS (美國墾務局)
Ackers-White 法	Ackers 及 White 法
Colby 法	Ackers-White 修正法
Dubois 法	Ashida 及 Michiue 法
Laursen-Copeland 法	Dubois 法
Madden 修正 Laursen 法	Engelund 及 Hansen 法
Meyer-Peter 及 Muller 法	Krone 及 Ariathurai and Krone 法
Toffaletti 法	Laursen 法
Toffaletti 法與 Meyer-Peter 及 Muller 法合併	Madden 修正 Laursen 法
Toffaletti 法與 Schoklitsch 法合併	Meyer-Peter 及 Muller 法
Yang 氏法	Parker 法
	Toffaletti 法
	Yang 氏法
	Yang 氏修正法

因上述各類輸砂演算及推估法則，常因計算式極為複雜以及較佳適用效果差異懸殊，而致使模擬河道輸砂時無法精確分析。部分計算式更面臨，需要資料不易取得，例如：分層厚度、能量坡降、傳遞速度，或必須假設代表值，例如：顆粒單次移動距離、河床粗糙度。僅在水土保持技術規範中所採用之流量法推估河道輸砂量，較為易於推廣及計算，可在取得年平均流量之水文資料後，並以該斷面之河床載之粒徑（公尺），一般可以 $D_{50}$ 為代表放入公式中計算，便可獲得推估量。如何導入水文分析，例如單場暴雨及整年評估，尚待探討。

#### (4) 地文因子評估

評估崩塌地之地文因子所需資訊將由台灣的 DEM 自動萃取產生，其將被建置在電腦系統中之地文因子係以子集水區為分析範圍，預計電腦自動計算項目說明如下，Gardiner(1978) 依地文因子之作用及尺度將集水區地文因子分為四類：

##### A. 流域尺度類因子

##### a. 集水區面積(A，單位：km<sup>2</sup>)

下圖為集水區自動劃分結果，其集水區面積為單位網格面積之總和，即

$$A = a \times n \times 10^{-6}$$

(a：網格面積[m<sup>2</sup>]，n：集水區網格數目)



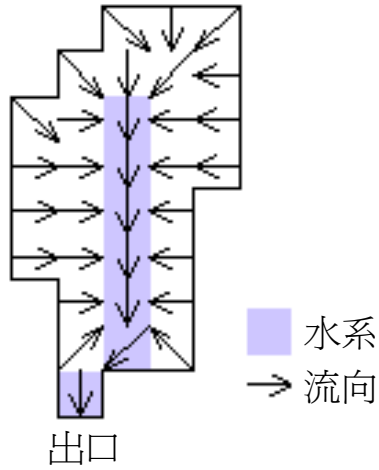


圖 8.集水區、水系及流向示意圖

b. 集水區周長(P, 單位: km)

上圖中, 集水區周長(Perimeter)為集水區邊界長, 即

$$P = l \times n \times 10^{-3}$$

(l: 網格長度[m], n: 集水區邊界鄰接網格邊長數目)

c. 集水區長度(L, 單位: km)

集水區長度為集水區最遠端至出口之直線投影長, 由圖 5-1 中可知, 集水區最遠端必落在集水區邊緣上, 配合流向資料進行追蹤即可計算出距出口最遠端之網格及計算兩點間之直線距離。

d. 河川主流長度( $L_0$ , 單位: km)

河川主流長度(Length of main stream)為集水區內最長之河川長度, 為集水區內河川源頭至出口最長的距離, 配合水系網及流向資料進行追蹤可計算出河川主流長度(如圖)。

e. 河川總長度( $L_T$ , 單位: km)

河川總長度為集水區內全部河川長度總和, 即主流長度及支流長度總和。

$$L_T = \sum_{i=0}^n L_i, \begin{cases} L_0 \text{ 爲主流長度} \\ L_1 \dots L_n \text{ 爲支流長度} \end{cases}$$

f. 河川數量(N)

河川數量為集水區內之溪流數量, 即主流加上支流之數量如下圖。

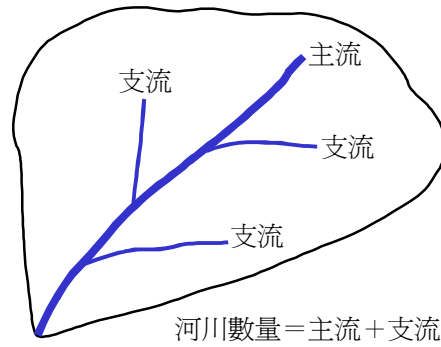


圖 9. 河川數量計算示意圖

g. 平均高程(H, 單位: m)

平均高程為集水區高程之平均值, 即

$$H = \frac{\sum Z}{n}$$

(Z: 網格之高程值)

h. 起伏量(R<sub>f</sub>, 單位: m)

起伏量為集水區之最大高差, 即

$$R_f = H_{\max} - H_{\min}$$

B. 流域梯度類因子

a. 平均坡度(S, 單位: %)

平均坡度為集水區坡度之平均值, 即

$$S = \frac{\sum slp}{n}$$

(slp 為網格之坡度值)

b. 起伏比(R)

起伏比為集水區之最大高差除以該兩點水平距離之值, 即

$$R = \frac{R_f}{\Delta d}$$

C. 流域形狀類因子

a. 集水區寬度(W, 單位: km)

集水區寬度(Width)為集水區面積除以河川主流長度之值, 其計算公式

$$W = \frac{A}{L_0}$$

b. 形狀因子(F)

形狀係數(Form factor)為 1932 年荷頓氏(Horton)提出，為單位主要河川長度之集水區寬度，其計算公式

$$F = \frac{W}{L_0} = \frac{A}{L_0^2}$$

c. 密集度(C)

密集度(Compactness)為同一集水區面積所對應之周長除以集水區周長，即

$$C = 2\left(\sqrt{\frac{A}{\pi}}\right) \times \frac{\pi}{P} = \frac{3.54\sqrt{A}}{P}$$

d. 圓比值(M)

圓比值(Circularity Ratio)集水區面積除以與集水區周長等長之圓面積，即

$$M = \frac{A}{\left(\frac{P}{2\pi}\right)^2 \pi} = \frac{4\pi A}{P^2}$$

e. 細長比(E)

細長比(Elongation Ratio)為 1956 年西姆(Schumm)所提出，為與集水區相等面積之圓直徑除以集水區長度，即

$$E = \frac{\sqrt{\frac{A}{\pi}}}{L} = \frac{1.128\sqrt{A}}{L}$$

D. 流域網路類因子

a. 水系密度(Ds)

水系密度(River density)為流域中全部河川長度總和，即主流長度及支流長度總和，除以集水區面積之值，即

$$D_s = \frac{L_T}{A}$$

b. 河川頻率(Fs)

河川頻率(Frequency)為集水區內河川數目除以集水區面積之值，即

$$F_s = \frac{N}{A}$$

(5) 水文因子評估

評估崩塌地之地文因子所需資訊將由台灣的 DEM 自動萃取產生，其將被建置在電腦系統中之水文因子係以子集水區為分析範圍，預計電腦自動配合水土保持技術規範之計算項目說明如下：

A. 漫地流時間( $t_0$ ，單位：min)

由集水區邊界流至河道所需時間(如下圖),  $t_0$  之估算採用坡面長度除以漫地流速度, 因此坡面長度係由集水區最遠端流至河道之距離, 而漫地流流速一般在 0.3-0.6 m/s, 由使用者依據集水區之現況輸入計算。

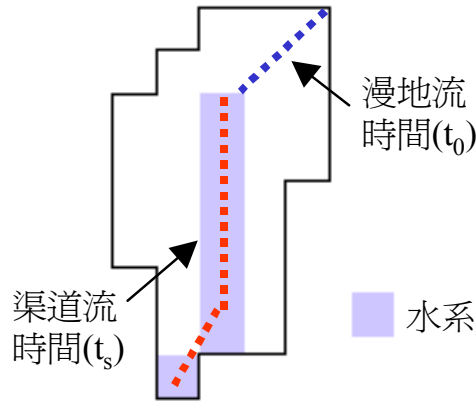


圖 10. 集水區之集流時間示意圖

B. 渠道流時間( $t_s$ , 單位: min)

由河道上游至出口所需時間(如圖 5-3), 依 Rziha 公式計算, 即

$$t_s = \frac{l_s}{60 \cdot v}$$

$$v = 20 \left( \frac{h}{l_s} \right)^{0.6}$$

( $h$  為河道上游與出口之高差[m],  $l_s$  為河道長度[m])

C. 集流時間( $t_c$ , 單位: min)

由集水區最遠端到達出口所需的時間, 一般為漫地流時間及渠道流時間之和(行政院農委會, 2002), 即

$$t_c = t_0 + t_s$$

D. 降雨強度( $I_{t_c}^T$ , 單位: mm/hr)

T 頻率年無因次降雨強度之推估, 係以  $T_{25}$ 、 $T_{50}$  及  $T_{100}$  為主, 其計算公式如下(行政院農委會, 2000):

$$\frac{I_t^T}{I_{60}^{25}} = (g' + h' \log T) \frac{a'}{(t + b')^{c'}}$$

$$I_{60}^{25} = \left( \frac{p'}{25.29 + 0.094 p'} \right)^2$$

$$a' = \left( \frac{p'}{-189.96 + 0.31 p'} \right)^2$$

$$b' = 55$$

$$c' = \left( \frac{p'}{-381.71 + 1.45p'} \right)^2$$

$$g' = \left( \frac{p'}{42.89 + 1.33p'} \right)^2$$

$$h' = \left( \frac{p'}{-65.33 + 1.836p'} \right)^2$$

式中，T：重現期距(年)

t：降雨延時或集流時間(分)

$I_t^T$ ：重現期距 T 年，降雨延時 t 分鐘之降雨強度(mm/hr)

$I_{60}^{25}$ ：重現期距 25 年，降雨延時 60 分鐘之降雨強度(mm/hr)

p'：年平均降雨量(mm)

a'、b'、c'、g'、h'：係數

E. 洪峰流量( $Q_T$ ，單位：cms)

洪峰流量之估算係採用合理化公式(Rational Formula)，係以  $Q_{25}$ 、 $Q_{50}$  及  $Q_{100}$  為主，推估公式為

$$Q_T = \frac{1}{360} C' I_{t_c}^T A'$$

(C' 為逕流係數，A' 為集水區面積[ha])

#### 四、結果與討論

本研究第一年度建立「地文、水文分析模組」與「河道泥砂產量推估模式」，在「地文、水文分析模組」中，可以利用 GIS 方式點選所要分析之集水區地文、水文相關基本資訊再採用真實水系萃取法、集水區搜尋法等演算技術進行分析。而在「河道泥砂產量推估模式」中將河道土砂災害來源主要分為二大部分：1.坡面泥砂遞移量 2.崩塌地泥砂遞移量；其中總體泥砂量透過河道輸砂而產生對於保全對象之影響，則採用遞移率的觀念加以計算。

在案例分析中，以土石災害集水區「陳有蘭溪」為例(如圖 11)，進行探討分析，其成果中之集水區坡面泥砂產量，則以內茅埔流量站歷年之實測懸浮載與流量之關係資料(如圖 12)，其推算結果顯示極為吻合，推估內茅埔流量測站集水區之年平均沖蝕深度約在 0.44cm；其他集水區亦可由此推估。



圖 11. 模式運算區位圖

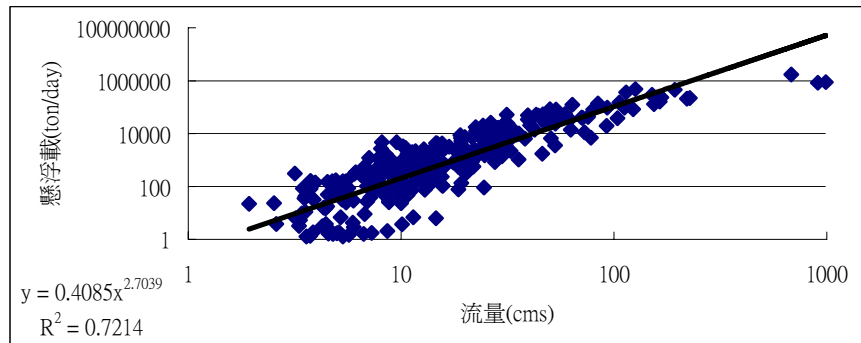


圖 12. 懸浮載率定曲線

## 參考文獻

- Ariathurai, R., Krone, R. B., 1976, Finite element model for cohesive sediment transport. J. Hydr. Div., ASCE, 102, 323-338.
- Bedient, P.B., Huber., W.C., 2002, Hydrology and Floodplain Analysis 3<sup>rd</sup> ed., Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA, pp.394-398.
- Benett, J.P., Nordin, C.F., 1977, Simulation of sediment transport and armouring. Hydological Sciences Bulletin, XXII.
- Cook, H. L., 1936, The nature and controlling variables of the water erosion process, Soil Sci. Soc. Am. Proc. 1, 60-64.
- Dymond, J.R., Jessen, M.R., Lovell, L.R., 1999, Computer simulation of shallow landsliding in New Zealand hill country, JAG, 1, 2, 122-131.
- Ferro, V., Minacapilli, M., 1995, Sediment delivery processes at basin scale. Journal of Hydrological Processes, 12, 5, 703-717.
- Graf, W.H., 1984, Hydraulics of Sediment Transport, Water Resources Publications, Littleton, Colorado.
- Gardiner, V., 1990, Drainage Basin Morphometry, in *Geomorphological Techniques*, Ed. Andrew Goudie, Unwin Hyman.
- Haverkamp, R., Parlange, J.Y., Cuenca, R., Ross, P.J., Steenhuis, T.S., 1998, Scaling of the Richards' equation and its application to watershed modeling. In *Scale Invariance and Scale Dependence in Hydrology*, Ed. G. Sposito, Cambridge University Press, New York, USA., ISBN 0-521-57125-1, Chaper 7, pp. 190-223.
- Lin, C.Y., Lin, W.T., Chou, W.C., 2002, Soil erosion prediction and sediment yield estimation: the Taiwan experience. Soil & Tillage Research 68, 2, 143-152.
- Musgrave, G. W., 1947, The quantitative evaluation of factors in water erosion: a first approximation. J. Soil Water Conserv. 2, 133-138.
- Ross, P.J., 2000, Modeling soil water and solute transport – Fast, simplified numerical solutions. ASA Special Symposium “The soil-plant-atmosphere continuum: gaps and unresolved issues”, Charlotte, N. Carolina, USA, October 21-25.
- Ross, P.J., 003 , Modeling soil water and solute transport – Fast, simplified numerical solutions. Agronomy Journal, 95, 1352-1361.
- Reggiani, P., Sivapalan, M., Hassanizadeh, M., 1998, A unifying framework of watershed thermodynamics: balance equations for mass, momentum, anergy and entropy and the second law of thermodynamics. Adv. Water Resour., 22, 4, 367-398.
- Reggiani, P., Sivapalan, M., Hassanizadeh, M., Gray, W.G., 1999, A unifying framework of watershed thermodynamics: constitutive relationships. Adv. Water Resour., 23, 1, 15-39.
- Simões, F.J.M., Patterson, D., Yang, C.T., 2000, Implementation of a Java-based graphical user interface for GSTARS 2.1. paper presented at the 4<sup>th</sup> International Conference on Hydro-Science and Engineering, Seoul, Korea.

- Smith D. D., and Whitt, D. M., 1948, Evaluating soil losses from field areas, *Agric. Eng.* 29, 394-398.
- USACE, 1990, HEC-6: Scour and Deposition in Rivers and Reservoirs User's Manual. Hydrologic Engineering Center, Institute for Water Resources, US Army Corps of Engineers, Davis, California, USA.
- USACE, 1991, Guidelines for the Calibration and Application of Computer Program HEC-6. Hydrologic Engineering Center, Institute for Water Resources, US Army Corps of Engineers, Davis, California, USA.
- USACE, 2002, HEC-RAS River Analysis System, User's Manual Hydrologic Engineering Center, Institute for Water Resources, US Army Corps of Engineers, Davis, California, USA.
- Walling, R.L., 1988, Soil Erosion Research Methods. Soil and Water Conservation Society, Iowa, USA.
- Walling, D.E.; Russell, M.A.; Hodgkinson, R.A.; Zhang, Y., 2002, Establishing sediment budgets for two small lowland agricultural catchments in the UK, *Catena*, 47, 4, 323-353.
- Wanielista, M., Kersten, R., Eaglin, R., 1997, "Hydrology: Water Quantity and Quality Control 2<sup>nd</sup> ed. ", John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, pp.205-264.
- Wischmeier, W.H., 1959, A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 23, 246-249.
- 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. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Handbook No. 282.
- Wischmeier, W. H., and Smith, D. D., 1978, Predicting Rainfall Erosion Losses - A Guide to Conservation Planning. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Handbook No. 537.
- Yang, C.T., 1996, Sediment Transport: Theory and Practice, McGraw-Hill, New York, N.Y.
- Yang, C.T., Simões, F.J.M., 1998, Simulation and prediction of river morphologic changes using GSTARS 2.0. paper presented at the 3<sup>rd</sup> International Conference on Hydro-Science and Engineering, Berlin, Germany.
- Yang, C.T., Simões, F.J.M., 2001, User's Manual for GSTARS 3.0. Sedimentation and River Hydraulics Group, Technical Service Center, Bureau of Reclamation, U.S. Department of the Interior, Denver, Colorado, USA.
- Zingg, R.W., 1940, Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff, *Agricultural Engineering.* 21, 59-64.
- 工業技術研究院，1998，石門水庫集水區崩塌地及土地利用航測調查計畫整體報告書，工業技術研究院能源與資源研究所。
- 行政院農業委員會，2001，水土保持技術規範，行政院農業委員會編印。
- 林昭遠，林文賜，2001，集水區資訊系統(WinGrid)入門，暉帥股份有限公司。
- 吳嘉俊、盧光輝、林俐玲編著，1996，土壤流失量估算手冊，行政院農業委員會。
- 國立台灣大學土木工程學研究所，1991，台灣地區河系沖淤模式之發展與應用（二）：以淡水河系大漢溪為應用對象，經濟部水資源統一規劃委員會研究案。
- 國立交通大學防災工程研究中心，2002，GSTARS 3.0 模式訓練講習會課程講義，經濟部水利署。
- 黃俊德，1979，台灣降雨沖蝕指數的研究，*中華水土保持學報*，10(1): 127-144。
- 萬鑫森、黃俊義，1981，台灣西北部土壤沖蝕及流失量之估算，*中華水土保持學報*，12(1):45-52。



萬鑫森、黃俊義，1989，台灣坡地土壤沖蝕，中華水土保持學報，20(1):17-45。

歐陽元淳，2003，水庫集水區土壤沖蝕之研究-以石門、翡翠水庫為例，國立臺灣大學地理環境資源學研究所碩士論文。

## 計畫成果自評

本研究提出整合性水文、地文評估系統，以植生變遷分析所計算出之成果：植群指標，用於推導網格式逕流係數，再利用集水區自動劃分技術處理數值高程模組，以便自動萃取集水區邊界檔、水系檔、流向檔、坡度檔及累積流量檔等相關地文、水文分析資訊，並在推導之理論上，計算坡面、河道、崩塌地等三項區域之沈澱產量，再整合 NDVI-based 的植生指標進行洪水演算，以獲得洪峰流量及遞移率，並推估保全對象所可能面臨之威脅及上游集水區所需整治之條件。在總計畫帶領下，本計畫也配合投稿並獲 SCI 收錄期刊 *Ecological Engineering* 接受刊登，題目：Assessment of vegetation recovery and soil erosion at landslides caused by catastrophic earthquake: A case study in Central Taiwan。

## 可供推廣之研發成果資料表

 可申請專利

 可技術移轉

日期：95年08月23日

<b>國科會補助計畫</b>	計畫名稱：集水區崩塌地變遷分析、災害評估及治理成效模式之建置—子計畫：崩塌區位水文地文整合分析系統之研究(I) 計畫主持人：周文杰 計畫編號：NSC 94-2625-Z-216-002-學門領域：森林、水保及生態
<b>技術/創作名稱</b>	電腦模式/集水區崩塌地變遷分析、災害評估及治理成效模式
<b>發明人/創作人</b>	林昭遠、林文賜、周文杰/林昭遠、林文賜、周文杰
<b>技術說明</b>	<p>中文： 集水區崩塌地之整體特性，尚未有學者進行整合式電腦分析系統開發，本研究提出整合性水文、地文評估系統，以植生變遷分析所計算出之成果：植群指標，用於推導網格式逕流係數，再利用集水區自動劃分技術處理數值高程模組，以便自動萃取相關地文、水文分析資訊，並在推導之理論上，計算集水區逕流歷線、洪峰流量、遞移率、沈澱產量等資訊，並推估保全對象所可能面臨之威脅及上游集水區所需整治之條件。</p> <p>英文： Integrated landslide analysis is critical for watershed management. However, the developments on integrated computer model still need more effort. This study proposes an evaluation system for combining hydrological and geomorphological factors. From vegetation change analysis, the derived vegetation index is used for grid runoff coefficient estimation. The digital elevation model data is used for watershed automatic extraction to obtain related information. Based on the proposed theories, the hydrograph, peak discharge, sediment delivery ratio, and sediment yield can be acquired.</p>
<b>可利用之產業及可開發之產品</b>	水土保持規劃設計
<b>技術特點</b>	以 GIS 技術處理崩塌地相關評估
<b>推廣及運用的價值</b>	快速進行崩塌地評估

- ※ 1. 每項研發成果請填寫一式二份，一份隨成果報告送繳本會，一份送 貴單位研發成果推廣單位（如技術移轉中心）。
- ※ 2. 本項研發成果若尚未申請專利，請勿揭露可申請專利之主要內容。
- ※ 3. 本表若不敷使用，請自行影印使用。