

曾文水庫集水區土壤沖蝕經驗式建構及土壤流失預測研究

楊尚霖¹ 林伯勳² 張德文³ 楊凱翔⁴

¹淡江大學土木工程學系碩士

²財團法人中興工程顧問社 防災科技研究中心 高級研究員

³淡江大學土木工程學系教授

⁴淡江大學土木工程學系碩士班研究生

摘 要

曾文水庫由於長年淤積影響水庫正常供水，本研究探討其集水區土壤沖蝕和土砂來源，以供後續管理應用參考。研究係以土壤沖蝕經驗式建置為主，考量水文及地文等影響因子，建構特定雨場或連續降雨下之沖蝕深度經驗式；另假設坡面尺度並使用經驗式及物理模式(WEPP)推估坡面土砂變化，並配合經驗模式與年超越機率，建構機率性土壤沖蝕經驗模式；同時採用GeoWEPP程式模擬氣候環境變化，結合土地利用、數值地形及土壤類型，由降雨逕流、土砂生產、土砂運移、土砂堆積等輸送過程，由坡面尺度推演至集水區尺度，以模擬整個集水區土砂運移量。

關鍵字：土壤沖蝕、雨場切割、多項式回歸、WEPP、GeoWEPP

A Study on Soil Erosion Empirical Model and Prediction of Soil Loss for Tseng-wen Reservoir Watershed

Shang-Lin Yang¹, Bo-Shiung Lin², Der-Wen Chang³, Kai-Shiang Yang⁴

¹Master, Dept. of Civil Engineering, Tamkang University, ROC

²Principle Researcher, Sinotech Engineering Consultants, inc., ROC

³Professor, Dept. of Civil Engineering, Tamkang University, ROC

⁴Master Student, Dept. of Civil Engineering, Tamkang University, ROC

Abstract

The long year's siltation of Tsengwen Reservoir affects the normal water supply severely. This study is aimed to evaluate soil erosions and sediments at corresponding watersheds, in which the management can be easily accessed. Regression analysis was conducted to predict the soil erosions where the hydrological and physiographic factors were considered for a specific rainfall site and/or the cases of continuous raining. Additionally with the presumed slope dimensions and the application of empirical formula and physical mode (WEPP) to predict soil changes along the slope, the probabilistic model of soil erosion can be established. Furthermore, GeoWEPP program was conducted to simulate climate change. With land reclamation, digital topographic map and soil files, the amount of sand transports at the watersheds can be predicted based on the information of rainfall and transports of soil formations. Both slope and watershed levels' assessment can be suggested.

Key Word: soil erosion, cutting method, WEPP, GeoWEPP, polynomial regression

1 前言

1.1 研究動機與目的

水庫集水區境內土砂淤積係屬無法避免之自然現象, 故積極調查土砂生產區域以及防砂對策擬定極為重要。以曾文水庫為例, 其位於嘉義縣大埔鄉曾文溪主流上游, 其庫容亦為臺灣之最, 曾文水庫集水區原推估年輸砂量 561 萬立方公尺, 高強度與長延時的降雨型態, 誘使集水區內發生大規模土砂災害, 嚴重威脅水庫壽命, 其對南部地區供水影響甚鉅。

有鑑於此, 曾文水庫集水區主要土砂問題, 暴雨期間深受降雨事件特性所影響, 過去水保局(2011), 針對山坡地鋪設眾多沖蝕針用以觀測降雨引致土壤沖蝕變化。另外, 亦累積豐富環境集水區圖資, 若能透過以上於現地所觀測實際資料, 搭配境內雨量站依時性雨量資訊加以運用, 配合一套合理性、系統性及標準化的土壤沖蝕經驗式建構程序, 合理預測水文事件對水庫淤積潛勢, 以掌握上游土壤沖蝕落入河道, 運移至水庫集水區所造成之淤積量, 將有助於未來水庫集水區保育治理規劃, 以及汛期間防淤減淤之策略參考, 實為本研究主要探討課題。

1.2 研究流程

本研究主要考量誘發土壤沖蝕之水文及地文等影響因子, 建構對特定雨場或連續降雨引致土壤沖蝕深度經驗推估式, 其次以曾文水庫為研究樣區, 於坡面尺度使用經驗式及物理模式(WEPP)推估坡面土砂變化; 而集水區採用 GeoWEPP 模擬氣候環境的變化, 並結合土地利用、數值地形及土壤類型等條件, 由降雨逕流、土砂生產、土砂運移、土砂堆積等一連串輸送過程, 由坡面尺度推演至集水區尺度, 模擬串接整個集水區土砂運移量化結果。本研究分成兩大尺度, 分述探討:

- (1) 坡面尺度: 建置一套適用於台灣集水區本土化土壤沖蝕估算式, 用於推估單一降雨事件或長期降雨的土壤沖蝕量, 以提供使用者另一種選擇以估算土壤沖蝕量。
- (2) 集水區尺度: 根據台灣的降雨特性, 針對單一降雨事件及逐年降雨推估整個集水區的土砂產量, 以有效掌握落入河道輸砂量變化。透過案例驗證所模擬集水區或坡面環境系統, 藉此模擬環境系統, 根據假設不同水文情境, 預測各式降雨量引致土壤沖蝕變化, 以掌握坡面集水區土壤分布流失, 輔助工程師或使用者針對集水區保育治理規劃依據。

2 文獻回顧

2.1 土壤沖蝕推估方法

國內學者曾使用進行沖蝕相關研究, 觀察一人工平台上之小型河道(紋溝)的地形地貌特徵, 觀察其在水力作用下的侵蝕或堆積現象, 並歸納出其發育模式, 藉以瞭解泥岩的紋溝與河道變遷特徵; 林金炳(2013)對臺灣北部地區不同土壤分類設置 17 處研究

試區, 進行現地土壤沖蝕量測, 從民國 99 年 5 月至 101 年 10 月止, 共觀測 717 筆資料進行研究與分析, 觀察北部土可之可蝕性。

李建堂(1997)曾系統式回顧土壤水蝕方法的相關文獻, 將量測土壤沖蝕的方法分為直接測量法、間接測量法與沖蝕預估模式等三大類, 其中直接測量法選包括實驗區法和集水區輸砂量法, 並且指出這些量測和估算方法的限制。

Stroosnijder (2005)更詳細的整理各種田間直接量測土壤沖蝕的設備與方法, 各方法和設備適用的尺度如表 1 所示; 此外, 其更進一步指出在量測土壤沖蝕時會產生誤差的幾項原因, 例如礙於成本與時間, 測量的時間太短, 或土壤、植被覆蓋的長期和季節變異, 對量測結果產生影響; 抑或是大範圍的空間變異, 也造成量測和推估上的困難; 又或風向的變化, 可能會是取樣重複; 或是測量儀器與設備的標準、規格不一, 容易導致測量上的誤差等。

表 1 土壤沖蝕設備與適用尺度

量測方法或設備	觀測項目	適用尺度
Splash cup and funnel	澆蝕	1 m ²
Field plot and trays	紋溝間沖蝕	<1 m ²
Buried bottle	緩慢的風蝕	1 m ²
Sediment collection	紋溝沖蝕	<100 m ²
Change in surface elevation and Pin	山坡面蝕和堆積 水蝕和風蝕均適用	<500 m
Change in channel cross section and laser beam	水道沖蝕	< 1 ha
Wilson and Cooke (W&C) catcher, or saltiphone	風蝕 收集跳動風蝕物質	<1 ha
Sediment collection and change in surface elevation with a flume	小型集水區的沖蝕	<50 ha
Radio nuclide tracer	適合用在自然環境的侵蝕研究	<50 ha
Vaseline-slide sampler (passive equipment) and active equipment	風蝕與風力搬運的懸浮沉積物	大區域尺度 (supra regional scale)

土壤沖蝕的方法在過去數十年間發展多種方法, 而本節先將針對經驗模式中最常被應用的土壤流失方程式(Universal Soil Loss Equation, USLE)及物理模式中近期發預報展迅速的水蝕預估計劃(Water Erosion Prediction Project, WEPP)進行整理。

2.1.1 土壤沖蝕經驗模式

經驗模式可被廣泛的應用在各地的土壤沖蝕初步評估, 由於為其利用實際資料, 經統計方法所堆導出的經驗公式通常較為簡單, 而且所需的相關資料較也較物理模式為快速, 其中 USLE 為經驗模式中典型的代表例子(李建堂, 1997)。此模式由 Smith and Wischmeier 1950 年於美國 21 個州 36 個地區蒐集超過 7500 標準 standard unit plot-years 及 500 處 watershed-years 的沖蝕數據, 重新評估土壤沖蝕的各項影響因子包括 R、K、LS、C 及 P, 主要用於預估一坡段的年平均土壤流失量。提出現今最廣為使用的通用土壤沖蝕公式(Universal Soil Loss Equation, USLE)。其公式可整理如下表 2

表 2 USLE 各項參數簡介

A = Rm · Km · LS · C · P		
代號	代號名稱	備註
A	土壤流失量	土壤流失量 其單位為 公噸/公頃·年
Rm	降雨沖蝕指數	量化降雨和徑流的侵蝕力, 為三十分鐘降雨強度和降雨動能兩個的乘積, 其單位為106 焦耳·毫米/公頃·小時·年
Km	土壤沖蝕指數	表土壤被侵蝕的難易程度, 和土壤種類及其有機物含量有關, 其單位為公噸·公頃·小時·年/106 焦耳·毫米·公頃·年
LS	地形因子	與其邊坡的坡長、坡形及坡度有關, 坡度影響流速提升河流的搬運能力,
C	覆蓋及管理因子	此因子考慮邊坡植物的密度和種類, 及考量管理措施包括 肥、耕作及灌溉, 最複雜且難定義。
P	水土保持措施因子	包括: 等高植立、草地水輪等水土保持措施

2.1.2 土壤沖蝕物理模式

物理模式與經驗模式差別在於, 物理模式以較具理論基礎之數學形式取代經驗模式所導出之關係式。一般而言, 物理模式應以沖蝕作用為基礎發展而成, 因此在預估土壤沖蝕時會較經驗模式準確, 同時應用限制較小, 不具地域性, 可配合當地氣候狀況用於其他地區, 為克服 USLE 的使用缺點, 1985 年, 美國農業部開始發展水蝕預報模型的研究, 該項目由美國國家土壤侵蝕研究實驗室(USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, Indiana)組織全美有關科學、教學、生產單位共同研究, 於1995 年發布了第一個官方正式版本WEPP'95, 隨後又於1998、2000 及 2001 年分別發布了不同版本。

WEPP 模型中, 土壤侵蝕過程包括沖蝕、搬運及堆積三大過程。暴雨所產生的逕流及其挾帶的侵蝕泥沙在從坡面向溝道匯集並最後從流域出口輸入至較大一級的流域過程中, 沖蝕、搬運及堆積作用不斷發生。坡面沖蝕包括紋溝沖蝕及紋溝間沖蝕。WEPP 模型理論基礎為:

- (1)紋溝間沖蝕主要以降雨沖蝕為主; 而紋溝沖蝕主要以逕流沖蝕為主。
- (2)沖蝕量(E)是搬運能力(Tc)及輸砂量(qs)的函數即

$$E = \tau(Tc - qs) \quad (1)$$

水蝕預報 (Water Erosion Prediction Project, WEPP)可模擬和預測不同時間尺度(日、月、季及年)和不同土地利用類型(農耕地、草地、林地、建築工地及城市等)的逕流量和土壤流失量。同時還具備模擬和預測土壤水分的滲入、蒸發及農作物生長等功能, 以表3列舉例之。圖2至4為WEPP 程式操作簡介。

表 3 WEPP 輸出表

output 模擬資料檔案	備註
RAINFALL AND RUNOFF SUMMARY	降雨和逕流摘要
ON SITE EFFECTS	現地影響報告
AREA OF NET SOIL LOSS	面積淨侵蝕量
SOIL LOSS/DEPOSITION ALONG SLOPE PROFILE	水土流失/沿斜坡剖面沉積
AVERAGE ANNUAL SEDIMENT LEAVING PROFILE	年平均剖面沉積報告



圖 2 WEPP 操作模式

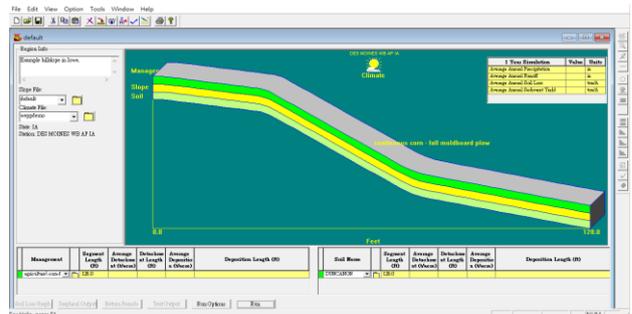


圖 3 WEPP 操作介面

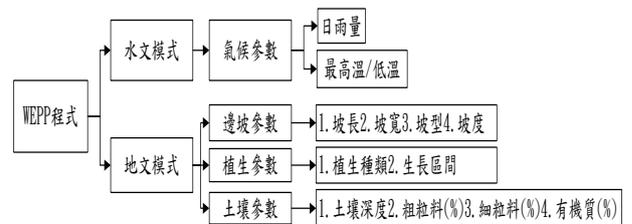


圖 4 WEPP 程式操作流程圖

由於坡面廣泛存在於自然界, 亦逕流及土砂產量的來源地, 故坡面版本的研發相對成熟, 但WEPP屬美國農業部所開發, 在東部與西部之氣候上存在著些許差異, 日雨量的參數輸入上僅能小於1000mm, 對於台灣有著極端降雨的氣候來說, 如何克服參數上的控制將是未來水土保持的一項課題。

美國科學家將WEPP模型與地理資訊模型GIS相結合, 基於ArcView軟體開發了GeoWEPP模型(the geo-spatial interface for WEPP)(Renschler, 2003)。該模型的優點在於與GIS有效的結合, 可直接利用數值化數據對沖蝕量進行估算; 同時模型能夠直接利用各種數值化地理資訊(數值高程模型及地形圖等等)生成模型所需之輸入參數, 來評估流域水土保持規劃的可行性; 對不同地區的模型參數加以律定, 能使WEPP的應用更加廣泛。

採用地理資訊系統軟體ArcGIS與GeoWEPP相結合方法進行流域產砂估算, GeoWEPP結合了三種不同的核心功能來計算土壤沖蝕:

- (1)TOPAZ(地形參數)-包含地形評估、排水鑑定、流域鑑定、流域切割及子流域參數。
- (2)PRISM(在獨立邊坡模型的高程參數回歸)-編輯現有的氣候數據。
- (3)WEPP(水蝕預報模型)-計算土壤沖蝕。

在進行流域產砂估算時首先要繪出流域河網(Network), 再將流域劃分成多個坡面單元(Hillslopes),

坡面將河網自上游至下游分為不同級數的河道 (Channels), 泥沙則從上游至下游的不同河道輸送, 最終通過出口(outlet)進入水庫, 建立好相關圖層和數據庫後, 在GeoWEPP進行分析, 圖5為GeoWEPP操作模式, 圖六為GeoWEPP各功能按鈕。

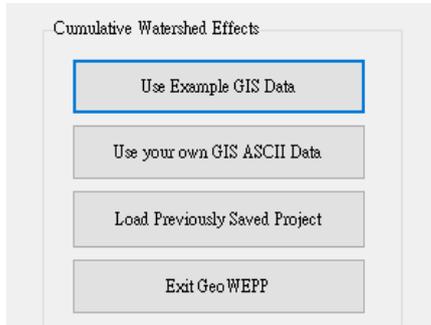


圖5 GeoWEPP操作模式



圖6 GeoWEPP各功能按鈕

(1) <TOPAZ part>

①定義CSA(流域面積)和MSCL(最小流域長)來描繪溪流, ②指定流域的出口點

(2) <PRISM part>

③打開PRISM選擇/編輯現有的氣候數據

(3) <WEPP part>

④獲得侵蝕模式的流域, ⑤顯示報告, ⑥、保存GeoWEPP項目, ⑦更改侵蝕的容許值, ⑧顯示邊坡在流域的訊息(點擊邊坡)⑨更改相關的土地利用和土壤類型, ⑩改變坡面參數後返回WEPP, ⑪點擊一個邊坡來載入WEPP, ⑫返回WEPP13. 儲存項目及退出

2.2 土壤沖蝕量測方法

Stroosnijder(2005)經文獻回顧指出於野外土壤沖蝕量測時, 就調查項目及對對象, 應需先釐清相關議題, 包括「時空間離散性大」、「量測資料準確性」、「由小尺度區域量測資料外插至較大尺度區域應用之衍生問題」以及「不同領域之沖蝕計量單位轉換」等四大項。其中針對坡面尺度量測, 可採用沖蝕針量測釐米級地表地伏變化, 適用於瞭解表層土壤受降雨逕流影響之侵蝕面及堆積層變動程度。

2.2.1 沖蝕針試驗

沖蝕針觀測法用於觀測邊坡的沖蝕狀態, 並可用以推測邊坡後退速率。本研究沖蝕針設計參考水保局(2010)於石門水庫集水區不同植被類型之坡面, 運用改良簡易型觀測樁來觀測土壤流失狀況, 其設計為300mm之5號竹節鋼筋(直徑約15.9mm)套上螺絲墊片, 如圖7。鋼筋頂部與地面間預留3cm之距離, 便於例行維護管理, 若有堆積現象仍可測得堆積高度。當進行地表沖蝕量調查量測時, 利用精度0.05mm之測微尺記錄針頭與墊片間之距離, 相隔一段時間後量

測一次, 則兩次值之差即為沖蝕深度或堆積高度。

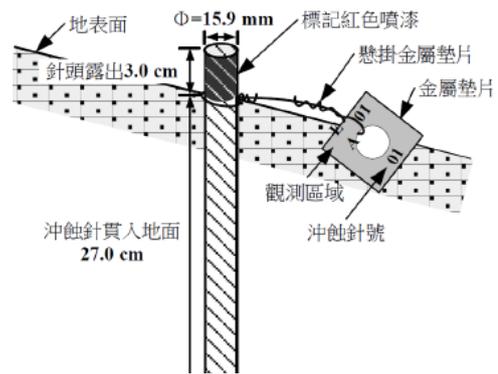


圖7 沖蝕針埋設示意圖(摘自 水保局, 2009)

2.3 水文機率模式建立

水文資料頻率分析之主要目的, 為決定具有某事件大小x之水文事件之重現期距(Recurrence interval)。所謂重現期距為大於或等於某一水文事件x之平均時間間距, 亦稱為回歸週期(Return period), 以T表示之, 通常T以年計。一年內該大小水文事件發生之機率, 有時亦稱為頻率(Frequency); 定率方式、序率方式兩種水文資料選用法, 設 T_M 為年最大選用法之重現期距, T_E 為年超過量選用法之重現期距, 兩者之關係式可表示為:

$$T_E = \frac{1}{\ell_n T_M - \ell_n (T_M - 1)} \quad (2)$$

有關各水工結構物之設計重現期距如表5所示。

表5 水工結構物設計重現期距

水工結構物名稱	設計重現年期(年)
受迴水影響重要公路之橋梁	50~100
次要公路上橋梁或涵洞	25
較小道路之涵洞、雨水下水道、排水溝	5~10
排水溝路口、邊溝	1~2
大壩或水庫	可能最大洪水(PMF)

依所用頻率方法, 選用適當之機率紙, 定出觀測水文資料點。機率紙大致分為兩種, 其一為海生機率紙(Hazen probability paper), 其實際為常態對數機率紙, 橫軸表示機率, 縱軸為對數。另一為甘保機率紙, 或稱極端機率紙, 其縱軸為算術座標, 橫軸為機率(%)、回歸週期(T)、改變量(Reduced variate, y)。

水文循環之水文諸量在地球上迥異不同, 且隨著時間變動, 水文諸量之分布當然受自然物理法則及機率法則之支配, 目前欲純以物理法則來探求它甚為困難目前欲純以物理法則來探求它甚為困難, 因此水文諸量之一系列觀測值視為可遵從符合某種法則之序率過程(stochastic process)中求得之實現值。研究水文量統計推定方法之學術領域是為水文統計學(hydrological statistics), 頻率分析(frequency analysis)則為水文分析常用之方法。

2.5 雨場切割方法

為萃取單一事件降雨雨場之降雨特性，故需進行雨場的分割，進而定義最大降雨強度、降雨延時、累積雨量，如圖 8 所示，量化出連續的降雨雨場，其中有效累積雨量為前期降雨加上本次前段降雨，前期降雨則為有效雨場前 7 日降雨影響，而判斷一場降雨事件的時間起迄，目前國內外已有諸多學者進行過研究，然而各研究區域有其不同的地理特性，針對前人研究之六種雨場切割方法整理為下表 6，可作為後續由萃取雨場因子之方法依據。

表 6 雨場切割方法

種類	雨場(降雨)開始	雨場(降雨)結束
方法 1	連續前 24hr 均無降雨	連續後 24hr 均無降雨
方法 2	連續前 12hr 均無降雨	連續後 12hr 均無降雨
方法 3	時雨量大於 4mm	連續 3hr 之時雨量小於 4mm
方法 4	前 24 小時累積雨量達 10mm	後 24 小時累積雨量小於 10mm
方法 5	時雨量大於 4mm	連續 6hr 之時雨量小於 4mm
方法 6	前 12 小時累積雨量達 10mm	後 12 小時累積雨量小於 10mm

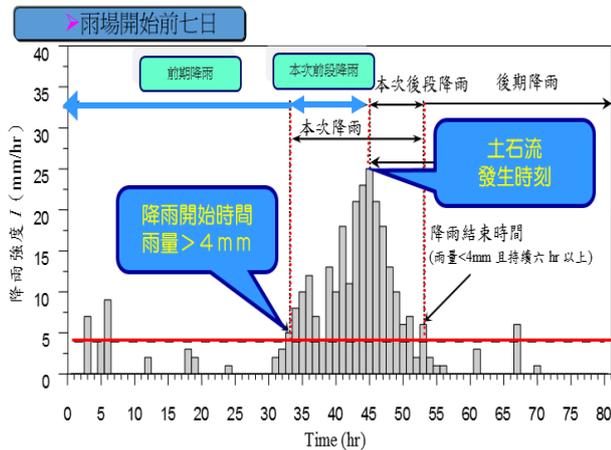


圖 8 雨場切割示意圖

3 土壤沖蝕經驗模式建立

3.1 經驗模式建立流程與架構

為有效系統化建構土壤沖蝕經驗式；可針對單一類型植生邊坡，考量集水區降雨引致水文因子特性，如累積雨量、降雨延時、降雨動能等；接著，可依所處地點之地層岩性、坡度以及坡向等地文因子，運用 Minitab 統計程式以雙尾檢定判斷各因子與沖蝕深度是否有其顯著性；依照水文與地文因子之顯著性及相關性挑選回歸式變量，並建構土壤沖蝕經驗式，其中可以分組方式逐一進行，其土壤沖蝕經驗式建構程序，如圖 9 所示。

整理各沖蝕相關因子間之關係，運用統計上的雙尾檢定之 P-Value 來判斷各項因子與沖蝕深度是否有其顯著性，並依照降雨因子與地文因子之顯著性及相關性挑選為回歸式之變量進行回歸。將會透過套裝軟體 Minitab 來進行相關回歸方法上的運算。本研究邊坡沖蝕經驗式之建立之步驟如流程圖 10 所示。

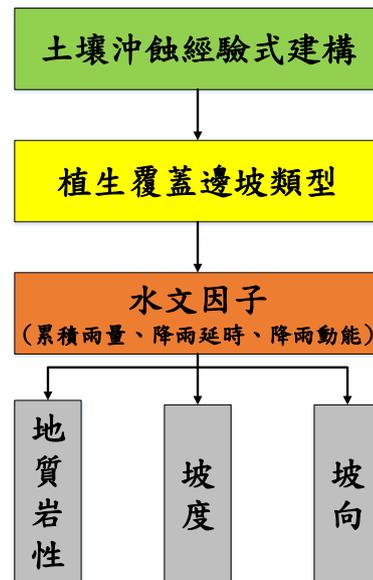


圖 9 經驗模式建立流程圖



圖 10 經驗回歸式建立流程圖

回歸方程式產出後須確認其方程式內容是否有其意義，因挑選之相關參數須符合表 7 的 Pearson correlation 值，判斷其相關性是否正確。同時藉由 correlation 分析判斷其多變量回歸方程式與原資料之 R 值，並繪製其回歸曲線，如圖 11 所示。

表 7 沖蝕影響因子相關表

沖蝕影響因子	雨場次數 (無因次)	累積雨量 (mm)	降雨動能 (MJ/ha)	降雨延時 (hr)	坡長 (m)	坡度 (度)
對應沖蝕深度 相關統計值	R					
	0.428	0.557	0.368	0.563	-0.094	0.159
	P-value					
	0	0	0	0	0.073	0.002

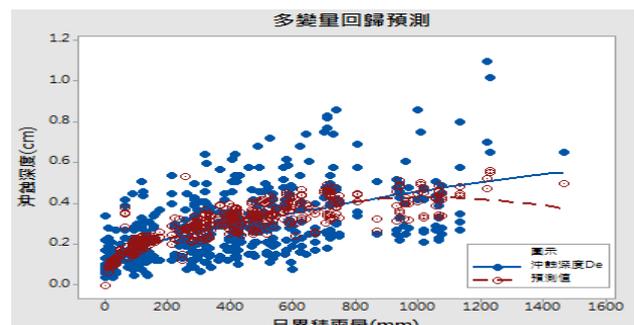


圖 11 繪製回歸曲線

3.2 水文及地文影響因素考量

土壤沖蝕是水與土壤之間的相互作用，土壤本身的性質與所處地形地貌條件決定其抵抗或抑制沖蝕的能力。若能建構一套可隨地文條件而變，並能考量降雨特性影響之土壤沖蝕經驗式，俾利工程師能快速推估土壤沖蝕量，有助於實際設計應用。

水文方面包含累積雨量、降雨延時、降雨動能及降雨季節，本章依內政部營建署，將降雨季節區分為汛期(5月至11月)及非汛期(12月至4月)，其中汛期又包含梅雨及颱風，非汛期則包含春雨及枯水期，在汛期的梅雨季屬延時長降雨強度低，在回歸分析上較無規律，颱風季屬延時短降雨强度高，在回歸分析上預測土壤沖蝕深度落於實際量測土壤深度內，非汛期則因延時短強度低，降雨時間上分布散亂，在回歸分析上預測土壤沖蝕深度較無規律；地文方面影響因素包含邊坡種類、地質岩性、坡度分級及坡向，分類如圖 12 所示，其中坡度屬可量化參數，其餘邊坡種類、地質岩性、坡向屬於定性說明、為不可量化之參數。

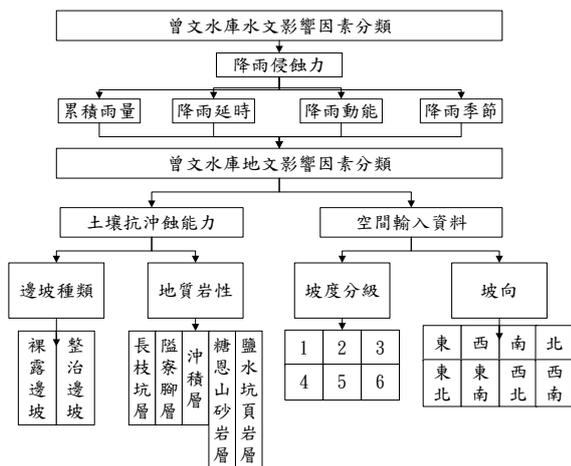


圖 12 曾文水庫地文因子影響因素分類

3.3 各經驗回歸式是用性探討

本節依上述方法將各植生程度不同之邊坡，在各式條件下分組進行回歸，在不同條件下，給予不同之影響因子進行回歸，已達最高之 R^2 值。進行單參數、多參數回歸，分別依照邊坡種類、坡向、坡度分級、地質岩性及降雨季節比較兩種回歸式的適用性

坡向:相關係數比較
 在整治邊坡方面，多參數整體的相關係數皆比單參數的相關係數高，其中相關係數最高為坡向東，其值為 0.933，多參數之相關係數最低為坡向東，其值為 0.621，其餘皆比單參數高許多，最高相關係數之坡向北有 0.904，如圖 13 所示

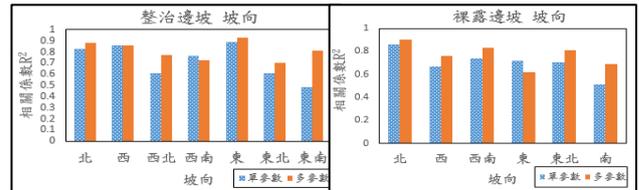


圖 13 整治邊坡及裸露邊坡之相關係數與坡向比較圖

(1) 坡度:相關係數比較

在整治邊坡方面，多參數在 1 級坡及 6 級坡稍微來的低；在裸露邊坡方面，多參數之相關係數皆比單參數相關係數高許多，其中相關係數最高的為四級坡，其值為 0.816，如圖 14 所示。

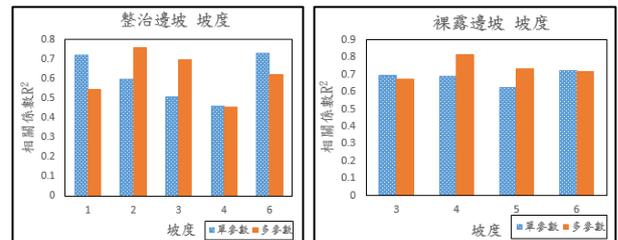


圖 14 整治邊坡及裸露邊坡之相關係數與坡度比較圖

(2) 岩性:相關係數比較

在整治邊坡方面，多參數在沖積層稍微來的低；在裸露邊坡方面，多參數之相關係數皆比單參數相關係數高許多，其中相關係數最高為冷水坑頁岩層，其值為 0.879，如圖 15 所示。

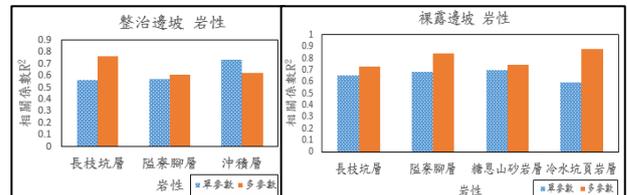


圖 15 整治邊坡及裸露邊坡之相關係數與岩性比較圖

(3) 降雨季節參數比較

汛期包含颱風及梅雨季節，颱風降雨延時短、降雨強度高，使得回歸散佈點位趨於集中的現象，非汛期包含春雨即枯水季，降雨延時及降雨強度不一，使得回歸散佈點位散亂，因此汛期相關係數高於非汛期相關係數，如圖 16 所示。

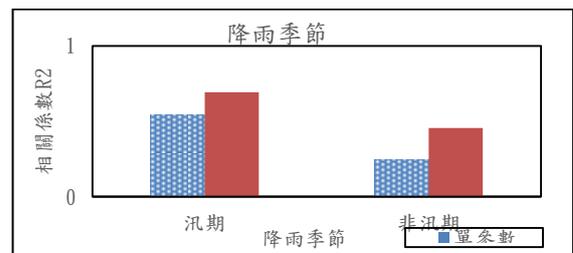


圖 16 汛期及非汛期之相關係數與降雨季節比較圖

透過上述分析可知多參數之相關係數(R^2)優於單參數之土壤經驗式，但差異不大，故應用上若以考量簡單快速者，建議可採單參數土壤沖蝕經驗式；考量

較為準確者，建議可採多參數土壤沖蝕經驗式。

3.4 水文機率性土壤沖蝕模式建立

透過各經驗模式結合水文序率模式中的海生法，建立水文機率性沖蝕模式，並且利用設計雨型可了解各降雨事件之降雨型態，由曾文水庫集水區之阿里山測站55年所統計之日雨量資料，於每年選取一個最大日雨量資料共55件，將55年之年最大日雨量按大小順序排列，並利用海生法計算其超越機率，接著以縱軸超越機率W(%), 橫軸日雨量值(mm)繪製其曲線圖，並以此曲線方程式計算2年、5年、10年、20年、100年、200年之重現期雨量，如圖17及表9所示。

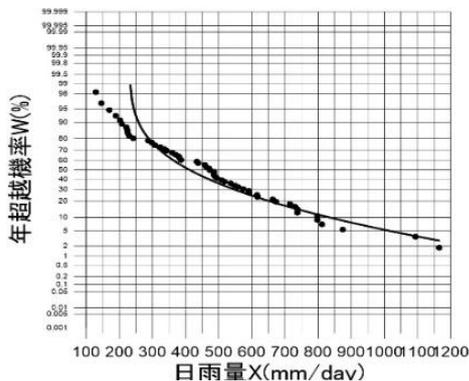


圖17 阿里山年超越機率

表8 重現期所對應之日雨量表

曲線方程式	$\ln(Y) = -0.003811731638 * X + 5.482596708$	
重現期(T年)	年超越機率 $W=1/T(\%)$	日雨量(mm/day)
2年	50	412.0
5年	20	652.4
10年	10	834.3
20年	5	1016.1
100年	1	1438.4
200年	0.5	1617.0

3.4.1 水文機率性土沖蝕模式建立

由上述水文頻率雨量分析，建立水文機率分布曲線，推求重現期降雨條件下之可能發生引致土壤沖蝕深度，供以水庫集水區防淤減淤及上游水土保持設計之參考，如及圖18所示，沖蝕深度透過前述章節經驗式回歸程序對整個曾文集水區進行回歸而得，各曲線方程式如表9所示，透過此程序可藉由年超越機率、一日累積雨量、沖蝕深度其一資料推求其餘兩項之資料。

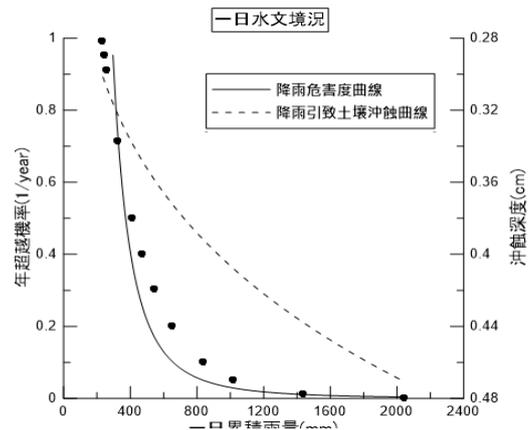


圖18 水文機率性土壤沖蝕模式

表9 降雨危害度曲線及降雨引致土壤沖蝕深度曲線方程式

	曲線方程式
降雨危害度曲線	$\ln(Y) = -2.827240602 * \ln(X) + 16.04454103$
降雨引致土壤沖蝕曲線	$\ln(Y) = 0.2050098231 * \ln(X) - 2.31607189$

3.4.2 設計雨型模式建立

由於曾文集水區面積廣大，流域平均時雨量之計算方式採徐昇氏法採徐昇氏法，並依8場颱風暴雨事件，設計其1日暴雨分配型態，並利用此降雨型態模擬颱風1日降雨雨型並將其歸納整理成表，如表10所示，表中降雨量乘上1日暴雨雨型分配圖中各百分點，產製此降雨量的暴雨雨型分配圖，供後續使用者在防災決策時查表之用，為計算水庫入流泥砂量，可配合土砂收支公式如下式

$$V_D = V_{ER} \times SDR \quad (3)$$

土砂遞移率(SDR)為44.67%； V_{ER} 為坡面土壤流失量

表10 一日重現期距之雨量

重現期距		2年	5年	10年	20年	100年	200年
1日	降雨量(mm)	412.0	652.4	834.3	1016.1	1438.4	1617.0
	小時尖峰降雨(mm)	39.1	62.0	79.3	96.5	136.6	153.9
	沖蝕深度(cm)	0.34	0.37	0.39	0.41	0.44	0.45
	坡面土壤流失量(V_{ER})($10^4 m^3$)	163.54	177.97	187.59	197.21	211.64	216.45
	土砂遞移率(SDR)	44.67%					
	水庫入流點泥砂產量(V_D)($10^4 m^3$)	73.0533	79.4992	83.7965	88.0937	94.5396	96.6882

4 土壤沖蝕物理模式建立

4.1 土壤沖蝕坡面模式建立

本節將應用目前既有且較為廣用的WEPP，透過現場地形條件、氣候條件、去模擬探討在量測時間坡面土壤流失狀況，流程圖如圖19所示。

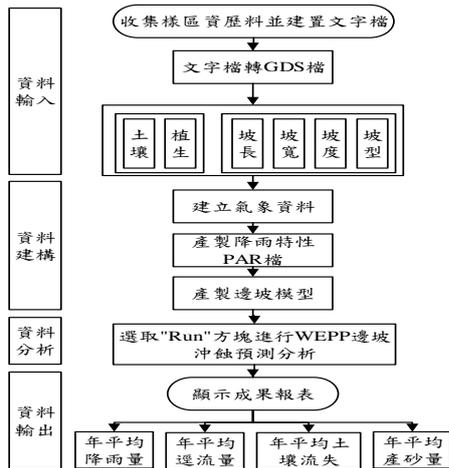


圖19 WEPP操作流程

並以東西坑溪、龍蛟溪、樂野3號野溪為研究案例，模擬各子集水區裸露邊坡之坡度外，同時將各類型邊坡(凹坡、凸坡、S坡及平坡)搭配不同坡度(20°~50°)進行年沖蝕量模擬，依其結果繪製成圖20至圖22，觀察其結果可發現沖蝕深度由大到小為凸坡>平坡≥S坡>凹坡。

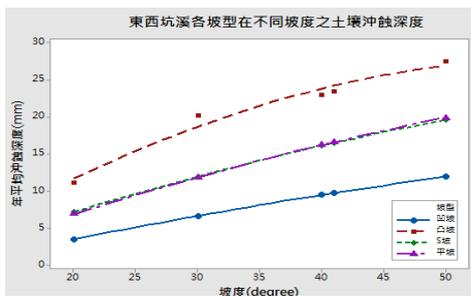


圖20 東西坑溪在不同坡度下之土壤沖蝕深度

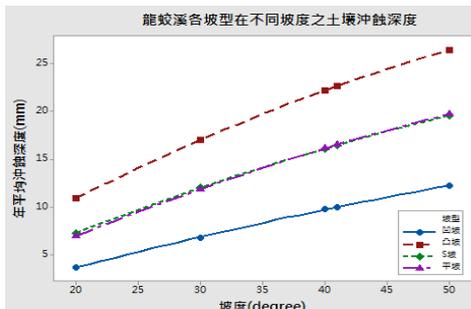


圖21 龍蛟溪在不同坡度下之土壤沖蝕深度

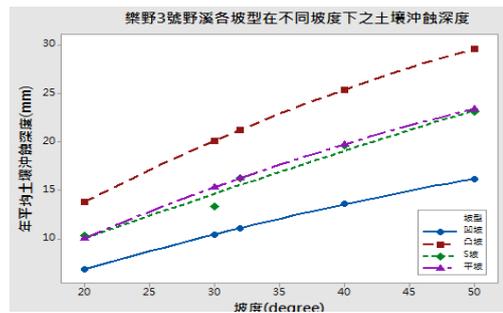


圖22 樂野3號野溪在不同坡度下之土壤沖蝕深度

經由本研究的三個案例模擬結果可得知，近5年的年平均土壤沖蝕深度變化量約為近10年的0.8~0.9倍之間；近2年的年平均土壤沖蝕深度變化量約為近10年的0.7~0.85倍之間，可看出年沖蝕深度有逐漸降低的趨勢，如圖22至圖25所示。

圖22 近年年平均土壤沖蝕深度趨勢

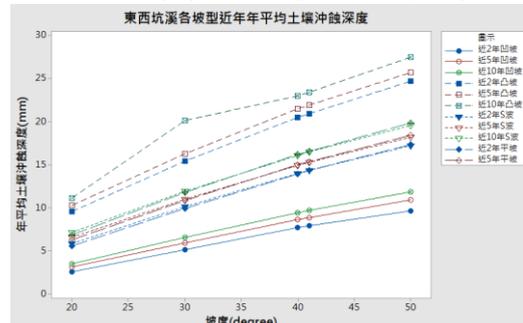


圖23 東西坑溪各坡行近年年平均土壤沖蝕深度

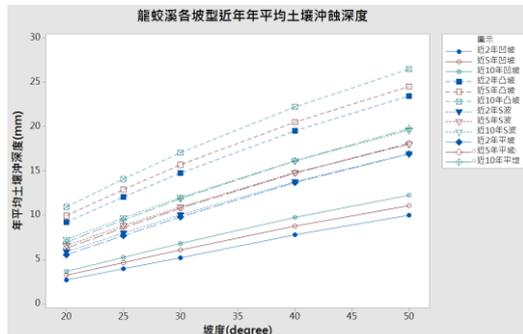


圖24 龍蛟溪各坡行近年年平均土壤沖蝕深度

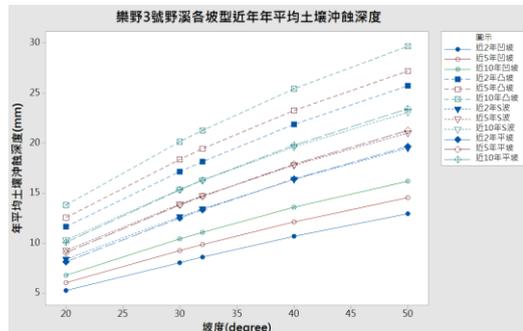
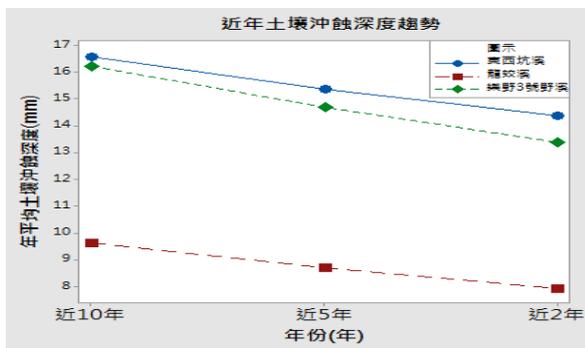


圖25 樂野3號野溪各坡行近年年平均土壤沖蝕深度



4.2 土壤沖蝕集水區模式建立

本研究以曾文水庫為例，將ArcGIS與GeoWEPP相結合，以高精度的DEM為基礎，進行流域的產砂估

算及其空間尺度效應分析, 同時將分析結果在ArcGIS中進行可視化表達, 為曾文水庫及其集水區的水土資源利用與保護提供理論與實踐之依據, 其流程圖如圖26所示。

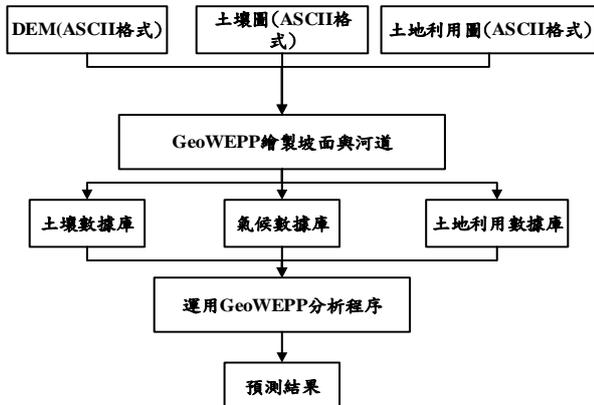


圖26 GeoWEPP模型分析流程

5 案例驗證

本章節以東西坑溪、龍蛟溪、樂野3號野溪為研究案例, 觀測時間為2011年5月14日至2013年9月2日, 代表降雨事件為天秤颱風、啟德颱風、海葵颱風, 模擬上述三個降雨事件誘發土壤沖蝕深度之結果, 其中各子集水區分別量測17次土壤沖蝕深度, 該研究區域位於大埔集水區及樂野集水區, 如圖27。

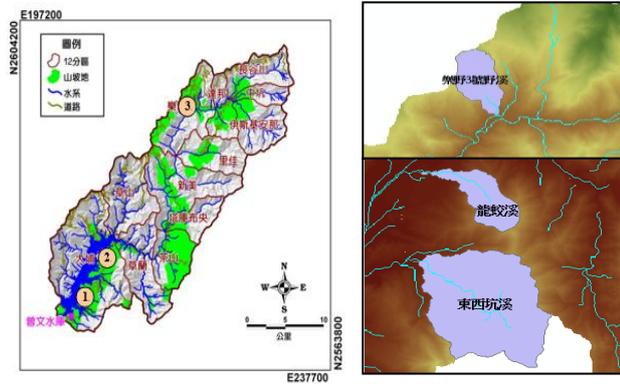


圖27 案例區域地理位置

5.2 坡面模擬

5.2.1 經驗模式

本節將第四章土壤沖蝕經驗回歸式運用在三個研究案例上, 再與沖蝕針實測值進行比較, 為了準確驗證本研究經驗式, 將回歸數據裡剔除一個降雨觀測區間當作一個獨立降雨事件以產製新的回歸式, 再以此回歸式套用至剔除的降雨觀測區間產生預測沖蝕深度, 在與實際沖蝕深度比對, 本研究所剔除降雨觀測區間為2012年8月4日至2012年9月24日, 回歸式圖28, 表11及所示。

表11 裸露邊坡經驗回歸式

項目	Regression Equation
----	---------------------

$$\text{驗證回歸式} \quad De = 0.0602 * V^{0.158} D^{0.170} E^{0.01} \theta^{0.014}$$

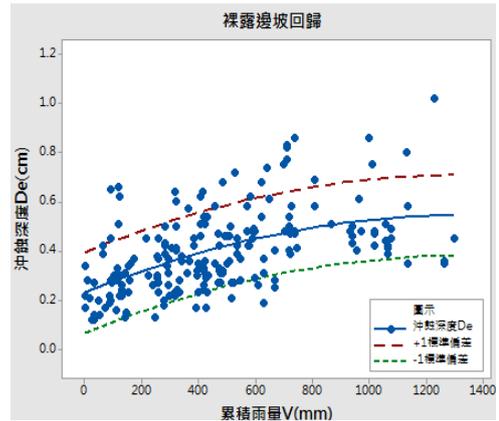


圖28 裸露邊坡回歸式曲線

為了驗證本研究經驗公式之準確性, 針對2012年8月4日至2012年9月24日量測區間進行比較驗證, 東西坑溪(EA02)推估結果為0.45高於實測值0.15, 相對誤差50%, 屬較保守之推估; 龍蛟溪(EB02)推估結果為0.43高於實測值0.01, 相對誤差2%, 屬較保守之推估; 樂野三號野溪(EE01)推估結果為0.13低於實測值0.15, 相對誤差53%, 屬較樂觀之推估, 因其觀測時間之推估結果, 大致會隨著降雨次數愈多, 累積雨量愈多, 沖蝕狀況愈為明顯, 惟實際應用時, 仍建議可考量安全因子予以合理放大, 以保守估算土壤沖蝕量, 便於水庫防淤降濁策略之研擬。

5.2.2 WEP模式

本節以東西坑溪裸露邊坡(EA02)、龍蛟溪裸露邊坡(EB02)、樂野三號野溪裸露邊坡(EE01)為研究案例, 觀測時間為2011年10月3日至2013年9月2日, 共量測12次土壤沖蝕深度, 在透過本文WEPP模擬之結果與實際監測值做比較如表12至14所示

表12 東西坑溪(EA02)裸露邊坡年沖蝕深度

坡型	坡度	soil loss(kg/m2)	沖蝕深度 (cm)	年平均充實深度實測值
	41	35.187	2.3458	2.44
	20	16.705	1.1137	NA
	30	30.225	2.0150	
	40	34.45	2.2967	
	50	41.198	2.7465	

東西坑溪在凸坡坡度為41度時沖蝕深度2.3458cm, 接近實際值96%, 惟應用上需保守估計, 應在推估時給予50以上之坡度。

表13 龍蛟溪(EB02)裸露邊坡年沖蝕深度

坡型	坡度	soil loss(kg/m2)	沖蝕深度 (cm)	年平均充實深度實測值
	25	21.129	1.4086	2.74
	20	16.363	1.0909	NA
	30	25.559	1.7039	
	40	33.355	2.2237	
	50	39.772	2.6515	

龍蛟溪在凸坡坡度為25度時沖蝕深度1.4086cm，接近實際值0.51%，惟應用上需保守估計，應在推估時給予50以上之坡度。

表14 樂野三號野溪(EE01)裸露邊坡年沖蝕深度

坡型	坡度	soil loss(kg/m ²)	沖蝕深度 (cm)	年平均充實深度實測值
	32	31.926	2.1284	2.29
	20	20.715	1.3810	NA
	30	30.225	2.0150	
	40	38.115	2.5410	
	50	44.523	2.9682	

樂野三號野溪在凸坡坡度為32度時沖蝕深度2.12cm，接近實際值93%，惟應用上需保守估計，應在推估時給予40以上之坡度。

表示WEPP其模擬結果在預估土壤沖蝕深度上與實際量測趨勢是相同，顯示本文WEPP在預估土壤沖蝕深度上具某一程度參考價值，但考量應用上需在坡度設定上予以放大以達到保守估計之目的。

5.3 集水區模式

5.3.1 集水區淤積資料

庫滿水面積為1714公頃（17平方公里），是台灣湖面面積最大的水庫，而其集水區面積為481平方公里，占全台灣面積6.24%。水庫設計容量達7億4,840萬立方公尺，更是全台容量最大的水庫，占全台水庫庫容26.3%。

集水區模擬採用GeoWEPP，主要針對代表性事件2009年之天秤颱風作為獨立事件之比較，透過GeoWEPP建立之模型預測其降雨事件產生之泥砂產量，並透過水利署提供之歷年水庫泥砂淤積資料比較其誤差，使其模擬結果為工程上可被信賴之範圍

5.3.2 GeoWEPP模式

透過地理空間界面水蝕預報模式預測曾文水庫集水區泥沙入庫之泥沙總量，進行模擬預測時須先準備曾文水庫之數值高程地形圖、土壤圖及土地利用圖，模型的執行所需氣候數據須先由WEPP模式對應2011年及2012年生成氣候條件。參數輸入之後點選最終河道匯流口並選擇流動路徑模式進行模擬如圖29所示。

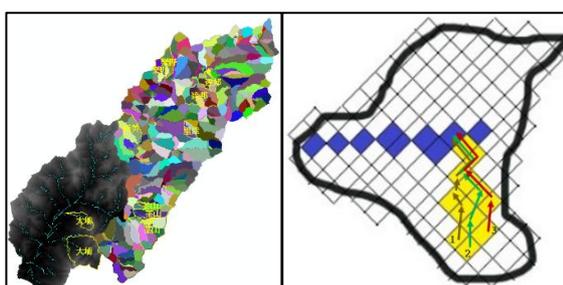


圖29 選取最終河道匯流口及流動路徑模式

模擬時會因河道的繪製，結果也會有些許變化，因此在輸入最小流域面積有75公頃、100公頃與最小河道長度有100公尺、200公尺、300公尺，交叉配置下達收斂狀態，而流域模式適用於小流域，因此要模擬整個曾文集水區時使用流動路徑模式較為準確，將其模擬結果與實際淤砂量做比較，一般水庫預測容許誤差有30%，2011年模擬結果相對誤差42.1%有高估的趨勢，2012年模擬結果相對誤差6.7%，與實際值十分接近，由上表結果可知最佳模擬配對結果為最小流域長200公尺/300公尺及流域面積75公頃，如表16所示。

表16 2011年及2012年流動路徑模式下水庫土砂模擬結果

年份	總降雨量	代表事件及侵台日期	預測值	實際值	分析時間
2011(75x200)	3176mm	南瑪都 (2011/8/27 - 2011/8/31)	5.156	3.380	5小時
2011(75x300)			5.155		
2011(100x100)			4.812		
2011(100x200)			4.806		
2011(100x300)			4.804		
2012(75x200)	4622mm	天秤 (2012/8/21 - 2012/8/28)	11.349	12.170	
2012(75x300)			11.355		
2012(100x100)			10.676		
2012(100x200)			10.665		
2012(100x300)			10.659		

6 結論

- 經驗模式由三個案例比較驗證得知，推估結果大致會隨著降雨次數愈多，累積雨量愈多，沖蝕狀況愈為明顯。
- 物理模式透過模擬東西坑溪、龍蛟溪、樂野3號野溪之年平均土壤沖蝕深度，再與實測值進行比較，應用時須於坡度適當放大，以進行保守預測。
- 集水區物理模式透過流動路徑模式之模擬2012年土砂總流失量，在眾多流域面積與最小流域長交叉配置下：
 - 流域面積75公頃、最小流域長200公尺，模擬值11.349百萬立方公尺，相對誤差6.7%
 - 流域面積75公頃、最小流域長300公尺，模擬值11.355百萬立方公尺，相對誤差6.7%
- 透過水文機率模式，使用海生法進行頻率雨量分

析, 產製降雨危害度曲線, 配合代表曾文集水區之11個子集水區所有數據回歸之土壤沖蝕經驗式, 繪製水文機率性土壤沖蝕模式, 提供相關使用者在曾文水庫集水區便於迅速推估降雨事件所代表之年超越機率及其產生之土壤沖蝕深度之值。

5. 經由一日重現期距之雨量配合90至98年共八個颱風事件所設計之1日報風與行產製2年、5年、10年、100年、200年重現期距之雨場, 並配合土砂遞移率及坡面土砂流式量計算水庫入流點泥砂產量, 進而制定防洪之策略

參考文獻

1. 中興社(2011), 「集水區水文分析報告」。
2. 中央氣象局(2015), 「新雨量分級定義與警戒事項之關聯」。
3. 水保局(2005), 「水土保持手冊」, 中華水土保持學會出版。
4. 水保局(2005), 「土石流災後現地調查規範之訂定」。
5. 水保局(2011), 「曾文水庫集水區多元尺度環境調查與保育治理成效評估」。
6. 水保局(2012), 「曾文南化烏山頭水庫集水區環境變異監測及治理成效評估」。
7. 水保局(2013), 「水庫集水區環境資料及土砂災害風險評估(1/3)」。
8. 水利署(2006), 「衛星災害監測及預警資料建立」。
9. 水利署(2009), 「曾文水庫保育治理計畫執行成效評估」。
10. 水利署(2012), 「曾文水庫防洪防淤策略」。
11. 水利署(2012), 「氣候變遷下異常事件對既有水庫安全風險與改善對策研究」。
12. 水利署(2015), 「水資源問題及展望」。
13. 王如意、易任(1979), 「應用水文學」下冊, 國立編譯館出版。
14. 王杰俊(2005), 「集水區泥砂生產量推估之探討」, 碩士論文, 屏東科技大學森林系。
15. 王金山、鍾明劍、冀樹勇(2011), 「降雨誘發崩塌地滑動之監測回饋分析與預警應用探討」, 中興工程季刊, 第110期, 第27-40頁。
16. 石棟鑫(2006), 「台灣地區颱風降雨型態之分析研究」, 碩士論文, 中央大學土木工程研究所。
17. 江介倫(2013), 「氣候變遷對臺灣年降雨沖蝕指數潛在影響」, 地理學報, 第68期, 第1-17頁。
18. 李鎮洋、傅桂霖、蔡明發、簡以達、許振崑、林伯勳(2015), 「應用沖蝕針量測數據評估曾文水庫集水區土壤沖蝕抑制成效」, 中興工程季刊, 第129期, 第9-18頁。
19. 李建堂(1997), 「土壤沖蝕的量測方法」, 國立臺灣大學地理學系地理學報, 第23期, 第89-106頁。
20. 余濬(1988), 「降雨設計兩型之研究」, 碩士論文, 台灣大學土木工程研究所。
21. 余新曉、張曉明、李建勞(2009), 「土壤侵蝕過程與機制」, 科學出版社, 北京。
22. 岑國平、沈晉、范榮生(1998), 「城市設計暴雨雨型研究」, 水科學進展, 第9卷第1期, 第41-46頁。
23. 何幸娟、林伯勳、張玉萍、冀樹勇、簡以達、蔡明發、費立浣(2013), 「莫拉克颱風後曾文水庫集水區山坡地保育治理成效評估」, 中興工程季刊, 第118期, 第21-30頁。
24. 何幸娟、林伯勳、冀樹勇、尹孝元、施美琴、羅文俊(2012), 「神木集水區土壤沖蝕特性」, 中華水土保持學報, 第43期, 第275-283頁。
25. 何幸娟、林伯勳、張玉萍、冀樹勇(2014), 「應用監測與遙測影像探討河道沖淤變化影響」, 中興工程季刊, 第122期, pp. 23-33。
26. 林韋成(2014), 「石門水庫集水區土壤沖蝕與水文地文影響因子研究」, 碩士論文, 淡江大學土木工程學系。
27. 林俊全(1995), 「泥岩邊坡發育模式之研究」, 國立臺灣大學地理學系地理學報, 第18期, 第45-58頁。
28. 林煥軒、李明熹、張平原(2013), 「利用不同降雨量推估年