

集水區坡面泥砂產量推估模式建立 之研究

林文賜^{*} 林昭遠^{**} 周文杰^{***} 黃碧慧^{****}

^{*}明道管理學院環境規劃暨設計研究所副教授

^{**}國立中興大學水土保持學系教授

^{***}中華大學土木與資訊工程學系副教授

^{****}逢甲大學土木暨水利研究所博士生

摘 要

水土保持之理論基礎及實務應用多以集水區為評估單元，近年來隨電腦科技之進步，利用電腦量化集水區坡面泥砂產量資訊，為坡地災害分析之趨勢。本研究以集水區自動劃分理論為主軸，結合通用土壤流失公式(USLE)及泥砂遞移率(SDR)之計算，建立集水區坡面泥砂產量推估模式，並以石門、德基、曾文水庫及二仁溪上游集水區為驗證區域，推估集水區土壤沖蝕量及坡面泥砂產量之空間分布。集水區坡面泥砂產量之推估結果，石門、德基、曾文水庫及二仁溪上游集水區之年泥砂產量分別為 1928168 tons/yr、1793742 tons/yr、4807205 tons/yr 及 5074396 tons/yr，年平均沖蝕深度分別為 1.82mm、2.45mm、7.10mm 及 25.81mm，以有泥岩分布之曾文水庫及二仁溪上游集水區較為嚴重。集水區坡面泥砂產量推估以 Nash and Sutcliffe (1970)公式所計算之模式效率(ME)為 81.21%，顯示所建立模式可應用於集水區經營管理之參考。

關鍵字：集水區自動劃分、泥砂產量、泥砂遞移率

*通訊作者. Tel. : 04-8876660-8200

E-mail address : aiken@mdu.edu.tw

壹、前言

台灣地區因地形陡峻、地質脆弱、土壤鬆軟、河短流急及降雨時空分布不均等因素，每逢颱風豪雨期間，大量土石泥砂奔馳而下，不僅造成水庫淤積，亦危害下游地區之生命財產安全。近年來，由於都市範圍不斷擴張，山坡地成為重要之開發目標，從早期之小型坡地社區開發及果樹、蔬菜、茶及檳榔等經濟作物種植，發展至目前之大型道路開挖、高爾夫球場建造、遊憩用地興建及水資源開發等，不當坡地開發利用，易造成水源涵養能力銳減，河川、水庫水質劣化與泥砂淤積，非但對自然環境破壞，亦降低生活環境品質。因此，如何落實水庫集水區經營與管理，並兼顧生態保育與開發利用之原則，為當前水庫集水區治理之重要課題。

集水區為水流匯集之完整地形單元，集水區內之非點源污染物、地表逕流等皆透過水流攜帶至出口而排出。因此，不論是水土保持設計規劃、環境生態保育、水利防洪演算、坡地災害評估及非點源污染防治，集水區之空間資訊如集水區與水系網分布、地文水文因子資訊等，皆為規劃時不可或缺之空間資料。而集水區之劃定，由早期人工劃定發展至目前之電腦自動劃定，乃藉由數值高程模型資料及地理資訊系統(Geographic Information Systems, GIS)方法，依地形之空間特徵及高度起伏變化，進而劃定所需之集水區範圍、水系網分布，並可配合現地資料推求集水區特性之空間資訊。Beven and Kirby(1979)由理論應用累積流量觀念及潤濕指數導出一半物理性之水文模式-TOPMODEL；美國農

業部、明尼蘇達州污染控制局及土壤保育中心於 1980 年代發展以網格式為基礎之集水區非點源污染推估模式(AGNPS)，將集水區降雨、地形與土地利用等資料，導入 USLE、CREAMS 模式，以推估單場暴雨之集水區逕流量、泥砂產量及污染物來源(Young *et al.* 1987)。

通用土壤流失公式(Universal Soil Loss Equation, USLE)，是目前世界各國最被廣泛使用之土壤沖蝕預測公式。農業非點源污染模式(Agricultural Non-Point Source Pollution Model, AGNPS)於 1987 年在美國發展出來，亦是利用 USLE 來預測集水區內的土壤沖蝕量。USLE、AGNPS 等模式配合地理資訊系統及影像處理技術，可迅速的處理與萃取集水區內網格之屬性資料，提供土壤沖蝕量之推估。林昭遠、林文賜(1999)結合地理資訊系統、遙測技術及集水區自動劃分理論，對大湖口溪集水區之土壤流失量及泥砂產量進行評估。盧光輝等(1994)利用地理資訊系統及 AGNPS 模式推估石門水庫集水區之土壤流失量，推估結果與實測值無差異。劉正川、陳錦嫣(1993)利用地理資訊系統及 AGNPS 模式推估台南縣泥岩地區大面積開發之土壤沖蝕情形，指出植生覆蓋因子(C 值)對土壤流失量之敏感度較其他因子為高。賴如慧(1998)利用地理資訊系統及衛星影像資料，以 RUSLE 模式推估德基水庫集水區之土壤流失量。

由於地理資訊系統及遙感探測之技術已相當成熟，而數值高程模型資料(Digital Elevation Model; DEM)已廣泛運用於集水區自動劃分及水系網路萃取，將 DEM 資料結合地理資訊系統及遙感探測之技術，

可建立動態之沖蝕因子知識庫。並整合集水區自動劃分理論、土壤沖蝕公式及遞移率觀念，以集水區為評估單元，建立集水區坡面泥砂產量推估模式，推估集水區土壤流失量及坡面泥砂產量之量化資訊及空間分布，迅速提供集水區泥砂敏感區域資訊，以供集水區經營管理之參考。

貳、研究材料與方法

一、研究地區

研究區域分為水庫集水區及主要河川集水區兩種，前者為石門水庫、德基水庫及曾文水庫，為台灣地區前三大水庫，分別位於台灣之北中南地區，分屬不同之土壤、地質、地形及氣候特性，配合 SPOT 衛星影像(石門為 87 年、德基及曾文為 89 年)所建立之植生覆蓋資料，可用以推估不同區域特性之集水區坡面泥砂量，加上其皆有歷年泥砂淤積測量資料，可用以驗證集水區泥砂量推估模式之合理性；後者為二仁溪上游集水區(以崇德橋為出口點)，係屬泥岩之代表區域，以 89 年衛星影像所建立植生覆蓋資料推估及驗證集水區坡面泥砂產量之合理性，研究地區之位置如圖 1。

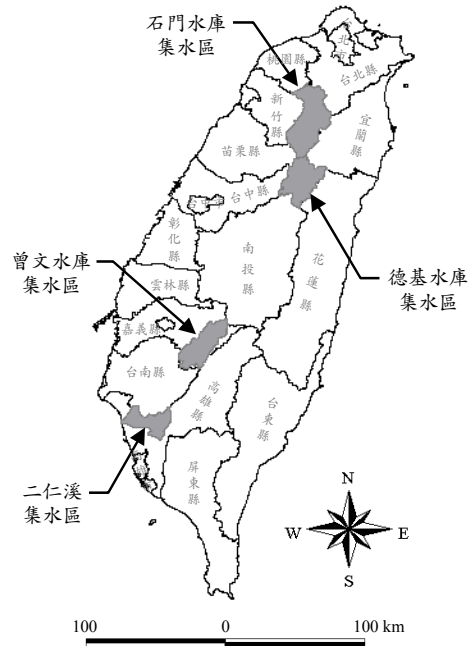


圖 1 研究地區

二、研究方法

(一)集水區自動劃分理論之建立

Band 於 1985 年提出之集水區與水系分布結構中，將外部集水分區(Exterior basin area)、內部集水分區(Interior basin area)、集水分區界線(Drainage divide link)、水系網(Stream channel link)、源點(Source)、連點(Junction)、外鏈(Exterior link)、內鏈(Interior link)及出口(Outlet)，與集水區空間分布之關連性進行探討，以瞭解其在集水區之水文意義。有關 DEM 資料推導集水區自動劃分之理論，首推 O' Callaghan and Mark (1984)提出排水流向 (Drainage Direction) 及累積流量 (Accumulative Flow)的觀念來萃取集水區之稜線與谷系，而 Jenson and Domingue (1988)則歸納上述之研究應用於集水區邊

界劃定及水系萃取，其結果可得一較連續而完整之集水區邊界與水系網。

目前集水區自動劃分理論大都運用 Jenson and Domingue 方法建立無窪地流向，再以 O' Callaghan and Mark 法建立各網格之累積流量；網格之累積流量為上游流入該網格之累積數量，而累積流量差值係計算網格與其下游網格累積流量之差。若網格之累積流量差值大於或等於使用者給定門檻值，則指定該網格為集水區出口，向上游進行追蹤可得集水區範圍。若網格之累積流量大於或等於使用者給定門檻值，則該網格視為水系，計算完畢後可得水系網。由於集水區及水系網皆是以累積流量之門檻值(Threshold)來決定，因此集水區邊界之範圍大都以試誤法或由使用者主觀上來認定，在進行實際之規劃作業時，較不具彈性及實用性，本研究以 Lin et al. (2006)提出之動態集水區觀念來彌補上述不足之處，亦即由使用者自行指定集水區出口，利用流向及遞迴演算法來搜尋上游之集水區範圍。本研究之集水區自動劃分係以 Chou et al. (2004)提出之理論為架構，藉由高差法(Jenson and Domingue, 1988)及斜面法計算集水區之初始流向，輔以窪地集水區法結合 PROMETHEE 理論計算無窪地流向，並以動態萃取集水區概念，由使用者指定出口點，電腦即可向上游自動追蹤流經該點之所有排水區位，另由多重門檻值萃取水系網方法，萃取研究區之真實水系網資料，以精確分析集水區相關資訊，其分析流程如圖 2。

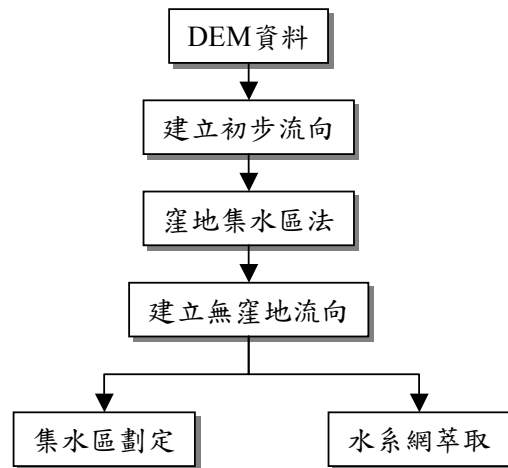


圖 2 集水區自動劃分之流程

(二)集水區坡面泥砂量推估模式之建立

1. 坡面泥砂產量計算

土壤沖蝕模式可分為經驗模式(Empirical Model)與理論模式(Physical Model)兩種，目前應用最廣的 USLE 即為經驗公式，其土壤沖蝕過程係由一系列因子量化和概算，在美國應用的相當成功，其與理論模式(如 WEPP)不相同，無法適用於任何地區，故在台灣地區使用此一公式評估土壤沖蝕量時，宜對沖蝕參數做適當之修正，使其配合台灣之自然環境條件。早期土壤流失量評估係以小試驗樣區為對象，其因子取得大都來自於現場量測，隨著電腦科技之進步，土壤沖蝕模式結合 GIS 及 RS 技術已廣泛應用於大面積集水區之評估，目前評估方式仍以整個集水區或子集水區為評估單元，其因子之代表性較為粗略，若將上述模式結合 GIS、RS 技術與 DEM 資料之網格特性，以及利用集水區排水流向概念，則能有效地建立沖蝕因子資料庫及集水區泥砂災害之敏感

區位。

為能建立本土化之集水區泥砂產量評估系統，利用本章推導之集水區自動劃分理論，以集水區為評估單元，結合 USLE 及泥砂遞移率概念，發展土壤流失量及坡面泥砂產量評估系統，並以圖形視窗介面為發展平台，提供初學者可方便操作之使用環境，以及管理者可迅速獲得集水區環境敏感區之決策資訊。本研究之集水區泥砂推估模式概念如圖 3，其推估流程說明如下：

- (1) 以目前台灣地區 DEM 資料之 $40 \times 40\text{m}$ 網格大小為基礎，藉由集水區自動劃分理論，計算無窪地流向、劃定集水區範圍及萃取真實水系網分布，並分析集水區之地文水文資訊，做為泥砂推估所需之空間資訊來源。
- (2) 利用 DEM 及衛星影像資料，結合 GIS 及 RS 技術建立土壤沖蝕因子資料庫，包括以線性克利金法內插集水區之降雨沖蝕指數及土壤沖蝕指數；利用空間分析方法自動萃取網格之漫地流長度及坡度，代入 Wischmeier and Smith (1978)之公式，計算坡長及坡度因子；由衛星影像資料配合土地利用資料，建立植生覆蓋因子(C)與 NDVI 之轉換公式，以迅速取得 C 因子資料庫。
- (3) 以土壤流失量公式(USLE)計算集水區之土壤流失量，將其乘上泥砂遞移率求得集水區之坡面泥砂產量，其空間分布及量化資訊可進行分級，並配合衛星影像分類集水區主要土地利用資料(林地、果樹類、

蔬菜類、裸露地、水域及雲)，探討泥砂來源敏感區位，作為泥砂控制之決策參考。

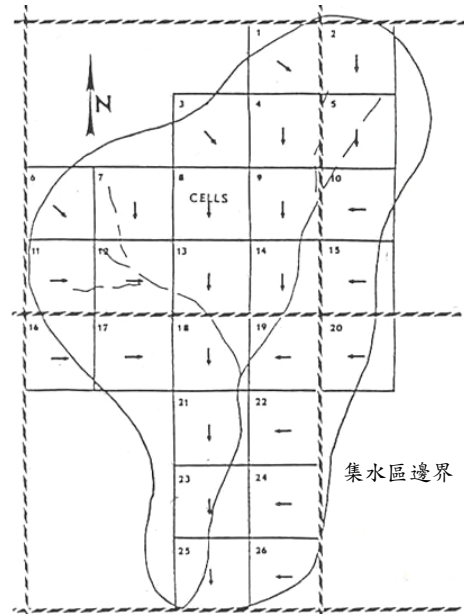


圖 3 集水區泥砂量推估示意圖
(Young *et al.*, 1994)

2. 土壤沖蝕模式

(1) 降雨沖蝕指數(Rm)

本研究降雨沖蝕指數之計算，係利用黃俊德(1979)所建立之降雨沖蝕指數資料，以地理統計方法建立台灣地區之年平均降雨沖蝕指數等值圖。

(2) 土壤沖蝕性指數(Km)

本研究之 Km 值求取係採用萬鑫森、黃俊義(1981、1989)所調查之台灣坡地土壤沖蝕指數值，並以地理統計方法建立台灣地區之土壤沖蝕指數等值圖。

(3) 坡長因子(L)

Wischmeier(1976)指出有效坡長為漫

地流起點至坡度減緩之處或至渠道之距離，通常不包含渠道之部份，且坡長易受坡度減緩或土地利用改變等因素而截斷。Wilson(1986)亦指出 USLE 之有效坡長常受到建物、道路或人工排水系統等影響，其長度不會太長。一般而言，集水區坡面受到地面窪蓄、入滲等作用，以及山溝、道路排水側溝等截流，地表漫地流之流長甚少超過 100m，加上一般坡地安全排水，超過 100m 即需分段排水，否則逕流集中易形成蝕溝；因此本研究利用數值高程模型資料，配合排水流向之觀念，萃取集水區漫地流與渠道流(為安全與方便計算，地表水之流長若超過 100m 時，可視為渠道流)之空間分布。藉由集水區漫地流之流長，利用 USLE 坡長因子之算式，自動萃取消水區之坡長因子，供坡面土壤流失量及泥砂產量之合理評估(Lin et al., 2002)。由於評估集水區之地形係利用台灣地區數值高程模型，網格解析度為 40m×40m 所產生。若以地表水之流向為指標，累計流長在兩個網格以下者可視為漫地流，以此來估算集水區之坡長分布；累計流長超過兩個網格時視為渠道流。

(4)坡度因子(S)

本研究坡度因子係計算各網格之平均坡度 (θ) (Burrough, 1986)，再代入 $S=65.4\sin^2\theta+4.56\sin\theta+0.0654$ 公式，以求得 S 值。

(5)覆蓋與管理因子(C)

由於台灣地區之 C 值尚無資料庫可資利用，目前 C 因子取得方式已逐漸由遙測影像來取代，利用土地利用判釋結果轉換為 C 值，然影像判釋工作需專業之遙測操作人員及耗費時間方能取得所需資訊，若

能藉由綠色植生量之評估來產生所需之 C 值資料庫，將有效地縮短評估 C 值所需時間。本研究為能迅速取得 C 因子，利用遙測理論之植生指標來計算覆蓋與管理因子，有關 NDVI 值與 C 值之計算方式說明如下：

A、將 SPOT 衛星影像利用 NDVI 公式計算植生指標值，其值域介於-1 至 1 之間。

B、由於 NDVI 值愈大顯示地表植被覆蓋愈佳，而地表植被覆蓋愈佳則表示 C 值愈小，因此需經反向配置之，其公式為

$$C = \left[\frac{1 - NDVI}{2} \right]^a, \text{ 式中 } a \text{ 為實}$$

數，經計算後之 C 值介於 0 至 1 之間，而 a 值可由集水區內主要之土地利用的 NDVI 值計算而得，依四個研究集水區之土地利用資訊可得

$$C = \left[\frac{1 - NDVI}{2} \right]^{1+NDVI}。$$

(6)水土保持處理因子(P)

本研究係以最危險狀態為考量，即假設在無任何水土保持處理之狀態下(P=1)進行評估。

3. 泥砂遞移率

本研究之泥砂遞移率計算係採用網格分析方式，為簡易計算坡面泥砂之遞移率，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。依此一假設及泥砂遞移率之定義，泥砂遞移率可視為某格點對最接近渠道格點之泥砂貢獻量，若將泥砂貢獻量用網格上游流入面

積表示，則網格上游流入面積愈大，其產生的逕流量亦愈大，愈能將泥砂帶至河道。因此，集水區坡面上任一格點之泥砂遞移率，可視為該格點上游流入面積(A_{grid})與該格點流至最接近渠道之上游流入面積(A_{total})之比值($SDR = \frac{A_{grid}}{A_{total}}$)，如圖 4。意

之泥砂愈容易進入渠道，而增加河道之泥砂產量，故泥砂遞移率愈高。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，藉由網格之排水流向可計算每個網格之泥砂遞移率及泥砂量。

即濱水區愈靠近渠道之格點，其坡面沖蝕

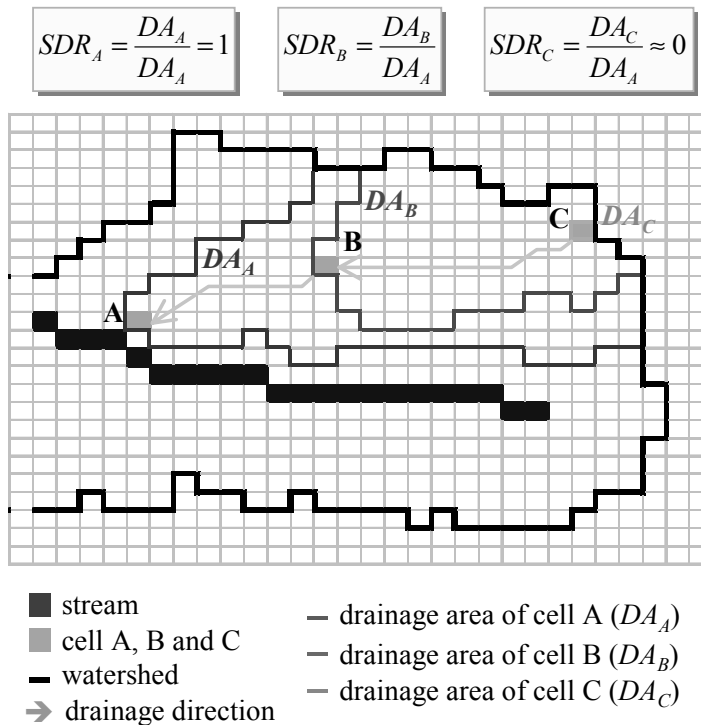


圖 4 集水區泥砂遞移率示意圖

參、結果與討論

一、集水區坡面泥砂產量之推估

為有效瞭解集水區之坡面泥砂分布及遞移情形，將土壤流失量乘上泥砂遞移率可得坡面泥砂產量如圖 5~6，其中坡面泥

砂產量大於 50 tons/ha/yr 之地區以二仁溪上游及曾文水庫集水區之分布較廣，各集水區之泥砂分布區位如下：

1. 石門水庫集水區之坡面泥砂來源，集中在濱水區兩側之農耕地，泥砂產量大於 50 tons/ha/yr 之面積為 3183.68ha，約佔全區之 4.21%。
2. 德基水庫集水區之坡面泥砂來源，集中在濱水區兩側之農耕地及上游之崩塌地部分，泥砂產量大於 50 tons/ha/yr 之面積為 2331.68ha，約佔全區之 4.45%。
3. 曾文水庫集水區之坡面泥砂來源分布甚廣，集中在河岸兩側之農耕地及泥岩裸露地，泥砂產量大於 50 tons/ha/yr 之面積為 3003.20ha，約佔全區之 6.21%。
4. 二仁溪上游集水區之坡面泥砂來源分

布更廣，均勻分布於集水區內，突顯泥岩地不可開發之特性，泥砂產量大於 50 tons/ha/yr 之面積為 1753.76ha，約佔全區之 12.49%。

由於泥砂產量大於 50 tons/ha/yr 之地區，明顯集中於濱水區或上游之裸露區；一般而言，集水區內濱水區之土地利用主要為農耕地，若不當開發易成泥砂來源及運移之主要途徑；對泥岩之集水區而言，不良之地質或土壤條件區域，應列為泥砂控制之重點地區。因此，若能對集水區內之遞移率較高地區，進行回收造林或土地利用管制之工作，將可降低泥砂對下游水庫淤積之衝擊。

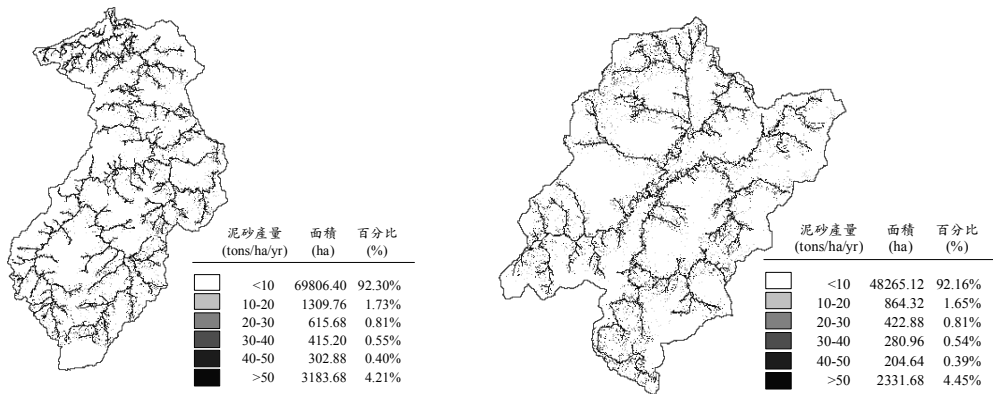


圖 5 石門及德基水庫集水區坡面泥砂產量分布圖

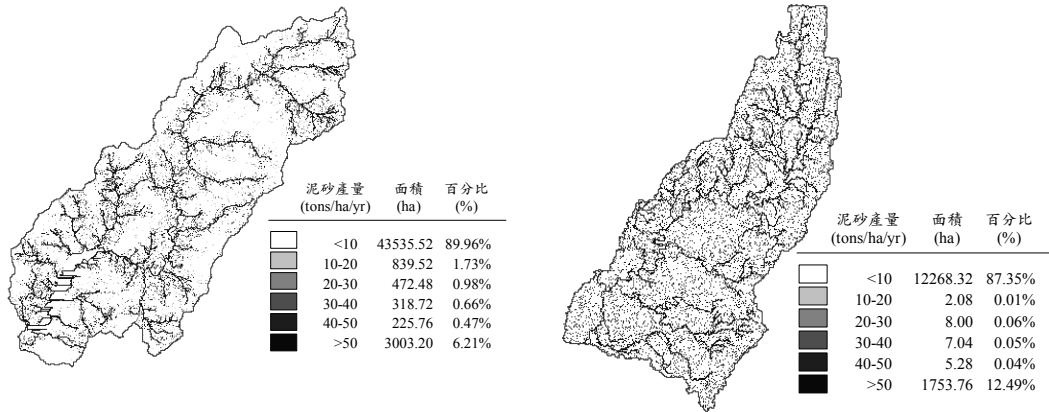


圖 6 曾文水庫及二仁溪上游集水區坡面泥砂產量分布圖

二、泥砂產量推估模式之驗證

由於長期以來 USLE 公式在土壤沖蝕評估皆有高估之情形，主要原因為以整個集水區或子集水區為評估單元，其沖蝕因子之代表性顯得較為粗略，以及沖蝕因子被誤用等因素，因此無法準確推估集水區之土壤流失量，若能採用單位網格之概念來進行評估，將可提高沖蝕因子對沖蝕力之代表性。

在沖蝕因子之計算中，坡長因子係利用漫地流長不小於 100m 之距離計算，由於 DEM 資料之網格大小為 40m，故坡長因子萃取之門檻值為 2(即累積漫地流長最大不超過 $80 \times \sqrt{2} = 113.14$ m)，但對於泥岩地區其坡長應小於 2 個網格，但受限於 DEM 解析度無法更精確計算坡長；C 因子之計算係利用 NDVI 值來反向配置，其範圍介於 0 至 1 間，但根據吳嘉俊等 (1996) 對台灣地區各覆蓋作物之 C 值評定中，建地部份應為 0—0.01，但實際上其計

算為 1，因此會稍微高估土壤流失量；而 P 因子之計算係以安全為考量下，假設集水區內無水土保持設施或等高耕作，以 P 值為 1 來進行評估，其推估結果亦將高估土壤流失量。

將集水區出口之泥砂產量除以集水區面積，可得集水區之年平均沖蝕深度，其公式如下：

$$\text{沖蝕深度(cm)} = \frac{\text{集水區出口泥砂量(ton)}}{\text{集水區面積(ha)} \times 10^4 \left(\frac{\text{m}^2}{\text{ha}} \right) \times 10^{-2} \left(\frac{\text{m}}{\text{cm}} \right) \times 1.4 \left(\frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right)}$$

以 87 年衛星影像推估石門水庫集水區之泥砂產量為 1928168 tons/yr、年平均沖蝕深度為 1.82mm；以 89 年衛星影像推估德基水庫集水區之泥砂產量為 1793742 tons/yr、年平均沖蝕深度為 2.45mm；以 89 年衛星影像推估曾文水庫集水區之泥砂產量為 4807205 tons/yr、年平均沖蝕深度為 7.10mm；以 90 年衛星影像推估二仁溪上游集水區之泥砂產量為 5074396 tons/yr、年平均沖蝕深度為 25.81mm。而

各集水區實測驗證資料中，石門、德基及曾文水庫集水區採用歷年水庫淤砂斷面測量資料之平均值，而二仁溪上游集水區則採用崇德站之懸浮質量測資料；然水庫淤砂測量資料為推移質及懸移質之總和，亦即除上游之泥砂產量(懸移質)外，尚有河道崩塌、水庫邊坡崩塌及道路開闢等泥砂來源。依經濟部水資源局(1998)對全省重要水庫之泥砂來源分析，石門水庫集水區歷年之懸移量與淤積量相當，顯示其崩塌現象並不嚴重；德基水庫集水區歷年之懸移量約佔淤積量之 40%；曾文水庫集水區則無懸移量可供比較，故本研究採用之淤砂測量資料，德基水庫集水區依比例修正以供驗證，石門及曾文水庫集水區仍採用原淤砂資料進行驗證。

各集水區歷年之實測平均值，係水庫淤積量除以水庫上游集水區面積求得，其計算式同推估沖蝕深度之公式，在考量衛星影像推估日期、集水區土地利用變遷、以及泥砂淤積測量受水庫操作及量測地點之影響而變動甚大等因素，係計算各集水區土地利用變遷較少，且各集水區推估日期近 10 年之實測平均值與推估值做比較；石門水庫集水區之土地利用變遷歷經 65 年、75 年及 85 年共三次調查，自 75 年以後無明顯變化，實測泥砂淤積量採用 79 年至 87 年之平均值，其沖蝕深度為 1.55mm(中華水土保持學會，1990；經濟部水資源局，1998)；德基水庫集水區自 71 年起即開始回收造林，此後集水區土地利用無明顯變化，實測泥砂淤積量採用 81 年至 87 年之平均值，其沖蝕深度為 0.84mm(台灣電力公司電源勘測隊，1998)；曾文水庫集水區之土地利用變遷歷

經 69~89 年共 7 次調查，自 81 年後集水區之林地變遷無明顯變化，實測泥砂淤積量採用 81 年至 87 年之平均值，其沖蝕深度為 9.05mm(經濟部水利處南區水資源局，2000)；而二仁溪上游集水區不若水庫集水區開發種植高經濟作物，其土地利用變化較不明顯，實測泥砂淤積量採用 81 年至 88 年之平均值，其沖蝕深度為 21.25mm(經濟部水資源局，2000)。將歷年泥砂實測之平均值與推估結果比較，顯示本研究推估之土壤流失量尚屬合理之範圍。就整個集水區之評估結果而言，已能接近集水區內土壤流失量之實際情形，若能藉此評估結果及泥砂分布趨勢來探討，將有助於瞭解集水區之泥砂來源，以及作為泥砂控制之參考。

將推估結果與實測值進行模式效率分析，以瞭解模式推估之合理性。Nash and Sutcliffe(1970)提出模式效率(Model Efficiency, ME)，其值愈高代表模式之模擬結果愈佳，反之則模式之模擬結果愈差，其計算公式(log 形式)如下：

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [\log(Q_{mi}) - \log(Q_{si})]^2}{\sum_{i=1}^n [\log(Q_{mi}) - \log(Q_m)]^2}$$

式中 Q_{mi} 為實測值(採用各集水區歷年之泥砂淤積平均深度)(mm)

Q_m 為實測值之平均(上述 Q_{mi} 之平均)(mm)

Q_{si} 為推估值(各集水區推估之沖刷深度)(mm)

將各集水區實測及推估結果代入公式可得 $ME = 81.21\%$ ，顯示由本研究所建立之泥砂量推估模式應可適用於大範圍之集水區。

肆、結論

本研究係以集水區為評估單元，結合土壤流失量及泥砂遞移率概念，建立集水區坡面泥砂產量推估模式，推估集水區坡面泥砂產量之空間分布及決策資訊。長期以來，有關 USLE 公式於集水區土壤流失量推估時，皆認定有高估之現象，本研究以網格分割概念，將 USLE 公式應用於大集水區之土壤沖蝕量推估。而土壤沖蝕因子之計算，本研究以 DTM 資料自動萃取合理之 L 因子，並以植生指標(NDVI)配合土地利用資料提供 C 因子之轉換公式，可迅速取得土壤沖蝕推估所需之資料庫。本研究利用 USLE 公式及所建立之泥砂遞移率概念，結合集水區自動劃分理論可迅速推估集水區坡面泥砂產量，由石門水庫、德基水庫、曾文水庫及二仁溪集水區驗證結果，顯示所建立推估模式能適用於集水區泥砂產量之計算。

伍、參考文獻

中華水土保持學會 (1990)，石門水庫集水區第二階段治理規劃。台灣省石門水庫管理局委託辦理。

台灣電力公司電源勘測隊 (1988)，德基水庫泥砂淤積量調查報告。

林昭遠、林文賜 (1999)，集水區坡長因子自動萃取之研究。中華水土保持學

報，30(4)，299-311。

黃俊德 (1979)，台灣降雨沖蝕指數之研究。中華水土保持學報，10(1)，127-144。

經濟部水利處南區水資源局 (2000)，曾文水庫集水區第一期治理調查規畫報告。

經濟部水資源局 (1998)，中華民國八十七年台灣水文年報。

經濟部水資源局 (2000)，台灣水文年報電子書。

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)，57-67。

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。

劉正川、陳錦嬌 (1993)，台南縣泥岩地區大面積開發之土壤沖蝕量研究。第三屆 ARC/INFO User Conference 地理資訊系統應用研討會論文集，pp.143-159。

盧光輝、姜善鑫、蔡博文 (1994)，山坡地土壤流失量之推估。80 年度水土保持及集水區經營研究計畫成果彙編，林業特刊，40，1-22。

賴如慧 (1998)，水庫集水區優先治理區域之評選—整合多評準決策與地理資訊系統。逢甲大學土地管理研究所碩士論文。

Band, L.E. (1985), Topographic partition of watersheds with digital elevation models, Water Resource Research, 22(1), 15-24.

Beven, K.J. & Kirby, M.J. (1979), A physically based variable contributing area

- model of basin hydrology, *Hydrological Sciences Bulletin*, 24, 43-69.
- Burrough, P.A. (1986), *Principles of geographical information systems for land resources assessment*, Oxford University Press, New York, p. 50.
- Chou, T.Y., Lin, W.T., Lin, C.Y., & Chou, W.C. (2004), Application of the PROMETHEE technique to determine depression outlet location and flow direction in DEM, *Journal of Hydrology*, 287, 49-61.
- Jenson, S.K., & Domingue, J.O. (1988), Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 54(11), 1593-1600.
- Lin, C.Y., Lin, W.T., & Chou, W. C. (2002), Soil erosion prediction and sediment yield estimation: The Taiwan experience, *Soil & Tillage Research*, 68, 143-152.
- Lin, W.T., Chou, W.C., Lin, C.Y., Huang, P.H., & Tsai, J.S. (2006), Automated suitable drainage network extraction from digital elevation models in Taiwan's upstream watersheds, *Hydrological Processes*, in press.
- Nash, J.E., & Sutcliffe, J.V. (1970), River flow forecasting through conceptual models: part I - A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- O'Callaghan, J.F., & Mark, D.M. (1984), The extraction of drainage networks from digital elevation data, *Computer Graphics and Image Processing*, 28, 323-344.
- Wilson, J.P. (1986), Estimating the topographic factor in the universal soil loss equation for watersheds, *Journal of Soil and Water Conservation*, 41(3), 179-184.
- Wischmeier, W.H. (1976), Use and misuse of the universal soil loss equation, *Journal of Soil and Water Conservation*, 31(1), 5-9.
- Wischmeier, W.H., & Smith, D.D. (1978), Predicting rainfall erosion losses, *Agricultural Handbook 537*, Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture.
- Young, R.A., Onstad, C.A., Bosch, D.D., & Anderson, W.P. (1987), Agricultural nonpoint source pollution model: A large watershed analysis tool, *Conservation Research Report 35*, Agricultural Research Service., USDA: Washington, DC.
- Young, R.A., Onstad, C.A., Bosch, D.D., & Anderson, W.P. (1994), *Agricultural Non-Point Source Pollution Model, Version 4.03, AGNPS USER'S GUIDE*.

Model establishment for estimating watershed-scale sediment yield on slopeland

Wen-Tzu Lin^{*} Chao-Yuan Lin^{**}

Wen-Chieh Chou^{***} Pi-Hui Huang^{****}

Abstract

Watershed unit has been regarded as an analyzed object for slopeland disaster assessment. With the fast growing progress of computer technologies, there is a trend to automatically estimate watershed-scale sediment yield on slopeland for slopeland disaster prevention. Universal Soil Loss Equation (USLE) and Sediment Delivery Ratio (SDR) coupled with automated watershed delineation theory were applied to estimate watershed sediment yield for Shihmen, Techí, Tsenwen reservoir and Erzen creek watersheds. Annual watershed sediment yields calculated for these watersheds are 1928168 tons/yr, 1793742 tons/yr, 4807205 tons/yr and 5074396 tons/yr, and the corresponding annual erosion depths are 1.82mm, 2.45mm, 7.10mm and 25.81mm, respectively. Tsenwen reservoir and Erzen creek show higher erosion depth because of moderate mudstone distribution in the watershed. Model efficiency by Nash and Sutcliffe (1970) for sediment yield estimation is 81.21%, the evaluated result shows that the model can be used as the reference of watershed management.

Keywords : Automated Watershed Delineation, Sediment Yield, Sediment Delivery Ratio