

應用農業非點源污染模式探討集水區泥砂遞移率

林俐玲⁽¹⁾ 杜怡德⁽²⁾ 馮美禎⁽³⁾

摘要

本研究係運用農業非點源污染模式對不同集水區進行逕流量、土壤沖蝕量、泥砂遞移率之推估，進而探討 AGNPS 中各輸入因子如降雨量、降雨沖蝕指數、土壤沖蝕因子、曼寧粗糙係數、植物覆蓋因子、逕流曲線值等對集水區泥砂遞移率之敏感度為何？經分析結果得知，降雨量、逕流曲線值與泥砂遞移率之關係成正比，降雨沖蝕指數、曼寧粗糙係數、土壤沖蝕因子、植生覆蓋因子與泥砂遞移率之關係成反比，地表狀況常數不影響泥砂遞移率；而影響集水區泥砂遞移率之敏感度因子依序為曼寧粗糙係數最大、降雨沖蝕指數和土壤沖蝕因子及植生覆蓋因子次之、降雨量再次之、逕流曲線值最小，惟地表狀況常數無影響。由此結論，以後應用農業非點源污染模式在收集集水區之輸入因子時，對敏感因子之求取應力求精確，方可得到較正確的推估值，而開發集水區時更應自各敏感因子著手，避免因開發而產生大量的土壤沖蝕與泥沙產量。

(**關鍵字**：敏感因子、集水區形狀、集水區面積、)

Applying AGNPS to Investigate Sediment Delivery Ratio for Different Watershed

Li-Ling Lin⁽¹⁾, *Mei-chen Feng*⁽²⁾, *Yi-Te Tu*⁽³⁾

Professor⁽¹⁾ and Graduate Student⁽²⁾⁽³⁾, Department of Soil and Water Conservation,
National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan 402.

ABSTRACT

Agricultural non-point source pollutant model (AGNPS) was applied to predict the runoff, soil erosion, sediment delivery ratio, and sediment yield of various watersheds. Furthermore, the

(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研究生

(3) 行政院農委會水土保持局技士

input parameters, such as rainfall amount, rainfall erosivity, soil erodibility, Manning roughness coefficient, vegetative cover factor, and curve number (CN) were selected to analyze their

sensitivity to the sediment delivery ratio. The results indicated that, rainfall amount and curve number have direct proportion with sediment delivery ratio. On the contrary, rainfall erosivity, Manning roughness coefficient, soil erodibility, and vegetative cover factor have inverse proportion with sediment delivery ratio. The soil surface cover factor was not sensitive to sediment delivery ratio. The sensitive sequence of these parameters are Manning coefficient, rainfall erosivity, soil erodibility, vegetative cover factor, rainfall amount, curve number.

AGNPS can be applied as planning tool for watershed management; however, we should collect the sensitive input carefully and correctly in order to get reasonable results. (**Key words:** sensitive factor, sensitivity analysis)

前言

研究集水區土壤沖蝕，往往會有集水區收集到的土壤流失量遠小於原有土壤沖蝕量的現象。而發生如此現象的原因，在於土體移動的過程中往往會有堆積現象發生。

集水區的泥砂遞移率(SDR)定義為集水區之泥砂產量與土壤沖蝕量之比，泥砂產量常遠小於土壤沖蝕量(Walling, 1994)。根據以往學者研究指出泥砂遞移率(SDR)與集水區諸多水文、地文因子有關，如Maner and Barnes (1953)發現泥砂遞移率與集水區面積有明確重要之相關性。Trimble (1975)發現如落差、分歧比、起伏量比及排水密度等均與泥砂遞移率有關。

為瞭解集水區的因子與集水區泥砂遞移率之相關性，本研究應用農業非點源污染模式(AGNPS)來探討。農業非點源污染模式(AGNPS)因為可同時針對土壤流失量、逕流量、泥砂產量、泥砂遞移率、及氮、磷肥運移等方面進行推估，對於坡地集水區開發經營時頗多助益，因此受到廣泛應用。而應用於台灣小集水區上，亦有其適用性(林俐玲、廖秀華,1990)，且其推估值(土壤流失量、泥砂產量、泥砂遞移率、

逕流係數)與實測值頗為接近(林俐玲、陳勝全,1996)，故以AGNPS來探討集水區之泥砂遞移率應為合理。本研究試以台北縣三芝鄉、雲林縣古坑鄉、台東縣卑南鄉、苗栗縣造橋鄉等坡地集水區為研究試區，利用AGNPS進行各集水區泥砂遞移率之推估，以瞭解影響遞移率之因子及探討模式中各輸入因子對集水區泥砂遞移率之敏感度。以供日後開發集水區為減少泥砂量時，可作為強化各敏感因子之參考。

研究試區與方法

(一) 試區介紹

本研究為期能較具客觀性，因此在試區之選定上，選定台灣北部、中部、東部等地區，土壤性質、集水區形狀等不同試區為研究試區(圖1)，希望所得結果能較合理且具代表性，試區狀況分述如下：

(1) 雲林縣古坑鄉試區

全區面積約13公頃，地勢大致呈西南向東或東北傾斜，高程介於120公尺至260公尺，平均坡度18.48%。主要地層有更新世頭嵛山層、上新世之堆積層與崩積層組成。主要之土壤質地為砂質壤土，其土壤結構為細至中顆粒狀，滲透性慢。本區原係經濟農場用地，植生覆蓋良好。部分用作造林種植麻竹林及次生灌木、苗圃之利

用。

(2) 台北縣三芝鄉試區

全區面積約 14 公頃，地勢由南向北傾斜，高程介於 59 公尺至 105 公尺，平均坡度 10.69%。主要地層由砂岩與頁岩或泥岩之互層所組成。土壤主要為粉質粘土，土壤結構為細至中顆粒狀，滲透性極慢。本區現況多為相思林、茶園及水稻田，整體而言，植生覆蓋良好。

(3) 台東縣卑南鄉試區

全區面積約 17 公頃，地勢由南向北傾斜，高程介於 59 公尺至 105 公尺，平均坡度 11.16%。主要的岩層為上新世利吉層。主要土壤為壤質砂土，土壤結構為極細顆粒狀，滲透性中等。本區植生覆蓋良好，土地利用現況大部分為草地與部分雜林、椰子樹及樟樹人造林等。

(4) 苗栗縣造橋鄉試區

全區面積約 17 公頃，地勢由東向西傾斜，高程介於 44 公尺至 90 公尺，平均坡度約 13.02%。主要的地層有更新世凝灰角礫岩，土壤質地為壤質砂土及砂質壤土互夾層，土壤結構為極細顆粒狀，滲透性極慢。本區植生覆蓋良好，主要種植相思林、次生灌木及雜草。

(二)、研究項目與方法

本研究之流程如圖 2 所示，茲分述如下：

(1) 土壤理化性質分析

於各試區逢機選點採回五組土樣，經過土壤風乾及過篩等分析之前期處理後，開始進行土壤理化性質分析，分析項目包括水分係數、總體密度、顆粒密度、孔隙率、機械分析、有機質含量以及水分滲透係數測定等，其分析方法如下：

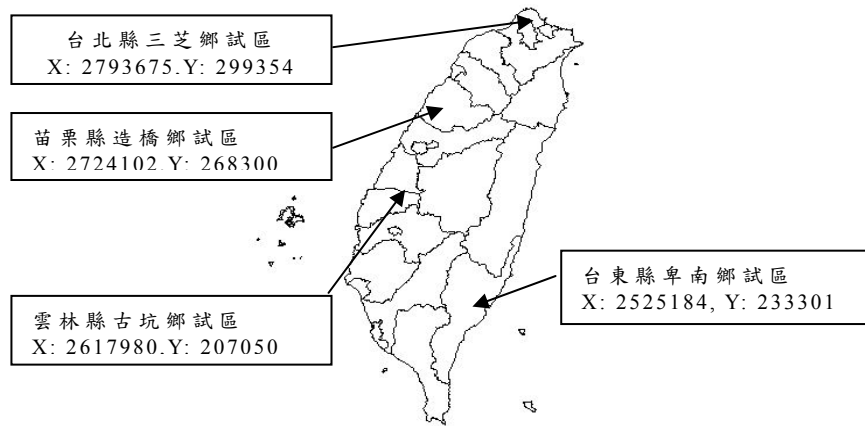


圖 1. 研究區地理位置圖
Figure 1. Location of experimental areas.

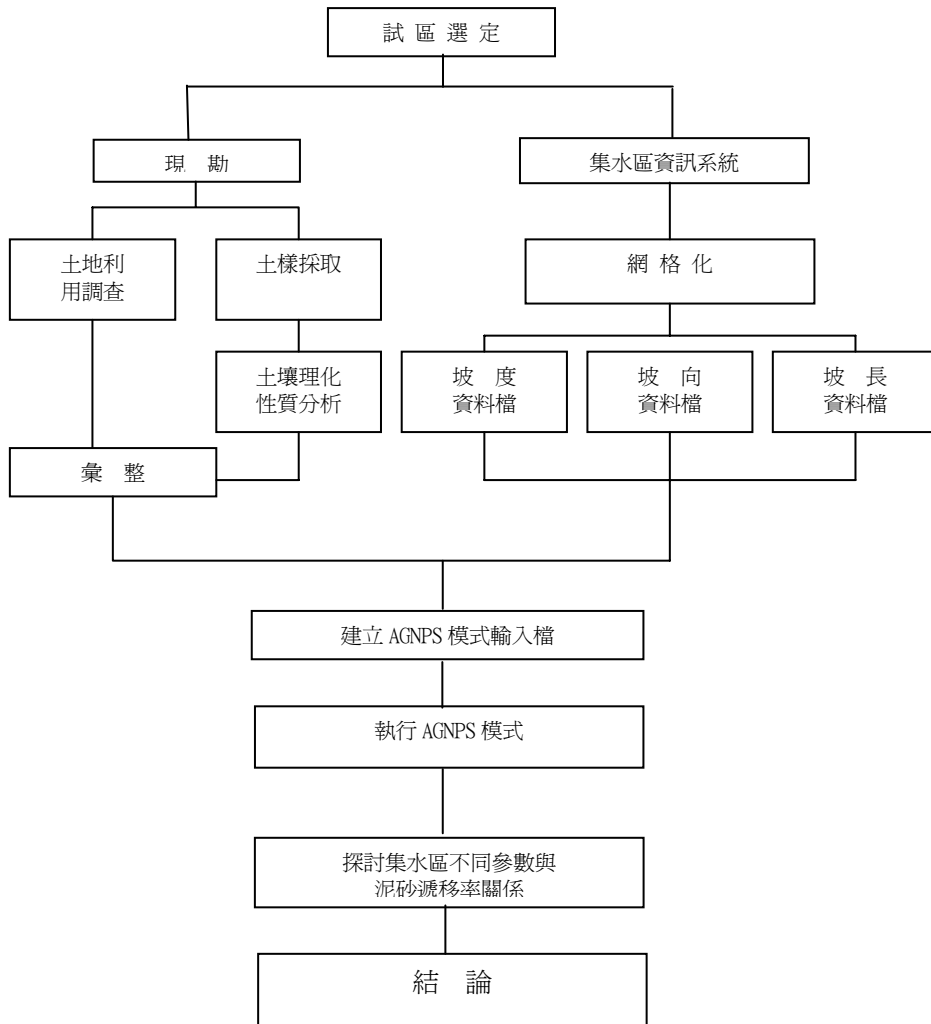


圖 2. 研究流程圖
 Figure 2. Flow chart of the research.

1. 水分係數：採烘乾法分析。
 2. 顆粒密度：以比重瓶煮沸法測定。
 3. 機械分析：吸管法分析。
 4. 有機質含量：以重鉻酸鉀氧化滴定。
 5. 水力傳導度：以 Darcy 定律設計出之室內量測儀器測定飽和水力傳導度。
- (2) 土壤沖蝕指數 (K) 之測定
 以 Wischmeier 及 Smith (1978) 利用試驗所得土壤沖蝕指數計算公式：

$$K = \frac{2.1M^{14}(10^{-4})(12-a)+3.25(b-2)+2.5(c-3)}{100} \quad (1)$$

K=英制之土壤沖蝕指數 (ton · acre · hr / hundreds of acre · ft · ton · in)

M=坩粒與極細砂% (100%-粘粒%)

a=有機質含量百分比

b=土壤結構參數

c=土壤滲透性參數

(3) AGNPS 模式預測沖蝕量及泥沙產量原理介紹

1. 土壤沖蝕

分別計算上游地表 (Upland) 單位面積沖蝕量、渠道 (Channel) 單位面積沖蝕量，並將沖蝕土壤分成五種顆粒大小等級 (粘粒、粉粒、小團粒、大團粒、砂粒)。估測單場暴雨的土壤流失量係採用修正之通用土壤流失方程式 (Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE)：

$$E = EI \times K \times L \times S \times C \times P \times SSF \quad (2)$$

E：土壤沖蝕量 (tons / acre)

EI：降雨能量強度 (100-ft-ton in / acre hr)

K：土壤沖蝕性指數 (ton-acre hr / 100-acre ft-ton in)

L：坡長因子

S：坡度因子

C：覆蓋因子

P：水土保持措施因子

SSF：坡型修正因子

SSF 之修正值因凸坡易沖刷，凹坡易淤積，故乘上一修正值加以修正，當均勻坡為 1，凸坡為 1.3，凹坡為 0.88 (Wischmeier and Smith, 1978)。

2. 泥砂運移

AGNPS 模式就泥砂運移部分係針對單一網格做分析 (圖 3)，考慮由上游及四周流入之泥砂量，扣除網格內自 O 點至 X 點之泥砂沉積量，即為該網格之模擬泥砂輸出量。泥砂運移量主要分成二部分進行估算，第一部分為上游之泥砂進入渠道，第二部分為河道中泥砂之輸送；並將之分為五級 (粘粒、粉粒、砂粒、大團粒、小團粒) 加以演算。

2.1. 泥砂輸出

模式中有關泥砂運移和沉積之方程式是採用 Foster et al., (1981) 與 Lane (1982) 之公式：

$$Q_s(X) = Q_s(O) + Q_{si} \frac{\Delta X}{L_r} - \int_0^X D(X) W dx \quad (3)$$

$Q_s(X)$ ：X 點泥砂之輸出量 (lb/sec)

$Q_s(O)$ ：O 點泥砂之輸入量 (lb/sec)

Q_{si} ：側流泥砂流入量 (lb/sec)

ΔX ：上游至 X 點之距離 (ft)

L_r ：側流之距離 (ft)

$D(X)$ ：X 點泥砂沉積率 (lb/sec²-ft)

W：渠道寬 (ft)

2.2. 各顆粒大小之泥砂輸出

$$Q_u(X) = \left[\frac{2q(X)}{2q(X) + \Delta X V_{ss}} \right] \times \left\{ \frac{Q_u(O) + Q_{si} - \left[\frac{V_{ss}}{q(O)} \times (q_u(O) - g_u(O)) - \frac{V_{ss}}{q(X) \times g_u(X)} \right]}{W \times \Delta X} \right\} \quad (4)$$

$Q_{si}(X)$ ：土粒流出率 (lb/sec)

$q(X)$ ：流出單位寬度網格之流量 (ft³/sec-ft)

ΔX ：渠道長之改變 (ft)

$Q_{si}(O)$ ：土粒流入率 (lb/sec)

\bar{W} ：平均渠道寬 (ft)

$q(O)$ ：流入單位寬度網格之流量 (ft³/sec-ft)

$q_{si}(O)$ ：單位寬度網格泥砂流入率 (lb/sec-ft)

$g_{si}(O)$ ：土粒輸入網格之能力 (lb/sec-ft)

$g_{si}(X)$ ：土粒輸出網格之能力 (lb/sec-ft)

Q_{sli} ：側流量流入速率 (lb/sec)

V_{ssi} ：土粒沉降速度 (ft/sec)

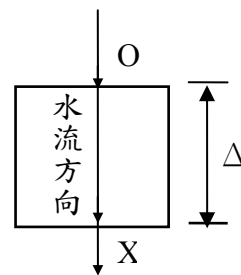


圖 3. 單一網格分析示意圖

Figure 3. Representation Watershed cell with flow distance along the cell noted.

(4) AGNPS 模式推估

為了進行 AGNPS 模式之推估，須將模式中所需之資料進行分析處理，先將其地形

網格化後分離出坡度、坡向、坡長等資料檔，建立 AGNPS 輸入檔。

本研究將四個試區以集水區資訊系統 WinGid (林昭遠、林文賜，2001) 分析取得各試區之坡度、坡向、坡長等後，進行 AGNPS 模式之模擬分析，來探討輸入因子如降雨量、降雨沖蝕指數、土壤沖蝕因子、曼寧粗糙係數、植物覆蓋因子、逕流曲線值等對集水區泥砂遞移率之影響。

結果與討論

(一) 土壤理化性質及土壤沖蝕指數(K 值) 之分析計算

將各集水區所採之土樣以三重複的方式進行土壤物理性質分析，再帶入 K 值計算公式(1)中，分別求出四試區土樣之 K 值，土壤理化性質分析及 K 值計算結果如於表 1 所示。四個試區土壤質地以卑南試區壤質砂土之土壤顆粒最大，所以飽和水力傳導度亦最大，反之三芝試區粉質黏土土壤顆粒最小，水力傳導度亦小，土壤沖蝕指數以三芝鄉為最小，因此此區有較多的有機質含量。

(二) 各集水區之地文特性

為便於分析各集水區地文因子與泥砂遞移之相關性，特將各集水區面積及地文特性表列於表 2。

(三) 各集水區 AGNPS 模式推估結果與分析

在相同的降雨量及降雨沖蝕指數情況下，利用 AGNPS 模式推估各集水區之沖蝕量、泥砂遞移率及泥砂產量，結果如表 3 所示，得知泥砂遞移率以三芝為最高、古坑及造橋次之、卑南再次之，另由表 1 知各集水區土壤粘粒所占之比率最高為三芝、古坑及造橋次之、卑南最低，與泥砂遞移率之高低次序相同，由此可得知土壤顆粒愈細則該集

水區之泥砂遞移率愈大。另各集水區內土壤質地之不同，所選取之逕流曲線值即有所不同，而不一樣之逕流曲線值亦影響其泥砂遞移率，如各集水區之逕流曲線值依泥砂遞移率之高低順序，分別為 73、60、60、36 由此可驗證。為得知集水區之地文因子是否對泥砂遞移率有影響，將各集水區所有輸入 AGNPS 模式中各因子置換為相同，只保留地形因子不同，經 AGNPS 模式分析之結果(見表 4)，泥砂遞移率以三芝為最、卑南次之、古坑及造橋再次之，而卑南泥砂遞移率自 78% (表三) 躍升為 84% (表四)，可知地文因子對泥砂遞移率是有影響的。Mane 及 Barnes (1953) 從德州 Blackland Prairie 地區中，發現泥砂遞移率與集水區面積有明確重要之相關性。Maner (1958) 提出起伏量比與泥砂遞移率之關係式。將各集水區地文特性(表 2) 與各集水區相同水文、土壤條件之推估值(表 4) 交叉比對；經比對結果得知集水區面積、平均坡度、密集度、圓比值及起伏量等，並未如前人研究結果與泥砂遞移率有明顯相關性，但其中細長比及起伏比與泥砂遞移率有反向關係。

(四) 模式中敏感因子之分析

為探討 AGNPS 模式中降雨量、降雨沖蝕指數、逕流曲線值、曼寧粗糙係數、土壤沖蝕因子、植物覆蓋因子、地表狀況常數等參數何者為敏感參數。我們將上述七個因子各加減 10%、25%、50% 等變化值而固定其它參數，在模式運算後會產生一相對的泥砂遞移率變化量(如圖 4~圖 10)，依圖表顯示得知，降雨量、逕流曲線值與泥砂遞移率之關係成正比，降雨沖蝕指數、曼寧粗糙係數、土壤沖蝕因子、植生覆蓋與泥砂遞移率之關係成反比，地表狀況因子不影響泥砂遞移率。

表 1. 試區土壤理化性質

Table 1. The soil properties and soil erodibility index (K) of experimental areas.

試區	土壤水分係數 (MF)	飽和水力傳導度 (cm/hr)	粉粒+極細砂%	粘粒%	孔隙率 (%)	有機質含量 (%)	土壤質地	K	Km (公制) (t · ha · hr /ha · Mj · mm)
古坑	1.014	2.486	39.2	9.15	37.5	2.03%	砂質壤土	0.317	0.0417
三芝	1.052	1.657	42.4	56.7	49.9	4.4%	粉質黏土	0.166	0.0219
卑南	1.020	2.803	40	5	26.7	1.16%	壤質砂土	0.339	0.0447
造橋	1.013	1.032	40	5.9	33.0	0.64%	砂質壤土	0.335	0.0441

表 2 各集水區地文特性

Table 2. The physiographic factor of different experimental area.

試區	面積 (公頃)	平均坡度 (%)	密集度	圓比值	細長比	起伏量 (M)	起伏比	輸入逕流曲線值 (CN number)
古坑	13.12	18.48	0.70	0.49	0.85	82	0.19	73
三芝	14.24	10.69	0.64	0.41	0.70	53	0.08	60
卑南	17.28	11.16	0.63	0.40	0.77	54	0.11	60
造橋	19.04	13.02	0.60	0.37	0.81	56	0.12	36

表 3. AGNPS 模式推估結果

Table 3. The output of different experimental areas predicted by AGNPS.

試區	單位面積沖蝕量 (t/a)	遞移率 (%)	單位面積泥砂產量 (t/a)	泥砂產量 (Ton)
古坑	3.95	82	3.25	106.72
三芝	2.86	86	2.47	87.78
卑南	3.34	78	2.62	113.26
造橋	3.56	82	2.92	139.21

表 4. 各集水區相同水文、土壤條件之推估結果

Table 4. The output of different experimental areas predicted by AGNPS with the same

hydrological and soil conditions.

試區	單位面積沖蝕量(t/a)	遞移率(%)	單位面積泥砂產量(t/a)	泥砂產量(Ton)
古坑	3.95	82	3.25	106.72
三芝	2.93	86	2.53	90.03
卑南	3.35	84	2.81	121.35
造橋	3.53	82	2.91	138.33

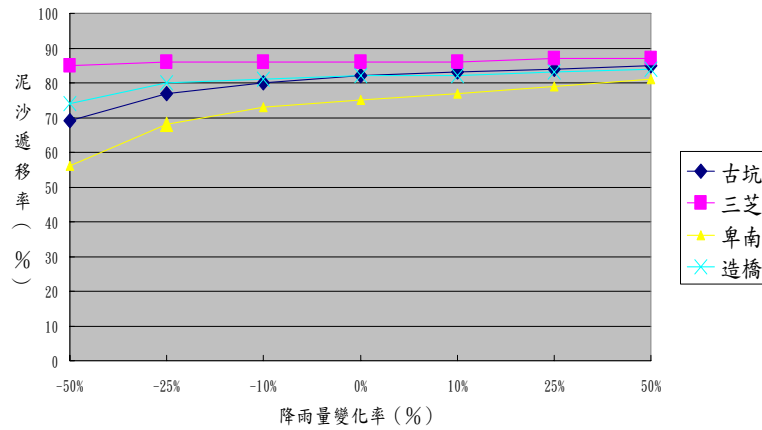


圖 4. 降雨量與泥砂遞移率之關係圖

Figure 4. The relations between rainfall amount and sediment delivery ratio.

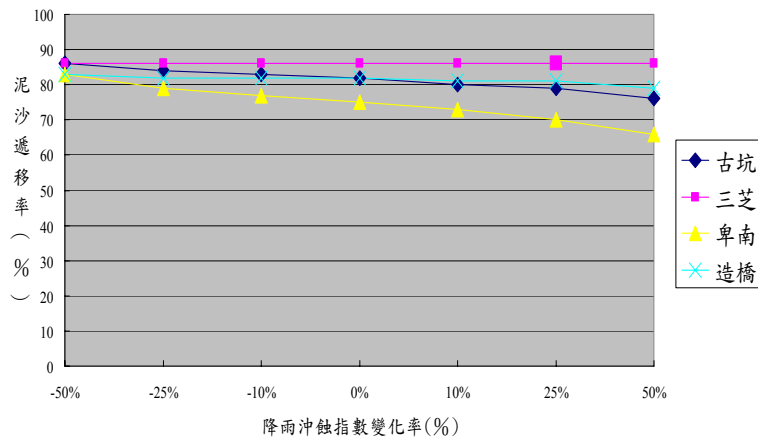


圖 5. 降雨沖蝕指數與泥砂遞移率之關係圖

Figure 5. The relations between rainfall erosivity index and sediment delivery ratio.

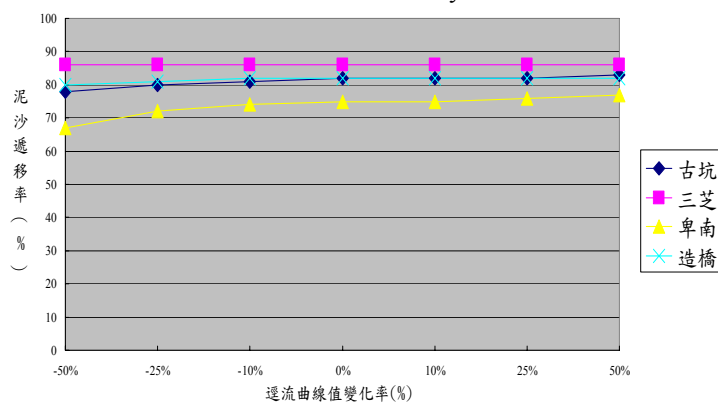


圖 6. 逕流曲線值與泥沙遞移率之關係圖

Figure 6. The relations between curve number and sediment delivery ratio.

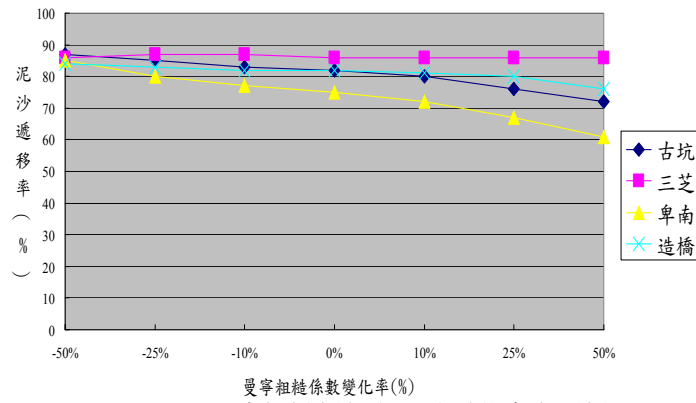


圖 7. 曼寧粗糙係數與泥沙遞移率之關係圖

Figure 7. The relations between manning roughness coefficient and sediment delivery ratio.

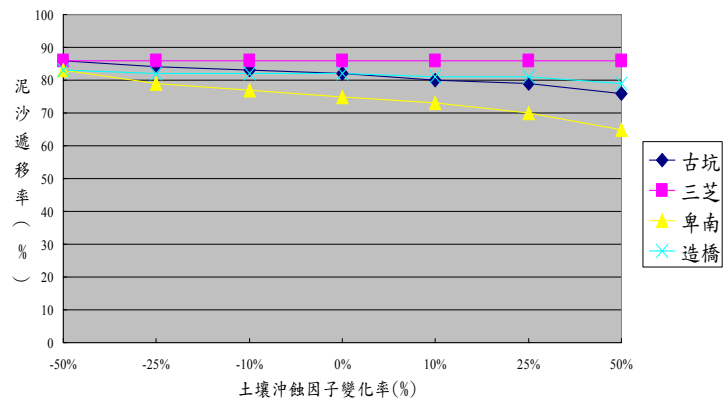


圖 8. 土壤沖蝕因子與泥沙遞移率之關係圖

Figure 8. The relations between soil erodibility index and sediment delivery ratio.

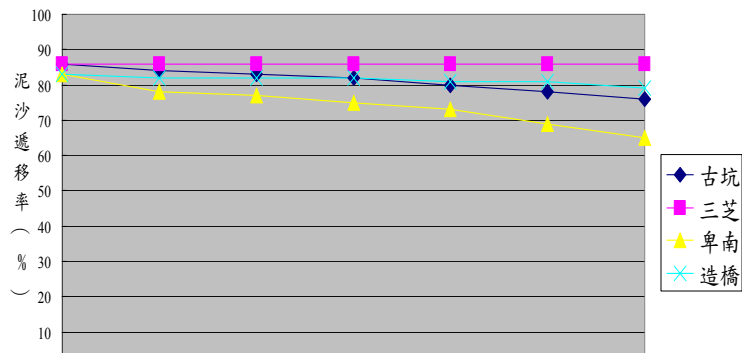


圖 9. 植生覆蓋與泥砂遞移率之關係圖

Figure 9. The relations between vegetative cover and sediment delivery ratio.

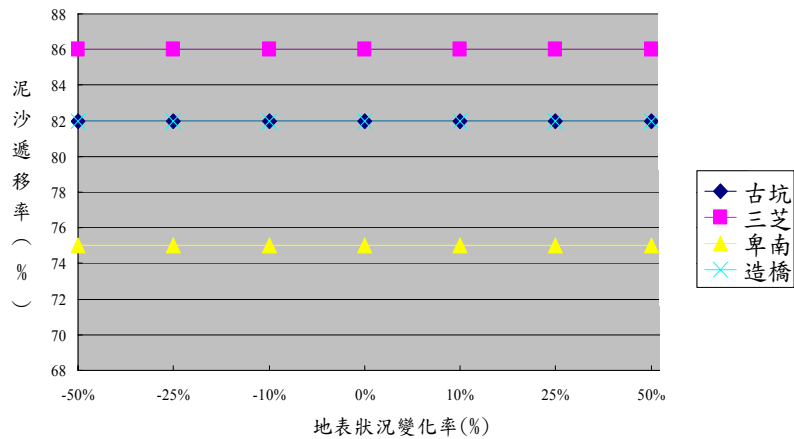


圖 10. 地表狀況與泥砂遞移率之關係圖

Figure 10. The relations between soil surface condition and sediment delivery ratio.

探討 AGNPS 模式中影響泥砂遞移率之敏感參數，為進一步了解該模式各參數之敏感度為何嘗試敏感度分析(Nearing et al., 1989)，各試區各參數敏感度 S 表示如下式 (McCuen, 1973; McCuen et al., 1986)，

$$S = \frac{\left[\frac{O_2 - O_1}{O_{12}} \right]}{\left[\frac{I_2 - I_1}{I_{12}} \right]} \quad (5)$$

I1 : 原參數值。
 I2 : 增加或減少之輸入值

I12 : 二者平均值
 O1 : I1 的輸出值
 O2 : I2 的輸出值
 O12 : O1 與 O2 之平均值
 S : 輸入值變化所產生相對的輸出值變化

經計算結果各試區各參數與泥砂遞移率之相關變化敏感度分析如圖 11~圖 14。由上述圖表顯示各試區泥砂遞移率之敏感度依序為曼寧粗糙係數最大、降雨量次之、降

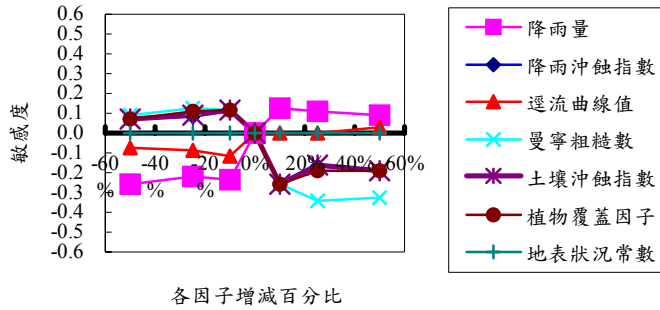


圖 11. 古坑試區各因子敏感度分析圖

Figure 11. The sensitivity factor analysis of sediment delivery ratio for Gu-Keng experimental area.

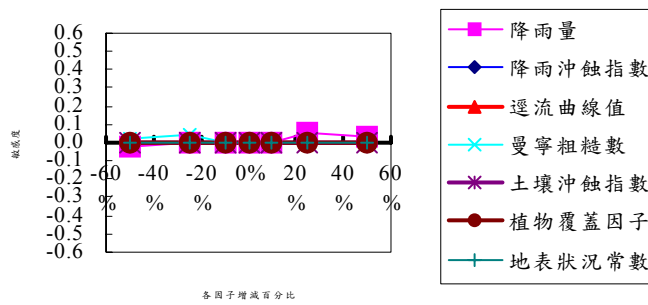


圖 12. 三芝試區各因子敏感度分析圖

Figure 12. The sensitivity factor analysis of sediment delivery ratio for San-Jr experimental area.

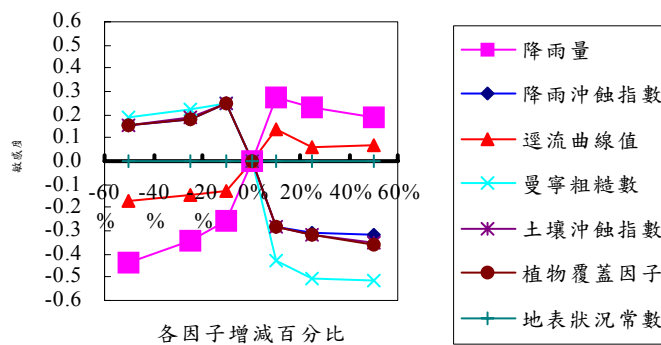


圖 13. 卑南試區各因子敏感度分析圖

Figure 13. The sensitivity factor analysis of sediment delivery ratio for Bei-Nan experimental area.

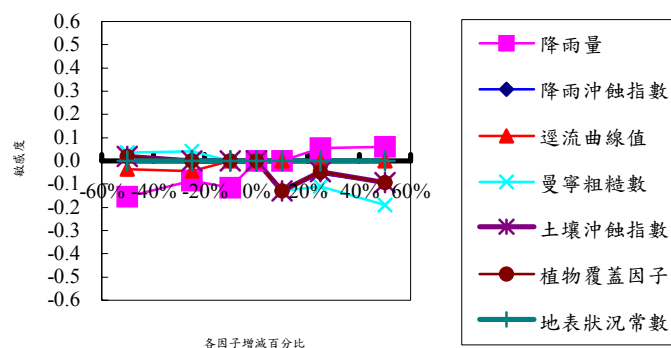


圖 14. 造橋試區各因子敏感度分析圖

Figure 14. The sensitivity factor analysis of sediment delivery ratio for Tzan-Chiau experimental area.

雨沖蝕指數和土壤沖蝕因子及植生覆蓋因子再次之、逕流曲線值最小，惟地表狀況常數無影響，而各敏感因子於增減百分之十之間最為敏感。

子時對敏感因子求取應力求精確，方可得到較正確的推估值，開發集水區為減少泥砂產量時，亦應自各敏感因子著手，以減少集水區土壤流失情形發生，進而達到永續經營利用之目的。

結 論

歸結整個研究的內容，大致上可將其分為以下幾點結論：

1. 利用 AGNPS 模式推估集水區泥砂遞移率發現，集水區面積、坡度、圓比值、密集度、起伏量等與泥砂遞移率無明顯相關性。
2. 在模式中降雨量、逕流曲線值與泥砂遞移率之關係成正比，降雨沖蝕指數、曼寧粗糙係數、土壤沖蝕因子、植生覆蓋因子與泥砂遞移率之關係成反比，地表狀況因子不影響泥砂遞移率。
3. 影響集水區泥砂遞移率之敏感因子依序為曼寧粗糙係數最大、降雨量次之、降雨沖蝕指數和土壤沖蝕因子及植生覆蓋因子再次之、逕流曲線值最小，惟地表狀況常數無影響；且各敏感因子於增減百分之十之間最為敏感。
4. 由此結論，以後在收集集水區之輸入因

參考文獻

1. 林俐玲、廖秀華 (1990) “應用地理資訊系統推估土壤沖蝕潛能”。水土保持學報 24(1)：13-17。
2. 林俐玲、陳勝全 (1998) ” 農業小集水區開發整治後土壤流失量與逕流量之評估”。水土保持學報 30(2)：143-175。
3. 林昭遠、林文賜 (2001) 集水區資訊系統 (WinGrid)。暉帥股份有限公司。
4. Maner, S.B., and L.H., Barnes, (1953) "Suggested Criteria for Estimating Gross Sheet Erosion and Sediment Delivery Rates for the Blackland Prairie Problem Area Soil Conservation", U.S. Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service Port Worth Texas.
5. Maner, S.B., (1958) " Factors Affecting Sediment Delivery Rates in the Red Hills Physiographic Area ", Trans.

- Am.Geophys.Union,Vol.39,No.4,pp. 559-675.
6. McCuen, R.H., (1973) " The Role of Sensitivity Analysis in Hydraulic Modeling.", Journal of Hydrology No.18,pp.37-53.
 7. McCuen, R.H., and W.H., Snyder.(1986) Hydrologic Modeling: Statistical Methods and Applications.
 8. Nearing, M.A., L.D. Ascough, and H.M.L. Chaves (1989) WEPP model sensitivity analysis. Profile Model Documentation. USDA-Water Erosion Prediction Project:Hillslope Version,eds. L.J. Lane and M.A. Nearing, 14.1-14.33. NSERL Rep.No.2. West Lafayette,Ind.:USDA-ARS-Nat.Soil Erosion Research Laboratory.
 9. Trimbel, S.W.,(1975) "A Volumetric Estimate of Man-Induced Soil Erosion on the Southern Piedmont Plateau.", In Present and Prospective Technology Predicting Sediment Yields and Sources, U.S. Dept of Agriculture, ARS-s-40,pp.142-154.
 10. Walling, D.E., (1994) " Measuring sediment yield from river basins," , In : Soil Erosion Research Methods, R. Lai, (ed.) ,2nd edition, soil and water conservation society.
 11. Wischmeier, W.H. and D.D. Smith, (1978)"Predicting Rainfall Erosion Losses : A Guide to Conservation.". Agricultural handbook No.537, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C. 55p.

95年10月22日 收稿

95年11月19日 修改

95年12月03日 接受

水土保持學報 38(4) : 373-386 (2006)

Journal of Soil and Water Conservation, 38(4) : 373-386 (2006)