

SWAT 模式參數之敏感性分析—以來社溪集水區為例

吳蕙雯⁽¹⁾ 鍾閔光⁽²⁾ 林俐玲⁽³⁾

摘要

本研究以 SWAT(Soil Water Assessment Tool)模式為對象，介紹其水文及泥砂方面之理論架構、計算運行方式，針對數據資料庫進行分析，描述模式所需的數據資料，且應用 SWAT 模式，建置屏東縣來社溪集水區的土壤類型資料庫、土地利用數據資料庫、氣候條件資料庫，針對流量及泥砂兩因子進行參數敏感性分析。敏感性分析結果顯示，在以常綠林地、水利設施、交通設施為土地利用之子集水區，對流量及泥砂產量最敏感的輸入參數分別為 Esco 和 Blai，在以農業利用為主的子集水區，對流量及泥砂產量最敏感的輸入參數分別為 Esco 和 Cn2。

(關鍵詞：敏感性分析、SWAT 模式)

The Sensitivity Analysis of SWAT Mode Parameter — Laishe Creek Watershed

Hui-Wen Wu ⁽¹⁾Ming-Kuang Chung ⁽²⁾, Li-Ling Lin ⁽³⁾

Graduate student ⁽¹⁾Graduate student ⁽²⁾, Professor ⁽³⁾ Department of Soil and Water Conservation National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan 402, R.O.C.

ABSTRACT

This study mainly based on SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model, introducing the structure of the model, which is about hydrology and sediment, and explains the basic database of SWAT model. In order to analyze sensitive parameters for flow and sediment, land use type and weather data of Laishe creek watershed were constructed by using SWAT model. Based on the results of sensitivity analysis, the land use of watershed which is evergreen, water facilities and transportation, the most sensitive input parameters for flow and sediment are Esco and Blai. Then the land use of the watershed which is agriculture, the most sensitive input parameters for flow and sediment are Esco and Cn2. (Keywords: sensitivity analysis, SWAT model)

1 國立中興大學水土保持學系研究生，通訊作者 email:rebecca321567528@yahoo.com.tw

2 國立中興大學水土保持學系研究生

3 國立中興大學水土保持學系教授

前言

年來全球氣候變遷，導致諸多災害發生，而台灣位屬於高溫多雨的亞熱帶氣候，由於降雨豐沛且集中、地形破碎、山陡流急、人口密度高，再加上經濟蓬勃發展和坡地開發的人為破壞，使得集水區土壤沖蝕之情形甚為嚴重。為有效了解沖蝕產生的影響，集水區水量及土壤泥砂產量之評估與控制便成為目前極度重要的課題。

SWAT 模式於 1990 年初由美國農業部之農業研究中心(USDA-ARS) Jeff Arnold 博士領導之團隊所研發。現今已廣泛應用於評估在不同管理方案下。如對集水區長時間所產生的流量、泥砂量、營養鹽和農藥的衝擊影響。

SWAT 模式具有許多優點且模式經長期發展與修正，整合許多美國農業部(USDA)歷年來所發展之模式修正建構而成，模擬機制相當完善，經檢定和驗證後，模擬結果可作為流域管理策略改變時的參考方案，而不必投入大量的人力、物力與時間進行實際測量(Arnold et al., 2005)。且模式具有綜合、分佈、基於物理機制並且與 GIS 集成的特徵，具備模擬流域水文狀況的功能，已在水資源和環境領域中得到廣泛的承認及普及(龐靖鵬等, 2007)。

在西方 SWAT 模式被應用來進行以日與月為時間單位的水文流量模擬，例如：地下水與地表水流量(Spruill, et al. ,2000 ; Chu and Shirmohammadi ,2004)，Santhi 等人更用 SWAT 模式，以河流域為研究區域，模擬大

型流域的點源與非點源污染(Santhi, et al. ,2001)。此外，SWAT 模式也可以在不同條件下的土地上，例如：坡度、地表覆蓋種類等，進行土壤沖蝕量的預測(Mosbahi et al. ,2013)。

在中國也有許多學者利用 SWAT 模式模擬集水區內的逕流及泥砂產量(Shen, et al. ,2009)，石小蘭學者(2011)更進一步的建構出五種不同的情境，利用 SWAT 模式研究不同土地利用方式下，集水區流量變化的影響機制。

近年來在國內陳立宗學者等人，運用 SWAT 模式，以台灣的翡翠水庫集水區為研究區域，進行集水區流量、泥砂和營養鹽以月為時間單位之模擬。研究結論表示 SWAT 模式能適用於國內集水區模擬流量、泥砂和營養鹽(陳立宗等人,2009)。而吳政緯等學者則是更進一步利用 SWAT 模式模擬翡翠水庫及其集水區在不同土地利用或管理措施改變所造成的水文及水質影響，研究顯示 SWAT 模式具有模擬混合土地利用集水區長期水文暨水質反應之能力，亦可有效管理土地利用及控制非點源污染。(吳政緯等人,2010)

本研究以 SWAT 模式為對象，建立屏東縣來社溪集水區資料庫，並針對流量及泥砂兩因子進行輸入參數之敏感性分析，比較各項輸入參數對於模擬來社溪流量及泥沙產量之影響，並將各輸入因子進行敏感度排行，找出對來社溪流量及泥沙產量影響最大之參數，以期未來在收集模式之基本資料、整理數據時，能將各輸入參數之敏感度加入

考量，對於影響輸出結果較大的輸入參數，也就是敏感度較大的參數，可蒐集更加完善的資料並以小心、謹慎的考量去建立模型之基本資料庫；而對於影響輸出結果較小，也就是敏感度較小的參數，可利用 SWAT 模式中較相近的預設值來代替需建置之資料庫。

研究方法與材料

SWAT 模式介紹

SWAT 模式本身以物理性描述為基礎，僅需輸入相關資料即可進行模擬及驗證，無須參數率定，此為模式特點之一，與一般須以輸入變數與輸出變數建立迴歸關係作為模擬依據之模式有所不同。

SWAT 在模擬時間上是具有連續性，並以日為時間模擬尺度，屬於長時期模擬之模式，並不適用於事件式洪水的模擬。以日為基本時間單位模擬水文、泥砂、地表作物生長、土地利用、營養鹽的循環及農藥傳輸，評估集水區在不同土地利用與土壤性質的管理作業下對水文、泥砂、營養鹽及農藥承載之影響。

在空間上，模式將集水區細分為更小的子集水區，子集水區更可細分為數個水文響應單元(Hydrologic Response Unit , HRU)，以反應不同的土地利用、土壤性質及坡度，並可指定 HRU 水流的流向，模式以 HRU 為主要計算單元，在 HRU 中估算流量、泥砂、營養鹽和農藥等產量，子集水區中各 HRU 的產量加總可以獲得子集水區的產量，再經河道演算到集水區出口(Arnold et al., 2005)。

本研究使用的 SWAT 模式為 2011 年推出之 ArcSWAT 2009.93.7b for ArcGIS9.3 SP2 版本，是 SWAT 結合了地理資訊系統 ArcGIS 為介面之模式，具有詳細的地理資訊分析功能，使模式能更精確的模擬集水區之水及泥砂產量情形。

水文模型

SWAT 模式模擬水的移動過程，如圖 1 所示，其水文演算包括地表逕流、蒸發散、土壤水及地下水等部份。降水落於集水區內地面時，地面上的水入滲至土壤層中，若其水量超過入滲水量，水在地表上則形成地表逕流流入水體，而地表逕流的傳輸及水體之蒸發作用都會造成水分散失。

模式中將土壤分為 10 層，若土壤層中含水量超過其田間容水量，且下一層土壤層為未飽和狀態，土壤層中的水則會滲透至下一層土壤層中，最後經最底層之土壤層補注到含水層中；若土壤層中的含水量呈現飽和狀態，滲透作用將被抑制，水會聚集於土壤剖面內，產生側向流動而匯入主河道。土壤層中的水則會因植物攝取和土壤蒸發作用而損失。

在含水層的部分，模式主要分成淺含水層和深含水層。淺含水層中的水會回流到主河道，形成主河道的基流量，或滲透到深含水層，而在淺含水層中亦會因再蒸發作用而減少水量。

經河道演算後的水，流入下一個子集水區的河道再進行演算，直至出流口處或水庫，此循環過程即為 SWAT 模式中水的移動程。

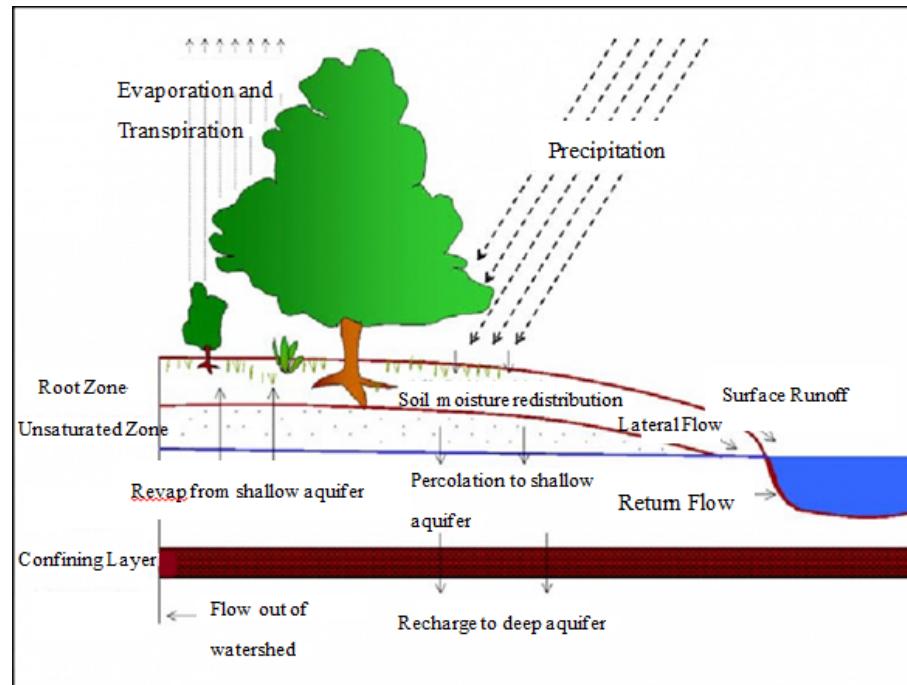


圖 1.模式中水的移動過程圖(SWAT 使用手冊,2009)

Fig.1 Schematic representation of the hydrologic cycle(SWAT user manual,2009)

1. 泥沙模型

SWAT 模式模擬集水區中產出泥砂之過程，主要分為地表沖蝕及河道中的泥砂傳輸兩部份。地表上的泥砂經由地表逕流的沖刷，伴隨著地表逕流進入河道；在河道中泥砂亦會產生沉澱和沖蝕的傳輸行為。

地表沖蝕於模式中以 Modified Universal Soil Loss Equation(MUSLE)(Williams,1975)估算逕流產生之泥砂量，由於地表逕流會沖蝕土壤表面造成泥砂量增加，故 MUSLE 考量水文及地文兩大因子進行一日之泥砂產量估算，因子包括：地表逕流、尖峰流量、HRU 之面積、土壤沖蝕性、地表覆蓋和水土保持措施等因子，如

公式(1)所示。

$$\text{sed} = 11.8 \times (Q_{\text{surf}} \times q_{\text{peak}} \times \text{area}_{\text{hru}})^{0.56} \times K_{\text{USLE}} \times C_{\text{USLE}} \times P_{\text{USLE}} \times LS_{\text{USLE}} \times CFRG \quad (1)$$

sed: 一日泥砂產出量(mt)。

Q_{surf} : 地表逕流量(mm/ha)。

q_{peak} : 尖峰流量(m^3/s)。

area_{hru} : HRU 之面積(ha)。

K_{USLE} : 土壤沖蝕因子。

C_{USLE} : 作物與管理因子。

P_{USLE} : 水土保持因子。

LS_{USLE} : 地形因子。

CFRG: 粗糙碎片因子。

研究材料

SWAT 模式需要輸入的數據資料主要有：

1. 流域數值高程模型(DEM):

本研究採用水土保持局台南分局所提供之屏東縣來義鄉 DEM 進行模擬分析，如圖 2 所示，利用 SWAT 模式將來社溪集水區劃分為 22 個子集水區，總集水區面積約為 3,850.27 公頃，由於 SWAT 模式利用集水區之降水入流口及出流口搭配河川網絡來進行集水區範圍劃分，故劃分後之面積可能與實際情形有所差異。劃分後集水區內最高點約

2,242 公尺，平均高程約 1,000 公尺。

2. 土地利用數據:

模式內之土地利用資料是基於美國國家地質調查局(USGS)的土地分類系統，以北美地區之植生類型進行分類，主要用來模擬植被生長和營養物質循環之情形，以及植物生長需水量和地表逕流量。依據國土測繪中心的圖資統計，將來社溪集水區劃分為常綠森林、農業使用、水利設施和交通設施共 4 種土地利用類型，表 1 為各種土地利用類型於 SWAT 模式內輸入之代碼及所占面積之百分比，圖 3 為 SWAT 模式劃分後之結果。

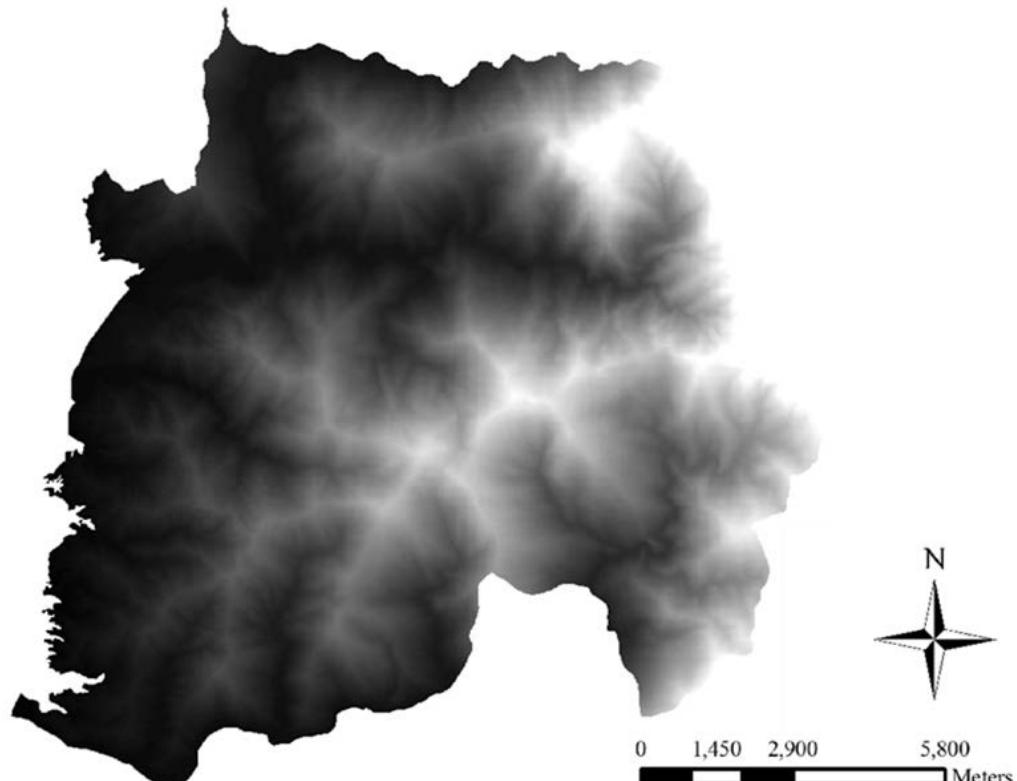


圖 2 屏東縣來義鄉 DEM

Fig. 2 DEM map of Laiyi country

表 1 SWAT 模式內來社溪集水區土地利用類型

Table1 Land use types of Laishe creek watershed in SWAT model

土地利用類型	SWAT 代碼	百分比(%)
常綠林	FRSE	96.56
農業使用	AGRR	1.40
水利設施	WATR	1.25
交通設施	UTRN	0.80

表 2 模型主要所需資料

Table2 Mainly required database

名稱	檔案格式	來源
地形資料	GRID 或.shp file 格式	水土保持局台南分局
土地利用資料	GRID 或.shp file 格式	國土測繪中心
土壤性質	GRID 或.shp file 格式	行政院農委會
氣象資料	.dbf 或.txt	新來義雨量站、恆春氣象站

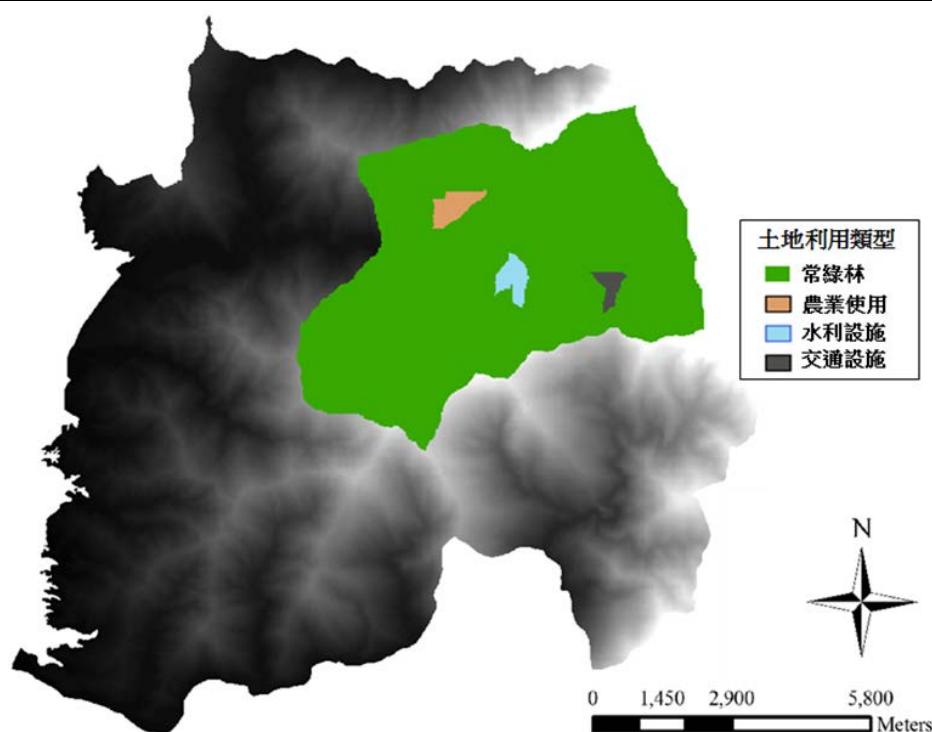


圖 3 來社溪集水區土地利用圖

Fig.3 Land use map of Laishe creek watershed

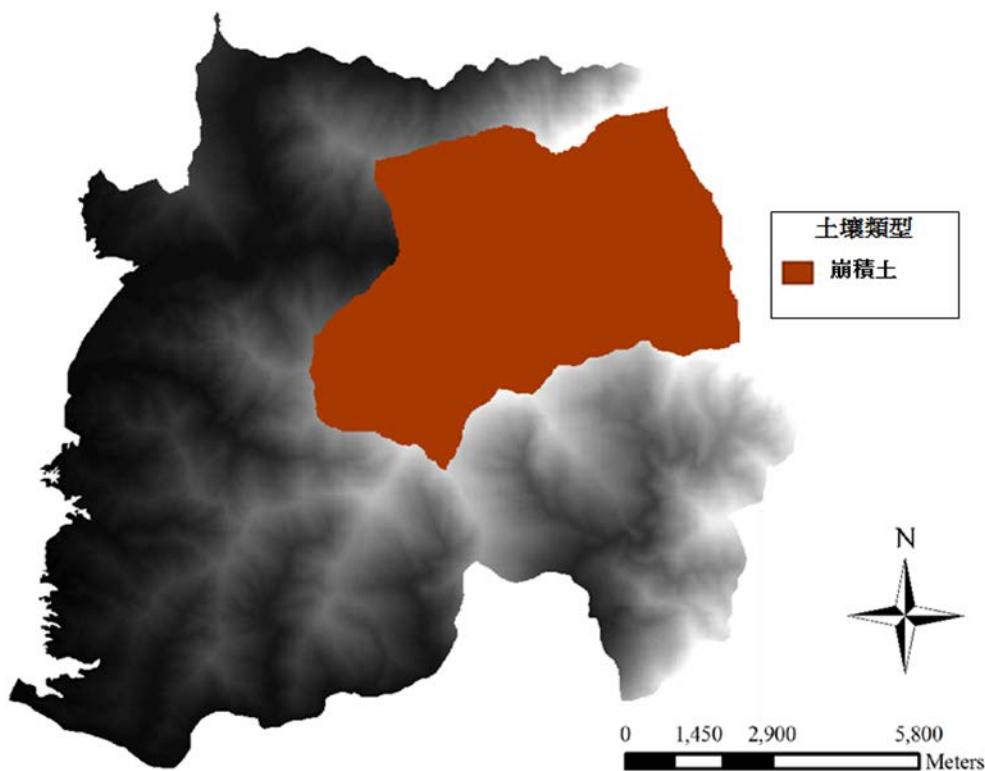


圖 4 來社溪集水區土壤類型圖

Fig.4 Soil type map of Laishe creek watershed

3. 土壤類型數據：

依據行政院農委會出版之「台灣地區土壤分布圖」研判，來社溪集水區內以無母質為主，其次為石質土及崩積土，由於無母質並無固定之土壤性質，故本研究將試區之土壤

設定為崩積土，以利研究進行。圖 4 為 SWAT 模式劃分後之土壤類型結果。

氣象資料數據：

由於來社溪集水區內僅有雨量測站並無氣象測站，故選用鄰近之中央氣象局恆春測站 2006 年至 2014 年之氣溫資料進行模擬。雨量方面，本研究採用水利署設置之新來義

雨量站資料，其標高約為 250 公尺，選定 1973 年至 2013 年共 41 年的雨量統計資料進行模擬。以上所需資料之格式及來源說明如表 2 所示。

研究方法

1. 敏感性分析

敏感性分析主要探討在輸入參數變動的情況下，對模式模擬結果的影響程度，當模擬結果對某一輸入參數的變動極為敏感時，表示該參數值的些微變動將導致模式輸出值產生大幅的變化，因此藉由敏感性分析可了解各項輸入參數對流量、泥砂和營養鹽等輸出值之影響程度，有助於模式的檢定過程中，優先選取敏感性高的輸入參數來進行檢定，

亦可將不敏感或敏感性趨近於零的參數排除於檢定程序外。

敏感性分析可分為全域性與局部性兩種類型。全域敏感性分析，是呈現出各項參數所組成的定義域中之綜合關係，但為求整體具代表性的敏感度，需在樣本空間中均勻取樣，故需較多的取樣次數及運算量。而局部性敏感性分析一次僅變動一個輸入參數，以探討對輸出結果的影響，其計算方法較為簡單，運算量也較少，但當模式參數量較多、具複雜計算及呈非線性的關係時，局部敏感性分析方法將無法具體呈現多項參數所組成的多維度樣本空間中之關係。

2. 拉丁高階方塊取樣法

Macky et al. 於 1988 提出拉丁高階方塊取樣法 (Latin Hypercube Sampling, LHS) ，其抽樣方式可看作某種意義上的分層抽樣，作法是先將每個輸入參數依據相等機率進行區間劃分，各區間內再依其機率分佈取樣 1 次，並將各參數間之區間取樣再相互做隨機配對，假設有若干項輸入參數，各項參數皆做 N 次區間取樣，各參數區間取樣之隨機配對便有 N 組配對，此 N 組配對便均勻的分佈於各項參數所組成的定義域中。再經模式計算可得到相對於此 N 組配對樣本之模式輸出結果。此方法主要缺點為輸出結果之差異並不能明確的歸因於某一特定輸入參數值的變化，因為所有參數的變動都是同步的。

3. OAT 敏感性分析法

OAT (One factor At a Time method) 敏感性分析法，表示每次分析只對一項輸入參數做微量變動，以計算各項參數對模式輸出結

果之敏感度。當計算某項輸入參數之敏感性時，其它參數將不做任何變動，以免因其它因素造成模式輸出結果之額外變動，影響到輸入參數的敏感性計算。

4. LHS-OAT 敏感性分析法

SWAT 模式採用 LHS-OAT 敏感性分析法，此方法結合拉丁高階方塊取樣法 (Latin Hypercube Sampling, LHS) 和 OAT (One factor At a Time method) 敏感性分析的一種新方法。如公式(2)所示。

$$I = \frac{\Delta O}{\Delta F_i} \times \frac{F_i}{O} \quad (2)$$

I: 敏感性指數

O: 模式輸出結果

ΔO : 模式輸出結果之變化量

F_i : 模式輸入因子

ΔF_i : 模式輸入因子之變化量

由上式可得知敏感性指數 $I = \frac{\text{輸出值變動百分比}}{\text{輸入值變動百分比}}$ 。

當 $I = 1$ 時，表示若輸入參數值變動量為增加 30% ，輸出結果值變動量亦為增加 30% ；當 $I = -1$ 時，表示若輸入參數值變動量為增加 30%，模式輸出結果將減少 30% ，而當 $I = 0$ 時，表示無論輸入參數值增加或減少多少，對模式輸出結果都無任何影響。

SWAT 模式中有眾多參數，要使每個輸入參數達到準確值相當困難，只能盡可能使重要的參數值正確。本研究由模式內預設的 41 個輸入參數中選出以下 27 項與流量及泥砂產量相關的參數，進行敏感性分析，透過

分析之結果，剔除敏感性較低之參數，以提高輸入參數值時之便利性與正確性。

5. 模式參數敏感性排行

模式在執行完敏感性分析後，將各項輸入參數值之敏感性指數取絕對值後，由高至低依序進行排列，整理出敏感性排名 (Sensitivity Rank)，由敏感性排名可以清楚得知，各項參數對輸出結果的影響程度，故可依此標準挑選敏感性較高之參數優先進行校正檢

定，以提高模式在此集水區之適用性。

表 3 中參數分為土壤、逕流、地下水、沖蝕、河道、作物、地形等類別，少部分如降雪、土壤中營養鹽濃度等類別之參數，考慮到集水區之氣候特性及主要研究目的，故予以排除，不參與分析。

表 3 SWAT 模式輸入參數

Table 3 Input parameters of SWAT model

參數名稱	下限	上限	定義	類別
Alpha_Bf	0	1	Baseflow alpha factor (days)	Groundwater
Biomix	0	1	Biological mixing efficiency	Soil
Blai	0	1	Leaf area index for crop	Crop
Canmx	0	10	Maximum canopy index	Runoff
Ch_Cov	0	1	Channel cover factor	Erosion
Ch_Erod	0	1	Channel erodibility factor	Erosion
Ch_K2	0	150	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium (mm/hr)	Channel
Ch_N2	0.025	0.065	Manning coefficient for channel	Channel
Cn2	-25%	25%	Initial SCS runoff curve number	Runoff
Epco	0	1	Plant evaporation compensation factor	Evaporation
Esco	0	1	Soil evaporation compensation factor	Evaporation
Gw_Delay	-10	10	Groundwater delay (days)	Groundwater
Gw_Revap	-0.036	0.036	Groundwater 'revap' coefficient	Groundwater
Gwqmn	-1000	1000	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm)	Soil
Revapmn	-100	100	Threshold depth of water in the shallow aquifer for 'revap' to occur (mm)	Groundwater
Slope	-25%	25%	Average slope steepness (m/m)	Geomorphology
Slsubbsn	-25%	25%	Average slope length (m)	Geomorphology

(續上頁)

Sol_Albedo	-25%	25%	Moist soil albedo	Soil
Sol_Awc	-25%	25%	Available water capacity of the soil layer (mm H ₂ O/mm soil)	Soil
Sol_K	-25%	25%	Soil saturated hydraulic conductivity (mm/hr)	Soil
Sol_Z	-25%	25%	Depth from soil surface to bottom of layer (mm)	Soil
Spcon	0.0001	0.01	Linear parameter for calculating the maximum amount of sediment that can be reentrained during channel sediment routing	Channel
Spexp	1	2	Exponent parameter for calculating sediment reentrained in channel sediment routing	Channel
Surlag	0	10	Surface runoff lag coefficient	Runoff
Tlaps	0	50	Temperature lapse rate (°C/km)	Geomorphology
Usle_C	-25%	25%	Minimum value of USLE C factor for water erosion applicable to the land cover/plant	Crop
Usle_P	0	1	USLE equation support practice factor	Erosion

結果與討論

SWAT 模式採用 LHS-OAT 敏感性分析法，假若選取 M 項輸入參數，各項參數皆做 N 次區間取樣，則模式總共需運算 $N \times (M+1)$ 次。本研究選定 27 項相關於土壤、逕流、地下水、沖蝕、河道、作物、地形等類別之輸入參數進行敏感性分析 ($M=27$)，將各項參數取樣次數定為 10 次 ($N=10$)，單次分析共需進行 280 次運算。表 4 至表 11 為集水區內各土地利用針對流量及泥砂兩大因子所作之敏感性分析結果。本研究將敏感性分析結果分為五種敏感等級，第 1 名為極高度敏感，第 2~5 名為高度敏感，第 6~10 名為敏感，第 11 名以

後為稍微敏感，並將平均敏感性指數為 0 之參數列為完全不敏感。四種不同土地利用下對流量及泥砂極高度敏感之參數如表 12 所示，在常綠林地之子集水區，對於流量最敏感的參數為土壤蒸發補償係數 (Esco)，對於泥砂最敏感的參數為作物葉面積指數 (Blai)。在農業為主之集水區，對於流量最敏感的參數為 Esco，對於泥砂最敏感的參數為 SCS 逕流曲線值 (Cn2)。在水利設施為主的子集水區，對於流量最敏感的參數為 Esco，對於泥砂最敏感的參數為 Blai。在交通設施為主的子集水區，對於流量最敏感的參數為 Esco，對於泥砂最敏感的參數為 Blai。

E03 表 4 常綠林地流量敏感性分析表
Table 4 Sensitivity analysis of flow in evergreen

參數名稱	敏感性排名	平均敏感性指數
Alpha_Bf	7	0.126E-01
Biomix	13	0.973E-03
Blai	6	0.210E-01
Canmx	2	0.107E+00
Ch_Cov	28	0.000E+00
Ch_Erod	28	0.000E+00
Ch_K2	8	0.537E-02
Ch_N2	11	0.131E-02
Cn2	3	0.527E-01
Epco	15	0.332E-03
Esco	1	0.162E+00
Gw_Delay	12	0.111E-02
Gw_Revap	9	0.324E-02
Gwqmn	5	0.343E-01
Revapmn	14	0.441E-03
Slope	28	0.000E+00
Slsubbsn	18	0.108E-03
Sol_Alб	17	0.207E-03
Sol_Awc	28	0.000E+00
Sol_K	10	0.165E-02
Sol_Z	4	0.501E-01
Spcon	28	0.000E+00
Spexp	28	0.000E+00
Surlag	16	0.229E-03
Tlaps	28	0.000E+00
Usle_C	28	0.000E+00
Usle_P	28	0.000E+00

表 5 常綠林地泥砂敏感性分析表

Table 5 Sensitivity analysis of sediment in evergreen

參數名稱	敏感性排名	平均敏感性指數
Alpha_Bf	12	0.615E-02
Biomix	15	0.117E-02
Blai	1	0.557E+01
Canmx	5	0.337E+00
Ch_Cov	28	0.000E+00
Ch_Erod	28	0.000E+00
Ch_K2	11	0.829E-02
Ch_N2	13	0.349E-02
Cn2	3	0.239E+01
Epco	9	0.225E-01
Esco	4	0.469E+00
Gw_Delay	14	0.341E-02
Gw_Revap	17	0.549E-03
Gwqmn	16	0.101E-02
Revapmn	28	0.000E+00
Slope	28	0.000E+00
Slsubbsn	7	0.120E+00
Sol_Alб	18	0.325E-03
Sol_Awc	28	0.000E+00
Sol_K	10	0.106E-01
Sol_Z	8	0.829E-01
Spcon	28	0.000E+00
Spexp	28	0.000E+00
Surlag	6	0.176E+00
Tlaps	28	0.000E+00
Usle_C	28	0.000E+00
Usle_P	2	0.273E+01

表 6 農業用地之流量敏感性分析表

Table 6 Sensitivity analysis of flow in agriculture

參數名稱	敏感性排名	平均敏感性指數
Alpha_Bf	5	0.266E-01
Biomix	13	0.949E-03
Blai	7	0.149E-01
Canmx	3	0.899E-01
Ch_Cov	28	0.000E+00
Ch_Erod	28	0.000E+00
Ch_K2	8	0.413E-02
Ch_N2	15	0.621E-03
Cn2	2	0.134E+00
Epc0	11	0.124E-02
Esco	1	0.153E+00
Gw_Delay	12	0.112E-02
Gw_Revap	10	0.252E-02
Gwqmn	6	0.256E-01
Revapmn	17	0.311E-03
Slope	16	0.311E-03
Slsubbsn	18	0.155E-03
Sol_Alб	28	0.000E+00
Sol_Awc	28	0.000E+00
Sol_K	9	0.363E-02
Sol_Z	4	0.417E-01
Spcon	28	0.000E+00
Spexp	28	0.000E+00
Surlag	14	0.660E-03
Tlaps	28	0.000E+00
Usle_C	28	0.000E+00
Usle_P	28	0.000E+00

表 7 農業用地之泥砂敏感性分析表
 Table7 Sensitivity analysis of sediment in agriculture

參數名稱	敏感性排名	平均敏感性指數
Alpha_Bf	14	0.375E-02
Biomix	15	0.335E-02
Blai	3	0.270E+01
Canmx	8	0.254E+00
Ch_Cov	28	0.000E+00
Ch_Erod	28	0.000E+00
Ch_K2	13	0.672E-02
Ch_N2	16	0.312E-02
Cn2	1	0.409E+01
Epc0	11	0.654E-01
Esco	6	0.395E+00
Gw_Delay	18	0.167E-02
Gw_Revap	22	0.272E-04
Gwqmn	21	0.987E-04
Revapmn	28	0.000E+00
Slope	5	0.425E+00
Slsubbsn	10	0.120E+00
Sol_Alb	17	0.195E-02
Sol_Awc	28	0.000E+00
Sol_K	12	0.919E-02
Sol_Z	7	0.299E+00
Spcon	19	0.628E-03
Spexp	20	0.999E-04
Surlag	9	0.128E+00
Tlaps	28	0.000E+00
Usle_C	4	0.463E+00
Usle_P	2	0.273E+01

表 8 水利用地之流量敏感性分析表

Table 8 Sensitivity analysis of flow in water facilities

參數名稱	敏感性排名	平均敏感性指數
Alpha_Bf	5	0.375E-01
Biomix	14	0.654E-03
Blai	7	0.202E-01
Canmx	2	0.106E+00
Ch_Cov	28	0.000E+00
Ch_Erod	28	0.000E+00
Ch_K2	8	0.976E-02
Ch_N2	13	0.951E-03
Cn2	3	0.540E-01
Epc0	16	0.356E-03
Esco	1	0.163E+00
Gw_Delay	11	0.119E-02
Gw_Revap	9	0.298E-02
Gwqmn	6	0.333E-01
Revapmn	15	0.357E-03
Slope	28	0.000E+00
Slsubbsn	17	0.293E-04
Sol_Alб	18	0.293E-04
Sol_Awc	28	0.000E+00
Sol_K	10	0.235E-02
Sol_Z	4	0.499E-01
Spcon	28	0.000E+00
Spexp	28	0.000E+00
Surlag	12	0.101E-02
Tlaps	28	0.000E+00
Usle_C	28	0.000E+00
Usle_P	28	0.000E+00

表 9 水利用地之泥砂敏感性分析表

Table 9 Sensitivity analysis of sediment in water facilities

參數名稱	敏感性排名	平均敏感性指數
Alpha_Bf	11	0.126E-01
Biomix	16	0.767E-03
Blai	1	0.551E+01
Canmx	5	0.332E+00
Ch_Cov	28	0.000E+00
Ch_Erod	28	0.000E+00
Ch_K2	12	0.124E-01
Ch_N2	14	0.608E-02
Cn2	3	0.238E+01
Epc0	10	0.214E-01
Esco	4	0.474E+00
Gw_Delay	15	0.296E-02
Gw_Revap	18	0.482E-03
Gwqmn	19	0.399E-03
Revapmn	28	0.357E-03
Slope	6	0.288E+00
Slsubbsn	8	0.123E+00
Sol_Alб	21	0.113E-03
Sol_Awc	28	0.000E+00
Sol_K	13	0.112E-01
Sol_Z	9	0.796E-01
Spcon	17	0.751E-03
Spexp	20	0.313E-03
Surlag	7	0.137E+00
Tlaps	28	0.000E+00
Usle_C	28	0.000E+00
Usle_P	2	0.273E+01

表 10 交通用地之流量敏感性分析表

Table 10 Sensitivity analysis of flow in transportation

參數名稱	敏感性排名	平均敏感性指數
Alpha_Bf	6	0.268E-01
Biomix	14	0.451E-03
Blai	7	0.165E-01
Canmx	2	0.986E-01
Ch_Cov	28	0.000E+00
Ch_Erod	28	0.000E+00
Ch_K2	8	0.653E-02
Ch_N2	10	0.122E-02
Cn2	3	0.520E-01
Epc0	17	0.144E-03
Esco	1	0.139E+00
Gw_Delay	11	0.119E-02
Gw_Revap	9	0.264E-02
Gwqmn	5	0.290E-01
Revapmn	15	0.304E-03
Slope	28	0.000E+00
Slsubbsn	16	0.147E-03
Sol_Alб	28	0.000E+00
Sol_Awc	28	0.000E+00
Sol_K	12	0.119E-02
Sol_Z	4	0.448E-01
Spcon	28	0.000E+00
Spexp	28	0.000E+00
Surlag	13	0.604E-03
Tlaps	28	0.000E+00
Usle_C	28	0.000E+00
Usle_P	28	0.000E+00

表 11 交通用地之泥砂敏感性分析表

Table11 Sensitivity analysis of sediment in transportation

參數名稱	敏感性排名	平均敏感性指數
Alpha_Bf	14	0.491E-02
Biomix	10	0.199E-01
Blai	1	0.284E+01
Canmx	5	0.120E+00
Ch_Cov	28	0.000E+00
Ch_Erod	28	0.000E+00
Ch_K2	12	0.558E-02
Ch_N2	9	0.221E-01
Cn2	3	0.751E+00
Epc0	11	0.728E-02
Esco	4	0.124E+00
Gw_Delay	17	0.115E-02
Gw_Revap	20	0.186E-03
Gwqmn	18	0.662E-03
Revapmn	21	0.102E-03
Slope	28	0.000E+00
Slsubbsn	6	0.447E-01
Sol_Alб	15	0.242E-02
Sol_Awc	28	0.000E+00
Sol_K	13	0.504E-02
Sol_Z	7	0.387E-01
Spcon	16	0.186E-02
Spexp	19	0.245E-03
Surlag	8	0.234E-01
Tlaps	28	0.000E+00
Usle_C	28	0.000E+00
Usle_P	2	0.102E+01

表 12 各類土地利用下對流量及泥砂極高度敏感之參數

Table 12 The most sensitivity parameter for flow and sediment between different land use types

	常綠林地	農業使用	水利設施	交通設施
流量	Esco	Esco	Esco	Esco
泥砂	Blai	Cn2	Blai	Blai

結論

研究運用 SWAT 模式在屏東縣來社溪集水區針對土壤、逕流、地下水、沖蝕、河道、作物、地形等類別之參數進行流量及泥砂之敏感性分析，參數敏感性分析結果顯示，在以常綠林地、水利設施、交通設施為土地利用之子集水區，對流量及泥砂產量最敏感的輸入參數分別為土壤蒸發補償係數 (Esco)和作物葉面積指數 (Blai)；土壤蒸發補償係數 (Esco)是土壤含水量的控制因子之一，而土壤中的含水量又會進而影響集水區之逕流量以及泥砂產量；作物葉面積指數 (Blai)與地表覆蓋度相關，而地表覆蓋度也會進而影響集水區內的逕流量與沖蝕量，所以此研究結果相當符合現況。在以農業利用為主的子集水區，對流量及泥砂產量最敏感的輸入參數分別為土壤蒸發補償係數 (Esco) 和 SCS 逕流曲線值 (Cn2)。而 Ch_Cov、Ch_Erod 此兩種河道沖蝕相關參數及溫度遞減率 Tlaps 參數，不論在何種之土地利用方式下對流量及泥砂的敏感性指數皆為 0，呈現完全不敏感。

參考文獻

- 石小蘭 (2011)，基於 SWAT 模型的江西大崗山森林生態站小流域逕流的模擬

研究，內蒙古農業大學碩士學位論文。

- 李慧、靳晟、雷曉云、朱連勇、張翔 (2010)，SWAT 模型參數敏感性分析與自動率定的重要性研究，水資源與工程學報，第二十一卷，第一期。
- 吳政緯 (2010)，翡翠水庫營養鹽之總最大日負荷規劃，國立台北科技大學土木與防災研究所碩士學位論文。
- 陳立宗、朱子偉 (2009)，「應用 SWAT 模式推估翡翠水庫集水區的非點源污染」，第十八屆水利工程研討會，屏東。
- 梁犁麗、汪黨獻、王芳 (2007)，SWAT 模型及其應用進展研究，中國水利水電科學研究院學報，第五卷，第二期。
- 黃宇齊 (2010)，翡翠水庫及水庫集水區水文暨水質模擬與其不確定性，國立台北科技大學土木與防災研究所碩士學位論文。
- 聚禾工程顧問有限公司 (2014)，來社溪集水區土砂變遷與分析 期末報告書。
- 龐靖鵬、徐宗學、劉昌明 (2007)，SWAT 模型研究應用進展，水土保持研究，第三卷，第十四期，第 31-35 頁。
- Arnold, J. G., Neitsch, S. L., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2005), "Soil and wa-

- ter assessment tool theoretical documentation version 2005,”
10. Bingner, R.L. (1996), “Runoff simulated from Goodwin Creek Watershed using SWAT,” Transactions of the American Society of Agricultural Engineers., 39 (1): 85-90.
 11. Chu, T.W. and A. Shirmohammadi (2004), “Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the Piedmont physiographic region of Maryland,” Transactions of the American Society of Agricultural Engineers., 47 (4): 1057-1073.
 12. McKay, M.D. (1988), “Sensitivity and Uncertainty Analysis Using a Statistical Sample of Input Values,” CRC Press, Boca Raton, FL: 145-186.
 13. Mosbahi, M., S. Benabdallah and M. R. Boussema (2013), “Assessment of soil erosion risk using SWAT model.” Arabian Journal of Geosciences.,6(10): 4011-4019.
 14. Santhi, C., J. G. Arnold, J. R. Williams, L. M. Hauck, W. A. Dugas(2001), “Application of a watershed model to evaluate management effects on point and non-point source pollution,” Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 44 (6):1559-1570.
 15. Shen, Z. Y., Y. W. Gong, Y. H. Li, Q. Hong, L. Xu and R. M. Liu (2009). "A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong Watershed in the Three Gorges Reservoir Area." Agricultural Water Management 96(10): 1435-1442.
 16. Soil and Water Assessment Tool , <http://swat.tamu.edu/>
 17. Spruill, C.A., S. R. Workman and J. L. Taraba. (2000), “Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model,” Transactions of the American Society of Agricultural Engineers., 43 (6): 1431-1439.
 18. Soil and Water Assessment Tool user manual(2009)
 19. Williams, J. R. (1975), “Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor,” Sediment-Yield Workshop, Present and Prospective Technol. for Predict Sediment Yields and Sources, Proc., USDA Sediment Lab.; 244-252.
-

104 年 09 月 01 日收稿

104 年 09 月 09 日修改

105 年 03 月 08 日接受