

# 土壤水文評估模式之介紹

鍾閔光<sup>(1)</sup> 林俐玲<sup>(2)</sup>

## 摘要

目前用於推估集水區土壤沖蝕量之水文模式眾多，而 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 為一 20 世紀後發展之水文模型，在台灣之使用情形並不普遍，故本文主要以 SWAT 模式為主，介紹其水文及泥沙方面之理論架構、計算運行方式，並針對數據資料庫進行分析，描述模式所需的數據資料，最後依據台灣集水區之特性，說明模型應用上之限制及建議的修正方向，以台灣集水區適用性高及便利性為主，藉由此研究達到推廣之目的，提供決策者在集水區管理及防災規劃方面良好的參考依據。

(**關鍵詞**：水文模式、SWAT 模式)

## Introduction of Soil Water Assessment Tool Model

國立中興大學   
*Ming-Kuang Chung*<sup>(1)</sup> *Li-Ling Lin*<sup>(2)</sup>

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

## ABSTRACT

Currently, there are many hydrological models for estimating soil erosion. SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model, developed in 1990s, is not commonly used in Taiwan. This article is mainly based on SWAT model, introducing the structure of the model, which is about hydrology and sediment, and explains the basic database of SWAT model. The calculating method and the source of the database are described. In conclusion, we point out restricting factors based on model application and some suggestions which can help improve the applicability in Taiwan. Hope through this article can increase the utilization rate of SWAT model, also provides decision maker a good reference while doing watershed management.

(**Keywords**: hydrological model, SWAT model)

---

(1)國立中興大學水土保持學系 碩士生

(2)國立中興大學水土保持學系 教授 (通訊作者 email:llin@dragon.nchu.edu.tw)

## 前言

台灣地區地形破碎、山陡流急，且位屬高溫多雨的亞熱帶氣候，近年來氣候變遷劇烈、經濟蓬勃發展、坡地開發的人為破壞，造成集水區土壤沖蝕情形旺盛。故擁有良好的集水區水文推估模式甚為重要。

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)。

Spruill et al. (2000) 以美國肯塔基州中央的一個小型集水區為研究區域，運用 SWAT 模式，進行以日和月為時間單位的流量模擬。研究結論表示 SWAT 模式能有效模擬小型集水區的河川流量，且以月流量為時間單位進行模擬能達到良好成效。

Chu et al. (2004) 運用 SWAT 模式，以美國馬里蘭州中山麓地形為主的集水區為研

究區域，進行水文模擬。研究中收集 6 年的水文資料進行檢定與驗證，以評估 SWAT 模式在山麓地形為主 340 公頃尺度的集水區裡，模擬地表水與地下水的功能。此研究結論表示 SWAT 模式於長時間的水文模擬結果良好且可被接受。

陳立宗等 (2009)，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。研究中收集 2002 年到 2006 年共 5 年的氣象、水文、地文和水質實測資料，以 2002 至 2004 年執行檢定，與後兩年數據進行驗證。結果顯示水文和泥砂的模擬情況良好。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。

黃宇齊 (2010) 及吳政緯 (2010) 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，模擬結果之流量、泥沙量、氮含量經檢定與驗證後均合理，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。

此外，Mosbahi et al. (2013) 於突尼西亞北部的 Sarrath river 集水區，利用 SWAT 預測地表逕流量及土壤流失量。研究指出土壤沖蝕的主要因素為地表覆蓋之種類及坡度的不同。結論顯示在半乾旱的集水區，SWAT 模式能有效的用於劃分不同土壤沖蝕的敏感性區位。

本研究主要針對 SWAT 模式之架構、數據庫進行分析，期望提高其在台灣集水區之適用性。

## 研究方法與材料

### 模型結構與基本數據庫

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)。以下分別探討水文、泥砂、氮和磷之傳遞方式及其理論架構。

### 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，地面上的水滲入土壤層中，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，直至出口處或水庫，此循環過程即為 SWAT 模式中水的移動過程。

模式在模擬水的傳輸過程中，分為地表逕流、蒸發散、土壤水與地下水等部分，說明如下：

#### 1. 地表逕流

降水落至地面，形成入滲進入土壤，土壤若乾燥，入滲率則高，而隨入滲至土壤的水份增加，土壤逐漸濕潤，入滲率則減少。若地表上的水量大於入滲量，水將會聚集於低窪處，最後於地表產生水流往低處河道流

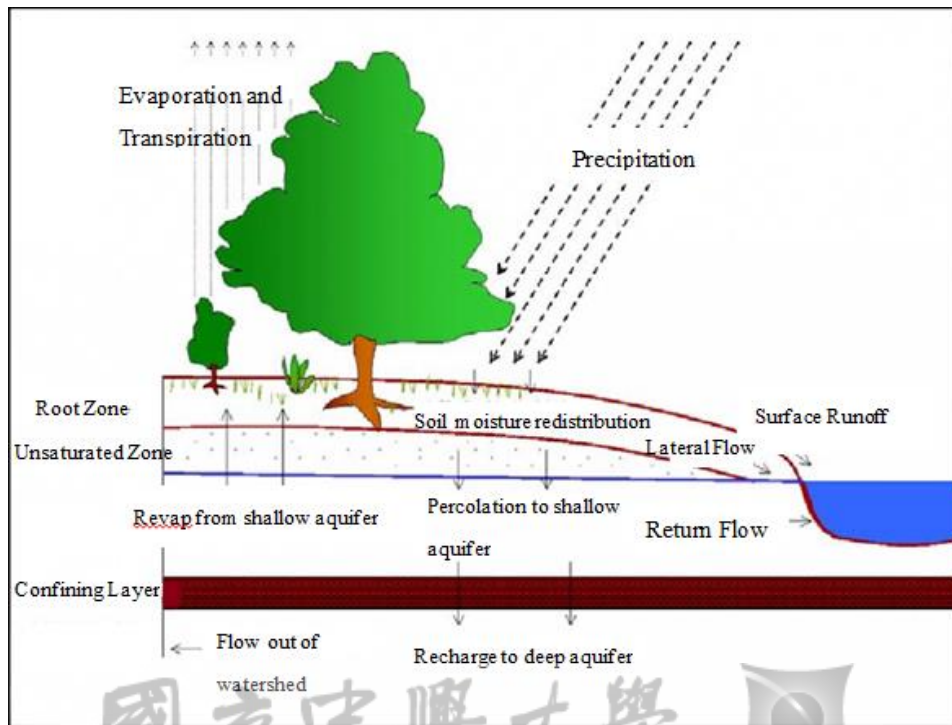


圖 1 模式中水的移動過程圖

Figure 1 .Schematic representation of the hydrologic cycle

動形成地表逕流。模式對地表逕流的模擬，採 SCS Curve Number 和 Green & Ampt method 計算地表逕流，接著以修正後的合理化公式計算尖峰流量值，並估計沖蝕所產生的泥砂量，最後考量地表逕流的延遲和傳輸損失。

SCS Curve Number：SCS 逕流方程式是由 Soil Conservation Service, SCS (現 Natural Resources Conservation Service, NRCS) 於 1972 年所建立，為一經驗公式，於美國一小型農業集水區中探討降雨量和逕流量之關係，收集 20 多年研究資料所推估的經驗公式，在不同的土地利用與土壤型態下可推估得逕流量，根據降雨量和逕流量的關係之經驗式，推估出地表逕流量，如(1)式所示；或

可採用 Green & Ampt method (Green, W. H. and Ampt, G. A., 1911)，先計算出集水區之入滲量，進而用降雨量扣除其入滲量，推估出地表逕流量，如方程式(3)所示。

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (1)$$

式中：

$Q_{surf}$ ：累積逕流量或超出雨量(mm)。

$R_{day}$ ：每日的降雨深度(mm)。

$I_a$ ：初期扣除量，包含產生逕流之前地表的窪蓄、截留和入滲量(mm)。

$S$ ：地表保持量(mm)，其定義如(2)式所示：

$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (2)$$

$CN$ ：Curve Number 值。

$$f_{inf} = K_e \left( 1 + \frac{\phi_{wf} \times \Delta \theta_v}{F_{inf}} \right) \quad (3)$$

$f_{inf}$ : 在時間  $t$  下的人滲率(mm/hr)。

$K_e$ : 有效的水力傳導係數(mm/hr)。

$\varphi_{wf}$ : wetting front 的勢能(mm)

$\Delta\theta_v$ : 經過 wetting front 之後，體積水分含量的改變(mm/mm)。

$F_{inf}$ : 在時間  $t$  所累積的人滲量(mm)。

## 2. 尖峰流量

尖峰流量意指在一場降雨事件中所產生之最大流量，可能造成明顯的沖蝕作用，故尖峰流量可作為沖蝕發生的指標，以預測沉積量的損失。SWAT 模式採用修正後的合理化公式以估計尖峰流量值。如公式(4)所示。

$$Q_{peak} = \frac{\alpha_{tc} \times Q_{surf} \times Area}{3.6 \times t_{conc}} \quad (4)$$

$Q_{peak}$ : 尖峰流量( $m^3/s$ )

$\alpha_{tc}$ : 發生於集流時間期間之每日降雨的比例

$Q_{surf}$ : 地表逕流量(mm)

$Area$ : 子集水區面積( $km^2$ )

$t_{conc}$ : 在子集水區中的集流時間(hr)

在流域面積大的集水區中，其集流時間可能超過一日，若以日為時間單位模擬，則一日內所產生的地表逕流僅有一部份流入主河道，模式為模擬地表逕流延遲情況，將延遲一部份地表逕流流入主河道，其計算式如公式(5)所示。

$$Q_{surf} + (Q'_{surf} + Q_{stor,i-1}) \times (1 - \exp\left[\frac{-surlag}{t_{conc}}\right]) \quad (5)$$

$Q_{surf}$ : 一日內流入主河道之地表逕流量(mm)

$Q'_{surf}$ : 子集水區中，一日內所產生之地表逕流量(mm)

$Q_{stor,i-1}$ : 於前一日所延遲或蓄留的地表逕流量(mm)

$Surlag$ : 地表逕流延遲係數

$t_{conc}$ : 在子集水區中的集流時間(hr)

集水區中有各種不同的溪流，常流溪於乾旱發生時溪流內依然有流量，間歇溪則於乾旱時溪流流量會開始枯竭而平時則有間歇的流量，暫時溪僅於發生降雨時才有流量。因暫時溪流量來源以降雨為主，所以溪流的傳輸損失對流量影響大，因此模式將模擬傳輸損失對地表逕流的影響。因缺乏實測入流量與出流量資料，故假設無側向流動由其他集水區流入，且無外堤水量加入逕流量，計算傳輸損失後之逕流量如公式(6)所示。

$$vol_{Q_{surf},f} \begin{cases} 0 & vol_{Q_{surf},i} \leq vol_{thr} \\ a_x + b_x \times vol_{Q_{surf},i} & vol_{Q_{surf},i} > vol_{thr} \end{cases} \quad (6)$$

## 3. 蒸發散

水文循環中，許多過程都可能發生蒸發散的作用，植物的葉面會發生蒸散作用，使水份散發至大氣中；而水流入河川海洋，水因蒸發而導致水份損失；降水落至土表入滲進土壤中，水份亦經由蒸發作用產生損失。模式模擬包括植被、水體及土壤所發生之蒸發散過程，以估算蒸發散量。模式以勢能蒸發量 (PET) 概念評估蒸發散量，其概念由 Thornthwaite 於 1948 年所提出，其定義為於蒸發散量的區域中，其環境條件為均勻覆蓋的植被、充足的土壤水份和無曝露於熱對流或熱能蓄存的影響。因蒸發散易受植物影響，故 Penman 於 1956 年重新定義勢能蒸發散量，於一小型綠色作物區域內，地表擁有完整的植被，植物高度一致且水量充足，於此環境條件下產生之蒸發量。模式提供三種方法以估算勢能蒸發散量，分別為

Penman-Monteith method (Monteith, 1965; Allen, 1986; Allen et al., 1989)、Priestley-Taylor method (Priestley & Taylor, 1972) 及 Hargreaves method (Hargreaves et al., 1985)。模式以勢能蒸發散量估計實際狀況可能的蒸發散量。

#### 4. 土壤水

模式將土壤剖面分為 10 層，以模擬土壤剖面內水的傳輸移動，模式於每一層土壤內輸入田間含水量，若某層土壤層的水分含量超過田間含水量且下一層土壤層為未飽和狀態，土壤層中的水份將產生滲漏作用，進入下一層的土壤層中，每層土壤層的水分經模擬計算後，水從最底層的土壤層補注至淺含水層中。若土壤剖面中水形成飽和狀態，則將抑制各層土壤層內的滲漏作用，水份在土壤剖面中聚集累積，形成暫棲水位，蓄積水量形成側向流動水，進而流入河道。

#### 5. 地下水

模式將含水層分為淺含水層與深含水層，以模擬地下水的傳輸情形，接近地表面的含水層為淺含水層，淺含水層下則為深含水層。水從土壤層底部補注至淺含水層和深措施等因子，如方程式(7)所示。

$$\begin{aligned} \text{sed} = 11.8 \times (Q_{\text{surf}} \times q_{\text{peak}} \times \text{area}_{\text{hru}})^{0.56} \times K_{\text{USLE}} \\ \times C_{\text{USLE}} \times P_{\text{USLE}} \times LS_{\text{USLE}} \times \text{CFRG} \end{aligned} \quad (7)$$

sed: 一日泥砂產出量(mt)。

$Q_{\text{surf}}$ : 地表逕流量(mm/ha)。

$q_{\text{peak}}$ : 尖峰流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )。

$\text{area}_{\text{hru}}$ : HRU 之面積(ha)。

$K_{\text{USLE}}$ : 土壤沖蝕因子。

含水層，當水滲漏到淺含水層時，淺含水層會提供基流量到河道中。若水滲漏至深含水層時，其水量則被視為流出集水區之外，模式的計算過程將不考慮此部份水量。模式模擬位於淺含水層的水，以前一日淺含水層水量作為本日淺含水層水量的初始值，增加的部份為補注至淺含水層的水量，減少的部份則為流入河道的基流量、土壤層底部的再蒸發作用、淺含水層的水量滲漏到深含水層和抽水馬達的使用。

#### 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  $C_{\text{USLE}}$ : 作物與管理因子。

$P_{\text{USLE}}$ : 水土保持因子。

$LS_{\text{USLE}}$ : 地形因子。

$\text{CFRG}$ : 粗糙碎片因子。

河道中泥砂演算分為沉澱和沖刷作用，SWAT 模式使用 Williams(1980) 所發展的方法推估河道中的泥砂量。藉比較河道中泥砂之初始濃度與河道中最大的泥砂濃度，若河道中初始的泥砂濃度大於河道中最大的泥砂

濃度，代表河道中的沉澱量比較明顯；若河道中之初始泥砂濃度小於河道中最大泥砂濃度，則表示河道中的沖刷量增加。以河道中評估河道中泥砂的產出量。如方程式(8)所示：

$$sed_{ch} = sed_{ch,i} - sed_{dep} + sed_{deg} \quad (8)$$

$sed_{ch}$ ：河道中的泥砂量(mt)。

$sed_{ch,i}$ ：河道中初始的泥砂量(mt)。

$sed_{dep}$ ：河段中沉澱的泥砂量(mt)。

$sed_{deg}$ ：河段中經沖刷而產生的泥砂量(mt)。

### 氮模組

SWAT 模式對於氮之模擬分為土壤、水中傳輸及河道演算三部份，始於土壤中的氮，以礦化、硝化、脫氮及固氮作用形成之循環；藉由地表逕流、地表下側向流動與滲漏中傳輸之硝酸鹽，以及地表逕流挾帶泥砂所附著之有機氮進入河道之中；在河道中的氮則以四種型態的氮相互轉換而形成氮之循環，其包括有機氮、氨氮、亞硝酸鹽和硝酸鹽，如圖 2 所示。

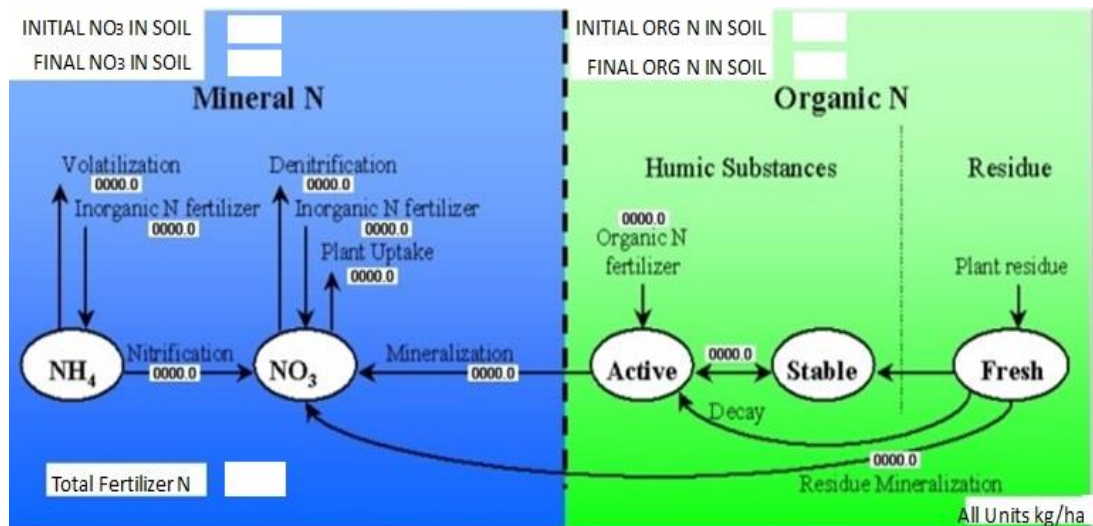


圖 2. 土壤中氮轉換圖

Figure 2. Partitioning of Nitrogen in SWAT

### 磷模組

模式將磷分為土壤、水中傳輸及河道演算三部分，以模擬磷在土壤和水中的傳輸與循環過程。土壤中的磷，主要有礦化作用、分解作用和吸附作用；水傳輸中的磷，有地表逕流、側向流動與滲漏中傳輸的溶解性磷，以及地表逕流挾帶泥砂所附著的有機磷和無機磷；而河道中的磷，則包含有機磷、無機磷及溶解性磷的轉換，如圖 3 所示。

### 模式基本資料庫

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):

用以推估集水區面積、河川網絡和河川流向、畫分子集水區面積、計算子集水區參數。

#### 2. 土地利用數據:

模式內是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



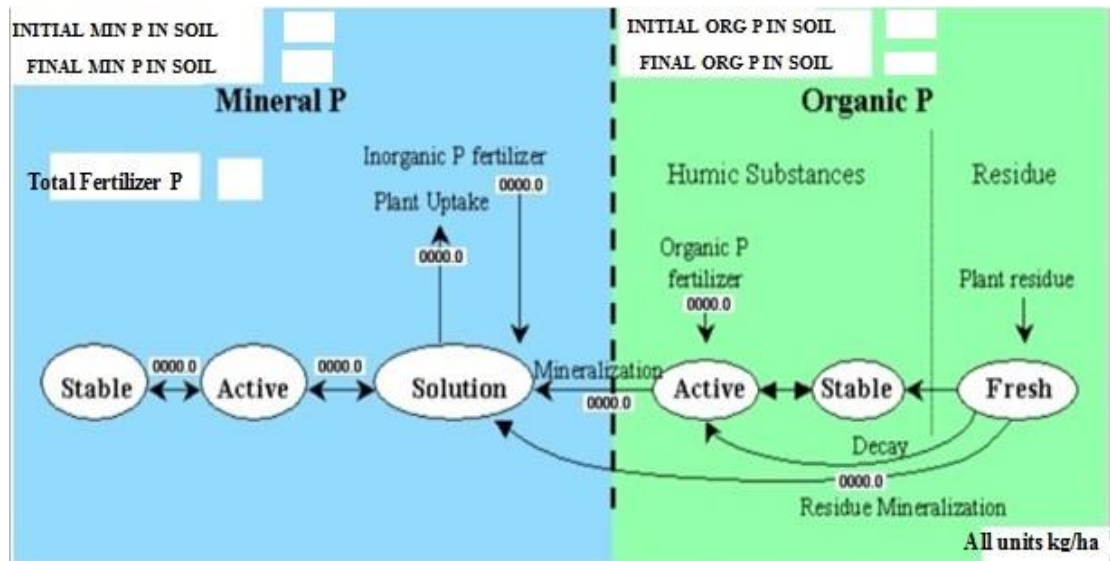


圖 3 .土壤中磷的轉換圖

Figure 3. Partitioning of Phosphorus in SWAT

之情形，以及植物生長需水量以及地表逕流量。

3. 土壤類型數據:

模式內將數據物理性質及化學性質，其中物理性質為影響水和空氣在土壤坡面之主要因子，故為必須輸入之數據。而化學性質用來設置土壤中不同化學物質的初始濃度，可以為選填。

4. 氣象資料數據:

氣象數據為決定集水區流域中水平衡及水文循環的重要因子，利用溫度、雨量、輻射量等所需資料進行模擬，模式內建了北美地區的氣象資料庫可供使用。

以上所需資料之格式及說明如下表 1 所示。

表1. 模型主要所需數據  
 table1. Mainly required database

名稱	數據	檔案格式	所需參數
地形數據	DEM	GRID 或.shp file 格式	地形高程、坡度、坡向
土地利用數據	植被利用圖	GRID 或.shp file 格式	植被種類、輻射利用率、葉面積指數、植物冠層高度等



土壤性質	土壤圖	GRID 或 .shp file 格式	飽和水力傳導度、孔隙率、各層土壤含水量、土壤砂粉粘含量等
氣象資料	氣象資料表	.dbf 或 .txt	日降雨量、日最高最低氣溫、相對濕度、日輻射量等

## 結果討論與建議

### SWAT 於台灣集水區之適用性

SWAT 為美國農業部所發展之水文模型，其模式架構、資料數據庫皆以當地集水區基準進行設計，故應用於台灣地區之集水區模擬上，尚有以下幾方面需要克服。

#### 1. 土壤資料

SWAT 主要是針對北美地區之土壤結構、生長植被、水文循環結構來設計，由於本身預設的土壤資料庫與台灣的土壤分類不盡相同，土壤的名稱與編碼也有差異。且模式將土層剖面細分為 10 層，台灣地區之土壤資料較為老舊，精度無法達到模式要求，模擬出的結果可能會有誤差。

#### 2. 土地利用資料

SWAT 的土地利用數據是以北美地區植被種類進行分類，與台灣目前的土地利用分類方式不同，無法直接套用現行的土地利用數據，用戶需建立自身的資料庫。模式在此方面之參數眾多，有些之取得方式須經由實際研究及調查，故在建立資料庫時較為艱難。

#### 3. 氣象資料

模式氣象資料有考慮到地表植物生長情形，故所需輸入之資料較為繁複，除了一般常見的平均雨量、平均氣溫，尚有平均太陽

輻射量、平均露點溫度、平均風速等，若模擬之集水區位於較偏僻處且缺乏氣象測站，可由模式內之氣象模擬器進行補遺，但結果可能與現地情形有所出入。

### 提高 SWAT 適用性之建議

由於 SWAT 模式內建資料庫為北美地區所適用，故台灣地區之使用者需建立自身的資料庫。地形數據方面，北美地區之集水區地形較寬大廣闊，台灣地區之集水區則較為狹小且密集，模式在此依使用者提供之 DEM 進行集水區流域及流向劃分，並可依照雨量站、氣象站等水文資料站，劃分指定範圍內之子集水區，以便進行模擬分析。

在土壤數據方面，目前台灣地區之土壤性質資料年代較久遠，若要達到較精確之模擬，需要進行土壤調查，以更新較為老舊之資料，模式在建立土壤數據庫時分為物理性質及化學性質。由於水在土壤中之傳遞主要影響因子為物理性質，若缺乏完整的土壤資料，化學性質部分可選擇略過。

土地利用方面，需取得集水區之主要植被種類，主要搭配 USLE 公式之 C 值，選取數據庫內 C 值類似之北美植物種類以進行模擬。

氣象數據方面，主要需要集水區氣象站之地理座標、每日最高和最低溫，以及每日或每小時的降雨量資料，其餘相對溼度、風

速等較不易取得之資料可由模式內氣象模組進行模擬。

希望藉由本研究以上幾點建議，提高 SWAT 在台灣之使用率，亦可提供集水區管理上一個良好的參考依據。

### 參考文獻

1. 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。
2. 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。
3. 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。
4. 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。
5. 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。
6. Allen, R. G. (1986), "A penman for all seasons," J. Irrig. and Drain Engng., ASCE., 112 (4): 348-368.
7. Allen, R. G., Jensen, M. E., Wright, J. L. and Burman, R. D. (1989), "Operational estimates of evapotranspiration, " Agron. J., 81: 650-662.
8. Arnold, J. G., Neitsch, S. L., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2005), "Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2005,"
9. Bingner, R.L. (1996), "Runoff simulated from Goodwin Creek Watershed using SWAT," Transactions of the American Society of Agricultural Engineers., 39 (1): 85-90.
10. 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.
11. Green, W. H. and Ampt, G.A. (1911), "Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils." Journal of Agricultural Sciences., 4:11-24.
12. Hargreaves, G. L., Hargreaves, G. H. and Riley, J. P. (1985), "Agricultural benefits for Senegal River Basin," J. Irrig. and Drain. Engr., 111(2): 113-124.
13. Monteith, J. L. (1965) "Evaporation and the environment. p. 205-234. In The state and movement of water in living organisms," XIXth Symposium, Swansea, Cambridge University Press.
14. 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.
15. Priestley, C. H. B. and Taylor, R. J. (1972), "On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale param-

- eters,” *Mon. Weather. Rev.*, 100: 81-92.
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. 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.
19. Williams, J. R. (1980), “SPNM, a model for predicting sediment, phosphorus, and nitrogen yields from agricultural basins,” *Water Resour. Bull.*, :843-848.

---

103 年 04 月 23 日收稿

103 年 04 月 29 日修改

103 年 05 月 05 日接受



水土保持學報 47 (4): 1539–1550 (2015)

Journal of Soil and Water Conservation, 47 (4): 1539–1550(2015)

