

# SWAT 模型之初步探讨

侯统昭,李锦育

(屏東科技大学水土保持系,台湾 屏东 91201)

**摘要:**由美国农业部农业研究中心(USDA - ARS)研发的分布式水文模型:水土评估工具(SWAT),具有强大的物理机制。近年来,它被认为是最适合模拟在不同土壤、土地利用和管理大流域中,长期土地管理对于水、土沙、营养物质及农业化学物质的影响。介绍 SWAT 模型的原理及基础数据库之建立,并搜集 SWAT 模型应用研究之文献(1999 - 2008 年),以统计分析 SWAT 模型目前的研究现况,作为日后应用 SWAT 模型进行相关研究之参考。

**关键词:**SWAT; 分布式水文模型; 基础数据库

**中图分类号:**F323.2;TV139.16

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2009)06-0282-05

## Primarily Study for Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

HOU Tung-chao,LEE Chin-yu

(Research Institute of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung, Taiwan 91201, China)

**Abstract:** The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) is a kind of distributed hydrologic model, it was developed by the USDA - ARS. In recent years, it is considered as one of the most suitable models for predicting long-term impacts of land management measures on water, sediment, and agricultural chemical yield (nutrient loss) in large complex watersheds with varying soils, land use, and management conditions. This paper introduced the principles and established the foundational database of SWAT, to collect the reference papers of the SWAT model (from 1999 to 2008) for statistical analysis, regarding to the application in the future.

**Key words:** Soil and Water Assessment Tool (SWAT); distributed hydrologic model; watershed foundational database

水资源与土地资源是人类在地球上生存不可或缺的资源,随着人类经济活动持续发展,土地利用面积亦随之增加,出现了由平地慢慢往坡地发展之趋势,这些开发行为往往造成水土流失,使得水土保持工作逐渐受到全球的重视。为能有效地管理与控制水土资源,世界各地的专家学者研发出各种不同的软件与程序,期能模拟人类活动下对于水土资源的影响,其中包括 AgNPS, ANSWERS, BASINS, CREAMS, EPCI, HSPF, IWMM, LWRMS, SWAT, SWIM, SWRRB, WEPP 等应用软件,而 SWAT 模型发展至今,已建构于地理信息系统(GIS)中,以 GIS 为操作接口,大大提高了数据的输入、管理及输出的效率,应用上更为便利。本研究对

于 SWAT 模型的原理及建置基础数据库作一简要的介绍,并搜集近年来 SWAT 模型相关研究,以了解 SWAT 模型目前的研究进展状况,作为应用于台湾地区之参考依据。

## 1 SWAT 模型概述

Soil and Water Assessment Tool (SWAT)<sup>[1]</sup>是由美国农业部农业研究服务中心(USDA - ARS)研发的分布式水文模型,它建立于 SWRRB 模型的基础上并结合了 USDA - ARS 其它几个模型(CREAMS、GLEAMS 等)的特点,是一个具有很强的水文物理机制,能够在缺乏数据的地区进行模拟,适用于不同土壤类型、不同土地利用方式和管理条件下,集水区内部

\* 收稿日期:2008-08-15

作者简介:侯统昭(1980 - ),男,台湾台北人,硕士研究生,主要研究方向为水文分析与流域管理。E-mail:anima0601@hotmail.com

通信作者:李锦育(1959 - ),男,台湾宜兰人,教授,博士生导师,研究方向为流域管理与生态工程。E-mail:cylee@mail.npust.edu.tw

之水、泥沙及化学物质的长期影响,并且能预测百年之内的总径流量、土壤冲蚀量和影响负荷,已被应用于非点源污染的管理与控制、集水区径流量模拟、土壤冲蚀量模拟等研究领域。SWAT 于 20 世纪 90 年代初期正式推出,之后陆续推出 SWAT 94. 2、SWAT 96. 2、SWAT 98. 1、SWAT 99. 2、SWAT 2000 及 SWAT 2005,至今仍不断修正内部程序,以增强原有的作业效能。

SWAT 模型由 701 个方程式、1 013 个中间变量所组成,因此可以模拟流域内多种水文循环的物理过程,包括气候变化、径流、泥沙运移、植物生长、营养元素迁移转化、农业药物迁移等,众多模拟过程可将水循环分为陆面(降雨与地表径流)及水面(河道汇流)两部分,前者主要控制每个子流域中,水、泥沙、营养物质及化学物质等的输入量,后者决定前述物质输入量经由河道向流域出口的输移运动及负荷的演算过程。

## 2 SWAT 模型原理

SWAT 模型以研究流域之数值高程模型(DEM)提供的地形数据为基础,计算流域内坡度与坡向,以判定地表径流可能路径,再按照不同的土地利用和土壤类型分布,将流域划分成若干个小区块——水文反应单元(Hydrologic Response Units, HRUs),它代表子集水区单一地表覆盖、单一土壤类型和管理方式的地形区块,每个 HRUs 进行独立运算,并将运算结果汇集于流域出口。流域内参数的输入包含气象水文、土壤、植被、营养物质、农药及农业管理等项目,可依不同的应用领域自行选择输入项目;水、土沙、营养物及农化物会经由地表径流挟带进入河道,SWAT 模型纳入河道演算模块与蓄水(水塘、水库)演算,方便计算前述物质的运移量。

### 2.1 气象与水文

流域内气候变化影响着水循环过程中的水分与能量,是控制水量平衡的关键因素,SWAT 的气候模块可以依据所输入的气候参数建立气候模拟条件,所需输入的参数包括降水量、气温、太阳辐射、风速、相对湿度等,这些参数可为实测值,也可透过模型自动生成,利于模拟气候变化的影响。

在降水过程中,部分水滴或冰晶在降落途中,会再度蒸发成水汽,只有颗粒较大的水滴或冰晶有机会落到地面而形成降水。部分降水直接落在植物叶面、树干上而未能降落到地面的,称为截留。降落到

地面的降水,部分又为土壤所吸收而入渗于地下,蓄存在地表下的土壤水,部分继续渗漏而形成地下水。超过土壤入渗量的雨水形成地表径流,沿着地表坡度向低处流动,填满地面低洼处的洼蓄后,继续向低处汇集形成河川径流,最后再流入大海中,蒸发为水汽,重新开始水的循环。当考虑一流域系统的水文循环时,降水就是此系统的输入量。截留、洼蓄、入参与地下水是此系统的储存量,蒸发散量与流出量是系统的输出量。在一流域内输入量应等于储存量与输出量的和,水平衡方程式可表示为:

$$\text{输入量(降雨量)} = \text{储存量(截留、洼蓄、入参与地下水)} + \text{输出量(蒸发散量与流出量)}$$

SWAT 模型亦依据此水平衡方程式来进行水文计算,其中地表径流可由降雨量直接计算而得,其计算方法采用美国水土保持局(US - SCS)研发的径流曲线法(SCS, runoff curve number),此方法能反映土壤特性与前期降雨之影响;土壤入渗采用土壤蓄水算法(Storage Routing Technology)计算土壤水分流动,土壤水分蒸发利用土壤厚度与含水量的指数关系式计算;植物蒸发散由叶面积指数(LAI)与蒸发散量的线性关系计算。

### 2.2 土壤特性

土壤参数包括土壤类型、土壤物理性质、土壤化学性质、土壤冲蚀性指数等,参数获得途径可由野外采样实验获得或于经验式换算获得,依所输入的土壤基础参数进行 HRUs 的划分;此外,SWAT 利用土壤流失公式(USLE、RUSLE、MUSLE 等)计算土壤冲蚀量,亦可依据不同土沙颗粒的沉积速度来模拟土沙的沉积过程。

### 2.3 植被与作物生长

SWAT 模型利用一个单独的作物生长模块模拟所有类型的植被覆盖,以太阳辐射量与叶面积指数之关系函数进一步求得作物的生长量,此模块能区分一年生植物与多年生植物,也可用来判定植物根系区的水分与养分的运移。

### 2.4 营养物质

流域内营养物质产量产制于 EPIC 模型,SWAT 模型能够连续模拟每个 HRUs 中营养物质的迁移路径,其中氮、磷两种营养元素是分开独立计算。氮元素:为能考虑土壤中入参与侧向流动的影响,于降雨事件中的有机氮的流失采用 Williams and Hann 所修改的模型进行模拟;磷元素:对磷元素的流失计算,采用 Leonard and Wanchop 的研究

方法,将磷元素分解成溶解状态与沉淀状态两类进行模拟。

2.5 农药

由于 SWAT 加入了 GLEAMS 模型,可以有效地模拟地表径流、渗漏、土壤挥发、土沙携带造成的农药之迁移状况,对于不同类型的农药设置了多种参数可输入。农药于植物表面或土壤中以化学成分之半衰期作为趋势变化模拟依据,在地表径流或运移土沙中的迁移则以每一次降雨事件单独模拟。

2.6 农业管理

SWAT 模型可以模拟作物轮作的种植情形,模拟多种农业管理措施的影响,诸如施肥、灌溉等。

2.7 河道汇流演算

SWAT 模型采用变动存储系数模型或 Muskingum 法进行河道汇流演算,流速与流量采用曼宁公式,另外需考虑输送损失、表面蒸发等可能影响河道出流量之因素;而河道内土沙演算,利用土沙颗粒的沉降速率、沉降深度及径流历时进行沉积土沙计算,对于营养物质与农化物于河道中而生的输送、溶解问题,此模型并没有支持,但基于质量不灭理论,这些物质将会被土沙吸收并且随之沉积于河道中。

3.8 蓄水(水塘、水库)汇流演算

蓄水(水塘、水库)汇流演算遵循水量平衡方程

表 1 SWAT 模型所需参数即可能获得途径

数据类别	所需参数	可能获得途径
气象水文	最高气温、最低气温、降雨量、太阳辐射、风速、相对湿度(日)	气象局气象观测站
地形	流域面积、流域平均坡度、坡向、坡长、高程	DEM、地形图
河川	河道长度、坡度、河宽、水深、最高点高程、最低点高程	DEM、地形图、实地实测、河川局
土壤	土壤类型空间分布、土壤物理性质、土壤化学性质	土壤分布图、环境保护局、研究单位实测
土地利用	土地利用类型与空间分布	遥测影像、航空照片
农业管理	作物轮作时序、灌溉方式、施肥方式、作物种类	实地调查、农业局

4 SWAT 模型之应用

4.1 SWAT 应用概况

SWAT 模型的模拟结果于国际上已经获得许多专家学者的肯定,应用研究领域包含径流模拟、土壤冲蚀模拟、河川泥沙量模拟、营养元素运移模拟、农化物运移模拟、非点源污染控制模拟、农业管理与土地利用等项目。美国环保署(USEPA)在计算每日最大负荷量项目,更是将 SWAT 模型列为首选,并已将其集成到其开发的 BASINS 模型中,显示 SWAT 模型具一定的可信度。应用 SWAT 模型进行研究并获得良好可靠之结果的案例相当多。Arnold 等<sup>[2]</sup>利用 SWAT 模型和数值滤波技术分别模

式,SWAT 模型对于计算出流量的方法,以实测出流量为主,其它水平衡式中相关参数采用模拟取得,而对于较小且无实测值之蓄水池,出流量按其一定的出流率计算。

3 SWAT 模型基础数据库建置

SWAT 基于水量平衡方程式及其它相关理论,针对所选取之研究流域在进行模拟前,必须先搜集所需的参数,其中所需参数大致可以分为气象水文、地形、土壤、土地利用、农业管理等项目,将每个项目所需之参数与可能获得途径简列于表 1。由于所需参数甚多,为能更方便地建立流域基础数据库,SWAT 模型结合 GIS 建立一个扩充模块(AvSWAT),此扩充模块满足了 SWAT 模型建置与管理基础数据库的需求。

经由前述参数建立 SWAT 所兼容的基础数据库后,便可以进行水文反应单元(HRUs)的划分,在 GIS 操作接口下,先以 DEM 建立流域地形参数(坡度与坡向),然后再所建置的土壤特性数据(土壤类型与土地利用)进行 HRUs 的划分,将流域区分成若干个 HRUs,每一个 HRUs 代表单一地表覆盖、单一土壤类型和管理方式的地形区块,完成 HRUs 的划分即可以进行模拟分析。

拟了密西西比河流域上游的地下水补给与基流量,比较了两模模拟精度;Eckhardt and Arnold<sup>[3]</sup>于德国中部的一个低山牧区,进行校准 SWAT 模型的自动运算法,其结果显示河川之日径流量的模拟值与实测值的效率系数达 0.7,其相关系数达 0.84;Bera and Borah<sup>[4]</sup>应用 SWAT 模型于农业和森林为主的流域进行非点源污染模拟,认为此法能发挥最有效的连续模拟能力;Chaplot<sup>[5]</sup>研究 DEM 和土壤数据对 SWAT 模型模拟的影响效应,指出 DEM 网格对于径流模拟的影响很小,而土壤分布图之比例尺对模拟结果影响较大;Romanowicz 等<sup>[6]</sup>对 SWAT 进行敏感性分析与适用性研究,认为 SWAT 模型能有效地模拟定量与定性的水文平衡项;Plus 等<sup>[7]</sup>进行

排放水之氮元素对地中海泻湖的影响已经投入 10 a, 认为结果可作为欧盟水资源管理之参考; Mulungu and Munishi<sup>[8]</sup> 于 Simiyu 流域(维多利亚湖)径流模拟与验证, 指出地表径流参数敏感度较高, 建议使用分布式雨量数据以提高精度; Schuol and Abbaspour<sup>[9]</sup> 于西非地区应用 SWAT 模拟气候, 结合以月统计资料推求每日数据, 结果获高度肯定; Lee 等<sup>[10]</sup> 于韩国汉江支流流域综合管理中纳入 SWAT 模型为径流模拟模型首选。中国地区应用 SWAT 模型进行模拟亦得到相当不错成效, 王中根等人<sup>[11]</sup> 成功将 SWAT 模型应用于西北寒带的黑河莺落峡以上流域; 杨桂莲等人<sup>[12]</sup> 以 SWAT 模型进行洛河流域之基流估算与验证, 其结果为  $R^2 = 0.76$ 、 $Ens = 0.75$ ; 陈军锋等<sup>[13]</sup> 应用 SWAT 模型于梭磨河流域之水量平衡模拟, 揭示了气候波动和地表覆盖变化对流域径流之影响; 宋艳华等<sup>[14]</sup> 在陇西黄土高原干旱半干旱地区探讨 SWAT 模型之适用性, 结果显示在于异常值状况下可获得较高的模拟精度; 庞靖鹏等人<sup>[15]</sup> 于密云水库进行非点源污染研究指出, 提高 SWAT 模型精度可藉由 IDW 法计算无测站地区之雨量, 以降低降雨空间分布的不均匀性; 范丽丽等人<sup>[16]</sup> 认为, 经调整参数后, 将 SWAT 模型应用三峡库区大宁河流域研究非点源污染是可行的。

#### 4.2 统计分析

本研究搜集欧美地区及亚洲地区有关 SWAT 模型应用研究之文献(1999 - 2008 年), 共计有 122 篇论文, 依出版年代统计结果显示, 应用 SWAT 模型进行研究的篇幅逐渐增加, 显示其模型越来越受到专家学者的肯定, 推估 2009 年应用此模型的研究的篇幅应略为增加, 如图 1 所示。

将 SWAT 模型依据其应用领域区分为气象水文、土壤特性、营养素迁移、污染物迁移、整合评估与理论分析等 6 大项, 进行统计分析, 其结果如图 2 所示, 其中以整合评估(28%)与气象水文(27%)为最多。探讨其中原因, 可能是由于水文(径流)模拟所获得的参数以实测值为基础, 故在验证模型效率时较为方便, 故为专家学者列为应用方向; 而整合评估方面, 由于 SWAT 功能强大, 在基础数据库建置较为完备的地区, 多采用多项目模拟分析, 一方面利于熟悉系统功能, 另一方面, 可作为水土资源利用的评估基础。

SWAT 模型就空间尺度上多应用于中、大尺度流域为主, 将空间尺度区分为 ( $> 100 \text{ km}^2$ 、 $100 \sim$

$1\,000 \text{ km}^2$ 、 $1\,000 \sim 10\,000 \text{ km}^2$ 、 $> 10\,000 \text{ km}^2$ ) 等 4 个区间, 加以统计分析如图 3 所示, 各区间所占比例依序为  $1\,000 \sim 10\,000 \text{ km}^2$  (36%)、 $100 \sim 1\,000 \text{ km}^2$  (26%)、 $< 100 \text{ km}^2$  (25%)、 $> 10\,000 \text{ km}^2$  (13%)。其中最最小之研究流域面积为  $1.41 \text{ km}^2$  (Bedfordshire, 英国), 最大为  $122\,000 \text{ km}^2$  (黄河上游, 中国), 虽空间尺度差异甚大, 但所得模拟结果皆良好。就时间尺度上, SWAT 模型内部的限制, 最小时间尺度应以日为单位, 据需要可模拟月、年等时间尺度。

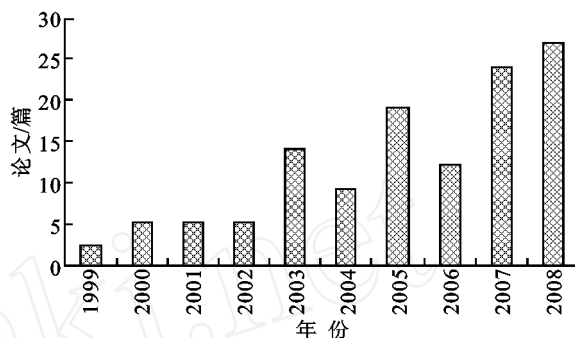


图1 相关研究论文统计(依年份)

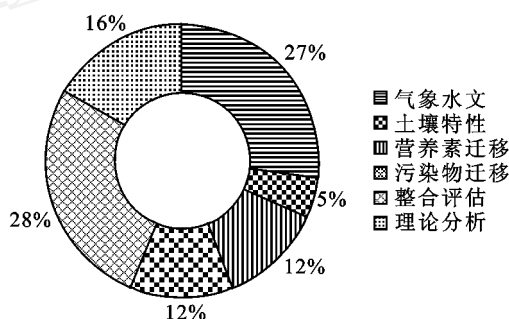


图2 相关研究论文统计(依应用领域)

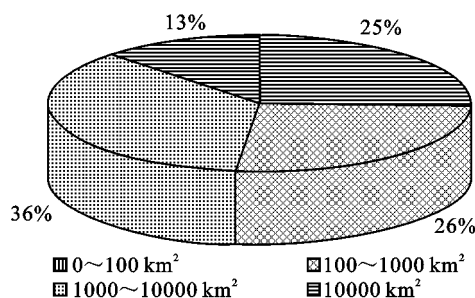


图3 相关研究论文统计(依空间尺度)

## 5 结论

(1) SWAT 模型于欧美及亚洲地区进行模拟, 皆获得不错的成果与肯定, 进而能够持续受到专家学者的重视, 综合整理得知: SWAT 模型主要适用于中、大尺度流域进行长时间模拟径流分析、泥沙流失、营养源负荷、非点源污染控制与土地利用变迁, 并且可于数据缺乏之地区进行模拟, 加上结合 GIS 作业平台及网络更新作业, 增加其便利性及适用性;

但也因为建置数据库较为费时,数据参数具有潜在误差之影响,影响模拟的准确性,且不适用模拟单一洪水事件,对于 SWAT 模型应用上有部分的限制。

(2) SWAT 模型之应用,经统计分析结果显示,篇幅增加之趋势,而就应用领域以径流模拟及水土资源整合性评价两个领域居多,其表示对于 SWAT 模型而言,在水文物理过程的模拟上已经具备相当高的精度,而从整合评价领域有增加之趋势也可以发现,随着科技不断进步,所能建立的基础数据也不断完善,因而使得专家学者能更有效地进行整合评估研究。营养物与污染物迁移方面于应用上较前两个项目较少,目前已经开始整合相关模型,改善 SWAT 模型的不足。

(3) SWAT 模型源于美国,故美国地区已经建立相当完善的基础数据供模型使用,对于其它地区而言基础数据相当缺乏,直接限制了 SWAT 模型应用及推广,而 3S 技术目前已相当成熟,未来若能藉以 3S 技术建立研究区域之基础数据,对于此模型之应用必有正面的帮助。

#### 参考文献:

- [1] Winchell M, Srinivasan R, Luzio M DI, et al. ArcSWAT 2.1 Interface for SWAT2005 User's Guide[Z]. 2008.
- [2] Arnold J G, Muttih R S, Srinivasan R, et al. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin[J]. Journal of Hydrology, 2000, 227:103-109.
- [3] Eckhardt K, Arnold J G. Automatic calibration of a distributed catchment model[J]. Journal of Hydrology, 2001, 251(1):103-109.
- [4] Bera M, Borah D K. Watershed - scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: review of mathematical bases[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2003, 46(6):1553-1566.
- [5] Chaplot V. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment and  $\text{NO}_3$  - N loads predictions[J]. Journal of Hydrology, 2005, 312:205-222.
- [6] Romanowicz A A, Vanclooster M, Rounsevell M, et al. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrization: a case study in Thyle catchment, Belgium[J]. Ecological Modelling, 2005, 187(1):27-39.
- [7] Plus M, La Jeunesse I, Bouraoui F, et al. Modelling water discharges and nitrogen inputs into a Mediterranean lagoon: Impact on the primary production[J]. Ecological Modelling, 2006, 193(1):69-89.
- [8] Mulungu D M M, Munishi S E. Simiyu river catchment parameterization using SWAT model[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2007, 32:1032-1039.
- [9] Schuol J, Abbaspour K C. Using monthly weather statistics to generate daily data in a SWAT model application to West Africa[J]. Ecological Modelling, 2006, 201(3):301-311.
- [10] Lee K S, Chung E S, Kim Y O, et al. Integrated watershed management for mitigating streamflow depletion in an urbanized watershed in Korea[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2008, 33:382-394.
- [11] 王中根,刘昌明,黄友波,等. SWAT 模型的原理、结构及应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(1):79-86.
- [12] 杨桂莲,郝芳华,刘昌明,等. 基于 SWAT 模型的基流估算及评价:以洛河流域为例[J]. 地理科学进展, 2003, 22(5):463-471.
- [13] 陈军锋,陈秀万. SWAT 模型的水量平衡及其在梭磨河流域的应用[J]. 北京大学学报, 2004, 40(2):265-270.
- [14] 宋艳华,马金辉. SWAT 模型在陇西黄土高原地区的适用性研究[J]. 干旱区地理, 2007, 30(6):933-938.
- [15] 庞靖鹏,刘昌明,徐宗学,等. 基于 SWAT 模型的径流与土壤侵蚀过程模拟[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6):89-95.
- [16] 范丽丽,沈珍瑶,刘瑞民,等. 基于 SWAT 模型的大宁河流域非点源污染空间特性研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(4):133-137.