

# SWAT 模型运行结构与组织研究

康杰伟, 李 硕

(南京师范大学 地理信息科学江苏省重点实验室, 南京 210097)

摘要: SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是美国农业部开发的具有物理基础的分布式非点源模型系统,可以模拟流域尺度的多种地理过程,如产水、产沙、养分和农药等的迁移与转化,并预测不同的管理措施对流域过程的影响。SWAT模型模拟内容多,程序结构复杂,导致集成应用和模型修改的困难。本文在模型结构剖析的基础上讨论了 SWAT 模型的内部运行结构,列举实例给出了运行控制文件的写法。

关键词: SWAT 模型; 分布式水文模型; 运行结构; 配置文件

## 1 引言

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是美国农业部(USDA)下属的农业研究所(ARS Agricultural Research Service)开发的流域尺度、连续时段、基于过程的综合模型。它可以模拟地表径流、入渗、侧流、地下水流、回流、融雪径流、土壤温度、土壤湿度、蒸散发、产沙、输沙、作物生长、养分(氮、磷)流失、流域水质、农药/杀虫剂等多种过程以及各种农业管理措施(耕作、灌溉、施肥、收割、用水调度等)对这些过程的影响。SWAT模型已经与GIS软件ArcView, GRASS, IDRISI进行了不同程度的集成,为遥感和GIS技术集成运用到流域模拟提供了极大的便利,并且被集成到美国环保署(EPA)开发的BASINS(Better Assessment Science Integration Point and Nonpoint Sources)模型系统中,成为EPA非点源污染控制研究的主要模型系统<sup>[1-5]</sup>。国外利用SWAT模型已有较多的成功案例,如:印度Nagwan的产污重点区域评价<sup>[6]</sup>;芬兰Vantaanjoki流域进行的点源和非点源污染负荷迁移过程的模拟<sup>[7]</sup>;在美国缅因州海湾近海流域评价(Coastal Watershed Assessment Of Gulf Of Maine)项目中,SWAT模型被用来模拟缅因州海湾和得克萨斯州Bosque River的点源和农业非点源污染状况,并对污染控制提供决策支持<sup>[8,9]</sup>。

由于SWAT模型功能强大以及较高的模拟精度,在国内也得到了广泛应用<sup>[10-12]</sup>,诸多的科研和管

理单位都将其作为流域研究和管理的基本工具进行集成<sup>[13-15]</sup>。由于模型结构复杂,空间运行单元的多层次组织,给模型的分解和重构带来一定的困难,本文在SWAT模型结构剖析的基础上,对于SWAT模型结构方法进行了分析,并根据实例给出了运行配置文件的写法。

## 2 SWAT模型中流域地理过程组织

水文循环是最主要的流域过程,也是流域内部过程的主要驱动力。SWAT模拟的流域水文过程可以分为陆相水文循环和河道水文循环两部分,前者控制流域内的水、沙、以及环境化学物质的产出过程(输入河道量),后者描述水、沙以及环境化学物质在河道和水体(湖泊、水库等)中的输移过程<sup>[16]</sup>。图1为陆相水文过程示意图,可以看到SWAT模型可以模拟地表、地下土壤层、浅蓄水层和深蓄水层,以及池塘和水库中的多种地理过程。在实际程序实现中,模型也是按照其中的过程来实现的,图1中每一个图框都代表了一个或一组相关的模块来描述特定过程,不同的子过程(模块)通过过程连接理论来集成,在程序化过程中,则是通过一个总体的配置文件来动态实现模块的调用。河道传输也是按照过程以模块进行组织,可以模拟传输过程中的河道渗漏损失、河道侵蚀以及内部的水质变化。“过程模块化,连接命令化”是SWAT模型结构的显著特点,是将庞大系统有机组织和高效率运行的保证。

收稿日期: 2007-02-15; 修回日期: 2007-06-01.

基金项目: 国家自然科学基金委员会项目资助(40501054)。

作者简介: 康杰伟(1982-),男,硕士研究生,主要研究方向为流域模拟和模型集成。E-mail:kjw247@163.com

图 1 SWAT 模型水文循环  
Fig.1 Hydrologic cycle of SWAT

### 3 分布式模拟的空间单元划分和运行文件组织

SWAT 是一个分布式水文模型, 通过空间离散化将整个流域划分成为地理因素和过程相对均一的单元, 通过参数化过程提取和组织每个单元的运行文件。SWAT 模型运行时可以采用格网离散化、坡面离散化或子流域离散化。离散化方案的选择需要根据不同的研究目标, 研究区域的空间范围、输入数据的空间分辨率等因素分别采用或组合使用。针对较大的复杂流域, 一般多采用流域-子流域-水

文响应单元的离散方案, 首先将整个流域依据地形划分为多个子流域; 然后在每个子流域内部, 通过土地利用图和数字土壤图进行叠加分析, 生成多个统计意义上(面积)由单一土壤、植被组合而成的水文响应单元<sup>[17]</sup>。

无论采用何种空间离散方法, 首先要解决的问题是按照不同空间离散单元来组织模型运行所需要的土壤、地形、气象、土地利用等输入文件。在 SWAT 2005 版本中, 对应流域-子流域-水文响应单元离散方法的输入文件如表 1 所示<sup>[18,19]</sup>。不同类型(土壤, 气象, 土地利用, 水质等)的文件分别按照一定的空间单元(流域、子流域, 水文响应单元)进行

组织。文件命名采用 9 位代码,前 5 位为子流域编号,后 4 位为水文响应单元编号,如:000610012.sdl 表示第 61 个子流域中的第 12 水文响应单元的土壤输入文件。对于一些具有特殊性质的空间实体比如水库、点源,则单独为其建立输入文件。

表 1 SWAT 模型输入文件汇总  
Tab.1 Input files of SWAT

4 SWAT 运行结构组织

SWAT 模型系统庞大,其 2000 版本已发展为由 701 个数学方程,1013 个中间变量组成的模型体系;结构复杂,分为水文、气象、泥沙、土壤温度、作物生长、养分、农药/杀虫剂和农业管理 8 个组件构成;分布式模拟时,流域需要划分为多个子流域和水文响应单元,同时需要多种地理数据,数据量随研究区域的增大而变得十分庞大。这些因素都决定了模型的运行必须按照特定的组织和步骤进行。SWAT 模型采用模块化的结构方法,模拟的各环节都有对应的子功能模块,模型运行采用命令行代码结构来控制相关模块的调用,命令行的控制由一个包含命令和代码的特定格式配置文件完成。

4.1 配置文件命令说明

在 SWAT 2005 版中,配置文件包含 15 个命令,分别完成不同模块调用和结果输出(表 2)<sup>[18-19]</sup>。

表 2 配置文件命令汇总  
Tab.2 The commands of watershed configuration file

在这些命令中,常用的有:subbaisn、route、add 和 finish。subbsin 是完成陆相水文模拟,控制水、沙等到河道的输入量,route 是河网中水、泥沙等物质

的传输过程, add 是把上下游子流域的输入按照特定的空间拓扑关系(流入、流出)进行汇总, finish 是模拟终止命令。

4.2 运行配置文件的书写和模型运行

配置文件是 SWAT 模型运行控制的中枢, 配置文件的命令和顺序结构决定了模型的运行过程和相关的参数调用。下面我们假设一个研究区域内部被分为 3 个子流域, 其中子流域 1 中有一个水库(图 2), 详细介绍模拟的过程和配置文件的书写。

图 2 子流域划分图  
Fig.2 Subwatershed delineation

4.2.1 基本模拟的配置文件结构

基本模拟指针对较为简单的流域, 假设流域内部不包含水库, 点源输入, 也不需要流域分块处理, 配置文件只包含一些必须的命令, 包括 subbasin、route、add、finish 等, 结构较为简单。其配置文件如图 3 所示。

(1) 陆相水文循环过程模拟(subbasin 命令): 计算和存储子流域内部对每个水文响应单元汇总的水、沙、化学物质等的产出量。

subbasin 命令有 4 个参数, 分两行书写。第一行第一列表示命令代码。第二列表示模拟结果的存储位置。每个模拟步骤的结果都保存在一个特定的位置, 因此该参数不可重复, 在配置文件中模拟结果存储位置参数从 1 开始顺次增加, 表示相应的存储数组位置。第三列表示子流域编号。第二行表示对应的子流域输入文件(.sub)。

(2) 模拟河道传输过程的演算和汇总(route 和 add 命令): 模拟水、沙、化学物质等在河道中的输移过程并汇总。上游子流域的模拟输出当作下游子流域的模拟输入, 因此 route 命令的必须遵循子流域的空间位置顺序。可以根据出口与入口的位置把子流域分成三类: 顶级子流域, 即河道最上游所在子

图 3 基本模拟配置文件示例  
Fig.3 Simple watershed configuration file

流域; 内部子流域, 出口入口处均连接其他子流域; 出口子流域, 出口为整个流域出口的子流域。在本例中, 子流域 1 和 2 为顶级子流域, 3 为出口子流域, 没有内部子流域。在河道演算过程中, 必须先模拟顶级子流域, 然后是内部子流域, 最后模拟出口子流域。

route 命令有 7 个参数, 分两行书写。第一行第一列表示命令代码。第二列表示模拟结果存储位置。第三列表示主河道编号, 与子流域编号相同。第四列表示输入参数位置。route 命令模拟子流域内部的物质输移过程, 如果该子流域是顶级子流域则读取 subbasin 命令的模拟结果, 如果该子流域是内部子流域或出口子流域则读取 subbasin 命令和所有上游子流域 route 命令模拟的汇总(add 命令的模拟结果)。在本例中, 子流域 1 和 2 为顶级子流域, 所以读取位于 #1、#2 的 subbasin 命令模拟结果; 子流域 3 为出口子流域, 所以读取位于 #7 的 add 命令模拟结果。第六列表示地表径流(overland flow)百分比, 表示采用坡面离散时坡面之间传输率, 在子流域离散中, 主要过程为河道传输, 该值为 0。因为模拟过程中认为所有的径流都是通过河道流入下级子流域的。Route 命令的第二行为主河道输入文件(.rte)和河道水质输入文件(.swq)。

在每个非出口子流域的 route 命令后都有一个 add 命令, 用来把模拟结果(水、沙、化学物质等的流出量)汇总作为下游子流域的输入。add 命令有四个参数。第一列表示命令编码。第二列表示汇总结果存储位置。第三第四列表示需要汇总的两个输入。

(3) 模拟结束(finish 命令): finish 命令结束模拟。

#### 4.2.2 复杂、较大流域模拟的配置文件结构

复杂流域表示面积较大, 流域内部包含点源(如: 工厂排污等), 水库、湖泊等水体的流域。假设图 2 所示研究区子流域 1 中有一个水库, 每个子流域内部包含一个点源。其配置文件如图 4 所示。

(1) 较大流域分块处理(save 命令): 对大型流域, 由于面积较大, 导致子流域数目增多, 需要把整个流域分成若干个具有水文联系的子块来分别模拟, 再进行汇总演算。save 命令可以对每个流域子块中子流域模拟结果进行汇总和存储, 并作为下游子块的输入值。SWAT 模型允许出现多个流域子块, 但不得超过 10 个。本例中, 研究区为一个大型流域其中的一个上游子块, 其模拟结果作为下游子

块的输入值。图 4 中 save 命令有 6 个参数, 分两行书写。第一行第一列表示命令编码。第二列表示存储位置。第三列表示输出文件号码(号码唯一, 从 1 到 10 顺次取值)。第四列表示输出频率(按天或按小时, 缺省值为按天输出)。第五列表示输出数据格式(ASCII 格式或 SWAT/ArcView 格式)。第二行为输出文件名(wshed.eve)。

(2) 水库演算(routres 命令): 在 SWAT 中, 水体的模拟主要包括湖泊和水库过程, routres 命令用来模拟这些水体中水、沙、化学物质等的输移过程。模拟过程中, 水库的个数不受限制。在空间预处理阶段, 可以通过自动或手工方法在子流域中添加水库, 水库空间关系通过所属的子流域加以确定。图 4 中 routres 命令有 7 个参数, 分两行书写。第一行第一列表示命令编码。第二列表示模拟结果存储位置。第三列表示水库编号。第四列表示流入水库的上游河道模拟结果存储位置。第五列表示与水库相关的子流域编号。第二行为水库输入文件(lakefork.res)和水库水质输入文件(lakefork.lwq)(图 4)。

(3) 读取点源或上游流域子块数据(recday, recmon, recyear, recconst 命令): recday, recmon, recyear, recconst 命令分别读取日、月、年和年平均的点源输入或模拟文件数据。在本例中, 假设每个子流域都有一个点源(如: 工厂排污点), 图 4 中 recday 包含 4 个参数, 分两行书写。第一行第一列表示命令编码。第二列表示读取结果存储位置。第三列表示读取文件的编号(该编号必须唯一)。第二行为读取的文件名(.pnt 或分块.eve 文件)。读取点源数据后, 用 add 命令把读取数据与原有数据累加。

(4) 保存指定位置的模拟结果(saveconc 命令): 模拟完成后用户需要把径流量、产沙、养分和化学物质等的模拟值与实测值进行比较, saveconc 命令就是用来保存河网上指定位置的模拟数据。配置文件中最多可以有 50 个 saveconc 命令。本例中, 假设流域出口处有一个观测站, 我们需要把模拟的径流数据与实测值进行比较。图 4 中 saveconc 命令有 5 个参数, 分两行书写。第一行第一列表示命令编码。第二行表示保存数据的位置。第三行表示文件编号, 在模拟过程中可以应用多个 saveconc 命令, 因此文件编号必须唯一, 而且从 1 开始顺次增加。第四列表示输出频率(按天或按小时)。第二行为输出文件名(.out)。



图 4 复杂流域配置文件结构实例  
Fig.4 Complex watershed configuration file

5 结论

SWAT 模型从模块化到运行结构的多级层次管理使得复杂的模拟过程变得有严谨有序。配置文件的引入更是 SWAT 模型调用模式的精彩之处,使用户能站在全局的角度看模型运行过程。这种模式也使得模型的改进和集成工作变得相对简单,只需

要改动特定的功能模块就可以完成模型升级。当利用 SWAT 模型进行特定应用时候,只要准备相应的输入文件和特定的配置程序就可以完成某一功能的计算。这个特点对其他大型水文模型的开发和集成应用有重要的参考价值。

参考文献  
[1] Sidney Abel, James Hetrick, James Lin, Ronald Parker,



- Jon Peckenpaugh. Model Evaluation Process, 1998, US-DA-EPA. <http://www.epa.gov/scipoly/sap/1998/july/1part5.pdf>
- [2] J G Aronld, R S Muttiah, R Srinivasan, P M Allen. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. *Journal of Hydrology*, 2000, 227: 21~40.
- [3] T W Fitz-Hugh, D S Mackay. Impact of subwatershed partitioning on modeled source- and transport- limited sediment yields in an agricultural nonpoint source pollution model. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 56(2): 137~143.
- [4] S L Neitsch. Differences between SWAT99.2 and SWAT 2000. August, 2001.
- [5] USEPA. BASINS Version3.1 Users' Manual. EPA- 823- C-04- 004, August 2004.
- [6] M P Tripathi, R K Panda, N S Raghuvanshi. Identification and prioritisation of critical sub- watersheds for soil conservation management using the SWAT model. *Biosystems Engineering*, 2003, 85 (3): 365~379.
- [7] B Grizzetti, F Bouraoui, K Granlund, et al. Modelling diffuse emission and retention of nutrients in the Vantaanjoki watershed (Finland) using the SWAT model. *Ecological Modelling* 169, 2003, 25~38.
- [8] Percy Pacheco, Dan Farrow, Ranjan Muttiah, Raghavan Srinivasan. Development of Land-based Pollution Sources Inventory for the Gulf of Maine Regional Watershed. 1996, NOAA. <http://www.brc.tam.us.edu/srin/projects/noaa.html>
- [9] H George Ward, Jr, Jennifer Benaman. Models for TMDL application in Texas watercourses: Screening and model review. 1999, CRWR. <http://www.cwrw.utexas.edu/reports/pdf/1999/rpt99- 7.pdf>
- [10] 李 硕. GIS和遥感辅助下流域模拟的空间参数化与离散化研究与应用. 南京: 南京师范大学地理科学学院, 2002.
- [11] 宋艳华. SWAT 辅助下的径流模拟与生态恢复水文响应研究—以陇西黄土高原华家岭南河流域为例. 兰州: 兰州大学资源环境学院, 2006.
- [12] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究. *地理科学进展*, 2003, 22(1): 79~86.
- [13] 张雪松, 郝芳华, 杨志峰. 基于 SWAT 模型的中尺度流域产流产沙模拟研究. *水土保持研究*, 2003, 10(4): 38~42.
- [14] 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. *地理科学进展*, 2004, 22(5): 463~471.
- [15] 胡远安, 程声通, 贾海峰. 非点源模型中的水文模拟—以 SWAT 模型在芦溪小流域的应用为例. *环境科学研究*, 2003, 16(5): 30~36.
- [16] S L Neitsch, J G Arnold, J R Kiniry, J R Williams. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version, 2005.
- [17] 李 硕, 孙 波, 曾志远 等. 遥感、GIS辅助下流域空间离散化方法研究. *土壤学报*, 2004, 41(2): 183~190.
- [18] S L Neitsch, J G Arnold, R Srinivasan, J R Williams. Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation Version, 2005.
- [19] S L Neitsch. Differences between SWAT 2000 and SWAT 2005.

## Study on the Running Configuration of SWAT Model

KANG Jiwei, LI Shuo

(Jiangsu Province Key Laboratory of Geographical Information Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

**Abstract:** SWAT (Soil and Water Assessment Tool) is a physically based, distributed non- point pollution model system developed by USDA. It can be used to model multiple geographic processes as well as predict the impacts of different management practices on water, sediment, agricultural chemical yields and pesticide fate in a river basin scale. Due to complex structure and too many components, SWAT model is difficult to modify or to be integratively applied with other models. In this paper, the inner running structure of SWAT was discussed based on the analysis of its components, and the core configuration file using for running model was presented with an example.

**Key words:** SWAT; distributed hydrological model; running structure; configuration file