

基于 SWAT 模型的径流与土壤侵蚀过程模拟

庞靖鹏<sup>1</sup>,刘昌明<sup>1,2</sup>,徐宗学<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学 水科学研究院 水沙科学教育部重点实验室,北京 100875;  
2. 中国科学院 地理科学与资源研究所,北京 100101)

**摘要:**将可表征土地利用变化对水文响应影响的分布式水文模型 SWAT 应用于密云水库潮河子流域,对模型的敏感性进行了分析,并采用 1986 - 1991 年下会水文站数据对其径流量和泥沙负荷进行了率定和验证,模型评估结果表明该模型对径流的模拟效果非常好,对泥沙的模拟效果较好。通过计算 34 个子流域内的侵蚀模数,对流域内的土壤侵蚀强度进行了分级,并分析了不同土地利用方式对产沙的影响。结果表明,流域内的土壤侵蚀主要发生在农田,为保障密云水库的水质应对其采取有效的水土保持措施。  
**关键词:**SWAT;敏感性分析;率定;验证;土壤侵蚀  
**中图分类号:**S157.1      **文献标识码:**A      **文章编号:**1005-3409(2007)06-0088-06

Streamflow and Soil Erosion Simulation Based on SWAT Model

PANGJing-peng<sup>1</sup>,LIU Chang-ming<sup>1,2</sup>,XU Zong-xue<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Institute of Geographic Sciences & Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** SWAT model is a kind of distributed hydrologic model with the ability to evaluate the effects of landuse change on hydrologic response. This model was applied in Cao River catchment of Miyun reservoir basin. First, the sensitive parameters were identified through sensitive analysis. Then, the calibration and validation for flow and sediment were performed from 1986 to 1991 at Xiahui gaging station. The results of model evaluation show that the streamflow was simulated excellently, and sediment is also well simulated. Finally, the soil erosion modulus were calculated in 34 subbasins delineated by the SWAT, and the effects of different landuse types on sediment loads were analyzed. This study shows that the soil erosion mainly happened in agriculture land in the Cao River catchment, and effective measures must be taken on them to ensure the water quality in the Miyun reservoir.  
**Key words:** SWAT; sensitivity analysis; calibration; validation; soil erosion

1 引言

非点源污染威胁着农业可持续发展并被认为是地表和地下饮用水源的最大威胁,然而农业生产活动是全球非点源污染最主要的原因,全世界有 30 % ~ 50 % 的地表已经受到非点源污染物的影响<sup>[1]</sup>。我国是农业大国,由于我国农业管理的集约化水平很低,由农业引起的非点源污染情况非常严重。全国范围内很多水域中非点源污染比例超过点源污染,非点源污染已上升为威胁饮用水源的主要原因<sup>[2]</sup>。河流中 N、P 等污染物主要以溶解态和吸附态的形态进行迁移和转化,水流和泥沙是其运移的主要载体。因此确定流域中水土流失严重的区域,对其采用切实有效的治理措施,将会极大地削减排放到水体中的非点源负荷,从而达到改善水质的效果。同时把有限的财力集中在效果最为显著的区域,可以加快水资源的恢复过程并节省时间和资金,确保可用的资源发挥最大效益<sup>[3]</sup>。特别是对中国这样一个发展中国家,没有足够的资金在整个区域来控制非点源污染,因而在关键区进行非点源污染防治尤为重要<sup>[4]</sup>。

密云水库是目前北京市惟一的生活饮用水水源地,然而研究发现近年来其水体向富营养化发展的趋势明显<sup>[5-6]</sup>,在密云水库周边点源污染得到初步控制的情况下,非点源污染已经成为密云水库水质污染的重要原因<sup>[7]</sup>,如果不加以研究与控制,很有可能成为第二个官厅水库<sup>[6]</sup>。因此,必须采取有效措施,改善其水质,确保北京市的饮水安全和社会经济的可持续发展。鲍全盛等<sup>[7]</sup>通过假定枯水期非点源影响很小,而点源污染负荷恒定不变,对密云水库非点源污染负荷进行了估算,并分析了流域内非点源污染的时空分布特征。苏保林等<sup>[8-9]</sup>应用 SWAT 模型模拟了潮、白河入库非点源污染负荷年度变化,并采用归一化指数法对非点源污染的关键区进行了分级。

从总体上说,由于数据限制、模型的选取、评价方法以及采取的技术路线差异等因素,模拟的精度亟待进一步提高。本文以密云水库潮河子流域为对象,采用 SWAT 模型对其 1989 - 1991 年的径流量和泥沙量进行了模拟,对其土壤侵蚀强度进行了分级,并分析了不同土地利用方式对河道中泥

收稿日期:2006-11-30  
基金项目:北京市科技计划项目(D0704004040191)  
作者简介:庞靖鹏(1976 - ),男,山东青岛人,博士研究生,主要从事水资源与水环境等研究。

沙负荷的贡献。

2 材料和方法

2.1 模型概述

SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 模型<sup>[10-11]</sup> , 由美国农业部农业研究中心(USDA-ARS) 于 20 世纪 90 年代初开发。它由 8 个部分组成 : 水文、气象、泥沙、土壤温度、作物生长、营养物质和农业化学品。SWAT 模型自开发以来很快在水资源和环境领域中得到广泛承认和普及。Bera 等<sup>[12]</sup> 称之为在农业和森林为主的流域具有连续模拟能力的最有前途的非点源模型。SWAT 模型开发的目的是预测大尺度、无测站流域水、泥沙和农药管理的影响, 它具备<sup>[10]</sup> : 不需要率定(在无测站站点率定是不可能的) ; 对大流域采用易获得的输入数据 ; 对大流域的计算效率高 ; 连续模拟, 能够模拟长期管理变化的影响。Romanowicz 等<sup>[13]</sup> 认为 SWAT 模型还具有 : 综合的水文模型, 模拟定量和定性的水文平衡项 ; 以 ArcView 为界面, 便于空间分布信息的预处理和后处理 ; 可以模拟分布式参数变化所带来的影响 ; 模型可以直接下载, 软件的开发者和用户通过邮件和网上讨论来对其进行改进和提高。

SWAT 模型在进行模拟时, 首先根据 DEM 把流域划分为一定数目的子流域, 子流域划分的大小, 可以通过定义形成河流所需要的最小集水区面积来调整, 还可以通过增减子流域出口进行进一步调整。然后在每一个子流域内再划分为水文响应单元 (Hydrologic Response Unit, HRU)。HRU 是同一个子流域内有着相同的土地利用类型和土壤类型的区域。子流域内划分 HRU 有 2 种方式, 一种方式是选择一个面积最大的土地利用和土壤类型的组合作为该子流域的代表, 即一个子流域就是一个 HRU ; 另一方式是把子流域划分为多个不同土地利用和土壤类型的组合, 即多个 HRUs。本文采用第二种 HRU 划分方式, 土地利用和土壤面积的最小阈值比均定为 10 % , 如果子流域中某种土地利用和土壤类型的面积比小于该阈值, 则在模拟中不予考虑, 剩下的土地利用和土壤类型的面积重新按比例计算, 以保证整个子流域的面积得到 100 % 的模拟。本研究共划分了 34 个子流域, 共计 219 个 HRUs。每一个 HRU 内的水平衡是基于降水、地表径流、蒸散、壤中流、渗透、地下水回流和河道运移损失来计算的。地表径流估算采用的是 SCS 径流曲线数法<sup>[14]</sup>。渗透模块采用存储演算方法, 并结合裂隙流模型来预测通过每一个土壤层的流量, 一旦水渗透到根区底层以下则成为地下水或产生回流<sup>[10]</sup>。在土壤剖面 (0 - 2 m) 中壤中流的计算与渗透同时进行。每一层土壤中的壤中流采用动力储库模型<sup>[15]</sup>进行预测。地下水流对径流的贡献, 即回流通过建立浅层含水层储库来模拟<sup>[16]</sup>。河道中流量演算采用变动存储系数法<sup>[17]</sup>或 Muskingum 演算法<sup>[18]</sup>, 本研究采用前者。SWAT 模型提供了 3 种估算潜在蒸散量的方法 —— Hargreaves<sup>[19]</sup>, Priestley-Taylor<sup>[20]</sup> 和 Penman-Monteith<sup>[21]</sup>, 本研究选用第一种方法。每一个子流域内侵蚀和泥沙量的估算采用改进的 USLE 方程 (MUSLE)<sup>[22]</sup>, 河道内泥沙演算采用改进的 Bagnold 泥沙运移方程<sup>[23]</sup>。

2.2 流域概况

密云水库流域是指潮白河流域密云水库所控制的部分,

它位于北纬 40°19' - 41°38' 和东经 115°25' - 117°35' 之间, 跨越河北省和北京市, 流域面积为 15 788 km<sup>2</sup>。它主要分为两大子流域, 即潮河子流域和白河子流域。本研究以潮河子流域为研究对象, 其集水区面积约为 6 175 km<sup>2</sup>, 见图 1。流域内地形西北高、东南低, 地貌以山地为主, 平均海拔高度约为 766 m。流域内平均降水量在 500 mm 左右, 受温带大陆性季风气候特征所决定, 降水的季节变化明显, 6 - 8 月的降水量占全年降水量的 65 % ~ 75 %, 所以降水多以暴雨形式出现, 降雨强度大、侵蚀力强, 为流域非点源污染的发生提供了动力。流域内的土壤主要以褐土分布最广, 其面积约占流域面积的 40.8 %, 其次为棕壤, 其面积约占流域面积的 28.2 %, 此外还有潮土和淋溶褐土等分布。模型率定和验证采用下会站观测数据, 其集水区面积为 5 340 km<sup>2</sup>。

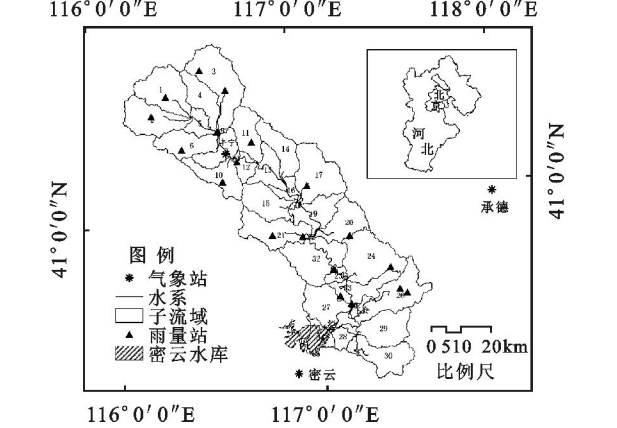


图 1 潮河子流域地理位置示意

2.3 模型输入

本研究原始空间数据的分辨率和格式见表 1, 数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心。所有输入数据均采用 Albers 等积圆锥投影。由于受 DEM 精度及人为因素影响, 由 DEM 形成的河网可能与实际情况会有偏差, 因此采用 1 : 25 万水系图进行校正。

表 1 空间数据分辨率、格式

数据	比例尺	格式
DEM	1 : 25 万	ESRI grid
土地利用图	1 : 10 万	Arc/ Info coverage
土壤类型图	1 : 100 万	Arc/ Info coverage
水系图	1 : 25 万	Arc/ Info coverage

构建 SWAT 模型所需的气象数据和水文数据见表 2。气象数据主要包括降雨量、日平均气温以及太阳辐射量等, 这些参数对水文过程、作物生长和养分降解、转化等都具有重要影响。特别是连续的日降雨量、日气温等气象资料对模型的模拟效果影响尤为显著。然而受监测站点数目所限和监测数据缺失等原因以及为了模拟气候变化对地表水文过程和水体水质的影响, 有必要构建一种用于模拟给定气候条件下的随机天气模型, 即天气发生器。SWAT 模型内建 WXGEN 天气发生器<sup>[24]</sup>, 其作用主要有两个<sup>[25]</sup> : 一是用于生成气候数据, 另一个是自动填补缺失的数据。构建该天气发生器的主要输入数据有日降水量、日最高和最低气温、日太阳辐射量、日露点温度和日平均风速等, 把这些数据经过统计分析后计算得出不同站点的多月平均气候特征。本研究构建天气发生器采用距离流域最近的承德、丰宁和密云 3

个气象站点数据。对于日降水量、日最高和最低气温、日平均风速这 4 个数据,这 3 个站点都有观测;日太阳辐射量通过建立日照时数和太阳辐射之间的关系近似得出;露点温度采用 Liersch 开发的露点温度计算程序<sup>[26]</sup>,由日气温值和平均湿度计算得出。

模型中用到的土壤数据主要包括两大类:物理属性数据和化学属性数据。土壤的物理属性决定土壤剖面中水和气的运动状况,并对水文响应单元(HRU s)中的水循环起着重

要作用。物理属性主要包括土层厚度、密度、有机碳、可利用有效水量和土壤饱和水力传导率等。一般来说,国内可获得的数据难以满足构建 SWAT 土壤库的要求。为此,土壤可利用有效水量、饱和水力传导度等参数采用由美国农业部开发的土壤水特性计算程序 SPAW<sup>[27-28]</sup>进行估算。估算结果可以初步反映出这些土壤参数的空间分布特征,最终结果还需要在模型率定过程中进行调整。

表 2 气象和水文数据信息

数据	数据项	格式	站点及位置	来源
气象数据	降水量、最高和最低气温、太阳辐射、日照百分比、风速和相对湿度	Dbase	承德 N40 58 E117 56	国家气象局 1975 - 2004 年
			丰宁 N41 13 E116 38	
			密云 N40 23 E116 52	
水文数据	流量和输沙率	文本	下会 N40 37 E117 10	水文统计年鉴

2.4 模型评估标准

评定模型效率的标准很多,目前国际上尚未对统一的模型评估标准达成共识。Van Liew 等<sup>[29]</sup>认为没有一种效率标准能够理想地评价模型性能,每一种标准都有其优缺点,必须在模型的率定和验证时加以考虑,推荐结合不同的效率标准。本文采用普遍接收的比较水文过程线、Nash-Sutcliffe 效率  $E_{NS}$  (见公式 1)和确定性系数  $r^2$  (见公式 2)3 种方法作为衡量模型效率的标准。根据以往经验<sup>[30]</sup>,当  $E_{NS} > 0.75$  时,可以认为模拟效果好; $0.36 \leq E_{NS} \leq 0.75$  时模拟效果令人满意; $E_{NS} < 0.36$  时,模拟效果不好。需要注意的是当采用  $r^2$  时应该把实测值与模拟值拟和曲线的斜率  $b$  和  $r^2$  一起来讨论。一种比较容易操作的方法是采用  $r^2$  的权重形式  $w r^2$ <sup>[31]</sup> (见公式 3)。

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \tag{1}$$

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \tag{2}$$

$$w r^2 = \frac{|b| \cdot r^2, b \leq 1}{|b|^{-1} \cdot r^2, b > 1} \tag{3}$$

式中:  $O_i$  ——观测值;  $\bar{O}$  ——观测平均值;  $P_i$  ——预测值;  $\bar{P}$  ——预测平均值;  $w$  ——权重因子;  $b$  ——数据点拟合线性回归的斜率。

表 3 模型率定所用参数

参数	模拟过程	描述	取值范围	实际取值
CN2 <sup>1,1</sup>	地表径流	径流曲线数	0 ~ 150	默认
ALPHA _BF <sup>2,3</sup>	地下水	基流 ALPHA 系数	0 ~ 1	0.0257
ESCO <sup>3,5</sup>	蒸散	土壤蒸发补偿系数	0.01 ~ 1	0.5
SOL _AWC <sup>4,4</sup>	土壤水	土壤层可利用有效水	0 ~ 1	+ 0.04
SOL _Z <sup>5,6</sup>	土壤水	土壤层深度	0 ~ 3000	默认
CANMX <sup>6,13</sup>	蒸散	最大叶冠指数	0 ~ 10	默认
SLOPE <sup>7,9</sup>	壤中流	HRU 平均坡度	0.0001 ~ 0.6	默认
SURLAG <sup>8,7</sup>	地表径流	地表径流滞后系数	0 ~ 10	1.0
SOL _K <sup>9,15</sup>	土壤水	土壤饱和水力传导度	0 ~ 100	- 50 %
CN _K2 <sup>10,8</sup>	壤中流	主河道河床有效的水力传导度	- 0.01 ~ 150	4.0
SPCON <sup>35,2</sup>	泥沙	挟沙能力线性指数	0.0001 ~ 0.01	0.1
BIOMIX <sup>12,10</sup>	营养物	生物混合效率	0 ~ 1	0.01
				农业 0.4
USLE _C <sup>21,14</sup>	泥沙	USLE 植物覆盖或管理因子	0.003 ~ 0.45	林地 0.003
				草地 0.009
SPEXP <sup>35,17</sup>	泥沙	挟沙能力幂指数	1 ~ 2	2
PRF	泥沙	泥沙演算的洪峰速率调整因子	0 ~ 20	5
RSDCO	泥沙	残余物分解因子	0.001 ~ 1	0.01

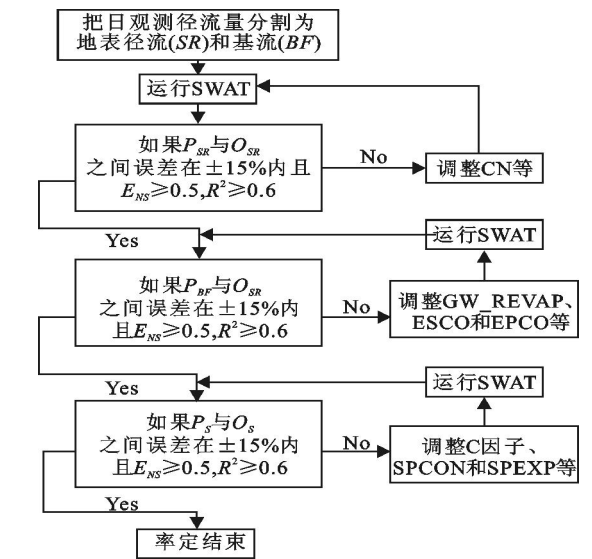
注:参数的 2 个上标,分别为径流和泥沙在敏感性分析中的排序。

2.5 模型敏感性分析、率定和验证

2.5.1 参数敏感性分析

本研究中对径流的敏感性分析采用模型自带的模块,该模块从 SWAT 2003 版本被添加到模型中来,它采用 Morris<sup>[32]</sup>提出的 LH-OAT 法进行参数的敏感性分析。该方法结合了 One-factor-At-a-Time(OAT)分析法与 Latin Hypercube 采样<sup>[33]</sup>技术,从而具有全局分析法和局部分析法二者

的长处。其优点是确保所有的参数在其取值范围内均被采样,并且明确地确定哪一个参数改变了模型的输出,减少了需要调整的参数数目,提高了计算的效率<sup>[34-35]</sup>。表 3 列出了对径流和泥沙最为敏感的 10 个参数,考虑到模型的率定应基于实际的物理过程,所以通过敏感性分析所确定的最为敏感的参数仅作为参考,在实际率定中并非都进行调整。



注:  $P_{SR}$  和  $O_{SR}$  分别代表地表径流模拟值和观测值;  $P_{BF}$ 、 $O_{BF}$  分别代表基流模拟值和观测值;  $P_S$  和  $O_S$  分别代表泥沙负荷模拟值和观测值

图 2 模型率定步骤

表 4 径流和泥沙率定和验证结果

模拟期	流量				泥沙				
	率定	$E_{NS}$	$r^2$	$b$	$E_{NS}$	$r^2$	$wR^2$		
1988 - 1989	月	日	月	日	月	月	月		
验证		0.89	0.75	0.95	0.89	0.91	0.82	0.47	0.72
1990 - 1991	月	日	月	日	月	月	月		
		0.98	0.60	0.99	0.78	0.97	1.07	0.71	0.94

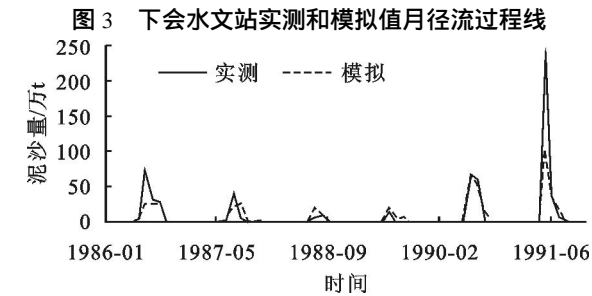
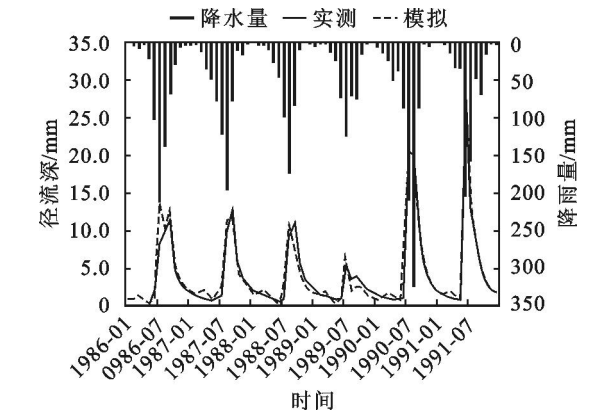


图 4 下会站实测和模拟泥沙负荷曲线

3 结果和讨论

3.1 率定和验证

根据前述模型评估标准,率定期月径流量的  $E_{NS}$ 、 $r^2$  和  $b$  分别为 0.89、0.95 和 0.91,验证期月径流量的  $E_{NS}$ 、 $r^2$  和  $b$  分别为 0.98、0.99 和 0.97,可评定为月模拟效果很好;率定

2.5.2 模型率定和验证

模型率定和验证分别采用 1987 - 1988 年和 1989 - 1991 年下会水文站实测数据,1986 年数据用于形成模型运行的初始条件。模型的率定借鉴 Santhi 等<sup>[36]</sup>采用的率定路线,其步骤如图 2 所示。先率定径流,后率定泥沙。每一步率定时先采用年数据进行粗率定,用月数据进一步率定,率定的参数被限定在表 3 所示的范围之内。对径流进行率定前,把实测径流分割为地表径流和基流,基流分割选用由美国地质调查局(USGS)所开发的 HYSEP<sup>[37]</sup>程序。首先对地表径流进行率定,如果地表径流的相对误差在 15 % 内,并且月  $E_{NS} > 0.5$ 、 $R^2 > 0.6$ ,则对基流采用同样的标准进行率定,直至二者均符合该标准。为了反映出分布式参数在流域内的空间变化,对于径流曲线数(CN2)和土壤层可利用有效水(SOL - AWC)等参数率定时在原值基础上按比例增减,模型率定和验证结果见表 4、图 3 和图 4。应该注意到,正如 White 等<sup>[38]</sup>所阐述的那样,“调整很多参数中的一个,都可以得到相同的结果,但选择最能描述过程的那个参数,否则这些参数不能反映系统的真实过程”。

期日径流量的  $E_{NS}$ 、 $r^2$  和  $b$  分别为 0.75、0.89 和 0.82,验证期日径流量的  $E_{NS}$ 、 $r^2$  和  $b$  分别为 0.60、0.78 和 1.07,模拟效果较好。率定期月泥沙量的  $E_{NS}$ 、 $r^2$  和  $b$  分别为 0.42、0.72 和 0.77,验证期月泥沙量的  $E_{NS}$ 、 $r^2$  和  $b$  分别为 0.71、0.94 和 1.07,考虑实测的输入数据和率定的数据可能存在很多潜在的误差,这个模拟结果也是令人满意的。Santhi 等<sup>[36]</sup>认为 SWAT 模型存在的潜在误差包括:降雨、土壤和土地利用的空间误差;实测流量中的误差;采样所引起的误差。Winter<sup>[39]</sup>认为年降水、径流和蒸发误差在 2 % ~ 15 %,而月误差能达到 2 % ~ 30 %。Walling 等<sup>[40]</sup>认为由连续含沙量和日流量计算出的年泥沙负荷可能产生 23 % ~ 83 % 的误差。在潮白河流域内,强降雨事件主要发生在 6 - 8 月,洪水携带大量泥沙涌入河道,而枯水期基本检测不到泥沙。洪水期流量大、含沙量高,观测值与实际情况可能存在较大误差。以 1991 年下会站点观测数据为例,1991 年 6 月 10 日流域内普遍发生了一次强降雨事件,从各雨量站观测值为 35.8 ~ 218.9 mm,流域内的平均降雨量为 49.5 mm,可划分为大雨一大暴雨。下会站于 6 月 11 日观测到的最大洪峰,其流量为 1 190 m<sup>3</sup>/s,日平均流量为 730 m<sup>3</sup>/s,日断面含沙量(断沙)为 29.2 kg/m<sup>3</sup>,输沙率高达 21.3 t/s,日泥沙负荷为 184.2 万 t/d,而 1991 年全年的泥沙负荷仅为 277.4 万 t,该日泥沙负荷占全年泥沙负荷的 66.4 %。因此,如果当日观测值出现较大误差,对该站点日、月、年的泥沙负荷都将产生巨大的影响。

3.2 土壤侵蚀强度分级

根据 SWAT 模型模拟结果计算各子流域 1987 - 1991

年的平均侵蚀模数,然后按照土壤侵蚀强度分级标准<sup>[41]</sup>(表 5)对各子流域内的土壤侵蚀强度进行分级。潮河子流域微度侵蚀的平均侵蚀模数应取北方土石山区土壤流失容许量 200 t/(km<sup>2</sup>·a) 为上限。各子流域土壤侵蚀强度分级结果如图 5 所示。本文设定子流域的划分阈值为 184 km<sup>2</sup>,加上自定义的河流出口,共计 34 个子流域,因此划定的结果比较粗略。更加详细的划分,可通过降低子流域的阈值来实现。从模拟结果来看,土壤侵蚀模数与降雨量存在密切的联系,二者的相关系数为 0.31。流域南部降水比北部偏丰,因此流域内向北有侵蚀强度增大的趋势。

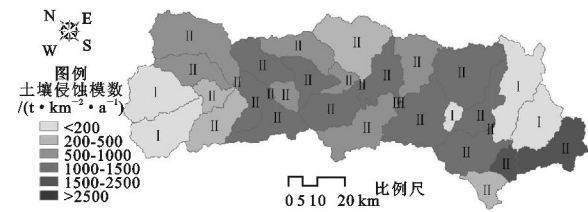


图 5 土壤侵蚀强度分级

表 5 土壤侵蚀强度分级标准

分级	级别	平均侵蚀模数/ (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
	微度	<200,500,1000
	轻度	200,500,1000~2500
	中度	2500~5000
	强度	5000~8000
	极强度	8000~15000
	剧烈	>15000

3.3 不同土地利用类型对产沙的影响

如前所述,SWAT 模型模拟的基本单位是水文响应单元(HRUs),为了提高计算效率,在每一个子流域内土地利用小于 10%的土地利用类型将被忽略,然后子流域内的土地利用类型进行重新分配。重新分配后的土地利用类型面积、所占比例以及运移到河道中的泥沙量(并非均通过流域出口,一部分在河道中沉积)如表 6 所示。从计算结果来看,耕地的土壤侵蚀情况最为严重,其次是草地,而林地的水土保持效果最好。

表 6 不同土地利用类型泥沙负荷

土地利用类型	实际面积/ km <sup>2</sup>	实际比例/ %	计算面积/ km <sup>2</sup>	计算比例/ %	泥沙量/ 万 t	平均侵蚀模数/ (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
耕地	1226.5	19.9	1248.1	20.2	484.3	3880.2
林地	3193.4	51.7	3265.6	52.9	0.3	0.6
草地	1596.5	25.9	1614.4	26.1	18.6	115.4
水域	113.8	1.8	46.7	0.8	0	0
城乡、工矿、居民用地	34.8	0.6	-	-	-	-
未利用土地	9.8	0.2	-	-	-	-
合计	6174.7	100.0	6174.7	100.0	503.2	814.9

4 结 论

模型计算结果表明,潮河子流域内的土壤侵蚀以微度和轻度侵蚀为主,土壤侵蚀强度由北向南随降雨量有增大的趋势,流域内土壤侵蚀最为严重的土地利用类型为耕地。为了保护密云水库水质,应提高对农业非点源污染的重视程度,引导农民采取最优的农业管理措施(Best management practices,BMPs),以减小由农业产生的非点源污染。特别是对土壤侵蚀比较严重的子流域以及密云水库周边区域,有步骤、有计划地实现退耕还林、还草等生态治理措施。

为了进一步提高模型的精度,真实反映流域内空间参数的分布特征,可以在以下几个方面对 SWAT 模型进一步改进。SWAT 模型中一个子流域内所有 HRUs 取相同的坡度值,可以利用 GIS 软件采用 DEM 生成坡度图并与 HRU 图叠置,计算每一个 HRU 内的平均坡度; 当有可用的数据时,采用多站点率定和验证,对其下游站点率定时,不改变前面率定好的集水区内的参数。提高空间数据的分辨率;

减小形成河流的最小集水区面积; SWAT 模型在计算每一个子流域内的降水量时,采用距离该子流域质心最近的雨量站数据,因此,可以采用空间数据插值方法,在没有观测站点的子流域上生成虚拟站点来降低降雨空间分布的不均匀性,从而提高模型模拟的精度。

参考文献:

[1] Pimentel D. World soil erosion and conservation[M]. Cambridge:Cambridge University Press,1993.

[2] 何萍,王家骥.非点源(NPS)污染控制与管理研究的现状、困境与挑战[J].农业环境保护,1999,18(5):234-237.

[3] Chu T. Modeling hydrologic and water quality response of a mixed land use watershed in Piedmont physiographic region[D]. Maryland:University of Maryland, College Park,2003.

[4] Guo H Y,Wang X R,Zhu J G. Quantification and index of nonpoint source pollution in Taihu Lake region with GIS[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2004,26(2):147-156.

[5] 杜桂森,孟繁艳,李学东,等.密云水库水质现状及发展趋势[J].环境科学,1999,(2):110-112.

[6] 杜桂森,刘晓端,刘霞,等.密云水库水体营养状态分析[J].水生生物学报,2004,28(2):191-195.

[7] 鲍全盛,曹利军,王华东.密云水库非点源污染负荷评价研究[J].水资源保护,1997(1):8-11.

[8] 苏保林,王建平,贾海峰,等.密云水库流域非点源污染识别[J].清华大学学报:自然科学版,2006,46(3):360-365.

[9] 苏保林,王建平,贾海峰,等.密云水库流域非点源模型系统[J].清华大学学报:自然科学版,2006,46(3):355-359.

[10] Arnold J G,Williams J R,Srinivasan R,et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I:Model development [J]. Journal of the American Water Resources Association,1998,34(1):73-89.

[11] Neitsch S L,Arnold J G,Kiniry J R,et al. Soil and Water Assessment Tool User's Manual[M]. Temple:

- Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, 2002.
- [12] Bera M, Borah D K. Watershed-scale hydrologic and non-point-source pollution models: Review of mathematical bases[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2003, 46(6): 1553 - 1566.
- [13] Romanowicz A A, Vanclooster M, Rounsevell M, et al. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the Thyle catchment, Belgium[J]. Ecological Modelling, 2005, 187(1): 27 - 39.
- [14] U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. SCS national engineering handbook [M]. Washington: Govt. Print. Off., 1972.
- [15] Sloan P G, Morre I D, Coltharp G B, et al. Modeling surface and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersheds[R]. Lexington: Water Resources Inst. Report 142, University of Kentucky, 1983.
- [16] Arnold J G, Allen P M, Bernhardt G. A comprehensive surface-groundwater flow model[J]. Journal of Hydrology, 1993, 142(1 - 4): 47 - 69.
- [17] Overton D E. Muskingum flood routing of upland streamflow[J]. Journal of Hydrology, 1966(4): 185 - 200.
- [18] Williams J R. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1969, 12(1): 100 - 103.
- [19] Hargreaves G H, Samani Z A. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature [J]. Applied Engineering in Agriculture, 1985, 1: 96 - 99.
- [20] Priestley C H B, Taylor R J. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters [J]. Monthly Weather Review, 1972, 100: 81 - 92.
- [21] Monteith J L. Climate and the Efficiency of Crop Production in Britain[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1965, 281: 277 - 329.
- [22] Williams J R. Sediment routing for agricultural watersheds[J]. Water Resources Bulletin, 1975, 11(5): 965 - 974.
- [23] Bagnold R A. Bedload transport in natural rivers[J]. Water Resources Research, 1977, 13(2): 303 - 312.
- [24] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator. 1. model documentation [M]. Washington, D C: U. S. Dept. of Agriculture Agricultural Research Service, 1990.
- [25] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2000 [M]. College Station: Texas Water Resources Institute, 2002.
- [26] Liersch S. The programs dew1.exe and dew02.exe user's manual [EB/OL]. [http://www.brc.tamus.edu/swat/manual\\_dew.pdf](http://www.brc.tamus.edu/swat/manual_dew.pdf) / 200609.
- [27] Saxton K E, Rawls W J, Romberger J S, et al. Estimating generalized soil-water characteristics from texture [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(4): 1031 - 1036.
- [28] Saxton K E, Rawls W J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions [EB/OL]. <http://users1adelphia.net/~ksaxton/SPAW%20Download.htm/> 200609.
- [29] Van Liew M W, Garbrecht J. Hydrologic simulation of the Little Washita River experimental watershed using SWAT[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2003, 39(2): 413 - 426.
- [30] Popov E G. Гидрологические Прогнозы (Hydrological Forecasts) [M]. Leningrad: Гидрометеоздат, 1979.
- [31] Krause P, Boyle D P, Base F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment [J]. Advances in Geosciences, 2005(5): 89 - 97.
- [32] Morris M D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. Technometrics, 1991, 33(2): 161 - 174.
- [33] McKay M D, Beckman R J, Conover W J. Comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from a computer code [J]. Technometrics, 1979, 21(2): 239 - 245.
- [34] Holvoet K, Van Griensven A, Seuntjens P, et al. Sensitivity analysis for hydrology and pesticide supply towards the river in SWAT[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2005, 30(8 - 10): 518 - 526.
- [35] Griensven A V, Meixner T, Grunwald S, et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models[J]. Journal of Hydrology, 2006, 324(1 - 4): 10 - 23.
- [36] Santhi C, Arnold J G, Williams J R, et al. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2001, 37(5): 1169 - 1188.
- [37] Sloto R A, Crouse M Y. HYSEP: A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis[R]. Lemoyne: U. S. geological survey, Water-Resources Investigations Report 96 - 4040, 1996.
- [38] White K L, Chaubey I. Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2005, 41(5): 1077 - 1089.
- [39] Winter T C. Uncertainties in estimating the water balances of lakes[J]. Water Resources Bulletin, 1981, 17(1): 82 - 115.
- [40] Walling D E, Webb B W. The reliability of rating curve estimates of suspended sediment yield: some further comments [C]// Borda M P, Walling D E, eds. Sediment budgets. Wallingford: IAHS publication, 174.
- [41] SL190 - 96, 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京: 中国水利水电出版社出版, 1997.