

# SWAT 模型在陕西黑河流域非点源污染模拟中的应用

胥彦玲<sup>1</sup>, 秦耀民<sup>2</sup>, 李怀恩<sup>2</sup>, 倪永明<sup>3</sup>

(1. 北京市科学技术情报研究所, 北京 100037; 2. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048; 3. 北京自然博物馆, 北京 100050)

**摘要:** SWAT 模型是最具有活力的非点源污染模型之一, 能够与 GIS 结合模拟复杂大流域不同土地利用条件下的非点源污染情况。本研究在建立流域非点源污染研究基础数据库的基础上, 根据实测资料的完整性, 运用 GIS 与分布式参数机理模型 SWAT 2000 版本的集成, 利用 1991—1996 年的实测水量、泥沙和营养负荷数据进行参数率定, 应用 1997—1998 年的实测数据进行模型验证, 从而确定 SWAT 模型在黑河流域非点源污染模拟中的适用性和可靠性, 可为流域非点源污染负荷的估算提供可靠的模型基础。

**关键词:** SWAT 模型; 非点源; 污染模拟; 陕西黑河流域

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2009)04-0114-04

**中图分类号:** X506, X52, X14

## Application of SWAT Model to Non-point Source Pollution Simulation in Heihe River Basin of Shaanxi Province

XU Yan-ling<sup>1</sup>, QIN Yao-min<sup>2</sup>, LI Huai-en<sup>2</sup>, NI Yong-ming<sup>3</sup>

(1. Beijing Municipal Institute of Science and Technology Information, Beijing 100037, China;

2. Key Laboratory of Northwest Water Resources, Environment and Ecology of the Ministry of Education, XUT, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 3. Beijing Museum of Natural History, Beijing 100050, China)

**Abstract:** SWAT model is one of the most active non-point source pollution models. Combined with GIS, it can simulate non-point source pollution under the different conditions of land use in complex large river basin. This study is based on the basic database of non-point source pollution and the integrity of the measured data and uses the GIS integration with the SWAT 2000 model. Model parameters are estimated using the measured data of water, sediment, and nutrient load from 1991 to 1996 and are verified using measured data from 1997 to 1998. Applicability and reliability of SWAT model in non-point source pollution simulation in Heihe River basin are determined, which provides a reliable model foundation for non-point source pollution simulation in Heihe River basin of Shaanxi Province.

**Keywords:** SWAT 2000 model; non-point source; pollution simulation; Heihe River basin of Shaanxi Province

近年来,随着计算机和 3S(RS, GIS, GPS)技术的快速发展,非点源污染的模型研究愈加深入,并相继出现了一些著名的机理模型,其中 SWAT 模型具有较强的物理基础,适用于具有不同的土壤类型、不同的土地利用方式和管理条件下的复杂流域,并能在资料缺乏的地区建模<sup>[1]</sup>,应用比较广泛。

SWAT(soil and water assessment tools)模型研制于 20 世纪 90 年代初期,由美国农业部农业研究所(USDA-ARS)开发,是具有很强物理基础的、流域尺度的动态过程模型,其运行以日为时间单位,可以进行连续多年的模拟计算,适用于具有不同的土壤类型、土地利用和农业管理条件下的复杂大流域。其主要目的是模拟预测土地利用、土地经营管理方式等对

流域水量、水质等方面的影响<sup>[2-3]</sup>。大量的研究表明<sup>[3-7]</sup> SWAT 是流域尺度营养物质输移时空演化模拟和趋势分析评估的一个有效模型。陕西黑河流域是西安市的主要供水水源地,其水质与水量直接关系到西安市 300 万市民的身体与健康与西安市社会经济的可持续发展。其水源区处于秦岭北麓深山区,区内地形环境复杂,非点源污染是水源区的主要污染源。因此,探讨适用于黑河流域非点源污染计算的模型,研究黑河水源地不同土地利用格局下的非点源污染,提出控制流域非点源污染的土地利用优化管理模式及措施,对保护黑河水源具有重要的现实意义。

本研究在建立流域非点源污染研究基础数据库的基础上,根据实测资料的完整性,运用 GIS 与分布

式参数机理模型 SWAT 2000 版本的集成,利用 1991—1996 年的实测水量、泥沙和水质数据进行参数率定,应用 1997—1998 年的实测数据进行模型验证,从而确定 SWAT 模型在黑河流域非点源污染模拟中的适用性和可靠性,为流域非点源污染负荷的估算提供了可靠的模型基础。

## 1 SWAT 模型原理

SWAT 模型主要用来预测人类活动对水、沙、农业、化学物质的长期影响,可以模拟流域内多种不同的水循环物理过程。主要涉及的模块有:分布式水文模块、非点源污染负荷预测模块、河道污染物迁移转换模块、湖泊水体水质模块 4 个模块。为了减小流域下垫面和气候因素时空变异对该模型的影响,SWAT 模型通常将研究流域细分成若干个单元流域,单独计算每个子流域上的产水产沙量及营养盐的输出。由于本研究所选流域出口断面位于黑河水库上游,故湖泊水体水质模块本研究不做考虑,SWAT 模型中水文模拟、泥沙模拟和非点源污染模拟原理参见文献[8]。

## 2 SWAT 模型在黑河流域的应用

陕西黑河为渭河右岸的较大支流,位于东经  $107^{\circ}43'—108^{\circ}24'$ ,北纬  $33^{\circ}42'—34^{\circ}13'$  之间,属黄河二级支流,发源于秦岭太白山南麓,由西南流向东北,至周至县马召镇附近的武家庄出峪后由东北的石马村入渭河。各河流峪口以上流域多年平均降雨量约 810 mm,南部深山区可达 900 mm 以上,秦岭北麓深山区多在 800 mm 以下,其余中浅山区在 1 000 mm 左右。降雨量在时间分布上差异也较大,夏季常出现暴雨,7—10 月降雨量约占全年的 60% 以上。该区山高坡陡,水土易于流失。长期以来,由于过量采伐,森林面积缩小,出现大面积裸岩和以草本灌木为主的荒坡。农业经营主要在河谷阶地和坡地上,人类活动对生态环境的破坏明显。

### 2.1 基础数据库的建立

2.1.1 DEM 的建立和处理 DEM(digital elevation model)建立的具体方法和过程为:(1)矢量化 1:5 万黑河流域地形图,建立空间拓扑关系;(2)设置地图投影坐标系统,由于在 SWAT 模型中涉及到面积量算以及地理要素经纬度的转换,采用 Transverse\_Mercator 投影,坐标系为 gcs\_krasovsky\_1940,单位为 m;(3)采用三角化不规则网(TIN:triangulated irregular network)方法,将矢量线图转化成 TIN 数据结构,并进行空间插值;(4)将 TIN 数据结构转换成格网结构(LAT-TICE);(5)对格网数据进行重采样,形成  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$

的栅格 DEM。本研究建立的黑河流域数字高程模型(DEM)如图 1 所示。

2.1.2 土地利用图的建立 本研究的土地利用图是利用遥感图像处理软件 ERDAS IMAGINE 8.5 对 2000 年 5 月的 Landsat TM/ETM 影像图进行解译获得。遥感解译精度是将全彩色的 8 个波段进行 15 m 与 30 m 的分辨率融合而成,解译结果见图 2。

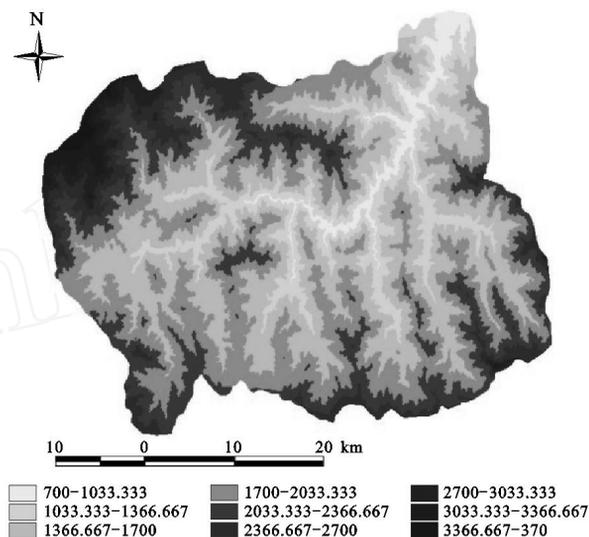


图 1 黑河流域数字高程模型(DEM)

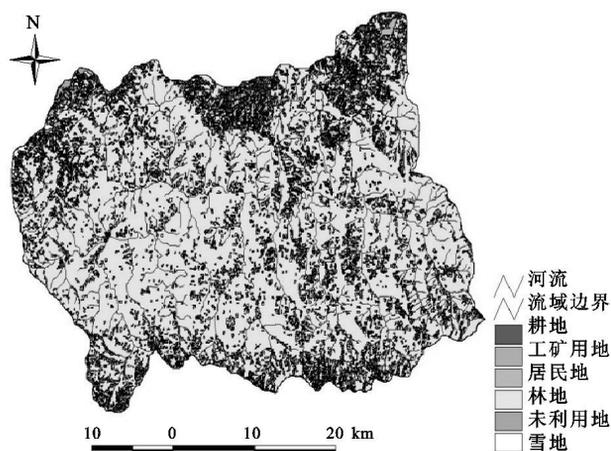


图 2 黑河流域 2000 年土地利用类型图

2.1.3 土壤类型图的建立 在矢量化软件 R2V 下对黑河流域 1:2 000 的土壤类型图进行矢量化,然后在 ARCGIS 软件下进行研究区域的裁剪和图形校准、定义投影和投影转化以及属性表的建立,获得本研究所需要的土壤类型图(图 3)。

2.1.4 水文气象数据 SWAT 模型需要的气象数据包括日平均的降雨量、最高和最低大气温度、太阳辐射、风速和相对湿度。在本研究中使用了 1991—1998 年黑河流域的日平均数据。其中降雨量采用了至今保存较好的 8 个雨量站的监测数据;由于黑河流

域无气象站点,可能获得的离流域最近的气象监测站只有周至县气象站点,因而研究中气温资料采用了流域相邻区域周至县的气温资料,并根据流域多年的平均气温进行了相应的调整;风速和相对湿度是采用西安地区实测站点连续多年的月平均数据,太阳辐射数据是通过经验公式计算而得。

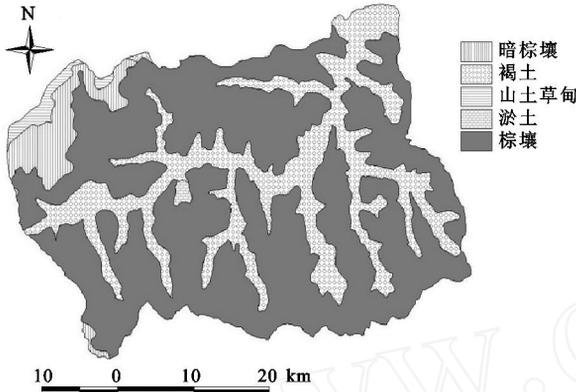


图 3 黑河流域土壤类型图

2.2 子流域划分

基于黑河流域 1:5 万的栅格数字高程模型 (DEM) 在 AVSWAT 2000 上进行河网提取和子流域的划分,依据实际河道和水库分布信息以及乡镇边

界,黑河流域被划分为 24 个子流域和 1 个水库(即金盆水库),按照实际情况,水库(金盆水库)位于子流域 1 内(图 4)。

2.3 参数选取与率定

2.3.1 水量模拟 选取流域出口断面黑峪口水文站 1991—1996 年实测资料进行水文参数的率定,1997—1998 年实测资料进行参数检验。经过调参可得,在一定条件下,1991—1996 年率定期效率系数为 0.68,相关系数为 0.75,见图 5a。1997—1998 年检验期效率系数为 0.81,相关系数为 0.86,见图 6b 水文模拟结果较为理想。

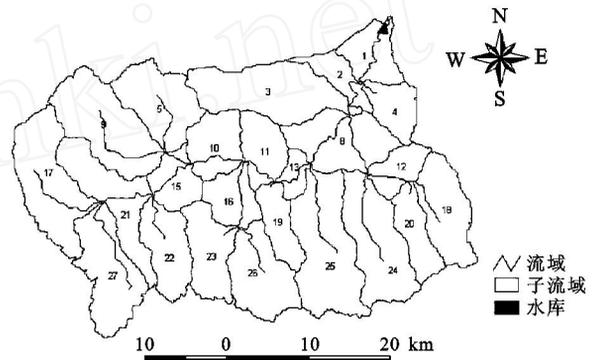


图 4 黑河流域子流域的划分

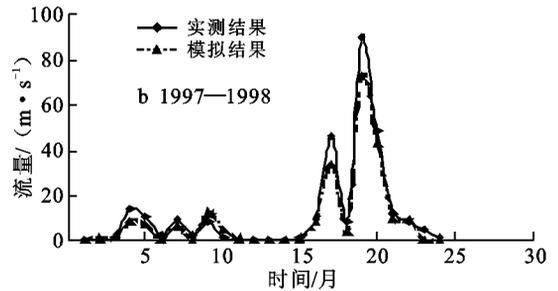
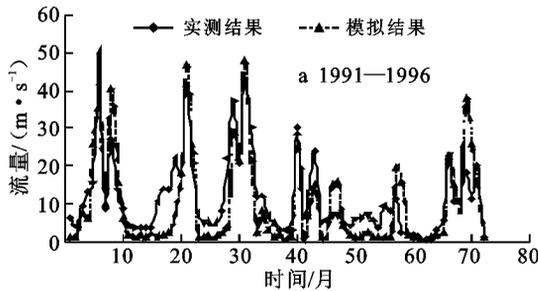


图 5 黑河流域水文站 1991—1998 年流量模拟与实测对比

2.3.2 泥沙模拟 选取流域出口断面黑峪口水文站 1991—1996 年实测泥沙资料进行模型参数的率定,1997—1997 年实测资料进行模型的验证,经调参可得,在一定条件下,1991—1996 年率定期效率系数为 0.79,相关系数为 0.8(图 6a)。1997—1998 年检验期效率系数为 0.81,相关系数为 0.86(图 6b)。泥沙模拟结果较好,满足 SWAT 模型对泥沙负荷的模拟精度要求,可用于流域泥沙负荷的预测。

2.3.3 营养负荷模拟 在 SWAT 模型中考虑的营养物质包括硝酸盐、有机氮、可溶性磷及有机磷等。本研究中,根据获得的观测资料对  $NO_3^- - N$ ,  $NH_4^+ - N$ ,  $NO_2^- - N$ , TP 作为指标进行参数率定。各种形态的 N 和 P 之间是相互转化的,在 SWAT 模型中这些因素都有考虑。营养负荷部分的参数率定分为两部分:地

表产流过程营养负荷的参数率定及河道中各营养物之间转化的参数率定。其中,地表产流过程营养负荷的输入参数污染负荷浓度分别为:(1)溶解态氮磷浓度根据实地采样获得,土壤制备与分析方法如下:土样风干,过 1 mm 筛,称取 50 g,于 500 ml 贝塞三角瓶中,加入 pH=5.6~6.4 的蒸馏水 200 ml(土:水=1:4),手工振摇 5 min,过滤后,滤液分析溶解态氮和磷,氮用  $K_2S_2O_8$  氧化—紫外分光光度法,磷用钼锑钒光度法<sup>[8]</sup>;(2)根据《陕西省第二次土壤普查数据集》查出西安市不同土壤类型表耕层的全磷和全氮含量,减去溶解态氮磷含量即可求出有机态氮磷含量。

选取 1991—1996 年黑峪口水文站实测资料对进行模型参数的率定,1997—1998 年实测资料进行参数验证,经调参可得,在一定条件下,1991—1996 年率定

期三氮的效率系数为 0.7, 相关系数为 0.77, 见图 7(a), 总磷的效率系数为 0.65, 相关系数为 0.7, 见图 7(b)。1997—1998 年检验期三氮的效率系数为 0.76,

相关系数为 0.78, 见图 7(c), 总磷的效率系数为 0.78, 相关系数为 0.9, 见图 7(d)。结果较为理想, 表明模型对研究流域水质的模拟具有一定的实用性。

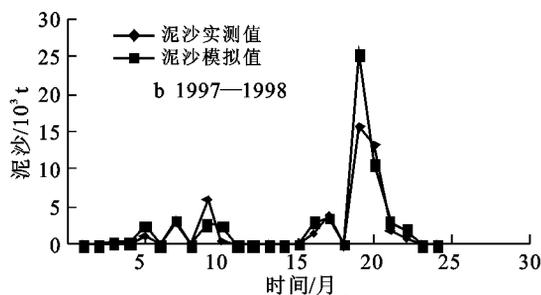
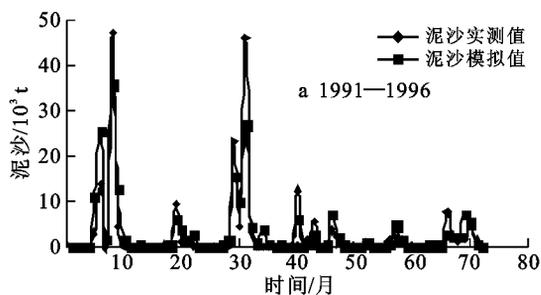


图6 黑河流域水文站 1991—1998 年流量泥沙拟与实测值对比

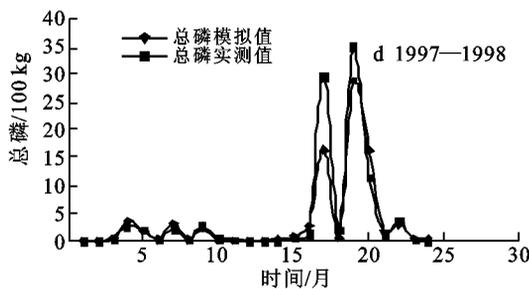
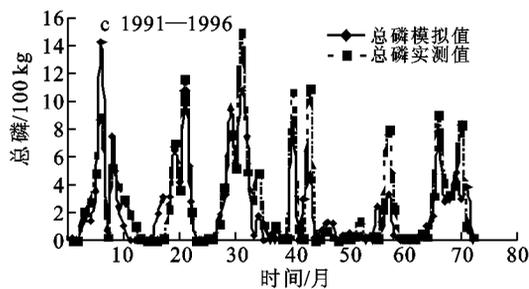
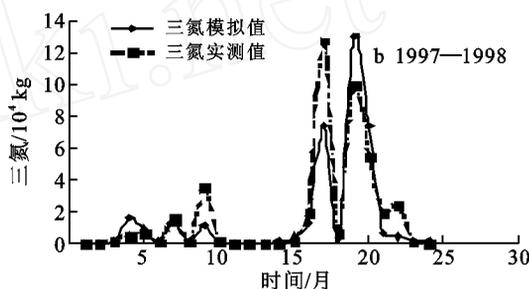
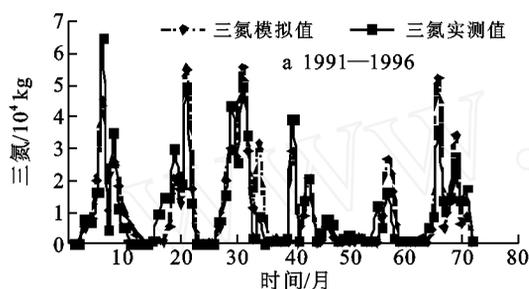


图7 黑河流域水文站 1991—1998 年水质模拟与实测值对比

### 3 结论

SWAT 2000 模型主要应用于大流域长时期的模型模拟,也可用于中尺度和小尺度的流域<sup>[9]</sup>。根据非点源污染产出的特点,首先需要率定的是水文部分,然后是泥沙,最后才是污染物的迁移。在水文部分或者侵蚀部分产生的误差,会转移并且扩大到其它部分。研究流域面积 1 481 km<sup>2</sup>,在这样一个较大流域进行非点源污染的模拟计算是一件复杂的工作。由于基础数据的误差及模型本身的局限性,模型的计算结果与实际监测结果会有一定的偏差。从本研究率定的结果来看,水文部分的模拟误差基本在 15% 以内,泥沙部分的误差大部分在 20% 以内,各主要非点源污染物的误差在 25% 以内。这样的结果表明率定后的模型具有一定的精确度,可用于该研究区土地利用/覆被变化对非点源污染过程的影响分析。但模

型在模拟过程中,存在洪峰移位的现象。同时,对干旱半干旱地区来说,小流量模拟十分困难,这样的精度可满足水资源管理与规划要求,但若用于洪水预报则精度尚待研究,予以提高。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation, Version 2000[OL]. [2008-11-10]. <http://www.brc.tamus.edu/swat/>. 2001.
- [2] Eckhardt K, Haverkamp S, Fohrer N, et al. SWAT-G, a version of SWAT 99.2 modified for application to low mountain range catchments[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27(9/10): 641-644.
- [3] 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.

(下转第 219 页)

表3 植物生长状况

处理	发芽率/ %	发芽时株高/cm	10 d后株高/cm	枯萎时天数/d
试样	90 %	4~5	26~30	19
对照	60 %	2~4	21~26	12

### 3 结论

(1) 以聚乙烯醇为交联剂,采用紫外光辐照聚合法合成了耐盐性高吸水树脂聚(聚丙烯酸钠),室温下吸蒸馏水倍率为4 100 g/g,吸盐倍率达405 g/g。所得树脂耐盐性好,有较好热稳定性。

(2) 在砂土中,聚丙烯酸钠吸液倍率和速率均减小;在砂土含水量较低时,砂土和聚丙烯酸钠之间存在着对水的吸收平衡关系。温度(20~70)和pH(4~10)对聚丙烯酸钠吸液倍率的影响较小。电解质肥料对聚丙烯酸钠吸液倍率的影响较大,非电解质肥料影响很小。

(3) 在土壤和溶液中有很好的保水能力。土壤中加入聚丙烯酸钠可将雨水或灌溉水吸收贮存起来,且可以抑制水的蒸发,对于干旱地区,可有效的保持土壤中的水分,保证植物生长。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 吴季怀,林建明,魏月琳.高吸水保水材料[M].北京:化学工业出版社,2005:10-12.
- [2] Tong Q Y, Zhang G W. Rapid synthesis of a superabsorbent from a saponified starch and acrylonitrile:AMPS graft copolymers [J]. Carbohydr Polym., 2005, 62:

74-79.

- [3] Starodoubsev S G, Ryabvva A A, Khokhlov A R, et al. Mechanism of smectic arrangement of montmorillonite and bentonite clay platelets incorporated in gels of poly (acrylamide) induced by the interaction with cationic surfactants[J]. Langmuir., 2006, 22: 369-374.
- [4] Haraguchi K, Li H J. Mechanical properties and structure of polymer-clay nanocomposite gels with high clay content[J]. Macromolecules, 2006, 39: 1898-1905.
- [5] Zhang J, Yuan K, Wang Y P, et al. Preparation and properties of polyacrylate/ bentonite superabsorbent hybrid via intercalated polymerization[J]. Materials Lett., 2007, 61: 316-320.
- [6] 新疆统计局. 新疆统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,1997.
- [7] 田长彦,周宏飞,刘国庆. 21世纪新疆土壤盐渍化调控与农业持续发展研究建议[J]. 干旱区地理. 2000, 23(2):177-181.
- [8] Lim D W, Song K G, Yoon K J, et al. Synthesis of acrylic acid-based superabsorbent interpenetrated with sodium PVA sulfate using inverse-emulsion polymerization [J]. European Polym J., 2002, 38:579-586.
- [9] 林润雄,王基伟. 高吸水性树脂的合成与应用[J]. 高分子通报,2000,(2):85-93.
- [10] 贾振宇,崔英德,黎新明,等. 聚丙烯酸钠高吸水性树脂的改性研究进展[J]. 化工进展,2004,23(5):468-471.
- [11] 王大勇,苏林,陈敏,等. 聚丙烯酸钠缓释作用及其在砂土中吸液性能的探讨[J]. 安徽化工,2006,(4):32-34.
- [12] 田义龙,付国瑞. 高吸水性树脂的性能研究[J]. 化工新型材料,2003,31(9):22-25.

(上接第117页)

- [4] 赖格英,于革,桂峰. 太湖流域营养物质输移模拟评估的初步研究[J]. 中国科学 D 辑:地球科学, 2005, 35(S2):121-130.
- [5] 万超,张思聪. 基于 GIS 的潘家口水库面源污染负荷计算[J]. 水力发电学报,2003,(2):62-68.
- [6] Santhi C, Arnold J G, Williams J R, et al. Validation of the SWAT model on large river basin with point and non-point sources[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2001, 37(5):1169-1188.
- [7] Jennifer B, Christine A S, Douglas A H. Modeling non-

point source pollution using a distributed watershed model for the Cannonsville Reservoir Basin, Delaware County[C]// New York: World Water Congress 2001, 2001.

- [8] 中国农科院土肥所. 土壤肥料分析[M]. 农业出版社, 1978:47.
- [9] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool user's manual version 2000[M]. US: Agriculture Research Service and Blackland Research Center, 2001.