

密云水库流域非点源模型系统

苏保林¹, 王建平¹, 贾海峰¹, 程声通¹, 杨忠山², 武佃卫², 孙峰²

(1. 清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 北京市水文总站, 北京 100038)

摘要: 以密云水库流域为研究背景, 在对流域内各类污染源调查的基础上, 集成应用流域数字高程模型(DEM)、土地利用、土壤、气象、水文与水质、农业管理措施等数据, 建立了基于SWAT模型的密云水库流域非点源模型系统, 并采用长系列实测数据对模型系统进行了参数率定和模型验证。结果表明, 无论是潮河还是白河流域, 径流和泥沙的模拟结果较好, 决定系数(r^2)和Nash模拟效率系数均达到了0.77以上; 潮河流域入库总氮、总磷负荷的模拟结果要优于白河流域。研究表明, 基于SWAT模型构建的非点源模型系统完全能应用于密云水库入库的非点源污染负荷模拟和预测。

关键词: 密云水库; 非点源; SWAT模型; 流域

中图分类号: X 506

文献标识码: A

文章编号: 1000-0054(2006)03-0355-05

Non-point source modeling system of the Miyun Reservoir watershed

SU Baolin¹, WANG Jianping¹, JIA Haifeng¹,
CHENG Shengtong¹, YANG Zhongshan²,
WU Dianwei², SUN Feng²

(1. Department of Environmental Science and Engineering,

Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Hydrological Station of Beijing, Beijing 100038, China)

Abstract: A soil water and assessment tools (SWAT) based non-point source (NPS) modeling system of the Miyun Reservoir watershed was established based on investigation of point and NPS pollution and digital elevation model, land-use, soil, weather, hydrological and water quality data, and agricultural management practices. Measured time-series stream flow and water quality data were used to calibrate and verify the modeling system. The hydrological and sediment simulations agree well with observations in both the Chao River and Bai River sub-watersheds, with coefficients of determination and Nash-Sutcliffe coefficients larger than 0.77. The simulation results for the total nitrogen and total phosphorus in the Chao River sub-watershed are better than those in the Bai River sub-watershed. The results show that the NPS modeling system can also be applied to simulate and predict NPS loadings in the Miyun Reservoir.

Key words: Miyun Reservoir; non-point source (NPS); soil water and assessment tools (SWAT); watershed

密云水库是北京市城市生活用水的主要地表水源, 目前水质已面临富营养化的威胁, 水库部分地区已出现富营养化的征兆^[1-3]。由于多年来各级政府十分重视密云水库水源地的保护, 在控制水库上游各区县工业点源污染方面采取了很多措施, 使得流域内工业点源的污染得到了有效控制。

有关研究表明, 目前由于土壤流失造成的非点源污染是造成水库富营养化程度加重的主要因素^[4-6]。但目前尚无针对整个流域范围, 统筹考虑流域内点源、农业非点源、农村生活点源和畜禽养殖污染等的非点源污染研究。

本文在对流域内各类污染源进行充分调查的基础上, 集成应用流域地形、土地利用、土壤、气象、水文与水质等多元数据, 以SWAT模型为基础建立了密云水库流域非点源模型系统, 并进行了参数识别和模型验证, 为识别和分析密云水库流域非点源污染特征奠定了基础。

1 流域概况

密云水库位于北京市中心东北约100 km的密云县, 它是潮白河水系上最大的水库。其汇水流域主要为水库上游的潮、白河流域, 控制流域面积约15 505 km²(图1)。

流域地貌以山地、丘陵为主, 丘陵区主要分布在潮河流域及水库周边。土壤类型以淋溶褐土(28%)、棕壤(26%)、褐土性土(18%)和石灰性褐土(12%)等四类土壤为主, 约占84%。流域内植被覆盖较好, 森林和草地覆盖率达到76%以上(森林49%, 不同覆盖度的草地27%), 农用旱地约占21%。

收稿日期: 2005-02-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50209007)

作者简介: 苏保林(1965-), 男(汉), 云南, 讲师。

E-mail: sbl@tsinghua.edu.cn

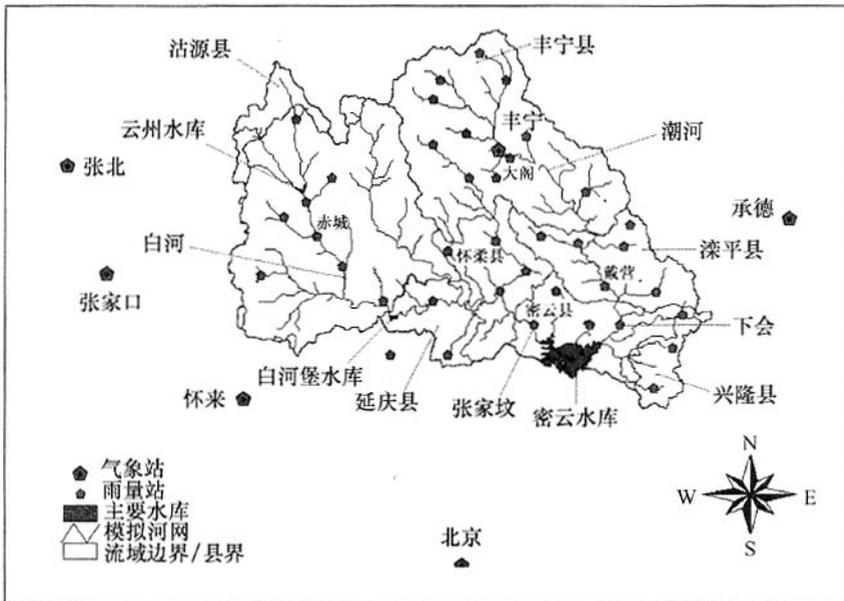


图1 密云水库流域图

2 SWAT 模型简介

SWAT(soil water and assessment tools)模型由美国 Texas 农业与工程大学学院站分校的水资源研究所开发。它是一个以日为步长的连续空间分布的流域模型,可以模拟大流域的径流、泥沙和营养物等的输移^[7,8]。该模型结构清楚,水文模拟采用 SCS 模型,土壤侵蚀模型采用 MUSLE 模型。目前版本的 SWAT 模型(AVSWAT2001)已集成到 ArcView GIS 环境中,具有良好的用户应用界面和较强的空间数据管理、分析和表达的能力,在众多的非点源模型应用中具有较强的应用优势。

SWAT 模型是一种半分布式的水文水质模型,即整个研究流域按一定的子流域面积阈值首先被划分为若干个子流域(sub-basins),在子流域上进一

步按土地利用和土壤面积阈值划分水文响应单元 HRU(hydrologic response unit),并应用概念性模型来估算 HRU 上的净雨、计算产流量和泥沙、污染物产生量,然后进行河道汇流演算,最后求得出口断面流量、泥沙和污染负荷^[7,8]。

3 模型数据描述

3.1 模型数据库建立

SWAT 模型所需的数据输入包括大量的空间数据和属性数据(表1)。空间数据主要包括数字高程模型(DEM)、土地利用和土壤分布;属性数据包括气象、水文/水质、流域内大型水库和湖泊的相关数据、各类污染源调查和农业管理措施等方面的数据。

表1 模型输入数据

数据类型	数据项	数据来源
DEM	高程、坡度、坡长、坡向	1:25 万数字高程模型地形图
土地利用	土地利用类型; 植被类型与状态,如生物量; 与作物、植被生长有关的部分参数等	1:10 万土地利用数据库,辅助以现场调研
土壤数据	土壤纵向分布; 水文特性、级配、容重、孔隙率等物理性质; 有机质含量、营养物含量等; 土壤可蚀性系数等	1:100 万数字化土壤分布图 土壤剖面理化性质表
气象数据	气象站位置、降雨、气温、日照、湿度、风速等数据	北京、承德、丰宁、张家口、张北、怀来 6 个站(1971—2000 年)
降雨	雨量站位置、日降雨量	39 个雨量站(1995—2002 年)
水文/水质	径流量、泥沙含量、水质组分数据	张家坟、下会、戴营水文站
湖库数据	湖库面积、最大库容、死库量、出流及水质等数据	云州/白河堡水库实际数据
污染源	生活污染源、畜禽养殖、农业化肥施用等	污染源调查、区县统计年鉴
管理措施	化肥施用日期和方式、典型耕作方式等	现场调研、农业统计资料

基于DEM、土地利用和土壤分布数据,流域空间单元的离散按照子流域到HRU的过程进行,HRU是SWAT模型最小的空间计算单位,通过GIS叠加分析土地利用和土壤分布图层得到,整个流域被划分为148个子流域和746个单一土壤类型和单一土地利用类型组合的HRU。

3.2 污染源调查

密云水库流域主要涉及河北省与北京市的7个区县,其中北京市境内3个区县(密云、延庆和怀柔),河北境内有4个县(丰宁、滦平、兴隆和赤城

县)。污染源调查的范围包括潮、白河流域内的60个乡镇。其中,潮河流域($6\,277\text{ km}^2$)包括承德地区丰宁县的12个乡镇、滦平县的11个乡镇、兴隆县的1个乡镇及北京市密云县的6个乡镇。白河流域($9\,228\text{ km}^2$)包括河北省赤城县全县18个乡镇、承德地区丰宁县2个乡镇、延庆县2个乡镇、怀柔区5个乡镇,以及北京市密云县的3个乡镇。调查内容为2002年各乡镇总人口、畜禽养殖和农业化肥施用数据。流域内各项人类活动的强度对比和各类污染源产生量估算的汇总结果参见表2和表3。

表2 潮、白河流域农业活动强度对比(化肥为实物量)

所属流域	人口密度	氮肥施用	磷肥施用	猪	羊	大牲畜	家禽
	人·km ⁻²	kg·亩 ⁻¹	kg·亩 ⁻¹	头·km ⁻²	只·km ⁻²	头·km ⁻²	只·km ⁻²
潮河	72	33.6	5.4	69	70	29	707
白河	42	17.5	1.2	22	53	14	486

表3 密云水库流域主要污染源及污染物产生量汇总表

所属流域	污染源	废水产生量	COD _{Cr}	NH ₃ -N	TN	TP
		万m ³ ·a ⁻¹	t·a ⁻¹	t·a ⁻¹	t·a ⁻¹	t·a ⁻¹
潮河	生活污染源	938	6 255	625	938	156
	畜禽养殖	587	81 859	7 327	15 678	3 544
	化肥施用量	—	—	—	7 742	360
	小计	1 525	88 114	7 952	24 358	4 060
白河	生活污染源	838	5 584	558	838	140
	畜禽养殖	451	59 448	5 356	12 096	2 622
	化肥施用量	—	—	—	5 641	157
	小计	1 289	65 032	5 914	18 575	2 918
总计		2 814	153 146	13 866	42 933	6 978

1) 生活污染源

考虑到有关建制镇的镇政府所在地有一定的非农业人口聚积区并建有一定的集中下水道系统。因此,对各建制镇的非农业人口排放的生活污染物将按点源排放的方式进入所在子流域的河道系统,并参与河道汇流演算。对建制镇行政范围内的农业人口和各建制乡人口排放的生活污染物将折算成有机肥以非点源的方式输入到农田中。而以点源排放的污染负荷直接作为输入被读入到模型中,并参与相关河道和水库的汇流演算。

2) 畜牧养殖污染源

根据统计年鉴中畜禽养殖量和排水、排污系数^[9,10]可以估算各乡镇因畜禽养殖产生和排放的污染物量。畜禽养殖排放的污染物也折算为相当的有机肥以非点源方式输入到农田中。

3) 农业污染源

农业化肥流失是造成农业非点源污染的重要原

因。流域内化肥利用主要以氮肥为主、磷和复合肥为辅,钾肥施用量很少。氮肥施用的主要种类包括硫酸-硝铵-碳铵-尿素等,磷肥为过磷酸钙-重过磷酸钙等,复合肥一般为磷酸二铵和复合化肥。氮肥、磷肥和复合肥施用比例大致为1:0.16:0.19(潮河流域)和1:0.06:0.13(白河流域)。

4 模型参数识别

4.1 率定过程和率定参数

SWAT模型参数繁多,用于完成基本功能的参数即达100多个。大部分的模型参数可以参照国外研究的结果进行参数选取,对于部分模型的细节需要根据流域的具体情况进行一定的修改和简化。模型的参数率定按照下列顺序进行:即先率定与水文模拟有关的参数,然后再率定土壤流失参数,最后在水文参数和土壤流失参数率定基础上对污染物流失参数进行率定。本研究中参与率定的模型参数如表4所示。

表4 参与模型率定的一些重要参数

流域过程	模型参数	参数定义
地表径流	CN2	SCS 方法曲线数
	ESCO	土壤蒸发补偿系数
	EPCO	植物吸收补偿系数
	SOL_AWC	土壤最大含水量
	OV_N	坡面流曼宁系数
地下水补给和流出	GWQMN	浅层地下水基流产生的最小深度阈值
	REVAPMN	浅层地下水再蒸发产生的最小深度阈值
	GW_REVAP	地下水再蒸发系数
	ALPHA_BF	基流系数
坡面产沙	K_{USLE}	MUSLE 方程中的土壤可侵蚀性因子
	C_{USLE}	MUSLE 方程中的作物经营管理因子
河道泥沙汇流	SPCON	水流挟沙能力函数的线性系数
	SPEXP	水流挟沙能力函数的幂指数
	PRF	峰值流量调整系数
	CH_N2	河道曼宁系数
河道水质模拟	ERORGN	有机氮在泥沙中的富集比例
	ERORGP	有机磷在泥沙中的富集比例
	NPERCO	氮的下渗系数
	PPERCO	磷的下渗系数
	RS4	20 C 时有机氮沉降速率
	RS5	20 C 时有机磷沉降速率
	BC1	20 C 时氨氮转化为亚硝酸盐氮的速率常数
	BC2	20 C 时亚硝酸盐氮转化为硝酸盐氮的速率常数
BC3	20 C 时有机氮的矿化速率常数	
BC4	20 C 时有机磷的矿化速率常数	

4.2 模型校准和验证

采用决定系数(r^2)以及 Nash-Sutcliffe 模拟效率系数(NSC)来评价计算结果。决定系数(r^2)由实测值和计算值按函数 $y=ax$ 做线性回归得到,用于评价实测值与计算值之间的吻合程度。NSC 的计算公式为

$$NSC = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{calc})^2}{\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2}, \quad (1)$$

式中: Q_{obs} 为观测值, Q_{calc} 为计算值, \bar{Q}_{obs} 为观测值的算术平均值。当计算值等于观测值时, $NSC=1$; 通常 NSC 在 0~1 之间, NSC 越大, 计算值与观测值

匹配程度越好。如果 NSC 为负值, 说明模型模拟平均值比直接使用实测算术平均值的可信度更低。

本研究采用 1995—2002 年降雨、径流和水质观测数据对模型进行参数识别。其中, 1995—1996 年数据用于 SWAT 模型的初始化, 1997—2000 年数据用于模型参数校准, 2001—2002 年数据用于模型验证。模型校准和验证结果参见表 5。其中, 由于白河流域下游缺少 2001—2002 年降雨数据, 因此其下游入库站张家坟站不参与模型验证。潮河中游戴营站无泥沙和水质监测数据, 该站不参与泥沙和水质参数的校核和验证。

表5 模型校准和验证结果

模拟步长	校核站点	径流		泥沙		TN		TP	
		r^2	NSC	r^2	NSC	r^2	NSC	r^2	NSC
年校准	下会	0.95	0.96	0.96	0.96	0.99	0.99	0.59	0.44
	张家坟	0.90	0.91	0.98	0.97	0.44	0.59	0.51	0.25
	戴营	0.91	0.84	—	—	—	—	—	—
月校准	下会	0.83	0.81	0.91	0.87	0.91	0.87	0.89	0.67
	张家坟	0.95	0.95	0.99	0.99	0.80	0.81	0.92	0.28
	戴营	0.87	0.77	—	—	—	—	—	—
月验证	下会	0.93	0.92	0.50	0.51	0.82	0.84	0.56	0.71

结果表明,无论是潮河还是白河流域,径流和泥沙的模拟结果都较好, r^2 和NSC均达到了0.80以上。对于年模拟,潮河下会站模拟的TN与实测值匹配很好, r^2 和NSC均达到了0.99,且明显优于白河张家坟站的年模拟结果(0.44和0.59);TP的模拟结果稍差,但也优于张家坟站的模拟结果。对于月模拟,下会站和张家坟站TN的模拟结果均较好(r^2 和NSC均达到了0.80以上);但下会站TP的模拟结果($r^2=0.89$ 和NSC=0.67)总体上要优于张家坟站($r^2=0.92$ 和NSC=0.28)。

潮河下会站月模拟径流与实测值匹配很好, r^2 和NSC均达到了0.92以上。戴营站月模拟径流与实测值匹配也较好($r^2=0.87$ 和NSC=0.77)。泥沙月模拟验证结果比模型校准结果差,但 r^2 和NSC也达到了0.50以上。TN模拟验证的结果比模型校准时稍差,但与实测值匹配也较好($r^2=0.82$ 和NSC=0.84)。TP模拟验证的结果比模型校准的结果稍好。

5 结论

密云水库流域内的氮、磷污染主要来源于流域内各乡镇的畜禽养殖排放、农业化肥的流失和生活污染源的排放;其中,畜禽养殖污染物排放量所占比例分别为:潮河流域COD:92.9%,总氮:64.4%,总磷:87.3%;白河流域COD:91.4%,总氮:65.1%,总磷:89.8%,是流域内主要的非点污染源。

潮、白河流域经济发展分布很不平衡,潮河流域内的人口密度、畜禽养殖密度、化肥施用强度都比白河流域大得多。这说明潮河流域内的农业生产活动强度比白河流域大得多,由此而带来的农业非点源流失也将比白河流域严重,是非点源污染控制中优先要考虑的子流域。

模型校准和验证的结果表明,经过验证的非点源SWAT模型系统完全能够应用于密云水库流域非点源污染入库负荷的模拟和预测,达到了较高的精度。

参考文献 (References)

[1] 刘霞,杜桂森,张会,等. 密云水库的浮游植物及水体营养程度[J]. 环境科学研究,2003,16(1):27-29.
LIU Xia, DU Guisen, ZHANG Hui, et al. Phytoplankton and nutrient degree of water body in Miyun Reservoir [J]. *Research of Envir Sci*, 2003, 16(1): 27-29. (in Chinese)

[2] 徐清,杨天行,刘晓端,等. 密云水库总磷的富营养化分析与预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2003,33(3):315-318.
XU Qing, YANG Tianxing, LIU Xiaoduan, et al. Analysis and prediction of eutrophication for Miyun reservoir [J]. *J Jilin University (Earth Science Edition)*, 2003, 33(3): 315-318. (in Chinese)

[3] 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):191-196.
DU Guisen, LIU Xiaoduan, LIU Xia, et al. Analysis on trophic state of water body in Miyun Reservoir [J]. *ACTA Hydrobiologica SINICA*, 2004, 28(2): 191-196. (in Chinese)

[4] 王晓燕,王一岫,蔡新广,等. 北京密云水库流域非点源污染现状研究[J]. 环境科学与技术,2002,25(4):1-3.
WANG Xiaoyan, WANG Yixun, CAI Xinguang, et al. Investigation of non-point source pollution in the Miyun Reservoir watershed of Beijing [J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 25(4): 1-3. (in Chinese)

[5] 王晓燕,郭芳,蔡新广,等. 密云水库潮白河流域非点源污染负荷[J]. 城市环境与城市生态,2003,16(1):31-33.
WANG Xiaoyan, GUO Fang, CAI Xinguang, et al. Non-point source pollution loading of the Miyun Reservoir watershed, Beijing [J]. *Urban Environment and Urban Ecology*, 2003, 16(1): 31-33. (in Chinese)

[6] 王晓燕,王一岫,王晓峰,等. 密云水库小流域土地利用方式与氮磷流失规律[J]. 环境科学研究,2003,16(1):30-33.
WANG Xiaoyan, WANG Yixun, WANG Xiaofeng, et al. The character of nutrient loss and land use in a small watershed of Miyun Reservoir [J]. *Research of Envir Sci*, 2003, 16(1): 30-33. (in Chinese)

[7] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation (Version 2000) [R]. Texas Water Resources Institute, College Station, Texas TWRI Report TR-192, 2001.

[8] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry, J R, et al. Soil and Water Assessment Tool User's Manual (Version 2000) [Z]. Agricultural Research Service (Draft-April, 2001).

[9] 张忠祥,钱易. 城市可持续发展与水污染防治对策[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1998.
ZHANG Zhongxiang, QIAN Yi. Sustainable Development of Cities and Countermeasures on Water Pollution Prevention and Control [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998. (in Chinese)

[10] 徐谦,朱桂珍,向俐云. 北京市规模化畜禽养殖场污染调查与防治对策研究[J]. 农村生态环境,2002,18(2):24-28.
XU Qian, ZHU Guizhen, XIANG Liyun. Pollution from large-scaled livestock and poultry breeding farms in Beijing and its control [J]. *Rural Eco-Environment*, 2002, 18(2): 24-28. (in Chinese)