

基于 SWAT 模型的流域非点源污染模拟 ——以密云水库北部流域为例

王晓燕, 秦福来, 欧 洋, 薛亦峰

(首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100037)

摘 要:本文利用 SWAT(Soil and Water Assessment Tools)模型,在 GIS 技术和流域数字高程模型的支持下,对北京密云水库北部区域进行了流域非点源污染模拟研究,建立了一套适用于 SWAT 模型的研究区非点源污染基础信息库;根据 2000—2002 年的气象、水文、水质等监测数据,对研究区非点源污染负荷的时空变化进行模拟。结果表明,在空间尺度上,白河流域产流(占总流域的 47.75%)、产沙(占总流域的 53.65%)最大,但潮河水系含沙量(占总流域的 62.55%)最大;单位面积氮磷流失量最高区域在潮河水系的东部丘陵区安达木河控制流域,其次为西部山地区的白河水系控制流域,流失量最低的区域出现在潮河水系中部冲积扇区主河道控制流域。在时间尺度上,8 月份流量最大,占雨季总流量的 51.48%;而硝态氮和矿物质磷在 9 月份输出最大,分别占雨季总输出 83.64%和 50.55%。不同土地利用类型非点源污染流失负荷不同,不同土地利用类型非点源污染流失负荷不同,耕地负荷贡献最大,其次是农村居民点,林地的污染负荷贡献最小。

关键词:非点源污染;SWAT;时空变化模拟;密云水库流域

中图分类号:X524 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)03-1098-08

SWAT-Based Simulation on Non-point Source Pollution in the Northern Watershed of Miyun Reservoir

WANG Xiao-yan, QIN Fu-lai, OU Yang, XUE Yi-feng

(College of Resource, Environment & Tourism, Capital Normal University, Beijing 100037, China)

Abstract: SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model is a watershed scale model developed to predict the impact of land use practices on waterflow, sediment, and agricultural chemical yields in large watersheds over long periods. SWAT model was applied to simulate the non-point source pollution (NPS) loading in the north watershed of the Miyun Reservoir—the most important source of drinking water supply in Beijing. The basic database for SWAT model in the study area has been established using the GIS and Visual Foxpro6.0 technology. The simulation of NPS loading was carried by SWAT model using three years (2000—2002) data. The spatial and temporal variations of loadings were then analyzed. At the spatial scales, the watershed of the Baihe River had higher flow and sediment loads; however, the Chaohe River had high water content of sediment. The eastern hilly watershed of the Andamu River exhibited the highest nutrient load per unit area, followed by the western mountain area of the Baihe River watershed, and the lowest load was from the central alluvial plain of the Chaohe River watershed. On the temporal scale, the highest flows were observed in August and highest nutrient load in September. Woodlands contribute the smallest NPS loading, orchards are the second smallest contributor, and farmlands contribute the highest NPS loading. Wastewater discharge from villages is the second highest contributor.

Keywords: non-point source pollution (NPS); SWAT; simulation of temporal and spatial variation; the watershed of Miyun Reservoir

收稿日期:2007-07-31

基金项目:北京市科技项目 密云水库流域水土流失综合防治体系及示范推广研究”,北京市教委科技项目(KM200510028012);北京市优秀人才计划 20061D0501600225)

作者简介:王晓燕 (1967—),女,甘肃人,博士,教授,研究方向为流域水环境污染研究。E-mail: cnuwxy@sohu.com

非点源污染(Non-Point Source Pollution)具有不确定性强、时空差异大、影响因素及作用过程复杂、污染监测困难等特点,为了对非点源污染进行有效的治理与控制,必须定量研究污染物的流失规律。地理信息系统(GIS)技术支持的非点源污染模型,可以通过对整个流域系统及其内部发生的复杂污染过程进行定量描述,分析非点源污染产生的时间和空间特征,识别其主要来源和迁移路径,预报污染的产生负荷及其对水体的影响,并评估土地利用的变化以及不同的管理与技术措施对非点源污染负荷和水质的影响,为流域规划和管理提供决策依据。

SWAT 模型的有效性已经得到了国内外许多研究项目的证明,模型已经广泛地应用流域的水平衡、河流流量预测和非点源污染控制评价等诸多方面^[1-3]。国内研究者对 SWAT 模型的空间离散化和空间参数化进行了深入研究,并成功地将其应用到小流域的径流和泥沙的模拟、化学径流(营养物流失和农药化肥流失等)模拟研究。如李硕^[4]在遥感和 GIS 的支持下,对 SWAT 模型的空间离散化和空间参数化,并应用到江西潦水河流域的径流和泥沙的模拟中;张建永^[5]对北京官厅水库流域进行了 SWAT 模型的化学径流(营养物流失等)模拟研究;张雪松^[6]在河南卢氏流域(4 623 km²)应用 SWAT 模型进行中尺度流域的产流产沙模拟试验,也得出模型在长期连续径流和泥沙负荷模拟中具有较好的适用性的结论。

对于密云水库流域,周为峰等^[7]、庞靖鹏等^[8]利用遥感和 GIS 技术,借鉴美国通用土壤流失方程 USLE 对上游土壤侵蚀进行定量估算、划分非点源污染的关键区域;苏保林等^[9]利用 SWAT 模型,经过参数率定和模型验证,对密云水库整个流域非点源时空变化、负荷关键区进行了识别,并针对不同的流域管理情景进行了情景分析。

综合国内 SWAT 模型的应用研究,大多是在一个完整流域(拥有一个流域出口)上进行的产流产沙或非点源污染模拟研究^[1-9]。本文的研究区域集中在北京密云境内水库周边,为非闭合多出口流域,这一方面加大了前期基础数据整理难度,另一方面也使得模拟研究结果分析量倍增。这在国内尚没有此类研究先例,本项研究的实施也为 SWAT 模型的广泛应用开辟了新的途径。

1 研究区概况

密云水库是北京市的惟一的地表饮用水水源,流域点源污染较少,非点源污染为影响水库水质的主要因素,其中水土流失、农田施用化肥农药以及畜禽养殖是主要的污染形式。目前库区水体的营养程度为中营养型,并出现向富营养型发展的特征^[10,11]。

考虑到模型所需资料及流域监测数据系列的可获得性和完整性,本文将研究区域集中在密云水库北部流域的密云县行政区内,具体范围包括白河流域自张家坟水文站以下至库区的部分,潮河流域自下会水文站以下至库区部分,白马关河、蛇鱼川河、安达木河、清水河流域,整个研究区的水系最终汇向密云水库,因此上述河流的入库口都作为研究区的出水口。研究区域大致涉及密云县北部、偏北部的 6 个乡镇(太师屯、不老屯、新城子、高岭、冯家峪、石城)。研究区域总

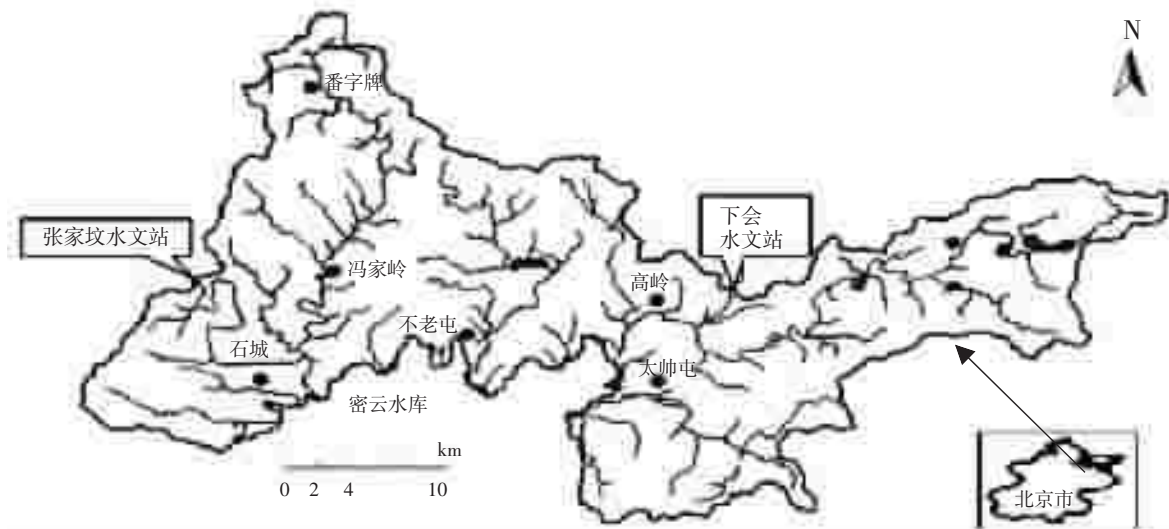


图 1 研究区域图

Figure 1 Map of the study area

面积为 951.72 km², 范围在 40°27′3″~40°47′44″N, 116°42′9″~117°28′17″E 之间,见图 1。

2 流域基础数据库的建立

模型所需的数据可以分成空间数据和属性数据。空间数据的形式主要是各类 GIS 电子图层,属性数据主要由各类表、文本文件组成。流域基础数据库的建立也就是基于这两类数据形式,地图的制备、修改、存储都由 ArcGIS8.3 等 GIS 软件来完成,属性数据则依靠 Visual Foxpro6.0 关系数据库软件来操作和管理。

按照 SWAT 模型的需要,将经纬度坐标转化为大地坐标(m),考虑到由于研究区域较小且东西向延伸,为保证投影变换后较高的面积真实性,因此选择了 Albers 等积圆锥投影进行图层的投影变换。基础数据建立说明见表 1。

3 模型应用

3.1 子流域划分及水文响应单元(HRUs)的生成

数字高程模型 (DEM)可为流域的非点源污染研究提供必要的流域地形和水文特征基础数据。对于大流域而言,若采用高精度的 DEM,往往会受到计算机存储容量、计算速度和数据源的严重制约而无法进行。若选择较低精度的 DEM,由于描述地形参数的信息量不足则会导致某些地形特征值提取的失真,从而降低其分析和应用结果的可信度。因此在流域尺度上如何确定适当的 DEM 精度来描述地形并控制其精度损失是十分必要的。现有的结论是不同精度的 DEM 对流域面积、河网结构、高程等特征以影响很小,但是对与坡度有关的参数差别较大。此外还有大量研究从地形学的角度探讨 DEM 提取地面坡度的精度问题,但均未能就坡度损失值随精度及地形变化的规律

进行量化模拟,不利于误差的具体估算与纠正^[12-14]。

本研究中选取 25 m×25 m 精度的 DEM 进行流域应用时,通过对不同精度 DEM 系列与基准 DEM 建立的坡度拟合回归方程式,在子流域尺度上进行了坡度损失控制代换,使模型中应用的坡度值水平近似达到 5 m×5 m 精度的 DEM 提取的坡度值水平^[15]。

由于潮河和白河在本研究区之外尚有河水汇入,因此分别在两条河流靠近流域边界的相应水文测站(潮河为下会,白河为张家坟)设置流域入水口,一方面方便对两河上游的水质和水量数据的获取,另一方面可以通过控制这两个入水口将研究区域近似为闭合流域进行流域的水系的提取和子流域的刻划。最后,在集水面积阈值=8 km² 的尺度上提取了流域的水系,并将研究区共划分成 75 个子流域。

SWAT 模型采用了不确定空间位置的水文响应单元(HRUs)划分方法,得到子流域内部不同土壤和土地利用组合的面积,使得模型可以模拟反映出其不同组合间的水文差异。

根据研究区域土地利用和土壤类型的组合和分布特征,确定土地利用的面积阈值为 25%,土壤类型的面积阈值为 25%,两图叠加后,生成 114 个水文响应单元。

3.2 模型校正

大量研究表明,SWAT 模型径流模拟中最敏感的 2 个参数是:径流曲线数 CN 及土壤蒸发补偿系数 ESCO^[16]。本文主要对上述 2 个关键参数进行敏感度分析和调整。径流曲线数 CN 的调整结果见表 2。

根据研究区域的土壤水分蒸发量等相关资料,考虑到季节的变化,模型的 ESCO 参数阈值设为 0.2~0.95。

模型适用性评价的顺序:先率定水量,然后率定输

表 1 SWAT 模型输入参数及获取途径
Table 1 Input parameters of SWAT model and data sources

数据类型		包含参数	获取途径
流域特征值	气象	日最高、最低气温,日降水量,日太阳辐射,日风速,日相对湿度等	1955—1980 年 25 a 气象站点观测资料; 2000—2002 年 3 a 逐日降雨和气温资料
	地形、河道	子流域面积,子流域平均坡长和坡度,平均高程,河道长度,河道宽度,河道深度,河道坡度,河道最低点、最高点高程等	数字高程模型 (DEM) 1:50 000、栅格大小 5 m×5 m 的 DEM 分析 现场勘测
单元级参数	土壤	土壤类型的空间分布,土壤物理属性(土壤容重、土壤导水率、土壤质地等),土壤可蚀性因子,土壤化学属性(有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷)等	1:50 000 北京密云县土壤类型图 野外采样室内试验
	土地利用	流域土地利用类型及其空间分布状况	2002 年 TM 影像(分辨率为 30 m)和同时段的 IRS 全波段黑白影像(分辨率为 5 m)
	农业管理措施	作物轮作时序,灌溉方式、数量,施肥种类、时间和数量,土地耕作方式,作物种类	现场调查,有关部门统计资料
	水库	日径流值,日泥沙值	水文站点资料

表 2 研究流域 CN 值
Table 2 CN of different soil-land use types

土壤类型	土地利用方式代码	水文土壤组	土壤厚度/cm	CN (II)
山地棕壤	林地	B	30	60
淋溶褐土	草地	B	30	69
碳酸褐土	果园	B	15	66
普通褐土	农地	B	20	77
潮土	居住地	C	60	86

注:CN(II)为 AMCH 水平,小区土壤水文条件差时对应的 CN 值。

沙量,最后率定水质。径流校准采用下会站 1990—1998 年的逐月平均径流量监测数据,与模型模拟结果比较,通过计算, R^2 为 0.82,达到了乙等 (R^2 值为 0.7~0.9) 方案的要求,月径流模拟与实测值的拟合效果也较好 (图 2)。

由于缺乏长时间序列的泥沙和水质监测数据,本文只对 2000 年石匣小流域的泥沙和总氮、总磷模拟过程进行了校准。结果表明,泥沙、总氮、总磷的模拟误差均小于 10%,模拟效果好,总体反映了实际情况。

4 结果分析

4.1 非点源污染负荷空间分布

4.1.1 各水系非点源污染负荷贡献

按照模型对研究区域水系及子流域的刻划结果及其出水口 (入库口) 的性质,将整个研究区的水系大致划分为 3 个部分:一是白河水系,具体包括白马关河、蛇鱼川河和白河在本研究区的主河道及支流;二是潮河水系,包括安达木河和潮河在本研究区的主河道及支流;三是除白河和潮河外,拥有单独入库口的其他河流,如牯牛河、清水河和库区周边一些短小支流共同组成的库区周边水系。

2000—2002 年 3 年的模拟结果分析,研究区域非点源污染贡献主要集中在白河流域和潮河流域,其中贡献量最大的是白河流域,其原因一方面是由于本区降雨比较集中,多暴雨;另一方面由于本区地表坡度较大,土壤易受侵蚀而发生水土流失。白河流域产流 (占总流域的 47.75%)、产沙 (占总流域的 53.65%) 最大,但潮河水系含沙量 (占总流域的 62.55%) 最大,其贡献率综合表现为 (见图 3)。

4.1.2 有机氮、磷的空间输出规律

有关研究显示,流域中 90% 以上的营养物流失与土壤流失有关。而与土壤颗粒结合的养分主要是有机态养分^[7]。分析表明,在本研究区域的营养物流失负荷中,有机氮、磷与总氮、总磷的流失负荷呈较明显的正相关关系,分别为 0.815 6 和 0.763 1。

其拟合二次方程分别为:
$$Y_1 = 4\,451.478\,591 - 0.009\,863 \cdot X_1 + 1.301\,701\,71E-08 \cdot X_1^2 \quad (R^2 = 0.824\,3)$$
$$Y_2 = -466.606\,676 + 0.815\,931 \cdot X_2 - 0.000\,2 \cdot X_2^2 \quad (R^2 = 0.770\,9)$$
其中 X_1 、 X_2 为总氮、总磷, Y_1 、 Y_2 为有机氮和有机磷。

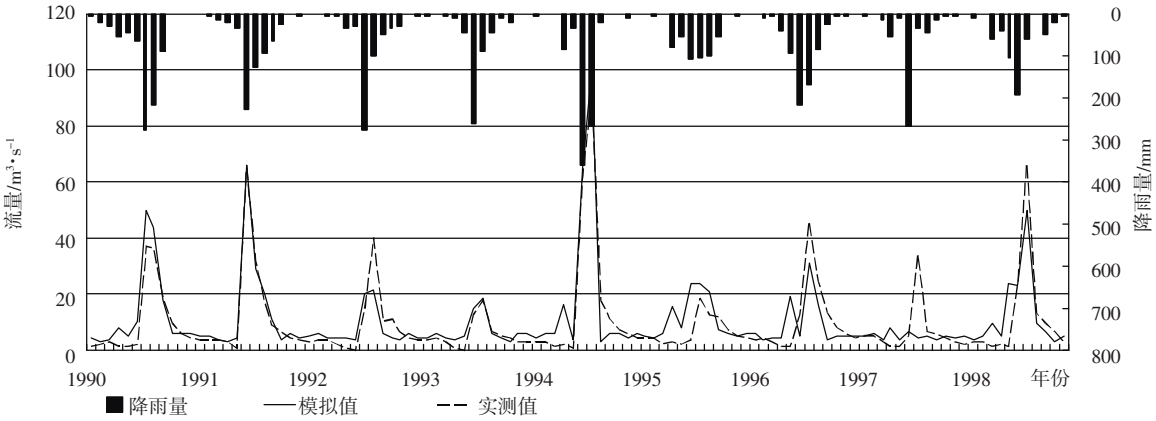


图 2 模型模拟月均径流量与实测月均径流量比较 (下会站数据)
Figure 2 Stimulated and observed value of monthly flow (Xiahui Station)

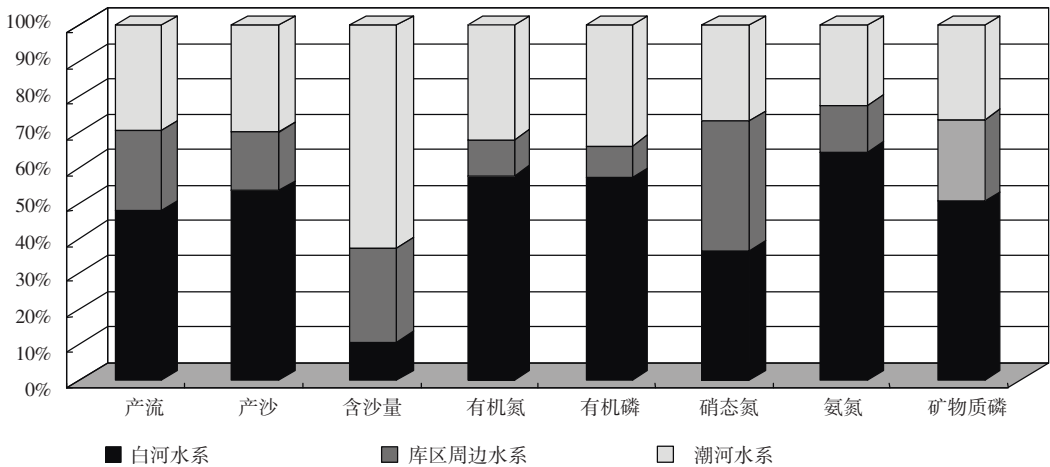


图 3 不同河流流域非点源污染负荷贡献率

Figure 3 Percentages of non-point source pollution loading from various river systems

因此本文主要以有机氮和有机磷的模拟负荷结果分析为例,有代表性地反映整个流域的非点源污染营养物流失规律。

在 3 个不同水系、河流控制的流域中,有机氮和有机磷的负荷量均成较强的正相关关系,相关系数达 0.994 6。在 2000 年的模拟结果中,3 个水系、河流控制流域的有机氮和有机磷单位面积流失量相近,均在 150~250 kg·km⁻² 之间。但在其后两年,白河流域的模拟产出量一直呈上升趋势,而潮河流域以及其他河流流域的有机氮和有机磷的模拟产出量却有较大波动,并整体呈下降趋势,其中以潮河流域最为明显 (图 4)。

可以看出,研究区的有机氮和有机磷单位面积流失量最高出现在潮河水系下的安达木河控制流域,其次为白河水系控制流域,流失量最低的出现在潮河水系的主河道控制流域,分析表明,受不同地貌类型的

影响,研究区有机氮、有机磷流失呈“西高-中低-东高”的空间分布,在东部丘陵区 (安达木河控制流域) 的有机氮、有机磷含量明显高于西部山地区 (白河水系控制流域),山地区又明显高于中部库区冲积扇区 (潮河主河道控制流域)。

4.2 非点源污染负荷时间分布

4.2.1 雨季的非点源污染负荷贡献

通过对研究区中古北口和石城两个气象站点 21 年逐月降雨资料的分析,降雨每年多集中夏秋季 6~9 月份,约占全年降雨总量的 84% 以上,降雨量与流量呈现明显的正相关关系。由于非点源污染的基本特征是污染物主要以水土流失为途径,因此,每年的雨季 (6~9 月) 也就成为流域非点源污染产生和扩散的重要时段。其非点源污染负荷贡献率见图 5。其中 8 月份流量最大,占雨季总流量的 51.48%;而硝态氮和矿物质磷在 9 月份输出最大,分别占雨季总输出

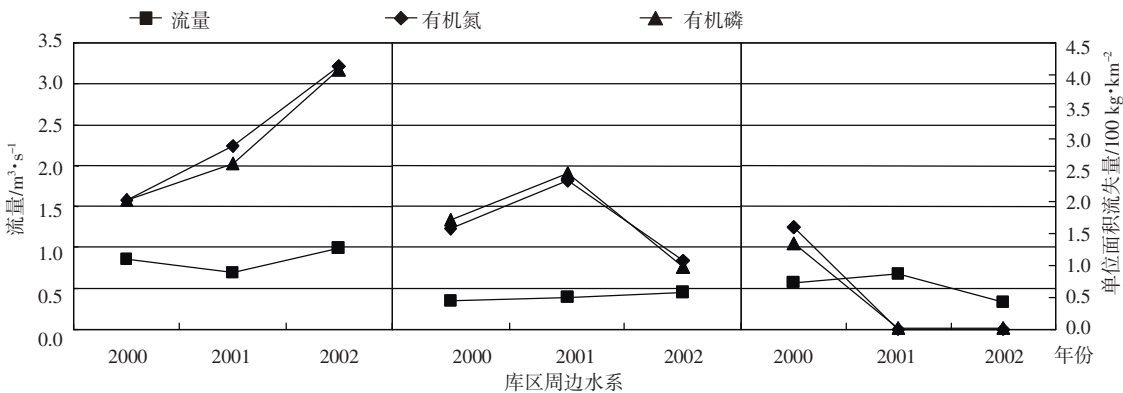


图 4 不同河流流域有机氮、有机磷负荷变化 (2000—2022)

Figure 4 Percentages of organic N and organic P loading from various river systems

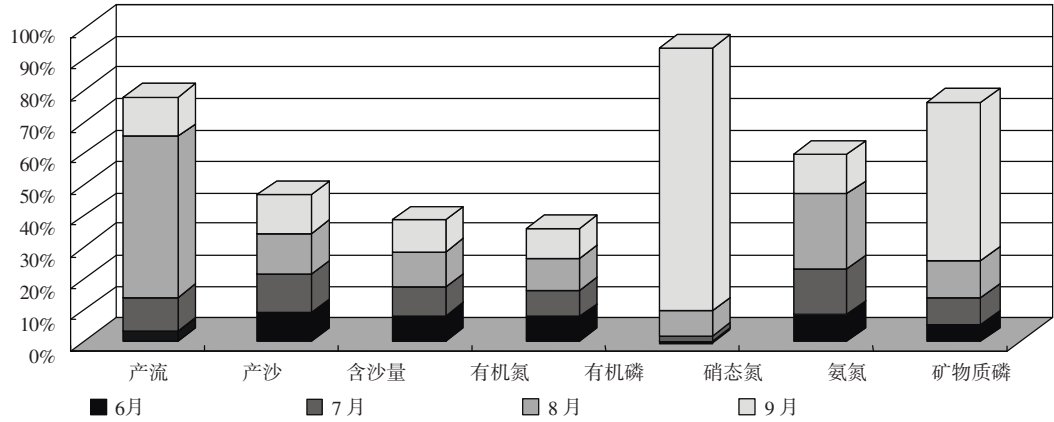


图 5 雨季非点源污染负荷贡献率 (2000—2002)

Figure 5 Percentage of non-point source pollution loading at rainy seasons

83.64%和 50.55%。

4.2.2 有机氮、磷的年内流失规律

通过 3 年逐月的模型模拟数据分析,研究区有机氮和有机磷的负荷与流量有明显的相关关系,分别为 0.909 8 和 0.803 0,但与产沙的相关关系规律性较差,

有机氮为 0.721 4, 有机磷却为 0.383 8。根据图 6 显示,年内有机氮、磷负荷随季节呈不规则的 W”形态变化:一般在雨季前期 (5~6 月份),有机氮磷的输出会有一个 “小高峰”,分析原因多为少量降雨侵蚀土壤表面所致。随着雨季的深入,降雨量与强度增大,土壤

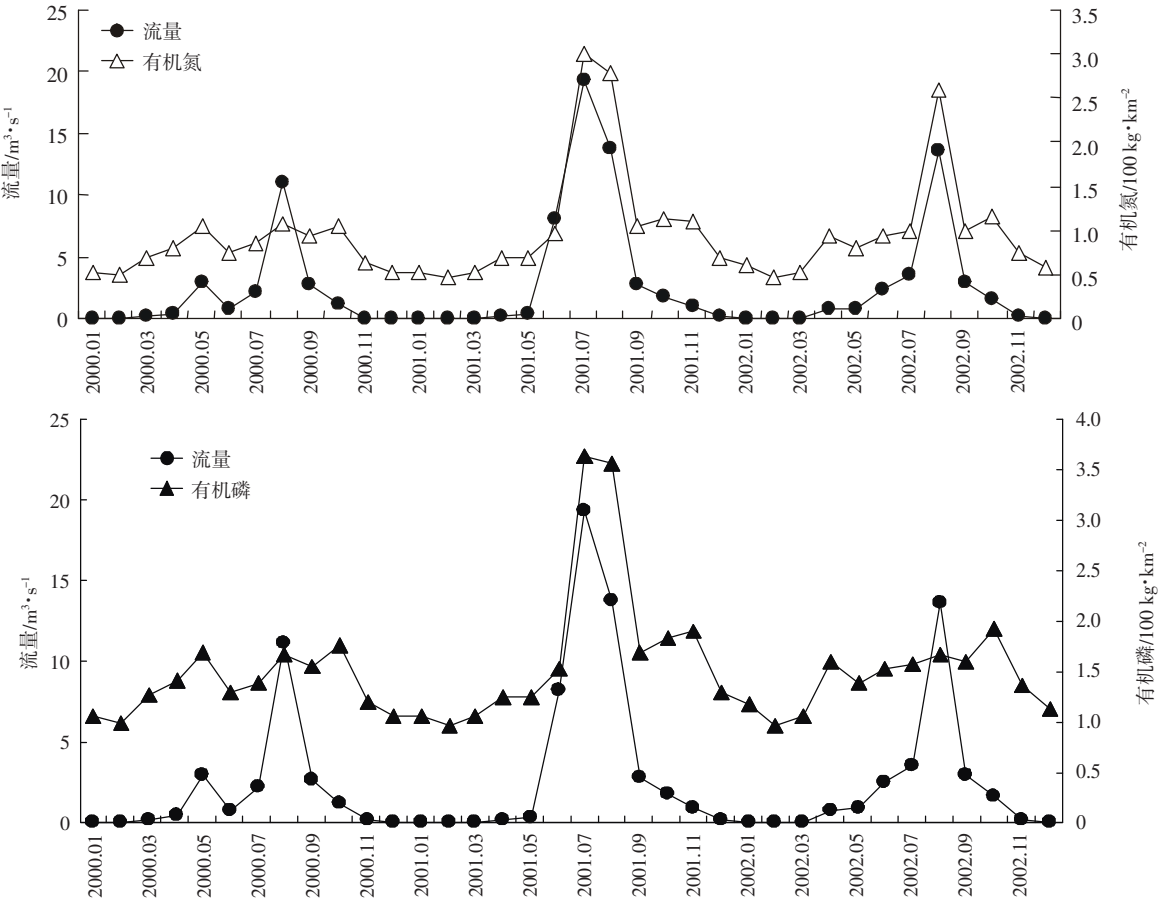


图 6 有机氮、有机磷负荷与流量变化关系

Figure 6 Variation of organic N and organic P with flow

侵蚀加深,每年 9 月份左右,加之秋季作物收获,植物落叶等影响,区域的有机氮、磷的流失会达到每年的最大值;雨季过后,流失量有所回落,到冬季由于降雪融雪事件发生,对地表产生轻微侵蚀,则又产生年度的第三个“峰”。

4.3 不同土地利用方式下的非点源污染负荷

从模型生成的 114 个水文响应单元中,本文选择了 5 个具有不同土地利用方式比较典型的 HRUs,分别隶属于 5 个不同的子流域,用于分析在不同土地利用方式下非点源污染负荷分布情况。

由图 7 可以看出,研究区的非点源污染流失负荷

(土壤流失、有机氮、有机磷)与土地利用有密切的关系。在五种不同土地利用方式下,林地和果园的非点源污染负荷贡献最小,耕地和农村居民点的负荷贡献最大。其中土壤流失量最大的为耕地,其次为草地和农村居民点,而果园和林地的土壤流失相对较小。有机氮和有机磷的流失量最大出现在农村居民点,其次为耕地和草地,林地和园地最小,流域综合表现为其污染负荷基本与林地覆盖面积成相反的趋势,即农田面积越小、林地面积越大则污染负荷越小,反之,负荷越大,这与本区监测研究的结果一致^[18,19]。

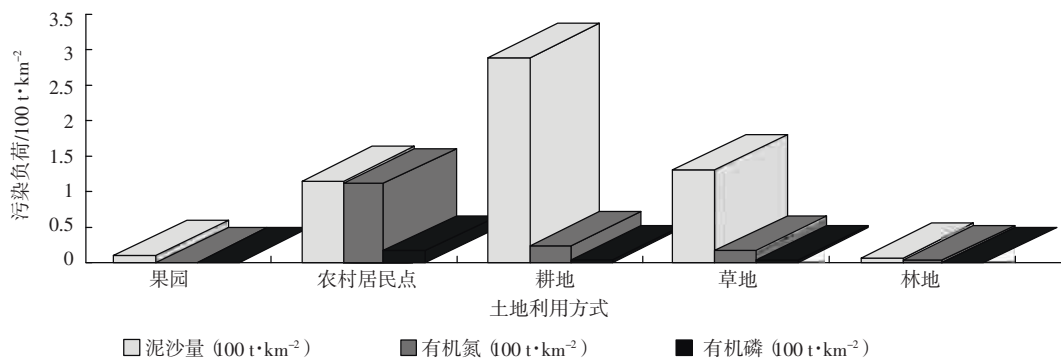


图 7 研究区五类不同土地利用方式的非点源污染负荷 (2000—2002)

Figure 7 Non-point source pollution loadings of different land uses

5 结论

在空间尺度上,白河流域产流(占总流域的 47.75%)、产沙(占总流域的 53.65%)最大,但潮河水系含沙量(占总流域的 62.55%)最大;单位面积氮磷流失量最高区域在潮河水系下的东部丘陵区安达木河控制流域,其次为西部山地区的白河水系控制流域,流失量最低的区域出现在潮河水系中部冲积扇区主河道控制流域。

在时间尺度上,8 月份流量最大,占雨季总流量的 51.48%;而硝态氮和矿物质磷在 9 月份输出最大,分别占雨季总输出的 83.64%和 50.55%。

不同土地利用类型非点源污染流失负荷不同,耕地负荷贡献最大,其次是农村居民点;果园次之,林地的污染负荷贡献最小。

研究结果表明,SWAT 在流域基础数据库的支持下,对密云水库北部非闭合区域的应用研究是可行的。

参考文献:

- [1] Spruill C A, Workman S R, Taraba J L. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model[J]. *Transactions of the ASAE*, 2000, 43(6): 1431–1439.
- [2] Drolc J Zagorc Koncan. Estimation of sources of total phosphorus in a river basin and assessment of alternatives for river pollution reduction [J]. *Environment International*, 2002, 28: 393–400.
- [3] Chaplot V. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and $\text{NO}_3\text{-N}$ loads predictions [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 312: 207–222.
- [4] 李 硕. GIS 和遥感辅助下流域模拟的空间离散化与参数化研究与应用[D]. 南京师范大学, 2002.
Li Shuo. Study on spatial discretization in basin simulation aided by RS and GIS [D]. Nanjing Normal University, 2002.
- [5] 张建永. 基于 SWAT 模型的官厅水库流域非点源污染模拟与评价[D]. 北京师范大学, 2002.
ZHANG Jianyong. GIS-based simulation on Non-point source pollution in the watershed of Guanting Reservoir [D]. Beijing Normal University, 2002.

- [6] 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[J]. 水土保持研究, 2003, 10(4): 38–42.
- ZHANG Xuesong, HAO Fanghua, YANG Zhifeng. Runoff and sediment yield modeling in meso-scale watershed based on SWAT model [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 10(4): 38–42.
- [7] 周为峰, 吴炳方. 基于遥感和 GIS 的密云水库上游土壤侵蚀定量估算[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 46–50.
- ZHOU Weifeng, WU Bingfang. Soil erosion estimation of the up river areas of Miyun Reservoir located on the Chaobai River using remote sensing and GIS[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(10): 46–50.
- [8] 庞靖鹏, 徐宗学, 刘昌明. 基于 GIS 和 USLE 的非点源污染关键区识别[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 171–174.
- PANG Jingpeng, XU Zongxue, LIU Changming. Identification of critical Nonpoint pollution source areas based on GIS and USLE [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2): 171–174.
- [9] 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, 2006, 46(3): 360–365.
- SU Baolin, WANG Jianping, JIA Haifeng. Identification of non-point source pollution in the Miyun Reservoir watershed [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2006, 46(3): 360–365.
- [10] Wang Xiaoyan, Li Tingfang, Xu Qian, et al. Study on the distribution of non-point source pollution in the watershed of Miyun reservoir, Beijing, China [J]. *Water Science and Technology*, 2001, 44(7): 35–40.
- [11] 杜桂森, 孟繁艳. 密云水库水质现状及发展趋势[J]. 环境科学, 1999, 20(2): 35–40.
- DU Guisen, MENG Fanyan. Water quality and development trend of Miyun Reservoir [J]. *Chinese Journal of Environment Science*, 1999, 20(2): 35–40.
- [12] 吴险峰, 刘昌明, 王中根. 栅格 DEM 的水平分辨率对流域特征的影响分析[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 148–154.
- WU Xianfeng, LIU Changming, WANG Zhonggen. Effect of horizontal resolution of raster DEM on drainage basin characteristics [J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 148–154.
- [13] 刘学军, 王叶飞, 曹志东, 等. 基于 DEM 的坡度坡向误差空间分布特征研究[J]. 测绘通报, 2004, 12: 11–13.
- LIU Xuejun, WANG Yefei, CAO Zhidong, et al. A study of error spatial distribution of slope and aspect derived from grid DEM [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2004, 12: 11–13.
- [14] 赵牡丹, 陈正江, 晋 锐. DEM 提取地面平均坡度误差的量化模拟[J]. 水土保持通报, 2002, 22(3): 55–57.
- ZHAO Mudan, CHEN Zhengjiang, JIN Rui. A aath-simulation on accuracy of gradient extracted from DEMs[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2002, 22(3): 55–57.
- [15] 秦福来, 王晓燕, 窦培谦, 等. 不同精度 DEM 流域地形特征提取分析及坡度误差控制研究[J]. 国土资源遥感, 2005, 66(4): 56–59.
- QIN Fulai, WANG Xiaoyan, DOU Peiqian, et al. An analysis of the watershed terrain features derived from DEMs with different precision and a study of the slope error control [J]. *Remote sensing for land & resources*, 2005, 66(4): 56–59.
- [16] 王中根, 刘昌明, 黄友波. 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.
- WANG Zhonggen, LIU Changming, HUANG Youbo. The theory of SWAT model and its application in Heihe basin [J]. *Progress In Geography*, 2003, 22(1): 79–86.
- [17] 王晓燕. 非点源污染及其管理[M]. 北京: 海洋出版社, 2003.
- WANG Xiaoyan. Nonpoint source pollution and management [M]. Ocean Press, Beijing, 2003.
- [18] 王晓燕, 王晓峰, 王振刚, 等. 北京密云水库石匣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): 33–36.
- WANG Xiaoyan, WANG Xiaofeng, WANG Zhengang, et al. The character of nutrient loss and land use in a small watershed of Miyun Reservoir [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2003, 16(1): 33–36.
- [19] 房孝铎, 王晓燕, 窦培谦. 密云水库上游流域氮流失规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 852–856.
- FANG Xiaoduo, WANG Xiaoyan, DOU Peiqian. Nitrogen loss in the watershed upstream of Miyun Reservoir[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3): 852–856.