

基于 SWAT 模型的大宁河流域 非点源污染空间特性研究

范丽丽, 沈珍瑶, 刘瑞民, 宫永伟

(北京师范大学 环境学院 环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 以三峡库区大宁河流域为研究区域, 应用 SWAT 模型进行了流域农业非点源污染负荷的模拟计算。利用巫溪水文站 2000—2004 年的实测日径流和泥沙数据进行了模型的率定与验证。验证结果表明, SWAT 模型适用于大宁河流域。利用验证后的模型分析了大宁河流域 2003 年的非点源污染空间分布特征, 结果发现, 大宁河流域西部地区是土壤侵蚀发生相对严重的地区, 有机氮产出的地区和高泥沙量产出的地区大致相同。总体上, 大宁河流域非点源污染的产生量西部高于东部, 南部高于北部, 中部地区最小。针对 SWAT 模型的空间分析结果提出了该区非点源污染的防治措施。

关键词: 大宁河流域; SWAT 模型; 农业非点源污染; 空间分布

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2008)04—0133—05

中图分类号: X53, P334

Spatial Distribution of Non-point Source Pollution in Daninghe Watershed Based on SWAT Model

FAN Li-li, SHEN Zhen-yao, LIU Rui-min, GONG Yong-wei

(State Key Lab. of Environ. Simulation and Pollution Control,

School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: SWAT model was used to calculate the agricultural non-point source pollution in Daninghe watershed. The runoff and the sediment data series from 2000 to 2004 were used to calibrate the parameters and validate the model. Results indicated that SWAT model was appropriate for Daninghe watershed. Then the calibrated model was used to calculate the spatial distribution of non-point source pollution. The calculated result indicated that the west part of the watershed was the serious soil erosion area, which is the same as the spatial distribution of organic nitrogen. In one word, the production of non-point source pollution in the west is more than that in the east, while in the south, more than that in the north. The measures for the prevention of non-point source pollution were presented according to the simulated results.

Keywords: Daninghe watershed; SWAT model; agricultural non-point source pollution; spatial distribution

农业非点源污染被认为是对地表和地下饮用水源的最大威胁, 全世界约有 30%~50% 的地表水体已经受到非点源污染物的影响^[1]。国外农业非点源污染研究起步于 20 世纪 60 年代, 首先在美、英、日等一些发达国家开展。到 20 世纪 70 年代以后逐渐为世界各地所重视。

我国农业非点源污染研究开始于 20 世纪 80 年代, 首先在全国范围内进行湖泊富营养化调查, 随后在北京地区、珠江流域、辽河流域、长江中下游流域的广州、沈阳、上海、杭州、苏州、南京等地开展了非点源污染研究。SWAT 模型是 20 世纪 90 年代发展起来

的且在国内外应用较好的具有物理机制的分布式水文模型。国内, 长江流域^[2]、黄河流域^[3-5]、海河流域^[6], 以及中国红壤生态实验站^[7], 都有 SWAT 应用的研究案例。

国内学者郝芳华^[8]以官厅水库为例, 对典型水文年的非点源污染负荷进行了模拟, 结果表明流域非点源污染负荷与降水量成正相关。万超^[9]应用率定后的 SWAT 对 3 个不同的水平年进行模拟计算, 得到了潘家口水库上游流域非点源污染负荷的时空特征及主要影响因素。许其功^[10]以大宁河流域为研究区域, 应用 SWAT 模型模拟了参数空间分布对非点源

收稿日期: 2008-01-09

修回日期: 2008-04-21

资助项目: 国家自然科学基金项目(40771193); 国家重点基础研究发展规划(973)课题(2003CB415204)

作者简介: 范丽丽(1981—), 女(汉族), 河北省邢台县人, 硕士, 助理工程师, 主要从事水环境与水资源研究, E-mail: sicream11122@163.com。

通信作者: 沈珍瑶(1967—), 男(汉族), 浙江省宁波市人, 博士, 教授, 主要从事水环境与水资源研究, E-mail: zyshen@bnu.edu.cn。

污染的研究,结果表明,不同的流域划分方案对营养物质的流失产生了轻微的影响,但没有明显的变化趋势和规律。本文在参数率定和模型验证的基础上,应用 SWAT 模型对大宁河流域巫溪水文站以上区域的非点源污染负荷空间变化规律进行模拟与分析,从而为研究区的水土保持及非点源污染治理提供参考。

1 研究区概况

大宁河发源于三峡库区巫山县的北部山区,贯通重庆市巫山、巫溪两县,自巫山县注入长江。其中,巫溪水文站控制流域面积 2 075.73 km²,境内各地多年平均降水量在 1 030 ~ 1 950 mm 之间。除大宁河(干流)、白杨河河谷年降水量在 1 100 mm 左右外,其余地区均大于 1 300 mm。流域内的主要作物有玉米、小麦、水稻和马铃薯等,土地利用类型主要为耕地、草地、林地。

本文研究区域为巫溪水文站控制流域,研究流域面积 2 075.73 km²。研究区域内土地利用类型以林地、旱地和草地为主,其中林地最多,占到总面积的 66.39%;旱地次之,占总面积的 21.84%;草地最少,占 11.19%。土壤类型以黄棕壤最多,占总面积的 29.91%;黄褐土次之,占总面积 19.78%;其它类型的土壤面积比例都较小。

2 研究方法

2.1 数据来源

SWAT 模型需要庞大而详细的数据。最主要的 GIS 图层数据包括流域的 DEM、土壤类型图、土地利用图等。这些 GIS 数据在 ArcView 中必须以图层的形式组织起来。本研究使用的 SWAT 2003 作为 ArcView 软件的一个扩展模块,可以接受 ArcView 中的矢量和栅格图层数据。主要输入数据及来源见表 1。

表 1 SWAT 模型主要输入数据及来源

数据类型	数据项目	数据来源
图件	DEM(1:25万)	国家基础地理信息中心
	土地利用图(1:10万)	中国科学院地理科学与资源研究所
	土壤图(1:100万)	中国科学院南京土壤研究所
水文	流量、泥沙和水质	长江水利委员会水文局
	气象	长江水利委员会水文局;巫山气象局
土壤物理属性	密度、水力传导度、田间持水量等	《中国土壤系统分类——理论·方法·实践》
土壤化学属性	土壤有机氮、硝酸盐氮、有机磷等	中国土壤数据库
作物管理措施	作物生育期和施肥等	实地调查

2.2 研究思路

本论文的研究思路主要是应用 SWAT 模型,综合利用地理信息系统(GIS)、数字高程模型(DEM)等先进手段,结合流域野外调查方法,获取 SWAT 模型所需数据。在此基础上对模型进行参数率定与验证,模拟并分析研究区域非点源污染负荷时空变化规律,为研究区域的水土保持及非点源污染治理提供参考。

2.3 参数率定与模型验证

论文选用巫溪水文站 2000—2004 年的日观测径流量数据和泥沙数据进行参数率定与模型验证,其中 2000—2002 年的数据用于参数率定阶段,2003—2004 年数据用于模型验证阶段。泥沙及径流的参数率定采用计算机自动优化法和人工试错法相结合的方式进行。水质数据只有 2004 年的月监测数据,因此营养负荷的率定过程和验证过程同时进行,采用人工试错法进行模型调参。

参数率定目标方程采用 SSQ 方程。模型率定的顺序是:先率定水量,再率定输沙量,空间上的调参顺

序是先上游后下游。在参数率定的基础上,选择巫溪水文站 2003—2004 年数据用作模型验证。模型参数最终取值见表 2。

本文选用相对误差 R_e 、相关系数 R^2 和 Nashé—Suttcliffe 系数 E_n 评价模型的适用性。表 3 列出了对径流、泥沙和 $\text{NH}_3\text{—N}$ 率定和验证结果的评价系数。结果表明,经率定和验证后的 SWAT 模型适用于大宁河流域进行农业非点源污染研究。

3 空间特性分析

非点源污染的产生具有很强的空间性,它和研究区内降雨量、土地利用、土壤及地形的分布密切相关。SWAT 模型是一个分布式模型,通过和 GIS 的结合,可以表达研究区内空间上非点源污染的产出特性。

本文以 2003 年模拟结果为例,从计算效率和该研究区的实际情况出发,取河道阈值面积 3 000 hm²,划分了 27 个子流域,分析研究区域降水量、径流深、土壤侵蚀及非点源污染负荷的空间分布特征。

表 2 模型参数率定最终值

参数	模拟过程	值域/变化范围	参数终值
径流曲线数 CN ₂	径流、泥沙	10% ~ -10%	-10%
土壤蒸发补偿系数 ESCO	径流、泥沙	0 ~ 1	0.005
土壤中植物可利用水量 SOL_AWC	径流、泥沙	0 ~ 1	0.380
土壤剖面深度 SOL_Z	泥沙	20% ~ -20%	20%
泥沙输移线性系数 SPCON	泥沙	0 ~ 1	0.001
泥沙输移指数系数 SPEXP	泥沙	1.0 ~ 1.5	1.100
氮渗透系数 NPERCO	氮	0 ~ 1	0.200
土壤中有氮的初始浓度 SOL_ORGN	氮	0 ~ 4 000	150.000
生物混合效率系数 BIOMIX	氮	0 ~ 1	0.600
残留物降解系数 RSDCO	氮	0 ~ 1	0.050

表 3 参数率定和模型验证结果

变量名称		月均值		R _e	R ²	E _{ns}
		实测值	模拟值			
径流量/10 ⁶ m ³	率定期	158.21	173.88	9.90%	0.91	0.79
	验证期	192.43	225.59	17.20%	0.76	0.68
泥沙负荷/t	率定期	120 354.00	83 163.00	-30.00%	0.83	0.78
	验证期	91 012.00	108 161.00	18.84%	0.73	0.66
NH ₃ -N/t		1 920.15	1913.06	-0.36%	0.78	0.72

3.1 空间分布特征

(1) 降雨量和径流深空间分布。由图 1 可以看出,大宁河流域 2003 年降雨量为 1 480 mm,其空间分布很不均匀。该区降雨量从西北地区向东南地区

逐渐降低。区域径流深的空间分布规律和降雨量空间分布特征极为相似,即总体上西部地区高于东部地区,南部地区高于北部地区,西部地区径流深最大,中部地区最小。

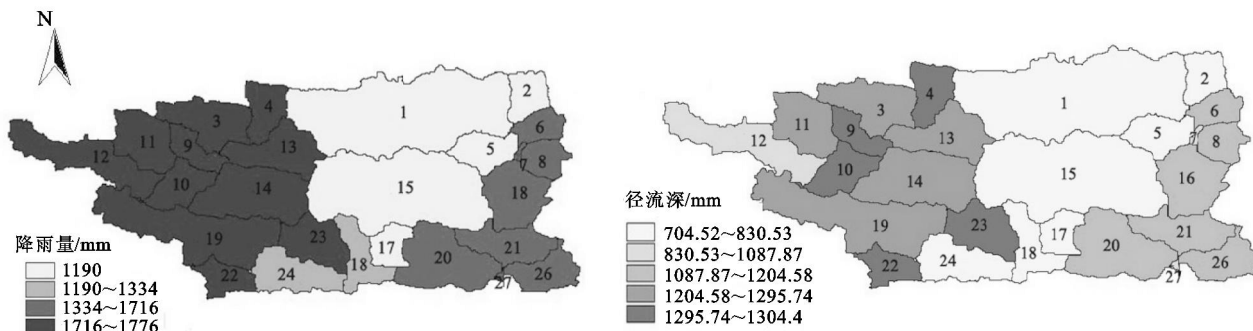


图 1 2003 年大宁河各子流域使用的降雨数据及径流深空间分布

(2) 土壤侵蚀空间分布。由图 2 可知,大宁河流域的主要产沙区集中在子流域 9,10,11,12,21,22,其侵蚀模数较大,多在 8.6 ~ 15 t/(hm²·a) 之间,个别地区侵蚀模数达到 20 t/(hm²·a) 以上,侵蚀十分剧烈。经计算统计,大宁河流域年土壤侵蚀量为 1 348 486.36 t/a,上述子流域产沙量达 687 230.30 t/a,占流域产沙量的 50.96%,是大宁河流域的主要产沙区。

总体上,大宁河流域土壤侵蚀空间分布特征随降

水空间分布的变化而变化。大宁河流域的西部地区是土壤侵蚀发生相对严重的地区。这种空间分布特征和降水空间分布特征极其相似,表明土壤侵蚀和降水具有一定的相关性。

(3) 非点源污染空间分布。由图 3 可知,大宁河流域硝酸盐氮产生区主要集中在子流域 3,4,9,10,11,13,19,22,23,6,14,单位面积产生量在 1.65 ~ 2.04 kg/hm² 之间。经计算统计,大宁河流域硝酸盐氮产生总量为 197.49 t/a,上述子流域硝酸盐氮产生量

达 113.81 t/a,占流域总产量的 57.63%,是硝酸盐氮的主要产污区。

大宁河流域有机氮产生区主要集中在子流域 7, 11, 19, 21, 单位面积产生量在 1.87 ~ 2.84 kg/hm² 之间,子流域 3, 4, 8, 12 单位面积产生量在 1.19 ~ 1.87 kg/hm² 之间。经计算统计,大宁河流域有机氮年产生量为 192.47 t/a,上述子流域有机氮产生量达 111.43 t/a,占流域总产量的 57.89%,是有机氮的主要产污区。

大宁河流域的非点源污染空间分布特性和土壤侵蚀空间分布特征极其相似,总体上,非点源污染单

位面积产生量,西部高于东部,南部高于北部,中部地区最少。

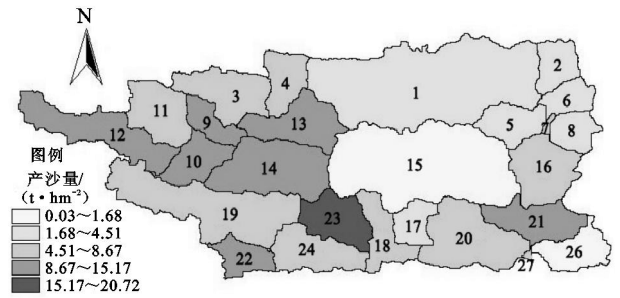


图 2 2003 年大宁河各子流域产沙量空间分布

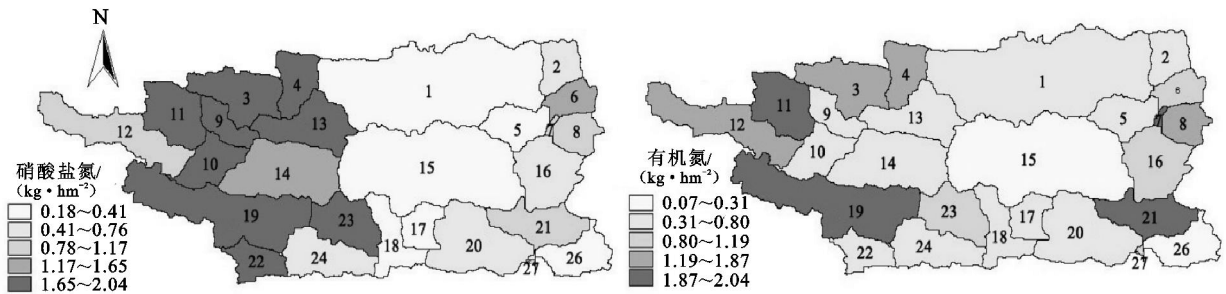


图 3 2003 年大宁河各子流域硝酸盐氮肥及有机氮空间分布

3.2 原因分析

非点源污染的一个重要来源是土壤侵蚀和土壤流失。伴随土壤侵蚀产生的悬浮颗粒物在水中会释放出硝酸盐氮等溶解态污染物,进而污染水环境;而水土流失则会挟带着非点源污染物进入地表水体,从而污染水环境。

土壤流失的强度取决于降雨强度、地形地貌、土地利用方式和植被覆盖率等。经实地调查,研究流域主要产沙地区(子流域 9, 10, 11, 12, 21, 22)山地灌木草丛分布较广,土壤类型中黄棕壤、黄褐土、山地灌丛草甸土所占比例较高。这种土壤侵蚀性高,加之这些地区降雨量大,平均坡度要高于其它地区,因此侵蚀强度较其它地区要高。实验表明,在年降雨量 500 mm 的情况下,坡度 5% ~ 7% 时土壤的年流失量是坡度 1% ~ 5% 时的 7 倍^[7]。对比图 1 和图 2 可以发现,土壤侵蚀空间分布特征和降雨空间分布特征极其相似,降雨量大的流域,其土壤侵蚀也较大,表明土壤侵蚀受降水量影响较大。

由于施肥等原因,耕地的硝酸盐氮含量较高^[11],大宁河流域上游部分地区耕地比例较高,相应的子流域 19, 22, 23 等硝酸盐氮产出较高。子流域 6, 8 的硝酸盐氮含量本底值较高,硝酸盐氮的产出也较高。子流域 3, 4, 9, 10, 11, 13 由于降雨量较大,其硝酸盐氮产出量也较高。

有机氮产出较高的地区主要是有机氮较高的耕地,以及覆盖度较低的山地灌木草丛,相应的土壤类型主要有黄棕壤、黄褐土、山地灌丛草甸土,这些土壤类型易于发生土壤流失。子流域 7, 11, 19, 21 是有机氮产出最高的地区,这些流域的土地利用类型多为耕地,其有机氮含量较其它类型土地类型高,加之降雨丰沛,土壤侵蚀严重,有机氮单位面积产出量较高。

由空间分析可知,巫溪境内大宁河西部地区是土壤侵蚀发生相对严重的地区,因此应重点加强水土保持工作。水土流失是造成农业非点源污染的一个重要途径,为减少因水土流失而引起的农业非点源污染,要改进耕作方式,降低开发力度,防止漫灌等。大宁河坡陡山多,坡耕地较多,据此,可采取横坡耕作的措施。横坡耕作是通过改变耕种方向对地面作物、地面粗糙度、土壤通透性以及降雨入渗等起作用以减少坡面水土流失。横坡耕作通过对地表径流的层层拦截,增加入流,防止水土流失的作用非常有效。

4 结论

(1) 采用巫溪水文站 2000—2004 年的日观测径流量数据和泥沙数据进行模型验证,选用相对误差和 Nash—Sutcliffe 模拟系数对模型率定和验证结果进行检验。结果表明,参数率定期月平均流量和月输沙量相关系数 R² 在 0.83 以上,Nash—Sutcliffe 系数

均在 0.78 以上。模型验证期,月平均流量和月输沙量相关系数 R^2 在 0.73 以上,Nash—Sutcliffe 系数均在 0.66 以上。SWAT 模型经调参后用于大宁河流域是合理可行的。

(2) 应用 SWAT 模型模拟结果,结合 GIS 空间分析功能,分析了大宁河流域土壤侵蚀空间分布特征,结果表明,大宁河流域土壤侵蚀模数西部高于东部,南部高于北部,中部地区最小。

(3) 应用 SWAT 模型模拟结果,结合 GIS 空间分析功能,分析了大宁河流域非点源污染空间分布特征。结果表明,大宁河流域非点源污染单位面积产生量,西部高于东部,南部高于北部,中部地区最少。其空间分布特征和土壤侵蚀空间分布特征极为相似。为减少因水土流失而引起的农业非点源污染,应重点加强研究区域西部地区的水土保持工作。

[参 考 文 献]

- [1] Tsihrintzis, V A, Hamid R. Modeling and management of urban storm water runoff quality: A review[J]. Water Resources Management, 1997, 11(2): 137—164.
- [2] 陈军峰, 李秀彬. 土地覆被变化的水文响应模拟研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(5): 833—836.
- [3] 李道峰, 田英, 刘昌明. 黄河河源区变化环境下分布式水文模拟[J]. 地理学报, 2004, 59(4): 565—573.
- [4] 黄清华, 张万昌. SWAT 分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进及应用[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2004, 28(2): 22—26.
- [5] 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[J]. 地理科学进展, 2003, 22(5): 463—471.
- [6] Singh V P 著, 赵卫民, 等译. 水文系统流域模拟[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000: 190—296.
- [7] 万洪涛, 万庆. 流域水文模拟研究的进展[J]. 地球信息科学, 2000(4): 46—49.
- [8] 郝芳华, 孙峰, 张建永. 官厅水库流域非点源污染研究进展[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 387—389.
- [9] 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(81): 62—68.
- [10] 许其功, 刘鸿亮, 沈珍瑶, 等. 参数空间分布对非点源污染模拟的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(7): 1425—1429.
- [11] 朱萱, 鲁纪行, 边金钟, 等. 农田径流非点源污染特征及负荷量化方法探讨[J]. 环境科学, 1985, 6(5): 6—11.
- [12] 项元和, 王正文, 张庆琼, 等. 内蒙古平庄矿区生产建设过程中水土流失预测[J]. 水土保持研究, 1998(9): 78—83.
- [13] 于辉, 孟繁斌, 杨庆国, 等. 开发建设项目新增水土流失量的预测方法研究[J]. 水电站设计, 2001, 17(4): 47—50.
- [14] 段喜明, 王治国. 朔黄铁路山西段水土流失预测及治理研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(6): 71—75.
- [15] 罗万勤. 关于水土保持方案中有关问题的探讨[J]. 水土保持通报, 1998, 18(7): 106—109.
- [16] 田宝珍, 李宗娟, 徐艳梅, 等. 编制水土保持方案的有关问题探讨[J]. 山西水土保持科技, 2007(3): 41—42.
- [17] 王东晖. 地下采煤项目水土流失预测研究[D]. 中南林学院, 2005.
- [18] 王治国, 段喜明, 李文银, 等. 开发建设项目水土流失预测的若干问题讨论[J]. 中国水土保持, 2000(4): 34—36.
- [19] 梁君. 高速公路土壤侵蚀预测模式及对策研究[D]. 四川: 四川大学硕士学位论文, 2004: 30—34.
- [20] 傅杰. 丹庄高速公路水土保持设计中若干问题探讨[D]. 大连理工大学, 2003.
- [21] 张云娥, 项元和, 张庆琼, 等. 开发建设项目水土保持方案编制的认识与体会[J]. 中国水土保持, 2007(6): 4—8.
- [22] 陈家琪. 兰新铁路风沙区提速改建工程对水土流失的影响及防治措施[J]. 水土保持通报, 2004, 24(4): 67—70.

(上接第 115 页)