

茅坪河流域非点源污染负荷模拟

许其功¹, 刘鸿亮², 沈珍瑶¹, 冒亚明³

(1. 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 3. 中国石油环境监测总站, 廊坊 065007)

摘要: 为量化研究茅坪河流域农业非点源营养物质氮、磷的输出负荷, 在茅坪河的亚流域陈家冲, 利用 2004-05~2004-10 降雨期的监测数据, 通过实测值和模拟值的比较对非点源污染模型 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 进行了率定和验证, 采用 Nash-Sutcliffe 系数(R^2)、均方根差(RMSE)和相对误差(CV)检验实测值和模拟值的拟合度。利用验证后的模型模拟了茅坪河流域营养物质氮、磷的输出负荷量。经验证径流、总氮和总磷的 Nash-Sutcliffe 系数分别为 0.71、0.51 和 0.62, 最小相对误差分别为 1.8%、1.1% 和 10%, 模型对氮和磷的输出模拟效果稍差, 但对径流的模拟取得了较好的效果, 表明该模型可运用于茅坪河流域非点源污染的模拟研究。模拟结果显示, 2004-05~2004-10, 茅坪河流域共有 102.5 t 氮和 9.46 t 磷流入长江, 大量农业非点源污染的产生是造成茅坪河水质恶化的重要原因之一。

关键词: 非点源; 总氮; 总磷; 茅坪河流域; 模拟

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)11-2176-06

Simulation of Nonpoint Source Pollution Load in Maoping River Watershed

XU Qirong¹, LIU Hongliang², SHEN Zhenyao¹, MAO Yaming³

(1. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China; 3. Environment Monitoring Centre of China National Petroleum Corporation, Langfang 065007, China)

Abstract: The nitrogen and phosphorous transport in the Maoping River watershed was modelled using the SWAT model, which simulates the water cycle and the transformation of nutrients. The model was first calibrated by comparing the observed and the simulated data from May to October 2004, and then validated. The Nash-Sutcliffe coefficient (R^2), the mean square root error (RMSE) and the relative error (CV) were used to test the agreement between observed and simulated data. The validated model was then be used to simulate the nutrients load in Maoping River watershed. The Nash-Sutcliffe coefficient of flow, nitrogen and phosphorous was 0.71, 0.51 and 0.62 with the minimum relative error 1.8%, 1.1% and 10% respectively. Despite achieving the relatively lower resemblance between observed and simulated phosphorous and nitrogen load the model showed good agreement in simulating runoff. The results showed that 102.5t nitrogen and 9.46t phosphorous entered into Yangtze River during May to October 2004. One of the important reason that caused the water quality deterioration can be attributed to the nonpoint source pollution.

Key words: nonpoint source pollution; total nitrogen; total phosphorous; Maoping River watershed; simulation

在降雨径流的淋溶和冲刷作用下, 农业非点源营养物质氮、磷是引起水体水质恶化的重要原因之一。以往我国针对水体污染的分析、研究和治理多侧重于工业废水和生活污水等点源污染, 近年来, 随着对点源污染治理的加强, 如何认识并有效控制非点源污染成为了一个亟待解决的重要课题。

非点源营养物质氮、磷的量化研究是非点源污染控制的重要环节之一, 其主要困难在于降雨径流发生的不确定性, 此外, 降雨和径流、氮磷排放负荷的非线性关系^[1]以及土地利用模式和管理措施的快速变化也加强了量化研究的复杂性。本研究应用在陈家冲流域经过率定和验证的 SWAT 模型, 模拟了茅坪河流域营养物质输出负荷量。

1 研究区域概况

茅坪河流域地处湖北秭归县、长阳县和宜昌市境内, 流域出口位于东经 110°99′、北纬 30°82′, 该河发源于长阳县火麦溪, 由西南向东北流经茅坪, 经导流洞注入长江, 主要支流有芭蕉溪、泗溪、大溪、青坪溪和陈家冲, 流域面积 129.1 km², 秭归县境内流长 23.9 km, 年平均流量 2.47 m³/s, 年均径流量 0.78 亿 m³。茅坪河流域地处中纬度, 属亚热带大陆性季风气候, 年降雨量在 950~1590 mm 之间, 年平均降

收稿日期: 2005-10-21; 修订日期: 2006-01-15

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2003CB415204); 国家科技攻关计划项目(2003BA614-04)

作者简介: 许其功(1972~), 男, 博士, 主要研究方向为流域水污染防治, E-mail: xuqigong@tom.com

雨量 1 439 mm, 年际间降雨量相差较大, 年内降雨量为单峰型, 以 5~8 月为主。

茅坪河流域内现有农作物播种面积 1 300 hm²、经济作物播种面积 560 hm²、蔬菜播种面积约 300 hm²、果园 494 hm²、茶园 67 hm², 土地垦植系数高, 农药及化肥的施用总量较大, 形成的农田废水量也相对较大。根据近 3 年的调查统计, 茅坪河流域内

平均每年的化肥施用总量为 1 003 t, 其中氮肥 800 t, 占化肥施用量的 80%, 磷肥施用量 120 t, 占化肥施用量的 12%, 其余钾肥 18 t、复合肥 65 t, 占化肥施用量的 8%。农药施用量为 62 t, 其种类主要包括 1605、杀虫双、除草醚、乐果乳剂和甲铵磷等。茅坪河流域地理位置见图 1, 灰色区域为模型率定和验证的亚流域。

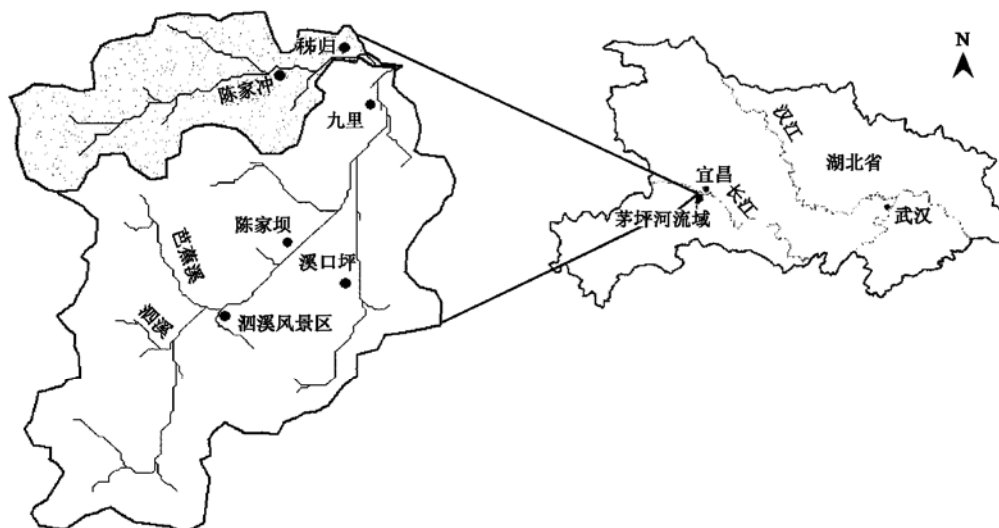


图 1 研究区域及率定、验证亚流域

Fig. 1 Study area and sub-watershed of validation and calibration

2 材料与方法

2.1 模型简介

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 是一个长时间序列、分布式参数的非点源污染模型, 由美国农业部 (USDA) 农业调查局 (ARS) 开发, 用于模拟土地管理措施对农业非点源污染物排放的影响。SWAT 模型包括水文、气象、侵蚀、营养物质和农药迁移模块, 同时考虑了表面径流、渗流、侧向流、地下水回流、土壤蒸腾蒸发和河道内的迁移损失, 表面径流利用 SCS^[2,3] (Soil Conservation Service) 曲线数方程 CN (Curve Number) 进行计算。气象数据输入的最低要求为日最高温度、最低温度和日降雨量。SWAT 模型利用修正的通用土壤流失方程^[4] (MUSLE) 预测土壤侵蚀量。最初, Williams 利用 18 个小流域的沉积物负荷值建立了 MUSLE, 随后, Williams 和 Berndt 将 MUSLE 和 SCS 曲线数方程相结合对 26 个流域进行了模拟计算, 取得了较好的结果。模型中, 土壤的日平均温度作为最高、最低气温的函数进行模拟。对于营养物质的输入, 模型考虑

了自然来源和人类活动排放的影响, 自然来源包括有机质矿化、固氮和硝酸盐的湿沉降, 人类活动包括化肥的使用 (非点源) 和废水 (点源) 的排放。对于河道内的水质变化, 模型采用 QUAL2E 模型进行模拟, 该模型包括营养物质循环, 藻类生长和需氧量的相互作用。氮循环包括有机氮转化为氨氮、亚硝态氮, 最后转化为硝态氮的过程。磷的循环过程为: 藻类死亡产生有机磷, 有机磷转化为溶解性无机磷被藻类吸收继而转化为初级生产量。

2.2 空间描述

SWAT 模型可以在 2 个尺度上得到有效的应用: ①通过河网连接的亚流域形成的流域尺度和 ②被分为若干个水文响应单元 HRU (Hydrological Response Unit) 的亚流域尺度。模型中, 通过对土地利用和土壤性质进行统计分布来计算水文响应单元的数量, 再将以 GIS 图层形式存在的空间信息转换为非空间分布的信息, 同时假定 HRU 之间是没有相互作用的, 即从一个 HRU 到另一个 HRU 没有水流的产生。对于土壤侵蚀和营养物质的计算, 模型采用了对于每一个 HRU 单独计算的方式, 然后加和得

出亚流域的土壤侵蚀和营养物质的通量. 划分 HRU 不仅可以有效地利用由农业调查统计得来的非空间分布数据, 而且还可以把大量具有相同性质的土壤和土地利用信息整合为一个单元, 大大降低了模拟计算的成本^[5]. 在模型中, HRU 是根据土壤性质和土地利用类型进行定义的, 因此, HRU 对流域的整体性质没有严格的要求. 此外, 不相邻的区域可以被集总为 1 个 HRU 进行模拟, 这种人为的连接方式忽略了真实的径流边界, 比如, 1 个亚流域中具有相似土地利用类型的 2 个区域, 可能被整合为 1 个 HRU, 这样就可将 2 个区域有效地连接起来, 通过计算每个 HRU 的侵蚀量进行加和即可得出亚流域的土壤侵蚀负荷.

2.3 数据库的建立

为保证模型计算的需要, 数据库的建立是非常重要的, 模型必须从数据库中提取地形、土壤、土地

利用等多种信息, 方可对研究区域进行模拟计算. 模型运行所需数据分为 3 类: 气象数据、地形数据、土壤类型和土地利用 GIS 图层数据. 对于地形数据, 采用了研究区域的 1: 25 万数字等高模型 (DEM) 提取面积、高程、坡度、河网与亚流域等信息. 研究区域流域面积为 129.1 km², 最低高程 100 m, 最高 1 540 m, 根据数字等高模型, 该流域被分为 63 个亚流域. 研究区域的 DEM、生成的亚流域见图 2. 土壤类型的 GIS 图层数据库的建立是根据全国土壤普查办公室 1995 年编制并出版的《1: 100 万中华人民共和国土壤图》, 采用了传统的“土壤发生分类”系统, 基本制图单元为亚类, 共分出 12 土纲, 61 个土类, 227 个亚类, 经中国科学院有关人员通过数字化、修编及编辑后完成的. 土地利用信息来自于中国科学院地理所的 1: 10 万 GIS 图层数据库^[6, 7], 研究区域土地利用类型见图 2.

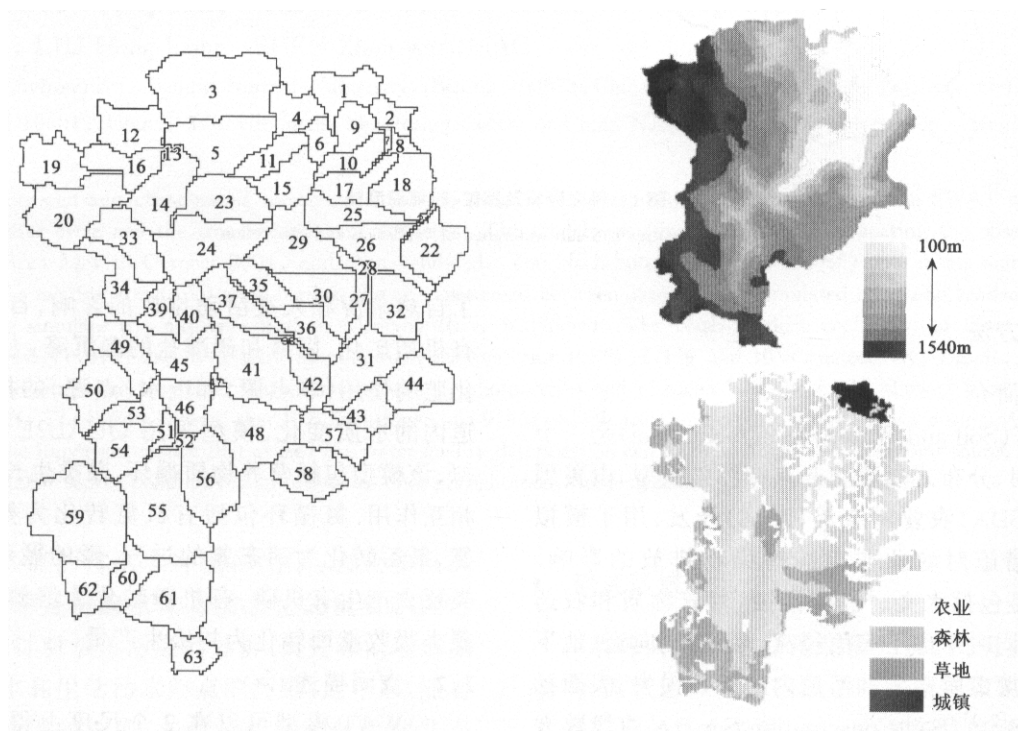


图 2 亚流域 DEM 和土地利用类型

Fig. 2 Subwatersheds DEM and landuse types of study area

土壤属性数据库可得到每种土壤的分层层数、各层有机质含量及机械组成等信息. 本文将研究区域的土地利用类型分为 4 类: 农业用地 (20.2%)、森林 (61.3%)、草地 (16.4%) 和建设用地 (2.1%). 在模拟计算中, 水稻、玉米、蔬菜等农业用地的具体信息无法在土地利用图中体现出来, 只是被归一化为农业用地进行处理, 因此, 在化肥施用量的输入中,

利用化肥施用量的平均值作为模型输入, 通过调查, 茅坪河流域每亩农业用地使用化肥约为 35 kg. 流域内的点源数据由当地环保局提供.

在 SWAT 模型中, 有几种方法可用于潜在土壤水分蒸发量的计算, 每种计算方法有不同的数据要求. 最基本的 Penman-Monteith 算法不但要求气温, 而且需要风速、太阳辐射和相对湿度的数据. 此外,

模型还可以根据这些气象数据的月平均值,利用气象模拟器产生每日的气象数据值.本研究利用国家气象局 1950~2000 年与研究区域邻近的 10 个气象站,50a 的气象数据,建立了研究区域的气象模拟数据库.

2.4 率定和验证

在陈家冲流域对模型进行了率定和验证.陈家冲是茅坪河的主要支流之一(见图 1),流域面积 30.6km²,占茅坪河流域面积的 23.7%,流域内土壤和土地利用类型与整个流域相似.利用 2004-05~2004-07 的日平均径流量进行径流的率定,利用 8~10 月的数据进行验证,在降雨期,同步进行总氮、总磷浓度的测定.选用相对误差(CV)、确定性系数^[8](R^2)和均方根差(RMSE)^[9]来衡量模拟值与观测值之间拟合度.确定性系数是 Nash 和 Sutcliffe 于 1970 年提出的,可用来评价模型模拟的精度,其表达式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{mea,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{mea,i} - \overline{Q_{mea}})^2} \quad (1)$$

均方根差定义为:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{mea,i} - Q_{sim,i})^2 / n} \quad (2)$$

式中, $Q_{sim,i}$ 和 $Q_{mea,i}$ 为模拟值和实测值; $\overline{Q_{mea}}$ 为实测平均值; n 为模拟次数.当模拟值和实测值相等时, $R^2=1$ 表示非常吻合,当 $R^2<1$ 时,其值越小表明吻合程度越低.若 CV 为正值,说明模拟值或预测值偏大;若 CV 为负值,说明模拟值或预测值偏小,若 CV=0,则说明模拟值与实测值正好吻合,同样,均方根差越小,说明模拟值越接近实测值.

首先进行径流的率定,为使径流量的模拟值和实测值达到较好的一致性,对影响水文模拟的敏感因子

CN 值进行调整,以 Nash-Sutcliffe 系数为依据,对模拟结果进行验证,直至实测值与模拟值达到较好的一致性为止.率定和验证结果见表 1、图 3 和图 4.

表 1 流量、总氮和总磷实测和模拟值的统计参数

Table 1 Statistical parameter of observed and simulated data for runoff, total N and total P

项目	次数	最小相对误差/%	最大相对误差/%	R^2	RMSE
流量	184	1.8	31	0.71	0.816 7
总氮	23	1.1	12.8	0.51	0.195 6
总磷	16	10	64.2	0.62	0.022 5

在本研究的模拟中,流量模拟值与实测值的最小相对误差为 1.8%,虽然有 1 次降雨的最大相对误差达到了 31%,但系数 R^2 依然达到了 0.71,说明对降雨径流的模拟取得了较好的结果.在径流率定完成后,需进行沉积物负荷和营养物质的验证,由于缺乏土壤侵蚀的监测数据,没有对侵蚀量进行验证.本研究选取了 23 次总氮测定值和 16 次总磷测定值对模型进行了验证,总氮和总磷的 R^2 分别为 0.51 和 0.62,虽然结果比径流模拟结果稍差,但说明了该模型依然可成功运用于区域的营养物质模拟研究.

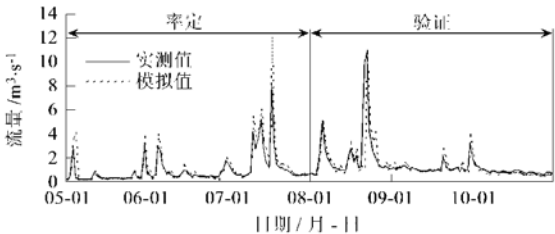


图 3 2004-05~2004-10 径流量模拟值与实测值
Fig. 3 Observed and simulated values of daily runoff from May to October 2004

2.5 模型应用

由于非点源污染定量化研究的复杂性,多年来

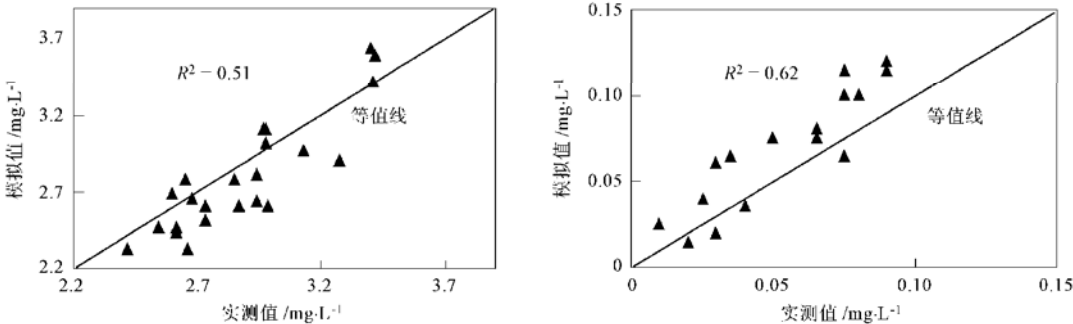


图 4 总氮、总磷实测与模拟浓度
Fig. 4 Observed and simulated concentration of total N and total P

对该流域非点源污染的研究基本上是以调查统计和估算为主,本研究利用经过率定和验证的 SWAT 模型,在降雨量较大的 2004-05~2004-10,模拟计算了茅坪河流域出口营养物质输出负荷。茅坪河流域降水量大,土地垦植系数高,农药及化肥的施用总量较大,在降水季节,形成的农田废水量也相对较大。根据近 3a 的调查统计,茅坪河流域内平均每年的化肥施用总量为 1 003t,加之流域内水土流失严重,各种农药、化肥随水土流失形成农田废水,继而流入河

流,对河流水质形成较为严重的污染。在茅坪河流域,5~10 月是降雨较多的季节,其多年平均径流量占全年径流总量的 75%,因此,农业非点源营养物质的迁移主要发生在这一时期。

3 结果与讨论

应用率定和验证后的 SWAT 模型模拟了茅坪河流域的径流量、氮和磷的逐月输出负荷,结果见表 2。

表 2 茅坪河流域营养物质输出负荷量

Table 2 Nutrients load of Maoping River watershed

日期/年-月	月均径流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	TN 月平均浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TP 月平均浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TN 负荷/t	TP 负荷/t
2004-05	3.02	1.62	0.130	13.1	1.05
2004-06	3.15	1.44	0.162	11.8	1.32
2004-07	6.51	1.23	0.145	21.4	2.53
2004-08	9.43	1.16	0.131	29.3	3.31
2004-09	4.66	1.38	0.055	16.7	0.66
2004-10	3.71	1.03	0.059	10.2	0.59

由计算结果可知,这一时期流失的总氮和总磷分别为 102.5 t 和 9.46 t,在 7 月和 8 月,虽然氮、磷的月平均浓度不是最高,但由于降雨量和径流量较大,导致输出的氮、磷负荷量较大,分别占模拟时期氮、磷输出负荷的 49.5% 和 62%,是非点源污染发生的主要时期。

模型的率定和验证是保证模拟结果准确的重要环节,对表面径流而言,影响表面径流的敏感性因子包括 SCS 法中的曲线数 CN、土壤含水量和土壤蒸发补偿系数,根据表面径流的实测值与模拟值的比较,对影响表面径流的敏感性因子进行了调整,在陈家冲流域对模型进行了率定和验证。结果表明,表面径流的最小和最大相对误差分别为 1.8% 和 31%,在日降雨量小于 35mm 时,模型模拟的误差较小,当日降雨量大于 35mm 时,径流的模拟则出现了较大的误差,其中最大的误差出现在 7 月 17 日,当日该流域的降雨量达到了 39mm,该模型对暴雨径流的模拟结果不是十分理想。在对径流的模拟中, Nash-Sutcliffe 系数达到了 0.71,径流的实测值和模拟值取得了较好的一致性,说明在对径流的长期模拟中,该模型仍不失为一个有效的工具。虽然 SWAT 模型能用于不同地理特征、不同土地利用和土壤类型的区域进行模拟研究,但值得注意的是,该模型是由美国的 SCS 进行开发的,在我国用于不同流域非点源污染的模拟时,必须首先进行模型的率定和验证^[10~13]。另外,建立研究区域的土壤类型和土地利

用数据库是模拟准确的先决条件,因为土壤属性和土地利用方式会对径流的模拟产生很大的影响,由径流带来的误差会直接影响到土壤侵蚀和污染物迁移转化的模拟,导致模型在研究区域内模拟效果较差。

在 SWAT 模型中,对营养物质氮和磷的参数率定分为 2 个部分,即地表产流过程营养负荷的参数率定和河道中各营养盐之间转化的参数率定,本研究只对影响氮、磷在河道中转化的参数进行调整,主要包括有机氮转化为氨氮的速度常数、氨氮生物氧化速度常数和有机磷的矿化速度常数。模拟结果显示,总氮的最小和最大相对误差分别为 1.1% 和 12.8%, Nash-Sutcliffe 系数为 0.51,多数实测值比模拟值大,总磷的最小和最大相对误差分别为 10% 和 64.2%, Nash-Sutcliffe 系数为 0.62,多数实测值比模拟值小。从单次模拟结果分析,总磷的相对误差较总氮大,但从长期的模拟结果来看,模型对总磷的模拟比总氮更为准确,主要原因是由于氮的形态较为复杂,在现场采样和实测中,亚硝酸盐氮向硝酸盐氮的转化很难准确测定,给模型的率定带来了一定的误差,另外,文中采用的土壤图层数据库精度不高也是导致氮的模拟结果稍差的主要原因之一。

在对茅坪河流域非点源污染负荷的模拟中, SWAT 模型对表面径流的模拟结果最为准确,其次是对磷负荷的模拟,对氮的模拟结果不很理想,但与传统的集总模型相比,该模型能够模拟营养物质的

排放和迁移转化,是计算流域非点源污染负荷的有效工具.模拟结果显示,茅坪河流域每年产生了大量的营养物质进入水体,如何根据污染物迁移转化的规律进行非点源污染的控制是至关重要的,有机肥的使用,土地利用类型的改变^[14]、采取有效的水土保持措施都是减少非点源污染的有效手段,今后,应加强土地利用变化对非点源污染的影响研究,为流域非点源污染的治理提供科学依据.

4 结论

利用多场降雨径流和营养物质氮、磷的实测数据,在茅坪河的支流陈家冲流域对非点源污染模型 SWAT 进行了率定和验证,并应用该模型对茅坪河流域的表面径流和营养物质负荷进行了模拟研究.结果表明,模型对表面径流的模拟取得了较为理想的结果,对营养物质氮、磷的模拟结果稍差.在应用 SWAT 模型对流域非点源污染进行模拟时,不同形态氮素之间的相互转化很难准确测定,给模型的率定带来了一定的误差.另外,土壤、土地利用空间数据库的精度也是影响模拟结果的重要原因之一.

参考文献:

- [1] Fitzhugh T W, Mackay D S. Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, **236**(1-2): 35~ 53.
- [2] Eckhardt K, Arnold J G. Automatic calibration of a distributed catchment model[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, **251**(1-2): 103~ 109.
- [3] Lenhart T, Eckhardt K, Fohrer N, *et al.* Comparison of two different approaches of sensitivity analysis [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2002, **27**(9-10): 645~ 654.
- [4] Williams J R, Berndt H D. Sediment yield prediction based on watershed hydrology[J]. *Transaction of ASAE*, 1977, **20** (6): 1100~ 1104.
- [5] Chen E, Mackay D S. Effects of distribution-based parameter aggregation on a spatially distributed agricultural nonpoint source pollution model[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, **295**(1-4): 211~ 224.
- [6] Liu J Y, Liu M L, Zhuang D F, *et al.* Study on spatial pattern of landuse change in China during 1995~ 2000[J]. *Science in China(D)*, 2003, **46** (4): 373~ 384.
- [7] Liu J Y, Zhuang D F, Luo D. Land cover classification of China: Integrated analysis of AVHRR imagery and Geophysical data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, **24** (12): 2485~ 2500.
- [8] Grunwald S, Norton L D. Calibration and validation of a nonpoint source pollution model [J]. *Agricultural Water Management*, 2000, **45**(1): 17~ 39.
- [9] Thomann R V. Verification of water quality models[J]. *Journal of Environmental Engineering Division*, 1982, **108**(5): 923~ 940.
- [10] 陈军锋, 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.
- [11] 朱利, 张万昌. 基于径流模拟的汉江上游区水资源对气候变化响应的研究[J]. *资源科学*, 2005, **27**(2): 16~ 22.
- [12] 胡远安, 程声通, 贾海峰. 非点源模型中的水文模拟——以 SWAT 模型在芦溪小流域的应用为例[J]. *环境科学研究*, 2003, **16**(5): 29~ 36.
- [13] 郝芳华, 陈利群, 刘昌明, 等. 土地利用变化对产流和产沙的影响分析[J]. *水土保持学报*, 2004, **18**(3): 5~ 8.
- [14] Susanna T Y T, Chen W L. Modeling the relationship between land use and surface water quality[J]. *Journal of Environmental Management*, 2002, **66**(4): 377~ 393.