

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2010.06.009

基于 SWAT 模型的流域非点源污染模拟

张皓天¹, 张 弛¹, 周惠成¹, 沈必成²

(1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024; 2. 黑龙江省水文局, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 利用 SWAT(soil and water assessment tool)模型, 在 GIS 技术支持下, 通过构建模型所需的空间数据库和属性数据库, 以黑龙江蚂蚁河流域为研究区域进行流域非点源污染的模拟研究. 分别在时间和空间尺度上对研究区域非点源污染负荷分布进行分析, 识别出非点源污染严重的区域及其影响因素. 结果表明: 在时间尺度上, 非点源污染物负荷与降雨量和径流量有较强的相关关系. 在空间尺度上, 流域西南部地区非点源污染较为严重. 不同土地利用类型的非点源污染负荷不同, 耕地的非点源污染单位面积负荷最高, 疏林地次之, 林地等其他土地利用类型的单位面积负荷较小.

关键词: SWAT 非点源污染 时空分布 土地利用 蚂蚁河流域

中图分类号: X502

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2010)06-0644-07

东北地区是我国重要的农牧业生产基地和最大的老工业基地, 城市化水平位于全国前列, 近些年来, 随着东北地区农业的发展和振兴东北老工业基地战略的逐步深入, 东北地区水环境污染问题日益突出. 目前, 许多发达国家的研究已经证实, 非点源污染是导致水环境恶化的主要原因之一^[1]. 为了对非点源污染进行有效的治理和控制, 必须定量研究污染物的排放规律. 应用 GIS 技术支持的非点源污染模型, 可以对整个流域的非点源污染进行定量描述, 分析其产生的时间和空间特征, 并评估土地利用的变化对非点源污染负荷的影响, 为流域规划和管理提供决策依据.

SWAT(soil and water assessment tool)模型是美国农业部农业研究局开发的流域尺度分布式水文模型, 该模型已经广泛地应用到流域的水平衡、河流流量预测和非点源污染控制评价等诸多方面. 在国外, 早期以 Arnold 为首的工作组分别从美国的国家尺度、流域尺度以及小流域尺度验证了 SWAT 模型在径流模拟方面的适用性^[2-6]. Santhi 等^[7-10]先后将 SWAT 模型应用于美国得克萨斯州 Bosque 流域, 对模型模拟非点源污染的适用性进行了验证. 基于美国经验, SWAT 模型在其他国家也得到了广泛的应用^[11-15]. 在国内, SWAT 模型的应用主要包括 3 个方面: 产流/产沙模拟、非点源污染研究及输入参数对模拟结果的影响研究. 在非点源污染研究方面, 胥彦玲等^[16]将 SWAT 模型应用到陕西黑河流域的非点源污染研究中; 张永勇等^[17]扩展了 SWAT 模型的水质模块, 并将其成功运用到海河流域中; 庞靖鹏等^[18]以密云水库为例, 研究了土地利用变化对产流和产沙的影响. 经过国内的研究可以发现, SWAT 模型是针对北美的土壤植被和流域水文结构来设计的, 模型自带的数据库和中国的实际情况有较大出入, 而我国东北地区又缺乏比较完善的流域基础数据库, 用来描述流域的很多参数如果靠直接测量来获得是很困难的, 因此估算模型的参数和验证模型在相关流域的适用性就显得尤为重要. 这些问题限制了 SWAT 等一系列物理型模型在我国东北地区非点源污染研究中的应用, 而目前我国东北地区非点源污染负荷量估算仍较粗略^[19].

针对上述问题, 本文选取黑龙江省蚂蚁河流域为研究区域, 通过建立和完善研究流域的水文模拟基础数据库, 运用 SWAT 模型来模拟该流域的非点源污染的发生, 通过率定 SWAT 模型的参数和验证模型的适用性, 得到了适合研究流域的一套模型参数值. 进而计算研究流域内产生的非点源污染负荷量, 研究非点源污染负荷的时空分布规律, 分析影响其分布的主要因素, 并评估不同土地利用类型非点源污染负荷量, 为流域的水质管理提供科学的决策依据.

收稿日期: 2010-08-26

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划(2007BAB28B01)

作者简介: 张皓天(1988—), 男, 辽宁铁岭人, 硕士研究生, 主要从事流域水循环与水环境研究. E-mail: zhan_luffy@126.com

1 研究区域概况

蚂蚁河流域位于黑龙江省南部,张广才岭西侧,是松花江干流右岸的一级支流,地理位置为东经 127°15′~129°33′,北纬 43°57′~46°26′. 蚂蚁河源海拔高 700 m,干流河长285 km,流域面积 10 547 km²,流域主要为山区和半山区,地势自东向西北,然后向东北倾斜,海拔高程在 104~1 400 m 之间,河谷宽阔平坦,地势低平,地面组成物上部为亚黏土,下部为沙砾石^[20]. 流域内的土壤主要有黑土、暗棕壤、白浆土、草甸土、沼泽土等. 流域内的主要种植作物为水稻、玉米和大豆,施肥主要以有机肥、尿素、硫酸钾和二铵为主. 流域内多年平均气温 2.3~3.4℃,年最高气温 35.5℃,最低气温 -41.6℃,年降雨量在 500~900 mm 之间. 研究区域地理位置如图 1 所示.

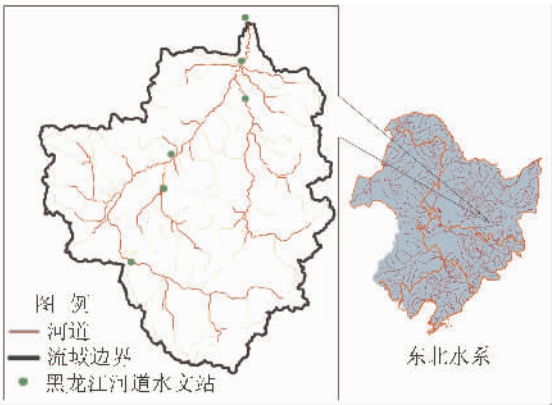


图 1 蚂蚁河流域示意图

Fig. 1 Mayihe watershed

2 基于 SWAT 模型的非点源污染模拟与验证

在收集资料的基础上,构建研究区域水文模拟基础数据库,之后通过划分流域内的空间单元,对非点源污染负荷量进行连续时段的动态模拟,最后利用流域内的实测资料对模型参数进行率定.

2.1 流域水文模拟基础数据库的建立

在运行 SWAT 模型前,需要准备必要的地图和数据库以生成 SWAT 模型输入数据集. 模型所需的数据可以分成空间数据和属性数据. 其中,SWAT 模型所需要的空间数据的准备、修改和存储可以通过 ArcGIS 9 等 GIS 软件完成. 而降水、温度、土壤等数据则通过多个输入文件以 ASCII 或者 .dbf 格式输入. 模型根据土地利用和土壤类型表,将土地利用图、土壤类型图与土地利用和土壤数据库进行链接.

本研究采用的气象数据是流域内 1966—2001 年气象站点的实测数据. 经过查阅《黑龙江土壤》^[21] 和中国土壤数据库以及利用美国华盛顿州立大学开发的土壤水特性软件 SPAW 计算出土壤的属性数据^[22]. 通过统计《黑龙江统计年鉴》和《哈尔滨统计年鉴》中的资料,得到研究区内 3 个县市的农业管理数据.

2.2 子流域划分及水文响应单元(HRU)的生成

SWAT 模型通过采用数字地形分析技术,利用栅格数字高程图(DEM)来精确描述流域边界、生成流域河网、进行子流域的划分以及生成水文响应单元. 流域河网生成的详细程度是由定义的上游集水区面积阈值大小来控制的;子流域的形成由子流域出口位置来控制. SWAT 模型采用了不能确定空间位置的水文响应单元的划分方法,使用不同的土地利用类型、土壤植被和坡度组合来生成水文响应单元^[23]. 本研究将流域划分为 70 个子流域,在整个流域内共生成了 509 个水文响应单元.

2.3 SWAT 模型参数率定与模型验证

通过参数敏感性分析,先得到了对径流影响比较大的高敏感参数,然后对这些关键参数进行调整,将 1983—1990 年定为模型月模拟的率定期,1991—2001 年定为模型的验证期. 选择相对误差 R_e 、相关系数 R^2 和 Nash-Sutcliffe 系数 E_{ns} 来评价模型的适用性. 模型参数的最终取值见表 1,率定期和验证期径流率定的结果见表 2.

模型输出结果与实测平均值之差占实测值的百分比应小于规定标准,即不大于

表 1 SWAT 模型参数在研究流域的率定值

Table 1 Calibrated values of parameters of SWAT model for study area

校准参数	参数含义	输入文件	参数值变化
ESCO	土壤蒸发补偿系数	.hru	-0.09
CN2	SCS 径流曲线系数	.mgt	-4
Gw_Revap	地下水再蒸发系数	.gw	+0.15
ALPHA_BF	基流 α 系数	.gw	+0.052
NPERCO	硝基氮下渗系数	.bsn	+0.3
BC1	氨氮生物氧化速度常数	.swq	-0.35
BC2	亚硝氮生物氧化速度常数	.swq	+0.5
BC3	有机氮转化为氨氮速度常数	.swq	+0.1

20%. 评价系数(E_{ns} 和 R^2)也应达到规定的精度标准,一般要求 $R^2 > 0.6$,且 $E_{ns} > 0.5$ ^[24]. 从表 2 可以看出研究流域率定期月径流的 $R_e = 5.93\% < 20\%$, $E_{ns} = 0.73$, $R^2 = 0.76$, E_{ns} 和 R^2 均大于 0.7. 验证期月径流的 $R_e =$

$2.85\% < 20\%$, $E_{ns} = 0.82$, $R^2 = 0.82$, E_{ns} 和 R^2 均大于 0.8. 说明模拟值和实测值之间的拟合较好, 精度可满足模拟要求. 将流域内 1957—2001 年的年径流量观测资料进行频率分析, 把频率大于 75% 的年份定为枯水年, 频率小于 25% 的年份定为丰水年, 其余的年份定为平水年. 在模型验证期内, 有枯水年 3 年, 平水年 6 年, 丰水年 2 年, 基本上体现出了径流量在年际间的变化情况, 说明验证期具有代表性. 在验证期内得到了较好的月径流模拟值, 这说明模型的模拟是符合实际的, 经过参数率定的 SWAT 模型适用于该流域.

由于缺乏长时间序列的泥沙和水质监测数据, 本研究只对流域的氨氮模拟过程进行了校准. 结果表明, 氨氮的模拟误差在 10% 左右, 总体反映了实际情况.

3 SWAT 模型模拟结果分析

选用率定后的模型参数计算流域内产生的非点源污染负荷量. 在时间上对非点源污染负荷的变化趋势进行分析, 对不同降水频率下的非点源污染负荷量进行模拟和研究. 在空间上对非点源污染负荷的分布进行分析, 识别出研究区内非点源污染严重的区域. 最后评估不同土地利用类型的非点源污染负荷量.

3.1 非点源污染负荷的时间分布

3.1.1 非点源污染负荷年际分布

通过对研究流域年降雨资料和年径流资料分析得出研究流域的年降雨量和年径流量的相关系数为 0.875, 有很强的相关性. 图 2 为 1993—2001 年研究流域内各年径流量实测值与河道总氮、总磷、输沙量变化, 由图 2 可以看出, 各年的河道输沙量、河道总氮负荷量和河道总磷负荷量均与径流量的关系密切. 这是因为降雨和产汇流是土壤侵蚀和非点源污染物的主要驱动力, 当下垫面的条件不变时, 土壤侵蚀和非点源污染就受降雨和径流的影响很大. 经过计算分析, 研究区域内年径流量与相应河道输沙量、总氮负荷量和总磷负荷量三者的相关系数分别为 0.973, 0.709 和 0.839.

为了分析降雨量变化对非点源污染的影响, 有必要进行不同降雨量下的非点源污染负荷研究. 根据流域内 1966—2001 年的降雨资料, 选用皮尔逊Ⅲ型曲线, 运用适线法计算流域年降雨量的经验累积频率, 得到曲线的算术平均值 $E_x = 591.8\text{ mm}$ 、变差系数 $C_v = 0.25$ 和偏态系数 $C_s = 0.64$. 由理论频率曲线可得到在 10%, 50%, 75%, 90% 降水频率下的年降雨量分别为 788.5 mm, 576.9 mm, 485.2 mm 和 414.2 mm. 选取与不同频率下降雨量相近的特征水文年的降雨资料作为模型降雨量输入数据, 研究非点源污染负荷与降雨量之间的相关关系. 各降水频率下泥沙和氮磷污染负荷估算见表 3.

由表 3 中的数据分析, 在不同降水频率下, 各种非点源污染负荷量随降雨量的增加有增大的趋势, 丰水年 ($P = 10\%$) 的总氮、总磷负荷分别为平水年 ($P = 50\%$) 的 1.76 倍和 1.17 倍, 为枯水年 ($P = 90\%$) 的 4.09 倍和 4.74 倍. 因此在丰水年应特别注意研究区非点源污染的控制与防治.

3.1.2 非点源污染负荷年内分布

1996 和 1997 年各月的非点源污染负荷随逐月径流量的变化过程见图 3. 从图 3 可以看出年内的总氮和

表 2 率定期及验证期月径流率定结果

模拟期	月平均流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		相对误差 $R_e/\%$	相关系数 R^2	Nash-Sutcliffe 系数 E_{ns}
	实测值	模拟值			
率定期	75.52	71.29	5.93	0.76	0.73
验证期	57.78	56.18	2.85	0.82	0.82

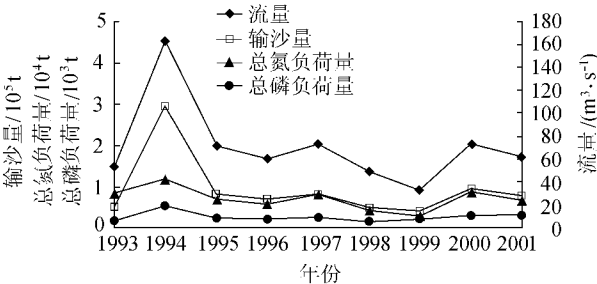


图 2 1993—2001 年径流量与河道总氮、总磷、输沙量变化

Fig. 2 Variations of runoff, total nitrogen, total phosphorus and sediment from 1993 to 2001

表 3 不同水文年非点源污染负荷

Table 3 Non-point source pollution loads in different hydrological years						
降水 频率/%	年份	降雨量/ mm	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	输沙量/ 万 t	总氮 负荷量/t	总磷 负荷量/t
90	1996	411.2	37.05	2.54	2 112.5	67.6
75	1970	496.2	32.53	5.64	4 224.0	206.9
50	2000	557.8	55.39	3.91	4 917.6	274.8
10	1988	764.4	93.86	32.83	8 649.8	320.2

总磷含量随季节大致呈不规则的‘W’形分布,一般在春汛期会出现一个小的峰值,进入汛期以后,特别是 8 月会出现一个较大的峰值,在冬季随着降雪和融雪的发生,又会出现一个较小的峰值。

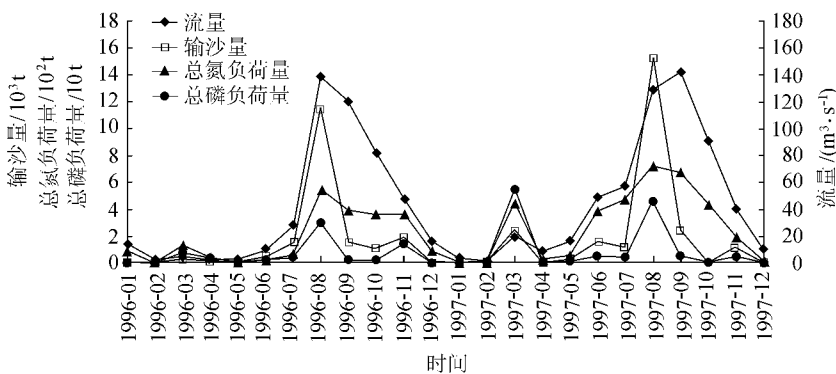


图 3 1996 和 1997 年逐月流量实测值与河道总氮、总磷、输沙量变化

Fig. 3 Variations of observed monthly runoff, total nitrogen, total phosphorus and sediment from 1996 to 1997

从图 3 还可以看出,流域内径流量较大的汛期(6—9 月)非点源污染的总氮和总磷负荷量均较大,而径流量少的枯水期非点源污染负荷量也较小. 因为非点源污染常常是伴随着降雨径流过程特别是暴雨过程而产生的,所以非点源污染主要集中在汛期产生^[25]. 汛期的非点源污染负荷贡献率见表 4. 汛期的总氮和总磷负荷量所占的比例较大,分别为 85.83% 和 84.07%,这一时期的径流量和输沙量分别占全年总量的 86.74% 和 95.69%,这与氮磷污染负荷在汛期内所占的比例是相近的,说明年内氮磷污染负荷与径流和产沙有关. 通过研究可以发现研究区内的总氮负荷同月径流量呈明显的正相关关系,而总磷负荷同泥沙负荷呈明显的正相关关系,其二次拟合方程分别为

$$y_1 = 0.000\,215x_1^2 + 0.023\,86x_1 + 8.651 \quad (R^2 = 0.848)$$
$$y_2 = 13.56x_2^2 - 051.27x_2 + 445.66 \quad (R^2 = 0.965)$$

式中: y_1 ——月平均流量, m^3/s ; x_1 ——总氮负荷量, t ; y_2 ——月泥沙负荷量, t ; x_2 ——总磷负荷量, t .
可以得出结论,年内氮磷污染负荷与径流和泥沙负荷有很强的相关性,其中氮负荷同月径流的相关系数为 0.848,磷负荷同泥沙负荷的相关系数为 0.965. 汛期是研究流域内非点源污染产生和发展的重要时段,这一时期的泥沙、总氮和总磷负荷量占全年的总负荷量的 80% 以上. 因此汛期是防治研究流域非点源污染的主要时期.

3.2 非点源污染负荷的空间分布

非点源污染有很强的空间差异性,可以根据研究区各子流域污染物负荷的大小来研究非点源污染的空间分布,进而找到对于非点源污染比较敏感的区域. 本研究结合降雨和土地利用类型在流域内的空间分布情况,进行泥沙、有机氮、有机磷负荷空间分布的对比和原因分析.

研究流域内降雨、泥沙、有机氮、有机磷负荷空间分布情况如图 4 所示. 从图 4 可以看出,泥沙流失同降雨的空间分布具有相关性,流域内降雨较大的地区泥沙流失也比较严重. 这是因为降雨是土壤侵蚀的主要驱动力,特别是暴雨的冲刷会造成土壤侵蚀加剧,进而造成泥沙的高负荷.

有机氮负荷和泥沙负荷的空间分布很相似,相关系数为 0.8925,具有很强的相关性. 分析原因是颗粒物对有机氮有较强的吸附能力^[26],有机氮吸附于泥沙而随泥沙输移. 另外,有机氮负荷的空间分布同降雨也有一定关系,在降雨丰富的地区有机氮负荷也较大. 有机磷负荷的空间分布同有机氮负荷的空间分布相似,二者的相关系数为 0.9945,这说明影响二者空间分布的因素是一致的.

此外,通过将流域内非点源污染分布图与流域内的土地利用图进行对比可以发现,河道附近农田较多的地区非点源污染负荷较大.

表 4 1993—2001 年年均汛期非点源污染负荷贡献率

Table 4 Contribution rates of annual average non-point source pollution during flood season from 1993 to 2001				
1993 to 2001				%
月份	径流	总氮	总磷	泥沙
6	5.29	2.40	4.63	5.60
7	10.73	6.32	9.10	10.62
8	48.09	51.71	67.49	74.86
9	22.63	25.40	2.85	4.61
汛期总计	86.74	85.83	84.07	95.69

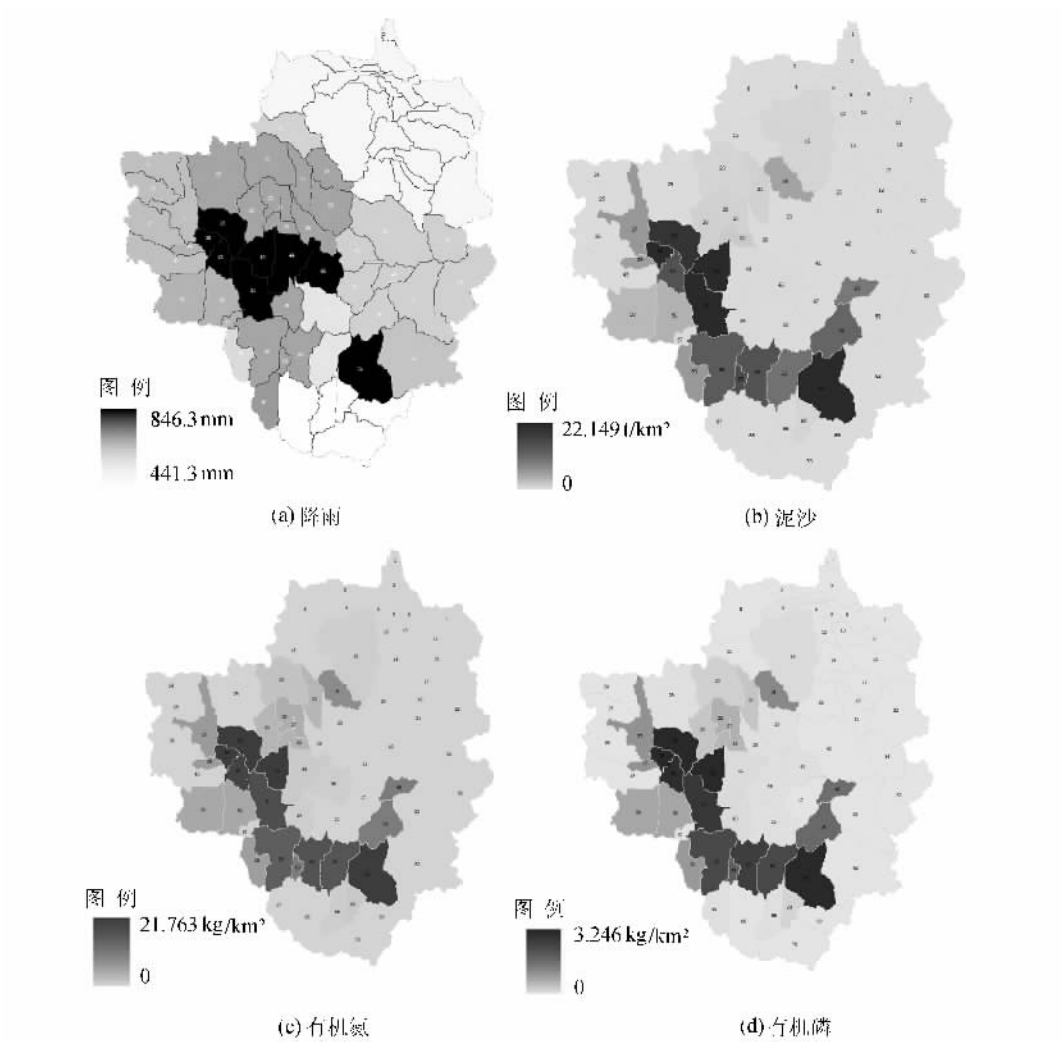


图 4 研究流域内降雨与泥沙、有机氮、有机磷负荷分布

Fig. 4 Distribution of rainfall and sediment, organic nitrogen, organic phosphorus loads in study area

3.3 不同土地利用类型的非点源污染负荷

通过以上分析可以发现除了降雨外,土地利用类型也是影响研究区非点源污染分布的主要因素,所以有必要对不同土地利用类型的非点源污染负荷量进行研究.研究流域内 1993—2001 年不同土地利用类型的年均非点源污染负荷量见表 5.从表 5 可看出,研究流域内耕地的非点源污染负荷量最大,泥沙、总氮和总磷负荷的比例均超过总负荷的 80%,是非点源污染的主要发生地.疏林地是流域内泥沙和磷负荷的第二大来源地.由于林地面积占整个流域的 57.36%,所以林地的氮污染负荷总量也较大.

研究流域内 1993—2001 年不同土地利用类型非点源污染单位面积负荷对比见表 6.从表 6 可看出,不同土地利用类型的非点源污染负荷量不同,耕地的单位面积非点源污染负荷最高,疏林地次之,林地、草地等其他土地利用类型较小.这与李俊然等^[27]的研究结论一致,即在单一土地利用类型占主导地位的流域内,土地利用类型以林地和草地为主的小流域地表水水质明显比以耕地为主的小流域地表水质好.因此控制研究区域内非点源污染的关键是控制耕地的氮磷污染和泥沙流失,采取退耕还林、等高耕作等水土保持措施^[28],同时还要注意耕地中农药化肥的合理施用.

表 5 不同土地利用类型 1993—2001 年年均非点源污染负荷模拟结果

Table 5 Simulated results of annual average non-point source pollution loads of different land uses from 1993 to 2001

土地利用类型	面积/km ²	面积比例/%	输沙量/t	总氮负荷量/kg	总磷负荷量/kg
林地	6049.34	57.36	27.85	10384.78	39.38
耕地	3274.53	31.05	3803.44	89595.88	22472.71
疏林地	422.30	4.01	77.81	3358.04	52.86
草地	399.20	3.79	0.61	374.93	2.91
滩地	128.78	1.22	4.81	444.85	20.75
总计	10274.15	97.43	3914.52	104158.48	22588.61

4 结 论

- a. 通过收集和统计研究流域内大量资料,建立了研究流域的水文模拟基础数据库.通过率定 SWAT 模型参数,得到研究流域逐月径流模拟值与实测值的 Nash-Sutcliffe 系数、相关系数均大于 0.8,模型的模拟是符合实际的,经过参数率定的 SWAT 模型适用于该流域.
- b. 在时间尺度上,研究流域内的农业非点源污染负荷与降雨量和径流量有较强的相关关系.年际间的非点源污染负荷的差异主要是由于降雨量不同造成的.丰水年($P = 10\%$)的总氮、总磷负荷分别为平水年($P = 50\%$)的 1.76 倍和 1.17 倍,为枯水年($P = 90\%$)的 4.09 倍和 4.74 倍.年内非点源污染负荷总体上随季节呈不规则的‘W’形态变化,汛期是研究流域内非点源污染产生和发展的重要时段,这一时期的泥沙、总氮和总磷负荷量占全年的总负荷量的 80% 以上.
- c. 在空间尺度上,研究流域内降雨丰富的中上游地区的非点源污染负荷要大于流域下游地区的非点源污染负荷.流域内河流附近农田面积较多的地区非点源污染较为严重.降雨、产沙和土地利用类型是影响研究区非点源污染空间分布的主要影响因素.
- d. 不同土地利用类型的非点源污染负荷不同,耕地的非点源污染负荷最高,泥沙、总氮和总磷负荷量占总负荷量的比例均超过 80%,是非点源污染的主要发生地.单位面积非点源污染负荷最高的是耕地,疏林地次之,林地、草地等其他土地利用类型较小.

参考文献：

[1] VAN DER MOLEN D T, PORTIELJE R, DE NOBEL W T, et al. Nitrogen in Dutch freshwater lakes : trends and targets [J] . Environmental Pollution,1998,102(S1) :553-557.

[2] FONTAINE T A,CRUICKSHANK T S,ARNOLD J G,et al. Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool(SWAT) [J] . Journal of Hydrology,2002,262 :209-233.

[3] ARNOLD J G,ALLEN P M. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds[J] . Journal of Hydrology,1996,176 :57-77.

[4] ARNOLD J G,SRINIVASAN R,MUTTHIAH R S,et al. Continental scale simulation of the hydrologic balance[J] . Journal of the American Water Resources Association,1999,35(5) :1037-1051.

[5] ECKHARDT K,ARNOLD J G. Automatic calibration of a distributed catchment model[J] . Journal of Hydrology,2001,251(112) :103-109.

[6] ARNOLD J G,SRINIVASAN R,TSETAL M. Large area hydrologic modeling and assessment Part II :model application[J] . Journal of the American Water Resources Association,1998,43(1) :91-101.

[7] SALEH A,ARNOLD J G,GASSMAN P W,et al. Application of SWAT for the upper north Bosque River watershed[J] . Transactions of the American Society of Agricultural and Biological and Biological Engineers,2000,43(5) :1077-1087.

[8] SANTHI C,ARNOLD J G,WILLIAMS J R,et al. Validation of the SWAT model on large river basin with point and nonpoint sources[J] . Journal of the American Water Resources Association,2001,37(5) :1169-1188.

[9] DI LUZIO M,SRINIVASAN R,ARNOLD J G. A GIS-coupled hydrological model system for the watershed assessment of agricultural nonpoint and point sources of pollution[J] . Transactions in GIS,2004,8(1) :113-136.

[10] BOSCH N S. The infuence of impoundments on riverine nutrient transport :an evaluation using the soil and water assessment tool [J] . Journal of Hydrology,2008,355(1/2/3/4) :131-147.

[11] KANG M S,PARK S W,LEE J J,ET Al. Applying SWAT for TMDL programs to a small watershed containing rice paddy fields[J] . Agricultural Water Management,2006,79(1) :72-92.

[12] BEHERA S,PANDA R K. Evaluation of management alternatives for an agricultural watershed in a sub-humid subtropical region using a physical process based model[J] . Agriculture Ecosystems & Environment,2006,113(1/4) :62-72.

[13] JURGEN S, KARIM C A, RAGHAVAN S, et al. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model[J] . Journal of Hydrology,2008,352(112) :30-49.

[14] CHAPONNIERE A, BOULET G, CHEHBOUNi A. Understanding hydrological processes with scarce date in a mountain environment[J] .

表 6 不同土地利用类型 1993—2001 年年均非点源污染单位面积负荷模拟结果

Table 6 Simulated results of annual average non-point source pollution loads of unit area for different land uses from 1993 to 2001

土地利用类型	泥沙/ (t·km ⁻²)	总氮/ (kg·km ⁻²)	总磷/ (kg·km ⁻²)
林地	0.0046	1.72	0.01
耕地	1.1615	27.36	6.86
疏林地	0.1843	7.95	0.13
草地	0.0015	0.94	0.01
滩地	0.0373	3.45	0.16

- Hydrological Processes, 2008, 22(12): 1908-1921.
- [15] BARLAND I, KIRKKALA T. Examining a model and assessing its performance in describing nutrient and sediment transport dynamics in a catchment in southwestern Finland[J]. Boreal Environment Research, 2008, 13(3): 195-207.
- [16] 胥彦玲, 秦耀民, 李怀恩, 等. SWAT 模型在陕西黑河流域非点源污染模拟中的应用[J]. 水土保持通报, 2009, 29(4): 114-117. (XU Yan-ling, QIN Yao-min, LI Huai-en, et al. Application of SWAT model to non-point source pollution simulation in Heihe River basin of Shaanxi Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(4): 114-117. (in Chinese))
- [17] 张永勇, 王中根, 于磊, 等. SWAT 水质模块的扩展及其在海河流域典型区的应用[J]. 资源科学, 2009, 31(1): 94-100. (ZHANG Yong-yong, WANG Zhong-gen, YU Lei, et al. Extended water quality module of SWAT model and its application to Hai River basin[J]. Resources Science, 2009, 31(1): 94-100. (in Chinese))
- [18] 庞靖鹏, 刘昌明, 徐宗学. 密云水库流域土地利用变化对产流和产沙的影响[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2006, 46(3): 290-299. (PANG Jing-peng, LIU Chang-ming, XU Zong-xue. Impact of land use change on runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Sciences, 2006, 46(3): 290-299. (in Chinese))
- [19] 杨育红, 阎百兴. 中国东北地区非点源污染研究进展[J]. 应用生态学报, 2010, 21(3): 777-784. (YANG Yu-hong, YAN Bai-xing. Nonpoint source pollution in Northeast China: research advance[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(3): 777-784. (in Chinese))
- [20] 任友山. 蚂蚁河流域水文特性分析[J]. 黑龙江水利科技, 2008, 36(4): 102-103. (REN You-shan. Hydrological characters analysis of Mayihe river basin[J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2008, 36(4): 102-103. (in Chinese))
- [21] 黑龙江省土地管理局, 黑龙江省土壤普查办公室. 黑龙江土壤[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [22] 魏怀斌, 张占庞, 杨金鹏. SWAT 模型土壤数据库建立方法[J]. 水利水电技术, 2007, 38(6): 15-18. (WEI Huai-bin, ZHANG Zhan-pang, YANG Jin-peng. Establishing method for soil database of SWAT model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(6): 15-18. (in Chinese))
- [23] 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: 南京师范大学, 2002.
- [24] 郝芳华, 程红光, 杨胜天. 非点源污染模型: 理论方法与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006: 54-55.
- [25] 李国斌, 王焰新, 程胜高. 基于暴雨径流过程监测的非点源污染负荷定量研究[J]. 环境保护, 2002(5): 46-48. (LI Guo-bin, WANG Yan-xin, CHENG Sheng-gao. A quantitative study on non-point source pollutant loading based on stream runoff monitoring results[J]. Environmental Protection, 2002(5): 46-48. (in Chinese))
- [26] 张学青, 夏星辉, 杨志峰. 水体颗粒物对有机氮转化的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(9): 1954-1959. (ZHANG Xue-qing, XIA Xing-hui, YANG Zhi-feng. Effect of suspended sediment on the transformation of organic nitrogen[J]. Environmental Science, 2007, 28(9): 1954-1959. (in Chinese))
- [27] 李俊然, 陈利顶, 郭旭东, 等. 土地利用结构对非点源污染的影响[J]. 中国环境科学, 2000, 20(6): 506-510. (LI Jun-ran, CHEN Li-ding, GUO Xu-dong, et al. Effect of land use structure on non-point source pollution[J]. China Environmental Science, 2000, 20(6): 506-510. (in Chinese))
- [28] 陈雪, 蔡强国, 王学强. 典型黑土区坡耕地水土保持措施适宜性分析[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(5): 44-49. (CHEN Xue, CAI Qiang-guo, WANG Xue-qiang. Suitability of soil and water conservation measures on sloping farmland in typical black soil regions of Northeast China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(5): 44-49. (in Chinese))

Simulation of non-point source pollution in watershed based on SWAT model

ZHANG Hao-tian¹, ZHANG Chi¹, ZHOU Hui-cheng¹, SHEN Bi-cheng²

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Hydrological Bureau of Heilongjiang Province, Harbin 150001, China)

Abstract: Based on the SWAT model and the GIS technology, simulation of non-point source pollution (NPS) in Mayihe watershed of Heilongjiang Province was performed by establishing the spatial database and the attribute database required by the model. The distribution of NPS loads in the study area was analyzed from the perspective of space and time. The severe zones of NPS and their factors were identified. The results show that on the temporal scale, the NPS loads have strong correlation with precipitation and runoff. On the spatial scale, the southwest of the watershed has severe NPS loads. The NPS loads for on different land uses are different. The farmlands have the highest NPS loads, the open forest lands are the second highest contributor, and the woodlands and the areas with other land use have smallest NPS loads.

Key words: SWAT; non-point source pollution; spatial and temporal distribution; land use; Mayihe watershed