

桃林口水库流域氮磷污染负荷对土地利用的响应分析

杨妮娟¹, 王晓云², 李建柱¹, 张婷¹, 冯平¹

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350; 2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

摘要: 非点源污染是目前水体污染防治的主要对象, 土地利用方式与污染物流失量密切相关。以桃林口水库流域为研究对象, 通过构建 SWAT 非点源污染模型对流域非点源污染负荷进行模拟, 研究不同土地利用结构对子流域 TN、TP 流失率的影响, 并定量分析了研究区在 2014 和 2019 年土地利用类型下 TN、TP 流失量的变化。结果表明: 构建的 SWAT 非点源污染负荷模型适用于该流域的非点源污染模拟, 在单一的土地利用类型中, 污染物流失率排序为耕地 > 草地 > 住宅用地 > 林地, 与相对应的单一土地利用类型相比, 林地的组合能有效降低子流域的污染物流失率; 不同土地利用类型的产污能力差异较大, 林地的单位面积产污量最低, 耕地最高, 与 2014 年相比, 2019 年流域林地面积增加而耕地和草地面积减少, TN、TP 负荷分别减少了 34.43%、23.75%。研究结果可为桃林口水库流域的水环境管理提供科学依据。

关键词: 非点源污染; 氮磷污染负荷; 土地利用方式; 污染负荷流失; SWAT 模型; 桃林口水库流域

中图分类号: X52

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)05-0061-09

Response of nitrogen and phosphorus pollution load to different land use patterns in Taolinkou Reservoir basin

YANG Nijuan¹, WANG Xiaoyun², LI Jianzhu¹, ZHANG Ting¹, FENG Ping¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. China Water Resources Beifang Investigation, Design & Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: Non-point source pollution has become the main target of water pollution prevention and control, the pollutant loss is closely related to the land use patterns. In this study, the non-point source pollution load in Taolinkou Reservoir basin was simulated by SWAT non-point source pollution model. The effects of different land use on nitrogen and phosphorus loss rates were studied, and the changes of non-point source pollution load loss under two land use patterns in 2014 and 2019 were quantitatively analyzed. The results showed that the SWAT non-point source pollution model was suitable for the simulation of non-point source pollution in the basin. In a single land use type, the pollutant loss rate ranked as follows: cultivated land (II) > grassland (III) > residential land (VIII) > woodland (I). The combination of woodland could effectively reduce the load loss rate of sub-basins, compared with any single land use. The pollution yield per unit area of different land use varied greatly, that of woodland was the lowest, whereas that of cultivated land was the highest. Compared with 2014, the area of woodland increased and the area of cultivated land and grassland decreased in 2019, and the output of TN and TP load decreased by 34.43% and 23.75%, respectively. The results of this study can provide a technical support for the water environment pollution management of the Taolinkou Reservoir basin.

Key words: non-point source pollution; pollution load of nitrogen and phosphorus; land use pattern; pollution load loss; SWAT model; Taolinkou Reservoir basin

收稿日期: 2022-11-15; 修回日期: 2023-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52079086)

作者简介: 杨妮娟 (2001—), 女, 贵州铜仁人, 硕士研究生, 主要从事流域水文过程研究。

通讯作者: 李建柱 (1981—), 男, 河北沧州人, 教授, 博士生导师, 主要从事流域水文过程研究。

1 研究背景

非点源污染是目前我国水环境治理的主要对象^[1-3],由于其过程具有随机性和分散性,污染的形成与流失机理较为复杂,难以对其进行有效的管理与控制^[4-5]。非点源污染受众多因素影响,其中土地利用方式直接影响着流域的水文循环与物质迁移过程,成为影响非点源污染的关键因子^[6-7],由于近年来极端气候事件频发和人类活动加剧,土地利用方式的时空变化显著,因此明晰不同土地利用方式对污染流失的影响以及流域环境对土地利用时空变化的响应具有重要意义。

国内外学者采用不同的方法对非点源污染进行了研究。邓华等^[8]采用田间试验法研究在不同的土地利用方式下石盘丘小流域非点源污染的流失变化,并针对总氮、总磷的流失特征分别提出了相应的治理措施,为流域的污染治理提供了科学依据。但试验法需要花费大量的时间和精力,通常只适合于面积较小的流域。付绍桐等^[9]利用“源-汇”理论分析了太原市景观空间特征对非点源污染的影响,在“源-汇”理论的基础上,Huang 等^[10]结合最小阻力累积(minimum cumulative resistance, MCR)模型对黄河三角洲的非点源污染进行了动态模拟,指出耕地的污染风险等级为中度以上的面积占耕地总面积的 47.57%。Srinivas 等^[11]采用多元回归方法探究了印度 Ganges 流域的土地利用类型与关键水质参数之间的关系。也有学者利用输出系数模型^[12-14]、潜在非点源污染指数(potential non-point pollution index, PNPI)模型^[15-16]研究了流域非点源污染对不同土地利用方式的响应,均指出耕地和城镇用地的污染流失较为严重。经验统计模型对数据要求不高,操作简便^[17-18],但没有反映真实的水文过程和物质的迁移转化规律,不能及时响应水文要素的动态变化^[19-20]。因此,探究土地利用方式的时空动态变化对非点源污染的影响,使用机理模型更为合适^[21]。Shi 等^[22]、李明涛等^[23]分别采用 SWAT(soil and water assessment tool)模型、HSPF(hydrological simulation program fortran)模型模拟了景观格局变化对非点源污染的影响,发现农田的高度集中在一定程度上会加剧非点源污染负荷。宗敏等^[24]以辽宁中部城市群为研究对象,利用 SWMM(storm water management model)研究了城市化的快速发展带来的城市非点源污染变化。天目湖流域因茶园开发使土地利用方式发生了改变,赖正清等^[25]利用 APEX

(air pollutants exposure) - SWAT 集成模型研究了该变化对流域非点源污染负荷的影响,结果表明茶园用地的污染负荷贡献率逐年上升。

目前,研究土地利用方式对流域非点源污染的影响主要是通过对比分析污染负荷在单一土地利用类型下产出量的差异,而实际中流域的计算单元往往包含多种土地利用类型,并不都以某一类型为主,但考虑土地利用类型的不同组合对流域非点源污染的影响研究还较少。本研究以桃林口水库流域为研究对象,通过构建 SWAT 非点源污染负荷模型研究不同土地利用结构对各子流域氮、磷流失率的影响,并定量分析研究区在 2014 和 2019 年两种土地利用模式下非点源污染产量的变化,以期为桃林口水库流域合理的土地利用规划、水环境保护及秦皇岛市水资源管理提供科学依据。

2 研究区概况

选择位于秦皇岛市青龙满族自治县青龙河上游的桃林口水库流域为研究区。青龙河发源于承德市平泉县境内,是滦河的第二大支流。桃林口水库是国家和河北省“八五”“九五”期间的重点建设工程,其水质情况对当地的生活和发展都有着重大影响。桃林口水库流域控制面积为 4 949 km²,占青龙河流域总面积的 79%,其地理位置为 118°37'~119°37'E,39°51'~41°07'N,海拔在 92~1 841 m 之间,地形总体上呈东北高西南低。桃林口水库流域地理位置及水系分布如图 1 所示。

研究区属北温带半湿润大陆性季风气候,四季特征变化明显,昼夜温差大,无霜期较长,多年平均气温为 24.7℃,年平均降水量为 500~700 mm,降水主要集中在 7—9 月份,约占全年降水量的 60%~70%,多年平均径流量为 2.55×10⁸ m³。流域内的土地利用方式以林地为主,棕壤土和褐土是主要的土壤类型,主要农作物为小麦和玉米。根据实测资料,桃林口水库流域内多年平均总磷(TP)、总氮(TN)浓度分别为 0.022 和 3.934 mg/L,根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),水库 TP 负荷满足Ⅱ类水质标准,TN 负荷为Ⅴ类水质标准。桃林口水库是秦皇岛市重要的饮用水源地,流域内点源污染得到了有效控制,污染来源主要以非点源形式存在。

3 数据来源与研究方法

3.1 数据来源与处理

构建桃林口水库流域 SWAT 模型需要的基础

数据包括数字高程模型 (digital elevation model, DEM)、土壤类型、土地利用类型等空间数据,以及气象、土壤物理及化学属性、污染源以及水文水质等属性数据,数据来源及时空尺度见表 1。

研究区非点源污染来源主要分为农村生活、农药化肥和禽畜养殖 3 种类型。农村生活污染与畜禽养殖污染负荷产量较为固定,因此根据两种污染源的 TN、TP 和 NH₃—N 的比例定义新的化肥类型,并以连续施肥的形式输入 SWAT 模型^[26-27],施肥持续时间设置为 1 a,施肥频次设置为每日 1 次^[28],同时综合考虑各子流域的人口与面积来确定子流域的污染排放量。对于农药化肥污染,查阅年鉴发现桃林口水库流域主要农作物为小麦和玉米,小麦在 3—4 月份播种,7 月份收获;玉米在 6—7 月份播种,10 月份收获,因此结合两种

作物的生长时间及所需施肥量,将施肥时间设置为每年的 4—9 月,施肥频次设置为每月 1 次。

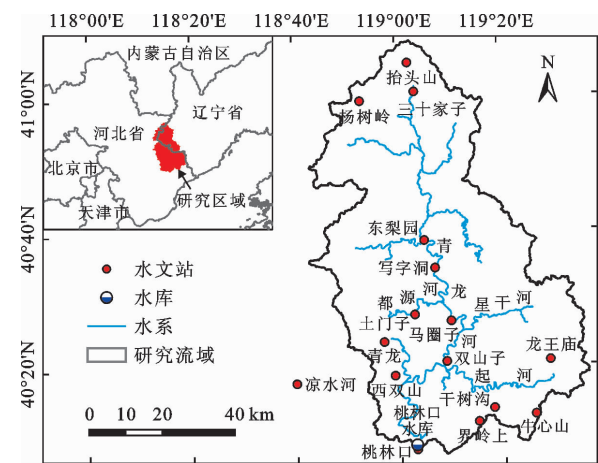


图 1 桃林口水库流域地理位置及水系分布

表 1 模型数据库所需基础数据及其来源

数据种类	时空尺度	资料年限	数据来源
地形	30 m × 30 m		http://www.gscloud.cn
土壤	1: 1000000		http://www.westdc.westgis.ac.cn
土地利用	1 km × 1 km	2014、2019 年	http://www.resdc.cn
气象	逐日观测值	2004—2020 年	http://cdc.cma.gov.cn
降水	逐日观测值	2004—2020 年	滦河流域水文年鉴
径流	逐日观测值	2004—2020 年	滦河流域水文年鉴
水质	逐月观测值	2019—2020 年	秦皇岛水文局
污染源	各县、区统计值	2019 年	统计年鉴、农村统计年鉴

3.2 研究方法

3.2.1 SWAT 模型基本原理 SWAT 模型可以模拟流域在不同情况下的水循环过程,能较好地预测人类活动对流域内水、泥沙以及化学物质的长期影响。水量平衡方程是 SWAT 模型的基础^[29-30],其表达式如下:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_a - W_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}})$$

(1)

式中: SW_t 为第 i 天的土壤最终含水量,mm; SW_0 为土壤初始含水量,mm; t 为时间,d; R_{day} 为第 i 天的降水量,mm; Q_{surf} 为第 i 天的地表径流量,mm; E_a 为第 i 天的蒸发量,mm; W_{seep} 为第 i 天存在于土壤剖面地层的渗透量和侧流量,mm; Q_{gw} 为第 i 天进入主河道的地下水量,mm。

SWAT 模型的水质模块来源于 QUAL2E 模型,能对流域中多种形式的氮和磷进行迁移转化模拟,

氮和磷的转化分别由氮循环和磷循环控制。在 SWAT 模型模拟污染物的过程中首先对子流域进行离散,将其划分为属性一致的水文响应单元 (hydrologic response unit, HRU),基于 HRU 对污染物的流失与迁移进行分析,再汇总到各个子流域,然后模拟污染物在河道及水库等水体中的迁移转化。

3.2.2 模型参数率定与验证 SWAT 模型的率定与验证采用“先径流后营养物质”的顺序,选取桃林口水库上游双山子水文站 2004—2020 年实测逐月数据对径流模拟参数进行校准,其中 2004—2005 年为预热期,2006—2016 年为率定期,2017—2020 年为验证期。对水质参数的率定和验证采用桃林口水库坝上逐月实测水质数据,基于率定好的 SWAT 水量模块模拟 2019—2020 年 TN 和 TP 负荷,2019 年为率定期,2020 年为验证期。使用 SWAT—CUP 软件的 SUFI—2 算法对模型参数进行率定和验证,该算法计算效率高^[31],并可以同时分析多个参数的敏

感性。

采用决定系数(R^2)和纳什效率系数(E_{ns})作为模型适用性评价指标,其表达式分别为^[32]:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \quad (2)$$

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

式中: S_i 和 O_i 分别为第 i 个模拟值和实测值; $\bar{S}$ 和 $\bar{O}$ 分别为模拟值和实测值的平均值; n 为实测值的个数。 R^2 和 E_{ns} 的值越大,表示模型的模拟效果越好,当 $R^2 \geq 0.6$ 且 $E_{ns} \geq 0.5$ 时,说明模型的模拟结果是可行的^[33-34]。

3.2.3 土地利用方式对非点源污染影响分析 考虑土地利用结构以及不同研究年份的土地利用变化研究土地利用方式对非点源污染的影响。基于流域2019年的土地利用数据将土地利用类型重分类为林地、耕地、草地、住宅用地和其他5种类型,并利用率定好的SWAT模型对流域的非点源污染进行模拟,分别统计各子流域2019年TN、TP负荷输出量和5种土地利用类型面积占比,根据子流域内5种土地利用类型的面积占比情况,将子流域划分为8种不同的土地利用结构,见表2。

以2019年为研究年份分析不同土地利用结构对桃林口水库流域TN、TP负荷的影响。考虑到降雨径流对非点源污染负荷的影响较大^[35-37],选取降雨径流特征相似的2014和2019年作为研究年份,分析不同年份的土地利用变化对桃林口水库流域TN、TP负荷的影响。

表2 土地利用结构分类

土地利用结构	名称	各种土地利用类型所占的百分比/%					所包含的子流域
		林地	耕地	草地	住宅用地	其他	
I	林地	>60	<20	<20	<10	<5	W_3 、 W_5 、 W_6 、 W_7 、 W_8 、 W_{10} 、 W_{11} 、 W_{12} 、 W_{13} 、 W_{15} 、 W_{17}
II	耕地	<30	>50	<20	<10	<5	W_{21}
III	草地	<30	<20	>50	<10	<5	W_{14}
IV	林地-耕地	30~60	20~50	<20	<10	<5	W_2 、 W_{24}
V	林地-草地	30~60	<20	20~50	<10	<5	W_4 、 W_9 、 W_{23} 、 W_{26} 、 W_{27} 、 W_{28} 、 W_{29}
VI	草地-耕地	<30	30~50	30~50	<10	<5	W_{16} 、 W_{25}
VII	林地-草地-耕地	30~60	20~50	20~50	<10	<5	W_1 、 W_{18} 、 W_{19} 、 W_{20}
VIII	住宅用地	<30	<30	<30	>20	<5	W_{22}

4 结果与分析

4.1 子流域划分

基于桃林口水库流域DEM提取的河道水系,将研究流域划分为29个子流域,如图2所示。将模型中土地利用类型面积、土壤类型面积以及坡度阈值均设置为10%,按照相同的土地利用、土壤属性和坡度组合将研究区进一步划分为2124个水文响应单元(HRUs)。

4.2 模型率定和验证

首先对模型参数进行敏感性分析,选取对径流和水质有重要影响的31个参数进行参数率定,率定参数敏感性及其最优值见表3。SWAT模型模拟的率定期和验证期桃林口水库流域双山子水文站径流量和水库TN、TP负荷与实测值对比见图3,双山子水文站径流量模拟效果及桃林口水库TN、TP负荷模拟评价结果见表4、5。

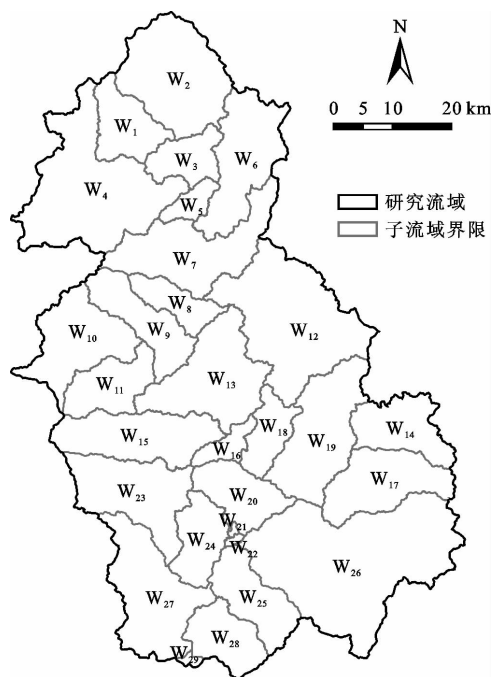


图2 研究区子流域划分

由表 4 可知,率定期桃林口水库流域径流量模拟结果的 $R^2 = 0.93$, $E_{ns} = 0.92$;验证期 $R^2 = 0.82$, $E_{ns} = 0.80$,说明构建的 SWAT 模型能较好地模拟该流域的水文特征,从图 3(a) 也可以看出,模拟的各月平均径流量能够反映出该流域径流的年内丰枯变化,并且峰值的模拟效果较好。表 5 显示,率定期桃林口水库 TN、TP 负荷模拟结果的 R^2 分别为 0.95、0.94,验证期 R^2 也均在 0.85 及以上,表明校准后的 SWAT 模型能较好地反映研究流域 TN 和 TP 的迁移转化情况。因此,构建的 SWAT 非点源污染模型对研究区的水文特征及 TN 和 TP 负荷的模拟具有较强的适用性。

表 3 模型参数敏感性最优值率定结果

类别	参数	物理意义	初始范围	最优值	排序
径流	ALPHA_BF.gw	基流 α 系数	(0,1)	0.767	2
	GW_DELAY.gw	地下水滞后系数	(0,500)	81.5	3
	GWQMN.gw	浅层地下水径流系数	(0,5000)	4875	4
	GW_REVAP.gw	地下水蒸发系数	(0.02,0.2)	0.16274	10
	RCHRG_DP.gw	浅层含水层再蒸发阈值深度	(0,1)	0.333	16
	CN2.mgt	径流曲线系数	(0,0.3)	0.1665	1
	SOL_AWC(.sol)	土壤有效含水量	(-0.5,0.5)	-0.451	6
	SOL_K(.sol)	土壤饱和导水率	(-0.5,0.5)	-0.263	5
	SOL_BD(.sol)	土壤容重	(-0.5,0.5)	-0.279	13
	ESCO.hru	土壤蒸发补偿系数	(0,1)	0.871	7
	EPCO.hru	土壤吸收补偿系数	(0,1)	0.663	8
	HRU_SLP.hru	平均坡度	(-0.5,0.5)	-0.113	15
	ALPHA_BNK.rte	河岸基流 α 因子	(0,1)	0.611	14
	CHN2.rte	河道曼宁系数	(0,0.3)	0.1665	12
	CHK2.rte	主河道水力传导率	(0,500)	132.5	11
	OV_N.hru	坡面漫流 n 值	(-0.5,0.5)	0.223	9
	CANMX.hru	最大冠层持水能力	(0,100)	69.3	17
	SOL_ORGN(.chm)	土壤初始有机氮含量	(0,100)	10	6
	OL_ORGP(.chm)	土壤初始有机磷浓度	(0,100)	30	14
	SOL_NO3(.chm)	土壤初始硝酸氮含量	(0,100)	99	1
水质	PPERCO_SUB(.chm)	土层中磷渗透速率	(10,17.5)	12	10
	SLSUBBSN.sub	坡长	(-0.8,0.8)	0.25	3
	USLE_P.mgt	USLE 水土保持措施因子	(-0.8,0.8)	0.1	2
	CH_COV1.rte	河道可蚀性因子	(0.05,0.6)	0.2	7
	CH_ERODMO(.rte)	河道侵蚀性因子	(0,1)	0.01	12
	CH_OPKO.rte	河道有机磷浓度	(0,5)	0.5	8
	ERORGN.hru	泥沙中有机氮富集率	(0,5)	0.5	4
	ERORGP.hru	泥沙中有机磷富集率	(0.01,0.7)	0.35	13
	BC4.swq	颗粒态有机磷转化为溶解态磷速率	(0.001,0.1)	0.08	6
	RS5.swq	有机磷沉降速率	(0.001,0.1)	0.002	5
	RS2.swq	底泥释放可溶性磷速率	(0,1000)	0.1	11
	GWSOLP.gw	地下水易溶性磷浓度	(0,100)	10	9

表 4 研究区双山子水文站径流量模拟评价结果

率定期(2006—2016 年)		验证期(2017—2020 年)	
R^2	E_{ns}	R^2	E_{ns}
0.93	0.92	0.82	0.80

表 5 桃林口水库 TN、TP 负荷模拟评价结果

水质 指标	率定期(2019 年)		验证期(2020 年)	
	R^2	E_{ns}	R^2	E_{ns}
TN	0.95	0.84	0.88	0.68
TP	0.94	0.89	0.85	0.66

4.3 土地利用方式对非点源污染的影响

4.3.1 不同土地利用结构下子流域的非点源污染特征差异 利用 SWAT 模型对桃林口水库流域非点源污染进行模拟,得到研究区 2019 年各子流域的

TN、TP 负荷量,由于各子流域在空间上的污染物施用量存在较大差异,本研究以 TN、TP 负荷流失率(流失量/施用量)作为污染指标,以此反映土地利用结构对子流域污染流失的影响,研究区不同土地利用结构下各子流域 TN、TP 负荷流失率见图 4。

从图 4 中可以看出,研究区土地利用结构为林地(I)的子流域数量最多,TN、TP 负荷在不同土地利用结构下的变化特征基本一致。在单一土地利用类型(I、II、III、VIII)中,子流域的 TN、TP 负荷流失率按从大到小排序为耕地(II) > 草地(III) > 住宅用地(VIII) > 林地(I);在多种土地利用类型的组合(IV、V、VI、VII)中,土地利用结构为林地-耕地-草地(VII)的子流域 TN、TP 负荷流失率最低,土地利用结构为耕地-草地(V)的子流域负荷流失率最高;与相对应的单一土地利用类型的土地利用结构相比,林地的组合能有效降低子流域的污染流失率。

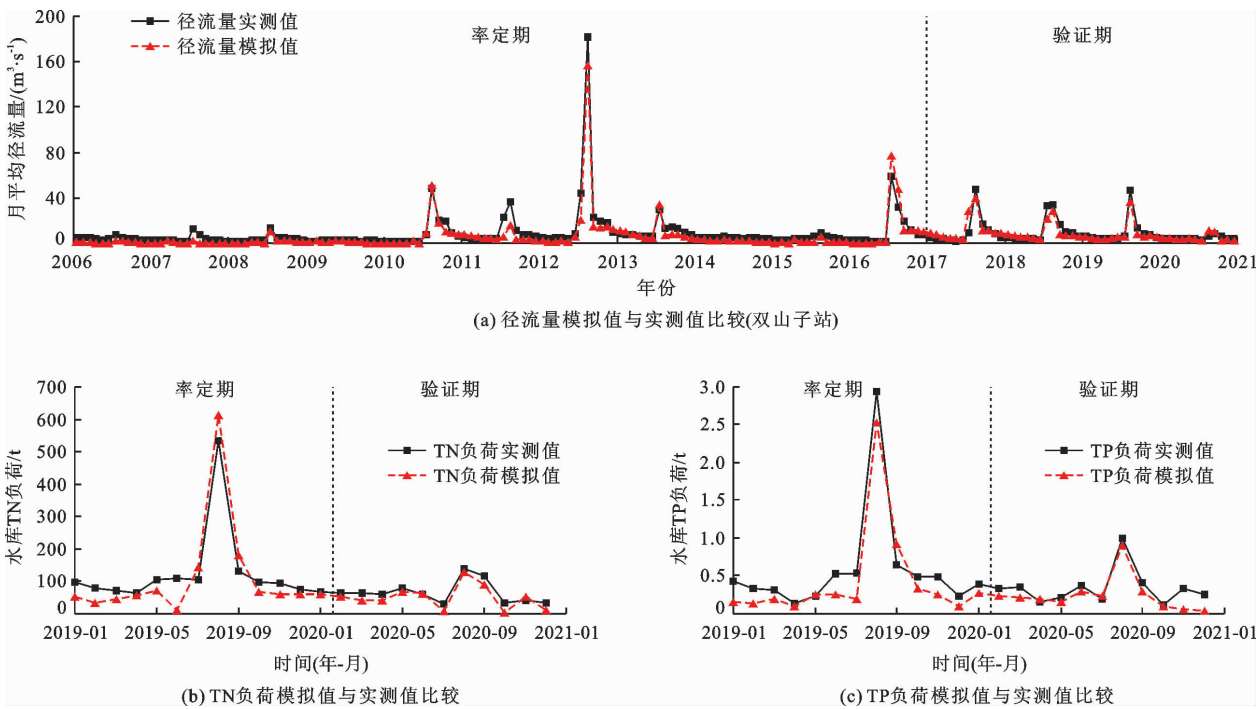


图 3 研究区径流量及库内 TN、TP 负荷模拟值与实测值对比

4.3.2 土地利用类型的年际变化对流域非点源污染的影响 2014、2019 年研究区的土地利用转移矩阵见表 6。分析表 6 可知,与 2014 年相比,2019 年的林地和住宅用地面积有所增加,耕地和草地面积相应减小,2014 年的土地利用类型中分别有 25.26 km² 的耕地、153.10 km² 的草地转化成 2019 年的林地。表 7 和图 5 为 2014、2019 年研究区各土地利用类型面积及 TN、TP 负荷量。由表 7 可以看出,2019 年桃林口水库流域 TN、TP 总负荷量较 2014 年明显

减少,分别减少了 34.43%、23.75%,说明林地面积的增加以及耕地和草地面积的减少对研究流域的 TN、TP 污染负荷有一定的削减作用。图 5 显示,研究区不同土地利用类型的单位面积产污量差异较大,林地的产污量最小,耕地的产污量最大;在研究年份(2014、2019 年)中林地的平均单位面积 TN、TP 负荷量分别为 10.73 和 0.40 kg/km²,而耕地的平均单位面积 TN、TP 负荷量分别高达 87.69 和 4.28 kg/km²。

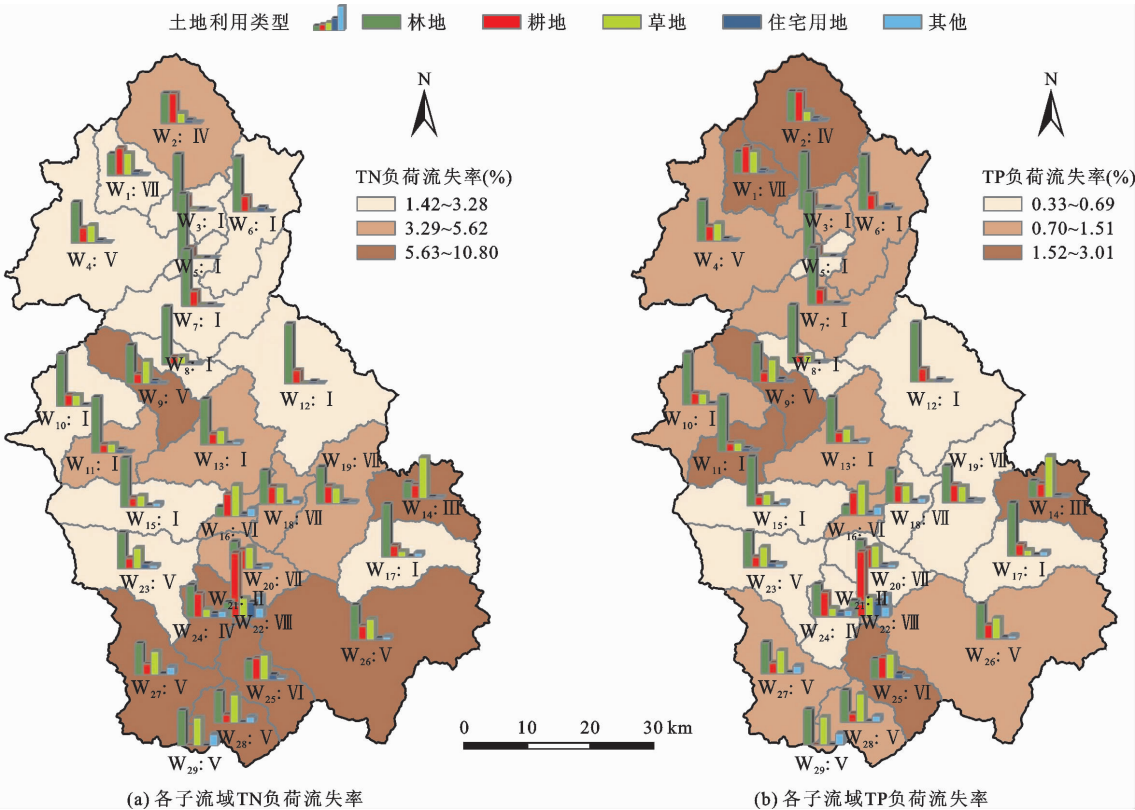


图 4 研究区不同土地利用结构下各子流域 TN、TP 负荷流失率(2019 年)

表 6 2014、2019 年研究区土地利用转移矩阵							km ²
土地利用类型	林地	耕地	草地	住宅用地	其他	总计	增加量
林地	2073.96	40.99	7.51	2.05	0	2124.51	-538.91
耕地	25.26	1140.2	36.74	10.33	3.44	1215.98	253.49
草地	153.1	74.42	1103.59	2.13	0	1333.24	394.95
住宅用地	0	0.84	0	51.69	0.42	52.95	-87.93
其他	0	0	0	0	131.32	131.32	-21.62
总计	2663.42	962.48	938.29	140.88	152.94	4858.00	
增加量	538.91	-253.49	-394.95	87.93	21.62		

表 7 2014、2019 年研究区各土地利用类型面积与 TN、TP 负荷量						
年份	指标	林地	耕地	草地	住宅用地	其他
2014	面积/km ²	2124.51	1215.98	1333.24	52.95	131.32
	TN/t	2633.25	12323.08	4751.02	206.39	443.25
	TP/t	90.33	550.02	271.33	2.87	14.02
2019	面积/km ²	2663.42	962.48	938.29	140.88	152.94
	TN/t	2523.23	7455.38	2555.63	419.70	394.57
	TP/t	105.01	403.70	177.06	7.09	15.14

5 讨 论

桃林口水库流域 SWAT 模型对非点源污染的

模拟具有较强的适用性,但从水质模拟结果中发现模拟值较实测值偏小,其主要原因可能为:(1) SWAT 模型中需要对子流域土地利用和土壤类型的

面积阈值进行设定,因此在模拟过程中会忽视对某些小面积区域的分析计算,但这些区域污染输出量

可能会较大;(2)未考虑点源污染排放、大气沉氮等情况,因而造成了误差。

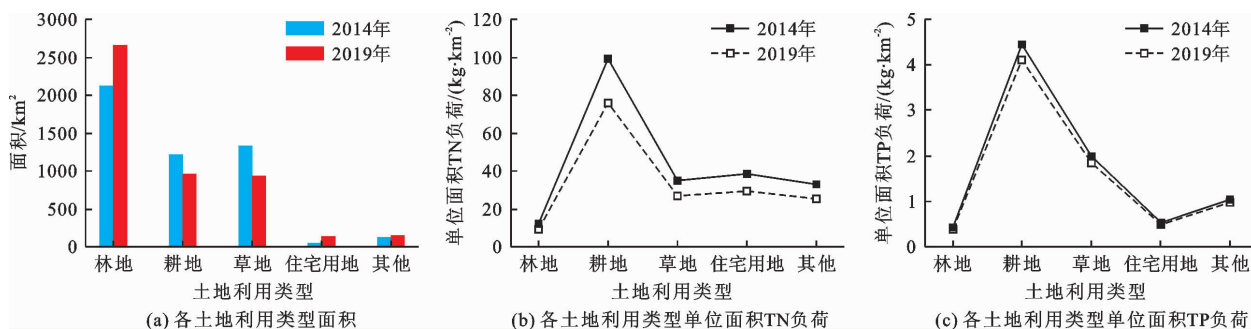


图5 2014、2019年研究区各土地利用类型面积及单位面积TN、TP负荷量

随着近几年环境保护力度的加大,退耕还林措施效果明显,2019年桃林口水库流域TN、TP输出量与2014年输出量相比有所减小。在单一的土地利用类型下,流域内林地的污染物流失量最小,草地次之,耕地最大^[38-39],林地中树木的根系能固持土壤,具有较强的土壤保持能力,且能较好地过滤上方径流中的淤泥,通过改变径流对TN、TP负荷的运输过程,可以在一定程度上抑制污染物的迁移与转化^[40-42]。桃林口水库流域的草地多为牧草地,所涉及的行政区养殖业较为发达,存在较高的牲畜养殖污染,因此以草地为主的区域污染流失也较严重,这一结论与Zeiger等^[43]在James河流域的研究结果一致。与相对应的单一土地利用类型的土地利用结构相比,林地的组合能有效降低子流域的负荷流失率,说明林地对非点源污染具有较强的调控作用。

6 结论

根据桃林口水库流域水文气象、水质、土地利用、土壤类型等资料,构建了流域SWAT非点源污染模型,对TN和TP负荷进行了模拟,分析了不同土地利用方式对流域非点源污染负荷的影响,主要结论如下:

(1)采用双山子水文站2004—2020年实测径流量和桃林口水库2019—2020年实测TN、TP负荷量数据,对构建的桃林口水库流域SWAT非点源污染模型进行参数率定和验证。率定期径流决定系数 $R^2 = 0.93$,纳什效率系数 $E_{ns} = 0.92$,TN、TP负荷决定系数 R^2 分别为0.95、0.94,纳什系数 E_{ns} 分别为0.84、0.89;验证期径流决定系数 $R^2 = 0.82$,纳什系数 $E_{ns} = 0.80$,TN、TP负荷决定系数 R^2 也均在0.85及以上,说明构建的SWAT模型适合桃林口水库流域氮、磷负荷特征的模拟。

(2)不同土地利用结构下的子流域非点源污染特征差异较大,TN、TP负荷的分布规律相似,土地利用结构为林地的子流域污染流失率最低,耕地的污染流失率最高;与相对应的单一土地利用类型相比,林地的组合能有效降低污染流失率。

(3)不同土地利用方式的产污能力差异显著,林地的单位面积产污量最低,耕地最高;土地利用方式的年际变化对流域非点源污染也有较大影响,与2014年相比,2019年桃林口水库流域林地面积增加而耕地与草地面积减少,TN、TP总负荷量分别减少了34.43%、23.75%。

参考文献:

- [1] 第二次全国污染源普查公报[J]. 环境保护, 2020, 48(18): 8-10.
- [2] 王思如,杨大文,孙金华,等. 我国农业面源污染现状与特征分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 140-147+172.
- [3] LI Xiaoping, CAI Jie, WANG Quanjing, et al. Heterogeneous public preferences for controlling agricultural non-point source pollution based on a choice experiment[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 305: 114413.
- [4] 谭少军,刘洋,朱小婕,等. 长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制[J]. 环境科学, 2022, 43(6): 3128-3139.
- [5] WANG Kang, WANG Pengxiang, ZHANG Renduo, et al. Determination of spatiotemporal characteristics of agricultural non-point source pollution of river basins using the dynamic time warping distance[J]. Journal of Hydrology, 2020, 583: 124303.
- [6] 边博,朱伟,李冰,等. 太湖流域西部地区面源污染特征及其控制技术[J]. 水资源保护, 2015, 31(1): 48-55.
- [7] 杜习乐,吕昌河,王海荣. 土地利用/覆被变化(LUCC)的环境效应研究进展[J]. 土壤, 2011, 43(3): 350-360.
- [8] 邓华,高明,龙翼,等. 石盘丘小流域不同土地利用方

- 式下土壤氮磷流失形态及通量[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 251–262.
- [9] 付绍桐, 甄志磊, 刘旭, 等. 基于“源-汇”理论的汾河太原段非点源污染识别[J]. 节水灌溉, 2023(1): 116–121+127.
- [10] HUANG Chong, HOU Xiangjun, LI He. An improved minimum cumulative resistance model for risk assessment of agricultural non-point source pollution in the coastal zone[J]. Environmental Pollution, 2022, 312: 120036.
- [11] SRINIVAS R, SINGH A P, DHADSE K, et al. An evidence based integrated watershed modelling system to assess the impact of non-point source pollution in the riverine ecosystem[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 246: 118963.
- [12] 李华林, 张守红, 于佩丹, 等. 基于改进输出系数模型的非点源污染评估及关键源区识别: 以北运河上游流域为例[J/OL]. 环境科学. (2023-02-16) [2023-09-09]. <https://doi.org/10.13227/j.hjks.202211321>.
- [13] 于佩丹, 张守红, 李华林, 等. 北沙河上游流域氮、磷污染风险空间分布特征解析[J]. 环境科学学报, 2022, 42(2): 4–12.
- [14] 李潇然, 李阳兵, 邵景安. 非点源污染输出对土地利用和社会经济变化响应的案例研究[J]. 生态学报, 2016, 36(19): 6050–6061.
- [15] 聂启阳, 吕继强, 孙夏利, 等. 土地利用变化影响的湍河流域潜在非点源污染风险时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 80–88.
- [16] 徐文静, 常国梁, 时迪迪, 等. 北运河上游非点源污染风险空间分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2021, 41(1): 7–14.
- [17] SINGH J, KNAPP H V, ARNOLD J G, et al. Hydrological modeling of the Iroquois River Watershed using HSPF and SWAT[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2005, 41(2): 343–360.
- [18] 李娜, 韩维峥, 沈梦楠, 等. 基于输出系数模型的水库汇水区农业面源污染负荷估算[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 224–230.
- [19] 李华林, 张建军, 张耀方, 等. 基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析[J]. 环境科学, 2021, 42(6): 2796–2809.
- [20] 郝改瑞, 李家科, 李怀恩, 等. 流域非点源污染模型及不确定分析方法研究进展[J]. 水力发电学报, 2018, 37(12): 54–64.
- [21] NGUYEN H H, RECKNAGEL F, MEYER W, et al. Comparison of the alternative models SOURCE and SWAT for predicting catchment streamflow, sediment and nutrient loads under the effect of land use changes[J]. Science of the Total Environment, 2019, 662: 254–265.
- [22] SHI Jinhao, JIN Ri, ZHU Weihong. Quantification of effects of natural geographical factors and landscape patterns on non-point source pollution in watershed based on geodetector: Burhatong River Basin, northeast China as an example[J]. Chinese Geographical Science, 2022, 32: 707–723.
- [23] 李明涛, 王晓燕, 刘文竹. 潮河流域景观格局与非点源污染负荷关系研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(8): 2296–2306.
- [24] 宗敏, 刘森, 李春林, 等. 辽宁中部城市群城市非点源污染负荷评估[J]. 生态学报, 2022, 42(24): 10138–10149.
- [25] 赖正清, 肖雪纯, 李硕, 等. 天目湖流域茶园非点源污染多尺度模拟[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(11): 2405–2416.
- [26] 牟兵娥. 基于 SWAT 模型的府澧河武汉段纳污能力及总量控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [27] 徐彬鑫. 基于水文、水动力、水质联合模拟的流域氮磷污染分布特征分析[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- [28] 邓欧平. 基于 ArcSWAT 的流域氮素非点源污染模拟和污染源识别[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [29] 张佩琪, 邓鹏, 王沃. 利用 SWAT 模型模拟退耕还林技术在岩溶流域的节水效果[J]. 四川水利, 2022, 43(2): 35–39.
- [30] 李荣朋. 气候与土地利用变化下沱水流域非点源污染模拟研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
- [31] ABBASPOUR K C, YANG Jing, MAXIMOV I. Modelling hydrology and water quality in the prealpine/alpine Thur Watershed using SWAT[J]. Journal of Hydrology, 2007, 333(2–4): 413–430.
- [32] 薛佳欣, 张鑫, 张建恒, 等. 基于 APSIM 模型小麦-玉米不同灌溉制度作物产量和水分利用效率分析[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 106–113.
- [33] 陈丹, 张冰, 曾逸凡, 等. 基于 SWAT 模型的青山湖流域氮污染时空分布特征研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(4): 1216–1222.
- [34] 方玉杰. 基于 SWAT 模型的赣江流域水环境模拟及总量控制研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2015.
- [35] 韩博, 周丽丽, 范昊明, 等. 蒲河流域氮污染负荷模拟及时空分布[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(2): 90–96.
- [36] 陈岩, 赵琰鑫, 赵越, 等. 基于 SWAT 模型的江西八里湖流域氮磷污染负荷研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(6): 1112–1118.
- [37] 王赵飞, 林晨, 许金朵, 等. 巢湖流域非点源颗粒态磷负荷的空间差异及关键影响因子研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 659–670.
- [38] 郑宇, 程香菊, 王兆礼, 等. 韩江流域面源污染及与景观格局的关系[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 78–85.

(下转第79页)

- ses of variations in sediment yield in the Jinghe River Basin, China[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 18045.
- [19] 荣易,秦成新,孙傅,等. SWAT模型在我国流域水环境模拟应用中的评估验证过程评价[J]. 环境科学研究, 2020, 33(11): 2571–2580.
- [20] 缪子梅,李竞春,陈栋. 基于熵权TOPSIS模型评价涝渍条件下冬小麦水位管理方案[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(12): 1306–1311.
- [21] CARRERA – HERNANDEZ J J. Not all DEMs are equal: an evaluation of six globally available 30 m resolution DEMs with geodetic benchmarks and LiDAR in Mexico[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 261: 112474.
- [22] 姜婧婧,杜鹏飞. SWAT模型流域划分方法在平原灌区的改进及应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(10): 866–872.
- [23] 高玉芳,陈耀登,蒋义芳,等. DEM数据源及分辨率对HEC – HMS水文模拟的影响[J]. 水科学进展, 2015, 26(5): 624–630.
- [24] 张耀文,张勃,姚荣鹏,等. 2000–2020年渭河流域植被覆盖度及产水量时空变化[J]. 中国沙漠, 2022, 42(2): 223–233.
- [25] 蓝雪春,完颜晟,张真奇. SWAT模型在浙江小流域径流计算中的应用[J]. 人民珠江, 2020, 41(12): 27–31+52.
- [26] SINGH A, JHA S K. Identification of sensitive parameters in daily and monthly hydrological simulations in small to large catchments in central India[J]. Journal of Hydrology, 2021, 601: 126632.
- [27] 张同,张承明,夏安全,等. 不同分辨率下SWAT模型在大汶河径流模拟中的应用[J]. 水电能源科学, 2017, 35(8): 27–30+44.
- [28] AL – KHAFAJI M, SAEED F H, AL – ANSARI N. The interactive impact of land cover and DEM resolution on the accuracy of computed streamflow using the SWAT model[J]. Water Air and Soil Pollution, 2020, 231: 416.
- [29] KHOI D N, THOM V T. Parameter uncertainty analysis for simulating streamflow in a river catchment of Vietnam[J]. Global Ecology and Conservation, 2015, 4: 538–548.
- [30] 韩振宇,高学杰,徐影. 多区域模式集合的东亚陆地区域的平均和极端降水未来预估[J]. 地球物理学报, 2021, 64(6): 1869–1884.

(上接第69页)

- [39] 廖雯,胡砚霞,于兴修,等. 丹江口库区2010—2020年土壤保持功能时空特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 288–294+376.
- [40] 王慧勇,遆超普,王良杰,等. 基于SWAT模型的典型农业小流域氮污染时空分布特征及关键源解析[J]. 湖泊科学, 2022, 34(2): 517–527.
- [41] 张展羽,司涵,孔莉莉. 基于SWAT模型的小流域非点源氮磷迁移规律研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 93–100.
- [42] 李倩楠,张静,宫辉力. 基于SWAT模型多站点不确定性评价方法的比较[J]. 人民黄河, 2017, 39(1): 24–29.
- [43] ZEIGER S J, OWEN M R, PAVLOWSKY R T. Simulating nonpoint source pollutant loading in a karst basin: a SWAT modeling application[J]. Science of the Total Environment, 2021, 785: 147295.

