

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.025

红枫湖流域非点源污染时空分布及管理措施

黄 维^{1,2}, 贾仰文¹, 黄国如³, 牛存稳¹, 张和喜²

(1. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038; 2. 贵州省水利科学研究院, 贵州 贵阳 550002;
3. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘要:为分析红枫湖流域非点源污染状况及非点源污染防控措施效果,利用该流域典型子流域的水量和水质数据对 SWAT 模型的径流和水质参数进行率定和验证,采用验证后的模型模拟了 2001—2015 年流域氨氮、总氮和总磷的时空分布特征,并分析了不同管理措施对非点源污染的削减效果。结果表明:SWAT 模型在红枫湖流域具有良好的适用性;氨氮、总氮、总磷负荷主要集中在 4—9 月,分别占全年负荷的 88.49%、83.74% 和 97.36%,西南部和东北部的子流域氮磷流失较大,是非点源污染的关键源区;化肥削减、退耕还林还草措施能有效削减非点源污染,尤其是总磷污染,实施综合管理措施对氮磷污染削减的效果更佳。

关键词:非点源污染;SWAT 模型;管理措施;红枫湖流域

中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)05-0190-06

Spatiotemporal distribution and control measures of non-point source pollution in the Hongfeng Lake Basin // HUANG Wei^{1,2}, JIA Yangwen¹, HUANG Guoru³, NIU Cunwen¹, ZHANG Hexi² (1. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Guizhou Provincial Water Conservancy Research Institute, Guiyang 550002, China; 3. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to investigate the situation of non-point source pollution in the Hongfeng Lake Basin, as well as the effects of prevention and control measures, the water quantity and water quality data of a typical sub-basin were used to calibrate and validate the water quantity and water quality parameters of the SWAT model. The validated SWAT model was used to simulate the spatiotemporal distribution of ammonia nitrogen, total nitrogen, and total phosphorus from 2001 to 2015 and investigate the effects of different measures on the control of non-point source pollution. The results show that the SWAT model has good applicability in the Hongfeng Lake Basin. The ammonia nitrogen, total nitrogen, and total phosphorus loads are mainly concentrated from April to September, accounting for 88.49%, 83.74%, and 97.36%, respectively, of the annual loads. The southwest and northeast sub-basins with large losses of nitrogen and phosphorus are key source areas of non-point source pollution. Measures such as fertilizer reduction and conversion of farmlands to forests and grasslands can effectively reduce the non-point source pollution, in particular, the total phosphorus pollution. The implementation of comprehensive management measures has a better effect in reducing nitrogen and phosphorus pollution.

Key words: non-point source pollution; SWAT model; control measures; the Hongfeng Lake Basin

河流湖库是我国重要水源,农业、工业和生活产生的污水流入河流、湖泊中,对其影响巨大。根据《中国水资源公报(2018)》,Ⅳ类、Ⅴ类和劣Ⅴ类的湖泊占 75.0%,处于富营养化水平的湖泊占 73.5%。非点源污染是造成水体污染的重要原因^[1-4]。国内外利用 SWAT、HSPF、AGNPS 等模

型^[5-7]对非点源污染进行了大量研究,其中 SWAT 模型应用广泛,在三峡库区、太湖、淮河等多个流域有良好的适用性^[8-10]。红枫湖属乌江水系,是贵阳市的重要水源地,由于流域内工农业发展迅速,大量污染物排入湖中,对周边居民用水造成威胁。1994—1995 年红枫湖连续发生死鱼、黑水污染事

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0407702);贵州省科技厅项目(黔科合服企[2021]4 号,黔科合支撑[2021]一般 469);贵州省水利科技项目(KT201821,KT202109)

作者简介:黄维(1990—),男,博士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail: 399467198@qq.com

件,1996—1998 年陆续发生藻华,造成严重经济损失,2000 年以后基本每年发生藻华现象^[11-12]。2007 年贵州省成立了两湖一库管理局,之后一直对红枫湖实施治理,红枫湖的水质监测数据显示,V 类、劣 V 类水出现频率减小,Ⅱ类、Ⅲ类水出现频率增大^[13]。近年来,也有一些学者对红枫湖流域的非点源污染开展了研究。耿润哲等^[14]以红枫湖上游羊昌河流域为例,利用 SWAT 模型模拟 2010—2014 年的非点源污染,并进行了污染控制区划。张昊天等^[15]利用等标污染负荷法对红枫湖流域平坝区的农业非点源污染进行了估算,分析了污染产生的主要原因。

本文采用 SWAT 模型对红枫湖流域非点源污染的时空分布进行分析,设置不同管理措施研究氮磷负荷的削减情况,以期治理流域非点源污染和改善水环境提供参考。

1 研究区概况

红枫湖流域位于 105 ° 97' E ~ 106 ° 49' E、26 ° 15' N ~ 26 ° 63' N 之间,地处低纬高原亚热带季风性湿润气候区,干湿分明,多年平均降水量达 1 200 mm,年均气温 14.4 °C,流域面积达 1 590 km²,涉及清镇市、平坝县、安顺县和长顺县。红枫湖主要由麦翁河、羊昌河、麻线河和后六河等河流汇入,如图 1 所示。

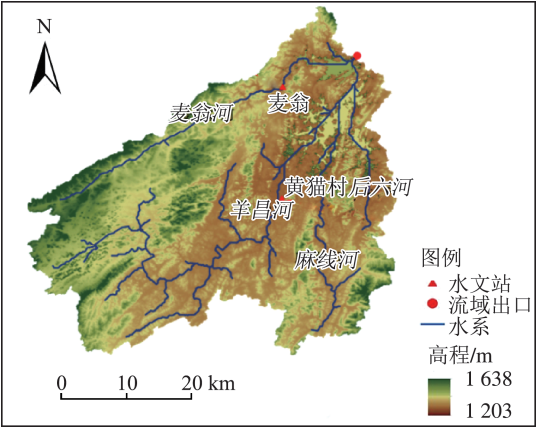


图 1 红枫湖流域水系分布
Fig.1 Distribution of water system in the Hongfeng Lake Basin

在羊昌河和麦翁河下游分别设立了焦家桥和骆家桥水质监测断面,根据贵州省水文局提供的水质资料,2012—2016 年化学需氧量、氨氮和总磷的质量浓度情况如图 2 所示。

根据《贵州省水功能区划》,红枫湖流域水质目标需达到Ⅱ类或Ⅲ类,可按照Ⅲ类标准分析这两个断面的水质达标情况。从图 2 可知,焦家桥和骆家桥断面的化学需氧量和氨氮在 2012 年 9 月至 2016

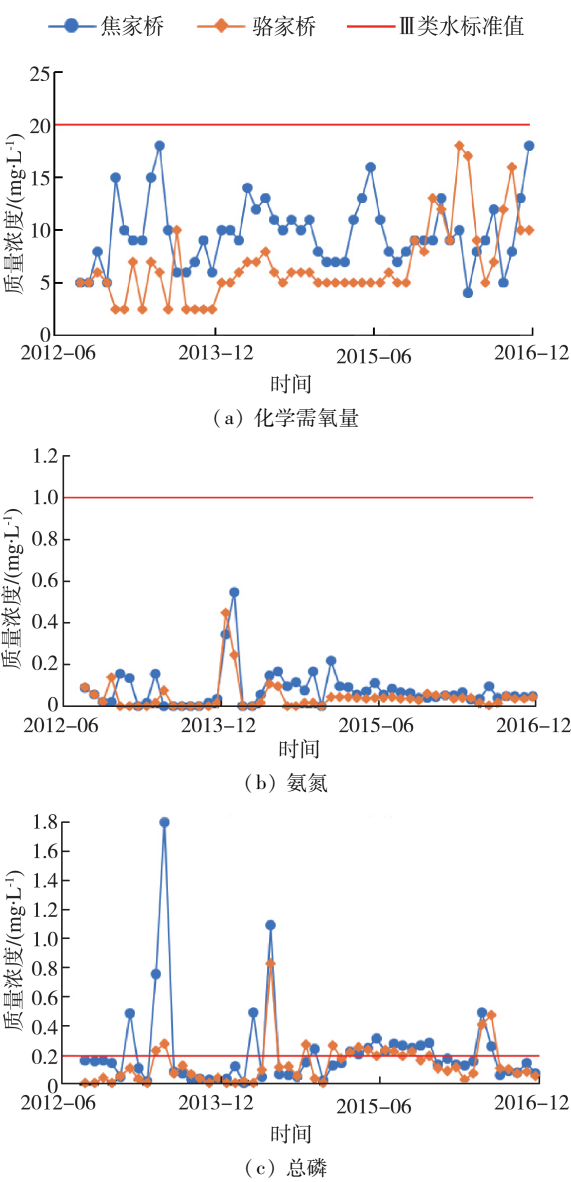


图 2 焦家桥和骆家桥水质指标状况
Fig.2 Situation of water quality indicators of Jiaojiaqiao and Luojiaqiao stations

年 12 月均满足Ⅲ类水标准;而焦家桥断面总磷质量浓度有 18 个月份超过Ⅲ类水标准,有 6 个月份超过 V 类水标准,骆家桥断面总磷质量浓度有 16 个月份超过Ⅲ类水标准,有 3 个月份超过 V 类水标准,总磷质量浓度超标率均较高。按照单因子评价法,两个断面的水质在相当长一段时期内达到Ⅳ或 V 类,甚至超过 V 类,特别是在汛期,总磷质量浓度超标,导致水质有所恶化。由此可见,总磷是导致水质变差的主要因素。工业、农业和生活污水的排放与水质变差密切相关,同时也使流域水环境污染加剧,对流域健康持续发展造成威胁。

2 研究数据和方法

2.1 数据来源

SWAT 模型基础数据库有数字高程 (DEM) 数

据、土地利用数据、土壤数据和水文气象数据等。本研究选取地理坐标系统为 D_WGS_1984, 投影坐标系统为 WGS_1984_UTM_Zone-48N。DEM 数据来源于地理空间数据云, 精度为 90 m × 90 m; 土地利用数据来自中国科学院的国家资源环境数据库, 采集时间为 2015 年, 精度为 90 m × 90 m; 土壤数据来自全球土壤数据库 (HWSO), 精度为 1 km × 1 km; 水文气象数据来自贵州省水文局和中国气象数据网, 时间序列为 2001—2015 年; 农业管理数据参考当地作物生长情况和相关文献^[16]; 点源污染数据参考流域内区县的统计公报、环境监测公报等资料。

2.2 SWAT 模型

SWAT 模型是基于 GIS 的一个长时段分布式流域水文模型, 通过空间离散化进行模拟^[17]。在划分子流域后, 根据土地利用、土壤类型以及坡度划分情况进一步划分水文响应单元。由于红枫湖流域出口位置为红枫水电站, 相关水文水质数据获取困难, 本文先选择径流水质资料充足、有代表性的典型子流域建立 SWAT 模型, 率定径流和水质参数, 再对红枫湖整个流域建立 SWAT 模型, 将流域划分为 23 个子流域和 404 个水文响应单元, 研究污染物的时空分布特征。

3 模拟结果与分析

3.1 典型子流域 SWAT 模型率定与验证

羊昌河流域位于红枫湖流域的西南方, 总出口位于焦家桥断面, 控制面积约 773 km², 占总流域面积近 50%, 具有典型性及代表性。利用 SWAT-CUP 软件对该流域的径流和水质参数进行率定^[18-20]。选择纳什系数 (NSE)、相对误差 (RE) 和决定系数 (R^2) 进行适用性评价。在径流率定和验证时, 选取 2000 年为模型预备期, 2001—2009 年为参数率定期, 2010—2015 年为模型验证期。率定期 NSE、RE 和 R^2 的值分别为 0.85、-10.39% 和 0.91, 验证期 NSE、RE 和 R^2 的值分别为 0.92、-13.72% 和 0.90, 模拟结果良好, 如图 3 所示。

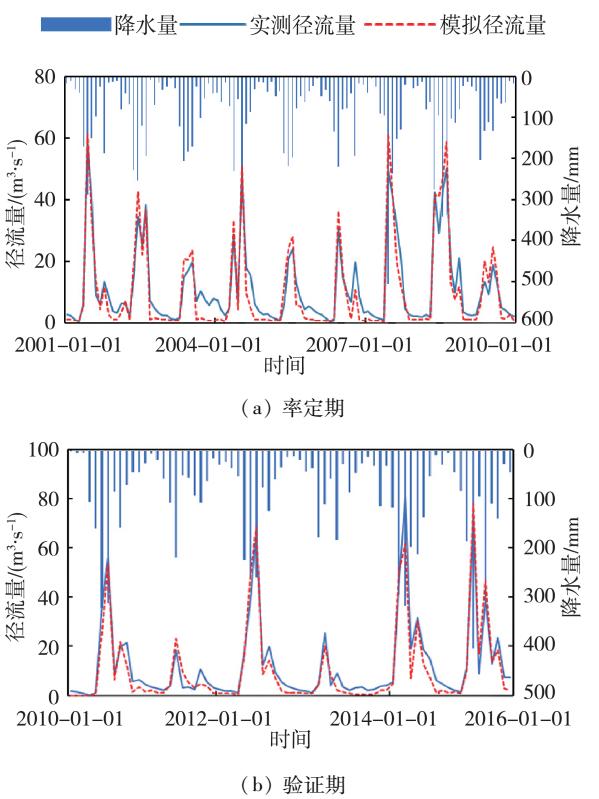


图3 率定期和验证期日径流模拟值与实测值拟合结果
Fig.3 Fitting results of simulated and measured values of daily runoff during calibration and validation periods

由于流域水质监测数据有限, 选择氨氮和总磷指标进行水质参数的率定和验证, 以 2013—2014 年为率定期, 2015 年为验证期, 从观测数据筛选若干个合理值与模拟值进行比较。从表 1 可见, 氨氮和总磷实测值和模拟值的相对误差基本在合理范围内, 表明水质参数取值合理。

3.2 非点源污染时间分布特征

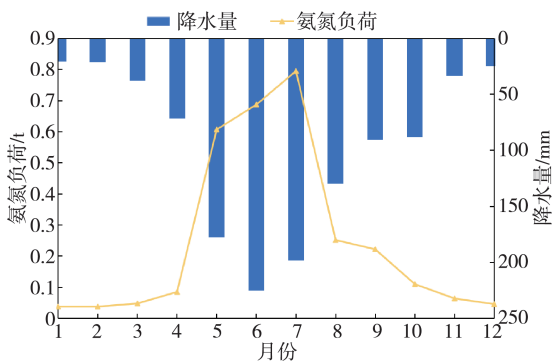
羊昌河流域控制面积 773 km², 占流域总面积近 50%, 为红枫湖流域最有代表性的子流域, 将羊昌河流域率定好的模型参数推广到红枫湖流域, 构建红枫湖流域 SWAT 模型, 利用该模型模拟 2001—2015 年红枫湖流域多年月均氮磷污染情况, 结果如图 4 所示。

将 4—9 月作为汛期, 其余月份作为枯水期, 从各污染物的多年月均负荷可以看出, 降水量越大, 氨

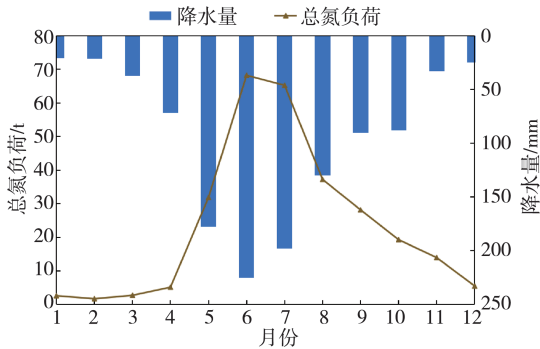
表1 氨氮和总磷月负荷率定及验证结果

Table 1 Calibration and validation results of monthly pollution loads of ammonia nitrogen and total phosphorus

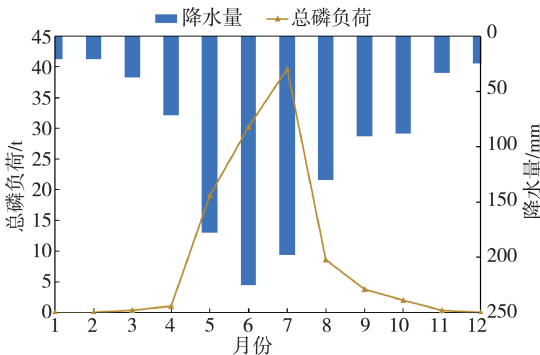
时期	氨氮				总磷			
	时间	实测负荷/kg	模拟负荷/kg	相对误差/%	时间	实测负荷/kg	模拟负荷/kg	相对误差/%
率定期	2014 年 6 月	17 199	8 808	-48.79	2013 年 3 月	567	604	6.54
	2014 年 8 月	5 135	4 854	-5.48	2014 年 4 月	5 459	4 551	-16.63
	2014 年 9 月	9 849	6 935	-29.59	2014 年 6 月	125 664	119 900	-4.59
验证期	2015 年 6 月	21 811	10 620	-51.31	2015 年 3 月	1 337	1 482	10.83
	2015 年 8 月	9 421	8 722	-7.42	2015 年 4 月	862	664	-22.98



(a) 氨氮



(b) 总氮



(c) 总磷

图4 2001—2015年氨氮、总氮和总磷多年月均负荷

Fig.4 Monthly average loads of ammonia nitrogen, total nitrogen, and total phosphorus from 2001 to 2015

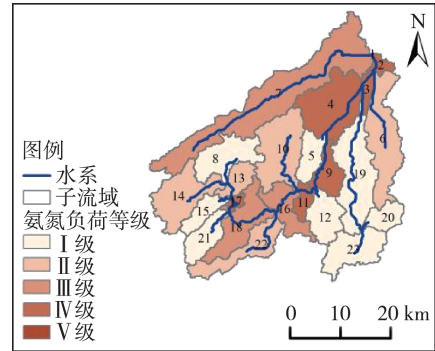
氮、总氮和总磷的产出越大,呈正相关关系。4—9月集中了全年近80%的降水,而这期间的氨氮、总氮和总磷负荷分别占全年负荷的88.49%、83.74%和97.36%,特别是6—7月各污染物的负荷均较高,分布曲线呈倒“V”形。汛期的降水量较大,使得径流量增大,而且流域处于高原地区,各区域海拔高差较大,坡度亦较大,氮磷污染物随径流很快进入河道,并且增加显著;而枯水期的降水量较小,对应的氮磷流失也很小。

3.3 非点源污染负荷空间分布与关键源区识别

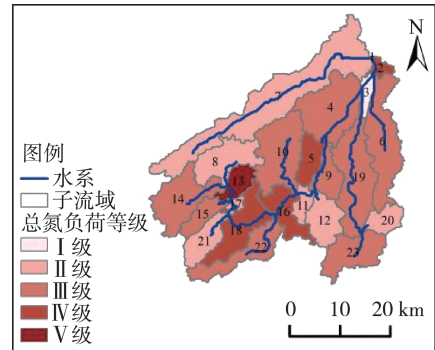
通过模型分析2001—2015年均氨氮、总氮和总磷单位面积负荷的空间分布特征。按照GIS中的自然断点法将研究区氨氮、总氮和总磷的负荷强度分为5个等级,如表2和图5所示。

表2 污染物负荷分级标准
Table 2 Pollutant load classification

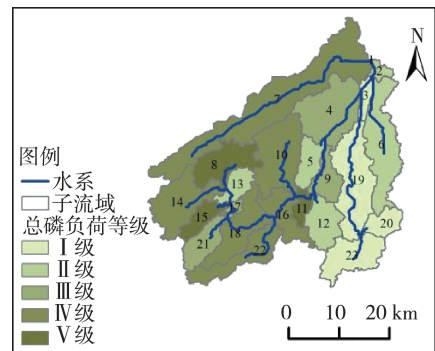
等级	负荷强度/($\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$)		
	氨氮	总氮	总磷
I级	≤ 0.46	≤ 71.38	≤ 23.09
II级	$> 0.46 \sim 1.22$	$> 71.38 \sim 156.61$	$> 23.09 \sim 44.86$
III级	$> 1.22 \sim 2.81$	$> 156.61 \sim 205.15$	$> 44.86 \sim 74.41$
IV级	$> 2.81 \sim 9.34$	$> 205.15 \sim 289.05$	$> 74.41 \sim 91.95$
V级	> 9.34	> 289.05	> 91.95



(a) 氨氮



(b) 总氮



(c) 总磷

图5 氨氮、总氮和总磷年均负荷等级空间分布

Fig.5 Spatial distribution of annual average loads of ammonia nitrogen, total nitrogen, and total phosphorus

由图5可知,水系干流所在的子流域污染物的流失强度较大。氨氮负荷较大的子流域有1、2、4、9、11、17和18,总氮负荷较大的子流域有1、2、4、5、13、16和18,基本均达到IV或V级,总磷负荷较大的子流域有7、8、10、11、15、16、18和22,也基本达到IV或V级。而子流域12、20的污染物流失较小,等级也较

低。从污染较为严重的子流域分布的位置来看,氮磷流失较大的子流域基本集中在西南部和东北部,同时也在羊昌河水系附近,主要原因是西南部集中分布着大量耕地,农业活动频繁,而且坡度较大,地势陡峭,在降雨驱动下更易造成氮磷流失;而东北部处于河流中下游地区,除了有耕地分布,人口密度也较大,因此污染物流失也较大。可见氮磷负荷的空间分布与土地利用类型、地形地势等因素密切相关。因此可将这些子流域视为氨氮、总氮和总磷输出的关键源区对非点源污染加以控制。

3.4 管理措施及效果

红枫湖流域在贵州省开发较早,经济发展水平比较领先,农业较为发达,非点源污染流失严重,对红枫湖水质造成严重影响。如果不开展长期有效的污染治理,会影响当地居民饮水安全。大量研究表明,采取化肥削减措施或减少不适宜耕作的耕地可以较为有效地控制流域的非点源污染^[21-23]。根据污染物的模拟结果,参考近年来相关研究成果^[24-26],设置以下几种情景进行模拟分析:①情景1,化肥削减10%;②情景2,化肥削减30%;③情景3,将坡度为10°以上、占比20%的耕地设置为林地,进行退耕还林;④情景4,将坡度为10°以上、占比20%的耕地设置为草地,进行退耕还草;⑤情景5,联合情景1和3;⑥情景6,联合情景1和4。不同情景下2011—2015年氮磷削减模拟结果如图6所示。

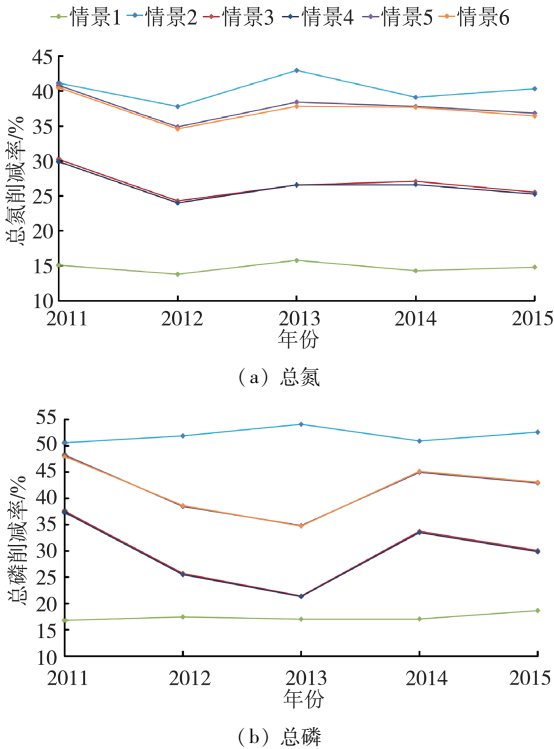


图6 不同情景下氮磷削减模拟结果
Fig. 6 Nitrogen and phosphorus reduction effects under different scenarios

从图6可知,情景1中流域总氮削减率为13.79%~15.78%,总磷削减率为16.79%~18.65%,年均削减率分别为14.74%和17.40%。情景2中流域总氮削减率为37.78%~42.95%,总磷削减率为50.59%~52.61%,年均削减率分别为40.26%和52.02%。从化肥削减措施来看,化肥施用对污染输出具有显著影响,削减越多,氮磷流失越少,同时削减速率也会变缓。化肥施用与农作物产量也有关系,考虑到经济效益,应深入研究测土配方施肥等施肥技术,在削减化肥施用的情况下,减小对农作物产量的影响,并考虑非点源污染的控制和农业经济的发展。

情景3中,将一部分耕地改为林地进行退耕还林,流域总氮削减率为24.27%~30.22%,总磷削减率为21.42%~37.59%,年均削减率分别为26.73%和29.71%。情景4则是将一部分耕地改为草地进行退耕还草,使总氮削减率为23.98%~29.89%,总磷削减率为21.32%~33.50%,年均削减率分别为26.46%和29.50%。林地和草地能有效拦截水土流失,从而减少土壤里氮磷养分的输出,而且增加林地和草地的面积,减少不适宜耕作的耕地,同时也提高了流域植被覆盖率,有利于流域的生态环境保护。

情景5组合了情景1和情景3,削减效果较单一的管理措施更佳,总氮削减率达到34.87%~40.81%,总磷削减率达到34.84%~48.26%。情景6削减效果与情景5相差不多,总氮削减率达到34.58%~40.49%,总磷削减率达到34.74%~48.00%。

对于流域的非点源污染,可以考虑结合不同管理措施进行综合控制,这样能达到更好的削减效果。根据红枫湖流域非点源污染的空间分布,可以将关键源区作为重点关注对象,考虑到不同子流域地形、土地利用等特点,选择合适的管理措施,从而在这些关键源区进行非点源污染的控制。

4 结 论

a. 利用红枫湖典型子流域率定 SWAT 模型参数,在率定期和验证期内,径流的NSE和R²均在0.8以上,相对误差在20%以内;氨氮和总磷实测值和模拟值的相对误差在合理范围内,表明模型有良好的适用性。

b. 4—9月氨氮、总氮、总磷负荷分别占全年负荷的88.49%、83.74%和97.36%,特别是在6—7月,污染物负荷均较高。西南部和东北部的子流域氮磷流失较大,分布在此的子流域可视为关键源区,对其非点源污染加以重点控制。

c. 模拟了不同管理措施对氮磷削减效果的影响,化肥削减、退耕还林还草措施对减少非点源污染

有显著效用,而且对总磷的削减效果更好,且实施综合管理措施后氮磷削减效果更为有效。

参考文献:

- [1] 涂小强,傅春. 非点源污染研究发展演化与前沿分析[J]. 人民长江,2021,52(4):47-54. (TU Xiaoqiang, FU Chun. Evolution and frontier analysis of non-point source pollution research[J]. Yangtze River, 2021, 52(4):47-54. (in Chinese))
- [2] LI Shu, LI Jiake, XIA Jun, et al. Optimal control of non-point source pollution in the Bahe River Basin, Northwest China, based on the SWAT model [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021,28:55330-55343.
- [3] 郝永飞,金光球,唐洪武,等. 淮河干流典型污染物时空分布特性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(4):291-299. (HAO Yongfei, JIN Guangqiu, TANG Hongwu, et al. Spatial and temporal distribution analysis of typical contaminants in mainstream of Huaihe River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020,48(4): 291-299. (in Chinese))
- [4] 赵永强,李为超,蒲欢欢,等. 基于 ArcSWAT 模型的老鹳河流域面源氮识别和分析[J]. 水生态学杂志,42(6):1-6. (ZHAO Yongqiang, LI Weichao, PU Huanhuan, et al. Identification and analysis of non-point source nitrogen in Laoguan River Watershed based on ArcSWAT [J]. Journal of Hydroecology, 42(6):1-6. (in Chinese))
- [5] ADU J T, KUMARASAMY M V. Assessing non-point source pollution models: a review [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2018, 27(5): 1913-1922.
- [6] 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: 14295.
- [7] 石金昊,朱卫红,田乐,等. 基于 SWAT 模型的布尔哈通河流域面源污染的变化研究[J]. 灌溉排水学报,2021,40(4):130-136. (SHI Jinhao, ZHU Weihong, TIAN Le, et al. Using SWAT to study the changes in nonpoint source pollution in Burhatong River Basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(4): 130-136. (in Chinese))
- [8] 黄国如,陈晓丽,任秀文. 北江飞来峡库区典型流域非点源污染特征分析及模拟[J]. 水资源保护,2019,35(4): 9-16. (HUANG Guoru, CHEN Xiaoli, REN Xiuwen. Characteristic analysis and simulation of non-point source pollution in typical watershed of Feilaixia Reservoir area [J]. Water Resources Protection,2019,35(4):9-16. (in Chinese))
- [9] 李家科,彭凯,郝改瑞,等. 黄河流域非点源污染负荷定量化与控制研究进展[J]. 水资源保护,2021,37(1):90-102. (LI Jiake, PENG Kai, HAO Gairui, et al. Research progress on quantification and control of non-point source pollution load in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (1): 90-102. (in Chinese))
- [10] 魏冲,董晓华,刘冀,等. 不同耕地类型对流域水沙过程的影响研究[J]. 水文,2019,39(6):20-26. (WEI Chong, DONG Xiaohua, LIU Ji, et al. Influence of different arable land types on water and sediment processes in river basin [J]. Journal of China Hydrology, 2019,39(6):20-26. (in Chinese))
- [11] 张婷,高雅,李建柱,等. 流域非点源氮磷污染负荷分布模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1): 42-49. (ZHANG Ting, GAO Ya, LI Jianzhu, et al. Distribution simulation of nonpoint source nitrogen and phosphorus pollution load in watershed [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(1): 42-49. (in Chinese))
- [12] 李峰,秦红超,龙汉武,等. 红枫湖蓝藻水华的成因及其控制对策[J]. 贵州科学,2017,35(3):11-18. (LI Feng, QIN Hongchao, LONG Hanwu, et al. Origin and control measures of cyanobacteria bloom in Hongfeng Lake [J]. Guizhou Science, 2017, 35 (3): 11-18. (in Chinese))
- [13] 吴琳娜. 红枫湖富营养化模糊评价[J]. 中国环境监测,2011,27(3):58-62. (WU Linna. Fuzzy evaluation of eutrophication in Hongfeng Lake [J]. Environmental Monitoring in China, 2011, 27(3):58-62(in Chinese))
- [14] 耿润哲,殷培红,原庆丹. 红枫湖流域非点源污染控制区划[J]. 农业工程学报,2016,32(19):219-225. (GENG Runzhe, YIN Peihong, YUAN Qingdan. Zonation for non-point source pollution control in Hongfenghu Reservoir Watershed [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(19):219-225. (in Chinese))
- [15] 张昊天,周忠发,刘贤梅,等. 基于 GIS 的红枫湖流域平坝区境内农业非点源污染估算[J]. 环境工程,2019,37(3):174-179. (ZHANG Haotian, ZHOU Zhongfa, LIU Xianmei, et al. Estimation of agricultural non-point source solution in Pingba district in Hongfeng Lake Basin based on GIS [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(3): 174-179. (in Chinese))
- [16] 薛超,田若衡,雷永疆,等. 贵州省化肥施用时空分异及环境风险评价[J]. 农村经济与科技,2018,29(18): 1-4. (XUE Chao, TIAN Ruoheng, LEI Yongjiang, et al. Temporal and spatial differentiation of fertilizer application and environment risk assessment in Guizhou Province [J]. Rural Economy and Science-Technology, 2018, 29(18): 1-4. (in Chinese))

(下转第 203 页)

[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6):506-513. (in Chinese))

[17] 李港,陈诚,何欣霞,等. 湖泊藻类动态模型数据同化模式的改进[J]. 水资源保护, 2021,37(4):156-165. (LI Gang, CHEN Cheng, HE Xinxia, et al. Modify of data assimilation model for lake algae dynamic model[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4):156-165. (in Chinese))

[18] 吴娟,朱跃龙,金松,等. 三种机器学习模型在太湖藻华面积预测中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020,48(6):542-551. (WU Juan, ZHU Yuelong, JIN Song, et al. Area prediction of cyanobacterial blooms based on three machine learning methods in Taihu Lake

[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6):542-551. (in Chinese))

[19] 方匡南, 吴见彬, 朱建平, 等. 随机森林方法研究综述[J]. 统计与信息论坛, 2011, 26(3):32-38. (FANG Kuangnan, WU Jianbin, ZHU Jianping, et al. A review of technologies on random forests [J]. Statistics Information Forum, 2011, 26(3):32-38. (in Chinese))

[20] 李欣海. 随机森林模型在分类与回归分析中的应用[J]. 应用昆虫学报, 2013, 50(4):1190-1197. (LI Xinhai. Using random forest for classification and regression [J]. Journal of Applied Entomology, 2013, 50(4):1190-1197. (in Chinese))

(收稿日期:2021-07-30 编辑:王芳)

(上接第 195 页)

[17] 矫桂丽,刘洪林,孙秀玲,等. 基于 SWAT 模型的尼山水库流域面源污染特征分析[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2021, 52(3):470-474. (JIAO Guili, LIU Honglin, SUN Xiuling, et al. Analysis of non-point source pollution characteristics of Nishan Reservoir based on SWAT model [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 52(3):470-474. (in Chinese))

[18] 荣易,秦成新,杜鹏飞,等. 基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析[J]. 环境科学, 42(6):2769-2777. (RONG Yi, QIN Chengxin, DU Pengfei, et al. Characteristic analysis of SWAT model parameter values based on assessment of model research quality [J]. Environmental Science, 2021, 42(6):2769-2777. (in Chinese))

[19] MANSI Parikh, FALGUNI Parekh. Hydrological modelling of Deo River Sub-Basin using SWAT model and performance evaluation using SWAT-CUP [J]. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), 2019, 8(12):2890-2896.

[20] 林若兰,卓文珊,高延康,等. 基于 SWAT 模型的北江流域生态径流调节服务评估[J]. 水资源保护, 2020, 36(6):131-136. (LIN Ruolan, ZHUO Wenshan, GAO Yankang, et al. Assessment of ecohydrological regulation service in the Beijiang River Basin based on SWAT model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6):131-136. (in Chinese))

[21] 郭英壮,王晓燕,周丽丽,等. 控制流域氮流失的最佳管理措施配置及效率评估[J]. 中国环境科学, 2021, 41(2):860-871. (GUO Yingzhuang, WANG Xiaoyan,

ZHOU Lili, et al. Configuration and efficiency evaluation of the best management practices to control nitrogen loss in the watershed [J]. China Environmental Science, 2021, 41(2):860-871. (in Chinese))

[22] 傅博. 江门市四堡水库非点源污染与健康评价研究 [D]. 广州:华南理工大学, 2020.

[23] 王媛,楚春礼,刘夏,等. 率水流域非点源污染分析及施肥措施模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(4):6-13. (WANG Yuan, CHU Chunli, LIU Xia, et al. Non-point source pollution analysis and fertilizer management simulation in Shuaishui Basin [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30(4):6-13. (in Chinese))

[24] 黄康. 基于 SWAT 模型的丹江流域面源污染最佳管理措施研究 [D]. 西安:西安理工大学, 2020.

[25] 李哲. 哈尔滨市水环境管控单元的划分及非点源污染应对策略 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.

[26] 丁洋. 基于 SWAT 模型的奶水河流域非点源污染最佳管理措施研究 [D]. 济南:济南大学, 2019.

(收稿日期:2021-07-07 编辑:俞云利)

