

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.153>



基于 SWAT 模型的四湖流域非点源氮磷污染负荷分布模拟

王一泽¹, 刘 慧¹, 孙海船¹, 梁宇航¹, 刘路广², 朱 棋^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北武汉 430078
2. 湖北省水利水电科学研究院, 湖北武汉 430070
3. 湖北省汉江兴隆水利枢纽管理局, 湖北武汉 430062

摘 要: 为精准识别四湖流域非点源氮磷污染的来源、时空分布特征及关键影响因素, 为流域水污染防治提供科学依据, 解决当前流域内湖泊水体富营养化突出的问题. 以四湖流域为研究区, 构建 SWAT 模型对流域内非点源氮磷污染的时空分布进行模拟. 研究表明, 该模型对流域内径流、总氮(TN)和总磷(TP)均具有较好的拟合效果; 时间上, 2010—2018年 TN、TP 负荷呈先升后降趋势, 2016 年达峰值, 2017—2018 年连续下降, 年内呈“汛期高、非汛期低”的特征; 空间上, 氮磷负荷较高的子流域集中于流域中下游, 分别为 11、24、25、32、33 号等子流域, 耕地与水域是流域内氮磷产生的主要污染源. 四湖流域氮磷污染负荷时空分布受径流、土地利用及降雨综合影响, 时间上汛期及空间上湖泊、农业区是防控重点, 可通过削减化肥使用、控制水产养殖规模、保护湿地等措施降低污染负荷.

关键词: 四湖流域; SWAT 模型; 分布模拟; 氮磷污染; 洪湖; 长湖; 环境地质.

中图分类号: X524

文章编号: 1000-2383(2026)06-2201-15

收稿日期: 2025-11-30

Simulation of Non-Point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Load Distribution in Sihu Watershed Based on SWAT Model

Wang Yize¹, Liu Hui¹, Sun Haichuan¹, Liang Yuhang¹, Liu Luguang², Zhu Qi^{1*}

1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China
2. Hubei Water Resources and Hydropower Science Research Institute, Wuhan 430070, China
3. Hubei Hanjiang Xinglong Water Control Project Administration Bureau, Wuhan 430062, China

Abstract: To accurately identify the sources, spatiotemporal distribution characteristics and key influencing factors of non-point source nitrogen and phosphorus pollution in the Sihu watershed, it provides a scientific basis for water pollution prevention and control in the basin, and addresses the prominent problem of lake eutrophication in the current watershed. Taking the Sihu watershed as the study area, a SWAT model was constructed to simulate the spatiotemporal distribution of non-point source nitrogen and phosphorus pollution in the basin. The results show that the model has a good fitting effect on runoff, total nitrogen

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No.U2340206); 湖北省科技创新平台计划项目(No.2025CSA007); 国家自然科学基金青年科学基金项目(No.52409024); 湖北省联合基金项目(No.2023AFD194).

作者简介: 王一泽(2003—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为流域氮磷迁移转化. ORCID: 0009-0008-9272-5717. E-mail: 2393227314@qq.com

* **通讯作者:** 朱棋, ORCID: 0000-0002-5973-0468. E-mail: zhuq@cug.edu.cn

引用格式: 王一泽, 刘慧, 孙海船, 梁宇航, 刘路广, 朱棋, 2026. 基于 SWAT 模型的四湖流域非点源氮磷污染负荷分布模拟. 地球科学, 51(6): 2201—2215.

Citation: Wang Yize, Liu Hui, Sun Haichuan, Liang Yuhang, Liu Luguang, Zhu Qi, 2026. Simulation of Non-Point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Load Distribution in Sihu Watershed Based on SWAT Model. *Earth Science*, 51(6): 2201—2215.

(TN) and total phosphorus (TP) in the basin. Temporally, the TN and TP loads from 2010 to 2018 first increased and then decreased, reaching a peak in 2016, followed by a continuous decline from 2017 to 2018, with the characteristic of "high in flood season and low in non-flood season" within a year. Spatially, the sub-watersheds with high nitrogen and phosphorus loads are concentrated in the middle and lower reaches of the basin, namely sub-watersheds 11, 24, 25, 32, 33, etc. Cultivated land and water areas are the main pollution sources of nitrogen and phosphorus in the basin. The spatiotemporal distribution of nitrogen and phosphorus pollution loads in the Sihou watershed is comprehensively affected by runoff, land use and rainfall. Temporally, the flood season and spatially, lakes and agricultural areas are the key points for prevention and control. Pollution loads can be reduced by measures such as reducing chemical fertilizer use, controlling the scale of aquaculture, and protecting wetlands.

Key words: Sihou watershed; SWAT model; distribution simulation; nitrogen and phosphorus pollution; Changhu Lake; Honghu Lake; environmental geography.

0 引言

随着全球工业化、城市化进程的加速以及农业集约化程度的不断提升,人为活动导致大量氮、磷营养物质通过多种途径进入水体环境,引发全球性的水环境恶化问题(Cheng *et al.*, 2021; Galloway *et al.*, 2004). 氮、磷过量输入水体后,极易诱发水体富营养化,不仅会破坏水生生态系统平衡、导致生物多样性锐减,还会加剧水环境质量退化,进而对人类饮用水安全构成严重威胁(Zhang *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2019). 因此,在保障经济持续发展的前提下,精准管控氮、磷污染物向水体的排放,已成为全球水环境治理领域面临的共性挑战(Tang *et al.*, 2012).

长江中游的江汉平原凭借优越的地理与气候条件,成为我国重要的经济发展核心区与农业生产基地,但其快速发展过程中伴随的水环境问题日益突出,大量氮、磷污染物通过点源与非点源途径进入流域内河湖水系(Liu *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2023). 其中,点源污染主要来源于经处理后排放的城市生活污水与工业废水,而非点源污染则以农村生活污水、畜禽养殖废水、水产养殖尾水及农业化肥流失等为主要贡献源. 污染负荷通常定义为单位时间内输入水体的污染物总量,表征水体承接的污染物输入强度,常用单位为“吨/年(t/a)”,是流域水污染程度的核心量化指标,地处江汉平原腹地的四湖流域,当前正遭受高氮、磷污染负荷的胁迫,流域中多数湖泊已出现不同程度的富营养化现象(Li *et al.*, 2019),且四湖流域内河湖密布、沟渠纵横,通过人工排灌系统与自然水系交织形成复杂的水文

连通网络,这种连通性也导致单一湖泊或河段的污染研究难以追溯污染负荷的来源与迁移路径,无法反映全流域污染的系统性特征,从全流域视角系统厘清氮、磷污染的时空分布规律与关键来源,已成为解决流域水环境问题的重中之重.

在四湖流域中,长湖作为流域上游重要的调蓄湖泊承接北部来水,洪湖则位于流域下游是最终汇水区且连通长江,其中,洪湖作为我国第七大淡水湿地,长期处于富营养化状态,现有研究多聚焦于洪湖及其周边区域.Zhang *et al.* (2017)采用二维数学模型 MIKE21,探究了频繁鱼类养殖活动对洪湖水动力过程与环境变量的影响(Zhang *et al.*, 2017); Chen *et al.* (2021b)基于洪湖水水质波动特征,结合水质指数法、多元统计及污染源分配技术,识别了调控水质指标的主要驱动因素(Chen *et al.*, 2021b). 长湖作为湖北省内第三大淡水湖,坐落于四湖流域上游,尽管其承接的氮、磷负荷规模小于洪湖,但受人类活动与气候变化的叠加影响,也已处于中富营养化状态,导致水质恶化与生物多样性锐减(Li *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022). 然而当前研究多针对洪湖或长湖单一水体展开,缺乏对全流域尺度氮、磷污染负荷的系统量化,尤其缺少对各类氮磷污染源对流域整体及关键湖泊所叠加造成的具体污染量. 基于此,本文收集四湖流域社会经济统计数据、水文气象数据、水质监测数据、点源排污数据及非点源污染相关数据,构建适用于四湖流域的 SWAT 分布式水文模型,系统分析氮、磷污染负荷的时空分布特征及其主要影响因素,以期为四湖流域水污染精准防控与综合治理提供科学依据,为流域水质改善与生态保护提供技术支撑.

1 研究区概况

四湖流域地处湖北省江汉平原中部,位于长江与汉江之间,地跨荆州、荆门、潜江3市,总面积约 $1.0\times 10^4\text{ km}^2$.该流域因历史上拥有长湖、三湖、白鹭湖、洪湖四大湖泊而得名,目前三湖、白鹭湖已因围垦与水文变化干涸或萎缩,仅保留长湖与洪湖两大核心湖泊,行政与水文上隶属于长江中游一级支流内荆河流域.

流域内河湖发育密集,以全长185 km的四湖总干渠为骨干,串联数百条支渠、斗渠及子湖,形成“干渠—支渠—湖泊”相互连通的复合型排灌水系网络,是江汉平原典型的人工调控与自然水文耦合的水系统(图1).从自然地理特征来看:(1)地层以第四系松散沉积物为主,厚度介于数十米至百余米,岩性以砂、粉砂及黏土为主,体现江汉平原冲积沉积的典型特征;(2)土壤类型具有明显空间分异,流域边缘低山丘陵区以黄棕壤为主,中部平原区受长江、汉江长期泥沙冲积影响,以冲积水稻土为主,占流域总面积的68%,是主要耕作土壤;(3)地势受三大河流冲积作用控制,整体呈“南北高、中间低”的槽形格局,中部平原区为流域核心汇水区,高程多在28~35 m(吴淞基面).

气候上,流域属亚热带湿润季风气候,多年平均气温 $16.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量1203 mm,降雨时空分布极不均:时间上,主汛期为6—8月,汛期(4—7月)降水量占全年总量的62%~65%;空间上,南部洪湖周边区域降水量略高于北部长湖区域,差值为50~80 mm.

2 研究方法与数据来源

2.1 SWAT模型简介

SWAT(Soil and Water Assessment Tool,土壤水评估工具)作为主流分布式水文模型,已在全球多流域的水文与环境研究中实现广泛应用(Gassman *et al.*, 2007).该模型由美国农业部(USDA)研发,依托物理机制构建模拟框架,可系统刻画流域内水文循环过程、泥沙运移规律、污染物迁移路径,同时量化农业管理措施(如灌溉、施肥、耕作)对流域生态环境的影响(Olivera *et al.*, 2006; Arnold *et al.*, 1998).其核心竞争力体现在对复杂下垫面(如多样土地利用类型)与气候变化情景的适应性,尤其适用于大尺度流域的长时序动态模拟,为流域水资源管理与非点源污染防控提供技术支撑.

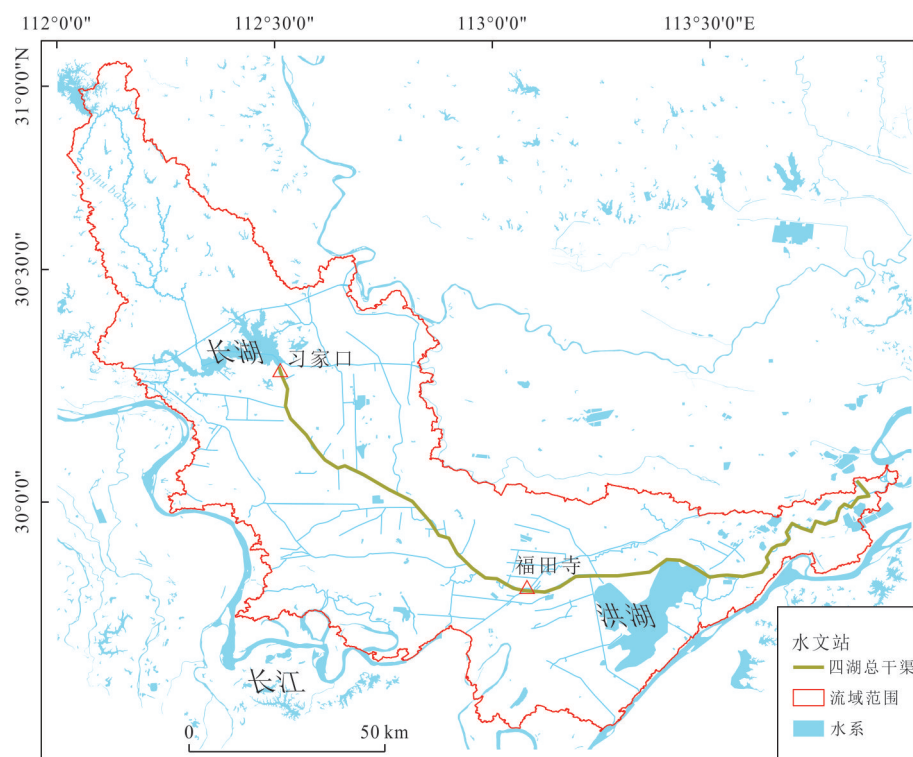


图1 研究区位置及水系分布

Fig.1 Location of the study area and distribution of the water system

河道中 SWAT 关于氮磷的模拟主要采用 QUAL2E 水质模型,主要考虑了藻类呼吸和死亡、硝化作用、反硝化作用、矿化作用和沉降作用等过程(Chen *et al.*, 2021a).

2.2 数据来源

构建 SWAT 模型数据需要气象、水文、水质监测数据,点、面源污染排放数据和地理空间数据等(图 2).其中,气象资料由中国气象同化驱动数据集(CMADSV1.2)(<https://poles.tpsc.ac.cn/>)提供,包括 2008—2018 年四湖流域及周边 288 个气象站的日降水量、日均气温、日最高气温和日最低气温、逐日的日照时数、日均风速、日相对湿度等;习家口、福田寺两个水文监测站点 2010—2018 年逐月流量数据均来自《中华人民共和国水文年鉴:长江流

域水文资料》;水文监测站点断面及主要季节性溪沟控制断面水质 2014 年 5 月—2018 年 12 月月均数据依据荆州市生态环境监测站实测数据成果;地理空间数据包括数字高程(DEM)、土地利用数据及土壤类型数据:流域数字高程数据来自中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),分辨率 30 m,将 DEM 坡度百分比(%)等级分为 3 级;流域土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>),分辨率 1 000 m;土壤数据来自世界土壤数据库(HWSD)(<https://www.fao.org/>)提供的分辨率 30 m 的土壤数据集,包含全球土壤类型分布及土壤属性数据库.

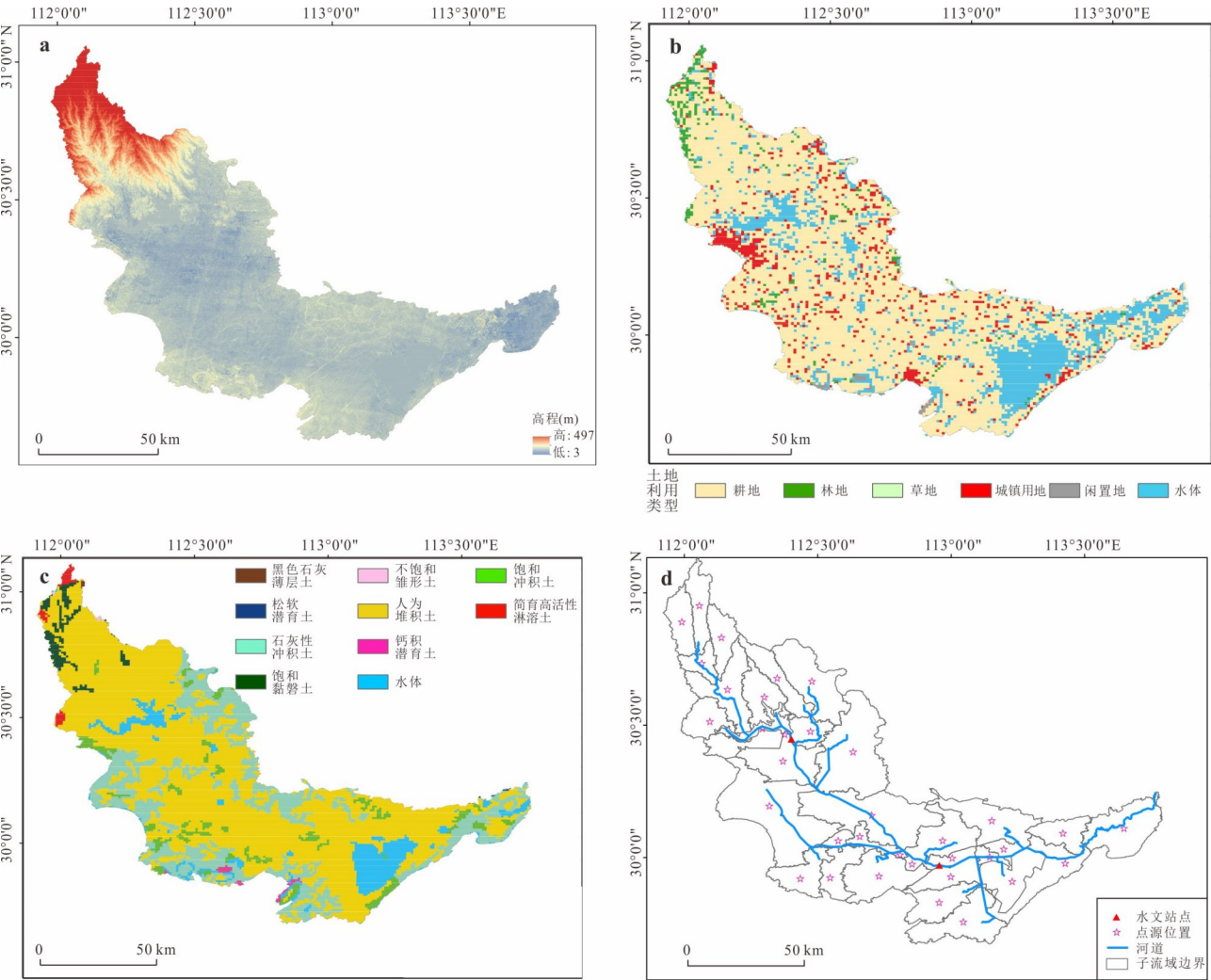


图 2 四湖流域:DEM 图(a)、土地利用类型图(b)、土壤类型图(c)及水文站点及点源分布(d)
Fig. 2 Maps of the Sihuo watershed: DEM map (a), land use type map (b), soil type map (c), and hydrological station and point source distribution map (d)

利用 ArcGIS10.2 将上述地理空间数据和获取的数据统一投影为 WGS_1984_UTM_Zone_49N 坐标系,在模型输入前,所有空间数据均进行了统一的预处理:DEM 数据重采样为 30 m 分辨率,并进行了填洼处理以消除伪洼地;土地利用数据重分类为 SWAT 模型所需的土地利用类型;土壤数据基于 HWSO 数据库提取土壤理化属性,并按 FAO-90 分类体系重分类.气象数据中,CMADSV1.2 数据集中获取的五大气象数据即为 SWAT 模型所需的每日气象数据,仅需对部分气象数据利用数学公式进行转换.流域全口径点源排放清单数据来自湖北省生态环境厅,包括流域内全部城镇生活污水处理厂、工业企业、规模化畜禽养殖等污染物排放设施 2008—2018 年年均废污水排放量.流域耕地种植制度、施肥量、农村人口及畜禽散养量等用以核算面源排放的社会经济统计数据依据当地统计部门,输入四湖流域 SWAT 模型所需的数据描述及来源清单见表 1.

2.3 模型的构建

利用 ArcSWAT10.2 平台,在输入 DEM 的基础上添加掩膜图层框选研究区范围,添加骨干排水渠(四湖总干渠及其周边干渠)的河道图层使生成的河网水系更符合四湖流域实际情况,随后通过设置最小子流域面积阈值为 204.45 km²,将四湖流域划

分为 35 个子流域,特别地,本研究采用预处理方式将长湖与洪湖设置为单独的子流域(分别为 11 号与 32 号子流域),并将四湖总干渠流入洪湖段设为流域出口.这一处理的水文意义在于:长湖和洪湖作为四湖流域的两大核心湖泊,具有显著的水量调蓄功能和污染物滞留效应,将其设为独立子流域能够更准确地模拟氮磷污染物进入湖泊的过程,避免将湖泊污染物简单归入相邻子流域而高估向下游的输出通量.

在此基础上,将输入模型的土地利用和土壤类型数据进行重采样,并将坡度等级设置为三级,将土地利用、土壤类型、坡度等级三者叠加并统一将阈值设置为 0,即保留所有土地利用、土壤、坡度组合类型,不进行合并简化,得到 1 117 个水文响应单元(HRUs).零阈值设置虽然增加了模型运算量,但能够最大程度保留下垫面的空间异质性,避免因合并 HRU 而导致的氮磷来源信息损失,从而提高了污染源解析的空间精度.随后进行氮磷负荷属性信息的输入,主要包括点源和非点源污染两个方面.其中,点源污染直接根据排污口位置,设置于各个子流域对应的河段上.非点源污染包括农村生活、禽畜养殖和农田化肥污染 3 个方面,前两个方面以连续施肥的形式输入,化肥污染则根据对应的农作物管理方式以施肥方式添加.

表 1 模型数据描述及来源
Table 1 Description of model data and sources

类型	名称	描述	时间尺度	格式	来源
空间数据	DEM	30 m 分辨率		GRID	中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)
	土地利用	1 000 m 分辨率		GRID	中国科学院资源环境科学与数据平台(https://www.resdc.cn)
	土壤类型	30 m 分辨率		GRID	世界土壤学数据库(HWSO)(https://www.fao.org/)
属性数据	气象数据	降雨和气温等	逐日数据	DBF	中国气象同化驱动数据集(CMADSV1.2)(https://poles.tpd.ac.cn)
	水文数据	流量	逐月数据	DBF	中国水利统计年鉴(2018) ^①
	水质数据	总氮和总磷等	逐月数据	DBF	荆州市生态环境局(http://sthjj.jingzhou.gov.cn/hjsj/)
	点源污染数据	排污口位置及氮磷污染负荷等	年均数据	DBF	湖北省生态环境厅(http://219.140.164.18:8045/pointModule/#/hubeiPoint/dashboard)
	非点源污染数据	农村生活、禽畜养殖、水产养殖、农田化肥等	年均数据	DBF	湖北农村统计年鉴(2019) ^②

注: ①中华人民共和国水利部,2018.中国水利统计年鉴(2018).北京市:中国水利水电出版社;②湖北农村统计年鉴编辑委员会,2019.湖北农村统计年鉴(2019).北京市:中国统计出版社.

表 2 参数率定结果
Table 2 Parameter calibration results

参数	中文含义	单位	取值方式	变动范围	参数变动值
CANMX.hru	最大冠层蓄水量	mm	V	0~100	0.017
ESCO.hru	土壤蒸发补偿系数	—	V	0~1	0.660
CN2.mgt	SCS 径流曲线数	—	R	−0.5~0.5	0.217
SOL_Z().sol	土壤底部埋深	mm	R	−0.5~0.5	0.299
SOL_BD().sol	土壤湿容重	g/cm ³	R	−0.5~0.5	0.274
SOL_K().sol	饱和水力传导系数	mm/h	R	−0.5~0.5	−0.082
GW_DELAY.gw	地下水滞后系数	day	V	0~500	34.618
CH_K2.rte	主河道有效水力传导率	m/s	V	0.01~500	21.360
RCHRG_DP.gw	地下水下渗系数	—	V	0~1	0.387
SPCON.bsn	泥沙输移线性系数	—	V	0.000 1~0.01	0.005
NPERCO.bsn	土壤剖面渗透系数	—	V	0~1	0.000 004
BC1.swq	氨氮生物氧化速度	day ^{−1}	V	0.1~1	0.216
CDN.bsn	反硝化速率系数	—	V	0~5	3.099
USLE_K().sol	USLE 土壤可蚀性因子	t·ha·h/(MJ·mm)	R	−0.2~0.2	−0.013
BIOMIX.mgt	生物混合效率	—	V	0~1	0.351
SDNCO.bsn	反硝化的土壤含水量阈值	—	V	0~1	0.083
PHOSKD.bsn	土壤磷分配系数	m ³ /kg	V	100~200	188.341
PSP.bsn	磷溶解度系数	—	V	0.01~0.7	0.481

注:单位中“—”表示该参数无单位。

2.4 参数的率定与验证

采用 SWAT-CUP 中的 SUFI2 算法进行参数敏感性分析和率定验证 (Wu and Chen, 2015). 选定了土壤蒸发补偿系数 (ESCO)、SCS 径流曲线系数 (CN2) 和地下水下渗系数 (RCHRG_DP) 等 9 个径流参数以及土壤剖面渗透系数 (NPERCO)、土壤可蚀性因子 (USLE_K) 和土壤磷分配系数 (PHOSKD) 等 9 个氮磷水质参数, 选取参数详见表 2, 需要说明的是, 表 2 中部分参数 (如 CN2.mgt、SOL_Z().sol、USLE_K().sol 等) 的变动范围出现负值, 这是由于 SWAT-CUP 在进行参数率定时采用相对调整方法 (如“V”表示替换值, “R”表示相对变化乘以当前值). 负值范围表示参数可以在原值基础上进行一定比例的增减调整 (如 CN2 的“−0.5~0.5”表示在默认值的 ±50% 范围内变化), 而非参数本身的物理意义为负. 利用 2010—2016 年、2017—2018 年习家口、福田寺两个水文站的实测径流数据进行模型的率定和验证; 采用 2014—2017 年、2018 年两个站点相同断面的实测总氮 (TN) 和总磷 (TP) 数据进行率定和验证. 选择决定系数 (R^2)、纳什效率系数 (NSE) 和相对偏差 (PBIAS) 3 个指标进行模型模拟效果评价. 参照 Santhi *et al.* (2014) 和 Moriasi *et al.* (2015) 提出的评价标准: 当 $R^2 > 0.6$ 、当 $NSE > 0.5$ 、

$|PBIAS| < 25\%$ 时, 可以认为径流模拟结果满意 (Moriassi *et al.*, 2015); 对于月氮磷负荷模拟, 当 $R^2 > 0.5$ 、 $NSE > 0.4$ 且 $|PBIAS| < 40\%$ 时, 认为模拟结果可接受 (Santhi *et al.*, 2014). 本研究采用上述标准进行模型适用性评价.

3 输出结果与分析

3.1 模型适用性评估

四湖流域率定期与验证期两水文站径流、TN、TP 的模拟值与实测值拟合精度统计结果见表 3, 福田寺站与习家口站模拟值与实测值的拟合效果见图 3 与图 4.

调参后, 四湖流域径流、TN、TP 的实测值和模拟值在率定期和验证期均拟合较好. 站点径流的决定系数 (R^2) 和纳什效率系数 (NSE) 在这两个时期均大于 0.7, 而相对偏差绝对值 ($|PBIAS|$) 则小于 25%, 表明该模型能较好地模拟径流的变化. 同时, TN、TP 实测值和模拟值的决定系数 (R^2) 和纳什效率系数 (NSE) 在这两个时期也均大于 0.6, 从相对偏差绝对值 ($|PBIAS|$) 可以看出, 各站点均在 20% 范围内, 故该模型也能较好地模拟氮磷水质指标的变化.

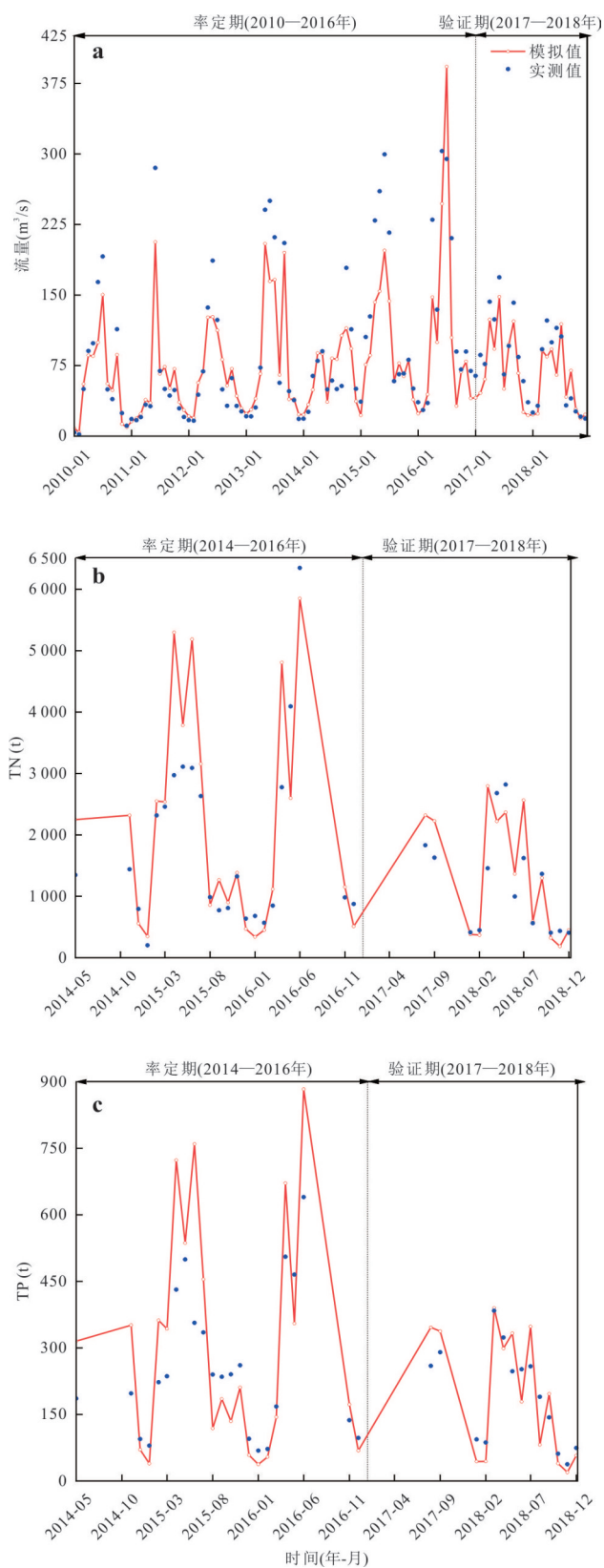


图 3 福田寺站控制断面逐月径流量(a)、总氮(b)和总磷(c)模拟值与实测值对比

Fig.3 Monthly comparison between simulated and measured values of runoff (a), total nitrogen (TN) (b), and total phosphorus (TP) (c) at the control section of Futiansi station

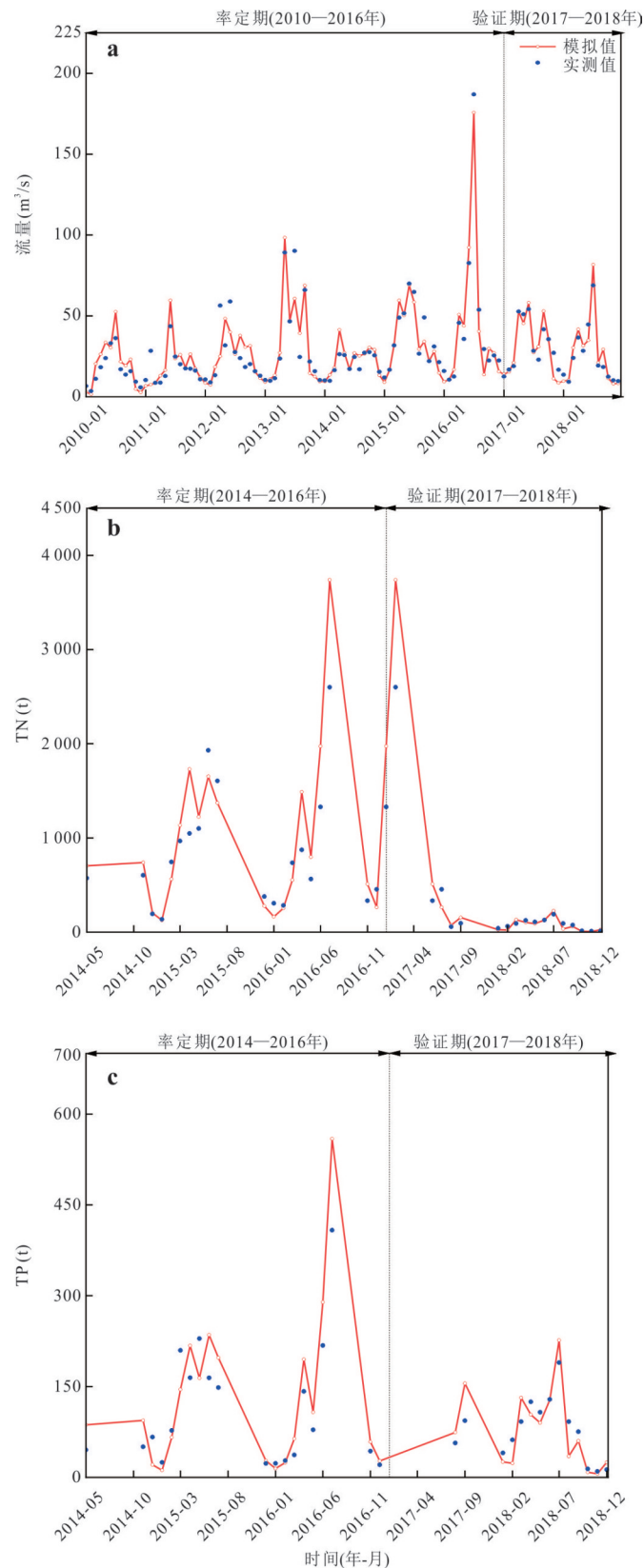


图4 习家口站控制断面逐月径流量(a)、总氮(b)和总磷(c)模拟值与实测值对比

Fig.4 Monthly comparison between simulated and measured values of runoff (a), total nitrogen (TN) (b), and total phosphorus (TP) (c) at the control section of Xijiakou station

表 3 站点模拟精度统计
Table 3 Statistics of station simulation accuracy

时期	项目	指标	习家口	福田寺	时期	项目	指标	习家口	福田寺
率定期	径流	R^2	0.88	0.83	验证期	径流	R^2	0.88	0.82
		NSE	0.88	0.79			NSE	0.83	0.74
		PBIAS	-2.1	13.5			PBIAS	-2.6	16.0
	总氮	R^2	0.81	0.83		总氮	R^2	0.80	0.82
		NSE	0.61	0.65			NSE	0.63	0.71
		PBIAS	-15.14	-21.63			PBIAS	16.59	19.06
	总磷	R^2	0.84	0.88		总磷	R^2	0.71	0.82
		NSE	0.68	0.67			NSE	0.61	0.70
		PBIAS	-20.51	-20.32			PBIAS	-9.53	12.70

综上所述,SWAT 模型对四湖流域具有较好的适用性,可用来模拟流域非点源污染负荷的变化,但本研究构建的 SWAT 模型存在一定的不确定性,主要体现在 3 个方面:(1)数据分辨率不确定性,土地利用原始数据分辨率为 1 000 m,经重采样至 30 m 后虽提升了空间匹配性,但存在一定的空间概化误差。(2)参数代表性不确定性,模型部分参数采用流域平均值赋值,未考虑子流域尺度的参数空间异质性,如土壤可蚀性因子、径流曲线数等,虽经率定修正,但仍存在一定的代表性误差。(3)点源排放数据时间代表性不确定性,点源污染数据采用年均值输入,未考虑年内不同时段排放差异,对汛期点源与非点源负荷叠加的模拟存在轻微偏差。针对上述不确定性,本研究通过多站点率定验证、精细化划分 HRU 等方式进行了弱化,且不确定性在可接受范围内,不影响整体研究结论的可靠性。

3.2 洪湖与长湖氮磷负荷时间变化分析

(1)年际变化.2010—2018 年四湖流域内长湖及洪湖(设为流域出口)的径流量及 TN、TP 污染负荷年际变化特征如图 5,图 6 所示。整体来看,两湖 TN、TP 负荷变化趋势一致,均呈现“先波动上升,2014 年短暂下降,2016 年达峰值,后逐步回落”的特征。

洪湖(流域出口):2010—2013 年 TN、TP 负荷年均增幅分别为 38.7%与 32.1%;2014 年受降雨减少影响,TN、TP 负荷分别较 2013 年下降 22.6%、22.1%;2015—2016 年负荷再次回升,2016 年达到研究期峰值,较 2010 年分别增长 162.4%、140.5%;2017—2018 年负荷逐步下降,回落至接近 2011 年水平。

长湖:变化趋势与洪湖高度同步,其 2010—2013 年 TN、TP 负荷年均增幅分别为 46.8%、

41.3%;2014 年 TN、TP 负荷分别较 2013 年下降 30.7%、36.6%;2016 年达研究期峰值,TN、TP 负荷较 2010 年分别增长 176.2%、175.6%;2017—2018 年逐步回落,2018 年 TN、TP 负荷较峰值分别下降 39.1%、41.9%。

进一步分析驱动因素发现,氮磷负荷峰值年份(2016 年)与研究期内径流量峰值完全吻合:2016 年流域年径流量为 $8.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,为 2010—2018 年最大值,表明径流量是氮磷非点源污染输出的核心驱动。首先通过 Pearson 相关分析进行整体相关性检验,结果显示:流域年径流量与 TN、TP 负荷的相关系数分别为 0.85、0.82($p < 0.01$),二者呈极显著正相关,这与张轶杰等(2025)在长江中游农业流域的研究结论一致——径流作为非点源污染的“载体”,可通过冲刷农田地表、携带土壤中累积的氮磷养分进入水体,主导污染负荷的年际波动(张轶杰等,2025)。

为排除年际化肥施用量、畜禽与水产养殖规模等人为因素的干扰,进一步采用偏相关分析进行验证:控制化肥施用量、养殖规模等多个协变量后,流域年径流量与 TN、TP 负荷的偏相关系数仍分别达 0.81、0.79($p < 0.01$),二者仍呈极显著正相关。这一结果证明,剔除人为源强的年际变化影响后,径流依然是氮磷负荷年际波动的核心驱动因子。

(2)年内变化.2010—2018 年长湖及洪湖(流域出口)的径流量及 TN、TP 污染负荷的年内变化特征如图 7,图 8 所示。整体来看,两湖氮磷负荷年内分布呈显著的“汛期富集”特征,即 4—7 月负荷占比超全年 60%,非汛期负荷占比不足 40%,且均在 6 月达到年内峰值:长湖:从月度分布看,1—3 月 TN、TP 月负荷处于低位;4 月起负荷快速攀升,4—7 月 TN 与 TP 负荷分别占全年 TN、TP 总负荷的 59%与 62%;其中 6—7 月为负荷峰值区间,TN、TP 月均

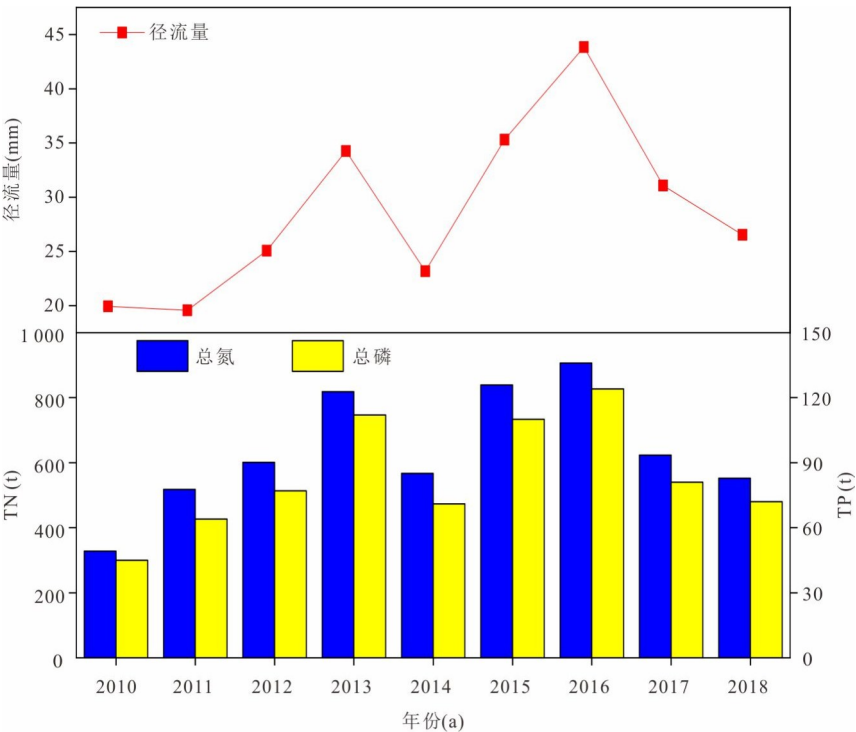


图5 长湖2010—2018年径流量及TN、TP年负荷变化

Fig.5 Annual variations of runoff, TN and TP loads in Changhu Lake from 2010 to 2018

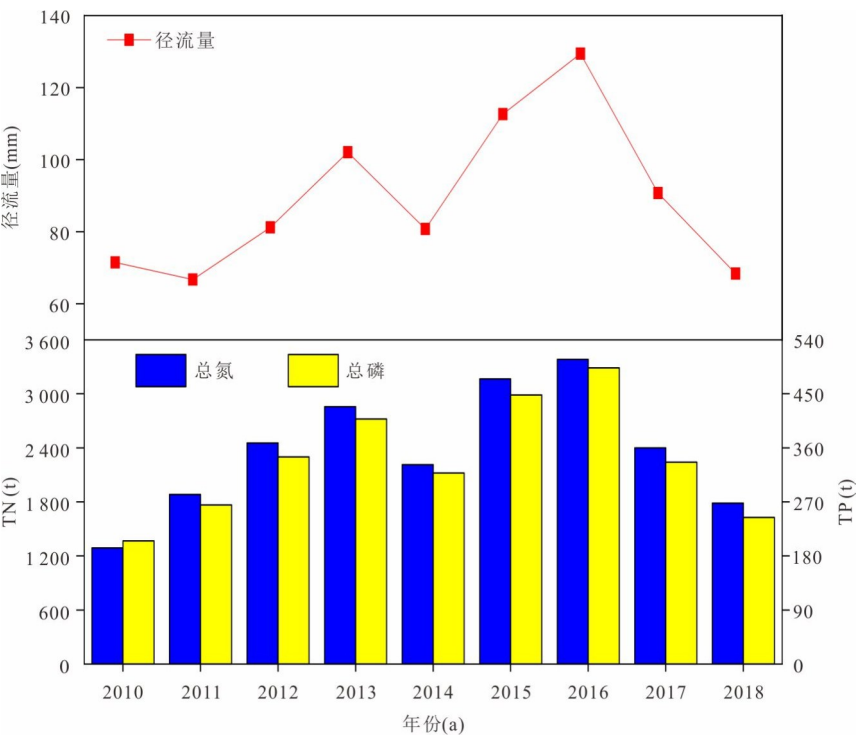


图6 洪湖2010—2018年径流量及TN、TP年负荷变化

Fig.6 Annual variations of runoff, TN and TP loads in Honghu Lake from 2010 to 2018

负荷分别是1—3月均值的6.7倍、4.5倍;8月后负荷显著回落,8—12月TN与TP月均负荷仅为汛期峰值的36.8%、30.3%。

洪湖(流域出口):其年内负荷变化趋势与长湖一致,但负荷更大;1—3月TN月均1251.7t、TP月均166.3t,4月起进入负荷快速增长期,4—7月TN、

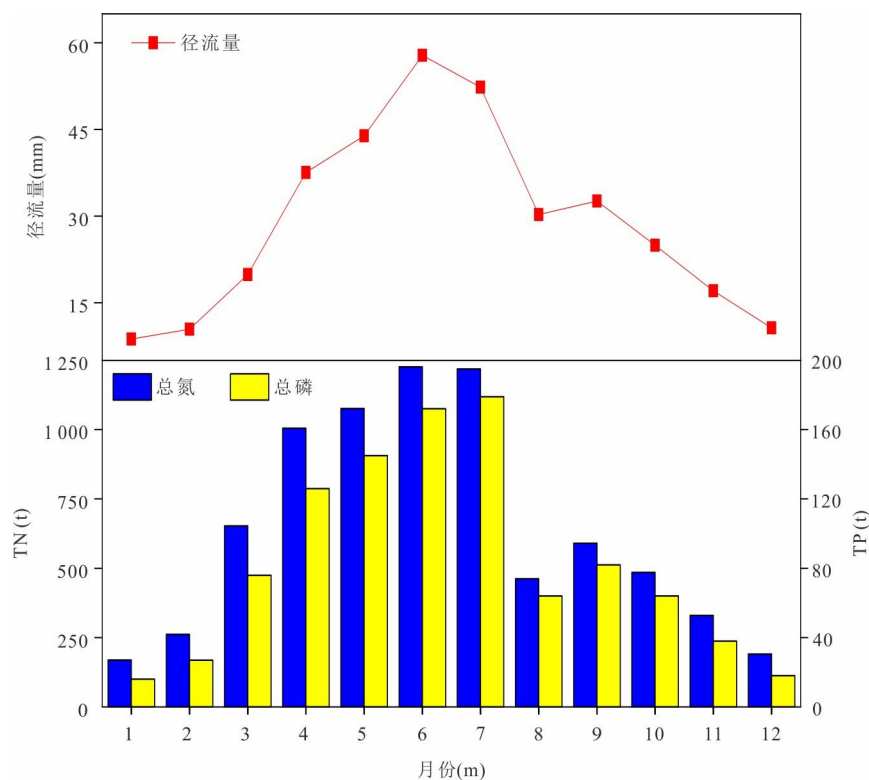


图 7 长湖 2010—2018 年月均径流量及 TN、TP 月均负荷

Fig.7 Monthly average variations of runoff, TN and TP loads in Changhu Lake from 2010 to 2018

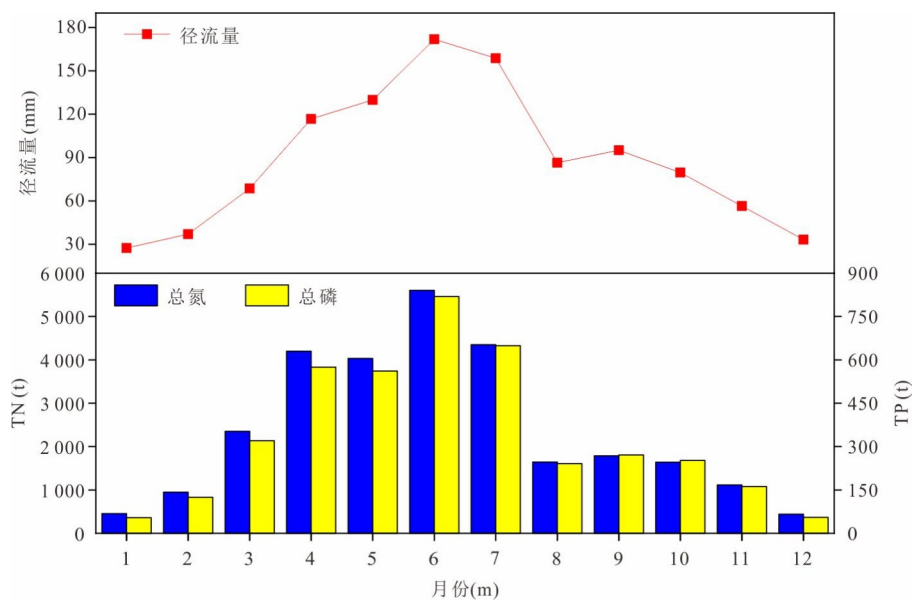


图 8 洪湖 2010—2018 年月均径流量及 TN、TP 月均负荷

Fig.8 Monthly average variations of runoff, TN and TP loads in Honghu Lake from 2010 to 2018

TP 月均负荷分别为 4 546 t 与 651 t; 6 月达到年内峰值, TN、TP 分别为 5 603 t、819 t, 分别是 1—3 月均值的 4.5 倍、4.9 倍; 8—12 月 TN、TP 负荷逐步下降仅为汛期峰值的 27.4%、28.8%。

从驱动机制来看, 年内负荷分布主要受径流调

控: 研究期内流域汛期(4—7 月)径流量占全年的 58%, 强降雨引发的地表径流可显著冲刷农田表层土壤, 携带累积的氮磷养分进入河湖, 直接推高负荷输出; 而 4 月是四湖流域水稻种植的关键施肥期, 化肥施用强度达 85 kg/hm², 未被作物吸收的氮磷通

过农田渗漏与初期径流进入水体,成为4月负荷提前增长的核心原因.Pearson相关分析进一步验证流域月径流量与TN、TP负荷高度相关,两者相关系数分别为0.87、0.89($p<0.01$),表明径流是氮磷负荷年内变化的重要驱动因子,这与年际变化中“径流主导负荷波动”的结论一致.

为排除季节性施肥、养殖尾水集中排放等其他人为因素的干扰,进一步开展偏相关分析:控制月度施肥强度等协变量后,流域月径流量与TN、TP负荷的偏相关系数仍分别达0.78、0.80($p<0.01$),二者显著相关.这一结果证明,即使剔除了季节性施肥等因素的影响,径流依然是氮磷负荷年内变化的核心驱动因子,进一步印证了“降雨—径流”过程在四湖流域非点源污染输出中的关键调控作用.

3.3 四湖流域氮磷负荷空间变化分析

2010—2018年四湖流域内各子流域TN、TP负荷空间分布见图9,根据研究区负荷变化量,将面源污染负荷划分为5个等级,面源污染负荷是子流域产生的氮磷污染物的量,其常用单位为“千克/(公顷·年)($\text{kg}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$)”,不同子流域的氮磷负荷等级可为流域污染治理及水环境改善提供有效参考价值.流域氮磷负荷强度等级划分见表4.由图9可知,四湖流域氮磷负荷主要集中在流域内两处大型湖泊以及中下游地区,从土地利用分布(图2b)可以看出,流域内氮磷负荷较大的区域水域占比大,在四湖流域内,禽畜养殖、水产养殖是其主要养殖模式,其产生的养殖废水会携带大部分氮磷进入水体,流域下游耕地占比相对较大,农业活动强烈,其

产生的氮磷负荷也相对较大,这表明区域尺度氮磷负荷空间分布主要与土地利用情况有关.

表5进一步统计了不同土地利用类型的TN、TP负荷量,四湖流域中土地利用面积占比达71.1%的耕地产生的TN、TP负荷达到全流域的40.7%、41.1%,土地利用面积占比达17.8%的水域产生的氮磷负荷达到全流域的28.5%与29.0%,这表明耕地与水域产生氮磷负荷是流域内氮磷负荷的主要来源.

四湖流域内,TN负荷较高的区域有11、24、25、32、33号子流域等,这些区域的TP负荷也较大,流域内氮磷负荷前五子流域信息见表6(各子流域编号对应的行政区以及河段详见表7).可以看出,水域占比是氮磷分布的主要影响因素,氮磷负荷排名前五的子流域其水域面积占比均大于流域平均值17.8%,部分子流域甚至达到45%以上.同时,这些子流域的降雨、径流在整个子流域中均偏大,因此在四湖流域内,氮磷负荷的分布主要受土地利用类型、降雨、径流综合性的影响.

本研究识别出四湖流域氮磷污染具有区别于同类流域的两大核心区域特征,在江汉平原流域中,四湖流域形成了独有的“耕地+水域”双主导型污染结构.Liu *et al.* (2022)对江汉平原整体净人为磷输入的研究已证实,农业种植是区域绝大多数流域氮磷污染的核心来源,耕地贡献占比普遍超60%(Liu *et al.*, 2022),而四湖流域因长湖、洪湖两大湖泊的存在,水域面积占比达17.8%,形成了区别于区域内其他流域的污染格局:耕地与水域两大污染源贡献占比接近,打破了江汉平原农业流域普遍的

表 4 氮磷营养物质负荷等级划分

Table 4 Classification of nitrogen and phosphorus nutrient load levels

评价因子		等级划分标准			
TN(kg/hm^2)	<10	10~30	30~50	50~70	>70
TP(kg/hm^2)	<1	1~4	4~7	7~10	>10
负荷强度	弱	较弱	中度	较强	强

表 5 四湖流域各土地利用类型氮磷污染负荷

Table 5 Nitrogen and phosphorus pollution loads of different land use types in the Sihy watershed

土地利用 类型	面积 (hm^2)	面积占比 (%)	TN		TP	
			负荷量(t)	占比(%)	负荷量(t)	占比(%)
耕地	727 020.0	71.1	6 105.1	40.7	891.8	41.1
水域	181 953.0	17.8	4 275.1	28.5	629.2	29.0
城镇用地	79 719.0	7.8	2 340.0	15.6	334.1	15.4
其他地类*	34 085.0	3.3	2 280.0	15.2	314.6	14.5

注:*包括林地、草地、闲置地.

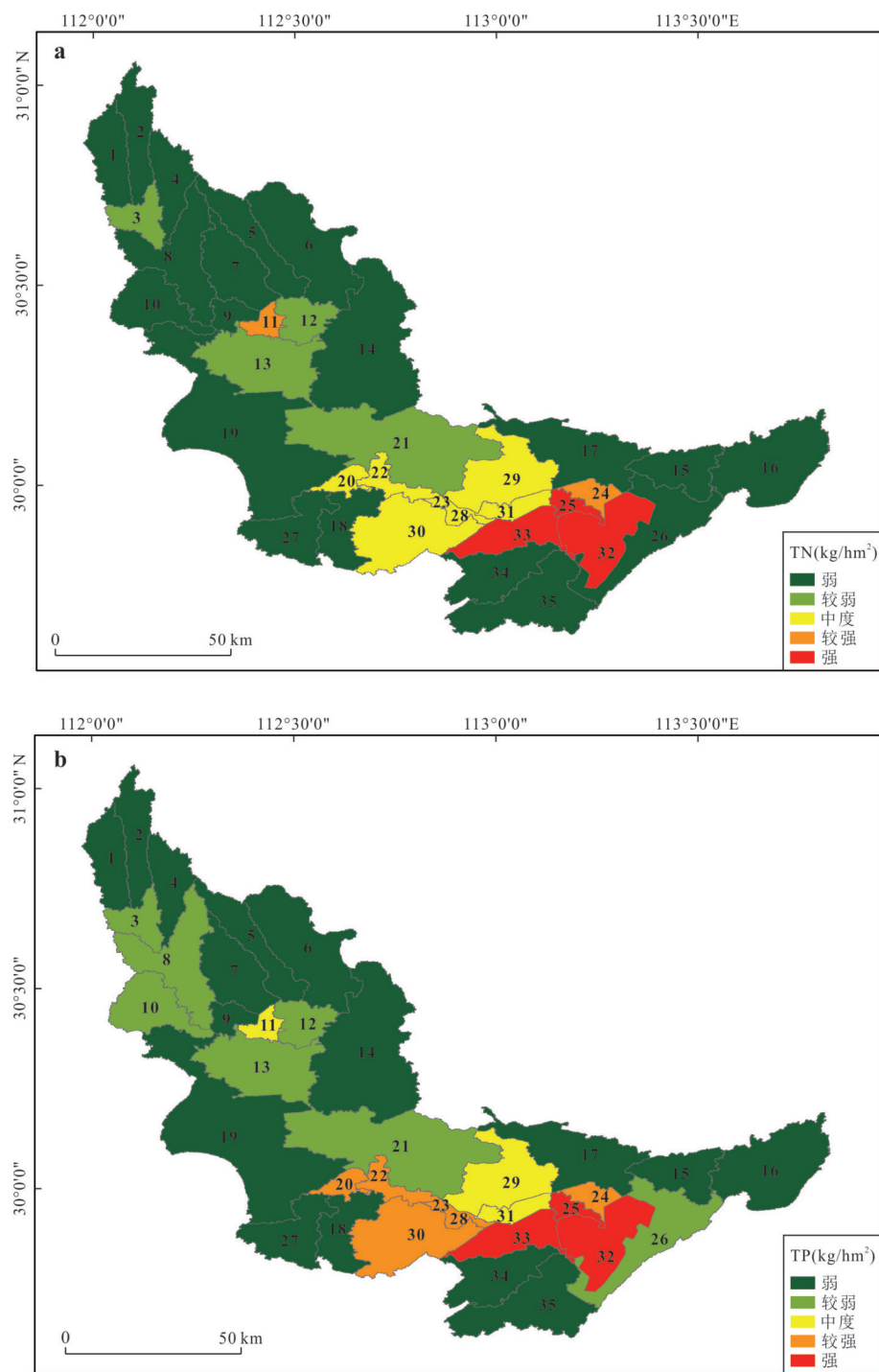


图9 四湖流域多年平均 TN(a)和 TP(b)负荷空间分布

Fig.9 Spatial distribution of multi-year average TN (a) and TP (b) loads in the Sihui watershed

“耕地单源主导”污染特征。同时,在全国平原水网流域中,四湖流域还呈现出特色农业转型带来的独有污染特征,流域内“虾稻共作”模式近年来快速推广,形成了区别于传统农业流域的新型污染矛盾,该模式虽在一定程度上降低了化肥施用强度,但养殖沟渠尾水集中排放带来了新的污染输入,本研究表6中24、25号养殖密集区子流域的高氮磷负荷,

正是这一区域特有污染模式的直接体现,可为我国南方平原农业转型期流域的污染防控提供参考。

3.4 四湖流域氮磷污染防治建议措施

基于四湖流域氮磷污染的时空分布特征,汛期是流域氮磷污染负荷输出的高峰期,因此氮磷污染防控需重点聚焦汛期时段,构建“汛期优先管控”的防控体系。此外,氮磷污染高负荷区主要集中于流

表 6 四湖流域氮磷负荷前五的子流域信息
Table 6 Information of the Top 5 sub-watersheds by nitrogen and phosphorus loads in the Sihua watershed

序号	子流域 编号	水域 占比 (%)	耕地 占比 (%)	年均 降雨 (mm)	年均 径流 (mm)	年均 TN (kg/ hm ²)	年均 TP (kg/ hm ²)
1	32	98.0	1.4	1 055.9	89.3	72.8	10.4
2	11	87.7	11.4	950.7	52.8	53.0	6.9
3	24	47.4	50.0	1 056.0	62.4	57.9	8.5
4	25	45.8	54.0	1 056.4	76.1	77.6	10.9
5	33	27.4	60.2	957.1	74.9	72.6	9.2

表 7 四湖流域各子流域所在行政区及河段
Table 7 Administrative regions and river reaches of each sub-watersheds in the Sihua watershed

子流域 编号	行政区	河段	子流域 编号	行政区	河段
1	掇刀区	内荆河	19	江陵县	西干渠
2	掇刀区	内荆河	20	监利市	西干渠
3	沙阳县	内荆河	21	潜江市	四湖总干渠
4	沙阳县	内荆河	22	监利市	四湖总干渠
5	沙阳县	西荆河	23	监利市	四湖总干渠
6	沙阳县	西荆河	24	洪湖市	四湖总干渠
7	沙阳县	内荆河	25	洪湖市	四湖总干渠
8	沙阳县	内荆河	26	洪湖市	四湖总干渠
9	沙市区	西干渠	27	石首市	西干渠
10	荆州区	西干渠	28	监利市	四湖总干渠
11	沙市区	长湖	29	监利市	四湖总干渠
12	潜江市	内荆河	30	监利市	西干渠
13	沙市区	四湖总干渠	31	监利市	四湖总干渠
14	潜江市	东干渠	32	洪湖市	洪湖
15	洪湖市	四湖总干渠	33	监利市	四湖总干渠
16	洪湖市	四湖总干渠	34	监利市	中心河
17	洪湖市	西干渠	35	监利市	赤湘河
18	石首市	西干渠			

域内大型湖泊及农业活动密集区,需针对不同区域特征制定差异化治理方案。

(1)针对水域区域,建议缩减禽畜养殖、水产养殖规模,优化养殖布局,同时严格管控含氮磷污染物的养殖尾水、工业废水及生活污水入湖排放量,从排放端减少氮磷输入;同时需加强流域内湿地生态系统的保护与修复,湿地可通过物理吸附、化学沉淀及生物转化等多重作用,显著降低进入水体的氮磷总量,且能为水生生物与水生植物提供稳定栖息环境,进而有效改善湖泊生态功能,提升流域自

净能力。

(2)针对农业活动区,应合理控制养殖沟占比,减少农业生产与养殖活动的叠加污染,同时配套建设池塘尾水生态治理设施,通过沉淀池、人工湿地等工艺净化尾水;此外,需削减化肥与农药施用强度,推广测土配方施肥技术及病虫害绿色防控技术,提升肥料利用效率,从源头减少农田氮磷通过地表径流、土壤渗漏等途径的流失量。

4 结论

2010—2018年四湖流域总氮(TN)、总磷(TP)污染负荷的年际变化总体呈现“先升后降”趋势:2010—2016年负荷波动上升,2016年达到研究期内峰值,2017—2018年则持续回落;年内变化表现为“汛期高、非汛期低”的显著特征,4—7月汛期负荷占全年总量的60%以上,且氮磷高负荷子流域主要为11号、24号、25号、32号及33号等分布在四湖流域中下游区域的子流域。

从驱动机制来看,流域氮磷负荷的时间尺度差异(年际与年内)主要受地表径流过程调控,Pearson相关分析显示,年径流量与TN、TP负荷的相关系数分别达0.85、0.82($p<0.01$),月径流量与TN、TP负荷的相关系数分别达0.87、0.89($p<0.01$),径流作为非点源污染的“载体”,直接主导负荷波动;区域尺度的空间分布主要受农业生产活动与水产养殖强度影响;而在子流域尺度上,氮磷负荷分布需受降水、径流及水域面积占比等多因素的综合作用。

本研究的主要贡献体现在以下3个方面:(1)针对四湖流域河湖连通复杂、水系高度人工调控的特征,构建了包含35个子流域的SWAT分布式模型,并通过将长湖与洪湖设置为独立子流域、刻画干渠水系,实现了对“干渠—支渠—湖泊”复合水文结构的精细化表达;(2)构建了基于径流—水质多要素联合率定的参数优化方案,通过同时约束径流、总氮和总磷过程,提高了模型在水量与污染负荷模拟中的一致性与参数可识别性;(3)在子流域尺度上构建了氮磷负荷强度分级体系,结合土地利用、水域占比及径流条件,识别了流域内高负荷子流域(如11、24、25、32、33号)及其主导影响因素,明确了农业种植与水产养殖叠加区域为氮磷污染的关键来源区,为流域分区管控与差异化治理提供了定量依据。

References

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., et al., 1998. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1): 73—89. <https://doi.org/>

- 10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x
- Chen, P., Yuan, Y. P., Li, W. H., et al., 2021a. Assessing the Impacts of Recent Crop Expansion on Water Quality in the Missouri River Basin Using the Soil and Water Assessment Tool. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13(6): e2020MS002284. <https://doi.org/10.1029/2020ms002284>
- Chen, S., Wang, S. M., Yu, Y. X., et al., 2021b. Temporal Trends and Source Apportionment of Water Pollution in Honghu Lake, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(42): 60130–60144. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14828-z>
- Cheng, J. R., Gong, Y. M., Zhu, D. Z., et al., 2021. Modeling the Sources and Retention of Phosphorus Nutrient in a Coastal River System in China Using SWAT. *Journal of Environmental Management*, 278: 111556. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111556>
- Galloway, J. N., Dentener, F. J., Capone, D. G., et al., 2004. Nitrogen Cycles: Past, Present, and Future. *Biogeochemistry*, 70(2): 153–226. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-0370-0>
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., et al., 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. *Transactions of the Asabe*, 50(4): 1211–1250. <https://doi.org/10.13031/2013.23637>
- Li, F., Qiu, Z. Z., Zhang, J. D., et al., 2019. Temporal Variation of Major Nutrients and Probabilistic Eutrophication Evaluation Based on Stochastic—Fuzzy Method in Honghu Lake, Middle China. *Science China Technological Sciences*, 62(3): 417–426. <https://doi.org/10.1007/s11431-017-9264-8>
- Li, X. M., Zhu, T. B., He, Y. F., et al., 2022. Assessment of Eutrophication and Nitrogen and Phosphorus Carrying Capacity before and after Removing Pen Culture (2013–2018) in Lake Changhu, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(4): 5674–5686. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15908-w>
- Liu, J., Gu, W. Q., Liu, Y. W., et al., 2023. Influence of Anthropogenic Nitrogen Inputs and Legacy Nitrogen Change on Riverine Nitrogen Export in Areas with High Agricultural Activity. *Journal of Environmental Management*, 338: 117833. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117833>
- Liu, J., Gu, W. Q., Liu, Y. W., et al., 2022. Dynamic Characteristics of Net Anthropogenic Phosphorus Input and Legacy Phosphorus Reserves under High Human Activity: A Case Study in the Jiangnan Plain. *Science of the Total Environment*, 836: 155287. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155287>
- Liu, X. M., Zhang, G. X., Sun, G. Z., et al., 2019. Assessment of Lake Water Quality and Eutrophication Risk in an Agricultural Irrigation Area: A Case Study of the Changgan Lake in Northeast China. *Water*, 11(11): 2380. <https://doi.org/10.3390/w11112380>
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., et al., 2015. Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 58: 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/TRANS.58.10715>
- Olivera, F., Valenzuela, M., Srinivasan, R., et al., 2006. ArcGIS-SWAT: A Geodata Model and GIS Interface for SWAT. *Journal of the American Water Resources Association*, 42(2): 295–309. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.tb04496.x>
- Santhi, C., Kannan, N., White, M., et al., 2014. An Integrated Modeling Approach for Estimating the Water Quality Benefits of Conservation Practices at the River Basin Scale. *Journal of Environmental Quality*, 43(1): 177–198. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0460>
- Tang, X. Q., Wu, M., Yang, W. J., et al., 2012. Ecological Strategy for Eutrophication Control. *Water Air and Soil Pollution*, 223(2): 723–737. <https://doi.org/10.1007/s11270-011-0897-3>
- Wang, H. Y., Li, T., Zhu, J. Q., et al., 2022. Effects of Extreme Water Levels on Nutrient Dynamics in a Large Shallow Eutrophic Lake (Changhu Lake, China). *Journal of Freshwater Ecology*, 37(1): 131–143. <https://doi.org/10.1080/02705060.2021.2023053>
- Wu, H. J., Chen, B., 2015. Evaluating Uncertainty Estimates in Distributed Hydrological Modeling for the Wenjing River Watershed in China by GLUE, SUFI-2, and ParaSol Methods. *Ecological Engineering*, 76: 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.ecoeng.2014.05.014>
- Zhang, T., Ban, X., Wang, X. L., et al., 2017. Analysis of Nutrient Transport and Ecological Response in Honghu Lake, China by Using a Mathematical Model. *Science of the Total Environment*, 575: 418–428. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.188>
- Zhang, X. N., Guo, Q. P., Shen, X. X., et al., 2015. Water Quality, Agriculture and Food Safety in China: Current Situation, Trends, Interdependencies, and Management. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(11): 2365–2379. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(15\)61128-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61128-5)
- Zhang, Y. J., Chen, P., Li, J. L., et al., 2025. Simulation Study on Non-Point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads Distribution in the Fenhe River Basin Based on SWAT Model. *Water Resources and Power*, 43(8): 37–41 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 张铁杰, 陈攀, 李京玲, 等, 2025. 基于SWAT模型的汾河流域非点源氮磷污染负荷分布模拟研究. *水电能源科学*, 43(8): 37–41.