

张永生, 李建国, 赵广臣. 景观湖对农田回归用水水质提升分析[J]. 环境科学与技术, 2024, 47(12): 70-78. Zhang Yongsheng, Li Jianguo, Zhao Guangchen. Contribution of landscape lake to improvement of water quality for farmland return water[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 47(12): 70-78.

景观湖对农田回归用水水质提升分析

张永生^{1,2}, 李建国², 赵广臣^{1,2}

(1. 山西工程技术学院土木工程系, 山西 阳泉 045000;

2. 山西工程技术学院, 矿区生态修复与固废资源化厅市共建山西省重点实验室培育基地, 山西 阳泉 045000)

摘要: 通常农田回归用水水质较差, 利用河湖生态系统自净能力可改善农田回归用水水环境质量。该文以宁夏阅海湖为例, 充分利用景观湖的净化能力, 建立湖泊水动力-水环境数学模型, 通过数值模拟实验, 量化分析水系调蓄方式对农田回归用水改善程度。结果表明: 实测工况下, 阅海湖将 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP浓度分别降低了0.80、1.06、0.057 mg/L; 模拟实验下, 春季、秋季水系调蓄情景水质由Ⅲ类水质优化至Ⅱ类水质, 夏季由Ⅳ类水质优化至Ⅱ类水质; 水动力对水质改善有一定的影响, 冬季水量调控情景下水质由Ⅱ类水质优化至Ⅰ类水质, 水量调蓄情景下由Ⅲ类水质提升至Ⅱ水质。该研究可为农业废水利用、黄河水资源优化配置提供参考。

关键词: 阅海湖; 水环境; 农田回归用水; 数值模拟; 水量调蓄

中图分类号: X522; TV131.2 文献标志码: A doi: 10.19672/j.cnki.1003-6504.1415.24.338 文章编号: 1003-6504(2024)12-0070-09

Contribution of Landscape Lake to Improvement of Water Quality for Farmland Return Water

ZHANG Yongsheng^{1,2}, LI Jianguo², ZHAO Guangchen^{1,2}

(1. Department of Civil Engineering, Shanxi Institute of Technology, Yangquan 045000, China;

2. The Cultivation Base of Shanxi Key Lab of Mining Area Ecological Restoration and Solid Wastes Utilization,
Shanxi Institute of Technology, Yangquan 045000, China)

Abstract: The return flow of farmland is usually of poor water quality; however, by properly using the self-purification capability of rivers and lakes it is possible to improve the water quality of return flow. In this paper, Yuehai Lake in Ningxia as a case study, by fully taking advantage of the landscape lake's purification capability we developed a lake hydrodynamic-water environment mathematical model and through numerical modelling experiment to simulate and quantitatively analyze the effect of the water system regulation/storage method on the degree of betterment of water quality of farmland return water. The experimental result showed that under working condition, through Yuehai Lake the concentrations of $\text{NH}_3\text{-N}$, TN, and TP were reduced by 0.80 mg/L, 1.06 mg/L, and 0.057 mg/L, respectively, while simulated scenarios revealed that by implementing water-system regulation/storage return water quality in spring and autumn could be improved from Class III to Class II, and in summer from Class IV to Class II; and hydrodynamic force exerted a certain effect on water quality improvement, in winter, with water quality control scenarios return water quality was improved from Class II to Class I, while in quantitative regulation scenarios from Class III to Class II. It is expected that the research could provide references for the utilization of agriculture wastewater and the optimal water resource allocation of the Yellow River.

Key words: Yuehai Lake; water environment; agricultural return flow; numerical simulation; water volume regulation

水资源短缺和水资源恶化是制约西北干旱地区社会经济快速发展最关键自然因素^[1]。其中, 水环境问题尤为突出, 严重影响居住环境和生态系统健康, 引发了社会强烈关注。宁夏回族自治区水资源短缺, 引黄灌区是农业灌溉的主要用水来源, 农田回归用水

富含大量的氮、磷等污染物, 富营养物质质量大而集中, 直接入河造成河流生态系统藻类爆发^[2-4], 导致水生生物多样性失衡。故在经济快速化进程中, 农田回归用水处理问题较为突出。在国家加强河湖水资源安全保护的背景下^[5-7], 农田回归用水妥善处理的任

务更加迫切。

大力推进节水减排、优化水资源配置、强化控源截污、完善农业面源污染是改善河湖水环境质量的根本途径。从供给侧出发,优化湖泊水系调蓄方式,利用湖泊自净能力和水环境容量,也是改善河湖生态系统水环境质量的重要思路之一。已有关于农业废水处理相关研究中,通过人为因素的介入利用物理、化学、生物等手段处理农业废水^[8-10]。在湿地生态系统中,Aqdas等^[11]研究发现湿地植物可吸收废水中的悬浮颗粒和富营养物质,同时促进湿地植物的生长,提升水质;牛永华^[12]对汾河流域湿地对农业废水净化效果的研究发现,多种植物对于废水中的氮、磷元素均有一定程度的净化效果。光催化技术的应用展示了在农业废水中去除有机污染物的高效性和可控性^[13,14]。生物滤池系统的研究揭示了其在氮化合物去除方面的潜力,通过微生物群落的协同作用显著减少了氮化合物的浓度^[15]。此外,化学混凝沉淀方法成功处理了农业废水中的营养物质^[16-18],通过添加适量的混凝剂和沉淀剂实现了对磷、氮等营养物质的有效沉淀。这些研究为农业废水处理提供了多元化的解决方案,强调了综合利用不同技术的重要性,以实现更有效和可持续的农业废水处理。然而,对于充分利用人工湿地景观湖对农业废水净化的能力^[19-23],提升水质,强化水资源利用仍待进一步研究。以往此类研究中仅依赖长期对水质的监测解析湖泊对水质改善的

效果,本研究在水质监测的基础上,引入数值模拟的技术,建立可靠的数学模型,解析人工湖对农业废水提升效果。

本文以西北干旱地区宁夏阅海湖为例,构建阅海湖水动力-水环境数学模型,通过对比现状和数值模拟实验条件下的流速、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP等要素的差异,解析景观湖对农田废水水质的影响,分析不同水系调蓄方式以及不同季节优化效果,实现水质提升的同时充分强化水资源利用。

1 研究方法

1.1 研究区域

阅海湖($106^{\circ}19'\sim 106^{\circ}30'\text{E}$, $38^{\circ}50'\sim 38^{\circ}59'\text{N}$)位于宁夏回族自治区银川市金凤区(图1),是银川市水系联通的核心地区,也是银川市最大的湖泊,同时是银川市重要生态、旅游景点之一。阅海湖湿地总面积为2 000 hm^2 ,湖域面积达1 791 hm^2 ,本研究区域为阅海湖湿地的湖域片区。湖水补给来自东南侧的引黄灌区银新沟,湖区地势呈南高北低,湖水沿东北侧的典农河流出。根据宁夏生态环境厅宁夏河湖长制平台水位监测断面2021年1-12月日平均水位数据,阅海湖年平均水深约为2.8 m,春夏季最大平均水深可达3.6 m。为保证阅海湖生态环境稳定以及水环境容量,定期水系调蓄,水位达到控制水位,动态调控湖水量,以满足湖区的水资源稳定。

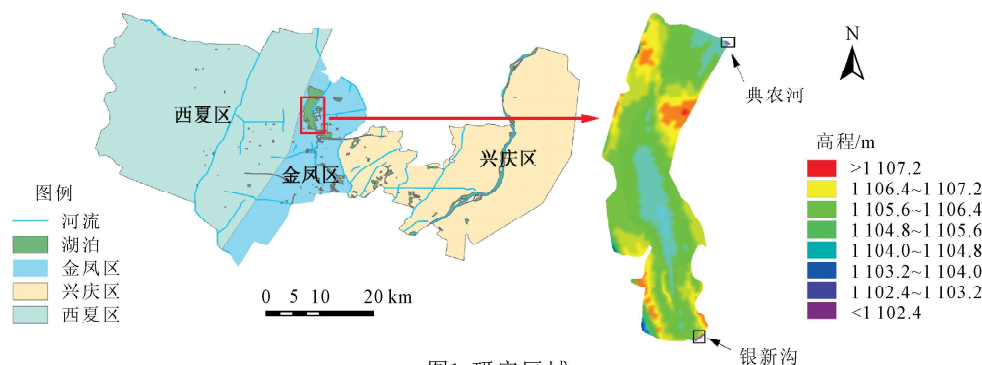


图1 研究区域
Fig.1 Study area

1.2 数据来源

本研究采用的基础数据包括阅海湖湖面断面、水系调蓄流量、水位、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP等资料。其中,研究区域重要边界控制断面水文数据数据源于现场实测,利用声学多普勒剖面仪(ADCP)采用走行式现场实测获取,共计测量6个断面;流量、水位、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP等数据源于2021年7月2日、7月7日、7月12日、7月17日、7月22日和7月27日共计6次监测数据,监测点分布如图2所示,为方便计算将研究区域分

为3个区,根据地形的复杂程度以及区域面积的大小,南湖区分4个采样点,中湖区2个采样点,北湖区3个采样点(图2)。

1.3 模型构建

阅海湖为浅水湖泊,最大水深不超过5.5 m,水流缓慢,垂向流速变化不明显。MIKE 21软件采用精细物理模型、先进数值算法和灵活参数设置,能够准确模拟浅水湖泊水质变化。考虑到地表水模拟系统(surface water modeling system, SMS)对于三角形非结

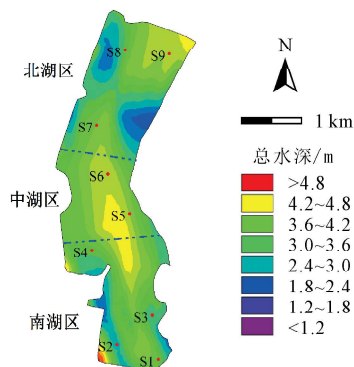


图2 阅海湖监测点分布及湖面分区
Fig.2 Distribution of monitoring points and lake surface zones in Yuehai Lake

构网格不规则地形和复杂地形边界时可提供更高的灵活性和精确性,因此利用SMS软件进行网格划分,将网格嵌入到MIKE软件中,采用领域差值的方式进行线性插值,如图3所示。研究区域划分1 974个节点,3 853个网格,单元平均网格边长80 m,湖泊进水口、出水口处进行网格加密,单元格平均边长40 m。

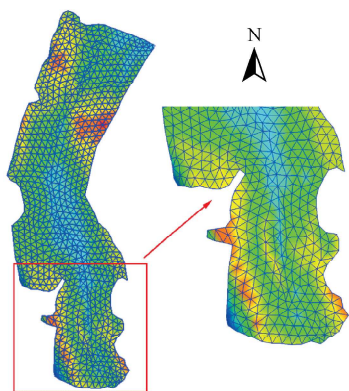


图3 阅海湖网格划分
Fig.3 Grid division of Yuehai Lake

1.4 控制方程

基于MIKE 21软件建立阅海湖二维平面水动力-对流扩散-Ecolab耦合模型,对湖区流场及浓度场进行模拟计算。其中,水动力模块是影响物质扩散的主要驱动因素,是描述湖区水动力要素的变化、计算平面二维自由表面流、识别干湿单元的基础,包含了连续性方程和 x 、 y 方向上的连续方程;水环境模块包括对流扩散-Ecolab模块的耦合模型,对流扩散模块用于计算物质在水体中对流和扩散的过程,Ecolab模块用于计算各物质相互转化关系,控制方程见参考文献[24]。

1.5 参数设定

考虑到阅海湖为浅水湖,湖面面积较小、流速缓慢以及入湖流量较小的特点,模型设置时忽略引潮力、波浪、科氏力、冰盖、热效应等的影响。为保证模型计算稳定,采用CFL收敛条件数作为判断计算的收敛条件,设置为0.8^[25],模拟中选取时间步长为30 s。

根据对阅海湖实地调研以及前人研究经验^[26],定义干水深 $h_{\text{dry}}=0.005$ m,淹没水深 $h_{\text{flood}}=0.05$ m,湿水深 $h_{\text{wet}}=0.1$ m。在本次模拟中,采用正压模式进行水体密度计算,在整个模拟过程中,水体的温度和盐度被视为恒定不变的以确保水体密度保持一致。参考文献[27]选取Smagorinsky系数表征涡流粘度,涡流粘度系数为0.25,曼宁系数为 $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$;TN、TP的扩散系数取值为 $15\sim 25 \text{ m}^2/\text{s}$,降解系数为 $0.001\sim 0.015 \text{ d}^{-1}$ 。

1.6 水环境模型验证

阅海湖为区域内现状活水工程,每月定期水系调蓄,通常情况下月初水量调蓄,库容满足城市发展需求后进行水量调控,湖区出水口闸门打开水量调控,闸门关闭水量调蓄。本研究以2021年7月2日、7日、12日、17日、22日银新沟水动力学要素以及水质数据时间序列文件作为上游边界条件,监测点前4次实测数据用于模型的构建和参数的率定,并对所有时刻的数据进行了验证;7月22日水量调控状态与7月27日水量调蓄状态验证结果如图4所示。水深实测值与模拟值最大误差为0.18 m,流速实测值与模拟值最大误差为 0.0003 m/s ,TN实测值与模拟值最大误差为 0.12 mg/L ,TP实测值与模拟值最大误差为 0.003 mg/L 。利用纳什效率系数(normalized squared error, NSE)对模型进行评价^[28],流速水量调控状态下NSE值最低为0.67,水深NSE值均大于0.88;TN的NSE值均大于0.92,TP的NSE值均大于0.95,结果表明该模型较好地重现了研究区域水动力学要素以及TN、TP的空间分布特征,可用于阅海湖水环境模拟。

2 结果分析

2.1 现状水质提升分析

以2021年7月水系调蓄条件下(水量调蓄+水量调控)水动力学要素及水质数据作为时间序列条件,针对阅海湖改善农田回归用水水质质量进行模拟。从流速的空间分布来看,如图5(a)所示,南湖区边界条件复杂,在边界条件变化剧烈处出现了漩涡,最大流速趋于湖心处,在 0.005 m/s 左右;中湖区流速流场相对平稳;北湖区由于地形因素及比降增大,最大流速可达 0.009 m/s 。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP在空间分布来看,如图5(b)~(d)所示,南湖区各离子的含量最高,南湖区 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP最大浓度分别为 0.99 、 1.36 、 0.068 mg/L ;随着富营养物质向北湖区扩散,不断与湖进行物化作用,浓度逐渐降低,北湖区 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP出水口处浓度分别为 0.19 、 0.32 、 0.012 mg/L 。根据《地表水环境质量标准》,入湖口银新沟水质为V类水质,出口典农河水质为IV类水质。可见,在现状情况下阅海湖总

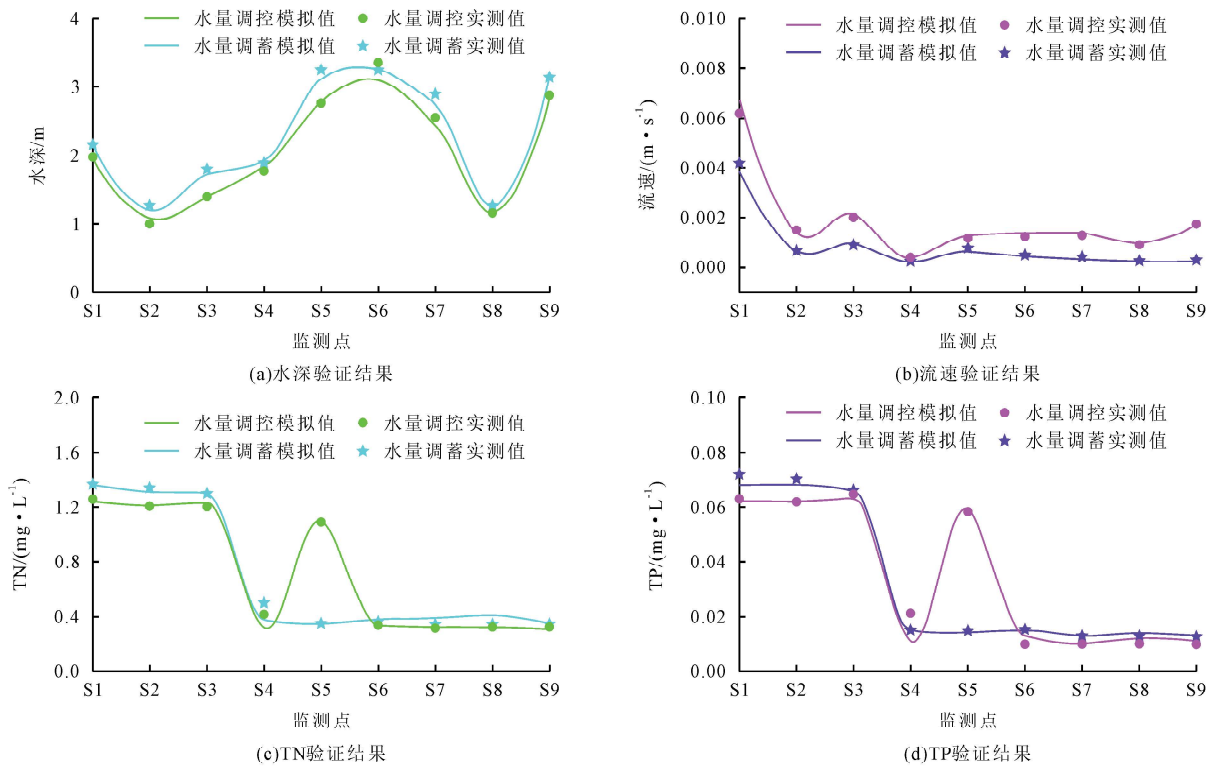


图4 水环境模型验证
Fig.4 Validation of the water environment model

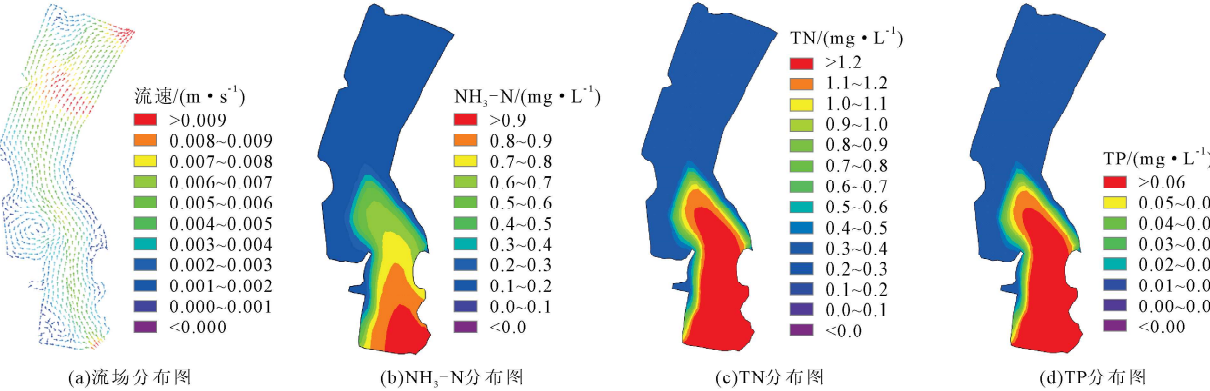


图5 7月水环境分布图
Fig.5 Water environment distribution map in July

体上对农业废水有较好的改善效果,提升了农田回归用水水质指标,优化了生态质量持续度。

2.2 不同季节水质改善分析

2.2.1 实验计算方案

为了探讨阅海湖对不同季节水系调蓄方式水质

改善的有效性,根据宁夏生态环境厅宁夏河湖长制平台水环境历史资料数据,合理对不同季节水动力学要素及污染物含量进行设计,如表1所示,将水动力学要素及水质数据作为上游开边界初始条件,利用MIKE 21 软件进行不同情景的水环境模拟。

表1 不同工况水环境模拟

Table 1 Water environment simulation under different working conditions

方案	水量调蓄				水量调控			
	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$\text{NH}_3\text{-N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{TN}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{TP}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$\text{NH}_3\text{-N}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{TN}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\text{TP}/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
春季	1.16	0.53	0.75	0.036	1.38	0.51	0.72	0.036
夏季	3.27	0.99	1.35	0.068	3.42	0.98	1.36	0.069
秋季	2.63	0.79	1.07	0.048	2.79	0.79	1.06	0.049
冬季	0.74	0.48	0.63	0.021	0.89	0.47	0.64	0.021

2.2.2 不同季节阅海湖流场分布特征

本研究利用数值模拟方法,分析了不同季节和不同的水系调蓄方式对阅海湖水力特性的影响,如图6所示。季节性变化是影响阅海湖水力特性的主要因素。夏季湖水流量大,水力特性好,流速大。冬季湖水流量小,水力特性差,流速低。水系调蓄方式对阅海湖水力特性同样有一定影响,水量调控状态下,湖水流速高于水量调蓄状态。夏季水量调控状态下,阅海湖湖水流速最高,湖心地区流速可达0.06~0.08 m/s;南湖区与中湖区交界处流速较低,为

0.005~0.007 m/s;北湖区流速相对稳定,为0.005~0.007 m/s。冬季水量调控状态下,阅海湖湖水流速最低,湖水流动性较差,水流主要集中在湖面中心,流速低于0.003 m/s。夏季水量调蓄状态下,阅海湖湖水流速仍然是最高值,流速最大的区域主要集中在中湖区与西湖区,为0.002~0.004 m/s,北湖区出水口闸门关闭,出现了回流形成旋涡。空间分布是影响阅海湖水力特性的另一重要因素,湖心地区流速最高,东湖区与中湖区交界处流速较低,西湖区流速相对稳定。

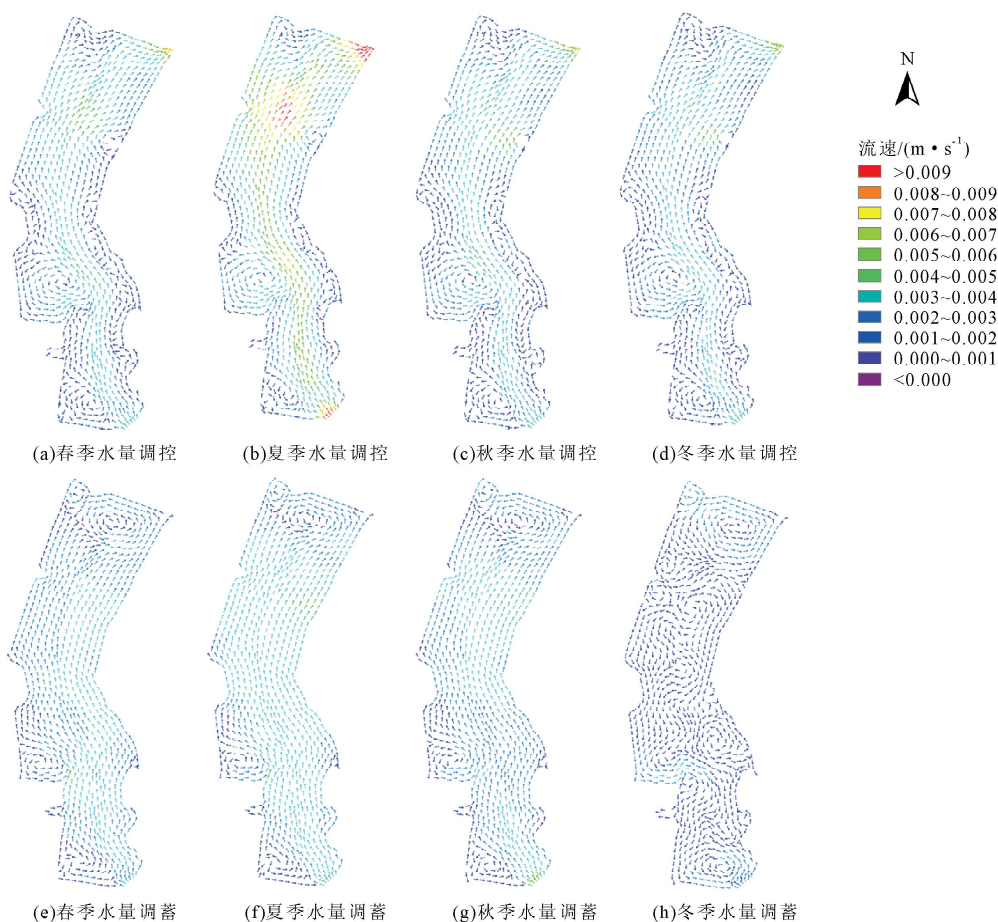


图6 不同季节不同供水方式阅海湖流场模拟结果
Fig.6 Simulation results of the flow field in Yuehai Lake under different water supply methods in different seasons

2.2.3 不同季节 $\text{NH}_3\text{-N}$ 分布特征

图7所示为阅海湖不同季节不同水系调蓄方式 $\text{NH}_3\text{-N}$ 时空分布的模拟结果。在时间分布上,不同季节的氨氮含量存在显著差异,春季与冬季氨氮含量较低,夏季含量最高;在空间分布上,不同季节不同水系调蓄方式南湖区氨氮含量最高,随着氨氮向北湖区运移,含量逐渐降低。水量调蓄状态下,夏季南湖区 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量最高为0.98 mg/L,北湖区临近出水口 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量为0.18 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度降低了0.80 mg/L;秋季降低了0.62 mg/L;春季降低了0.38 mg/L;冬季降

低了0.27 mg/L。水量调控状态下,夏季南湖区 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量最高为0.92 mg/L,北湖区临近出水口 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量为0.17 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度降低了0.75 mg/L;秋季降低了0.66 mg/L;春季降低了0.33 mg/L;冬季降低了0.28 mg/L。

2.2.4 不同季节TN分布特征

如图8模拟结果显示,TN在时间分布上,夏季的TN含量最高,其次是秋季和春季,而冬季TN含量最低。在空间分布上,沿水流流向TN含量逐渐降低。水量调控情景下,夏季南湖区TN含量最高为1.13 mg/L,

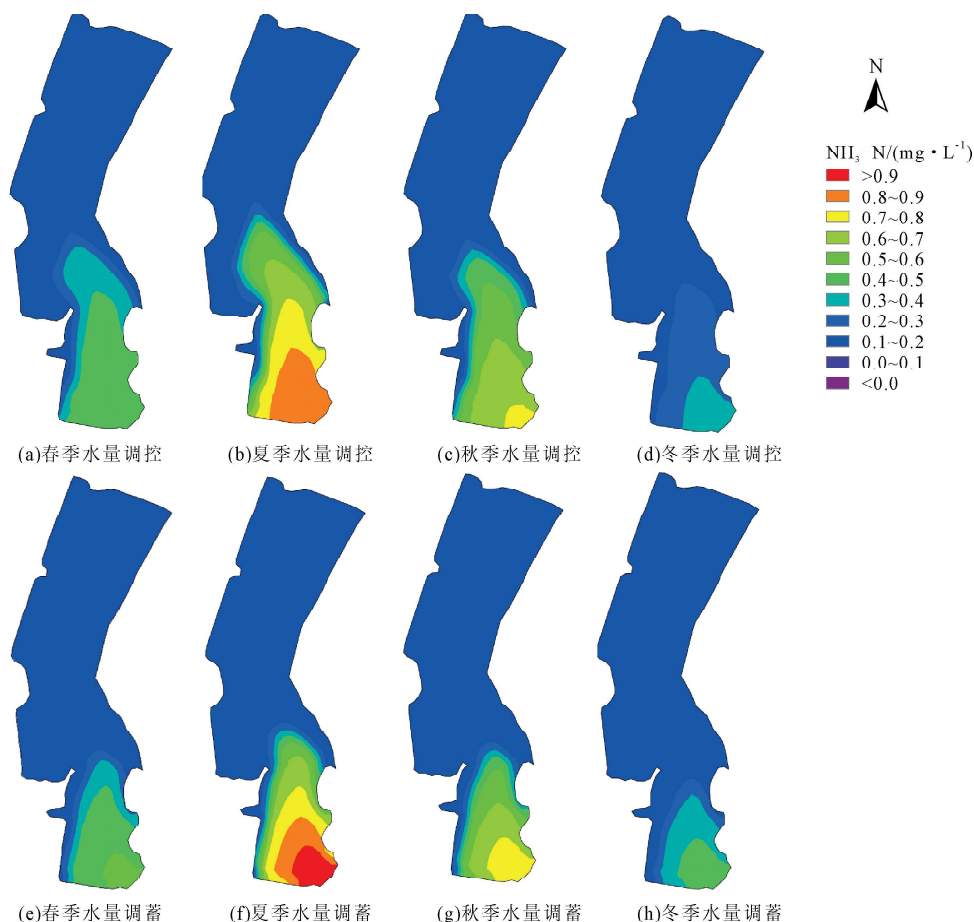


图7 不同季节不同供水方式阅海湖 $\text{NH}_3\text{-N}$ 分布
Fig.7 $\text{NH}_3\text{-N}$ distribution in Yuehai Lake under different water supply methods in different seasons

北湖区临近出水口 TN 含量为 0.32 mg/L, TN 浓度降低了 0.81 mg/L; 秋季降低了 0.63 mg/L; 春季降低了 0.39 mg/L; 冬季降低了 0.27 mg/L。水量调蓄情景下, 夏季南湖区 TN 含量最高为 1.36 mg/L, 北湖区临近出水口 TN 含量为 0.30 mg/L, TN 浓度降低了 1.06 mg/L; 秋季降低了 0.80 mg/L; 春季降低了 0.43 mg/L; 冬季降低了 0.35 mg/L。

2.2.5 不同季节 TP 分布特征

阅海湖 TP 模拟结果如图 9 所示, 在空间分布上, 南湖区 TP 含量高于中湖区和北湖区; 当水量调控时, 夏季 TP 含量最高位于东湖区, 0.051 mg/L, 随着 TP 向北湖区扩散, TP 的含量由于湖泊的稀释作用以及沉积不断降低, 夏季 TP 含量最低位于北湖区, 为 0.019 mg/L。冬季 TP 含量为全年最低的季节, TP 浓度在 0.009~0.024 mg/L 之间, TP 在空间上的分布规律与夏季分布规律一致; 春季与秋季 TP 含量居于冬季与春季之间, TP 浓度在 0.017~0.048 mg/L 之间。然而当水量调蓄时, 夏季南湖区 TP 量最高为 0.062 mg/L, 北湖区临近出水口含量为 0.005 mg/L, TP 浓度降低了 0.057 mg/L; 秋季降低了 0.033 mg/L; 春季降低了 0.021 mg/L; 冬季降低了 0.018 mg/L。

2.3 水质改善对比

如表 2 所示, 对比农田回归用水流经阅海湖前后水质质量可知, 相对于南湖区, 北湖区水质得到的显著改善。春季、秋季水系调蓄状态下水质由 III 类水质提升到 II 水质; 夏季水系调蓄水质改善效果明显, 由 IV 类水质提升至 II 水质; 冬季水量调蓄状态束流缓慢, 水动力学性能差, 南湖区 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 含量均较高, 水质由 III 提升至 II, 水量调控水质由 II 水质提升至 I 类水质。由此可见, 在考虑 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP 3 种物质的情况下, 阅海湖对农田回归用水水质改善有显著效果。

3 结论

本文以宁夏回族自治区银川市阅海湖为例, 综合考虑农田回归用水节约利用、满足水功能需求与生态生活用水, 分析了 2021 年 7 月水质综合净化情况; 建立了景观湖提升水质模型, 开展了不同季节数值模拟实验, 并基于《地表水环境质量标准》评价了不同模拟实验水质改善效果。

(1) 采用 MIKE 21 水动力-水环境数学模型模拟了阅海湖 7 月流速/常规污染物的时空分布。结果显

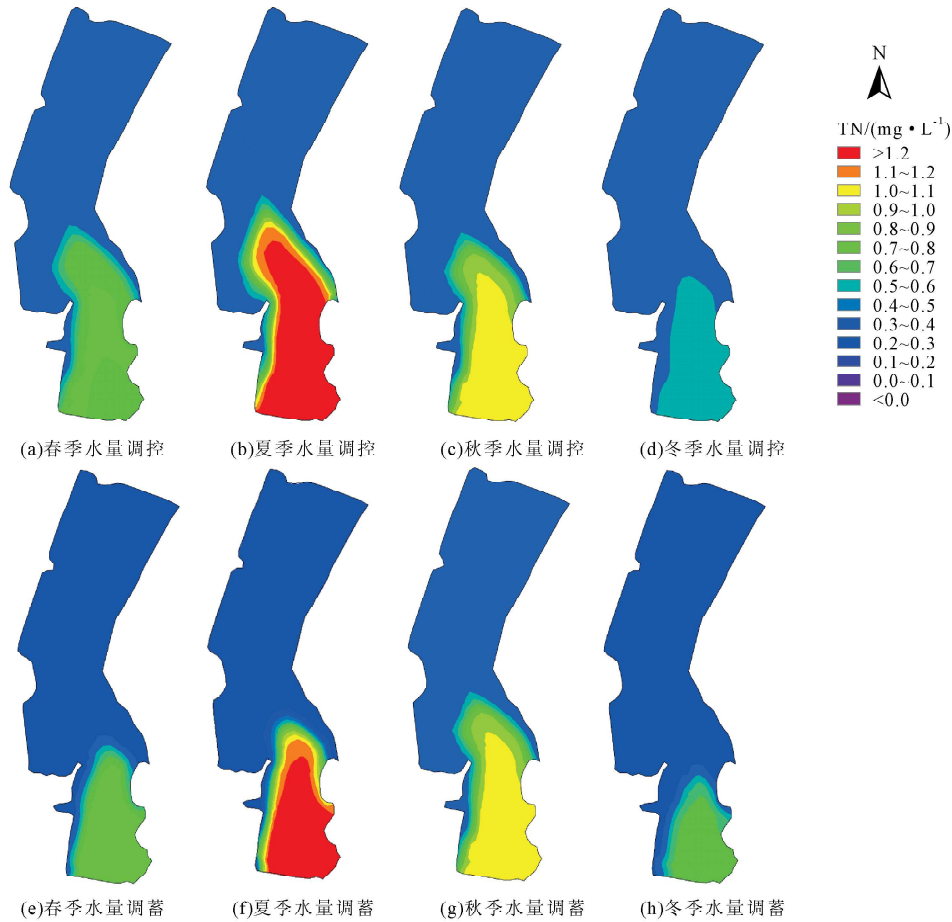


图8 不同季节不同供水方式阅海湖TN分布
Fig.8 TN distribution in Yuehai Lake under different water supply methods in different seasons

表2 阅海湖水质提升对比表
Table 2 Comparison of water quality improvement in Yuehai Lake

季节		南湖区				北湖区			
		NH ₃ -H/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)	水质分类	NH ₃ -H/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)	水质分类
水量调控	春季	0.48	0.68	0.033	Ⅲ	0.15	0.29	0.010	Ⅱ
	夏季	0.92	1.13	0.062	Ⅳ	0.17	0.32	0.011	Ⅱ
	秋季	0.72	0.94	0.042	Ⅲ	0.16	0.31	0.010	Ⅱ
	冬季	0.32	0.46	0.018	Ⅱ	0.14	0.19	0.009	Ⅰ
水量调蓄	春季	0.52	0.75	0.036	Ⅲ	0.14	0.32	0.011	Ⅱ
	夏季	0.98	1.36	0.068	Ⅳ	0.18	0.30	0.011	Ⅱ
	秋季	0.78	1.08	0.48	Ⅲ	0.16	0.28	0.010	Ⅱ
	冬季	0.47	0.62	0.02	Ⅲ	0.20	0.27	0.009	Ⅱ

示阅海湖的自净能力作用对农田回归用水有较好的提升作用,水质由Ⅳ类水质提升至Ⅱ类水质。

(2)定量分析了不同季节不同水系调蓄情景下阅海湖对水质的改善程度。在夏季水质最差季节,经过阅海湖的净化作用,水量调控情景下NH₃-N、TN、TP分别降低了0.75、0.81、0.051 mg/L;水量调蓄情景下NH₃-N、TN、TP分别降低了0.80、1.06、0.057 mg/L。

(3)阅海湖改善水质在空间分布上,南湖区吸收了大部分常规污染物,中湖区与北湖区水质变化不明显;在动力学角度,水量调控情景下湖面流速大于水

量调蓄情景下湖面流速,水质优化效果显著。

[参考文献]

[1] 陶汪海,邓铭江,王全九,等. 西北旱区农业高质量发展体系的生态农业内涵与路径[J]. 农业工程学报, 2023,39(20): 221-232.
Tao Wanghai, Deng Mingjiang, Wang Quanjui, et al. Ecological agriculture connotation and pathway of high-quality agricultural development system in northwest arid region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(20):221-232.

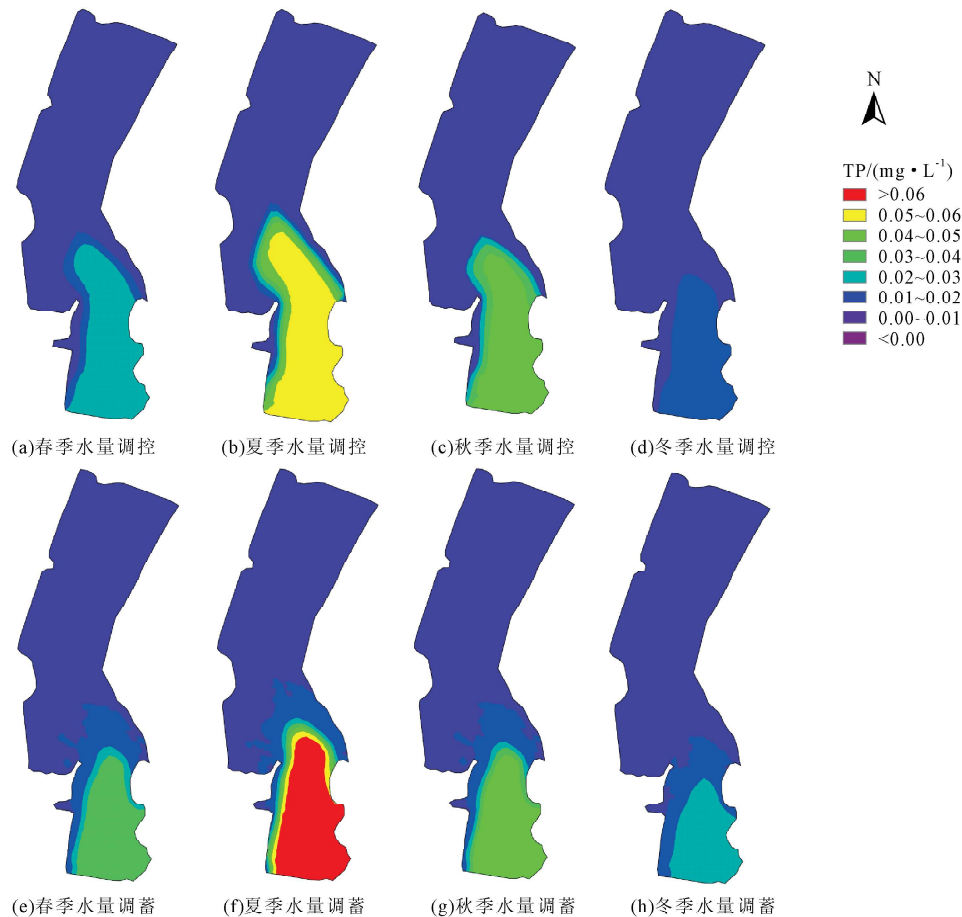


图9 不同季节不同供水方式阅海湖TP分布

Fig.9 TP distribution in Yuehai Lake under different water supply methods in different seasons

- [2] 季鹏飞,许海,詹旭,等. 长江中下游湖泊水体氮磷比时空变化特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2020,41(9): 4030–4041.

Ji Pengfei, Xu Hai, Zhan Xu, et al. Spatial-temporal variations and driving of nitrogen and phosphorus ratios in lakes in the middle and ower reaches of Yangtze River[J]. Environmental Science, 2020,41(9):4030–4041.

- [3] 胡晓燕,朱元荣,孙福红,等. 河流氮磷和水量输入对太湖富营养化的影响机理研究[J]. 环境科学研究, 2022,35(6): 1407–1418.

Hu Xiaoyan, Zhu Yuanrong, Sun Fuhong, et al. Mechanism research of the effects of water quality (nitrogen and phosphorus concentrations) and water volume on eutrophication of Lake Taihu[J]. Research of Environmental Sciences, 2022,35(6):1407–1418.

- [4] 高立方,吴静颖,葛小东,等. 长江经济带淡水养殖污染负荷特征分析[J]. 华中农业大学学报, 2021,40(3):64–74.

Gao Lifang, Wu Jingying, Ge Xiaodong, et al. Pollution load characteristics of freshwater aquaculture in the Yangtze River Economic Belt[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021,40(3):64–74.

- [5] 张修宇,王李良,杨淇翔. 河南省引黄受水区水资源安全综合评价[J]. 人民黄河, 2021,43(9):90–93.

Zhang Xiuyu, Wang Liliang, Yang Qixiang. Comprehensive evaluation of water resources security in the Yellow River diversion area of Henan Province[J]. Yellow River, 2021,43(9):90–93.

- [6] 武兰珍,赵霞,成艺,等. 黄河流域甘肃段水资源承载力与水资源安全评价[J]. 排灌机械工程学报, 2021,39(9):897–903.

Wu Lanzhen, Zhao Xia, Cheng Yi, et al. Evaluation of water resources carrying capacity and water resources security in Gansu section of Yellow River Basin[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021,39(9):897–903.

- [7] 马维兢,张闻顺,李程伟,等. 黄河流域经济规模与水资源边际效益异速增长时空特征及驱动因素[J]. 自然资源学报, 2023,38(12):3116–3134.

Ma Weijing, Zhang Wenshun, Li Chengyi, et al. Spatiotemporal characteristics and driving factors of allotropic growth of economic scale and marginal benefits of water resources in the Yellow River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2023,38(12):3116–3134.

- [8] 张新帅,张红宇,黄凯,等. 石灰与生物炭对矿山废水污染农田土壤的改良效应[J]. 农业环境科学学报, 2022,41(3): 481–491.

- Zhang Xinshuai, Zhang Hongyu, Huang Kai, et al. Beneficial effects of lime and biochar application on farmland soil polluted by mine wastewater[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2022,41(3):481-491.
- [9] Jagaba A H, Bashir F M, Lawal I M, et al. Agricultural wastewater treatment using oil palm waste activated hydrochar for reuse in plant irrigation: synthesis, characterization, and process optimization[J]. *Agriculture*, 2023,13(8):1531.
- [10] Zhou Y Y, Wang J L. Detection and removal technologies for ammonium and antibiotics in agricultural wastewater: recent advances and prospective[J]. *Chemosphere*, 2023,334:139027.
- [11] Aqdas A, Hashmi I. Role of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) in integrated constructed wetlands: a review on its phytoremediation potential[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2023,20(2):2259-2266.
- [12] 牛永华. 汾河流域湿地植物对农业污染的净化效果研究[J]. *中国农村水利水电*, 2018(6):92-96.
- Niu Yonghua. Response of wetland emergent plants to agricultural pollution of Fen River watershed and their nitrogen purification efficiencies[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2018(6):92-96.
- [13] Aliste M, Garrido I, Hernández V, et al. Assessment of reclaimed agro-wastewater polluted with insecticide residues for irrigation of growing lettuce (*Lactuca sativa* L) using solar photocatalytic technology[J]. *Environmental Pollution*, 2022,292:118367.
- [14] Kushnirou A, Garrido I, Fenoll J, et al. Solar photocatalytic reclamation of agro-wastewater polluted with twelve pesticides for agricultural reuse[J]. *Chemosphere*, 2019,214:839-845.
- [15] Wang J L, Wang S Z. Preparation, modification and environmental application of biochar: a review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,227:1002-1022.
- [16] Wang L K, Wang M H S, Shammas N K, et al. Physico-chemical Treatment Consisting of Chemical Coagulation, Precipitation, Sedimentation, and Flotation[M]. *Handbook of Environmental Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2021:265-397.
- [17] Akinawo S O, Ayadi P O, Oluwalope M T. Chemical coagulation and biological techniques for wastewater treatment [J]. *Ovidius University Annals of Chemistry*, 2023,34(1):14-21.
- [18] Bahrodin M B, Zaidi N S, Hussein N, et al. Recent advances on coagulation-based treatment of wastewater: transition from chemical to natural coagulant[J]. *Current Pollution Reports*, 2021,7(3):379-391.
- [19] Gregoire C, Elsaesser D, Huguenot D, et al. Mitigation of agricultural nonpoint-source pesticide pollution in artificial wetland ecosystems[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2009,7(3):205-231.
- [20] Dell'Osbel N, Colares G S, Oliveira G A, et al. Hybrid constructed wetlands for the treatment of urban wastewaters: increased nutrient removal and landscape potential[J]. *Ecological Engineering*, 2020,158:106072.
- [21] Athukorala D, Murayama Y, Madduma Bandara C M, et al. Effects of urban land change on ecosystem service values in the Bolgoda Wetland, Sri Lanka[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2024,101:105050.
- [22] 裴亮,孙莉英,梁晶,等. 不同填料对阶梯式人工湿地降解农业废水的影响[J]. *水资源与水工程学报*, 2018,29(1):232-235.
- Pei Liang, Sun Liying, Liang Jing, et al. Effect of different matrix in steps constructed wetland system for degradation of agricultural wastewater[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018,29(1):232-235.
- [23] Stefanakis A. The role of constructed wetlands as green infrastructure for sustainable urban water management[J]. *Sustainability*, 2019,11(24):6981.
- [24] 杜彦良,张双虎,王利军,等. 人工湿地植物水质净化作用的数值模拟研究[J]. *水利学报*, 2020,51(6):675-684.
- Du Yanliang, Zhang Shuanghu, Wang Lijun, et al. Numerical simulation of water purification effects of aquatic plant in artificial surface flow wetland[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020,51(6):675-684.
- [25] 蔡一,尚福强,唐莉华,等. 基于数值模拟的南湖流场优化与水质改善研究[J]. *水资源保护*, 2022,38(6):125-130.
- Cai Yi, Shang Fuqiang, Tang Lihua, et al. Flow field optimization and water quality improvement of Nanhu Lake based on numerical simulation[J]. *Water Resources Protection*, 2022,38(6):125-130.
- [26] Lyu S J, Li C G, Gao F. Hydrodynamic features and water ecology improvement of Yuehai Lake based on ecological water diversion[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2022,61(4):2909-2918.
- [27] 易雨君,郭玉明,刘泓汐. 不同典型年“引江济巢”工程对巢湖水质的影响[J]. *湖泊科学*, 2022,34(6):1901-1911.
- Yi Yujun, Guo Yuming, Liu Hongxi. Impacts of the Yangtze River Water Transfer Project on water quality of Lake Chaohu in different typical years[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022,34(6):1901-1911.
- [28] Venable K, Johnston J M, LeDuc S D, et al. Model linkage to assess forest disturbance impacts on water quality: a wildfire case study using LANDIS(II)-VELMA[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2024,180:106134.