

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.017

基于数值模拟的南湖流场优化与水质改善研究

蔡一¹, 尚福强², 唐莉华¹, 孔彬², 王硕², 王可平¹, 马进龙¹

(1. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084; 2. 中电建路桥集团有限公司, 北京 100048)

摘要:针对城市景观水体流动性差, 往往处于封闭或半封闭状态, 容易造成富营养化的问题, 以典型城市景观水体山东聊城南湖为研究对象, 基于 MIKE21 软件构建了湖区水动力-水质耦合模型, 对湖区流场与水质情况进行了模拟计算。为改善湖区流场和水质状况, 提出增设水源热泵回水口的优化方案, 并根据模型模拟结果, 对不同方案流场改善效果进行了分析比较。结果表明: 增设水源热泵回水口能有效改善南湖流场分布与湖区水质; 以氨氮为评价指标, 沿湖岸设置 4 个回水口的方案与原方案相比较, 观测点的氨氮质量浓度平均降低了 59.7%, 对水质的改善效果最好。

关键词:流场模拟; MIKE21 软件; 水质改善; 城市景观湖泊; 南湖

中图分类号: X524; TV13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2022)06-0125-06

Flow field optimization and water quality improvement of Nanhu Lake based on numerical simulation // CAI Yi¹, SHANG Fuqiang², TANG Lihua¹, KONG Bin², WANG Shuo², WANG Keping¹, MA Jinlong¹ (1. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Power China Roadbridge Group Co., Ltd., Beijing 100048, China)

Abstract: In view of the poor mobility of urban landscape water body, being often in a closed or semi-closed state and easy to cause eutrophication, flow field optimization research was carried out on the typical urban landscape water body of Nanhu Lake in Yuncheng City, Shandong Province. First, the hydrodynamic and water quality coupling model for Nanhu Lake was constructed based on MIKE21 software, and the flow field and water quality in the lake area were simulated. Then, schemes of adding water-source heat pump outlets were proposed for improvement of the flow field and water quality in the lake area. The effects of different schemes were comparatively analyzed according to simulated results. The analysis results show that increasing the number of outlets may effectively improve the flow field distribution and water quality in Nanhu Lake, and the scheme of setting four outlets along the lake shore is effective for water environment improvement in Nanhu Lake, with the ammonia nitrogen mass concentration at the observation point decreasing by 59.7% on average, as compared with the original scheme.

Key words: flow field simulation; MIKE21 software; water quality improvement; city landscape lake; Nanhu Lake

很多城市景观湖泊由于结构相对封闭、缺乏有效水量交换, 导致水体流速较慢, 自净化能力弱; 同时, 为满足城市景观需求, 湖岸多设计成曲折多弯型, 容易形成流动性更差的“死水”区域。由于湖体缺乏有效的水量置换手段, 导致各类污染物、营养物质等易于沉积, 进而导致水环境恶化^[1-2]。

针对城市景观湖泊水体流动性差的特点, 人工水循环是一种行之有效的湖泊水环境治理手段^[3]。有关研究表明, 湖泊型景观水体主要由季节性降雨与出入流控制湖区流量大小, 且流量决定着其他水

力因子的分布与变化特征^[4]。通过人为增设取水口延长引水时间, 加大引水流量^[4-5], 可以有效地提高湖泊水体交换能力, 促进水体循环流动, 改善城市景观湖泊水动力条件, 实现流速的提高与流场分布的优化, 加速污染物的迁移与转化^[6]。因此, 可以通过人工方式对流场进行改变, 从而达到对水体环境质量的改善效果^[7-9]。

对湖泊流场分布的研究方法主要包括野外观测法、物理试验法和数值模拟法等 3 类^[7], 其中, 数值模拟法通过数值计算方法求解数学模型, 能较为精

作者简介: 蔡一(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文水资源及水环境研究。E-mail: duanwutasi@qq.com

通信作者: 唐莉华(1975—), 女, 副研究员, 博士, 主要从事水文水资源及水环境研究。E-mail: tanglh@tsinghua.edu.cn

确地再现湖泊水体流动,是应用最为广泛的研究方法,如 EFDC (environmental fluid dynamics code)、WASP (water quality analysis simulation program) 和 MIKE 系列软件等都是较为成熟的数值模拟模型,在国内应用较多^[10-11]。由于一般湖泊宽浅的形态特点,目前主要采用平面二维模型进行湖泊流场模拟,如美国陆军工程兵团和扬·伯明翰大学研发的 SMS-RMA2 模型、荷兰代尔夫特理工大学研发的 Delft2D、丹麦水利研究所研发的 MIKE21 等软件。此类机理性模型的理论基础坚实、平台工具成熟,能够对各种工况下水域的水动力-水质情况进行全方位的模拟,在实际工作中更具适用性。其中,MIKE21 软件经过多年来的完善发展,已经被广泛应用于包括湖泊、水库在内的各类水体的模拟研究中^[9,11-13],为指导相关湖泊的水环境治理提供了科学工具。

本文以典型城市景观湖泊山东郓城南湖为例,基于 MIKE21 软件进行湖区流场和浓度场的模拟,提出多个水源热泵回水口设置方案,以提高湖区水体的流动性,改善湖区水质,并通过分析不同方案对流场的改善效果,寻求最佳设置方案。

1 研究区概况

郓城县南湖公园位于山东省菏泽市西南部平原区,东临德商路、西临胜利街、南临东溪路、北临裕民路,水面面积约 27.2 hm²,平均水深约为 3.6 m。南湖承接了周边约 2.2 km² 范围的雨水径流,通过图 1 所示的 5 个雨水管进入湖中,是湖区主要的污染来源。同时,南湖北岸的南湖宾馆空调采用水源热泵系统,通过湖区北岸的取水口将湖水引入热泵系统用于空调热量交换,然后通过回水管退水到湖中,设计引水量 800 m³/h,退水升温不超过 1℃。由于湖中水量远大于引退水量,本文暂不考虑水温变化对流场和浓度场的影响。取水口由并列的 2 个 1.5 m × 2 m 矩形口组成,回水口由 6 个直径为 0.478 m 的圆管束组成。取水口及回水口位置如图 1 所示。南湖为人工城市景观湖泊,因此湖盆平坦且湖岸坡度较大。所在的郓城县地处华北平原,属于暖温带半湿润东亚季风大陆性气候,四季分明,多年年均降水量为 695 mm,年均蒸发量为 1 860 mm。

南湖是典型的城市封闭景观水体,水体流动性差,自净化能力弱,易受污染且不容易自我修复。根据 2018 年 6 月进行的水质采样和检验数据,按照 GB 3838—2002《国家地表水环境质量标准》,湖区水质主要指标如溶解氧、氨氮、化学需氧量的质量浓度都在 IV ~ V 类水范围内,叶绿素 a 含量处于富

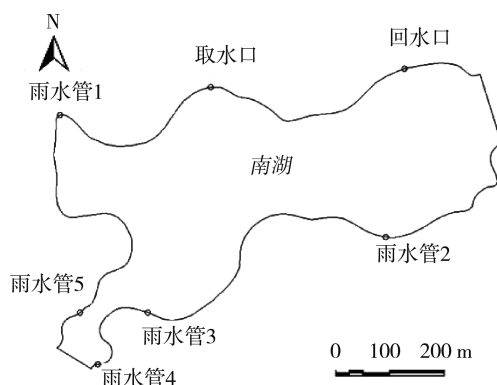


图1 雨水管及水源热泵取水和回水口位置
Fig.1 Locations of rainwater pipes and inlet and outlet of water-source heat pump

营养化水平,未达到一般景观水域要求,受到当地管理部门的关注。从空间分布来看,湖区中央及湖区南部的水样水质较差。

2 模型构建和参数确定

2.1 模型构建

基于 MIKE21 软件建立南湖湖区二维平面水动力-水质耦合模型,对湖区流场及浓度场分布进行模拟计算。建模主要采用以下模块:

a. 水动力模块。水动力模块是 MIKE21 软件的基础,能够模拟研究区域的水位和流速变化,主要应用于平面二维自由表面流,模块能够灵活地识别干湿单元。水动力模块主要包含了连续性方程和动量方程^[14-16]。

b. 水质模块。水质模块包括对流扩散模块和水质反应模块 Ecolab。对流扩散模块可以模拟物质在水体中的对流和扩散过程;Ecolab 模块通过设置变化量的反应方程实现对于复杂水质情况的模拟^[17-18],同时也可以考虑各物质之间的相互转换关系,主要用于全氮素、叶绿素、大肠杆菌浓度等复杂反应体系的模拟。

利用网格编辑器对南湖进行三角形网格划分,基本单元尺寸为 30 m,并对弯曲岸边局部进行加密处理,如图 2 所示。计算区域网格总数为 8 496,最小单元面积为 8.0 m²。

利用 MIKE21 软件中的水动力模块与水质反应模块 Ecolab,依次添加降水、蒸发、风场等气象数据并设置相关参数。气象数据来源于国家气象信息中心《中国地面气候资料日值数据集(V3.0)》,本文采用 2018 年逐日实测气象数据序列,计算分析湖区的流场分布。模型的边界输入条件为 5 个雨水管的水量、水质和水源热泵的抽退水量,初始条件为 2018 年 1 月的水位和水质数据。

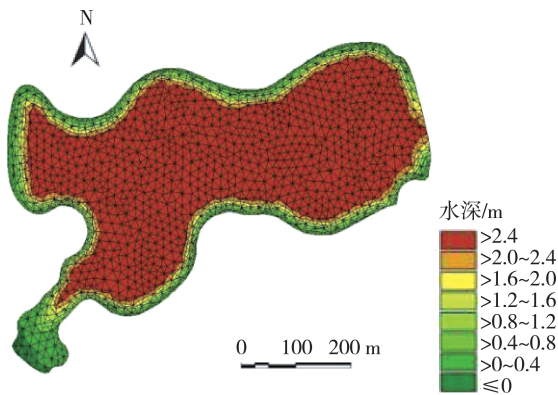


图2 南湖水下地形和计算网格

Fig. 2 Underwater topography and model mesh of Nanhu Lake

2.2 模型参数确定及验证

水动力模块需要考虑的基本参数包括起始时间、时间步数、主时间步长、CFL (Courant-Friedrich Levy) 收敛条件数、底床摩擦力、科氏力、风场、冰盖、引潮势、降水量、蒸发量、波浪辐射应力等。考虑到南湖面积不大、水深较小,水体流动较为缓慢以及南湖周边单位用水情况等特点,模型设置时忽略科氏力、冰盖、引潮力、波浪、热效应等的影响。为保证模型运行稳定,采用 CFL 收敛条件数作为判断计算的收敛条件,参考文献[15],设置为 0.8,代入式(1),可计算得到相应的主时间步长,即最大允许时间步长为12 s。本文采用 10 s 作为计算步长。

$$C = (\sqrt{gh} + |u|) \frac{\Delta t}{\Delta x} + (\sqrt{gh} + |v|) \frac{\Delta t}{\Delta y} \quad (1)$$

式中: C 为 CFL 收敛条件数; g 为重力加速度, m/s^2 ; h 为水深, m ; u 、 v 分别为 x 、 y 方向的流速, m/s ; Δt 为时间步长, s ; Δx 、 Δy 分别为 x 、 y 方向的网格长度, m 。

参考文献[19-21]选取 Smagorinsky 系数表征涡流粘度,其值为 0.28,选取曼宁系数表示底床摩擦,其值为 $32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ 。风场对上层水流影响较大^[22],风摩擦力设定为风速的函数,水面风应力的大小取决于水面风速的强弱,可由经验公式得出:

$$\tau_s = \rho_a c_d |\bar{u}_w| \bar{u}_w \quad (2)$$

式中: τ_s 为水面风应力, kPa ; ρ_a 为空气密度, kg/m^3 ; c_d 为空气中的经验拖曳力,可根据 Geernaert 等^[21]经验公式得到; $\bar{u}_w$ 为水平面以上 10 m 处测得的平均风速, m/s 。

水质计算模块参数众多,特别是 Ecolab 模块中的很多参数无法通过试验测得。因此,综合参考相关文献设置初始参数,并通过控制点模拟,与实测结果对比,对参数进行调整,最终确定合适的参数。

南湖为新建人工湖泊,缺乏足够的实测数据,因此,仅通过水量平衡方法对流场模拟结果进行合理

性分析。基于 2018 年模拟结果,湖区直接降水量为 17.9 万 m^3 ,管道入湖的雨水径流量为 70.3 万 m^3 ,湖面蒸发量为 41.1 万 m^3 ,湖底渗漏量为 50.1 万 m^3 。根据水量平衡,2018 年南湖水量减少了 3.1 万 m^3 。结合南湖地形高程情况,湖水位平均下降约 0.12 m 。根据现场有关资料,南湖 2018 年的水位实际下降约 0.15 m ,与模型所得结果比较接近。采样点水质指标模拟值与实测值对比见表 1,相对误差均在 15% 以内,因此,可以采用该模型对不同方案的流场和浓度场进行模拟与分析。

表1 南湖水质指标的实测值与模拟值对比

Table 1 Comparison of observed and simulated values of water quality indicators in Nanhu Lake

水质指标	质量浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		相对误差/%
	模拟值	实测值	
氨氮	1.43	1.49	-4.03
化学需氧量	35.16	36.23	-2.95
总氮	2.88	2.91	-1.03
叶绿素 a	27.27	31.38	-13.10

3 计算方案和结果分析

3.1 计算方案

南湖岸边的南湖宾馆空调系统采用水源热泵,每天抽取湖水约 1.9 万 m^3 ,并通过回水口退回湖中,形成湖水的循环利用。取水口及原设计的回水口位置见图 1。为了提高湖水的流动性,拟在不同位置增设回水口,利用 MIKE21 软件进行不同方案的流场模拟和分析。

根据对现状流场的模拟结果,分别增设 2 个、3 个和 4 个回水口,具体方案和相应回水口的位置及各方案回水口流量见表 2 和图 3,各方案的退水总量不变。

表2 不同方案及设计流量

Table 2 Design schemes of outlets and discharges

方案	回水口数量/个	设计流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
1	2	0.111
2	3	0.074
3	4	0.056
4	3	0.074

3.2 结果分析

根据模拟结果,采用整个流场分析与代表点分析相结合的方法,对不同方案下的流场进行比较。由于降水会扰动湖面,导致湖区流场变化,为避免降水对流场的扰动,选择前 1 周内未发生明显降水的 2018 年 3 月 16 日作为典型日来考察湖区的流场分布。原方案下的流场分布情况如图 4 所示,不同方案改善后的流场分布情况如图 5 所示。

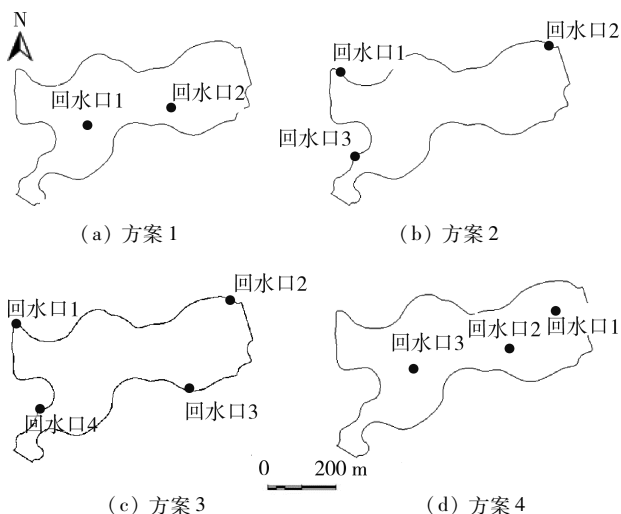


图3 不同方案的回水口位置分布

Fig. 3 Locations of outlets in different schemes

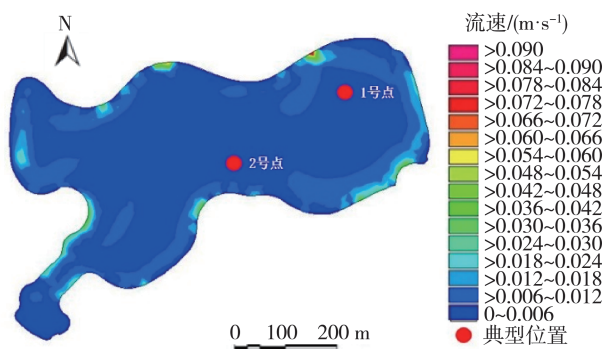


图4 原方案下2018年3月16日0:00的流场分布

Fig. 4 Fluid distribution at 0:00 of March 16, 2018 in original scheme

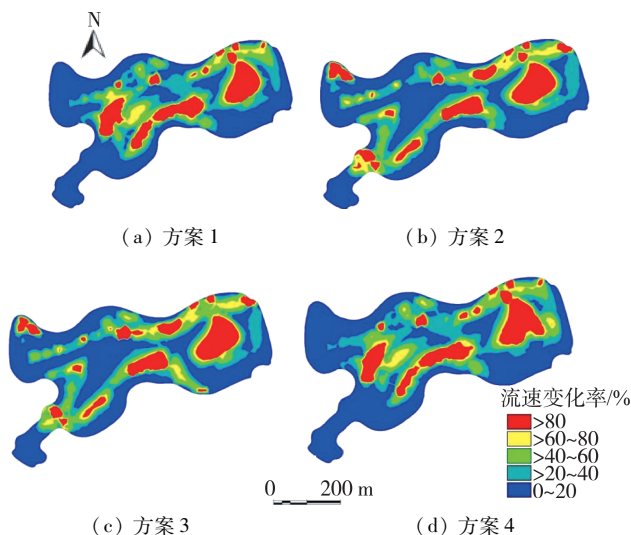


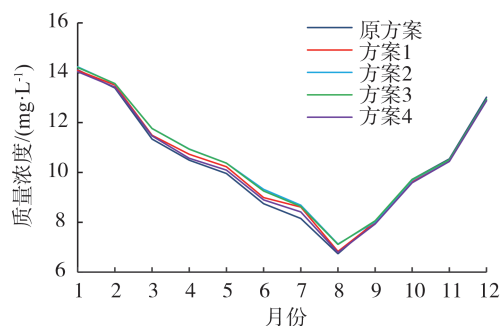
图5 不同方案下2018年3月16日0:00的流速变化率空间分布

Fig. 5 Distributions of flow velocity change rate in different schemes at 0:00 of March 16, 2018

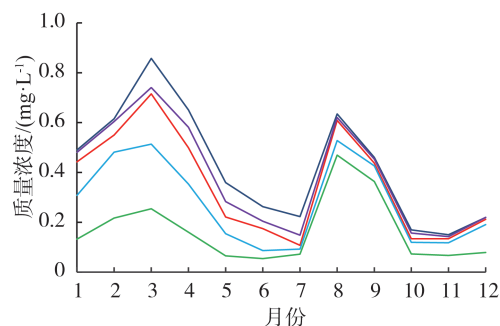
由图4可以看出,原方案的湖中心存在大片低速区,且流速长期维持在 0.006 m/s 以下,流场状况

不佳。由图5可以看出,增设回水口之后,其附近一定时间内均发生了流场的变化,特别是原来接近“静水”的湖心区域流速明显增加,增幅超过80%;在各增加排水口方案下,低流速区域的面积均有一定程度的减小,流场状况变好;对比方案1和方案4、方案2与方案3都可以看出,随着回水口的数量增加,湖泊中的低流速区域明显变小。参考已有研究结果^[23]认为,流速增加有利于水体的混合,并能提高水面的复氧能力,从而增强湖泊的自净能力,即流速越大越有利于湖泊水环境的改善。本研究中由于回水口的出水打破了原有的“死水”环境,使得湖水能够实现更快、更大范围内的流动,有利于湖水的充分混合。

流场的改变在避免污染物局部聚集的同时更有利于提高湖泊的自净能力。为了验证流场改变对水环境的改善效果,选取流速变化较明显的典型位置(图4中的1号和2号点),分析不同方案下溶解氧和氨氮月均质量浓度变化的模拟结果(图6和图7)。



(a) 溶解氧

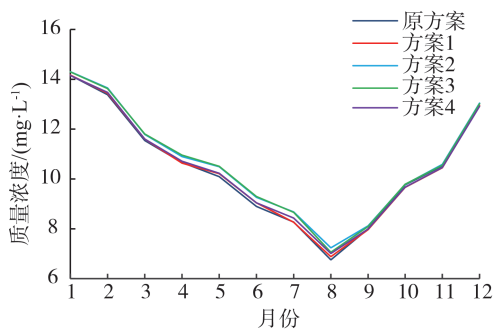


(b) 氨氮

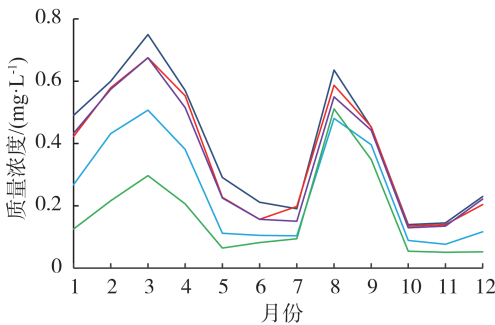
图6 不同方案下1号点的溶解氧和氨氮质量浓度变化

Fig. 6 Mass concentrations of dissolved oxygen and ammonia nitrogen at point 1 in different schemes

由模拟结果可以看出,两个典型位置的水质变化规律相似,增设回水口数量能够在一定程度上改善南湖的局部水质。增加回水口方案下溶解氧质量浓度有所升高,变化幅度在5%以内;与溶解氧相比,增加回水口方案对氨氮的削减效果更为显著。



(a) 溶解氧



(b) 氨氮

图7 不同方案下2号点溶解氧和氨氮质量浓度变化

Fig.7 Mass concentrations of dissolved oxygen and ammonia nitrogen at point 2 in different schemes

其中,冬春季由于入湖污染负荷少,水质改善效果尤为明显,在各方案下,1号和2号点氨氮质量浓度春季降幅普遍超过30%,显著改善了附近水域的水质。由此可见,不同回水口方案对流场的改变,不仅表现在流速变化上,还表现在对湖水的混合作用。流速增大可以提高污染物的降解速率,同时由混合作用带来的稀释效果,也会提升水体自净能力。因此氨氮质量浓度的变化幅度比流速和溶解氧质量浓度的增幅更为显著。

对比不同方案的结果表明,各方案之间的差异明显,特别是在春季的作用效果差异较大。其中,方案3对氨氮的削减效果最好,1号点在方案3下的年均氨氮质量浓度较原方案降低了61.2%,方案1、方案2和方案4下的年均氨氮质量浓度较原方案分别降低了19.0%、34.6%和10.1%;2号点在方案3下的年均氨氮质量浓度较原方案降低了58.2%,而方案1、方案2和方案4下的年均氨氮质量浓度较原方案分别降低了9.0%、38.8%和11.5%。可以看出,方案3对南湖水质改善最为有利。

4 结论

a. 基于MIKE21软件的二维平面水动力-水质耦合模型,模拟得到不同方案下的流场和浓度场,结果表明,回水口对流场的影响主要受其布设位置与

数量的影响,增设回水口改善了湖区的流场分布,改变了封闭湖体存在大面积低流速区域的现状,对改善湖区水质有较好的效果。

b. 根据模型模拟结果,各方案对湖区水质改善的效果不同,以氨氮为分析指标,方案3(即设置4个回水口方案)的水质改善效果最好,与原方案相比,两个观测点氨氮质量浓度的平均降幅为59.7%,有利于南湖的水质改善。

c. 模型参数参考了相关研究成果进行设定,并根据水量平衡分析对其合理性进行了评估,今后可结合现场实测数据进一步对模型进行完善,以提高其模拟精度。

参考文献:

- [1] 桂杨山,马荣华,张路,等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略[J]. 湖泊科学,2010,22(6):3-14. (YANG Guishan, MA Ronghua, ZHANG Lu, et al. Lake status, major problems and protection strategy in China [J]. Journal of Lake Science, 2010, 22(6): 3-14. (in Chinese))
- [2] 丁玲,沈耀良,黄勇. 公园水体的修复技术及发展现状[J]. 苏州科技学院学报,2005(2):48-52. (DING Ling, SHEN Yaoliang, HUANG Yong. The present situations of technology and development of restoration for park water [J]. Journal of University of Science and Technology of Suzhou (Engineering and Technology), 2005(2): 48-52. (in Chinese))
- [3] 叶上扬. 城市景观湖泊水力改善技术及其数值模拟研究[D]. 上海:上海交通大学,2011.
- [4] 朱振杰. 基于水动力适应性的湖泊型景观水体规划设计方法初探:以武汉蔡甸区西湖动植物王国中心湖为例[D]. 武汉:武汉大学,2017
- [5] 汪洁琼,陈奕,毛永青,等. 基于Delft3D污染物扩散模拟的城市湖泊景观水体三维形态循证设计[J]. 中国园林, 2021, 37(5): 44-49. (WANG Jieqiong, CHEN Yi, MAO Yongqing, et al. Evidence-based design for three-dimensional form of landscape water body of urban lake via Delft3D pollutant diffusion simulation [J]. Chinese Landscape Architecture, 2021, 37(5): 44-49. (in Chinese))
- [6] 高庆先,胡铭,杨新兴,等. 湖泊流体动力学模型及其应用[J]. 环境科学研究, 2001, 14(6): 29-32. (GAO Qingxian, HU Ming, YANG Xinxing, et al. Hydrodynamic model of lakes and its application [J]. Research of Environmental Sciences, 2001, 14(6): 29-32. (in Chinese))
- [7] 程伟平,张洪. 基于EFDC模型的滇池外海流场及温度变化研究[J]. 科技通报, 2018(6): 54-58. (CHENG Weiping, ZHANG Hong. Research of flow field and

- temperature change of Dianchi Lake based on EFDC[J]. Bulletin of Science and Technology, 2018(6):54-58. (in Chinese)
- [8] 逢敏,宋为威,钱程. 引调水改善玄武湖水质的水量优化方法[J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 133-139. (PANG Min, SONG Weiwei, QIAN Cheng. Water quantity optimization method for improving water quality of Xuanwu Lake by water diversion[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 133-139. (in Chinese))
- [9] 陈庆江,丁瑞,赵海. 平原河网区活水畅流对水动力和水质的改善效果[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(3): 8-13. (CHEN Qingjiang, DING Rui, ZHAO Hai. Improvement effect of hydrodynamics and water quality by flowing water in plain river network area[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(3): 8-13. (in Chinese))
- [10] 郭鹏程,轩晓博,闫大鹏. 基于 EFDC 模型的人工湖水质保障最佳运行方式研究[J]. 水资源保护, 2014, 30(1): 53-56. (GUO Pengcheng, XUAN Xiaobo, YAN Dapeng. Optimal scheme of water quality assurance in artificial lakes based on EFDC model [J]. Water Resources Protection, 2014, 30(1): 53-56. (in Chinese))
- [11] 孙子日哈,尚福强,吴得卿,等. 基于水生态系统平衡的郅城南湖水体生态净化方案[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 169-176. (SUN Zirha, SHANG Fuqiang, WU Deqing, et al. Water ecological purification scheme of Yuncheng Nanhu Lake based on water ecosystem balance [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 169-176. (in Chinese))
- [12] PALIWAL R, PATRA R R. Applicability of MIKE 21 to assess temporal and spatial variation in water quality of an estuary under the impact of effluent from an industrial estate[J]. Water Science and Technology, 2011, 63(9): 1932-1943.
- [13] 焦雅玲,王昊,李永顺等. 人工湿地数值模拟研究:以山东平阴湿地示范区为例[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(6): 87-89. (JIAO Cuiling, WANG Hao, LI Yongshun, et al. Numerical simulation of flow field of artificial wetland: a case of Pingyin Wetland demonstration[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(6): 87-89. (in Chinese))
- [14] 任杰,董增川,徐伟,等. 基于 MIKE21 FM 模型的河道防浪林行洪影响分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 420-424. (REN Jie, DONG Zengchuan, XU Wei, et al. Study on influence of river wavebreak forest on flood discharge ability based on MIKE21 FM model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(5): 420-424. (in Chinese))
- [15] Danish Hydraulic Institute(DHI). Mike21 & Mike3 flow model FM, hydrodynamic and transport module, scientific documentation [R]. Copenhagen: DHI Water & Environment, 2009.
- [16] 赵棣华,戚晨,庾维德,等. 平面二维水流-水质有限体积法及黎曼近似解模型[J]. 水科学进展, 2000, 11(4): 368-374. (ZHAO Dihua, QI Chen, YU Weide, et al. Finite volume method and Riemann solver for depth-averaged two-dimensional flow-pollutants coupled model[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(4): 368-374. (in Chinese))
- [17] ZHAO D H. Approximate Riemann solvers in FVM for 2D hydraulic shock wave modeling[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 122(12): 692-702.
- [18] 马惠群. 济南市河流湖泊水质数值模拟研究[D]. 济南:山东大学, 2007.
- [19] 杨具瑞,方铎. 滇池二维分层水质模拟研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(5): 533-536. (YANG Jurui, FANG Duo. Study on three-dimensional and fractional water quality simulation of Dianchi Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(5): 533-536. (in Chinese))
- [20] 贾瑞鹏,窦明,米庆彬,等. 基于 MIKE21 的万宝湖二维水环境数值模拟[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(5): 34-39. (JIA Ruipeng, DOU Ming, MI Qingbin, et al. Two-dimensional simulation on water environment of Wanbao Lake based on MIKE21 software [J]. Environmental Pollution & Control, 2018, 40(5): 34-39. (in Chinese))
- [21] GEERNAERT G L, Plant W J. Surface waves and fluxes [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1990.
- [22] 丁文浩,秦伯强,吴挺峰,等. 夏季风下的太湖风场-流场野外观测研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 102-108. (DING Wenhao, QIN Boqiang, WU Tingfeng, et al. Study on Taihu Lake's wind field and flow field under summer monsoon[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(2): 102-108. (in Chinese))
- [23] 朱红伟,陈红海,王勇. 水动力条件对水体自净作用的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 97-102. (ZHU Hongwei, CHEN Honghai, WANG Yong. The effect of hydrodynamic conditions on the self-purification of water body[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 97-102. (in Chinese))

(收稿日期:2021-08-25 编辑:施业)