



定岗湖湿地水动力及水体交换特性分析

李正阳¹, 刘俊国^{1,2,3,✉}, 张晓雷^{1,2}, 鞠俊彦¹, 户东东¹

1. 华北水利水电大学水利学院, 郑州 450046; 2. 河南省水圈与流域水安全重点实验室, 郑州 450046; 3. 南方科技大学环境科学与工程学院, 深圳 518000

摘要 为最大程度地发挥生态湿地的净化潜能, 缓解并改善水体质量。以深圳市定岗湖湿地公园为例, 通过不同河床糙率、阶梯水位等因素制定了 4 种补水方案, 基于有限体积法建立了包含水龄模块的二维水动力数学模型, 结合 3~5 m 的网格尺度对湖区开展了精细模拟, 对比分析了沉淀塘、砾石床、沉水塘和出水塘的水动力空间分布以及水体交换特性。结果表明, 在湖区高处的狭长水域开展生态补水措施, 在水动力上能提高水体的流动性与交换效果, 湖区 54.23% 的水动力得到明显提升, 较其他方案分别提升 22.9%、2.6%、1.7%; 在水龄上能使 84.79% 水域在 10 d 内完全更新一次, 远高于其他方案 73.66%、82.96%、84.55%。受限于出水塘的东部地形边界局部存在凹岸, 4 种生态补水措施形成的滞留区占比分别为 0.84%、0.80%、0.79% 和 0.78%。研究成果不仅可为定岗湖水体流动特性及生态补水效果提供决策支持, 还可对城市景观设计以及环境保护提供科学指导。

关键词 二维水动力数学模型; 生态补水方案; 水龄; 数值模拟

随着工农业的快速发展, 城市区域的高密度建设给周边湖泊水质带来了负面影响。这一情况主要由汇水区内的排污^[1]、雨污水管网建设^[2] 以及生活工业区等污染活动所致。大量废水和污水的排放使得流域水体遭受污染, 进而降低了河流的自净能力^[3-4]。深圳市的定岗湖是茅洲河流域中的重要湖泊之一, 与周边水系如石岩渠、壘岗排洪渠、塘下沟、下涌等相连接, 直接关联着上寮河、排涝河片区的生态补水系统。为重建当地的生态环境, 政府进行定岗湖的清淤联通和生态化改造, 并计划在多个地点对湖区进行生态补水。因此, 迫切需要明确生态补水对定岗湖湿地水体水动力的影响, 并量化补水方案对水动力的作用效果。

目前, 研究城市湿地生态补水面临主要挑战: 一是精确定量补水需求; 二是设计高效补水路径。城市湿地依赖适当的水量补充, 以增进水域间的互联互通。通过“活水”的加入带动静止不动的“死水”, 将“死水”成功向“活水”转变, 提升区域水体流动交换的能力^[5]。自 1997 年开始, 南京的玄武湖实行生态补水政策, 补水的日均量逐年增加, 目前已达到 3.5×10^5 t, 但是尽管补水量增加, 近年来湖泊水质仍显著下降。这表明, 并非补水量的增多能直接改善水质状况, 反而水生态环境再次受到挑战^[6]。同时, YANG 等^[7] 也在研究中发现, 由于引水的水质存在季节性变化, 若补入大量水质较差的水体, 湖泊水质恶化的风险可能因此增大。此外, 补水管线设计在调整水体流场分配及促进水质提升方面起着关键作用^[8]。

数值模拟是研究湿地生态补水的水动力规律的典型方法^[9]。通过数值模拟可以快速准确地分析水流在生态补水过程中的流动特性。根据已有研究成果, 并结合国内实践经验, 张珮纶等^[10] 总结了湿地生态需水量的研究方法, 系统归纳出不同类型湿地的适宜生态补水方法, 并指明目前湿地生态补水机制存在的问题。提出了未来研究应关注湿地生态需水量、完整的补水方法体系和模式、不确定性分析以及多目标决策等方面。王志鹏^[11] 以三江平原挠力河湿地群为研究对象, 通过分析湿地退化过程和生态需水量, 提出 3 种湿地补水方案, 并通过模拟比较得出 4 月和 7 月份分期补水方案效果最佳。通过 FLUS 模型预测, 生态补水工程将对挠力河湿地的沼泽和水域面积有显著增加, 耕地面积减少, 对湿地生态恢复和演化具有积极影响。丁磊等^[12] 以挠力河湿地群为对象, 提出了 3 种湿地补水方案, 并比较得出 4 月和 7 月分期补水方案效果最佳。通过预测

收稿日期: 2024-05-06; 录用日期: 2024-06-06

基金项目: 深圳市科技计划项目可持续发展专项 (KCXFZ20201221173601003)

第一作者: 李正阳 (1999 年—), 男, 硕士研究生, E-mail: lzy19990521@gmail.com; ✉通信作者: 刘俊国 (1977 年—), 男, 博士, 教授, E-mail: junguo.liu@gmail.com

模拟,生态补水工程将增加湿地的沼泽和水域面积,减少耕地,对湿地生态恢复和演化具有积极影响。另有XU等^[13]研究者开发了一个创新的随机水资源分配优化模型,该模型旨在降低供水系统的总成本。通过与现行的供水方案进行比较,结果显示新模型能有效减少供水量,且足以支持湿地生态系统中植物的生长需求。耿植等^[14]通过多角度研究因缺水问题导致生态退化的汉石桥湿地,确定湿地最适水位及对应生态补水量,结合水动力模型模拟发现双路补水方案在改善水动力条件和保护湿地生态功能方面效果最佳,为提升汉石桥湿地生态补水效率提供了理论支撑。ALAFIFI等^[15]研发提出一款 Watershed Area of Suitable Habitat (WASH) 系统模型,旨在通过重新分配可用水资源,优化水库释放、水流和水分配,最大化生态系统栖息地质量,维持人类和农业用水需求平衡。研究将该模型应用于 Bear River 流域的犹他州部分,展示了有效增加栖息地质量、平衡人类和生态系统水使用的水资源分配方案,为未来水资源规划和生态系统的发展提供决策支持。孙博闻等^[16]研究分析了雄安新区白洋淀湿地的生态补水对水动力和水文连通性的影响。通过水动力模型和地统计学方法,发现白洋淀湿地水文连通性存在季节性变化和阈值效应,不同区域的最大连通距离和水流速度不同,且在汛期受到临界水深阈值的影响。研究结果指出改善关键节点的水动力条件有助于提升白洋淀水体交换能力和水文连通性。

尽管已有一定深入的生态湿地补水研究,但在具体复杂生态修复工程的补水线路设计以及城市微观尺度的水动力学研究等方面仍需要补充。因此,本研究针对定岗湖湿地公园独特的生态改造措施,在考虑不同种湿地的糙率、梯级水位等多方面因素,通过二维水动力数学模型并引入水龄模块模拟不同补水点位补水对定岗湖水动力与水体交换时间的影响,揭示定岗湖不同水域的动力状况和水体交换特性。本研究不仅能够为定岗湖未来的水体补给和管理策略制定提供理论依据,还能够帮助管理者结合多方面因素,制定出合理的调度方案,为进一步理解污染物在水体中传播和分布规律,实现定岗湖水质的改善和提升提供科学支撑。同时本研究也可对其他类似的中小型人工生态湖泊水动力水质研究时的模型参数设置、低流量非汛期补给时水动力水体交换空间分布规律提供一定的参考价值。

1 研究区概述

1.1 研究区范围及现状

定岗湖位于深圳市宝安区(22°57' N, 113°39' E)沙井街道,改造前总面积约 6 hm²,其包括五个独立湖体,大湖面积约 5 hm²,水深约 3~4.5 m;四个小湖总面积约 1 hm²,水深约 1.5~2.5 m,水体容积 1.2~1.6×10⁵ m³,见图 1(a)。该湖区年平均气温为 23.7 ℃,年平均降水量为 3.88 mm,且多集中在 4~9 月,年平均水面蒸发量为 4.36 mm。定岗湖曾是一个通过改造天然堰塞湖而成的水库,是重要的抗旱设施。

根据规划设计,为优化定岗湖的水环境和生态系统,市政部门在最大程度保留原有植被和水系的基础上,对湖体进行清淤联通改造,卫星影像见图 1(b),联通概化图见图 2(a)。定岗湖联通后地势由南向北逐渐降低,并且在湖体上游改建了梯级湿地净化区,提高水质净化效率。其中包括沉淀塘 380 m²,生态砾石床 2 000 m²,以及总面积为 4 500 m²的沉水植物塘(其中沉水植物 4 000 m²,挺水植物 500 m²)。对于下游的大型水体,欲将其改造成集合沉水植物栖息、水生动物栖身、水鸟觅食于一体的浅滩人工湿地,营造一处富有亲水氛围的滨水空间。生态湿地分区见图 2(b)。

1.2 研究区进出水口分布

为优化湿地公园的生态调节作用,特别是湖体水质净化性能,规划与建设阶段需要深入了解湖泊区域的水动力学及水体交换特性。这不仅利于工程方案的科学制定,还助于生态补水策略的比选和完善,确保湿地公园的水域连通性和补水路径的合理性。



(a) 定岗湖改造前卫星图

(b) 定岗湖改造后卫星图

图 1 研究区域卫星影像

Fig. 1 Study area satellite images

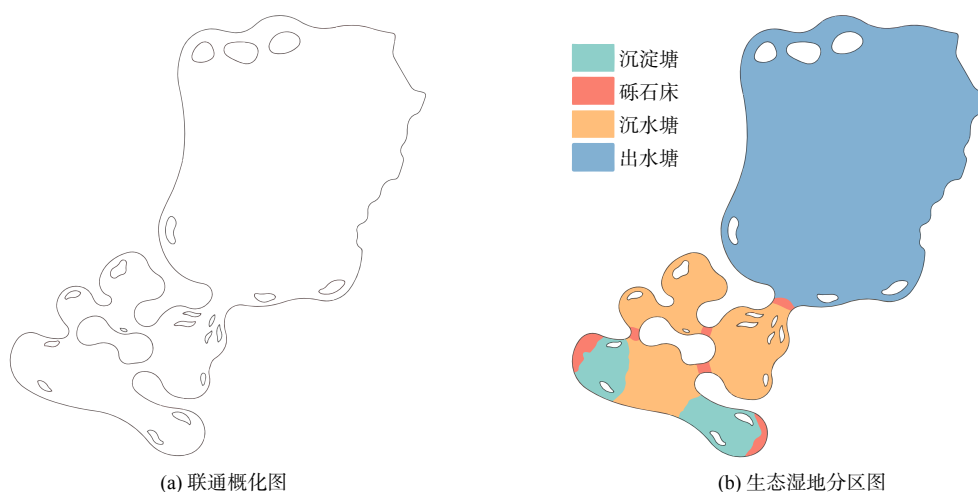


图2 联通概化图及生态湿地分区图

Fig. 2 Link generalized map and ecological wetland zoning map

本湿地公园受外部条件限制, 预计设置4个补水口, 分别为非汛期常规补水口, 二号沉淀池及弃流井补水口, 三号沉淀池及弃流井补水口, 林草场地雨水汇流补水口; 设置3个出水口, 分别为排洪渠溢流出水口, 塘下沟下涌出水口以及石岩渠水泵提水出水口。由于湿地公园内周边水系联通状况复杂, 从地形地势、生态净化以及经济成本等多方面考虑, 补排水点位设置相对固定, 补水点位均处于阶梯湿地所在的上中游, 其中上游依次从西向东选取较宽广水域点位II、偏中间段的两湖联通水域点位III以及东部狭长水域点位IV。排水点位位于地势较低的出水塘, 以最经济方式与定岗湖下游的排洪渠、塘下沟下涌以及石岩渠进行联通。具体位置见图3。

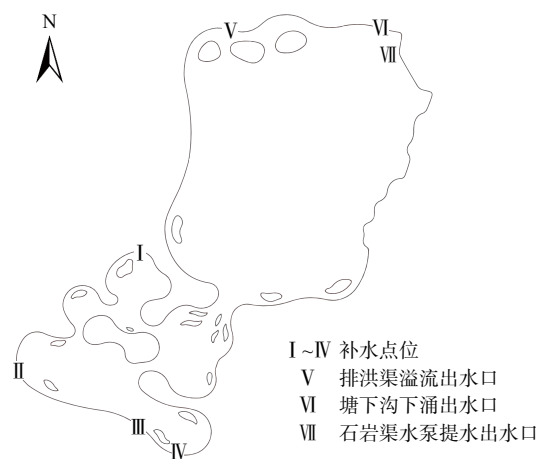


图3 研究点分布示意图

Fig. 3 distribution diagram of research points

2 水动力模型构建

2.1 模型原理

本研究通过应用二维非稳态浅水流动方程, 并结合有限体积法对该方程组进行数值模拟, 研究了湖泊水域的流动情况, 并借助水龄模块评估湖泊水体的交换能力。构建的水动力学模型是在三维不可压缩流动的框架下, 结合雷诺数分布均匀的假设, 采用 Navier-Stokes 方程进行描述, 该模型同时遵循 Boussinesq 近似和静水压力假设。水动力控制方程组^[17] (Navier—Stokes 方程) 如式 (1)、(2)、(3) 所示。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = \bar{f}vh - gh\frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{g}{2}\frac{h^2}{\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial x} + A_x + hu_sS \quad (2)$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} = -\bar{f}uh - gh\frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial P_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial y} + A_y + hv_sS \quad (3)$$

式中: t 为时间; x, y 为笛卡尔坐标; η 为水位; d 为静止水深; $h=d+\eta$ 水深, 为总水深; u, v 分别为 x, y 方向上的速度分量; $f=2\omega\sin\psi$, 为 Coriolis 系数, ω 为地球自转角速度, ψ 为当地纬度; P_a 为水压力; g 为重力加速度; ρ 为水密度; A_x, A_y 为应力分项; S 为源项; u_s, v_s 为源项水流流速。

上划线字母代表平均值。如, $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 是沿水深平均的流速, 由式 (4) 定义^[18]。

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz, h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad (4)$$

水体交换时间可以使用水龄来表征, 根据溶解性物质的平均水龄计算理论 (简称 CART 理论), 通过利用运输方程在数学建模的框架下, 对保持恒定的物质的相对浓度和加权水龄进行估计。本模型基于一个前提, 即追踪物质只通过河流的一个入口点进入, 并忽略了其他潜在的进出途径。

通过式 (5)、(6), 可计算得知保守物质的相对浓度和估算其加权水龄^[19]。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \left[\frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} \right] - K \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \left[\frac{\partial(u\alpha)}{\partial x} + \frac{\partial(v\alpha)}{\partial y} \right] - K \left(\frac{\partial^2 \alpha}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \alpha}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (6)$$

式中: C 表示保守物质的相对浓度; α 代表加权的水龄总和; K 指扩散系数。

平均水龄 a 可以表示为式 (7)。

$$a = \frac{\alpha}{C} \quad (7)$$

2.2 模型概化

本研究采用非结构化网格, 将定岗湖整体网格剖分节点 3 022 个, 网格 4 998 个, 由于定岗湖水域范围内, 湖心岛较多, 联通口断面较窄且弯曲复杂, 部分流通断面仅 4 m 宽, 因此需对各狭窄复杂地段网格进行局部加密, 见图 4。

采用水下地形资料对模型进行概化, 见图 5(a)。由于联通口处的生态砾石床对不同水域有拦蓄要求, 以此来保证生态湿地区域对水体污染物长时间的净化, 为保证模型准确度, 依据定岗湖各湖体的设计水位要求对此概化模型进行地形修正, 由见图 5(b)。

2.3 边界条件及主要参数

2.3.1 边界条件

1) 湖区各水体水位受设计水位控制, 分区 1、2、3、4、5 的初始水位分别设定为 7.0、6.8、

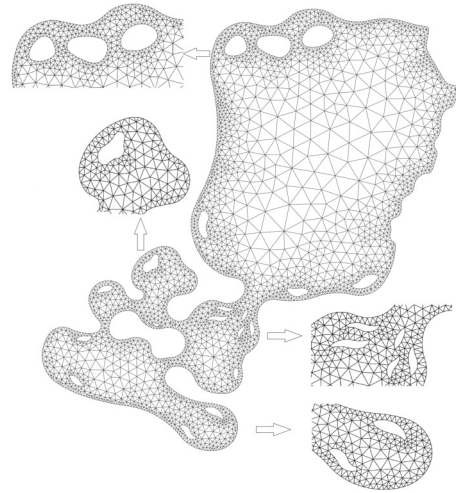


图4 研究区网格剖分

Fig. 4 Study area meshing

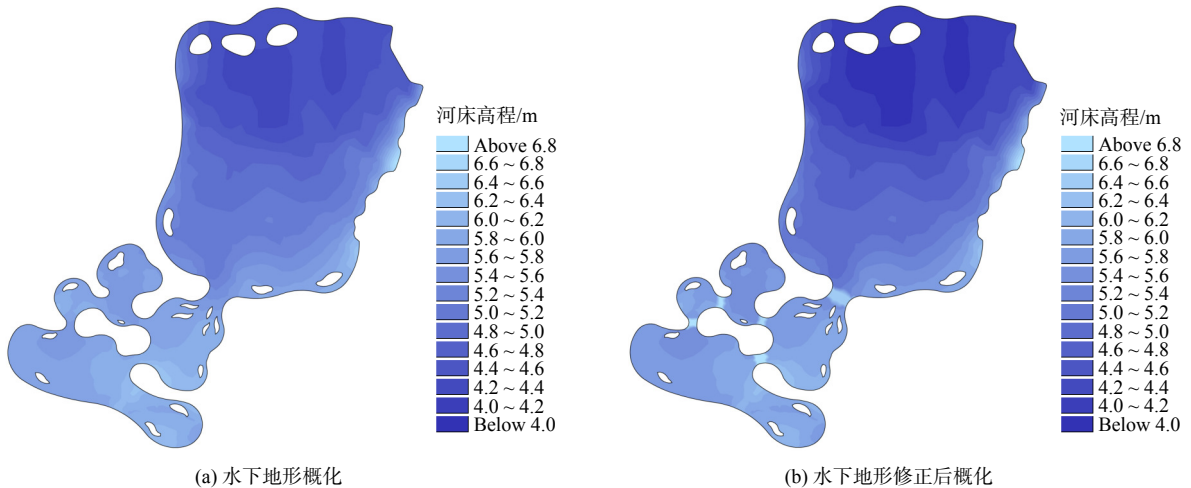


图5 研究区水下地形概化

Fig. 5 Generalization of the underwater topography of the study area

6.7、6.5 和 6.0 m, 具体见图 6, 保守物质相对浓度加权水龄初始值均设为 0。

2) 湖区非汛期常规生态补水拟从 I、II、III、IV 这 4 个补水点位引入, 目前, 为保障定岗湖对下游石岩渠、垦岗排洪渠、塘下沟下涌补水需求以及滞洪需求, 经水量平衡分析计算, 设计非汛期补水规模为 $6\,200\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。其他 3 项地雨水汇流补水口 (二号沉淀池及弃流井补水口, 三号沉淀池及弃流井补水口, 林草地雨水汇流补水口) 在确定非汛期补水口后, 将其与剩余补水点位以经济最佳方式联通至湖体。后三者补水口流量依据场地面积及研究时段实时降雨量计算得出。

3) 计算水体交换能力时, 定义下边界条件如下: 设定补充水源中一个稳定的物质相对浓度为 100, 并将其加权水龄积初始化为 0。同时, 对于其余开放界限处, 该种保守性物质的相对浓度以及其水龄的加权总和都被设定为 0。

2.3.2 主要参数

为捕捉水边线的动态变化, 本研究采用富裕水深法。该方法根据水位升降实时调整水边线位置, 以精确呈现其移动轨迹。将模型计算得到每个单元的水深数值, 根据计算水深把各个单元分成干单元、半干半湿单元和湿单元 3 种类型, 然后依据半干半湿单元分布情况来确定计算水体边界。当观察到单元的水深超出预设的富裕水深时, 该单元应被纳入计算范围, 即作为可计算的水域。反之, 如果水深未达到此标准, 则该单元将被排除在外, 不参与后续的水域分析计算。本研究设置干水深为 0.005 m, 淹没水深为 0.05 m, 湿水深为 0.1 m。

湿地区植物、碎石浅滩是影响湖泊水动力学的重要因素之一。植被和地形对水流具有显著阻滞作用, 在数值模型中考虑这一影响能更准确地模拟水动力过程。糙率是量化地表粗糙程度的重要参数, 不仅受底质粗糙度、河曲度和水位变化的影响, 还与植被分布、河床淤积和建筑物有关。对于简单河道, 糙率通常取 0.020~0.030; 多植被河床糙率约为 0.030~0.040; 弯曲河道含浅滩和植被时, 糙率在 0.034~0.050 之间。针对定岗湖梯级湿地的特点, 即人工调整后的湿地渠道形状规整, 但植被分布呈现差异性, 本研究依据自然环境中的糙率范围进行调整, 确保其既符合实际植被状态, 又贴近自然湿地的物理特性。模型中各分区糙率设置为: $M_{\text{沉淀塘}}=0.06\sim0.08$, $M_{\text{砾石床}}=0.13\sim0.17$, $M_{\text{沉水塘}}=0.08\sim0.10$, $M_{\text{出水塘}}=0.03\sim0.04$ (糙率分布图见图 7)

3 补水方案模拟

3.1 补水方案

为满足定岗湖生态湿地公园水体流通交换要求, 针对非汛期常规补水的点位设计拟定四种不同的工程分布方案。将日均 $6\,200\text{ m}^3$ 的补水分别设置到 I、II、III、IV 号点位, 通过观察四种方案同等流量不同点位补水效果, 对湖区水体的交换能力进行深入分析, 旨在识别理想的补水点以优化该区域的水动力状况, 进而提高整个湖区的水体循环效率。具体的补水策略如表 1 所示。

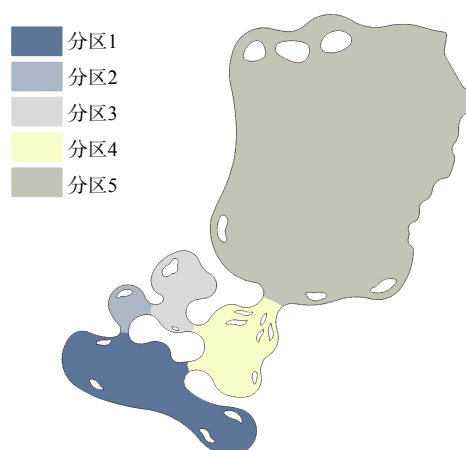


图 6 水域分区

Fig. 6 Zoning of waters

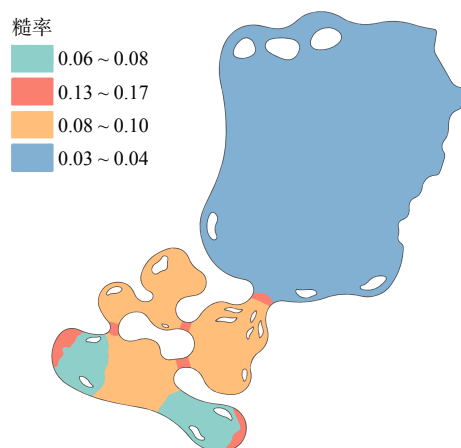


图 7 湖区各分区糙率设置

Fig. 7 Roughness settings for each sub-zone in the Lake District

从模拟结果分析,在各补水方案下,湖区的流速分布和湖体水交换周期呈现显著差异。

3.2 不同方案水动力对比分析

图8为在相同补水流量下不同补水点位对定岗湖整体水动力变化的模拟结果。表2为不同方案下不同流速分布面积占比比较结果。当补水量为 $6\,200\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 时:方案1从湖体中部区域I号点位进行补水,对分区3、4、5的水动力提升明显,其区域中心流速分别为 0.01 、 0.005 、 0.002

$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。整体湖区流速在 $0.002\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的面积占比为 19.43% ,但由于地势因从南向北的递减,导致分区1、2的水动力变化幅度极小。方案2在湖体南部左侧方的II号点位进行补水,对分区2、4、5的水动力提升明显,其区域中心流速分别为 0.05 、 0.006 、 $0.002\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,整体湖区流速在 $0.002\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的面积占比为 23.89% ,位于联通处的最高流速可达 $0.013\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。该补水点位对分区3的水动力提升一般,主要原因为主水流未通过其中心水域。补水对分区1东部的狭长水域提升效果较差,趋近于 $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,不利于分区1东部水体动力提升。

表1 补水点位方案

Table 1 Hydration point plan

方案	补水点位	补水流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$
1	位于I	6 200
2	位于II	
3	位于III	
4	位于IV	

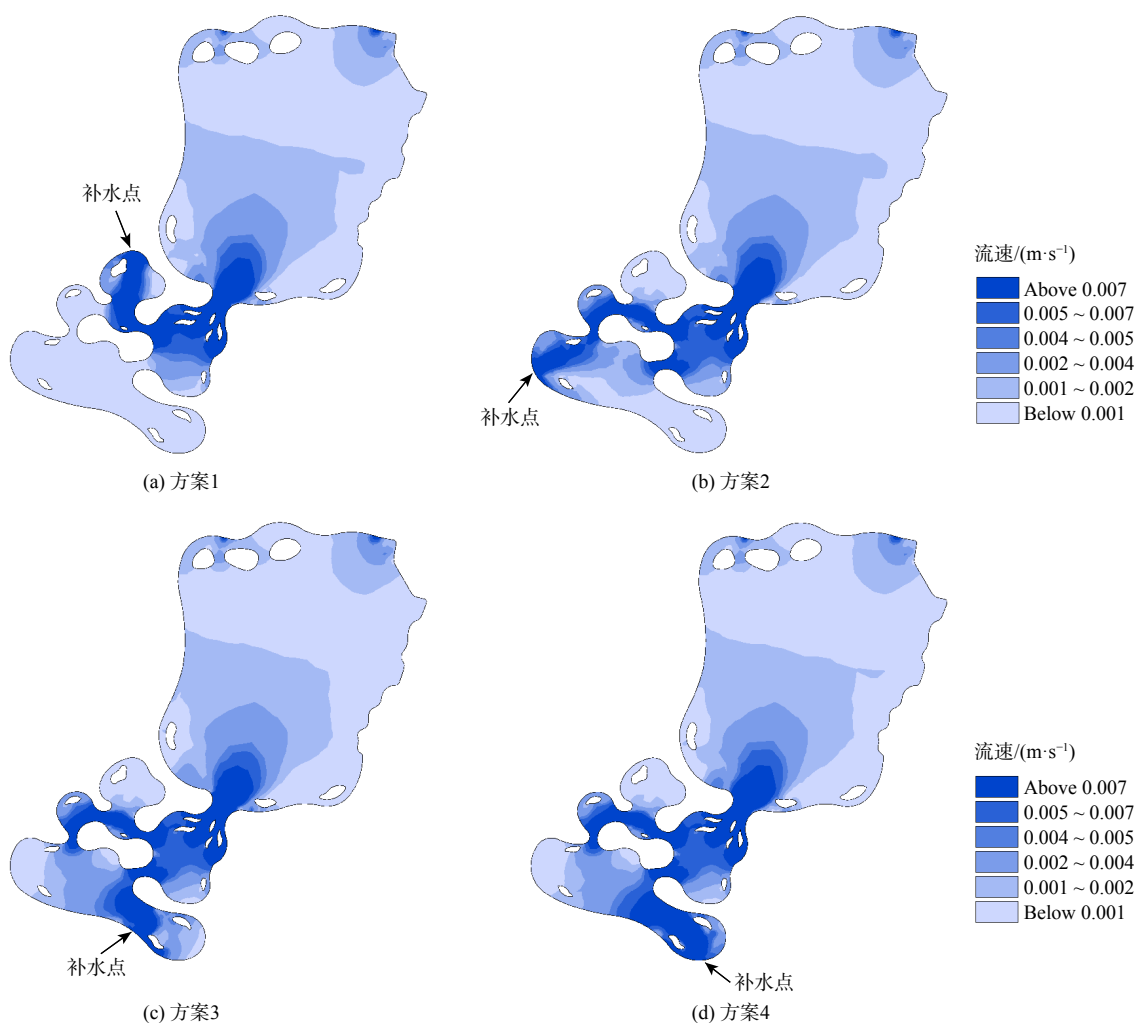


图8 不同方案流速分布

Fig. 8 Flow velocity distribution for different schemes

方案 3 和方案 4 的可视化模拟结果相对方案 1、方案 2 较好。方案 3 在湖体南部中侧偏右处 III 号点位进行补水, 对分区 1 东部水域水动力效果较方案 2 有较大提升, 同时也能兼顾分区 1 左侧大面域水体的流动, 使区域中心的流速提升至 $0.006 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 整体湖区流速在 $0.002 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的面积占比为 27.32%。通过对比, 补水点右侧的湖心岛对分区 1 水域东侧边缘水动力的提升有阻碍作用, 影响明显。方案 4 在方案 3 的基础上将补水点移至湖心岛的右侧区域, 即 IV 号补水点位, 既保证湖体整个水体的流动, 又提升了分区 1 南部区域右侧狭长水域的水动力, 使整体湖区流速在 $0.002 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的面积占比提升至 28.26%, 在

4 种方案中对水动力的提升最佳。为进一步表现不同方案水动力提升效果, 本研究将水动力较差的方案 1, 分别对方案 2、3、4 的流速进行了差值后处理, 对比后 3 者在方案 1 基础上水体流速的提升效果, 如图 9 所示。

由图 9 可见, 方案 2、3、4 较方案 1 水动力在分区 1、2 提升明显, 对分区 4、5 并无明显提升。后 3 者方案在分区 1、2 以及附近联通口处均有提升, 提升流速在 $0.004 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上。提升差异主要体现在对分区 1 的提升, 方案 2 对其西部的提升明显, 提升 $0.002 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的面积占分区 1 面积的 39.15%, 对中部、东部水域水动力改善效果差。方案 3 对中部水域提升明显, 提升 $0.002 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的面积占分区 1 面积的 60.48%, 对西部、东部水域水动力改善效果一般。方案 4 对东部狭长水域提升明显, 提升 $0.002 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的面积占分区 1 面积的 67.57%, 但是对西部水域水动力改善效果相对较差。从整体改善效果分析, 方案 4 对定岗湖水体水动力提升效果最佳。

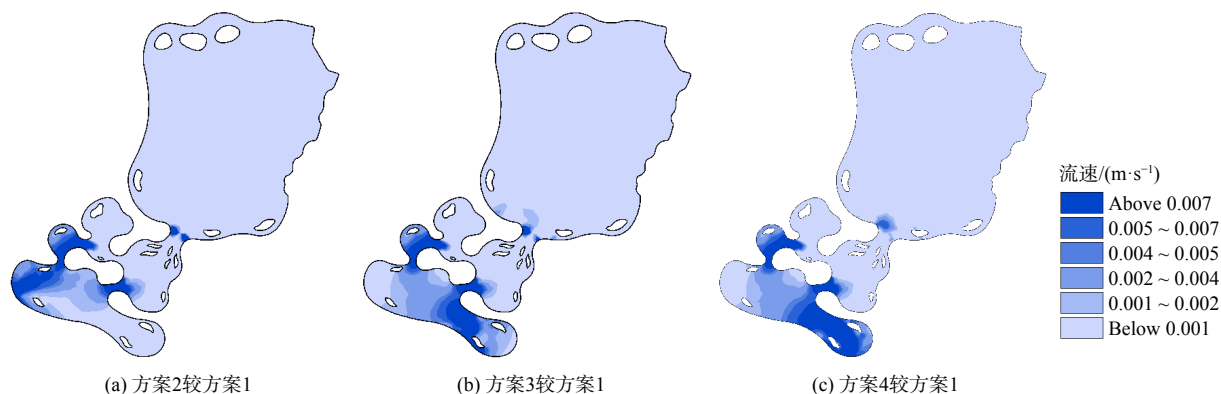


图 9 方案 2、3、4 较方案 1 流速提升

Fig. 9 The flow rate of schemes 2, 3 and 4 increased compared with scheme 1

3.3 不同方案水体交换能力对比分析

图 10 为在相同补水流量下不同补水点位补水对各水体交换时间的模拟结果。表 3 为不同方案下不同水体交换时间面积占比对比结果。在方案 1 中的 I 号点位进行补水, 定岗湖 10.65% 水体交换时间超 20 d, 主要集中在分区 1、2, 占分区面积高达 62.07%, 不利于上游湖泊水体的流通, 同时也不利于上游湿地对补水水质的净化和降解。下游分区 5 的水体交换能力与后 3 者方案差异不大。在方案 2、3、4 补水点位进行补水, 水体交换时间在分区 1 的表现明显优于方案 1, 体交换时间大面积缩减。在方案 2 补水点位进行补水, 超 20 d 的滞水水域面积占比为 2.12%, 因补水口位于分区 1 西部宽广水域, 受水流量限制, 并不能使东部的狭长水域水体良好交换, 存在部分滞留水域, 优于方案 1, 但不及方案 3、方案 4。方案 3、方案 4 点位相距较近, 从定岗湖整体看来对水体交换的能力差异不大, 超 20 d 的滞水水域面积占比分别为 1.5%、1.42%。

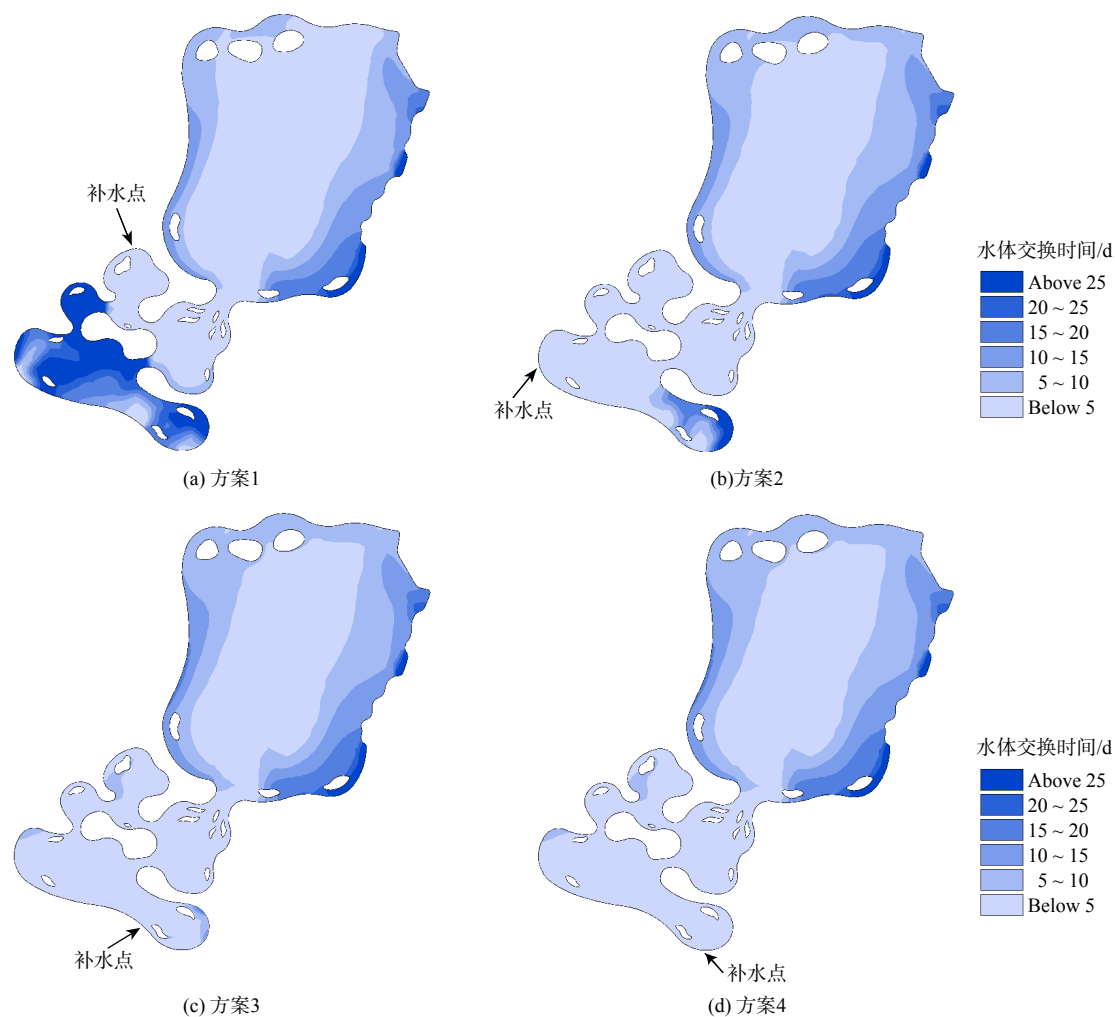


图 10 不同方案水体交换时间

Fig. 10 The time of the exchange of water bodies for different schemes

但由于受到分区 1 东部湖心岛影响，从局部的水体交换时间方面考虑，方案 3 在对其东部沿岸水体交换效率略逊于方案 4。综上，从水体交换时间角度，遵循方案 4 在Ⅳ号补水点位进行非汛期生态补水表现最佳。

综合考虑水动力改善效果以及水体交换时间模拟结果，方案 4 对湖体水动力的提升最佳，同时在水体交换能力表现方面最好，研究表明，实施方案 4 湖区 54.23% 水域的水动力得到明显提升，且湖区 84.79% 的水体在 10 d 之内可以更换一次，确定点位Ⅳ为四个补水点位中的最优补水点位。

确定最佳常规补水点位Ⅳ后，将入湖流量较小的林草场地雨水汇流的补水口以及二号、三号沉淀池及弃流井补水口以最优方式联通到湖体剩余的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ号点位。在其他点位选址上，需充分考虑入湖流量大小、补水口附近水域水动力条件等，将流量较大的补水设施优先接入水动力较弱水域，并采取经济合理的连通方式，以达到工程投资和运营成本的最优化。

表 3 各方案水体交换时间对比
Table 3 Comparison of water exchange times among different schemes

水体交换时间/ d	面积占比/%			
	方案1	方案2	方案3	方案4
≤5	56.08	60.83	60.23	61.44
(5,10]	17.58	22.13	24.32	23.35
(10,15]	9.78	10.72	10.13	10.09
(15,20]	5.91	4.21	3.7	3.67
(20,25]	3.11	0.79	0.66	0.64
>25	7.54	1.33	0.84	0.78

4 结论

1) 补水点位对定岗湖水动力的影响敏感度高。在非汛期常规补水流量下, 每种方案对定岗湖全域水动力提升效果明显, 对出水塘的水动力提升欠佳。其中, 实施方案4 (即补水位置放在点位IV) 补水效果最佳, 最大程度提高了水体流通性, 对定岗湖全域水动力的提升最好, 有54.23% 面域得到明显提升, 同时方案4 对高处水域的水动力提升效果最佳, 优于前3 者方案。

2) 水体交换时间受补水点位的影响明显。研究显示, 在非汛期常规补水流量下, 每种补水方案对定岗湖高处水体交换效率提升明显, 对出水塘的部分凹岸水体交换提升不足。当补水点位设置在IV处, 湖区各水域水体交换效率最高, 84.79% 的水域10 d内可完全更新1次水体, 且水域滞水区面积占比最低, 优于前3 者方案。

3) 从整体水动力改善效果、水资源利用水平、水体自净能力及控制调节水平等方面综合分析, 为改善出水塘水体流速过低的情况, 进行非汛期常规生态补水时, 建议在出水塘中北部安装曝气推流设备, 增强水流的流动性和促进水体间的有效交换, 以此改善水质并增强水体的自净能力, 同时建议对出水塘东部沿岸水域的水质进行长期监测监管。

参考文献

- [1] 高红杰, 袁鹏, 刘瑞霞. 我国城市黑臭水体综合整治: 问题分析、治理思路与措施[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(5): 691-695.
- [2] 游如玥, 敖天其, 朱虹, 等. 小安溪流域水环境污染综合评估[J]. 水力发电, 2020, 46(11): 6-10, 64.
- [3] 李咏红. 基于协同发展的北方湿地公园生态修复技术研究——以琉璃河湿地公园为例[J]. 水生生物学报, 2022, 46(10): 1535-1545.
- [4] 孙貽超, 邢妍, 孙静, 等. 国家水体污染控制与治理科技重大专项“天津滨海工业带废水污染控制与生态修复综合示范”项目的主要研究成果及其应用[J]. 环境工程学报, 2022, 16(7): 2111-2121.
- [5] 朱琪, 易维良, 张华. 城市湿地公园水系保护与利用的规划方法探讨——以永州市东部新城湿地公园为例[C]//2017中国城市规划年会. 中国广东东莞, 2017: 6.
- [6] 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.
- [7] YANG Y, ZHANG J, YAN W, et al. Impact assessment of water diversion project on urban aquatic ecological environment[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107496.
- [8] 陈晓静, 李昆朋, 李萍, 等. 秦淮区北部水系引补水方案模拟[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(2): 6-10, 22.
- [9] 吴普特, 高学睿, 卓拉, 等. 过程水文学的方法框架与学科体系探讨[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 1-7.
- [10] 张珮纶, 王浩, 雷晓辉, 等. 湿地生态补水研究综述[J]. 人民黄河, 2017, 39(9): 64-69.
- [11] 王志鹏. 三江平原挠力河湿地群生态补水研究[D]. 大连理工大学, 2022.
- [12] 丁磊, 陈黎明, 王逸飞, 等. 感潮河段城市湿地水动力模拟及改善方案研究[J]. 水利水运工程学报, 2024(1): 35-45.
- [13] XU Y, WANG Y, LI S, et al. Stochastic optimization model for water allocation on a watershed scale considering wetland's ecological water requirement[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 92: 330-341.
- [14] 耿植, 杜际增, 刘泓汐, 等. 基于水动力过程的城市小微湿地生态补水量与补水路径评估: 以北京汉石桥湿地为例[J]. 环境工程, 2023, 41(1): 51-60.
- [15] Alafifi A. Systems Modeling to Improve River, Riparian, and Wetland Habitat Quality and Area[J]. AGU Fall Meeting Abstracts, 2016, 2016: H53A-1670.
- [16] 孙博闻, 陈巍, 李娜, 等. 生态补水下白洋淀湿地水文连通特性研究[J]. 水利水电技术, 2022, 53(3): 134-144.
- [17] 戴雪, 杨桂山, 万荣荣, 等. 长江通过江湖水文水动力交互对其支流水域东洞庭湖的影响(英文)[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(8): 1072-1084.
- [18] 唐崇熙. 基于MIKE 21的白洋淀水动力与水质数值模拟研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2021.
- [19] 陈黎明, 陈炼钢, 李挺来, 等. 城市湿地公园生态补水调度方案对比分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 162-167, 174.

(责任编辑: 金曙光)

Analysis of hydrodynamic forces and water exchange characteristics in Dinggang Lake Wetland

LI Zhengyang¹, LIU Junguo^{1,2,3,*}, ZHANG Xiaolei^{1,2}, JU Junyan¹, HU Dongdong¹

1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

2. Key Laboratory of Hydrosphere and Watershed Water Security in Henan Province, Zhengzhou 450046, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518000, China

*Corresponding author, E-mail: junguo.liu@gmail.com

Abstract In order to maximize the purification potential of ecological wetlands and alleviate and improve water quality, this article took the Dinggang Lake Wetland Park in Shenzhen as an example. Four water replenishment schemes were developed based on factors such as different riverbed roughness and stepped water levels. A two-dimensional hydrodynamic mathematical model including a water age module was established based on the finite volume method, and a detailed simulation was conducted on the lake area with a grid scale of 3 to 5 m. The spatial distribution of hydrodynamic forces and water exchange characteristics of sedimentation ponds, gravel beds, submerged ponds, and outlet ponds were compared and analyzed. The results showed that ecological water replenishment measures in the narrow waters at the top of the lake area can improve the fluidity and exchange effect of water bodies in terms of hydrodynamic forces. The hydrodynamic forces of 54.23% of the lake area were significantly improved, with increases of 22.9%, 2.6%, and 1.7% compared to other schemes. In terms of water age, 84.79% of the waters can be completely renewed within 10 days, which is much higher than the other schemes of 73.66%, 82.96%, and 84.55%. Due to the local concave bank on the eastern terrain boundary of the outlet pond, the retention areas formed by the four ecological water replenishment measures accounted for 0.84%, 0.80%, 0.79%, and 0.78%, respectively. The research results can not only provide decision support for the flow characteristics and ecological water replenishment effects of Dinggang Lake, but also provide scientific guidance for urban landscape design and environmental protection.

Keywords 2D hydrodynamic mathematical model; ecological water replenishment scheme; water age; numerical simulation