

杨啸宇,王艳红,王逸飞,等.半封闭湖泊水体交换能力模拟及提升措施研究:以海棠湾龙江塘为例[J].水利水电技术(中英文),2026,57(2):20-31.DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.002

YANG Xiaoyu, WANG Yanhong, WANG Yifei, et al. Study on simulation and improvement measures of water exchange capacity in semi-enclosed lakes: A case study of Longjiang Pond in Haitang Bay [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(2): 20-31. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.002

半封闭湖泊水体交换能力模拟及提升措施研究: 以海棠湾龙江塘为例

杨啸宇,王艳红,王逸飞,缴健,丁磊

(南京水利科学研究院,江苏南京 210029)

摘要:【目的】半封闭湖泊的水体交换主要依赖于入湖河流,容易出现季节性、潮汐性缺水问题。在气候变化和人类活动的双重影响下,半封闭湖泊缺水问题日渐突出,进而引发水质恶化、生态退化等复杂问题,亟待通过有效方式加以改善。【方法】选取龙江塘作为研究对象,建立龙江塘二维水动力-水质数学模型,选取污染物相对浓度和水体半交换时间作为评价指标,对比了现状和水系连通工程建成后龙江塘内水体交换能力。【结果】结果表明:现状条件下,龙江塘污染物相对浓度和水体半交换时间均表现为从南向北递增的趋势,北湖区污染物相对浓度下降最慢,水体半交换时间基本在2周以上;南湖区污染物相对浓度下降最快,水体半交换时间基本在1周以内。连通工程建成后,污染物相对浓度和水体半交换时间变为西部区域大于东部区域,北湖区污染物相对浓度下降速度加快,尤其是靠近1#水系连通工程的东部区域,在计算第2天相对浓度降低至0.17;南湖区污染物相对浓度下降速度在前10天有所减缓,其中西部区域最为明显,水体半交换时间由6d延长至14d,在第20天后污染物相对浓度降低至0.2以内。【结论】研究表明:水系连通工程有助于加速半封闭湖泊污染物相对浓度下降速度,并有效缩短水体半交换时间,但会削弱原连接通道附近的水动力条件,本研究可为改善类似半封闭湖泊的水环境提供参考。

关键词: 半封闭湖泊; 水体交换能力; 水系连通工程; 数值模拟; 污染物相对浓度; 水体半交换时间

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.002

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: X171.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)02-0020-12



Study on simulation and improvement measures of water exchange capacity in semi-enclosed lakes: A case study of Longjiang Pond in Haitang Bay

YANG Xiaoyu, WANG Yanhong, WANG Yifei, JIAO Jian, DING Lei

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu, China)

Abstract [Objective] Water exchange in semi-enclosed lakes mainly relies on river inflows, making it prone to seasonal and

收稿日期: 2024-11-21; 修回日期: 2025-02-18; 录用日期: 2025-03-05; 网络出版日期: 2025-04-29

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3208500); 南京水科院基本科研业务费项目(Y223002)

作者简介: 杨啸宇(1998—),男,博士研究生,主要从事港口海岸及近海工程研究。E-mail: xyang1007@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

tidal water shortages. Under the combined influence of climate change and human activities, the issue of water scarcity in these lakes has become increasingly prominent, leading to complex problems such as water quality deterioration and ecological degradation, urgently requiring effective solutions. [Methods] Longjiang Pond was selected as the study area, and a two-dimensional hydrodynamic-water quality mathematical model of Longjiang Pond was established. Relative pollutant concentration and half time of water exchange were taken as evaluation indicators to compare the water exchange capacity of Longjiang Pond before and after the completion of the water system connectivity project. [Results] The result showed that under current conditions, both relative pollutant concentration and half time of water exchange in Longjiang Pond exhibited an increasing trend from south to north. In the northern lake area, the pollutant concentration decreased the slowest, with the half time of water exchange generally exceeding 2 weeks. In contrast, the southern lake area experienced the fastest decline in pollutant concentration, with the half time of water exchange generally within one week. After the implementation of the water system connectivity project, both the relative pollutant concentration and the half time of water exchange became higher in the western region than in the eastern region. The pollutant concentration in the northern lake area declined more rapidly, especially in the eastern region near Water System Connectivity Project No. 1, where the relative concentration decreased to 0.17 on the second day of simulation. In the southern lake area, the decline in pollutant concentration slowed during the first 10 days, especially in the western area, where the half time of water exchange increased from 6 to 14 days. After 20 days, the relative pollutant concentration decreased to below 0.2. [Conclusion] The findings demonstrate that the water system connectivity project helps accelerate the reduction in relative pollutant concentration and effectively shorten the half time of water exchange in semi-enclosed lakes. However, it weakens the hydrodynamic conditions near the original connecting channels. These findings can provide a practical reference for improving the water environment of similar semi-enclosed lakes.

Keywords: semi-enclosed lake; water exchange capacity; water system connectivity project; numerical simulation; relative pollutant concentration; half time of water exchange

0 引言

湖泊是陆地水循环的重要组成部分^[1], 具有水源提供、气候调节、生物多样性保护等多种功能^[2-4]。按照湖泊出入流的情况, 可将中小型湖泊分为半封闭和封闭湖泊, 半封闭湖泊存在与外部水系的水体交换, 当汇入支流较小时, 易出现季节性缺水的问题。如果半封闭湖泊与感潮河段相通, 当汇入支流的天然潮汐动力较弱时, 还会引起潮汐性缺水的问题^[5]。在气候变化和人类活动的双重影响下, 半封闭湖泊缺水问题日渐突出, 进而引发水质恶化、生态退化等复杂问题, 亟待通过有效方式加以改善。

水体交换能力是影响半封闭湖泊生态系统健康的重要因素^[6]。数值模拟是评估水体交换能力的典型方法^[7-9], 已有众多学者针对大型湖泊、湿地等开放性区域的水体交换能力进行研究。LONG 等^[10]采用 EFDC 模型模拟了三峡工程建成前后洞庭湖水龄的空间、时间尺度变化特征, 发现洞庭湖春、夏季的水龄小于秋、冬季, 三峡工程间接影响了洞庭湖水龄分布, 为其他大型浅水湖泊的水体交换研究提供参考。方青青等^[11]采用 EFDC 模型模拟了大型调水工程实施后湖泊水体交换能力变化特征, 提出调水工程的实施在年尺度上增强了湖泊水体交换能力。陈黎

明等^[12]在水动力模型中引入水龄计算模块, 明确了不同补水工程下湿地公园内部湖区水体交换特性。丁磊等^[13]模拟了现状和不同闸、泵调控措施下江滩湿地的水体交换能力, 发现建闸延长了各区域换水周期, 补水泵站缩短了大部分区域的换水周期。针对半封闭区域, 当前研究大多围绕半封闭海湾和潟湖的水体交换能力展开。CHEN 等^[14]模拟了疏浚河道和升级闸门两项工程措施下柘林湾的水动力和水质情况, 发现工程措施有助于降低半封闭海湾的半交换时间, 提高水体交换量达 15%。FU 等^[15]分析了冬季潮汐对半封闭海湾的水体交换影响, 为半封闭海湾未来的水质管理提供参考。JEYAR 等^[16]采用对流扩散模型对比研究了摩洛哥 Nador 潟湖在不同潮汐动力下的水体交换效率。目前针对半封闭湖泊的水体交换能力研究较少, 半封闭湖泊中污染物空间、时间分布特征等尚不明晰。

水系连通工程是改善水体流动性和优化水环境的有效工程措施^[17-19], 河湖水系连通是指采取一系列人工或自然措施连通水系, 在河道之间建立水力联系, 通过以动制静、以清释污, 达到促进水流畅通、提高湖泊自净能力和改善水质的目的, 对于增强水资源承载能力、推动水资源的可持续利用、提高生态文明水平具有重要意义^[20]。当前的水系连通工程效果

研究多聚焦于大型湖泊的水体净化效率, 柳恒等^[21]基于连通性指标对洞庭湖区典型水系连通工程进行优化, 分析得到优化后水动力条件、换水效率均有提高。陈叶华等^[22]基于岳阳城区芭蕉湖-南湖连通工程方案, 发现水系连通使得湖泊水体自循环能力提高, 水体自净化速度加快。孙静月等^[23]模拟分析了连通工程下汤逊湖的流场以及水质浓度空间分布, 提出水网连通方案下湖区水体的置换效率更高。此外, 也有学者围绕水系连通工程对城市河道的水环境影响展开研究, ZHANG 等^[24]从水动力、水质、生态效应三方面分析了城市水系连通工程对水环境的影响, 提出水系连通工程增强了河道水体交换能力, 对未来研究区域内水环境的发展具有指导意义。王少波等^[25]探讨了河湖水系连通对城市河道生态修复水动力的作用效果, 结果表明水系连通可显著改善河道水质。目前针对水系连通工程的水环境提升研究成果较为丰富, 但围绕水系连通工程作用下半封闭湖泊的水体交换能力提升研究较少, 水系连通工程对半封闭湖泊水体交换特性的改善效果有待进一步明确。因此, 有必要采用数值模拟等手段, 揭示半封闭湖泊的水体交换特性, 明确水系连通工程作用下半封闭湖泊水体交换能力提升效果。

本文以海棠湾龙江塘为研究对象, 建立了龙江塘二维水动力-水质数学模型, 选取污染物相对浓度和

水体半交换时间作为评价指标, 对比了现状和水系连通工程建成后龙江塘内水体交换能力。研究成果为龙江塘水系连通工程合理实施提供科学依据, 也为半封闭湖泊水体交换特性及水环境改善措施研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域

海棠湾位于海南省三亚市东北部海滨, 定位为“国家海岸”, 以生态资源保护和利用为出发点, 建设世界级的高端旅游休闲度假区。龙江塘位于海棠湾龙江河中部片区, 仅南端与龙江河支流连通, 属于典型的半封闭湖泊(见图 1)。

龙江塘所在区域属于弱潮区, 内部水体主要依靠龙江河藤桥河口及铁炉港口与外海水体进行交换, 上游由海棠湾 1[#] 泵闸对水位进行调控。目前龙江塘与龙江河间的水循环能力较弱, 龙江塘自净能力已呈现出逐渐退化的趋势^[26], 严重影响海棠湾的生态环境健康。针对龙江塘的水环境恶化问题, 现规划开挖 1[#]、2[#] 两个水系连通工程, 从龙江河引水至龙江塘, 以增强龙江塘水体交换能力。

1.2 模型构建

本研究采用 MIKE 21 对龙江塘水体交换进行研究, MIKE 21 可以有效地应用于河口和潮汐河网等

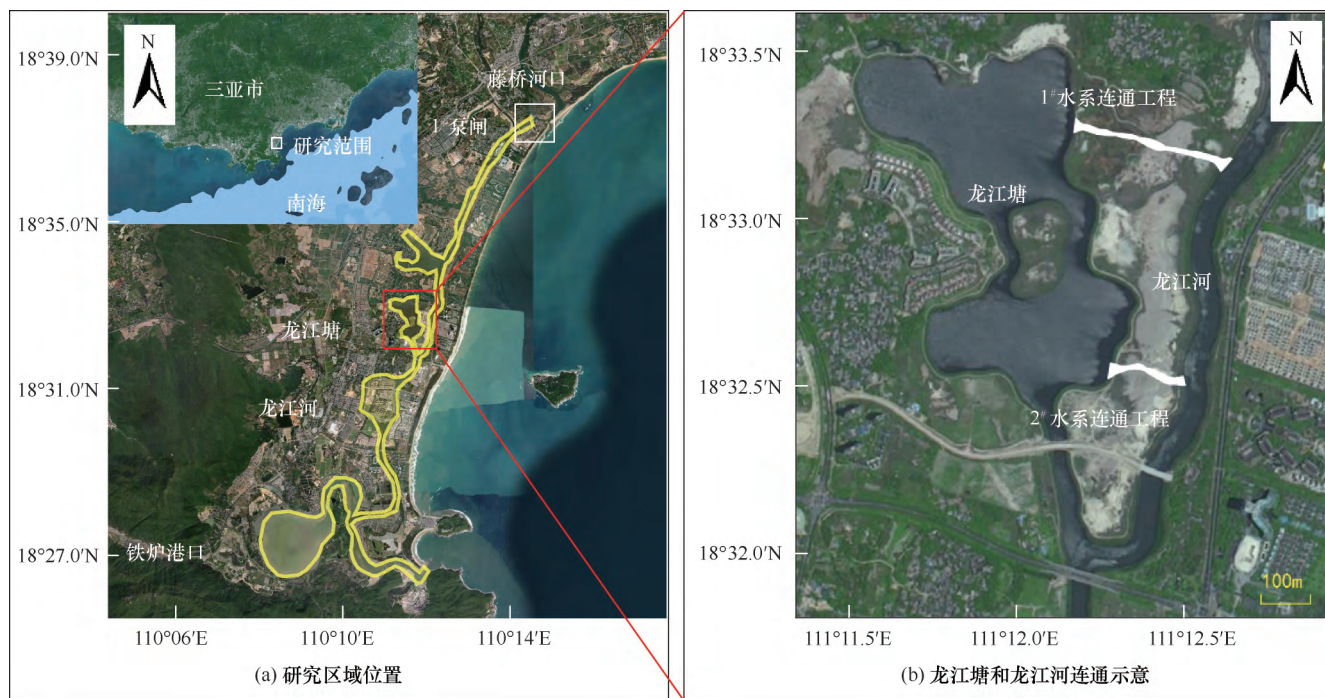


图 1 研究区域位置

Fig. 1 Location of the study area

复杂水域研究^[27-28]。应用二维非恒定流浅水方程组, 采用有限体积法及黎曼近似解对方程组进行数值求解, 模拟计算龙江塘内污染物输移和水体交换时间。

1.2.1 模型原理

二维浅水方程和对流-扩散方程的守恒形式为

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + gh^2/2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = gh(s_{0x} - s_{fx}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2 + gh^2/2)}{\partial y} = gh(s_{0y} - s_{fy}) \quad (3)$$

式中, h 为水深(m); t 为时间(s); u 、 v 分别为 x 、 y 方向垂线平均水平流速分量(m/s); g 为重力加速度(m^2/s); S_{0x} 、 S_{fx} 分别为 x 向的水底底坡、摩阻坡度; S_{0y} 、 S_{fy} 分别为 y 向的水底底坡、摩阻坡度。

污染物扩散应用二维对流-扩散方程描述。方程式如下

$$\frac{\partial(hC_i)}{\partial t} + \frac{\partial(huC_i)}{\partial x} + \frac{\partial(hvC_i)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x h \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y h \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + S_i \quad (4)$$

式中, C_i 为污染物的平均浓度(mg/L); S_i 为各污染物源汇项(包括各种污染物的降解、转化、底泥释放等) [$mg/(L \cdot s)$]; D_x 、 D_y 分别为 x 向、 y 向的扩散系数(m^2/s)。

1.2.2 模型概化

模型北边界为龙江河与外海交界处的三亚海棠湾1#泵闸下游, 南边界为铁路港口。采用三角形网格对计算区域进行划分: 网格尺寸在10~100m之间, 共计8821个节点, 14926个网格单元, 其中最大网格面积约6000m², 最小网格面积约0.2m²; 工程前将连通工程段网格封闭。为精准刻画龙江塘内水体交换分布, 针对龙江塘工程区域进行局部加密, 平均网格大小约为6.5m², 加密后的网格可以很好地反映出工程后通道内的高程变化(见图2、图3)。

1.2.3 边界条件及主要参数

初始条件: 初始水位按常水位控制, 初始流速为0; 保守污染物相对浓度龙江塘内初始值为1, 其他区域为0。

水力边界条件: 由于研究区域南北边界位置无可用水文站或潮位站为模型提供边界条件, 本研究利用调和分析^[29]计算得到模型南北边界位置连续潮位过程作为边界条件(见图4)。

水质边界条件: 边界保守污染物相对浓度为0。模型主要参数与文献[26]相同。

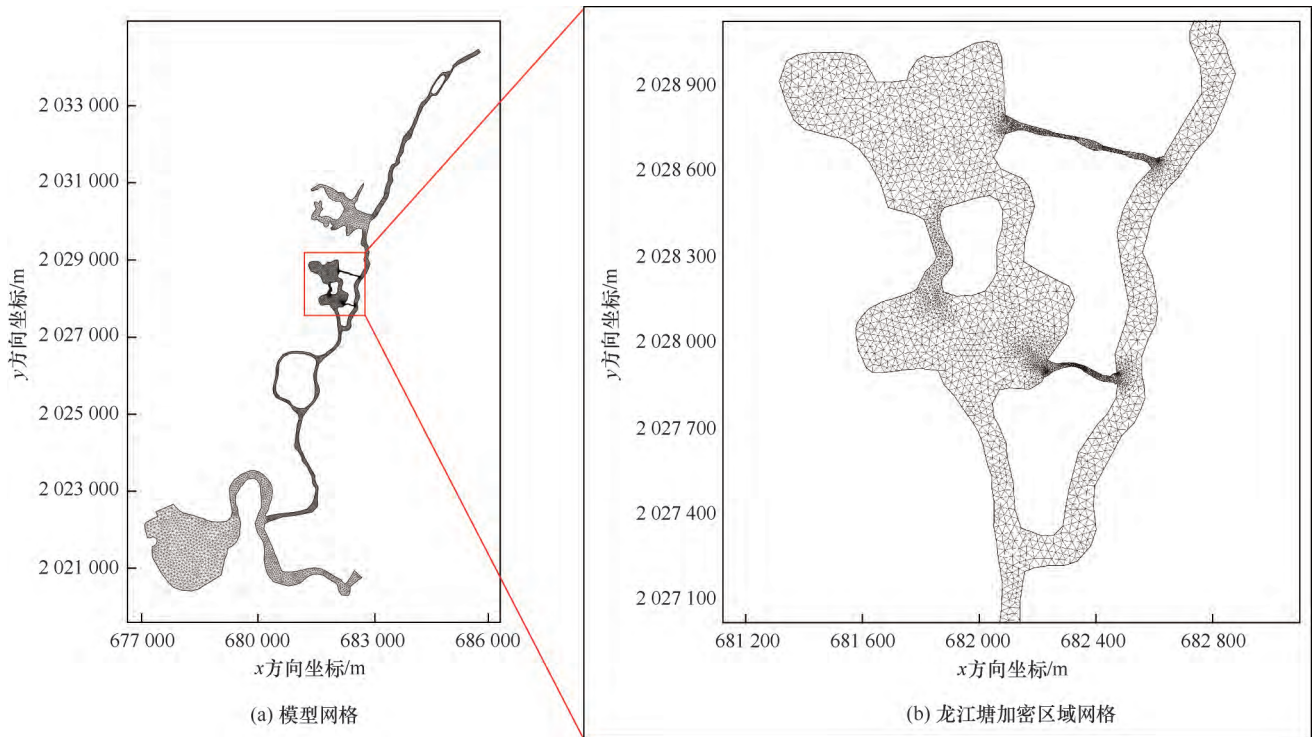


图2 模型网格
Fig.2 Model mesh

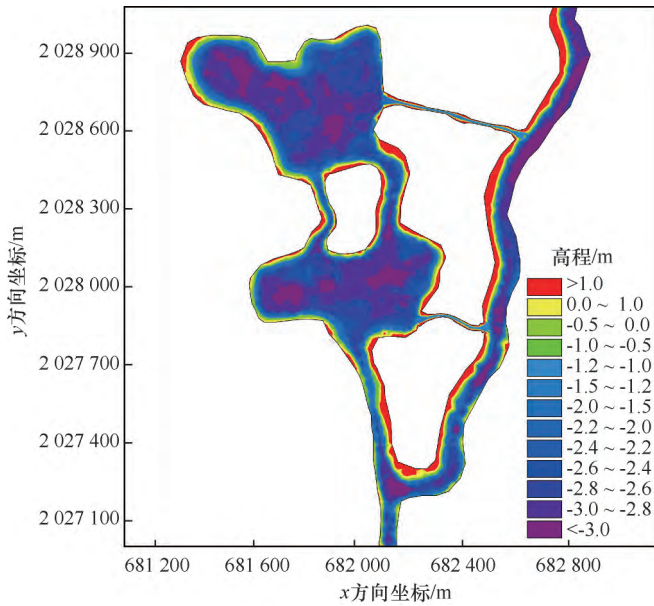


图3 研究区域地形

Fig. 3 Topography of the study area

1.2.4 计算工况

共设置4组计算方案(见表1),以研究不同水文条件下连通工程建设对龙江塘内水体交换能力的影响。考虑龙江塘内充满相对浓度为1的保守污染物,连续计算30d,分别针对现状条件(以下简称工程前)、水系连通工程完成后(以下简称工程后)龙

江塘在雨季、旱季的污染物相对浓度变化过程和水体交换特征进行模拟。为方便统计分析,将湖区分为北湖区、南湖区、东通道和西通道,其中北湖区和南湖区再分为西部、中部和东部区域,在上述8个区域中各设置1个观测点(见图5)。

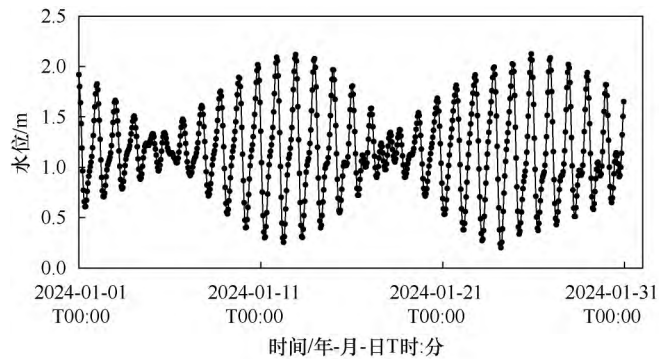
2 结果与分析

2.1 现状水体交换模拟

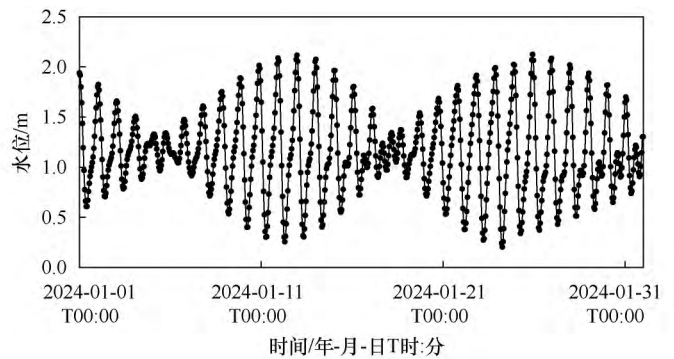
2.1.1 污染物相对浓度变化过程

龙江河潮汐为非正规日潮混合型,潮动力较弱。龙江塘仅南侧与龙江河相连,无其他河流注入,水体交换能力主要受龙江河天然潮汐动力影响。工程前在雨季、旱季污染物传播30d后的相对浓度分布如图6所示,从浓度分布图可以看出,除南湖区外,旱季污染物相对浓度整体大于雨季,南湖区污染物相对浓度在30d后基本降至0.1以下;东、西通道污染物相对浓度在0.1~0.3左右,雨季略高于旱季;北湖区污染物相对浓度基本高于0.3,旱季北湖区西部区域相对浓度达到0.9以上,雨季略低于旱季,但也达到0.7以上。

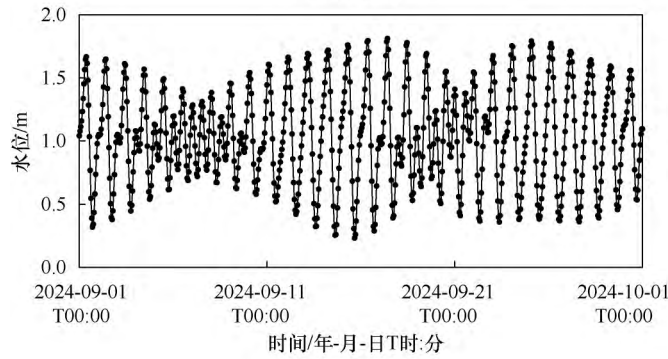
提取雨季各区域观测点的污染物相对浓度逐时过程(见图7),并统计各观测点的日平均值(见表2)。北湖区污染物相对浓度下降整体较慢,其中西部区域



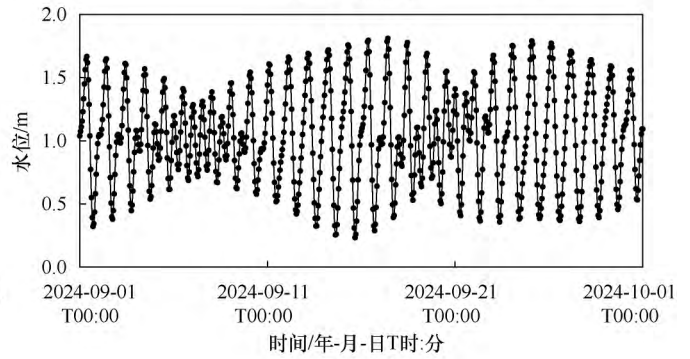
(a) 旱季北边界



(b) 旱季南边界



(c) 雨季北边界



(d) 雨季南边界

图4 龙江河潮位过程

Fig. 4 Tidal process of Longjiang River

表 1 计算方案

Table 1 Calculation schemes

计算方案	边界条件		降雨量/mm · d ⁻¹	工程情况	闸门调度模式
	北边界条件	南边界条件			
方案一	2024 年 9 月潮位过程(雨季)	2024 年 9 月潮位过程(雨季)	10.99	工程前	涨潮开闸 落潮关闸
方案二	2024 年 1 月潮位过程(旱季)	2024 年 1 月潮位过程(旱季)	0.21	工程前	
方案三	2024 年 9 月潮位过程(雨季)	2024 年 9 月潮位过程(雨季)	10.99	工程后	
方案四	2024 年 1 月潮位过程(旱季)	2024 年 1 月潮位过程(旱季)	0.21	工程后	

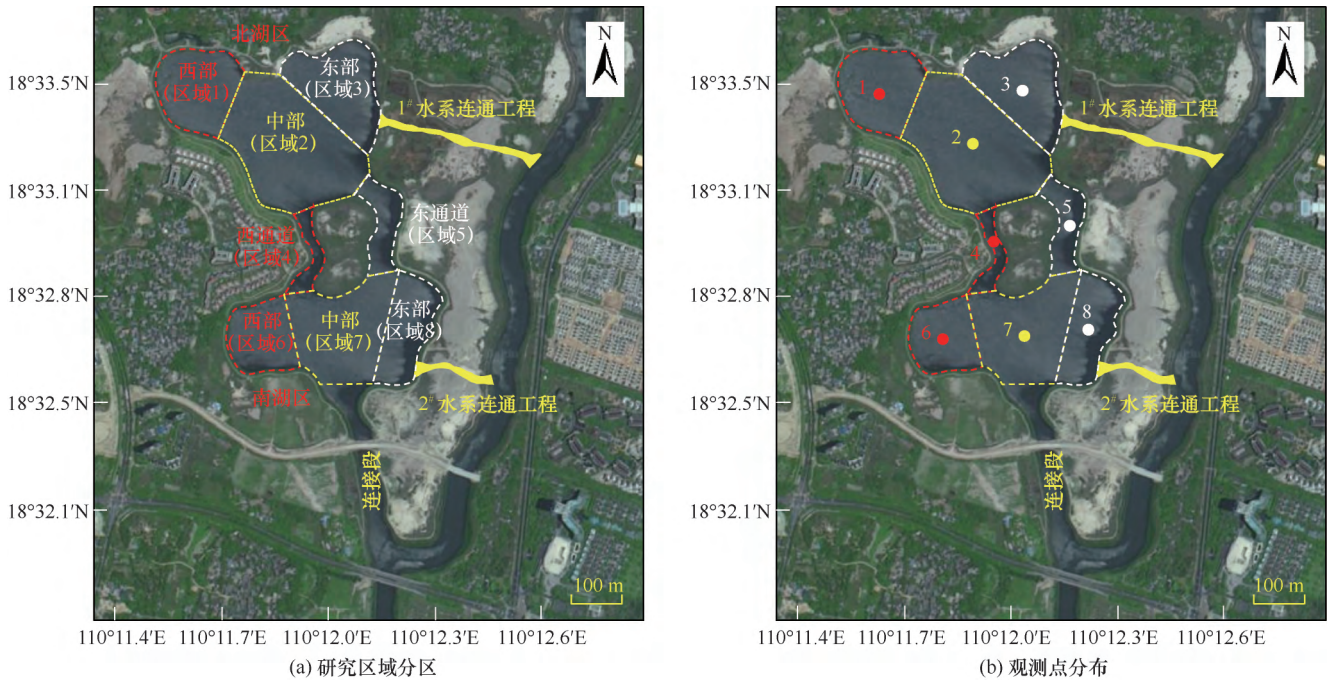


图 5 研究区域分区及观测点分布

Fig. 5 Zoning of the study area and distribution of observation points

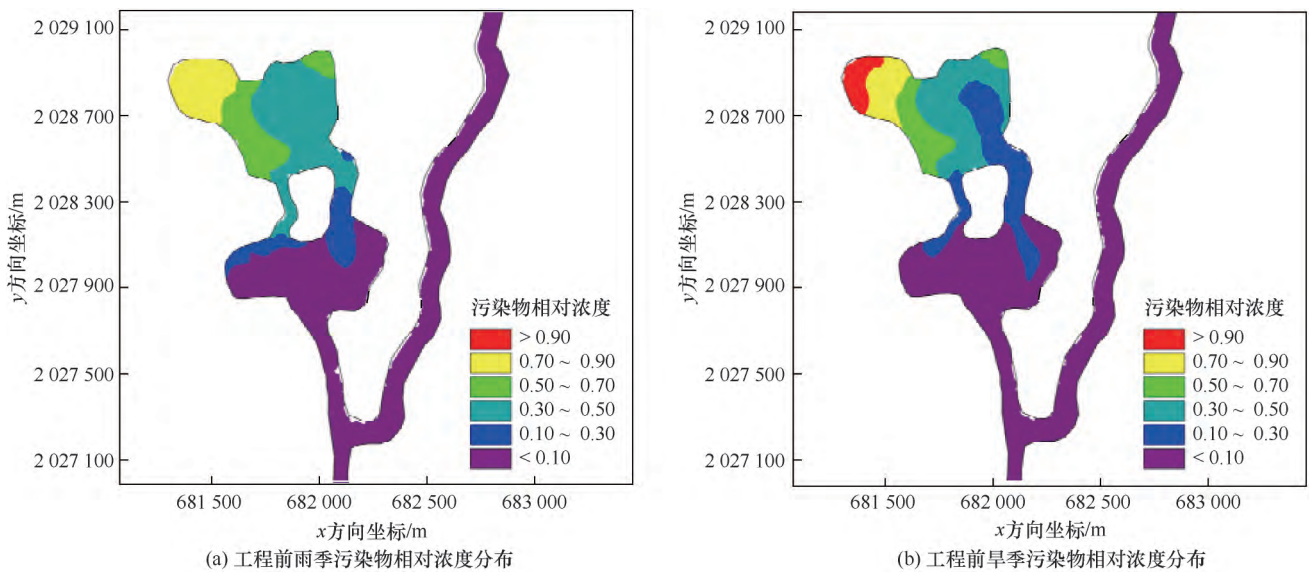


图 6 工程前污染物相对浓度分布

Fig. 6 Distribution of relative pollutant concentration before project

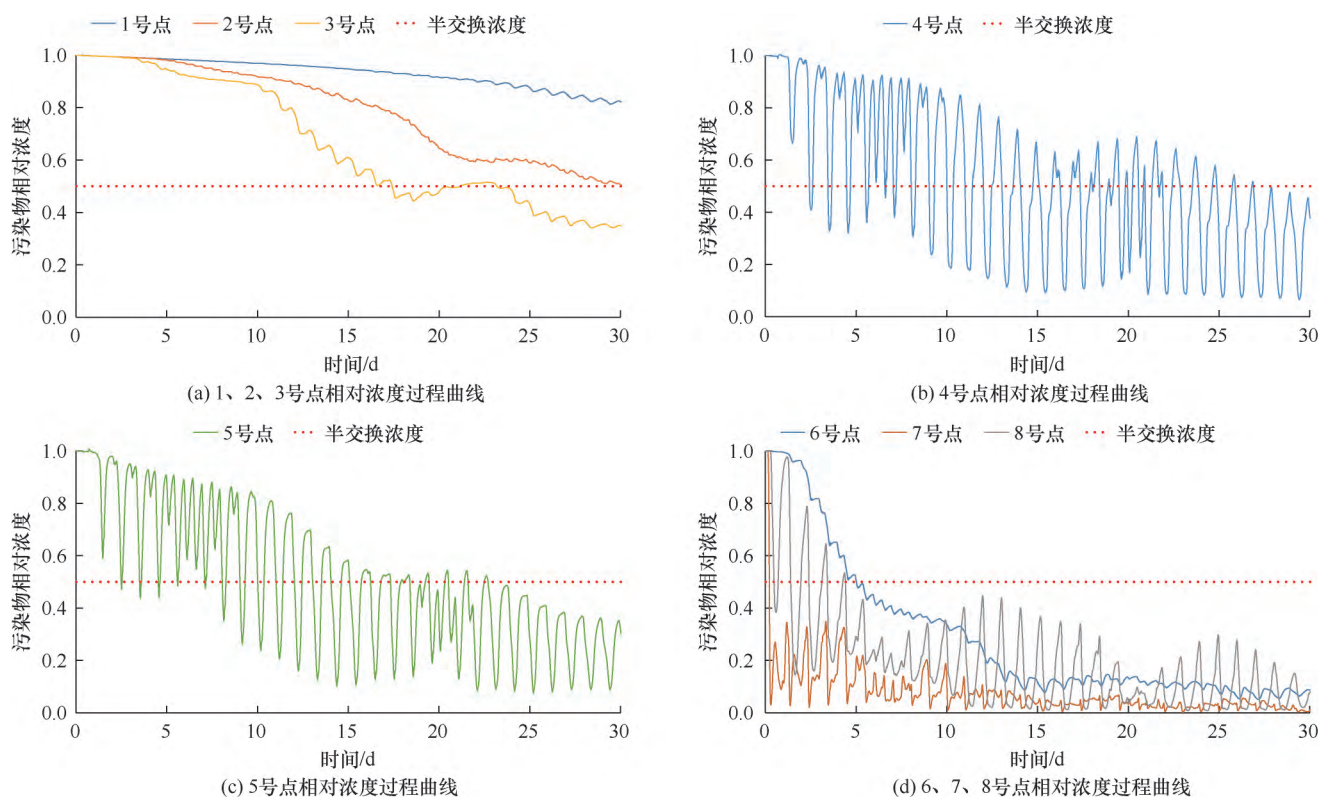


图 7 工程前雨季污染物相对浓度过程曲线(逐时值)

Fig. 7 Process curves of relative pollutant concentration before project during wet season (hourly values)

表 2 工程前雨季污染物相对浓度(日均值)

Table 2 Relative pollutant concentration before project during wet season (daily average values)

计算天数/d	北湖区			西通道	东通道	南湖区		
	1号点	2号点	3号点	4号点	5号点	6号点	7号点	8号点
5	0.99	0.98	0.96	0.74	0.78	0.55	0.18	0.34
10	0.97	0.92	0.89	0.63	0.64	0.35	0.09	0.21
15	0.95	0.84	0.61	0.38	0.40	0.12	0.04	0.13
20	0.92	0.67	0.47	0.44	0.40	0.12	0.05	0.10
25	0.88	0.60	0.44	0.35	0.32	0.10	0.03	0.10
30	0.82	0.51	0.35	0.28	0.23	0.08	0.01	0.07

(1号点)在30 d后污染物相对浓度仍达到0.82;中部(2号点)和东部区域(3号点)在30 d时污染物相对浓度分别降至0.51和0.35。西通道(4号点)和东通道(5号点)总体呈波动下降趋势,污染物相对浓度随潮汐周期性涨落变化明显,30 d时相对浓度分别为0.28和0.23。南湖区污染物相对浓度下降速度较快,其中中部区域(7号点)下降速度最快,基本1 d内就降至原浓度的一半,10 d后污染物相对浓度下降至0.1以下;西部区域(6号点)和东部区域(8号点)污染物相对浓度随潮汐周期性涨落变化明显,在30天时相对浓度均降至0.1以下。

2.1.2 水体半交换时间

目前可量化水体交换能力的指标有:自净速率、

半交换时间、停留时间等^[15,30]。针对湖泊的水体交换能力,目前尚无规范推荐的指标及计算方法。本研究采用《海湾水交换能力评价技术规程》(GB/T 42417—2023)中推荐半交换时间量化分析水体交换能力^[31]。因研究区域受潮汐影响,污染物浓度在一天内存在周期性波动,故采用污染物浓度的日平均值变化确定半交换时间。通过平均半交换时间表征龙江塘整体的自净能力,通过对不同区域取代表点的方法,分析龙江塘内部水体自净能力的分布特点。

根据污染物相对浓度下降过程(见图7),计算出工程前湖区8个观测点的半交换时间。雨季和旱季水体半交换时间特征基本一致,总体表现为从南向北递增的趋势,南湖区的半交换时间均在1周内,而北湖

区的半交换时间在 2 周以上。北湖区水体半交换时间表现为由东向西递增的特点, 除东部区域(3 号点) 水体半交换时间为 17 d 外, 中部区域(2 号点) 和西部区域(1 号点) 水体半交换时间均超过 30 d。西通道(4 号点)、东通道(5 号点) 水体受到潮汐影响, 1 d 内的污染物相对浓度变化幅度较大, 半交换时间分别为 12 d 和 13 d。南湖区分水半交换时间表现为中间小于两侧的特点, 中部区域(7 号点) 在 1 d 内就实现半交换, 东部区域(8 号点) 和西部区域(6 号点) 的半交换时间分别为 2 d 和 6d。

2.2 连通工程效果分析

2.2.1 污染物相对浓度变化过程

工程后在雨季、旱季污染物传播 30 d 后的相对浓度分布如图 8 所示, 从浓度分布图可以看出, 工程后雨季和旱季污染物分布基本相同, 南湖区和东通道的污染物相对浓度基本降至 0.1 以下; 西通道污染物相对浓度在 0.1~0.3 左右; 北湖区西部区域污染物相对浓度基本高于 0.1, 少部分区域相对浓度达到 0.7~0.9, 北湖区中部及东部区域污染物相对浓度基本降至 0.1 以下。

提取雨季各区域观测点的污染物相对浓度逐时过程(见图 9), 并统计各观测点的日平均值(见表 3), 并与工程前进行对比。可以看出, 连通工程建成后, 北湖区和南湖区分别增加了一条东西方向与龙江河连通的通道, 龙江河的直接实现与北湖区的水体交换, 北湖区污染物相对浓度下降速度相对工程前有了明显提升。靠近 1#水系连通工程的东部区域(2 号点)

在计算的第 1 天时污染物相对浓度就有明显下降, 而工程前在第 8 天污染物相对浓度才出现下降趋势; 中部区域在第 5 天时相对浓度也显著降低, 在第 20 天时基本降至 0.1 以内, 而工程前污染物相对浓度在第 30 天尚保持在 0.5 以上; 西部区域(1 号点) 污染物相对浓度下降整体较慢, 但仍快于工程前。西通道(4 号点) 和东通道(5 号点) 污染物相对浓度随潮汐周期性涨落趋势减弱, 东通道下降速度略快于西通道, 污染物相对浓度日均值小于工程前。南湖区分受到水系连通工程影响, 原河湖连接段的污染物输移动力减弱, 在前 10 d 时污染物相对浓度下降速度有所减缓。其中西部区域(6 号点) 最为明显, 工程在前 5 d 时污染物相对浓度能降低在 0.5 左右, 工程在后 10 d 时相对浓度仍保持在 0.6 以上, 但在第 25 d 时工程前后相对浓度均下降至 0.1 左右; 中部区域(7 号点) 下降速度仍最快, 1 d 内就降至原浓度的一半, 随潮汐周期性涨落变化明显; 东部区域(8 号点) 污染物相对浓度在 30 d 时相对浓度降至 0.1 以内。

2.2.2 水体半交换时间

根据污染物浓度下降过程(见图 8), 计算出工程后雨季湖区 8 个观测点的半交换时间。雨季和旱季水体半交换时间特征基本一致, 总体表现为西部区域大于东部区域。北湖区除西部区域外, 半交换时间整体上有较为明显的缩短。西部区域(1 号点) 水体半交换时间仍超过 30 d, 中部区域(2 号点) 水体半交换时间由工程前超过 30 d 缩短为工程后的 8 d, 东部区域(3 号点) 水体半交换时间相对工程前大幅缩短, 仅需

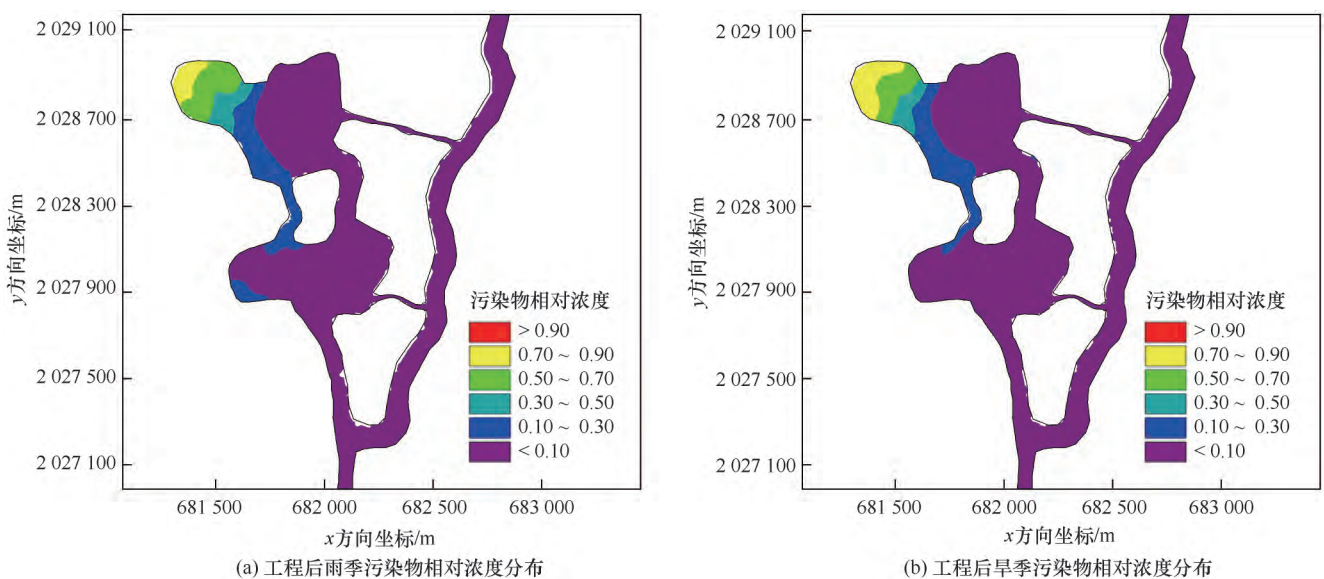


图 8 工程后污染物相对浓度分布

Fig. 8 Distribution of relative pollutant concentration after project

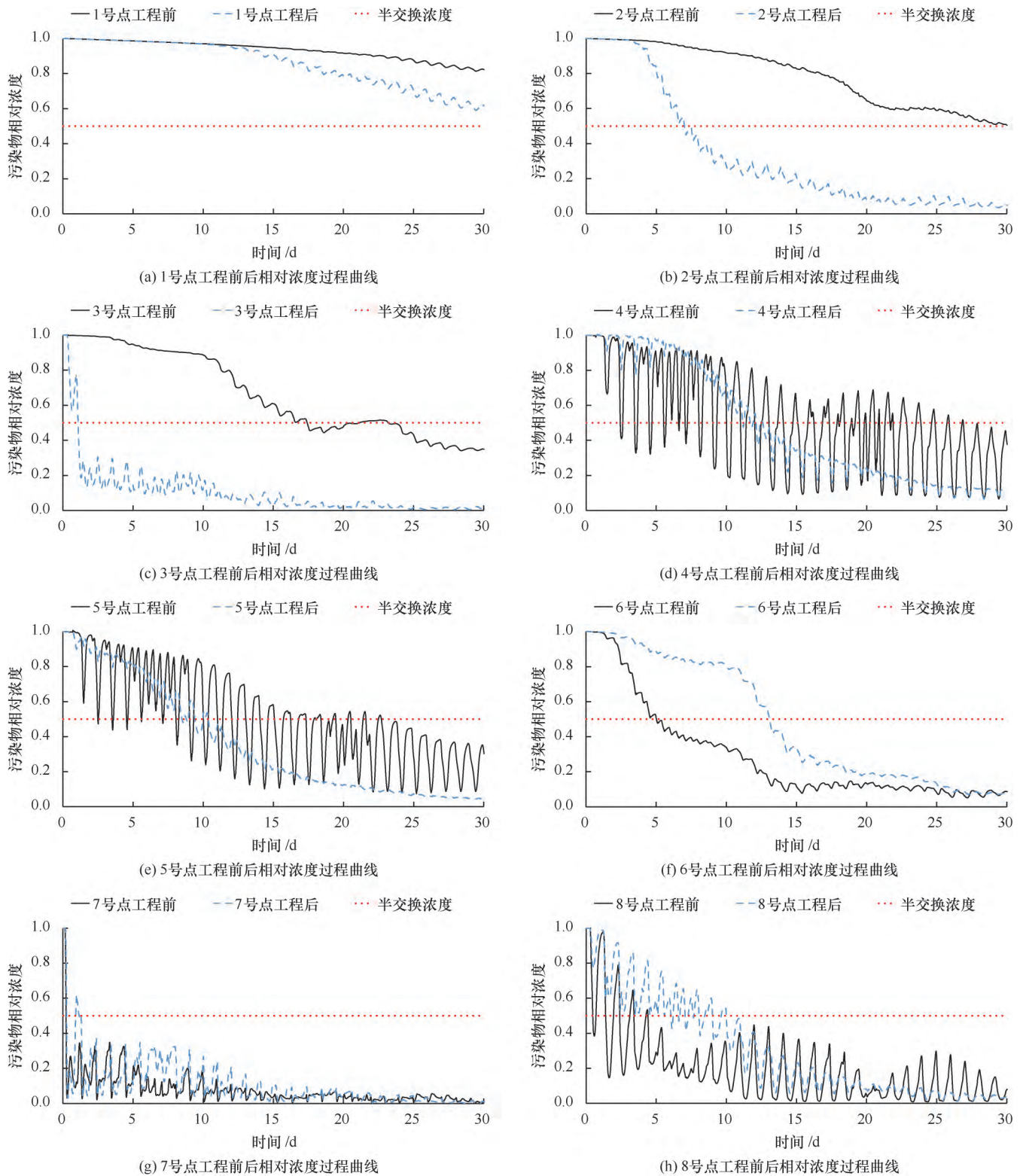


图9 工程前后雨季各区域相对污染物浓度变化曲线(逐时值)

Fig. 9 Variation curves of relative pollutant concentration in each region before and after project during wet season (hourly values)

2 d。西通道(4号点)、东通道(5号点)半交换时间略有减少,分别为12 d和10 d。南湖区除西部区域外,水体半交换时间相对工程前无太大变化,中部区

域(7号点)在1 d内就实现半交换,东部区域(8号点)半交换时间为2 d,而西部区域(6号点)半交换时间由6 d延长至14 d。

表3 工程后雨季湖区污染物相对浓度(日均值)

Table 3 Relative pollutant concentration in lake area after project during wet season (daily average values)

计算天数/d	北湖区			西通道	东通道	南湖区		
	1号点	2号点	3号点	4号点	5号点	6号点	7号点	8号点
5	0.99	0.89	0.17	0.96	0.82	0.90	0.14	0.63
10	0.97	0.31	0.15	0.71	0.50	0.82	0.13	0.46
15	0.91	0.20	0.06	0.34	0.24	0.34	0.05	0.16
20	0.80	0.09	0.02	0.24	0.13	0.19	0.06	0.10
25	0.71	0.07	0.01	0.14	0.08	0.14	0.02	0.05
30	0.61	0.04	0.01	0.11	0.05	0.08	0.01	0.04

3 结果讨论

3.1 适用性分析

半封闭湖泊是自然界常见的一种湖泊类型,其内部水环境主要受入湖河流影响。随着气候变化和人类活动的影响,半封闭湖泊缺水问题加剧,从而引发水质恶化等一系列复杂问题,对湖泊及周边生态造成影响。当前针对半封闭湖泊水体交换能力的研究较少,本研究采用数学模型计算了水系连通工程对半封闭湖泊水体交换能力的提升效果,选取污染物相对浓度和水体半交换时间作为评价指标,对比工程前后的水体交换特性。考虑到本研究侧重于对比水系连通工程前后的水体交换能力,并非精准模拟现状条件下龙江塘内部的水体交换情况,因此未进行模型验证。本文的研究思路和方法适用于其他类型的半封闭湖泊,有助于为半封闭湖泊的水体交换能力及提升措施研究提供参考。

3.2 研究可能存在的问题及展望

根据本文的研究结论,在水系连通工程建成前后,北湖区西部区域的水体交换能力均较差,污染物浓度下降速度最慢,水体半交换时间均超过30d,属于水环境未改善区域。该区域距离原连接通道和新建的1#、2#水系连通工程均较远,水动力条件弱于其他区域。针对此类区域的水体交换能力提升可采用设置活水泵站、补水点^[32]等方式,加强局部水动力条件以改善水体交换能力。因此,可进一步研究增加活水点后龙江塘内水体交换能力的改善效果,以及对比不同活水点的位置、数量、活水流量等参数对水动力和水体交换能力的提升效率,指导龙江塘以及其他半封闭湖泊的水环境提升措施。

4 结论

本文以海棠湾龙江塘为研究对象,建立了龙江塘二维水动力-水质数学模型,选取污染物相对浓度和水体半交换时间作为评价指标,对比了现状和水系连

通工程建成后龙江塘内水体交换能力,得出以下结论。

(1) 水系连通工程的建成将有效加速龙江塘污染物相对浓度下降速度。现状条件下,龙江塘北湖区污染物相对浓度下降最慢,尤其是西部区域,在计算第30天后相对浓度仍保持在0.8以上,东部和中部区域相对浓度大部分时间保持在0.5以上;南湖区污染物相对浓度下降最快。连通工程建成后,北湖区污染物相对浓度下降速度显著增加,靠近1#水系连通工程的东部区域在计算第2天相对浓度降低至0.17,中部区域在计算第10天时相对浓度降低至0.31;但西部区域动力条件仍较弱,在第30天时相对浓度保持在0.6以上,可考虑增加活水点以改善水动力条件。东、西通道变化较小。新建工程削弱了原河湖连接处的动力条件,南湖区污染物相对浓度下降速度在前10天有所减缓,其中西部区域最为明显。

(2) 采用龙江塘水体半交换时间反映工程前后水体交换能力的变化。在工程的影响下,龙江塘平均半交换时间明显缩短。雨季时北湖区东部区域由工程前的17d缩短为工程后的2d,中部区域由工程前的超过30d缩短为工程后的9d,西部区域水体交换能力仍然很弱,仍在30d以上。东、西通道变化较小。南湖区东部区域工程前后均为2d,中部区域工程前后均为1d,西部区域由6d延长至14d,相对工程前有所延长。

参考文献(References):

- [1] 李林森,王涵,刘凯,等.我国城市湖泊空间分布格局特征分析及影响因素探讨[J].湖泊科学,2024,36(2):587-601.
LI L S, WANG H, LIU K, et al. The analysis of spatial distribution pattern of Chinese urban lakes and its influence factors[J]. Journal of Lake Sciences, 2024, 36(2): 587-601.
- [2] 张运林,蔡永久,彭凯,等.南水北调东线沿线湖泊生态环境面临的挑战与保护对策[J].湖泊科学,2024,36(5):1289-1302.
ZHANG Y L, CAI Y J, PENG K, et al. Challenges and protection

- strategies of ecological environment of lakes along the Eastern Route of the South to North Water Diversion Project [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(5): 1289-1302.
- [3] FENG M, SEXTON J O, CHANNAN S, et al. A global, high-resolution (30-m) inland water body dataset for 2000: First results of a topographic-spectral classification algorithm [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2016, 9(2): 113-133.
- [4] ZHANG Y L, QIN B Q, ZHU G W, et al. Importance and main ecological and environmental problems of lakes in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(30): 3503-3519.
- [5] 姚姗姗, 张鹏, 陈纯, 等. 海棠湾规划水系水体交换能力的数值模拟[J]. *水道港口*, 2017, 38(3): 252-257.
YAO S S, ZHANG P, CHEN C, et al. Numerical study on water exchange ability of planning water system project in Haitang Bay [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2017, 38(3): 252-257.
- [6] LIN H Y, CHEN Z Z, HU J Y, et al. Numerical simulation of the hydrodynamics and water exchange in Sansha Bay [J]. *Ocean Engineering*, 2017, 139: 85-94.
- [7] 王愿宁, 郝燕妮, 赵婉余, 等. 基于流量函数的海水交换数值模拟研究[J]. *海洋环境科学*, 2020, 39(2): 309-314.
WANG Y N, HAO Y N, ZHAO W Y, et al. Numerical simulation of seawater exchange based on flow function [J]. *Marine Environmental Science*, 2020, 39(2): 309-314.
- [8] 刘尚辰, 孙昭晨, 梁秀秀. 新村潟湖水体交换能力数值模拟研究[J]. *水道港口*, 2020, 41(3): 257-266.
LIU S C, SUN Z C, LIANG S X. Numerical study on water exchange capacity of Xincun Lagoon [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2020, 41(3): 257-266.
- [9] KUANG C P, DONG Z C, GU J, et al. Quantifying the influence factors on water exchange capacity in a shallow coastal lagoon [J]. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2020, 31: 26-40.
- [10] LONG Y N, CAO J S, XIONG W, et al. Spatiotemporal pattern of water age in Dongting Lake before and after the operation of the Three Gorges Project [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, 55: 101902.
- [11] 方青青, 王国强, 张尚弘, 等. 基于水体交换能力的调水工程对底栖动物群落影响研究[J]. *水力发电学报*, 2024, 43(4): 62-72.
FANG Q Q, WANG G Q, ZHANG S H, et al. Study on mechanism of water transfer project impacting on macrobenthos community based on water exchange capacity [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2024, 43(4): 62-72.
- [12] 陈黎明, 陈炼钢, 李禔来, 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.
CHEN L M, CHEN L G, LI T L, et al. Comparative analysis of operation schemes for ecological water supply in urban wetland park [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(6): 162-167.
- [13] 丁磊, 陈黎明, 王逸飞, 等. 感潮河段江滩湿地水体交换模拟与调控措施研究[J]. *水生态学杂志*, 2024, 45(1): 32-41.
DING L, CHEN L M, WANG Y F, et al. Water exchange simulation and regulation of a Yangtze Estuary wetland [J]. *Journal of Hydroecology*, 2024, 45(1): 32-41.
- [14] CHEN Z P, LUO F, ZHU F, et al. Impact of engineering measures on water exchange and water quality in semi-closed bay: A model study in Zhelin Bay [J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2024, 77: 103722.
- [15] FU M J, LIN J L, ZHANG P, et al. Tide drives nutrients variation and exchange flux in the semi-enclosed Shuidong Bay coastal water in winter, South China Sea [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2023, 242: 106710.
- [16] JEYAR M, CHAABELASRI E, SALHI N, et al. Numerical modelling of transport time scales within Nador lagoon (Morocco) [J]. *World Journal of Modelling and Simulation*, 2017, 13(2): 113-122.
- [17] 李悦, 李志威, 胡旭跃, 等. 大通湖区水系连通工程改善水环境的评估[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(4): 116-123.
LI Y, LI Z W, HU X Y, et al. Evaluation of improvement effect of the water system connection project on aquatic environment in the Datong Lake area [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, 32(4): 116-123.
- [18] 韩方红, 高凡, 王海东, 等. 基于图论法的阿克苏河流域生态水网水系连通性评估[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2025, 23(5): 1090-1099.
HAN F H, GAO F, WANG H D, et al. Effectiveness evaluation of water system connectivity of ecological water network in Aksu River basin based on graph theory [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2025, 23(5): 1090-1099.
- [19] 李宗礼, 李原园, 王中根, 等. 河湖水系连通研究: 概念框架[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(3): 513-522.
LI Z L, LI Y Y, WANG Z G, et al. Research on interconnected river system network: conceptual framework [J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(3): 513-522.
- [20] 杨卫, 张利平, 李宗礼, 等. 基于水环境改善的城市湖泊群河湖连通方案研究[J]. *地理学报*, 2018, 73(1): 115-128.
YANG W, ZHANG L P, LI Z L, et al. Interconnected river system network scheme of urban lake group based on water environment improvement [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(1): 115-128.
- [21] 柳恒, 李志威, 胡旭跃, 等. 洞庭湖区典型水系连通工程优化分析[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(1): 91-96.
LIU H, LI Z W, HU X Y, et al. Connectivity analysis and optimization of typical river-lake connection projects in Dongting Lake area [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(1): 91-96.
- [22] 陈叶华, 李志威, 沈小雄. 芭蕉湖-南湖连通工程的连通性评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(3): 731-738.
CHEN Y H, LI Z W, SHEN X X. Hydrodynamic connectivity evaluation of bajiao-south lakes connected projects in Yueyang City [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(3): 731-738.
- [23] 孙静月, 肖宜, 张利平, 等. 武汉市梁子湖-汤逊湖水系连通工程效果分析[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2018, 51(2): 125-131.
SUN J Y, XIAO Y, ZHANG L P, et al. Study of effect of

- connection engineering between liangzi lake and Tangxun Lake in Wuhan City [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2018, 51(2): 125-131.
- [24] ZHANG X Q, QIAO W B, HUANG J F, et al. Impact and analysis of urban water system connectivity project on regional water environment based on Storm Water Management Model (SWMM) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 423: 138840.
- [25] 王少波, 张舒, 熊玉龙, 等. 河湖水系连通对城市河道生态修复水动力作用效果: 以猎德涌为例 [J/OL]. *人民珠江*, 1-12 [2024-09-18].
WANG Shaobo, ZHANG Shu, XIONG Yulong, et al. Hydrodynamic Effects of River-Lake System Connectivity on Ecological Restoration of Urban Rivers: A Case Study of Liede River [J/OL]. *Pearl River*, 1-12 [2024-09-18].
- [26] 王逸飞, 王艳红, 杨啸宇, 等. 水系连通工程对近海潮汐水域水动力的影响 [J]. *人民珠江*, 2025, 46(1): 78-87.
WANG Y F, WANG Y H, YANG X Y, et al. Influence of water system connectivity project on hydrodynamics of offshore tidal waters [J]. *Pearl River*, 2025, 46(1): 78-87.
- [27] WU C Z, WAN J Q, WANG Y S, et al. Evaluation of water quality fluctuation in the tidal reach under the impact of on shore wastewater discharges based on MIKE 21 model in Dongguan, China [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2024, 136: 103730.
- [28] THU P T S, TRI D Q. Assessing the impact of industrial zones on the environmental pollution in Hai phong's coastal areas, Vietnam [J]. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 2023, 11(7): 11-29.
- [29] 季凯敏, 路川藤. 长江口外潮汐精细化模型研究与精度分析 [J]. *海洋技术学报*, 2019, 38(5): 64-67.
JI K M, LU C T. Research and precision analysis on the tide model outside the Yangtze River Estuary [J]. *Journal of Ocean Technology*, 2019, 38(5): 64-67.
- [30] 吴真真, 王诗文, 车志伟. 三亚海棠湾海域水质分析及评价 [J]. *海南大学学报(自然科学版)*, 2013, 31(2): 127-132.
WU Z Z, WANG S W, CHE Z W. Analysis and assessment of water quality in the Haitang Bay, Sanya [J]. *Natural Science Journal of Hainan University*, 2013, 31(2): 127-132.
- [31] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 海湾水交换能力评价技术规程: GB/T 42417—2023 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Code of Practice for Assessment of Water Exchange Capacity in Sea Bay: GB/T 42417—2023 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [32] GAO C, XU Z, YAN X, et al. Coupling the measures of pollution source control and water replenishment to improve water quality in the catchment scale of Qianshan River Basin [J]. *Environmental Pollution*, 2024, 341: 122899.

(责任编辑 王璐)