

吴良洪, 谢思凯, 陈橙, 等. 福州西湖初雨净化补水方案及其水动力优化[J]. 净水技术, 2026, 45(9): 156–163.

Wu L H, Xie S K, Chen C, et al. Water replenishment scheme of initial rainwater purification and hydrodynamic optimization of West Lake in Fuzhou City [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(9): 156–163.

福州西湖初雨净化补水方案及其水动力优化

吴良洪¹, 谢思凯², 陈橙², 黄志心³, 林明波³, 张亚雷^{4,*}

(1. 福州市城市排水有限公司, 福建福州 350001; 2. 福州大学土木工程学院, 福建福州 350108; 3. 福州市规划设计研究院集团有限公司, 福建福州 350108; 4. 福州大学环境与安全工程学院, 福建福州 350108)

摘要 【目的】伴随人口规模的扩张与城市化进程的加速, 湖泊生态系统承受了巨大的压力。未经净化的城市雨水经铜盘河与屏西河汇入福州西湖, 进而污染西湖水质。为改善福州西湖水体透明度低、水生态系统功能差等水环境问题, 拟采用初雨净化设施为西湖补水, 因此亟须对补水方案及其水动力优化效果进行研究。【方法】本文从水动力改善角度出发, 将福州西湖与左海视为整体, 基于沿深度平均的二维不可压缩流体雷诺平均纳维-斯托克斯浅水方程, 采用 MIKE 21 构建二维水动力数学模型, 设计 7 种不同的补水工况与现状工况进行对比, 探究不同补水量对西湖水体置换率、更新时间及滞水区面积的影响。【结果】分析模型结果可知, 每日补水量小于 5 万 t 时, 水动力优化效果有待提高; 每日补水量超过 5 万 t 时, 水体置换率、更新时间及滞水区面积均接近或优于原河道补水方案; 随着每日补水量增加, 水动力优化的边际效应逐步递减, 并定量提出了不同补水量下的水体置换率和滞水区占比计算公式。【结论】综合结果表明, 设置三个补水口对西湖水体水动力环境有一定的改善, 每日补水量为 5 万 t 以上时的水动力环境效果较好。西湖湖区水体更新置换呈现显著分区, 滞水区主要集中在左海区域和西湖南部区域。

关键词 福州西湖; 补水; 水动力模拟; 水体置换; 水体更新时间; 滞水区域

中图分类号: X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2026)09-0156-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.09.017

Water Replenishment Scheme of Initial Rainwater Purification and Hydrodynamic Optimization of West Lake in Fuzhou City

Wu Lianghong¹, Xie Sikai², Chen Cheng², Huang Zhixin³, Lin Mingbo³, Zhang Yalei^{4,*}

(1. Fuzhou Urban Drainage Co., Ltd., Fuzhou 350001, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

3. Fuzhou Planning & Design Research Institute Group Co., Ltd., Fuzhou 350108, China;

4. College of Environment & Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract [Objective] With the expansion of population and accelerated urbanization, lake ecosystems are facing tremendous pressure. Unpurified urban rainwater flows into Fuzhou West Lake via the Tongpan River and Pingxi River, resulting in water quality degradation of the lake. To address the poor water transparency and degraded aquatic ecosystem functions of Fuzhou West Lake, initial rainwater purification facilities are adopted to supply clean water to the lake. Accordingly, it is urgent to investigate water replenishment schemes and their hydrodynamic optimization effects. [Methods] From the perspective of hydrodynamic improvement, this paper introduces Fuzhou West Lake and Zuohai Lake as an integrated water body. Based on the depth-averaged two-dimensional incompressible Reynolds-averaged Navier-Stokes shallow water equations, a two-dimensional hydrodynamic numerical model is established using MIKE 21. Seven water replenishment scenarios are designed and compared with the baseline condition to explore the influences of different daily replenishment volumes on the water exchange rate, water renewal time, and stagnant water area of West

[收稿日期] 2026-04-08

[作者简介] 吴良洪(1978—), 男, 高级工程师, 主要从事给排水管网建设、施工、运维、城市水环境治理等工作, E-mail: 1154996566@qq.com。

[通信作者] 张亚雷(1971—), 男, 教授, 研究方向为水污染控制, E-mail: zyl@fzu.edu.cn。

Lake. [**Results**] Model simulation result indicate that the hydrodynamic improvement effect is limited when the daily water replenishment volume is less than 50 000 t. When the daily replenishment volume exceeds 50 000 t, the water exchange rate, water renewal time, and stagnant water area are comparable to or superior to the original river water replenishment scheme. The marginal benefit of hydrodynamic optimization gradually diminishes with the increase of daily replenishment volume. Quantitative formulas for water exchange rate and the proportion of stagnant water area under different replenishment volumes are proposed. [**Conclusion**] The comprehensive analysis demonstrates that three water intake outlets can effectively improve the hydrodynamic environment of Fuzhou West Lake, and favorable hydrodynamic performance can be achieved with a daily replenishment volume of over 50 000 tons. Distinct spatial zoning is observed in the water renewal and exchange process of the lake, with stagnant zones mainly distributed in the Zuohai Lake area and the southern part of West Lake.

Keywords Fuzhou West Lake; water replenishment; hydrodynamic simulation; water exchange; water renewal time; stagnant water area

湖泊作为维系人类生存与社会发展的关键自然资源,展现出极高的综合应用价值,不仅是安全优质饮用水的重要来源,还广泛服务于工农业生产、渔业捕捞、雨洪调蓄以及局部气候调节等多个领域。此外,其在生态景观与旅游开发方面的功能亦不可忽视。然而,伴随人口规模扩张与城市化进程的加速,在追求经济效益最大化的过程中,不合理的资源开发与污染物的持续排入使湖泊生态系统承受了巨大压力,导致水环境质量呈现出明显的衰退趋势。根据现场调研以及水质分析,福州西湖存在水体透明度较低、现场污水入湖、水生态系统功能较差等问题。透明度低的主要原因之一是闽江补水带来的超细无机颗粒泥沙不易沉降,在水体中悬浮。此外,城市雨水未经净化经铜盘河与屏西河汇入福州西湖,进而污染西湖水质。为改善西湖公园水体生态环境,提升生态服务功能,开展城市湖泊治理被提上重要议程,这是亟待解决的一大城市环境问题。

为提升福州西湖水质,拟采用初雨净化补水措施代替原有河道补水,因此拟定补水规模及水动力优化成为亟待解决的问题。传统城市湖泊补水方案设计多依赖工程经验估算或局部单点监测数据,难以全面揭示湖泊内部流场的空间分布规律及补水驱动下的水体交换过程。特别是对于具有复杂岸线形态和局部封闭水域的湖泊体系,经验方法往往无法准确预测不同补水方案下各区域的水动力响应差异,从而导致补水效果评估失真或方案设计保守。采用 MIKE 21 二维水动力数值模型,能够在较高时空分辨率下精细模拟湖体流速场,定量评估不同补水流量、进水口位置及补水时制对湖泊水动力环境的改善效果,为制定科学、精准的补水调度方案提供可靠的数学依据。

近年来,国内外学者对不同湖泊也进行了数值模拟的相关研究,如黄明等^[1]利用 MIKE 21 构建巢湖水动力水质耦合模型模拟不同生态补水方案的改善效果,为巢湖水环境精细化管控提供了科学依据。吴昊昊等^[2]构建沱湖水动力模型探究水体更新规律,为湖区水质改善与调水方案优化提供了数据支撑。秦银徽等^[3]构建异龙湖 MIKE 21 水动力-水质耦合模型模拟生态补水效果,为湖区生态调度与水生态修复提供了决策支撑。吕俊^[4]利用 MIKE 11、MIKE 21 与 Ecolab 模型构建了水质水量耦合模型,针对南宁市南湖环水系探讨了外江引水方案及截污减污工程对改善城市内河水环境的效果。Zhang 等^[5]基于 MIKE 21 构建白龟山水库水动力-水质耦合模型,模拟了不同生态补水方案对水库水环境的影响,为水库生态调度与水环境改善提供了技术参考。Sharip 等^[6]构建了马来西亚 Chini 湖的三维水动力-生态耦合模型,模拟了不同驱动力条件下湖泊生态系统的动态变化,揭示了旱季风应力驱动的平流输运是影响水质变化的主导物理机制。诸多学者基于 MIKE 21 模型开展了河湖、水库、河口等多类水域的数值模拟研究,涵盖模型应用探究、水交换模拟、河道水动力与河床演变、感潮河段洪水风险分析及水质模拟等内容,并重点探究了补水调控措施对不同区域水体水质与透明度的改善效果^[7-16]。

与上述研究相比,本研究对象福州西湖具有典型的城市浅水小湖特征——湖体库容有限、环境容量较低,对降雨汇流所携带的外源污染负荷表现出高度敏感性,暴雨事件易引发水质指标的显著波动。目前,福州西湖的主要补给水源为屏西河与铜盘河,其来水水质欠佳,进一步加剧了湖区的污染压力。针对这一现实问题,本文在湖区上游设置初雨处理

设施补水口, 将汇入河道的初期雨水经设施净化处理后作为补充水源输入西湖, 通过模拟不同工况下的水体置换过程, 系统评估初雨处理设施对湖区水质的改善效果, 旨在寻求最优补水运行方案, 以有效解决福州西湖现状来水水质不佳的核心问题。

本文采用 MIKE 21 软件构建福州西湖水动力数值模型, 模拟分析实施补水调控措施后福州西湖水动力特征。依托模型模拟结果开展系统解析, 可为福州西湖初雨净化补水方案的制定提供科学指引, 同时为该区域水环境综合治理相关决策提供理论支撑。

1 福州西湖水动力数学模型

1.1 控制方程

福州西湖具有湖面开阔、平均水深较浅的特点, 水体宽深比相对较高, 其水体在垂向上混合作用剧烈, 不存在显著的密度分层现象, 整体属于典型的宽浅型城市浅水湖泊。基于该水域的水文与水动力特征, 本文选取沿整层积分的二维模型进行数值模拟。在大尺度水动力模拟中, 由于水平尺度远大于垂直尺度, 许多重要物理量如流速、水深等在水平方向上的变化显著大于垂直方向。因此, 可将水域视为一个准二维的浅水系统进行近似处理。本模型控制方程基于沿深度平均的二维不可压缩流体雷诺平均纳维-斯托克斯浅水方程, 服从如下假设。

(1) 布辛涅斯克假设: 利用层流黏性应力对紊动应力进行变量化。

(2) 静水压力假定: 计算区域水平方向的尺度远大于垂直方向, 垂向加速度可以忽略, y 方向动量方程中近似假设为静水压力的关系。

下述公式中 (x, y) 为笛卡尔坐标系, 水流连续方程表示如式(1)。

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

沿 x 方向的动量方程表示如式(2)。

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = & f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial \rho_a}{\partial x} - \\ & \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \end{aligned} \quad (2)$$

沿 y 方向的动量方程表示如式(3)。

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} = & -f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial \rho_a}{\partial y} - \\ & \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \quad (3)$$

$\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 定义如式(4)。

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

其中: t ——时间, s;

g ——地球重力加速度, m/s^2 ;

ρ ——水的密度, kg/m^3 ;

ρ_0 ——水的参考密度, kg/m^3 ;

h ——总水深, $h = \eta + d$, 其中 η 为表面水位, d 为静止水深, m;

u ——沿 x 方向上的速度分量, m/s ;

v ——沿 y 方向上的速度分量, m/s ;

$\bar{u}$ ——沿水深平均 x 方向上的速度分量, m/s ;

$\bar{v}$ ——沿水深平均 y 方向上的速度分量, m/s ;

f ——科氏力参数;

S ——源汇项;

u_s ——源汇项沿 x 方向上的水流速度分量, m/s ;

v_s ——源汇项沿 y 方向上的水流速度分量, m/s ;

T_{ij} ——水平黏滞应力项, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$;

ρ_a ——空气密度, kg/m^3 ;

τ_{sx} 、 τ_{sy} ——海面风应力 τ_s 沿 x 、 y 方向上的分量;

τ_{bx} 、 τ_{by} ——海底摩阻力 τ_b 沿 x 、 y 方向上的分量;

S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yx} 、 S_{yy} ——辐射应力分量。

1.2 模型范围及数据来源

西湖水动力模型计算范围涵盖了福州西湖的整个湖区, 如图 1 所示。西湖水下地形由研究团队采用走航式声学多普勒流速剖面仪野外走航实测得到, 结合差分全球定位系统获取测点平面位置, 经水位订正、数据滤波后插值生成数字地形用于模型构

建。水位与流速的验证数据采用 2025 年 1 月 6 日的实测数据,测点如图 1 所示。



图 1 福州西湖水动力模型计算范围

Fig. 1 Calculation Domain of Hydrodynamic Model for Fuzhou West Lake

1.3 模型验证及网格无关性分析

福州西湖现有方案补水点位于图 2 的 1#和 2#补水口附近,分别由屏西河及铜盘河补水。现有方案的日常补水量为 $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ (铜盘河为 $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$, 屏西河为 $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$), 每天补水时段为 3:00—23:00。将计算结果与对应的实测数据对比,反复设置曼宁糙率系数,并最终确定西湖水动力模型曼宁糙率系数为 $0.028 \sim 0.031$ 。将现有方案的水动力计算结果用于模型的验证,模型计算水位与实测水位 (5.5 m) 一致,流速验证结果如表 1 所示。本模型计算时间步长为 1 s ,非结构网格取 2 m ,并与 $5, 1 \text{ m}$ 的网格计算结果进行对比验证其具有收敛性(表 1)。

表 1 不同网格尺寸下流速计算结果与实测值对比

Tab. 1 Comparison of Flow Rates Results between Numerical Results and Experimental Measurements at Various Grid Resolutions

测点	实测流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	5 m 网格模型 计算流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	2 m 网格模型 计算流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1 m 网格模型 计算流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	0.002	0.002	0.002	0.002
2	0.008	0.009	0.009	0.009
3	0.007	0.008	0.007	0.007
4	0.001	0.001	0.001	0.001
5	0.006	0.005	0.005	0.005
6	0.002	0.001	0.001	0.001
7	0.001	0.001	0.001	0.001

1.4 补水方案设计

现状补水由铜盘河与屏西河提供,拟建的初雨净化设施位于西湖北侧左海停车场。由此,新补水口位置的设计核心依据研究区现有水利设施、场地建设条件与民生约束综合确定,将补水方案增设 3 个补水口,补水口 1 设置在西湖东北区域,向东南进入西湖;补水口 2 设置在左海区域,向西进入西湖;补水口 3 设置在西湖北区域,向南进入西湖。在数学模型中的相应位置设置补水点作为上游边界条件,具体位置如图 2 所示,每日的补水时间设定为 18 h ,其中,每日的 3:00—20:59 进行补水,21:00—2:59 停止补水。各工况下的补水量如表 2 所示。

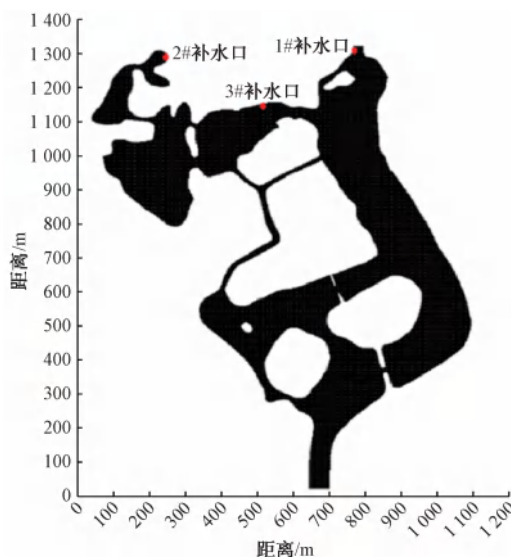


图 2 水动力模型补水口位置

Fig. 2 Water Intake Locations of Hydrodynamic Model

2 结果分析

2.1 水体置换率结果

水体置换率可定义为外源引入水体体积与研究区域水体总体积的比值,该指标能够对水体交换能力进行定量表征。通常而言,外源补水在研究水域中所占比例越高,对应的水体置换率数值越大,水体置换与更新效果也越显著。关于水体是否完成有效更新,根据现有相关研究给出的相应判定标准,当研究区域内原有水体分别有 67%、80% 或 90% 的比例被外源引入水体替换时,可判定该区域水体实现更新。本文将示踪物初始浓度设定为 1,参考已有研究成果^[2],当水体中示踪剂浓度下降至 0.37 时,意味着 63% 的原始水体已被新水体替换,此时即认定

表 2 各工况下的补水量设置
Tab. 2 Water Replenishment Settings under Various Working Conditions

工况	补水点 1 流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	补水点 2 流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	补水点 3 流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	总补水流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	每日 18 h 补水总量/t
原方案	0.30	1.00	0	1.30	9.36 万(20 h 补水)
1	0.16	0.13	0.09	0.39	2.50 万
2	0.24	0.20	0.14	0.58	3.76 万
3	0.32	0.27	0.19	0.77	5.00 万
4	0.40	0.33	0.23	0.96	6.24 万
5	0.48	0.40	0.28	1.16	7.52 万
6	0.56	0.47	0.33	1.35	8.76 万
7	0.64	0.53	0.37	1.54	10.00 万

水体完成更新。福州西湖在不同模拟工况下的水体置换结果如图 3 所示。

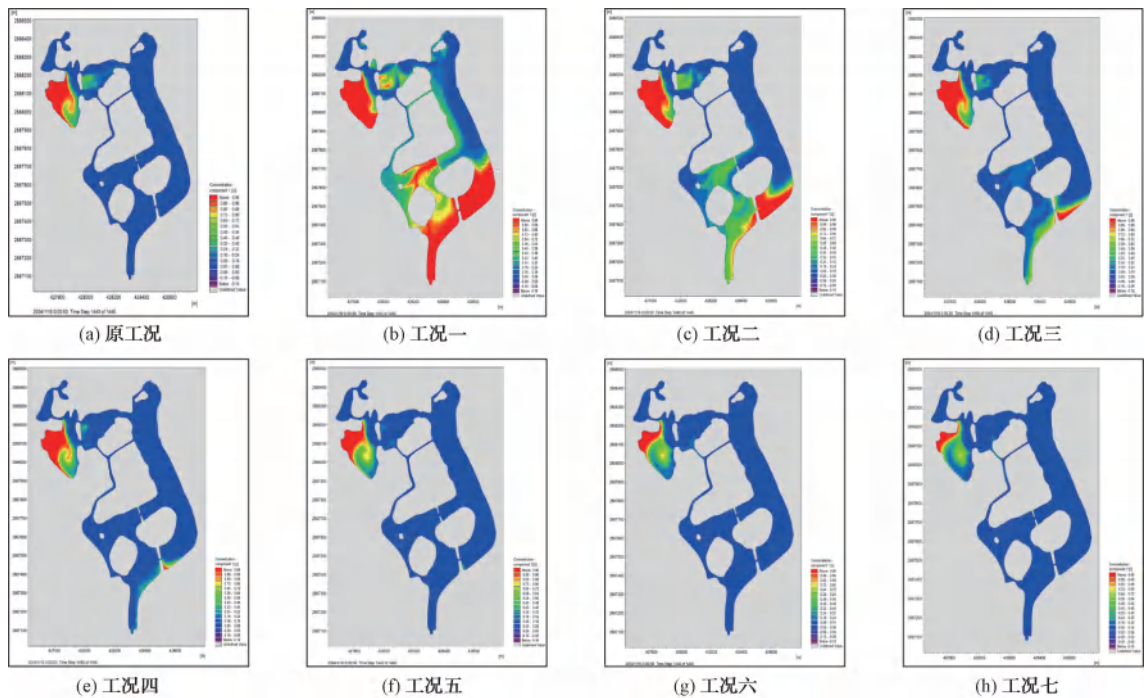


图 3 各工况水体置换情况

Fig. 3 Water Replacement under Various Working Conditions

本次模型计算时间为 15 d,随着补水量的增加,15 d 后的水体置换率也同步增加。补水量与水体置换率关系如图 4 所示。由结果可知,当补水量为每日 5 万 t 时(即工况 3),全湖区 15 d 水体置换率可超过 80%,基本接近原方案的水体置换效果。换言之,初雨净化补水规模为 5 万 t 以上时,净化后的水体可在 15 d 后置换西湖大部分区域水体。

根据模型计算结果,提出了不同初雨净化补水量的 15 d 水体置换计算式,如式(5)。

$$R_{15} = (1 - e^{-0.3Q}) \times 100\% \quad (5)$$

其中: R_{15} ——15 d 西湖水体置换率;
 Q ——每日补水总量,万 t。

图 5 为各工况不同补水天数下的水体置换率。随着补水天数的增加,水体置换率逐步提升。前 3 d 时原工况(日补水量为 9.36 万 t)水体置换率稍有领先;而在第 4 d 时,工况七(日补水量为 10 万 t)的水体置换率开始超过了原工况;在第 8 d 时,工况六(日补水量为 8.76 万 t)的水体置换率也开始超越

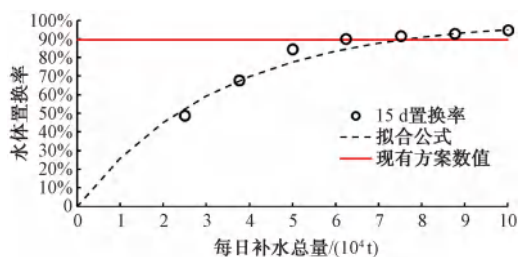


图4 不同补水量下的15d水体置换率

Fig. 4 Water Replacement Rates over 15 Days under Different Daily Water Supplement Volumes

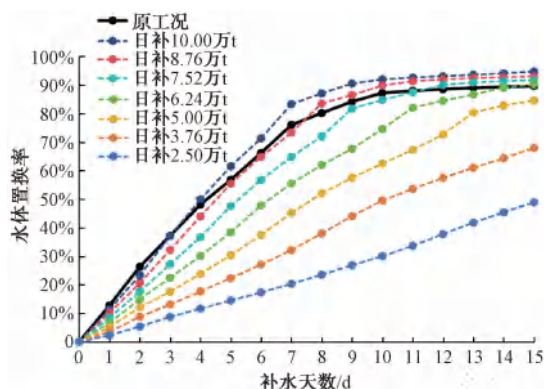


图5 各工况不同补水天数下的水体置换率

Fig. 5 Water Replacement Rates under Different Replenishment Durations and Working Conditions

原工况;第12 d时,工况五(日补水量为7.52万t)的水体置换率也开始超越原工况;第15 d时,工况四(日补水量为6.24万t)的水体置换率也开始超越原工况。分析上述结果,原工况在日补水量较大的情况下,水体置换率陆续被小补水量的工况超越,这正体现出了新补水口方案的优势之处。

2.2 水体更新时间结果

为探究福州西湖及左海区域的水体置换规律,本文选取了水体输移时间指标中的水体更新时间进行分析,结合数值模型对该指标的具体计算方法阐述如下。

本次研究针对目标水域构建了耦合水动力模块的对流扩散数学模型,具体计算流程如下:(1)在已建立的模型体系内,将研究水域内示踪物质的初始浓度设为1,入湖补给水源处示踪物浓度设定为0;(2)选取足够时长的计算周期 T ,通过模型进行对流扩散过程模拟,并输出各时间步长下示踪物质的浓度分布数据;(3)对各计算网格单元逐时间步进行统计,当单元格内示踪剂浓度不低于0.37时赋值为

1,低于该阈值则赋值为0;(4)分别计算各网格单元内所有时间步长赋值结果的平均值;(5)基于上述统计结果完成各网格单元水体更新时间的求解。

从水体更新的内涵来看,该指标属于可人为界定的参数,具备一定可调性,能够依据不同研究区域的特征进行合理取值。为保证模型计算与数据处理过程的逻辑一致性,本文在模拟运算中采用原水体浓度的0.37倍作为置换后示踪剂浓度阈值,将达到该阈值所对应的计算时长定义为水体更新时间。不同补水量下,水体更新均遵循“接近补水口处的水体更新时间快”、“远离补水口处的更新时间慢”这样的原则,这一原则亦符合客观规律。为了方便对比,图6将不同补水量下的水体更新时间图汇总为一张图,图中红色区域代表水体更新时间大于15 d的区域。由图6可知,当每日补水5万t时,基本可以满足西湖绝大部分水体能在15 d内更新完成,但仍有一部分区域(如左海区域、西湖南部区域等)水体尚未更新完成。

2.3 不同补水量的滞水区面积

对模型的计算成果进行分析,统计不同补水工况下研究水域补水15 d后的滞水区面积,考虑流速小于0.000 5 m/s的滞水区面积占比,结果如图7所示。综合各工况模拟结果,当日补水量由0增大到5万t时,滞水面积占比显著减小;当日补水量由5万t继续增大时,滞水面积占比的减小趋势趋于平稳,这表明继续增大补水量对水动力改善的边际贡献已大幅下降,单位补水量所带来的水环境改善效益降低。根据模型结果,提出不同补水工况下的滞水区占比计算公式如下:

$$P_{15} = (0.1 + 0.9e^{-0.4Q}) \times 100\% \quad (6)$$

其中: P_{15} ——补水15 d后西湖滞水区域占比。

从拟合趋势可知,随着每日补水量的增加,15 d后的滞水区域趋近于10%左右,难以进一步减小。从地形和水系连通性角度分析,左海片区与西湖主体之间通过较窄的连通水道相连,在水力上相对独立,补水驱动的动量输入经连通水道传递后能量损耗较大,难以在左海内部形成有效的循环流场。西湖南部区域同样因岸线弯曲、局部形成相对封闭的凹岸形态,水体对流更新动力有限。因此,后续还需结合推流设施等地针对性地更新滞水区域的水体。

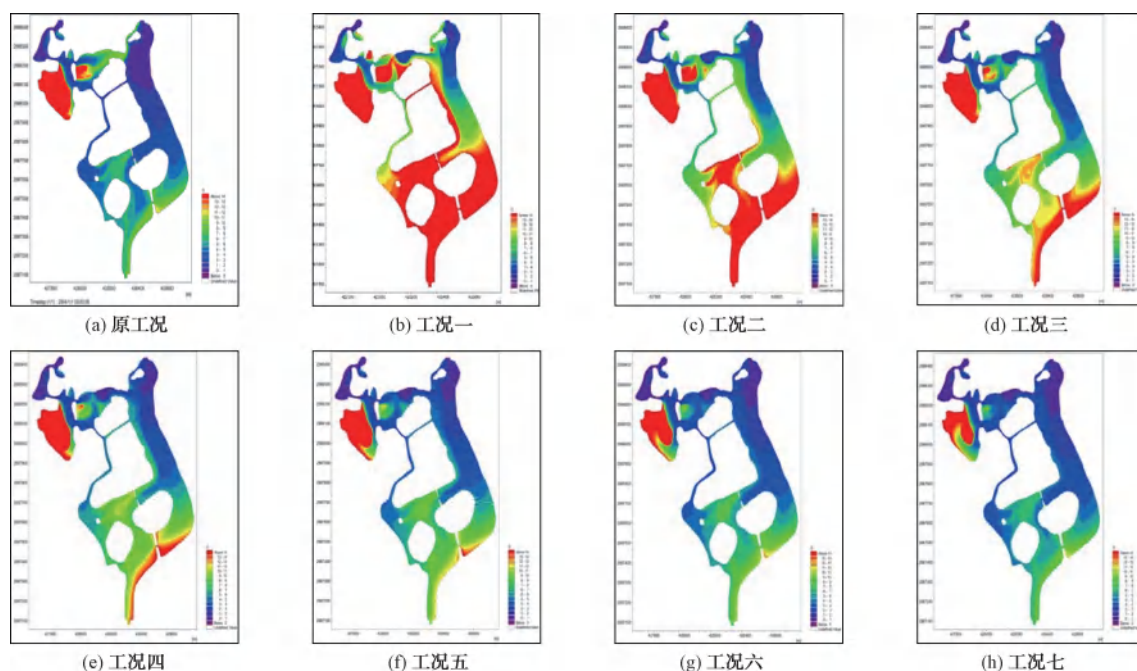


图6 各补水工况下西湖水体更新时间

Fig. 6 Water Renewal Time of West Lake under Various Water Supplement Conditions

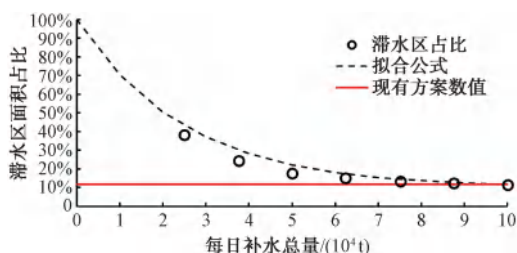


图7 福州西湖各工况补水 15 d 后的滞水区面积占比

Fig. 7 Stagnant Area Proportion of Fuzhou West Lake under Various Water Supplement Conditions after 15 Days

3 结论及建议

福州西湖的补给水源主要为屏西河与铜盘河,其来水水质整体欠佳,难以满足湖区水环境质量维持的需求。为此,基于初雨处理设施将初期雨水经净化处理后作为补充水源输入西湖的方案,本文构建福州西湖的水动力模型进行计算分析。初雨补水设施规模设置 2.50 万 t/d 至 10.00 万 t/d 的 7 种工况,计算各工况下福州西湖水域的水体置换率、水体更新时间和滞水区占比等相关结果,并提出了新补水方案下的水体置换率和滞水区占比计算公式。

结果表明,新补水方案(三出水口)的水动力水体置换效果相比于现状补水方案在同等条件下更优。以水体交换率、水体更新时间和滞水面积三项指标构成综合评价体系,对 7 种补水方案进行了系

统比选,认为日补水量 5 万 t 的新补水方案(工况三)已经接近现状补水的水动力效果,故推断在该方案下(补充净水)的西湖水质将优于现状河道补水方案。而当补水量超过 5 万 t 后,继续增加补水量对水动力优化的边际效应逐步递减。

在新补水方案下,部分水域仍存滞水区,建议后续还可辅以局部曝气、机械循环或优化进出水口布局等工程措施以实现水动力条件的针对性改善。

参考文献

- [1] 黄明,马飞虎,匡武,等. 基于 MIKE21 研究生态补水对巢湖水质时空分布的影响[J]. 环境污染与防治, 2024, 46(4): 463-470, 477.
Huang M, Ma F H, Kuang W, et al. Study on the effect of ecological water replenishment on the spatial and temporal distribution of water quality in Chaohu Lake based on MIKE21 [J]. Environmental Pollution and Control, 2024, 46(4): 463-470, 477.
- [2] 吴昊昊,倪晋,潘强. 基于 MIKE21 的沱湖水动力及水体更新时间模型[J]. 水电能源科学, 2025, 43(8): 47-51.
Wu H H, Ni J, Pan Q. Model of Tuohu Lake dynamics and water renewal time based on MIKE21 [J]. Water Resources and Power, 2025, 43(8): 47-51.
- [3] 秦银徽,陈欣,马巍,等. 基于 MIKE21 模型模拟的异龙湖水动力特性与生态补水效果研究[J]. 环境生态学, 2024, 6(7): 92-100.

- Qin Y H, Chen X, Ma W, et al. Research on ecological water replenishment scheme of Yilong Lake based on MIKE21 model [J]. Environmental Ecology, 2024, 6(7): 92-100.
- [4] 吕俊. 基于 MIKE 的南宁市南湖环水系水质水量耦合模型的研究[J]. 广西水利水电, 2017(1): 11-15.
- Lü J. Study of Nanhu Lake ring water system with water quality-quantity coupling model based on MIKE [J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 2017(1): 11-15.
- [5] Zhang X Q, Duan B S, He S Y, et al. Simulation study on the impact of ecological water replenishment on reservoir water environment based on Mike21—Taking Baiguishan reservoir as an example[J]. Ecological Indicators, 2022, 138: 108802. DOI: 10.1016/J.ECOLIND.2022.108802.
- [6] Sharip Z, Yanagawa R, Terasawa T. Eco-hydrodynamic modelling of chini lake: Model description [J]. Environmental Modeling & Assessment, 2016, 21(2): 193-210.
- [7] 吴佩翰, 朱海, 徐项哲, 等. 补水对蠡湖水体透明度改善效果的数值模拟[J]. 水资源保护, 2025, 41(1): 186-197.
- Wu P H, Zhu H, Xu X Z, et al. Numerical simulation of improvement effect of water replenishment on water transparency in Lihu Lake [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(1): 186-197.
- [8] 牛智航, 张旭东. MIKE 21 的水质数值模型的应用研究[J]. 水资源开发与管理, 2020, 6(5): 56-60, 23.
- Niu Z H, Zhang X D. Application research of MIKE 21 water quality numerical model [J]. Water Resources Development and Management, 2020, 6(5): 56-60, 23.
- [9] 周哲睿, 刘姣, 吴浩力, 等. 基于 MIKE21 模型的水交换数值模拟研究[J]. 陕西水利, 2021(4): 17-20.
- Zhou Z R, Liu J, Wu H L, et al. Numerical simulation of water exchange based on MIKE21 model [J]. Shanxi Water Resources, 2021(4): 17-20.
- [10] 马铁梅, 付俊峰, 孙英. 基于 MIKE21 的异龙湖水动力优化与水质改善研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(7): 54-58.
- Ma T M, Fu J F, Sun Y. Study on hydrodynamic optimization and water quality improvement of Yilong Lake based on MIKE21 [J]. Water Resources and Power, 2023, 41(7): 54-58.
- [11] 刘云韩, 李连强, 王云庆, 等. 基于 Mike21 工程补水对异龙湖水质改善研究[J]. 中国水运, 2024, 24(16): 60-62.
- Liu Y H, Li L Q, Wang Y Q, et al. A study on the improvement of water quality in Yilong Lake through water replenishment under the Mike21 project [J]. China Water Transport, 2024, 24(16): 60-62.
- [12] 叶永, 陈雪倩, 汪旭. 基于 MIKE21 水质与水动力模型的清江流域水质改善措施影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2025(4): 14-19.
- Ye Y, Chen X Q, Wang X. Research on the improvement of water quality based on MIKE21 water quality and hydrodynamic model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2025(4): 14-19.
- [13] 胡文雁, 周肆访, 徐征和, 等. 基于 MIKE 21 模型的小清河入海口感潮河段水动力模拟及洪水风险分析[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2025, 39(3): 346-354.
- Hu W Y, Zhou S F, Xu Z H, et al. Hydrodynamic simulation and flood risk analysis of tide-sensitive section of Xiaoqing River Estuary based on MIKE 21 model [J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2025, 39(3): 346-354.
- [14] 郭雅静, 冯慧娟, 王军力. 基于 MIKE21 模型的西藏某水库水质数值模拟研究[J]. 海河水利, 2025(8): 88-90, 100.
- Guo Y J, Feng H J, Wang J L. Numerical simulation of water quality in a reservoir in Tibet based on the MIKE21 model [J]. Haihe Water Resources, 2025(8): 88-90, 100.
- [15] 胡克龙, 计勇, 岑奕兴, 等. 基于 MIKE21 的信江八字嘴顺直分汊河道水动力特性及河床演变分析[J]. 人民珠江, 2023, 44(6): 83-90.
- Hu K L, Ji Y, Cen Y X, et al. Hydrodynamic characteristics and riverbed evolution analysis of the bazizui straight branching channel in Xinjiang River based on MIKE21 [J]. Pearl River, 2023, 44(6): 83-90.
- [16] 秦丽佳, 高真伟, 谢云. 基于二维水动力模型的辽河口湿地生态补水模拟[J]. 湿地科学与管理, 2024, 20(1): 25-30.
- Qin L J, Gao Z W, Xie Y. A simulation of ecological water replenishment for Liaohu Estuary wetland based on the MIKE21 model [J]. Wetland Science & Management, 2024, 20(1): 25-30.