

李翰卿, 胡贤群, 张小潭, 等. 潜水推流器对草海水体置换影响研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S2): 511-517.

LI Hanqing, HU Xianqun, ZHANG Xiaotan, et al. Study on the influence of submersible water impeller on water replacement in Caohai Lake[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S2): 511-517.

潜水推流器对草海水体置换影响研究

李翰卿¹, 胡贤群¹, 张小潭¹, 李宏芳²

(1. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051;

2. 大理白族自治州水利水电勘测设计研究院, 云南 大理 671000)

摘要: 草海属于半封闭式浅水湖泊, 湖泊水动力主要依靠风场提供, 因此湖泊水流流速缓慢、水体交换能力弱, 污染物沉积, 湖泊水质问题愈发严峻。为改善湖泊水质, 牛栏江-草海引水工程引用牛栏江优质水源置换草海内原有水体, 但该工程引流方案较为单一, 水体置换效率不理想。为提高水体置换率并减少水资源浪费, 依据整理与收集的实测数据, 建立草海流域三维风场模型和二维水动力-对流扩散耦合模型, 利用该模型探讨了不同入流形式和工程措施下对草海水体置换效率的改善效果。研究表明: (1) 周围山体的存在使得草海风场不均匀分布于湖面; (2) 受风的影响, 湖泊流场复杂, 存在多个环流阻碍水体置换进程; (3) 拆除部分导流带并增设 7.5 kW 潜水推流器能起到“引清推污”作用, 优化了水体置换过程, 对于引调水工程的优化具有一定参考价值。

关键词: 风生流; 水动力; 水体置换; 高原湖泊; MIKE; PHOENICS; 草海; 潜水推流器

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S2.084

中图分类号: TV524

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)S2-0511-07

Study on the influence of submersible water impeller on water replacement in Caohai Lake

LI Hanqing¹, HU Xianqun¹, ZHANG Xiaotan¹, LI Hongfang²

(1. PowerChina Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650051, Yunnan, China; 2. Dali Bai Autonomous Prefecture Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute, Dali 671000, Yunnan, China)

Abstract: Caohai is a semi-enclosed shallow water lake, relies predominantly on wind fields for its hydrodynamics, resulting in slow water flow velocities and weak water exchange capacities. Consequently, pollutant deposition has led to a deteriorating water quality situation. In an effort to improve water quality, the Niulan River-Caohai Water Diversion Project uses the high-quality water source of the Niulan River to replace the existing water in the Caohai Lake, but the drainage scheme of the project is relatively simple and the water replacement efficiency is not ideal. To enhance water replacement rates and minimize water resource wastage, based on the collection and analysis of field measurement data, a three-dimensional wind field model for the Caohai Lake basin and a two-dimensional hydrodynamic-convection diffusion coupled model were established. This model was utilized to investigate the improvement effects of water replacement efficiency under various inflow forms and engineering measures. The research findings indicated: (1) the presence of surrounding mountainous terrain result in uneven distribution of wind fields across the lake surface. (2) Influenced by wind, the lake's flow field is complex, with multiple circulation patterns

收稿日期: 2024-11-13

基金项目: 云南省科技厅重点研发计划(202203AA080010); 中国电力建设股份有限公司核心攻关技术项目(DJ-HXGG-2021-04, DJ-HXGG-2021-05); 云南省数字水工程技术创新中心(202305AK340003)

作者简介: 李翰卿(1995—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事水文水资源、水力学及河流动力学研究。E-mail: hugolhq@foxmail.com

通信作者: 张小潭(1990—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: zxt2306@163.com

that hinder the water replacement process. (3) Removing certain guide flow barriers and installing 7.5 kW submersible propellers can play a “clear water introduction and pollution pushing” role, optimizing the water replacement process. This approach holds certain reference value for the optimization of water diversion project.

Keywords: wind driven current; hydrodynamic; water replacement; highland lake; MIKE; PHOENICS; Caohai; submersible water impeller

0 引言

滇池分为外海和草海, 草海位于滇池北部, 昆明主城下方, 属于半封闭式浅水湖泊, 2019年实施完成的昆明市草海导流带加固完善工程, 又将草海人为的划分为两个部分, 导流带内河流有新运粮河、老运粮河和王家堆渠3条, 草海侧河流有乌龙河、大观河、西坝河和船房河4条。草海入湖河流共有7条, 但集水面积小, 入流量小, 水动力主要依靠风场提供, 因此湖泊水流流速缓慢, 水体交换能力弱, 污染物沉积等问题导致湖泊水质日益恶化。

直至牛栏江-滇池补水等一系列工程措施的实施, 草海水质才逐步好转。为了进一步巩固治理成果, 涂家伟等^[1]提出以水环境容量来指导流域点、面源污染物的总量控制。蒋芳旋等^[2]通过模拟物理除藻方式控制草海藻类扩散与繁殖。王琦等^[3]利用不同生物及其不同密度对导致草海富营养化的TN、TP的去除率进行研究。以上研究为草海水质精细化管理提供了依据, 但针对潜水推流器对草海水环境数值模拟方面的研究较少, 潜水推流器所产生的高速水流能够使溶解氧DO的浓度上升、改善水流条件、防止污泥沉降、降低水体中叶绿素与高锰酸盐含量等^[4]。

目前, 国内外水环境数学模型有EFDC、MIKE21、Delft3D等。其中MIKE21模型在计算中可综合考虑地形、风速、风向等多种因素影响, 因其精度较高、对浅水湖泊适用性广, 被广泛应用于滇池、洱海、异龙湖、普者黑等高原湖泊水质研究。基于此, 本研究利用PHOENICS软件模拟了考虑山体遮挡的三维湖泊风场, 并利用MIKE21软件二维水动力与对流扩散耦合模型建立了滇池草海水动力以及污染物输移模型, 研究拆除部分导流带, 同时增设潜水推流器前后污染物的输移变化特性, 以为滇池水环境提升提供数据支撑, 助力河湖生态环境复苏。

1 模型及数值计算

1.1 模型建立

草海流域面积195 km², 当草海处于正常蓄水位时, 湖面面积约为10.8 km², 占滇池流域总面积约

2.7%, 平均水深2.3 m, 容积约为0.25亿m³, 湖岸线长约23 km, 南北长约7.4 km, 东西最大宽度约2.25 km, 最小宽度约0.12 km, 湖泊宽深比为1:869, 属于浅水湖泊, 呈现出南北向长的“瘦长”型水体。草海紧邻昆明市的西南区域, 地理坐标为: 102°24'E—102°28'E、24°57'N—25°00'N。入湖河道主要有7条。草海现状唯一的出湖通道为西园隧洞, 其最大过流能力为40 m³/s, 草海卫星图及水系图如图1所示。

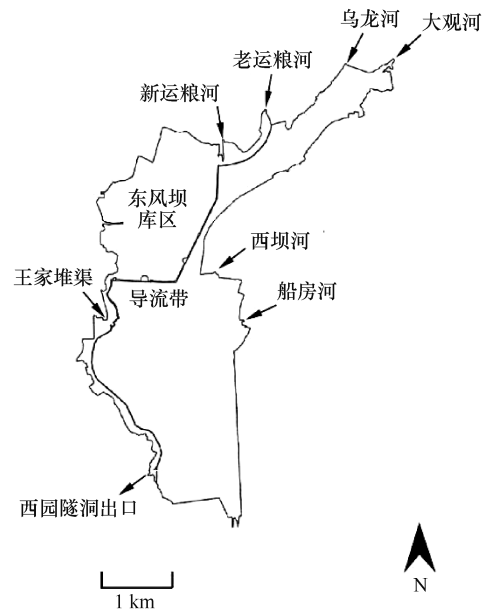


图1 草海水系示意

草海靠近西山, 西山及其周边山体的海拔较高, 西南风作为主导风向时, 这些山体也会对草海湖面的风速和风压产生影响, 造成草海湖面风场在时空上存在差异, 进而对湖泊流场产生影响, 因此利用PHOENICS软件对风场进行三维模拟。气象数据采用与草海邻近的昆明巫家坝机场气象站近40年气象数据, 站点经度102.743 536°E、纬度24.992 364°N, 站点高程1 894.94 m, 主导风向为西南(SW), 平均风速4.66 m/s。站点1月—4月份平均压强大小为81 168.51 Pa。风压系数为1.428 57, 地面粗糙度0.5 m, 利用地理空间数据云提取30 m精度草海及其周围山体地理信息数据, 构建三维模型

后导入软件, 将计算区域 $12\ 789.20\ \text{m} \times 14\ 035.1\ \text{m} \times 2\ 000\ \text{m}$ ($L \times W \times H$) 划分为 1 800 万个六面体计算单元进行计算。

结合滇池湖底地形图与 Google earth 确定湖泊边界, 坐标系为北京 102°E , 利用 MIKE 软件构建二维水动力模型, 模型共计 4 883 个计算节点和 8 478 个计算单元(见图 2)。设置草海 4 条河道为入湖河道和 1 条出湖河道, 共计 5 条河道为开边界, 将其余边界设置为陆地边界, 设置糙率、涡粘系数、风作用力、科氏力、降雨蒸发等条件后进行计算。

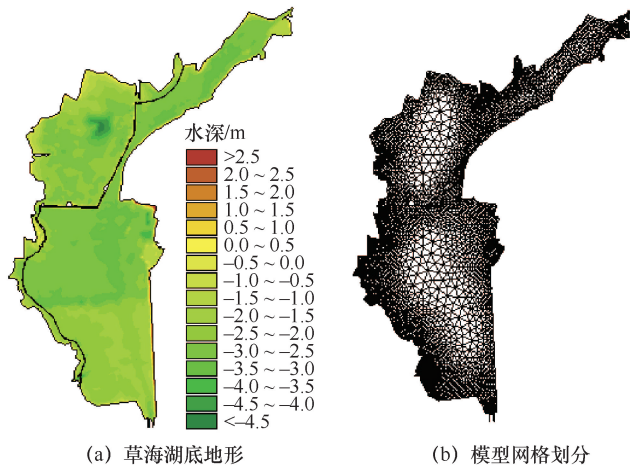


图 2 草海湖底地形图与草海区域网格划分

1.2 控制方程

针对三维风场模拟本文主要利用 PHOENICS 内的 FLAIR 模块, 其根据 Elliptic Staggered 公式下的 KECHEN 模型进行湍流计算 ($k-\varepsilon$ 模型), 模型相应输运方程^[5]如下

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{\partial k} (G_k + C_3 G_b) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2)$$

式中, G_k 为因平均速度梯度而引起的湍动能 k 的产生项; G_b 为因浮力引起的湍动能 k 的产生项; Y_M 为可压湍流中脉动扩展的贡献; C_1 、 C_2 、 C_3 为经验常数, $C_1 = 1.15$, $C_2 = 1.9$; σ_k 、 σ_ε 分别为湍动能 k 和消散率 ε 对应的 Prandtl 数, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$; S_k 、 S_ε 为用户定义的原项。

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

式中, C_μ 为常数, $C_\mu = 0.090\ 004$ 。

MIKE21 FM 模型基于三向不可压缩和 Reynolds 值均布的 Navier-Stokes 方程进行计算, 并服从于 Boussinesq 假定和静水压力假定^[6-7]。其中方程为

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h \bar{v}}{\partial y} = h S \quad (4)$$

$$\frac{\partial h \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h \bar{u} \bar{v}}{\partial y} = f \bar{v} h - g h \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g h^2}{2 \rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (h T_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x} (h T_{xy}) + h u_s S \quad (5)$$

$$\frac{\partial h \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h \bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial h \bar{u} \bar{v}}{\partial x} = f \bar{u} h - g h \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g h^2}{2 \rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (h T_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h T_{xy}) + h v_s S \quad (6)$$

式中, t 为时间; x 、 y 为笛卡尔坐标系坐标; η 为水位; d 为静水深; $h = \eta + d$ 为实际水深; \bar{u} 、 \bar{v} 分别为 x 、 y 方向上的速度分量; ω 为地球自转角速度; φ 为当地纬度; f 为哥氏力系数, $f = 2\omega \sin \varphi$; g 为重力加速度; ρ 、 ρ_0 为水的密度与相对密度; S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yy} 分别为辐射应力分量; S 为源项, u_s 、 v_s 为源项水流流速, τ_{sx} 、 τ_{bx} 、 τ_{sy} 、 τ_{by} 为不同方向上的剪应力。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x_i} + v \frac{\partial C}{\partial y_i} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (7)$$

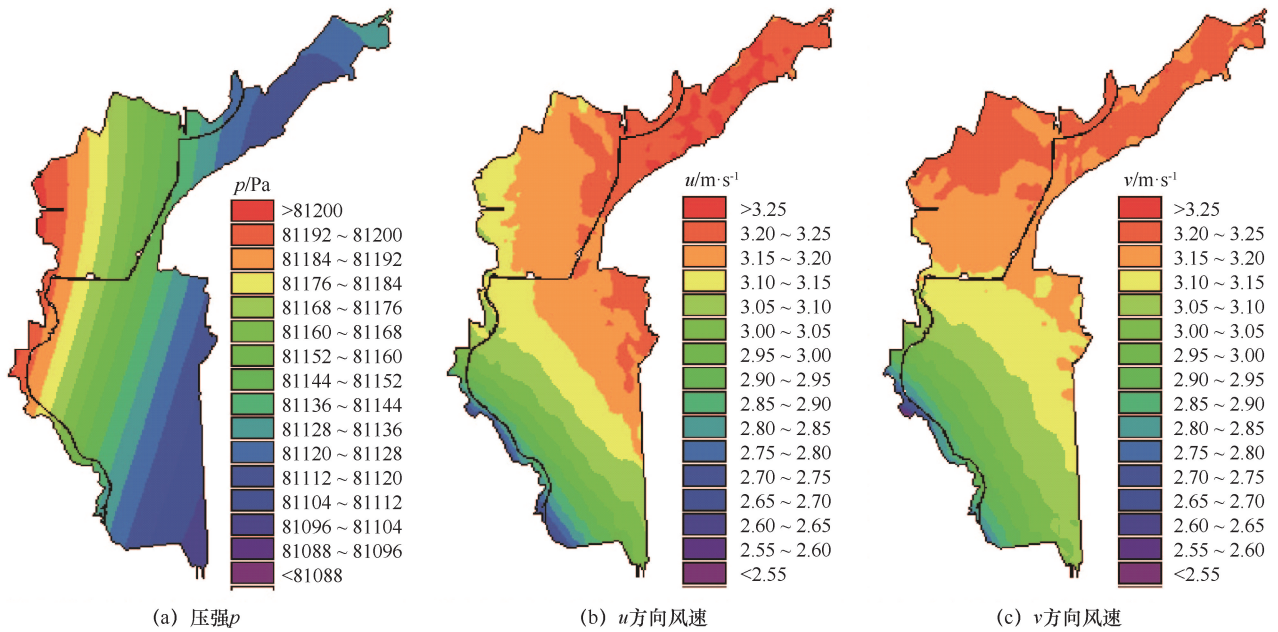
式中, C 为污染物浓度; D_x 、 D_y 分别为 x 、 y 方向上的扩散系数。

2 数值模拟结果分析

2.1 风场模拟结果分析

利用 tecplot 软件对 PHOENICS 模拟结果中水面上 10 m 的风向、风速、风压数据进行提取, 得到二维平面上的草海湖泊风场数据, 如图 3 所示。

由成果可知, 草海湖泊风场受到山体遮挡的影响, 压强场与风速场在湖泊表面(距湖面 10 m 处)呈现出的不均布现象。湖泊压强场西高东低, 东西两端压强差约 100 Pa。湖泊风场在 u 、 v 方向上表现出相似分布规律, 靠近山体风速低, 远离山体风速高, 具体表现为西南平均风速为 3.74 m/s, 由西南向东北方向风速逐渐增大, 东北平均风速为 4.57 m/s, 增大 0.83 m/s。风向与草海北入流西南出流的方向相反, 置换水流需逆风行径至西园隧洞, 用于置换的清水流动因此受阻。

图3 水面上10m处压强、 u 方向风速、 v 方向风速

2.2 水动力模拟结果分析

草海湖泊水流相对稳定后, 流场成果如图4所示。

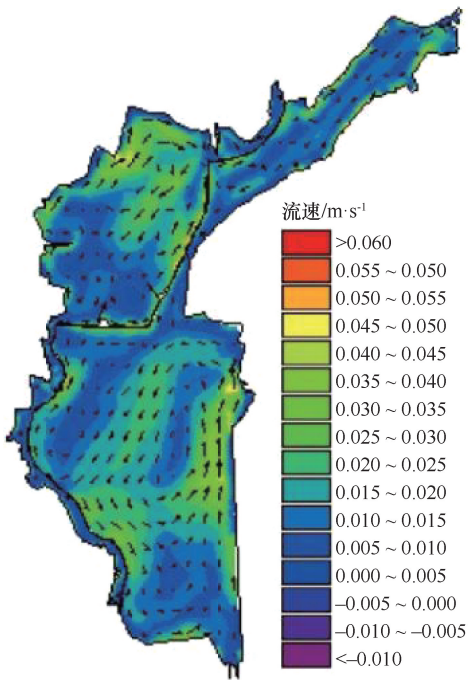


图4 草海流场示意

经计算可知, 草海在山体遮挡后的非均匀西南风(SW)风场的作用下, 水顺风流动, 但由于边界限制, 产生回流, 水流场呈现多个大小不一的顺时针或逆时针环流, 且东部流速相较西部较大, 且东部水流流向以顺风向为主, 湖泊整体平均流速 0.0161 m/s 。结果还表明受到风的作用, 湖泊水体随风迁移, 但受到水量平衡的影响转向后形成逆风补偿

流, 在流向转变的过程中流速减小, 水位升高, 呈现出西低东高态势, 两侧平均水位差达 0.014 m 。

由此可见草海湖泊流场受到山体遮挡后风场作用而产生的风生流特征明显, 水体内产生了多个环流, 且环流的环边外流速高环内流速低, 不均匀的风场导致靠近山体的水流流速会相应减小, 水位在湖泊两侧出现差距。

2.3 水体置换数值模拟结果

根据牛栏江-草海应急工程2016年向草海补水规模为 $55.0\text{ 万 m}^3/\text{d}$ ^[8]换算可知入湖流量为 $6.3\text{ m}^3/\text{s}$ 。由于草海补水工程补水通道以大观河为主, 因此仅设置大观河为主要入湖边界, 入湖流量为 $6.3\text{ m}^3/\text{s}$ 。出湖条件为西园隧洞, 由于闸门与水泵同步运行, 因此设置边界条件为 $-6.3\text{ m}^3/\text{s}$ 。设置初始浓度100, 入湖水体浓度为0。在大观河单引水口 $6.3\text{ m}^3/\text{s}$ 流量情况下, 水体置换效果不佳(见图5)。导流带内水体无法与引入水体产生水体交换, 仅有左侧导流带内少部分水体在弱交换情况下得到置换。导流带以外水体置换效果较为良好, 没有明显的死水区, 但由于风生流产生的巨大环流, 环边流速高环内流速低, 环流内水体受到环流影响而滞留在环内, 因此草海东部存在椭圆形滞水区, 该滞水区的存在对湖泊整体水体置换时长产生影响。

2.4 拆除部分导流带并增设潜水推流器模拟结果

在保证新老运粮河各类污染源满足标准的情况下, 大观河入流流量提升至 $10\text{ m}^3/\text{s}$, 以加快水体置换进程, 拆除湖泊北端新老运粮河段部分导流带, 流

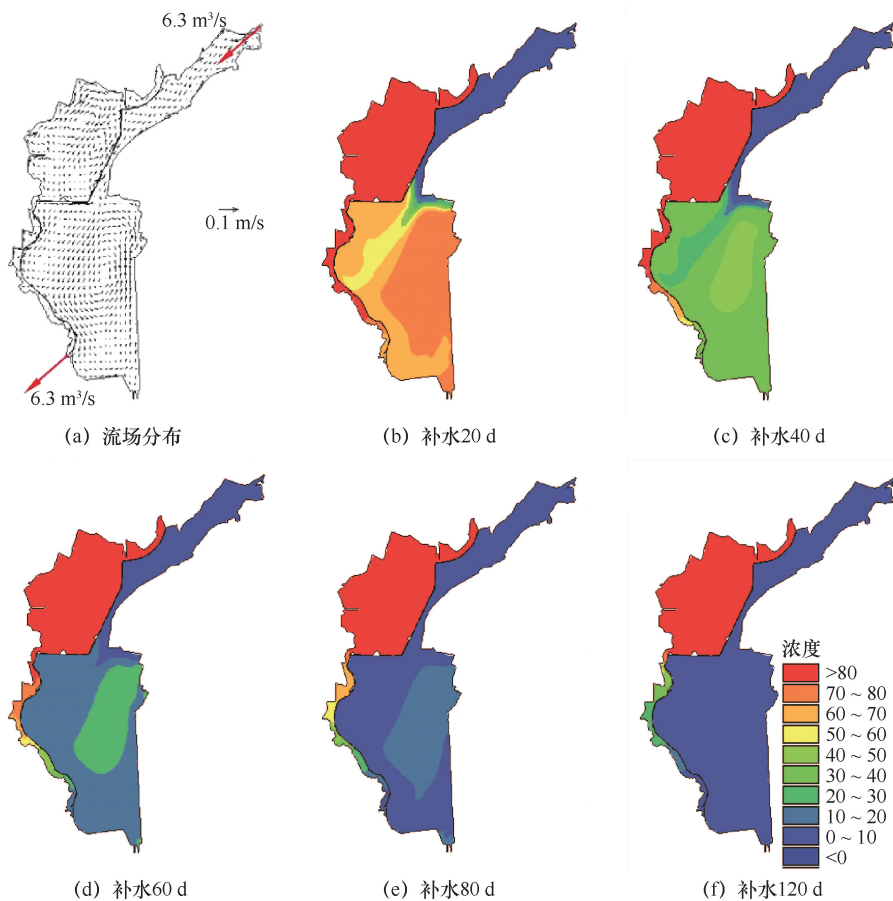


图5 大观河单引水口 $6.3\text{ m}^3/\text{s}$ 流场及水体置换成果

入的清水被拆除后的导流带一分为二，一部分进入导流带外的草海主体区域，另一部分进入导流带内，使得导流带两侧水体都能得到交换，简化引水过程；拆除西园隧洞口南侧小段导流带，使得水流能够更加通畅地流向出口处。拆除后流场如图6所示。

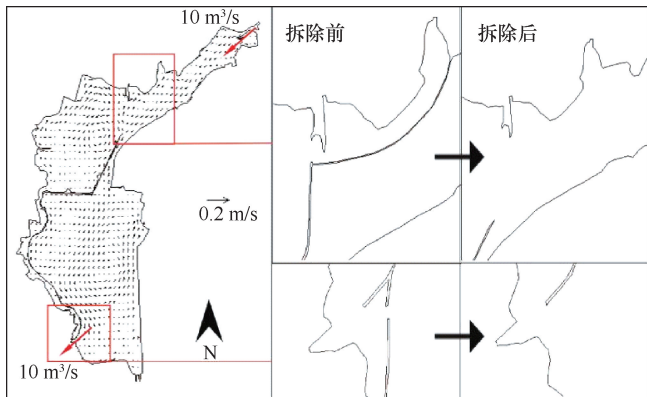


图6 导流带拆除前后对比

由于导流带内区域整体呈现漏斗形，水流“易进难出”，并且导流带内存在多个环流对清水的流入产生阻碍，水体置换困难。为了能够“辅助”水流进入到导流带内，加速水体置换进程并且考虑到新老

运粮河内的水质不稳定本研究模拟在导流带入口处增设潜水推流器对水流进行推流，使清水能够通畅进入到导流带内，增快水体置换的进程。采用 7.5 kW 推流器以提高草海水体置换能力，其叶轮直径 $1\ 300\text{ mm}$ ，叶轮转速 110 r/min ，单机搅拌能力： 200 m 液体，最大浸没深度 10 m ，推流等效出口流量为 $2.5\text{ m}^3/\text{s}$ ，等效的出口流速为 2.1 m/s 。为改善区域水体置换能力采用可转向潜水推流器进行推流，其主要由扇叶、电机、连接机构等组成，推流器主体示意图及推流器流速分布如图7所示。

考虑到潜水推流器的影响范围及推流能力，设置两个推流器于被拆除导流带处，将大观河引入的清水顺利推送至导流带内，两个潜水推流器位置及推流参数如表1所列。

在增设潜水推流器后，在推流器附近水体流速增大，导流带以内水动力情况有所改善，污水得以顺利流向出口。增设后的导流带内平均流速为 0.0187 m/s ，相较未增设提升了 10.65% ，且区域内水体置换效果改善明显，说明潜水推流器加速了水流并将其引入到导流带内，起到了“引清推污”的作用。在引流

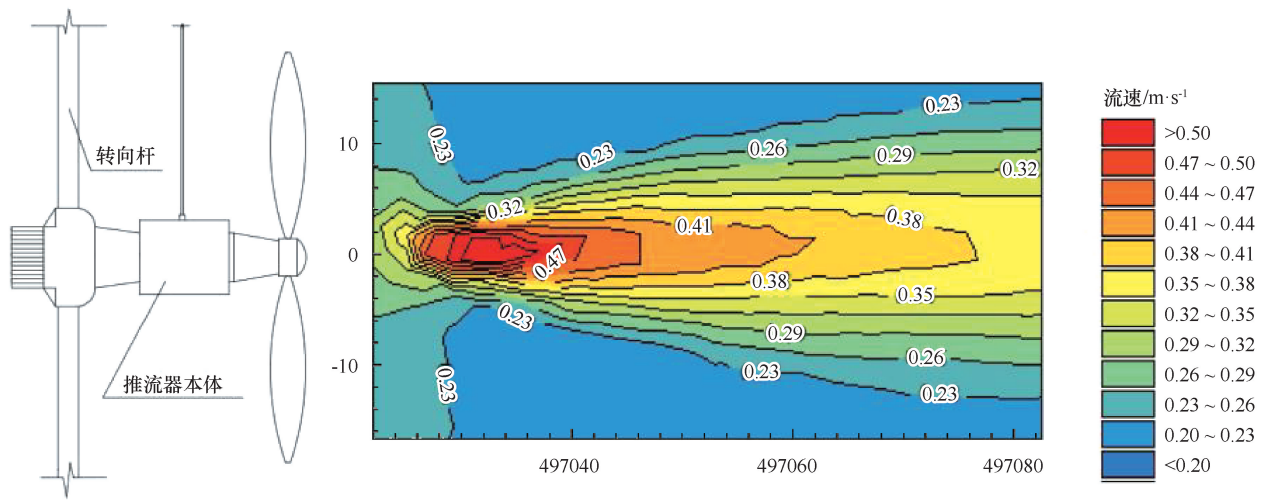


图7 7.5 kW 推流器主体及推流流速分布

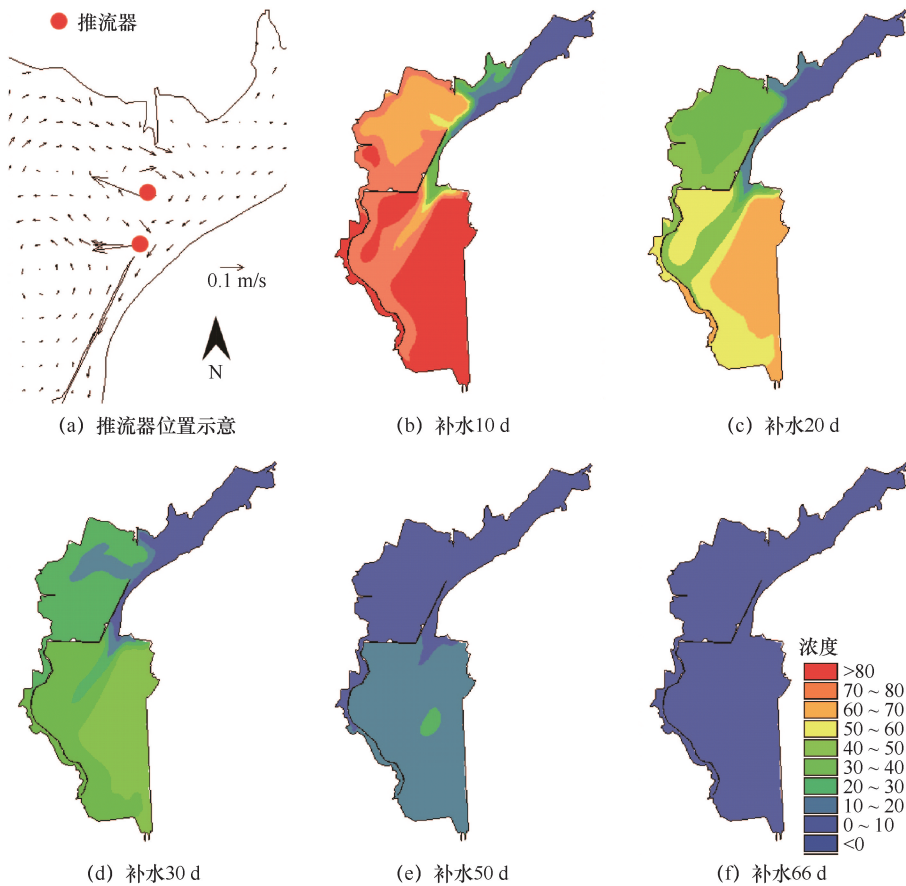


图8 增设潜水推流器水体置换成果

20 d时, 未增设推流器的导流带内水体相对浓度为52.72%~87.06%, 增设推流器后的下降至27.30%~59.74%, 相对浓度整体下降20%左右。模拟到达66 d时, 湖泊内水体相对浓度均下降至10%以内, 已满足水体置换需求。由此可知潜水推流器加速了水体置换的进程, 使导流带内被置换水体能够顺利排出。

表1 推流器参数

推流器名称	等效流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	方向 倾角/ ($^{\circ}$)	U / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	V / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	推流器坐标
推流器1	2.5	270	-2.1	0	880467, 2568347
推流器2	2.5	270	-2.1	0	880427, 2568104

3 结 论

(1)草海水体在湖泊表面风场受到周围山体遮挡的影响呈现出靠近山体气流流速低, 气压小; 远离山体气流流速高, 气压大的不均匀分布特征, 从而导致水流在浅水区域顺风而行且流速较高, 受到边界阻挡和水量平衡的影响后产生多个大小不一的环流, 环流的存在会导致水体滞留从而延长湖泊水体置换时间, 湖泊表面风向以西南(SW)风为主, 风向与草海北进西南出的水流方向相反, 置换水流需逆风行径至西园隧洞, 用于置换的清水流动因此受阻。

(2)拆除部分导流带并增设潜水推流器能够增强导流带内水体水动力情况, 导流带内流速提升 10.65%, 20 d 时导流带内相对浓度整体下降 20%左右, 66 d 时满足水体置换需求, 且区域内水体置换效果改善明显, 潜水推流器加速了水流并将其引入到导流带内, 起到了“引清推污”的作用, 由此可知潜水推流器加速了水体置换的进程, 使导流带内被置换水体能够顺利排出。

参考文献:

- [1] 淦家伟, 杨洋, 马巍, 等. 滇池流域水环境承载力及其提升方案研究[J]. 人民长江, 2021, 52(8): 38-43.
- [2] 蒋芳旋. 滇池草海蓝藻收集装置水动力数值模拟研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
- [3] 王琦, 刘高慧, 肖能文, 等. 不同生物联合对滇池草海水质的净化作用[J]. 水资源保护, 2020, 36(3): 89-97.
- [4] HIDEAKA T. Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea [J]. Continental Shelf Research, 1984, 3(3): 311-326.
- [5] 庄智, 余元波, 叶海, 等. 建筑室外风环境 CFD 模拟技术研究现状[J]. 建筑科学, 2014, 30(2): 108-114.
- [6] 许婷. MIKE21 HD 计算原理及应用实例[J]. 港工技术, 2010, 47(5): 1-5.
- [7] JUNGKYU A. Development of two-dimensional inundation modelling process using MIKE21 Model [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(9): 3968-3977.
- [8] 姚云辉, 马巍, 施国武, 等. 牛栏江—草海补水与西园隧洞协同运行方案研究[J]. 人民长江, 2019, 50(5): 133-139.

(责任编辑 王 璐)