

考虑鱼类生境垂向异质性的深水湖泊适宜生态水位研究*

司源^{1,2}, 马冰^{1,2}, 刘晓波^{1,2**}, 董飞^{1,2}, 邓欣¹, 杨坪宏³, 杨文春⁴

(1:中国水利水电科学研究院 流域水循环与水安全全国重点实验室, 北京 100038)

(2:水利部京津冀水安全保障重点实验室, 北京 100038)

(3:云南省水文水资源局, 昆明 650106)

(4:云南省水文水资源局玉溪分局, 玉溪 653100)

摘要: 抚仙湖是我国蓄水量最大的深水型淡水湖泊, 2010年以来, 因入湖流量减小等原因, 湖水水位出现下降现象, 土著鱼类自然繁殖受到影响。为保护抚仙湖珍稀鱼类资源及生物多样性、维持湖泊生态系统健康可持续发展, 亟需研究确定面向抚仙湖特有鱼类生境保护与修复的适宜生态水位。本文以抚仙湖特有鱼类鱈浪白鱼 (*Anabarilius grahami*) 为目标物种, 针对鱈浪白鱼成鱼期生境需求, 选取水温、流速、溶解氧三个关键生境因子, 考虑抚仙湖深水湖泊特征, 构建了基于环境流体动力学模型 (EFDC) 的三维水动力水质模型, 以生境模拟法为基础提出了适用于深水湖泊的垂向累计加权可利用面积, 计算得到了抚仙湖适宜生态水位目标值并分析了可达性。结果表明: ①水温、流速、溶解氧三个关键生境因子适宜度指数空间分布特征不同。水温、流速适宜度指数随水深增加变化幅度较小且对三者综合后的生境适宜度指数影响不大, 而当水深大于15m时溶解氧适宜度指数显著减小, 溶解氧是垂向上影响生境适宜性分布的主要因素; ②不同水位方案下鱈浪白鱼生存空间内 (水下0~20m范围) 加权可利用面积变化规律基本相同。随水深增加, 适宜鱈浪白鱼生长的加权可利用面积呈逐渐减少特征, 并在水深大于15m后大幅减少; ③建立湖水水位与鱈浪白鱼生境垂向累计加权可利用面积之间的响应关系曲线, 发现垂向累计加权可利用面积随水位上升先增加后减少特征, 曲线最大值对应的适宜生态水位目标值为1722.29m, 考虑气候变化与人类活动驱动下的抚仙湖水位变化预测以及流域规划的引调水规模, 该适宜生态水位目标值具有可达性。

关键词: 抚仙湖; 深水湖泊; 生态水位; 生境模拟; EFDC

Determining the suitable ecological water level of a deep lake considering the vertical heterogeneity of fish habitat

Si Yuan^{1,2}, Ma Bing^{1,2}, Liu Xiaobo^{1,2**}, Dong Fei^{1,2}, Deng Xin¹, Yang Pinghong³ & Yang Wenchun⁴

(1: State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, P.R.China)

(2: Key Laboratory of Water Safety for Beijing-Tianjin-Hebei Region of Ministry of Water Resources, Beijing 100038, P.R.China)

(3: Yunnan Hydrology and Water Resources Bureau, Kunming 650106, P.R.China)

(4: Yuxi Branch of Yunnan Hydrology and Water Resources Bureau, Yuxi 653100, P.R.China)

Abstract: Lake Fuxian, the largest deep freshwater lake in China in terms of water storage capacity, has experienced a decline in water level since 2010 due to reduced inflow and other factors, which has adversely affected the natural reproduction of its indigenous fish species. To protect the rare fish resources and biodiversity of Lake Fuxian and ensure the healthy and sustainable development of its ecosystem, it is imperative to determine an appropriate ecological water level that facilitates the protection and restoration of the habitats of its endemic fish species. This study focused on *Anabarilius grahami*, an endemic fish species of Lake Fuxian, which was taken as the target species for analysis. Based on the habitat requirements of *Anabarilius grahami* during its growth period, three critical habitat factors were identified: water temperature, flow velocity, and dissolved oxygen (DO). Considering Lake Fuxian's characteristics as a deep lake, a three-dimensional hydrodynamic and water quality model was established using the Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC). The Vertical Cumulative Weighted Usable Area (VCWUA), tailored for deep lakes, was proposed, and the habitat simulation method was employed to calculate the suitable ecological water level for Lake Fuxian and evaluate its feasibility. The study obtained several key findings: 1) The spatial distribution characteristics of the Suitability Index (SI) for the three key habitat factors—water temperature, flow velocity, and DO—exhibit differences. The SIs for water temperature and flow velocity show minimal variations at different depths and have little impact on the comprehensive Habitat Suitability Index (HSI). However, the SI for DO decreases significantly when the water depth exceeds 15 meters, which is the main factor affecting the vertical distribution of suitable habitat space. 2) Under different water level schemes, the variation trend of the Weighted Usable Area (WUA) in the living space (0-20m underwater range) of *Anabarilius grahami* is consistent. As the water depth increases, the WUA first increases and then decreases, reaching its peak at a water depth of 15 meters. 3) By analyzing the relationship between the water level of Lake Fuxian and the VCWUA of *Anabarilius grahami*, it was found that the VCWUA first increases and then decreases with the rise of water level. The target value of the suitable ecological water level corresponding to the maximum value of the curve is 1722.29 m. Considering the predictions of water level changes driven by climate change and human activities, as well as the scale of water diversion projects implemented in the Lake Fuxian basin, this target water level is deemed achievable.

Keywords: Lake Fuxian; Deep Lake; Ecological Water Level; Habitat Simulation; EFDC

湖泊是陆地表层系统最基本的地理单元, 也是地表水资源的重要载体, 具有提供水源、养殖水产、净化水质、维护生物多样性等生态服务功能, 在保障全球水生态安全格局中占有重要地位^[1-2]。近年来, 全球气候变化和人类活动导致部分湖泊水位波动变化规律异常, 持续高或低的水位均会损害湖泊完整性, 打破生态系统平衡, 威胁水生生物生存和湿地生态恢复, 对湖泊经济效益发挥也会产生影响^[3-5]。确定湖泊生态水位对于维系湖泊生态系统结构与功能、促进流域水资源高效开发利用具有重要意义, 也是湖泊管理和调控的重要依据。

关于湖泊生态水位研究, 早期研究主要集中于湖泊最低生态水位或最小生态需水量, 计算方法主要基于湖泊

* 2025-04-17 收稿; 2026-03-24 收修改稿。

国家重点研发计划项目 (2024YFC3212600) 和国家自然科学基金项目 (U2340224、U2040211、52309108) 联合资助。

**通信作者: xbliu@iwhr.com

形态分析、水文资料分析、生物最小空间需求分析等方法^[6-8]。最低生态水位是维系湖泊生态系统基本功能不严重退化的水位，若长期维持这种水位，生态系统仍会崩溃^[9]。为维持湖泊生态系统健康可持续发展，需要将湖泊水位维持在一定波动范围内，即适宜生态水位（Suitable Ecological Water Level, SEWL）。当前关于湖泊适宜生态水位的研究主要借鉴了河流的自然水流状态（Nature Flow Regime, NFR）理论^[10]，根据大小、频率、发生时间、持续时间、变化率等描述天然水文情势特征的指标来确定适宜生态水位目标值，常用计算方法为水文改变指标变化范围法（IHA-RVA）^[11-12]，其基本假设为天然水位情势是维护本土物种和生态完整性的关键指标^[13-14]。在此基础上，有研究考虑水质、营养负荷等因素对水位的需求，采用经验公式等方法对天然水位阈值范围进行修正得到适宜生态水位^[15-16]。然而，上述方法计算得到的结果在生态学意义上并不明确，缺乏生态系统对湖泊水位变化响应的定量认识。指示物种是衡量水生态系统健康的重要指标，生境模拟法根据指示物种所需的物理生境条件，通过野外监测或水环境模型获得生境因子的时空分布，并与生境适宜度评价指标相结合，模拟流量和适宜生境分布之间的定量关系，获得保护水生生物的生态流量^[17-18]。生境模拟法起源于美国鱼类和野生动物服务中心（U.S. Fish and Wildlife Service）提出的河道内流量增量法（IFIM），物理栖息地模型（Physical Habitat Simulation System, PHABSIM）所模拟的加权可利用面积（Weighted Useable Area, WUA）是栖息地评价的核心^[19]。该方法当前主要应用于河流生态流量的计算，少数研究将其改进后应用于湖泊^[20-22]，但主要针对浅水湖泊，未考虑生境因子在垂向上的分布特征和累积影响，在深水湖泊的应用尚未见报道。

高原深水湖泊多为封闭或半封闭型湖泊，湖水流动性差，换水周期长，生态系统脆弱，修复能力较弱。相对于浅水湖泊而言，深水湖泊通常具有随季节变化显著的分层与混合现象，在热分层驱动下导致光、化学、生物等其他垂直分层，理化因子分布特征与变化规律更为复杂^[23-24]，进而导致生境垂直向分布格局变化及生物昼夜垂直向迁移等行为发生^[25-26]。当前湖泊生境评价主要采用“平面视角”，忽视了垂直分层导致的生境垂直向异质性。为准确模拟深水湖泊生境空间分布，需要引入垂直向分层生境评价方法。已有研究^[27-29]采用三维水动力模型结合栖息地评价指标分析了鱼类生境垂直向分布特征，并与二维模型模拟结果和实测数据进行了比较，表明考虑生境因子垂直向异质性与均一化相比对生境评价结果存在较大差异。抚仙湖是我国蓄水量最大的深水型淡水湖泊，是我国重要的淡水资源战略储备库，也是滇中地区社会经济可持续发展的重要载体和生命线。抚仙湖水质常年保持I类，属典型的“生态保育型（水质较好）”湖泊^[30]。抚仙湖-星云湖出流改道工程于2007年完工，抚仙湖成为星云湖的上级湖，抚仙湖入湖水量大幅减少，加之降雨连续偏枯等原因，2010年以来抚仙湖水位出现显著下降现象，严重制约了鳤浪白鱼（*Anabarilius graham*）等土著鱼类自然繁殖。鳤浪白鱼具有繁殖季节从深水区向岸边浅水区洄游以及进入湖溪流和沟洞产卵的习性，需要足够高的水位淹没以形成适宜的产卵基质和微环境，水位过低会物理性阻断洄游路径，使浅水区可用于产卵的区域面积减少，阻断湖水与岸边沟洞自然连通^[31-33]，水位异常波动也可能干扰鱼类对环境（水深、水温、流速等）的感知，打乱其内在的生物节律和洄游启动信号^[34-35]，因此，实施湖泊水位调控具有重要的生态学意义。已有研究采用了湖泊形态分析法、水量平衡法等方法推求了抚仙湖最低生态水位^[36-37]，尽管最低生态水位在当前抚仙湖流域水资源条件下保障程度较高，但从长远来看，该水位无法满足鳤浪白鱼等土著鱼类生长繁殖需求，进而影响湖泊生态系统健康可持续发展，因此，亟需研究确定面向抚仙湖珍稀鱼类水生环境保护与修复的抚仙湖适宜生态水位。

本文以抚仙湖为研究对象，构建了基于环境流体动力学模型（Environmental Fluid Dynamics Code, EFDC）的三维水动力水质模型，模拟了鳤浪白鱼关键生命阶段成鱼期的关键生境因子，考虑生境因子水平及垂直向空间分布特征，基于生境模拟法提出了适用于深水湖泊的适宜生态水位计算方法，建立了水位梯度与垂直向累计加权可利用面积之间的定量关系，并计算得到适宜生态水位目标值，为抚仙湖水位优化调控提供依据。

1 研究区域和研究对象

抚仙湖地处云南省玉溪市境内，居滇中盆地中心，距昆明市东南约60km，横跨澄江市、江川区和华宁县，隶属南盘江流域西江水系（图1）。湖面呈南北向的倒葫芦形，流域面积约674.69km²（不含星云湖流域），水域面积约216.6km²，湖体南北长约31.4km，湖最宽处11.8km，湖岸线总长100.8km，最大水深158.9m，平均水深95.2m，湖体总蓄水量约206.2亿m³，占云南省九大高原湖泊总蓄水量的71.8%，是我国蓄水量最大的深水型淡水湖泊^[38]。抚仙湖地属中亚热带半湿润季风气候，具有四季如春、干湿分明的气候特征。常年平均气温15.5℃，多年平均降雨量800~1100mm，全年80%~90%降雨量集中于雨季5~10月。蒸发量一般大于降水量，介于1200~1900mm之间。全年无霜期330天，日照时数2000~2400h。

根据水利部珠江水利委员会2020年编制的《抚仙湖生态流量保障实施方案》，抚仙湖水生态保护要求主要为维持湖泊形态与鱼类水生环境，促进特有珍稀物种保育，维护湖泊水质自净能力，保护自然生态景观等。抚仙湖分布有抚仙湖特有鱼类国家级水产种质资源保护区，2010年入选第三批国家级水产种质资源保护区名单，主要保护对象为鳤浪白鱼，其他保护物种包括云南倒刺鲃、抚仙金线鲃、青虾、草鱼、鲫、鲤、鲢等。鳤浪白鱼既是抚仙湖的特有珍稀鱼类，又是主要经济鱼类，2021年被农业农村部评为我国“水产十大优质种质资源”之一。近年来，由于外来物种入侵、水体污染、过度捕捞及产卵场环境退化等原因，抚仙湖土著鱼类资源逐渐衰退，外来鱼类如太湖新银鱼等小型鱼类在食物竞争中取得胜利，已经逐渐取代土著鱼类，分别成为生活于敞水区和沿岸区底层的优势种群^[39]。鳤浪白鱼产量已由20世纪80年代全湖300~400吨降至21世纪初不足1吨^[39-40]，被列入中国物种红色名录红皮书，划定为濒危级别。近年来，抚仙湖鳤浪白鱼人工养殖和增殖放流取得了成功，2020年以来鳤浪白鱼年产量达到20吨^[41]，但仍较原有水平存在较大差距。鳤浪白鱼产卵场主要分布在明星、小湾、禄充、大湾以及孤岛一带具有风浪拍击的浅滩处，抚仙湖湖岸带主要底质类型为砾石、粗砂，为产粘性卵鱼类提供了必要的物理基质^[33,42]。

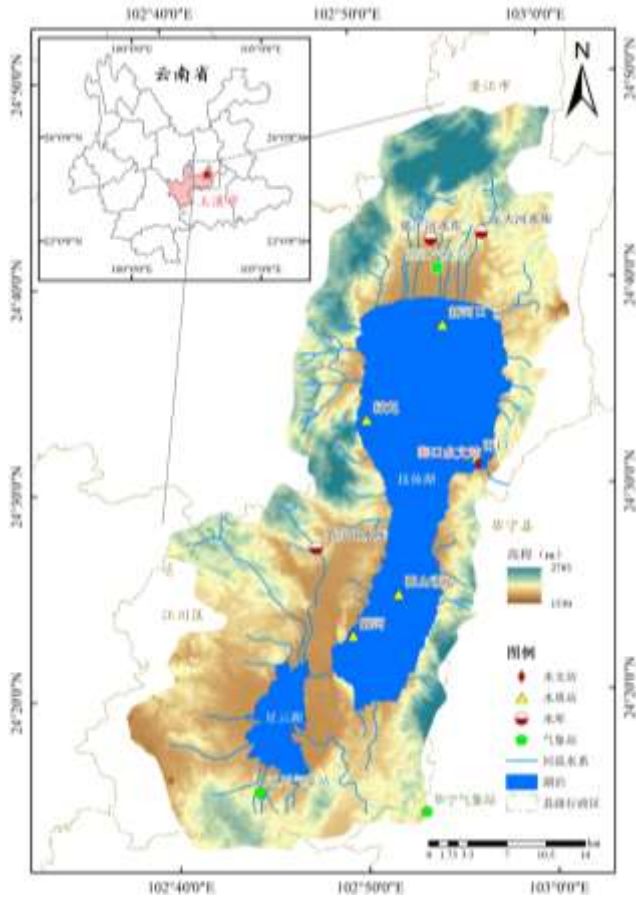


图1 抚仙湖流域水系与观测站点
Fig.1 River system and monitoring stations in Lake Fuxian basin

根据1990年出版的《抚仙湖》^[43]中鱼类产量资料记载与云南省水文水资源局玉溪分局提供的抚仙湖海口水文站水位实测数据, 1954—1977年抚仙湖年平均水位与鳣浪白鱼年产量关系如图2所示。从历史统计数据来看, 鳣浪白鱼产量与抚仙湖平均水位呈正相关关系, 水位波动可能影响鳣浪白鱼产卵、洄游等行为, 如水位升高时岸边砾石滩地淹没可使鱼类产卵有效面积增加等, 合理的水位调控对于维持抚仙湖适宜生境及特有鱼类资源恢复具有一定作用。

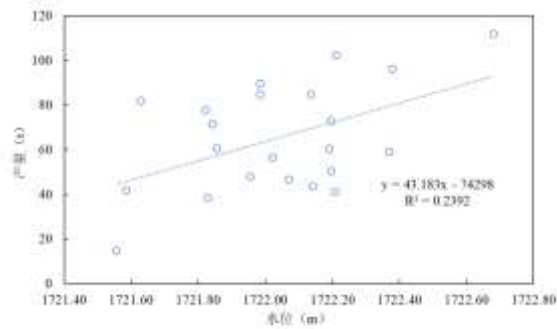


图2 1954—1977年抚仙湖年平均水位与鳣浪白鱼年产量关系
Fig.2 Annual average water level of Lake Fuxian and annual production of *Anabarilius graham*, 1954-1977

2 研究方法

2.1 三维水动力水质模型构建

为模拟抚仙湖鳣浪白鱼生境因子时空分布, 考虑到深水湖泊垂向分层特征, 基于 EFDC^[44]构建抚仙湖三维水动力水质模型。

2.1.1 控制方程 动量方程为:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial t}(m_x m_y H u) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y H u u) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x H v u) + \frac{\partial}{\partial z}(m_x m_y w u) \\
 & - m_x m_y f H v - \left(v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) H v = -m_y H \frac{\partial}{\partial x} (g \zeta + p + P_{atm}) \\
 & - m_y \left(\frac{\partial h}{\partial x} - z \frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{m_y}{m_x} H A_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{m_x}{m_y} H A_H \frac{\partial u}{\partial y} \right)
 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{m_x m_y}{H} A_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) - m_x m_y c_p D_p u \sqrt{u^2 + v^2} + S_u \\
& \frac{\partial}{\partial t} (m_x m_y H v) + \frac{\partial}{\partial x} (m_y H u v) + \frac{\partial}{\partial y} (m_x H v v) + \frac{\partial}{\partial z} (m_x m_y w v) \\
& - m_x m_y f H u + \left(v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) H u = -m_x H \frac{\partial}{\partial y} (g \zeta + p + P_{atm}) \\
& - m_x \left(\frac{\partial h}{\partial y} - z \frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{m_y}{m_x} H A_H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{m_x}{m_y} H A_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\
& + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{m_x m_y}{H} A_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) - m_x m_y c_p D_p v \sqrt{u^2 + v^2} + S_v \\
& \frac{\partial p}{\partial z} = -g H \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}
\end{aligned} \tag{2}$$

连续性方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (m_x m_y \zeta) + \frac{\partial}{\partial x} (m_y H u) + \frac{\partial}{\partial y} (m_x H v) + \frac{\partial}{\partial z} (m_x m_y w) = S_h \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (m_x m_y \zeta) + \frac{\partial}{\partial x} (m_y H U) + \frac{\partial}{\partial y} (m_x H V) = S_h \tag{5}$$

式中: (x, y) 为水平方向的曲线-正交坐标; z 为垂向 σ 坐标; u 和 v 为 (x, y) 方向的水平速度分量, m/s ; w 为 z 方向的垂直速度分量, m/s ; H 为总水深, m ; ζ 为水面高程, m ; P_{atm} 为大气压强, Pa ; m_x 和 m_y 为坐标变换系数, 笛卡尔坐标下的变换系数为1; U 和 V 为 (x, y) 方向的深度平均速度分量, m/s ; g 为重力加速度, $g = 9.81 m/s^2$; ρ 为水密度, kg/m^3 ; p 为参考密度 ρ_0 下的附加静水压, Pa ; f 为科氏力系数, s^{-1} ; A_H 为水平动量扩散系数, m^2/s ; A_v 为垂向紊动黏性系数, m^2/s ; c_p 为植被阻力系数; D_p 为投影植被区; S_u 和 S_v 为 (x, y) 方向的源汇项, m^2/s^2 ; S_h 为质量守恒方程的源汇项, m^3/s 。

温度和热传递基本方程为:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t} (m_x m_y H T) + \frac{\partial}{\partial x} (P T) + \frac{\partial}{\partial y} (Q T) + \frac{\partial}{\partial z} (m_x m_y w T) \\
& = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{m_x m_y}{H} A_b \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial I}{\partial z} + S_T
\end{aligned} \tag{6}$$

式中: P 和 Q 为 (x, y) 方向的质量通量分量, m^2/s ; T 为温度, $^{\circ}C$; I 为太阳短波辐射强度, W/m^2 ; A_b 为垂向紊动扩散系数, m^2/s ; S_T 为热交换的源汇项, J/s 。

水质变量的质量守恒方程为:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t} (m_x m_y H C) + \frac{\partial}{\partial x} (m_y H u C) + \frac{\partial}{\partial y} (m_x H v C) + \frac{\partial}{\partial z} (m_x m_y w C) \\
& = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{m_y H A_x}{m_x} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{m_x H A_y}{m_y} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{m_x m_y A_z}{H} \frac{\partial C}{\partial z} \right) + m_x m_y H S_C
\end{aligned} \tag{7}$$

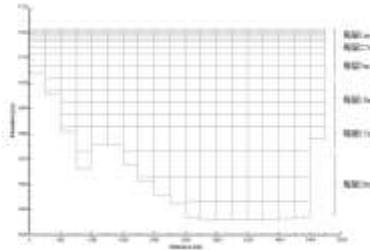
式中: C 为水质变量浓度, mg/L ; u 、 v 、 w 分别为水平曲线坐标与垂向 σ 坐标下的 x 、 y 、 z 的速度分量, m/s ; A_x 、 A_y 、 A_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的紊动扩散系数, m^2/s ; S_C 为内/外源汇项; H 为水柱深度, m ; m_x 和 m_y 为水平曲线坐标变化因子。

状态变量的动力学方程(一阶形式)为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = kC + R \tag{8}$$

式中: k 为动力学速率; R 为由于外部负荷和/或内部反应引起的源汇项。

2.1.2 网格划分 模型模拟范围为抚仙湖湖区。根据抚仙湖 2004 年 1:2000 实测水下地形资料(国家 85 高程基准), 考虑到模拟精度和计算效率, 经测试, 计算网格在平面上采用矩形网格, 大小为 $300m \times 300m$, 生成网格总数为 2368 个, 该网格能准确反映抚仙湖地形和湖区岸线的变化。垂向上采用 SGZ 坐标系统, 考虑抚仙湖深水湖泊温跃层特征及鳊浪白鱼成鱼生存空间, 采用水下 0~40m 范围网格加密(分层厚度在 1~5m)、40m 以下范围网格渐疏的非均匀分层方案, 划分为 21 层, 其中, 水面以下 1~5 层层间间隔为 1m, 6~7 层层间间隔为 2.5m, 8~13 层层间间隔为 5m, 14~16 层层间间隔为 10m, 17~18 层层间间隔为 15m, 19~21 层层间间隔为 20m。经与 Xu 等^[45]研究中垂向分层监测数据对比, 该分层方案能较好捕捉到水温、溶解氧的垂向分布规律及突变特征, 详见附图 7-8。基于实测地形数据插值得到每层计算网格离散化的底部高程。抚仙湖三维水动力水质模型网格如图 3 所示。



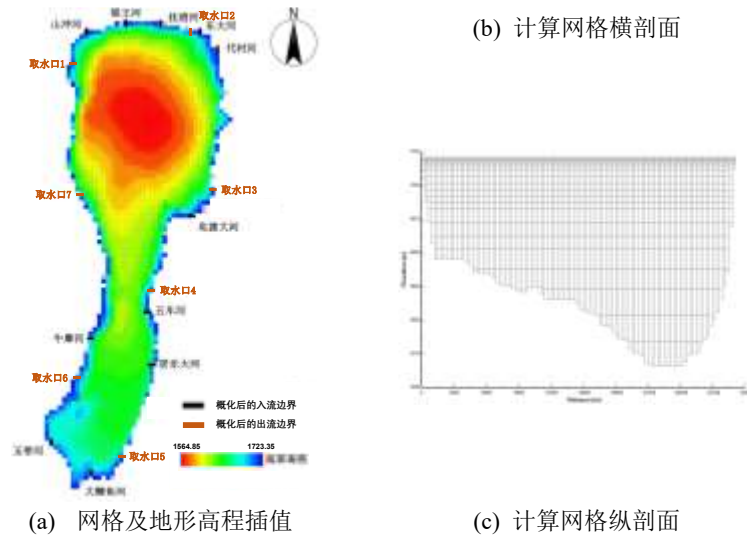


图3 抚仙湖三维水动力水质模型网格

Fig.3 Grids of the three-dimensional hydrodynamic and water quality model for Lake Fuxian

2.1.3 初始及边界条件设置 模型边界条件主要包括流量、气象、风场、水温、水质等。其中，流量边界包括入湖流量和出湖流量。抚仙湖包含大大小小入湖河流103条，根据入湖河流地理位置、流量大小及河长制管理等因素，将全部入湖河流分别概化到11个入湖点上，即入湖流量边界采用如下河流代表：山冲河、梁王河、抚澄河、东大河、代村河、矣渡大河、五车河、居乐大河、大鲫鱼河、玉带河、牛摩河，如图3(a)所示。考虑到部分河流没有流量监测数据，根据云南省水文水资源局玉溪分局提供的抚仙湖水资源量统计成果，将入湖总水量根据已有监测数据河流按比例分配到11个入湖点上。出湖流量边界根据2020年抚仙湖流域取水许可审批登记信息，以乡镇（龙街街道、右所镇、海口镇、青龙镇、路居镇、江城镇）为基本单元，考虑取水口分布集中程度及取水量大小，将从湖体取水的114个取水口概化为7个取水口进行分配。气象边界包括气压、气温、相对湿度、降水、蒸发、太阳短波辐射和云遮挡系数7类，其中，气压、气温、相对湿度采用澄江气象站逐日监测数据，降水、蒸发采用海口水文站逐日监测数据，太阳短波辐射从NASA气象数据库网站

(<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>)获取。风场边界采用气象数据库网站下载的海口站（102.95°E, 24.52°N）距离地面10m处的风速风向数据。水温边界和水质边界采用云南省水文水资源局玉溪分局提供的入湖河流实测水质数据资料。部分河流部分月份没有监测数据，类比附近其他河流及背景条件进行确定。上述边界条件取值详见附图1-4和附表1-4。模型初始条件采用计算期初始时刻日平均水位、水温等实测数据进行设置。

2.1.4 参数率定验证 采用2018年1月1日—12月31日抚仙湖实测数据对水动力水质模型的主要参数进行率定和验证，由于收集到的入湖河流水质边界只有2020年的数据资料，因此水质模型率定验证期为2020年1月1日—12月31日。参考已发表相关文献中模型参数取值范围^[46-47]，经率定模型主要参数取值见表1。在湖区盛行的西南风场持续作用下，因风向与湖区南北走向基本一致，在柯氏力与风力的综合作用在东南部狭长地带湖盆内形成一个比较稳定的北偏东湖流，主流线位于湖心偏东方向。图4中流向为北偏东的湖流注入北部湖区后，在北部主体湖心处形成一个大范围逆时针环流区，在西北部形成一个小范围的顺时针环流，南部区域由南向北分别形成两个小型的顺时针环流。从图5可以看出，水位模拟结果与实测水位过程吻合程度较高，平均绝对误差（MAE）为0.013m，相对误差（RE）为0.1%，均方根误差（RMSE）为0.018m；水温模拟结果与实测水温过程吻合程度较高，MAE为1.242℃，RE为6.732%，RMSE为1.477℃；溶解氧模拟结果MAE为0.96mg/L，RE为11.61%，RMSE为1.37mg/L，满足模拟精度要求。其他站点表层水温、溶解氧模拟值与实测值对比结果及误差统计结果详见附图5-6和附表5-6。

表1 抚仙湖水动力水质模型主要参数取值

Tab.1 Main parameters of the hydrodynamic and water quality model for Lake Fuxian		
参数名称	取值	单位
底部粗糙高度	0.01	m
风遮挡系数	1.0	无量纲
常数涡流黏度	3.0	m ² s ⁻¹
水平动量扩散系数	0.1	无量纲
纯水消光系数	0.45	m ⁻¹
表层吸收太阳辐射	1	无量纲
初始河床温度	14.6	℃
活性床温层厚度	40	m
复氧速率常数	5.32	无量纲
复氧速率温度调节常数	1.03	无量纲

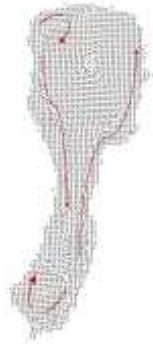


图 4 典型风场下抚仙湖流场模拟结果

Fig.4 Simulation results of Lake Fuxian flow field under a typical wind field

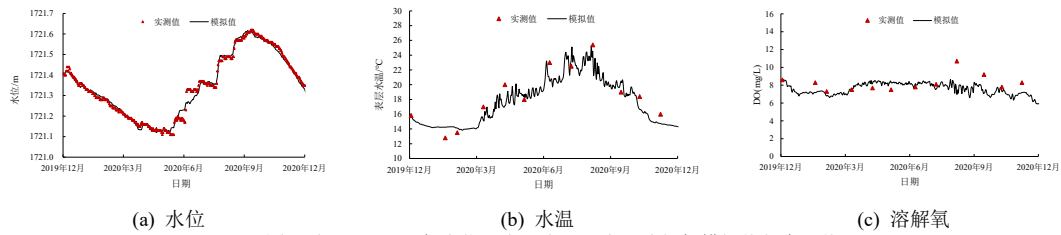


图 5 海口站 2020 年水位、表层水温、表层溶解氧模拟值与实测值对比

Fig.5 Comparison of simulated and measured values of water level, surface water temperature and surface DO at Haikou Station, 2020

抚仙湖水动力水质模型模拟得到的 2020 年 1—12 月水温分布见附图 7，与张秀锦等^[24]研究中基于抚仙湖水温实测数据得到的年内水温垂向分布特征与变化规律基本一致，表明该模型在时间尺度上能较好模拟水温季节变化与分层特征。根据云南省水文水资源局玉溪分局 6 月开展的抚仙湖水水质分层采样监测分析数据，从水面以下 0.5m 起设置表层采样点，沿采样垂线向下以 20m 为间隔设置采样点，采用哈希 HQ40D 便携式多参数水质分析仪对分层采集的水样进行现场测定，湖区采样点位置及各点位水温模拟值与实测值对比如图 6 所示，误差统计结果见附表 7。所有点位垂向水温模拟结果 MAE 均在 0.94°C 以内，RE 均在 5.44% 以内，RMSE 均小于 1.20°C，表明该模型在空间跨度上能较好模拟水温垂向分布特征。

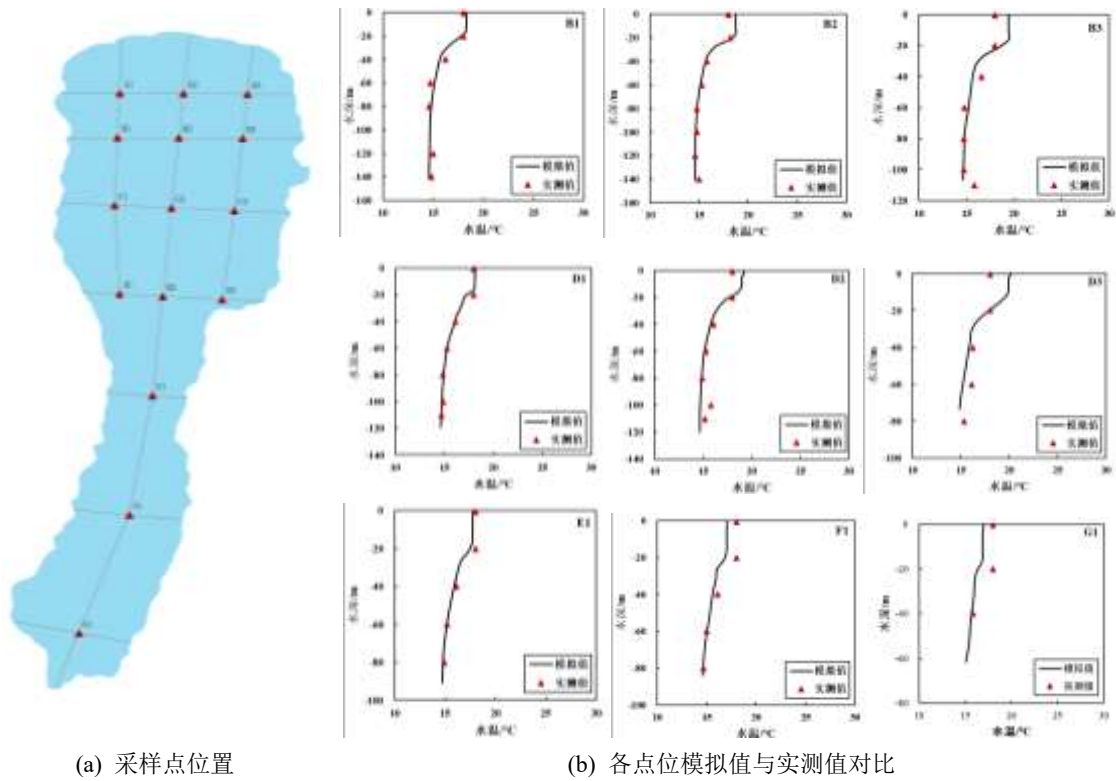


图 6 抚仙湖垂向采样点位置及各点位水温模拟值与实测值对比

Fig.6 Position of vertical sampling sites and the comparison between simulated and measured water temperature at each site, Lake Fuxian

2.2 生境适宜度评价

生境适宜度评价主要步骤包括：选取对目标物种生境有重要影响的关键生境因子；构建关键生境因子的适宜

度曲线 (Habitat Suitability Curve, HSC); 监测或模拟不同流量 (水位) 条件下生境因子分布; 计算生境适宜度指数 (Habitat Suitability Index, HSI), 获得加权可利用面积 (Weighted Usable Area, WUA); 建立流量 (水位) 与 WUA 的关系曲线。WUA 计算公式如下:

$$WUA = \sum_{i=1}^n HSI_i * A_i = \sum_{i=1}^n F[f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_j)] * A_i \quad (9)$$

式中: WUA 为目标物种的加权可利用面积, km^2 ; A_i 为第 i 个网格单元的面积, km^2 ; n 为网格总数; HSI_i 为第 i 个网格单元的生境适宜度指数; $f(x_j)$ 为第 i 个网格单元第 j 个生境因子的适宜度指数; F 为生境适宜度指数表达式, 本研究中采用乘积形式。

当前越来越多研究将生境因子选取从传统物理因子发展到水质等因素^[17]。本研究主要考虑鳊浪白鱼成鱼生境需求, 鳊浪白鱼属冷水性鱼类, 成体在湖体冷水区中上层觅食和生活, 集中分布于 0~20m 深的水层^[31], 水位波动对其生境的影响本质是通过改变水体理化分层结构实现的, 而非水深绝对值。鳊浪白鱼成体主要摄食枝角类、桡足类等浮游动物, 兼食小鱼和鱼卵等, 不依赖底栖生物或底层基质。因此, 水深和底质并非鳊浪白鱼的限制性生境要素, 水位调控的核心目标是优化水体理化分层结构。对于湖泊而言, 水温和溶解氧是鱼类生存的两个关键因素, 影响鱼类呼吸代谢、摄食生长、繁殖行为等基础生理过程^[48]。根据鳊浪白鱼习性调查, 鳊浪白鱼趋流性显著, 其生长繁殖需要具有一定流速的环境, 具有激流产卵特性, 持续的水流刺激是诱导其性腺最终成熟、排卵和受精的决定性因子^[33,40,49]。因此, 选取上述三项理化指标作为关键生境因子。根据鳊浪白鱼人工养殖水温要求^[50]结合抚仙湖水温分层特征^[24], 水温最适取值范围为 18~24°C; 在流速 0.1m/s 下出现明显的趋流游泳行为、在流速 0.25m/s 时趋流率可达 100%^[49], 流速最适取值范围为 0.1~0.25m/s; 鳊浪白鱼喜水质清新、含氧量较高的水域环境, 在含氧量 6~7mg/L 的水体生长良好^[50], 考虑到抚仙湖水水质保护目标 I 类水质标准^[51]对应的溶解氧浓度限值, 溶解氧最适取值范围为 6~8mg/L。据此, 构建关键生境因子适宜度曲线(图 7)。

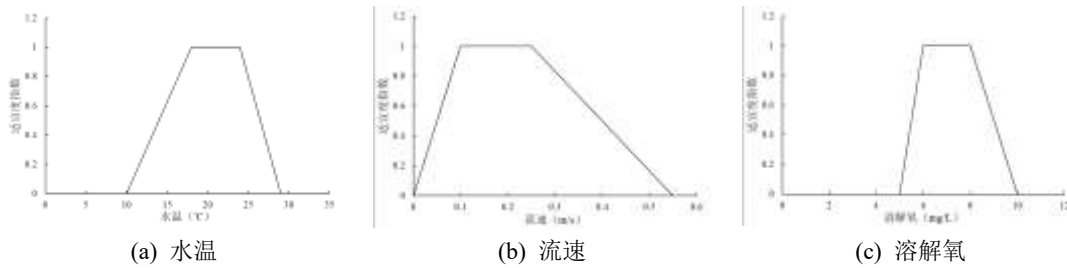


图 7 鳊浪白鱼关键生境因子适宜度曲线
Fig.7 Habitat suitability curve of key habitat factors for *Anabarilius graham*

2.3 计算方案设置

采用率定验证后的抚仙湖三维水力水质模型, 模拟湖区水下 20m 范围内 (即表层至水下第 9 层) 每一层各网格水温、流速、溶解氧三个生境因子, 结合目标物种鳊浪白鱼适宜度曲线, 计算各层 WUA 值, 最终将垂向上各层 WUA 值相加, 得到垂向累计加权可利用面积 (Vertical Cumulative Weighted Usable Area, VCWUA)。根据抚仙湖 1953—2020 年长系列水位资料统计抚仙湖历史水位变化区间, 并根据水利部发布的《第二批重点河湖生态流量保障目标》中抚仙湖最小生态水位 (1720.77m) 要求, 以 0.5m 为间隔, 设置水位梯度方案: 1721.0m、1721.5m、1722.0m、1722.5m、1723.0m、1723.5m、1724.0m。考虑到水温、流速、溶解氧均受气温、风速等气象条件影响, 本研究计算适宜生态水位时采用各气象要素多年平均值进行设置, 气温取值为 15.5°C, 风速取值为 3.89m/s, 主导风向为西南风。

3 结果与讨论

3.1 生境因子适宜度指数分布特征

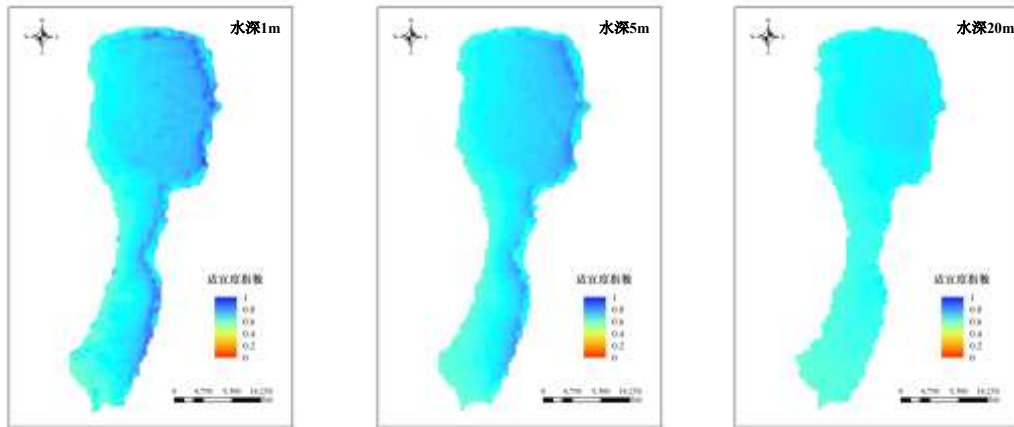
3.1.1 分层适宜度指数统计结果 针对鳊浪白鱼集中分布的水下 20m 范围 (即计算网格表层至水下第 9 层), 计算各层各网格生境因子适宜度指数。不同水位方案下鳊浪白鱼生存空间内各生境因子适宜度指数统计特征基本相同。以水位 1722.50m 为例, 分析生境因子适宜度指数随水深增加的变化规律, 各层生境因子适宜度指数统计值见表 2。从平均值来看, 随水深增加, 水温、流速适宜度指数平均值均呈减小趋势, 其中, 水温适宜度指数平均值从 0.70 减小至 0.66, 流速适宜度指数平均值从 0.45 减小至 0.36; 溶解氧适宜度指数则呈先增大后减小趋势, 最大值为 0.94 (水深 10m 处), 最小值为 0.74 (水深 20m 处)。从标准差来看, 随水深增加, 水温、流速适宜度指数标准差均呈减小趋势, 溶解氧适宜度指数标准差则呈先减小后增大趋势。

3.1.2 水温适宜度指数分布 选取表层、水下第 5 层、水下第 9 层分析生境因子适宜度指数在水平方向的分布特征。不同水深处水温适宜度指数分布如图 8 所示。表层、水下第 5 层、水下第 9 层各网格水温范围分别为 14.38~17.64°C、14.40~16.92°C、14.60~15.76°C, 对应的适宜度指数范围分别为 0.55~0.96、0.55~0.87、0.57~0.72。从水平分布来看, 表层水温适宜度指数呈自东北往西南方向递减的特征, 可能是由于风的影响, 在西南风的持续作用下导致南部水温偏低; 水下第 5 层水温也表现出相似特征, 但水温适宜度指数总体有所下降; 而至水下第 9 层, 全湖水温适宜度指数差异不大。

3.1.3 流速适宜度指数分布 不同水深处流速适宜度指数分布如图 9 所示。表层、水下第 5 层、水下第 9 层各网格流速范围分别为 0~0.16m/s、0~0.14m/s、0~0.14m/s, 对应的流速适宜度指数范围均为 0~1.00。从水平分布来看, 各层流速适宜度指数呈全湖混合分布特征, 总体而言, 湖心高于岸边、南边高于北边。

表2 各层生境因子适宜度指数统计值
Tab.2 Statistical value of suitability index of habitat factor in each layer

层数	水深 (m)	水温适宜度指数		流速适宜度指数		溶解氧适宜度指数	
		平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
1	1	0.70	0.06	0.45	0.26	0.85	0.19
2	2	0.70	0.06	0.45	0.25	0.86	0.18
3	3	0.70	0.05	0.42	0.24	0.88	0.18
4	4	0.69	0.05	0.40	0.24	0.90	0.17
5	5	0.69	0.05	0.39	0.23	0.92	0.16
6	7.5	0.68	0.04	0.36	0.21	0.93	0.16
7	10	0.68	0.04	0.36	0.21	0.94	0.16
8	15	0.67	0.03	0.36	0.21	0.91	0.21
9	20	0.66	0.03	0.36	0.21	0.74	0.36



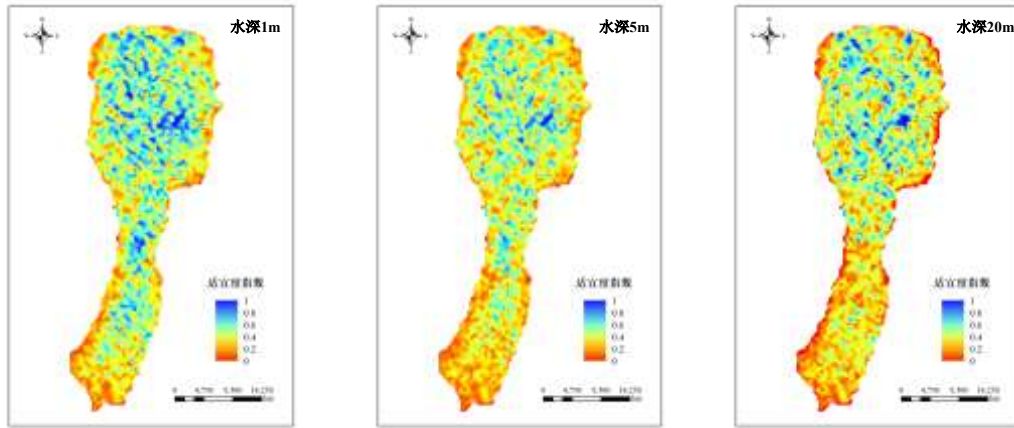
(a) 表层

(b) 水下第5层

(c) 水下第9层

图8 不同水深处水温适宜度指数分布

Fig.8 Water temperature suitability index distribution in different water depth



(a) 表层

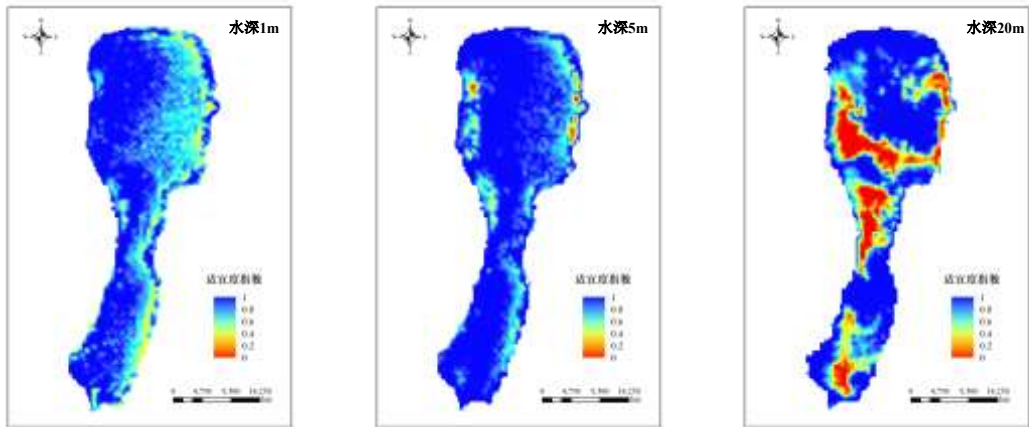
(b) 水下第5层

(c) 水下第9层

图9 不同水深处流速适宜度指数分布

Fig.9 Flow velocity suitability index distribution in different water depth

3.1.4 溶解氧适宜度指数分布 不同水深处溶解氧适宜度指数分布如图10所示。表层、水下第5层、水下第9层各网格溶解氧浓度值范围分别为5.41~9.56mg/L、3.94~9.27mg/L、3.14~8.67mg/L，对应的溶解氧适宜度指数范围分别为0.22~1.00、0~1.00、0~1.00。从水平分布来看，受水温、光合作用、大气复氧和气象条件等因素综合影响，表层溶解氧适宜度指数呈现较为明显的西岸大于东岸特征；水下第5层，溶解氧适宜度指数大于0.8的面积有所增加；而至水下第9层，湖中部溶解氧适宜度指数出现显著减小的现象，溶解氧小于5mg/L处于低氧状态，不利于鱼类生理行为。抚仙湖具有明显的热力学分层现象，本研究计算采用的气象水文要素历史平均值，与4~5月气象条件相近，该时期为温跃层发育期，温跃层在水下10~25米左右^[24,52]，因此，在水深20m处局部区域溶解氧浓度出现显著下降现象，进而导致溶解氧适宜度指数降低。



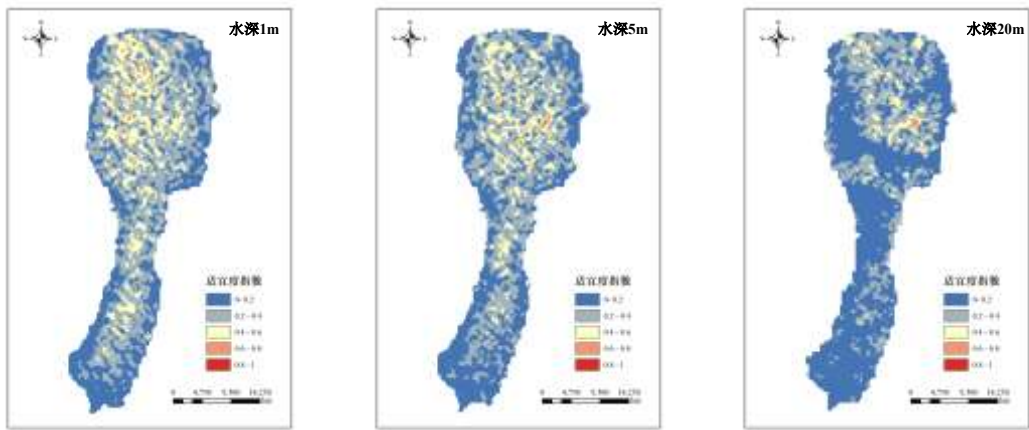
(a) 表层 (b) 水下第5层 (c) 水下第9层

图 10 不同水深处溶解氧适宜度指数分布

Fig.10 Dissolved oxygen suitability index distribution in different water depth

3.2 鳊浪白鱼生境适宜度指数空间分布特征

综合水温、流速、溶解氧三个生境因子的各层生境适宜度指数计算结果如图 11 所示。在水下 20m 范围内，随水深增加，适宜鳊浪白鱼生长的生境面积呈先增加后减少的特征，最大值为水下 15m，WUA 为 35.66km²。总体来看，生境适宜度指数分布与溶解氧适宜度指数分布特征相似，即整体呈湖岸大于湖心、西岸大于东岸、北岸大于南岸的分布特征。由表 2 也可以看出，水温、流速适宜度指数在不同层间变化不大，溶解氧浓度值变化是垂向上影响生境空间适宜性分布的主要因素。



(a) 表层 (b) 水下第5层 (c) 水下第9层

图 11 不同水深处生境适宜度指数分布

Fig.11 Habitat suitability index distribution in different water depth

3.3 水位-垂向累计加权可利用面积响应关系

不同水位方案下综合水温、流速、溶解氧三个生境因子的各层WUA计算结果见图12。在水下20m范围内，随水深增加，适宜鳊浪白鱼生长的生境面积呈逐渐减小的特征，在水深大于15m后，WUA值出现大幅减小现象。

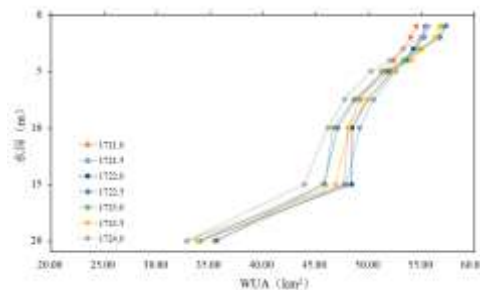


图 12 不同水位方案下分层 WUA 计算结果

Fig.12 Calculation results of WUA in different water depths under different water level schemes

不同水位方案计算得到的 VCWUA 如图 13 所示。可以看出，VCWUA 随水位上升呈先增加后减少的趋势。采用二次函数形式进行拟合，得到 VCWUA 与水位关系式为 $y = -4.4226x^2 + 15234x - 10^7$ ($R^2 = 0.66$)，曲

线顶点处即水位最大值为 1722.29m，对应的 VCWUA 为 452.98km²。

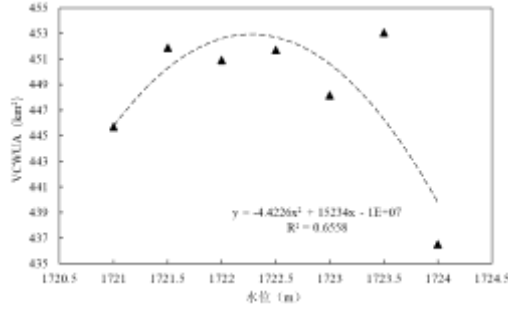


图 13 水位与 VCWUA 拟合关系
Fig.13 Fitting relationship between water level and VCWUA

3.4 适宜度曲线参数敏感性分析

生境因子适宜度曲线最适值、耐受阈等参数取值直接影响VCWUA计算结果，进而影响适宜生态水位确定。为分析参数取值对结果的影响，采用变动适宜度曲线左右边线的方法进行参数敏感性分析，包括以下三种变动方式：①固定底端变动顶端；②固定顶端变动底端；③平移。分析变动后适宜生态水位计算结果变化，如在1722.29m ± 0.10m范围内，认为适宜度曲线在该参数范围内变动对结果影响不大，如超出该范围，则应根据修正后的适宜度曲线重新计算。

3.4.1 水温适宜度曲线 以1℃为单位依次按三种方式变动水温适宜度曲线，获取水位-VCWUA关系曲线并得到适宜生态水位取值。经试验，当左侧边线在灰色阴影部分变动时对水位计算结果影响不大，当适宜度曲线变动超出此范围时水位计算结果将存在一定偏差；而对于右侧边线来说，发生三种变动时均不影响水位计算结果。水温适宜度曲线变动范围以及变动极值情景下对应的水位-VCWUA拟合关系如图14所示。

3.4.2 流速适宜度曲线 以0.01m/s为单位依次按三种方式变动流速适宜度曲线，获取水位-VCWUA关系曲线并得到适宜生态水位取值。经试验，当左侧边线在灰色阴影部分变动时对水位计算结果影响不大，当适宜度曲线变动超出此范围时水位计算结果将存在一定偏差；而对于右侧边线来说，发生上述三种变动时均不影响水位计算结果。流速适宜度曲线变动范围以及变动极值情景下对应的水位-VCWUA拟合关系如图15所示。

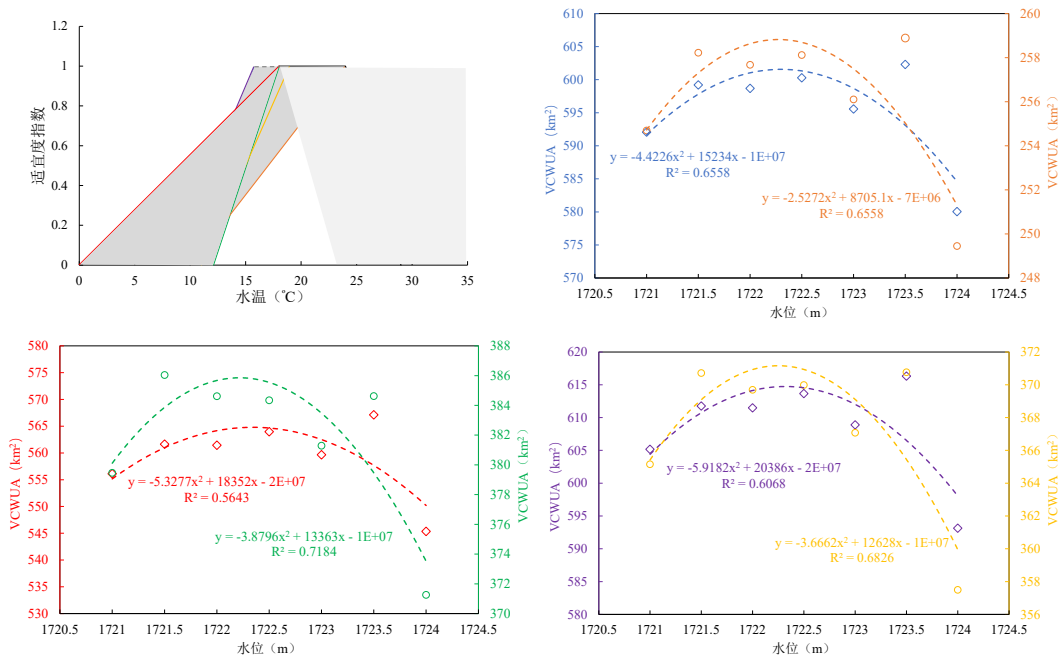


图 14 水温适宜度曲线参数敏感性分析结果
(a) 水温适宜度曲线变动范围(b) 不同水温适宜度曲线变动极值情景下水位-VCWUA 拟合关系

Fig.14 Parameter sensitivity analysis results of water temperature suitability curve

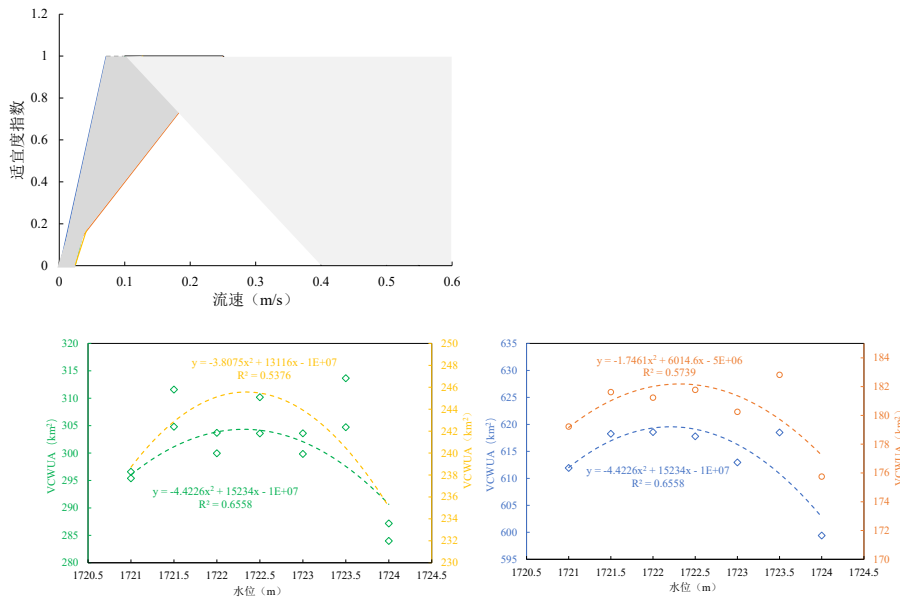


图 15 流速适宜度曲线参数敏感性分析结果

(a) 流速适宜度曲线变动范围(b) 不同流速适宜度曲线变动极值情景下水位-VCWUA 拟合关系

Fig.15 Parameter sensitivity analysis results of flow velocity suitability curve

3.4.3 溶解氧适宜度曲线 以0.5mg/L为单位依次按三种方式变动溶解氧适宜度曲线，获取水位-VCWUA关系曲线并得到适宜生态水位取值。经试验，当左、右侧边线在灰色阴影部分变动时对水位计算结果影响不大，当适宜度曲线变动超出此范围时水位计算结果将存在一定偏差。溶解氧适宜度曲线变动范围以及变动极值情景下对应的水位-VCWUA拟合关系如图16所示。

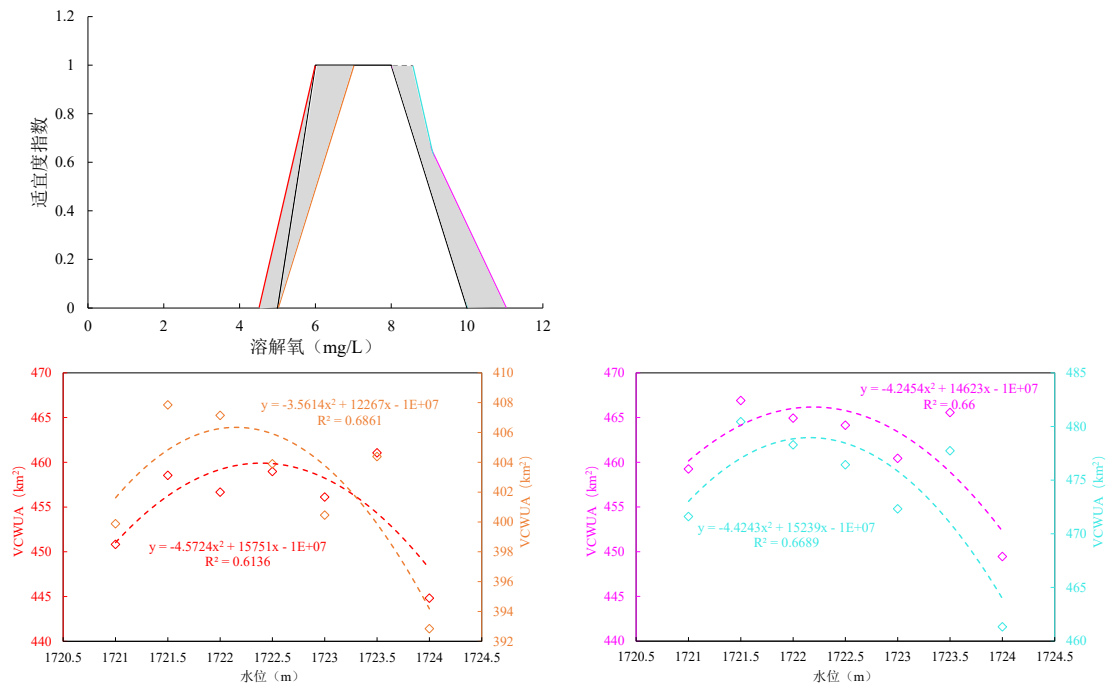


图 16 溶解氧适宜度曲线参数敏感性分析结果

(a) 溶解氧适宜度曲线变动范围 (b) 不同溶解氧适宜度曲线变动极值情景下水位-VCWUA 拟合关系

Fig.16 Parameter sensitivity analysis results of dissolved oxygen suitability curve

经上述分析可知，溶解氧适宜度曲线容差范围（即图中灰色阴影区域）面积明显大于水温适宜度曲线容差范围和流速适宜度曲线容差范围，说明抚仙湖适宜生态水位目标值计算结果对溶解氧适宜度曲线参数取值和模拟误差较为敏感。

3.5 模型模拟误差影响分析

根据三维水动力水质模型模拟结果，溶解氧模拟误差RE为11.61%，较其他指标模拟精度偏低。为分析溶解氧

模拟误差可能对结果产生的影响,结合RE取值考虑两种极端情况:①溶解氧模拟值较实测值均偏小11.61%;②溶解氧模拟值较实测值均偏大11.61%,据此在溶解氧模拟值基础上分别增加11.61%和减少11.61%进行修正,分别计算VCWUA,结果如图17所示。溶解氧增加11.61%修正后各水位对应的VCWUA较基准值平均增加了1.68%,溶解氧减少11.61%修正后各水位对应的VCWUA较基准值平均减少了7.46%,即溶解氧模拟误差对VCWUA计算结果的影响幅度在8%以内。水位与VCWUA拟合关系曲线的整体形状与峰值位置基本保持稳定,溶解氧增加11.61%对应的适宜生态水位目标值为1721.90m,溶解氧减少11.61%对应的适宜生态水位目标值为1722.62m,与基准值1722.29m相比,溶解氧模拟误差可能导致的适宜生态水位目标值偏差在[-0.39m, 0.33m]范围。

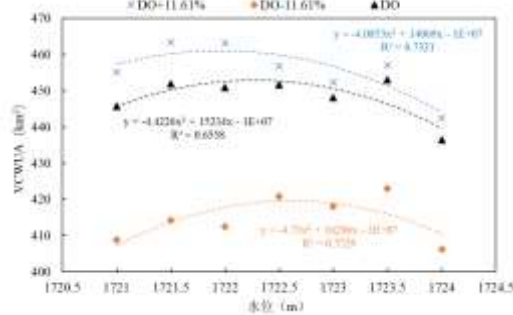


图 17 不同溶解氧模拟值修正情景下的水位与 VCWUA 拟合关系曲线

Fig.17 Fitting relationship between water level and VCWUA under different scenarios of simulated dissolved oxygen correction values

3.6 适宜生态水位可达性分析

2020年水利部印发的《第二批重点河湖生态流量保障目标》中指出,抚仙湖最低生态水位(以海口断面为参考断面)为1720.77m,调度管理目标为1721.65m。2023年11月30日审议通过的《云南省抚仙湖保护条例》中规定,抚仙湖最高运行水位为1723.35m(1985国家高程基准),最低运行水位为1721.65m。上述特征水位较2007年版《云南省抚仙湖保护条例》中规定的抚仙湖最高蓄水位1722.50m、最低运行水位1720.80m有所提高,该特征水位提高论证过程中已兼顾了防洪安全、供水安全与生态保护需求。最高蓄水位1723.35m根据抚仙湖防洪标准采用20年一遇洪水过程在起调水位1722.85m基础上经调洪计算得到,即汛限水位控制在1722.85m以下即可保证防洪库容需求。另据测算,抚仙湖每增加0.1m的水位,约可增加2100万 m^3 的调蓄库容,可供水量相应增加。综上,本研究基于鳊浪白鱼生境需求确定的适宜生态水位目标值1722.29m符合现行法定运行水位,且满足防洪、供水等功能需求。

本研究采用多年平均气象条件作为基准状态确定的适宜生态水位旨在为日后抚仙湖水水位调控提供参考目标。值得注意的是,2010年以来抚仙湖水水位出现严重下降现象^[37],自2019年11月起,连续1000多天低于法定运行水位1721.65m运行。导致抚仙湖水水位下降的原因是多方面的,可能原因主要如下:一是流域降水连续偏枯。抚仙湖2006—2013年连续8年降水持续偏少(累积偏少1225.2 mm),特别是2009—2013年遭遇连续5年大旱^[53],2015—2019年降水情况虽有所好转,抚仙湖水水位开始小幅回升,但累积效应仍处于亏损状态,2019年以来水位又出现下降趋势;二是陆域入湖来源减少。2007年出流改道工程实施,原本从星云湖流入抚仙湖的隔河流向改变,湖水补给途径减少^[54]。其他主要入湖河流入湖水量也较历史有所减少。抚仙湖主要入湖水源之一的沿湖周边泉水出水量减少,目前沿湖泉水部分供当地群众生产生活用水,大部分泉水出流流量逐年衰减;三是流域人口增长、用水结构变化、用水量增加等用水侧变化。抚仙湖为构造断陷湖,湖水主要靠溶洞、周围的小河流以及大气降水等方式补给,且大气降水是其主要的补给来源^[55],具有补给水源单一、出流小的半封闭流域或全封闭流域特点。在当前低水位运行状况下,需要考虑未来气候变化背景和人类活动综合作用影响下抚仙湖水水位变化趋势^[56],论证水位恢复可能性,分析适宜生态水位目标可达性。

根据李加龙等^[57]研究,考虑抚仙湖流域中期(2025年)、远期(2035年)用水需求,采用SSP245和SSP585两个典型气候情景进行预测,抚仙湖2021—2050年平均水位分别为1722.98m和1723.93m。上述测算结果尚未考虑流域近、远期规划建设并实施的引调水工程外调水源补给。华宁盘溪大龙潭、甸堆龙潭是抚仙湖流域稳定的地下水补给源,根据工程可研、初设报告,针对抚仙湖周边区域,华宁盘溪大龙潭调水工程年可供水量1077万 m^3 ,甸堆龙潭调水工程年可供水量为661.1万 m^3 ,用于替代沿湖居民的生产生活用水,减少从抚仙湖直接取水。滇中引水工程是抚仙湖流域核心外调水保障工程,竣工实施后预计每年向澄江片区新增供水4034万 m^3 。三大引调水工程将通过“直接补水+置换取水”的组合机制,估计每年可增加入湖水量约2452万 m^3 。根据抚仙湖水水位-库容曲线($y=2.1634x-3520.3$,式中: y 为库容,亿 m^3 ; x 为水位, m)测算,水位每提高1.0cm,约需补充水量216万 m^3 。增加的入湖水量可使湖水水位提升约0.11m,更有利于生态水位保障,抚仙湖实现并维持略高的适宜生态水位目标值1722.29m具有现实可能性。

在引调水工程实施之前,从抚仙湖生态水位维持和流域水资源可持续利用角度出发,建议进一步贯彻落实“保卫抚仙湖雷霆行动”“休耕轮作”等保护治理政策,减少取用水等人类活动对湖泊水位乃至整个湖区水生态系统的影响。在保障流域生活用水的前提下,适当降低流域内水资源开发利用,提高再生水利用率,置换流域内洁净水资源通过天然河道下泄补给湖体^[58]。在引调水工程实施后,探索建立外流域调水与本地水资源联合优化配置模式,为持续保障抚仙湖适宜生态水位提供水量调度基础支撑条件。

3.7 研究局限性

本文在常用于河流和浅水湖泊的传统生境模拟法基础上,提出了一种适用于深水湖泊的适宜生态水位计算新方法,选取了鳊浪白鱼成鱼期水温、流速、溶解氧三项关键生境因子,适宜度曲线参数取值主要依据文献、技术

标准和专家经验,然而,关键生境因子、指示阶段选取及其最适值、耐受阈值范围都将对生态水位计算结果产生重要影响,因此,在管理部门应用该方法制定生态水位调控方案前,应开展更为深入的鳊浪白鱼生理学特性研究,进一步将营养盐、底质等因素纳入生境因子考虑范畴,并采用野外实验或室内控制实验对适宜度曲线予以论证,同时优化提升三维水动力水质模型的模拟精度,为精准计算适宜生态水位提供更为可靠的证据佐证与数据支撑。

需要说明的是,本文计算得到的适宜生态水位为理想状态的目标水位,而非实际操作中的恒定值,其意义在于提供参照基准,指导湖泊水位动态调控中的“趋近目标”,后续可以考虑将目标水位作为动态浮动区间的中值,根据湖泊水位天然季节性波动节律与生物生活史周期进行年内动态水位调整,并考虑年内不同时期生态需求与防洪、供水等多目标功能权衡,优化湖泊水位过程,最大限度发挥湖泊功能。此外,本研究用于模型模拟计算的风速、气温为多年平均值,实际上风速、风向及气温等边界条件对流速、水温、溶解氧等生境因子分布均有影响,后续可根据不同季节(月份)气象条件分别计算年内各月适宜生态水位过程,并可结合典型水文年特征设计不同天然来流条件分析不同情景下适宜生态水位,为抚仙湖生态水位动态调控提供依据。

4 结论

面向抚仙湖特有鱼类鳊浪白鱼生境保护与修复,选取了鳊浪白鱼成鱼期关键生境因子,根据生境因子偏好建立了适宜度曲线,考虑深水湖泊生境垂向异质性特征构建了抚仙湖三维水动力水质模型,改进生境模拟法得到了垂向累计加权可利用面积,并据此提出了适用于深水湖泊的适宜生态水位计算方法。主要结论如下:

(1) 水温、流速、溶解氧三个关键生境因子适宜度指数空间分布特征不同。水温、流速适宜度指数在各水深处变化不大,且对三个因子综合的生境适宜度指数影响不大,而当水深大于15m时,溶解氧适宜度指数显著减小,并对生境适宜度指数产生较大影响。

(2) 不同水位方案下鳊浪白鱼生存空间内各层加权可利用面积分布规律基本相同。在水下0~20m范围内,随水深增加,适宜鳊浪白鱼生长的生境面积呈逐渐减小的特征,在水深大于15m后,加权可利用面积出现大幅减小现象。

(3) 建立了湖水位梯度变化与鳊浪白鱼生境垂向累计加权可利用面积之间的定量关系。垂向累计加权可利用面积随水位上升呈先增加后减少的特点,拟合后的二次函数曲线最大值对应的水位为1722.29m,即为适宜生态水位目标值。经参数敏感性分析发现,与水温、流速相比,适宜生态水位目标值计算结果受溶解氧适宜度曲线参数取值和模拟误差影响相对较大。通过分析抚仙湖历史水位变化趋势、未来气候变化与人类活动对湖水位变化的影响,判断适宜生态水位目标值具有可达性。

5 附件

附图、附表见电子版(DOI:10.18307/2026.0538)。

6参考文献

- [1] Rockström J, Steffen W, Noone K et al. A safe operating space for humanity. *nature*, 2009, 461(7263): 472-475. DOI: 10.1038/nature08475.
- [2] Zhang Y, Qin B, Zhu G et al. Importance and main ecological and environmental problems of lakes in China. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(30): 3503-3519. DOI: 10.1360/TB-2022-0178. [张运林, 秦伯强, 朱广伟等. 论湖泊重要性及我国湖泊面临的主要生态环境问题. *科学通报*, 2022, 67(30): 3503-3519.]
- [3] Fergus C E, Brooks J R, Kaufmann P R et al. Natural and anthropogenic controls on lake water-level decline and evaporation-to-inflow ratio in the conterminous United States. *Limnology and oceanography*, 2022, 67(7): 1484-1501. DOI: 10.1002/lno.12097.
- [4] Wurtsbaugh W A, Miller C, Null S E et al. Decline of the world's saline lakes. *Nature Geoscience*, 2017, 10(11): 816-821. DOI: 10.1038/ngeo3052.
- [5] Yang G, Ma R, Zhang L et al. Lake status, major problems and protection strategy in China. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(6): 799-810. DOI: 10.1080/09500340.2010.529951. [杨桂山, 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. *湖泊科学*, 2010, 22(06): 799-810.]
- [6] Zhao X, Cui B S, Yang Z F. A study of the lowest ecological water level of Baiyangdian Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1033-1040. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2005.05.014. [赵翔, 崔保山, 杨志峰. 白洋淀最低生态水位研究. *生态学报*, 2004, 25(5): 1033-1040.]
- [7] Xu Z X, Chen M J, Dong Z C. Researches on the calculation methods of the lowest ecological water level of lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2324-2328. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2004.10.035. [徐志侠, 陈敏建, 董增川. 湖泊最低生态水位计算方法. *生态学报*, 2004, 24(10): 2324-2328.]
- [8] Yang Y X, Du C Y, Zhang J F et al. Determination of lowest ecological water level in Dongting Lake area. *Water Resources Protection*, 2019, 35(3): 89-94. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2019.03.015. [杨毓鑫, 杜春艳, 张金帆等. 洞庭湖湖区最低生态水位的确定. *水资源保护*, 2019, 35(03): 89-94.]
- [9] Xu Z X. Research on ecological water requirements for rivers and lakes[Dissertation]. Nanjing: Hohai University, 2005. [徐志侠. 河道与湖泊生态需水研究[学位论文]. 南京: 河海大学, 2005.]
- [10] Poff N L R, Allan J D, Bain M B et al. The natural flow regime. *BioScience*, 1997, 47(11): 769-784. DOI: 10.2307/1313099.
- [11] Richter B D, Baumgartner J V, Powell J et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 1996, 10(4): 1163-1174. DOI: 10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x.
- [12] Richter B, Baumgartner J, Wigington R et al. How much water does a river need? *Freshwater Biology*, 1997, 37(1): 231-249. DOI: 10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x.
- [13] Huang Y Y, Yu M H, Lu J et al. Suitable ecological water level of the East Lake Dongting after the Three Gorges Project operation. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(2): 417-427. DOI: 10.18307/2020.0211. [黄宇云, 余明辉, 陆晶等. 三峡建库后东洞庭湖适宜生态水位需求分析. *湖泊科学*, 2020, 32(02): 417-427.]
- [14] Gan F, Tang L, Guo H et al. New method and application of estimating ecological water level of the Lake Poyang. *Journal of Lake Sciences*, 2015, 27(5): 783-790. DOI: 10.18307/2015.0504. [淦峰, 唐琳, 郭怀成等. 湖泊生态水位计算新方法与应用. *湖泊科学*, 2015, 27(05): 783-790.]
- [15] Zhang T Y, Dong Z C, Luo Y. Optimum ecological water level of water-carrying lake based on the relationship between water quality. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(05): 1670-1682. DOI: 10.18307/2022.0520. [张天衍, 董增川, 罗贇等. 基于水质-水位二元响应关系推求过水型湖泊适宜生态水位研究. *湖泊科学*, 2022, 34(05): 1670-1682.]
- [16] Ge Y H, Liu X M, Yang J S et al. The threshold value of all-seasons suitable ecological water level coupled with nutrient load in Lake

- Chagan. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(06): 1979-1989. DOI: 10.18307/2023.06. [葛裕豪, 刘雪梅, 杨敬爽等. 耦合营养负荷的查干湖全季节适宜生态水位阈值研究. *湖泊科学*, 2023, 35(06): 1979-1989.]
- [17] Yi Y J, Zhang S H. Review of aquatic species habitat simulation method and modelling. *Sci. Sin. Technol*, 2019, 49: 363-377. DOI: 10.1360/N092018-00217. [易雨君, 张尚弘. 水生生物栖息地模拟方法及模型综述. *中国科学: 技术科学*, 2019, 49(04): 363-377.]
- [18] Yang L, Hou J, Cheng L et al. Application of habitat suitability model coupling with high-precision hydrodynamic processes. *Ecological Modelling*, 2021, 462: 109792. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2021.109792.
- [19] Booker D J, Dunbar M J. Application of physical habitat simulation (PHABSIM) modelling to modified urban river channels. *River Research and Applications*, 2004, 20(2): 167-183. DOI: 10.1002/rra.706.
- [20] Chen L G, Chen L M, Xu Y F et al. Ecological water level for proposed hydraulic construction locking Lake Poyang based upon wintering waterfowls habitat modelling. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(5): 1519-1528. DOI: 10.18307/2020.0523. [陈炼钢, 陈黎明, 徐祎凡等. 基于越冬水鸟生境模拟的拟建鄱阳湖水利枢纽生态控制水位探讨. *湖泊科学*, 2020, 32(05): 1519-1528.]
- [21] Dai L Q, Wang Y, Tang Z Y et al. Impact of water supply of the three gorges reservoir on the foraging habitat of *Grus leucogeranus* in Lake Dongting during the dry season. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(04): 1208-1218. DOI: 10.18307/2022.0414. [戴凌全, 王煜, 汤正阳等. 三峡水库枯水期补水调度对洞庭湖越冬白鹤 (*Grus leucogeranus*) 摄食栖息地的影响. *湖泊科学*, 2022, 34(04): 1208-1218.]
- [22] Zhu Y, Wang H, Guo W. The impacts of water level fluctuations of East Dongting Lake on habitat suitability of migratory birds. *Ecological Indicators*, 2021, 132: 108277. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108277.
- [23] Katsev S, Crowe S A, Mucci A, et al. Mixing and its effects on biogeochemistry in the persistently stratified, deep, tropical Lake Matano, Indonesia. *Limnology and Oceanography*, 2010, 55(2): 763-776. DOI: 10.4319/lo.2010.55.2.0763.
- [24] Zhang X J, Niu Y, Wu Y L et al. Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Driving Factors in a Typical Plateau Deep Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2024, 37(05): 1006-1014. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2024.01.19. [张秀锦, 牛远, 吴亚丽等. 高原深水湖泊抚仙湖溶解氧分层特征及驱动因素. *环境科学研究*, 2024, 37(05): 1006-1014.]
- [25] Sierszen M E, Hrabik T R, Stockwell J D, et al. Depth gradients in food-web processes linking habitats in large lakes: Lake Superior as an exemplar ecosystem. *Freshwater Biology*, 2014, 59(10): 2122-2136. DOI:10.1111/fwb.12415.
- [26] Lemmin U. Insights into the dynamics of the deep hypolimnion of Lake Geneva as revealed by long-term temperature, oxygen, and current measurements. *Limnology and Oceanography*, 2020, 65(9): 2092-2107. DOI:10.1002/lno.11441.
- [27] Booker D J, Dunbar M J, Ibbotson A. Predicting juvenile salmonid drift-feeding habitat quality using a three-dimensional hydraulic-bioenergetic model. *Ecological Modelling*, 2004, 177(1-2): 157-177. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2004.02.006.
- [28] Pisaturo G R, Righetti M, Dumbser M, et al. The role of 3D-hydraulics in habitat modelling of hydropeaking events. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 219-230. DOI:10.1201/9781315644479-312.
- [29] Yang S, Zhang Z, Wang Y, et al. An improved 3D fish habitat assessment model based on the graph theory algorithm. *Ecological Indicators*, 2023, 148: p.110022. DOI:10.1016/j.ecolind.2023.110022.
- [30] Zheng B H, Cao J, Wang K et al. Theoretical basis and Chinese practice for environmental protection of lakes with better water quality. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(03): 699-710. DOI: 10.18307/2022.0300. [郑丙辉, 曹晶, 王坤等. 水质较好湖泊环境保护的理论基础及中国实践. *湖泊科学*, 2022, 34(03): 699-710.]
- [31] Yang J. Origin and evolution of some biological characters of *Anabailius graham* as referred to geological development of Fuxian Lake. *Zoological Research*, 1992, 13(4): 353-360. [杨君兴. 云南抚仙湖鳊白鱼若干生物学特性的形成和演化及其与湖泊环境演变的关系. *动物学研究*, 1992, 13(4): 353-360.]
- [32] Li Z Y, Chen Y R, Yang J X. Biology and population decaying agents of the *Anabailius graham*. *Freshwater Fishery*, 2003, (01): 26-27. [李再云, 陈银瑞, 杨君兴. 鳊白鱼的生物学及其种群衰减原因分析. *淡水渔业*, 2003, (01): 26-27.]
- [33] 常徽. 抚仙湖鳊浪白鱼生物学与产卵场修复技术研究[学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- [34] Tan, Z, Li Y, Zhang Q et al. Assessing effective hydrological connectivity for floodplains with a framework integrating habitat suitability and sediment suspension behavior. *Water Research*, 2021, 201: 117253. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117253
- [35] Li Q, Xiao J, Ou T et al. Impact of water level fluctuations on the development of phytoplankton in a large subtropical reservoir: implications for the management of cyanobacteria. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(2): 1306-1318. DOI:10.1007/s11356-017-0502-4.
- [36] 李学辉, 李菊, 谷桂华. 高原山区深水湖泊生态水位研究及保障对策——以云南抚仙湖为例. *人民珠江*, 2021, 42(S01): 1-5.
- [37] Deng X, Si Y, Yang P et al. Water level variation characteristics and influencing factors of Fuxian Lake. *Yangtze River*, 2023, 54(10): 44-51. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.10.007. [邓欣, 司源, 杨坪宏等. 抚仙湖水位变化特征及影响因素研究. *人民长江*, 2023, 54(10): 44-51.]
- [38] Ma W, Li B, Yang F et al. Estimation of the benefit of reducing pollutants into lake for the ecological storage zone project in the north shore of Fuxian Lake Basin. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2024, 22(02): 129-137+148. DOI: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20230139. [马巍, 李必琼, 杨凡等. 抚仙湖北岸生态调蓄带工程入湖污染物减排效益核算. *中国水利水电科学研究院学报(中英文)*, 2024, 22(02): 129-137+148.]
- [39] Chen C F, Yin S M, Yin L J et al. A brief summary of research achievements, issues and suggestions related to the fishery resources of the *Anabailius graham*. *Current Fisheries*, 2019, 44(03): 86-88. [陈昌福, 殷树茂, 殷立京, 等. 简述鳊浪白鱼渔业资源相关研究成果、问题与建议. *当代水产*, 2019, 44(03): 86-88.]
- [40] Xiong F, Li W, Pan J et al. Study and changes of fish resources in Lake Fuxian, Yunnan Province. *J. Lake Sci*, 2006, 18(03): 305-311. DOI:10.18307/2006.0318. [熊飞, 李文朝, 潘继征, 等. 云南抚仙湖鱼类资源现状与变化. *湖泊科学*, 2006, 18(03): 305-311.]
- [41] 唐开华, 陈云超. 鳊浪白鱼人工驯养繁殖技术. *现代农业科技*, 2021, (12): 218-220.
- [42] Zhang Y Y, Xie M, Liu S S et al. The Analysis of Water Quality Change Trend for Lake Fuxian & Lake Xingyun. *Geographical Science Research*, 2015, 4(3): 81-94. [张云鹰, 谢曼平, 刘姗姗, 等. 抚仙湖和星云湖水水质变化趋势分析. *地理科学研究*, 2015, 4(3): 81-94.]
- [43] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 抚仙湖. 北京: 海洋出版社, 1990.
- [44] Hamrick J M. User's Manual for the Environmental Fluid Dynamics Computer Code. Special Reports in Applied Marine Science and Ocean Engineering (SRAMSOE) No. 331. Virginia Institute of Marine Science, College of William and Mary, 1996.
- [45] Xu J, Rashid F, Duan L et al. Thermal stratification and water quality dynamics in Lake Fuxian: seasonal patterns in a deep monomictic lake. *Journal of Hydrology*, 2025: 134322. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2025.134322 R
- [46] 李一平, 龚然, 保罗·克雷格. 地表水环境数值模拟与预测——EFDC建模技术及案例实训. 北京: 科学出版社, 2019.
- [47] Liu Y, He H, Zhou J et al. Understanding thermal stratification and circulation dynamics in Fuxian Lake: Insights from EFDC simulation study. *Ecological Indicators*, 2024, 165. DOI:10.1016/j.ecolind.2024.112202.
- [48] Chen Y, Zhu D, Li Z. Projecting the impact of climatic warming on coldwater fish habitat in Lake Jingpo. *Scientia Sinica(Technologica)*, 2015, 45: 1035-1042. DOI: 10.1360/N092015-00016. [陈永灿, 朱德军, 李钟顺. 气候变暖条件下镜泊湖冷水性鱼类栖息地的评价. *中国科学: 技术科学*, 2015, 45(10): 1035-1042.]
- [49] Zhong J X, Zhang Q, Li X R et al. Effects of water velocity on the swimming behavior of *Anabailius graham*. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(3): 655-660. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2013.0090. [钟金鑫, 张倩, 李小荣等. 不同流速对鳊(鳊)白鱼游泳行为的影响. *生态学杂志*, 2013, 32(3): 655-660.]

-
- [50] DB5304/T 005-2019. 抗浪鱼成鱼养殖技术规范. 玉溪: 玉溪市市场监督管理局, 2019.
- [51] GB3838—2002. 地表水环境质量标准. 北京: 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局, 2002.
- [52] Li T S, Ma X K, Fu Z H. Research on the vertical distribution of water temperature in Fuxian Lake. *Marine and Limnological Bulletin*, 2020, (02): 107-112. DOI:10.13984/j.cnki.cn37-1141.2020.02.013. [李铁术, 马徐琨, 付朝晖, 等. 抚仙湖水温的垂直分布研究. *海洋湖沼通报*, 2020, (02): 107-112.]
- [53] 谷桂华, 李红明, 火寿华. 抚仙湖流域1964—2021年气象干旱演变特征分析. *人民珠江*, 2023, 44(S1): 27-32.
- [54] 余鸿. 滇中星云湖水位变化特征及其对抚仙湖水位变化的定量影响分析. *人民珠江*, 2024, 45(S1): 67-71.
- [55] Yang C, Li T, Shi Y et al. Study on variation characteristics of water quality and protection measures for Fuxian Lake in past decade. *Yangtze River*, 2021, 52: 47-55. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.11.008. [杨春艳, 李天翠, 施艳峰等. 抚仙湖近十年水质变化特征及保护措施初探. *人民长江*, 2021, 52(11): 47-55.]
- [56] He K D, Gao W, Duan C Q et al. Water level variation and its driving factors in Lake Dianchi, Fuxian and Yangzong during 1988–2015. *J. Lake Sci*, 2019, 31: 1379-1390. DOI: 10.18307/2019.0504. [贺克雕, 高伟, 段昌群等. 滇池、抚仙湖、阳宗海长期水位变化(1988—2015年)及驱动因子. *湖泊科学*, 2019, 31(05): 1379-1390.]
- [57] Li J L, Li H Y, Luo L C et al. Water level retrieval for the past and prediction for the next 30 years at Lake Fuxian. *J. Lake Sci*, 2022, 34: 958-971. DOI: 10.18307/2019.0504. [李加龙, 李慧赞, 罗潋葱等. 抚仙湖历史水位反演与未来30年水位变化预测. *湖泊科学*, 2022, 34(03): 958-971.]
- [58] Niu Y, Hu X Z, Wang L J et al. Ideas and practice of ecological protection and restoration of mountain-river-forest-farmland-lake-grassland system in Lake Fuxian Basin. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(5): 482-490. DOI: 10.12153/j.issn.1674-991X.2019.08.010. [牛远, 胡小贞, 王琳杰等. 抚仙湖流域山水林田湖草生态保护修复思路与实践. *环境工程技术学报*, 2019, 9(5): 482-490.]

附表 1 抚仙湖水动力水质模型入流流量边界条件

Table S1 Inflow boundary conditions of hydrodynamic water quality model for Fuxian Lake

日期	入湖流量 (m ³ /s)										
	山冲河	梁王河	抚澄河	东大河	代村河	矣渡大河	五车河	居乐大河	大鲫鱼河	玉带河	牛摩河
2018年01月	0.019	0.435	0.191	0.053	0.029	0.029	0.004	0.004	0.249	0.058	0.003
2018年02月	0.023	0.514	0.226	0.063	0.034	0.034	0.005	0.005	0.295	0.069	0.003
2018年03月	0.027	0.617	0.271	0.075	0.041	0.041	0.006	0.006	0.354	0.083	0.004
2018年04月	0.032	0.740	0.325	0.090	0.050	0.050	0.007	0.007	0.424	0.099	0.005
2018年05月	0.065	1.488	0.653	0.181	0.100	0.100	0.015	0.015	0.853	0.200	0.009
2018年06月	0.089	2.034	0.893	0.248	0.136	0.136	0.020	0.020	1.166	0.273	0.012
2018年07月	0.100	2.285	1.003	0.279	0.153	0.153	0.022	0.022	1.310	0.307	0.014
2018年08月	0.118	2.681	1.177	0.327	0.180	0.180	0.026	0.026	1.537	0.360	0.016
2018年09月	0.078	1.777	0.780	0.217	0.119	0.119	0.017	0.017	1.018	0.238	0.011
2018年10月	0.049	1.109	0.487	0.135	0.074	0.074	0.011	0.011	0.635	0.149	0.007
2018年11月	0.034	0.766	0.336	0.093	0.051	0.051	0.007	0.007	0.439	0.103	0.005
2018年12月	0.021	0.486	0.213	0.059	0.033	0.033	0.005	0.005	0.279	0.065	0.003
2019年01月	0.007	0.903	0.043	0.246	0.008	0.017	0.002	0.002	0.146	0.034	0.002
2019年02月	0.007	0.842	0.010	0.259	0.004	0.020	0.003	0.003	0.173	0.040	0.002
2019年03月	0.034	0.789	0.125	0.076	0.005	0.024	0.004	0.004	0.208	0.049	0.002
2019年04月	0.026	0.541	0.159	0.225	0.009	0.029	0.004	0.004	0.249	0.058	0.003
2019年05月	0.027	0.168	0.185	0.133	0.008	0.059	0.009	0.009	0.501	0.117	0.005
2019年06月	0.017	0.197	0.160	0.149	0.012	0.080	0.012	0.012	0.684	0.160	0.007
2019年07月	0.003	0.384	0.091	0.047	0.018	0.090	0.013	0.013	0.769	0.180	0.008
2019年08月	0.008	0.075	0.077	0.049	0.029	0.106	0.015	0.015	0.902	0.211	0.010
2019年09月	0.007	0.253	0.105	0.108	0.022	0.070	0.010	0.010	0.598	0.140	0.006
2019年10月	0.001	0.965	0.159	0.074	0.032	0.044	0.006	0.006	0.373	0.087	0.004
2019年11月	0.002	0.818	0.091	0.051	0.009	0.030	0.004	0.004	0.258	0.060	0.003
2019年12月	0.002	0.461	0.041	0.044	0.020	0.019	0.003	0.003	0.164	0.038	0.002
2020年01月	0.002	0.303	0.052	0.246	0.007	0.065	0.009	0.009	0.555	0.130	0.006
2020年02月	0.002	0.245	0.040	0.259	0.008	0.074	0.011	0.011	0.634	0.148	0.007
2020年03月	0.005	0.192	0.034	0.076	0.009	0.092	0.013	0.013	0.788	0.184	0.008
2020年04月	0.001	0.140	0.043	0.225	0.015	0.110	0.016	0.016	0.944	0.221	0.010
2020年05月	0.001	0.145	0.089	0.133	0.015	0.222	0.032	0.032	1.900	0.445	0.020

日期	入湖流量 (m ³ /s)										
	山冲河	梁王河	抚澄河	东大河	代村河	矣渡大河	五车河	居乐大河	大鲫鱼河	玉带河	牛摩河
2020年06月	0.000	0.193	0.097	0.149	0.020	0.304	0.044	0.044	2.596	0.608	0.028
2020年07月	0.003	1.130	0.444	0.047	0.023	0.341	0.050	0.050	2.918	0.683	0.031
2020年08月	0.007	1.100	0.268	0.049	0.009	0.401	0.058	0.058	3.423	0.801	0.036
2020年09月	0.003	1.860	0.189	0.108	0.009	0.265	0.039	0.039	2.268	0.531	0.024
2020年10月	0.001	1.470	0.138	0.074	0.010	0.166	0.024	0.024	1.416	0.331	0.015
2020年11月	0.001	0.953	0.053	0.051	0.009	0.114	0.017	0.017	0.978	0.229	0.010
2020年12月	0.001	0.530	0.044	0.044	0.007	0.073	0.011	0.011	0.621	0.145	0.007

附表 2 抚仙湖水动力水质模型出流流量边界条件

Table S2 Outflow boundary conditions of hydrodynamic water quality model for Fuxian Lake

日期	出湖流量 (m ³ /s)						
	取水口 1	取水口 2	取水口 3	取水口 4	取水口 5	取水口 6	取水口 7
2018 年 01 月	0.001568	0.007425	0.005059	0.007699	0.018242	0.051354	0.005756
2018 年 02 月	0.001852	0.008773	0.005977	0.009096	0.021554	0.060679	0.006801
2018 年 03 月	0.002223	0.010529	0.007174	0.010917	0.025869	0.072824	0.008163
2018 年 04 月	0.002665	0.012621	0.008599	0.013086	0.031008	0.087292	0.009784
2018 年 05 月	0.005362	0.025395	0.017301	0.02633	0.062391	0.17564	0.019687
2018 年 06 月	0.007327	0.034704	0.023644	0.035982	0.085262	0.240024	0.026904
2018 年 07 月	0.008234	0.038997	0.026569	0.040434	0.09581	0.269718	0.030233
2018 年 08 月	0.00966	0.045752	0.03117	0.047437	0.112404	0.316433	0.035469
2018 年 09 月	0.034722	0.000451	0.006402	0.03032	0.020657	0.031436	0.07449
2018 年 10 月	0.003995	0.018921	0.012891	0.019618	0.046487	0.130867	0.014669
2018 年 11 月	0.00276	0.013072	0.008906	0.013554	0.032117	0.090413	0.010134
2018 年 12 月	0.001752	0.008299	0.005654	0.008604	0.020388	0.057396	0.006434
2019 年 01 月	0.001546	0.007321	0.004988	0.007591	0.017988	0.050638	0.005676
2019 年 02 月	0.001827	0.008651	0.005894	0.008969	0.021254	0.059832	0.006707
2019 年 03 月	0.002192	0.010382	0.007073	0.010765	0.025508	0.071808	0.008049
2019 年 04 月	0.002628	0.012445	0.008479	0.012903	0.030575	0.086074	0.009648
2019 年 05 月	0.005287	0.025041	0.01706	0.025963	0.061521	0.17319	0.019413
2019 年 06 月	0.007225	0.03422	0.023314	0.03548	0.084072	0.236675	0.026529
2019 年 07 月	0.008119	0.038453	0.026198	0.03987	0.094473	0.265955	0.029811
2019 年 08 月	0.009525	0.045113	0.030735	0.046775	0.110836	0.312018	0.034974
2019 年 09 月	0.034722	0.000451	0.006312	0.029897	0.020368	0.030998	0.073451
2019 年 10 月	0.003939	0.018657	0.012711	0.019345	0.045838	0.129041	0.014464
2019 年 11 月	0.002722	0.01289	0.008782	0.013365	0.031669	0.089152	0.009993
2019 年 12 月	0.001728	0.008183	0.005575	0.008484	0.020104	0.056595	0.006344
2020 年 01 月	0.001411	0.006683	0.004553	0.006929	0.016419	0.046221	0.005181
2020 年 02 月	0.00161	0.007624	0.005194	0.007905	0.018731	0.05273	0.005911
2020 年 03 月	0.002001	0.009477	0.006456	0.009826	0.023283	0.065545	0.007347
2020 年 04 月	0.002398	0.01136	0.007739	0.011778	0.027908	0.078566	0.008806
2020 年 05 月	0.004826	0.022857	0.015572	0.023699	0.056155	0.158084	0.01772

日期	出湖流量 (m ³ /s)						
	取水口 1	取水口 2	取水口 3	取水口 4	取水口 5	取水口 6	取水口 7
2020 年 06 月	0.006595	0.031235	0.02128	0.032386	0.076739	0.216032	0.024215
2020 年 07 月	0.007411	0.035099	0.023913	0.036392	0.086233	0.242759	0.027211
2020 年 08 月	0.008694	0.041178	0.028055	0.042695	0.101169	0.284804	0.031924
2020 年 09 月	0.034722	0.000451	0.005762	0.027289	0.018592	0.028294	0.067044
2020 年 10 月	0.003596	0.01703	0.011603	0.017657	0.04184	0.117786	0.013203
2020 年 11 月	0.002484	0.011766	0.008016	0.012199	0.028906	0.081376	0.009121
2020 年 12 月	0.001577	0.007469	0.005089	0.007744	0.01835	0.051659	0.00579

附表 3 抚仙湖水动力水质模型风边界条件

Table S3 Wind boundary conditions of hydrodynamic water quality model for Fuxian Lake

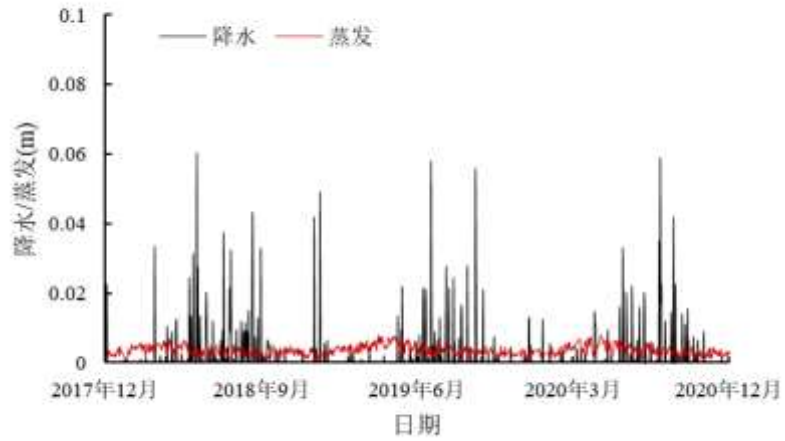
时间	风速 (m/s)	风向 (°)	时间	风速 (m/s)	风向 (°)	时间	风速 (m/s)	风向 (°)
2018 年 01 月	4.02	208.50	2019 年 01 月	3.62	216.04	2020 年 01 月	4.31	213.88
2018 年 02 月	4.34	210.29	2019 年 02 月	5.01	242.33	2020 年 02 月	4.05	205.98
2018 年 03 月	4.15	215.61	2019 年 03 月	4.75	231.43	2020 年 03 月	4.86	224.23
2018 年 04 月	4.33	208.39	2019 年 04 月	5.02	241.93	2020 年 04 月	4.06	193.98
2018 年 05 月	4.26	214.33	2019 年 05 月	4.42	216.96	2020 年 05 月	4.35	227.46
2018 年 06 月	3.33	190.94	2019 年 06 月	3.20	170.92	2020 年 06 月	4.32	227.18
2018 年 07 月	2.97	161.29	2019 年 07 月	3.37	190.07	2020 年 07 月	4.13	202.28
2018 年 08 月	2.60	129.88	2019 年 08 月	2.80	132.28	2020 年 08 月	3.30	176.99
2018 年 09 月	3.09	153.55	2019 年 09 月	2.97	152.00	2020 年 09 月	3.15	175.17
2018 年 10 月	3.10	174.06	2019 年 10 月	3.06	176.86	2020 年 10 月	3.35	129.56
2018 年 11 月	3.46	213.69	2019 年 11 月	3.40	185.39	2020 年 11 月	3.20	166.81
2018 年 12 月	3.46	202.28	2019 年 12 月	3.59	190.08	2020 年 12 月	3.64	190.23

附表 4 抚仙湖水动力水质模型水温边界条件

Table S4 Water temperature boundary conditions of hydrodynamic water quality model for Fuxian Lake

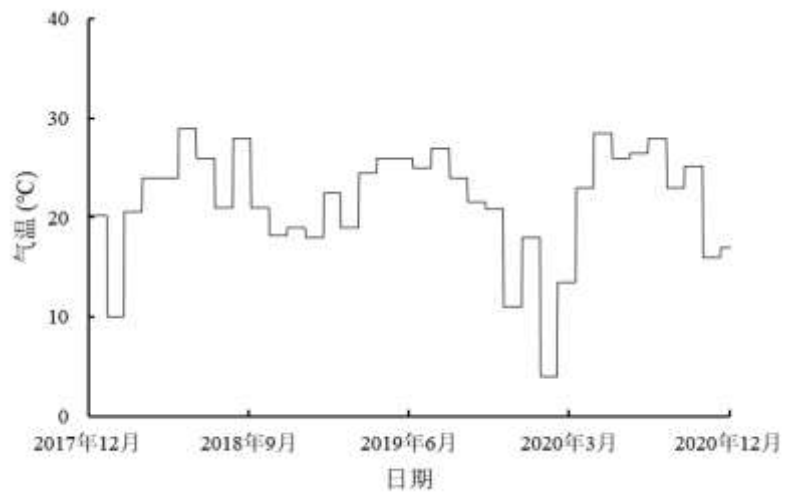
日期	水温 (°C)										
	山冲河	梁王河	抚澄河	东大河	代村河	矣渡大河	五车河	居乐大河	大鲫鱼河	玉带河	牛摩河
2018 年 01 月	12.3	17.8	12.2	12.2	12.2	9.9	9.9	9.5	12.5	14.3	12.3
2018 年 02 月	13	14.1	12.3	11.3	11.3	9.3	9.3	9.2	12.4	14.3	12.4
2018 年 03 月	14.1	14.1	14.5	14.5	14.5	12	12	12.6	12	13	15.5
2018 年 04 月	18.4	18.4	15.6	15.6	15.4	15.4	15.4	15.5	18.2	17	16.6
2018 年 05 月	18.5	18.5	20.8	20.8	19.5	19.5	19.5	21	21.1	20.4	17.3
2018 年 06 月	24.9	24.9	20.3	20.3	25.7	19.6	19.6	23.2	22.6	22.2	18.5
2018 年 07 月	21.5	20.8	22.9	22.5	22.1	20.5	20.5	22	21.1	22.2	20.2
2018 年 08 月	21.5	20.6	22.2	22.4	22.1	21	21	22.3	22.7	22.2	20.2
2018 年 09 月	21.9	19.2	21.3	20.4	20.4	19.5	19.5	20.4	21.6	22.2	20.1
2018 年 10 月	20.7	17.8	20.2	19.2	19.2	18.5	18.5	18.8	19.4	20.5	17.8
2018 年 11 月	17	15.8	17.6	17.6	17.6	13.9	13.9	15.2	17.4	18.9	17.3
2018 年 12 月	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	11.6	11.6	12.3	14.1	16.5	15.2
2019 年 01 月	12.3	17.8	12.2	12.2	12.2	9.9	9.9	9.5	12.5	14.3	12.3
2019 年 02 月	13	14.1	12.3	11.3	11.3	9.3	9.3	9.2	12.4	14.3	12.4
2019 年 03 月	14.1	14.1	14.5	14.5	14.5	12	12	12.6	12	13	15.5
2019 年 04 月	18.4	18.4	15.6	15.6	15.4	15.4	15.4	15.5	18.2	17	16.6
2019 年 05 月	18.5	18.5	20.8	20.8	19.5	19.5	19.5	21	21.1	20.4	17.3
2019 年 06 月	24.9	24.9	20.3	20.3	25.7	19.6	19.6	23.2	22.6	22.2	18.5
2019 年 07 月	21.5	20.8	22.9	22.5	22.1	20.5	20.5	22	21.1	22.2	20.2
2019 年 08 月	21.5	20.6	22.2	22.4	22.1	21	21	22.3	22.7	22.2	20.2
2019 年 09 月	21.9	19.2	21.3	20.4	20.4	19.5	19.5	20.4	21.6	22.2	20.1

日期	水温 (°C)										
	山冲河	梁王河	抚澄河	东大河	代村河	矣渡大河	五车河	居乐大河	大鲫鱼河	玉带河	牛摩河
2019年10月	20.7	17.8	20.2	19.2	19.2	18.5	18.5	18.8	19.4	20.5	17.8
2019年11月	17	15.8	17.6	17.6	17.6	13.9	13.9	15.2	17.4	18.9	17.3
2019年12月	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	11.6	11.6	12.3	14.1	16.5	15.2
2020年01月	12.3	17.8	12.2	12.2	12.2	9.9	9.9	9.5	12.5	14.3	12.3
2020年02月	13	14.1	12.3	11.3	11.3	9.3	9.3	9.2	12.4	14.3	12.4
2020年03月	14.1	14.1	14.5	14.5	14.5	12	12	12.6	12	13	15.5
2020年04月	18.4	18.4	15.6	15.6	15.4	15.4	15.4	15.5	18.2	17	16.6
2020年05月	18.5	18.5	20.8	20.8	19.5	19.5	19.5	21	21.1	20.4	17.3
2020年06月	24.9	24.9	20.3	20.3	25.7	19.6	19.6	23.2	22.6	22.2	18.5
2020年07月	21.5	20.8	22.9	22.5	22.1	20.5	20.5	22	21.1	22.2	20.2
2020年08月	21.5	20.6	22.2	22.4	22.1	21	21	22.3	22.7	22.2	20.2
2020年09月	21.9	19.2	21.3	20.4	20.4	19.5	19.5	20.4	21.6	22.2	20.1
2020年10月	20.7	17.8	20.2	19.2	19.2	18.5	18.5	18.8	19.4	20.5	17.8
2020年11月	17	15.8	17.6	17.6	17.6	13.9	13.9	15.2	17.4	18.9	17.3
2020年12月	15.5	15.5	15.5	15.5	15.5	11.6	11.6	12.3	14.1	16.5	15.2



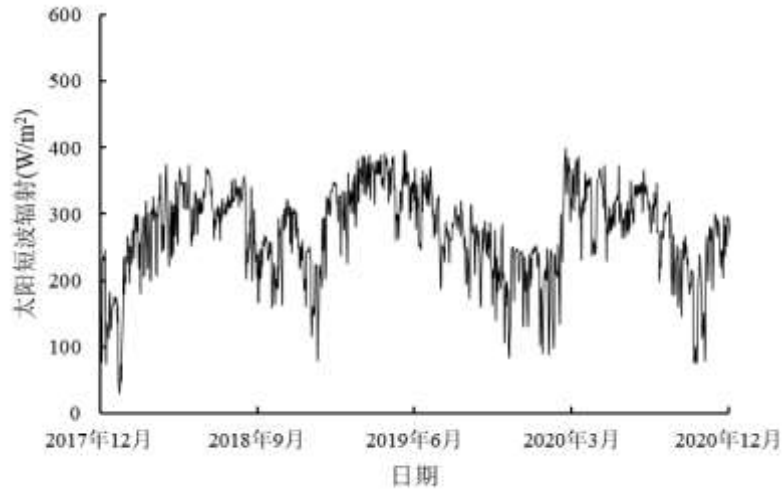
附图 1 抚仙湖水动力水质模型降水、蒸发边界条件

Fig.S1 Precipitation, evaporation boundary conditions of hydrodynamic water quality model for Fuxian Lake



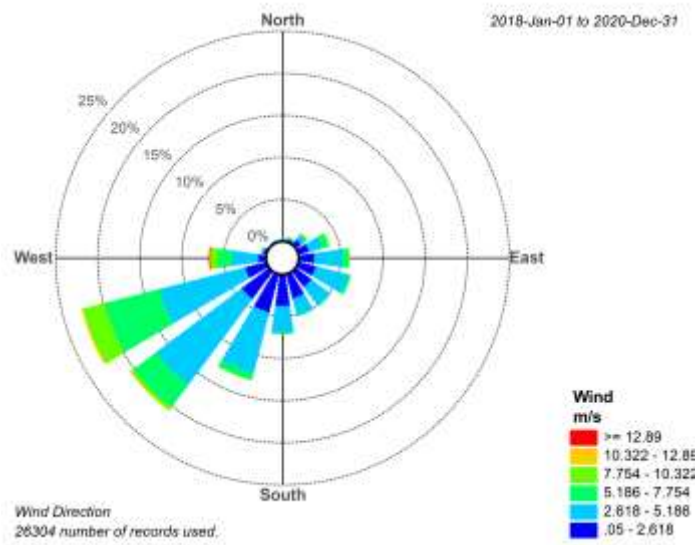
附图 2 抚仙湖水动力水质模型气温边界条件

Fig.S2 Temperature boundary conditions of hydrodynamic water quality model for Fuxian Lake



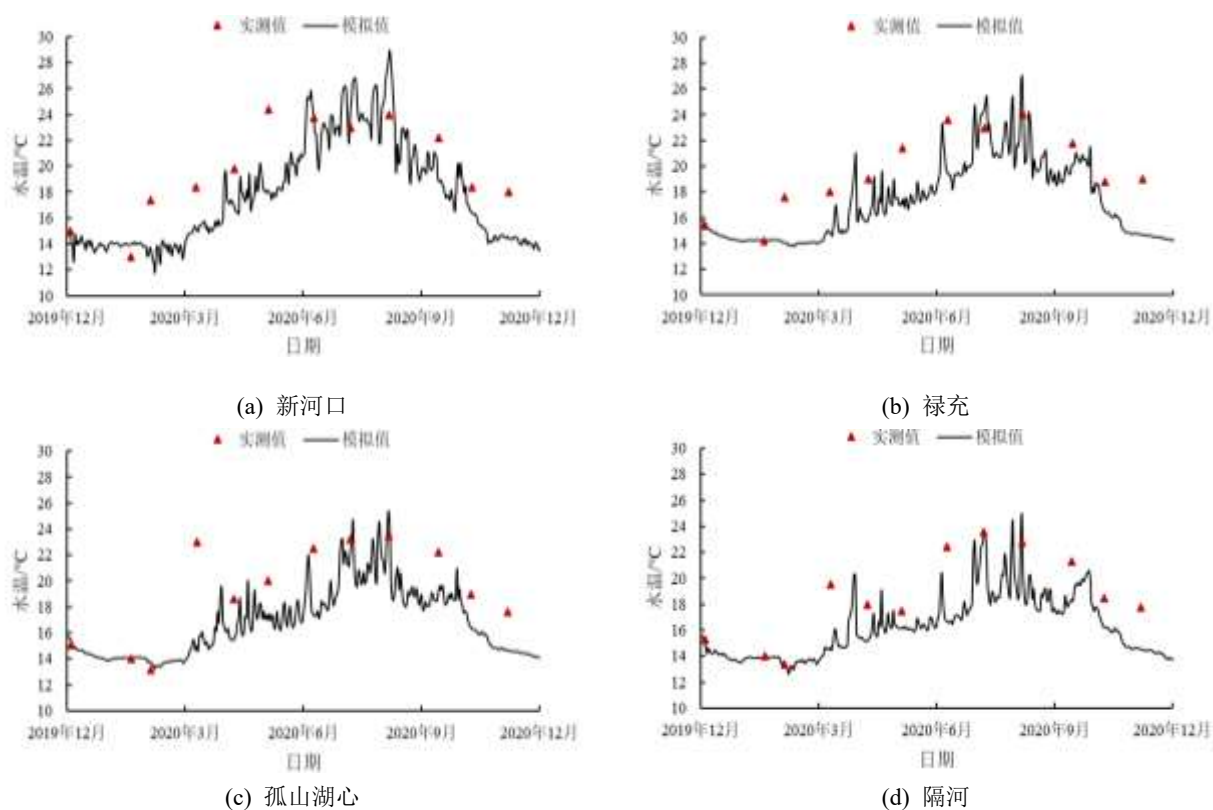
附图 3 抚仙湖水动力水质模型太阳短波辐射边界条件

Fig.S3 Solar short-wave radiation boundary conditions of hydrodynamic water quality model for Fuxian Lake



附图 4 抚仙湖水动力水质模型风边界条件风玫瑰图

Fig.S4 Wind rose of wind boundary conditions of hydrodynamic water quality model for Fuxian Lake



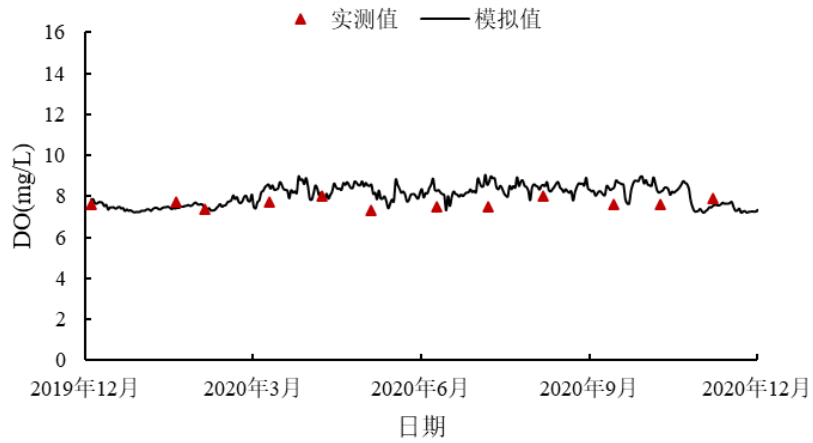
附图 5 抚仙湖其他水质监测站点表层水温模拟值与实测值对比

Fig.S5 Comparison of simulated and measured surface water temperature of other water quality monitoring stations in Fuxian Lake

附表 5 抚仙湖表层水温验证误差统计

Table S5 Statistical results of simulation error of surface water temperature in Fuxian Lake

监测站点	平均绝对误差 (°C)	相对误差 (%)	均方根误差 (°C)
海口	1.242	6.732	1.477
新河口	2.476	12.516	2.979
禄充	1.828	9.787	2.280
孤山湖心	2.689	13.917	3.482
隔河	2.100	11.245	2.784



附图 6 抚仙湖孤山湖心站表层溶解氧模拟值与实测值对比

Fig.S6 Comparison of simulated and measured surface dissolved oxygen of Gushanhuxin water quality monitoring station in Fuxian Lake

附表 6 抚仙湖表层溶解氧验证误差统计

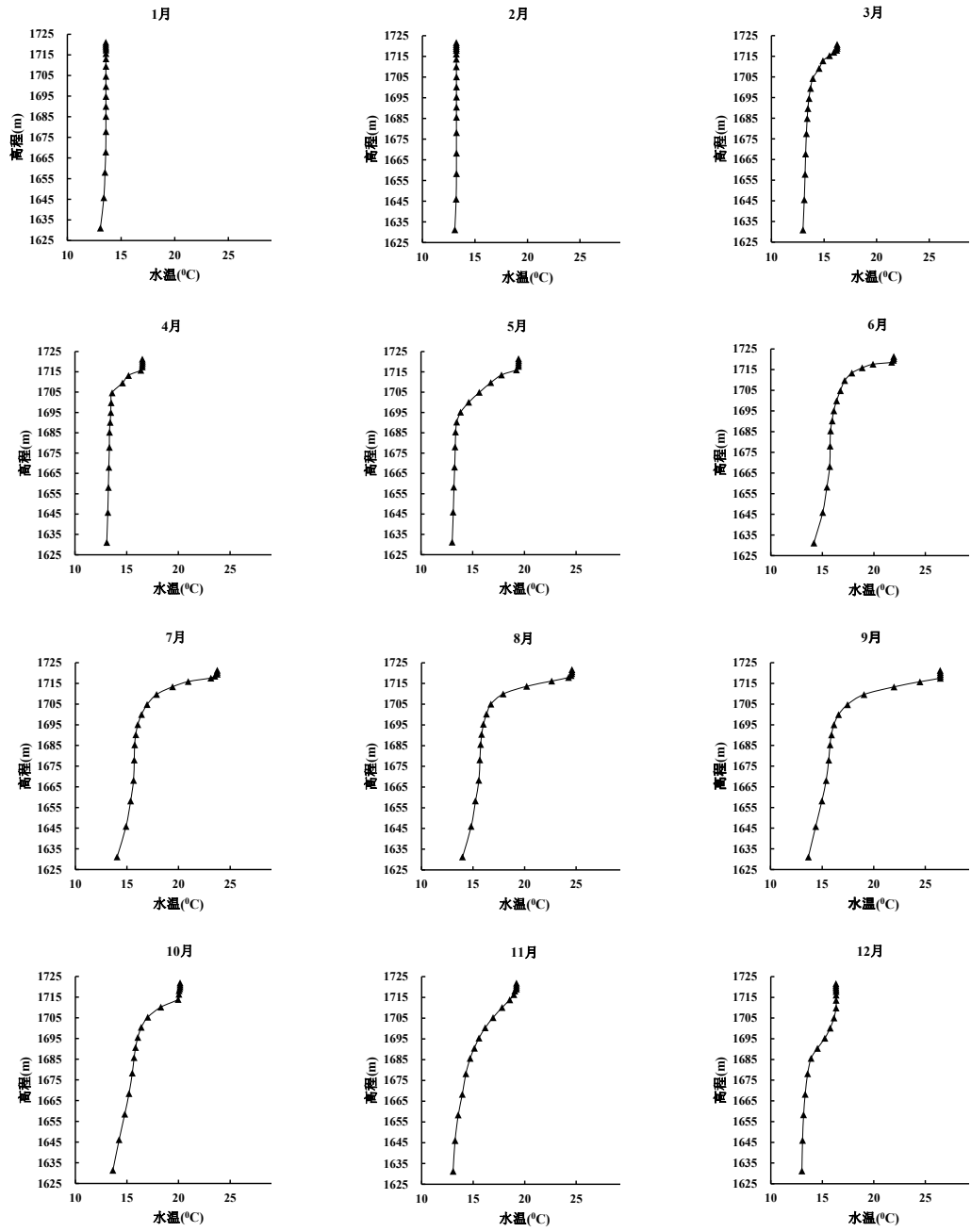
Table S6 Statistical results of simulation error of surface dissolved oxygen in Fuxian Lake

监测站点	平均绝对误差 (mg/L)	相对误差 (%)	均方根误差 (mg/L)
海口	0.9562	11.61	1.3738
孤山湖心	0.5782	7.56	0.6864

附表 7 抚仙湖垂向水温验证误差统计

Table S7 Statistical results of simulation error of surface water temperature in Fuxian Lake

采样点	平均绝对误差 (°C)	相对误差 (%)	均方根误差 (°C)
A1	0.692	4.247	0.899
A2	0.283	1.783	0.597
A3	0.661	4.040	0.959
B1	0.265	1.664	0.287
B2	0.207	1.313	0.298
B3	0.605	3.759	0.772
C1	0.207	1.313	0.280
C2	0.222	1.419	0.376
C3	0.428	2.730	0.679
D1	0.138	0.865	0.236
D2	0.544	3.359	0.666
D3	0.759	4.540	1.059
E1	0.229	1.393	0.291
F1	0.519	3.171	0.683
G1	0.939	5.438	1.119

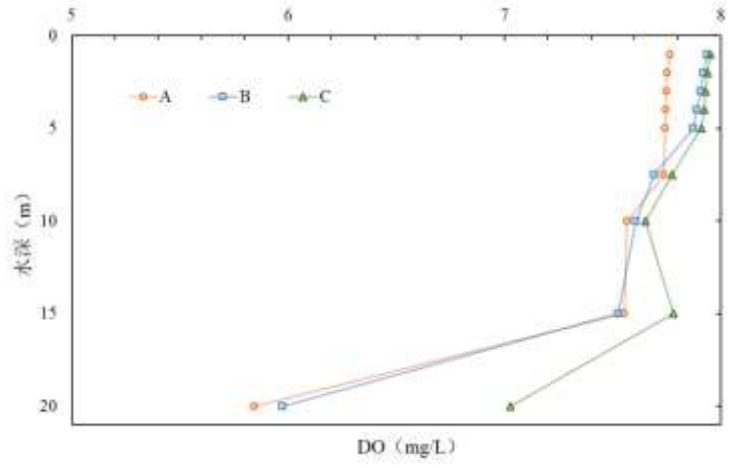


附图 7 抚仙湖水动力水质模型模拟的 2020 年 1—12 月水温分布

Fig.S7 The water temperature distribution simulated by the hydrodynamic water quality model of Fuxian Lake from January to December 2020



(a) 点位分布



(b) 各点位溶解氧垂向分布

附图 8 抚仙湖水动力水质模型模拟的 3 个点位溶解氧垂向分布

Fig.S8 Vertical distribution of dissolved oxygen at three points simulated by the hydrodynamic water quality model of Fuxian Lake