

基于 EFDC 模型的博斯腾湖 COD 动态模拟与调控策略*

李江^{1,2}, 段仲昭^{3**}, 高伟⁴, 贺金良², 王勇², 邢豪杰³, 魏光辉², 李卓雅⁵, 何连生⁵, 后希康⁵

- 1.新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052;
- 2.新疆塔里木河流域管理局, 库尔勒, 841000;
- 3.高原湖泊生态与环境健康云南省高校协同创新中心, 昆明学院农学与生命科学学院, 昆明 650214;
- 4.广东工业大学生态环境与资源学院, 广州 510006
- 5.中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 博斯腾湖作为我国最大的内陆吞吐湖, 在干旱区水资源调配和生态屏障功能中具有重要地位。然而, 近年来湖泊化学需氧量 (COD) 浓度持续超标, 成为区域生态环境治理的突出问题。本研究构建博斯腾湖 EFDC 三维水动力水质模型, 结合情景模拟方法, 系统反演了 2014-2023 年博斯腾湖水动力条件及 COD 浓度的动态, 设计多种水文调控情景并评估了不同水文调控措施对全湖水动力条件及 COD 浓度的改善效果。结果表明, 1) 博斯腾湖 COD 浓度的变化是自然过程 (高蒸发量、低流速、长水龄) 与人为活动 (育苇区) 共同作用的结果; 2) 博斯腾湖水动力条件较弱, 且呈现西高东低的特点, 有效提升全湖水动力条件是改善 COD 浓度的关键; 3) “引开济黄”情景通过重新分配入湖流量显著改善了湖泊水动力条件, 使 COD 浓度下降 18.37%, 是最优的调控方案。本研究不仅为博斯腾湖 COD 调控提供了科学依据, 也为干旱区湖泊污染控制和水环境管理提供了借鉴。

关键词: EFDC, COD, 水动力, 水文调控, 水质达标

EFDC modelling revealed COD dynamics in Lake Bosten and regulation mechanism

Li Jiang^{1,2}, Duan Zhongzhao^{**}, Gao Wei⁴, He Jinliang², Wang Yong², Xing Haojie³, Weigh Guanghui², Li Zhuoya⁵, He Liansheng⁵ & Hou Xikang⁵

1. School of water conservancy and civil engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, P. R. China;
2. Xinjiang Tarim River Basin Authority, Korla 841000, P. R. China;
3. Yunnan Collaborative Innovation Center for Plateau Lake Ecology and Environmental Health, College of Agronomy and Life Sciences, Kunming University, Kunming 650214, P. R. China;
4. School of Ecology, Environment, and Resources, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, P. R. China;
5. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing, 100012, P. R. China)

Abstract: As the largest inland drainage lake in China, Lake Bosten plays a critical role in water resource allocation and ecological barrier functions in arid regions. However, the persistent exceedance of chemical oxygen demand (COD) concentration standards in recent years has become a significant challenge for regional ecological and environmental management. This study employed the three-dimensional hydrodynamic and water quality model Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC) for Lake Bosten, combined with scenario simulation methods, to systematically reconstruct the dynamics of hydrodynamic conditions and COD concentrations from 2014 to 2023. Multiple hydrological regulation scenarios were constructed to evaluate the improvement effects of different measures on the lake's hydrodynamic conditions and COD concentrations. The results indicate that: 1) Changes in COD concentration in Lake Bosten result from the combined influence of natural processes (high evaporation, low flow velocity, and long water residence time) and human activities (such as reed cultivation areas); 2) The lake exhibits weak hydrodynamic conditions with a spatial pattern of higher values in the west and lower values in the east, and effectively enhancing lake-wide hydrodynamic conditions is key to improving COD concentrations; 3) The “Kaidu-to-Huangshui Water Diversion” scenario can significantly improve lake hydrodynamics by reallocating inflow and reduce COD concentrations by 18.37%, representing the optimal regulation scheme. This research provides a scientific basis for COD control in Lake Bosten and offers insights into pollution management and water quality governance in lakes located in arid regions.

Key words: EFDC, COD, Hydrodynamic, Hydrological Regulation, Water Quality

博斯腾湖位于新疆巴音郭楞蒙古自治州境内, 作为我国最大的内陆吞吐湖, 既是塔里木河流域的重要生态屏障和水资源保障^[1]; 也是干旱区典型湖泊生态系统, 在流域水资源调配、生态安全维持及区域经济发展中具有关键作用^[2]。受气候暖干化与高强度人类活动影响, 其面临入湖径流衰减后水位持续下降^[3], COD 长期超标等复杂水环境问题^[4]。此外, 高蒸发与季节性断流加剧水动力不足, 而农业面源与芦苇残体分解形成的内源负荷, 进一步导致 COD 浓度时空异质性显著^[5]。干旱区湖泊受高变异性水文循环影响, 入湖流量、污染物通量与水动力过程呈现显著时空异质性^[6, 7]; 叠加农业面源、工业点源及内源释放的复杂交互污染^[8]; 加之高蒸发、低降水导致的水动力不足限制污染物扩散^[9]; 多重自然与人为因素交织, 增加了水质管理中精准捕捉 COD 变化及调控响应的难度。

* 2025-07-07 收稿;2025-09-04 收修改稿

博斯腾湖 COD 源解析与调控策略项目 (TGJBYJG-2024KYXM0003) 和新疆维吾尔自治区高校科研计划项目 (No.XJEDU2023J017) 联合资助。

** 通信作者;E-mail: dinod520@outlook.com

基于数值模拟的研究方法可为湖泊 COD 的动态评估及调控情景优化提供重要的技术支撑^[10, 11]。目前常用的模拟方法包括机理模型、统计模型及机器学习等^[12-14]。机理模型（如 EFDC、CE-QUAL-W2、MIKE 21 等）通过数学方程描述湖泊水动力、水质及生态系统过程，能够揭示污染物的迁移、转化机理，可用于长期水质动态模拟、污染源识别及多情景分析。EFDC（Environmental Fluid Dynamic Code）是基于三维不可压缩流体动力学方程的水动力-水质耦合模型，可模拟流速、水质等多参数时空分布，支持水动力、泥沙、水质等模块耦合^[15]。因其高时空精度、多场景适配的优势，已广泛应用于湖泊、水库、河口等水体的水质模拟、纳污能力测算、蓝藻水华预测、GHG 排放估算等^[16-18]。此外，EFDC 模型在湖库 COD 浓度反演、污染溯源及水质调控方面也得到应用。

在我国北方镜泊湖构建的 EFDC 水质模型表明，水动力及温度的变化导致污染物衰减速率的季节性差异，并进一步驱动水质（COD_{Mn}、NH₃N）变化^[19]。在深圳石岩、铁岗、西丽水库的研究表明，通过内外源削减（石岩水库）、提高调水水质（铁岗水库）或增加洪水期的调水量（西丽水库），可有效降低库内 COD 浓度^[20]。美国密西西比州圣路易斯湾支流的 EFDC 模拟进一步揭示了干早期低流量与暴雨期高径流等临界水文条件可显著影响氮磷营养盐的迁移转化过程，并通过多情景分析量化了水文调控对河口水质的改善潜力^[21]。然而，现有研究未能充分适配干旱区吞吐湖特有的“水位-流量强耦合”水动力特征。这类湖泊的污染物（如：COD）迁移受水龄（水位主导）与流速（流量主导）的协同控制，而当前模型忽略了两者的交互作用，导致难以全面解析水质的动态规律、识别其关键影响因素并进一步优化水文调控策略。

针对上述空缺，本研究以博斯腾湖为对象，构建 EFDC 水文水质模型，研究 COD 浓度变化的主要驱动因素；聚焦入湖流量配置、扬水站空间布局调整、湖泊生态水位调控等关键水文调控措施；开展多情景下的水质模拟与优化调控研究，评估不同调控措施对湖泊 COD 浓度的影响，为博斯腾湖 COD 达标管理提供科学依据，同时为干旱区湖泊水环境管理提供研究思路和实践路径。

1 方法

1.1 研究区概况

博斯腾湖被誉为开都河-孔雀河流域的“心脏”，既是上游开都河、黄水沟等水系的尾闾，又是下游孔雀河水系的源头；不仅对上游来水的调蓄起到关键作用，还为下游生态用水及社会经济发展提供了重要支撑^[22]。其流域主要位于巴音郭楞蒙古自治州境内，总集水面积 4.64 万 km²。博斯腾湖由大湖区和小湖区两部分组成，其中大湖区是湖泊的主体部分。在水位 1047.5 m 时（85 基面），大湖区湖泊面积 1106.7 km²，总蓄水量 78.4 亿 m³，平均水深 8 m，最大水深 16 m。小湖区位于大湖西南部，主要为密布芦苇的湿地，由达乌孙诺尔等 16 个小片水域和大片芦苇沼泽湿地组成，面积约 350 km²。博斯腾湖具有典型的温带大陆性气候特征，四季分明，昼夜温差大，气候干燥，光照充足^[23]。年均气温 8.3℃，平均日照时数 3109 h，无霜期 222 d；年降水量仅为 64.7 mm（16.2 ~ 154.6 mm），而蒸发量高达 1881 mm。博斯腾湖的主要入湖河流为开都河、黄水沟和清水河，其中开都河是最重要的入湖水系，约占湖泊总入流量的 86%^[4]。孔雀河是博斯腾湖的唯一出湖河流，流量主要通过扬水站进行人工控制，以调节湖泊水位并向下游区域供水。

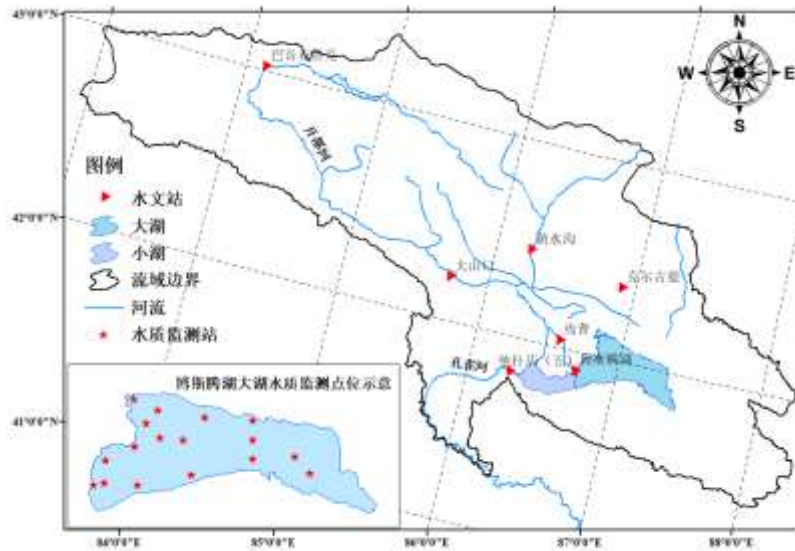


图 1 博斯腾湖流域地理位置及主要水质监测点位、气象水文站示意

Fig.1 Geographical location, water quality monitoring sites, meteorological and hydrological stations in Lake Bosten Basin

1.2 数据来源

本研究所需数据涵盖流域气象、水文、水质、土地利用、湖泊形态等多方面内容，其主要来源包括州环保局、水文局、气象局、塔里木河流域管理局、公开文献及科研数据库等，具体如下：

水质数据：以 COD 浓度为主，主要来源于属地生态环境保护部门及生态环境监测中心；包括大湖区 17 个监督性监测点位，及 5 个主要入湖河道河流水质监测数据。气象数据：包括逐日降水、气温、风速风向、云量、日照时长、相对湿度、大气压等。主要依托流域内国家级气象站的长期观测数据及 ERA5（欧洲中期天气预报中心）的高分辨率气象产品。水文数据：包括主要出入湖河流的逐日流量、入湖河道水温、湖泊水位、湖泊表面水温；其中入湖河道流量及湖泊水位来源于水文水资源局、水文年鉴，入湖河道水温通过随机森林重建^[24]，湖泊表面水温来源于 ERA5 再分析数据^[25, 26]。地理空间数据：包括湖泊水下地形图、30 米分辨率土地利用数据、土壤类型数据及数字高程模型（DEM），来源于中科院资源环境科学数据平台（<https://www.resdc.cn/>）及属地生态环境管理部门。

为确保 EFDC 模型在博斯腾湖大湖区水文水质模拟中的准确性与适用性，本研究基于大湖水位观测数据和 17 个国控监测点近 10 年（2014~2023）的逐月 COD_{Cr} 实测数据，对模型关键参数进行了率定和验证。参数率定以 RMSE（均方根误差）最小化为目标，同时注重对 COD 变化趋势的模拟能力。采用基于经验值的分步率定策略：使用 2014-2019 年实测数据，逐一调整水动力、热量传输、水质（COD）模块的参数，使模拟结果贴近实测数据；而后使用 2020-2023 年数据对率定后的参数进行验证，以评估模型的整体效果。

1.3 博斯腾湖 EFDC 模型构建

1.3.1 EFDC 模型简介 EFDC（Environmental Fluid Dynamics Code）模型由美国环保署资助，美国弗吉尼亚州海洋研究所 Hamrick 研发，使用 Fortran 语言编写，集水动力、泥沙、污染物运移和水质模块于一体，可实现湖泊、水库、海湾、湿地、河口及近岸海域的一维、二维及三维数值模拟^[15]。EFDC 模型通过物质欧拉输运方程综合描述紊流长度、紊流动能、温度和盐度等多变量过程，其中平流项的求解采用 Blumberg-Mellor 模型的差分格式或正定迎风差分格式，以保证计算精度与稳定性。EFDC 模型在全球范围具有广泛的应用，其模块化设计和高度适应性使其成为湖泊水质模型的首选工具之一^[27]。本研究使用 Tera-tech 整合的 EFDC Explorer 8.4（EE 8.4）软件进行博斯腾湖大湖区的三维建模。

1.3.2 网格划分及边界条件设置

博斯腾湖小湖湿地虽与大湖存在连通，但小湖总面积仅占全湖总水域面积的 5.2%，且以芦苇沼泽湿地的静态滞水为主，对大湖核心水域的水动力过程及污染物迁移路径影响较小。本研究核心目标为大湖 COD 达标模拟，综合权衡模型网格数量优化、计算效率提升的实际需求，对小湖进行概化处理，模型中仅保留大湖区的开放水域作为模拟主体。本研究将博斯腾湖大湖区在水平上划分为 4063 个 750 m × 750 m 的笛卡尔网格，在垂向上平均划分为 10 层（SGZ 分层，每层厚度 1.35m），全湖共计 19105 个有效网格。博斯腾湖大湖区共大小入湖河道 13 条，出湖河道仅 1 条，即孔雀河，其流量受扬水站节制^[28]。在 13 条入湖河道中，开都河、黄水沟和清水河的径流量占流域总径流量的 96.3%，是博斯腾湖水量的关键补给源。为优化模型运算时间，取扬水站为出湖口，入湖口仅保留开都河、黄水沟和清水河的径流量。所有入湖口均输入流量、水温及 COD 浓度的逐日时间序列，出湖口仅输入输出湖流量的逐日时间序列。此外，为模拟大湖西侧芦苇种植区的影响，在大湖西侧网格人为加入高 COD 浓度低流量的多个时间序列以模拟育苇区有机质输入的影响。

1.4 调控情景设置

基于博斯腾湖 EFDC 模型还原的 2014-2023 年 COD 变化及前期调研的 COD 变化潜在驱动力，结合博斯腾湖的管理需求与现实约束设计了多组调控情景方案。调控情景以水文调控为核心，重点针对入湖流量、出湖流量及水位调控等关键变量，综合考虑其对湖泊水动力条件和污染物迁移转化的直接影响^[29]。因此，主要从扬水站调整、入湖流量调控和水位保持等三个方向设计了多组情景，以评估不同调控方案对博斯腾湖 COD 浓度改善的效果。具体情景设置见表 1，各调控点位见图 2 所示。

表 1 博斯腾湖 COD 调控情景设置
Tab.1 Scenario setting of COD regulation in Lake Bosten

考虑因素	情景名称	具体方案
现状	S0: 基准情景	水文水位等因子维持现状。
	S1: 东迁情景 1	扬水站调整至: N 41°55'10.75"; E 87°04'37.34"
扬水站改道	S2: 东迁情景 2	扬水站调整至: N 41°53'40.98"; E 87°12'37.23"
	S3: 东迁情景 3	扬水站调整至: N 41°53'08.53"; E 87°17'31.22"
	S4: 开都河改道黄水沟	开都河东支的流量改由黄水沟入博斯腾湖
入流改道改流	S5: 开都河东支比例扩大	宝浪苏木东、西支比例由原有 6:4 调整到 7:3
	水位	S6: 保持生态水位

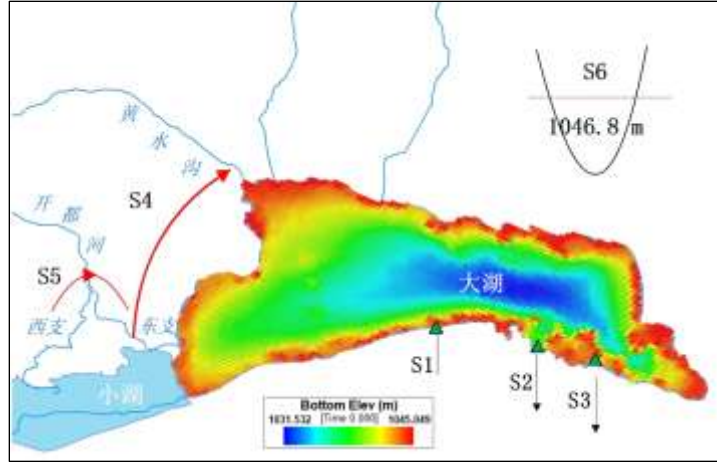


图2 波斯腾湖 COD 调控点位示意图，图中 Bottom Elev(m)表示以米为单位的底部高程
 Fig.2 Schematic map of COD regulation sites in Lake Bosten, Bottom Elev (m) in the figure denotes the bottom elevation in meters.

2. 结果

2.1 波斯腾湖 EFDC 模型参数率定

本研究中构建的波斯腾湖 EFDC 模型的水动力（水位）、热量（水温）及水质（COD）模块的参数率定结果具体如下：

（1）水动力及热量模块

水位初始值设置为 1045.1m（全湖平均），水温初始值设置为 0°C（全湖平均），率定过程中，以波斯腾湖站逐日实测水位为水位率定的参照标准。由于缺乏波斯腾湖逐日实测水温数据，故使用经过校验的 ERA5 全球湖泊数据中的波斯腾湖逐日全湖平均表面水温作为率定的参照标准。经调参后，模拟水位、水温与实测水位、ERA5 水温在率定期（2014-2019）及验证期（2020-2023）均较为接近，模型表现较好（图 3）。水位全期（2014-2023）的可决系数（ R^2 ）、均方根误差（RMSE）、及纳什系数（NSE）分别为 0.936、0.271、0.917；水温全期的 RMSE 及 NSE 分别为 3.860、0.917（表 2）。率定参数时，水动力模块使用 EFDC 模型的默认参数，温度模块及水质（COD&DO）模块经手动率定。温度模块选用全热平衡（Full Heat Balance）模型，COD 模块仅率定影响 COD 的关键参数降解速率^[19, 30]，其余参数选用默认值。温度模块及水质（COD&DO）模块各参数取值如表 3 所示。

表 2 波斯腾湖 EFDC 模型水位及水温率定结果
 Tab.2 Calibration results of water level and water temperature for Lake Bosten EFDC model

类型	率定/验证期	可决系数 (R^2)	均方根误差 (RMSE)	纳什系数 (NSE)
水位	全期	0.936	0.271	0.917
	率定期	0.962	0.236	0.951
	验证期	0.536	0.317	0.606
水温	全期	—	3.860	0.822
	率定期	—	3.918	0.817
	验证期	—	3.493	0.853

表 3 波斯腾湖 EFDC 模型温度及水质（COD&DO）模块参数率定值
 Tab.3 Calibrated Parameter values for the temperature and water quality (COD & DO) module of Lake Bosten EFDC model

参数名	率定值	同类文献取值范围
Evaporative Heat Transfer	5	30 ~ 300 ^[31]
Convective Heat Transfer	50	100 ~ 1000 ^[31]
Fast Coefficient: /m	0.53	0.2 ~ 1.3 ^[32, 33]
Slow Coefficient: /m	0.14	0.1 ~ 0.5 ^[32, 33]
Fraction Attenuated Fast	0.7	0.3 ~ 1.0 ^[32, 33]
COD Decay Rate (per day)	0.0004	0.0015 ~ 0.1 ^[19, 20, 30]

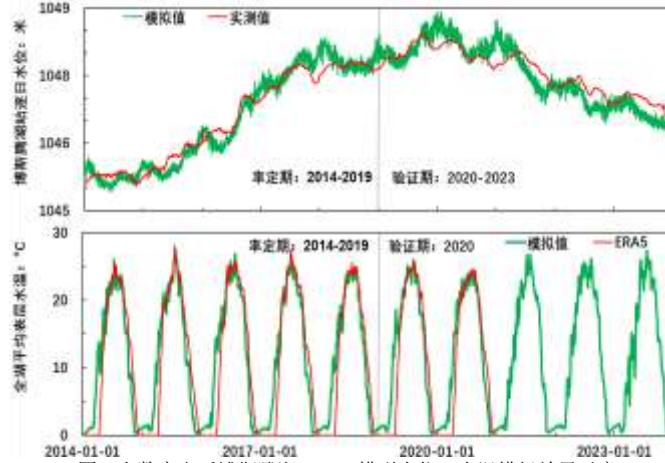


图3 参数率定后博斯腾湖 EFDC 模型水位、水温模拟效果示意

Fig. 3 Simulation performance of water level and water temperature of Lake Bosten EFDC model after parameter calibration
注：ERA5 逐日水温数据来自欧洲中尺度气象预测中心(<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5>), 开展本研究时暂未公布 2022 年以后数据。

(2) COD 率定结果

基于博斯腾湖 17 个国控、省控水质监测点位 2014 年至 2020 年逐月监督性监测数据开展 COD 率定, 其中 2014-2017 年为率定期, 2018-2020 年为验证期, 率定期及验证期均对比当日模拟 COD 值及实测 COD 值。全期 7 年, 17 个点位共获得 748 个 COD 观测值, COD 平均值为 21.85 ± 3.62 。经参数校验后, 认为 EFDC 模型模拟的 COD 值可在全湖平均水平上较好的反演其 COD 动态变化 (图 4 a); 但仅考虑 COD 负荷来源为主要入湖河道时, 17 个国控点位的模拟 COD 浓度远低于实测水平 (图 3 b)。率定后, 全期 (2014-2020) COD 模拟与实测值的全湖平均相对误差为 -4.49%, 相关系数为 0.50。在 17 个点位的 COD 模拟值与实测值相对误差在 5% 以内, 1 个点位相对误差在 10% 以内。但博湖 14、博湖 12、博湖 13 因靠近最大的入湖口 (开都河) 及唯一的出湖口 (扬水站), 水动力条件较为复杂, 模拟值与实测值的相对误差高于 10% (表 4)。

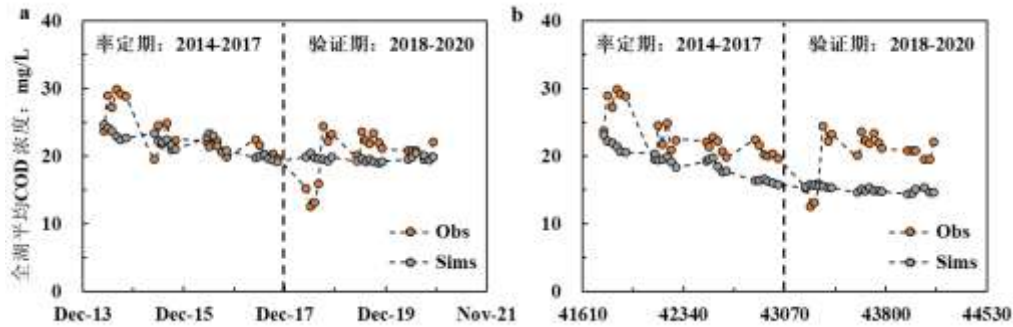


图4 博斯腾湖全湖平均 COD 模拟与实测值对比

Fig.4 Comparison of lake-wide average COD simulated and observed values in Lake Bosten

(a) 图为包含主要河道及大湖西侧育苇区 COD 负荷的模型模拟结果, (b) 图为仅有主要河道 COD 负荷的模型模拟结果

2.2 各调控情景下的流场变化

博斯腾湖全湖流速较低, 统计 2014-2023 年表层 ($K=10$) 的模拟结果, 在原始情景下 (S_0) 全湖平均流速为 0.0192 m/s , 流速最高的点位为博湖 3, 流速为 0.0404 m/s , 最低的点位为博湖 7, 流速仅 0.0052 m/s (图 5. a)。入流改道、改流 (S_4 、 S_5) 情景对博斯腾湖流速、流场具有较大的影响, 其中“引开济黄”情景 (S_4) 对全湖流速有显著增加作用 (+31.0%), 而开都河东支比例扩大 (S_5) 可降低全湖流速 (-4.8%)。扬水站东迁 (S_1 - S_3) 及保持生态水位不低于 1046.8 m 的情景 (S_6) 对全湖流速影响不大 (图 5. b)。

除流速外, 在 EFDC 模型中模拟了 2014 年至 2023 年的水龄, 在现状情景 (S_0) 下, 博斯腾湖全湖平均水龄为 1052 天, 水龄最高的点位为博湖 17, 水龄为 1339 天, 最低的点位为博湖 7, 水龄为 338 天。水龄 1000 天以下的点位仅 4 个, 分别为博湖 7、博湖 14 (389 天)、博湖 13 (650 天)、博湖 12 (866 天)。其他 13 个点位水龄均高于 1000 天 (图 5. c)。对比不同调控措施对全湖平均及 17 个国控点位的水龄改善作用发现, 扬水站东迁及“引开济黄”情景对全湖平均水龄的改善作用较为显著, 可降低全湖平均水龄 12.93-19.65% (图 5. d)。其中扬水站东迁情景 3 (S_3) 对全湖平均水龄的改善作用最为显著, 使全湖平均水龄降低 19.65%; 其次

分别为“引开济黄”（S4）、扬水站东迁情景 2（S2）、扬水站东迁情景 1（S1）。需要注意的是，生态水位保持情景（S6）下，全湖平均水龄增加了 2.85%。

表 4 博斯腾湖 17 个水质点位 2017-2020 年全期 COD 模拟值与实测值对比结果

点位	实测值	模拟值	相对误差	相关系数
	mg/L	mg/L	%	—
博湖 1	20.61 ± 4.08	20.36 ± 1.70	-1.25	0.24
博湖 2	20.98 ± 3.41	20.67 ± 1.98	-1.47	0.41
博湖 3	21.84 ± 4.03	21.58 ± 2.14	-1.19	0.44
博湖 4	21.70 ± 4.30	22.06 ± 2.22	1.63	0.39
博湖 5	22.36 ± 4.44	22.66 ± 2.52	1.31	0.43
博湖 6	21.75 ± 4.57	22.28 ± 2.31	2.44	0.45
博湖 7	23.32 ± 4.85	21.53 ± 3.48	-7.65	0.15
博湖 8	22.25 ± 3.99	22.27 ± 2.50	0.10	0.44
博湖 9	22.70 ± 4.00	22.18 ± 2.10	-2.32	0.48
博湖 10	22.70 ± 3.44	21.75 ± 2.01	-4.19	0.32
博湖 11	22.57 ± 3.91	21.33 ± 2.61	-5.49	0.44
博湖 12	22.07 ± 4.20	19.40 ± 2.28	-12.07	0.08
博湖 13	21.59 ± 4.27	18.51 ± 2.93	-14.28	0.05
博湖 14	16.68 ± 6.59	11.87 ± 4.15	-28.85	-0.49
博湖 15	22.61 ± 5.07	22.07 ± 2.18	-2.42	0.47
博湖 16	22.59 ± 3.82	21.97 ± 2.25	-2.76	0.39
博湖 17	23.11 ± 3.99	22.30 ± 2.39	-3.53	0.29
全湖平均	21.85 ± 3.62	20.87 ± 1.62	-4.49	0.50

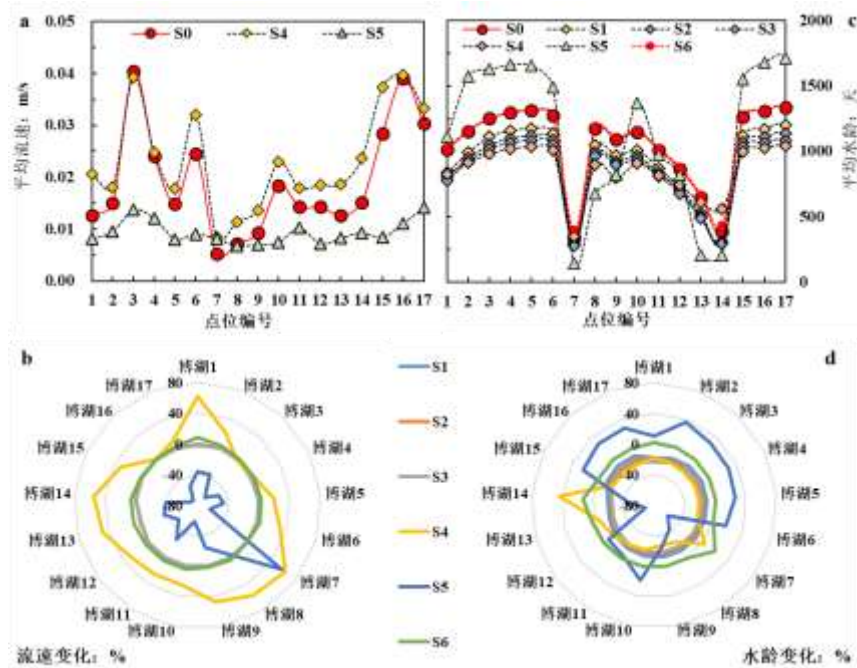


图 5 博斯腾湖 17 个监测点位在原始情景及各调控措施情景下的平均流速 (a)、水龄 (c) 示意及与原始情景对比的变化 (b、d) 示意 (a)；图中扬水站东迁 (S1-S3) 及生态水位保持 (S6) 情景与原始情景差距不大，并未在图中展示，(b) 图中生态水位保持 (S6) 情景与原始情景差距不大，并未在图中展示。此外，(c) 图中 S6 曲线与 S0 曲线重叠。

Fig.5 Schematic of average flow velocity (a) and water age (c), and their variations vs. the original scenario (b, d) at 17 monitoring sites in Lake Bosten under the original and regulation scenarios

2.2 各情景下的 COD 变化

在 EFDC 模型中模拟了 2014 至 2023 年的 COD，并对比了各情景下 2014 年 8 月至 2020 年 11 月开展监督性监测期间 COD 浓度的变化（图 6. a）。在现状情景（S0）下，博斯腾湖模拟 COD 的全湖平均值为 20.87 mg/L，波动范围 18.98-24.71 mg/L。从不同调控措施情景的模拟结果来看，“引开济黄”情景（S4）对全湖平均 COD 改善最为显著，可降低 COD 浓度 18.37%（图 6. a b）。其次，改迁扬水站对降低博湖 COD 浓度也有显著作用，在不同的改迁位置（S1、S2、S3）情景下，全湖平均 COD 分别可下降 5.51%、7.12%、8.00%。而开都河东支扩大情景（S5）可导致全湖平均 COD 浓度上升 3.09%（图 6. c）。

从各点位模拟全期（2014-01-01 至 2023-12-31）的统计结果来看（图 6. b c），在原始情景下，仅有 5 个点位（博湖 1、博湖 7、博湖 12、博湖 13、博湖 14）的 COD 平均浓度可满足 III 类水质标准。在“引开济黄”情景下，17 个点位的平均 COD 均可满足 III 类水质要求。在扬水站东迁的 3 个情景中，平均 COD 浓度满足 III 类水质的点位数量分别为：7 个、14 个、16 个。而在 S5 及 S6 情景下，与 S0 一致，仅有 5 个点位的平均 COD 浓度满足 III 类水质。

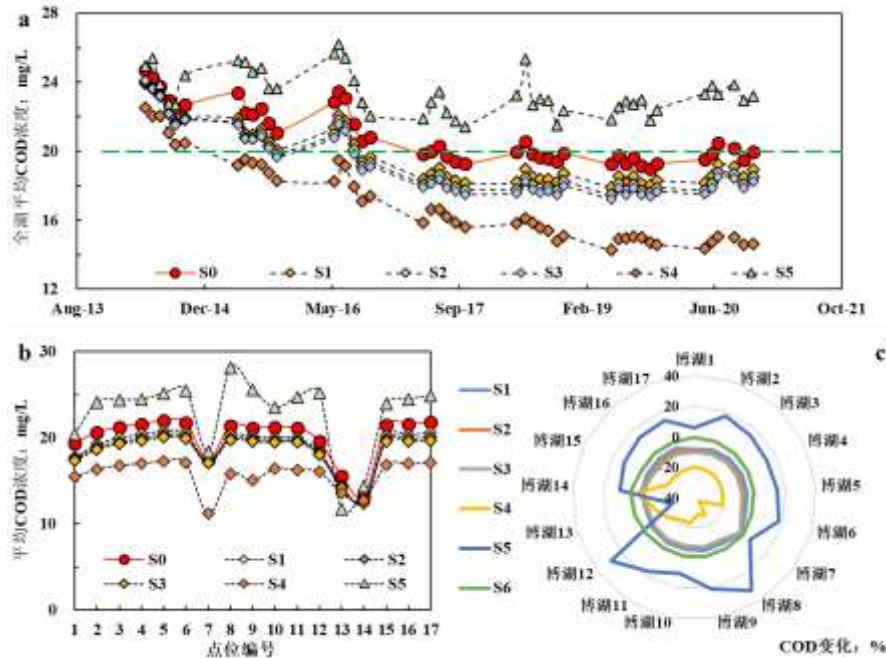


图 6 博斯腾湖 17 个监测点位在原始情景及各调控措施情景下的平均 COD 示意 (a) 及各情景下博斯腾湖全湖平均 COD 浓度变化 (b、c)；统计日期为开展监督性监测的时间，绿色虚线“—”为 GB3838-2002 中 COD 的 III 类水质标准 (20mg/L)；保持生态水位 (S6) 情景与原始情景差距不大，并未在图中展示。

Fig.6 Schematic of average COD at 17 monitoring sites in Lake Bosten under the original and regulation scenarios (a), and variations in lake-wide average COD concentration under each scenario (b, c)

3. 讨论

3.1 博斯腾湖 COD 超标问题的复杂成因

博斯腾湖 COD 浓度长期超标是自然条件与人为活动共同作用的结果。博斯腾湖地处内陆干旱区，其典型特征为高蒸发但低降水，2014-2023 年间多年平均蒸发量 1881 mm/年，降水量 64.7 mm/年。这一特性导致湖泊水量补给不足，水体流速较低（平均 0.019 m/s）、水龄较长（平均 1052 天），限制了污染物的扩散和稀释^[34]。此外，湖泊特殊的地貌特征使入湖径流集中于大湖西岸，造成了东、西部湖区水动力条件和污染物分布的显著差异，加剧了局部区域水质恶化的问题^[35, 36]。

人类活动的干扰是 COD 浓度超标的另一重要因素^[37]。湖泊周边广泛的农业灌溉和工业排放显著增加了入湖的有机污染负荷^[38]；湿地及芦苇种植区的污染也进一步加剧了 COD 浓度的累积^[39, 40]。在构建博斯腾湖 EFDC 模型时，开展了 2014-2020 年博斯腾湖 COD 浓度反演。通过“有无芦苇区 COD 负荷”的对照模拟发现，仅输入开都河、黄水沟等主河道的 COD 负荷时，17 个国控点位的 COD 模拟值 (17.27 ± 2.52) 较实测水平 (21.85 ± 3.62) 偏低 21%；而纳入大湖西侧芦苇区的 COD 负荷（芦苇残体分解贡献年均 1200 t COD）后，模拟浓度 (20.87 ± 1.62) 接近实测水平（图 4a），模拟值与实测值的相对误差小于 5%。同时，人工水位调控（如扬水站运行）虽然保障了下游水资源供给，但改变了湖泊的自然水动力条件，导致部分区域污染物滞留，扩散能力降低，进一步加重了湖泊的污染问题^[39]。

与前人研究结果相似，博斯腾湖 COD 超标是水力循环弱和育苇区污染输入叠加的结果^[41]。在开都河入湖口处，入湖流量较大，开都河水与湖区水体交换频繁，COD 浓度较低。此外，博斯腾湖在冬春季可发生热力分层，进而影响 COD 的垂向分布。进入夏季后，风速增强，水体混合，表层 COD 也逐渐向底层扩散。因此，改善博斯腾湖的 COD 污染，需从优化水动力条件，同时减少外源污染负荷出发，采取科学调控措施以改善水质。

3.2 不同调控情景对 COD 改善效果的评估

通过 EFDC 模型的情景模拟，本研究评估了不同调控方案对博斯腾湖水质的改善效果。结果表明，“引开济黄”（S4）情景对 COD 改善效果最为显著。“引开济黄”通过将开都河东支的流量改道黄水沟，显著提升了湖内水动力条件，全湖平均流速提升 31%，水龄降低 19%。尤其在西湖滨带区域，流速提升 42.2%，水龄缩短 18.6%，大幅增强了水体流动性，促进了污染物的扩散和稀释，最终实现全湖平均 COD 浓度降低 18.37%。在此情景下，17 个监测点的 COD 浓度全部达到 III 类水质标准（ $\leq 20 \text{ mg/L}$ ）。总体而言，“引开济黄”情景通过重构湖内环流结构、优化流速空间分布，增强污染物扩散能力。从流场矢量图（图 7）可见，S4 情景下开都河入流路径调整使湖内形成更连贯的环流。一方面，提升了污染物随环流的输移效率；如：6 月 15 日，S4 流场在大湖区的流速衔接更顺畅，中低流速区较 S0 大幅下降；在 8 月 15 日（丰水期），大湖西侧浅滩育苇区的周边，流速也有显著提升；10 月 15 日（枯水期）全湖流速也更为均匀。另一方面，水体交换增强推动了大气复氧过程，使溶解氧（DO）在局部区域的浓度得到改善。例如，博湖 13、博湖 14 点位的表层 DO 平均值分别由 S0 情景下的 8.60 mg/L、7.10 mg/L 上升至 S4 情景下的 10.96 mg/L、11.00 mg/L，为微生物好氧降解、有机物氧化等化学作用提供了氧源。而博湖 7 点位的 DO 由 8.38 mg/L 降低至 4.08 mg/L，表征该区域可能仍以静态滞水为主、复氧能力弱且化学作用消耗 DO。其余点位的 DO 相较于 S0 情景变化不大，全湖平均 DO 在 S0 情景下为 10.31 mg/L，S4 情景下为 10.25 mg/L，整体保持稳定。总体来看，博湖 COD 的改善，主要表现为扩散稀释主导、局部化学作用影响的特点。

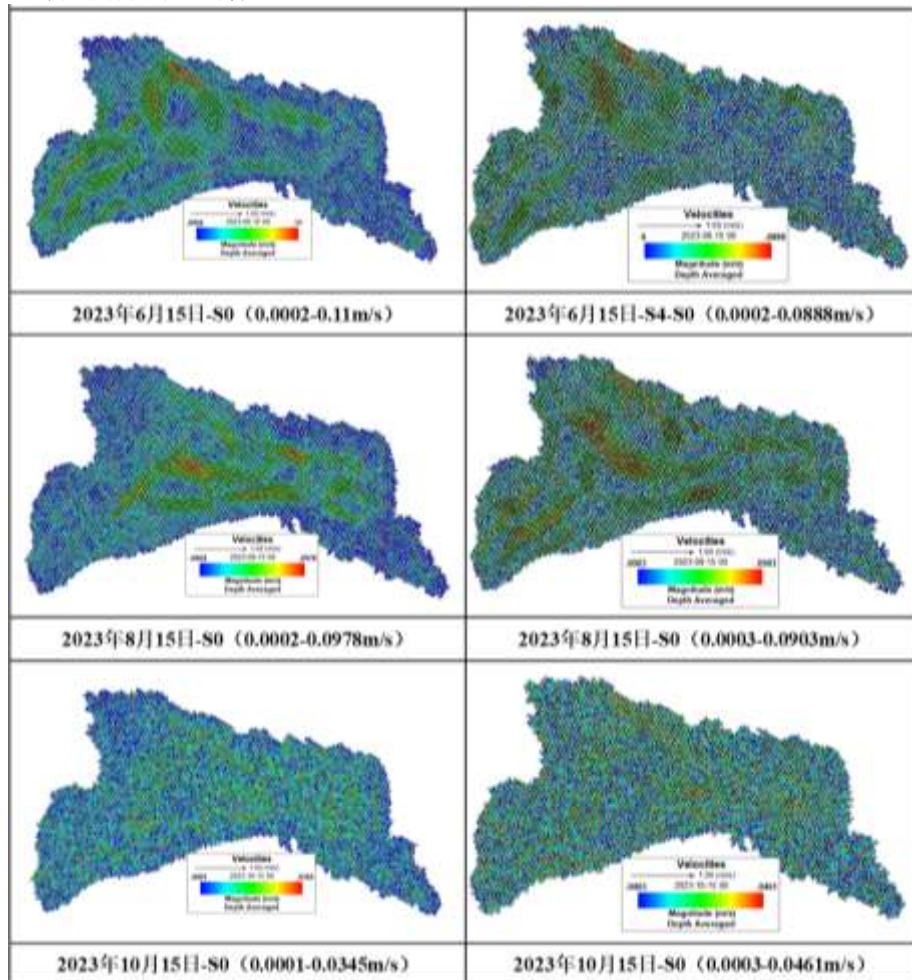


图 7 现状（S0）及引开济黄（S4）情景下博斯腾湖流场示意

Fig.7 Schematic of the flow field in Lake Bosten under the current situation (S0) and the Kaidu River Diversion to Yellow River scenario (S4)

相比之下, 扬水站改道情景 (S1-S3) 对流速和水龄的改善作用有限, 流速提升不足 10%, COD 浓度仅降低 5.51-8.00%。保持生态水位情景 (S6) 的作用更为有限, 部分区域水龄甚至有所增加 (+2.85%), 不利于污染物稀释。此外, 开都河东支比例扩大情景 (S5) 对水质产生负面影响, 导致 COD 浓度增加 3.09%。在该情景下, 全湖平均流速从 0.0192 m/s (S0) 降至 0.0094 m/s, 除博湖 7 点位外, 其余 16 个点位流速降低 5.7% 至 71.5% 不等 (图 5a、b), 显著影响 COD 稀释扩散。

综合来看, “引开济黄”情景是最优策略, 通过优化入湖流量分配, 可有效改善湖泊的水动力条件和污染物分布, 显著降低 COD 浓度; 而扬水站改道和生态水位保持情景作用有限, 难以实现湖泊整体水质的达标。

3.3 潜在社会生态影响与调控挑战

博斯腾湖的水质改善对区域生态系统健康和社会经济可持续发展至关重要。“引开济黄”情景通过优化入湖流量分配显著降低了 COD 浓度。然而, 这一调控措施也可能对区域生态和社会产生复杂影响。

从生态角度看, 黄水沟流量的增加改善了湿地的水动力条件, 但流量分配的变化可能对开都河下游及湖泊东部湿地的水资源平衡带来一定压力^[42, 43]。此外, 调控措施可能引发湖泊底泥中污染物的释放, 对 COD 浓度的长期变化影响需进一步评估^[44]。因此, 治理措施需在改善水动力的同时, 关注内源污染潜在影响, 以避免新的生态风险。

从社会角度看, “引开济黄”情景可能对农业用水和区域经济产生双重影响。一方面, 黄水沟流量增加可提升黄水沟流域内耕地灌溉保证率, 促进农业生产; 另一方面, 开都河下游可能因流量减少面临灌溉用水短缺, 农田受旱风险加剧, 城乡生活用水保障压力增大, 工业生产用水受限的问题。对此, 可考虑构建跨区域水资源协调机制, 通过水权交易与补偿、工程性调蓄及社会参与式管理等措施, 统筹上下游用水需求, 兼顾生态保护与经济发展的平衡。

本研究提出的优化水动力条件、提升流速、缩短水龄的技术路径, 为其他干旱区湖泊治理提供了借鉴。这一方法可在其他干旱区湖泊中推广应用, 但需因地制宜, 结合湖泊的自然特性和社会经济背景设计符合实际的调控措施^[45, 46]。通过数据和模型优化的协同推进, 本研究的技术方法和治理思路有望为干旱区湖泊生态修复和水资源可持续利用提供更加全面的科学指导。

3.4 研究局限、数据优化方向及未来研究建议

EFDC 模型作为一种多过程耦合工具, 在博斯腾湖水质研究中发挥了重要作用。本研究利用 EFDC 模型, 模拟了湖泊流速、水龄与 COD 浓度的动态关系, 并评估了不同情景下的水质改善效果。EFDC 模型的优势在于其灵活的网格划分和垂向分层能力, 能够适应博斯腾湖复杂的水动力条件。例如, 在“引开济黄”情景中, 模型准确捕捉到了西湖滨带区域流速提升和水龄缩短的显著效果。同时, 模型支持多情景模拟, 为水质管理和调控策略设计提供了科学依据。

本研究中, 水位、水温模块率定精度较高 (率定期水位 NSE=0.951), 但验证期水位模拟精度降低 (NSE=0.606); COD 全湖平均模拟精度良好 (相对误差- 4.49%), 但变异趋势模拟存在偏差。总体而言, 模型可以反映 2014-2021 年博湖水位、水温及 COD 浓度的长期变化趋势, 并用于后续的调控情景分析。湖泊水位变化由水量收支差驱动, 率定期未调整默认参数即获得较高水位模拟精度, 表明 EFDC 水动力模块参数组具有良好的稳健性。验证期水位模拟偏差主要因焉耆、巴音布鲁克气象站数据对 1106 km² 湖面的降水及蒸发量代表性不足, 尽管两站距湖较近, 但流域实测数据与湖面实际值存在差异, 导致水位模拟误差增大。模型对 COD 变异趋势模拟不足, 一是 EFDC 模型中 COD 降解系数采用固定值 (0.0004 d⁻¹), 未考虑季节尺度微生物活性差异 (如夏季降解速率较冬季高 30%) 及湖区水动力条件导致的空间异质性; 二是入湖 COD 输入数据基于逐月监测整编, 时间分辨率较低, 难以刻画突发性污染脉冲等短期水质变化。

EFDC 模型支持高时空精度的模拟, 其水平空间精度可高达米, 时间步长可精确至秒。在本研究中, 受有限的观测数据影响, 模型仅能基于已有实测数据的点位开展率定。如水位仅能依据大湖西侧博斯腾湖站逐日水位进行率定, 而 COD 仅能依据 17 个国控点位的逐月数据进行率定。通过引入高频监测设备, 可改善实测数据的精度, 提升模型的时空分辨率以抓取 COD 的短期动态, 为调水决策提供更可靠的支撑^[47]。此外, 未来研究也可考虑结合生态、社会和经济目标, 开展多目标调控策略研究, 探索更加综合的调控方案, 确保水质改善与水资源高效利用的协调平衡; 深入评估入湖流量调整等调控措施的长期生态和社会影响, 为流域-湖泊一体化管理提供科学依据。值得注意的是, 干旱区特殊水文过程的复杂性仍对模型模拟带来挑战。未来可结合遥感蒸发数据, 进一步优化陆-湖界面水分交换过程的模拟精度, 从而更准确地刻画干旱区湖泊的水文特征与生态响应, 完善模型在特殊地理环境下的应用。

4 结论

本研究基于 EFDC 三维水动力水质模型, 结合多情景模拟方法, 揭示了博斯腾湖 COD 动态变化的驱动要素, 并评估了多种水文调控情景对湖内水动力条件及 COD 浓度的改善效果。主要结论如下: (1) 博斯腾湖 COD 浓度的动态变化是自然过程与人为活动的共同作用结果。高蒸发量、低流速及长水龄限制了污染物的扩散和稀释能力; 育苗区输入的大量有机质进一步加剧了其 COD 超标问题。(2) 博斯腾湖全湖水动力条件较弱, 水龄较长; 大湖西主要入湖河道及出湖口一侧水动力条件较强具有较强的污染物稀释能力, 大湖中部及东部湖区水力循环弱, 污染物稀释能力较差; 改善全湖水动力条件, 增强污染物运移稀释能力是博斯腾湖 COD 达标的關鍵。(3) “引开济黄”情景 (S4) 通过增加黄水沟流量, 显著改善了湖泊的水动力条件, 使流速提

升 31%，水龄下降 19%，COD 浓度下降 18.37%，是最优的调控策略。扬水站东迁情景（S1-S3）次之，但其改善效果有限，难以保障全湖 COD 达标。（4）干旱区湖泊水质治理应注重流域-湖泊联动管理，优化水动力条件，并结合生态系统和社会经济的综合需求，因地制宜地设计调控策略。本研究为其他干旱区湖泊的水质管理提供了重要参考。

5 参考文献

- [1] LIU QQ, XU XB. Construction of lake ecosystem service production function: A case study of Lake Bosten. *China. Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(1): 279-288. [刘倩倩, 徐昔保. 湖泊生态服务生产函数构建研究—以博斯腾湖为例. *湖泊科学*, 2023, 35(1): 279-288].
- [2] YU ZL, XU XB, LI JY. Ecosystem Service Values of Bosten Lake from 1955 to 2019 and Their Influence Factors. *Wetland Science*, 2022, 20(3): 395-403. [禹泽龙, 徐昔保, 李景宜. 1955~2019 年博斯腾湖生态系统服务价值及其影响因素研究. *湿地科学*. 2022: 395-403.]
- [3] ZHOU HH, LI WH, CHEN YN, *et al.* Water-salt succession patterns(1951-2011) and its response to climate change in Lake Bosten. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(1): 55-65. [周洪华, 李卫红, 陈亚宁 *等*. 博斯腾湖水盐动态变化(1951-2011 年)及对气候变化的响应. *湖泊科学*, 2014, 26(1): 55-65.]
- [4] Saimire T, Dilinuer A, ZHANG M, *et al.* Characteristics and evaluation of spatial variation of water quality in Bosten lake. *Transactions of Oceanology and Limnology*. 2024, 46(2): 143-150. [赛米热·托合提, 迪丽努尔·阿吉, 张敏 *等*. 博斯腾湖水水质空间变化特征及评价. *海洋湖沼通报*. 2024: 143-150.]
- [5] LIU LM, ZHAO JF, ZHANG JP, *et al.* Water balance of Lake Bosten using annual water-budgets method for the past 50 years. 2013, 36(1): 33-40. [刘丽梅, 赵景峰, 张建平等. 近 50a 博斯腾湖逐年水量收支估算与水平衡分析. *干旱区地理*. 2013: 33-40.]
- [6] JIANG XT, XIAO QT, LI YM, *et al.* Temporal and Spatial Effects of River Input on Dissolved Organic Matter Composition in Lake Bosten. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(5): 1636-44. [蒋昕桐, 肖启涛, 李一民 *等*. 河流输入对博斯腾湖溶解性有机物组成的时空影响. *光谱学与光谱分析*. 2023: 1636-44]
- [7] WU JL, MA L, ZENG HA. Water Quality and Quantity Characteristics and Its Evolution in Lake Bosten, Xinjiang over the Past 50 Years. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(2): 231-237. [吴敬禄, 马龙, 曾海鳌. 新疆博斯腾湖水水质水量及其演化特征分析. *地理科学*. 2013: 231-237.]
- [8] ZHENG BY, CAO YM, ZHANG EL, *et al.* C, N Stable Isotope Records of Environmental Changes in Bosten Lake During the Past 200 Years. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(6): 165-171. [郑柏颖, 曹艳敏, 张恩楼 *等*. 博斯腾湖近 200 年来湖泊环境变化的有机碳氮稳定同位素记录. *海洋地质与第四纪地质*. 2012: 165-171]
- [9] JIANG XT, LIU D, ZHONG P, *et al.* Estimation of DOC concentration in the surface water of Lake Bosten using CDOM absorption coefficient. *China Environmental Science*. 2022, 42(12): 5824-5835. [蒋昕桐, 刘东, 钟朴 *等*. 利用 CDOM 吸收系数估算博斯腾湖水表层 DOC 浓度. *中国环境科学*. 2022: 5824-5835.]
- [10] FRASSL M A, ABELL J M, BOTELHO D A, *et al.* A short review of contemporary developments in aquatic ecosystem modelling of lakes and reservoirs. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 117: 181-7.
- [11] JANSSEN A B G, ARHONDITSIS G B, BEUSEN A, *et al.* Exploring, exploiting and evolving diversity of aquatic ecosystem models: a community perspective. *Aquatic Ecology*, 2015, 49(4): 513-48.
- [12] VISSER H, EVERS N, BONTSEMA A, *et al.* What drives the ecological quality of surface waters? A review of 11 predictive modeling tools. *Water Research*, 2022, 208.
- [13] MOOIJ W M, TROLLE D, JEPPESEN E, *et al.* Challenges and opportunities for integrating lake ecosystem modelling approaches. *Aquatic Ecology*, 2010, 44(3): 633-67.
- [14] LIU Y, JIANG QS, LIANG ZY, *et al.* Lake eutrophication responses modeling and watershed management optimization algorithm: A review. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(1): 49-63. [刘永, 蒋青松, 梁中耀 *等*. 湖泊富营养化响应与流域优化调控决策的模型研究进展. *湖泊科学*, 2021, 33(1): 49-63.]
- [15] ZOU R, CARTER S, SHOEMAKER L, *et al.* Integrated Hydrodynamic and Water Quality Modeling System to Support Nutrient Total Maximum Daily Load Development for Wissahickon Creek, Pennsylvania. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, 132(4): 555-66.
- [16] SHI W, WU W, FAN H, *et al.* Estimating CO₂ and CH₄ fluxes from reservoirs: Model development and site-level study. *Journal of Hydrology*, 2025, 654: 132794.
- [17] VILLOTA-LÓPEZ C, RODRÍGUEZ-CUEVAS C, TORRES-BEJARANO F, *et al.* Applying EFDC Explorer model in the Gallinas River, Mexico to estimate its assimilation capacity for water quality protection. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 13023.
- [18] ZHENG L, WANG H, LIU C, *et al.* Prediction of harmful algal blooms in large water bodies using the combined EFDC and LSTM models. *Journal of Environmental Management*, 2021, 295: 113060.
- [19] QIN Z, HE Z, WU G, *et al.* Developing Water-Quality Model for Jingpo Lake Based on EFDC. *Water*, 2022, 14(17): 2596.
- [20] HUA R, ZHANG Y. Assessment of Water Quality Improvements Using the Hydrodynamic Simulation Approach in Regulated Cascade Reservoirs: A Case Study of Drinking Water Sources of Shenzhen, China. *Water*, 2017, 9(11): 825.
- [21] LIU Z, KINGERY W L, HUDDLESTON D H, *et al.* Modeling nutrient dynamics under critical flow conditions in three tributaries of St. Louis Bay. *Journal of environmental science and health Part A, Toxic/hazardous substances & environmental engineering*, 2008, 43(6): 633-45.
- [22] 闫豫疆. 新疆开都-孔雀河流域生态系统服务供需研究, 2023.
- [23] JIANG B, CHEN YY, RAO EM, *et al.* Final ecosystem services valuation of Bosten Lake. *Chinese Journal of Ecology*. 2015, 34(4): 1113-1120. [江波, 陈媛媛, 饶恩明 *等*. 博斯腾湖生态系统最终服务价值评估. *生态学杂志*. 2015, 34(4): 1113-1120.]
- [24] DUAN Z, GAO W, CHENG G, *et al.* Warming surface and Lake heatwaves as key drivers to harmful algal Blooms: A case study of Lake Dianchi, China. *Journal of Hydrology*, 2024, 632: 130971.
- [25] HERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, *et al.* The ERA5 global reanalysis. 2020, 146(730): 1999-2049.
- [26] BELL B, HERSBACH H, SIMMONS A, *et al.* The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950. 2021, 147(741): 4186-227.
- [27] JAHN J M, LEE K, LYU S. Effect of Changes in Watershed Runoff Characteristics on Salinity Intrusion in Estuary Using EFDC. *Ksce Journal of Civil Engineering*, 2020, 24(1): 87-98.
- [28] 姚俊强, 陈静, 迪丽努尔·托列吾别克 *等*. 博斯腾湖流域气候水文变化及对湖泊水位的影响研究. *人民珠江*. 2021(4): 19-27
- [29] QI W, LI YP, WANG Y, *et al.* Control and Optimization Scheme of Tianjing Lake Hydrodynamics Based on EFDC Model. *Water Resources and Power*. 2015(1): 47-51. [戚文, 李一平, 王莹 *等*. 基于 EFDC 模型的天镜湖水动力优化调控方案研究. *水电能源科学*, 2015(1): 47-51]

- [30]XIE P, GAO F, WANG SH, ZHANG B, *et al.* Study on the influence of inflowing rivers on the water quality of Qiandao Lake: taking COD_{Mn} as an example. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(6): 692-700. [谢培, 高峰, 王书航等 入湖河流对千岛湖水质影响研究—以 COD_{Mn} 为例. 环境工程技术学报, 2019, 9(6): 692-700.]
- [31]张洪. 基于 EFDC 模型滇池外海水环境仿真研究, 2017.
- [32]ARIFIN R R, JAMES S C, DE ALWIS PITTS D A, *et al.* Simulating the thermal behavior in Lake Ontario using EFDC. *Journal of Great Lakes Research*, 2016, 42(3): 511-23.
- [33]张锦鹏. 基于 EFDC 模型的洱海水动力-水质数值模拟, 2020.
- [34]何晨. 干旱区半封闭湖泊富营养化驱动因素及调控研究 —以博斯腾湖为例, 2023.
- [35]GU HM, SHI JQ, ZOU CX, *et al.* Study on the Effect of Climate Change on Runoff in Kaidu River Basin. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(06):135-139,144. [顾海敏, 史建桥, 邹长新等 气候变化对开都河流域径流的影响研究. 水土保持研究, 2013, 20(06):135-139,144.]
- [36]肖伟. 开都-孔雀河流域水生态安全与对策研究. 水利科学与寒区工程. 2021(1): 72-74.
- [37]郑刚, 姚力, 章文亭. 博斯腾湖 COD_{Cr} 污染现状及影响因素分析. 新疆环境保护. 2024(2): 11-18.
- [38]DU DD, ZHANG CJ, LI ZW. The effects of modern 14C pool in Lake Bosten, Xinjiang, China. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(4): 1279-1288. [杜丁丁, 张成君, 李志文. 中国新疆博斯腾湖现代碳库效应研究. 湖泊科学 2024, 36(4): 1279-1288.]
- [39]HU CM, NARENGERILE, MA JF, *et al.* Study on the project of reducing organic pollutants in the Bosten Lake. *Arid Zone Research*. 2020(2): 428-434. [胡春明, 娜仁格日乐, 马金锋等 博斯腾湖有机物污染改善方案研究. 干旱区研究. 2020(2): 428-434.]
- [40]乔沪, 迪丽努尔·阿吉, 李平平, *et al.* 博斯腾湖西岸表面流人工湿地强化处理措施研究. 安徽农业科学. 2016(29): 39-40,43.
- [41]YU ZT, LI GY, ZHANG EL, *et al.* Process variations of sedimentary carbon accumulation in Lake Bosten since 1860. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(1): 293-304. [于志同, 李广宇, 张恩楼等 1860 年以来博斯腾湖碳沉积过程演变. 湖泊科学. 2019, 31(1): 293-304]
- [42]陈宇. 新疆和静县黄水沟径流及枯水特性分析. 地下水. 2015: 143-5
- [43]HU CM, NARENGERILE, MA JF, *et al.* The Influence of Huangshuigou Water Transfer Project on the Mineralization in Bosten Lake. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(3): 17-22. [胡春明, 娜仁格日乐, 马金锋等 黄水沟调水工程对博斯腾湖矿化度影响分析. 中国农村水利水电. 2021(3): 17-22.]
- [44]Zhang YL, Qin BQ, Zhu GW, *et al.* Importance and main ecological and environmental problems of lakes in China. *Chinese Science Bulletin*. 2022(30): 3503-3519. [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(30): 3503-3519.]
- [45]WANG HX, SUN ZD, WANG R. Study on the evaluation of ecological fragility of the wetlands in the Bosten Lake Region. *Arid Land Geography*. 2006, 29(2): 248-254. [万洪秀, 孙占东, 王润. 博斯腾湖湿地生态脆弱性评价研究. 干旱区地理. 2006, 29(2): 248-254.]
- [46]ZUO QT, CHEN X, ZHOU KF. Eco-environmental Control Model of Small Basin in Arid Region, Western China—Taking Bosten Lake Basin in Xinjiang as an Case. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2001(3): 85-88. [左其亭 陈嘻, 周可法. 西部干旱区小流域生态环境调控模式研究—以新疆博斯腾湖流域为例. 水土保持学报. 2001(3): 85-88.]
- [47]LI W, ZHE C, XUAN D, *et al.* Research on water environmental capacity accounting of the Yongzhou Section of Xiangjiang River Basin based on the SWAT-EFDC coupling model. *Journal of Water and Climate Change*, 2022, 13(2): 1106-22.