

水库型水源地水动力与污染物示踪数值模拟研究

张峰¹ 叶瑞¹ 张正东² 顾琴²

1. 安徽水利水电职业技术学院, 中国·安徽 合肥 231603

2. 合肥市董铺·大房郢水库管理处, 中国·安徽 合肥 230071

摘要:江淮区域分布着众多水库型水源地, 因枯水期和汛期受到本流域产汇流输入和跨流域渠道引水不同程度的影响, 日常管理面临着库区水质波动突发风险。本研究以董铺水库水源地为对象, 针对水库水体水文水环境突发风险, 数字化分析水库地形和水系, 以国际先进和主流应用的 EFDC 模型框架定制化构建库区三维水动力与污染物示踪动力学模型, 通过完整年度的本地化校准, 计算并统计 2023 年度水库的收支平衡, 建立水量汇入与库区水位波动 (25.62~28.66m) 的因果定量响应关系, 并在此基础上反演了水温的时空变化及示踪污染物进入库区水体之后的输移时间 (20d) 和路径。因此, 可以为库区长时间水动力变化、突发事件的应急响应时间和应急处置的分析研判提供科学决策辅助。

关键词: 水库型水源地; 水量平衡; 三维水动力模拟; 示踪模拟; 应急响应时间

Numerical Simulation Research on Hydrodynamics and Pollutant Tracing in Reservoir Type Water Source Areas

Feng Zhang¹ Rui Ye¹ Zhengdong Zhang² Qin Gu²

1. Anhui Technical College of Water Resources and Hydroelectric Power, Hefei, Anhui, 231603, China

2. Hefei Dongpu-Dafangying Reservoir Management Office, Hefei, Anhui, 230071, China

Abstract: In the Jianghuai region, numerous reservoir-type water sources are distributed, which are subject to varying degrees of influence from the inflow of water within the basin and the diversion of water across basins during the dry season and the flood season, posing sudden risks of water quality fluctuations in the reservoir area. This study takes Dongpu Reservoir as the research object, aiming at the sudden risks of hydrological and environmental emergencies in the reservoir water body. It digitally analyzes the topography and water system of Dongpu Reservoir, and constructs a customized three-dimensional hydrodynamic and pollutant tracing dynamic process model for the reservoir area using the internationally advanced and mainstream EFDC model. Through a full year of localized calibration, it calculates and statistically analyzes the water balance of the reservoir in 2023, and establishes a quantitative causal response relationship between the inflow of water and the fluctuation of reservoir water level (25.62~28.66m). It retraces the spatiotemporal changes of water temperature and the transport time (20d) and path of pollutants after entering the reservoir water body, providing scientific decision-making assistance for the analysis and judgment of long-term hydrological changes in the reservoir area and emergency response time for emergencies.

Keywords: reservoir-type water source; water balance; 3D hydrodynamic simulation; tracer simulation; emergency response time

0 前言

江淮区域分布着众多水库型水源地, 因枯水期和汛期受到本流域产汇流输入和跨流域渠道引水不同程度的影响, 日常管理面临着库区水质波动突发风险, 影响到城区供水质量^[1-3], 需要基于多源要素监控数据, 研究系统性的预测模型, 为水源地的长时间水动力变化、突发事件的应急响应时间和应急处置的分析研判提供科学决策辅助。

目前, 随着水源地在线传感器监测数据的积累, 为了更加科学准确的评估量化水量平衡和水质风险演化^[4-6], 需要能够系统量化水量平衡和污染物输移扩散多源影响因素的三维水动力与污染物示踪耦合数值模型系统^[7-9] 框架, 围

绕水量、水质边界输入, 气象驱动因子、示踪污染物动力学变化参数等影响因素, 通过大量的数值试验敏感性模拟测试, 建立来水水量与库区水位因果定量响应关系, 通过示踪污染物输移扩散过程的预测模拟, 实现突发性污染物的应急响应时间和空间演进路径的预测。

本研究以董铺水库水源地为对象, 在多源数据获取的基础上, 针对水库水体水文水环境突发风险, 数字化分析董铺水库地形和水系, 诊断主要水环境问题。选择适合董铺水库的水动力与污染物扩散模型, 定制化构建库区三维水动力—示踪污染物动力学过程模型, 通过完整年度的本地化校准, 计算统计年度水库的收支平衡, 建立水量汇入与库区水

位的因果定量响应关系。反演水温的时空变化及示踪污染物进入库区水体之后的输移过程,为库区水质突发事件的预测提供模型基础,提升水库系统风险的预警和决策能力。

1 研究区域概况

董铺水库坐落于合肥市庐阳区,在巢湖支流南淝河上游地区。如图 1 展示,该水库主要承担着城市防洪和供水的重要任务,同时也承担着生态补水功能,属于大型(2)型水库。水库的集水区域覆盖了 207.5 平方公里。基于吴淞高程系,董铺水库的正常蓄水高度设定为 29.00 米,汛期时的水位上限为 28.00 米,而最低水位线即死水位则为 18.50 米,整体库容达到了 2.42 亿立方米。

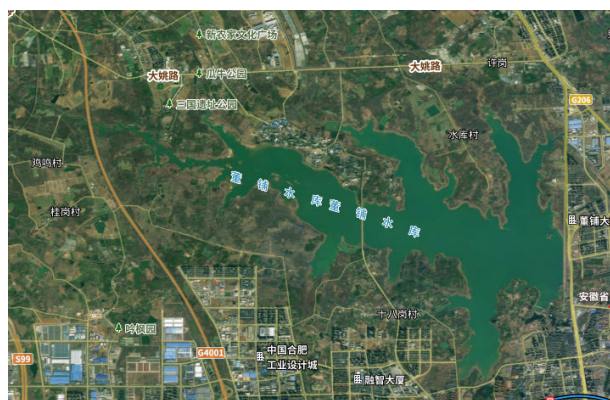


图 1 董铺水库位置分布图

2 研究方法

2.1 模型简介

本研究选择适合董铺水库的污染物扩散模型,基于国际上先进和主流应用的 EFDC (The Environmental Fluid Dynamics Code) 模型框架定制化构建库区三维水动力与污染物示踪动力学过程模型,通过完整年度的水量平衡和相关指标校准,计算统计年度水库的收支平衡,反演水位和水温的时空变化,通过示踪模拟污染物进入库区水体之后的输移扩散过程。

2.2 模型原理

EFDC (The Environmental Fluid Dynamics Code) 是由美国威廉玛丽大学维吉尼亚海洋科学研究所 (VIMS) 的 John Hamrick 领导的团队开发的一款通用的三维地表水水质数学模型框架^[10]。这个模型框架能够模拟河流、湖泊、水库、湿地、河口以及海洋等水体的水动力学和水质过程,是一个包含多个参数的有限差分模型。经过大约 30 年的发展,EFDC 模型在全球范围内欧美等其他国家 200 多个河湖库地表水水体区域的研究中得到了广泛的应用,包括大学、政府研究机构以及环境咨询公司等。在我国,EFDC 模型也被应用于多个水体的水质模拟研究,例如云南滇池、重庆两江汇流区、密云水库以及内蒙古乌梁素海的水体富营养化模拟等。

在我国,水动力水质模拟技术已经得到了广泛的应用。

例如,在江苏太湖,安徽巢湖以及云南滇池等地区,该技术被用于模拟和研究水动力水质情况。在重庆,两江汇流区域的水动力特性也通过模拟得到了深入分析。此外,密云水库的水质营养盐模拟研究,为水库水质管理和流域综合治理提供了科学依据。在内蒙古乌梁素海地区,水体富营养化模拟技术被应用于评估和控制水体富营养化问题。这些应用展示了水动力水质模拟技术在不同水体环境中的适用性和有效性。

该模型涵盖了水动力学、泥沙动力学、有毒物质迁移、水质变化、底质交换和风浪影响等多个方面。在模拟过程中,首先进行水域流场的计算,以确定水流速度在三维空间中的变化规律。基于流场结果,进一步模拟污染物的传输和扩散行为,追踪其在水体中的动态变化。为了更精确地匹配研究区域的地形特征,模型在水平方向上不仅支持标准的笛卡尔坐标系,还提供了正交曲线坐标系的选项。在垂直方向上,则采用 σ 坐标系,以适应不同的地形和水深变化。这样的设计使得模型能够更灵活地适应复杂多变的水体环境,提高模拟的准确性与可靠性。

基于 EFDC 模型计算平台,能够科学的定量董铺水库水动力学过程、水中污染物输移扩散示踪模拟过程。具体包含了水动力和污染物示踪模块部分的动力学过程原理^[11]。

2.2.1 水动力模拟过程

董铺水库水动力的外部驱动力综合考虑了大气驱动力、点源和非点源、人流边界等的影响。当水底地形高程变化较显著时,为了描述地形对水流的影响,模型在垂向采用 sigma 坐标。

2.2.2 污染物示踪模拟过程

EFDC 模型的示踪 DYE 模块主要用于模拟水体中染料或其他稀释污染物质的输移和扩散。示踪物质在水体中的传输不会影响水动力学或其他水体过程,因此可以作为示踪剂来追踪水流路径和物质扩散情况。

3 模型构建与校验

综合考虑到获取的数据条件充分的情况下,选择 2023 年为研究年份,建立 2023 年水动力水质水生态模型。

3.1 模型构建

基于董铺水库特点,研究构造垂向 4 层的水平 3- 维水动力模型。模拟起始时间为 2023 年 1 月 1 日,计算周期为 365 天,时间步长为 5 秒。模拟指标:水位,水温。董铺水库网格划分及地形插值图分别如图 2a 和图 2b 所示。

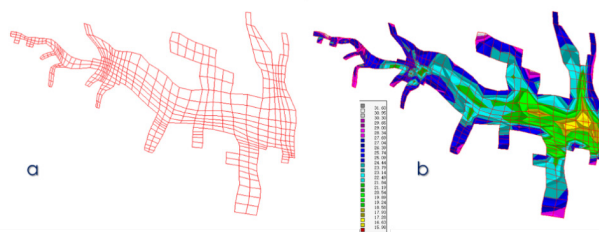


图 2 董铺水库网格划分与地形插值图

气象边界包括 9 个要素,分别为气压、相对湿度、气温、蒸发、降雨、风速、云量、风向、辐射。采用董铺水库出流堰气象站点 2023 年逐小时气象数据。

董铺水库水量边界的构建,对于入库水量而言,包括 4 部分组成:① 13 条主要入库河流及渠道;② 长岗抽水支渠及大蜀山分干渠渠道引水;③ 与大房郢水库连通进水;④ 库区其他进水。模型中通过区域内的降雨径流关系考虑了降雨径流汇入河道水量。而对于出库水量,同样包括 4 部分组成:① 自来水取水;② 泄洪;③ 与大房郢水库连通出水;④ 库区其他出水。库区水动力模型设置了 17 个人流网格边界,4 个出流边界(具体位置如图 3 所示),用于库区入出流表达。

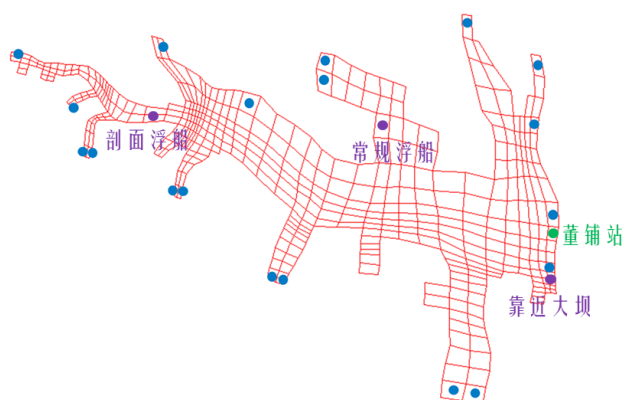


图 3 董铺水库入出流网格位置(蓝色圆点)水位校准点(绿色圆点)及水温校准点(紫色圆点)分布图

水温边界:考虑到边界水温数据没办法获取到,研究中采用 2023 年库区靠近大坝站点水温监测数据,作为 2023 年董铺水库入库河道水温边界条件。

初始条件:初始条件是模型模拟的起点,启动模型,设置水位、水温的初始场。确定 2023 年 1 月 1 日监测到的水位、水温作为模拟的初始场。

3.2 模型校验

应用模型对关键模型参数进行敏感性测试,并且将模拟值与实测数据进行对比校准。本研究在董铺水库模型构建

基础上进行模型校准,将模型得到的 2023.1~2023.12 月董铺水库水位、水温的模拟值和监测值进行比较,采用以趋势判断和宏观视觉判断的主流模式作为判定模型校准的方式,将董铺水库参数本地化。

水位校准点分布如图 3 所示。由图 4 可知,水位的模拟曲线较好的吻合了逐日观测水位,表达了局部时段的低水位和高水位,很好的抓住了枯水期和汛期水位波动变化,体现了时间上的连续模拟,并且反映出水动力模型在水量平衡方面的准确性。此外,董铺水库是人为调控水库,通过调控水量使得水位从 25.62~28.66m 波动,模型可以很好地模拟出这个动态过程。

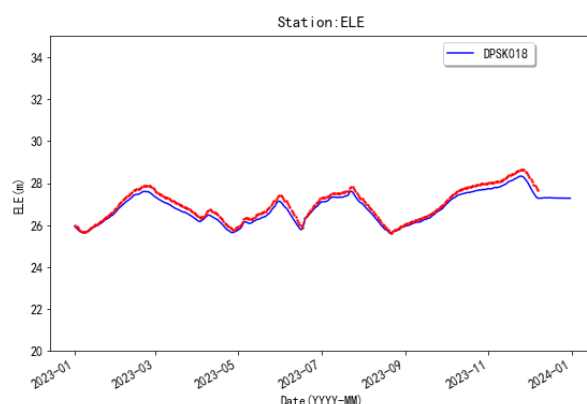


图 4 董铺水库水位模拟值与监测值对比曲线
(蓝色为模拟值,红色为监测值)

本研究采用了从多个点位(常规浮船、剖面浮船、靠近大坝)的温度观测数据进行水温校验(如图 5 所示)。在模型的运行过程中,系统以每天一次的频率对多个监测站点的温度模拟数据进行输出,并将其与实际观测数据进行同步对比分析。如图 5 所示,模型有效地复现了温度的季节性变化和整体观测温度的大致水平,准确地反映了董铺水库的物理状态。

综上所述,本研究建立的三维水动力模型良好的模拟了董铺水库的水动力过程,为进一步模拟董铺水库示踪污染物动力学过程提供了本地化的水动力模型基础。

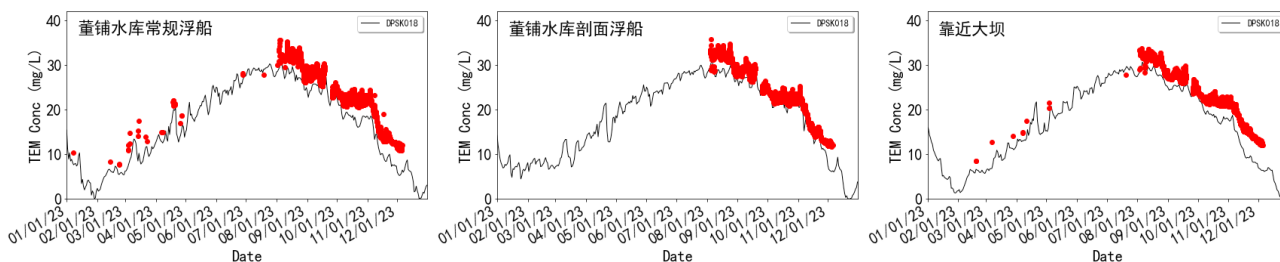


图 5 水温模拟曲线与监测值对比图(黑色线为模拟曲线,红色点为监测值)

4 模拟结果分析

4.1 不同水位的库容和面积模拟分析

校验后的董铺水库三维水动力模型，可以很好的再现水位观测值逐日的变化。针对研究期内水位 25.62~28.66m 波动范围，模型的干湿交替模拟很好的抓住了从汛期高水位到枯水期低水位再到丰水期高水位的波动变化，可以为我们精细化的定量得到不同水位下的库区水面面积和库区相应地形下的库容。

2023 年，年度最高水位为 28.66m，最低水位为 25.62m。基于董铺水库库区地形数据，通过插值得到完整库区地形见图 2b，通过模型模拟结果计算可以得到最高水位 28.66m 下对应水库面积为 17.32km²，库容为 0.84 亿 m³；最低水位 25.6m 下对应水库面积为 11.55km²，库容为 0.38 亿 m³。

4.2 年度水量收支平衡分析

本地化的董铺水库三维水动力模型，系统性的量化了入库径流量、出流量、降雨量和蒸发量多个影响因子，进而定量的模拟了逐日水位波动变化对应的水量收支平衡过程。经统计计算，2023 年全年净入湖水量约 5.7 亿 m³，净出湖水量约 5.34 亿 m³，降雨量约 0.114 亿 m³，蒸发量约 0.122 亿 m³，库容增量 0.237 亿 m³，水量基本平衡，如图 6 所示。

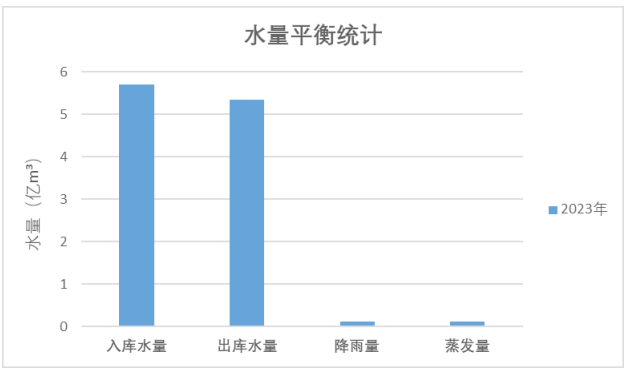


图 6 董铺水库水量平衡统计图

4.3 污染物输移扩散时空模拟

污染物在库区内的示踪模拟，是以污染物在库区内的输移扩散过程时间和空间范围来表征，能够很好地反映输移动力学特征。在董铺水库模拟年度，恒定的示踪污染物释放方式，模拟董铺水库污染物从主要引水水域释放进入库区输移扩散时空变化过程。结果表明：在模型中进行污染物输移扩散模拟，从库前投放示踪物质，输移扩散到达库尾时间为 20 天左右，研究成果可以为董铺水库上游发生水质突发事件的应急响应时间和应急处置的分析研判提供科学决策辅助。具体的扩散时间路径如图 7 所示。

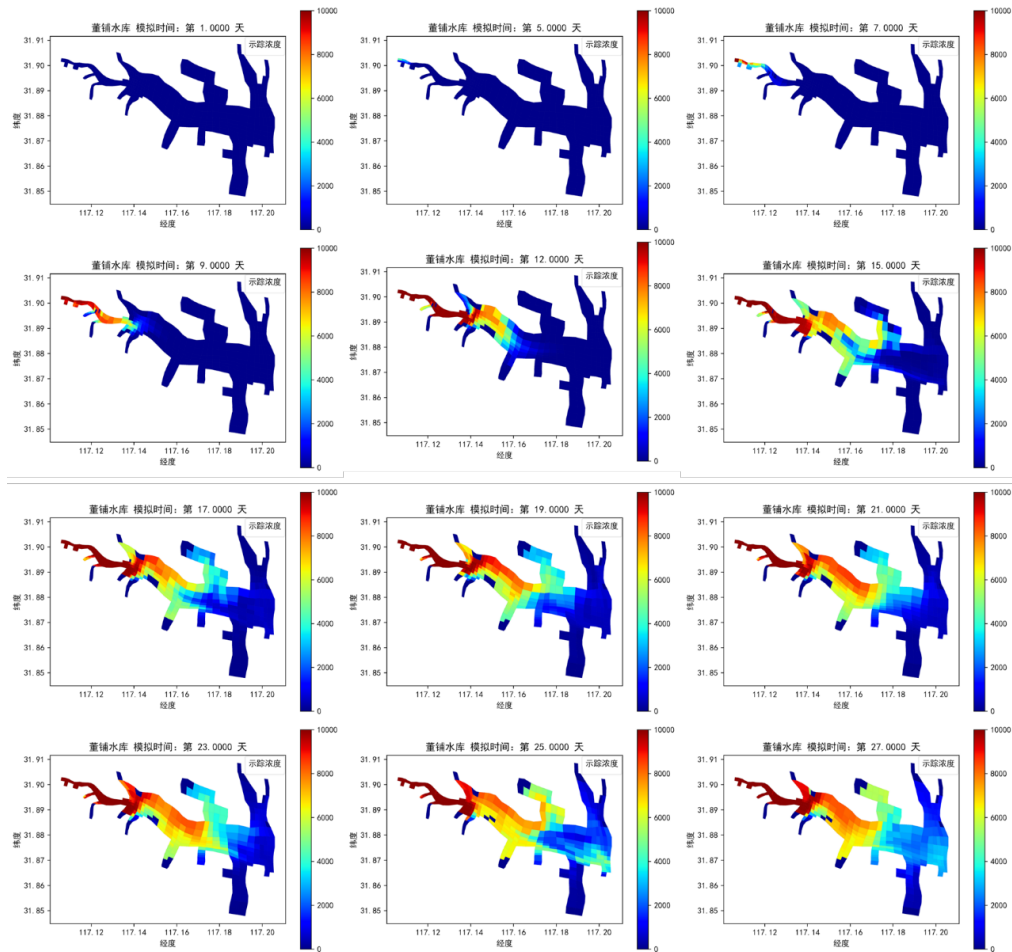


图 7 董铺水库污染物输移扩散路径图

5 结论与展望

5.1 结论

①本研究以董铺水库水源地为对象,在多源数据获取的基础上,针对水库水体水文水环境突发风险,数字化分析董铺水库地形和水系,构建了董铺水库三维水动力与污染物示踪模型。考虑了大气驱动、主要入库河流及渠道、长岗抽水支渠及大蜀山分干渠道引水、与大房郢水库连通进出水、库区其他进出水、自来水取水、泄洪的过程;水质方面,考虑了示踪污染物进入董铺水库后的迁移扩散,建立了能够量化董铺水库水资源、污染物示踪的三维数值模型框架。

②通过 2023 年完整年度的本地化校准,能够精细化的定量不同水位下的库区水面面积和库区相应地形下的库容变化规律。计算统计年度水库的收支平衡,建立水量汇入与库区水位的因果定量响应关系。反演水温的时空变化及示踪污染物进入库区水体之后的输移过程,为库区水质突发事件的预测提供模型基础,提升水库系统风险的预警和决策能力。

5.2 展望

本研究基于当前获取的有限数据,构建了董铺水库三维水动力与污染物示踪模型,进行了突发性污染物输移扩散的模拟研究,为下一步建立董铺水库污染源输入与库区内水质及藻类间的因果定量响应关系奠定动力学模型基础。

参考文献:

- [1] 朱广伟,许海,朱梦圆,等.我国城市水源水库水质风险成因及对策[J].湖泊科学,2024,36(1):1-16.
- [2] 段文秀,朱广伟,刘俊杰,等.水源地型水库水生态安全评价方法探索[J].中国环境科学,2020,40(9):4135-4145.
- [3] 史鹏程,朱广伟,杨文斌,等.江苏水源地型水库异味物质发生风险及影响因素[J].环境科学,2019,40(9):4000-4008.
- [4] 李亚峰,伍建伯,程浩.基于EFDC模型的汤河水库污染物扩散模拟[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2022,38(5):945-952.
- [5] 李嘉,郑向阳,张华,等.基于Delft 3D模型的感潮河口示踪模拟[J].海洋科学,2020,44(10):23-32.
- [6] 周民哲.董铺和大房郢水库生态水位确定及保障研究[J].安徽水利水电职业技术学院学报,2023,23(1):18-22.
- [7] 龙良红,黄宇擘,徐慧,等.近20年来三峡水库水动力特性及其水环境效应研究:回顾与展望[J].湖泊科学,2023,35(2):383-399.
- [8] 王栋,章四龙,郭丹阳.基于EFDC模型的清河水库溃坝洪水演进模拟[J].中国农村水利水电,2020(7):26-31+35.
- [9] Paskhal A N R, Hassain A H N M, Rosni A, et al. A Complete Proposed Framework for Coastal Water Quality Monitoring System With Algae Predictive Model[J]. IEEE ACCESS,2021(9): 108249-108265.
- [10] Hamrick J M. A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: Theoretical and computational aspects. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Special Report[R].1992.
- [11] Hamrick J M. Users Manual for the Environmental Fluid Dynamic Computer Code. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science, Special Report[R].1996.

作者简介: 张峰(1974-),男,中国安徽蒙城人,硕士,副教授,从事数据挖掘、信息系统开发、智慧水利研究。

基金项目: 安徽省高校科研重点项目“水源地内源污染动力学过程系统分析与累积性影响定量评估”(项目编号: 2024AH050562); 安徽省高等学校自然科学研究重点项目“合肥市董铺、大房郢水库饮用水源地水质监控预警系统的研究与实践”(项目编号: KJ2014A094)。