

深水型水源水库底部缺氧防控的综合策略研究

余 晓¹, 诸葛亦斯^{**}, 刘晓波, 杜强, 李国强, 谭红武, 许旭明

(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 湖库型水源地是我国重要水源, 对保障区域供水安全发挥着举足轻重的作用。本文以引滦入津工程水源地潘家口水库为研究对象, 构建了三维水动力-水质数学模型, 开展了水库调度、入库硝酸盐浓度等条件变化下水库底部缺氧的响应研究, 提出了防控水库底部缺氧的综合策略。本文采用 2017–2018 年的水库实测数据, 验证了模型的可靠性。研究发现: 水库调度与硝酸盐浓度对库底溶解氧浓度的影响显著, 在热分层中后期水库下泄水量增大, 库底缺氧持续时间、缺氧严重程度显著降低; 大幅度降低来水硝酸盐浓度, 库底缺氧持续时间、缺氧严重程度和影响范围均显著增加。结合水库实际调度运行情况和供水水质达标的要求, 本文建议: 1) 潘家口水库与下游大黑汀水库联合调度, 将每年 1~4 月和 9~12 月的下泄水量调整至 10 月中下旬集中下泄, 优化后库底严重缺氧持续时间、最大缺氧面积可分别缩减 54%、23%; 2) 上游来水硝酸盐浓度降低至 1.5~2mg/L 的流域治污建议, 在保证下泄水体 TN 达标的同时, 能够最大限度的发挥硝酸盐对库底耗氧的缓解作用。本文从“水库上游污染源控制—库区底部缺氧防控—下游水质达标”多角度有针对性的制定水库水质保护综合策略, 可为深水型水源水库水环境保护与修复提供科学指导。

关键词: 深水型水源水库; 水质模拟; 溶解氧; 水环境保护; 潘家口水库

Comprehensive strategy research on the prevention and control of hypoxia at the bottom of deep water source reservoirs

Yu Xiao, Zhuge Yisi^{**}, Liu Xiaobo, Du Qiang, Li Guoqiang & Tan Hongwu

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, P.R.China)

Abstract: Lake and reservoir-type water sources play a vital role in ensuring regional water security and are crucial to China's water supply. This study focused on the Panjiakou Reservoir, which is a vital water source for the Luanhe-Tianjin Water Diversion Project. A three-dimensional numerical model was used to reveal how bottom hypoxia responds to varying reservoir operations and nitrate concentrations in the inflow. Based on these findings, we have proposed comprehensive strategies for preventing and controlling bottom hypoxia. In this paper, measured reservoir data from 2017 to 2018 were used to verify the model's reliability. The results show that increasing the outflow from the reservoir significantly shortened the duration of bottom hypoxia and reduced its severity during the later stage of thermal stratification. Furthermore, a substantial reduction in nitrate concentration in the inflow resulted in a notable increase in the duration, severity and spatial extent of bottom hypoxia. Based on the reservoir's actual operation and the water supply quality standards, this article makes the following suggestions: 1) Joint scheduling with the downstream Daheiting Reservoir should be implemented, with adjustments to outflow volumes made during January–April and September–December to concentrate discharge in mid-to-late October. This optimisation reduces the duration of severe hypoxia and the maximum hypoxic area by 54% and 23%, respectively. Secondly, we recommend reducing the upstream nitrate

* 2024-10-30 收稿; 2025-03-27 收修改稿。

国家自然科学基金项目 (U2340224) 资助。

** 通信作者; E-mail: zhugeys@iwhr.com。

concentration to 1.5–2 mg/L as part of watershed pollution control efforts. This approach ensures that the total nitrogen (TN) concentration in the discharged water meets the required standards while maximising the nitrate's mitigating effect on bottom hypoxia. Our study proposed a comprehensive strategy for protecting the quality of reservoir water from multiple perspectives, including 'controlling the concentration of pollution sources upstream, preventing reservoir hypoxia and ensuring compliance with downstream water quality standards', which are important for protecting and restoring aquatic environments in deep water source reservoirs.

Key words: Deep water source reservoirs ; water quality simulation; dissolved oxygen; water environment protection; Panjiakou Reservoir

全球地表淡水有近 90%储存在湖库中，湖库型水源地占我国集中式饮用水水源地的 40.6%，服务了 47.2%的人口，是保障饮水安全的重要基石^[1,2]。水库作为国家水网建设及流域水资源调控的关键节点，也是流域中河流通量的“汇”，在水体热分层及污染沉积物耗氧的共同作用下，水库底部溶解氧迅速降低，易形成溶解氧小于 2mg/L 的缺氧环境^[3,4]。研究表明，水库底部缺氧会导致沉积物中磷、氨氮等大量还原物质释放等问题，影响供水安全的同时，也会引发鱼类和底栖生物大量死亡^[5,6]、富营养化加重^[7,8]、温室气体大量释放^[9,10]等突出问题。

从世界范围看，全球水生态系统正广泛面临溶解氧浓度下降的严峻形势，缺氧区的范围和程度呈现逐年增加的态势，对水生生物多样性产生一系列严重影响^[11-14]。目前相关的研究主要集中在近海水域，对内陆湖库溶解氧浓度的变化所知甚少^[6, 15, 16]。Jane 等人统计分析了全球温带湖泊溶解氧的变化，研究发现近几十年湖泊底部溶解氧浓度大幅度下降，其中 1980-2017 年底部溶解氧浓度降低 18.6%，其下降速率是世界海洋水体的 2.75~9.3 倍^[11]。湖库缺氧是供水安全和水生态安全的重大风险隐患，湖库底部缺氧导致内源污染释放等问题已成为世界性难题^[17-19]。

深水湖库通常会出现明显的热分层现象，期间温跃层较大的温度和密度梯度会有效抑制水体的垂向混合，为水库形成物质循环的上层“快循环”与下层“慢循环”提供了分异性物理环境，水库溶解氧等水质指标呈现出显著的垂向差异性特征^[3, 20, 21]。表层水体藻类等浮游植物大量繁殖、叶绿素 a 浓度高，死亡的浮游植物碎屑大部分在温跃层矿化分解，加速了上层的物质循环^[22]；温跃层的阻隔作用下湖库下层水体流动慢、物质循环周期长，溶解氧的上层补给有限，以底部沉积物耗氧为主^[23-25]。在生源物质充足的富营养湖库，底部耗氧物质丰富，热分层中后期底部会出现缺氧、甚至无氧的现象。

水库调度引起的水动力学条件变化，对水库水温和溶解氧分层结构、库底缺氧区分布等产生显著影响^[26]，水库调度可以减缓甚至完全消除水库底部缺氧问题^[27,28]。硝酸盐具有较强的氧化性，在水体低氧时（DO<4mg/L）发生反硝化反应，硝酸盐作为氧化剂能够有效缓解水体溶解氧的消耗，在湖库水质保障方面发挥积极作用^[29-32]。优化水库调度、控制入库硝酸盐浓度等是缓解库底缺氧、破解水库水环境问题的有效措施，对改善库区水质具有重要意义。

潘家口水库是我国华北地区重要的水源水库，上世纪 90 年代以来受上游来水污染负荷增加以及库区大面积网箱养殖的影响，水库氮磷负荷增加，营养状况急剧恶化，受此影响作为引滦入津工程曾在 2016-2018 年停止供水 671d，严重威胁天津市的供水安全。相关研究表明，水库底部的溶解氧浓度控制着沉积物氮、磷等内源污染的释放^[33,34]，潘家口水库的沉积物处于严重污染级别^[27]，热分层末期库底水体出现缺氧，并存在反硝化脱氮以及 TP、氨氮等内源污染的显著释放^[35]。在水库外源性污染得到有效控制后，内源性污染的有效控制可能是保障水库水质的关键。对此，本文构建水库三维水动力-水质数学模型，以溶解氧为核心水质指标量化分析水库调度、入库硝酸盐浓度等条件变化下库底缺氧的响应，据此研究制定防控库底缺氧的综合策略，以期深化对深水型水源水库水环境演变特征的认识，为该类水库的水环境保护提供科学指导。

1 研究区域

潘家口水库建于 1980 年,位于河北省承德、唐山交界处的滦河干流,控制流域面积 3.37 万 km²,其地理位置如图 1 所示。潘家口水库作为引滦入津工程的龙头水库和水源地,承担着向天津市、唐山市供水的任务。该水库为峡谷型深水水库,回水长度 80km,水域面积 69km²,库区水面宽 200~1000m,平均水面宽不足 500m;水库总库容 19.13 亿 m³,水库近 10 年最大水深均值为 54.74m,年平均径流量 8.71 亿 m³,该水库为多年调节水库^[27]。



图 1 滦河流域及潘家口水库位置示意图

Fig.1 Location of Luanhe River Basin and the Panjiakou Reservoir

潘家口水库 4 月中旬至 11 月底存在显著的季节性热分层,受重污染沉积物耗氧的影响,热分层期间库底 DO 浓度持续下降,热分层末期库底出现缺氧^[24]。根据出入库营养盐通量测算,近年来潘家口水库存在明显的硝酸盐滞留,2014-2018 年硝酸盐的平均滞留效率高达 70%;垂向水质的监测表明,水库热分层中后期(8-11 月)库底硝酸盐浓度显著降低、低氧条件下的反硝化反应消耗大量硝酸盐,是水库硝酸盐滞留的主要原因^[36]。潘家口水库分层期间的底部耗氧率约为 0.045 mg/(L·d),与其他类似水库相比底部耗氧率偏低^[37,38],远低于同流域、污染状况类似的大黑汀水库(底部耗氧率 0.33mg/(L·d))^[27]。潘家口水库入库硝酸盐浓度较高,低氧条件下硝酸盐反硝化反应的显著发生能有效减缓库底溶解氧的消耗,这可能是水库在沉积物重污染状态下底部耗氧率较低的重要原因。

2 水库水质监测及数值模型

2.1 库区水质监测及资料收集

本文于 2017 年 5 月~2018 年 11 月进行逐月垂向水质监测,于 2018 年 8 月、11 月对潘家口水库坝前断面进行分层采样。逐月垂向水质监测采用 YSI EXO 便携式水质监测仪,监测指标包括水深、水温、溶解氧等,垂向每 0.2m 记录一次数据;分层采样采用卡盖式分层采水器,监测指标有总氮、硝酸盐氮等,表水层和温跃层每 5m 采集一个水样,滞温层每 10m 采集一个水样,库底以上 1m、3m、5m 分别采集水样。水样冷藏于保温箱中带回实验室检测,各项指标均参照《水和废水监测分析方法》(2002 版),其中总磷采用钼酸铵分光光度法、总氮采用改进的碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法、氨氮采用纳氏试剂分光光度法、硝酸盐采用紫外分光光度法。

此外,本文收集了 2017-2018 年潘家口水库入库、出库断面总氮、硝酸盐的逐月监测数据,以及建库以来水库出入库流量、水位等水库运行调度数据等。

2.2 三维数值模型

为了全面、准确的了解潘家口水库水质的演化特征和变化规律,本文借助 MIKE 3 的水动力、水温和 ECOLab 模块构建了潘家口水库三维水动力-水质模型,对水库水动力、水质过程进行模拟^[39]。

2.2.1 模型描述 本文水质模型构建以溶解氧为核心，考虑与溶解氧循环密切相关的碳、氮循环。由于潘家口水库磷浓度始终高于 0.02mg/L ，磷不是水库藻类生长的限制因子，因此本模型不考虑磷循环过程。本模型模拟的主要过程包括溶解氧循环、BOD-DO 动态过程、氮循环转化以及藻类的相关过程。模型中溶解氧的模拟包括溶解氧的补给、消耗、缓冲等关键过程，具体包括大气复氧、水生植物光合作用等溶解氧的补给过程，呼吸作用、有机物分解、沉积物耗氧、硝化反应（还原性无机物氧化）等溶解氧的消耗过程，以及反硝化反应等溶解氧的缓冲过程，共包括 26 个水质反应参数，模型模拟过程如图 2 所示。

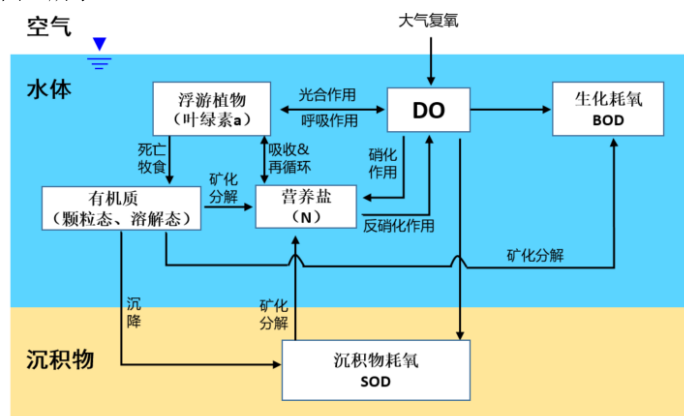
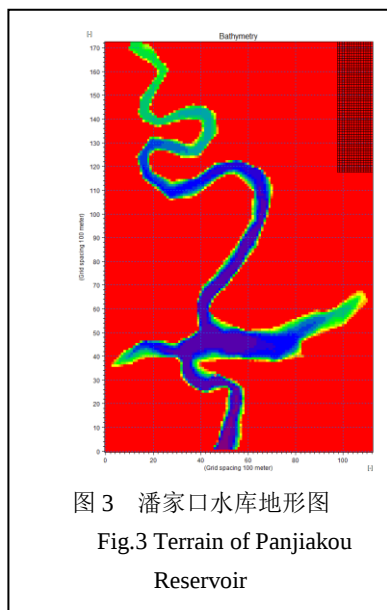


图 2 水库水质模型主要过程概化图

Fig.2 Schematic diagram of the main process of reservoir water quality model



天然水体中硝酸盐是无机氮最常见的赋存形式，其在水体中的氧化性仅次于溶解氧，在低氧条件下硝酸盐作为氧化剂发生反硝化反应，该过程基本不消耗水体溶解氧，有助于维持水体的溶解氧水平、抑制水体缺氧^[40]。根据已有研究，当水体溶解氧浓度降低至 4mg/L 以下时反硝化反应发生^[41]，据此本模型设置反硝化反应的启动条件为溶解氧浓度低于 4mg/L 。

水库地形源自实测数据（图 3），范围从坝前到上游 64km 区段，本次模型构建选取距离坝前 64km 断面作为入流断面。模型采用三维矩形网格，计算网格尺寸为 100m （纵向） $\times 100\text{m}$ （横向） $\times 2\text{m}$ （垂向），计算时间步长 60 秒。模型中水库的水-气边界设置为开放边界，存在热量交换及大气复氧等物质交换；沉积物-水界面设置为绝热边界，考虑沉积物耗氧过程以及还原性氮氮的释放过程等物质交换。模型上边界采用水位边界，下边界为大坝固壁边界。

2.2.2 边界条件与率定验证 本模型上游边界条件为水位、水温、水质过程，下游边界条件为水库实际调度下泄流量，模型的

边界条件均根据实测数据给定。模型计算中包含气温、相对湿度等气象条件，根据潘家口水库气象站实测数据给定。2017 年、2018 年的水库实测数据分别用于模型参数的率定和验证(本模型涉及水动力、水质参数的率定结果见附表 I)，图 4~图 6 为水温、溶解氧、硝酸盐模型计算值与实际观测值的比较。用水温、溶解氧实测值和模拟值的纳什效率系数对模拟结果进行评估，水温、溶解氧的纳什效率系数分别为 0.91 、 0.85 ，这些系数的高值表明模型能够较好地模拟潘家口水库实际的热分层及溶解氧演化过程。

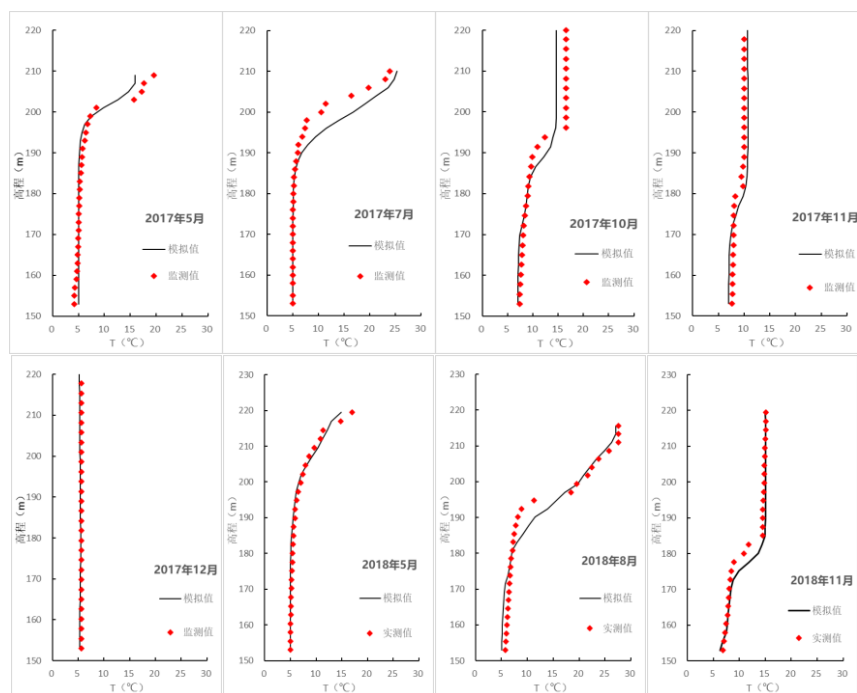


图 4 2017~2018 年典型月份潘家口水库坝前断面水温实测值和模拟值对比

Fig.4 Comparison of the Measured and Simulated Water Temperature at the Dam-Front Cross-Section of Panjiakou

Reservoir in Typical Months from 2017 to 2018

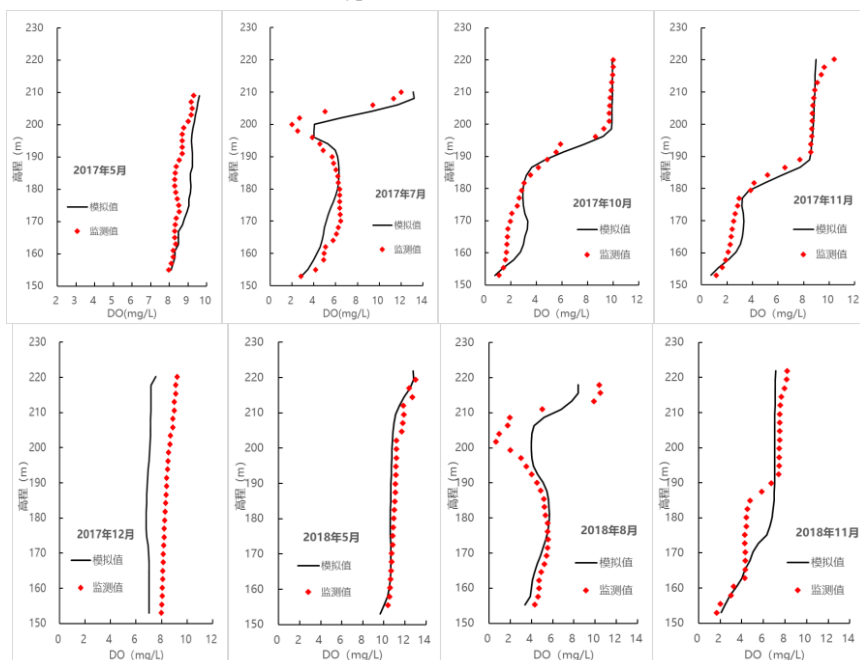


图 5 2017~2018 年典型月份潘家口水库坝前断面溶解氧实测值和模拟值对比

Fig.5 Comparison of the Measured and Simulated DO at the Dam-Front Cross-Section of Panjiakou Reservoir in Typical

Months from 2017 to 2018

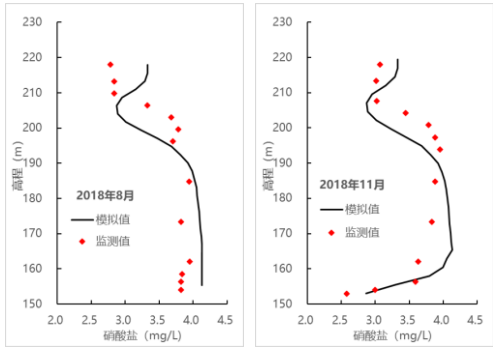


图 6 2018 年典型月份潘家口水库坝前断面硝酸盐实测值与模拟值对比

Fig.6 Comparison of the Measured and Simulated Nitrate at the Dam-Front Cross-Section of Panjiakou Reservoir in Typical Months of 2018

2.2.3 模拟情景设置 本文主要探讨调度运行方式、入库硝酸盐浓度等条件变化对潘家口水库水质的影响，据此设置对应的模拟情景。所有情景模型出入库流量、水位边界等根据代表年份实际运行数据给定，水质边界根据 2017 年实测数据给定。其中调度情景根据水库实际运行情况设置，考虑运行水位、下泄水量变化的影响，据此选取代表年份（表 1）。

表 1 各代表年份水库运行参数

Tab. 1 Reservoir operating parameters for each representative year				
水位	下泄水量	年均水位（m）	下泄水量（亿 m ³ /a）	代表年份
高	小水量	216	3.2	2017 年
高	大水量	222	13.1	2018 年
低	小水量	199	3.6	2005 年

硝酸盐浓度设置现状、水质达标两种情景，其中现状情景的硝酸盐浓度为 2017 年实测浓度，入库年均浓度为 7.89mg/L。水质达标情景是考虑水库具有生活供水功能，根据《地表水环境质量标准》（GB 3838-2002）水源地水质须至少满足 III 类水质标准（TN<1mg/L）的要求，设定该情景来水和库区 TN 浓度设置为 1mg/L，硝酸盐浓度根据 2017 年实测水质中硝酸盐在 TN 浓度中的占比计算^[36]，该情景的硝酸盐浓度设置为 0.6mg/L。考虑上述各种条件设置如下四种情景，其中情景 1 为基准情景，情景 2~情景 4 的对比情景（表 2）。

表 2 潘家口水库模拟情景基本参数

Tab. 2 Basic parameters of simulation scenario for Panjiakou Reservoir					
情景	名称	水位	下泄水量	硝酸盐浓度	水库调度数据代表年份
1	高水位-小下泄	高	小水量	现状	2017 年
2	低水位-小下泄	低	小水量	现状	2005 年
3	高水位-大下泄	高	大水量	现状	2018 年
4	水质达标	高	小水量	0.6mg/L	2017 年

3 不同控制条件下水库底部缺氧的响应特征分析

库底缺氧程度和缺氧持续时间是水库水质健康状况的良好指标，结合潘家口水库库底缺氧出现在热分层中后期的特征，本文分析了各种情景热分层中后期坝前断面库底溶解氧浓度变化过程（图 7）、水库的缺氧最大面积等，统计了坝前断面底部溶解氧浓度 2mg/L 以下（定义为“缺氧”）、1mg/L 以下（定义为“严重缺氧”）的持续时间、最低溶解氧浓度等（表 3）。

表 3 不同情景库底缺氧情况分析

Tab. 3 Analysis of Hypoxia Situations at the Bottom of Reservoirs in Different Scenarios

情景编号	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4
情景描述	高水位 小下泄 (2017 年)	低水位 小下泄 (2005 年)	高水位 大下泄 (2018 年)	水质达标 (2017 年)
缺氧持续时间 (天)	68	63	35	112
严重缺氧时间 (天)	10	39	—	82
最低溶解氧浓度 (mg/L)	0.92	0.65	1.6	0.16
缺氧最大面积 (km ²)	6.69	6.24	1.13	11.68

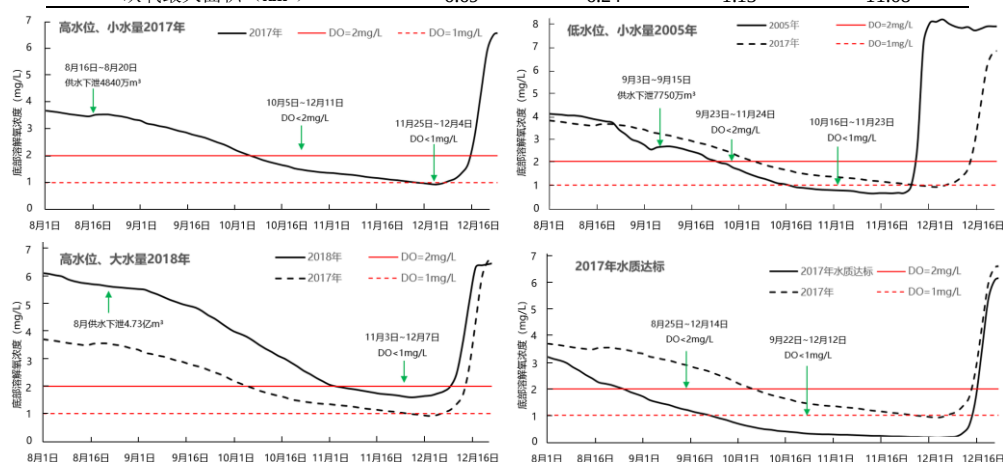


图 7 各种情景水库坝前底部溶解氧浓度变化过程

Fig.7 Variations in dissolved oxygen concentration at the bottom of various scenarios in front of the reservoir dam

3.1 热分层中后期水库小水量下泄的库底缺氧特征

2017 年水库处于高水位运行、小水量下泄状态（情景 1），该情景水库热分层期间库底溶解氧浓度持续缓慢下降，至 10 月 5 日库底出现缺氧，11 月 25 日库底出现严重缺氧，库底缺氧和严重缺氧持续时间分别为 68 天、10 天。库底全年溶解氧最小值为 0.92mg/L，缺氧最大面积为 6.69km²。

2005 年水库处于低水位运行、小水量下泄状态（情景 2），该情景库底缺氧、严重缺氧的持续时间分别为 63 天、39 天；库底全年溶解氧最小值为 0.65mg/L，缺氧最大面积为 6.24km²。与 2017 年相比，2005 年水库年均水位降低 17m，低水位运行条件下水库热分层启动和结束时间提前，热分层期间库底升温快、底部耗氧率增加，热分层期间库底缺氧时间提前、缺氧程度加剧，库底严重缺氧持续时间增加 2.9 倍。

3.2 热分层中后期水库大水量下泄的库底缺氧特征

2018 年水库处于高水位运行、大水量下泄状态（情景 3），该情景库底缺氧的持续时间为 35 天，库底全年溶解氧最小值为 1.60mg/L，不存在严重缺氧，水库缺氧最大面积为 1.13km²。2017 年、2018 年水库均为高水位运行，但 2018 年热分层中后期下泄水量增加，水库热分层期间缺氧持续时间明显缩短、缺氧严重程度明显减弱，缺氧持续时间、缺氧最大面积分别减小 49%、87%。

4.3 入库硝酸盐浓度大幅度降低的库底缺氧特征

情景 4 以保障水库 TN 浓度达到生活供水功能为导向，大幅度降低入库硝酸盐浓度。与情景 1 相比，该情景每年库底缺氧、严重缺氧的持续时间分别增加 0.65、7.2 倍，缺氧最大面积增加 75%。由此可见，潘家口水库沉积物有机污染严重，沉积物耗氧量大，一定浓度的硝酸盐能有效缓解水体溶解氧的消耗，在抑制库底缺氧和内源污染释放方面发挥了积极作用。

4 讨论

4.1 优化调度对库底缺氧的改善效果分析

水库调度是调控水体溶解氧浓度的重要措施，为了有效缓解库底缺氧，本文开展了水库运行调度的优化研究。本文确定潘家口水库调度优化的核心是在热分层期间、特别是热分层中后期水库保持大流量下泄，以此增强水体的垂向扰动、增加底部溶解氧补给。潘家口水库所在的滦河流域水资源有限，热分层期间水库一直保持大流量下泄是难以实现的。潘家口水库下游已建有库容 3.37 亿 m³ 的大黑汀水库，若实行潘家口-大黑汀水库的联合调度，在热分层中后期以短时间、大流量的方式集中下泄，该方案具有可操作性。

根据各种情景水库调度情况及库底缺氧状况，本文提出潘家口水库调度的优化建议为：将水库 1~4 月和 9~12 月下泄水量调整至 10 月中下旬集中下泄。其中高水位条件（情景 1）水库蓄水量充足，集中下泄的总水量为 2 亿 m³；低水位条件（情景 2）水库蓄水量少，集中下泄总水量约为 1 亿 m³。表 4 和图 8、图 9 为调度方案优化后库底溶解氧的模拟结果。

表 4 调度方案优化前后各种情景的库底缺氧情况表

Tab. 4 Various scenarios of bottom hypoxia before and after the optimization of the scheduling plan

情景描述		缺氧持续时间 (天)	严重缺氧持续时间 (天)	库底最大缺氧面积 (km ²)
情景 1	现状	68	10	6.69
	优化后	64	—	5.19
情景 2	现状	63	39	6.24
	优化后	56	18	4.63

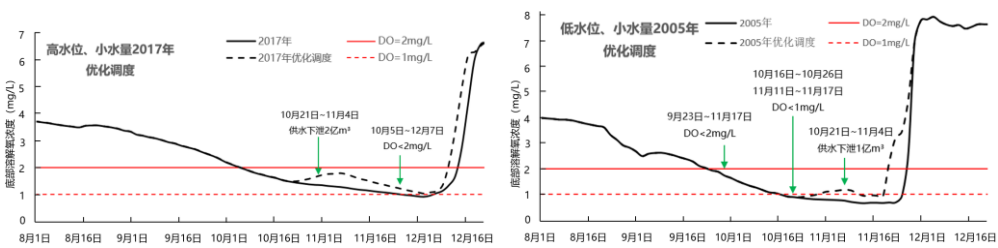


图 8 情景 1 和情景 3 调度方案优化前、后库底溶解氧浓度变化过程

Fig.8 The process of changes in dissolved oxygen concentration at the bottom of the reservoir before and after the scheduling schemes of Scenario 1 and Scenario 3

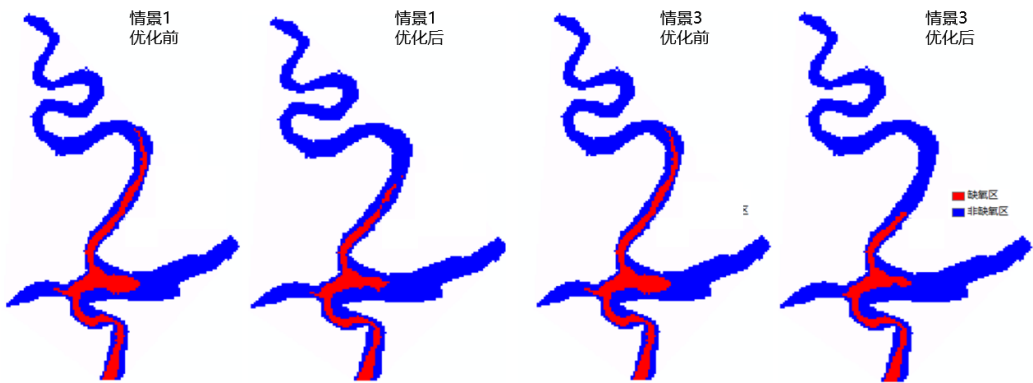


图 9 情景 1 和情景 3 调度方案优化前、后库底最大缺氧区分布

Fig.9 Distribution of the maximum hypoxic zone at the bottom of the reservoir before and after the scheduling schemes of Scenario 1 and Scenario 3

高水位、小水量下泄情景（情景 1）调度方案优化后库底最大缺氧面积减少 23%，全年不存在严重缺氧。低水位、小水量下泄情景（情景 2）调度方案优化后库底最大缺氧面积减少 26%，缺氧和严重缺氧持续时间分别减少了 11%、54%。由此可见，优化的调度方案能有效抑制潘家口水库底部缺氧。

水库热分层结构、溶解氧的分层和演化特性与运行调度过程密切相关，调度可以作为调控深水型水库底部溶解氧浓度的重要措施。Zouabi 等对地中海南部 Sejnane 水库的研究表明，水库不同深度的泄水方案对水质影响较大，优化调度方案可以使夏季热分层期间库区温跃层温度梯度减弱，有助于水库垂向能量和物质的交换，减缓库底缺氧^[42]；刘畅等和 Sun 等对我国大黑汀水库的研究表明，水库调度引起的水动力学条件变化对库区溶解氧分层结构及库底缺氧的影响十分显著，大流量调度过程可以削弱甚至完全消除水库底部缺氧现象^[43,44]。本文制定的潘家口水库优化水库调度方案，在热分层中后期以短时间、大流量的方式集中下泄，库底缺氧程度和缺氧持续时间均显著缩小，由此可见优化调度是改善深水型水库底层缺氧的有效举措。

4.2 入库硝酸盐控制对库区缺氧的缓解效果分析

潘家口水库 TN、TP 等指标超标，近年来水库上游加强治污力度，入库 TP 浓度显著降低，2016-2018 年入库 TP 年均浓度下降 65%以上^[36]。但入库和库区 TN 浓度一直较高，2016-2018 年入库 TN 浓度较高，年均浓度均在 6.80mg/L 以上，远超地表水 III 类的生活供水水质标准。

在淡水生态系统中磷是关键限制性营养元素，大幅度减少磷负荷后水质将持续提升，但氮也是淡水生态系统富营养化的重要驱动力，水体氮、磷单一限制或者共同限制非常普遍^[45]。从供水安全的角度，水体中高浓度氮，特别是高浓度的硝酸盐可能给人类带来健康风险，导致新生儿基因突变、致畸或出生缺陷等^[46]；从流域污染综合治理的角度，仅限制磷负荷导致高浓度的氮输运到下游，可能加剧河口和近海生态系统的富营养化和水体缺氧问题^[47]，我国已经制定了相关行动方案，加强入海河流总氮治理与管控，限制河流入海的氮排放量^[48]。因此，有效管控滦河流域的氮负荷，严格限制硝酸盐等各类氮素的入库浓度刻不容缓。

然而已有研究表明，低氧条件下一定浓度的硝酸盐有利于维持水体的溶解氧浓度，能够有效抑制水体溶解氧浓度的持续下降^[49,50]。采用稳定同位素组成以及宏基因组测序技术对贵州阿哈水库氮循环过程的量化分析表明，库底缺氧水域反硝化反应显著发生，硝酸盐氧化水体大量硫化物等还原物质，使得底部一直维持缺氧而非厌氧环境^[49]。对墨西哥湾北部水域的研究表明，该水域反硝化过程活跃，该过程可移除 23%~68%的氮负荷，也有效抑制了水体底部缺氧的发展^[50]。潘家口水库沉积物有机污染严重、沉积物耗氧量大，现阶段若将入库硝酸盐浓度治理到较低水平，将会导致库底缺氧持续时间、缺氧严重程度、缺氧范围的显著增加，必然会导致水库内源污染的大量释放、水库水质恶化。因此，对潘家口水库甚至滦河流域来说，实施氮负荷的控制、制定合理的管控目标至关重要。

根据情景 1~情景 3 的模拟结果统计入库、出库的水量水质，得到 3 种情景潘家口水库全年消耗硝酸盐的平均浓度为 1.23~1.64mg/L（表 5），硝酸盐作为氧化剂每消耗 1mg/L 相当于缓解了水体 2.86mg/L 溶解氧的消耗，因此水库每年硝酸盐的消耗量相当于减少了水体溶解氧年均浓度 3.52~4.69mg/L 的消耗。潘家口水库作为水源水库，其下泄的水质目标为地表 III 类标准，对应的 TN 浓度限值是 1mg/L。综合上述分析，本文建议水库上游来水硝酸盐浓度控制在 1.5~2.0mg/L，根据 2017 年实测水质中硝酸盐在 TN 浓度中的占比推算上游来水 TN 浓度可控制在 2.5mg/L~3.3mg/L。该浓度的硝酸盐能有效缓解热分层期间的库底缺氧，有效控制水库内源污染的释放；同时硝酸盐也能在库区大量消耗、使得下泄水体硝酸盐浓度保持较低水平，确保出库总氮浓度的达标。

长期以来湖库管理重视外源污染的控制，普遍认为控制流域的氮、磷等浓度至较低水平是有益的^[29]，然而也不能忽视硝酸盐在特定条件下对水库水质所发挥的正面效应^[32,51]。德国柏林的 Tegel 湖、Schlachtensee 湖以及巴西富营养化水库的研究均发现，使用硝酸盐能维持湖库底部的有氧环境，有效抑制了底部沉积物内源污染的释放^[30, 52]。本文提出的潘家口水库上游来水硝酸盐浓度合理控制

的建议，有效缓解底部缺氧的同时，也能保证水库下泄水体 TN 达标，对水源水库的供水安全保障产生积极作用。

表 5 各种情景热分层期间硝酸盐浓度最小值统计表

Tab. 5 Minimum nitrate concentration during thermal stratification in various scenarios

情景	水位	下泄水量	硝酸盐最低浓度 (mg/L)	全年消耗硝酸盐的浓度 (mg/L)
1	高	小水量	2.36	1.64
2	高	大水量	2.62	1.38
3	低	小水量	2.77	1.23

5 结论

本文利用以溶解氧为核心的潘家口水库三维水动力-水质模型，量化分析了不同调度方案和入库硝酸盐浓度变化情景下库底缺氧的响应特征。研究表明，热分层中后期水库进行大流量下泄，库底缺氧持续时间明显缩短、缺氧严重程度明显减弱；大幅度降低来水硝酸盐浓度，库底缺氧持续时间、严重程度、缺氧面积等均显著增加。综合考虑水库实际运行情况和供水安全保障需求，本文从水库调度运行和流域治污两方面提出了抑制库底缺氧的水质保护综合策略。水库调度的优化建议是：将水库 1~4 月和 9~12 月下泄水量调整至 10 月中下旬集中下泄，优化后库底严重缺氧持续时间、缺氧最大面积可分别缩减 54%、23%。考虑潘家口水库下泄供水水质达标的要求，提出了上游来水硝酸盐浓度降低至 1.5~2.0mg/L 的流域治污建议，该建议在保证下泄水体 TN 达标的同时，能最大限度的发挥硝酸盐对库底耗氧的缓解作用，有效抑制内源污染的释放。本文从“水库上游污染源控制—库区底部缺氧防控—下游水质达标”等角度有针对性的提出水库水质保护综合策略，可为深水型水源水库水环境保护与修复提供科学指导。

6 附件

附表 I 见电子版（doi: 10.18307/2026.0121）。

7 参 考 文 献

[1] Zhang Y, Deng J, Qin B, et al. Importance and vulnerability of lakes and reservoirs supporting drinking water in China. *Fundamental Research*, 2023, 3(2): 265-273. DOI: 10.1016/j.fmre.2022.01.035.

[2] Zhu G, Xu H, Zhu M, et al. Mechanisms and countermeasures of water quality risks in reservoirs using as drinking water sources in China. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(1): 1-16. DOI: 10.18307/2024.0101. [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. *湖泊科学*, 2024, 36(1): 1-16.]

[3] Zhang Y, Wu Z, Liu M, et al. Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir (Lake Qiandaohu, China). *Water Research*, 2015, 75: 249-258. DOI: 10.1016/j.watres.2015.02.052.

[4] Zhang Y N, Gao X P, Sun B W, et al. Oxygen evolution and its drivers in a stratified reservoir: A supply-side perspective for informing hypoxia alleviation strategies. *Water Research*, 2024, 257: 121694. DOI: 10.1016/j.watres.2024.121694.

[5] Pilla R M, Williamson C E. Multidecadal trends in ultraviolet radiation, temperature, and dissolved oxygen have altered vertical habitat availability for *Daphnia* in temperate Lake Giles, USA. *Freshwater biology*, 2023,68(3):523-533. DOI: 10.1111/fwb.14044.

[6] Sunyer Raquel, Duarte Carlos M. Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(40): 15452-15457. DOI: 10.1073/pnas.0803833105.

[7] Carey C C, Hanson P C, Thomas R Q, et al. Anoxia decreases the magnitude of the carbon, nitrogen, and phosphorus sink in freshwaters. *Global Chang Biology*, 2022, 28(16): 4861-4881. DOI: 10.1111/gcb.16228.

[8] Hupfer M, Lewandowski J, Walz N, et al. Oxygen controls the phosphorus release from lake sediments; a long-lasting paradigm in limnology. *International review of hydrobiology*, 2008, 93(4-5): 415-432. DOI: 10.1002/iroh.200711054.

- [9] Encinas F J, Peeters F, Hofmann H. Importance of the autumn overturn and anoxic conditions in the hypolimnion for the annual methane emissions from a temperate lake. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(13): 7297-7304.
- [10] Hounshell A G, McClure R P, Lofton M E, et al. Whole-ecosystem oxygenation experiments reveal substantially greater hypolimnetic methane concentrations in reservoirs during anoxia. *Limnology and oceanography letters*, 2021, 6(1): 33-42. DOI: 10.1002/lol2.10173.
- [11] Jane S F, Hansen G J A, Kraemer B M, et al. Widespread deoxygenation of temperate lakes. *Nature*, 2021, 594(7861): 66-70. DOI: 10.1038/s41586-021-03550-y.
- [12] Breitburg D, Levin L A, Oschlies A, et al. Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, 2018, 359(6371). DOI: 10.1126/science.aam7240.
- [13] Chen H, Luo A, Mi C, et al. Climate-driven decline in water level causes earlier onset of hypoxia in a subtropical reservoir. *Water Research*, 2024, 267: 122445. DOI: 10.1016/j.watres.2024.122445.
- [14] Jean - Philippe Jenny , Pierre Francus , Alexandre Normandeau, et al. Global spread of hypoxia in freshwater ecosystems during the last three centuries is caused by rising local human pressure. *Global Chang Biology*, 2016, 22(4): 1481-1489. DOI: 10.1111/gcb.13193.
- [15] Schmidtko S, Stramma L, Visbeck M. Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades. *Nature*, 2017, 542(7641): 335-339. DOI: 10.1038/nature21399.
- [16] Diaz Robert J , Rosenberg Rutger. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 2008, 321(5891): 926-929. DOI: 10.1126/SCIENCE.1156401.
- [17] Müller B, Bryant L D, Matzinger A, et al. Hypolimnetic Oxygen Depletion in Eutrophic Lakes. *Environmental Science & Technology*, 2012: 9964-9971. DOI: 10.1021/es301422r.
- [18] Yusuke Nakashima , Akiyoshi Shimizu , Masahiro Maruo, et al. Trace elements influenced by environmental changes in Lake Biwa: (I) Seasonal variations under suboxic hypolimnion conditions during 2007 and 2009. *Limnology*, 2016, 17(2): 151-162. DOI: 10.1007/s10201-015-0474-3.
- [19] Lewis A S L, Lau M P, Jane S F, et al. Anoxia begets anoxia: A positive feedback to the deoxygenation of temperate lakes. *Global Change Biology*, 2023, 30(1). DOI: 10.1111/gcb.17046.
- [20] Bao Y, Zhang D, Wang Y, et al. Analysis of nitrogen migration and transformation in the typical deep and large reservoir of the Lancang River — Evidence from nitrogen and oxygen isotopes. *Journal of Hydrology*, 2024: 131701. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131701.
- [21] Yu X, Zhuge Y, Liu X, et al. Evolution mechanism of dissolved oxygen stratification in a large deep reservoir. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(5): 1496-1507. DOI: 10.18307/2020.0521. [余晓, 诸葛亦斯, 刘晓波, 等. 大型深水水库溶解氧层化结构演化机制. *湖泊科学*, 2020, 32(5): 1496-1507.]
- [22]Boehrer B, Schultze M. Stratification of lakes. *Reviews of Geophysics*, 2008, 46(2): 1-27. DOI: 10.1029/2006RG000210.
- [23]Müller B, Bryant L D, Matzinger A, et al. Hypolimnetic Oxygen Depletion in Eutrophic Lakes. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(18): 9964-9971. DOI: dx.doi.org/10.1021/es301422r.
- [24] Du YL, Peng WQ, Liu C. A review of dissolved oxygen variation and distribution in the stratified lakes or reservoirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(8) : 990-998. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20190147. [杜彦良, 彭文启, 刘畅. 分层湖库溶解氧时空特性研究进展. *水利学报*, 2019, 50(8) : 990-998.]
- [25] Matzinger A, Müller B, Niederhauser P, et al. Hypolimnetic oxygen consumption by sediment-based reduced substances in former eutrophic lakes. *Limnology and Oceanography*, 2010, 55(5): 2073-2084. DOI: 10.4319/lo.2010.55.5. 2073.
- [26] Chen H, Luo A, Mi C, et al. Climate-driven decline in water level causes earlier onset of hypoxia in a subtropical reservoir. *Water Research*, 2024, 267:122445. DOI: 10.1016/j.watres.2024.122445.
- [27] Liu C, Liu X, Zhou H, et al. Temporal and spatial evolution characteristics and driving factors of reservoir anoxic zone. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(12): 1479-1490. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20190688. [刘畅, 刘晓波, 周怀东,

等. 水库缺氧区时空演化特征及驱动因素分析. 水利学报, 2019, 50(12): 1479-1490.]

[28] Sun B, Zong Q, Zhang Y, et al. MASR: A novel monitoring method coupled with interpretation platform for near-term management in thermal stratified reservoirs . Journal of Environmental Management, 2022, 323: 1-10. DOI: 10.2139/ssrn.4119757.

[29] Hemond H F, Lin K. Nitrate suppresses internal phosphorus loading in an eutrophic lake. Water Research, 2010, 44(12): 3645-3650. DOI: 10.1016/j.watres.2010.04.018.

[30] Yamada T M, Sueitt A P E, Beraldo D A S, et al. Calcium nitrate addition to control the internal load of phosphorus from sediments of a tropical eutrophic reservoir: Microcosm experiments. Water Research, 2012, 46(19): 6463-6475. DOI:10.1016/j.watres.2012.09.018

[31] Cubas F J, Novak J T, Godrej A N, et al. Effects of nitrate input from a water reclamation facility on the Occoquan Reservoir water quality. Water Environment Research, 2014, 86(2):123-133. DOI: 10.2175/106143013X13596524517067.

[32] Austin D, Scharf R, Carroll J, et al. Suppression of hypolimnetic methylmercury accumulation by liquid calcium nitrate amendment: redox dynamics and fate of nitrate. Lake and Reservoir Management, 2016, 32(1): 61-73. DOI: 10.1080/10402381.2015.1121306.

[33] Beutel M W, Duval R, Cubas F J, et al. A review of managed nitrate addition to enhance surface water quality. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2016, 46(7): 628-673. DOI: 10.1080/10643389.2016.1151243.

[34] Orihel D M, Baulch H M, Casson N J, et al. Internal phosphorus loading in Canadian fresh waters: a critical review and data analysis. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2017, 74(12): 2005-2029. DOI: 10.1139/cjfas-2016-0500.

[35] Zhu X, Zhang M, Qu XD et al. Contamination status and speciation for the sediment nutrients in Panjiakou-Daheiting. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(11): 3847-3856. DOI: 10.13287/J.1001-9332.201811.036. [朱翔, 张敏, 渠晓东, 等. 潘大水库表层沉积物营养盐污染状况及赋存形态. 应用生态学报, 2018, 29(11): 3847-3856.]

[36] Yu X, Li G, Zhuhe Y, et al. Distributions and retention of nitrogen and phosphorus in Panjiakou Reservoir. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020, 18(6): 469-478. DOI: 1672-3031(2020)06-0469-10. [余晓, 李国强, 诸葛亦斯, 等. 潘家口水库氮与磷营养盐的时空变化及滞留效应分析.中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(6): 469-478.]

[37] Ma Y, Guo Q, Huang T, et al. Response characteristics of water quality to the seasonal thermal stratification in Jin-pen reservoir along the Heihe river,Xi'an city in China. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(04): 406-415. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2013.04.007. [马越, 郭庆林, 黄廷林, 等. 西安黑河金盆水库季节性热分层的水质响应特征. 水利学报, 2013, 44(04): 406-415.]

[38]Jiang X, Zhu L, Xu S, et al. Effects of seasonal stratification and suspended sediment behaviors on the mobilization of manganese and iron in a drinking water reservoir——A case of Biliuhe Reservoir, Liaoning Province. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(02): 375-385. DOI: 10.18307/2019.0207. [姜欣, 朱林, 许士国, 等. 水源水库季节性分层及悬浮物行为对铁锰迁移的影响——以辽宁省碧流河水库为例. 湖泊科学, 2019, 31(02): 375-385.]

[39] Danish Hydraulic Institute. MIKE 3 esturrline and coastal hydraulics and oceanography hydraulic module reference manual[M]. DHI, 2002.

[40] Jacob Kalff. 湖沼学——内陆水生态系统. 古滨河, 刘正文, 李宽意, 等译.北京: 高等教育出版社, 2011.

[41]李小平. 湖泊学. 北京: 科学出版社, 2013.

[42] Zouabi A B, Adelana S M, Gueddari M. Effects of selective withdrawal on hydrodynamics and water quality of a thermally stratified reservoir in the southern side of the Mediterranean Sea: a simulation approach. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(5): 1-14. DOI: 10.1007/s10661-015-4509-3.

[43] Liu C, Liu X, Zhou H, et al. Study on the threshold condition to suppress anoxic zone by large flow operation process. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(10): 1217-1228. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20210110. [刘畅, 刘晓波, 周怀东, 等. 大流量调度过程对水库缺氧区抑制阈值条件研究.水利学报, 2021, 52(10): 1217-1228.]

[44] Sun B, Zong Q, Zhang Y, et al. MASR: A novel monitoring method coupled with interpretation platform for near-term

management in thermal stratified reservoirs . *Journal of Environmental Management*, 2022, 323: 1-10. DOI: 10.2139/ssrn.4119757.

[45] Daniel J. Conley H W P R. Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus. *Science*, 2009, 323(5917): 1014-1015. DOI: 10.1126/SCIENCE.1167755.

[46] Camargo J A, Alonso Á. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment. *Environment International*, 2006, 32(6): 831-849. DOI: 10.1016/J.ENVINT.2006.05.002.

[47] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2007, 10(12): 1135-1142. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2007.01113.x.

[48]生态环境部关于做好重点海域入海河流总氮等污染治理与管控的意见[环办海洋（2023）3号].生态环境部，2023

[49] Mengdi Yang, Qianli Luo, Zhongya Fan, et al. Metagenomics and stable isotopes uncover the augmented sulfide-driven autotrophic denitrification in a seasonally hypoxic, sulfate-abundant reservoir. *Environmental Science & Technology*, 2024,58(32). DOI: 10.1021/acs.est.4c00248.

[50] McCarthy, M.J., Newell, S.E., Carini, S.A. et al. Denitrification Dominates Sediment Nitrogen Removal and Is Enhanced by Bottom- Water Hypoxia in the Northern Gulf of Mexico. *Estuaries and Coasts*, 2015, 38: 2279–2294. <https://doi.org/10.1007/s12237-015-9964-0>.

[51] Beutel M W. Inhibition of ammonia release from anoxic profundal sediments in lakes using hypolimnetic oxygenation. *Ecological Engineering*, 2006, 28(3): 271-279. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2006.05.009.

[52] Schauser I, Chorus I, Lewandowski J. Effects of nitrate on phosphorus release: comparison of two Berlin lakes. *Acta Hydrochim. Hydrobiol*, 2006, 34: 325-332. DOI: 10.1002/ahch.200500632.

附表 I 模型参数率定结果

Appendix Tab.I Model Parameter Calibration Results

序号	参数类型	参数意义	对应表达	取值
1	水动力-水温模拟参数	纵向 Smagorinsky 常数	C_{sm}	10
2		温度垂向扩散系数	—	2
3		温度纵向扩散系数	—	0.5
4		蒸发参数	a_1	0.5
5		蒸发参数	b_1	0.9
6		太阳辐射参数	a_2	0.295
7		太阳辐射参数	b_2	0.371
8		表面水体吸收光能比例	β	0.6
9		光衰减系数	λ	0.5
10	水质模拟参数	BOD 过程: 20℃时有机物衰减速率	K_3	0.5
11		BOD 过程: 20℃时浮游植物碎屑衰减速率	K_7	0.5
12		BOD 过程: 温度调整系数	θ_3	1.2
13		BOD 过程: 半饱和浓度	K_{S_BOD}	2.0
14		光合作用: 透明度盘深度	SD	0.4
15		光合作用: 午间最大产氧量	P_{max}	12
16		光合作用: 中午时间校正	τ	0.0
17		呼吸作用: 20℃时呼吸作用耗氧速率	K_2	0.3
18		呼吸作用: 温度调整系数	θ_2	1.1
19		呼吸作用: 半饱和浓度	K_{S_R}	2.0
20		沉积物耗氧过程: 20℃时沉积物耗氧率	Y_3	0.8
21		沉积物耗氧过程: 温度调整系数	θ_6	1.07
22		沉积物耗氧过程: 半饱和浓度	K_{S_SOD}	2.0
23		硝化作用: 20℃时衰减系数 (氨氮至亚硝酸盐)	K_4	0.05
24		硝化作用: 20℃时衰减系数 (亚硝酸盐至硝酸盐)	K_5	1.0
25		硝化作用: 温度调整系数 (氨氮至亚硝酸盐)	θ_4	1.088
26		硝化作用: 温度调整系数 (亚硝酸盐至硝酸盐)	θ_5	1.088
27		硝化作用: 半饱和浓度	K_{S_N}	2.0
28		BOD 降解产生氨氮: BOD 衰减的氨氮释放率	Y_1	0.3
29		植物吸收氨氮: 植物吸收氨氮的量	UP_p	0.066
30		反硝化过程: 20℃时衰减系数	K_6	0.1
31		反硝化过程: 温度系数	θ_7	1.160
32		叶绿素过程: 叶绿素 a 的含碳率	K_{10}	0.04
33		叶绿素过程: 初级生产的碳氧比	K_{11}	0.3
34		叶绿素过程: 叶绿素 a 的死亡率	K_8	0.1
35		叶绿素过程: 叶绿素 a 的沉降率	K_9	0.2