鲁班水库的水质现状分析与治理措施研究

欧阳凯华， 杨惠钫， 屈思潮
（中国水利水电第五工程局有限公司，四川 成都 610066）

摘 要：鲁班水库作为四川省重要的水利工程、国家级水禽湿地保护区和饮用水源保护区，肩负着重要的生态环境保护使命。阐述了通过对水库水质的调查，深入了解了其水质状况，并对不同水深下水库总磷、氨氮、总氮、COD 和 pH 等指标的变化进行了研究。通过分析水库污染源，查清了影响其水质的主要因素。在比较了五种不同的水库水体治理方案后，最终推荐采用富氧修复方案，以期改善鲁班水库的水质。该方案的实施有望为维护鲁班水库的生态平衡和保障周边地区的饮用水安全做出积极的贡献。

关键词：鲁班水库；水质；水体分层；富氧修复；治理措施
中图分类号：TV7；TV62+1；TV697.3；TV697.2；X832 **文献标志码**： B **文章编号**：1001-2184(2024)04-0041-05

Research on the Current Status and Remediation Measures of Water Quality in Luban Reservoir

OUYANG Kaihua, YANG Huifang, QU Sichao
(Sinohydro Bureau 5 Co., LTD., Chengdu Sichuan 610066)

Abstract: As an important hydraulic engineering project, national-level wetland protection area for waterfowl, and drinking water source protection area in Sichuan Province, Luban Reservoir bears the significant mission of ecological environmental protection. This study conducted an investigation into the water quality of the reservoir, gaining an in-depth understanding of its water quality status and studying the variations of different indicators such as total phosphorus, ammonia nitrogen, total nitrogen, COD, and pH under different water depths. Through the analysis of pollution sources in the reservoir, the main factors affecting water quality were identified. After comparing five different reservoir water management plans, the oxygen-enrichment restoration plan was ultimately recommended to significantly improve the water quality of the Luban Reservoir. The implementation of this plan is expected to make a positive contribution to maintaining the ecological balance of the reservoir and ensuring the drinking water safety of surrounding areas.

Keywords: Lu Ban Reservoir; Water quality; Water stratification; Oxygen-enrichment restoration; Remediation measures

1 概 述

水是地球上不可或缺的资源之一，其在维系人类社会和生态系统平衡中扮演着至关重要的角色。随着人口的增加和工业化的推进，水资源的管理和保护变得尤为迫切。在这个背景下，各地的水利工程承担着巨大的责任，既要满足社会对水的需求，又要保护生态系统的完整性。鲁班水库作为四川省的一项重要水利工程，不仅是国家级水禽湿地保护区，更是饮用水源保护区，其所承担的生态环境保护责任十分重大[1]。

此次研究以鲁班水库为对象，通过对库水中不同深度的水质进行调查、深入了解其水质状况，并对水库污染源进行了分析。为应对这些问题，笔者比选了五种不同的水库水体治理方案，充分考虑了成本效益、可行性和环境友好性等多方面因素，其中富氧修复方案凭借其高效性和可持续性被推荐为最佳选择，预计该方案的实施能够显著改善鲁班水库的水质。

1.1 水库概况

鲁班水库位于绵阳市三台县鲁班镇涪江流域凯江的一级支流绿豆河上，地理坐标为东经 104°59′～105°01′，北纬 30°53′～30°56′之间。鲁班水库以灌溉为主，灌区涉及三台、射洪、大英三个县，设计灌溉面积为 62.69 万亩（1 hm^2 = 15 亩）；兼顾供水、改善生态环境、发电等综合利用，

收稿日期：2024-03-14

供水人口为 20 余万人。

该水库的集雨面积为 21 km^2，多年平均来水量为 476.0 万 m^3。水库正常蓄水位高程为 460.00 m，相应库容为 2.78 亿 m^3，校核洪水位高程为 460.70 m，总库容为 2.94 亿 m^3，死水位高程为 439.00 m，死库容为 0.68 亿 m^3，有效库容为 2.10 亿 m^3，水库除拦蓄坝址以上来水外，主要由都江堰人民渠七期干渠汛期供给。

1.2　数据的收集

2021 年 11 月，项目研究团队分别在鲁班水库大坝库区浅水区（1～3 号点位，水深＜25 m）按水面以下 1.0、6.0、11.0、16.0、20.0 m 取样进行了水质检测。检测期库水位高程为 458.37 m，天气晴朗。分别在鲁班水库坝前库区深水区（4～5 号点位，水深＞25 m）按水面以下 1.0、6.0、11.0、16.0、2 0.0、25.0、30.0、35.0、40.0、45.0 取样进行了水质检测，亦对放空隧洞出口的水质进行了检测。检测期库水位高程为 457.33 m，天气晴朗。

受季节气温的影响，深水水库易产生水温分层现象，其上下层水体交换受阻而减弱，有机质在水库坝前深水区沉积和降解时消耗大量的溶解氧，进而导致水体质量进一步恶化。项目研究团队于 2022 年 6 月在原采样点位取样并对放空隧洞出口的水质进行了检测。检测期库水位高程为 454.33 m，天气晴朗。鲁班水库水质检测点位置分布情况见图 1。

图 1　鲁班水库水质检测点位置分布图

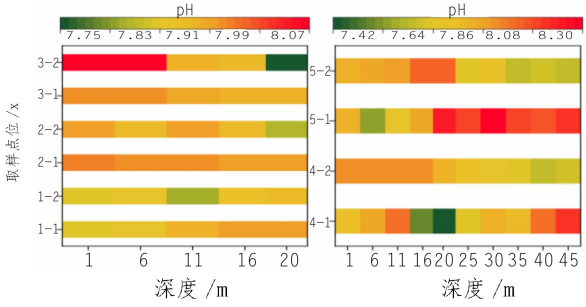
1.3　测定方法

鲁班水库水体的检测项目主要包括化学需氧量、氨氮、总磷、总氮和酸碱度共计五项。所有检测水体均采用现场取样。化学需氧量（COD）采用重铬酸盐法测定；氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定；总磷采用钼酸铵分光光度法测定；总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定；酸碱度（pH）采用智能检测仪测定。研究按照《地表水环境质量标准》GB 3838－2002 中的相关规定对水质进行分类。

2　检测结果与分析

2.1　水质检测结果分析

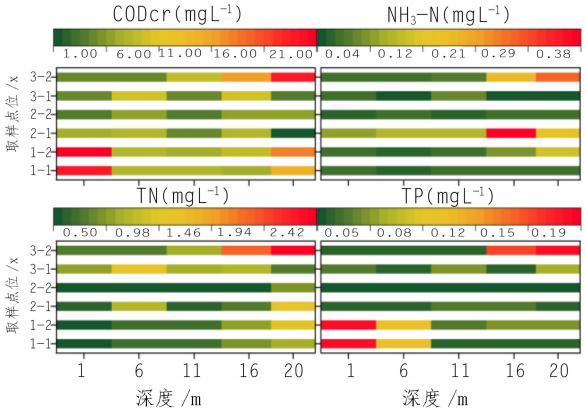
从图 2 中不难发现，水库中的不同采样点以及不同深度的 pH 值的变化相差不大，均在 7.4～8.3 之间，呈弱碱性，达标。不同采样点位的 pH 值热力情况见图 2。



注：x－1 与 x－2 分别为 x 号点于 2021 年 11 月和 2022 年 6 月的取样。

图 2　不同采样点位的 pH 值热力图

浅水区采样点位的水质指标热力情况见图 3。根据检测成果并按照《地表水环境质量标准》GB 3838－2002 中的相关规定，库区（1～3 号测点）表层以下 1.0～20.0m 为Ⅲ～劣Ⅴ类水质，其



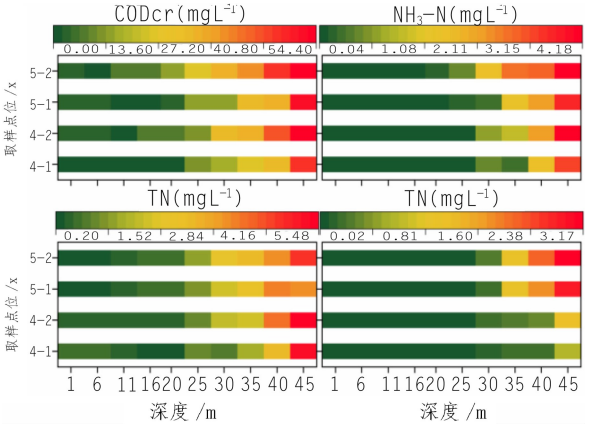
注：x－1 与 x－2 分别为 x 号点于 2021 年 11 月和 2022 年 6 月的取样。

图 3　浅水区采样点位的水质指标热力图

中以Ⅳ类水质为主，Ⅴ类水质次之，少量为Ⅲ类和劣Ⅴ类水质。主要为总磷（＞0.05 mg·L^{-1}）、总氮（＞1 mg·L^{-1}）超标与化学需氧量超标（＞20 mg·L^{-1}），氨氮含量偏低且均低于 0.4 mg·L^{-1}。

其中 1 号测点（1 号供水厂进水口）的表层水超标严重，且前后两次检测结果基本一致。2 号检测点位距都江堰灌区较近，检测时间为 2022 年 6 月 28 日，库水位高程为 454.33 m，透明度为 4.0 m，水深 20.30 m，水面以下 11.0 m 深度的温度为 24.8 ℃；检测成果显示：水面以下 11.0、16.0、20.0 m 处的水质为Ⅲ类，较 2021 年 11 月检测的全Ⅳ类水质偏好，其主要原因为 2022 年春灌前都江堰灌区向鲁班水库实施了连续的充水过程，且都江堰灌区的来水水质为Ⅲ类；水体进入水库后受地形条件影响水体交换较弱，出库基本为前水体，故其水质有所提升。

深水区采样点位的水质指标热力情况见图 4。由图 4 可知：库区（4 号、5 号测点）总体上的水质呈现出随着水深的增加逐渐变差的趋势，表层以下 1.0～20.0 m 主要为Ⅲ类水质，20.0～30.0 m 为Ⅲ～Ⅴ类水质，其中以Ⅴ类水质为主，Ⅲ类和Ⅳ类水质次之；30.0～45.0 m 为Ⅴ～劣Ⅴ类水质，其中以劣Ⅴ类水质为主，Ⅴ类水质次之。20.0 m 以上主要为总磷、总氮超标；20.0 m 以下的 CODcr、氨氮、总磷、总氮均超标，其中又以 417.00 m 高程为界，在其以下基本以劣Ⅴ类水质为主，水样浑浊，具有明显的刺鼻气味。



注：x－1 与 x－2 分别为 x 号点于 2021 年 11 月和 2022 年 6 月的取样。

图 4　深水区采样点位的水质指标热力图

3 号检测点、4 号检测点和 5 号检测点水质指标的检测成果较 2021 年 11 月检测出现的偏差主要是由于春、冬季分别是温跃层的形成、消失时期，尚不稳定的热分层结构对上、下层水体对流运动影响较小，使得鲁班水库库区水体冬季没有出现明显的分层现象；而夏、秋季节温跃层结构较为稳定，上、下层水体对流交换不充分[2－3]。

水库水温的垂向分层直接导致了 COD、总磷、总氮和 pH 值在垂向发生变化，进而对水质产生了不利影响。在适宜的气温条件下，浮游植物在水库表面温跃层繁殖生长，通过光合作用释放出大量的氧气，使溶解氧浓度始终处于饱和状态。但当水温结构分层时阻断了上下层水体的交换；温跃层之下，垂向水流发生掺混的概率很小，上层含溶解氧浓度较多的水体不能通过水体的交换发生传递；另一方面，浮游植物光合作用所必需的阳光受到水深的影响不能透射到深层水体中，致使水体不能发生光合作用而产生氧气，而水中的好氧微生物因新陈代谢消耗氧气、且因溶解氧得不到补充而导致深层水溶解氧浓度急剧降低；同时，在低氧状态下，厌氧生物的分解使库底的氨、磷等营养物质从土壤中析出并释放出 CO_2，使 pH 值减小，含碱量和亚磷酸盐有所增加；随着水深的增加，溶解氧、pH 值逐渐降低，化学需氧量逐渐升高，水质则不断恶化[4－5]。

总体而言，鲁班水库水质的化学需氧量、氨氮、总磷和总氮均存在不同程度的超标，其中水深 20.0 m 以下的水质污染较为严重。

2.2　水库污染源分析

（1）自然污染。自然污染主要是在地表径流形成水体过程中产生，其由水体承载物性质决定。鲁班水库多年平均来水量仅为 476.0 万 m^3，库区植被较好，绿豆河流域多年平均悬移质输沙量为 0.8 万 t，人民渠进库多年平均悬移质输沙量为 10.7 万 t，合计年均悬移质输沙量为 11.5 万 t，体积为 9.27 万 m^3；推移质输沙量为 1.15 万 t，体积为 0.68 万 m^3，入库总沙量为 9.95 万 m^3。水库死库容为 6 800 万 m^3；自然污染对水库产生的污染有限。

（2）人为污染。人为污染主要为人类生活、生产活动中产生且其无法转换，最终流入或渗入水体的行为。至 2015 年初，鲁班水库大面积肥水养鱼业兴起，且其均以租赁的方式承包给个体经营者，投放了主要以氮、磷、钾等化学元素生物剂饵

料进行渔业养殖，造成库区底质污染严重。即使在停止养殖、采取保护措施后，由于水库水域面积大、水域相对封闭而导致水体交换速度受限，迄今水体污染仍未得到有效改善。

集镇建设的加快发展和环境治理的滞后导致生活污水和垃圾集中处理普遍存在很大难度，基本没有处理设施。首先，生活污水没有通过污水沟向外排放而直接进入了水库[6]；其次，根据三台县政府统计，仅 2020 年，库区的猪、鸡、鸭等动物尸体即有十余万只，其对水库的水质造成了较大影响。该水库运行至今已经 40 余年，对库底沉积物从未进行过清淤。

其他人为污染如农药、化肥的施用，水库自身杂草、漂浮物污染，水环境、水质的保护意识缺乏等也是造成水库水体污染的次要原因。

2.3　水体治理的方案比较与选择

目前，在污染源防范和控制的基础上，湖库污染水域的治理与生态修复技术总体上分为三大类：物理法、化学法和生物生态法。根据治理的方式，具体的技术名称又包括：底泥疏浚、生态调水、富氧修复、化学除藻、絮凝沉淀、重金属化学固定、微生物强化、植物净化、生物膜、生物菌剂等。由于化学法对水环境和水生态平衡造成的重大污染和影响已经不再采用[7-8]。针对鲁班水库水体的治理，笔者在本阶段仅从物理法和生物生态法进行了分析与比较并择优选择。水体治理方案比较成果汇总情况见表 1。

表 1　水体治理方案比较成果汇总表

方案	主要整治内容	主要优缺点	处理费用	处理时间
物理法—底泥疏浚	底泥工程疏浚	1、对于特定的水体，其清淤程度与持续时间应进行细致周密地研究与论证； 2、清理的效果欠佳； 3、底泥堆放及处理难度大	100～180 元/m^3，总投资约 15.19 亿元	5～10 a
物理法—生态调水	采用清洁水源冲刷稀释污染水域，同时通过水动力增加水体的富氧量	1、距离远（水平直线距离为 5 300 m）； 2、流量仅 15 m^3/s，库水交换弱，深层水体基本不交换	不增加工程投资	无限期
生物生态法—富氧修复	富氧提高水体氧含量，水体活化加快水体污染物质的去除，进而改善水质	1、环保、无污染； 2、成熟技术，已在全国多个项目应用； 3、治理时间短，见效快	水体治理费用为 1.92 元/m^3，水体维护费用为 0.29 元/m^3	6 个月施工期，8 个月维护期
生物生态法—植物净化	培植水生植物吸收、吸附、降解、转化水体中的有机污染物	1、环保、无污染； 2、水生植物在污染严重的水体和水深较大的环境条件不具备生存条件，有待进一步研究	2～3 元/m^3（调查询价）	8～10 a
生物生态法—生物菌剂处理	通过利用微生物、水生动植物等的生命活动，对水中污染物进行转移、转化及降解，从而使水体净化	1、适宜多种环境的水体治理； 2、对重金属、藻类及某些化学污染效果甚微； 3、易诱发水生生物变异	6.3 元/m^3（调查询价）	6 个月施工期

笔者通过对以上五种常用的水体治理方案进行分析与研究得知：富氧修复生物生态治理是近 20 年兴起的新技术，在四川省多座水库已经成功应用；通过研究团队现场考察得知：水库水体清澈透明，无异味，无悬浮物；总磷、总氮、高锰酸盐等检测数据已经达到并长期维持在Ⅲ类水质标准。笔者结合鲁班水库污染源、水质检测成果和地形条件，本次推荐采用富氧修复方案以改善水库底层微环境、内部活水提升、逐步恢复生物多样性、逐渐形成良性生态平衡。以水质稳定达标为任务核心，提升水质，提高其水体自净能力，保障水体稳定达标。

3　结　语

本次研究通过深入调查鲁班水库的水质状况得知：鲁班水库水质的 COD、氨氮、总磷和总氮均存在不同程度的超标，其中尤以 20.0 m 以下的水质污染较为严重。在对水库污染源进行细致分析的基础上，笔者提出了五种不同的水体治理方案，并在综合考虑成本效益、可行性和环境友好性等多方面因素后，最终推荐富氧修复方案为最佳

选择，其具有高效性和可持续性，有望显著改善鲁班水库的水质。

水库的水质治理工作是一项涉及内容复杂、时间要求长、投入大的综合性工作。水库运行和管理单位一定要把水库治理与水环境整治相结合，坚持做到“四清”和“五无”，即清垃圾、清污水、清杂物、清污泥；库岸无垃圾，水面无漂浮物，库中无污染物，饮用水源无污染，入库充水口无动物尸体。同时，地方政府应加快城镇污水处理厂建设，严禁将生活污水排入水库，尽可能地解决雨污混排现象。笔者期待在三台县政府和人民的持续努力下，通过对鲁班水库水体进行治理，“一江清水入湖来”将指日可期！

参考文献：

[1] 邓地娟，王静雅，谢强，等. 鲁班水库生态安全状态评估研究[J]. 四川环境，2021，40(3)：156-163.

[2] 王兴菊，于文晴，赵华青，等. 大冶水库夏秋季热分层对沉积物氮磷释放的影响[J]. 环境科学与技术，2023，46(10)：42-52.

[3] 王璨，李一平，李聂贵，等. 南方水库热分层消亡时期水体混合特征及其驱动机制[J]. 湖泊科学，2023，35(5)：1613-1622.

[4] 谭文明，李惠平，邱宇，等. 深水型水库水质因子与藻类群落垂向演替及水华爆发机制分析[J]. 环境工程学报，2023，17(6)：2027-2036.

[5] 李青倩，杨鹊平，高红杰，等. 嘉陵江鲁班水库氮磷时空分布特征及截留率[J]. 环境工程技术学报，2022，12(2)：567-572.

[6] 杨达刚，秦琳. 加强鲁班水库水污染防治 促进库区经济发展[J]. 四川水利，2015，36(1)：43-45.

[7] 余冬元，汪东亮. 浅水湖泊水体富营养化治理技术研究进展[J]. 中国资源综合利用，2021，39(6)：95-97，101.

[8] 陈卫东，周世平，周彦宏. 三台县鲁班水库水环境修复可行性探讨[J]. 城市建设理论研究(电子版)，2018，8(18)：186-187.

作者简介：

欧阳凯华(1974-)，男，湖南娄底人，副总工程师，勘察设计院总工程师，副高级工程师，硕士，从事水利水电工程勘察设计及技术管理工作；

杨惠钫(1983-)，女，四川宜宾人，室主任，副高级工程师，硕士，从事水利水电工程勘察设计工作；

屈思潮(1998-)，男，四川成都人，助理工程师，硕士，从事水工设计与规划设计工作.

(编辑：李燕辉)

(上接第 31 页)

汽养护温度，满足了混凝土芯部与表层、表层与环境温差不超过 15 ℃的要求，保障了冬期箱梁制、运、架的施工质量，提高了制梁生产效率，实现了质量与工期目标，亦保障了工程的工期，如期完成了施工任务；同时，对蒸汽养护施工技术及温度进行了研究与分析，总结出一套箱梁蒸汽养护关键技术与参数，为同类工程施工提供了可靠的经验。

参考文献：

[1] 屈超. 高速铁路建设箱梁预制场的布设方案探讨[J]. 铁路工程技术与经济. 2017，32(2)：43-45，49.

[2] 铁路混凝土工程施工技术规程：Q/CR 9207-2017[S].

[3] 周位帅. 浅谈大体积混凝土箱梁蒸养技术[J]. 铁道建筑技术，2008，20(4)：29-31.

[4] 高速铁路预制后张法预应力混凝土简支梁：GB/T 37439-2019[S].

[5] 郭振武，李冲. 900 t 箱梁蒸汽养生技术[J]. 交通标准化，2010，34(19)：41-47.

[6] 何惠军，李冲. 客运专线大型箱梁冬期蒸汽养护技术[J]. 西部探矿工程，2011，23(5)：208-210.

作者简介：

张达志(1990-)，男，甘肃环县人，工程师，注册安全工程师，学士，从事高速铁路工程建设施工技术与管理工作；

任小强(1981-)，男，甘肃成县人，副高级工程师，从事工程项目管理工作；

赵俊松(1994-)，男，四川乐山人，助理工程师，从事高速铁路工程建设施工技术与管理工作；

任　浩(1996-)，男，河北磁县人，助理工程师，学士，从事高速铁路工程建设施工技术与管理工作；

赵　耀(1997-)，男，四川广元人，助理工程师，从事高速铁路工程建设质量管理工作.

(编辑：李燕辉)