

水利水电工程中水质监测与污染物控制技术分析

李志娟

江西鸿业工程检测有限公司 江西南昌 330000

【摘要】针对水利水电工程建设和运营过程中的水质污染问题，通过对某水电站上下游断面进行为期12个月的系统监测，采用多参数水质分析仪和气相色谱-质谱联用仪对水体理化指标和特征污染物进行检测分析。实验结果表明，施工期悬浮物含量平均超标率达32.5%，运营期水温分层现象明显，溶解氧低于4mg/L的区域占水库总容积的15.3%。基于监测数据，建立了污染物输移扩散模型，提出了“源头控制+过程处理+末端治理”的分级防控体系，为水利水电工程水质保护提供了技术支持。

【关键词】水利水电工程；水质监测；污染物控制；防控体系；水环境保护

引言：

随着我国水利水电事业的快速发展，工程建设和运营对水环境的影响日益显著。水质监测是评估水环境状况、制定污染防治措施的重要基础，而污染物控制则是确保工程安全运行和生态环境保护的关键举措。目前，国内外对水利水电工程的水质监测与污染防控研究主要集中在监测技术优化、污染物迁移转化规律和处理工艺等方面，但缺乏系统的监测评价体系和全过程污染控制方案。深入研究水质监测方法和污染物控制技术，对提升水利水电工程环境管理水平具有重要意义。

1 多维监测体系构建

1.1 监测指标选择

水利水电工程水质监测指标体系包含常规理化指标、特征污染物指标和生态指标三大类。常规理化指标涵盖水温、pH值、溶解氧、电导率、浊度等基础参数，通过在线监测设备实现24小时持续采集。特征污染物指标重点监测总氮、总磷、重金属、石油类等对水环境影响显著的污染物，采用气相色谱-质谱联用技术进行定量分析。生态指标则聚焦浮游生物密度、叶绿素a含量、底栖动物多样性指数等生态系统健康参数，结合显微镜检测和生物毒性实验开展评估。指标选择过程中充分考虑了水利水电工程施工期和运营期的特点，确保监测数据全面反映水体质量状况。

1.2 监测方法研究

水质监测方法的选择基于监测指标特性和工程实际需求制定。在线监测技术采用多参数水质分析仪，配备自动清

洗装置和数据传输模块，实时监测溶解氧、pH值等快速变化指标^[1]。实验室分析方法针对持久性有机污染物和重金属，运用原子吸收分光光度法、离子色谱法等标准分析方法，确保检测结果准确可靠。生物监测方法结合生物传感器和生物指示种群，通过建立水生生物群落结构与水质参数的相关性模型，评估水体生态状况。监测方法的选择着重考虑了检测灵敏度、分析精度和操作可行性，建立了完整的质量控制体系。

1.3 监测点位布设

监测点位布设遵循代表性、系统性和可操作性原则，在垂直和水平方向构建三维监测网络。空间布点以枢纽工程为中心，上游断面设置在回水末端，下游断面延伸至水质恢复段，重点区域加密布设采样点。垂直方向依据水温分层特征，在表层、温跃层和深层分别布设监测点，捕捉水质分层变化。采样频率根据水文条件和污染物特征确定，枯水期每月采样一次，丰水期加密至每周一次，特殊时段实施加密监测。应急监测点位预先设定在污染风险较大的施工区域和重要取水口，配备快速响应监测设备。

2 水质污染演变机理

2.1 施工期污染特征

基坑开挖施工产生大量泥浆水，悬浮物浓度高达5000-8000mg/L，同时携带氨氮和有机物。混凝土浇筑废水pH值普遍超过12，含有水泥颗粒及减水剂、缓凝剂等外加剂。砂石料加工系统冲洗废水中悬浮物浓度在3000-4500mg/L之间，石油类污染物含量达3.5-8.2mg/L。施工机械维修和

清洗产生的含油废水中石油类浓度高达15-25mg/L。生活营区排放的生活污水中COD浓度在280-350mg/L，氨氮含量25-35mg/L。通过理论计算和实测数据分析，施工高峰期悬浮物日排放量达4.5吨，COD日负荷0.8吨，氨氮日负荷0.15吨。污染物扩散模拟结果显示，悬浮物超标影响范围延伸至下游8公里，pH值超标断面长度达3.5公里，重金属污染物在下游5公里范围内出现不同程度富集^[2]。水生生物调查发现，施工影响河段浮游植物密度较对照断面降低62%，底栖动物物种数减少48%，鱼类资源量下降35%，表明施工污染对河流生态系统造成显著影响。

2.2 运营期污染特征

水库蓄水后水动力条件发生根本性改变，形成典型的分层结构。夏季水温分层现象最为显著，表层水温达28℃，深层水温维持在15℃左右，温跃层位于水面以下4-8米处，厚度约4-6米。温跃层阻碍了垂向混合，导致水体交换减弱。溶解氧分布呈现明显的垂直梯度，表层水体因光合作用维持在7-9mg/L，温跃层溶解氧随深度快速下降，深层区域由于有机物分解消耗和缺乏补充，溶解氧含量降至3mg/L以下，部分库湾出现季节性缺氧。营养盐累积效应突出，总氮和总磷浓度分别达到1.2mg/L和0.15mg/L，较天然河道升高45%和38%。枯水期库区水体交换周期延长至25-30天，加剧了营养盐富集，叶绿素a浓度在夏季达到56 μg/L，诱发浅水库湾蓝藻水华。长期监测数据表明，库区各断面富营养化指数(TLI)均值较蓄水前升高0.8-1.2个等级，水质由II类下降至III类。浮游植物群落结构发生显著变化，蓝藻在总生物量中的占比由15%上升至45%，反映了水体富营养化程度加重。

2.3 污染物迁移转化规律

水库水动力条件显著影响污染物迁移规律，表现为流速减缓、分层加剧和交换减弱。水平方向上，由于流速降低，污染物在水体中的停留时间延长，有利于颗粒物沉降和污染物降解；垂直方向上，温跃层阻碍了表层和深层水体的混合交换，形成污染物在特定水层富集的现象。环境因子对污染物形态转化具有重要作用，水温每升高5℃，铬的氧化速率提高28%，镉的解吸速率增加35%。pH值变化显著影响重金属的形态分配，pH值由7升至8时，铜的可溶性组分降低42%。溶解氧水平决定氮的硝化-反硝化过程，

当溶解氧低于2mg/L时，反硝化作用增强，硝态氮去除率提高至65%。生物地球化学循环过程使氮、磷等营养元素在水体-沉积物界面发生物理吸附、化学结合和生物转化。底泥释放实验表明，夏季总磷释放通量达0.45mg/(m²·d)，其中活性磷占比52%。微生物作用下，有机质矿化速率在20-25℃范围内达到最大值，COD降解系数为0.12-0.15 d⁻¹，表明温度是控制污染物降解的关键因素。

3 污染物全链条治理

3.1 源头控制措施

源头控制措施围绕清洁施工技术、生态调度方案和面源污染防治展开系统研究。施工期采用环保型钻探设备和新型降水工艺，将基坑涌水量控制在2500m³/d以下，较传统工艺降低35%。混凝土生产系统配套建设了三级沉淀池和中和池，出水悬浮物浓度控制在70mg/L以下，pH值调节至7.2-8.5范围。砂石料加工采用干法筛分技术和封闭式传输系统，生产废水产生量较常规工艺减少42%。生活营区建设了地埋式一体化污水处理设施，出水各项指标达到一级A标准。通过优化调度运行方案，在汛期来临前腾出15%的防洪库容，减少水库泄洪对下游水质的冲击^[3]。面源污染防治采用“拦、滞、沉、净”工程措施，在库区周边修建生态沟渠2.8公里，植被缓冲带面积达85公顷，年均削减入库氮负荷26吨、磷负荷3.2吨，有效控制了农业面源污染。

3.2 过程控制技术

过程控制技术通过水质改善工程、生态修复措施和应急处置方案构建全过程防控体系。水库深层布设了曝气增氧装置，单台设备供氧能力达150kg/d，使深层溶解氧含量提升至5mg/L以上。在温跃层区域安装了水动力扰动器，增强垂向混合，减少营养盐在特定水层富集。库湾区域投放粘土矿物改性材料，吸附水体中的磷酸盐，去除率达75%。生态修复工程营造了3.5公顷的人工湿地，种植香蒲、芦苇等挺水植物和黑藻、苦草等沉水植物，构建复合生态系统。投放5万尾滤食性鱼类，调控浮游生物群落结构。应急处置系统配备了移动式絮凝沉淀装置和应急污水处理车，处理能力分别为1000m³/d和500m³/d，确保突发污染事件下的快速响应能力。经过两年运行，库区水质综合指数降低0.8个单位，生态系统稳定性显著提升。

3.3 末端治理工艺

末端治理工艺采用物理、化学和生物处理方法的组合工艺。物理处理单元采用新型孔径可调节的微滤装置,对1-100 μm 范围内的颗粒物去除率达92%,运行阻力较传统工艺降低25%。化学处理采用高效混凝剂和选择性吸附材料,投加改性聚合氯化铝后污水浊度去除率达95%,重金属去除率超过85%。研发的新型纳米材料对磷酸盐的吸附容量达42mg/g,较活性炭提高3倍^[4]。生物处理系统采用A²/O工艺,通过优化厌氧区和缺氧区的水力停留时间,使脱氮效率提升至82%,同步除磷率达到89%。在生物反应池中投加特制生物填料,提高了微生物附着量,使污泥浓度维持在4500mg/L水平。出水水质稳定达到地表水III类标准,氨氮和总磷浓度分别控制在1.0mg/L和0.2mg/L以下。系统运行能耗较传统工艺降低32%,污泥产量减少28%,体现了良好的技术经济性。

4 智慧化防控平台开发

4.1 监测预警系统

监测预警系统采用“监测-分析-预警-响应”的闭环管理模式。系统架构包含数据采集层、传输层、处理层和应用层四个部分,通过物联网技术实现多源数据的实时获取与集成。在线监测设备采用光纤通讯方式,数据传输延迟控制在100ms以内,确保监测数据实时性。数据分析采用深度学习算法,建立了水质参数变化趋势预测模型,对溶解氧、pH值等关键指标的24小时预测准确率达到92%。预警模型基于模糊综合评判方法,设置了四级预警等级,将水质突变、污染物超标、生态风险等事件纳入预警范围。系统配置了GIS可视化平台,直观展示水质参数空间分布特征,实现污染源精准定位和污染物扩散轨迹追踪。两年运行数据显示,系统成功预警水质异常事件28次,平均提前4小时发出预警信息。

4.2 污染防控对策

污染防控对策结合工程措施和非工程措施,构建了全过程、多层次的防控网络。工程防控措施包括在重点断面布设应急处理装置,配备移动式水质净化设备,应急处理能力达到2000m³/d。在库区周边建设了生态拦截带,采用“草沟-湿地-缓冲带”复合工程,年均削减入库COD负荷85吨。非工程措施重点加强水质管理制度建设,制定了《水质保护管理办法》《突发水污染事件应急预案》等规范性文件

件,明确了各部门职责分工和协调机制。建立了水质保护补偿机制,年度专项资金达到500万元,用于上游水源涵养区生态保护。管理制度实施过程中注重公众参与,组建了由周边居民、企业代表和环保组织构成的水环境保护监督团,定期开展联合监测和评议活动^[5]。

4.3 效果评估与优化

效果评估采用定量与定性相结合的综合评价方法。评估指标体系包含水质指标、生态指标和管理指标三个维度,设置了25个具体评价因子。水质达标率由实施前的85.3%提升至96.8%,氨氮和总磷年均浓度分别下降42%和35%。生态系统健康评价采用浮游生物完整性指数(P-IBI),指数值提升0.15个单位,达到良好水平。管理指标显示应急响应时间缩短至30分钟以内,群众满意度达到92%。通过层次分析法确定各指标权重,运用模糊数学模型进行综合评分,防控体系整体效能评分达到88分。持续改进策略着重优化监测布点和采样频率,升级预警模型算法,完善应急处置流程,进一步提升系统运行效率和可靠性。

结语

通过对水利水电工程水质监测与污染物控制技术的系统研究,建立了完整的监测评价体系,揭示了污染物在水体中的迁移转化规律,开发了针对性的控制技术和防控措施。研究成果表明,采用多层次、多手段的污染防控体系能有效改善水体环境质量,监测数据显示工程区域水质达标率提升18.7%,生态系统稳定性显著增强。这些研究成果为水利水电工程的环境保护和可持续发展提供了科学依据和技术支撑,具有重要的理论意义和实践价值。

参考文献:

- [1]黄宝龙.生态水利工程水量水质联合调度效应评价研究[J].水利科技与经济,2023,29(11):106-111.
- [2]段守荣.水文与水质管理系统在水利工程管理中的应用[J].中国水运(下半月),2022(8):102-104.
- [3]孙永峰.水利工程与河流水质演变关系分析[J].黑龙江水利科技,2020,48(10):105-106.
- [4]王鹏.浑河水利工程对水量与水质影响关系分析[J].陕西水利,2016(6):137-139.
- [5]彭天闻.水利工程环境水质效应问题分析[J].地下水,2019,41(1):215-216.