

夏季清江高坝洲库区水体氮磷浓度比对藻华暴发的影响及防控对策探析

杨昭 袁婷 王玉影 李利平

长阳土家族自治县环境监测站

DOI:10.32629/eep.v9i7.3271

[摘要] 清江高坝洲水库为长阳重要的饮用水源地,峡谷型库区水体滞留时间长,夏季分层稳定,氮磷负荷达到阈值时容易发生藻华。以2024年、2025年5—8月天龙湾断面逐日监测的氮磷浓度比为依据,对氮磷浓度比和藻华暴发的关系进行分析。两年总氮基本持平,总磷均值从0.007mg/L上升到0.035mg/L,氮磷比值从324下降到81,溶解氧 $\geq 9.0\text{mg/L}$ 的过饱和天数由1天增加到97天。水温 $20\sim 25^\circ\text{C}$ 时以甲藻为主,水温 $\geq 25^\circ\text{C}$ 后蓝藻占优势。总磷是决定藻华强度的主要指标,应该按照 20°C 、 25°C 两级阈值进行预警,从源头减排、生态拦截、原位控藻、长效监管四个方面进行防控。

[关键词] 高坝洲库区; 氮磷浓度; 藻华暴发; 防控对策; 水环境管理

中图分类号: X321 文献标识码: A

Analysis of the impact of nitrogen phosphorus concentration ratio on algal bloom outbreak in the Gaobazhou reservoir area of Qingjiang River in summer and its prevention and control measures

Zhao Yang Ting Yuan Yuying Wang Liping Li

Changyang Tujia Autonomous County Environmental Monitoring Station

[Abstract] Qingjiang Gaobazhou Reservoir is an important drinking water source in Changyang. The canyon type reservoir area has a long water retention time, stable stratification in summer, and is prone to algal blooms when nitrogen and phosphorus loads reach the threshold. Based on the daily monitoring of nitrogen and phosphorus concentration ratios in the Tianlong Bay section from May to August 2024 and 2025, analyze the relationship between nitrogen and phosphorus concentration ratios and algal bloom outbreaks. The total nitrogen remained basically unchanged for two years, the average total phosphorus increased from 0.007mg/L to 0.035mg/L, the nitrogen phosphorus ratio decreased from 324 to 81, and the number of supersaturation days with dissolved oxygen $\geq 9.0\text{mg/L}$ increased from 1 day to 97 days. When the water temperature is between $20\sim 25^\circ\text{C}$, dinoflagellates are dominant, while blue-green algae dominate when the water temperature is above 25°C . Total phosphorus is the main indicator determining the intensity of algal blooms, and early warning should be carried out according to two thresholds of 20°C and 25°C . Prevention and control should be carried out from four aspects: source emission reduction, ecological interception, in-situ algae control, and long-term supervision.

[Key words] Gaobazhou Reservoir Area; Nitrogen and phosphorus concentration; Algal bloom outbreak; Prevention and control measures; Water environment management

2024年6月22日清江高坝洲库区长阳城区段水体第一次出现红色,县环境监测站立刻对该断面白石雄关、欧式农庄进行了预警监测,连续四个月共检测了48次,两断面水华天数所占比例分别是52%和58%。持续异常表明库区藻华由偶发性变成常态化风险,找到它的触发条件就是水质安全保障的迫切需要。

1 库区水体氮磷污染现状分析

1.1 氮磷输入来源特征

库区氮磷来源主要是面源输入和内源释放。上游雨季径流带来氮磷残留进入库湾,沿岸养殖、生活污水是持续点源补充,库底沉积物厌氧释放磷酸盐产生二次污染^[1]。面源集中在汛期,

内源释放随着水温的升高而增加，两者在夏季叠加。支流入库口流速突然变小，颗粒态营养盐沉降形成富营养化热点，也是藻华先发区。

1. 2 氮磷形态与迁移转化规律

氮以硝态氮、氨氮、有机氮为主，磷以正磷酸盐、聚合磷酸盐、有机磷共存。水温升高使有机态向无机态转化加快，活性磷酸盐比例增大。库湾静水区流速慢、光照充足，是藻类优先增殖区。

1. 3 库区氮磷浓度的空间分异特征

受地形、水动力的影响，库区氮磷浓度空间分异明显，库湾及支流汇入区受面源和点源叠加影响，浓度较高，主河道过流区交换活跃，浓度较低，坝前深水区表底层差异大，分层稳定期底层磷浓度明显高于表层，防控应分区施策。

2 氮磷浓度与藻华暴发的关联机制

2. 1 氮磷比值对藻类群落结构的影响

藻类生长遵循李比希最小因子定律，氮磷比值决定限制性营养元素种类，进而影响优势藻种的演替。当比值偏低时，固氮蓝藻占优势，容易出现蓝藻水华；比值升高、磷成为限制因子时，硅藻、绿藻更易占优^[2]。实测显示，两年总氮均值 1.97、2.01 mg/L，差别很小，总磷均值却由 0.007 升至 0.035 mg/L，氮磷比值由 324 降至 81；2025 年水温≥25℃的 36 天里比值降至 50，已进入蓝藻优势区间。

2. 2 温度与光照对氮磷效应的放大作用

夏季高温强光给光合作用提供充足的能源，氮磷浓度达到阈值之后，藻类分裂速率随着水温的升高呈指数增长。以 20℃ 和 25℃ 为节点，将风险区间分为甲藻水华区和蓝藻区，20℃ 到 25℃ 甲藻水华为主，超过 25℃ 蓝藻凭固氮、气囊调节和储磷的优势取代甲藻。2024 年预警监测中水华日水温>20℃ 的比例达到 82%、100%，溶解氧≥9.0mg/L 的比例分别为 83%、86%，关联度依次为水温、溶解氧、pH；6 月 22 日首次出现红褐色水体时，朱津滩断面水温 23.0℃，正好处于甲藻优势区间。

2. 3 水体滞留时间对藻类增殖窗口的影响

峡谷型水库滞留时间比河道长得多，氮磷停留时间充足，藻类完成营养积累到快速增殖的全过程。下泄流量减少时交换变慢，藻类在同一个水团内繁殖不会被稀释冲刷。滞留时间和氮磷浓度、水温三者共同作用，叠加越大，藻华规模就越大、持续时间就越长。

3 夏季氮磷浓度动态特征及标准阈值对比

3. 1 库区氮磷浓度季节变化特征

库区总氮、总磷夏季从支流向干流递减，从库湾向坝前递增。库湾总磷常在暴发前一到两周上升，随藻类摄取而下降。七八月份温跃层稳定，底层磷酸盐释放加快，风险最大，应转而对表底层进行同步监测^[2]。选取朱津滩（天龙湾）断面 2024 年、2025 年 5 月 1 日-8 月 31 日逐日审核数据，有效监测日 119、109 天。2024 年水温均值 22.5℃、总磷 0.007 mg/L、溶解氧 7.05 mg/L、高锰酸盐指数 0.92 mg/L；2025 年分别升至 23.8℃、0.035 mg/L、15.48 mg/L 和 2.38 mg/L，溶解氧转为持续过饱和。

3. 2 水温区间分布与藻类优势类群响应

水温是藻华暴发的第一个相关因子。按照 20℃、25℃ 来划分水温区间，可以对应到优势类群上，20℃-25℃ 以甲藻为主，水体观感多为红褐色；超过 25℃ 以后蓝藻就取代了甲藻。两年内各区间天数以及配套指标见表 1。

表 1 为 2024 年和 2025 年夏季（5-8 月）朱津滩（天龙湾）断面不同水温区间水质指标统计

年份	水温区间（℃）	天数（d）	占比（%）	总磷（mg/L）	总氮（mg/L）	氮磷比	溶解氧（mg/L）	高锰酸盐指数（mg/L）
2024	20~25	72	61	0.007	1.95	303	6.94	0.92
2024	≥25	23	19	0.007	1.83	288	6.44	1.07
2025	20~25	69	63	0.029	2.02	94	14.89	1.99
2025	≥25	36	33	0.049	2.01	50	17.40	3.26

数据来源为长阳土家族自治县环境监测站朱津滩（天龙湾）断面 2024 年、2025 年 5 月 1 日-8 月 31 日逐日审核监测数据。

由表 1 可见，2024 年 20~25℃ 区间共 72 天（61%），总磷均值仅 0.007 mg/L，甲藻水华仅局部出现；2025 年该区间 69 天（63%），总磷升至 0.029 mg/L，溶解氧≥9.0 mg/L 达 61 天（88%），甲藻暴发条件具备。≥25℃ 的蓝藻区间由 23 天（19%）增至 36 天（33%），首次达 25℃ 由 7 月 7 日提前至 7 月 2 日。2025 年该区间总磷 0.049 mg/L，接近Ⅲ类限值，超Ⅲ类 15 天，氮磷比值降至 50，高锰酸盐指数 3.26 mg/L、为 2024 年同区间的 3.0 倍，蓝藻风险明显高于甲藻期。

3. 3 氮磷浓度与地表水环境质量标准对比分析

按照地表水环境质量标准（GB3838-2002），可以将实测浓度和标准阈值进行对比来判断风险等级，具体限值见表 2。

表 2 地表水环境质量标准（GB3838-2002）湖、库总氮、总磷标准限值

水质类别	总氮限值（mg/L）	总磷限值（mg/L）
I 类	≤0.20	≤0.010
II 类	≤0.50	≤0.025
III 类	≤1.00	≤0.050
IV 类	≤1.50	≤0.100
V 类	≤2.00	≤0.200

数据来源为地表水环境质量标准 GB3838-2002，湖、库营养物质基准限值。

代入该框架可见，总磷才是决定藻华强度的关键指标。2024 年总磷以 I 类为主（101 天，86%），最高 0.016 mg/L，为 II 类限值的 64%，氮磷比值 324，磷为绝对限制因子；2025 年总磷升至 0.012~0.110 mg/L，超 II 类 60 天（55%）、超 III 类 24 天，氮磷比值降至 81。两年总氮均值分别为 1.97mg/L、2.01mg/L，均大于或等于 V 类限值，氮素长期富余，防控重点应转向磷的削减。

3.4 溶解氧过饱和与高锰酸盐指数对藻华强度的印证

预警监测中水华日溶解氧 ≥ 9.0 mg/L的占83%和86%、最高19.36 mg/L, 可作快速识别指标。2024年溶解氧均值7.05 mg/L, ≥ 9.0 mg/L仅1天, 与水温负相关($r=-0.74$), 无光合叠加; 2025年升至15.48 mg/L, ≥ 9.0 mg/L达97天(89%), 5月16日至8月9日连续78天过饱和, 峰值25.0 mg/L, 与水温转为正相关($r=0.45$), 光合产氧已压倒物理溶解效应。同期高锰酸盐指数由0.92升至2.38 mg/L, 与水温相关系数0.69, 为各项最高。

藻华演进分为四个阶段, 5月上旬水温刚过20℃, 溶解氧正常, 为启动期; 5月中到6月下旬水温稳定在20~25℃, 溶解氧升至14.0~19.0 mg/L, 总磷升至0.029 mg/L, 对应甲藻期; 7月上旬水温超过25℃, 溶解氧达到峰值20.2 mg/L, 进入蓝藻期; 7月下旬到8月中旬水温下降, 总磷达到0.069~0.083 mg/L, 高锰酸盐指数达到3.94~4.41 mg/L, 生物量积累并开始衰亡释放, 嗅味和藻毒素风险最高, 是应急管控的重点。各个指标逐旬变化过程如图1所示。

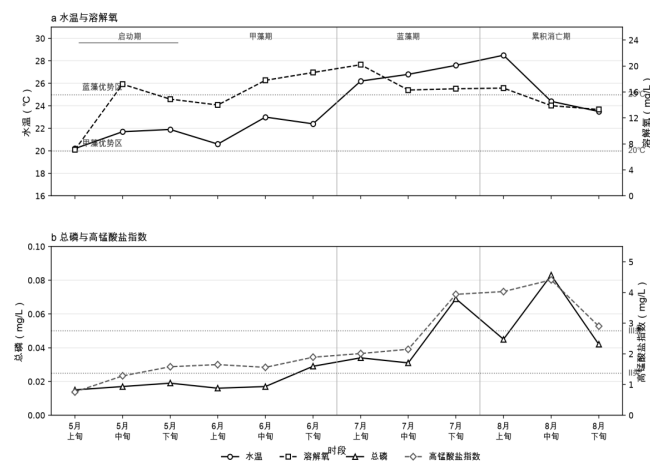


图1 为2025年夏季朱津滩(天龙湾)断面主要水质指标逐旬变化图

4 藻华暴发的防控技术对策

4.1 源头减排与面源污染阻控

源头减排要从种植、施肥开始, 在库周缓冲带上推行测土配方施肥, 控制化肥用量, 削减雨季径流氮磷流失。沿岸生活污水应全部收集, 分散农户用人工湿地预处理。支流入口处设拦截带, 用芦苇、香蒲来削减入库负荷。坡耕地采用等高种植方式减缓径流, 养殖区实行粪污资源化利用^[3]。

4.2 生态调控与原位控藻技术

库区可以依地形布置生态浮床, 吸收溶解态氮磷, 给浮游动物提供栖息地, 抑制藻类^[4]。在藻华高发的库湾投放鲢、鳙等滤食性鱼类来控制藻类生物量。对聚集的水域可以采用超声波除藻或者改性粘土絮凝应急处理。

4.3 水动力调度与分层破坏技术

水体分层是藻华暴发的诱因之一。藻华高发期增大下泄流

量, 可以加强垂向交换, 削弱表层高温区, 在敏感区设置扬水曝气装置, 把底层低温水提升到表层混合, 破坏温跃层, 抑制藻类在表层富集。

4.4 沉积物内源污染治理技术

对库湾底泥磷释放可以采用原位钝化和生态清淤相结合的方式。钝化技术投加铝盐、铁盐或者改性矿物材料, 和活性磷酸盐结合成稳定的沉淀, 施工周期短、扰动小。

5 长效监管体系构建与应急响应机制

5.1 常态化监测预警体系建设

库区于干流、支流汇入口及库湾敏感区布设监测断面, 加密监测总氮、总磷等指标, 高风险区每周监测, 并辅以遥感巡查。依据水温设置两级预警, 以实测水温作为启动判据, 到达对应阈值后加密相关指标监测、开展现场巡查并预置应急物资。

5.2 部门协同与应急处置机制

统筹生态环境、水利、农业农村等部门搭建联动体系, 厘清溯源、应急、评价各环节职责。指标超阈值即启动预案, 开展核查控藻、溯源限排; 汛前组织会商, 统筹防控与调度工作。

6 结束语

库区夏季藻华由氮磷输入、水温分层和高温光照共同驱动, 总磷是决定强度的主要因素。只有创建起“源头减排-生态调节-水动力改善-长久监管”的综合体系, 才能削减暴发危险, 保证饮用水源地的安全。两年对比可知, 总氮不变, 总磷由0.007 mg/L变为0.035 mg/L, 氮磷比由324变为81, 过饱和天数由1天变为97天, 磷负荷削减优先级最高; 水温20~25℃和 ≥ 25 ℃分别对应甲藻和蓝藻的暴发窗口, 防控要按水温分级启动。

参考文献

- [1] 姚金忠, 范向军, 杨霞, 等. 三峡库区重点支流水华现状、成因及防控对策[J]. 环境工程学报, 2022, 16(6): 2041-2048.
- [2] 杨震, 张会强, 陈静, 等. 不同氮磷比对比北洛河中藻类生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(9): 2069-2076.
- [3] 王耀耀, 徐涛, 崔玉洁, 等. 神农溪水体季节热分层特征及其对水华影响[J]. 水生生态学杂志, 2020, 41(4): 19-26.
- [4] 刘永豪, 刘杨文, 杨德, 等. 好氧脱氮菌剂强化生态浮岛——一种饮用水源水体氮素微污染应急修复技术[J]. 防化研究, 2026, 5(2): 47-58.

作者简介:

杨昭(1986—), 男, 白族, 云南大理人, 本科, 环保工程师, 研究方向: 环境监测分析及质控分析。

袁婷(1998—), 女, 土家族, 湖北宜昌人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 环境监测。

王玉影(1996—), 女, 土家族, 湖北宜昌人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 环境监测。

李利平(1996—), 男, 土家族, 湖北长阳人, 本科, 初级职称, 研究方向: 环境监测。