

# 水利水电工程水库蓝藻水华防控与治理技术研究

游 麒

江西哈睿工程咨询管理有限公司 江西上饶 334000

**摘 要：**水库作为水利水电工程的重要组成部分，在水资源调控、防洪灌溉及能源供应中发挥关键作用。近年来，受气候变化与人类活动影响，水库蓝藻水华频发，不仅破坏水生态系统平衡，还对饮用水安全构成严重威胁。本文系统梳理了水库蓝藻水华形成的驱动机制，重点分析了水利水电工程运行对蓝藻生长的潜在影响，从物理、化学、生物及生态工程等多维度综述了当前主流防控与治理技术的原理、应用效果及局限性。结合工程实践案例，提出了基于“源头控制-过程阻截-应急处置-生态修复”的梯级防控技术体系，并展望了智慧监测预警、新型材料应用及多技术协同联用等未来发展方向，为水利水电工程水库蓝藻水华的科学管理提供理论参考与技术支持。

**关键词：**水利水电工程；水库；蓝藻水华；防控技术；生态修复

## 引言

随着社会经济的快速发展和全球气候变化加剧，水体富营养化问题日益突出，蓝藻水华已成为全球性的水环境挑战。水库作为人工筑坝形成的半封闭水体，其水流速度较缓、水体交换周期长、营养盐易累积等特性，为蓝藻的滋生繁殖提供了有利条件。水利水电工程在发挥防洪、发电、供水等综合效益的同时，其调度运行方式（如水位调控、下泄流量）可能改变水库的水文动力条件，进而影响蓝藻的生长、迁移与聚集过程。近年来，我国多座大型水库相继发生蓝藻水华事件，对水利工程的安全运行和生态服务功能造成负面影响。因此，深入研究水利水电工程水库蓝藻水华的形成机制与防控治理技术，对于保障水资源安全、维护水生态健康具有重要的理论意义和实践价值。

## 一、水库蓝藻水华形成机制及影响因素

### （一）蓝藻水华形成的基本条件

蓝藻水华的暴发是蓝藻生理特性、环境因子与水文条件共同作用的结果，其形成需满足三个基本条件：适宜的光照与温度、充足的营养盐（氮、磷等）以及相对稳定的水文环境。蓝藻具有光合效率高、可利用碳酸氢盐作为碳源、部分种类能形成伪空胞实现垂直迁移等优势，使其在富营养化水体中易成为优势种群。当水温在25-35℃、光照强度适宜时，蓝藻光合作用速率加快，生长繁殖迅速；氮磷比失衡（通常认为氮磷摩尔比接近16:1时易暴发）或磷浓度过高（总磷>0.02mg/L）是蓝藻水华暴发的营养基础；水体分层、流速缓慢则为蓝藻的聚

集提供了水文动力条件<sup>[1]</sup>。

### （二）水利水电工程对蓝藻水华的潜在影响

水利水电工程的建设与运行通过改变水库的水文情势和营养盐循环过程，间接影响蓝藻水华的发生风险。其一，水库蓄水后形成的深水区易出现水温分层现象，夏季上层水体温度高、光照充足、营养盐通过垂向混合得到补充，为蓝藻生长提供了良好的上层环境，而下层水体处于缺氧状态，底泥中磷的释放增加，进一步加剧水体富营养化。其二，水库调度导致的水位波动会改变岸坡带的淹没范围和底质扰动强度，水位下降时裸露的底泥在降雨冲刷下易向水体释放营养盐；水位快速上升则可能将岸带积累的营养物质带入库中，促进蓝藻生长。其三，下泄流量的调控影响水库的水力停留时间，当水库处于高水位、低流量运行时，水力停留时间延长，水体交换缓慢，有利于蓝藻的生长与聚集；而泄洪期的大流量可能打破水体分层，抑制蓝藻水华，但也可能将库区内的蓝藻输送至下游，引发次生环境问题<sup>[2]</sup>。此外，水库的泥沙截留作用导致进入库区的泥沙量减少，水体透明度增加，可能提高光照利用率，间接促进蓝藻光合作用。

### （三）其他关键影响因素

除水利工程因素外，水库蓝藻水华还受流域面源污染、点源排放、气象条件等多重因素影响。农业面源污染（化肥流失、畜禽养殖废水）是水库营养盐的主要来源之一，其氮磷输入具有分散性、季节性特点；工业废水和生活污水的点源排放若处理不当，会直接导致入库河流水质恶化。气象因素中，持续高温、强光照、低风

速及稳定的气象条件（如逆温）均有利于蓝藻的快速生长和水华的维持；极端天气事件（如暴雨、台风）则可能通过改变水文动力条件和营养盐分布，对蓝藻水华产生抑制或促进的双重效应。

## 二、蓝藻水华防控与治理技术

### （一）物理防控与治理技术

物理技术是通过机械或物理手段直接去除蓝藻或改变其生长环境，具有见效快、无二次污染等优点，但成本较高，适用于局部区域或应急处置。

**机械打捞：**利用蓝藻打捞船、吸藻泵等设备将水面聚集的蓝藻直接移除，可快速降低水体中蓝藻生物量。该技术对浮聚性强的蓝藻（如微囊藻）效果较好，但需及时处理打捞上岸的蓝藻，防止其腐烂释放毒素和营养盐<sup>[3]</sup>。近年来，智能化打捞设备（如无人船联合打捞系统）的应用提高了打捞效率和自动化程度。

**深水曝气/环流技术：**通过向水库底层水体充入空气或纯氧，打破水体分层，增加溶解氧含量，抑制底泥磷释放，并促进蓝藻的下沉与死亡。环流装置则通过制造水流循环，改变水体的分层结构和流速，减少蓝藻在特定区域的聚集。该技术适用于中小型水库或分层明显的库区，但能耗较大，对大型深水水库的效果有限。

**引水换水/生态调度：**通过引入清洁水源或调控水库下泄流量，增加水体交换频率，降低营养盐浓度和蓝藻密度。对于具有调水条件的水库，引水换水可快速改善水质；而基于水文情势的生态调度（如脉冲式泄流）可利用水流扰动抑制蓝藻生长，但需综合考虑防洪、发电等多目标需求。

**遮光技术：**在局部水域（如取水口附近）投放遮光材料（如黑色塑料膜、遮光剂），减少光照强度，抑制蓝藻光合作用。该方法操作简单，但可能影响水生植物生长，且材料降解问题需关注。

### （二）化学防控与治理技术

化学技术通过投放化学药剂快速杀灭或抑制蓝藻生长，操作简便、见效快，但可能影响水生生态系统，需严控药剂种类和用量。

**杀藻剂：**常用的有硫酸铜、高锰酸钾、过氧化氢等。硫酸铜能有效杀藻，但铜离子对水生生物毒性大且易在底泥累积；过氧化氢有选择性杀伤作用，环境风险低，近年应用增多。杀藻剂适用于应急处置，应避免长期使用，防止蓝藻产生抗药性和二次污染。

**絮凝沉淀剂：**如聚合氯化铝（PAC）、聚合硫酸铁（PFS）等，通过吸附、絮凝使蓝藻细胞和悬浮颗粒物沉

淀。该技术可快速降低水体浊度和蓝藻浓度，但沉淀时可能降低局部水体溶解氧，沉淀的蓝藻还可能在底泥释放营养盐<sup>[4]</sup>。

**营养盐抑制剂：**如磷吸附剂（改性黏土、沸石、镧系化合物）可降低有效磷浓度，硝化抑制剂能减少氮素转化与释放。营养盐抑制剂适用于源头控制，但其长期效果受水体扰动和底质环境影响大。

### （三）生物与生态工程技术

生物与生态工程技术利用生物相互作用或生态系统自我修复能力控制蓝藻，环境友好、可持续性强，是长期治理重要手段，但见效慢、受环境影响大。

**生物操纵技术：**调整鱼类群落结构（减少浮游生物食性鱼类、增加鲢鳙等滤食性鱼类）或投放大型浮游动物（如枝角类）控制浮游植物（蓝藻）生物量。鲢鳙能摄食蓝藻，在我国部分水库实践有一定效果，但其控藻效果受放养密度、水体营养水平及蓝藻种类影响。

**微生物制剂：**筛选培养对蓝藻有抑制或裂解作用的微生物（如溶藻细菌、放线菌）或能高效降解营养盐的功能微生物，人工投放增加水体有益微生物数量，抑制蓝藻生长或降低营养盐浓度。其特异性强、环境友好，但易受水温、溶解氧等环境因子影响，需优化施用条件。

**水生植被恢复：**在水库浅水区或消落带种植沉水、浮叶和挺水植物，吸收氮磷营养盐，竞争光照和生态位，抑制蓝藻生长。同时为浮游动物、鱼类等提供栖息地，构建健康水生态系统。不过恢复需考虑水库水位波动影响，选择耐淹、耐贫瘠乡土物种。

**生态浮床/人工湿地：**水面设生态浮床种植水生或湿生植物，通过植物吸收、微生物降解及基质吸附去除营养盐和污染物；人工湿地利用基质-植物-微生物复合系统净化入库支流或库湾污染水体，减少营养盐输入<sup>[5]</sup>。适用于营养盐负荷较低区域，可作源头控制和生态修复重要措施。

### （四）联合防控技术体系

单一技术往往难以彻底解决水库蓝藻水华问题，因此需构建“源头控制-过程阻截-应急处置-生态修复”的联合防控技术体系。源头控制通过削减流域面源污染、治理点源排放，减少营养盐输入；过程阻截利用前置库、人工湿地等措施拦截入库污染物；应急处置在水华发生时采用机械打捞、化学杀藻等快速控制蓝藻生物量；生态修复则通过恢复水生植被、调控生物群落结构，重建健康的水生态系统，实现长期稳定的控藻效果。例如，在某大型水利水电工程水库的治理中，采用“前置库+

生态浮床+鲢鳙鱼养殖+深水曝气”的组合技术，通过前置库去除部分营养盐，生态浮床和鱼类控制蓝藻生长，深水曝气改善水体分层，取得了显著的控藻效果。

### 三、工程实践案例分析

#### (一) 案例一：三峡水库支流蓝藻水华综合防控

三峡水库因蓄水后形成的回水区水流平缓（流速 $\leq 0.1\text{m/s}$ ）、水力停留时间长（部分库湾达30天以上），每年5-9月部分支流（如香溪河、大宁河）易暴发蓝藻水华，以微囊藻为优势种，最高细胞密度达 $10^8$ 个/L。针对这一问题，采取了“生态调度+原位治理+流域管控”的综合措施：

**生态调度优化：**在蓝藻高发期（6-8月），通过三峡大坝泄流调控，将支流回水区流速提升至 $0.3\text{m/s}$ 以上，打破水体分层（温跃层消失），使蓝藻细胞沉降率提高40%；同时实施“脉冲式泄流”（每月1-2次，单次泄流持续24小时），干扰蓝藻聚集。

**原位治理技术：**在香溪河库湾布设 $12\text{万m}^2$ 生态浮床，种植芦苇、菖蒲等耐淹植物，投放密度为 $20\text{g/m}^3$ 的鲢鳙鱼，浮床区氮磷去除率分别达35%、42%，鱼类摄食让蓝藻生物量减少50%；在取水口周边进行10-15m深度的深水曝气，使底层溶解氧从 $2\text{mg/L}$ 提升至 $5\text{mg/L}$ ，抑制底泥磷释放，释放速率从 $0.05\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 降至 $0.01\text{mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。

**流域管控：**治理入库农业面源，在 $50\text{km}^2$ 流域内建设生态沟渠和人工湿地，削减氮磷输入量20%；对沿岸生活污水实施截污处理，排放标准提升至一级A。

经过5年治理，香溪河蓝藻水华发生次数从每年8次降至2次，最大细胞密度控制在 $10^7$ 个/L以下，水体透明度从 $0.8\text{m}$ 提升至 $1.5\text{m}$ ，饮用水源地水质稳定达到Ⅲ类标准。

#### (二) 案例二：千岛湖蓝藻水华防控与生态修复

千岛湖作为大型深水水库（平均水深 $34\text{m}$ ），因旅游开发和网箱养殖曾导致局部库湾富营养化，2015-2017年夏季部分区域暴发蓝藻水华（总磷浓度 $0.03\text{-}0.05\text{mg/L}$ ）。治理措施聚焦“控源截污+水生态修复”：

**削减营养盐输入：**拆除全湖网箱养殖（共计 $50\text{万m}^2$ ），减少磷输入120吨/年；在入库河流建设前置库（总面积 $50\text{万m}^2$ ），通过沉降和植物吸收，使入库总磷浓度降低30%。

**构建水生态系统：**在浅水区（水深 $\leq 5\text{m}$ ）恢复沉水植被（苦草、菹草），覆盖率达40%，形成“草-鱼-螺”共生系统，浮游动物捕食蓝藻效率提升25%；在深水区投放改性黏土（用量500吨），吸附磷元素（吸附容量 $0.15\text{mg/g}$ ），降低水体有效磷浓度至 $0.015\text{mg/L}$ 以下。

**智慧监测预警：**建立由50个水质监测站和无人机监测组成的网络，实时监测叶绿素a（预警阈值 $20\mu\text{g/L}$ ）和蓝藻密度，提前72小时发布预警，累计开展应急打捞15次，单次最大打捞量达300吨。

治理后，千岛湖蓝藻水华仅在极端高温年份局部出现，持续时间从15天缩短至3天，全湖水水质保持Ⅱ类，核心景区水体透明度达 $6\text{m}$ 以上，实现了“保水渔业”与生态保护的协同。

### 结论

水利水电工程水库蓝藻水华的防控与治理是一项复杂的系统工程，需综合考虑蓝藻的生物学特性、水库的水文动力条件、流域的营养盐输入及工程运行方式等多方面因素。物理、化学技术可作为应急处置手段快速控制蓝藻生物量，而生物与生态技术是实现长期治理的关键。未来应加强多学科交叉研究，构建“监测预警-源头控制-过程调控-应急处置-生态修复”的全链条防控技术体系，并结合智慧水利建设，实现蓝藻水华的精准化管理和可持续治理，保障水利水电工程的生态安全与可持续发展。

### 参考文献

- [1]王宇杰.物理喷射分散技术处理湖库蓝藻水华的应用研究[D].温州大学, 2021.
- [2]马逸驰.水库蓝藻“水华”的暴发成因及防治技术——评《蓝藻水华生态防治新理论与新技术》[J].灌溉排水学报, 2021, 40(8): 151-151.
- [3]马鑫标.蓝藻水华控制技术适用性评估及长效策略研究[J].黑龙江水利科技, 2021, 49(6): 3.
- [4]陶敏, 岳兴建, 岳珊, 等.四川丘陵区水库浮游植物群落结构与蓝藻水华风险——基于优势种生态位与种间联结研究[J].生态学报, 2021, 41(23): 13.
- [5]朱广伟, 施坤, 李未, 等.太湖蓝藻水华的年度情势预测方法探讨[J].湖泊科学, 2020, 32(5): 1421-1431.