

蓝藻围隔与加压控藻协同技术的湖泊治理应用研究

赵春 朱毅平 蒋超 祁欢
宜兴市公用投资管理有限公司
DOI:10.32629/eep.v9i3.3132

[摘要] 针对浅水湖泊蓝藻水华防控难题,以太湖西岸宜兴近岸区域治理工程为案例,系统研究蓝藻围隔与加压控藻协同技术的工程应用。在分析项目区水域环境特征与治理难点的基础上,明确围隔物理拦截与加压灭活分离的技术原理及协同机制,系统介绍近岸围隔防线布设、控藻单元装配、作业参数设定、藻情实时监测及工序质量控制等关键环节。应用结果表明,该协同技术可高效拦截并灭活蓝藻、显著降低湖泛风险,为富营养化湖泊蓝藻治理提供可行路径。

[关键词] 蓝藻围隔; 加压控藻; 协同技术; 湖泊治理; 水华防控
中图分类号: P343.3 **文献标识码:** A

Research on the application of collaborative technology of blue-green algae enclosure and pressurized algae control in lake governance

Chun Zhao Yiping Zhu Chao Jiang Huan Qi
Yixing Public Investment Management Co., Ltd.

[Abstract] In view of the difficult problem of prevention and control of cyanobacteria bloom in shallow lakes, the engineering application of the collaborative technology of cyanobacteria enclosure and pressure algae control was systematically studied by taking the Yixing nearshore area treatment project on the west bank of the Taihu Lake as a case. On the basis of analyzing the characteristics of the water environment in the project area and the difficulties in governance, clarify the technical principles and collaborative mechanisms of physical interception and pressurized inactivation separation in the enclosure, and systematically introduce key links such as the layout of nearshore enclosure defense lines, assembly of algae control units, setting of operating parameters, real-time monitoring of algae conditions, and process quality control. The application results show that this collaborative technology can efficiently intercept and inactivate blue-green algae, significantly reduce the risk of lake flooding, and provide a feasible path for the management of blue-green algae in eutrophic lakes.

[Key words] blue-green algae enclosure; Pressure controlled algae; Collaborative technology; Lake management; Prevention and control of algal blooms

引言

蓝藻水华暴发是富营养化湖泊面临的突出环境问题,严重影响了水体生态功能与供水安全^[1]。太湖作为我国典型浅水湖泊,其西沿岸区域受入湖污染负荷及湖流影响,蓝藻聚集频繁,局部水域存在间歇性湖泛风险。传统的机械打捞和化学除藻技术,存在处置效率低、二次污染风险高等局限^[2]。近年来,物理围隔与加压控藻技术的集成应用逐渐受到关注,前者可实现蓝藻高效拦截与导流,后者则能对聚集藻类进行快速灭活与泥水分离,二者协同能够形成“拦截—聚集—处置”的治理闭环。开展蓝藻围隔与加压控藻协同技术的工程应用研究,对于提升湖泊蓝藻水华防控能力、降低湖泛发生风险、保障区域水生态安全具有重要的现实意义。

1 区域基本情况

1.1 工程概况

湖泊治理工程位于宜兴市周铁镇、新庄街道及丁蜀镇沿岸水域,是太湖蓝藻水华暴发最为频繁的区域之一。该区域岸线长度约18.6km,水域面积约32.5km²,属太湖竺山湖与西部沿岸带的交汇区。为应对蓝藻水华与湖泛风险,工程部署了蓝藻围隔与加压控藻协同治理系统,主要在符渎港、官渎港、庙渎港等蓝藻多发区近岸水域布设总长约4.5km的复合围隔防线;同步配置200m³/h处理能力加压控藻船2艘,配套藻浆输送管道及尾水净化单元,形成拦截、聚集、处置一体化作业能力。工程工期为8个月,可实现重点区域蓝藻常态化防控与应急处置全覆盖。

1.2 水域环境特征及治理难点

太湖西沿岸水域属典型浅水湖泊环境,平均水深约1.2~1.5m,水流缓慢,流速低于0.2m/s。受东南季风影响,夏秋季蓝藻易在近岸带大量聚集,形成高密度藻浆积聚区。监测数据显示,该区域夏秋季藻类密度峰值超过5000万个/升,叶绿素a浓度常高于30 μg/L,局部水域存在间歇性湖泛风险。区域水体处于中度富营养化状态,入湖河道携带的外源污染物与底泥内源释放叠加,为蓝藻暴发提供了持续的营养盐供给。该区域受风向、湖流等水文气象因素影响,蓝藻聚集位置与强度动态变化显著,传统固定式治理设施难以适配其迁移特性;加之近岸水深较浅,大型作业船舶与常规打捞设备无法正常作业,存在明显治理盲区。蓝藻暴发窗口期短,从出现到形成高密度聚集仅需数小时,对治理系统的响应速度与处置效率提出极高要求,需通过技术集成形成系统性的解决方案^[3]。

2 蓝藻围隔与加压控藻协同技术基础

2.1 蓝藻围隔技术

蓝藻围隔是基于浅水湖泊水动力与藻类迁移规律的物理拦截技术,通过在水体中布设柔性围隔结构,实现对蓝藻漂移路径的拦截与导向^[4]。围隔系统对蓝藻的作用主要基于两类物理机制,一是直接拦截机制,当藻类随水流迁移至围隔位置时,因围隔材料的阻隔作用被阻滞于上游侧;二是导流聚集机制,通过优化围隔布设角度与走向,引导蓝藻沿围隔方向运动并逐步汇聚至指定作业区域,为后续处置创造条件。

2.2 加压控藻技术

加压控藻技术是通过机械加压方式对蓝藻藻浆进行快速处置的物理化学耦合工艺。其核心原理是利用压力突变破坏蓝藻细胞的气囊结构,使其丧失漂浮能力,同时结合絮凝沉淀实现藻水分离。加压控藻系统主要由藻浆抽吸单元、压力反应罐、絮凝投药单元及泥水分离单元组成。在适宜压力区间内,藻类灭活率随压力与保压时间提升而提高,该技术可在无化学药剂添加条件下实现藻体无害化处置,有效避免二次污染风险^[5]。

2.3 围隔-加压协同技术原理

围隔-加压协同技术是将物理拦截与机械处置两种技术手段进行系统集成的治理模式。围隔系统承担拦截与聚集功能,将漂移的蓝藻有效阻滞在特定作业区域;加压控藻系统承担处置与消减功能,对聚集区内的蓝藻进行快速灭活与泥水分离^[6]。该协同技术的整体处置效率取决于围隔拦截效率与加压处置效率的乘积关系,计算公式如式(1):

$$E_t = E_b \times E_p \times \varphi \quad (1)$$

式中, E_t 表示协同系统综合处置效率; E_b 表示围隔系统对漂移蓝藻的拦截效率; E_p 表示加压控藻系统对拦截藻浆的处置效率; φ 为协同系数,反映拦截与处置两个环节的时空衔接程度,取值范围为0.8~0.95。通过建立拦截区藻量累积速率与加压处置能力的平衡关系,可实现蓝藻治理的连续高效运行。

3 协同技术实施流程与控制要点

3.1 布设近岸围隔防线

近岸围隔防线采用垂直全封闭柔性结构,沿湖泊近岸蓝藻高发区段布设。围隔主体采用高强度HDPE防渗膜,结构由浮体装置、防渗膜体、底部配重及锚固系统组成,具体构造如图1所示。

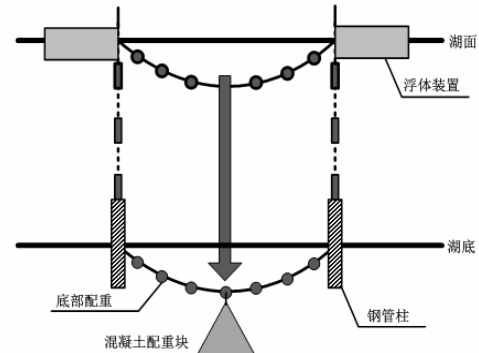


图1 围隔结构剖面图

施工依据设计定位完成钢管桩施打,间距控制为5m,风浪扰动区加密至3m。防渗膜体沿桩列展开,顶部与浮体装置连接,确保膜体露出水面0.6m,抵御风浪越境。底部配重链条与混凝土配重块沉放至湖底,膜体嵌入湖底0.8m,实现与湖底无缝贴合^[7]。围隔单元间采用热熔焊接搭接,焊缝强度不低于母材的80%,接缝处设置双重密封层,岸端采用现浇混凝土块锚固,埋深1.2m,满足抗拔与抗冲刷要求。通过平面位置、垂向封堵深度以及锚固间距的精准控制,围隔可在动态水流条件下保持连续拦截能力,为后续加压控藻提供稳定的藻浆供给。

3.2 装配加压控藻单元

加压控藻单元采用模块化集成设计,由藻浆抽吸、压力反应、絮凝沉淀及尾水净化四个模块构成。藻浆抽吸采用变频调节螺杆泵,额定流量200m³/h,扬程60m,吸口配备格栅除杂装置,可拦截粒径大于5mm的漂浮物。压力反应模块核心为不锈钢压力反应罐,设计承压1.0MPa,有效容积8m³,罐内设置导流板与曝气搅拌装置,保障藻浆均匀受压。絮凝沉淀采用竖流式沉淀池,表面负荷0.8m³/(m²·h),配套自动投药系统,选用聚合氯化铝与聚丙烯酰胺复合配方。尾水净化模块集成砂滤与活性炭吸附单元,处理能力与加压单元匹配,确保出水达标排放。

各模块采用快接法兰与柔性软管连接,装配时间控制在8h以内,具备快速转场作业能力。加压控藻单元的处理能力采用处置效率公式,如式(2):

$$Q_p = \frac{V_r \times n \times \eta_p}{t_r} \quad (2)$$

式中, Q_p 表示加压单元实际处置能力; V_r 为反应罐有效容积; n 为单罐日处理批次,按连续运行24批次/d计; η_p 为时间利用系数; t_r 为单批次平均反应时间,包括进料、加压、保压、排料等工序。通过上述模块化装配与参数校核,加压控藻单元可实现与围隔拦截能力相匹配的快速处置,为协同系统稳定运行提供设备保障。

3.3 设定协同作业参数

工程实践中,围隔有效拦截宽度依据蓝藻高频聚集区范围设定为300~500m,拦截深度取围隔水下部分实际高度1.2~1.5m,湖流流速取现场实测值0.1~0.2m/s。上述参数组合下,围隔拦截通量稳定在150~200m³/h区间,与加压单元额定处置能力160~200m³/h处于同一量级,满足协同匹配的流量平衡要求。

依据蓝藻从漂移聚集到形成高密度藻浆的演变规律,作业响应时间控制上限设定为24h,高藻期加密至12h以内,确保拦截区藻量累积不超过加压单元日处置能力上限。协同作业频次依据藻情预警等级动态调整,轻度预警时每日作业2次,中度预警时增至3次,重度预警时提升至4次,实现处置强度与藻情风险等级的精准匹配。协同作业参数需根据水文气象条件与藻情监测数据进行动态修正,维持拦截与处置的动态平衡。

3.4 实时监测藻情数据

藻情监测采用“定点监测+移动巡检”相结合的模式,实现了蓝藻分布、浓度及水质指标的全方位、全天候监测。定点监测在围隔拦截区、藻体汇聚区及加压单元进出口布设监测点位,配备在线监测设备,实时采集藻类密度、叶绿素a浓度、pH值及溶解氧等关键指标,监测频率为1h/次,高藻期加密至30min/次。移动巡检采用监测船搭载便携式监测仪器,沿围隔防线及近岸水域巡回监测,补充定点监测盲区,每日完成1次全区域覆盖巡检。

监测数据实时传输至中控系统,建立藻情预警阈值,当藻类密度超过3000万个/L时触发预警,自动推送信号至作业单元,指导调整协同作业参数。同时定期对监测数据进行整理分析,掌握蓝藻迁移规律与生长趋势,为协同作业参数优化、治理效果评估提供数据支撑,保障治理系统精准响应藻情变化。

3.5 工序衔接质量控制措施

蓝藻围隔与加压控藻协同系统涉及多道工序,其衔接质量将直接影响湖泊治理效能,针对各工序接口环节设定质量控制点如下:

(1)围隔布设→藻情监测:围隔布设完成后进行水下探摸与视频巡检双重复核,确认围隔无破损、接缝无渗漏、锚固稳定后方可接入监测系统。(2)藻情监测→作业调度:重点控制预警信息的传递时效,实时上传监测数据,预警推送延迟不超过5min,数据链路采用双通道备份,主备切换时间控制在1min以内。(3)作业调度→加压处置:加压单元保持24h热备状态,每日开展空载试运行,确保接到调度指令后,启动响应时间不超过30min。(4)加压处置→尾水排放:每批次尾水排放前取样检测,控制悬浮物含量不超过10mg/L、pH值控制在6~9,超标尾水自动回流循环处理。(5)尾水排放→围隔拦截区:尾水回流点远离拦截区,扩散距离不小于200m,经示踪试验验证后方可排放。

在此基础上建立工序衔接质量追溯机制,将操作人员、检测数据及交接时间录入中控系统,形成全流程可追溯档案。每周召开质量分析会,针对衔接环节暴露的问题制定整改措施,持续优化工序接口控制标准,确保协同系统各工序无缝衔接、稳定运行。

4 应用效果分析

为验证蓝藻围隔与加压控藻协同技术的实际治理效果,在太湖西岸宜兴近岸区域开展了为期6个月的连续监测。监测周期覆盖蓝藻暴发高峰期,重点跟踪蓝藻聚集量、水质指标及湖泛风险等关键参数的变化,监测数据显示,协同治理技术投运后拦截区水质指标得到显著改善。围隔设施日均拦截藻类达120~180t,为加压处置提供了稳定的藻浆来源,高藻期加压单元最高日处置量达1850m³,处置能力与拦截通量匹配良好。水体中的藻类生物量得到有效控制,水体自净能力显著增强。湖泛预警天数由月均6~8d降至2~3d,运行期间拦截区未发生明显湖泛现象。实践证明,蓝藻围隔与加压控藻协同技术在太湖西岸宜兴近岸区域的应用达到预期治理效果,验证了该技术在浅水湖泊蓝藻防控中的可行性与适用性。

5 结束语

本文围绕湖泊蓝藻水华防控与水体生态修复需求,系统探索物理围隔与加压控藻协同技术的实践路径。通过明确技术定位、优化参数配置与强化过程管控,构建起“拦截—聚集—处置”的全流程治理体系,实现了防控效能与生态效益的同步提升。未来可进一步结合智能监测与动态调控手段,持续完善治理体系,为保障区域水生态安全、推动水环境治理高质量发展提供更坚实的技术支撑。

[参考文献]

- [1]刘思宇,刘容君.潘家口、大黑汀水库蓝藻水华成因分析及治理策略[J].农村科学实验,2025,(23):48-50.
- [2]朱琳.面向流域的浅水型湖泊蓝藻智能防控技术体系[J].城市道桥与防洪,2025,(09):306-309.
- [3]王震威,李宸,姚思亲.太湖蓝藻治理的湖州智慧从单一控污控藻逐步向协同治理、系统修复转变[J].中国生态文明,2025,(04):22-24.
- [4]周嘉铭,高子昕,黄佳欢.太湖西部水域蓝藻水华驱动因素分析[J].资源节约与环保,2025,(07):98-101.
- [5]蔡梅.芬兰蓝藻水华治理管理对太湖治理的启示[J].水利规划与设计,2024,(11):66-71.
- [6]曹晶,袁静,赵丽,等.湖库蓝藻水华控制技术发展和应用及展望[J].环境工程技术学报,2024,14(02):487-500.
- [7]李静.小塔山水库蓝藻水华的监测分析及防治对策[J].资源节约与环保,2024,(02):96-100.

作者简介:

赵春(1998—),男,汉族,江苏宜兴市人,硕士,工程师,研究方向:防震减灾及防护工程。

朱毅平(1982—),男,汉族,江苏宜兴市人,本科,工程师,研究方向:给排水。

蒋超(1996—),男,汉族,江苏宜兴市人,硕士,助理工程师,研究方向:水利工程。

祁欢(1996—),男,汉族,江苏淮安人,硕士,助理工程师,研究方向:环保工程。