

面向流域的浅水型湖泊蓝藻智能防控技术体系

朱琳

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 蓝藻水华频发严重威胁G湖流域水生态安全与可持续发展。针对现有防控措施单一、协同性不足、长效性差等问题,基于系统工程思想,构建了G湖流域蓝藻水华综合防控技术体系。以“源头减负—过程阻断—末端治理—智慧管控”为核心防控路径,系统整合了流域污染负荷精准削减技术、湖体水动力与生态调控技术、藻华高效应急处置技术以及基于物联网和大数据的智慧监测预警与决策支持技术。同时,强化了跨部门、跨区域协同治理机制与长效管理策略,形成多目标、多层次、多技术协同联动的综合防控网络。体系构建遵循整体性、动态性和可持续性原则,旨在提升G湖流域蓝藻水华防控的系统性、精准性与长效性,为大型浅水湖泊富营养化与藻华治理提供系统性解决方案和技术支撑。

关键词: 流域治理;蓝藻水华防控;智能技术体系

中图分类号: X524

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)09-0306-04

Research into a Basin-Scale Smart Technology System for Cyanobacterial Bloom Prevention and Control in Shallow Lakes

ZHU Lin

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Frequent cyanobacterial blooms pose a severe threat to the water ecological security and sustainable development of the Lake G basin. Addressing the limitations of existing control measures, such as their singular approach, lack of synergy, and poor long-term effectiveness, this paper constructs an integrated technical system for cyanobacterial bloom prevention and control in the Lake G basin, grounded in systems engineering principles. The core framework of this system revolves around the pathway of "source load reduction - process interruption - end-of-pipe treatment - smart management and control." It systematically integrates technologies for precise watershed pollution load reduction, hydrodynamic and ecological regulation within the lake, efficient emergency response for bloom outbreaks, and intelligent monitoring, early warning, and decision support based on the Internet of Things (IoT) and big data. Furthermore, the system emphasizes cross-departmental and cross-regional collaborative governance mechanisms and long-term management strategies, forming a comprehensive prevention and control network characterized by multi-objective, multi-level, and multi-technology synergy. Adhering to the principles of holism, dynamism, and sustainability, the construction of this system aims to enhance the systematization, precision, and long-term efficacy of cyanobacterial bloom control in the Lake G basin. It provides a systematic solution and technical foundation for managing eutrophication and algal blooms in large, shallow lakes.

Keywords: basin governance; cyanobacterial bloom prevention and control; smart technology system

0 引言

太湖流域G湖泊是太湖前置库,湖区面积约173 m²。平均水深约1.2 m,库容1.74 亿 m³。随着周

边区域经济的快速发展和城市化进程的加快,2007年以来G湖从“草型”湖泊彻底退化成了“藻型”湖泊,蓝藻水华暴发成为常态,湖体自净能力下降,总磷超标。2025年北部湖湾蓝藻水华面积占比高达65%,总磷浓度逼近临界值(0.083 mg/L),陷入“污染超载—生态退化”恶性循环。为落实省新一轮太湖治理要求,改变传统治理面临的时空割裂(陆域—湖泊脱节)、人力依赖(打捞成本高)、长效缺失(沉水植被覆盖率低)3大瓶颈。本文基于系统工程方法论,构建“陆域—近岸带—湖泊”三级智能防控体系,采用陆

收稿日期: 2025-08-20

基金项目: 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司科研项目,超大城市关键基础设施及其致灾因子风险研判和韧性提升方法研究(K2025K518)

作者简介: 朱琳(1979—),女,硕士,高级工程师,从事水环境治理、智能装备研发等工作。

域截污,近岸带缓冲,以G湖北部湖区12.8 km²示范区逐步展开试点五维一体无人船集群作业。本文技术体系的主要创新突破在于三级治理链贯通,消除防控盲区实现空间协同;无人船降低打捞成本实现无人化自动作业;藻泥资源化实现长效低成本运维,为中小浅水湖泊治理提供“系统、智能、预警”三合一新范式。

1 G湖现状水质与藻情分析

1.1 水质现状:总磷核心矛盾突出

关键指标:2025年1~7月G湖水域总磷(TP)平均浓度为0.083 mg/L(Ⅳ类水标准限值0.1 mg/L),同比改善24.5%,但仍接近临界值;总氮浓度1.84 mg/L,同比上升12.2%。主要污染物空间分布显示总磷总体呈现出湖河口区高于入湖河口区,受内源影响较大;总氮高值主要分布于入湖河口区,受外源输入影响较大。

水质类别:整体稳定Ⅳ类,但局部湖湾(如入湖河口区)夏季仍波动至Ⅴ类。

时空差异:入湖河口(如HL河、XX河)TP浓度超湖心区40%(见图1),面源输入贡献显著;6~8月高温期TP浓度较非汛期升高35%,与内源释放强相关,G湖北部湖区蓝藻遥感斑块明显(见图2)。

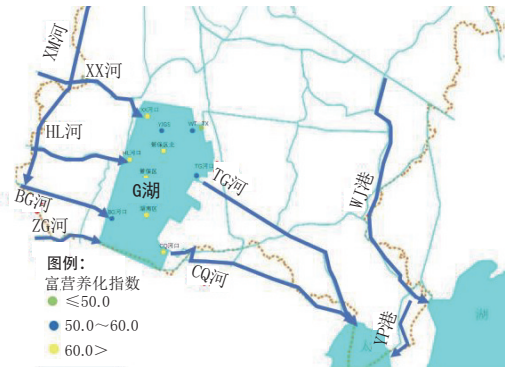


图1 G湖入湖河道富营养化



图2 G湖蓝藻遥感图斑

1.2 藻情特征:打捞量揭示防控压力

G湖蓝藻水华年度暴发期通常在每年的6~9月(水温>25℃+风速<2 m/s),在东南风主导下,藻团向西北湖湾堆积,堆积区藻密度达湖心区3倍。G湖湖体浮游植物枯水期、平水期优势种主要为硅藻门,丰水期为蓝藻门。藻密度呈现枯水期<平水期<丰水期,与富营养化指数变化趋势一致。

自2025年6月19日启动打捞至今,累计处置蓝藻7.7万t(日均打捞量约1 000 t);藻水分离站的日处理能力5 800 t,藻泥制有机肥实现循环利用。

1.3 生物量空间格局:恶性循环标志

浮游植物、动物的丰度基本呈现由中部区域向南北两侧逐渐降低的趋势。沉水植物衰退严重,北部底泥疏浚区水生植物恢复缓慢。底栖动物密度和生物量呈现沿岸带较高,湖心区较低的趋势。北部湖区的沉水植物覆盖率较低,清淤后仅零星分布金鱼藻(耐污种),苦草、黑藻等衰退种未恢复;底质板结硬化(清淤机械碾压),冬芽定植成功率低。

底栖动物在湖湾内部分化显著摇蚊幼虫扰动底泥(加剧悬浮物),清淤区缺乏滤食性贝类(河蚬<20 ind./m²)。

2 G湖蓝藻水华综合防控系统构建

2.1 系统目标体系构建

2.1.1 顶层目标

有效控制蓝藻水华,恢复健康水生态,保障水安全。高水平实现“两保两提”(即:确保饮用水安全、确保不发生大面积水质黑臭,不断提升生态环境治理现代化水平、提高流域防洪保安与水资源配置能力),保障G湖安全。

2.1.2 分解目标

结合G湖流域已实施或计划实施工程,将上述总目标进行分解。

2.1.2.1 控源截污(外源、内源)

G湖蓝藻暴发的根本原因在于外源污染物持续输入与内源污染物的长期累积。外源污染控制是治理的首要环节。

(1)管网溯源排查:针对环湖上游乡镇开展重点地块的系统排查溯源,识别工业、农业及生活污水主要排放口,通过农村污水改造、管网修复、一河一策整治等措施,削减源头污染。

(2)河道生态治理:对主要入湖河道建设生态拦截沟渠、人工湿地及强化污水处理厂提标改造,有效

削减氮、磷等营养盐入湖量。同步实施河口生态拦截工程,在河道入湖口设置沉水植物带或生态滤坝,吸附悬浮颗粒物及溶解性污染物。

(3)近岸带空间塑造:重构湖滨缓冲带,恢复自然岸线,种植芦苇、茭草等湿生植物,形成物理屏障与生物过滤带,阻截面源污染径流。

2.1.2.2 底泥生态清淤

针对污染物富集区域(如河口、港湾),采用环保绞吸式清淤技术,精确移除表层高有机质、高营养盐底泥,避免二次污染。清淤后污泥经污泥捕获槽进行脱水固化与资源化利用。

2.1.2.3 水华过程阻断(发生、扩散)

针对蓝藻水华的发生与扩散机制,实施全过程干预:

(1)藻情监测预警:基于实时气象数据(风速、光照、温度)与水文水动力模型,预测蓝藻上浮集聚趋势。在易发区布设浮标式藻类在线监测仪,结合无人机遥感,构建“空一天一水”立体监测网络,实现敏感易发水域水华发生的早期识别(见图3)。



图3 G湖沿岸无人机机库部署方案

针对蓝藻水华快速变化的特征,拟采用“分区并行、多机协同”的采集策略:多台无人机同时起飞,分片执行正射+倾斜航拍任务;单次全覆盖飞行约20~30个架次,单台机库日均飞行>5架次,每周巡检1~2次。

(2)物理拦截与移除:在主导风向下流的湖湾、取水口等敏感区域,部署V形围隔导流设施与蓝藻捕获槽,通过机械打捞、抽吸等方式及时移除聚集藻体,阻断其扩散路径。在G湖北岸沿岸带,科学设计并分步部署8~10套创新型导流围隔装置(见图4)。该装置能够结合蓝藻水华的漂移规律,采用人工手动操作实现灵活开关,有效收纳蓝藻水华,配合各类型蓝藻打捞设备开展集中打捞,显著提升蓝藻处置的效率和效果。



图4 创新型蓝藻导流围隔布置图

(3)水动力调控优化:利用闸坝调度调节湖体流场,增加水体流动性,破坏蓝藻滞留静水环境所需的稳定条件,抑制水华规模性形成。

2.1.2.4 生态系统修复(结构、功能)

重建健康水生生态系统是遏制蓝藻的治本之策,实施“分片治理、分级实施”策略:(1)沉水植物重建(湖体生态修复核心):选择苦草、狐尾藻等本土优势种,采用“以水养草”原则,先行改善局部水域透明度(通过清淤、控藻提升光照),分区种植沉水植物,逐步恢复“水下森林”。(2)水生动物调控:引入滤食性鱼类(鲢、鳙)控藻,投放螺、蚌等底栖动物促进底质矿化,构建“以渔控藻、以草养湖”的草—鱼—螺共生体系,增强生态系统稳定性。(3)河道与河口生态治理:修复入湖河道植被廊道,恢复河漫滩湿地;河口区构建生态浮岛与深潭—浅滩序列,提升水体自净能力。

2.1.2.5 长效智能运维(监测、预警、响应)

保障治理成效可持续的关键在于构建如图5所示的智慧化管理体系。

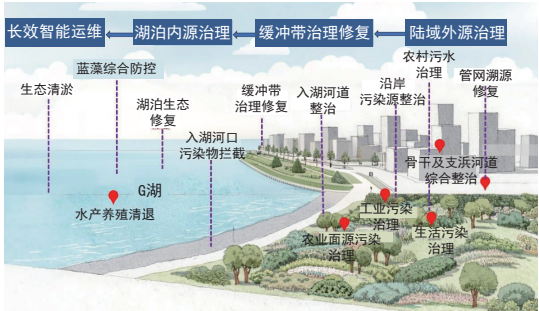


图5 分级实施的协同治理示意图

(1)智能监测平台:集成水质、藻密度、底泥、水文等多源数据,建立G湖数字孪生模型,实现污染物迁移与藻华动态的实时模拟预警。

(2)响应决策支持:基于预警信息,自动生成应

急方案(如增氧、调水、捞藻),并通过物联网设备(自动曝气机、藻水分离站)快速响应。

(3)长效运维机制:制定生态维护标准(如沉水植被覆盖率 $\geq 30\%$),定期评估修复效果;建立“政府—科研—企业”协同运维联盟,确保资金、技术与管理的可持续投入。

2.2 示范区选择与体系部署

2.2.1 选择典型区域

根据最新遥感数据 G 湖北部湖区藻华强度占全湖藻华面积 65%,沉水植被覆盖率较低,自净能力基本丧失;地形适配性:口袋状湖湾(面积 12.8 km²)适合无人机、无人船集群作业,因此考虑 G 湖北部湖区作为示范区域(见图 5)。

2.2.2 聚焦应用的个核心技术组合/模块

2.2.2.1 无人机移动机库监测

该项目重点监测区域为 G 湖北部湖区,主要涵盖京沪高速以北水域,以及 G 湖低碳湿地公园向湖心延伸约 2 km 沿岸水域,总面积约 36 km²。本阶段计划分 3 轮推进:第一轮测试:开展 5 个机库适飞范围测试,识别并排查飞行安全隐患,初步评估各线路的作业效率;第二轮采集:对重点关注区域开展全覆盖飞行,验证图像质量并进行初步数据分析,持续优化航线设计;第三轮联动飞行:组织 5 个机库协同开展同步飞行,评估整体作业流程及业务化落地的可行性。

2.2.2.2 无人船集群作业

打捞作业体系三级优化如下。一级拦截(导流围隔):V 形围隔将藻华导向无人船作业区(占湖湾面积 20%);二级打捞(无人船集群):部署 6 艘无人船,网格化分区(每船负责 2.1 km²),打捞能力日均处理藻水混合物 480 t(折合干藻泥 72 t);三级处置(岸基资源化):藻浆输送至移动式藻水分离站(TP 去除率 $> 85\%$),藻泥制有机肥含水率 $\leq 65\%$,年产量 1 500 t。

2.3 初步结果与体系验证

通过完善“空—水—地”三位一体化体系,搭建湖泊藻类和水质大数据监测平台,提前对蓝藻水华易暴发的区域进行精细化监测,多方面综合研判风险,以实现对蓝藻水华的有效管控。

打捞效率:藻华高峰期湖湾藻密度降幅为 52%(同期未干预区仅降 18%);

生态恢复:作业区透明度由 45 cm 提升至 65 cm,沉水植物新萌发面积 3.2 hm²。

经济收益:藻泥肥料销售额抵减 30% 设备运维成本。

3 结 语

3.1 主要结论

本技术体系以空间协同、过程阻断、智能管控为核心,构建陆域—近岸带—湖泊三级智能防控系统。(1)在控源截污方面,从注重末端治理向源头、过程、末端全过程污染拦截、分段施策转变;(2)在水华阻断方面,从爆发后人工被动发现到空—天—水立体监测巡查主动预警转变;(3)在生态修复方面,从单一控藻向植物—动物—生境全系统构建转变。用智能化装备无人船的使用使打捞成本降低近 5 成,智能平台将响应速度提升 3 倍以上。

此体系已应用于 G 湖北部湖湾 12.8 km²示范区,2025 年有望实现藻华面积减少一半,为中小型浅水湖泊治理提供可复制的“技术—管理—智能”三合一模板。

3.2 建议与展望

建议针对沉水植物定植难,内源释放波动大,无人船功能局限等当前瓶颈,进行装备技术升级,如布设底泥通量实时监测仪;加装藻毒素快检模块等。进一步强化责任,将压实责任与激发活力并举,优化管理机制。

实现现代智慧治藻从感知—决策—执行层面的跃迁。如应用多元光谱智能自动监测站,减少监测盲区;融合气象—水文—生态多源数据,预演不同治理方案成效,用 AI 生成最优打捞路径;无人船集群效率再提升,让执行层从“机械打捞”向机器人作业过渡。

参考文献:

[1] 杨宏业,朱玉东,刘婉蓉,等.滨岸带蓝藻水华无人机探测方法研究[J].环境科学与管理,2024,49(2):113-115.
[2] 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):67-71.
[3] 蔡启佳,马千里,苟婷,等.湖库型水源地蓝藻水华应急处置技术研究进展[J].中国环境科学,2025,45(1):390-405.
[4] 胡月红,张屹,赵芳,等.基于 BP 神经网络的湘江蓝藻水华定量遥感反演模型[J].中国环境监测,2024,40(6):239-248.
[5] 周园,刘元志.基于 HY-1CD 卫星 CZI 数据的蓝藻水华监测研究[J].测绘与空间地理信息,2025,48(1):119-124.
[6] 杨宏业,陈迪,袁云娟,等.蓝藻水华的短期监测预警与防控策略[J].环境科学与技术,2024,47(增刊1):189-197.
[7] 马玉坤,倪利晓,杜存浩,等.青蒿素缓释化感物质在富营养化湖泊中抑藻效果与环境影响研究[J].江苏水利,2025(2):6-10;17.