

滇池蓝藻水华污染监测分析及防控策略研究

汪明珠

昆明市西山区人民政府棕树营街道办事处

DOI:10.32629/eep.v8i12.2991

[摘要] 滇池作为我国高原湖泊的典型代表,近年来蓝藻水华污染问题日趋严峻,破坏了湖泊生态系统稳定性,威胁周边居民生产生活安全。本文聚焦滇池蓝藻水华的污染监测、成因解析及防控策略开展系统研究,揭示其暴发演化规律,提出科学可行的综合治理方案,为滇池蓝藻污染的精准治理与生态修复提供理论依据和实践参考,从而推动湖泊生态环境的改善与可持续发展。

[关键词] 滇池; 蓝藻; 试验; 水华污染; 监测分析; 防控策略

中图分类号: Q958.116 **文献标识码:** A

Monitoring analysis and control strategy of cyanobacterial bloom pollution in Dianchi Lake

Mingshu Wang

Zongshuying sub district office of Xishan District People's Government of Kunming

[Abstract] as a typical representative of plateau lakes in China, the pollution of cyanobacterial blooms in Dianchi Lake has become increasingly serious in recent years, which has damaged the stability of lake ecosystem and threatened the production and life safety of surrounding residents. This paper focuses on the pollution monitoring, cause analysis and prevention and control strategy of cyanobacterial bloom in Dianchi Lake, reveals the law of its outbreak and evolution, and puts forward a scientific and feasible comprehensive treatment scheme, which provides a theoretical basis and practical reference for the precise treatment and ecological restoration of cyanobacterial pollution in Dianchi Lake, so as to promote the improvement and sustainable development of the lake ecological environment.

[Key words] Dianchi Lake; blue-green algae; Tests; Water bloom pollution; Monitoring and analysis; Prevention and control strategy

滇池具有重要的生态、经济与文化价值,对区域气候调节、生物多样性维系等方面发挥着不可替代的重要作用。然而,伴随城市化进程提速与人类活动强度攀升,滇池正面临严峻的蓝藻水华污染问题。蓝藻水华的滋生与暴发,不仅破坏了湖泊生态系统的稳定状态,而且影响居民饮用水安全,同时严重制约沿湖相关产业的健康发展。在此背景下,系统开展滇池蓝藻水华污染的监测技术研发与防控策略制定工作,具有重大且迫切的现实意义与实践价值。

1 滇池蓝藻水华污染基本情况及影响

1.1 蓝藻水华暴发频率与规模。自“九五”以来,滇池作为国家“三河三湖”重点治理水体,历经近30年系统治理,生态修复成效显著。2016年水质由劣V类好转为V类,2018年进一步改善至IV类水质并连续7年稳定保持;2025年水体营养状态已从重度富营养化改善为轻度富营养化。蓝藻水华暴发频次呈明显下降趋势,2023年、2024年及2025年截至11月底分别发生62次、38次和24次。但因水体富营养化状态尚未根本改变,蓝

藻水华仍呈现周年性发生、季节性暴发的特点,5-10月为高发期,7-9月为强度峰值期。暴发时部分近岸水域仍会出现藻体聚集现象,虽未形成全湖连片覆盖,但藻毒素释放仍对生态环境与居民健康构成潜在威胁,蓝藻水华防控工作仍需常抓不懈、久久为功。

1.2 蓝藻水华对滇池生态系统的影响。滇池蓝藻水华大规模暴发后,对湖泊生态系统造成多方面危害。首先,水体溶解氧急剧衰减,蓝藻疯长后大量死亡,残体经微生物分解快速消耗水体有限溶解氧,造成鱼类、底栖生物及浮游动物批量窒息死亡,导致湖泊食物链断裂,滇池生态系统稳定性受损。其次,蓝藻暴发形成的厚层水华覆盖水面,大幅降低水体透明度,阻碍阳光穿透,导致沉水植物光照不足,光合作用显著受抑^[1]。水生植物生长受阻会弱化其对氮磷营养盐的吸收能力,进一步加剧水体富营养化,破坏湖泊生态平衡,降低生物多样性。更关键的是,蓝藻生长过程中释放的藻毒素等有毒物质,会先毒害浮游动物及鱼类幼体,再通过食物链逐级富集,最终可能影响人类健康。

1.3 蓝藻水华对周边社会经济的影响。滇池蓝藻水华连年复发, 不仅严重破坏湖体生态环境, 更给周边社会经济高质量发展埋下多重长期隐患。作为重要的饮用水源地, 滇池蓝藻暴发直接导致取水口水质急剧恶化, 造成藻细胞大量消耗水体溶解氧、藻毒素含量大幅攀升。自来水厂需大幅提升粉末活性炭、臭氧及氯的投加量, 延长水处理流程、推高制水成本, 最终加重居民用水负担。旅游业受冲击更为直观, 夏季湖面被蓝藻覆盖形成绿色浮渣, 腥臭味沿湖扩散至城区范围, 原本热门的观景节点客流锐减, 旅行社订单取消频发, 景区停车场闲置率极高, 导致区域旅游营收大幅下滑。为抑制蓝藻危害, 地方政府每年需投入巨额资金, 用于在线监测浮标布设、应急打捞船舶购置、全天候打捞作业及设备日常运维等工作, 这笔持续增长的蓝藻治理专项支出, 占用了大量财政资源, 成为制约区域经济社会可持续发展的重要瓶颈。

2 滇池蓝藻水华污染分析及多元化监测技术探讨

2.1 蓝藻水华分布规律与影响因素分析。通过整合比对多年连续监测数据, 滇池蓝藻水华的分布特征呈现出显著规律性。在空间上, 湖体北侧、西侧为蓝藻水华成片高发区域。究其原因, 该区域为半封闭水域形态, 水体流通性差, 氮磷等营养盐汇入后易淤积富集, 浓度长期高于湖心及流出区域; 加之冬春季节晴日较多、日照充沛, 为蓝藻光合作用提供了充足能量。同时, 这些区域平均水深较浅, 风浪扰动作用较弱, 蓝藻细胞易在水体表层聚集, 一旦水温适宜即快速增殖, 最终形成肉眼可见的藻毯。在时间上, 滇池蓝藻水华每年集中暴发于5—10月暖季, 7—9月为暴发强度峰值期。此阶段湖体水温持续偏高、日照充足, 叠加滇池本身较高的富营养化水平, 多重条件为蓝藻暴发式生长提供了适宜环境。气象条件对水华迁移扩散影响显著, 风向与风速的变化会改变藻团空间分布, 持续定向风力可将大量蓝藻推送至岸带区域, 形成局部高密度聚集, 显著加剧岸线区域污染防治压力。

2.2 滇池蓝藻水华污染成因剖析。滇池蓝藻水华的反复出现并非由单一因素导致, 而是多重诱因在同一时空维度叠加放大的结果。过去一段时间, 滇池流域人口密度持续攀升, 在经济快速扩张过程中, 大量未达标生活污水、工业废水直排入湖, 导致水体中氮、磷营养盐浓度大幅升高, 为蓝藻生长提供了充足的物质基础。作为典型浅水湖泊, 滇池水体交换能力薄弱, 天然自净能力受限, 营养物质进入湖体后难以排出, 在水体与底泥间循环富集累积, 进一步加剧了富营养化程度, 为蓝藻滋生营造了适宜环境。与此同时, 区域气候变暖、日照时长增加等外部环境因素变化, 显著加快蓝藻繁殖进程, 即适宜的温度与充足的光照条件可大幅提升藻细胞分裂速率, 促使蓝藻在湖面快速聚集形成水华。此外, 农业面源污染的影响同样不容忽视, 流域内农田为追求高产过量施用化肥、农药, 雨季来临时, 地表径流将这些污染物带入滇池, 进一步加重水体营养负荷, 为蓝藻生长补充了新的营养来源。

2.3 监测方法与技术手段。为精准掌握滇池蓝藻水华污染状

况, 需构建多维度、全要素的监测体系。传统监测以现场采样结合实验室分析为核心, 重点监测氮磷营养盐浓度、溶解氧含量及叶绿素水平等关键指标, 通过量化水体富营养化程度反推蓝藻潜在生长阈值, 为污染诊断提供基础且核心的数据支撑。同时, 随着科学技术的持续发展, 卫星遥感技术凭借广覆盖、高时效优势, 已成为滇池蓝藻监测的常规手段。依托过境卫星影像可实现全湖蓝藻水华的全域捕捉, 同步获取水华暴发点位、覆盖面积、污染等级等信息并推送至管理终端, 进一步为区域污染态势判断提供基准, 弥补了传统采样在大尺度监测中的覆盖局限与时效滞后问题, 提升了防控决策的科学性。无人机监测作为新兴补充技术, 兼具轻便灵活、高分辨率的特性, 解决了人工巡查与卫星遥感在空间分辨率和数据时效性上的不足。无人机可抵近湖湾、河口等水华高发区域, 在距藻团十余米处完成近距离拍摄与采样, 在数分钟内反馈叶绿素浓度、藻华厚度等参数, 为应急防控争取决策时间^[2]。通过构建无人机航拍、地面传感器与卫星遥感的数据链, 监测实现从单点到全局、从固定时段到全天候滚动更新的跨越, 融合微观藻细胞扩散与宏观水域漂移监测, 为滇池蓝藻水华的科学防控与精准治理筑牢技术根基。

3 滇池蓝藻水华污染的防控策略

3.1 削减外源污染负荷。要从根本上有效遏制滇池蓝藻水华, 关键在于阻断营养物质入湖通道。其一, 需强化流域污水处理设施建设与运营管理。一方面加大投入, 加密污水处理设施布局、推进现有设施扩容升级, 同步引入先进脱氮除磷工艺, 确保生活污水与工业废水排放前实现氮、磷浓度精准削减; 另一方面健全运营管理体系, 规范日常巡检制度、完善在线监测网络、细化故障应急处置流程, 保障设施长期稳定运行, 从源头减少营养盐入湖量。其二, 需严格控制农业面源污染。推进农业生产模式转型升级, 引导农户摒弃大水大肥的粗放种植模式, 推广精准施肥、生物防治等绿色技术, 最大限度减少化肥、农药施用量^[3]; 加强畜禽养殖监管, 配齐粪污收集池、沼气池、堆肥场等配套设施, 推动粪肥就地还田或加工为有机肥, 阻断粪污随雨水入湖通道。通过工业点源与农业面源污染协同管控, 可切实降低滇池水体营养负荷, 为滇池水质持续改善提供坚实保障。

3.2 改善滇池水体环境。要实现滇池蓝藻水华污染的有效管控, 不能仅聚焦水体表面治理, 更需同步推进湖底沉积物清理与水生生态系统重构。滇池湖底淤积的黑色淤泥富集大量氮磷元素, 高温条件下易向上释放至水体, 成为蓝藻连年暴发的重要内源诱因。因此, 需采用精准化技术手段清挖富营养化表层底泥, 尽管该项工作工程量较大, 但能直接大幅削减内源污染负荷。清淤产物需经无害化处理, 通过资源化利用生产线转化为建筑用砖或有机肥, 实现减容降耗与二次污染防治的目标。

在生态修复层面, 在浅水区及湖滨带规模化种植芦苇、香蒲等挺水植物是基础且易实施的方法。此类植物根系发达, 可快速吸附水体中过剩氮磷养分并固定于植株体内, 有效降低水体富营养化程度。同时挺水植物群落可构建立体生境, 为小型水生生物提供繁殖、避险与觅食场所, 为恢复湖泊生物多样性奠定基

础。搭配投放鲢鱼、鳙鱼等滤食性鱼类,可通过其在水体中上层巡游摄食,实现对浮游藻类的生物截留,精准控制蓝藻生物量,遏制高温期水华暴发^[4]。沉水、浮叶、挺水植物与滤食性鱼类的组合修复模式,可推动水质从藻型浑浊态向草型清澈态转变,重构断裂食物链,恢复水生生态系统结构完整性与物质能量循环功能。

3.3降低蓝藻水华危害。要有效管控滇池蓝藻水华暴发,需摒弃事后被动处置模式,构建前置预警监测体系和高效应急响应机制,形成“监测—预警—处置”闭环管理。首先,整合遥感监测、无人机巡查与人工现场核查三类手段,搭建全天候动态监测网络,实现湖面蓝藻初发迹象的精准锁定。通过融合卫星影像、无人机航拍及地面采样获取的多源数据,输入模型进行比对分析,精准预判蓝藻迁移路径、潜在覆盖范围及暴发强度,提前通过预警短信等多渠道发布信息,为后续处置预留充足时间。在防控技术层面,已突破传统单一打捞模式,构建起“原位净化—内源削减—生态循环”的综合处置体系。当蓝藻大面积上浮时,可引入太湖成熟应用的智能水面清理长臂船技术,该设备依托人工智能和新能源技术,通过柔性拦截臂主动围捕蓝藻,吃水浅且操控灵活,可在水深40厘米以上的浅岸区域作业,能高效完成藻水分离,兼具移动作业、零碳排放、操控简便等优势。结合滇池水域实际优化船体结构,将顶棚增高0.3米,增设藻泥储存仓和脱水设备,补充燃料发电机适配岸电现状,避免在天然水体中直接进行絮凝作业。同时搭配机械打捞船抽排表层藻浆、曝气机提升溶解氧,科学投加高效絮凝剂促使残余藻细胞凝聚沉降,快速降低水体藻密度。需将自来水厂取水口划定为重点防护区域,加密监测频次,全力保障取水水质安全。

3.4科技支撑与政策保障。要实现滇池蓝藻水华污染的根本性治理,必须强化科技研发与制度保障两大支撑。在科技赋能上,要持续加大研发投入,推动高校、科研院所与企业组建产学研用协同创新联合体,聚焦监测预警、生态修复、高效治理等关键技术攻关。推广高分遥感监测、智能藻水分离打捞设备等新技术

新装备应用,为治理决策提供实时数据支撑,提升管控措施的精准性与有效性。在制度保障上,需进一步健全完善滇池流域保护政策法规体系,对偷排、超排、乱排等违法排污行为依法实施严厉惩戒,确保各项治理部署落地见效。构建财政引导、社会参与的多元化融资机制,一方面扩大政府专项治理基金规模,夯实资金保障基础;另一方面通过生态补偿机制、绿色债券发行等市场化手段引导社会资本参与,为蓝藻水华防控工作筑牢坚实资金保障。

4 结语

滇池蓝藻水华污染本质上是一项需久久为功的系统性治理工程,其防控绝非单一手段能够奏效。本文通过梳理蓝藻水华污染现状、分布特征及成因机理,从削减外源污染负荷、开展湖底清淤与生态重构、搭建智能监测预警体系、强化科技研发与制度保障等方面,提出了多维度协同推进的防控策略。当前滇池治理虽取得阶段性成效,但水体富营养化问题尚未根本解决,蓝藻水华防控仍面临诸多挑战。未来需持续深化技术攻关与流域协同治理,通过精准施策与长效管理,推动滇池生态环境质量稳步提升,为实现流域生态可持续发展奠定坚实基础。

[参考文献]

- [1]柏金金.基于遥感数据的湖泊藻华爆发后水质恢复周期的影响研究[D].南京信息工程大学,2024.
- [2]郝悦竹.基于GEE的滇池蓝藻水华时空分布监测[J].水土保持应用技术,2023(1):43-44.
- [3]徐虹,施秀梅,程晋昕,等.滇池外海蓝藻水华时空变化及影响因素[J].云南大学学报(自然科学版),2025,(47):1-13.
- [4]许玉博.滇池蓝藻防控处置信息系统的运维管理研究[D].云南财经大学,2023.

作者简介:

汪明姝(1973--),女,汉族,云南昆明人,本科,环境工程工程师,研究方向:滇池流域生态修复与水环境综合治理。