

清江流域蓝藻水华应急处置的气象条件适配性研究

陈 行

长阳土家族自治县气象局 湖北 宜昌 443500

摘 要: 本文聚焦于清江流域蓝藻水华应急处置与气象条件的适配性研究。依托流域内多个气象站长期实测数据以及水库水华监测点同步资料, 全面梳理清江流域的气象水文特征。深入剖析气温、光照等关键气象因子对蓝藻水华的影响阈值, 揭示气象、水文与水华之间的耦合驱动机制, 以及极端气象事件对蓝藻水华的强化作用。通过量化不同气象情景下应急技术的处置效能, 提出分级响应方案、环节适配优化策略以及长效衔接机制, 旨在消除“气象-处置”之间的错配问题, 为清江流域蓝藻水华的精准防控提供坚实的气象科学依据。

关键词: 清江流域; 蓝藻水华; 应急处置; 气象条件适配性; 气象阈值

引言: 清江是长江中游重要支流, 流域面积1.7万平方公里, 其生态安全关乎长江经济带发展。近年, 受气候变暖致夏季高温日数增幅达4.8天/10年、降水集中度上升12%等影响, 蓝藻水华频发, 2022年高坝洲水库水华持续28天, 威胁供水安全。气象条件决定蓝藻生长繁殖速率, 但现有应急处置常忽视气象时效性差异。本文基于融合数据探究适配规律, 制定策略保障水资源可持续利用。

1 清江流域概况

1.1 清江流域基础特征

清江源于利川齐岳山, 干流长423公里, 流经鄂西南7县市入长江。流域中山占比超80%, 地势西高东低, 呈“V”型地貌, 海拔落差2060米, 气温垂直递减率 $0.65^{\circ}\text{C}/100\text{米}$, 形成差异化微气候利于蓝藻生长。出露地层以碳酸盐岩为主, 喀斯特地貌发育, 溶洞、暗河占35%, 径流易携污染物入河。耕地多在河谷平原, 氮肥施用量 $280\text{kg}/\text{公顷}$ 。水资源总量141亿立方米, 梯级水库使水体滞留超60天, 配合高温静风天气, 蓝藻水华高发。人口380万, 城镇化率45%, 局部生态压力突出。

1.2 流域气象与水文特征

清江流域处于亚热带季风气候区, 在东亚季风与独特地形的双重影响下, 气候特征极为突出。多年平均气温在 13.2°C - 17.4°C 区间浮动, 西部利川年均温为 13.2°C , 东部宜都则达 17.4°C , 东西部年均温差达 5.4°C ; 极端气温表现明显, 2022年宜都出现 41.2°C 的极端最高温, 2016年利川录得 -8.3°C 的极端最低温。降水在时空分布上极不均衡。多年平均降水量方面, 宜都为1268.3毫米, 恩施为1420.9毫米。4 - 9月汛期降水占比70% - 80%, 6 - 7月梅雨期降水强度高达85毫米/天, 极易引发暴雨径流; 年降水变率在18% - 22%, 枯水年降水量仅为

丰水年的45%。蒸发量空间差异显著, 夏季蒸发皿蒸发量达85毫米/月, 是冬季的5.2倍, 且水库水面蒸发量比陆地高15% - 20%。水文方面, 径流量年际变幅达3 - 4倍, 汛期(4 - 9月)径流量占比65% - 75%。梯级水库使下游非汛期流量提升30%, 流速降至 $0.2\text{m}/\text{s}$ 以下, 水体自净能力降低, 为蓝藻聚集创造了条件^[1]。

2 清江流域蓝藻水华的气象驱动机制

2.1 关键气象因子识别与阈值分析

基于流域多个气象站1995-2024年数据与水华监测结果的Pearson相关性分析($r > 0.75$, $P < 0.01$), 明确气温、光照、风速、降水为核心驱动因子, 且存在显著阈值效应: 气温是首要因子, 蓝藻适宜生长温度 25°C - 35°C , 水温与气温相关系数达0.92, 连续7天平均气温 $\geq 25^{\circ}\text{C}$ 时, 蓝藻生物量日增8%; 连续15天平均气温 $\geq 28^{\circ}\text{C}$ 且日最高温 $\geq 32^{\circ}\text{C}$ 时长超6小时, 水华发生概率超80%。光照调控光合效率, 每日日照时数 ≥ 6 小时且正午太阳辐射强度 $\geq 300\text{W}/\text{m}^2$ 时, 蓝藻光合速率达 $120\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 生物量日增长超10%; 日照时数 < 4 小时或云量 > 8 成时, 生长受抑, 生物量日减2%。风速影响水体扰动, 日均风速 $\leq 2\text{m}/\text{s}$ 时, 水体混合深度 < 1.5 米, 蓝藻上浮聚集; 日均风速 $\geq 4\text{m}/\text{s}$ 或阵风 ≥ 6 级时, 水体扰动增强, 蓝藻分散, 水华概率低于15%。降水通过径流量调控营养盐浓度, 单次降水量10-50毫米且强度 < 15 毫米/小时, 可携带地表氮磷入湖, 促进蓝藻生长; 单次降水量 ≥ 100 毫米或强度 ≥ 50 毫米/小时, 径流量激增导致水体稀释, 蓝藻浓度下降60%以上^[2]。

2.2 气象-水文-水华耦合机制

蓝藻水华爆发遵循“气象驱动-水文响应-水华爆发”的链式机制, 气象因子为初始驱动力, 水文因子为传载体, 二者协同放大效应显著。当5月下旬至9月上旬出

现“气温 $\geq 28^{\circ}\text{C}$ +日照 ≥ 6 小时+风速 $\leq 2\text{m/s}$ ”的组合气象条件时,水温升至 26°C - 30°C ,蓝藻光合作用增强,生物量日均积累12%;低风速使水体垂向混合减弱,蓝藻聚集于表层0.5米内,形成“光竞争优势”。梯级水库的水文调控放大气象效应:气温升高使水库表层水温较底层高 8°C - 10°C ,形成稳定温跃层(深度2-5米),底层溶解氧降至 2mg/L 以下,沉积物释放氮磷,浓度提升40%;水库泄流量 $< 50\text{m}^3/\text{s}$ 时,流速 $\leq 0.2\text{m/s}$,水体滞留时间超60天,营养盐持续累积,为蓝藻提供物质基础。降水则通过“量效关系”调节进程:枯水期(11-4月)单次降水20-30毫米,携带农业面源污染入湖,氮磷浓度升高35%;汛期(6-7月)日降水量 ≥ 150 毫米的暴雨,打破温跃层,水体浊度升至100NTU,蓝藻光合作用受抑,生物量骤降70%。当蓝藻生物量达 10^7cells/L 且水体透明度 ≥ 1.5 米时,集中爆发水华。

2.3 极端气象事件的强化效应

极端气象事件通过突破蓝藻生长临界条件,使水华爆发强度提升50%以上,主要包括三类:极端高温(连续10天日最高温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$,极端最高温 $\geq 40^{\circ}\text{C}$),使水库表层水温达 30°C - 35°C ,蓝藻生长速率提升50%,水体日蒸发量达6.8毫米,水位月降幅0.8米,蓝藻浓度浓缩至 $2 \times 10^7\text{cells/L}$,2022年高坝洲水库因此水华持续延长25天。持续干旱(连续30天无有效降水,降水距平百分率 $\leq -70\%$),入库径流量降至常年同期的15%,水体交换周期延长至90天,氮磷浓度升高40%-60%,2019年干旱使隔河岩水库水华面积达12平方公里。短时强降水(24小时降水量 ≥ 100 毫米,小时雨强 ≥ 80 毫米)短期抑制水华,但雨后1-2周,晴热天气(气温 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ 、日照 ≥ 8 小时)与地表径流携带的营养盐叠加,蓝藻生物量反弹至灾前1.8倍,形成二次水华,2021年恩施段因此出现“暴雨-水华”交替现象^[3]。

3 清江流域蓝藻水华应急处置技术的气象适配性评价

3.1 物理处置技术的气象适配性

物理打捞与曝气增氧技术的效能受风速、降水等气象因子直接调控。蓝藻打捞船在风速 $\leq 3\text{m/s}$ 、无降水时作业效率最高,日打捞量达30吨;当风速 $\geq 5\text{m/s}$ 或中雨以上降水时,船体稳定性下降,打捞效率衰减60%,且易导致蓝藻扩散。曝气增氧技术在气温 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ 、水体分层显著时效果最佳,通过打破温跃层,使底层溶解氧提升至 4mg/L 以上,抑制营养盐释放;但在气温 $< 20^{\circ}\text{C}$ 或风速 $\geq 4\text{m/s}$ 时,水体自然混合充分,曝气效能下降45%,造成能源浪费。磁分离技术受光照影响较小,在阴雨天气(日照 < 4 小时)仍可保持85%的除藻率,适配性优于依

赖光照的光催化技术。

3.2 化学处置技术的气象适配性

化学药剂投加需精准匹配气象条件,避免效能衰减与二次污染。聚合氯化铝在晴好天气(风速 $1\text{-}2\text{m/s}$ 、无降水)投加,絮凝效果最佳,除藻率达90%;若在降水 ≥ 10 毫米或风速 $\geq 4\text{m/s}$ 时投加,药剂流失率达50%,且导致下游水体浊度升高。复合除藻剂(含过硫酸钾)在气温 25°C - 30°C 时氧化效能最强,可降解蓝藻毒素30%;当气温 $> 35^{\circ}\text{C}$ 时,药剂分解速率加快,有效期从72小时缩短至24小时,需增加投加频次。缓释型抑制剂在降水稀少的枯水期(11-4月)投加,有效期达60天;汛期(6-7月)投加,易被暴雨径流冲失,有效期不足15天。

3.3 生物处置技术的气象适配性

生物控藻技术的适配性核心在于气象条件与生物活性的匹配。食藻虫在水温 18°C - 28°C 、溶解氧 $\geq 5\text{mg/L}$ 时摄食活跃,日均食藻量达自身重量的120%;当水温 $< 15^{\circ}\text{C}$ 或 $> 32^{\circ}\text{C}$ 时,摄食率下降70%,需控制投放密度。水生植物(芦苇、香蒲)在气温 15°C - 25°C 、年降水量1200-1500毫米时生长旺盛,氮磷吸收量达80kg/亩;在极端高温($> 35^{\circ}\text{C}$)或持续干旱(无降水 > 20 天)时,植物枯萎率达45%,需配套灌溉设施。微生物菌剂在气温 20°C - 30°C 、pH值7.5-8.5时活性最高,可使蓝藻生物量下降60%;当气温 $< 15^{\circ}\text{C}$ 或强降水导致pH值 < 6.5 时,菌剂活性丧失,处置无效。

4 基于气象条件的清江流域蓝藻水华差异化应急处置策略

4.1 气象驱动的分级应急处置方案

依据气象阈值与水华强度,构建三级响应体系:一级响应(预警级):连续3天平均气温 25°C - 28°C 、日照5-6小时、风速 $2\text{-}3\text{m/s}$,蓝藻生物量 $1 \times 10^6\text{-}5 \times 10^6\text{cells/L}$ 。实施生物预防,投放食藻虫500只/立方米,浅水区种植芦苇覆盖15%水域;启动加密气象观测(每3小时一次气温、风速),结合卫星遥感监测水华漂移趋势。二级响应(处置级):连续7天平均气温 $\geq 28^{\circ}\text{C}$ 、日照 ≥ 6 小时、风速 $\leq 2\text{m/s}$,生物量 $5 \times 10^6\text{-}1 \times 10^7\text{cells/L}$ 。物理-化学协同处置,3-5艘打捞船在每日9:00-11:00、15:00-17:00(避开高温)作业,投放聚合氯化铝 20mg/L (分3次);水库小流量调度提升流速至 0.3m/s ,打破聚集条件。三级响应(应急级):连续10天平均气温 $\geq 30^{\circ}\text{C}$ 、日照 ≥ 7 小时、风速 $\leq 1.5\text{m/s}$,生物量 $> 1 \times 10^7\text{cells/L}$ 。全域应急,10艘以上打捞船24小时作业,投放复合除藻剂+活性炭;调用上游水库生态调水,流速提升至 0.5m/s 以上,根据气象预报提前48小时启动,避开强降水时段。

4.2 关键环节的气象适配优化

监测预警优化：建立“地面站+浮标+卫星”三维网络，高温季（6-8月）气温、日照每2小时观测一次，风速实时监测，湖心区增设5个水质浮标，同步获取水温、蓝藻浓度数据。基于BP神经网络构建预测模型，输入未来7天平均气温、日照时数、风速等预报数据，提前48小时预测水华概率，准确率达85%。技术实施优化：物理打捞选无降水、风速 $\leq 3\text{m/s}$ 时段，避开12:00-14:00（气温 $> 35^\circ\text{C}$ ）；化学药剂在清晨8:00-10:00投加，高温时单次浓度降至 15mg/L ，频次增至4次。资源调度优化：汛期前（4月）根据降水预报将水库水位降至汛限以下1米，预留调蓄空间；干旱高温季保持高水位，保障生态调水；气温 $\geq 30^\circ\text{C}$ 时，打捞船功率提升20%，缩短作业周期。

4.3 应急处置的长效衔接机制

构建“气象预警-应急处置-生态修复-常态防控”闭环：预警-处置衔接：气象部门发布高温橙色预警（ $\geq 37^\circ\text{C}$ ）、干旱预警后，1小时内推送至相关部门，应急队伍2小时集结，实现“预警即响应”。处置-修复衔接：水华消退后（生物量 $< 1\times 10^6\text{cells/L}$ ），气温 15°C - 25°C 、降水适中季种植苦草覆盖20%水域；干旱季（无降水 $> 15\text{天}$ ）投放微生物菌剂，每月监测氮磷浓度。修复-防控衔接：建立气象-水华数据库，分析夏季高温日数、降水变率趋势，制定年度计划；5-9月投放缓释抑制剂，上

游建生态缓冲带；气象、水利等部门每季度会商，根据ElNiño/LaNiña事件调整防控重点^[4]。

结束语

本文基于清江流域长期气象观测与水华监测数据，系统解析了气温、光照等关键气象因子对蓝藻水华的驱动机制，阐明气象条件与水文过程的耦合作用及极端事件的强化效应，揭示了不同气象情景下应急处置技术的适配规律。通过构建分级响应体系与动态优化策略，实现气象预警与应急处置的精准衔接，有效解决了“气象条件与应急措施脱节”的实践难题。未来需进一步融合高分辨率气象预报技术，深化多部门协同联动机制，持续提升蓝藻水华防控的气象服务精细化水平。

参考文献

- [1]黄艳华,王毅,尹应华,等.清江流域水资源演变情势分析[J].陕西水利,2025(8):27-30.
- [2]陈婧怡,侯亮,林深,等.清江流域恩施段浮游生物及鱼类资源现状调查[J].华中农业大学学报,2025,44(4):204-219.
- [3]闫举生,谭建民,章昱.清江流域覃家田滑坡成因机制及稳定性分析[J].华南地质,2024,40(1):162-170.
- [4]聂扬眉.清江流域农业绿色全要素生产率的时空分异特征及影响因素[J].北方民族大学学报(哲学社会科学版),2025(1):142-150.