南水北调中线工程藻类防控分析与实践研究

黄　鹏　王西苑　沈龙梅　王　曦　李文鹏
中国南水北调集团中线有限公司渠首分公司　河南　南阳　473000

摘　要：南水北调中线工程作为我国战略性重大民生工程，惠及河南、河北、天津、北京四省市上亿群众。确保丹江口水库水源地水质清澈，实现输水全程安全达标并满足饮用水标准，是工程运行的核心目标之一。水质安全保障是多维度系统工程，本文聚焦藻类这一核心影响因子，深入分析南水北调中线工程藻类生长的时空特征与成因，结合实践案例设计针对性防控方案，评估防控成效并提出优化建议，为构建全链条、立体化藻类防控体系，筑牢工程水质安全防线提供理论与实践支撑。

关键词：南水北调中线工程；水质安全；藻类防控；监测预警；生态协同

引言

南水北调中线工程是我国优化水资源配置的战略性基础设施，自通水十余年来，持续为北京、天津、河北、河南四省市经济社会高质量发展提供水资源保障，贡献卓著。随着社会发展对优质水资源需求的不断攀升，以及工程运行体系的日趋成熟，沿线区域对南水北调供水的依赖度同步提升，这一趋势的核心支撑在于工程持续稳定输出的优良水质，既赢得了沿线群众的广泛认可，更凝聚成社会各界对“南水北调”国家工程品牌的高度信任。

1 南水北调中线藻类防控的战略意义与核心价值

水质安全是南水北调中线工程“工程安全、水质安全、运行安全”三大核心目标的关键组成，事关沿线亿万群众身心健康，是民生福祉的重要防线，也是国家水资源战略调配安全的根本前提。中线输水干线全长 1432 公里，串联丹江口水库、陶岔渠首、穿黄工程等关键设施，水质保障需覆盖“源头 - 过程 - 终端”全过程。藻类防控为水质保障核心环节，关乎输水通畅、供水安全与工程稳定运行：可防范藻类毒素风险，守护饮用水安全；能够抑制缓流水体蓝藻水华，维护沿线水体生态平衡；保障工程战略功能有效发挥。中线工程自规划阶段便将藻类防控纳入水质保障体系，构建“源头控制 - 过程监测 - 应急响应”全链条防控模式，保障干线水质长期稳定达标[1]。

2 南水北调中线藻类生长的时空特征与周期规律

藻类生长周期与气候、水文条件高度关联，呈现清晰的季节性演变规律：4 月气温回升至 15℃以上，渠内藻类启动生长；6-8 月进入高温期，水温 25-32℃、光照时长 10-12 小时/天，均处于藻类生长最适区间，繁殖速度达全年峰值，藻密度峰值集中出现；9-10 月气温回落至 15-25℃，藻类生长速率显著放缓；11 月至次年 3 月，低温（低于 10℃）环境抑制藻类活性，逐步进入休眠、消亡阶段。

工程运行 12 年来，常规工况下水体依托自身水文调节能力，结合气候与环境条件的协同作用，可实现自我净化、循环调节与生态修复，保障输水水质持续安全。但在极端气候（如持续高温、干旱少雨）与特殊水文条件（如水位长期稳定、水流滞缓）叠加时，局部渠段仍存在藻类增殖风险。

3 南水北调中线藻类突发事件的成因解析——基于典型案例

为精准识别藻类突发事件的核心诱因，本文以某辖区某年藻类突发事件处置实践为研究对象，结合处置发生前后的环境、水文数据，系统剖析成因，为防控工作提供实践参考。该处置中，依据藻密度持续攀升的监测数据，启动藻类突发事件 IV 级应急响应，经处置后藻密度恢复至安全区间。回溯事件背景，某年以来辖区降水偏少、汛期降雨量不足、高温天气频发，且库区水位长期稳定在 2m 波动区间，波动极小，多重不利因素叠加诱发藻类增殖。

3.1 降雨量显著偏少，水体流动性与环境容量受限

该辖区多年平均降雨量约 830mm，往年 1-8 月累计降雨量普遍达 660mm 以上（占全年 79.5%）；而某年 1-8 月降雨量仅 330mm，不足年平均降雨量的 40%，较往年同期偏少 50%。降雨量不足导致上游来水补给少，渠道水体流动性显著降低，水流滞缓使营养盐（氮、磷）

浓度逐步升高，为藻类生长提供了物质基础。

3.2 极端高温天气频发，适配藻类快速繁殖需求

进入汛期后，该区域持续受副热带高压影响，高温天气频发，气温显著高于往年同期。气象数据显示，某年某月当地累计发布 37℃以上高温预警 8 次、40℃以上高温预警 2 次，极端高温持续时间长、强度大。高温环境不仅提升藻类酶活性，加速其光合作用与繁殖速率，还降低水体溶解氧含量，形成低氧环境，进一步助推藻类优势种群的扩张[2]。

3.3 库区水位长期稳定，水体自净能力下降

受上游来水不足影响，库区水位自某年某月起长期维持在 2m 波动区间，波动幅度不足。水体长期处于静稳状态，一方面导致底部沉积物中的营养盐（如磷酸盐）重新释放至水体，加剧营养盐富集；另一方面削弱水体纵向、横向循环，使得藻类细胞难以被水流带走，易在局部区域滞留聚集，同时水体自我净化、污染物降解能力显著下降，进一步放大藻类增殖风险。

综上，藻类生长繁殖对“温暖环境、充足光照、静稳水体、富集营养”具有高度依赖性，此次事件中“降雨量偏少、高温频发、水位稳定”三大因素形成协同效应，构建了藻类暴发的适宜环境，共同构成突发事件的客观诱因。

4 藻类防控工作设计

结合某管理处辖区输水工程实际情况，聚焦藻类防控“监测预警-精准处置”核心环节，针对性强化水质保障措施，构建“全方位、多层次”防控体系。

4.1 优化监测预警体系，筑牢数据支撑基础

在重点防控区域、关键节点（如渠首、分水口）新增水质取样监测点位，同步加密监测频次，实时追踪藻密度、叶绿素 a、氮磷营养盐等核心指标变化。建立“人工取样 + 在线监测”联动机制，确保监测数据实时更新、动态同步，全面精准掌握辖区水质动态，为藻类防控决策提供数据支撑。

4.2 完善硬件防控设施，构建立体化处置体系

科学布设超声波除藻设备、活氧修复系统、阶梯式藻类拦截设施及增氧曝气装置等多元装备，构建“监测预警 + 物理拦截 + 技术除藻 + 生态修复”立体化防控模式。通过物理、生态手段协同作用，在藻类生长关键环节进行干预，既有效削减藻密度，又避免化学药剂对水体生态的干扰，确保输水水质安全。

5 藻类防控措施的实践应用

藻类防控工作聚焦“监测预警精准化、处置措施差异化”，从监测网络优化与防控设施布设两方面同步推进，实现对藻类生长的全周期、全维度管控。

5.1 加密水质取样监测，构建全覆盖监测网络

对现行水质监测方案进行系统性优化，实现“频次加密、范围全覆盖、数据全实时”：监测频次由每周 2 次提升至每日 2 次；监测点位由原来的 4 个增至 10 个，新增点位沿上游至下游依次布设，覆盖关键缓流段、调蓄水库入口等风险区域，实现辖区监测全域覆盖；加快监测分析效率，采集水样于当日上午、下午分别送至水质中心检测，确保监测数据实时反馈。具体取样安排为：每日上午在位置 1、位置 2、位置 3、位置 4（上游关键断面）各采集 1 次水样；每日中午在位置 5、位置 6、位置 7、位置 8、位置 9、位置 10（下游关键断面）各采集 1 次水样，全面追踪藻类生长动态。

5.2 多维布设防控设施，实现精准化除藻处置

结合渠道水文特征与藻类分布规律，统筹布设各类防控设施，各措施独立运行且协同发力，布设后同步配套专属取水监测点，跟踪评估处置效果，为方案优化提供依据。

5.2.1 固定式超声波除藻设施

在水面宽 120m 的关键断面布设 1 道固定式超声波除藻装置，含 3 组超声波发射器。每组发射器长 6m、搭载 4 个发射单元，组间间距 20m，通过钢丝绳固定于渠坡，借助浮桶悬浮于水下，24 小时持续运行。发射器朝上游侧以 70° 夹角发射 28000Hz 高频超声波，作用深度达 50cm，有效覆盖距离超 50m，3 组设备实现过水断面全笼罩。其原理为通过高频声波破坏藻类细胞壁与胶被，促使藻体死亡沉底，实现水体净化。

5.2.2 活氧修复净化系统

在岸边布设 1 套活氧修复设施，设计日处理能力 600m³/h，采用“下游取水、上游布水”布局。在设备上游 66m 处铺设 3 根平行布水管道，延伸至渠道底部，水下部分长度 12-24m。通过下游水泵取水经氧化处理后，由上游渠底穿孔管持续向水体底部释放“活氧水”，将大分子水团细化为小分子团，结合超饱和溶氧技术提升水体溶解氧含量，改善水体环境，抑制藻类生长繁殖。

5.2.3 阶梯式藻类拦截设施

依据水体监测结果确定藻类富集深度，在水面设置三道阶梯式拦藻网，从上游至下游拦截深度依次为 2m、2.5m、4m，呈梯度加深设计，网体底部加装配重保障稳

定性。拦截网采用高强防蚀 PVC 材质，通过钢丝绳固定于岸坡，利用蓝藻在表层高温透光水体富集、下层低温弱光水体藻密度低的特性，选择性拦截表层高浓度蓝藻，仅允许下层低藻水体通过，有效削减进入引水渠的蓝藻密度。

5.2.4 增氧曝气装置

在渠道缓流段布设增氧机与曝气机，通过钢丝绳固定于渠坡，24 小时不间断运行。增氧机作用于水面下 1m 浅层水体，曝气机作用于水面下 3-4m 深层水体，两者协同将空气高效打入水体，打破气液界面限制，提升水体溶解氧含量，破坏藻类偏好的低氧静水环境，从根源抑制藻类生长。

5.2.5 移动式超声波除藻仪

在渠道高风险段布设移动式超声波除藻仪，每道间距 120m，第一道安装 1 台，通过钢丝绳固定于岸边，悬浮于水面下 20cm 处。除藻仪以 180° 广角发射 12 种不同频率的超声波，借助声波反射实现全水面覆盖，沿水流方向清除藻体；可根据藻类种类精准调节频率，实现“现存藻类清除 + 后续增殖抑制”双重效果[3]。

6 藻类防控处置效果评价

通过对各应急处置设备布设前后的水样进行连续监测，对比分析藻密度及叶绿素 a、氮磷营养盐等关键水质指标变化，处置效果显示处置后，各项水质指标均恢复至安全区间，表明所采用的立体化防控措施可有效遏制藻类增殖，处置成效显著，为后续藻类防控提供了可靠实践经验。

7 南水北调中线藻类防控优化建议

为进一步提升藻类防控的科学性、精准性与长效性，结合工程运行实际与防控实践经验，从监测预警、技术应用、管理机制、生态协同四个维度提出优化建议。

7.1 强化监测预警：构建“智慧化 + 全维度”监测体系

一是优化监测点位，补充渠首、缓流段等关键断面，增设底栖藻类监测，实现水体全维度监测，消除盲区。二是升级监测技术，引入 AI、在线监测设备，结合人工采样，建立分级快速响应机制，缩短处置时效。三是强化数据应用，依托历史监测数据搭建藻类预测模型，融合多环境参数，提前预判高藻风险，支撑防控前置部署。

7.2 优化技术应用：推行“差异化 + 低影响”防控模式

一是分场景精准施策。针对不同季节、水文条件采用适配技术：夏季高藻期以“物理拦截 + 生态调度”为主，通过闸门调控水流速度提升，抑制藻类滞留增殖；冬季底栖藻类高发期以“机械清理 + 遮光防控”为主，避免化学药剂干扰水体生态。二是推广绿色技术应用。优化超声波除藻、活氧修复系统的布设密度，根据藻类分布动态调整设备运行参数，提升能效与处置精准度。三是强化技术效果评估。为每类防控措施设置专属对照监测点，跟踪分析实施前后藻类密度、水质指标（高锰酸盐指数、溶解氧、叶绿素 a）变化，建立“措施-效果”对应数据库，为技术迭代优化提供实践依据。

7.3 健全管理机制：形成“协同化 + 闭环式”防控体系

建立立四方联动小组，汛期、高温期共享气象、水文、水质数据，突发高藻事件协同应急。构建闭环管控流程，落实风险预判、部署、评估、优化全链条，预警 24h 布设设备，处置 48h 复核效果。组织人员开展藻类识别、设备操作培训，进行多场景应急演练，邀请专家指导，提升现场处置能力。。

7.4 注重生态协同：推动“水体-周边”生态联动防控

一是强化沿线污染源管控。联合地方生态环境部门排查渠道周边农业、矿业、生活污水排放口，建立污染源台账，严控氮磷营养盐汇入。二是提升水体自净能力。定期清理渠道淤积的藻泥与底泥，避免营养盐二次释放；适度开展生态调度，通过每月 1-2 次小幅度水位调节促进水体循环，增强水体自身净化与抗干扰能力。三是开展长期生态监测。跟踪监测藻类防控措施对水体浮游生物、底栖生物群落结构的影响，避免单一防控措施破坏生态平衡；建立“藻类防控-生态健康”双评估体系，实现水质安全与生态稳定协同推进。

8 结束语

本文聚焦南水北调中线工程藻类防控，总结藻类时空生长规律，结合典型案例，探明极端高温、少雨、水位静稳为藻类增殖主因。构建“智能预警 + 多技术协同”立体化防控体系，管控成效显著。从监测、技术、管理、生态四方面提出优化对策，可为调水工程藻类治理提供参考，持续筑牢中线水质安全屏障。

参考文献

[1] 王超, 辛小康, 王树磊, 等. 长距离人工输水渠道水质时空演变规律研究: 以南水北调中线总干渠为例 [J]. 环境科学学报,2022,42(2):184-194.

[2] 李建. 丹江口水库陶岔水域丝状蓝藻异常增殖风险预警研究 [J]. 人民长江,2025,56(7):45-51.

[3] 尹炜, 王超, 辛小康. 南水北调中线总干渠水质管理问题与思考 [J]. 人民长江,2020,51(3):17-24.