

# 水体富营养化背景下蓝藻水华暴发机制与防控策略

沙 森

南阳市生态环境局镇平分局 河南 南阳 474250

**摘要:** 蓝藻水华 (Cyanobacterial Blooms) 作为水体富营养化最显著、最具破坏性的生态后果之一, 已成为全球性环境问题, 严重威胁着水生态系统健康、饮用水安全及社会经济发展。本文系统阐述了在水体富营养化这一核心驱动背景下, 蓝藻水华暴发的内在生物学机制与外在环境驱动因子。首先, 剖析了氮 (N)、磷 (P) 等营养盐过量输入导致水体富营养化的成因及其对蓝藻生长的促进作用; 其次, 深入探讨了蓝藻独特的生理生态学优势, 包括其高效的营养盐吸收与储存能力、浮力调节机制、光合作用适应性以及化感作用等, 这些特性使其在富营养化水体中能够形成竞争优势并大规模增殖。在此基础上, 综合分析了温度、光照、水文气象条件等关键环境因子如何与富营养化协同作用, 共同触发和维持水华事件。最后, 本文从“控源截污、过程阻断、末端治理”三个维度, 系统梳理并评述了当前主流的蓝藻水华防控策略, 包括源头减排、生态修复、物理/化学/生物技术干预等, 并对未来构建以流域综合治理为基础、多技术协同、智慧化管理为核心的综合防控体系提出了展望。旨在为科学理解和有效应对蓝藻水华问题提供理论参考与实践指导。

**关键词:** 富营养化; 蓝藻水华; 暴发机制; 生理生态学; 防控策略

## 引言

水是生命赖以生存的基础性自然资源。然而, 全球工业化、城市化及农业集约化扩张, 导致大量生活污水、工业废水及农业面源污染物 (含化肥农药) 排入水体, 引发氮、磷等营养盐浓度急剧升高, 造成水体富营养化。富营养化改变了水体理化性质, 重塑水生生态系统结构与功能, 其中蓝藻水华频发尤为突出。蓝藻 (如微囊藻、鱼腥藻等) 作为原核光合自养微生物, 在适宜条件下可指数级增殖, 形成覆盖水面的“水华”。大规模蓝藻水华会遮蔽阳光、抑制沉水植物生长、消耗溶解氧, 导致鱼类窒息死亡, 破坏生物多样性; 更严重的是, 产毒蓝藻可合成肝毒素 (如微囊藻毒素MCs)、神经毒素等, 威胁饮用水源安全, 并通过食物链危害人畜健康。此外, 水华还引发恶臭、影响景观、阻碍航运, 造成巨大经济损失。因此, 深入解析蓝藻水华在富营养化背景下的暴发机制, 发展科学、高效、可持续的防控策略, 已成为水环境科学领域的重大课题。

## 1 水体富营养化: 蓝藻水华的温床

富营养化是蓝藻水华发生的根本前提和物质基础。其核心在于水体中生物可利用的氮、磷等营养元素的过量积累。

### 1.1 富营养化的成因

当代水体富营养化主要源于高强度的人类活动。城镇生活污水处理厂即使经过二级处理, 其尾水中仍含有相当浓度的氮磷, 成为重要的点源污染; 而食品加工、

化肥制造等工业废水若未经严格管控, 亦会向水体持续输入高浓度有机氮、氨氮、硝酸盐及磷酸盐。相比之下, 面源污染更为复杂且难以控制, 其来源广泛, 包括农田中过量施用的化肥与畜禽养殖废弃物在降雨或灌溉冲刷下形成的农业径流, 城市地表积累的含氮磷颗粒物经雨水冲刷进入排水系统所形成的初期雨水污染, 以及工业燃烧和机动车尾气排放产生的氮氧化物通过大气干湿沉降进入水体的过程<sup>[1]</sup>。这些人为输入共同打破了水体原有的营养盐循环平衡, 使氮、磷浓度远超生态系统的承载阈值, 为藻类特别是具有竞争优势的蓝藻提供了近乎无限的“营养盛宴”, 从而从根本上创造了水华暴发的温床。

### 1.2 营养盐与蓝藻生长的关系

在藻类生长所需的诸多营养元素中, 氮和磷的作用尤为关键, 二者共同构成了蓝藻水华形成的物质基础。在多数淡水湖泊中, 磷通常被视为首要限制性因子, 这源于其在自然水体中循环相对封闭、难以从大气补充, 且易被底泥吸附固定。一旦外部磷负荷增加, 水体中溶解性活性磷 (SRP) 浓度迅速上升, 直接刺激藻类初级生产力。大量长期监测与模拟实验均表明, 削减磷输入是控制淡水富营养化和蓝藻水华最有效的手段。值得注意的是, 蓝藻中的微囊藻等优势种对低磷环境具有极强的适应能力, 不仅能高效吸收微量磷, 还能将其以多聚磷酸盐形式储存在细胞内, 形成“营养银行”, 以便在后续脉冲式输入后快速响应。与此同时, 氮的作用不可忽

视。充足的氮供应,尤其是铵态氮,能显著促进蓝藻生物量积累。更关键的是,部分蓝藻如鱼腥藻和束丝藻具备固氮能力,可在氮受限而磷充足的环境中利用大气氮气作为氮源,从而在与其他非固氮藻类的竞争中占据绝对优势。这种生理特性意味着,若仅控制磷而不同步削减氮负荷,长期内可能诱发固氮蓝藻的替代性暴发,反而加剧水华的复杂性和治理难度。因此,氮磷协同控制应成为富营养化治理的基本原则。

## 2 蓝藻水华的暴发机制:内在优势与外在驱动

蓝藻能在富营养化水体中脱颖而出并形成水华,是其内在生理生态学优势与特定外在环境条件协同作用的结果。

### 2.1 蓝藻的内在生理生态学优势

蓝藻之所以能在复杂的水生环境中占据主导地位,源于其在亿万年进化过程中形成的一系列高度特化的生存策略。首先,它们具备卓越的营养获取与储备能力。面对波动剧烈的营养环境,蓝藻可通过高亲和力转运系统在极低浓度下高效摄取氮磷,并将过剩营养以多聚磷酸盐或氰ophycin等形式储存于细胞内,这种“丰储歉用”的代谢模式使其在营养脉冲后迅速增殖,并在贫瘠期维持基本代谢。其次,伪空胞(gas vesicles)赋予了蓝藻无与伦比的浮力调节能力。通过调控细胞内碳水化合物的合成与分解,蓝藻能精确改变自身密度,实现在水柱中的垂直迁移:白天上浮至透光层最大化光合作用效率,夜则下沉至营养丰富的底层吸收氮磷。这种时空分离的资源利用策略,使其在光与营养的竞争中远胜于其他浮游植物。此外,蓝藻的光合色素系统(含叶绿素a和藻胆蛋白)具有宽光谱适应性,部分种类甚至能通过调整藻胆体组成来优化不同光质下的光能捕获效率,这在水华后期光线穿透受限的环境中尤为重要。更为隐蔽而有效的竞争手段是化感作用——许多蓝藻能向周围水体分泌特定的次生代谢物,这些化感物质可抑制甚至杀死绿藻、硅藻等竞争者,从而减少种间竞争压力。最后,群体形态(如微囊藻的胶质团块)不仅增强了整体浮力,还形成了物理屏障,有效抵御浮游动物的摄食压力,并缓冲外界环境胁迫,进一步巩固了其生态优势。

### 2.2 关键外在环境驱动因子

尽管蓝藻具备强大的内在竞争力,但其大规模暴发仍需特定的外在环境条件予以触发和维持。温度是最关键的驱动因子之一,蓝藻普遍为喜温生物,其最适生长温度范围在25–35℃之间。全球气候变暖趋势下,水体热积累时间延长,不仅扩大了蓝藻的地理分布,也显著延长了其生长季。高温还会降低水中溶解氧饱和度,加剧

底层厌氧状态,促使底泥中吸附态磷发生还原性释放,形成“外源输入—内源释放”的恶性循环。光照则是光合作用的能量来源,在夏季晴朗少云、风力微弱的天气条件下,长时间强光照为蓝藻提供了充足能量,同时平静的水面有利于其通过浮力调节聚集于表层形成可见水华。相反,大风或强降雨带来的水体扰动会打散藻团,抑制水华形成<sup>[2]</sup>。水文条件同样至关重要,流动性差、滞留时间长的湖泊或水库更易积累营养盐和藻类生物量,成为水华的高发区。干旱导致水位下降,进一步浓缩水体营养浓度;而暴雨虽可短期稀释,却常伴随大量面源污染输入,为后续水华埋下隐患。此外,夏季强烈的太阳辐射常导致水体形成稳定的热分层结构,上层暖水与下层冷水之间形成密度跃层,这种物理稳定性为蓝藻的垂直迁移提供了理想的“轨道”,使其能高效穿梭于光与营养资源之间,最终促成水华的集中暴发。

## 3 蓝藻水华的综合防控策略

面对严峻的蓝藻水华问题,单一的治理手段往往效果有限且难以持久。必须采取“标本兼治、系统治理”的综合策略,从源头到末端进行全链条管控。

### 3.1 源头控制:控源截污(治本之策)

源头控制是遏制蓝藻水华最根本、最经济、最可持续的途径,其核心在于系统性削减进入水体的氮磷负荷。对于点源污染,必须全面提升城镇污水处理厂的脱氮除磷工艺水平,推广反硝化滤池、化学辅助除磷、膜生物反应器等深度处理技术,确保尾水排放标准严于常规要求;同时,严格监管涉氮磷工业企业的废水排放,杜绝超标排污行为。针对更为复杂的面源污染,则需多措并举:在农业领域,大力推广测土配方施肥、缓控释肥应用和生态种植模式,从源头减少化肥流失;配套建设生态沟渠、植被缓冲带和人工湿地系统,拦截并净化农田径流中的氮磷污染物;规范畜禽养殖业,推动粪污资源化利用,实现“变废为宝”。在城市区域,应加快海绵城市建设步伐,通过透水铺装、雨水花园、绿色屋顶等低影响开发设施,增强雨水就地入渗与净化能力,有效削减城市径流污染<sup>[3]</sup>。对于已严重污染的内源底泥,可审慎采用环保疏浚或原位钝化技术(如投加镧改性粘土或铝盐固定磷),抑制内源营养盐的二次释放,从而切断水华的“内部燃料”供应。

### 3.2 过程调控:生态修复与调控(长效之策)

在有效控制外源输入的基础上,通过生态修复重建健康的水生生态系统,是提升水体自净能力与生态韧性的长效之策。恢复沉水植被(如苦草、黑藻)和挺水植被(如芦苇、香蒲)是关键举措。这些水生植物不仅能

直接吸收水体及底泥中的氮磷营养，与藻类形成资源竞争，其发达的根系还可为微生物提供附着基质，构建高效的“根际微生物净化圈”；同时，茂密的植株能削弱风浪扰动、降低水体透明度，抑制蓝藻的光合作用与聚集。合理配置滤食性鱼类（如鲢、鳙）也是重要的生物调控手段，它们通过滤食浮游植物可有效降低藻类生物量，尤其对微囊藻等群体蓝藻具有一定控制效果，但需注意放养密度与种类配比，避免引发新的生态失衡。近年来，基于微生物的调控技术也受到关注，例如筛选和应用特异性溶藻菌或噬藻体，通过寄生或裂解作用靶向抑制蓝藻种群。该方法环境友好、针对性强，但其在开放水体中的定殖稳定性、生态安全性及长期效果仍需深入研究及谨慎评估。

### 3.3 末端应急：物理、化学与生物技术干预（治标之策）

当蓝藻水华已大规模形成并对供水安全或公共健康构成紧迫威胁时，必须启动快速响应的末端应急措施。物理方法中，机械打捞是最直接有效的手段，通过专业蓝藻打捞船可迅速移除水面藻类，显著降低藻密度与毒素风险，但其运行成本高昂，且仅能处理已形成的水华，无法阻止再生。人工造流或推流曝气技术则通过增强水体混合、破坏热分层，干扰蓝藻的垂直迁移能力，从而抑制其聚集。化学方法主要包括絮凝沉降，即向水体投加改性粘土、聚合氯化铝等絮凝剂，促使藻细胞凝聚沉降到底泥<sup>[4]</sup>。该法见效快，适用于局部水域应急处置，但需警惕絮凝剂残留带来的潜在生态风险，且沉降藻体在厌氧条件下可能再次释放毒素与营养盐，形成二次污染。历史上曾广泛使用的化学杀藻剂（如硫酸铜）因毒性大、非选择性强、易引发生态灾难，现已被多数国家严格限制或禁止。此外，利用大型漂浮植物（如凤眼莲）或滤食性贝类（如河蚌）进行生物提取，虽具有一定潜力，但在规模化应用中仍面临生态入侵风险与管理

难题，需在严格风险评估后谨慎实施。

## 4 结语

蓝藻水华是水体富营养化在特定环境条件下催生的复杂生态灾害。其暴发机制根植于人类活动导致的氮磷过量输入，并通过蓝藻自身独特的生理生态学优势（如高效营养利用、浮力调节、化感作用等）得以放大，最终在外在水文气象因子（如高温、静水、强光照）的触发下形成。因此，任何试图“头痛医头、脚痛医脚”的单一治理模式都注定难以成功。未来的蓝藻水华防控必须走向系统化、精准化和智慧化。系统化要求坚持“山水林田湖草沙”生命共同体理念，实施全流域、全过程的综合治理，将控源截污、生态修复、水资源优化调度与产业结构绿色转型等措施深度融合，形成协同治理合力。精准化则依赖于高光谱遥感、原位水质传感网络、环境DNA（eDNA）监测等先进技术，实现对水华的早期预警、动态追踪与污染溯源，并基于对特定水体水华成因的精细化诊断，制定“一湖一策”的差异化治理方案。智慧化是未来方向，需构建集数据采集、机理模型、人工智能决策于一体的智慧水务平台，通过大数据分析预测水华风险，智能优化应急响应与资源配置，推动治理模式从被动应对向主动预防的根本转变。

## 参考文献

- [1] 苏华,石军,孙璟,等.富营养化水体偶发性蓝藻水华堆积污染时空变化特征研究[J].环境科学与管理,2025,50(09):158-162.
- [2] 张晓飞.探究蓝藻水华与水体富营养化综合治理策略[J].科技风,2018,(09):60-61.
- [3] 关艳,丁文浩,李景娟,等.我国太湖与北美洲伊利湖蓝藻水华治理对照研究[J].东北水利水电,2025,43(04):31-35.
- [4] 毕凯,潘俊池.蓝藻水华的危害及防治措施[J].乡村科技,2025,16(02):147-150.