

藻类异常增殖的形成机理、监测预测 与防控策略研究进展

段春建^{1,2}, 王哲¹, 周文²

(1. 中国南水北调集团中线有限公司河南分公司, 河南 郑州 450018;

2. 内蒙古自治区兴安盟水利局, 内蒙古 兴安盟 137400)

摘要: 藻类异常增殖导致水质恶化、溶解氧耗竭、藻毒素释放等, 严重威胁饮用水安全、水生生态系统健康, 面临全球性的水环境挑战。在系统梳理水华形成机制的基础上, 重点分析富营养化、水文气象条件、生物相互作用及人为活动对其发生发展的关键影响。在监测预测方面, 评述传统方法的局限性, 并详细探讨遥感监测技术与数值模拟模型的最新进展、优势及面临的挑战。当前研究仍面临藻类生长与毒素产生机理复杂、预测模型精度受限、长效生态控藻技术有待突破等关键挑战, 未来研究可侧重于深化多过程耦合机理研究、发展高精度智能预测预警技术、研发绿色高效控藻材料与方法、构建基于生态系统的适应性管理框架、加强社会-生态系统(SES)视角的综合研究。

关键词: 藻类异常增殖; 形成机理; 预测技术; 防控策略; 富营养化

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8735(2026)02-0124-07

DOI: 10.3969/j.issn.1001-8735.2026.02.002

藻类异常增殖(藻化, 水华)是由多种因素共同引发的藻类在水体中迅速增长与积累的现象, 对水体环境、生态系统和人类健康构成了严峻挑战^[1-2]。全球气候变化加剧和人类活动频繁导致水体富营养化问题日益严重, 是藻华频发的根本原因^[3]。藻华不仅覆盖水面, 降低水体透明度, 消耗溶解氧, 导致水生生物死亡, 其释放的藻毒素(如微囊藻毒素等)更可通过食物链富集, 直接威胁人类健康^[4-5]。此外, 藻华显著增加饮用水处理难度和成本, 甚至引发供水危机, 对水资源可持续利用构成重大威胁^[6]。因此, 深入研究藻类异常增殖的机理、发展精准预测方法、制定高效防控策略, 具有迫切的生态意义和重大的社会经济价值。尽管国内外学者在藻华机理、监测预测和防控技术方面已取得一定进展, 但仍存在诸多挑战: 如不同藻类生理生态特性及种间互作机制差异显著; 环境因子与生物因子耦合作用的复杂性尚未完全阐明; 现有预测模型在精度、普适性和时效性方面仍有局限; 长效、生态友好的控藻技术亟须突破等^[7-10]。本文旨在系统梳理藻类异常增殖形成机理、监测预测方法及防控技术的最新研究进展, 对比分析各类技术的优缺点与应用潜力, 提出多尺度、多层次的针对性防控策略框架, 并基于当前不足展望未来重点研究方向, 为深化水体生态系统的科学研究、提升防控技术水平和优化管理决策、制定可持续管理策略提供参考。

1 研究现状概述

藻类异常增殖机理与防控研究已形成较为完善的体系。机理研究证实, 环境因子(如光照、温度、营养盐(氮、磷))是藻类生长的基础驱动力^[8-9], 生物因素(如微生物共生、浮游动物摄食、鱼类调控)通过竞争、捕食等相互作用显著影响藻类种群动态, 而人为活动(工农业废水排放、水利工程、水产养殖)导

收稿日期: 2025-07-16

作者简介: 段春建(1981-), 男, 高级工程师, 主要从事水利工程, 质量安全、水质保护和水质监测研究, E-mail: 276121922@qq.com。

致的外源营养输入和水文改变是诱发和加剧藻华的关键因素^[11-13]。在预测预警方面,遥感监测技术(如利用叶绿素 a、藻蓝蛋白特征波段)为大范围、实时监测藻华时空分布提供了有效手段^[14],数值模拟模型(如结合水动力-生态过程的模型)则用于预测藻华发展趋势^[15],但二者均面临数据精度、算法适用性等挑战。防控策略研究聚焦源头控制(减少营养盐输入)、生态修复(恢复水生植被、调控食物网)及物理/化学/生物应急控藻措施。政策法规在规范排污行为、促进技术应用和协调流域管理中发挥重要保障作用^[16]。然而,面对藻类多样性、环境复杂性和管理需求的多重压力,亟需在机理深度、预测精度、控藻效力和管理协同性等方面取得进一步突破^[17]。

2 藻类异常增殖的关键驱动因素

藻类异常增殖是多种自然与人为因素协同作用的结果,以下为核心驱动因素。

2.1 富营养化

水体中过量的氮(N)、磷(P)等营养盐输入是藻华暴发的物质基础。外源营养盐输入主要来源于农业面源污染(化肥流失、畜禽养殖)、城市生活污水和工业废水。内源释放则指沉积物中营养盐在特定条件下(如厌氧、扰动)的再释放。磷通常被认为是淡水藻华的关键限制因子,而氮在河口和近海区域也可能起限制作用^[18-19]。多数研究表明富营养化程度与藻类生物量通常呈显著正相关。

2.2 水文气象条件改变

气温升高直接促进藻类代谢和生长速率(Q10效应)。强光照有利于光合作用,但极端强光可能起抑制作用^[20-21]。降雨模式改变(强度、频率)影响营养盐径流输入和水体滞留时间,风速风向影响水体混合层深度和水华聚集^[22-23]。

水体滞留时间延长(如水库、缓流河段)为藻类聚集生长提供有利条件,分层(温跃层)阻碍底层营养盐和氧气交换,促进蓝藻等浮游藻类优势生长,水流流速影响藻类悬浮和迁移^[24-26]。

2.3 生物群落失衡

营养盐浓度和比例变化改变藻类种间竞争格局,如富营养化常利于蓝藻(具气囊、固氮能力)成为优势种^[27]。

浮游动物(枝角类、桡足类)对小型藻类的摄食是重要的生物调控机制。鱼类过度摄食浮游动物(下行效应)或选择性滤食会使食物链发生变化,可间接促进藻类增长^[28]。微生物相互作用使某些细菌可能促进或抑制藻类生长(如提供维生素、产生溶藻物质)^[29]。

2.4 人为活动干扰

人为干扰首先是污染物排放,工农业及生活污水排放是外源营养盐的主要来源^[30],水产养殖投饵和排泄物导致内源负荷^[31]。其次是水利工程,筑坝建库改变河流自然水文节律,延长滞留时间,创造利于藻华形成的静水环境^[32],而调水工程可能引入外来藻种或改变本地生境^[33]。

渔业活动也是一种干扰,不合理放养(如滤食性鱼类不足或过多)或过度捕捞会破坏食物网结构,削弱生物控藻能力。捕捞活动也可能直接扰动底泥,促进内源释放^[34]。

3 藻类异常增殖的监测及预测方法

3.1 传统监测方法及其局限性分析

显微镜计数法是藻类监测领域中最为基础且广泛应用的手段之一。该方法依赖于对藻类细胞的直接显微镜观察与精确计数,从而确保了监测的准确性。通过显微镜的放大作用,研究者可清晰地观察到藻类细胞的形态结构特征以及数量分布,进而对水体的藻类浓度进行精确的量化评估。但显微镜计数法存在明显的局限性:首先,该方法从样本的采集、预处理直至最终的计数整个过程耗时耗力;其次,其监测范围相对有限,主要适用于小范围水域监测,对于广阔水体难以实现全面覆盖。此外,显微镜计数法的结果还受人员技术水平及经验的显著影响,不同人员之间的计数结果可能存在较大差异,

从而影响了数据的可比性和可靠性^[35]。

电阻抗法是另一种在藻类监测中广泛应用的传统方法。该方法通过测量水中藻类细胞引起的电阻抗变化来间接反映藻类数量。电阻抗法具有操作简便、检测结果快的优势。但电阻抗法的测量结果易受到多种水质参数的影响,如温度、pH 值、离子强度等,这些因素都可能对测量结果产生显著干扰,从而影响数据的准确性。此外,电阻抗法只能反映藻类数量的总体概况,无法对不同种类的藻类进行区分,因此在准确性和精细度方面存在一定的不足^[36-37]。

近年来,生物传感器法作为一种新兴的藻类监测技术逐渐崭露头角^[38]。该方法利用生物传感器检测藻类代谢过程中产生的特定生物标志物,从而实现了对藻类数量的间接评估。例如,基于藻蓝蛋白荧光特性的水质蓝绿藻传感器,通过检测特定激发波长下的荧光强度来估算蓝绿藻浓度,具有灵敏度高、响应快、可实时在线监测的优势^[39]。然而,该方法存在成本较高、需要专业人员操作和维护的局限性。此外,生物传感器在长时间使用后可能会出现灵敏度下降或失效的情况,需要定期更换和校准,从而增加了维护成本和使用难度^[40]。

3.2 遥感监测技术在藻类异常增殖预测中的应用

遥感监测技术,凭借其宏观覆盖、快速响应及动态监测的独特优势,在藻类异常增殖的预测研究中日益展现出其重要性。该技术主要依赖卫星或航空遥感平台,通过捕获水体的光谱特征信息,并利用这些信息反演出藻类的空间分布、浓度水平及生长态势等关键参数^[41]。

遥感监测技术在藻类异常增殖预测中的应用具有多重显著优势。首先,该技术能够实现对广阔水域的高效、快速监测,显著提升监测工作的效率。其次,该技术能够连续获取时间序列数据,为分析藻类的动态变化规律、预测其未来发展趋势提供强有力的数据支撑。此外,通过融合多光谱、高光谱等多样化的遥感数据,该技术还能进一步提取出藻类的种类信息,为实施更加精准有效的防控策略提供科学依据^[42]。

遥感监测技术在实际应用中,需特别关注以下几个核心环节。首先是遥感数据的预处理阶段,包括辐射定标、大气校正等一系列关键步骤,其核心目的是保障所获取遥感数据的准确性与可靠性。其次是反演算法的选择与优化,需紧密结合水体的独特光学特性与藻类的特定光谱特征,构建高度精确的反演模型。最后是遥感数据与地面实测数据的验证与融合,经过这一关键步骤,预测的精度与可靠性得以显著提升。

未来,随着遥感技术的持续迭代与创新,尤其是蓝藻与水华监测研究的不断深入,以及水质藻类在线监测系统的逐步推广应用,遥感技术在藻类异常增殖预测领域的应用前景将更为广阔,对水体富营养化防控具有重要支撑作用。利用 Landsat 系列、Sentinel-2MSI、MODIS 等卫星数据,通过反演叶绿素 α 浓度(Chl- α)、浮游藻类指数(FAI)、藻蓝蛋白细胞丰度(PC)等参数,已成功应用于太湖^[43]、巢湖^[44]、三峡水库等大型水体蓝藻水华的监测、空间分布制图与动态追踪。高光谱遥感可进一步提升藻种识别潜力。然而,其精度受大气条件、水体光学特性复杂性(如 CDOM、悬浮物干扰)、云覆盖及空间分辨率的限制。未来需融合多源卫星数据,发展更稳健的反演算法,并加强与地面/无人机观测的协同验证^[45-46]。

3.3 数值模拟预测模型在藻类异常增殖研究中的应用与挑战

数值模拟的机理模型,如 EFDC、CE-QUAL-W2、Delft3D-WAQ、MIKE ECO Lab 等,通过耦合水动力模块与生态模块(描述营养盐循环、藻类生长、呼吸、沉降、死亡等过程),模拟和预测不同情景下藻类生物量的时空动态,服务于水华预警与管理决策^[47-49]。但这类模型还需在以下方面进行改进。

(1)数据需求与参数化:模型构建和校准依赖大量高质量的水文、水质、气象和生物数据。应加强多源数据(监测、遥感、文献)融合与同化技术应用;发展参数敏感性分析与优化方法,降低不确定性^[50]。

(2)生态过程复杂性:藻类生理生态(如光适应、营养吸收动力学、毒素产生)、种间竞争、浮游动物摄食等过程具有高度非线性和变异性。需要深化关键过程机理研究,改进生态子模块的数学表达;探

索利用机器学习辅助参数估计或构建混合模型^[51-52]。

(3)尺度效应与区域适用性:模型在特定水域校准后,移植到其他区域效果可能不佳。应加强模型本地化研究,发展模块化、可灵活配置的模型框架以适应不同水体特征。

(4)计算效率与预报时效性:复杂三维生态-水动力模型计算成本高,应用高性能计算提高效率;需开发简化但核心过程保留的预报模型;结合统计模型或AI模型提升短期预报速度。

4 藻类异常增殖的针对性防控措施

防控策略需针对关键驱动因素精准施策,形成“源头减排-过程阻断-末端治理-系统管理”的综合体系。

4.1 控制外源与内源营养负荷

外源营养盐控制的具体防控措施如下:

(1)农业面源:推广测土配方施肥、缓释肥应用、有机肥替代;建设生态沟渠、缓冲带、人工湿地拦截径流;推进畜禽粪污资源化利用,减少营养盐流失^[53]。

(2)城镇点源:提升污水处理厂排放标准(尤其脱氮除磷),推广污水再生利用;完善雨污分流管网,控制合流制溢流污染(CSOs)。

(3)工业点源:严格执行排污许可与总量控制,推行清洁生产,强化预处理和深度处理。

内源控制针对污染严重的沉积物,可采用环保疏浚、原位覆盖(如钝化剂锁磷)、曝气增氧等方式抑制内源释放等。

4.2 生态修复与水文调控

(1)恢复水生植被:科学种植沉水、浮叶、挺水植物,吸收营养盐,抑制藻类。提供栖息地,增强系统稳定性^[54]。如太湖梅梁湾的示范工程。

(2)重建健康食物网:合理放养滤食性鱼类(鲢、鳙)控制浮游藻类;保护和恢复大型枝角类等浮游动物种群,增强其对小型藻类的摄食压力。需注意避免过度放养导致新的生态问题。

(3)水文调控:优化水库调度(如生态泄流),增强水体流动性,破坏分层,缩短滞留时间;实施生态补水改善水质和水动力条件^[55]。

4.3 应急与直接控藻技术

(1)物理方法:机械打捞、围隔导流、扬水筒/曝气控藻、超声波/紫外灭藻(如浙江恒达智能变频物理控藻系统,通过优化声强频率提升抑藻效率)^[56]。

(2)化学方法:施用改性黏土、过氧化氢、硫酸铜等除藻剂(需谨慎评估生态风险)。

(3)生物方法:施用特定溶藻菌、病毒或植物化感物质控藻,尚处于研究或小试阶段^[57]。

4.4 政策法规与综合管理

(1)完善法规标准:制定、修订严格的水污染防治法、营养盐排放标准、水质标准(如增加藻毒素指标)。

(2)强化监管执法:利用遥感、在线监测技术(如AF-23藻类智能监测系统)提升监管能力;严格执法,落实河湖长制、排污许可证制度。

(3)推行流域综合管理:建立跨行政区、跨部门的协调机制(如流域管理机构);制定实施基于最大日负荷总量(TMDL)的流域管理计划;运用生态补偿等经济杠杆^[25]。

(4)加强监测预警与公众参与:构建天地一体化监测预警网络(如集成藻类水华智能监测预警仪);普及环保教育,鼓励公众监督。

5 未来发展趋势与展望

未来藻类异常增殖防控研究与实践将在以下关键方向持续深化。

(1)深化多过程耦合机理研究:聚焦不同藻类(尤其产毒蓝藻)在多变环境下的生理生态响应、种间互作(藻-菌、藻-藻)、藻毒素合成与归趋机制,以及气候-水文-生态-人为活动的多尺度耦合效应。揭示其非线性响应和阈值特征。

(2)发展高精度智能预测预警技术:融合多源异构数据(高频传感器、卫星/无人机遥感、社交媒体),利用人工智能(机器学习、深度学习)提升藻华发生时间、地点、规模及毒素风险的预测精度、时效性和空间分辨率。如发展基于深度学习的多源遥感融合反演模型、数据-机理混合驱动预测模型。

(3)研发绿色高效控藻材料与方法:探索新型、高选择性、低生态风险的控藻材料(如纳米改性黏土、缓释型过氧化物、高效溶藻微生物制剂)及其靶向递送技术;优化物理控藻设备(如智能超声、高效曝气)的能效与适应性;深化基于生态位调控(水生植被恢复、食物网优化)的长效控藻机制与应用模式研究。

(4)构建基于生态系统的适应性管理框架:强化流域系统思维,发展“从源头到水体”的全过程营养盐管理策略;推动基于自然的解决方案(NbS)规模化应用;建立适应气候变化和人类活动干扰的韧性管理框架;开展管理措施的成本效益分析与长期生态风险评估。

(5)加强社会-生态系统(SES)视角的综合研究:探索藻华防控的社会驱动因素(政策、经济、行为)与生态响应的交互作用;研究有效的信息传播、风险沟通和公众参与模式;评估不同管理策略的社会可接受度和公平性;发展促进多利益相关方协同治理的制度设计。

参考文献:

- [1] 谢平. 蓝藻水华及其次生危害[J]. 水生态学杂志, 2015, 36(4): 1-13.
- [2] 张翀, 赵亮, 张莹, 等. 藻类爆发危害及其控制技术进展[J]. 环境保护科学, 2015, 41(3):107-112.
- [3] 邓建明, 秦伯强. 全球变暖对淡水湖泊浮游植物影响研究进展[J]. 湖泊科学, 2015, 27(1):1-10.
- [4] 王成林, 潘维玉, 韩月琪, 等. 全球气候变化对太湖蓝藻水华发展演变的影响[J]. 中国环境科学, 2010, 30(6):822-828.
- [5] 邱雨, 马增岭, 张子怡, 等. 水生生态系统中微囊藻毒素的分布及其生态毒理效应研究进展[J]. 应用生态学报, 2023, 34(1): 277-288.
- [6] 李正月, 颜慧琼, 林强. 水污染造成藻类大量繁殖及其除藻的研究现状[C]//2020 中国环境科学学会科学技术年会论文集. 南京: 2020: 169-172.
- [7] 黄红妍. 水处理中藻类暴发造成的水质问题及处理方法[J]. 低碳世界, 2022, 12(2): 22-24.
- [8] 许珍. 温度和光照对四种藻类生理生态学特性的影响研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2017.
- [9] 钱志萍, 李卓远, 李燕均, 等. 温度、光照及藻细胞密度对 3 种水华蓝藻生长及竞争的影响[J]. 上海师范大学学报(自然科学版), 2020, 49(1): 18-23.
- [10] 贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 等. 周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2149-2157.
- [11] LAMPERT W. Laboratory studies on zooplankton-cyanobacteria interactions[J]. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 1987, 21(3): 483-490.
- [12] 况琪军, 毕永红, 周广杰, 等. 三峡水库蓄水前后浮游植物调查及水环境初步分析[J]. 水生生物学报, 2005, 29(4): 353-358.
- [13] BURFORD M A, THOMPSON P J, MCINTOSH R P, et al. Nutrient and microbial dynamics in high-intensity, zero-exchange shrimp ponds in Belize[J]. Aquaculture, 2003, 219(1-4): 393-411.
- [14] PARK J, KHANAL S, ZHAO K G, et al. Remote sensing of chlorophyll- α and water quality over inland lakes: How to alleviate geo-location error and temporal discrepancy in model training[J]. Remote Sensing, 2024, 16(15): 2761.
- [15] BAE S, SEO D. Analysis and modeling of algal blooms in the Nakdong River, Korea[J]. Ecological Modelling, 2018, 372: 53-63.
- [16] 刘兆孝. 《长江保护法》对推进流域水资源保护重点工作的启示[J]. 长江技术经济, 2021, 5(2):17-20.
- [17] 王小艺, 白玉廷, 阳译, 等. 基于多源异构信息的藻类水华治理群决策方法[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(3):1575-1584.
- [18] 许海, 陈洁, 朱广伟, 等. 水体氮、磷营养盐水平对蓝藻优势形成的影响[J]. 湖泊科学, 2019, 31(5): 1239-1247.

- [19] 胡梅娟. 藻华衰亡过程中湖泊氮、磷迁移转化过程及机理研究[D]. 重庆:重庆大学, 2018.
- [20] MA D D, LI Y F, FU H F. Effect of high temperature on the balance between photosynthetic light absorption and energy utilization in *Chlorella pyrenoidosa* (Chlorophyceae)[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2020, 38(1): 186-194.
- [21] 邵晓峰, 刘炜, 钟逸云, 等. 不同温度对大叶藻生长与光合生理的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2022, 28(1): 175-181.
- [22] 余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 等. 风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(8): 3519-3529.
- [23] 刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 等. 降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析[J]. *环境科学*, 2018, 39(2): 774-782.
- [24] 孙昕, 叶丽丽, 赵伟丽, 等. 分层水库温度梯度对扬水曝气原位控藻效果的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(2): 352-358.
- [25] 陈洋, 杨正健, 黄钰铃, 等. 混合层深度对藻类生长的影响研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(8): 3049-3056.
- [26] 周妍, 赵巧华, 刘鹏. 垂向湍流扩散和光耦合对下沉藻增长的影响:基于内陆混浊湖泊(太湖)分析[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(2): 792-801.
- [27] 谢静, 程燕, 查燕, 等. 氮磷营养盐对铜绿微囊藻和斜生栅藻生长及竞争的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2021, 43(3): 694-702.
- [28] 李欢, 张修峰, 刘正文. 浮游动物调控对浮游藻类的影响[J]. *生态科学*, 2014, 33(1): 20-24.
- [29] 叶益华, 杨旭楠, 胡文哲, 等. 溶藻细菌的功能多样性及其菌剂应用[J]. *微生物学报*, 2022, 62(4): 1171-1189.
- [30] 彭凌云, 童超普, 李恒鹏, 等. 太湖流域池塘养殖污染排放估算及其空间分布特征[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(1): 70-78.
- [31] 欧阳佚亭, 宋国宝, 陈景文, 等. 中国淡水池塘养殖鱼类排污的灰水足迹及污染负荷研究[J]. *环境污染与防治*, 2018, 40(3): 317-322.
- [32] 张远, 夏瑞, 张孟衡, 等. 水利工程背景下河流水华暴发成因分析及模拟研究[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(8): 1163-1173.
- [33] 朱宇轩, 米武娟, 李波, 等. 南水北调中线干渠两个水工构筑物对着生藻类群落的影响[J]. *水生生物学报*, 2021, 45(4): 817-825.
- [34] 杜奕衡. 鱼类滤食与植物净化协同下藻华削减及氮磷迁移研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2019.
- [35] 铁程, 张榆霞, 金玉, 等. 显微镜计数法测定浮游植物的研究进展及修订建议[J]. *中国环境监测*, 2018, 34(6): 179-186.
- [36] 贾妍, 朱昱辉, 梁熙文, 等. 基于电导率和吸光度的水体藻类浓度监测研究[J]. *哈尔滨商业大学学报(自然科学版)*, 2020, 36(1): 21-24.
- [37] 尹美琳, 张嘉琪, 路春晖, 等. 蓝藻实时监测技术综述[J]. *价值工程*, 2019, 38(22): 208-209.
- [38] 范玉国, 李婉琳, 杨升洪, 等. 生物传感器技术在水质监测中的应用[J]. *环境与发展*, 2019, 31(12): 76-79.
- [39] 岳元长. 荧光法蓝绿藻在线测量仪的技术实现[J]. *福建电脑*, 2021, 37(10): 90-93.
- [40] 刘宇. 水环境检测中藻蓝蛋白浓度反演传感器分析[J]. *南方农机*, 2020, 51(6): 14.
- [41] 吕丽丽, 宋开山, 刘阁, 等. 内陆水体藻蓝蛋白遥感反演研究进展[J]. *遥感学报*, 2022, 26(1): 32-48.
- [42] 张运林, 张毅博, 李娜, 等. 利用陆基高光谱遥感捕捉太湖蓝藻水华日内快速变化过程[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(6): 1951-1960.
- [43] 石浚哲, 吴蔚, 宋挺, 等. 基于国产“风云三号”卫星 MERSI 的太湖蓝藻水华监测业务化应用[J]. *环境监控与预警*, 2018, 10(2): 6-10.
- [44] 张东彦, 尹勋, 余宝, 等. 多源卫星遥感数据监测巢湖蓝藻水华爆发研究[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(7): 303-314.
- [45] ZENG C Q, BINDING C E. Consistent multi-mission measures of inland water algal bloom spatial extent using MERIS, MODIS and OLCI[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(17): 3349.
- [46] MU M, WU C Q, LI Y M, et al. Long-term observation of cyanobacteria blooms using multi-source satellite images: A case study on a cloudy and rainy lake[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26(11): 11012-11028.
- [47] FRANKS P J S. Recent advances in modelling of harmful algal blooms[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2018, 10: 1-22.
- [48] QIU Y G, DUAN H T, WAN N S, et al. Design and practice of a platform for monitoring, early-warning and simulation of algal blooms in Lake Chaohu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(1): 38-48.
- [49] 任凯. 基于生长模型的太湖蓝藻生物量模型模拟研究[D]. 南京:南京师范大学, 2019.
- [50] 胡文, 李春华, 叶春, 等. 生态模型在水体富营养化研究领域的应用进展[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(2): 349-362.
- [51] 刘永伟, 王文, 刘元波, 等. 水文模型模拟预报的多源数据同化方法及应用研究进展[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(6): 483-491.

- [52] 林春焕. 藻类生长机制分析及其多智能体模型构建[D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [53] 张亮, 张震斌, 于德贵, 等. 氮和磷对藻类的抑制研究[J]. 绿色科技, 2020, 22(10): 186-187.
- [54] 王寿兵, 屈云芳, 徐紫然. 基于生物操纵的富营养化湖库蓝藻控制实践[J]. 水资源保护, 2016, 32(5): 1-4.
- [55] 钟少荣. 紊流脉动及植物激素对微藻生长特性及处理污水效果的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [56] 陈贺林, 李芸, 储昭升, 等. 超声波控藻技术现状及研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(1): 72-78.
- [57] 刘佩蕊, 洪喻, 谢兴. 藻华防控方法及灭活与捕获新技术研究进展[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(2): 171-185.

Research Progress on Mechanisms, Monitoring, Prediction, and Control Strategies of Algal Bloom Formation

DUAN ChunJian^{1,2}, WANG Zhe¹, ZHOU Wen²

(1. Henan Branch of China South-to-North Water Diversion Middle Route Corporation Limited, Zhengzhou 450018, China;

2. Hinggan League Water Resources Bureau, Hinggan League 137400, Inner Mongolia, China)

Abstract: Algal blooms, caused by abnormal proliferation of algae, lead to water quality deterioration, depletion of dissolved oxygen, and the release of algal toxins, posing a serious threat to drinking water safety and the health of aquatic ecosystems. This is a global water environmental challenge. Based on a systematic review of the mechanisms underlying algal bloom formation, this study focused on the key influences of eutrophication, hydrometeorological conditions, biological interactions, and human activities on the occurrence and development of blooms. In terms of monitoring and prediction, the limitations of traditional methods were discussed, followed by a detailed exploration of the latest advancements, advantages, and challenges associated with remote sensing technologies and numerical simulation models. Current research still faces key challenges such as the complex mechanisms of algal growth and toxin production, limitations in the accuracy of predictive models, and the need for breakthroughs in long-term ecological algal control technologies. Future studies could focus on deepening the research into multi-process coupling mechanisms, developing high-precision intelligent prediction and early warning technologies, creating green and efficient algal control materials and methods, constructing an adaptive management framework based on ecosystem principles, and enhancing integrated research from a social-ecological system (SES) perspective.

Key words: algal bloom; formation mechanisms; prediction technology; control strategy; eutrophication

【责任编辑 张颖娟】