

湖库蓝藻水华应急治理技术研究现状与展望

郝越^{1,2}, 杨霞³, 龙萌^{1,2*}, 王振华^{1,2}, 林莉^{1,2}

¹长江科学院流域水环境研究所, 湖北 武汉

²长江科学院流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉

³中国长江三峡集团有限公司流域枢纽运行管理中心, 湖北 宜昌

收稿日期: 2023年2月28日; 录用日期: 2023年3月28日; 发布日期: 2023年6月27日

摘要

针对我国湖库蓝藻水华治理需求, 首先从蓝藻生理生态特性、水质条件、气象条件、水文水动力条件和水生生物群落结构等方面简要分析了湖库蓝藻水华暴发成因与机理, 简述了湖库蓝藻水华产生的危害及监测手段, 然后重点从物理、化学和生物三个方面对现有的应急除藻技术原理、适用范围、优势和不足进行了梳理总结, 最后对蓝藻水华应急治理技术的研究方向与应用前景提出了展望。认为应针对湖库富营养化特点及水体净化需求, 研发适应于水体低浓度营养盐高效削减、轻度水华防控抑藻、中重度水华应急除藻、抑藻除藻后水质持续改善等多场景的水质净化关键技术及装备, 同时提出“多技术优化集成开发、便捷智能化操作、绿色节能环保、除藻技术与湖库水质富营养化监测预警相结合”等是未来的发展方向。

关键词

蓝藻水华, 成因与机理, 监测预警, 应急治理技术

Research Status and Prospect of Emergency Treatment Technology for Cyanobacteria Bloom in Lakes and Reservoirs

Yue Hao^{1,2}, Xia Yang³, Meng Long^{1,2*}, Zhenhua Wang^{1,2}, Li Lin^{1,2}

¹Basin Water Environmental Research Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan Hubei

²Key Lab of Basin Water Resource and Eco-Environmental Science in Hubei Province, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan Hubei

³Operation and Administration Center for River Basin Hydro Complex, China Three Gorges Corporation, Yichang Hubei

Received: Feb. 28th, 2023; accepted: Mar. 28th, 2023; published: Jun. 27th, 2023

作者简介: 郝越(1997-), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 研究方向为流域水环境与生态, Email: hy970706@foxmail.com

*通讯作者 Email: longmeng@mail.crsri.cn

文章引用: 郝越, 杨霞, 龙萌, 王振华, 林莉. 湖库蓝藻水华应急治理技术研究现状与展望[J]. 水资源研究, 2023, 12(3): 226-237. DOI: 10.12677/jwrr.2023.123026

Abstract

Aiming at the demand of cyanobacterial bloom control in lakes and reservoirs in China, this paper briefly analyzes the causes and mechanisms of cyanobacteria blooms in lakes and reservoirs from the aspects of physiological and ecological characteristics of cyanobacteria, water quality, meteorology, hydrology and hydrodynamics, and aquatic communities. The harm and monitoring methods of cyanobacterial bloom in lakes and reservoirs are briefly described. The principles, application scope, advantages and disadvantages of the existing emergency algae removal technology are summarized from three aspects of physics, chemistry and biology. Finally, the research direction and application prospect of emergency management technology are prospected. The key technologies and equipment for water purification should be developed according to the characteristics of eutrophication of lakes and reservoirs and the needs of water purification, such as efficient reduction of low-concentration nutrients in water bodies, prevention and control of mild algal blooms, emergency algae removal of moderate and severe algal blooms, and continuous improvement of water quality after algae inhibition and algae removal. The multi-technology optimization and integrated development, convenient and intelligent operation, green energy conservation and environmental protection, algae removal technology and lake water eutrophication monitoring and early warning are suggested the future development directions.

Keywords

Cyanobacteria Bloom, Causes and Mechanisms, Monitoring and Early Warning, Emergency Treatment Techniques

Copyright © 2023 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球气候变化和人类活动影响的加剧，生态环境正在面临着严峻的风险与挑战，湖库蓝藻水华频发即是流域水环境领域所面临的重要挑战之一，蓝藻又称“蓝细菌”，是一种光合自养型原核生物，广泛分布于全世界水体中。蓝藻水华是蓝藻门藻类过度增殖并在水面大量聚集的一种水环境污染现象。

近年来，国内外湖库均有不同程度的蓝藻水华暴发。在国内，云南滇池是我国水质污染较为严重的湖泊之一，在2015年暴发大规模的蓝藻水华[1]；江苏太湖在整个“十三五”时期蓝藻水华平均聚集次数达107次[2]；安徽巢湖在2010~2015年间蓝藻水华暴发的频率整体呈现持续增加的趋势[3]；此外，三峡水库部分支流库湾也有不同程度的水华发生[4]。在国外，美国犹他湖[5]、伊利湖[6]，俄罗斯贝加尔湖[7]，巴拉圭伊帕卡莱湖[8]等世界各地的湖泊都暴发过蓝藻水华。

2020年4月，生态环境部在部署重点湖库水华防控工作中着重强调要做好应急防控工作，健全应急工作机制，提高应急处理能力，有效防范化解重大生态环境问题风险隐患。作为防控措施的核心组成部分，蓝藻水华的应急处理技术一直是该领域研究热点，其主要包括物理除藻技术、化学除藻技术以及生物控藻技术等。

本文对湖库蓝藻水华的成因和危害进行简要分析，重点从物理、化学和生物三个方面对当前蓝藻水华应急处理技术进行梳理总结，并分析总结不同技术的原理、适用范围及优缺点，为今后蓝藻水华应急处理技术的进一步研究及应用提供参考。

2. 蓝藻水华的成因

关于湖库蓝藻水华暴发成因,国内外学者已经进行数十年的研究。大多数学者认为,水华是当水体中出现富营养状况并具备适宜的温度、光照、气候及合适的水文条件等有利于藻类生长或聚集的环境条件时,水体藻类大量生长繁殖或聚集并达到一定浓度的现象[9] [10]。周兵等[11]通过文献计量的方法分析了 2014 年至 2019 年关于蓝藻水华成因的文献,归纳出蓝藻水华暴发的主要原因包括光照、温度、营养盐以及大型水利工程四个方面。姚金忠等[12]对 2010 年至 2020 年期间三峡库区 12 条重点支流的水质数据进行分析,认为蓝藻水华暴发的根本原因为充足的氮磷营养盐,次要原因包括温度、透明度以及水动力条件。由此可见,蓝藻水华的暴发与蓝藻自身的生理生态特性及其生长的环境(如水质条件、气候条件、水文水动力条件、水生生物群落结构等)等因素有关。其中,藻类的生理生态特性被认为是水华形成的内因,而水环境因素则是蓝藻水华暴发的外因[13]。

2.1. 生理生态特性

蓝藻具有伪空胞、胶质鞘、CO₂ 浓缩机制、适应低光强、贮藏营养物质、防晒、产毒素和固氮等独特的生理生态特性,因此它可在水体中与其他浮游植物形成竞争关系。例如,蓝藻所具有的伪空胞可提供浮力,有助于其上浮占据光照条件较好的空间位置,对水生植物和其他藻类形成竞争光的优势[14]。当蓝藻在水中处于适宜的生长条件时,就会导致水华暴发。

2.2. 水质条件

1) **pH**: 水体 pH 主要通过改变环境酸碱度和影响碳酸盐平衡系统及不同形态无机碳分配关系两方面来影响藻类的生长。pH 值过高或过低都会对藻细胞产生伤害,只有在适宜的范围内,藻细胞才能正常生长繁殖。不同藻类生长适宜的 pH 值范围也不尽相同,一般认为蓝藻适宜较高的 pH。陈建中等[15]研究表明,铜绿微囊藻作为淡水湖库中常见的优势蓝藻藻种,最适 pH 为 8.0~9.0,当 pH 超过 9.0 时,铜绿微囊藻的生长会受到抑制。

2) **溶解氧**: 溶解氧是重要的水质指标,也是藻类生长繁殖的重要环境因素之一。溶解氧与蓝藻的关系十分复杂,当蓝藻的光合作用大于呼吸作用时,水体溶解氧的含量会增加,反之则会降低。当水体中溶解氧含量过低时,会造成蓝藻因缺氧而死亡;而溶解氧含量的增大,会削减 HCO₃⁻ 的浓度、增加水体的 pH,当溶解氧含量达到一定程度时,也会使得蓝藻的生长和繁殖受到限制[16]。

3) **氮磷营养盐**: 水质的化学特性对蓝藻的影响十分显著,尤其是水中的氮、磷营养盐浓度。氮、磷浓度是蓝藻水华产生的关键因素之一,当 TN:TP 处于某一合适值时,易暴发蓝藻水华。蓝藻细胞组成的原子比率 C:N:P = 106:16:1, Figler Aida 等[17]研究发现,当 TN:TP 在 10:1~25:1 范围时,蓝藻生长繁殖速度与氮、磷浓度存在直线相关关系;TN:TP 在 12:1~13:1 时最适宜蓝藻生长。此外,如果 TN:TP 超过 16:1 时,磷被认为是限制性因素;反之,当 TN:TP 小于 10:1 时,氮通常被考虑为限制性因素;而当 TN:TP 在 10~20 之间时,限制性因素则变得不确定[18]。当前关于蓝藻与营养盐浓度关系的研究大多都只针对某一特定的湖泊,不同地域不同湖泊的营养盐阈值或许有所不同。

4) **微量元素**: 微量元素也是藻类生长的重要条件,水体中微量元素的类型和含量一定程度上影响蓝藻的生长和增殖[19]。铁、钼、钴等是蓝藻生长所需的微量金属元素,当水体中的铁含量较高时,水体氮循环过程中硝酸盐、亚硝酸盐还原酶的活性增强,从而亚硝态氮被还原,降低水体氮含量,使得氮成为藻类生长的限制因素,进而降低水体富营养化程度。当水体中 TN:TP 为 40:1,铁离子浓度为 1.2 mg/L 时,蓝藻的生长速率最快;当铁离子浓度为 0 时,藻类基本不生长;当 TN:TP 为 80:1 或铁离子浓度为 4.8 mg/L,抑制蓝藻生长和繁殖[20]。另外,不同价态的铁元素对藻类生长的影响也不同,Fe³⁺相较于 Fe²⁺更有利于促进蓝藻的生长[21]。因此,在控制蓝藻生长时,不仅要控制水中氮磷比,同时需要控制水体中的铁离子浓度。水体中微量元素的含量一定程度上会促进或抑制蓝藻的生长和增殖,但各微量元素在湖库水体中的具体影响阈值尚未取得较为统一的

结论。

2.3. 气象条件

1) **温度**: 温度则主要通过影响水生植物生命活动所需酶的活性, 从而引起酶促反应的反应速率不同来影响藻类的生长, 通常 $10^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ 的温度范围下, 温度每升高 10°C , 浮游植物将提高一倍多生长率。蓝藻最适的生长温度位于 $25^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ 之间。铜绿微囊藻易在高温的夏季暴发。有研究表明, 铜绿微囊藻耐受高温的能力较其他藻类更强, 而耐低温的能力较弱, 铜绿微囊藻适宜的生长温度约为 30°C [22]。

2) **光照**: 光照会影响藻类的生长速率、光合活性以及酶的活性等等, 光照强度、频率、波长和明暗周期等都是重要影响因素。光照强度的大小是影响藻类生长的重要因子, 光合作用的速率因光照强度的变化而发生变化。除此之外, 不同藻类对光照的需求度也不同。铜绿微囊藻的最适光强约为 $77.4\ \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, 拟柱胞藻约为 $72\ \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, 鱼腥藻约为 $39.6\ \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ [23]。

3) **降雨**: 降雨一方面会导致水量增加, 加快藻类的迁移, 当湖库水体热分层受到破坏时, 就会抑制藻类的生长。另一方面, 湖库热分层未发生改变时, 降雨形成的径流可携带陆面的污染物进入湖库, 使得水体营养盐含量增加, 从而促进蓝藻水华的暴发 [24] [25]。

4) **风场**: 风场会干扰浮游生物的生长, 也会改变水体的流速和扰动情况。蓝藻多浮于湖库水面, 风场直接影响湖库封闭水体的表层流动, 间接影响蓝藻水华的迁移聚集, 使其具有一定的空间分布差异性。研究表明, 在封闭的浅水湖泊中, 气温高于 20°C , 风及其引起的水力扰动成为促进蓝藻水华增殖的主要影响因子 [26]。因此, 条件适宜的风场可能会促进蓝藻水华短时间内的局部暴发。

2.4. 水文水动力条件

1) **水位**: 水位变化会破坏水体原有的稳定性, 从而改变水体的光、热等理化条件, 特别是在分层的湖库中。研究表明, 水位变化较小时, 不能够有效抑制藻类的生长, 只有当水位变化幅度超过一定程度, 才能达到较好的抑制效果 [27]。

2) **流速**: 流速是水动力条件最基本的表征因子, 水流流速能够直接或间接影响藻类的生长。藻类生长的水流流速可能存在某一阈值, 一旦超过临界流速, 则生长便受到抑制。蓝藻适宜在流速较低的水体中生长, 就铜绿微囊藻而言, 在河道环境中, 最利于铜绿微囊藻生长的临界流速为 $0.30\ \text{m/s}$, 当流速大于 $0.50\ \text{m/s}$ 时微囊藻几乎不再生长; 在湖泊环境中, 一定强度的风浪有削弱藻类水华的作用, 但是微风则有利于藻类的聚集。对太湖蓝藻水华的研究表明, 风速在 $0\sim 2\ \text{m/s}$ 时, 微囊藻容易上浮聚集但只发生缓慢的水平漂移, 易形成大面积薄层的水华; 风速在 $2\sim 4\ \text{m/s}$ 时, 微囊藻容易上浮聚集并能够快速水平漂移, 易形成面积偏小的厚层水华; 在风速大于 $4\ \text{m/s}$ 时, 微囊藻受强烈的紊流作用而难以上浮, 而已经上浮的藻类受到扰动混合在垂向较为均匀分布, 从而导致水华现象消退 [28]。

3) **其他水体扰动**: 除水平流动外, 环形扰动、振荡以及水循环等扰动方式对藻类生理生态学的影响结果也不同。由于部分蓝藻具有自主的垂直运动和水平迁移的能力, 水体扰动会影响蓝藻的生理生化过程。适当强度下的间歇扰动能促使水华微囊藻群体扩张, 而长时间的持续扰动会抑制微囊藻群体的生长 [29], 不仅如此, 扰动还会促进水体中藻毒素浓度的升高, 严重影响水体水质。

2.5. 水生生物群落结构

水生生物群落结构对蓝藻水华的影响主要基于物种间的滤食关系和营养竞争, 在食藻浮游动物种类数量稀少、大型水生植物覆盖度过低的水体中, 水华更容易暴发。湖库水生态系统中, 成百上千种的水生生物之间形成了复杂的食物链网结构和能量流动场, 合理的种群结构可有效地抑制水华暴发。

2.6. 其他因素

人类活动对湖库富营养化的影响主要表现为生活或工业污水的排放、水利工程的修建以及湖泊水系的连通等。若污水的排放量超过湖库等封闭水体的自净能力,则可能使水体氮磷营养盐超标,进一步导致水体富营养化和暴发水华。水利工程的修建和湖泊水系的连通使得原水体水量、流速、水质等发生变化,水生生物的种类、数量也会有所改变,从而影响水华的发生。

3. 蓝藻水华的危害

1) 影响水生态环境,破坏水生态景观。蓝藻水华的暴发导致水体透明度下降,水生植物光合作用减少,水体溶解氧含量降低,可能导致部分水生动植物因缺少氧气或食物而大量死亡,水体散发异味[9]。随着蓝藻的快速生长繁殖,水体会进一步恶化,水生生物群落结构改变,水生生物多样性丧失,水景观、水环境、水生态系统等都会受到破坏。

2) 影响水源地水质,增加水处理成本。水源地蓝藻水华的暴发还会降低水处理工艺的处理效能,增加水厂处理的运行难度[18]。藻类可释放大量的有机质,有机质氧化后会消耗管网中的余氯,因此,进入管网中的藻类可为细菌的生长繁殖提供合适的环境。久而久之,菌藻混合体在管壁附着、腐蚀和结垢,使给水水质恶化的同时也加速了管道的损耗,这也就增加了配水系统的运行和维护成本。

3) 影响生活生产,威胁人体健康。藻类会释放多种藻毒素,严重威胁人类和鱼类等健康,且传统的净水工艺难以彻底消除。另外,某些藻类及其代谢物质经常规消毒后,形成的消毒副产物具有一定的致病性[4]。严重的蓝藻水华既可能导致水生生物的死亡和水产行业受挫,又可能妨碍水路的正常航行,还可能造成饮用水供水危机,影响人类正常的生产生活。

4. 蓝藻水华的预警

加强重点湖库水质和蓝藻水华的监测预警工作,是水生态环境综合管理的重点内容。其中,运用计算机模型研究蓝藻水华的成因机制和动态变化,是预测湖库蓝藻水华的暴发重要手段。目前国内外关于水质和蓝藻水华的预测已经研究出多种理论方法和模型,按照水质预测的空间维数可划分为一维模型、二维模型和三维模型;按照污染物的范围,又可划分为单因子模型和复合水质模型;按照模型的理论基础,还可分为水质模拟模型预测法、数理统计预测法和神经网络模型预测法等[30]。

一维稳态氧平衡模型 S-P 模型是运用最早的水质模型,后来国外逐步研发了 QUAL2K 模型、WASP 模型、MIKE 模型、EFDC 模型、AQUATOX 模型、SWAT 模型等,国内学者也在此基础上进行过深入地开发和改进,大多模型都是以污染物在水体中的变化过程以及各因素之间的数量关系为基础,搭建污染物的迁移转化模型,从而实现水环境污染的预测和预警[30]。随着对预测精度、原始数据等,人工神经网络模型如 BP 神经网络模型、RBF 神经网络模型等和数理统计模型如 SVR 回归模型、RVM 模型等凭借训练速度快、预测精度高等优势得到广泛的关注和应用。近年来,基于多因素或多方法的耦合模型在水质预测领域应用较多,崔玉洁等[31]应用 CE-QUAL-W2 模型研究降雨及水库调度过程中藻类水华生消过程,模拟结果较好。邱银国等[32]结合巢湖水动力-水质-藻类耦合模拟模型,研发设计了巢湖蓝藻水华监测预警与模拟分析平台,实现了巢湖水质和水华的高精度预测预警,合理将多种模型进行耦合能够增加水质预测结果的可靠性和稳定性,避免单一模型预测的不确定性风险。在推进智慧水利的建设工作中,结合“3S”技术的水质预测模型可以进一步提高水质的预测和管理能力,将会是未来重要的发展方向。总之,做好蓝藻水华的监测预警,就能够尽早发现异常情况并主动采取相应处理技术。

5. 应急处理技术

目前,藻类应急处理技术一般可分为物理技术、化学技术和生物技术。物理和化学除藻技术多用于蓝藻水

华暴发期间的治理, 生物技术则更适用于蓝藻水华的前期预防和暴发后期的水体修复。不同除藻技术的适用条件和效果有所不同, 具体使用需结合实际情况而定。

5.1. 物理除藻技术

物理除藻技术大体上可分为两类(表 1), 一类为异位处理技术, 指的是通过人力、机械设备或者分离介质等将藻水分离, 从而减少水体中藻类的含量, 如人工/机械捞藻、藻水分离技术等等; 另一类为原位处理技术, 指通过改变原水水体的环境条件, 形成不利于蓝藻生长的环境, 间接抑制蓝藻的增殖, 如引水换水、整流幕除藻、生态调度控藻等; 也可以直接作用于蓝藻细胞, 破坏蓝藻的生理生态特性, 加速蓝藻的死亡, 如遮光控藻、超声波除藻等。

1) 打捞除藻: 打捞除藻是采用人工和机械手段直接将藻类从水体中打捞上岸的方法, 是目前国内湖库清除蓝藻的主要措施之一。该方法简单、有效、无二次污染, 适用于藻浓度较高的中小型水体。由于通常需投入大量人力和物力, 在大型水体中实施困难。机械化、自动化的蓝藻打捞技术是今后的发展趋势[10]。

2) 藻水分离: 藻水分离是指采用单一或者组合的物理技术手段将藻水分离, 从而将藻类集中处理的方法, 如过滤、曝气增氧、“混凝沉淀 + 过滤”“混凝沉淀 + 气浮”以及“气浮 + 过滤”等。过滤除藻分为普通过滤、微滤和超滤, 优点是无二次污染, 不足是需经常清理或更换滤网。曝气增氧除藻技术是对下层水体充氧以提高其溶解氧浓度, 同时破坏藻类的生存环境, 影响藻类的悬浮状态, 使之向下层迁移, 从而抑制其生长。曝气增氧除藻技术可以直接提升底层水体的溶解氧含量, 改善底层水体的厌氧环境, 却不能从根本上改变水体营养盐浓度, 且水体结构分层很可能会对其他水生生物造成影响。组合式藻水分离技术除藻效率高、实用性强, 除藻的同时能够携带出大量的氮磷[33], 具有广泛的应用前景。

3) 引水换水抑藻: 引水换水抑藻是一种工程抑藻手段, 是通过改变原水水体的水量、流速等水动力条件来控制水华的形成, 主要方式有稀释冲刷、引水调度等。引水换水技术能高效处理大面积的水华水体, 适用于连通型的湖泊和河流水体, 而在实际应用中受来水条件、防洪、发电等多种因素的限制, 不能够随时响应控藻调度需求[10]。

4) 整流幕抑藻: 整流幕技术就是利用水动力学原理改变水体中的能量交换、水团混合及水体分层等过程, 从而改变光照、水温、营养盐等藻类生境要素来抑制水华的发生[34]这种技术对于狭长型河流, 特别是对于水深大、流速慢的河道和水库都有很好的应用效果, 但是相关的研究还处在初级阶段, 并且在我国还没有真正意义上的工程应用, 另外这种方法还会受航运的制约。

5) 生态调度控藻: 潮汐式生态调度控藻技术是利用水体分层异重流的特点, 在短时间内通过水位的升降来增加干支流之间水体交换, 打破水体分层状态的同时支流泥沙含量对藻类生长产生抑制作用, 适用于具有分层异重流的且方便调度的湖库水体[35]。它具有影响范围广, 效果好, 见效快, 成本低等优点, 能周期性改变水库藻类的生境条件, 抑制单一藻类滋生等; 缺点是工程量较大, 并会受到实际工程运行的影响。

6) 遮光抑藻: 遮光抑藻主要是将浮板、遮阳网等遮光材料覆盖在湖库表面, 通过限制光照条件来抑制藻类生长和增殖, 适合在面积较大、受风力影响较小的湖库水中应用。大面积铺设遮光材料实施困难且费用昂贵, 还可能会给水体中其他生物的生长带来负面影响[36]。

7) 超声波除藻: 超声波除藻是近年来国内外关注较多的一种除藻技术, 主要工作原理是利用超声波的空化泡共振效应、高温裂解效应、自由基氧化效应和微射流剪切效应控制水中的藻类, 主要有两种途径: 一是破坏藻类细胞壁进行直接除藻, 二是抑制藻类细胞生长[37]。超声波除藻技术具有自动化操作、反应温和、速度快等优点, 缺点是不具有持续抑藻的能力, 能耗大, 单独使用时成本高、辐射范围有限, 需要联合其他技术组合使用。

5.2. 化学除藻技术

化学除藻技术一般均为原位除藻, 可分为化学药剂除藻和高级氧化技术除藻(见表 2)。化学药剂除藻操作简

Table 1. Physical treatment techniques for cyanobacteria bloom**表 1.** 物理除藻技术

技术类别	技术名称	优缺点	适用性	参考文献
原位处理技术	打捞除藻技术	优点: 方法简单、有效、无二次污染 不足: 需投入大量人力和物力	适用于中小型河流、景观水体	[10]
	藻水分离技术	优点: 操作简单、除藻效率高 不足: 过滤设备需定时清理; 传统气浮设备占地面积较大、能耗高; 投加絮凝剂后, 出水中含有药剂残留等	适用于较大型湖库, 通常需要建造大规模的藻水分离站	[33]
异位处理技术	引水换水	优点: 能高效处理大面积蓝藻水华 不足: 受上游来水条件和机组运行条件的限制, 效率低, 可能会对下游水体带来隐患	适用于大型连通型湖库藻类水华的防治	[10]
	整流幕技术	优点: 环保、高效、无污染 不足: 国内应用案例较少, 相关研究不完善	适用于狭长型河流, 尤其适用于水深较大, 流速缓慢的河道、水库	[34]
	生态调度	优点: 影响范围大、作用强、见效快, 能周期性地改变水库藻类生境条件, 遏制单一藻类的繁殖 不足: 工程量大, 且会受实际工程运行情况, 不能够随时响应调度需求	适用于具有分层异重流且方便调度的湖库水体	[35]
	遮光抑藻	优点: 抑藻率高, 见效快 不足: 施工难度大, 可能对水体中其他生物的生长产生不利影响	适用于面积较大、受风力影响较小的湖库水体	[36]
	超声波除藻	优点: 绿色环保、经济可行、安全友好、效果明显 不足: 持续抑藻能力弱, 单独使用能耗大	适用于湖泊、水源地、游泳池、池塘、污水处理厂等	[38]

Table 2. Chemical treatment techniques for cyanobacteria bloom**表 2.** 化学除藻技术

技术名称	优缺点	适用性	参考文献
化学药剂除藻	优点: 操作简便、短期除藻效果明显 不足: 存在水体二次污染的风险	多适用于小型景观水体和一般湖库局部的蓝藻治理	[39] [40]
高级氧化技术	优点: 氧化性强, 效率高, 能降解藻毒素 不足: 大多技术处在实验阶段, 工程实用性有待考虑	适用于流动性较小的湖库水体	[41] [42]

便、省时省力、应急能力强, 效果立竿见影, 因此应用也较为广泛。然而, 化学药剂除藻没有选择性, 在抑制蓝藻生长的同时, 也可能对水中的其他生物产生威胁。一些除藻剂和絮凝剂或本身具有一定的毒性, 或使用后会生成有毒的副产物, 亦或使藻细胞破裂, 释放藻毒素等, 对水环境的负面影响较大, 易引发二次污染。于是, 电化学、光化学以及其他高级氧化技术应运而生。高级氧化技术不仅具有除藻效率高的优点, 而且无需投放化学药剂的同时可以有效降解藻毒素, 弥补化学药剂除藻的不足, 是环保高效的新型除藻技术, 极具应用潜力。近年来, 许多学者主要致力于研究不同高级氧化技术的除藻机理和除藻效果的优化, 而该技术在实际应用中的可行性研究和长期使用产生的生态效应尚需深入的论证。

1) 化学药剂除藻: 化学药剂除藻分为除藻剂除藻和絮凝剂除藻。除藻剂除藻是指向水体中投加二氧化氯、过氧化氢、臭氧、高锰酸盐、高铁酸盐等氧化剂或含铜离子、镉离子等能够抑制藻类生长的杀藻剂实现对藻类的去除。絮凝剂除藻是用黏土、药品等无机絮凝剂或有机絮凝剂等絮凝沉降除藻[39]。

除藻剂和絮凝剂作为传统的化学药品除藻技术, 能够快速杀死水体中的藻细胞, 操作简便, 见效快。但是化学药剂的使用会导致二次污染的风险, 影响水环境与水生态。因此, 既能达到良好的除藻效果, 又要控制化

学药剂的使用剂量是化学除藻技术研发的关键所在[40]。

2) 高级氧化技术除藻:高级氧化技术除藻技术是一种物理氧化除藻技术,它是通过声、光、电等作用产生具有强氧化性的物质来实现除藻的效果,如微电流电解抑藻、低温等离子体除藻等。微电流电解抑藻技术是通过微电流电解在水中产生一系列半衰期较长的活性物质以抑制藻类的生长,适用于小型湖库、池塘、景观水体等的治理[41]。低温等离子体除藻技术是集光、电、化学氧化于一体的新型环境除藻技术,可高效破碎藻细胞,对藻毒素和细胞内含物具有分解与降解作用,无选择性、无二次污染,具有清洁、高效、环境友好的优势[42]。目前,此类技术多处于室内实验或初期探索阶段,实际应用效果还需更多的野外试验研究和中试验证。该新技术氧化性强、抑藻效果明显、无二次污染,但存在处理成本较高、会受一定的反应条件干扰、相关研究仍不够完善等问题,目前尚未得到广泛应用。

5.3. 生物控藻技术

生物除藻技术主要基于生态学原理,利用物种间的捕食和竞争关系,调节水生生物的群落结构,形成合理的食物链或食物网,以此抑制藻类的增殖,保证水生生态系统的平衡与稳定。生物除藻技术包括水生动物控藻、水生植物控藻、微生物控藻以及生态修复工程控藻等(见表3)。

Table 3. Biological treatment techniques for cyanobacteria bloom

表 3. 生物除藻技术

技术名称	优缺点	适用范围	参考文献
水生动物抑藻	优点:可提高水体生物群落结构,可有效改善水质,长期抑藻效果明显 不足:经典生物操纵技术浮游动物种群数量少,摄食藻类能力有限,对群体蓝藻水华的控制不明显;非经典生物操纵技术可能使氮磷营养盐的含量不降反增,可能诱导水华的二次暴发	适用于一般的浅水湖库,尤其是适宜鱼类生存的水体	[43]
水生植物抑藻	优点:能够降解营养盐,可长期改善水质 不足:有外来物种入侵风险,见效时间较慢,当藻类大量暴发时植物容易死亡	多用于湖泊、河道、水库、景观水域的藻类预防和长期修复	[44]
生态修复工程	优点:可以起到拦污截污、吸收养分的作用,同时具备经济、生态效益 不足:周期较长,不适于突发性水华的治理	较适用于受外源污染影响严重的湖库、河流、景观水域的蓝藻水华预防	[45] [46]
微生物控藻技术	优点:具有特异性、操作简单、可维持水体生态平衡 不足:大多处于室内实验阶段,相关研究薄弱,可能存在影响生态系统安全性的风险	多适用于小型景观水体和生物分布垂直空间差异较小的湖库	[47]

1) 水生动物控藻:水生动物控藻分为经典生物操纵技术和非经典生物操纵技术。经典生物操纵技术是通过控制牧食浮游动物的鱼类、改变鱼群结构的方式,来提高浮游动物的数量,从而控制藻类的过度生长、降低藻类生物量。而非经典生物操纵技术简单来说,就是直接利用滤食浮游植物的鱼类和软体动物来控制藻类的增长[43]。前者适宜在轻度中度富营养化的浅水湖泊中使用,但通常作用不明显、长期稳定性难以评估,也无法削减水体中的氮、磷的浓度;后者则适用于大多数富营养化的浅水湖库,尤其是含有鲢鱼、鳙鱼等生存的水体,鲢鱼和鳙鱼可以摄食丝状或聚集性的蓝藻,并对蓝藻毒素有较强的耐性,这一方面能够弥补经典生物操纵技术的不足,但是也不能降低水中氮、磷营养盐的浓度,反而可能会浓度增加,导致水华的二次暴发。

2) 水生植物控藻:一般的水生植物可通过竞争营养来间接抑藻,如浮萍、菖蒲、凤眼莲、金鱼藻等部分水生植物也可通过释放化感物质直接抑藻[44]。水生植物控藻运行成本低,实施简单,能够有效吸收水体中的营养盐,且不产生二次污染。缺点是见效时间较慢,当藻类大量暴发时难以起到很好的抑制效果。

3) **生态修复工程控藻**: 基于水生生物控藻和生态修复的原理, 建造植被过滤带、生态缓冲区、人工湿地、生态浮岛等设施, 来抑制蓝藻水华的发生。生态工程较多用于小型河道、景观湖泊的局部藻类治理, 可以多个工程组合应用, 能起到拦污截污、吸收营养盐的作用, 符合河湖湿地的生态环保要求[45] [46]。

4) **微生物控藻**: 噬藻体、原生生物、溶藻细菌、真菌、放线菌等微生物可直接作用于藻细胞, 破坏藻的细胞结构; 也可通过降解水中过量的营养物质抑藻; 此外, 某些微生物还有絮凝除藻的作用[47]。微生物控藻具有特异性、可维持水体生态平衡、成本低廉、操作简便。然而, 相关研究仍较为薄弱, 大多技术还停留在室内实验阶段, 缺乏长期的生态安全性评估。

6. 研究展望

蓝藻水华频发仍是许多湖库突出的生态环境问题, 其应急处理技术的研究及应用依然任重道远。随着我国生态环境保护要求和科学技术创新能力的提高, 蓝藻水华的治理技术也得到不同程度研发和应用, 各类技术的优缺点和适用性也存在差异。因此, 未来在湖库蓝藻水华治理技术的研发和实际应用过程中, 仍需要重视以下几个方面:

1) 湖库富营养化一般经历“营养盐富集→轻度水华多发→中重度水华频发→水质急剧恶化”等多个场景和复杂过程。因此, 应针对湖库富营养化特点及水体净化需求, 研发适应于水体低浓度营养盐高效削减、轻度水华防控抑藻、中重度水华应急除藻、抑藻除藻后水质持续改善等多场景的水质净化关键技术及装备, 并加快开展技术优化、中试验证和相关装备的研发, 推进实用高效的应急治理技术规模化应用与落地见效。

2) 便捷智能操作与绿色节能环保是今后湖库蓝藻水华应急治理技术及装备研发的一个重要方向。机械化水平低、能耗高的物理除藻技术设备, 需加快优选处理单元和工艺参数, 提高装备智能化水平, 同时考虑借助太阳能、风能等清洁能源, 达到提效降耗的目的, 有效助力碳达峰和碳中和。化学除藻技术要尽量避免或降低有毒有害物质对水体水质的污染。生物控藻技术要充分考虑当地的生物种群结构, 减少生态系统破坏的风险, 避免外来物种入侵。

3) 对于大规模暴发水华的湖库而言, 单一治理技术的处理效果有限, 将具有协同治理作用的多种技术进行优化集成开发, 同时将应急除藻技术与污染源削减技术、水生态修复技术、藻类资源化利用技术有效衔接与组合, 是今后湖库蓝藻水华防控研究的重点工作之一。

4) 不同水文水动力、地理及社会环境条件下湖泊和水库发生富营养化的污染物及藻华类型、经历过程、持续时间、严重程度等各具特殊性和差异性, 蓝藻水华应急治理技术还应充分考虑湖库的地形条件、水质条件、生态要求等, 因时因地进行选择, 以保证除藻技术的合理性和除藻效益最大化; 同时, 各地也应制订蓝藻水华的应急和预警监测方案, 加快推进除藻技术与湖库水质富营养化监测预警系统的相结合, 实现水华防控的信息化管理, 便于及早介入处理, 从而提高抑藻效果, 降低治理成本; 另外, 也有必要推进藻类的资源化利用能力, 防止生物资源的浪费。

基金项目

本论文依托国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点项目(U21A20156)以及长江科学院技术开发和成果转化推广项目(CKZS2017008/SH)的支持。

参考文献

- [1] 崔松云, 李显鸿. 2015 年滇池蓝藻水华爆发原因分析及对策研究[C]//中国科学技术协会学会学术部, 吉林省人民政府. 湖泊湿地与绿色发展——第五届中国湖泊论坛论文集. 长春: 吉林人民出版社, 2015: 198-202.
CUI Songyun, LI Xianhong. Causes analysis and countermeasures of cyanobacteria bloom in Dianchi Lake in 2015. In Academic Department of Society of China Association for Science and Technology, The People's Government of Jilin Province.

- Lakes, wetlands and green development: Proceedings of the fifth China lake forum. Changchun: Jilin People's Press, 2015: 198-202. (in Chinese)
- [2] 江苏省生态环境厅. 2020 年江苏省生态环境公报[R]. 2020. Department of Ecology and Environment of Jiangsu Province. Eco-environment bulletin of Jiangsu Province in 2020. 2020. (in Chinese)
- [3] 唐晓先, 沈明, 段洪涛. 巢湖蓝藻水华时空分布(2000-2015 年) [J]. 湖泊科学, 2017, 29(2): 276-284. TANG Xiaoxian, SHEN Ming and DUAN Hongtao. Temporal and spatial distribution of algal blooms in Lake Chaohu, 2000-2015. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(2): 276-284. (in Chinese)
- [4] 邱光胜, 胡圣, 叶丹, 等. 三峡库区支流富营养化及水华现状研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(3): 311-316. QIU Guangsheng, HU Sheng, YE Dan, et al. Investigation on the present situation of eutrophication and water bloom in the branches of three gorges reservoir. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(3): 311-316. (in Chinese)
- [5] PAGE, B. P., KUMAR, A. and MISHRA, D. R. A novel cross-satellite based assessment of the spatial-temporal development of a cyanobacterial harmful algal bloom. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 66: 69-81. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.11.003>
- [6] MORGAN, M., STEFFEN, B., et al. Status, causes and controls of cyanobacterial blooms in Lake Erie. Journal of Great Lakes Research, 2014, 40(2): 215-225. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2013.12.012>
- [7] NAMSARAEV, Z., MELNIKOVA, A., IVANOV, V., et al. Cyanobacterial bloom in the world largest freshwater Lake Baikal. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 121: 032039. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/121/3/032039>
- [8] WORTH, K. Paraguay dealing with lethal algae bloom in Ypacarai lake. International Dredging Review, 2012, 31(6): 26-29.
- [9] 郑建军, 钟成华, 邓春光. 试论水华的定义[J]. 水资源保护, 2006, 22(5): 45-47. ZHENG Jianjun, ZHONG Chenghua and DENG Chunguang. Discussion on definition of alga. Water Resources Protection, 2006, 22(5): 45-47. (in Chinese)
- [10] JEF, H., PAERL, C. G. A., et al. Cyanobacterial blooms. Nature Reviews Microbiology, 2018, 16(8): 471-483. <https://doi.org/10.1038/s41579-018-0040-1>
- [11] 周兵, 蔡小莉, 杨欣欣, 等. 蓝藻水华爆发成因的研究[J]. 环境科学与管理, 2020, 45(1): 37-42. ZHOU Bing, CAI Xiaoli, YANG Xinxin, et al. Study on causes of cyanobacterial bloom. Environmental Science and Management, 2020, 45(1): 37-42. (in Chinese)
- [12] 姚金忠, 范向军, 杨霞, 等. 三峡库区重点支流水华现状、成因及防控对策[J]. 环境工程学报, 2022, 16(6): 2041-2048. YAO Jinzhong, FAN Xiangjun, YANG Xia, et al. Current situation, causes and control measures of water bloom in the key tributaries of the Three Gorges Reservoir. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(6): 2041-2048. (in Chinese)
- [13] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 589-595. KONG Fanxiang, GAO Guang. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 589-595. (in Chinese)
- [14] 张永生, 孔繁翔, 于洋, 等. 蓝藻伪空胞的特性及浮力调节机制[J]. 生态学报, 2010, 30(18): 5077-5090. ZHANG Yongsheng, KONG Fanxiang, YU Yang, et al. The characteristics and buoyancy regulations of cyanobacterial gas vesicles. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(18): 5077-5090. (in Chinese)
- [15] 陈建中, 刘志礼, 李晓明, 等. 温度、pH 和氮、磷含量对铜绿微囊藻生长的影响[J]. 海洋与湖沼, 2010, 41(5): 714-718. CHEN Jianzhong, LIU Zhili, LI Xiaoming, et al. Effects of temperature, pH, nitrogen and phosphorus on growth of *Microcystis aeruginosa*. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2010, 41(5): 714-718. (in Chinese)
- [16] 罗肖丽. 地表水中藻类代谢对溶解氧含量及 pH 值的影响[J]. 广东化工, 2021, 48(21): 138-139. LUO Xiaoli. The influence of algae metabolism on dissolve oxygen and pH in surface water. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(21): 138-139. (in Chinese)
- [17] AIDA, F., KAMILLA, M., VIKTÓRIA, B., et al. Effects of nutrient content and nitrogen to phosphorous ratio on the growth, nutrient removal and desalination properties of the green alga colostrum Morus on a laboratory scale. Energies, 2021, 14(8): 2112. <https://doi.org/10.3390/en14082112>
- [18] GEIDER, R., LA ROCHE, J. Redfield revisited: Variability of C:N:P in marine microalgae and its biochemical basis. European Journal of Psychology, 2002, 37(1): 1-17. <https://doi.org/10.1017/S0967026201003456>
- [19] 鲁祥, 龚昭荟, 殷雨婷, 等. 微量金属元素污染对水体藻类影响的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(2): 102-106. LU Xiang, GONG Zhaohui, YIN Yuting, et al. Progress in effect of trace metals pollution on algae. Environmental Science & Technology, 2018, 41(2): 102-106. (in Chinese)
- [20] ALEXOVA, R., FUJII, M., BIRCH, D., et al. Iron uptake and toxin synthesis in the bloom-forming *Microcystis aeruginosa*

- under iron limitation. *Environmental Microbiology*, 2011, 13(4): 1064-1077. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2010.02412.x>
- [21] 胡权. 不同价态铁对藻华暴发影响规律及其机理研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2013.
HU Quan. The study of regularity and mechanism of different valence iron on algal blooms. Master's Thesis, Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [22] 方丽娟, 刘德富, 杨正健, 等. 水温对浮游植物群落结构的影响实验研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(S2): 45-50.
FANG Lijuan, LIU Defu, YANG Zhengjian, et al. Effects of water temperature on the phytoplankton community structure. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(S2): 45-50. (in Chinese)
- [23] SINGH, S. P., SINGH, P. Effect of temperature and light on the growth of algae species: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 50: 431-444. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.024>
- [24] 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.
LIU Wish, SONG Linxu, JI Daobin, et al. Effect of the rainfall on extinction of cyanobacteria bloom and its mechanism analysis. *Environmental Science*, 2018, 39(2): 774-782. (in Chinese)
- [25] 孙祥, 朱广伟, 笪文怡, 等. 天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2632-2640.
SUN Xiang, ZHU Guangwei, DA Wenyi, et al. Thermal stratification and its impacts on water quality in Shahe Reservoir, Liyang, China. *Environmental Science*, 2018, 39(6): 2632-2640. (in Chinese)
- [26] 丁文浩, 李云, 徐世凯, 等. 变化风场下太湖表层湖流特征及其对蓝藻迁移的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(6): 58-65.
DING Wenhao, LI Yun, XU Shikai, et al. Characteristics of surface lake current and its effect on cyanobacteria migration in Lake Taihu under changing wind field. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2022, 50(6): 58-65. (in Chinese)
- [27] 黄宇波, 杨霞, 向波. 水位变化对三峡水库小江蓝藻水华的影响[J]. 四川环境, 2020, 39(6): 115-121.
HUANG Yubo, YANG Xia and XIANG Bo. Effects of water level on cyanobacteria bloom in Xiaojiang River, Three Gorges Reservoir. *Sichuan Environment*, 2020, 39(6): 115-121. (in Chinese)
- [28] 宋洋, 张陵蕾, 陈旻, 等. 流速对水库水华优势种铜绿微囊藻生长的影响研究[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2016, 48(S1): 25-32.
SONG Yang, ZHANG Linglei, CHEN Min, et al. Impacts of flow velocity on growth of dominant species *Microcystis aeruginosa* of algae-bloom in reservoirs. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2016, 48(S1): 25-32. (in Chinese)
- [29] 芮政, 杨桂军, 刘玉, 等. 扰动方式对水华微囊藻群体大小的影响[J]. 湖泊科学, 2019, 31(2): 355-364.
RUI Zheng, YANG Guijun, LIU Yu, et al. Effects of disturbance modes on the size of *Microcystis flos-aquae* colonie. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(2): 355-364. (in Chinese)
- [30] 王健, 向峰, 邱飞, 等. 水质预测模型研究进展[J]. 环境科学导刊, 2018, 37(4): 63-67.
WANG Jian, XIANG Feng, QIU Fei, et al. Research progress of water quality prediction model. *Environmental Science Survey*, 2018, 37(4): 63-67. (in Chinese)
- [31] 崔玉洁. 三峡水库香溪河藻类生长敏感生态动力学过程及其模拟[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2017.
CUI Yujie. The sensitive ecological dynamic processes and their simulations of algal growth of Xiangxi Bay in the Three Gorges Reservoir. Ph.D. Thesis, Wuhan: Wuhan University, 2017. (in Chinese)
- [32] 邱银国, 段洪涛, 万能胜, 等. 巢湖蓝藻水华监测预警与模拟分析平台设计与实践[J]. 湖泊科学, 2022, 34(1): 38-48.
QIU Yinguo, DUAN Hongtao, WAN Nengsheng, et al. Design and practice of a platform for monitoring, early-warning and simulation of algal blooms in Lake Chaohu. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(1): 38-48. (in Chinese)
- [33] 张军, 杨铮, 李婷, 等. 藻水分离技术应用研究进展[J]. 环境科学导刊, 2019, 38(S2): 97-99+111.
ZHANG Jun, YANG Zheng, LI Ting, et al. Research progress on the application of the technology of separating algae from water. *Environmental Science Survey*, 2019, 38(S2): 97-99+111. (in Chinese)
- [34] 啜明英, 马骏, 杨正健, 等. 整流幕在防控水库水华中的应用研究综述[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(10): 15-20.
CHUO Mingying, MA Jun, YANG Zhengjian, et al. Review on the application of curtain weirs to controlling algal blooms of reservoirs. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(10): 15-20. (in Chinese)
- [35] 刘晋高. 防控三峡水库支流水华的潮汐式生态调度研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 湖北工业大学, 2019.
LIU Jingao. Research on tidal ecological operation of controlling the algae bloom of tributaries in the Three Gorges Reservoir. Master's Thesis, Wuhan: Hubei University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [36] 周起超, 宋立荣, 李林. 遮光对滇池春季藻类水华的影响[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(9): 53-59.
ZHOU Qichao, SONG Lirong and LI Lin. Effect of shading on the algal blooms during spring in Lake Dianchi, China. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(9): 53-59. (in Chinese)
- [37] 陈龙甫, 姚娟娟, 张智, 等. 超声波除藻的机制以及安全性研究进展[J]. 四川环境, 2014, 33(1): 150-153.
CHEN Longfu, YAO Juanjuan, ZHANG Zhi, et al. A research progress review on the mechanics and safety of algae removal

- by ultras. *Sichuan Environment*, 2014, 33(1): 150-153. (in Chinese)
- [38] 钱丹, 王宏丽, 赵双喜, 等. 超声波除藻技术研究及应用前景[J]. *海河水利*, 2018(6): 52-54.
QIAN Dan, WANG Hongli, ZHAO Shuangxi, et al. Research and application prospects of ultrasonic algae control technology. *Haihe Water Resources*, 2018(6): 52-54. (in Chinese)
- [39] 周波, 朴栋海. 概论常用化学药剂在蓝藻水华应急处理中的作用及影响[J]. *中国西部科技*, 2011, 10(35): 3+6.
ZHOU Bo, PIAO Donghai. Introduction to the role and influence of commonly used chemical agents in emergency treatment of cyanobacteria bloom. *Science and Technology of West China*, 2011, 10(35): 3+6. (in Chinese)
- [40] 魏群, 王磊, 马湘蒙, 等. 淡水湖库蓝藻水华治理对策研究与展望[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(1): 22-30.
WEI Qun, WANG Lei, MA Xiangmeng, et al. Research status and prospect of management countermeasures for cyanobacteria blooms in freshwater lakes. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2021, 42(1): 22-30. (in Chinese)
- [41] 林莉, 李青云, 黄苗, 等. 微电流电解对铜绿微囊藻的持续抑制研究[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2012, 40(10): 87-90.
LIN Li, LI Qingyun and HUANG Zhuo. Research of *Microcystis aeruginosa*'s inactivation and inhibition by micro-current electrolysis. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 40(10): 87-90. (in Chinese)
- [42] 李俊楠, 杨苏文, 金卫栋, 等. 低温等离子体除藻应用的研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(1): 114-121.
LI Junnan, YANG Suwen, JIN Weidong, et al. Research progress of the application of non-thermal plasma to algae removal. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(1): 114-121. (in Chinese)
- [43] 刘恩生. 生物操纵与非经典生物操纵的应用分析及对策探讨[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(3): 307-314.
LIU Ensheng. Analysis on biomanipulation, nontraditional biomanipulation and discussion of the countermeasures of biomanipulation application in waters. *Journal of Lake Science*, 2010, 22(3): 307-314. (in Chinese)
- [44] 汤鹏, 于鲁冀, 彭赵旭, 等. 水生植物化感作用抑藻研究进展[J]. *生物学杂志*, 2021, 38(4): 104-108.
TANG Peng, YU Luji, PENG Zhaoxu, et al. Research progresses on algae inhibition by allelopathy of aquatic plants. *Journal of Biology*, 2021, 38(4): 104-108. (in Chinese)
- [45] 郑杨忠, 李钢, 杜江, 等. 生物浮岛对三峡库区典型支流库湾水质和浮游藻类的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2013, 29(3): 278-283.
ZHENG Yangzhong, LI Gang, DU Jiang, et al. Effect of biological floating island on water quality and algae in a tributary bay typical of the Three-Gorge Reservoir. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(3): 278-283. (in Chinese)
- [46] 孙园, 魏心雨, 丁怡. 人工湿地在修复富营养化水体中的应用及研究进展[J]. *工业水处理*, 2021, 41(2): 8-14.
SUN Yuan, WEI Xinyu and DING Yi. Application and research progress of constructed wetland in restoration of eutrophic water body. *Industrial Water Treatment*, 2021, 41(2): 8-14. (in Chinese)
- [47] 陈莉婷, 左俊, 陶思依, 等. 利用微生物控制蓝藻研究进展[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2019, 65(4): 401-410.
CHEN Liting, ZUO Jun, TAO Siyi, et al. Progress in control of cyanobacteria by microorganism. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2019, 65(4): 401-410. (in Chinese)