

曹晶,袁静,赵丽,等.湖库蓝藻水华控制技术发展、应用及展望[J].环境工程技术学报,2024,14(2):487-500.

CAO J,YUAN J,ZHAO L,et al.Development, application and prospect of cyanobacteria blooms control technology in lakes and reservoirs[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2024, 14(2): 487-500.

## 湖库蓝藻水华控制技术发展、应用及展望

曹晶<sup>1,2</sup>,袁静<sup>1</sup>,赵丽<sup>1</sup>,潘正国<sup>3</sup>,闫国凯<sup>1</sup>,高思佳<sup>1</sup>,储昭升<sup>1\*</sup>,郑丙辉<sup>1</sup>

1.湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室,中国环境科学研究院

2.清华大学环境学院

3.无锡德林海环保科技股份有限公司

**摘要** 蓝藻水华暴发会引起供水系统堵塞、水体异味、水生生物死亡等一系列生态环境问题,严重时还将威胁饮用水安全,因此采取切实有效的蓝藻水华控制技术对蓝藻水华防控至关重要。通过文献调研系统梳理了国内外蓝藻水华控制技术发展历程,综述了典型蓝藻水华控制技术及其适用范围、应用情况及优缺点等。结果表明:蓝藻水华控制技术总体分为物理控藻技术、化学控藻技术和生物控藻技术。从技术文献关键词时间发展脉络看,2010年之前国外蓝藻水华控制技术关键词多集中在絮凝、混凝等化学控藻技术,2010年后向水生植物抑藻等生物控藻技术发展;我国蓝藻水华控制技术关键词2010年前主要集中在鲢鳙鱼控藻、水生植物抑藻等生物控藻技术,2010年后超声波、机械除藻等物理控藻技术和絮凝等化学控藻技术快速发展,2015年后物理控藻技术进一步发展。国外蓝藻水华控制技术于20世纪50年代起步于化学控藻技术,2000年后研发了超声波、光波等物理控藻技术,2010年后主要以生物控藻和化学控藻技术为主;国内蓝藻水华控制技术于20世纪80年代起步于针对小型水体的生物控藻技术,2000年后逐渐发展为针对大型湖库的机械除藻技术(物理控藻技术)。物理控藻、化学控藻技术的应急效果显著,但物理控藻技术存在成本高、长效性不足等缺点,化学控藻技术存在二次污染风险;而生物控藻技术存在见效慢、有外来物种入侵风险、生态系统被扰乱风险等生态安全问题,目前实际应用案例较少。未来应加快推进蓝藻水华控制技术优化筛选和示范应用,同时开展蓝藻水华控制技术与内外源污染控制、水生态修复等技术的集成应用,提高蓝藻水华控制效果。

**关键词** 湖库;蓝藻水华;控制技术;物理控藻;化学控藻

中图分类号:X524 文章编号:1674-991X(2024)02-0487-14 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20230453

## Development, application and prospect of cyanobacteria blooms control technology in lakes and reservoirs

CAO Jing<sup>1,2</sup>, YUAN Jing<sup>1</sup>, ZHAO Li<sup>1</sup>, PAN Zhengguo<sup>3</sup>, YAN Guokai<sup>1</sup>, GAO Sijia<sup>1</sup>,  
CHU Zhaosheng<sup>1\*</sup>, ZHENG Binghui<sup>1</sup>

1.National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration,  
Chinese Research Academy of Environmental Sciences

2.School of Environment, Tsinghua University

3.Wuxi Delin Hai Environmental Protection Technology Co., Ltd.

**Abstract** Cyanobacteria blooms will cause a series of ecological environment problems such as the water supply system blockage, water odor, aquatic death, etc., and even threaten the safety of drinking water. Therefore, effective control technology is very important for the prevention and control of cyanobacteria blooms. The development history of cyanobacteria blooms control technology at home and abroad was summarized through literature research, and application scope, application situation, advantages and disadvantages of typical cyanobacteria blooms control technology were reviewed. The algal bloom control technology can be divided into physical algal control technology, chemical algal control technology and biological algal control technology. From the perspective of the time development of key words in technical literature, before 2010, foreign cyanobacteria bloom control technology mainly focused on chemical algal control technology such as flocculation and coagulation, and after 2010, it developed to biological algal control technology such as aquatic plant algal suppression. Before 2010, China's

收稿日期:2023-06-16

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07401003)

作者简介:曹晶(1989—),女,助理研究员,博士研究生,主要从事湖库蓝藻水华研究,caojj2014@163.com

\* 责任作者:储昭升(1973—),男,研究员,主要从事湖泊水体修复及蓝藻水华发生机理研究, chuzssci@yeah.net

cyanobacteria bloom control technologies mainly focused on biological algal control technologies such as silver carp bighthys algae control and aquatic plant algae suppression. After 2010, physical algal control technologies such as ultrasonic and mechanical algal removal and chemical algal control technologies such as flocculation developed rapidly. After 2015, physical algal control technology further developed. Foreign cyanobacteria bloom control technology started from chemical algal control technology in the 1950s, and developed physical algal control technology such as ultrasonic wave and light wave after 2000, and mainly biological algal control and chemical algal control technology after 2010. Domestic cyanobacteria bloom control technology started from biological algal control technology for small water bodies in the 1980s, and gradually developed into mechanical algal removal technology (physical algal control technology) for large lakes and reservoirs after 2000. Physical algal control technology and chemical algal control technology have significant emergency effects, but physical algal control technology has disadvantages such as high cost and insufficient long-term performance, and chemical algal control technology has secondary pollution risk. However, the biological algal control technology has some ecological security problems, such as slow effect, risk of invasion of alien species, and risk of disturbance of ecosystem, so there are few practical application cases. In the future, the optimization, screening and demonstration application of cyanobacteria bloom control technology should be accelerated, and the integrated application of cyanobacteria bloom control technology with internal and external pollution control and water ecological restoration technologies should be carried out to improve the effect of cyanobacteria bloom control.

**Key words** lakes and reservoirs; cyanobacterial blooms; control technology; physical algal control technology; chemical algal control technology

水华是指浮游植物(俗称藻类)爆发性繁殖使水面呈现蓝色、红色、棕色或者乳白色等异常水色的现象<sup>[1]</sup>。水华发生时,水体叶绿素 a(Chla)浓度一般在 20  $\mu\text{g/L}$ (相当于藻密度  $5.0 \times 10^7$  个/L)以上<sup>[2]</sup>。蓝藻水华是以蓝藻为优势种发生的水华,是淡水湖库最常见的一种水华类型<sup>[3]</sup>。蓝藻水华暴发会引起供水系统堵塞、水体异味、鱼类死亡、水生植被退化<sup>[4-5]</sup>,产生毒素并威胁饮用水安全等<sup>[6-7]</sup>,因此,保障饮用水及水生生态安全是蓝藻水华防控的重要目标。在人类活动和全球气候变暖共同影响下,近 30 年来全球湖库蓝藻水华发生强度呈增大趋势<sup>[8]</sup>,我国以太湖、巢湖、滇池等大型淡水湖泊蓝藻水华问题最为突出<sup>[9-10]</sup>。

早在 2001 年,《国家环境科技发展“十五”计划纲要》就指出,要开展湖泊富营养化及水华灾害控制国家方案研究,开展富营养化和水华灾害发生的关键诱导因子研究<sup>[11]</sup>。其中太湖、巢湖、滇池(“老三湖”)是最早开展水华防治的湖泊,在“老三湖”水污染防治“十五”计划中,均对蓝藻水华控制相关工作进行了部署<sup>[12-14]</sup>。2004 年,原国家环境保护总局、原农业部、水利部、原交通部和科学技术部联合发布的《湖库富营养化防治技术政策》<sup>[15]</sup>中指出,对蓝藻水华暴发等造成水体景观和水生态系统破坏的情况,应采取有效措施应急处理。2007 年太湖暴发蓝藻水华污染事件<sup>[16]</sup>后,蓝藻水华暴发造成的饮用水威胁及水生生态风险引起国家的高度重视。“十一五”至“十二五”期间,国家及地方政府持续开展“老三

湖”水华防治<sup>[17-18]</sup>。“十三五”实施“水十条”以来,重点湖库蓝藻水华问题成为我国水污染防治的关注重点,生态环境部更是将蓝藻水华作为我国水污染防治攻坚战的核心问题,自 2014 年起每年均组织部署重点湖库蓝藻水华防控工作<sup>[19]</sup>。

我国重点湖库蓝藻水华控制技术的发展直接关系到蓝藻水华的防治成效。湖库蓝藻水华一旦发生,必须采取有效的应急控制技术防止水华造成危害或威胁饮用水安全。然而,蓝藻水华控制技术类型多样,各类技术的适用范围及优缺点也不尽相同。笔者通过梳理国内外蓝藻水华控制技术的发展和适用范围、应用情况及优缺点等,旨在为蓝藻水华控制技术的选择提供参考,支撑湖库蓝藻水华控制的设计和管理。

## 1 蓝藻水华控制技术关注度演变及发展脉络

蓝藻水华控制技术按学科分类可以划分为物理控藻技术、化学控藻技术和生物控藻技术。物理控藻技术是指采用物理方法控制藻类的一种技术,包括机械除藻技术、水力控藻技术、超声波控藻技术、絮凝沉淀技术、深井加压控藻技术等。化学控藻技术可利用杀藻剂使藻细胞破裂或蛋白质变性从而使藻类死亡,杀藻剂主要包括金属离子或光敏物质杀藻剂、硫酸铜等盐类杀藻剂、过氧化氢等强氧化杀藻剂等;除采用杀藻剂外,化学控藻还包括化学混凝控藻,主要利用藻类表面电荷的电化学中和作用去

除藻类。生物控藻技术主要是利用生物或微生物方法控制藻类的一类技术,包括生物操纵技术、微生物制剂控藻技术、水生植物抑藻技术等。

基于 Web of Science 数据库以“Cyanobacteria\*、bloom\*、control\*”为主题,进一步以“physical OR aeration OR oxygenation OR ultrasonic OR hydraulic OR machine OR equipment, chemical OR flocculation OR coagulation OR clay OR algacide OR PAC OR PAM, Microorganism OR algal suppressant OR silver carp OR bighead carp OR fish OR zooplankton, submerged plant OR aquatic plant OR straw OR pressurization OR artificial floating island”进行精练检索,再经过进一步筛选,得到 1954—2022 年英文文献数量为 995 篇。基于中国知网(CNKI)数据库以“蓝藻、蓝藻水华、控制”为主题,进一步以“打捞、藻水分离、围隔、磁分离、化学杀藻、絮凝、沉淀、气浮、加压、曝气、鲢鳙、生物、水生植物”等为关键词进行精练检索,再经过进一步筛选,得到

1987—2022 年中文文献数量为 474 篇。不同年份英文及中文的文献数量变化如图 1 所示。由图 1 可知,蓝藻水华控制技术英文相关文献数量呈逐年增长趋势,中文相关文献数量呈先增长后下降再增长的趋势;英文文献数量显著变化的年份分别为 2000 年和 2013 年,说明国外蓝藻水华控制技术自 2000 年起开始迅速发展;中文文献数量显著变化的年份分别为 2007 年和 2013 年,说明国内蓝藻水华控制技术自 2007 年起开始迅速发展,但 2013 年起中文文献数量呈下降趋势,推测原因是国内研究人员在国际期刊发表文献数量的比例增大,这与英文文献数量自 2013 年起再次显著增多保持一致。

### 1.1 技术关注度演变

2000 年前中英文文献发表数量较少,因此将 2000 年前的文献归为一类;2000 年后文献发表数量增加,以 3 年为间隔进行归纳分析。由湖库蓝藻水华控制技术英文文献关注度演变过程[图 2(a)]可知,自有该领域研究相关文献出版记录(1954 年)以

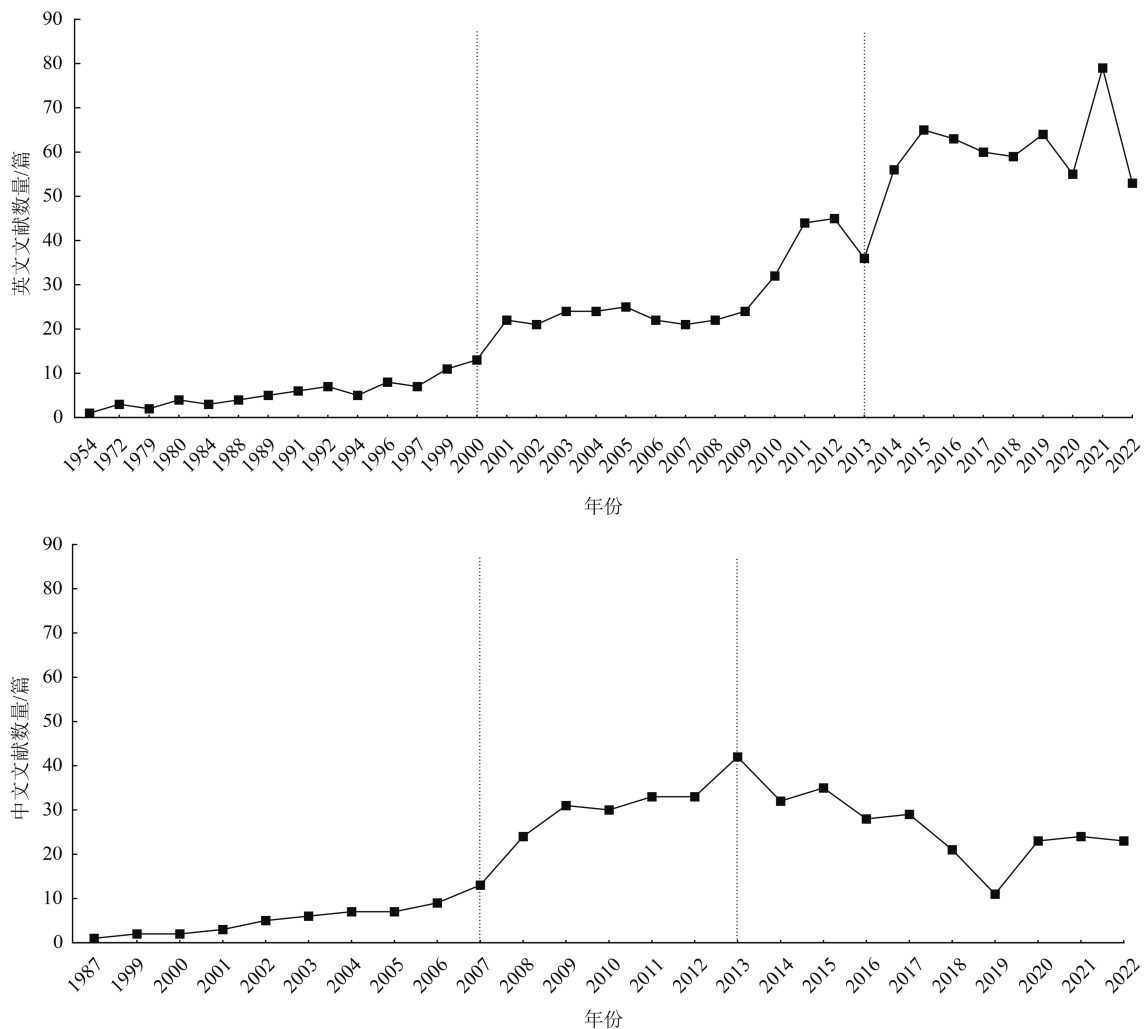


图 1 蓝藻水华控制技术中英文文献发表数量年变化趋势

Fig.1 Annual trend of English and Chinese literature publications on cyanobacteria blooms control technology

来,关于蓝藻水华控制技术的英文文献多数集中于化学控藻技术和生物控藻技术,其文献发表数量占比分别为 31.7%~47.6% 和 40.0%~55.1%;其中化学控藻技术自有文献发表记录(1954 年)以来文献发表数量呈下降趋势,生物控藻技术文献发表数量呈增长趋势。物理控藻技术文献发表数量相对较少且变化幅度较小,占比为 11.0%~15.6%。1987—2000 年蓝藻水华控制技术相关中文文献正处于起步阶段,文献发表数量较少,1987—2000 年仅有 5 篇(图 1)。由湖库蓝藻水华控制技术中文文献关注度演变过程[图 2(b)]可知,2000 年前蓝藻水华控制技术中文文献整体上以生物控藻技术和物理控藻技术为主。2000 年后蓝藻水华控制技术相关中文文献发表数量迅速增加,于 2013 年达到峰值(图 1),其中物理控藻技术和化学控藻技术文献发表数量呈上升趋势,生物控藻技术文献发表数量呈下降趋势。2000 年前物理控藻技术文献发表数量占比为 33.3%,之后有所下降;2009—2016 年文献发表数量占比增加(35.6%~36.0%);2017—2022 年有所下降,占比为 26.0%。化学控藻技术文献发表数量占比由 1987—2000 年的 16.7% 增至 2017—2022 年的 30% 左右。生物控藻技术由 2001—2004 年的 62.5% 降至 2017—2022 年的 41.2%。

### 1.2 技术发展脉络

对 1954 年以来蓝藻水华控制技术相关英文文献进行可视化分析可知,英文文献相关技术多集中在化学控藻技术,如絮凝、混凝等(图 3)。2010 年之前蓝藻水华控制技术主要集中在黏土絮凝(local

soil)、浮游动物控藻(zooplankton)、声波降解(sonication)、机械除藻(device)等,研究内容除集中在蓝藻水华去除外,还在蓝藻藻毒素(toxin)上有所研究。2010—2015 年前后研究热点继续在絮凝、混凝技术上进一步开展,另外在水生植物(marophyte)抑藻技术方面也有所突破。2015 年后,蓝藻水华控制技术相关的英文文献向蓝藻资源化利用转变,近两年还兴起了蓝藻的光催化氧化(photocatalyst)等新型蓝藻降解技术。

对 1987 年以来湖库蓝藻水华控制技术相关的中文文献进行可视化分析可知,2010 年之前文献关注点整体上以生物控藻技术为主(图 4),包括鲢鳙鱼控藻、生物控制、水生植物控藻、化感作用控藻等;随着对蓝藻特征研究的不断深入,2010 年后超声波控藻技术、絮凝剂化学混凝等物理和化学控藻技术开始快速发展;2015 年之后,机械除藻技术、加压控藻技术等物理控藻技术获得进一步发展。

对比发现,近 20 年来蓝藻水华控制技术中英文文献关注点变化差异较大。英文文献早期关注生物或化学控藻技术,随着蓝藻水华控制关注度的提高,化学和生物控藻技术文献发表数量显著增加;2000 年以来物理控藻技术相关文献虽有所增加,但可能国外类似中国这种富营养化大型湖泊的蓝藻水华问题较少,而主要是集中在相对清洁或小型水体,因此以机械除藻技术为主的物理控藻技术未获得长足发展。蓝藻水华控制技术相关的中文文献早期关注生物控藻技术,随着我国大型湖泊蓝藻水华问题关注度的提高,以及我国大型湖泊应用生物、化学控

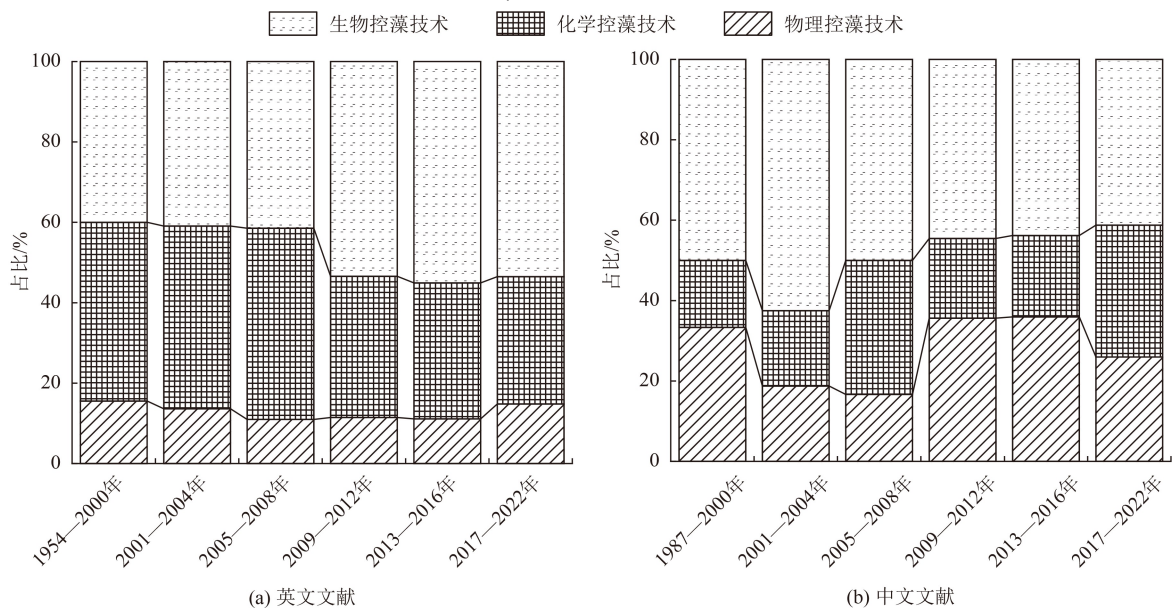


图 2 蓝藻水华控制技术文献发表数量占比变化

Fig.2 Proportion changes in the literature publications on cyanobacteria blooms control technology



大多集中在化学和生物控藻技术。

我国蓝藻水华控制技术起步于 20 世纪 80 年代中后期,中国科学院水生生物研究所谢平等<sup>[35-36]</sup>在探索武汉东湖水华动态时首次运用了鲢鳙鱼控藻方法,即非经典生物操纵技术,之后该技术应用逐渐向我国大型富营养化湖泊发展<sup>[37-38]</sup>。20 世纪 70—80 年代,日本小岛禎男最早开始利用黏土矿物对藻类絮凝作用进行研究<sup>[39]</sup>,我国黏土絮凝技术开始于 20 世纪 90 年代对海洋赤潮治理的研究<sup>[40]</sup>,同时化学除藻技术也在 20 世纪 90 年代兴起<sup>[41]</sup>。90 年代末期,机械除藻技术开始发展<sup>[42]</sup>,但其处理量小、处理能力低、处理效果不稳定<sup>[43]</sup>。21 世纪初,我国研究人员在国外扬水筒技术基础上优化发展起扬水曝气抑藻技术<sup>[44-45]</sup>,该技术可通过对水体充氧进而改变水体藻类垂直分布,抑制藻类生长<sup>[44]</sup>;同期我国超声波控藻技术也开始发展,付琨等<sup>[46]</sup>首先在滇池开展了不同超声条件对滇池藻类生长的影响研究,当超声波功率为 120 W、辐照时间为 5 min 时对藻类有明显抑制作用,藻细胞密度下降 65%, Chla 浓度降至对照组的 77.9%。进入 21 世纪,我国太湖、巢湖、滇池等大型湖泊富营养化及蓝藻水华问题加重<sup>[9-10]</sup>,大型富营养化湖泊水华发生具有不确定性强、规模大、易转移等特征,而以化学和生物为主的蓝藻水华控制技术多数局限于景观水体或湖库特定水域,对水华的规模性控制效果有限。2007 年太湖蓝藻水华污染事件的发生,推动了我国机械除藻技术的迅猛发展,中国船舶重工集团七〇二所在“十一五”期间研发制造了一艘从收集到分离、浓缩功能配套的“太湖一号”蓝藻打捞原理样船<sup>[47]</sup>,推动了我国机械除藻技术的发展,自此,机械除藻技术逐渐成为我国大型湖库蓝藻水华控制的主流技术。“十一五”至“十三五”期间,叠筛仿生过滤、转鼓过滤、磁分离等技术及相关集成技术相继得到发展<sup>[48-49]</sup>,使得蓝藻水华机械打捞效率和蓝藻处理能力明显提高。

### 3 蓝藻水华控制技术及应用

#### 3.1 超声波控藻技术

超声波是指频率高于 20 kHz 的声波,超声波控藻是利用超声波的机械效应、热效应和空化效应引起的局部高温、高压、剪切应力及产生自由基等作用破坏蓝藻细胞<sup>[50]</sup>,或通过破坏蓝藻伪空胞使其沉降<sup>[28]</sup>。由于超声波控藻技术具有设备简单、经济性好、无二次污染及管理方便等优点,在蓝藻水华控制中得到应用并取得较好的控藻效果。Hao 等<sup>[51]</sup>研究了高频(1.7 MHz)和低频(20 kHz)超声波对水华蓝

藻的影响,发现高频超声波对蓝藻的处理效果明显好于低频超声波,1.7 MHz 超声处理 5 min 后蓝藻去除率可达 63%。储昭升等<sup>[52]</sup>研究发现,超声波对蓝藻、绿藻和硅藻均有抑制作用且存在差异,其中低强度超声波(发射功率为 20 W、超声波发生角为 150°)对蓝藻惠氏微囊藻具有较好的抑制作用,超声处理 2 d 后,惠氏微囊藻生长明显减弱,6 d 后抑制率达到 68%。但也有研究发现,超声波处理蓝藻会对鱼类或浮游动物等造成影响<sup>[53-54]</sup>,且该方法并不能杀灭蓝藻,只能促使蓝藻沉降,沉降的蓝藻还可能沉积至泥水界面引起营养盐再释放<sup>[55]</sup>。Zhou 等<sup>[56]</sup>开展了超声波对水生生物青石斑鱼生长的影响研究,结果发现将青石斑鱼置于低频低强超声波辐射(频率<50 kHz、强度<400 mW/cm<sup>2</sup>)中,其死亡率很低;而将其置于高频高强超声波辐射环境(频率>50 kHz、强度>400 mW/cm<sup>2</sup>)中,其死亡率较高。此外,超声波强度过大会使藻细胞破裂,导致藻毒素和藻细胞液外泄,影响水体安全<sup>[28]</sup>。超声波控藻技术目前多应用于小型湖泊和景观水体<sup>[57-60]</sup>,大型湖泊实际应用案例则较少<sup>[61]</sup>。

#### 3.2 水力控藻技术

水力控藻技术是通过装置将空气注入水中使水与空气接触,增加水体溶解氧,改变藻类垂直分布格局从而抑制藻类在水体表面堆积的一种方法<sup>[62]</sup>。典型的水力控藻技术包括曝气充氧技术、扬水曝气抑藻技术、密度流扩散抑藻技术等,其中曝气充氧技术成本低,是水体溶解氧改善的常见方法。但由于我国大型富营养化湖泊多为内源污染严重的浅水湖泊,而曝气充氧扰动过程的水动力作用较大,易造成底泥再悬浮从而增加氮磷释放风险<sup>[63]</sup>,因此曝气充氧技术只适用于我国大型浅水湖泊浅表层水体蓝藻的辅助控制。由于普通曝气增氧难以实现深层水体上下层水的充分交换,因此国外于 20 世纪 60 年代针对深水水库研发了扬水筒曝气、密度流扩散等打破垂直热分层的方法来控制水华,取得了良好的效果<sup>[64]</sup>。我国扬水筒曝气抑藻技术是在国外扬水筒技术基础上优化发展起来的,兴起于 21 世纪初。丛海兵等<sup>[44]</sup>对扬水筒的结构进行一系列改进后得到一种扬水曝气器,可以通过对水体充氧进而改变水体藻类垂直分布,抑制藻类生长<sup>[45]</sup>。该技术目前应用于西安市地表饮用水水源——黑河金盆水库(平均水深 70~100 m)进行水质修复,处理水域出水 TP、NH<sub>3</sub>-N、COD<sub>Mn</sub>、Chla 浓度分别削减 46.7%、69.5%、22.4% 及 53.6%,水质改善效果明显<sup>[65-66]</sup>。但该技术往往局限于水深超过 10 m 的大型湖库等深水水域,

且运行时间长、见效慢、维护成本较高。日本在某闭锁性内湾(水深 15 m、Chla 浓度为 17~46  $\mu\text{g/L}$ )开展试验,研究了密度流扩散抑藻装置的抑藻效果,结果发现运行后水体透明度提升 40%~56%,藻类集中的温跃层 Chla 浓度降低 67%~80%<sup>[67]</sup>。但该方法仅适用于水深较深、有明显温度分层的深水湖泊或水库,对于无明显垂直分层的重度蓝藻水华浅水湖泊(Chla 浓度>80  $\mu\text{g/L}$  或蓝藻细胞密度>8 000 万个/L),虽然水体混合能暂时减少表层蓝藻比例,但由于浅水湖泊水体交换快,下层蓝藻很快会循环至上层,因此,该方法对水柱中蓝藻总量的控制效果欠佳。

### 3.3 机械除藻技术

20 世纪 90 年代末,利用蓝藻水华易在水体表面漂浮并在下风向水域聚集堆积的特征,我国研发了机械除藻技术。90 年代,沈银武等<sup>[42]</sup>研发的滇池水华蓝藻机械清除设备利用重力振动、旋振和卧式离心等方法收集富藻水,逐次浓缩、脱水后得藻泥,实现了机械除藻设备的实际应用;但其富藻水处理能力仅为 20  $\text{m}^3/\text{h}$ ,蓝藻去除率仅为 70%,藻泥含水率为 91%,并且处理效果不稳定<sup>[43]</sup>。

机械除藻技术一般均包含蓝藻拦截富集、蓝藻打捞、藻水分离、藻泥脱水和藻泥处置 5 个技术单元,其核心处理单元为藻水分离工艺,起初该分离工艺主要依托卧式离心机,但其处理效率较低,之后板框压滤脱水技术被应用到藻水分离<sup>[68]</sup>,其蓝藻处理量可达 1 000 t/d,蓝藻去除率可达到 95% 以上。但该技术的缺点是能耗大、使用成本高、不适合车载供电,并且占地面积大,只适合岸基式藻水分离站使用。针对岸基式藻水分离站,2010 年左右依据气浮原理,混凝沉淀+气浮技术被研发出来<sup>[69]</sup>,在混凝沉淀池尾端增加气浮工艺后再进行过滤,极大提高了藻水分离效率。近些年,针对混凝沉淀技术的研究也较多,主要集中在混凝药剂的类型、投加量、投加时间等对混凝沉降效果的影响<sup>[70]</sup>。

“十一五”期间,中国科学院南京地理与湖泊研究所等单位研发了叠筛仿生过滤、转鼓过滤、筛滤等一系列过滤/筛滤藻水分离技术,使得蓝藻打捞规模和藻水分离效率有所提高,富藻水处理能力为 300~1 000  $\text{m}^3/\text{h}$ ,Chla 浓度去除率可达 70%~80%<sup>[49]</sup>,但存在藻浓度高易造成过滤系统堵塞等问题。另外,2010 年前后,磁分离技术及装备被研发出来<sup>[71]</sup>,该技术与絮凝技术相结合,可实现移动作业,速度快、效率高,蓝藻去除率增加至 90%,藻泥含水率小于 90%;但尾水悬浮颗粒物浓度较高,约为 150  $\text{mg/L}$ ,

另外设备的采购、维护成本较高,其使用过程还需要添加磁粉,使用成本也较高。“十二五”以来,针对藻水分离效率低、适用范围有限、能耗高等问题,磁分离高效脱水技术、毛毡过滤、振动叠筛藻水分离等技术及装备被研发出来,使 Chla 去除率提高至 90%~99%,富藻水处理能力提高至 1 000~1 200  $\text{m}^3/\text{h}$ ,藻水处理成本降低,且有效解决了藻浓度高时过滤系统堵塞的问题,极大提高了藻水分离效率,缺点是藻渣含水率较高。“十三五”期间,机械除藻技术仍然存在蓝藻富集困难、藻水分离效率低、技术适用范围窄等问题,针对这些问题,机械除藻技术与其他原位控藻技术的集成应用开始发展,使得蓝藻富藻水处理能力提高至 4 700  $\text{m}^3/\text{h}$ 、藻水分离效率大幅提高,能耗进一步降低,并实现了针对不同类型水域、不同程度蓝藻水华的集成控制<sup>[48]</sup>。其中基于蓝藻加压浮力被破坏的技术原理,研发了蓝藻原位深井加压控制技术<sup>[72]</sup>,进一步提高了蓝藻去除效率。

机械除藻技术的源头工艺为蓝藻拦截富集,是依据蓝藻易在下风向堆积的特征,使用软性围隔或围堰对蓝藻进行拦截富集,但随着藻水处理能力的提高,富集的蓝藻量不能满足藻水处理能力。针对该问题,2012 年中国科学院水生生物研究所研发了蓝藻水华拦截和陷阱捕获技术<sup>[73]</sup>,在水华暴发期间该技术可以拦截 50% 以上的蓝藻水华,在适宜气象条件下聚集效率约为 2  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。“十三五”期间,中国科学院南京地理与湖泊研究所针对局部敏感水域藻华应急防控需求,研发了一种智能蓝藻水华阻挡技术,采用快速充/放气的可隐没式柔性围隔,挡藻效率可达 82%~99%<sup>[74]</sup>。藻渣脱水单元起初采用离心脱水技术,脱水后的藻泥含水率可以达到 85%,但由于离心脱水技术动力大,仅适用于岸基式藻水分离站的藻渣脱水。之后转鼓过滤、带式脱水、叠螺脱水、板框压滤等藻渣脱水技术被研发,但各技术均有其适用范围和优缺点。其中转鼓过滤技术兼具旋转与反冲洗功能,可以及时转移滤网截留的滤渣,实现连续过滤<sup>[75]</sup>。该技术首次在滇池试验时藻水处理能力仅为 900  $\text{m}^3/\text{h}$ <sup>[76]</sup>,但出水 Chla 浓度较高,为 50  $\mu\text{g/L}$ 。带式脱水工艺藻泥含水率为 89%,但由于系统易堵塞等问题,仅适用于藻细胞密度较低的富藻水处理。叠螺脱水具有占地面积小、藻渣脱水效率高优点,虽然藻泥含水率较高(90%),其仍成为目前船载式和岸基式藻渣脱水的主流工艺。板框压滤工艺的藻泥含水率较低,可以达到 60%,但由于占地面积大、能耗高等问题,仅在藻泥资源化利用对藻泥

含水率有较高要求时才使用。

### 3.4 黏土絮凝除藻技术

由于絮凝技术具有高效、低成本及无二次污染风险的特征,2010年后蓝藻水华絮凝技术得到快速发展,其中物理控藻技术中的黏土絮凝技术由于应急去除效果较好,受到研究者的广泛关注<sup>[77-79]</sup>,但该技术的研究目前还停留在实验室阶段,在实际湖库蓝藻水华治理中的应用较少,而且该方法也仅适用于小型水体或大型湖库部分水域的蓝藻水华控制。如孙佩石等<sup>[80]</sup>研究了黏土除藻技术对滇池藻类的去除效果,实验室小试结果表明,采用黏土除藻材料试验 70 d 后,水质明显好转,藻类去除率可达 95.8%;在滇池岸边围隔 300 m<sup>2</sup> 水面进行除藻效果试验显示,除藻材料放入试验区 10 d 后,试验区中藻类明显减少,围隔内透光率由 55% 增加至 88%,水质状况也有很大改善。另外,利用一些具有吸附特性的天然物质如海泡石、膨润土、蒙脱石、活性炭和壳聚糖等进行藻类吸附沉淀,或将几种物质组合使用或进行改进(如壳聚糖改性黏土等)<sup>[78]</sup>,具有天然无毒、使用方便、吸附效果明显和价廉等特点,对蓝藻的絮凝沉降效果也较好<sup>[81-82]</sup>。陆贻超等<sup>[83]</sup>用壳聚糖对硅藻土进行改性获得双效精土,当壳聚糖和硅藻土比例为 1:15 时除藻效果最好,水华蓝藻去除率在 80% 左右。但由于絮凝处理后的蓝藻细胞仍然保留在水体中,对水体可能产生潜在危害,因此目前该技术仅在局部水域有所应用。

### 3.5 加压控藻技术

蓝藻具有伪空胞,能为其提供浮力从而调节其在水柱中的分布,施加 0.7 MPa 以上压力将会破坏蓝藻伪空胞使其丧失浮力<sup>[84]</sup>。依据上述原理,“十三五”期间研发的一系列加压控藻技术在太湖、巢湖、滇池、星云湖等大型湖泊进行了广泛应用<sup>[85]</sup>。其中在太湖梅梁湖锦园附近水域配置的 1 套原位深井压力控藻平台日处理富藻水量超过 20 000 m<sup>3</sup>,年处理富藻水超 300 万 m<sup>3</sup>,实现了水华发生水域表层水体中漂浮蓝藻的快速清除,示范区蓝藻清除率超过 70%<sup>[48]</sup>。在巢湖派河口北侧—丙子河附近水域配置的 1 座原位深井压力控藻平台,在 1 个完整的蓝藻季累计清除表层漂浮蓝藻 975 万 m<sup>3</sup>,工程运行期间派河口北侧—丙子河入湖口沿线未见长时间大面积的藻源性臭味<sup>[48]</sup>。类似于絮凝除藻技术,加压控藻技术同样能实现透明度的快速提升,但由于其藻细胞密度并未减少,只是暂时沉降至下层水体,藻类死亡腐烂后沉积至泥水界面可能会增加氮、磷释放风

险<sup>[86]</sup>,这也是该技术存在的争议之处。

### 3.6 化学控藻技术

化学控藻技术包括化学杀藻技术和化学混凝/絮凝技术。化学杀藻技术主要是使用化学杀藻剂对蓝藻进行消杀,由于速度快、效果好,被作为蓝藻水华应急去除的常用技术。化学杀藻剂种类较多,根据对蓝藻的作用方式不同可分为氧化型杀藻剂和非氧化型杀藻剂<sup>[87]</sup>。氧化型杀藻剂是指通过氧化作用杀灭藻类的一种化学试剂,包括过氧化氢、过硫酸盐、臭氧、二氧化氯、次氯酸钠等<sup>[88]</sup>。由于过氧化氢分解生成水和氧气,被认为是一种无害环保氧化剂,其不仅能选择性地破坏藻细胞,对藻毒素也有很好的氧化降解作用<sup>[89]</sup>。臭氧的杀藻效果很强,在水体中产生氧化能力极强的新生态氧和羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ ),能够破坏藻细胞<sup>[90]</sup>;但其在水中不稳定,很快分解为氧气,因此除藻的持久性较差。二氧化氯能有效杀灭藻类,具有广谱杀菌功效,其杀藻效果与浓度有关<sup>[91]</sup>,实际应用中应严格控制用量。次氯酸钠是一种常用的消毒剂,亦可用于杀藻,但由于其会产生消毒副产物造成二次污染而逐渐被淘汰<sup>[92]</sup>。非氧化型杀藻剂是指不具有氧化性的杀藻剂,包括金属离子杀藻剂如硫酸铜、氯酚类及其衍生物、季铵盐类化合物等。硫酸铜对藻类控制的原理:  $\text{Cu}^{2+}$  通过对藻细胞壁表面含硫基团的强亲和力干扰藻类正常新陈代谢和生化反应,从而抑制藻类生长<sup>[93]</sup>。研究表明,  $\text{Cu}^{2+}$  浓度低于 0.16  $\mu\text{mol/L}$  或高于 2.16  $\mu\text{mol/L}$  时可抑制铜绿微囊藻生长<sup>[94]</sup>。但硫酸铜具有效果维持时间短、重金属残留等问题。氯酚类及其衍生物和季铵盐类化合物可渗入藻类细胞质内使蛋白质沉淀或通过改变细胞膜通透性使藻类死亡,但其不易被微生物降解、毒性高、易累积,二次污染风险较高<sup>[95]</sup>。

化学混凝/絮凝技术是利用化学物质对藻类的絮凝作用使藻类沉降从而提高水体透明度的方法。常用的化学絮凝剂有硫酸铝[ $\text{Al}(\text{SO}_4)_3$ ]、硫酸铜( $\text{CuSO}_4$ )、聚合氯化铝(PAC)、氯化铁( $\text{FeCl}_3$ )和聚丙烯酰胺(PAM)等。王晓丽等<sup>[96]</sup>对比研究了硫酸铜、硫酸铝及明矾对藻类的絮凝效果,发现在相同的水质、投药量、温度和搅拌强度条件下,硫酸铝的除藻效果最优,Chla 的最佳去除率可以达到 80%,但存在  $\text{Al}^{3+}$  残留问题。PAC 是一种优良的无机高分子混凝剂,混凝处理效果较好,是目前水处理工艺中被广泛应用的絮凝剂,其絮凝效率高于 80%,但 PAC 的投加量过多,易出现絮团疏松、絮体体积增大而再悬

浮现象<sup>[97]</sup>。张谦等<sup>[98]</sup>研究了  $\text{KMnO}_4$  预氧化强化 PAC 混凝沉淀对藻类的去除效能,发现 PAC 浓度为 20 mg/L 时藻细胞去除率为 93.0%。PAM 属于有机高分子絮凝剂,具有絮凝能力强、投加量少、产品性能稳定、沉降速度快的优点,应用较广泛,对藻类絮凝效率可以达到 90%<sup>[99]</sup>。

### 3.7 生物操纵技术

生物操纵技术包括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放养凶猛鱼类和浮游生物食性鱼类,以减少对浮游动物的捕食,促进滤食效率高的植食性大型浮游动物的繁殖,通过浮游动物增长加大对浮游植物的捕食,从而抑制藻类生长<sup>[100]</sup>。Shapiro 等<sup>[101]</sup>在 Round Lake 通过引入鱼食性鱼类使其与浮游生物食性鱼类的比例由 1:165 增加为 1:2.2, 2 年后实现了 TN、TP、Chla 浓度均有不同程度下降、透明度上升的良好效果。研究表明 1 个大型蚤 (*Daphnia magna*) 1 d 可捕食 700 万个小球藻,对藻类的吸收率可达 60%~80%<sup>[102]</sup>。但很多学者认为浮游动物无法控制丝状藻类和形成群体的蓝藻水华,另外在我国大型浅水湖泊中浮游动物的数量一般并不多,浮游动物对浮游植物的摄食压力不大,因此,在我国大型浅水湖泊并没有应用经典生物操纵成功的案例<sup>[103]</sup>。

非经典生物操纵技术是利用鲢鳙鱼控制水华蓝藻的技术<sup>[35-36]</sup>。随着鲢鳙鱼控藻技术成功案例的增多,该技术的研究及应用逐渐受到广泛关注。从“十五”开始,我国太湖便以五里湖为工程示范区域,尝试通过放流鲢鳙鱼对蓝藻水华进行控制<sup>[38]</sup>。2013 年,太湖渔业管理委员会又在无锡竺山湾开展鲢鳙鱼控藻(“以渔控藻”)项目试点,通过大规模放流鲢鳙鱼苗近 5 亿尾,消耗藻类 658 万 t,取得了良好的生态效益<sup>[104]</sup>。但由于蓝藻细胞表面具有衣鞘,鲢、鳙对其消化利用率很低,一般只有 25%~30%,鲢、鳙粪便中往往存在着大量未消化的具有生命力的蓝藻<sup>[105]</sup>。

无论是经典生物操纵技术还是非经典生物操纵技术,都不能获得对蓝藻水华快速有效的控制效果,

因为构建一个平衡稳定的水生态系统需要借助生物操纵的长期控制作用,所以生物操纵技术存在一定的生物滞后性,往往见效较慢<sup>[106]</sup>。另外,湖泊中营养级关系复杂,生物操纵中涉及的众多机理还未被研究清晰,所以在实际应用中存在诸多问题,导致控藻效果不甚理想<sup>[106]</sup>。

### 3.8 水生植物抑藻技术

一些水生植物能够分泌、释放抑制藻类生长的化感物质,通过影响藻类光合活性、破坏细胞膜、影响细胞内某些酶的活性等途径抑制藻类生长,由于其具有效果好、费用低、材料天然易得、不易造成二次污染等优点,被国内外研究者广泛关注<sup>[107-108]</sup>。使用人工浮岛种植水生植物从而抑制藻类水华的方法自 20 世纪 70 年代在国外兴起<sup>[109]</sup>,90 年代在我国开始盛行<sup>[110]</sup>。但由于人工浮岛的材质多为塑料、橡胶、木材和竹子等,易造成二次污染;受季节温差影响,冬季人工浮岛处理效率低下,并且浮岛植物的收割管理及维护成本也较高,难以大面积推广应用。另外,也有利用大麦秸秆应用于水库控藻成功的案例<sup>[107]</sup>,试验在 1 个面积为 25 000 m<sup>2</sup> 的水库开展,采用 7 t 大麦秸秆,经过 1 年试验,水库中不同区域藻类平均细胞数量较试验前减少 25%~50%。但对于大型湖库来说,大面积秸秆放置于水面不仅影响美观,而且在风力作用下长时间堆积会发生腐烂,可能存在有机质释放风险。总体上来讲,由于水生植物对生长环境要求较高,生长过程中季节性周期变化较大,适应性管理难,维护成本高等问题,该方法难以在富营养化程度较高的水体广泛应用;另外目前该方法仅应用于面积较小的水体,大型富营养化湖库鲜见有成功的应用案例。

综上,20 世纪至今,针对湖库蓝藻水华的控制已经发展出物理、化学和生物多类技术,但各类技术在实际应用过程中有其适用范围并存在一定的局限性(表 1),因此在选择蓝藻水华控制技术时,应根据各类技术的适用条件及水华发生的严重程度进行选择,以实现蓝藻水华控制效益的最大化。

表 1 典型蓝藻水华控制技术适用范围及优缺点

Table 1 Application range, advantages and shortages of typical cyanobacteria bloom control technology

技术分类	技术名称	适用范围	作用效果	国内应用情况	优点	缺点
物理控藻技术	超声波控藻技术	有藻华堆积趋势的小型湖泊或景观水体, Chla > 50 μg/L <sup>[63]</sup>	适宜频率和强度可使 60% 以上藻类沉降	成功应用于银川市中山公园银湖 <sup>[57]</sup> 、上海曲阳公园景观湖 <sup>[58]</sup> 、深圳某水库围栏 <sup>[59]</sup> 、三峡库区澎溪河流域 <sup>[61]</sup>	沉降效果好,应急速度较快	可能造成藻细胞破裂,藻毒素释放

(续表 1)

技术分类	技术名称	适用范围	作用效果	国内应用情况	优点	缺点
物理控藻技术	曝气充氧技术	有水华发生的表层水体, Chla>100 $\mu\text{g/L}$ [63]	溶解氧浓度增加	多与其他技术组合使用[65]	快速增氧, 防止黑臭	持续曝气可能会引起沉积物再悬浮和营养盐释放
	水力控藻技术	有藻类及温度垂直分层的深水(>10 m)水体, Chla<100 $\mu\text{g/L}$ [44]	溶解氧浓度增加, 藻类垂直分布格局被打破, Chla削减率在40%以上[44]	多应用于深水水库, 如西安市黑河金盆水库[66]	无二次污染	受限于有藻类分层的水体, 浅水湖泊一般不适用
	密度流扩散抑藻技术	与外部水交换困难的闭锁性水域, 温度有垂直分层的深水(>10 m)水体, Chla<80 $\mu\text{g/L}$ [67]	藻类垂直分布格局被打破, 表层Chla削减率为60%~80%[67], 无明显蓝藻堆积	成功应用于日本东京某海域内湾[67], 国内鲜见报道	利用水体自身密度差打破垂直分层, 能耗低、应用灵活	受限于有温度分层的水体
	机械除藻技术	有明显水华堆积的近岸水域, Chla>500 $\mu\text{g/L}$	实现近岸堆积藻类的日聚日清, 蓝藻去除率>70%	成功应用于太湖、巢湖、滇池等[48-49]	将蓝藻进行异位处理, 有效减少水体藻量	处理量过小、处理效率不高
	黏土絮凝技术	藻华暴发初期的小水体或局部水域, Chla<200 $\mu\text{g/L}$ [63]	藻类在短时间内快速沉降	大多在实验阶段, 在滇池围隔区域有应用[80]	天然无毒、使用方便、吸附效果明显	藻细胞暂时沉降, 存在潜在生态风险
	加压控藻技术	有水华堆积的近岸水域, Chla>200 $\mu\text{g/L}$	透明度快速提升, 蓝藻沉降率>70%	应用于太湖、巢湖、滇池、星云湖等[48]	能耗低、效率高、运行成本低	蓝藻仍留在水体, 存在潜在生态风险
化学控藻技术	化学杀藻剂	小型水体、景观水体	除藻效果明显, Chla削减率>90%	应用于滇池草海特定水域[111]	速度快、效果好	有二次污染风险
	化学混凝/絮凝技术	小水体或局部水域, Chla>1 500 $\mu\text{g/L}$ [63], 常与其他技术联用	蓝藻去除率>80% [63]	对藻类进行异位处理, 未见直接作用于水体中藻类处理的报道[112]	沉降速度快, 透明度提升效果好	一些有机高分子絮凝剂存在二次污染风险
生物控藻技术	微生物制剂	小型水体或试验水体, 藻华暴发初期, Chla<200 $\mu\text{g/L}$	溶藻率>70% [87]	多处于实验阶段	见效快	微生物控制难度大, 后续潜在的生态风险高
	生物操纵技术	面积较小水体或试验水域, 藻华暴发初期, Chla<50 $\mu\text{g/L}$	对藻类控制率>60%	成功应用于太湖、滇池特定水域[37-38, 104]	安全、无二次污染风险	控制效果较慢, 应急效果较差
	水生植物抑藻技术	富营养化程度低、藻细胞密度较低的水体, 藻密度低于3 000万个/L [111]	藻细胞密度减少率为25%~50% [107]	太湖、星云湖、滇池、武汉沙湖等[113]	效果好、费用低、材料易得、二次污染风险小	生长管理难度大, 不确定性强

#### 4 结论与展望

针对蓝藻水华控制, 国内外自 20 世纪中后期开始研发了一系列技术, 包括物理控藻技术、化学控藻技术和生物控藻技术。总体上国外蓝藻水华控制技术的发展要早于国内, 以生物控藻、化学控藻技术为主; 我国蓝藻水华控制技术从最初的针对小型水体逐渐发展为针对大型水库或湖泊, 从起初以生物控藻技术为主逐渐发展为目前的以机械打捞除藻技术(物理控藻技术)为主。蓝藻水华控制各类技术各有优缺点, 在技术选择时需要根据水华发生区位置、水华发生程度及投入成本等进行综合判断。其中物理控藻、化学控藻技术的应急效果显著。物理控藻技术因其安全性较高而得到广泛应用, 但存在成本高、长效性不足等缺点。化学控藻技术因为存在二次污染风险使其应用受到限制。而生物控藻技术存在外来物种入侵、生态系统被扰乱等生态安全问题, 目前实际应用的案例也较少。

在人类活动和气候变化大背景下, 湖库蓝藻水华发生形势不容乐观, 因此湖库蓝藻水华防控将是一项艰巨而长期的任务。针对我国大型湖库蓝藻水华控制, 机械打捞除藻技术在“十四五”及未来仍将作为一项主流技术, 但其处理规模和藻水分离效率等需要做进一步提升和优化, 同时应减少藻水处理成本、提升藻泥资源利用效率。富营养化是多数湖库蓝藻水华发生的重要原因, 因此湖库内外源污染控制与蓝藻水华控制技术的有效结合是蓝藻水华防治的重要途径。目前很多蓝藻水华控制技术还未实现大规模推广应用, 对蓝藻水华的控制效果还处于试验研究阶段, 因此未来应加快开展技术优化筛选、示范应用等, 实现蓝藻水华控制技术的推广应用。针对一些有实际应用但治理成效较差或仅在局部水域发挥成效而无法大面积推广应用的蓝藻水华控制技术, 可考虑与其他具有协同治理效果的技术联用, 优化集成关键或成套技术, 也可与生态修复技术相结合, 加快改善局部生态环境, 进一步提高蓝藻水华

控制效果。

## 参考文献

- [ 1 ] 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 J J, ZHONG C H, DENG C G. Discussion on definition of algal bloom[J]. Water Resources Protection, 2006, 22(5): 45-47.
- [ 2 ] QIN B Q, LI W, ZHU G W, et al. Cyanobacterial bloom management through integrated monitoring and forecasting in large shallow eutrophic Lake Taihu (China)[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 287: 356-363.
- [ 3 ] REYNOLDS C S. Cyanobacterial water-blooms[J]. *Advances in Botanical Research*, 1987, 13: 67-143.
- [ 4 ] SMAYDA T J. Harmful algal blooms: their ecophysiology and general relevance to phytoplankton blooms in the sea[J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42(5): 1137-1153.
- [ 5 ] LARSSON M E, AJANI P A, RUBIO A M, et al. Long-term perspective on the relationship between phytoplankton and nutrient concentrations in a southeastern Australian Estuary[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 114(1): 227-238.
- [ 6 ] KENEFICK S L, HRUDEY S E, PREPAS E E, et al. Odorous substances and cyanobacterial toxins in prairie drinking water sources[J]. *Water Science and Technology*, 1992, 25(2): 147-154.
- [ 7 ] KOTAK B G, KENEFICK S L, FRITZ D L, et al. Occurrence and toxicological evaluation of cyanobacterial toxins in Alberta lakes and farm dugouts[J]. *Water Research*, 1993, 27(3): 495-506.
- [ 8 ] HO J C, MICHALAK A M, PAHLEVAN N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s[J]. *Nature*, 2019, 574(7780): 667-670.
- [ 9 ] 朱喜, 朱云. 太湖蓝藻暴发治理存在的问题与治理思路 [J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(6): 714-719.  
ZHU X, ZHU Y. Problems and countermeasures of controlling cyanobacteria bloom in Taihu Lake[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, 9(6): 714-719.
- [ 10 ] 王菁哈, 何吕奇姝, 杨成, 等. 太湖、巢湖、滇池水华与相关气象、水质因子及其响应的比较 (1981—2015 年)[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(4): 897-906.  
WANG J H, HE L, YANG C, et al. Comparison of algal bloom related meteorological and water quality factors and algal bloom conditions among Lakes Taihu, Chaohu, and Dianchi(1981-2015)[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(4): 897-906.
- [ 11 ] 国家环境保护总局. 国家环境科技发展“十五”计划纲要 [J]. 环境保护, 2001, 29(8): 3-9.
- [ 12 ] 关于印发《太湖水污染防治 2002 年度工作计划》的通知: 环办[2002]75 号 [A/OL]. [2023-05-05]. [https://www.mee.gov.cn/gkml/zj/bgt/200910/t20091022\\_173790.htm](https://www.mee.gov.cn/gkml/zj/bgt/200910/t20091022_173790.htm).
- [ 13 ] 关于印发巢湖流域水污染防治“十五”计划实施意见的函: 环办函[2003]307 号 [A/OL]. [2023-05-05]. [https://www.mee.gov.cn/gkml/zj/bgth/200910/t20091022\\_174072.htm](https://www.mee.gov.cn/gkml/zj/bgth/200910/t20091022_174072.htm).
- [ 14 ] 关于印发《滇池流域水污染防治“十五”计划》的通知: 环发[2003]84 号 [A/OL]. [2023-05-05]. [https://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022\\_172191.htm](https://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022_172191.htm).
- [ 15 ] 国家环境保护总局. 湖库富营养化防治技术政策 [J]. 环境保护, 2004, 32(8): 18-22.
- [ 16 ] 谢平. 太湖蓝藻的历史发展与水华灾害: 为何 2007 年在贡湖水厂出现水污染事件: 30 年能使太湖摆脱蓝藻威胁吗 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [ 17 ] 关于印发《2008 年全国环境监测工作计划》的通知: 环办[2008]8 号 [A/OL]. [2023-05-05]. [https://www.mee.gov.cn/gkml/zj/bgt/200910/t20091022\\_174048.htm](https://www.mee.gov.cn/gkml/zj/bgt/200910/t20091022_174048.htm).
- [ 18 ] 关于进一步加强饮用水水源安全保障工作的通知: 环办[2009]30 号 [A/OL]. [2023-05-05]. [https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/200910/t20091022\\_174787.htm](https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/200910/t20091022_174787.htm).
- [ 19 ] 关于加强重点湖泊蓝藻水华防控工作的通知: 环办函[2014]796 号 [A/OL]. [2023-05-05]. [https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201407/t20140702\\_278137.htm](https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201407/t20140702_278137.htm).
- [ 20 ] FITZGERALD G P, SKOOG F. Control of blue-green algae blooms with 2, 3-dichloronaphthoquinone[J]. *Sewage and Industrial Wastes*, 1954, 26(9): 1136-1140.
- [ 21 ] Wetzel R G. *Limnology*[M]. 2nd Edition. New York: Mc Graw-Hill, Inc, 1994.
- [ 22 ] SHAPIRO J, LAMARRA V, LYNCH M. Biomanipulation: an ecosystem approach to lake restoration[J]. *Proceedings of the Symposium on Water*, 1975, 21(6): 85-96.
- [ 23 ] SHAPIRO J. Biomanipulation: the next phase: making it stable[J]. *Hydrobiologia*, 1990, 200(1): 13-27.
- [ 24 ] MURRAY-GULDE C L, HEATLEY J E, SCHWARTZMAN A L, et al. Algicidal effectiveness of clearigate, cutrine-plus, and copper sulfate and margins of safety associated with their use[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2002, 43(1): 19-27.
- [ 25 ] van HULLEBUSCH E, DELUCHAT V, CHAZAL P M, et al. Environmental impact of two successive chemical treatments in a small shallow eutrophied lake: part II. case of copper sulfate[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 120(3): 627-634.
- [ 26 ] GARCÍA-VILLADA L, RICO M, ALTAMIRANO M, et al. Occurrence of copper resistant mutants in the toxic cyanobacteria *Microcystis aeruginosa*: characterisation and future implications in the use of copper sulphate as algicide[J]. *Water Research*, 2004, 38(8): 2207-2213.
- [ 27 ] 郑少波, 杜鹤桂. 冷却水光磁协同处理技术 [J]. 工业水处理, 1998, 18(1): 9-11.  
ZHENG S B, DU H G. Researches on the technology of co treatment cooling water with photon and magnetic field[J]. *Industrial Water Treatment*, 1998, 18(1): 9-11.
- [ 28 ] 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.  
CHEN H L, LI Y, CHU Z S, et al. Present situation and research progress of ultrasonic algae control technology[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 10(1): 72-78.
- [ 29 ] CONG H B, HUANG T L, CHAI B B, et al. A new mixing-oxygenating technology for water quality improvement of urban water source and its implication in a reservoir[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(9): 2054-2060.
- [ 30 ] 方荣楠. 密度流扩散装置对闭锁海域的搅拌净化 [J]. 渔业现代化, 2000, 27(1): 42-43.  
FANG R N. Mixing and purification of closed sea area by density flow diffusion device[J]. *Fishery Modernization*, 2000, 27(1): 42-43.
- [ 31 ] JUNGO E, VISSER P, STROOM J, et al. Artificial mixing to reduce growth of the blue-green alga *Microcystis* in Lake Nieuwe Meer, Amsterdam: an evaluation of 7 years of experience[J]. *Water Science & Technology: Water Supply*, 2001, 1: 17-23.

- [ 32 ] 大内一之. 密度流扩散装置の研究開発 [R]. 日本造船学会論文集, 1998: 183.
- [ 33 ] NEZBRYTSKA I, USENKO O, KONOVELTS I, et al. Potential use of aquatic vascular plants to control cyanobacterial blooms: a review[J]. *Water*, 2022, 14(11): 1727.
- [ 34 ] GHERNAOUT B, GHERNAOUT D, SAIBA A L. Algae and cyanotoxins removal by coagulation/flocculation: a review[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2010, 20(1/2/3): 133-143.
- [ 35 ] 谢平. 鲢、鳙与藻类水华控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [ 36 ] XIE P, LIU J. Practical success of biomanipulation using filter-feeding fish to control cyanobacteria blooms: a synthesis of decades of research and application in a subtropical hypereutrophic lake[J]. *The Scientific World Journal*, 2001, 1: 337-356.
- [ 37 ] 但文德, 王勇, 彭军, 等. 滇池内源污染生物治理 (以鱼控藻)[R]. 昆明: 昆明市滇池管理局渔业行政执法处, 2015.
- [ 38 ] 李明锋. 太湖蓝藻治理推出“生物杀手”: 15 万尾鲢鳙鱼游向内太湖 [J]. 渔业致富指南, 2001(19): 17.  
LI M F. Blue-green algae control in Taihu Lake promotes “biological killer”: 150 000 silver carp and bighead carp swim to Taihu Lake[J]. *Fishery Guide to Be Rich*, 2001(19): 17.
- [ 39 ] 俞志明, 邹景忠, 马锡年, 等. 治理赤潮的化学方法 [J]. 海洋与湖沼, 1993, 24(3): 314-318.  
YU Z M, ZOU J Z, MA X N, et al. The chemical means of controlling red tides[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1993, 24(3): 314-318.
- [ 40 ] YU Z M, ZOU J Z, MA X N. Application of clays to removal of red tide organisms: III. the coagulation of kaolin on red tide organisms[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 1995, 13(1): 62-70.
- [ 41 ] 兰智文, 赵鸣, 尹澄清. 藻类水华的化学控制研究 [J]. 环境科学, 1992, 13(1): 12-15.  
LAN Z W, ZHAO M, YIN C Q. Controlling algal overgrowth with chemical methods[J]. *Environmental Science*, 1992, 13(1): 12-15.
- [ 42 ] 沈银武, 刘永定, 吴国樵, 等. 富营养湖泊滇池水华蓝藻的机械清除 [J]. 水生生物学报, 2004, 28(2): 131-136.  
SHEN Y W, LIU Y D, WU G Q, et al. Mechanical removal of heavy cyanobacterial bloom in the hyper-eutrophic Lake Dianchi[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2004, 28(2): 131-136.
- [ 43 ] 徐佳良, 杨栋, 陈嘉伟, 等. 适用船载的藻水高效分离技术研究 [J]. 中国环保产业, 2019(4): 52-56.  
XU J L, YANG D, CHEN J W, et al. Study on high efficiency separation technology for algae water of shipborne[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2019(4): 52-56.
- [ 44 ] 丛海兵, 黄廷林, 缪晶广, 等. 水体修复装置: 扬水曝气器的开发 [J]. 中国给水排水, 2005, 21(3): 41-45.  
CONG H B, HUANG T L, MIAO J G, et al. Development of rehabilitation device for water body: water lifting aerator[J]. *China Water & Wastewater*, 2005, 21(3): 41-45.
- [ 45 ] 孙昕, 张梦丹, 黄廷林, 等. 扬水曝气器类型对分层水库藻类控制效果的影响 [J]. 环境科学研究, 2014, 27(12): 1479-1485.  
SUN X, ZHANG M D, HUANG T L, et al. Comparison of water-lifting aerator type for algae inhibition in stratified reservoirs[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(12): 1479-1485.
- [ 46 ] 付琨, 高云涛, 刘晓海. 超声波抑制滇池水华藻类生长的实验研究 [J]. 化学与生物工程, 2007, 24(12): 64-65.  
FU K, GAO Y T, LIU X H. Study on experiment of ultrasonic wave inhibiting the growth of water bloom algae in Dianchi Lake[J]. *Chemistry & Bioengineering*, 2007, 24(12): 64-65.
- [ 47 ] 倪其军, 眭爱国, 杨栋. 蓝藻打捞船研发与应用 [C]//第十三届中国国际船艇展暨高性能船舶学术报告会, 上海, 2008.
- [ 48 ] 湖泊生态系统功能修复及规模化推广应用成套技术 [R]. 北京: 中国环境科学研究院, 2021.
- [ 49 ] 受损水体修复技术长清单 (技术、工程、设备名片集)[R]. 北京: 中国环境科学研究院, 2021.
- [ 50 ] BROEKMAN S, POHLMANN O, BEARDWOOD E S, et al. Ultrasonic treatment for microbiological control of water systems[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2010, 17( 6 ): 1041-1048.
- [ 51 ] HAO H W, WU M S, CHEN Y F, et al. Cyanobacterial bloom control by ultrasonic irradiation at 20 kHz and 1.7 MHz[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2004, 39(6): 1435-1446.
- [ 52 ] 储昭升, 庞燕, 郑翔芳, 等. 超声波控藻及对水生生态安全的影响 [J]. 环境科学学报, 2008, 28(7): 1335-1339.  
CHU Z S, PANG Y, ZHENG S F, et al. Algal control by ultrasonic radiation and its risks to the aquatic environment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(7): 1335-1339.
- [ 53 ] FRENKEL V, KIMMEL E, IGER Y. Ultrasound-induced cavitation damage to external epithelia of fish skin[J]. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 1999, 25(8): 1295-1303.
- [ 54 ] HOLM E R, STAMPER D M, BRIZZOLARA R A, et al. Sonication of bacteria, phytoplankton and zooplankton: application to treatment of ballast water[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 56(6): 1201-1208.
- [ 55 ] 谭啸, 顾惠卉, 段志鹏, 等. 超声波控藻对氮磷释放及水质变化的影响 [J]. 中国环境科学, 2018, 38(4): 1371-1376.  
TAN X, GU H H, DUAN Z P, et al. Effects of ultrasound on the released amount of nitrogen and phosphorus and changes of water quality during blooms control[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(4): 1371-1376.
- [ 56 ] ZHOU Y C, HUANG H, WANG J, et al. Vaccination of the grouper, *Epinephelus awoara*, against vibriosis using the ultrasonic technique[J]. *Aquaculture*, 2002, 203(3/4): 229-238.
- [ 57 ] 崔峻岭, 吴竹林. 超声波技术在防治人工湖水藻中的应用 [J]. 宁夏农林科技, 2009, 50(2): 41.  
CUI J L, WU Z L. Application of ultrasonic technology in controlling algae in artificial lake[J]. *Journal of Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2009, 50(2): 41.
- [ 58 ] 丁永良, 卢守珍, 郭磊, 等. 超声波水域灭藻净水装置在上海曲阳公园景观湖的应用 [J]. 上海水务, 2006, 22(4): 15-18.
- [ 59 ] 闫莉. 超声共振技术在水库藻类抑制中的应用初探 [J]. 人民珠江, 2015, 36(4): 88-90.  
YAN L. Preliminary study on the application of ultrasonic resonance technology in algae inhibition in reservoirs[J]. *Pearl River*, 2015, 36(4): 88-90.
- [ 60 ] RAJASEKHAR P, FAN L H, NGUYEN T, et al. A review of the use of sonication to control cyanobacterial blooms[J]. *Water Research*, 2012, 46(14): 4319-4329.
- [ 61 ] 韩景明. 澎溪河水环境及超声波除 (抑) 藻技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [ 62 ] VISSER P M, IBELINGS B W, BORMANS M, et al. Artificial mixing to control cyanobacterial blooms: a review[J]. *Aquatic Ecology*, 2016, 50(3): 423-441.
- [ 63 ] 史小丽, 杨瑾晟, 陈开宁, 等. 湖泊蓝藻水华防控方法综述 [J].

- 湖泊科学, 2022, 34(2): 349-375.
- SHI X L, YANG J S, CHEN K N, et al. Review on the control and mitigation strategies of lake cyanobacterial blooms[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(2): 349-375.
- [ 64 ] 方荣楠. 间歇式空气扬水筒改善水质环境 [J]. 渔业机械仪器, 1989, 16(6): 39.
- FANG R N. Intermittent air pump improves water quality environment[J]. *Fishery Modernization*, 1989, 16(6): 39.
- [ 65 ] 周真明, 黄廷林, 丛海兵. 扬水曝气/生物接触氧化工艺的除藻效果研究 [J]. 中国给水排水, 2007, 23(15): 13-16.
- ZHOU Z M, HUANG T L, CONG H B. Algae removal effect by combined process of water-lifting aeration and biological contact oxidation[J]. *China Water & Wastewater*, 2007, 23(15): 13-16.
- [ 66 ] 马越, 黄廷林, 丛海兵, 等. 扬水曝气技术在河道型深水水库水质原位修复中的应用 [J]. 给水排水, 2012, 48(4): 7-13.
- MA Y, HUANG T L, CONG H B, et al. Application of the technology of water-lifting and aeration on water quality *in situ* restoration in a deep channel reservoir[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2012, 48(4): 7-13.
- [ 67 ] 密度流扩散装置技术资料 [R]. 东京: 东京大学, 2005.
- [ 68 ] 倪其军, 睦爱国, 顾建民. 蓝藻水脱水处理方法: CN101648092A[P]. 2011-06-01.
- [ 69 ] 吴元宝, 王启山, 王玉恒, 等. 混凝-气浮除藻工艺中各参数的优化 [J]. 中国给水排水, 2008, (3): 95-99.
- WU Y B, WANG Q S, WANG Y H, et al. Optimization of parameters in coagulation/flotation process for algae removal[J]. *China Water & Wastewater*, 2008, (3): 95-99.
- [ 70 ] 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(增刊 2): 97-99.
- ZHANG J, YANG Z, LI T, et al. Research progress on the application of the technology of separating algae from water[J]. *Environmental Science Survey*, 2019, 38(Suppl 2): 97-99.
- [ 71 ] 史春琼, 黄光团, 周鼎, 等. 磁化处理对水中藻类的去除效果研究 [J]. 净水技术, 2009, 28(6): 54-57.
- SHI C Q, HUANG G T, ZHOU D, et al. Algae removal effect by magnetization[J]. *Water Purification Technology*, 2009, 28(6): 54-57.
- [ 72 ] 胡明明, 胡云海, 孙阳, 等. 一种蓝藻深井处理设备: CN207645907U[P]. 2018-07-24.
- [ 73 ] 李敦海, 汪志聪, 秦仁杰, 等. 蓝藻水华的拦截和陷阱捕获综合控藻技术研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(增刊 2): 45-50.
- LI D H, WANG Z C, QIN H J, et al. An integrated technology of bloom-barrier and bloom-trap for cyanobacterial bloom control[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(Suppl 2): 45-50.
- [ 74 ] 柯凡, 李文朝, 潘继征, 等. 一种智能拦挡式围隔: CN108221891B[P]. 2023-08-18.
- [ 75 ] BELLOCQ B, RUIZ T, DELAPLACE G, et al. Screening efficiency and rolling effects of a rotating screen drum used to process wet soft agglomerates[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 195: 235-246.
- [ 76 ] 肖邦定, 黄立新. 一种全自动船载除藻的方法及设备: CN105833596A[P]. 2019-03-26.
- [ 77 ] ANDERSON D M. Turning back the harmful red tide[J]. *Nature*, 1997, 388(6642): 513-514.
- [ 78 ] 慕利梅, 王图锦, 曹琳, 等. 聚合氯化铝-镧改性膨润土的制备及除磷除藻研究 [J]. 环境科学研究, 2022, 35(6): 1450-1457.
- MU L M, WANG T J, CAO L, et al. Preparation of polyaluminum chloride-lanthanum modified bentonite and study on phosphorus and algae removal[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(6): 1450-1457.
- [ 79 ] 蒋茜茜, 张小凤, 陈文清. 9 种黏土对铜绿微囊藻的去除效果 [J]. 中国给水排水, 2018, 34(7): 56-59.
- JIANG Q Q, ZHANG X F, CHEN W Q. Effect of *Microcystis aeruginosa* removal by nine types of clay[J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(7): 56-59.
- [ 80 ] 孙珮石, 许晓毅, 毕晓伊, 等. 滇池水体除藻材料的除藻作用试验研究 [J]. 安全与环境学报, 2004, 4(6): 3-6.
- SUN P S, XU X Y, BI X Y, et al. Experimental research on algae-removing effect of Dianchi Lake by algacide material[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2004, 4(6): 3-6.
- [ 81 ] AKTAS T S, TAKEDA F, MARUO C, et al. Comparison of four kinds of coagulants for the removal of picophytoplankton[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2013, 51(16/17/18): 3547-3557.
- [ 82 ] 郭培章, 宋群. 中外水体富营养化治理案例研究 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [ 83 ] 陆贻超, 王国祥, 李仁辉. 超声波和改性粘土集成技术在去除蓝藻水华上的应用 [J]. 湖泊科学, 2010, 22(3): 421-429.
- LU Y C, WANG G X, LI R H. Using the integrated technique of ultrasonic and modified-clay to remove algal blooms[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(3): 421-429.
- [ 84 ] CHU Z S, JIN X C, YANG B, et al. Buoyancy regulation of *Microcystis flos-aquae* during phosphorus-limited and nitrogen-limited growth[J]. *Journal of Plankton Research*, 2007, 29(9): 739-745.
- [ 85 ] 曹泽磊, 陈旭清, 胡航宇, 等. 一种蓝藻打捞及加压控藻船: CN106638518B[P]. 2018-11-13.
- [ 86 ] 潘阳. 大型水体原位加压沉淀控制蓝藻生长机理研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2020.
- [ 87 ] 陈昕, 胡胜华, 陈晓飞, 等. 蓝藻水华应急处置方法与技术研究进展 [J]. 环境科学与技术, 2023, 46(5): 108-116.
- CHEN X, HU S H, CHEN X F, et al. Progress on methods and technologies for the emergency treatment of cyanobacterial blooms[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 46(5): 108-116.
- [ 88 ] 郑婷婷, 牟霄, 张崇森, 等. 电话化过硫酸盐去除铜绿微囊藻的效果及机理研究 [J]. 环境科学研究, 2022, 35(1): 98-107.
- ZHENG T T, MOU X, ZHANG C M, et al. Removal performance and mechanisms of *Microcystis aeruginosa* by electro-activated persulfate[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(1): 98-107.
- [ 89 ] YANG Z, BULEY R P, FERNANDEZ-FIGUEROA E G, et al. Hydrogen peroxide treatment promotes chlorophytes over toxic cyanobacteria in a hyper-eutrophic aquaculture pond[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 240: 590-598.
- [ 90 ] MIAO H F, TAO W Y. The mechanisms of ozonation on cyanobacteria and its toxins removal[J]. *Separation and Purification Technology*, 2009, 66(1): 187-193.
- [ 91 ] 回东冰, 吴明松. 二氧化氯与 PAC 混凝剂同时投加对含藻水的处理效果 [J]. 城镇供水, 2022(5): 30-34.
- HUI D B, WU M S. Effect of adding chlorine dioxide and PAC coagulant at the same time on algae-containing water treatment[J]. *City and Town Water Supply*, 2022(5): 30-34.
- [ 92 ] 王铮, 王珂, 夏萍. 二溴海因与次氯酸钠杀菌除藻效果对比研究 [J]. 净水技术, 2016, 35(增刊 1): 39-41.

- WANG Z, WANG K, XIA P. Comparison of killing alga and bacteria by DBDMH and NaClO[J]. *Water Purification Technology*, 2016, 35(Suppl 1): 39-41.
- [ 93 ] 赵小丽, 宋立荣, 张小明. 硫酸铜控藻对浮游植物群落的影响[J]. *水生生物学报*, 2009, 33(4): 596-602.
- ZHAO X L, SONG L R, ZHANG X M. Effects of copper sulfate treatment on eutrophic urban lake phytoplankton communities[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2009, 33(4): 596-602.
- [ 94 ] 王寿兵, 徐紫然, 马小雪, 等.  $\text{Cu}^{2+}$ 对铜绿微囊藻生长及叶绿素荧光主要参数的影响研究[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(12): 3759-3765.
- WANG S B, XU Z R, MA X X, et al. Effects of  $\text{Cu}^{2+}$  on the growth and main parameters of chlorophyll fluorescence of *Microcystis aeruginosa*[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(12): 3759-3765.
- [ 95 ] 柴仕淦, 贾钊, 李欣怡, 等. 季铵盐型 Gemini 表面活性剂去除铜绿微囊藻[J]. *环境工程技术学报*, 2016, 6(1): 8-15.
- CHAI S G, JIA C, LI X Y, et al. Removal of *Microcystis aeruginosa* by using quaternary ammonium salt of Gemini surfactant[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2016, 6(1): 8-15.
- [ 96 ] 王晓丽, 张永丽. 硫酸盐及其组合除藻的比较分析[J]. *资源开发与市场*, 2008, 24(12): 1060-1062.
- WANG X L, ZHANG Y L. Kraft and combinations algae removal of a comparative analysis[J]. *Resource Development & Market*, 2008, 24(12): 1060-1062.
- [ 97 ] ZEMMOURI H, DROUICHE M, SAYEH A, et al. Coagulation flocculation test of keddara's water dam using chitosan and sulfate aluminium[J]. *Procedia Engineering*, 2012, 33: 254-260.
- [ 98 ] 张谦, 刘晓冬, 邓非凡.  $\text{KMnO}_4$  预氧化强化混凝沉淀对太湖高藻水 DON 去除研究[J]. *环境工程技术学报*, 2018, 8(5): 527-532.
- ZHANG Q, LIU X D, DENG F F. Research on removal of Taihu Lake algal source DON by  $\text{KMnO}_4$  pre-oxidation and coagulation sedimentation[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2018, 8(5): 527-532.
- [ 99 ] 陈春艳, 胡哈华, 王煜, 等. 氯化铁和聚丙烯酰胺絮凝剂 WT652 对三角褐指藻的絮凝作用[J]. *水生生物学报*, 2010, 34(3): 669-672.
- CHEN C Y, HU H H, WANG Y, et al. Flocculation of *Phaedactylum tricornutum* induced by ferric chloride and polyacrylamide flocculant WT652[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, 34(3): 669-672.
- [ 100 ] 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 E S. Analysis on biomanipulation, non-traditional biomanipulation and discussion of the countermeasures of biomanipulation application in waters[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(3): 307-314.
- [ 101 ] SHAPIRO J, WRIGHT D I. Lake restoration by biomanipulation: round Lake, Minnesota, the first two years[J]. *Freshwater Biology*, 1984, 14: 371-383.
- [ 102 ] 张喜勤, 徐锐贤, 许金玉, 等. 水蚤净化富营养化湖水试验研究[J]. *水资源保护*, 1998, 14(4): 32-36.
- ZHANG X Q, XU R X, XU J Y, et al. Experimental study on purification of eutrophic lake water by water cress[J]. *Water Resources Protection*, 1998, 14(4): 32-36.
- [ 103 ] 刘建康, 谢平. 用鲢鳙直接控制微囊藻水华的围隔试验和湖泊实践[J]. *生态科学*, 2003, 22(3): 193-198.
- LIU J K, XIE P. Direct control of microcystis bloom through the use of planktivorous carp-closure experiments and lake fishery practice[J]. *Ecologic Science*, 2003, 22(3): 193-198.
- [ 104 ] 5 亿尾鲢鳙鱼吃掉太湖 658 万吨蓝藻实现生态经济双赢[J]. *科学养鱼*, 2018(8): 52.
- Million silver carp and bighead carp ate 6.58 million tons of cyanobacteria in Taihu Lake to achieve eco-economic win-win situation[J]. *Scientific Fish Farming*, 2018(8): 52.
- [ 105 ] 陈少莲, 刘肖芳, 胡传林, 等. 论鲢、鳙对微囊藻的消化利用[J]. *水生生物学报*, 1990, 14(1): 49-59.
- CHEN S L, LIU X F, HU C L, et al. On the digestion and utilization of microcystis by fingerlings of silver carp and bighead[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1990, 14(1): 49-59.
- [ 106 ] 此里能布, 毛建忠, 黄少峰. 经典与非经典生物操纵理论及其应用[J]. *生态科学*, 2012, 31(1): 87-91.
- CI L, MAO J Z, HUANG S F. Theory and application of biomanipulation and non-traditional biomanipulation[J]. *Ecological Science*, 2012, 31(1): 87-91.
- [ 107 ] BARRETT P R F, LITTLEJOHN J W, CURNOW J. Long-term algal control in a reservoir using barley straw[M]/CAFFREY J, BARRETT PRF, FERREIRA MT, et al. *Biology, ecology and management of aquatic plants*. Dordrecht: Springer, 1999: 309-313.
- [ 108 ] 王敏, 刘浩, 王江南, 等. 生物法治理蓝藻水华研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(1): 92-99.
- WANG M, LIU H, WANG J N, et al. Research progress on the biological control of cyanobacterial blooms[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(1): 92-99.
- [ 109 ] PROETZEL A E. Artificial floating islands: cities of the future[J]. *Theses and Major Papers*, 1983: 145.
- [ 110 ] 刘晶晶, 彭娟莹, 吴奇. 生态浮岛技术的研究现状及展望[J]. *湖南农业科学*, 2014(15): 47-49.
- LIU J J, PENG J Y, WU Q. Research status and prospect of ecological floating island technology[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2014(15): 47-49.
- [ 111 ] 和丽萍. 利用化学杀藻剂控制滇池蓝藻水华研究[J]. *云南环境科学*, 2001, 20(2): 43-44.
- HE L P. Control blue algal bloom by using algacide[J]. *Yunnan Environmental Science*, 2001, 20(2): 43-44.
- [ 112 ] 宁平, 朱易, 徐小军. 三氯化铁在滇池蓝藻爆发期除藻中的应用研究[J]. *农业环境保护*, 2001, 20(5): 348-350.
- NING P, ZHU Y, XU X J. Application of ferric chloride in removal of blue algae at algal eruptive period in Dianchi Lake[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2001, 20(5): 348-350.
- [ 113 ] 赵祥华, 田军. 人工浮岛技术在云南湖泊治理中的意义及技术研究[J]. *云南环境科学*, 2005(增刊 1): 130-132. ⊗