

微生物抑制藻华生长的研究进展

陆春龙

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2025年12月29日; 录用日期: 2026年2月2日; 发布日期: 2026年2月11日

摘要

藻华是水体富营养化引发的全球性环境问题, 严重破坏水生态平衡并威胁人类健康。传统物理、化学控藻方法存在成本高、二次污染等弊端, 而微生物控藻因高效、环保、特异性强等优势成为研究热点。本文系统梳理了具有抑藻活性的微生物种类, 包括溶藻细菌、抑藻病毒、功能真菌及大型藻类关联微生物等; 深入分析了其抑制藻华生长的作用机制, 如直接接触溶藻、分泌活性代谢产物抑藻及营养竞争等; 总结了微生物控藻技术的研发阶段与应用现状, 涵盖单一菌株应用、复合菌群调控及活性物质开发等方向; 最后探讨了当前研究存在的瓶颈及未来发展趋势, 为微生物控藻技术的产业化应用提供理论参考。

关键词

微生物, 藻华抑制, 溶藻细菌, 作用机制, 生物防治

Research Progress on Microbial Inhibition of Algal Bloom Growth

Chunlong Lu

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: December 29, 2025; accepted: February 2, 2026; published: February 11, 2026

Abstract

Algal blooms are a global environmental problem caused by water eutrophication, severely disrupting aquatic ecological balance and threatening human health. Traditional physical and chemical methods for controlling algae have drawbacks such as high costs and secondary pollution, whereas microbial control of algae has become a research hotspot due to its high efficiency, environmental friendliness, and strong specificity. This paper systematically reviews the types of microorganisms with algistic activity, including algicidal bacteria, algal viruses, functional fungi, and microorganisms

associated with large algae. It provides an in-depth analysis of their mechanisms in inhibiting algal bloom growth, such as direct contact lysis of algae, secretion of active metabolites to suppress algae, and competition for nutrients. The paper also summarizes the development stages and current application status of microbial algal control technologies, covering approaches such as the use of single strains, regulation of microbial consortia, and development of active substances. Finally, it discusses the current research bottlenecks and future development trends, providing a theoretical reference for the industrial application of microbial algal control technologies.

Keywords

Microorganisms, Algal Bloom Inhibition, Algicidal Bacteria, Mechanism of Action, Biological Control

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

有害藻华的暴发，不仅会大量消耗水体中的溶解氧、破坏水生生物的栖息环境，还会促使藻类产生藻毒素，污染饮用水源，进而对渔业生产、旅游业发展以及人类健康构成严重威胁[1]-[3]。据相关统计数据显示，我国巢湖流域每年因藻华造成的渔业直接经济损失高达数亿元[4]；与此同时，海洋环境中由藻华引发的赤潮事件发生频次逐年攀升，对近海生态系统的结构与功能造成了毁灭性破坏[5]。

目前，藻华治理主要依赖物理、化学及生物三大技术手段[6]-[8]。物理方法如机械打捞、粘土絮凝等，虽能短期清除藻细胞，但存在成本高昂、效率低下、难以规模化应用等问题[9] [10]；化学方法如使用硫酸铜、过氧化氢等杀藻剂，虽杀藻速度快，但易导致二次污染，破坏水体微生物群落结构，引发更严重的生态失衡[9] [11]。相比之下，微生物控藻技术以其环境友好、特异性强、可持续性好等独特优势，成为近年来藻华治理领域的研究焦点[12] [13]。微生物通过自身代谢活动或与藻类的相互作用，可有效抑制藻类生长甚至裂解藻细胞，且不易对非目标生物产生影响，契合生态治理的发展需求[14] [15]。本文旨在系统总结微生物抑制藻华生长的最新研究进展，分析不同类型微生物的抑藻特性与作用机制，探讨技术应用中的关键问题与未来方向，为推动微生物控藻技术的实际应用提供理论支撑。

2. 抑制藻华生长的主要微生物类群

自然界中存在多种具有抑藻活性的微生物，它们广泛分布于水体、底泥等环境中，构成了藻华自然消亡的重要生态驱动力[14] [16]。根据微生物类群的不同，可将其分为溶藻细菌、抑藻病毒、功能真菌及大型藻类关联微生物等，各类群具有独特的抑藻特性与作用范围。

2.1. 溶藻细菌

溶藻细菌是目前研究最广泛、最深入的抑藻微生物类群，指能够通过直接或间接方式抑制藻类生长或裂解藻细胞的细菌。自 1924 年 Geitler 首次报道寄生并致死刚毛藻的黏细菌以来，国内外学者已从淡水、海洋等不同水体环境中分离鉴定出多种溶藻细菌，涵盖假单胞菌属、黄杆菌属、交替单胞菌属、芽孢杆菌属、鞘氨醇单胞菌属等多个类群[17]。例如，青岛能源所研究团队[18]从海洋环境中筛选到一株具有广谱杀藻活性的细菌，其可通过合成新型小分子物质 3,3',5,5'-四溴-2,2-联苯二酚(4-BP)，对硅藻、绿藻、甲藻等多种藻类产生致死效应；温州大学赵敏教授团队[19]分离的交替单胞菌 *A. abrolhosensis* JY-JZ1，

对有害甲藻米氏凯伦藻具有显著的溶藻效果，其代谢产物中的 5 种新型活性物质被证实具有溶藻活性。此外，从巢湖底泥中筛选出的 35 株溶藻细菌，其中假单胞菌属菌株对蓝藻的 24 h 溶藻率可达 85.9%，且能有效降解微囊藻毒素 LR [20]。溶藻细菌的抑藻谱存在差异，部分菌株具有广谱抑藻活性，可作用于多种藻类，而有些则表现出较强的特异性，仅对特定藻类产生抑制作用，这种特异性为精准治理单一优势种藻华提供了可能。

2.2. 抑藻病毒

抑藻病毒(又称噬藻体)是一类特异性感染藻类的病毒，通过裂解宿主藻细胞实现抑藻效果，具有宿主特异性强、增殖速度快、对环境友好等特点[15]。抑藻病毒广泛存在于海洋、湖泊等水体环境中，尤其在藻华暴发区域的病毒丰度显著升高，是调控藻类种群动态的重要生态因子。日本研究人员[21]从发生水华的湖泊沉积物中分离出 HcRNAV 病毒，该病毒可特异性裂解环沟藻(*Heterocapsa circularisquama*)，通过将含病毒沉积物与湖水混合扩增后喷洒，成功控制了 5 km² 湖区的藻华暴发，这是抑藻病毒实际应用的典型案例。此外，针对亚历山大藻、微囊藻等[14]常见藻华优势种的抑藻病毒也相继被发现，其感染机制主要是通过识别藻细胞表面受体进入细胞，利用宿主代谢系统完成自身增殖，最终裂解藻细胞释放子代病毒，形成连锁反应以抑制藻华扩散。由于抑藻病毒具有高度的宿主特异性，不会对水体中的其他有益生物产生影响，因此在精准控藻方面具有巨大应用潜力。

2.3. 其他抑藻微生物

主要溶藻微生物及其特性如表 1 所示。除溶藻细菌和抑藻病毒外，功能真菌和大型藻类关联微生物也具有一定的抑藻活性。功能真菌如木霉属、青霉属等，可通过分泌抗生素、酶类等活性物质抑制藻类生长，部分真菌还能与藻细胞形成寄生关系，直接破坏藻细胞结构。大型藻类关联微生物主要是指与海带、石莼等大型海藻共生的微生物群落，这些微生物可通过分泌化感物质抑制有害藻华藻类的生长。研究发现[22]，养殖海带(*Saccharina latissima*)、石莼(*Ulva*)等大型海藻时，其表面共生微生物产生的化感物质能有效抑制亚历山大藻(*Alexandrium catenella*)的生长，同时降低蓝贻贝体内的石房蛤毒素积累，且大型海藻养殖本身具有固碳、提供栖息地等生态效益，实现了控藻与生态修复的协同发展。

Table 1. Major algicidal microorganisms and their characteristics

表 1. 主要溶藻微生物及其特性

微生物名称	分类地位	靶向藻种	活性物质/机制	溶藻效率(%)	参考文献
海洋广谱杀藻细菌	细菌域, γ -变形菌门	硅藻、绿藻、甲藻	3,3',5,5'-四溴-2,2-联苯二酚 (4-BP), 抑制光合作用	90 以上(48 h)	[23]
交替单胞菌 <i>A. abrolhosensis</i> JY-JZ1	细菌域, γ -变形菌门, 交替单胞菌属	米氏凯伦藻	5 种新型溶藻活性化合物, 破坏光合作用、引发氧化损伤	88.6 (72 h)	[19]
假单胞菌属菌株	细菌域, γ -变形菌门, 假单胞菌属	蓝藻	分泌溶藻酶类, 降解藻细胞结构	85.9 (24 h)	[24]
HcRNAV 病毒	病毒域, 单链 RNA 病毒	环沟藻	特异性感染裂解藻细胞	95 以上(自然水体)	参考赤潮治理相关研究
木霉属真菌	真菌界, 子囊菌门, 木霉属	蓝藻、绿藻	抗生素、纤维素酶, 抑制生长 + 破坏细胞结构	76.3 (72 h)	环境微生物相关研究
海带共生微生物	细菌域, 多种类群(拟杆菌门、厚壁菌门等)	亚历山大藻	化感物质, 抑制生长	82.1 (96 h)	海洋生态相关研究

3. 微生物抑制藻华的作用机制

微生物抑制藻华生长的作用机制复杂多样，不同类群微生物的作用方式存在显著差异，即使是同一类群的不同菌株，其抑藻机制也可能不同。根据作用方式的不同[13][25]，可将其概括为直接作用机制和间接作用机制两大类，多数微生物通过多种机制协同发挥抑藻作用。微生物溶藻机制如图1所示。

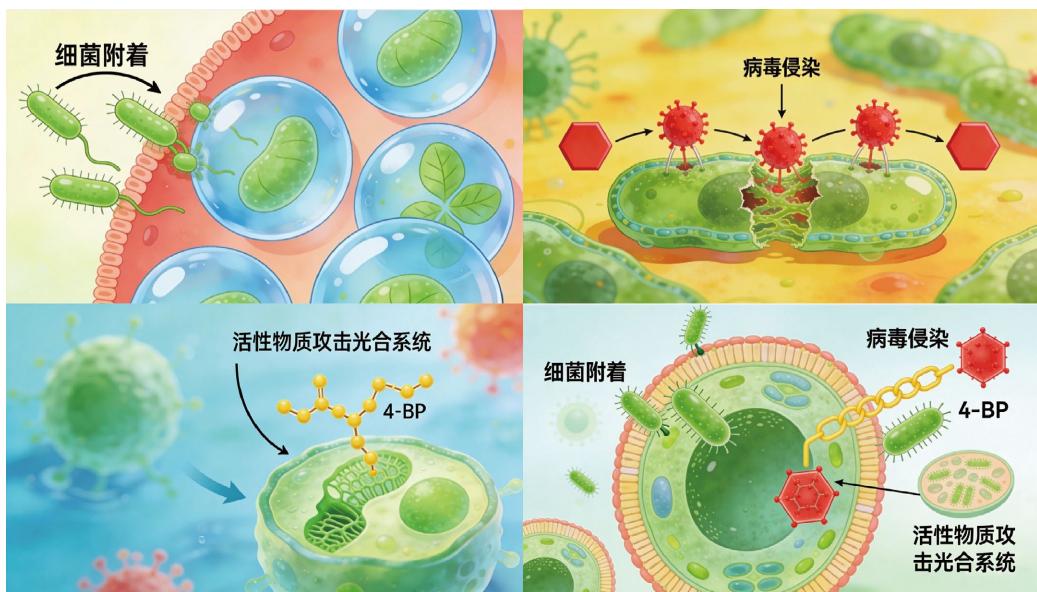


Figure 1. Microbial algae-lysis mechanism
图 1. 微生物溶藻机制

3.1. 直接作用机制

直接作用机制是指微生物通过与藻细胞直接接触，对藻细胞产生物理或生理上的破坏，从而抑制其生长或导致其裂解。这种作用方式主要存在于部分溶藻细菌和寄生性真菌中。例如，一些黏细菌[13]可通过附着在藻细胞表面，分泌黏液物质包裹藻细胞，阻碍其光合作用和物质交换，同时释放溶菌酶等物质破坏藻细胞的细胞壁和细胞膜结构，导致藻细胞内容物外泄而死亡。显微镜观察发现[14]，溶藻细菌 *A. abrolhosensis* JY-JZ1 与米氏凯伦藻细胞接触后，藻细胞膜完整性遭到破坏，碘化丙啶(PI)染色显示藻细胞核酸被染色，表明细胞膜已失去屏障功能。此外，抑藻病毒通过特异性识别藻细胞表面受体进入细胞内部，利用藻细胞的核酸和蛋白质合成系统进行自身增殖，最终导致藻细胞裂解，释放出大量子代病毒，进一步感染周围的藻细胞，形成链式裂解反应，快速抑制藻华扩散。

3.2. 间接作用机制

间接作用机制是指微生物不与藻细胞直接接触，而是通过分泌活性代谢产物或竞争营养物质等方式抑制藻类生长，这是微生物抑藻的主要作用方式，尤其在溶藻细菌中更为普遍。

分泌活性代谢产物抑藻是最常见的间接作用机制。微生物分泌的抑藻活性物质种类丰富[15]，包括小分子化合物、酶类、抗生素等。这些活性物质通过不同途径干扰藻细胞的正常生理代谢，如破坏光合作用系统、引发氧化应激、干扰物质合成等。值得关注的是，微生物合成溶藻化合物的过程并非单一基因调控，而是由一系列功能相关基因组成的生物合成基因簇(Biosynthetic Gene Clusters, BGCs)协同调控完成。溶藻化合物生物合成基因簇通常包含结构基因、调控基因、转运基因等核心模块，结构基因负责合

成活性物质的基本骨架并进行修饰，调控基因通过感知环境信号(如藻类代谢产物、营养盐浓度)调控整个基因簇的表达强度，转运基因则负责将合成的溶藻化合物分泌至胞外发挥作用。近年来，随着基因组测序和生物信息学技术的发展，越来越多溶藻微生物的生物合成基因簇被解析。青岛能源所研究团队在具有广谱杀藻活性的海洋细菌中，鉴定出新型溶藻物质 3,3',5,5'-四溴-2,2-联苯二酚(4-BP)的完整生物合成基因簇，该基因簇包含 4 个核心结构基因和 2 个调控基因，通过异源表达实验证实，这些基因协同作用可高效合成 4-BP，且调控基因能响应藻类分泌物信号，实现 4-BP 的诱导型合成。此外，有研究团队发现 [26] 在交替单胞菌 *A. abrolhosensis* JY-JZ1 的基因组中，预测出 5 个潜在的溶藻活性物质生物合成基因簇，通过基因敲除和回补实验，明确了其中 2 个基因簇与溶藻活性直接相关，其表达产物可显著抑制米氏凯伦藻的光合作用。解析溶藻化合物生物合成基因簇的结构与功能，不仅能揭示溶藻活性物质的合成机制，还能为通过合成生物学技术改造微生物、提升溶藻效率提供关键靶点，同时为人工异源合成溶藻化合物奠定基础，推动微生物控藻技术的精准化和产业化发展。

营养竞争也是微生物抑藻的重要间接机制[27]。藻类生长需要氮、磷、碳等多种营养物质，而微生物可通过快速吸收水体中的营养物质，或利用藻细胞分泌的有机物作为碳源和氮源，与藻类形成营养竞争关系，从而限制藻类的生长。在富营养化水体中，溶藻细菌的生长繁殖速度通常快于藻类，能够快速消耗水体中的氮、磷等营养盐，使藻类因营养缺乏而无法正常生长[15]。研究发现，固氮细菌群落可与聚球藻竞争营养盐，支持自身生长的同时抑制藻类增殖，在寡营养大洋中这种竞争关系对调控浮游植物种群结构具有重要作用。此外，部分微生物还可分泌有机酸等物质改变水体 pH 值，间接影响藻类的生长环境，抑制其生长繁殖[13]。

4. 微生物抑制藻华的应用技术研究

Table 2. Comparison of advantages, disadvantages, and cost-effectiveness of different algae control techniques
表 2. 不同控藻技术的优缺点及成本效益对比

控藻技术类型	优点	缺点	成本效益分析
物理控藻(机械打捞、粘土絮凝)	操作简单、见效快，无二次污染风险，对藻种无选择性	成本高、效率低，难以规模化应用，仅能短期清除表层藻细胞，底泥残留藻细胞易复发	成本高(吨水治理成本约 2~5 元)，效益短期性，适合小范围应急治理，长期效益差
化学控藻(硫酸铜、过氧化氢)	杀藻速度快、效率高，成本相对较低，适合大面积快速控藻	易产生二次污染，破坏水体微生物群落结构，引发生态失衡，对非目标生物有毒性，可能导致藻毒素释放	直接成本低(吨水治理成本约 0.5~1.2 元)，但需承担生态修复后续成本，综合效益差，长期使用隐患大
微生物单一菌株控藻	环境友好、特异性强，不破坏生态平衡，可降解藻毒素，操作相对简单	自然水体中存活稳定性差，易受环境因素(温度、pH)影响，抑藻效果波动大，功能单一	中低成本(吨水治理成本约 1~2 元)，实验室阶段效益显著，自然水体中效益受环境制约，规模化应用需优化
微生物复合菌群控藻	环境适应性强，菌株间协同作用提升抑藻效率，功能全面(控藻 + 降解毒素)，稳定性优于单一菌株	菌群构建与优化难度大，筛选周期长，不同水体需针对性适配菌群	中成本(吨水治理成本约 1.2~2.5 元)，综合效益好，长期控藻效果稳定，规模化应用潜力大
固定化微生物控藻	微生物稳定性强、可重复利用，抑藻作用时间长，减少菌株流失，对环境适应性进一步提升	固定化载体成本高，制备工艺复杂，大规模制备难度大，载体可能存在降解残留风险	中高成本(吨水治理成本约 2~3.5 元)，初期投入高，后期因重复利用降低成本，长期效益好，适合重点水体治理

不同控藻技术的优缺点及成本效益对比如表 2 所示。随着微生物抑藻机制研究的不断深入，相关应

用技术也逐步从实验室研究向中试和实地示范阶段推进,见表2。目前,微生物抑制藻华的应用技术主要集中在单一菌株直接应用、复合菌群协同调控、活性代谢产物开发及固定化技术应用等方向[17],旨在提升抑藻效率、增强环境适应性并降低应用成本。微生物控藻工程化应用需遵循标准化流程,具体如图2所示:

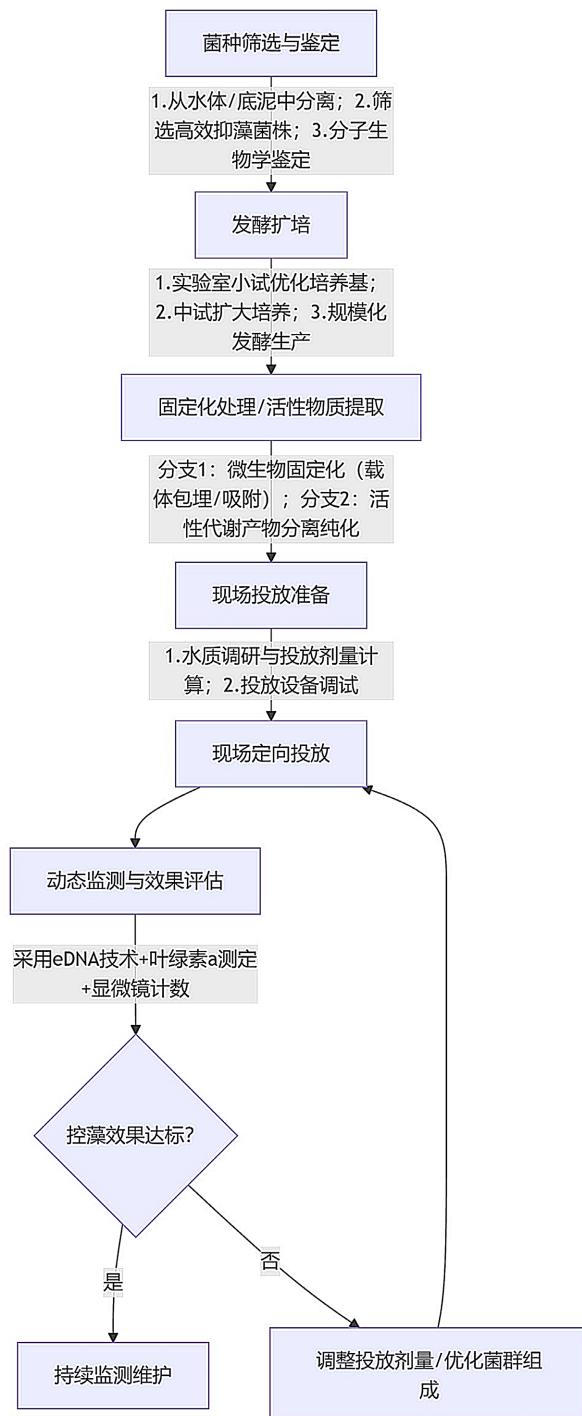


Figure 2. Microbial algae control engineering process
图 2. 微生物控藻工程化流程

4.1. 单一菌株与复合菌群应用

单一菌株应用是最基础的微生物控藻技术，通过筛选高效抑藻菌株，经扩大培养后直接投入受污染水体实现控藻。例如，美国研究人员将溶藻细菌 *Shewanella* sp. IRI-160 投入水体，其分泌的特异性化合物(IRI-160AA)可有效抑制甲藻生长。然而，单一菌株在自然水体中的存活能力和抑藻效果易受环境因素(如温度、pH 值、其他微生物竞争)影响，稳定性较差[28]。为解决这一问题，复合菌群应用技术应运而生。复合菌群由多种具有不同功能的微生物组成，各菌株之间存在协同作用，可提升整体抑藻效率和环境适应性。例如，将溶藻细菌与降解藻毒素的细菌组合，可在抑制藻类生长的同时降解藻毒素，避免藻毒素积累造成二次污染。研究表明[13][29]，复合菌群的抑藻效果显著优于单一菌株，且在复杂水体环境中的存活时间更长，具有更广阔的应用前景。

4.2. 活性代谢产物开发

微生物分泌的抑藻活性代谢产物具有高效、特异性强等特点，开发新型抑藻活性物质是微生物控藻技术产业化的重要方向。通过分离、纯化微生物分泌的活性物质，明确其化学结构和抑藻机制，可实现人工合成或规模化生产，降低应用成本。青岛能源所研究团队发现的新型抑藻物质 4-BP，其合成基因簇在全球海洋多种细菌中广泛存在，人工合成的 4-BP 在室内模拟实验中可有效抑制赤潮藻光合作用，已申报专利并有望开发为新型高效除草剂和抑藻剂。温州大学研究团队[26]从 *A. abrolhosensis* JY-JZ1 的代谢产物中分离出 5 种首次报道的溶藻活性化合物，为新型生物抑藻剂的开发提供了新的候选物质。与直接应用微生物菌株相比，应用活性代谢产物可避免微生物在自然水体中的存活问题，且便于控制剂量和作用时间，安全性更高，更易被市场接受[15]。

4.3. 固定化技术应用

固定化技术通过将微生物或其活性物质固定在特定载体上，可提升其在自然水体中的稳定性和重复利用性，减少环境因素对抑藻效果的影响。常用的固定化载体包括海藻酸钙[30]、琼脂、壳聚糖等天然高分子材料，具有生物相容性好、环境友好等特点。例如，美国研究人员将 *Shewanella* sp. IRI-160 细菌或其分泌的藻毒素包埋在海藻酸钙水凝胶中，制成 DinoSHIELD 产品，实现了藻毒素的缓释，延长了抑藻作用时间，且在小规模实地环境中测试表明其对非目标微生物群落影响较小。固定化技术还可减少微生物菌株的流失，降低应用剂量和成本，同时便于回收和后续处理，为微生物控藻技术的规模化应用提供了技术支持[31][32]。

5. 研究挑战与未来展望

5.1. 当前研究挑战

尽管微生物抑制藻华生长的研究取得了显著进展，但仍面临诸多挑战，限制了其产业化应用。首先，自然水体环境复杂多变，温度、pH 值、溶解氧含量、营养盐浓度等环境因素均会影响微生物的存活和抑藻效果，实验室条件下的高效抑藻菌株在自然水体中往往难以达到预期效果。其中，开放水体中水力停留时间和温度波动对微生物存活率的影响尤为显著且可量化。从水力停留时间的量化影响来看，研究表明，当水力停留时间小于 3 天，溶藻细菌存活率随停留时间缩短呈线性下降，停留时间每减少 1 天，存活率平均降低 15%~22%；例如在流速 0.5 m/s 的河流中，水力停留时间仅 2 天，假单胞菌属溶藻菌株存活率不足 40%，而停留时间延长至 7 天以上时，存活率可稳定在 85%以上。温度波动的量化影响则表现为：多数溶藻微生物的适宜生长温度范围为 20℃~30℃，当温度偏离适宜范围±5℃时，存活率下降 30%~45%；若出现短期极端温度(如高于 35℃或低于 10℃)持续 24 h 以上，存活率可降至 20%以下，且极

端温度造成的活性损伤多不可逆。其次，微生物与藻类及其他微生物之间的相互作用机制尚未完全明确，尤其是在复杂生态系统中的协同与竞争关系，给微生物控藻技术的优化带来困难。再次，规模化应用成本较高，无论是微生物菌株的扩大培养还是活性代谢产物的分离纯化，都需要大量的人力、物力和财力投入，难以满足大面积藻华治理的需求。此外，微生物控藻技术的环境安全性评估尚不充分，部分微生物或其代谢产物可能对非目标生物产生潜在影响，公众接受度有待提升，相关监管政策也不够完善。

5.2. 未来发展展望

构建科学完善的环境安全风险评估指标体系是推动微生物控藻技术产业化的关键前提，建议从以下4个核心维度建立量化评估指标体系：1) 非目标生物安全性指标：包括对浮游动物(如枝角类、桡足类)的急性毒性(96 h-LC_{50})、对底栖生物(如颤蚓)的生长抑制率、对鱼类的鳃组织损伤程度及肝酶活性变化，其中 96 h-LC_{50} 应 $\geq 10^9\text{ CFU/L}$ (单一菌株)或 $\geq 10^{10}\text{ CFU/L}$ (复合菌群)，生长抑制率需 $\leq 10\%$ ；2) 水体生态系统稳定性指标：涵盖投放后水体微生物群落Shannon-Wiener多样性指数变化率($\leq 15\%$)、优势菌群结构改变持续时间(≤ 7 天)、水体溶解氧、pH值等理化指标波动幅度(溶解氧波动 $\leq 1\text{ mg/L}$, pH波动 ≤ 0.5)；3) 藻毒素与代谢产物风险指标：包括藻毒素(如微囊藻毒素LR)降解率($\geq 90\%$)、微生物代谢产物的环境残留浓度($\leq 0.1\text{ mg/L}$)及慢性毒性阈值，需确保代谢产物无“三致”效应(致癌、致畸、致突变)；4) 土壤与地下水迁移风险指标：针对近岸或浅水体应用场景，监测微生物在底泥中的渗透深度($\leq 5\text{ cm}$)及地下水检出浓度(未检出)，避免对地下水生态系统造成影响。

基于上述指标体系，建议归纳形成“微生物控藻剂环境安全评价标准”三级评价框架，具体如下：一级评价(基础安全级)：针对实验室阶段，完成非目标生物急性毒性、核心理化指标影响及藻毒素降解能力测试，所有指标达标即可进入中试阶段；二级评价(生态适应级)：针对中试应用场景，开展小范围($\leq 1000\text{ m}^2$)实地监测，重点验证微生物群落稳定性、代谢产物残留及短期(30天)生态影响，确保无明显生态扰动后可进入规模化示范；三级评价(长期安全级)：针对规模化应用，进行为期1年以上的长期监测，涵盖季节温度波动下的微生物活性稳定性、非目标生物长期累积效应、土壤与地下水迁移风险，同时建立应急处置阈值(如微生物存活率低于30%时需补充投放，出现非目标生物死亡率超20%时立即停止应用)，全面保障开放水体生态系统的长期安全。

针对当前研究存在的问题，未来微生物抑制藻华生长的研究应聚焦于以下方向：一是加强微生物抑藻机制的基础研究，利用高通量测序、代谢组学、转录组学等分子生物学技术，深入解析微生物与藻类之间的相互作用网络，明确关键抑藻基因和活性物质的合成途径，为高效抑藻菌株的筛选和改造提供理论依据。二是研发高效稳定的复合菌群和新型生物抑藻剂，通过基因工程技术改造微生物菌株，提升其抑藻效率和环境适应性；优化复合菌群的组成比例，增强菌株间的协同作用。尤其值得关注的是合成生物学技术在构建超级溶藻菌中的巨大应用潜力，该技术可通过精准设计与改造微生物底盘菌株，实现抑藻功能基因的定向插入、高效表达及调控网络的优化。例如，可选取生长速率快、环境耐受性强的溶藻弧菌等作为底盘，通过基因组工程工具整合多个功能基因簇，赋予工程菌株广谱抑藻、高效降解藻毒素及耐受复杂水体环境(如高盐、极端pH)的多重特性，突破天然溶藻菌功能单一、环境适应性差的瓶颈。三是完善固定化技术和规模化应用工艺，开发低成本、高稳定性的固定化载体，优化微生物扩大培养和活性物质生产工艺，降低应用成本。四是加强环境安全性评估和监管体系建设，系统研究微生物控藻技术对水体生态系统的长期影响，建立科学的风险评估方法和监管标准，提升公众接受度。在此过程中，环境DNA(eDNA)技术可作为监测控藻效果的高效工具，通过检测水体中藻类及功能微生物的eDNA特征序列，实现对藻华优势种丰度变化、抑藻微生物定植动态的快速、精准监测，相较于传统的显微镜计数、叶绿素a测定等方法，eDNA技术具有灵敏度高、检测范围广、可实现非侵入式实时监测的优势，能

为控藻方案的优化调整提供及时的数据支撑。五是推动 eDNA 监测技术与微生物控藻技术的深度融合，结合卫星遥感、水质传感器等手段构建立体化藻华监测与治理体系。六是加强国际合作与跨学科研究，整合生态学、微生物学、环境工程、合成生物学及分子检测等多学科资源，推动微生物控藻技术的创新与产业化应用，实现藻华的精准、高效、可持续治理。

6. 结论

微生物抑制藻华生长作为一种环境友好型的生物治理技术，具有广阔的应用前景。目前已发现多种具有抑藻活性的微生物类群，其抑藻机制主要包括直接接触溶藻、分泌活性代谢产物及营养竞争等，不同机制协同作用实现对藻华的有效抑制。相关应用技术如单一菌株应用、复合菌群调控、活性物质开发及固定化技术等已取得初步进展，但在环境适应性、规模化应用成本及安全性等方面仍存在诸多挑战。未来通过加强基础研究、技术创新和跨学科合作，有望攻克现有技术瓶颈，推动微生物控藻技术的产业化应用，为解决全球藻华污染问题提供有效的技术支撑。

参考文献

- [1] Reddy, K.R. and Chirakkara, R.A. (2013) Green and Sustainable Remedial Strategy for Contaminated Site: Case Study. *Geotechnical and Geological Engineering*, **31**, 1653-1661. <https://doi.org/10.1007/s10706-013-9688-5>
- [2] 李媛. 浅析蓝藻水华的危害及防治[J]. 中国水产, 2023(2): 65-66.
- [3] 刘雪梅, 章光新. 气候变化对湖泊蓝藻水华的影响研究综述[J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 316-326.
- [4] 杨瑾. 含磷洗涤剂对水域环境的污染危害及防治[C]//山东省社会科学界联合会, 山东省社会科学院. 科学发展观: 理论·模式·实践——山东省社会科学界 2006 年学术年会文集(2). 山东社会科学院海洋经济研究所, 2006: 577-583.
- [5] 陈奕帆, 王君玥, 王英豪, 等. 典型赤潮生物夜光藻研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2024, 39(6): 1075-1086.
- [6] 戴国飞, 杨平, 甘南琴, 等. 水华蓝藻控制技术开发与应用[R/OL]. 江西省水利科学研究院, 2021. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=SNAD&dbname=SNAD&filename=SNAD000001915537>, 2025-12-24.
- [7] 韩雯昕, 孙晓雯, 杨瑞冰, 等. 噬藻体对水库蓝藻水华的抑制及调控研究进展[J]. 国外医药(抗生素分册), 2025, 46(4): 244-252.
- [8] 史文凯, 徐晓莹, 张凡, 等. 我国球形棕囊藻藻华危害与应对策略[J]. 渔业研究, 2023, 45(3): 311-316.
- [9] 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.
- [10] Zeng, G., Zhang, R., Liang, D., Wang, F., Han, Y., Luo, Y., et al. (2023) Comparison of the Advantages and Disadvantages of Algae Removal Technology and Its Development Status. *Water*, **15**, Article 1104. <https://doi.org/10.3390/w15061104>.
- [11] 方雨博, 王趁义, 汤唯唯, 等. 除藻技术的优缺点比较、应用现状与新技术进展[J]. 工业水处理, 2020, 40(9): 1-6.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 郑宁宁, 孙丽, 丁宁, 等. 有害微藻抑藻细菌多样性及抑藻机制研究进展[J]. 微生物学通报, 2019, 46(5): 1204-1219.
- [15] 刘姗姗, 俞志明, 曹西华, 等. 微生物治理有害藻华研究进展[J]. 海洋科学, 2023, 47(6): 96-107.
- [16] 林帽英, 罗智伟, 谢章彰, 等. 光合细菌 *Rhodopseudomonas faecalis* JS 提升细菌抑藻能力的机制研究[J]. 环境科学, 2024, 37(12): 2792-2801.
- [17] 宁华, 王琼瑶, 程祖强. 溶藻细菌应用于生物杀藻剂的研究进展[J]. 净水技术, 2017, 36(9): 27-33.
- [18] 中国科学院. 青岛能源所等揭示海洋中调控菌藻关系的新型物质及杀藻机制[EB/OL]. https://www.cas.cn/syky/202309/t20230915_4970627.shtml, 2025-12-24.
- [19] Jia, Y., Lu, J., Zhang, J., Jin, Y., Ren, L., Xu, H., et al. (2025) Algicidal Mechanism and Algicidal Active Metabolites of *Alteromonas Abrolhosensis* against Harmful Dinoflagellates *Karenia Mikimotoi*. *Journal of Hazardous Materials*,

- 490, Article 137815. <https://doi.org/10.1016/j.ihazmat.2025.137815>
- [20] 肖巧巧, 尹华, 叶锦韶, 等. 一株微囊藻毒素-LR 降解菌的降解特性[J]. 环境化学, 2014, 33(9): 1594-1600.
- [21] Nakayama, N., Hamaguchi, M., Yamaguchi, H., Masuda, K. and Fujiwara, M. (2020) Evaluation of a Virus-Based Control Method to Protect Cultured Oysters from the Harmful Dinoflagellate *Heterocapsa Circularisquama*. *Aquaculture*, 529, Article 735625. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735625>
- [22] 吴克敏, 鲁介一, 黄凌风. 海马齿对 3 种典型赤潮甲藻的化感作用及潜在化感物质的鉴定[J]. 海洋学报, 2025, 47(3): 73-84.
- [23] 张增虎, 唐丽丽, 张永雨. 海洋中藻菌相互关系及其生态功能[J]. 微生物学通报, 2018, 45(9): 2043-2053.
- [24] 高菲. 巢湖溶藻细菌的筛选与初步研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽大学, 2012.
- [25] 刘湘, 徐蕾, 王纯波, 等. 枯草芽孢杆菌发酵液对拟柱孢藻的抑制效果及作用方式[J]. 水生生物学报, 2023, 47(12): 1889-1898.
- [26] 黄洪辉, 韩贝贝, 张书飞, 等. 海洋溶藻菌的研究进展[J]. 南方水产科学, 2019, 15(5): 126-132.
- [27] 高前程, 黄力行, 徐炜, 等. 细菌对引发赤潮相关藻类的杀藻作用研究综述[J]. 渔业研究, 2021, 43(4): 426-435.
- [28] 王寿兵, 徐紫然, 张洁. 大型湖库富营养化蓝藻水华防控技术发展述评[J]. 水资源保护, 2016, 32(4): 88-99.
- [29] 王平, 吴晓英, 李科林, 胡曰利. 有效微生物群(EM)抑藻效应研究[J]. 环境科学研究, 2004(3): 34-38+59.
- [30] 毛轩雯, 李逸雯, 姜小羽, 等. 混合白腐真菌的固定化及其在治理铅污染废水中的应用[J]. 微生物学报, 2024, 64(1): 283-302.
- [31] 肖亦, 钟飞, 潘献晓. 固定化微生物技术在废水处理中的应用研究进展[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(6): 82-84.
- [32] Yang, L., Sun, X., Li, H., Hao, R. and Liu, F. (2025) New Insights into Microalgal-Bacterial Immobilization Systems for Wastewater Treatment: Mechanisms, Enhancement Strategies, and Application Prospects. *Bioresource Technology*, 431, Article 132609. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132609>