

基于化感作用抑制藻类水华暴发的研究进展

汪玉莹, 方王凯, 陈冠祥

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2024年5月6日; 录用日期: 2024年6月9日; 发布日期: 2024年6月30日

摘要

气候变化和水体富营养化引起藻类水华大量繁殖, 严重危害水生态环境和人类健康。有害藻华暴发已成为全球范围内的重要环境问题。化感作用作为一种高效、环境友好的藻类水华处理方法备受关注。本文详细介绍了化感作用及化感物质, 以及当前主要的化感抑藻作用方式及其作用机制, 包括水生植物、陆生植物、微生物、藻间相互作用和人工合成化感物质抑藻。为化感作用在抑制有害藻华爆发方面提供了全面的综述和分类总结, 为该领域的进一步研究和应用提供了新的思路和方法。

关键词

化感作用, 水生植物, 陆生植物, 微生物, 有害藻华

Research Progress of Algal Bloom Suppression Based on Allelopathy

Yuying Wang, Wangkai Fang, Guanxiang Chen

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

Received: May 6th, 2024; accepted: Jun. 9th, 2024; published: Jun. 30th, 2024

Abstract

Climate change and water eutrophication cause algal blooms, which seriously endangers aquatic ecological environment and human health. Harmful algal blooms have become an important environmental problem worldwide. Allelopathy has attracted much attention as an efficient and environmentally friendly algal bloom treatment method. In this paper, allelopathy and allelopathy substances are introduced in detail, and the main ways and mechanisms of allelopathy inhibiting algae, including aquatic plants, terrestrial plants, microorganisms, algal interaction and synthetic allelopathy inhibiting algae. This paper provides a comprehensive review and classification of al-

lelopathy in inhibiting harmful algal blooms, and provides a new idea and method for further research and application in this field.

Keywords

Allelopathy, Aquatic Plants, Land Plants, Microorganisms, Harmful Algal Blooms

Copyright © 2024 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

随着工业化和城市化的发展,大量的氮、磷等营养物质进入水体,水体富营养化加剧,全球气候变化进一步刺激了水中有害藻类的生长,导致有害藻华暴发。有害藻华的暴发已成为全球范围内的重要环境问题[1]。藻华暴发导致水中溶解氧降低,水质恶化,进一步导致水生生物死亡,水生态平衡受到破坏。有些藻类会释放具有肝脏毒性的藻毒素,危害水生生物,进一步对人类健康构成威胁。预防和控制藻类水华暴发的方法主要包括引水换水、投加化学药剂、物理分离、生物捕食和竞争等。然而这些方法都存在一定的弊端,例如成本高、易产生二次污染、对水生生物和生态系统产生毒副作用等。化感作用作为一种高效廉价的抑藻的方法,已受到国内外学者的关注,成为了解决有害藻华问题的新思路。本文主要从化感作用抑制有害藻华暴发的角度出发对已有的研究进行分类归纳总结,以期对化感作用抑制有害提供新的思路。

2. 化感作用及化感物质

化感作用是指生物体通过向环境中释放化学物质而对另一生物体产生的任何直接或间接的有益或有害影响,分泌的化学物质称为化感物质[2]。

目前已鉴定出多种化感物质可抑制藻类的生长。化感物质可分为酚类、脂肪酸/酯类、含氮化合物和萜类化合物。化感物质一般具有选择性,即同一种化感物质对不同的靶向生物表现出不同的作用。相较于绿藻,蓝藻对化感物质的胁迫更敏感,如对叔丁基苯二酚具有选择性,对水体中的蓝藻有较好的抑制效果,而对于绿藻则无明显的抑制作用[3]。化感物质具有浓度效应,一些研究表明化感物质少量多次的投加方式能获得更好的抑制效果。有些化感物质对藻类的生长表现为“低促高抑”作用,一定程度上也反映了化感物质需要积累到一定浓度后,才能对藻类产生抑制作用。化感作用还具有复合性,自然环境中化感作用通常是多种化感物质联合作用的结果,具体表现为拮抗、协同、相加和独立。没食子酸、焦性没食子酸和鞣花酸不同配比下对铜绿微囊藻抑制作用具有加合效应。咖啡酸和 N-苯基-1-萘胺等效浓度比条件下对铜绿微囊藻的抑制作用为拮抗作用。

3. 水生植物抑藻进展

1949 年,Hasler 等首次报道了水生植物对藻类具有抑制作用[4]。近年来关于水生植物抑藻的研究逐渐增多,水生植物抑藻通过与藻类营养竞争、光竞争、和分泌化感物质抑制藻类的生长。水生植物主要分为沉水植物、挺水植物和浮水植物。

3.1. 沉水植物抑藻

沉水植物是指完全生长在水面之下,是水生态系统的重要组成部分。目前已有研究多种沉水植物对

藻类具有抑制作用。吴晓辉等[5]研究发现马来眼子菜和斜生栅藻在共培养模式下,斜生栅藻酶活性受到影响,藻细胞受到氧化损伤。苦草、轮叶黑草和伊乐藻对两株微囊藻的最大抑制率均达到 80%,并且伊乐藻的抑制效果最为显著[6]。王红强等通过 GC-MS 对伊乐藻所含的 9 种生物碱组分进行鉴定,发现提取出的总生物碱含量在 62 mg/L 时,在 3 天内对铜绿微囊藻的抑制率达到 44%,说明伊乐藻对铜绿微囊藻的生长具有抑制作用[7]。黑藻种植水能影响藻细胞的生理生化反应,破坏藻细胞结构,最终杀死藻细胞。张之浩等对比了 6 种沉水植物在以硅藻的绿藻为优势种的富营养化水体中的修复作用,结果表明,苦草、轮叶黑藻和狐尾藻的抑藻效果显著且稳定[8]。

3.2. 浮水植物抑藻

浮水植物是指叶片浮于水面之上,通过减少藻类的光合作用抑制藻的生长,一些学者也证实浮水植物也可通过化感作用抑制藻类生长。常见的浮水植物包括凤眼莲、水花生、大漂和荇菜等均具有抑藻作用。杨小杰等[9]研究发现凤眼莲和铜绿微囊藻共培养条件下藻的抗氧化酶系统被破坏,内囊体溶解,藻的生长受到抑制,并且培养体系中藻毒素的释放量显著降低。另有学者发现凤眼莲分泌的化感物质对铜绿微囊藻和斜生栅藻呈现“低促高抑”的现象[10]。大漂与铜绿微囊藻共培养时抑藻率为 90%,其种植水对铜绿微囊藻的抑制率为 72.3% [11]。两种作用方式造成的抑藻能力的差异,可能是因为共培养模式下,大漂能通过化感作用持续分泌化感物质抑制藻的生长。

3.3. 挺水植物抑藻

挺水植物是指根系生长于底泥中,可从底泥中获取营养物质,顶部生长于大气环境中。常见的挺水植物荷花、菖蒲、芦苇等均具有抑藻作用。朱传雪等[12]研究发现荷花新鲜组织和种植水对铜绿微囊藻的有效抑制率达到 90%。另有学者发现荷花的茎和叶的水提液也能抑制铜绿微囊藻和四尾栅藻的影响[13]。李峰民和胡洪营等[14]发现芦苇中的化感物质 2-甲基乙酰乙酸乙酯(EMA)能抑制斜生栅藻、铜绿微囊藻、蛋白核小球藻和羊角月牙藻的生长,芦苇中的化感物质 EMA 导致小球藻和铜绿微囊藻的细胞壁脱落,细胞结构被破坏,导致内容物流出至外界环境中,造成藻细胞死亡[15]。菖蒲的干物质提取液高浓度抑制铜绿微囊藻和小球藻的生长,而低浓度促进了铜绿微囊藻的生长。近年来也有学者将挺水植物与生态浮床相结合,如 Wang 等[16]以菖蒲和鸢尾为浮床植物,以沸石和海绵铁为浮床填料,不仅能控制水体中藻类的生长,还具有一定的观赏价值。

水生植物对藻类的影响是多方面的,除了投加水生植物组织浸提液外,可根据不同水生植物的生长特性,采用不同的抑藻方式。挺水植物与浮水植物通过遮光效应或植物根系分泌化感物质抑制藻的生长。而沉水植物全株处于水下,通过植物根、茎、叶分泌化感物质或与藻类竞争营养物质,从而抑制藻的生长,因此更具有抑藻特性。在实际应用中,应根据环境条件及水体中藻的优势种等要求选择合适的水生植物,并且将多种水生植物混合培养,会产生复合效应,具有更强的抑制作用。

4. 陆生植物抑藻进展

相比于水生植物,陆生植物选择范围更广,数量较大,成本更低。目前陆生植物研究较多的主要为草本植物和木本植物。

4.1. 草本植物抑藻

草本植物中的禾本科、菊科和百合科等对藻类表现为抑制作用[17]。陆生植物中研究最早且抑藻效果最好的是大麦秸秆,一些学者认为大麦秸秆在浸泡和降解过程中产生酚类、酯类、萜醌类等化感物质能有效抑制藻类生长[18]。张庭廷等[19]研究发现农作物水稻秸秆发酵液中的化感物质通过影响铜绿微囊藻

的正常生理代谢功能,破坏藻细胞的抗氧化酶系统,从而抑制藻的生长。禾本科植物互花米草的水提液对铜绿微囊藻的生长具有抑制作用,且呈现剂量-效应关系,有抑藻效应的化感物质主要为环己烷、庚烷、十六烷酸和 2,4-二叔丁基酚等。野艾蒿和杭白菊这两种陆生菊科植物与铜绿微囊藻共培养条件下,最高抑制率均达到 90%以上[20]。百合科植物大蒜液浓度为 0.2 g/L 时对铜绿微囊藻表现为促进作用,当浓度为 6.4 g/L 时大蒜液抑制铜绿微囊藻的生长,抑制率可达 53.4%,大蒜液对铜绿微囊藻呈现“低促高抑”的效果[21]。

4.2. 木本植物抑藻

木本植物中的柏科、桃金娘科、松科和胡桃科等对藻类具有抑制作用。有学者对比了 30 种木本植物的浸提液对铜绿微囊藻的影响,结果表明广玉兰、黄杨叶和龙爪槐这三种木本植物的抑藻效果较好,其中广玉兰的抑藻效果最强,最高抑制率 97.35% [22]。植物落叶多的水体中,藻类暴发的几率较小,可能是植物落叶中存在的化感物质抑制了藻的生长。王文卿[23]等从香樟叶浸提液中共分离鉴定出大量的萜类物质,以及从银杏叶浸提液中分离鉴定出大量的黄酮类物质对东海原甲藻具有显著的抑制作用,且香樟叶萜类物质中的橙花醇,浓度为 4 mg/L 时抑制率最高可达 99.55%,极具抑藻潜力。除了植物落叶外,植物的树皮及果实同样能抑制藻的生长,臭椿树的树皮浸提液对铜绿微囊藻的抑制率也在 90%以上。石榴皮、橘子皮和女贞子等的浸出液均对铜绿微囊藻有抑制作用。

陆生植物的化感物质可以通过落叶、土壤冲洗或人为投加的方式进入水体,在抑藻方面也发挥着显著作用。木本植物主要是通过投加植物干体或采用溶剂提取法提取化感物质作用于水体,从而达到抑藻的目的。而部分草本植物,因其具有良好的水适应性,可通过与藻共培养、或添加种植水的方式抑制水体中藻类的生长。

5. 微生物抑藻

水生态系统中,微生物与藻类之间存在着复杂且密切的关系。微生物可通过摄食、营养竞争和分泌胞外物质等方式,达到抑制藻类生长的目的。真菌类主要是通过分泌抗生素类物质抑制藻的生长,如翅孢壳属真菌和支顶孢属真菌分泌的抗生素 β -内酰胺类抗生素头孢菌素 C 可抑制水华鱼腥藻的生长[24]。细菌是目前研究最为广泛的抑藻微生物。目前发现的细菌分泌的杀藻活性物质主要有肽、蛋白质、生物碱、氨基酸、抗生素、色素和脂肪酸化合物等。如芽孢杆菌 SY-1 分泌的多肽芽胞酰胺对多环旋沟藻具有特异性的杀藻作用[25]。Guo 等[26]从太湖中分离出一株金色杆菌属细菌 GLY-1106 对铜绿微囊藻具有显著抑制作用。但利用微生物抑制有害藻华暴发,目前正处于实验室研究阶段,还缺乏实际的应用。

6. 藻间化感作用

藻类在生长过程中会分泌化感物质从而对其他藻类产生影响,主要包括酶、酯质和毒素等。有藻毒素的铜绿微囊藻和无藻毒素的惠氏微囊藻混合比例为 1:1 时,惠氏微囊藻受到胁迫作用。基于藻间化感作用,利用有益藻类与有害藻类藻间化感作用,可以达到治理有害藻华暴发的问题。宋婵媛等[27]发现栅藻滤液显著抑制两种微囊藻的生长,经 GC-MS 检测,栅藻滤液中具有抑制效应化感物质为邻苯二甲酸二(2-甲氧基乙基)酯。将绿藻应用于水产养殖水体中,既可以作为水产动物的饵料,又能调节水体的生态稳定性,控制有害藻华的暴发。有学者在水产养殖池中利用小球藻防控铜绿微囊藻,结果表明,小球藻通过吸收水体氮磷等营养物质,抑制养殖水体中微囊藻的暴发,微囊藻始终维持在较低水平[28]。

7. 其他人工合成化感物质抑藻

化感物质直接作用于水体后,导致局部浓度过高,对非目标性生物产生毒性或不利影响,并且部分

化感物质暴露于环境后性质不稳定,易降解。微球化技术作为一种药物供给手段,可以有效提高化感物质的稳定性、延长化感物质的释放周期,同时可降低人工合成化学物质的毒副作用,具有广阔的应用前景。Ni 等[29]研究发现,亚油酸微球化处理 4 d 后,显著抑制藻的生长。微球化技术在今后还需重点解决载体材料生物降解性差、回收利用困难等问题。为了克服化学药剂的固有缺点,部分学者将化感物质与化学药剂相结合达到抑制藻类生长的目标。如将化感物质(N-苯基-1-萘胺和 N-苯基-2-萘胺)与壳聚糖及粉煤灰混合,合成杀藻剂的抑藻率可达 99%。人工合成化感物质的生态安全性还需进一步研究。

8. 结论与展望

在藻类水华治理及水生态修复的迫切需求下,利用化感作用抑制藻类水华暴发,因其高效性、生态安全性和投加方式多样性成为当前水环境领域的研究热点,具有一定的实际应用价值。然而,目前仍有许多研究工作有待改进,以期取得重大突破:

- 1) 目前的研究主要集中在实验室阶段,应用于工程的实际案例较少,天然水体往往复杂多变,在今后的研究中应当开展一些野外模拟试验,以期为实际项目应用做出重要参考。
- 2) 在天然水体中,需要考虑化感物质的生态安全性,进一步探究化感物质对水体群落结构的影响。
- 3) 具有藻类抑制活性的化感化学物质已得到研究学者的广泛认可,但目前的化感抑藻方式单一,应当优化化感抑藻的应用方式,将化感作用与其他处理方法相结合,有利于化感作用在抑藻、杀藻领域的进一步应用。

参考文献

- [1] Ayele, H.S. and Atlabachew, M. (2021) Review of Characterization, Factors, Impacts, and Solutions of Lake Eutrophication: Lesson for Lake Tana, Ethiopia. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 14233-14252. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12081-4>
- [2] 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.
- [3] 陈宏伟, 王志红, 仇永婷, 等. 对叔丁基邻苯二酚抑藻效果及毒性应用研究[J]. 环境科技, 2022, 35(5): 1-7. <https://doi.org/10.19824/j.cnki.cn32-1786/x.2022.0061>
- [4] Hasler, A.D. and Jones, E. (1949) Demonstration of the Antagonistic Action of Large Aquatic Plants on Algae and Rotifers. *Ecology*, **30**, 359-364. <https://doi.org/10.2307/1932616>
- [5] 吴晓辉, 张兵之, 邓平, 等. 马来眼子菜化感作用对斜生栅藻同工酶的影响[J]. 武汉植物学研究, 2007(5): 479-483.
- [6] 李龙飞, 魏颖, 赵建南, 等. 3 种沉水植物对微囊藻的抑制作用及其周丛藻类响应[J]. 生态环境学报, 2023, 32(10): 1822-1832. <https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2023.10.011>
- [7] 王红强, 成水平, 张胜花, 等. 伊乐藻生物碱的 GC-MS 分析及其对铜绿微囊藻的化感作用[J]. 水生生物学报, 2010, 34(2): 361-366.
- [8] 张之浩, 李威, 吴晓芙. 6 种沉水植物对富营养化水体化感抑藻效果研究[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2017, 39(2): 55-60. <https://doi.org/10.13715/j.cnki.nsxx.2017.02.011>
- [9] 杨小杰, 韩士群, 唐婉莹, 等. 凤眼莲对铜绿微囊藻生理、细胞结构及藻毒素释放与削减的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(2): 376-382.
- [10] 刘光涛, 周长芳, 孙利芳, 等. 凤眼莲化感物质对铜绿微囊藻、斜生栅藻生长及细胞数相对比例的影响[J]. 环境科学学报, 2011, 31(10): 2303-2311. <https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2011.10.007>
- [11] 张胜花, 刘烨, 孙珮石. 大漂对几种常见水华蓝藻的抑制作用研究[J]. 环境保护前沿, 2013, 3(1): 40-44. <http://dx.doi.org/10.12677/AEP.2013.31B010>
- [12] 朱传雪, 岳繁阳, 刘永胜. 荷花及其种植水对巢湖蓝藻抑制作用的研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(9): 1274-1278.
- [13] 何连生, 孟繁丽, 刁晓君, 等. 白洋淀荷茎叶提取液对铜绿微囊藻及四尾栅藻化感效应[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2637-2641. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.2013.07.034>

- [14] 门玉洁, 胡洪营, 李锋民. 芦苇化感组分对斜生栅藻 *Scenedesmus obliquus* 生长特性的影响[J]. 生态环境, 2006(5): 925-929. <https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2006.05.007>
- [15] 李锋民, 胡洪营, 种云霄, 等. 2-甲基乙酰乙酸乙酯对藻细胞膜和亚显微结构的影响[J]. 环境科学, 2007(7): 1534-1538. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.2007.07.022>
- [16] Wang, W.H., Wang, Y., Li, Z., et al. (2018) Effect of a Strengthened Ecological Floating Bed on the Purification of Urban Landscape Water Supplied with Reclaimed Water. *Science of the Total Environment*, **622**, 1630-1639. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.035>
- [17] 钱凯荣, 马增岭, 李仁辉, 等. 植物化感作用研究进展——以抑制铜绿微囊藻生长为例[J]. 生物技术通报, 2021, 37(4): 177-193.
- [18] 邓继选, 邹华, 庄严. 大麦秸秆抑藻物质的分离及其抑藻作用研究[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(6): 39-43.
- [19] 张庭廷, 胡春霞, 陈波. 稻草秸秆发酵液对铜绿微囊藻生化参数影响[J]. 中国环境科学, 2021, 41(11): 5345-5352. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2021.0373>
- [20] 徐芙清, 何伟, 郑星, 等. 野艾蒿及其有机提取物对铜绿微囊藻生长的抑制作用[J]. 生态学报, 2010, 30(3): 745-750.
- [21] 董龙香, 胡利静, 胡鲲, 等. 大蒜对铜绿微囊藻的化感抑制作用[J]. 江西农业大学学报, 2016, 38(6): 1167-1173. <https://doi.org/10.13836/j.jjau.2016164>
- [22] 李楠. 木本植物抑藻化感物质的分离、抑藻机理及应用效果研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2009.
- [23] 王文卿, 沈益绿. 香樟和银杏落叶海水浸提液对东海原甲藻的抑藻效应及其有效成分分析[J]. 海洋渔业, 2024, 46(1): 96-109. <https://doi.org/10.13233/j.cnki.mar.fish.2024.01.005>
- [24] 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.
- [25] Jeong, S.Y., Ishida, K., Ito, Y., Okada, S. and Murakami, M. (2003) Bacillamide, a Novel Algicide from the Marine Bacterium, *Bacillus* sp SY-1, against the Harmful Dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*. *Tetrahedron Letters*, **44**, 8005-8007. <https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2003.08.115>
- [26] Guo, X., Liu, X., Pan, J., et al. (2015) Synergistic Algicidal Effect and Mechanism of Two Diketopiperazines Produced by *Chryseobacterium* sp. Strain GLY-1106 on the Harmful Bloom-Forming *Microcystis aeruginosa*. *Scientific Reports*, **5**, Article No. 14720. <https://doi.org/10.1038/srep14720>
- [27] 宋婵媛, 白芳, 李天丽, 等. 绿藻栅藻对微囊藻的抑制效应及评价[J]. 水生生物学报, 2022, 46(12): 1916-1923.
- [28] 张新农, 刘爱民, 桑明远, 等. 利用小球藻防控养殖水体蓝藻水华的初步研究[J]. 当代水产, 2014, 39(3): 82-83.
- [29] Ni, L., Rong, S., Gu, G., et al. (2018) Inhibitory Effect and Mechanism of Linoleic Acid Sustained-Release Microspheres on *Microcystis aeruginosa* at Different Growth Phases. *Chemosphere*, **212**, 654-661. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.045>