

# 化感物质提取与抑藻途径研究进展

陈冠祥, 汪玉莹

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2023年12月25日; 录用日期: 2024年1月17日; 发布日期: 2024年2月29日

## 摘要

湖泊水体富营养化问题一直受到国内外的高度重视, 已成为全球性的水环境问题之一。但是一直未得到有效解决, 利用植物所分泌的化感物质产生化感作用抑制水体藻类爆发, 是公认的有效和生态友好手段。植物分泌的化感物质化学性质不同, 作用机理也存在很大的差异, 根据其作用的机理适当改变其抑藻的方式可以获得更好的作用效果。本文梳理了化感物质的作用机理, 罗列了化感物质提取常见的方法即浸泡法、水提法和醇提法(有机物提取法), 概述了当前几种主要的化感抑藻作用方式。本研究结果可为进一步深入研究水生生态系统中化感抑藻及相关技术应用提供科学依据。最后对化感物质研究和应用前景进行展望, 以期为进一步工作打下认识基础并对控藻技术研究和开发提供指导意义。

## 关键词

化感物质, 化感抑藻机理, 化感物质提取, 作用途径, 化感复合材料

# Research Progress on Allelochemicals Extraction and Algal Inhibition

Guanxiang Chen, Yuying Wang

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

Received: Dec. 25<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jan. 17<sup>th</sup>, 2024; published: Feb. 29<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Lake Algal Bloom has been highly regarded at home and abroad, and has become one of the global water environment problems. However, it has not been effectively resolved. It is an effective and eco-friendly method to use allelochemicals secreted by plants to inhibit algal blooms in water. The chemical properties of allelochemicals secreted by plants are different, and the mechanism of action is also very different. According to the mechanism of action, we can get better effect by changing the way of inhibiting algae. In this paper, the action mechanism of allelochemicals was summa-

rized, and the common methods of allelochemicals extraction, such as soaking, water extraction and alcohol extraction (organic matter extraction), were listed. The results of this study can provide a scientific basis for further research on allelopathy and algal control in aquatic ecosystems and the application of related technologies. Finally, the research and application prospect of allelochemicals are prospected, in order to lay a foundation for further work and provide guidance for the research and development of algal control technology.

## Keywords

Allelochemicals, Allelochemicals Algal Inhibition Mechanism, Allelochemicals Extraction, Action Pathway, Allelochemicals Composite Materials

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

在气候变暖和水体富营养化不断加剧之下,藻类水华已经成为全球性的水环境问题之一[1][2]。当藻类频繁繁殖时,水体中的光补偿层会逐渐变浅,导致透明度下降,同时活性藻毒素的含量也会增加[3],对生态环境和饮用水的安全构成潜在威胁[4]。治理蓝藻水华已成为当前环境保护中一个亟待解决的课题[5],近年来随着人们对藻类认识的不断深入,利用植物化感物质抑制藻类生长的研究越来越多。

国外对于化感作用的研究最早可以追溯到公元前 350 年,古希腊哲学家 Theophrastus 的著作中,他记录到鹰嘴豆能抑制如棘的生长,并消灭杂草[6],这是关于化感作用的第一个书面文件。到了 16 世纪,有人发现植物叶片产生化学物质,并随着雨水流动从而对其他植物产生有害影响,使其生长减缓。20 世纪初,有研究发现作物产生的化学物质可以贮藏在土壤中,连作会导致化学物质积累对作物产生有害影响,通过原始的方式将积累物去掉后,毒害症状消失。作为首次对作物自毒现象的研究,其为后续的相关进展提供了理论基础[7]。而我国古代劳动民族在两千多年前就从农耕中产生了系统论、复杂论、循环论的意识,已成为化感作用在农业方面应用的雏形。贾思勰的《齐民要术》中提到,把芝麻种植在未开垦的休闲地上,因为芝麻可以更有效地控制杂草的生长与蔓延[8]。到了 20 世纪中期通过大量的实验许多学者发现了化感物质的作用,2001 年,《植物化感作用及其应用》在我国出版,此后我国化感方面的研究得到快速发展和推动[9]。

化感抑藻是从植物中提取化感物质来调控水华藻类生长的一种技术。一般自然条件下化感物质容易降解,生态系统不累积,具有较好的生态安全性[10]。近年来随着人们对藻类认识的不断深入,利用植物化感物质抑制藻类生长的研究越来越多,其中包括植物提取物及其在水产养殖中的应用。本研究主要探讨了化感物质对藻类的抑制效果,基于对化感物质抑藻研究的总结,详细梳理了抑藻作用的机制,并特别强调了化感物质提取技术和作用路径,为实际抑藻提供作用方式的选择。最后总结了实际藻类控制需求和现有研究存在的不足,对后续研究方向进行了展望。

## 2. 植物化感抑藻分析

### 2.1. 植物化感物质

化感作用放出的化学物质即化感物质一般为次生代谢产物,它是植物在不同生理过程中生成的副产

物[11]。按照结构进行分类[12]可以分为酚类化合物及其衍生物；含氮化合物；脂肪酸/酯类；萜类化合物四类。酚类化合物及其衍生物主要包括简单酚[13]、多酚[14]、苯甲酸及其衍生物[15]、肉桂酸及其衍生物[16]、黄酮类[17]、单宁[18]、香豆素类[19]、醌类[20]，含氮化合物主要是生物碱[21]、苯胺[22]、萘胺氨基酸和多肽类物质[23]。除了脂肪酸[24]以外，脂肪酸/酯类还包括邻苯二甲酸二辛脂、邻苯二甲酸二异丁酯[25]，而皂苷类物质[26]是常见的属于萜类化合物的化感物质。

植物产生这些化感物质后向环境中释放主要是通过植物叶、根[27]、枝的渗出，通常通过影响藻类藻细胞膜的通透性、藻类光合作用、多种酶系活力等以扰乱受体藻类正常生长。

## 2.2. 植物化感抑藻机理

植物化感作用的概念是由德国科学家 Molish [28]在 1937 年提出的，即所有类型植物(含微生物)之间生物化学物质的相互作用[11]。上世纪 70 年代中期 Rice [29]等人在 Molish 的理论基础上进行完善，提出了植物化感作用就是植物向环境释放化学物质所引起的直接或间接危害其他植物的作用，这一理念得到了普遍的认同。不论植物是以活态还是死态排放到环境中的次生物质均可称其为化感[30]。化感物质不同其抑藻作用机理和方式也不同，作用的机理根据化感物质的化学性质大致可分为 3 个方面(下图 1)。

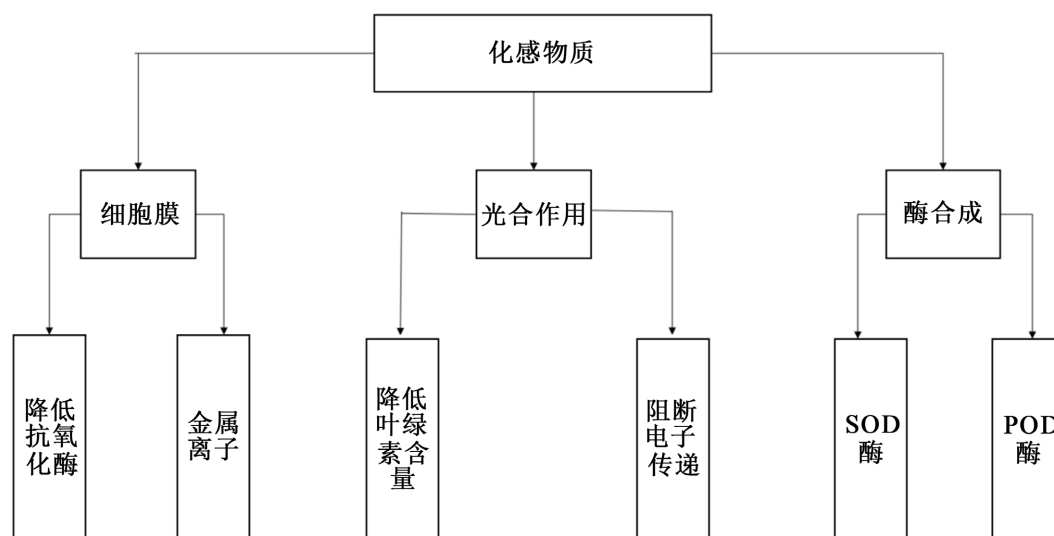


Figure 1. Algae inhibitory effect of allelopathic substances

图 1. 化感物质抑藻作用

### 2.2.1. 影响细胞膜的透性

化感物质增加植物细胞膜的透性。实验研究表明通过对水生植物菰进行浸泡所得的浸泡液能够改变铜绿微囊藻细胞膜通透性，其中含有的化感物质可以提高藻细胞丙二醛(MDA)水平，使细胞膜被破坏，藻细胞直径变短，体积变小，最后使藻细胞发生程序性死亡[31]。

### 2.2.2. 影响光合作用

植物生长离不开光合作用这一过程，而光合作用效率的任何变化都可能给植物生长带来有利或者不利影响。大量的研究表明，化感物质在藻类光合系统中所起的作用可以分为减少藻类细胞内叶绿素、藻蛋白含量和阻滞电子传递两部分[32]。

如图 2，化感物质可以通过将藻细胞光合系统作为其攻击的靶点，胁迫铜绿微囊藻叶绿素 a 及藻蓝蛋

白(PC)与别藻蓝蛋白(APC)的含量降低[33]。藻细胞内叶绿素自发荧光值的不断下降, 对藻类的生长有抑制作用, 并最终破坏细胞结构引起细胞凋亡, 从而达到抑藻的效果。炉石换等[34]对比地钱浸提液对小球藻光合作用活性的影响, 从三维荧光的结果也同样得出化感物质抑制了藻蛋白的合成, 降低捕获光蛋白的含量从而达到抑藻效果的结论。

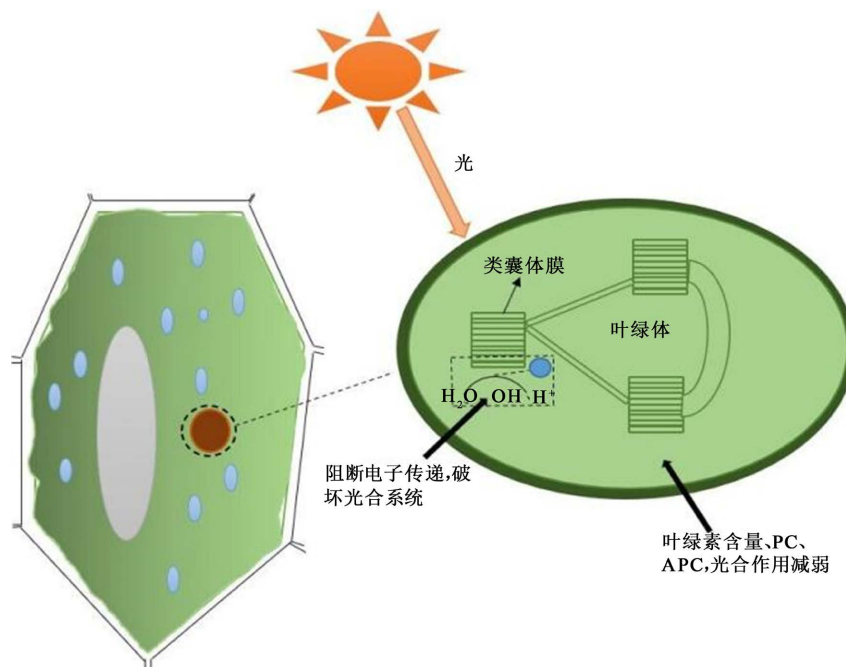


Figure 2. Photosynthesis mechanism of chemopathic substances [36]

图 2. 化感物质光合作用机理图[36]

电子传递链对于藻细胞进行光合作用同样具有重要意义[35]。藻细胞内部电子传递被阻断后, 光合作用中假环式电子传递就无法正常的发生, 光合色素获得的太阳能无法转化为化学能[36], 引发细胞内氧化反应, 导致活性氧水平升高, 从而对细胞产生氧化损伤[37]。

### 2.2.3. 影响酶的合成

酶的作用对于生物实体是绝对必要的, 而酶的活跃度直接决定了藻类的成长情况。已有许多研究证明化感物质会抑制受体植物酶系活力并影响其正常生长。杨小杰等[38]采用共培养试验研究凤眼莲对产毒铜绿微囊藻的生长作用, 发现凤眼莲根系分泌物能在短期内破坏藻细胞超氧化物歧化酶系统(SOD), 超氧化物歧化酶(SOD)的活性明显降低, 此时活性氧生成与清除失去动态平衡, 活性氧积累过多超出藻细胞耐受极限而导致藻体死亡。

过氧化物酶(POD)的含量对藻细胞生长也有重要影响, 李源等[39]将菹草和铜绿微囊藻共培养过程中铜绿微囊藻细胞抗氧化能力降低, 过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)的活性降低, 丙二醛(MDA)水平升高, 藻细胞生长受到抑制。

## 3. 化感物质的提取

化感物质的提取纯度、效率、成本以及作用效果一直是国内外研究的重点。在实验中一般常用的提取化感物质的方法是浸泡法、水提法、醇提法以及其他一些有机溶剂提取法。具体方法的采取一般与所需要提取化感物质化学性质有关, 通过对比实验发现物质最好的提取方式, 会增加化感抑藻的效果。

### 3.1. 浸泡法

浸泡法主要将清洗干燥后的植物粉末和一定量去离子水放入棕色瓶内, 常温下好氧/厌氧 15 天后用纱布滤过, 所得滤液作厌氧浸泡液于 4℃ 保存。许志兰等[40]以槟榔抑藻为研究对象, 探索了在实验室环境中槟榔厌氧浸泡液对铜绿微囊藻生长的具体影响。实验结果表明, 槟榔的厌氧浸泡液对铜绿微囊藻的生长有显著的抑制效果。槟榔的厌氧浸泡液在加入后的 1~11 天内, 其抑制效果仍然稳定在 96%~100% 的范围内。

浸泡条件的选择对植物化感抑藻效果也会产生影响, 通过做对比实验研究稻草在不同降解方式下浸泡液的抑藻效果[41]。实验结果表明, 好氧和厌氧降解的稻草浸泡液都具有抑藻效果。随着稻草分解的时间逐渐延长, 浸泡液所含有机物组分种类和含量都呈下降趋势, 且最终以好氧法降解处理模式较明显。

### 3.2. 水提法

水提法一般是将植物清洗干净烘干, 研磨成粉末待用。之后在电子天平上精确称出一定数量的植物干粉并添加到高温蒸汽消毒后的玻璃烧杯内, 最后添加一定量的清水。充分搅拌等待浸提 48 h 后取上清液, 上清液再经滤膜过滤除去微生物获得用于试验的浸提母液。过滤工艺是在超净工作台上严格无菌地完成的。

水提法具有成本低, 操作方便, 后续不会产生污染等优点而被大量选用。石雨鑫等[42]对于黄丝藻、铜绿微囊藻和水华微囊藻, 使用一年蓬、加拿大一枝黄花、喜旱莲子草和水葫芦的水提取液来进行藻类抑制实验。实验数据显示, 蓬水提液对三种藻类的生长都展现出了显著的抑制作用, 特别是水葫芦水提液, 其对黄丝藻生长的抑制效果超过了 90%; 加拿大的一枝黄花的水提取物对铜绿微囊藻和水华微囊藻这两种藻类的生长抑制效果都超出了 70%; 这一结果说明了水提法可在抑藻过程中广泛采用。

### 3.3. 醇提法(有机物提取法)

有机溶剂提取法一般是在植物干燥研磨成粉的基础上称取一定重量再加入有机溶液, 按照料液比进行超声提取, 之后收集过滤冷冻干燥成浸膏, 制备成有机溶剂粗提母液备用[43]。由于该类方法可以获得较多的活性物质如挥发油、多糖、黄酮、多酚、生物碱和三萜类化合物且易于实现工业化生产而被大量采用。目前经常使用的有机溶剂有醇类如甲醇、乙醇, 还有其他有机物如正己烷、乙酸乙酯[44]等。

### 3.4. 提取方法的选择

水提法抑藻效果在一些特定的情况下要好于其他提取方法。肖晗[45]等以海菖蒲为实验材料, 利用人工海水和两种有机溶剂提取海菖蒲中抑藻活性物质对锥状斯氏藻进行抑藻实验。结果表明: 三种提取物对锥状斯氏藻生长均有显著抑制作用。在实验设定的浓度条件下水浸物的抑藻率高达 95.34%, 乙醇提取物与正己烷提取物的抑藻率分别高达 78.55% 与 58.28%。研究表明海菖蒲水提液抑制效果最好。在某些情况下有机溶液做提取液抑藻效果强于水提取液, 同样得到了一些实验的论证。薛维纳[46]对新鲜仙人掌茎水浸提液和乙醇浸提液处理铜绿微囊藻进行了化感抑制实验。实验结果显示, 这两种浸提液都能有效地抑制铜绿微囊藻的化感, 其中乙醇浸提液的抑制效果明显优于水浸提液。从抑制效果的角度看, 当水浸提液的浓度较低时, 它对铜绿微囊藻具有促进效果, 乙醇浸提液则持续显示出抑制效果, 仙人掌有可能用于水体富营养化控制以及研制新型抑藻剂。被提取的物质如果存在低浓度促进藻类生长的情况一般多采用醇提取法提取物质, 而水提法多适用于持续显示出抑制效果的物质。

## 4. 植物化感抑藻作用实施途径

通过植物释放的化感物质对藻类进行抑藻的方式不同, 产生的效果也有差异。在化感物质提取作用



前应该根据植物的属性进行筛选, 选择一个较为合理高效的提取方式。目前植物化感物质作用普遍方式是采用植物原位修复、提取液作用水体以及和复合材料相结合作用于相关藻类。

原位修复技术利用水生植物的化感作用无需移动水体就可抑制水体中藻类的生长, 是目前应用于解决湖泊水体富营养化问题的最佳方法。而改性复合材料的结合应用则是未来几十年的一个研究方向, 与新兴材料相结合赋予了化感作用发展的无限可能。

#### 4.1. 化感物质原位修复

原位修复技术是指在不改变水体位置的前提下, 对水体进行修复和治理的方法。在众多修复方法中原位修复技术因其简单的操作方式, 高回报低成本的特点, 赢得了国内外研究者的广泛赞誉。这项技术主要包括湿地生态恢复、生态浮床、稳定塘、沉水植物等[47]。

##### 4.1.1. 生态浮床技术

生态浮床技术的核心是在待修复的水域上进行植物种植, 所种植的植物能够利用水中的氮、磷等元素来支持其生长, 进而减少水中的营养成分浓度, 同时, 利用活体植物排放的酚类, 低分子有机酸, 脂肪酸, 萜类等化感物质, 抑制有害藻类生长, 改善水体水质。采用单独种植、两种混种和三种混种的种植模式, 验证水位修复的可行性[48]。

Nakai 等[49]通过共同培养实验, 排除了营养竞争、光照遮挡和微生物作用等因素的影响, 结果表明抑制藻类的生长都来源于化感物质所起到的效果, Seonah Jeong [50]等在实验中也得到了验证。

##### 4.1.2. 沉水植物技术

沉水植物生长期间可通过释放某些化感物质对藻类生长产生直接或者间接作用, 有机酸与酯类为主化感物质植物抑藻现象很可能受到它们所分泌各种化感物质共同影响。将植物放在水缸里进行培养, 然后对水培液进行浓缩提取。水培液被提取后进行 GC-MS 分析以确定沉水植物次生代谢物类型, 探讨其可能产生的抑藻效应, 探究原位修复中沉水植物化感物质的作用机理[51]。

其中沉水植物其分泌的多种化感物质联合作用抑制藻类生长的机制在的实验中得到了论证。高云霓 [52]等从苦草分泌物中测得 9 个酚酸并研究其 6 个酚酸共混施用的抑藻效应, 结果表明: 抑藻作用随着共混酚酸品种增加而增强。

生物浮床技术一般多适用于陆地上的植物, 浮床上的植物在生长过程中, 能够有效地起到净化水质的目的, 投入成本较低, 使用寿命也较长。浮床上能种植多种水生植物, 对河道的景观也起到一定的美观度。沉水植物技术一般多适用于沉水植物, 将沉水植物种植于待修复水体, 利用沉水植物分泌的化感物质起到净化水质的作用。

#### 4.2. 化感物质直接作用水体

许多研究发现, 只有高浓度化感物质才能抑制藻类的生长, 而且浓度越高越有利于藻类的生长。自然状态下植物代谢向水体释放化感物质的浓度很低, 所以通过实验提取化感物质, 增加化感物质的浓度, 再投入含藻水体中以达到抑藻目的是抑藻的重要途径之一。

董颖娜等[53]试验比较了香蒲叶浸提液不同质量浓度关于铜绿微囊藻生长的影响, 实验数据显示, 在质量浓度 $\leq 5.00 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的情况下, 铜绿微囊藻的生长得到了一定程度的促进, 表现为“低促现象”。当香蒲叶浸提液的浓度达到  $10.00 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 它展现出了显著的抑制效果。董龙香等[54]通过人工培养箱培养的方法, 对铜绿微囊藻在不同大蒜浓度下的常规指标进行了测量。研究结果显示, 大蒜对铜绿微囊藻有低促高抑效应, 而  $0.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  的大蒜浓度实际上会轻度促进铜绿微囊藻的生长; 当大蒜的浓度为  $6.4 \text{ g/L}$  时,

它对铜绿微囊藻的生长展现出了明显的抑制效果, 并且这种抑制效果随着作用时间的延长而变得更为突出, 到了 96 小时, 铜绿微囊藻的生长抑制率高达 53.42%。大量的“低促高抑”实验均表明将化感物质提取浓缩后直接投入水体的作用途径可取性。

而一些化感物质浓度过高时对生物存在一定毒性[55]。部分高浓度的化感物质如亚油酸、水杨酸和对羟基苯甲酸, 已经被证明对除了有毒藻细胞外的非目标水生生物(如大型溞等)具有一定的毒性作用[56]。在考虑抑藻效果最大化的同时也需要控制化感物质的浓度, 将化感物质浓度控制在对环境生态不造成影响的范围是后期研究的重点。

### 4.3. 化感物质微球固定缓释

在纳米技术飞速发展的今天, 纳米材料得到了越来越多的使用, 纳米材料为人们提供了种种方便的同时, 必然会通过多种方式排放进入水环境[57]。利用化感物质作为有效成分, 采用微胶囊技术生产抑藻剂, 即把化感物质包裹在缓释颗粒内, 利用化感物质的抑藻作用, 并结合经济且环保的缓释微球化方法, 已经被证明是控制藻类增长的一种高效策略。期望化感物质在实现选择性抑藻的同时, 也能达到低剂量持续释放的效果。

微球化能够很好地解决因直接投加提纯化感物质而造成局部浓度过高的问题。并且它所具有的长时间缓释和持续化感刺激的特点, 使长时间抑藻和阻止蓝藻再爆发得以实现。王娜[58]等基于 Ni [59]等人是用滴制法制得缓释微粒。先向 2.5%海藻酸钠溶液中加入油酸乙酯, 使 0.6%亚油酸发生乳化。然后把混合溶液滴在含 0.75%壳聚糖, 2%氯化钙溶液里形成微粒。降至室温后加交联剂戊二醛凝固, 抽滤, 冲洗, 经过风干过程, 最终获得了缓释的微粒。通过测定释放率和粒径大小来确定其最佳使用浓度。该实验旨在探究缓释微粒对铜绿微囊藻在不同生长阶段的抑制作用, 以及相应的抑藻机制。本项研究证实, 缓释抑藻剂在铜绿微囊藻的各个生长阶段都展现出了出色的抑制效果。在抑藻过程中, 亚油酸缓释抑藻剂导致藻细胞中的叶绿素 a 被破坏, 同时细胞膜的脂质过氧化也得到了增强, 抗氧化酶活性降低, 使藻细胞膜不可逆地受到伤害, 藻细胞正常生长受到影响。

长时间、持续的化感刺激是纳米技术在化感上应用的一种重要方向, 郑东凤等[60]以缓释微球化技术作为技术支持, 制备可实现低剂量持续释放的缓释微球。微球化技术的加入保护了化感物质的理化性质, 模拟了水生植物分泌代谢过程。但是目前微球化技术的应用还存在一些问题, 化感物质的包埋效率有待提高, 后续在包埋技术、材料方面也需进一步提升, 从而推动化感物质缓释微球在实际工程中的应用。

## 5. 结论与展望

尽管对植物化感作用现象的观测较早, 但只是在近几十年来, 化感作用研究的意义才引起了普遍的注意和重视。化感作用具有很大的潜在应用价值, 熟悉化感物质的作用机理和作用方式对化感物质的提取与作用有很大帮助。目前作用机理和方式主要是:

- 1) 化感物质主要通过影响细胞膜透性、光合作用以及酶的合成来抑制藻类的生长。
- 2) 化感物质的提取主要有浸泡法、水提法和醇提法, 一般低浓度浸提液促进藻类生长的采用醇提法提取, 如果一直体现抑制藻类生长的多采用水提法提取化感物质。
- 3) 化感物质作用方式主要通过原位修复、直接作用水体和微球固定缓释, 原位修复一般用于大型湖泊, 修复技术多采用生态浮床技术和沉水植物技术。生态浮床技术一般种植的是陆地植物, 而沉水植物技术一般是沉水植物种植于水体。直接将提取出来的物质浓缩作用于水体以及微球固定缓释技术目前还未成熟, 多处于实验阶段, 随着技术的发展后续会大量应用于实践。

目前通过化感物质作用机理与新兴技术相结合, 最大程度的发挥化感抑藻作用, 在实验中已经取得

了很大的进展,但在应用到实践中仍存在问题需要去解决:

(1) 目前对于化感物质抑藻作用的研究仅限于短期,而对于抑藻之后蓝藻恢复状况,长期有效抑藻等方面的研究还比较欠缺,对于化感物质的抑藻机理认识还不够全面和充分,如何对蓝藻水华进行持久,稳定的控制,深入分析蓝藻水华暴发期的发生机制,已成为未来研究的热点问题之一。

(2) 对于植物对化感物质的抑制藻类生长的机制进行了更为深入的研究。现有的抑藻机制并不能充分解释化感物质在抑制藻类生长过程中的某些特定现象,例如当化感物质分泌不足时,植物对藻类生长有促进作用的低促高抑现象,或者当多种化感物质共同作用时,它们可能起到的协同或拮抗作用的具体原因,这些都需要进一步的科学研究来解释。

(3) 原位修复处理在实际中存在水体季节性涨水、枯水、水深不均等问题,对抑藻植物生长作用有很大影响,不同水体中浮游动植物优势种也不同,化感植物的存在会不会破坏水体生态平衡有待研究。

(4) 目前对于化感物质的提取更多是采用水溶液或者有机溶剂,很多提取技术还停留在理论阶段,未来优化提取及分离方法,高效精准获得新型化感物质是研究与技术进度的关键。

(5) 针对化感物质化学性质的不同,微球化技术的革新是未来需要努力的方向。

## 参考文献

- [1] Huisman, J., Codd, G.A., Paerl, H.W., *et al.* (2018) Cyanobacterial Blooms. *Nature Reviews Microbiology*, **16**, 471-483. <https://doi.org/10.1038/s41579-018-0040-1>
- [2] Ho, J.C., Michalak, A.M. and Pahlevan, N. (2019) Widespread Global Increase in Intense Lake Phytoplankton Blooms since the 1980s. *Nature*, **574**, 667-670. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1648-7>
- [3] Mohamed, Z.A. (2017) Macrophytes-Cyanobacteria Allelopathic Interactions and Their Implications for Water Resources Management—A Review. *Limnologia*, **63**, 122-132. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2017.02.006>
- [4] Janssen, E.M.L. (2019) Cyanobacterial Peptides beyond Microcystins—A Review on Co-Occurrence, Toxicity, and Challenges for Risk Assessment. *Water Research*, **151**, 488-499. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.12.048>
- [5] Monchamp, M.E., Spaak, P., Domaizon, I., *et al.* (2018) Homogenization of Lake Cyanobacterial Communities over a Century of Climate Change and Eutrophication. *Nature Ecology & Evolution*, **2**, 317-324. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0407-0>
- [6] Aliotta, G., Cafiero, G., Fiorentino, A. and Strumia, S. (1993) Inhibition of Radish Germination and Root Growth by Coumarin and Phenylpropanoids. *Journal of Chemical Ecology*, **19**, 175-183. <https://doi.org/10.1007/BF00993687>
- [7] Muller, C.H. (1965) Inhibitory Terpenes Volatilized from Salvia Shrubs. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, **92**, 38-45. <https://doi.org/10.2307/2483311>
- [8] 陈业兵. 银胶菊化感潜力及其潜在化感物质的分离鉴定[D]: [博士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2010
- [9] 孟林宜. 美国薄荷水浸液对不同植物的化感作用研究[D]: [硕士学位论文]. 吉林: 北华大学, 2023. <https://doi.org/10.26928/d.cnki.gbhhu.2022.000033>
- [10] 赵倩名, 钟佳峻, 何培民, 等. 黄酮类物质对铜绿微囊藻的抑制效应研究[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(2): 1-7. <https://doi.org/10.19672/j.cnki.1003-6504.1837.21.338>
- [11] 杨浩娜, 周成言, 邬腊梅, 等. 植物化感物质的作用机理研究进展[J]. 湖南农业科学, 2022(3): 108-112.
- [12] 郭钟惠, 李洁明, 张明霞. 不同类型化感物质抑制蓝藻效益比较及联合抑藻效应评述[J]. 水生生物学报, 2023, 47(1): 177-194.
- [13] Planas, D., Sarhan, F., Dube, L., Godmaire, H. and Cadieux, C. (1981) Ecological Significance of Phenolic Compounds of *Myriophyllum spicatum*. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*, **21**, 1492-1496. <https://doi.org/10.1080/03680770.1980.11897219>
- [14] Gross, E.M., Meyer, H. and Schilling, G. (1996) Release and Ecological Impact of Algicidal Hydrolysable Polyphenols in *Myriophyllum spicatum*. *Phytochemistry*, **41**, 133-138. [https://doi.org/10.1016/0031-9422\(95\)00598-6](https://doi.org/10.1016/0031-9422(95)00598-6)
- [15] 孙文庆. 加工番茄酚酸类化感物质的鉴定及对幼苗生长的影响[D]: [硕士学位论文]. 石河子: 石河子大学, 2017.
- [16] 朱小琴, 刀国华, 陶益, 等. 典型植物化感物质对铜绿微囊藻生长的抑制效果评价[J]. 中国环境科学, 2020, 40(5): 2230-2237.



- [17] Kong, Y., Zou, P., Yang, Q., et al. (2013) Physiological Responses of *Microcystis aeruginosa* under the Stress of Anti-algal Actinomycetes. *Journal of Hazardous Materials*, **262**, 274-280. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.08.032>
- [18] 肖功春. 水稻秸秆生物炭对四种酚酸类化感物质的吸附行为研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2022. <https://doi.org/10.27200/d.cnki.gkmlu.2022.000786>
- [19] 邬彩霞, 刘苏娇, 赵国琦. 黄花草木樨水浸提液中潜在化感物质的分离、鉴定[J]. 草业学报, 2014, 23(5): 184-192.
- [20] Wang, A.K., Bi, Y.F., Wen, X., Wang, Y.K. and Li, W.C. (2019) Research Advances of Plant Allelochemicals. *Molecular Plant Breeding*, **17**, 5829-5835.
- [21] Macías, F.A., Mejías, F.J. and Molinillo, J.M. (2019) Recent Advances in Allelopathy for Weed Control: From Knowledge to Applications. *Pest Management Science*, **75**, 2413-2436. <https://doi.org/10.1002/ps.5355>
- [22] 徐梦雪. 当归的化感作用及其水溶性化感物质的分离鉴定[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [23] Lorenzo, P., Pazos-Malvido, E., Reigosa, M.J. and González, L. (2010) Differential Responses to Allelopathic Compounds Released by the Invasive *Acacia dealbata* Link (Mimosaceae) Indicate Stimulation of Its Own Seed. *Australian Journal of Botany*, **58**, 546-553. <https://doi.org/10.1071/BT10094>
- [24] Jin, P.F., Wang, H.N., Huang, W.K., et al. (2018) The Allelopathic Effect and Safety Evaluation of 3, 4-Dihydroxy-benzalacetone on *Microcystis aeruginosa*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, **147**, 145-152. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2017.08.011>
- [25] 邱爽. 化感物质脂肪酸酯对嫁接西瓜生理生化特性及根际土壤微生态的研究[D]: [硕士学位论文]. 雅安: 四川农业大学, 2016.
- [26] 李云龙. 三七化感作用及其微生物学消减机制[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京师范大学, 2020. <https://doi.org/10.27245/d.cnki.gnjsu.2020.000083>
- [27] Pei, Y., Liu, L., Hilt, S., et al. (2018) Root Exudated Algicide of *Eichhornia crassipes* Enhances Allelopathic Effects of Cyanobacteria *Microcystis aeruginosa* on Green Algae. *Hydrobiologia*, **823**, 67-77. <https://doi.org/10.1007/s10750-018-3696-7>
- [28] Molisch, H. (1938) Der Einfluss einer Pflanze auf die Andere, Allelopathie. *Nature*, **141**, 493. <https://doi.org/10.1038/141493a0>
- [29] Rice, E.L. (1984) Allelopathy. 2nd Edition, Academic Press, San Diego, 266-291. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-092539-4.50014-9>
- [30] 孔垂华. 植物种间和种内的化学作用[J]. 应用生态学报, 2020, 31(7): 2139-2150.
- [31] 荆晓玲, 李林, 汪淑贞, 等. 鄱阳湖洲滩菰浸泡液对铜绿微囊藻生长的影响[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(2): 12-16. <https://doi.org/10.19672/j.cnki.1003-6504.2019.02.002>
- [32] 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.
- [33] 胡春霞, 陈波, 张庭廷. 稻草秸秆发酵液的抑藻效应及其机理[J]. 中国环境科学, 2021, 41(4): 1925-1931. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210218.003>
- [34] 卢诗煊, 陈彬, 尹璐, 等. 地钱浸提液对小球藻的生长抑制效应[J]. 中国环境科学, 2020, 40(2): 824-831. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2020.0143>
- [35] 祁茜, 辛建攀, 李文明, 等. 化感效应及其对藻类光合作用影响的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(4): 43-52. <https://doi.org/10.19672/j.cnki.1003-6504.2019.04.008>
- [36] 任媛媛, 刘成. 化感物质抑制藻类过度繁殖的机理及效能研究进展[J]. 净水技术, 2023, 42(3): 39-48.
- [37] Kaplan, A., Harel, M., Kaplan-Levy, R.N., et al. (2012) The Languages Spoken in the Water Body (or the Biological Role of Cyanobacterial Toxins). *Frontiers in Microbiology*, **3**, Article 138. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00138>
- [38] 杨小杰, 韩士群, 唐婉莹, 严少华, 周庆. 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.
- [39] 李源, 闫浩, 施媚, 何宗祥, 张庭廷. 菹草与铜绿微囊藻化感互作及其对藻抗氧化能力的影响[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2015, 38(6): 572-575, 602. <https://doi.org/10.14182/j.cnki.1001-2443.2015.06.014>
- [40] 许志兰, 廖日红, 吴晓辉. 不同处理方法对槟榔抑藻效果的影响[C]//北京市水利科学研究所. 北京水问题研究与实践(2011年). 北京: 中国水利水电出版社, 2012: 4.
- [41] 朱攀, 冯菁, 吴为中, 等. 稻草浸泡液的抑藻效果与抑藻活性组分的初步分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2009, 45(1): 178-182. <https://doi.org/10.13209/j.0479-8023.2009.026>
- [42] 石雨鑫, 汤春宇, 谭梦, 等. 常见入侵植物水提液对水华藻生长及光合荧光特性的影响[J]. 上海农业学报, 2020,

- 36(2): 101-107. <https://doi.org/10.15955/j.issn1000-3924.2020.02.17>
- [43] 向舒, 陈雯雯, 沈益绿. 3种陆生植物叶片浸提液对东海原甲藻生长及光合生理的影响[J]. 海洋渔业, 2022, 44(4): 468-479. <https://doi.org/10.13233/j.cnki.mar.fish.2022.04.009>
- [44] 元晖. 桉木 APMP 制浆废水中化感物质的提取及对铜绿微囊藻的化感效应研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津科技大学, 2016.
- [45] 肖晗, 王璐响, 赵旻, 等. 海菖蒲浸提液对锥状斯氏藻的抑制效应研究[J]. 生态科学, 2018, 37(3): 21-26. <https://doi.org/10.14108/j.cnki.1008-8873.2018.03.003>
- [46] 薛维纳, 彭岩波, 陈阳. 仙人掌浸提液对铜绿微囊藻生长的影响[J]. 山东建筑大学学报, 2012, 27(1): 55-58, 110.
- [47] 张之浩. 富营养化水体原位生态修复中沉水植物的功能研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018.
- [48] 顾凡强. 基于水体生态修复理念的滨河景观设计研究[D]: [硕士学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2021. <https://doi.org/10.27415/d.cnki.gxngc.2021.000533>
- [49] Nakai, S., Inoue, Y., Hosomi, M., *et al.* (1999) Growth Inhibition of Bluegreen Algae by Allelopathic Effects of Macrophytes. *Water Science and Technology*, **39**, 47-53. <https://doi.org/10.2166/wst.1999.0382>
- [50] Jeong, S., Yang, D., Joo, S. and Park, S. (2021) Allelopathic Inhibition Effects of *Myriophyllum spicatum* on Growths of Bloom-Forming Cyanobacteria and Other Phytoplankton Species in Coexistence Experiments. *Journal of Plant Biology*, **64**, 501-510. <https://doi.org/10.1007/s12374-021-09322-5>
- [51] 张之浩, 李威, 吴晓英. 水体原位修复中沉水植物化感物质的分离与鉴定[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(6): 1164-1172.
- [52] 高云霓, 刘碧云, 王静, 等. 苦草(*Vallisneria spiralis*) 释放的酚酸类物质对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*) 的化感作用[J]. 湖泊科学, 2011, 23(5): 761-766.
- [53] 董颖娜, 冯彬, 王冰璇, 等. 香蒲水浸提液对铜绿微囊藻的化感作用[J]. 生态学杂志, 2018, 37(2): 498-505. <https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.201802.001>
- [54] 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>
- [55] 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.
- [56] Techer, D., Fontaine, P., Personne, A., *et al.* (2016) Allelopathic Potential and Ecotoxicity Evaluation of Gallic and Nonanoic Acids to Prevent Cyanobacterial Growth in Lentic Systems: A Preliminary Mesocosm Study. *Science of the Total Environment*, **547**, 157-165. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.164>
- [57] 蒋小峰. 纳米材料对化感物质抑藻效应的影响[D]: [硕士学位论文]. 芜湖: 安徽师范大学, 2018.
- [58] 王娜, 倪利晓, 刘烜瑜, 等. 一种新型缓释微粒的抑藻机制研究[J]. 四川环境, 2020, 39(2): 1-8. <https://doi.org/10.14034/j.cnki.schj.2020.02.001>
- [59] Ni, L., Jie, X., Wang, P., *et al.* (2015) Characterization of Unsaturated Fatty Acid Sustained-Release Microspheres for Long-Term Algal Inhibition. *Chemosphere*, **120**, 383-390. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.07.098>
- [60] 郑东风. 化感物质焦性没食子酸缓释微球的制备及其抑藻效应研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.