

梭鱼草化感物质丁二酸、肉桂酸及香草酸对铜绿微囊藻生长的抑制效应

赵 楚¹, 钱燕萍^{1,2}, 田如男¹

(1. 南京林业大学 风景园林学院, 江苏 南京 210037; 2. 南京晓庄学院 环境科学学院, 江苏 南京 210000)

摘要: 【目的】探讨从梭鱼草 *Pontederia cordata* 根状茎中分离鉴定出的 3 种有机酸类化感物质对铜绿微囊藻 *Microcystis aeruginosa* 生长的影响。【方法】以丁二酸、肉桂酸及香草酸标准品模拟研究了梭鱼草根状茎有机酸单一及联合处理对铜绿微囊藻生长的影响。【结果】①丁二酸、肉桂酸、香草酸单一及联合处理均可以有效抑制铜绿微囊藻的生长, 以 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 丁二酸+肉桂酸联合处理 7 d 时抑藻率最高 (92.78%)。②3 种有机酸类化感物质单一作用时, 其抑藻能力从高到低依次为肉桂酸、丁二酸、香草酸; 联合作用时, 其抑藻能力从高到低依次为丁二酸+肉桂酸、肉桂酸+香草酸、丁二酸+肉桂酸+香草酸, 同时香草酸可以在一定程度上削弱丁二酸+肉桂酸对铜绿微囊藻生长的抑制效应。③丁二酸与酚酸(肉桂酸、香草酸)、肉桂酸与香草酸及三者联合可以协同增强对铜绿微囊藻的抑制效果, 表明同类或不同类有机酸联合作用可以协同增强抑藻效果。【结论】梭鱼草根状茎有机酸类化感物质很可能具有良好的抑藻效果, 同时多种化感物质联合作用可能是梭鱼草抑制铜绿微囊藻水华的一种主要机制。丁二酸、肉桂酸、香草酸具有开发为抑藻剂的潜质。图 2 表 2 参 26

关键词: 梭鱼草; 有机酸; 化感作用; 铜绿微囊藻

中图分类号: Q946.8

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2020)06-1105-07

Inhibitory effect of succinic acid, cinnamic acid and vanillic acid from *Pontederia cordata* on *Microcystis aeruginosa*

ZHAO Chu¹, QIAN Yanping^{1,2}, TIAN Runan¹

(1. School of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. School of Environment Science, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing 210000, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] With succinic acid of fatty acids, cinnamic acid and vanillic acid standards of phenolic acids, three allelochemicals extracted from *Pontederia cordata* rhizomes used both alone and jointly. [Method] This paper is aimed at an investigation of the effects of organic acids on the growth of *Microcystis aeruginosa*. [Result] (1) The growth of *M. aeruginosa* could be inhibited by succinic acid, cinnamic acid and vanillic acid either solely or jointly, with 92.78% as the inhibition rate achieved with the employment of $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ succinic acid and cinnamic acid for seven days; (2) when used alone, cinnamic acid demonstrates the strongest inhibition ability with succinic acid and vanillic acid following behind, yet when used jointly, the inhibition ability weakens in the following order: succinic acid + cinnamic acid > cinnamic acid + vanillic acid > succinic acid + cinnamic acid + vanillic acid with vanillic acid weakening the inhibition effect of succinic acid and cinnamic acid on the growth of *M. aeruginosa* to a certain degree; (3) when succinic acid was combined

收稿日期: 2019-12-16; 修回日期: 2020-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31670698); 江苏高校“青蓝工程” (201705); 江苏高校优势学科建设工程联合资助项目 (201811)

作者简介: 赵楚, 从事园林植物生态修复研究。E-mail: 451197605@qq.com。通信作者: 田如男, 教授, 从事园林植物生态修复、应用研究。E-mail: beike0607@aliyun.com

with phenolic acid (cinnamic acid or vanillic acid), cinnamic acid was combined with vanillic acid or the three organic acids combined, their inhibition effect on *M. aeruginosa* was enhanced; (4) the combination of fatty acid and phenol acidification either in the same kind or among different kinds can enhance the effect of algal inhibition. [Conclusion] The three allelochemicals extracted from the rhizome of *P. cordata* might have good algae inhibition effect and the combined action of various allelochemicals might be the main mechanism of *P. cordata* inhibiting cyanobacteria bloom. Therefore, succinic acid, cinnamic acid and vanillic acid have the potential to be developed as algal inhibitors. [Ch, 2 fig. 2 tab. 26 ref.]

Key words: *Pontederia cordata*; allelopathy; organic acid; *Microcystis aeruginosa*

水体富营养化导致水华频繁爆发, 影响水体景观, 引起水质恶化, 最为常见的蓝藻水华还会产生多种天然毒素。传统的物理控藻、化学控藻方式存在成本高昂、易造成二次污染等问题^[1-3], 利用水生植物改善治理水体问题成为当前研究的主要方向。20世纪70年代, RICE^[4]提出了化感作用的概念, 即植物或微生物通过释放化学物质到周边环境而产生的对其他植物或者微生物直接或间接的有害作用。近年来, 国内外学者对植物释放的常见化感抑藻物质进行了大量研究, 其中酚酸与脂肪酸是最常见的2种类型^[5], 如NAKAI等^[6]从狐尾藻 *Myriophyllum spicatum* 中分离鉴定出鞣花酸、没食子酸、邻苯二酚酸、(+)-儿茶素4种酚酸, 其联合作用对铜绿微囊藻 *Microcystis aeruginosa* 产生协同生长抑制; 陈国元等^[7]从黄菖蒲 *Iris pseudacorus* 中提取有机酸组分对铜绿微囊藻生长抑制显著, 鉴定出15种脂肪酸类物质和9种酚酸类物质; 高云霓等^[8]证实苦草 *Vallisneria spiralis* 种植水中的酚酸组分对铜绿微囊藻生长具有抑制作用, 进一步鉴定出阿魏酸等9种酚酸类物质, 并提出不同种类酚酸的联合作用可能是水生植物抑藻的重要机制。梭鱼草 *Pontederia cordata* 是园林中广泛应用的水生观赏植物, 不仅能去除污染水体中的总氮、总磷^[9], 还可以有效抑制有害藻类生长^[10], 在净化污水、防止水华等方面表现出很好的应用潜力。本课题组前期研究发现, 梭鱼草根状茎水浸提液对铜绿微囊藻抑制效果最佳, 并从中提取鉴定出多种有机酸类物质, 筛选出梭鱼草根状茎中含量较高、抑藻效果较好的丁二酸、肉桂酸、香草酸^[11]。因此本研究对这3种化感物质单一及联合作用对蓝藻主要藻种——铜绿微囊藻的抑制效果进行研究, 以期探究梭鱼草根状茎有机酸类化感物质对蓝藻的抑制机理, 为推广梭鱼草在净化水体方面的应用提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

铜绿微囊藻属于蓝藻门 Cyanophyta 色球藻科 Chroococcaceae 微囊藻属 *Microcystis*, 购于中国科学院水生生物研究所淡水藻种库, 编号为FACHB-315。铜绿微囊藻培养于BG-11培养液, 培养温度(25±1)℃、光暗比12 h/12 h, 光照强度2 500 lx, 定时震荡3次·d⁻¹, 培养至对数增长后期用于实验。

在梭鱼草根状茎中分离鉴定出11种有机酸类化感物质, 选择抑藻效果较强的丁二酸、肉桂酸、香草酸, 采用其标准品模拟进行抑藻实验, 标准品纯度≥99.5%。上述化学试剂与二甲亚砜均由国药集团化学试剂有限公司生产。

1.2 实验设计

1.2.1 单一有机酸化感物质对铜绿微囊藻的抑制作用 依据预实验结果, 丁二酸、肉桂酸的质量浓度梯度分别设置为0(对照)、20、40、50、60、80、100 mg·L⁻¹, 香草酸的质量浓度梯度设置为0(对照)、20、40、60、80、100、120和150 mg·L⁻¹, 吸取上述物质各100 μL分别添加至100 mL铜绿微囊藻藻液中[D(650)=0.15]。所有处理均重复3次。每24 h采用紫外分光光度计测定藻细胞D(650), 计算抑藻率。

1.2.2 有机酸化感物质联合对铜绿微囊藻的抑制作用 根据前期研究结果^[11], 将丁二酸和肉桂酸以1:1的质量浓度比例二维混合, 丁二酸和香草酸、肉桂酸和香草酸均以1:2的质量浓度比例二维混合, 丁二酸、肉桂酸和香草酸以1:1:2的质量浓度比例三维混合。设置混合后的质量浓度梯度为0(对照)、20、40、60、80、100 mg·L⁻¹, 吸取上述物质各100 μL分别添加至100 mL铜绿微囊藻藻液中[D(650)=0.15]。所有处理均重复3次。每24 h测定藻细胞D(650), 计算抑藻率。

1.3 数据处理

1.3.1 抑藻率计算 各处理对铜绿微囊藻生长抑制率的计算公式为: $I_R = (1 - N/M) \times 100\%$ 。其中: I_R 为抑制率; N 为第 t 天处理组的藻细胞 $D(650)$; M 为第 t 天对照组的藻细胞 $D(650)$; I_R 为正值表示抑制藻细胞生长, 负值表示促进藻细胞生长。采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 进行计算和统计分析。在方差分析显著的基础上, 用 Duncan 法进行比较检验。

1.3.2 半抑制质量浓度 (C_{E50}) 计算方法 采用 SPSS 19.0 软件, 通过概率单位法 (Probit 过程) 计算各个化感物质联合作用于藻类 72 h 的 C_{E50} [12]。

1.3.3 联合作用评价方法 采用毒性单位法 [13] 和相加指数法 [14] 对有机酸类化感物质抑制铜绿微囊藻生长的效应进行评价。①毒性单位法 (U_{Ti})。规定混合物中第 i 组分的毒性单位为: $U_{Ti} = C_i / C_{L50,i}$ 。其中: C_i 为混合物中 i 组分的质量浓度, $C_{L50,i}$ 为 i 组分单独作用时的半致死质量浓度。 M 与 M_0 为评价毒性效应的相加指数, 对于一个 N 组分的混合物来说, 混合物的毒性单位 U_{Tmix} 等于各组分毒性单位之和 (M), 即: $M = U_{Tmix} = \sum_{i=1}^N U_{Ti}$ 。若令, $M_0 = M / (U_{Ti})_{\max}$, 则当 $M=1$ 时, 为相加作用; 当 $M > M_0$ 时, 为拮抗作用; 当 $M < 1$ 时, 为协同作用; 当 $M=M_0$ 时, 为无相加或独立作用; 当 $M_0 > M > 1$ 时, 为部分相加作用, 其中 $(U_{Ti})_{\max}$ 表示混合物中各组分毒性单位的最大值。②相加指数法 (AI)。相加指数法 (AI) 是在毒性单位概念的基础上提出的, 定义如下: 当 $M=1$ 时, $I_A = M-1$; 当 $M < 1$ 时, $I_A = 1/M-1$; 当 $M > 1$ 时, $I_A = 1-M$ 。其中, I_A 为相加指数。 I_A 的评价标准如下: 当 $I_A=0$ 时, 为简单的相加作用; 当 $I_A < 0$ 时, 为拮抗作用; 当 $I_A > 0$ 时, 为协同作用。

2 结果与分析

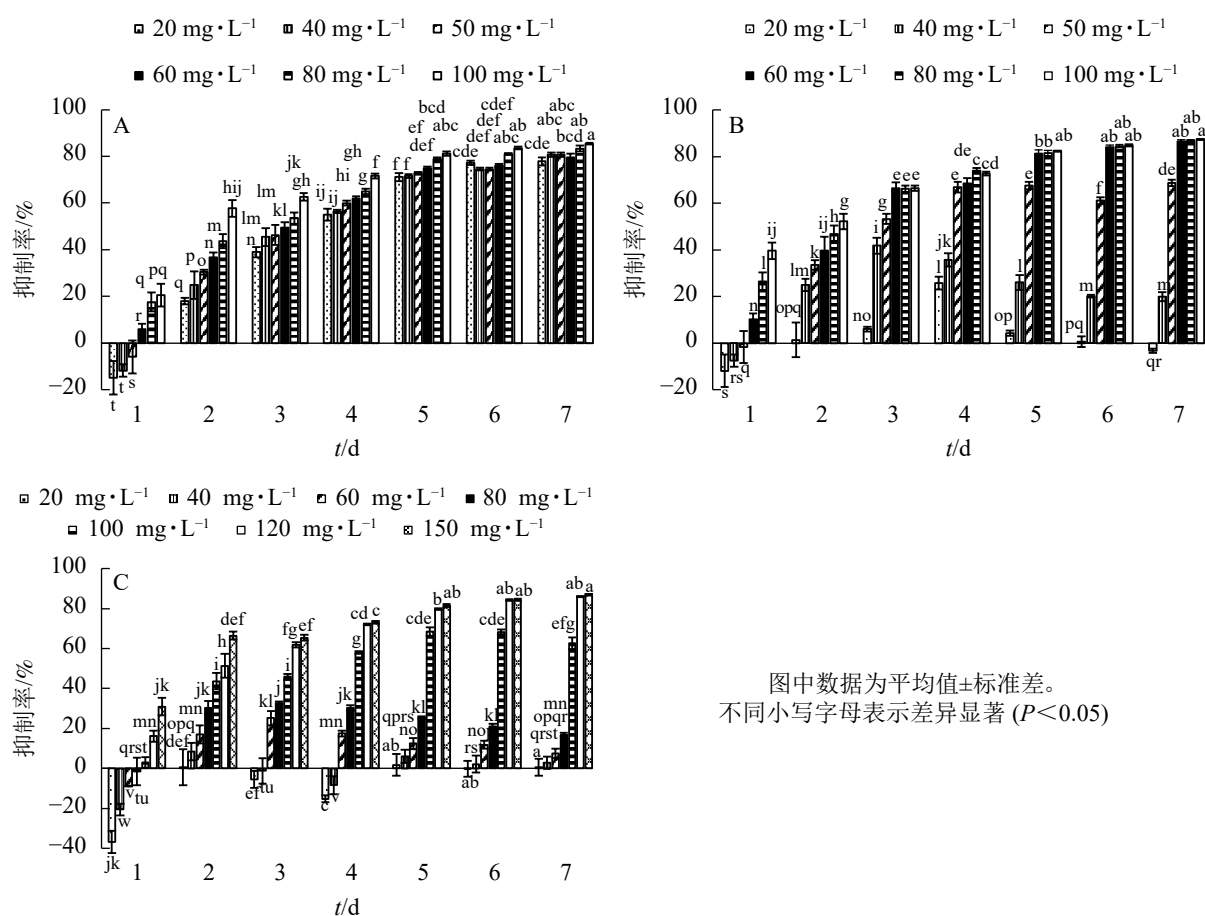
2.1 单一有机酸化感物质处理对铜绿微囊藻生长的影响

通过方差分析和多重对比 (图 1) 可知: 处理质量浓度与处理时间对 3 种化感物质抑藻效果均有显著影响 ($P < 0.05$)。丁二酸、肉桂酸、香草酸单一作用于铜绿微囊藻时, 初期均呈现出“低促高抑”的现象, 香草酸尤为显著。处理第 1 天时, 低质量浓度 ($\leq 60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 丁二酸、肉桂酸及香草酸处理均能够在不同程度上促进铜绿微囊藻的生长。不同质量浓度肉桂酸、丁二酸、香草酸对铜绿微囊藻的生长均具有显著差异 ($P < 0.05$), 随着质量浓度升高, 抑藻能力逐渐增强。香草酸低质量浓度处理对铜绿微囊藻的生长几乎没有抑制作用, 肉桂酸低质量浓度处理抑藻效果最佳, $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理 7 d 时抑藻率达 77.86%。3 种有机酸处理随着时间的延长抑藻作用整体先上升后稳定。 60 、 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的香草酸处理以及 20 、 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的丁二酸处理的抑制率随时间延长呈先上升后下降的趋势, 肉桂酸所有处理抑藻率均随时间上升, 处理 7 d 时各质量浓度抑藻率最大差值仅为 7.56%。处理第 7 天, 丁二酸、肉桂酸质量浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、香草酸质量浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时抑藻率达到最高, 分别为 87.42%、85.42% 和 86.95%。

2.2 有机酸化感物质联合处理对铜绿微囊藻生长的影响

由图 2 可见: 当丁二酸、肉桂酸和香草酸以二维方式联合作用于铜绿微囊藻时, 各处理组抑藻效果随着处理质量浓度的升高及处理时间的延长而逐渐升高, 差异达极显著水平 ($P < 0.01$)。丁二酸+肉桂酸不同质量浓度处理均具有抑藻效果, 而低质量浓度丁二酸+香草酸与肉桂酸+香草酸处理在实验前期具有促进铜绿微囊藻生长的作用, $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理中肉桂酸+香草酸第 5 天抑藻率最高, 为 20.73%。丁二酸+香草酸处理实验期间各质量浓度抑藻率始终差异显著 ($P < 0.01$)。随着时间延长, 丁二酸+香草酸与丁二酸+肉桂酸抑藻率呈先上升后稳定的趋势, 肉桂酸+香草酸呈先上升后下降的趋势。处理第 7 天, 丁二酸+肉桂酸、丁二酸+香草酸质量浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 其抑藻率最高, 分别为 92.78%、84.81%; 处理第 6 天, 肉桂酸+香草酸质量浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其抑藻率最高, 为 77.94%。

当 3 种有机酸以三维方式联合作用于铜绿微囊藻时, 处理质量浓度和处理时间对抑藻率的影响差异达到极显著水平 ($P < 0.01$)。 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的处理仅在第 1 天对铜绿微囊藻的生长具有抑制效果, 其他质量浓度处理均具有明显的抑藻效果, $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理在第 2 天抑制率达 46.37%, 为最大, 60 、 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理在第 3 天抑制率最大, 为 53.45% 和 61.76%, 处理第 7 天, 处理质量浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 其抑藻率最高, 为 89.99%。随着时间延长, 40 、 60 、 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理抑制效果先上升后下降, 100



图中数据为平均值±标准差。
不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

图1 肉桂酸(A)、丁二酸(B)、香草酸(C)对铜绿微囊藻生长的影响

Figure 1 Effects of cinnamic acid (A), succinic acid (B), vanillic acid (C) on the growth of *M. aeruginosa*

mg·L⁻¹ 处理抑藻率上升且 2~4、6~7 d 差异不显著。

2.3 有机酸化感物质对铜绿微囊藻毒性效应的评价

经肉桂酸、丁二酸和香草酸分别处理 72 h 时, 对铜绿微囊藻的半致死质量浓度分别为 52.95、54.32 和 106.00 mg·L⁻¹, 此时这 3 种有机酸类化感物质抑藻能力大小为肉桂酸>丁二酸>香草酸。丁二酸+肉桂酸、丁二酸+香草酸、肉桂酸+香草酸、丁二酸+肉桂酸+香草酸处理在实验第 72 小时的半致死质量浓度分别为 51.03、78.69、52.84 和 59.04 mg·L⁻¹, 此时这 3 种有机酸类化感物质联合作用的抑藻能力大小依次为丁二酸+肉桂酸>肉桂酸+香草酸>丁二酸+肉桂酸+香草酸>丁二酸+香草酸。此外, 由表 1 和表 2 可知: 采用毒性单位法和相加指数法对铜绿微囊藻联合作用的评价结果均是协同作用。

3 讨论

本研究发现: 利用丁二酸、肉桂酸、香草酸单独作用于铜绿微囊藻初期均会导致抑制率出现“低促高抑”的现象, 刘晓宇等^[15]、YAN 等^[16]研究中也观察到了相似的现象, 这可能是因为低质量浓度的丁二酸、肉桂酸、香草酸可以一定程度上改变藻细胞膜透性, 使细胞更易从外界获得营养物质^[17]。然而, 较高质量浓度有机酸则会明显抑制铜绿微囊藻的生长, 研究期间观察到的藻液颜色逐渐变淡可以证明, 可能是较高质量浓度有机酸超过了藻细胞膜的承受阈值, 导致藻细胞膜结构被破坏, 细胞膜破裂, 细胞内溶物大量外渗^[18]。

为获得在生存环境中的竞争优势, 植物往往向环境中分泌多种化感物质。陈国元等^[7]研究发现: 黄菖蒲水浸提液中含有丁酸、辛酸、戊酸等, 均被证实具有较强抑藻能力。NAKAI 等^[19-20]从穗花狐尾藻中提取的鞣花酸、没食子酸儿茶酚均能抑制铜绿微囊藻的生长。INDERJIT 等^[21]认为, 几乎所有的化感作用都是多种化感物质联合作用的结果, 这种联合作用可以强化化感作用效果。同时, 结构类似的同类化感物质联合作用抑藻存在协同或相加效应^[22-23]。本研究中, 丁二酸属于脂肪酸类, 肉桂酸与香草酸为

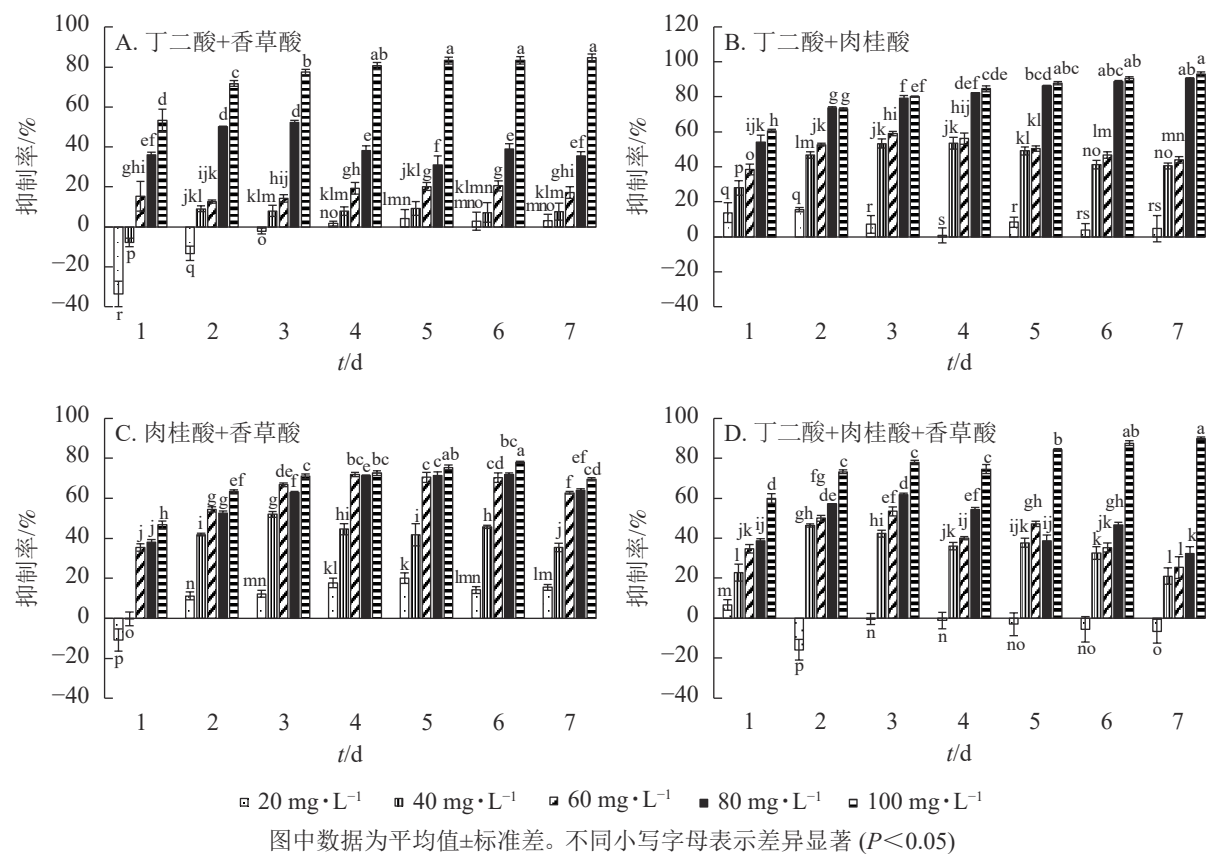


图 2 有机酸化感物质联合处理对铜绿微囊藻生长的影响

Figure 2 Effects of combined succinic acid, cinnamic acid and vanillic acid on the growth of *M. aeruginosa*

表 1 利用毒性单位法评价有机酸联合对铜绿微囊藻的毒性效应

Table 1 Results of toxic unit on the joint effects of the mixture of organic acids on <i>M. aeruginosa</i>		
联合作用类型	M 与 M_0 的关系	评价结果
丁二酸+肉桂酸	$M_0>1>M$	协同作用
丁二酸+香草酸	$M_0>1>M$	协同作用
肉桂酸+香草酸	$M_0>1>M$	协同作用
丁二酸+肉桂酸+香草酸	$M_0>1>M$	协同作用

表 2 利用相加指数法评价有机酸联合对铜绿微囊藻的毒性效应

Table 2 Results of additive index on the joint effects of the mixture of organic acids on <i>M. aeruginosa</i>		
联合作用类型	相加指数 I_A	评价结果
丁二酸+肉桂酸	0.051>0	协同作用
丁二酸+香草酸	0.023>0	协同作用
肉桂酸+香草酸	0.504>0	协同作用
丁二酸+肉桂酸+香草酸	0.206>0	协同作用

酚酸类, 3 种化感物质以二维、三维方式联合对铜绿微囊藻生长的抑制作用均表现为协同效应, 与倪利晓等^[12]在酚酸与不饱和脂肪酸联合作用对铜绿微囊藻生长影响上的研究结果类似, 表明脂肪酸与酚酸化感物质联合处理能够有效增强其对铜绿微囊藻的抑制效果。本研究证实 3 种化感物质单一及联合作用抑藻能力从高到低依次为丁二酸+肉桂酸、肉桂酸+香草酸、肉桂酸、丁二酸、丁二酸+肉桂酸+香草酸、丁二酸+香草酸、香草酸。肉桂酸、丁二酸单一作用时抑藻效果最好, 二者联合作用抑藻能力最强。肉桂酸抑藻效果强于丁二酸, 二者分别与香草酸联合时, 肉桂酸+香草酸的抑藻效果更佳。由此说明单一作用时抑藻效果较好的化感物质进行联合作用时抑藻效果也相对较好。丁二酸+肉桂酸+香草酸抑藻效果明显弱于丁二酸、肉桂酸单一及联合作用单一作用时抑藻效果, 可能是香草酸抑藻能力最差, 在联合作用时会削弱整体的抑藻效果。这与 GAO 等^[23]的研究结果相一致, 表明抑藻活性较差的化感物质会削弱梭鱼草根状茎有机酸化感物质联合抑藻效果。丁二酸、肉桂酸单一作用时抑藻能力相当, 但二者分别与香草酸联合作用时, 表现为肉桂酸+香草酸的抑藻效果远低于丁二酸+香草酸, 这可能是由于同种类的化感物质联合抑藻效果更佳。

半抑制质量浓度表示一定时间铜绿微囊藻被半数抑制的毒物质量浓度。高云霓等^[8]发现: 香草酸处

理 72 h 对铜绿微囊藻的 EC_{50} 约 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 张庭廷等^[24]发现: 肉桂酸处理 6 d 对铜绿微囊藻与蛋白核小球 *Chlorella pyrenoidosa* 混合体系的半抑制质量浓度为 $89.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 与本研究结果存在明显的差异, 这可能与植物种类、藻类初始质量浓度、处理时间等因素有关。同时, 梭鱼草根状茎分泌的丁二酸、肉桂酸、香草酸含量明显低于其对铜绿微囊藻的半抑制质量浓度, 这与 NAKAI 等^[6]的结论相一致。即便水体中可检测到的化感物质很低, 但其控藻效果极佳, 这可能与植物化感作用方式有关。低剂量持续作用可能是水生植物抑藻作用的重要机理^[25]。除此之外, 通过不同联合作用, 在降低单个物质作用剂量以达到更好的抑藻效果可能是植物化感抑藻作用的重要机制^[12]。但是, 多种化感物质共同作用于藻类时, 其作用机理比单一种类化感物质更为复杂^[26]。这也是自然条件下植物释放化感物质作用于藻类的方式, 化感物质的种类、质量浓度及环境条件等均会影响联合作用效果, 因此联合处理对藻生长的作用机制值得进一步探究。同时, 3 种化感物质的抑藻效果显著, 具有开发为抑藻剂的潜质, 但其作为抑藻制剂的生态安全性也有待深入研究。

除此之外, 一些研究表明自然界中梭鱼草化感物质含量虽然远低于实验室所得半抑制质量浓度, 但仍然能有效抑制藻类。张景雯等^[9]研究发现: 共培养条件下梭鱼草植株在试验期间对重度污染水的铜绿微囊藻平均抑制率超过 70%。田如男等^[11]通过共培养以及种植水处理的方式, 证实梭鱼草均能有效控制铜绿微囊藻、斜生栅藻 *Scenedesmus obliquus* 和小球藻 *Chlorella vulgaris* 的生长。表明梭鱼草具有控制水华的能力, 存在开发为净化水体植物的潜力, 所以有关梭鱼草在自然水体中的控藻方式及应用方法值得进一步探索。

4 参考文献

- [1] 洪喻, 胡洪营. 水生植物化感抑藻作用研究与应用[J]. 科学通报, 2009, 54(3): 287–293.
HONG Yu, HU Hongying. Research and application of allelopathy and algae inhibition of aquatic plants [J]. *Sci Bull*, 2009, 54(3): 287–293.
- [2] van HULLEBUSCH E D, DELUCHAT V, CHAZAL P M, *et al.* Environmental impact of two successive chemical treatments in a small shallow eutrophied lake: Part I. Case of aluminium sulphate [J]. *Environ Pollut*, 2002, 120(3): 617–626.
- [3] van HULLEBUSCH E D, 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]. *Environ Pollut*, 2002, 120(3): 627–634.
- [4] RICE E L. *Allelopathy* [M]. 2nd ed. New York: Academic Press, 1984: 1–67.
- [5] MACIAS F A, GALINDO J L G, GARCÍA-DÍAZ M D, *et al.* Allelopathic agents from aquatic ecosystems: potential biopesticides models [J]. *Phytochem Rev*, 2008, 7(1): 155–178.
- [6] NAKAI S, INOUE Y, HOSOMI M, *et al.* *Myriophyllum spicatum*-released allelopathic polyphenols inhibiting growth of blue-green algae *Microcystis aeruginosa* [J]. *Water Res*, 2000, 34(11): 3026–3032.
- [7] 陈国元, 李青松, 唐凯. 黄菖蒲有机酸组分对铜绿微囊藻的化感作用[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(9): 26–30.
CHEN Guoyuan, LI Qingsong, TANG Kai. Allelopathic effect of organic acids from *Iris pseudacorus* L. on *Microcystis aeruginosa* [J]. *Environ Sci Technol*, 2013, 36(9): 26–30.
- [8] 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.
GAO Yunni, LIU Biyun, WANG Jing, *et al.* Allelopathic effects of phenolic compounds released by *Vallisneria spiralis* on *Microcystis aeruginosa* [J]. *Lake Sci*, 2011, 23(5): 761–766.
- [9] 张景雯, 田如男. 4 种植物对模拟的城市景观污水的净化效果[J]. 湿地科学, 2018, 16(1): 85–92.
ZHANG Jingwen, TIAN Runan. Purification effect of four kinds of aquatic plants on simulated urban landscape polluted water [J]. *Wetland Sci*, 2018, 16(1): 85–92.
- [10] 田如男, 孙欣欣, 魏勇, 等. 水生花卉对铜绿微囊藻、斜生栅藻和小球藻生长的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(12): 2732–2738.
TIAN Runan, SUN Xinxin, WEI Yong, *et al.* Effects of hydrophytes on the growth of *Microcystis aeruginosa*, *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella vulgaris* [J]. *Chin J Ecol*, 2011, 30(12): 2732–2738.
- [11] 钱燕萍. 梭鱼草释放的有机类化感物质的抑藻效应及机理研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2018.

- QIAN Yanping. *Study on Algol Inhibition Effects and Mechanism of Allelochemicals Released from Rhizome of Pontedoria cordata* [D]: Nanjing: Nanjing Forestry University, 2018.
- [12] 倪利晓, 任高翔, 陈世金, 等. 酚酸和不饱和脂肪酸对铜绿微囊藻的联合作用[J]. 环境化学, 2011, **30**(8): 1428 – 1432.
NI Lixiao, REN Gaoxiang, CHEN Shijin, *et al.* Joint effects of phenolic acids and unsaturated fatty acids on *Microcystis aeruginosa* [J]. *Environ Chem*, 2011, **30**(8): 1428 – 1432.
- [13] MARKING L L, DAWSON V K. Method for assessment of toxicity or efficacy of mixtures of chemicals [J]. *J Fish Res Bd Can*, 1975, **22**: 425 – 432.
- [14] MARKING L L. Method for assessing additive toxicity of chemical mixtures [J]. *Aquatic Toxicol Hazard Eval*, 1977, **634**: 99 – 108.
- [15] 刘晓宇, 傅海燕, 黄国和, 等. 美人蕉有机酸组分对铜绿微囊藻的化感作用[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(12): 5769 – 5774.
LIU Xiaoyu, FU Haiyan, HUANG Guohe, *et al.* Allelopathic effect of organic acids from *Canna indica* on *Microcystis aeruginosa* [J]. *Chin J Environ Eng*, 2015, **9**(12): 5769 – 5774.
- [16] YAN Rong WU Yonghong, JIA Hongli, *et al.* The decoction of *Radix astragali* inhibits the growth of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2011, **74**(4): 1006 – 1010.
- [17] 傅海燕, 柴天, 赵坤, 等. 水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1564 – 1569.
FU Haiyan, CHAI Tian, ZHAO Kun, *et al.* Inhibitory effects of liquor cultured with *Hydrodictyon reticulatum* on the growth of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Environ Sci*, 2012, **33**(5): 1564 – 1569.
- [18] ALLEN R D. Dissection of oxidative stress tolerance using transgenic plants [J]. *Plant Physiol*, 1995, **107**(4): 1049 – 1054.
- [19] NAKAI S, HOSOMI M. Allelopathic inhibitory effects of polyphenols released by *Myriophyllum spicatum* on algal growth [J]. *Allelopathy J*, 2002, **10**(2): 123 – 131.
- [20] NAKAI S, YAMADA S, HOSOMI M, *et al.* Anti-cyanobacterial fatty acids released from *Myriophyllum spicatum* [J]. *Hydrobiologia*, 2005, **543**(1): 71 – 78.
- [21] INDERJIT, DAKSHINI K M M, EINHELLIG F A. *Allelopathy: Organisms, Processes and Applications* [M]. USA: ACS. 1995.
- [22] 胡陈艳, 葛芳杰, 张胜花, 等. 马来眼子菜体内抑藻物质分离及常见脂肪酸抑藻效应[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(4): 569 – 576.
HU Chenyan, GE Fangjie, ZHANG Shenghua, *et al.* Isolation of antialgal compounds from *Potamogeton malaianus* and alga linhibitory effects of common fatty acids [J]. *Lake Sci*, 2010, **22**(4): 569 – 576.
- [23] GAO Yunni, LIU B Y, GE F J, *et al.* Joint effects of allelochemical nonanoic acid, n-phenyl-1-naphthylamine and caffeic acid on the growth of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Allelopathy J*, 2015, **35**(2): 249 – 258.
- [24] 张庭廷, 韩玉珍, 何宗祥, 等. 酚酸类物质对铜绿微囊藻以及蛋白核小球藻的抑藻作用[J]. 卫生研究, 2016, **45**(3): 448 – 451.
ZHANG Tingting, HAN Yuzhen, HE Zongxiang, *et al.* Joint inhibitory effects researches on *Microcystis aeruginosa* and *Chlorella pyrenoidosa* of phenolic acids [J]. *J Hyg Res*, 2016, **45**(3): 448 – 451.
- [25] 高云霓, 董静, 何燕, 等. 基于化感物质释放特性的沉水植物抑藻作用模式研究进展[J]. 水生生物学报, 2016, **40**(6): 1287 – 1294.
GAO Yunni, DONG Jing, HE Yan, *et al.* Research advances on the modes of action of action for allelopathic algal inhibition by submerged macrophytes based on the release characteristics of allelochemicals [J]. *Acta Hydrobiol Sin*, 2016, **40**(6): 1287 – 1294.
- [26] 孙颖颖, 董晓柯, 李光成, 等. 3 种酚酸对中肋骨条藻生长的抑制作用[J]. 环境科学与技术, 2015, **38**(3): 26 – 30.
SUN Yingying, DONH Xiaoke, LI Guangcheng, *et al.* Growth inhibition of three kinds of phenolic acids on *Skeletonema costatum* [J]. *Environ Sci Technol*, 2015, **38**(3): 26 – 30.