

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.03.019

丙二酸对铜绿微囊藻的抑制效果

杨超慧^{1,2}, 王 超^{1,2}, 欧阳萍³, 甘小蓉^{1,2}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 3. 江苏省生态环境厅, 江苏 南京 210036)

摘要:为研究丙二酸对铜绿微囊藻的抑制效果,测定了不同浓度和不同投加方式的丙二酸作用下铜绿微囊藻藻细胞密度和叶绿素 a 质量浓度的变化;在此基础上,通过丙二酸添加后藻细胞藻胆蛋白含量及超微结构的变化,分析了丙二酸的抑藻机理。结果表明:丙二酸对铜绿微囊藻有较强的抑制效果;当丙二酸质量浓度达到 60 mg/L 时,在试验末期即第 12 天对铜绿微囊藻的抑制率达到了 87.26%;在相同的作用时间内,与分批投加相比,采用一次性投加丙二酸的方式抑藻效果更强;在丙二酸作用下,藻细胞叶绿素 a 及藻蓝蛋白质量浓度下降,光合作用受到抑制;在扫描电镜下能够观察到藻细胞结构遭到破坏,胞内物质外泄,从而导致了藻细胞死亡。

关键词:丙二酸;铜绿微囊藻;化感作用;抑制机理

中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)03-0121-06

Inhibitory effect of malonic acid on *Microcystis aeruginosa* // YANG Chaohui^{1,2}, WANG Chao^{1,2}, OUYANG Ping³, GAN Xiaorong^{1,2} (1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Department of Ecology and Environment of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China)

Abstract: In order to study the inhibitory effect of malonic acid on *Microcystis aeruginosa*, the changes of cell density and chlorophyll a mass concentration of *Microcystis aeruginosa* were determined under the action of malonic acid with different mass concentrations and different dosing methods. On this basis, the inhibition mechanism of malonic acid was analyzed through the changes of phycobiliprotein content and ultrastructure of algae cells after malonic acid was added. The results showed that the malonic acid had a strong inhibitory effect on *Microcystis aeruginosa*. When the mass concentration of the malonic acid was 60 mg/L, the inhibition rate reached 87.26% on the 12th day. In the same action time, compared with batch dosing, the effect of one-time dosing of malonic acid was stronger. Under the action of malonic acid, chlorophyll a and phycocyanin decreased and photosynthesis was inhibited. Under the scanning electron microscope, it can be observed that the structure of algal cells was destroyed, and the material inside the cells leaked out, which led to the death of algal cells.

Key words: malonic acid; *Microcystis aeruginosa*; allelopathy; inhibitory mechanism

水华暴发近年来成了发生频繁且危害严重的环境问题。蓝藻聚集成团漂浮在水面上,不仅使水体透明度下降,还使水体中溶解氧质量浓度降低,导致水生生物窒息而死,破坏生态环境^[1-3]。此外,蓝藻释放的藻毒素还会给饮用水源安全带来威胁^[4],但如何抑制蓝藻生长仍是世界性的难题。目前去除蓝藻的方法主要分为物理法、化学法及生物法。物理法如机械打捞^[5]、黏土吸附^[6]等,虽然能够在一定

程度上缓解藻类暴发,但是无法从根本上解决问题。化学法如向水体中投加具有杀藻效用的化学物质^[7]等,虽然起效快,但是会对水体造成二次污染。生物法指利用生物间的相互作用来抑制藻类生长,其中,化感抑藻因其高效性和环境友好性成为了研究热点。化感作用指植物通过向环境中释放化学物质而对另一种植物产生直接或间接影响的现象,这种化学物质,是植物生长过程中产生的次生代谢物

基金项目:国家自然科学基金(51579073)

作者简介:杨超慧(1996—),女,硕士研究生,研究方向为生物环境修复。E-mail: 451375121@qq.com

通信作者:王超(1958—),男,院士,主要从事水环境保护与生态修复研究。E-mail: cwang@hhu.edu.cn

质,被称为化感物质。近年来,关于利用植物释放的化感物质抑制藻类生长的报道不断增多^[8]。Zhao等^[9]经过野外试验发现在水体中种植桉树能够有效抑制藻类生长,在试验第30天对藻类的抑制率达到了85.8%;Wang等^[10]通过试验发现,在质量浓度为2 g/L的人面树树叶提取物的作用下,试验第15天时铜绿微囊藻的叶绿素a质量浓度下降了96%。化感物质大体上可以分为14类,包括酚酸类、生物碱、萜类化合物等^[11],由于化感物质种类繁多,因此从中选择能够高效抑藻的物质仍是难点所在。

铜绿微囊藻在高温、低光照等不利条件下仍能保持较高的生长速率^[12-13],夏季时在蓝藻竞争中处于优势地位^[14],因此本文选择铜绿微囊藻作为试验藻种。丙二酸是常见的化感物质之一,属于有机酸,具有良好的水溶性,常用于医药中间体和香料合成等。经预试验后发现,丙二酸具有抑藻效应,由于丙二酸较为常见,价格低廉,因此本文选择丙二酸作为抑藻剂,探讨它对蓝藻水华中典型藻种铜绿微囊藻的抑制效果,并根据丙二酸处理后藻细胞藻胆蛋白质量浓度及超微结构的变化分析丙二酸的抑藻机理,以期利用丙二酸治理蓝藻水华提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验藻种铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*, FACHB 1343)购自中国科学院水生生物研究所藻种库,采用BG-11培养基进行培养。将藻种置于光照培养箱中于温度25℃,光照强度4 000 lx,光暗比12 h:12 h的条件下培养,每天定时摇动3~4次。丙二酸为分析纯,纯度98%,购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 试验方法

a. 丙二酸质量浓度对抑藻效果的影响试验。将铜绿微囊藻置于1.1节所述条件下培养至对数生长期(藻细胞密度约为 $10^5 \sim 10^6$ 个/mL)后,根据预试验结果向350 mL藻液中加入丙二酸,使丙二酸质量浓度分别为0(对照组)、5 mg/L、10 mg/L、20 mg/L、40 mg/L、60 mg/L、80 mg/L和120 mg/L。各试验组和对照组均设置3个平行组,在试验第0、1、3、5、8、12天利用血球计数板在显微镜下测定藻细胞数目,并参照郭亚丽等^[15]采用丙酮提取-分光光度法测定藻液叶绿素a的质量浓度。

b. 不同丙二酸投加方式对抑藻效果的影响试验。根据预试验结果计算可得丙二酸在试验第3天对铜绿微囊藻的半最大效应浓度 EC_{50} 值,从抑藻效

果和投加剂量的方面综合考虑,后续试验控制丙二酸浓度为 EC_{50} 值即73.8 mg/L。向350 mL藻液中投加丙二酸,使丙二酸质量浓度达到73.8 mg/L的投加量25.83 mg作为基础剂量。设置3个试验组B1~B3,B1组在0 h时一次性投加25.83 mg的丙二酸,B2组分别在0 h和6 h投加一半基础剂量即12.92 mg的丙二酸,B3组分别在0 h、3 h、6 h、9 h和12 h投加1/5基础剂量即5.17 mg的丙二酸。3个试验组在试验开始12 h后丙二酸质量浓度均达到73.8 mg/L,对照组不投加丙二酸。各试验组和对照组均设置3个平行组,在试验第0、1、3、5、8、12天利用血球计数板在显微镜下测定藻细胞数目,并参照郭亚丽等^[15]采用丙酮提取-分光光度法测定藻液叶绿素a质量浓度。

c. 丙二酸抑藻机理研究试验。向350 mL藻液中一次性加入丙二酸,使丙二酸浓度为73.8 mg/L,对照组不添加丙二酸。各试验组和对照组均设置3个平行组,在试验第12天参照吴忠兴^[16]利用反复冻融法测定藻液藻胆蛋白质量浓度,并参照邓继选等^[17]的方法在扫描电镜下观察藻细胞形态变化。

1.3 数据处理

丙二酸对铜绿微囊藻的抑制率计算公式为

$$I_R = (1 - N/N_0) \times 100\% \quad (1)$$

式中: I_R 为抑制率,%; N 为试验组藻细胞密度,个/mL; N_0 为对照组藻细胞密度,个/mL。

抑藻的半最大效应浓度 EC_{50} 通过将丙二酸质量浓度与对铜绿微囊藻的抑制率作一元线性回归方程来计算。试验数据取3个平行试验组的平均值,采用Excel 2007和SPSS21.0软件进行处理,对照组与试验组之间采用单因素方差分析, $P < 0.05$ 说明有显著性差异, $P > 0.05$ 说明无显著性差异。

2 结果与分析

2.1 丙二酸质量浓度对抑藻效果的影响

在不同质量浓度的丙二酸作用下,铜绿微囊藻的藻细胞密度变化趋势如图1所示。对照组的藻细胞密度随着试验时间的增长而不断增大,试验组的藻细胞密度较对照组出现下降。当丙二酸质量浓度小于60 mg/L时,对铜绿微囊藻的抑制效果较弱,甚至出现促进的现象,这与前人研究中化感物质的抑藻效用呈现“低促高抑”的现象一致^[18]。但当丙二酸质量浓度为60 mg/L时,铜绿微囊藻藻细胞密度较对照组出现显著下降($P < 0.05$),在试验第12天时抑制率达到了87.26%。当丙二酸质量浓度较高(≥ 60 mg/L)时,对铜绿微囊藻的抑制效果随着丙二酸质量浓度的增大而不断增强。

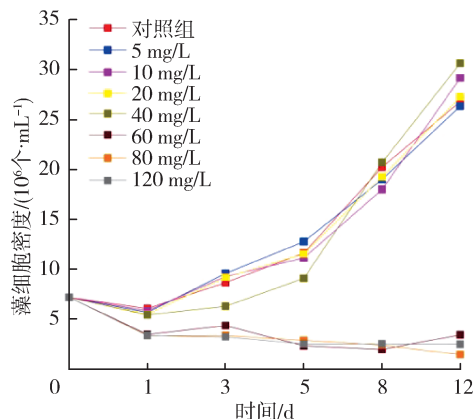


图1 不同质量浓度丙二酸对铜绿微囊藻细胞密度的影响

Fig.1 Effect of different mass concentration of malonic acid on cell density of *Microcystis aeruginosa*

图2为不同质量浓度丙二酸对铜绿微囊藻叶绿素a质量浓度的影响。如图2所示,对照组藻液的叶绿素a质量浓度随着试验时间增长不断增大,而试验组的叶绿素a质量浓度变化趋势与藻细胞密度变化趋势基本一致。当丙二酸的质量浓度小于60 mg/L时,虽然藻细胞叶绿素a质量浓度略有下降,但下降幅度较小,有时甚至出现高于对照组的情况。但随着丙二酸的质量浓度继续增大,试验组的叶绿素a质量浓度较对照组出现了显著下降($P < 0.05$)。在试验期间也可以观察到藻液颜色逐渐变黄,这说明由于叶绿素a质量浓度下降,铜绿微囊藻的光合作用受到了抑制。根据试验结果计算可得,在试验第3天时,丙二酸对铜绿微囊藻抑制作用的 EC_{50} 值为73.8 mg/L。

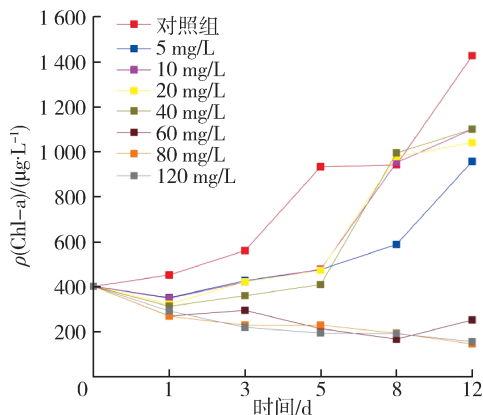


图2 不同质量浓度丙二酸对铜绿微囊藻叶绿素a质量浓度的影响

Fig.2 Effect of different mass concentration of malonic acid on mass concentration of chlorophyll a of *Microcystis aeruginosa*

2.2 不同丙二酸投加方式对抑藻效果的影响

图3和图4分别为在不同丙二酸投加方式的作用下,铜绿微囊藻细胞密度和叶绿素a质量浓度

的变化。对照组铜绿微囊藻的藻细胞密度和叶绿素a质量浓度随着试验时间的增长而不断增大。与对照组相比,各试验组铜绿微囊藻的生长都受到了抑制,但分批次投加的试验组的抑藻效果明显差于一次性投加组。当试验进行到第12天时,B1组对铜绿微囊藻的抑制率达到了94%,较对照组出现显著下降($P < 0.05$)。而B2组和B3组此时的抑制率分别为-87.85%和30.25%,与对照组相比没有明显抑制效果,甚至产生了促进作用。叶绿素a质量浓度的变化与藻细胞密度的变化趋势相似。在试验第12天,B1组的叶绿素a质量浓度较对照组下降了93.8%,而B2组的叶绿素a质量浓度较对照组上升,B3组的叶绿素a质量浓度下降幅度较小,这进一步说明了一次性投加的方式有利于增强抑藻效果。

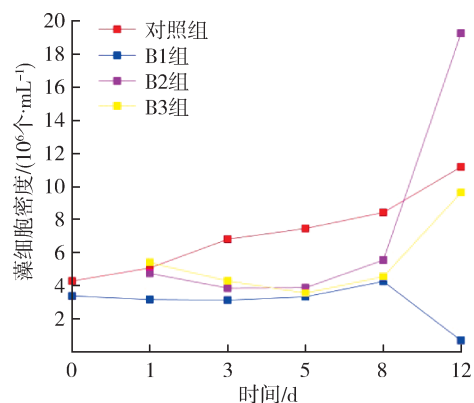


图3 不同丙二酸投加方式对铜绿微囊藻细胞密度的影响

Fig.3 Effect of different dosing methods of malonic acid on cell density of *Microcystis aeruginosa*

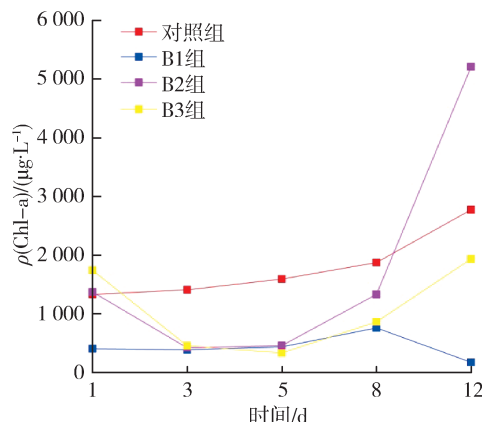


图4 不同丙二酸投加方式对铜绿微囊藻叶绿素a质量浓度的影响

Fig.4 Effect of different dosing methods of malonic acid on mass concentration of chlorophyll a of *Microcystis aeruginosa*

2.3 丙二酸对藻胆蛋白质量浓度的影响

添加丙二酸第12天藻液中藻胆蛋白质量浓度的变化如表1所示。藻胆蛋白包括藻蓝蛋白、别藻

蓝蛋白和藻红蛋白等,是铜绿微囊藻重要的捕光蛋白,对光合作用起辅助作用^[19]。添加丙二酸后,试验组中藻细胞的藻蓝蛋白质量浓度显著降低($P < 0.05$),较对照组下降了 85.31%。但别藻蓝蛋白质量浓度未出现明显变化,且藻红蛋白质量浓度略有上升。这说明丙二酸主要通过影响藻蓝蛋白的合成进一步阻碍铜绿微囊藻的光合作用,影响铜绿微囊藻的正常生长。

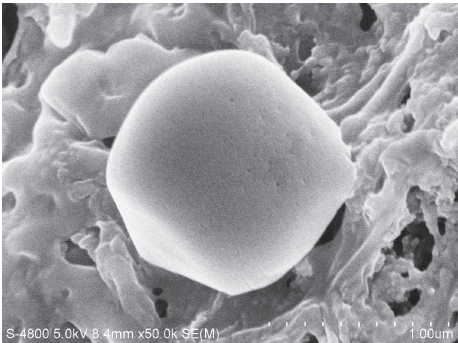
表 1 试验第 12 天丙二酸对铜绿微囊藻藻胆蛋白质量浓度的影响

Table 1 Effect of malonic acid on mass concentration of phycobiliprotein of *Microcystis aeruginosa* on 12th day

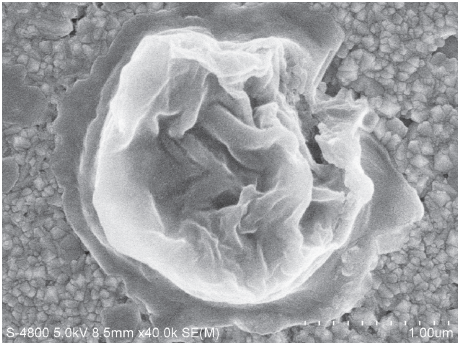
组别	质量浓度/(mg · L ⁻¹)		
	藻蓝蛋白	别藻蓝蛋白	藻红蛋白
对照组	1.477	1.628	18.683
试验组	0.217	1.477	26.998

2.4 丙二酸对藻细胞超微结构的影响

图 5 为丙二酸对铜绿微囊藻细胞结构的影响。由图 5 可见,在丙二酸的作用下,藻细胞形态发生了明显变化,图 5(b)为丙二酸质量浓度 73.8 mg/L 进行处理的试验组。对照组的藻细胞结构完整,表面光滑,整体呈球形,而试验组的藻细胞表面出现孔洞,细胞膜发生明显凹陷,从而使得胞内物质溢出,细胞结构完整性遭到破坏。由此可推测,丙二酸通过破坏铜绿微囊藻的细胞结构使得藻细胞破裂,造



(a) 对照组



(b) 试验组

图 5 丙二酸对铜绿微囊藻细胞结构的影响
Fig.5 Effect of malonic acid on ultrastructure of *Microcystis aeruginosa*

成藻细胞大量死亡,从而抑制铜绿微囊藻生长。

3 讨论

化感物质种类繁多,不同化感物质对藻类的抑制效果不同。有研究发现,在赖氨酸和丙二酸的协同作用下,第 21 天时试验水体中的铜绿微囊藻生物量降至对照组的 1/6^[20]。本研究表明,丙二酸单独作用于铜绿微囊藻时,同样具有良好的抑制效果。当丙二酸质量浓度达到 60 mg/L 时,在试验第 12 天对铜绿微囊藻的抑制率达到了 87.26%。经过计算可得,丙二酸在试验第 3 天对铜绿微囊藻抑制效果的 EC₅₀ 值为 73.8 mg/L。张庭延等^[21]研究表明水杨酸和肉桂酸在试验第 6 天对铜绿微囊藻的 EC₅₀ 值分别为 64.9 mg/L 和 89.34 mg/L;杨萌等^[22]研究发现,阿魏酸和阿魏酸乙酯在试验第 3 天抑制铜绿微囊藻生长的 EC₅₀ 值分别为 123.7 mg/L 和 87.7 mg/L。比较可得,在相同时间内丙二酸对铜绿微囊藻抑制效果的 EC₅₀ 值较小,这说明与目前所报道的常见化感物质相比,在以达到相同抑藻效果为目标的前提下,利用丙二酸除藻所需投加的丙二酸量较少,具有良好的经济效益。

影响化感抑藻的因素包括藻的初始密度^[23],化感物质浓度^[24]、化感物质的投加方式^[25]等。由于当铜绿微囊藻处于对数生长期,即藻细胞密度已达到 10⁵ ~ 10⁶ 个/mL 时,丙二酸仍具有良好的抑藻效果,因此可认为利用丙二酸来减缓铜绿微囊藻暴发具有实际应用意义。研究表明,与分次投加相比,一次性投加丙二酸的试验组的抑藻效果最好,但吴程等^[26]通过试验发现,连续添加植物种植水的抑藻效果强于一次性投加。这可能是因为水生植物在生长过程中会以连续释放化感物质的方式作用于藻类^[27],但本试验采用了直接投加化感物质的方式进行研究,因此在初始加入足量丙二酸有利于增强抑藻效果。

目前研究表明,化感物质的抑藻机理主要包括使藻细胞叶绿素 a 质量浓度降低来阻碍藻类的光合作用^[28]、破坏藻细胞结构使细胞完整性遭到破坏^[29]、对藻细胞膜系统造成过氧化损伤^[30]、改变藻细胞相关基因的表达^[31]等。通过对藻细胞超微结构的观察,发现丙二酸能够破坏铜绿微囊藻藻细胞结构,使细胞内物质泄露,这是导致藻细胞死亡的原因之一,这与武赟^[32]的研究结果相似。在丙二酸作用下,不仅藻细胞的叶绿素 a 质量浓度减少,藻蓝蛋白质量浓度也出现了明显下降,因而藻细胞的捕光功能受到影响,光合活性下降。但吴程等^[33]的研究表明,在添加水生植物种植水后,不仅集胞藻藻细胞

中的藻蓝蛋白质量浓度出现明显下降,别藻蓝蛋白合成也受到阻碍。这说明藻细胞的捕光功能对不同化感物质的敏感程度不同,但藻胆蛋白是化感物质作用于藻细胞的重要位点。但是本文并未测定藻细胞中过氧化酶质量浓度的变化,后续试验可以针对丙二酸对铜绿微囊藻细胞中酶合成的影响做进一步研究,以完善丙二酸的抑藻机理。

4 结 论

a. 丙二酸能够显著抑制铜绿微囊藻的生长,且抑制效果与丙二酸质量浓度呈正相关。当丙二酸质量浓度达到 60 mg/L 时,对铜绿微囊藻的抑制效果随着浓度的增大而增强。在试验第 12 天,质量浓度为 60 mg/L 的丙二酸处理组对铜绿微囊藻的抑制率为 87.26%。

b. 丙二酸通过引起铜绿微囊藻叶绿素 a 及藻蓝蛋白质量浓度下降的方式来阻碍藻细胞的光合作用。同时,丙二酸能够破坏藻细胞结构,使胞内物质外泄,从而导致藻细胞死亡。

c. 一次性投加丙二酸较分批投加而言对铜绿微囊藻的抑制效果更强,因此在实际应用时应采用一次性投加丙二酸的方式来治理蓝藻水华。

参考文献:

- [1] 应佳薇,张菁,张丽娜. 关于蓝藻危害与防治[J]. 广东化工,2017,44(11):212-213. (YING Jiawei,ZHANG Jing,ZHANG Lina. Hazards and control of Cyanobacteria [J]. Guangdong Chemical Industry,2017,44(11):212-213. (in Chinese))
- [2] 宋微. 蓝藻水华暴发的危害与控制技术研究[J]. 环境保护与循环经济,2016,36(9):55-58. (SONG Wei. The study of harm of *Cyanobacteria* bloom and control measures [J]. Environmental Protection and Circular Economy,2016,36(9):55-58. (in Chinese))
- [3] NWANKWEGU A S,LI Y,HUANG Y,et al. Harmful algal blooms under changing climate and constantly increasing anthropogenic actions: the review of management implications[J]. Biotech,2019,9(12):449.
- [4] KRISHNAN A,KOSKI G,MOU X. Characterization of microcystin-induced apoptosis in HepG2 hepatoma cells [J]. Toxicon,2020,173:20-26.
- [5] FAN Fan,SHI Xiaoli,ZHANG Min,et al. Comparison of algal harvest and hydrogen peroxide treatment in mitigating cyanobacterial blooms via an in situ mesocosm experiment [J]. Science of The Total Environment,2019,694:133-137.
- [6] LIU Shuya,YU Zhiming,SONG Xiuxian,et al. Effects of modified clay on the physiological and photosynthetic

- activities of *Amphidinium carterae* Hulburt [J]. Harmful Algae,2017,70(10):64-72.
- [7] 陈思莉,邴永鑫,常莎,等. 除藻剂应急治理湖水蓝藻水华案例分析[J]. 中国农村水利水电,2019(3):20-23. (CHEN Sili,BING Yongxin,CHANG Sha,et al. Emergency treatment of *Cyanobacteria* bloom by algicide in the lake[J]. China Rural Water and Hydropower,2019(3):20-23. (in Chinese))
- [8] 钱燕萍,赵楚,田如男. 水生植物对藻类的化感作用研究进展[J]. 生物学杂志,2018,35(6):95-97. (QIAN Yanping,ZHAO Chu,TIAN Runan. Research advances in inhibitory effects on phytoplankton mediated by aquatic plants[J]. Journal of Biology,2018,35(6):95-97. (in Chinese))
- [9] ZHAO Wei,ZHENG Zheng,ZHANG Junlei,et al. Evaluation of the use of eucalyptus to control algae bloom and improve water quality [J]. Science of the Total Environment,2019,667:412-418.
- [10] WANG X X,SZETO Y T,JIANG C C,et al. Effects of dracontomelon duperreanum leaf litter on the growth and photosynthesis of *microcystis aeruginosa* [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology,2018,100(5):690-694.
- [11] 王安可,毕毓芳,温星,等. 植物化感物质的研究现状[J]. 分子植物育种,2019,17(17):5829-5835. (WANG Anke,BI Yufang,WEN Xing,et al. Research advances of plant allelochemicals [J]. Molecular Plant Breeding,2019,17(17):5829-5835. (in Chinese))
- [12] 李燕均. 三种水华蓝藻竞争机理的研究[D]. 上海:上海师范大学,2019.
- [13] 马欠,邓春暖,郭锋锋,等. 光照对小球藻和铜绿微囊藻生长及叶绿素荧光的影响[J]. 西安文理学院学报(自然科学版),2019,22(4):73-77. (MA Qian,DENG Chunnuan,GUO Fengfeng,et al. Effects of illumination on growth of *Chlorella* and *Microcystis Aeruginosa* and chlorophyll fluorescence [J]. Journal of Xi'an University (Natural Science Edition),2019,22(4):73-77. (in Chinese))
- [14] DUAN Hongtao,MA Ronghua,XU Xiaofeng,et al. Two-decade reconstruction of algal blooms in China's Lake Taihu[J]. Environmental Science & Technology,2009,43(10):3522-3528.
- [15] 郭亚丽,傅海燕,黄国和,等. 阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用[J]. 环境科学,2013,34(4):1492-1497. (GUO Yali,FU Haiyan,HUANG Guohe,et al. Allelopathy effects of ferulic acid and coumarin on *Microcystis aeruginosa* [J]. Environmental Science,2013,34(4):1492-1497. (in Chinese))
- [16] 吴忠兴. 我国微囊藻多样性分析及其种群优势的生理学机制研究[D]. 武汉:中国科学院水生生物研究所,2006.

- [17] 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. (DENG Jixuan,ZOU Hua,ZHUANG Yan. On the isolation of anti-algal compounds from the wheat straw and the algae inhibiting effect[J]. Journal of Safety and Environment, 2013,13(6):39-43. (in Chinese))
- [18] 程萌,李丹,张猛. 入侵植物喜旱莲子草对铜绿微囊藻的化感作用研究[J]. 安徽农学通报,2019,25(12):32-35. (CHENG Meng,LI Dan,ZHANG Meng. Study on the allelopathic effects of alternanthera philoxeroides on *Microcystis aeruginosa* [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin,2019,25(12):32-35. (in Chinese))
- [19] 马丞博,秦松,李文军,等. 藻胆蛋白生物合成研究进展[J]. 科学通报,2019,64(1):49-59. (MA Chengbo,QIN Song,LI Wenjun, et al. Progress in biosynthesis of phycobiliprotein[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64 (1):49-59. (in Chinese))
- [20] KAYA Kunimitsu, LIU Yongding, SHEN Yinwu, et al. Selective control of toxic *Microcystis* water blooms using lysine and malonic acid: an enclosure experiment[J]. Environmental Toxicology,2005,20(2):170-178.
- [21] 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]. Journal of Hygiene Research,2016,45(3):448-451. (in Chinese))
- [22] 杨萌,刘喆,杨笑宇,等. 阿魏酸类化合物对铜绿微囊藻的化感作用及富里酸对化感作用的影响[J]. 生态环境学报,2018,27(8):1530-1537. (YANG Meng, LIU Zhe, YANG Xiaoyu, et al. Allelopathy effects of ferulic acid derivatives on *Microcystis aeruginosa* and the effect of fulvic acid on allelopathy[J]. Ecology and Environment Sciences,2018,27(8):1530-1537. (in Chinese))
- [23] 谭凯婷,王志红,黄梓淇,等. 对叔丁基邻苯二酚对铜绿微囊藻的化感抑制作用[J]. 环境化学,2018,37(12):2645-2650. (TAN Kaiting, WANG Zhihong, HUANG Ziqi, et al. Allelopathic inhibition of p-tert-butylcatechol (TBC) on *Microcystis aeruginosa* [J]. Environmental Chemistry,2018,37(12):2645-2650. (in Chinese))
- [24] 郭孝玉,张潇月,李奇勇,等. 粉防己碱对铜绿微囊藻的化感作用[J]. 三明学院学报,2017,34(6):57-61. (GUO Xiaoyu,ZHANG Xiaoyue,LI Qiyong, et al. Growth and allelopathic effects of *Microcystis Aeruginosa* under different concentration tetrandrine[J]. Journal of Sanming University,2017,34(6):57-61. (in Chinese))
- [25] LU Z Y, LIU B, HE Y, et al. Effects of daily exposure of *Cyanobacterium* and *Chlorophyte* to low-doses of Pyrogallol [J]. Allelopathy Journal,2014,34(2):195-205.
- [26] 吴程,常学秀,董红娟,等. 粉绿狐尾藻 (*Myriophyllum aquaticum*) 对铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 的化感抑制效应及其生理机制[J]. 生态学报,2008(6):2595-2603. (WU Cheng, CHANG Xuexiu, DONG Hongjuan, et al. Allelopathic inhibitory effect of *Myriophyllum aquaticum* (Vell.) Verdc. on *Microcystis aeruginosa* and its physiological mechanism [J]. Acta Ecologica Sinica,2008(6):2595-2603. (in Chinese))
- [27] 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 for allelopathic algal inhibition by submerged macrophytes based on the release characteristics of allelochemicals[J]. Acta Hydrobiologica Sinica,2016,40(6):1287-1294. (in Chinese))
- [28] 姚华,张帮婵,齐睿晨,等. 黄酮类化合物对水华鱼腥藻的抑制作用研究[J]. 安徽农学通报,2019,25(12):29-31. (YAO Hua, ZHANG Bangchan, QI Ruichen, et al. Study on inhibitory effect of flavonoids on anabaena flos-aquae[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin,2019,25(12):29-31. (in Chinese))
- [29] LI Fengmin, HU Hongying. Isolation and characterization of a novel antialgal allelochemical from phragmites communis[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006,71(11):6545-6553.
- [30] TAO Lu, QIAN Haifeng, QU Qian, et al. Responses of unicellular alga *Chlorella pyrenoidosa* to allelochemical linoleic acid[J]. Science of the Total Environment,2018,625:1415-1422.
- [31] 章典. 复合化感物质抑藻效应及其对微囊藻毒素生物合成影响的研究[D]. 合肥:安徽师范大学,2012.
- [32] 武赞. 女贞子浸提液对铜绿微囊藻化感抑制作用与机理的研究[D]. 合肥:安徽大学,2017.
- [33] 吴程,常学秀,吴锋,等. 高等水生植物对集胞藻 (*Synahocystis sp.*) 的化感作用研究[J]. 云南大学学报 (自然科学版), 2008 (5): 535-540. (WU Cheng, CHANG Xuexiu,WU Feng, et al. Studies on allelopathy of aquatic macrophytes on *Synahocystis sp.* [J]. Journal of Yunnan University(Natural Sciences Edition),2008(5):535-540. (in Chinese))

(收稿日期:2020-02-10 编辑:王 芳)

