

利用植物化感作用抑藻的研究进展

沈冰洁, 陈明利, 吴晓芙

(中南林业科技大学林学院环境科学与工程研究中心, 湖南 长沙 410004)

摘要:利用植物化感作用抑制藻类具有生态安全和灵敏高效等优点,对水体富营养化的生态控制具有极其重要的意义。本文研究了利用植物化感作用抑藻的进展,从化感物质对藻细胞光合作用、酶活性、细胞膜、细胞超微结构、基因表达的影响方面探究了植物化感抑藻作用的机理。并分别就水生植物和陆生植物中提取的各类化感抑藻物质的抑藻效果进行分析比较,尤其探讨了木本植物抑藻的潜在价值,为开发新的抑藻剂提供理论指导。本文还针对目前的研究现状,提出植物抑藻领域存在的问题及前景展望。

关键词:植物;化感作用;化感物质;抑藻

中图分类号:X524

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2013)06-0035-05

Advance Research on Allelopathy Effects of Plants for Inhibiting Harmful Algae

SHEN Bing-jie, CHEN Ming-li, WU Xiao-fu

(Research Center of Environmental Science and Engineering, School of Forestry, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, China)

Abstract:The use of plant allelopathy for inhibiting harmful algae, with the advantages of high efficiency and sensitivity to algae controlling and ecological security to aquatic organisms, will play a significant role on ecological control of water eutrophication. The advance research on allelopathy effects of plants for inhibiting harmful algae was introduced, in which the mechanisms of algal-inhibition were analyzed from aspects of photosynthesis, enzyme activities, cell membrane, cell ultrastructure, gene expression. And the effect of allelochemical extracting from the aquatic plants and terrestrial plants on anti-algae was compared, especially the value of woody plants was explored, which would provide the theory guide for developing new algicide. The problems of allelopathy of plants on algae were point out and the prospect of allelopathic algae control was put forward.

Keywords: plant; allelopathy; allelochemicals; algal-inhibition

2013年7月19日,安徽巢湖东半湖蓝藻大面积爆发,再一次为我们敲响警钟。近几年,国内外藻类爆发事件的频发令人愈发担忧。沿海地区,如中国的青岛、美国的墨西哥湾沿海、美国西海岸,或者在一些淡水区域,如美国的五大湖区等等,都能常常见到大规模的藻类爆发事件。因此,当务之急是寻求一种安全、高效的控制藻类过度生长的方法。

传统的抑藻方法主要有物理法、化学法和生物法

3类,但该类方法都存在操作难、费用高、生态危害大等缺点^[1]。利用植物化感物质控制藻类因其具有选择性、无二次污染、环境友好等特点,有望成为具有应用价值的安全性生物抑藻技术。化感物质主要来源于植物的次生代谢产物,主要包括酚类、萜类、生物碱等,具有分子量小、结构简单等特点。目前,国内外已发现几十种水生植物具有化感抑藻作用^[2],且抑藻植物的范围已从水生植物扩展到陆生植物^[3-5],从中寻找分泌高抑藻活性物质的植物种类,分离其中的抑藻化感物质用于抑制有害藻类具有良好的应用前景,可为充分利用水、陆植物资源进行水域环境治理与生态修复研究与应用提供参考。

收稿日期:2013-10-03

基金项目:湖南省重点学科基金项目;湖南省教育厅重点实验室开放基金项目(12K071)

作者简介:沈冰洁(1990—),女,浙江舟山人,硕士研究生,主要研究方向为水环境污染生物修复。E-mail:sbj901003@163.com

1 植物化感抑藻机理

1.1 影响光合作用

吴程等^[6]通过逐层分析粉绿狐尾藻(*Myriophyllum aquaticum*)对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)藻细胞吸收光谱、藻胆蛋白吸收光谱、APC 和 PC 及 Chla 三者相对含量等指标的变化动态,表明粉绿狐尾藻释放的化感物质可直接破坏铜绿微囊藻藻胆体内的辅助捕光色素系统,阻断藻胆蛋白对光电子的捕获和传递,从而影响光合作用正常进行。汪丽等^[7]研究了苻菜(*Nymphoides peltatum*)种植水对铜绿微囊藻的影响,结果显示藻胆蛋白(包括藻蓝蛋白、别藻蓝蛋白和藻红蛋白)、叶绿素 a 的相对含量均有不同程度的下降,藻细胞 $\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+}$ -ATP 酶活性明显下降,藻细胞数量逐渐减少,表明苻菜种植水中存在着某种对铜绿微囊藻产生抑制作用的物质,该物质通过对铜绿微囊藻光反应系统(PS I 和 PS II)的作用来影响藻细胞光合作用。Zhu 等^[8]对沉水植物穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)及其分泌物对蓝绿藻的化感机制研究,结果表明铜绿微囊藻光合活性降低和化感物质协同效应可能是引起天然水生生态系统沉水植物抑制有害浮游植物的 2 个重要原因,并且认为蓝藻的光系统 II 是被化感多酚抑制的靶位点。

1.2 影响细胞膜功能

植物分泌的化感物质能改变细胞膜流动性,或者降低细胞膜的完整性,使细胞内物质大量渗出,渗出液的电导率增加^[9]。张庭廷等^[10]研究了对羟基苯甲酸对铜绿微囊藻生长的影响以及对鲤鱼的毒性作用,发现其抑藻机制可能与对羟基苯甲酸产生氧离子自由基有关,氧离子自由基通过破坏细胞膜结构,改变细胞膜通透性,导致细胞内大量物质渗出,最终使得细胞溶解破裂。花铭等^[11]通过研究铜绿微囊藻细胞膜系统对邻苯三酚和咖啡酸胁迫的响应,结果表明 2 种酚类化感物质会引起铜绿微囊藻膜脂过氧化,而使酯酶活性受抑制,丙二醛(MDA)含量升高,降低了细胞膜的完整性。芦苇抑藻化感物质 2-甲基乙酰乙酸乙酯(ethyl 2-methylacetoacetate, EMA)破坏了铜绿微囊藻和蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidesa*)的细胞膜,同时,高浓度 EMA 能显著增加铜绿微囊藻和蛋白核小球藻内 K^{+} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 的渗出量^[12]。N-苯基-2-萘胺是凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)根系丙酮提取物中的主要抑藻物质,其可能通过自由基反应破坏细胞膜的结构,使得藻体中的可溶性蛋白质和 MDA 含量升

高,达到抑藻效果^[13]。

1.3 破坏细胞超微结构

化感物质破坏细胞超微结构主要是通过破坏细胞膜,使膜质系统受到损伤,从而进一步作用于叶绿体、拟核、线粒体及内含物和细胞核等细胞超微结构达到抑制藻类生长的目的^[14]。夏钰妹^[15]发现加入肠浒苔(*Enteromorpha intestinalis*)水相提取物后,海洋原甲藻(*Prorocentrum micans*)的细胞膜出现一定的内陷,且整个细胞空洞,叶绿体的类囊体片层膨胀不均匀造成波浪状的无序排列,高尔基体片层模糊。Sun 等^[16]将槐糖脂加入赤潮异弯藻(*Heterosigma akashiwo*)、多环旋沟藻(*Cochlodinium polykrikoides*)和塔马亚历山大藻(*Alexandrium tamarense*)3 种海藻,结果显示,槐糖脂会在短时间内造成赤潮异弯藻的快速溶解、多环旋沟藻的溶胀和塔马亚历山大藻的细胞膜鞘与原生质体的分离,从而导致核苷酸的泄漏。王立新等^[17]研究了黑藻(*Hydrilla verticillata*)养殖水对铜绿微囊藻的抑制作用,电镜照片显示,细胞质膜逐渐解体、类囊体片层呈无序的松乱状态直至呈零星散落的片层残余;中央拟核区也在这个过程中逐渐萎缩直至消失。

1.4 破坏抗氧化酶系统

由于酶的特性不同,化感物质能提高部分酶的活性,也能抑制另外一部分酶的活性。植物化感作用可通过影响酶活性从而抑制藻类的生长。研究结果显示,EMA、N-苯基-2-萘胺处于高浓度时,小球藻(*Chlorella vulgaris*)、蛋白核小球藻的 SOD、POD、CAT 3 种酶活性都逐渐降低^[1,18]。在水网藻(*Hydrodictyon reticulatum*)种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究中,SOD、POD、CAT 活性在实验室前 2 d 因受到活性氧的刺激增加,随着酶活性达到极限,活性氧开始积累并破坏细胞正常代谢,酶活性显著下降^[19]。芦苇(*Phragmites communis*)的化感物质导致蛋白核小球藻和铜绿微囊藻的 SOD、POD 活性降低,对 2 种藻的生长存在很强的抑制作用^[20]。

1.5 影响藻细胞基因表达

目前,化感物质对藻细胞基因表达影响的研究较少。从已有研究来看,化感物质主要是通过诱导藻细胞内的某些基因表达上调,阻止 DNA 的翻译和转录,抑制有丝分裂等几个方面影响藻细胞基因表达^[15]。Shao 等^[21]研究化感物质邻苯三酚对铜绿微囊藻 prx、mcyB、psbA、recA、grpE 和 fabZ 基因的表达图谱,结果显示 grpE 和 recA 无显著变化;mcyB 和 psbA 上调 4

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 在邻苯三酚浓度低于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, *grpE* 和 *fabZ* 基因表达上调,且具有显著性影响。

2 植物化感物质研究

2.1 水生植物化感作用

挺水植物的根、根茎生长在水的底泥之中,茎、叶挺出水面,因此挺水植物对藻类的化感作用主要是通过根部释放化感物质来实现。具有化感抑藻作用的挺水植物有很多,如石菖蒲(*Acorus tatarinowii*)、芦苇、芦竹(*Arundo donax*)、马蹄莲(*Zantedeschia aethiopica* Spreng)、宽叶菖蒲(*Typha latifolia*)、鸢尾(*Iris tectorum*)等。石菖蒲根系可向水体分泌化感物质抑制藻类生长^[22]。蒲黄经乙酸乙酯提取后分离出棕榈酸和胆固醇油酸酯对斜生栅藻(*Scenedesmus arcuatus*)和小球藻均呈现较好的抑藻活性^[23]。芦竹乙酸乙酯提取物、芦苇化感物质 2-甲基乙酰乙酸乙酯(EMA)对铜绿微囊藻具有显著的抑制效果^[24-25]。

浮水植物是漂浮于水中生长或根固定在水底、叶浮在水面的水生高等植物。凤眼莲、浮萍(*Lemnaminor*)、紫萍(*Spirodela polyrrhiza*)、满江红(*Azolla imbricata*)、槐叶萍(*Salvinia natans*)、水花生(*Alternanthera philoxides*)等均具有一定化感抑藻作用。凤眼莲种植水抽滤液及不同部位的提取液均能对铜绿微囊藻产生一定的化感抑制作用,并降低稳定期的铜绿微囊藻产量^[26]。俞子文等^[27]研究了水花生、凤眼莲、满江红、紫萍、浮萍和西洋菜对雷氏衣藻(*Chlamydomonas reinhardtii*)的抑制作用,并与凤眼莲的作用进行了比较。结果显示前 5 种水生植物对雷氏衣藻表现了抑制作用,但不如凤眼莲强。西洋菜没有抑制作用,甚至稍有促进效应。从水花生、水浮莲、凤眼莲的种植水中得到的分泌物粗提物,都对雷氏衣藻具抑制效应。

沉水植物整株生活在水下,茎、叶直接受到藻类等浮游生物的伤害,通过茎、叶直接释放化感物质能有效抑制藻类的生长。金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、苦草(*Vallisneria spiralis*)、黑藻(*Hydrilla verticillata*)、水剑叶(*Stratiotes aloides*)、马来眼子菜(*Potamogeton malaianus*)等沉水植物均具有较强的化感作用。但是 Sabine 等^[28]发现金鱼藻、水剑叶、穗花狐尾藻等抑藻活性较伊乐藻(*Elodea canadensis*)、轮叶狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*)等要高。穗花狐尾藻释放的壬酸、顺式-6-十八碳烯酸、顺式-9-十八碳烯酸等脂肪酸类物质能显著地抑制铜绿微囊藻^[29]。马来眼子菜、黑藻和苦草水培液的乙酸乙酯提取浓缩液经气

质联用色谱(GC-MS)检测得出,马来眼子菜的亚麻酸、对羟基苯甲酸、对羟基苯丙烯酸、反式阿魏酸和半日花烷型二萜化合物,黑藻的顺乌头酸和顺阿魏酸,苦草的 2-甲基乙酰乙酸乙酯具有抑藻活性^[30]。水剑叶等释放化感物质抑制谷皮菱形藻(*Nitzschia palea*)、细长聚球藻(*Synechococcus elongatus*)、斜生栅藻的生长^[31-32]。黑藻养殖水乙醚提取物经 GC-MS 分析含有邻苯二甲酸二异辛酯、邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸丁酯 2-甲基丙酯等物质,具体是哪一种物质抑制能力最强或是以什么比例组合才能达到最佳的抑藻效应需要进一步的研究^[33]。Waridel 等^[34]对篦齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)的二氯甲烷提取物经分析得到半月花烷二萜,其具有明显的抑藻效应。Alamsjah 等^[35]研究了 37 种大型海藻甲醇提取物和水溶液提取物对藻类的抑制作用,发现肠浒苔提取物对赤潮异弯藻(*Heterosigma akashiwo*)和鞭毛藻(*dinoflagellate*)都具有较强的抑制效应。

2.2 陆生植物化感作用

陆生植物生物量大,次生代谢物质更加丰富,有望成为抑藻领域的研究热点。草本植物中已有利用大麦秸秆控制藻类生长的报道^[36],其能使水库中蓝藻和一般浮游植物的活性显著降低^[37]。胡晓佳等^[38]利用 2 种不同的有机溶剂(水、乙酸乙酯)及水蒸气蒸馏法(挥发油成分)提取加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis* L.)的抑藻活性物质,结果表明 3 种提取物对铜绿微囊藻均具有较强的抑制作用。利用中草药抑制藻类的研究也有少量报道^[39-40]。张树林^[41]通过测定 40 种中草药对铜绿微囊藻液的影响,结果表明,黄连对铜绿微囊藻生长的抑制效果最好,其次是乌梅和槟榔、秦皮、生地榆、百部和青蒿。Xiao 等^[42]发现青稞浸提液能抑制铜绿微囊藻的生长。

董昆明等^[43]将广玉兰(*Magnolia grandiflora*)叶片提取物对铜绿微囊藻的抑藻活性物质进行分离纯化和结构鉴定,结果发现,正丁醇提取物中含有大量的抑藻活性物质,主要为小分子的醇类、酮类和酯类。柳树(*Salix babylonica*)叶能够释放抑藻活性物质影响四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)的生长^[44]。杨维东等^[45]研究托里桉(*Eucalyptus torelliana*)木粉、尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)、窿缘桉(*Eucalyptus exserta*)对塔玛亚历山大藻抑制作用,结果表明,托里桉木粉的抑藻作用最强,同时发现丙酮、水粗提物的抑藻活性最高,经 GC-MS 分析得知酮类可能是托里桉木粉能有效抑制藻类生长的重要化感物质。

3 植物抑藻前景及展望

植物化感抑藻因经济有效、生态安全、简单易行等特点在国内外受到广泛的关注,为控制有害藻类提供了新思路,并已取得了一定研究成果。(1)植物抑藻取材来源已逐渐多样化,涵盖水生及陆生植物,利用陆生植物体内代谢物的化感作用抑制藻类大量生长具有良好的研究价值及应用前景;(2)抑藻对象也多元化,从有害单胞藻到多胞藻。

但在实际应用中仍存在问题有待解决:(1)目前大多抑藻实验是在实验室内完成的,存在局限性。实际水体中生物种类繁多,研究植物化感物质对其他水生生物的影响,才能全面了解化感物质的生态安全性;(2)化感物质在水体中抑藻作用持续时间的长短直接关系到其在藻类控制领域的应用^[46],因此,植物化感物质在环境中的降解特性需要深入研究;(3)植物抑藻机理研究还处于细胞水平,应深入分子和基因水平的研究,进一步透彻研究抑藻机理;(4)利用陆生植物来源广、生物量大等优势,进一步拓宽植物抑藻领域,研究陆生植物的化感抑藻作用及机理。

参考文献:

- [1] 李锋民,胡洪营,门玉洁,等. 化感物质对小球藻抗氧化体系酶活性的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(10): 2091–2094.
- [2] Mulderij. Chemical warfare in freshwater—allelopathic effects of macrophytes on phytoplankton[D]. The Netherlands: Netherlands Institute of Ecology, 2006.
- [3] 朱 擎,冯 菁,吴为中. 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.
- [4] 杨维东,欧阳好婧,刘洁生. 玉米秸秆对塔玛亚历山大藻生长的影响及化学基础研究[J]. 环境科学, 2008, 29(9): 2470–2474.
- [5] 郭 峰,张 恒,陈 旭. 绿茶浸出液对衣藻的抑制作用[J]. 同济大学学报, 2001, 22(5): 73–74.
- [6] 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, 28(6): 2595–2603.
- [7] 汪 丽,王国祥,唐晓燕,等. 荇菜(*Nymphoides peltatum*)对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)生长的抑制效应及其机制[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(3): 257–263.
- [8] Zhu J Y, Liu B Y, Wang J, et al. Study on the mechanism of allelopathic influence on cyanobacteria and chlorophytes by submerged macrophyte (*Myriophyllum spicatum*) and its secretion[J]. *Aquatic Toxicology*, 2010, 98(2): 196–203.
- [9] 倪利晓,陈世金,任高翔,等. 陆生植物化感作用的抑藻研究进展[J]. 生态环境学报, 2011, 20(6–7): 1176–1182.
- [10] 张庭廷,何 梅,吴安平,等. 对羟基苯甲酸对铜绿微囊藻的化感效应以及对鲤鱼的毒性作用[J]. 环境科学学报, 2008, 28(9): 1887–1893.
- [11] 花 铭,陈良燕,尹大强. 邻苯三酚和咖啡酸对铜绿微囊藻的化感作用及其机理[J]. 环境化学, 2008, 27(3): 331–334.
- [12] 李锋民,胡洪营,种云霄,等. 芦苇化感物质对藻类细胞膜选择性的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(11): 2453–2456.
- [13] 刘洁生,陈芝兰,杨维东,等. 凤眼莲根系丙酮提取物抑制赤潮藻类生长的机制研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(5): 815–820.
- [14] 张 彬,郭劲松,方 芳,等. 植物化感抑藻的作用机理[J]. 生态学杂志, 2010, 29(9): 1846–1851.
- [15] 夏钰妹. 大型绿藻浒苔对赤潮藻的抑制作用及其机理研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2012: 22–23.
- [16] Sun X X, Choi J K, Kim E K. A preliminary study on the mechanism of harmful algal bloom mitigation by use of sophorolipid treatment [J]. *Journal of Experimental Marine Biology Ecology*, 2004, 304(1): 35–49.
- [17] 王立新,张 玲,张余霞,等. 黑藻(*Hydrilla verticillata*)养殖水对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)的抑制效应及其机制[J]. 植物生理与分子生物学报, 2006, 32(6): 672–678.
- [18] Qian H F, Xu X Y, Fu Z W. Allelochemical stress causes oxidative damage and inhibition of photo synthesis in *Chlorella vulgaris* [J]. *Chemosphere*, 2009, 75(3): 368–375.
- [19] 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.
- [20] Li F M, Hu H Y. Isolation and characterization of a novel antialgal allelochemical from *Phragmites communis* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 71(11): 6545–6553.
- [21] Shao J H, Wu Z X, Yu G L, et al. Allelopathic mechanism of pyrogallol to *Microcystis aeruginosa* PCC7806 (*Cyanobacteria*): from views of gene expression and antioxidant system [J]. *Chemosphere*, 2009, 75(7): 924–927.
- [22] 何池全,叶居新. 石菖蒲(*Acorus tatarinowii*)克藻效应的研究[J]. 生态学报, 1999, 19(5): 754–758.
- [23] 戴树桂,赵 凡,金朝晖,等. 香蒲植物提取物的抑藻作用及其分离鉴定[J]. 环境化学, 1997, 16(3): 268–271.
- [24] 洪 喻,胡洪营,黄晶晶,等. 芦竹抑藻物质的初步分离及抑制铜绿微囊藻的效果[J]. 环境化学, 2008, 27(6): 751–755.
- [25] 门玉洁,胡洪营. 芦苇化感物质 EMA 对铜绿微囊藻生长及藻毒素产生和释放的影响[J]. 环境化学, 2007, 28(9): 2058–2063.
- [26] 胡廷尖,王雨辰,陈丰刚,等. 凤眼莲对铜绿微囊藻的化感抑制作

- 用研究[J]. 水生生态学杂志, 2010, 3(6): 47–51.
- [27] 俞子文, 孙文浩, 郭克勤, 等. 几种高等水生植物的克藻效应[J]. 水生生物学报, 1992, 16(1): 1–7.
- [28] Sabine H, Gross E M. Can allelopathically active submerged macrophytes stabilize clear water states in shallow lakes? [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2008, 9: 422–432.
- [29] Nakai S, Yamada S, Hosomi M. Anti-cyanobacterial fatty acids released from *Myriophyllum spicatum* [J]. *Hydrobiologia*, 2005, 543(1): 71–78.
- [30] 黄新颖, 种云霄, 汤仲恩, 等. 3 种沉水植物水培液中抑藻活性物质的分析[J]. 华南农业大学学报, 2010, 31(3): 19–23.
- [31] Mulderij G, Mooij W M, Smolders A J P, et al. Allelopathic inhibition of phytoplankton by exudates from *Stratiotes aloides* [J]. *Aquatic Botany*, 2005, 82(4): 284–296.
- [32] Mulderij G, Mooij W M, Van Donk E. Allelopathic growth inhibition and colony formation of the green alga *Scenedesmus obliquus* by the aquatic macrophyte *Stratiotes aloides* [J]. *Aquat Ecology*, 2005, 39: 11–21.
- [33] 王立新, 张玲, 张余霞, 等. 黑藻(*Hydrilla verticillata*)养殖水对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)的抑制效应及其机制[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2006, 32(6): 672–678.
- [34] Waridel P, Wolfender J L, Lachavanne J B, et al. Ent-labdane diterpenes from the aquatic plant *Potamogeton pectinatus* [J]. *Phytochemistry*, 2003, 64(7): 1309–1317.
- [35] Alamsjah M A, Hirao S, Ishibashi F, et al. Isolation and structure determination of algicidal compounds from *Ulva fasciata* [J]. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 2005, 69(11): 2186–2192.
- [36] Murray D, Jefferson B, Jarvis P, et al. Inhibition of three algae species using chemicals released from barley straw [J]. *Environmental Technology*, 2010, 31(4): 455–466.
- [37] Everall N C, Lees D R. The identification and significance of chemicals released from decomposing barley straw during reservoir algal control [J]. *Water Resource*, 1997, 31(3): 614–620.
- [38] 胡晓佳, 魏月姑, 孙小红, 等. 加拿大一枝黄花提取物对铜绿微囊藻的抑制作用[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(1): 55–58.
- [39] Kim J S, Kim J C, Lee S, et al. Biological activity of L-2-azetidinecarboxylic acid, isolated from *Polygonatum odoratum* var. pluriflorum against several algae [J]. *Aquatic Botany*, 2006, 85(1): 1–6.
- [40] 张薛, 胡洪营. 桔皮水提液对铜绿微囊藻生长的抑制效果研究[J]. 环境科学研究, 2008, 21(5): 43–48.
- [41] 张树林. 中草药对铜绿微囊藻的抑制作用及机理研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010: 19–29.
- [42] Xiao X, Chen Y X. Effects of Tibetan hulless barley on bloom-forming cyanobacterium (*Microcystis aeruginosa*) measured by different physiological and morphologic parameters [J]. *Chemosphere*, 2010, 81(9): 1118–1123.
- [43] 董昆明, 周晓见, 靳翠丽, 等. 广玉兰叶片化感物质的抑藻活性及 GC-MS 分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(29): 18128–18130, 18134.
- [44] 郭沛涌, 李庆华, 苏东娇, 等. 柳树叶浸提液对四尾栅藻生长特性及光合效率的影响[J]. 激光生物学报, 2011, 20(4): 455–461.
- [45] 杨维东, 刘玉荣, 刘洁生, 等. 桉木粉对塔玛亚历山大藻(*Alexandrium tamarense*)的抑制作用及其化学基础研究[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2296–2301.
- [46] 邹华, 邓继选, 朱银. 植物化感作用在控制水华藻类中的应用[J]. 食品与生物技术学报, 2012, 31(2): 134–140.