

挺水植物化感作用抑制藻类生长的机理与应用

边归国¹, 郑洪萍²

(1. 福建省环境保护厅, 福建 福州 350003; 2. 福建省环境监测中心站, 福建 福州 350003)

摘要: 根据国内外挺水植物化感作用抑制藻类的研究, 对菖蒲等 15 科 20 种挺水植物化感抑制水华鱼腥藻等 18 种水华藻类的作用予以评述; 归纳了挺水植物化感作用在影响藻细胞亚显微结构、酶体系活性、呼吸作用、光合作用、细胞膜和细胞内小分子物质的含量等 6 方面的抑制藻类生长的机理; 对移植栽种植物共培养、从植物中提取化感物质和直接施加化感物质等 3 种类型抑制藻类的应用方式进行概述; 结合当前中国水华频发、抑藻和除藻任务繁重的现状, 指出存在的主要问题并提出今后研究和应用化感作用抑制藻类的展望。

关键词: 挺水植物; 化感作用; 水华; 抑制; 机理

中图分类号: X171.5

文献标识码: A

文章编号: 1674-6732(2013)-02-0015-05

Mechanisms and Applications of Algal Growth Inhibition by Plant Allelopathy among Aquatic Emerged Plants

BIAN Gui-guo¹, ZHENG Hong-ping²

(1. Fujian Provincial Environmental Protection Bureau, Fuzhou, Fujian 350003, China; 2. Fujian Provincial Environmental Monitoring Central Station, Fuzhou, Fujian 350003, China)

ABSTRACT: Based on the existing reports of the anti-algal allelopathy study of aquatic emerged plants, the inhibition effects of 20 species in 15 families of aquatic emerged plants, including *Acorus calamus*, on the growth of 18 species of bloom-forming microalgae, including *Anabaena flosaquae*, are reviewed. The inhibitory mechanisms for allelopathy are clustered into 6 categories, which refer to modifying the submicroscopic structure, enzyme system, respiration, photosynthesis, cell membrane and intracellular micro-molecule content, respectively. The application modes for anti-algal practice may be summarized as three types which are co-culture, allelochemical extraction and allelochemical direct exertion. Finally, combined with the frequent outbreak situation of harmful algal bloom in China and the urgent needs for effective bloom prevention approaches, the subsistent main problems in above areas are pointed out and the further study about emerged plant allelopathy and its application to algal bloom prevention are prospected.

KEY WORDS: emerged plants; allelopathy; water blooms; inhibition; mechanisms

挺水植物是湿地和构建人工湿地植被系统的主要类型植物, 具有吸收污染物和拦截、过滤污染物的作用。其对藻类的相互抑制作用是广泛存在的, 挺水植物除了能通过光、营养盐的竞争抑制藻类的生长, 同时也能分泌特异性的化感物质抑制或杀死藻类。因此, 可以在水体中栽种一些挺水植物, 利用植物分泌物与藻类间的相生相克关系去除藻类, 达到净化水质、恢复水生态系统的目的。

至今已知的 14 类化感物质中, 酚类和类萜化合物较为常见^[1]。对已报道的具有抑藻活性的水生植物的种类和数量进行分析, 发现抑藻水生植物中浮水以及沉水植物约占 68%, 而挺水植物仅占 32% 左右。虽然对挺水植物的研究相对较少, 但是

已有的研究表明, 从挺水植物中发现的化感物质均具有强烈的抑藻活性。

1 挺水植物化感抑藻机理

1.1 对细胞亚显微结构影响

李锋民等研究了芦苇化感物质 2-甲基乙酰乙酸乙酯 (EMA) 对蛋白小球藻、铜绿微囊藻和普通小球藻细胞膜磷脂脂肪酸种类、含量以及藻细胞亚

收稿日期: 2012-07-02

基金项目: 福建省环境保护厅 2011 年重点课题 [FJHK(2011) 1 号]。

作者简介: 边归国 (1952—), 男, 高级工程师, 大学, 主要从事藻类处置等研究。

显微结构的影响^[2]。结果表明,EMA对普通小球藻细胞膜磷脂脂肪酸含量没有显著影响,对普通小球藻细胞亚显微结构没有显著破坏。投加化感组分EMA后斜生栅藻细胞边缘变得不规则,细胞核消失,线粒体等细胞器解体,淀粉粒体积增大,数量增多,细胞结构出现显著的紊乱现象^[3]。美人蕉根区水培养小球藻试验发现,藻液后期有部分卵形衣藻蛋白核颜色变浅,细胞器逐渐溶解。有时还看到3~4个卵形衣藻结合在一起,形成胶群体^[4]。不同溶剂芦竹提取物对铜绿微囊藻细胞形态的影响差异显著。甲醇提取物组藻细胞出现明显的空洞,细胞色素减退;乙酸乙酯提取物组藻细胞出现明显的空洞,细胞色素减退,部分细胞发生严重的破碎现象;正己烷提取物组藻细胞形态出现褶皱,细胞内含物(如色素)或细胞壁膜结构分布不均匀。随着培养时间的延长,甲醇提取物组空洞现象更加明显;乙酸乙酯提取物组细胞除产生空洞、出现破碎现象外,部分细胞出现聚集抱团现象;而正己烷提取物组大部分细胞聚集抱团。培养后期,所有实验组藻细胞细胞色素均明显减退^[5]。

1.2 对酶体系活性的影响

李锋民等研究了抑藻化感物质EMA对蛋白核小球藻和普通小球藻抗氧化酶体系活性的影响^[6]。结果显示,化感物质浓度为0.25 mg/L,2种藻类的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性都高于对照组。但随着化感物质浓度的升高,蛋白核小球藻3种酶活性都逐渐下降,当化感物质浓度为4 mg/L时,SOD活性为0;而普通小球藻的酶活性随着化感物质浓度升高持续升高,都达到对照组的3~4倍。经20~50 g/L水芹水浸提液处理,小球藻藻细胞的SOD、POD活性,细胞氧自由基($O_2^{\cdot-}$)产生速率及丙二醛(MDA)含量均呈先升高后降低的趋势,并且有浓度效应^[7]。低浓度(<1.00 mg/L)的EMA对铜绿微囊藻的SOD活性都有促进作用,其酶活性比对照组升高了约50%。当EMA浓度>1.00 mg/L,随着EMA浓度的增加,铜绿微囊藻的SOD活性逐渐降低,浓度为4.00 mg/L时,SOD活性仅为对照组的60%。高浓度EMA使铜绿微囊藻的抗氧化体系酶SOD、POD和CAT活性降低^[8]。张维昊等实验结果表明,铜绿微囊藻在菖蒲释放的化感物质作用下,蛋白质合成发生了变化;而有关SOD、CAT、MDA抗氧化系统酶活性的提高,表明在

化感物质的胁迫下,微囊藻细胞内产生了过量的对细胞有伤害作用的活性氧^[9]。荷花和睡莲种植物对铜绿微囊藻的MDA的含量和SOD活性呈先升后降的变化趋势,升高是由于藻细胞脂膜过氧化程度加深,使细胞膜受到伤害,到实验的第7 d开始,MDA的含量显著下降,此时藻细胞膜结构受到严重损伤,藻细胞已经开始破裂。芦竹化感物质可损伤铜绿微囊藻细胞内超氧化物歧化酶,使超氧阴离子等自由基堆积,活性氧自由基水平显著提高,实验期间过氧化氢酶出现初期增强后减少的现象,短暂的应激反映了藻细胞试图抵御氧化胁迫^[10]。

1.3 对呼吸作用的影响

李锋民等研究了芦苇产生的化感物质EMA对铜绿微囊藻呼吸作用^[8]。结果表明,在实验条件下,EMA能提高铜绿微囊藻的呼吸速率,使培养瓶中的CO₂浓度升高;加入0.25和1.00 mg/L的EMA后,CO₂浓度分别升高了156%和162%,远高于对照组的上升幅度,说明在此浓度下,EMA促进了铜绿微囊藻的呼吸作用,增加了CO₂释放量。但当EMA浓度为4.00 mg/L时,CO₂浓度低于EMA浓度为0.25,1.00 mg/L时的瓶中的浓度。菖蒲化感物质 α -细辛醚可降低羊角月牙藻生长速率,电子显微镜观察发现细胞内线粒体数目增多,推测细胞呼吸作用可能受到影响,测定结果也发现培养48 h后呼吸速率仅为对照组的60%^[11]。

1.4 对光合作用的影响

芦苇产生的化感物质EMA降低铜绿微囊藻的光合作用速率,促进了铜绿微囊藻叶绿素a的降解,使其含量降低。铜绿微囊藻的光合作用受到EMA的抑制。对照组的光合作用速率为0.494 1 $\mu\text{mol O}_2/(\text{10}^9 \text{ cell} \cdot \text{h})$,加入EMA后,微囊藻的光合作用速率均低于对照组。当EMA为4.00 mg/L时,铜绿微囊藻的光合速率仅为0.239 1 $\mu\text{mol O}_2/(\text{10}^9 \text{ cell} \cdot \text{h})$,为对照组的48%。说明加入EMA后铜绿微囊藻的光合速率显著下降,光合作用受到抑制,高浓度EMA促进藻类叶绿素的降解可能是其抑藻机理之一。用培养石菖蒲的水培养藻类,可破坏藻类的叶绿素a,使其光合速率、细胞还原TTC的能力显著下降,在荧光显微镜下可看到藻细胞从鲜红色变为淡蓝色^[12]。但是,化感物质通过什么途径降低藻类的叶绿素a以及如何破坏藻类的光合系统,有待于进一步研究。

1.5 对细胞膜的影响

细胞膜具有选择透过性,如果细胞膜结构发生改变,细胞膜的选择透过性则会被破坏。投加芦苇化感物质 EMA 的实验组中,羊角月牙藻细胞出现了形态变大、内部结构紊乱的现象。其可能的原因是化感组分改变了膜透性,造成细胞内含物外泄,由此引发细胞溶胀。李锋民等研究了芦苇产生的化感物质 EMA 对铜绿微囊藻、蛋白核小球藻和普通小球藻细胞膜选择透过性产生的影响^[13]。结果表明,在实验条件下,铜绿微囊藻和蛋白核小球藻细胞经煮沸完全破坏细胞膜时 K^+ 渗出量为 1.45 和 1.59 $\mu\text{g}/10^9\text{cell}$,当 EMA 浓度为 2 mg/L 时,铜绿微囊藻和蛋白核小球藻的 K^+ 渗出量为 1.38 和 1.40 $\mu\text{g}/10^9\text{cell}$,当 EMA 浓度为 4 mg/L 时,铜绿微囊藻和蛋白核小球藻的 K^+ 渗出量为 1.44 和 1.58 $\mu\text{g}/10^9\text{cell}$,离子渗出量达到完全破坏细胞膜最大渗出量的 95% 以上。EMA 浓度为 4 mg/L 时,普通小球藻细胞内 K^+ 渗出量为 0.64 $\mu\text{g}/10^9\text{cell}$,仅为完全破坏细胞膜后 K^+ 渗出量的 31.5%。EMA 对 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 的渗出量的影响规律与 K^+ 相同。EMA 破坏了铜绿微囊藻和蛋白核小球藻的细胞膜,但对普通小球藻的细胞膜透性没有显著影响,这是 EMA 选择性抑藻的机理之一。

1.6 影响藻细胞内小分子物质的含量

研究发现,芦苇化感物质 EMA 可破坏藻细胞内抗坏血酸-谷胱甘肽循环,抗坏血酸和还原型谷胱甘肽含量应激增加后开始降低,清除自由基的能力降低。同时发现活性氧自由基的水平显著升高。EMA 使藻细胞氧化还原水平紊乱,细胞膜脂质过氧化产物丙二醛大量积累,细胞膜完整性受损^[14,15]。芦竹化感物质作用于铜绿微囊藻细胞的过程中,细胞小分子物质的变化也具有类似的规律^[10]。

2 挺水植物化感抑藻应用方法

目前,利用植物化感作用抑制藻类的方式主要有移植栽种植物共培养、投放干燥物质、从植物中提取化感物质和人工合成化感物质等 4 种类型。

2.1 移植栽种植物共培养

2.1.1 单一植物种植水共培养

丁惠君等将有机玻璃缸在长 1/3 处分成两部分,中间开一直径为 9 cm 的圆孔,装上 0.45 μm 的微孔滤膜,大厢种植菖蒲,小厢培养藻类^[16]。分别把含水华鱼腥藻和小球藻的藻液加入菖蒲种植水

中,在 4~5 d 对水华鱼腥藻抑制率达 100%,5~9 d 对小球藻抑制率达 91.2%。张维昊等采用同样方法,移植菖蒲的微囊藻培养液,开始 1~4 d 内光密度增加,并在第 4 d 达到最大^[9]。第 4 d 后藻体开始发黄,并逐渐下沉,培养液的光密度也急剧下降,直至第 8 d 水体基本透明。项俊等利用菖蒲和香蒲种植水培养铜绿微囊藻和鱼腥藻^[17]。研究表明,菖蒲对铜绿微囊藻生长表现为明显的抑制作用,香蒲则表现出促进作用;两种植物对鱼腥藻都表现为较强的抑制作用,但抑制作用大小与藻类培养液中种植水添加浓度密切相关。丁惠君等发现,菖蒲和鸢尾的铜绿微囊藻抑制效果较明显,在培养 3 d 后藻细胞的数量就开始下降,呈现出抑藻效应,培养第 7 d 时,藻细胞接近消亡,抑藻率分别为 93.1% 和 79.6%^[18]。而美人蕉的抑藻效果较差,藻类一直处于生长状态,7 d 后的抑藻率为 45.3%。从培养过石菖蒲的玻璃缸中取水,经 0.45 μm 的微孔滤膜过滤,加适量营养液后接藻种。荧光显微镜下观察到处理组的藻细胞呈淡蓝绿色,表明接近或已经死亡,说明培养过石菖蒲的水中含有某些化合物,可对藻类起抑制作用^[19]。结果表明,不同浓度的荷花种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用不尽相同,表现为明显的低促高抑现象;而连续滴加荷花种植水对铜绿微囊藻的生长也有较明显的抑制作用。灭菌方法对种植水的抑藻试验也有影响,不能采用高温灭菌来代替微膜过滤,说明荷花分泌物中含有热不稳定性的物质^[20]。刘文生等研究了美人蕉种植根区水对小球藻和卵形衣藻的影响,结果显示根区水在 6 d 对小球藻的化感效应为 -0.733 1,对卵形衣藻则为 -0.440 8^[4]。

2.1.2 单一植物共培养

何池全等将培养 32 种藻类的玻璃缸一半水面种植石菖蒲,另一半为敞开水面,二者之间用一层塑料窗纱阻隔^[19]。2~3 d 后处理组藻细胞数量开始下降,在 8 d 内从 0.1 降至 0.01,敞开区和覆盖区的培养液同样变清。在荧光显微镜下可看到藻细胞从鲜红色变为淡蓝色,表明石菖蒲对藻类有显著的抑制效果,可用于治理富营养化水体中的藻类繁殖;通过根系分泌物的提取实验,显示该分泌物对同一受体产生浓度效应。张庭廷等将水花生、茭白分别与蛋白核小球藻、斜生栅藻共培养时,抑藻效果与其相应根的浸提水和种植水相比也有所增强 ($P < 0.05$),表明在植物的生长过程中其化感

物质是连续释放且能迅速降解的^[20]。

2.1.3 混合移植栽种植物共培养

田如男研究了4种植物群落(群落A:梭鱼草、黄菖蒲、水罨粟;群落B:梭鱼草、溪荪、黄菖蒲;群落C:梭鱼草、溪荪、大藻;群落D:白花水龙、大藻、水罨粟)对铜绿微囊藻生长的化感作用^[21]。研究表明,4种植物群落种植水对铜绿微囊藻均具有较强的抑制作用^[21],且随着群落种植时间的延长,种植水对铜绿微囊藻的抑制作用越强。4个植物群落对铜绿微囊藻生长的抑制作用由大到小依次是:群落A,群落B,群落C,群落D。

2.2 从植物中提取化感物质

2.2.1 水浸提

将芦苇、宽叶香蒲、水葱、莲、茨菰等干燥后粉碎,用藻类培养基(1:5)浸泡48 h,减压抽滤,不同部位的浸出液对蛋白核小球藻都有一定的抑制作用,其中芦苇的抑制作用最强,在一定浓度下抑制率接近100%。在芦苇的各个部位中,叶片对蛋白核小球藻的抑制作用最强^[22]。张庭廷等分别取水花生根、水花生茎叶、茭白根、茭白茎叶,洗净泥沙,用蒸馏水淋洗后,剪成小段,放入烧杯中用蒸馏水将其完全浸泡,在4℃下放置96 h后,先用定性滤纸过滤出浸提液,再将其用0.45 μm微孔滤膜过滤,除去微生物^[20]。总体对蛋白核小球藻、斜生栅藻抑藻作用顺序为:水花生根>茭白根>水花生茎叶>茭白茎叶^[20]。这反映出不同的水生植物对藻类生长的抑制能力不同,而植物的不同部位抑藻作用也有所区别。郭欢将芦苇粉碎、烘干、取粉末,去离子水浸泡,用滤纸过滤;滤液烘干,滤渣继续浸泡,如此循环得到烘干的活性物质^[23]。提取的活性物质对铜绿微囊藻有明显的抑制作用,且活性物质浓度越高,对铜绿微囊藻的抑制效果越好。宰学明等将水芹植株洗净、烘干、粉碎研磨,再加超纯水提取72 h,制备水芹水浸提液,试验前滤膜过滤消除微生物的影响^[7]。采用小球藻在不同浓度的水芹水浸提液中纯培养的方法,测定小球藻生长速率、SOD和POD活性、O₂⁻产生速率及MDA含量的变化。

2.2.2 有机萃取

何池全等取石菖蒲培养水,加等体积经纯化的乙醚提取石菖蒲根系分泌物两次,水浴中蒸发溶剂,再用无水乙醚定容,将提取物挥发后滴加衣藻

液^[19]。结果表明,石菖蒲根系分泌物在较低浓度下抑制率为负值即表现为促进作用;在较高浓度下抑制率为正值,表现出抑制作用。将香蒲冲洗干净后晾干、粉碎,在暗室中将粉末用石油醚(60~90℃)室温下浸提48 h。萃取所得挥发油用无水Na₂SO₄干燥后,进行干燥、旋蒸。经生物检测和相关计算可知,当挥发油总质量浓度为53.0 mg/L时,其对铜绿微囊藻的生长抑制速率为40.7%^[24]。洪喻等比较了3种极性不同的有机溶剂(甲醇、乙酸乙酯、正己烷)提取的芦竹化感物质对铜绿微囊藻生长的影响^[5]。发现3种溶剂提取物对铜绿微囊藻均有抑制作用,抑藻作用出现早晚次序为:甲醇提取物,乙酸乙酯提取物,正己烷提取物。各溶剂提取物的半效应质量浓度(EC₅₀)分别为甲醇提取物0.17 g/L,乙酸乙酯提取物0.05 g/L,正己烷提取物0.08 g/L。俞子文等在种植水抑藻试验的基础上,取水花生种植水加等体积经纯化的乙醚提取分泌物两次,进行根系分泌物提取,提取物在较高浓度下,也出现显著的抑藻作用^[25]。

2.3 直接施加化感物质

李锋民等将预培养4 d的蛋白核小球藻藻种和化感物质EMA溶液加入锥形瓶进行抗氧化体系酶活性实验^[6]。并研究了EMA对蛋白核小球藻、铜绿微囊藻和普通小球藻细胞膜磷脂脂肪酸种类、含量以及藻细胞亚显微结构的影响^[2]。门玉洁等研究了EMA对铜绿微囊藻生长及藻毒素产生和释放的影响,对斜生栅藻、羊角月牙藻和雷氏衣藻生长特性的影响^[3]。周律等对EMA和大麦秸浸出液两种化感物质以及十六烷基溴化铵和异噻唑啉酮等4种药剂对不同生长期的铜绿微囊藻进行了对比抑制试验,结果显示在铜绿微囊藻生长的迟缓期投加4种药剂,都有很好的抑藻效果;在铜绿微囊藻生长的对数期投加化感物质,虽然有一定的抑藻率,但效果较差^[26]。

3 展望

挺水植物化感抑制水华藻类生长研究目前还处于实验阶段,实际水体水情复杂,特别是季节性河流和水较深的湖泊、水库,挺水植物的栽培有一定的制约性。应根据实际情况,在水域中栽培浮水、沉水、挺水等植物,在堤岸、护坡栽种有化感抑藻作用的陆生、湿生和沼生植物,构建立体的化感抑藻体系。

挺水植物种类繁多,至今所利用的化感抑藻挺水植物十分有限,仅20余种。筛选和培育新型化感抑藻挺水植物,尤其是适合于当地生长的挺水植物还需广泛进行研究。

截至目前,挺水植物分泌的次生代谢化感物质的分离、提取、合成还仅限于少数植物体中的十几种,其提取率、理化性能以及对生物的毒理性能的研究还比较薄弱。因此,人工合成高效低毒、价格低廉、可以控制大范围使用的新型化感物质已成为当务之急。

植物化感作用抑藻机理的研究目前还处于探索阶段,“低促高抑”只是一种表面现象,不能以此作为化感的唯一依据,应结合其他抑藻机理综合判定是否是化感作用抑制藻类。另外在化感物质的降解特性、对产毒水华藻毒素产生和释放的影响、对其他水生生物的影响等方面还应深入研究。

[参考文献]

- [1] RICE E L. Allelopathy [M]. New York: Academic Press, 1974.
- [2] 李锋民,胡洪营,种云霄. 2-甲基乙酰乙酸酯对藻细胞膜和亚显微结构的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(7): 1534-1538.
- [3] 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, 15(5): 925-929.
- [4] 刘文生,潘秋林. 美人蕉种植根区水对藻类生长的影响[J]. 淡水渔业, 2007, 37(1): 24-28.
- [5] 洪喻,胡洪营,黄晶晶. 不同溶剂提取芦竹化感物质对铜绿微囊藻生长的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(11): 3143-3147.
- [6] 李锋民,胡洪营,门玉洁. 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.
- [7] 宰学明,钦佩,袁亚光. 水芹水浸提液对小球藻生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(19): 11433-11435.
- [8] 李锋民,胡洪营,种云霄. 芦苇化感物质 EMA 对铜绿微囊藻生理特性的影响[J]. 中国环境科学, 2007, 28(3): 377-381.
- [9] 张维昊,周连凤,吴小刚. 菖蒲对铜绿微囊藻的化感作用[J]. 中国环境科学, 2006, 26(3): 355-358.
- [10] HONG Y, HU H Y, XIE X. Gramine-induced growth inhibition, oxidative damage and antioxidant response in freshwater cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* [J]. Aquatic Toxicology, 2008(11).
- [11] 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.
- [12] 叶居新,何池全,陈少凤. 石菖蒲的克藻效应[J]. 植物生态学报, 1999, 23(4): 379-384.
- [13] 李锋民,胡洪营,种云霄. 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.
- [14] HONG Y, HU H Y, XIE X. The responses of enzymatic antioxidants and non-enzymatic antioxidants in cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* to allelochemical ethyl 2-methyl acetoacetate (EMA) isolated from reed (*Phragmites communis*) [J]. Journal of Plant Physiology, 2008, 165(12): 1264-1273.
- [15] HONG Y, HU H Y, LI F M. Physiological and biochemical effects of allelochemical ethyl 2-methyl acetoacetate (EMA) on cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* [J]. Elsevier Science Ecotoxicology and Environmental Safety, 2008, 71(2): 527-534.
- [16] 丁惠君,张维昊,王超. 菖蒲对几种常见藻类的化感作用研究[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(6): 20-22.
- [17] 项俊,栗茂腾,吴耿. 黄淮海湿地系统典型挺水植物对水华藻类的化感效应[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 506-510.
- [18] 丁惠君,彭祺,张维昊. 三种湿生植物对微囊藻的化感作用初步分析[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(4): 7-10.
- [19] 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.
- [20] 李磊,侯文华. 荷花和睡莲种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究[J]. 环境科学, 2007, 28(10): 2180-2186.
- [20] 张庭廷,陈传平,何梅. 几种高等水生植物的克藻效应研究[J]. 生物学杂志, 2007, 24(4): 32-36.
- [21] 田如男,孙欣欣,魏勇. 不同类型水生植物群落对铜绿微囊藻的化感作用[J]. 生态环境学报, 2010, 19(9): 2149-2154.
- [22] 李锋民,胡洪营. 大型水生植物浸出液对藻类的化感抑制作用[J]. 中国给水排水, 2004, 20(11): 18-21.
- [23] 郭欢. 芦苇中活性物质对有毒藻类抑制作用的研究[J]. 现代农业科技, 2009, (9): 234-235.
- [24] 王红强,刘建华,张列宇. 香蒲中挥发油对铜绿微囊藻的化感抑制作用[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(7): 19-2126.
- [25] 俞子文,孙文浩,郭克勤. 几种高等水生植物的克藻效应[J]. 水生生态学报, 1992, 16(1): 1-7.
- [26] 周律,邢丽贞,段艳萍. 药剂抑制铜绿微囊藻生长的试验研究[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(5): 14-16.

致谢:对厦门大学海洋与环境学院黄凌风教授的帮助表示感谢!

(本栏目编辑 周立平)