

化感物质的抑藻作用研究、应用及生态安全性评价

王红强^{1,2}, 吴振斌^{2*}

1. 河南城建学院环境与市政工程系, 河南 平顶山 467044;

2. 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430072

摘要: 水体富营养化日益严重, 水华频繁爆发, 如何有效控制水华, 治理富营养化水体是目前水环境领域的研究热点和前沿。目前湖泊藻类控制技术主要有: 物理方法、化学法、生物法, 但是这些方法都有其固有的缺点。利用植物化感作用抑制有害藻类生长具有廉价、生态安全等优点近年来备受关注。化感作用就是生物体产生的生物活性物质即化感物质在生物体之间传递信息并导致生物体相互作用。归纳了国内外不同生活型水生植物化感作用研究的主要成果(包括已报道的抑藻水生植物种类、已从水生植物体内和种植水中分离鉴定得到的化感物质), 以及化感物质的联合作用研究, 讨论了化感物质的生态安全性。通过化感作用能有效控制引起水体富营养化的各种藻类生长, 优化水生生物的组成结构。例如, 水体中投放大麦秆可以增加无脊椎动物以及鱼类的数量, 从而达到改善水生生态系统的目的。展望了植物化感作用用于水环境治理的发展前景。以期为利用植物化感作用控制水华的发生提供理论基础。

关键词: 化感物质; 联合作用; 工程实践; 生态安全性评价

中图分类号: X17

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2012) 07-1375-05

近年来, 随着经济的高速发展, 湖泊富营养化问题日益突出, 富营养化导致蓝藻水华频繁发生。在我国很多富营养化的水体中, 微囊藻能成为优势种类, 并在合适的气候条件下可全年发生, 并且铜铝微囊藻藻细胞死亡或细胞膜通透性增强时会向水中释放藻毒素, 导致生态系统失衡, 危害人体健康^[1]。如2007年太湖、巢湖和滇池都发生大面积水华, 其中, 太湖5—6月的大面积水华暴发致使无锡数十万群众的饮水安全受到了影响^[2]。因此, 如何有效控制水华, 治理富营养化水体是目前水环境领域的研究热点和前沿^[3]。

关于藻类生长控制, 国内外开展了大量的研究。利用植物化感作用抑制藻类生长被认为是一种新型的生物抑藻技术, 具有高效、生态安全性较好等特点^[4], 因而受到国内外专家学者的关注^[5-14], 不仅有一方对另一方的抑制作用^[15-18], 也有双方的互感作用^[19-21]。目前, 利用水生植物化感作用抑制藻类生长的方式主要有 3 种: (1) 将水生植物栽培至待处理水体, 利用活体植物释放的化感物质抑制藻类; (2) 将植物体干燥后投入待处理水体, 利用其腐败过程中释放的化感物质抑制藻类; (3) 将从植物中提取的化感物质施入水体抑制藻类^[22]。栽种水生植物主要适用于城市景观水体等相对水域面积较小的水体。北京奥林匹克森林公园的景观

水系中通过组合搭配种植显花水生植物(如红蓼(*Polygonum orientale* Linn.)、千屈菜(*Spiked Loosetrife*)、鸢尾(*Iris tectorum*)等)与具有较强抑藻化感作用的水生植物(如芦苇(*Phragmites communis*)、香蒲(*Typha* Linn.)、水葱(*Scirpus validus* Vahl)、菖蒲(*Acorus calamus* L.)等), 组成了具有抗击水华暴发风险的景观植物体系^[3]。但此方法依赖植物生长过程, 技术周期长, 对一些已经暴发水华的水体不适用。投放干燥植物体利用其腐败过程中释放的化感物质控制藻类的生长。但该方法不仅影响水体美观, 还必须做好投放后植物的管理工作, 避免植物投放时间过长造成二次污染。Everall 等^[23]研究发现在藻类生长开始之前投放大麦(*Hordeum vulgare* L.)秸秆抑藻效果最佳, 投放量要控制在 25 g·m⁻² 左右, 投放 1 个月内一般即可产生抑藻活性, 此时宜迅速取出植物体, 抑藻效果通常可以保持半年左右。将植物中提取的化感物质施入水体进行藻类控制, 可控性好、作用迅速、生态危害小, 是一种非常前景的方法, 结合其他资源化方法, 如造纸、发酵制沼气等还可同时解决植物提取后的剩余残渣处置问题^[3]。国内外学者从芦苇、狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum* L.)等植物体内提取分离了抑藻活性组分, 对多种蓝藻具有很好的抑制效果^[9,24], 但将植物体内提取分离的化感物质应用到富

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108447); 中国博士后特别资助基金项目(201104499); 中国博士后科学基金项目(20100471208); 淡水生态与生物技术国家重点实验室开放基金项目(2011FB03); 河南城建学院科研基金项目(2010JZD004)

作者简介: 王红强(1977年生), 男, 副教授, 博士, 主要从事水生态恢复研究。E-mail: wanghq77@yahoo.com.cn

*通信作者

收稿日期: 2012-06-06

营养化水体达到控制藻类生长还有许多研究亟待开展。目前,国内外关于化感作用的研究非常广泛,相关研究主要集中在以下几个方面。

1 化感物质的分离、鉴定及其化感作用

化感物质的产生和释放是生物在环境胁迫的选择压力下形成的,化感作用是生物在进化过程中产生的一种对环境的适应性机制,是生态系统中自然的化学调控现象^[25]。目前,关于化感物质的分离鉴定都多有报道。这些化感物质包括有机酸、多酚、类萜、生物碱等。戴树桂等^[26]从长苞香蒲(*Typha angustata*)、窄叶香蒲(*T. minima*)和宽叶香蒲(*T. latifolia*)混合物的乙酸乙酯提取物中分离、鉴定到具有较高抑藻活性的棕榈酸。LI等^[9]从芦苇中分离出并鉴定出了具有较高抑藻活性的化感物质2-甲基乙酰乙酸乙酯。孙文浩等^[27-31]对漂浮植物凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)对藻类的相生相克作用进行了研究,并从凤眼莲的根系分泌物中鉴定出了亚油酸、N-苯基-2-萘胺等克藻化合物。杨善元等^[32]也从凤眼莲根系的丙酮提取物中分离得到3种抑藻活性较强的化合物(亚油酸、亚油酸甘油酯、N-苯基-2-萘胺)。Gross等^[33]从狐尾藻的萃取出了没食子酸、鞣花酸具有抑藻活性的多酚物质,并且还从狐尾藻中分离出了1种可水解的多酚—特里马素II(Tellimagrandin II),是一种主要抑藻物质,占植物干质量的1.5%,其抑藻活性可能部分归因于它可抑制藻类的胞外酶(如碱性磷酸酶)。Planas等^[34]从穗花狐尾藻的萃取物中发现了12种酚和多酚(如没食子酸、鞣花酸)能藻类生长。Della-Greca等^[35]从川蔓藻(*Ruppia maritima*)中分离出了7种萜类抑藻化合物,其中的3种具有较强的抑藻效应,最高毒性化合物的 IC_{50} 为 $0.8 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。张胜花^[36]从黄丝草(*Potamogeton maackianus*)的乙酸乙酯萃取物中分离得到了6-羟基- α -紫罗兰酮,3-吡啶甲醛、(+)-松脂素、豆甾醇、对羟基苯甲酸,藻类毒性试验发现这5种化合物对羊角月牙藻(*Selenastrum capricornutum*)都具有抑制活性。张兵之^[37]从伊乐藻(*Elodea nuttallii*)体内分离出了豆甾-4-烯-3,6-二酮,对羊角月牙藻具有较强的抑制作用。Thanh等^[38]发现侧生藻(*Fischerella* sp.)可分泌生物碱类化感物质12-epi-hapalindole Eisonitrile,不仅可以作用于蓝藻(*Cyanobacteria*)、绿藻(*Chlorophyta*),还可作用于G+菌、G-菌、真菌和哺乳动物细胞。Augusto等^[39]报道了侧生藻中的另1种生物碱类化感物质12-epi-hapalindole F,可以抑制微囊藻和聚球藻的生长。王红强等^[40]采用GC-MS联用技术鉴定出了沉水植物伊乐藻中的9种生物碱成分,还研究了其总生物碱对铜绿微囊藻的化感作用。

2 化感物质的联合作用

利用藻类生长抑制实验确定化合物的化感作用已有不少报道,但大多集中在测定单一化合物对藻类的化感作用^[24, 33]。而在天然水环境中通常是以多种化合物共存的。并且植物释放的化感物质也不是单一的,不同条件下释放的化感物质的量也是有差异的^[41-42];化感物质之间往往还有协同、拮抗和加合等相互作用^[24]。因此,只分析单一化合物对藻类的化感作用是不够的。研究多种成分的综合效应对于探讨化感作用的机理,配制天然药剂具有重要的指导意义。而国际上对于将同一植物体内的几种化感成分按不同组合、不同比例混合,观测它们的化感作用,以寻找化感物质在自然状况下的作用机制的研究还远远不够^[43]。Wang等^[44]曾发现没食子酸等3种有机酸之间存在协同作用,化感活性明显强于单一化合物。倪利晓等^[45]采用相加指数法和半致死剂量指数法,评价了3种酚酸类(邻苯二酚、联苯三酚、没食子酸)和1种不饱和脂肪酸类(亚油酸)化感物质通过等效浓度(1:1)两两混合后对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)的联合作用效果,研究结果表明,邻苯二酚和联苯三酚、邻苯二酚和亚油酸表现为协同效应,其余二元混合物的联合作用表现为相加效应。高云霓等^[46]在研究从苦草种植水中检测到的酚酸类物质对铜绿微囊藻的化感作用时发现不同酚酸以毒性效应比例多维混合表现出加和抑藻效应,且随着混合种数的增多,酚酸的加和效应增强。胡陈艳等^[47]研究马来眼子菜(*Potamogeton malaianus*)体内脂肪酸类物质对羊角月牙藻的抑制作用时也发现多种脂肪酸联合作用时,具有协同抑藻作用。这些研究结果可能揭示了在自然水生态系统中当沉水植物存在时藻类数量明显减少的机理:即通过多种化感物质在低浓度下的协同作用达到控制藻类的效果。

3 化感作用在工程实践中的应用

1993年3月Barrett等^[48]向苏格兰一个长期周期性暴发硅藻(*Diatom*)和蓝藻水华的水库中投放大麦秆,同年7月水体中藻细胞和叶绿素a浓度分别从未处理前的20 000 mL、 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 减少至3 000 mL、 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,水华现象基本消失;随后,又于11月和次年6月2次向水库投放大麦秆,藻细胞浓度降至1 000 mL以下。Ridge等^[49]曾经分别向2个水池投加橡树(*Quercus robur*)、山毛榉(*Fraxinus excelsior*)、枫树(*Acer pseudoplatanus*)等的落叶和大麦秆,团集刚毛藻(*Cladophora glomerata*)等藻类的生长被有效抑制。美国水生植物管理中心开发了一种利用大麦秸秆直接投入水体抑制藻类的方法^[50],这是成功的利用化感作用控制藻类的应用实例。

Ball等^[51]利用大麦秆提取物来抑制富营养化水体中的藻类,结果显示,大麦秆提取物即使在非常低的浓度下(0.005%)也能够对铜绿微囊藻产生抑制作用。大麦秆能有效控制引起水体富营养化的各种藻类生长,优化水生生物的组成结构。例如水体中放入大麦秆可以增加无脊椎动物以及鱼类的数量,从而达到改善水生生态系统的目的^[52]。

4 化感物质的生态安全性评价

目前,国内外对化感物质的抑藻作用进行了广泛研究,并在部分地区得到了工程应用。尽管化感物质作为植物的次生代谢产物,具有生态安全性较好等优点,但在向环境中投加大剂量的化感物质时,是否会对环境产生一定的副作用,尤其是对水环境中的其他生物的生态安全性的评价尚需深入研究。郑春艳等^[53]考察了亚油酸、水杨酸和对羟基苯甲酸对多刺裸腹蚤(*Moina macrocopa*)的毒性作用,研究结果表明,3者对多刺裸腹蚤的 EC_{50} 均明显大于对池塘水华混合藻类的 EC_{50} ,表明了利用这3种化感物质(尤其是亚油酸)来开发生物除藻剂的巨大潜能,同时也说明在可除藻的浓度范围内对环境的不良影响可能较小。张庭廷等^[54]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(*Cyprinus carpio* Linnaeus)的毒性作用。结果表明,实验中抑藻作用最佳浓度的对羟基苯甲酸($0.8\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)作用于鲤鱼后,对鲤鱼血清中的天门冬氨酸氨基转移酶(AST)、丙氨酸氨基转移酶(ALT)、 γ -谷氨酰基转移酶(γ -GT)、碱性磷酸酶(ALP)的活性没有明显影响,对肝脏、鳃和肌肉中的超氧化物歧化酶(SOD)的活性以及膜脂质过氧化产物(MDA)的含量也没有明显影响,提示对羟基苯甲酸在该浓度下对鲤鱼无毒性作用。周立红^[55]也研究了儿种抑藻剂对褶臂肾尾轮虫(*Brachionus plicatilis*)群体、真鲷(*Pagrosomus major*)幼鱼、蒙古裸腹蚤(*Moina mongolica daday*)、花尾胡椒鲷(*Plectorhinchus cinctus*)、卤虫(*Artemia parthenogenetica*)、斑节对虾(*Penaeus monodon*)稚虾、凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)稚虾等水生生物的毒性,通过效用-安全比分析,秦皮(*Cortex fraxini*)、鱼腥草(*Herba houttuyniae*)、槟榔(*Semen arecae*)、黄连(*Rhizoma coptidis*)是较好的抑藻材料,可以应用于藻类爆发水体,而不造成水域生态系统的明显影响。

5 研究展望

目前,已有的化感物质抑藻研究大多是在实验室完成的,研究体系中影响因素的设计单一,考察范围有限^[3]。而实际水体中藻类多种多样,并且与其他水生生物共存。因此,笔者认为在今后的化感作用研究中有3方面的问题不容忽视:

(1)通过改进试验手段进行化感物质抑藻效应的原位试验研究^[56]; (2)开展多种化感物质的联合作用研究更加接近自然生态系统,将有助于了解在自然水生态系统中当沉水植物存在时藻类数量明显减少的机理; (3)开展化感物质的生态安全性评价,研究大剂量的化感物质投加到自然水体中时对环境除有害藻类外的其他水生生物的影响,有助于综合、全面地评价化感物质抑藻应用的生态安全性。

参考文献:

- [1] 金相灿,李兆春,郑朔方,等.铜绿微囊藻生长特性研究[J].环境科学,2004,17(增1):52-61.
JIN Xiangcan, LI Zhaochun, ZHENG Shuofang, et al. Studies on the growth characteristics of *Microcystis aeruginosa* [J]. Research of Environmental Sciences, 2004, 17(suppl): 52-61.
- [2] 金相灿.湖泊富营养化研究中的主要科学问题:代“湖泊富营养化研究”专栏序言[J].环境科学学报,2008,28(1):21-23.
JIN Xiangcan. The key scientific problems in lake eutrophication studies [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(1):21-23.
- [3] 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 inhibitory allelopathy from aquatic plants on algae [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(3): 287-293.
- [4] 孟丽华,刘义新.利用植物化感作用抑制铜绿微囊藻的研究进展[J].中国给水排水,2008,24(20):7-9,14.
MENG Lihua, LIU Yixin. Research on plant allelopathy in inhibition of *Microcystis aeruginosa* [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(20): 7-9, 14.
- [5] 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.
YU Ziwen, SUN Wenhao, GUO Keqin, et al. Allelopathic effects of several aquatic plants on algae[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1992, 16(1): 1-7.
- [6] 何池全,叶居新.石菖蒲(*Acorus tatarinowii*)的克藻效应的研究[J].生态学报,1999,19(5):754-758.
HE Chiquan, YE Juxin. Inhibitory effects of *Acorus tatarinowii* on algae growth [J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(5): 754-758.
- [7] 项俊,栗茂腾,吴耿,等.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.
XIANG Jun, LI Maoteng, WU Geng, et al. Allelopathic effect of emergent plants to bloom algal from the Yellow River, Huaihe River and Haihe River's Wetland[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(2): 506-510.
- [8] 肖溪,楼莉萍,李华,等.沉水植物化感作用控藻能力评述[J].应用生态学报,2009,20(3):705-712.
XIAO Xi, LOU Liping, LI Hua, et al. Algal control ability of allelopathically active submerged macrophytes: A review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(3): 705-712.
- [9] 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.
- [10] XIAN Q M, CHEN H D, LIU H L, et al. Isolation and identification of antialgal compounds from the leaves of *Vallisneria spiralis* L. by activity-guided fractionation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2006, 13(4): 233-237.
- [11] KONG C H, WANG P, ZHANG C X, et al. Herbicidal potential of allelochemicals from *Lantana camara* against *Eichhornia crassipes* and the alga *Microcystis aeruginosa*[J]. Weed Research, 2006, 46(4):

- 290-295.
- [12] GROSS E M, HILT S, LOMBARDO P, et al. Searching for allelopathy in action - State of the art and open questions[J]. *Hydrobiologia*, 2007, 584(1): 77-88.
- [13] NAKAI S, INOUE Y, HOSOMI M, et al. Anti-cyanobacterial fatty acids released from *Myriophyllum spicatum*[J]. *Hydrobiologia*, 2005, 543: 71-78.
- [14] SABINE H, GROSS E M. Can allelopathically active submerged macrophytes stabilize clear water states in shallow lakes[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2008, 9(4): 422-432.
- [15] 杨琳, 吴伟, 胡庚东, 等. 两种沉水植物浸提液对斜生栅藻的化感效应[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(4): 1530-1535.
YANG Lin, WU Wei, HU Gengdong, et al. Allelopathic effect of water extracts from two submerged macrophytes on growth of *Scenedesmus obliquus*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1530-1535.
- [16] 吴安平, 张庭廷, 何梅, 等. 水杨酸对水华鱼腥藻的化感抑制作用及相关毒理学的初步研究[J]. *生物学杂志*, 2008, 25(5): 44-47.
WU Anping, ZHANG Tingting, HE Mei, et al. A preliminary study on *Anabena flos-aquae* minitigation of salicylic acid and its related toxicity [J]. *Journal of Biology*, 2008, 25(5): 44-47.
- [17] 王仁君, 唐学玺, 孙俊华. 小珊瑚藻对赤潮异弯藻的化感效应[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(10): 2322-2326.
WANG Renjun, TANG Xuexi, SUN Junhua. Allelopathic effects of *Corallina pilulifera* on red tide microalgae *Heterosigma akashiwo*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(10): 2322-2326.
- [18] 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.
WU Cheng, CHANG Xuexiu, DONG Hongjuan, et al. Allelopathic inhibitory effect of *Myriophyllum aquaticum* (Vel. l) Verdc. On *Microcystis aeruginosa* and its physiological mechanism[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2595-2603.
- [19] WU Z B, ZHANG S H, WU X H, et al. Allelopathic interactions between *Potamogeton maackianus* and *Microcystis aeruginosa*[J]. *Allelopathy Journal*, 2007, 20(2): 327-338.
- [20] 陈卫民, 张清敏, 戴树桂. 苦草与铜绿微囊藻的相互化感作用[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(2): 147-151.
CHEN Weimin, ZHANG Qingmin, DAI Shugui. The mutual allelopathy of *Vallisneria spiralis* Linn. and *Microcystis aeruginosa*[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(2): 147-151.
- [21] 郑迪, 段舜山. 普通小球藻和雨生血球藻之间的化感效应[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(6): 2380-2383.
ZHENG Di, DUAN Shunshan. Allelopathic effects on *Chlorella vulgaris* and *Haematococcus pluvialis*[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(6): 2380-2383.
- [22] 李锋民, 胡洪营. 芦苇抑藻化感物质的分离及其抑制蛋白核小球藻效果研究[J]. *环境科学*, 2004, 25(5): 89-92.
LI Fengmin, HU Hongying. Isolation and effects on green alga *Chlorella pyrenoidosa* of algal-inhibiting allelochemicals in the macrophyte, *Phragmites communis* Tris[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(5): 89-92.
- [23] EVERALL N C, LESS D R. The use of barley-straw to control general and blue-green algal growth in a Derbyshire reservoir[J]. *Water Research*, 1996, 30(2): 269-276.
- [24] NAKAI S, INOUE Y, HOSOMI M, et al. *Myriophyllum spicatum* released allelopathic polyphenols inhibiting growth of blue-green algae *Microcystis aeruginosa*[J]. *Water Research*, 2000, 34(11): 3026-3032.
- [25] 王海燕, 蒋展鹏. 化感作用及其在环境保护中的应用[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2002, 3(6): 86-89.
WANG Haiyan, JIANG Zhanpeng. Allelopathy and its use in environmental protection[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2002, 3(6): 86-89.
- [26] 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.
DAI Shugui, ZHAO Fan, JIN Zhaozhui, et al. Allelopathic effect of plant's extracts on algae and the isolating and identifying of phototoxins[J]. *Environmental Chemistry*, 1997, 16(3): 268-271.
- [27] 孙文浩, 余叔文, 杨善元. 凤眼莲根系分泌物中的克藻化合物[J]. *植物生理学报*, 1993, 19(1): 92-96.
SUN Wenhao, YU Shuwen, YANG Shanyuan. Allelochemicals from root exudates of Water Hyacinth(*Eichhornia crassipes*)[J]. *Acta Phytophysiological sinica*, 1993, 19(1): 92-96.
- [28] 孙文浩, 余叔文. 相生相克效应及其应用[J]. *植物生理学通讯*, 1992, 28(2): 81-87.
- [29] 孙文浩, 俞子文, 邵根福, 等. 凤眼莲无茵苗培养及其克藻效应[J]. *植物生理学报*, 1990, 16(3): 301-305.
SUN Wenhao, YU Ziwen, TAI Genfu, et al. Sterilized G-Mlture of Water Hyacinth and its appilcatloa in the study of allelopathie effect on algae [J]. *Acta Phytophysiological sinica*, 1990, 16(3): 301-305.
- [30] 孙文浩, 俞子文, 余叔文. 水葫芦对藻类的克制效应[J]. *植物生理学报*, 1988, 14(3): 294-300.
SUN Wenhao, YU Ziwen, YU Shuwen. Inhibitory effect of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms on algae[J]. *Acta Phytophysiological sinica*, 1988, 14(3): 294-300.
- [31] 孙文浩, 俞子文, 余叔文. 城市富营养水域的生物治理和凤眼莲抑制藻类生长的机理[J]. *环境科学学报*, 1989, 9: 188-195.
SUN Wenhao, YU Ziwen. The harness of an eutrophic water body by Water-Hyacinth[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1989, 9: 188-195.
- [32] 杨善元, 俞子文, 孙文浩, 等. 凤眼莲根系中抑藻物质分离与鉴定[J]. *植物生理学报*, 1992, 18(4): 399-402.
YANG Shanyuan, YU Ziwen, SUN Wenhao, et al. Isolation and identification of antialgal compounds from root system of Water Hyacinth[J]. *Acta Phytophysiological sinica*, 1992, 18(4): 399-402.
- [33] GROSS E M, MEYER H, SCHILLING G. Release and ecological impact of algicidal hydrolysable polyphenols in *Myriophyllum spicatum*[J]. *Phytochemistry*, 1996, 41: 133-138.
- [34] PLANAS D, SARHAN F, DUBE L, et al. Ecological significance of phenolic compounds of *Myriophyllum spicatum*[J]. *Verhandlungen Internationale Vereinigung Limnologie*, 1981, 21: 1492-1496.
- [35] DELLA GRECA M, FIORENTION A, ISIDORI M, et al. Antialgal ent-labdane diterpenes from *Ruppia maritima*[J]. *Phytochemistry*, 2000, 55: 909-913.
- [36] 张胜花. 两种眼子菜科沉水植物与浮游藻类之间的化感作用研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2007: 126.
ZHANG Shenghua. Studies on the allelopathy between two species of submerged *Potamogetonaceae* and planktonic[D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, the Chinese Academy of Sciences, 2007:126.
- [37] 张兵之. 伊乐藻对铜绿微囊藻的化感作用研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2007: 102.
ZHANG Bingzhi. Studies on the Allelopathy of *Elodea Nuttallii* on *Microcystis Aeruginosa* [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, the Chinese Academy of Sciences, 2007: 102.
- [38] THANH D N, RICKARDS R W, ROTHSCCHILD J M, et al. Allelopathic actions of the alkaloid 12-*epi*-hapalindole Eisonitrile and calothrixin A from cyanobacteria of the genera *Fischerella* and *Calothrix*[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2000, 12(3/5): 409-416.
- [39] AUGUSTO E, EDENILSON R, RALF D, et al. Algicide production by the filamentous cyanobacterium *Fischerella* sp. CENA 19[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2004, 16(3): 237-243.
- [40] 王红强, 成水平, 张胜花, 等. 伊乐藻生物碱的GC-MS分析及其对铜绿微囊藻的化感作用[J]. *水生生物学报*, 2010, 34(2): 361-366.
WANG Hongqiang, CHENG Shuiping, ZHANG Shenghua, et al. Analysis of alkaloid from *Elodea nuttallii* by GC-MS and its allelopathic activity on *Microcystis aeruginosa*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, 34(2): 361-366.
- [41] IRMGARD B, ANDERS H, GUNNAR A. Seasonal changes of

- mechanisms maintaining clear water in a shallow lake with abundant Chara vegetation[J]. Aquatic botany, 2002, 72: 315-334.
- [42] ASAEDA T, SULTANA M, MANATUNGE J, et al. The effect of epiphytic algae on the growth and production of *Potamogeton perfoliatus* L. in two light conditions[J]. Environmental and Experimental Botany, 2004, 52: 225-238.
- [43] 须海丽. 植物化感作用研究中亟待解决的问题综述[J]. 农业科技通讯, 2008(8): 92-95.
XU Haili. Review on problems needed attention on plant allelopathy research[J]. Bulletin of Agricultural Science & Technology, 2008(8): 92-95.
- [44] WANG H Q, WU Z B, ZHANG S H, et al. Relationship between the allelopathic activity and molecular structure of hydroxyl derivatives of benzoic acid and their effects on cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*[J]. Allelopathy Journal, 2008, 22(1): 205-212.
- [45] 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. Study on joint action of phenolic acids and unsaturated fatty acids to *Microcystis aeruginosa*[J]. Environmental Chemistry, 2011, 30(8): 1428-1432.
- [46] 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]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(5): 761-766.
- [47] 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 algal inhibitory effects of common fatty acids[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(4): 569-576.
- [48] BARRETT P R F, CURNOW J C, LITTLEJOHN J W. The control of diatom and cyanobacterial blooms in reservoirs using barley straw[J]. Hydrobiologia, 1996, 340(1/3): 307-311.
- [49] RIDGE I, WALTERS J, STREET M. Algal growth control by terrestrial leaf litter: A realistic tool?[J]. Hydrobiologia, 1999(395/396): 173-180.
- [50] EVERALL N C, LESS D R. The identification and significance of chemical released from decomposing barley straw during reservoir algal control[J]. Water Research, 1997, 31(3): 614-620.
- [51] BALL A S, WILLIAMS M, VINCENT D, et al. Algal growth control by a barley straw extract[J]. Bioresource Technology, 2001, 77(2): 177-181.
- [52] 吴为中, 芮克俭, 刘永. 大麦秆控藻研究进展[J]. 生态环境, 2005, 14(6): 972-975.
WU Weizhong, RUI Kejian, LIU Yong. Review on algal control by barley-straw[J]. Ecology and Environment, 2005, 14(6): 972-975.
- [53] 郑春艳, 张哲, 胡威, 等. 三种化感物质对水华混合藻类以及多刺裸腹蚤的毒性作用[J]. 中国环境科学, 2010, 30(5): 710-715.
ZHENG Chunyan, ZHANG Zhe, HU Wei, et al. The toxic effect of three allelochemicals on natural algal assemblage and *Moina macrocopa* [J]. China Environmental Science, 2010, 30(5): 710-715.
- [54] 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.
ZHANG Tingting, HE Mei, WU Anping, et al. Allelopathic inhibition of p-hydroxybenzoic acid on *Microcystis aeruginosa* Kuetz with no toxicological effects on *Cyprinus carpio Linnaeus*[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(9): 1887-1893.
- [55] 周立红. 基于化感作用的环境友好型抑藻剂的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008: 105-106.
ZHOU Lihong. Study on Environment-Benign HABs-Inhibitors Based on Allelopathy[D]. Xiamen: Xiamen University, 2008: 105-106.
- [56] 张彬, 王书敏, 刘小兵, 等. 植物化感抑藻物质研究[J]. 给水排水, 2011, 37(4): 115-121.

Inhibitory effects of allelochemicals on algal growth: research, application and eco-safety evaluation

WANG Hongqiang^{1,2}, WU Zhenbin²*

1. Department of Environmental and Municipal Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan, Henan 467036, China;

2. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China

Abstract: With the frequent occurrence of algal blooms resulted from eutrophication in surface water bodies, how to control algal blooms and water eutrophication efficiently is recognized as a frontier and hot-spot in the field of water environment research. Nowadays, the algal bloom controlling technologies include physical, chemical and biological methods, but these ways have their inherent drawbacks. The inhibitory allelopathy of plants on harmful algae is low-cost and ecologically safe, which has been drawn extensive attention recently. Allelopathic effect is the way in which organisms exchange messages and interact with each other resulting in inhibition or promotion between them. This paper reviewed the major research progresses in the allelopathic effects of aquatic plants of different life forms, including the species of aquatic plants with algal inhibiting effects, the types of allelochemicals isolated and identified from these aquatic plants and their culture waters, and the synergistic effects of allelochemicals. The ecological safety of allelochemicals was also discussed. Allelochemicals were applied successfully in reducing algal biomass and optimizing the aquatic community structure. For instance, the presence of the barley-straw in the water can increase the growth of aquatic organisms such as invertebrates and fishes, and lead to the amelioration of aquatic ecosystem. Finally, the application potential for plant allelopathy in the water pollution control were discussed in order to provide the principles and guidelines for the algal blooms control by plant allelopathic effect.

Key words: allelochemicals; the synergistic effects; engineering application; eco-safety evaluation