

水生植物化感抑藻作用研究与应用

洪喻, 胡洪营*

北京林业大学环境科学与工程学院, 北京 100083;

清华大学环境科学与工程系环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084

* 联系人, E-mail: hyhu@tsinghua.edu.cn

2008-10-15 收稿, 2008-12-17 接受

国家科技支撑计划(编号: 2007BAC22B02)、NSFC-JST 国际合作项目(编号: 50721140017)和国家杰出青年科学基金(批准号: 50825801)资助

摘要 近年来, 水体富营养化及水华问题日益严峻, 水体的景观和生态功能受到严重影响. 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. 水生植物化感作用抑藻作为一种新型安全的生物抑藻技术近年来备受关注. 本文综述了国内外水生植物化感作用抑藻研究领域的主要研究成果, 包括已发现的抑藻水生植物种类、已分离鉴定得到的水生植物化感物质类型、化感物质抑藻机理等. 最后提出了水生植物化感作用抑藻技术的应用和发展, 及有待研究的问题, 希望为今后更好地利用水生植物资源进行水环境治理研究提供参考.

关键词
富营养化
水华控制
水生植物
化感作用

2008年, 北京成功地举办了第29届夏季奥林匹克运动会. 以再生水为补充水源的北京奥林匹克森林公园也实现了对“绿色奥运”的承诺. 按照现有国家标准《城市污水再生利用景观环境用水水质》(GB/T18921-2002)中所界定的景观用水水质标准, 再生水中仍然含有较高浓度的氮、磷等营养物质, 有较大的水华爆发风险. 因此, 有效控制再生水水质条件下的水华藻类生长, 成为保障北京奥林匹克森林公园水质的关键问题和技术难点. 再生水补水的再次深度处理和水质稳定化是景观水体长效保持的前提. 清华大学环境科学与工程系自主研发的基于湿生/水生植物的水质生态净化与保持技术, 成功地应用于奥林匹克森林公园可持续发展教育中心. 其水质净化工艺采取的关键技术主要包括生态脱氮水质净化技术、高效除磷技术、植物化感抑藻技术等, 其中水生植物化感抑藻技术的应用值得关注.

关于藻类生长控制, 国内外开展了大量的研究, 根据控制原理主要分为物理、化学和生物三类方法. 物理方法如机械除藻、紫外线杀藻、遮光抑藻等, 虽见效快, 但耗时、费用高、操作困难, 因此不易大规模实施. 投加如重金属类杀藻剂(Cu, Fe等)、氧化剂

和有机类药剂(有机羧酸和有机胺), 虽能快速杀藻, 但是药剂二次污染严重, 生态风险高, 因而应用逐渐受到限制. 生物方法是利用鱼、菌、水生植物等直接或间接抑藻. 利用滤食性鱼类控藻效果较好, 但后期管理复杂, 高密度放养也可能破坏水体生态环境, 其技术稳定性仍有待研究^[1].

水生植物化感作用抑藻是利用水生植物产生的次生代谢物质(即化感物质)对水华藻类的生长进行控制的技术. 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, 这是目前为止最为成功的利用化感作用控制藻类的应用实例^[2]. 化感物质对藻类的抑制作用具有明显的选择性, 对特定的藻类具有显著的抑制作用. 化感物质是植物次生代谢物质, 通常在自然条件下易降解, 在生态系统中不会积累, 生态安全性较好. 因此, 将水生植物及其化感物质应用于藻类控制具有良好的应用前景, 水生植物化感作用对藻类生长影响的研究更具有重要的环境和生态意义.

1 水生植物的抑藻化感作用

化感作用是指一种植物或微生物通过向环境中

释放化学物质影响其他生物生长的现象^[3], 释放的化学物质称为化感物质. 植物化感作用的研究主要集中在农业、林业和环境生物治理三大领域. 化感作用在农业、林业、杂草控制与病虫害控制等方面的研究与应用较多, 直到 20 世纪末期, 才开始水生植物化感作用抑藻的研究, 并逐渐形成利用化感作用抑藻的研究领域^[4].

目前, 国内外关于水生植物化感作用的研究非常广泛, 目前已经发现几十种水生植物具有化感抑藻作用, 如苦草、金鱼藻、凤眼莲、穗状狐尾藻、马蹄莲、石菖蒲、芦苇、芦竹、浮萍、满江红、紫萍、灯心草等水生植物都具有较强的抑藻作用^[4-7]. 大量的现场试验以及实验室研究都表明水生植物对藻类的化感抑制作用是普遍存在的, 表 1 列出了常见的抑藻水生植物.

2 水生植物的抑藻化感物质

化感物质是供体植物(包括微生物)释放的作用于受体植物(包括微生物)的次生代谢物质. Rice^[3]按照化感物质的化学结构, 将其分为 14 类: 水溶性有机酸、简单不饱和内酯、长链脂肪酸和多炔、苯醌、蒽醌和复醌、简单酚、苯甲酸及其衍生物、肉桂酸及其衍生物、香豆素类、类黄酮、单宁、萜类和甾类化

合物、氨基酸和多肽、生物碱和甾醇、硫化物和芥子油苷、嘌呤和核苷. 在农业、林业、杂草及病虫害控制的化感作用研究中, 上述各类化感物质均有报道, 其中最为常见的是长链脂肪酸、酚酸以及萜类化感物质^[3,27]. 而目前发现的水生植物抑藻化感物质的种类相对较少, 仅对少数植物抑藻化感物质进行了详细的研究和报道.

Della Greca 等人^[28]分离浮叶眼子菜的抑藻物质发现, 二萜呋喃类化感物质的半效应浓度值(EC₅₀)可低至 2.84 μmol/L(见图 1(a)). Waridel 等人^[29]从莨菪眼子菜极性提取物中分离到多个半日花烷型二萜类化感物质, 可显著抑制羊角月牙藻的生长, EC₅₀可低至 6.1 μmol/L(见图 1(b)). Li 等人^[30]从芦苇极性提取物中分离并鉴定出化感物质 2-甲基乙酰乙酸乙酯(EMA), 发现其对铜绿微囊藻、蛋白核小球藻具有显著的抑制效果, EC₅₀为 4.51 μmol/L(见图 1(c)). 苦草叶片氯仿提取物对铜绿微囊藻的抑制率可达 91%, 通过硅胶柱层析分离并经过高分辨率气相色谱-质谱分析发现其中含有的 2-乙基-3-甲基顺丁烯二酰亚胺是其主要的抑藻化感物质^[24]. 作者研究芦竹对多种藻类生长的影响, 发现芦竹水浸提液对产毒铜绿微囊藻的生长具有显著的抑制作用, EC₅₀(以干燥植物材

表 1 具有化感抑藻作用的常见水生植物及其有效抑制藻类

生活类型	植物名称	有效抑制藻类	文献
挺水植物	石菖蒲	水华鱼腥藻, 四尾栅藻, 纤细裸藻等多种蓝藻, 绿藻	[5, 6]
	香蒲	小球藻, 铜绿微囊藻	[7]
	芦苇, 莲, 两栖蓼	铜绿微囊藻, 蛋白核小球藻	[8]
	芦竹	铜绿微囊藻	[9]
	马蹄莲	羊角月牙藻	[10]
	细果荸荠	雨生红球藻, 水华鱼腥藻, 链状鱼腥藻, 弱细颤藻	[11]
	灯心草	羊角月牙藻	[12]
浮水植物	凤眼莲, 水花生, 水浮莲, 满江红, 浮萍, 紫萍	雷氏衣藻, 斜生栅藻	[13]
	萍蓬草	隐藻	[14]
	大	多种蓝藻, 绿藻, 金藻, 红藻	[15]
	槐叶萍	铜绿微囊藻, 蛋白核小球藻	[16]
沉水植物	密刺苦草, 石龙尾, 菹草, 尖叶眼子菜, 穗状狐尾藻, 水蕴草	铜绿微囊藻, 水华鱼腥藻, 小席藻	[4]
	金鱼藻, 大茨藻	鱼腥藻, 铜绿微囊藻	[17]
	穗状狐尾藻, 互花狐尾藻, 轮叶狐尾藻, 巴西茼	铜绿微囊藻等蓝藻	[18]
	微齿眼子菜	铜绿微囊藻	[19]
	黑藻	铜绿微囊藻	[20]
	轮藻	羊角月牙藻, 小小球藻	[21]
	水剑叶	谷皮菱形藻, 细长聚球藻, 斜生栅藻	[22, 23]
	苦草	铜绿微囊藻	[24]
	川蔓藻	羊角月牙藻, 普通小球藻	[25, 26]

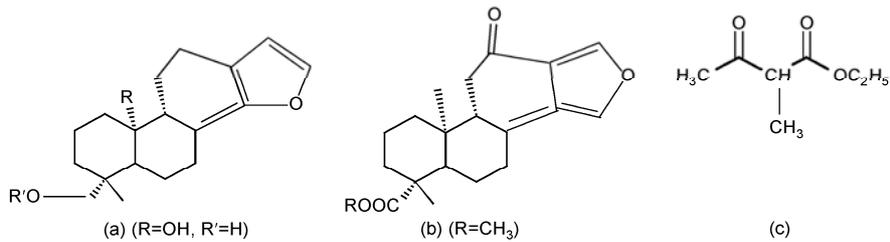


图1 水生植物化感物质结构

(a) 浮叶眼子菜二萜呋喃类化感物质; (b) 菹齿眼子菜半日花烷型二萜类化感物质; (c) 芦苇 2-甲基乙酰乙酸乙酯

料的等价质量浓度表示)为 4.7 g/L, 较其他多种水生植物浸提液的抑藻效果更强^[9]。进一步比较不同溶剂提取的芦竹抑藻物质活性, 发现甲醇提取物和乙酸乙酯提取物的抑藻效果显现最快^[31], 其中乙酸乙酯提取物的 EC_{50} 为 50 mg/L。对乙酸乙酯提取物活性物质采用多级分离分析发现, 仅酸性组分具有强抑藻活性, 且其中仍含有多组不同的抑藻物质, 在 10 mg/L 时抑藻效果可达 100%^[32]。Nakai 等人^[33,34]研究穗花狐尾藻对铜绿微囊藻的抑制作用中, 发现其分泌物中富含焦酸、没食子酸、(+)-儿茶素等酚酸类化感物质, 以及正壬酸、肉豆蔻酸、棕榈酸、硬脂酸、油酸在内的多种脂肪酸类化感物质。穗花狐尾藻主要化感物质的 EC_{50} 见表 2。

表 2 穗花狐尾藻化感物质对铜绿微囊藻生长抑制作用的 EC_{50}

化感物质	$EC_{50}/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	文献
五倍子酸	5.32	[33]
焦酸	5.16	
鞣花酸	16.89	
原儿茶酸	19.47	
正壬酸	3.16	[34]
顺式十八碳-9-烯酸	5.66	
顺式十八碳-6-烯酸	11.68	

目前得到的水生植物化感物质的类型主要为长链脂肪酸、简单酚酸、酯、醇、醚、酮、萜及菲类化合物、硫化物或单质硫、木质素类、苯基萘胺以及苯基丙烷类、简单不饱和内酯、苯甲酸及其衍生物等, 表 3 列出了主要的水生植物化感物质。与 Rice 提出的化感物质类型比较, 可见水生植物化感物质亦以长链脂肪酸、简单酚酸类最为常见; 但水生植物中仍未发现氨基酸、多肽、甾醇、嘌呤和核苷类化感物质。

3 水生植物化感物质抑藻机理

基于文献报道和已有的实验研究, 化感物质对

藻类的生长抑制作用机理主要有以下 5 个方面:

(1) 破坏藻细胞结构。芦苇化感物质可破坏蛋白核小球藻以及铜绿微囊藻细胞膜结构。分析藻细胞膜磷脂脂肪酸种类和相对含量发现, 蛋白核小球藻膜上饱和脂肪酸 C18:3 和 C18:2 的含量分别从 23.31%, 11.46% 增加到 37.68%, 25.91%; 铜绿微囊藻的 C18:1 和 C18:2 含量从 30.26%, 18.85% 增加为 42.88%, 28.46%。膜上饱和脂肪酸的比例增加直接导致膜流动性增加、对物质选择能力降低, 细胞稳定性下降, 内含物(如 K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+})泄露。除膜结构损伤外, 还导致类囊体片层结构消失、核区呈不规则状、淀粉粒增多、液泡体积增大^[16]。门玉洁等人^[41]考察芦苇化感物质对斜生栅藻的影响发现, 细胞联体结构明显减少, 细胞核消失, 线粒体等细胞器解体。水浮莲根系分泌物抑制雷氏衣藻时出现大量藻细胞的不规则碎片^[13]。黑藻分泌物可使铜绿微囊藻细胞质壁脱离、类囊体片层结构松散杂乱, 且损伤作用随时间延长而加剧^[20]。

(2) 影响藻细胞光合作用。目前已发现多种水生植物可抑制藻类光合作用。藻细胞光合作用的损伤可分为光反应(类囊体反应)损伤和暗反应(碳固定反应)损伤。凤眼莲根系分泌物可使栅藻叶绿体解体, 细胞叶绿素 a 含量显著减少, 而降解产物脱镁叶绿素 a 酸酯含量升高, 光合速率急剧下降, 类囊体反应严重损伤。黑藻与铜绿微囊藻共培养时, 铜绿微囊藻细胞叶绿素 a 含量显著低于对照, 培养 9 d 时仅为对照的 12.5%^[20]。五刺金鱼藻以及穗花狐尾藻分泌物均可通过抑制多种藻类的光系统^[42]。Leu 等人^[43]研究狐尾藻酚酸类化感物质发现特里马素可抑制光系统中电子受体与供体之间的电子传递过程。Wium-Andersen 等人^[44]报道球状轮藻产生的不稳定硫化物或单质硫可抑制硅藻的碳固定反应。

表3 不同水生植物中已鉴定的主要化感物质及受抑制藻类

水生植物	化感物质	有效抑制藻类	文献
香蒲	棕榈酸, 胆固醇油酸酯, 2-氯酚, 水杨醛, 亚油酸, α -亚麻酸, 20(S)-4 α -甲基-24-亚甲基胆甾-7-烯-3 β -醇	斜生栅藻, 小球藻, 水华鱼腥藻, 蛋白核小球藻	[35]
芦苇	香豆酸, 阿魏酸, 香草酸, 芥子酸, 丁香酸, 咖啡酸, 原儿茶酚酸, 没食子酸, 豆蔻酸, 棕榈酸, 正壬酸, 硬脂酸, EMA	铜绿微囊藻	[30, 36]
石菖蒲	1,2-二甲氧基-4-(E-3'-甲基环氧乙烷基)苯, 1,2,4-三甲氧基-5-(E-3'-甲基环氧乙烷基)苯, β -细辛醚, α -细辛醚, γ -细辛醚	水华鱼腥藻, 四尾栅藻, 纤细裸藻等多种蓝藻及绿藻	[5, 6]
水菖蒲	α -细辛醚, β -细辛醚, γ -细辛醚, 反式-异丁子香酚甲酯	水华鱼腥藻, 四尾栅藻, 纤细裸藻等多种蓝藻, 绿藻	[5]
马蹄莲	环阿廷醇型三萜类, 固醇类, 新木质素类, 亚油酸, α -亚麻酸, 新木质素类, 3-(4-羟基-3-甲氧基苯基)-1,2-丙二醇; 1-(4-羟基-3-甲氧基苯基)-2-[4-(2,3-二羟丙基)-2-甲氧基苯氧基]-1,3-丙二醇	羊角月牙藻	[10]
萍蓬草	间苯二酚	隐藻	[14]
灯心草	苯基丙烷类, 甘油脂肪酸酯类, 二氢菲类, 四氢苊, 二聚类苯基菲类	羊角月牙藻	[12, 37]
凤眼莲	N-苯基-1-萘胺, N-苯基-2-萘胺, 亚油酸, 亚油酸甘油酯, 苯并茛菪酮, 非那烯, 双非那烯	雷氏衣藻	[38, 39]
苦草	4-氧代- β -紫罗兰酮, 二氢猕猴桃内酯, 2-乙基-3-甲基顺丁烯二酰亚胺	铜绿微囊藻	[24]
丽藻	二硫环戊烷	谷皮菱形藻	[40]
川蔓藻	半日花烷二萜类	普通小球藻, 羊角月牙藻	[25, 26]
轮藻	4-甲硫基-1,2-二噻茂烷, 5-甲硫基-1,2,3-三噻烷	谷皮菱形藻	[40]

(3) 影响藻细胞呼吸作用. 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羊角月牙藻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 时呼吸速率仅为对照的 60%, 但继续培养呼吸速率增大为对照的 120%. Pollio 等人^[45]认为磷氧比 (ADP/O) 的降低导致细胞氧化磷酸化解偶联, 因此呼吸速率增大、线粒体增多, 但细胞呼吸效率却未得到提高. 芦苇化感物质抑藻过程中也发现呼吸作用的损伤. 化感物质投加初期呼吸速率呈现低促高抑的现象, 随时间延长呼吸速率逐渐降低^[16].

(4) 影响藻细胞酶活性. 不同化感物质可影响藻细胞不同酶的活性. 由于酶功能的差异, 化感物质可提高某些酶的活性, 而抑制另一些酶的活性. 狐尾藻特里马素 以及其他几种酚酸类化感物质可有效地抑制细胞碱性磷酸酶的活性, 并且混合的酚酸类物质对酶活的抑制作用较单一酚酸效果强烈^[33]. 芦苇化感物质可损伤藻细胞抗氧化酶(包括超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶), 使细胞清除自由基的能力下降^[8,46]. 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; 期间过氧化氢酶出现初期增强后减少的现象, 短暂的应激增强反映了藻细胞试图抵御氧化胁迫^[47]. 凤眼莲分泌物使栅藻细胞超氧化物歧化酶的活性应激升高后逐渐下降, 但过氧化物酶活性则持续升高^[48].

(5) 影响藻细胞内小分子物质的含量. 藻细胞内含有许多小分子物质, 行使着各自特殊的生理功能. 还原性小分子抗氧化物质与抗氧化酶功能相似, 承担着清除细胞内自由基的功能. 研究发现芦苇化感物质 EMA 可破坏藻细胞抗坏血酸-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(ROS)的水平显著升高, EMA 使藻细胞氧化还原平衡紊乱, 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^[46,49]. 芦竹化感物质作用于铜绿微囊藻细胞的过程中, 细胞中小分子物质的变化也具有类似规律^[47].

4 水生植物抑藻的应用方式

水生植物化感物质的释放途径可能包括挥发、根系分泌、雨雾淋溶、腐败释放、种子、花粉传播等^[27], 因此利用水生植物化感作用抑藻的方式主要有移植

栽种植物、投放干燥植物体、从植物中提取化感物质和人工合成化感物质。

移植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。通过植物之间景观功能的组合,既可以实现水体景观的需求,又可以在一定程度上满足抑藻的要求。如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、千屈菜、鸢尾等)与具有较强抑藻化感作用的水生植物(如芦苇、香蒲、水葱、菖蒲等),组成了具有抗击水华暴发风险的景观植物体系。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。

干燥植物体腐败过程中仍可释放抑藻化感物质。投放干燥植物体还可以为鱼虾等提供栖息环境,改善水体生态环境;但此方法影响水体美观,必须做好投放后植物的管理工作,防止植物投放时间过长引起的二次污染。如大麦秸秆抑藻,投放时间控制在藻类生长开始之前为最佳,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^[50]。

水生植物化感物质是天然的除藻剂。Rice^[3]认为化感物质有可能取代化学农药,大大减少农药用量。从植物中提取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,是一种非常有前景的方法,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。

另外,根据化感物质的结构进行人工合成,也是今后的研究方向。此方法不受水生植物的限制,不需要进行物质的分离提取,也不存在其他有机物的污染和活性的干扰,并且通过合理的人工修饰还可以进一步改良化感物质的抑藻特性,更好地满足抑藻需求。

5 水生植物抑藻今后有待研究的问题

(1) 化感物质的降解特性。化感物质的降解行为在农业等领域报道较多,但水生植物抑藻化感物质的降解行为少见报道。Kong 等人^[51]在五色梅植物体(非水生植物)在抑制铜绿微囊藻的过程中研究了两种马缨丹烯化感物质的降解行为,发现随着作用时

间的延长马缨丹烯在水体中的含量逐渐减少,30 天时降至最大浓度的 1/10 左右。了解水生植物化感物质的降解特性可以指导今后化感物质抑藻的实际应用,如确定化感物质的降解特性后,可以根据化感物质的有效作用浓度,制定化感物质的投加方案和投加剂量,因此相关的研究十分必要,亟待加强。

(2) 化感物质对产毒水华藻毒素产生和释放的影响。早在 1994 年, Jones 等人^[52]发现投撒有机螯合铜类杀藻剂控制铜绿微囊藻水华时,水中微囊藻毒素(MC-LR)显著升高,持续两周才逐渐被微生物降解。因此,投放杀藻剂控制产毒藻可能产生额外的风险。化感物质抑藻过程中是否会引起同样的问题也值得关注。门玉洁等^[53]研究发现化感物质 EMA 和焦酸均可增加铜绿微囊藻细胞内 MC-LR 的含量,但焦酸浓度高于 4 mg/L 时,细胞产毒能力受到抑制;并且发现当 EMA 达到一定浓度,抑制率较高时,由于培养液中藻密度显著降低,单位培养液中 MC-LR 总量也显著减少。目前,关于化感物质对产毒水华藻毒素产生和释放的影响研究有限,上述结论是否适用于其他化感物质,仍有待系统、全面地研究。

(3) 化感物质对其他水生生物的影响。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。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,研究化感物质对其他水生生物的影响十分必要,有助于综合全面地了解化感物质抑藻应用的生态安全性。李锋民^[16]采用快速 PFU 微型生物群落毒性试验法研究了芦苇化感物质 EMA 对微型生物群落的急性毒性,结果表明 EMA 对水中微型动物群落多样性影响不大。上述研究仍需进一步开展,而对其他化感物质、其他水生生物(包括有益藻类、鱼类等)的研究也将是今后研究的一个重要方面。

总之,将水生植物化感作用应用于水华藻类的生态治理,仍需要从化感物质的分离鉴定、化感物质对藻类生长特性、化感物质抑藻机理、化感物质应用的生态安全性、降解特性及迁移转化特性等多个方面做更为深入、系统和全面的研究。

参考文献

- 1 谢平. 鲢、鳙与藻类水华控制. 北京: 科学出版社, 2003
- 2 李锋民, 胡洪营. 植物化感作用控制天然水体中有害藻类的机理与应用. 城市给排水, 2004, 30(2): 1—4

- 3 Rice E L. Allelopathy. 2nd edition. London: Academic Press, 1984
- 4 Nakai S, Inoue Y, Hosomi M, et al. Growth inhibition of blue-green algae by allelopathic effects of macrophytes. *Wat Sci Tech*, 1999, 39(8): 47—53
- 5 Della Greca M, Monaco P, Previtiera L, et al. Allelochemical activity of phenylpropanes from *Acorus gramineus*. *Phytochemistry*, 1989, 28(9): 2319—2321
- 6 何池全, 叶居新. 石菖蒲(*Acorus tatarinowii*)克藻效应的研究. *生态学报*, 1999, 19(5): 754—758
- 7 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. *环境化学*, 1997, 16(3): 268—271
- 8 Li F M, Hu H Y. Allelopathic effects of different macrophytes on the growth of *Microcystis aeruginosa*. *Allelopathy J*, 2005, 15(1): 145—152
- 9 Hong Y, Hu H Y. Effects of the aquatic extract of *Arundo donax* L. (giant reed) on the growth of freshwater algae. *Allelopathy J*, 2007, 20(2): 315—325
- 10 Della Greca M, Ferrara M, Fiorentino A, et al. Antialgal compounds from *Zantedeschia aethiopica*. *Phytochemistry*, 1998, 49(5): 1299—1304
- 11 van Aller R T, Pessoney G F, Rogers V A, et al. Oxygenated fatty acids: A class of allelochemicals from aquatic plants. *ACS Symp Ser*, 1985, 268: 387—400
- 12 Della Greca M, Fiorentino A, Monaco P, et al. New dimeric phenanthrenoids from the rhizomes of *Juncus acutus*. Structure determination and antialgal activity. *Tetrahedron*, 2003, 59(13): 2317—2324
- 13 俞子文, 孙文浩, 郭克勤, 等. 几种高等水生植物的克藻效应. *水生生物学报*, 1992, 16(1): 1—7
- 14 Sutfeldt R, Petercif F, Nahrstedt A. Resorcinol in exudates of *Nuphar lutea*. *J Chem Ecol*, 1996, 22: 2221—2231
- 15 Aliotta G, Monaco P, Pinto G, et al. Potential allelochemicals from *Pistia stratiotes* L. *J Chem Ecol*, 1991, 17(11): 2223—2234
- 16 李锋民. 水生植物化感物质抑制有害藻类的研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2005
- 17 Gross E M, Erhard D, Enikö I. Allelopathic activity of *Ceratophyllum demersum* L. and *Najas marina* ssp. *Intermedia* (Wolfgang) Casper. *Hydrobiologia*, 2003, 506-509: 583—589
- 18 Saito K, Matsumoto M, Sekine T, et al. 1989. Inhibitory substances from *Myriophyllum brasiliense* on growth of blue-green algae. *J Nat Prod*, 52(6): 1221—1226
- 19 鲜啟鸣, 陈海东, 邹惠仙, 等. 四种沉水植物的克藻效应. *湖泊科学*, 2005, 17(1): 75—80
- 20 王立新, 吴国荣, 王建安, 等. 黑藻(*Hydrilla verticillata*)对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)抑制作用. *湖泊科学*, 2004, 16(4): 337—342
- 21 Mulderij G, van Donk E, Roelofs J G M. Differential sensitivity of green algae to allelopathic substances from Chara. *Hydrobiologia*, 2003, 491: 261—271
- 22 Mulderij G, Mooij W M, Smolders A J P, et al. Allelopathic inhibition of phytoplankton by exudates from *Stratiotes aloides*. *Aquat Bot*, 2005, 82(4): 284—296
- 23 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*. *Aquat Ecol*, 2005, 39: 11—21
- 24 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. *Environ Sci Pollut Res*, 2006, 13(4): 233—237
- 25 Della Greca M, Fiorentino A, Isidori M, et al. Antialgal ent-labdane diterpenes from *Ruppia maritima*. *Phytochemistry*, 2000, 55(8): 909—913
- 26 王卫红, 季民, 王苗苗, 等. 川蔓藻在再生水体中对普通小球藻的化感作用. *湖泊科学*, 2007, 19(3): 321—325
- 27 孔垂华, 胡飞. 植物化感(相生相克)作用及其应用. 北京: 中国农业出版社, 2001
- 28 Della Greca M, Fiorentino A, Isidori M, et al. Antialgal furano-diterpenes from *Potamogeton natans* L. *Phytochemistry*, 2001, 58(2): 299—304
- 29 Waridel P, Wolfender J L, Lachavanne J B, et al. ent-Labdane diterpenes from the aquatic plant *Potamogeton pectinatus*. *Phytochemistry*, 2003, 64(7): 1309—1317
- 30 Li F M, Hu H Y. Isolation and characterization of a novel antialgal allelochemical from *Phragmites communis*. *Appl Environ Microbiol*, 2005, 71: 6545—6553
- 31 洪喻, 胡洪营, 黄晶晶, 等. 不同溶剂提取芦竹化感物质对铜绿微囊藻生长的影响. *环境科学*, 2008, 29(11): 152—156
- 32 洪喻, 胡洪营, 黄晶晶, 等. 芦竹抑藻化感物质的初步分离及抑制铜绿微囊藻的效果. *环境化学*, 2008, 27(6): 751—755
- 33 Nakai S, Inoue Y, Hosomi M, et al. *Myriophyllum spicatum*-released allelopathic polyphenols inhibiting growth of blue-green algae *Microcystis aeruginosa*. *Wat Res*, 2000, 34(11): 3026—3032
- 34 Nakai S, Yamada S, Hosomi M. Anti-cyanobacterial fatty acids released from *Myriophyllum spicatum*. *Hydrobiologia*, 2005, 543: 71—78
- 35 Della Greca M, Mangoni L, Molinaro A, et al. (20S)-4 α -Methyl-24-methylenecholest-7-en-3 β -ol, an allelopathic sterol from *Typha latifolia*. *Phytochemistry*, 1990, 29: 1797—1798
- 36 Zhou S, Nakai S, Hosomi M, et al. Allelopathic growth inhibition of cyanobacteria by reed. *Allelopathy J*, 2006, 18(2): 277—285
- 37 Della Greca M, Fiorentino A, Monaco P, et al. Synthesis and antialgal activity of dihydrophenanthrenes and phenanthrenes II: Mimics of naturally occurring compounds in *Juncus effusus*. *J Chem Ecol*, 2001, 27(2): 257—271

- 38 孙文浩, 余叔文, 杨善元, 等. 凤眼莲根系分泌物中的克藻化合物. 植物生理学报, 1993, 19(1): 92—96
- 39 Della Greca M, Lanzetta R, Molinaro A, et al. Phenalene metabolites from *Eichhornia crassipes*. Bioorg Med Chem Lett, 1992, 2: 311—314
- 40 Wiium-Andersen S. Allelopathy among aquatic plants. Arch Hydrobiol, 1987, 27: 167—172
- 41 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. 生态环境, 2006, 15(5): 925—929
- 42 Körner S, Nicklisch A. Allelopathic growth inhibition of selected phytoplankton species by submerged macrophytes. J Phycol, 2002, 38: 862—871
- 43 Leu E, Krieger-Liszka A, Goussias C, et al. Polyphenolic allelochemicals from the aquatic angiosperm *Myriophyllum spicatum* inhibit photosystem II. Plant Physiol, 2002, 130(4): 2011—2018
- 44 Wiium-Andersen S, Anthoni U, Houen G. Elemental sulphur, a possible allelopathic compound from *Ceratophyllum demersum*. Phytochemistry, 1983, 22: 2613
- 45 Pollio A, Pinto G, Ligrone R, et al. Effects of the potential allelochemical α -asarone on growth, physiology and ultrastructure of two unicellular green algae. J Appl Phycol, 1993, 5: 395—403
- 46 Hong Y, Hu H Y, Xie X, et al. 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 Plant Physiol, 2008, 165(12): 1264—1273
- 47 Hong Y, Hu H Y, Xie X, et al. Gramine-induced growth inhibition, oxidative damage and antioxidant responses in freshwater cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*. Aquat Toxicol, doi: 10.1016/j.aquatox.2008.11.014
- 48 唐萍, 吴国荣, 陆长梅, 等. 凤眼莲根系分泌物对栅藻结构及代谢的影响. 环境科学学报, 2000, 20(3): 355—359
- 49 Hong Y, Hu H Y, Li F M. Physiological and biochemical effects of allelochemical ethyl 2-methyl acetoacetate (EMA) on cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*. Ecotox Environ Safe, 2008, 71(2): 527—534
- 50 李锋民, 胡洪营. 植物化感作用控制天然水体中有害藻类的机理与应用. 给水排水, 2004, 30(2): 1—4
- 51 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*. Weed Res, 2006, 46: 290—295
- 52 Jones G J, Orr P T. Release and degradation of microcystin following algicide treatment of a *Microcystis aeruginosa* bloom in a recreational lake, as determined by HPLC and protein phosphatase inhibition assay. Water Res, 1994, 28(4): 871—876
- 53 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. 环境科学, 2007, 28(9): 2058—2062

Research and application of inhibitory allelopathy from aquatic plants on algae

HONG Yu^{1,2} & HU HongYing²

¹ College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

² State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

In recent years, water eutrophication and algal blooms have been serious problems influencing the landscape and ecological functions of water bodies. How to control algal blooms and water eutrophication efficiently is recognized as vanguard and hot-spot issue in the field of water environment research. The inhibitory allelopathy of aquatic plants on algae as a novel and safe alternative for algal-bloom control has aroused extensive concern recently. This article reviews the major research achievements at home and abroad in the field of inhibitory allelopathy of aquatic plants on algae, including the species of aquatic plants discovered with inhibition on algae, the types of allelochemicals isolated and identified from these aquatic plants, and the inhibitory modes of action of allelochemicals on algae, etc. Finally, the technological application and research development as well as the problems yet to be studied in the field of inhibitory allelopathy of aquatic plants on algae are raised to help make better use of aquatic plant resources for water environment research and management.

eutrophication, algal-bloom control, aquatic plants, allelopathy