

植物化感作用在控制水华藻类中的应用

邹华, 邓继选, 朱银

(江南大学 环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 伴随着水环境污染, 水体中藻类疯长形成的“水华”、“赤潮”现象日益严重。各种化学、物理、生物方法被用于抑制藻类的生长, 但这些方法都存在不易控制、成本高、易破坏生态等问题。利用植物化感作用抑制藻类生长具有生态安全和灵敏高效等优点, 对湖泊富营养化的生态控制具有非常重要的意义。作者介绍了植物化感抑藻的研究进展, 归纳了化感作用的种类和化感物质的化学成分, 并讨论了植物化感抑藻的作用机制、抑藻机理, 最后对植物化感作用在抑藻方面的研究前景进行了展望。

关键词: 富营养化; 化感作用; 水生植物; 抑藻

中图分类号: X 171.4 文献标志码: A 文章编号: 1673-1689(2012)02-134-07

Application of Plant Allelopathy in Controlling of Algal Bloom

ZOU Hua, DENG Ji-xuan, ZHU Yin

(School of Environment & Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: With the serious water pollution, the "algal bloom", "red tide" formed by the overpopulation of algal is getting worse. At present, different methods including chemical, physical, biological were used to inhibit the growth of algae in polluted water. However, the characteristics of these methods are difficult controlling, high cost, and damaging the ecology. In order to develop a low cost and ecologically safe method to inhibit the growth of algae, plant allelopathy is introduced. In this review, the research progress of algal-inhibition with plant allelopathy was introduced, the types of plant allelopathy and the chemical composition of allelochemicals were summarized, the mechanisms and perspective of plant allelopathy were discussed.

Key words: eutrophication, allelopathy, hydrophyte, algal-inhibition

1 植物化感作用研究背景

近年来水体富营养化现象愈演愈烈, 导致藻华频发。藻华暴发的水域中藻类耗掉了水中大量溶解氧, 使水生生物大量死亡, 不仅严重恶化了水质,

破坏了生态系统的平衡和自我调节能力, 而且许多有害藻类会产生并向水体释放毒素^[1-3]。这些剧毒的藻分泌物不仅毒害水生生物, 影响渔业生产, 甚至会通过食物链传递, 威胁人类的健康。因此, 人们对新型高效、生态安全的藻类控制技术的探索一直没有停止, 化感作用和化感物质的发现为解决以

收稿日期: 2011-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(20707007)。

作者简介: 邹华(1972-), 男, 江苏无锡人, 工学博士, 副教授, 主要从事环境生物技术和天然水体藻华污染治理研究。

E-mail: hoolzou@163.com

上问题提供了一种新的思路^[4-6]。近年来,水生植物对藻类的化感抑制作用开始应用于富营养化水体藻类控制领域,相关研究已受到国内外的关注。

植物化感作用(Allelopathy)的概念是 H. Molisch 在 1937 年首先提出,指所有类型植物(含微生物)之间生物化学物质的相互作用,同时指出这种相互作用包括有害和有益两个方面^[7]。20 世纪 70 年代中期,Rice E. L. 根据 H. Molisch 的原始定义和 40 年植物化感作用的研究成果,将植物化感作用定义为:植物(含微生物)通过释放化学物质到环境中而产生对其他植物直接或间接的有害作用,这些物质称为化感物质(Allelochemical)^[7]。

抑藻植物能够分泌抑制藻类生长的化感物质,起到修复、净化水体的作用。而且,这些化感物质是植物生长过程中产生的次生代谢物质,在很低的浓度下就可以发挥有效作用,化感物质的作用不是“杀死”,而往往是抑制或拒避,这样的自然化学调控作用常常是缓慢和温和,化感物质在自然条件下容易降解,不会积累,生态安全性好。因此,利用植物的化感物质来抑制藻类的生长是一种廉价、安全、高效的抑制方法,将化感物质应用于藻类控制具有良好地应用前景。

2 植物化感抑藻的研究进展

化感作用在农林生态系统中的研究起步较早,并已取得了丰硕的成果,而在抑制藻类生长方面的研究在国内外均处在起步阶段。

2.1 水生植物化感抑藻的研究

化感作用广泛存在于水生生态系统。对水生植物的研究,多集中在沉水植物和少数漂浮植物对藻类的化感作用上。国内外报道的具有化感抑藻作用的沉水植物已超过 30 多种^[8]。

早在 1949 年,加拿大伊乐藻就被发现对蓝藻的生长有抑制作用,伊乐藻能明显减少生物膜上的一些附着藻类^[9]。后来,Lüring 等^[10]发现加拿大伊乐藻对栅藻的生长也有抑制作用。眼子菜科的某些植物能抑制浮游植物的增长,鼈齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)、尖叶眼子菜(*P. oxyphyllus*)、微齿眼子菜(*P. maackianus*)都能阻止铜绿微囊藻的生长^[6,11]。轮藻丰富的湖泊一般都水体清澈,而且,轮藻表面一般都较少附着藻类。

Mulderij 等^[12]发现几种轮藻混合培养的种植水对羊角月牙藻和微小小球藻(*Chlorella minutissima*)具有明显的抑制作用。金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)对浮游植物有明显的化感作用,其释放的化感物质能抑制藻类,特别是蓝藻的生长^[13,14]。另外,黑藻(*Hydrilla verticillata*)^[15]、水卫士(*Stratiotes aloides*)^[16,17]、苦草(*Vallisneria spiralis*)^[18,6]、大茨藻(*Najas marina*)^[19]、水罗兰等都对铜绿微囊藻的生长有明显的抑制作用^[20]。

对不同水生植物化感抑藻作用的比较研究,不同研究者得到的结果却不尽相同。狐尾藻属(*Myriophyllum*)的植物曾被报道是目前已知化感作用最强的一属沉水植物^[6]。但 Sabine 等的研究^[21]发现穗花狐尾藻、金鱼藻、水剑叶、水盾草等抑藻活性很高,而轮叶狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*)、伊乐藻(*Elodea canadensis/Elodea nuttallii*)、茨藻(*Najas marina*)等抑藻活性一般。鲜啟鸣等研究了 4 种沉水植物(金鱼藻、微齿眼子菜、苦草、伊乐藻)对铜绿微囊藻的抑制作用。结果显示金鱼藻和微齿眼子菜在生长过程中连续释放化感物质,具有较强的抑制藻类生长的作用^[11]。杨琳等的研究称伊乐藻(*Elodea canadensis*)和鼈齿眼子菜(*Potamogeton pectinatus* L.),这两种沉水植物均对斜生栅藻的生长具有化感效应,且都表现为“低促高抑”的现象^[22]。

对挺水植物的化感抑藻的研究发现,菖蒲对淡水中几种常见藻类(栅藻、小球藻、盘星藻、何雷氏衣藻、铜绿微囊藻等)均有化感抑制作用^[23]。自然光照条件下,菖蒲对水华鱼腥藻和小球藻的抑制率分别达 100% 和 91.2%^[24]。清华大学的李锋民等研究了芦苇等 7 种大型水生植物及芦苇不同部位的浸出液对蛋白核小球藻的化感作用。结果显示所有受试植物的浸出液均对蛋白核小球藻产生抑制作用,其中芦苇的抑制作用最强,当芦苇浸出液为 10 g/L 时抑制率可达 97.6%,藻类几乎不能生长^[25]。植物的不同部位对藻类的抑制效果会存在差异。芦苇的不同部位(根、地下茎、茎和叶片)对蛋白核小球藻的生长抑制作用的比较结果表明,叶片的抑藻效果最好。

景观植物如睡莲、荷花等也有化感抑藻作用^[26],这对改善小型景观水体的藻类过度生长有着重要作用。

2.2 陆生植物化感抑藻的研究

陆生植物对藻类也有化感抑制作用,农作物秸

秆^[27]、柳树、广玉兰、黄杨和龙爪槐等植物的提取物都具有抑藻作用^[28,29]。利用大麦秸秆直接投放水体抑制藻类是目前为止最为成功的化感抑藻的应用实例^[30,31]。Weclh 等曾在切斯特菲尔德一个废弃的以团集刚毛藻(*Cladophora glomerata*)和水绵丝状藻(*Spirogyra sp.*)为主的重度富营养化的运河中的研究发现,大麦秆的投入对水体中藻的抑制率达到了 90%^[32]。同样,在苏格兰的一个面积为 25 000 m² 的水域,经过大麦秆处理以后,水体中的藻量减少一半,富营养化现象得到了有效控制^[33]。1994 年,美国水生植物管理中心将约 50 g/m³ 的大麦秆直接投入富营养化水体有效抑制了藻类。1997 年,Everall 等在对 Linacre Brook 的水库所做的研究发现:大麦秆的浸出液使水库中原有的优势藻——弱细颤藻(*Oscillatoria tenuis*)和浮游绿藻的生物量在 3 个月以后显著降低^[34],另外在加拿大、澳大利亚、瑞典、南非等也都有用大麦秆成功抑制水体中藻类过度生长的报道^[30]。

作者研究发现:大麦秆对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、小球藻(*Chlorella vulgaris*)、团集刚毛藻(*C. glomerata*)、溪生克里藻(*Klebsormidium rivulare*)、鞘藻(*Oedogonium sp.*)、黄道带饰月牙藻(*Selenastrumcapricornutum*)等都表现出了良好的抑藻效果^[30]。大麦秆浸出液浓度在很低时就会对绝大多数藻类的生长产生明显的抑制作用,但不同藻的敏感性是不同,铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)最为敏感,抑制作用最明显,即使在非常低的质量分数(0.005%)下也能够对铜绿微囊藻产生抑制作用^[35],而有些藻类却存在一定的抗性^[36]。美国的普度大学和马里兰大学的实验室还对不同微藻对大麦秆浸出液的敏感程度做了比较,反应从大到小依次是:蓝藻、硅藻、绿藻、裸藻,相对来说各种丝状藻,如黑孢藻(*Pithophora*)和水绵则抑制不明显,最高仅为 50%^[37]。

通过对水稻秸秆的抑藻作用研究,我国学者发现稻秆也具有与大麦秆类似的抑藻作用^[38-40],但效果没有大麦秆好^[41]。比较稻秆的不同部分的抑藻效果,发现抑藻效果:稻根>稻穗>稻秆^[41]。暨南大学的欧阳婷等研究了玉米秸秆和玉米叶对塔玛亚历山大藻(*Alexandrium tamarense*)生长的影响,发现玉米秸秆不仅能显著抑制塔玛亚历山大藻的生长,还能选择性的抑制不同赤潮藻的生长,而

且玉米叶的抑藻作用强于玉米秸秆,0.5 g/L 的玉米叶对密度为 1.69×10^6 个/L 的塔玛亚历山大藻的生长有明显的抑制作用^[42]。

2.3 植物化感作用的机理探讨

自从 1949 年 Hasler 等人首次发现了水生植物对藻类的克制效应,研究者对这一现象提出了不同的解释:水生植物与藻类之间对矿质营养的竞争;水生植物对藻类的遮光作用;水生植物释放的化感物质对藻类生长产生的化感作用;水生植物根际微生物的作用。孙文浩^[43]等通过光照和营养试验证明在排除了前两个原因的条件下,凤眼莲仍有显著的抑藻作用。何池全等也通过实验证明了石菖蒲抑制藻类的生长除了由于与藻类竞争光照和矿质营养外,主要原因是石菖蒲根系分泌物对藻类的化感作用^[44]。Nakai^[6]等通过测定培养容器底部的光密度和藻类培养液中矿质营养的浓度,排除了由于遮光作用和矿质营养竞争而造成藻类生长受到抑制的可能性。孙文浩^[45]等又进一步培育出了凤眼莲无菌苗,并用实验证明了该无菌苗仍然对雷氏衣藻有抑制作用。这说明是凤眼莲分泌的化感物质对藻类产生了化感抑制作用。另外,Nakai 等还通过初始投加和半连续投加实验证明了水生植物是通过连续释放化感物质来抑制藻类生长的^[46]。

为了确定抑藻活性物质,以进一步开发出具有抑藻作用的天然化合物,得到对自然环境无害的绿色除藻剂,研究者进行了大量的研究。有人认为不稳定的含硫化合物是主要的抑制藻类生长的活性物质,有人发现从石菖蒲中提取的苯丙烷类对多种绿藻和蓝藻具有抑制作用,袁峻峰^[19]则通过对金鱼藻的抑藻研究,认为生物碱是主要的化感物质。江南大学向丽等采用 GC/MS 手段检测具有抑藻作用的秸秆浸出液成份后,指出脂肪酸和酚酸类物质在秸秆抑藻作用中起着重要作用^[41],这与 Everall 等的现场实验结果^[34]类似。Everall 等在现场秸秆抑藻实验中鉴定出多种抑藻活性成分,主要为长链脂肪酸和酚类物质,同时还有一一定量的酮类等物质。

清华大学从芦苇中分离并鉴定出的化感物质 2-甲基乙酰乙酸乙酯(ethyl 2-methylacetoacetate, EMA)对藻类的抑制作用具有高效性和选择性^[47]。它对于铜绿微囊藻和蛋白核小球藻具有很强的化感抑制作用,半效应浓度(EC50)值分别为 0.65 mg/L 和 0.49 mg/L,而对普通小球藻却没有表现

出明显的化感抑制作用。不同的植物产生的化感抑藻物质并不相同,化感物质选择性抑制某些藻类的特点可能与该化感物质的抑制机理有关。

在高等植物领域,化感作用的机理研究已经取得一定成果,但化感物质抑制藻类的机理研究仍然缺乏,且尚无统一的结论,但不同的研究者根据各自的实验得到了一些初步结果。化感物质对藻类的生长抑制作用机理总结为以下几个方面:

2.3.1 影响光合作用 叶绿素是光合作用的场所。有些化感物质通过破坏藻类的叶绿素,减少藻类的同化产物,从而抑制藻类的生长。孙文浩研究凤眼莲种植水的藻类的抑制作用时,发现藻类光合作用效率显著降低,叶绿素 a 被破坏,细胞还原能力显著下降,用荧光显微镜检测看到藻细胞由鲜红色变为淡绿色^[45]。凤眼莲根系附着的藻细胞中叶绿素 a 的含量明显下降,而其降解产物脱镁叶绿素 a 酸酯的含量升高,这说明了化感物质可能促进了叶绿素 a 的降解。向丽也指出秸秆浸出液不仅阻碍了藻细胞生长、合成新的叶绿素,而且会破坏原有藻细胞的叶绿素^[41]。

2.3.2 影响细胞膜的功能 化感物质能降低细胞膜的完整性,使细胞内物质大量渗出,使渗出液的电导率增加^[47]。从芦苇中分离得到的抑藻组分 2-甲基乙酐乙酸乙酯(EMA)能够造成细胞膜的彻底破坏,使得 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 外泄,从而造成藻细胞的死亡。进一步的研究表明,化感物质 EMA 能够使铜绿微囊藻和蛋白核小球藻细胞膜中存在的主要脂肪酸(不饱和脂肪酸亚酸和亚油酸)被氧化,不饱和度增加,从而使细胞膜流动性增强,稳定性降低,对进出细胞物质的选择性降低,导致细胞内含物泄露,这也是细胞内金属离子渗出的原因。向丽的研究指出,化感物质会引起藻细胞酯膜过氧化程度加剧,导致细胞膜的损伤;藻细胞膜上的酯膜过氧化反应会产生大量的 MDA 和新的氧自由基等,所以 MDA 呈上升趋势。MDA 具有强交联性,它可使蛋白质、核酸等交联成 schiff 碱,使蛋白质分子及酶变性失活,使 DNA 受到损伤,结果造成膜结构被破坏。

2.3.3 对酶活性的影响 化感物质能影响生物体的酶活性,由于酶的特性不同,化感物质在提高某些酶活性的同时又能抑制另外一些酶的活性。芦苇中分离得到的抑藻活性组分 EMA 能够降低藻细

胞中超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)的活性,引起某些脂类的过氧化^[47]。低浓度的 EMA 提高了蛋白核小球藻和普通小球藻 2 种藻类的 SOD、POD 活性;高浓度的 EMA 显著降低了蛋白核小球藻的抗氧化体系酶活性,而使普通小球藻的抗氧化体系酶活性提高了 3 倍以上。Friebe 发现化感物质能影响细胞膜 ATP 酶的活性^[48]。作者也发现化感物质使超氧化物歧化酶(SOD)和丙二醛(MDA)有应激性反应。藻细胞的 SOD 活力都会发生先升高后降低的变化,MDA 含量则呈逐渐上升的趋势。SOD 活力的降低打破了细胞内自由基产生与清除间的正常平衡状态,使自由基过量产生并积累,从而进一步对藻造成伤害,由此达到抑藻效果^[41]。

3 结语

采用植物化感抑藻处理水体藻类过度繁殖具有效果显著、安全环保、简易可行,经济易普及的特点。尽管目前各研究结果还不统一,但普遍认为:不会产生环境危害;植物化感作用只抑制某些藻类和微生物的生长,对鱼类、水生高等植物的生长没有影响^[49];此外,不同藻细胞对不同植物化感作用的敏感性不同,可以选择性抑制某些藻类。因此,研究、开发其作为治理富营养化水体的产品,不失为解决棘手环境问题的一种理想方法。

随着人们对水华危害认识的加深以及对藻类生长生理特性的了解,对化感抑藻的研究也取得了一定的阶段性成果,但目前仍处于研究阶段,要在实践中应用仍存在一些问题。今后需要从以下几个方面开展进一步研究:

1) 植物化感物质的产生和释放是植物在进化过程中产生的一种对环境的适应性机制。不同的环境条件,如光强、光照时间、水质等的不同,应该对化感物质的产生也具有影响。因此在今后的研究中要把这方面的因素也考虑在内。

2) 已提出的化感物质抑藻机理并不能完全解释化感物质对藻类的选择性抑制。因此还需要与分析化学、分子生物学等学科结合,在分子或基因水平上,从化感物质及其作用的藻类两方面进一步进行抑藻机理研究,尤其是对化感物质选择性抑藻机理的研究。

3) 化感物质在水中抑藻作用持续时间的长短直接影响其在藻类控制领域的应用。目前,尚未对化感物质在环境中的降解特性进行深入研究。虽然目前尚未发现化感控藻对环境有负面作用,但对其在应用中可能产生的生态影响应加以研究探讨,对化感抑藻物质的生态毒理学方面也应进行必要的研究。

4) 虽然目前已经分离、提取了多种抑藻化感物质,应对其做进一步的实验研究,针对相关物质进行藻类生长的联合抑制实验,得到最佳抑藻效果的

物质组分,并对分离出的物质作更深入的抑藻机理探讨。由于化感物质在植物体内含少,要在实际中应用会比较困难。因此应该考虑人工培养和浸提化感物质,在此基础上开发环境友好的高效控藻制剂。

总之,将植物化感作用应用于富营养化水域藻类的控制,需要从化感物质对不同藻类生长特性的影响、在实际水体中的作用效果、对应用水域的生态安全性、在环境中的降解特性,以及作用机理等多方面进行全面深入地系统研究。

参考文献(References):

- [1] Matthiensen A, Beattie K A, Yunes J S, et al. Microcystin-LR, from the cyanobacterium *Microcystis* RST 9501 and from a *Microcystis* Bloom in the Patos Lagoon Estuary, Brazil [J]. **Phytochemistry**, 2000, 55:383-387.
- [2] 戚莉莉,程子波,邹华,等. 高效液相色谱法测定太湖水中微囊藻毒素的研究[J]. **食品与生物技术学报**, 2009, 28(1): 97-101.
QI Li-ly, CHEN Zi-bo, ZOU Hua, et al. HPLC Determination of microcystin in Taihu Lake [J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2009, 28(1): 97-101. (in Chinese)
- [3] 程子波,邹华,向丽,等. 叶绿素作用下微囊藻毒素-LR的光降解[J]. **环境化学**, 2009, 28(5):683-686.
CHENG Zi-bo, ZOU Hua, XIANG Li, et al. Photocatalytic degradation of microcystin-LR with chlorophyll[J]. **Environmental Chemistry**, 2009, 28(5):683-686. (in Chinese)
- [4] Vyvyan J. R. Allelochemicals as leads for new herbicides and agrochemicals [J]. **Tetradron**, 2002, 58(9): 1631-1646.
- [5] Nakai S, Inoue Y, Hosomi M. Algal growth inhibition effects and inducement modes by plant-producing phenols [J]. **Water Research**, 2001, 35(7):1855-1859.
- [6] Nakai S, Inoue Y, Hosomi M, et al. Growth inhibition of blue-green algae by allelopathic effects of macrophytes [J]. **Water Science and Technology**, 1999, 39(8):47-53.
- [7] Rice E. L. 天然化学物质与有害生物防治[M]. 北京:科学出版社, 1988.
- [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 Li-ping, 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. (in Chinese)
- [9] Daniela Erhard and Elisabeth M. Gross. Allelopathic activity of *Elodea canadensis* and *Elodea nuttallii* against epiphytes and phytoplankton [J]. **Aquatic Botany**, 2006,(3): 203-211.
- [10] Lürling M., van Geest G. and Scheffer M. Importance of nutrient competition and allelopathic effects in suppression of the green alga *Scenedesmus obliquus* by the macrophytes *Chara*, *Elodea* and *Myriophyllum*[J]. **Hydrobiologia**, 2006,556(1):209-220.
- [11] 鲜启鸣,陈海东,邹惠仙,等. 四种沉水植物的克藻效应[J]. **湖泊科学**, 2005, 17(1): 75-80.
XIAN Qi-ming, CHEN Hai-dong, ZOU Hui-xian, et al. Allelopathic effects of four submerged macrophytes on *Microcystis aeruginosa*[J]. **Journal of Lake Science**, 2005, 17(1): 75-80. (in Chinese)
- [12] Mulderij G, Van Donk E, Roelofs J G M. Differential sensitivity of green algae to allelopathic substances from *Chara*[J]. **Hydrobiologia**, 2003, 491(1-3): 261-271.
- [13] 钱志萍,冯燕,孙莉,等. 金鱼藻对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究[J]. **植物研究**, 2006, 26(1): 79-83.
QIAN Zhi-ping, FENG Yan, SUN li, et al. Inhibitory effects of *Ceratophyllum oryzetorum* on the growth of *Microcystis aeruginosa* [J]. **Bulletin of Botanical Research**, 2006, 26(1): 79-83. (in Chinese)
- [14] KÖRNER S, NICKLISCH A. Allelopathic growth inhibition of selected phytoplankton species by submerged macro-

- phytes[J]. *Journal of Phycology*, 2002, 38(5): 862—871.
- [15] 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.
WANG Li-xin, ZHANG Ling, ZHANG Yu-xia, et al. The inhibitory effect of *Hydrilla verticillata* culture water on *Microcystis aeruginosa* and its mechanism [J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2006, 32(6): 672—678. (in Chinese)
- [16] Mulderij G, Mooij W, Van. Donk E. Allelopathic growth inhibition and colony formation of the green alga *Scenedesmus obliquus* by the aquatic macrophyte *Stratiotes aloides*[J]. *Aquatic Ecology*, 2005, 39(1): 11—21.
- [17] Mulderij G, Mooij W M, Smolders A J, et al. Allelopathic inhibition of phytoplankton by exudates from *Stratiotes aloides* [J]. *Aquatic Ecology*, 2005, 39(1): 284—296.
- [18] 顾林娣,陈坚,陈卫华,等. 苦草种植水对藻类生长的影响[J]. *上海师范大学学报:自然科学版*, 1994, 23(1): 62—68.
GU Lin-di, CHEN Jian, CHEN Wei-hua, et al. *Vallisneria Water on the Growth of Algae*[J]. *Journal of Shanghai Normal University: Natural Sciences*, 1994, 23(1): 62—68. (in Chinese)
- [19] 邓平. 三种沉水植物对浮游植物的化感效应研究[D]. 武汉:中国科学院水生生物研究所, 2007.
- [20] 孟丽华,刘义新. 水罗兰对不同密度铜绿微囊藻抑制作用的研究[J]. *环境污染与防治*, 2009, 31(1): 43—46.
MENG Li-hua, LIU Yi-xin. Inhibitory effects of *Hygrophila difformis* on the growth of *Microcystis aeruginosa*. [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2009, 31(1): 43—46. (in Chinese)
- [21] Sabine H, Gross EM. Can allelopathically active submerged macrophytes stabilize clear water states in shallow lakes[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2008, 9: 422—432.
- [22] 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 Geng-dong, 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. (in Chinese)
- [23] 张维昊,周连凤,吴小刚,等. 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.
ZHANG Wei-hao, ZHOU Lian-feng, WU Xiao-Gang, et al. Allelopathic effect of *acorus calamus* on *microcystis aeruginosa*[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(3): 355—358.
- [24] 丁惠君,张维昊,王超,等. 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.
DING Hui-jun, ZHANG Wei-hao, WANG Chao, et al. Allelopathic effect of *acorus calamus* on some species of algae[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 30(6): 20—22. (in Chinese)
- [25] 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.
LI Feng-Min, HU Hong-ying. Allelopathy and inhibitory effect of extracts from macrophytes on algae growth[J]. *China Water & Wastewater*, 2004, 20(11): 18—21. (in Chinese)
- [26] 李磊,候文华. 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.
LI Lei, HOU Wen-hua. Inhibitory effects of liquor cultured with *nelumbo nucifera* and *nymphaea tetragona* on the growth of *microcystis aeruginosa*[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2007, 28(10): 2180—2186. (in Chinese)
- [27] 邹华,向丽,周思佳. 农作物秸秆控制藻华的研究与应用[J]. *上海环境科学*, 2010, 29(3): 122—126.
ZOU Hua, XIANG Li, ZHOU Si-jia. Research and applications of crop straw in controlling of algal bloom[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2010, 29(3): 122—126. (in Chinese)
- [28] 李庆华,郭沛涌,田美燕,江中央. 柳树叶浸提液对蛋白核小球藻的化感作用[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(5): 884—888.
LI Qing-hua, GUO Pei-yong, TIAN Mei-yan, et al. Allelopathy of *Salix babylonica* leaf extracts on *Chlorella pyrenoidosa* [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(5): 884—888. (in Chinese)
- [29] Miao Li, Dong Kun-ming, Li Nan, et al. Antialgal activities of allelochemical extracts from 3 terrestrial plant species[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2010, 11(7).
- [30] 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: 307—311.
- [31] Huang Z Q, Liao L P, Wang S L. Allelopathy of phenolics from decomposing stump—roots, in replant Chinese fir wood-

- land [J]. **Journal of Chemical Ecology**, 2000, 26(9): 2211—2219.
- [32] Welch I M, Barrett P R F, Gibson M T, et al. Barley straw as an inhibitor of algal growth I : studies in the Chesterfield canal [J]. **Journal of Applied Phycology**, 1990, 2: 231—239.
- [33] Barrett P R F, Littlejohn J W, Curnow J. Long-term algal control in a reservoir using barley straw [J]. **Hydrobiologia**, 1999, 415: 309—313.
- [34] Everall N C, Lees D R. The identification and significance of chemicals released from decomposing barley straw during reservoir algal control [J]. **Water Research**, 1997, 31(3): 614—620.
- [35] Ball A S, Williams M, Vincent D, et al. Algal growth control by a barley straw extract [J]. **Bioresource Technology**, 2001, 77: 177—181.
- [36] Martin D, Ridge. The relative sensitivity of algae to decomposing barley straw [J]. **Journal of Applied Phycology**, 1999, 11: 285—291.
- [37] Lembi C A. Barley straw for algae control [J]. **Aquatics**, 2001, fall: 13—16.
- [38] 张玲. 盐京九号水稻抑制铜绿微囊藻生长作用及其机制的研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2008.
- [39] 万宏, 张昀. 降解稻草对蓝藻生长的抑制作用[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2000, 36(4): 485—488.
WAN Hong, ZHANG Jun. Growth inhibition of cyanobacteria by decomposed rice straw[J]. **Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis**, 2000, 36(4): 485—488. (in Chinese)
- [40] 吴小平, 张平静. 发酵稻草抑藻机理研究[J]. 生态环境, 2006, 15(1): 20—22.
WU Xiao-ping, ZHANG Ping-jing. The Mechanisms of algal inhibition by fermented rice straw[J]. **Ecology And Environment**, 2006, 15(1): 20—22. (in Chinese)
- [41] 向丽. 稻麦秸秆对铜绿微囊藻生长的抑制作用及其机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2010.
- [42] 欧阳好婧. 玉米秸秆对赤潮藻的抑制作用及其机制的初步研究[D]. 广州: 暨南大学, 2006.
- [43] 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 Wen-hao, YU Zi-wen, YU Shu-wen. Inhibitory effect of eichhornia crassipes (Mart.) Solms on algae [J]. **Acta Phytophysiological Sinica**, 1988, 14(3): 294—300. (in Chinese)
- [44] 何池全, 叶居新. 石菖蒲克藻效应的研究[J]. 生态学报, 1999, 19(5): 745—749.
HE Chi-quan, YE Ju-xin. Inhibitory effects of *Acorus tatarinowii* on algae growth[J]. **Acta Ecologica Sinica**, 1999, 19(5): 754—758. (in Chinese)
- [45] 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[J]. 植物生理学报, 1993, 19(1): 92—96.
SUN Wen-hao, YU Shu-wen, YANG Shan-yuan, et al. Allelochemicals from root exudates of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) [J]. **Acta Phytophysiological Sinica**, 1993, 19(1): 92—96. (in Chinese)
- [46] Nakai S, Inoue Y, Hosomi M, et al. Growth inhibition of blue-green algae (*Microcystis aeruginosa*) by *Myriophyllum spicatum*-releasing for polyphenols[J]. **Water Research**, 2000, 34(11): 3026—3032.
- [47] 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[J]. 给水排水, 2004, 30(2): 1—4.
LI Feng-min, HU Hong-ying. Mechanism of phyto-allelochemicals and its application for harmful algae control in nature water body[J]. **Water & Wastewater Engineering**, 2004, 30(2): 1—4. (in Chinese)
- [48] Fribe A, Roth U. Effect of 2,4-dihydroxy-1,4-benzoxazin-3-ones on the activity of plasma membrane H⁺-ATPase[J]. **Phytochemistry**, 1996, 44(6): 979—983.
- [49] Cooper J A, Pillinger J M, Ridge I. Barley straw inhibits growth of some aquatic saprolegniaceous fungi [J]. **Aquaculture**, 1997, 156: 157—163.