

潘琦, 刘娅琴, 邹国燕, 等. 香根草对铜绿微囊藻的生长抑制及其成分分析[J]. 上海农业学报, 2019, 35(1): 47-52.

香根草对铜绿微囊藻的生长抑制及其成分分析

潘琦, 刘娅琴*, 邹国燕**, 周文宗, 付子轼, 刘长娥, 宋祥甫
(上海市农业科学院, 上海 201403)

摘要: 随着水体富营养化程度的加剧, 藻类等大量繁殖, 在对水体造成破坏的同时, 藻类产生的藻毒素会使动物中毒或通过食物链传递, 威胁人类的健康。为控制富营养化水体中蓝藻的数量, 减少水华的发生, 利用生态浮床技术, 以浮床植物香根草为研究对象, 通过在铜绿微囊藻培养中添加香根草种植水, 研究香根草对铜绿微囊藻的抑制效应。每 3 d 使用血球计数板计算藻细胞密度, 记录接种微囊藻的种植水和对照处理下的藻类数量; 并用分光光度法测定培养液中铜绿微囊藻的叶绿素 a 含量, 使用固相萃取方法收集香根草种植水中的根系分泌物, 经气质联用仪(GC-MS)分析香根草种植水中的化学物质。结果表明: 以蒸馏水培养 5 d 收集获得的香根草种植水对铜绿微囊藻的生长有明显的抑制作用。与对照组相比, 香根草种植水中培养的铜绿微囊藻生长缓慢。其中培养 6 d 后, 香根草种植水开始对铜绿微囊藻的生长产生抑制作用, 且抑制作用随时间的推移而增加, 在与铜绿微囊藻共培养 21 d 后, 抑制率达到 76%。种植水中藻类叶绿素 a 含量为 447.62 mg/L, 对照组铜绿微囊藻叶绿素 a 含量则高达 3 592 mg/L, 为试验组的 8 倍。香根草根分泌物中有 24 种化合物, 其中己酸、棕榈酸、硬脂酸等脂肪酸对铜绿微囊藻等藻类有抑制作用。2-羟基丙酸相对含量最高, 为 50.71%; 其次是棕榈酸, 相对含量为 23.2%。香根草种植水通过抑制铜绿微囊藻的光合作用, 对铜绿微囊藻的生长产生抑制作用。

关键词: 香根草; 铜绿微囊藻; 脂肪酸; 化感作用

中图分类号: X52; X173 文献标识码: A 文章编号: 1000-3924(2019)01-047-06

Inhibitory effect of the root of floating bed plants of *Vetiveria zizanioids* Linn. on *Microcystis aeruginosa*

PAN Qi, LIU Ya-qin*, ZOU Guo-yan**, ZHOU Wen-zong, FU Zi-shi, LIU Chang-e, SONG Xiang-fu
(Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China)

Abstract: With the aggravation of eutrophication of water body, algae can be propagated in large amount. The toxin produced by algae will cause the animals to be poisoned or pass through the food chain, threatening the health of human beings. In order to control the number of the blue-green algae in eutrophic water, this experiment used ecological floating bed technology to study the inhibition effect of *Vetiveria zizanioids* on *Microcystis aeruginosa* by adding the water which planted *V. zizanioids* in the culture of *M. aeruginosa*. The cell density was calculated with the blood cell count board per 3 d, and the content of chlorophyll a of *M. aeruginosa* was measured by spectrophotometric method. The chemical substances in *V. zizanioids* were analyzed by GC-MS. The results showed that the growth of *M. aeruginosa* was significantly inhibited by the root secretions of *V. zizanioids*. The highest inhibitory rate (76%) could be reached within 21 days. The results showed that the chlorophyll a concentration of algae in the plant was 447.62 mg/L, and the concentration of chlorophyll a in the control group was up to 3 592 mg/L. The ρ (Chla) of the controls could be as 8 times high as that of the experiments. The results of GC-MS analyses showed that there were 24 fatty acids in the root secretions of *V. zizanioids*. Those acids included hexanoic acid, palmitic acid, oleic acid and stearic acid, etc. The relative content of lactic acid was the

收稿日期: 2018-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(20477028); 国家水体污染控制与治理科技重大专项专题(2012ZX07202004-004); 上海市科委项目(15391912200, 16391900500)

作者简介: 潘琦(1978—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事水环境治理研究。E-mail: panqi@saas.sh.cn

* 并列第一作者

** 通信作者

highest(50. 71%) ,followed by palmitic acid(23. 2%) . The *V. zizanioids* water can inhibit the growth of *M. aeruginosa* by inhibiting photosynthesis and growth quantity of *M. aeruginosa*.

Key words: *Vetiveria zizanioids*; *Microcystis aeruginosa*; Fatty acid; Alleloathy

随着社会经济的发展,大量废水和生活污水排入湖泊和江河,引起地表水体严重污染。富营养化水域日益增多,导致藻类特别是蓝藻迅猛生长,由此引发的水华或赤潮,在破坏原有水体生态系统平衡^[1]的同时,也严重威胁到了人类健康。改善富营养化水体水质,有效控制有害藻类生长已成为环境科学领域的研究热点。现有抑藻方法一般分为化学法、物理法和生物法^[2]。但这些方法存在可能形成二次污染、见效慢等缺点,使其推广受到限制^[3-4]。因此,迫切需要寻求更加高效安全的抑藻技术。利用植物的化感作用抑制藻类生长,为控制水华提供了新的研究思路。

植物化感作用抑制藻类生长以其效率高、生态安全性好等特点而备受关注^[5-7]。化感作用是指一种植物通过向环境释放化学物质促进或抑制其他植物生长的现象。目前,已发现多种水生植物具有化感作用,这些植物产生的次生代谢产物,通过多种方式抑制藻细胞的生长。如粉绿狐尾藻可破坏集胞藻的叶绿素 a 和藻胆蛋白的特征吸收峰,降低藻细胞对光的吸收能力;芦苇的化感物质 EMA 能造成藻类细胞膜的彻底破坏,使 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 外泄,从而使藻细胞死亡^[8]。在已发现的植物化感物质中,脂肪酸和酚类化合物较为常见。张庭廷等^[9]从普生轮藻中分离得到的 3 种脂肪酸(亚油酸、软脂酸和豆蔻酸),均有不同程度的抑藻作用。Gross 等^[10]发现,狐尾藻除脂肪酸外,其多酚类物质也具有抑藻活性;此外,萜类和酯类等也被证实具有较好的抑藻效果^[11-12]。

香根草为禾本科香根草属多年生植物,其根系能富集重金属、吸收水体氮磷^[12-14],具有生长速度快、净化水质能力强、适应性强等特点,是一种净化富营养化水体的理想植物。本研究以香根草作为供试植物,探讨其对蓝藻水华的主要组成者——铜绿微囊藻的抑制效果,并对其根系分泌物中的化学物质进行分析,以期利用陆生植物控制有害藻类的生长提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试植物为香根草 (*Vetiveria zizanioids* Linn.),供试藻类为蓝藻门的铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*),藻种来自上海师范大学。采用 Modified C (CB)^[15] 营养液作为藻类试验的培养液,培养温度为 25 ℃,光暗比为 14 h:10 h,由冷白荧光灯提供光照,光照强度为 3 000 lx。

1.2 试验方法

香根草在塑料大棚内陆地育苗后,选择同期同龄的香根草 2 株(二者质量平均值为 820 g)。将其根系用蒸馏水洗净,分别置于盛有 10 L 蒸馏水的塑料桶内培养 5 d,之后从塑料桶中分别收集 1 L 种植液,并进行充分混合。香根草生长情况如表 1 所示。

表 1 试验所用香根草生长情况
Table 1 The growth of *V. zizanioids*

	株高/cm	根长/cm	叶片数	鲜重/g
香根草 1	166.5	25.5	48	960
香根草 2	153.5	22.0	30	680

1.3 样品采集及分析方法

1.3.1 样品采集

种植水样品:香根草种植水过滤后,用 HCl 调至 pH 1.5,取 150 mL 用 Oasis HLB 固相萃取柱进行固相萃取。萃取前先用 4 mL 甲醇活化萃取柱,再用 4 mL 蒸馏水(用 HCl 调 pH 至 1.5)清洗,香根草种植水以 3 mL/min 的速度过柱,用 pH 1.5 的蒸馏水洗柱。待水完全抽干后,用 20 mL 甲醇洗脱柱子上的提取物。洗脱液用无水硫酸钠脱水, R-205 旋转蒸发器浓缩至 5 mL,作为香根草种植水样品。

种植水与藻类培养:香根草种植水经 Waterman 玻璃纤维滤膜(GF/F 47 mm,孔径 0.52 μm)过滤后,取 100 mL 过滤液并添加 CB 营养液使之与藻类培养液浓度相同。在无菌条件下使用 Millex-GP 针头过滤器抽滤灭菌。取灭菌后的种植水 10 mL,接种 100 μL 的铜绿微囊藻液(试验初期铜绿微囊藻密度为

1×10^4 个/mL) 加塞后摇匀。取 10 mL 经灭菌的 CB 培养液并接种 100 μ L 的铜绿微囊藻液作为对照组。接种微囊藻的种植水和对照处理均各重复 3 次。上述操作均在无菌条件下完成。将锥形瓶置于 25 $^{\circ}$ C、3 000 lx、80 r/min 的光照振荡培养箱中培养。

1.3.2 测定方法

每 3 d 使用血球计数板计算藻细胞密度,记录 1 次接种微囊藻的种植水和对照处理下的藻类数量;铜绿微囊藻的叶绿素 a 采用分光光度法进行测定。

香根草种植水对藻类的抑制率(RI): $RI = (1 - N/N_0) \times 100\%$ 。其中, N 为香根草种植水组藻密度, 10^5 个/mL; N_0 为对照组藻密度, 10^5 个/mL。

取香根草种植水样品 2 mL,于 45 $^{\circ}$ C 下氮气吹干后,加入 100 μ L 硅烷化试剂(BSTFA)和 200 μ L 正己烷,封管后于 120 $^{\circ}$ C 下反应 0.5 h,取 1.0 μ L 该反应液经 GC-MS(安捷伦 5975C,美国)对其化合物组成进行分析。GC-MS 测定条件:检测仪器为 Finnigan Voyager 气相色谱-质谱联用仪,质量扫描范围 35—290 原子质量单位(amu),色谱柱为 VF-5 ms 石英毛细管柱(柱长 30 m \times 内径 0.25 mm,膜厚 0.25 μ m);接口温度 28 $^{\circ}$ C,柱温为 80 $^{\circ}$ C,保持 2 min,以 20 $^{\circ}$ C/min 的速率升至 300 $^{\circ}$ C,保持 10 min,汽化温度为 250 $^{\circ}$ C;载气为 He,流量为 1.0 mL/min;分流比为 20:1;进样量为 1.0 μ L^[16]。

质谱检测器:EI 源,电子能量 70 eV,源温 200 $^{\circ}$ C,得到分离后的总离子流图和各组分质谱图。使用 NIST 谱库进行图谱检索,并使用面积归一化法计算各种物质的相对含量。

1.4 数据处理

使用 SPSS 9.0 软件进行数据处理与分析。

2 结果与分析

将添加 CB 营养液的香根草种植水以及对照组分别与藻类培养 21 d 后发现,2 种培养液中铜绿微囊藻均有不同程度的生长。与对照组相比,香根草种植水与藻类培养中的铜绿微囊藻生长缓慢。香根草种植水与铜绿微囊藻共培养 6 d 后,香根草种植水开始对铜绿微囊藻的生长产生抑制作用,且抑制作用随时间的推移而增加;共培养 15 d 后,种植水对藻类的抑制作用开始下降,其对铜绿微囊藻的抑制率最高可达到 76%(图 1)。

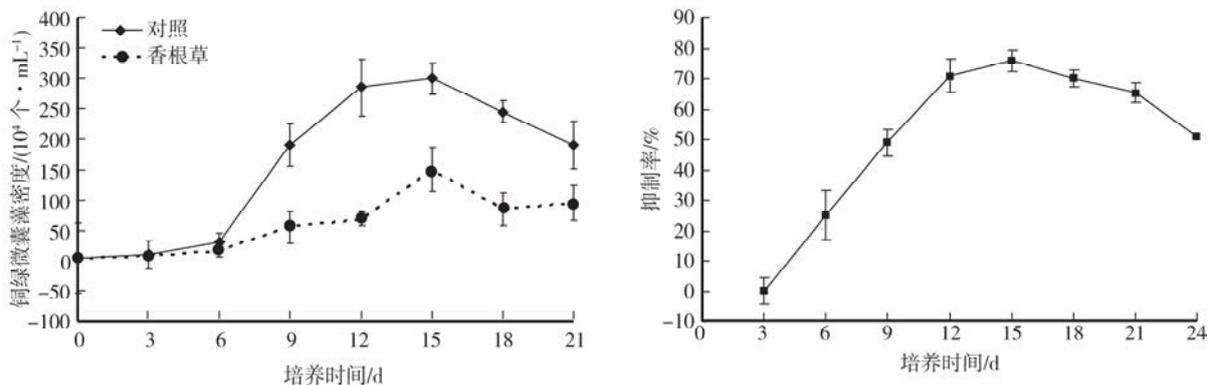


图 1 香根草种植水对铜绿微囊藻的抑制作用

Fig. 1 Inhibitory effects of root exudates solution of *V. zizanioids* on growth of *M. aeruginosa*

使用种植水进行试验,可以避免种植的香根草与藻类竞争光照、营养和空间等因素对其生长产生的影响,从而体现香根草对藻类作用的试验目的。种植水添加 CB 营养液后,用 NaOH 调节种植水的 pH 至 8,以避免香根草根系分泌物的有机酸类物质可能会降低水的 pH,进而影响藻类的生长。由此证实香根草对藻类的抑制作用是其所释放的化感物质对藻类细胞的生理影响。

叶绿素 a 是反映藻类是否正常生长和光合作用的重要指标之一。在本试验中铜绿微囊藻在香根草种植水中培养 21 d 后,种植水中藻类叶绿素 a 含量为 447.62 mg/L,对照组铜绿微囊藻叶绿素 a 含量则高达 3 592 mg/L,对照组铜绿微囊藻叶绿素含量是香根草种植水的 8 倍,差异极显著 ($P < 0.01$)。

蒸馏水培养 5 d 后收集到的香根草种植水和根系提取物的样品,经 GC-MS 分析(图 2),香根草种植水中的成分主要为脂肪酸。通过与 NIST 谱库中的标准物质进行匹配,筛选得到一些匹配度较高的化合

物。表 2 显示, 从香根草种植水中共鉴定出 24 种化合物, 其中 2-羟基丙酸相对含量最高, 为 50.71%; 其次是棕榈酸, 相对含量为 23.2%。

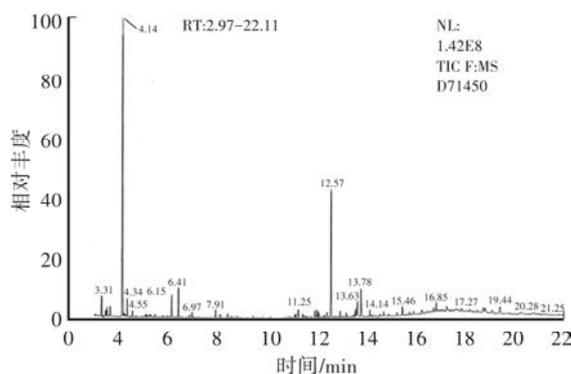


图 2 香根草种植水和根系提取物 GC-MS 图谱

Fig. 2 Total ion chromatogram of the secretions and the root extraction of *C. indica* by GC-MS

表 2 GC-MS 分析检测香根草种植水中所得化学物质

Table 2 Compounds of roots exudates *V. zizanioids* tested by GC-MS

保留时间/min	化学物质	相对含量/%	相似度/%
4.14	2-羟基丙酸	50.71	87.81
4.34	乙醇酸	3.36	88.41
4.55	己酸	1.25	87.44
5.06	呋喃二羧酸	0.33	76.07
5.11	丙二酸	0.48	71.01
5.27	β -羟基丁酸	0.53	80.98
6.76	1-羟基-2-烯戊酸	0.23	88.49
6.86	琥珀酸	0.59	83.21
6.97	2,3-二羟基丙酸	0.90	95.20
7.21	延胡索酸	0.14	83.09
7.91	2-羟基丁二酸	1.42	91.97
8.41	苹果酸	0.81	84.53
8.83	2,3,4-三羟基丁酸	0.21	78.29
8.95	3-甲氧基-4-羟基苯甲醛	0.09	83.23
9.80	月桂酸	0.29	85.64
10.11	邻苯二甲酸	0.24	93.73
10.99	十四烷酸	0.19	90.23
11.74	十五烷酸	0.15	85.54
12.41	棕榈油酸	1.14	92.26
12.57	棕榈酸	23.20	96.45
13.19	十七烷酸	0.91	85.27
13.63	油酸	3.32	87.20
13.78	硬脂酸	5.22	96.82
15.93	扁油酸	1.13	89.37

3 讨论与结论

植物释放的化感物质通过抑制藻类细胞酶活性、破坏藻类的光合作用、破坏细胞膜等方式影响藻类的正常生长^[19-20]。研究显示^[21-22]通常情况下化感物质浓度较高时会显著抑制植物的生长发育, 随着其浓度的降低, 该抑制作用会逐渐减弱、消失甚至转变为促进作用。本试验中的香根草种植水对铜绿微囊藻的生长具有一定抑制作用, 可见香根草在蒸馏水中培养 5 d 后其根系分泌的化感物质就达到了较高浓度, 因此抑制了铜绿微囊藻的正常生长。叶绿素 a 是反映藻类是否正常生长和光合作用的重要指标之一。研究显示^[23-25]化感物质通过降低藻类叶绿素含量、抑制光合系统电子传递连活性等, 减少藻类同化产物的方式而抑制藻类生长。与香根草种植水共培养 21 d 后的铜绿微囊藻叶绿素含量降低, 这可能是由于香根草种植水中化学物质阻碍了铜绿微囊藻叶绿素 a 的合成或加速了叶绿素 a 的降解。经 NIST 谱库比对, 香根草种植水中有己酸、棕榈酸、硬脂酸等物质。Nakai 等^[26]从穗花狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum*)

中获得了包括棕榈酸、硬脂酸和油酸等多种脂肪酸,并证明这些脂肪酸对铜绿微囊藻的生长有抑制作用。本研究发现,种植香根草5 d后,其水中就出现了可抑制藻类生长的化感物质,并且也以脂肪酸居多。研究结果表明^[27-28]:己酸、棕榈酸、硬脂酸等脂肪酸对铜绿微囊藻、蛋白核小球藻和斜生栅藻有抑制作用。胡陈艳等^[29]研究马来眼子菜体内脂肪酸类物质对羊角月牙早的抑制作用时,也发现多种脂肪酸联合作用具有协同抑藻效果。由此推测,可能是香根草根系释放到水体中的脂肪酸共同作用抑制了铜绿微囊藻的生长。文媛等^[30]将香根草根系浸提为净油进行成分分析,发现香根草净油成分主要为醇类、酮类、酸和萜烯类化合物。本研究中香根草种植水中基本成分多为有机酸类,这可能是由于试验中根系分泌物收集偏重有机酸类物质,也可能是由于香根草根系化合物在富营养化水体环境下转换形成新的化感物质而抑制藻类生长,具体理化机制还有待进一步深入研究。

气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)被广泛应用与药物检测、环境分析、司法鉴定和未知样品的测定,具有灵敏度高、抗干扰能力强的特点^[31]。本试验通过GC-MS技术初步测定了香根草种植水中可能有的化感物质,但具体是哪些化合物对铜绿微囊藻产生抑制作用,这些化学物质对铜绿微囊藻的抑制是否存在协同作用还有待于进一步研究。

本试验发现,香根草除了可以有效净化水质外,对于水华灾害中的优势藻种铜绿微囊藻具有极强的抑制作用。香根草对湖泊富营养化水体中的总氮、总磷具有明显的去除效果^[32],能显著改善富营养化水体的水质^[33-35]。同时,香根草是集原料、饲料、燃料三料于一体的经济植物,是一种性能优良的草类资源^[36]。因此,通过浮床种植香根草在改善生态环境的同时,又可产生商业价值,具有巨大的发展潜力。

浮床植物香根草的存在可以持续抑制铜绿微囊藻的正常生长。蒸馏水培养5 d获得的香根草种植水与铜绿微囊藻共培养21 d后,对铜绿微囊藻生长的抑制率可达76%,对照培养液中铜绿微囊藻叶绿素a含量是香根草种植水中的8倍;蒸馏水培养5 d后采集香根草种植水,经GC-MS分析获得己酸、棕榈酸、油酸和硬脂酸等24种化合物,大多为有机酸类。

参 考 文 献

- [1] 秦伯强,高光,朱光伟,等.湖泊富营养化及其生态系统响应[J].科学通报,2013,58(10):855-864.
- [2] 李锋民,胡洪营.生物化感作用在水处理中的应用[J].中国给水排水,2003,19(7):38-40.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] DAI Q Y. Purification of beer wastewater by *Lolium multiflorum* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1993, 4(3): 334-337.
- [6] MA L S, LUO Y M, WU L H, et al. Dynamics and efficiency of nitrogen and phosphorus removal from eutrophicated water bodies by *Vetiveria Zizanioides* (L.) Nash on floating-beds [J]. Soil, 2000, 32(2): 99-101.
- [7] CHOE S, JUNG I H. Growth inhibition of freshwater algae by ester compounds released from rotted plants [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2002, 8(4): 297-304.
- [8] 李锋民,胡洪营,钟云霄,等.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,2007,27(3):377-381.
- [9] 张庭廷,郝春艳,何梅,等.脂肪酸类物质的抑藻效应及其构效关系[J].中国环境科学,2009,29(3):274-279.
- [10] GROSS EM, MEYER H, SCHILLING G. Release and ecological impact of algicidal hydrolysable polyphenols in *Myriophyllum spicatum* [J]. Phytochemistry, 1996, 41: 133-138.
- [11] 王红强,吴振斌.化感物质的抑藻作用研究、应用及生态安全评价[J].生态环境学报,2012,21(7):1375-1379.
- [12] 张志勇,冯明雷,杨林章.浮床植物净化生活污水中N、P的效果及N₂O的排放[J].生态学报,2007,27(10):4333-4341.
- [13] 马立珊,骆永明,吴龙华,等.浮床香根草对富营养化水体氮磷去除动态及效率的初步研究[J].土壤,2000(2):99-101.
- [14] 杨兵,蓝崇钰,宋文圣.香根草在铅锌尾矿上升至及其对重金属的吸收[J].生态学报,2005,25(1):45-50.
- [15] 夏汉平.香根草和水花生对垃圾污水中N、P、Cl的吸收效果[J].植物生态学报,2000,24(5):613-616.
- [16] NAKAI S, INOUE Y, HOSOMI M. Allelopathic effects of polyphenols released by *Myriophyllum spicatum* on the growth of *Cyanobacterium Microcystis aeruginosa* [J]. Allelopathy Journal, 2001, 8(2): 201-210.
- [17] 潘琦,邹国燕,宋祥甫,等.美人蕉根系对铜绿微囊藻的化感作用[J].环境科学研究,2014,27(10):1193-1198.
- [18] 王立新,吴国荣,王建安,等.黑藻对铜绿微囊藻抑制作用[J].湖泊科学,2004,16(4):337-342.
- [19] 朱俊英,刘碧云,王静,等.穗花狐尾藻化感作用对铜绿微囊藻光合效率的影响[J].环境科学,2011,32(10):2904-2908.
- [20] 吴程,常学秀,吴峰.高等水生植物对集胞藻(*Synalocystis* sp.)的化感作用[J].云南大学学报(自然科学版),2008,30(5):535-540.
- [21] 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[J].环境科学,2004,25(5):89-92.
- [22] 陈德辉,刘永定,宋立荣.菹荇眼子菜对栅藻和微囊藻的他感作用及其参数[J].水生生物学报,2004,28(2):163-168.
- [23] 白羽,黄莹莹,孔海南,等.加拿大一枝黄花化感抑藻效应的初步研究[J].生态环境学报,2012,21(7):1296-1303.

- [24] 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.
- [25] DZIGA D ,SUDA M ,BIALCZK J ,et al. The alteration of *Microcystis aeruginosa* and dissolved Microcystin-LR concentration following exposure to plant-producing phenols [J]. *Environmental Toxicology* 2007 22: 341-346.
- [26] NAKAI S ,HOSOMI M. *Myriophyllum spicatum*-released allelopathic from *Myriophyllum spicatum* [J]. *Hydrobiologia* 2005 543: 71-78.
- [27] 王桂龙. 植物间的他感作用及其应用 [J]. *作物研究* ,1992 6(3): 4-7.
- [28] 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): 7-19.
- [29] 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.
- [30] 文媛 ,王飞生 ,赵鹏飞 ,等. 香根草净油主要化学成分检测 [J]. *安徽农业科学* 2008 36(31): 13482-13484.
- [31] 段礼新 ,漆小泉. 基于 GC-MS 的植物代谢组学研究 [J]. *生命科学* 2015 27(8): 971-977.
- [32] 冯燕 ,张慧. 浮床组合生物技术对湖泊富营养化水体氮磷去除效果研究 [J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)* 2012 37(1): 78-81.
- [33] 任朝阳 ,邓春光. 生态浮床技术应用研究进展 [J]. *农业环境科学学报* 2007 26(增刊): 261-263.
- [34] 杨林 ,武斌 ,赖发英 ,等. 7 种典型挺水植物净化生活污水氮磷的研究 [J]. *江西农业大学学报* 2011 33(3): 616-621.
- [35] 蒋敏 ,秦普丰 ,雷鸣 ,等. 香根草人工湿地处理生活污水的试验研究 [J]. *中国环境管理* 2012(2): 36-38.
- [36] 管珍珍 ,郝宝红 ,李玉英 ,等. 香根草的综合利用开发研究进展 [J]. *南阳师范学院学报* 2013 12(3): 32-37.

(责任编辑: 张睿)