

广玉兰、龙爪槐和黄杨化感物质 对铜绿微囊藻生长的抑制*

周晓见^{1,2} 缪莉^{1,2} 靳翠丽^{1,2} 董昆明^{1,2} 李楠¹ 封克^{1,2#}

(1. 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2. 扬州大学海洋科学与技术研究所, 江苏 扬州 225127)

摘要 针对水华的主要物种——铜绿微囊藻, 初步测定了60种植物的浸提液对其细胞增殖的抑制率。结果表明, 8种植物的浸提液对铜绿微囊藻生长的抑制率达到90%以上。其中, 广玉兰、龙爪槐和黄杨叶片浸提液对铜绿微囊藻生长的抑制率分别达到97.4%、95.6%和91.2%。通过计算得到培养7 d后广玉兰、龙爪槐和黄杨的50%抑制效应质量浓度(EC_{50})分别为0.52、1.04、5.87 g/L, 而90%抑制效应质量浓度(EC_{90})分别为3.79、6.45、9.09 g/L。首次发现此3种植物浸提液中富含能抑制铜绿微囊藻细胞增殖的化学物质, 可以作为抑藻化感物质的一个重要来源。根据 EC_{50} 和 EC_{90} 对培养时间的拟合方程判断, 广玉兰和龙爪槐浸提液对铜绿微囊藻的抑制效果较黄杨浸提液更为长效, 且由于其抑制效果优于农作物秸秆, 具有进一步研究的价值。

关键词 铜绿微囊藻 化感物质 广玉兰 龙爪槐 黄杨

Inhibitory effect of three allelochemicals on growth of *Microcystis aeruginosa* ZHOU Xiaojian^{1,2}, MIAO Li^{1,2}, JIN Cuili^{1,2}, DONG Kunming^{1,2}, LI Nan¹, FENG Ke^{1,2}. (1. Institute of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu 225127; 2. Institute of Marine Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu 225127)

Abstract: The inhibitory effects of extracts from 60 plant samples on *Microcystis aeruginosa* were investigated by measuring the cell number of *Microcystis aeruginosa* during the cultivation process. 8 plant extracts presented remarkable anti-algae activity, their inhibitory ratio to *Microcystis aeruginosa* were all above 90%. The inhibitory effects of three most effective samples, *Magnolia grandiflora*, *Sophora japonica f. pendula* and *Buxus sinica*, were further measured, their inhibition ratio to *Microcystis aeruginosa* were calculated as 97.4%, 95.6% and 91.2%, the medial effective concentrations (EC_{50}) for seven days were 0.52, 1.04 and 5.87 g/L, and EC_{90} were 3.79, 6.45 and 9.09 g/L, respectively. The fitting equations between EC_{50} and culture time showed that the inhibitory effects of *Magnolia grandiflora* and *Sophora japonica f. pendula* to *Microcystis aeruginosa* would not decrease with the elongation of incubation time. The above results revealed that the three land-floras contained very high levels of anti-algae allelochemicals, they might have a great potential to treat algae bloom and control the eutrophication of water.

Keywords: *Microcystis aeruginosa*; allelochemicals; *Magnolia grandiflora*; *Sophora japonica f. pendula*; *Buxus sinica*

江河湖泊富营养化是目前世界性的严重问题, 水体的富营养化会造成藻类大量繁殖, 形成水华。水华暴发会引起水体缺氧, 致使鱼类及其他水生动物窒息而死^[1-3], 还常常引起自来水厂滤池的堵塞, 增加水处理困难, 而且长期食用富营养化的水对人类的健康也十分有害^[4]。近年来我国南方水域夏季经常出现大规模水华暴发现象, 太湖、滇池等地形成的水华主要物种是铜绿微囊藻, 其属蓝藻门, 微囊藻属, 原核单细胞藻类, 能合成和分泌细胞毒素。所以, 针对这一典型水华藻类——铜绿微囊藻, 研究环境友好的高效的抑制暴发技术, 已成为改善水环境和保持水资源的一个重要问题。

利用化感物质抑制有害藻类是一种廉价、安全、高效的方法^[5-8]。化感作用广泛存在于植物群落系统中, 是指植物之间通过信号化合物相互感应的作用。化感作用和化感物质的发现为寻找新型、高效、安全的抑藻方法提供了一种新思路。经研究发现, 许多水生植物产生的化感物质具有一定的抑制藻类生长的作用^[9-11]。抑藻化感物质是水生植物生长过程中产生的次生代谢物质, 一般能在自然条件下降解, 不会在生态系统中积累, 生态安全性好。利用水生植物的化感作用控制水体中藻类生长的方式主要是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。在合适的水体中栽培某些

第一作者: 周晓见, 男, 1976年生, 博士, 副教授, 研究方向为水环境生物学。* 通讯作者。

* 国家自然科学基金资助项目(No. 30671240、No. 30871588); 辽宁省教育厅高校科研资助项目(No. 2009A093)。

水生植物,能在一定程度上满足抑制藻类生长的需要。但是许多严重富营养化的水体不适合水生植物的生长,或者在藻类已经暴发的水体中水生植物也不能存活。另外,这种方法还受季节的影响,抑制藻类时效性差,大量生长的水生植物的后续处理较为麻烦,且栽培植物后需要较长时间才能产生明显的抑藻效果^[12,13]。

也有报道将死亡干燥的植物体放入待处理水体,利用其腐败后释放的化感物质抑制藻类。如向水体中投加大麦秸秆,经过几周后可以起到明显的抑藻效果。另外,目前日益受到关注的利用化感物质抑藻的新方式是从植物中提取的化感物质施入水体抑制藻类,直接通过化感物质的抑藻作用来控制藻类的爆发性繁殖。

但就目前的情况看,从水生植物中提取的化感物质的抑藻效果并不理想,原因多样,其中由于水生植物长期浸泡在水体中,化感物质容易流失可能是一个重要原因。陆生植物也含有大量的化感物质,利用陆生植物的化感作用抑制藻类的生长在国内外也有少量研究。商文等^[14]从杉木粉中提取出精油来抑制塔玛亚历山大藻的生长,并用气相色谱/质谱(GC/MS)鉴定出其中的主要化感物质是单萜和倍半萜类化合物(如松油烯、雪松醇、桉树脑等)。美国水生植物管理中心最先开发了一种新的控制藻类的方法,即利用大麦秸秆直接投入水体抑制藻类^[15]。此外,EVERALL等^[16]报道了利用发酵大麦秸秆有效控制水华发生的新途径。NAKAI等^[17,18]和BALL等^[19]报道,大麦秸秆可用于水渠或水库水华的控制。万宏等^[20]发现,降解稻草对蓝藻的生长有抑制作用。陆生植物生物量大,其次生代谢物质丰富,但总体而言,利用陆生植物的化感作用抑制藻类的生长在国内外的研究较少^[21,22]。因此,寻找分泌高抑藻活性的植物材料,通过投放干植物体或者分离其中的抑藻化感物质来控制藻类的生长具有良好的应用前景。

本研究测定了60种植物(包括水生植物和陆生植物)浸提液对铜绿微囊藻生长的抑制率,得到8种植物浸提液对铜绿微囊藻生长的抑制率达到90%以上,并对其中的3种陆生植物(广玉兰、龙爪槐和黄杨)浸提液的抑藻效果进行了分析探讨。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用60种植物样品来自扬州市郊外及花

鸟市场;实验所用铜绿微囊藻购自中科院武汉水生生物研究所,编号FACHB-905。

1.2 铜绿微囊藻培养基组分

铜绿微囊藻的培养采用BG11培养基。具体配方如下:NaNO₃ 1.5 g, K₂HPO₄ · 3H₂O 0.04 g, MgSO₄ · 7H₂O 0.075 g, CaCl₂ · 2H₂O 0.036 g, 柠檬酸(C₅H₇O₅COOH) 0.006 g, 柠檬酸铁铵(FeC₆H₅O₇ · NH₄OH) 0.006 g, 乙二胺四乙酸二钠(C₁₀H₁₄N₂Na₂O₈ · 2H₂O) 0.001 g, Na₂CO₃ 0.02 g, A5微量元素溶液 1 mL, 用纯水定容至1 000 mL。

A5微量元素溶液配方为:H₃BO₃ 2.86 g, MnCl₂ · H₂O 1.81 g, ZnSO₄ · 7H₂O 0.222 g, CuSO₄ · 5H₂O 0.079 g, Na₂MoO₄ · 2H₂O 0.390 g, Co(NO₃)₂ · 6H₂O 0.049 g, 纯水定容到1 000 mL。

1.3 实验方法

1.3.1 植物浸提液的母液制备

将植物茎叶用自来水冲洗干净后晾干,取晾干的活体植物组织(无特殊说明均为叶片组织)100 g,用组织捣碎机粉碎,加1 000 mL纯水浸泡48 h后,经定量滤纸过滤,再用0.22 μm微孔滤膜减压抽滤,以消除其他微生物的影响,得到100.0 g/L的浸提液母液,备用。

1.3.2 植物浸提液的抑藻实验

实验前采用BG11培养基,将铜绿微囊藻预培养7~8 d,使之处于对数增长期,作为藻种使用。

在无菌条件下将所需体积的植物浸提液母液(100.0 g/L)置于250 mL三角瓶内,加入BG11培养基使体系体积均为135 mL,再取15 mL藻种接种于该溶液中,每个处理做3个平行样。同时将15 mL藻种置于不含植物浸提液的250 mL三角瓶内,并加入BG11培养基,使藻培养总体积为150 mL,作为对照组。

1.3.3 铜绿微囊藻培养和计数

将各种浓度的植物浸提液处理组和对照组样品在光照培养箱内进行培养,培养条件为温度25℃,光暗比12 h:12 h。培养期间每日定时摇动各三角瓶2次,同时随机调换三角瓶在培养箱中的位置。细胞计数每天采样1 mL,用鲁格溶液固定染色,用血球计数板在显微镜下计藻细胞数。

1.4 数据处理

植物浸提液对铜绿微囊藻的抑制率计算公式:

$$\text{抑制率} = \frac{\text{对照组藻细胞浓度} - \text{处理组藻细胞浓度}}{\text{对照组藻细胞浓度}} \times 100\% \quad (1)$$

表1 植物浸提液对铜绿微囊藻生长的抑制率
Table 1 Inhibition rate of plants extracts on *Microcystis aeruginosa*

序号	植物名称	抑制率/%	序号	植物名称	抑制率/%	序号	植物名称	抑制率/%
1	玉米秸秆	90.2	21	水稻	88.9	41	水盾草	91.3
2	芦苇根	-40.6	22	浮萍	2.4	42	白玉兰	23.6
3	芦苇茎	-23.6	23	凤眼莲	5.7	43	水芙蓉	65.2
4	芦苇叶	91.3	24	苕菜	-56.3	44	柏树	36.5
5	香樟	69.9	25	皇冠	-23.1	45	樱花	-23.5
6	银杏	57.5	26	芥南	-7.9	46	紫荆	-68.3
7	番薯叶	75.6	27	菊花草	-25.5	47	法国梧桐	-65.4
8	冬青	44.9	28	红胡桃	-45.6	48	雪松	13.6
9	黄杨	91.2	29	花柳	-11.3	49	水杉	19.8
10	龙爪槐	95.6	30	大豆	23.8	50	海桐	-25.3
11	莲	49.6	31	苹果	3.6	51	白丁香	-56.4
12	水花生	48.8	32	梨	-35.6	52	琼花	23.1
13	菱	85.5	33	花生	53.1	53	芍药	85.9
14	小麦秸秆	84.2	34	满江红	75.6	54	牡丹	-32.1
15	大麦秸秆	90.3	35	紫萍	21.9	55	月季	-45.6
16	广玉兰	97.4	36	金鱼藻	2.4	56	油松	63.5
17	柳叶	66.5	37	大茨藻	90.9	57	榆树	25.8
18	白杨	2.3	38	轮藻	24.9	58	槐树	78.9
19	海棠	51.2	39	石菖蒲	9.0	59	黑麦草	65.3
20	紫丁香	21.4	40	两栖蓼	5.3	60	三叶草	-13.6

50%抑制效应浓度(EC_{50})和90%抑制效应浓度(EC_{90})计算:将抑制率数据和对应的植物浸提液处理浓度进行logistic和probit转化,计算 EC_{50} 和 EC_{90} 。

2 结果与分析

2.1 植物浸提液抑藻效果的初步筛选

初步筛选实验使用的植物浸提液质量浓度均为10.0 g/L。通过7 d的培养实验后,选取的60种植物样品对铜绿微囊藻生长的抑制率见表1。由表1可见,多种植物浸提液具有较强的抑制藻细胞增殖的作用,其中玉米秸秆、芦苇叶、黄杨、龙爪槐、大麦秸秆、广玉兰、大茨藻、水盾草等8种植物浸提液对铜绿微囊藻的抑制率达到90%以上,表现出较强的抑制活性。还有多种植物(包括芦苇根、芦苇茎、苕菜、梨、花柳、红胡桃、菊花草、芥南、皇冠、樱花、三叶草、月季、牡丹、海桐、白丁香、法国梧桐和紫荆)浸提液对藻细胞增殖具有促进作用,说明这些植物浸提液中含有促进藻细胞生长、增殖的物质。其余植物浸提液对铜绿微囊藻生长表现出不同程度的抑制活性。

在具有较强抑制活性的植物样品中,由于玉米秸秆、芦苇叶、大麦秸秆、大茨藻和水盾草已有文献报道,而广玉兰、龙爪槐、黄杨3种陆生植物的抑藻活性至今国内外未见报道,且此3种植物浸提液对铜绿微囊藻生长的抑制效果优于农作物秸秆(如玉米秸秆、小麦秸秆和大麦秸秆),对其作进一步研究。

2.2 广玉兰浸提液对铜绿微囊藻的抑制作用

为精确测定广玉兰对铜绿微囊藻的抑制效果,将处于指数生长期的铜绿微囊藻接种到不同浓度的广玉兰浸提液中,每日测定藻细胞数,作铜绿微囊藻的抑制率曲线,结果见图1。

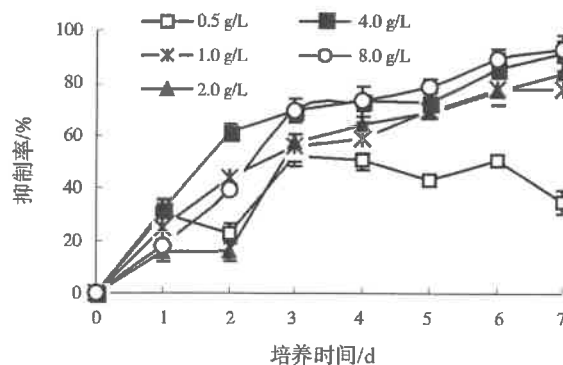


图1 广玉兰浸提液对铜绿微囊藻的抑制效果
Fig.1 Inhibition effect on *Microcystis aeruginosa* by *Magnolia grandiflora* extract

由图1可见,广玉兰浸提液对铜绿微囊藻的生长具有明显的抑制作用,且随着浸提液浓度的升高,其对铜绿微囊藻生长的抑制作用逐渐加强。8.0 g/L处理下,7 d后几乎所有的藻细胞都死亡,抑制率达到95%以上,说明广玉兰浸提液在高浓度时对铜绿微囊藻有直接的杀灭作用。在1.0、2.0、4.0 g/L处理下,铜绿微囊藻的生长也受到显著的持续的抑制作用,抑制率持续上升。在0.5 g/L处理下,抑藻作用不显著,最大抑制率出现在第3天,为

52.8%, 3 d后藻细胞增殖得到恢复, 表现为抑制率下降。

2.3 龙爪槐浸提液对铜绿微囊藻的抑制作用

按照同样的方法, 测定了龙爪槐浸提液对铜绿微囊藻生长的抑制率, 结果见图2。由图2可见, 4种不同浓度浸提液第1天对铜绿微囊藻的抑制率都呈上升趋势, 且随着浸提液浓度的升高, 对铜绿微囊藻生长的抑制作用也逐渐加强。8.0 g/L处理下, 在第1天的抑制率就接近50%。显微镜下观察发现, 藻细胞破裂, 颜色变白。7 d后, 抑制率达到90%以上。但1.0 g/L处理下的铜绿微囊藻在4 d后恢复生长, 抑制率有所下降, 此后的抑制率均未超过45%, 抑制作用不显著。此现象和广玉兰的0.5 g/L处理组相似。

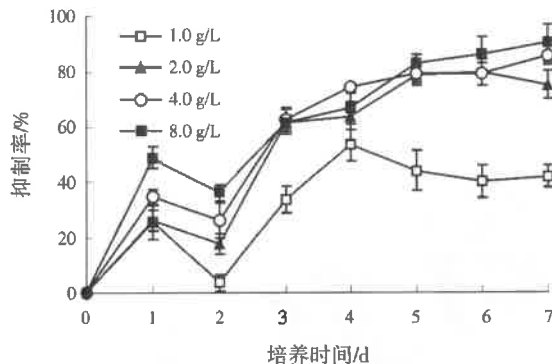


图2 龙爪槐浸提液对铜绿微囊藻的抑制效果
Fig. 2 Inhibition effect on *Microcystis aeruginosa* by *Sophora japonica f. pendula* extract

2.4 黄杨浸提液对铜绿微囊藻的抑制作用

黄杨浸提液对铜绿微囊藻生长的抑制效果见图3。从图3可以看出, 4.0、8.0 g/L处理下, 铜绿微囊藻的生长受到了明显的抑制, 7 d后的抑制率达到90%以上; 而1.0、2.0 g/L处理下, 2 d后的抑制率开始下降, 铜绿微囊藻的生长有所恢复, 最终抑制率有所上升。

2.5 EC_{50} 和 EC_{90} 计算

为进行抑制效果的比较, 进行了3种植物浸提液对铜绿微囊藻生长抑制的 EC_{50} 和 EC_{90} 的计算。

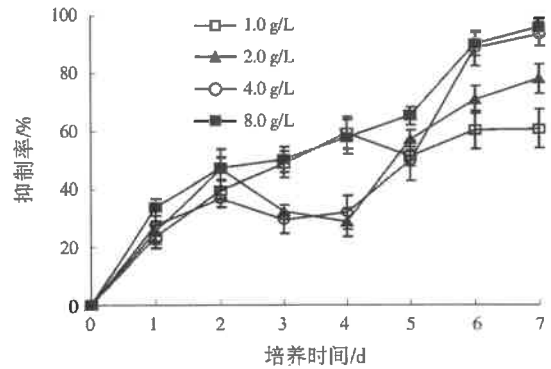


图3 黄杨浸提液对铜绿微囊藻的抑制效果
Fig. 3 Inhibition effect on *Microcystis aeruginosa* by *Buxus sinica* extract

由于接种初期, 藻细胞进入新的溶液环境, 细胞分裂、增长速度不够稳定, 所以本实验中植物浸提液对铜绿微囊藻生长抑制的 EC_{50} 和 EC_{90} 计算从第4天开始, 结果见表2。

从表2可以看出, 广玉兰的 EC_{50} 随培养时间的延长基本稳定在0.4 g/L左右, 变化趋势不明显; 而 EC_{90} 随培养时间的延长呈指数下降, 说明随着培养时间的延长, 控制藻类细胞大量增殖所需的植物浸提液浓度快速下降。龙爪槐的 EC_{50} 随培养时间的延长呈对数增加; EC_{90} 随培养时间的延长基本呈指数下降。黄杨的 EC_{50} 随培养时间的延长呈指数增加, 其 EC_{90} 基本在9.0 g/L左右浮动, 随时间变化不明显, 说明黄杨浸提液对铜绿微囊藻生长的抑制随培养时间的延长出现明显耐受性。

3 讨论

广玉兰、龙爪槐和黄杨3种陆生植物浸提液对铜绿微囊藻生长存在抑制作用, 且浓度越高, 抑制作用越显著。在高浓度处理组培养7 d后, 水体变得接近透明, 显微镜下观察发现, 3种植物叶片浸提液都能显著减慢铜绿微囊藻的游动性, 抑制藻细胞的生长, 导致细胞脱壳、膨胀、裂解, 最终死亡。说明此3种植物浸提液能在较短时间内降低水体中的藻细胞浓度。

表2 植物浸提液对铜绿微囊藻抑制作用的 EC_{50} 和 EC_{90} ¹⁾
Table 2 EC_{50} and EC_{90} of 3 plants extracts to *Microcystis aeruginosa*

植物	指标	4 d	5 d	6 d	7 d	拟合方程	R^2
广玉兰	EC_{50}	0.41	0.47	0.29	0.52	nd	
	EC_{90}	122.90	35.14	7.61	3.79	$y = 374.23e^{-1.1967x}$	0.9810
龙爪槐	EC_{50}	0.40	0.80	0.95	1.04	$y = 0.4662\ln x + 0.4271$	0.9815
	EC_{90}	427.23	12.99	9.45	6.45	$y = 606.3e^{-1.2898x}$	0.7386
黄杨	EC_{50}	0.50	0.90	3.21	5.87	$y = 0.4048x^{1.8109}$	0.9260
	EC_{90}	9.17	*	8.67	9.09	nd	

注: 1) nd 表示未能拟合; * 表示数据不能得到; 拟合方程中 x 表示培养时间, d; y 表示 EC_{50} 或 EC_{90} , g/L。

通过计算 EC_{50} 和 EC_{90} 发现,培养 7 d 后,在 3 种植物中广玉兰的 EC_{50} 和 EC_{90} 最小,抑藻活性最强。且只有广玉兰的 EC_{50} 随培养时间延长,变化不明显,其他 2 种植物浸提液的抑制效果均有一定程度减弱,表现为 EC_{50} 随培养时间延长而增大,其中龙爪槐的 EC_{50} 随培养时间延长呈对数增加,而黄杨的 EC_{50} 呈指数增加。黄杨浸提液的 EC_{90} 较为稳定,随培养时间延长变化不大,说明铜绿微囊藻对黄杨浸提液的抑制出现明显耐受性;而广玉兰和龙爪槐浸提液的 EC_{90} 均随培养时间延长而呈指数下降,说明此 2 种植物浸提液相比黄杨浸提液,对铜绿微囊藻的生长抑制更为有效,可在较长时期内抑制铜绿微囊藻暴发增长,因而更具有进一步研究的价值。

本研究首次发现广玉兰、龙爪槐、黄杨 3 种植物浸提液具有很强的抑藻活性,这是由于浸提液中含有植物自身合成的一种化学物质——抑藻化感物质。根据相关研究报道及本研究结果,这类化学物质应符合易降解、效应浓度低等特点,因此这 3 种植物有成为良好的生物源控藻剂的应用潜力。后续研究将利用化感物质的分离技术和生物测试方法,分析其抑制机制和分离鉴定其中的化学物质。

4 结 论

本研究首次发现广玉兰、龙爪槐和黄杨 3 种陆生植物的浸提液具有抑藻活性,其自身合成的化感物质对铜绿微囊藻的生长有明显的抑制作用,且抑制效果优于农作物秸秆。浸提液质量浓度为 8.0 g/L 时,培养 7 d 后,3 种植物浸提液对铜绿微囊藻生长的抑制率均达到 90% 以上。

培养 7 d 后,广玉兰、龙爪槐和黄杨的 EC_{50} 分别为 0.52、1.04、5.87 g/L,而 EC_{90} 分别为 3.79、6.45、9.09 g/L,其中广玉兰抑藻活性最强。分析 EC_{50} 和 EC_{90} 随培养时间变化的拟合方程,得出广玉兰和龙爪槐浸提液对铜绿微囊藻生长的抑制较黄杨浸提液更为长效。

参考文献:

- [1] 张伟,杨秀山.水体的富营养化及其治理[J].生物学通报,2001,36(11):20-21.
- [2] 赵不凋,刘柏朱,卢晓芳,等.水体富营养化的形成、危害和防治[J].安徽农学通报,2007,13(17):51-53.

- [3] 李静会,高伟,张衡,等.除藻剂应急治理玄武湖蓝藻水华实验研究[J].环境污染与防治,2007,29(1):60-62.
- [4] 彭海清,谭章荣,高乃云.给水处理中藻类的去除[J].中国给水排水,2002,18(2):29-31.
- [5] 李寿田,周健民,王火焰,等.植物化感作用机理的研究进展[J].农村生态环境,2001,17(4):52-55.
- [6] 孔垂华,胡飞.植物化感(相生相克)作用及其应用[M].北京:中国农业出版社,2001.
- [7] 彭少麟,邵华.化感作用的研究意义及发展前景[J].应用生态学报,2001,12(5):780-786.
- [8] 鲜放鸣,陈海东,邹惠仙,等.淡水水生植物化感作用研究进展[J].生态学杂志,2005,24(6):664-669.
- [9] 徐洁,李小路,陈海东,等.金藻中抑藻化感物质的研究[J].环境污染与防治,2008,30(1):28-32.
- [10] 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.
- [11] 张艳丽,芦鹏,吴晓英.植物化感作用在抑藻方面的研究进展[J].环境科学与管理,2006,31(7):50-52.
- [12] 孙文浩,俞子文.水葫芦对藻类的克制效应[J].植物生理学报,1988,14(3):294-300.
- [13] 俞子文,孙文浩.几种高等水生植物的克藻效应[J].水生生物学报,1992,16(1):1-6.
- [14] 商文,杨维东,李丽璇,等.杉木粉对两种赤潮藻去除的试验研究[J].海洋环境科学,2009,28(4):371-373.
- [15] NAKAI S,INOUE Y,HOSOMI M,et al. Growth inhibition of blue-green algae by allelopathic effects of macrophytes[J]. Water Science & Technology,1999,39(8):47-53.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] NAKAI S,INOUE Y,HOSEMI M. *Myriophyllum spicatum*-released allelopathic polyphenols inhibiting growth of blue-green algae *Microcystis aeruginosa* [J]. Water Research,2000,34(11):3026-3032.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] MULDERIJ G,VAN DONK E,ROELOFS J G M. Differential sensitivity of green algae to allelopathic substances from *Chara* [J]. Hydrobiologia,2003,491(1/2/3):261-271.
- [22] GROSS E M,MEYER H,SCHILLING G. Release and ecological impact of algicidal hydrolysable polyphenols in *Myriophyllum spicatum* [J]. Phytochemistry,1996,41(1):133-138.

编辑:陈泽军 (修改稿收到日期:2010-06-25)

