

5种沉水植物对斜生栅藻的化感作用*

闫志强^{1#} 宋本如^{1#} 刘 颀³ 刘 燕³ 吴小业³ 李洁珊¹ 林燕珍¹ 冯翊果¹ 陈章和^{1**}
赵建刚^{2**}

¹华南师范大学生命科学学院 广州 510631

²水体富营养化与赤潮防治广东普通高校重点实验室(暨南大学) 广州 510632

³岭南园林股份有限公司 东莞 523125

摘 要 为了解不同湿地植物和不同处理方式下化感作用的差异,在实验室条件下,研究5种常见的沉水植物黑藻(*Hydrilla verticillata*)、伊乐藻(*Elodea nuttallii*)、狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)、苦草(*Vallisneria spiralis*)和皇冠草(*Echinodorus amabilis*)与斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)共培养以及用这5种植物的种植水、浸提液培养斜生栅藻时藻细胞数量及叶绿素a浓度的变化。结果显示,5种植物与斜生栅藻共培养时抑藻效果最明显(1.6×10^8 cells L⁻¹),其斜生栅藻细胞数量显著低于种植水(6.2×10^8 cells L⁻¹)和浸提液组(4.5×10^8 cells L⁻¹) ($P < 0.05$),但5种植物间的差异不显著;除黑藻外,其他4种植物的浸提液培养斜生栅藻时均表现出对斜生栅藻明显的抑制效果,斜生栅藻的相对增长率显著低于对照组和黑藻组 ($P < 0.05$);5种植物的种植水培养斜生栅藻时则表现出相对较弱的抑藻效果,且植物间差异不显著。本研究表明,沉水植物对藻类的化感作用因不同植物和不同处理而有着显著不同。图3 表1 参24

关键词 沉水植物;斜生栅藻;化感作用;显微计数

CLC Q948.12 : X52

Allelopathic effect of five submerged macrophytes on *Scenedesmus obliquus**

YAN Zhiqiang^{1#}, SONG Benru^{1#}, LIU Mian³, LIU Yan³, WU Xiaoye³, LI Jieshan¹, LIN Yanzhen¹, FENG Yiguo¹,
CHEN Zhanghe^{1**} & ZHAO Jian'gang^{2**}

¹School of Life Sciences, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

²Guangdong Higher Education Key Laboratory of Eutrophication and Red Tide Prevention, Jinan University, Guangzhou 510632, China

³Lingnan Landscape Co., Ltd., Dongguan 523125, China

Abstract To better understand the allelopathy effect of different macrophytes with different treatments, we studied the allelopathy effect of five submerged plant species (*Hydrilla verticillata*, *Elodea nuttallii*, *Myriophyllum spicatum*, *Vallisneria spiralis* and *Echinodorus amabilis*) on an eutrophic alga *Scenedesmus obliquus* by measuring the cell number of *S. obliquus* and concentration of Chl a in the co-culture systems of the alga and the five macrophytes, as well as those in the culture systems of the alga treated with the culture waters and the plant extractions of the five macrophytes. The co-culture systems exhibited the most obvious inhibition effect on *S. obliquus*, followed by extraction-treated systems and culture-treated systems, with cell number of *S. obliquus* significantly lower than in the other two culture systems ($P < 0.05$). No significant difference existed among the five macrophytes and the alga co-culture systems. The concentration of Chl a in the co-culture systems with *H. verticillata* was significantly higher than that in the other four ($P < 0.05$). The extraction treated systems, except those of *H. verticillata*, showed a significant inhibition effect on the cell number and relative growth rate (RGR) of *S. obliquus* ($P < 0.05$). The cell number of *S. obliquus* and concentration of Chl a showed that the culture water treated systems had a relatively weak effect on *S. obliquus*. The inhibition effect of culture water treated systems on *S. obliquus* was better than co-culture systems and extraction culture treated systems at the beginning of the experiment. The RGR of *S. obliquus* showed that the culture water treated systems of *H. verticillata* and *E. nuttallii* exhibited an obvious inhibition effect on *S. obliquus*, with the RGR of *S. obliquus* being significantly lower than that in the control group ($P < 0.01$) and no significant difference among the five macrophytes. The experiment showed that both macrophyte species and treatment may have different inhibition effects on

收稿日期 Received: 2014-05-24 接受日期 Accepted: 2014-09-12

*石马湿地公园富营养化人工湖生态修复工程项目(330760)、中央高校基本科研业务费专项资金(11613301)和省部产学研结合项目(2012B09090001)资助 Supported by the Ecological Restoration of Eutrophication Lake in Shima Wetland Park (330760), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (11613301), and the Combination Project of Production, Education and Research of Guangdong Province (2012B09090001)

#并列第一作者 Joint first authors

**并列通讯作者 Joint corresponding authors (E-mail: chenzhh@scnu.edu.cn; zhjg@jnu.edu.cn)

algae. The allelopathy of different treatments requires further research.

Keywords submerged macrophytes; *Scenedesmus obliquus*; allelopathic effect; microscopic counting

沉水植物与浮游藻类同为水生生态系统中主要的初级生产者,对调节水体生态平衡起着重要作用^[1]。随着近年来水体富营养化导致的藻类爆发性事件的增多,如何控制浮游藻类的过度生长已成为富营养化水体生态修复的焦点^[2-4]。斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)是常见的淡水藻类,也是淡水水体污染指示种之一。苦草(*Vallisneria spiralis*)、黑藻(*Hydrilla verticillata*)、伊乐藻(*Elodea nuttallii*)、狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)和皇冠草(*Echinodorus amandus*)是常见的沉水植物,除皇冠草外,其余4种植物的化感抑藻作用均有报道,对不同藻类的抑制效果不一,向水体分泌的化感物质亦有区别。苦草分泌的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等对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)和蓝绿藻(*Cyanobacteria*)有明显的抑制效果^[5-7];黑藻分泌的邻苯二甲酸二异辛酯、邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸丁酯2-甲基丙酯等对铜绿微囊藻、鱼腥藻(*Anabaena*)、莱茵衣藻(*Chlamydomonas reinhardtii*)、有明显的抑制效果^[6-8];伊乐藻向水体分泌的2-乙基吡、2-乙基-5-甲基吡嗪、吡啶等生物碱对铜绿微囊藻有明显的抑制效果^[9-11];狐尾藻分泌的鞣花酸、五倍子酸、焦酸等多种低分子量有机酸以及多酚类物质能对铜绿微囊藻产生抑制作用^[10-14]。鲜敢鸣等研究表明,不同植物之间以及新鲜植物和植物干粉之间具有抑藻作用的挥发油的成分和相对含量差别较大,新鲜植物挥发油中含有40%的邻苯二甲酸酯,而在干粉挥发油中70%为脂肪族化合物和萜类物质,在新鲜植物挥发油中约占20%的是不稳定的未知物^[15]。浦寅芳等研究了菹草(*Potamogeton crispus*)、狐尾藻和金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)等3种沉水植物及其新鲜组织的水浸出液、干粉末的蒸馏水和甲醇萃取物对取自太湖的水华藻类生长的影响,结果表明,在共生条件下,3种沉水植物明显抑制了水华藻类的生长;与金鱼藻相比,菹草和狐尾藻的抑制作用更强;当菹草、狐尾藻和金鱼藻的质量浓度分别为80、80和160 g L⁻¹(鲜重)时,其新鲜组织的水浸出液对水华藻类的生长都产生了抑制作用,第12天时其对水华藻类的生长抑制率分别为86.5%、77.4%和79.6%,3种沉水植物干粉末质量浓度达到20 g L⁻¹(干重)时的蒸馏水萃取物,第12天时对水华藻类的生长抑制率超过50%,3种沉水植物干粉末质量浓度达到1.92 g L⁻¹(干重)时的甲醇萃取物显著($P < 0.05$)抑制了水华藻类的生长,第12天时其对水华藻类的生长抑制率均超过80%^[16]。以上的研究表明,沉水植物对藻类的化感作用,除了因不同植物而不同外,还与植物量(化感物质浓度)和处理方式(沉水植物和藻类共同培养、沉水植物浸提液处理等)有关。但目前对同种沉水植物不同处理方式抑藻效果的对比研究较少,特别缺少不同处理和不同种之间抑藻能力的差异比较^[17-19]。关于水生植物对藻类化感作用的研究对于利用生态学方法控制藻类爆发具有重要意义,但在不适合种植大型水生植物的水域则具有局限性^[20]。同时,这种方法周期长,不能在短期内见效,也限制了其应用^[7],故研

究不同处理方式抑藻效果的差异,可为实际应用中不同的沉水植物采用合适的处理方式抑制藻类提供参考,具有很高的实用价值和生态意义。鉴于此,本研究以斜生栅藻为受试藻,比较5种沉水植物的种植水、新鲜植物体、浸提液等的抑藻效果,旨在为利用沉水植物治理富营养化水体藻类水华提供理论依据和实践参考。

1 材料与方法

实验用斜生栅藻藻种取自暨南大学生态学系藻种室,在无菌条件下,将5 mL斜生栅藻液移入装有800 mL 10%的霍格兰氏营养液的1 000 mL的锥形瓶中。然后将锥形瓶置于光照培养箱中进行扩培培养(光强4 000 lx,温度25 ℃,光暗比12 h : 12 h),待藻细胞进入指数生长期时取出作为培养实验的备用受试藻。

1.1 斜生栅藻与植物共培养

称取黑藻、伊乐藻、狐尾藻、苦草和皇冠草新鲜植物体各6 g,用蒸馏水反复冲洗干净后分别与斜生栅藻在蓝色塑料箱(18.0 cm × 12.0 cm × 6.5 cm)中共培养,箱内有750 mL 10%的霍格兰氏营养液,即为约8 g L⁻¹(鲜重)植物与斜生栅藻共培。将蓝色塑料箱置于光照培养箱中培养(光强4 000 lx,温度25 ℃,光暗比12 h : 12 h)。藻的初始浓度为 7×10^7 cells L⁻¹。另取750 mL 10%霍格兰氏营养液+斜生栅藻为空白对照组,每组处理3个重复。连续培养12 d,每24 h测量1次藻细胞数量,实验结束后测定叶绿素a浓度。

1.2 植物种植水培养斜生栅藻

称取黑藻、伊乐藻、狐尾藻、苦草和皇冠草新鲜植物体各600 g,用蒸馏水反复冲洗干净后分别种于底部铺有15 cm细沙的白色塑料桶(上口直径×下口直径×高:50 cm × 45 cm × 55 cm)中,灌入并保持桶内75 L 10%霍格兰氏营养液。7 d后将桶内种植水混匀每桶取不低于1 L水样,经0.22 μm的微孔滤膜过滤,即为约8 g L⁻¹(鲜重)植物种植水^[21]。取750 mL种植水在蓝色塑料箱(18.0 cm × 12.0 cm × 6.5 cm)中培养斜生栅藻。将蓝色塑料箱置于光照培养箱中培养(光强4 000 lx,温度25 ℃,光暗比12 h : 12 h)。藻的初始浓度为 7×10^7 cells L⁻¹。另取750 mL 10%霍格兰氏营养液+斜生栅藻为空白对照组。每组处理设置3个重复,连续培养12 d,每24 h测量1次藻细胞浓度,实验结束后测定叶绿素a浓度。

1.3 植物浸提液培养斜生栅藻

取黑藻、伊乐藻、狐尾藻、苦草和皇冠草新鲜植物体若干,用蒸馏水冲洗干净,风干(30 ℃ 24 h,鼓风干燥),剪切成< 2 cm长的碎片,各取150 g碎片用3 L 10%霍格兰氏营养液25 ℃浸泡48 h,然后用8层消毒纱布粗滤,粗滤液再经定性滤纸过滤,最后经0.22 μm的微孔滤膜抽滤,滤液即为50 g L⁻¹(干重)植物浸提液^[16, 22]。取750 mL浸提液在蓝色塑料箱(18.0 cm × 12.0 cm × 6.5 cm)中培养斜生栅藻。将蓝色塑料箱置于光照培养箱中培养(光强4 000 lx,温度25 ℃,光暗比12 h : 12 h)。藻的初始浓度为 7×10^7 cells L⁻¹。另取750 mL 10%霍

格兰氏营养液+斜生栅藻为空白对照组, 每组处理3个重复. 连续培养12 d, 每24 h测量1次藻细胞数量.

1.4 相对生长速率

斜生栅藻相对生长速率 (Relative Growth Rate, RGR) 计算

$$\text{公式: } \text{RGE} = \frac{\ln n_2 - \ln n_1}{t}$$

式中, n_1 为初始藻细胞数量 ($10^7 \text{ cells L}^{-1}$), n_2 为实验结束后藻细胞数量 ($10^7 \text{ cells L}^{-1}$), t 为培养时间 (d).

1.5 数据统计与分析

利用SPSS18.0统计软件进行数据统计与分析, 利用单因素方差分析方法进行处理间及种间的差异显著性分析.

2 结果与分析

2.1 叶绿素a浓度

5种植物与斜生栅藻共培养时, 共培液中叶绿素a浓度显著低于种植水组 ($P < 0.05$), 极显著低于对照组 ($P < 0.01$) (图1). 黑藻与斜生栅藻共培液中叶绿素a浓度显著高于其他4种植物 ($P < 0.05$). 5种植物种植水培养斜生栅藻时, 培养液中叶绿素a浓度显著低于对照组 ($P < 0.05$), 但植物间无显著差异.

2.2 斜生栅藻的生长

总的看来5种植物与斜生栅藻共培养对斜生栅藻的抑制效果最好 (图2), 浸提液次之, 种植水最弱. 但5种植物种植水培养斜生栅藻时, 前期对斜生栅藻的抑制效果都好于各自共培养和浸提液处理. 伊乐藻、狐尾藻、苦草和皇冠草的浸提液在实验第8天后均呈现出比种植水组更强的抑藻效果, 但黑藻种植水组的抑藻效果整个实验期整体上要优于浸提液组.

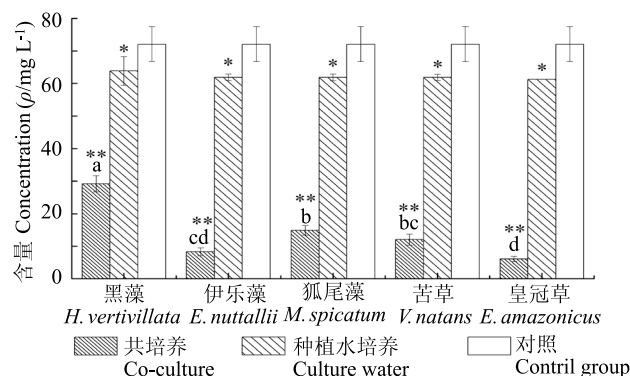


图1 5种沉水植物与斜生栅藻共培养和5种植物的种植水培养斜生栅藻12 d后培养液中的Chl a浓度. *表示与对照差异显著 ($P < 0.05$), **表示与对照差异极显著 ($P < 0.01$), 不同字母表示不同沉水植物间差异显著 ($P < 0.05$).

Fig. 1 Concentration of Chl a in the co-culture systems of *Scenedesmus obliquus* and five submerged macrophytes and in the *S. obliquus* culture systems treated with the culture water of the five macrophytes after a 12 d experiment. *: significant difference with control ($P < 0.05$); **: extremely significant difference with control ($P < 0.01$). Lowercase letters indicate significant differences among different submerged macrophytes ($P < 0.05$).

5种植物3种处理表现出不同的抑藻效果 (图3). 共培养处理时, 对斜生栅藻有明显的抑制作用, 但5种植物差异不明显. 种植水培养时, 5种植物的抑藻效果起初无差异, 中后期略有差异, 但不显著. 除黑藻外, 其余4种植物浸提液处理时, 对斜生栅藻的抑制效果明显 ($P < 0.05$), 尤其是狐尾藻、苦草和伊乐藻. 总的看来, 浸提液处理时狐尾藻、苦草和伊乐藻对斜生栅藻的抑制效果较好, 皇冠草次之, 黑藻较弱.

2.3 斜生栅藻的相对生长率 (RGR)

5种植物与斜生栅藻共培养处理的抑藻作用最明显 (表

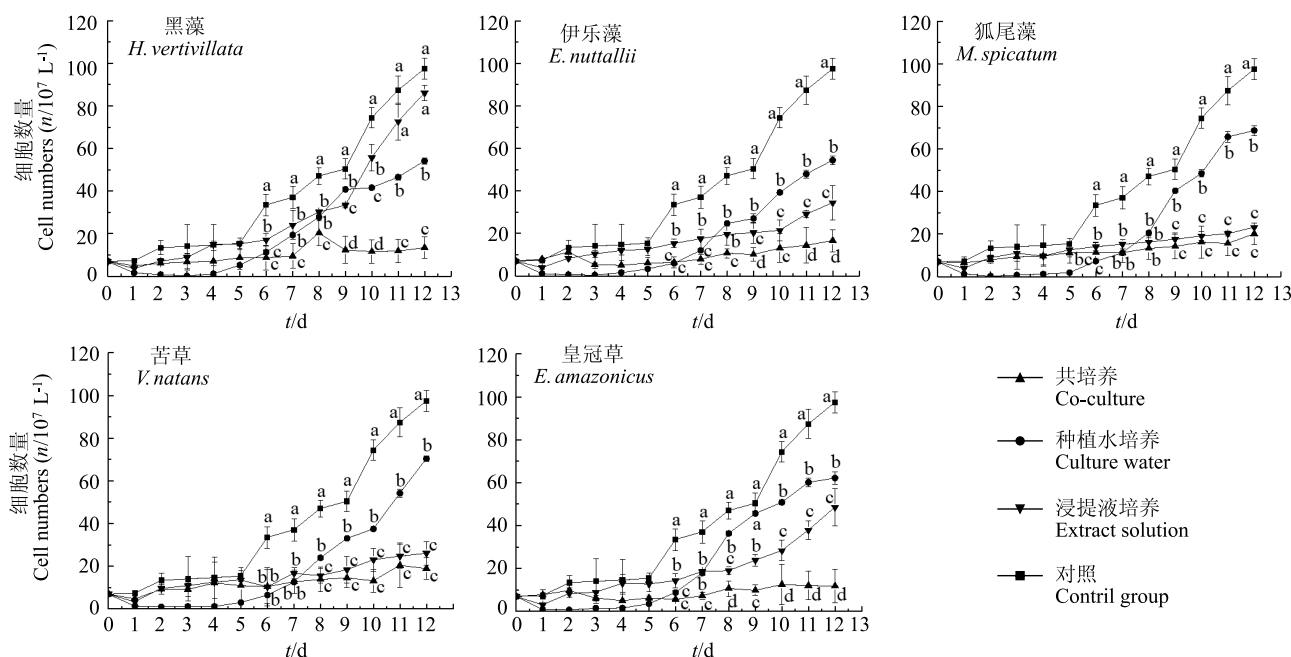


图2 相同植物3种处理下斜生栅藻的生长曲线. 不同字母表示在同一天不同处理差异显著 ($P < 0.05$).

Fig. 2 *Scenedesmus obliquus* growth curves under different culture systems. Lowercase letters indicate significant differences among different culture systems on the same day ($P < 0.05$).

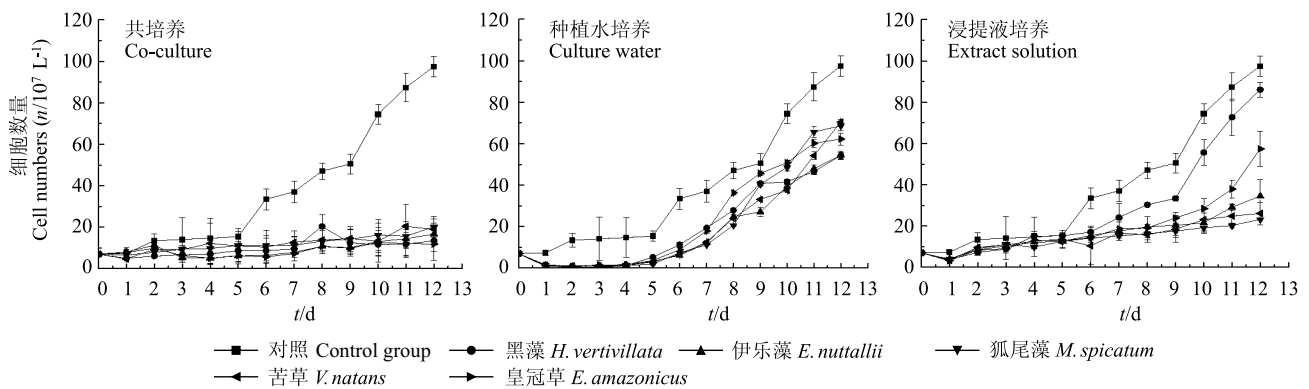


图3 斜生栅藻在不同的培养系统中的生长曲线。

Fig. 3 *Scenedesmus obliquus* growth curves under different culture systems.

1), RGR极显著低于对照组 ($P < 0.01$), 但植物种间无显著差异; 伊乐藻、狐尾藻、苦草、皇冠草的浸提液处理的抑藻作用明显, RGR极显著低于黑藻和对照组 ($P < 0.01$); 黑藻、伊乐藻的种植水处理的抑藻作用明显, RGR极显著低于对照组 ($P < 0.01$), 但种间无显著差异。

表1 不同培养系统中斜生栅藻的相对生长率 (RGR)

Table 1 Relative growth rate of *Scenedesmus obliquus* under different culture systems

植物种类 Plant species	共培养 Co-culture	种植水培养 Culture water	浸提液培养 Extract solution
对照 Control group	0.2194 ± 0.0042 ^A	0.2194 ± 0.0042 ^A	0.2194 ± 0.0042 ^A
黑藻 <i>H. verticillata</i>	0.0494 ± 0.0354 ^B	0.1684 ± 0.0229 ^B	0.209 ± 0.00340 ^A
伊乐藻 <i>E. nuttallii</i>	0.0626 ± 0.0481 ^B	0.1665 ± 0.0340 ^B	0.1311 ± 0.0204 ^B
狐尾藻 <i>M. spicatum</i>	0.0836 ± 0.0328 ^B	0.1901 ± 0.0053 ^{AB}	0.0998 ± 0.0009 ^B
苦草 <i>V. natans</i>	0.0810 ± 0.0213 ^B	0.1919 ± 0.0113 ^{AB}	0.1055 ± 0.0311 ^B
皇冠草 <i>E. amazonicus</i>	0.0325 ± 0.0051 ^B	0.1814 ± 0.0118 ^{AB}	0.1730 ± 0.0241 ^B

不同字母表示不同沉水植物间差异显著 ($P < 0.01$)。

Uppercase letters indicate significant differences among different submerged macrophytes ($P < 0.01$).

3 讨论

由于同种植物在不同处理条件下对水华藻类的抑制效果有所不同, 为了让同种植物不同处理的抑制效果具有可比性, 本研究在实验设计时通过查阅文献及进行预实验来确定不同处理所需的植物材料的用量及浓度。浦寅芳等 (2009) 研究表明在共培养时大约 5 g L^{-1} 的沉水植物即对水华藻类的生长产生持续明显的抑制效果, 而产生同样的抑制效果则需要 20 g L^{-1} 以上新鲜组织的水浸出液才可以, 干粉末的水浸提液的浓度需要更大, 需要达到大约 40 g L^{-1} (干重) 的浓度^[16]。这为本研究实验设计提供了参考, 另外本研究也得出了相似的结果。由结果可以看出, 不仅不同植物对斜生栅藻的抑藻效果不同, 同种植物在不同处理条件下的抑制效果也不同。5种沉水植物种植水和浸提液的抑藻效果在实验的前半段时间都非常显著, 且种间差异性均不显著。但前

期种植水的抑藻效果要明显好于浸提液, 说明植物向环境中释放的化感物质达到一定浓度时对藻类的抑制效果还是非常显著的。但是实验后半段时间种植水的抑藻效果逐渐减弱。这可能与我们的种植水是一次添加而非连续添加有关, 由此也可以推断植物抑藻成分多数是一些易分解或挥发性物质, 这在前人的研究中也得到了印证。鲜敏鸣等也证实植物挥发油的浓度与抑藻效果呈正相关^[15]。

后期浸提液抑藻效果的减弱程度小于种植水, 这可以说明, 浸提液抑藻的持续性整体好于种植水, 猜测浸提液所用植物经过烘干处理, 不易分解和挥发的物质的含量会相对高些。而且后期各植物间浸提液的抑藻效果也存在显著差异, 狐尾藻浸提液对斜生栅藻的抑制效果最为明显, 苦草和伊乐藻次之, 黑藻较弱, 可能是由于对受试生物的化感物质不同, 有些物质不稳定, 易受环境条件如温度、光照等的影响^[3], 造成了各植物浸提液抑藻效果持久性的不同, 这在前人的研究中已有报道^[12-14]。此外, 化感作用具有选择性, 对藻类生长的抑制机理也不尽相同^[23], 导致不同植物浸提液对斜生栅藻抑制效果的差异。而在整个实验期间黑藻种植水的抑藻效果要好与浸提液。俞子文等研究也发现, 黑藻对斜生栅藻生长的抑制效果以黑藻植物体与斜生栅藻共培养最佳, 其次为连续添加种植水, 猜测黑藻植物体中含有较少的抑藻物质, 抑藻物质被释放的体外的量相对较多^[24]。而5种植物与藻类共培时都表现出显著的持久的抑藻效果, 且种间差异性不大, 这可能与植物体不断向环境中释放化感物质有密切的关系。研究结果意味着, 种植沉水植物抑制富营养化藻类是一种有效的方法。皇冠草是一种植物体较大、阔叶形的热带水草。有关皇冠草的化感抑藻研究还未见报道, 本研究中皇冠草的种植水、植物体、浸提液3种处理结果, 都证实了皇冠草对斜生栅藻有着明显的化感作用, 但皇冠草分泌出何种化感物质, 还有待进一步研究。

参考文献 [References]

- 肖溪, 楼莉萍, 李华, 陈英旭. 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 X, Lou LP, Li H, Chen YX. Algal control ability of allelopathically active submerged macrophytes: a review [J]. Chin J Appl Ecol, 2009, 20 (3): 705-712]

- 2 Zhao JG, He FF, Chen ZH, Li HJ, Hu JM, Lin FP. Effect of culture and extract solutions of macrophytes on the growth of three common algae [J]. *J Freshwater Ecol*, 2012, **27** (3): 367-379
- 3 Mulderij G, Van Donk E, Roelofs JGM. Differential sensitivity of green algae to allelopathic substances from *Chara* [J]. *Hydrobiologia*, 2003, **491** (1-3): 261-271
- 4 Jasser I. The influence of macrophytes on a phytoplankton community in experimental conditions [J]. *Hydrobiologia*, 1995, **306** (1): 21-32
- 5 Xian QM, Chen HD, Liu HL, Zou HX, Yin DQ. Isolation and identification of antialgal compounds from the leaves of *Vallisneria spiralis* L. by activity-guided fractionation [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2006, **13** (4): 233-237
- 6 黄新颖, 种云霄, 汤仲恩, 吴启堂. 3种沉水植物水培液中抑藻活性物质的分析[J]. 华南农业大学学报, 2010, **31** (3): 19-23 [Hang XY, Chong YX, Tang ZE, Wu QT. Analysis on antialgal allelochemicals in culture solutions of three submerged macrophytes [J]. *J South China Agric Univ*, 2010, **31** (3): 19-23]
- 7 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 FM, Hu HY. Isolation and effects on green alga *Chlorella pyrenoidosa* of algal-inhibiting allelochemicals in the macrophyte, *Phragmites communis* Tris [J]. *Chin J Envir Sci*, 2004, **25** (5): 89-92]
- 8 王立新, 张玲, 张余霞, 金春燕, 陆长梅, 吴国荣. 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 LX, Zhang L, Zhang YX, Jin CY, Lu CM, Wu GR. The inhibitory effect of *Hydrilla verticillata* culture water on *Microcystis aeruginosa* and its mechanism [J]. *J Plant Physiol Mol Biol*, 2006, **32** (6): 672-678]
- 9 王红强, 成水平, 张胜花, 王静, 胡陈艳, 葛芳杰, 吴振斌. 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 HQ, Cheng SP, Zhang SH, Wang J, Hu CY, Ge FJ, Wu ZB. Analysis of alkaloid from *Elodea nuttallii* by GC-MS and its allelopathic activity on *Microcystis aeruginosa* [J]. *Acta Hydrobiol Sin*, 2010, **34** (2): 361-366]
- 10 Gross EM. Differential response of tellimagrandin II and total bioactive hydrolysable tannins in an aquatic angiosperm to changes in light and nitrogen [J]. *Oikos*, 2003, **103** (3): 497-504
- 11 Hilt S. Allelopathic inhibition of epiphytes by submerged macrophytes [J]. *Aquat Bot*, 2006, **85** (3): 252-256
- 12 Nakai S, Inoue Y, Hosomi M, Murakami A. Growth inhibition of blue-green algae by allelopathic effects of macrophytes [J]. *Water Sci Technol*, 1999, **39** (8): 47-53
- 13 Körner S. Loss of submerged macrophytes in Shallow Lakes in North-Eastern Germany [J]. *Int Rev Hydrobiol*, 2002, **87** (4): 375-384
- 14 Gross EM. Allelopathic interaction between submerged macrophytes, epiphytes and phytoplankton: algaecide hydrolysis polyphenol from *Myriophyllum spicatum* L. [D]. Cuvillier: Kiel University, 1995
- 15 鲜啟鸣, 陈海东, 邹惠仙, 尹大强. 沉水植物中挥发性物质对铜绿微囊藻的化感作用[J]. 生态学报, 2006, **26** (11): 3549-3554 [Xian QM, Chen HD, Zou HX, Yi DQ. Allelopathic activity of volatile substance from submerged macrophytes on *Microcystis aeruginosa* [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26** (11): 3549-3554]
- 16 浦寅芳, 孙颖颖, 阎斌伦, 朱明. 3种沉水植物对水华藻类生长的影响[J]. 水生生态学杂志, 2009, **2** (6): 46-50 [Pu YF, Sun YY, Yan BL, Zhu M. Effects of three submerged macrophytes on the growth of bloom algae in the laboratory [J]. *J Hydroecol*, 2009, **2** (6): 46-50]
- 17 He F, Deng P, Wu XH, Cheng SP, Gao YN, Wu ZB. Allelopathic effects on *Scenedesmus obliquus* by two submerged macrophytes *Najas minor* and *Potamogeton malaianus* [J]. *Fresen Environ Bull*, 2008, **17** (1): 92-97
- 18 Pakdel FM, Sim L, Bearda J, Davis J. Allelopathic inhibition of microalgae by the freshwater stonewort, *Chara australis*, and a submerged angiosperm, *Potamogeton crispus* [J]. *Aquat Bot*, 2013, **110**: 24-30
- 19 Erhard D, Gross EM. Allelopathic activity of *Elodea canadensis* and *Elodea nuttallii* against epiphytes and phytoplankton [J]. *Aquat Bot*, 2006, **85** (3): 203-211
- 20 何梅, 张庭廷, 吴安平, 聂刘旺. 肉桂酸对铜绿微囊藻和斜生栅藻的抑制作用[J]. 应用与环境生物学报, 2008, **14** (6): 774-778 [He M, Zhang TT, Wu AP, Nie LW. Inhibition of cinnamic acid on *Microcystis aeruginosa* K. and *Scenedesmus arcuatus* L. [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2008, **14** (6): 774-778]
- 21 汤仲恩, 种云霄, 吴启堂, 李玲玲, 朱文玲. 3种沉水植物对5种富营养化藻类生长的化感效应[J]. 华南农业大学学报, 2008, **28** (4): 42-46 [Tang ZE, Zhong YX, Wu QT, Li LL, Zhu WL. Allelopathic effects of three submerged macrophytes on five eutrophic algae [J]. *J South China Agric Univ*, 2008, **28** (4): 42-46]
- 22 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 FM, Hu HY. Allelopathy and inhibitory effect of extracts from macrophytes on algae growth [J]. *China Water Wastewater*, 2004, **20** (11): 18-21]
- 23 Streibig JC, Olofsdotter M. Joint action of phenolic acid mixtures and its significance in allelopathy research [J]. *Physiol Plant*, 2002, **114** (3): 422-428
- 24 俞子文, 孙文浩, 郭克勤, 余叔文. 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 ZW, Sun WH, Guo KQ, Yu SW. Allelopathic effects of several aquatic plants on algae [J]. *Acta Hydrobiol Sin*, 1992, **16** (1): 1-7]