

铜离子对 2 种沉水植物种植水抑藻效应的影响

种云霄, 汤仲恩, 余光伟, 吴启堂

华南农业大学资源环境学院环境科学与工程系, 广东 广州 510642

摘要: 为了阐明铜离子对沉水植物化感抑藻作用的影响, 利用 2 种常见且具有明显化感抑藻效应的沉水植物: 马来眼子菜和苦草种植水进行了研究, 分析了协同加入铜离子的情况下, 种植水对铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 脆杆藻 (*Fragilaria* sp.) 和沙角衣藻 (*Chlamydomonas sajabo*) 等单细胞蓝绿藻生长的抑制效应。铜离子投入量参考污水综合排放标准, 综合考虑水生动物和藻类的耐铜毒性范围, 在较低的范围设置 4 个水平: 100、150、200、250 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子每升藻类培养液。研究结果表明, 与不同水平铜离子混合后, 种植水的抑藻效应出现 4 种情况, (1) 被消除, 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子加入后, 马来眼子菜种植水对脆杆藻、苦草种植水对铜绿微囊藻的抑制作用被消除。(2) 被削弱, 马来眼子菜种植水在加入 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 150 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子 2 种情况下, 对铜绿微囊藻抑制作用被削弱, 加入 200 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子后, 对脆杆藻抑制作用被削弱; 苦草种植水在加入 150 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子后, 对铜绿微囊藻的抑制被削弱。(3) 无变化, 马来眼子菜种植水, 分别加入 200 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 250 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子后, 对铜绿微囊藻抑制效应不受影响, 分别加入 150 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 250 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子, 对脆杆藻抑制效应不受影响; 苦草种植水, 加入 150 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子后, 对铜绿微囊藻抑制效应不受影响, 加入 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 150 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子后, 对沙角抑藻的抑制效应不受影响。(4) 被强化, 苦草种植水, 分别加入 200 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 250 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子后, 对铜绿微囊藻、沙角抑藻的抑制效应均被强化。沉水植物化感抑藻物质主要是小分子的有机物, 包括各种有机酸, 而铜离子极易和水中有机物发生络合反应, 可能是铜离子与种植水中某些抑藻化感物质发生络合反应导致其抑藻效应受到影响, 具体机制有待进一步研究。

关键词: 化感抑藻; 沉水植物; 铜离子

中图分类号: X142

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2012) 09-1594-05

引用格式: 种云霄, 汤仲恩, 余光伟, 吴启堂. 铜离子对 2 种沉水植物种植水抑藻效应的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1594-1598.

ZHONG Yunxiao, TANG Zhongen, YU Guangwei, WU Qitang. Growth inhibition of blue-green algae by submerged macrophytes culture solutions with existence of the low level of copper ion [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(9): 1594-1598.

沉水植物可以通过营养固定和向水中分泌抑藻化感物质等机制抑制单细胞蓝绿藻类生长^[1-3], 依靠这些机制, 在富营养化水体中只要形成一定覆盖度的沉水植被就能实现对藻类的控制, 维持较好水质, 因此重建或恢复沉水植被是目前富营养化水体治理技术的研究热点^[4]。

沉水植被恢复或重建需要克服较多的问题^[5], 其中之一是高密度藻类的竞争抑制作用, 研究表明单细胞蓝绿藻类也会利用营养、光照竞争及化感作用等对沉水植物生长进行抑制^[6-7], 因此在已经富营养化的水体中恢复沉水植被时, 往往面临一个难题: 初始植入的沉水植物生物量较小, 在与高密度藻类竞争中处于劣势, 不能充分发展甚至完全死亡。沉水植被构建或恢复初始阶段使用一些辅助强化措施共同抑制藻类生长, 为其获得充分生长的空间成为该项技术成功的关键。针对不同的水体特点, 有多种针对性措施被尝试^[8-10], 向水体中投加化学抑藻剂是一个具有普适性且快速有效的手段,

铜离子由于其廉价有效是化学抑藻剂的首选^[11], 可以作为沉水植被恢复时潜在化学辅助措施。但沉水植物向水中释放化感物质, 通常是小分子有机物^[12-14], 加入铜离子可能和其相互作用, 进而影响抑藻效应, 目前相关报道还较少, 因此这种措施是否可行有待验证。

本论文使用含有化感抑藻物质的沉水植物种植水进行了研究实验, 希望能够为沉水植被恢复时适宜的化学辅助技术的开发提供依据。

1 研究材料与方法

1.1 研究材料

根据文献调研和本研究组前期研究发现^[15-17], 苦草 (*Vallisneria asiatica*) 的种植水对蓝藻铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 和绿藻沙角衣藻 (*Chlamydomonas sajabo*) 生长具有明显抑制作用, 马来眼子菜 (*Potamogeton malaianus*) 种植水对蓝藻铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 和绿藻脆杆藻 (*Fragilaria* sp.) 的生长具有明显抑制作用,

基金项目: 广东省科技计划项目 (0711250100006)

作者简介: 种云霄 (1974 年生), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为水污染控制。E-mail: cyx04@scau.edu.cn

收稿日期: 2012-07-09

表明这些植物可能向种植水中释放某些特定抑藻化感物质^[6-10], 因此本研究选择这 2 种沉水植物和对应的单细胞藻类作为研究材料, 沉水植物采自广州市郊自然水体, 藻种购自中科院水生生物研究所藻种库, 2 类实验材料带回实验室后均扩大培养后待用。

1.2 研究方法

1.2.1 铜离子投入量设置

参考污水综合排放标准 (GB 8978—1996), 综合考虑水生动物和藻类的耐铜毒性范围^[18-19], 在较低的范围设置 4 个水平: 铜离子 100、150、200、250 $\mu\text{g/L}$ 藻类培养液。

1.2.2 沉水植物种植水的培养

马来眼子菜和苦草分别取生长良好 (根茎叶完好, 叶色正常) 的植株 25 g 左右, 经自来水、蒸馏水各清洗 3 次, 每次 10 min, 去除植株上携带的泥沙等杂质, 放于 3 L 大烧杯中, 然后加入 2.5 L Hoagland (1 \times) 营养液 (约 10 g 鲜质量植物/L 营养液的水平), 置于 GXZ 智能型光照培养箱 (白天温度 25 $^{\circ}\text{C}$, 光强 4 000 lx; 晚上温度 15 $^{\circ}\text{C}$, 光强 200 lx; 光暗时间比 16:8) 培养 10 d。培养结束后, 取出植物体, 剩余种植水经 0.22 μm 的微滤膜抽滤处理, 滤掉可能带入的原生动物及微生物等, 滤液用保鲜膜密封放入冰箱 0~4 $^{\circ}\text{C}$ 保存备用。

1.2.3 藻类生长抑制实验

马来眼子菜对应抑制藻类为铜绿微囊藻和脆杆藻, 苦草为铜绿微囊藻和沙角衣藻, 形成 4 类对应抑藻实验体系, 每个体系包括 4 个种植水与不同水平铜离子的混合抑制实验及相应的 2 个对照实验, 共 6 个实验 (具体见表 1), 每个设置 3 个重复。所用 3 种藻分别在 Hoagland (1 \times) 营养液预先培养

表 1 马来眼子菜和苦草种植水与铜离子的抑藻实验方案

Table 1 Experimental program of growth inhibition of blue-green algae by copper ion and culture solutions of *Potamogeton malaiamus* and *Vallisneria asiatica*

	马来眼子菜		苦草	
	<i>Potamogeton malaiamus</i>		<i>Vallisneria asiatica</i>	
	铜绿微囊藻	脆杆藻	铜绿微囊藻	沙角衣藻
	<i>Microcystis aeruginosa</i>	<i>Fragilaria sp.</i>	<i>Microcystis aeruginosa</i>	<i>Chlamydomonas sajjao</i>
种植水+铜离子母液	10 mL 种植水+10 mL 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子母液			
	10 mL 种植水+10 mL 150 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子母液			
	10 mL 种植水+10 mL 200 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子母液			
	10 mL 种植水+10 mL 250 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子母液			
种植水	10 mL 种植水+10 mL Hoagland (1 \times) 营养液			
营养液	20 mL Hoagland (1 \times) 营养液			

*铜离子母液以 CuSO_4 和 Hoagland (1 \times) 营养液分别配置而成, 100、150、200、250 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 母液中铜离子质量浓度分别为 3 200、4 800、6 400、8 000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

到对数生长期时, 进行实验, 每个实验取 20 mL 的藻种离心洗涤后接种于盛有 300 mL Hoagland (1 \times) 营养液的 1 000 mL 锥形瓶中, 置于日光温室自然光照培养, 培养初始至结束每 2 d 滴加 1 次抑制液或营养液, 连续滴加 7 次后培养结束; 每天用消毒试管取出 10 mL 藻液测定藻生长量, 测定前手工摇动锥形瓶内藻液 0.5 min 左右, 取出后用低频漩涡混合振荡器震荡 2 min 令试管内藻细胞分布均匀, 用 UV-754 型可见分光光度计测定波长为 650 nm 下的 OD 值代表藻生长量; 实验培养在日光温室进行, 期间培养条件: 温度和光照范围是 13.9~26.9 $^{\circ}\text{C}$ 和 3 830~25 600 lx。

1.2.4 测定结果计算与分析

藻细胞生物量增加以相对增长率 (relative growth rate RGR) 来衡量^[20], 按下式计算:

$$\text{RGR} = (\ln N_2 - \ln N_1) / t$$

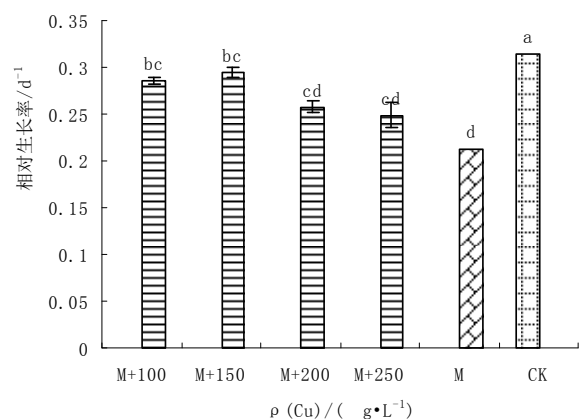
式中, N_2 表示试验结束时的藻液 OD 值; N_1 表示试验开始时的藻液 OD 值; t 为试验进行时间 (单位是 d^{-1})。当 $\text{RGR} < 0$, 表明藻已受到抑制并逐渐死亡; 当 $\text{RGR} \geq 0$, 表明所设置条件藻可以耐受生长。

对计算结果采用 Excel 2003 和 SAS 软件 8.1 版本进行显著性分析和多重比较分析 (邓肯法, $P=0.05$ 的显著水平)。

2 结果与讨论

2.1 铜离子对马来眼子菜种植水抑藻效应的影响

图 1 可以看出, 铜绿微囊藻的生长速率, 在只滴加营养液时最高, 其次是马来眼子菜种植水和 4 个水平铜离子混合, 滴加马来眼子菜种植水和营养



M 表示马来眼子菜种植水; M+100 表示马来眼子菜种植水与 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子混合, 其余类推; CK 表示对照 2, 即只滴加营养液处理; 多重比较分析结果说明: 互相比较 2 项字母相同表示无显著性差异, 不同字母有显著性差异, 下同

图 1 不同水平铜离子与马来眼子菜种植水混合对铜绿微囊藻的抑制作用

Fig. 1 Antialgal effect of mixed copper ion and *Potamogeton malaiamus* culture solution on *Microcystis aeruginosa*

液时最低, 统计分析结果表明, 无抑制因素: 只滴加营养液的空白对照藻类生长速率显著高于其他 5 种情况, 表明马来眼子菜种植水、及种植水和 4 种铜离子混合液这些因子都对铜绿微囊藻的生长产生了一定的抑制作用, 其中以马来眼子菜种植水抑制效应最强, 应该是种植水中马来眼子菜所分泌的化感物质的作用; 与只滴加马来眼子菜种植水作为抑制因子情况相比较, 种植水分别与 2 个低水平 ($100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $150 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 铜离子混合情况下, 藻类生长速率显著升高, 这表明种植水的抑藻效应被削弱; 而分别与 2 个较高水平 ($200 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $250 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 铜离子混合情况下, 藻类生长速率略有升高, 但差异不显著, 表明种植水抑藻效应未受到铜离子影响。

图 2 可以看出, 与铜绿微囊藻相似, 脆杆藻的相对生长率, 也是在只滴加营养液时最高, 其次是马来眼子菜种植水和 4 个水平铜离子混合, 滴加马来眼子菜种植水时最低。统计分析结果表明, 与只滴加营养液的生长速率相比, 马来眼子菜和 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子混合情况下, 脆杆藻生长速率变化不显著, 表明这个因子未对脆杆藻生长起到抑制作用, 而其他 4 种情况, 包括只滴加马来眼子菜种植水作为抑制因子情况下, 脆杆藻生长速率都有显著降低, 表明脆杆藻生长都受到明显的抑制, 也进一步说明种植水与 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子混合情况下, 种植水的抑藻效应被消除了; 而与只滴加种植水相比较, 其与 $200 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子混合情况下, 藻类生长速率也有显著升高, 表明种植水抑藻效应被部分削弱, 其分别 150 、 $250 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子混合情况下, 脆杆藻生长速率则变化不显著, 可见这 2 个水平对种植水抑藻效应没有影响。

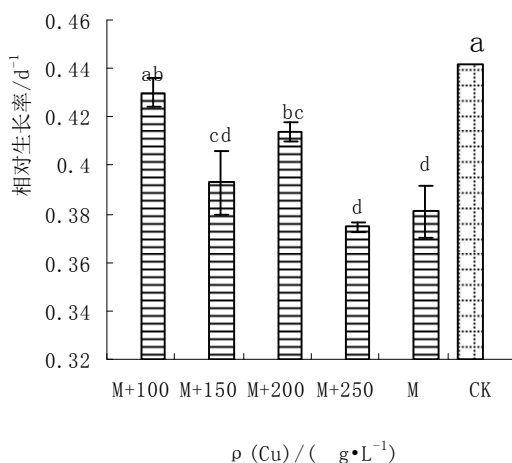
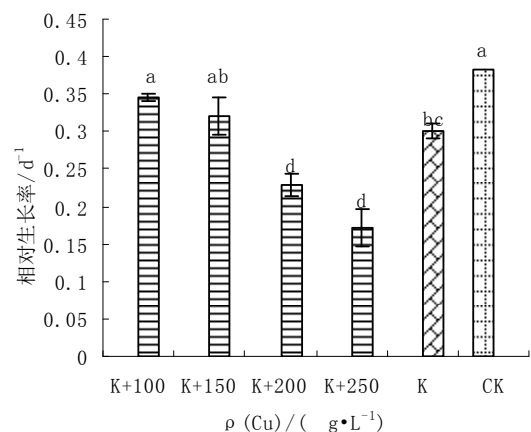


图 2 铜离子和马来眼子菜种植水对脆杆藻的抑制作用

Fig.2 Antialgal effect of mixed copper ion and *Potamogeton malaianus* culture solution on *Fragilaria* sp

2.2 铜离子对苦草种植水抑藻效应的影响

图 3 可以看出, 铜绿微囊藻的相对生长率在只滴加营养液时最高, 其次是苦草种植水分别和 100 、 $150 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子混合及苦草种植水与营养液混合的 3 种情况下, 最低的是苦草种植水分别与 200 、 $250 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子混合的 2 种情况下。统计分析的结果表明, 种植水分别和 100 、 $150 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子混合时, 铜绿微囊藻的生长速率与只滴加营养液时空白对照差异不显著, 可见这 2 种情况下其生长未受到抑制; 其余 3 种情况下, 包括只滴加苦草作为抑制因子的, 其生长速率与空白对照相比, 都显著降低, 表明这些因子都明显抑制藻类生长, 也进一步说明, 2 个低水平铜离子 (100 、 $150 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 可以抵消苦草种植水对铜绿微囊藻生长的抑制效应; 而苦草种植水分别与 200 、 $250 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子混合时, 铜绿微囊藻生长速率又显著低于只滴加种植水作为抑制因子的处理, 表明这 2 个水平铜离子可以强化苦草种植水对铜绿微囊藻的抑制。



K 表示苦草种植水; K+Cu100 表示等体积的苦草种植水与 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的铜离子溶液的混合液; Cu100 表示质量浓度为 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的铜离子溶液, 其余浓度类推; CK 表示空白对照, 即既不添加种植水也不添加铜离子溶液, 下图同

图 3 铜离子和苦草种植水对铜绿微囊藻的抑制作用

Fig.3 Antialgal effect of mixed copper ion and *Hydrilla verticillata* culture solution on *Microcystis aeruginosa*

图 4 可见, 与铜绿微囊藻相同, 沙角衣藻的生长速率, 在只滴加营养液时最高, 其次是苦草种植水分别和 100 、 $150 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子混合及苦草种植水与营养液混合的 3 种情况下, 最低的是苦草种植水分别与 200 、 $250 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子混合的 2 种情况下。但统计分析结果表明, 无抑制因素: 只滴加营养液的空白对照情况下, 沙角衣藻生长速率显著高于其他 5 种有抑制因素的, 说明这 5 种情况下, 抑制因子都明显抑制沙角衣藻生长。与只有种植水这一抑制因素相比, 种植水分别与 100 、 $150 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子混合 2 种情况下, 沙角衣藻生长速率变化不显著,

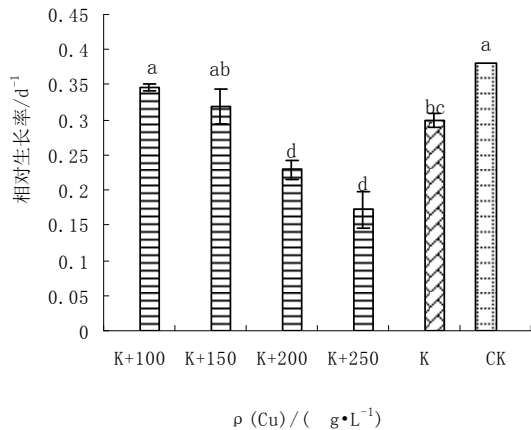


图4 铜离子和苦草种植水对沙角衣藻的抑制作用

Fig.4 Antialgal effect of mixed copper ion and *Hydrilla verticillata* culture solution on *Chlamydomonas sajabo*

可见这 2 个水平铜离子对苦草种植水抑藻效应无影响, 但种植水分别与 200、250 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 铜离子混合 2 种情况下, 沙角衣藻生长速率显著降低, 可见这 2 个水平铜离子可以强化对苦草种植水抑藻效应。

以上研究结果表明, 对马来眼子菜和苦草种植水, 低水平铜离子会抵消或削弱其抑藻效应, 随铜离子水平升高, 这种抑藻的削弱效应会消除, 对于苦草种植水, 当铜离子达到较高水平时, 还可强化其抑藻效应, 但对于马来眼子菜种植水, 在本研究范围内, 未出现抑藻效应被强化现象, 是否进一步提高铜离子水平可以达到强化效果还需进一步研究验证。

马来眼子菜和苦草种植水的抑藻效应主要是由于它们释放的化感抑藻物质导致^[3,12,15], 研究表明, 沉水植物释放抑藻化感物质许多为小分子的有机物, 包括长链脂肪酸、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^[12,15], 而铜离子在水溶液中往往是活泼的配位阳离子, 可与多种有机物发生络合反应形成配位化合物^[21], 针对铜离子抑藻性研究发现, 与有机物络合后其抑藻性会发生变化, 袁信芳等研究发现^[22], 铜离子与常见的螯合剂 EDTA、NTA 和 DTPA 络合后, 对铜绿微囊藻的抑制率降低, 而三乙醇胺络合铜^[22,24]对铜绿微囊藻的抑制率则高于单纯铜离子。从本研究结果看, 水生植物分泌的这些具有抑藻性能的化感物质与低浓度铜离子络合后其抑藻性也可能降低; 随铜离子水平由低到高, 种植水抑藻效应相应的从被消除、削弱到加强, 很可能是由于铜离子浓度升高导致, 抑或高浓度铜离子与另外的化感抑藻物质络合形成抑制性更强的络合物, 其中具体机制有待进一步研究。而马来眼子菜和苦草的不同, 也可能是由于它们各自释放的

化感物质不同, 从而与铜离子的相互作用不同。

苦草是湖泊等水体沉水植被修复的主要建群种, 从本研究结果看, 铜离子水平达到 200 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 可以强化它对铜绿微囊藻和沙角衣藻这 2 种常见富营养化蓝绿藻的抑制, 因此在苦草植被恢复初始, 可以考虑同时投加此水平的铜离子来强化对藻类抑制, 促进恢复。此水平铜离子尽管远低于常规控藻所需的量, 但还是远远高出渔业用水标准^[11], 可能会对敏感的水生生物产生危害, 具体使用时还应综合考虑其生物毒性。

3 结论

在本研究条件下, 得出结论如下:

(1) 协同投加铜离子水平从 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 升高 250 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 马来眼子菜种植水抑藻效应会逐渐出现完全抵消、削弱和不受影响 3 种情况。

(2) 协同投加铜离子在 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 250 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 水平时, 苦草种植水抑藻效应会被抵消或削弱, 当铜离子在 200 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 250 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 水平时, 可以强化苦草种植水对藻类生长的抑制。

参考文献:

- [1] 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001: 121.
- [2] HILT S, GROSS E M. Can allelopathically active submerged macrophytes stabilize clear-water states in shallow lakes [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2008, 9: 422-432.
- [3] 肖溪, 楼丽萍, 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.
- [4] 濮培民, 王国祥, 李正魁, 等. 健康生态系统的退化及其修复: 理论、技术及应用[J]. *湖泊科学*, 2001, 13 (3): 193-203.
- [5] 李伟. 富营养化湖泊水生植物群落恢复重建的理论与方法[J]. *水生态学杂志*, 2008, 1 (1): 8-13.
- [6] 陈卫民, 张清敏, 戴树桂. 苦草与铜绿微囊藻的相互化感作用[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(2): 147-151.
- [7] MULDERIJ G, VAN N E H, Van D E. Macrophyte-phytoplankton interactions: The relative importance of allelopathy versus other factors [J]. *Ecological modeling*, 2007, 204: 85-92.
- [8] 陈灿, 王国祥, 朱增银, 等. 城市人工湖泊水生植被生态恢复技术[J]. *湖泊科学*, 2006, 18 (5): 523-527.
- [9] 李敦海, 杨勐, 方涛, 等. 水位调控法恢复富营养化水体沉水植物技术研究: 以无锡五里湖为例[J]. *环境科学与技术*, 2008, 32(12): 59-62.
- [10] 马剑敏, 贺锋, 成水平, 等. 武汉莲花湖水生植被重建的实践与启示[J]. *武汉植物学研究*, 2007, 25(5): 473-478.
- [11] 张树林, 邢克智, 周艳. 铜离子对铜绿微囊藻的急性毒性效应[J]. *水产科学*, 2007, 26(6): 323-326.
- [12] 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.
- [13] KORNER S, NICKLISCH A. Allelopathic growth inhibition of selected phytoplankton species by submerged macrophytes [J]. *Journal of Phycology*, 2002, 38: 862-871.

- [14] 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: 47-53.
- [15] 胡洪营, 门玉洁, 李锋民. 植物化感作用抑制藻类生长的研究进展[J]. 生态环境, 2006, 15(1): 153-157.
- [16] 鲜敬鸣, 陈海东, 邹惠仙, 等. 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.
- [17] 汤仲恩, 种云霄, 吴启堂, 等. 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, 2007, 28(4): 42-46.
- [18] 况琪军, 惠阳. 重金属对藻类的致毒效应[J]. 水生生物学报, 1996, 20(3): 277-283.
- [19] 刘洪涛, 李杰, 席宇, 等. 铜离子对铜绿微囊藻生长及生理的影响[J]. 郑州大学学报: 医学版, 2004, 39(1): 57-60.
- [20] HUNT R. Plant growth analysis [M]. London: Edward Arnold, 1978: 67.
- [21] 王晓蓉. 环境化学[M]. 南京: 南京大学出版社, 1993: 41-55.
- [22] 袁信芳, 王宁, 王海明, 等. 有机配体对铜胁迫下铜绿微囊藻生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 207-210.
- [23] 周律, 邢丽贞, 陈华东, 等. 利用络合铜控制水华优势藻的试验研究[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(8): 13-15.
- [24] 王蕾, 石利利, 蔡道基. 蓝藻水华优势藻高效防控铜制剂筛选研究[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(1): 60-64.

Growth inhibition of blue-green algae by submerged macrophytes culture solutions with existence of the low level of copper ion

ZHONG Yunxiao, TANG Zhongen, YU Guangwei, WU Qitang

College of Resource and Environment, Key Laboratory of Ecological Agriculture of Ministry of Agriculture of China, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China

Abstract: The aim of this study is to examine whether copper ion with low level affects the allelopathic activity of *Potamogeton malaianus* and *Hydrilla verticillata* against blue or green algae. The algae inhibited by *Potamogeton malaianus* are *Microcystis aeruginosa* and *Fragilaria sp.*, and ones inhibited by *Hydrilla verticillata* are *Microcystis aeruginosa* and *Chlamydomonas sajabo*. The culture solution of *Potamogeton malaianus* and *Hydrilla verticillata* could inhibit the growth of the corresponding algae because it contained the allelopathic compounds from the macrophyte. After mixing with four level of copper ion: 100, 150, 200 and 250 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ individually, the inhibitory effect of the culture solution from each specie on the algae were investigated and compared to the one of only using culture solution. The results indicated that the inhibitory effect taken on four types of changes, when the culture solution mixing with different level of copper ion. (1) It was eliminated when mixing with 100 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ copper ion, for *Potamogeton malaianus* against *Fragilaria sp.* and *Hydrilla verticillata* against *Microcystis aeruginosa*. (2) It was weakened, for *Potamogeton malaianus* against *Microcystis aeruginosa* when mixing with 100 and 150 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, for *Potamogeton malaianus* against *Fragilaria sp.* when mixing with 200 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, for *Hydrilla verticillata* against *Microcystis aeruginosa* when mixing with 150 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. (3) It had no significant change, for *Potamogeton malaianus* against *Microcystis aeruginosa* when mixing with 200 and 250 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ respectively, for *Potamogeton malaianus* against *Fragilaria sp.* when mixing with 150 and 250 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ respectively, for *Hydrilla verticillata* against *Microcystis aeruginosa* when mixing with 150 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, for *Hydrilla verticillata* against *Chlamydomonas sajabo* when mixing with 100 and 150 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ respectively. (4) It was enhanced, for *Hydrilla verticillata* against *Microcystis aeruginosa* and *Chlamydomonas sajabo* when mixing with 200 and 250 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ respectively. Copper ion is easily chelated with different organic compounds in solution. Moreover, the allelopathic compounds of macrophytes usually are organic compounds with low molecular weight. Maybe the complexing reaction between copper ion and some allelopathic compound is the reason that the allelopathic activity of *Hydrilla verticillata* or *Potamogeton malaianus* was changed. But the mechanism still needed to be researched.

Key words: allelopathy; submerged macrophytes; copper ion