

# 水网藻对铜绿微囊藻的化感作用及对氮磷去除能力研究

赵坤<sup>1</sup>, 傅海燕<sup>2\*</sup>, 柴天<sup>2</sup>, 张明真<sup>1</sup>, 刘智峰<sup>3</sup>, 陈秀娟<sup>2</sup>, 侯明<sup>1</sup>, 许鹏成<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学能源与环境研究院, 北京 102206; 2. 厦门理工学院环境工程系, 厦门 361024; 3. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082)

**摘要:** 通过测定藻液  $D_{680}$  和叶绿素 a 浓度, 研究了水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的影响, 探讨了在分离培养和共生培养 2 种条件下水网藻对铜绿微囊藻的抑制作用, 并考察了水网藻对氮磷的去除能力。结果表明, 水网藻对铜绿微囊藻有较强的抑制作用, 在水网藻种植水作用 8 d 后, 铜绿微囊藻死亡率达 92%; 不同浓度的水网藻对铜绿微囊藻的抑制作用不同, 分离培养条件下 3 g/L 水网藻的抑制作用最强, 10 d 内  $D_{680}$  从 0.1 下降到 0.004, 共生培养条件下 4 g/L 水网藻的抑制作用最强, 抑制率为 96%; 比较 2 种条件下藻细胞大规模死亡的时间发现, 分离培养下水网藻的抑制作用强于共生培养。2 种条件下培养液中氮、磷浓度都有大幅度地降低, 表明水网藻对氮磷有较强的吸收能力; 氮、磷浓度下降速率与水网藻浓度成正比, 10 d 内氮、磷浓度最大下降幅度分别为 93.4 mg/L 和 4.58 mg/L。

**关键词:** 水网藻; 铜绿微囊藻; 化感作用; 分离培养; 共生培养; 氮磷去除

中图分类号: X171; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)08-2267-06

## Allelopathy of *Hydrodictyon reticulatum* on *Microcystis aeruginosa* and Its Removal Capacity on Nitrogen and Phosphorus

ZHAO Kun<sup>1</sup>, FU Hai-yan<sup>2</sup>, CHAI Tian<sup>2</sup>, ZHANG Ming-zhen<sup>1</sup>, LIU Zhi-feng<sup>3</sup>, CHEN Xiu-juan<sup>2</sup>, HOU Ming<sup>1</sup>, XU Peng-cheng<sup>1</sup>

(1. Research Academic of Energy and Environmental Studies, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Department of Environmental Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The effects of liquid culture after cultured with *Hydrodictyon reticulatum* on the growth of *Microcystis aeruginosa* were investigated by measuring the  $D_{680}$  value and the chlorophyll-a content of *M. aeruginosa*. The inhibitory effects of *H. reticulatum* on *M. aeruginosa* were studied in both isolated culture and co-culture conditions. Nitrogen and phosphorus removal capacity of *H. reticulatum* was also tested. Results showed that *H. reticulatum* could inhibit the growth of *M. aeruginosa* obviously. After treated by the liquid culture after cultured with *H. reticulatum* for 8 days, the mortality rate of *M. aeruginosa* reached 92%. The inhibitory effects of *H. reticulatum* at different concentrations on *M. aeruginosa* were different. The strongest inhibitory effect occurred with 3 g/L *H. reticulatum* in the isolated culture as the  $D_{680}$  value reduced from 0.1 to 0.004 in 10 days, and it occurred with 4 g/L *H. reticulatum* in the co-culture as the suppression ratio was 96%. Comparing the large-scale death time for cells under these two conditions, the inhibitory effects of *H. reticulatum* in the isolated culture were stronger than those in the co-culture. The concentrations of nitrogen and phosphorus decreased sharply under both conditions, which showed that *H. reticulatum* had removal capacity on nitrogen and phosphorus. The decrease speed of nitrogen and phosphorus concentrations positively correlated to the concentrations of *H. reticulatum*. The highest decrease of nitrogen and phosphorus were 93.4 mg/L and 4.58 mg/L in 10 days, respectively.

**Key words:** *Hydrodictyon reticulatum*; *Microcystis aeruginosa*; allelopathy; isolated culture; co-culture; removal of nitrogen and phosphorus

随着大量氮、磷等营养盐的流入, 水体富营养化程度日益严重, 由此导致藻类等水生浮游植物异常生长, 形成水华或赤潮, 严重破坏了水体的生态平衡, 其中蓝藻属的铜绿微囊藻释放的藻毒素更是直接威胁到了人类的健康<sup>[1,2]</sup>。目前, 人们对除藻的研究也取得了一些进展, 主要有物理、化学、生物等方法, 但是仍然缺乏一种高效、安全、低成本的除藻方法<sup>[3]</sup>。研究发现, 某些水生植物分泌的化感物质<sup>[4]</sup>能够有效抑制水华藻的生长, 这为藻类控制技术开

拓了新的方向<sup>[5-9]</sup>。各国学者通过植物纯提取物实验、分泌物实验、藻类共培养实验、渗析袋实验等方法, 发现多种水生植物都具有抑藻能力<sup>[10-12]</sup>, 如芦

收稿日期: 2010-08-24; 修订日期: 2010-11-08

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB403307, 2005CB724200); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07104-004); 厦门市科技计划项目(3502Z20093040); 福建省科技计划项目(2008F5061)

作者简介: 赵坤(1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊富营养化问题, E-mail: zhaokun@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: fuh@xmut.edu.cn

菁、穗状狐尾藻等,并从中分离鉴定出具有抑藻活性的化感物质<sup>[13,14]</sup>,研究了其抑藻机制及对生态环境的影响<sup>[15-19]</sup>.

以往学者们对水生植物的研究主要侧重于对藻类的抑制作用,而对其去除氮磷能力的研究鲜有报道.降低氮磷浓度是防止藻类暴发的根本手段,若某种水生植物同时具有较强的抑藻作用和去除氮磷能力,则能对富营养化水体起到标本兼治的作用.水网藻是一种大型网片状或网袋状绿藻,肉眼可见,适应能力强,繁殖速度快,生长过程中能吸收大量的氨氮、硝态氮和无机磷等<sup>[20-22]</sup>,同时对微藻有一定的抑制作用<sup>[23]</sup>.本研究选取铜绿微囊藻作为实验对象,考察了不同浓度水网藻对铜绿微囊藻生长的影响及其对氮磷的去除能力,旨在为蓝藻水华的防治提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

水网藻(*Hydrodictyon reticulatum*)和铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)均购于中国科学院武汉水生生物研究所,分别用经过高压蒸汽灭菌后的 MCV 和 BG11 培养基于 500 mL 锥形瓶中培养,并用纱布包扎好瓶口,防止灰尘或其它杂质落入,整个过程在洁净工作台上进行,然后放入已用紫外灯消毒的光照培养箱中,生长温度 25℃,光照强度 3 000 lx,光暗周期 12 h:12 h,待生长至对数生长期便可用于实验.

### 1.2 实验仪器

上海博讯 SW-CJ-2FD 洁净工作台;广东科力 PYX-800G-B 光照培养箱;日本岛津 UV-2450 紫外可见分光光度计;日本岛津 TNM-1 总氮分析仪;美国致微 G154D 自动高压蒸汽灭菌器.

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 水网藻种植水抑藻实验

水网藻种植水的制备:将处于对数生长期的水网藻置于新鲜的培养基中,培养 30 d 后,将培养液经滤纸过滤,再经 0.45 μm 的微孔滤膜抽滤后即得到水网藻种植水.种植水抑藻实验在 500 mL 锥形瓶中进行,实验组加入 250 mL 水网藻种植水,对照组用去离子水代替,再加入 100 mL 铜绿微囊藻藻种,用去离子水添加至总体积为 500 mL,然后投入相应浓度的 BG11 营养盐,藻液初始  $D_{680}$  为 0.103,每组 4 个平行样,每天振荡 2 次,每 24 h 测定铜绿微囊藻的  $D_{680}$ ,每 48 h 测定叶绿素 a 浓度.

#### 1.3.2 水网藻和铜绿微囊藻分离培养实验

分离培养实验于自制玻璃培养缸中进行,玻璃缸长宽高为 20 cm × 10 cm × 10 cm,材料为普通玻璃,在长 1/2 处玻璃缸被分为两部分,中间开一个直径为 4 cm 的圆孔,并装上 0.45 μm 的微孔滤膜,水网藻和铜绿微囊藻被滤膜隔开,但化学物质可以相互交流.玻璃缸的一边种植水网藻,设置 4 个对比实验,对应的水网藻浓度分别为 1、2、3、4 g/L.另一边培养铜绿微囊藻,初始  $D_{680}$  为 0.1,培养液为 500 mL BG11.空白 1 中不加水网藻,只培养铜绿微囊藻.对照 1 中水网藻浓度为 4 g/L,不加铜绿微囊藻.每组 4 个平行样,每天振荡 2 次,每 24 h 测定铜绿微囊藻的  $D_{680}$ ,每 72 h 测定培养液中的氮磷浓度.

#### 1.3.3 水网藻和铜绿微囊藻共生培养实验

共生培养实验于 500 mL 锥形瓶中进行,设置 4 个对比实验,对应的水网藻浓度分别为 1、2、3、4 g/L.藻液初始  $D_{680}$  为 0.1,培养液为 500 mL BG11.空白 2 中不加水网藻,只培养铜绿微囊藻.对照 2 中水网藻浓度为 4 g/L,不加铜绿微囊藻.每组 4 个平行样,每天振荡 2 次,每 24 h 测定铜绿微囊藻的  $D_{680}$ ,每 72 h 测定培养液中的氮磷浓度.

#### 1.4 测定方法

铜绿微囊藻生物量用紫外可见分光光度计于 680 nm 波长处的吸光度表示.

叶绿素 a 测定<sup>[24]</sup>:取 5 mL 藻液经 0.45 μm 微孔滤膜过滤,将截留有铜绿微囊藻的滤膜置于冰箱中冷冻 8 h,再放入研钵中,加入少量碳酸镁粉末及 2~3 mL 90% 丙酮,充分研磨,提取叶绿素 a,然后用 90% 丙酮定容到 10 mL,放入冰箱冷藏 6 h 继续浸取,再经 4 000 r/min 离心 10 min,取上清液测定 630、645、663、750 nm 波长下的吸光度,按下式计算叶绿素 a 含量.

$$\text{叶绿素 a (mg/m}^3\text{)} = [11.64 \times (D_{663} - D_{750}) - 2.16 \times (D_{645} - D_{750}) + 0.1 \times (D_{630} - D_{750})] \cdot V_1 / V$$

式中, $V$  为水样体积(L), $V_1$  为提取液定容后的体积(mL), $D$  为吸光度.

总氮测定:将藻液经 0.45 μm 微孔滤膜过滤,再将去除铜绿微囊藻后的滤液直接由总氮分析仪测定.

总磷测定:将藻液经 0.45 μm 微孔滤膜过滤,滤液用过硫酸钾消解法消解,再用钼锑抗分光光度法测定总磷浓度<sup>[24]</sup>.

## 2 结果与讨论

### 2.1 水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的影响

图 1 为实验组和对照组铜绿微囊藻的生长情

况,实验组的  $D_{680}$  在前 2 d 缓慢增长至 0.147 后迅速下降,至第 8 d 基本为 0,对照组的铜绿微囊藻生长情况良好,  $D_{680}$  从 0.103 增长至 0.369. 这表明水网藻种植水能抑制铜绿微囊藻的生长,证明了水网藻在代谢过程中能分泌出某种抑藻物质,而实验初期铜绿微囊藻的增长说明这种抑制作用具有一定的滞后效应.

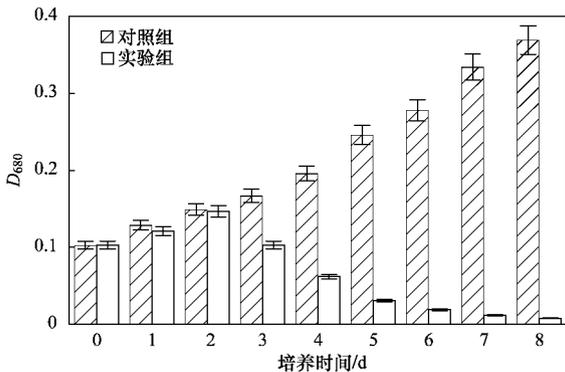


图1 水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的影响

Fig.1 Effects of liquid culture after cultured with *Hydrodictyon reticulatum* on the growth of *Microcystis aeruginosa*

藻体中叶绿素 a 含量与藻细胞生长状态和光合作用密切相关<sup>[25]</sup>. 图2为铜绿微囊藻叶绿素 a 浓度随时间的变化情况,实验前 2 d 实验组和对照组叶绿素 a 浓度都呈上升趋势,从  $346.2 \text{ mg/m}^3$  分别增长到  $531.4 \text{ mg/m}^3$  和  $578.6 \text{ mg/m}^3$ ,实验组略低于对照组,然后实验组叶绿素 a 浓度开始迅速下降,至第 8 d 降为  $26.1 \text{ mg/m}^3$ ,此时藻体已基本死亡,而对照组叶绿素 a 浓度增长到  $1352.7 \text{ mg/m}^3$ .

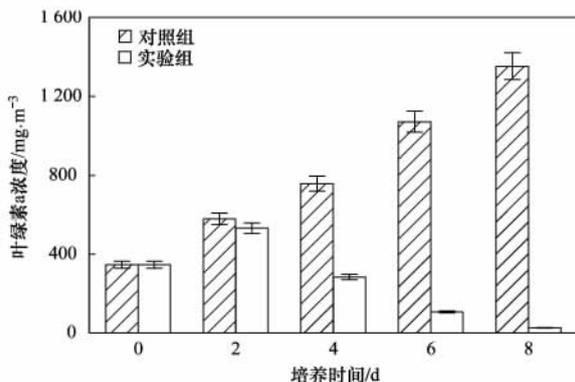


图2 水网藻种植水对铜绿微囊藻叶绿素 a 含量的影响

Fig.2 Effects of liquid culture after cultured with *Hydrodictyon reticulatum* on the chlorophyll-a content of *Microcystis aeruginosa*

2.2 分离培养下水网藻对铜绿微囊藻的抑制作用  
由图3可见,空白1的  $D_{680}$  呈直线上升趋势,从

0.1 增加到 0.377,铜绿微囊藻生长情况良好,投加了水网藻的 4 个实验组的  $D_{680}$  都明显低于空白 1,这表明铜绿微囊藻均受到了不同程度的抑制作用. 水网藻浓度为  $1 \text{ g/L}$  的实验组  $D_{680}$  缓慢增加,但始终低于空白 1 的增长幅度,实验结束时仅为空白 1 的 61%.  $2 \text{ g/L}$  实验组的  $D_{680}$  在前 3 d 缓慢增加,最高达到 0.130,随后开始降低,至第 8 d 基本为 0,培养液变为透明.  $3 \text{ g/L}$  实验组的  $D_{680}$  在前 3 d 从 0.1 缓慢增加至 0.125,接着迅速下降,至第 7 d 水体基本透明.  $4 \text{ g/L}$  实验组的  $D_{680}$  缓慢下降,至实验结束时仍有 0.063.

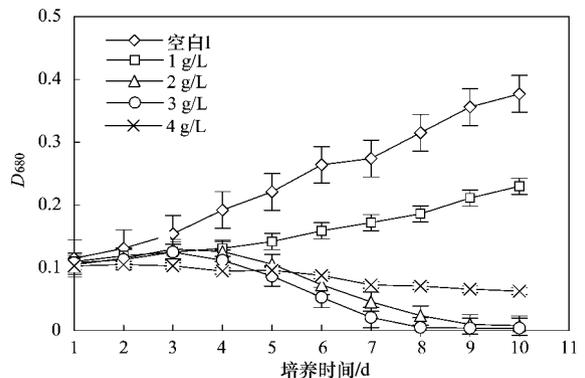


图3 分离培养条件下铜绿微囊藻的生长曲线

Fig.3 Growth curves of *Microcystis aeruginosa* in the isolated culture

实验结果表明,在分离培养条件下水网藻对铜绿微囊藻有明显的抑制作用,结合水网藻种植水的实验结论,证明这种抑制作用是一种化感作用,这种化感作用效果与水网藻的浓度有关, $1 \text{ g/L}$  实验组由于水网藻浓度较低,分泌的化感物质较少,还不足以完全抑制铜绿微囊藻的生长,所以表现为铜绿微囊藻的缓慢增长. 水网藻的化感作用也与铜绿微囊藻的生物量有关,实验初始阶段  $2 \text{ g/L}$ 、 $3 \text{ g/L}$  实验组的铜绿微囊藻缓慢增长,增长到一定程度后才开始下降,这是因为实验初期水网藻分泌的化感物质相对较少,而随着铜绿微囊藻的生长,不断诱导水网藻释放出更多的化感物质,在这种强化感作用下铜绿微囊藻被完全抑制,这与研究报道的某些水生植物的化感作用与藻类的生物量有关相一致<sup>[8,18]</sup>.  $4 \text{ g/L}$  实验组的铜绿微囊藻数量呈现缓慢下降的趋势,这可能是由于水网藻浓度较高,实验前期抑藻化感物质相对较多,使得铜绿微囊藻基本不能生长,所以也不能诱发水网藻释放出更多的化感物质,抑藻现象不如其它实验组明显.

### 2.3 共生培养下水网藻对铜绿微囊藻的抑制作用

由图4可知,共生培养条件下水网藻对铜绿微囊藻有较强的抑制作用,1 g/L实验组的 $D_{680}$ 缓慢增加,10 d后达到0.29,仅为空白2的59%. 2 g/L、3 g/L实验组的 $D_{680}$ 在前4 d分别增长到0.146和0.132,然后迅速下降,至第10 d为0.4 g/L实验组的 $D_{680}$ 在第9 d基本降为0.

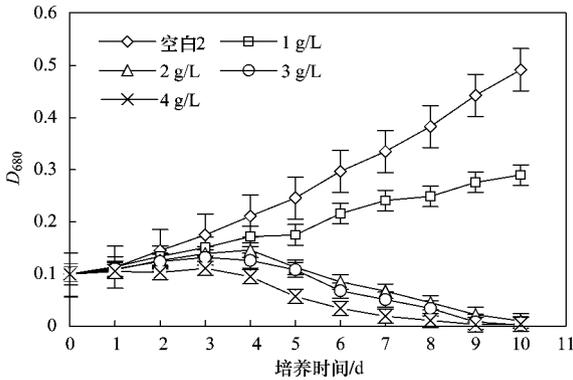


图4 共生培养条件下铜绿微囊藻的生长曲线

Fig.4 Growth curves of *Microcystis aeruginosa* in the co-culture

共生培养的实验结果基本与分离培养的实验结果一致,1 g/L实验组的 $D_{680}$ 缓慢增加和2 g/L、3 g/L实验组的 $D_{680}$ 先增加后降低的趋势,再次证明了水网藻的化感作用效果取决于水网藻和铜绿微囊藻的相对生物量. 共生培养下4 g/L实验组的铜绿微囊藻生长情况和分离培养实验有所不同,在经过3 d的缓慢上升后开始迅速下降,至第9 d降为0,这可能是由于共生培养条件下2种藻体直接接触,铜绿微囊藻诱导水网藻释放出更多的化感物质,高浓度的化感物质使得铜绿微囊藻迅速死亡. 另外,分离培养和共生培养部分实验组的铜绿微囊藻大规模死亡的时间分别是在第8 d和第10 d,并且前者在同一时期的铜绿微囊藻生物量基本都低于后者,这表明分离培养下水网藻的抑制作用要强于共生培养,这是由于铜绿微囊藻对水网藻也会有一定的抑制作用<sup>[26]</sup>,而在共生培养条件下这种抑制作用更强,水网藻的生长受到抑制,生物量增加缓慢,甚至减少,导致释放的化感物质比分离培养少,从而对铜绿微囊藻的抑制作用也相对较弱<sup>[18]</sup>.

### 2.4 分离培养下水网藻对氮磷的去除作用

如图5、6所示,培养液的氮磷浓度迅速降低. 空白1中没有投加水网藻,TN、TP分别降低了24.4 mg/L和1.16 mg/L,这是因为铜绿微囊藻因维持自身生长需要消耗了一部分氮磷. 1 g/L实验组中氮磷下

降幅度要大于空白1,分别降低了49.3 mg/L和2.21 mg/L. 4 g/L实验组的氮磷浓度分别降低了93.4 mg/L和4.58 mg/L. 对照1在没有铜绿微囊藻存在的条件下,去除氮磷的效果最好,分别从245.8 mg/L和5.51 mg/L降低至140.9 mg/L和0.66 mg/L.

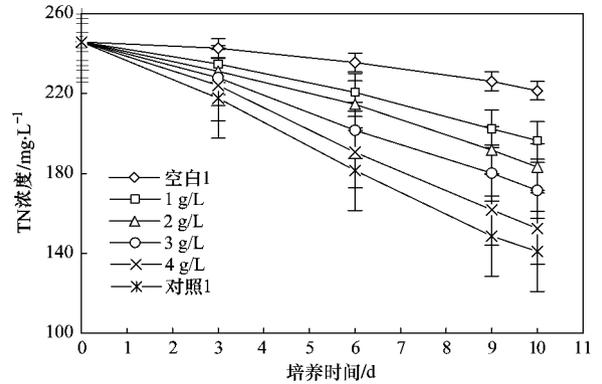


图5 分离培养液中总氮的变化曲线

Fig.5 Variation curves of TN in the isolated culture solution

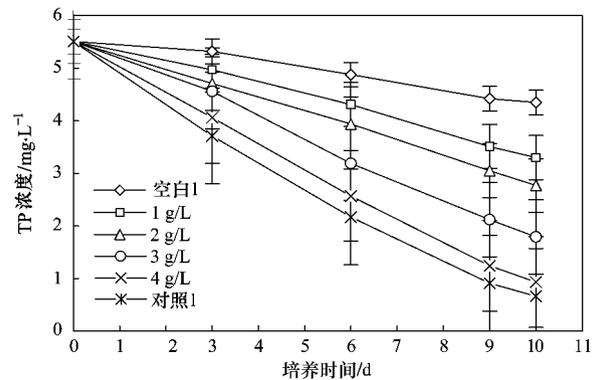


图6 分离培养液中总磷的变化曲线

Fig.6 Variation curves of TP in the isolated culture solution

实验结果表明分离培养条件下水网藻对氮磷有较强的去除能力,空白1中氮磷下降幅度远低于其它几个实验组,表明投加了水网藻后去除氮磷能力增强. 由图5、6可知,4个处理组中4 g/L实验组去除氮磷效果最好,水网藻去除氮磷能力与其浓度成正比. 另外,对照1的氮磷去除率比4 g/L实验组高,表明相同浓度的水网藻在没有铜绿微囊藻存在的条件下有更好的去除氮磷能力,这是因为铜绿微囊藻对水网藻的生长有抑制作用<sup>[26]</sup>,减缓了水网藻的增长速度,从而使消耗氮磷的速度降低.

### 2.5 共生培养下水网藻对氮磷的去除作用

由图7、8可知,共生培养条件下水网藻对氮磷有较好的去除效果,去除能力随水网藻浓度的增加

而增强,4 g/L实验组的氮磷浓度分别从 245.8 mg/L 和 5.51 mg/L 降低至 158.6 mg/L 和 1.03 mg/L。共生培养下的氮磷去除率都普遍低于分离培养,平均去除率仅为后者的 86%,这是因为共生培养与分离培养相比,前者中铜绿微囊藻对水网藻的抑制作用更强,水网藻的生长速度就会低于后者,其对氮磷的去除能力也会相应降低<sup>[18]</sup>。

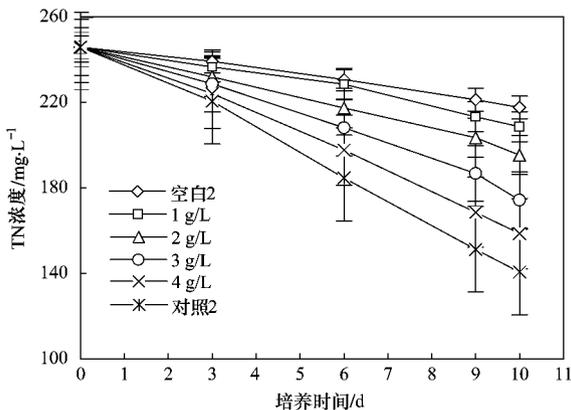


图7 共生培养液中总氮的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of TN in the co-culture solution

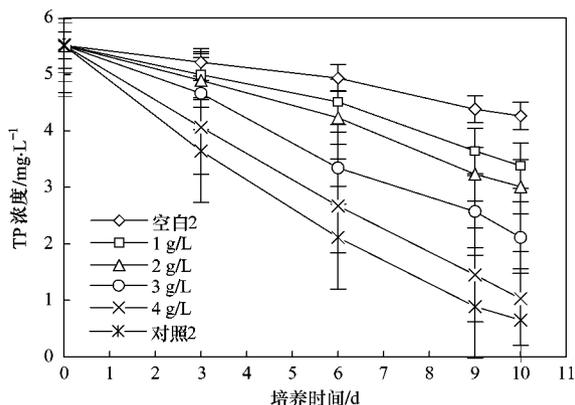


图8 共生培养液中总磷的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of TP in the co-culture solution

### 3 结论

(1) 水网藻种植水抑藻实验结果以及水网藻和铜绿微囊藻的分离培养和共生培养实验结果联合表明,水网藻对铜绿微囊藻有化感抑制作用,这种化感作用效果取决于水网藻和铜绿微囊藻的相对生物量,分离培养条件下水网藻的化感作用要强于共生培养。

(2) 在分离培养和共生培养条件下水网藻对氮磷都有较强的去除能力,其中前者的去除效果更好。

### 参考文献:

- [1] Vasconcelos V M, Pereira E. Cyanobacteria diversity and toxicity in a wastewater treatment plant (Portugal) [J]. Water Research, 2001, **35**(5):1354-1357.
- [2] Veldhuis M J W, Wassmann P. Bloom dynamics and biological control of a high biomass HAB species in European coastal waters: A *Phaeocystis* case study [J]. Harmful Algae, 2005, **4**: 805-809.
- [3] 聂发辉, 李田, 吴晓芙, 等. 藻型富营养化水体的治理方法 [J]. 中国给水排水, 2006, **22**(18):11-15.
- [4] Fitter A. Making allelopathy respectable [J]. Nature, 2003, **301**(5638):1337-1338.
- [5] Gross E M. Allelopathy of aquatic autotrophs [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2003, **22**(3-4):313-339.
- [6] Donk E V, Bund W J V D. Impact of submerged macrophytes including charophytes on phyto- and zooplankton communities: allelopathy versus other mechanisms [J]. Aquatic Botany, 2002, **72**(3-4):261-274.
- [7] Lurling M, Geest G V, 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.
- [8] 张维昊, 周连凤, 吴小刚, 等. 菹蒲对铜绿微囊藻的化感作用 [J]. 中国环境科学, 2006, **26**(3):355-358.
- [9] Tillmann U, Hansen P J. Allelopathic effects of *Alexandrium tamarense* on other algae: evidence from mixed growth experiments [J]. Aquatic Microbial Ecology, 2009, **57**(1):101-112.
- [10] Nakai S, Yamada S, Hosomi M. Anti-cyanobacterial fatty acids released from *Myriophyllum spicatum* [J]. Hydrobiologia, 2005, **543**(1):71-78.
- [11] Gross E M, Erhard D, Ivanyi E. Allelopathic activity of *Ceratophyllum demersum* L. and *Najas marina* spp. *intermedia* (Wolfgang) Casper [J]. Hydrobiologia, 2003, **506-509**(1-3):583-589.
- [12] Li F M, Hu H Y. Isolation and characterization of a novel antialgal allelochemical from *Phragmites communis* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(11):6545-6553.
- [13] Jin Z H, Zhuang Y Y, Dai S G, et al. Isolation and identification of extracts of *Eichhornia crassipes* and their allelopathic effects on algae [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2003, **71**(5):1048-1052.
- [14] 洪喻, 胡洪营, 黄晶晶, 等. 不同溶剂提取芦竹化感物质对铜绿微囊藻生长的影响 [J]. 环境科学, 2008, **29**(11):3143-3147.
- [15] 张庭廷, 何梅, 吴安平, 等. 对羟基苯甲酸对铜绿微囊藻的化感效应以及对鲤鱼的毒性作用 [J]. 环境科学学报, 2008, **28**(9):1887-1893.
- [16] 李锋民, 胡洪营, 钟云霞, 等. 芦苇化感物质对藻类细胞膜选择透性的影响 [J]. 环境科学, 2007, **28**(11):2453-2456.
- [17] Irfanullah H M, Moss B. Allelopathy of filamentous green algae [J]. Hydrobiologia, 2005, **543**(1):169-179.

- [18] 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.
- [19] Zhang T T, Zheng C Y, Hu W, *et al.* The allelopathy and allelopathic mechanism of phenolic acids on toxic *Microcystis aeruginosa* [J]. *Journal of Applied Phycology*,2010,22(1):71-77.
- [20] 王朝晖,江天久,杞桑,等. 水网藻对富营养化水样中氮磷去除能力的研究[J]. 环境科学学报,1999,19(4):448-452.
- [21] Sary J,Zeman A,Kratzer K. The uptake of ammomium nitrite and nitrate ions by *Hydrodictyon reticulatum* [J]. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*,1987,15(2):193-198.
- [22] Sary J,Kratzer K,Zeman A. The uptake of phosphate ions by the algae *Hydrodictyon reticulatum* [J]. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*,1987,15(3):275-280.
- [23] 刘德启,由文辉,李敏,等. 利用水网藻对微藻的抑制作用净化水源[J]. 中国给水排水,2004,20(10):14-17.
- [24] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京:中国环境科学出版社,2002. 244-248.
- [25] 李磊,侯文华. 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.
- [26] 刘德启,由文辉,李敏,等. 微藻对水网藻在水体修复中的胁迫作用研究[J]. 环境科学与技术,2005,28(4):18-20.