

铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 对惠氏微囊藻 (*Microcystis wesenbergii*) 的化感作用*

杨佳 王经洁 鲜启鸣** 钱新

(污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京大学环境学院, 南京 210046)

摘要 通过混合培养和添加过滤液两种方式观察铜绿微囊藻和惠氏微囊藻的生长曲线, 探讨两种微囊藻之间的化感作用。结果表明: 在混合培养条件下, 两者能够形成相互抑制作用; 当两者起始藻密度高于 0.5×10^6 cells · mL⁻¹、混合比为 1 : 1 时, 惠氏微囊藻的生长因化感作用而受到显著抑制 ($P < 0.05$), 同时惠氏微囊藻也会对铜绿微囊藻产生一定的胁迫作用; 处于对数生长期的铜绿微囊藻过滤液能抑制惠氏微囊藻的生长, 且惠氏微囊藻起始藻密度低于 0.5×10^6 cells · mL⁻¹, 连续滴加该过滤液后, 其生长受到极显著抑制 ($P < 0.01$)。

关键词 化感作用; 铜绿微囊藻; 惠氏微囊藻; 共培养

中图分类号 Q948.8 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2012)1-0131-07

Allelopathic effect of *Microcystis aeruginosa* on *Microcystis wesenbergii*. YANG Jia, WANG Jing-jie, XIAN Qi-ming**, QIAN Xin (State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210046, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(1): 131-137.

Abstract: By the methods of co-culture and cell-free filtrate addition, this paper studied the growth curves of *Microcystis aeruginosa* and *Microcystis wesenbergii*, and approached the allelopathy between them. The co-culture test revealed that there existed mutual inhibition effect between *M. aeruginosa* and *M. wesenbergii*. When the initial cell density of the two algae was higher than 0.5×10^6 cells · mL⁻¹ and their mixed ratio was 1 : 1, the growth of *M. wesenbergii* was suppressed significantly ($P < 0.05$) due to the allelopathic effect of *M. aeruginosa*, and the growth of *M. aeruginosa* was slightly inhibited by *M. wesenbergii*. The cell-free filtrate of *M. aeruginosa* in its exponential phase inhibited the growth of *M. wesenbergii*, and, when the filtrate was added continuously into culture solution and the initial cell density of *M. wesenbergii* was less than 0.5×10^6 cells · mL⁻¹, the growth of *M. wesenbergii* was suppressed significantly ($P < 0.01$).

Key words: allelopathy; *Microcystis aeruginosa*; *Microcystis wesenbergii*; co-culture.

化感作用是指植物通过向外界环境释放化学物质, 对其他植物 (包括微生物) 产生促进或抑制作用, 其中抑制现象更为普遍 (Rice, 1984)。陆地植物间最早被发现存在这种现象, 它也成功解释了如黑矢车菊 (*Centaurea maculosa*) 和薇甘菊 (*Mikania micrantha*) 等植物入侵现象 (Chen *et al.*, 2009; Pollock *et al.*, 2009)。随着研究的深入, 水生植物间的化感作用逐渐引起人们的关注。相比于陆地植物, 水生植物释放至水中的化感物质必须是亲水性的, 而且

浓度足够才能对竞争者产生作用 (Gross, 2003)。Erhard 和 Gross (2006) 研究表明, 伊乐藻 *Elodea canadensis* 和 *Elodea nuttallii* 的甲醇提取物能够显著抑制附生植物 (epiphyte) 和浮游植物 (phytoplankton) 的生长。Mulderij 等 (2009) 发现, 大萍 (*Stratiotes aloides*) 与浮游丝状藻 (*Filamentous algae*) 之间存在着化感作用。吴晓辉等 (2007) 将马来眼子菜 (*Potamogeton malaianus*) 和斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*) 在共培养系统中培养, 认为斜生栅藻通过抗氧化酶防御系统来抵制化感作用。

近些年, 随着湖泊富营养化导致的藻类水华等环境问题的日益加剧, 浮游藻类间化感作用的研究

* 国家重点基础研究计划项目 (2008CB418003) 资助。

** 通讯作者 E-mail: xianqm@nju.edu.cn

收稿日期: 2011-06-28 接受日期: 2011-10-26

也逐渐增多。小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 释放出的小球藻毒素 (Chlorellin) 能明显抑制 *Pseudokirchneriella subcapitata* 的生长 (Fergola *et al.*, 2006)。节球藻 (*Nodularia spumigena*)、水华丝囊藻 (*Aphanizomenon flos-aquae*)、项圈藻 (*Anabaena lemmermannii*) 释放的化感物质 (Allelochemical) 能抑制其他几种海藻的生长 (Suikkanen *et al.*, 2004)。侧生藻 (*Fischerella*) 粗提物中的亲脂性物质对绿藻属的衣藻 (*Chlamydomonas*) 具有很强的抑制作用 (Gantar *et al.*, 2008)。

目前浮游藻类化感作用的研究中, 实验所用的藻种大多能形成有害藻类水华 (Harmful algae bloom, HAB)。HAB 不仅对水生生物能产生危害, 甚至引发了对人类健康的关注 (Tang *et al.*, 2003)。本文选取中国典型浅水湖泊太湖的水华优势种铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 和惠氏微囊藻 (*Microcystis wesenbergii*) 作为研究对象, 探讨这两种典型有害藻类之间的化感作用, 为初步探讨太湖水华蓝藻优势种之间的演替和蓝藻形成机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

铜绿微囊藻 FACHB 905 和惠氏微囊藻 FACHB 929, 均购于中国科学院水生生物研究所淡水藻种库, 藻种用 BG11 培养基培养。BG11 培养基组分如下 (pH 为 7.5, 质量浓度为 $\rho / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$): NaNO_3 1500, K_2HPO_4 40, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 75, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 36, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 6, $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{FeNO}_8$ 6, $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ 1, Na_2CO_3 20, H_3BO_3 2.86, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 1.81, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.222, $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.391, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.079, $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.049。

实验前对藻种进行预培养, 光照强度为 2000 lx, 光暗比为 12 h : 12 h, 温度 25℃。每 1 个月转接 1 次, 两株藻种镜检能明显区分形态 (图 1), 且无杂藻, 将其作为实验藻种。

1.2 实验仪器

Zeiss Axio Imager A1 荧光显微镜, PGX-350B 智能光照培养箱 (宁波海曙赛福实验仪器厂), YX280B 手提式不锈钢蒸汽消毒器 (上海三审医疗器械有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 铜绿微囊藻和惠氏微囊藻混合培养实验 将铜绿微囊藻和惠氏微囊藻以不同的初始藻密度

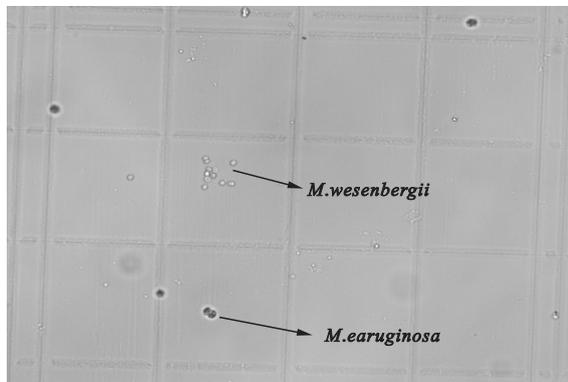


图 1 显微镜观察实验藻种的形态

Fig. 1 The algae morphology under microscope
目镜放大 10 倍, 物镜放大 40 倍。

(10^5 cells \cdot mL $^{-1}$ 、 5×10^5 cells \cdot mL $^{-1}$ 和 7×10^5 cells \cdot mL $^{-1}$) 及不同混合比 (1 : 1、1 : 2、2 : 1) 接种于 250 mL 锥形瓶中, 每组设置 3 个平行。每天定时摇动锥形瓶 3 次, 并任意改变它们在光照培养箱中的位置。每天同一时间取 0.1 mL 藻液在显微镜下用血球计数法进行细胞计数。

1.3.2 铜绿微囊藻过滤液培养惠氏微囊藻 将处于对数生长期 (培养 25 d, 藻密度为 10^7 cells \cdot mL $^{-1}$) 的铜绿微囊藻培养液过滤 (GF/C 膜, Whatman) 得到实验所需的过滤液, 按不同的方式添加至惠氏微囊藻培养液中 (表 1)。设置 3 个起始藻密度 (10^6 cells \cdot mL $^{-1}$ 、 2×10^6 cells \cdot mL $^{-1}$ 和 3×10^6 cells \cdot mL $^{-1}$), 每天取 0.1 mL 藻液在显微镜下进行细胞计数。

1.3.3 连续滴加铜绿微囊藻过滤液培养惠氏微囊藻 用 BG11 培养基接种对照组, 连续滴加组与 1.3.2 中控制组条件相同, 保持对照组和连续滴加组的初始藻密度相同, 并设置 3 个初始密度 (2×10^5 cells \cdot mL $^{-1}$ 、 5×10^5 cells \cdot mL $^{-1}$ 和 10^6 cells \cdot mL $^{-1}$)。从实验第 1 天起, 每天加入 10 mL 的 1.3.2 中 *M. aeruginosa* 过滤液 (对照组加 10 mL 的 BG11 培养基), 连续滴加 5 d, 每天取 0.1 mL 藻液在显微镜下计数藻细胞个数。

表 1 铜绿微囊藻过滤液的添加方式

Table 1 The addition ways of the cell-free filtrate from *M. aeruginosa*

组别	过滤液体积 (mL)	BG11 培养基的体积 (mL)	添加方式
对照组	0	150 (1×)	
控制组	50	100 (1.5×) ^a	一次性加
对比组	50	100 (1.5×)	水浴 10 min 后一次性加

a 为浓度 1.5 倍的 BG11 培养基

1.4 抑制率

以藻细胞计算抑制率(inhibition rate, IR):抑制率=(对照组-处理组)/对照组 \times 100%

1.5 数据处理

采用 SPSS(16.0 版本)软件中 One-way ANOVA 过程比较各种培养方式下惠氏微囊藻生长的差异,采用 Independent-Sample *T* Test 过程分析连续滴加时惠氏微囊藻生长的差异,同时采用 Origin(8.1 版本)进行图表处理。

2 结果与分析

2.1 铜绿微囊藻和惠氏微囊藻共同培养

2.1.1 铜绿微囊藻对惠氏微囊藻的化感作用 *M. aeruginosa* 和 *M. wesenbergii* 以较低(10^5 cells \cdot mL $^{-1}$)的起始藻密度共同培养时,*M. wesenbergii* 的生长受到轻微的影响(图 2A)。该起始藻密度下,*M. aeruginosa* 与 *M. wesenbergii* 混合比是 1:2 时,*M. wesenbergii* 能够正常生长;而两者的混合比为 1:1 时,*M. wesenbergii* 与对照(BG11 培养液单独培养)相比,生长速率开始变慢;当混合比为 2:1 时,*M. wesenbergii* 的生长更加缓慢,但差异不显著($P=0.145$)。提高两株藻的起始藻密度(5×10^5 cells \cdot mL $^{-1}$)后,*M. wesenbergii* 的生长明显异常(图 2B)。该起始藻密度下,培养前 3 d 内,3 种混合比下的 *M. wesenbergii* 都能正常生长;但从第 4 d 开始,对照组 *M. wesenbergii* 已进入对数期,而共同培养中各混合比的 *M. wesenbergii* 均受到严重的抑制;尤其是两者混合比为 1:1 和 2:1 时,*M. aeruginosa* 都极显著抑制 *M. wesenbergii* 的生长($P=0.009$, $P=0.003$)。当两者起始藻密度为 7×10^5 cells \cdot mL $^{-1}$ 时(图 2C),*M. aeruginosa* 对 *M. wesenbergii* 的抑制作用则更加显著。培养 3 d 后,各混合比下 *M. wesenbergii* 都不生长,但未死亡;其中 *M. aeruginosa* 和 *M. wesenbergii* 初始混合比分别为 1:1 和 2:1 时,*M. wesenbergii* 受抑制情况极显著($P=0.002$, $P=0.004$)。

抑制率直观地反映了 *M. wesenbergii* 受抑制的情况(表 2),*M. aeruginosa* 与 *M. wesenbergii* 初始浓度为 10^5 cells \cdot mL $^{-1}$ (方案 A)时,前 7 d 培养中,*M. wesenbergii* 未受到抑制,7 d 后 3 个混合比(1:1、1:2、2:1)条件下 *M. wesenbergii* 生长都受到抑制,第 9 d 抑制率分别为 58.9%、39.5%、48.4%。两者起始密度提高为 0.5×10^6 cells \cdot mL $^{-1}$ (方案 B)和

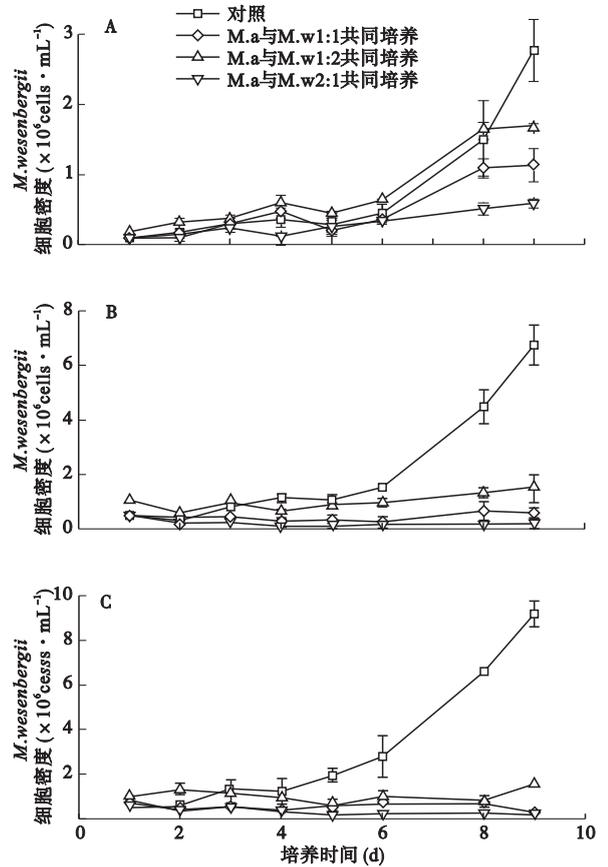


图 2 *M. aeruginosa* 与 *M. wesenbergii* 共同培养时 *M. wesenbergii* 的生长曲线

Fig. 2 Growth curve of *M. wesenbergii* when cultured together with *M. aeruginosa*

A, 起始藻密度 10^5 cells \cdot mL $^{-1}$; B, 5×10^5 cells \cdot mL $^{-1}$; C, 7×10^5 cells \cdot mL $^{-1}$ 。

0.7×10^6 cells \cdot mL $^{-1}$ (方案 C)时,混合培养 4 d 内,3 个混合比下 *M. wesenbergii* 生长都未受到抑制。从第 4 d 起,*M. wesenbergii* 生长明显受抑制,抑制率随时间变化呈逐渐增加的趋势。至第 9 天,初始藻密度为 0.5×10^6 cells \cdot mL $^{-1}$ 时,1:1、1:2、2:1 三个混合比下 *M. wesenbergii* 抑制率均在 70% 以上;初始密度为 0.7×10^6 cells \cdot mL $^{-1}$ 时,3 个混合比下抑制率均在 80% 以上。

2.1.2 惠氏微囊藻对铜绿微囊藻的胁迫作用 在 *M. aeruginosa* 与 *M. wesenbergii* 共同培养实验中,同时也出现了 *M. wesenbergii* 胁迫 *M. aeruginosa* 生长的现象。两者起始浓度为 10^5 cells \cdot mL $^{-1}$ 时(图 3A),各混合比下 *M. aeruginosa* 能够正常生长,生长没有受到抑制。而起始藻密度高于 0.5×10^6 cells \cdot mL $^{-1}$,混合比为 1:1 时,*M. aeruginosa* 生长便会受到抑制。其中起始藻密度为 0.5×10^6 cells \cdot mL $^{-1}$ 时(图 3B),3 个混合比条件下抑制现象不显著($P>$

0.2)。起始藻密度增加为 $0.7 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ (图3C)抑制作用最明显,尤其是混合比为1:2时,*M. aeruginosa* 的生长受到了显著抑制($P=0.023$)。

2.2 铜绿微囊藻过滤液对惠氏微囊藻生长的影响

用处于对数生长期的铜绿微囊藻过滤液培养惠氏微囊藻,在3个初始藻密度下,与对照组相比,*M. wesenbergii* 的生长都受到了抑制(图4)。同时,加热处理后的铜绿微囊藻过滤液与原过滤液相比,其对

M. wesenbergii 生长影响没有显著性差异($p>0.5$)。

2.3 连续滴加铜绿微囊藻过滤液对惠氏微囊藻生长的影响

实验结果显示(图5),连续滴加 *M. aeruginosa* 过滤液后,*M. wesenbergii* 的生长受到了显著地抑制。与连续滴加 BG11 培养基相比,初始藻密度为 $2 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 和 $5 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时(图5A和B),*M. wesenbergii*抑制情况极显著($P<0.01$)。实

表2 混合培养时 *M. wesenbergii* 的抑制率(%)

Table 2 The inhibition rate of *M. wesenbergii* when co-cultured with *M. aeruginosa*

培养时间(d)	方案A			方案B			方案C		
	1:1	1:2	2:1	1:1	1:2	2:1	1:1	1:2	2:1
4	-24.1	-58.6	75.0	73.0	37.1	93.3	74.5	24.5	68.4
5	39.1	-47.8	-50.0	68.6	18.6	89.5	89.7	67.7	70.3
6	17.1	-40.0	3.4	83.7	39.8	91.1	92.8	62.8	76.2
8	26.7	-8.3	53.4	85.0	71.6	94.7	96.4	87.9	89.8
9	58.9	39.5	48.4	91.3	78.1	96.7	97.4	83.9	96.5

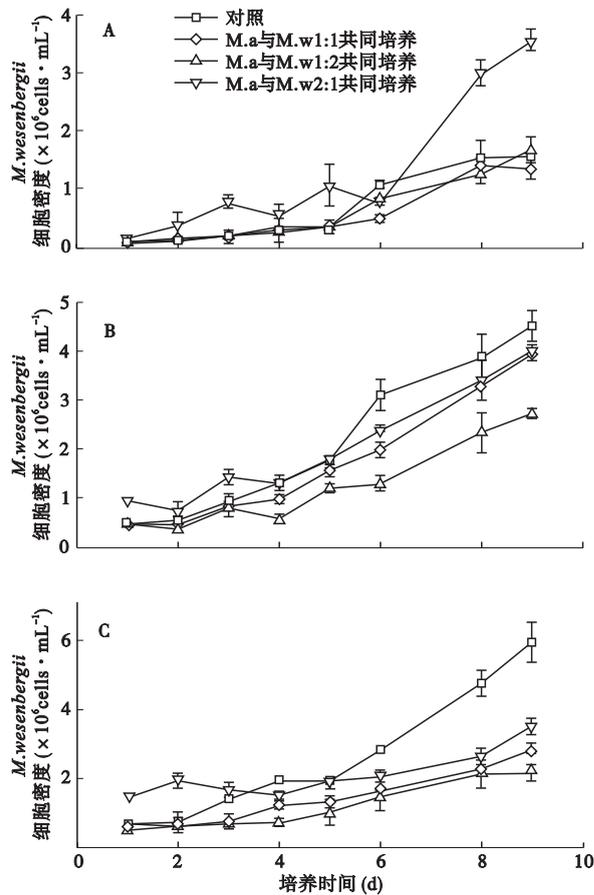


图3 *M. aeruginosa* 与 *M. wesenbergii* 共同培养时 *M. aeruginosa* 生长曲线

Fig. 3 Growth curve of *M. aeruginosa* when cultured together with *M. wesenbergii*

A, 起始藻密度 $10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$; B, $5 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$; C, $7 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。

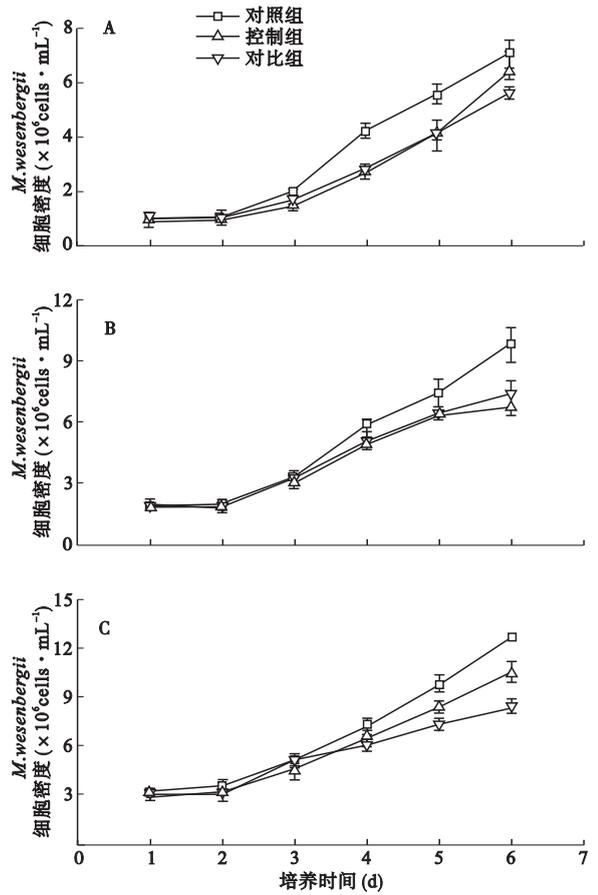


图4 *M. aeruginosa* 过滤液培养 *M. wesenbergii* 的生长曲线

Fig. 4 Growth curve of *M. wesenbergii* in cell-free filtrate from *M. aeruginosa*

A, 起始藻密度 $10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$; B, $2 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$; C, $3 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。

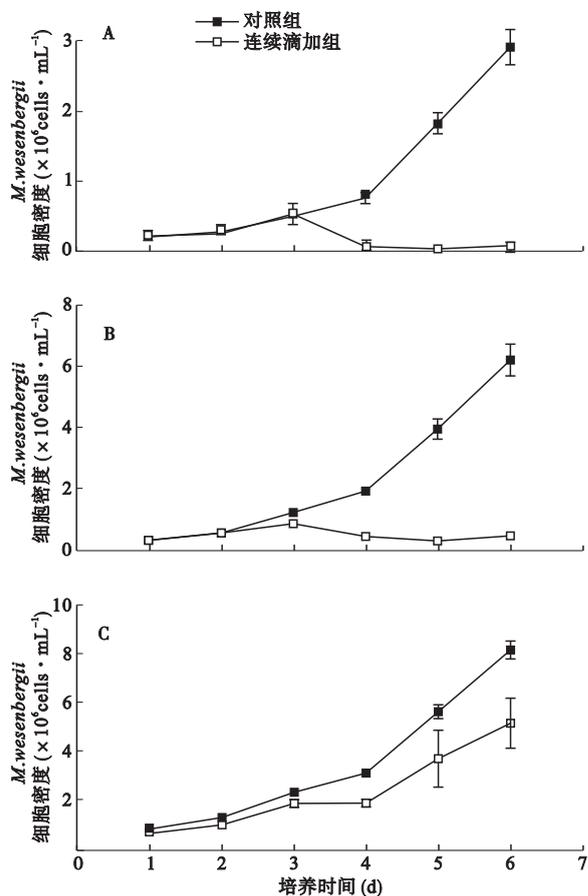


图5 连续滴加 *M. aeruginosa* 过滤液时 *M. wesenbergii* 的生长曲线

Fig. 5 Growth curve of *M. wesenbergii* when cell-free filtrate from *M. aeruginosa* added continuously

A, 起始藻密度 $2 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$; B, $5 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$; C, $10^6 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$.

验 3 d 内, *M. wesenbergii* 在这两种条件下都能正常生长。但从第 4 d 起, 连续滴加组中的 *M. wesenbergii* 生长受到抑制, 藻密度开始降低, 之后 *M. wesenbergii* 培养液开始发黄。而整个实验中对照组能正常生长, 没有出现生长异常情况。

3 讨论

混合培养是研究藻类化感作用最典型的方法, 用一种藻培养液的过滤液培养其他藻也属于这种方法 (Legrand *et al.*, 2003)。本实验采用 *M. aeruginosa* 和 *M. wesenbergii* 混合培养方式探索两者间的化感作用。而且为了降低培养时环境因素的干扰, 实验各组别的培养条件和方法都是相同的。首先, 一般湖泊中无机氮和总磷分别达到 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 即为富营养化, 本实验前后培养液中

营养盐 ($\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$) 远高于该水平, 能保证藻类生长于富营养状况。其次, 每天定时摇晃锥形瓶并任意改变其位置, 可以降低光照不均带来的影响。另外, 使用灭菌后的 BG11 培养基, 且过滤液通过 GF/C 滤膜, 可以降低微生物的干扰。所以, 排除以上能引起竞争的环境因素后, 两株藻种混合培养时 *M. aeruginosa* 对 *M. wesenbergii* 的抑制作用可以归结为化感作用。但是 *M. wesenbergii* 抑制 *M. aeruginosa* 生长的原因尚不清楚, 可能存在竞争抑制关系。赤潮异湾藻与三角褐指藻也存在着类似的现象, 赤潮异湾藻对三角褐指藻有强烈化感抑制作用, 而三角褐指藻能对赤潮异湾藻产生轻微的竞争抑制 (林志芬等, 2010)。

目前许多研究证实了微囊藻能够对其他藻类产生化感作用, 如培养 20 d 的微囊藻 (*Microcystis*) 过滤液能够显著抑制双鞭藻 *Peridinium gatunense* 的光合作用 (Sukenic *et al.*, 2002); 一些蓝藻在生长过程中释放的挥发性有机物 (VOCs) 能够抑制小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*) 的生长 (Ikawa *et al.*, 2001)。本实验中经过 9 d 的混合培养, *M. aeruginosa* 对 *M. wesenbergii* 存在明显的化感作用, 且这种抑制作用与 *M. aeruginosa* 的起始藻密度和两者的混合比相关。只有当 *M. aeruginosa* 起始藻密度足够高, 使其分泌的化感物质在培养液达到一定的浓度时, 才能对 *M. wesenbergii* 产生明显的抑制作用。Nakai 等 (1999) 的研究证实了植物化感作用存在浓度效应。一些研究表明, 藻类化感作用同样具有这一特征, 亚历山大藻 (*Alexandrium tamarense*) 和棕囊藻 (*Phaeocystis globosa*) 浓度较高时, 可以完全抑制其他几株 HAB 藻类的生长, 浓度较低时那些藻种则可以维持生长 (Liu *et al.*, 2010; Yin *et al.*, 2010)。

为了克服浓度效应并模拟水生植物间化感作用, 研究水生植物对藻类的化感作用时, 大量文献中都采取连续滴加植物种植水的方式培养藻类。连续滴加种植水后, 金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum*)、微齿眼子菜 (*Potamogeton maackianus*) 等沉水植物的克藻效应加强 (鲜啟鸣等, 2005)。连续滴加粉绿狐尾藻 (*Myriophyllum aquaticum*) 种植水可以明显地抑制铜绿微囊藻的生长 (吴程等, 2008)。本实验采用 *M. aeruginosa* 过滤液培养和连续添加该过滤液两种方式, 结果表明第二种条件下 *M. wesenbergii* 生长

的抑制效果更加明显,这与两株实验藻种共同培养时 *M. wesenbergii* 受抑制的现象吻合,所以共同培养时 *M. aeruginosa* 可能是连续释放化感物质抑制 *M. wesenbergii* 的生长。当然,仍需进一步对本研究中产生化感作用的化感物质进行分析鉴定,应当对 *M. aeruginosa* 过滤液进行富集和分离,结合生物测试的方法鉴定具体的化感物质。

水生植物对 HAB 藻类的化感抑制作用为我们有效控制富营养化水体中形成的水华提供了新思路。研究藻类间的化感作用同样具有指导意义,因为在复杂的水环境中,许多藻类的优势种地位会发生变化,经常发生藻类的演替并呈现不同的时空分布特征。Yamamoto 和 Nakahara(2009)研究了日本某一富营养水体中微囊藻和项圈藻(*Anabaena*)的季节性变化,结果表明,在水华形成之前绿色微囊藻(*Microcystis viridis*)在微囊藻中占优势;铜绿微囊藻和惠氏微囊藻在7月后占绝对优势,且铜绿微囊藻于7—11月是最优势种。中国太湖蓝藻水华爆发时,微囊藻是优势藻种,其中主要由铜绿微囊藻、惠氏微囊藻、水华微囊藻(*Microcystis flos-aquae*)组成,且随着时间变化,三者在水生环境中的主导地位也会变化(Chen *et al.*, 2003)。以上研究只着重分析了营养、光照、温度等基本的环境因素对这种变化的作用,即基本的竞争机制是主要影响因素;除此以外,我们还应当考虑在水华优势种时空分布变化过程中,优势种之间化感作用的贡献,从而为阐明蓝藻水华形成和暴发机制提供更多的理论依据。

4 结论

M. aeruginosa 和 *M. wesenbergii* 间存在相互抑制作用,其中 *M. aeruginosa* 对 *M. wesenbergii* 有强烈的抑制作用,且化感作用是主要因素,而 *M. wesenbergii* 对 *M. aeruginosa* 的抑制作用则较弱。*M. aeruginosa* 对 *M. wesenbergii* 的化感作用存在浓度效应。当两者藻密度为 0.5×10^6 cells · mL⁻¹ 以上时,3个混合比(1:1、1:2、2:1)下,*M. wesenbergii* 的生长都受到了严重的抑制,培养9d后抑制率在80%以上。初始藻密度低于 0.5×10^6 cells · mL⁻¹ 时,连续滴加对数期的 *M. aeruginosa* 过滤液后,*M. wesenbergii* 的生长受到了极显著抑制($P < 0.01$)。

参考文献

- 林志芬,曹志民,郭小菊,等. 2010. 赤潮异湾藻与三角褐指藻的竞争及其化感作用初探. 环境科学与技术, **33**(10): 5-9.
- 吴程,常学秀,董红娟,等. 2008. 粉绿狐尾藻(*Myriophyllum aquaticum*)对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)的化感抑制效应及其生理机制. 生态学报, **28**(6): 2595-2603.
- 吴晓辉,张兵之,邓平,等. 2007. 马来眼子菜化感作用对斜生栅藻同工酶的影响. 武汉植物学研究, **25**(5): 479-483.
- 鲜啟鸣,陈海东,邹惠仙,等. 2005. 四种沉水植物的克藻效应. 湖泊科学, **17**(1): 75-80.
- Chen BM, Peng SL, Ni GY. 2009. Effects of the invasive plant *Mikania micrantha* H. B. K. on soil nitrogen availability through allelopathy in South China. *Biological Invasions*, **11**: 1291-1299.
- Chen YW, Qin BQ, Teubner K, *et al.* 2003. Long-term dynamics of phytoplankton assemblages: Microcystis-domination in Lake Taihu, a large shallow lake in China. *Journal of Plankton Research*, **25**: 445-453.
- Erhard D, Gross EM. 2006. Allelopathic activity of *Elodea canadensis* and *Elodea nuttallii* against epiphytes and phytoplankton. *Aquatic Botany*, **85**: 203-211.
- Fergola P, Cerasuolo M, Pollio A, *et al.* 2006. Allelopathy and competition between *Chlorella vulgaris* and *Pseudokirchneriella subcapitata*: Experiments and mathematical model. *Ecological Modelling*, **208**: 205-214.
- Gantar M, Berry JP, Thomas S, *et al.* 2008. Allelopathic activity among Cyanobacteria and microalgae isolated from Florida freshwater habitats. *FEMS Microbial Ecology*, **64**: 55-64.
- Gross EM. 2003. Allelopathy of Aquatic Autotrophs. *Critical Reviews in Plant Sciences*, **22**: 313-339.
- Ikawa M, Sasner JJ, Haney JF. 2001. Activity of cyanobacterial and algal odor compounds found in lake waters on green alga *Chlorella pyrenoidosa* growth. *Hydrobiologia*, **443**: 19-22.
- Legrand C, Rengefors K, Fistarol GO, *et al.* 2003. Allelopathy in phytoplankton-biochemical, ecological and evolutionary aspects. *Phycologia*, **42**: 406-419.
- Liu JS, Van Rijssel M, Yang WD, *et al.* 2010. Negative effects of *Phaeocystis globosa* on microalgae. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, **28**: 911-916.
- Mulderij G, Mau B, De Senerpont Domis LN, *et al.* 2009. Interaction between the macrophyte *Stratiotes aloides* and filamentous algae: Does it indicate allelopathy. *Aquatic Ecolo-*

- gy, **43**: 305–312.
- Nakai S, Inoue Y, Hosomi M, *et al.* 1999. Growth inhibition of blue-green algae by allelopathic effects of macrophytes. *Water Science and Technology*, **39**: 47–53.
- Pollock JL, Callaway RM, Thelen GC, *et al.* 2009. Catechin-metal interactions as a mechanism for conditional allelopathy by the invasive plant *Centaurea maculosa*. *Journal of Ecology*, **97**: 1234–1242.
- Rice EL. 1984. Allelopathy. 2nd Edition. Orlando, Florida: Academic Press.
- Suikkanen S, Fistarol GO, Granéli E. 2004. Allelopathic effects of the Baltic cyanobacteria *Nodularia spumigena*, *Aphanizomenon flos-aquae* and *Anabaena lemmermannii* on algal monocultures. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **308**: 85–101.
- Sukenik A, Eshkol R, Livne A, *et al.* 2002. Inhibition of growth and photosynthesis of the dinoflagellate *Peridinium gatunense* by *Microcystis* sp. (Cyanobacteria): A novel allelopathic mechanism. *Limnology and Oceanography*, **47**: 1656–1663.
- Tang DL, Kester DR, Ni I-H, *et al.* 2003. In situ and satellite observations of a harmful algal bloom and water condition at the Pearl River estuary in late autumn 1998. *Harmful Algae*, **2**: 89–99.
- Yamamoto Y, Nakahara H. 2009. Seasonal variations in the morphology of bloom-forming cyanobacteria in a eutrophic pond. *Limnology*, **10**: 185–193.
- Yin J, Xie J, Yang WD, *et al.* 2010. Effect of *Alexandrium tamarense* on three bloom-forming algae. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, **28**: 940–944.
-
- 作者简介** 杨 佳, 1986年生, 男, 硕士研究生, 主要从事富营养化水体蓝藻水华形成机理的研究。E-mail: young-jia2010@126.com
- 责任编辑** 李凤芹
-