

文章编号:1000-582X(2010)09-086-06

亚硝酸盐对铜绿微囊藻和四尾栅藻生长和竞争的影响

陈卫民¹,戴树桂²,张清敏²

(1. 河南大学 环境与规划学院,河南 开封 475000;2. 南开大学 环境科学与工程学院,天津 300071)

摘要:亚硝酸盐浓度的升高不但会影响藻类的种群密度,而且会影响藻类的群落结构。为了探讨亚硝酸盐对湖泊藻类种群竞争的影响,采用批量培养的方法,研究了不同亚硝酸盐浓度下,铜绿微囊藻和四尾栅藻的生长和竞争,并通过竞争抑制参数对相互的竞争关系进行了分析。结果表明,在实验条件下,两种藻之间存在着竞争抑制作用,四尾栅藻在竞争中占据一定的优势,亚硝酸盐浓度的升高使得四尾栅藻的竞争优势更为明显,加快了铜绿微囊藻的衰退。分析原因,是在高浓度亚硝酸盐(20 mg/L、30 mg/L)条件下,铜绿微囊藻受到的伤害更大和铜绿微囊藻与四尾栅藻的相互化感作用增强这两方面协同作用造成的。

关键词:铜绿微囊藻;四尾栅藻;亚硝酸盐;光合速率;竞争参数

中图分类号:X171.5

文献标志码:A

Effects of nitrite on the growth and competition of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus quadricauda*

CHEN Wei-min¹, DAI Shu-gui², ZHANG Qing-min²

(1. College of Environment and Planning of Henan University, Henan, Kaifeng 475000, P. R. China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, P. R. China)

Abstract: Not only population densities of phytoplankton but also its community structure can be influenced by nitrite concentration. To investigate this effect, the growth and competition of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus quadricauda* under different nitrite concentrations are studied by using batch cultures, and the competition relation is analyzed by the competition parameters. The results indicate that there is competition between *M. aeruginosa* and *S. quadricauda* in present experiment conditions, and *S. quadricauda* is dominant in competition. Meanwhile, the increase of nitrite concentration can strengthen *S. quadricauda* dominance, because under high nitrite concentration (20 mg/L, 30 mg/L), *M. aeruginosa* is more damaged and the allelopathy between *M. aeruginosa* and *S. quadricauda* is intenser.

Key words: *Microcystis aeruginosa*; *Scenedesmus quadricauda*; nitrite; photosynthetic rate; competition parameters

随着水体污染程度的加剧,中国一些湖泊、水库和河流相继爆发水华,对群众的生产和生活带来了巨大的危害^[1-3]。但是,不同水体产生的水华优势种

往往不同,而且同一水体中藻类优势种年内也发生着变化。水华优势种的形成是不同藻类在资源竞争以及相互干扰竞争的生长中取得优势的过程^[4]。氮

收稿日期:2010-04-18

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002BC412301)

作者简介:陈卫民(1975-),男,河南大学副教授,主要从事湖泊藻类方向的研究,(E-mail)chenwm_env@yahoo.com.cn。

磷比、温度、碱度、光频率、扰动强度、pH 和氧化还原电位等环境因子影响下藻类的竞争能力及群体结构组成的变化已经被报道^[5-11]。而关于亚硝酸盐对藻类间竞争影响的研究鲜见报道。在水体环境中尤其在富营养化环境中,亚硝酸盐由于硝化-反硝化作用和一些人为的因素能够在水体中大量聚集^[12-13],一些污染严重的水体中亚硝酸盐的浓度甚至能够达到 20 mg/L^[14]。因此,笔者以湖泊及水库等富营养化水体中主要藻类铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 和四尾栅藻 (*Scenedesmus quadricauda*) 为实验藻种,进行不同亚硝酸盐浓度条件下的单培养与共培养实验,通过分析、比较不同亚硝酸盐浓度下 2 种藻的竞争情况和各自生长增值规律、化感作用与光合作用特性,探讨亚硝酸盐对浮游植物种群结构的潜在影响。

1 材料与方法

1.1 试验藻种及培养

试验用铜绿微囊藻和四尾栅藻购自中国科学院武汉水生生物研究所。以 BG₁₁ 培养基为基础,加入 NaNO₂ 配成 NO₂⁻-N 浓度为 0, 10, 20, 30 mg/L 4 个浓度组。在 1 L 锥形瓶内加入 500 mL 无菌培养基,接入藻种,放置在人工气候箱中,保持温度 25 °C,光照强度 3 000 lx,光暗周期 12 h:12 h,每天震荡 3 次。每 2 天添加一次亚硝酸盐,保持培养基中亚硝酸盐浓度不变。每组做 3 个平行样。单藻培养实验的接种密度为 5 × 10⁴ cells/mL,混和培养实验中铜绿微囊藻和四尾栅藻按细胞比 1:1 的比例接入,初始密度均为 5 × 10⁴ cells/mL。

1.2 接种

取一定量处于指数生长期的藻液,在 3 500 r/min 下离心 10 min,弃上清液,用 15 mg/L 的碳酸氢钠溶液洗涤后离心。如此重复 3 次,用无菌水悬浮后用于接种。

1.3 光合速率 v 的测定

培养 8 d 后,采用 Clark 型氧电极(英国 Hansatech 公司)测定各单培养处理组中藻的光合速率,光照强度为 400 μmol/(m² · s),温度 25 °C。光合速率的大小用 μmol O₂/(mg chl *a* h) 表示。叶绿素采用文献^[15]的方法测定。

1.4 生长测定和生长曲线的拟合

每天用血细胞计数板测定藻细胞密度(D),以逻辑斯谛方程拟合藻类的增长过程。进行参数估计,每个处理组的最大生物量(X_{\max})作为各自 K 的估计值。应用逻辑斯谛方程的对数形式

$$\ln[(K - N)/N] = a - rt, \quad (1)$$

以最小二乘法进行回归分析,获得该方程的截距和斜率作为 a 和 r 的估计值。

1.5 竞争抑制参数的计算

利用 Lotka-Volterra 的竞争模型的差分形式^[16]

$$(N_{st} - N_{s,t-1}) / (t_n - t_{n-1}) = r_s N_{s,t-1} (K_s - N_{s,t-1} - \alpha N_{m,t-1}) / K_s, \quad (2)$$

$$(N_{mt} - N_{m,t-1}) / (t_n - t_{n-1}) = r_m N_{m,t-1} (K_m - N_{m,t-1} - \beta N_{s,t-1}) / K_m, \quad (3)$$

式中, N_{st} , N_{mt} 分别为共培养中四尾栅藻和铜绿微囊藻在时间 t_n 时的数量(10⁴ cells/mL); $N_{s,t-1}$, $N_{m,t-1}$ 分别为共培养中四尾栅藻和铜绿微囊藻在时间 t_{n-1} 时的数量(10⁴ cells/mL); r_s , r_m 分别为四尾栅藻和铜绿微囊藻的比增长率(由单种培养经回归计算获得); K_s , K_m 分别为四尾栅藻和铜绿微囊藻的最大环境容量(由单种培养获得); α , β 分别为共培养中铜绿微囊藻对四尾栅藻,和四尾栅藻对铜绿微囊藻竞争抑制参数。

应用上述公式计算共培养藻类增长曲线在拐点以后的每一单位时间的所有的竞争抑制参数,取其平均值作为该种的竞争抑制参数的估计值。

1.6 抑制起始点的确定

即藻类增长曲线的拐点,为逻辑斯谛方程二阶导数等于零时的时间 t_p 值,这时 $N = K/2$, $t_p = (a - \ln 2) / r$ 。因为是差分形式,故 t_p 对 $(a - \ln 2) / r$ 取整数^[16]。

1.7 藻的相互化感作用

以 BG₁₁ 培养基为基础,设定亚硝酸盐浓度为 0 mg/L 和 30 mg/L 两个浓度,同时进行铜绿微囊藻和四尾栅藻的单独培养,培养条件如 1.1,每 2 天添加一次亚硝酸盐,保持培养基中亚硝酸盐浓度不变。每组做 3 个平行样。在 8 d 时,将两个浓度组的铜绿微囊藻培养液用灭菌的 0.45 μm 微孔滤膜过滤除去铜绿微囊藻,各收集过滤液 50 mL,向初始亚硝酸盐浓度为 0 mg/L 的滤液加入亚硝酸盐,使其亚硝酸盐浓度增加至 30 mg/L。从初始亚硝酸盐浓度为 30 mg/L 的四尾栅藻培养液中取 2 × 50 mL 藻液,3 000 r/min 下离心 10 min,得藻体,分别加入上述的过滤液中,观察四尾栅藻的生长情况。同样,将铜绿微囊藻加入四尾栅藻的滤液中,观察铜绿微囊藻的生长情况。

2 结果与讨论

2.1 单藻培养时亚硝酸盐对铜绿微囊藻和四尾栅藻生长和光合作用的影响

单藻培养条件下,不同亚硝酸盐浓度处理组中

铜绿微囊藻和四尾栅藻在培养 15 d 以后数量基本趋于稳定。将这一时期内显微镜下计数得到的藻类数量随时间的变化结果整理为图 1(铜绿微囊藻)和图 2(四尾栅藻)。从图 1、图 2 中可以看出,两种藻在亚硝酸盐浓度 0~30 mg/L 的范围内都能生长,但是,不同浓度的亚硝酸盐对两种藻的生长有不同程度的影响。铜绿微囊藻最适亚硝酸盐浓度为 0~10 mg/L,在此亚硝酸盐浓度范围内,铜绿微囊藻生长良好,比增长率和最大生物量都相差不大,当亚硝酸盐浓度的进一步增加(20 和 30 mg/L),藻生长受到抑制,与 0 mg/L 相比,比增长率分别减少了 14.7%和 28.0%,最大生物量也分别减少了 18.8%和 47.6%(图 1,表 1)。与铜绿微囊藻相比,培养基中亚硝酸盐浓度的变化对四尾栅藻的生长没有明显的影响(图 2),各处理组中四尾栅藻的比增长率和最大生物量相差不大(表 1)。

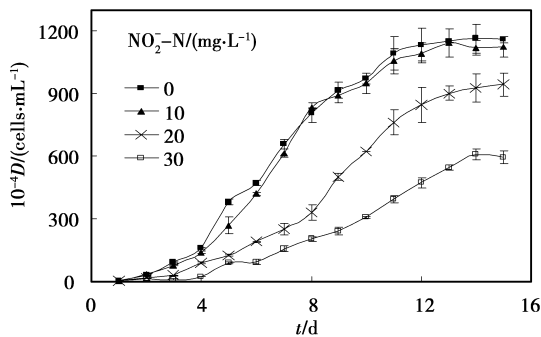


图 1 单藻培养时不同 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度下铜绿微囊藻的生长曲线

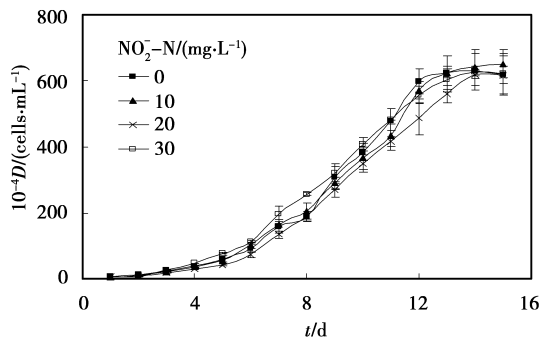


图 2 单藻培养时不同 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度下四尾栅藻的生长曲线

光合速率实验显示,一次性加入不同浓度的亚硝酸盐对铜绿微囊藻的 v 有不同程度的影响。在低亚硝酸盐浓度条件下(0 和 10 mg/L),铜绿微囊藻的 v 相差不大,当亚硝酸盐浓度为 20 和 30 mg/L 时,其光合速率显著下降,与 0 mg/L 相比,分别减

少了 17.4%和 42.4%(图 3)。四尾栅藻的 v 在亚硝酸盐浓度 0~30 mg/L 的范围内差别不是很大,对亚硝酸盐浓度适应范围较广(图 3)。

表 1 单藻培养时不同 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度下铜绿微囊藻和四尾栅藻的最大生物量和比增长率

种类	$\text{NO}_2\text{-N}$ /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	比增长 率/ d^{-1}	最大生物量 $\times 10^{-4}$ /($\text{cells} \cdot \text{mL}^{-1}$)
铜绿微囊藻	0	0.75	1 164 ± 70
	10	0.76	1 125 ± 49
	20	0.64	945 ± 34
	30	0.54	610 ± 26
四尾栅藻	0	0.63	630 ± 13
	10	0.63	652 ± 42
	20	0.62	619 ± 59
	30	0.62	627 ± 61

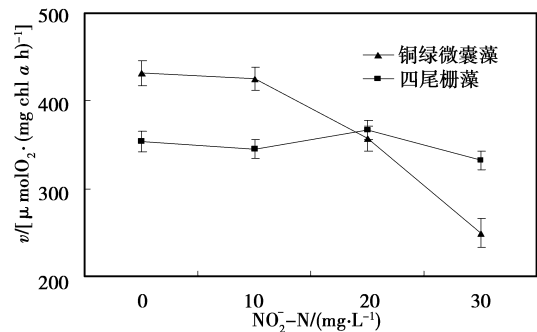


图 3 不同 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度下铜绿微囊藻和四尾栅藻的光合速率

亚硝酸盐在植物的生命过程中扮演着极为重要的角色,它是植物利用硝酸盐的中间产物,一些研究发现亚硝酸盐作为氮源的一种,在一定的浓度范围内可以为植物生长提供所需的氮^[17],但是高浓度的亚硝酸盐则是一种环境毒物,能对植物的生长产生不利影响。一般认为,亚硝酸盐对植物的最主要影响表现在其对植物光合作用的抑制上,高浓度的亚硝酸盐通过增加细胞膜的质子通透性,导致细胞膜两侧的质子梯度较低,进而造成光合作用效率的下降^[18]。Archana^[19]和 Chen^[20]等人也报道高浓度的亚硝酸盐可以抑制两个光合作用中心的电子传递,降低叶绿体产氧的速率。本研究中,铜绿微囊藻的光合速率从 20 mg/L 开始减小,表明在此亚硝酸盐浓度下铜绿微囊藻的光合作用受到抑制。然而四尾栅藻光合速率在实验设置的亚硝酸盐范围内没有明显变化,原因可能是相比铜绿微囊藻,四尾栅藻对亚硝酸盐的耐受性较强,30 mg/L 还不足以对其产生

不良影响。这与 Yang^[17] 和 Abe^[21] 研究显示的不同藻类能够维持正常生长的亚硝酸盐浓度范围不同相一致。光合作用是植物生长中能量和物质来源,其受到抑制必然影响到藻的生长,实验中随着铜绿微囊藻的光合速率从 20 mg/L 开始减小,比增长率也呈现减小趋势,而各处理组中四尾栅藻的比增长率则没有明显变化。比增长率是藻类在浮游植物群落种间竞争能力和演替顺序的指标,在营养丰富的条件下,比增长率高的藻往往可以成为优势种。本研究条件下,营养盐含量丰富不会对藻的生长造成影响,因此铜绿微囊藻比增长率的减少,显示亚硝酸盐减小了其的竞争能力。

2.2 混合培养时不同亚硝酸盐浓度下铜绿微囊藻和四尾栅藻的竞争

在混合培养的情况下,铜绿微囊藻和四尾栅藻的竞争结果如图 4 和表 2 所示,在亚硝酸盐浓度 0 和 10 mg/L 的条件下,铜绿微囊藻的生长占明显优势,比增长率和最大生物量均高于四尾栅藻。但是与单养时比较,铜绿微囊藻的最大生物量仅为单养时的 61.3% 和 61.5%,而四尾栅藻的最大生物量为单养时的 69.8% 和 67.0%。随着亚硝酸盐浓度进一步的增加(20 和 30 mg/L),四尾栅藻的生长逐渐占据优势,其最大生物量为单养时的 68.0% 和 101.5%,而铜绿微囊藻的最大生物量进一步降为单养时的 57.5% 和 39%。

表 2 混合培养时不同 NO₂⁻-N 浓度下铜绿微囊藻和四尾栅藻的竞争抑制参数、最大生物量和比增长率

	NO ₂ ⁻ -N /(mg · L ⁻¹)	比增长 率/d ⁻¹	最大生物量 × 10 ⁻⁴ /(cells · mL ⁻¹)	抑制参数
铜绿 微囊藻	0	0.63	714 ± 64	0.52
	10	0.63	703 ± 38	0.62
	20	0.57	519 ± 45	0.72
	30	0.45	238 ± 26	0.11
四尾 栅藻	0	0.52	440 ± 34	1.06
	10	0.53	437 ± 51	1.23
	20	0.49	421 ± 34	2.17
	30	0.58	637 ± 39	0.59

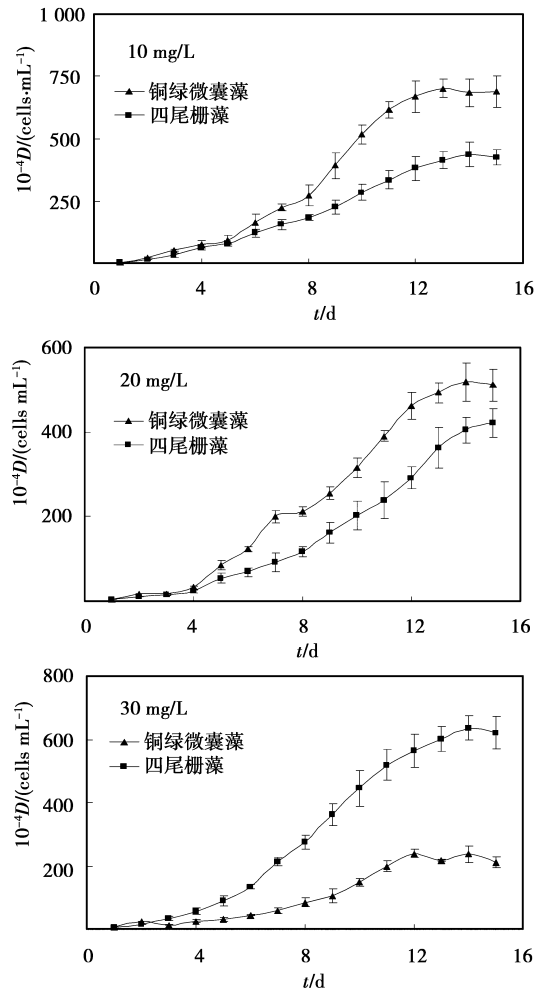
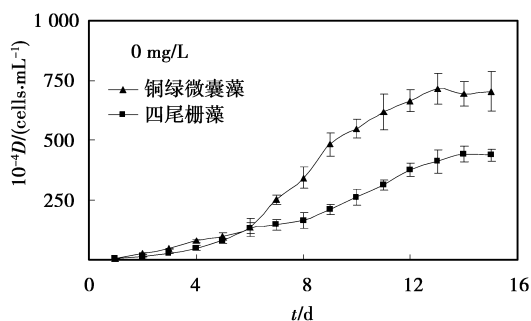


图 4 混合培养时 NO₂⁻-N 浓度对铜绿微囊藻和四尾栅藻竞争的影响

从这些结果中可以发现,两种藻混合培养时比增长率和最大生物量均小于单藻培养时,而且在所有处理组中,四尾栅藻混养时最大生物量与单养时最大生物量的比值都高于铜绿微囊藻,随着亚硝酸盐浓度的增加这种趋势越明显。这些现象表明,铜绿微囊藻和四尾栅藻之间存在着相互抑制和竞争,四尾栅藻在竞争中相比铜绿微囊藻始终占据优势,而且亚硝酸盐浓度的增加使得四尾栅藻的优势变得更为明显。由 Lotka-Volterra 竞争模型计算出的在混养中铜绿微囊藻和四尾栅藻的竞争抑制参数也支持这一结论,在所有的处理组中四尾栅藻对铜绿微囊藻的竞争抑制参数 β 明显大于铜绿微囊藻对四尾栅藻的抑制参数 α ,而且随着亚硝酸盐浓度从 0 mg/L 增加到 30 mg/L, β/α 的值从 2.03 增加到 5.36。在低亚硝酸盐浓度条件下,铜绿微囊藻表现出更高的比增长率和最大生物量,分析原因是铜绿微囊藻最大环境容量和比增长率的本底值高于四尾栅藻(由单种培养获得),虽然此时铜绿微囊藻受到

的抑制高于四尾栅藻,但是四尾栅藻的竞争优势较小还不足以使得铜绿微囊藻的生物量下降至低于四尾栅藻。在高亚硝酸盐浓度的条件下,两藻竞争能力之间的差距被扩大,最终导致四尾栅藻的生物量超过了铜绿微囊藻。

2.3 不同亚硝酸盐浓度下藻的相互化感作用

图5(铜绿微囊藻)和图6(四尾栅藻)显示,相比原培养基中的藻,铜绿微囊藻和四尾栅藻在对方的培养液中生长都受到明显的抑制,而且初始亚硝酸盐浓度为30 mg/L的培养液中藻受到的抑制明显强与初始亚硝酸盐浓度为0 mg/L培养液(过滤后亚硝酸盐浓度调至30 mg/L)中的藻。试验中原培养基和对方培养液的亚硝酸盐浓度均为30 mg/L,其他培养条件也相同,由此可以推断,四尾栅藻和铜绿微囊藻之间存在着相互的化感作用,两种藻分泌的化感物质能有效的抑制对方的生长。而藻在高初始亚硝酸盐浓度培养液中受到更强的抑制是因为,在单培养阶段高浓度的亚硝酸盐增加了藻生长的胁迫,存活下来的藻为了应对外界的胁迫而产生更多的化感物质^[22-23],进而造成化感作用的增强。

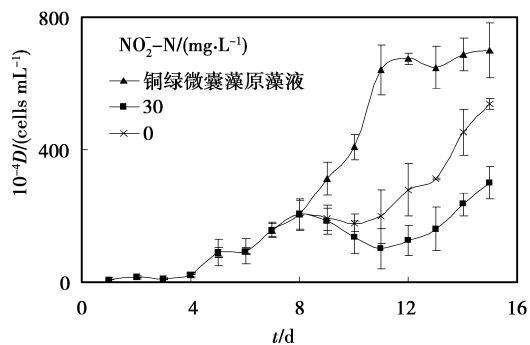


图5 铜绿微囊藻在原培养液和四尾栅藻培养液中的生长曲线

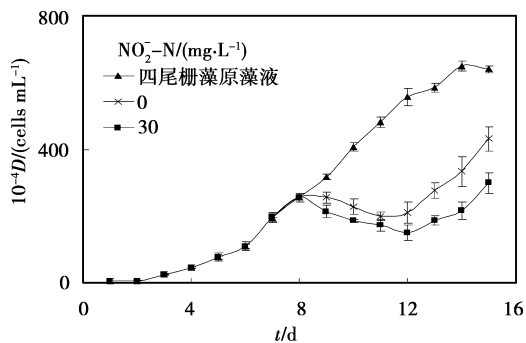


图6 四尾栅藻在原培养液和铜绿微囊藻培养液中的生长曲线

综上所述,亚硝酸盐对两种藻竞争的影响体现在两个方面:首先,高浓度的亚硝酸盐对两种藻的抑制程度不同,相比四尾栅藻,铜绿微囊藻受到的抑制和损伤更为明显;其次,亚硝酸盐刺激两种藻的化感作用明显增强,在混合培养的条件下,相互化感作用的增强对已经受到更严重损伤的铜绿微囊藻的抑制作用更为显著。两种藻的抑制参数和 β/α 的值随着亚硝酸盐浓度的增加而增大的现象也证明了这一点。30 mg/L时,藻的抑制参数明显减小,原因可能是在此时铜绿微囊藻在竞争中完全失败,生长几乎被完全抑制,已经不能对四尾栅藻的生长造成太大的影响。因此,本研究中四尾栅藻在高亚硝酸盐条件下竞争优势的增强是上述两方面相互耦合,共同作用的结果。

3 结论

排除了光照、营养竞争和浮游动物这些影响因素,在营养丰富的条件下共同培养的铜绿微囊藻和四尾栅藻之间存在着相互竞争、相互抑制的作用。虽然相比四尾栅藻,铜绿微囊藻表现出更高的比增长率和最大生物量,但是四尾栅藻在与铜绿微囊藻的竞争中还是占据一定的优势,而亚硝酸盐浓度的升高扩大了四尾栅藻的竞争优势,并最终导致四尾栅藻的生长完全抑制了铜绿微囊藻的生长。原因是亚硝酸盐对两种藻的抑制程度不同和刺激藻的相互化感作用增加这两方面协同作用造成的。

参考文献:

- [1] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 193-202.
QIN BO-QING. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangze River [J]. Journal of Lake Science, 2002, 14(3): 193-202.
- [2] 卢大远, 刘培刚, 范天俞, 等. 汉江下游突发“水华”的调查研究[J]. 环境科学研究, 2000, 13(2): 28-31.
LU DA-YUAN, LIU PEI-GANG, FAN TIAN-YU, et al. The investigation of “water bloom” in the downstream of Han River [J]. Research of Environmental Sciences, 2000, 13(2): 28-31.
- [3] 赵孟绪, 韩博平. 汤溪水库蓝藻水华发生的影响因子分析[J]. 生态学报, 2005, 25(7): 1554-1561.
ZHAO MENG-XU, HAN BO-PING. Analysis of factors affecting cyanobacteria bloom in a tropical reservoir [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(7): 1554-1561.
- [4] PAERL H W, FULTON R S, MOISANDER P H, et al. Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria[J]. Scientific World

- Journal, 2001, 1(4): 76-113.
- [5] HYENSTRAND P, BURKET U, PETTERSSON A, et al. Competition between the green alga *Scenedesmus* and the cyanobacterium *Synechococcus* under different modes of inorganic nitrogen supply[J]. *Hydrobiologia*, 2000, 435(9): 91-98.
- [6] HUISMAN J, SHARPLES J, STROOM J, et al. Changes in turbulent mixing shift competition for light between phytoplankton species [J]. *Ecology*, 2004, 85(11):2960-2970.
- [7] 万蕾,朱伟,赵联芳. 氮磷对微囊藻和栅藻生长及竞争的影响[J]. *环境科学*, 2007, 28(6):1230-1235.
WAN LEI, ZHU WEI, ZHAO LIAN-FANG. Effect of nitrogen and phosphorus on growth and competition of *M. aeruginosa* and *S. quadricauda*[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(6):1230-1235.
- [8] 刘春光,金相灿,邱金泉,等. 光照与磷的交互作用对两种淡水藻类生长的影响[J]. *中国环境科学*, 2005, 25(1):32-36.
LIU CHUN-GUANG, JIN XING-CAN, QIU JIN-QUAN, et al. Influence of interaction of light and phosphorus on growth of two species of algae in freshwaters [J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(1):32-36.
- [9] 杨波,除昭升,金相灿,等. CO₂/pH 对三种藻生长及光合作用的影响[J]. *中国环境科学*, 2007, 27(1):54-57.
YANG BO, CHU ZHAO-SHENG, JIN XIANG-CAN, et al. Influence of CO₂/pH on growth and photosynthesis of three kins of algae [J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(1):54-57.
- [10] 扬威,孙凌,袁有才,等. 碱度水平对铜绿微囊藻和四尾栅藻生长和竞争的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4):1264-1268.
YANG WEI, SUN LING, YUAN YOU-CAI, et al. Effects of alkalinity on growth and competition of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus quadricauda*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1264-1268.
- [11] 张民,孔繁翔,史小丽,等. 铜绿微囊藻在竞争生长条件下对氧化还原电位降低的响应[J]. *湖泊科学*, 2007, 19(2):118-124.
ZHANG MIN, KONG FAN-XIANG, SHI XIAO-LI, et al. Responses of *Microcystis aeruginosa* to reducing oxidation reduction potential under competition growth condition[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(2): 118-124.
- [12] BRAID W, ONG S K. Decomposition of nitrite under various pH and aeration conditions[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2000, 118(1/2): 13-26.
- [13] RAZUMOV V A, TYUTYUNOVA F I. Nitrite contamination of the moskva River: Causes and effects[J]. *Water Resources*, 2001, 28(3): 324-334.
- [14] MARGARETE M, WAGNER C V. Effect of nitrite on larval development of giant river prawn *Macrobrachium rosenbergii* [J]. *Aquaculture*, 2006, 261(4): 1292-1298.
- [15] 钱芸,戴树桂,刘光良,等. 硝酸铜对铜绿微囊藻生长特性的影响[J]. *中国环境科学*, 2003, 23(1):7-11.
QIAN YUN, DAI SHU-GUI, LIU GUANG-LIANG, et al. Effect of lanthanum nitrate on growth characteristics of *Microcystis aeruginosa* [J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(1):7-11.
- [16] 陈德辉,刘永定,袁峻峰,等. 微囊藻和栅藻共培养实验及其竞争参数的计算[J]. *生态学报*, 1999, 19(6): 908-913.
CHEN DE-HUI, LIU YONG -DING, YUAN JUN-FENG, et al. Experiments of mixed culture and calculation of competitive parameters between *Microcystis* (Cyanobacteria) and *Scenedesmus* (Green algae) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(6): 908-913.
- [17] YANG S, WANG J, CONG W, et al. Utilization of nitrite as nitrogen source by *Botryococcus braunii* [J]. *Biotechnology Letters*, 2004, 26(17): 239-243.
- [18] ALMEIDA J S, JULIO S M, REIS M A M, et al. Nitrite inhibition of denitrification by *Pseudomonas fluorescens* [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1995, 46(3): 194-201.
- [19] ARCHNA S, ANJANA J, POOJA S, et al. Nitrite regulates distribution of excitation energy between the two photosystems by causing state transition [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2006, 44(1): 7-12.
- [20] CHEN W M, ZHANG Q M, DAI S G. Effects of nitrate on intracellular nitrite and growth of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2009, 21(6): 701-706.
- [21] ABE K, IMAMAKI A, HIRANO M. Removal of nitrate, nitrite, ammonium and phosphate ions from water by the aerial microalga *Trentepohlia aurea* [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2002, 14(2): 129-134.
- [22] 门玉洁,胡洪营. 芦苇化感物质 EMA 对铜绿微囊藻生长及藻毒素产生和释放的影响[J]. *环境科学*, 2007, 28(9):2058-2062.
MEN YU-JIE, HU HONG -YING. Effects of allelochemical EMA from reed on the production and release of cyanotoxins in *Microcystis aeruginosa* [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(9):2058-2062.
- [23] JANG M H, HA K, LUCAS M C, et al. Changes in microcystin production by *Microcystis aeruginosa* exposed to phytoplanktivorous and omnivorous fish [J]. *Aquatic Toxicology*, 2004, 68(1): 51-59.

(编辑 赵 静)