

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第5期 Vol.34 No.5 **2014**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 5 期 2014 年 3 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 干旱指标研究进展..... 李柏贞,周广胜 (1043)
- 气候变化对作物矿质元素利用率影响研究进展..... 李堃清,吴正云,张 强,等 (1053)
- 森林生态系统中植食性昆虫与寄主的互作机制、假说与证据 曾凡勇,孙志强 (1061)
- 线虫区系分析指示土壤食物网结构和功能研究进展..... 陈云峰,韩雪梅,李钰飞,等 (1072)
- 中国省际水足迹强度收敛的空间计量分析 赵良仕,孙才志,郑德凤 (1085)
- 高原河谷城市植被时空变化及其影响因素——以青海省西宁市为例..... 高 云,谢苗苗,付梅臣,等 (1094)
- 土地利用和环境因子对表层土壤有机碳影响的尺度效应——以陕北黄土丘陵沟壑区为例.....
..... 赵明月,赵文武,钟莉娜 (1105)
- 赤子爱胜蚓和毛利远盲蚓对添加造纸污泥土壤的化学和生物学特征的影响.....
..... 陈旭飞,张 池,戴 军,等 (1114)

个体与基础生态

- 钾与信号抑制剂对外生菌根真菌分泌乙酸的调控作用..... 杨红军,李 勇,袁 玲,等 (1126)
- 砷诱导蚕豆气孔保卫细胞死亡的毒性效应..... 薛美昭,仪慧兰 (1134)
- 石油污染土壤中苯酚降解菌 ad049 的鉴定及降解特性..... 胡 婷,谷 洁,甄丽莎,等 (1140)
- 紫花苜蓿对铜胁迫生理响应的傅里叶变换红外光谱法研究..... 付 川,余顺慧,黄怡民,等 (1149)
- 播种期对晚季稻香气 2-乙酰-1-吡咯啉含量和产量的影响 杨晓娟,唐湘如,闻祥成,等 (1156)
- 外源钙(Ca)对毛葱耐镉(Cd)胁迫能力的影响 王巧玲,邹金华,刘东华,等 (1165)
- 基于植被指数的北京军都山荆条灌丛生物量反演研究..... 高明亮,官兆宁,赵文吉,等 (1178)
- 三种暖季型草坪草对二氧化硫抗性的比较..... 李 西,王丽华,刘 尉,等 (1189)
- 恩施烟区无翅桃蚜在烤烟田空间动态的地统计学分析..... 夏鹏亮,王 瑞,王昌军,等 (1198)
- 啮齿动物捕食和搬运蒙古栎种子对种群更新的影响..... 张晶虹,刘丙万 (1205)
- 高原鼠兔有效洞穴密度对高寒草甸优势植物叶片和土壤氮磷化学计量特征的影响.....
..... 李倩倩,赵 旭,郭正刚 (1212)
- 光、温限制后铜绿微囊藻和斜生栅藻的超补偿生长与竞争效应..... 谢晓玲,周 蓉,邓自发 (1224)

种群、群落和生态系统

- 人工巢箱繁殖鸟类主要巢捕食者及其影响因素..... 张 雷,李东来,马锐强,等 (1235)
- 泉州湾埕埔潮间带大型底栖动物群落的时空分布..... 卓 异,蔡立哲,郭 涛,等 (1244)

不同尺度因子对滦河流域大型底栖无脊椎动物群落的影响..... 张海萍,武大勇,王赵明,等 (1253)

呼兰河湿地夏、秋两季浮游植物功能分组演替及其驱动因子..... 陆欣鑫,刘 妍,范亚文 (1264)

江西桃红岭国家级自然保护区梅花鹿生境适宜性评价..... 李 佳,李言阔,缪沪君,等 (1274)

景观、区域和全球生态

中国自然保护综合地理区划..... 郭子良,崔国发 (1284)

近 10 年来蒙古高原植被覆盖变化对气候的响应 缪丽娟,蒋 冲,何 斌,等 (1295)

人类活动与气候变化对洪湖春旱的影响 刘可群,梁益同,周金莲,等 (1302)

2000—2010 年武汉市中心城区湖泊景观变化 谈永利,王宏志,张 欢,等 (1311)

资源与产业生态

三江源区冬虫夏草资源适宜性空间分布..... 李 芬,吴志丰,徐 翠,等 (1318)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 282 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 30 * 2014-03



封面图说：插秧季节的桂西——2009—2011 年,我国广西、云南、贵州、四川、重庆等西南地区遭受了百年不遇的特大旱灾,其中广西西北部、云南大部、贵州西部等石漠化地区最为严重,农作物大面积绝收,千百万人和大牲畜饮水困难,这种危害是巨大的、现实的。从对 2009—2011 年我国西南地区旱灾程度及其对植被净初级生产力影响结果显示:2009—2011 年西南地区年均降水量和湿润指数明显低于 1980—2008 年均值,植被净初级生产力低于 2001—2008 年均值,造成的碳损失约占我国总碳汇的 7.91%。全球气候变暖给大气环流提供了动力,也造成了许多极端灾害天气,因此如何应对气候变化形势显得更加紧迫。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201306131698

谢晓玲, 周蓉, 邓自发. 光、温限制后铜绿微囊藻和斜生栅藻的超补偿生长与竞争效应. 生态学报, 2014, 34(5): 1224-1234.

Xie X L, Zhou R, Deng Z F. Overcompensation and competitive effects of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus* after low temperature and light stresses. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(5): 1224-1234.

光、温限制后铜绿微囊藻和斜生栅藻的 超补偿生长与竞争效应

谢晓玲, 周 蓉, 邓自发*

(南通大学生命科学学院, 南通 226007)

摘要:研究了铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)和斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)低温和低光照限制后的超补偿效应,以及共培养条件下的竞争效应。结果表明,低温和低光照均显著抑制微藻的生长发育,但低温对铜绿微囊藻的抑制效应更强,而斜生栅藻则对低光胁迫更敏感。经过低光和低温培养后,铜绿微囊藻和斜生栅藻在恢复正常培养时藻细胞密度短期内都表现出超补偿增长效应,但不同藻类超补偿模式不同,斜生栅藻补偿生长时间不超过 1 周,而铜绿微囊藻的补偿效应可以持续 10 天;此外,统计结果表明铜绿微囊藻细胞密度对低温限制解除表现出更显著的补偿生长,斜生栅藻则在低光解除后表现出更强的超补偿效应。微藻叶绿素 a 指标在光恢复条件下都表现出显著的补偿效应,但温度恢复过程中叶绿素 a 含量与藻密度增长不同步,低温胁迫对恢复正常培养后微藻叶绿素 a 的形成产生了一定的负效应;铜绿微囊藻产毒株(912)在两种恢复模式下脱氢酶活性显著高于对照,产毒株(912)脱氢酶活性的补偿响应明显高于其它两种材料。共培养实验结果表明斜生栅藻同铜绿微囊藻产毒株(912)相比处于竞争劣势,而在同无毒株(469)的共培实验中,尽管连续正常培养情况下两者竞争能力差异不显著,但在恢复培养条件下斜生栅藻竞争能力显著高于后者。因此产毒型铜绿微囊藻低温和低光后的补偿生长效应以及对斜生栅藻的竞争优势可能是蓝藻爆发的内源性机制之一。

关键词:铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*);斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*);超补偿效应;竞争效应;蓝藻爆发

Overcompensation and competitive effects of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus* after low temperature and light stresses

XIE Xiaoling, ZHOU Rong, DENG Zifa*

School of Life Science, Nantong University, Nantong 226007, China

Abstract: Changes of temperature and light significantly influence the growth and activity of phytoplankton. To explore the effects of these two variables on the cyanobacterial blooms, we analyzed the growth of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus*, as well as the competition between the two species, under conditions of low temperature and low light, and under conditions of release from these two stress factors. The results showed that low temperature and low light significantly inhibited the growth of microalgae. Low temperature led to a stronger inhibitory effect on *M. aeruginosa* than low light did; however, the growth inhibition of *S. obliquus* was more sensitive to low light than to low temperature. After release from low temperature or limiting light, all of the experimental taxa exhibited the overcompensation growth within a limited time and this response varied by species. Two *M. aeruginosa* strains showed a greater response to increased temperature than increased light. However, overcompensation of *S. obliquus* was greater in response to increased light than increased temperature. When the species were grown together, results showed that under all culture conditions, the toxic *Microcystis* strains (912) had a competitive advantage over *S. obliquus*. Although there was no significant difference between the

基金项目:国家重点研究发展计划(2008CB418201);江苏省高校“青蓝工程-中青年学术带头人”项目;南通大学“创新人才”项目

收稿日期:2013-06-13; **修订日期:**2013-10-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dengzifa@126.com

competitive ability of the nontoxic *Microcystis* strain (469) and *S. obliquus* under the normal, the former (469) showed a competitive disadvantage to *S. obliquus* under conditions of release from low light and low temperature. Chlorophyll-a content of all experimental algae overcompensated when released from light limitation. In the temperature experiments, the increase of chlorophyll-a content and algal density were asynchronism for all species, and cryogenic pre-treatment had a negative after-effect on microalgae chlorophyll-a content under release from low temperature. The response of dehydrogenase activity of algae when released from low temperature or low light stress varied with algae species, and the compensating increase of dehydrogenase activity of toxic strains (912) was significantly higher than that of the other two taxa. The results suggested that higher the compensatory growth of toxic *Microcystis* as well as its competitive advantage over *S. obliquus* while released from low temperature and light stresses, might be the important mechanisms that result in blue-green algae bloom.

Key Words: *Microcystis aeruginosa*; *Scenedesmus obliquus*; overcompensation; competitive effect; Cyanobacterial bloom

蓝藻爆发是包括海洋在内所有水体最严重的环境问题之一,爆发后果不仅影响生态系统本身的结构和功能,更为重要的是它将严重威胁区域环境质量和水安全,因此有关蓝藻爆发的机制及控制等方面的研究长期以来都是水体生态学关注的热点之一^[1-4]。众所周知,水体富营养化是导致蓝藻爆发的主要原因,然而多项研究指出蓝藻爆发与气候因素存在着密切关系,当营养物质足够维持蓝藻水华的形成时气候因素将是导致蓝藻水华事件的关键^[5-6]。有研究表明温度与光照等气候因子对太湖蓝藻群落种类组成的影响大于营养盐^[7],其中温度可能是驱动温带和亚热带湖泊藻类群落更替的主要因子^[8]。在全球气候变暖的大背景下蓝藻爆发频繁更受到温度等气候变量短期变化影响^[9-10]。

温度和光照是影响水生微藻的重要环境变量,而低温和低光照是其常常遇到的胁迫因素,不同藻类对这些胁迫具有不同的耐受性^[11-12],并表现出不同生长策略^[13]。研究发现一些微藻在遭受低光照等胁迫时生长速度和活力显著降低,但在胁迫解除后藻细胞密度都表现出超补偿生长响应^[14-17]。铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)是引起蓝藻水华的最重要藻种,尽管已有大量研究证明光照和温度显著影响其种群生长和发育^[5,18-20],但有关低温和低光照胁迫后的补偿生长及其对种群竞争力的影响研究少有报道,而这有可能是蓝藻爆发的重要内源性因素。

本项研究通过比较不同株系铜绿微囊藻以及斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*) 在光温胁迫后的生长过程,探究其是否存在超补偿响应,同时采用共培养实验评估这一过程对其种群竞争力的影响,从而解析蓝藻复苏和爆发机制,并为有效控制水华提供理

论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本实验所用铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*) 产毒株系 912 和无毒株系 469, 以及斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*) 均购自中国科学院武汉水生生物研究所淡水藻种库。

1.2 实验方法

1.2.1 藻类的培养

实验选用 BG-11 培养基培养^[21]。所有培养基和所用器皿均于 121℃ 在高压蒸汽灭菌锅灭菌 15min。实验前将铜绿微囊藻和斜生栅藻进行扩大培养。预处理实验设 3 个组,低光组,低温组和正常对照组;补偿实验设 3 组:低光组光恢复、低温组温度恢复,正常对照组,同时分为 3 种藻种独立恢复培养与共培养(竞争实验)两种模式(912+斜生栅藻;469+斜生栅藻),具体实验条件见表 1。光暗比为 12 h:12 h,恒温培养箱静置培养,每天定时人工摇瓶 3 次。每一实验组合 4 个重复。

1.2.2 藻细胞密度的测定

自接种之日起每隔 72h 取样,用血球计数板在显微镜下分别记录铜绿微囊藻和斜生栅藻细胞密度,取样前充分摇动培养瓶使培养液均匀,从而保证取样代表性,每次每瓶镜检 3 张计数板。前期预处理起始接种密度分别为 5.4×10^5 个/mL(912)、 5.5×10^5 个/mL(469) 和 6.3×10^5 个/mL(斜生栅藻);恢复培养与竞争实验起始接种密度分别为 4.6×10^5 个/mL(912)、 4.7×10^5 个/mL(469) 和 5.6×10^5 个/mL(斜生栅藻),保证各培养瓶中起始藻密度基本一致。

表 1 实验设计表

Table 1 The experimental design

实验类别 Experimental type	材料 Materials	实验条件 Experimental condition	代码 Code	培养量 Volume	增长率 Growth rate	备注 Notes
预处理(单培) Pretreatments (single species)	912、469、斜生 栅藻扩增材料	37.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 30 $^{\circ}\text{C}$	A	1L	μ_A	预处理对照
		6.2 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 30 $^{\circ}\text{C}$	B	1L		低光处理
		37.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 5 $^{\circ}\text{C}$	C	1L		低温处理
恢复实验(单培) Recovery experiments (single species)	A	37.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 30 $^{\circ}\text{C}$		500mL	μ_A	恢复与正常竞争对照
竞争实验 Competitive experiments (912-斜生栅藻, 469-斜生栅藻)	B	37.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 30 $^{\circ}\text{C}$		500mL	μ_B	光照恢复
	C	37.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 30 $^{\circ}\text{C}$		500mL	μ_C	温度恢复
	A	37.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 30 $^{\circ}\text{C}$		500mL	$\mu_{\text{正常竞争}}$	正常竞争
	B	37.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 30 $^{\circ}\text{C}$		500mL	$\mu_{\text{光竞争}}$	光照恢复竞争
	C	37.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 30 $^{\circ}\text{C}$		500mL	$\mu_{\text{温竞争}}$	温度恢复竞争

在不同时段统计的藻密度数据基础上,计算不同处理藻细胞比增长率(μ):

$$\mu = \ln(x_n - x_{n-1}) / (t_n - t_{n-1})$$

式中, x_n 为本计数期的细胞密度(个/mL); x_{n-1} 为前一计数期的细胞密度(个/mL); t_n 为对应于 x_n 的培养天数; t_{n-1} 为对应于 x_{n-1} 的培养天数,具体计算以 3d 为时间周期。

1.2.3 补偿效应和竞争效应的量化分析

根据补偿指数^[22]和竞争指数^[23]的计算原理,以未经预处理的藻种单独正常培养时藻细胞最大比增长率(μ_A)为基准,分别按照以下公式计算光照和温度恢复培养处理的补偿效应与正常竞争时的竞争效应:

$$\text{补偿效应}_{\text{光}} = (\mu_{\text{恢复B}} - \mu_A) / \mu_A \times 100\%$$

$$\text{补偿效应}_{\text{温}} = (\mu_{\text{恢复C}} - \mu_A) / \mu_A \times 100\%$$

$$\text{竞争效应}_{\text{正常竞争}} = (\mu_{\text{竞争竞争}} - \mu_A) / \mu_A \times 100\%$$

以单独培养的恢复实验时藻细胞最大比增长率(μ_B 和 μ_C)为基准,按照以下公式计算光照和温度恢复时的竞争效应,

$$\text{竞争效应}_{\text{光恢复}} = (\mu_{\text{光竞争}} - \mu_B) / \mu_B \times 100\%$$

$$\text{竞争效应}_{\text{温恢复}} = (\mu_{\text{温竞争}} - \mu_C) / \mu_C \times 100\%$$

式中, μ_A , μ_B 和 μ_C 具体含义见表 1。

1.2.4 光合色素含量和脱氢酶活性测定

铜绿微囊藻为蓝藻,没有叶绿素 b,所以每次取样 50mL 混合均匀的藻液抽滤并参照文献测定不同培养条件下叶绿素 a 含量^[14], 3 次重复;采用 TTC (2,3,5-氯化三苯基四氮唑)-脱氢酶还原法测定藻细胞活性:取混合均匀藻液 50mL 离心、弃上清夜,在三(羟甲基)氨基甲烷盐酸盐(Tris-HCl)缓冲溶

液、pH=8.4 的反应环境中,加入 1mL0.8%的 TTC 溶液,水浴温度(32 $\pm$ 1) $^{\circ}\text{C}$ 、发色培养 1h,使用双组分萃取剂 4mL 丙酮和 5mL 石油醚的混合溶剂进行萃取;同时设置对照;3 次重复;用紫外分光光度计(UV-1200)测定^[21]。

1.3 数据处理与统计分析

数据统计分析应用 SPSS 18.0 软件;在多因素方差分析的基础上,藻细胞密度采用 t 检验分析不同处理与对照间,以及不同处理间差异显著性,同时应用 Mann-Whitney U-test 对各密度变化曲线进行差异性检验,并根据差异性的显著程度评估敏感性;以单独正常培养未经预处理的藻种生长数据为对照,计算恢复培养的补偿效应和共培时正常竞争效应,以恢复实验的单独培养数据为对照计算恢复期共培养处理竞争效应,并进行统计分析;用单因素方差分析(One-way ANOVA)比较不同培养条件下叶绿素 a 含量与脱氢酶活性,当差异显著时($P<0.05$),进一步应用 Duncan 多重比较检验处理之间的差异性。同时以藻细胞密度为协变量进行协方差分析,从而检验不同培养条件下单个藻细胞相关指标的差异性。绘图应用 Origin 8.5。

2 结果与分析

2.1 低光照和低温对不同藻种生长的影响

实验结果表明,同正常培养相比低光照和低温胁迫显著影响铜绿微囊藻和斜生栅藻的正常生长发育。在不同培养条件下铜绿微囊藻两个株系和斜生栅藻表现出类似的生长曲线,12d 后密度增加幅度显著降低,逐渐呈水平趋势(图 1),期间正常培养条件

下的藻密度增加了约 25 倍,而低光照和低温条件下藻密度仅增加了 1 倍。同样正常培养体系藻细胞比增长速率显著高于两种逆境处理体系中的。此外,统计分析结果表明铜绿微囊藻和斜生栅藻对这两种胁迫因素的响应也表现出一定的差异:通过对密度

变化曲线各时间点藻密度的显著性检验,发现与斜生栅藻相比,铜绿微囊藻在低温条件下表现出更强的抑制效应,而斜生栅藻则对低光更敏感(图 1) (Mann-Whitney U-test, $P < 0.05$)。

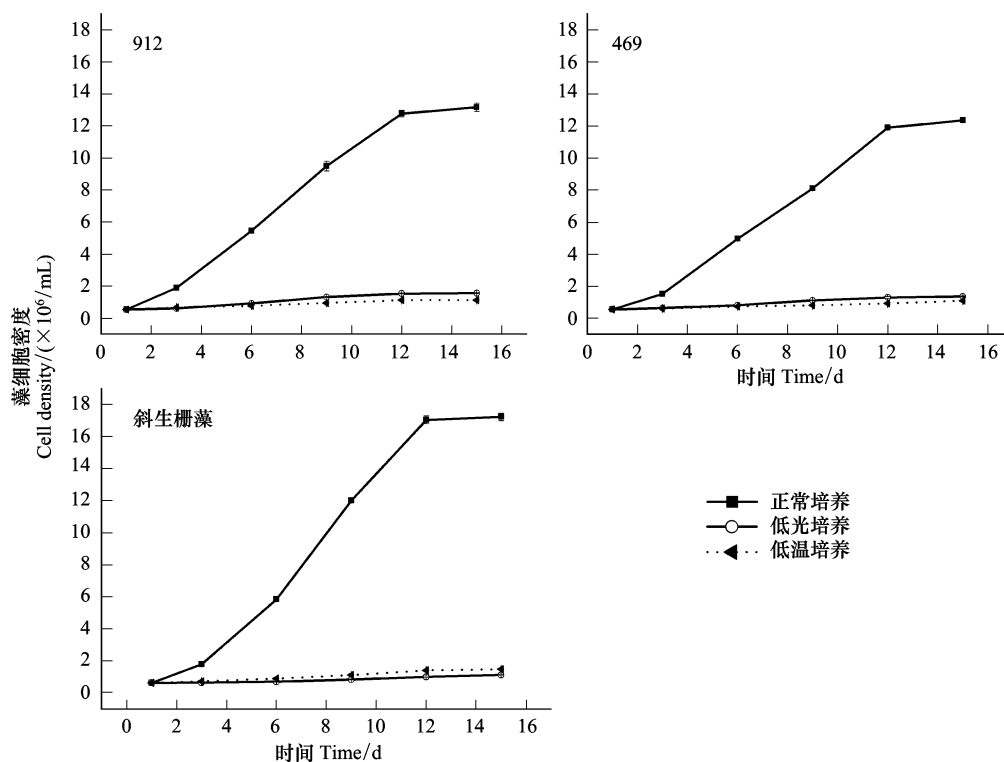


图 1 低光照和低温对铜绿微囊藻和斜生栅藻生长的影响(均值 $\pm$ 标准误, $n=4$)

Fig.1 The effects of lower illumination and temperature on the growth of *M. aeruginosa* and *S. obliquus* (Mean $\pm$ S.E., $n=4$)

912: 铜绿微囊藻产毒株系 912; 469: 铜绿微囊藻无毒株系 469;

2.2 不同藻株藻细胞密度对光照和温度的补偿效应

从图 2 可以看出,同正常培养的藻株相比,经过低光和低温培养的铜绿微囊藻和斜生栅藻细胞密度在恢复正常培养条件时都表现出一定的超补偿效应,但不同藻类呈现出不同的超补偿模式。两株铜绿微囊藻在培养的前 10d 都呈现一定超补偿生长,细胞密度显著高于对照 (One-way ANOVA, $P < 0.05$),但随着培养时间的延长这种补偿生长逐渐消失,第 12 天时不同处理的藻株基本达到相同的密度;无毒株系 469 低光和低温解除后较产毒株 912 的超补偿效应更显著 (图 2) ($P < 0.05$)。与铜绿微囊藻相比,斜生栅藻低光和低温解除后正常培养的超补偿效应仅在培养的前 7 天表现出来,到第 8 天连续正常培养的藻株密度已经接近光恢复培养材料的藻株,统计结果表明补偿效应持续时间显著短于

铜绿微囊藻的(图 2)。同样,从图 3 中可以看出,实验初期恢复培养材料的比增长速率显著高于对照。此外,不同藻类对低光和低温后的超补偿敏感性存在一定的差异性,铜绿微囊藻对低温限制解除表现出更高的敏感性,而斜生栅藻则在低光解除后表现出更强的超补偿效应($P < 0.05$)。

2.3 不同条件下铜绿微囊藻与斜生栅藻的竞争效应

斜生栅藻分别与产毒(912)和不产毒的铜绿微囊藻(469)共培养实验结果表明,与单独培养相比,共培养体系中无论铜绿微囊藻还是斜生栅藻的藻细胞比增长速率 μ 和最大密度都显著降低($P < 0.05$) (图 3,图 4)。比较 3 种共培养模式的结果可以看出,经过低光或低温预处理的藻种在恢复正常培养过程中藻细胞密度都较连续正常培养样品的高。从斜生栅藻与两种不同株系的铜绿微囊藻的竞争关系

分析,在斜生栅藻与无毒株(469)的共培养体系中藻细胞密度显著高于其同有毒株(912)共培养中的密

度,产毒株 912 产生的微囊藻毒素可能对共培养的斜生栅藻产生了一定的竞争性抑制(图 4)。

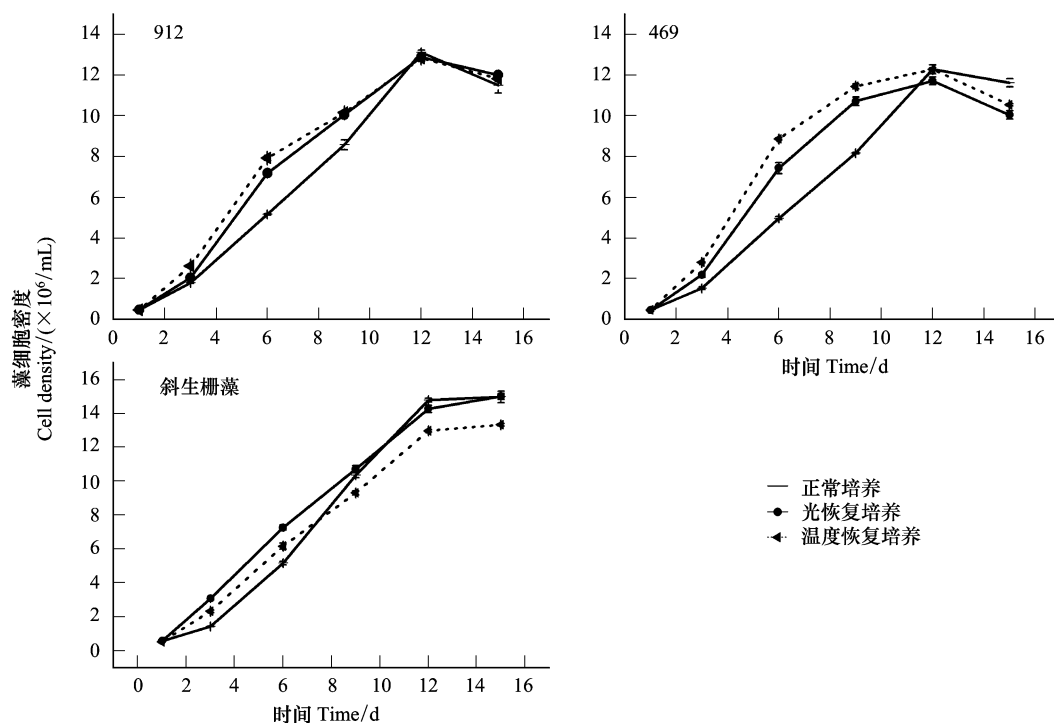


图 2 铜绿微囊藻和斜生栅藻光和温度恢复下的补偿生长(均值±标准误, $n=4$)

Fig.2 Overcompensation of *M. aeruginosa* and *S. obliquus* experienced low light and temperature stress (Mean±S.E., $n=4$)

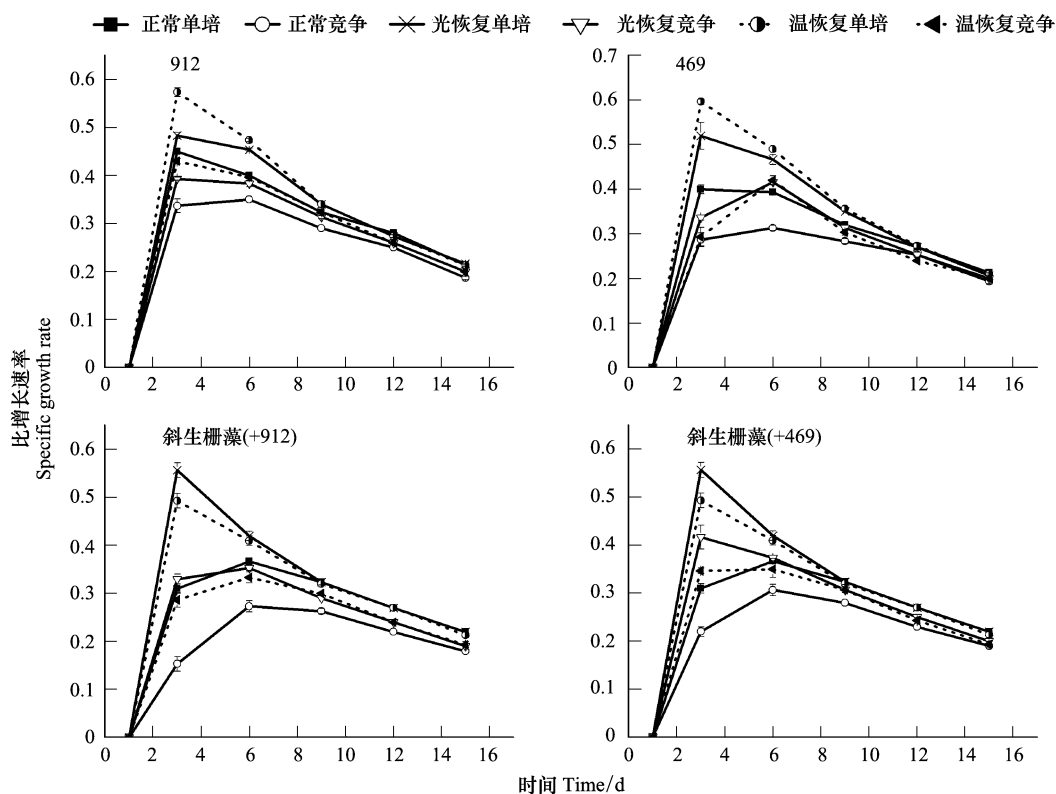


图 3 不同条件下铜绿微囊藻与斜生栅藻的藻密度比增长率(均值±标准误, $n=4$)

Fig.3 The specific growth rate of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus* under different culture conditions (Mean±S.E., $n=4$)

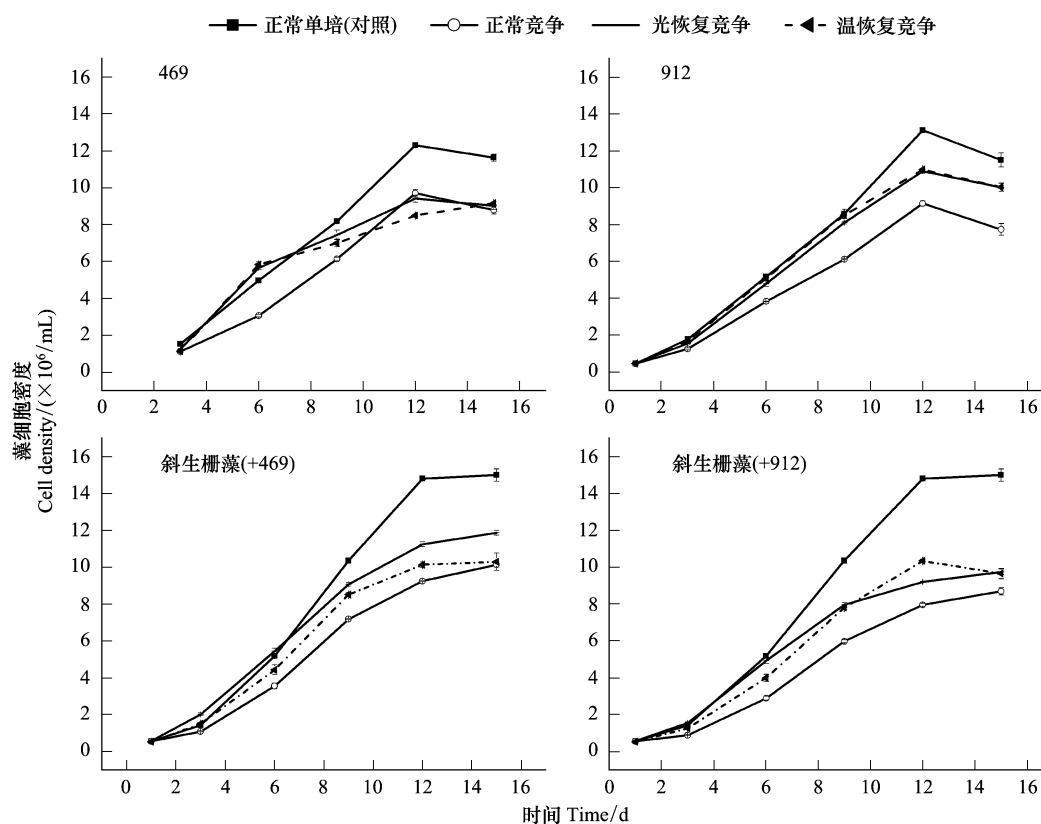


图4 不同条件下铜绿微囊藻与斜生栅藻的竞争效应 (均值 $\pm$ 标准误, $n=4$)

Fig.4 The competition effects of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus* under different culture conditions (Mean $\pm$ S.E., $n=4$)

量化分析补偿期内不同藻株的补偿生长结果表明,斜生栅藻在光照恢复的情况下补偿效应显著高于铜绿微囊藻的,而温度恢复时与产毒株 912 的差异不显著,但显著低于无毒株 469 的补偿效应(图 5);无毒株 469 在光照和温度恢复正常后的补偿生长能力显著高于产毒株 912 的。敏感性分析结果表明铜绿微囊藻对温度表现出更高的敏感性(图 5),而斜生栅藻对光照强度更敏感(图 5)($P<0.05$)。量化分析结果表明,未经胁迫预处理的共培体系中斜生栅藻细胞增殖被竞争抑制的幅度显著高于共培的产毒株 912 的,而与共培的无毒株 469 差异不显著。尽管在经过低光或低温胁迫预处理后的共培体系中斜生栅藻的抑制程度降低,但还是显著高于产毒株被抑制率($P<0.05$)。与无毒株 469 相比,两种藻类在连续正常培养情况下竞争能力相当,而在恢复培养的处理中斜生栅藻对 469 生长和扩增的抑制效应远大于 469 对斜生栅藻的,即斜生栅藻具有更强的竞争能力($P<0.05$)。

2.4 不同培养条件对铜绿微囊藻和斜生栅藻叶绿素 a 含量的影响

同正常培养相比,限光和低温处理都显著降低了培养体系单位体积中叶绿素 a 的含量;两种胁迫处理比较限光培养体系显著低于低温处理下的;3 种藻株之间差异不显著(图 6)。结合不同培养体系中藻密度数据进行协方差分析结果表明,在限光和低温处理下单个藻细胞叶绿素 a 含量与正常培养条件下的差异不显著($P>0.05$)。

在光恢复培养的条件下,实验藻叶绿素 a 含量都显著高于连续正常培养的和经过低温处理后温度恢复的相应样品,而温度恢复培养的藻株叶绿素 a 含量显著低于另外两类相应样品的,其中尤以产毒株 912 叶绿素 a 含量差异最显著(图 6)。光恢复培养的条件下 3 个藻株叶绿素 a 含量都表现出一定程度的超补偿效应,而经过低温处理后即使恢复正常温度,叶绿素 a 含量并未表现出超补偿效应,而藻密度在此情况下表现出较强的超补偿效应(图 5),两个指标表现出不同步性,说明低温预处理直接影响了后期正常培养时藻类叶绿素 a 的合成。

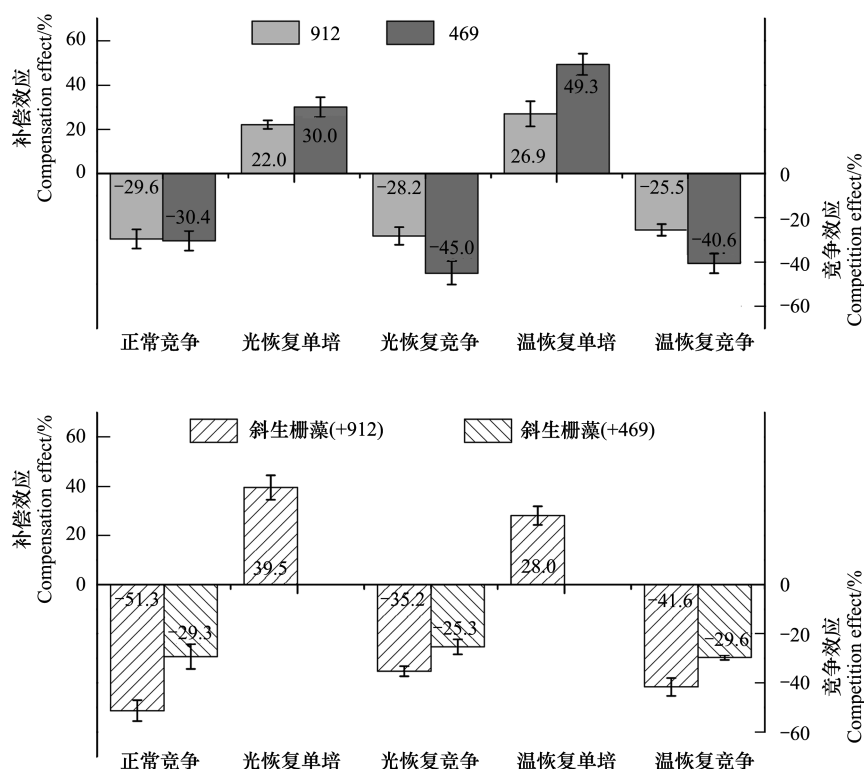


图5 不同培养体系中铜绿微囊藻和斜生栅藻的补偿效应和抑制效应 (均值±标准误, $n=4$)

Fig.5 The compensation effects and inhibitory effects of *M. aeruginosa* and *S. obliquus* under different culture systems (Mean±S.E., $n=4$)

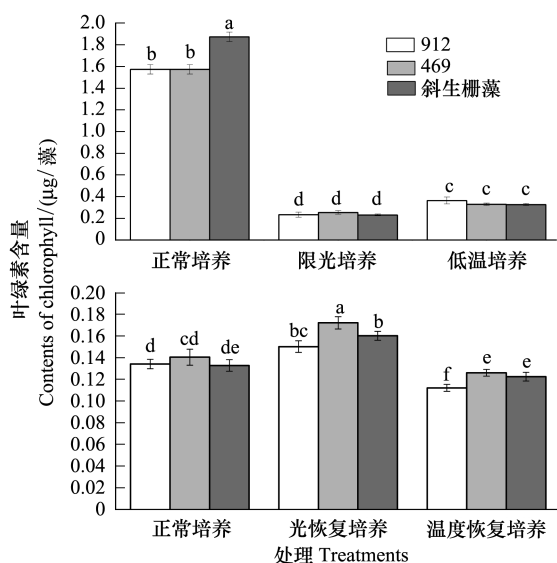


图6 不同培养条件下铜绿微囊藻和斜生栅藻叶绿素含量的差异

Fig.6 The differences of content of chlorophyll of *M. aeruginosa* and *S. obliquus* under different culture systems

平均值±标准误, 不同字母表示差异显著, $P<0.05$, $n=4$

2.5 不同培养条件对铜绿微囊藻和斜生栅藻脱氢酶活性的影响

低温和限光培养体系中3种藻细胞脱氢酶活性

都显著低于正常培养体系中的, 而两种胁迫处理间差异不显著; 3种藻株之间比较可以看出限光和低温胁迫下铜绿微囊藻产毒株(912)藻细胞脱氢酶活性都显著高于其它两种藻细胞脱氢酶活性(图7)。协方差分析结果表明在限光和低温胁迫条件下单个藻细胞脱氢酶活性显著高于正常培养的($P<0.05$)。单个藻细胞脱氢酶活性的提高可能是对限光和低温胁迫的应急响应。

在单独培养体系中, 铜绿微囊藻和斜生栅藻脱氢酶活性对不同恢复条件响应模式不完全相同, 而且铜绿微囊藻不同株系的响应也存在差异。产毒株912在两种恢复培养模式下脱氢酶活性都有极显著提高($P<0.01$), 而产毒株469仅在光恢复条件下极显著提高($P<0.01$), 在温度恢复条件下脱氢酶活性与对照(正常培养)相比差异不大($P>0.05$), 斜生栅藻脱氢酶对不同处理的响应模式与469相似(图7)。

3 讨论

植物在逆境胁迫下生长速率往往表现出一定程度降低, 在胁迫解除之后, 植物将逐渐恢复其生长

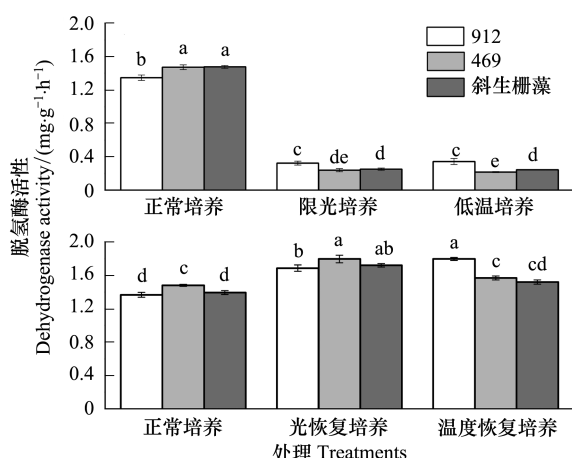


图7 不同培养条件下铜绿微囊藻和斜生栅藻脱氢酶活性的差异

Fig.7 The differences of activity of dehydrogenase of *M. aeruginosa* and *S. obliquus* under different culture systems

能力,甚至表现出超过正常生长速率的现象,即超补偿生长。超补偿反应是植物对抗波动环境的一种适应对策,是植物在与环境的长期博弈中形成的抗逆机理的重要组成部分^[22]。藻细胞密度是表征浮游植物种群生物量最真实的指标,研究发现蛋白核小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*)、三角褐指藻 (*Phaeodactylum tricornutum*)、绿色巴夫藻 (*Pavlova viridis*)、四列藻 (*Tetraselmis tetrahele*)等在暗处理等胁迫解除后藻细胞密度都表现出超补偿生长现象^[14-17]。本研究表明铜绿微囊藻和斜生栅藻在低温和低光照逆境解除后的恢复生长过程中藻细胞密度短期内都表现出显著的超补偿生长效应。与斜生栅藻相比,铜绿微囊藻补偿性生长虽然启动稍晚,但启动后藻细胞密度快速增加,且持续时间长于斜生栅藻,尤其是低温解除后蓝藻的补偿生长效应更加明显,这将为高温情况下蓝藻优势地位的建立和维持奠定基础,这和谭啸等^[24]模拟升温对藻类复苏研究结果基本一致。尽管低温和低光照显著抑制了铜绿微囊藻的生长,但9℃以上铜绿微囊藻和斜生栅藻都可复苏,但前者复苏后的生长速率高于后者,并且随着温度的升高蓝藻的优势更加明显^[25]。在全球气候变化的大背景下,温度短期变化的幅度和频率明显增加,这种短期变温刺激将诱发蓝藻超补偿生长,藻类群落组成结构将发生改变,蓝藻数量显著增加,因此在营养足够的情况下蓝藻爆发频率和规模很有可能增加。

种间竞争在植物群落构建和维持中扮演着极其

重要的角色,不同植物针对某一种或某些生态因子往往具有不同的竞争能力,而竞争能力强的物种将在群落组成和功能作用上占主导地位。一般情况下生物群落的物种组成处于动态平衡中,但当环境发生变化而导致某一种或某几种生物在种间竞争中占绝对优势时其数量将快速增长,蓝藻爆发就是典型的例证,研究发现春末夏初气温回暖时太湖藻类群落组成发生了显著改变:蓝藻取代了绿藻成为优势种^[26-27]。本实验结果中,与单种培养对照相比,铜绿微囊藻和斜生栅藻共培养时两种藻类的细胞增长速率和最大密度呈现出显著降低趋势,说明两种藻类存在明显的相互竞争。绿藻、硅藻和蓝藻是大多数淡水水体最主要的藻类,当气温较低时绿藻和硅藻更占优势,随着温度的升高蓝藻更具竞争优势^[28]。通过比较斜生栅藻分别与产毒株912和无毒株469竞争结果可以看出,同912共培养过程中产生的微囊藻毒素对斜生栅藻可能产生了毒害作用,铜绿微囊藻可通过产生微囊藻毒素增强其竞争能力^[29-33]。因此,微囊藻毒素可能是产毒性微囊藻在群落中优势地位建立和巩固的重要机制之一。

应用叶绿素a含量表征浮游植物初级生产力和水体营养化水平已有很长的历史,尽管有研究表明用叶绿素a含量表征浮游藻类生物量存在一定的问题^[33],但到目前为止还没有一个更快速、简便而相对准确的指标来替代它^[35-37]。叶绿素a是浮游植物中最主要的光合色素,占浮游藻类干重的1%—2%,其含量的高低与藻类对光能吸收效率和利用效率都显著相关,其值越大说明光合同化率越高^[34]。叶绿素a含量又随藻类种类、温度、光照等因素的变化而异,低温和低光照都直接降低了浮游植物种群叶绿素含量^[38]。同对照相比,低光照胁迫解除后3种实验藻叶绿素a含量与细胞密度的增长幅度基本一致,因此低光照胁迫并未影响叶绿素a的生物合成能力,研究表明虽然大多数植物叶绿素合成的通路是光依赖性的,但部分藻类还具有在黑暗条件下合成叶绿素的辅助通路^[39]。尽管低温胁迫下单个藻细胞叶绿素a含量没有显著变化,但在低温胁迫解除后的恢复性生长过程中叶绿素含量显著低于相应对照,由此说明低温预处理仍然对藻细胞叶绿素合成能力造成了影响,在恢复培养的过程中藻细胞密度表现出了补偿性生长,叶绿素a的合成能力未能

完全恢复,从而表现出叶绿素 a 增长幅度与细胞密度增加并非同步。这一结果也证明有些情况下叶绿素 a 含量并不能很好的表征藻细胞密度^[34]。

脱氢酶是一类氧化还原酶,参与了生物体氨基酸合成和降解、丙酮酸的氧化、光合作用、戊糖磷酸途径、氧化磷酸化、脂肪的氧化和合成等过程,是生物生命活动过程中极其重要的酶类^[21]。由于脱氢酶只有活细胞体才能产生,所以生物体的脱氢酶活性(DHA)是细胞活力的最重要表征指标之一,通过检测藻细胞脱氢酶活性可以体现出藻细胞生命力^[21,40-41]。同对照相比,经过低光照或低温预处理后恢复生长的藻细胞脱氢酶活性都有一定程度的提高,尤其是产毒株 912 经过低温胁迫解除后的恢复生长过程中脱氢酶活性显著提高。同时 3 种藻响应模式表现出一定的差异,在低温胁迫解除后铜绿微囊藻无毒株 469 和斜生栅藻脱氢酶活性都显著低于光恢复培养状态的。结合低温和低光照胁迫解除后 3 种藻细胞密度的增长可以发现,虽然斜生栅藻和无毒株 469 藻细胞密度都呈现出较明显的补偿生长,但经过低温后的恢复生长过程藻细胞活性并未达到正常水平,而铜绿微囊藻产毒株不仅藻细胞密度增长迅速,细胞活力也得到恢复或提高,由此可见其抗低温胁迫能力明显高于另外两种藻类。因此铜绿微囊藻产毒株低温和低光照逆境胁迫后的补偿性生长和对其它藻类的竞争优势可能是蓝藻爆发的重要内源性机制。

4 结论

蓝藻生长和水华形成历经休眠、复苏、增殖和爆发四个阶段,在营养保证的前提下温度和光照是促进蓝藻细胞迅速增殖,种群密度急剧增加的关键因素,不同藻类对环境变化的响应以及种间竞争能力的差异是蓝藻爆发的内源机制。本研究中低温和低光照均显著抑制微藻的生长发育,但铜绿微囊藻在低温条件下表现出更强抑制,而斜生栅藻则对低光胁迫更敏感。在光温恢复正常的条件下各种藻细胞密度增长短期内都表现出超补偿效应,但不同藻类超补偿模式不同,斜生栅藻补偿生长时间不超过 1 周,而铜绿微囊藻的补偿效应可以持续 10d;铜绿微囊藻细胞密度对低温限制解除表现出更显著的补偿生长,而斜生栅藻则在低光解除后表现出更强的超

补偿效应。竞争实验结果表明铜绿微囊藻产毒株(912)对斜生栅藻具有显著的竞争优势,而无毒株(469)对斜生栅藻则不具有竞争优势,因此微囊藻毒素可能是产毒型微囊藻在群落中优势地位建立和巩固的重要机制之一。温度恢复条件下藻类叶绿素 a 含量并未表现出与藻密度增长同步,低温胁迫可能对微藻叶绿素 a 的形成产生了一定的负效应。脱氢酶是表征藻类细胞活力的重要指标,产毒株(912)脱氢酶活性的补偿响应显著高于无毒株(469)和斜生栅藻的。因此产毒型铜绿微囊藻低温和低光后的补偿生长效应以及对斜生栅藻的之一竞争优势可能是蓝藻爆发的重要内源性机制。

致谢:感谢美国北卡大学教堂山分校(University of North Carolina at Chapel Hill)生物系 Peter S. White 教授润色英文摘要;南通大学孙政玺、于珍、赵莉莉、汪情等同学参与部分实验工作,特此致谢。

References:

- [1] Kong F X, Gao G. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 925(3): 589-595.
- [2] Kong F X, Ma R H, Gao J F, Wu X D. The theory and practice of prevention, forecast and warning on cyanobacteria bloom in Lake Taihu. *Journal of Lake Science*, 2009, 21(3): 314-328.
- [3] Paerl H W, Otten T G. Harmful Cyanobacterial Blooms: Causes, Consequences, and Controls. *Microb Ecology*, 2013, 65: 995-1010.
- [4] Wang C Y, Yu Y, Sun Y K, Li H L, Kong F X, Zhang M, Shi X L, Yang Z. The discussion of the early forecasting of cyanobacteria bloom in the Lake Taihu based on ELCOM-CAEDYM model. *China Environmental Science*, 2013, 33(3): 491-502.
- [5] Paul V J. Global warming and cyanobacterial harmful algal blooms. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 2008, 619: 239-257.
- [6] Zhang M, Duan H, Shi X, Yu Y, Kong F X. Contributions of meteorology to the phenology of cyanobacterial blooms: implications for future climate change. *Water Research*, 2012, 46(2): 442-452.
- [7] Gu T T, Kong F X, Tan X, Yu Y. Investigation on spatio-temporal pattern of cyanobacterial community structure by T-RFLP during overwinter and recruitment period in Taihu Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(1): 21-30.
- [8] Grover J P, Chrzanowski T H. Seasonal dynamics of phytoplankton in two warm temperate reservoir: association of taxonomic composition with temperature. *Journal of Plankton Research*,

- 2005, 27(10): 1-7.
- [9] Huber V, Wagner C, Gerten D, Adrian R. To bloom or not to bloom: contrasting responses of cyanobacteria to recent heat waves explained by critical thresholds of abiotic drivers. *Oecologia*, 2012, 169(1): 245-256.
- [10] Paerl H W, Otten T G. Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls. *Microb Ecology*, 2013, 65 (4) : 995-1010.
- [11] Eilertsen H C, Degerlund M. Phytoplankton and light during the northern high-latitude winter. *Journal of Plankton Research*, 2010, 32(6): 899-912.
- [12] Clegg M R, Gaedke U, Boehrer B, Spijkerman E. Complementary ecophysiological strategies combine to facilitate survival in the hostile conditions of a deep chlorophyll maximum. *Oecologia*, 2012, 169(3): 609-622.
- [13] Laabir M, Jauzein C, Genovesi B, Massere E, Grzebyk D, Cecchi P, Vaquer A, Perrin Y, Collos Y. Influence of temperature, salinity and irradiance on the growth and cell yield of the harmful red tide dinoflagellate *Alexandrium catenella* colonizing Mediterranean waters. *Journal of Plankton Research*, 2011, 33 (10) : 1550-1563.
- [14] Duan S S, Guo Y F, Liu Z Q, Li A F, Xu N, Zhang Y N, Chen H. Overcompensatory growth of *Tetraselmis tetrahele* under the stress of nutrients deficiency. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (7) : 1297-1304.
- [15] Zhang Z P, Duan S S, Liu Z Q, Li A F, Xu N. Overcompensation response of *Nannochloris oeropsiculata* under the darkness stress. *Journal of Jinan University (Natural Science)*, 2005, 26(3): 412-416.
- [16] Liu X J, Duan S S, Li A F. The effect of overcompensatory growth in *Pavlova viridis* after UV-B stress treatments. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1763-1771.
- [17] Cai Z P, Duan S S, Wei W. Darkness and UV radiation provoked compensatory growth in marine phytoplankton *Phaeodactylum tricorutum* (Bacillariophyceae). *Aquaculture Research*, 2009, 40(13): 1559-1562.
- [18] Chen X C, Sun Y C, Zeng X W, Li C J, Kong H N. The inhibition of low light intensity on the growth of *Microcystis aeruginosa* in raw water. *China Environmental Science*, 2007, 27 (3) : 352-355.
- [19] Wu R, Cui L F, Lou S, Shi Y. The influence of temperature and illumination on the *Microcystis* production. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(6): 33-36.
- [20] Zeng J, Wang W X. Temperature and irradiance influences on cadmium and zinc uptake and toxicity in a freshwater cyanobacterium, *Microcystis aeruginosa*. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 190: 922-929.
- [21] Xie J, Hu W R, Pei H Y. Detection of amount and activity of living algae in fresh water by dehydrogenase activity (DHA). *Environ Monit Assess*, 2008, 146: 473-478.
- [22] Tommy L, Tuomi J, Nilsson P. Evidence for an evolutionary history of overcompensation in the grassland biennial *Gentianella campestris* (Gentianaceae). *American Naturalist*, 1997, 149, 6: 1147-1155.
- [23] Weigelt A, Jolliffe P. Indices of plant competition. *Journal of ecology*, 2003, 91: 707-720.
- [24] Tan X, Kong F X, Yu Y, Shi X L. Effects of enhanced temperature on algae recruitment and phytoplankton community succession. *China Environmental Science*, 2009, 29 (6) : 578-582.
- [25] Tang J, Song L R, Sun S S, Wei H H, Wan N. Recruitment ability of *Microcystis aeruginosa* under low light-low temperature combination. *Environmental Science (Chinese)*, 2010, 31(12): 2933-2937.
- [26] Hu X Z, Jin X C, Chu Z S, Ma Z Y, Yi L W. Light competition between *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus quadricauda* from Taihu lake and the dominance process simulation in microcosm. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(3): 538-543.
- [27] Xing P, Kong F X, Cao H S, Zhang M. Relationship between bacterioplankton and phytoplankton community dynamics during late spring and early summer in lake Taihu. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 1696-1702.
- [28] Zhang Z B, Shi X L, Liu G J, Yang X Y, Wang Y N, Liu X J. The relationship between planktonic algae changes and the water quality of the West Lake, Hangzhou, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 2980-2987.
- [29] Deblois C P, Juneau P. Comparison of Resistance to Light Stress in Toxic and Non-Toxic Strains of *Microcystis aeruginosa* (Cyanophyta). *Journal of Phycology*, 2012, 48(4): 1002-1011.
- [30] El-Shehawey R, Gorokhova E, Fernandez-Pinas F, del Campo F F. Global warming and hepatotoxin production by cyanobacteria: What can we learn from experiments?. *Water Research*, 2012, 46: 1420-1429.
- [31] Li D M, Kong F X, Shi X L, Ye L L, Yu Y, Yang Z. Quantification of microcystin-producing and non-microcystin producing *Microcystis* populations during the 2009 and 2010 blooms in Lake Taihu using quantitative real-time PCR. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(2) 284-290.
- [32] Li Y X, Li D H. Competition between toxic *Microcystis aeruginosa* and nontoxic *Microcystis wesenbergii* with *Anabaena* PCC7120. *Journal of Applied Phycology*, 2012, 24: 69-78.
- [33] Harel M, Weiss G, Lieman-Hurwitz J, Lebendiker M, Temper V, Block C, Sukenik A, Zohary T, Braun S, Carmeli S, Kaplan A. Interactions between *Scenedesmus* and *Microcystis* may be used to clarify the role of secondary metabolites. *Environmental Microbiology Reports*, 2013, 5(1): 97-104.
- [34] Kruskopf M, Flynn K J. Chlorophyll content and fluorescence responses cannot be used to gauge reliably phytoplankton biomass,

- nutrient status or growth rate. *New Phytologist*, 2006, 169: 525-536.
- [35] Huot Y, Babin M, Bruyant F. Does chlorophyll a provide the best index of phytoplankton biomass for primary productivity studies? *Biogeosciences Discuss*, 2007, 4: 707-745.
- [36] Todd V R, Mark B D, Lowell E G. Chlorophyll-a as a criterion for establishing nutrient standards in the streams and rivers of Illinois. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37: 437-447.
- [37] Boyer J N, Kelble C R, Ortner P B, Rudnick D T. Phytoplankton bloom status: Chlorophyll a biomass as an indicator of water quality condition in the southern estuaries of Florida, USA. *Ecological Indicators*, 2009, 9: 56-67.
- [38] Shaaban A M, Mansour H A, Saber A A. Relationships between total chlorophyll and phytoplankton individuals of Rosetta branch of River Nile, Egypt. *International Research Journal of Biochemistry and Bioinformatics*, 2011, 1(10): 257-265.
- [39] Wu Q Y, Vermaas W F J. Light-dependent chlorophyll a biosynthesis upon chlL deletion in wild-type and photosystem I-less strains of the cyanobacterium *Synechocystis* sp. PCC 6803. *Plant Molecular Biology*, 1995, 29: 933-945.
- [40] Liang W Y, Wang K, Ruan Q Y, Wang J L. Viability determination of *Microcystis aeruginosa* by TTC-dehydrogenase assay. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(9): 1745-1750.
- [41] Hoch M P, Dillon K S, Coffin R B, Cifuentes L A. Sensitivity of bacterioplankton nitrogen metabolism to eutrophication in subtropical coastal waters of Key West, Florida. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 56: 913-926.
- 讨. *中国环境科学* 2013, 33(3): 491-502.
- [7] 顾婷婷, 孔繁翔, 谭啸, 于洋. 越冬和复苏时期太湖水体蓝藻群落结构的时空变化. *生态学报*, 2011, 31(1): 21-30.
- [14] 段舜山, 郭羽丰, 刘振乾, 李爱芬, 徐宁, 张亚楠, 陈洁. 四列藻在营养限制胁迫下的超补偿生长研究. *生态学报*, 2003, 27(7): 1297-1304.
- [15] 张珍萍, 段舜山, 刘振乾, 李爱芬, 徐宁. 眼点拟微绿球藻在黑暗胁迫下的超补偿生长响应. *暨南大学学报(自然科学与医学版)*, 2005, 26(3): 412-416.
- [16] 刘晓娟, 段舜山, 李爱芬. 绿色巴夫藻在 UV-B 胁迫后的生长补偿效应. *生态学报*, 2006, 26(6): 1763-1771.
- [18] 陈雪初, 孙扬才, 曾晓文, 李春杰, 孔海南. 低光照度对源水中铜绿微囊藻增殖的抑制作用. *中国环境科学*, 2007, 27(3): 352-355.
- [19] 吴溶, 崔莉凤, 卢珊, 时寅. 温度光照对铜绿微囊藻生长及藻毒素释放的影响. *环境科学与技术*, 2010, 33(6): 33-36.
- [22] 王海洋, 杜国祯, 任金吉. 种群密度和施肥对垂穗披碱草刈割后补偿作用的影响. *植物生态学报*, 2003, 27(4): 477-483.
- [24] 谭啸, 孔繁翔, 于洋, 史小丽, 张民. 升温过程对藻类复苏和群落演替的影响. *中国环境科学*, 2009, 29(6): 578-582.
- [25] 汤俊, 宋立荣, 孙松松, 魏海慧, 万能. 低光低温联合作用对铜绿微囊藻复苏能力的影响. *环境科学*, 2010, 31(12): 2933-2937.
- [26] 胡小贞, 金相灿, 储昭升, 马祖友, 易文利. 太湖铜绿微囊藻与四尾栅藻的光竞争及模拟优势过程初探. *农业环境科学学报*, 2005, 24(3): 538-543.
- [27] 邢鹏, 孔繁翔, 曹焕生, 张民. 太湖浮游细菌与春末浮游藻类群落结构演替的相关分析. *生态学报*, 2007, 27(5): 1696-1702.
- [28] 张志兵, 施心路, 刘桂杰, 杨仙玉, 王娅宁, 刘晓江. 杭州西湖浮游藻类变化规律与水质的关系. *生态学报*, 2009, 29(6): 2980-2987.
- [40] 梁文艳, 王珂, 阮清鸳, 王金丽. TTC-脱氢酶还原法测定铜绿微囊藻活性. *环境科学学报*, 2008, 28(9): 1745-1750.

参考文献:

- [1] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考. *生态学报*, 2005, 25(3): 589-595.
- [2] 孔繁翔, 马荣华, 高俊峰, 吴晓东. 太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践. *湖泊科学*, 2009, 21(3): 314-328.
- [4] 王长友, 于洋, 孙运坤, 李洪利, 孔繁翔, 张民, 史小丽, 阳振. 基于 ELCOM-CAEDYM 模型的太湖蓝藻水华早期预测探

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.5 Mar., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Advance in the study on drought index LI Bozhen, ZHOU Guangsheng (1043)
- State-of-the-art review of the impact of climatic change on bioavailability of mineral elements in crops
..... LI Longqing, WU Zhengyun, ZHANG Qiang, et al (1053)
- Mechanism, hypothesis and evidence of herbivorous insect-host interactions in forest ecosystem
..... ZENG Fanyong, SUN Zhiqiang (1061)
- Approach of nematode fauna analysis indicate the structure and function of soil food web
..... CHEN Yunfeng, HAN Xuemei, LI Yufei, et al (1072)
- A spatial econometric analysis of water footprint intensity convergence on a provincial scale in China
..... ZHAO Liangshi, SUN Caizhi, ZHENG Defeng (1085)
- Pattern dynamics of vegetation coverage of Plateau Valley-City in the Western China; a case study in Xining
..... GAO Yun, XIE Miaomiao, FU Meichen, et al (1094)
- Scale effect analysis of the influence of land use and environmental factors on surface soil organic carbon; a case study in the
hilly and gully area of Northern Shaanxi Province ZHAO Mingyue, ZHAO Wenwu, ZHONG Lina (1105)
- Effects of *Eisenia foetida* and *Amyntas morrisi* on the chemical and biological properties of soil amended with the paper mill
sludge CHEN Xufei, ZHANG Chi, DAI Jun, et al (1114)

Autecology & Fundamentals

- Regulation of potassium supply and signal inhibitors on acetate effluxes by ectomycorrhizal fungi
..... YANG Hongjun, LI Yong, YUAN Ling, et al (1126)
- Arsenic induces guard cell death in leaf epidermis of *Vicia faba* XUE Meizhao, YI Huilan (1134)
- Identification and characteristics of phenol degrading bacteria ad049 screened from oil contaminated soil
..... HU Ting, GU Jie, ZHEN Lisha, YANG Jiu, et al (1140)
- Physiological response of *Medicago sativa* L. to copper stress by FTIR spectroscopy
..... FU Chuan, YU Shunhui, HUANG Yimin, et al (1149)
- Effects of sowing date on 2-acetyl-1-pyrroline content and yield of late season aromatic rice
..... YANG Xiaojuan, TANG Xiangru, WEN Xiangcheng, et al (1156)
- Effects of exogenous calcium (Ca) on tolerance of *Allium cepa* var. *agrogarum* L. to cadmium (Cd) stress
..... WANG Qiaoling, ZOU Jinhua, LIU Donghua, et al (1165)
- The study of *Vitex negundo* shrubs canopy biomass inversion in Beijing Jundu mountainous area based on vegetation indices
..... GAO Mingliang, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji, et al (1178)
- Comparison study of sulfur dioxide resistance of three warm-season turf grasses LI Xi, WANG Lihua, LIU Wei, et al (1189)
- Geostatistical analysis on spatial dynamics of the apterous *Myzus persicae* in flue-cured tobacco fields of Enshi tobacco area, China ...
..... XIA Pengliang, WANG Rui, WANG Changjun, et al (1198)
- Patterns of seed predation and removal of Mongolian oak (*Quercus mongolica*) by rodents
..... ZHANG Jinghong, LIU Bingwan (1205)
- Effect of available burrow densities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of dominant
plants and soil in alpine meadow LI Qianqian, ZHAO Xu, GUO Zhenggang (1212)

- Overcompensation and competitive effects of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus* after low temperature and light stresses XIE Xiaoling, ZHOU Rong, DENG Zifa (1224)

Population, Community and Ecosystem

- The main nest predators of birds breeding in artificial nest-boxes and its influencing factors ZHANG Lei, LI Donglai, MA Ruiqiang, et al (1235)
- Temporal and spatial variation of macrobenthic communities in the intertidal zone of Xunpu, Quanzhou Bay ZHUO Yi, CAI Lizhe, GUO Tao, et al (1244)
- The influence of variables at different scales on stream benthic macroinvertebrates in Luanhe River Basin ZHANG Haiping, WU Dayong, WANG Zhaoming, et al (1253)
- Relationships between environmental variables and seasonal succession in phytoplankton functional groups in the Hulan River Wetland LU Xinxin, LIU Yan, FAN Yawen (1264)
- Habitat assessment of sika deer (*Cervus nippon*) in the Taohongling National Nature Reserve, Jiangxi Province, China LI Jia, LI Yankuo, MIAO Lujun, et al (1274)

Landscape, Regional and Global Ecology

- The comprehensive geographical regionalization of China supporting natural conservation GUO Ziliang, CUI Guofa (1284)
- Response of vegetation coverage to climate change in Mongolian Plateau during recent 10 years MIAO Lijuan, JIANG Chong, HE Bin, et al (1295)
- Impact analysis of human activities and climate change on Honghu lake's spring drought LIU Kequn, LIANG Yitong, ZHOU Jinlian, et al (1302)
- Lakes evolution of central Wuhan during 2000 to 2010 DAN Yongli, WANG Hongzhi, ZHANG Huan, et al (1311)

Resource and Industrial Ecology

- The spatial distribution of *Ophiocordyceps sinensis* suitability in Sanjiangyuan Region ... LI Fen, WU Zhifeng, XU Cui, et al (1318)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 象伟宁

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 5 期 (2014 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 5 (March, 2014)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@ cspg. net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@ cspg. net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元