

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM_{2.5} 的影响 陈国磊,周颖,程水源,杨孝文,王晓琦(4069)

浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数 姚轶,王浙明,何志桥,徐志荣,顾震宇(4080)

山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献 闫雨龙,彭林(4086)

某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析 高松,崔虎雄,伏晴艳,高爽,田新愿,方方,衣学文(4094)

加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用 黄玉虎,常耀卿,任碧琪,秦建平,胡玮,刘明宇(4103)

北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究 崔彤,李金香,杨妍研,程刚(4110)

西安市人为源大气氨排放清单及特征 苏航,闫东杰,黄学敏,宋文斌,王惠琴,宋雪娟(4117)

佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究 周雪明,项萍,段菁春,贺克斌,马永亮,邓思欣,司徒淑婷,谭吉华(4124)

天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析 赵梦雪,吴琳,方小珍,杨志文,李凤华,毛洪钧(4133)

戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点 袁磊,李文周,陈文伟,张金波,蔡祖聪(4142)

青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究 孟祥斌,李孟哲,李鸿涛,高冬梅,祁建华(4147)

玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成 刘刚,孙丽娜,徐慧,李久海,李中平,李立武(4156)

极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析 张成,吕新彪,龙丽,张军伟,穆晓辉,李迎晨,王圣瑞,张文丽,肖尚斌(4162)

典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征:基于沿岸生态系统分析 陈雪霜,江韬,卢松,白薇扬,张成,王定勇,魏世强(4168)

西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析 陈诗文,袁旭音,金晶,李正阳,许海燕(4179)

周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析 张春华,黄廷林,方开凯,周石磊,夏超(4187)

太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征 董丹萍,章婷曦,张丁予,王巧云,李德芳,王国祥(4194)

多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响 蔡顺智,李大鹏,王忍,刘焱见,徐垚,于胜楠,黄勇(4203)

丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化 王伟,于兴修,汉强,刘航,徐苗苗,任瑞,张家鹏(4212)

营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响 岳冬梅,李洁,肖琳(4220)

氯灭活地下水源中3种优势真菌的效能与机制 文刚,朱红,黄廷林,赵建超,任崑,徐向前(4228)

净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析 马晓琳,陆洋,王钰,侯誉,白晓慧(4235)

单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化 敖秀玮,李豪杰,刘文君,余京儒(4241)

三维有序介孔 Co₃O₄ 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B 冯善方,邓思萍,杜嘉雯,马晓雁,卢遇安,高乃云,邓靖(4247)

调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4255)

初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N₂O 释放的影响 付昆明,王会芳,苏雪莹,周厚田(4261)

3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性 张娅,郝瑞霞,徐鹏程,徐忠强(4268)

基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制 范军辉,郝瑞霞,李萌,朱晚霞,万京京(4275)

基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究 程朝阳,赵诗惠,吕亮,吴鹏,沈耀良(4282)

中温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响 袁砚,朱亮(4289)

生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响 崔延瑞,邱鑫,张庆荣,王琦,吴青,孙剑辉(4296)

ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究 周健,完颜德卿,黄勇,刘忻,袁怡,李祥,姚鹏程,杨朋兵,薛鹏程(4302)

间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究 董宝刚,宋小燕,刘锐,川岸朋树,张永明,陈吕军(4309)

应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥 何晶晶,王颖,胡洁,吕凡,邵立明(4317)

应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋 薛南冬,陈宣宇,杨兵,秦普丰,龙雨(4326)

南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征 苗迎,孔祥胜(4333)

杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平 金漫彤,滕丹丹,郑艳霞,胡张璇,沈学优,金赞芳(4341)

应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数 王佳怡,毕二平(4349)

表流湿地细菌群落结构特征 魏佳明,崔丽娟,李伟,雷茵茹,于菁菁,秦鹏,穆泳林,梁钊瑞(4357)

城市污水中硝化菌群落结构与性能分析 于莉芳,杜倩倩,傅学焘,张茹,李文江,彭党聪(4366)

DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响 王聪,吴讷,侯海军,汤亚芳,沈健林,秦红灵(4372)

培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响 刘畅,黄雅丹,张莹,靳振江,梁月明,宋昂,王腾,郭佳怡,李强(4380)

1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定 陶兰兰,向玉萍,王定勇,黄曼琳,申鸿(4389)

北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征 张兰河,王佳佳,哈雪姣,邱孟超,高敏,仇天雷,王旭明(4395)

梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征 黄福义,安新丽,陈青林,任红云,苏建强(4402)

几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比 霍婷婷,董发勤,邓建军,张青碧,贺小春,孙东平(4410)

添加复合吸附剂对土壤吸附非和 Cr(VI) 的影响 李文斌,孟昭福,吴琼,许绍娥,刘泽(4419)

生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响 张振国,蒋煜峰,慕仲锋,孙航,周琦,展惠英(4428)

集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应 王昌江,施成晓,冯帆,陈婷,张磊,吕晓康,王伟,廖允成(4437)

秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响 黄容,高明,万毅林,田冬,陶睿,王芳丽(4446)

《环境科学》征稿简则(4161) 《环境科学》征订启事(4365) 信息(4123,4132,4409)

营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响

岳冬梅, 李洁, 肖琳*

(南京大学环境学院, 污染控制与资源化国家重点实验室, 南京 210023)

摘要: 在自然水体中微囊藻经常经历营养盐的限制和再补充, 营养盐浓度的波动影响着微囊藻的生长和暴发. 本文利用¹⁴C标记和荧光定量 PCR 研究了营养盐恢复对氮磷饥饿的铜绿微囊藻细胞生理和光合作用相关基因表达的影响. 结果表明经过氮磷饥饿的铜绿微囊藻在补充营养盐后, 都能快速生长, 氮饥饿的藻细胞生长更快, 但其经过快速增长长期后很快开始衰亡. 补充营养盐后, 经过磷饥饿的藻细胞固碳能力和光合作用相关基因表达很快恢复至未经饥饿藻细胞的水平, 而经过氮饥饿的藻细胞其固碳能力和相关基因虽然有很大提升, 却难以恢复至未经饥饿的藻细胞的水平. 这可能也是氮饥饿的藻细胞在饥饿解除后虽然能暂时地快速生长, 但很快又进入衰亡的原因之一.

关键词: 铜绿微囊藻; 碳固定; 光合作用相关基因; 氮磷饥饿; ¹⁴C 标记

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4220-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201603082

Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved *Microcystis aeruginosa*

YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin*

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: *Microcystis* in natural water bodies may frequently go through periods of nutrient limitation and then may recover when the limited nutrient becomes available. We investigated changes in cell physiology and expression of photosynthesis-related genes during the recovery of *Microcystis aeruginosa* from nitrogen starvation and phosphorus starvation with the method of ¹⁴C isotope and fluorescent quantitative PCR. Our results suggested that *Microcystis* cells relieved from N starvation and P starvation resumed growth within 24 h and displayed significantly higher growth rates than not-starved-cells in the first 48 h. Carbon production rates and the expression levels of photosynthesis-related genes all increased rapidly after relieving from N starvation and P starvation in different degrees, enabling the rapid recovery from nutrient starvation. However, N-starved cells can not resume their cellular activity to full capacity when N became available and the damage of N deficiency to *M. aeruginosa* was unrecoverable, whereas cellular activity of P-starved cells could recover to normal properties.

Key words: *Microcystis aeruginosa*; carbon fixation; photosynthesis-related genes; nitrogen and phosphorus starvation; ¹⁴C isotope

氮、磷水平对水华蓝藻的生长及水华的暴发起着重要作用, 但即便是在富营养化的湖泊, 微囊藻的生长也存在着氮、磷限制的状况^[1,2]. 但水体是一个开放的体系, 营养盐限制不仅会存在季节性的波动^[1,2], 在短期内, 受营养盐限制的藻也可能因营养盐的再输入或迁移至营养盐丰富的湖区而使限制得以解除, 进而恢复生长. 了解营养盐限制解除后, 水华蓝藻生长的恢复情况, 有助于了解自然水体中蓝藻水华的动态, 还能为进一步了解水华蓝藻应对营养盐限制的能力提供重要信息, 从而进一步了解营养盐在水华发生中的作用.

但是关于营养盐限制解除后蓝藻的生长情况, 研究者关注的较少. 在有限的研究中, 关于氮限制后蓝藻的恢复情况, 研究者主要关注细胞内含氮大分子如藻蓝蛋白、藻青素的合成情况及光合作用的恢复情况等, 且都是观察营养盐恢复后蓝藻在短

间内的响应(40 h 以内)^[3~5]. 而关于营养盐饥饿后蓝藻生长的恢复情况, 李杰等^[6]观测了铜绿微囊藻经过 30 d 的氮磷饥饿, 重新转入正常条件下培养后其 Chl-a 的恢复情况. 而关于铜绿微囊藻在经受氮磷饥饿后, 其生长、光合作用等恢复情况的细致研究还未见报道.

本文以经受氮磷饥饿的铜绿微囊藻为研究对象, 观测其在营养盐得到补充后生长的恢复情况, 并结合其光合能力及光合作用关键基因的表达情况两方面对其生长的恢复进行阐述.

收稿日期: 2016-03-10; 修订日期: 2016-06-02

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101006); 国家自然科学基金项目(41071313)

作者简介: 岳冬梅(1986~), 女, 博士, 主要研究方向为蓝藻生理, E-mail: qiushanmu@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xiaolin@nju.edu.cn

1 材料与方法

1.1 藻细胞培养

铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa* 469, 购自中国科学院武汉水生生物研究所) 用 BG-11 培养基在 28℃, 光照强度 $60 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 光照周期 12 h: 12 h 的条件下培养. 对数期时离心收集藻细胞, 并用灭菌的不含氮磷的 BG-11 培养基洗涤 3 次. 然后重新接种至以下 3 个处理组的培养基中: Control (BG-11 培养基)、-N (不含氮的 BG-11 培养基) 和 -P (不含磷的 BG-11 培养基), 每个处理组 3 个平行. 培养 7 d 后, 离心收集各个处理组的藻细胞, 用各自相应的培养基洗涤后, 将各个处理组的细胞密度调整在一致水平上, 转入 BG-11 培养基中培养. 每个处理组 3 个平行. 分别在营养盐恢复后的 0、2、6、24、48、96、144 h 取样测定各指标.

1.2 ^{14}C 同位素标记法测定藻细胞的碳固定速率

(1) $\text{Na}_2^{14}\text{CO}_3$ 储备液的配置

将 $\text{Ca}_2^{14}\text{CO}_3$ (8.4 g , $7.6 \mu\text{Ci} \cdot \text{g}^{-1}$, 由南京大学环境学院季荣教授提供, Ci 为放射性活度单位) 和 NaOH 溶液 (100 mL , $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 分别放入 H 瓶左右两边, 塞好橡胶塞, 并用石蜡密封后, 用注射器缓缓将过量的 H_2SO_4 加入到 CaCO_3 中, 反应过程中进行磁力搅拌, 平衡约 20 h 后将制备的碱性 $\text{Na}_2^{14}\text{CO}_3$ 溶液转移至蓝盖玻璃瓶 (Duran) 中, 4℃ 保存.

(2) 样品测定

取 30 mL 样品, 离心收集藻细胞, 用新鲜 BG-11 培养基 (不含 Na_2CO_3) 洗涤两次后, 重悬在等量的新鲜 BG-11 培养基 (不含 Na_2CO_3) 中, 添加 $\text{Na}_2^{14}\text{CO}_3$ ($50 \mu\text{Ci} \cdot \text{mL}^{-1}$) 后培养 1 h (光照温度同); 然后离心收集藻细胞, 加 2 mL $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl, 在通风橱中过夜酸化, 以去除残余的碳酸; 将样品转移至液闪瓶中, 加 8 mL 液闪液, 混匀并平衡 10 min 后, 用液闪计数器测放射性强度.

1.3 藻细胞计数

采集的样品用终浓度 1.5% 的鲁哥氏碘液固定, 静置 48 h 后, 虹吸走上清液浓缩样品, 用血细胞计数板在 Zeiss 显微镜 (Zeiss Axio image A1) 下放大 400 倍进行计数.

1.4 叶绿素 a 测定

测定 Chl-a 的水样经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后收集滤膜, 用 90% 的丙酮在 4℃ 冰箱提取 24 h 后离心, 取上清用分光光度法测定.

1.5 细胞内活性氧 (ROS) 的测定

2',7'-Dichlorofluorescein diacetate (DCFH-DA) 本身没有荧光, 是非离子、非极性的化合物, 可以自由穿过细胞膜, 进入细胞后被细胞内的酯酶水解成 DCFH; DCFH 不能穿过细胞膜, 本身也不发荧光, 但能被多种 ROS 氧化成能发射荧光的 2',7'-Dichlorofluorescein (DCF); 因此细胞内 DCF 的荧光强度可以作为衡量细胞内总 ROS 产生量的指标^[7].

DCFH-DA (Sigma) 用乙醇配制成 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的储备液, 避光保存在 -20°C 的冰箱内. 向样品中加入终浓度为 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 DCFH-DA, 室温下摇床震荡避光孵育 1 h, 离心收集藻细胞, 用相应的培养基清洗 3 次. 因为藻细胞有自发荧光, 因此每个样品均设阴性对照, 除了不加 DCFH-DA, 其他处理与加 DCFH-DA 的处理相同. 上流式细胞仪 (BD LSRFortessa), 在激发波长 488 nm, 发射波长 525 nm 下检测细胞内的荧光强度. 每个样品统计 105 个细胞的平均荧光强度值 (峰高) 作为细胞内的荧光强度, 结果以处理组 (加 DCFH-DA) 荧光强度与其对应的阴性对照的荧光强度比值来表示.

1.6 基因表达分析

(1) RNA 提取及反转录

取 40 mL 样品, 离心收集藻细胞, 放入液氮中速冻, 然后用液氮研磨; 用 RNAiso Plus (Takara) 提取细胞总 RNA, 并于 -80°C 保存.

RNA 提取过程中所用器具均按以下方法处理去除 Rnase 污染: 用 0.1% DEPC (焦碳酸二乙酯) 水溶液在 37°C 下处理 12 h, 然后在 120°C 下高压灭菌 30 min 以除去残留的 DEPC. 用于 RNA 实验的试剂均用 RNase-free 水 (Takara) 配置.

取 500 ng RNA 用 Reverse transcriptase kit (TaKaRa) 进行反转录.

(2) 实时定量 PCR (qPCR)

引物参考相关研究或使用 Primer 5.0 软件设计, 详见表 1. 反转录得到的 cDNA 稀释 10 倍后用于实时定量 PCR. 反应体系为 $10 \mu\text{L}$: $5 \mu\text{L}$ SYBR® Premix Ex Taq II (Tli RNaseH Plus), $1 \mu\text{L}$ cDNA, 正反引物 ($10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 表 1) 各 $0.8 \mu\text{L}$, 并用 dH_2O 补足至 $10 \mu\text{L}$. 使用仪器是 Rotor-Gene 6000 thermal cycler (Corbett Research). 扩增条件: 95°C 预变性 1 min 后 40 个循环 (95°C 变性 15 s, 60°C 延伸 1 min). 每个样品重复 3 次. 扩增结束后进行溶解曲线分析扩增特异性: 温度为 $60 \sim 95^\circ\text{C}$. 溶解曲线没有杂峰. 扩增产物进行琼脂糖凝胶电泳, 进一步确

认扩增片段与目的片段长度相符. 以16S rDNA作为内参基因, 结果用 $2^{-\Delta\Delta Ct}$ 方法^[8] 计算各取样点相对于该处理组 0 h 的表达差异或是处理组相对于对照组的表达差异.

表 1 实时定量 PCR 引物

Table 1 The qPCR primers used in this study

基因	引物序列	PCR 产物大小/bp	文献
16S rDNA	Forward: 5'-GCCGCRAGGTGAAAMCTAA-3' Reverse: 5'-AATCCAAARACCTTCCTCCC-3'	240	[9]
<i>psaB</i>	Forward: 5'-CGGTGACTGGGGTGTGTATG-3' Reverse: 5'-ACTCGGTTTGGGGATGGA-3'	153	[9]
<i>psbD</i>	Forward: 5'-TCTTCGGCATCGCTTTCTC-3' Reverse: 5'-CACCCACAGCACTCATCCA-3'	81	[9]
<i>rbcL</i>	Forward: 5'-CGTTTCCCCTGGCTTT-3' Reverse: 5'-CCGAGTTTGGGTTTGATGCT-3'	128	[9]
<i>OCP</i>	Forward: 5'-TTACCAATGCCACCGTCCTC-3' Reverse: 5'-CCTCTTTACCGACGATGGGAC-3'	129	MAE_18910
<i>sodB</i>	Forward: 5'-TACACTGCCTTAGAGCCTTGC-3' Reverse: 5'-CGAGTCCGTATTCTTTGACCA-3'	112	MAE_16920
<i>nblA</i>	Forward: 5'-AAATGAGTCAGGAGCAAGCG-3' Reverse: 5'-CTAGACCCCACTGGTGTGTTGAG-3'	105	MAE_02520

2 结果与分析

2.1 饥饿的铜绿微囊藻在营养盐再补充后生长的恢复情况

营养盐恢复后, 细胞数和叶绿素 a 的变化都表明, 饥饿的铜绿微囊藻仅经过 6 h 的迟缓期后便开始迅速生长, 但对照组却经过 24 h 的迟缓期后才开始生长, 且经营养盐饥饿的处理组生长明显快于对照(图 1 和表 2). 在前 48 h, 从细胞数的变化来看, 经氮饥饿的处理组生长最快, 经磷饥饿的处理组次之, 对照组生长最慢, 生长速率分别为 0.25 、 0.15 、 0.11 d^{-1} , 根据叶绿素 a 计算的生长速率也类似(表 2). 然而, 经氮饥饿的处理组经过 48 h 的快速生长后, 生长开始减缓, 至 144 h 时细胞数显著减少 ($P < 0.01$), 叶绿素 a 也明显降低 ($P < 0.05$), 表明经氮饥饿的处理组在 144 h 时出现衰亡; 而经磷饥饿的处理组在前 96 h 内细胞数都以较稳定的速率进行增长 ($0.12 \sim 0.15 \text{ d}^{-1}$), 随后进入稳定期; 对照组也

未出现衰亡现象(图 1).

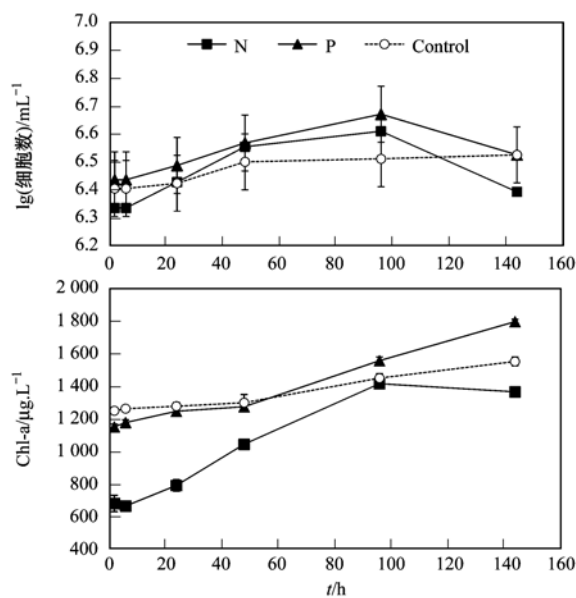


图 1 氮磷饥饿恢复过程中铜绿微囊藻细胞数和叶绿素 a 的变化
Fig. 1 Changes in cell counts and Chl-a concentrations during recovery from nitrogen starvation and phosphorus starvation in *Microcystis aeruginosa*

表 2 各处理组生长速率的变化/ d^{-1} Table 2 Growth rates during recovery from N starvation and P starvation/ d^{-1}

项目	处理组	时间/h					
		0~2	2~6	6~24	24~48	48~96	96~144
根据细胞数计算	-N(N 饥饿)	0	0	0.22	0.25	0.06	-0.25
	-P(P 饥饿)	0	0	0.12	0.15	0.12	0.01
	空白	0	0	0.05	0.11	0.01	0.02
根据 Chl-a 计算	-N(N 饥饿)	0	0	0.15	0.21	0.15	-0.02
	-P(P 饥饿)	0	0	0.02	0.05	0.1	0.07
	空白	0	0	0.02	0.02	0.05	0.03

2.2 饥饿的铜绿微囊藻在营养盐再补充后碳固定速率的变化

单位细胞的碳固定速率显示, 营养盐饥饿时(0 h)碳固定速率显著低于对照($P < 0.05$), 表明氮磷饥饿降低了铜绿微囊藻的碳固定能力. 氮饥饿处理组仅为对照组的 55%, 而磷饥饿的处理组能达对照组的 94% [图 2(a)], 表明氮饥饿比磷饥饿对藻细胞碳固定能力的抑制作用更明显. 补充营养盐 6 h 后, 各个处理组的碳固定速率均开始升高; 经磷饥饿的处理组在 24 h 时已达到对照组的水平; 而经氮饥饿处理组的碳固定速率虽然增加了 2 倍, 但在整个实验期间一直未能达到对照组的水平 [图 2(a)], 表明经氮饥饿的藻细胞的碳固定能力难以恢复至正常水平.

与单位细胞的碳固定速率一致的是, 营养盐饥饿处理时, 营养盐饥饿处理组的单位叶绿素的碳固定速率也显著低于对照($P < 0.05$) [图 2(b)]. 补充营养盐 6 h 后, 各个处理组的碳固定速率也均有所增加 [图 2(b)]. 经磷饥饿的处理组在 24 h 时达到最大值, 达到对照组的水平; 而经氮饥饿的处理组在 48 h 时增加至其最大值, 也达到对照组的水平, 但在 144 h 时开始显著降低($P < 0.01$), 仅为最

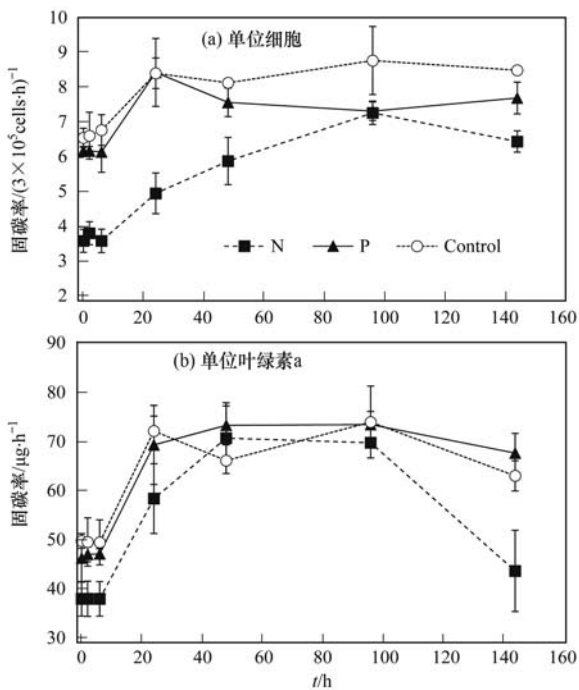


图 2 营养盐恢复后各处理组单位细胞和单位叶绿素 a 的碳固定速率的变化

Fig. 2 Changes in carbon fixation rates normalized by cell counts and total Chl-a during recovery from nitrogen starvation and phosphorus starvation in *Microcystis aeruginosa*

大值的 63% [图 2(b)].

2.3 饥饿的铜绿微囊藻在营养盐再补充后细胞内藻蓝蛋白和叶绿素恢复情况

从图 3 可以看出, 在 0 h 还未补充营养盐时, 氮饥饿处理组的细胞内藻蓝蛋白和叶绿素含量均显著低于对照($P < 0.01$); 而磷饥饿处理组则与对照无显著性差异($P > 0.05$). 补充营养盐后, 经氮饥饿处理的铜绿微囊藻细胞内藻蓝蛋白和叶绿素含量均立刻迅速增加, 至 24 h 达到其最大值, 但最大值依然显著低于对照组($P < 0.01$); 而经磷饥饿的处理组则一直与对照类似($P > 0.05$).

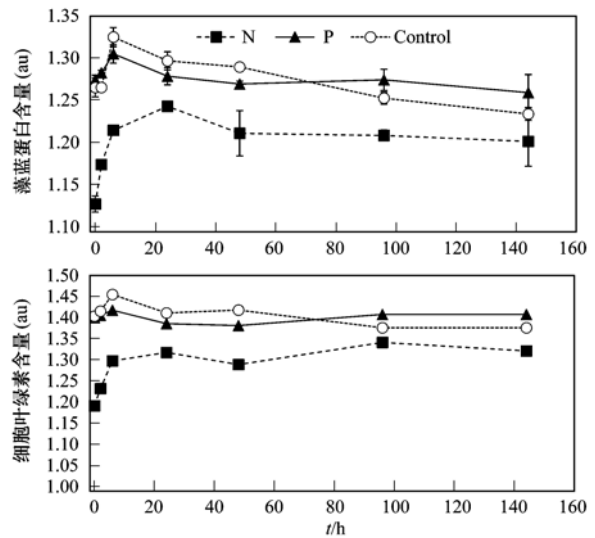


图 3 营养盐恢复后各处理组细胞内藻蓝蛋白和叶绿素的变化
Fig. 3 Changes in cellular Chl-a content and cellular phycocyanin content during recovery from nitrogen starvation and phosphorus starvation in *Microcystis aeruginosa*

2.4 饥饿的铜绿微囊藻在营养盐再补充后细胞内 ROS 积累的变化

如图 4 所示, 在前 24 h 内, 经氮饥饿处理的藻细胞内 ROS 积累显著高于对照($P < 0.01$). 48 h 时, 经氮饥饿处理的藻细胞内 ROS 积累量下降至对照组水平. 而经磷饥饿处理的则一直与对照组无显著性差异($P > 0.05$).

2.5 基因表达

在 0 h 时, 氮饥饿处理组中, PS I 关键基因 *psaB* 的表达显著下调(2 倍), 表明 PS I 的合成下调; 藻胆体降解基因 *nbla* 的表达则显著上调(2.5 倍), 表明氮饥饿促进藻胆体的降解; 而 PS II 关键基因 *psbD* 和碳固定关键基因 *rbcL* 的表达与对照相比则无显著性差异(图 5). 磷饥饿处理组中, 光合作用相关基因(*psaB*、*psbD*、*rbcL*、*nbla*)的表达与对照相比则均无显著性差异(图 5). 光保护相关基因 *OCPI*

的表达在氮饥饿和磷饥饿处理组中均有所上调(1.2~1.4倍).

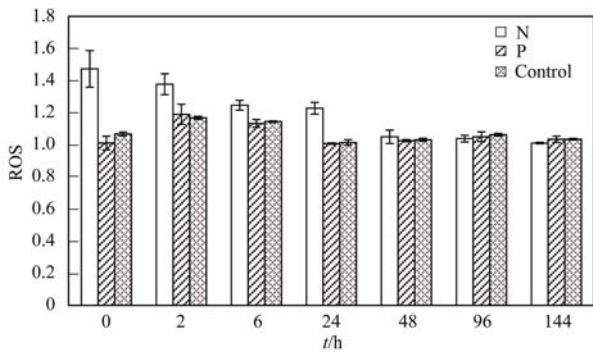


图4 营养盐恢复后各处理组藻细胞内 ROS 积累量的变化

Fig. 4 Changes in cellular ROS accumulation during recovery from nitrogen starvation and phosphorus starvation in *Microcystis aeruginosa*

营养盐重新补充后,与0 h相比,各个处理组中 *psaB*、*psbD*、*rbcl* 的表达量均立刻上调,经氮饥饿的处理组上调幅度最大,且基本能在6 h内达到其最大值(图6),表明细胞内 PS I、PS II 和碳固定组件等的数量在补充营养盐后迅速增加. 经氮饥饿的处理组中,*psaB* 在2 h后开始上调,6~24 h时达到其最大值,随后表达量开始回落;*psbD* 的表达量在2 h

时已达到其最大值,随后表达量趋于接近0 h水平;*rbcl* 的表达在营养盐重新补充后迅速急剧上调,上调量达206~248倍(2~24 h),虽然24 h之后上调幅度有所降低,但依然能达52~114倍(48~96 h)(图6). 经磷饥饿的处理组中,*psaB* 和 *psbD* 的表达量在补充磷源后虽然也迅速发生上调,但其表达情况与对照组类似;*rbcl* 的表达量在补充磷源后也迅速上调,但上调幅度远低于经氮饥饿的处理组,在2 h时达到最大值(8倍),随后上调幅度开始缓缓降低,但始终高于0 h的表达量(5~1.7倍). 对照组中,*rbcl* 的表达量虽然也有所上调,但其上调幅度远低于经氮磷饥饿的处理组. 经氮饥饿的处理组在重新补充营养盐后,*nblA* 的表达量立刻下调,结合细胞内藻蓝蛋白含量的增加可知,藻胆体的数量在增加,表明藻细胞的光捕获能力增强. 而经磷饥饿的处理组则未发生显著性变化,与对照组的变化趋势一致(图6). 在各个处理组中,*OCP* 与 *sodB* 表达水平的变化相似(图6). 经氮饥饿的处理组中,均在2 h时发生上调(2.1~2.9倍),随后其表达水平趋向于接近0 h水平;经磷饥饿的处理组中其表达水平的变化与对照基本一致.

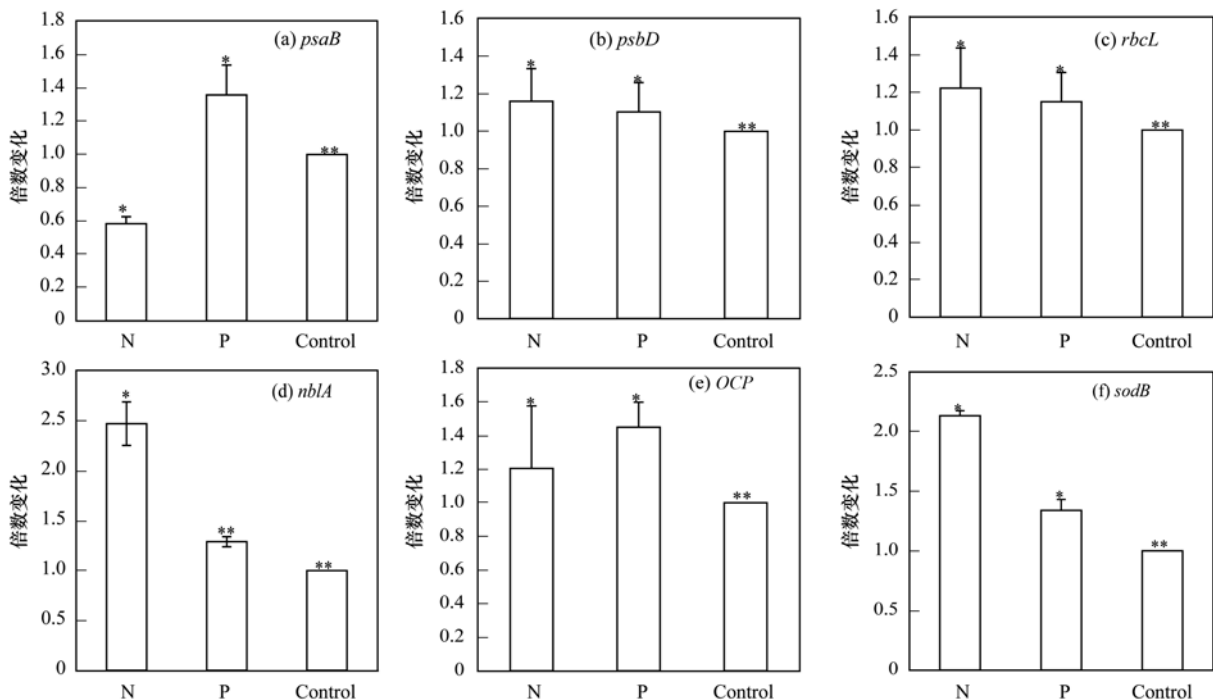


图5 氮磷饥饿条件下铜绿微囊藻 *psaB*、*psbD*、*rbcl*、*nblA*、*OCP* 及 *sodB* 基因相对于对照组的表达差异

Fig. 5 Expression of *psaB*, *psbD*, *rbcl*, *nblA*, *OCP*, *sodB* under N starvation and P starvation in *M. aeruginosa* compared to the control

3 讨论

胁迫条件下如氮磷饥饿、低温、低光等,铜绿

微囊藻及其他一些真核藻类如蛋白核小球藻、斜生栅藻等的生长会减缓,但当胁迫解除后,藻细胞会逐步恢复其生长能力,且经过胁迫的藻细胞的生长速

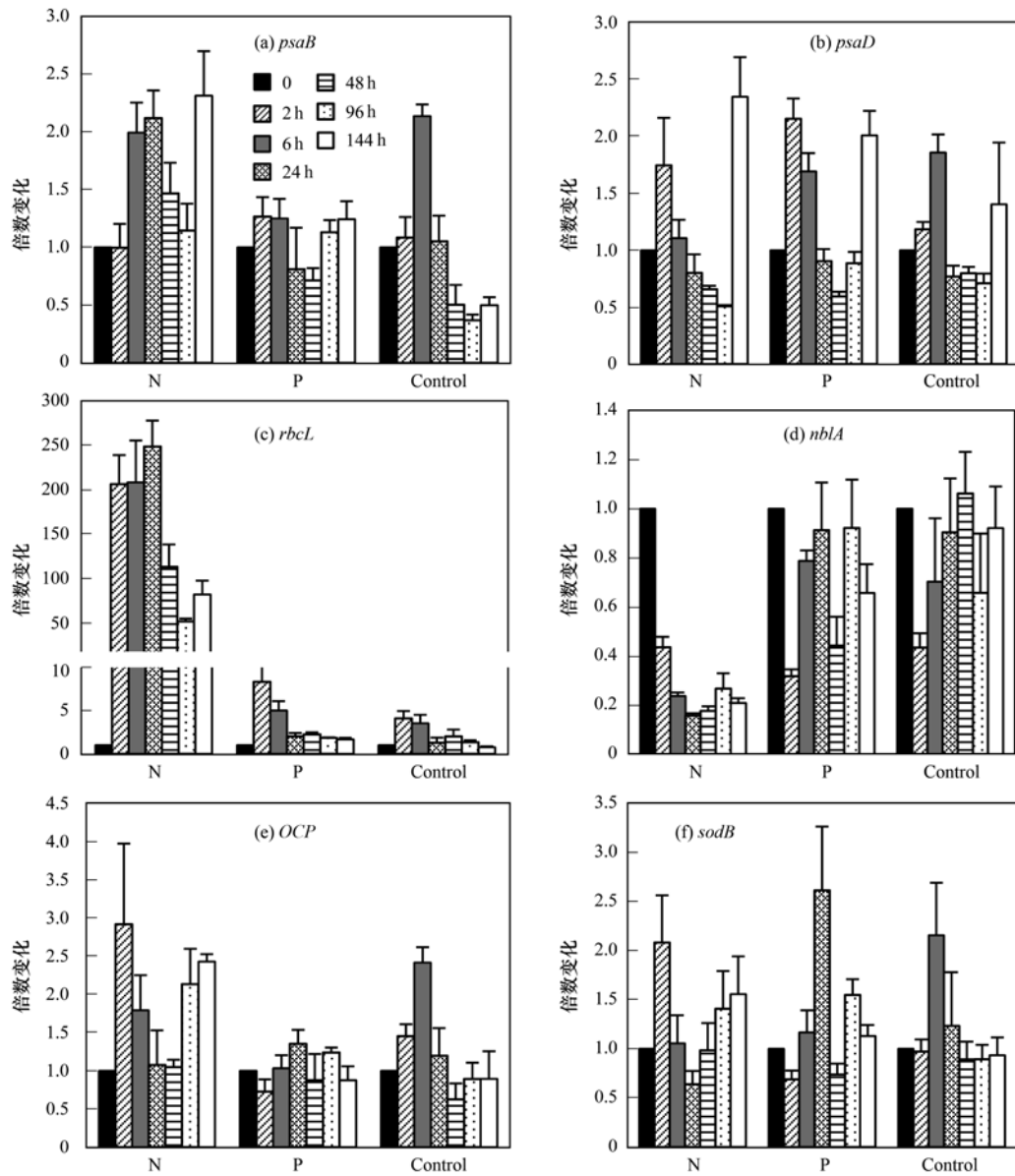


图 6 氮磷饥饿恢复过程中铜绿微囊藻 *psaB*、*psbD*、*rbcL*、*nblA*、*OCP* 及 *sodB* 基因相对于对照组的表达差异

Fig. 6 Expression of *psaB*, *psbD*, *rbcL*, *nblA*, *OCP*, *sodB* during recovery from N starvation and P starvation in *M. aeruginosa* compared to 0 h

率会超过未经过胁迫处理的藻细胞^[6,10-12]。本研究也表明,经过氮磷饥饿的铜绿微囊藻在营养盐恢复后,经过6 h的迟缓期后能很快开始生长,且生长速率显著高于未经饥饿处理的铜绿微囊藻,尤其是经过氮饥饿处理的藻细胞生长最快(图1和表2)。总体来看,胁迫时生长受抑制越严重,在胁迫解除后生长速率越高,这与前人的研究结果类似^[6,10-12]。但经过氮饥饿的铜绿微囊藻在经过短暂的快速增长后,很快开始衰亡,而此时,经磷饥饿处理和未经饥饿处理的铜绿微囊藻却还在维持缓慢的增长(图1和表2)。

光合作用是光合生物的中心代谢途径,是其生

长的能量来源和物质基础。氮饥饿铜绿微囊藻的碳固定能力显著下降,磷饥饿时其固碳能力则仅仅轻微下调[图2(a)],与氮磷饥饿时铜绿微囊藻的生长情况相一致^[13]。光能驱动光反应产生ATP和还原力。光合生物要协调光能的输入使光反应产生的还原力的量与细胞代谢能力相一致,既要保证有足够的量来满足细胞的生长代谢,又要避免过量,以免导致活性氧的过量积累^[14]。碳、氮同化是光反应产生的还原力最主要的汇。氮饥饿时,氮的同化很显然会大大减少,而碳的同化也显著降低(图2),因此藻细胞对还原力的需求会随之减少。氮饥饿的藻细胞藻胆体发生降解(图3),削弱了藻细胞的光捕获

能力,从根本上减少了光能的输入. 氮饥饿藻细胞中,PS I 的合成也发生下调(图 5),由于 PS I 提供还原力,因而 PS I 的合成下调可能进一步减少还原力的产生. 强光条件下,蓝藻会通过抑制 PS I 的合成,降低 PS I/PS II 的比值来优化光合电子传递^[15,16]. 此外,氮饥饿藻细胞内超氧化物歧化酶相关基因的表达水平(图 5)也相应上调. 并且,氮磷饥饿时,*OCP* 的表达水平^[13]和其基因的表达水平(图 5)也显著上调,以耗散掉吸收的过量的能量. 从而,从多个方面来维持细胞内的氧化还原稳态. 但是,氮饥饿藻细胞中 ROS 的积累依然显著高于未经饥饿的藻细胞(图 4). 许多研究表明,氮限制会影响细胞的氧化还原稳态^[17,18]. 蛋白组研究表明,氮饥饿会在翻译后水平上改变原绿球藻(*Prochlorococcus*)多种代谢关键蛋白的氧化还原状态^[15]. 磷饥饿时,藻细胞内 ROS 水平与未经饥饿的藻细胞类似(图 4).

营养盐恢复后,经过饥饿处理的藻细胞的碳固定能力在经过 6 h 的迟缓期后均迅速增加,尤其是经氮饥饿的藻细胞增加幅度最大(图 2),这为饥饿后细胞的快速增长提供了物质基础. Allen 等^[4]研究表明,经过氮饥饿的集胞藻在重新补充氮源后,光合产氧能力立刻增加,固碳能力却在 2~4 h 后才开始增加,认为光反应产生的还原力优先用于其他的代谢过程如氮的同化,然后再用于碳的固定. 经过氮饥饿的铜绿微囊藻,其 PS I、PS II 及碳固定关键基因的表达水平在补充氮源后均立刻上调,尤其是碳固定基因的表达水平上调了约 250 倍(图 6),表明光合作用机构的数量在增加. 细胞内叶绿素和藻胆体的量也同步增加(图 3),进而增强了藻细胞的光捕获能力. 这些为提高整体光合能力提供了物质基础. 经过磷饥饿的藻细胞,其 PS I、PS II 及碳固定关键基因的表达水平也有所上调,但上调程度低于经氮饥饿处理的藻细胞,碳固定基因的表达仅上调 8 倍(图 6),这与经氮磷饥饿的藻细胞碳固定能力的上调程度相一致(图 2).

但是,营养盐补充后,经过磷饥饿的铜绿微囊藻的固碳能力很快恢复至未经饥饿的藻细胞的水平,而经过氮饥饿的藻细胞其固碳能力虽然有很大提升,却难以恢复至未经饥饿的藻细胞的水平(图 2). 蓝藻中基本所有叶绿素分子都存在于光化学作用中心复合体(光系统)中^[19]. 因此,叶绿素水平能在一定程度上反映细胞内光系统的数量^[16],也就是光合单位的数量. 单位叶绿素的碳固定速率恢复至未经

饥饿的水平,这很可能表明细胞内每个光合单位的碳固定能力已恢复至正常水平. 但是,虽然经氮饥饿的藻细胞内叶绿素含量在补充氮源后迅速增加,24 h 时增加至最大值,但仍显著低于未经饥饿藻细胞的水平(图 3),表明经氮饥饿的藻细胞的光合单位的数量可能难以恢复至未经饥饿的藻细胞的水平. 因此,藻细胞的碳固定能力难以恢复至未经饥饿的藻细胞的水平. Krasikov 等^[20]研究表明,氮饥饿条件下,PS I 和 PS II 均能保持很好的活性. 许多现场研究和实验室研究都表明,PS II 反应中心的活性对氮限制不敏感^[21~23]. 氮饥饿条件下,PS I 和 PS II 的数量虽然能大量减少,但 PS II 反应中心还能保持正常的光合活性^[24].

总体来说,氮饥饿对铜绿微囊藻的光合作用能力的影响是不可恢复的. 王雨等^[25]的研究也表明,经过氮磷饥饿的威氏海链藻,在营养盐恢复后,胞内蛋白和可溶性糖含量依然低于未经饥饿的水平,生理活性无法恢复. 此外,单位叶绿素的碳固定速率在 96 h 后开始急剧降低(图 2),这可能与 96 h 细胞开始出现衰亡有一定联系.

4 结论

经氮磷饥饿的铜绿微囊藻在补充营养盐后,均能快速开始生长,且经氮饥饿的铜绿微囊藻生长速率更快. 经过氮磷饥饿的铜绿微囊藻其碳固定能力均迅速增加,为藻细胞的快速生长提供了物质基础. 经磷饥饿的藻细胞的固碳能力和光合作用相关基因的表达很快增加至未经饥饿的藻细胞的水平;而经氮饥饿的藻细胞的光合作用相关基因,尤其是碳固定基因的表达显著上调,但固碳能力却难以恢复至未经饥饿的藻细胞的水平. 经氮饥饿的铜绿微囊藻经过短暂的快速增长后,很快进入衰亡阶段.

参考文献:

- [1] Moisaner P H, Ochiai M, Lincoff A. Nutrient limitation of *Microcystis aeruginosa* in northern California Klamath River reservoirs[J]. *Harmful Algae*, 2009, **8**(6): 889-897.
- [2] Xu H, Paerl H W, Qin B Q, et al. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China[J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(1): 420-432.
- [3] Allen M M, Hutchison F. Nitrogen limitation and recovery in the cyanobacterium *Aphanocapsa* 6308 [J]. *Archives of Microbiology*, 1980, **128**(1): 1-7.
- [4] Allen M M, Law A, Evans E H. Control of photosynthesis during nitrogen depletion and recovery in a non-nitrogen-fixing cyanobacterium[J]. *Archives of Microbiology*, 1990, **153**(5):

- 428-431.
- [5] 周庆, 韩士群, 严少华, 等. 凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 597-604.
- [6] 李杰, 欧丹云, 宋立荣. 微囊藻衰亡过程研究——四种模拟胁迫条件下微囊藻的衰亡生理[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(5): 549-555.
- [7] Wang H, Joseph J A. Quantifying cellular oxidative stress by dichlorofluorescein assay using microplate reader [J]. Free Radical Biology and Medicine, 1999, **27**(5-6): 612-616.
- [8] Livak K J, Schmittgen T D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the method [J]. Methods, 2001, **25**(4): 402-408.
- [9] Qian H F, Hu B L, Yu S Q, *et al.* The effects of hydrogen peroxide on the circadian rhythms of *Microcystis aeruginosa* [J]. PLoS One, 2012, **7**(3): e33347.
- [10] 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[J]. 生态学报, 2014, **34**(5): 1224-1234.
- [11] 汤俊, 宋立荣, 孙松松, 等. 低光低温联合作用对铜绿微囊藻复苏能力的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(12): 2932-2937.
- [12] 王健, 周天艺, 高文程, 等. 低氧化还原电位对铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 生长的抑制及恢复的影响[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(4): 528-534.
- [13] Yue D M, Peng Y K, Yin Q, *et al.* Proteomic analysis of *Microcystis aeruginosa* in response to nitrogen and phosphorus starvation [J]. Journal of Applied Phycology, 2015, **27**(3): 1195-1204.
- [14] Schwarz R, Forchhammer K. Acclimation of unicellular cyanobacteria to macronutrient deficiency: emergence of a complex network of cellular responses [J]. Microbiology, 2005, **151**(8): 2503-2514.
- [15] Muramatsu M, Hihara Y. Acclimation to high-light conditions in cyanobacteria: from gene expression to physiological responses [J]. Journal of Plant Research, 2012, **125**(1): 11-39.
- [16] Fuhrmann E, Gathmann S, Rupprecht E, *et al.* Thylakoid membrane reduction affects the photosystem stoichiometry in the cyanobacterium *Synechocystis* sp. PCC 6803 [J]. Plant Physiology, 2009, **149**(2): 735-744.
- [17] McDonagh B, Domínguez-Martín M, Gómez-Baena G, *et al.* Nitrogen starvation induces extensive changes in the redox proteome of *Prochlorococcus* sp. strain SS120 [J]. Environmental Microbiology Reports, 2012, **4**(2): 257-267.
- [18] Latifi A, Ruiz M, Zhang C C. Oxidative stress in cyanobacteria [J]. FEMS Microbiology Reviews, 2009, **33**(2): 258-278.
- [19] Vermass W, Xu H, He Q F, *et al.* Chlorophyll-binding proteins in cyanobacteria [J]. Photochemistry and Photobiology, 1999, **69**: 71S-72S.
- [20] Krasikov V, Von Wobeser E A, Dekker H L, *et al.* Time-series resolution of gradual nitrogen starvation and its impact on photosynthesis in the cyanobacterium *Synechocystis* PCC 6803 [J]. Physiologia Plantarum, 2012, **145**(3): 426-439.
- [21] Behrenfeld M J, Worthington K, Sherrell R M, *et al.* Controls on tropical Pacific Ocean productivity revealed through nutrient stress diagnostics [J]. Nature, 2006, **442**(7106): 1025-1028.
- [22] Halsey K H, Milligan A J, Behrenfeld M J. Physiological optimization underlies growth rate-independent chlorophyll-specific gross and net primary production [J]. Photosynthesis Research, 2010, **103**(2): 125-137.
- [23] Moore C M, Mills M M, Langlois R, *et al.* Relative influence of nitrogen and phosphorous availability on phytoplankton physiology and productivity in the oligotrophic sub-tropical North Atlantic Ocean [J]. Limnology and Oceanography, 2008, **53**(1): 291-305.
- [24] Sauer J, Schreiber U, Schmid R, *et al.* Nitrogen Starvation-Induced Chlorosis in *Synechococcus* PCC 7942. Low-level photosynthesis as a mechanism of long-term survival [J]. Plant Physiology, 2001, **126**(1): 233-243.
- [25] 王雨, 林茂, 卢昌义, 等. 营养盐亏缺与恢复对威氏海链藻 (*Thalassiosira weissflogii*) 生长和生化组成的影响 [J]. 海洋通报, 2009, **28**(4): 47-53.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM _{2.5} in Chengde	CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4069)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province	YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (4080)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province	YAN Yu-long, PENG Lin (4086)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China	GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> (4094)
Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station	HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> (4103)
NH ₃ Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing	CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> (4110)
Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an	SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (4117)
Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City	ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (4124)
Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin	ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4133)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve	YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> (4142)
Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao	MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> (4147)
Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion	LU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> (4156)
Gas Transfer Velocity of CH ₄ at Extremely Low Wind Speeds	ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> (4162)
Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (4168)
Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed	CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir	ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> (4187)
Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu	DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> (4194)
Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (4203)
Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China	WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> (4212)
Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i>	YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin (4220)
Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine	WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (4228)
Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water	MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> (4235)
Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder	AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> (4241)
Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co ₃ O ₄ for the Degradation of Rhodamine B	FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> (4247)
Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4255)
Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (4261)
Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor	ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (4268)
Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> (4275)
Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process	YUAN Yan, ZHU Liang (4289)
Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios	CUI Yan-rui, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> (4296)
Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4302)
A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggery Wastewater	DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> (4309)
Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria	HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> (4317)
Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model	XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> (4326)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng (4333)
PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou	JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> (4341)
Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship	WANG Jia-yi, BI Er-ping (4349)
Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands	WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> (4357)
Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants	YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils	WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions	LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (4380)
Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions	TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4389)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing	ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> (4395)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm	HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> (4402)
Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells	HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> (4410)
Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil	LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> (4419)
Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China	ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> (4428)
Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns	WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> (4437)
Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils	HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> (4446)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行