

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第6期

Vol.34 No.6

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~ 2010 年北京城区大气 BTEX 的浓度水平及其 O ₃ 生成潜势	曹函玉, 潘月鹏, 王辉, 谭吉华, 王跃思 (2065)
利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态	牟莹莹, 楼晟荣, 陈长虹, 周敏, 王红丽, 周振, 乔利平, 黄成, 李梅, 李莉, 王倩, 黄海英, 邹兰军 (2071)
沈阳市降水化学成分及来源分析	张林静, 张秀英, 江洪, 张清新 (2081)
秦皇岛大气污染物浓度变化特征	刘鲁宁, 申雨璇, 辛金元, 吉东生, 王跃思 (2089)
笼养鸡生长过程 NH ₃ 、N ₂ O、CH ₄ 和 CO ₂ 的排放	周忠凯, 朱志平, 董红敏, 陈永杏, 尚斌 (2098)
碳化硅协同分子筛负载型催化微波辅助催化氧化甲苯性能	王晓晖, 卜龙利, 刘海楠, 张浩, 孙剑宇, 杨力, 蔡力栋 (2107)
生物滴滤塔净化多组分废气的研究	张定丰, 房俊逸, 叶杰旭, 邱松凯, 钱东升, 戴启洲, 陈东之 (2116)
在氧化和还原氛围下脉冲电晕法降解二硫化碳废气	金圣, 黄立维, 李国平 (2121)
模拟大气 CO ₂ 水平升高对春季太湖浮游植物生理特性的影响	赵旭辉, 汤龙升, 史小丽, 杨州, 孔繁翔 (2126)
一种确定湖泊水质基准参照状态浓度的新方法	华祖林, 汪靛 (2134)
HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究	李燕, 李兆富, 席庆 (2139)
基于非点源污染的水质监测方案研究	吴喜军, 李怀恩, 李家科, 李强坤, 董雯 (2146)
不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究	陈玲, 刘德富, 宋林旭, 崔玉洁, 张革 (2151)
春季东海赤潮发生前后营养盐及溶解氧的平面分布特征	李鸿妹, 石晓勇, 陈鹏, 张传松 (2159)
三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布	张永生, 郑丙辉, 王坤, 姜霞, 郑浩 (2166)
湖泊沉积物溶解性有机氮组分的藻类可利用性	冯伟莹, 张生, 焦立新, 王圣瑞, 李畅游, 崔凤丽, 付绪金, 甄志磊 (2176)
刚毛藻分解对上覆水磷含量及赋存形态的影响	侯金枝, 魏权, 高丽, 孙卫明 (2184)
反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换	李大鹏, 王晶, 黄勇 (2191)
三峡库区主要支流表层沉积物多溴联苯醚的分布特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 刘晓茹, 余丽琴, 文武, 张盼伟 (2198)
UV 和 H ₂ O ₂ 联合消毒灭活饮用水中大肠杆菌研究	张一清, 周玲玲, 张永吉 (2205)
臭氧降解水中邻苯二甲酸二甲酯的动力学及影响因素	于丽, 张培龙, 侯甲才, 庞立飞, 李越, 贾寿华 (2210)
硝酸根对水体中甲基汞光化学降解的影响	毛雯, 孙荣国, 王定勇, 马明, 张成 (2218)
快雌醇氯化反应的动力学和机制研究	王斌楠, 刘国强, 孔德洋, 陆勇鹤 (2225)
金属离子对 δ-MnO ₂ 去除对叔辛基酚抑制作用的研究	李非里, 牟华倩 (2232)
核-壳表面磁性印迹聚合物的制备及其对水中双酚 A 的特异性去除	刘建明, 李红, 熊振湖 (2240)
有机蒙脱石负载纳米铁去除溶液中四溴双酚 A 的研究	闫梦玥, 庞志华, 李小明, 退建宇, 罗隽 (2249)
纳滤预处理测定景观水体中溶解性有机氮质量浓度及其分布特征	于红蕾, 霍守亮, 杨周生, 席北斗, 咎逢宇, 张靖天 (2256)
改性水凝胶的制备及其对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 吸附性能研究	吴宁梅, 李正魁 (2263)
直接大红 4BE 的磷钨酸均相光催化还原脱色	魏红, 李克斌, 李娟, 陈经涛, 张涛 (2271)
基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究	张磊, 刘平, 马锦, 张静, 张明, 吴根 (2277)
Fenton 法处理竹制品废水生化出水出水的研究	郭庆稳, 张敏, 王炜, 杨治中, 吴东雷 (2283)
二价铁离子对 UASB 反应器厌氧发酵产氢效能的影响	李永峰, 王艺璇, 程国玲, 刘春妍 (2290)
进水底物浓度对蔗糖废水产酸合成 PHA 影响研究	陈志强, 邓毅, 黄龙, 温沁雪, 郭子瑞 (2295)
接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究	刘文如, 沈耀良, 丁玲玲, 丁敏 (2302)
聚磷污泥去除高浓度铅的影响因素研究	杨敏, 卢龙, 冯涌, 方超, 李雄清 (2309)
体积溶氧传递系数在好氧颗粒污泥系统中的变化特性初步分析	李志华, 范长青, 王晓昌 (2314)
我国淡水水体中双酚 A (BPA) 的生态风险评价	汪浩, 冯承莲, 郭广慧, 张瑞卿, 刘跃丹, 吴丰昌 (2319)
麦穗鱼物种敏感性评价	王晓南, 刘征涛, 闫振广, 张聪, 何丽, 孟双双 (2329)
不同评估方法得出的五氯酚的 PNEC 值的比较研究	雷炳莉, 文育, 王艺陪, 康佳, 刘倩 (2335)
桂林市交警头发 Hg、Pb 含量及分布研究	钱建平, 张力, 李成超, 黄栋 (2344)
直流电场处理后降线藻趋光性对 Cu ²⁺ 和 Hg ²⁺ 的响应	王飞祥, 袁玲, 黄建国 (2350)
UV-B 辐射对青冈凋落叶化学组成和分解的影响	宋新章, 卜涛, 张水奎, 江洪, 王志坤, 赵明水, 刘永军 (2355)
7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 杨聘聘 (2361)
溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落影响解析	于皓, 陈川, 张莉, 王爱杰 (2368)
不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroResp TM 方法	陈晓娟, 吴小红, 刘守龙, 袁红朝, 李苗苗, 朱捍华, 葛体达, 童成立, 吴金水 (2375)
典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究	韩建刚, 曹雪 (2383)
三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究	刘意章, 肖唐付, 宁增平, 贾彦龙, 黎华军, 杨菲, 姜涛, 孙昊 (2390)
北京市不同区位耕作土壤中重金属总量与形态分布特征	陈志凡, 赵焯, 郭廷忠, 王永峰, 田青 (2399)
季节变化对贵阳市不同功能区地表灰土重金属的影响	李晓燕 (2407)
东营市孤岛地区土壤中类二噁英类 PCBs 的污染特征	王登阁, 崔兆杰, 傅晓文, 殷永泉, 许宏宇 (2416)
模拟氮沉降对森林土壤有机物淋溶的影响	段雷, 马萧萧, 余德祥, 谭炳全 (2422)
甲基 β 环糊精对污染场地土壤中多环芳烃的异位增效洗脱修复研究	孙明明, 滕应, 骆永明, 李振高, 贾仲君, 张满云 (2428)
胶质芽孢杆菌对印度芥菜根际土壤镉含量及土壤酶活性影响	杨榕, 李博文, 刘微 (2436)
长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征	吴小莲, 向垒, 莫测辉, 姜元能, 严青云, 李彦文, 黄献培, 苏青云, 王纪阳 (2442)
有机废弃物堆肥肥培土壤的氮矿化特性研究	张旭, 席北斗, 赵越, 魏自民, 李洋, 赵昕宇 (2448)
北京市生活垃圾转运站耗能和排污特征及其影响因素分析	王昭, 李振山, 冯亚斌, 焦安英, 薛安 (2456)
氨对垃圾焚烧飞灰浸出特性的影响及地球化学模拟	官贞珍, 陈德珍, Thomas Astrup (2464)
焚烧飞灰预处理工艺及其无机氯盐的行为研究	朱芬芬, 高冈昌辉, 大下和傲, 姜惠民, 北岛義典 (2473)
富含中孔与酸性基团的生物炭的制备与吸附性能	李坤彬, 李辉, 郑正, 张雨轩 (2479)
生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估	姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇 (2486)
基于物质流分析的钾素流动与循环研究	白桦, 曾思育, 董欣, 陈吉宁 (2493)
《环境科学》征订启事 (2115) 《环境科学》征稿简则 (2224) 信息 (2217, 2289, 2349, 2398) 专辑征稿通知 (2478)	

模拟大气 CO₂ 水平升高对春季太湖浮游植物生理特性的影响

赵旭辉^{1,2}, 汤龙升³, 史小丽¹, 杨州³, 孔繁翔^{1*}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 南京师范大学生命科学学院, 南京 210046)

摘要: 基于2012年春季在太湖梅梁湾进行为期27 d的不同CO₂水平(大气CO₂体积分数([CO_{2,g}])梯度为270 × 10⁻⁶、380 × 10⁻⁶、750 × 10⁻⁶)的野外培养实验,揭示了大气CO₂水平升高对太湖浮游植物的碳源选择、生长速率、光合作用、净初级生产力和细胞化学元素组成等生理过程的影响,结果表明,大气CO₂浓度的升高首先会显著改变太湖水体的pH值和碳化学环境,减弱浮游植物碳浓缩机制(CCM)的必要性. 大气CO₂浓度加倍后,浮游植物的最大生长速率($U_{\max}$)、净初级生产力(NPP)、单位叶绿素a(Chl-a)含量的NPP会分别增加63.1%、69.6%、33.8%. 大气CO₂浓度的升高会促进太湖绿藻和硅藻的最大光合作用效率并且其对硅藻的促进作用比绿藻更显著,但并没有改变春季蓝藻光合作用活性极低的现状. 大气CO₂浓度的升高在提高浮游植物细胞中C、N含量的同时,却减少了P的吸收. 本研究结果将为预测和揭示太湖浮游植物对未来气候变化的响应提供理论基础.

关键词: CO₂; 春季; 太湖; 浮游植物; 生理特性

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)06-2126-08

Effects of Simulated Elevation of Atmospheric CO₂ Concentration on the Physiological Features of Spring Phytoplankton in Taihu Lake

ZHAO Xu-hui^{1,2}, TANG Long-sheng³, SHI Xiao-li¹, YANG Zhou³, KONG Fan-xiang¹

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Biological Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract: To disclose the impact of different CO₂ concentrations (270 × 10⁻⁶, 380 × 10⁻⁶, 750 × 10⁻⁶) on physiological features of spring phytoplankton, an *in situ* simulated experiment was carried out in Meiliang Bay of Taihu Lake from 29 April to 26 May in 2012. The results showed that atmospheric CO₂ elevation would significantly alter the pH value and carbonate chemical environments of Taihu Lake, resulting in weakening the advantages of carbon concentrating mechanism (CCM) of phytoplankton. Phytoplankton in Taihu Lake tended to use more dissolved CO₂ (CO_{2,aq}) due to the deliberate CO₂ sequestration under the high CO₂ level treatment. When atmospheric CO₂ concentration doubles at the end of century, the maximum growth rate constant of phytoplankton ($U_{\max}$), NPP, chlorophyll a (Chl-a)-specific NPP would increase by 63.1%, 69.6% and 33.8%, respectively. Atmospheric CO₂ elevation promoted the maximum photosynthetic efficiency of chlorophyta and bacillariophyta in Taihu Lake and its promotion effect on bacillariophyta was more notable than that on chlorophyta. However, it did not change the photosynthetic efficiency of cyanobacteria which was very low in spring. Meanwhile, the stoichiometry value of phytoplankton changed significantly due to the CO₂ elevation, as phytoplankton cells assimilated more C and N, but less P under the treatment of high CO₂ level. Our results indicated the enhanced CO₂ level could dramatically change the physiological features of phytoplankton. This information would help us to understand and predict the response of phytoplankton in Taihu Lake to the future climate change.

Key words: CO₂; spring; Taihu Lake; phytoplankton; physiological features

随着煤、石油和天然气等化石燃料的大量燃烧,大气中CO₂(CO_{2,g})的体积分数([CO_{2,g}])已经从工业革命前的270 × 10⁻⁶升高至现在的386 × 10⁻⁶,如果人类的生产和生活方式没有较大的改变,已有研究预计到21世纪末大气CO₂水平可能较现在加倍,甚至可超过750 × 10⁻⁶[1,2],水体作为大气CO₂的重要碳汇,大气CO₂浓度的升高会影响海

洋、湖泊和河流等水体的CO₂水气交换,水体环境的变化必然会影响水体中浮游植物细胞的新陈代谢过程,进而对水生生态系统和生物地球化学循环产

收稿日期: 2012-09-04; 修订日期: 2012-10-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(31070420, 31270507); 江苏省自然科学基金项目(BK2011877)

作者简介: 赵旭辉(1986~),男,硕士研究生,主要研究方向为湖泊生物生态学, E-mail: zhaoxuhui05@163.com

* 通讯联系人, E-mail: fxxkong@niglas.ac.cn

生深远影响^[3]。因此目前关于浮游植物应对大气 CO₂ 浓度升高的生理和生态响应一直是热点问题^[4-9],但是目前的相关研究较多集中于海洋浮游植物,而有关大型淡水湖泊中浮游植物的原位研究则相对较少,如太湖,虽然其对全球碳平衡、气候调节,以及整个生物地球化学循环的影响要远远小于海洋生态系统,但作为内陆水体最重要的组成单元,淡水湖泊中浮游植物生理特性的改变可能会直接影响与人类生存和社会发展有着更加紧密联系的湖泊生态系统,相关研究显得更为紧迫。

太湖富营养化问题较为严重,湖泊深度和碱度都较小,应对大气 CO₂ 水平升高的缓冲能力相对较弱,所以太湖浮游植物对大气 CO₂ 水平升高的生理反应可能更加敏感。本研究通过在原位模拟实验,分析了太湖大气 CO₂ 水平的升高对太湖浮游植物的碳源选择、生长速率、光合作用、净初级生产力和细胞化学元素组成的影响,以期预测未来太湖浮游植物群落结构演替(如蓝藻水华过程)和太湖生态系统物质循环和能量传递的变化提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 太湖原位实验设计

原位实验安排在太湖梅梁湾的中国科学院太湖生态系统研究站(31°25'15"N, 120°12'55"E),周围空气流通顺畅,实验安排在浮游植物复苏生长的春

季^[10];2012-04-29~2012-05-26,共27 d。实验开始时,取紧邻的太湖水样150 L(预先通过孔径为100 μm 的尼龙筛绢,用于除去大型浮游动物)置于白色塑料桶(高70 cm、内径58 cm,共9个)内,装置安放于太湖岸边的水池内,气温、水温和光照等气候因素与太湖水体基本一致。本研究设置大气 CO₂ 的低浓度水平 $[(270 \pm 40) \times 10^{-6}, P1]$ 可由当地空气通过 Na₂CO₃ 溶液吸收制备,作为对照组的现有水平 $[(380 \pm 20) \times 10^{-6}, P2]$ 采用当地空气,高 CO₂ 浓度水平 $[(750 \pm 50) \times 10^{-6}, P3]$ 由 CO₂ 加富器(CO₂ Enrichlor CE-300,武汉瑞华仪器)制备,采用 CO₂ 红外检测仪(Testo 535, Germany)跟踪并及时修正的 CO₂ 浓度水平;每个浓度梯度设置3个平行组,采用气石鼓气(微小气泡)的形式模拟大气 CO₂ 浓度升高的过程,控制鼓气速度为1.0 L·min⁻¹(图1)。

为了模拟太湖水体的生长环境,每2 d检测塑料桶内和太湖梅梁湾水体的 N、P 等营养盐变化,根据需及时添加营养盐(KH₂PO₄、NH₄Cl 和 NaNO₃ 的混合溶液),确保塑料桶内和梅梁湾水体的 N、P 等营养盐无显著性差异。

1.2 样品采集及分析方法

每隔2 d在上午09:00~10:00采集水样一次,其中总氮(TN)、总磷(TP)、溶解性总氮(DTN)、溶解性总磷(DTP)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、磷酸根(PO₄³⁻-P)、碱度(Alk)、温度

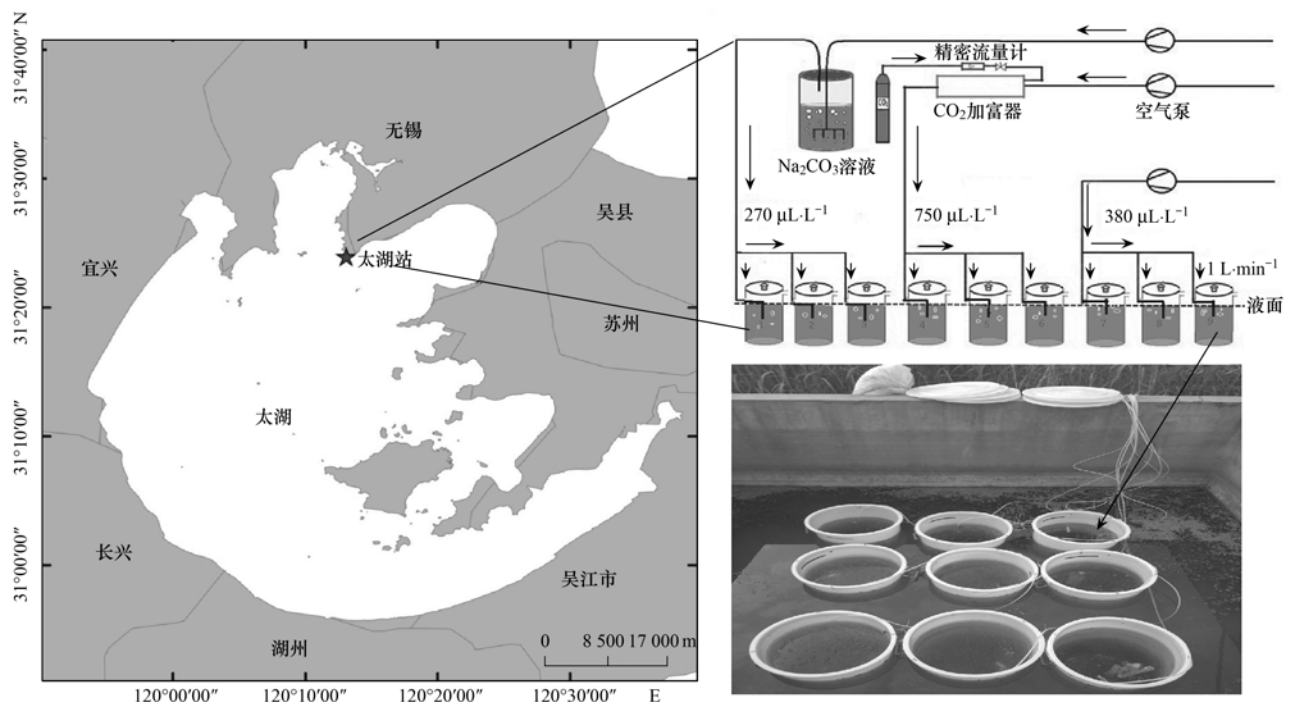


图1 模拟实验位置和实验装置示意

Fig. 1 Location of the simulation experiment and schematic of experimental setup

(t)、pH、净初级生产力 (net primary productivity, NPP) 的测定方法见文献 [11, 12]. 叶绿素 a (chlorophyll a, Chl-a) 采用热乙醇法测定^[13]. 最大光量子产率 (F_v/F_m) 采用调制叶绿素荧光仪测定 (Phyto-PAM, ED, Walz, Effeltrich, Germany)^[14].

溶解性无机碳 (dissolved inorganic carbon, DIC) 和溶解性有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 的测定是采用 GF/F 玻璃纤维滤膜 (马弗炉中 500℃ 灼烧 4 h) 过滤水样后, 采用岛津 Shimadzu TOC CPN 仪通过高温灼烧法进行测定. 溶解性 CO_2 ($\text{CO}_{2,\text{aq}}$)、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 的浓度由水样的 DIC、Alk、 t 、pH 和 $[\text{CO}_{2,\text{g}}]$ 等参数根据碳酸盐平衡系统计算^[15].

颗粒性有机碳 (particulate organic carbon, POC)、颗粒性有机氮 (particulate organic nitrogen, PON) 和总颗粒性磷 (total particulate phosphorus, TPP) 的测定采用预称重的 GF/F 玻璃纤维滤膜 (马弗炉中 500℃ 灼烧 4 h) 过滤 200 ~ 300 mL 水样, 再用 15 mL 的 Na_2SO_4 溶液 ($0.17 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 冲洗 GF/F 滤膜上溶解态的 C、N 和 P, 避光保存于 -25℃ 的冰箱, 测定前最长可保存 60 d^[16, 17]. 测定 POC 和 PON 的 GF/F 滤膜先经 45℃ 烘 8 h 干后称重, 再置于干燥器内用浓盐酸熏蒸 8 h, 最后 45℃ 烘干、研碎, 用于有机元素分析仪 (EA3000, 意大利) 测定 C、N 含量. TPP 采用碱性过硫酸钾消解法测定^[18].

1.3 数据分析

1.3.1 浮游植物生物量 (以 Chl-a 计算) 的 Logistic 模型拟合

Logistic 模型是描述有限环境下 (营养盐、光照、体积、 CO_2 等) 种群生物量具有最大密度制约特点的经典增长模型, 能描述一种特定形状的 S 曲线, 适用于描述生长期较长并且早期生长缓慢的生长过程^[19], 例如春季中太湖浮游植物的复苏过程.

$$B_t = \frac{B_f}{1 + \frac{B_f - B_0}{B_0} e^{\frac{-4U_{\max}t}{B_f}}} \quad (1)$$

式(1)表示浮游植物生物量 (以 Chl-a 表示) 随时间变化的生长曲线, 式中, t 为时间 (d), B_t 为 t 时刻生物量, B_0 为初始生物量, B_f 为终止生物量, $U_{\max}$ 表示当密度为最大密度一半时的最大生长速率常数 (d^{-1}).

1.3.2 相关统计分析

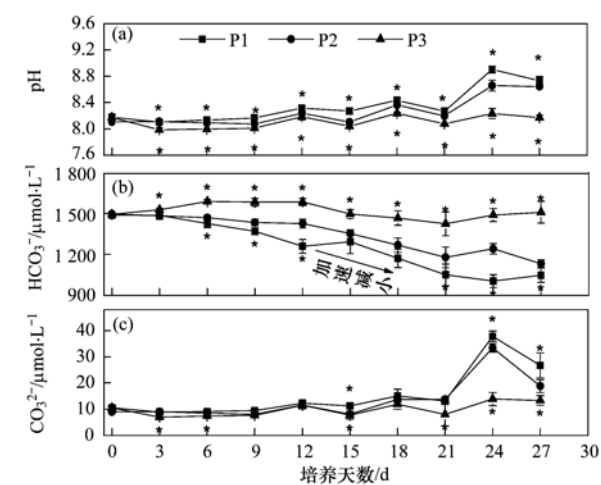
本研究采用 SPSS 16.0 软件包和 Origin 8.0 进行相关统计分析和绘图, 所有参数均表示成平均值 $\pm$ 标准偏差 ($n=3$), 组间差异利用 one-way analysis

of variance (ANOVA) 分析, $P < 0.05$ 表示显著性差异, $P < 0.01$ 表示极显著性差异.

2 结果与讨论

2.1 水体碳化学的变化以及浮游植物对碳源的选择变化

由于大气-水体间 CO_2 交换服从开放体系的亨利定律, 大气 CO_2 分压逐渐升高的综合效果必然会增加 $\text{CO}_{2,\text{aq}}$ ^[20], 所以可以根据鼓入空气中 CO_2 的浓度来控制水样中的 $\text{CO}_{2,\text{aq}}$, 由亨利定律可以计算不同处理条件 (P1、P2、P3) 下的 $\text{CO}_{2,\text{aq}}$ 分别保持在 (9.1 ± 0.4) 、 (12.5 ± 0.5) 、 $(25.5 \pm 0.7) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; 另一方面, 由于 $\text{CO}_{2,\text{aq}}$ 的升高会酸化太湖水体, P3 处理的 pH 值比 P1、P2 分别低 0.5 ~ 0.9、0.2 ~ 0.5 [图 2(a)], 这说明未来大气 CO_2 浓度的升高对太湖的酸化程度比海洋 (pH 值下降约 0.3) 更加显著, 水体酸化会影响酶的活性, 这将会直接影响太湖中部浮游植物种类的生理过程^[21], 比如可能会减弱喜碱性浮游植物的竞争优势, 如蓝藻. 此外, 水体中无机碳 (HCO_3^- 、 CO_3^{2-}) 的形态分布也发生了显著变化, P3 处理组的 HCO_3^- 浓度在实验前 6 d 逐渐增加且最大增幅达 14.3%, 第 9 d 开始下降, 至第 21 d 开始稳定, 而 P1、P2 的 HCO_3^- 浓度从实验开始就逐渐下降, 第 12 d 开始加速下降, 至第 21 d 也逐渐稳定 [图 2(b)]. 这是因为浮游植物对碳源的吸收选择上首先倾向于 $\text{CO}_{2,\text{g}}$, 其次是 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} [22~24], P3 处理的 $[\text{CO}_{2,\text{g}}]$ 较高, 在生物量较低时 $\text{CO}_{2,\text{g}}$ 可以满足浮游植物生长, 但随着生物量的增加, 第 12 d 时水体 CO_2 已经不能满足浮游植物生长的需要, 需要 HCO_3^- 补充碳源, 直至第 21 d 达到新的平衡 (碳源补充和吸收), 而 P1、P2 处理由于 $[\text{CO}_{2,\text{g}}]$ 较低, 所以从第 0 d 开始 HCO_3^- 浓度就逐渐下降并且随着生物量的增加下降速度越快 (第 21 d 开始). CO_3^{2-} 浓度的降低主要是受到了水体 pH 变化的间接影响 [图 2(c)]^[20]. 太湖水体的 pH 值一般为 7.0 ~ 9.0, 溶解态的 $\text{CO}_{2,\text{aq}}$ 仅占 DIC 的 0.5% ~ 1%, 而 CO_2 的水气扩散速度一般小于浮游植物固定 CO_2 的速度, 表现为碳源限制^[25], 所以未来水体中直接碳源 $\text{CO}_{2,\text{aq}}$ 的增多不仅减弱了 HCO_3^- 作为后备碳源 (被动运输过程, 高耗能性) 的必要性, 而且会降低具有碳浓缩机制 (carbon concentration mechanism, CCM) 的浮游植物种群的竞争优势^[26], 如太湖蓝藻水华的优势种群——铜绿微囊藻^[10].



P1、P2、P3 分别代表空气中 CO₂ 的体积分数 ([CO_{2,g}]) 为 270 × 10⁻⁶、380 × 10⁻⁶、750 × 10⁻⁶ 的处理组; * 表示当日 P1 和 P2、P2 和 P3 具有显著性差异, *P* < 0.05, 下同

图2 不同 CO₂ 水平条件下 (P1、P2、P3) 水样 pH、HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻ 浓度的比较

Fig. 2 Comparison of pH, HCO₃⁻ and CO₃²⁻ of water samples under different CO₂ concentrations (P1, P2, P3)

2.2 Chl-a 的连续时间变化

以 Chl-a 的质量浓度估算浮游植物生物量, 以培养天数为横坐标, 根据公式 (1) 将不同处理条件下的生长曲线利用 Origin 进行非线性 (Logistic 模型) 拟合 (图 3), 不同大气 CO₂ 浓度条件下的拟合曲线都收敛, 表 1 显示 Logistic 模型可以很好地描述春季太湖浮游植物的生长状况 (确定系数 *r*² > 0.90, *P* < 0.01) [27]. 实验第 0 d 时 Chl-a 的质量浓度为 (6.2 ± 0.3) μg·L⁻¹, 从第 12 d 开始的不同处理组的 Chl-a 质量浓度表现为 P3 > P2 > P1 (*P* < 0.05); 第 21 ~ 24 d 时浮游植物的生物量达到最大并开始呈现下降趋势, 不同 CO₂ 水平条件下 (P1、P2、P3) 的 Chl-a 最大质量浓度分别出现在第 21、21、24 d,

分别为 (61.9 ± 1.5)、(94.6 ± 5.1)、(123.2 ± 3.8) μg·L⁻¹ (图 3), 所以浮游植物在大气 CO₂ 浓度较高条件下的最大生物量不仅显著增加, 而且出现较晚, 这可能是因为较为充足的碳源为浮游植物提供了更大的环境容量.

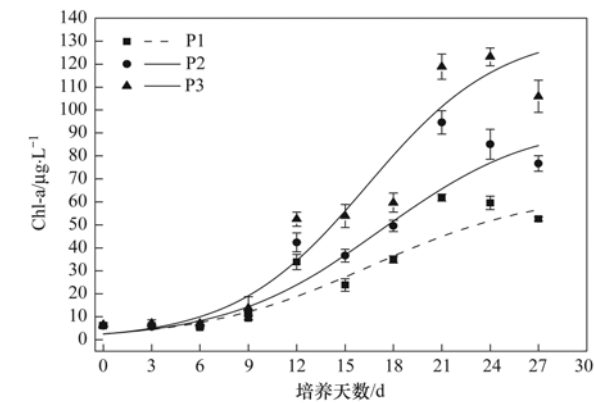


图3 不同 CO₂ 水平条件下 (P1、P2、P3) 太湖水样用 Logistic 方程拟合的生长曲线

Fig. 3 Growth curves of water samples of Taihu Lake under different CO₂ concentrations (P1, P1, P3) used by Logistic function

已有大量的室内和野外实验表明大气 CO₂ 浓度的升高可以促进海洋浮游植物的生长和繁殖速度 [28,29]. 而对于淡水浮游植物, 从表 1 显示的 Logistic 模型拟合参数可以看出在初始生物量没有显著性差异的情况下, 大气 CO₂ 浓度的增加也可以促进太湖浮游植物的生长, 不仅 P3 组的 *B_f* 高于 P1、P2 组, 分别增加 108.7%、41.0% (*P* < 0.05); 其最大生长速率常数 (*U_{max}*) 相对于 P1、P2 组, 也分别增加了 166.1%、63.1%, 这说明较高的大气 CO₂ 浓度显著提高了太湖浮游植物的生长和繁殖速率, CO_{2,aq} 可能不再是核酮糖-2-磷酸羧化氧化酶 (rubisco) 催化羧化反应的限制因子, 浮游植物同化作用速率可能随之加快 [30].

表1 不同 CO₂ 水平条件下 (P1、P2、P3) Logistic 生长模型中的参数¹⁾

Table 1 Comparison parameters of Logistic growth curves under different CO₂ concentrations (P1, P1, P3)

处理组	<i>B</i> ₀ /μg·L ⁻¹	<i>B</i> _f /μg·L ⁻¹	<i>U</i> _{max} /d ⁻¹	确定系数 <i>r</i> ²	模型拟合的 <i>P</i> 值
P1	2.6 (±1.2) ^a	64.4 (±16.7) ^a	3.07 (±0.54) ^a	0.090 345	0.000 35
P2	2.5 (±1.1) ^a	95.3 (±23.4) ^b	5.01 (±0.86) ^b	0.908 18	0.000 25
P3	2.4 (±1.3) ^a	134.4 (±26.3) ^c	8.17 (±1.19) ^c	0.940 56	0.000 19

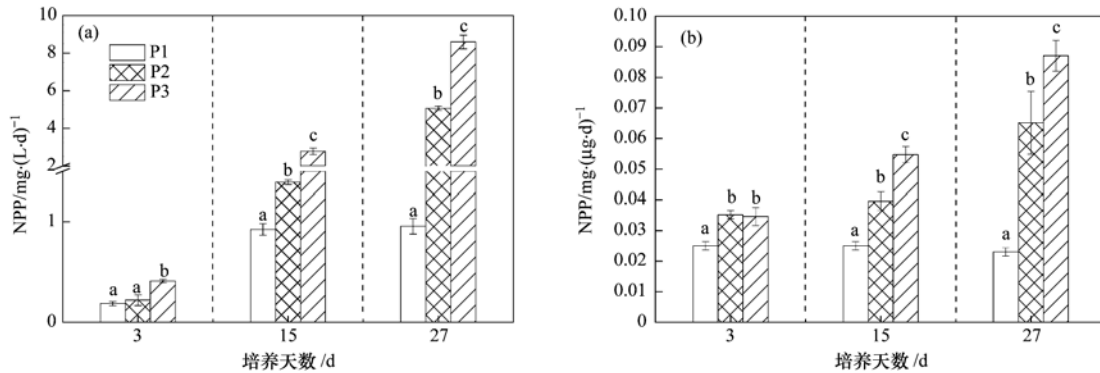
1) 不同处理组 (P1、P2、P3) 之间带有的不同英文字母 (如 a、b、c) 表示具有显著性差异, *P* < 0.05

2.3 净初级生产力 (NPP) 的影响

本研究测定 NPP (总初级生产力扣除呼吸消耗) 是通过测定黑白瓶中水样溶解氧浓度的变化速率来表征. 如图 4(a) 所示, 实验第 3 d 时 P3 处理组的 NPP 开始显著高于 P1、P2 处理组; 至第 15、27

d 时 NPP 表现出来的规律均为 P3 > P2 > P1 (*P* < 0.05), 例如 P3 处理组的 NPP (27 d) 比 P1 (27 d)、P2 (27 d) 分别高 798.2%、69.6%. 另外, 为了扣除模拟实验过程中不同处理组浮游植物生物量变化不一致的影响, 本研究采用 Chl-a 标准化的 NPP 即单

位 Chl-a 质量浓度的 NPP[图 4(b)],用以表征浮游植物光合作用净产氧的能力,可以发现第 3、15、27 d 时较高大气 CO_2 水平的处理组 P2、P3 都显著高于低大气 CO_2 水平的 P1 处理组,其中以第 27 d 最为明显,大气 CO_2 水平为 270×10^{-6} 、 380×10^{-6} 、 750×10^{-6} 时的 NPP(Chl-a 标准化,以 $\text{O}_2/\text{Chl-a}$ 计)



不同处理组 (P1、P2、P3) 之间带有的不同英文字母 (a、b、c) 表示具有显著性差异, $P < 0.05$

图 4 不同 CO_2 水平条件下 (P1、P2、P3) 实验进行 3、15、27 d 时的 NPP 和 Chl-a 标准化的 NPP

Fig. 4 NPP and Chl-a-specific NPP after 3, 15, 27 d cultivation under different CO_2 concentrations (P1, P1, P3)

本研究结论符合 CO_2 浓度升高会提高水体 (包括淡水湖泊和海洋) NPP 的普遍观点^[31~34]; 同时也发现相对于 CO_2 浓度加倍后会使海洋的 NPP 提高约 10%~40%^[32,33], 淡水湖泊 (如太湖) NPP 的促进作用要强于海洋 (NPP 提高大于 50%), 这可能是由于淡水湖泊浮游植物的生物量一般高于海洋, 水体中 $\text{CO}_{2,\text{aq}}$ 的浓度较低, 浮游植物受碳源的限制更加显著, 所以淡水水体的 NPP 受大气 CO_2 浓度升高带来的影响应受到更加广泛的重视。

2.4 光合作用的影响

因为获得野外条件下的纯种藻作为参照极为困难, 本实验采用实验室培养的铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 和小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 作为蓝藻和绿藻的参照, 硅/甲藻采用系统配置参照, 采用 $0.2 \mu\text{m}$ 过滤器过滤的水样为 Phyto-PAM 校零^[14]. F_v/F_m (最大可变荧光与最大荧光之比) 通常情况下是一个相当稳定的值, 但是在浮游植物受到胁迫时则明显降低, 是用来研究浮游植物受到的胁迫对光合作用系统 II (PS II) 活性影响的重要指标^[35,36]. 本研究测定了不同 CO_2 水平条件下 (P1、P2、P3) 太湖水体中浮游植物的 F_v/F_m , 结果如图 5 所示. 模拟实验过程中太湖绿藻门 (bacillariophyta) 和硅藻门 (chlorophyta) 的 F_v/F_m 值都在 0.32~0.59 之间 (图 5), 而蓝藻的 F_v/F_m 值为 0, 表明春季绿藻、硅藻具有较强的光合作用活性, 蓝藻的光合作

分别为 (0.023 ± 0.001) 、 (0.065 ± 0.01) 、 $(0.087 \pm 0.005) \text{mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{d})^{-1}$, 说明未来大气 CO_2 浓度的升高不仅会显著提高太湖水体的 NPP, 而且会提高太湖中浮游植物单位生物量的初级生产力, 这进一步证明了大气 CO_2 浓度的升高提高了浮游植物同化作用的能力。

用活性未检出, 这与吴晓东等^[37] 研究结论一致, 所以大气 CO_2 浓度的升高并没有改变春季蓝藻光合作用活性极低现状, 可能是具有 CCM 机制的蓝藻在大气 CO_2 浓度的升高过程中受益较少造成的。

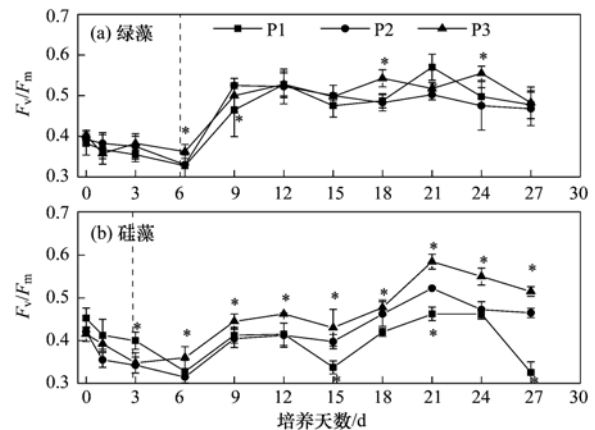


图 5 不同 CO_2 水平条件 (P1、P2、P3) 对绿藻和硅藻的 F_v/F_m 的影响

Fig. 5 Effects of CO_2 concentrations (P1, P1, P3) on F_v/F_m of chlorophyta and bacillariophyta

在实验初期 (0~6 d), 不同处理 (P1、P2、P3) 之间绿藻的 F_v/F_m 没有显著性差异 ($P > 0.05$), 第 6 d 以后, 较高的 CO_2 浓度促进了绿藻的光合活性 (6、9、18、24 d), P3 处理组的 F_v/F_m 较 P1、P2 高出 5%~15% [图 5(a)]; 而硅藻在不同处理组之间的显著性差异变化比绿藻出现早 (第 3 d), 且高

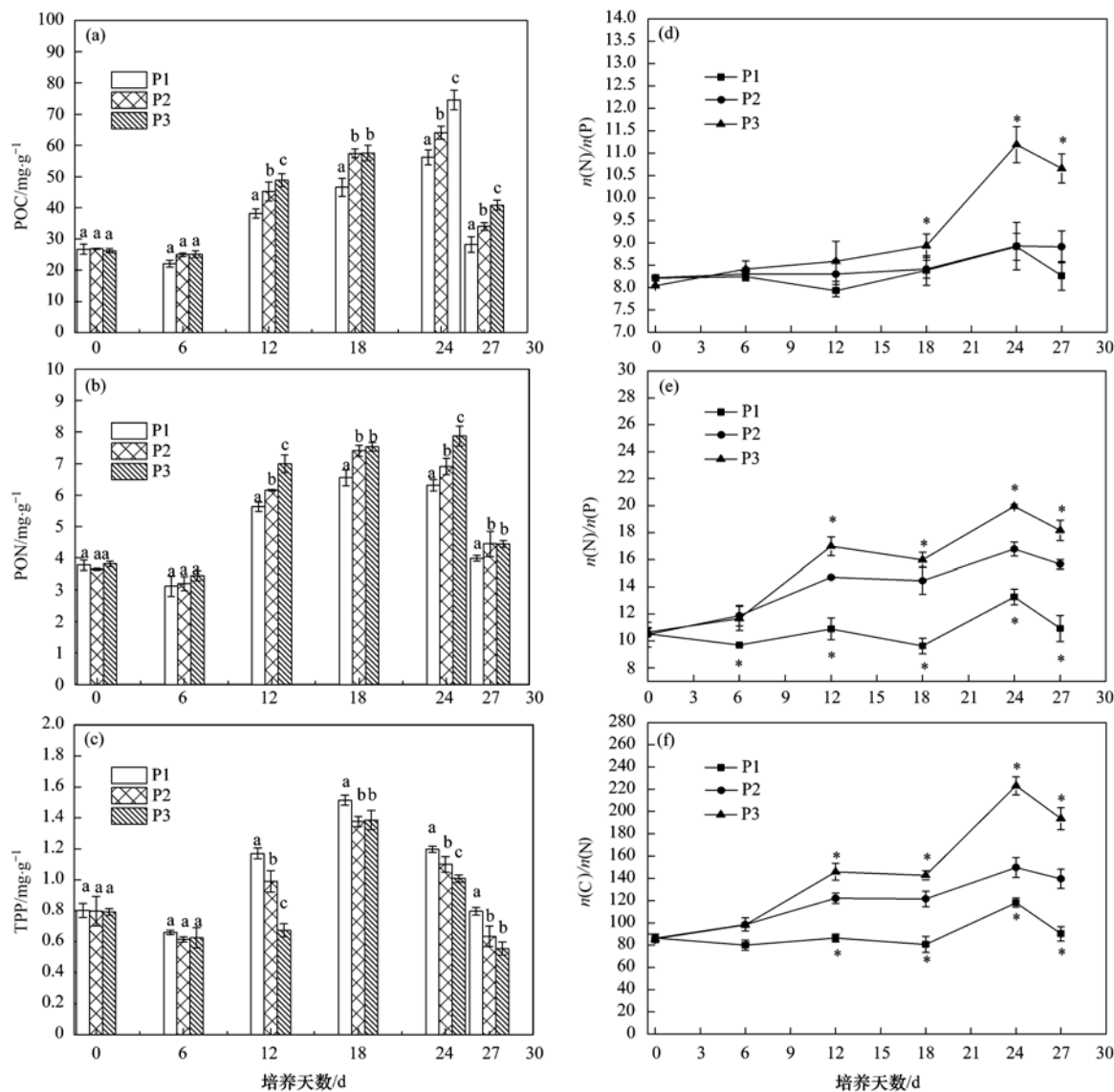
CO₂ 水平的 P3 处理组的 F_v/F_m 在第 3 d 以后都显著大于较低 CO₂ 水平的 P1、P2 处理组 ($P < 0.05$), 高出 5% ~ 20% [图 5(b)]. 这说明大气 CO₂ 浓度的升高对太湖绿藻和硅藻的光合作用活性有促进的作用并且其对硅藻促进作用强于绿藻, 这就预示着可能未来太湖中硅藻和绿藻的竞争优势可能变大, 尤其是硅藻.

2.5 POC、PON 和 TPP 的影响

春季, 在富营养化的太湖中浮游植物生物量较大, 和异养细菌相比, 浮游植物生物量占绝对优势, 尤其在太湖的梅梁湾中, 有机碳主要以 POC 形式存在且 Chl-a 与 POC 存在显著正相关关系, 浮游植物是颗粒性有机物 (POM) 的主要来源^[38], 所以 POC、

PON 和 TPP 的含量变化基本能够表示浮游植物源的主要生物化学元素 (C、N、P) 组成. 实验结果表明, 从第 12 d 开始, 较高的 CO₂ 浓度增加了 POC、PON 的含量, 其中 P3 处理组的 POC、PON 较 P2 处理组分别提高了 6% ~ 17%、4% ~ 13% [图 6(a)、图 6(b)]; 而 TPP 含量的变化规律却相反, 较低的 CO₂ 浓度促进了浮游植物对 P 的吸收 [图 6(c)], 这与目前的大气 CO₂ 浓度升高促进海洋浮游植物 C、N 吸收的结论一致^[39,40], 但是对于 P 的吸收, 太湖在大气 CO₂ 浓度升高时却表现出与海洋完全不同的变化, 这可能是太湖中浮游植物群落结构组成与海洋相差甚远的原因造成的.

此外, 大气 CO₂ 水平的升高对浮游植物的生物



POC、PON、TPP 表示其在总颗粒悬浮物的含量

图 6 不同 CO₂ 水平条件 (P1、P2、P3) 对太湖浮游植物生物化学元素 (C、N、P) 组成的影响

Fig. 6 Effects of CO₂ concentrations (P1, P2, P3) on biochemical compositions (C, N, P) of phytoplankton in Taihu Lake

化学元素(C、N、P)比例也产生了显著影响,可能是由于大气 CO₂ 浓度升高后,浮游植物吸收 C、N、P 的生理过程表现出了不同敏感程度的变化,致使 $n(C)/n(N)$ 、 $n(N)/n(P)$ 、 $n(C)/n(P)$ 在不同处理组之间在第 3~6 d 后出现了显著性差异($P < 0.05$),未来大气 CO₂ 浓度加倍(P3)后可使 $n(C)/n(N)$ 、 $n(N)/n(P)$ 、 $n(C)/n(P)$ 较现在(P2)增加 6%~20%、15%~22%、20%~50% [图 6(d)、图 6(e)、图 6(f)],表明在未来太湖浮游植物的细胞化学元素组成中 C 含量增加最多、N 次之、P 则会减少. 这不仅预示了未来太湖浮游植物吸收 C、N、P 等生理过程的巨变,而且可能会进一步改变太湖水体中 C、N、P 等生源要素的生物地球化学循环.

3 结论

(1) 未来大气 CO₂ 浓度加倍后,太湖水体中 CO_{2,aq}、HCO₃⁻ 的浓度显著提高,浮游植物倾向于吸收浓度增大的 CO_{2,aq},浮游植物的最大生长速率常数(U_{max})、NPP、单位生物量的 NPP 较现在分别提高 63.1%、69.6%、33.8%. 较高的大气 CO₂ 浓度可增加太湖浮游植物的生长和繁殖速率.

(2) 春季,大气 CO₂ 浓度的加倍促进了太湖绿藻和硅藻的最大光合作用效率且对硅藻的促进作用强于绿藻,但没有改变蓝藻光合作用活性极低的现状,春季蓝藻的竞争优势将相对减弱.

(3) 未来大气 CO₂ 浓度升高后,太湖春季浮游植物吸收 C、N、P 的生理过程表现出不同敏感程度的变化,浮游植物细胞增加了 C、N 的含量,降低了 P 的吸收.

致谢:在实验过程中得到了张民、刘世民、苏文、余丽、王泽人等的帮助,在此一并感谢!

参考文献:

- [1] Lee P A, Riseman S F, Hare C E, *et al.* Potential impact of increased temperature and CO₂ on particulate dimethylsulfoniopropionate in the southeastern bering Sea [J]. *Advances in Oceanography and Limnology*, 2011, **2**(1): 33-47.
- [2] Houghton J T. *Climate change 2001: the scientific basis* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 1-32.
- [3] Hargrave C W, Gary K P, Rosado S K. Potential effects of elevated atmospheric carbon dioxide on benthic autotrophs and consumers in stream ecosystems: a test using experimental stream mesocosms[J]. *Global Change Biology*, 2009, **15**(11): 2779-2790.
- [4] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, *et al.* Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components[J]. *Science*, 1998, **281**(5374): 237-240.
- [5] Burkhardt S, Riebesell U, Zondervan I. Effects of growth rate, CO₂ concentration, and cell size on the stable carbon isotope fractionation in marine phytoplankton [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, **63**(22): 3729-3741.
- [6] Burkhardt S, Zondervan I, Riebesell U. Effect of CO₂ concentration on the C N P ratio in marine phytoplankton: A species comparison[J]. *Limnology and Oceanography*, 1999, **44**(3): 683-690.
- [7] Urban O. Physiological impacts of elevated CO₂ concentration ranging from molecular to whole plant responses [J]. *Photosynthetica*, 2003, **41**(1): 9-20.
- [8] Tortell P D, Trimborn S, Li Y Y, *et al.* Inorganic carbon utilization by ross sea phytoplankton across natural and experimental across CO₂ gradients [J]. *Journal of Phycology*, 2010, **46**(3): 433-443.
- [9] Hopkinson B M, Xu Y, Shi D, *et al.* The effect of CO₂ on the photosynthetic physiology of phytoplankton in the Gulf of Alaska [J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(5): 2011-2024.
- [10] 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[J]. *生态学报*, 2005, **25**(3): 589-595.
- [11] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范 [M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 160-187.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 243-248.
- [13] 梁兴飞, 郭宗楼. 超声辅助热乙醇提取法测定浮游植物叶绿素 a 的方法优化[J]. *水生生物学报*, 2010, **34**(4): 856-862.
- [14] Wu X D, Kong F X. Effect of excess light on colony size and photosynthetic quantum yield of *Microcystis* sp. during a summer bloom[J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2010, **25**(4): 507-516.
- [15] Mehrbach C, Culbertson C H, Hawley J E, *et al.* Measurement of the apparent dissociation constants of carbonic acid in seawater at atmospheric pressure[J]. *Limnology and Oceanography*, 1973, **18**(6): 897-907.
- [16] Fu F X, Zhang Y H, Bell P R F, *et al.* Phosphate uptake and growth kinetics of *Trichodesmium* (cyanobacteria) isolates from the north atlantic ocean and the great barrier reef, Australia[J]. *Journal of Phycology*, 2005, **41**(1): 62-73.
- [17] Fu F X, Warner M E, Zhang Y, *et al.* Effects of increased temperature and CO₂ on photosynthesis, growth, and elemental ratios in marine synechococcus and prochlorococcus (cyanobacteria)[J]. *Journal of Phycology*, 2007, **43**(3): 485-496.
- [18] Andersen T, Hessen D O. Carbon, nitrogen, and phosphorus content of freshwater zooplankton [J]. *Limnology and Oceanography*, 1999, **36**(4): 807-814.
- [19] 张蕾, 王修林, 韩秀荣, 等. 石油烃污染物对海洋浮游植物生长的影响——实验与模型[J]. *青岛海洋大学学报(自然科学版)*, 2002, **32**(5): 804-810.
- [20] Biswas H, Cros A, Yadav K, *et al.* The response of a natural phytoplankton community from the godavari river estuary to

- increasing CO₂ concentration during the pre-monsoon period [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2011, **407**(2): 284-293.
- [21] Beardall J, Stojkovic S, Larsena S. Living in a high CO₂ world: impacts of global climate change on marine phytoplankton [J]. Plant Ecology & Diversity, 2009, **2**(2): 191-205.
- [22] Burkhardt S, Amoroso G, Riebesell U, *et al.* CO₂ and HCO₃²⁻ uptake in marine diatoms acclimated to different CO₂ concentrations [J]. Limnology and Oceanography, 2001, **46**(6): 1378-1391.
- [23] Kaplan A, Badger M R, Berry J A, *et al.* Photosynthesis and the intracellular inorganic carbon pool in the bluegreen alga *Anabaena variabilis*; response to external CO₂ concentration [J]. Planta, 1980, **149**(3): 219-226.
- [24] Volokita M, Zenvirth D, Kaplan A, *et al.* Nature of the inorganic carbon species actively taken up by the cyanobacterium *Anabaena variabilis* [J]. Plant Physiology, 1984, **76**(3): 599-602.
- [25] Ihnken S, Roberts S, Beardall J. Differential responses of growth and photosynthesis in the marine diatom *Chaetoceros muelleri* to CO₂ and light availability [J]. Phycologia, 2011, **50**(2): 182-193.
- [26] Raven J A. Physiology of inorganic C acquisition and implications for resource use efficiency by marine phytoplankton; relation to increased CO₂ and temperature [J]. Journal of Phycology, 2007, **43**(3): 485-496.
- [27] 杨佳, 胡洪营, 李鑫. 再生水水质环境中典型水华藻的生长特性 [J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 76-81.
- [28] Schippers P, Lürding M, Scheffer M, *et al.* Increase of atmospheric CO₂ promotes phytoplankton productivity [J]. Ecology Letters, 2004, **7**(6): 446-451.
- [29] Bowes G. Facing the inevitable: plants and increasing atmospheric CO₂ [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1993, **44**(1): 309-332.
- [30] Badger M R, Andrews T J, Whitney S M, *et al.* The diversity and coevolution of Rubisco, plastids, pyrenoids, and chloroplast-based CO₂ concentrating mechanisms in algae [J]. Canadian Journal of Botany, 1998, **76**(6): 1052-1071.
- [31] Ibelings B W, Maberly S C. Photoinhibition and the availability of inorganic carbon restrict photosynthesis by surface blooms of cyanobacteria [J]. Limnology and Oceanography, 1998, **43**(3): 408-419.
- [32] Meseck S L, Smith B C, Wikfors G H, *et al.* Nutrient interactions between phytoplankton and bacterioplankton under different carbon dioxide regimes [J]. Journal of Applied Phycology, 2006, **19**(3): 229-237.
- [33] Levitan O, Rosenberg G, Setlik I, *et al.* Elevated CO₂ enhances nitrogen fixation and growth in the marine cyanobacterium *Trichodesmium* [J]. Global Change Biology, 2007, **13**(2): 531-538.
- [34] Jansson M, Karlsson J, Jonsson A. Carbon dioxide supersaturation promotes primary production in lakes [J]. Ecology Letters, 2012, **15**(6): 527-532.
- [35] Dring M J, Wagner A, Lüning K. Contribution of the UV component of natural sunlight to photoinhibition of photosynthesis in six species of subtidal brown and red seaweeds [J]. Plant, Cell & Environment, 2001, **24**(11): 1153-1164.
- [36] Shelly K, Heraud P, Beardall J. Interactive effects of PAR and UV-B radiation on PSII electron transport in the marine alga *Dunaliella Tertiolecta* (Chlorophyceae) [J]. Journal of Phycology, 2003, **39**(3): 509-512.
- [37] 吴晓东, 孔繁翔, 曹焕生, 等. 越冬浮游植物光合作用活性的原位研究 [J]. 湖泊科学, 2007, **19**(2): 139-145.
- [38] 叶琳琳, 史小丽, 于洋, 等. 藻类水华对太湖梅梁湾不同粒径有机组分结构的影响 [J]. 环境科学学报, 2012, **32**(3): 662-667.
- [39] Badger M R, Price G D. CO₂ concentrating mechanisms in cyanobacteria: molecular components, their diversity and evolution [J]. Journal of Experimental Botany, 2003, **54**(383): 609-622.
- [40] Hessen D O, Anderson T R. Excess carbon in aquatic organisms and ecosystems: Physiological, ecological and evolutionary implications [J]. Limnology and Oceanography, 2008, **53**(4): 1685-1696.

CONTENTS

Concentrations and Ozone Formation Potentials of BTEX During 2008-2010 in Urban Beijing, China	CAO Han-yu, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2065)
Aging and Mixing State of Particulate Matter During Aerosol Pollution Episode in Autumn Shanghai Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	MU Ying-ying, LOU Sheng-rong, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (2071)
Chemical Characteristics and Source Assessment of Rainwater at Shenyang	ZHANG Lin-jing, ZHANG Xiu-ying, JIANG Hong, <i>et al.</i> (2081)
Variation of Atmospheric Pollutants in Qinhuangdao City	LIU Lu-ning, SHEN Yu-xuan, XIN Jin-yuan, <i>et al.</i> (2089)
NH ₃ , N ₂ O, CH ₄ and CO ₂ Emissions from Growing Process of Caged Broilers	ZHOU Zhong-kai, ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, <i>et al.</i> (2098)
Synergetic Effects of Silicon Carbide and Molecular Sieve Loaded Catalyst on Microwave Assisted Catalytic Oxidation of Toluene	WANG Xiao-hui, BO Long-li, LIU Hai-nan, <i>et al.</i> (2107)
Removal of Mixed Waste Gases by the Biotrickling Filter	ZHANG Ding-feng, FANG Jun-yi, YE Jie-xu, <i>et al.</i> (2116)
Decomposition of Carbon Disulfide by Pulse Corona Under Oxidizing and Reducing Atmosphere	JIN Sheng, HUANG Li-wei, LI Guo-ping (2121)
Effects of Simulated Elevation of Atmospheric CO ₂ Concentration on the Physiological Features of Spring Phytoplankton in Taihu Lake	ZHAO Xu-hui, TANG Long-sheng, SHI Xiao-li, <i>et al.</i> (2126)
A New Method for Estimation of the Lake Quality Reference Condition	HUA Zu-lin, WANG Liang (2134)
Parameter Sensitivity Analysis of Runoff Simulation and Model Adaptability Research Based on HSPF	LI Yan, LI Zhao-fu, XI Qing (2139)
Study on Water Quality Monitoring Scheme Based on Non-Point Source Pollution	WU Xi-jun, LI Huai-en, LI Jia-ke, <i>et al.</i> (2146)
Characteristics of Nutrient Loss by Runoff in Sloping Arable Land of Yellow-brown Under Different Rainfall Intensities	CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (2151)
Distribution of Dissolved Inorganic Nutrients and Dissolved Oxygen in the High Frequency Area of Harmful Algal Blooms in the East China Sea in Spring	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, CHEN Peng, <i>et al.</i> (2159)
Temporal-Spatial Distribution of Algal Cells During Drought Period in Daning River of Three Gorges	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, WANG Kun, <i>et al.</i> (2166)
Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen Components in the Lake Sediment to Algae	FENG Wei-ying, ZHANG Sheng, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2176)
Influence of Decomposition of <i>Cladophora</i> sp. on Phosphorus Concentrations and Forms in the Overlying Water	HOU Jin-zhi, WEI Quan, GAO Li, <i>et al.</i> (2184)
Phosphorus Exchange Between Suspended Solids Sediments Overlying Water Under Repeated Disturbance	LI Da-peng, WANG Jing, HUANG Yong (2191)
Distribution Characteristics of PBDEs in Surface Sediment from the Three Gorges Reservoir of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2198)
Study on UV and H ₂ O ₂ Combined Inactivation of <i>E. coli</i> in Drinking Water	ZHANG Yi-qing, ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji (2205)
Kinetics and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate Degradation in Aqueous Solution by Ozonation	YU Li, ZHANG Pei-long, HOU Jia-cai, <i>et al.</i> (2210)
Effects of Nitrate Ion on Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	MAO Wen, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2218)
Chlorination of Ethynyl Estradiol: A Kinetic and Mechanistic Study	WANG Bin-nan, LIU Guo-qiang, KONG De-yang, <i>et al.</i> (2225)
Metal Ions Restrained the Elimination of 4- <i>tert</i> -Octylphenol by δ -MnO ₂	LI Fei-li, MOU Hua-qian (2232)
Removal of Bisphenol A in Aqueous Solutions by Core-shell Magnetic Molecularly Imprinted Polymers	LIU Jian-ming, LI Hong-hong, XIONG Zhen-hu (2240)
Research on Removal of Tetrabromobisphenol A from Synthetic Wastewater by Nanoscale Zero Valent Iron Supported on Organobentonite	YAN Meng-yue, PANG Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (2249)
Measurement of Dissolved Organic Nitrogen with Nanofiltration Pretreatment and Its Distribution Characteristics in Landscape Water	YU Hong-lei, HUO Shou-liang, YANG Zhou-sheng, <i>et al.</i> (2256)
Preparation of a Novel Modified Hydrogel and Study of Its Adsorption Performance	WU Ning-mei, LI Zheng-kui (2263)
Photocatalytic Reductive Degradation of Direct Red 4BE by Phosphotungstic Acid	WEI Hong, LI Ke-bin, LI Juan, <i>et al.</i> (2271)
Wastewater Treatment Using a Microbubble Aerated Biofilm Reactor	ZHANG Lei, LIU Ping, MA Jin, <i>et al.</i> (2277)
Research on Fenton Treatment of the Biochemical Processes Effluent of Bamboo Industry Wastewater	GUO Qing-wen, ZHANG Min, WANG Wei, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Fe ²⁺ on Fermentation Hydrogen Production in an UASB	LI Yong-feng, WANG Yi-xuan, CHENG Guo-ling, <i>et al.</i> (2290)
Influence of Substrate Concentration on PHA Production Using Fermented Sugar Cane as Substrate	CHEN Zhi-qiang, DENG Yi, HUANG Long, <i>et al.</i> (2295)
Study on Rapid Start-up of a Nitrifying Process Using Aerobic Granular Sludge as Seed Sludge	LIU Wen-ru, SHEN Yao-liang, DING Ling-ling, <i>et al.</i> (2302)
Influencing Factors of High-Concentration Lead Removal Using the Phosphorus-Accumulating Sludge	YANG Min, LU Long, FENG Yong, <i>et al.</i> (2309)
Preliminary Study on Characteristics of Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Granular Sludge Systems	LI Zhi-hua, FAN Chang-qing, WANG Xiao-chang (2314)
Ecological Risk Assessment of Bisphenol A in Chinese Freshwaters	WANG Hao, FENG Cheng-lian, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (2319)
Species Sensitivity Evaluation of <i>Pseudorasbora parva</i>	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (2329)
Comparison of Aquatic Predicted No-Effect Concentrations (PNECs) for Pentachlorophenol Derived from Different Assessment Approaches	LEI Bing-li, WEN Yu, WANG Yi-pei, <i>et al.</i> (2335)
Study on Hair Hg and Pb Content Distribution of Traffic Polices, Guilin	QIAN Jian-ping, ZHANG Li, LI Cheng-chao, <i>et al.</i> (2344)
Changes in Phototoxic Index of <i>Daphnia carinata</i> Under Electric Field of Direct Current in Response to Cr ⁶⁺ and Hg ²⁺	WANG Fei-xiang, YUAN Ling, HUANG Jian-guo (2350)
Effect of UV-B Radiation on the Chemical Composition and Subsequent Decomposition of <i>Cyclobalanopsis glauca</i> Leaf Litter	SONG Xin-zhang, BU Tao, ZHANG Shui-kui, <i>et al.</i> (2355)
Leaf Micro-morphology and Features in Adsorbing Air Suspended Particulate Matter and Accumulating Heavy Metals in Seven Tress Species	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (2361)
Effect of Dissolved Oxygen on Microbial Community in Simultaneous Removal of Carbon, Nitrogen and Sulfur Process	YU Hao, CHEN Chuan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (2368)
Microbial Activity and Community Structure Analysis Under the Different Land Use Patterns in Farmland Soils: Based on the Methods PLFA and MicroResp TM	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (2375)
Effects of Drying-rewetting Alternation on Nitrogen Dynamics in a Typical Coastal Wetland: A Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (2383)
Cadmium and Selected Heavy Metals in Soils of Jianping Area in Wushan County, the Three Gorges Region: Distribution and Source Recognition	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, NING Zeng-ping, <i>et al.</i> (2390)
Total Contents of Heavy Metals and Their Chemical Fractionation in Agricultural Soils at Different Locations of Beijing City	CHEN Zhi-fan, ZHAO Ye, GUO Ting-zhong, <i>et al.</i> (2399)
Influence of Season Change on the Level of Heavy Metals in Outdoor Settled Dusts in Different Functional Areas of Guiyang City	LI Xiao-yan (2407)
Characteristics of Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls Contamination in Soils of Gudao Region in Dongying	WANG Deng-ge, CUI Zhao-jie, FU Xiao-wen, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Organic Matter Leaching in Forest Soil	DUAN Lei, MA Xiao-xiao, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2422)
<i>Ex-situ</i> Remediation of PAHs Contaminated Site by Successive Methyl- β -Cyclodextrin Enhanced Soil Washing	SUN Ming-ming, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2428)
Effects of <i>Bacillus mucilaginosus</i> on the Cd Content of Rhizosphere Soil and Enzymes in Soil of <i>Brassica juncea</i>	YANG Rong, LI Bo-wen, LIU Wei (2436)
Concentrations of Antibiotics in Vegetables from Manure-mended Farm	WU Xiao-lian, XIANG Lei, MO Ce-hui, <i>et al.</i> (2442)
Characteristics of Organic Nitrogen Mineralization in Organic Waste Compost-Amended Soil	ZHANG Xu, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (2448)
Characteristics and Influence Factors of the Energy Consumption and Pollutant Discharge of Municipal Solid Waste Transfer Stations in Beijing	WANG Zhao, LI Zhen-shan, FENG Ya-bin, <i>et al.</i> (2456)
Influence of Ammonia on Leaching Behaviors of Incineration Fly Ash and Its Geochemical Modeling	GUAN Zhen-zhen, CHEN De-zhen, Thomas Astrup (2464)
Pretreatment Technology for Fly Ash from MSWI and the Corresponding Study of Chloride Behavior	ZHU Fen-fen, Takaoka Masaki, Oshita Kazuyuki, <i>et al.</i> (2473)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of Mesoporous Activated Carbon with Acidic Groups	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (2479)
Preliminary Assessment of the Potential of Biochar Technology in Mitigating the Greenhouse Effect in China	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (2486)
Research of Potassium Flow and Circulation Based on Substance Flow Analysis	BAI Hua, ZENG Si-yu, DONG Xin, <i>et al.</i> (2493)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 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)

2013年6月15日 34卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 6 Jun. 15, 2013

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	中国国际图书贸易总公司 (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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行