

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律	刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)
太原冬季 PM _{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征	杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪娉, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)
盘锦市冬季 PM _{2.5} 水溶性离子特征及来源分析	张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)
广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析	古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)
热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋非烯的排放特征	金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)
天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用	蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬乐 (2548)
亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较	朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)
京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估	卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)
北京北运河河流生态系统健康评价	顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)
长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析	董磊, 汤显强, 林莉, 郇超, 黎睿, 吴敏 (2588)
福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征	张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张炯 (2600)
三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价	方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)
三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征	潘婵娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)
基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源	孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)
天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响	孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧赞 (2632)
重庆雪玉洞滴水水文地球化学时空变化特征及其环境意义	曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)
岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例	刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九继, 王正雄, 段世辉 (2651)
托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义	李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲桂, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)
五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响	彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)
西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例	张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)
四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子	郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)
营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验	王梦梦, 张伟, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)
植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响	刘森, 陈开宁 (2706)
江汉平原水稻季灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险	华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪媛 (2715)
冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除	柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)
臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制	董秉直, 高昊旻, 胡孟柳 (2732)
中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性	于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)
海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能	曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)
玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性	龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)
硝化细菌的培养及包埋固定化中试	杨宏, 胡银龙 (2763)
不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能	安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)
高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律	詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)
污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化	李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)
丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响	高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)
同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析	孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)
四环素对人工粪堆好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响	时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)
长期定位有机物还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响	袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)
菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)
¹³ C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入	孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)
西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响	杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)
江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布	吕建树, 何华春 (2853)
黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布	于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)
典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价: 以临安市为例	郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林于也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)
西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价	周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)
典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及其风险评价	张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)
生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响	黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)
厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响	王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)
矿业活动影响稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险	田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)
硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响	刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)
吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征	李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)
喷施锌肥对油菜镉锌生物可给性的影响	王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)
贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征	许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)
废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险	付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)
县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态	孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)
颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响	严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)
防晒剂的海洋环境行为与生物毒性	朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)
《环境科学》征订启事 (2527)	《环境科学》征稿简则 (2723)
信息 (2826, 2852, 2910)	

营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金孢藻生长和竞争影响的原位实验

王梦梦^{1,2,3}, 张玮^{1,2,3*}, 张军毅⁴, 尚光霞^{1,2,3}, 杜彩丽^{1,2,3}, 王丽卿^{1,2,3*}

(1. 上海海洋大学农业部鱼类营养与环境生态研究中心, 上海 201306; 2. 上海海洋大学水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306; 3. 上海海洋大学水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306; 4. 无锡市环境监测中心站, 无锡 214023)

摘要: 为探究在水体营养盐浓度持续增加的条件下, 卵孢金孢藻 (*Chrysosporum ovalisporum*) 的生长趋势和其它藻类的生长响应, 在上海滴水湖畔采用 39 个大桶 (100 L) 进行不同浓度 N、P 添加的原位中型模拟实验。结果表明, 高浓度营养盐添加可促进卵孢金孢藻和绿藻生物量的增加, 加 P 组二者生物量的增加趋势高于加 N 组, 但差异并不显著 ($P > 0.05$), 加 N&P 组二者生物量的增加趋势显著高于加 N 组和加 P 组 ($P < 0.001$)。在加 N 组和加 N&P 组, 卵孢金孢藻相对丰度随营养盐添加量的增加呈显著的下降趋势 ($P < 0.05$), 而在加 P 组其相对丰度随着 P 浓度的增加略有上升, 但不显著 ($P > 0.05$)。实验结束时, 所有处理组中卵孢金孢藻的生物量不占优势, 而小粒径藻类[色球藻属 (*Chroococcus* spp.)、空星藻属 (*Coelastrum* spp.)、小球藻属 (*Chlorella* spp.)、四角藻属 (*Tetraedron* spp.)、栅藻属 (*Scenedesmus* spp.)] 的生物量随营养盐浓度升高的增加趋势显著高于卵孢金孢藻 ($P < 0.05$), 小型绿藻占据绝对优势, 表明在高温和相对静止的条件下, 随着水体中营养盐浓度的持续增加, 小粒径藻类易替代卵孢金孢藻而占据竞争优势; 这与小粒径藻类在高营养条件下代谢速率较高有关, 也与绿藻喜静止、高光强的生物学特性有关。小型绿藻占据优势可能成为小型超富营养水体中浮游植物群落在高温季节的演替方向之一。

关键词: 卵孢金孢藻; 水华蓝藻; 富营养化; 绿藻; 中型实验

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2698-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201711020

Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium *Chrysosporum ovalisporum*: An In-situ Experiment

WANG Meng-meng^{1,2,3}, ZHANG Wei^{1,2,3*}, ZHANG Jun-yi⁴, SHANG Guang-xia^{1,2,3}, DU Cai-li^{1,2,3}, WANG Li-qing^{1,2,3*}

(1. Centre for Research on Environmental Ecology and Fish Nutrient (CREEFN) of the Ministry of Agriculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Ministry of Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. Wuxi Environmental Monitoring Centre Station, Wuxi 214023, China)

Abstract: An in-situ mesocosm experiment was conducted to study the growth dynamic of *Chrysosporum ovalisporum* and the other phytoplankton organisms under accelerated eutrophication conditions by using 39 buckets (100 L) in Lake Dishui, Shanghai. The results showed that the growth of both filamentous cyanobacteria (*C. ovalisporum*) and green algae were promoted with nutrient enrichment. The increase in the algal biomass rate in N plus P addition treatments was significantly higher than in treatments with N or P alone ($P < 0.05$). Although the increasing biomass rate with P addition alone was higher than with N alone, there was no statistically significant difference ($P > 0.05$). The relevant abundance of *C. ovalisporum* showed a significantly decreasing trend with N addition treatments and N plus P additions treatments ($P < 0.05$), although it was slightly increased with the treatments with P alone ($P > 0.05$). Nutrient addition could significantly improve the growth of small sized algae organisms (*Chroococcus* spp., *Coelastrum* spp., *Chlorella* spp., *Tetraedron* spp., and *Scenedesmus* spp.) rather than *C. ovalisporum* in all treatments ($P < 0.05$). The small sized green algae overcoming *C. ovalisporum* indicated that small sized algae were more favored by hyper-eutrophicated, high water temperature and relatively undisturbed conditions. This is because small sized algal organisms have higher metabolic and growth rates compared to other sized algae, especially in stationary water regimens and high, light density conditions. We foresee that the small sized algae, Chlorophyte, dominating the small hyper-eutrophic aquatic system may be a potential succession pattern in the high water temperature seasons.

收稿日期: 2017-11-01; 修订日期: 2017-12-12

基金项目: 上海市优秀技术带头人计划项目(15XD1522900); 上海水务局河道生态监测项目(沪水科 2012-2)

作者简介: 王梦梦(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为藻类生态学, E-mail: aquawangmm@163.com

* 通信作者, E-mail: weizhang@shou.edu.cn; lqwang@shou.edu.cn

Key words: *Chrysosporum ovalisporum*; cyanobacterial bloom; eutrophication; Chlorophyte; in-situ mesocosm experiment

水体富营养化导致湖泊蓝藻水华频繁暴发, 并促使藻类有毒有害物种的全球性扩散^[1,2]. 有毒蓝藻的暴发不仅降低了水资源的利用效能, 而且会改变原有浮游植物的群落结构, 并通过级联效应对浮游动物和鱼类造成影响^[3], 最终引起严重的生态危机, 给人类社会造成巨大的经济损失.

有研究认为^[4], 当水体中的氮(Nitrogen, N)浓度小于 $30 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 蓝藻暴发的风险仅为 10%, 而当水体中磷(Phosphorus, P)浓度接近或超过 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 水体蓝藻暴发的风险将超过 80%. Xu 等的研究发现^[5], 当太湖水体 N、P 浓度分别大于 $80 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $200 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 就可以满足微囊藻水华暴发的营养条件. 除了对富营养水体的偏好外, 蓝藻还具有其他一些特性, 利于其维持在水体中的优势地位. 例如不少蓝藻生物可以通过形成胶被聚集成大群体或丝状体^[6] 以及分泌毒素和异味物质^[7] 从而降低自己被捕食的风险; 另外, 一些蓝藻会对其它浮游植物胞外碱性磷酸酶的释放造成影响, 尤其对一些绿藻的生长产生抑制^[8], 以保持其在浮游生物生态位竞争中的优势地位. 朱伟等^[9] 的研究也表明在重富营养条件下, 高温可能会抑制蓝藻生长, 使得绿藻成为浮游植物优势种. 尽管目前有关蓝藻水华暴发机理的研究较多, 但总体而言, 有关水体超富营养条件下蓝藻生长和藻类群落结构生态响应的研究还相对较少^[10], 尤其是在亚热带地区湖泊中.

卵孢金孢藻(*Chrysosporum ovalisporum*) 之前被报道为卵孢束丝藻(*Aphanizomenon ovalisporum*)^[11], 是一种能进行固氮作用, 并可产生拟柱胞藻毒素(cylindrospermopsin, CYN)的水华性蓝藻^[12]. 早期报道该物种主要分布于东欧的土耳其、以色列等国家以及澳大利亚昆士兰地区的水库和中小型湖泊中, 并经常暴发水华^[13,14]; 近年来, 研究人员在亚洲的新加坡、俄罗斯远东地区以及北美的少数地区也发现了该物种的踪迹, 并认为该物种与水华蓝藻拉氏拟柱胞藻(*Cylindrospermopsis raciborskii*) 相似, 有较强的入侵能力^[15,16]. Zhang 等^[17] 在 2013 年对上海地区湖泊浮游植物调查时, 在滴水湖检测出了卵孢金孢藻, 并首次在国内对卵孢金孢藻水华进行了报道. 目前, 有关该物种产毒特性和地理分布的研究相对较多^[13,18,19], 也有部分研究涉及了温度和光照对该物种的光合作用、生长及扩散的影

响^[20,21], 但迄今为止, 有关该物种和群落中其它藻类对不同 N、P 营养浓度(尤其是超富营养条件下)生长响应的研究还鲜见报道.

本文以卵孢金孢藻为研究主体, 通过野外原位大桶模拟营养盐添加实验, 研究富营养或超富营养状态下卵孢金孢藻在野外水体中的生长趋势以及群落中其他藻类物种的生长响应, 以期为我国水华蓝藻生物学的基础研究积累资料, 并为入侵水华蓝藻的水资源生态管理提供依据.

1 材料与方法

1.1 实验藻种

实验所用卵孢金孢藻为本实验室前期在滴水湖分离鉴定(形态学和 16S rRNA 鉴定)获得的纯化藻株, 编号为 CEWA01007^[17]. 实验开始前, 卵孢金孢藻藻液经 3 次离心($4000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 10 min)后保存于生理盐水中待用, 以减少藻类培养液中 N、P 对大桶内营养盐水平的影响.

1.2 实验设计

将 39 个体积为 100 L 的塑料桶, 布置在上海临港滴水湖畔, 于 2016 年 7 月 25 日, 在同一地点将湖水泵入塑料桶(每个桶 80 L 湖水). 以湖水原始 N、P 浓度为对照组, 设置加 N 组、加 P 组和同时添加 N 和 P 组(N&P), 每个组设置 4 个梯度水平, 即为原湖水浓度的 2、4、8 和 16 倍, 每个水平设置 3 个重复(表 1). 处理组初始 N 和 P 浓度梯度通过添加 NaNO_3 和 KH_2PO_4 来实现. 添加卵孢金孢藻后, 每个桶中的卵孢金孢藻初始生物量为 $(1.00 \pm 0.17) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

整个实验进行时间为 8 d, 实验首末进行浮游植物样品的采集, 理化指标每日同一时间进行测定, 并通过添加 NaNO_3 和 KH_2PO_4 来保证大桶内 N、P 浓度梯度水平. 实验期间, 每天早、中、晚充分搅动大桶内的水体, 使得营养盐分布均匀.

正式实验前对湖水进行浮游植物群落测定, 共检出浮游植物 6 门 42 属 67 种, 其中绿藻为优势门类, 有 27 属 41 种, 占 61.2%, 绿藻生物量占浮游植物总生物量的 36.5%; 蓝藻 5 属 5 种, 占浮游植物总物种数的 7.5%, 蓝藻生物量占浮游植物总生物量的 30.7%; 硅藻 9 属 15 种, 占浮游植物总物种数的 22.4%, 硅藻生物量占浮游植物总生物量的 27.4%. 主要优势类群有卵囊藻(*Oocystis* spp.)、顶

棘藻 (*Chodatella* spp.)、空星藻 (*Coelastrum* spp.)、衣藻 (*Chlamydomonas* spp.)、胶网藻 (*Dictyosphaerium* spp.)、小环藻 (*Cyclotella* spp.)、直链藻 (*Melosira* spp.)、卵形藻 (*Cocconeis* spp.)。

表 1 湖水和不同处理组的氮磷浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Overview of the experimental treatments and the concentration of TN and TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

处理组 ¹⁾		TN	TP
加 N 组	N-2	2.40	0.08
	N-4	4.80	0.08
	N-8	9.60	0.08
	N-16	19.20	0.08
加 P 组	P-2	1.20	0.16
	P-4	1.20	0.32
	P-8	1.20	0.64
	P-16	1.20	1.28
加 N&P 组	NP-2	2.40	0.16
	NP-4	4.80	0.32
	NP-8	9.60	0.64
	NP-16	19.20	1.28
对照组		1.20	0.08

1)表中 N-2、N-4、N-8、N-16 分别表示 P 浓度相同,添加 N 的浓度分别为对照组的 2、4、8、16 倍;P-2、P-4、P-8、P-16 分别表示 N 浓度相同,添加 P 的浓度分别为对照组的 2、4、8、16 倍;NP-2、NP-4、NP-8、NP-16 分别表示添加 N 和添加 P 的浓度均为对照组 N、P 浓度的 2、4、8、16 倍

1.3 理化条件和浮游植物测定

使用 YSI Pro-plus 水质测定仪每日同一时间测定大桶内水温 (water temperature, WT), pH, 溶氧 (dissolved oxygen, DO) 和电导率 (electricity conductivity, EC)。使用联合过硫酸盐消化法测定总氮 (total nitrogen, TN)、总磷 (total phosphorus,

TP)^[22]。

用鲁哥氏碘液 (最终浓度为 2%) 和甲醛溶液 (最终浓度 4%) 固定浮游植物样品,并沉降 48 h,浓缩至 50 mL。使用 Sedgwick-Rafter 计数框于 400 × 倍数下显微镜 (Olympus BX53) 计数。根据经典分类学资料^[22, 23] 鉴定和计数浮游植物物种。

生物量的计算,假设 1 mm³ 细胞体积相当于 1 mg 鲜重,每种藻的生物量为该物种生物密度与该物种单个藻鲜重的乘积,总生物量为所有藻类物种生物量的总和,具体计算方法参考文献 [24]。

1.4 数据分析

采用 SPSS 18.0 软件进行方差分析 (Tukey's post hoc test) 对处理组与对照组的结果进行比较分析;不同处理组藻类生物量的增加趋势 (斜率差异) 用协方差进行比较。优势种属相对增长率 (RGR) 通过收集到的样品中的细胞数来确定,并根据以下公式计算:

$$\text{RGR} = (N_{t+7} - N_t) / N_t \times 100\%$$

式中, N_{t+7} 是指在 $t+7$ 培养时间点藻的细胞数量, N_t 是指在 t 培养时间点的藻的细胞数量。

2 结果与分析

2.1 环境参数的变化

实验期间,前 5 d 为晴天,后 3 d 为阴天,水温变化区间为 25.5 ~ 32.0℃, pH、DO 和 EC 在不同处理之间变化幅度有差异,其中添加 N&P 处理组的变化范围明显高于加 N 处理组、加 P 处理组和对照组 (表 2)。

表 2 溶氧、电导率和 pH 在不同处理组的变化

Table 2 Range of DO, EC, and pH with various treatments

项目	对照组	加 N 组	加 P 组	加 N&P 组
pH	8.42 ~ 8.87	8.32 ~ 9.25	8.52 ~ 9.28	8.37 ~ 9.57
DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	6.98 ~ 12.30	7.23 ~ 14.55	7.05 ~ 12.33	7.15 ~ 16.32
EC/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	1 278 ~ 1 489	1 264 ~ 1 660	1 285 ~ 1 549	1 275 ~ 1 730

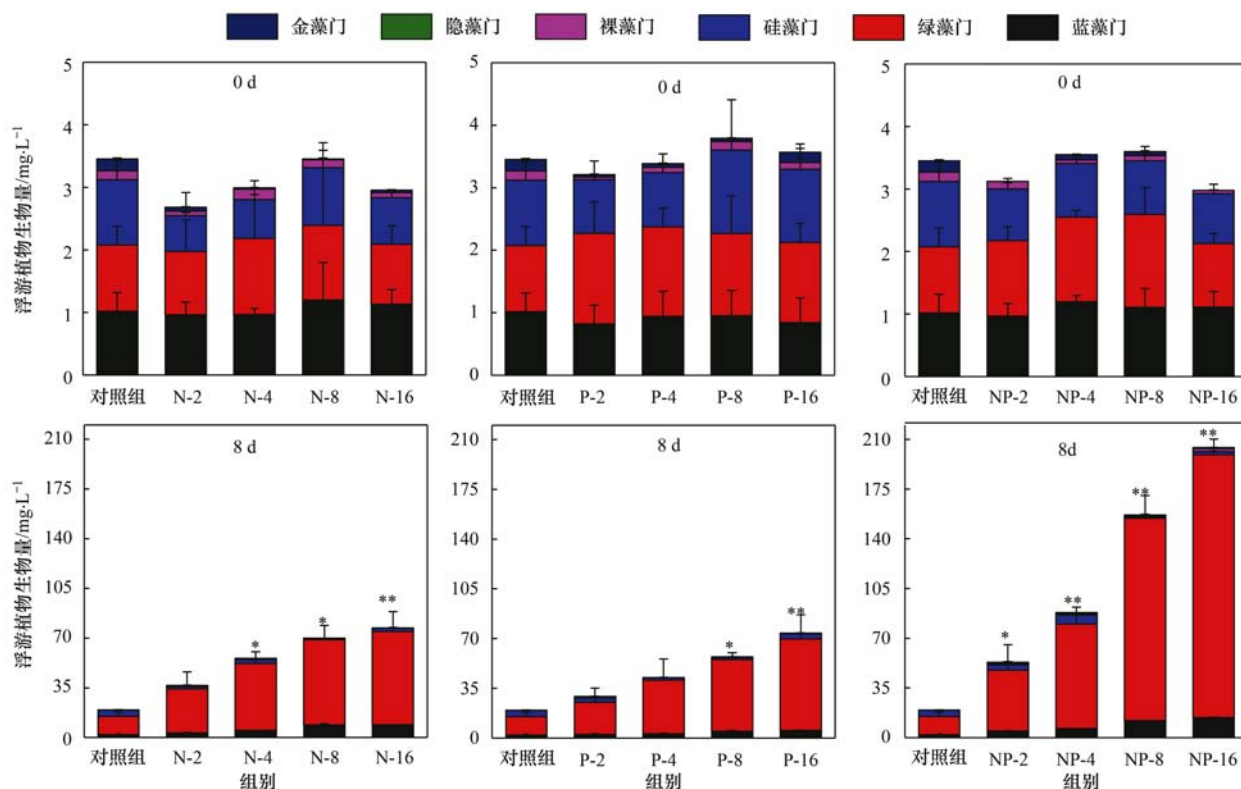
2.2 添加 N、P 后藻类总生物量的变化

实验各桶的初始藻类总生物量为 $(3.20 \pm 0.50)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 1)。加 N 组经过 8 d 培养后,各水平的总生物量均高于对照组,尤其添加 8 倍和 16 倍 N 浓度组显著高于对照组 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$);添加 16 倍 N 浓度组的生物量显著高于添加 2 倍 N 浓度组的生物量 ($P < 0.05$),其他各水平无显著差异 ($P > 0.05$)。加 P 处理组,每个处理水平的生物量均高于对照组,添加 4 倍 P 浓度及以上浓

度的处理组生物量均显著高于对照组 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。加 N&P 组,每个添加水平的生物量均显著高于对照组 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$),添加 16 倍 N&P 的生物量显著高于添加 2 倍和 4 倍的水平 ($P < 0.05$)。

2.3 添加 N、P 后蓝藻和绿藻生物量的变化趋势

经过 8 d 培养,绿藻门占绝对优势,其相对丰度上升明显,对照组绿藻门占 $(66.0 \pm 7.5)\%$,加 N 组在 $(78.0 \pm 4.1)\% \sim (87.1 \pm 8.8)\%$ 之间,加 P



* 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$; N-2、N-4、N-8、N-16 分别表示磷 P 浓度相同, 添加 N 的浓度分别为对照组的 2、4、8、16 倍; P-2、P-4、P-8、P-16 分别表示 N 浓度不变, 添加 P 的浓度分别为对照组的 2、4、8、16 倍; NP-2、NP-4、NP-8、NP-16 分别表示添加 N 且添加 P 的浓度为对照组 N、P 浓度的 2、4、8、16 倍, 下同

图 1 不同处理组浮游植物生物量的变化

Fig. 1 Variations of phytoplankton biomass with different treatments

组在 $(80.2 \pm 3.8)\%$ ~ $(85.1 \pm 5.5)\%$ 之间; 加 N&P 组在 $(80.2 \pm 3.8)\%$ ~ $(90.5 \pm 5.5)\%$ 之间, 添加 16 倍 N 和 16 倍 P 的绿藻丰度都显著高于对照组 ($P < 0.05$), 加 N&P 的处理组中, 所有水平的绿藻相对丰度都显著高于对照组 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$). 绿藻门的相对丰度在 3 个处理组中, 都呈现随 N、P 添加量增加而增高的趋势, 并且添加 N&P 的增加趋势显著高于其他两个组 ($P < 0.001$) (图 2). 蓝藻门的丰度在 3 个处理组中, 都随着营养盐添加量的增加而增加 (加 N: $R^2 = 0.78$; 加 P: $R^2 = 0.51$; 加 N&P: $R^2 = 0.72$); 加 P 组的增加趋势高于加 N 组, 但不显著 ($P > 0.05$), 加 N&P 组的增加趋势显著高于加 N 组和加 P 组 ($P < 0.001$).

2.4 卵孢金孢藻的变化趋势

总体而言, 营养盐的添加对卵孢金孢藻的生长起促进作用, 加 P 组的促进趋势强于加 N 组, 而加 N&P 组的增加趋势显著高于其他两个处理组 ($P < 0.05$) (图 3). 卵孢金孢藻的相对丰度在对照组最高 ($13.0 \pm 1.1\%$), 在添加 16 倍 N&P 时最低, 仅为 $(6.1 \pm 0.8)\%$ (图 3). 在加 N 组和加 N&P 组, 卵

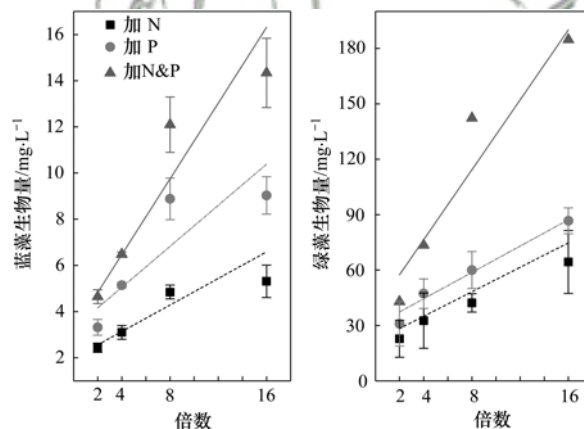


图 2 蓝藻和绿藻在不同处理组变化趋势

Fig. 2 Dynamics of cyanobacterial and chlorophyte biomass at different levels with different treatments

孢金孢藻相对丰度随营养盐添加量的增加呈显著的下降趋势 ($P < 0.05$), 而在添加 P 组略有上升, 但不显著 ($P > 0.05$).

2.5 优势属种的特征及其相对增长率

经过 8 d 的野外培养后, 大桶中的主要优势类群为蓝藻门的色球藻属 (*Chroococcus* spp.)、卵孢金孢藻 (*C. ovalisporum*); 绿藻门的空星藻属

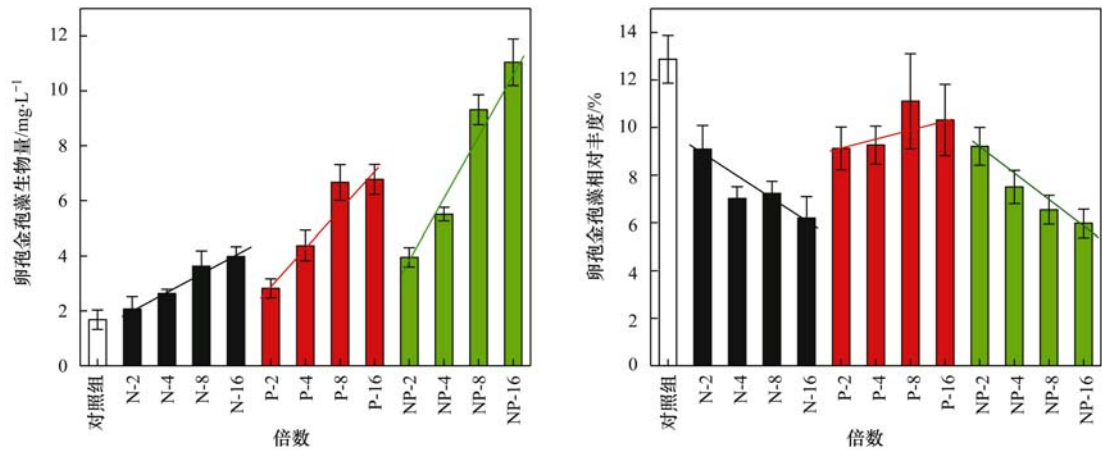


图3 卵抱金孢藻在不同处理组的生物量变化和相对丰度变化

Fig. 3 Variations of *C. ovalisporum* biomass and relative abundance with different treatments

(*Coelastrum* spp.)、小球藻属(*Chlorella* spp.)、四角藻属(*Tetradron* spp.)、栅藻属(*Scenedesmus* spp.)。除了金孢藻外,其他的优势类群主要为单胞藻或小型群体。这些优势种属的形态特征见表3。

表3 实验中蓝藻门和绿藻门主要属的特征¹⁾

Table 3 Main genera of cyanobacteria and chlorophyte in the experiment

门	属	形态特征	粒径/ μm
蓝藻门	色球藻	半球形或近球形	6.3 ± 2.4 (细胞直径)
	金孢藻	细胞近圆柱形, 丝状	530.0 ± 187.0 (藻丝长), 6.1 ± 0.5 (藻丝宽)
绿藻门	空星藻属	细胞球形或近球形, 小型群体	16.0 ± 4.9 (细胞直径)
	小球藻属	球形或椭圆形	8.0 ± 2.3 (细胞长), 6.0 ± 1.8 (宽)
	四角藻属	四角形或角锥形	14.0 ± 2.5 (细胞边长或直径)
	栅藻属	新月形, 椭圆形	17.0 ± 6.0 (细胞长), 6.0 ± 1.8 (宽)

1) 每个属挑选 50 个以上个体进行测量获得相关参数

添加营养盐对卵抱金孢藻的相对增长率有促进作用, 相对增长率在 $(13.0 \pm 3.5)\% \sim (124.0 \pm 3.5)\%$ 之间, 其中添加 N&P 组的相对增长率增加趋势(斜率)显著高于其他两个处理组 ($P < 0.05$)。高浓度加 N、加 P 处理和加 N&P 处理后, 色球藻的相对增长率显著高于对照组 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。

添加营养盐对小球藻的相对增长率也有促进作用, 但其增加趋势小于其他优势绿藻。添加 N&P 对栅藻属的增长促进作用显著 ($P < 0.01$), 最高达 $(56.0 \pm 8.6)\%$ 。高浓度加 N、加 P 和加 N&P 处理均对四角藻属有显著的促进作用 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 最高可达 $(82.0 \pm 20.0)\%$ 。空星藻属是所有类群中最占优势的类群, 相对增长率在 $(118.0 \pm 52.0)\% \sim (1073.0 \pm 84.0)\%$ 之间, 在各个添加水平都显著高于对照组 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$); 该类群对于 N 的添加, 增加趋势明显, 但对于 P 的添加, 增加趋势不明显, 对于 N&P 的添加, 其增加趋

势显著高于其他两个处理组 ($P < 0.01$), 见图 4。

3 讨论

本研究发现, 向湖水中添加 N 或 P 显著促进了绿藻生物量的增加(图 1 和图 2)。尽管卵抱金孢藻的生物量也随着营养盐浓度的增加而增长, 但增长趋势并不显著(图 3); 在所有处理组中(包括对照组), 绿藻门优势类群的生物量和相对生长率均超过卵抱金孢藻, 尤其在高浓度的 N&P 添加组更加明显(图 4)。不少研究认为, 在水体中添加营养盐一般会促进蓝藻的增加, 并可能暴发水华^[4,25], 本研究的结果似乎与这些报道相悖。尽管水体营养盐的大量富集是蓝藻暴发水华的重要物质基础^[26], 但并非水体营养盐浓度越高蓝藻生物量就越高^[27]。许海等的研究发现^[27,28]: 水华蓝藻生长需要的 N、P 浓度低于绿藻, 在水体中营养盐浓度很高的条件下, 绿藻比蓝藻生长更快。万蕾等^[29]对微囊藻和四尾栅藻在贫营养、富营养、超富营养化水体中的生

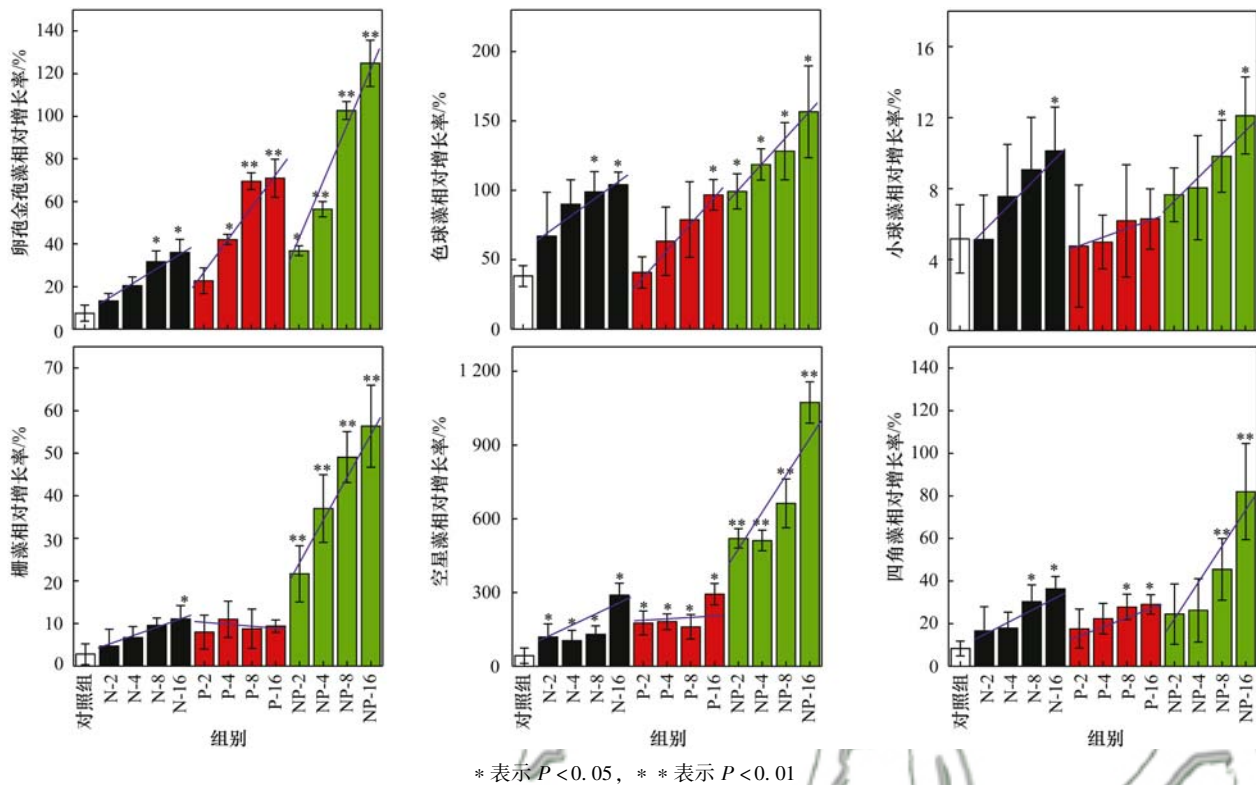


图 4 不同优势类群的相对增长率在不同处理组中的变化

Fig. 4 Variation of relative growth rate of various dominant groups with different treatments

长竞争情况进行研究时,也发现微囊藻更适宜在中等偏低的营养水平下生长,而四尾栅藻适宜于中等偏高的营养水平.对太湖浮游植物优势种的长期监测发现^[30],当P浓度超过一定阈值时(TP为 $200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$),夏季浮游植物优势种会由蓝藻变为绿藻,P浓度降低到一定水平时(TP为 $113 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$),蓝藻再次成为优势种.Jensen等^[31]对温带地区的178个湖泊调查发现,当水体TP小于 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,固氮蓝藻容易占优势;当TP大于 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 且小于 $0.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,非固氮水华蓝藻容易占优势;当TP大于 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,尤其是大于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,绿藻将占绝对优势.本实验在一定程度上对“富营养水体中小型绿藻比蓝藻更占优势”的结果在亚热带地区的水体中进行了验证.

另外,藻类的生长率与其细胞形态和大小密切相关.本研究中的所有处理组(包括对照组),除了卵孢金胞藻外,其它优势类群主要为单胞藻或小型群体,且小型单胞绿藻占据绝对优势,这也可能是细胞粒径影响生长代谢速率的结果.最新研究表明^[32],藻类细胞体积在 $0.1 \sim 10^6 \mu\text{m}^3$ 之间时,细胞生长率与细胞大小呈现单峰模型,即中间大小的藻类($50 \sim 250 \mu\text{m}^3$)具有最高的生长率;藻类细胞越大,其对营养盐的存储能力越强,但代谢和生长

速率越慢.换言之,浮游植物对于N、P营养盐吸收的能力随着细胞体积的增大而降低.这种特性导致大个体的藻类或群体性藻类往往更倾向于在中等营养水平水体中占据优势^[32].本研究中占优势的栅藻属、空星藻属、四角藻属等绿藻,其细胞体积远小于丝状蓝藻的体积,在营养条件适宜时,其生长速率将远高于卵孢金胞藻.

最后,水动力因素也是影响浮游植物生长的重要原因.在自然湖泊中,水体受风力或其他因素的扰动,导致水体光照和营养盐的分布也受到干扰,进而影响浮游植物的生长.中等强度的扰动能促进蓝藻的生长;高强度的扰动,则促使硅藻占优势;而绿藻则喜欢相对静止的水体^[33].有报道认为,小型绿藻,尤其是非运动性单胞绿藻,如盘星藻、栅藻属、空星藻属等喜欢在静止、超富营养的高温水体中爆发性增长^[34].其他研究也发现^[35],当水体中营养盐浓度增加时,小型的绿藻(粒径小于 $35 \mu\text{m}$ 的绿藻)如:星状空星藻(*Coelastrum astroideum*),尖细栅藻(*Scenedesmus acuminatus*),微小四角藻(*Tetradon minimum*)等,更易在同营养级中占据优势.本研究利用塑料桶进行实验,水体相对较小、也相对静止,利于小型绿藻生长.

4 结论

(1) 在富营养化水体中继续添加 N、P, 绿藻相对丰度随营养盐浓度升高呈显著增加, 而丝状蓝藻卵孢金孢藻的生物量虽然随营养盐浓度升高而增加, 但其相对丰度则增加不显著。

(2) 在超富营养、相对静止的高温水体中, 小粒径绿藻更易占据优势, 而丝状蓝藻卵孢金孢藻则不易形成优势; 小粒径绿藻高生长速率与其粒径大小密切相关。

致谢: 感谢课题组杨丽、吴晓敏、周东和王志虹等同学在采样工作中给予的帮助。

参考文献:

- [1] Paerl H W, Huisman J. Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms [J]. Environmental Microbiology Reports, 2009, **1**(1): 27-37.
- [2] Karjalainen M, Engström-Öst J, Korpinen S, et al. Ecosystem consequences of cyanobacteria in the Northern Baltic Sea [J]. Ambio: A Journal of the Human Environment, 2007, **36**(2-3): 195-202.
- [3] Paerl H W, Paul V J. Climate change: Links to global expansion of harmful cyanobacteria [J]. Water Research, 2012, **46**(5): 1349-1363.
- [4] Downing J A, Watson S B, Mecauley E. Predicting cyanobacteria dominance in lakes [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2001, **58**(10): 1905-1908.
- [5] 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.
- [6] Yang Z, Kong F X, Shi X L, et al. Morphological response of *Microcystis aeruginosa* to grazing by different sorts of zooplankton [J]. Hydrobiologia, 2006, **563**(1): 225-230.
- [7] Watson S B. Cyanobacterial and eukaryotic algal odour compounds: signals or by-products? A review of their biological activity [J]. Phycologia, 2003, **42**(4): 332-350.
- [8] Bar-Yosef Y, Sukenik A, Hadas O, et al. Enslavement in the water body by toxic *Aphanizomenon ovalisporum*, inducing alkaline phosphatase in phytoplanktons [J]. Current Biology, 2010, **20**(17): 1557-1561.
- [9] 朱伟, 万蕾, 赵联芳. 不同温度和营养盐质量浓度条件下藻类的种间竞争规律 [J]. 生态环境学报, 2008, **17**(1): 6-11.
- [10] Zhu W, Wan L, Zhao L F. Interspecies competition rule of algae under different temperature and nutrient concentration condition [J]. Ecology and Environment, 2008, **17**(1): 6-11.
- [11] Ma H, Cui F Y, Liu Z Q, et al. Effect of filter-feeding fish silver carp on phytoplankton species and size distribution in surface water: A field study in water works [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, **22**(2): 161-167.
- [12] Zapomělová E, Skácelová O, Pumann P, et al. Erratum to: biogeographically interesting planktonic nostocales (cyanobacteria) in the Czech Republic and their polyphasic evaluation resulting in taxonomic revisions of *anabaena bergii* Ostenfeld 1908 (*chrysosporum* gen. nov.) and *a. tenericaulis* Nygaard 1949 (*Dolichospermum tenericaule* comb. nova) [J]. Hydrobiologia, 2013, **711**(1): 201-202.
- [13] Banker R, Carmeli S, Hadas O, et al. Identification of cylindrospermopsin in *Aphanizomenon ovalisporum* (cyanophyceae) isolated from lake Kinneret, israel [J]. Journal of Phycology, 1997, **33**(4): 613-616.
- [14] Quesada A, Moreno E, Carrasco D, et al. Toxicity of *Aphanizomenon ovalisporum* (Cyanobacteria) in a Spanish water reservoir [J]. European Journal of Phycology, 2006, **41**(1): 39-45.
- [15] Messineo V, Melchiorre S, Di Corcia A, et al. Seasonal succession of *Cylindrospermopsis raciborskii* and *Aphanizomenon ovalisporum* blooms with cylindrospermopsin occurrence in the volcanic Lake Albano, Central Italy [J]. Environmental Toxicology, 2010, **25**(1): 18-27.
- [16] Medvedeva L A, Nikulina T V. Catalogue of freshwater algae of the southern part of the Russian Far East [M]. Vladivostok: Dalnauka, 2014.
- [17] Vaccarino M A, Veselá J, Johansen J R. The algal flora of acadia national park, maine [J]. Northeastern Naturalist, 2011, **18**(4): 457-474.
- [18] Zhang W, Jeppesen E, Wang M M, et al. Allelopathic effect boosts *Chrysosporum ovalisporum* dominance in summer at the expense of *Microcystis panniformis* in a shallow coastal water body [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2016, **24**(5): 4666-4675.
- [19] Fadel A, Atoui A, Lemaire B J, et al. Dynamics of the toxin cylindrospermopsin and the cyanobacterium *Chrysosporum* (*Aphanizomenon*) *ovalisporum* in a mediterranean eutrophic reservoir [J]. Toxins, 2014, **6**(11): 3041-3057.
- [20] Akcaalan R, Köker L, Oğuz A, et al. First report of cylindrospermopsin production by two cyanobacteria (*Dolichospermum mendotae* and *Chrysosporum ovalisporum*) in Lake Izmir, Turkey [J]. Toxins, 2014, **6**(11): 3173-3186.
- [21] Cirés S, Wörmer L, Wiedner C, et al. Temperature-dependent dispersal strategies of *Aphanizomenon ovalisporum* (Nostocales, Cyanobacteria): implications for the annual life cycle [J]. Microbial Ecology, 2013, **65**(1): 12-21.
- [22] Walsby A E, Yacobi Y Z, Zohary T. Annual changes in the mixed depth and critical depth for photosynthesis by *Aphanizomenon ovalisporum* that allow growth of the cyanobacterium in Lake Kinneret, Israel [J]. Journal of Plankton Research, 2003, **25**(6): 603-619.
- [23] Ebina J, Tsutsui T, Shirai T. Simultaneous determination of total nitrogen and total phosphorus in water using peroxodisulfate oxidation [J]. Water Research, 1983, **17**(12): 1721-1726.
- [24] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [25] Hu H J, Wei Y X. The freshwater algae of China freshwater algae of China [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [26] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [27] Paerl H W, Hall N S, Calandrino E S. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a world experiencing anthropogenic and climatic-induced change [J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(10): 1739-1745.

- [26] 金相灿, 屠清瑛. 中国湖泊富营养化[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [27] 许海, 杨林章, 刘兆普. 铜绿微囊藻和斜生栅藻生长的氮营养动力学特征[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(1): 69-73.
- [28] 许海, 朱广伟, 秦伯强, 等. 氮磷比对水华蓝藻优势形成的影响[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(10): 1676-1683.
Xu H, Zhu G W, Qin B Q, *et al.* Influence of nitrogen-phosphorus ratio on dominance of bloom-forming cyanobacteria (*Microcystis aeruginosa*) [J]. China Environmental Science, 2011, **31**(10): 1676-1683.
- [29] 万蕾, 朱伟, 赵联芳. 氮磷对微囊藻和栅藻生长及竞争的影响[J]. 环境科学, 2007, **28**(6): 1230-1235.
Wan L, Zhu W, Zhao L F. Effect of nitrogen and phosphorus on growth and competition of *M. aeruginosa* and *S. quadricauda* [J]. Environmental Science, 2007, **28**(6): 1230-1235.
- [30] Chen Y W, Qin B Q, Teubner K, *et al.* Long-term dynamics of phytoplankton assemblages: *Microcystis*-domination in Lake Taihu, a large shallow lake in China [J]. Journal of Plankton Research, 2003, **25**(4): 445-453.
- [31] Jensen J P, Jeppesen E, Olrik K, *et al.* Impact of nutrients and physical factors on the shift from cyanobacterial to chlorophyte dominance in shallow Danish Lakes [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1994, **51**(8): 1692-1699.
- [32] Marañón E, Cermeño P, López-Sandoval D C, *et al.* Unimodal size scaling of phytoplankton growth and the size dependence of nutrient uptake and use [J]. Ecology Letters, 2013, **16**(3): 371-379.
- [33] Huisman J, Sharples J, Stroom J M, *et al.* Changes in turbulent mixing shift competition for light between phytoplankton species [J]. Ecology, 2004, **85**(11): 2960-2970.
- [34] Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, *et al.* Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton [J]. Journal of Plankton Research, 2002, **24**(5): 417-428.
- [35] Hulot F D, Lacroix G, Lescher-Moutoué F, *et al.* Functional diversity governs ecosystem response to nutrient enrichment [J]. Nature, 2000, **405**(6784): 340-344.



CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM _{2.5} Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Panjin	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin	CAI Zi-ying, HAN Su-qin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin	LI Yong-ge, LI Zong-xing, GAO Hao-yang, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO ₂ and CH ₄ Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysosporum ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR)	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(<i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ¹³ C Pulse-labeling	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO ₂ Emissions in Chongqing: An Empirical Analysis at the County Level	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)