ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第36卷 第4期
2015年4月15日

目 次

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示 …… 高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)
2013年1月北京市 $PM_{2.5}$ 区域来源解析 …… 李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松(1148)
2013年1月北京市一次空气重污染成因分析 …… 程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)
上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征 …… 常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)
厦门春季 PM_{10} 中 PAHs 成分谱特征及其与气象要素相关性分析 …… 张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)
硫氧同位素示踪南京北郊大气 $PM_{2.5}$ 中硫酸盐来源 …… 魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)
结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程 …… 包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)
春季华东高山背景区域 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{2.5\sim10}$ 中水溶性无机离子特征 ……
…… 苏彬彬,张智胜,陶俊,许楉洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)
落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究 …… 杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)
四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征 …… 何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)
深圳市船舶排放清单与时空特征研究 …… 杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)
超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性 …… 孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)
空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征 …… 张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)
基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应 …… 靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)
黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响 …… 张永领,王明仕,董玉龙(1249)
调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响 ……
…… 王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)
春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响 …… 于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)
降雨期间岩溶城镇区地下河水重金属变化特征及来源解析 …… 任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)
北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价 …… 钟惠舟,韦朝海(1277)
丰水期洪湖水质空间变异特征及驱动力分析 …… 李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)
三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例 ……
…… 操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)
营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响 …… 王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖雪(1301)
一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究 …… 杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)
昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析 ……
…… 梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)
河道曝气提升河流水质的WASP模型研究 …… 朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)
γ辐照降解水中的盐酸环丙沙星的研究 …… 祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)
电化学氢化物发生法处理含锑废水及对锑的回收 …… 陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)
Fe-MCM-41 催化臭氧氧化间甲酚废水 …… 孙文静,王亚旻,卫皇曌,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)
生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素 …… 孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)
308 nm 光作用下 α-Fe_2O_3 表面 HNO_3 的光解 …… 陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承驻(1359)
L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚 …… 何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)
醌基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究 ……
…… 许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)
枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性 …… 马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)
喹啉降解菌筛选及其对焦化废水强化处理 …… 李静,李文英(1385)
Fe^{3+} 对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及 N_2O 释放的影响 …… 李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)
内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究 ……
…… 赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)
利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻 …… 王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)
进水渗滤液总氮和 BOD_5/TN 对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响 …… 杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)
重庆金佛山土壤中 PAHs 含量的海拔梯度分布及来源解析 …… 师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)
湖南攸县典型煤矿和工厂区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析 …… 张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)
沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响 …… 苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)
施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响 …… 王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)
不同条件下皂苷对污染塿土中 Cu、Pb 的淋洗修复 …… 邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)
陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价 …… 齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)
有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响 …… 王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)
玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究 …… 程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)
硼锑交互作用对水稻吸收积累锑和硼的影响 ……
…… 向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)
丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响 …… 郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)
滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究 …… 陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)
不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系 …… 吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)
工业 VOCs 经济手段和工程技术减排对比性分析 …… 王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)
《环境科学》征订启事(1216) 《环境科学》征稿简则(1248) 信息(1163,1194,1248,1424)

一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究

杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏*
(宁波大学海洋学院,教育部应用海洋生物技术重点实验室,宁波 315211)

摘要: 对小型藻华水体进行密集采样调查有利于揭示藻华过程中浮游植物演替规律及其影响因子. 于 3 ~ 10 月对一小型藻华池塘进行为期 30 周的逐周跟踪调查,监测其水体理化指标和浮游生物种类和数量的变化,并应用 PRIMER 软件多元统计分析方法探求采样池塘浮游植物群落结构的动态变化及其与水体理化因子、浮游动物之间的关系. 调查期间共发现浮游植物 54 种(属),细胞丰度在 0.28×10^8 ~ 6.11×10^8 cells·L^{-1}之间; 浮游动物 55 种(属),个体数量在 26 ~ 2.5×10^5 ind·L^{-1}之间. 浮游植物优势类群主要为蓝藻和绿藻,且随季节的变化浮游植物群落结构呈现出明显的演替过程,该过程可分为绿藻和隐藻共存期、绿藻和蓝藻共存期、蓝藻优势期这 3 个阶段. 生物-环境相关性分析发现 pH、水温、光照、总磷及轮虫、桡足类的数量是影响该池塘浮游植物群落结构动态变化的主要因素,且相比于浮游动物,水体理化因子的影响力或更强.

关键词:藻华水体; 浮游植物; 群落演替; PRIMER; 多元统计分析
中图分类号: X524 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2015)04-1309-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2015.04.023

Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond

YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, WAN Li, LU Kai-hong*
(Key Laboratory of Applied Marine Biotechnology, Ministry of Education, School of Marine Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The high-density sampling of eutrophic water can help to reveal the general rules of phytoplankton community succession and the relationship with environmental factors. The species and abundance of plankton and the physical-chemical factors were tracked for 30 weeks from March to October in a eutrophicated small pond. The relationships between the phytoplankton community dynamic change and the physical-chemical factors as well as the zooplankton in the water body community were studied by the multivariate statistical analysis with PRIMER. A total of 54 phytoplankton and 55 zooplankton species were identified, and the abundances of plankton varied from 0.28×10^8-6.11×10^8 cells·L^{-1} for phytoplankton and 26-2.5×10^5 ind·L^{-1} for zooplankton. The dominant species of phytoplankton were Cyanophyta and Chlorophyta, and an obvious succession process was showed with the seasonal change, which could be roughly divided into three stages: Chlorophyta-Cryptophyta type, Chlorophyta-Cyanophyta type and Cyanophyta type. BIO-ENV showed that pH, water temperature, transparency, total phosphorus and the abundances of Rotifera and Copepoda were the most critical influencing factors on the community dynamics of phytoplankton, and compared to zooplankton, the physical-chemical factors might have a greater influence.

Key words: eutrophic water; phytoplankton; community succession; PRIMER; multivariate statistical analysis

水生生态系统中浮游植物种类和数量与水体环境之间存在着紧密关系[1]. 一方面,浮游植物群落结构易受水体环境因子如光照、温度、营养盐及动物牧食等的影响而发生改变[2,3]; 另一方面,作为水生生态系统初级生产力的主要贡献者,浮游植物的种类组成和生物量又决定着水生生态系统的结构和功能,是评价水体营养程度和水质状况的重要指标之一[4]. 近年来,水体富营养化程度的加剧对水域生态系统的平衡构成了极大威胁. 营养盐的剧增和光照限制促使少数投机性藻类(opportunistic algae)如微囊藻(*Microcystis*)、颤藻(*Oscillatoria*)等过度增殖,进而导致水华暴发,这不仅对生态环境造成恶劣影响,还对人类健康构成严重危害[5].

目前关于藻华水体浮游植物群落动态的报道虽有很多[6,7],但所研究的水体多为湖泊、水库等大型水体,对小型水体的研究并不多见. 小型水体如池塘、浅水湖泊等不仅能为水华暴发提供稳定的水体环境,而且相比于大型水体,还能够加快并放大浮游植物群落结构与环境因子间的响应过程,对藻华水体的生态学研究具有重要的意义[8]. 另一方面,在目前的研究报道中,浮游植物样品的采集频次多处

收稿日期: 2014-09-15; **修订日期**: 2014-11-17
基金项目: 国家自然科学基金项目(31302192); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20123305110001); 浙江省教育厅科研项目(Y201327177); 宁波市自然科学基金项目(2013A610171); 宁波大学校科研基金项目(XYL14024)
作者简介: 杨文(1990 ~),女,硕士研究生,主要研究方向为水域生态学,E-mail:waithiei@126.com
* 通讯联系人,E-mail:lukaihong@nbu.edu.cn

于月度水平. 而浮游植物作为微型生物,其世代时间短,环境条件的变化对其种群水平的影响在数天的尺度内就能够得到体现[9],过长的采样间隔易造成调查期间关键生态学过程的遗漏. 此外,水华暴发通常集中在夏秋季,此时水体理化参数及浮游动物等生物因子随温度上升会表现出较大幅度的变化,因此,适当的缩小采样间隔对于更为精确地反映富营养化水体浮游植物群落动态特征及与环境因子之间的内在联系很有必要.

本文以一小型藻华池塘为研究对象,通过周度跟踪监测水华暴发期间池塘水体的理化指标和浮游生物动态,利用多元统计分析法研究不同时期藻华池塘浮游植物的群落结构及其与环境因子之间的关系,借助浮游植物功能类群(functional group)概念进一步分析揭示浮游植物对环境因子动态变化的响应,解析藻华池塘浮游植物群落的演替规律,通过深入探讨水华发生机制,以期为水华防治提供理论基础和科学依据.

1 材料与方法

1.1 水体概况

研究水体为一小型封闭式池塘,位于宁波大学校园内(29°54′ N, 121°38′ E),平均水深为 1.7 m. 池塘周围人类活动密集,存在排污等面源污染,造成水体富营养化程度严重,根据地表水国家标准,该水体属劣Ⅴ类水体,连续多年发生蓝藻水华,优势种主要为蓝藻门的微囊藻属(*Microcystis* sp.)、色球藻属(*Chroococcus* sp.)和颤藻属(*Oscillatoria* sp.)等的一些常见种[10]. 水华常于春夏之交开始出现,持续至深秋甚至初冬.

1.2 样品采集与处理

自 2011 年 3 月 21 日至 10 月 12 日历时 30 周,每周采集水样. Hydrolab Datasonde 4α 水质分析仪现场测定水温(WT)、pH、溶解氧(DO),Secchi 盘现场测定透明度(SD), 采集表层 0.5 m 处的水样,分别用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法和钼锑抗分光光度法测定总氮(TN)、总磷(TP)[11]. 浮游生物定量水样现场用鲁哥氏液和福尔马林固定后,静置沉淀 48 h,利用虹吸法除去上清液,余下水样经二次沉淀后定容至 50 mL 标本瓶中,并进行鉴定和计数. 浮游动、植物的鉴定参见文献[12,13]. 数据计算依据文献[11].

1.3 数据处理方法

本试验多元统计分析均采用英国普利茅斯海洋实验室开发的 PRIMER 5.0 分析软件进行[14~16]. 选取出现频率大于 10% 的物种进行多元分析. 首先对筛选后的物种丰度进行平方根标准化转换,将其整理成包含浮游植物种类和物种丰度的原始数据矩阵,矩阵的样本为采样次数,共 30 个样本,矩阵变量为每个样本中的浮游植物种类,以两两样本间生物组成的 Bray-Curtis 相似性系数为依据,得到采样池塘浮游植物群落的物种相似性矩阵. 在此基础上,采用等级聚类(CLUSTER)和非度量多维尺度分析(Non-metric MDS)分析采样池塘浮游植物群落结构随时间的变化趋势并分组; 应用相似性分析(ANOSIM)检验不同组群间的差异显著性; 应用相似性百分比分析(SIMPER)找出造成不同组群或聚类间差异的原因种,即主要特征种; 采用生物-环境相关性检验(RELATE)和生物-环境匹配性分析(BIO-ENV)比较水体理化因子和浮游动物群落结构对浮游植物群落结构影响的相关性,将池塘的浮游动物分为浮游动物总丰度、原生动物丰度、轮虫类丰度、桡足类丰度和枝角类丰度 5 个因子,分别对这 5 个浮游动物因子和 6 个水体理化因子与池塘浮游植物群落结构进行生物-环境相关分析.

相关性分析和图表绘制分别采用 SPSS 13.0 和 Origin 8.0 完成.

2 结果与分析

2.1 主要理化因子动态

调查期间各个理化因子随时间的变化如图 1 所示. 调查历经春、夏、秋三季,采样池塘水温随气温变化明显,最高 WT 出现在 8 月 23 日,为 29.66℃; 最低 WT 出现在 3 月 29 日,为 12℃. pH 变化在 6.24 ~ 9.79 之间,且春季 > 夏季 > 秋季,呈下降趋势; 池塘 DO 变化于 1.32 ~ 5.64 $mg \cdot L^{-1}$间. SD 变化于 0.18 ~ 0.65 m 间,夏季透明度略低于春秋两季. 池塘营养盐波动明显,TN 水平变化于 3.03 ~ 13.20 $mg \cdot L^{-1}$间,TP 变化于 0.35 ~ 2.06 $mg \cdot L^{-1}$之间. 其中,TN、TP 均在 8 月上旬(8 月 2 日)急剧上升,至 8 月中旬(8 月 16 日)达到最大值,随后开始缓慢下降.

2.2 池塘浮游生物种类组成及细胞丰度

调查期间共鉴定出浮游植物 54 种(属),隶属于 5 门,主要为绿藻(55.6%)和蓝藻(29.6%),同时还有少量硅藻(3.7%)、隐藻(3.7%)和裸藻(7.4%). 浮游植物细胞丰度变化范围为 0.28×10^8 ~ 6.11×10^8 $cells \cdot L^{-1}$,平均细胞丰度为 2.12×10^8

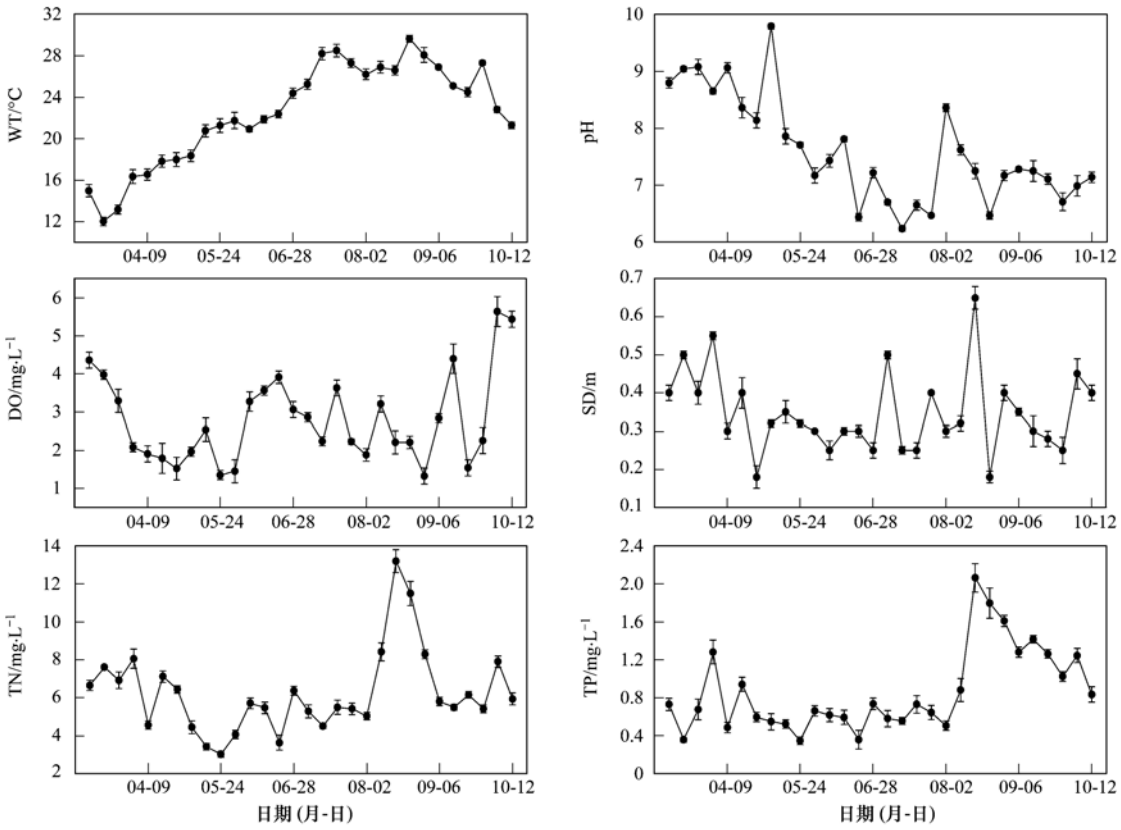

图 1　池塘各理化因子随采样时间的动态

Fig. 1　Changes of physical-chemical factors with sampling time in the sampling pond

cells·L^{-1},种类丰度随时间变化差异明显($^{***}P < 0.001$),具有一定的季节特征(图 2). 细胞丰度高峰出现在 8 月左右,此时蓝藻为优势种; 细胞丰度低值出现在 4 月底 5 月初,此时浮游植物群落多由绿藻组成.

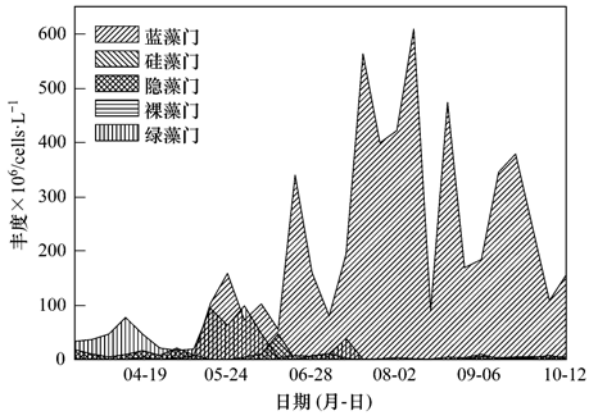

图 2　采样池塘浮游植物细胞丰度随采样时间的变化

Fig. 2　Changes of phytoplankton abundance with sampling time in the sampling pond

调查期间共鉴定出浮游动物 55 种(属),其中原生动物 24 种,轮虫 26 种,枝角类 2 种,桡足类 3 种,分别占浮游动物种类数的 43.6%、47.3%、3.6% 和 5.5%. 浮游动物个体数量变幅为 26 ~ 2.5 × 10^5 ind·L^{-1},随时间变化差异较大($^{***}P < 0.001$),最初采样时数量最少,7 月 12 日时出现数量高峰,主要由轮虫组成(图 3).

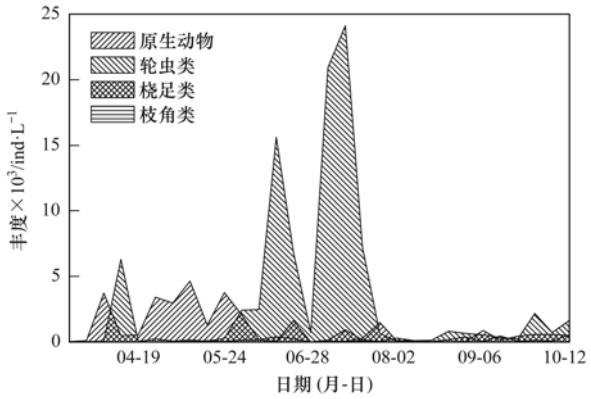

图 3　采样池塘浮游动物细胞丰度随采样时间的变化

Fig. 3　Changes of zooplankton abundance with sampling time in the sampling pond

2.3　池塘浮游植物群落结构的多元统计分析

基于 Bray-Curtis 相似性系数进行 CLUSTER 聚类分析和 MDS 排序分析,结果如图 4 与图 5 所示. 以

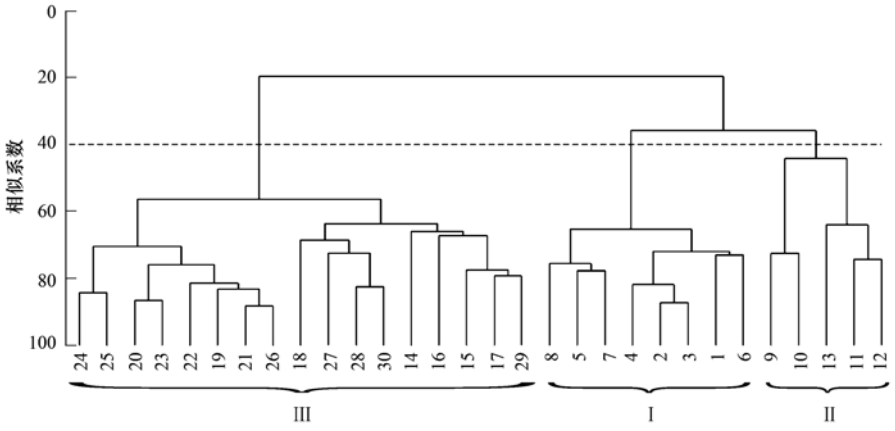

图 4 采样池塘浮游植物聚类分析

Fig. 4 CLUSTER dendrogram of phytoplankton community in the sampling pond

40% 相似度为分组界限可以将这 30 周浮游植物群落分为 3 个组群：Ⅰ组(1 ~ 8 周,即 3 月 21 日至 5 月 10 日)、Ⅱ组(9 ~ 13 周,即 5 月 17 日至 6 月 14 日)和Ⅲ组(14 ~ 30 周,即 6 月 21 日至 10 月 21 日)(图 4). MDS 排序图的压力系数 stress = 0.08(图 5),说明该图可以正确解释样本间的相似关系,且 MDS 排序分析的结果与 CLUSTER 所得到的结果基本一致. 同时,表 1 中的单因素 ANOSIM 分析的结果也显示不同群落组间差异极其显著($^{**}P < 0.01$),进一步印证了聚类分析的结果. 由此可见,浮游植物群落结构随着时间的变化发生了显著性变化.

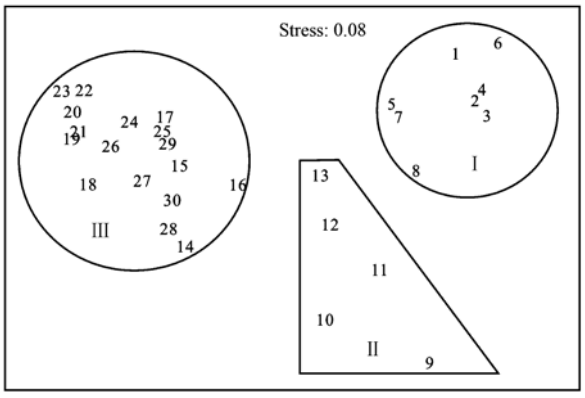

图 5 采样池塘浮游植物 MDS 排序

Fig. 5 MDS ordination of phytoplankton community in the sampling pond

表 1 采样池塘浮游植物群落 3 大组群间的 ANOSIM 分析

Table 1 ANOSIM test of three different groups of phytoplankton community in the sampling pond

验对象	R 统计值	显著性水平
Ⅰ组和Ⅱ组	0.883	0.004
Ⅰ组和Ⅲ组	0.998	0.001
Ⅱ组和Ⅲ组	0.924	0.001

为找出造成不同组群间差异的原因种,对池塘浮游植物群落的 3 大组群进行 SIMPER 分析,选择各组群中对组内相似性贡献率大于 5% 的浮游植物作为主要特征种,其分析结果见表 2. Ⅰ组的主要特征种为绿藻和隐藻,多为鞭毛运动型藻类(衣藻、隐藻),其累积贡献率达到 79.28%. Ⅱ组的主要特征种为绿藻、蓝藻和隐藻三大类,其中,绿藻的贡献率最大,为 46.64%,特别是四尾栅藻(34.39%); 蓝藻的贡献率为 40.98%,且都为丝状蓝藻; 隐藻贡献率为 5.16%. Ⅲ组的主要特征种均为蓝藻,贡献率高达 84.59%,其中,群体蓝藻作用最大,贡献率为 66.16%; 丝状蓝藻次之,贡献率为 18.43%.

2.4 池塘浮游植物群落结构与环境因子的关系

为研究环境因子和池塘浮游植物群落结构的相关性,使用 RELATE 进行检验,结果表明: 浮游植物群落和水体理化因子间的相关系数 $R = 0.489$,显著性水平 $P = 0.001$; 浮游植物群落与浮游动物之间的相关系数 $R = 0.29$,显著性水平 $P = 0.003$. 可见,浮游植物群落结构与水体理化因子和浮游动物均存在显著相关性,且与水体理化因子的相关程度大于与浮游动物的.

池塘浮游植物群落结构与水体理化因子的 BIO-ENV 分析结果表明,单因子中 pH 与浮游植物群落变化的相关性最强,相关系数为 0.711; 双因子中相关性最强的为 pH 和 SD,相关系数为 0.704,其次是 pH、TP 和 pH、WT(见表 3). pH 作为诸环境因子子集的共有元素,与浮游植物群落结构有着紧密相关关系,同时 SD、WT 和 TP 也具有不可忽视的作用.

池塘浮游植物群落结构与浮游动物的 BIO-ENV分析结果显示,浮游植物群落与轮虫类丰度和

表 2　采样池塘浮游植物群落 3 大组群间的 SIMPER 分析

Table 2　SIMPER test of three different groups of phytoplankton community in the sampling pond

组群类别	浮游植物物种	贡献率/%	累积贡献率/%
Ⅰ组	衣藻 *Chlamydomonas* spp.	50.18	50.18
	隐藻 *Cryptomonas* spp.	29.10	79.28
	四尾栅藻 *Scenedesmus quadricauda*	9.95	89.23
Ⅱ组	四尾栅藻 *S. quadricauda*	34.39	34.39
	颤藻 *Oscillatoria* spp.	27.27	61.66
	席藻 *Phormidium* spp.	13.71	75.37
	衣藻 *Chlamydomonas* spp.	12.25	87.61
	隐藻 *Cryptomonas* spp.	5.16	92.77
Ⅲ组	色球藻 *Chroococcus* spp.	35.61	35.61
	平裂藻 *Merismopedia* spp.	30.54	66.16
	颤藻 *Oscillatoria* spp.	12.60	78.76
	螺旋藻 *Spirulina* spp.	5.83	84.59

表 3　池塘浮游植物群落与水体理化因子 BIO-ENV 匹配性分析结果

Table 3　Results of BIO-ENV correlation analysis between the phytoplankton community and environmental factors in the sampling pond

环境变量个数 n	相关系数 R	环境变量子集
1	0.711	pH
2	0.704	SD, pH
2	0.664	TP, pH
2	0.663	pH, WT
3	0.657	SD, pH, WT
3	0.657	TP, SD, pH
3	0.643	TP, pH, WT
4	0.638	TP, SD, pH, WT
2	0.618	TN, pH
3	0.615	TN, SD, pH

桡足类丰度这 2 个因素组合之间的相关性最强(见表 4). 且在 3 因素组合中,轮虫类丰度和桡足类丰度这 2 个因素也为共有元素. 可见轮虫和桡足类是与池塘浮游植物群落结构的变化有着紧密关系.

表 4　池塘浮游植物群落与浮游动物 5 个因素 BIO-ENV 匹配性分析结果[1)]

Table 4　Results of BIO-ENV correlation analysis between the phytoplankton community and five factors of zooplankton in the sampling pond

环境变量个数 n	相关系数 R	环境变量子集
2	0.310	RotAb, CopAb
3	0.306	TAb, RotAb, CopAb,
3	0.306	RotAb, CopAb, ClaAb
4	0.303	TAb, RotAb, CopAb, ClaAb
3	0.294	ProAb, RotAb, CopAb
4	0.293	ProAb, CopAb, ClaAb
4	0.291	TAb, ProAb, RotAb, CopAb
5	0.290	TAb, ProAb, RotAb, CopAb, ClaAb
2	0.281	RotAb, ClaAb
3	0.281	TAb, RotAb, ClaAb

1) TAb: 浮游动物总丰度 total zooplankton abundance; ProAb: 原生动物丰度 protozoa abundance; RotAb: 轮虫类丰度 rotifera abundance; ClaAb: 枝角类丰度 cladocera abundance; CopAb: 桡足类丰度 copepoda abundance

3　讨论

3.1　藻华池塘浮游植物群落的演替规律

浮游植物群落的演替与水体环境因子的特征是相互对应的[17,18]. 在一定生境下,环境因子类似于一种“过滤器”,能依据浮游植物的功能性特征(如形态、适应策略等)筛选出最适合在该生境下生存的物种[19]. 从浮游植物功能性特征的角度出发,借助功能类群这一概念,能够深入地解析藻华水体浮游植物群落的演替规律.

由表 2 可知,本研究池塘浮游植物优势种的贡献率较高,多达 30% 以上. 相比于大型水体,该小型水体优势种的优势度更高,浮游植物群落结构趋向于单一化. 进一步说,这就使得小型水体浮游植物群落对环境因子的变动更为敏感,演替规律更为明显,更有利于研究藻华水体浮游植物的功能性特征. 本研究中衣藻和隐藻之所以能在春季池塘水体中占有绝对优势(表 2 中Ⅰ组)即是由其功能性特征决定: 一方面,衣藻和隐藻同属于 X2 这一功能类群[20,21],此类群浮游植物繁殖率高,对水体搅动和光照衰弱较敏感[22]; 另一方面,由于衣藻和隐藻同为鞭毛运动型藻类,它们能够在春季复杂多变的水体环境中寻找最适合生长的环境[23]. 同样,Sommer 等[2]总结的 PEG 模型中也表明,春季水体中的优势种多为小型且繁殖迅速的藻类,如隐藻,它们不但能为水体提供大量的初级生产力,还能作为食物支撑大型浮游动物的发展(图 3). 然而,浮游动物数量的暴发又成为浮游植物群落结构变化的制约条件. 一般来说,浮游动物多以捕食单细胞微型藻类为生,这就使因体积较大的而难被摄食的四尾栅藻和丝状蓝藻得到了迅速发展[6],从而在随后的演替中成为主要特征种(表 2 中Ⅱ组). 值得注意的是,四尾栅

藻和丝状蓝藻的同时出现并不是偶然现象. Romo 等[24]发现,S1(丝状蓝藻)和 J(四尾栅藻)[20,21]这两类功能类群常会共生于浑浊的富营养化水体中,这可能与四尾栅藻和丝状蓝藻的自身功能性特征能适应低光照水体环境有关. 研究表明,栅藻既可以在光照条件下自养生长,也可以在低光照条件下兼性利用有机物[25],而丝状蓝藻同时具有藻蓝素[26]和浮力调节机制[27],所以相比于其他藻类,这些藻类在低光照的富营养型水体环境中占有竞争优势. 随着夏季温度的升高,群体型的色球藻和平裂藻因水温等环境条件的适宜而演化为主要特征种(表 2 中Ⅲ组). 由 Reynolds 的功能类群分类方法可知,色球藻和平裂藻同属于 Lo[20,21],适合生存于夏季低搅动的水体环境. 但这样的水体易发生分层现象,而丝状蓝藻恰能通过其浮力调节机制来耐受分层引起的营养盐分离,成为该时期的第二特征种. 许多研究发现,色球藻和丝状蓝藻常会共存或交替出现于同一水体环境中[24,28],这一现象可能是与水体中 TP 浓度有关:低浓度时色球藻占优势,高浓度时丝状蓝藻占优势[24]. 本研究水体在夏季时 TP 浓度波动明显(图 1),这就为色球藻、平裂藻和丝状蓝藻三者共存创造了条件.

综上可知,本研究池塘浮游植物的优势种类多为绿藻和蓝藻,且随季节的变化呈现出绿藻和蓝藻的有规律更替,其过程可分为绿藻和隐藻共存期、绿藻和蓝藻共存期、蓝藻优势期这 3 个阶段. 这与同样为富营养型水体的东平湖研究结果相似[29]. 然而,藻华水体浮游植物的群落演替不仅体现在浮游植物种类的变化,其形态特征和功能性特征也存在一定的演替规律. 从第Ⅰ组到第Ⅲ组,浮游植物的形态特征由运动型转变为群体型和丝状体,浮游植物功能类群也由中-富营养型类群(X2)演化为高度富营养型类群(Lo/S1). 这同时表明,池塘水质情况也由中-富营养类型转变为高度富营养类型. 由此可见,浮游植物与水体环境间存在着紧密联系,环境因子对藻华池塘浮游植物的演替起着决定性的作用[30].

3.2 环境因子对藻华池塘浮游植物群落结构的影响

水体的富营养化现象多由外界因素如人类活动及污水排放所造成,本研究水体作为一位于宁波大学校内的小型封闭式池塘,周围人类活动密集,其环境因子同样易受到降雨、排污等外界的影响而发生剧烈变幅,营养盐含量较高(图 1). 浮游植物群落对环境因子的这些变化十分敏感,其种类组成及丰度会随之发生相应改变(图 2),而短时间尺度的精细化采样恰能捕捉到浮游植物群落结构的细微变化,能更为准确地揭示藻华水体浮游植物与环境因子间的关系.

调查显示,与藻华池塘浮游植物群落相关的理化因子包括 pH、透明度、水温和总磷等(表 3). 浮游植物群落结构和水体 pH 之间联系密切,López-Archilla 等[31]通过研究一个西班牙富营养化湖泊发现 pH 的升高是蓝藻水华暴发的主导因素. 然而本研究中,浮游植物由绿藻向蓝藻演替的同时 pH 却呈下降趋势(图 1). 事实上,蓝藻只在低碱度条件下表现出高的竞争生长能力,在高碱度条件下,蓝藻的竞争能力不如四尾栅藻等绿藻[32]. 本调查前期池塘水体 pH 一直处于较高水平($pH > 8.5$),使得进入水中的 CO_2 转化为碳酸氢盐提高了碱度,更适合于绿藻的生存和发展. 浮游植物的生长繁殖变化反过来也会导致水体 pH 值改变. 许多研究表明,水体 pH 值与藻类初级生产力呈显著正相关,可作为浮游植物丰度及生物量的反馈因子[17]. 本调查Ⅲ组期间池塘水体 pH 值的剧烈变化与浮游植物数量的变动具有同步关系(图 1 和图 2),与前述研究结论相吻合.

水温是温带水体浮游植物群落季节变化最重要的推动力,不同浮游植物具有不同的最适生长温度. 一般条件下,蓝藻和绿藻都易在较高温度水体中形成优势,但蓝藻的适宜温度更高[33]. 因而由初春持续到秋末的时间跨度中,随着池塘水温呈现的上升趋势(图 1),出现了绿藻逐渐被蓝藻所替代的现象(图 2).

透明度直接反映出水体的光照强度. 调查期间池塘透明度一直处于较低水平,但调查池塘主要特征浮游植物种多具有鞭毛、气囊等功能性特征,能很好地适应低光照的水体环境,而这些浮游植物的大量繁殖反过来又使水体透明度进一步降低,最终引发水华暴发.

营养盐,特别是 N 和 P,是藻类生长最主要的营养元素,也是影响浮游植物群落结构的主要环境因子. 1966 年,Sakamoto[34]曾提出可通过水体中氮磷比值判断浮游植物的营养限制因子,大于 17 时为 P 限制,小于 10 时则为 N 限制,并一直沿用至今. 而在本研究中,水体氮磷比值一直小于 10,浮游植物的限制因子却为 P. 无独有偶,Lv 等[35]在对武汉富营养型浅水湖泊浮游植物群落影响因子的研究中也发现,虽然藻华期间湖泊氮磷比值比较低(< 10),

但浮游植物群落变化与 TP 表现出更强的相关性. 可见,这种“氮磷比值法则”并不适用于所有水体,特别是小型富营养型水体. 另一方面,藻华后期池塘出现了具有固氮能力的丝状蓝藻,缓解了水体中 N 的缺失,使浮游植物更大程度上受 P 的限制[36].

此外,轮虫和桡足类这 2 类浮游动物也是影响池塘浮游植物群落结构的关键因素(表 4). Romo 等[24]在研究一个地中海富营养型湖泊时也证明了此观点. 轮虫和桡足类的取食机制为滤食,可以滤食水体中包括小型浮游植物在内的所有适合大小的食物颗粒,而不能被滤食的较大食物颗粒则得以保留[34,37]. 本研究池塘前期浮游植物多为单细胞类型的浮游植物,这就促进了轮虫和桡足类浮游动物的生长,但随之产生的牧食压力又使群体型浮游植物得到发展,此时浮游动物又由于食物的限制而数量骤减.

对比 RELATE 检验结果发现,水体理化因子比浮游动物对浮游植物群落结构的影响更明显. 同样的现象也出现在一个位于葡萄牙的蓝藻优势富营养型湖泊中[38]. 可见,以蓝藻为优势的藻华水体中,上行效应所产生的影响或更多地表现出比下行效应更强的影响力. 究其原因可能是因为蓝藻的大量存在会抑制浮游动物群落的发展. 蓝藻不仅不适于浮游动物捕食,而且其产生的藻毒素会抑制浮游动物的生长繁殖[38],削弱浮游动物对浮游植物群落所产生的下行效应.

4　结论

(1) 调查期间共检出浮游植物 5 门 54 种(属),浮游动物 55 种(属). 浮游植物优势类群主要为蓝藻和绿藻,且随季节的变化浮游植物群落结构呈现出明显的演替过程. 浮游植物的种类由绿藻和隐藻共存期转变为绿藻和蓝藻共存期和蓝藻优势期; 形态特征由运动型转变为群体型和丝状体; 浮游植物功能类群由中-富营养型类群演化为高度富营养型类群. 池塘水质情况也由中-富营养类型转变为高度富营养类型.

(2)小型富营养化藻华池塘中,浮游植物群落结构受水体理化因子和浮游动物群落的共同影响,其主要影响因子包括 pH、水温、光照、TP 和轮虫、桡足类的数量,而且水体理化因子比浮游动物对浮游植物群落结构的影响更为显著.

参考文献:

[1] Götzenberger L, de Bello F, Bråthen K A, *et al*. Ecological assembly rules in plant communities—approaches, patterns and prospects [J]. Biological Reviews, 2012, **87**(1): 111-127.

[2] Sommer U, Gliwicz Z M, Lampert W, *et al*. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters [J]. Archiv für Hydrobiologie, 1986, **106**(4): 433-471.

[3] Sommer U, Adrian R, de Senerpont Domis L, *et al*. Beyond the Plankton Ecology Group (PEG) model: mechanisms driving plankton succession [J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2012, **43**: 429-448.

[4] Padisák J, Borics G, Grigorszky I, *et al*. Use of phytoplankton assemblages for monitoring ecological status of lakes within the Water Framework Directive: the assemblage index [J]. Hydrobiologia, 2006, **553**(1): 1-14.

[5] Smith V H, Joye S B, Howarth R W. Eutrophication of freshwater and marine ecosystems [J]. Limnology and Oceanography, 2006, **51**(1, part2): 351-355.

[6] 陆开宏, 朱津永, 王扬才, 等. 湖南镇水库浮游生物及其影响因子的典范对应分析[J]. 中国水产科学, 2008, **15**(6): 950-960.

[7] 王超, 高越超, 王沛芳, 等. 广东长潭水库富营养化与浮游植物分布特征[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(5): 749-755.

[8] Robin J, Wezel A, Bornette G, *et al*. Biodiversity in eutrophicated shallow lakes: determination of tipping points and tools for monitoring [J]. Hydrobiologia, 2014, **723**(1): 63-75.

[9] Jaanus A, Toming K, Hällfors S, *et al*. Potential phytoplankton indicator species for monitoring Baltic coastal waters in the summer period [J]. Hydrobiologia, 2009, **629**(1): 157-168.

[10] 张克鑫, 陆开宏, 朱津永, 等. 基于 BP 神经网络的藻类水华预测模型研究[J]. 中国环境监测, 2012, **28**(3): 53-57.

[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.

[12] 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.

[13] 韩茂森, 束蕴芳. 中国淡水生物图谱[M]. 北京: 海洋出版社, 1995.

[14] Clarke R. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure [J]. Australian Journal of Ecology, 1993, **18**(1): 117-143.

[15] Clarke K R, Ainsworth M. A method of linking multivariate community structure to environmental variables [J]. Marine Ecology Progress Series, 1993, **92**: 205-219.

[16] Clark K R, Warwick R M. Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation [M]. (2nd ed.). Plymouth, UK: PRIMER-E Ltd., 2001.

[17] 郑丙辉, 张佳磊, 王丽婧, 等. 大宁河水华敏感期浮游植物与环境因子关系[J]. 环境科学, 2011, **32**(3): 641-648.

[18] 邱小琮, 赵红雪, 孙晓雪. 宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2265-2271.

[19] Martiny J B H, Bohannan B J M, Brown J H, *et al*. Microbial biogeography: putting microorganisms on the map [J]. Nature Reviews Microbiology, 2006, **4**(2): 102-112.

[20] 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.

[21] Padisák J, Crossetti L O, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates [J]. Hydrobiologia, 2009, **621**(1): 1-19.

[22] Devercelli M. Phytoplankton of the Middle Paraná River during an anomalous hydrological period: a morphological and functional approach [J]. Hydrobiologia, 2006, **563**(1): 465-478.

[23] Reynolds C S. Phytoplankton designer - or how to predict compositional responses to trophic-state change [J]. Hydrobiologia, 2000, **424**(1-3): 123-132.

[24] Romo S, Villena M J. Phytoplankton strategies and diversity under different nutrient levels and planktivorous fish densities in a shallow Mediterranean lake [J]. Journal of Plankton Research, 2005, **27**(12): 1273-1286.

[25] Soeder C J, Hegewald E. Scenedesmus [A]. In: Borowitzka M A, Borowitzka L J (Eds.). Microalgal Biotechnology [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1988. 59-84.

[26] 刘光钊. 水体富营养及其藻害[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005.

[27] Humphries S E, Lyne V D. Cyanophyte blooms: The role of cell buoyancy [J]. Limnology and Oceanography, 1988, **33**(1): 79-91.

[28] de Melo S, Huszar V L M. Phytoplankton in an Amazonian flood-plain lake (Lago Batata, Brasil): diel variation and species strategies [J]. Journal of Plankton Research, 2000, **22**(1): 63-76.

[29] 庞清江, 李白英. 东平湖水体富营养化评价[J]. 水资源保护, 2003, (5): 42-44.

[30] Havens K E. Cyanobacterial harmful algal blooms: state of the science and research needs [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.

[31] López-Archilla A I, Moreira D, López-García P, *et al*. Phytoplankton diversity and cyanobacterial dominance in a hypereutrophic shallow lake with biologically produced alkaline pH [J]. Extremophiles, 2004, **8**(2): 109-115.

[32] 杨威, 孙凌, 袁有才, 等. 碱度水平对铜绿微囊藻和四尾栅藻生长和竞争的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(4): 1264-1268.

[33] 张华, 胡鸿钧, 晁爱敏, 等. 浙江紧水滩水库浮游植物群落结构季节变化特征[J]. 生态学报, 2013, **33**(3): 944-956.

[34] Sakamoto M. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth [J]. Archiv Fur Hydrobiologie, 1966, **62**: 1-28.

[35] Lv J, Wu H J, Chen M Q. Effects of nitrogen and phosphorus on phytoplankton composition and biomass in 15 subtropical, urban shallow lakes in Wuhan, China [J]. Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters, 2011, **41**(1): 48-56.

[36] Schindler D W, Hecky R E, Findlay D L, *et al*. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37-year whole-ecosystem experiment [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, **105**(32): 11254-11258.

[37] 张才学, 陈慧妍, 孙省利, 等. 流沙湾海草床海域浮游植物的时空分布及其影响因素[J]. 生态学报, 2012, **32**(5): 1527-1537.

[38] Abrantes N, Antunes S C, Pereira M J, *et al*. Seasonal succession of cladocerans and phytoplankton and their interactions in a shallow eutrophic lake (Lake Vela, Portugal) [J]. Acta Oecologica, 2006, **29**(1): 54-64.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 36 No. 4

Apr. 15, 2015

CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America ····· GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, *et al.* (1141)

Regional Source Apportionment of $PM_{2.5}$ in Beijing in January 2013 ····· LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, *et al.* (1148)

Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing ····· CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, *et al.* (1154)

Soluble of Metals within TSP in Shanghai ····· CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, *et al.* (1164)

Analysis of Component Spectral Characteristics of PM_{10}-Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen ····· ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, *et al.* (1173)

Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes ····· WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, *et al.* (1182)

Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014 ····· BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, *et al.* (1187)

Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in $PM_{2.5}$ and $PM_{2.5-10}$ in Mountain Background Region of East China in Spring ····· SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, *et al.* (1195)

Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves ····· YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, *et al.* (1202)

Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province ····· HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, *et al.* (1208)

Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen ····· YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, *et al.* (1217)

Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes ····· SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, *et al.* (1227)

Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards ····· ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, *et al.* (1234)

Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen ····· JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, *et al.* (1241)

Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport ····· ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long (1249)

Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary ····· WANG Miao-miao, SUN Zhi-gao, LU Xiao-ning, *et al.* (1256)

Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season ····· YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, *et al.* (1263)

Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event ····· REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, *et al.* (1270)

Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources ····· ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai (1277)

Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period ····· LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, *et al.* (1285)

Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary ····· CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, *et al.* (1293)

Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake ····· WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, *et al.* (1301)

Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond ····· YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, *et al.* (1309)

Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer ····· LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, *et al.* (1317)

Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study ····· ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, *et al.* (1326)

Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation ····· ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, *et al.* (1332)

Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony ····· CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, *et al.* (1338)

Degradation of *m*-Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation ····· SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, *et al.* (1345)

Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol ····· KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, *et al.* (1352)

Photolysis of Gaseous HNO_3 on the α-Fe_2O_3 Films Under 308 nm UV Light ····· LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, *et al.* (1359)

Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode ····· HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, *et al.* (1365)

Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Biodenitrification Catalysis ····· XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, *et al.* (1374)

Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by *Bacillus subtilis* ····· MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, *et al.* (1379)

Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water ····· LI Jing, LI Wen-ying (1385)

Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process ····· LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, *et al.* (1392)

Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitritation System ····· ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, *et al.* (1399)

Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate *Chlorella vulgaris* ····· WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, *et al.* (1406)

Effects of Total Nitrogen and BOD_5/TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor ····· YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, *et al.* (1412)

Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinfo Mountain, Chongqing ····· SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, *et al.* (1417)

Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province ····· ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, *et al.* (1425)

Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain ····· SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, *et al.* (1431)

Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil ····· WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, *et al.* (1437)

Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions ····· DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, *et al.* (1445)

Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County ····· QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, *et al.* (1453)

Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure ····· WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, *et al.* (1461)

Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead ····· CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, *et al.* (1468)

Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling ····· XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, *et al.* (1474)

Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content ····· GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, *et al.* (1481)

A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by *Phragmites australis* and *Typha angustifolia* in Coastal Estuary Area ····· CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, *et al.* (1489)

Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase ····· WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, *et al.* (1497)

Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs ····· WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, *et al.* (1507)

《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）

2015 年 4 月 15 日　第 36 卷　第 4 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 36　No. 4　Apr. 15, 2015

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：120.00 元　　**国外发行代号**：M 205

国 内 外 公 开 发 行