

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, 孙洪博, 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基烯的排放特征	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	潘婊娟, 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, 刘九雄, 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)	

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, 郑忠明, 朱津永*

(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: 浮游植物群落变化既受到环境因子单独作用的影响, 也受到各因子之间交互作用的影响. 为探究浮游植物群落结构的季节演替规律, 对四明湖水库浮游植物群落及水体 11 项非生物因子和 4 项生物因子进行周年采样调查, 分析了水库内浮游植物功能类群组成、季节演替规律及其与生物因子和非生物因子的关系. 结果显示, 调查期间四明湖水库的浮游植物种类可归入 22 个功能类群, 其优势功能类群主要隶属于绿藻门和硅藻门. 非度量多维尺度分析(NMDS)显示, 浮游植物群落结构呈现出明显的季节性演替; 通过 SIMPER 分析, 筛选出 10 个与季节变化显著相关的功能类群, 其主要变化过程表现为: 夏季 D + Lo → 秋冬季 D + P + Lo → 春季 X2 + P + MP. 方差分解分析(VPA)显示, 浮游植物功能类群的季节变化是由水温-浮游动物交互作用与水温单独作用共同影响的结果; 典范对应分析(CCA)发现, 水温(WT)、透明度(SD)和硝态氮(NO_3^- -N)以及浮游动物生物量是影响该水库浮游植物群落结构动态变化的主要因子.

关键词: 亚热带水库; 浮游植物; 功能类群; 季节演替; 生物因子; 非生物因子

中图分类号: X171; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2688-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201709194

Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir

ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, ZHENG Zhong-ming, ZHU Jin-yong*

(Key Laboratory of Applied Marine Biotechnology, Ministry of Education, School of Marine Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The succession of phytoplankton communities is affected by pure environmental factors as well as the interaction of various factors. Phytoplankton communities with eleven aquatic abiotic factors and four biotic factors were investigated in the Siminghu Reservoir, and the seasonal succession of phytoplankton FGs related to the biotic and abiotic factors was analyzed. The results suggested that a total of 22 phytoplankton functional groups were identified across the samples, and they were all affiliated with Chlorophyta and Bacillariophyta. An obvious seasonal succession was discovered by NMDS, which were present as D + Lo in summer, D + P + Lo in autumn and winter, and X2 + P + MP in spring. In particular, we screened 10 functional groups with biomass significantly associated with the seasonal change in the phytoplankton community. A variance partitioning analysis (VPA) revealed that water temperature-zooplankton covariation and water temperature explained the variation in the phytoplankton functional groups throughout the year. A canonical correspondence analysis (CCA) showed that water temperature, transparency, nitrate nitrogen, and the biomass of zooplankton were the most critical factors determining the community dynamics of phytoplankton.

Key words: subtropical reservoir; phytoplankton; functional groups; seasonal succession; biotic factors; abiotic factors

浮游植物作为水生生态系统中初级生产力的主要贡献者, 其群落结构常常随水体理化因子的变化而发生变化^[1,2]; 浮游植物群落中物种的种类和数量又在很大程度上决定着水生生态系统的结构和功能^[3], 是反映水体富营养化程度和水质状况的重要指标. 大量研究表明, 浮游植物群落, 特别是温带及亚热带水体中的浮游植物群落存在明显的季节演替现象^[2,4,5]. 但浮游植物群落的季节演替是一个多因素参与的复杂生态过程. 一方面, 它会受到水温^[2]、光照^[6]、营养盐^[7]等可利用资源(available resource)所产生的上行效应的影响; 另一方面, 浮游动物^[8]和滤食性鱼类^[2]又能通过下行效应改变浮游植物群落结构. 值得注意的是, 这些影响因

子并不是单独影响浮游植物群落动态, 因子与因子间还存在着明显的交互作用(co-interaction), 这些交互作用同样可能成为控制浮游植物生长、群落结构组成与演替的关键因子^[9]. Göthe 等的研究表明^[10], 瑞士 Dalalven 河流域的硅藻群落结构主要与单独的环境因子和环境-生物交互作用密切相关; Cabecinha 等^[11]对亚热带水库浮游植物群落进行探究, 发现时间因子和时间-地方-区域-地理

收稿日期: 2017-09-21; 修订日期: 2017-11-29

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY17C190004); 浙江省大学生科技创新计划项目(2017R405061); 宁波市海洋与渔业局招标项目(NBITC20163590G); 宁波市海洋与渔业专项(HK2012000116)

作者简介: 郑诚(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水域生态学, E-mail: zhengcheng57@126.com

* 通信作者, E-mail: zhujinyong@nbu.edu.cn

尺度的共同作用对群落结构影响显著; 叶然等^[12]研究发现, 环境-空间因子交互作用是影响浙北海域浮游植物群落分布格局的主要因素. 这些研究都为解释浮游植物群落演替规律提供了一个新的角度和思路.

近年来, Reynolds 等^[13]和 Padisák 等^[14]提出的功能类群分类方法为浮游植物群落生态学研究提供了一种新方法. 浮游植物功能类群以个体生态学为依据进行分类, 能够最大限度地揭示浮游植物群落与水体环境间的动态关系, 成为了当今研究浮游植物群落动态变化的重要工具^[15]. 采用功能群分类法使人们能够通过研究群落结构和组成的变化来预测群落生态功能的变化, 因为物种之间存在的功能冗余现象使群落组成的改变并不能直接反映群落生态功能的变化^[16, 17]. 功能类群分类法将具有同一功能型的物种归为一类, 而同一功能型物种具有相同的生态功能, 这使人们能够透过物种分类的干扰看到群落动态的生态功能实质. 浙江四明湖水库属一典型亚热带水体, 迄今为止, 关于该水库内浮游植物的调查并不多见, 且已有的调查结果年代间隔较久^[18, 19]. 本研究运用功能类群分类方法, 对四明湖水库中的浮游植物群落结构信息进行表征, 分析调查期间浮游植物功能类群随季节的变化特征, 并分析影响浮游植物功能类群季节性变化的主要环境因子, 以此来揭示驱动浮游植物群落结构季节演替的关键因子, 探讨浮游植物功能类群季节演替的发生机制, 以期为深入理解亚热带水库生态系统结构及功能提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 采样地

四明湖水库地处四明山北麓, 位于余姚市梁弄镇境内, 属浙江省八大水库之一. 水库库容 1.235 4 亿 m^3 , 集雨面积 103.1 km^2 , 养殖面积 14 595 亩, 平均水深 7.3 m, 是一座集防洪、供水、灌溉、发电、养殖等综合利用的大型水库, 根据四明湖水库库区特征, 选取了 4 个采样点, 其中 1 号点位于梁弄大溪入库口、2 号点位于横岙大溪入库口、3 号点位于库中心、4 号点位于大坝前.

自 2012 年 8 月至 2013 年 7 月, 每月采集水样 (2013 年 1 月除外), 共采样 11 次. 采样时间均在当月中下旬天气晴朗的上午 09:00 ~ 12:00 之间.

1.2 浮游生物的采集、鉴定和生物量测定

浮游植物和浮游动物定性样品分别用 25 号和

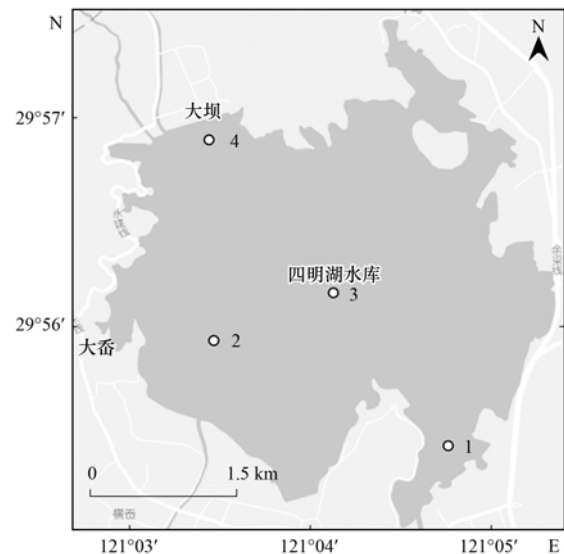


图 1 四明湖水库采样点分布情况

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the Siminghu Reservoir

13 号浮游生物网采集, 用福尔马林现场固定. 浮游植物定量样品用 5 L 采水器在表层 (0.5 m)、1/2 真光层 (Euphotic zone, Z_{eu} , 即透明度的 2.7 倍) 和 $1Z_{eu}$ 这 3 个水层采集, 充分混合后取水样 1 L, 用鲁哥试液固定, 带回实验室浓缩沉淀至 50 mL. 浮游动物是取表层、中层、底层的水, 共计 15 L, 用动物网过滤后使用福尔马林固定, 并带回实验室浓缩沉淀至 30 mL. 浮游动、植物的鉴定参见文献 [20, 21], 数据计算依据文献 [20]. 浮游植物功能类群的划分依据 Reynolds 等^[13]和 Padisák 等^[14]的研究.

1.3 非生物因子的测定

使用 YSI 多功能水质检测仪现场测定水温 (water temperature, WT)、pH 值、溶解氧 (dissolved oxygen, DO), Secchi 盘现场测定透明度 (secchi depth, SD). 用 5 L 采水器分别采集表、中、底层水样, 混合后用聚乙烯塑料瓶带回实验室, 检测总氮 (total nitrogen, TN), 总磷 (total phosphorus, TP), 氨氮 (ammonium N, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$), 亚硝态氮 (nitrite N, $\text{NO}_2^- - \text{N}$), 硝态氮 (nitrate N, $\text{NO}_3^- - \text{N}$), 无机磷 (orthophosphate, $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$) 和化学需氧量 (高锰酸盐指数). 测定方法参照文献 [22].

1.4 数据处理

筛选出相对生物量至少在一个样本 $> 5\%$ 的浮游植物功能类群, 采用 R-3.4.0 软件中的 Vegen 包对浮游植物群落结构进行分析. 首先对筛选后的功能类群生物量、非生物因子和生物因子进行 $\lg(x + 1)$ 数据标准化转换. 在此基础上, 采用非度量多维

尺度分析 (nonmetric multidimensional scaling, NMDS) 分析四明湖水库浮游植物群落结构随时间的变化趋势并分组, 采用单因素方差分析 (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) 找出不同组群或聚类间差异的原因种, 即主要特征功能类群。

为研究驱动浮游植物群落季节演替的主要作用力, 将环境因子分为水温、营养盐因子 (TN、TP、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N 和 PO_4^{3-} -P)、水体其他理化因子 (透明度、pH 值、高锰酸盐指数和溶解氧) 和生物因子 (原生动物、轮虫、桡足类和枝角类生物量) 四类变量组合。首先, 利用向前选择分析 (forward selection) 去除因子之间的共线性, 筛选出影响浮游植物群落结构变化主要因子并将其归类到各变量组合中; 之后, 运用方差分解分析 (variance partitioning analysis, VPA) 研究各变量组合的单独作用力及交互作用力, 并评估各作用力的相对重要性; 最后, 运用典范对应分析 (canonical

correspondence analysis, CCA) 来具体分析各影响因子与优势功能群和浮游植物群落变化的关系。

2 结果与分析

2.1 非生物因子动态

四明湖水库非生物因子的月际变化如表 1 所示, 其中 WT、SD、TN 和 NO_3^- -N 随季节变化差异明显 ($P < 0.05$)。库区属亚热带季风气候, 调查期间, 水库水温随气温变化明显, 最高 WT 出现在 8 月, 为 31.79°C , 最低出现在 2 月, 为 9.68°C 。SD 变化于 $0.92 \sim 3.46 \text{ m}$ 间, 最高 SD 出现在 4 月。水库的 N 盐浓度随时间波动明显, 特别是 TN ($1.00 \sim 1.46 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 NO_3^- -N ($0.43 \sim 0.89 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 最低浓度均出现在 10 月, 最高浓度在 3 月和 4 月。而 P 营养盐浓度随时间波动不显著 ($P > 0.05$), TP 变化范围为 $0.03 \sim 0.06 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, PO_4^{3-} -P 为 $0.004 \sim 0.020 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。其余非生物因子在调查期间的季节性差异也不显著 ($P > 0.05$)。

表 1 四明湖水库环境因子的月际变化

Table 1 Monthly variations of environmental factors in the Siminghu Reservoir

环境因子	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月
WT/ $^\circ\text{C}$	31.788 ± 0.318	25.113 ± 0.149	22.338 ± 0.328	14.388 ± 0.207	12.668 ± 0.229	9.683 ± 0.832	13.533 ± 0.160	17.420 ± 0.279	25.940 ± 0.261	29.843 ± 0.267	31.363 ± 0.109
pH	9.633 ± 0.029	8.408 ± 0.425	7.970 ± 0.205	7.628 ± 0.081	7.313 ± 0.025	8.133 ± 0.214	7.880 ± 0.073	7.523 ± 0.084	7.583 ± 0.164	7.925 ± 0.019	7.420 ± 0.028
SD/m	1.240 ± 0.110	1.09 ± 0.03	1.40 ± 0.07	0.923 ± 0.080	1.288 ± 0.085	1.558 ± 0.230	3.360 ± 1.462	3.458 ± 0.621	2.063 ± 0.225	2.113 ± 0.063	2.100 ± 0.082
DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4.565 ± 0.161	7.108 ± 1.354	7.620 ± 0.474	8.825 ± 0.597	8.348 ± 0.073	9.953 ± 0.226	9.590 ± 0.449	11.798 ± 1.296	9.975 ± 0.350	9.775 ± 0.340	9.998 ± 0.097
高锰酸盐指数/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2.949 ± 0.233	2.213 ± 0.511	1.581 ± 0.291	2.085 ± 0.235	1.719 ± 0.073	2.107 ± 0.175	1.096 ± 0.186	1.820 ± 0.349	1.809 ± 0.412	2.053 ± 0.207	2.216 ± 0.099
TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.034 ± 0.002	0.036 ± 0.011	0.041 ± 0.005	0.0057 ± 0.011	0.057 ± 0.003	0.028 ± 0.005	0.033 ± 0.009	0.019 ± 0.004	0.028 ± 0.005	0.024 ± 0.005	0.023 ± 0.004
TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.461 ± 0.132	1.203 ± 0.162	1.005 ± 0.080	0.889 ± 0.144	1.025 ± 0.108	1.177 ± 0.175	1.388 ± 0.255	1.395 ± 0.099	1.388 ± 0.150	1.248 ± 0.119	1.168 ± 0.228
PO_4^{3-} -P/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.011 ± 0.006	0.019 ± 0.002	0.028 ± 0.038	0.004 ± 0.001	0.005 ± 0.002	0.016 ± 0.006	0.012 ± 0.001	0.019 ± 0.005	0.011 ± 0.005	0.006 ± 0.004	0.004 ± 0.001
NH_4^+ -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.027 ± 0.009	0.055 ± 0.011	0.042 ± 0.009	0.061 ± 0.011	0.055 ± 0.017	0.032 ± 0.008	0.090 ± 0.011	0.102 ± 0.018	0.024 ± 0.008	0.057 ± 0.008	0.026 ± 0.006
NO_2^- -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.019 ± 0.000	0.023 ± 0.002	0.032 ± 0.003	0.024 ± 0.003	0.027 ± 0.002	0.007 ± 0.003	0.012 ± 0.004	0.030 ± 0.004	0.015 ± 0.001	0.012 ± 0.002	0.008 ± 0.001
NO_3^- -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.537 ± 0.057	0.646 ± 0.036	0.433 ± 0.011	0.502 ± 0.084	0.598 ± 0.062	0.718 ± 0.162	0.888 ± 0.202	0.820 ± 0.069	0.792 ± 0.019	0.691 ± 0.036	0.503 ± 0.007

2.2 浮游植物群落组成及其生物量

调查期间共发现浮游植物 208 种 (属), 隶属于 7 门 85 属。其中绿藻门种类最多, 共 42 属 108 种, 占总数的 51.92%; 蓝藻门次之, 共 16 属 36 种, 占总数的 17.31%; 硅藻门共 15 属 32 种, 占总数的

15.38%; 甲藻门共 4 属 13 种, 占总数的 6.25%; 裸藻门、隐藻门和金藻门种类较少, 分别占总数的 3.85%、3.37% 和 1.92%。

对四明湖水库浮游植物进行功能类群划分, 共得到 22 个功能类群。其中相对生物量至少在

一个样本 >5% 的浮游植物功能类群有 14 个，分别为 C、D、P、MP、S1、X2、E、G、J、H1、Lo、M、W1 和 W2，各功能类群的生境特征及其代表种见表 2。

表 2 四明湖水库主要功能类群及其生境特征、代表种

Table 2 Main functional groups with their habitat characteristics, and representative species with their taxonomic groups in the Siminghu Reservoir				
功能类群	生境特征	代表种	代表种占该功能类群百分比/%	分类单元
C	富营养型的小中型湖泊，湖泊无分层现象	梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	53.4	硅藻门
D	河流在内的浑浊型水体	小针杆藻 <i>Synedra nana</i>	77.7	硅藻门
P	栖息在 2~3 m 的连续或者半连续的水体混合层中，水体营养指数较高	颗粒直链藻极狭变种 <i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	32.7	硅藻门
		变异直链藻 <i>Melosira varians</i>	19.1	硅藻门
		颗粒直链藻极狭变种螺旋变形 <i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i> f. <i>spiralis</i>	23.4	硅藻门
MP	经常受到搅动的，无机的，浑浊的淡水湖泊	扁圆卵形藻 <i>Cocconeis placentula</i>	20.6	硅藻门
		最细丝藻 <i>Ulothrix tenuissima</i>	43.0	绿藻门
S1	均匀的浑浊水体，对光照敏感，适于生活于暗环境中	伪鱼腥藻 <i>Pseudanabaena</i> spp.	35.9	蓝藻门
		细浮鞘丝藻 <i>Planktolyngbya subtilis</i>	22.2	蓝藻门
X2	中营养型到高度营养型浅水水体	球衣藻 <i>Chlamydomonas globosa</i>	20.8	绿藻门
		尖尾蓝隐藻 <i>Chroomonas acuta</i>	18.5	隐藻门
E	寡营养型小型浅水湖泊或者非自养的池塘	鱼鳞藻 <i>Mallomonas</i> spp.	69.7	金藻门
G	富营养型小型湖泊以及大型河流和贮水池等静止水域	空球藻 <i>Eudorina elegans</i>	66.6	绿藻门
		实球藻 <i>Pandorina</i> sp.	33.3	绿藻门
J	混合营养型的，高纯度的浅水水体(包括一些落差较低的河流)	栅藻 <i>Scenedesmus</i> spp.	7.2	绿藻门
		单角盘星藻 <i>Pediastrum simplex</i>	14.8	绿藻门
		微小四角藻 <i>Tetraëdron minimum</i>	16.2	绿藻门
H1	富营养型小型湖泊，有分层现象，N 含量低	水华束丝藻 <i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	54.4	蓝藻门
Lo	寡营养型到富营养型、大中型深水或浅水湖泊	加顿多甲藻 <i>Peridinium gatunense</i>	26.0	甲藻门
		埃尔拟多甲藻 <i>Peridiniopsis elpatiewskyi</i>	10.6	甲藻门
M	富营养型或高度富营养型小中型水体	惠氏微囊藻 <i>Microcystis wesenbergii</i>	83.6	蓝藻门
W1	从农田或污水中获得有机质的池塘或临时形成的水体	绿色裸藻 <i>Euglena viridis</i>	47.2	裸藻门
		长尾扁裸藻 <i>Phacus longicauda</i>	36.2	裸藻门
W2	中或富营养型池塘，也可是临时形成的浅水湖泊	旋转囊裸藻 <i>Trachelomonas volvocina</i>	7.3	裸藻门
		不定囊裸藻 <i>Trachelomonas incertissima</i>	66.5	裸藻门

四明湖水库浮游植物生物量变化范围为 0.47~8.67 mg·L⁻¹，年均生物量为 4.53 mg·L⁻¹。从浮游植物生物量月际变化来看(图 2)，8 月的生物量最大，为 8.76 mg·L⁻¹，之后逐渐减少，并在次年 3 月降至最低，仅有 0.47 mg·L⁻¹，4 月开始逐渐回升，方差分析显示各功能类群生物量随时间变化差异显著($P<0.01$)。

2.3 浮游植物群落结构的季节演替

基于 Bray-Curtis 相似性系数对浮游植物群落数据进行 NMDS 分析，结果如图 3 所示。采样期间浮游植物群落变化可大致分为 3 个阶段：Ⅰ组，包括 6~9 月(夏季)；Ⅱ组，包括 10~12 月和 2 月(秋冬季)；Ⅲ组，包括 3~5 月(春季)。NMDS 分析图的压力系数 stress = 0.16，说明该图可以用于描述样

本间的相似关系。单因素方差分析(ANOSIM)表明，不同阶段间存在极显著差异($P<0.01$)。

通过应用相似性百分比分析(SIMPER)找出造成不同组群间差异的功能类群，即主要特征功能类群，结果如图 4 所示，共筛选到 10 个浮游植物功能类群，主要功能类群分别为 D、X2、P、Lo 等。功能类群 D、Lo、J 随着夏季向秋冬季到春季的转变，相对生物量逐渐减少；功能类群 P、MP、G 在秋冬季时的相对生物量最大；X2 的相对生物量在春季占有最大比重。在这 10 个功能类群中，尽管有些功能类群的生物量数值差别不大，但在季节演替过程中，其相对生物量显著变化。

2.4 环境因子对浮游植物群落季节演替的影响

利用向前选择分析筛选出影响浮游植物群落变

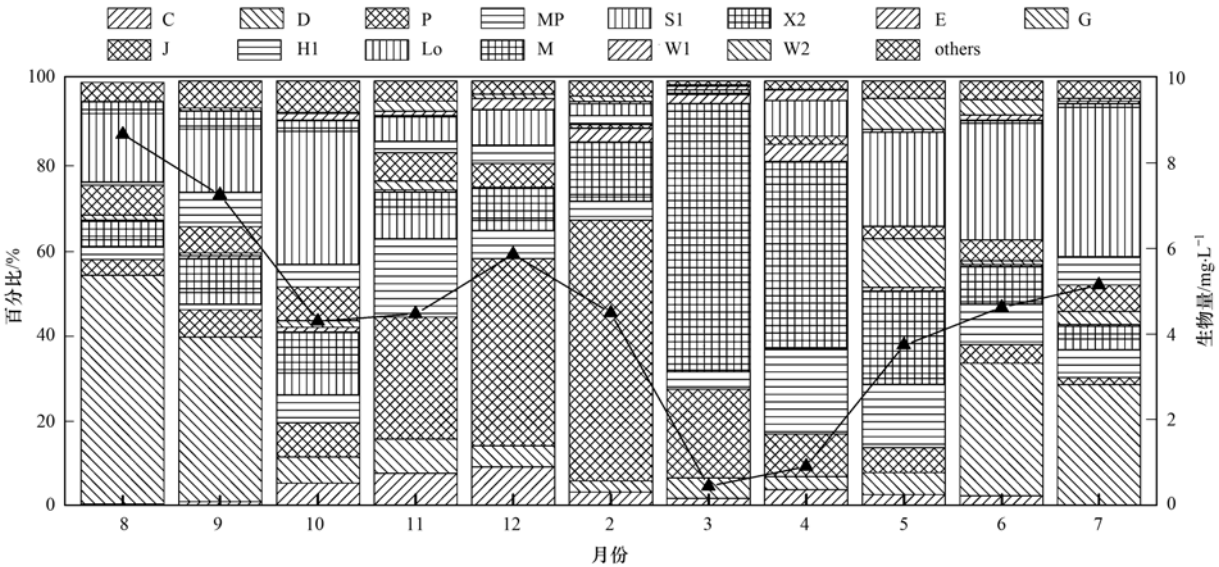
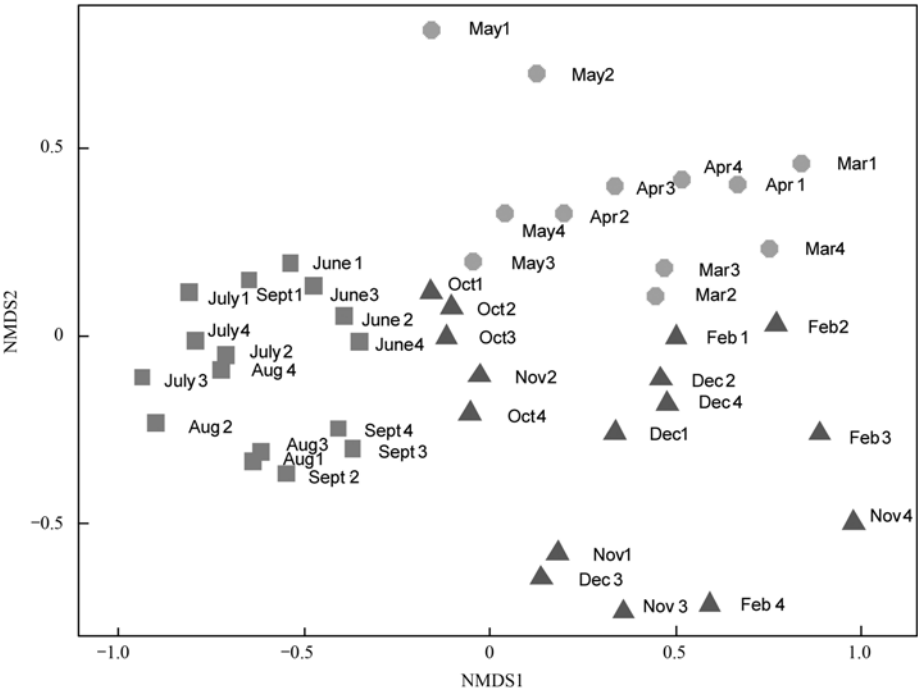


图 2 四明湖水库浮游植物群落组成及其生物量变化

Fig. 2 Variation of biomass and composition of phytoplankton in the Siminghu Reservoir



字母表示对应月份,阿拉伯数字表示采样点位

图 3 四明湖水库浮游植物 NMDS 序列

Fig. 3 NMDS ordination of the phytoplankton community in the Siminghu Reservoir

化的关键因子(包括水温、SD、pH、TN、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、原生动物、桡足类和轮虫),这些因子随季节变化差异明显($P < 0.05$).根据因子特性,将其归为水温、营养盐因子(TN、 NO_2^- -N和 NO_3^- -N)、水体其他理化因子(SD和pH)和生物因子(原生动物、桡足类和轮虫)四大类变量组合.为了解不同类型因子在驱动浮游植物季节演替上的相对重要性,对选出的变量组合进行方差分解分析,结果如

图 5 所示.全年浮游植物群落有 9.3% 的群落变化是由于水温-浮游动物的交互作用引起的,其次为水温的单独影响作用,能解释 5.7% 的群落变化,未能由环境因子解释的部分为 53.8%;夏季主要引起浮游植物群落变化的因子有浮游动物(15.2%)、其他理化因子(11.6%)和水温(9.7%);秋冬季,营养盐因子和水温对浮游植物群落结构变化的解释量分别为 16.1% 和 12.8%;春季,理化-营养盐-浮

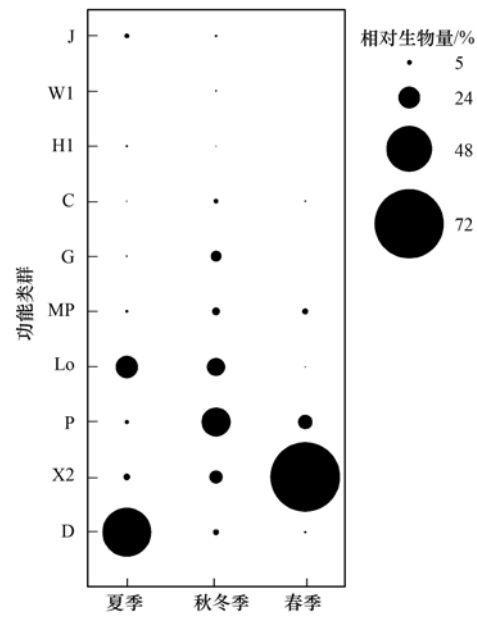


图 4 与季节演替显著相关的 10 个浮游植物功能类群
Fig. 4 Identification of the 10 functional groups serving as bio-indicators for the seasonal variation

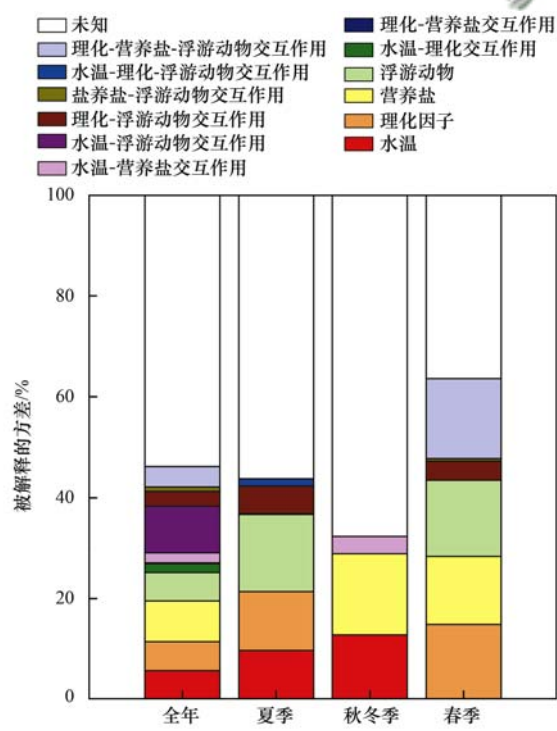


图 5 四明湖水库浮游植物方差分解分析结果
Fig. 5 Result of abundant phytoplankton variance partitioning in the Siminghu Reservoir

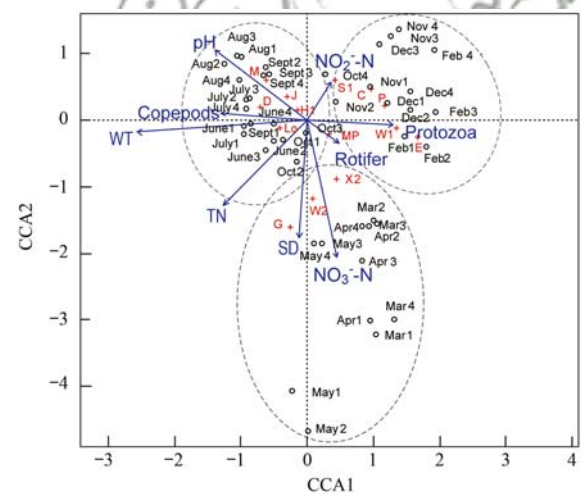
游动物交互作用(15.8%)、浮游动物(15.1%)和其他理化因子(14.9%)对浮游植物结构的变化影响较大。

将方差分解分析结果中影响显著的环境因子与优势功能类群进行 CCA 分析(图 6)，第一轴和第二

轴的特征值分别为0.522 2和0.205 4。从 CCA 分析图中可以看出，与轴一相关性较强的非生物因子主要有 WT、pH 和 TN，相关系数分别为 -0.978 72、-0.530 86和 -0.479 82，这 3 个因子都呈负相关性。与轴 2 呈负相关的因子为 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ (-0.785 92)、SD (-0.670 97) 和 DO (-0.485 53)。

来自不同季节的样方分别聚集于图 6 中的不同区域，夏季的样方大多位于第二象限，与 WT、pH 和 TN 箭头方向相同，水温较高且营养盐丰富，M、D 和 Lo 等功能类群主要分布于这一区域；秋冬季样方与夏季相反，水温较低，功能类群 E、W1 和 P 主要分布于该区域；春季位于轴 2 下方，与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、SD 呈正相关，说明该生境光照充足、N 资源丰富，功能类群 G、W2 和 X2 主要分布于该区域。这与它们的适宜生境相吻合(表 2)。

生物因子中，桡足类(Copepods)生物量同 D 和 M 功能类群正相关；轮虫类(Rotifer)生物量同 MP 功能类群正相关；原生动物(Protozoa)生物量与 W1 功能类群呈正相关。



字母表示对应月份，阿拉伯数字表示采样点位
图 6 四明湖水库浮游植物功能类群与生物-非生物因素关系的 CCA 分析
Fig. 6 CCA biplot of functional groups and biotic-abiotic factors in the Siminghu Reservoir

3 讨论

3.1 四明湖水库浮游植物群落季节演替规律

当季节变化引起水环境发生改变，浮游植物功能群会通过自身的演替来维持生态平衡^[13, 14, 23]，而这种演替过程往往具有一定的规律性。四明湖水库中浮游植物群落动态就反映出随时间推移的季节演替存在着明显的规律性和周期性(图 6)。

VPA 分析显示影响夏季浮游植物群落组成的主要因子分别为浮游动物(15.2%)、其他理化因子(11.6%)和水温(9.7%)。夏季较高的水温有利于浮游植物的大量增殖,藻类生物量的增加会导致SD降低,这为适合在低光照浑浊型水体中生存的功能类群D提供了良好的条件^[13];同时,水体环境中高的pH值符合功能类群D的生长环境需求,使其成为夏季主要的优势功能类群。本次调查中功能类群D的生物量主要来自小针杆藻(77.7%),小针杆藻的比表面积大且表面带负电荷,大量出现易相互聚集形成网状,悬浮于水层中难以下沉,从而导致透明度的下降^[24]。此外,群体针杆藻因体积大,无法成为轮虫理想的食物来源,这可能是导致夏季轮虫生物量逐渐减少的原因^[25]。功能类群Lo也是夏季优势功能类群之一,适合在20~27℃的高温稳定水体中生存,同时,Lo能利用鞭毛自由地运动于光照充足的表层和营养盐充足的底部,使其处于竞争优势地位。功能类群H1和J同为夏季主要特征功能类群(图4),功能类群H1的代表种多为适应高温和低光环境的丝状固氮蓝藻,在N营养盐较低的环境下占有竞争优势^[26];功能类群J的代表种多为非运动的不含胶质的绿藻,其适宜生长的环境与pH值有正相关性^[1]。除温度和光照之外,水库中浮游动物组成也在很大程度上影响了浮游植物群落结构的组成。鱼类的最优捕食原理^[27]导致大中型枝角类丰度减小,通过级联效应增加了M的生物量。与此同时,小型桡足类开始占据优势,这与易齐涛等^[9]在淮南湖泊中观察到的现象相似。

秋冬季营养盐因子和水温对浮游植物群落变化可解释的变化分别为16.1%和12.8%。该季节水温下降,混合程度增强,功能类群Lo的优势度逐渐被功能类群P和C取代^[28]。P和C多为大型硅藻,适合在低温水体中生存,且耐受弱光,因两组功能类群的代表种具有较高的S/V比和较强的光照捕获能力,使其在秋冬季环境下能获得更多信息,形成优势类群^[29];丰富的营养盐含量使得温度适应性强的功能类群W1数量逐渐增加,也为原生动物的生长创造条件,这与Sommer等的研究相符合^[1]。绝大多数的原生动物是以直接摄取固体有机物的全动物性营养(holozoic nutrition)形式为主^[30],原生动物不但会对浮游植物产生牧食压力,而且会和浮游植物相互竞争营养盐、光照等营养物质,这也会改变浮游植物群落的结构。功能类群P、C和W1的生物量同时大量出现是由于这些功能群的代表种营

养吸收功能强,能将无机营养盐更多地转化为有机营养物,为生态系统所用,促进生态系统的物质循环,进而造成了生态功能的变化^[31]。

四明湖水库春季浮游植物群落结构主要受理化-营养盐-浮游动物交互作用(15.8%)的影响(图5),优势功能类群主要为X2、MP和P。此时,水库水温升高,光照强度增强,以C型生长策略藻种为主的功能类群X2得到迅速发展^[32, 33];一方面,在水体相对稳定的情况下,X2代表种衣藻、隐藻通过鞭毛运动到真光层捕获光照^[34];另一方面,以绿藻门为主的功能类群X2属于投机性藻类(opportunistic algae),一旦营养盐浓度和温度适宜,便会迅速生长。值得注意的是,功能类群X2的生物量与轮虫类浮游动物的生物量呈正相关(图6),这可能与初春的水体理化因子适宜两者的生长有关,同为投机性生物(opportunistic organisms)的轮虫能在适宜的环境下快速增殖^[35, 36]。同时,耐受磷限制的中心硅藻(功能群P)^[29]和具有强营养吸收能力的MP^[28]在这一环境中也表现出竞争优势,与X2共同形成优势。此外,原生动物(以捕食蓝藻为主)生物量的减少,也为功能类群MP提供发展机遇,使其占据一定生态位^[37]。较高的N营养盐同样为适合在富营养型水体生存的W2和G提供了适宜条件^[13],丰富了春季浮游植物群落结构。

3.2 环境因子对浮游植物群落季节演替的影响

四明湖水库全年浮游植物群落季节演替的影响因子是由单独因子(25.2%)与这些因子之间交互作用(21.0%)组成的,主要包括水温(WT)、光照(SD)、硝态氮(NO_3^- -N)、轮虫、桡足类和原生动物的生物量(图5和图6)。

方差分解分析发现(图5),浮游植物群落结构全年受因子交互作用影响较大,其中,水温-浮游动物交互作用是驱动全年浮游植物群落季节演替的主要因子,可解释9.3%的群落变化。水温会通过改变浮游动物的生物量直接影响浮游植物的群落结构^[38]。秋冬季水温的降低会迫使甲壳类浮游动物进入休眠卵阶段,浮游动物生物量逐渐减少。而随着春季水温的升高,休眠卵开始复苏,浮游动物生物量得以爆发式增长。浮游藻类作为水体中的初级生产力,是浮游动物主要的食物直接来源。浮游动物生物量的增加,加大了对浮游植物的牧食压力,造成了春季“清水期”阶段。Gaedke等的研究发现^[6],随着温度升高,植食性浮游动物生物量和当

前的牧食压力会对浮游植物群落结构产生复杂的间接影响. 浮游植物群落结构一方面受到来自水温产生的“上行效应”的影响, 另一方面又受到来自浮游动物产生的“下行效应”的控制, 这与 Abrantes 等^[7]研究贝拉湖的结果相似.

除此之外, 理化因子、营养盐与浮游动物产生交互作用也能影响浮游植物群落组成. 透明度主要是反映水下光照条件. 光照既能为浮游植物光合作用提供能量, 又在浮游植物细胞分裂生长过程中起到关键作用^[39]. 同时, 浮游植物的大量增殖也会在水体透明度产生影响. 营养盐, 尤其是 N 和 P, 是藻类生长最主要的营养元素, 水体环境中各个营养物质的浓度, 间接影响浮游植物的生长活动^[40]. 适宜的光照、pH 和营养盐因子共同影响水环境, 水体环境又作用于浮游动物, 进而, 影响浮游植物的群落结构.

值得注意的是, 在全年中, 驱动浮游植物群落结构变化的交互作用到达 21.0%, 与单独因子所解释群落变化部分(25.2%)相差不大; 而在各个季节中, 交互作用所解释的部分远远低于单独的环境因子(图 6). 这说明环境因子的交互作用对浮游植物整个过程的季节演替有较大的影响, 但在各个阶段中, 由于单独环境因子数量少且作用性强, 故交互作用影响较小. 秋冬季, 低温环境和较高的氮磷比, 会抑制藻类的生长繁殖^[41]; 而浮游动物多数处于休眠期, 对浮游植物影响不大^[41]. 春季, 浮游植物群落没有被温度限制, 是因为该季节温度范围在 15~25℃, 是大多数藻类适宜生长的温度; 适宜的温度、光照和营养盐使得浮游动物繁殖, 交互影响浮游植物群落.

4 结论

(1) 调查期间共检出浮游植物 7 门 208 种(属), 分属于 22 个功能类群, 其中优势功能类群有 14 个.

(2) 四明湖水库浮游植物功能类群演替具有明显的季节性特征: 夏季 D + Lo → 秋冬季 D + P + Lo → 春季 X2 + P + MP.

(3) 四明湖水库浮游植物群落结构的季节演替受水体中环境因子的单独作用和因子之间交互作用的共同影响, 主要的影响因子包括水温、光照、硝态氮和浮游动物的生物量. 其中, 水温为最主要的单独作用因子, 水温-浮游动物交互作用为最重要的交互作用因子.

参考文献:

- [1] 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**: 433-471.
- [2] 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**(1): 429-448.
- [3] Padisák J, Borics G, Grigorczyk 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.
- [4] 田泽斌, 刘德富, 姚绪姣, 等. 水温分层对香溪水库湾浮游植物功能群季节演替的影响 [J]. *长江流域资源与环境*, 2014, **23**(5): 700-707.
Tian Z B, Liu D F, Yao X J, *et al.* Effect of water temperature stratification on the seasonal succession of phytoplankton function grouping in Xiangxi Bay [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(5): 700-707.
- [5] 马沛明, 施练东, 张俊芳, 等. 浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(12): 4560-4569.
Ma P M, Shi L D, Zhang J F, *et al.* Succession of phytoplankton assemblages and its influencing factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(12): 4560-4569.
- [6] Gaedke U, Rühnströth-Bauer M, Wiegand I, *et al.* Biotic interactions may overrule direct climate effects on spring phytoplankton dynamics [J]. *Global Change Biology*, 2010, **16**(3): 1122-1136.
- [7] 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.
- [8] 陈晓江, 杨劼, 杜桂森, 等. 官厅水库浮游植物功能群季节演替及其驱动因子 [J]. *中国环境监测*, 2016, **32**(3): 74-81.
Chen X J, Yang J, Du G S, *et al.* Relationships between environmental variables and seasonal succession in phytoplankton functional groups in the Guanting Reservoir [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, **32**(3): 74-81.
- [9] 易齐涛, 陈求稳, 赵德慧, 等. 淮南采煤塌陷湖泊浮游植物功能群的季节演替及其驱动因子 [J]. *生态学报*, 2016, **36**(15): 4843-4854.
Yi Q T, Chen Q W, Zhao D H, *et al.* Seasonal succession of phytoplankton functional groups and their driving factors in the artificial lakes created by mining subsidence in Huainan coal mine areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(15): 4843-4854.
- [10] Göthe E, Angeler D G, Gottschalk S, *et al.* The influence of environmental, biotic and spatial factors on diatom metacommunity structure in Swedish headwater streams [J]. *PLoS One*, 2013, **8**(8): e72237.
- [11] Cabecinha E, Van Den Brink P J, Cabral J A, *et al.* Ecological relationships between phytoplankton communities and different spatial scales in European reservoirs: implications at catchment level monitoring programmes [J]. *Hydrobiologia*, 2009, **628**

- (1): 27-45.
- [12] 叶然, 刘莲, 王琼, 等. 春季浙北海域浮游植物群落的空间分布[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(4): 1492-1504.
Ye R, Liu L, Wang Q, *et al.* Biogeography of spring phytoplankton community in the coastal waters of northern Zhejiang[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(4): 1492-1504.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 杨文, 朱津永, 陆开宏, 等. 淡水浮游植物功能类群分类法的提出、发展及应用[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(6): 1833-1840.
Yang W, Zhu J Y, Lu K H, *et al.* The establishment, development and application of classification approach of freshwater phytoplankton based on the functional group: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, **25**(6): 1833-1840.
- [16] Kruk C, Segura A M, Costa L S, *et al.* Functional redundancy increases towards the tropics in lake phytoplankton[J]. Journal of Plankton Research, 2017, **39**(3): 518-530.
- [17] Várdfó G, Görgényi J, Tóthmérész B, *et al.* Functional redundancy modifies species-area relationship for freshwater phytoplankton[J]. Ecology and Evolution, 2017, **7**(23): 9905-9913.
- [18] 陆开宏. 四明湖水浮游生物及其渔业利用的初步研究[J]. 浙江水产学院学报, 1990, **9**(1): 17-26.
Lu K H. Preliminary studies on the plankton of Siminghu Reservoir, Zhejiang and its rational piscicultural utilization[J]. Journal of Zhejiang College of Fisheries, 1990, **9**(1): 17-26.
- [19] 周志明, 朱俊杰, 顾志敏, 等. 四明湖水浮游生物现状调查及评价[J]. 水生生态学杂志, 2011, **32**(3): 104-107.
Zhou Z M, Zhu J J, Gu Z M, *et al.* Investigation and assessment of planktonic population in Siminghu Reservoir[J]. Journal of Hydroecology, 2011, **32**(3): 104-107.
- [20] 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.
Hu H J, Wei Y X. The freshwater algae of China: systematics, taxonomy and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [21] 韩茂森, 束蕴芳. 中国淡水生物图谱[M]. 北京: 海洋出版社, 1995.
Han M S, Shu Y F. Atlas of freshwater ater biota in China[M]. Beijing: China Ocean Press, 1995.
- [22] 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.
Jin X C, Tu Q Y. The standard methods in lake eu- trophication investigation (2nd ed.) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [23] 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文. 呼兰河湿地夏、秋两季浮游植物功能分组演替及其驱动因子[J]. 生态学报, 2014, **34**(5): 1264-1273.
Lu X X, Liu Y, Fan Y W. Relationships between environmental variables and seasonal succession in phytoplankton functional groups in the Hulan River Wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(5): 1264-1273.
- [24] 蒋绍阶, 蒋晖, 向平, 等. 强化混凝去除尖针杆藻[J]. 环境工程学报, 2013, **7**(9): 3312-3318.
Jiang S J, Jiang H, Xiang P, *et al.* Removal of synedra acus by enhanced coagulation[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, **7**(9): 3312-3318.
- [25] Frenken T, Velthuis M, De Senerpont Domis L N, *et al.* Warming accelerates termination of a phytoplankton spring bloom by fungal parasites[J]. Global Change Biology, 2015, **22**(1): 299-309.
- [26] Xiao L J, Wang T, Hu R, *et al.* Succession of phytoplankton functional groups regulated by monsoonal hydrology in a large canyon-shaped reservoir[J]. Water research, 2011, **45**(16): 5099-5109.
- [27] Hall D J, Threlkeld S T, Burns C W, *et al.* The size-efficiency hypothesis and the size structure of zooplankton communities[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1976, **7**(1): 177-208.
- [28] Wang L, Cai Q H, Tan L, *et al.* Phytoplankton development and ecological status during a cyanobacterial bloom in a tributary bay of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(19): 3820-3828.
- [29] Zhu K X, Bi Y H, Hu Z Y. Responses of phytoplankton functional groups to the hydrologic regime in the Daning River, a tributary of Three Gorges Reservoir, China[J]. Science of the Total Environment, 2013, **450-451**: 169-177.
- [30] 赵文. 水生生物学[M]. (第二版). 北京: 中国农业出版社, 2016.
Zhao W. Hydrobiology (2nd ed.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2016.
- [31] Hood R R, Laws E A, Armstrong R A, *et al.* Pelagic functional group modeling: Progress, challenges and prospects[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2006, **53**(5-7): 459-512.
- [32] Machado K B, Borges P P, Carneiro F M, *et al.* Using lower taxonomic resolution and ecological approaches as a surrogate for plankton species[J]. Hydrobiologia, 2015, **743**(1): 255-267.
- [33] 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.
- [34] 张怡, 胡韧, 肖利娟, 等. 南亚热带两座不同水文动态的水库浮游植物的功能类群演替比较[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(1): 107-117.
Zhang Y, Hu R, Xiao L J, *et al.* Comparative analysis of succession of the phytoplankton functional groups in two reservoirs with different hydrodynamics in Southern China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, **21**(1): 107-117.
- [35] Simões N R, Lansac-Tôha F A, Velho L F, *et al.* Intra and inter-annual structure of zooplankton communities in floodplain lakes: a long-term ecological research study[J]. Revista de Biologia Tropical, 2012, **60**(4): 1819-1836.
- [36] Grigorczyk I, Kiss K T, Béres V, *et al.* The effects of temperature, nitrogen, and phosphorus on the encystment of *Peridinium cinctum*, Stein (Dinophyta) [J]. Hydrobiologia, 2006, **563**(1): 527-535.

- [37] 庞燕, 金相灿, 储昭升, 等. 几种捕食性微小动物对铜绿微囊藻及孟氏浮游蓝丝藻生长的抑制作用[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(1): 56-61.
Pang Y, Jin X C, Chu Z S, *et al.* Degradation of growing *Microcystis aeruginosa* and *Planktothrix mougeotii* by several predacious microanimals [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, **28**(1): 56-61.
- [38] Reynolds C S. Ecology of phytoplankton [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [39] Winder M, Sommer U. Phytoplankton response to a changing climate[J]. Hydrobiologia, 2012, **698**(1): 5-16.
- [40] Thomas M K, Aranguren-Gassis M, Kremer C T, *et al.* Temperature-nutrient interactions exacerbate sensitivity to warming in phytoplankton[J]. Global Change Biology, 2017, **23**(8): 3269-3280.
- [41] 王雄, 纪道斌, 刘德富, 等. 大宁河浮游植物季节演替与环境的响应关系[J]. 中国农村水利水电, 2017, (4): 86-90, 96.
Wang X, Ji D B, Liu D F, *et al.* The relationship between seasonal succession of phytoplankton and environmental in Daning River[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017, (4): 86-90, 96.

环境科学

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-biological 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)