ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

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

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 39 卷 第 6 期
2018 年 6 月 15 日

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菲烯的排放特征 …… 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氮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, 郦超, 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, 张娴(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, 笪文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧赟(2632)
重庆雪玉洞洞穴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, 胡刘婵, 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, 刘九缠, 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, 郑忠明, 朱津永(2688)
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, 张玮, 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 …… 刘淼, 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, 高昊旸, 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)
海藻酸锆/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, 廖烜弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷(2802)
四环素对人粪便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)
长期定位有机物料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, 陈檣, 邓绍坡, 万金忠, 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)
矿业活动影响区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 …… 孙秀锋, 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)

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[1], 李洪[2], 李嘉[1], 宋洋[1], 张陵蕾[1*], 李永[1], 蒲迅赤[1], 黄文典[1]
(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065; 2. 四川省紫坪铺开发有限责任公司, 成都 610037)

摘要: 为了解中国西南山区河道型水库——紫坪铺水库的藻种类的构成、演替及其影响因素, 于 2016 年 4 月~2017 年 3 月对紫坪铺水库 8 个点位进行采样分析, 首次探索该区藻类生物量、藻类构成并进行藻类功能分组、分析环境因子与功能群之间的关系. 结果表明, 共检出藻类 6 门 49 属, 其中绿藻门 18 属, 硅藻门 15 属, 裸藻门 7 属, 蓝藻门 6 属, 甲藻门 2 属, 隐藻门 1 属, 可分为 21 个功能群:B、C、D、F、G、H_1、J、L_0、L_M、M_P、N、P、S_2、T、W_1、W_2、X_1、X_2、X_3、Y、Z. 紫坪铺库区一年内不同时期的藻类优势功能群存在明显差异, 其中 W_2、Y、L_0、W_1、M_P、B 是紫坪铺水库的优势藻类功能群. 该库区藻类 C-R-S 生长策略的季节演替过程中, R 策略藻种长期占据优势地位, S 与 C 策略藻种占优时间相对较少. 紫坪铺库区 2016 年 6 月发生轻度水华, 水华藻种为甲藻门多甲藻属, 其功能群分组为 L_0, 生长策略为 S 型胁迫耐受者. 藻密度、叶绿素 a、水温、五日生化需氧量是主要的影响因子, 其中水温的变化对藻类功能群演替影响程度最大.

关键词:紫坪铺水库; 藻; 功能群; C-R-S 生长策略; 时空演替; 环境因子
中图分类号: X171; X524 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2018)06-2680-08 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201709163

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[1], LI Hong[2], LI Jia[1], SONG Yang[1], ZHANG Ling-lei[1*], LI Yong[1], PU Xun-chi[1], HUANG Wen-dian[1]
(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Sichuan Province Zipingpu Development Company Limited, Chengdu 610037, China)

Abstract: In order to explore the spatial and temporal variations of algal functional groups in the Zipingpu reservoir, a typical channel-type reservoir in the southwest mountainous area of China, water samples were collected from eight sections of the Zipingpu reservoir from April 2016 to March 2017. A total of 21 algal functional groups were identified as B, C, D, F, G, H_1, J, L_0, L_M, M_P, N, P, S_2, T, W_1, W_2, X_1, X_2, X_3, Y, and Z. Based on the analysis of the dominant degree ($y>0.02$), the algal functional groups were dominated by W_2, Y, L_0, W_1, M_P, and B. The C-R-S strategy of algal growth in the Zipingpu reservoir showed that R-type was a more dominant type than the S- and C-type for the majority of the time. *Peridinium* (group L_0, type S) was the significant algae in the Zipingpu reservoir algal bloom event in June 2016. Redundancy analysis (RDA) was used to explore the relationship between algal functional groups and environmental factors. The results showed that algal density, chlorophyll a, water temperature, and biochemical oxygen demand were the major factors influencing the spatiotemporal succession of algal functional groups across the eight sampling sections, with water temperature having the highest influence.

Key words: Zipingpu Reservoir; algal; functional groups; C-R-S growth strategy; spatiotemporal succession; environmental factors

近年来, 藻类功能分组(algal functional classification)逐渐成为国内外藻类生态学领域的研究热点. 不同藻类具有其特殊的生理生长特征和环境适应性机制, 以此特点为基础, Reynolds 等[1]提出了把具有相同适应性特征而易在同种生境下共存的藻类归类分组成藻类功能群的理论, 后经 Padisák 等[2]补充完善, 至今共鉴定描述了 39 种藻类功能群[3]. 这一理论能够满足大部分淡水水域的藻类的分类[4], 将不同种类的藻类缩小到一个或几个适应该生境的功能群, 用字母作为功能群代码, 极大地简化了传统生物分类系统的复杂性[5], 更是为探寻生境变化与藻类群落演替之间的关系提供了研究基础平台, 明晰了对藻类群落生态特征与机制

收稿日期: 2017-09-18; **修订日期**: 2017-12-11
基金项目: 国家自然科学基金项目(51679156, 51309170); 国家重点研发计划项目(2016YFC0502200)
作者简介: 张耀文(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态与环境水力学, E-mail:342079872@qq.com
* 通信作者, E-mail:zhanglinglei@hotmail.com

的认识. 湖泊学者[6~18]开始考虑不是用某一个优势种而是用功能群[19]来研究环境因子与藻类演替之间的关系.

中国西南山区蕴含丰富的水资源与水能资源，此区域水库形态多为河道型，具有水深大、水温较低、有关物化参量(如流速、温度、营养盐浓度等)垂向变化较大、流态复杂等特点；此区域社会经济发展水平总体较低，受地理位置、人口聚集程度、农耕方式等的限制，水体营养盐水平往往并不高. 紫坪铺水利枢纽工程位于四川省成都市西北部岷江上游[20]，于2006年12月竣工，是一座以灌溉、供水为主，同时兼备发电、防洪等综合效益的水利工程. 紫坪铺水库最大坝高156 m，正常蓄水位877 m，死水位817 m，总库容11.12亿 m^3，是一座典型的山区河道型水库. 紫坪铺水库为成都市民提供饮用水源，近年来却频发水华，水华藻属为甲藻门多甲藻属，水库水源水质安全受到严重威胁.

目前关于紫坪铺水库的研究多是针对水温[20]、水质[21]等方向，而鲜有关于藻类尤其是功能群方面相关的研究. 本研究对紫坪铺水库藻类进行了连续性监测，并首次将浮游植物功能分组理论应用于紫坪铺水库藻类研究中，对紫坪铺水库藻类进行功能群划分，从藻类C-R-S生长策略了解其对水体中能量和物质的需求，探究其时空分布特征及影响藻类优势功能群分布的主要环境因子，以期为紫坪铺水库藻类研究及保证水库水源水质安全提供理论支持和技术支撑.

1　材料与方法

1.1　采样点的设置

本研究以四川省内紫坪铺水库为研究对象，开展了为期1 a的连续观测. 于2016年4月~2017年3月进行12次采样，每月一次. 根据紫坪铺水库水域特点设置8个采样点，采样点位置如图1所示. 分别为G1渔子溪电站尾水下游、G3牛圈沟、G5阿坝铝厂下游、Z9寿溪河、G10寿溪河汇口下游、G12跨库大桥、G14查关村坝前码头、G15坝下水文站. 其中G1、G3、G5、G10位于上游干流河道，Z9位于上游支流河道，G12、G14位于水库库区内，G15位于水库下游河道.

1.2　样品的采集、处理与检测方法

采样时间控制在09:30~12:00之间.

在现场直接采用水银温度计和AMI溶解氧分析仪对水温(T)、溶解氧(DO)进行测定；

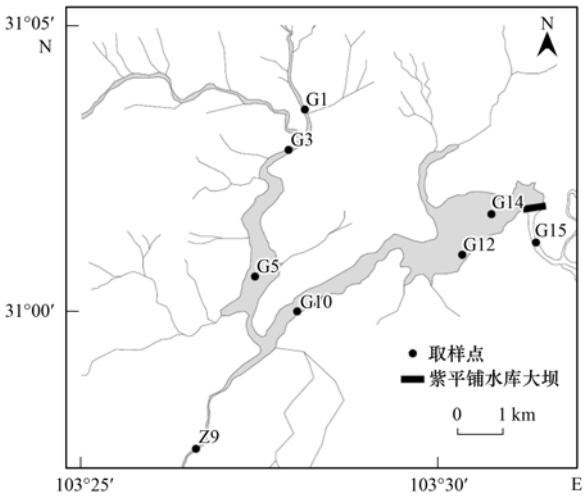


图1　紫坪铺采样点分布示意

Fig. 1　Sampling sites in the Zipingpu Reservoir

现场取1 L水样加10 mL鲁哥试剂固定，带回实验室用于藻属鉴定及藻密度计数，将加有鲁哥试剂的水样于实验室摇匀后静置沉淀24~48 h后用虹吸法浓缩至200 mL，参照文献[22]对浓缩后的样品进行藻类种属鉴定，采用显微镜法[23]进行藻细胞计数，得到藻密度(个·L^{-1}).

取1 L水样加入1%碳酸镁悬浊液1 mL带回实验室用于测定叶绿素a(Chla)，参照文献[23]进行测定.

另取2 L水样带回实验室用于测定总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N)、化学需氧量(COD)、五日生化需氧量(BOD_5)等常规水质指标，参照文献[23]进行测定.

1.3　水华程度判别方法

水华程度判别方法参考郑建军[24]的研究成果，具体标准见表1.

表1　水华程度判别

Table 1　Grades of algal bloom

程度	藻密度×10^4/个·L^{-1}	Chla浓度/mg·m^{-3}
轻度水华	100~1 000	30~150
中度水华	1 000~2 000	150~300
重度水华	≥2 000	≥300

1.4　藻类功能群分类方法

本研究采用Reynolds等[1]和Padisák等[2]提出的浮游植物功能群分类方法对检出的藻属进行功能群分类，特定的功能类群对应特定的生境状态及其耐受性特点[25]，水体中浮游植物的功能类群越多，说明水体环境系统中生境多样性越高[2]. 并确定各功能群的C-R-S生长策略，藻类的C-R-S生长策略从藻类生理生态特征方面对藻类的生长特性、环境

适应机制进行了划分，分别为：C 型竞争者(competitors)：物质供给、能量输入均较理想时，具有较快的生长繁殖速率和较低的沉降速率，可以在竞争中占优；R 型杂生者(ruderals)：物质供给充足时，对能量输入具较高的耐受性，能长期在高、低光照下生长；S 型胁迫耐受者(stress-tolerators)：在物质相对不足时，能通过其他途径获取生长所需资源.

1.5 数据分析

功能群的优势度根据不同藻类功能群出现的频率和丰度来确定[26]：

$$y = f_i \times P_i$$

式中，y 为优势度，f_i 为第 i 藻类功能群的出现频率，P_i 为第 i 功能群丰度占总藻类丰度的比例. 当 $y > 0.02$ 时，定为优势功能群[27].

选择优势度 $y > 0.02$ 的藻类功能群，分析环境因子与优势藻类功能群丰度之间的关系.

先用 Canoco 4.5 对藻类优势功能群丰度数据进行去趋势分析(DCA)分析，按最大梯度长度的大小来确定采用何种分析方法来分析环境因子与优势藻类功能群丰度之间的关系，若最大梯度长度大于 4，采用典范对应分析(CCA)；若小于 3，采用冗余分析(RDA)；若处于 3～4 之间，选 RDA 和 CCA 均可.

2 结果与分析

2.1 紫坪铺水库藻类生物量

本文从 Chla、藻密度两方面来共同反映紫坪铺水库藻类生物量的时空分布，如图 2 所示，Chla 与藻密度的变化规律大致相同. 各采样点位藻密度均具明显季节性变化规律，藻密度峰值出现在夏季 5～7 月，秋季 11 月和冬季 2 月左右有小峰值. 夏季水华易发期，河道上游的点位(G1、G3)与支流的点位(Z9)的 Chla、藻密度持续处于较低水平，并未发生水华；两个水库库区点位(G12、G14)的 Chla、藻密度于 5 月率先开始发生巨幅增长并在 6 月达到顶峰，Chla 分别为 17.89 mg·m^{-3}和 27.54 mg·m^{-3}，藻密度分别为 934×10^4 个·L^{-1}和 888×10^4 个·L^{-1}，发生轻度水华；水库下游的 G15 点位未发生水华，但增长规律与水库库区点位 G12、G14 基本一致；G5 点位和 G10 点位的 Chla、藻密度于 6 月～7 月之间开始增长并在 7 月达到峰值，Chla 分别为 10.11 mg·m^{-3}和 7.08 mg·m^{-3}，藻密度分别为 248×10^4 个·L^{-1}和 182×10^4 个·L^{-1}，发生轻度水华.

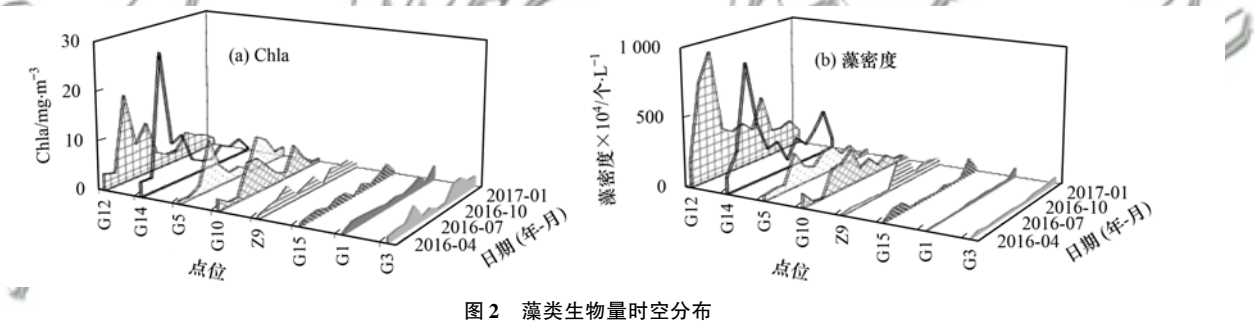


图 2 藻类生物量时空分布

Fig. 2 Spatiotemporal distribution of algal biomass

2.2 紫坪铺水库藻类功能群分组

2.2.1 藻类组成

2016 年 4 月～2017 年 3 月共 12 个月，8 个采样点共检出藻类 6 门 49 属，其中绿藻门(Chlorophyta)18 属，占总属数的 36.73%；硅藻门(Bacillariophyta)15 属，占总属数的 30.61%；裸藻门(Euglenophyta)7 属，占总属数的 14.29%；蓝藻门(Byanbacteria)6 属，占总属数的 12.25%；甲藻门(Pyrrophyta)2 属，占总属数 4.08%；隐藻门(Cryptophyta)1 属，占总属数的 2.04%.

2.2.2 功能分组

将检测到的藻属进行功能分组，可分为 21 个功能群，各藻类功能群的生境特征、代表性藻属及其 C-R-S 生长策略如表 2 所示.

2.2.3 功能群演替特征

图 3 内容包括藻类功能群相对丰度分析与紫坪铺 12 个月功能群演替特征，选择相对丰度大于 10%(主要优势)的功能群组合或大于 50%(绝对优势)的功能群代表该样品的优势藻类功能群，其对应的 C-R-S 生长策略演替规律见表 3.

2.3 紫坪铺水库藻类功能群动态变化的影响因子

2.3.1 优势藻类功能群

根据紫坪铺水库具体情况，对其藻类功能群进行筛选，将优势度 $y > 0.02$ 的功能群定位紫坪铺水库优势藻类功能群，由图 4 可知，W_2、Y、L_0、W_1、M_P、B 是紫坪铺水库的优势藻类功能群，以此优势功能群为基础开展藻类功能群动态变化的影响因子分析.

表 2　紫坪铺藻类功能群的代表性藻属及其 C-R-S 生长策略

Table 2　Algal functional group classification in the Zipingpu Reservoir

功能群	功能群生境特征	代表性藻种(属)	生长策略
B	中营养水体，对分层敏感	小环藻(*Cyclotella*)	CR
C	富营养中小水体，对分层敏感	星杆藻(*Asterionella*)	R
D	浅水、浑浊程度大的水体，含河流	菱形藻(*Nitzschia*)	R
F	中富营养型湖泊变温层	卵囊藻(*Oocystis*)	CS
G	富营养型小型湖泊或池塘	实球藻(*Pandorina*)、空球藻(*Eudorina*)	CS
H_1	固氮型的念珠藻目典型生境	鱼腥藻属(*Anabeana*)	
J	混合的高富营养浅水水体	栅藻(*Scenedesmus*)、多芒藻(*Golenkinia*)、十字藻(*Crucigenia*)、四角藻(*Tetraedron*)	CR
L_0	广适性	平裂藻(*Merismopedia*)、色球藻(*Chroococcus*)、多甲藻(*Peridinium*)、羽纹藻(*Pinnularia*)	S
L_M	富营养湖泊变温层	微囊藻(*Microcystis*)	S
M_P	频繁扰动的浑浊型浅水湖泊	舟形藻(*Navicula*)、异极藻(*Gomphonema*)、卵形藻(*Cocconeis*)、双菱藻(*Surirella*)、桥弯藻(*Cymbella*)、曲壳藻(*Achnanthes*)	CR
N	中营养型水体混合层	鼓藻属(*Cosmarium*)	R
P	混合程度较高中富营养浅水水体	等片藻(*Diatoma*)、脆杆藻(*Fragilaria*)、直链藻(*Melosira*)、新月藻(*Closterium*)	R
S_2	浅的、浑浊的混合层	螺旋藻属(*Spirulina*)	R
T	混合均匀的深水水体变温层	转板藻属(*Mougeotia*)	R
W_1	富含有机质，或农业废水和生活污水的水体	裸藻(*Euglena*)、扁裸藻(*Phacus*)	R/CS
W_2	浅水型中营养湖泊	囊裸藻(*Trachelomonas*)、陀螺藻(*Strombomonas*)	R/CS
X_1	混合程度较高的富营养浅水水体	小球藻(*Chlorella*)、弓形藻(*Schroederia*)、纤维藻(*Ankistrodesmus*)	C
X_2	混合程度较高的中-富营养浅水水体	衣藻(*Chlamydomonas*)	C
X_3	浅的、清澈的混合层	波缘藻属(*Cymatopleura*)、布纹藻(*Gyrosigma*)	
Y	广适性(多反映了牧食压力低的静水环境)	隐藻(*Cryptomonas*)、裸甲藻(*Gymnodinium*)	CRS
Z	清澈的混合层	聚球藻属(*Synechococcus*)	

表 3　紫坪铺藻类优势功能群 C-R-S 生长策略演替规律

Table 3　Spatiotemporal succession of the C-R-S growth strategy

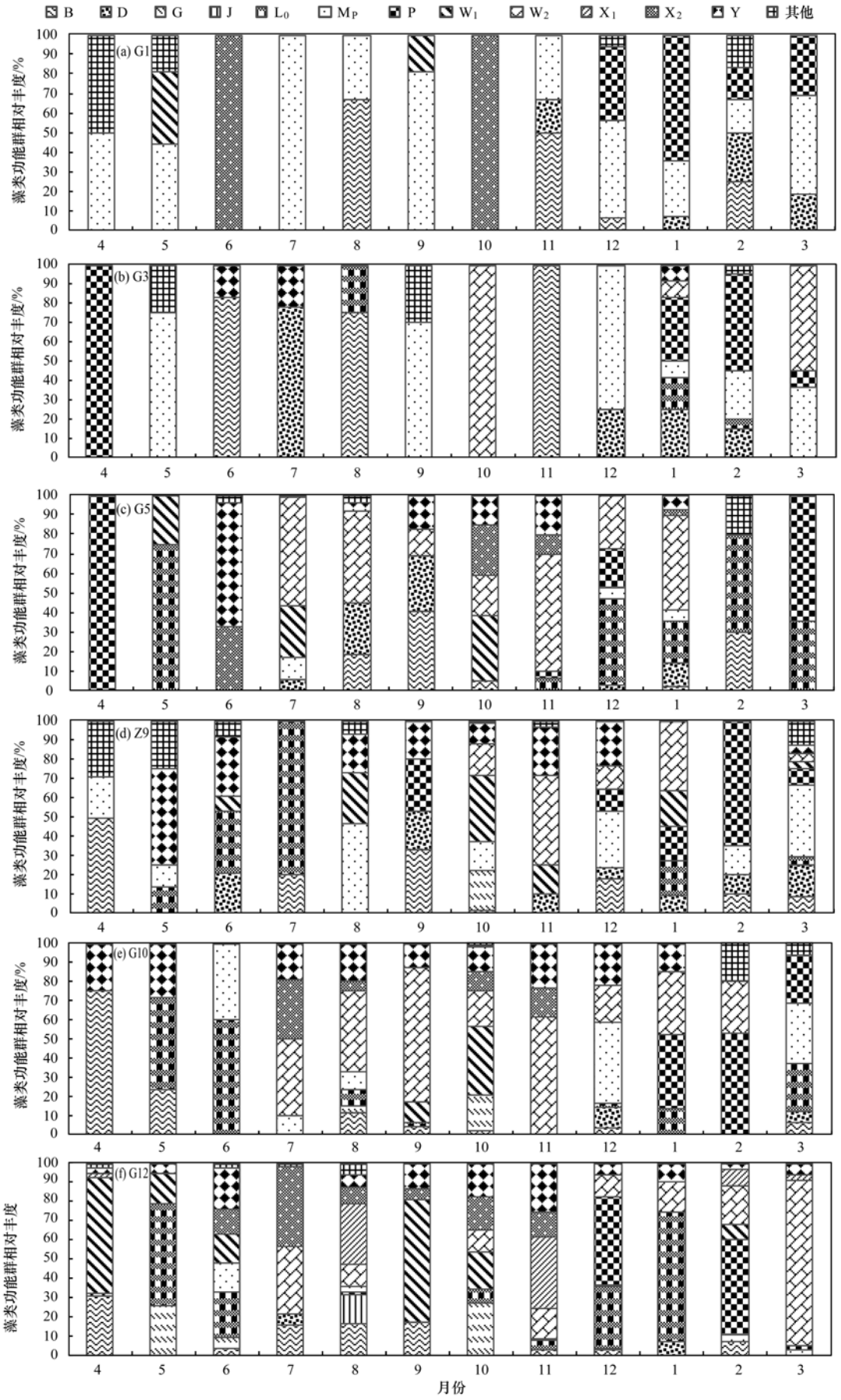
点位	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月
G1	CR	CR/R	C	CR	CR	CR	C	CR	CR	R	CR/R	CR
G3	R	CR	CR	R	CR	CR	R	CR	CR	R/S	R	R
G5	R	S	CRS	R	R/CR	CR/R/CRS	R/C/CRS	R	S/R	R/S	S	R
Z9	CR	CRS	S/CRS/R	S	CR/R/CRS	CR/R/CRS	R/CS/CR/CRS	R/CRS	CR/CRS/R	R/S	R	CR/R
G10	CR	S/CRS/CR	S	R/C/CRS/CR	R/CRS/CR	R	R/CS/CRS	R	CR/CRS/R	R/CRS/S	R	CR/S
G12	R	S	S/CRS/CR/R/C	C/R/CR	C/CR/R	R	CS/R/CRS/C	C/CRS/R	R/S	S	R	R
G14	CR	R/CS	S/CR/R	C/R/CR	C/CR	R	CS/CRS/C/R	R/C	S	R	R/C	C
G15	R/CR	CR/CS	CRS	CR	CS	R	R	CR/R	S	R	R/C/S/CR	C

2.3.2　藻类优势功能群与环境因子的相关分析

运用 Canoco 4.5 对藻类优势功能群丰度数据进行去趋势分析(DCA)，最大梯度长度为 2.860，小于 3，故采用线性模型较为合适，故对紫坪铺优势藻类功能群和环境因子进行冗余分析(RDA)，参与冗余分析的环境因子包括藻密度、Chla、水温、pH、TP、TN、NH_4^+-N、BOD_5、COD、DO.

经 RDA 分析发现其中藻密度、Chla、水温、BOD_5 是主要的影响因子，影响程度依次递减，轴 1 是主要特征轴，特征值为 0.252，优势功能和环境因子与 4 个排序轴的相关性分别是 0.860、0.611、0.548、0.327.

各环境因子关联性在图 5 中主要通过夹角大小来反映，两者夹角越大，相关性越弱(锐角为正相关，钝角为负相关)，环境因子表征射线越长，作用越显著. 可知藻密度、Chla 与 6 个优势功能群均呈正相关，其中与 L_0 相关性最强，与观察到的 L_0 功能群发生水华的现象相一致. 环境因子 DO、BOD_5、水温 T 与 6 个优势功能群均呈正相关；COD 与 W_2、Y、W_1、B 呈正相关，与 L_0、M_P 呈负相关；TN 与 W_2、Y、W_1 呈正相关，与 B、L_0、M_P 呈负相关；TP、NH_4^+-N与 M_P 呈正相关，与 L_0、B、W_1、Y、W_2 呈负


B
D
G
J
L_0
M_P
P
W_1
W_2
X_1
X_2
Y
其他
(a) G1
(b) G3
(c) G5
(d) Z9
(e) G10
(f) G12
藻类功能群相对丰度/%
藻类功能群相对丰度
月份
4 5 6 7 8 9 10 11 12 1 2 3

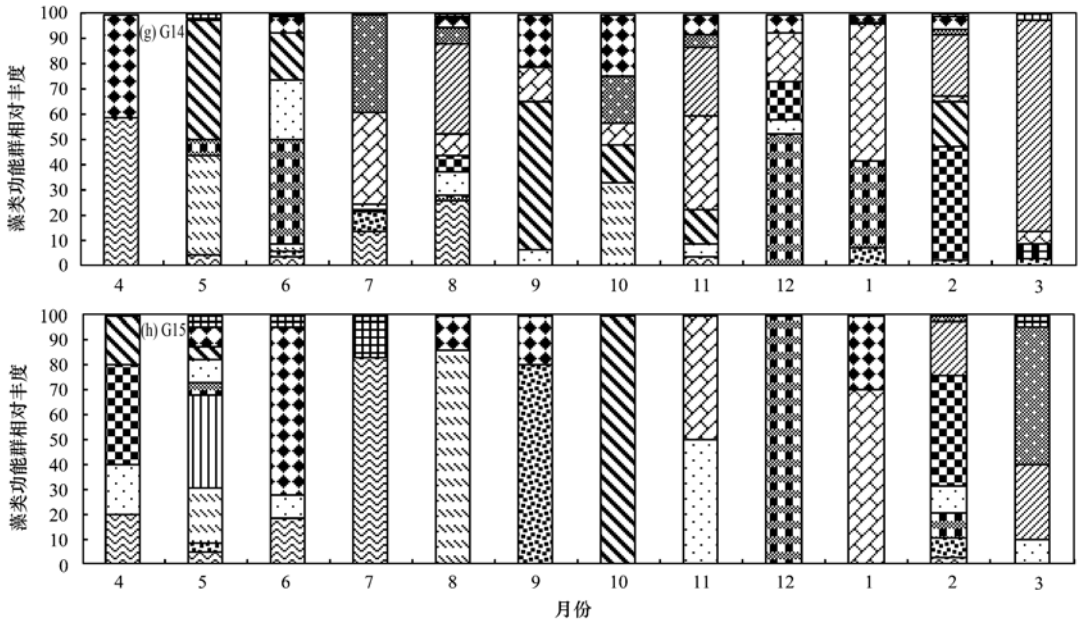


图 3　各采样点各时期藻类功能群相对丰度

Fig. 3　Relative abundance of algal functional groups for each sampling point

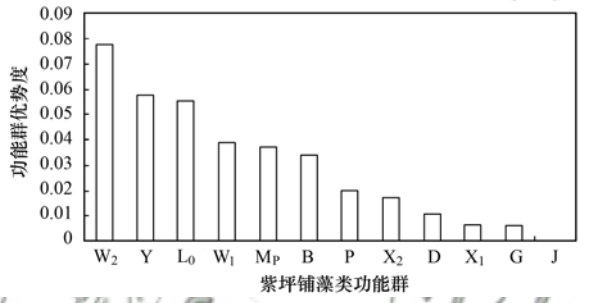


图 4　紫坪铺藻类功能群优势度

Fig. 4　Dominance of algal functional groups in the Zipingpu Reservior

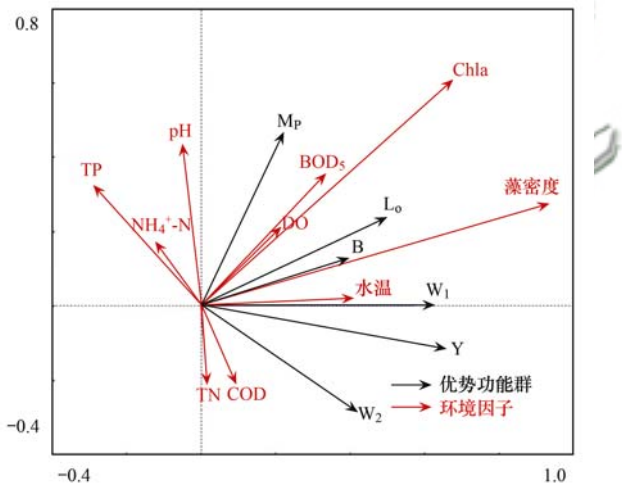


图 5　优势藻类功能群丰度与环境因子的 RDA 分析

Fig. 5　Redundancy analysis of functional groups of algal related to environmental factors in the Zipingpu Reservoir

相关；pH 与 M_P、L_0、B 呈正相关，与 W_1、Y、W_2 呈负相关.

综上可知，藻类功能群演替是紫坪铺不同生境条件共同作用的结果，其中水温 *T* 的变化对藻类功能群演替影响程度最大.

3　讨论

水库内 Chla、藻密度水平远高于上游河道及下游河道，可以证明水库条件更适宜藻类生长，与近年来水库水华频发的现象相一致. 而水库内的藻密度和 Chla 波峰先于上游河道的波峰一个月到达，可能是因为修建人工水库人为的改变了藻类的生长环境，如流速、水温、营养元素等均发生了改变，影响了藻类的生长周期，使之提前开始大幅增长. 而水库下游的 G15 点位距水库大坝不远，波峰与水库内藻类生长波峰一致，可能是因为其中蕴含的藻大部分是水库中随水流迁移出的藻，小部分才是适宜此环境而增殖出的藻. 藻类的生长极为复杂，而此次实验只进行了一年，并不能排除偶然因素，所以还应继续监测紫坪铺藻类生物量，继续探索水库中的藻类是否比河流中的藻类较为提前地进入对数增长期，才能进一步论证水库的修建是否改变了藻类的生长周期这一猜测.

稳定的湖泊系统中，藻类群落在光热传递（能量）季节变化和营养物（物质）输入的交叠影响下将沿着一定的群落演替路径发生结构化变化，欧洲、北美的富营养深水分层湖泊演替模式为：冬季 R 策

略→冬末春初 C 或 CS 策略→春季 S 策略→RS 策略/R 策略[25]. 对于紫坪铺水库库区(G12、G14)点位而言, 藻类生长策略的季节演替过程可能并不完善, 缺失了 RS 型藻类在群落中占优的时段, 推测紫坪铺水库藻类群落演替可能尚未稳定, 为证实此推测应持续对紫坪铺水库藻类进行跟踪监测; 紫坪铺水库藻类群落 C-R-S 演替过程相较稳定湖泊系统而言各策略的占优季节不大一致, 可能是经纬度等差异导致的光热传递季节变化不同的原因. 紫坪铺水库库区 G12 点位 R 策略藻种长期占据优势地位, 其中绝对占优 4 次、主要占优 6 次, 物质供给充足时, R 策略藻种对能量输入具较高的耐受性, 能长期在高、低光照下生长, 故紫坪铺水库应严格控制水体营养物质, 以防 R 策略的藻种暴发严重水华; S 策略藻种绝对占优 2 次、主要优势 2 次, 在物质相对不足时, 能通过其他途径获取生长所需资源; C 策略藻种绝对占优 0 次、主要占优 5 次, 物质供给、能量输入均较理想时, 具有较快的生长繁殖速率和较低的沉降速率, 可以在竞争中占优.

水质治理可以将水体理化条件与浮游植物生长策略相结合. 比如紫坪铺水库水华藻种是甲藻门多甲藻属, 其功能群分组为 L_0, 其敏感性为持续时间长或深层混合, 与观察到的紫坪铺水库甲藻水华在雨后消退的现象相符合, 生长策略为 S 型胁迫耐受者(stress-tolerators), 其在物质条件方面相对不足时, 能通过其他途径获取生长所需资源, 但在能量条件方面则需要能量充足, 所以在治理紫坪铺水库这种易发生甲藻(L_0 功能群)水华的水体水质时, 可考虑通过生态工程等方法来调节水体光热条件, 同时控制水体营养物质.

4 结论

(1)紫坪铺水库 2016 年 4 月 ~2017 年 3 月藻密度均具明显季节性变化规律, 峰值出现在夏季 5 ~7 月, 秋季 11 月和冬季 2 月左右有小峰值, 夏季库区及库区下游藻密度及 Chla 峰值先于上游一个月到达.

(2)2016 年 ~2017 年对紫坪铺水库 8 个采样点位所采集的藻类功能分组结果显示, 共可分为 21 个功能群: B、C、D、F、G、H_1、J、L_0、L_M、M_P、N、P、S_2、T、W_1、W_2、X_1、X_2、X_3、Y、Z.

(3)紫坪铺水库年内不同时期的藻类优势功能群存在明显差异, 其中 W_2、Y、L_0、W_1、M_P、B 是其优势藻类功能群.

(4)紫坪铺水库库区藻类 C-R-S 生长策略相较欧洲、北美的富营养深水分层湖泊演替模式而言, 缺失了 RS 型藻类在群落中占优的时段. 紫坪铺水库库区 G12 点位 R 策略藻种长期占据优势地位, 其中绝对占优 4 次、主要占优 6 次, 物质供给充足时, 对能量输入具较高的耐受性, 能长期在高、低光照下生长, 故紫坪铺水库应严格控制水体营养物质, 以防 R 策略的藻种暴发严重水华.

(5)紫坪铺库区 2016 年 6 月发生轻度水华, 水华藻种为甲藻门多甲藻属, 其功能群分组为 L_0, 生长策略为 S 型胁迫耐受者, 治理紫坪铺水库这种易发生甲藻(L_0 功能群)水华的水体水质时, 可考虑通过生态工程等方法来调节水体光热条件, 同时控制水体营养物质.

(6)藻类功能群演替是紫坪铺不同生境条件共同作用的结果, 对紫坪铺优势藻类功能群和 10 个环境因子进行冗余分析后的结果表明, 藻密度、Chla、水温、BOD_5 是紫坪铺功能群演替的主要影响因子, 其中水温影响程度最大.

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 黄国佳. 贵州高原红枫湖水库和百花湖水库浮游植物功能群时空演替特征[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2015.

[4] 李哲. 三峡水库运行初期小江回水区藻类生境变化与群落演替特征研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.

[5] Kruk C, Mazzeo N, Lacerot G, *et al*. Classification schemes for phytoplankton: a local validation of a functional approach to the analysis of species temporal replacement[J]. Journal of Plankton Research, 2002, **24**(9): 901-912.

[6] 卢金锁, 胡亚潘. 深水型水库藻类功能组时空演替及生境变化的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2611-2617.
Lu J S, Hu Y P. Spatiotemporal succession of algae functional groups and the influence of environment change in a deep-water reservoir[J]. Environmental Science, 2013, **34**(7): 2611-2617.

[7] 董静, 李根保, 宋立荣. 抚仙湖、洱海、滇池浮游藻类功能群 1960s 以来演变特征[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(5): 735-742.
Dong J, Li G B, Song L R. Historical changes of phytoplankton functional groups in Lake Fuxian, Lake Erhai and Lake Dianchi since 1960s[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, **26**(5): 735-742.

[8] 武安泉, 郭宁, 覃雪波. 寒区典型湿地浮游植物功能群季节变化及其与环境因子关系[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(5): 1341-1349.
Wu A Q, Guo N, Qin X B. Seasonal variation of phytoplankton

functional groups and their relationship with environmental factors in a typical cold regions wetland [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(5): 1341-1349.

[9] 李磊, 李秋华, 焦树林, 等. 阿哈水库浮游植物功能群时空分布特征及其影响因子分析[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(11): 3604-3611.
Li L, Li Q H, Jiao S L, *et al*. Spatial and temporal distribution characteristics of phytoplankton functional groups in aha reservoir and their influencing factors[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(11): 3604-3611.

[10] Liu X, Qian K M, Chen Y W. Effects of water level fluctuations on phytoplankton in a Changjiang River floodplain lake (Poyang Lake): Implications for dam operations[J]. Journal of Great Lakes Research, 2015, **41**(3): 770-779.

[11] 黄国佳, 李秋华, 陈椽, 等. 贵州高原红枫湖水库浮游植物功能分组及其时空分布特征[J]. 生态学报, 2015, **35**(17): 5573-5584.
Huang G J, Li Q H, Chen C, *et al*. Phytoplankton functional groups and their spatial and temporal distribution characteristics in Hongfeng Reservoir, Guizhou Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(17): 5573-5584.

[12] 汪星, 李利强, 郑丙辉, 等. 洞庭湖浮游藻类功能群的组成特征及其影响因素研究[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(12): 3766-3776.
Wang X, Li L Q, Zheng B H, *et al*. Composition and influential factors of algal function groups in Dongting Lake[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(12): 3766-3776.

[13] 杨喆, 卢金锁, 赵建超. 深水库藻类功能组演替特征及与其水动力关系[J]. 环境工程学报, 2017, **11**(2): 945-951.
Yang Z, Lu J S, Zhao J C. Relationship between succession characteristics of algae functional groups and hydrodynamic in deep-water reservoir [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, **11**(2): 945-951.

[14] 杨毓, 卢金锁, 张颖. 深水型水库藻形态功能组(MBFG)的季节演替特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 121-128.
Yang Y, Lu J S, Zhang Y. Seasonal succession characteristics of the morphologically-based functional groups (MBFG) in deep-water reservoir[J]. Environmental Science, 2017, **38**(1): 121-128.

[15] 杨敏, 张晟, 刘朔孺. 草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2480-2486.
Yang M, Zhang S, Liu S R. Phytoplankton community structure and water quality assessment in Jialing River after the impoundment of Caojie Reservoir[J]. Environmental Science, 2015, **36**(7): 2480-2486.

[16] 张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 等. 三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 535-546.
Zhang J L, Zheng B H, Liu D F, *et al*. Succession pattern of phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and its driving factors[J]. Environmental Science, 2017, **38**(2): 535-546.

[17] 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.

[18] 林岿璇, 汪星, 王瑜, 等. 镜泊湖浮游藻类功能群的演替特征及其影响因素[J]. 环境科学研究, 2017, **30**(4): 520-528.
Lin K X, Wang X, Wang Y, *et al*. Composition and influencing factors of algal functional groups in Jingpo Lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, **30**(4): 520-528.

[19] 胡韧, 蓝于倩, 肖利娟, 等. 淡水浮游植物功能群的概念、划分方法和应用[J]. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 11-23.
Hu R, Lan Y Q, Xiao L J, *et al*. The concepts, classification and application of freshwater phytoplankton functional groups [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, **27**(1): 11-23.

[20] 吴宇雷, 梁瑞峰, 李嘉, 等. 紫坪铺水库水温变化规律[J]. 环境影响评价, 2016, **38**(3): 24-28.
Wu Y L, Liang R F, Li J, *et al*. Study on water temperature change of Zipingpu Reservoir [J]. Environmental Impact Assessment, 2016, **38**(3): 24-28.

[21] 张沁, 李然, 李克锋, 等. 紫坪铺水库水质原型观测[J]. 武汉大学学报(工学版), 2011, **44**(5): 624-627.
Zhang Q, Li R, Li K F, *et al*. Water quality prototype observation at Zipingpu Reservior[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, **44**(5): 624-627.

[22] 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. 23, 91.

[23] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[24] 郑建军, 钟成华, 邓春光. 试论水华的定义[J]. 水资源保护, 2006, **22**(5): 45-47, 80.
Zheng J J, Zhong C H, Deng C G. Discussion on definition of algal bloom[J]. Water Resources Protection, 2006, **22**(5): 45-47, 80.

[25] Reynolds C S. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status? [J]. Hydrobiologia, 1998, **369**: 11-26.

[26] Aksnes D L, Wassmann P. Modeling the significance of zooplankton grazing for export production[J]. Limnology and Oceanography, 1993, **38**(5): 978-985.

[27] Richardson T L, Jackson G A. Small phytoplankton and carbon export from the surface ocean[J]. Science, 2007, **315**(5813): 838-840.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 39 No. 6

Jun 15, 2018

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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning ····· JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, *et al.* (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin ····· CAI Zi-ying, HAN Su-qin, ZHANG Min, *et al.* (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China ····· ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, *et al.* (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region ····· LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, *et al.* (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China ····· GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, *et al.* (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, *et al.* (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province ····· ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China ····· SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin ····· LI Yong-ge, LI Zong-xing, FENG Qi, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir ····· ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, *et al.* (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium *Chrysosporum ovalisporum*: An In-situ Experiment ····· WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, *et al.* (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 Jianghan Plain ····· HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, *et al.* (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China ····· CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, *et al.* (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, *et al.* (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(*N*-isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network ····· ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, *et al.* (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater ····· LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, *et al.* (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, *et al.* (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion ····· ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, *et al.* (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, *et al.* (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria ····· GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, *et al.* (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate ····· MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil ····· QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, *et al.* (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ^{13}C Pulse-labeling ····· SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, *et al.* (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China ····· YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical *Carya cathayensis* Production Area ····· ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, *et al.* (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, *et al.* (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils ····· WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, *et al.* (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas ····· TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHAGN Yun-xia, *et al.* (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, *et al.* (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province ····· LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-bai, *et al.* (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi ····· WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments ····· ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, *et al.* (2991)