

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.5
第41卷 第5期

目次

上海大气 PM_{2.5} 来源解析对比:基于在线数据运用3种受体模型 周敏(1997)

不同浓度臭氧对单颗粒气溶胶化学组成的影响 吴梦曦,成春雷,黄渤,李梅,陈多宏(2006)

二次有机气溶胶壳对氯化钠核吸湿性的影响:基于单颗粒微观尺度 张淑佳,徐亮,郭新梅,黄道,李卫军(2017)

城区与县区不同空气质量下碳组分污染特征对比分析 李欣悦,张凯山,邓林俐,向铎鹏,武文琪,殷子渊(2026)

临沂市 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中元素分布特征及来源解析 陆平,赵雪艳,殷宝辉,张楠,王歆华,余浩,杨文,王晓丽(2036)

西安市秋冬季市区与山区微生物气溶胶组成特征及来源 谢雯文,路瑞,慕云飞,戚玉珍,白文艳,李彦鹏(2044)

北京市典型餐饮企业大气污染物排放特征 何万清,王天意,邵霞,聂磊,石爱军(2050)

基于随机森林模型的中国 PM_{2.5} 浓度影响因素分析 夏晓圣,陈菁菁,王佳佳,程先富(2057)

大气污染联合治理分区视角下的中国 PM_{2.5} 关联关系时空变异特征分析 杨文涛,黄慧坤,魏东升,赵斌,彭焕华(2066)

基于地-空观测数据的粤港澳大湾区大气污染调查及时空演变特征 王耀庭,梁加成,郑祚芳,李青春,李威,窦有俊(2075)

龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因 唐春雷,郑秀清,梁永平(2087)

三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析 唐小娅,童思陈,黄国鲜,许光祥,李丹(2096)

三峡水库汛后蓄水期典型支流溶解氧与叶绿素 a 垂向分布特征 杨凡,纪道斌,王丽婧,李虹,李莹杰(2107)

汉丰湖正式运行年水体营养盐分布特征 付适,倪九派,何丙辉,李天阳,唐毅,钱田,向可翠(2116)

白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征 刘鑫,史斌,孟晶,周云桥,可欣,王铁宇(2127)

新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应 史鹏程,朱广伟,杨文斌,许海,朱梦圆,刘明亮,虞左明,吴志旭,郑文婷,王裕成,笄文怡,胡林娜(2137)

不同水文情景下高邮湖、南四湖和东平湖有色可溶性有机物的生物可利用性特征 张柳青,石玉,李元鹏,郭燕妮,周蕾,周永强,张运林,杨艳(2149)

水源水藻类功能群落演替特征及水质评价 李衍庆,黄廷林,张海涵,温成成,杨尚业,林子深,高欣(2158)

人工强制混合对金盆水库水体藻类群落结构时空演替的影响 王晨旭,黄廷林,李楠,齐允之,徐金兰,司凡,张晗,路林超(2166)

雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体好氧反硝化菌群落空间分布特征及驱动因素 周石磊,孙悦,岳智丞,张航,王周强,刘世崇,彭瑞哲,苑世超,李再兴,崔建升(2177)

分层型水库水体好氧不产氧光合细菌时空演替特征 张海涵,王燕,黄廷林,王晨旭,路林超,司凡,李楠,刘凯文,闫苗苗,苗雨甜(2188)

大型通江湖泊有色可溶性有机物对不同水文情景的响应 郭燕妮,李元鹏,石玉,张柳青,周蕾,周永强,张运林,韩龙飞(2198)

秦岭北麓河流夏季有色溶解有机物分布特征及影响因素 林子深,黄廷林,杨尚业,温成成,李衍庆,周石磊,宋选社(2210)

长江下游支流水体中多环芳烃的分布及生态风险评估 贾天琪,雷荣荣,武小琳,倪涛涛,孙树睿,郭伟,刘文彬(2221)

太湖水体中 NSAIDs 的时空分布规律和生态风险评估 廉杰,李祎飞,王晓喧,叶彬,邹华,史红星(2229)

8种典型 PhACs 在水中的赋存、生态风险及其对大型溞的影响 徐鑫磊,刘建超,陆光华(2239)

我国南方桉树人工林区水库沉积物污染物的分布特征及迁移规律 朱雅,李一平,罗凡,李荣辉,黄列,程一鑫,蒋裕丰(2247)

基于连续监测的城市内河返黑返臭机制初探:以南宁市二坑溪为例 李永新,王威,何妹,申泰铭(2257)

城郊流域源汇景观格局与水体抗生性的关系 李敏,唐剑锋,陈利顶,赵方凯,冯青郁,杨磊(2264)

城市雨水径流中溶解性有机物的分子化学多样性 聂云汉,陈浩,李磊,朱奕,赵昕,贾其隆,徐慧婷,叶建锋(2272)

方解石/氯磷灰石混合物添加对水体内源磷迁移转化的调控效应和机制 柏晓云,林建伟,詹艳慧,常明玥,吴俊麟,辛慧敏,黄良君(2281)

不同环境条件下水铁矿和针铁矿纳米颗粒稳定性 王智巧,马杰,陈雅丽,翁莉萍,顾亚陶,李永涛(2292)

向日葵秸秆生物炭强化 Fe(III)/S₂O₈²⁻ 体系降解苯甲酸 孙鹏,张凯凯,张玉,张延荣(2301)

非活化单过硫酸盐降解柳氯磺胺吡啶:动力学及机制 丁曦,张学维,周润生,宋哲,严佳颖,周磊,修光利(2310)

贵州某规模化养猪场废水中抗生素的污染特征及去除效果 杨钊,李江,向福亮,李彦澄,马凯,谢锋(2320)

新型填料 A/O 生物滤池处理低碳氨比农村污水脱氮 赵远哲,杨永哲,王海燕,储昭升,常洋,董伟羊,闫国凯,王欢,李丛宇(2329)

贫营养好氧反硝化菌株的脱氮特性及氮/碳平衡分析 文刚,王彤,黄廷林,万琪琪,曹瑞华,寇莉青,杨尚业(2339)

连续流 SNAD 工艺处理猪场沼液启动过程中微生物种群演变及脱氮性能 秦嘉伟,信欣,鲁航,张萍萍,王露蓉,邹长武,郭俊元(2349)

不同培养条件厌氧氨氧化颗粒污泥活性及微生物群落结构差异 姜滢,郭萌蕾,谢军祥,常尧枫,谢嘉玮,陈重军,沈耀良(2358)

反硝化除磷耦合部分亚硝化-厌氧氨氧化一体式工艺的启动 陈亚,印雯,张星星,张钰,宋吟玲,吴鹏,徐乐中(2367)

土壤环境承载力评价体系构建与应用 李笑诺,丁寿康,陈卫平,王夏晖,吕斯丹,刘睿(2373)

磁性生物炭的合成及对土壤重金属污染的钝化效果 王俊楠,程珊珊,展文豪,任强,马晓宇,王洋洋(2381)

还原增溶强化 EGTA 淋洗修复重金属污染土壤 张金永,朱玉婷,王明新,韩莹,葛嘉琦(2390)

不同价态铬和土壤理化性质对大麦根系毒性阈值的影响 付平南,贡晓飞,罗丽韵,王琪,李花粉(2398)

生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响 王舒,王子芳,龙翼,严冬春,慈恩,徐国鑫,李娇,高明(2406)

长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系 王兴,钟泽坤,张欣怡,吴少君,卢绪巧,杨改河,任成杰,韩新辉(2416)

施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响 王强,耿增超,许晨阳,郭靖宇,李倩倩,刘莉丽,赵汉红,杜旭光(2425)

间种高粱及施用大颗粒尿素对茶园 N₂O 排放的影响 张珂彬,刘新亮,康曼,王毅,沈健林,李勇(2434)

缙云山森林植被类型对土壤 N₂O 相关功能微生物的影响 王盛燕,王富华,罗东海,昌盛,王子芳,高明(2445)

咸水滴灌对棉田土壤 N₂O 排放和反硝化细菌群落结构的影响 郭慧楠,马丽娟,黄志杰,李美琪,侯振安,闵伟(2455)

有机质提升对酸性红壤氮循环功能基因及功能微生物的影响 储成,吴赵越,黄欠如,韩成,钟文辉(2468)

模拟酸雨对毛竹阔叶林过渡带土壤真菌结构及其多样性的影响 王楠,潘小承,王传宽,白尚斌(2476)

海洋沉积物中细菌 DNA 和 RNA 水平群落差异 李明月,杨雨虹,米铁柱,贺惠,甄毓(2485)

2003~2013年中国湿地变化的空间格局与关联性 周婷,马姣姣,徐颂军(2496)

《环境科学》征订启事(2086) 《环境科学》征稿简则(2187) 信息(2209,2263,2309)

水源水库藻类功能群落演替特征及水质评价

李衍庆^{1,2}, 黄廷林^{1,2*}, 张海涵^{1,2}, 温成成^{1,2}, 杨尚业^{1,2}, 林子深^{1,2}, 高欣³

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西省环境工程重点实验室, 西安 710055; 3. 李家河水库管理有限公司, 西安 710016)

摘要: 为了解水源水库的藻类功能群落时空演替特征及水质变化,以李家河水库为例,2018年9月~2019年6月对藻类及水质因子开展连续监测,采用功能类群划分方法对水库藻类进行了识别与分类,探讨了藻类功能群落与水质间关系,并结合WQI指数法进行水质评价。结果表明,本研究共获得藻类56种,隶属于4门28属,可划分为15个功能类群,其中优势藻类功能类群分别为B、D、G、J、L₀、Mp、P、W₁和X₁;李家河水库藻类结构呈现明显的季节性特征,混合期藻密度明显低于分层期,其中混合期的主要功能藻种为小球藻和小环藻,分层期的主要功能藻种为舟形藻和针杆藻。冗余分析(RDA)表明,水温、混合层深度和RWCS指数是驱动藻类演替的主要因子;WQI分析结果显示李家河水体水质为“良好”,混合期水质略好于分层期。本研究指出扬水曝气系统可改变藻类功能群落的演替特征,有效改善水源水库水质,保障了饮水供水安全。

关键词: 李家河水库; 藻类功能群落; 演替特征; RDA分析; WQI水质评价

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)05-2158-08 DOI: 10.13227/j.hjx.201910147

Succession Characteristics of Algae Functional Groups and Water Quality Assessment in a Drinking Water Reservoir

LI Yan-qing^{1,2}, HUANG Ting-lin^{1,2*}, ZHANG Hai-han^{1,2}, WEN Cheng-cheng^{1,2}, YANG Shang-ye^{1,2}, LIN Zi-shen^{1,2}, GAO Xin³

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Lijiahe Reservoir Management Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: To understand the temporal and spatial succession characteristics of algae functional communities and water quality changes in a drinking water reservoir, the Lijiahe Reservoir was selected to monitor variations in water quality and algae from September 2018 to June 2019. The algae community was classified into functional groups following the method proposed by Reynolds and Padisák. The relationship between algal functional community and water quality was discussed, and the water quality was assessed using the water quality index (WQI) method. The results showed that 56 species of algae were obtained, belonging to 4 families and 28 genera, which were divided into 15 functional groups. The dominant algae functional communities were B, D, G, J, L₀, Mp, P, W₁, and X₁. The algae structure of Lijiahe Reservoir showed obvious seasonal characteristics. The algal density in the mixed period was significantly lower than that in the stratification period. The main functional algae in the mixed period were Chlorella and Cyclotella, but Navicula and Synedra were the dominant functional algae in the stratification period. Redundancy analysis showed that the water temperature, mixing depth, and relative water column stability index were the main factors driving algae succession. WQI analysis indicated that the water quality of Lijiahe Reservoir was “good”, and the water quality during the mixed period was slightly better than that in the stratification period. This study demonstrates that water-lifting aerators can change the succession characteristics of algae functional groups, and effectively contribute to improvement in water quality in a drinking water reservoir.

Key words: Lijiahe Reservoir; algae functional community; succession characteristics; RDA analysis; WQI assessment

水库是我国重要的饮用水水源,但在全球变暖和经济快速发展的背景下,过量营养输入和气温升高导致水库水体面临藻类水华和富营养化的双重问题^[1]。而水库水环境变化也会引起浮游藻类群落的演替,反映水质变化^[2]。因此,藻类时空演替特征及水生生态评价在水源水库显得尤为重要。

浮游藻类作为水体中主要的初级生产者和生态指示物种^[3,4],其群落组成和种群变化能直接反映水环境的状况^[5-7],但常规传统的浮游藻类的系统分类学难以体现浮游植物的生态学功能^[8,9]。目前

国内外学者广泛采用藻类功能分组(phytoplankton functional classification)研究湖库水生态状况^[10-12]。Reynolds等^[13]以生理生长特征及环境适应性为基础,将具有相同生态位的浮游藻类优势种组合划分为31个不同的功能群,可更合理地揭示生境变化对

收稿日期: 2019-10-21; 修订日期: 2019-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979217); 陕西省重点研发计划项目(2018ZDXM-SF-020); 陕西省重点研发计划项目(2019ZDLSF06-01, 2019ZDLSF06-02)

作者简介: 李衍庆(1994~),男,硕士研究生,主要研究方向为水源水库藻类演替及水质改善, E-mail: liyanqing37462@163.com

* 通信作者, E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

藻类集群的选择机制和水质状况. 邓婕等^[14]对雅鲁藏布江湘河流域水质进行了评价, 指出优势功能群的演替是水动力环境与水质变化共同作用的结果. 以上报道指出了藻类功能分组应用于湖泊水源研究的可行性, 但多集中于自然水域时空演替及其群落驱动因子方向, 针对水源水库混合期及分层期浮游功能藻类演替特征、优势功能群落识别方向的研究较少.

李家河水库源起秦岭山脉, 是西安市的主要供水水源之一, 作为典型的峡谷性深水型分层水库, 2017 年分层期暴发蓝藻水华且底层沉积物释放, 水生态系统被破坏^[15,16]. 针对以上问题, 李家河水库于 2018 年引入扬水曝气水质改善技术 (water-lifting aerators, WLAs), 延长了水体混合期, 改变了原有水生态环境及水质状况^[17], 这可能驱动藻类演替和功能组群的再选择. 因此, 本研究以李家河水库为例, 于 2018 年 9 月至 2019 年 6 月期间开展连续监测, 通过对浮游藻类和水质指标的分析, 探究人工干预水库混合期及分层期浮游藻类功能组演替规律及其主控因子, 并结合 WQI (water quality index) 开展水库水质的量化评估, 以期为水源水库生态功能解析、水质监管和治理提供理论依据和决策参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

李家河水库 (33°51'N ~ 34°08'N; 109°17'E ~ 109°36'E) 位于陕西省西安市蓝田县境内, 是西安市重要的供水水源之一, 兼具发电、防洪等功能. 李家河水库建于 2015 年, 是典型性的峡谷深水型分层水库, 总库容 $5.69 \times 10^7 \text{ m}^3$, 平均水深和最大水深分别为 56 m 和 80 m.

李家河水库于 2016 年和 2017 年均暴发了蓝藻水华^[18], 为改善水库水质, 提高供水安全. 李家河水库于 2018 年引入扬水曝气水质改善技术 (water-lifting aerators, WLAs), 兼具人工强制混合及底层充氧功能, 可改变藻类结构及分布, 在主库区共安装 8 台扬水曝气器, 呈 S 型分布, 其他具体性能参数见文献^[19].

2018 年 6 月 20 日 ~ 9 月 30 日, 扬水曝气系统运行, 实现了水体强制混合, 9 月底系统关闭后, 水体持续自然混合, 故 2018 年 9 月 ~ 2019 年 2 月底为水体混合期, 2019 年 3 ~ 6 月为水体自然分层期.

1.2 采样点布置

根据藻类及水质研究需要, 在李家河水库坝前区域设置原位监测点 (见图 1), 该监测点位于水库最深区域且水体滞留时间长, 历年水深范围为 32 ~

77 m, 平均水深 49 m, 存在明显的季节性分层特征, 具有研究代表性. 监测点垂向共设置 3 个采样深度, 分别为表层 (水下 0.5 m)、中层 (分层期为温跃层中部, 混合期为水体垂向中部) 及底层 (沉积物上 0.5 m).

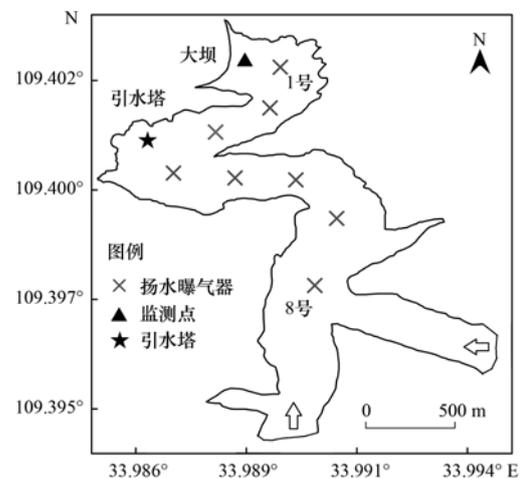


图 1 李家河水库采样点位置示意

Fig. 1 Location of sampling sites in Lijiahe Reservoir

1.3 水样采集与分析

本研究于 2018 年 9 月 ~ 2019 年 6 月在坝前监测点实施原位监测, 频率为每月 2 ~ 4 次, 利用 5 L 的取水器分别采集不同深度水样. 其中, 每个水样保留 1 L 现场加入鲁哥试剂, 用于浮游植物定性及定量分析, 其余水样带回实验室立即开展理化分析. 水温 (WT)、电导率 (EC)、溶解氧 (DO)、pH 和浊度 (Turb) 等指标使用哈希 Hydrolab DS5 多功能水质分析仪原位监测, 深度间隔为 1 m; 透明度 (SD) 采用 Secchi 盘法现场测定.

水体营养盐及有机物指标均参照文献^[20]中标准方法. 高锰酸盐指数采用酸式滴定法测定, 总氮 (TN) 和总磷 (TP) 采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法和过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法测定, 氨氮 ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) 采用纳氏试剂分光光度法测定, 硝氮 ($\text{NO}_3^- \text{-N}$) 采用紫外分光光度法测定.

藻类分析采用生物光学显微镜, 鉴定到属水平, 具体藻类的识别参考文献^[21], 对已获得的藻种根据 Renolyd 等^[13]和 Padisák 等^[22]提出的方法进行浮游植物功能群落的分类.

1.4 评价方法

1.4.1 优势度分析

藻类功能群的优势度指数根据相应功能群出现的频率和丰度来确定^[23]:

$$Y = f_i \times P_i \quad (1)$$

式中, Y 为优势度, f_i 为第 i 藻类功能群在采样点中出现的频率; 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^[24].

1.4.2 真光层、混合层及水体稳定指数分析

水体真光层 (Z_{eu}) 深度为透明度 (SD) 的 2.7 倍, 混合层 (Z_{mix}) 深度主要与水体参混状态有关, 其值根据水温垂向分布分析获得^[25]. 其中, Z_{eu}/Z_{mix} 比值能用来反映水体光的可利用性, 影响浮游植物的分布^[26]; 水体热分层稳定性评价采用 RWCS 指数, 具体计算公式如下^[27]:

$$RWCS = (D_b - D_s) / (D_4 - D_5) \quad (2)$$

式中, D_s 和 D_b 分别代表表层和底层的水体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; D_4 和 D_5 分别代表 4°C 时的纯水密度和 5°C 时的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; 由于李家河水库浊度总体较低, 故计算中未考虑悬浮固体.

表 1 用于 WQI 计算的相对权重和参数归一化因子

Table 1 Relative weights and normalization factors of parameters for WQI calculation

参数	相对权重 (P_i)	归一化值 (C_i)										
		100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
WT	1	16~21	15~22	14~24	12~26	10~28	5~30	0~32	-2~36	-4~40	-6~45	<-6; >45
pH	1	7	7~8	7~8.5	7~9	6.5~7	6~9.5	5~10	4~11	3~12	2~13	1~14
EC	1	<750	<1000	<1250	<1500	<2000	<2500	<3000	<5000	<8000	≤12000	>12000
DO	4	≥7.5	>7	>6.5	>6	>5	>4	>3.5	>3	>2	≥1	<1
TN	2	<0.1	<0.2	<0.35	<0.5	<0.75	<1	<1.25	<1.5	<1.75	≤2	>2
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	3	<0.01	<0.05	<0.1	<0.2	<0.3	<0.4	<0.5	<0.75	<1	≤1.25	>1.25
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	2	<0.5	<2	<4	<6	<8	<10	<15	<20	<50	≤100	>100
TP	1	<0.01	<0.02	<0.05	<0.1	<0.15	<0.2	<0.25	<0.3	<0.35	≤0.4	>0.4
高锰酸盐指数	3	<1	<2	<3	<4	<5	<8	<10	<12	<14	≤15	>15
浊度	2	<5	<10	<15	<20	<25	<30	<40	<60	<80	≤100	>100

1.5 数据处理

所有数据建立 Excel 数据管理库, 水质统计分析及绘图采用 Surfer 12.0、Origin 9.0 及 SPSS 22.0 软件. 藻类与水质相关性分析采用 Canoco 5.0 软件, 所有参数均经过 $\lg(x+1)$ 转换, 后开展去趋势分析 (DCA), 当计算梯度大于 4, 采用典范对应分析 (CCA) 方法; 当计算梯度小于 3, 采用冗余分析 (RDA) 方法, 当计算梯度处于 3~4 之间, RDA 和 CCA 皆可选择.

2 结果与分析

2.1 水体理化指标变化

2.1.1 物理指标变化

如图 2 所示, 李家河水库水温季节性变化大, 全年水温在 $3.23 \sim 25.14^\circ\text{C}$ 之间, 平均水温为 13.49°C ; 表层水温在 $3.28 \sim 25.14^\circ\text{C}$ 之间, 平均水温 17.24°C ; 底层水温在 $4.11 \sim 22.31^\circ\text{C}$, 平均水温 9.88°C . 图 3 为水库 RWCS 指数季节性变化特征, RWCS 值处在 $0.2 \sim 104$ 之间, 根据水体热分层稳定性评价标准, 水体可分为 2 个时期: 混合期 (2018 年 9 月~2019 年 2 月), 分层期 (2019 年 3 月~2019 年

1.4.3 水质指数 (WQI) 分析

为了更客观地评价李家河水库水质状况, 采用水质评价指数 (WQI), 遴选 WT、pH、EC、DO、TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TP、RWCS 和 Z_{eu}/Z_{mix} 开展水质分析评估, 其中各个指标相对权重见表 1, 评价分析参考 Pesce 等^[28] 提出的方法, 具体公式如下:

$$WQI = \sum_{i=1}^n C_i P_i / \sum_{i=1}^n P_i \quad (3)$$

式中, n 是参数的总数, C_i 是分配给参数 i 的归一化值, P_i 是从 1~4 分配给参数 i 的相对权重. WQI 值评定水质, 范围从 1~100: >90 是优秀, 70~90 是良好, 50~70 是中等, 25~50 是差, <25 是非常差.

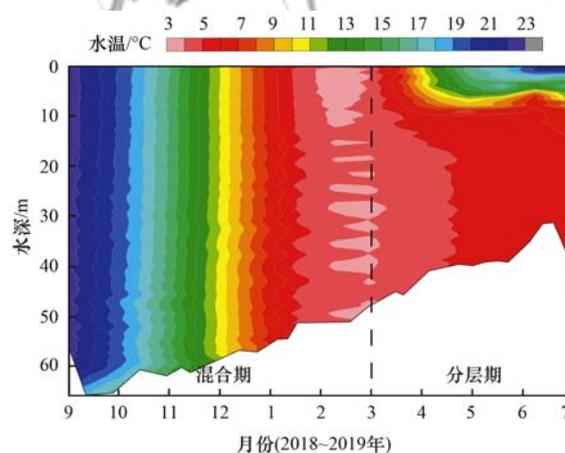


图 2 李家河水库水温垂向分布

Fig. 2 Vertical distribution of water temperature in Lijiahe Reservoir

6 月).

Z_{eu}/Z_{mix} 比值可反映光的可利用性, 是评价藻类分布的一个重要因素. 如图 4 所示, 总体上 Z_{eu} 值变化不大, 混合期略微大于分层期, 而 Z_{eu}/Z_{mix} 值变化显著, 分层期大于混合期, 最大值出现在 6 月, 随着混合深度的减小而增加.

2.1.2 营养盐及有机物变化

如图 5 所示, 总氮、总磷、氨氮和高锰酸盐指数

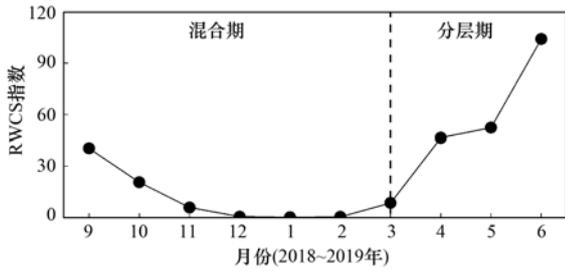


图3 水体 RWCS 指数季节性变化

Fig. 3 Seasonal variation in relative water column stability in Lijiahe Reservoir

(除硝氮外)在混合期污染物浓度呈降低趋势,垂向污染物浓度差异不明显($P > 0.05$),硝氮浓度随着混合的持续,升高后逐步稳定. 分层期各污染物浓度有升高趋势,垂向污染物浓度存在差异($P < 0.05$),主要原因是该时期低层水体呈缺氧或厌氧态,沉积物中污染物释放到上覆水体所致. 氮磷比(N/P)季节性变化特征明显,混合期与分层期均呈先升高后降低趋势.

2.2 藻类功能群落的演替特征

2.2.1 藻密度变化与功能群落划分

如图 6 所示,本研究期间藻密度在 ($192 \sim$

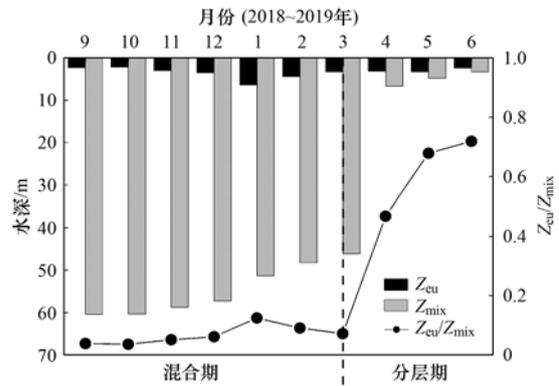


图4 李家河水库混合层 (Z_{mix})、真光层 (Z_{eu}) 和 Z_{eu}/Z_{mix} 季节性变化

Fig. 4 Seasonal variation in the mixing zone, euphotic zone, and Z_{eu}/Z_{mix} ratio in Lijiahe Reservoir

$1013) \times 10^4$ 个 $\cdot L^{-1}$ 之间,平均值为 416×10^4 个 $\cdot L^{-1}$,藻密度存在明显的季节变化特征,分层期藻密度高于混合期且在垂向存在显著差异($P < 0.05$).

本研究期间共鉴定出藻类 4 门 28 属,其中混合期以绿藻门为主,占比超过 80%,分层期以硅藻门为

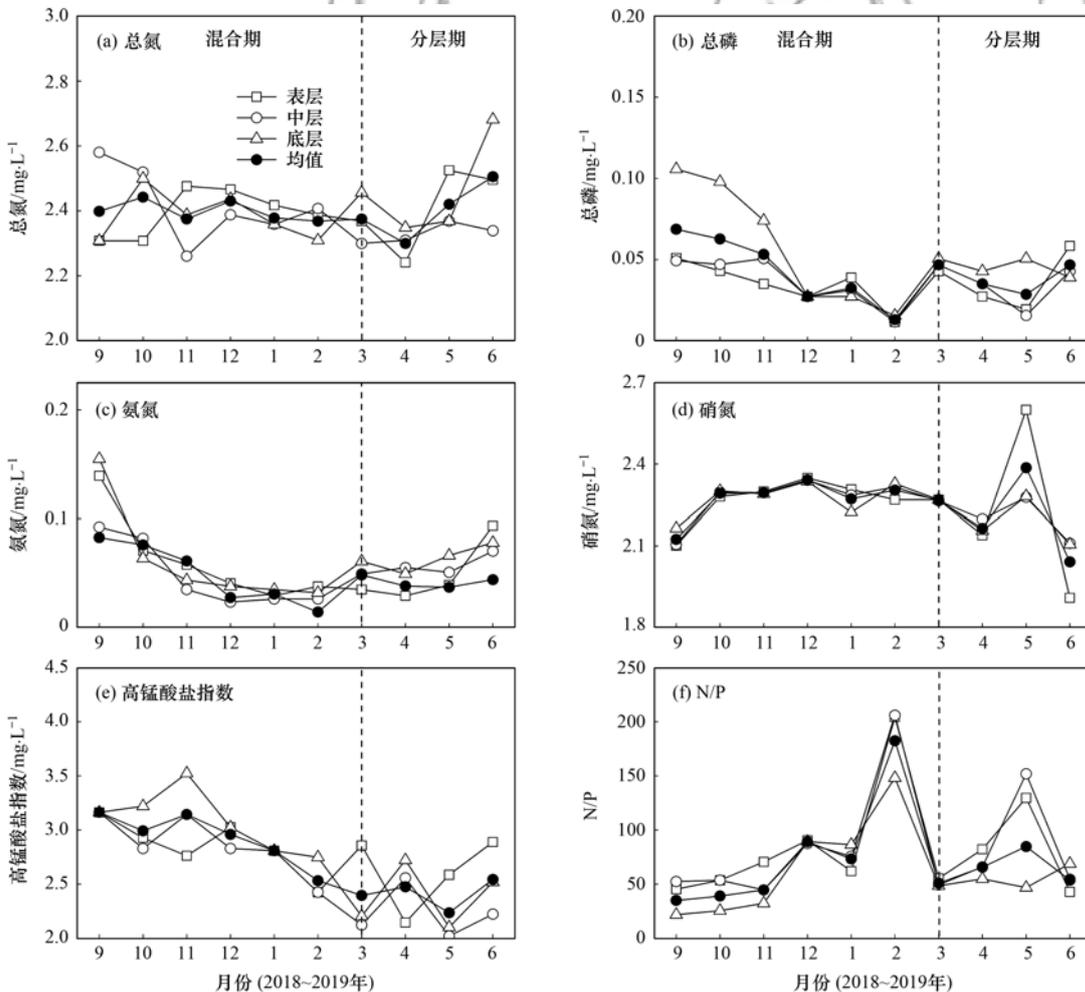


图5 李家河水库营养盐和有机物季节性变化

Fig. 5 Seasonal variation in nutrients and organic matter in Lijiahe Reservoir

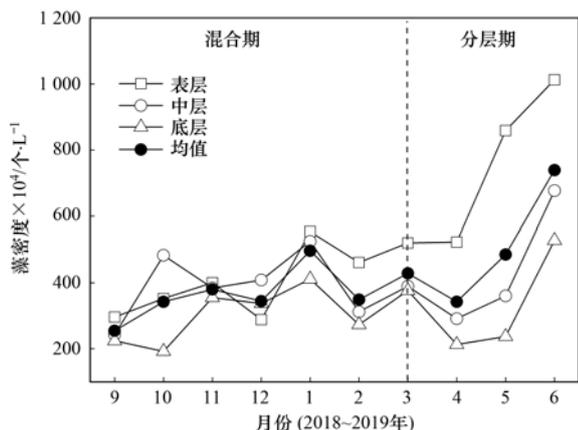


图6 李家河水库藻密度季节性变化

Fig. 6 Seasonal variation in algal cell density in Lijahe Reservoir

主,占比超过50%。李家河水库藻类功能群划分结果见表2,共获得15个藻类功能群,分别为: X_1 、J、F、G、P、N、 X_2 、Y、B、D、 M_p 、C、 W_2 、 W_1 和 L_0 。

表2 李家河水库藻类功能群划分

Table 2 Classification of algae functional groups in Lijahe Reservoir

浮游藻类功能群	代表藻属	生境描述
B	小环藻 (<i>Cyclotella</i>)	中营养、低光照水体
C	星杆藻 (<i>Asterionella</i>)	富营养中小水体,对分层敏感
D	针杆藻 (<i>Synedra</i>)	含有营养、浑浊程度大的浅水水体
F	卵囊藻 (<i>Oocystis</i>)	中富营养型湖泊变温层
G	实球藻 (<i>Pandorina</i>) 空球藻 (<i>Eudorina</i>)	富营养型小型湖泊或池塘
J	栅藻 (<i>Scenedesmus</i>) 四角藻 (<i>Tetraedron</i>)	混合的高富营养浅水水体
L_0	多甲藻 (<i>Peridinium</i>) 羽纹藻 (<i>Pinnularia</i>)	广适性
M_p	舟形藻 (<i>Navicula</i>) 桥弯藻 (<i>Cymbella</i>) 异极藻 (<i>Gomphonema</i>)	中营养、浑浊型浅水湖泊
N	鼓藻 (<i>Cosmarium</i>)	中营养型水体混合层
P	脆杆藻 (<i>Fragilaria</i>) 直链藻 (<i>Melosira</i>) 新月藻 (<i>Closterium</i>)	混合程度较高中富营养浅水水体
W_1	裸藻 (<i>Euglena</i>) 扁裸藻 (<i>Phacus</i>)	富含有机质,或农业废水和生活污水的水体
W_2	囊裸藻 (<i>Trachelomonas</i>) 陀螺藻 (<i>Strom</i>)	浅水型中营养湖泊
X_1	弓形藻 (<i>Schroederia</i>) 小球藻 (<i>Chlorella</i>)	混合程度较高的贫营养水体
X_2	衣藻 (<i>Chlamydomonas</i>) 蓝隐藻 (<i>Chroomonas</i>)	混合程度较高的中-富营养浅水水体
Y	裸甲藻 (<i>Gymnodinium</i>) 薄甲藻 (<i>Glenodinium</i>) 隐藻 (<i>Cryptomonas</i>)	广适性(多反映了牧食压力低的净水环境)

2.2.2 藻类优势功能群演替特征

李家河水库主要的藻类优势功能群为B、D、G、J、 L_0 、 M_p 、P、 W_1 和 X_1 ,本研究中的浮游藻类优势功能群的构成、演替及其影响因子的分析均以上述优

势功能群为基础。李家河水库浮游藻类功能群演替特征见图7,混合期主要以功能群 X_1 +B为主,垂向上表层、中层和底层的群落组成并无较大差异($P>0.05$),分层期功能群 X_1 +B的占比逐渐下降,功能群 M_p +D成为优势功能群,垂向上表层和中层逐渐以功能群D为主,而底层以功能群 M_p 为主。

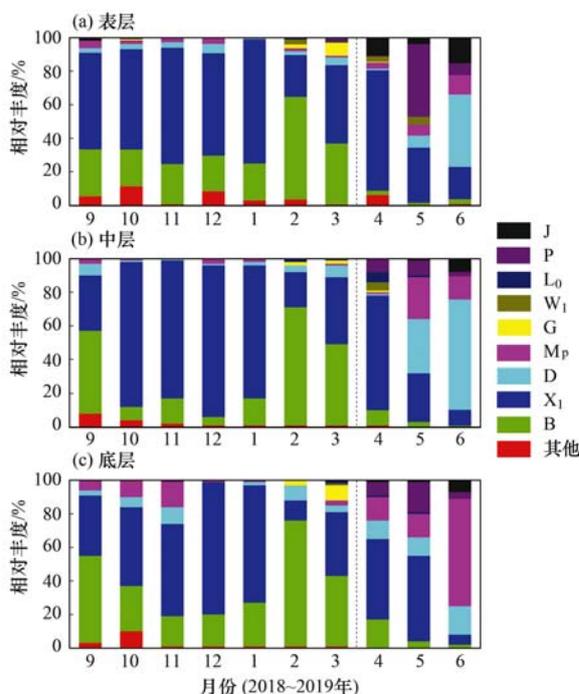


图7 李家河水库藻类功能群相对丰度季节性变化

Fig. 7 Seasonal variations in the relative abundance of algae functional groups in Lijahe Reservoir

2.3 WQI 指数法评价水库水质

采用WQI指数法对李家河水库水质进行评价,结果见图8。从中可知,李家河水库水体WQI值处在70~90之间,评价为“良好”,最大值和最小值分别出现在11月和3月。总体上混合期水质略好于分层期水质,混合期垂向差异较小($P>0.05$),分层期表

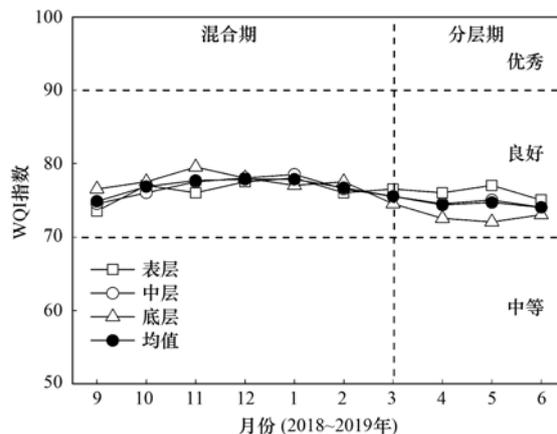


图8 李家河水库WQI值季节性变化

Fig. 8 Seasonal variation in WQI value in Lijahe Reservoir

层水质最好.

2.4 藻类功能群落演替驱动分析

选取藻类优势功能群与主要水质因子开展 RDA 分析(图 9),参与冗余分析的主要因子为 WT、TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、SD、RWCS 和 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$,轴 1 为主要的特征轴,轴 1 和轴 2 的特征值分别为 0.9845 和 0.0130,分别解释了 98.45% 和 1.30% 的浮游藻类功能群变化.如图 9 所示,WT、RWCS 和 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 是驱动藻类功能群演替的主要环境因子,其次为 TP 和 SD 等;此外,功能群 X_1 、 M_p 、P、J、D 和 W_1 与 TP、WT、RWCS 和 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 呈正相关,与 TN 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 呈负相关, L_0 与 SD 和 TN 呈正相关,B 和 G 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈正相关.

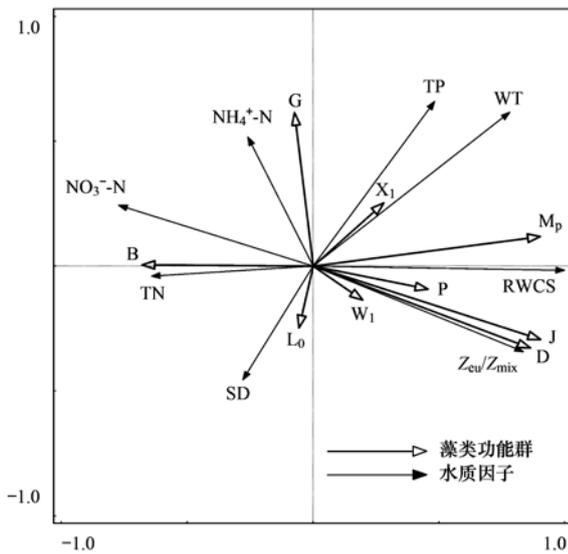


图 9 李家河水库藻类功能群与水质因子的 RDA 分析
Fig. 9 RDA analysis between water quality parameters and algae functional groups in Lijiahe Reservoir

3 讨论

3.1 藻类功能群落演替机制

浮游藻类结构及丰度是反映水体生态系统功能和进行水质评价的重要参数^[4],其演替受水温、光照、营养盐、水体热稳定状况(混合或分层)及光的可利用性($Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$)等环境因子的影响^[29].李家河水库藻群生物量及组成在混合期及分层期呈现差异,具体表现为“低藻密度和 $X_1 + B$ 功能群(混合期)”向“高藻密度及 $M_p + D$ 功能群(分层期)”的演替特征,其内在的驱动机制值得深入研究.

混合期,水体热分层消亡(前期 WLAs 运行,水体实现了人工去分层;后期水体自然混合),垂向温差 $<1^\circ\text{C}$,水体热稳定性 RWCS 指数较低,水体处于持续混合的状态(图 2 和图 3).Ma^[30] 和 Stramska 等^[31] 的研究表明,水体混合增加了混合层深度和光限制,且紊动的水环境影响了藻类光合作用,不利于

藻类生长,这是导致混合期藻密度较低的主要原因.此外,该期间 Z_{eu} 值较大(透明度 SD 较大),但 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 仅为 0.10 ~ 0.17(图 4).Oliver 等^[32] 的研究指出, $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 小于某个临界值时会表现为光限制,这临界值的范围为 0.20 ~ 0.35,这可能导致光敏感型藻类的大量衰亡.同时,混合期营养盐(TN、TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$)总体呈下降趋势,N/P 在 34 ~ 182 之间(图 5),表现为磷限制($\text{N/P} > 16$)^[33].由此可知,混合期具有水动力环境不稳定、光可利用性低和磷限制的特征,这是导致藻密度低的主要原因,RDA 分析也印证了以上结论,即 WT、 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 和 RWCS 指数是驱动藻类演替的主要因子(图 9),同时以上复杂的生境可能导致藻类再选择.结合藻类功能生境特征分析(表 2),功能群 X_1 (以小球藻为代表)可适应混合度较高的贫营养水体,功能群 B(以小环藻为代表)对环境耐受性强,低光照水体亦可生长,因此功能群 $X_1 + B$ 凭借其对生境的高适应性及营养盐利用效率^[34],成为此时期的优势功能群.

分层期,随气温升高,垂向温差加剧,RWCS 指数升高,伴随着营养盐逐渐升高,该时期功能群 $M_p + D$ (分别以舟形藻和针杆藻为代表,均属硅藻门)取代功能群 $X_1 + B$ 成为分层期的主要优势功能群.卢金锁等^[35] 的研究指出,水温变化对藻类功能群演替影响程度最大,可能促使藻类暴发,这与本研究的结论一致,即分层期高藻密度(图 6)及 $M_p + D$ 与 WT 良好的相关性(图 9).生境特征分析显示(表 2), $M_p + D$ 均适应在中高营养的浅水水体,而李家河水库作为磷限制水体,分层期上升的 TP 浓度也是导致其成为优势功能群的主要原因.黄亚男等^[36] 的研究指出, $M_p + D$ 以硅藻门为主体,属狭冷型藻,易于在春季及初夏暴发水华,进一步支撑了本研究的结论.

3.2 WLAs 运行及水质改善对藻类功能群落演替的影响

以上部分讨论了混合期、分层期 WT、 $Z_{\text{eu}}/Z_{\text{mix}}$ 、RWCS 指数和 TP 在藻类功能群落演替中的重要作用及深层机制,但 WLAs 运行促使水体强制混合,改变了水温分布、混合层深度及水质可能是主要原因.温成成等^[17] 对李家河水库的研究指出,2018 年 6 月底 WLAs 运行,诱使水体混合期延长,含直接作用期(9 月 1 日 ~ 31 日)和间接作用期(10 月 1 日 ~ 翌年 2 月底)均为混合期,该时期水动力环境复杂且水质得到改善,营养盐(除 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 外)TN、TP 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均呈现降低趋势,WQI 值处在 74.83 ~ 77.84 之间,不利于藻类生长,可能筛选环境耐受性及营养盐利用效率高的藻种,如小球藻和小环藻($X_1 + B$)等.苟婷

等^[37]对贝江浮游藻类的研究指出,氮磷营养盐是影响浮游藻类群落分布的重要环境因子,水质变化为驱动藻类演替的重要因素;任杰等^[38]对苏南水库的研究表明,磷及营养状态指数与硅藻生物量的关系密切.相较于混合期,分层期(3月~6月)水温和营养盐升高,WQI值较低(74.00~74.67之间,低于混合期),稳定的水动力环境、高水温及营养条件均有利于藻类生长,可能导致藻类暴发.

因此,李家河水库混合期(9月~翌年2月)水体WLA_s运行引起的自然分层破坏及水质改善,可能是促使该时期藻密度降低及藻类功能群再选择的深层原因,而分层期(3~6月)WLA_s未运行(属于非作用期),水体处于自然演替状态,水温和营养盐升高,且水质较混合期差,藻密度升高,也印证了以上结论.总之,WLA_s有利于水质改善,可改变藻类演替特征,且驱动藻功能群的再选择,保障了水源水库供水安全.

4 结论

(1)李家河水库藻类总细胞密度在研究期间具有明显的时空变化规律,混合期表层、中层和底层藻密度差异不大,分层期随着水温分层的形成,表层藻密度高于中层和底层.

(2)对水库进行的浮游藻类分析结果显示李家河水库藻类共可分为15个藻类功能群: X_1 、J、F、G、P、N、 X_2 、Y、B、D、 M_p 、C、 W_2 、 W_1 和 L_0 ,且不同时期的浮游藻类功能群优势群存在显著差异.李家河水库藻类功能群混合期主要以功能群 $X_1 + B$ 为主,且垂向差异小;分层期功能群 $X_1 + B$ 的占比逐渐下降,功能群 $M_p + D$ 成为优势功能群,表层、中层和底层优势功能群存在差异.

(3)根据WQI指数评价李家河水库水质为“良好”,且混合期评分高于分层期,混合期垂向差异小,分层期垂向差异较混合期大.冗余分析(RDA)表明,李家河水库藻类功能群分布与演替受水质因子影响较为明显,水温、混合层深度、RWCS指数和营养盐是影响李家河水库藻类功能群的主要因素.

参考文献:

- [1] 朱党生, 张建业, 史晓新, 等. 城市饮用水水源地安全评价(II): 全国评价[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 914-920.
Zhu D S, Zhang J Y, Shi X X, et al. Security assessment of urban drinking water sources II. Security assessment for cities in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(8): 914-920.
- [2] 韩博平. 中国水库生态学研究的回顾与展望[J]. 湖泊科学, 2010, 22(2): 151-160.
Han B P. Reservoir ecology and limnology in China: a retrospective comment[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(2): 151-160.
- [3] 孟睿, 何连生, 过龙根, 等. 长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2588-2596.
Meng R, He L S, Guo L G, et al. Canonical correspondence analysis between phytoplankton community and environmental factors in macrophytic lakes of the middle and lower reaches of Yangtze river[J]. Environmental Science, 2013, 34(7): 2588-2596.
- [4] 王爱爱, 冯佳, 谢树莲. 汾河中下游浮游藻类群落特征及水质分析[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 915-923.
Wang A A, Feng J, Xie S L. Phytoplankton community structure and assessment of water quality in the middle and lower reaches of Fenhe river[J]. Environmental Science, 2014, 35(3): 2915-2923.
- [5] 韩欢欢, 范亚文. 黑龙江省安兴湿地秋季浮游植物群落结构[J]. 湖泊科学, 2012, 24(4): 577-585.
Han H H, Fan Y W. Phytoplankton community structure in autumn of Anxing wetland, Heilongjiang province[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(4): 577-585.
- [6] 姚玲爱, 赵学敏, 周广杰, 等. 广东省高州水库春季蓝藻水华成因初步探讨[J]. 湖泊科学, 2011, 23(4): 534-540.
Yao L A, Zhao X M, Zhou G J, et al. Preliminary regulating factors of spring cyanobacteria bloom in Gaizhou reservoir, Guangdong province[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(4): 534-540.
- [7] 王自业, 葛继稳, 李建峰, 等. 三峡库区古夫河着生藻类分布与水质因子的关系[J]. 植物科学学报, 2013, 31(3): 219-227.
Wang Z Y, Ge J W, Li J F, et al. Relationship between periphyton distribution and water quality of Gufu river of Three Gorges reservoir area[J]. Plant Science Journal, 2013, 31(3): 219-227.
- [8] 夏莹霏, 胡晓东, 徐季雄, 等. 太湖浮游植物功能群季节演替特征及水质评价[J]. 湖泊科学, 2019, 31(1): 134-146.
Xia Y F, Hu X D, Xu J X, et al. Seasonal succession of phytoplankton functional group and assessment of water quality in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(1): 134-146.
- [9] 王莲, 李璇, 马卫星, 等. 盐龙湖水源生态净化系统FG和MBFG演替特征及水质响应性评价[J]. 环境科学, 2020, 41(3): 1265-1275.
Wang L, Li X, Ma W X, et al. Succession characteristics and water quality responsiveness evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake water source ecological purification system[J]. Environmental Science, 2020, 41(3): 1265-1275.
- [10] Diaz M M, Pedrozo F L, Temporetti P F. Phytoplankton of two Araucanian lakes of differing trophic status (Argentina) [J]. Hydrobiologia, 1998, 369: 45-57.
- [11] Lepistö L, Holopainen A L, Vuoristo H. Type-specific and indicator taxa of phytoplankton as a quality criterion for assessing the ecological status of Finnish boreal lakes[J]. Limnologia, 2004, 34(3): 236-248.
- [12] 彭凯, 李太民, 刘利, 等. 苏北骆马湖浮游植物群落结构及其水质生物评价[J]. 湖泊科学, 2018, 30(1): 183-191.
Peng K, Li T M, Liu L, et al. Community structure of phytoplankton and bio-assessment of water quality in lake Luoma, northern Jiangsu province[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(1): 183-191.
- [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] 邓捷, 童猛, 张红星, 等. 雅鲁藏布江湘河流域浮游生物群

- 落结构的探究与多样性分析[J]. 基因组学与应用生物学, 2019, **38**(9): 3987-3993.
- Deng J, Tong M, Zhang H X, *et al.* Investigation and diversity analysis of plankton community structure in the Xianghe basin of the Yalu Tsangpo river[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2019, **38**(9): 3987-3993.
- [15] 刘雪晴, 黄廷林, 李楠, 等. 水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2258-2264.
- Liu X Q, Huang T L, Li N, *et al.* Algal bloom and mechanism of hypoxia in the metalimnion of the Lijiahe reservoir during thermal stratification [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2258-2264.
- [16] 徐进, 黄廷林, 李凯, 等. 李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3049-3057.
- Xu J, Huang T L, Li K, *et al.* Pollution sources and the stratification effects on water quality in Lijiahe reservoir [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 3049-3057.
- [17] 温成成, 黄廷林, 李楠, 等. 人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1227-1235.
- Wen C C, Huang T L, Li N, *et al.* Effects of artificial destratification and induced-natural mixing on water quality improvement in a drinking water reservoir [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1227-1235.
- [18] Huang Y W, Yang C, Wen C C, *et al.* S-type Dissolved oxygen distribution along water depth in a canyon-shaped and algae blooming water source reservoir: reasons and control [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **16**(6): 987.
- [19] 巨拓, 黄廷林, 马卫星, 等. 稳定分层水库水质的季节性变化特征及扬水曝气水质改善[J]. 湖泊科学, 2015, **27**(5): 819-828.
- Ju T, Huang T L, Ma W X, *et al.* Characteristics of seasonal variation and water-lifting aerator improvement of water quality in a steady stratified reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27**(5): 819-828.
- [20] 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.
- [21] 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. Freshwater algae in China: system, classification and ecology[M]. Beijing: Science press, 2006.
- [22] Padišák 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.
- [23] Aksnes D L, Wassmann P. Modeling the significance of zooplankton grazing for export production [J]. *Limnology and Oceanography*, 1993, **38**(5): 978-985.
- [24] Richardson T L, Jackson G A. Small phytoplankton and carbon export from the surface ocean[J]. *Science*, 2007, **315**(5813): 838-840.
- [25] Katsiapi M, Moustaka-Gouni M, Michaloudi E, *et al.* Phytoplankton and water quality in a mediterranean drinking-water reservoir (Marathonas reservoir, Greece) [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **181**(1-4): 563-575.
- [26] 姚绪姣. 三峡水库香溪河库湾浮游植物群落结构演替规律研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2013.
- Yao X J. Succession of phytoplankton assemblages in Xiangxi bay of Three Gorges reservoir [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2013.
- [27] Padišák J, Scheffler W, Kasprzak P, *et al.* Interannual variability in the phytoplankton composition of Lake Stechlin (1994-2000)[J]. *Advances in Limnology*, 2003, **58**: 101-133.
- [28] Pesce S F, Wunderlin D A. Use of water quality indices to verify the impact of Córdoba city (argentina) on suquia river [J]. *Water Research*, 2000, **34**(11): 2915-2926.
- [29] 孙文秀, 武道吉, 裴海燕, 等. 山东某新建水库浮游藻类的群落结构特征及其环境驱动因子[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(3): 734-745.
- Sun W X, Wu D J, Pei H Y, *et al.* Phytoplankton community structure and environmental factors in a newly built reservoir, Shandong Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(3): 734-745.
- [30] Ma W X, Huang T L, Li X. Study of the application of the water-lifting aerators to improve the water quality of a stratified, eutrophicated reservoir[J]. *Ecological Engineering*, 2015, **83**: 281-290.
- [31] Stramska M, Dickey T D. Phytoplankton bloom and the vertical thermal structure of the upper ocean [J]. *Journal of Marine Research*, 1993, **51**(4): 819-842.
- [32] Oliver R L, Hart B T, Olley J, *et al.* The darling river: algal growth and the cycling and sources of nutrients. Report to the Murray-darling basin commission (project M386) [R]. Australia: Fmal Report, 2000.
- [33] 吴雅丽, 许海, 杨桂军, 等. 太湖春季藻类生长的磷营养盐阈值研究[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(9): 1622-1629.
- Wu Y L, Xu H, Yang G J, *et al.* Developing the critical phosphorus threshold for spring algal growth in lake Taihu, China [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(9): 1622-1629.
- [34] Reynolds C S. The ecology of phytoplankton [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [35] 卢金锁, 张颖, 胡亚潘. 深水型水库中藻类功能群组演替及其与环境因子的关系[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(11): 4605-4611.
- Lu J S, Zhang Y, Hu Y P. Succession of algae functional groups and its relationship with environmental factors in a deep water reservoir [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8**(11): 4605-4611.
- [36] 黄亚男, 纪道斌, 龙良红, 等. 三峡库区典型支流春季特征及其水华优势种差异分析[J]. 长江流域资源与环境, 2017, **26**(3): 461-470.
- Huang Y N, Ji D B, Long L H, *et al.* The variance analysis of characteristics and blooms of the typical tributaries of the Three Gorges reservoir in spring[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(3): 461-470.
- [37] 苟婷, 马千里, 许振成, 等. 贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 946-954.
- Gou T, Ma Q L, Xu Z C, *et al.* Phytoplankton community structure and eutrophication risk assessment of Beijiang river[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 946-954.
- [38] 任杰, 周涛, 朱广伟, 等. 苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1742-1753.
- Ren J, Zhou T, Zhu G W, *et al.* Community structure characteristics of diatom in reservoirs located in the south of Jiangsu province, China and its control factors [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1742-1753.

CONTENTS

Comparison of Three Receptor Models for Source Apportionment of PM _{2.5} in Shanghai; Using Hourly Resolved PM _{2.5} Chemical Composition Data	ZHOU Min (1997)
Impact of Differences in the Concentrations of Ozone on the Chemical Composition of Single Particles	WU Meng-xi, CHENG Chun-lei, HUANG Bo, et al. (2006)
Influence of Secondary Organic Coating on Hygroscopicity of a Sodium Chloride Core; Based on Micro-scale Single Particle Analysis	ZHANG Shu-jia, XU Liang, GUO Xin-mei, et al. (2017)
Comparative Analysis of Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosol Components in the Atmosphere Between Urban and Suburban Areas	LI Xin-yue, ZHANG Kai-shan, DENG Lin-li, et al. (2026)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Elements Bonded with PM _{2.5} and PM ₁₀ in Linyi	LU Ping, ZHAO Xue-yan, YIN Bao-hui, et al. (2036)
Characteristics and Sources of Microbial Aerosols in Urban and Mountainous Areas in Autumn and Winter in Xi'an, China	XIE Wen-wen, LU Rui, MU Fei-fei, et al. (2044)
Pollution Characteristics of Cooking Fumes, Particulates, and Non-methane Hydrocarbons in the Exhaust of Typical Beijing Restaurants	HE Wan-qing, WANG Tian-yi, SHAO Xia, et al. (2050)
PM _{2.5} Concentration Influencing Factors in China Based on the Random Forest Model	XIA Xiao-sheng, CHEN Jing-jing, WANG Jia-jia, et al. (2057)
Spatio-temporal Variation of PM _{2.5} Related Relationships in China from the Perspective of Air Pollution Regional Linkage Control and Prevention	YANG Wen-tao, HUANG Hui-kun, WEI Dong-sheng, et al. (2066)
Characteristics of Spatial and Temporal Evolution and Investigation of Air Pollution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Ground-Space Observation Data	WANG Yao-ting, LIANG Jia-cheng, ZHENG Zuo-fang, et al. (2075)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in the Longzici Spring Catchment	TANG Chun-lei, ZHENG Xiu-qing, LIANG Yong-ping (2087)
Tempo-spatial and Retention Analysis of Total Phosphorus in the Three Gorges Reservoir	TANG Xiao-ya, TONG Si-chen, HUANG Guo-xian, et al. (2096)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Chlorophyll a in Typical Tributaries During the Impoundment Period of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, JI Dao-bin, WANG Li-jing, et al. (2107)
Spatial-temporal Distribution of Nutrients in Hanfeng Lake After Official Operation	FU Shi, NI Jiu-pai, HE Bing-hui, et al. (2116)
Spatio-temporal Variations in the Characteristics of Water Eutrophication and Sediment Pollution in Baiyangdian Lake	LIU Xin, SHI Bin, MENG Jing, et al. (2127)
Spatial-temporal Distribution of Suspended Solids and Its Sedimentation Flux and Nutrients Effects in Xin'anjiang Reservoir, China	SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, et al. (2137)
Bioavailability Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Gaoyou, Lake Nansi, and Lake Dongping Under Different Hydrological Scenarios	ZHANG Liu-qing, SHI Yu, LI Yuan-peng, et al. (2149)
Succession Characteristics of Algae Functional Groups and Water Quality Assessment in a Drinking Water Reservoir	LI Yan-qing, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, et al. (2158)
Effect of Artificial Mixing on Temporal and Spatial Succession of Algae Community Structure in Jinpen Reservoir	WANG Chen-xu, HUANG Ting-lin, LI Nan, et al. (2166)
Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Aerobic Denitrification Bacterial Community Structure from Baiyangdian Lake in Xiong'an New Area During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUE Ge-cheng, et al. (2177)
Spatial and Temporal Succession Characteristics of Aerobic Anoxygenic Photosynthesis Bacteria in a Stratified Reservoir	ZHANG Hai-han, WANG Yan, HUANG Ting-lin, et al. (2188)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Dynamics to Different Hydrological Scenarios in the Two Largest Freshwater Lakes Connected to the Yangtze River	GUO Yan-mi, LI Yuan-peng, SHI Yu, et al. (2198)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Northern-Side River of the Qinling Mountains in Summer	LIN Zi-shen, HUANG Ting-lin, YANG Shang-ye, et al. (2210)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Tributary Waters of the Lower Reaches of the Yangtze River, China	JIA Tian-qi, LEI Rong-rong, WU Xiao-lin, et al. (2221)
Temporal and Spatial Occurrence of NSAIDs in Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	LIAN Jie, LI Yi-fei, WANG Xiao-xuan, et al. (2229)
Occurrence and Ecological Risk of Eight Typical PhACs in Surface Water and Its Impact on <i>Daphnia magna</i>	XU Xin-lei, LIU Jian-chao, LU Guang-hua (2239)
Distribution Characteristics and Migration Rules of Pollutants in Sediments of Reservoirs with <i>Eucalyptus</i> Plantation, Southern China	ZHU Ya, LI Yi-ping, LUO Fan, et al. (2247)
Mechanism of Urban Black Odorous Water Based on Continuous Monitoring: A Case Study of the Erkeng Stream in Nanning	LI Yong-xin, WANG Wei, HE Mei, et al. (2257)
Relationship Between Source-Sink Landscape Pattern and Antibiotics in Surface Water in Peri-urban Watershed	LI Min, TANG Jian-feng, CHEN Li-ding, et al. (2264)
Molecular Chemo-diversity of the Dissolved Organic Matter Occurring in Urban Stormwater Runoff	NIE Yun-han, CHEN Hao, LI Lei, et al. (2272)
Regulating Effect and Mechanism of Calcite/Chlorapatite Mixture Addition on Transformation and Transport of Phosphorus in Sediments	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, et al. (2281)
Stability of Ferrihydrite and Goethite Nanoparticles Under Different Environmental Conditions	WANG Zhi-qiao, MA Jie, CHEN Ya-li, et al. (2292)
Sunflower-Straw-Derived Biochar-Enhanced Fe(III)/S ₂ O ₈ ²⁻ System for Degradation of Benzoic Acid	SUN Peng, ZHANG Kai-kai, ZHANG Yu, et al. (2301)
Non-activated Peroxymonosulfate-Induced Degradation of Sulfasalazine; Kinetics and Mechanism Investigations	DING Xi, ZHANG Xue-wei, ZHOU Run-sheng, et al. (2310)
Pollution Characteristics and Removal Effects of Antibiotics in Wastewater from Large-Scale Pig Farms in Guizhou	YANG Zhao, LI Jiang, XIANG Fu-liang, et al. (2320)
Nitrogen Removal in Low-C/N Rural Sewage Treatment by Anoxic/Oxic Biofilter Packed with New Types of Fillers	ZHAO Yuan-zhe, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, et al. (2329)
Nitrogen Removal Performance and Nitrogen/Carbon Balance of Oligotrophic Aerobic Denitrifiers	WEN Gang, WANG Tong, HUANG Ting-lin, et al. (2339)
Bacterial Community Shifts and Nitrogen Removal Characteristics for a SNAD Process Treating Anaerobic Digester Liquor of Swine Wastewater (ADLSW) in a Continuous-Flow Biofilm Reactor (CFBR)	QIN Jia-wei, XIN Xin, LU Hang, et al. (2349)
Characteristics of ANAMMOX Granular Sludge and Differences in Microbial Community Structure Under Different Culture Conditions	JIANG Ying, GUO Meng-lei, XIE Jun-xiang, et al. (2358)
Start-up of an Integrated Process of Denitrifying Phosphorus Removal Coupled with Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	CHEN Ya, YIN Wen, ZHANG Xing-xing, et al. (2367)
Construction and Application of an Evaluation System for Soil Environmental Carrying Capacity	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, et al. (2373)
Synthesis of Magnetic Biochar and Its Application in the Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soils	WANG Jun-nan, CHENG Shan-shan, ZHAN Wen-hao, et al. (2381)
Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soil by EGTA Washing Enhanced with Reduction Solubilization	ZHANG Jin-yong, ZHU Yu-ting, WANG Ming-xin, et al. (2390)
Toxicity of Chromium to Root Growth of Barley as Affected by Chromium Speciation and Soil Properties	FU Ping-nan, GONG Xiao-fei, LUO Li-yun, et al. (2398)
Effect of Fertilizer Reduction and Biochar Application on Soil Nitrogen Loss in Purple Upland	WANG Shu, WANG Zi-fang, LONG Yi, et al. (2406)
Relationship Between the Composition of Soil Aggregates and the Distribution of Organic Carbon Under Long-Term Abandoned Restoration	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHANG Xin-yi, et al. (2416)
Effects of Biochar Application on Soil Microbial Nutrient Limitations and Carbon Use Efficiency in Lou Soil	WANG Qiang, GENG Zeng-chao, XU Chen-yang, et al. (2425)
N ₂ O Emissions from Tea Plantations with Sorghum Intercropping and Application of Big Urea Pills	ZHANG Ke-bin, LIU Xin-liang, KANG Man, et al. (2434)
Effects of Different Forest Vegetation Types on Soil Nitrogen-Related Microbial Communities and Functions in Jinyun Mountain	WANG Ying-yan, WANG Fu-hua, LUO Dong-hai, et al. (2445)
Nitrous Oxide Emission and Denitrifying Bacterial Communities as Affected by Drip Irrigation with Saline Water in Cotton Fields	GUO Hui-nan, MA Li-juan, HUANG Zhi-jie, et al. (2455)
Effect of Organic Matter Promotion on Nitrogen-Cycling Genes and Functional Microorganisms in Acidic Red Soils	CHU Cheng, WU Zhao-yue, HUANG Qian-ru, et al. (2468)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Fungi Diversity in the Transition Zone of Moso Bamboo and Broadleaf Forest	WANG Nan, PAN Xiao-cheng, WANG Chuan-kuan, et al. (2476)
Differences Between DNA- and RNA-Based Bacterial Communities in Marine Sediments	LI Ming-yue, YANG Yu-hong, MI Tie-zhu, et al. (2485)
Spatial Patterns and Spatial Autocorrelations of Wetland Changes in China During 2003-2013	ZHOU Ting, MA Jiao-jiao, XU Song-jun (2496)