

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.3
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM _{2.5} 分布格局演变及其影响因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)
中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析	方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)
阳泉市秋冬季 PM _{2.5} 化学组分及来源分析	王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)
泰安市夏季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源	衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)
黄山秋季大气颗粒物理化特性	卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)
北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性	曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)
淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征	王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)
鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析	付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)
浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数	滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)
基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征	王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)
薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征	牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 燕莹莹, 祁士华 (1107)
精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法	叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)
2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估	施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)
中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势	庞凯莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)
京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单	韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)
在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测	王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵玺乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)
参数选取对畜禽养殖业大气氨排放的影响: 以长三角地区为例	张琪, 黄凌, 殷司徒, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)
乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析	吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)
长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征	李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)
伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素	刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹霜, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)
城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)
基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例	王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)
黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素	梁晓文, 郇田田, 王涛 (1217)
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	温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)
滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)
太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997~2017 年)	杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)
汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系	薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)
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	王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 刘向阳 (1265)
三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量	陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)
化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响	罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)
利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放	柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)
茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性	范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)
3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性	王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)
新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附	徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)
三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险	方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)
固城湖及出入湖河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估	阚可聪, 谷孝鸿, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)
衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)
北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估	张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)
基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性	马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)
PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性	王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)
中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化	付昆明, 杨宗珏, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)
抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响	代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 亮根祥, 胡双庆 (1401)
多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验	张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志成, 曹思雨 (1409)
剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响	邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)
硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响	何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)
工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析	李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)
耕地土壤重金属健康风险空间分布特征	姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)
黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析	赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)
不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响	李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)
红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征	章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)
有机肥与无机肥配施对潮土 N ₂ O 排放的影响	孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)
冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系	王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)
钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响	鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)
桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应	方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)
外源亚精胺对 As ⁵⁺ 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响	刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩廿, 刘玉荣, 胡红青 (1505)
《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)	

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

王莲^{1,2}, 李璇^{2*}, 马卫星², 邹立航^{1,2}, 赵强强², 丁成^{1,2*}, 吴向阳¹

(1. 江苏大学环境与安全工程学院, 镇江 212013; 2. 盐城工学院环境科学与工程学院, 盐城 224000)

摘要: 为探究水源生态净化系统水质净化及浮游植物控制效能, 并评价 FG (functional group, FG) 和 MBFG (morphology-based functional group, MBFG) 两种功能群对水源生态净化系统内部环境以及水质响应的有效性, 于 2018 年夏季对盐龙湖生态净化系统各单元出水水质和浮游植物功能群进行监测分析. 结果表明, 盐龙湖生态净化系统能够有效净化水质, 进水总磷、总氮、溶解氧和浊度的平均值分别为 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $2.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 60.23 NTU , 经系统处理后分别为 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $6.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 39.53 NTU . 同时, 系统内部水质的空间分布具有异质性, 其中溶解氧 (DO)、酸碱度 (pH) 和浊度的空间差异显著 ($P < 0.001$). 盐龙湖生态净化系统在出水处于轻度富营养状态下仍能够有效控制浮游植物密度 ($4.42 \times 10^5 \sim 4.32 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$), 降低水华风险. 研究期间绝对优势 FG 功能群有 5 个: B、P、TC、J 和 W1, 绝对优势 MBFG 功能群有 6 个: Group I、Group III、Group IV、Group V、Group VI 和 Group VII, 两种绝对优势功能群都能够有效指示生境条件的变化. RDA 分析表明 MBFG 功能群的环境解释度要高于 FG 功能群. 研究结果表明, 选择 MBFG 分类法研究夏季盐龙湖生态净化系统中浮游植物的动态来了解生境的变化更合适.

关键词: 生态净化系统; 调控; 功能群 (FG 和 MBFG); 冗余分析; 响应

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1265-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.201905068

Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System

WANG Lian^{1,2}, LI Xuan^{2*}, MA Wei-xing², ZOU Li-hang^{1,2}, ZHAO Qiang-qiang², DING Cheng^{1,2*}, WU Xiang-yang¹

(1. School of Environmental and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224000, China)

Abstract: To explore the water purification efficiency and phytoplankton control efficiency of the water source ecological purification system, and evaluate the effectiveness of the functional group (FG) and morphology-based functional group (MBFG) in response to the internal environment and water quality of the water source ecological purification system, in the summer of 2018, the water quality and phytoplankton functional groups of each unit of the Yanlong Lake ecological purification system were monitored and analyzed. The results showed that the Yanlong Lake water source ecological purification system can effectively purify the water. The average values of total phosphorus, total nitrogen, dissolved oxygen, and turbidity in the influent water were $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $1.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $2.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and 60.23 NTU , respectively; after system treatment, these were $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $6.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and 39.53 NTU , respectively. Simultaneously, the spatial distribution of water quality within the system was heterogeneous, with significant spatial differences in dissolved oxygen (DO), pH, and turbidity ($P < 0.001$). The Yanlong Lake water source ecological purification system could effectively control the density of phytoplankton ($4.42 \times 10^5 \sim 4.32 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$) when the effluent was in a mild eutrophication state. This reduced the risk of algal blooms. There were five absolute advantage FG: B, P, TC, J, and W1. There were six absolute advantage MBFG: Group I, Group III, Group IV, Group V, Group VI, and Group VII. Both absolute dominant functional groups were effective in indicating changes in habitat conditions. The results of RDA analysis found that the environmental interpretation of the MBFG was higher than that of the FG. The results suggested that it is more appropriate to study the dynamics of phytoplankton in the Yanlong Lake ecological purification system in summer by selecting the MBFG classification method.

Key words: ecological purification system; regulation; functional groups (FG and MBFG); redundancy analysis; response

近年来,构建以人工湿地为核心的水源生态净化系统对微污染源进行预处理已成为水处理领域的研究热点^[1-4]. 水源生态净化系统内部水生植物、水生动物及水力运行条件等都有别于天然水体,这些“非天然”因素导致系统内部环境具有高度空间异质性. 一方面,随着水体浊度减小透明度提高,水下光强增大,局部区域水力停留时间较长,沉积物在

厌氧或扰动的条件下向水体释放营养物质等因素为

收稿日期: 2019-05-09; 修订日期: 2019-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51878587); 江苏省自然科学基金青年基金项目 (BK20160438); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目 (SJCX18-0889); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51608466)

作者简介: 王莲 (1995 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为微污染水源水处理, E-mail: 1512831368@qq.com

* 通信作者, E-mail: lixuan@ycit.edu.cn; ycdingc@163.com

浮游植物大量繁殖提供了有利条件;另一方面,水生植物竞争吸收营养物质、植物间化感作用和水生动物摄食等因素控制了浮游植物的群落结构与繁殖速率.人工构建的水源生态净化系统为浮游植物提供了复杂多样的生存环境.

浮游植物是水环境中重要的初级生产者,其群落结构和生物量的变化对水生态系统的稳定与功能的发展起到了至关重要的作用^[5,6],水温^[7]、光照强度^[8]和营养盐^[9,10]等环境因子是驱动其演替的主要动力.生态学家常通过研究浮游植物群落的变化来了解水域的生态状况^[11,12].但由于传统的系统分类学方法难以体现浮游植物的生态学功能^[13],许多学者便采用浮游植物功能群分组的方法来研究海洋^[14]、湖泊^[15]和河流^[16]等水体的生态状况.浮游植物功能群分组是一种基于浮游植物生理和形态特征,将具有类似生态学功能的浮游植物进行分组的分类方法,可以很好地阐释浮游植物对生境变化的响应^[17,18]. Reynolds 等^[19]首次划分出 31 个浮游植物功能群组(functional group, FG). Padisák 等^[20]在此基础上补充,形成了一套普遍采用的浮游植物功能群划分标准. Kruk 等^[21]首次提出了浮游植物形态功能群(morphology-based functional group, MBFG)的概念,主要依据浮游植物形态特征将其划分为 7 大功能类群,简化了研究工作,为浮游植物功能群分类方法的广泛应用做出贡献.

夏季是流域水质问题高发的季节.鉴于高温是驱动蓝藻快速繁殖的主要因素^[22],在参考 Wang 等^[23]依据气温划分季节的方法后,将候平均气温高于 22℃ 的 6~9 月划分为夏季,共约 130 d,时间尺度较大.在此期间,由于光合作用强水生植物大量消耗水中氧气,暴雨将土壤中的污染物冲入天然水体当中,造成富营养化程度加剧^[24],加上持续的高温和高光照强度,蓝藻极易迅速繁殖形成水华,且分泌毒害物质造成水生动物死亡,进而使水体发黑发臭,严重破坏水环境的生态健康.

若人工构建的水源生态净化系统中内部要素配置不合理,导致水体生态失衡,浮游植物会异常繁殖,这不但会影响系统的正常运行,还会对后续自来水厂的水处理过程产生影响,人类饮水安全将无法得到保障.那么,在夏季人工构建的水源生态净化系统能否有效控制浮游植物?且水源生态系统内部环境具有高度时空异质性,浮游植物受到多种环境要素的综合影响,究竟是哪些关键环境要素的改变使得浮游植物得到有效调控,同时浮游植物产生了哪些响应变化?目前针对上述问题的研究尚未开展.因此,本研究采用 FG 与 MBFG 这两种常用的浮游

植物功能群划分方法,对夏季盐龙湖生态净化系统中的浮游植物进行功能群划分,研究两种浮游植物功能群的演替特征和水质响应的有效性,以期为水源生态净化系统浮游植物功能群划分方法的选择提供一定研究基础.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与采样点设置

盐龙湖生态净化系统位于江苏省盐城市龙冈镇蟒蛇河南岸,占地面积 2.23 km²,依次建有 4 处理单元:预处理单元、挺水植物单元、沉水植物单元和深度净化单元.其中,预处理单元通过跌水、曝气和铺设人工介质等方法去除水中悬浮颗粒和挥发性有机物,提高水体溶解氧水平;生态净化单元(挺水植物单元和沉水植物单元)内种植了大量净化效果较强的水生植物(茭草、芦苇、黄菖蒲、狐尾藻和轮叶黑藻等)净化水体;深度净化单元主要起到应急蓄水的作用,同时其内部水生生物间的相互作用也能进一步净化和稳定水质.如图 1 所示,结合实际工程运行情况共设置了 6 个采样点:S1 位于原水泵站处即进水,S2 位于预处理单元出水,S3 位于挺水植物 B 单元出水,S4 位于挺水植物 C 单元出水,S5 位于沉水植物单元出水,S6 位于深度净化单元出水.于 2018 年 6 月 10 日(T1)、7 月 4 日(T2)、7 月 20 日(T3)、7 月 31 日(T4)、8 月 22 日(T5)和 9 月 9 日(T6)进行采样分析.

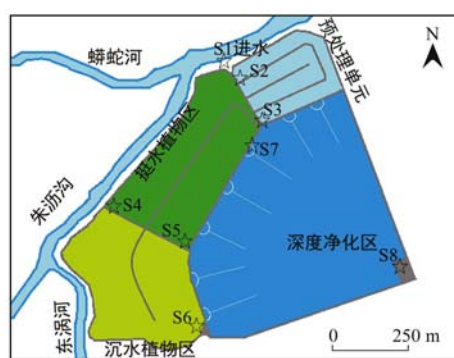


图 1 盐龙湖生态净化系统采样点分布示意

Fig. 1 Sampling stations in Yanlong Lake ecological purification system

1.2 样品的采集与分析

浮游植物定性样品采集:用 25 号浮游生物网于水平方向呈“∞”字形在水面匀速拖网,蒸馏水反复冲洗网壁,滤去多余水分后收集到装有福尔马林固定液的样品瓶中,带回实验室进行种属鉴定.浮游植物定量样品采集:用 5 L 有机玻璃采水器采集水下 30 cm 处混合水样 1 L,加入 1% 的 Lugol 试剂混匀固定,带回实验室静置 48~96 h 后用虹吸法浓缩样

品,充分摇匀后吸取样品于 0.1 mL 计数框内镜检计数. 浮游植物的定性定量分析均在 OLYMPUS CX41 显微镜下进行,浮游植物种属鉴定主要参考文献[25].

使用美国哈希公司出产的 HQ40d 多参数水质分析仪原位测定水温(WT)、酸碱度(pH)、溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP)和电导率(EC);使用美国哈希公司出产的 2100Q 便携式浊度仪原位测定水体浊度. 用样品瓶盛装 1L 水样,快速运回实验室,按文献[26]中的方法尽快测定水样的总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝酸盐氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、高锰酸盐指数和叶绿素 a(Chla),用美国哈希公司出产的 BODTrak-II 测定水样的五日生化需氧量(BOD_5). 使用小型气象站原位收集水文气象数据.

1.3 数据统计与分析

利用 SPSS 22.0 软件对水质参数进行单因素方差分析(ANOVA),以检验各单元间水环境因子是否存在显著性差异. 利用 CANOCO4.5 软件先对浮游植物功能群密度数据进行 DCA 分析,发现 SD 值 < 3,于是选择冗余分析(RDA)来分析浮游植物功能群与环境因子的关系,其中浮游植物功能群密度数据和环境因子(除 pH 外)数据先进行 $\lg(x+1)$ 转换,然后再将所有数据均一化处理. 其他图表用 Origin 2017 绘制.

采用优势度(Y)来表征浮游植物功能群结构特征,计算公式如下:

$$Y = \frac{N_i}{N} \times f_i$$

式中, N 为样品中所有功能群的细胞总数; N_i 为样品中第 i 种功能群的细胞数; f_i 为第 i 种功能群在各采样点出现的频率.

本研究将 Chla、TN、TP 和高锰酸盐指数作为评价内容,采用综合营养状态指数法评价水体营养状态,计算公式如下:

$$\text{TLI}\left(\sum\right) = \sum_{j=1}^m W_j \times \text{TLI}(j)$$

式中, $\text{TLI}\left(\sum\right)$ 为综合营养状态指数; W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重; $\text{TLI}(j)$ 为第 j 种参数的营养状态指数; m 为评价参数的个数.

2 结果与分析

2.1 盐龙湖生态净化系统水质净化效果

由表 1 可知,夏季盐龙湖生态净化系统中 WT 在 23.20 ~ 32.30℃ 内,系统进水平均 WT(28.67℃)

要高于出水(28.27℃);水体 pH 在 6.85 ~ 8.37 内,系统出水的平均 pH(7.97)高于进水(7.35);水体 EC 在 344 ~ 630 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 范围内,其中进水平均 EC(563 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)高于出水(533 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$);水体 ORP 在 64.6 ~ 271.0 mV 内波动,出水平均 ORP(166.5 mV)较进水(179.5 mV)降低;水体 DO 浓度在 1.47 ~ 8.35 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 内,出水平均 DO 水平(6.26 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)高于进水(2.88 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$);水体浊度在 20.3 ~ 91.6 NTU 内变化,出水平均浊度(39.53 NTU)低于进水(60.23 NTU);水体 TP、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 这些营养盐的浓度分别在 0.02 ~ 0.34、0.64 ~ 3.40、0.05 ~ 1.90 和 0.06 ~ 0.97 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内,系统出水中各类营养盐的平均浓度与进水相比都有所降低;水体高锰酸盐指数和 BOD_5 浓度分别在 4.56 ~ 8.40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 2.50 ~ 18.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 内波动,系统出水中两种有机物指标的平均浓度也都低于进水;水体 SD 在 20.0 ~ 65.0 cm 内,出水平均 SD(50.0 cm)高于进水(35.8 cm). 进水水质总体上属于 IV ~ V 类水,经过系统处理后基本符合地表水环境质量 III 类水标准. 其中,预处理单元主要提高了水体中 DO 含量,该单元出水进入挺水植物单元后,水体 DO、营养盐和有机物浓度均有所下降,这说明挺水植物根部处于耗氧状态^[27],植物体生长旺盛,快速消耗水体营养物质,从而很好地净化了水质. 挺水植物单元出水进入沉水植物单元后水体浊度升高,这可能是因为水体较浅,底部基质易受风力扰动造成的. 深度净化单元降低水体浊度,提高水体透明度的作用明显. 单因素方差分析结果显示(表 1),夏季盐龙湖生态净化系统内 DO、pH、浊度和 SD 的 F 值较高(5.147 ~ 16.786),空间差异显著.

2.2 盐龙湖生态净化系统浮游植物暴发控制效果

2.2.1 盐龙湖生态净化系统富营养化状况

从图 2 可知,夏季盐龙湖生态净化系统水体 $\text{TLI}\left(\sum\right)$ 在 47.20 ~ 62.63 范围内. 其中进水 $\text{TLI}\left(\sum\right)$ 在 54.43 ~ 62.63 范围内,预处理单元出水 $\text{TLI}\left(\sum\right)$ 在 52.56 ~ 61.59 范围内,挺水植物 B 单元出水 $\text{TLI}\left(\sum\right)$ 在 48.56 ~ 58.59 内变化,挺水植物 C 单元出水 $\text{TLI}\left(\sum\right)$ 在 47.20 ~ 58.09 内变化,沉水植物单元出水 $\text{TLI}\left(\sum\right)$ 在 53.29 ~ 59.40 内,深度净化单元出水 $\text{TLI}\left(\sum\right)$ 在 48.53 ~ 54.20

表 1 盐龙湖生态净化系统各单元基本水质参数浓度及单因素方差分析统计结果¹⁾

Table 1 Basic water quality parameter concentration and ANOVA of each unit in the Yanlong Lake ecological purification system

项目	采样点						方差分析统计结果	
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	F	P
WT/℃	25.10 ~ 32.30 (28.67)	25.30 ~ 31.90 (28.42)	23.30 ~ 30.60 (27.67)	23.40 ~ 31.10 (27.45)	23.20 ~ 31.30 (27.57)	24.50 ~ 32.20 (28.27)	0.196	0.961
pH	6.85 ~ 7.72 (7.35)	7.50 ~ 7.87 (7.66)	7.27 ~ 7.61 (7.47)	7.34 ~ 7.75 (7.50)	7.53 ~ 8.12 (7.77)	7.59 ~ 8.37 (7.97)	6.769	<0.001
EC/μS·cm ⁻¹	487 ~ 630 (563)	445 ~ 622 (554)	406 ~ 618 (551)	409 ~ 614 (551)	344 ~ 610 (540)	468 ~ 596 (533)	0.116	0.988
ORP/mV	139.7 ~ 252.6 (179.5)	119.7 ~ 267.9 (178.3)	64.6 ~ 271.0 (174.5)	116.3 ~ 201.2 (168.3)	130.3 ~ 195.7 (173.1)	138.6 ~ 196.6 (166.5)	0.084	0.994
DO/mg·L ⁻¹	2.17 ~ 3.48 (2.88)	3.70 ~ 6.70 (5.99)	1.79 ~ 3.75 (2.81)	1.47 ~ 3.19 (2.37)	4.16 ~ 8.14 (6.14)	3.69 ~ 8.35 (6.26)	16.786	<0.001
浊度/NTU	50.00 ~ 91.60 (60.23)	39.90 ~ 58.90 (48.42)	29.00 ~ 59.30 (44.67)	20.30 ~ 54.50 (38.53)	58.10 ~ 82.90 (66.97)	23.10 ~ 58.80 (39.53)	5.265	0.001
TP/mg·L ⁻¹	0.10 ~ 0.34 (0.20)	0.04 ~ 0.23 (0.14)	0.04 ~ 0.24 (0.12)	0.02 ~ 0.16 (0.11)	0.02 ~ 0.21 (0.13)	0.04 ~ 0.16 (0.09)	1.945	0.116
TN/mg·L ⁻¹	1.15 ~ 3.40 (1.91)	0.95 ~ 1.97 (1.30)	0.76 ~ 1.63 (1.18)	0.82 ~ 1.64 (1.13)	0.81 ~ 1.72 (1.17)	0.64 ~ 1.30 (0.95)	0.200	0.939
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	0.50 ~ 1.90 (0.95)	0.35 ~ 1.03 (0.62)	0.32 ~ 0.86 (0.58)	0.31 ~ 0.78 (0.57)	0.28 ~ 0.74 (0.58)	0.05 ~ 0.68 (0.44)	0.712	0.620
NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	0.23 ~ 0.97 (0.62)	0.06 ~ 0.86 (0.38)	0.07 ~ 0.61 (0.35)	0.09 ~ 0.62 (0.37)	0.16 ~ 0.76 (0.42)	0.13 ~ 0.59 (0.33)	1.125	0.368
高锰酸盐指数/mg·L ⁻¹	5.24 ~ 8.40 (6.57)	5.48 ~ 7.20 (6.27)	5.20 ~ 6.72 (5.96)	5.16 ~ 7.20 (6.03)	5.20 ~ 6.64 (5.85)	4.56 ~ 6.88 (5.47)	1.531	0.210
BOD ₅ /mg·L ⁻¹	5.80 ~ 15.00 (12.00)	3.60 ~ 18.00 (12.12)	5.20 ~ 14.00 (10.83)	2.50 ~ 18.00 (11.00)	6.80 ~ 18.00 (13.45)	3.80 ~ 17.00 (11.37)	0.217	0.952
SD/cm	30.0 ~ 50.0 (35.8)	35.0 ~ 40.0 (35.8)	25.0 ~ 45.0 (33.3)	30.0 ~ 60.0 (40.8)	20.0 ~ 35.0 (29.2)	40.0 ~ 65.0 (50.0)	5.147	0.002

1)表中数据为最小值~最大值(平均值)

内.蟒蛇河原水在盐龙湖生态净化系统的逐级处理下,水体 TLI ($\sum$) 总体呈现下降的趋势.根据有关湖泊(水库)营养状态分级规定,水体中 $50 < \text{TLI}(\sum) \leq 60$ 为轻度富营养, $60 < \text{TLI}(\sum) \leq 70$ 为中度富营养,夏季盐龙湖生态净化系统基本处于轻度富营养状态,虽然水质得到提升,但仍能够

为浮游植物的大量繁殖提供较为充足的营养物质.

2.2.2 盐龙湖生态净化系统浮游植物群落与总细胞密度变化

本研究期间盐龙湖生态净化系统中共鉴别出浮游植物 5 门 40 属,如图 3(a)所示,绿藻门种类最多,占总种数的 43%,主要包括小球藻属、衣藻属、四尾栅藻属、盘星藻属等 17 属;硅藻门占总种数的 30.0%,主要包括小环藻属、颗粒直链藻属、舟形藻属等 12 属;蓝藻门占总种数的 15.0%,分别为颤藻属、平裂藻属、微囊藻属、伪鱼腥藻属、鱼腥藻属和隐球藻属;裸藻门占总种数的 10.0%,分别为裸藻属、陀螺藻属、扁裸藻属和囊裸藻属;甲藻门中只有多甲藻属,占总种数的 2%.夏季盐龙湖生态净化系统的浮游植物构成类型为绿藻-硅藻型.由图 3(b)可知,夏季盐龙湖生态净化系统中浮游植物细胞密度在 $4.42 \times 10^5 \sim 4.32 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内.其中预处理单元出水中浮游植物总细胞密度波动幅度较大,而沉水植物单元出水中浮游植物总细胞密度波动幅度最小.夏季盐龙湖总藻细胞密度最大仅为 $4.32 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,低于一般浮游植物水华安全预警值 ($1.5 \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$)^[28],可能是由盐龙湖生态净化系统中水生植物化感作用、浮游动物滤食、鱼

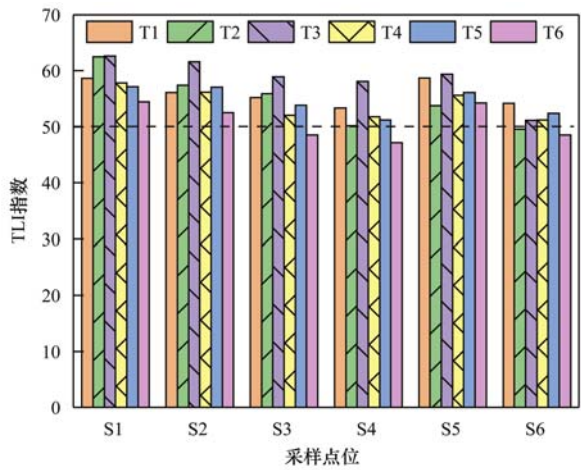


图 2 盐龙湖生态净化系统各单元 TLI 指数

Fig. 2 TLI index of each unit of the Yanlong Lake ecological purification system

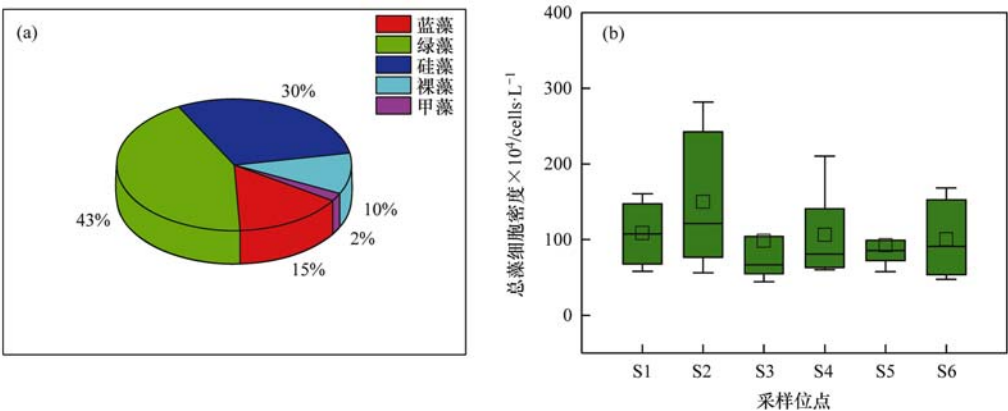


图3 盐龙湖生态净化系统浮游植物构成和细胞密度变化

Fig. 3 Phytoplankton composition and cell density changes in the Yanlong Lake ecological purification system

类摄食和浮游植物间的相互作用等多种因素综合造成的. 这间接说明盐龙湖生态净化系统内部各单元配置要素较为合理,高温期运行基本正常,能够对浮游植物群落结构及数量起到一定的调控作用.

2.3 盐龙湖生态净化系统浮游植物功能群演替特征

2.3.1 盐龙湖生态净化系统 FG 功能群的时空变化特征

本研究期间盐龙湖生态净化系统中共划分出

21 个 FG 功能群组:B、D、N、NA、P、MP、TC、S1、X3、X2、X1、F、G、J、K、H1、Lo、M、W1、W2 和 Wo. 各 FG 功能群组的划分结果和主要特征见表 2. 选择 FG 功能群中 $Y > 0.02$ 且出现频率为 100% 的功能群 B、P、TC、J、W1 作为代表(绝对优势功能群),对其优势度数据进行分析. 由图 4 可知随着时间的变化,夏季盐龙湖生态净化系统各单元绝对优势功能群变化动态如下:系统进水为P→J→J→J

表 2 盐龙湖生态净化系统 FG 功能群组划分

Table 2 Division of functional groups of phytoplankton in the Yanlong Lake ecological purification system				
类别	生境描述	耐受性	敏感性	代表藻属
B	中小型中营养水体	低光照	pH 升高	小环藻 <i>Cyclotella</i>
D	含有营养盐、浑浊	冲刷	营养缺乏	针杆藻 <i>Synedra</i> 、谷皮菱形藻 <i>Nitzschia palea</i>
N	持续或半持续混合水体	低营养	水体分层、pH 升高	窗格平板藻 <i>Tabellaria fenestrata</i> 、鼓藻 <i>Cosmarium</i>
NA	贫到中营养、静水		水体混合	角星鼓藻 <i>Staurostrum</i>
P	混合中营养, 浑浊, 浅水	中程度的低光照和低碳含量	水体分层、缺乏硅元素	颗粒直链藻 <i>Melosira granulata</i>
MP	经常性搅动、浑浊、浅水	混合搅动		舟形藻 <i>Navicula</i> 、异极藻 <i>Gomphonema</i> 、卵形藻 <i>Cocconeis</i>
TC	富营养静水或流动缓慢、具有挺水植物		冲刷作用	颤藻 <i>Oscillatoria</i>
S1	混合浑浊、透明度低	极低的光照	冲刷作用	伪鱼腥藻 <i>Pseudoanabaena</i>
X3	贫营养、混合、浅水	恶劣环境	水体混合、牧食作用	布纹藻 <i>Gyrosigma</i> 、波缘藻 <i>Cymatopleyra</i>
X2	中到富营养、浅水	分层	水体混合、滤食作用	衣藻 <i>Chlamydomonas</i>
X1	富营养到高度富营养型浅水水体	分层	营养缺乏、牧食作用	小球藻 <i>Chlorella</i> 、纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i>
F	中到富营养、洁净、混合强	低营养、高浑浊	二氧化碳缺乏	卵囊藻 <i>Oocystis</i> 、微芒藻 <i>Micractinium</i>
G	富营养、静水	高光照	营养盐缺乏	空球藻 <i>Eudorina</i> 、实球藻 <i>Pandorina</i>
J	高营养、混合、浅水		高光照	十字藻 <i>Crucigenia</i> 、盘星藻 <i>Pediastrum</i> 、四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i> 、扁盘栅藻 <i>Scenedesmus platydiscus</i>
K	富营养浅水		水体高度混合	隐球藻 <i>Aphanocapsa</i>
H1	富营养、分层、浅水	低含氮量、低含碳量	水体混合、低光照、低磷含量	鱼腥藻 <i>Anabaena</i>
Lo	贫到富营养、中到大型水体、可深可浅	营养分层	长时间或深层混合	多甲藻 <i>Peridinium</i> 、平裂藻 <i>Merismopedia</i>
M	小到中型、富营养到高度富营养、稳定、透明度较高	暴晒	冲刷、低光照	微囊藻 <i>Microcystis</i>
W1	有机污染、浅水	高生化需氧量	牧食作用	裸藻 <i>Euglena</i> 、扁裸藻 <i>Phacus</i>
W2	中营养、浅水			囊裸藻 <i>Trachelomonas</i> 、陀螺藻 <i>Strombomonas</i>
Wo	富含有机质			衣藻 <i>Chlamydomonas</i>

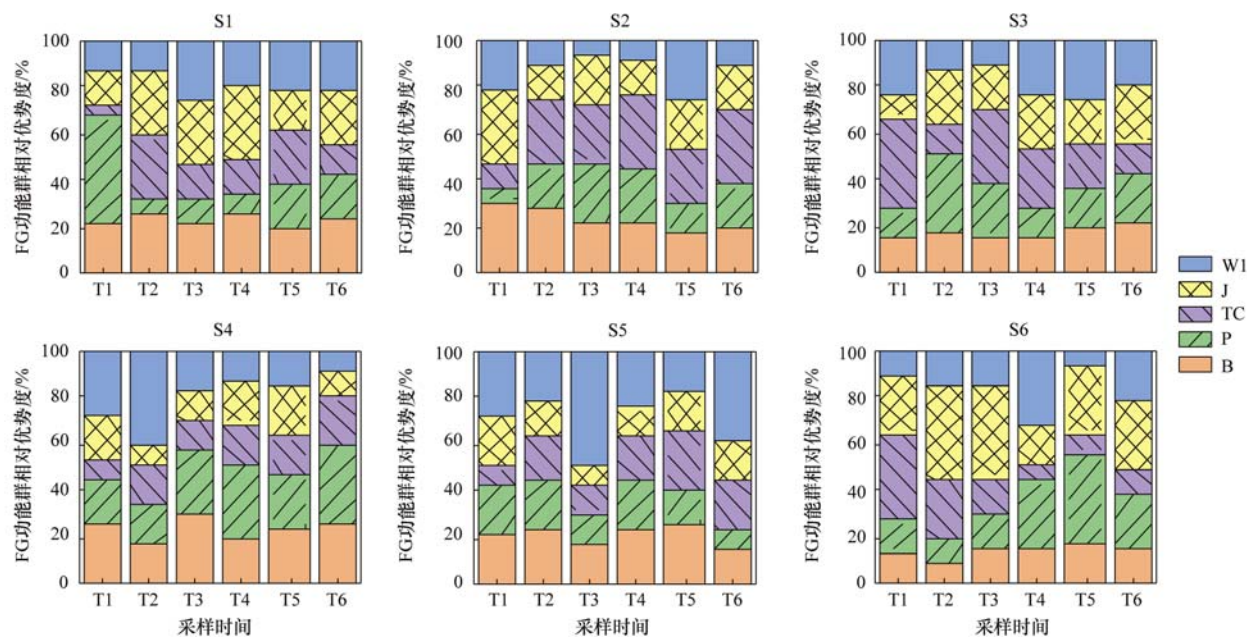


图4 各单元绝对优势 FG 功能群的优势度的时间分布

Fig. 4 Time distribution of the dominance of absolute dominant phytoplankton functional groups in each unit

→TC →B, 预处理单元为 J →B →P →TC →W1 →TC, 挺水植物 B 单元为 TC →P →TC →J →W1 →J, 挺水植物 C 单元为 W1 →W1 →B →P →P →P, 沉水植物单元为 W1 →B →W1 →W1 →TC →W1, 深度净化单元为 TC →J →J →W1 →P →J. 由图 5 可知在空间上, 夏季盐龙湖生态净化系统内进水和深度净化单元中功能群 J 占主要优势, 预处理单元和挺水植物 B 单元中功能群 TC 占主要优势, 挺水植物 C 单元中功能群 P 占主要优势, 沉水植物单元中功能群 W1 占主要优势.

总体上, 夏季盐龙湖生态净化系统中绝对优势 FG 功能群在时间和空间上都发生了改变, 尤其是在时间上的变化更为多样. 其中, 绝对优势 FG 功能群在挺水植物 C 单元中的时间变化规律与其他单元相比最为明显, 而在预处理单元中的演替规律则最为复杂.

2.3.2 盐龙湖生态净化系统 MBFG 功能群的时空变化特征

本研究期间盐龙湖生态净化系统中共划分出 6 个 MBFG 功能群组: Group I、Group III、Group IV、Group V、Group VI 和 Group VII. 各 MBFG 功能群组的

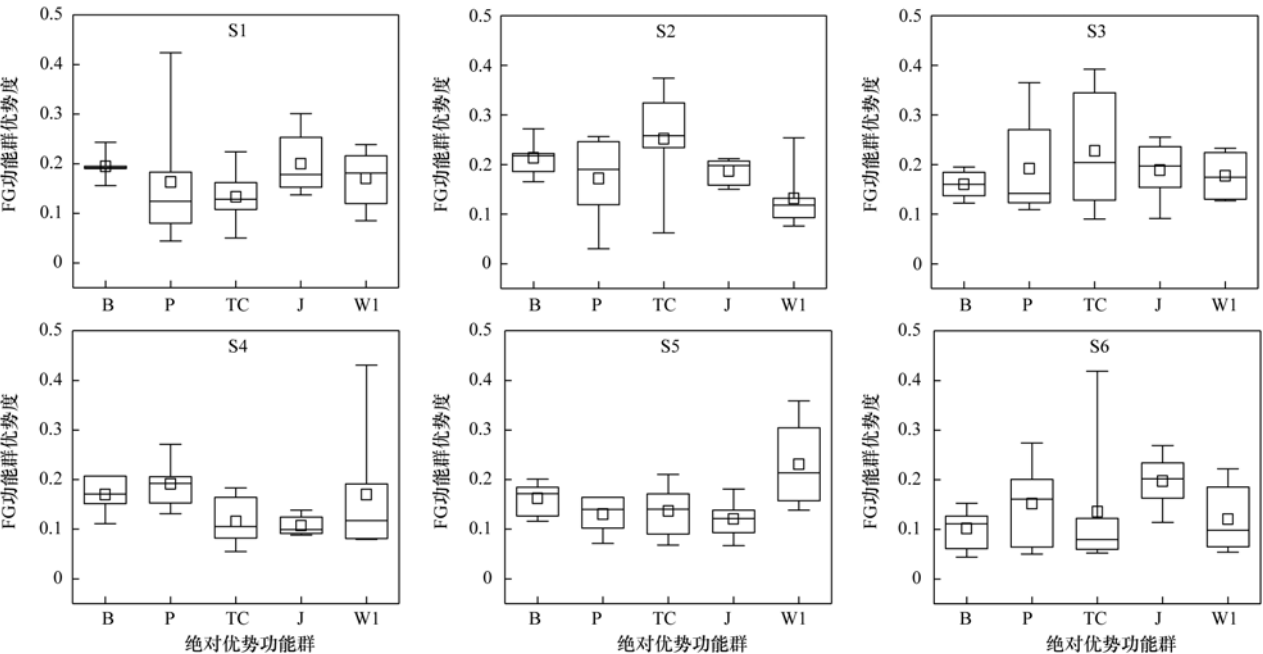


图5 夏季绝对优势 FG 功能群的优势度的空间变化

Fig. 5 Spatial variation of the dominance of absolute dominant phytoplankton functional groups in summer

划分结果和主要形态特征见表 3。由于所划分的 MBFG 功能群的优势度均大于 0.02 且出现频率均为 100%,因而对所有 MBFG 功能群优势度数据进行分析。如图 6 所示,随时间的变化,夏季盐龙湖生态净化系统各单元 MBFG 功能群的变化动态如下:系统进水为 Group III→Group III→Group I→Group I→Group VII→Group VII,预处理单元为 Group I→Group VI→Group IV→Group VII→Group VII→Group III,挺水植物 B 单元为 Group VI→Group I→Group III→Group III→Group IV→Group V,挺水植物 C 单元为 Group III→Group V→Group VI→Group IV→Group VI→Group VII,沉水植物单元为 Group V→Group V→

Group V→Group V→Group V→Group V,深度净化单元为 Group VII→Group VII→Group VII→Group IV→Group I→Group I。由图 7 可知,在空间上夏季盐龙湖生态净化系统的进水、挺水植物 B 单元和深度净化单元中 Group I 占主要优势,预处理单元和挺水植物 C 单元中 Group VII 占主要优势,沉水植物单元中 Group V 占主要优势。

夏季盐龙湖生态净化系统中各单元 MBFG 功能群组也产生了时空上的变化。虽然在时间上的演替规律也最为复杂,但与绝对优势 FG 功能群相比较为明显,尤其是沉水植物单元,该单元中 Group V 一直占据着绝对优势的地位。

表 3 盐龙湖生态净化系统 MBFG 功能群划分

Table 3 Division of morphology-based functional groups of phytoplankton in the Yanlong Lake ecological purification system		
类别	形态描述	代表藻属
Group I	小型单细胞或群体、高 S/V	衣藻 <i>Chlamydomonas</i> 、十字藻 <i>Crucigenia</i> 、集星藻 <i>Actinastrum</i> 、小球藻 <i>Chlorella</i> 、纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i> 、微芒藻 <i>Micractinium</i>
Group III	具气囊的大型丝状体	颤藻 <i>Oscillatoria</i> 、伪鱼腥藻 <i>Pseudoanabaena</i> 、鱼腥藻 <i>Anabaena</i>
Group IV	中型单细胞或群体、	空星藻 <i>Coelastrum</i> 、盘星藻 <i>Pediastrum</i> 、四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i> 、扁盘栅藻 <i>Scenedesmus platydiscus</i> 、二形栅藻 <i>Scenedesmus dimorphus</i> 、四角藻 <i>Tetraedron</i> 、鼓藻 <i>Cosmarium</i> 、角星鼓藻 <i>Staurastrum</i>
Group V	中型到大型的单细胞鞭毛类	裸藻 <i>Euglena</i> 、扁裸藻 <i>Phacus</i> 、囊裸藻 <i>Trachelomonas</i> 、陀螺藻 <i>Strombomonas</i> 、多甲藻 <i>Peridinium</i>
Group VI	具硅质外壳的藻类、无鞭毛	小环藻 <i>Cyclotella</i> 、针杆藻 <i>Synedra</i> 、谷皮菱形藻 <i>Nitzschia palea</i> 、窗格平板藻 <i>Tabellaria fenestrata</i> 、异极藻 <i>Gomphonema</i> 、舟形藻 <i>Navicula</i> 、双菱藻 <i>Suriella</i> 、桥弯藻 <i>Cymbella</i> 、卵形藻 <i>Cocconeis</i> 、布纹藻 <i>Gyrosigma</i> 、波缘藻 <i>Cymatopleura</i>
Group VII	具胶被的群体细胞、低 S/V	平裂藻 <i>Merismopedia</i> 、微囊藻 <i>Microcystis</i> 、隐球藻 <i>Aphanocapsa</i>

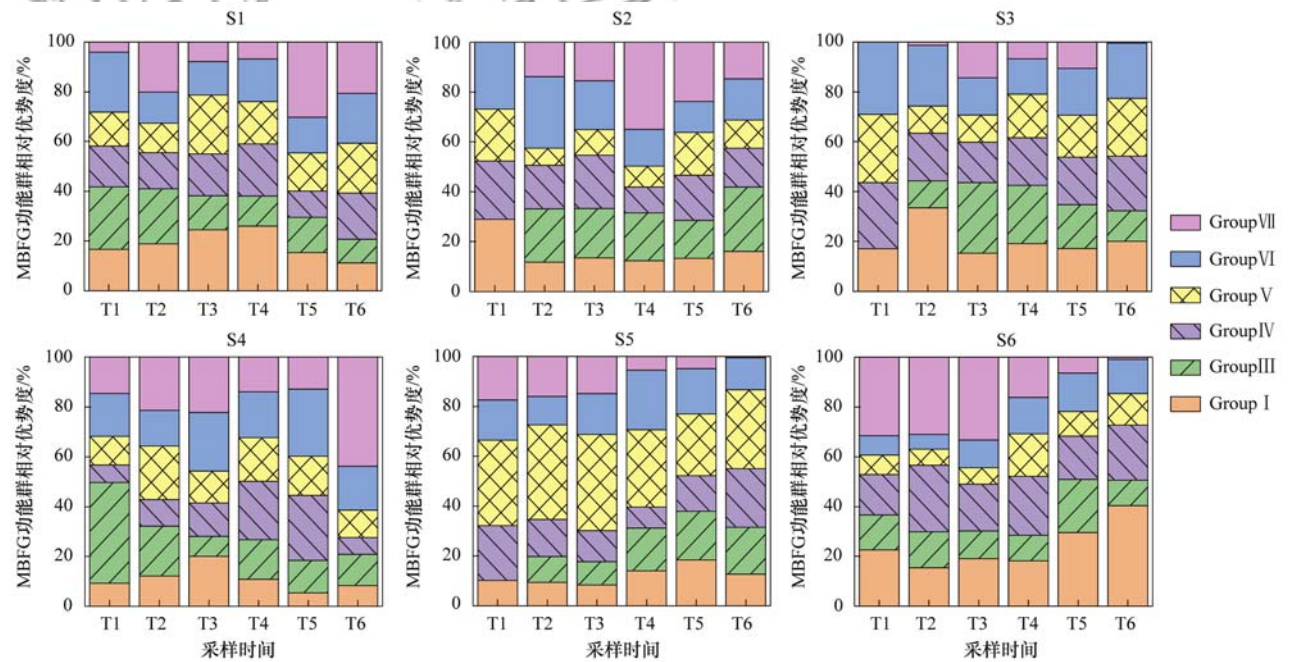


图 6 各单元浮游植物形态功能群的优势度的时间分布

Fig. 6 Time distribution of the dominance of phytoplankton morphologically-based functional groups in each unit

2.4 盐龙湖生态净化系统 FG 与 MBFG 功能群的冗余分析

如表 4 所示,盐龙湖生态净化系统中 FG 功能

群组密度与环境因子间的相关性较高,前 2 个轴的相关系数分别为 0.801 和 0.809,轴 1 解释了物种数据累积变化率的 20.7% 和物种-环境相关性累积变

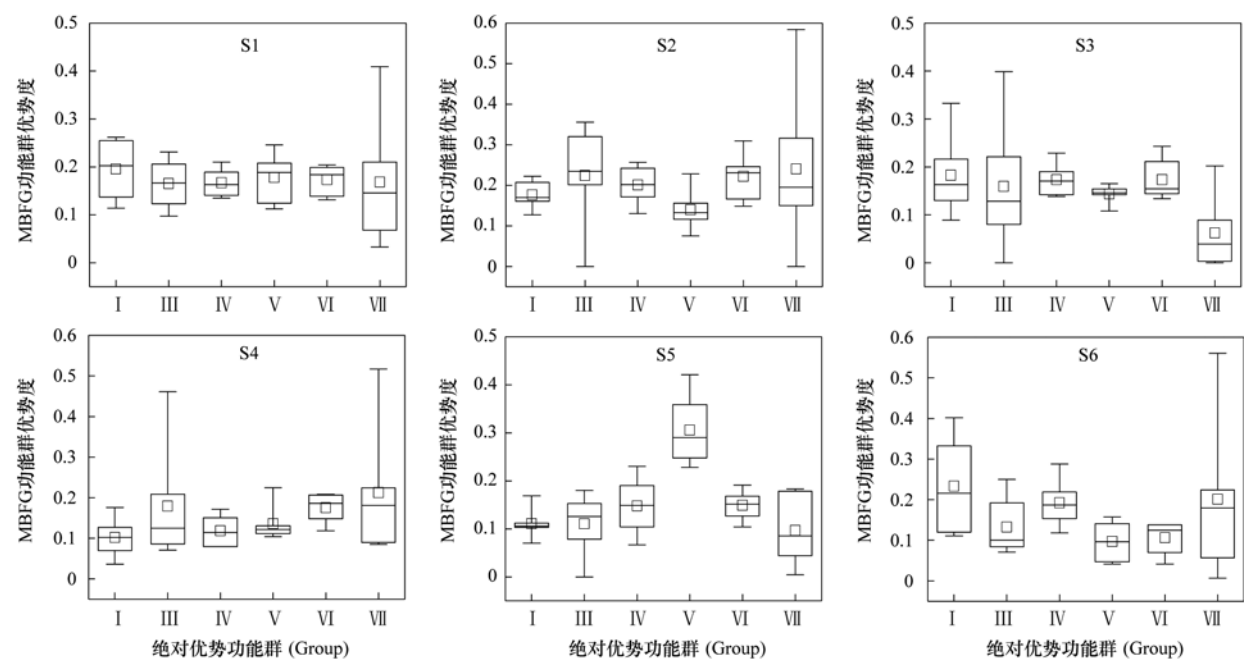


图7 夏季浮游植物形态功能群的优势度的空间变化

Fig. 7 Spatial variation of the dominance of phytoplankton morphologically-based functional groups in summer

表4 盐龙湖生态净化系统不同浮游植物功能群密度与环境因子的 RDA 结果

Table 4 RDA analysis between densities of different phytoplankton functional groups in the Yanlong Lake ecological purification system

参数项	FG				MBFG			
	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4
特征值	0.207	0.084	0.064	0.035	0.539	0.080	0.031	0.025
物种密度与环境因子相关系数	0.801	0.809	0.806	0.720	0.870	0.875	0.725	0.518
物种密度的变异累积百分比/%	20.7	29.2	35.6	39.1	53.9	61.9	65.1	67.5
物种密度-环境因子变异累积百分/%	42.0	59.1	72.2	79.3	78.9	90.6	95.2	98.8

化率的 42.0%,轴 2 解释了物种数据累积变化率的 29.2%和物种-环境相关性累积变化率的 59.1%,说明前两轴能够解释大多数 FG 功能群的分布.而 MBFG 功能群组密度与环境因子间的相关性与 FG 功能群相比更高,前 2 个轴的相关系数分别为 0.870 和 0.875,轴 1 解释了物种数据累积变化率的 53.9%和物种-环境相关性累积变化率的 78.9%,轴 2 解释了物种数据累积变化率的 61.9%和物种-环

境相关性累积变化率的 90.6%,也说明前两轴能够解释大多数 MBFG 功能群的分布.由图 8 可知,影响绝对优势 FG 功能群 B 和 W1 的关键环境因子为浊度,影响绝对优势 FG 功能群 P、TC 和 J 的关键环境因子分别为 TP、EC 和 pH,RDA 分析结果显示浊度、TP、EC 和 pH 与轴 1 的相关系数分别为 0.136 6、-0.207 2、-0.437 4 和 0.186 5.影响 Group I、Group V 和 Group VI 的关键环境因子为

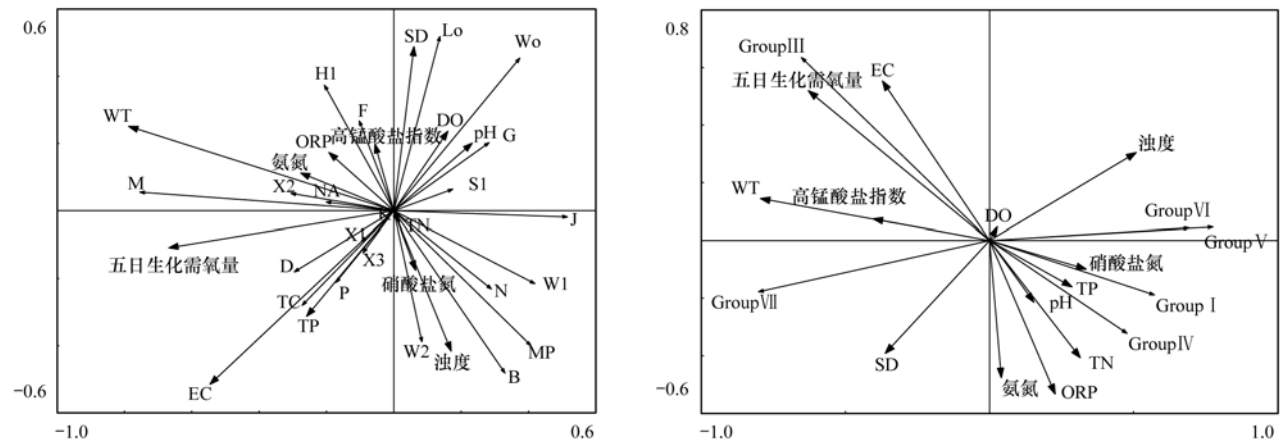


图8 浮游植物功能群密度与环境因子的冗余分析(RDA)

Fig. 8 Redundancy analysis(RDA) of density of phytoplankton functional groups and environmental factors

NO_3^- -N, 影响 Group III、Group IV 和 Group VII 的关键环境因子分别为 BOD_5 、TP 和 WT. RDA 分析结果显示 NO_3^- -N、TP、 BOD_5 和 WT 与轴 1 的相关系数分别为 0.292 5、0.249 5、-0.547 2 和 -0.692 0.

3 讨论

3.1 盐龙湖生态净化系统 FG 功能群生境响应特征

功能群 W1^[18]一般指有机质含量丰富的水体, 其优势度在进水中逐渐升高. RDA 分析结果显示浊度为影响该功能群的关键环境因子, 再结合水质指标的变化可以看出这是由雨水冲刷带来了大量外源性有机质^[29]和悬浮颗粒物造成的. 预处理单元减少了水体中悬浮颗粒和能被微生物所利用的有机物, 促使功能群 W1 的优势度与进水相比明显降低. 而水体进入沉水植物单元后, 功能群 W1 的优势度明显升高, 并占据该单元夏季浮游植物功能群中的绝对优势地位, 这可能与沉水植物单元水质净化效果差, 甚至反向释放营养盐和有机质有关. 本研究期间发现沉水植物单元内的沉水植物分布不均, 生长缓慢. 在雨水冲刷和鱼类扰动等作用下使底部沉积物悬浮, 增大了水体浊度, 再加上鱼类的啃食^[30], 这些环境因素限制了沉水植物的生长. 在深度净化单元出水中功能群 W1 的优势度明显减小, 这同样也是由水体浊度和有机物含量的进一步削减造成的.

功能群 B 常存在于中营养水体中, 主要由广适性小环藻属构成, 常成为水中的优势类群^[7]. 虽然功能群 B 耐受低光照并对水体 pH 变化敏感, 但 RDA 分析表明浊度也同样影响其分布的关键因素. 夏季盐龙湖各单元中功能群 B 的优势度波动与其他功能群相比并不大. 尽管预处理单元降低了水体浊度, 可功能群 B 的优势度与进水中相比并没有明显的降低, 而在深度净化单元出水中功能群 B 的优势度与沉水植物单元出水相比明显减小. 深度净化单元水体透明度高, 水中光照强度大, 利于耐受高光照且易在理想条件下占据绝对优势的功能群 J 生存^[29], 实际上功能群 J 也的确成为深度净化单元的绝对优势功能群, 可能正是在这样的竞争下, 导致功能群 B 的优势地位明显降低. 此外, 功能群 J 的适宜生境为高营养的混合浅水, 夏季系统的进水正适合其生存, 也促使功能群 J 成为绝对优势的功能群.

功能群 P 适宜生境为中营养的混合水体, 是夏季挺水植物 C 单元的绝对优势功能群, RDA 分析表明影响其分布的环境因子为 TP. 功能群 TC 适宜生境为具有挺水植物、富营养的流动缓慢水体, 是夏季挺水植物 B 单元的绝对优势功能群, RDA 分析表明影响其分布的环境因子为 EC. 同样是挺水植物单

元, 但在夏季两个单元内的绝对优势功能群却不同, 虽然影响这两种功能群分布的关键环境因子不同, 但这两种环境因子的空间差异并不显著, 这可能是由挺水植物生长状况不同导致的. 本研究期间多次观察到挺水植物 B 单元的挺水植物生长状况较挺水植物 C 单元旺盛, 几乎全部覆盖, 而挺水植物 C 单元仍存在部分空白区域. 功能群 TC 主要由颤藻属组成, 作为喜高温高光照的蓝藻, 其在预处理单元中成为绝对优势功能群多与该单元水体浊度降低, 水下光强增大有关.

3.2 盐龙湖生态净化系统 MBFG 功能群生境响应特征

夏季盐龙湖生态净化系统的进水、挺水植物 B 单元和深度净化单元中由小型单细胞或群体细胞构成的 Group I 为绝对优势功能群, 且中等大小单细胞或群体细胞构成的 Group IV 的优势度波动与在其他单元中相比较小. RDA 分析表明影响 Group I 和 Group IV 分布的关键环境因子分别是 NO_3^- -N 和 TP, 但方差分析结果显示两者的空间差异并不显著, 这可能与夏季降雨有关, Rangel 等^[31]研究河流-水库系统的浮游植物特征时认为支流因高降水量稀释了浮游植物的密度, 有利于 Group I 和 Group IV 这些耐受水流冲刷和低光照的功能群生存. 但深度净化单元中水体浊度和流速均为最小, 这可能是因为 Group I 中的浮游植物具有高 S/V, 对水中光能的利用率较高, 利于繁殖, 而 Group IV 多由夏季常见的无运动器官的绿藻构成, 加上关键环境因子差异不大和环境中各功能群相互竞争的综合作用, 这些都可能是两者保持稳定的优势地位的原因.

Group III 主要由颤藻、鱼腥藻和伪鱼腥藻这些具有气囊的丝状体蓝藻构成, 浑浊且高营养的水环境中也能生存^[20,31], Group VII 主要由微囊藻、平裂藻和隐球藻这些具有胶被的群体蓝藻细胞组成, 这两类功能群均由夏季易水华的蓝藻类浮游植物组成, 喜高温和高光强, 因而在预处理单元水体浊度降低, 水下光强增大时其优势度明显升高, 但在深度净化单元中两者的优势度却随时间变化而降低, 这可能是因为在水流冲刷、增氧机曝气和水生动物牧食等影响下, 导致群体分散, 从而对这类小群体细胞的计数存在较大的波动.

在盐龙湖生态净化系统大多数单元中, 中型到大型单细胞鞭毛类构成的 Group V 和具有硅质外壳、无鞭毛藻类构成的 Group VI 的优势度变化较大, 夏季气候对这两类功能群中的浮游植物来说并不适宜, 这可能导致其分布多随着其他功能群的变化而变化, 因而波动较大. 但在水体浊度较高、水质净化

效果差的沉水植物单元中, Group V 一直是占据着绝对优势地位, 这可能是因为 Group V 中浮游植物具有鞭毛, 能为了适应环境变化而运动^[20], 从而在这样的生境条件下耐受性强于其他功能群。

在两个挺水植物单元当中, MBFG 功能群的结构差异明显且绝对优势功能群也不相同, RDA 分析结果中影响两者的关键环境因素空间差异并不大, 这可能也是由两个单元挺水植物生长状态和分布情况不同造成的。

3.3 盐龙湖生态净化系统 FG 和 MBFG 功能群生境响应性比较

RDA 结果表明夏季盐龙湖生态净化系统中 MBFG 功能群组的环境解释度高于 FG 功能群组, 生境响应性强。Rangel 等^[31]在研究热带蓝藻为主导的河流-水库系统中个各种浮游植物分类方法适用性时也得出了同样的结论。Kruk 等^[32]比较了全球 211 个湖泊的浮游植物功能群分类数据时也得出了 MBFG 是水生态系统中预测浮游植物的最佳因子的结论。Izaguirre 等^[33]分析比较了 3 种分类方法后认为 MBFG 足以用来分析监测受人类影响的水生系统中浮游植物群落动态。尽管 FG 功能群的分类要求比 MBFG 更加严格, 但在夏季这种雨水冲刷频繁, 水温 and 光强适合具有多种形态、运动特征的蓝藻繁殖的季节, MBFG 功能群在生境响应方面的优势可能会更加凸出。虽然不少研究报道了水温、营养盐和有机物对夏季浮游植物群落的变化有着重要的驱动作用^[34~36]。但从两种功能群的响应变化来看, 对于盐龙湖这类人工构建的水源生态净化系统, 似乎水体动力学的变化、水生植物的生长状态与分布、鱼类的摄食和扰动也是影响浮游植物分布的重要环境因素, 其影响力可能更高, 这种环境变化也许放大了浮游植物形态特征上的差异, 同样凸出了 MBFG 功能群在生境响应方面的优势。

4 结论

(1) 夏季盐龙湖生态净化系统能够有效净化水源水质。蟒蛇河原水经生态净化系统处理后, 水体浊度和营养盐含量降低, 水中 DO 和 SD 明显提高, 出水水质基本符合Ⅲ类水质标准。同时, 系统内部水环境的空间分布具有异质性, 其中, DO、pH 和浊度的空间差异最为显著($P < 0.001$)。

(2) 夏季盐龙湖生态净化系统能够有效控制浮游植物。尽管蟒蛇河原水在盐龙湖生态净化系统处理下, 出水水质仍处于轻度富营养状态, 但浮游植物的总密度最高仅为 $4.32 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 远低于水华安全预警值。

(3) 研究期间共划分出 21 个 FG 功能群和 6 个 MBFG 功能群。其中, 绝对优势 FG 功能群有 5 个: B、P、TC、J 和 W1; 绝对优势 MBFG 功能群有 6 个: Group I、Group III、Group IV、Group V、Group VI 和 Group VII。随着系统内部环境和水质的改变, 两种绝对优势功能群在时空尺度上进行演替, 能够有效指示生境变化。

(4) RDA 分析表明影响绝对优势 FG 功能群的环境因子为浊度、TP、EC 和 pH, 影响 MBFG 功能群的环境因子为 NO_3^- -N、TP、BOD₅ 和 WT, 盐龙湖生态净化系统中 MBFG 功能群的生境响应性优于 FG 功能群。因此, 在夏季选择 MBFG 功能群划分方法研究水源生态净化系统中浮游植物对内部环境和水质变化的响应更加合适。

参考文献:

- [1] Yang Y L, Lu J L, Yu H K, *et al.* Characteristics of disinfection by-products precursors removal from micro-polluted water by constructed wetlands [J]. *Ecological Engineering*, 2016, **93**: 262-268.
- [2] Jing Z Q, He R, Hu Y, *et al.* Practice of integrated system of biofilter and constructed wetland in highly polluted surface water treatment [J]. *Ecological Engineering*, 2015, **75**: 462-469.
- [3] Martín M, Oliver N, Hernández-Crespo C, *et al.* The use of free water surface constructed wetland to treat the eutrophicated waters of lake L'Albufera de Valencia (Spain) [J]. *Ecological Engineering*, 2013, **50**: 52-61.
- [4] 赵晶, 赵和平, 许良峰, 等. 复合人工湿地对水源地区水质净化效果分析 [J]. *环境工程学报*, 2013, **7**(12): 4816-4822.
Zhao J, Zhao H P, Xu L F, *et al.* Analysis of water purification efficiency of integrated constructed wetland in drinking water supply reservoir [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, **7**(12): 4816-4822.
- [5] Yan Q Y, Yu Y H. Metagenome-based analysis: a promising direction for plankton ecological studies [J]. *Science China Life Sciences*, 2011, **54**(1): 75-81.
- [6] Cardoso S J, Roland F, Loverde-Oliveira S M, *et al.* Phytoplankton abundance, biomass and diversity within and between Pantanal wetland habitats [J]. *Limnologia*, 2012, **42**(3): 235-241.
- [7] 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*, 2017, **34**(7): 2611-2617.
- [8] Azhikodan G, Yokoyama K. Spatio-temporal variability of phytoplankton (Chlorophyll-a) in relation to salinity, suspended sediment concentration, and light intensity in a macrotidal estuary [J]. *Continental Shelf Research*, 2016, **126**: 15-26.
- [9] He H, Kang Y H, Liu Z W. Nitrogen inputs enhance phytoplankton growth during sediment resuspension events: a mesocosm study [J]. *Hydrobiologia*, 2015, **744**(1): 297-305.
- [10] Maberly S C, King L, Dent M M, *et al.* Nutrient limitation of phytoplankton and periphyton growth in upland lakes [J]. *Freshwater Biology*, 2002, **47**(11): 2136-2152.
- [11] Tsai C H, Miki T, Chang C W, *et al.* Phytoplankton functional group dynamics explain species abundance distribution in a directionally changing environment [J]. *Ecology*, 2014, **95**

- (12): 3335-3343.
- [12] Shen H L, Li B, Cai Q H, *et al.* Phytoplankton functional groups in a high spatial heterogeneity subtropical reservoir in China[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, **40**(4): 859-869.
- [13] Yu H X, Wu J H, Ma C X, *et al.* Seasonal dynamics of phytoplankton functional groups and its relationship with the environment in river: a case study in northeast China [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2012, **27**(3): 429-441.
- [14] Iglesias-Rodríguez M D, Brown C W, Doney S C, *et al.* Representing key phytoplankton functional groups in ocean carbon cycle models: coccolithophorids [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, **16**(4): 1100.
- [15] 杨丽, 张玮, 尚光霞, 等. 淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3158-3167.
Yang L, Zhang W, Shang G X, *et al.* Succession characteristics of phytoplankton functional groups and their relationships with environmental factors in Dianshan Lake, Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3158-3167.
- [16] 闵文武, 王培培, 李丽娟, 等. 渭河流域浮游植物功能群与环境因子的关系[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(9): 1397-1406.
Min W W, Wang P P, Li L J, *et al.* Relationship between phytoplankton functional groups and environmental factors in the Wei River Basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(9): 1397-1406.
- [17] 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.
- [18] 胡韧, 蓝于倩, 肖利娟, 等. 淡水浮游植物功能群的概念、划分方法及应用[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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Kruk C, Huszar V L M, Peeters E T H M, *et al.* A morphological classification capturing functional variation in phytoplankton [J]. *Freshwater Biology*, 2010, **55**(3): 614-627.
- [22] 于晨, 张萌, 陈宏文, 等. 仙女湖及入湖河流浮游植物功能类群与环境因子的相互关系[J]. *水生生物学报*, 2018, **42**(3): 622-634.
Yu C, Zhang M, Chen H W, *et al.* Relationship between phytoplankton morphology-based functional groups and environmental factors of different habitat in the Lake Xiannü and inflow rivers[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2018, **42**(3): 622-634.
- [23] Wang W D, Zheng J, Wang Z Q, *et al.* Performance of pond-wetland complexes as a preliminary processor of drinking water sources[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, **39**: 119-133.
- [24] 刘磊, 孙涛, 陈慧敏, 等. 暴雨径流对海河干流水质的影响及排干水质要求的确定[J]. *安全与环境学报*, 2018, **18**(4): 1564-1568.
Liu L, Sun T, Chen H M, *et al.* Impact of the storm-water runoff on the water quality of Haihe River and the decisive factors for the water drainage quality demands [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, **18**(4): 1564-1568.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 熊元武, 田永兰, 孙雪薇, 等. 近自然湿地挺水植物对水体 DO 含量的影响[J]. *环境污染与防治*, 2018, **40**(1): 23-27.
Xiong Y W, Tian Y L, Sun X W, *et al.* The influence of emergent plant on DO in the near natural wetland [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2018, **40**(1): 23-27.
- [28] 程曦, 李小平. 淀山湖浮游藻类群落的早期增长[J]. *环境科学*, 2011, **32**(11): 3215-3222.
Cheng X, Li X P. Early growth of phytoplankton community in Dianshan Lake [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(11): 3215-3222.
- [29] 李磊, 李秋华, 焦树林, 等. 小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应[J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4436-4443.
Li L, Li Q H, Jiao S L, *et al.* Response of phytoplankton functional groups to eutrophication in summer at Xiaoguan reservoir [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4436-4443.
- [30] Akhurst D J, Jones G B, Clark M, *et al.* Effects of fish and macrophytes on phytoplankton and zooplankton community structure in a subtropical freshwater reservoir [J]. *Limnologia*, 2017, **62**: 5-18.
- [31] Rangel L M, Soares M C S, Paiva R, *et al.* Morphology-based functional groups as effective indicators of phytoplankton dynamics in a tropical cyanobacteria-dominated transitional river-reservoir system [J]. *Ecological Indicators*, 2016, **64**: 217-227.
- [32] Kruk C, Peeters E T H M, Van Nes E H, *et al.* Phytoplankton community composition can be predicted best in terms of morphological groups [J]. *Limnology and Oceanography*, 2011, **56**(1): 110-118.
- [33] Izaguirre I, Allende L, Escaray R, *et al.* Comparison of morpho-functional phytoplankton classifications in human-impacted shallow lakes with different stable states [J]. *Hydrobiologia*, 2012, **698**(1): 203-216.
- [34] 陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 等. 东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3238-3247.
Chen C C, Rao L, Huang J L, *et al.* Seasonal variation on nutrient limitation for phytoplankton growth in a coastal river-reservoir system, Southeast China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3238-3247.
- [35] 彭水秀, 张坤, 邓道贵, 等. 南漪湖春夏季浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *生物学杂志*, 2019, **36**(1): 35-38, 47.
Peng S X, Zhang K, Deng D G, *et al.* Community structure of phytoplankton and its correlation with environmental factors during spring and summer in Lake Nanyi [J]. *Journal of Biology*, 2019, **36**(1): 35-38, 47.
- [36] 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.

CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM _{2.5} Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM _{2.5} During Autumn and Winter in Yangquan City	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM _{2.5} from Taian City During the Summer	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR)	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil	JI Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Typess on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As ⁵⁺ Stress	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)