

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



2019

Vol.40 No.7

第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)
基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟	谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)
郑州市 PM _{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析	杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)
能见度与 PM _{2.5} 浓度关系及其分布特征	王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)
基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征	白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)
太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源	李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)
办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征	王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦杏春 (3008)
南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征	张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)
黄土丘陵区小流域不同水体氢氧同位素特征	张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)
基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析	王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)
李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响	徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)
水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价	王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)
银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价	田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)
人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例	谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)
漓江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析	唐金平, 张强, 胡漾, 张宇, 聂保伟 (3089)
三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因子分析	付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)
降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响	翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)
绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征	童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)
微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析	刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 彭飞, 王凯军 (3126)
钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性	张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)
基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用	唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)
N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBK5 染料废水	于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)
Cu ²⁺ 对以 NO ₃ ⁻ 为电子受体反硝化过程的影响	买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)
CANON 中试反应器启动及性能优化	孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)
好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响	徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)
有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响	刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)
不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响	吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王佳伟, 张树军 (3195)
ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性	张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)
在线 NaClO 反洗对倒置 A ² O-MBR 系统微生物群落的影响	王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)
基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价	袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)
北京市清水与再生水协同利用优化模型	张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)
N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除	柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)
北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存	周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)
贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险	杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅红 (3249)
紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征	程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)
四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响	陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)
热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归	李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)
鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响	武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)
宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制	王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)
石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)
磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度	湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)
会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较	贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)
湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析	蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)
改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响	李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)
重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应	韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)
不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异	彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)
添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N ₂ O 排放影响	孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)
渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)
不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征	鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)
西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征	廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)
生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响	李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)
《环境科学》征订启事 (3194)	《环境科学》征稿简则 (3222)
信息 (3256, 3284, 3323)	

三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因子分析

付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴*

(西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆市三峡库区植物生态与资源重点实验室, 重庆 400715)

摘要: 以三峡库区重庆段奉节地区草堂河、梅溪河和大溪河三条支流为研究区域, 对蓄水期和非蓄水期库区支流的非回水区和回水区(常年回水区和变动回水区)附石藻类组成及其相关环境因素进行分析。结果表明, 3条支流共发现附石藻类103种, 隶属4门45属, 非回水区67种, 隶属3门34属, 回水区82种(常年回水区64种, 变动回水区41种), 隶属4门34属。蓄水期, 非回水区优势种为变异直链藻、扁圆卵形藻、普通等片藻、锉刀布纹藻和巨颤藻, 回水区优势种为变异直链藻、近缘桥弯藻、普通等片藻、高山立方藻和颗粒直链藻; 非蓄水期, 非回水区优势种为变异直链藻、近缘桥弯藻和扁圆卵形藻, 回水区优势种为巨颤藻、岩栖颤藻、美丽颤藻、尖针杆藻、丝藻、优美平裂藻和小颤藻, 表明非蓄水期不同河段优势藻种差异显著, 而蓄水期不同河段优势藻种差异较小; 非回水区不同时期优势藻种无明显差异, 在非蓄水期常年回水区和变动回水区优势种属差异相对较小, 而蓄水期差异较大。冗余(RDA)分析表明, 附石藻类组成变化是温度、电导率(SPC)、pH、总氮(TN)和总磷浓度(TP)等环境因子共同作用的结果, 各样点优势藻种细胞密度变化主要受氮、磷元素浓度变化的影响。这些结果表明库区不同水文情势不仅影响支流水体环境, 而且对底栖藻类组成变化起着重要的作用。

关键词: 三峡库区; 附石藻类; 水文情势; 群落组成; 影响因子

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-3099-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201812086

Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir

FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, ZHANG Hong-bo, DONG Cong-cong, YANG Yan-jun, SHI Jun-qiong, WU Zhong-xing*

(Chongqing Key Laboratory of Plant Ecology and Resources Research in Three Gorges Reservoir Region, Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: In order to explore the composition of epiphytic algae and its related environmental factors, 12 sampling sites in the natural reaches and the backwater reaches (including perennial backwater sections and fluctuating backwater sections) were investigated among tributaries of the Caotang River, the Meixi River, and the Daxi River in the Fengjie district of the Chongqing section of the Three Gorges Reservoir under different hydrological regimes (i. e., storage and non-storage periods). Results showed that 103 species of epilithic algae belonging to 45 genera and 4 families are found in the 3 tributaries. This included 67 species belonging to 34 genus in the natural sections and 82 species (64 species in perennial backwater sections and 41 species in fluctuating backwater sections) belonging to 34 genera in the backwater sections. During the storage period, the dominant species in the natural sections were *Melosira varians*, *Cocconeis placentula*, *Diatoma vulgure*, *Gyrosigma scalproides*, and *Oscillatoria tenuis*, while the dominant species in the backwater sections were *M. varians*, *Cymbella affinis*, *D. vulgure*, *Eucapsis alpina*, and *M. granulata*. During the non-storage period, the dominant species in the natural sections were *M. varians*, *C. affinis*, and *C. placentula*, whereas the dominant species in the backwater sections were *O. princeps*, *O. rupicola*, *O. formosa*, *Synedra acus*, *Ulothrix* sp., *Merismopedia elegans*, and *O. tenuis*. These results suggested that the compositions of dominant species showed significant differences during the non-storage period, while little difference was found during the storage period. In addition, the dominant species did not show a significant change in the natural sections, but a marked difference was observed in the backwater sections. Similar dominant species were observed in both perennial and fluctuating backwater sections during the non-storage period, but significantly different dominant species were found during the storage period. Redundancy analysis suggested that the composition of epilithic algae was influenced by different environmental factors, such as temperature, electrical conductivity, pH, total nitrogen, and total phosphorus. Indeed, changes in the cell densities of dominant algae at the different sites were mainly affected by temperature and the concentrations of nitrogen and phosphorus. These results suggest that the different hydrological regimes had an important role not only on the reservoir water environment, but also the dynamics of epilithic algal communities.

Key words: Three Gorges Reservoir; epilithic algae; hydrological regime; community composition; environmental factors

收稿日期: 2018-12-10; 修订日期: 2019-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877410); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2017B010)

作者简介: 付君珂(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为藻类生态学, E-mail: 2582536467@qq.com

* 通信作者, E-mail: wuzhx@swu.edu.cn

三峡水库是我国特大型的人工调蓄河道型水库,承载着防洪、发电和航运等重要的任务^[1].然而,由于水库采取枯期蓄水、汛期泄洪的“冬蓄夏排”反季节调度模式,使得库区下游支流形成了差异显著的三类水体:①自然河流型水体(非回水区),该河段完全不受库区蓄水影响;②过渡型水体(变动回水区),该河段水体在水库 145 m 蓄水时为河流型,而在 175 m 蓄水时为类湖泊型;③类湖泊型水体(常年回水区),该河段水位位于 145 m 以下,常年受库区蓄水的影响,形成了流速较低的水体^[2].这 3 种不同类型的水体有着各自不同的水文环境,且受水库蓄水的影响,其水动力条件及水环境条件也发生显著变化^[3].已有研究表明,受 145 m 长期蓄水影响回水段植被结构不完整,水土流失严重,影响了浮游植物群落组成和结构^[4],而受 175 m 蓄水影响,对回水区上游鱼类群落结构产生较大影响^[5],且在不同河段浮游植物群落结构呈现出不同的变化^[6~8].这些研究表明了三峡库区不同水文情势周期蓄水对水生生态系统造成了重要的影响.

藻类是水生生态系统主要的生产者,在水生生态系统中起着重要的作用^[9].因此,藻类常常被作为水质监测的重要指标之一.然而,浮游藻类由于生长不固定、容易迁移和受环境影响变化大等特征,使得其并不能准确地反映水质状况^[10].相反,底栖藻类由于更新时间短,对河流水环境和栖息地环境质量变化反应迅速,且群落变化趋势可预测性较强等特征常被用作河流生物监测和评价^[11~13].

附石藻类作为底栖藻类的一种类型,是指固着生长在水体各种浸没基质——石头表面上的藻类^[14].由于其生物多样性丰富、样本易获取,且对环境变化响应敏感等特点,因此其已被作为河流生态状况的重要指示生物^[15~17].然而,目前针对三峡库区不同水文情势影响下不同水体附石藻类的研究甚少.因此,本研究于 2015 年 8 月(非蓄水期)和 2016 年 2 月(蓄水期)对奉节地区的 3 条库区支流常年回水区、变动回水区与非回水区附石藻类群落组成及其影响因子进行研究.通过对库区在不同水文情势下支流不同河段附石藻类的结构及组成变化,阐明水位变动条件下附石藻类的生态学变化特征及其影响因素,以期为库区的水环境保护和管理提供基础依据.

1 材料与方法

1.1 研究河流状况

在重庆奉节地区的 3 条库区支流梅溪河

(31°05′~31°12′N, 109°08′~109°29′E)、草堂河(31°03′~31°08′N, 109°31′~109°34′E)和大溪河(30°46′~31°00′N, 109°15′~109°31′E)设置 12 个采样点(图 1),其中非回水区和回水区各 6 个样点,非回水区:S1、S2、S3、S4、S5 和 S6;变动回水区:H1、H2 和 H3;常年回水区:H4、H5 和 H6,并于非蓄水期(2015 年 8 月)和蓄水期(2016 年 2 月)对样点进行采样.为了便于比较,每次采样均为当月中旬,尽量选晴天进行.

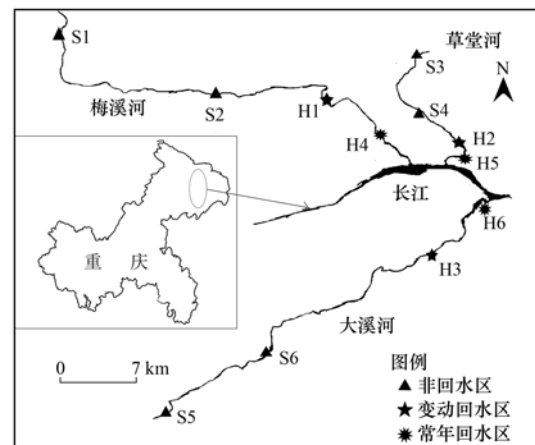


图 1 三峡库区支流样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites in the tributaries of the Three Gorges Reservoir

1.2 水体理化指标测定

各采样点的水温(WT)、pH、电导率(SPC)、溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP)、浊度(Tur)和水下光照(PAR)等参数均采用多参数水质分析仪 DS5/DS5X (Hydrolab, 美国)现场测定;透明度(SD)用塞氏盘测量;水体流速用国产 LS45A 型旋杯式流速仪现场测定.各样点取混合水样带回实验室,参照文献^[18]的方法,并用 Flowsys 流动分析仪(SYSTEA, 意大利)测定以下化学指标:总氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N)、硝氮(NO_3^--N)、总磷(TP)、正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)和高锰酸盐指数.

1.3 附石藻类采集、定性与定量分析

附石藻类采集依照美国环保署(EPA)的采样方法进行采集^[19].将采集的附石藻类样品混匀,分两份进行保存,一份取 50 mL 加入鲁哥氏固定液固定,在 Nikon E-Ci 光学显微镜(Nikon, 日本)下观察和统计,得到硅藻以外的其他藻类的定性数据;另一份取 50 mL 藻液加入福尔马林固定,经酸处理后分别在 1 000 倍油镜下和扫描电子显微镜下对硅藻进行鉴定,获得硅藻定性数据.藻类鉴定参考文献^[20~23].藻类定量分析采取浮游植物计数框进行计数,获得的各样点藻类个体数总和,最后换算为单位面积石块上的藻密度(单位:ind.·m⁻²)^[18].

1.4 数据分析

用 Excel 对数据进行统计整理, 用 Origin 8.5 作图. 用 SPSS 22.0 软件 (IBM) 分析检验非蓄水期与蓄水期附石藻类组成在不同河段的差异显著性. 用 Canoco for Windows 4.5 对物种数据进行除趋势对应分析 (DCA), 4 个轴最大梯度大于 4.0, 选用典范对应分析 (CCA); 如果小于 3.0, 选用冗余分析 (RDA). 本研究中 4 个轴最大梯度均小于 3, 故采用 RDA (冗余分析) 进行物种数据与环境因子的排序分析.

2 结果与分析

2.1 蓄水期与非蓄水期的理化因子变化

不同水文期环境因子变化如表 1 所示. 在非蓄水期, 总氮、氨氮、硝氮、总磷、正磷酸盐、高锰酸盐指数和溶氧分别为 0.27 ~ 2.4、0.01 ~ 0.11、

0.38 ~ 2.23、0.04 ~ 0.12、0.001 ~ 0.118、0.29 ~ 3.93 和 7.26 ~ 18.32 mg·L⁻¹, 而蓄水期, 总氮、氨氮、硝氮、总磷、正磷酸盐、高锰酸盐指数和溶氧分别为 1.11 ~ 2.07、0.01 ~ 0.84、0.57 ~ 1.47、0.09 ~ 0.13、0.080 ~ 0.127、0.01 ~ 0.09 和 8.87 ~ 13.31 mg·L⁻¹. 总氮、氨氮、硝氮、正磷酸盐指数、溶氧和水温等参数在非蓄水期波动较大, 在蓄水期则相对较小; 水温和高锰酸盐指数在非蓄水期高于蓄水期. 回水区正磷酸盐浓度在非蓄水期低于蓄水期; 除 H1 样点蓄水期与非蓄水期流速和透明度没有明显差异, 回水区其余样点则表现出蓄水期流速低于非蓄水期, 而回水区透明度则表现为非蓄水期低于蓄水期. 非蓄水期, 变动回水区正磷酸盐浓度高于常年回水区, 变动回水区 pH 和溶氧却低于常年回水区; 蓄水期, 变动回水区溶氧高于常年回水区, 且蓄水期变动回水区 pH 高于非蓄水期.

表 1 非蓄水期和蓄水期各样点的环境因子
Table 1 Environmental factors at each sampling site under the high and level hydrological regimes

理化参数	非回水区						变动回水区			常年回水区		
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	H1	H2	H3	H4	H5	H6
TN /mg·L ⁻¹	0.47 (1.71)	1.20 (1.24)	1.60 (1.27)	1.88 (1.93)	1.60 (1.11)	1.55 (1.20)	1.18 (2.07)	2.40 (2.06)	2.07 (1.65)	1.09 (1.37)	1.03 (1.85)	1.46 (1.16)
NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	0.01 (0.08)	0.02 (0.08)	0.06 (0.03)	0.06 (0.01)	0.06 (0.03)	0.06 (0.09)	0.01 (0.03)	0.11 (0.01)	0.06 (0.84)	0.01 (0.02)	0.07 (0.04)	0.08 (0.35)
NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	0.38 (1.47)	0.98 (0.83)	1.50 (0.63)	1.75 (1.07)	1.24 (0.85)	1.34 (0.89)	0.89 (1.08)	2.23 (1.43)	1.94 (0.57)	0.84 (1.00)	0.95 (1.22)	1.23 (0.65)
TP /mg·L ⁻¹	0.12 (0.12)	0.10 (0.11)	0.07 (0.12)	0.06 (0.11)	0.08 (0.12)	0.08 (0.13)	0.09 (0.11)	0.07 (0.09)	0.07 (0.11)	0.04 (0.13)	0.07 (0.11)	0.08 (0.10)
PO ₄ ³⁻ -P /mg·L ⁻¹	0.118 (0.082)	0.105 (0.083)	0.004 (0.120)	0.002 (0.107)	0.068 (0.120)	0.051 (0.127)	0.004 (0.120)	0.029 (0.085)	0.017 (0.107)	0.002 (0.107)	0.001 (0.110)	0.01 (0.101)
高锰酸盐指数 /mg·L ⁻¹	0.98 (0.07)	0.28 (0.04)	2.51 (0.06)	2.71 (0.06)	2.72 (0.07)	2.77 (0.04)	0.67 (0.03)	3.62 (0.07)	2.74 (0.08)	0.73 (0.02)	3.93 (0.01)	3.43 (0.09)
pH	7.22 (7.59)	7.27 (7.78)	7.71 (7.89)	7.51 (8.06)	7.14 (7.89)	7.43 (7.66)	7.48 (7.82)	7.32 (7.73)	7.24 (7.93)	7.70 (7.46)	7.79 (8.04)	7.79 (7.80)
SPC	208.6 (237.7)	224.9 (318.9)	601.7 (569.2)	608.4 (621.5)	405.3 (402.8)	450.5 (463.7)	251.4 (365.3)	651.3 (397.7)	384.3 (375.7)	273.1 (386.0)	322.1 (393.9)	338.1 (393.7)
DO /mg·L ⁻¹	9.49 (10.69)	8.11 (10.47)	7.26 (10.77)	7.53 (10.51)	8.50 (13.31)	8.62 (11.59)	12.11 (10.99)	7.50 (10.38)	7.63 (11.77)	14.15 (9.86)	18.32 (9.43)	15.72 (8.87)
透明度/cm	40 (55)	25 (20)	21 (20)	40 (40)	30 (40)	26 (20)	25 (20)	43 (288)	46 (398)	86 (315)	51 (415)	76 (463)
水温/°C	30.59 (10.12)	29.94 (11.04)	27.72 (13.2)	30.59 (12.98)	24.37 (10.24)	25.89 (10.75)	30.89 (13.88)	29.22 (13.01)	25.83 (12.69)	29.69 (13.75)	30.5 (12.83)	30.51 (12.81)
流速/m·s ⁻¹	1.42 (0.80)	1.15 (0.92)	1.01 (0.74)	0.64 (0.71)	0.44 (0.73)	0.80 (0.51)	0.19 (0.20)	1.23 (0.02)	0.44 (0.06)	0.36 (0.05)	0.10 (0.03)	0.58 (0.07)

1) 括号中数值为蓄水期各参数平均值, 括号外数值为非蓄水期各参数平均值

2.2 蓄水期和非蓄水期各河段附石藻类的物种组成

3 条支流共发现附石藻类 103 种, 隶属 4 门 45 属, 其中非回水区 67 种, 隶属 3 门 34 属, 回水区 82 种 (常年回水区 64 种, 变动回水区 41 种), 隶属 4 门 34 属. 蓄水期 [图 2(b)] 藻密度显著高于非蓄

水期 [图 2(a)], 且蓄水期以硅藻占据明显优势.

非回水区, 非蓄水期 and 蓄水期均以硅藻占优势, 硅藻平均藻密度分别为 643 ind.·m⁻² 和 9088 ind.·m⁻². 回水区, 非蓄水期在 H1 和 H2 样点绿藻和硅藻为优势种, 在 H1 样点藻密度均为 262 ind.·m⁻², 在 H2 样点则分别为 22 ind.·m⁻² 和 39

ind. $\cdot$ m $^{-2}$, H3 以绿藻、硅藻和黄藻为优势种, 藻密度分别为 22、44 和 52 ind. $\cdot$ m $^{-2}$, H4、H5 和 H6 均以蓝藻、绿藻和硅藻为优势种, 平均藻密度分别为 491、69 和 175 ind. $\cdot$ m $^{-2}$; 而蓄水期 H1 样点以蓝藻和硅藻为优势种, 藻密度分别为 3 037 ind. $\cdot$ m $^{-2}$ 和 2 928 ind. $\cdot$ m $^{-2}$, 其余样点均以硅藻占绝对优势, 平均藻密度为 4 643 ind. $\cdot$ m $^{-2}$.

在非蓄水期变动回水区, 主要以绿藻和硅藻占

优势, 平均藻密度为 102 ind. $\cdot$ m $^{-2}$ 和 115 ind. $\cdot$ m $^{-2}$, 而在常年回水区则为蓝藻和硅藻占优势, 平均藻密度为 491 ind. $\cdot$ m $^{-2}$ 和 175 ind. $\cdot$ m $^{-2}$; 在蓄水期变动回水区, 除 H1 样点以蓝藻和硅藻为优势种外, H2 和 H3 样点以硅藻占绝对优势, 藻密度为 5 746 ind. $\cdot$ m $^{-2}$ 和 2 972 ind. $\cdot$ m $^{-2}$, 而常年回水区, 各样点均以硅藻占优势, 平均藻密度达 5 404 ind. $\cdot$ m $^{-2}$.

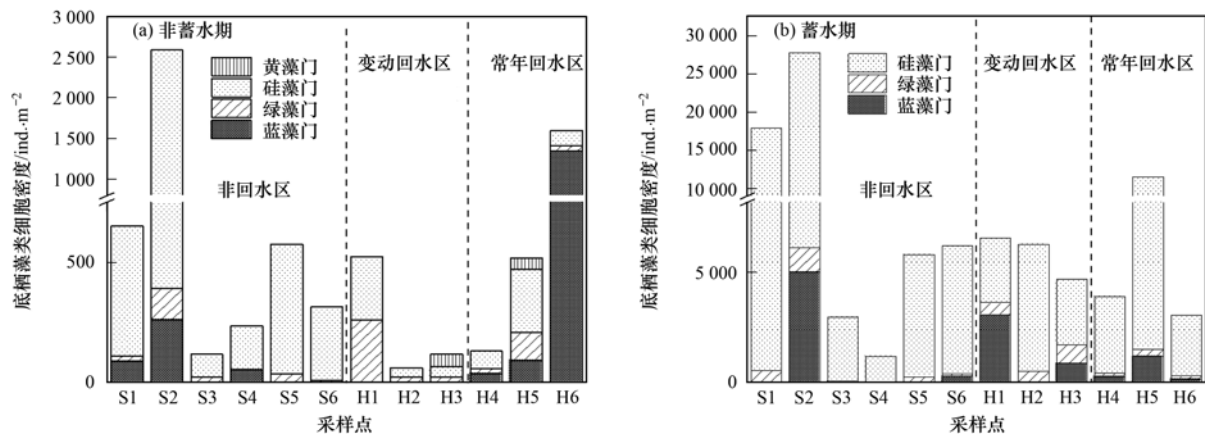


图2 非蓄水与蓄水期3条支流各样点附石藻细胞密度

Fig. 2 Density of epilithic algae at each sampling site during the non-storage and storage periods

2.3 蓄水期和非蓄水期各河段附石藻类的优势种组成

进一步以相对丰度大于 5% 划分优势种, 发现蓄水期和非蓄水期不同河段优势藻种 17 种[图 3(a)].

在非蓄水期, 非回水区优势种为变异直链藻、近缘桥弯藻和扁圆卵形藻, 相对丰度分别为 42.08%、15.03% 和 7.32%; 回水区优势种为巨颤藻 (6.95%)、岩栖颤藻 (14.94%)、美丽颤藻

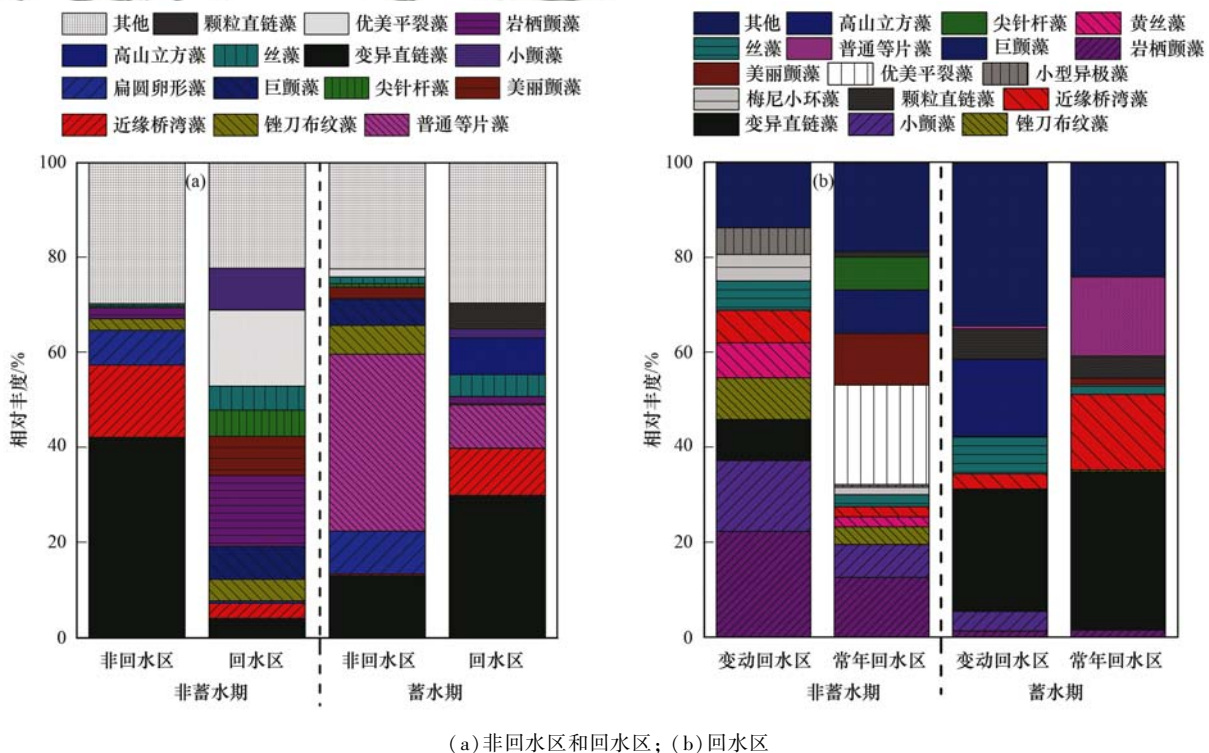


图3 不同水位期非回水区和回水区及变动回水区和常年回水区优势种相对丰度

Fig. 3 Relative abundance of dominant species in the natural reaches and the backwater reaches, and in the perennial backwater sections and the fluctuating backwater sections under different hydrological regimes

(8.28%)、尖针杆藻(5.47%)、丝藻(5.08%)、优美平裂藻(15.98%)和小颤藻(8.88%)。在蓄水期,非回水区优势种为变异直链藻(12.97%)、扁圆卵形藻(9.02%)、普通等片藻(37.33%)、锉刀布纹藻(6.08%)和巨颤藻(5.51%);而回水区优势种为变异直链藻(29.81%)、普通等片藻(99.11%)、近缘桥弯藻(9.9%)、高山立方藻(7.72%)和颗粒直链藻(5.43%),其中蓄水期变异直链藻与普通等片藻在非回水区和回水区均为优势种。

对变动回水区和常年回水区优势藻种研究发现[图3(b)],在非蓄水期变动回水区,优势藻种为岩栖颤藻(22.36%)、小颤藻(14.89%)、变异直链藻(8.67%)、锉刀布纹藻(8.66%)、黄丝藻(7.41%)、近缘桥弯藻(6.78%)、丝藻(6.16%)、梅尼小环藻(5.53%)和小型异极藻(5.53%),而常年回水区,优势种则为优美平裂藻(20.97%)、岩栖颤藻(12.62%)、美丽颤藻(10.87%)、巨颤藻(9.13%)、尖针杆藻(6.99%)和小颤藻(6.99%)。蓄水期变动回水区,优势种为变异直链藻(25.83%)、高山立方藻(16.29%)、丝藻(7.76%)和颗粒直链藻(6.36%),而常年回水区,优势种为变异直链藻(33.41%)、普通等片藻(16.76%)和近缘桥弯藻(15.96%)。非蓄水期岩栖颤藻和小颤藻在变动回水区和常年回水区均为优势种;蓄水期变异直链藻在变动回水区和常年回水区均为优势种。

2.4 不同时期各河段优势藻种与环境因子的 RDA 分析

对样点和环境因子进行 RDA 分析发现[图 4

(a)],各样点受蓄水影响较大,蓄水期与非蓄水期出现明显的分区。非蓄水期非回水区、变动回水区和常年回水区环境因子没有明显差异,而在蓄水期非回水区样点和回水区样点出现明显差异,其中 H1 样点由于透明度明显降低,而流速则增加,从而使得 H1 样点偏离其余回水区样点。

对非蓄水期、蓄水期非回水区和蓄水期回水区优势藻种(其物种名称及代码见表 2)与环境因子关系分析表明,在非蓄水期、蓄水期的非回水区和蓄水期的回水区,物种与环境因子排序轴的相关性系数均为 1,前两轴的特征值分别为 0.497 和 0.309、0.647 和 0.275、0.932 和 0.052,且前两轴对数据的解释量分别达到了 80.7%、92.2% 和 98.4%(表 3)。在非蓄水期,蓝藻门优势种物种(A1:岩栖颤藻、A2:小颤藻、A3:美丽颤藻、A4:巨颤藻和 A5:优美平裂藻)、绿藻门优势种(B:丝藻)和硅藻门优势种(C8:普通等片藻)与透明度和溶氧呈正相关关系,而与正磷酸盐和总磷浓度呈负相关;而硅藻门优势种(C1:近缘桥弯藻、C2:小型异极藻、C3:扁圆卵形藻、C4:变异直链藻和 C5:梅尼小环藻)则刚好相反;C7(尖针杆藻)和 D(黄丝藻)与高锰酸盐指数、电导率、总氮、氨氮和硝氮浓度呈正相关,与水温 and 流速呈负相关,而 C6(锉刀布纹藻)则刚好相反[图 4(b)]。总体而言,在非蓄水期,黄藻受氮元素和水温等环境因子的影响较大,而在水温、透明度和溶氧高的情况下有利于蓝藻的生长,在低温和磷元素浓度高的情况下有利于大部分硅藻的生长。

表 2 RDA 分析中的附石藻类优势藻种代码
Table 2 Codes of dominant species of epilithic algae for RDA

编号	物种	拉丁学名	编号	物种	拉丁学名
	蓝藻门	Cyanophyta		硅藻门	Bacillariophyta
A1	岩栖颤藻	<i>Oscillatoria rupicola</i>	C1	近缘桥弯藻	<i>Cymbella affinis</i>
A2	小颤藻	<i>Oscillatoria tenuis</i>	C2	小型异极藻	<i>Gomphonema parvulum</i> var. <i>micropus</i>
A3	美丽颤藻	<i>Oscillatoria formosa</i>	C3	扁圆卵形藻	<i>Cocconeis placentula</i>
A4	巨颤藻	<i>Oscillatoria princeps</i>	C4	变异直链藻	<i>Melosira varians</i>
A5	优美平裂藻	<i>Merismopedia elegans</i>	C5	梅尼小环藻	<i>Cyclotella meneghiniana</i>
A6	高山立方藻	<i>Eucapsis alpina</i>	C6	锉刀布纹藻	<i>Gyrosigma scalproides</i>
	绿藻门	Chlorophyta	C7	尖针杆藻	<i>Synedra acus</i>
B	丝藻	<i>Ulothrix</i> sp.	C8	普通等片藻	<i>Diatoma vulgure</i>
	黄藻门	Xanthophyta	C9	颗粒直链藻	<i>Melosira granulata</i>
D	黄丝藻	<i>Tribonema</i> sp.			

在蓄水期非回水区,A3、A4、A5、B、C4、C5、C6(高山立方藻)和 C8 与氨氮和总磷浓度呈正相关关系,而 C1、C2 和 C3 则与正磷酸盐浓度呈正相关关系,与总磷浓度呈负相关关系[图 4(c)];在蓄水期回水段,A1、C1、C3、C4、C5 和 C8 与高锰酸

盐指数、氨氮和总磷浓度呈正相关关系,与总氮和硝氮浓度呈负相关关系,而 A2、B、C2、C6 和 C7 则刚好相反;A6 与流速呈正相关关系,与透明度呈负相关关系,而 C9(颗粒直链藻)则刚好相反[图 4(d)]。

表 3 蓄水期和非蓄水期各河段主要优势种与环境因子的 RDA 分析

Table 3 RDA analysis between dominant species and environmental factors in the different river sections and under the different hydrological regime

	参数指标	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4
非蓄水期	特征值	0.497	0.309	0.089	0.061
	物种-环境相关性	1	1	1	1
	物种数据积累变化百分率/%	49.7	80.7	89.6	96.4
	物种-环境相关性累计变化百分率/%	49.7	80.7	89.6	96.4
蓄水期非回水区	特征值	0.647	0.275	0.005 5	0.002 2
	物种-环境相关性	1	1	1	1
	物种数据积累变化百分率/%	64.7	92.2	97.7	99.8
	物种-环境相关性累计变化百分率/%	64.7	92.2	97.7	99.8
蓄水期回水区	特征值	0.932	0.052	0.013	0.002
	物种-环境相关性	1	1	1	1
	物种数据积累变化百分率/%	93.2	98.4	99.7	99.9
	物种-环境相关性累计变化百分率/%	93.2	98.4	99.7	99.9

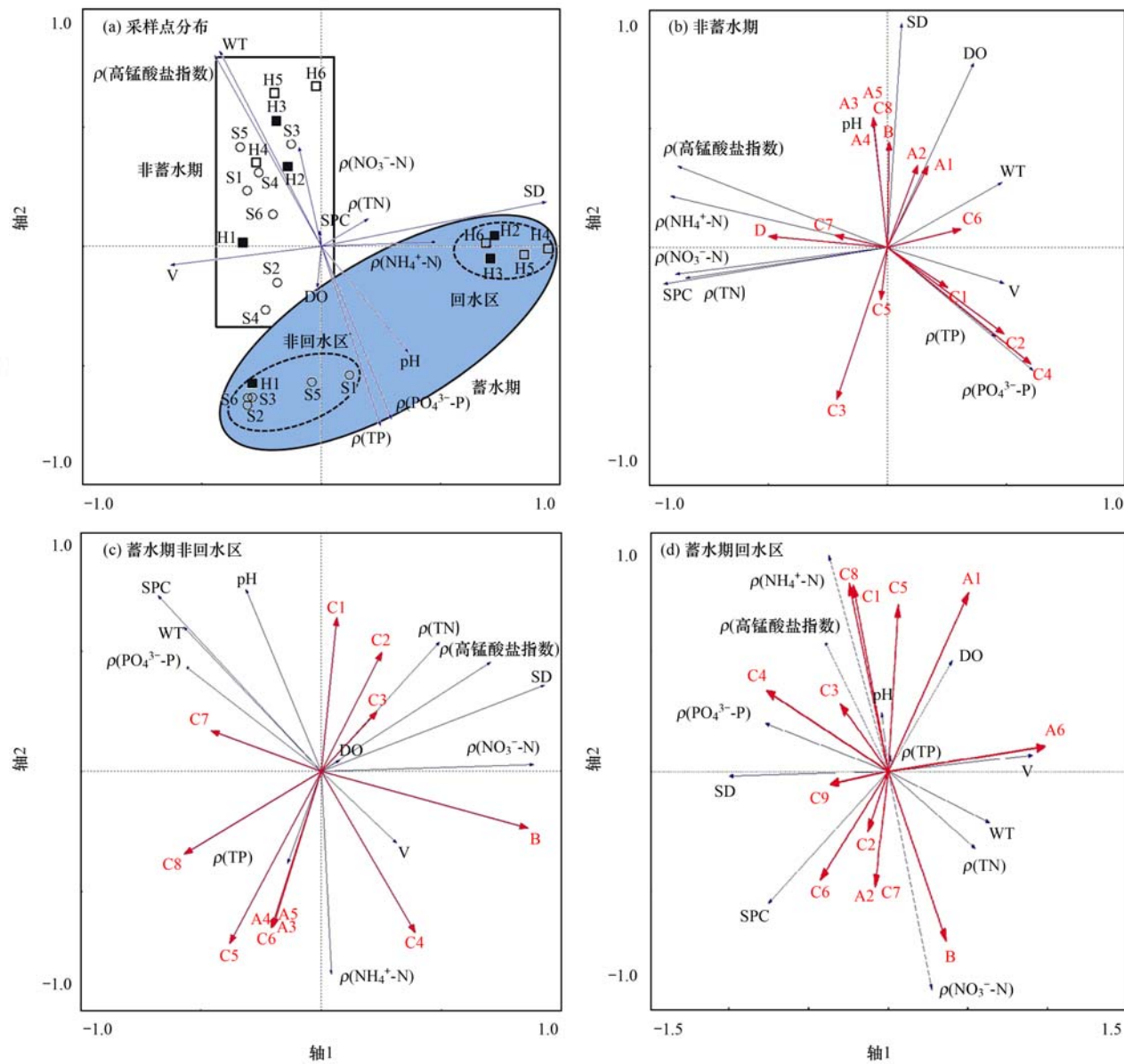


图 4 非蓄水期和蓄水期各河段主要优势种与环境因子的 RDA 排序图

Fig. 4 RDA ordination diagram between dominant species and environmental factors in different river sections and during the different hydrological regime

3 讨论

贾兴焕等^[24]对库区支流香溪河附石藻类时空动态的研究表明, 香溪河附石藻类密度冬、春季节高于夏、秋季节. 本研究对奉节地区库区支流不同河段附石藻类组成及分布情况的调查中也发现非蓄水期的附石藻类细胞密度明显低于蓄水期(图 2), 表明冬季温度有利于附石藻类的生长. 刘奕伶等^[25]对支流古夫河的研究中发现在不同时期优势种差异显著. 张蔚珍等^[26]对西湖附石藻类的研究中发现不同季节附石藻类优势种不同. 在本研究也发现非蓄水期与蓄水期在不同河段优势藻种有明显差异($P < 0.01$). 在非蓄水期非回水区以硅藻占优势, 回水区则为蓝藻、绿藻和硅藻为优势种; 在蓄水期非回水区和回水区均以附石硅藻占据明显优势, 主要优势种为变异直链藻和普通等片藻. 非回水区蓄水期和非蓄水期变异直链藻和扁圆卵形藻均作为优势种出现, 主要优势藻种无明显差异^[27]. 而回水区不同时期优势藻种出现差异, 对常年回水区和变动回水区进一步分析发现, 在非蓄水期两个河段均以颤藻占据明显优势; 在蓄水期主要优势种均为变异直链藻(图 3). 这些结果表明了三峡库区水文情势变动对附石藻类群落组成具有显著的影响, 使得不同水情期主要优势藻种不同, 对环境变化呈现出不同的指示特征.

已有研究发现水环境的变化对附石藻类的组成和结构有直接影响^[28]. 在浅水湖泊中附石藻类的空间异质性受水体中氮、磷等营养水平的制约^[29, 30], TP 浓度达到 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时敏感硅藻大量减少, 达到 $0.065 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时敏感硅藻几乎消失, 在 $0.082 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时硅藻群落结构则发生显著改变^[14]. 在河流中, 氮和磷浓度也是影响底栖藻类群落变动的主要因子^[31]. 此外, 水体中氮、磷浓度增加, 导致了附植藻类的生物量显著增加^[32]. 对丹江口水库的研究中发现, 在水库泄水后总磷浓度下降^[33]. 本研究也发现总磷浓度在蓄水期高于非蓄水期, 总氮浓度差异不大(表 1), 然而, 附石藻类细胞密度在蓄水期远高于非蓄水期(图 2), 表明库区附石藻类群落结构变化与总磷浓度的变化显著相关, 支持了总磷浓度增加会增加硅藻的百分比^[14]与附着藻类生物量增加的结论^[34, 35]. 氨氮可以通过食物链的传递作用决定以藻类为食的寡食者和沉积物收集者的密度, 从而反作用于底栖藻类, 导致底栖藻类的分布和数量明显发生变化^[36]. 前人研究也发现氨氮在蓝藻水华形成过程中具有重要作用^[37]. 室内研究中则发现在所设定的浓度内氨氮

能够抑制藻类的生长, 且浓度越高, 抑制越明显^[38]. 同时斜生栅藻对氨氮浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时具有较高的去除率^[39]. 本研究发现蓄水期与非蓄水期氨氮并未表现出明显的差异(表 1), 表明氨氮对库区底栖藻类分布和数量并未有显著的影响. Potapova 等^[40]认为硅藻群落的变化是水体电导率和营养盐综合效应的结果. 本研究 RDA 分析结果也发现总磷、正磷酸盐浓度和电导率的增加均有助于增加硅藻细胞密度(图 4), 表明电导率等是影响附石藻类群落的重要环境因子^[41~43]. Leira 等^[44]在研究中发现硅藻的组成与温度关系密切, 在本研究非蓄水期水温在 $24.37 \sim 30.59^\circ\text{C}$, 而蓄水期水温则在 $10.12 \sim 13.88^\circ\text{C}$ 之间, 表明在冬季温度较低可能更适合附石藻类尤其是硅藻的生长^[24], 而在夏季温度较高附石藻类密度较低, 优势藻种则为蓝藻、绿藻和硅藻^[45], 在本研究中也发现相似的结果, 即非蓄水期(2015 年 8 月)蓝、绿、硅藻为共优势种, 蓄水期(2016 年 2 月)主要以硅藻为优势种.

在非回水区不同时期优势藻种无明显差异, 但主要优势藻种发生了演替现象, 推测在非蓄水期非回水区水位较低、水体搅动较大, 比较适宜变异直链藻生活^[43], 而在蓄水期水位升高, 使得更适宜于持续层水体的普通等片藻占据明显优势^[46], 使得主要优势藻种由非蓄水期的变异直链藻演替为蓄水期的普通等片藻.

在回水区非蓄水期优势藻种为颤藻、丝藻和尖针杆藻, 然而, 由于蓄水影响使得回水区在蓄水期流速显著降低, 主要优势藻种为变异直链藻和桥弯藻, 这与在缓流的情况下变异直链藻有升高趋势的结果相一致^[47]. Bennion^[48]的研究表明, 针杆藻主要受透光条件影响, 受营养的影响较小, 本研究中非蓄水期回水区透明度比非回水区高, 表明透明度的增加有利于针杆藻的生长. 总之, 从 3 条支流水质来看, 3 条支流氮、磷浓度已经达到富营养化标准^[49]. 有研究表明各物种在不同区域内表现出特定的物种-环境关系, 会导致同一物种在不同区域呈现不同的指示特征^[50, 51].

4 结论

(1) 奉节地区 3 条支流, 共鉴定出附石藻类 103 种, 隶属 4 门 45 属, 其中非回水区 67 种, 回水区 82 种(常年回水区 64 种, 变动回水区 41 种).

(2) 非蓄水期, 非回水区优势种为变异直链藻等硅藻, 回水区优势种为巨颤藻等蓝藻; 蓄水期非回水区和回水区均以变异直链藻等硅藻为优势种.

非回水区蓄水期和非蓄水期优势藻种差异不大,而回水区则变化显著。

(3) 附石藻类群落组成受众多环境因子共同作用,而各样点优势藻种细胞密度变化主要受氮、磷元素浓度变化的影响。

参考文献:

- [1] Stone R. Three gorges dam: into the unknown[J]. *Science*, 2008, **321**(5889): 628-632.
- [2] Sha Y K, Wei Y P, Li W P, *et al.* Artificial tide generation and its effects on the water environment in the backwater of Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, **528**: 230-237.
- [3] 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 等. 三峡水库 172.5 m 蓄水过程对香溪河库湾水体富营养化的影响[J]. *中国科学: 技术科学*, 2010, **40**(4): 358-369.
Yang Z J, Liu D F, Ji D B, *et al.* Influence of the impounding process of the Three Gorges Reservoir up to water level 172.5 m on water eutrophication in the Xiangxi Bay[J]. *Science China Technological Sciences*, 2010, **53**(4): 1114-1125.
- [4] 陈森, 苏晓磊, 黄慧敏, 等. 三峡库区支流生境因子对库区蓄水的响应[J]. *生态学报*, 2018, **38**(4): 1478-1486.
Chen M, Su X L, Huang H M, *et al.* Response of habitat factors to reservoir impoundment in tributaries in the Three Gorges Reservoir Region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(4): 1478-1486.
- [5] 杨志, 唐会元, 朱迪, 等. 三峡水库 175 m 试验性蓄水期库区及其上游江段鱼类群落结构时空分布格局[J]. *生态学报*, 2015, **35**(15): 5064-5075.
Yang Z, Tang H Y, Zhu D, *et al.* Spatiotemporal patterns of fish community structures in the Three Gorges Reservoir and its upstream during the 175-m-deep impoundment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(15): 5064-5075.
- [6] 姜伟, 周川, 纪道斌, 等. 三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2326-2335.
Jiang W, Zhou C, Ji D B, *et al.* Comparison of relationship between conduction and algal bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2326-2335.
- [7] 杨浩, 曾波, 孙晓燕, 等. 蓄水对三峡库区重庆段长江干流浮游植物群落结构的影响[J]. *水生生物学报*, 2012, **36**(4): 715-723.
Yang H, Zeng B, Sun X Y, *et al.* Effect of impoundment on community structure of the phytoplankton in the main stream of the Three Gorges Reservoir of Chongqing[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2012, **36**(4): 715-723.
- [8] 张晟, 刘景红, 黎莉莉, 等. 三峡水库成库初期营养盐与浮游植物分布特征[J]. *环境科学*, 2006, **27**(6): 1056-1061.
Zhang S, Liu J H, Li L L, *et al.* Distribution features of nutrient and phytoplankton in incipient Three Gorges Reservoir[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2006, **27**(6): 1056-1061.
- [9] Cardinale B J, Palmer M A, Collins S L. Species diversity enhances ecosystem functioning through interspecific facilitation[J]. *Nature*, 2002, **415**(6870): 426-429.
- [10] Jia Y H, Dan J, Zhang M, *et al.* Growth characteristics of algae during early stages of phytoplankton bloom in Lake Taihu, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(2): 254-261.
- [11] Round F E. Diatoms in river water-monitoring studies[J]. *Journal of Applied Phycology*, 1991, **3**(2): 129-145.
- [12] Van Dam H, Mertens A, Sinkeldam J. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands[J]. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*, 1994, **28**(1): 117-133.
- [13] Chessman B, Gowns I, Currey J, *et al.* Predicting diatom communities at the genus level for the rapid biological assessment of rivers[J]. *Freshwater Biology*, 1999, **41**(2): 317-331.
- [14] Smucker N J, Becker M, Detenbeck N E, *et al.* Using algal metrics and biomass to evaluate multiple ways of defining concentration-based nutrient criteria in streams and their ecological[J]. *Ecological Indicators*, 2013, **32**: 51-61.
- [15] Black R W, Moran P W, Frankforter J D. Response of algal metrics to nutrients and physical factors and identification of nutrient thresholds in agricultural streams[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **175**(1-4): 397-417.
- [16] Potapova M, Charles D F. Diatom metrics for monitoring eutrophication in rivers of the United States[J]. *Ecological Indicators*, 2007, **7**(1): 48-70.
- [17] Porter S D, Mueller D K, Spahr N E, *et al.* Efficacy of algal metrics for assessing nutrient and organic enrichment in flowing waters[J]. *Freshwater Biology*, 2008, **53**(5): 1036-1054.
- [18] 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.
- [19] Lazorchak J M, Klemm D J, Peck D V. Environmental monitoring and assessment program- surface waters: field operations and methods for measuring the ecological condition of wadeable streams[R]. EPA/620/R-94/004F, Washington: EPA, 1998, 119-132.
- [20] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 300-416.
Hu H J, Wei Y X. The freshwater algae of China: systematics, taxonomy and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006. 300-416.
- [21] Krammer K, Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae 3. teil: centrales, fragilariaceae, eunotiaceae[A]. In: Ettl H, Gerloff J, Heynig H, *et al.* (Eds.). *Süßwasserflora von Mitteleuropa* [M]. Jena: Gustav Fischer Verlag, 1991. 1-576.
- [22] 朱蕙忠, 陈嘉佑. 中国西藏淡水藻[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [23] 中国科学院中国孢子植物志编辑委员会. 中国淡水藻志(第一至二十卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1988-2016.
- [24] 贾兴焕, 吴乃成, 唐涛, 等. 香溪河水系附石藻类的时空动态[J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(4): 881-886.
Jia X H, Wu N C, Tang T, *et al.* Spatiotemporal variation of epilithic algae in Xiangxi River system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, **19**(4): 881-886.
- [25] 刘奕伶, 葛继稳, 李艳元, 等. 古夫河着生藻类优势种体积与水质因子的相关性研究[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(7): 2182-2191.
Liu Y L, Ge J W, Li Y Y, *et al.* Correlations between the volume of dominant periphytic algae species and the water quality parameters in Gufu River[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(7): 2182-2191.
- [26] 张蔚珍, 于佳, 夏午来, 等. 西湖湖西浮游与着生藻类季节变化及相互关系[J]. *水生生物学报*, 2017, **41**(4): 896-903.
Zhang W Z, Yu J, Xia W L, *et al.* Seasonal variation of phytoplankton and periphyton and their relationships in the western region of the west lake[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*,

- 2017, **41**(4): 896-903.
- [27] 杨燕君, 徐沙, 刘瑞, 等. 基于附石藻类生物完整性指数对汝溪河水生态系统健康的评价[J]. 水生生物学报, 2017, **41**(1): 228-237.
Yang Y J, Xu S, Liu R, *et al.* Using epilithic algae assemblages to assess stream health of the Ruxi River, China [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, **41**(1): 228-237.
- [28] Muscio C. The diatom pollution tolerance index: assigning tolerance values [R]. Austin: Watershed Protection & Development Review Department, 2002.
- [29] 汤婷, 任泽, 唐涛, 等. 基于附石硅藻的三峡水库入库支流氮、磷阈值[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(8): 2670-2678.
Tang T, Ren Z, Tang T, *et al.* Total nitrogen and total phosphorus thresholds for epilithic diatom assemblages in inflow tributaries of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(8): 2670-2678.
- [30] 宋玉芝, 薛艳, 徐建强, 等. 太湖附泥藻类生物量空间分布及其与环境营养盐的关系[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(11): 4178-4186.
Song Y Z, Xue Y, Xu J Q, *et al.* Spatial distribution of epipellic algal biomass and its relationship with the environmental nutrients in Lake Taihu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(11): 4178-4186.
- [31] Leland H V, Porter S D. Distribution of benthic algae in the upper Illinois River basin in relation to geology and land use [J]. *Freshwater Biology*, 2010, **44**(2): 279-301.
- [32] Blumenshine S C, Vadeboncoeur Y, Lodge D M, *et al.* Benthic-pelagic links: responses of benthos to water-column nutrient enrichment [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 1997, **16**(3): 466-479.
- [33] 李冰, 王亚, 郑钊, 等. 丹江口水库调水前后表层沉积物营养盐和重金属时空变化[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3591-3600.
Li B, Wang Y, Zheng Z, *et al.* Temporal and spatial changes in sediment nutrients and heavy metals of the Danjiangkou Reservoir before and after water diversion of the mid-route project [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3591-3600.
- [34] Pizarro H, Vinocur A, Tell G. Periphyton on artificial substrata from three lakes of different trophic status at Hope Bay (Antarctica) [J]. *Polar Biology*, 2002, **25**(3): 169-179.
- [35] Quinlan E L, Philips E J, Donnelly K A, *et al.* Primary producers and nutrient loading in Silver Springs, FL, USA [J]. *Aquatic Botany*, 2008, **88**(3): 247-255.
- [36] 渠晓东, 曹明, 邵美玲, 等. 雅砻江(锦屏段)及其主要支流的大型底栖动物[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(1): 158-162.
Qu X D, Cao M, Shao M L, *et al.* Macrobenthos in Jinping reach of Yalongjiang River and its main tributaries [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, **18**(1): 158-162.
- [37] 彭宇科, 路俊玲, 陈慧萍, 等. 蓝藻水华形成过程对氮磷转化功能细菌群的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 4938-4945.
Peng Y K, Lu J L, Chen H P, *et al.* Dynamic changes of nitrogen-transforming and phosphorus-accumulating bacteria along with the formation of cyanobacterial blooms [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 4938-4945.
- [38] 刘炎, 石小荣, 崔益斌, 等. 高浓度氨氮胁迫对纤细裸藻的毒性效应[J]. 环境科学, 2013, **34**(11): 4386-4391.
Liu Y, Shi X R, Cui Y B, *et al.* Toxic effects of high concentrations of ammonia on *Euglena gracilis* [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(11): 4386-4391.
- [39] 刘盼, 贾成霞, 杨慕, 等. 2种微藻对养殖水体中氨氮和亚硝态氮的净化作用[J]. 水产科学, 2018, **37**(3): 389-393.
Liu P, Jia C X, Yang M, *et al.* Removal of ammonia and nitrite nitrogen in aquaculture water by two species of microalgae [J]. *Fisheries Science*, 2018, **37**(3): 389-393.
- [40] Potapova M, Charles D F. Distribution of benthic diatoms in U. S. rivers in relation to conductivity and ionic composition [J]. *Freshwater Biology*, 2010, **48**(8): 1311-1328.
- [41] Walker C E, Pan Y D. Using diatom assemblages to assess urban stream conditions [J]. *Hydrobiologia*, 2006, **561**(1): 179-189.
- [42] Chen X, Zhou W Q, Pickett S T A, *et al.* Diatoms are better indicators of stream conditions: A case study in Beijing, China [J]. *Ecological Indicators*, 2016, **60**(1): 265-274.
- [43] Leland H V. Distribution of phyto-benthos in the Yakima River Basin, Washington, in relation to geology, land use and other environmental factors [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1995, **52**(5): 1108-1129.
- [44] Leira M, Sabater S. Diatom assemblages distribution in Catalan rivers, NE Spain, in relation to chemical and physiographical factors [J]. *Water Research*, 2005, **39**(1): 73-82.
- [45] Eloranta P V. Periphyton growth and diatom community structure in a cooling water pond [J]. *Hydrobiologia*, 1982, **96**(3): 253-265.
- [46] Reynolds C S. The ecology of freshwater phytoplankton [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- [47] 臧小苗, 张远, 林佳宁, 等. 2009年与2014年太子河流域附石藻群落结构变化及其与水环境的关系[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(6): 1057-1067.
Zang X M, Zhang Y, Lin J N, *et al.* Variation of periphyton community structure in 2009, 2014 and their relationship with environmental factors in Taizi River basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(6): 1057-1067.
- [48] Bennion H. A diatom-phosphorus transfer function for shallow, eutrophic ponds in southeast England [J]. *Hydrobiologia*, 1994, **275-276**(1): 391-410.
- [49] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [50] Chambers P A, Culp J M, Roberts E S, *et al.* Development of environmental thresholds for streams in agricultural watersheds [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, **41**(1): 1-6.
- [51] Loughheed V L, Parker C A, Stevenson R J. Using non-linear responses of multiple taxonomic groups to establish criteria indicative of wetland biological condition [J]. *Wetlands*, 2007, **27**(1): 96-109.

CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)