

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

### 冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期  
Vol.42 No.7

目次

|                                                              |                                                            |
|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素 .....                                       | 李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)                         |
| 新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM <sub>2.5</sub> 的影响 .....               | 逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)                               |
| 基于网格的长三角 PM <sub>2.5</sub> 分布影响因素及交互效应 .....                 | 黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)                                       |
| ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用 .....                           | 李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)            |
| 中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析 .....                                | 赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 李志健, 王格慧 (3127)       |
| 四川盆地 PM <sub>2.5</sub> 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析 .....             | 李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)                     |
| 河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用 .....                           | 邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)                              |
| 九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应 .....                              | 黄亚玲, 黄金良 (3156)                                            |
| 滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性 .....                                   | 袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)                               |
| 白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析 .....                          | 张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)            |
| 镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价 .....                     | 原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)           |
| 洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险 .....                                | 刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)                |
| 苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价 .....                              | 白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)                   |
| 武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价 .....                          | 朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)                              |
| 升金湖河湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析 .....                               | 崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)                                |
| 青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析 .....                                      | 寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)                |
| 三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析 .....                                | 何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)                    |
| 哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子 .....                              | 路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)                           |
| 湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应 .....                                 | 居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)                                |
| 补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征 .....                                | 赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海森, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)              |
| 蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征 .....                                   | 李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)                |
| 长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例 .....                          | 马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)                         |
| 长江下游居民区降水地表径流的污染特征 .....                                     | 郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)                              |
| 潮河流域降雨径流事件污染物输出特征 .....                                      | 包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)                                         |
| 不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响 .....                               | 单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)              |
| 基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估 .....                                | 秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)                          |
| 蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性 .....                                   | 李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸣 (3348)                                  |
| 污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布 .....                              | 王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)                                        |
| 基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因 .....                             | 杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)                   |
| 石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析 .....                           | 唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月月, 陈怡雯, 周帅 (3375)                |
| 一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水 .....                           | 吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)                          |
| 外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能 .....                                   | 唐义, 马懿文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)                                |
| 臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响 .....                             | 吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)                 |
| 间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷 .....                              | 张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张富国, 张杰 (3405)                               |
| 提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响 .....                             | 古铂铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)                         |
| 低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析 .....                            | 钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)                                  |
| 矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化 .....                                      | 张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)                                  |
| 2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氮排放的影响 .....                      | 王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)                   |
| 麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氮挥发排放的影响 .....                            | 韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)                          |
| 水肥管理对热带地区双季稻田 CH <sub>4</sub> 和 N <sub>2</sub> O 排放的影响 ..... | 李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458) |
| 耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径 .....                                  | 杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)                |
| 铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响 .....                                  | 赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)                        |
| 农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价 .....                          | 陈莹, 刘汉燚, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)                               |
| 亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例 .....                   | 刘旭, 王训, 王定勇 (3507)                                         |
| 深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征 .....                                | 林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)                       |
| 同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选 .....                                   | 周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)                |
| 两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复 .....                                | 袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)                              |
| 青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征 .....                                    | 刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)               |
| 成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析 .....                                | 刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)                     |
| 土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异 .....                                  | 席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)                     |
| 《环境科学》征订启事 (3315)                                            |                                                            |
| 《环境科学》征稿简则 (3357)                                            |                                                            |
| 信息 (3391, 3441, 3564)                                        |                                                            |



# 三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析

何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 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:** 浮游植物群落稳定性变化不仅带来一系列水体生态环境变化,而且也影响了水体生态系统的服务功能。为了揭示库区水体浮游植物群落稳定性变化,分别于春季、夏季、秋季和冬季对三峡库区支流花溪河的11个样点进行浮游植物采集,并对资源利用效率( $RUE_{pp}$ )、物种丰富度( $S$ )、物种均匀度( $J$ )和群落更替值( $BC$ )进行研究。结果表明,花溪河全年共检测出藻类8门103属380种,春季、夏季、秋季和冬季分别采集到264、181、197和183种,绿藻种类最多,其次是硅藻、裸藻和蓝藻;S0样点物种数量和细胞密度最小,S2样点物种数量和细胞密度最大;夏季 $RUE_{pp}$ 最大,秋季 $RUE_{pp}$ 最小; $BC$ 与 $RUE_{pp}$ 、物种均匀度、总磷( $TP$ )、正磷酸盐( $PO_4^{3-}-P$ )、总氮( $TN$ )、硝氮( $NO_3^- -N$ )、高锰酸盐指数和电导率( $Spc$ )呈显著负相关,而与物种丰富度和溶氧( $DO$ )呈显著正相关关系,表明蓄水对花溪河浮游植物群落结构具有显著的影响,导致浮游植物群落不稳定,易发生更替,其更替程度受生物因子和非生物因子共同作用。

**关键词:** 三峡库区; 花溪河; 浮游植物; 群落稳定性; 资源利用效率

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3242-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012096

## Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir

HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, JI Lu-lu, YANG Song-qi, SHI Jun-qiong, WU Zhong-xing\*

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

**Abstract:** Changes in the community stability of freshwater phytoplankton not only induce a series of ecological environment problems but also influence freshwater ecosystem service functions. To understand the changes in community stability and its driving factors, phytoplankton and environmental parameters were analyzed at 11 sample sites in Huaxi River, a tributary of the Three Gorges Reservoir, in spring, summer, autumn, and winter. Moreover, the resource use efficiency ( $RUE_{pp}$ ), phytoplankton richness ( $S$ ), phytoplankton evenness ( $J$ ), and community turnover ( $BC$ ) were also determined. Results showed that a total of 8 phyla, including 103 genera and 380 species, were identified in Huaxi River throughout the year. Among them, 264 species were collected in spring, 181 in summer, 197 in autumn, and 183 in winter. The number of Chlorophyta was the largest, followed by Bacillariophyta, Euglenophyta, and Cyanophyta. The number of species and cell density in S0 site were the smallest, while those in S2 site were the largest. The  $RUE_{pp}$  was fluctuated in four seasons, with the maximum in summer and the minimum in autumn.  $BC$  was significantly negatively correlated with  $RUE_{pp}$ , phytoplankton richness, total phosphorus ( $TP$ ), orthophosphate ( $PO_4^{3-}-P$ ), total nitrogen ( $TN$ ), nitrate ( $NO_3^- -N$ ), permanganate index, and conductivity ( $Spc$ ); however, it was significantly positively correlated with phytoplankton evenness and dissolved oxygen ( $DO$ ). These results suggest that water level regulation in the Three Gorges Reservoir has a significant impact on the structure of phytoplankton community in Huaxi River, which leads to the instability of phytoplankton community and easy replacement, and the degree of community turnover is affected by the combined effect of biological and abiotic factors.

**Key words:** Three Gorges Reservoir; Huaxi River; phytoplankton; community stability; resource use efficiency

群落稳定性是指群落在达到顶级演替后,能够自我更新并维持,使群落的结构和功能长期维持在一个较高的且波动较小的水平;也可指群落在受到干扰后恢复其原来结构、功能状态和抗干扰的能力<sup>[1~3]</sup>。群落更替则是指群落内物种随时间变化的总和,可以反映群落在组成时间上的变异性,是生态系统稳定的重要组成成分<sup>[4]</sup>,能体现群落稳定性情况。一般在波动环境中,群落更替速率越强表明群落抵御外界环境变化而维持自身稳定性的能力越弱<sup>[5]</sup>。因此,研究群落稳定性特征对揭示群落物种变化及生态系统功能具有重要的意义。

Hodapp等<sup>[6]</sup>和MacArthur<sup>[7]</sup>的研究发现生物多

样性除影响生态系统服务功能外,生物多样性越高的群落,其群落更替值越低,稳定性越高。Filstrup等<sup>[8]</sup>的研究发现在自然生态系统中,物种均匀度与群落更替值呈显著负相关,物种均匀度越高群落稳定性越强。相似的研究也发现水体浮游生物多样性与群落稳定性具有显著正相关关系<sup>[4]</sup>,且浮游植物群落稳定性随着物种丰富度的增加而减少<sup>[9]</sup>。然而,Ipsen等<sup>[10]</sup>利用Lotka-Volterra竞争模型论证却

收稿日期: 2020-12-11; 修订日期: 2020-12-30

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(XDJK2019C044)

作者简介: 何书晗(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为藻类生理生态学,E-mail:1806739873@qq.com

\* 通信作者,E-mail:wuzhx@swu.edu.cn

发现,较高的生物多样性会引起物种间平衡波动,而导致群落的局部稳定性降低.相似的结论也被 Gardner 等<sup>[11]</sup>证实,即生物多样性过高,种间竞争加强,会引起群落局部不稳定.此外,田旺<sup>[5]</sup>通过研究发现,环境因子对群落稳定性变化有显著影响. Limberger 等<sup>[12]</sup>的研究也表明水文环境如:总磷、硝态氮、水温 and 流速等对群落稳定性有不同程度的影响.以上研究均表明了物种多样性与群落稳定性变化并不是唯一的线性关系,可能受不同条件所制约.因此,物种多样性及周边环境如何影响群落稳定性,值得进一步开展深入研究.

三峡工程自竣工投入使用后,在发电、航运、防洪和蓄水等方面发挥着重要作用<sup>[13]</sup>.然而,库区的“冬蓄夏排”反季节调度模式,造成库区在不同层面上产生了一些不容忽视的生态环境问题<sup>[14,15]</sup>.有研究表明,库区水体营养盐含量、流速、温度、酸碱度以及溶解氧含量等均发生了变化<sup>[16]</sup>.目前,对三峡库区水生态方面的研究主要集中在水质污染情况<sup>[14,15]</sup>,浮游植物组成和附石藻等藻类的群落结构及动态变化<sup>[17,18]</sup>.然而,库区反季节的水位调度是否影响水体浮游植物群落稳定性却未见报道.因此,本研究对三峡库区一级支流——花溪河的浮游植物群落稳定性变化进行研究,利用 Bray-Curtis 相异性指数来衡量群落更替情况.同时,通过对群落稳定性变化与浮游植物资源利用效率、物种组成结构特征以及水体理化因子之间的关系探讨,旨在从浮游植物稳定性层面为三峡库区的水环境管理提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

花溪河源于重庆市巴南区石岗乡碑垭岩口,属于三峡库区一级支流,全长约 63.62 km,流域面积约为 195.9 km<sup>2</sup>,年降水量 1 000 mm 左右,多年平均径流总量大约为  $9.0 \times 10^7$  m<sup>3</sup>.位于花溪河上游的南彭水库是国家一级保护饮用水源.库区蓄水后,花溪河下游回水有机物和泥沙大量沉积,导致了花溪河不同河流段均受到了不同程度的污染,富营养化加重<sup>[19]</sup>.本研究从 2017 年 11 月 16 日到 2018 年 10 月 18 日从花溪河源头碑垭村(上游)到入江口(下游)共设置 S0~S10 共 11 个采样点(图 1),每个月对 11 个采样点分别进行调查,共调查一年.

### 1.2 水体理化指标的测定

用多参数水质分析仪 DS5/DS5X (HydrolAB, USA) 现场测定:水温(WT)、pH、电导率(SPC)、溶解氧(DO)和氧化还原电位(ORP)等.用塞氏盘(黑

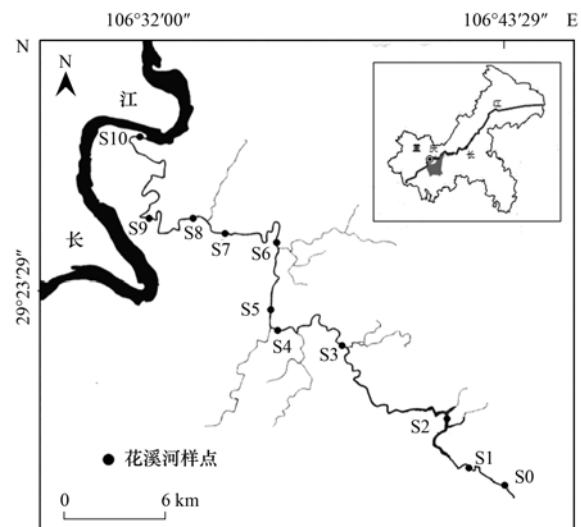


图 1 花溪河样点分布示意

Fig. 1 Distributions of sampling sites in the Huaxi River

白盘)测定水体透明度(SD).用国产 LS45A 型旋杯式流速仪(华正水文仪器有限公司,重庆)测量水体流速( $v$ ).在所设断面按照采样要求取 250 mL 表层(0.5 m)水样,水体中总氮(TN)、硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N)、总磷(TP)、正磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}$ -P)和高锰酸盐指数( $\text{KMnO}_4$ )浓度测定方法,详见参考文献[20].

### 1.3 叶绿素的测定

在各样点取 500 mL 水样,用 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜抽滤,避光保存.反复冻融 3~5 次,加入 90% 丙酮,4℃ 避光浸提 24 h 后,离心,取上清液测定波长为 750、664、647 和 630 nm 处的吸光值 A,并计算出叶绿素的含量.

$$\text{Chla} (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}) = [11.85(A_{664} - A_{750}) - 1.54(A_{647} - A_{750}) - 0.08(A_{630} - A_{750})] V_1 / (V_2 L)$$

式中, $L$  表示比色皿光程(cm); $V_1$  表示提取液体积(mL); $V_2$  表示水样体积(L).

### 1.4 浮游植物采集、定性和定量分析

定性样品采集和分析:使用 20  $\mu\text{m}$  孔径的浮游生物网在水体表层 0.5 m 处作“∞”形缓慢拖动,提起并滤去多余的水,将剩下的样品置于离心管中,按 100:1.5 的比例现场加入 Lugol 溶液(鲁哥氏液)进行固定,然后带回实验室鉴定分析.定性样品的鉴定分析使用 Nikon E-Ci 显微镜,物种的鉴定参考文献[21~24].

定量样品采集和分析:取表层水样 1 L,现场滴加 1% Lugol 溶液固定<sup>[25]</sup>,回实验室后沉淀 96 h,用细小虹吸管吸取上层水,将水样浓缩至 30 mL 后,补加 1 mL 40% 甲醛溶液长期保存并计数.浮游植物定量计数采用面积为 20 mm × 20 mm,容量为 0.1 mL

的浮游植物计数框. 每瓶重复观察计数两次后, 若两次计数结果的差异小于 15% 则取两次的平均值, 若大于 15%, 则再计数一次, 取 3 次的平均值<sup>[25]</sup>.

### 1.5 资源利用效率

Davidson 等<sup>[26]</sup>的研究发现总磷浓度几乎可以代表淡水生态系统的初级生产力水平, 利用浮游植物生物量和总磷 (TP) 的比值可以衡量浮游植物的资源利用效率 (RUE<sub>pp</sub>). 因此, 本研究通过公式  $RUE_{pp} = \text{Bio}(\text{Phyto})/\text{TP}$  来表征浮游植物的资源利用效率. 其中, RUE<sub>pp</sub> 为浮游植物资源利用效率, Bio (Phyto) 为浮游植物生物量 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), TP 为总磷浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ).

### 1.6 Bray-Curtis 相异性指数

通过 Bray-Curtis 相异性指数来衡量群落稳定性<sup>[8]</sup>, Bray-Curtis 相异性指数 (BC) 取值范围是 [0, 1], BC 值越接近于 1, 表明物种更替性越强, 稳定性越弱. 计算公式为<sup>[8]</sup>:

$$BC = \frac{\sum_{i=1}^n |y_{i1} - y_{i2}|}{\sum_{i=1}^n |y_{i1} + y_{i2}|}$$

式中, BC 表示群落更替值;  $y_{i1}$  表示群落中物种  $i$  第一次测量的生物量 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $y_{i2}$  表示群落中物种  $i$  第二次测量的生物量 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $n$  表示群落中两次测量所鉴别出的总物种数.

### 1.7 多样性指数

物种多样性可以通过物种丰富度 ( $S$ )、Shannon 多样性指数 ( $H$ ) 和均匀度 ( $J$ ) 等指标进行衡量. 物种丰富度指某区域或群落中所含物种数的多少, 物种均匀度指群落中各物种个体数目分配的均匀程度, 均匀度越高可反映群落中可能不存在明显优势种<sup>[27~29]</sup>.

物种丰富度  $S$  = 每个样方中出现的物种数

Shannon-Wiener 指数:

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

Pielou 均匀度指数:

$$J = H/\ln S$$

式中,  $P_i$  为物种  $i$  的相对重要值<sup>[28,29]</sup>.

### 1.8 数据处理与分析

用 Excel 对数据进行统计, 整理藻类的生物量、水体理化因子和浮游植物资源利用效率 (RUE<sub>pp</sub>) 等; 用 Origin 2019 进行作图; SPSS 22.0 软件分析群落稳定性与资源利用效率和环境因子等的相关性分析.

## 2 结果与分析

### 2.1 水体理化特征

4 个季节中, 水体的总氮 (TN)、硝氮 ( $\text{NO}_3^- \text{-N}$ )、总磷 (TP)、正磷酸盐 ( $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ )、高锰酸盐指数、叶绿素  $a$  (Chla)、水温 (WT)、pH、氧化还原电位 (ORP)、电导率 (Spc) 和溶氧 (DO) 等参数见表 1. 与冬季的环境相比, TP、 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 、高锰酸盐指数、pH、氧化还原电位、电导率、溶氧和透明度等具有显著性差异 ( $P < 0.05$ ). 总氮、硝氮、总磷、正磷酸盐、Chla 以及溶氧的含量在春季均为最低. 夏季的总氮含量高于其它季节, 秋季的硝氮含量显著高于其它 3 个季节 ( $P < 0.05$ ), 冬季总磷和正磷酸盐含量显著高于其它 3 个季节 ( $P < 0.05$ ). 总氮、高锰酸盐指数、Chla 和水温等在夏季的含量均为最高, 而高锰酸盐指数在秋季最低, Chla 在春季最低, 水温在冬季最低. 氧化还原电位在春季最高, 夏季最低. 电导率则在冬季最高, 夏季最低.

表 1 花溪河不同季节环境因子变化<sup>1)</sup>

Table 1 Environmental factors of Huaxi River changes in different seasons

| 理化指标                                                           | 春季                | 夏季                | 秋季               | 冬季              | F 值    | P 值   |
|----------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------------|--------|-------|
| TN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$                            | 4.49 ± 0.61       | 5.69 ± 0.7        | 5.23 ± 0.76      | 5.51 ± 0.81     | 0.57   | 0.66  |
| $\text{NO}_3^- \text{-N}$ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$    | 2.67 ± 0.4        | 2.85 ± 0.38 *     | 3.92 ± 0.68 *    | 3.04 ± 0.49     | 4.78   | 0.01  |
| TP/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$                            | 0.18 ± 0.03 **    | 0.2 ± 0.03 **     | 0.24 ± 0.04 **   | 0.32 ± 0.06     | 32.298 | 0.00  |
| $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 0.16 ± 0.03 **    | 0.18 ± 0.03 *     | 0.2 ± 0.04 *     | 0.27 ± 0.06     | 3.08   | 0.04  |
| 高锰酸盐指数/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$                        | 4.67 ± 0.32 **    | 5.34 ± 0.28 **    | 3.76 ± 0.28 **   | 4.93 ± 0.43     | 75.02  | 0.00  |
| Chla/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$                          | 14.17 ± 2.23      | 22.58 ± 4.34 **   | 15.38 ± 5.77     | 21.53 ± 4.04    | 3.67   | 0.02  |
| 水温 (WT)/℃                                                      | 19.55 ± 0.55      | 27.67 ± 0.73 *    | 18.93 ± 0.39     | 11.23 ± 0.35    | 3.68   | 0.02  |
| pH                                                             | 7.83 ± 0.12 **    | 7.77 ± 0.15 **    | 7.82 ± 0.08 **   | 7.89 ± 0.06     | 71.14  | 0.00  |
| 氧化还原电位 (ORP)/mV                                                | 424.06 ± 12.24 ** | 382.36 ± 15.01 ** | 394.27 ± 4.68 ** | 392.88 ± 5.34   | 391.03 | 0.00  |
| 电导率 (Spc)/ $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$                  | 600.54 ± 58.07 *  | 559.16 ± 74.66 *  | 595.14 ± 61.21 * | 803.93 ± 110.54 | 3.01   | 0.04  |
| 溶氧 (DO)/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$                       | 6.05 ± 0.37 **    | 6.8 ± 0.37 **     | 7.91 ± 0.14 **   | 6.94 ± 0.56     | 51.99  | 0.00  |
| 透明度 (SD)/cm                                                    | 44.58 ± 9.1 **    | 30.11 ± 3.89 **   | 39.27 ± 5.81 **  | 50.52 ± 9.09    | 8.38   | 0.00  |
| 流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$                             | 0.27 ± 0.08       | 0.36 ± 0.07       | 0.25 ± 0.06      | 0.19 ± 0.06     | 1.04   | 0.385 |

1) \*\* 表示  $P < 0.01$  两者之间极显著相关, \* 表示  $P < 0.05$  两者之间显著相关



## 2.2 群落结构及物种多样性

调查期间,花溪河全年共检测出藻类 8 门 103 属 380 种. 其中绿藻(40 属)和硅藻(29 属)均为 124 种,占总物种数的 32.6%; 其次为裸藻和蓝藻(17 属)分别为 63 种和 35 种,分别占物种总数的 16.6% 和 9.2%; 而甲藻(4 属)、隐藻(2 属)、金藻(3 属)和黄藻(2 属)物种数为 21、6、4 和 3,分别占物种总数的 5.5%、1.6%、1.1% 和 0.8%.

春季、夏季、秋季和冬季分别采集到 264、181、197 和 183 个种, 4 个季节均以绿藻门、硅藻门、裸藻门和蓝藻门为主. 春季,蓝藻门和绿藻数量均在 S2 样点最多,S0 样点最少; 硅藻在 S10 和 S8 样点

物种数较多,S0、S1 和 S2 样点物种数少; 甲藻物种数在 S2 样点最多,S3 样点次之[图 2(a)]. 夏季,绿藻物种在 S1 和 S5 样点物种数最多,S2 和 S5 蓝藻物种数量多,仅有 S2、S6 和 S7 有黄藻物种[图 2(b)]. 秋季,S0 样点只有绿藻和硅藻,蓝藻和绿藻多集中在 S2 样点,甲藻多集中在 S2 和 S3 样点,硅藻则在 S9 和 S10 样点较多[图 2(c)]. 冬季,除 S0、S1 和 S4 样点无金藻外,其余样点均含有金藻物种,黄藻仅有 S8 样点存在,S2 样点的蓝藻门和绿藻数量较多[图 2(d)]. 4 个季节中, S0 样点物种数最少. 除夏季外,其余 3 个季节均为 S2 样点物种数最多(图 2).

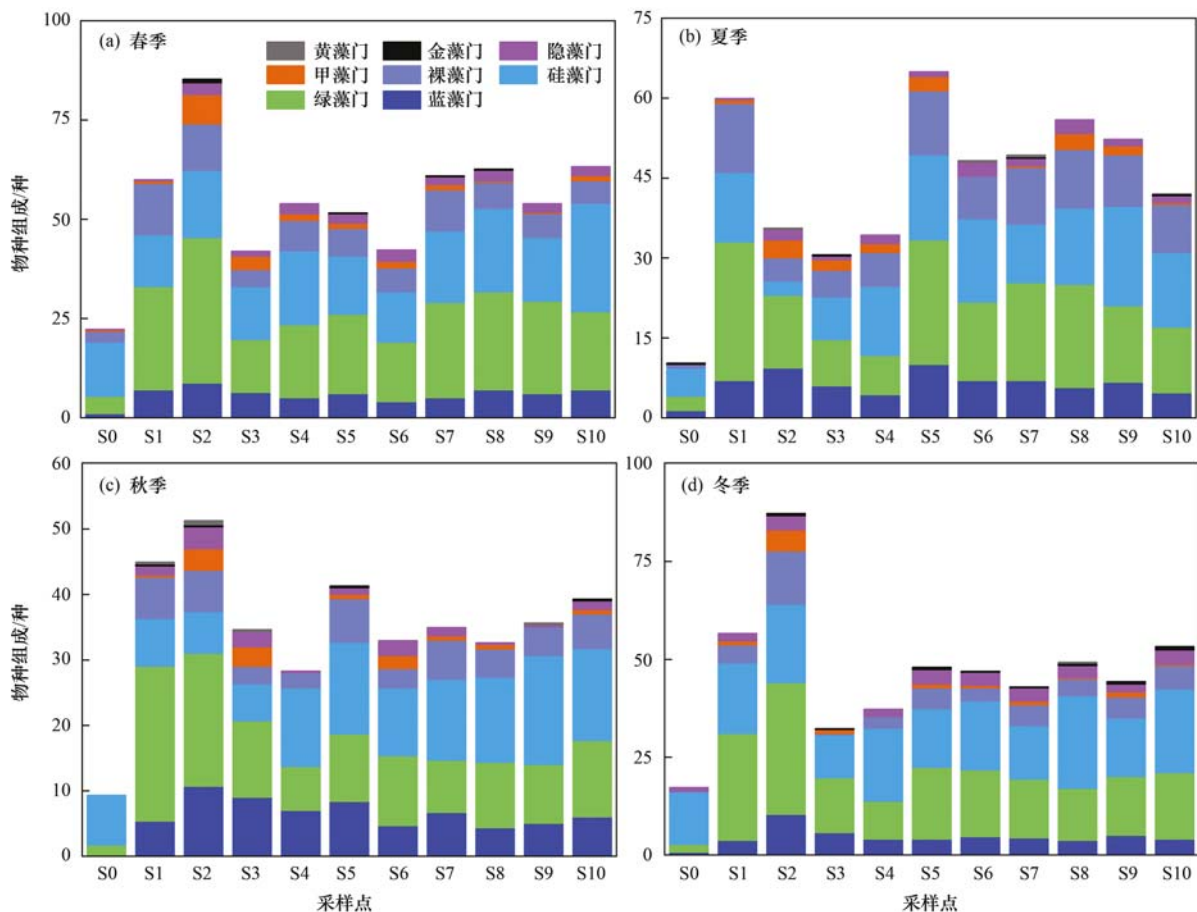


图 2 不同时期各样点浮游植物种类组成

Fig. 2 Composition of phytoplankton at sampling sites during different hydrological periods

4 个时期,S2(南彭水库)样点藻密度均值远大于其它样点,S0(碑垭村)样点藻密度均值远小于其它样点. 除夏季 S0 样点是蓝藻密度最大,其余 3 个季节 S0 样点均为硅藻密度最大. 春季,S0 样点硅藻密度最大为  $2.09 \times 10^4$  个·L<sup>-1</sup>,S2 样点绿藻密度最大为  $1.98 \times 10^7$  个·L<sup>-1</sup>[图 3(a)]. 夏季,蓝藻密度在各样点均占优势,在 S2 样点最大,达到  $2.61 \times 10^9$  个·L<sup>-1</sup>,S0 样点最少为  $3.05 \times 10^4$  个·L<sup>-1</sup>,绿藻密度在各样点所占比例仅次于蓝藻[图 3(b)]. 秋季,

S2、S3 和 S1 样点藻密度较高,S2 样点的蓝藻、绿藻和硅藻密度较高,分别达到  $7.46 \times 10^8$ 、 $5.59 \times 10^7$  和  $3.81 \times 10^7$  个·L<sup>-1</sup>[图 3(c)]. 冬季,蓝藻和绿藻密度在各样点所占比列较大,S2 和 S3 样点蓝藻密度分别高达  $4.74 \times 10^7$  个·L<sup>-1</sup> 和  $3.10 \times 10^7$  个·L<sup>-1</sup>,S1 和 S10 样点绿藻密度分别为  $1.21 \times 10^7$  个·L<sup>-1</sup> 和  $7.60 \times 10^6$  个·L<sup>-1</sup>[图 3(d)]. 春季和秋季的物种多样性较大,冬季次之,夏季最少(图 4). S0 样点 Shannon-Wiener 指数最大在春季为 2.53,最

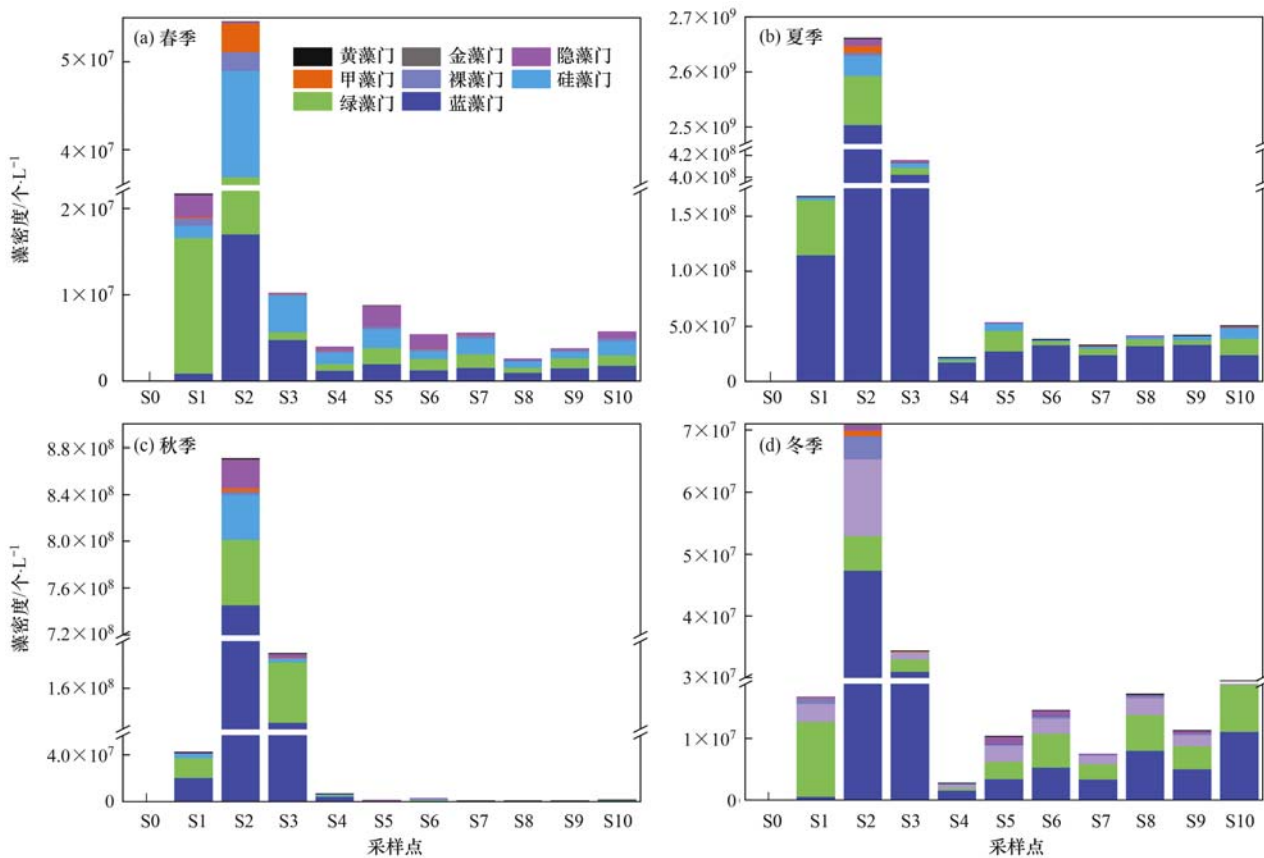


图3 不同时期各样点浮游植物密度

Fig. 3 Density of phytoplankton at sampling sites during different hydrological periods

小在夏季为 0.107; S2 样点 Shannon-Wiener 指数最大在秋季为 2.03, 最小在夏季为 1.27; 而 S5 样点 Shannon-Wiener 指数最大在秋季为 3.03, 最小在夏季为 1.94 (图 4)。

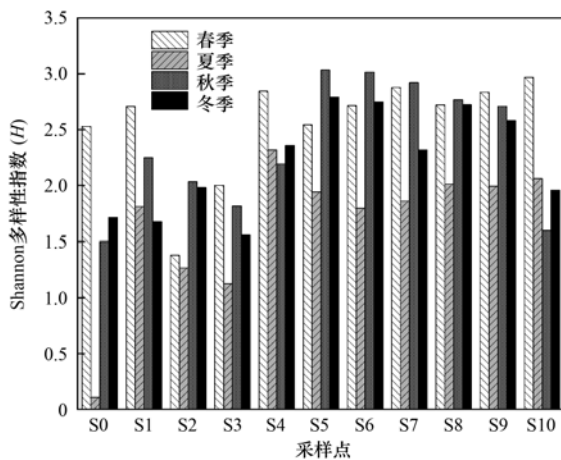


图4 不同时期各样点浮游植物 Shannon-Wiener 指数

Fig. 4 Shannon-Wiener index of phytoplankton at sampling sites during different hydrological periods

### 2.3 群落稳定性

对 4 个季节浮游藻类主要的 6 个门进行群落稳定性分析, 发现 4 个季节浮游藻类稳定性均存在着更替和波动 (图 5)。其中, 蓝藻门的群落稳定

性波动范围较小, 夏季到秋季群落稳定性较好, 冬季到春季群落稳定性最差; 绿藻门的群落更替幅度则高于蓝藻门, 与其它季节相比, 冬季到春季绿藻门的群落更替程度最弱。硅藻门的 BC 值变化范围最大, 群落更替呈现先下降后增加的趋势, 群落稳定性变化则为先增加后减弱, 春季-夏季硅藻门的群落更替程度远大于夏季-秋季和秋季-冬季。裸藻门 BC 也呈现出先下降后增加的趋势。甲藻门和隐藻门的 BC 值均呈现先增加后减小的趋势。甲藻门和隐藻门的 BC 值变化春季-夏季最小, 群落稳定性最好。

### 2.4 群落稳定性驱动因子

#### 2.4.1 资源利用效率 ( $RUE_{pp}$ ) 与群落稳定性

除 S0 样点外, 夏季的  $RUE_{pp}$  均大于春季、秋季和冬季, 而秋季浮游藻类的  $RUE_{pp}$  在 S0、S5、S6、S7、S8、S9、S10 和 S11 则表现为最小。S0 样点的  $RUE_{pp}$  为春季最大。S5、S6、S7、S8、S9、S10 和 S11 等样点,  $RUE_{pp}$  表现为夏季最高, 冬季、春季次之, 而 S2 和 S3 样点则为夏季最高, 秋季、春季次之。总体而言, 夏季浮游植物的  $RUE_{pp}$  大于冬季浮游植物的  $RUE_{pp}$  [图 6(a)]。群落稳定性与  $RUE_{pp}$  表现为较强的相关性, 支持浮游藻类资源利用效率影响群落稳

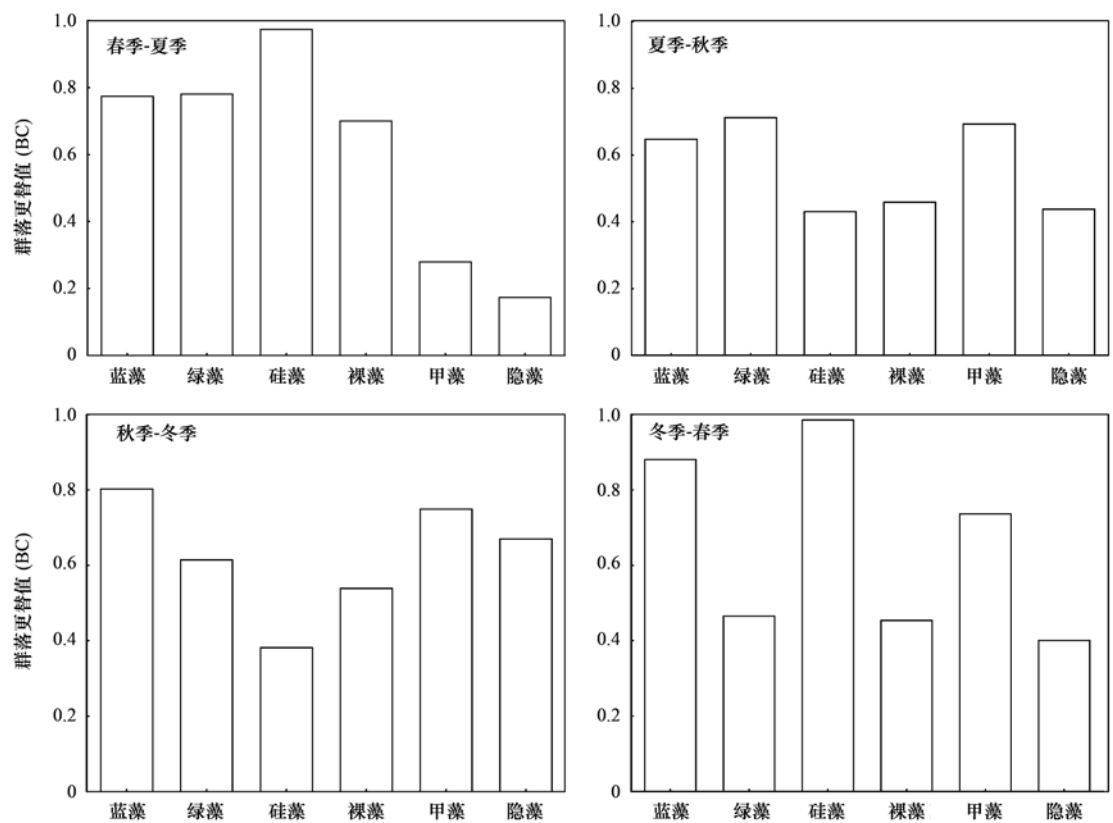


图5 花溪河浮游植物群落更替指数(BC)  
Fig. 5 Phytoplankton community turnover index (BC) in Huaxi River

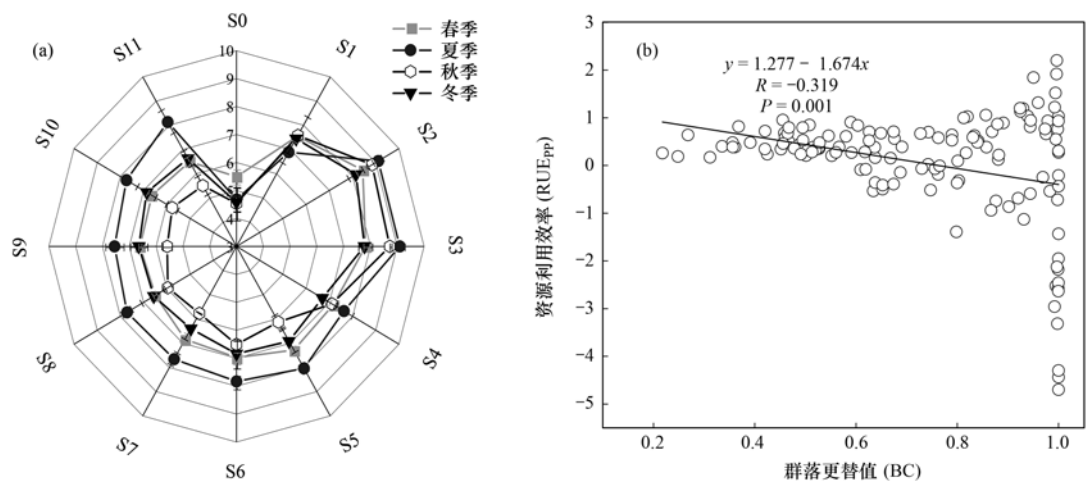


图6 浮游植物资源利用效率(RUE<sub>pp</sub>)及其与群落更替关系

Fig. 6 Relationship between resource use efficiency(RUE<sub>pp</sub>)and community turnover (BC) in phytoplankton

定性这一假设. 不同样点之间的群落更替值与 RUE<sub>pp</sub>差值之间的线性回归分析如图 6(b), 具体的线性关系为 RUE<sub>pp</sub> = 1.277 - 1.674 × BC, 两者呈负相关, Pearson 相关系数为 -0.319.

2.4.2 生物多样性与群落稳定性

浮游植物群落稳定性变化与物种均匀度(J)和物种丰富度(S)的关系如图 7. 群落更替值与物种均匀度为显著正相关(P < 0.001), 线性回归关系为: J = 0.074 + 0.119 × BC, Pearson 相关系数 R = 0.025, P <

0.01, 随着 J 的增加, BC 也增加, 群落稳定性减弱[图 7(b)]. 然而, BC 与 S 为显著负相关(P < 0.001), 线性回归分析结果为: S = 40.314 - 15.343 × BC, Pearson 相关系数 R = -0.293, P < 0.001, 随着 S 的增加, BC 减小, 群落越稳定[图 7(a)].

2.4.3 环境因子与群落稳定性

群落稳定性变化与环境因子的线性分析中, BC 与正磷酸盐、水温、溶氧和透明度等环境因子不同样点之间的差值没有显著(P > 0.05)线性关系. BC 与



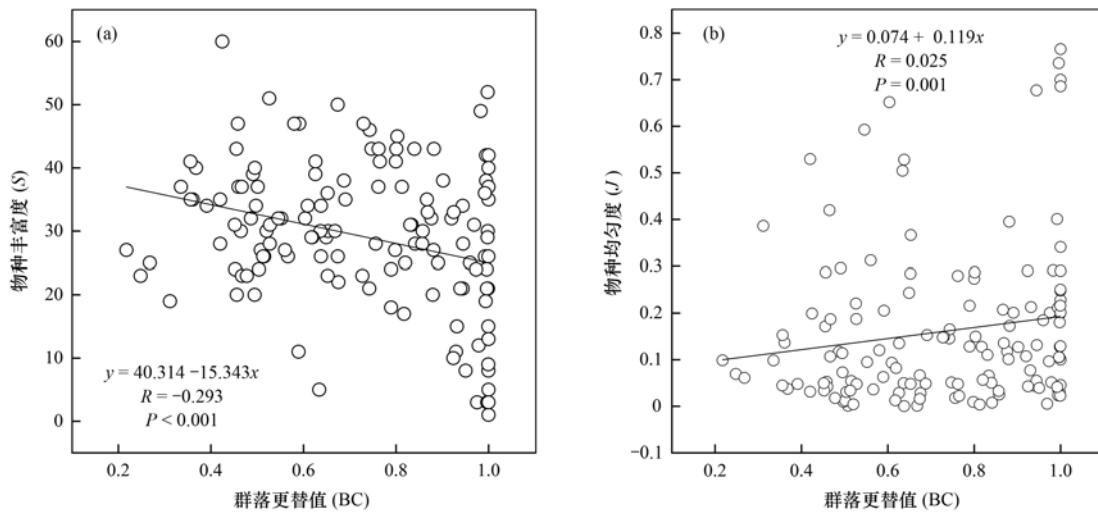
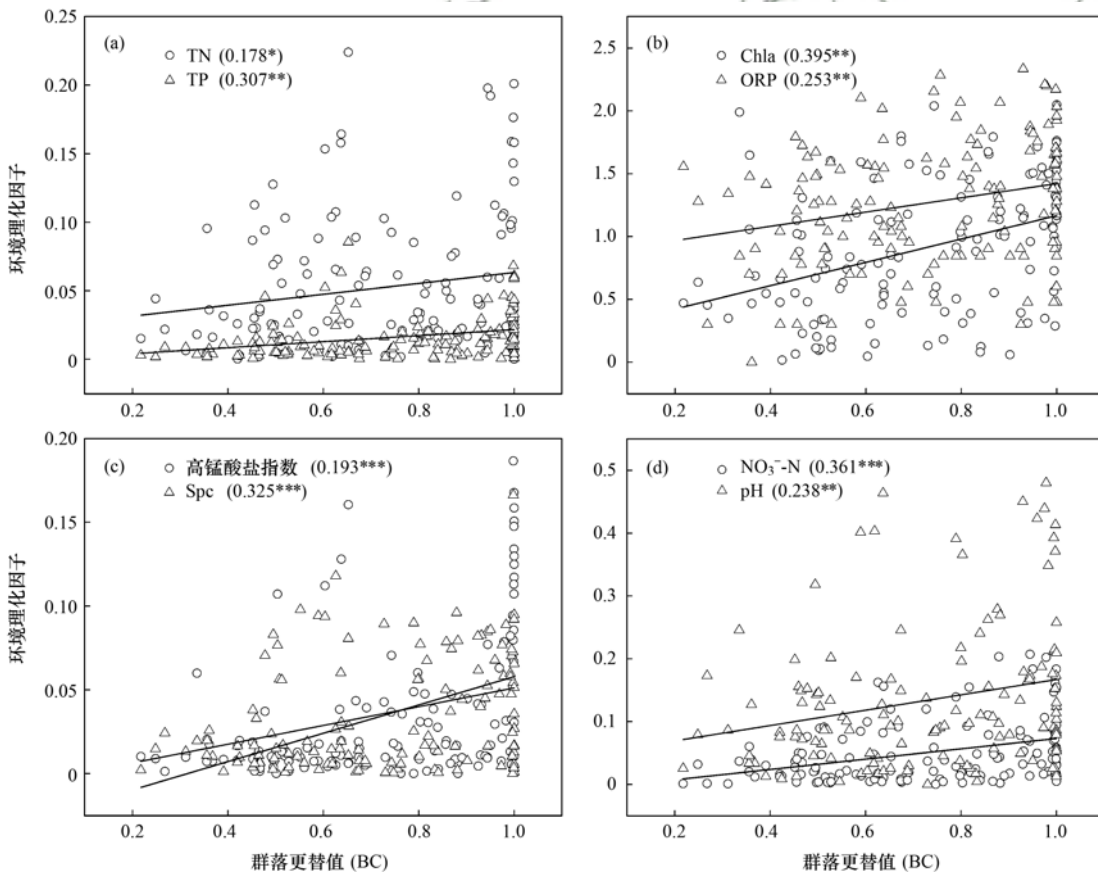


图 7 群落更替值 (BC) 与物种均匀度 (J) 和物种丰富度 (S) 线性关系

Fig. 7 Linear relationships between the community turnover (BC) and phytoplankton evenness (J) or richness (S)

总氮、总磷、硝氮、氧化还原电位、高锰酸盐指数、电导率和 pH 等 8 种环境因子在不同样点之间的差值

有显著 ( $P < 0.05$ ) 线性关系, 且与 BC 呈为显著正相关, 抑制群落稳定性 (图 8 和表 2)。



\*\*\* 表示  $P < 0.001$ , \*\* 表示  $P < 0.01$ , \* 表示  $P < 0.05$

图 8 群落更替值 (BC) 与环境因子线性回归分析

Fig. 8 Linear regression analysis of community turnover (BC) and environmental factors

### 3 讨论

#### 3.1 群落组成与结构特征分析

藻类的群落结构对水体的环境变化具有依赖性, 在一定程度上可以反映水体受污染情况<sup>[30~32]</sup>。

未被污染的自然水体中, 浮游植物多以硅藻占优势, 蓝藻和绿藻较少。水体被污染后, 群落优势种由硅藻向丝状绿藻转变, 群落组成也由耐受性范围窄的物种向耐受性范围广物种转变<sup>[33,34]</sup>。王松波等<sup>[33]</sup>的研究发现, 随着三峡库区蓄水后, 藻类群落组成由硅藻

表 2 环境因子与群落更替值(BC)的线性回归方程<sup>1)</sup>

| Table 2 Linear regressions between environmental factors and community turnover (BC) |                                |                 |           |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------|-----------|-------|
| 环境因子(Y)                                                                              | 线性回归方程                         | Pearson 相关系数(R) | 显著性检验(P)  | 对数(N) |
| 总磷(TP)                                                                               | $Y = -0.001 + 0.022 \times BC$ | 0.307           | 0.001 **  | 132   |
| 总氮(TN)                                                                               | $Y = 0.023 + 0.039 \times BC$  | 0.178           | 0.049 *   | 132   |
| 氧化还原电位(ORP)                                                                          | $Y = 0.854 + 0.567 \times BC$  | 0.253           | 0.003 **  | 132   |
| Chla                                                                                 | $Y = 0.237 + 0.929 \times BC$  | 0.395           | 0.004 **  | 132   |
| pH                                                                                   | $Y = 0.045 + 0.122 \times BC$  | 0.238           | 0.005 **  | 132   |
| 电导率(Spc)                                                                             | $Y = -0.005 + 0.056 \times BC$ | 0.325           | 0.001 *** | 132   |
| 硝氮(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N)                                                  | $Y = -0.009 + 0.082 \times BC$ | 0.361           | 0.000 *** | 132   |
| 高锰酸盐指数                                                                               | $Y = -0.027 + 0.084 \times BC$ | 0.193           | 0.000 *** | 132   |

1) \*\*\* 表示  $P < 0.001$ , \*\* 表示  $P < 0.01$ , \* 表示  $P < 0.05$

为主,蓝藻和绿藻次之,转变为以绿藻为主,蓝藻和硅藻次之. 本研究中,花溪河浮游植物在春季、夏季和秋季均是绿藻门占优势,冬季则是硅藻门占优势,表明蓄水对花溪河浮游植物群落结构有显著的影响. 刘潘等<sup>[35]</sup>的研究表明花溪河水体已受到工业点源污染、城镇生活点源污染以及农业面污染研究结果一致. 因此,花溪河春季、夏季和秋季水体污染对浮游植物组成影响较大,导致了群落组成以绿藻为优势.

邱光胜等<sup>[36]</sup>的研究发现,浮游植物密度峰值出现的季节在蓄水前期主要是冬季,而蓄水后峰值出现的季节多为春季. 本研究中,花溪河浮游植物藻密度峰值并未出现在春季,夏季浮游植物藻密度峰值(S2 样点蓝藻: $2.61 \times 10^9$  个 $\cdot L^{-1}$ )大于春季藻密度峰值(S2 样点绿藻: $1.99 \times 10^7$  个 $\cdot L^{-1}$ )(图 3),可见花溪河水华暴发最严重是夏季. 水华暴发期间,水体藻密度大,但物种多样性较低,这是由于水华优势种大量繁殖造成的. 方小凤<sup>[37]</sup>的研究表明三峡库区支流香溪河甲藻水华暴发于春季,而隐藻、蓝藻水华暴发于夏季. 花溪河甲藻水华也多春季暴发,甲藻水华暴发时,浮游植物群落组成仍以硅藻和绿藻物种数居多<sup>[37]</sup>,与本研究的结论一致. 夏季, S5(吉庆村)样点物种数最多,但藻密度小于 S2 样点,说明吉庆村受污染程度小于南彭水库. 南彭水库(S2)湖面较宽,枯水期水体深度可以达 6~10 m,水库受人为干扰程度大,使水体营养盐含量增加是 S2 样点藻密度均值远大于其它样点的重要原因. 水华发生期间,南彭水库浮游植物群落中拟柱孢藻数量占绝对优势,张红波指出南彭水库拟柱孢藻水华在 8 月和 9 月最严重,在藻类总数中的比例高达 98.68%<sup>[38]</sup>,支持本研究的结论. S0(碑垭村)样点藻密度均值远小于其它样点主要是因为碑垭村是花溪河源头,不受人为干扰,水质较好. S8、S9 和 S10 样点位于花溪河下游,物种数量和藻密度较小,水体富营养程度相对较低,这与下游水体流速快、水量增加以及水体的自净

作用和受污染程度低有关<sup>[35]</sup>.

3.2 资源利用效率与群落稳定性关系

有研究表明,资源利用效率(RUE<sub>pp</sub>)的变化,意味着有资源暂时未得到充分利用,这为新物种在生态系统中的生存提供可获得的生态位<sup>[9]</sup>. Striebel 等<sup>[39]</sup>的研究发现 RUE<sub>pp</sub>与浮游植物物种多样性呈正相关. Ptacnik 等<sup>[9]</sup>对浮游植物研究发现其 RUE<sub>pp</sub>随着物种多样性增加而增加. 本研究中,除 S0 和 S1 样点外,其他样点夏季浮游藻类的 RUE<sub>pp</sub>最大,这表明了花溪河夏季浮游植物物种多样性增加导致了浮游植物 RUE<sub>pp</sub>增加. Filstrup 等<sup>[8]</sup>研究表明 RUE<sub>pp</sub>与群落更替值呈显著负相关,本研究发现,4 个季节花溪河浮游植物有不同程度的群落更替(图 5),且群落更替与 RUE<sub>pp</sub>呈显著的负相关[图 6(b)]. 较高的群落更替率引起较多的生物量向主要类群转移,从而可导致生物产量(即:资源利用效率)下降. Norberg 等<sup>[40]</sup>的研究表明,群落稳定性变化是受多种因素共同影响, RUE<sub>pp</sub>与群落稳定性之间的关系取决于生态系统的干扰程度. 本研究中,样点 S0 和 S1 由于位于花溪河上游,样点人为干扰少,水体清澈,总体藻密度较低,导致 RUE<sub>pp</sub>远小于其他样点.

3.3 群落多样性与群落稳定性关系

MacArthur<sup>[7]</sup>的研究认为随着食物网复杂程度升高和营养级间联结通路增加,系统的稳定性也逐渐加强. Tian 等<sup>[41]</sup>的研究也指出多样化的群落,其物种间波动较小,群落稳定性更高. 本研究发现群落稳定性变化与丰富度均呈负相关关系,支持 Tian 等<sup>[41]</sup>指出的物种丰富度(S)与 BC 呈负相关[图 7(a)],说明 S 越高的群落,BC 反而越小,群落稳定性好. Allan 等<sup>[42]</sup>的研究发现物种均匀度越高,功能转换越强. 本研究结果也发现随着 J 增加群落更替程度越高[图 7(b)],表明 J 高的群落,处于演替前期或中期,群落结构不稳定. 因此功能互补物种的更替确保了生态系统功能始终保持在高水平,有利于维持群落稳定性.

### 3.4 水体理化环境与群落稳定性关系

有研究表明,磷是限制浮游植物生长的关键因子<sup>[43,44]</sup>. 本研究发现冬季磷含量最高为  $0.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 春季最少为  $0.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 相对于冬季,其它3个季节总磷含量均显著减少(表1),且总磷与群落更替值呈显著正相关[图8(a)],支持了Fu的结论,即适量的磷含量可促进物种多样性和丰富度<sup>[45]</sup>. 除总磷外,水体中的其他营养盐对藻类生长、群落结构也有较大影响<sup>[46,47]</sup>. Salmasso<sup>[48]</sup> 和 Rothenberger 等<sup>[49]</sup> 的研究结果指出,溶解性有机氮、硝态氮以及盐含量对藻类群落更替稳定性具有较强影响. 本研究结果也发现 BC 与硝氮、总氮、电导率、氧化还原电位及高锰酸盐指数均为显著正相关(图8),其原因可能是水体的营养盐影响藻类生长和群落结构特征,从而影响群落更替稳定性. 李巧玉等<sup>[50]</sup> 的研究发现溶解氧与藻类呈负相关. 米文梅等<sup>[17]</sup> 的研究表明溶解氧与某些附石藻类群呈正相关. 本研究发现,溶解氧与 BC 呈显著正相关( $P < 0.01$ ),表明溶解氧可能通过影响藻类群落结构组成,使得群落稳定性发生变化.

韩龙等<sup>[51]</sup> 的研究发现电导率与海河干流浮游植物生长关联性较高, Weilhoefer 等<sup>[52]</sup> 的研究也指出电导率是美国俄勒冈州波特兰城市河流浮游植物丰度最相关的环境因子之一. 本研究发现电导率与 BC 呈极显著正相关( $P < 0.001$ ),表明低的电导率有利于群落维持高的稳定性. 杨漪帆等<sup>[53]</sup> 的研究表明碱性环境有利于浮游植物捕获大气中二氧化碳,进而促进藻类生长,这也许是本研究中 pH 变化对 BC 呈显著正相关的重要原因. 水温会影响藻类的生长、水体营养盐的利用效率和群落结构等特征<sup>[54~57]</sup>. 然而,本研究结果发现,水温对 BC 无显著性影响,原因可能是引起群落更替的物种对温度具有普适性,轻微的温度变化对该物种影响较小,具体的原因还需要进一步展开研究. 总之,不仅是群落结构特征对群落稳定性有较强影响,水体理化性质与群落稳定性变化也紧密相关.

## 4 结论

(1) 调查期间,花溪河全年共检测出藻类 8 门 103 属 380 种,4 个季节均以绿藻、硅藻、裸藻和蓝藻为主,其他藻类物种相对较少.

(2) 4 个季节  $\text{RUE}_{\text{pp}}$  波动较大,夏季  $\text{RUE}_{\text{pp}}$  普遍高于其他季节,夏季-秋季群落更替值小,群落稳定,而冬季-春季  $\text{RUE}_{\text{pp}}$  较低,群落更替值大,群落不稳定.

(3) 群落稳定性受生物因子和非生物因子共同

作用. 其中,群落稳定性与物种丰均匀度、总氮、总磷、硝氮、氧化还原电位、高锰酸盐指数、电导率和 pH 呈正相关,与物种丰富度呈负相关.

### 参考文献:

- [1] Suar P L. The complexity and stability of ecosystems [J]. *Nature*, 1984, **307**(5949): 321-326.
- [2] Holling S C. Resilience and stability of ecological systems [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, **4**: 1-13.
- [3] Sennhauser E B. The concept of stability in connection with the gallery forests of the chaco region [J]. *Vegetatio*, 1991, **94**(1): 1-13.
- [4] 郑颖慧. 浮游生物多样性与群落生产力和稳定性关系研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.  
Zheng Y H. Research on the effects of plankton species diversity on community productivity and stability [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2019.
- [5] 田旺. 湖泊浮游生物群落对环境及生物多样性的响应机制 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.  
Tian W. Response mechanisms of lake plankton community to environment and biodiversity [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2017.
- [6] Hodapp D, Kraft D, Hillebrand H. Can monitoring data contribute to the biodiversity-ecosystem function debate? Evaluating data from a highly dynamic ecosystem [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2014, **23**(2): 405-419.
- [7] MacArthur R. Fluctuations of animal populations, and a measure of community stability [J]. *Ecology*, 1955, **36**(3): 533-536.
- [8] Filstrup C T, Hillebrand H, Heathcote A J, et al. Cyanobacteria dominance influences resource use efficiency and community turnover in phytoplankton and zooplankton communities [J]. *Ecology Letters*, 2014, **17**(4): 464-474.
- [9] Płaczek R, Solimini A G, Andersen T, et al. Diversity predicts stability and resource use efficiency in natural phytoplankton communities [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**(13): 5134-5138.
- [10] Ipsen J R, Schomerus H. Isotropic brownian motions over complex fields as a solvable model for may-wigner stability analysis [J]. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 2016, **49**(38), doi: 10.1088/1751-8113/49/38/385201.
- [11] Gardner M R, Ashby W R. Connectance of large dynamic (cybernetic) systems: critical values for stability [J]. *Nature*, 1970, **228**(5273), doi: 10.1038/228784a0.
- [12] Limberger R, Fesl C, Schagerl M. Phytoplankton community structure in a Danubian backwater system: Response to environmental factors [J]. *Archiv für Hydrobiologie-Hauptbände*, 2004, **161**(2): 189-198.
- [13] 曹广品, 陈永柏. 三峡库区水环境现状与对策建议 [J]. *科技导报*, 2005, **23**(10): 25-29.  
Cao G J, Chen Y B. Water environment actuality and protected countermeasures of Three Gorges Reservoir [J]. *Science & Technology Review*, 2005, **23**(10): 25-29.
- [14] 郭胜, 李崇明, 郭劲松, 等. 三峡水库蓄水后不同水位期干流氮、磷时空分异特征 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(5): 1266-1272.  
Guo S, Li C M, Guo J S, et al. Spatio-temporal variation of nitrogen, phosphorus in different period in Three gorges reservoir after its impoundment [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(5): 1266-1272.



- [15] 邹家祥, 翟红娟. 三峡工程对水环境与水生生态的影响及保护对策[J]. 水资源保护, 2016, **32**(5): 136-140.  
Zou J X, Zhai H J. Impacts of Three Gorges project on water environment and aquatic ecosystem and protective measures[J]. Water Resources Protection, 2016, **32**(5): 136-140.
- [16] 刘黎, 贺新宇, 付君珂, 等. 三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3577-3587.  
Liu L, He X Y, Fu J K, *et al.* Benthic diatom communities in the main stream of Three Gorges Reservoir area and its relationship with environmental factors [J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3577-3587.
- [17] 米文梅, 施军琼, 杨燕君, 等. 三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1636-1647.  
Mi W M, Shi J Q, Yang Y J, *et al.* Changes in epilithic algae community and its relationship with environmental factors in the Meixi River, a tributary of the Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1636-1647.
- [18] 向蓉, 李巧玉, 喻焱, 等. 汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(8): 3290-3301.  
Xiang R, Li Q Y, Yu Y, *et al.* Functional group characteristics of planktonic diatoms and their relationship with environmental factors in the Ruxi River[J]. Environmental Science, 2017, **38**(8): 3290-3301.
- [19] 周富春, 胡霞. 重庆市巴南区花溪河富营养化水平评价[J]. 环境工程, 2017, **35**(9): 141-144.  
Zhou F C, Hu X. Eutrophication assessment of Huaxi River in banan district of Chongqing city[J]. Environmental Engineering, 2017, **35**(9): 141-144.
- [20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [21] 中国科学院中国孢子植物志编辑委员会. 中国淡水藻志[M]. 北京: 科学出版社, 1988-2012.
- [22] 李家英, 齐雨藻. 中国淡水藻志: 第十九卷 硅藻门, 舟形藻科(II)[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [23] 水利部水文局, 长江流域水环境监测中心. 中国内陆水域常见藻类图谱[M]. 武汉: 长江出版社, 2012.
- [24] 朱惠忠, 陈嘉佑. 中国西藏硅藻[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [25] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [26] Davidson E A, Howarth R W. Environmental science: nutrients in synergy[J]. Nature, 2007, **449**(7165): 1000-1001.
- [27] Magurran A E. Ecological diversity and its measurement[M]. Dordrecht: Springer, 1988.
- [28] Warwick R M. Ecological diversity and its measurement; Anne E. Magurran; Chapman and Hall, London; second edition (paperback), 1991, 179pp; GBP 13.95; ISBN 0-412-38330-6 (paperback)[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1992, **159**(2): 279-280.
- [29] Daly A J, Baetens J M, de Baets B. Ecological diversity: measuring the unmeasurable[J]. Mathematics, 2018, **6**(7), doi: 10.3390/math6070119.
- [30] 邓春凯. 生物的指示作用与水环境[J]. 环境保护科学, 2007, **33**(4): 114-117.  
Deng C K. Indicative function of organism and water environment [J]. Environmental Protection Science, 2007, **33**(4): 114-117.
- [31] 于爽, 孙平安, 杜文越, 等. 人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 72-79.  
Yu S, Sun P A, Du W Y, *et al.* Effect of hydrochemistry characteristics under impact of human activity: a case study in the upper reaches of the Xijiang River basin[J]. Environmental Science, 2015, **36**(1): 72-79.
- [32] 冯天翼, 宋超, 陈家长. 水生藻类的环境指示作用[J]. 中国农学通报, 2011, **27**(32): 257-265.  
Feng T Y, Song C, Chen J Z. Environmental indication function of aquatic algae [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, **27**(32): 257-265.
- [33] 王松波, 耿红, 吴来燕. 三峡水库蓄水后库区浮游植物研究进展[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2013, **32**(4): 19-23.  
Wang S B, Geng H, Wu L Y. Research advances of phytoplankton after impounding in the Three Gorges Reservoir region[J]. Journal of South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition). 2013, **32**(4): 19-23.
- [34] 尹真真, 邓春光, 徐静. 三峡水库二期蓄水后次级河流回水河段富营养化调查[J]. 安徽农业科学, 2006, **34**(19): 4998-5000.  
Yin Z Z, Deng C G, Xu J. Research on eutrophication in the backwater reach of tributaries of the Three Gorges Reservoir after second water storage[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006, **34**(19): 4998-5000.
- [35] 刘潘, 吴林键. 重庆市花溪河流域污染成因分析及综合治理措施[J]. 三峡环境与生态, 2012, **34**(6): 42-45.  
Liu P, Wu L J. Source analysis and comprehensive treatment of water pollution in Huaxi Watershed, Chongqing [J]. Environment and Ecology in the Three Gorges, 2012, **34**(6): 42-45.
- [36] 邱光胜, 叶丹, 陈洁, 等. 三峡水库蓄水前后库区干流浮游藻类变化分析[J]. 人民长江, 2011, **42**(2): 83-86.  
Qiu G S, Ye D, Chen J, *et al.* Analysis on floating algae variation in main stem of TGP reservoir area before and after impoundment[J]. Yangtze River, 2011, **42**(2): 83-86.
- [37] 方小凤. 三峡水库香溪河库湾浮游植物群落结构时空分布与演替规律[D]. 宜昌: 三峡大学, 2012.  
Fang X F. Spatial and temporal distribution and succession for the phytoplankton assemblages in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2012.
- [38] 张红波. 花溪河拟柱孢藻的种群动态及其环境因子相关性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019.  
Zhang H B. The population dynamics of *Cylindropermopsis raciborskii*, and its relationship with environmental factors in Huaxi River[D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [39] Striebel M, Behl S, Stibor H. The coupling of biodiversity and productivity in phytoplankton communities: consequences for biomass stoichiometry[J]. Ecology, 2009, **90**(8): 2025-2031.
- [40] Norberg J, Swaney D P, Dushoff J, *et al.* Phenotypic diversity and ecosystem functioning in changing environments: a theoretical framework[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2001, **98**(20): 11376-11381.
- [41] Tian W, Zhang H Y, Zhang J, *et al.* Biodiversity effects on resource use efficiency and community turnover of plankton in Lake Nansihu, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(12): 11279-11288.
- [42] Allan E, Weisser W, Weigelt A, *et al.* More diverse plant communities have higher functioning over time due to turnover in complementary dominant species[J]. Proceedings of the National

- Academy of Sciences of the United States of America, 2011, **108** (41): 17034-17039.
- [43] Yuan L L, Jones J R. Rethinking phosphorus-chlorophyll relationships in lakes[J]. *Limnology and Oceanography*, 2020, **65**(8): 1847-1857.
- [44] Dillon P J, Rigler F H. The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes[J]. *Limnology and Oceanography*, 1974, **19**(5): 767-773.
- [45] Fu H, Yuan G X, Özkan K, *et al.* Patterns of seasonal stability of lake phytoplankton mediated by resource and grazer control during two decades of re-oligotrophication [J]. *Ecosystems*, 2020, doi: 10.1007/s10021-020-00557-w.
- [46] 朱利英, 陈媛媛, 刘静, 等. 温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 702-712.
- Zhu L Y, Chen Y Y, Liu J, *et al.* Spatio-temporal evolution and relationship of water environment quality and phytoplankton community in Wenyu River[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 702-712.
- [47] 周川, 蔚建军, 付莉, 等. 三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 873-883.
- Zhou C, Wei J J, Fu L, *et al.* Temporal and spatial distribution of environmental factors and phytoplankton during algal bloom season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 873-883.
- [48] Salmaso N. Long-term phytoplankton community changes in a deep subalpine lake: responses to nutrient availability and climatic fluctuations[J]. *Freshwater Biology*, 2010, **55**(4): 825-846.
- [49] Rothenberger M B, Burkholder J M, Wentworth T R. Use of long-term data and multivariate ordination techniques to identify environmental factors governing estuarine phytoplankton species dynamics[J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, **54**(6): 2107-2127.
- [50] 李巧玉, 刘瑞, 向蓉, 等. 三峡库区支流底栖硅藻功能群特征及其驱动因子分析——以汝溪河为例[J]. *湖泊科学*, 2017, **29**(6): 1464-1472.
- Li Q Y, Liu R, Xiang R, *et al.* Functional group characteristics of benthic diatoms and its driving factors in the branch of Three Gorges Reservoir: a case study of Ruxi River[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(6): 1464-1472.
- [51] 韩龙, 虞英杰, 梅鹏蔚, 等. 海河干流浮游植物与环境因子的灰色关联评价[A]. 见: 2016 中国环境科学学会学术年论文集(第二卷)[C]. 海口: 中国环境科学学会, 2016. 4.
- [52] Weilhoefer C L, Pan Y D. Diatom assemblages and their associations with environmental variables in Oregon Coast range streams, USA[J]. *Hydrobiologia*, 2006, **561**(1): 207-219.
- [53] 杨漪帆, 朱永青, 林卫青. 淀山湖蓝藻水华及其控制因子的模型研究[J]. *环境污染与防治*, 2009, **31**(6): 58-63, 88.
- Yang Y F, Zhu Y Q, Lin W Q. Simulation study on blue-green algae blooms in Dianshan Lake and its impact factors [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2009, **31**(6): 58-63, 88.
- [54] Tilman D, Kilham S S, Kilham P. Phytoplankton community ecology: the role of limiting nutrients [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1982, **13**: 349-372.
- [55] 王兰. 升金湖浮游植物群落的时空变化及其与环境因子的相关性研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2015.
- Wang L. Temporal and spatial variations in phytoplankton community and their correlations with environmental factors in Shengjin Lake[D]. Hefei: Anhui University, 2015.
- [56] 王丽卿, 许莉, 卢子园, 等. 淀山湖浮游植物数量消长及其与环境因子的关系[J]. *环境科学*, 2011, **32**(10): 2868-2874.
- Wang L Q, Xu L, Lu Z Y, *et al.* Dynamic of phytoplankton abundance and the relationship with environmental factors in Dianshan Lake, Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(10): 2868-2874.
- [57] Forsblom L, Engström-öst J, Lehtinen S, *et al.* Environmental variables driving species and genus level changes in annual plankton biomass[J]. *Journal of Plankton Research*, 2019, **41**(6): 925-938.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                       |                                                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission .....                                                                          | LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)          |
| Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM <sub>2.5</sub> Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period .....                                        | LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)             |
| Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM <sub>2.5</sub> in the Yangtze River Delta Based on Grids .....                                                        | HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)                   |
| Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration .....                                                                                            | LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)       |
| Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China .....                                    | ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)                  |
| Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM <sub>2.5</sub> Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China ..... | LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)       |
| Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides .....                                   | XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)         |
| Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed .....                                                                | HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)                                |
| Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake .....                                                                         | YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)           |
| Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer .....                                           | ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)    |
| Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City .....          | YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)              |
| Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland .....                                           | LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)          |
| Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou .....                                                        | BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)          |
| Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan .....                                     | ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)          |
| Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface .....                                                  | CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)             |
| Identifying the Sources of Groudwater NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N in Agricultural Region of Qingdao .....                                                                         | KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)         |
| Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir .....                                                              | HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)               |
| Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season .....                                                 | LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)                  |
| Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments .....                                                                                               | JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)                 |
| Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland .....                                                                           | ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)          |
| Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay .....                                                                                         | LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)               |
| Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment .....                       | MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)           |
| Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China .....                                                                   | GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)    |
| Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed .....                                                                                | BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)                                |
| Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles .....                                                                       | SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)        |
| Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents .....                                                                            | QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)                |
| Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants .....                              | LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)       |
| Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant .....                                          | WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)                          |
| Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge .....                                                                                                            | DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)        |
| Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants .....                                          | TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)          |
| Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR .....                                                                                     | LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)         |
| Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source .....                                                                                             | TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)             |
| Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System .....                                                                                    | LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)     |
| First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration .....                                         | ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)            |
| Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors .....                                                           | GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)             |
| Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure .....                                           | QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)       |
| Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent .....                                                                                            | ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)     |
| Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018 .....                                                  | WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)          |
| Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields .....                                                            | HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)             |
| Effects of Water and Fertilization Management on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions .....                                 | LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)       |
| Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil .....                                                                                   | YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)               |
| Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands .....                                                                                | ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)     |
| Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil .....                                                                       | CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)                  |
| Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province .....             | LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)                              |
| Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen .....                                                                   | LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)            |
| Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil .....                                                                                                       | ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527) |
| Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials .....                                                                         | YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)             |
| Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau .....                                                                 | LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)         |
| Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain .....                                           | LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)           |
| Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost .....                                                                                              | XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)             |