

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM _{2.5} 浓度遥感反演	刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一 (1513)
秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响	李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉 (1520)
基于 GAM 模型的西安市 O ₃ 浓度影响因素解析	黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎 (1535)
北京及周边 6 个城市大气 PM _{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征	朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕 (1544)
典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析	李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤 (1550)
成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析	王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛 (1561)
天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响	姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖 (1573)
涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正 (1582)
典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因	邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤 (1589)
中国地表水硝酸盐分布及其来源分析	张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦 (1594)
中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险	杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇 (1607)
小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析	范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟 (1619)
浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征	马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖 (1629)
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	米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴 (1636)
骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子	张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军 (1648)
拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系	王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁 (1657)
基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升 (1666)
岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析	赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航 (1676)
巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应	李如忠, 王莉, 刘超 (1684)
镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复	丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇 (1692)
氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用	杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君 (1700)
北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性	陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡 (1709)
新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用	黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵炯, 冯华军 (1716)
Ni 掺杂 Sb-SnO ₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶	石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠 (1725)
磁性 Fe ₃ O ₄ -CuO 非均相活化过碳酸钠降解 AO7	徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅 (1734)
赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星: 性能和机制	史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟 (1743)
工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响	张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜 (1752)
污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性	陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇 (1761)
改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性	毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆 (1770)
A ² /O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性	刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康 (1779)
基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制	杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮 (1787)
HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响	王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪 (1794)
低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征	朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良 (1801)
不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征	程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良 (1808)
投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响	杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪 (1816)
中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险	李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新 (1825)
基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染	胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜 (1838)
扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险	姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然 (1847)
桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估	陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波 (1855)
重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素	王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜 (1864)
棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用	刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛 (1871)
连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量	薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠 (1880)
纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响	邓继宝, 张春来, 徐卫红 (1888)
矿业废弃地复垦土壤-作物硒吸收特征及其对重金属拮抗效应	尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文 (1904)
不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响	杨彩迪, 宗玉统, 卢升高 (1914)
化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响	朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳 (1921)
紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应	熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明 (1930)
浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径	吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰 (1941)
极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素	孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国 (1950)
红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应	吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽 (1960)
稻田土壤 N ₂ O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制	郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅 (1968)
京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估	陈盼, 施晓清 (1976)
中国城市工业化发展与 PM _{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制	李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波 (1987)
《环境科学》征订启事 (1618)	
《环境科学》征稿简则 (1635)	
信息 (1724, 1769, 1800)	

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

米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 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: 为了解不同水文期三峡库区支流附石藻类与环境因子的关系, 分别于丰水期(2016年8月)、枯水期(2016年11月)及平水期(2017年3月)这3个时期, 对三峡库区支流梅溪河非回水区和回水区的26个采样点附石藻类进行采样并对其相关环境因子进行分析。结果表明, 3个水情期, 共鉴定出附石藻类5门47属106种(含变种)。其中, 丰水期采集到73种, 隶属5门38属, 枯水期67种, 隶属4门36属, 平水期63种, 隶属4门33属。丰水期、枯水期和平水期优势种分别为19种、17种和18种, 丰水期的主要优势种属为曲壳藻属、束丝藻属和席藻属, 枯水期为异极藻属、曲壳藻属和舟形藻属, 而平水期为异极藻属、曲壳藻属和色球藻属。3个时期共有的优势种为扁圆卵形藻(*Cocconeis placentula*)、曲壳藻(*Achnanthes* sp.)、近棒形异极藻(*Gomphonema subclavatum*)、小型异极藻(*G. parvulum*)、小型舟形藻(*Navicula parva*)和缢缩异极藻(*G. constrictum*)。冗余(RDA)分析表明, 回水区的附石藻类优势种相对丰度与电导率(Spc)、溶氧(DO)、pH、总磷(TP)和总氮(TN)的变化相关, 而在非回水区, 附石藻类优势种相对丰度主要与电导率(Spc)、pH、总磷(TP)、水温(WT)和流速(*v*)的变化有关。3个时期, 影响附石藻类环境因子具有差异, 然而, 3个时期小型异极藻、缢缩异极藻和曲壳藻等优势种的相对丰度均与总磷呈负相关, 与pH呈正相关。这些结果表明三峡库区不同水文期及水环境变化对附石藻类群落组成具有重要影响, 导致群落结构发生变化。

关键词: 三峡库区; 梅溪河; 附石藻类; 群落组成; 环境因子

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1636-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201909253

Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir

MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, YANG Song-qi, HE Shu-han, WU Zhong-xing*

(Key Laboratory of Eco-environments 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: To explore the relationship between the community of epilithic algae and environmental factors in tributaries of the Three Gorges Reservoir region, the epilithic algae and related environment factors were investigated from 26 sampling sites in Meixi River, a tributary of the Three Gorges Reservoir region, during flood period (August 2016), drought period (November 2016), and normal water period (March 2017). Results showed that 106 species (including varieties) belonging to 47 genera and 5 families were identified from 26 sampling sites during the three periods. Among these, 73 species belonged to 38 genera and 5 families in the flood period, 67 species belonged to 36 genera and 4 families in the drought period, and 63 species belonged to 33 genera and 4 families in the normal water period. Nineteen, 17, and 18 dominant species were identified during the flood period, drought period, and normal water period, respectively. The main dominant species were *Achnanthes* sp., *Aphanizomenon* sp., and *Phormidium* sp. in the flood period; *Achnanthes* sp., *Gomphonema* sp., and *Microcystis* sp. in the drought period; and *Gomphonema* sp., *Nitzschia* sp., and *Chroococcus* sp. in the normal water period. Moreover, species such as *Cocconeis placentula*, *Achnanthes* sp., *Gomphonema subclavatum*, *G. parvulum*, *Navicula parva*, and *G. constrictum* were determined to be the common dominant species during the three periods. Redundancy analysis revealed that the changes in the relative abundance of dominant species in the backwater sections were significantly related to the electrical conductivity, dissolved oxygen, pH, total phosphorus, and total nitrogen, and the relative abundance of dominant species in the natural sections was mainly related to the electrical conductivity, pH, total phosphorus, temperature, and velocity. Moreover, a different relationship with the environmental factors was determined among the three periods. However, a negative correlation between total phosphorus and the relative abundances in *G. parvulum*, *G. constrictum*, and *Achnanthes* sp. and a positive correlation between pH and the relative abundances in *G. parvulum*, *G. constrictum*, and *Achnanthes* sp. were found during the three periods. These results indicated that the differences in the hydrological regime and environmental factors in the Three Gorges Reservoir played an important role on the composition of epilithic algae community and led to a significant change in the community structure of epilithic algae.

Key words: Three Gorges Reservoir; Meixi River; epilithic algae; community composition; environmental factors

收稿日期: 2019-09-27; 修订日期: 2019-11-05

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, XDJK2017B010)

作者简介: 米文梅(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为藻类生态学, E-mail: 1349634825@qq.com

* 通信作者, E-mail: wuzhx@swu.edu.cn

长江三峡工程是世界上综合效益最大的水利枢纽之一。三峡工程蓄水运行后,在支流形成大面积的回水区,其水文情势相比于天然河流具有显著差异,且其环境状况发生显著改变。有研究表明,蓄水改变了水动力条件和水环境条件,再加上季节因素的交互作用,使得三峡库区蓄水后浮游生物密度显著增加^[1],且一些水体植物群落结构不稳定^[2]。同时,受蓄水的影响,鱼类物种组成和群落结构也发生改变^[3]。

附石藻类是指生长在如:花岗岩、大小鹅卵石和大石头等坚硬而致密的基质上的底栖藻类,是淡水水体中的初级生产者以及物质和能量循环中的重要一环,在淡水水域生态系统中具有重要作用^[4]。同时,附石藻类是一个小而简单的有效模式生物系统,具有高度的物种丰富度,是常被用作研究生态系统结构和功能的主要对象^[5]。Cattaneo 等^[6]的研究表明附石藻类的生物量、生物多样性和群落结构是淡水湖泊富营养化和水质监测的重要生物指标。此外,附石藻类由于生长范围广泛,对环境变化十分敏感,且其生长位置相对固定,因此通过建立附石藻类群落对外界环境的应答关系,能够更准确的监测水质状况以及生态质量^[7]。Round 等^[8]的研究发现一定浓度的氮和磷污染物的量与底栖藻类种群数量具有正相关关系。裴国风等^[9]对东湖沿岸带的底栖藻类的研究表明水温与底栖藻类现存量呈负相关。Potapova 等^[10]对美国河流底栖藻类与环境因子关系的研究发现,电导率和主要离子的浓度与藻类分布显著相关。然而,不同的地区具有不同的环境特点,导致了同一种藻在不同环境条件下的响应机制可能存在差异^[11]。三峡库区由于反季节的水位变动,且涉及生境较为复杂,然而,相对于三峡库区较多的浮游动、植物研究而言,有关三峡库区附石藻类的研究则相对较少。因此,对三峡库区附石藻类的群落组成及其驱动因子进行分析,将有助于评判三峡库区的水质状况以及水生生态系统状况。

为探讨三峡库区不同水文情势对不同水体附石藻类的影响,本研究以三峡库区腹心地带——梅溪河流域为研究区域,通过对梅溪河附石藻类群落和环境因子进行调查,并综合运用 Mcnaughton 优势度分析、去趋势对应分析(DCA)和冗余分析(RDA)等方法,探究梅溪河流域不同地区附石藻类在不同水文时期群落结构以及组成的变化及其主要的影响因素,以期对三峡库区水质监测和保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

梅溪河流域位于 $108^{\circ}56'22'' \sim 109^{\circ}33'38''E$,

$31^{\circ}02'39'' \sim 31^{\circ}32'43''N$,发源于重庆市巫溪县塘坊乡,在奉节县汇入长江,全长为 112.8 km,其流域面积达 $1\,928\text{ km}^2$,总落差为 $1\,610\text{ m}$,年平均流量约为 $41\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,是三峡库区的腹心地带。根据梅溪河流域的地理区域特征和水文特征,本研究设置了 26 个样点(图 1),其中非回水区样点 21 个($S1 \sim S21$),分布于多条支流中,回水区样点 5 个($S22 \sim S26$),并于丰水期(2016 年 8 月,三峡库区低水期)、枯水期(2016 年 11 月,三峡库区蓄水期)和平水期(2017 年 3 月,三峡库区泄水期)对该流域 26 个样点的附石藻类及理化参数进行采样监测。

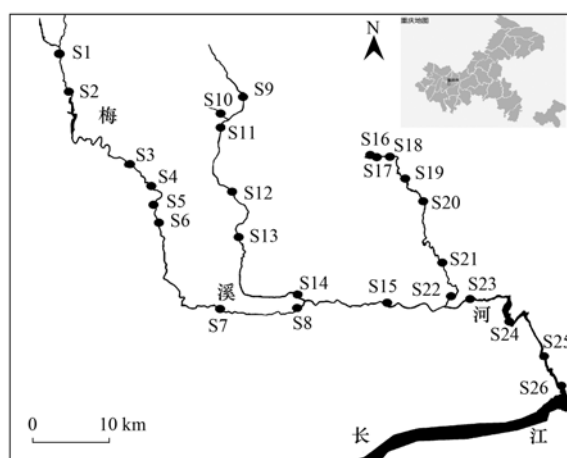


图 1 研究区样点分布示意

Fig. 1 Distributions of sampling sites in the Three Gorges Reservoir region

1.2 样本采集及鉴定

附石藻类采集依据美国环保署(EPA)的采集方法^[12],在每个样点随机选取 3~5 块直径约为 10~20 cm 的石头,并在石头上选取半径为 2.7 cm 的固定面积,共随机取 5 个圆形样方并用尼龙刷刷取样方中的藻,记录刷液体积。取其中一份加甲醛进行固定,经过一系列定量化酸处理步骤后,定容到 0.5 mL,取 0.1 mL 制片分别在 1 000 倍油镜和扫描电子显微镜下进行硅藻鉴定;另一部分加鲁哥氏固定液固定用于其他附石藻类的定性定量分析。藻类鉴定参考文献[13~20]。藻类定量分析采用浮游植物计数框来计数,获得各样点藻类个体总数,并换算为单位面积石块上的藻密度。

1.3 理化指标

pH、水温(WT)、电导率(Spc)、溶氧(DO)和流速(v)等采用多参数水质分析仪 DS5 (HYDROLAB, USA)现场测定。透明度(SD)用塞氏盘法测量。水体流速用 LS45A 型旋杯式流速仪测定。水体中的总氮(TN)和总磷(TP)指标用 Flowsys 连续流动分析仪(SYSTEAL,意大利)进行测定。

1.4 数据处理及分析

对原始数据采用 Excel 进行统计整理,根据藻类鉴定结果计算各样点的附石藻类的种数、相对密度以及藻类的 Mcnaughton 优势度,将优势度大于 0.2 的藻类归为优势种^[21].采用 SPSS 22.0 软件对附石藻类的数据和环境因子进行多元统计分析^[22],利用 Canoco for Windows 4.5 软件对附石藻类物种数据进行去趋势对应分析(DCA),由于最大长度均低于 4.0,故本研究选择典范对应分析(RDA)进行分析^[23].对回水区与非回水区各时期参数采用独立样本 *T* 检验进行差异性检验,若 $P < 0.01$,则表示差异极显著,若 $P < 0.05$,则表示差异显著, $P > 0.05$ 则无显著性差异,并用 $\lg(x+1)$ 转化,数据转换之后绘制箱线图.图表的制作应用 Origin 2017.

2 结果与分析

2.1 梅溪河流域附石藻类群落特征

3 个时期,26 个样点共鉴定出附石藻类 5 门 47 属 106 种.其中,丰水期采集到 73 种,隶属 5 门 38 属,回水区采集到 33 种,隶属 3 门 21 属,非回水区采集到 71 种,隶属 5 门 36 属;枯水期 67 种,隶属 4 门 36 属,回水区采集到 35 种,隶属 4 门 23 属,非回水区采集到 60 种,隶属 3 门 32 属;平水期 63 种,隶属 4 门 33 属,回水区采集到 35 种,隶属 4 门 22 属,非回水区采集到 57 种,隶属 4 门 30 属.

3 个时期附石藻类在种类组成均以硅藻为主,其中,丰水期,除 S3 样点外,其余样点附石藻类组成均以硅藻门种类数目占优势,所占比例均超过 50%,蓝绿藻种类数目所占比例在 10%~30% 之间,其他门的种类数目低于 3%.其中回水区所有样点均以硅藻门占绝对优势,且仅有硅藻门、蓝藻门和绿藻门,在非回水区,除样点 S3 是以绿藻门为主体外,其余样点均以硅藻门占绝对优势[图 2(a)];枯水期,除 S12 和 S26 样点外,其余样点种类数目也均以硅藻门占绝对优势,在回水区, S26 样点蓝藻门占优势,其余样点则均以硅藻门占优势,在非回水区,除 S12 样点外,其余样点均以硅藻门为主体[图 2(b)].平水期,所有样点均以硅藻门占绝对优势,所占比例均超过 50% [图 2(c)].

3 个时期藻细胞密度的均值为 228 705.7 ind. $\cdot$ cm⁻²,其中丰水期为 80 688.1 ind. $\cdot$ cm⁻²,枯水期为 377 443.7 ind. $\cdot$ cm⁻²,平水期 319 467.4 ind. $\cdot$ cm⁻²,且 26 个样点中枯水期的 S19 样点附石藻类细胞密度最大,达到了 5.3×10^5 ind. $\cdot$ cm⁻²,最小则为丰水期的 S25 和 S26 样点,均为 262.1 ind. $\cdot$ cm⁻².其中,丰水期,回水区藻密度是 15 499.8

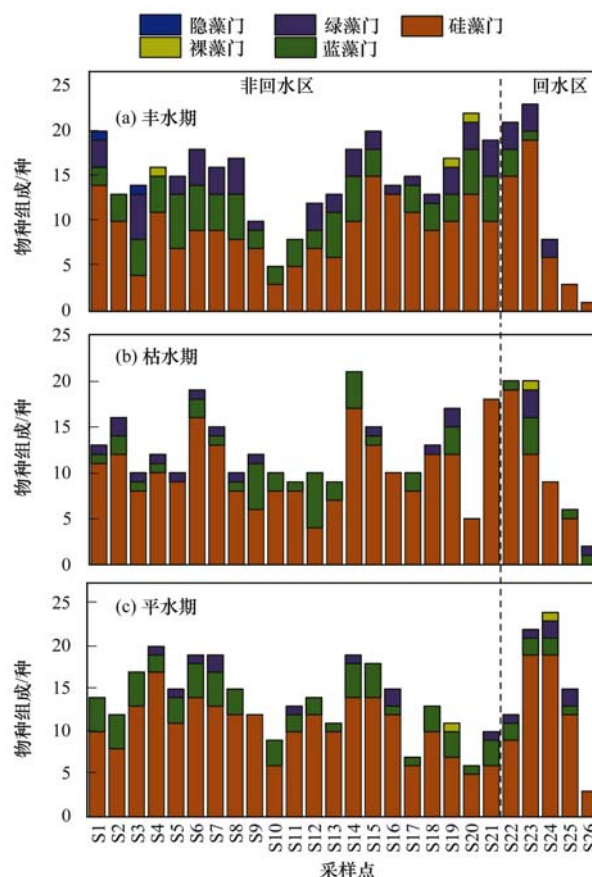


图 2 不同时期各样点附石藻物种组成

Fig. 2 Species composition of epilithic algae at sampling sites during the different hydrological periods

ind. $\cdot$ cm⁻²,非回水区为 65 188.3 ind. $\cdot$ cm⁻² [图 3(a)];枯水期,回水区藻密度是 21 292.6 ind. $\cdot$ cm⁻²,非回水区为 356 151.1 ind. $\cdot$ cm⁻² [图 3(b)];平水期,回水区藻密度是 60 601.3 ind. $\cdot$ cm⁻²,非回水区为 258 866.1 ind. $\cdot$ cm⁻² [图 3(c)].

2.2 梅溪河流域附石藻类优势种变化

丰水期,各样点共鉴定出 19 种优势种,分别为膨胀桥弯藻 (*Cymbella pusilla*)、扁圆卵形藻 (*Cocconeis placentula*)、喙头舟形藻 (*Navicula rhynchocephala*)、曲壳藻 (*Achnanthes* sp.)、束丝藻 (*Aphanizomenon* sp.)、微细转板藻 (*Mougeotia parvula*)、近棒形异极藻 (*Gomphonema subclavatum*)、颤藻 (*Oscillatoria* sp.)、近缘桥弯藻 (*C. affinis*)、喜雪曲壳藻 (*A. kryophila*)、席藻 (*Phormidium* sp.)、缢缩异极藻 (*G. constrictum*)、小型异极藻 (*G. parvulum*)、小型舟形藻 (*N. parva*)、尾丝藻 (*Uronema confervicolum*)、刺孢胶刺藻 (*Gloeotrichia echinulata*)、披针曲壳藻 (*A. lanceolata*)、依沙束丝藻 (*Aphanizomenon issatschenkoi*) 和桥弯藻 (*Cymbella* sp.),其中,回水区的主要优势种有膨胀桥弯藻、喙形舟形藻、曲壳藻、近缘桥弯藻、披针曲壳藻和喜雪

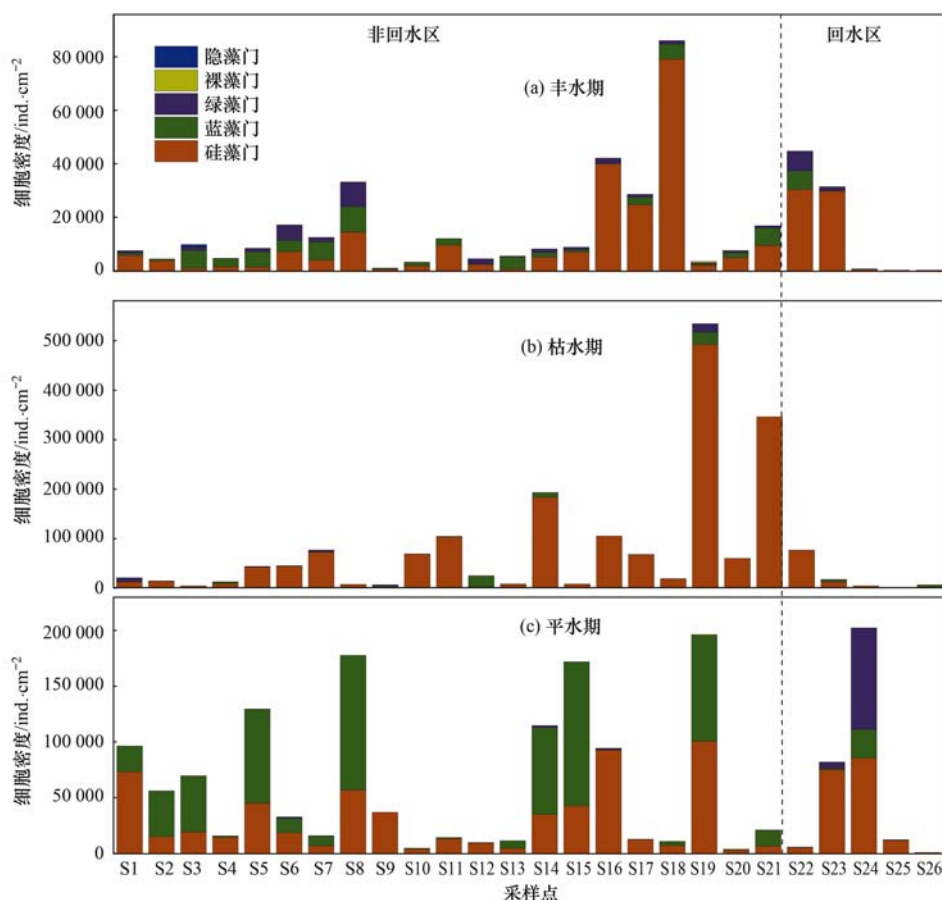


图3 不同时期各样点附石藻细胞密度

Fig. 3 Density of epilithic algae at sampling sites during the different hydrological period

曲壳藻,非回水区的主要优势种有扁圆卵形藻、曲壳藻、束丝藻、喜雪曲壳藻、席藻、尾丝藻和膨胀桥弯藻。束丝藻、微细转板藻、刺孢胶刺藻、席藻、依沙束丝藻和近棒形异极藻仅在非回水区是优势种,而尾丝藻和桥弯藻在回水区的相对丰度的均值高于非回水区[图4(a)]。

枯水期,各样点共有17种优势种,依次为扁圆卵形藻、曲壳藻、微细转板藻、近棒形异极藻、颤藻、喜雪曲壳藻、席藻、缢缩异极藻、小型异极藻、小型舟形藻、尾丝藻、系带舟形藻(*N. cincta*)、菱形藻(*Nitzschia* sp.)、单岐藻(*Tolypothrix* sp.)、微囊藻(*Microcystis* sp.)、细小桥弯藻(*C. gracilis*)和尖针杆藻(*Synedra acus*),其中,回水区的主要优势种有小型异极藻、曲壳藻、系带舟形藻、小型舟形藻、菱形藻和尖针杆藻,非回水区的主要优势种有近棒形异极藻、小型异极藻、曲壳藻、扁圆卵形藻、缢缩异极藻和小型舟形藻。微细转板藻、近棒形异极藻、席藻、细小桥弯藻和尾丝藻仅在非回水区为优势藻,而尖针杆藻仅在回水区是优势藻[图4(b)]。

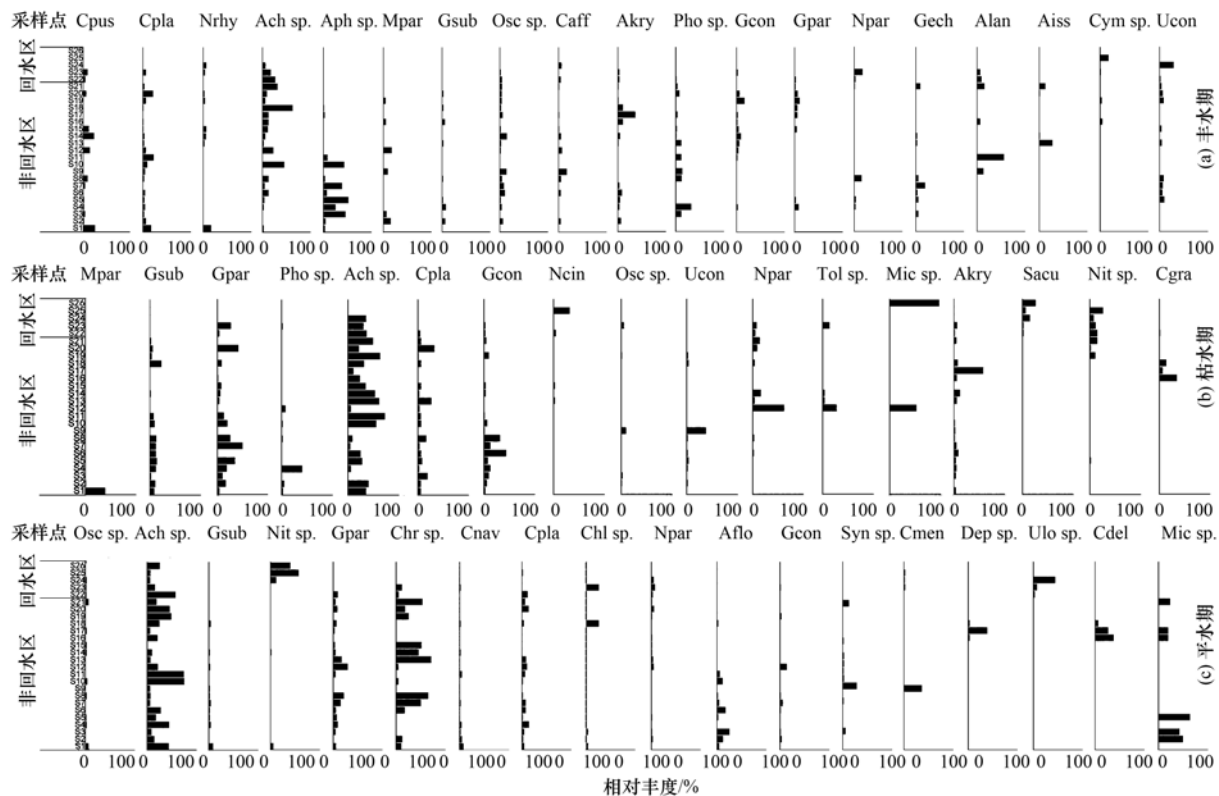
平水期,优势种18种,为颤藻、曲壳藻、近棒形异极藻、菱形藻、小型异极藻、小型舟形藻、色球藻(*Chroococcus* sp.)、偏肿桥弯藻(*C. naviculiformis*)、

扁圆卵形藻、刚毛藻(*Cladophora* sp.)、微细转板藻、水华束丝藻(*A. flos-aquae*)、针杆藻(*Synedra* sp.)、梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)、细齿藻(*Denticula* sp.)、丝藻(*Ulothrix* sp.)、披针形桥弯藻(*Cym. delicatula*)和缢缩异极藻,其中,回水区的主要优势种有曲壳藻、菱形藻、色球藻、小型舟形藻和丝藻,非回水区的主要优势种有曲壳藻、小型异极藻、色球藻、扁圆卵形藻、水华束丝藻和微囊藻。颤藻、近棒形异极藻、水华束丝藻、缢缩异极藻、微囊藻、针杆藻、细齿藻和披针形桥弯藻仅在非回水区为优势种,而丝藻仅在回水区为优势种[图4(c)]。

3个水文时期共有的优势种主要是扁圆卵形藻、曲壳藻、近棒形极藻、小型异极藻和小型舟形藻缢缩异极藻,回水区的优势种为曲壳藻、扁圆卵形藻、小型异极藻、近棒形异极藻、色球藻和缢缩异极藻,非回水区的主要优势种有小型舟形藻、菱形藻、尖针杆藻和丝藻。

2.3 梅溪河流域水体理化因子变化

3个时期中丰水期的水温、溶解氧、流速、电导率、浊度、透明度、pH、总氮(TN)和总磷(TP)分别为17.05~28.97℃、5.89~10.72 mg·L⁻¹、0.08~0.84 m·s⁻¹、135.1~681.1 μS·cm⁻¹、0.10~68.60



Cpus: 膨胀桥弯藻 (*Cymbella pusilla*)、Cpla: 扁圆卵形藻 (*Cocconeis placentula*)、Nrhy: 喙头舟形藻 (*Navicula rhynchocephala*)、Ach sp.: 曲壳藻 (*Achnanthes* sp.)、Aph sp.: 束丝藻 (*Aphanizomenon* sp.)、Mpar: 微细转板藻 (*Mougeotia parvula*)、Gsub: 近棒形异极藻 (*Gomphonema subclavatum*)、Osc sp.: 颤藻 (*Oscillatoria* sp.)、Caff: 近缘桥弯藻 (*Cymbella affinis*)、Akry: 喜雪曲壳藻 (*Achnanthes kryophila*)、Pho sp.: 席藻 (*Phormidium* sp.)、Geon: 缢缩异极藻 (*Gomphonema constrictum*)、Gpar: 小型异极藻 (*Gomphonema parvulum*)、Npar: 小型舟形藻 (*Navicula parva*)、Ucon: 尾丝藻 (*Uronema confervicolum*)、Gech: 刺胞胶刺藻 (*Gloeotrichia echinulata*)、Alan: 披针曲壳藻 (*Achnanthes lanceolata*)、Aiss: 依沙束丝藻 (*Aphanizomenon issatschenkoi*)、Cym sp.: 桥弯藻 (*Cymbella* sp.)、Nein: 系带舟形藻 (*Navicula cincta*)、Nit sp.: 菱形藻 (*Nitzschia* sp.)、Tol sp.: 单歧藻 (*Tolypothrix* sp.)、Mic sp.: 微囊藻 (*Microcystis* sp.)、Cgra: 细小桥弯藻 (*Cymbella gracilis*)、Sacu: 尖针杆藻 (*Synedra acus*)、Chr sp.: 色球藻 (*Chroococcus* sp.)、Cnav: 偏肿桥弯藻 (*Cymbella naviculiformis*)、Chl sp.: 刚毛藻 (*Cladophora* sp.)、Aflo: 水华束丝藻 (*Aphanizomenon flos-aquae*)、Syn sp.: 针杆藻 (*Synedra* sp.)、Cmen: 梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*)、Den sp.: 细齿藻 (*Denticula* sp.)、Ulo sp.: 丝藻 (*Ulothrix* sp.)、Cdel: 披针形桥弯藻 (*Cymbella delicatula*)

图4 不同时期各样点优势种相对丰度

Fig. 4 Relative abundance of dominant species in the different hydrological periods

NTU、5~200 cm、8.30~9.82、0.01~5.04 mg·L⁻¹和0.04~0.69 mg·L⁻¹；枯水期分别为7.59~19.04℃、7.04~11.53 mg·L⁻¹、0.02~1.38 m·s⁻¹、91.0~617.0 μS·cm⁻¹、0.00~908.00 NTU、10~313 cm、7.18~8.54、0.98~6.79 mg·L⁻¹和0.02~1.09 mg·L⁻¹；平水期分别为7.77~15.14℃、8.29~13.24 mg·L⁻¹、0.01~1.56 m·s⁻¹、90.0~667.0 μS·cm⁻¹、0.00~2808.00 NTU、15~236 cm、7.78~9.18、0.85~5.17 mg·L⁻¹和0.00~0.19 mg·L⁻¹。其中，丰水期各样点的平均水温和pH高于其他两个水文期，且枯水期和平水期各样点的平均水温无显著差异。溶解氧均值在枯水期最高，而丰水期最低。流速在平水期最高，丰水期最低。电导率在丰水期最高，枯水期最低。浊度在平水期最高，丰水期最低。总氮在枯水期最高，丰水期最低。总磷在枯水期最高，平水期最低。回

水区的水温、电导率、浊度、透明度、pH和总氮的均值均大于非回水区的均值，而在回水区，流速的均值低于非回水区的均值 ($P < 0.05$) (图5)。

2.4 附石藻类与环境因子关系

附石藻类物种数据进行冗余分析(RDA)，结果显示，丰水期和枯水期，回水区RDA排序第一轴和第二轴的特征值分别均为0.544和0.264，物种和环境的相关性系数均为1，前两轴对数据的解释量分别是54.4%和80.8%；平水期，RDA排序第一轴和第二轴的特征值分别为0.536和0.289，物种和环境的相关性系数均为1，前两轴对数据的解释量分别是53.6%和82.4% (表1)。

丰水期，在回水区，曲壳藻、缢缩异极藻、喜雪曲壳藻、颤藻、小型异极藻和小型舟形藻的相对丰度与pH、透明度和电导率呈正相关，但与浊度、总氮和总磷呈负相关 [图6(a)]，在非回水区，小型异极藻、

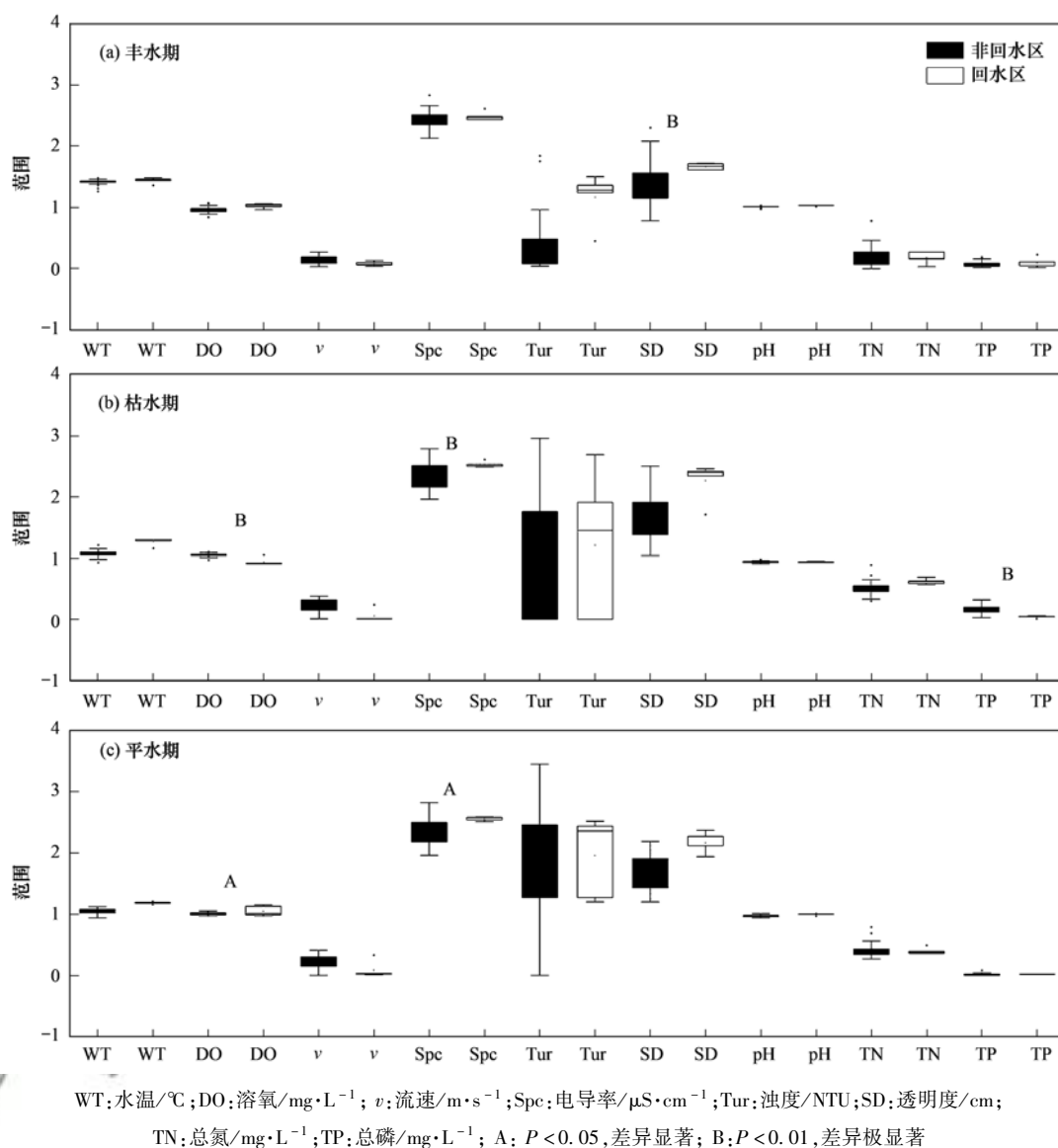


图5 不同时期各样点环境因子箱型图

Fig. 5 Boxplot of environmental factors in sampling sites during the different hydrological periods

曲壳藻、尾丝藻和缢缩异极藻与电导率、浊度、pH 和总氮呈正相关, 而与总磷和透明度呈负相关[图 6 (b)].

枯水期, 在回水区, 曲壳藻、喜雪曲壳藻、缢缩异极藻、小型舟形藻、小型异极藻、尾丝藻和颤藻与总氮、浊度、溶氧和 pH 呈正相关, 而与总磷和水温呈负相关[图 6 (c)], 在非回水区, 缢缩异极藻、喜雪曲壳藻、颤藻和微细转板藻与电导率、透明度、pH 和总氮呈正相关, 与溶氧、总磷和流速呈负相关[图 6 (d)].

平水期, 在回水区, 颤藻、小型舟形藻、缢缩异极藻、水华束丝藻和梅尼小环藻的相对丰度与溶氧、总氮和 pH 呈正相关, 而与电导率、流速与总磷具有负相关关系[图 6 (e)], 在非回水区, 针杆藻、梅尼小环藻和水华束丝藻与 pH、溶氧、水温 and 透明度呈正相关, 而与电导率、浊度和总磷呈负相关[图 6 (f)]. 综合而言, 3 个水文时期, 在回水区, 曲壳藻、

缢缩异极藻、小型舟形藻、颤藻、单歧藻和席藻对环境因子的响应具有一致性, 而在非回水区, 尾丝藻、系带舟形藻和颤藻对环境因子的响应具有一致性, 回水区和非回水区的主要优势藻种总是与总磷具有负相关关系, 而与 pH 具有正相关关系.

对样点和环境因子进行 RDA 分析(图 7), 丰水期、枯水期和平水期出现较为明显的分区; 同时, 回水区和非回水区样点在枯水期和平水期出现明显分区, 而在丰水期则未发现回水区和非回水区样点具有明显分区.

3 讨论

3.1 梅溪河流域附石藻类群落特征及其分布情况

在自然水体中, 藻类的物种组成是以硅藻占优势的、兼有少量蓝绿藻的群落结构, 然而, 当水体受到一定的人为干扰而被污染以后, 藻类的群落组成

表 1 不同时期主要优势种与环境因子的 RDA 分析

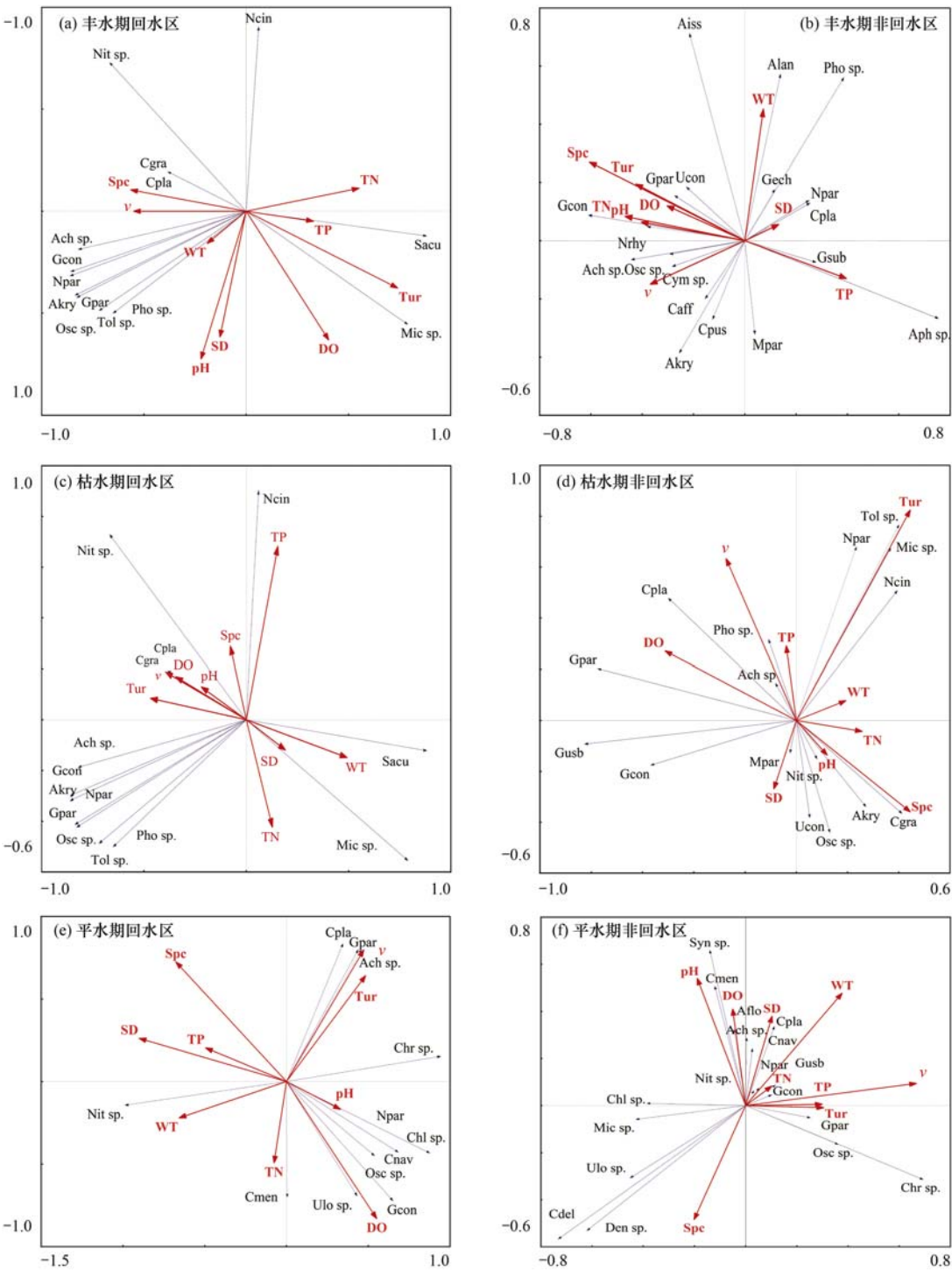
Table 1 RDA analysis between dominant species and environmental factors in the different hydrological periods

时期	样点	参数项	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4
丰水期	非回水区	特征值	0.146	0.108	0.096	0.079
		物种-环境因子相关系数	0.941	0.925	0.908	0.815
		种类数据的累积变量百分比/%	14.6	25.4	34.9	42.8
		种类-环境相关的累计变量百分比/%	25.8	44.8	61.7	75.6
		总特征值	1			
		所有典范特征值	0.566			
	回水区	特征值	0.544	0.264	0.125	0.068
		物种-环境因子相关系数	1	1	1	1
		种类数据的累积变量百分比/%	54.4	80.8	93.2	100
		种类-环境相关的累计变量百分比/%	54.4	80.8	93.2	100
		总特征值	1			
		所有典范特征值	1			
枯水期	非回水区	特征值	0.213	0.153	0.11	0.071
		物种-环境因子相关系数	0.924	0.93	0.903	0.89
		种类数据的累积变量百分比/%	21.3	36.6	47.6	54.7
		种类-环境相关的累计变量百分比/%	32.9	56.5	73.4	84.4
		总特征值	1			
		所有典范特征值	0.647			
	回水区	特征值	0.544	0.264	0.125	0.068
		物种-环境因子相关系数	1	1	1	1
		种类数据的累积变量百分比/%	54.4	80.8	93.2	100
		种类-环境相关的累计变量百分比/%	54.4	80.8	93.2	100
		总特征值	1			
		所有典范特征值	1			
平水期	非回水区	特征值	0.193	0.109	0.087	0.066
		物种-环境因子相关系数	0.834	0.927	0.826	0.78
		种类数据的累积变量百分比/%	19.3	30.2	38.9	45.4
		种类-环境相关的累计变量百分比/%	35	54.7	70.4	82.2
		总特征值	1			
		所有典范特征值	0.553			
	回水区	特征值	0.536	0.289	0.147	0.029
		物种-环境因子相关系数	1	1	1	1
		种类数据的累积变量百分比/%	53.6	82.4	97.1	100
		种类-环境相关的累计变量百分比/%	53.6	82.4	97.1	100
		总特征值	1			
		所有典范特征值	1			

会发生明显的变化,转变为以蓝绿藻占优势的群落^[24,25]. 本研究发现,梅溪河流域大多数样点附石藻类以硅藻门种类占优势,比例均达到 50% 以上(图 2),表明梅溪河流域大多数样点附石藻类群落组成仍保持自然河流状态. 然而,受库区蓄水调节的影响,枯水期(三峡库区蓄水期)回水区 S26 样点蓝藻门占优势. 已有研究表明三峡库区蓄水以后,许多水体的水文特征发生了明显的变化,一些水体由原先的天然河道逐渐转变为水库类湖泊型水体,这使得水体流速变缓,不利于污染物的扩散自净^[26]. 这表明三峡库区蓄水调节等水文变动影响了梅溪河附石藻类群落组成. 而丰水期(三峡库区低水期)非回水区 S3 样点则是绿藻门占优势,此外,3 个时期,梅溪河非回水区一些样点,如:枯水期的 S12 和丰水期

的 S3 样点藻类组成也由硅藻为优势转变为蓝藻或绿藻为优势(图 2). 调查期间发现,该区域存在着河沙开采和农田灌溉,导致了这些样点周边的面源污染及水体泥沙含量增加的影响,表明库区的农业面源污染,影响了库区水体理化因子,从而对浮游生物和底栖生物种类、数量及其组成有着重要的影响^[27].

贾兴焕等^[28]的研究表明三峡库区香溪河支流附石藻类密度冬、春季高于夏、秋季. 付君珂等^[29]的研究发现库区奉节地区支流不同河段非蓄水期附石藻类细胞密度明显低于蓄水期. 本研究也发现,梅溪河 3 个时期附石藻类细胞密度在枯水期最高,丰水期最低(图 3),支持了前面的研究结论,即附石藻类细胞密度冬、春季高于夏季,蓄水期高于非蓄水期,



藻种名缩写同图4

图6 不同时期主要优势种与环境因子的 RDA 排序图

Fig. 6 RDA ordination diagram between dominant species and environmental factors in the different hydrological periods

表明冬季三峡库区蓄水有利于梅溪河附石藻类的生长。张蔚珍等^[30]的研究发现西湖附石藻类在不同季节优势种差异显著。刘奕伶等^[31]对古夫河研究发现不同时期着生藻类优势种变化明显,付君珂等^[29]对库区奉节地区不同支流、不同河段附石藻类研究发现非蓄水期不同河段优势藻种差异明显,而蓄水期不同河段优势种差异不明显,本研究发现3个时期

的优势藻,如丰水期的主要优势种属为曲壳藻属、束丝藻属和席藻属,枯水期则为异极藻属、曲壳藻属、微囊藻属和尖针杆藻属,平水期则为异极藻属、菱形藻属、色球藻属和微囊藻属。同时,本研究也发现3个时期非回水区的主要优势种为曲壳藻属、颤藻属、束丝藻属、桥弯藻、异极属和舟形藻属,而回水区主要为舟形藻属、微囊藻属、针杆藻属、菱形藻属、色球

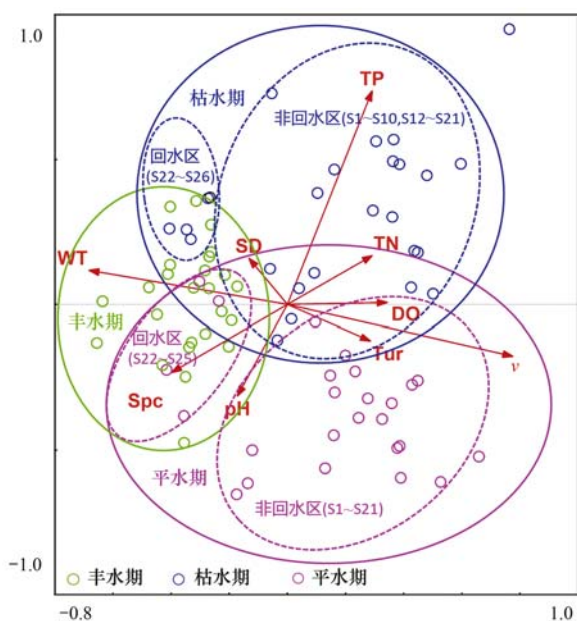


图7 不同时期各样点与环境因子的 RDA 排序图

Fig. 7 RDA ordination diagram between sampling sites and environmental factors in the different hydrological periods

藻属和刚毛藻属(图4),支持了上述研究结论,表明库区3个水文期影响了梅溪河附石藻类优势种,库区水文情势变动对附石藻类群落组成具有显著的影响,导致了不同水文期优势藻种不同,呈现对不同环境的不同指示特征。

3.2 梅溪河流域附石藻类群落特征与环境因子的关系

底栖藻类对水体环境变量十分敏感,其群落结构与水体环境具有直接的关系^[32]。本研究发现,3个水文期的水温在7.59~28.97℃之间,丰水期的各样点的水温明显高于其他两个时期(图5),而蓝、绿藻在平水期具有最大细胞密度,硅藻则在枯水期出现了最大细胞密度(图4),RDA结果也表明,在枯水期和平水期,回水区多数优势种的相对丰度均与水温呈负相关,而在丰水期呈正相关(图6)。Engle等^[33]认为温度变化通过控制底栖藻类光合作用或呼吸作用的酶促反应,直接影响藻类的生长,并可通过控制水体中各类物质的解离、溶解和分解等间接影响藻类的生长。一般而言,蓝藻、绿藻适宜在较高的水温条件下生长,硅藻则适宜生活在较低的水温环境中^[34]。因此,三峡库区蓄水期间的水温变幅,可能导致了不同附石藻类光合、生长出现差异,使得附石硅藻群落的组成和优势种发生明显的变化^[35,36]。Visser等^[37]的研究也发现温度升高还能提高蓝藻与其他浮游植物的竞争力。本研究发现在丰水期蓝藻门物种数所占比例达到最高,进一步说明丰水期较高的水温有利于蓝藻丰度的增加,使其在竞争中具有明显的优势,导致物种数和多样性发生变化。

有研究表明,水体pH值与藻类生长关系密切,与藻类数量具有较好的相关性^[38]。任辉等^[39]的研究发现硅藻门植物受pH影响较大,适宜碱性环境生长。本研究发现,梅溪河流域水体采样期间呈碱性(7.18~9.27),且多数样点藻类组成以硅藻为优势(图2),表明梅溪河碱性的水体有利于附石硅藻的生长。有研究已经发现, α -中污染性硅藻如:变异直链藻、双尖菱板藻的相对丰度及密度与pH呈正相关,而 β -中污染性硅藻如:近缘桥弯藻、扁圆卵形藻、肋缝菱形藻和中强污染性硅藻如:小型异极藻和梅尼小环藻的相对丰度与pH呈负相关^[40,41]。本研究发现3个时期优势藻如:缢缩异极藻、喜雪曲壳藻、颤藻、小型异极藻、小型舟形藻、尾丝藻、针杆藻、水华束丝藻和梅尼小环藻的相对丰度均与pH呈正相关(图6),结果并不完全支持了不同污染性硅藻呈现与pH不同的相关性的研究。因此,不同水域的不同环境特点,导致了同一物种藻在不同环境条件下的响应机制可能存在差异^[11]。Dixit等^[42]认为水体的酸碱度会影响藻类的生长,且影响藻类许多代谢过程,从而使得底栖藻类的分布会受pH的影响。吴运东等^[43]的研究表明莱茵衣藻和蛋白核小球藻胞外碳酸酐活性和光合效率随着pH的升高而增大。王铭等^[44]发现当pH在7.5~8.0范围内,雨生红藻光合效率较高。本研究发现3个时期优势种呈现不同差异,推测可能是由于不同藻类光合效率及呼吸效率对pH及相关因子耦合呈现不同的特征效应。

Dalu等^[41]的研究发现溶解氧、浊度与底栖硅藻群落结构的变化具有显著的关系。本研究发现在枯水期和平水期,回水区的附石藻类优势种与溶氧和浊度呈正相关(图6),且回水区的浊度与溶解氧在这两个时期高于丰水期回水区的浊度与溶氧,表明梅溪河流域附石藻类适宜在较高溶解氧和浊度的环境中生长,且不同水文时期溶解氧及浊度的变化影响附石藻类群落结构,使得回水区与非回水区群落结构及组成存在一定的差异。李巧玉等^[40]的研究表明变异直链藻、披针形舟形藻和近缘桥弯藻与溶解氧呈负相关。然而,本研究发现的曲壳藻、喜雪曲壳藻、缢缩异极藻、小型舟形藻、小型异极藻、尾丝藻、颤藻、水华束丝藻和梅尼小环藻与溶氧呈正相关,进一步表明,水体环境的变化是驱动附石藻类群落结构变化的重要原因。

周贤杰等^[45]的研究表明,随着氮、磷营养盐浓度的增加,藻类由清洁型向耐污型转化,细胞密度、叶绿素浓度和比增长率随氮、磷浓度的变化有相同的增减趋势。本研究表明,3个水情期总氮的平均浓度为 $1.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,总磷的平均浓度为 $0.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图

5), 因此, 单从营养盐含量来看, 梅溪河流域水体的氮、磷浓度已达到富营养化水平, 将在一定程度上影响藻类组成及丰度的变化^[42]. 杨宋琪等^[46]的研究表明黑河张掖段浮游植物总密度与总氮呈显著相关, 且总氮浓度与优势种分布呈正相关. 本研究也发现除丰水期的回水区外, 其余时期和样点的优势种相对丰度均与总氮呈正相关, 支持了总氮能够直接或间接影响梅溪河附石藻类的生长及分布^[47,48].

Ogata 等^[49]在研究英国哥伦比亚 Salmonid 河流底栖藻类生物量和物种组成与环境因子的相关关系时发现, 藻类群落结构的变化与溶解性磷含量密切相关. 王倩^[50]的研究表明硅藻群落结构的变化主要与溶解性磷含量等水体理化因子密切相关. Pan 等^[51]的研究也发现激流环境中的总磷对底栖藻类多样性和物种丰富度具有重要的影响. 因此, 总磷常被确定为与底栖生物, 特别是与硅藻物种丰度和生物多样性相关的关键变量^[52]. 本研究发现枯水期的总磷在回水区和非回水区具有显著差异 ($P < 0.05$), 回水区 TP 浓度均值高于非回水区, 而回水区附石藻类各个门的物种数均值却低于非回水区, 且 TP 浓度均值在枯水期出现最高值, 而在该时期物种数最低, 细胞密度最高, 说明梅溪河 TP 浓度不利于附石藻类丰度的增加, 而有利于其生物量的增加. 且冗余分析结果表明各样点不同时期附石藻类优势种与总磷呈负相关(图 6), 支持了以上的研究, 汤婷等^[53]的研究表明三峡库区入库支流的 TP 阈值为 $0.016 \sim 0.065 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 当河流 TP 浓度低于 $0.016 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 河流附石硅藻群落组成相对稳定, 超过这一浓度阈值后, 敏感种密度减少, 而当河流 TP 浓度超过 $0.065 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 连耐受种密度均会受到显著影响. Smucher 等^[54]研究表明总磷浓度达到 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 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, 在达到 $0.082 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时硅藻结构则发生显著变化. 本研究发现, 梅溪河总磷的平均浓度为 $0.221 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 远远高于上述标准, 表明梅溪河流域的 TP 浓度不利于一些敏感附石藻类生长, 导致敏感种消失, 优势种发生变化, 使得库区水体附石藻类呈现出均一化的趋势. 小型异极藻是高浓度总磷污染的指示种^[55]. 本研究也发现小型异极藻是 3 个水文期的优势藻种, 且它在 3 个时期的优势度均值均大于优势度的平均水平, 但其在不同时期的分布样点具有差异性(图 4). 因此, 结合 3 个时期的总磷水平来看, 总磷水平平均高于 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这可能与小型异极藻的频繁出现具有相关性, 因此, 梅溪河流域应该注意磷浓度的控制.

本研究发现, 枯水期和平水期回水区和非回水

区样点特征具有差异(图 7). 三峡库区由于采取枯水期蓄水、汛期泄洪的“冬蓄夏排”的反季节调水模式, 使得水动力和水环境条件发生显著变化^[55]. 因此, 蓄水和排水的调度变化将会使得附石藻类分布发生明显的分化.

4 结论

(1) 梅溪河流域的 26 个样点在采样期间共鉴定出 5 门 47 属 106 种. 回水区共采集到 57 种, 隶属 4 门 32 属, 非回水区共采集到 93 种, 隶属 5 门 43 属.

(2) 3 个水文时期以硅藻门的曲壳属、舟形藻和异极藻属为共有优势种, 其中共有的优势种为曲壳藻、扁圆卵形藻、缩缢异极藻、小型异极藻、近棒形异极藻和小型舟形藻. 非回水区的主要优势种为曲壳藻属、颤藻属、束丝藻属、桥弯藻、异极属和舟形藻属, 而回水区的主要为舟形藻属、微囊藻属、针杆藻属、菱形藻属、色球藻属和刚毛藻属.

(3) RDA 分析结果表明, 丰水期影响回水区附石藻类物种相对丰度的主要环境因子为 pH、浊度和总氮. 枯水期, 影响其相对丰度的主要环境因子为总磷、浊度和总氮. 在平水期, 流速、溶氧和电导率是影响其相对丰度的主要环境因子.

参考文献:

- [1] 王英才, 邱光胜, 陈水松, 等. 三峡库区试验性蓄水期间浮游生物群落特点研究[J]. 人民长江, 2012, **43**(12): 4-9.
Wang Y C, Qiu G S, Chen S S, et al. Research on plankton community in Three Gorges Reservoir during its trial impoundment[J]. Yangtze River, 2012, **43**(12): 4-9.
- [2] 郭劲松, 谢丹, 李哲, 等. 三峡水库开县消落区水域冬季蓄水期间藻类群落结构与水质评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1129-1135.
Guo J S, Xie D, Li Z, et al. Algal community structure and water quality assessment on drawdown area of Kaixian waters in Three Gorges Reservoir during winter storage period [J]. Environmental Science, 2012, **33**(4): 1129-1135.
- [3] 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.
- [4] De Winder B, Staats N, Stal L J, et al. Carbohydrate secretion by phototrophic communities in tidal sediments[J]. Journal of Sea Research, 1999, **42**(2): 131-146.
- [5] Solak C N. The application of diatom indices in the upper Porsuk Creek Kutahya-Türkiye [J]. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2011, **11**(1): 31-36.
- [6] Cattaneo A, Kalff J. Periphyton in lakes of different trophic[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1987, **44**(2): 296-303.
- [7] 易燃, 蔡德所, 张永祥, 等. 龙江底栖硅藻群落特征及与环

- 境因子的关系[J]. 环境科学与技术, 2015, **38** (4): 40-46, 78.
- Yi R, Cai D S, Zhang Y X, *et al.* Benthic diatom assemblages distribution in Longjiang River, in relation to environmental factors[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **38** (4): 40-46, 78.
- [8] Round F E, Crawford R M, Mann D G. The diatoms: biology & morphology of the genera[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [9] 裴国凤, 刘国祥, 胡征宇. 东湖沿岸带底栖藻类群落的时空变化[J]. 水生生物学报, 2007, **31**(6): 836-842.
- Pei G F, Liu G X, Hu Z Y. Spatial and temporal variation of benthic algal communities in the littoral zone of Lake Donghu [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2007, **31**(6): 836-842.
- [10] Potapova M, Charles D F. Diatom metrics for monitoring eutrophication in rivers of the United States [J]. Ecological Indicators, 2007, **7**(1): 48-70.
- [11] 项珍龙, 杨璐, 李晨, 等. 浑河流域底质类型对硅藻群落分布特征的影响[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(2): 570-578.
- Xiang Z L, Yang L, Li C, *et al.* Effect of sediment type on the distribution of diatom community in Hunhe River Basin, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(2): 570-578.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 刘静, 韦佳峰, 胡韧, 等. 珠江水系东江流域底栖硅藻图集 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- [15] 施之新. 中国淡水藻志: 第16卷 硅藻门 桥弯藻科 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [16] 水利部水文局, 长江流域水环境监中心. 中国内陆水域常见藻类图谱 [M]. 武汉: 长江出版社, 2012.
- [17] 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.
- [18] 施之新. 中国淡水藻志: 第12卷 硅藻门 异极藻科 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [19] 朱惠忠, 陈嘉佑. 中国西藏硅藻 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [20] 施之新. 中国淡水藻志: 第六卷 裸藻门 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [21] Lampitt R S, Wishner K F, Turley C M, *et al.* Marine snow studies in the Northeast Atlantic Ocean: distribution, composition and role as a food source for migrating plankton [J]. Marine Biology, 1993, **116**(4): 689-702.
- [22] Jain A K, Murty M N, Flynn P J. Data clustering: a review[J]. ACM Computing Surveys, 1999, **31**(3): 264-323.
- [23] 贾晓妮, 程积民, 万惠娥. DCA、CCA 和 DCCA 三种排序方法在中国草地植被群落中的应用现状 [J]. 中国农学通报, 2007, **23**(12): 391-395.
- Jia X N, Cheng J M, Wan H E. Application present situation of DCA, CCA, and DCCA ordination of grassland vegetation communities in China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, **23**(12): 391-395.
- [24] 程海云, 葛守西, 闵要武. 人类活动对长江洪水影响初析 [J]. 人民长江, 1999, **30**(2): 38-40.
- Cheng H Y, Ge S X, Min Y W. Impact of human activities on Yangtze flood[J]. Yangtze River, 1999, **30**(2): 38-40.
- [25] 杨健. 三峡水库澎溪河回水区浮游生物组成及水质评价 [D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- Yang J. Plankton community distribution and evaluation in backwater area of Pengxi River under designed water storage level of the Three Gorges Reservoir [D]. Chongqing: Southwest University, 2010.
- [26] 徐长江, 徐高洪, 戴明龙, 等. 三峡水库蓄水期洞庭湖区水文情势变化研究[J]. 人民长江, 2019, **50**(2): 6-12.
- Xu C J, Xu G H, Dai M L, *et al.* Study on hydrological regime variation in Dongting Lake during water storage period of Three Gorges Reservoir[J]. Yangtze River, 2019, **50**(2): 6-12.
- [27] 程辉, 吴胜军, 王小晓, 等. 三峡库区生态环境效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2015, **23**(2): 127-140.
- Cheng H, Wu S J, Wang X X, *et al.* Research progress on the effects of the Three Gorges Reservoir on the ecological environment[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, **23** (2): 127-140.
- [28] 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.
- [29] 付君珂, 刘黎, 贺新宇, 等. 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[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3099-3107.
- Fu J K, Liu L, He X Y, *et al.* Dynamics of epilithic algae communities and their relationship with environmental factors during storage and non-storage periods in the Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2019, **40** (7): 3099-3107.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 钱振明. 海洋底栖硅藻生长条件及其理化成分的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- Qian Z M. Study on growth conditions and biochemical compositions of marine benthic diatoms [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [33] Engle D V, Summer S, Macauley J M. Dissolved oxygen conditions in Northern Gulf of Mexico Estuaries [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1999, **57** (1): 1-20.
- [34] 沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩, 等. 微型生物监测新技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
- [35] 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.
- [36] 向蓉, 李巧玉, 喻隼, 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.
- [37] Visser P M, Verspagen J M H, Sandrini G, *et al.* How rising CO₂ and global warming may stimulate harmful cyanobacterial blooms? [J]. Harmful Algae, 2016, **54**: 145-159.
- [38] 周鹏瑞. 环境因子对三峡库区次级河流回水区藻类生长影响的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- Zhou R P. The impacts research of the environmental factors on the algae growth in the backwater areas of the tributaries in Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [39] 任辉, 田恬, 杨宇峰, 等. 珠江口南沙河涌浮游植物群落结构时空变化及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2017, **37**(22): 7729-7740.
- Ren H, Tian T, Yang Y F, *et al.* Spatial and temporal distribution of phytoplankton community and its relationship with environment factors in Nansha's Rivers, Pearl River estuary[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(22): 7729-7740.
- [40] 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.
- [41] Dalu T, Wasserman R J, Magoro M L, *et al.* Variation partitioning of benthic diatom community matrices: Effects of multiple variables on benthic diatom communities in an Austral temperate river system[J]. Science of the Total Environment, 2017, **601-602**: 73-82.
- [42] Dixit S S, Cumming B F, Birks H J B, *et al.* Diatom assemblages from Adirondack lakes (New York, USA) and the development of inference models for retrospective environmental assessment[J]. Journal of Paleolimnology, 1993, **8**(1): 27-47.
- [43] 吴运东, 吴沿友, 李潜, 等. pH与氟对莱茵衣藻和蛋白核小球藻胞外碳酸酐酶活性及光合效率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(10): 1972-1977.
- Wu Y D, Wu Y Y, Li Q, *et al.* Effect of pH and fluoride on extracellular carbonic anhydrase activity and photosynthetic efficiency of *Chlamydomonas reinhardtii* and *Chlorella pyrenoidosa*[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, **30**(10): 1972-1977.
- [44] 王铭, 李涛, 李爱芬, 等. 光照、温度和 pH 对雨生红球藻光合特性的影响[J]. 水生生物学报, 2009, **33**(3): 400-405.
- Wang M, Li T, Li A F, *et al.* Effect of lighting, temperature and pH on photosynthetic characters of *Haematococcus pluvialis* CG-11[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2009, **33**(3): 400-405.
- [45] 周贤杰, 罗固源, 杨清玲, 等. 大宁河回水腹心区氮磷浓度对藻类生长影响的模拟试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(3): 1123-1127.
- Zhou X J, Luo G Y, Yang Q L, *et al.* Simulation study of effects of different nitrogen and phosphorus concentrations on algae growth in the central backwater reach of Daning River[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, **27**(3): 1123-1127.
- [46] 杨宋琪, 祖廷勋, 王怀斌, 等. 黑河张掖段浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(1): 159-170.
- Yang S Q, Zu T X, Wang H B, *et al.* Relationship between the structure of phytoplankton community and environmental factors in the Zhangye section of Heihe River[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(1): 159-170.
- [47] 李蕊, 陈光杰, 康文刚, 等. 抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3168-3178.
- Li R, Chen G J, Kang W G, *et al.* Spatio-temporal variations of diatom community and their relationship with water environment in Fuxian Lake[J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3168-3178.
- [48] 张莉, 林佳宁, 张远, 等. 浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值[J]. 环境科学, 2017, **38**(11): 4570-4579.
- Zhang L, Lin J N, Zhang Y, *et al.* Responses of the benthic diatom community to nutrients and the identification of nutrient thresholds in three aquatic ecoregions of the Hantai River, Northeast China[J]. Environmental Science, 2017, **38**(11): 4570-4579.
- [49] Ogata T, Ishimaru T, Kodama M. Effect of water temperature and light intensity on growth rate and toxicity change in *Protogonyaulax tamarens*[J]. Marine Biology, 1987, **95**(2): 217-220.
- [50] 王倩. 黔、桂珠江水系底栖硅藻群落分布特征及其与环境变量间的相关性研究[D]. 贵州: 贵州师范大学, 2009.
- Wang Q. Study on distribution characteristics of benthic diatom communities and correlation between benthic diatom communities and environmental variables in Rivers of Qiangui Zhujiang Watershed[D]. Guizhou: Guizhou Normal University, 2009.
- [51] Pan Y D, Stevenson R J, Hill B H, *et al.* Using diatoms as indicators of ecological conditions in lotic systems: a regional Assessment[J]. Journal of the North American Benthological Society, 1996, **15**(4): 481-495.
- [52] Cooper S R, Huvane J, Vaithianathan P, *et al.* Calibration of diatoms along a nutrient gradient in Florida Everglades Water Conservation Area-2A, USA[J]. Journal of Paleolimnology, 1999, **22**(4): 413-437.
- [53] 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.
- [54] 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 relevance[J]. Ecological Indicators, 2013, **32**: 51-61.
- [55] 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.

CONTENTS

PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of A07 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II)	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)