

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.8

第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM _{2.5} 污染特征与浓度控制效果	张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)
北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析	徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)
合肥市PM _{2.5} 和PM ₁₀ 中元素组成特征及重污染成因分析	刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)
濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琰, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)
关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析	康宝荣, 刘立忠, 刘煥武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)
长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源	吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)
中国城市扩张及空间特征变化对PM _{2.5} 污染的影响	王桂林, 张炜 (3447)
不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM _{2.5} 排放的影响	邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)
浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数	徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)
生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征	马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)
青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征	官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)
广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价	宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)
截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征	胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)
黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析	邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)
风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响	余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)
向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应	王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)
外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响	李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)
新疆喀什三角洲地下水SO ₄ ²⁻ 化学特征及来源	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)
黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析	李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)
北京市河流秋季浮游动物群落特征分析	王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)
三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系	刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)
渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测	万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)
汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系	汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)
饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析	胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)
基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果	彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)
植被对绿色屋顶径流量和水质影响	章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)
光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制	范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)
多种材料对水中氨氮的吸附特性	焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)
不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响	常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)
3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程	刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)
铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制	韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)
缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮	杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)
连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响	薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)
FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制	马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)
ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件	董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)
全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析	张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)
不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比	刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)
异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析	杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)
Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现	高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)
高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N ₂ O产生特征	代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)
生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响	王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)
两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响	周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)
承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征	孙厚云, 卫晓峰, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)
厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析	张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)
宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析	张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)
铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果	林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)
铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用	周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)
生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响	刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)
有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响	汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)
土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响	罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)
宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响	高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)
不同浸提剂条件下生物炭吸附性有机物的浸出规律	何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)
基于成组生物毒性测试的PM _{2.5} 毒性	江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)
《环境科学》征订启事 (3587)	
《环境科学》征稿简则 (3595)	
信息 (3611, 3705, 3745)	

三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系

刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 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: 为了解三峡水库长江干流不同水文期底栖硅藻群落变化及其与环境因子的关系, 分别于非蓄水期(2015年7~9月)和蓄水期(2015年12月~2016年3月)对干流32个样点进行底栖硅藻采集和分析。结果表明, 蓄水期与非蓄水期在水温(WT)、水下光强(PAR)、pH、电导率(Spc)、溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP)、浊度(Tur)、透明度(SD)、流速(v)和高锰酸盐指数具有显著性差异。2个水情期共鉴定出底栖硅藻96种, 隶属28属, 非蓄水期鉴定出13种优势种, 蓄水期鉴定出3种, 且2个时期优势种在组成和分布上存在一定的差异, 但 α -中污染性、富营养化的种类变异直链藻(*Melosira varians*)为两个时期的绝对优势种。通过冗余分析(RDA)发现, 非蓄水期显著影响长江干流底栖硅藻群落组成的环境因子是pH、流速和正磷酸盐, 且上、下游样点存在明显分区; 而蓄水期影响底栖硅藻群落的主要环境因子是水温、浊度、高锰酸盐指数和溶解氧, 上、下游样点分区不明显。这些结果表明三峡库区蓄水对底栖硅藻群落组成具有重要影响, 导致群落结构发生变化。

关键词: 底栖硅藻; 群落; 环境因子; 长江干流; 三峡库区

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3577-11 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201901017

Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors

LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, YANG Yan-jun, MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, WU Zhong-xing*

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

Abstract: In order to study changes in benthic diatom communities and their relationships with environmental factors during different hydrological periods, 32 sites were sampled in the main stream of the Three Gorges Reservoir during the non-storage period (July 2015 to September 2015) and the storage period (December 2015 to March 2016). Results showed that there were significant differences in water temperature (WT), underwater light intensity (PAR), pH, conductivity (Spc), dissolved oxygen (DO), redox potential (ORP), turbidity (Tur), transparency (SD), flow rate (v), and permanganate index between the storage and non-storage periods. Ninety-six species of benthic diatoms, belonging to 28 genera, were identified during the two hydrological periods. Thirteen dominant species and three dominant species were identified during the non-storage period and the storage period, respectively, suggesting that some differences existed in the composition and distribution of dominant species between the two periods. However, *Melosira varians*, an α -polluting and eutrophic species, was dominant during both of the hydrological periods. Redundancy analysis (RDA) found that pH, flow rate, and orthophosphate ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) were the main environmental factors affecting the composition of benthic diatom communities, and a significant difference was found between up- and down-stream areas during the non-storage period. In comparison, water temperature, turbidity, permanganate index, and dissolved oxygen (DO) were the main environmental factors influencing the patterns of benthic diatoms communities, for which an insignificant difference was observed between up- and down-stream areas during the storage period. These results suggest that water storage in the Three Gorges Reservoir has an important impact on the composition of benthic diatom communities, and that this results in a change in community structure.

Key words: benthic diatom; community composition; environmental factors; main stream of Yangtze River; Three Gorges Reservoir

在河流生态系统中, 藻类是水体中的初级生产者, 对污染物反应灵敏, 且群落结构组成随着水体生态环境的变化而变化, 常被用于水质监测和评价^[1]。水体中的藻类虽种类繁多, 但大量研究表明硅藻在水体中的多样性较其他藻类多, 分布广泛且生活史较短^[2], 对环境变化如富营养化、酸化、土地利用和污染等干扰非常敏感, 在淡水系统中被认为是有力反映水质状况的指示物种^[3]。在我国虽然也有关于硅藻生物监测河流水质的报道, 但主要还是限于理化监测。然而, 理化监测存在着单一性、片面性和瞬时性等不足, 因此需要生物监测提供必要的补充^[4]。相对于其它的生物指标, 例如大型水

生植物, 小型藻类、大型无脊椎动物和鱼类, 硅藻种类更多、分布更广, 对于水体的变化更敏感迅速, 是更准确高效及时的水质指示生物^[5~9]。硅藻已被欧盟明确列入《水框架指南》中的生物监测指标^[10]。在硅藻中, 比起浮游硅藻, 底栖硅藻只能在狭小的水环境条件下生存^[11], 其生长位置相对固定, 能更准确地反映特定区域水体的持续变化, 能

收稿日期: 2019-01-03; 修订日期: 2019-03-15

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

作者简介: 刘黎(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为藻类生理学, E-mail: 734552297@qq.com

* 通信作者, E-mail: wuzhx@swu.edu.cn

更全面、综合、稳定、持续和真实地反映水体的水质和生态质量^[12],常被用于河流水质监测与生态健康评估^[13, 14].

三峡工程蓄水成库后,除了产生巨大的经济、社会和环境等综合效益外,也带来一系列的生态环境问题.许多学者对三峡库区水体中的氮、磷、重金属等污染物的分布规律,浮游藻类的多样性和种群动态等进行了研究,但对于三峡库区干流水体的研究较少.底栖硅藻的分布广泛,生活史较短,分类特征明显,其生物群落物种较其他群落丰富,且空间分布紧密.不同的底栖硅藻具有不同环境的耐受性,它们固着生长,不能通过迁移或其他形式来躲避污染的危害,对环境变化能够迅速做出响应^[15],然而,由于鉴定和采样的困难,目前对三峡库区干流底栖硅藻的研究则鲜有关注.因此,本研究于2015年7~9月(非蓄水期)和2015年12月~2016年3月(蓄水期)对三

峡库区长江干流底栖硅藻群落结构变化做了调查研究,探讨非蓄水期和蓄水期三峡库区干流水体底栖硅藻群落组成变化特征,并分析其与环境因子的关系,以期对三峡库区长江干流水质监测和水体管理提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

三峡库区是被三峡大坝蓄水所淹没的地区,库区流域面积达100万 km^2 ,属中亚热带湿润季风气候,年平均气温 $17\sim 19^\circ\text{C}$ ^[16].长江干流自西向东横穿三峡库区段,全长683.8 km,北有嘉陵江、南有乌江汇入,形成不对称的、向心的网状水系^[17].本研究在位于三峡库区的长江干流设置了32个样点(图1),分别于2015年7~9月(非蓄水期),2015年12月~2016年3月(蓄水期)进行样品采集与理化指标的测定和分析.

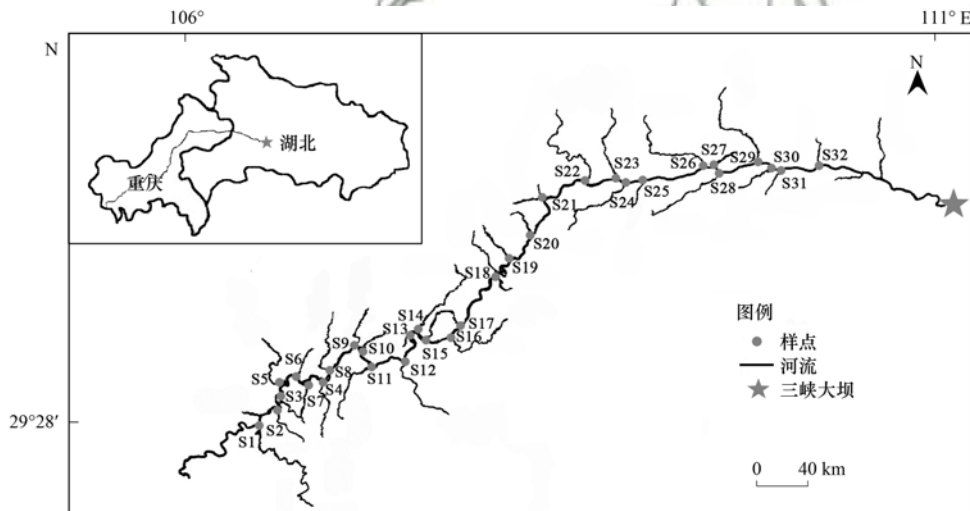


图1 研究区样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the Three Gorges Reservoir area

1.2 水体理化指标的测定

水温(WT)、pH、电导率(Spc)、溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP)、浊度(Tur)和水下光强(PAR)等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(v)用国产LS45A型旋杯式流速仪测量(华正水文仪器有限公司,重庆).水体中总氮(TN)、总磷(TP)、正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝酸盐氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)和高锰酸盐指数(KMnO_4)等化学指标通过Flowsys连续流动分析仪(SYTEA, 意大利)进行测定.

1.3 底栖硅藻样品采集、处理与分析

底栖藻类采集依据EPA^[18]的采样方法,每个样点随机选取3~5块石头,在石头上选取 $R=2.7$

cm的固定表面积,共取5个圆形样方,刷取圆内的藻.记录刷液体积,等量分装为2份,一份加鲁哥试剂固定,一份加甲醛固定.带回实验室经处理后,鲁哥试剂固定的藻液用于定量分析,甲醛固定的藻液用于固定标本玻片的制作以及优势种的确定.硅藻的鉴定主要根据硅藻壳面的形态及纹饰,为了清楚地看出壳面的纹饰.对于部分无法进行鉴定的样品,在镜检前,对样品进行消化,去除其中的有机物质.

计数采用网格计数法,所使用网格计数框为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$.计数时,若底栖藻类密度不大则使用全片计数,密度大时运用视野法(即400倍下计50~100视野),最后按照相关公式算出底栖硅藻数量.藻类鉴定参照文献[19~25].

1.4 数据处理和分析

用 Excel 处理数据, 用 SPSS 22.0 软件和 Canoco for Windows 4.5 分析软件对底栖硅藻数据和环境因子进行多元统计分析. 用 SPSS 22.0 软件完成重复测量方差分析, 用 Canoco for Windows 4.5 分析软件完成去趋势对应分析(DCA)和冗余分析(RDA). RDA 分析中藻种数据保留相对丰度 $\geq 5\%$ 的藻种以避免偶然误差, 减少计算结果偏差; 藻种数据用 $\lg(Ax + B)$ 转化, 本试验取 $A = 1, B = 1$, 同时把相对丰度 $> 5\%$ 、且频率 ≥ 3 作为优势种的判定依据. 不同的硅藻具有不同的环境喜好性和耐受性, 根据硅藻生态属性^[26], 进一步对硅藻进行分类.

2 结果与分析

2.1 非蓄水期和蓄水期的水体理化因子变化

对非蓄水期和蓄水期的水体理化指标进行重复测量方差分析后, 结果显示(表1), 两个时期的水温、水下光照、pH、氧化还原电位、电导率、溶氧、浊度、透明度、流速和高锰酸盐指数具有极显著差异($P \leq 0.01$).

在非蓄水期, 水温出现最高值, 变化范围为 $21.36 \sim 27.39^{\circ}\text{C}$, 水下光照在 $5.67 \sim 75.67$

$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 之间波动, pH 的变化范围为 $7.12 \sim 8.54$. 氧化还原电位在非蓄水期较低, 变化范围为 $240.67 \sim 436.00 \text{ mV}$, 电导率的变化范围为 $272.17 \sim 369.27 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$. 溶氧在非蓄水期出现最大值, 变化范围为 $6.05 \sim 17.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 浊度在非蓄水期较高, 在 $83.77 \sim 1482.67 \text{ NTU}$ 范围内波动. 透明度在非蓄水期的变化范围为 $13.0 \sim 103.0 \text{ cm}$. 流速在非蓄水期的变化范围为 $0.02 \sim 1.90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 高锰酸盐指数在非蓄水期出现最小值, 在 $0.73 \sim 4.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内波动. 在蓄水期, 水温的变化范围为 $11.95 \sim 18.66^{\circ}\text{C}$. 水下光照的波动较大, 变化范围为 $9.67 \sim 1037.33 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. pH 的变化范围为 $7.17 \sim 8.45$. 氧化还原电位在蓄水期波动较大, 出现最大值, 波动范围为 $440.67 \sim 2488.67 \text{ mV}$. 电导率在蓄水期出现最大值, 在 $349.87 \sim 405.80 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 范围内波动. 溶氧的变化范围为 $7.72 \sim 10.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 浊度在蓄水期的变化范围为 $2.93 \sim 817.67 \text{ NTU}$. 透明度在蓄水期出现最高值, 变化范围为 $70.0 \sim 549.0 \text{ cm}$. 流速在蓄水期的变化范围为 $0.04 \sim 0.84 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 高锰酸盐指数在蓄水期出现最高值, 波动范围为 $1.65 \sim 7.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

表1 水体理化因子的重复测量方差分析统计结果

Table 1 Statistical results of repeated measurement ANOVA for physical and chemical factors of the water				
理化指标	非蓄水期	蓄水期	F	P
水温(WT)/ $^{\circ}\text{C}$	$24.63 \pm 0.3(21.36 \sim 27.39)$	$14.37 \pm 1.65(11.95 \sim 18.66)$	582.091	0.000**
水下光强(PAR)/ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$	$34.25 \pm 3.70(5.67 \sim 75.67)$	$307.22 \pm 51.14(9.67 \sim 1037.33)$	27.460	0.000**
pH	$7.55 \pm 0.06(7.12 \sim 8.54)$	$7.85 \pm 0.06(7.17 \sim 8.45)$	13.250	0.001**
氧化还原电位(ORP)/mV	$321.46 \pm 9.8(240.67 \sim 436.00)$	$555.98 \pm 62.63(440.67 \sim 2488.67)$	13.688	0.000**
电导率(Spc)/ $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$	$322.73 \pm 4.75(272.17 \sim 369.27)$	$385.46 \pm 2.97(349.87 \sim 405.80)$	127.238	0.000**
溶氧(DO)/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$7.98 \pm 0.36(6.05 \sim 17.21)$	$9.0 \pm 0.12(7.72 \sim 10.24)$	7.137	0.010**
浊度(Tur)/NTU	$423.26 \pm 52.29(83.77 \sim 1482.67)$	$107.02 \pm 29.8(2.93 \sim 817.67)$	27.615	0.000**
透明度(SD)/cm	$42.19 \pm 3.32(13.0 \sim 103.0)$	$256.59 \pm 20.27(70.0 \sim 549.0)$	108.988	0.000**
流速(v)/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$0.64 \pm 0.09(0.02 \sim 1.90)$	$0.26 \pm 0.04(0.04 \sim 0.84)$	16.324	0.000**
TN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$1.27 \pm 0.08(0.6 \sim 2.40)$	$1.25 \pm 0.07(0.35 \sim 1.83)$	0.046	0.830
$\text{NH}_4^{+}\text{-N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$0.10 \pm 0.01(0.001 \sim 0.35)$	$0.14 \pm 0.02(0.01 \sim 0.43)$	3.381	0.071
$\text{NO}_3^{-}\text{-N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$0.95 \pm 0.07(0.35 \sim 2.01)$	$0.92 \pm 0.05(0.31 \sim 1.42)$	0.065	0.800
TP/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$0.07 \pm 0.01(0.03 \sim 0.13)$	$0.08 \pm 0.01(0.01 \sim 0.18)$	1.208	0.276
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$0.03 \pm 0.00(0.003 \sim 0.090)$	$0.04 \pm 0.00(0.003 \sim 0.088)$	1.356	0.249
高锰酸盐指数/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$2.30 \pm 0.21(0.73 \sim 4.54)$	$3.70 \pm 0.30(1.65 \sim 7.76)$	13.867	0.000**

1) ** 表示 $P < 0.01$, 差异极显著; 2) 括号外的数值为各参数平均值, 括号内的数值为各参数的波动范围

2.2 非蓄水期和蓄水期底栖硅藻群落结构特征

本研究中共鉴定出 28 属, 96 种硅藻, 硅藻种较多的属有异极藻属(*Gomphonema*) (15 种)、桥弯藻属(*Cymbella*) (12 种)、舟形藻属(*Navicula*) (11 种)、菱形藻属(*Nitzschia*) (9 种)、直链藻(*Melosira*) (4 种)、双菱藻(*Surirella*) (4 种)和羽纹藻(*Pinnularia*) (4 种).

由表2和图2可以看出, 两个时期各样点优势

种在组成和分布上都具有一定的差异. 非蓄水期各样点鉴定出 13 种优势种, 包括变异直链藻(*M. varians*)、颗粒直链藻(*M. granulata*)、膨胀桥弯藻(*C. tumida*)、近缘桥弯藻(*C. affinis*)、双尖菱板藻(*Hantzschia amphioxys*)、梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)、肋缝菱形藻(*N. frustulum*)、谷皮菱形藻(*N. palea*)、克劳氏菱形藻(*N. clausii*)、锉刀布纹藻(*G. scalproides*)、扁圆卵形藻(*Cocconeis*

placentula)、小型异极藻(*Gomphonema parvulum*)和简单舟形藻(*Navicula simplex*). 其中有 20 个样点以变异直链藻为优势种, 变异直链藻的生态属性为 α -中污染性、富营养化种类. 从相对丰度图谱可以看出(图 2), 变异直链藻在 S1、S4、S8 和 S17 的相对丰度较高, 在上游样点分布较多. 除变异直链藻外, 相对丰度较高的优势种有近缘桥弯藻、颗粒直链藻和扁圆卵形藻; 分布较广的优势种有梅尼小环藻、谷皮菱形藻和锉刀布纹藻. 其中, 梅尼小环藻在中上游的相对丰度较高; 谷皮菱形藻在中上游样点分布较密集,

且相对丰度较高; 而锉刀布纹藻在下游的相对丰度较高. 而在蓄水期, 各样点共鉴定出 3 种优势种, 包括变异直链藻、近缘桥弯藻、披针形舟形藻(*N. lanceolata*). 其中有 30 个样点均以变异直链藻为优势种, 在 S30、S27 和 S7 的相对丰度较高(图 2). 蓄水期的 3 个优势种均为富营养化种类(表 2). 近缘桥弯藻分布在中下游, 在 S32 的相对丰度最高, 披针形舟形藻只分布在下游, 其相对丰度在 S22 达到最高值(图 2). 总体而言, 两个时期的绝对优势种为变异直链藻, 共同的优势种还有近缘桥弯藻.

表 2 三峡库区长江干流不同水情期各样点优势种的平均相对丰度¹⁾

Table 2 Mean relative abundances of dominant species at various sites during different hydrological periods of the Three Gorges Reservoir area							
硅藻种类	拉丁学名	水生环境 腐殖度	营养状况	样点		相对丰度/%	
				非蓄水期	蓄水期	非蓄水期	蓄水期
变异直链藻	<i>Melosira varians</i>	α mes	Eutr	S1、S3 ~ S8、S14 ~ S19、S25、S26、S28、S30 ~ S32	S1、S3 ~ S21、S23 ~ S31	51.4	42.3
颗粒直链藻	<i>Melosira granulata</i>	UN	UN	S22	NO	13.6	6.7
膨胀桥弯藻	<i>Cymbella tumida</i>	olig	Meeu	S2	NO	10.68	5.6
近缘桥弯藻	<i>Cymbella affinis</i>	β mes	Eutr	S9、S24、S29	S32	13.5	8.7
双尖菱板藻	<i>Hantzschia amphioxys</i>	α mes	Hype	S10	NO	8.7	2
梅尼小环藻	<i>Cyclotella meneghiniana</i>	α mpo	Eutr	S11、S13	NO	7.7	1.7
肋缝菱形藻	<i>Nitzschia frustulum</i>	β mes	Eutr	S2	NO	9.3	3.3
谷皮菱形藻	<i>Nitzschia palea</i>	Poly	Hype	S11、S12、S24	NO	10.8	6.4
克劳氏菱形藻	<i>Nitzschia clausii</i>	α mes	Eutr	S23	NO	8.4	3.3
锉刀布纹藻	<i>Gyrosigma scalproides</i>	UN	UN	S20	NO	10	3.2
扁圆卵形藻	<i>Cocconeis placentula</i>	β mes	Eutr	S21、S24	NO	16.1	3.2
小型异极藻	<i>Gomphonema parvulum</i>	α mpo	Eutr	S24	NO	12	5.7
简单舟形藻	<i>Navicula simplex</i>	UN	UN	S27	NO	10.3	1.9
披针形舟形藻	<i>Navicula lanceolata</i>	α mes	Eutr	NO	S22	2.5	9

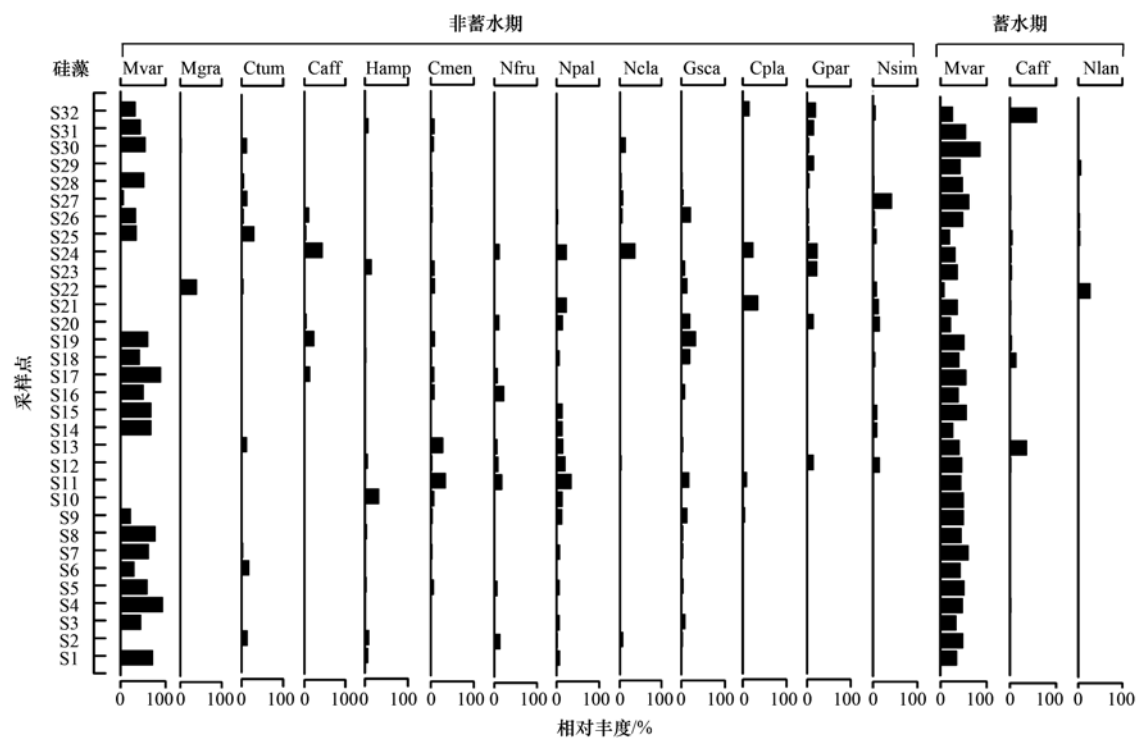
1) α mes 为 α -mesosaprobou, olig 为 oligosaprobou, β mes 为 β -mesosaprobous, α mpo 为 α -meso/polysaprobous, poly 为 polysaprobous, Eutr 为 eutrphentic, Meeu 为 meso-eutrphent, Hype 为 hypereutrphentic; “UN”表示文献中分类不明确; “NO”表示不是该样点的优势种

2.3 底栖硅藻群落结构变化与水体理化因子的关系

对底栖硅藻数据进行去趋势对应分析(DCA)来选用适当的模型进行物种与环境间关系的拟合, 非蓄水期的排序结果显示 4 个轴最大长度为 3.634, 蓄水期为 1.767. 本研究中两个时期都选择冗余分析(RDA). RDA 结果显示(表 3), 非蓄水期 RDA 排序第一轴和第二轴特征值分别为 0.172 和 0.097, 种类和环境相关性较强, 相关系数分别为 0.911 和 0.907; 蓄水期 RDA 排序第一轴和第二轴特征值分别为 0.142 和 0.111, 种类和环境相关性较强, 相关系数分别为 0.849 和 0.819, 表明两个时期的排序轴可以较好地反映底栖硅藻和环境因子之间的关系. 非蓄水期和蓄水期的所有环境因子共能解释硅藻群落变异的 58% 和 56%, RDA 前两轴共解释了硅藻群落 44.1% 和 39.5% 的变异情况.

在非蓄水期的 RDA 图中(图 3), 第一轴反映总氮、水下光照、正磷酸盐、总磷和高锰酸盐指数的变化梯度, 第二轴则反映氧化还原电位、透明度、硝酸盐氮、水温、电导率、浊度、氨氮、溶解

氧、流速和 pH 的变化梯度. 采用蒙特卡罗置换检验来预选环境变量, 评估环境变量对硅藻群落变量的贡献. 运行 499 次蒙特卡罗置换, 结果显示, 在非蓄水期, pH、流速和正磷酸盐的显著水平小于 0.05, 说明它们对底栖硅藻群落结构变化的影响最为显著, 共能解释硅藻群落总变异的 18%, 占 15 个环境因子总解释量的 31%. 在 RDA 排序图中, 正磷酸盐是与第一轴相关性最大的正相关因子, 相关系数为 0.3261, 粗壮双菱藻(Srob)、微绿羽纹藻(Pvir)、梅尼小环藻(Cmen)和肋缝菱形藻(Nfru)的相对丰度与正磷酸盐呈正相关关系, 随着正磷酸盐的增加有增多的趋势, 而变异直链藻(Mvar)、显喙舟形藻(Nper)、双头幅节藻(Sanc)则表现出相反的趋势. 而流速是与第一轴相关性最大的负相关因子, 相关系数为 -0.5549, 锉刀布纹藻(Gsca)和钝脆杆藻(Fcap)的相对丰度与流速呈正相关关系, 而意大利直链藻(Mita)、颗粒直链藻(Mgra)、近棒状异极藻(Gsub)、普通内丝藻(Evul)、瞳孔舟形藻(Npup)、似钝舟形藻(Nmut)、岭南舟形藻(Nsub)、



Mvar:变异直链藻 (*Melosira varians*), Mgra:颗粒直链藻 (*Melosira granulata*), Ctum:膨胀桥弯藻 (*Cymbella tumida*), Caff:近缘桥弯藻 (*Cymbella affinis*), Hamp:双尖菱板藻 (*Hantzschia amphioxys*), Cmen:梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*), Nfru:肋缝菱形藻 (*Nitzschia frustulum*), Npal:谷皮菱形藻 (*Nitzschia palea*), Ncla:克劳氏菱形藻 (*Nitzschia clausii*), Gsca:锉刀布纹藻 (*Gyrosigma scalproides*), Cpla:扁圆卵形藻 (*Cocconeis placentula*), Gpar:小型异极藻 (*Gomphonema parvulum*), Nsim:简单舟形藻 (*Navicula simplex*), Nlan:披针形舟形藻 (*Navicula lanceolata*)

图 2 三峡库区长江干流不同水情期各样点优势种相对丰度图谱

Fig. 2 Relative abundances of dominant species at various sites during different hydrological periods of the Three Gorges Reservoir area

表 3 长江干流不同水情期底栖硅藻群落与环境因子间的 RDA 结果

Table 3 RDA results for benthic diatom communities and environmental factors during the different hydrological periods

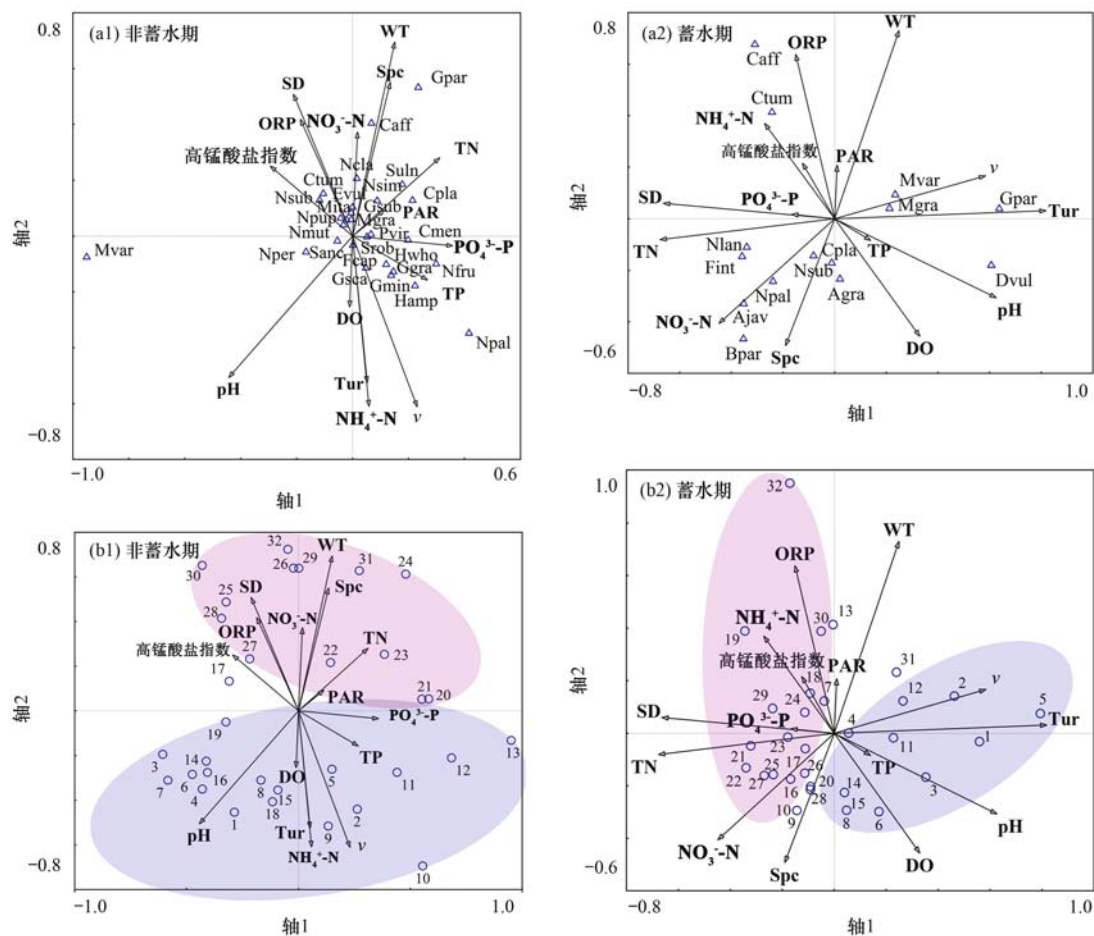
参数项	非蓄水期				蓄水期			
	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4
特征值	0.172	0.097	0.064	0.062	0.142	0.111	0.095	0.076
物种-环境因子相关系数	0.911	0.907	0.876	0.819	0.849	0.819	0.79	0.837
种类数据的累积变量百分比/%	17.2	26.9	33.3	39.6	14.2	25.3	34.8	42.4
种类-环境相关的累积变量百分比/%	29.7	46.4	57.4	68.2	25.4	45.2	62.1	75.7
总特征值	1				1			
所有典范特征值	0.58				0.56			

克劳氏菱形藻(Ncla)和近缘桥弯藻(Caff)则与流速呈负相关关系. pH与第一轴和第二轴均呈负相关,但与第二轴的相关性较大,双头幅节藻(Sanc)的相对丰度与pH呈正相关,而简单舟形藻(Nsim)、肘状针杆藻(Suln)、小型异极藻(Gpar)和扁圆卵形藻(Cpla)的相对丰度与pH呈负相关关系.在非蓄水期中[图3(b1)],除S17外,中上游样点S1~S19都分布在第三、四象限,而其余样点分布在第一、二象限. S1、S8和S4与pH呈正相关,而S22、S24和S31则与pH呈负相关. S12、S13、S21和S20与正磷酸盐呈正相关,而S19与其呈负相关. S2、S5、S9与流速呈正相关,而S25、S30和S32与流速呈负相关.

在蓄水期的RDA图(图3)中,第一轴反映浊度、流速、pH、总磷、正磷酸盐、透明度、总氮和硝酸盐氮的变化梯度,第二轴则反映氨氮、高锰酸盐指数、氧化还原电位、光照、水温、溶解氧和电导率的变化梯度. 蒙特卡罗置换检验结果显示,蓄水期影响底栖硅藻群落结构的主要环境因子为浊度、水温、高锰酸盐指数和溶解氧,共能解释硅藻群落总变异的26%,占15个环境因子总解释量的46.2%. 蓄水期中[图3(a2)],浊度是与第一轴相关性最大的正相关因子,相关系数为0.6949,小型异极藻(Gpar)和颗粒直链藻(Mgra)的相对丰度与浊度呈正相关关系,而披针形舟形藻(Nlan)和中型脆杆藻(Fint)的相对丰度与其呈负相关关系. 水温

是与第二轴相关性最大的正相关因子, 相关系数为 0.598 6, 变异直链藻 (Mvar) 的相对丰度与其呈正相关关系, 而岭南舟形藻 (Nsub)、扁圆卵形藻多孔变种 (Cpla) 和奇异棍形藻 (Bpar) 的相对丰度与其呈负相关关系. 高锰酸盐指数与第二轴的相关性较大, 膨胀桥弯藻 (Ctum) 和近缘桥弯藻 (Caff) 的相对丰度与高锰酸盐指数呈正相关关系, 扁圆卵形藻多孔变种 (Cpla)、颗粒直链藻极狭变种 (Agra) 和普通等片藻 (Dvul) 的相对丰度与其呈负相关关系. 溶氧与第二轴的相关性更大, 且与第二轴呈负相关关系, 扁圆卵形藻多孔变种 (Cpla) 和颗粒直链藻极狭

变种 (Agra) 的相对丰度与溶氧呈正相关, 而膨胀桥弯藻 (Ctum) 和近缘桥弯藻 (Caff) 的相对丰度与溶氧呈负相关. 蓄水期样点分布差异不如非蓄水期明显. 蓄水期中 [图 3 (b2)], 在第一、三象限分布的大部分是干流中下游的样点, 而在二、四象限分布的大部分是中上游样点, 而第三象限分布的样点最多, 大部分是下游样点. 与浊度呈正相关的样点有 S5、S4、S1 和 S11, 呈负相关的有 S23、S21 和 S17. 与水温呈正相关的样点有 S13, 而与其呈负相关的有 S20、S28、S9 和 S10. S6 与溶氧呈正相关关系, 而 S7、S18、S19 和 S24 与溶氧呈负相关. S7、S18、



Suln: 肘状针杆藻 (*Synedra ulna*), Mgra: 颗粒直链藻 (*Melosira granulata*), Mvar: 变异直链藻 (*Melosira varians*), Mita: 意大利直链藻 (*Melosira italica*), Agra: 颗粒直链藻极狭变种 (*Aulacoseira granulata* var. *angustissima*), Nsim: 简单舟形藻 (*Navicula simplex*), Nper: 显喙舟形藻 (*Navicula perstrata*), Npup: 瞳孔舟形藻 (*Navicula pupula*), Nmut: 似钝舟形藻 (*Navicula muticopsis*), Nlan: 披针形舟形藻 (*Navicula lanceolata*), Nsub: 岭南舟形藻 (*Navicula subadnata*), Nfru: 肋缝菱形藻 (*Nitzschia frustulum*), Npal: 谷皮菱形藻 (*Nitzschia palea*), Ncla: 克劳氏菱形藻 (*Nitzschia clausii*), Srob: 粗壮双菱藻 (*Surirella robusta*), Caff: 近缘桥弯藻 (*Cymbella affinis*), Ctum: 膨胀桥弯藻 (*Cymbella tumida*), Pvir: 微绿羽纹藻 (*Pinnularia viridis*), Gpar: 小型异极藻 (*Gomphonema parvulum*), Gsub: 近棒状异极藻 (*Gomphonema subclavatum*), Ggra: 纤细异极藻 (*Gomphonema gracile*), Gmin: 极小异极藻 (*Gomphonema minusculum*), Gsca: 锉刀布纹藻 (*Gyrosigma scalproides*), Cpla: 扁圆卵形藻 (*Cocconeis placentula*), Hamp: 双尖菱板藻 (*Hantzschia amphioxys*), Hwho: 黄浦水生藻 (*Hydrosera whompoensis*), Sanc: 双头幅节藻 (*Stauroneis anceps*), Cmen: 梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*), Evul: 普通内丝藻 (*Encyonema vulgare*), Feap: 钝脆杆藻 (*Fragilaria capucina*), Dvul: 普通等片藻 (*Diatoma vulgare*), Fint: 中型脆杆藻 (*Fragilaria intermedia*), Bpar: 奇异棍形藻 (*Bacillaria paradoxa*), Cpla: 扁圆卵形藻多孔变种 (*Cocconeis placentula* var. *euglypta*), Ajav: 膨大曲壳藻 (*Achnanthes javanica*); (a) 底栖硅藻与环境因子; (b) 采样断面与环境因子

图 3 长江干流不同水情期底栖硅藻群落与环境因子间的 RDA 二维排序

Fig. 3 RDA two-dimensional ordination diagrams for benthic diatom communities and environmental factors during the different hydrological periods

S19 和 S24 与高锰酸盐指数呈正相关, S6 与其呈负相关关系。

3 讨论

3.1 三峡水库干流蓄水期与非蓄水期水环境变化

水体环境由各种环境因子构成, 三峡工程使库区环境因子发生显著变化进而对水生态环境产生显著影响^[27]。长江干流整体总氮变化范围在 $0.35 \sim 2.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 1), 在 II ~ 劣 V 类之间波动, 主要以 IV 类水质标准为主。总磷质量浓度变化范围为 $0.01 \sim 0.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在 I ~ II 类水质间波动, 以 II 类水质标准为主。总氮和总磷在两个时期的质量浓度有差异但不明显, 可能是由于工业、生活污水向水体中排放较多, 较频繁, 致使水体中氮磷的质量浓度较大, 研究表明三峡库区总氮、总磷在两个水情期均已达到富营养化水平标准^[28, 29]。高锰酸盐指数变化范围为 $0.73 \sim 7.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 1), 在 I ~ IV 水质标准间波动, 非蓄水期以 I 类水质标准为主, 蓄水期以 II 类水质标准为主, 这可能与蓄水期水体受有机污染以及还原性物质污染的程度较高有关。氨氮质量浓度主要在 I ~ II 类水质标准, 主要为 I 类水质标准。溶解氧在两个时期均以 I 类水质标准为主。戴润泉等^[30]对长江三峡库区 1996 ~ 2001 年的水质监测资料进行水质状况分析, 结果表明三峡库区江段参与水质评价的各项指标多年均值均符合 II 类水体标准。在 2002 年, 根据中国环境状况公报^[31], 长江干流水体主要以 II 类水质为主, 无 V 类和劣 V 类水质。然而, 本研究发现三峡库区长江干流在非蓄水期和蓄水期水质以 II 类水为主, 但有的指标达到 V 类和劣 V 类水质标准, 表明三峡工程对库区水质造成了一定影响, 部分干流断面影响较大。

3.2 非蓄水期和蓄水期底栖硅藻群落结构及生态属性变化

有研究表明, 在自然的、未受污染的河流中, 藻类植物的种类主要以硅藻为主, 并含有少量的绿藻和蓝藻。然而, 河流一旦受到污染, 藻类物种数目将减少, 甚至一些种类消失。同时, 藻类群落的种类, 从以硅藻占优势改变为以各种丝状绿藻占优势或以单细胞绿藻、蓝藻占优势的群落结构类型, 且硅藻种类从耐受力较狭窄的种类转变为耐受力宽广的种类^[32]。非蓄水期水体中绝对的优势种为变异直链藻, 其他优势种中近缘桥弯藻、颗粒直链藻和扁圆卵形藻的相对丰度较大; 而蓄水期有 30 个样点以变异直链藻为优势种, 其余的优势种为近缘桥弯藻和披针形舟形藻 (表 2 和图 2), 表明不同水

文期对水体中的底栖硅藻种类具有一定的影响, 导致了群落结构呈现差异。变异直链藻是 α -中污染性、富营养化种类, 在长江支流、广东东江、武汉东湖、贵州龙江、上海苏州河等许多河流或湖泊中均有记录^[12, 33~36]。而近缘桥弯藻、扁圆卵形藻和披针形舟形藻分别为 β -中污染性、 β -中污染性和 α -中污染性的富营养化种类, 且多出现在频繁搅动的浑浊、浅水水体中, 并在三峡库区、巢湖、太湖、洱海等具有分布^[33, 37, 38], 表明蓄水期水质为 α -中污染, 而非蓄水期水质有由 α -中污染向 β -中污染发展的趋势。变异直链藻是一种广谱性的河流藻类, 其多出现在搅动大、流速较快的环境^[33]。然而, 臧小苗等^[39]的研究表明在缓流的情况下变异直链藻有升高趋势。本研究发现两个时期均以变异直链藻为绝对优势种, 表明三峡干流水体环境适合变异直链藻的生长。在非蓄水期, 水位较低, 流速较高, 水体搅动较大, 有利于变异直链藻生长, 而蓄水期, 虽然流速有所减缓, 但水体搅动仍然较高, 因而变异直链藻也易成为优势种。

3.3 非蓄水期和蓄水期底栖硅藻群落结构及环境因子关系

藻类生长与水体酸碱度关系密切。Chen 等^[40]在湖北神农架九江湖和七姊妹山的湿地研究中, 发现水体中的 pH 值及水深对硅藻种群分布有重要影响。易燃等^[12]在对龙江底栖硅藻的研究中发现, α -中污染性的变异直链藻的相对丰度与 pH 呈正相关, 而 β -中污染性的近缘桥弯藻与 pH 呈负相关。李巧玉等^[33]的研究发现变异直链藻的藻密度与 pH 呈正相关, 而 β -中污染性优势种 (近缘桥弯藻、扁圆卵形藻) 和中强污染性优势种 (梅尼小环藻) 与 pH 呈负相关。Dalu 等^[2]发现梅尼小环藻的相对丰度与 pH 呈负相关。刘浩^[41]也发现中强污染性的小型异极藻与 pH 呈显著负相关。本研究也获得相似的结果, 即 α -中污染性的优势种 (变异直链藻、双尖菱板藻) 的相对丰度与 pH 呈正相关, 而 α -中污染性优势种 (克劳氏菱形藻)、 β -中污染性优势种 (近缘桥弯藻、扁圆卵形藻、肋缝菱形藻)、中强污染性优势种 (小型异极藻、梅尼小环藻)、强污染性的优势种 (谷皮菱形藻) 和较清洁优势种 (膨胀桥弯藻) 的相对丰度与 pH 呈负相关关系 (图 3), 表明三峡库区弱碱性的水体 (pH 为 $7.12 \sim 8.54$) 能显著影响底栖硅藻群落的结构变化, 导致了 α -中污染性的种类如: 变异直链藻数量增加并形成优势。流速也是显著影响底栖硅藻群落结构的环境因子^[42]。郭云^[43]对乌江中上游底栖硅藻的研究也表明流速是影响丰水期的底栖硅藻丰度的第一显著因子。向蓉

等^[44]对三峡库区支流汝溪河的研究发现,丰水期双尖菱板藻、小型异极藻和谷皮菱形藻随着流速的升高有增多的趋势。Dalu 等^[2, 42]发现小型异极藻、谷皮菱形藻和梅尼小环藻的相对丰度与流速呈正相关,变异直链藻则与流速呈负相关。然而,李巧玉等^[33]发现近缘桥弯藻、扁圆卵形藻随流速的升高而减少。本研究中,双尖菱板藻、肋缝菱形藻、小型异极藻、梅尼小环藻和谷皮菱形藻的相对丰度与流速呈正相关关系,而变异直链藻、克劳氏菱形藻、近缘桥弯藻、扁圆卵形藻和膨胀桥弯藻的相对丰度与流速呈负相关(图 3),支持了上述研究结论。Passy^[45]指出底栖硅藻在流速大的水体中比在流速低的水体中更容易呈随机地、碎片状地、异质性分布。三峡库区非蓄水期的流速高于蓄水期,使得水体产生更为多变的、生存状况适宜的生存空间、食物资源、竞争,使得非蓄水期硅藻种类及分布区域均高于蓄水期^[46]。

前人研究发现硅藻多在温度较低的季节生长繁殖^[47]。张浩然等^[48]对龙江和刁江的研究中表明,水温也显著影响了硅藻群落结构。本研究发现变异直链藻和近缘桥弯藻的相对丰度与水温呈正相关,而披针形舟形藻的相对丰度与其呈负相关(图 3)。这一结果与向蓉等^[44]的研究结果一致,表明蓄水期水温的变幅可能会使底栖硅藻群落的组成和优势种发生较明显的变化。Dalu 等^[2]发现溶氧、浊度与底栖硅藻群落结构的变化具有显著的相关性。李巧玉等^[33]也发现变异直链藻、披针形舟形藻和近缘桥弯藻与溶氧呈负相关。本研究发现,蓄水期变异直链藻、披针形舟形藻和近缘桥弯藻的相对丰度与溶氧呈负相关。变异直链藻的相对丰度与浊度呈正相关,而披针形舟形藻和近缘桥弯藻的相对丰度随浊度的变化趋势相反(图 3),支持了前期的研究结果,表明溶氧和浊度也是驱动硅藻群落结构变化的重要因素。邓培雁等^[49]研究水质对东江流域附生硅藻群落的影响时发现,高锰酸盐指数对东江流域附生硅藻群落分布影响很大。江源等^[50]认为高锰酸盐指数是影响东江干流浮游植物密度及属类数的重要因素。Von Schiller 等^[51]通过一些试验发现营养盐是影响硅藻生长的重要因子。向蓉等^[44]研究发现变异直链藻、近缘桥弯藻随着高锰酸盐指数的增加而增多。李巧玉等^[33]的研究发现披针形舟形藻的藻密度与其高锰酸盐指数呈负相关。本研究发现,变异直链藻、近缘桥弯藻的相对丰度与高锰酸盐指数呈正相关,披针形舟形藻的相对丰度与其呈负相关,与前人的研究结果一致。调查中,高锰酸盐指数在蓄水期显著高于非蓄水期,其原因可能与

水体中大量有机物氧化分解有关,长江沿岸城市经济发达,人类活动密集,有机物来源充足,进入水体的有机物经氧化分解,从而影响蓄水期的底栖硅藻群落结构。

3.4 非蓄水期与蓄水期环境因子的变化

已有研究发现水环境的变化对底栖硅藻的组成和结构有直接影响^[52]。pH 是影响硅藻代谢过程的重要因子,硅藻可以按照对 pH 的适应性划分为碱性、嗜碱性、中间型、嗜酸性和酸性生物型^[53],本研究中两个时期水体 pH 的变化范围分别为 7.12 ~ 8.54 和 7.17 ~ 8.45,非蓄水期较蓄水期高,但均为弱碱性,两个时期的硅藻种类相差不是很大。水体流速影响硅藻属种和数量的分布。水体流速会影响硅藻的形态特征和生理结构,水体流速的提高可以加速底栖硅藻对营养盐的吸收(特别是对磷的吸收)、促进其光合作用、提高繁殖率^[43]。本研究也发现在流速较高的非蓄水期,底栖硅藻的相对丰度、种类和分布均高于蓄水期,而正磷酸盐与底栖硅藻群落结构具有显著的相关性。Leira 等^[54]在研究中发现硅藻的组成与温度关系密切,在本研究发现非蓄水期水温在 21.36 ~ 27.39℃,而蓄水期水温则在 11.95 ~ 18.66℃之间,表明在冬季温度较低可能更适合硅藻的生长^[45],而本研究中也发现相似结果,即蓄水期水温与底栖硅藻群落组成具有显著的相关性。Dalu 等^[2]发现浊度、溶氧与底栖硅藻群落结构的变化具有显著的相关性。本研究也发现蓄水期浊度是驱动底栖硅藻群落结构变化的重要因子。两个时期浊度的波动范围分别为 83.77 ~ 1482.67 NTU 和 2.93 ~ 817.67 NTU,非蓄水期明显高于蓄水期,可能与非蓄水期水体泥沙或污染物有关。非蓄水期的溶解氧均值低于蓄水期,出现的藻类如克劳氏菱形藻、梅尼小环藻的相对丰度均高于蓄水期,说明这些种喜好在溶解氧低的环境中生存^[26],蓄水期的溶解氧较高,使得这类藻种不占优势。高锰酸盐指数常被作为反映水质受还原性物质污染程度的综合指标,与水体中有机腐殖质含量较高有关^[55]。邓培雁等^[49]的研究发现高锰酸盐指数对东江流域附生硅藻群落分布影响很大。在本研究中也发现高锰酸盐指数与底栖硅藻群落组成显著相关,而高锰酸盐指数在蓄水期较高,蓄水期优势种也都是富营养化种类。

4 结论

(1)三峡水库干流在非蓄水期和蓄水期共鉴定出底栖硅藻 96 种,28 属,其中异极藻属(*Gomphonema*)、桥弯藻属(*Cymbella*)、舟形藻属

(*Navicula*)、菱形藻属(*Nitzschia*)、直链藻(*Melosira*)、双菱藻(*Surirella*)和羽纹藻(*Pinnularia*)种类较多,变异直链藻(*M. varians*)均为两个时期的优势种。

(2)RDA 分析发现,在非蓄水期,pH、流速和正磷酸盐是影响长江干流底栖硅藻群落结构的主要环境因子,而蓄水期显著影响底栖硅藻群落结构的环境因子是浊度、水温、高锰酸盐指数和溶解氧。

参考文献:

- [1] 李国忱,刘录三,汪星,等. 硅藻在河流健康评价中的应用研究进展[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(9): 2617-2624.
Li G C, Liu L S, Wang X, *et al.* Applications of diatom in river health assessment: a review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, **23**(9): 2617-2624.
- [2] 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.
- [3] Dalu T, Bere T, Froneman P W. Assessment of water quality based on diatom indices in a small temperate river system, Kowie River, South Africa [J]. Water SA, 2016, **42**(2): 183-193.
- [4] 邹曦,万成炎,潘晓洁,等. 水环境在线生物监测的研究与应用[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(12H): 155-159.
Zou X, Wan C Y, Pan X J, *et al.* Study and application of on-line biological monitoring system in water environment [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **34**(12H): 155-159.
- [5] Passy S I, Bode R W, Carlson D M, *et al.* Comparative environmental assessment in the studies of benthic diatom, macroinvertebrate, and fish communities [J]. International Review of Hydrobiology, 2004, **89**(2): 121-138.
- [6] Carlisle D M, Hawkins C P, Meador M R, *et al.* Biological assessments of appalachian streams based on predictive models for fish, macroinvertebrate, and diatom assemblages [J]. Journal of the North American Benthological Society, 2008, **27**(1): 16-37.
- [7] Griffith M B, Hill B H, McCormick F H, *et al.* Comparative application of indices of biotic integrity based on periphyton, macroinvertebrates, and fish to southern Rocky Mountain streams [J]. Ecological Indicators, 2005, **5**(2): 117-136.
- [8] Smucker N J, Vis M L. Diatom biomonitoring of streams: reliability of reference sites and the response of metrics to environmental variations across temporal scales [J]. Ecological Indicators, 2011, **11**(6): 1647-1657.
- [9] Lotter A F, Birks H J B, Hofmann W, *et al.* Modern diatom, cladocera, chironomid, and chrysophyte cyst assemblages as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in the Alps. I. Climate [J]. Journal of Paleolimnology, 1997, **18**(4): 395-420.
- [10] Bennion H, Kelly M G, Juggins S, *et al.* Assessment of ecological status in UK lakes using benthic diatoms [J]. Freshwater Science, 2014, **33**(2): 639-654.
- [11] Bellinger B J, Cocquyt C, O'Reilly C M. Benthic diatoms as indicators of eutrophication in tropical streams [J]. Hydrobiologia, 2006, **573**(1): 75-87.
- [12] 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.
- 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.
- [13] Barlow N. The Diatoms: applications for the environmental and earth sciences [J]. Quaternary Science Reviews, 2011, **30**(7-8): 1011.
- [14] Bate G, Smailes P, Adams J. A water quality index for use with diatoms in the assessment of rivers [J]. Water SA, 2004, **30**(4): 493-498.
- [15] 谭香,张全发. 底栖硅藻应用于河流生态系统健康评价的研究进展[J]. 水生生物学报, 2018, **42**(1): 212-220.
Tan X, Zhang Q F. A review of diatoms in biomonitoring and ecosystem health assessment [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2018, **42**(1): 212-220.
- [16] 马骏,李昌晓,魏虹,等. 三峡库区生态脆弱性评价[J]. 生态学报, 2015, **35**(21): 7117-7129.
Ma J, Li C X, Wei H, *et al.* Dynamic evaluation of ecological vulnerability in the Three Gorges Reservoir Region in Chongqing Municipality, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(21): 7117-7129.
- [17] 陈森,苏晓磊,黄慧敏,等. 三峡库区河流生境质量评价[J]. 生态学报, 2019, **39**(1): 192-201.
Chen M, Su X L, Huang H M, *et al.* Assessment of river habitat quality in the Three Gorges Reservoir Region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(1): 192-201.
- [18] Delgado C, Pardo I. Comparison of benthic diatoms from mediterranean and atlantic spanish streams: community changes in relation to environmental factors [J]. Aquatic Botany, 2015, **120**: 304-314.
- [19] 胡鸿钧,李尧英,魏印心,等. 中国淡水藻类[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1980.
- [20] 施之新. 中国淡水藻志-第十二卷-硅藻门, 异极藻科[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [21] 李家英,齐雨藻. 中国淡水藻志-第十四卷-硅藻门, 舟形藻科(I)[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [22] 施之新. 中国淡水藻志-第十六卷-硅藻门, 桥弯藻科[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [23] 朱蕙忠. 中国西藏硅藻[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [24] 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.
- [25] 刘静,韦桂峰,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. 108.
- [26] van Dam H, Mertens A, Sinkeldam J. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from The Netherlands [J]. Netherlands Journal of Aquatic Ecology, 1994, **28**(1): 117-133.
- [27] 张佳磊,郑丙辉,刘德富,等. 三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 535-546.
Zhang J L, Zheng B H, Liu D F, *et al.* Succession pattern of phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and its driving factors [J]. Environmental Science, 2017, **38**(2): 535-546.
- [28] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [29] 吴雅丽,许海,杨桂军,等. 太湖春季藻类生长的磷营养盐阈值研究[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(9): 1622-1629.
Wu Y L, Xu H, Yang G J, *et al.* Developing the critical phosphorus threshold for spring algal growth in Lake Taihu, China [J]. China Environmental Science, 2013, **33**(9): 1622-1629.

- [30] 戴润泉, 臧小平, 邱光胜. 三峡水库蓄水前库区水质状况研究[J]. 长江流域资源与环境, 2004, **13**(2): 124-127.
Dai R Q, Zang X P, Qiu G S. Water quality in the Three Gorges reservoir before impoundment[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2004, **13**(2): 124-127.
- [31] 国家环境保护总局. 2002 年中国环境状况公报[J]. 环境保护, 2003, (7): 3-13.
- [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] 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.
- [34] 林罗敏. 东江干流底栖硅藻分布特征及生态系统健康评价研究[D]. 广州: 暨南大学, 2017.
Lin L M. Distribution of benthic diatoms and water ecosystem health evaluation in the main stream of Dongjiang River[D]. Guangzhou: Jinan University, 2017.
- [35] 裴国风, 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.
- [36] 顾咏洁, 吕亚红. 苏州河沉积物中硅藻的垂直分布与水质变化[J]. 生态学报, 2006, **26**(11): 3617-3623.
Gu Y J, Lü Y H. The vertical distribution of diatoms in the sediments and water quality change of Suzhou Creek[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, **26**(11): 3617-3623.
- [37] 陈旭, 羊向东, 刘倩, 等. 巢湖近代沉积硅藻种群变化与富营养化过程重建[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(4): 607-615.
Chen X, Yang X D, Liu Q, *et al.* Sedimentary diatom flora changes and eutrophication reconstruction for the last 200 years in Lake Chaohu[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, **22**(4): 607-615.
- [38] 胡竹君, 李艳玲, 李嗣新. 洱海硅藻群落结构的时空分布及其与环境因子间的关系[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(3): 400-408.
Hu Z J, Li Y L, Li S X. Spatial and temporal distributions of diatom communities and their relationships with environmental factors in Lake Erhai[J]. Journal of Lake Sciences, 2012, **24**(3): 400-408.
- [39] 臧小苗, 张远, 林佳宁, 等. 2009 年与 2014 年太子河流域附石藻群落结构变化及其与水环境的关系[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(6): 1057-1067.
Zang X M, Zhang Y, Lin J N, *et al.* Variation of periphyton community structure in 2009, 2014 and their relationship with environmental factors in Taizi River basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(6): 1057-1067.
- [40] Chen X, Qin Y M, Stevenson M A, *et al.* Diatom communities along pH and hydrological gradients in three montane mires, central China[J]. Ecological Indicators, 2014, **45**: 123-129.
- [41] 刘浩. 沂沭泗河水系底栖硅藻分布格局及其与环境因子的关系[D]. 上海: 上海师范大学, 2016.
Liu H. Distribution pattern of benthic diatom and its relationship to environmental factors in Yi-Shu-Si River Basin[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2016.
- [42] Dalu T, Richoux N B, Froneman P W. Distribution of benthic diatom communities in a permanently open temperate estuary in relation to physico-chemical variables[J]. South African Journal of Botany, 2015, **107**: 31-38.
- [43] 郭云. 乌江中上游底栖硅藻与水环境因子关系定量研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2008.
Guo Y. Research quantitatively on relationship between benthic diatoms and water environmental factors in middle and upper of Wujiang River[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2008.
- [44] 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.
- [45] Passy S I. Spatial paradigms of lotic diatom distribution: a landscape ecology perspective[J]. Journal of Phycology, 2001, **37**(3): 370-378.
- [46] 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]. 贵阳: 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 Qianguai Zhujiang Watershed[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2009.
- [47] 王渊源, 姜庆国, 江航宇. 培养小形舟形藻的氮、磷肥料量[J]. 海洋科学, 1986, **10**(5): 35-37.
Wang Y Y, Jiang Q G, Jiang H Y. The amount of phosphata-nitrogenous fertilizer required on the cultivation of *Navicula parva* (Men) Cleve-Euler[J]. Marine Sciences, 1986, **10**(5): 35-37.
- [48] 张浩然, 蔡德所, 林金城, 等. 龙江与刁江底栖硅藻群落结构及影响因子[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2018, **36**(1): 132-141.
Zhang H R, Cai D S, Lin J C, *et al.* Benthic diatom assemblages distribution in Longjiang and Diaojang Rivers, in relation to chemical and physiographical factor[J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2018, **36**(1): 132-141.
- [49] 邓培雁, 张婉, 王旭涛, 等. 水质对东江流域附生硅藻群落的影响[J]. 生态学报, 2015, **35**(6): 1852-1861.
Deng P Y, Zhang W, Wang X T, *et al.* The effects of water quality on epilithic diatoms communities of Dongjiang river basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(6): 1852-1861.
- [50] 江源, 王博, 杨浩春, 等. 东江干流浮游植物群落结构特征及与水质的关系[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(11): 1700-1705.
Jiang Y, Wang B, Yang H C, *et al.* Community structure of phytoplankton and its relation with water quality in Dongjiang River[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, **20**(11): 1700-1705.
- [51] Von Schiller D, Martí E, Riera J L, *et al.* Effects of nutrients and light on periphyton biomass and nitrogen uptake in Mediterranean streams with contrasting land uses[J]. Freshwater Biology, 2007, **52**(5): 891-906.
- [52] Musico C. The diatom pollution tolerance index: assigning tolerance values[R]. Austin: Watershed Protection & Development Review Department, 2002.
- [53] Hurlbert S H. The nonconcept of species diversity: a critique and

- alternative parameters[J]. *Ecology*, 1971, **52**(4): 577-586.
- [54] Leira M, Sabater S. Diatom assemblages distribution in Catalan rivers, NE Spain, in relation to chemical and physiographical factors[J]. *Water Research*, 2005, **39**(1): 73-82.
- [55] 李丹. 乌江上游(毕节市层台镇)底栖硅藻生态特征及水体污染的过滤坝治理研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2014.
- Li D. Study on benthic diatoms ecological characteristics and control effect of filter dam to polluted water in Wujiang river upstream (Cengtai town in Bijie city)[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2014.

欢迎订阅 2019 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2019 年全年 12 期。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjkk@rcees.ac.cn;网址:www.hjkk.ac.cn

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NP1	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)