

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估	李晓晓, 张强, 邓建国, 蒋靖坤, 郝吉明 (3095)
钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征	张进生, 吴建会, 马威, 冯银厂 (3102)
常州市大气 PM _{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析	顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 毕承路, 苏亚兰, 叶招莲, 盖鑫磊 (3110)
兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源	尉媛丽, 刘攀亮, 于周锁, 高宏, 毛潇萱, 马建民, 黄韬 (3120)
株洲市大气降尘中元素特征及来源分析	王世豪, 张凯, 柴发合, 钟学才, 周广柱, 杨晴, 柯馨妹 (3130)
传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征	徐敏, 何万清, 聂磊, 韩力慧, 潘涛, 石爱军 (3139)
基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征	史纯珍, 郝雪薇, 申现宝, 曹鑫悦, 张伟, 吴辉, 姚志良 (3146)
基于 wavelet-SVM 的 PM ₁₀ 浓度时序数据预测	王平, 张红, 秦作栋, 姚清晨, 耿红 (3153)
广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算	黄学良, 张洲, 杨威强, 李晟, 朱明, 方华, 何俊杰, 陈俊文, 万承浩, 张艳利, 刘国光, 黄祖照, 王宇骏, 王新明 (3162)
沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响	李鸿涛, 祁建华, 董立杰, 高冬梅 (3169)
典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价	芦会杰 (3178)
杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征	张明, 唐访良, 俞雅雲, 徐建芬, 陈金汉, 余波, 周嫻, 张伟 (3185)
黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征	聂明华, 晏彩霞, 杨毅, 周俊良, 刘敏 (3192)
漓江地表水体有机碳来源	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (3200)
夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响	吴飞红, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 李丽, 黄思宇 (3209)
城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例	徐美娟, 童桂华, 孙丹, 李建新, 虞效益 (3218)
地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例	张小文, 何江涛, 彭聪, 张昌延, 倪泽华 (3225)
人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析	李如忠, 叶舟, 高苏蒂, 郑悦 (3235)
长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义	刘军, 臧家业, 冉祥滨, 赵晨英, 刘季花, 王小静 (3243)
三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系	陈成龙, 高明, 木志坚, 倪九派, 祁乐 (3254)
黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例	鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁 (3264)
新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制	李欢, 李正魁, 李爱民, 周庆, 王莹, 潘咏 (3273)
藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响	张大为, 徐慧, 王希, 门彬, 王东升, 段晋明 (3281)
汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析	向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴 (3290)
石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析	宋云龙, 张金松, 郭小雅, 朱佳, 王丽, 陶益, 张丽 (3302)
不同湿地模型中根系微生物的多样性	王林, 李冰, 余家辉, 朱加宾, 朱健 (3312)
北海湖微生物群落结构随季节变化特征	张雅洁, 李珂, 朱浩然, 张洪勋 (3319)
基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析	张海耿, 宋红桥, 顾川川, 单建军, 张宇雷, 倪琦 (3330)
高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析	孟婷, 杨宏 (3339)
基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理	韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 陈洪一 (3347)
生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果	王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 刘天中 (3354)
微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水	刘春, 周洪政, 张静, 陈晓轩, 张磊, 郭延凯 (3362)
pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响	于德爽, 周同, 李津, 王晓霞, 吴国栋, 王尧静 (3369)
酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性	周正, 林兴, 王凡, 顾澄伟, 沈婧, 袁砚, 金润 (3377)
模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性	康乃馨, 朱能武, 郭雯颖, 何志心 (3385)
采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程	王利君, 李志华, 韩冬, 张天宇, 杨成建 (3393)
CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动	张婷, 吴鹏, 沈耀良, 闫刚, 徐乐中, Samwine Thomas (3399)
硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径	完颜德卿, 黄勇, 毕贞, 刘忻, 姚鹏程, 张文静 (3406)
不同 TOC/NH ₄ ⁺ -N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响	王凡, 刘凯, 林兴, 周正, 李祥, 黄勇 (3415)
盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响	谭潇, 黄靛, 杨平, 涂奔州 (3422)
CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (3429)
胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛酸磺酸 (PFOS) 的影响	刘鑫彤, 尹华, 彭辉, 李浩榕, 杨萍萍, 曹雅娟 (3435)
不同施肥方式下紫色土 N ₂ O 与 NO _x 的排放特征	胡磊, 刘韵, 朱波 (3442)
地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响	张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 石将来, 石孝均, 江长胜 (3451)
模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响	张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 王军涛, 杨中领, 韩红艳, 张丽梅, 万师强, 贺正 (3463)
长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征	徐白璐, 钟文辉, 黄欠如, 秦红益, 邓欢, 韩成 (3473)
施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响	郭安宁, 段桂兰, 赵中秋, 唐仲, 王杨扬, 王伯勋 (3483)
水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应	魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 蔡观, 葛体达, 王久荣, 吴金水 (3489)
凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素	张彦军 (3497)
西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义	王新, 夏敦胜, 王博, 陈红, 刘浩 (3507)
小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物质碳及其吸附 Cd ²⁺ 活性	张如玉, 刘海波, 邹雪华, 庆承松, 李梦雪, 陈冬, 陈天虎 (3519)
交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响	汪婷, 丁锐, 黄丹妮, 祝子逸, 章军, 叶怀庄, 徐迎春, 金永堂 (3529)
外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响	杨萍萍, 尹华, 彭辉, 唐少宇, 卢妙, 刘皓 (3536)
中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价	刘巍, 田金平, 陈吕军 (3544)
《环境科学》征稿简则 (3280) 《环境科学》征订启事 (3301) 信息 (3353, 3472, 3535)	

汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析

向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴*

(西南大学生命科学学院, 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: 基于不同水文期特点, 分别在平水期(2014 年 4 月)、丰水期(2014 年 7 月)、枯水期(2014 年 12 月)对三峡库区支流汝溪河的浮游硅藻及理化参数进行采样监测, 应用功能群分类和数理统计分析等手段, 探讨汝溪河不同水文期浮游硅藻功能群特征及其与环境因子间的相互关系。结果表明: 3 个水文期, 汝溪河共发现浮游硅藻功能群 10 个, 分别为 A、B、C、D、L₀、MP、P、T_B、X3、S1 类群, 其中种类最多的功能群是 MP 类群, 数量最多的是 D 类群。多元逐步回归分析发现, 影响平水期功能类群密度最重要的环境因子为总氮(TN); 与丰水期功能群密度显著相关的环境因子为透明度(SD); 浊度(Tur)、碱度和 pH 以及电导率则是影响枯水期功能群密度的主要环境因子。RDA 分析结果显示, 影响汝溪河浮游硅藻功能群多样性的主要环境因子含水温(WT)、电导率(Spc)、氧化还原电位(ORP)、溶解氧(DO)、硝态氮(NO₃⁻-N)等。因此, 功能群能较好反映汝溪河的生境特点, 而氮营养元素对汝溪河浮游植物功能群变化及水质的影响应引起关注。

关键词: 浮游硅藻; 功能群; 环境因子; 汝溪河; 三峡水库

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3290-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201701111

Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River

XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, ZHANG Hong-bo, DONG Cong-cong, 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, School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: To elucidate the functional group characteristics of planktonic diatoms and their relationship with environment factors in the Ruxi River, multivariate statistical analysis and functional group classification were conducted in this study. The success pattern of a diatom functional group and its driving factor were analyzed for the Ruxi River, a typical tributary of Three Gorges Reservoir, after the phytoplankton community and environmental variables were investigated at three different stages: level water period (April 2014), dry season (December 2014), and wet season (July 2014), based on the characteristic of water level. The results showed that there were 10 diatom functional groups in the Ruxi River: the A, B, C, D, L₀, MP, P, T_B, X3, and S1 groups, and among them, MP was the most groups, but the dominant group was D group. Stepwise multiple regression analysis indicated that ρ (TN) in the water column was the primary factor significantly affecting the densities in the normal water period, whereas turbidity, alkalinity, and pH significantly influenced the functional group densities in the normal water period. In the high water period, however, transparency was the most important environmental factor affecting the functional group densities. Additionally, the results of RDA analysis found that water temperature, electrical conductivity (Spc), oxidation-reduction potential (ORP), ρ (DO), and ρ (NO₃⁻-N) were the main environmental factors that influenced the diversity of diatom functional groups in the Ruxi River. These results suggested that functional groups could well reflect the habitat characteristics of the Ruxi River and the effect of the nutrient element, nitrogen, to the success of phytoplankton functional groups and changes of water quality in the Ruxi River should be paid more attention.

Key words: planktonic diatoms; functional groups; environmental factors; Ruxi River; Three Gorges Reservoir

三峡工程蓄水成库后,除了产生了巨大的经济、社会和环境等综合效益外,也带来一系列的生态环境问题。蓄水后,入库支流和库湾水域的水体各方面理化性质发生了很大变化,造成水体营养负荷过重,水体流速减缓,导致水华暴发的风险性增加^[1]。同时优势藻种也由蓄水初期河流型的硅、甲藻逐步向湖泊型的有毒蓝、绿藻演替^[2]。

汝溪河位于库区的腹地地带,是三峡库区重要的一级支流之一,全流域面积 720 km²,主河道长 54.5

km,在忠县境内流域面积 272.9 km²,主河道长 25.4 km。多年平均径流总量达 1.49 × 10⁹ m³。受三峡工程蓄水的影响,汝溪河的流速、流量及水环境特征发生了显著性的变化,水质呈富营养化趋势^[2]。然而,目

收稿日期: 2017-01-13; 修订日期: 2017-03-03

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2016C111); 西南大学博士基金项目(SWU110065)

作者简介: 向蓉(1991~),女,硕士研究生,主要研究方向为藻类生态学, E-mail: XSxiangrong@163.com

* 通信作者, E-mail: wuzhx@swu.edu.cn

前对于汝溪河的浮游植物的研究较少。

浮游植物是在淡水水体中营浮游生活的一类光合自养生物,是水生态系统重要的初级生产者。因个体较小、对环境的变化响应迅速^[3~5]以及分布广泛、结构稳定等特点,使得浮游植物在水体水环境研究方面得到广泛应用^[6,7]。传统研究常根据形态学水平划分不同的类群来表征水体环境质量。然而,不同生境下浮游植物群落往往高度多样化且大多数物种的发生难以预测,因此,传统形态学方法不能很好体现出水体生态环境特征。

“功能群”的概念最早由 Grime 提出^[8]。2002 年,Reynolds^[9]将“功能群”引入了浮游植物生态学研究,建立了浮游植物的 C-S-R 模型,并依据浮游植物特殊的生存策略分为:低干扰、低胁迫的 C 类入侵性机会主义策略者(C-invasive opportunists)、低干扰、高胁迫的 S 类进取型策略者(S-acquisitive)、高干扰、低胁迫的 R 类调和或适应型策略者(R-attuning or acclimating)这 3 大类群。后来又增加了 SS 类慢性胁迫耐受策略者(Chronic-stress tolerant)^[10]。后经 Padisák 等^[11]的补充,共鉴定描述了 39 种浮游藻类功能群。浮游植物功能群的分类方法是以浮游植物的形态、生理及生态特征为基点,将具相似环境适应性的归为一类,实现了浮游植物与生境间的一一对应^[12]。其基本含义是:①较其他浮游植物能充分适应特定生境并耐受该生境条件下的限制因素;②特定的生境条件易于相同生态属性的一类浮游植物生长、共存和占优。由于功能群能够直观反映其在群落的生态功能及各种生态现象,所以浮游植物功能群已经被运用在揭示浮游植物群落演替与环境变化的关系,并得到广泛关注^[13~15]。

浮游硅藻物种数量丰富,其细胞壁高度钙质化,是最重要的固碳生物之一,是水体初级生产力的主要组成部分^[16]。不同的水体环境,往往导致浮游硅藻群落结构和功能类群具有显著差异。Potapova 等^[17]发现电导率和离子组成是影响河流中的底栖硅藻分布的最重要因子;郭云^[18]发现 $p(\text{TP})$ 是影响乌江中上游底栖硅藻属种分布的第一显著性因子;王朝晖^[19]表明水温对大亚湾海域角毛藻数量变动影响最显著。然而,对淡水浮游硅藻功能群特征与环境因子的研究报道甚少。因此,本研究通过对汝溪河浮游植物和环境因子进行研究,通过浮游硅藻功能群分类和多重统计分析,探讨汝溪河浮游硅藻功能群演替及其环境驱动因子,以期构建浮

游植物功能群在水体生态系统评价体系提供基础数据,并为三峡水库的水环境管理提供基础依据。

1 材料与方法

1.1 采样点设置

实验所选样点自汝溪河上游到下游共计 7 个,上游样点分别为白庙(RX-B)、老涂井(RX-T),下游样点分别为龙滩大桥(RX-L)、杨盘滩(RX-Y)、坪山大桥(RX-P)、汝溪入江口(RX-R)及汝溪干流(RX-G),具体如图 1 所示。上游取表层水,下游每点设上(1 m)、中(5 m)、下(10 m)共 3 个采样水层。根据降水量不同,分别于平水期(2014 年 4 月)、丰水期(2014 年 7 月)、枯水期(2014 年 12 月)调查浮游藻类现存量(密度和生物量),并分析每个样点的水质参数。

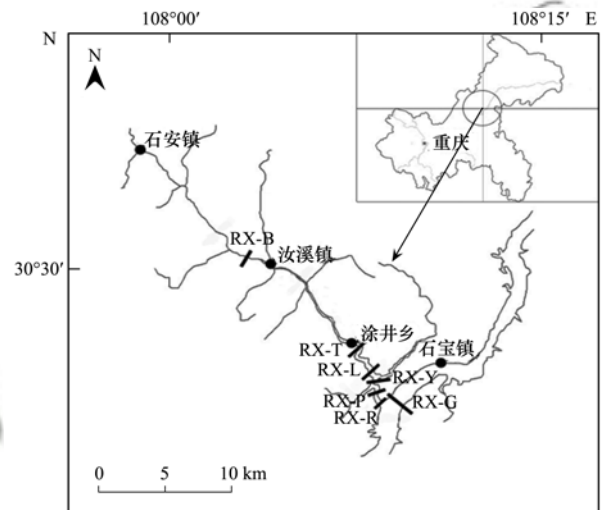


图 1 汝溪河样点分布示意

Fig. 1 Sampling stations in Ruxi River

1.2 水体理化指标的测定

水温、pH、电导率、溶解氧(DO)、氧化还原电位、浊度、水下光照等用多参数水质分析仪 DS5X, DS5 (HYDROLAB, USA) 现场测定。透明度(SD)用塞氏盘法测量。水体流速用国产 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、总磷、正磷酸盐、氨氮、亚硝酸盐氮、可溶性硅酸盐、高锰酸盐指数等化学指标通过 Flowsys 连续流动分析仪(SYTEA, 意大利)进行测定。水体中的碱度测定方法参照文献[20]。共收集包括水温(WT)、pH、光照(PAR)、电导率(Spc)、氧化还原电位(ORP)、浊度(Tur)、透明度(SD)、水深、碱度、溶解氧 $p(\text{DO})$ 、流速(v)、氨氮 $p(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、硝态氮 $p(\text{NO}_3^--\text{N})$ 、总氮 $p(\text{TN})$ 、高锰酸盐指数

$\rho(\text{KMnO}_4)$ 、总磷 $\rho(\text{TP})$ 、正磷酸盐 $\rho(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 。

1.3 浮游藻类采集、定性以及定量分析

定性分析样品采集:用 25 号浮游生物网于水平方向呈“ ∞ ”形在水面来回拖取,待收集到一定量的浮游植物样品之后,提起滤去多余水分,倒入采样瓶中,按 100:1.5 的比例,现场立即加入 Lugol 溶液固定,回实验室鉴定种类。

定量分析样品采集:在断面左、中、右 3 点同时按回水区分层、非回水区取表层水样各取 1 L,现场滴加 1% Lugol 溶液固定,配制方法参照文献[20],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 50 mL 后,补加 1 mL 40% 甲醛溶液长期保存并计数。

定性、定量分析均使用 Nikon E-Ci 显微镜 (Nikon, Japan),物种的鉴定参照文献[21, 22]等资料。

计数采用网格计数法,所使用网格计数框为 20

mm $\times$ 20 mm。计数时,若浮游生物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 100 视野)最后按照相关公式算出浮游植物数量^[23]。

叶绿素 a:将采集的水样用 0.45 μm 滤膜过滤,将滤膜存于 10 mL 离心管,冻融 24 h 后用 90% 的丙酮萃取,萃取液经离心定容后,取一定量的上清液,使用分光光度计在波长为 750、663、645、630 nm 下测定其吸光度。叶绿素 ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) 计算公式:

$$\text{Chl-a} = [11.64 \times (D_{663} - D_{750}) - 2.16 \times (D_{645} - D_{750}) + 0.1 \times (D_{630} - D_{750})] \times V_1 \div (V \times \delta)$$

式中, V 为水样体积 (L), V_1 为提取液定容后的体积, δ 为比色皿光程, D 为吸光度

1.4 硅藻功能群划分

浮游植物功能群划分主要依据雷氏 (Reynolds)、博氏 (Borics) 和帕氏 (Padisák) 分类体系^[11, 24, 25] (表 1),并参考其他学者对于功能群的划分标准^[18, 26 ~ 29]。

表 1 浮游植物功能群的主要识别特征

Table 1 Main classification features of the phytoplankton functional groups

类别	生境	耐受性	敏感性
A	深水, 洁净, 贫营养	低营养	pH 值升高
B	垂直混合, 中小型中营养型水体	低光照	pH 值升高, Si 缺乏, 分层
C	混合, 中小型富营养水体	低光照, 低碳含量	Si 消耗, 分层
D	含有营养盐, 浑浊, 浅水	冲刷	营养缺乏
L _o	贫到富营养, 中到大型水体, 可深可浅	营养分层	长时间或深层的混合
MP	经常性搅动, 浑浊, 浅水	混合搅动	
P	经常性搅动, 浑浊, 浅水	中程度的低光照和低碳含量	水体分层, 硅元素缺乏
S1	混合浑浊, 透明度低	极低的光照	冲刷作用
T _B	强急流	冲刷	
X3	贫营养, 混合, 浅水	恶劣环境条件	水体混合, 牧食作用

1.5 统计分析方法

采用 SPSS 22.0 软件及 Canoco for Windows 4.5 对浮游植物数据和环境因子进行多元统计分析^[30, 31]。多元逐步回归分析使用 SPSS 22.0 软件对浮游硅藻功能类群的密度和环境因子进行多元逐步回归分析。其中,以所有水环境因子为自变量 (x), 样点的浮游硅藻各功能类群密度 (y) 为因变量进行逐步回归分析。用 Canoco for Windows 4.5 分析软件完成 RDA (冗余分析) 进行排序分析。

2 结果与分析

2.1 汝溪河浮游植物特征及硅藻功能群划分

在汝溪河丰水期、枯水期和平水期这 3 个水情期共鉴定出浮游植物 273 种, 包括 8 门, 79 属, 其中蓝藻门 15 属, 35 种, 绿藻门 52 属, 92 种, 甲藻门 4 属, 11 种, 裸藻门 3 属, 9 种, 隐藻门 2 属, 3 种, 黄藻

门 1 属, 2 种, 金藻门 2 属, 1 种, 硅藻门 33 属 120 种。依据所有浮游硅藻类群的生境、耐受性和敏感性, 将 120 种硅藻共划分为 10 个功能类群 (表 2)。其中种数最多的功能群是 MP 类, 含 51 种, 其次 D 类群 18 种, P 类群 16 种, L_o 类群 12 种, X3 类群 10 种, 及 B 类群 5 种, C、T_B 类群各 3 种, A 类群 2 种, S1 类群 1 种。

图 2 表明, 平水期的优势类群为 D 类群, 其类群密度占平水期功能群总类群密度的 38.51%, MP 与 P 类群组成次优势类群, 分别占比重 21.26% 与 13.22%; 丰水期 D 类群密度也占绝对优势, 在丰水期功能群总类群密度所占比重为 42.86%, 明显高于其他类群, 其次是 MP、B、P 类群分布较多 [图 2 (b)]; 枯水期优势功能类群与其他 2 个水情期一样, D 类群占绝对优势, 其次 MP、P 类群为共次优势类群 [图 2 (c)]。3 个水情期, 丰水期的整体功能

群类群密度较其他 2 个水期丰富,平水期最少;虽然总体 MP 类群的浮游硅藻种类最多,但 3 个水期均是 D 类群类群密度占绝对优势,且类群密度在丰水期 > 平水期 > 枯水期。

表 2 汝溪河浮游硅藻种类构成及功能群划分
Table 2 Planktonic diatom compositions and functional classifications in the Ruxi River

硅藻门物种	功能类群	硅藻门物种	功能类群	硅藻门物种	功能类群
<i>Cyclotella</i> sp.	A	<i>Achnanthes</i> sp.	MP	<i>Nitzschia sigmoidea</i>	MP
<i>Rhizosolenia</i> sp.	A	<i>Cocconeis placentula</i>	MP	<i>Rhopalodia gibba</i>	MP
<i>Cyclotella bodanica</i>	B	<i>Cymbella affinis</i>	MP	<i>Rhopalodia gibba</i> var. <i>ventricosa</i>	MP
<i>Cyclotella kuetzingiana</i>	B	<i>Cymbella bremii</i>	MP	<i>Surirella linearis</i>	MP
<i>Amphipleura pellucida</i>	B ¹⁾	<i>Cymbella cistula</i>	MP	<i>Surirella linearis</i> var. <i>helvetica</i>	MP
<i>Hydrosira whompoensis</i>	B ¹⁾	<i>Cymbella cymbiformis</i>	MP	<i>Surirella robusta</i>	MP
<i>Melosira distans</i>	B ¹⁾	<i>Cymbella hustedtii</i>	MP	<i>Surirella ovalis</i> var. <i>maxima</i>	MP
<i>Asterionella formosa</i>	C	<i>Cymbella lacustris</i>	MP	<i>Surirella ovata</i>	MP
<i>Cyclotella meneghiniana</i>	C	<i>Cymbella lunata</i>	MP	<i>Stauroneis</i> sp.	MP ¹⁾
<i>Rhoicosphenia curva</i>	C ¹⁾	<i>Cymbella tumida</i>	MP	<i>Anomoeoneis intermedia</i>	MP ¹⁾
<i>Nitzschia</i> sp.	D	<i>Cymbella</i> sp.	MP	<i>Fragilaria</i> sp.	P
<i>Nitzschia acula</i>	D	<i>Eunotia</i> sp.	MP	<i>Fragilaria brevistriata</i>	P
<i>Nitzschia angustata</i>	D	<i>Gomphonema</i>	MP	<i>Fragilaria capucina</i>	P
<i>Nitzschia communis</i>	D	<i>Gomphonema augur</i>	MP	<i>Fragilaria crotonensis</i>	P
<i>Nitzschia linearis</i>	D	<i>Gomphonema constrictum</i>	MP	<i>Fragilaria harrissonii</i>	P
<i>Nitzschia microcephala</i>	D	<i>Gomphonema gracile</i>	MP	<i>Fragilaria intermedia</i>	P
<i>Nitzschia palea</i>	D	<i>Gomphonema montanum</i>	MP	<i>Melosira granulata</i>	P
<i>Nitzschia sinuata</i>	D	<i>Gomphonema montanum</i> var. <i>subclavatum</i>	MP	<i>Melosira granulate</i> var. <i>angustissima</i>	P
<i>Nitzschia stagnorum</i>	D	<i>Gomphonema olivaceum</i>	MP	<i>Melosira granulate</i> var. <i>angustissima</i> f. <i>spiralis</i>	P
<i>Nitzschia sublinearis</i>	D	<i>Gomphonema subclavatum</i>	MP	<i>Melosira granulate</i> var. <i>curvata</i>	P
<i>Synedra acus</i>	D	<i>Navicula</i> sp.	MP	<i>Melosira italica</i>	P
<i>Synedra acus</i> var. <i>radians</i>	D	<i>Navicula adversa</i>	MP	<i>Bacillaria paradoxa</i>	P ¹⁾
<i>Synedra rumpens</i>	D	<i>Navicula cari</i>	MP	<i>Hantzschia</i> sp.	P ¹⁾
<i>Synedra tenera</i>	D	<i>Navicula confervacea</i>	MP	<i>Hantzschia amphioxys</i>	P ¹⁾
<i>Synedra ulna</i>	D	<i>Navicula cryptocephala</i>	MP	<i>Hantzschia amphioxys</i> f. <i>capitata</i>	P ¹⁾
<i>Synedra ulna</i> var. <i>axyrhynchus</i>	D	<i>Navicula cuspidata</i>	MP	<i>Hantzschia elongaia</i>	P ¹⁾
<i>Synedra ulna</i> var. <i>biceps</i>	D	<i>Navicula dicephala</i>	MP	<i>Frustulia vulgaris</i>	S1
<i>Amphora</i> sp.	L _o ¹⁾	<i>Navicula gregaria</i>	MP	<i>Gomphonema parvulum</i>	T _B
<i>Amphora ovalis</i>	L _o ¹⁾	<i>Navicula grimmei</i>	MP	<i>Melosira varians</i>	T _B
<i>Coscinodiscaceae</i> sp.	L _o ¹⁾	<i>Navicula hasta</i>	MP	<i>Neidium</i> sp.	T _B ¹⁾
<i>Diatoma</i> sp.	L _o ¹⁾	<i>Navicula lanceolata</i>	MP	<i>Frustulia rhomboides</i>	X3
<i>Diatoma hiemale</i> var. <i>quadratum</i>	L _o ¹⁾	<i>Navicula minima</i>	MP	<i>Caloneis ventricosa</i>	X3 ¹⁾
<i>Diatoma vulgare</i>	L _o ¹⁾	<i>Navicula mutica</i>	MP	<i>Cymatopleur elliptica</i>	X3 ¹⁾
<i>Gyrosigma acuminatum</i>	L _o ¹⁾	<i>Navicula muticoides</i>	MP	<i>Cymatopleura</i> sp.	X3 ¹⁾
<i>Gyrosigma attenuatum</i>	L _o ¹⁾	<i>Navicula placentula</i>	MP	<i>Cymatopleura elliptica</i> var. <i>constricta</i>	X3 ¹⁾
<i>Gyrosigma scalproides</i>	L _o ¹⁾	<i>Navicula pupula</i>	MP	<i>Cymatopleura solea</i>	X3 ¹⁾
<i>Pinnularia acrosphaeria</i>	L _o ¹⁾	<i>Navicula pupula</i> f. <i>capitata</i>	MP	<i>Cymatopleura solea</i> var. <i>constricta</i>	X3 ¹⁾
<i>Pinnularia mesolepta</i>	L _o ¹⁾	<i>Navicula pupula</i> var. <i>rectangularis</i>	MP	<i>Diploneis puella</i>	X3 ¹⁾
<i>Pinnularia</i> sp.	L _o ¹⁾	<i>Navicula simplex</i>	MP	<i>Diploneis</i> sp.	X3 ¹⁾
<i>Surirella capronii</i>	MP	<i>Navicula subbacillum</i>	MP	<i>Pleurosira laevis</i>	X3 ¹⁾

1) 代表综合性状接近的某一类群,为作者暂定划分的类别

2.2 汝溪河浮游植物叶绿素 a 含量

由图 3 可以看出,不同水文期,浮游植物叶绿素 a 含量变化显著. 平水期 Chl-a 含量变化范围为 1.666 ~ 26.616 mg·m⁻³,丰水期为 0.256 ~ 7.239 mg·m⁻³,枯水期为 0.583 ~ 2.570 mg·m⁻³. 总体上,平水期 Chl-a 的平均含量 > 丰水期 > 枯水期,且平

水期 Chl-a 含量的高峰出现在平水期的中下游.

2.3 汝溪河环境因子变化

图 4 表明,在不同水文期,汝溪河环境因子呈现相应变化. 总氮[图 4(a)]在平水期出现最高值,变化范围为 2.298 ~ 3.313 mg·L⁻¹;丰水期和枯水期较平水期低,在 1.296 ~ 2.130 mg·L⁻¹ 范围内波动.

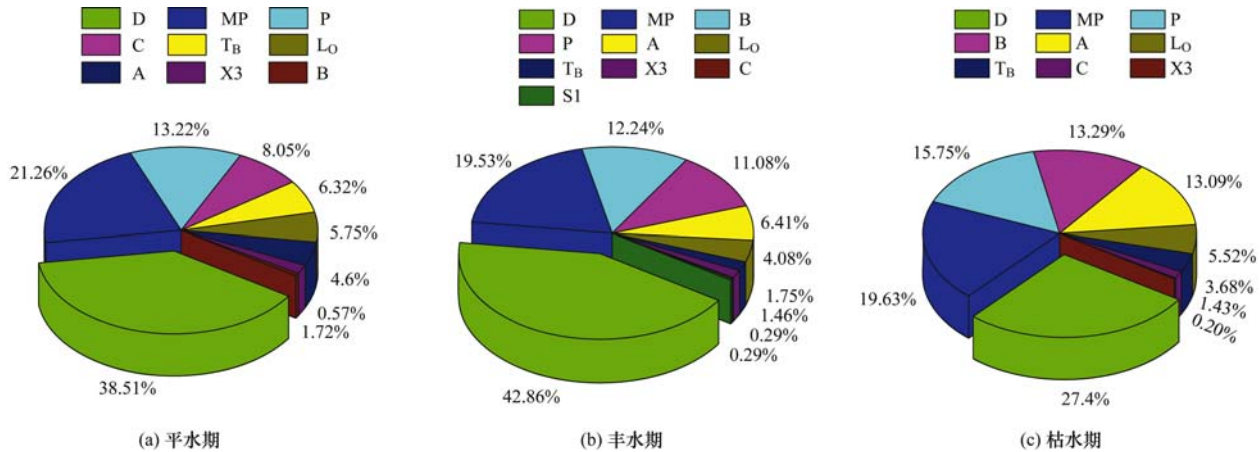


图2 不同水文期汝溪河浮游硅藻功能类群密度

Fig. 2 Densities of planktonic diatom functional classifications in the Ruxi River during the different water periods

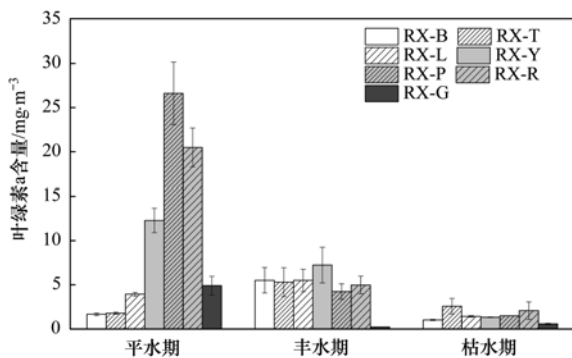


图3 不同水文期汝溪河叶绿素 a 含量变化

Fig. 3 Changes of Chl-a in the Ruxi River during the different water periods

总磷[图4(b)]在丰水期出现最大值,并呈现总磷质量浓度丰水期>平水期>枯水期,平、丰、枯水期波动范围分别为0.066~0.136、0.053~0.287、0.024~0.042 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。高锰酸盐指数[图4(c)]在各水期变化趋势为丰水期>平水期>枯水期,波动范围分别为丰水期:3.560~5.600 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平水期:2.236~3.468 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;枯水期:1.015~1.464 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。透明度[图4(d)]在枯水期最高,最大可达到300 cm,变化范围为77~300 cm,平水期为15~117 cm,丰水期为58~140 cm。其他的环境因子也具相应变化,如硝酸盐氮和氨氮质量浓度分别为0.180~2.110 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和0.008~1.667 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;正磷酸盐质量浓度范围0.006~0.183 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;碱度变化区间为46.621~114.960 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,溶解氧整体在7.00~16.02 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内波动等等。

2.4 浮游硅藻功能类群结构与环境因子的回归分析

通过多元逐步回归分析,剔除了对相应功能群不显著的环境因子,保留了效应相对显著的因子,最后得到环境因子与各功能类群的最优回归关系。不

同水文期内汝溪河浮游硅藻功能类群密度与环境因子的逐步回归统计结果如表3所示。

平水期共发现9个功能类群,通过逐步回归分析结果(表3)发现,A、D、 L_0 、MP、P、 T_B 这6个类群都筛选出了主要的环境影响因子,相关系数分别为0.999、0.973、0.904、0.789、0.982、0.999,说明这6个类群的密度与环境因子的逐步回归相关系数大,线性关系显著;且相应P值分别为0.028、0.017、0.035、<0.001、0.018、0.030,说明相应方程拟合好,回归性显著。其中,A类群密度仅仅与氧化还原电位关系密切, L_0 、 T_B 类群密度则分别与水深和浊度关系紧密,较前3个类群,D、P、类群密度与环境因子的关系更加活跃,MP最为活跃,与之显著相关的环境因子筛选出了6个。D类群密度与 $\rho(\text{TN})$ 、水温线性显著相关,P类群受电导率、 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{DO})$ 的显著影响,而电导率、水温、 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{KMnO}_4)$ 、 v 、浊度则显著影响着MP类群密度。综合而言,影响平水期功能类群密度最重要的环境因子为 $\rho(\text{TN})$ 。

丰水期10个功能类群中,逐步回归分析结果(表3)显示,A、B、D、 L_0 、MP、P、 T_B 、X3类群与环境因子的相关系数分别0.928、0.999、0.964、0.869、0.994、0.956、0.934、1.000,系数大,且P值均小于0.05。相较于其他7个类群,MP类群密度与环境因子关系最为活跃,入选环境因子达4个,与 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、氧化还原电位、透明度、电导率显著相关。B、P类群密度与环境因子关系也较为活跃,分别受透明度、水深和透明度、氧化还原电位的显著影响。剩下5个类群都仅与单一环境因子线性相关,如A类群密度与水温,D类群密度与碱度, L_0 类群密度与水温, T_B 类群密度与 $\rho(\text{DO})$,X3类群密度

与浊度,虽环境因子单一,但相关性很显著,特别是 X3 类群与浊度之间,相关系数达到 1.000。综合而言,影响丰水期功能群密度最主要环境因子为透明度。

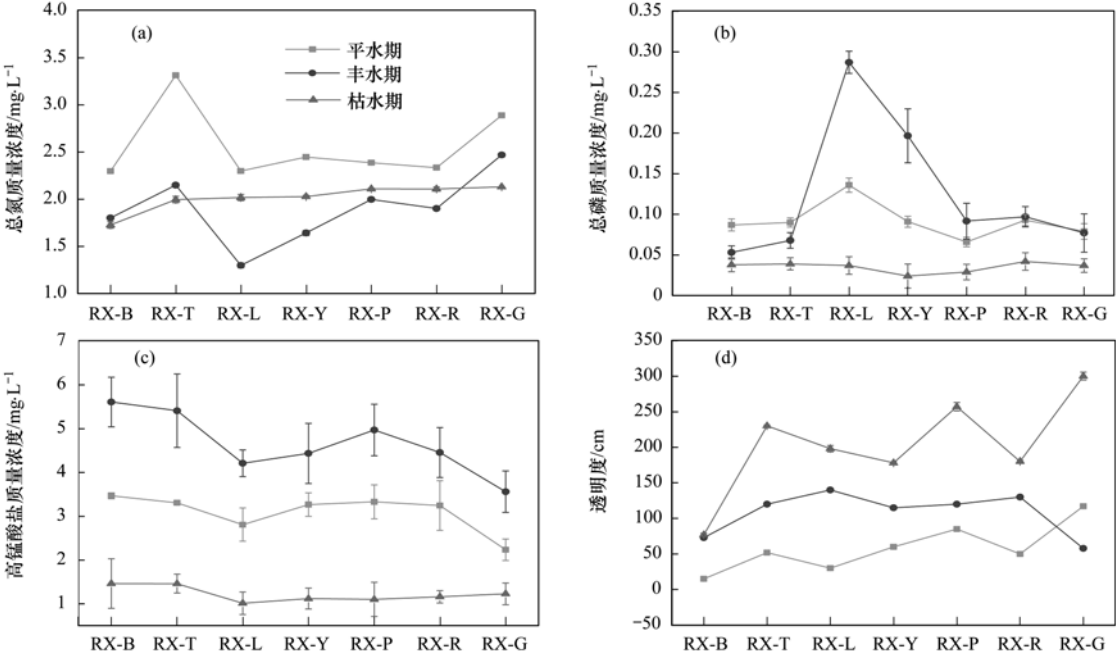


图4 汝溪河不同水文期总氮、总磷、高锰酸盐、透明度的变化

Fig. 4 Variations of TN, TP, KMnO₄, and SD in the Ruxi River during the different water periods

表3 不同水文期汝溪河浮游硅藻功能类群结构与环境因子的逐步回归统计结果¹⁾

Table 3 Stepwise multiple regression between densities of planktonic diatom functional classifications and environmental factors in the Ruxi River during the different water periods

水文期	功能类群 (y)	所筛选变量(x_i)	逐步回归方程	相关系数 R	P
平水期	A	氧化还原电位	$y = -0.119x_1 + 37.511$	0.999	0.028
	D	$\rho(\text{TN})$ 、水温	$y = 32.891x_1 + 5.659x_2 - 188.133$	0.973	0.017
	L _o	水深	$y = -0.078x_1 + 4.283$	0.904	0.035
	MP	电导率、水温、 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{KMnO}_4)$ 、v、浊度	$y = 0.138x_1 + 4.804x_2 + 5.366x_3 - 4.740x_4 - 0.535x_5 + 1.4 \times 10^{-3}x_6 - 143.516$	0.789	<0.001
	P	电导率、 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{DO})$	$y = 8.874x_1 + 0.063x_2 + 0.048x_3 - 44.358$	0.982	0.018
	T _B	浊度	$y = 0.372x_1 - 5.021$	0.999	0.03
丰水期	A	水温	$y = 3.073x_1 - 88.355$	0.928	0.008
	B	透明度、水深	$y = 3.466x_1 + 0.051x_2 - 413.911$	0.999	0.016
	D	碱度	$y = -3.494x_1 + 271.312$	0.964	0.008
	L _o	水温	$y = 6.148x_1 - 183.687$	0.869	0.032
	MP	$\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 、氧化还原电位、透明度、电导率	$y = -269.275x_1 + 0.029x_2 - 0.023x_3 + 0.017x_4 + 27.207$	0.994	0.038
	P	透明度、氧化还原电位	$y = -0.113x_1 + 0.035x_2 + 4.323$	0.956	0.039
	T _B	$\rho(\text{DO})$	$y = -1.919x_1 + 24.114$	0.934	0.017
枯水期	X3	浊度	$y = 0.064x_1 + 1.735$	1.000	<0.001
	A	浊度	$y = -0.348x_1 + 11.780$	0.854	0.03
	B	$\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 、氧化还原电位、光照	$y = 580.942x_1 + 0.094x_2 - 0.116x_3 - 25.090$	0.864	0.028
	C	碱度、pH	$y = -1.293x_1 - 0.697x_2 + 100.827$	1.000	<0.001
	D	$\rho(\text{DO})$ 、电导率	$y = 14.346x_1 + 0.181x_2 - 171.623$	1.000	0.017
	L _o	pH	$y = 19.005x_1 + 164.278$	0.948	0.004
	MP	碱度	$y = 1.237x_1 - 80.504$	0.944	0.005
	P	浊度	$y = -58.569x_1 + 129.850$	0.934	0.006
	T _B	电导率	$y = 0.609x_1 - 218.216$	1.000	<0.001

1) 逐步回归方程中各变量与所筛选变量一一对应. y 表示相应功能类群的藻密度, x 表示各环境因子

枯水期 9 个功能类群中,结果(表 3)表明 A、B、C、D、L₀、MP、P 和 T_B 这 8 个类群的密度与环境因子之间逐步回归相关系数都大,依次为 0.854、0.864、1.000、1.000、0.948、0.944、0.934、1.000, *P* 值均小于 0.05. 相较于其他类群, C、D 和 T_B 这 3 个类群的密度与环境因子之间的相关系数最高,均为 1.000, 类群密度与环境因子间呈极显著相关,与 C 类群密度关系密切的环境因子为碱度、pH, 对于 D 类群,电导率是最为显著的影响因子, $\rho(\text{DO})$ 是其次要影响因子, 电导率也为 T_B 类群唯一显著影响的因子; 而 B 类群密度与环境因子间相互关系则更为活跃, 入选的环境因子达 3 个, 分别有 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 、氧化还原电位、光照, 其中光照的影响最为显著. 对 L₀、MP 和 P

类群密度有影响的环境因子均为一个, 但影响显著, L₀ 类群的入选因子为 pH, MP 类群的为碱度, P 类群的则为浊度. 综合而言, 影响枯水期功能群密度的主要环境因子为浊度、碱度和 pH 以及电导率.

方差分析结果显示(表 4), 平水期有 4 个类群(A、D、L₀、P)的密度与环境因子的 *F* 值(12.794 ~ 35.788)较高, 说明它们同时受环境因素的影响较大; 在丰水期除了 C 类群与 L₀ 类群外其他类群的密度与环境因子间的 *F* 值(13.580 ~ 39.446)较高, 说明丰水期它们受环境因素的影响较大; 枯水期, 除了 A、B、X3 类群外, 其他类群的密度与环境因子间的 *F* 值(12.657 ~ 35.200)较高, 说明枯水期它们受环境因素的影响较大.

表 4 不同水文期汝溪河浮游硅藻功能类群分布受环境因子影响的方差分析统计结果¹⁾

Table 4 ANOVA for the effects of environmental factors on the densities of planktonic diatom functional classifications in the Ruxi River during the different water periods

功能类群	平水期		丰水期		枯水期	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
A	12.794	0.028	24.968	0.008	10.767	0.030
B	—	—	15.870	<0.001	11.828	0.026
C	—	—	—	—	12.657	0.006
D	35.788	0.003	39.446	0.008	17.362	<0.001
L ₀	13.418	0.035	10.217	<0.001	35.200	0.004
MP	8.245	0.035	24.121	<0.001	32.633	0.005
P	15.138	<0.001	15.197	0.007	27.565	0.006
T _B	11.235	<0.001	18.419	<0.001	23.143	<0.001
X3	—	—	13.580	<0.001	—	—

1) —表示无数据

2.5 浮游硅藻功能类群密度与环境因子间的 RDA 分析

通过 RDA 分析发现,平水期浮游硅藻功能类群

结构主要受到电导率、 $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 、 $\rho(\text{DO})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 、氧化还原电位(ORP)、水深的影响[图 5(a)]. 结果显示,浮游硅藻功能类群密度与主要

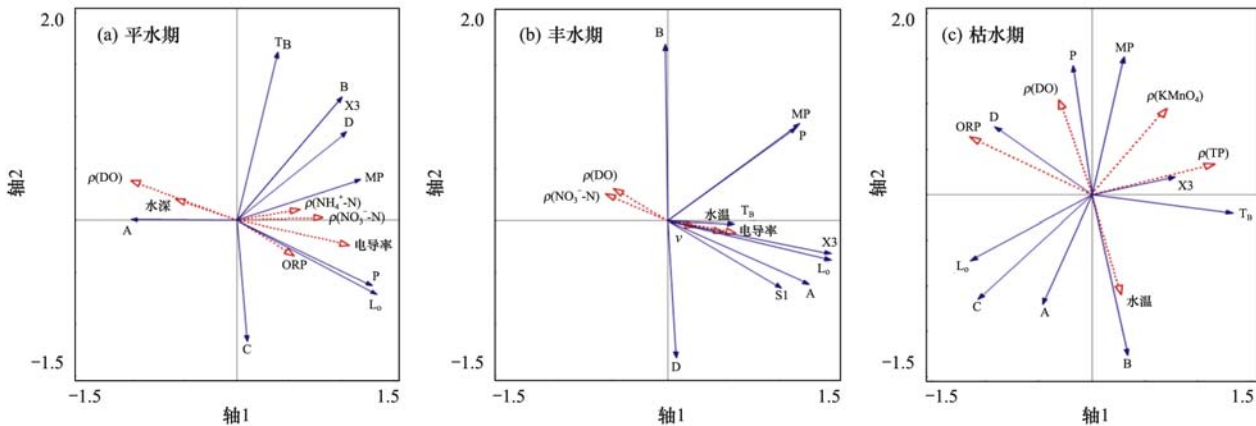


图 5 汝溪河各水情期浮游硅藻功能类群密度与主要环境因子间的 RDA 二维排序图

Fig. 5 RDA two-dimensional ordination diagram between environmental factors and densities of planktonic diatom functional classifications in the Ruxi River during the different water periods

影响环境因子间的相关性极强,前 2 个环境因子轴的相关系数达到 1.000(表 5),且前 2 个环境因子轴的解释度达 75.70%。浮游硅藻功能类群密度与 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 、电导率、氧化还原电位(ORP)呈正相关,与水深、 $\rho(\text{DO})$ 呈负相关。P、 L_0 类群密度与 $\rho(\text{DO})$ 、水深及氧化还原电位(ORP)

相关性很强,与氧化还原电位(ORP)呈正相关,与 $\rho(\text{DO})$ 、水深呈负相关,电导率也是其重要的影响因子,A 类群与之相反。而 MP、D、B、X3 以及 T_B 均与 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 呈正相关,MP 与这 2 个环境因子的相关性更强。C 类群与电导率及氧化还原电位(ORP)呈正相关。

表 5 不同水期汝溪河浮游硅藻功能类群密度与主要环境因子间的 RDA 结果
Table 5 RDA analysis between densities of planktonic diatom functional classifications and major environmental factors in the Ruxi River during the different water periods

参数项	平水期				丰水期				枯水期			
	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4
特征值	0.48	0.28	0.20	0.03	0.41	0.29	0.17	0.08	0.55	0.27	0.17	0.07
物种密度-环境因子相关系数	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
物种密度的变异累积百分比/%	47.70	75.70	95.30	98.10	40.60	69.80	86.60	94.50	55.00	82.40	99.40	100.00
物种密度-环境因子的变异累积百分比/%	47.70	75.70	95.30	98.10	40.60	69.80	86.60	94.50	55.00	82.40	99.40	100.00

丰水期浮游硅藻功能类群结构的主要影响环境因子有电导率、 $\rho(\text{DO})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 、水温(WT)、 v [图 5(b)]。排序分析结果显示,前 2 个环境因子轴的解释度达 69.80%,且前 2 个环境因子轴的相关系数达到 1.000(表 5)。由浮游硅藻功能类群密度与水温、电导率及 v 呈显著正相关,而 $\rho(\text{DO})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 呈负相关。MP、P、 T_B 、X3、 L_0 、A 以及 S1 均与水温、电导率以及 v 呈正相关,其中 T_B 、X3、 L_0 、A 与水温、电导率以及 v 相关性较强,与 $\rho(\text{DO})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 呈明显负相关。B 与 $\rho(\text{DO})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 呈正相关,而 D 与之呈负相关。

枯水期功能类群密度主要受水温(WT)、氧化还原电位(ORP)、 $\rho(\text{DO})$ 、 $\rho(\text{KMnO}_4)$ 、 $\rho(\text{TP})$ 的影响[图 5(c)]。排序分析结果显示,前 2 个环境因子轴的解释度达 82.40%,且游硅藻功能类群密度与主要影响环境因子间的相关性极强,前 2 个环境因子轴的相关系数达到 1.000(表 5)。浮游硅藻功能类群密度与水温(WT)、 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{KMnO}_4)$ 呈正相关,与 $\rho(\text{DO})$ 、氧化还原电位(ORP)呈负相关,轴 2 与氧化还原电位(ORP)、 $\rho(\text{DO})$ 、 $\rho(\text{KMnO}_4)$ 、 $\rho(\text{TP})$ 呈正相关,与水温(WT)呈负相关。 $\rho(\text{KMnO}_4)$ 、 $\rho(\text{TP})$ 均与 MP、X3、 T_B 、 L_0 、C、A 相关性较强,说明这 2 个环境因子可能是这 6 个功能类群的主要影响因子,P 类群与氧化还原电位(ORP)、 $\rho(\text{DO})$ 、 $\rho(\text{KMnO}_4)$ 呈正相关,与水温呈负相关,而 B 类群与 P 类群正好相反,说明 2 个功能群可能恰好生活在相反的两种生境中。D 类群与氧化还原电位(ORP)、 $\rho(\text{DO})$ 呈正相关,而与水温(WT)、 $\rho(\text{KMnO}_4)$ 、 $\rho(\text{TP})$ 呈负相关。

3 讨论

3.1 不同水文期汝溪河浮游硅藻动态变化及功能群特征

本研究结果显示(图 2),汝溪河丰水期、枯水期和平水期这 3 个水情期共鉴定出浮游植物 273 种,囊括 8 门,其中蓝藻门 15 属,35 种,绿藻门 52 属,92 种,甲藻门 4 属,11 种,裸藻门 3 属,9 种,隐藻门 2 属,3 种,黄藻门 1 属,2 种,金藻门 2 属,1 种,硅藻门 33 属 120 种。浮游硅藻种类最多,生物量最大,且浮游硅藻在 3 个水情期均是优势类群。3 个水情期,以丰水期最盛,有 103 种,硅藻细胞数量达到高峰。王亚尼等^[32]对大茶湖浮游藻类的调查研究结果显示,硅藻在每个水情期均占一定的比例,但优势性主要体现在平水期和枯水期;王丽卿等^[33]、刘霞等^[34]的研究也表明,淀山湖、太湖浮游硅藻在平水期和枯水期是优势类群。本研究所呈现的研究结果与一般湖泊在各水情期的硅藻动态变化情况有所差异不一致,这有可能与三峡大坝水库的建立和反季节的水位调度有关。三峡工程自 2003 年开始蓄水到 2010 年 175 米最高设计水位蓄水后进入全面的运行状态,受库区干流回水顶托的影响,库区各一级支流和二级支流库湾形成了大面积的支流回水区,库区的水文水生态情势包括流速、透明度、水深、水体滞留时间、水体营养盐含量以及浮游植物群落结构等方面均发生了很大的变化。经过统计分析(表 2)发现,汝溪河浮游硅藻功能类群多样,包括 A、B、C、D、 L_0 、MP、P、 T_B 、X3、S1 这 10 大功能类群。其中丰水期 D 类群密度占绝对优势,其次是 MP、B、P 类群;枯水期优势功能类群依然

是 D 类群,其次 MP、P、A、B 类群为共次优势类群;平水期的优势类群则也是与其他 2 个水情期有相同的趋势,D 类群最多,MP、P 类群次之. 浮游硅藻功能类群的组成与水体环境特征联系紧密,各种生物与非生物环境因子都影响着水体中浮游藻类的功能类群^[35~37],不同的环境条件具不同的功能类群,同时,不同的功能类群对应着不同的环境条件,对环境具指示作用. 然而,世界范围内,浮游硅藻功能群组成结构在不同河湖水系内基本相似^[38].

3.2 汝溪河水体水环境

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^[39]. 研究表明,汝溪河整体 TN 变化范围在 $1.296 \sim 3.313 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ $> 1.200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [图 4(a)]; TP 质量浓度变化范围为 $0.024 \sim 0.287 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ $> 0.020 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [图 4(b)]; 单从 TN、TP 来看,3 个水期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,致使水体中氮磷质量浓度均较大,根据文献[40,41],TN、TP 在 3 个水文期均已达到富营养化水平. 而丰水期 Chl-a 含量(图 3)变化范围为 $0.256 \sim 7.239 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,枯水期为 $0.583 \sim 2.570 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,均达到中营养水平;高锰酸盐指数变化范围为 $1.015 \sim 5.600$ [图 4(c)],也已达到中营养水平,其中,丰水期水体受有机污染以及还原性物质污染的程度较高,达到富营养水平;透明度[图 4(d)]在平水期由于甲藻水华的频繁发生致使其值出现最低,变化范围为 $15 \sim 117 \text{ cm}$,达到富营养水平. 综合来看,汝溪河在平水期和丰水期均达到中-富营养化水平,枯水期也能达到中等富营养化水平.

3.3 汝溪河浮游硅藻功能群与环境因子的相关性

通过统计分析发现,汝溪河 D 功能类群最多,其中又以丰水期最盛,且丰水期主要以菱形藻属(*Nitzschia*)和针杆藻属(*Synedra*)为主. 通过逐步回归分析(表 3)筛选出了影响丰水期 D 类群密度主要环境因子为碱度, RDA 分析[图 5(b)]表明与 $\rho(\text{DO})$ 呈显著负相关. 在丰水期碱度变化范围为 $60.660 \sim 76.760 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,较平水期和枯水期低,可能是在夏季,水体浮游植物大量繁殖生长,光合作用速率增大,水体中 CO_2 大量消耗, HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 含量增多,进而降低水体的碱度,而这个碱度范围刚好最适应 D 类群的生长;而夏季的高温会降低水体中溶解氧含量,加上水体中浮游植物的大量繁殖生长更加减少了水体中的溶解氧含量,由此可见,D 类群

是适应在溶解氧含量充足的条件下生长. 平水期筛选出影响 D 类群密度的主要环境因子为 $\rho(\text{TN})$ 、水温(表 3),且与 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 呈正相关[图 5(a)]. 这个时期的水温适中,在 $17.60 \sim 21.04^\circ\text{C}$ 范围波动,且整个水体的氮水平处于富营养状态[图 4(a)],由此可见,此时期的 D 类群较同时期其他类群更能适应富营养水体. 枯水期 D 类群, $\rho(\text{DO})$ 与电导率是最为显著的影响因子(表 3), $\rho(\text{DO})$ 呈显著正相关[图 5(c)]. 枯水期温度较低,水体中的溶解氧含量显著增多,由于 D 类群与之正相关,进而使 D 类群形成优势类群. 综合这个时期环境因子监测来看,汝溪河水体整体呈现富营养水平,而 D 类群在 3 个时期均是优势类群,说明 D 类群更能适应富营养化水体. 并且在 Padisák 等^[11]的研究中也表明 D 类群适宜生活在富营养化水体中. 而在张萌^[38]对赣江功能群研究中,表明 D 类群对水体氨氮有机污染比较敏感,除此之外还受电导率和氧化还原电位的影响.

MP 类群适宜生活在扰动频繁,浑浊的淡水水体中,P 类群适宜生活在持续混合水层,耐受低光,对水体分层很敏感^[42]. 在本研究中这 2 个功能群虽在 3 个水情期均有分布,但在枯水期丰度最大,MP 为 $1.03 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,P 为 $0.71 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$;且 MP 类群以舟形藻(*Navicula*)为代表属种,P 类群以钝杆藻(*Fragilaria*)为代表属种. 在枯水期,汝溪河水体中碱度的平均水平在 3 个水情期最高,高锰酸盐指数及总磷质量浓度在 3 个水情期虽是最低,但也已达到中-富营养水平;并且在枯水期温度低,光照强度低,对于耐低温捕光能力强的类群具有显著优势,如耐低光的 P 类群. 通过逐步回归分析(表 3)以及 RDA 分析[图 5(c)]发现,在枯水期 MP 功能群与碱度, $\rho(\text{KMnO}_4)$ 、 $\rho(\text{TP})$ 呈正相关,说明如果水体遭遇有机和无机污染以及水体营养过盛,MP 类群依然能够存活得很好. 对于 L_0 类群,在 3 个水文期也都有出现,以普通等片藻(*Diatoma vulgare*)和羽纹藻(*Pinnularia*)为主. 与 L_0 类群相关性较强的环境因子有水深、水温、pH、 $\rho(\text{DO})$ 、氧化还原电位(ORP)、水温、电导率以及流速(v),说明 L_0 类群适宜生活的生境很广,而前人的研究也表明 L_0 类群适应的生境范围很广^[42],水体可深可浅,水域可大可小,营养状况可贫可富.

A、B、C 类群均以小环藻属(*Cyclotella*)为代表属种,但是它们各自对环境的耐受性具明显差异. 在本研究中(表 3),A 类群与氧化还原电位、水温、

浊度关系密切,汝溪河的水温变化在 $8.7 \sim 32.5^{\circ}\text{C}$ 之间,由于水体碱度呈现弱碱性-中强碱性,随着温度升高,水体的 pH 减小,这使得对 pH 升高很敏感的 A 类群来说很适宜生存,与张萌^[38]关于赣江流域功能群以及 Reynolds 等^[24]关于湖泊水体的研究结论相似。对于 B 类群,通过 RDA 分析显示其与 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 以及水温呈正相关,在枯水期光照较弱,水体热分层不明显,使得该时期 B 类群较其它 2 个时期丰度大,在黄国佳^[12]的研究中甚至发现枯水期 B 类群为优势功能类群。C 类群出现在平水期和枯水期,以美丽星杆藻 (*Asterionella formosa*) 和梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*) 为主,在这 2 个时期光照不强,并且由于三峡大坝蓄水,回水区水位高,水体分层明显,生活污水以及人工饲养大肆投放的鱼饲料,使得水体污染较严重,水体富营养化,而 C 类群的出现,说明 C 类群适宜生活在富营光化水体中且耐弱光,这也验证了胡韧等^[26]就 C 类群的识别以及 Padisák^[11]关于 C 类群的描述。

T_B 类群主要是生活在水流湍急,耐冲刷的上游地区,X3 类群主要的生活环境为耐恶劣环境的贫营养混合浅水水体,S1 类群则适宜于耐低光的混合浑浊水体^[26],此前在清洁的湖泊中就发现过 S1 类群^[25]。本研究中,在进行数据统计分析时发现 T_B 、X3、S1 这 3 个类群均集中出现于上游较清洁样点, T_B 类群在 3 个水情期都有出现,且集中出现于上游样点老涂井;X3 类群在白庙、老涂井均有出现,但还是集中于老涂井;S1 类群仅出现于丰水期老涂井样点。逐步回归分析(表 3)及 RDA 分析(图 5)结果也显示, T_B 、X3、S1 这 3 个功能类群与流速(v)、浊度正相关性较强。

4 结论

(1) 汝溪河共发现浮游植物 273 种,包括 8 门,79 属。硅藻 33 属 120 种,归于 A、B、C、D、 L_0 、MP、P、 T_B 、X3、S1 共 10 个功能类群,其中种数最多的功能群是 MP 类群,数量最多的是 D 类群。

(2) 平水期 $\rho(\text{TN})$ 对 3 个浮游硅藻功能类群有显著影响,在平水期、丰水期分别有 2 个功能类群受水温的显著影响,而在枯水期,透明度对 3 个浮游硅藻功能类群影响显著。

(3) 氧化还原电位、电导率和浊度以及 $\rho(\text{DO})$ 作为 3 个水情期的入选环境因子,对汝溪河浮游硅藻功能类群有重要影响。

(4) 从功能群而言,汝溪河水体生态平衡破坏严重,应加强对水体富营养化的管理。

参考文献:

- [1] 张晟, 李崇明, 付永川, 等. 三峡水库成库后支流库湾营养状态及营养盐输出[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 7-12.
Zhang S, Li C M, Fu Y C, et al. Trophic states and nutrient output of tributaries bay in Three Gorges Reservoir after impoundment[J]. Environmental Science, 2008, **29**(1): 7-12.
- [2] 邱光胜, 胡圣, 叶丹, 等. 三峡库区支流富营养化及水华现状研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(3): 311-316.
Qiu G S, Hu S, Ye D, et al. Investigation on the present situation of eutrophication and water bloom in the branches of Three Gorges Reservoir[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, **20**(3): 311-316.
- [3] Lean D R S, Pick F R. Photosynthetic response of lake plankton to nutrient enrichment: a test for nutrient limitation[J]. Limnology and Oceanography, 1981, **26**(6): 1001-1019.
- [4] O'Farrell I, de Tezanos Pinto P, Izaguirre I. Phytoplankton morphological response to the underwater light conditions in a vegetated wetland[J]. Hydrobiologia, 2007, **578**(1): 65-77.
- [5] Reynolds C S. Variability in the provision and function of mucilage in phytoplankton: facultative responses to the environment[J]. Hydrobiologia, 2007, **578**(1): 37-45.
- [6] Akbulut A, Dügel M. Planktonic diatom assemblages and their relationship to environmental variables in lakes of Salt Lake Basin (Central Anatolia-Turkey) [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2008, **17**(2): 154-163.
- [7] Siver P A. Development of paleolimnological inference models for pH, total nitrogen and specific conductivity based on planktonic diatoms[J]. Journal of Paleolimnology, 1999, **21**(1): 45-60.
- [8] Grime J P. Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory [J]. The American Naturalist, 1977, **111**(982): 1169-1194.
- [9] Reynolds C S. community organization in the freshwater plankton [A]. In: Gee J H R, Giller P S (Eds.). Organization of Communities Past and Present. Twenty-seventh Symposium of the British Ecological Society [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1987. 297-325.
- [10] Reynolds C S, Irish A E, Elliott J A. The ecological basis for simulating phytoplankton responses to environmental change (Protech)[J]. Ecological Modelling, 2001, **140**(3): 271-291.
- [11] Padisák J, Crossetti L, Naselli-Flores L. Use and misuse in the application of the phytoplankton functional classification: a critical review with updates[J]. Hydrobiologia, 2009, **621**(1): 1-19.
- [12] 黄国佳. 贵州高原红枫湖水库和百花湖水库浮游植物功能群时空演替特征[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2015.
Huang G J. Phytoplankton function groups and their spatial and temporal succession characteristics in Hongfeng Reservoir and Baihua Reservoir, Guizhou Province [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2015.
- [13] 李磊, 李秋华, 焦树林, 等. 关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应[J]. 环境科学, 2015, **36**(12): 4436-4443.
Li L, Li Q H, Jiao S L, et al. Response of phytoplankton functional groups to eutrophication in summer at Xiaoguan

- Reservoir[J]. Environmental Science, 2015, **36**(12): 4436-4443.
- [14] 张怡, 胡韧, 肖利娟, 等. 南亚热带两座不同水文动态的水库浮游植物的功能类群演替比较[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(1): 107-117.
- Zhang Y, Hu R, Xiao L J, *et al.* comparative analysis of succession of the phytoplankton functional groups in two reservoirs with different hydrodynamics in Southern China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, **21**(1): 107-117.
- [15] 王雅文, 杨扬, 潘鸿, 等. 基于浮游植物功能类群的广东省大型水库生态分区初探[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(1): 147-153.
- Wang Y W, Yang Y, Pan H, *et al.* Ecological region classification of 10 key reservoirs in Guangdong Province based on phytoplankton functional groups[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, **26**(1): 147-153.
- [16] 吕昌伟, 何江, 梁英, 等. 岱海硅藻类浮游植物初级生产力 Si 限制初探[J]. 环境科学, 2010, **31**(3): 639-644.
- Lv C W, He J, Liang Y, *et al.* Examination of silicate limitation of primary production by diatoms phytoplankton in the Daihai Lake[J]. Environmental Science, 2010, **31**(3): 639-644.
- [17] Potapova M, Charles D F. Distribution of benthic diatoms in U. S. rivers in relation to conductivity and ionic composition[J]. Freshwater Biology, 2003, **48**(8): 1311-1328.
- [18] 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.
- [19] 王朝晖, 齐雨藻, 陈菊芳, 等. 大亚湾角毛藻细胞数量波动及其与环境因子关系的多元分析[J]. 生态学报, 2006, **26**(4): 1096-1102.
- Wang Z H, Qi Y Z, Chen J F, *et al.* Population dynamics of *Chaetoceros* spp. and multivariate analysis of its relationship with environmental factors in Daya Bay, South China Sea[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, **26**(4): 1096-1102.
- [20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [21] 中国科学院中国孢子植物志编辑委员会. 中国淡水藻志(第一至第十五卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1988-2012.
- Consilio Florarum Cryptogamarum Sinicarum Academiae Sinicae Edita. Flora algarum sinicarum aquae dulcis (First to fifteenth volumes). [M]. Beijing: Science Press, 1988-2012.
- [22] 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.
- [23] 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. 338, 340, 345-347.
- [24] Reynolds C S, Huszar V, Kruk C, *et al.* Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton[J]. Journal of Plankton Research, 2002, **24**(5): 417-428.
- [25] Borics G, Várbíró G, Grigorszky I, *et al.* A new evaluation technique of potamo-plankton for the assessment of the ecological status of rivers[J]. Large Rivers, 2007, **17**(3-4): 465-486.
- [26] 胡韧, 蓝于倩, 肖利娟, 等. 淡水浮游植物功能群的概念、划分方法和应用[J]. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 11-23.
- Hu R, Lan Y Q, Xiao L J, *et al.* The concepts, classification and application of freshwater phytoplankton functional groups[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, **27**(1): 11-23.
- [27] 刘足根, 张柱, 张萌, 等. 赣江流域浮游植物群落结构与功能类群划分[J]. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(3): 375-384.
- Liu Z G, Zhang Z, Zhang M, *et al.* Classification of functional groups and community structure of phytoplankton in the Ganjiang River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, **21**(3): 375-384.
- [28] 齐雨藻. 中国淡水藻志 第四卷 硅藻门 中心纲[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [29] 齐雨藻, 李家英. 中国淡水藻志 第十卷 硅藻门 羽纹纲[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [30] 张力. SPSS 13.0 在生物统计中的应用[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2006. 104-119.
- [31] Lepš J, Šmilauer P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003.
- [32] 王亚尼, 周序协, 张桂蓉, 等. 大茶湖浮游藻类调查与水质初步评价[J]. 华中农业大学学报, 2013, **32**(3): 118-123.
- Wang Y N, Zhou X X, Zhang G R, *et al.* Investigation of phytoplankton and preliminary evaluation of water quality in Dacha Lake[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2013, **32**(3): 118-123.
- [33] 王丽卿, 施荣, 季高华, 等. 淀山湖浮游植物群落特征及其演替规律[J]. 生物多样性, 2011, **19**(1): 48-56.
- Wang L Q, Shi R, Ji G H, *et al.* Phytoplankton community structure and its succession in Dianshan Lake[J]. Biodiversity Science, 2011, **19**(1): 48-56.
- [34] 刘霞, 陆晓华, 陈宇炜. 太湖浮游硅藻时空演化与环境因子的关系[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(4): 821-827.
- Liu X, Lu X H, Chen Y W. Long-term evolution of planktonic diatoms and their relationships with environmental factors in Lake Taihu[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(4): 821-827.
- [35] 黄享辉, 胡韧, 雷腊梅, 等. 南亚热带典型中小型水库浮游植物功能类群季节演替特征[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(2): 311-318.
- Huang X H, Hu R, Lei L M, *et al.* Seasonal succession of phytoplankton functional groups in typical small and medium-sized reservoirs in southern China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, **22**(2): 311-318.
- [36] Reynolds C S. The ecology of phytoplankton[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006.
- [37] Abonyi A, Leitão M, Lançon A M, *et al.* Phytoplankton functional groups as indicators of human impacts along the River Loire (France)[J]. Hydrobiologia, 2012, **698**(1): 233-249.
- [38] 张萌, 邓道贵, 黄丹, 等. 赣江流域浮游硅藻功能群多样性及其水期演替的驱动特征[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(5): 680-691.
- Zhang M, Deng D G, Huang D, *et al.* Functional group diversity of planktonic diatoms and the driving pattern of water-period guild succession in Ganjiang River Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(5): 680-691.
- [39] 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.
- [40] 金菊良, 丁晶. 水资源系统工程[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2002.
- Jin J L, Ding J. *Water resource systems engineering* [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Publishing House, 2002.
- [41] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [42] 杨文, 朱津永, 陆开宏, 等. 淡水浮游植物功能类群分类法的提出、发展及应用[J]. *应用生态学报*, 2014, **25** (6): 1833-1840.
- Yang W, Zhu J Y, Lu K H, *et al.* The establishment, development and application of classification approach of freshwater phytoplankton based on the functional group: a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25** (6): 1833-1840.

欢迎订阅 2017 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》2017 年为大 16 开本,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号: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:hjlx@rcees.ac.cn;网址:www.hjlx.ac.cn

CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated MgCl_2 Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i>	(3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i>	(3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i>	(3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i>	(3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-hao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i>	(3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i>	(3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i>	(3146)
PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i>	(3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i>	(3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i>	(3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie	(3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i>	(3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i>	(3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i>	(3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i>	(3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i>	(3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i>	(3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i>	(3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i>	(3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>	(3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i>	(3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i>	(3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i>	(3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i>	(3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll <i>a</i> and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i>	(3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i>	(3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i>	(3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i>	(3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong	(3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i>	(3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i>	(3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i>	(3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i>	(3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i>	(3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i>	(3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i>	(3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i>	(3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i>	(3406)
Effect of Different TOC to NH_4^+ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i>	(3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i>	(3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i>	(3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i>	(3435)
Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo, <i>et al.</i>	(3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i>	(3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-peí, SUN Yi-fei, <i>et al.</i>	(3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i>	(3473)
Effects of CaCO_3 Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i>	(3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun	(3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i>	(3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i>	(3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i>	(3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i>	(3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(3544)