

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估 陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明(789)

空气细菌真菌污染的分级评价构建方法 张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁(795)

2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析 何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌(801)

北京市夏季不同O₃和PM_{2.5}污染状况研究 王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪(807)

2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性 王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶(816)

上海典型持续性PM_{2.5}重度污染的数值模拟 常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰(825)

厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平 韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛(834)

复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究 黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山(847)

环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究 孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康(854)

面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究 杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒(862)

三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系 周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊(873)

三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征 陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙(884)

黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析 冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉(893)

岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕(900)

长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征 王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇(910)

长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征 尹肃, 冯成洪, 李扬颀, 殷立峰, 沈珍瑶(917)

涌湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价 熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿(925)

三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价 王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良(935)

海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估 童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军(942)

三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征 何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰(950)

三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响 梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇(955)

不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究 周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃(963)

富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征 贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩(970)

间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响 汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东(980)

非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究 张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博(988)

紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响 王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹(994)

类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子 顾怡冰, 马邕文, 王金泉, 王艳, 关泽宇(1000)

富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响 李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛(1008)

铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能 孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷(1016)

富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性 方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇(1023)

3种低分子量有机酸对紫色土吸附菲的影响 谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬(1032)

HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究 蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞(1039)

水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响 王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广炜, 汪印(1048)

煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究 张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚(1055)

硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究 周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉(1061)

低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究 端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀荣, 赵乐军, 田乐琪(1070)

游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响 孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航(1075)

1株 *Arthrobacter arilaitensis* 菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用 何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义(1082)

海洋菌株 γ 3 的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性 孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津(1089)

几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁(1098)

不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响 张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义(1106)

绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响 周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐(1114)

黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究 方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼(1121)

黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征 张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽(1128)

包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析 张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大(1139)

砷污染土壤复合淋洗修复技术研究 陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝(1147)

以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性 赵艳辉, 赵阳国, 郭亮(1156)

废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究 王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东(1163)

淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响 耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇(1171)

《环境科学》征订启事(1138) 《环境科学》征稿简则(1155) 信息(824,853,883)

三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系

周川^{1,2}, 蔚建军^{1,2}, 付莉^{1,2}, 崔玉洁³, 刘德富³, 姜伟^{1,2}, Douglas Haffner^{1,2,4}, 张磊^{1,2,4*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 中加三峡水域科学研究中心, 重庆 400716; 3. 三峡大学三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443000; 4. 加拿大温莎大学大湖环境研究中心, 加拿大 安大略省温莎市, N9B 3P4)

摘要: 分别在 2014 年春季和夏季三峡库区水华高发期, 在库区北岸最大支流澎溪河流域从其河口处逆流而上至回水末端共布置 8 个采样点, 对浮游藻类和环境因子进行了监测, 运用数理统计分析手段, 对浮游藻类的群落结构及其与环境因子的关系进行了分析. 结果表明在 4 月中旬, 除河口样点外, 其他采样点水体出现分层, 但断面多只有温跃层和滞温层, 而没有混合层; 上游水体层次间温差高于下游水体; 各采样点的水深以及表层水体(水面向下至 0.5 m 深的水层)的水温、浊度、pH、电导率、溶解氧、叶绿素 a、总氮和总磷的空间分布差异显著 (ANOVA, $P < 0.05$); 共检测到浮游藻类 25 种(属), 丰度在 $(2.76 \sim 145.8) \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 以角甲藻 (*Ceratium hirundinella*) 为主要优势藻, 鱼腥藻 (*Anabaena* sp.) 为次优势藻; 上游接近支流来水的样点 S7 ($63.4 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 S8 ($145.8 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$) 水华最为严重; 硝酸盐氮、水温、pH、电导率和溶解氧是藻类生长的决定因子. 在 7 月下旬, 水体分层, 趋势与春季相似; 各采样点深度和 0~0.5 m 水层的水温、浊度、氧化还原电位、pH、电导率、叶绿素 a、氨氮、硝酸盐氮、总氮和总磷的空间分布仍然差异显著 (ANOVA, $P < 0.05$); 共检测到浮游藻类 46 种(属), 丰度在 $(9.56 \sim 278.88) \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 总体以席藻 (*Phormidium* sp.) 为主要优势藻, 鱼腥藻 (*Anabaena* sp.) 为次优势藻; 下游接近澎溪河河口的样点 S2 ($216.44 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$)、S3 ($278.88 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 S4 ($108.12 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$) 水华严重; 浊度、水深、总氮、氧化还原电位、电导率和溶解氧是藻类生长的决定因子. 水体分层与水华形成有重要关系.

关键词: 澎溪河; 水华; 水体分层; 浮游藻类; 环境因子; 冗余度分析

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-0873-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.03.011

Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir

ZHOU Chuan^{1,2}, YU Jian-jun^{1,2}, FU Li^{1,2}, CUI Yu-jie³, LIU De-fu³, JIANG Wei^{1,2}, Douglas Haffner^{1,2,4}, ZHANG Lei^{1,2,4*}

(1. College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. China-Canada Three Gorges Reservoir Water Science Centre, Chongqing 400716, China; 3. Engineering Research Centre of Eco-Environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Three Gorges University, Yichang 443000, China; 4. Great Lakes Institute for Environmental Research, University of Windsor, Windsor, Ontario, N9B 3P4, Canada)

Abstract: Planktonic algae and Related Environmental Factors were monitored during the period of algal blooms season in 2014 (Spring April 17 and summer 27 July) in Pengxi river, Three Gorges Reservoir. Mathematical statistical tools were used to analyze the community structure of planktonic algae in Pengxi River with its environmental factors. The results of sampling in spring showed that except the estuary site, S1 and the site close by, S2, the waters stratified, but without epilimnion, only had metalimnion and hypolimnion; the upstream sites had larger temperature difference between water layers than did the downstream ones; from all the 8 sampling sites from estuary to upstream, water depth, and the temperature, pH, conductivity, dissolved oxygen, chlorophyll a, TN and TP of the surface layer (0-0.5 m deep) were significantly different (ANOVA, $P < 0.05$). 25 species (genus) of planktonic algae were identified. The abundance of species ranged from $2.76 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ to $145.8 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$. *Ceratium hirundinella* was the main dominant species, and *Anabaena* sp. was the sub-dominant species. Algal bloom in upstream sampling sites S7 ($63.4 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$) and S8 ($145.8 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$) were relatively serious in spring. Temperature of water, pH, conductivity, dissolved oxygen and NO_3^- were the key regulatory factors for phytoplankton abundance based on redundancy analysis (RDA). The results of sampling in summer showed similar stratification trends among sites; the depth of the same 8 sampling sites, and their surface layer's temperature of water, turbidity, redox potential, pH, water depth, conductivity, chlorophyll a, NH_4^+ , NO_3^- , total nitrogen and total phosphorus were significantly different (ANOVA, $P < 0.05$). 46 species (genus) of phytoplanktonic algae were identified. The abundance ranged from

收稿日期: 2015-09-01; 修订日期: 2015-11-08

基金项目: 科技部国际科技合作专项 (2013DFG92520)

作者简介: 周川 (1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水生态学和微生物学, E-mail: zhou-chuan@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: zhanglei03@aliyun.com

$9.56 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$ to $278.88 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$. *Phormidium* sp. was the main dominant species, and *Anabaena* sp. was the sub-dominant algae. Algal bloom at the lower part of the river, S2 ($216.44 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$), S3 ($278.88 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$) and S4 ($108.12 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$) were relatively serious in summer. Turbidity, depth of water, TN, oxidation-reduction potential, conductivity and dissolved oxygen were the key regulatory factors for phytoplankton abundance based on RDA. Stratification had important effect on algal bloom formation.

Key words: Pengxi River; algal blooms; stratification; phytoplankton; environmental factors; RDA

三峡水库自 2003 年蓄水以来,在产生巨大的防洪、发电、通航、供水等综合效益的同时,也因拦河大坝改变了河流水文、水动力等条件,由原来的河流型生态系统演变为水库型生态系统^[1]. 在这个演变过程中,库区水流流速变缓^[2],入库污染负荷削减困难、水体自净能力降低^[3],导致部分支流库湾已呈富营养化状态,不少支流每年均暴发不同程度的藻类水华^[4].

澎溪河是三峡库区北岸流域面积最大的支流,也是三峡水库自蓄水以来每年水华暴发较为严重的支流之一. 此前,郭劲松等^[5-7]、李哲等^[8-10]对澎溪河回水区段的浮游藻类群落以及环境因子特征进行过初步研究,但关于澎溪河浮游藻类的空间分布及其动态,浮游藻类群落及生物量与水文、水流断面的时空关系的研究较少. 新近关于库区支流水华机理的研究表明库区支流浮游藻类的生长与水体分层,即水流断面结构直接相关^[11,12]. 因此,本试验于 2014 年澎溪河春季和夏季水华高发期,对澎溪河全干流的浮游藻类及其环境因子进行监测,并分析了水华高发期浮游藻类群落结构与水流断面结构及环境因子的关系,初步揭示了澎溪河水华高发期影响浮游藻类群落结构的主要环境因子.

1 材料与方法

1.1 采样点分布

澎溪河(图 1)位于北纬 $30^{\circ}49' \sim 31^{\circ}42'$,东经 $107^{\circ}56' \sim 108^{\circ}54'$ 之间,地处四川盆地东部边缘,是三峡库区北岸流域面积($5\,173 \text{ km}^2$)最大的支流,全长 182 km. 本研究沿澎溪河干流溯流而上设置了 8 个采样断面(图 1):①样点 S1 ($30^{\circ}56'42.828''\text{N}$, $108^{\circ}40'0.300''\text{E}$),位于澎溪河与长江干流的交汇处;②样点 S2 ($30^{\circ}56'56.502''\text{N}$, $108^{\circ}40'6.546''\text{E}$);③样点 S3 ($30^{\circ}57'52.704''\text{N}$, $108^{\circ}42'18.438''\text{E}$);④样点 S4 ($30^{\circ}59'0.156''\text{N}$, $108^{\circ}42'28.002''\text{E}$);⑤样点 S5 ($31^{\circ}3'56.334''\text{N}$, $108^{\circ}41'26.970''\text{E}$);⑥样点 S6 ($31^{\circ}5'26.658''\text{N}$, $108^{\circ}34'36.228''\text{E}$);⑦样点 S7 ($31^{\circ}8'13.272''\text{N}$, $108^{\circ}33'7.836''\text{E}$);⑧样点 S8 ($31^{\circ}8'46.200''\text{N}$, $108^{\circ}30'41.136''\text{E}$).

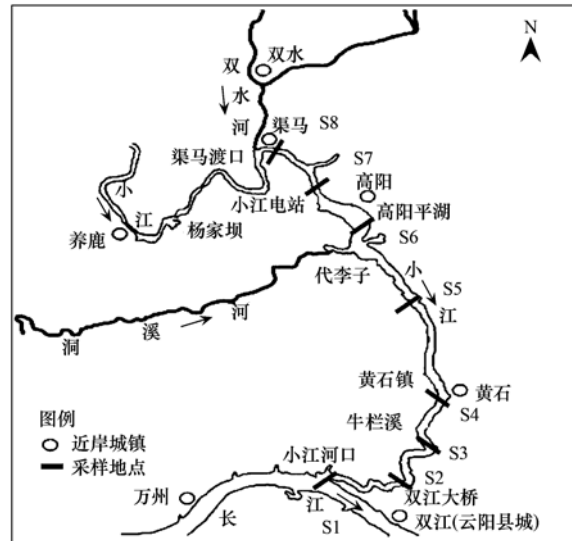


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites

1.2 样品采集及测定方法

样品采集及测定方法参照文献[13~19]进行,具体方法为:①用 RBR-80220 型水质自动分析仪现场测定每一样点水体垂直方向的水温(Tem)、浊度(Tur)、氧化还原电位(ORP)、pH、水深(Depth)、电导率(Cond)、溶解氧(DO)、叶绿素 a(Chla). 即将启动的仪器缓慢匀速地沉入水中直到触及该采样点河床底部. 在整个过程中仪器自动记录水体的各个参数数值,记录时间间隔设定为每 3 秒记录一次;②采集表层水(水面下 0.5 m),分别测定氨氮(NH_4^+)、硝酸盐氮(NO_3^-)、总氮(TN)、总磷(TP);③用 25 号浮游藻类网在水面下 0~0.5 m 作“∞”字形捞取浮游藻类定性样品,并现场滴加适量鲁哥氏试剂固定;④采集 1 L 表层水(水面下 0.5 m)用于浮游藻类定量,并现场滴加适量鲁哥氏试剂固定. 样品采集在当天 08:00~17:00 内完成. 所有藻类样品带回实验室后静置沉淀 48 h,浓缩至适宜体积,用浮游生物计数板在光学显微镜(10×40)下观察并对各藻种进行计数. 采样时间为澎溪河水华高发期,即 2014 年春季 4 月 17 日和夏季 7 月 27 日,各断面采样点均位于河道深泓线处.

1.3 数据处理及分析方法

用 SPSS 17.0 和 Excel 2007 对环境因子指标和藻类指标数据分别进行相关统计分析; 用 CANOCO^[20,21] 软件进行了浮游藻类的群落结构与环境因子之间的关系分析和除趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA). 结果显示, 春季样品“lengths of gradient”(展示每个轴的梯度长度)为 2.256, 夏季样品“lengths of gradient”(展示每个轴的梯度长度)为 1.798. 因此, 均选择冗余度分析 (redundancy analysis, RDA), 数据分析过程中将浮游藻类的细胞密度和环境因子数据进行 $\lg(x+1)$ 转换, 保证获得正态分布.

2 结果与分析

2.1 采样期间水位及水体表现

三峡大坝于每年 5 月至 9 月中旬放水腾库用于防洪, 9 月中旬至第二年 4 月底大坝蓄水用于发电和航运. 受三峡水库调度运行的影响, 本研究 2014 年 4 月中旬采样时是三峡库区水位最高的时期, 澎溪河各样点水深在 19~55 m 之间, 上游水华现象明显, S7、S8 水面悬浮大量肉眼可见的藻类, 水体呈暗褐色; 处于库区蓄水阶段, 所有采样点水流缓慢; 2014 年 7 月下旬采样时是三峡库区放水时期, 澎溪河各样点水深在 8~40 m 之间, S2、S3 和 S4 样点水

面悬浮聚集少量藻类, 水体呈深绿色; 上游 (S7、S8) 水流明显, 至高阳平湖 (S6) 水流变得缓慢.

2.2 浮游藻类的环境因子指标特征

2.2.1 水体温度的垂向分层变化

深水型湖库水体随季节性温度变化, 常常出现分层和异重流现象, 且水体分层持续时间长、分层温差大, 呈现季节性分层的现象. 典型的层化的水体, 表层受风力影响, 水体交换活跃, 温度分布均匀, 形成混合层; 底层水受气温影响比较滞后, 水温较稳定, 形成滞温层; 混合层与滞温层之间的过渡层, 水温急剧变化, 形成温跃层. 澎溪河 4 月和 7 月水体呈现分层, 但也存在特异性. 样点 S1 位于长江干流, 水流流速较大, 整个水体混合均匀, 4 月和 7 月的两次采样均不呈现分层现象. 除 S1 外, 4 月澎溪河各样点几乎没有混合层, 温跃层出现在水面至 10 m 深度范围内, 表层与底层最大温差约 8℃. 7 月, S5 和 S8 两断面有 4 m 深度内的混合层, 其他 (S1 除外) 断面仍然只有温跃层和滞温层, 温跃层存在于从混合层向下至水深 10 m 的范围, 表层与底层最大温差约 9.5℃ (图 2).

2.2.2 春季浮游藻类的环境因子指标特征

表 1 为澎溪河春季水华高发期各采样点理化环境特征. 8 个样点的水温差异极显著 (ANOVA, $F = 6.402, P < 0.01$), 表面水温随自然水流方向由上游

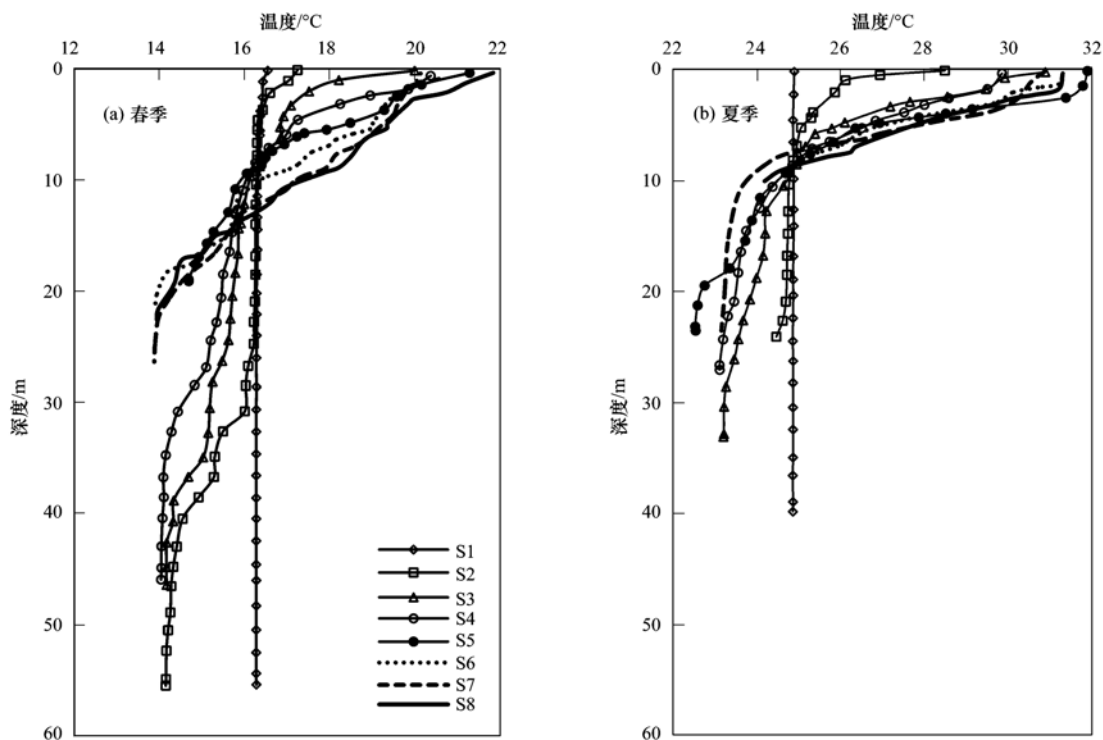


图 2 澎溪河春季和夏季水体温度的垂向分层变化

Fig. 2 Vertical stratification of water temperature in Pengxi River in spring and summer

向下游逐渐降低,上游与下游温度差异达到 5.20℃,水温适宜藻类的生长(18~25℃);浊度也呈现上游向下游降低的趋势,但澎溪河上游水流至高阳平湖(S6 样点),浊度明显降低,高阳平湖上游与下游水体的浊度相差 2~4 倍,差异极显著(ANOVA, $F=48.2, P<0.01$),变化范围为(3.14 ± 0.20)NTU(S2)~(13.93 ± 2.30)NTU(S8); 8 个样点氧化还原电位变化范围为(0.08 ± 0.04)V(S8)~(0.18 ± 0.04)V(S3),各样点间的差异不显著;各样点 pH 范围为(7.90 ± 0.14)(S1)~(9.21 ± 0.26)(S3)之间,为中性偏弱碱性水体,并且各采样点间存在显著的差异(ANOVA, $F=5.223, P<0.05$). 河口处 pH 最低,除样点 S3 外,高阳平湖上游水体 pH 高于下游的;各样点电导率差异极显著(ANOVA, $F=161.409, P<0.01$),变化范围为(399.99 ± 14.16)(S3)~(607.48 ± 10.58)μS·cm⁻¹(S8). 同样地,在高阳平湖上游(包括平湖)水体的电导率为平湖下游的 1.3 倍以上;溶解氧含量的范围在(5.70 ± 0.99)(S1)~(14.71 ± 2.42)mg·L⁻¹(S3)之间,采样点间差异极显著(ANOVA, $F=12.197, P$

<0.01),除样点 S3,水体溶氧自上游向下游递减; 8 个样点水深在(19.14 ± 1.22)(S5)~(55.50 ± 0.71)m(S2)之间,从上游来水至样点 S4 水深由 20~30 m 陡增至 45~96 m,样点 S4 至河口逐渐加深,样点间的水深差异极显著(ANOVA, $F=838.624, P<0.01$).

澎溪河春季氮、磷含量变化见表 1. 方差分析结果表明总氮的空间分布存在极显著差异(ANOVA, $F=14.01, P<0.01$),总氮含量变化范围在(0.56 ± 0.15)(S6)~(1.96 ± 0.25)mg·L⁻¹(S7)之间,上下游未呈现明显趋势;NH₄⁺的空间分布差异不显著;虽然 NO₃⁻的空间分布差异也不显著,但除样点 S8 外,包括高阳平湖及其以上的上游样点的 NO₃⁻浓度为平湖下游样点的 4 倍以上. 总磷含量的变化范围在(0.11 ± 0.004)(S6)~(0.21 ± 0.019)mg·L⁻¹(S2)之间,各采样点间存在极显著差异(ANOVA, $F=47.02, P<0.01$),但未显示上游和下游的区别;总氮与总磷的质量比在 3.73~10.83 之间,适宜藻类的生长. 各样点叶绿素 a 浓度差异显著(ANOVA, $F=2115.087, P<0.05$). 除样点 S3 外,回水断面(样点 S4)以上的样点叶绿素 a 浓

表 1 澎溪河春季各采样点环境因子特征¹⁾(平均值 ± 标准差)

Table 1 Variability of environmental parameters (mean ± sd) at different sampling sites in spring in Pengxi River

项目	温度/℃	浊度/NTU	ORP/V	pH	电导率/μS·cm ⁻¹	DO/mg·L ⁻¹	水深/m
S8	21.75 ± 1.10	13.93 ± 2.30	0.08 ± 0.04	9.00 ± 0.28	607.48 ± 10.58	11.53 ± 0.47	22.59 ± 0.83
S7	21.38 ± 0.88	10.61 ± 0.27	0.10 ± 0.04	9.17 ± 0.24	592.11 ± 7.23	13.86 ± 0.20	26.40 ± 0.57
S6	20.07 ± 1.32	8.39 ± 0.16	0.16 ± 0.03	8.80 ± 0.42	547.03 ± 11.36	10.39 ± 0.86	21.29 ± 1.00
S5	21.30 ± 0.98	3.17 ± 0.18	0.14 ± 0.03	8.88 ± 0.31	401.28 ± 9.50	9.06 ± 1.33	19.14 ± 1.22
S4	20.38 ± 0.88	3.62 ± 0.11	0.09 ± 0.03	7.90 ± 0.14	406.36 ± 7.58	5.70 ± 0.99	45.96 ± 0.06
S3	20.01 ± 1.40	4.56 ± 0.23	0.18 ± 0.04	8.32 ± 0.25	399.99 ± 14.16	7.12 ± 1.58	46.43 ± 0.61
S2	17.25 ± 1.10	3.14 ± 0.20	0.15 ± 0.03	9.21 ± 0.26	409.96 ± 14.09	14.71 ± 2.42	55.50 ± 0.71
S1	16.55 ± 0.92	3.73 ± 0.18	0.09 ± 0.01	8.67 ± 0.18	408.28 ± 4.64	7.83 ± 1.17	55.42 ± 0.59
AVG	19.84 ± 1.95	6.39 ± 3.94	0.12 ± 0.04	8.47 ± 0.45	471.56 ± 89.27	10.03 ± 3.16	36.59 ± 15.05
F	6.402	48.2	2.646	5.233	161.409	12.197	838.62
	**	**		*	**	**	**
项目	Chla /μg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	TN/TP	
S8	43.26 ± 1.05	0.01 ± 0.01	0.08 ± 0.04	1.30 ± 0.07	0.120 ± 0.010	10.83	
S7	54.17 ± 1.17	0.02 ± 0.02	0.42 ± 0.31	1.96 ± 0.25	0.190 ± 0.010	10.32	
S6	14.13 ± 0.18	0.09 ± 0.04	0.27 ± 0.15	0.56 ± 0.15	0.110 ± 0.004	5.09	
S5	11.53 ± 0.66	0.08 ± 0.07	0.33 ± 0.32	1.60 ± 0.56	0.160 ± 0.001	10.00	
S4	1.05 ± 0.07	0.01 ± 0.01	0.08 ± 0.02	0.56 ± 0.09	0.150 ± 0.001	3.73	
S3	18.17 ± 0.24	0.02 ± 0.01	0.08 ± 0.07	1.13 ± 0.11	0.180 ± 0.011	6.28	
S2	2.81 ± 0.16	0.11 ± 0.02	0.05 ± 0.05	1.66 ± 0.11	0.210 ± 0.019	7.90	
S1	0.59 ± 0.13	0.02 ± 0.01	0.05 ± 0.04	1.63 ± 0.15	0.170 ± 0.004	9.59	
AVG	18.21 ± 19.20	0.05 ± 0.02	0.17 ± 0.07	1.3 ± 0.46	0.16 ± 0.05	8.13	
F	2115.1	4.48	1.43	14.01	47.02	—	
	**			**	**		

1)表中除深度外,其他指标均为水面下 0~0.5 m 水体的特征,AVG 为均值;F 值为组间均方与组内均方的比值;样点使用单因素方差分析($P<0.05$);* 表示 $P<0.05$ ** 表示 $P<0.01$,箭头表示相应值升高的方向,下同

度为回水断面以下样点的数十倍,水华高发期最严重的 S7 点的叶绿素 a 浓度含量最高(该点也具有总 N 最高值),达到 $54.17 \pm 1.17 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,河口 S1 点叶绿素含量最低。

2.2.3 夏季浮游藻类的环境因子指标特征

表 2 为澎溪河夏季水华高发期各采样点环境因子特征。8 个样点的表面水温差异极显著(ANOVA, $F = 179.269, P < 0.01$),在 (24.89 ± 0.13) (S1) ~ (31.91 ± 0.16) °C (S5) 之间变化。与春季相似,上游水体表层水温高于河口水温 6°C 左右;夏季各样点浊度为春季平均值的近 3 倍,特别是河口,夏季为春季的 11 倍。与春季相反,澎溪河夏季水体浊度由上游至下游增加,特别是在高阳平湖以下,样点浊度陡增,各样点的差异极显著(ANOVA, $F = 3202.942, P < 0.01$),变化范围为 (5.24 ± 0.33) (S8) ~ (42.19 ± 0.27) NTU (S1); 与春季不同,各样点间的氧化还原电位差异极显著(ANOVA, F

$= 27.725, P < 0.01$),由上游向下游递增,变化范围为 (0.04 ± 0.01) (S8) ~ (0.49 ± 0.06) V (S3); 澎溪河 pH 在 (7.57 ± 0.24) (S1) ~ (8.99 ± 0.27) (S2) 之间,为中性偏弱碱性水体,各采样点间存在极显著的差异(ANOVA, $F = 13.139, P < 0.01$),但与春季不同,样点间未显示上、下游的差别;夏季水体电导率低于春季。与春季相似,上游水体电导率高于下游。各样点间差异极显著(ANOVA, $F = 161.409, P < 0.01$),变化范围为 (242.27 ± 3.21) (S3) ~ (369.71 ± 27.87) $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (S1); 溶解氧含量的范围在 (1.67 ± 0.10) (S3) ~ (2.00 ± 0.14) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (S4) 之间,为春季水体溶解氧 1/6 ~ 1/3,且样点间差异不显著;夏季样点水深在 (7.96 ± 0.22) (S6) ~ (39.86 ± 0.23) m (S1) 之间,为春季水深的 1/3 ~ 2/3,由来水向河口水深逐渐增加,各样点的水深差异极显著(ANOVA, $F = 1780.818, P < 0.01$)。

表 2 澎溪河夏季各采样点环境因子特征(平均值 ± 标准差)

Table 2 Variability of environmental parameters (mean ± sd) at different sampling sites in summer in Pengxi River

项目	温度 /°C	浊度/NTU	ORP /V	pH	电导率 / $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	DO / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	水深 /m
S8	31.01 ± 0.27	5.24 ± 0.33	0.04 ± 0.01	8.61 ± 0.13	358.09 ± 2.70	1.84 ± 0.18	10.10 ± 0.14
S7	30.88 ± 0.17	5.84 ± 0.20	0.12 ± 0.02	8.03 ± 0.24	331.77 ± 16.65	1.85 ± 0.14	23.60 ± 0.85
S6	31.65 ± 0.35	5.81 ± 0.27	0.28 ± 0.04	7.83 ± 0.18	302.27 ± 3.21	1.81 ± 0.13	7.96 ± 0.22
S5	31.91 ± 0.16	19.55 ± 0.64	0.16 ± 0.04	8.96 ± 0.20	244.75 ± 7.42	1.79 ± 0.13	23.60 ± 0.28
S4	29.87 ± 0.24	16.07 ± 0.10	0.19 ± 0.06	8.21 ± 0.13	269.29 ± 13.14	2.00 ± 0.14	27.13 ± 0.18
S3	30.90 ± 0.28	22.15 ± 0.21	0.49 ± 0.06	8.42 ± 0.17	242.27 ± 3.21	1.67 ± 0.10	33.11 ± 0.16
S2	28.49 ± 0.27	13.04 ± 0.06	0.36 ± 0.04	8.99 ± 0.27	293.40 ± 18.95	2.00 ± 0.16	24.14 ± 0.20
S1	24.89 ± 0.13	42.19 ± 0.27	0.37 ± 0.01	7.57 ± 0.24	369.71 ± 27.87	1.68 ± 0.11	39.86 ± 0.23
AVG	29.95 ± 0.28	16.24 ± 0.23	0.25 ± 0.14	8.33 ± 0.16	301.44 ± 16.47	1.83 ± 0.13	23.69 ± 0.37
F	179.27 **	3202.9 **	27.73 **	13.14 **	22.74 **	1.96	1780.8 **
项目	Chla / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	NH_4^+ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NO_3^- / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN/TP	
S8	4.49 ± 0.16	0.01 ± 0.01	0.12 ± 0.07	0.81 ± 0.03	0.04 ± 0.005	20.25	
S7	3.37 ± 0.10	0.04 ± 0.03	0.41 ± 0.17	1.00 ± 0.12	0.05 ± 0.001	20.00	
S6	3.26 ± 0.23	0.10 ± 0.051	0.43 ± 0.06	1.07 ± 0.11	0.06 ± 0.001	17.83	
S5	4.89 ± 0.16	0.10 ± 0.05	0.26 ± 0.01	1.27 ± 0.04	0.07 ± 0.001	18.14	
S4	2.73 ± 0.04	0.02 ± 0.01	0.11 ± 0.03	1.35 ± 0.05	0.05 ± 0.001	27.00	
S3	7.77 ± 0.10	0.08 ± 0.01	0.13 ± 0.07	1.51 ± 0.03	0.06 ± 0.002	25.17	
S2	1.33 ± 0.04	0.09 ± 0.06	0.10 ± 0.10	1.77 ± 0.04	0.05 ± 0.001	35.40	
S1	0.18 ± 0.01	0.13 ± 0.04	0.06 ± 0.05	1.70 ± 0.04	0.16 ± 0.017	10.63	
AVG	3.50 ± 0.15	0.07 ± 0.03	0.20 ± 0.06	1.31 ± 0.015	0.068 ± 0.002	19.26	
F	697.68 **	3.77 *	5.41 *	75.21 **	101.99 **	—	

澎溪河夏季氮、磷含量变化见表 2。总氮的平均值与春季相似,空间分布存在极显著差异(ANOVA, $F = 75.21, P < 0.01$),总氮含量变化范围为 (0.81 ± 0.03) (S8) ~ (1.77 ± 0.04) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (S2),由上游至下游逐渐递增;夏季水体氨氮高于

春季的,且空间分布差异显著(ANOVA, $F = 3.77, P < 0.05$),但未呈现上下游的差别,含量变化范围为 (0.01 ± 0.01) (S8) ~ (0.13 ± 0.04) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (S1); 夏季硝氮含量也略高于春季,且样点间差异显著(ANOVA, $F = 5.41, P < 0.05$),与春季相似,也呈现

上游高于下游的趋势,范围在 (0.06 ± 0.05) (S1) ~ (0.43 ± 0.06) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (S6)之间. 夏季总磷均值为春季的43%,除河口外,各样点总磷含量相似;总氮与总磷的质量比在10.63 ~ 35.40之间. 夏季叶绿素a均值仅为春季的19.2%. 与春季相似,河口具有最低值. 除样点3外,高阳平湖上游各断面的叶绿素a含量高于下游的;各样点之间的差异极显著(ANOVA, $F = 697.677$, $P < 0.01$),变化范围在 (0.18 ± 0.01) (S1) ~ (7.77 ± 0.10) $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ (S3).

2.3 水华高发期浮游藻类的群落结构

澎溪河流域8个采样点在春、夏两次采样共检出浮游藻类8门53种(属),其中以绿藻门(Chlorophyta)和硅藻门(Bacillariophyta)分布最多,分别为17种(属)和14种(属),其次是蓝藻门(Cyanophyta),有11(属)种、甲藻门(Pyrroptata)4种(属)、裸藻门(Euglenophyta)3种(属)、黄藻门(Xanthophyta)2种(属)、金藻门(Chrysophyta)1种(属)和隐藻门(Cryptophyta)为1种(属). 具体浮游

藻类的种类组成及代码见表3.

2.3.1 春季水华高发期浮游藻类的群落结构

春季澎溪河流域8个采样点,共检出浮游藻类5门25种(属),其中以绿藻门(Chlorophyta)和硅藻门(Bacillariophyta)分布最多,分别为9种(属)和7种(属),其次是蓝藻门(Cyanophyta)的6种(属)、裸藻门(Euglenophyta)2种(属)和甲藻门(Pyrroptata)1种(属). 浮游藻类密度在 2.76×10^4 (S1) ~ 145.8×10^4 $\text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$ (S8)之间,由上游向下游递减,上游接近支流来水的样点S7(63.4×10^4 $\text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$)和S8(145.8×10^4 $\text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$)藻类密度较高,水华最为严重;总体以角甲藻(*Ceratium hirundinella*, A33)为主要优势藻,出现于每一断面,其藻密度由上游向下游规律递减;微囊藻(*Microcystis* sp., A5)为次优势藻,出现于S3 ~ S8断面,藻密度由上游向下游递减;鱼腥藻(*Anabaena* sp., A10)只出现于S4、S5和S6三断面,并成为S4和S5的优势藻. 具体各采样点细胞密度和主要藻类组成见表4.

表3 浮游藻类的种类及代码¹⁾

Table 3 Codes of phytoplankton species

藻类名称	编号	藻类名称	编号	藻类名称	编号
蓝藻门 Cyanophyta		脆杆藻 <i>Fragilaria</i> sp.	A19	绿藻门 Chlorophyta	
细小隐球藻 <i>Aphanocapsa elachista</i>	A1	针杆藻 <i>Synedra</i> sp.	A20	异形水绵 <i>Spirogyra varians</i>	A37
银灰平裂藻 <i>Merismopedia glauca</i>	A2	星杆藻 <i>Asterionella</i> sp.	A21	新月藻 <i>Closterium</i> sp.	A38
腔球藻 <i>Coelosphaerium</i> sp.	A3	辐节藻 <i>Stauroneis</i> sp.	A22	角星鼓藻 <i>Staurastrum</i> sp.	A39
色球藻 <i>Chroococcus</i> sp.	A4	舟形藻 <i>Navicula</i> sp.	A23	鼓藻 <i>Cosmarium</i> sp.	A40
微囊藻 <i>Microcystis</i> sp.	A5	近缘桥弯藻 <i>Cymbella affinis</i>	A24	英克斯四棘鼓藻 <i>Arthrodesmus incus</i>	A41
席藻 <i>Phormidium</i> sp.	A6	异极藻 <i>Gomphonema</i> sp.	A25	布朗衣藻 <i>Chlamydomonas braunii</i>	A42
钝顶螺旋藻 <i>Spirulina platensis</i>	A7	菱形藻 <i>Nitzschia</i> sp.	A26	杂球藻 <i>Pleodorina</i> sp.	A43
颤藻 <i>Oscillatoria</i> sp.	A8	波缘藻 <i>Cymatopleura</i> sp.	A27	实球藻 <i>Pandorina</i> sp.	A44
弯形尖头藻 <i>Raphidiopsis curvata</i>	A9	双菱藻 <i>Surirella</i> sp.	A28	空球藻 <i>Eudorina elegans</i>	A45
鱼腥藻 <i>Anabaena</i> sp.	A10	隐藻门 Cryptophyta		粗刺藻 <i>Acanthosphaera zachariasii</i>	A46
念球藻 <i>Nostoc</i> sp.	A11	隐藻 <i>Cryptomonas</i> sp.	A29	拟菱形弓形藻 <i>Schroederia nitzschioide</i>	A47
金藻门 Chrysophyta		甲藻门 Pyrroptata		四角藻 <i>Tetraedron</i> sp.	A48
鱼鳞藻 <i>Mallomonas</i> sp.	A12	裸甲藻 <i>Gymnodinium</i> sp.	A30	湖生卵囊藻 <i>Oocystis lacustris</i>	A49
黄藻门 Xanthophyta		薄甲藻 <i>Glenodinium</i> sp.	A31	球囊藻 <i>Sphaeroecystis</i> sp.	A50
绿色黄丝藻 <i>Tribonema viride</i>	A13	多甲藻 <i>Peridinium</i> sp.	A32	栅藻 <i>Scenedesmus</i> sp.	A51
小型黄管藻 <i>Ophiocytium parvulum</i>	A14	角甲藻 <i>Ceratium hirundinella</i>	A33	盘星藻 <i>Pediastrum</i> sp.	A52
硅藻门 Bacillariophyta		裸藻门 Euglenophyta		美丽胶网藻 <i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	A53
直链藻 <i>Melosira</i> sp.	A15	裸藻 <i>Euglena</i> sp.	A34		
梅尼小环藻 <i>Cyclotella comensis</i>	A16	囊裸藻 <i>Trachelomonas</i> sp.	A35		
四棘藻 <i>Attheya</i> sp.	A17	扁裸藻 <i>Phacus</i> sp.	A36		
等片藻 <i>Diatoma</i> sp.	A18				

1)表中为春、夏两季采样涉及的藻类名称及其代码

2.3.2 夏季浮游藻类的群落结构

夏季澎溪河流域8个采样点,检出浮游藻类8门46种(属),其中以绿藻门(Chlorophyta)和硅藻门(Bacillariophyta)分布最多分别为14种(属)和11种(属),其次是蓝藻门(Cyanophyta)的10种(属)、甲藻门(Pyrroptata)4种(属)、裸藻门(Euglenophyta)3种(属)、黄藻门(Xanthophyta)2种(属)、隐藻门(Cryptophyta)1种(属)和金藻门

(Chrysophyta)1种(属). 浮游藻类密度在 9.56×10^4 (S1) ~ 278.88×10^4 $\text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$ (S3)之间. 与春季不同,夏季除河口和样点7外,其余样点藻密度呈由上游向下游增加的趋势,下游接近澎溪河河口的样点S2(216.44×10^4 $\text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$)、S3(278.88×10^4 $\text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$)和S4(108.12×10^4 $\text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$)藻类密度较高,水华严重;以鱼腥藻(*Anabaena* sp., A10)为主要优势藻,出现于全部断面中,且在S2、S3、S4和

S5 等 4 个高藻密度断面中为绝对优势藻；席藻 (*Phormidium sp.*, A6) 为次优势藻, 出现于所有断面, 为 S2 和 S5 断面次优势藻, S6 和 S7 断面的优势藻。其中在 S7 断面, 席藻密度达到 $65.82 \times 10^4 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1}$, 为该断面的绝对优势藻。具体各采样点细胞密度和主要藻类组成见表 5。

表 4 澎溪河春季浮游藻类群落结构 $\times 10^4/\text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 4 Community structure of planktonic algae in spring in Pengxi River $\times 10^4/\text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
蓝藻门(6) Cyanophyta			A4 \times 0.32 A5 \times 0.72	A2 \times 0.30 A5 \times 3.81	A4 \times 0.80 A5 \times 12.64	A5 \times 10.96 A6 \times 2.48	A5 \times 19.10	A5 \times 39.06
		A6 \times 0.28 A9 \times 0.04	A10 \times 22.53	A10 \times 17.88	A10 \times 4.08			
硅藻门(9) Bacillariophyta	A15 \times 0.18 A20 \times 0.20 A21 \times 1.92 A26 \times 0.06 A28 \times 0.04	A20 \times 0.38 A21 \times 1.94 A26 \times 0.22	A15 \times 0.20 A20 \times 0.60 A21 \times 0.12 A24 \times 0.08 A26 \times 0.44	A16 \times 0.15 A20 \times 0.06 A21 \times 0.12 A22 \times 0.06 A26 \times 0.09	A16 \times 0.36 A23 \times 0.08 A26 \times 0.08	A15 \times 7.76 A23 \times 0.56 A26 \times 7.20		A15 \times 0.42 A20 \times 0.12
甲藻门(1) Pyrroptata	A33 \times 0.10	A33 \times 0.26	A33 \times 0.08	A33 \times 0.45	A33 \times 1.80	A33 \times 12.72	A33 \times 44.30	A33 \times 96.9
裸藻门(2) Euglenophyta	A34 \times 0.06		A34 \times 0.08	A35 \times 0.06	A34 \times 0.16 A35 \times 0.12			A35 \times 0.48
绿藻门(7) Chlorophyta	A37 \times 0.10 A38 \times 0.04 A48 \times 0.06	A38 \times 0.08	A38 \times 0.36 A45 \times 0.64 A52 \times 0.52	A38 \times 0.18 A40 \times 0.21 A42 \times 0.09	A45 \times 0.24 A48 \times 0.12	A45 \times 1.04		A45 \times 8.82
总和	2.76(10)	2.88(5)	4.48(14)	28.11(13)	34.28(11)	46.8(8)	63.4(2)	145.8(6)

表 5 澎溪河夏季浮游藻类的群落结构 $\times 10^4/\text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 5 Community structure of planktonic algae in summer in Pengxi River $\times 10^4/\text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
蓝藻门(10) Cyanophyta	A6 \times 2.85 A8 \times 0.75 A10 \times 1.25	A6 \times 66.99 A8 \times 13.09 A9 \times 2.45 A10 \times 88.97	A6 \times 4.98 A8 \times 4.86 A9 \times 0.24 A10 \times 236.82	A1 \times 0.06 A6 \times 3.3 A7 \times 0.24 A8 \times 2.34 A9 \times 0.24 A10 \times 76.26	A6 \times 6.05 A8 \times 2.85 A9 \times 0.45 A10 \times 33.85	A1 \times 0.09 A3 \times 0.06 A6 \times 9.00 A7 \times 0.54 A9 \times 0.15 A10 \times 2.04	A2 \times 0.12 A5 \times 1.11 A6 \times 65.82 A7 \times 14.73 A8 \times 0.03 A9 \times 1.26 A10 \times 2.16 A11 \times 0.09	A6 \times 4.84 A7 \times 0.60 A9 \times 0.28 A10 \times 4.28
金藻门(1) Chrysophyta		A12 \times 0.14						
黄藻门(2) Xanthophyta			A13 \times 0.06 A14 \times 0.06					
硅藻门(11) Bacillariophyta	A15 \times 1.35 A18 \times 0.2 A20 \times 0.95 A23 \times 0.25 A24 \times 0.15 A26 \times 0.45	A15 \times 10.87 A17 \times 0.28 A20 \times 13.37 A21 \times 1.19 A23 \times 6.79 A25 \times 1.12 A26 \times 5.95 A27 \times 0.07	A15 \times 4.62 A20 \times 11.04 A23 \times 5.22 A26 \times 5.94	A15 \times 2.82 A17 \times 0.12 A20 \times 10.62 A21 \times 1.44 A23 \times 1.08 A25 \times 0.54 A26 \times 1.14	A20 \times 3.05 A21 \times 0.35	A15 \times 2.97 A19 \times 1.50 A20 \times 2.22 A21 \times 0.45	A15 \times 2.04 A19 \times 0.09 A20 \times 23.43 A21 \times 0.09 A26 \times 0.63	A15 \times 3.08 A20 \times 2.04 A26 \times 0.84
隐藻门(1) Cryptophyta			A29 \times 1.62	A29 \times 0.24				
甲藻门(4) Pyrroptata	A33 \times 0.05	A30 \times 0.14 A33 \times 0.07	A30 \times 2.1 A33 \times 0.3	A30 \times 1.02 A33 \times 3.78	A30 \times 2.25 A32 \times 1.05 A33 \times 4.00	A30 \times 0.63	A30 \times 0.15 A33 \times 0.03	A30 \times 1.88 A31 \times 0.20 A33 \times 0.20
裸藻门(3) Euglenophyta	A34 \times 0.10 A35 \times 0.10		A35 \times 0.18	A34 \times 0.06 A35 \times 0.9	A34 \times 0.15 A35 \times 0.85		A35 \times 0.09 A36 \times 0.27	A36 \times 0.16
绿藻门(14) Chlorophyta	A47 \times 0.35 A52 \times 0.85	A35 \times 0.07 A47 \times 4.34 A52 \times 0.63	A50 \times 0.24 A51 \times 0.24 A52 \times 0.48	A43 \times 0.06 A44 \times 0.06 A50 \times 0.12 A51 \times 0.30 A52 \times 1.26	A44 \times 1.2 A45 \times 0.4 A46 \times 0.05 A52 \times 0.1 A53 \times 0.1	A39 \times 0.03 A44 \times 0.06 A46 \times 0.06 A49 \times 0.12 A51 \times 0.03 A52 \times 0.15	A38 \times 0.03 A39 \times 0.03 A41 \times 0.03 A46 \times 0.03 A47 \times 0.27 A49 \times 0.24 A51 \times 0.06 A52 \times 0.57	A38 \times 0.04 A40 \times 0.12 A41 \times 0.04 A44 \times 0.12 A46 \times 0.04 A51 \times 0.48 A52 \times 0.04
总和	9.56(14)	216.39(18)	278.88(15)	108.12(25)	56.75(16)	20.10(17)	113.4(25)	19.28(18)

采样期间澎溪河水体以微囊藻 (*Microcystis* sp.)、鱼腥藻 (*Anabaena* sp.)、角甲藻 (*Ceratium hirundinella*)、席藻 (*Phormidium* sp.) 为主要优势种. 澎溪河流域各个样点的水华优势藻种不同,且优势藻种变化较大. 春季水华最为严重的样点是 S7 ($63.4 \times 10^4 \text{ cell}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 S8 ($145.8 \times 10^4 \text{ cell}\cdot\text{L}^{-1}$), 角甲藻 (*Ceratium hirundinella*) 为主要优势藻; 夏季水华最为严重的样点是 S2 ($216.44 \times 10^4 \text{ cell}\cdot\text{L}^{-1}$)、S3 ($278.88 \times 10^4 \text{ cell}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 S4 ($108.12 \times 10^4 \text{ cell}\cdot\text{L}^{-1}$), 以鱼腥藻 (*Anabaena* sp.) 为优势藻.

2.4 RDA 分析

2.4.1 春季浮游藻类的种类组成与环境因子的 RDA 分析

用冗余度分析 (redundancy analysis, RDA) 春季浮游藻类的种类组成与环境因子之间的关系. RDA 排序图中轴 1 的特征值和方差累计贡献百分数都大于其它各轴,轴 1 的特征值为 0.317,累积方差贡献率为 31.7%,轴 2 的特征值为 0.220,累积方差贡献率为 22%.

图 3 分析结果表明,全部的样品分布在主轴 1 和主轴 2 构成的 4 个象限内. 8 个采样点均有水深、总氮、总磷与轴 1 呈正相关,而氨氮、硝酸盐氮、水温、pH、电导率、浊度、叶绿素 a、溶解氧和氧化还原电位与轴 1 呈负相关. 水温、硝酸盐氮、pH、电导率、浊度、溶氧、水深和总磷对春季浮游藻类群落结构动态影响较大,其中硝酸盐氮、水温、pH、电导率和溶解氧对春季优势藻类角甲藻 (*Ceratium hirundinella*, A33) 和微囊藻 (*Microcystis* sp., A5) 的生长起重要作用. 样点 S1 与 S2 及 S6 与 S8 具有较高的相似性,而 S3、S4、S5、S7 分别不同于其他样点. S1 和 S2 主要为绿-硅藻型水体,总氮、总磷和水深对浮游藻类的丰度贡献较大; S3 和 S4 点与所测环境因子的相关性低,藻类的丰富度大;水温和硝酸盐氮对 S5 点的贡献值最大;水温、pH、电导率、浊度、叶绿素 a、溶解氧和氧化还原电位对 S6 和 S8 点的贡献较高; S7 点藻类的丰度大,种类丰富度小,温度、硝酸盐氮和氨氮对该点的贡献大.

2.4.2 夏季浮游藻类的种类组成与环境因子的 RDA 分析

夏季浮游藻类的种类组成与环境因子之间的关系也采用冗余度分析 (redundancy analysis, RDA). RDA 排序图中轴 1 的特征值和方差累计贡献百分数都大于其它各轴,轴 1 的特征值为 0.309,累积方差贡献率为 30.9%,轴 2 的特征值为 0.187,累积方

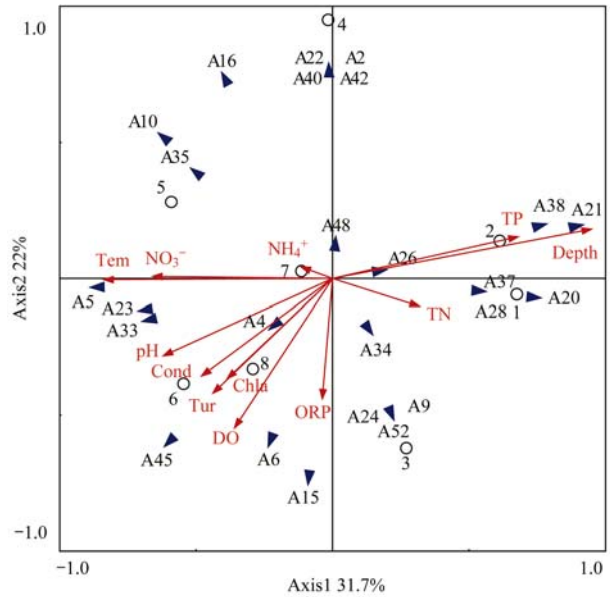


图 3 澎溪河春季浮游藻类组成与环境关系的 RDA 排序
Fig. 3 Biplot of the first two axes of the RDA analysis for environmental factors associated with phytoplankton variation (spring)

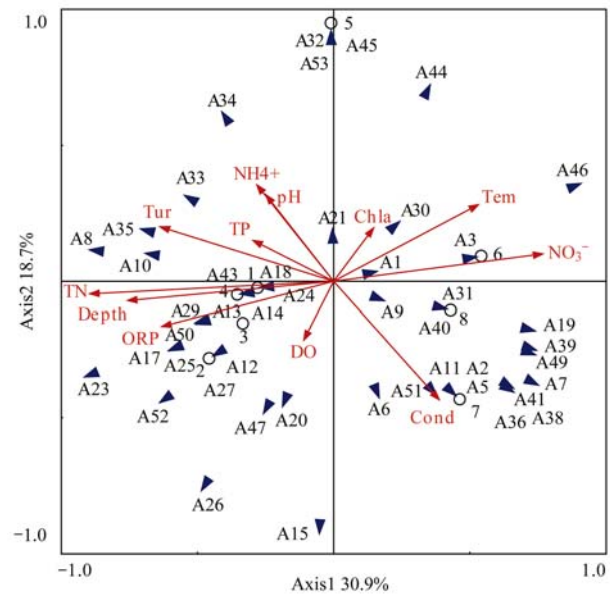


图 4 澎溪河夏季浮游藻类组成与环境关系的 RDA 排序
Fig. 4 Biplot of the first two axes of the RDA analysis for environmental factors associated with phytoplankton variation (summer)

差贡献率为 18.7%.

图 4 分析结果表明,全部的样品分布在主轴 1 和主轴 2 构成的 4 个象限内. 8 个采样点均有水温、硝酸盐氮、电导率、叶绿素 a 与轴 1 呈正相关,而总氮、总磷、浊度、水深、氨氮、pH、溶解氧和氧化还原电位与轴 1 呈负相关. 样点 S1、S2、S3、S4 与轴 1 呈负相关,且具有较高的相似性,总氮、总磷、浊

度、水深和氧化还原电位对这 4 个样点的贡献较大; 而 S6、S7、S8 这 3 个样点具有较高的相似性, 且与轴 1 呈正相关, 温度、硝酸盐氮和电导率对这 3 个样点的贡献较大; S5 与轴 2 呈正相关, 且不同于其他样点, pH、氨氮、硝酸盐氮、温度和浊度对该样点的贡献较大. 水深、水温、总氮、硝酸盐氮、氧化还原电位、浊度、电导率对浮游藻类群落结构动态起驱动作用, 其中浊度、水深、总氮和氧化还原电位对夏季优势藻鱼腥藻(*Anabaena* sp., A10) 的生长有重要影响; 电导率和溶解氧对夏季次优势藻席藻(*Phormidium* sp., A6) 的生长起重要作用.

3 讨论

澎溪河是 2003 年三峡库区蓄水后, 淹没大量农田和消落带形成的支流, 也是库区水华暴发最频繁的支流之一, 在环境特征和浮游藻类群落组成上都具有其相应的特点. 澎溪河流域的生态环境体系十分复杂, 受上游支流来水和干流回水顶托作用的影响, 同时还受到支流中段三峡库区移民迁置城镇的人为因素影响.

国际上一般认为当水体中总磷浓度 $0.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、总氮浓度 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总氮与总磷摩尔比值 16:1 (质量比值 7.2:1) 是水华暴发营养条件的理论阈值^[22]. 澎溪河春季总氮浓度为国际公认水体富营养阈值的 2~10 倍, 总磷浓度高于国际公认的水体富营养阈值 50 倍以上; 夏季总磷水平较春季下降, 但营养盐总量充足, 总氮和总磷水平仍然远高于国际公认的水体富营养阈值. 澎溪河春季高水位时期 TP 浓度高于夏季低水位时期 TP 浓度, 胡念三等^[23]在澎溪河的研究表明长江干流水体的 TP 浓度高于澎溪河水体的 TP 浓度, 郭胜等^[24]的研究指出营养盐通量与水流流量呈显著正相关, 水位越高倒灌回水量越大, 带入的外源磷越多, 因此出现澎溪河春季高水位时期 TP 浓度高于夏季低水位时期 TP 浓度. 这与蔚建军等^[25]在澎溪河高阳平湖的研究结果一致.

典型的湖库水体层化模式将水体分为混合层、温跃层和滞温层^[26], 而温度分层状况可以直接或间接影响湖库水体中各种物理、化学和生物过程^[27,28]. 由于三峡库区特殊的调水制度, 库区山地风小等原因, 虽然支流流速小^[2], 但澎溪河作为库区一级支流之一, 4 月和 7 月水体在温度分层模式出现了与典型湖泊水体分层不同的模式, 即分层断面大部分只有温跃层和滞温层, 而缺失混合层, 藻类

生物量集中在温跃层. 除河口样点 S1 外, 春、夏两季在垂向水柱上分层显著, 上游样点水华现象明显, 春季 S7、S8 水面悬浮大量肉眼可见的藻类, 藻密度分别达到 $63.4 \times 10^4 \text{ cell}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $145.8 \times 10^4 \text{ cell}\cdot\text{L}^{-1}$, 水体呈暗褐色; 夏季 S2、S3 和 S4 样点水面悬浮聚集少量藻类, 藻密度分别达到 216.39×10^4 、 278.88×10^4 和 $108.12 \times 10^4 \text{ cell}\cdot\text{L}^{-1}$, 水体呈深绿色. 根据郑建军等^[29]的对水华定义, 澎溪河属轻度水华 ($100 \sim 1000 \times 10^4 \text{ cell}\cdot\text{L}^{-1}$). 澎溪河各样点春、夏两季的 TN/TP、TN、TP、DO 等均适宜藻类的生长, 但两次采样期间河口样点 S1 始终未出现水体温度分层现象, 该样点春季叶绿素 a 和藻细胞密度分别仅为上游 S8 断面的 1.4% 和 1.9%, 夏季样点 S1 叶绿素 a 和藻细胞密度分别仅为上游 S8 断面的 4% 和 49.5%, 不呈现水华现象. 这表明水体分层对澎溪河春季水华的发生起到重要作用. 杨正健等^[26]在香溪河的研究也表明, 水体分层是藻类水华暴发的主要原因, 越容易出现水体稳定分层的水域越易暴发藻类水华. 陈洋等^[30]研究表明, 真光层深度与混合层深度的比值是影响藻类水华暴发的关键因子. Liu 等^[31]基于这一理论提出通过调节三峡库区水位, 控制真光层深度与混合层深度的比值, 防控水华.

澎溪河春季采样时是三峡库区水位最高的时期, 浮游藻类密度由上游向下游递减, 上游接近支流来水的样点 S7 ($63.4 \times 10^4 \text{ cell}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 S8 ($145.8 \times 10^4 \text{ cell}\cdot\text{L}^{-1}$) 藻类密度较高; 夏季采样时是三峡库区放水时期, 除河口和样点 7 外, 其余样点藻密度基本呈由上游向下游增加的趋势, 下游接近澎溪河河口的样点 S2 ($216.44 \times 10^4 \text{ cell}\cdot\text{L}^{-1}$)、S3 ($278.88 \times 10^4 \text{ cell}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 S4 ($108.12 \times 10^4 \text{ cell}\cdot\text{L}^{-1}$) 藻类密度较高. 这可能与三峡库区水位调度有关, 春季高水位时期水流流速较缓, 夏季库区放水时期水流流速增大. 水力可以驱动上游的藻类漂移至下游, 此前郑丙辉等^[32]在大宁河也发现过类似的上游藻类向下游的漂移的现象; 同时, 流速也对藻类生长、繁殖及其空间分布产生直接影响^[33]; 此外, 水动力能够改变水体的营养盐浓度和物理过程, 适宜的水体流速有利于藻类不断得到新的营养物质供应, Whitford 等^[34]研究表明, 水流流速可以显著影响藻类对磷的吸收效率, Borchardt^[35]认为水流流速可以影响藻类细胞膜营养盐的扩散和细胞对营养盐的吸收效率.

Reynolds 等^[36]的藻类功能分组 (phytoplankton

functional classification)理论将藻类按生长策略划分为3大类:① C型竞争者(先锋种);② R型冗余者;③ S型胁迫耐受者. 澎溪河藻类 C-R-S 生长策略的季节演替具有重现性,春季 S/CS 型藻类占据优势,夏季汛期易出现 CR/CS 频繁交替的混生型群落格局. 这与此前李哲等^[8]在澎溪河的研究结果一致.

澎溪河春季水体 DO 高,浊度低,角甲藻(真核)占据生存优势;夏季水体 DO 低,鱼腥藻(原核)占据生存优势,显示了由能效较高的真核系统向能效低的原核系统转换的趋势. 该现象也可能与藻类自身的基因表达和遗传特性有关,有研究表明部分原核藻类的基因组序列中包含有程序性死亡序列^[37],在 DO 浓度较高时,这段序列可直接诱导这些原核藻类的程序性死亡^[38].

4 结论

(1)澎溪河在浮游藻类群落及其环境因子特征上呈现出显著的空间特征异质性. 因此各个样点的藻细胞密度和优势藻种呈现出较大的差异. 水体分层对澎溪河春季浮游藻类的生长起至关重要的作用.

(2)春季上游样点 S8 水华最为严重,总体以角甲藻(*Ceratium hirundinella*)为主要优势藻,鱼腥藻(*Anabaena* sp.)为次优势藻. 夏季与干流接近的 S2、S3 和 S4 水华最为严重,水总体以席藻(*Phormidium* sp.)为主要优势藻,鱼腥藻(*Anabaena* sp.)为次优势藻.

(3)澎溪河藻类 C-R-S 生长策略的季节演替具有重现性,春季 S/CS 型藻类占据优势,夏季汛期易出现 CR/CS 频繁交替的混生型群落格局.

参考文献:

- [1] 刘德富,黄钰玲,纪道斌,等. 三峡水库支流水华与生态调度[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013. 1-419.
- [2] 中国环境监测总站主编. 长江三峡工程生态与环境监测公报[R]. 北京:国家环境保护总局,2005.
- [3] 李崇明,黄真理. 三峡水库入库污染负荷研究(II)——蓄水后污染负荷预测[J]. 长江流域资源与环境,2006,15(1): 97-106.
- [4] 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.
- [5] 郭劲松,盛金萍,李哲,等. 三峡水库运行初期小江回水区藻类群落季节变化特点[J]. 环境科学,2010,31(7): 1492-1497.
- [6] 郭劲松,陈园,李哲,等. 三峡小江回水区叶绿素 a 季节变化及其同主要藻类的相互关系[J]. 环境科学,2011,32(4): 976-981.
- [7] 郭劲松,陈杰,李哲,等. 156 m 蓄水后三峡水库小江回水区春季浮游植物调查及多样性评价[J]. 环境科学,2008,29(10): 2710-2715.
- [8] 李哲,方芳,郭劲松,等. 三峡小江(澎溪河)藻类功能分组及其季节演替特点[J]. 环境科学,2011,32(2): 392-400.
- [9] 李哲,郭劲松,方芳,等. 三峡小江回水区氮素赋存形态与季节变化特点[J]. 环境科学,2009,30(6): 28-34.
- [10] 李哲,郭劲松,方芳,等. 三峡小江回水区蓝藻季节变化及其与主要环境因素的相互关系[J]. 环境科学,2010,31(2): 301-309.
- [11] 付莉,张磊,蔚建军,等. 三峡库区支流回水区水体分层与藻类生长[J]. 环境工程学报,2015,9(5): 2265-2271.
- [12] 张磊,蔚建军,付莉等. 三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系[J]. 环境科学,2015,36(6): 2061-2069.
- [13] 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. 239-284.
- [14] 李国刚. 水和废水污染物分析测试方法/环境监测分析方法与检测技术丛书[M]. 北京:化学工业出版社,2012. 1-304.
- [15] 《地表水常规监测项目质量控制指标》编写组. 地表水常规监测项目质量控制指标[M]. 北京:中国环境科学出版社,2011. 1-151.
- [16] 胡鸿均,李尧英,魏印心,等. 中国淡水藻类——系统、分类及生态[M]. 北京:科学出版社,2006. 1-1023.
- [17] 翁建中,徐恒省. 中国常见淡水浮游藻类图谱[M]. 上海:上海科学技术出版社,2010. 1-120.
- [18] 福建省环境监测中心站. 福建省大中型水库常见淡水藻类图集[M]. 北京:中国环境科学出版社,2012. 1-109.
- [19] 浙江省环境监测中心. 浙江省主要常见淡水藻类图集(饮用水水源)[M]. 北京:中国环境科学出版社,2010. 1-137.
- [20] Lepš J, Šmilauer P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 250-259.
- [21] Šmilauer P, Lepš J. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO 5 (2nd ed.) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. 1-352.
- [22] Thomann R V, Mueller J A. Principles of surface water quality modeling and control[M]. New York: Haper & Row, 1987. 4-282.
- [23] 胡念三,刘德富,纪道斌,等. 三峡水库干流倒灌对支流库湾营养盐分布的影响[J]. 环境科学与技术,2012,35(10): 6-11.
- [24] 郭胜,李崇明,郭劲松,等. 三峡水库蓄水后不同水位期干流氮、磷时空分异特征[J]. 环境科学,2011,32(5): 1266-1272.
- [25] 蔚建军. 澎溪河回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系[D]. 重庆:西南大学,2015. 27-69.
- [26] 杨正健,刘德富,马骏,等. 三峡水库香溪河库湾特殊水湿分层对水华的影响[J]. 武汉大学学报(工学版),2012,45(1): 1-9, 15.

- [27] 赵林林, 朱广伟, 陈元芳, 等. 太湖水体水温垂向分层特征及其影响因素[J]. 水科学进展, 2011, **22**(6): 844-850.
- [28] 董春颖, 虞左明, 吴志旭, 等. 千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2575-2581.
- [29] 郑建军, 钟成华, 邓春光. 试论水华的定义[J]. 水资源保护, 2006, **22**(5): 45-47, 80.
- [30] 陈洋, 杨正健, 黄钰铃, 等. 混合层深度对藻类生长的影响研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 3049-3056.
- [31] Liu L, Liu D F, Johnson D M, *et al.* Effects of vertical mixing on phytoplankton blooms in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir: Implications for management[J]. Water Research, 2012, **46**(7): 2121-2130.
- [32] 郑丙辉, 张佳磊, 王丽婧, 等. 大宁河水华敏感期浮游植物与环境因子关系[J]. 环境科学, 2011, **32**(3): 641-648.
- [33] 王丽平, 郑丙辉, 张佳磊, 等. 三峡水库蓄水后对支流大宁河富营养化特征及水动力的影响[J]. 湖泊科学, 2012, **24**(2): 232-237.
- [34] Whitford L A, Schumacher G J. Effect of current on mineral uptake and respiration by a freshwater alga[J]. Limnology and Oceanography, 1961, **6**(4): 423-425.
- [35] Borchardt M A. Effects of flowing water on nitrogen-and phosphorus-limited photosynthesis and optimum N:P ratios by *Spirogyra fluviatilis* (Charophyceae)[J]. Journal of Phycology, 1994, **30**(3): 418-430.
- [36] 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.
- [37] Frangeul L, Quillardet P, Castets A M, *et al.* Highly plastic genome of *Microcystis aeruginosa* PCC 7806, a ubiquitous toxic freshwater cyanobacterium[J]. BMC Genomics, 2008, **9**(1): 274.
- [38] Bouchard J N, Purdie D A. Effect of elevated temperature, darkness, and hydrogen peroxide treatment on oxidative stress and cell death in the bloom-forming toxic cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*[J]. Journal of Phycology, 2011, **47**(6): 1316-1325.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2015年10月21日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2014年度中国科技论文统计结果.统计结果显示2014年度《环境科学》多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

《环境科学》综合评价总分76.00,排名第一,总被引频次7733,影响因子1.294.

综合评价总分是根据中国科技期刊综合评价指标体系,计算多项科学计量指标(总被引频次、影响因子、他引率、基金论文比、引文率等),采用层次分析法确定重要指标的权重,分学科对每种期刊进行综合评定,计算出每个期刊的综合评价总分.这项指标屏蔽了各个学科之间总体指标背景值的差异,使科技期刊可以进行跨学科比较.根据发布的统计结果,2014年度《环境科学》综合评价总分76.00,在被统计的33种环境科学技术及资源科学技术类期刊中名列第一.

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supramicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong,JIANG Jing-kun,DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun,ZHANG Peng,YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHAGN Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国 外 总 发 行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行