

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第6期

Vol.34 No.6

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~ 2010 年北京城区大气 BTEX 的浓度水平及其 O ₃ 生成潜势	曹函玉, 潘月鹏, 王辉, 谭吉华, 王跃思 (2065)
利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态	牟莹莹, 楼晟荣, 陈长虹, 周敏, 王红丽, 周振, 乔利平, 黄成, 李梅, 李莉, 王倩, 黄海英, 邹兰军 (2071)
沈阳市降水化学成分及来源分析	张林静, 张秀英, 江洪, 张清新 (2081)
秦皇岛大气污染物浓度变化特征	刘鲁宁, 申雨璇, 辛金元, 吉东生, 王跃思 (2089)
笼养鸡生长过程 NH ₃ 、N ₂ O、CH ₄ 和 CO ₂ 的排放	周忠凯, 朱志平, 董红敏, 陈永杏, 尚斌 (2098)
碳化硅协同分子筛负载型催化微波辅助催化氧化甲苯性能	王晓晖, 卜龙利, 刘海楠, 张浩, 孙剑宇, 杨力, 蔡力栋 (2107)
生物滴滤塔净化多组分废气的研究	张定丰, 房俊逸, 叶杰旭, 邱松凯, 钱东升, 戴启洲, 陈东之 (2116)
在氧化和还原氛围下脉冲电晕法降解二硫化碳废气	金圣, 黄立维, 李国平 (2121)
模拟大气 CO ₂ 水平升高对春季太湖浮游植物生理特性的影响	赵旭辉, 汤龙升, 史小丽, 杨州, 孔繁翔 (2126)
一种确定湖泊水质基准参照状态浓度的新方法	华祖林, 汪靛 (2134)
HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究	李燕, 李兆富, 席庆 (2139)
基于非点源污染的水质监测方案研究	吴喜军, 李怀恩, 李家科, 李强坤, 董雯 (2146)
不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究	陈玲, 刘德富, 宋林旭, 崔玉洁, 张革 (2151)
春季东海赤潮发生前后营养盐及溶解氧的平面分布特征	李鸿妹, 石晓勇, 陈鹏, 张传松 (2159)
三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布	张永生, 郑丙辉, 王坤, 姜霞, 郑浩 (2166)
湖泊沉积物溶解性有机氮组分的藻类可利用性	冯伟莹, 张生, 焦立新, 王圣瑞, 李畅游, 崔凤丽, 付绪金, 甄志磊 (2176)
刚毛藻分解对上覆水磷含量及赋存形态的影响	侯金枝, 魏权, 高丽, 孙卫明 (2184)
反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换	李大鹏, 王晶, 黄勇 (2191)
三峡库区主要支流表层沉积物多溴联苯醚的分布特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 刘晓茹, 余丽琴, 文武, 张盼伟 (2198)
UV 和 H ₂ O ₂ 联合消毒灭活饮用水中大肠杆菌研究	张一清, 周玲玲, 张永吉 (2205)
臭氧降解水中邻苯二甲酸二甲酯的动力学及影响因素	于丽, 张培龙, 侯甲才, 庞立飞, 李越, 贾寿华 (2210)
硝酸根对水体中甲基汞光化学降解的影响	毛雯, 孙荣国, 王定勇, 马明, 张成 (2218)
快雌醇氯化反应的动力学和机制研究	王斌楠, 刘国强, 孔德洋, 陆勇 (2225)
金属离子对 δ-MnO ₂ 去除对叔辛基酚抑制作用的研究	李非里, 牟华倩 (2232)
核-壳表面磁性印迹聚合物的制备及其对水中双酚 A 的特异性去除	刘建明, 李红, 熊振湖 (2240)
有机蒙脱石负载纳米铁去除溶液中四溴双酚 A 的研究	闫梦玥, 庞志华, 李小明, 退建宇, 罗隽 (2249)
纳滤预处理测定景观水体中溶解性有机氮质量浓度及其分布特征	于红蕾, 霍守亮, 杨周生, 席北斗, 咎逢宇, 张靖天 (2256)
改性水凝胶的制备及其对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 吸附性能研究	吴宁梅, 李正魁 (2263)
直接大红 4BE 的磷钨酸均相光催化还原脱色	魏红, 李克斌, 李娟, 陈经涛, 张涛 (2271)
基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究	张磊, 刘平, 马锦, 张静, 张明, 吴根 (2277)
Fenton 法处理竹制品废水生化出水出水的研究	郭庆稳, 张敏, 王炜, 杨治中, 吴东雷 (2283)
二价铁离子对 UASB 反应器厌氧发酵产氢效能的影响	李永峰, 王艺璇, 程国玲, 刘春妍 (2290)
进水底物浓度对蔗糖废水产酸合成 PHA 影响研究	陈志强, 邓毅, 黄龙, 温沁雪, 郭子瑞 (2295)
接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究	刘文如, 沈耀良, 丁玲玲, 丁敏 (2302)
聚磷污泥去除高浓度铅的影响因素研究	杨敏, 卢龙, 冯涌, 方超, 李雄清 (2309)
体积溶氧传递系数在好氧颗粒污泥系统中的变化特性初步分析	李志华, 范长青, 王晓昌 (2314)
我国淡水水体中双酚 A (BPA) 的生态风险评价	汪浩, 冯承莲, 郭广慧, 张瑞卿, 刘跃丹, 吴丰昌 (2319)
麦穗鱼物种敏感性评价	王晓南, 刘征涛, 闫振广, 张聪, 何丽, 孟双双 (2329)
不同评估方法得出的五氯酚的 PNEC 值的比较研究	雷炳莉, 文育, 王艺陪, 康佳, 刘倩 (2335)
桂林市交警头发 Hg、Pb 含量及分布研究	钱建平, 张力, 李成超, 黄栋 (2344)
直流电场处理后降线藻趋光性对 Cu ²⁺ 和 Hg ²⁺ 的响应	王飞祥, 袁玲, 黄建国 (2350)
UV-B 辐射对青冈凋落叶化学组成和分解的影响	宋新章, 卜涛, 张水奎, 江洪, 王志坤, 赵明水, 刘永军 (2355)
7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 杨聘聘 (2361)
溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落影响解析	于皓, 陈川, 张莉, 王爱杰 (2368)
不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroResp TM 方法	陈晓娟, 吴小红, 刘守龙, 袁红朝, 李苗苗, 朱捍华, 葛体达, 童成立, 吴金水 (2375)
典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究	韩建刚, 曹雪 (2383)
三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究	刘意章, 肖唐付, 宁增平, 贾彦龙, 黎华军, 杨菲, 姜涛, 孙旻 (2390)
北京市不同区位耕作土壤中重金属总量与形态分布特征	陈志凡, 赵焯, 郭廷忠, 王永峰, 田青 (2399)
季节变化对贵阳市不同功能区地表灰土重金属的影响	李晓燕 (2407)
东营市孤岛地区土壤中类二噁英类 PCBs 的污染特征	王登阁, 崔兆杰, 傅晓文, 殷永泉, 许宏宇 (2416)
模拟氮沉降对森林土壤有机物淋溶的影响	段雷, 马萧萧, 余德祥, 谭炳全 (2422)
甲基 β 环糊精对污染场地土壤中多环芳烃的异位增效洗脱修复研究	孙明明, 滕应, 骆永明, 李振高, 贾仲君, 张满云 (2428)
胶质芽孢杆菌对印度芥菜根际土壤镉含量及土壤酶活性影响	杨榕, 李博文, 刘微 (2436)
长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征	吴小莲, 向垒, 莫测辉, 姜元能, 严青云, 李彦文, 黄献培, 苏青云, 王纪阳 (2442)
有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究	张旭, 席北斗, 赵越, 魏自民, 李洋, 赵昕宇 (2448)
北京市生活垃圾转运站耗能和排污特征及其影响因素分析	王昭, 李振山, 冯亚斌, 焦安英, 薛安 (2456)
氨对垃圾焚烧灰渣浸出特性的影响及地球化学模拟	官贞珍, 陈德珍, Thomas Astrup (2464)
焚烧飞灰预处理工艺及其无机氯盐的行为研究	朱芬芬, 高冈昌辉, 大下和傲, 姜惠民, 北岛義典 (2473)
富含中孔与酸性基团的生物炭的制备与吸附性能	李坤彬, 李辉, 郑正, 张雨轩 (2479)
生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估	姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇 (2486)
基于物质流分析的钾素流动与循环研究	白桦, 曾思育, 董欣, 陈吉宁 (2493)
《环境科学》征订启事 (2115) 《环境科学》征稿简则 (2224) 信息 (2217, 2289, 2349, 2398) 专辑征稿通知 (2478)	

三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布

张永生¹, 郑丙辉^{1*}, 王坤¹, 姜霞¹, 郑浩^{1,2}

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 西华师范大学国土资源学院, 南充 637009)

摘要: 本研究旨在为三峡库区大宁河藻华预警提供基础数据, 于2011年4~9月期间在大宁河流域选择4个取样点开展藻细胞时空变化研究。藻细胞在时间序列表现为: 4~9月, 藻种主要以蓝藻、绿藻和硅藻为主, 藻密度呈逐步递增趋势; 在此期间4个取样点的蓝藻比重均逐步增大, 硅藻比重逐步降低, 绿藻比重变化不显著。藻细胞在空间分布上表现为: 藻密度与水温 and 叶绿素呈极显著相关, 相关系数分别为0.97和0.95, 与光照、溶解氧、pH值和可溶性磷盐呈显著相关, 相关系数分别为0.87、0.83、0.82、0.82; 菜子坝在整个试验期间0 m处藻密度比其他水层的藻密度高, 白水河在6月和7月的2.0 m处藻密度最高, 双龙在7、8和9月的0 m和2.0 m处藻密度较高, 大昌在整个试验期间, 藻密度变化不大; 不同藻细胞在垂向水层中的比重也随时间的变化而改变, 可能是不同藻细胞适合不同生态环境所致。

关键词: 三峡水库; 大宁河; 藻华; 时空分布; 相关性分析

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)06-2166-10

Temporal-Spatial Distribution of Algal Cells During Drought Period in Daning River of Three Gorges

ZHANG Yong-sheng¹, ZHENG Bing-hui¹, WANG Kun¹, JIANG Xia¹, ZHENG Hao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012, China; 2. Collge of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong 637009, China)

Abstract: In order to provide basic data for algal bloom warning system, the study on temporal-spatial distribution of algal cells was carried out in Daning River of Three Gorges from April to September, 2011. The results of temporal distribution were as follows: the dominant algal species were blue algal, green algal and diatom. During the test, the density proportion of blue algae increased continuously, the density proportion of diatom decreased, while the density proportion of green algae did not change significantly. The results of spatial distribution were as follows: algal density was extremely significantly correlated with water temperature and chlorophyll a (Chl a), the correlation coefficient were 0.97 and 0.95, respectively; algal density was significantly correlated with light intensity (LI), dissolved oxygen (DO), pH and dissoluble total phosphorus (DTP), the correlation coefficient were 0.87, 0.83, 0.82 and 0.82, respectively; the algal density in 0 m of Caziba was higher than those in other water depths, and in Baishuihe the highest algal density occurred at 2.0 m water depth in June and July, in Shuanglong most algal cells were found in 0 m and 2.0 m in July, August and September, in Dachang algal density in different water depth did not change significantly during the test; the proportion of different algal species in vertical direction was different in the test, probably because different algal species fitted different environments.

Key words: Three Gorges; Daning River; algal bloom; temporal spatial distribution; correlation analysis

近年来,我国部分湖库富营养化严重,频繁发生藻华灾害,严重影响湖泊生态安全和居民饮用水安全^[1,2]。为了预测藻华的暴发,必须理清藻华形成机制以及准确地预测藻华发生时间和地点^[3],而藻细胞的时空分布是解决这些问题的关键要素之一。

随着人们对湖库生态安全的重视,藻细胞时空分布研究也日益得到重视。但由于研究目的不同,研究的湖库也不同,其研究的范围、时期及结果也不尽相同。为预测太湖蓝藻次年暴发地点,季健等^[4]对太湖冬季蓝藻的时空分布进行分析;为探究某一藻种在水体的中分布,刘霞等^[5]分析了太湖硅藻的时空分布,Yang等^[6]对淀山湖夏季蓝藻的时空分布进行分析,李源等^[7]分析了滇池的水华蓝藻时空分布,陈作州^[8]对阿哈水库和红枫水库的微囊藻

时空分布做了分析,这些研究细致分析了藻种在湖库中的运动规律及分布,为了解不同湖库的生态提供了重要依据。但是目前的研究大多基于单一藻种,而且主要是蓝藻,其他藻种较少,试验场地也主要是浅水湖泊。然而野外湖库中,单一优势藻种的情况很少,大部分的湖库多种藻种并存,并且存在明显的藻种演替现象^[9]。在藻种演替明显的湖库中,鲜有文献报道藻种演替时期的藻种时空分布,特别是不同藻种在数量上由“绝对优势”到“势均力敌”

收稿日期: 2012-09-26; 修订日期: 2012-11-12

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2012CB417004); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07503-002)

作者简介: 张永生(1977~),男,博士,主要研究方向为水环境学、环境生物学, E-mail: yzsunny@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhengbh@craes.org.cn

再到“绝对劣势”过程中的藻细胞时空分布。

三峡水库蓄水后,受干流顶托作用,支流流速减缓,水体扩散能力减弱,库湾和支流污染物的滞留时间延长^[10],支流藻密度较高,且呈逐年加重趋势^[11~14],这种环境极易导致藻华的形成。三峡库区支流中存在明显的藻种演替现象,枯水期(5~9月)比丰水期(10~次年4月)更易发生藻华^[13],因此探究三峡库区枯水期支流中的藻细胞时空分布对藻华预警是至关重要的。本研究调查了三峡库区大宁河流域枯水期部分环境因子指标、水质理化指标,并分析了在此期间藻细胞的时空分布,以期为大宁河藻华预警体系提供基础数据,初步为建立适合大宁河藻华预警体系提供理论依据,同时也为从事大宁河生态环境的科研人员提供相关研究材料。

1 材料与方法

1.1 研究地点

本研究选择三峡库区大宁河流域4个具有代表性采样位点,分别是菜子坝、白水河、双龙及大昌(图1)。菜子坝是大宁河支流与长江干流的交汇处;白水河是大宁河流域典型的河湾,其河底平坦,蓄水前为农田,此种类型的河湾在大宁河流域较为常见;双龙取样点属峡谷航道,两岸为石质峭壁,河流横断面为“V”型;大昌取样点位于古城原址,蓄水前人为影响较大,蓄水后大宁河的回水最上端区域。

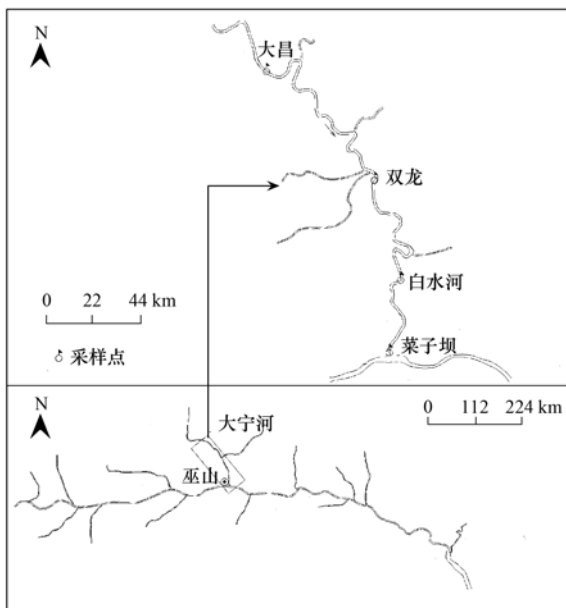


图1 采样点在三峡库区的地理位置示意

Fig. 1 Sampling site in Baishui Bay, the Daning River, the Three Gorges Reservoir

1.2 野外采样

试验于2011年4~9月进行,每月取样1次。选取风平浪静的天气进行取样工作,取样当天水位无明显变化,采样时采样点处无大型船只来往,因此所取样品能够代表野外水体藻细胞的真实分布。

根据本实验室的前期研究成果,0 m处藻细胞在风和流速影响下可以自由漂移和聚集,水深0~3.0 m是藻密度最高的深度,水深3.0~5.0 m是藻密度降低最明显的深度,水深10.0 m左右是三峡水库的斜温层深度^[15]。因此本研究的取样深度分别为0、2.0、4.0、10.0 m。

取样时,样品分2种处理:其一,4个水层的样品混为一个样品,用来分析藻密度及藻种随时间的变化;其二,4个水层的样品不混合,用来分析藻细胞的时空分布。

1.3 测定方法

不同水层的光强和水温利用 Onset 照度计(美国 onset 公司)测定,不同水层的流速利用 Rivecat 多普勒 YCN-RC3025 测定,电导率、溶解氧和 pH 在现场用水质多参数仪 YSI26600(美国,金泉公司)测定。

野外水样直接利用电子显微镜对藻细胞进行分类和计数,每个视野计数3次,每个样品观察3个视野,藻种的鉴定参考水生生物学图谱数据库^[16]。

总氮、硝态氮和亚硝态氮、铵态氮、总磷、溶解性总磷和磷酸盐在实验室测定。水质总氮的测定利用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB/T 11894-1989),硝酸盐氮的测定利用紫外分光光度法(HJ/T 346-2007),亚硝酸盐氮的测定利用分光光度法(GB/T 7493-87),氨氮的测定利用纳氏试剂光度法(HJ 535-2009),总磷的测定利用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法(GB 11893-89),溶解性总磷的测定利用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法(GB 11893-89),溶解性正磷酸盐的测定利用钼酸铵分光光度法(GB 11893-89)。

1.4 数据处理

每个样品相关指标测定重复3次,取其平均值;相关性分析利用 SPSS 16.0 处理, $P < 0.05$ 为显著性相关, $P < 0.01$ 时为极显著相关。

2 结果

2.1 环境因子及水质物理参数

枯水期(4~9月)环境因子和水质参数表现各自变化特征如下。

光强:4~8月4个取样点0 m处的光强呈略微

上升趋势,随后略微下降,但是基本维持相对稳定, $7.9 \times 10^4 \sim 9.1 \times 10^4$ lx; 水深 2 m 处的光强在 8 月相对较低; 水深 5 m 和 10 m 处光强较弱,10 m 处的光强为 0 ~ 48 lx 之间.

水温:4 个取样点在 4 月各水层水温较为一致, 11 ~ 13℃ 之间; 随后至 6 月,水温迅速升至 25℃ 左右,其中白水河 5 月水温就可达到 25℃ 左右,其他 3 个采样点 5 月各水层的水温存在差异; 6 ~ 9 月各取样点不同水层基本呈现缓慢增长趋势.

溶解氧:菜子坝和大昌取样点各水层中,溶解氧在 6 月比其它月份的含量较低,而在白水河和双龙 8 月的溶解氧的含量比其它月份低.

pH:4 个取样点不同水层的 pH 均呈现碱性. 菜子坝取样点各水层 pH 值从 4 月逐渐降低,到 6 月达到最低,随后 0 m 处的 pH 值逐渐上升至 9.0 左右,其它水层维持在 8.0 左右. 白水河 0 m 和 2.0 m 处的 pH 值在各月份(8 月除外)维持相对稳定, 8 月各水层的 pH 值均在 8.0 左右. 双龙与大

昌各水层 pH 值在 5 月较高,随后下降趋于平稳, 各月份双龙取样点 0 m 和 2.0 m 处的 pH 值介于 8.5 ~ 9.0 之间,而大昌此两水层的 pH 值介于 8.0 ~ 8.5 之间.

电导率:菜子坝和大昌 2 个取样点各水层在 8 月的电导率最小. 白水河处各水层电导率变化趋势一致,4 ~ 6 月电导率逐渐上升,6 ~ 9 月电导率依次降低; 双龙取样点 2.0 m 处 6 月的电导率比其他的各水层的电导率显著低.

浊度:各月份 4 个采样点不同水层的浊度变化趋势较为一致,4 月后逐渐升高,8 月达到最大值,随后降低. 菜子坝和大昌两点各水层的浊度在 7 月后迅速升高,而白水河和双龙 2 个取样点的浊度在 6 月后显著升高.

流速:试验期间,各采样点不同水深处的流速并不十分明显,最高流速为 $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (双龙 0 m). 不同水层的水流方向也不完全相同,具体参见表 1. 图 2 为试验期间主要环境因子及水质理化指标.

表 1 试验期各取样点不同水层处的流速¹⁾/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Table 1 Flow rate in different water depth in four sampling sites/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

取样点	水深/m	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月
菜子坝	0.0	0.02	0.04	0.03	0.01	-0.02	-0.01
	2.0	0.01	0.02	0.01	0.00	-0.01	0.00
	4.0	-0.01	0.00	0.01	0.02	-0.02	-0.01
	10.0	0.00	0.00	0.00	0.01	-0.01	0.01
白水河	0.0	-0.02	0.00	0.02	0.01	-0.01	0.00
	2.0	0.01	0.01	0.02	-0.01	-0.02	-0.01
	4.0	0.0-	-0.01	-0.01	0.00	-0.02	0.00
	10.0	-0.02	0.00	-0.01	0.00	0.01	-0.01
双龙	0.0	0.00	-0.01	0.05	-0.01	-0.04	-0.01
	2.0	0.01	-0.01	-0.02	0.00	-0.02	-0.01
	4.0	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01
	10.0	0.00	0.01	0.01	-0.01	-0.01	0.00
大昌	0.0	-0.03	-0.02	0.02	0.01	-0.02	0.00
	2.0	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
	4.0	0.02	0.01	0.01	-0.01	0.00	-0.01
	10.0	0.01	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00

1) 负值表示逆流

2.2 藻密度及藻种随时间的变化

2.2.1 藻密度随时间的变化

枯水期(4 ~ 9 月),白水河的平均藻密度最高,菜子坝的藻密度次之,再次是双龙处的藻密度,大昌的藻密度最低. 4 月 4 个取样点的平均藻密度差异不显著,均在 $1.15 \times 10^5 \sim 1.31 \times 10^5 \text{ cells}\cdot\text{L}^{-1}$,此时平均藻密度由河流下游往上游依次增大,即菜子坝 < 白水河 < 双龙 < 大昌. 5 月白水河处的平均藻密度迅速增加,平均藻密度最大,其他 3 处的平均藻密

度增加缓慢. 6 ~ 7 月 4 个取样点的平均藻密度显著增加; 8 月白水河与大昌的平均藻密度持续稳定增加,而菜子坝与双龙的平均藻密度略微下降; 9 月白水河与大昌的平均藻密度呈下降趋势,而菜子坝与双龙处的藻密度与 8 月持平(图 3).

2.2.2 藻种随时间的演替

试验期间,大宁河流域的藻细胞种类较多,主要包括蓝藻门、绿藻门、硅藻门、甲藻门等. 蓝藻门主要有微囊藻、束丝藻、鱼腥藻等; 绿藻门主要有

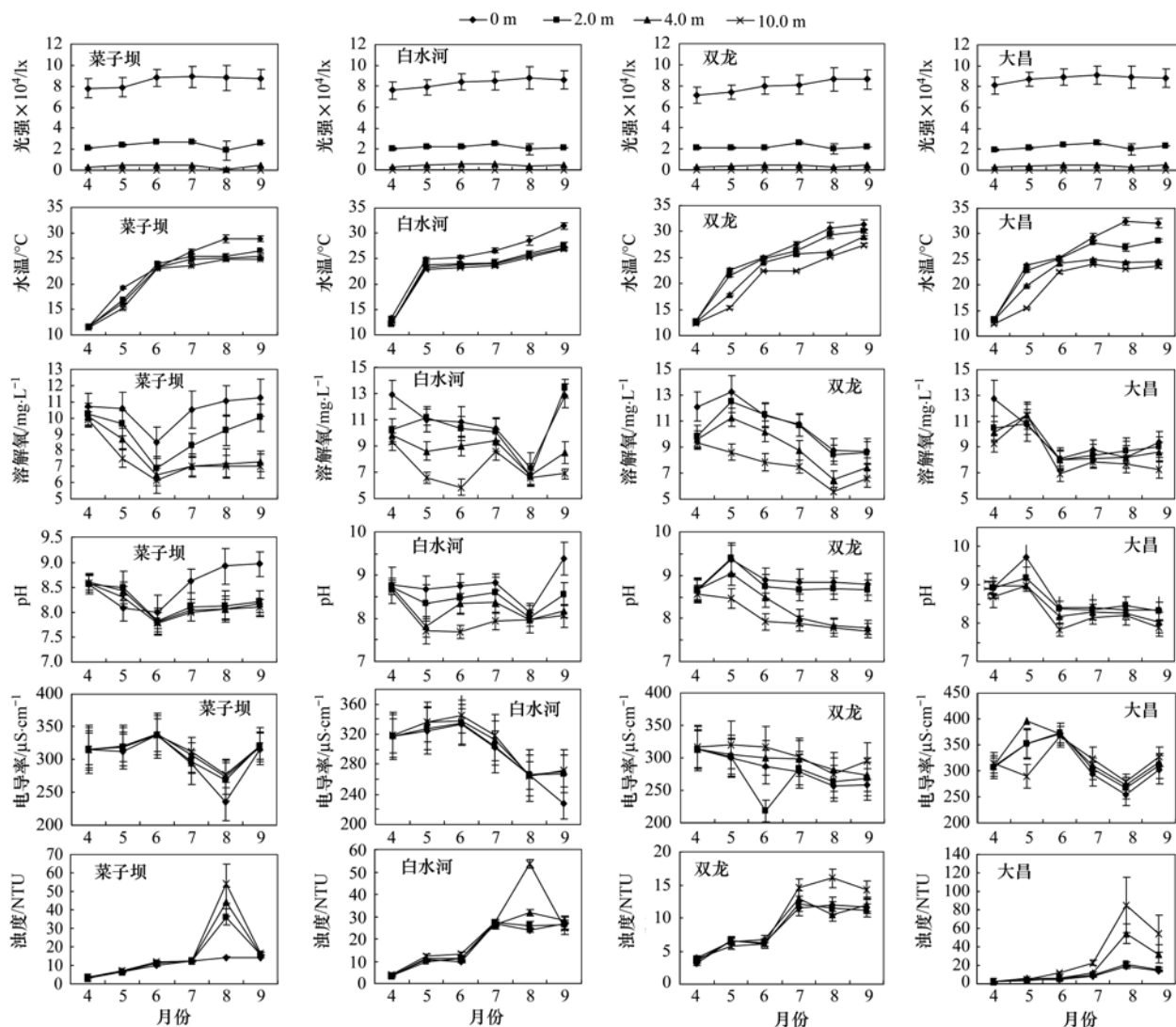


图2 试验期间主要环境因子及水质理化指标

Fig. 2 Environment indicators and physicochemical indicators during the experiment

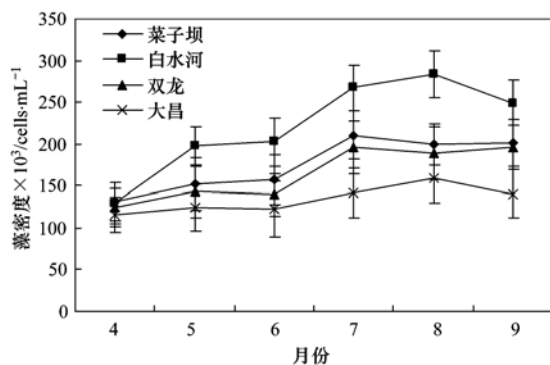


图3 试验期间不同取样点处藻密度随时间的变化

Fig. 3 Algal density in different water depth during the experiment

肾形藻、卵囊藻、小球藻、盘星藻、月牙藻、实球藻等;硅藻门主要有直链藻、小环藻、环状扇形藻、细齿棱形藻、角甲藻等;甲藻门主要有埃尔多甲藻等. 试验期间4个取样点不同类型藻细胞百分比变

化趋势类似,蓝藻百分含量持续增大,绿藻的含量维持相对稳定,硅藻的百分含量逐步缩小,甲藻及其他藻类细胞的百分含量变化不大. 但在每个采样点不同藻细胞的百分比变化很大,4月蓝藻在菜子坝、双龙和大昌的百分比分别为4%、2%和4%,而白水河处蓝藻的百分比为12%;5、6月蓝藻百分比逐步增大,7、8、9月的百分含量相对稳定30%~40%之间. 绿藻在6月的百分比相对稳定,维持在26%~39%之间,绿藻在菜子坝、白水河和双龙3个取样点的百分比最大,分别为39%、36%和33%,在大昌取样点4月绿藻百分比的最大值33%. 4月4个取样点硅藻含量均都最大,其中菜子坝处其百分比为59%,双龙处硅藻百分含量为62%,试验期间每个月份双龙处的硅藻百分比均比其他取样点高,4个取样点6月开始硅藻的百分比

显著降低. 甲藻在整个试验期间,各取样点的百分含量变化差异不大,维持2%~8%. 综上所述,试验期间大宁河流域的优势藻种为硅藻、绿藻、蓝藻和

甲藻,其中硅藻和蓝藻随时间的变化其百分比变化较大,绿藻和甲藻在整个枯水期的百分比变化不大(图4).

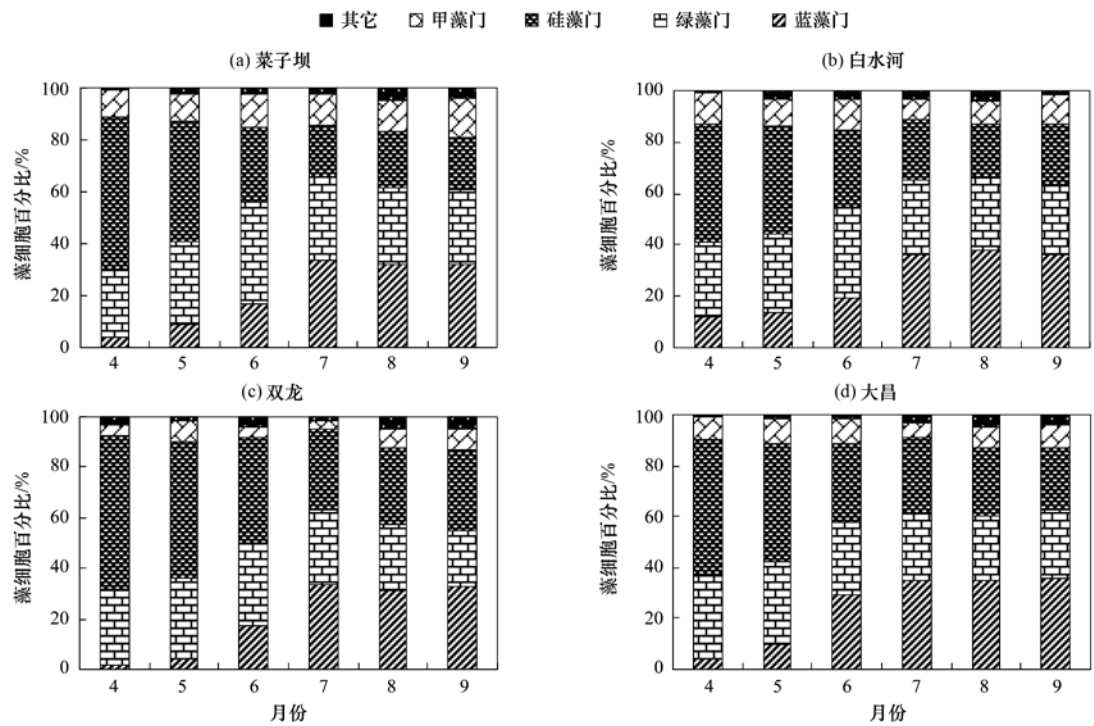


图4 试验期间不同取样点藻种比例随时间的变化

Fig. 4 Proportion of algae in the different sampling sites during the experiment

2.3 藻细胞空间分布

2.3.1 藻密度空间分布

菜子坝在整个试验期间,0 m处的藻密度最大,同一月份内除0 m外各水层间的藻密度差异不显著;白水河6月和7月2.0 m处的藻密度最高,其他月份该水层的藻密度比0 m处藻密度低;双龙除了6月,其他月份2.0 m处的藻细胞比0 m处的藻密度高,7~9月0 m和2.0 m处藻密度显著高于4.0 m及10.0 m的藻密度,4.0 m和10.0 m处的藻密度在整个试验期间维持相对稳定. 大昌在试验期间藻密度维持相对稳定,同一月份内各水层的藻密度差异不显著,8月藻密度随水深而增加,10.0 m的藻密度最高. (图5)

相关性分析表明,藻密度与水温、叶绿素呈极显著正相关,相关系数分别高达0.97和0.95. 与溶解氧、pH、可溶性总磷呈显著正相关,相关系数分别为0.83、0.82、0.82(表2).

2.3.2 藻种类型的空间分布

0 m处的藻细胞种类变化如下.

4月:蓝藻分别在菜子坝、白水河、双龙和大昌的比例分别为8.6%、19.8%、4.2%和10.1%,绿

藻在该水层的比例31.2%~35.1%之间;硅藻在该水层的百分比差异很大,菜子坝处最高为47.3%,双龙为44.8%,而白水河和大昌分别为29.6%和34.3%. 甲藻的比例12.1%~14.6%左右. 其他藻种细胞在菜子坝(6.4%)和白水河(8.3%)比例比双龙(2.1%)和大昌处(2.3%)的比例略微高.

表2 相关指标的相关性分析¹⁾

	Chl-a	LI	WT	WS	SPC	DO	pH	TUR
AD	0.95 **	0.87 *	0.97 **	-0.31	-0.80	0.83 *	0.82 *	-0.33
	TP	DTP	PO ₄ ³⁺	TN	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	
AD	0.29	0.82 *	0.73	0.61	0.52	0.33	-0.37	

1) *表示极显著相关 $P<0.01$; *表示显著相关 $P<0.05$; AD:藻密度; Chl-a:叶绿素a; LI:光强; WT:水温; WS:流速; SPC:导电率; DO:溶解氧; TUR:浊度

7月:蓝藻在菜子坝、白水河、双龙和大昌的百分比分别为54.2%、61.2%、50.4%和42.9%,绿藻的百分比相对稳定,4个取样点处的百分比分别为23.1%、17.2%、17.4%和20.5%. 而硅藻较4月呈大幅下降趋势,该月份4个取样点的硅藻百分比分别为19.6%、9.2%、15.7%和21.1%. 甲藻

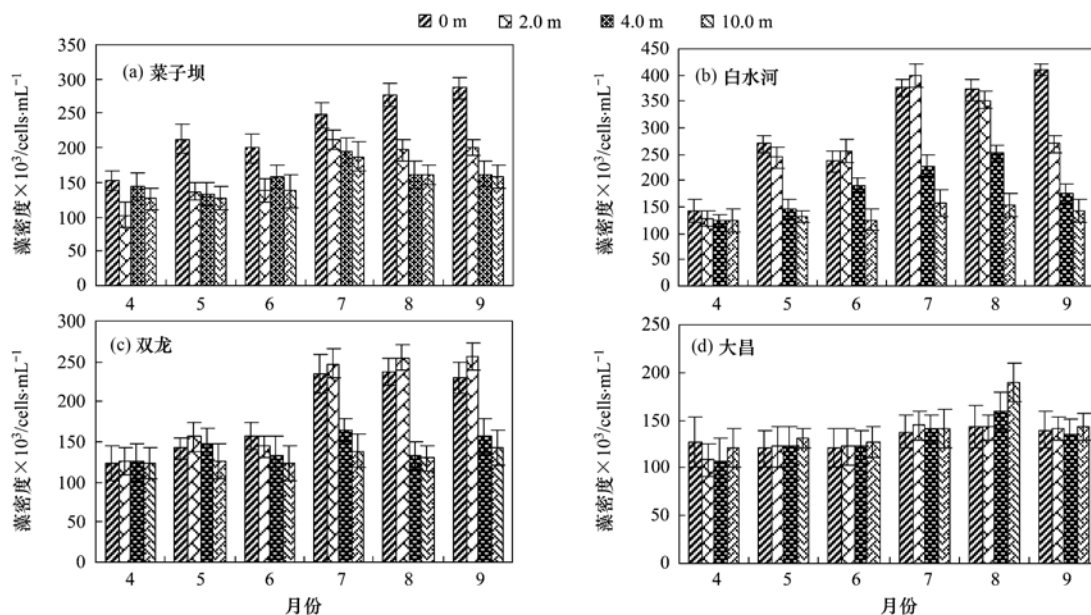


图5 藻密度在不同水层随时间变化的分布差异

Fig. 5 Temporal-spatial distribution of algal density

的百分比分别为 2.6%、7.3%、5.9% 和 9.3%。其他藻种的比例较少,大昌取样点的比例较高 6.2%。

9 月:蓝藻在菜子坝、白水河、双龙和大昌的百分比分别为 31.4%、35.72%、29.6% 和 37.2%,绿藻在 4 个取样点处的百分比相对稳定,分别为 28.2%、18.1%、29.3% 和 23.7%。而硅藻在 4 个取样点的硅藻百分比分别为 19.5%、25.4%、21.2% 和 18.7%。甲藻在此月份的比例为 17.9%~19.2%。其他藻种的比例较少。

2.0 m 处的藻细胞种类变化如下。

4 月:蓝藻在菜子坝和双龙的百分比小 2.1% 和 1.9%,而在白水河和大昌的百分比为 10.2% 和 7.3%。绿藻在菜子坝、白水河、双龙和大昌 4 个取样点该水层的比例分别为 39.3%、32.0%、25.2% 和 35.1%;硅藻在该水层的百分比差异很大,双龙处最高为 52.2%,白水河最低 38.0%,而菜子坝和大昌分别为 39.4% 和 39.8%。甲藻的比例相对稳定,为 9.8%~13.6% 之间。其他藻种细胞除大昌(4.2%)外,其他 3 个取样点的比例均高于 10%。

7 月:蓝藻在菜子坝、白水河、双龙和大昌的百分比分别为 42.7%、44.3%、29.7% 和 41.9%。绿藻在 4 个取样点处的百分比分别为 30.8%、16.9%、28.4% 和 22.0%。硅藻在 4 个取样点百分比分别为 10.7%、17.5%、22.3% 和 24.5%。甲藻的百分比分别为 5.4%、13.2%、10.3% 和 8.1%。其他藻种在大昌取样点的比例较低为 3.5%。

9 月:蓝藻在菜子坝、白水河、双龙和大昌的百分比变化不大,分别为 23.4%、22.1%、19.4% 和 18.6%。绿藻在 4 个取样点的百分比相对稳定,分别为 36.1%、31.3%、30.2.3% 和 36.4%。硅藻除了在白水河的比例较低(20.7%)外,在其他 3 个取样点相对稳定 26.2% (白水河)、27.6% (双龙) 和 26.4% (大昌)。甲藻在此月份的百分比的变化差异很小,14.1%~15.2%。其他藻种的比例 3.9%~6.5%。

4.0 m 处的藻细胞种类变化如下。

4 月:蓝藻在菜子坝、白水河、双龙和大昌的百分比为 16.2%、4.2%、11.2% 和 6.6%。绿藻在 4 个取样点的百分比分别为 28.0%、20.9%、18.9% 和 24.3%。硅藻在该水层的百分比差异很大,白水河处最高为 56.3%,其次是双龙为 50.5%,而白水河和大昌分别为 34.4% 和 35.5%。甲藻的比例在大昌最高为 22.7%,菜子坝、白水河、双龙处甲藻百分比分别为 15.6%、13.3% 和 10.6%。其他藻种细胞在大昌处的比例较高(9.9%)。

7 月:蓝藻在菜子坝、白水河百分比分别为 18.6% 和 19.4%,双龙和大昌蓝藻百分比相差不显著,分别为 12.7% 和 12.4%。绿藻在 4 个取样点的百分比分别为 30.9%、29.5%、29.4% 和 30.8%。硅藻在 4 个取样点的百分比分别为 28.9%、30.6%、36.7% 和 27.0%。甲藻的百分比分别为 11.8%、13.5%、13.3% 和 18.9%。其他藻种的比

例在大昌较高 10.9%。

9 月:蓝藻在菜子坝、白水河、双龙和大昌 4 个取样点的百分比分别为 14.7%、15.2%、8.9% 和 6.7%。绿藻的百分比分别为 23.5%、31.2%、30.7% 和 46.4%。硅藻在菜子坝和双龙的百分比差异不大,分别为 30.5% 和 30.1%,在白水河和大昌的百分比分别为 26.0% 和 23.8%。甲藻在菜子坝和双龙的百分比 20.6% 和 19.7%,在白水河和大昌的百分比 15.1% 和 13.5%。其他藻种的比例相对均匀,白水河比例最大 12.5%,大昌最小 9.6%。

10.0 m 处的藻细胞种类变化如下。

4 月:菜子坝、白水河、双龙和大昌蓝藻的百分比比较小,分别为 2.6%、0.7%、0.6% 和 1.9%。绿藻在菜子坝、白水河、双龙和大昌 4 个取样点该水层的比例差异不明显,分别为 36.0%、39.5%、38.9% 和 40.6%;硅藻在 4 个取样点的百分比较高,分别为 40.9%、55.9%、57.7% 和 45.5%。甲藻在菜子坝的比例最高位 16.7%,其次是大昌 9.5%,白水河和双龙处较低,分别为 1.6% 和 2.2%。其他藻种的比例在 4 个取样点的比例均都较低,其中双龙处的比例仅为 0.6%。

7 月:蓝藻在菜子坝、白水河、双龙和大昌的百分比分别为 3.2%、3.9%、4.6% 和 3.4%。绿藻在 4 个取样点处的百分比分别为 45.4%、45.2%、33.8% 和 37.5%。硅藻在 4 个取样点百分比分别为 28.5%、31.1%、20.8% 和 22.7%。甲藻的百分比分别为 13.1%、17.4%、25.6% 和 25.1%。其他藻种在白水河取样点的比例较低为 2.4%,双龙点比例最高 15.2%。

9 月:蓝藻在菜子坝、白水河、双龙和大昌的百分比分别为 4.1%、7.6%、0.4% 和 2.1%。绿藻在 4 个取样点处的百分比分别为 32.8%、22.5%、37.8% 和 39.5%。硅藻在 4 个取样点的比例分别为 22.1%、32.0%、27.1% 和 37.5%。甲藻的百分比分别为 30.6%、22.7%、21.0% 和 13.5%。其他藻种在大昌的比例仅为 7.4%,在其他 3 个取样点的比例均高于 10%。

5、6 和 8 月的藻种空间变化不在此一一赘述,具体变化详见图 6。

3 讨论

3.1 环境因子及水质理化指标的影响因素

流速是影响河流水质的重要因素之一^[17,18],但由于三峡大坝的堵截作用,三峡水库既具有河流型

水库水动力特征,也具备天然湖泊的水动力特征。本研究结果表明:4~7 月,各水层的流速既有正向流速也有逆向流速;在 8 月除了白水河 10.0 m 和大昌 2.0 m 的流速为正,其他水层的流速为负,8 月三峡库区开始蓄水,因此大多数的检测点的断面均出现回水现象。虽然三峡水库属于河流型水库,但是水动力条件与常规的河流水动力条件显著不同,枯水期三峡水库为迎接即将到来的雨季,每天定期开闸泄洪,其泄流量对于整个三峡库区的库容量而言是极其微小的,其流速也仅在大坝前的部分区域较为明显,对于水库上游的支流而言,流速变化较小,加之长江干流对支流有回顶作用,大宁河水动力条件更加类似于天然深水湖泊,其水动力主要受来往船只影响,且主要集中在上层水体,其流速的方向虽然有正有负,但其绝对值较小,均都小于 $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而且本研究的藻细胞垂直分布研究也表明藻细胞主要集中在 0~4.0 m(图 5),并没有发现藻密度与流速存在显著相关性,因此推测流速不是影响大宁河藻细胞分布的主要因素。

水温是影响水生生物分布的重要因子^[15,19]。水温在 4 月各监测点的不同水层差异不显著。5 月,白水河处各水层的水温上升幅度较为一致,随后 6~9 月水温呈逐级上升趋势;其他各监测点的不同水层在 6 月水温差异较小,其它时间水温呈逐渐升高趋势。造成这种水温差异的原因可能是冬、春季节气温较冷且变化不大,导致水温在不同水层的变化差异不大。

本研究发现溶解氧与 pH 值的变化关系紧密。菜子坝和大昌各水层的溶解氧在 6 月最低,这 2 个取样点的 pH 值在 6 月相对较低;白水河各水层的溶解氧在 8 月较低,pH 值在该月份较低。溶解氧与 pH 值的这种关系可能与稳定的气候条件和水生生物的生命活动有关,其根本原因可能还是光照诱导的结果。

本研究还发现电导率与浊度呈反向变化,4 个采样点除了白水河 0 m 和双龙 2.0 m 之外,其他水层的电导率 8 月最低,而菜子坝、白水河和大昌这 3 个取样点的浊度在 8 月却最高,而且随着水深增加,浊度增强。

3.2 藻细胞时空分布及其影响因素

影响藻细胞时空分布的因素很多,温度、光照及营养盐都是重要的影响因素^[20-23],但是不同地域、不同时期,影响藻分布的主要因子却不同。本研究中藻密度在 5 月和 7 月增幅较大,对照此时期

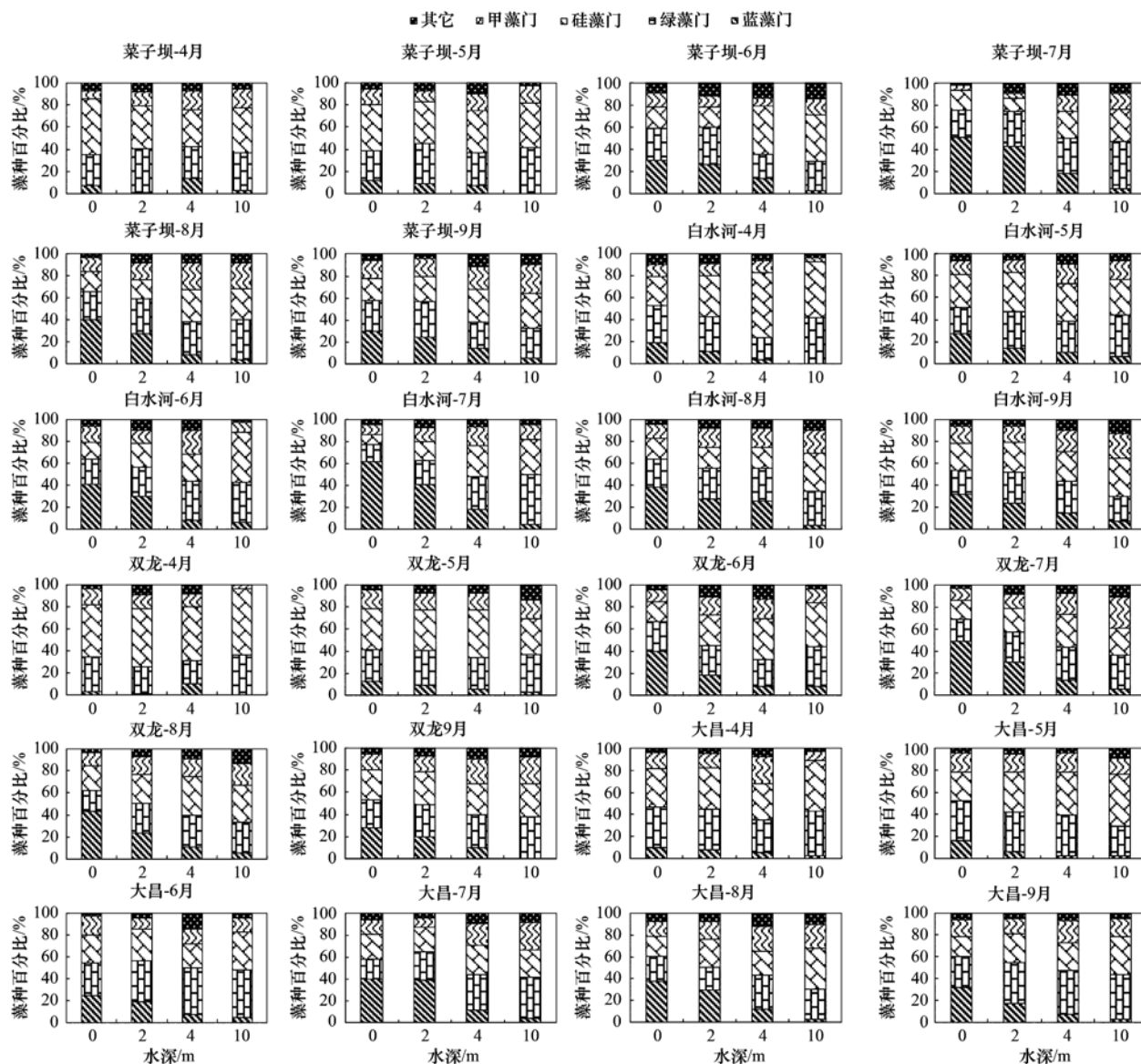


图6 藻种的空间分布

Fig. 6 Temporal-spatial distribution of algal species during the experiment

环境因子及水质理化指标,5月的水温增幅较大,故推测该月份藻密度的增加可能是由于水温的升高,各种藻细胞在经历越冬后开始复苏,呈现生物量增加的趋势。但是经过6月的升温,7月水温已经维持在25℃左右,该月份藻细胞生物量的增大不太可能是由于水温升高引起,对比该月份的藻种变化发现,在该月份蓝藻的比重显著升高,此月份藻细胞的生物量增加极可能是由于优势藻种蓝藻,呈指数式的增长所致。

藻细胞的空间分布结果表明,菜子坝在各月份0 m处的藻密度比其他采样点该水层的藻密度高,白水河7月和8月0 m和2.0 m藻密度差异不显著,该取样点是大宁河的水湾,流速相对较缓,并且

这2个月份的主要藻种为绿藻和蓝藻,藻种在0~2.0 m之间存在显著的垂直迁移现象^[24];双龙7、8和9月的2.0 m处藻密度却比0 m处高,双龙是一个大宁河的峡谷,枯水期河面较窄,最宽处仅有10.0 m左右,经常有船只来往,水体动力学较为复杂,虽然在河面会形成蓝藻藻华,但是大量的硅藻和绿藻由于河面复杂的水动力而无法适应,因而聚集在水动力相对稳定的水面以下。大昌在整个枯水期各水层的藻密度差异不大,为了研究的可比性,笔者选择大昌取样点在枯水期水深最浅时大约10.0 m左右,但大昌河面较宽,枯水期更多的水域非常浅,甚至在2.0 m以内,各水层的光强、水温及营养盐等差异不大,加之不同水层的藻细胞的分布也不尽

相同,故在枯水期,大昌取样点的个水层的藻密度差异不大。

3.3 藻种时空演替变化及其影响因素

三峡库区不同时期存在明显的藻种演替^[13,14]。本研究中4~5月硅藻在4个取样点的比重占有绝对的优势,但随后逐渐变小,该藻种9月后在双龙取样点比重开始升高。蓝藻比重在7月之后逐渐增大,而绿藻在枯水期期间相对稳定,因此枯水期大宁河流域存在藻种演替现象,藻种演替主要是硅藻和蓝藻的演替,绿藻及其他藻种在整个枯水期的比例变化不大,因此推测绿藻是大宁河常年稳定藻种,绿藻之所以能够常长时期维持稳定的比例,这可能与绿藻独特的适应环境能力有关。蓝藻依靠伪空胞改变自身在水体中的位置^[25,26],在形成蓝藻群体后,由于胞外多糖的“束缚”^[27~29],遇到不良的环境后无法及时应对,因此只能“消亡”。硅藻主要在春、秋季节繁殖,在水温较低的环境依然能正常繁殖^[30,31],这也许正是春季水体中硅藻的比重显著比其他藻种高的原因;而绿藻自身具有鞭毛^[32],可以像浮游动物一样在水中自由运动,当环境及营养盐适宜时,绿藻可以“召之即来”,当遇到不良的环境,绿藻可以“挥之而去”,聚散极为灵活,也极大的提高了自己在环境改变时候的适应能力。

本研究也发现:垂直水层间,各种藻种的分布也不尽相同。4月菜子坝0 m处,硅藻比例较高,其次是绿藻,然后依次是甲藻、蓝藻、其他藻种;2.0、4.0和10.0 m藻种的比重与0 m处的藻种比重类似。其他3个取样点在该月份藻细胞的垂直分布与菜子坝类似,但0 m处白水河比其他取样点蓝藻细胞多,这可能是白水河是大宁河的河湾,水体流动性较其他3个取样点差,更适合像蓝藻这样具有浮力调节机制的浮游生物生长。7月菜子坝0 m,蓝藻占有绝对的优势,随后是绿藻、硅藻、甲藻和其他藻种,随着水深增加,蓝藻比重逐渐降低,绿藻、硅藻、甲藻和其他藻种比重逐渐增强,4.0 m硅藻比重最大,其次是绿藻、甲藻、蓝藻、其他藻种,其他3个取样点在该月份藻细胞的垂直分布与菜子坝类似,造成不同藻种的时空分布的原因可能是不同藻种的主要环境影响因子不同。本研究发现硅藻与水体流速关系不显著,因为枯水期大宁河的流速并不明显,但在4、5月大宁河中硅藻占有绝对优势,因此推测流速不是影响硅藻生长的主要因素。

4 结论

(1)三峡库区大宁河4~9月,藻种主要以蓝

藻、绿藻和硅藻为主,整体藻密度呈逐步递增趋势;蓝藻比重均逐步增大,硅藻比重逐步降低,绿藻比重变化不显著。

(2)不同藻细胞在垂向水层中的比重也随时间的变化而改变,菜子坝在整个试验期间0 m处藻密度比其他水层的藻密度高,白水河在6和7月的2.0 m处藻密度最高,双龙在7、8和9月的0 m和2.0 m处藻密度较高,大昌在整个试验期间,藻密度变化不大。

(3)藻细胞在空间分布上表现为:藻密度与水温 and 叶绿素呈极显著相关,与光照、溶解氧、pH值和可溶性磷盐呈显著相关。

参考文献:

- [1] 秦伯强. 太湖生态与环境若干问题的研究进展及其展望[J]. 湖泊科学, 2009, 21(4): 445-455.
- [2] 郑丙辉. 中国湖库富营养化评价标准研究报告[R]. 北京: 中国环境科学研究院, 2011.
- [3] 孔繁翔, 马荣华, 高俊峰, 等. 太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践[J]. 湖泊科学, 2009, 21(3): 314-328.
- [4] 季健, 孔繁翔, 于洋, 等. 太湖越冬蓝藻空间分布的初步研究[J]. 湖泊科学, 2009, 21(4): 490-494.
- [5] 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.
- [6] Yang H, You W H, Wang Y P, *et al.* Study on the spatial and temporal distribution of blue algae in lake Dianshan in summer[J]. Meteorological and Environmental Research, 2010, 1(6): 82-85.
- [7] 李原, 张梅, 王若南. 滇池的水华蓝藻的时空变化[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2005, 27(3): 272-276.
- [8] 陈作州. 阿哈水库、红枫湖水库水华蓝藻的时空变化及毒性试验研究[D]. 贵州: 贵州师范大学, 2007.
- [9] 顾婷婷. 越冬与复苏时期太湖水体和底泥蓝藻群落结构的时空变化[D]. 北京: 中国科学院, 2010.
- [10] 吴光应, 刘晓霭. 大宁河水体营养盐状况与水华爆发之间关系分析[J]. 中国环境监测, 2009, 25(4): 98-101.
- [11] 徐耀阳, 蔡庆华, 黎道丰, 等. 三峡水库香溪河库湾拟多甲藻昼夜垂直分布初步研究[J]. 武汉植物学研究, 2008, 26(6): 608-612.
- [12] 周广杰, 况琪军, 胡征宇, 等. 香溪河库湾浮游藻类种类演替及水华发生趋势分析[J]. 水生生物学报, 2006, 30(1): 42-46.
- [13] 郭劲松, 张超, 方芳, 等. 三峡水库小江回水区水华高发期浮游植物群落结构特征研究[J]. 科技导报, 2008, 26(17): 70-75.
- [14] 郑丙辉, 曹承进, 张佳磊, 等. 三峡水库支流大宁河水华特征研究[J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3218-3226.
- [15] 易仲强, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾水温结构及其对春季水华的影响[J]. 水生态学杂志, 2009, 2(5): 6-11.

- [16] <http://www1.gdou.edu.cn/scxy/gexi/course/mouse/index.asp#>.
- [17] 张毅敏, 张永春, 张龙江, 等. 湖泊水动力对蓝藻生长的影响[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(5): 707-711.
- [18] 王华, 逢勇. 藻类生长的水动力学因素影响与数值仿真[J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 884-889.
- [19] 杨正健, 刘德富, 马骏, 等. 三峡水库香溪河库湾特殊水温分层对水华的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, **45**(1): 1-9, 15.
- [20] 任健, 蒋名淑, 商兆堂, 等. 太湖蓝藻暴发的气象条件研究[J]. 气象科学, 2008, **28**(2): 221-226.
- [21] 湛敏, 姚建玉, 张云怀, 等. 光照对三峡库区蓝藻垂直迁移过程的影响模拟[J]. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(11): 1302-1308.
- [22] 周敏, 刘正文. 氮、磷对热带浅水湖泊惠州西湖蓝藻的控制[J]. 生态科学, 2012, **31**(2): 115-120.
- [23] Dejene T A. Phytoplankton community structure and cyanobacterial blooms in the semi-arid highlands of Tigray, Ethiopia[D]. Ghent: Ghent University, 2009.
- [24] 张永生, 郑丙辉, 姜霞, 等. 三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(11): 3787-3796.
- [25] Walsby A E. Gas vesicles[J]. Microbiology Reviews, 1994, **58**(1): 94-144.
- [26] 储昭升, 杨波, 金相灿, 等. 6 株蓝藻伪空胞的临界破裂压力研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(12): 2695-2699.
- [27] Bazaka K, Crawford R J, Nazarenko E L, *et al.* Bacterial extracellular polysaccharides [J]. Advances in Experimental Medicine and Biology, 2011, **715**: 213-226.
- [28] De Philippis R, Vincenzini M. Extracellular polysaccharides from cyanobacterial and their possible applications [J]. FEMS Microbiology Reviews, 1998, **22**: 151-175.
- [29] 张永生, 李海英, 孔繁翔, 等. 群体细胞间空隙在微囊藻水华形成过程中的浮力调节作用[J]. 环境科学, 2011, **32**(6): 1602-1607.
- [30] De Castro A S, Garcia V M T. Growth and biochemical composition of the diatom *Chaetoceros cf. wighamii* brightwell under different temperature, salinity and carbon dioxide levels. I. Protein, Carbohydrates and Lipids[J]. Aquaculture, 2005, **246**(1-4): 405-412.
- [31] 钱振明, 邢荣莲, 吴春雪, 等. 温度对 8 种底栖硅藻生长及其理化成分的影响[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2009, **22**(1): 30-34.
- [32] 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.

CONTENTS

Concentrations and Ozone Formation Potentials of BTEX During 2008-2010 in Urban Beijing, China	CAO Han-yu, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2065)
Aging and Mixing State of Particulate Matter During Aerosol Pollution Episode in Autumn Shanghai Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	MU Ying-ying, LOU Sheng-rong, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (2071)
Chemical Characteristics and Source Assessment of Rainwater at Shenyang	ZHANG Lin-jing, ZHANG Xiu-ying, JIANG Hong, <i>et al.</i> (2081)
Variation of Atmospheric Pollutants in Qinhuangdao City	LIU Lu-ning, SHEN Yu-xuan, XIN Jin-yuan, <i>et al.</i> (2089)
NH ₃ , N ₂ O, CH ₄ and CO ₂ Emissions from Growing Process of Caged Broilers	ZHOU Zhong-kai, ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, <i>et al.</i> (2098)
Synergetic Effects of Silicon Carbide and Molecular Sieve Loaded Catalyst on Microwave Assisted Catalytic Oxidation of Toluene	WANG Xiao-hui, BO Long-li, LIU Hai-nan, <i>et al.</i> (2107)
Removal of Mixed Waste Gases by the Biotrickling Filter	ZHANG Ding-feng, FANG Jun-yi, YE Jie-xu, <i>et al.</i> (2116)
Decomposition of Carbon Disulfide by Pulse Corona Under Oxidizing and Reducing Atmosphere	JIN Sheng, HUANG Li-wei, LI Guo-ping (2121)
Effects of Simulated Elevation of Atmospheric CO ₂ Concentration on the Physiological Features of Spring Phytoplankton in Taihu Lake	ZHAO Xu-hui, TANG Long-sheng, SHI Xiao-li, <i>et al.</i> (2126)
A New Method for Estimation of the Lake Quality Reference Condition	HUA Zu-lin, WANG Liang (2134)
Parameter Sensitivity Analysis of Runoff Simulation and Model Adaptability Research Based on HSPF	LI Yan, LI Zhao-fu, XI Qing (2139)
Study on Water Quality Monitoring Scheme Based on Non-Point Source Pollution	WU Xi-jun, LI Huai-en, LI Jia-ke, <i>et al.</i> (2146)
Characteristics of Nutrient Loss by Runoff in Sloping Arable Land of Yellow-brown Under Different Rainfall Intensities	CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (2151)
Distribution of Dissolved Inorganic Nutrients and Dissolved Oxygen in the High Frequency Area of Harmful Algal Blooms in the East China Sea in Spring	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, CHEN Peng, <i>et al.</i> (2159)
Temporal-Spatial Distribution of Algal Cells During Drought Period in Daning River of Three Gorges	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, WANG Kun, <i>et al.</i> (2166)
Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen Components in the Lake Sediment to Algae	FENG Wei-ying, ZHANG Sheng, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2176)
Influence of Decomposition of <i>Cladophora</i> sp. on Phosphorus Concentrations and Forms in the Overlying Water	HOU Jin-zhi, WEI Quan, GAO Li, <i>et al.</i> (2184)
Phosphorus Exchange Between Suspended Solids Sediments Overlying Water Under Repeated Disturbance	LI Da-peng, WANG Jing, HUANG Yong (2191)
Distribution Characteristics of PBDEs in Surface Sediment from the Three Gorges Reservoir of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2198)
Study on UV and H ₂ O ₂ Combined Inactivation of <i>E. coli</i> in Drinking Water	ZHANG Yi-qing, ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji (2205)
Kinetics and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate Degradation in Aqueous Solution by Ozonation	YU Li, ZHANG Pei-long, HOU Jia-cai, <i>et al.</i> (2210)
Effects of Nitrate Ion on Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	MAO Wen, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2218)
Chlorination of Ethynyl Estradiol: A Kinetic and Mechanistic Study	WANG Bin-nan, LIU Guo-qiang, KONG De-yang, <i>et al.</i> (2225)
Metal Ions Restrained the Elimination of 4- <i>tert</i> -Octylphenol by δ -MnO ₂	LI Fei-li, MOU Hua-qian (2232)
Removal of Bisphenol A in Aqueous Solutions by Core-shell Magnetic Molecularly Imprinted Polymers	LIU Jian-ming, LI Hong-hong, XIONG Zhen-hu (2240)
Research on Removal of Tetrabromobisphenol A from Synthetic Wastewater by Nanoscale Zero Valent Iron Supported on Organobentonite	YAN Meng-yue, PANG Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (2249)
Measurement of Dissolved Organic Nitrogen with Nanofiltration Pretreatment and Its Distribution Characteristics in Landscape Water	YU Hong-lei, HUO Shou-liang, YANG Zhou-sheng, <i>et al.</i> (2256)
Preparation of a Novel Modified Hydrogel and Study of Its Adsorption Performance	WU Ning-mei, LI Zheng-kui (2263)
Photocatalytic Reductive Degradation of Direct Red 4BE by Phosphotungstic Acid	WEI Hong, LI Ke-bin, LI Juan, <i>et al.</i> (2271)
Wastewater Treatment Using a Microbubble Aerated Biofilm Reactor	ZHANG Lei, LIU Ping, MA Jin, <i>et al.</i> (2277)
Research on Fenton Treatment of the Biochemical Processes Effluent of Bamboo Industry Wastewater	GUO Qing-wen, ZHANG Min, WANG Wei, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Fe ²⁺ on Fermentation Hydrogen Production in an UASB	LI Yong-feng, WANG Yi-xuan, CHENG Guo-ling, <i>et al.</i> (2290)
Influence of Substrate Concentration on PHA Production Using Fermented Sugar Cane as Substrate	CHEN Zhi-qiang, DENG Yi, HUANG Long, <i>et al.</i> (2295)
Study on Rapid Start-up of a Nitrifying Process Using Aerobic Granular Sludge as Seed Sludge	LIU Wen-ru, SHEN Yao-liang, DING Ling-ling, <i>et al.</i> (2302)
Influencing Factors of High-Concentration Lead Removal Using the Phosphorus-Accumulating Sludge	YANG Min, LU Long, FENG Yong, <i>et al.</i> (2309)
Preliminary Study on Characteristics of Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Granular Sludge Systems	LI Zhi-hua, FAN Chang-qing, WANG Xiao-chang (2314)
Ecological Risk Assessment of Bisphenol A in Chinese Freshwaters	WANG Hao, FENG Cheng-lian, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (2319)
Species Sensitivity Evaluation of <i>Pseudorasbora parva</i>	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (2329)
Comparison of Aquatic Predicted No-Effect Concentrations (PNECs) for Pentachlorophenol Derived from Different Assessment Approaches	LEI Bing-li, WEN Yu, WANG Yi-pei, <i>et al.</i> (2335)
Study on Hair Hg and Pb Content Distribution of Traffic Polices, Guilin	QIAN Jian-ping, ZHANG Li, LI Cheng-chao, <i>et al.</i> (2344)
Changes in Phototaxical Index of <i>Daphnia carinata</i> Under Electric Field of Direct Current in Response to Cr ⁶⁺ and Hg ²⁺	WANG Fei-xiang, YUAN Ling, HUANG Jian-guo (2350)
Effect of UV-B Radiation on the Chemical Composition and Subsequent Decomposition of <i>Cyclobalanopsis glauca</i> Leaf Litter	SONG Xin-zhang, BU Tao, ZHANG Shui-kui, <i>et al.</i> (2355)
Leaf Micro-morphology and Features in Adsorbing Air Suspended Particulate Matter and Accumulating Heavy Metals in Seven Tress Species	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (2361)
Effect of Dissolved Oxygen on Microbial Community in Simultaneous Removal of Carbon, Nitrogen and Sulfur Process	YU Hao, CHEN Chuan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (2368)
Microbial Activity and Community Structure Analysis Under the Different Land Use Patterns in Farmland Soils: Based on the Methods PLFA and MicroResp TM	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (2375)
Effects of Drying-rewetting Alternation on Nitrogen Dynamics in a Typical Coastal Wetland: A Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (2383)
Cadmium and Selected Heavy Metals in Soils of Jianping Area in Wushan County, the Three Gorges Region: Distribution and Source Recognition	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, NING Zeng-ping, <i>et al.</i> (2390)
Total Contents of Heavy Metals and Their Chemical Fractionation in Agricultural Soils at Different Locations of Beijing City	CHEN Zhi-fan, ZHAO Ye, GUO Ting-zhong, <i>et al.</i> (2399)
Influence of Season Change on the Level of Heavy Metals in Outdoor Settled Dusts in Different Functional Areas of Guiyang City	LI Xiao-yan (2407)
Characteristics of Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls Contamination in Soils of Gudao Region in Dongying	WANG Deng-ge, CUI Zhao-jie, FU Xiao-wen, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Organic Matter Leaching in Forest Soil	DUAN Lei, MA Xiao-xiao, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2422)
<i>Ex-situ</i> Remediation of PAHs Contaminated Site by Successive Methyl- β -Cyclodextrin Enhanced Soil Washing	SUN Ming-ming, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2428)
Effects of <i>Bacillus mucilaginosus</i> on the Cd Content of Rhizosphere Soil and Enzymes in Soil of <i>Brassica juncea</i>	YANG Rong, LI Bo-wen, LIU Wei (2436)
Concentrations of Antibiotics in Vegetables from Manure-mended Farm	WU Xiao-lian, XIANG Lei, MO Ce-hui, <i>et al.</i> (2442)
Characteristics of Organic Nitrogen Mineralization in Organic Waste Compost-Amended Soil	ZHANG Xu, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (2448)
Characteristics and Influence Factors of the Energy Consumption and Pollutant Discharge of Municipal Solid Waste Transfer Stations in Beijing	WANG Zhao, LI Zhen-shan, FENG Ya-bin, <i>et al.</i> (2456)
Influence of Ammonia on Leaching Behaviors of Incineration Fly Ash and Its Geochemical Modeling	GUAN Zhen-zhen, CHEN De-zhen, Thomas Astrup (2464)
Pretreatment Technology for Fly Ash from MSWI and the Corresponding Study of Chloride Behavior	ZHU Fen-fen, Takaoka Masaki, Oshita Kazuyuki, <i>et al.</i> (2473)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of Mesoporous Activated Carbon with Acidic Groups	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (2479)
Preliminary Assessment of the Potential of Biochar Technology in Mitigating the Greenhouse Effect in China	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (2486)
Research of Potassium Flow and Circulation Based on Substance Flow Analysis	BAI Hua, ZENG Si-yu, DONG Xin, <i>et al.</i> (2493)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2013年6月15日 34卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 6 Jun. 15, 2013

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. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. 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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发刊