

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

重庆市 PM _{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子	吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)
2012~2013 年间北京市 PM _{2.5} 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析	杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)
南京地区大气 PM _{1.1} 中 OC、EC 特征及来源解析	姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)
太原市大气 PM _{2.5} 中碳质组成及变化特征	张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)
朔州市市区 PM _{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征	刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)
中国 2013 年 1 月 PM _{2.5} 重污染过程卫星反演研究	薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)
高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究	廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)
重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量	覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)
海南五指山大气气态总汞含量变化特征	雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)
树叶烟尘中的有机碳和元素碳	陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)
介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析	姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)
长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价	母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)
河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素	王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)
岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)
岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析	卢丽, 王喆, 裴建国 (862)
两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例	闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)
三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)
夏、冬季降雨中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析	梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)
南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比	程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)
夏季大辽河河口区水体反硝化及其影响因素	杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)
太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性	叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)
汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析	王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)
三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化	黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)
太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算	金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)
贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析	苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)
物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用	史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)
磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响	殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)
矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究	王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)
PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝	和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)
微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用	宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)
生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究	汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)
污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究	罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)
高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律	卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)
MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制	郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)
基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响	滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)
天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究	何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)
开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价	李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)
不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响	邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)
种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响	张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘灵飞 (1053)
江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价	金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)
镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用	章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)
高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响	李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)
黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究	李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)
单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究	叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)
不同有机物料中的磷形态特征研究	邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)
北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究	施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)
燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述	段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)
菌根真菌金属耐性机制研究进展	陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)
亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展	沈李东 (1133)
《环境科学》征订启事 (830)	
《环境科学》征稿简则 (846)	
信息 (838, 861, 913, 935)	

汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析

王宇飞^{1,2}, 赵秀兰^{1,2*}, 何丙辉¹, 黄琪¹

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716)

摘要: 2013 年 6~8 月对三峡库区汉丰湖的浮游植物群落进行了调查, 共检出浮游植物 7 门 72 种, 优势种为针杆藻、舟形藻、直链藻、卵形藻、栅藻、伪鱼腥藻、平裂藻。浮游植物在东河入口以硅藻为主, 南河入口以蓝、绿藻居多。运用典范对应分析对浮游植物与环境因子关系进行研究。结果表明, 东河入口物种受水体理化性质影响大, 南河入口物种受营养盐含量影响大, 影响浮游植物群落结构的主要因子为温度、溶解氧(DO)、pH、总氮(TN)、总磷(TP)、可溶性氮(DN)与可溶性磷(DP)。

关键词: 典范对应分析; 汉丰湖; 浮游植物; 环境因子; 群落结构

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-0922-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.03.022

Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake

WANG Yu-fei^{1,2}, ZHAO Xiu-lan^{1,2*}, HE Bing-hui¹, HUANG Qi¹

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China)

Abstract: The phytoplankton community in Hanfeng Lake Reservoir, located in the Three Gorges Reservoir Areas of Yangtze River, was investigated from Jun to August 2013. The results showed that 72 species belonging to 7 phyla of phytoplankton were detected in the water. The dominant species were *Synedra*, *Navicula*, *Melosira*, *Cocconeis*, *Scenedesmus*, *Pseudoanabaena* and *Merismopedia*. The phytoplankton at the entrance of Donghe River was mainly composed of Bacillariophyta, while that at the entrance of Nanhe River was dominated by Cyanophyta and Chlorophyta. Canonical correspondence analysis was applied to investigate the relationships between the distribution of phytoplankton and the environmental factors. The results showed that the species of phytoplankton at the entrance of the Donghe River were influenced by the physiochemical properties of the water, while those at the entrance of Nanhe River were affected by the nutrient status of the water. The key factors influencing the distributions of phytoplankton were temperature, dissolved oxygen (DO), pH, total nitrogen (TN), dissolved nitrogen (DN) and dissolved phosphorus (DP).

Key words: canonical correspondence analysis; Hanfeng Lake; phytoplankton; environmental factors; community structure

浮游植物是水体初级生产者^[1], 在水库等水体中, 其群落的组成和数量结构变化受物理、化学和生物等环境因子的影响^[2]。浮游植物种类组成和分布对环境变化具有指示作用, 而环境条件的改变也会直接或者间接的影响到浮游植物的群落结构^[3]。但浮游植物群落结构、动态变化与环境因子的关系复杂, 不同类型的水库起主导作用的环境因子在不同时期的作用也有差别。尽管有研究表明营养盐和水温是影响浮游植物生长的关键因子^[4,5], 但总的来看目前还缺乏统一的理论解释。

典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA) 可以同时结合多个环境因子在同一排序图上反映群落、生物种类与环境之间的关系, 结果明确直观, 是分析生物群落与环境因子关系的有效工具^[6]。近年来, 基于 CCA 研究浮游植物与环境因子关系在国内也得到了广泛的应用, 而在众多

不同水库的研究结果中也可以发现对水库浮游植物起主导作用的环境因子的多样性: 对热带的广东大镜山水库研究表明, 四季浮游植物结构主要受水温与降雨量影响^[2], 而在四季分明的苏州浅水湖泊的研究则发现, 不同季节影响浮游植物的环境因子有所差异^[7]; 对大镜山水库和白洋淀的研究表明, 理化性质中的水温或 pH 是影响水库浮游植物变化的主导因子^[2,8], 而在红枫湖、南太湖入口以及苏州平原浅水湖泊的研究中则发现 N、P 等营养盐是水体中浮游植物结构变化主要因素^[3,7,9]。

汉丰湖位于三峡库区腹心地带一级支流——澎溪河上游的开业境内, 是三峡大坝建成后新建成的人工湖泊, 常年水面 14.8 km², 蓄水量 8 000 万 m³,

收稿日期: 2014-09-05; 修订日期: 2014-10-25

作者简介: 王宇飞 (1990~), 男, 硕士, 主要研究方向为环境规划与管理, E-mail: wyf63772335@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zxl@swu.edu.cn

是我国西部内陆最大的城市人工湖。该湖泊不仅与开县城市命运有着紧密的联系,其生态环境状况还对澎溪河下游及长江水环境状况产生极大影响。本研究于 2013 年 6~8 月在汉丰湖布点观测浮游植物变化特性,分析影响藻类生长分布的环境因子,探讨夏季汉丰湖浮游植物演替规律及原因,以为汉丰湖的管理与水质保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 样点设置

按照湖泊采样原则,在汉丰湖入口、湖心、不同水体交汇处、出口共设置 7 个采样点,南河段设 3 个点,分别为东湖郡(HF4)、石龙船大桥(HF6)和南河入口(HF7),头道沟与南河交汇口(HF5)设 1 个点,东河设 1 个点即东河入口(HF3),两河交汇口(HF2)设 1 个点,调节坝处设 1 个点即水库出口(HF1),具体可见图 1。采样按照文献[10]中的规定采集水样。



图 1 汉丰湖采样点示意

Fig. 1 Sampling sites in Hanfeng Lake

1.2 样品采集

在水体表层 0.5 m 处采取 1 L 水样,加入 10 mL 鲁哥氏液固定,静置 24 h 用虹吸管浓缩至 30 mL 后进行浮游植物的细胞分类计数统计。

1.3 监测指标与方法

理化指标的测定参考文献[10]:透明度(SD)用塞氏罗盘现场测定;溶解氧(DO)、pH、电导率(EC)、温度(T)和叶绿素 a(Chl-a)用多参数水质监测仪现场测定;总氮(TN)、可溶性氮(DN)、氨氮(NH_4^+-N)与硝态氮(NO_3^--N)分别用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法、纳氏试剂比色法和酚二磺酸光度法测定;总磷(TP)与可溶性磷(DP)用钼酸铵分光光度法测定;高锰酸盐指数用酸性高锰酸钾法测定。

浮游植物的计数与鉴定参考文献[11]。

1.4 数据处理

优势度计算见公式(1):

$$Y = (n_i/N) f_i \quad (1)$$

式中, n_i 为第 i 种物种的总个体数; f_i 为第 i 种在各点位出现的频率; N 为所有物种的总个体数; Y 为优势度,以 $Y > 0.02$ 作为优势种^[12]。

香农多样性指数计算见公式(2):

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (2)$$

式中, H' 为群落的香农多样性指数, S 为总种数, P_i 为第 i 种的个体比例^[13]。

物种均匀度采用 Pielou 指数计算,见公式(3)^[14]:

$$J = \frac{H'}{\ln S} \quad (3)$$

环境因子采用 SPSS 与 Excel 进行分析与作图。采用 Canoco for Windows 4.5 软件对环境因子与物种数据进行 CCA 分析。本研究用于排序的物种数据需经过以下条件进行筛选:该物种在至少一个采样点处的相对密度 $\geq 1\%$,且该物种在各样点出现的频度 $> 12.5\%$ ^[15]。由于各指标间数据差异较大,需对物种及环境数据进行 $\lg(x+1)$ 转换,pH 除外^[8]。分析结果用 Canodraw 软件制作环境因子与物种间的双序图。

2 结果与分析

2.1 水理化性质及营养盐含量

汉丰湖 6~8 月水的理化性质月变化如表 1 所示。6~8 月,汉丰湖温度逐渐升高,水体 SD 与 EC 在 7 月均值最低,TSS 则在 7 月均值最高,DO 值在 8 月均值最高,pH 在 8 月最低,温度、pH 和 DO 点位间差异小,其余指标各点位差异大。

汉丰湖 6~8 月营养盐变化如表 2 所示。TN、DN、TP 逐月增高,DP 在 7 月均值最低,8 月均值最高, NH_4^+-N 在 7 月均值最低, NO_3^--N 与高锰酸盐指数在 7 月最高,Chl-a 在 8 月最高。6、8 月各指标点位间差异较大,7 月除 TP 外,其余指标点位差异大。

水库富营养化是一个非常复杂的环境生态体系,所涉及的因子很多,Chl-a 与水的理化性质及 N、P 等营养盐的关系存在争议,有研究发现,在水库、湖泊缓流状态下,一般 Chl-a 与 N、P 间存在不同程度的线性关系^[16~21],而刘景红等^[22]对重庆 35 座水库的研究发现 Chl-a 与 TP 的相关性较弱,李培培等^[23]对千岛湖的研究以及吴阿娜等^[24]对淀山湖的研究发现 Chl-a 与 TN 无明显的相关性。对汉丰湖

进行相关分析,发现水体 Chl-a 与 TP、DP、TN 均呈 0.05(表3). 表明 TN、DN、TP 和 DP 是汉丰湖 Chl-a 极显著正相关 $P < 0.01$ 与 DN 呈显著正相关 $P < 0.05$ a 变化的主要因素.

表 1 汉丰湖夏季水体理化性质变化

Table 1 Changes in the physicochemical properties of Hanfeng Lake in summer

月份	SD/m	T/℃	EC/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	pH	DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TSS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
6	0.34 ± 0.17	25.51 ± 3.11	423 ± 230	9.10 ± 0.14	8.36 ± 0.34	21.27 ± 14.17
7	0.15 ± 0.07	25.15 ± 3.74	224 ± 127	9.19 ± 0.07	8.37 ± 0.23	130.00 ± 141.67
8	0.28 ± 0.19	29.16 ± 2.92	421 ± 127	7.93 ± 0.27	8.39 ± 0.42	12.38 ± 8.10

表 2 汉丰湖夏季叶绿素及水体营养盐变化/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Concentrations of Chl-a and N,P nutrients in Hanfeng Lake from June to August, 2013/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

月份	Chl-a/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	TP	DP	TN	DN	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	高锰酸盐指数
6	2.15 ± 0.55	0.085 ± 0.047	0.055 ± 0.036	1.060 ± 0.103	0.875 ± 0.149	0.134 ± 0.148	0.185 ± 0.131	3.48 ± 1.37
7	2.46 ± 0.50	0.104 ± 0.034	0.044 ± 0.024	1.492 ± 0.413	1.229 ± 0.415	0.070 ± 0.026	0.746 ± 0.309	4.10 ± 1.26
8	4.17 ± 2.58	0.113 ± 0.036	0.093 ± 0.032	1.893 ± 0.451	1.518 ± 0.232	0.128 ± 0.055	0.430 ± 0.181	3.11 ± 0.97

表 3 汉丰湖营养盐相关分析¹⁾

Table 3 Correlation coefficients of Chl-a and nutrient salts in Hanfeng Lake

	Chl-a	TP	DP	TN	DN	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	高锰酸盐指数
Chl-a	1							
TP	0.593 **	1						
DP	0.697 **	0.702 **	1					
TN	0.643 **	0.413	0.598 **	1				
DN	0.453 *	0.249	0.527 *	0.892 **	1			
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	0.196	-0.240	-0.133	0.025	-0.002	1		
$\text{NO}_3^- \text{-N}$	0.262	0.339	0.212	0.544 *	0.608 **	-0.316	1	
高锰酸盐指数	0.277	0.577 **	0.439 *	0.253	0.181	-0.460 *	0.598 **	1

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

2.2 浮游植物种类组成

2.2.1 种类组成及优势种

经过镜检,共检测到浮游植物 7 门 72 种,其中,绿藻门种数最多,为 27 种,占 38%;硅藻门次之,为 23 种,占 32%;蓝藻门 13 种,占 18%;甲藻门 4 种,

占 6%;裸藻门 3 种,占 5%;隐藻门和黄藻门各 1 种,分别占 1%,汉丰湖优势种(优势度)为针杆藻(0.048)、舟形藻(0.063)、直链藻(0.069)、卵形藻(0.027)、栅藻(0.021)、伪鱼腥藻(0.096)、平裂藻(0.102). 各点位种类组成及优势种见表 4.

表 4 汉丰湖各采样点浮游植物组成及优势种

Table 4 Phytoplankton composition and dominant species of each sampling site in Hanfeng Lake

点位	每门浮游植物物种数及占藻类总数百分比/%							优势种 (优势度)
	蓝藻门	硅藻门	绿藻门	甲藻门	裸藻门	隐藻门	黄藻门	
HF1	7 种 30.43	10 种 43.48	4 种 17.39	1 种 4.35	1 种 4.35	—	—	无
HF2	6 种 20.69	12 种 41.38	6 种 20.69	1 种 3.45	2 种 6.90	1 种 3.45	1 种 3.45	异极藻(0.037),小环藻(0.025) 舟形藻(0.068),直链藻(0.025)
HF3	3 种 16.67	10 种 55.56	4 种 22.22	1 种 5.56	—	—	—	伪鱼腥藻(0.101)
HF4	5 种 26.32	6 种 31.58	4 种 21.05	1 种 5.26	1 种 5.26	1 种 5.26	1 种 5.26	平裂藻(0.054)
HF5	6 种 26.09	12 种 52.17	4 种 17.39	—	—	—	1 种 4.35	脆杆藻(0.024)
HF6	8 种 29.63	8 种 29.63	7 种 25.93	1 种 3.70	2 种 7.41	1 种 3.70	—	小尖头藻(0.039),隐藻(0.030), 小环藻(0.022)
HF7	8 种 28.57	10 种 35.71	6 种 21.43	1 种 3.57	2 种 7.14	1 种 3.57	—	平裂藻(0.022)

2.2.2 种类组分的时空变化

图2反映了汉丰湖6~8月浮游植物的时空变化. 汉丰湖夏季各断面均为蓝藻、绿藻和硅藻为主,其中硅藻所占比例较高,尤其以7月最大,最高

达到58%. 月份间相比6月以硅藻为主,绿藻次之; 7月以硅藻为主,蓝藻比例增高,绿藻比例有所下降; 8月绿藻、硅藻、蓝藻种数均增多,但硅藻与蓝藻所占种数比例有所下降,绿藻则明显增高.

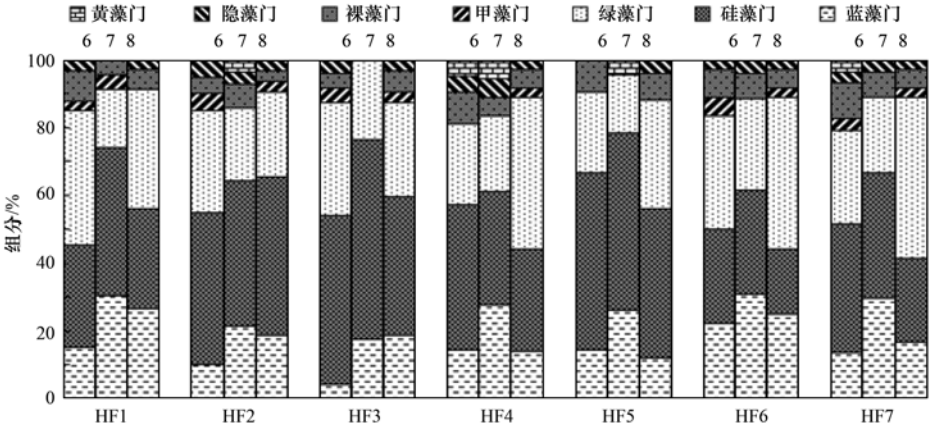


图2 2013年6~8月汉丰湖浮游植物组分时空变化
Fig. 2 Temporal and spatial variation of phytoplankton in Hanfeng Lake from June to August, 2013

各断面间相比,东河入口(HF3)与两河交汇(HF2)断面夏季以硅藻为主,占45%左右,蓝、绿藻比例相近,占20%左右;位于南河的各断面(HF4、HF6、HF7)6、7月蓝藻、硅藻和绿藻的比例相近,占20%左右,8月绿藻所占比例明显增加,达到40%~50%,成为主要藻种;头道河入口断面(HF5)各月藻种比例变化不大,6、7月以硅藻所占比例最大,占50%左右,蓝、绿藻相近,占20%左右,8月绿藻比例有所增大,占33.3%,但仍以硅藻为主,蓝藻比例下降,占12.5%;调节坝(HF1)藻种比例相似,6月以绿藻、硅藻为主,7、8月蓝藻、硅藻、绿藻所占比例相近,占20%~30%.

2.2.3 多样性分析

群落多样性通常与物种的丰富度和均匀度密切相关,本研究用香农指数和Pielou均匀度指数对汉丰湖浮游植物群落进行分析,香农指数可反映群落结构的复杂程度,Pielou指数用于反映群落均匀度,结果见表5.

表5 汉丰湖各采样点浮游植物多样性指数

Table 5 Diversity indexes of phytoplankton at each sampling site in Hanfeng Lake

采样点	香农指数	Pielou 指数
HF1	2.38	0.55
HF2	1.30	0.35
HF3	1.19	0.23
HF4	1.10	0.18
HF5	1.83	0.38
HF6	1.80	0.46
HF7	2.09	0.36

汉丰湖浮游植物群落香农指数介于1.10~2.38,均值为1.67,最高值出现在调节坝(HF1),东河入口(HF3)、两河交汇处(HF2)及东湖郡(HF4)的值较低,其余断面香农指数相近. Pielou指数介于0.18~0.55,均值为0.36,与香农指数相似,其最高

表6 CCA浮游植物编号表

Table 6 Code of phytoplankton species for CCA

编号	藻类名称(拉丁名)	
A1	异极藻	Gomphonema
A2	小环藻	Cyclotella
A3	针杆藻	Synedra
A4	硅藻门	脆杆藻
A5		舟形藻
A6		桥弯藻
A7		直链藻
A8		卵形藻
B1		栅藻
B2		针丝藻
B3	绿藻门	新月藻
B4		衣藻
C1		鞘丝藻
C2		棒胶藻
C3	蓝藻门	伪鱼腥藻
C4		束丝藻
C5		平裂藻
C6		小尖头藻
D1	裸藻门	裸藻
D2		囊裸藻
D3		扁裸藻
E1	隐藻门	隐藻
E2		尖尾蓝隐藻

值出现在调节坝(HF1),东河入口(HF3)及东湖郡(HF4)处值较低,其余各点位均匀度指数相近. 综上所述,汉丰湖不同水域浮游植物的群落结构有明显不同. 其中,调节坝(HF1)断面浮游植物组成较复杂,而东河入口及东湖郡(HF3、HF4)浮游植物组成较简单,其余各断面两指数均为中间水平.

2.3 CCA 分析

CCA 可作为分析浮游植物群落组成与环境因子间对应关系的工具^[2],在由环境因子特征变量所构成的空间上对环境变量和浮游植物等排序作图,实现两者的对应排序. 在主轴1(横轴)和主轴2(纵轴)构成的平面中,箭头表征环境因子在平面上的相对位置,向量长短代表它在主轴中的作用,箭头所处象限表示环境因子与排序轴之间相关性的正

负^[25]. 根据夏季汉丰湖浮游植物出现频率($f_i > 12.5\%$)和相对密度($n_i/N > 1\%$),选取 23 种浮游植物(表 6)与 13 种理化指标进行 CCA 分析.

表 7 中列出了汉丰湖浮游植物 CCA 分析的统计信息,可以看出,前两个排序轴的特征值分别为 0.435 和 0.211,它们共解释了浮游植物物种数据累计方差值的 58.6%;环境因子(EN)与浮游植物(SPE)的前两个排序轴(EN1 与 SPE1,EN2 与 SPE2)的相关系数高达 1.000;环境因子的第 1 和第 2 排序轴(EN1 与 EN2)相关系数为 0,表明两轴垂直,浮游植物的第 1 与第 2 排序轴(SPE1 与 SPE2)相关系数也为 0,即相互垂直. 上述均说明排序轴和环境因子间线性结合程度较好地反映了物种与环境之间的关系,排序结果是可靠的^[26,27].

表 7 汉丰湖浮游植物群落 CCA 分析的统计信息

Table 7 Summary statistics of CCA performed on phytoplankton in Hanfeng Lake

项目	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4
特征值	0.435	0.211	0.175	0.142
百分数/%	34.4	19.2	15.9	12.9
方差贡献累计百分比/%	39.4	58.6	74.5	87.4
第 1 与第 2 轴相关性	EN1 与 SPE1 1.000	EN2 与 SPE2 1.000	EN1 与 EN2 0.000	SPE1 与 SPE2 0.000

图 3 反映了汉丰湖浮游植物与环境因子之间的关系,从中环境因子向量长度可以看出,各环境因子对浮游植物的密度均有较大程度的影响,其中以温度、DO、TN、DP、DN 的影响最为显著. 从环境因子箭头与浮游植物第 1 排序轴夹角分析,温度、EC、TN、DN、DP、 NO_3^- -N 均与第 1 排序轴呈负相关,相关系数分别为 -0.9579 、 -0.5540 、 -0.8171 、 -0.6169 、 -0.6060 、 -0.5469 ; DO 与 pH 与第 1 排序轴呈正相关,相关系数为 0.9336 、 0.5926 . 第 1 排序轴反映了物种对上述指标的需求趋势,即排序图上从左往右,浮游植物在 TN、DN、DP、 NO_3^- -N 浓度及温度、EC 的适宜值逐渐降低,DO 和 pH 值的适宜值逐渐升高. 从环境因子与浮游植物第 2 排序轴夹角分析,TSS 与第 2 排序轴呈正相关,相关系数为 0.5237 ; SD 与第 2 排序轴呈负相关,相关系数为 -0.7200 . 第 2 排序轴反映了浮游植物对 TSS 和 SD 需求的变化趋势,即从上而下,物种对 TSS 的需求逐渐降低,对 SD 的要求逐渐增大.

根据物种与环境因子的分布特征,可将浮游植物分成 4 个种组. 第 I 组包括小环藻、衣藻、鞘丝藻、小尖头藻、扁裸藻、隐藻、尖尾蓝隐藻共 7 种浮游植物,以蓝、绿藻居多,与水温、EC 以及营养

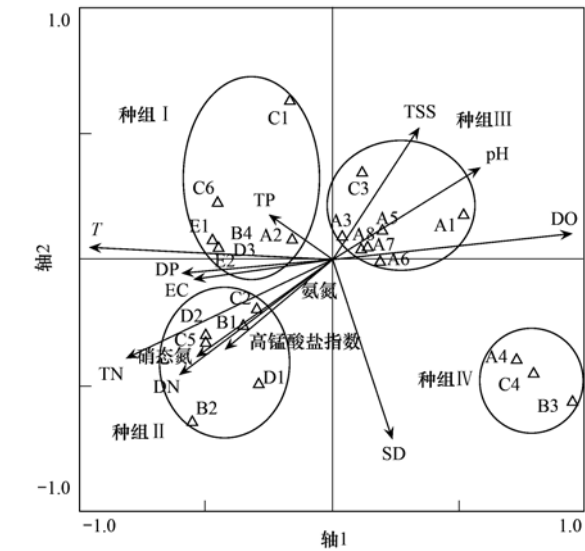


图 3 汉丰湖浮游植物与环境关系的 CCA 排序图
Fig. 3 CCA ordination biplot of phytoplankton species and environmental variables in Hanfeng Lake

盐中的 TP、DP 均有正相关性;第 II 组栅藻、针丝藻、棒胶藻、平裂藻、裸藻、囊裸藻共 6 种浮游植物,以蓝、绿藻为主,与 TN、DN、 NO_3^- -N、DP、高锰酸盐指数有极大的正相关性,第 I、II 组藻类的分布与蓝藻易在高温处生长的习性相吻合^[28];第 III

组包括异极藻、针杆藻、舟形藻、桥弯藻、直链藻、卵形藻和伪鱼腥藻共 7 种浮游植物,以硅藻为主,与水体中含沙量、DO 和 pH 呈现出极大正相关性, I、II、III 组的分布与蓝、绿藻比硅藻对磷酸盐需求高的规律一致^[29];第 IV 组包括脆杆藻、新月藻和束丝藻共 3 种浮游植物,受 TP 影响较大,但对 TP 需求不高。

从箭头的连线长度以及图中物种的分布可以看出,影响汉丰湖浮游植物结构特征的主要因素是温度、DO、pH、TN、TP、DN 与 DP。

3 结论

(1)汉丰湖 6~8 月 N、P 含量逐月上升,其中 TN、TP、DN、DP 与 Chl-a 具有显著的相关关系,是叶绿素 a 变化的主要影响因素。

(2)汉丰湖共检测到浮游植物 7 门 72 种,主要为蓝藻、绿藻和硅藻。优势种为针杆藻、舟形藻、直链藻、卵形藻、栅藻、伪鱼腥藻、平裂藻。东河入口、南河河段浮游植物种类有明显差异。

(3)汉丰湖不同水域浮游植物的群落结构有明显不同。其中,调节坝(HF1)断面浮游植物组成较复杂,而东河入口及东湖郡浮游植物组成较简单。

(4)CCA 排序结果显示,汉丰湖浮游植物分布呈现出一定的区域性,东河入口以硅藻为主,受水体理化性质影响大,南河段主要以蓝、绿藻为主,受营养盐影响大;所选 13 种环境因子中,影响浮游植物结构特征的主要因素是温度、DO、pH、TN、TP、DN 与 DP。

参考文献:

- [1] 沈韞芬, 张宗涉, 龚循矩, 等. 微型生物监测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990. 1-20.
- [2] 李秋华, 韩博平. 基于 CCA 的典型调水水库浮游植物群落动态特征分析[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2355-2364.
- [3] 夏品华, 马健荣, 李存雄, 等. 红枫湖水库冬春季浮游生物群落与环境因子的典范对应分析[J]. 环境科学研究, 2011, 24(4): 378-386.
- [4] Chapman B R, Ferry B W, Ford T W. Phytoplankton communities in water bodies at Dungeness, U. K.: analysis of seasonal changes in response to environmental factors [J]. *Hydrobiologia*, 1997, 362(1-3): 161-170.
- [5] 姚敏, 刘倩, 李艳玲, 等. 南京市两个小型富营养湖泊浮游硅藻的季节性变化[J]. 湖泊科学, 2009, 21(5): 693-699.
- [6] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 171-178.
- [7] 石晓丹, 阮晓红, 邢雅因, 等. 苏州平原河网区浅水湖泊冬夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J]. 环境科学, 2008, 29(11): 2999-3008.
- [8] 沈会涛, 刘存歧. 白洋淀浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析[J]. 湖泊科学, 2008, 20(1): 773-779.
- [9] 姚恩亲, 杨晓红, 张海燕, 等. 基于典范对应分析的南太湖入湖口浮游植物-环境关系研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2010, 21(4): 57-62.
- [10] 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.
- [11] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [12] 张才学, 孙省利, 谢少英, 等. 湖光岩玛珥湖的浮游植物[J]. 水生生物学报, 2008, 32(5): 620-630.
- [13] 孙儒泳, 李庆芬, 牛翠娟, 等. 基础生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [14] 何青, 孙军, 栾青杉, 等. 长江口及其邻近水域冬季浮游植物群集[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2559-2566.
- [15] Lopes M R M, Bicudo C E M, Ferragut M C. Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir, southeast Brazil [J]. *Hydrobiologia*, 2005, 542(1): 235-247.
- [16] Prairie Y T, Duarte C M, Kalff J. Unifying nutrient-chlorophyll relationships in lakes [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1989, 46(7): 1176-1182.
- [17] Jones J R, Knowlton M F. Limnology of Missouri reservoirs: an analysis of regional patterns [J]. *Lake and Reservoir Management*, 1993, 8(1): 17-30.
- [18] 张晟, 郑坚, 刘婷婷, 等. 三峡水库入库支流水体中营养盐季节变化及输出[J]. 环境科学, 2009, 30(1): 58-63.
- [19] 张晟, 李崇明, 郑丙辉, 等. 三峡库区次级河流营养状态及营养盐输出影响[J]. 环境科学, 2007, 28(3): 500-505.
- [20] 林秋奇, 胡韧, 段舜山, 等. 广东省大中型供水水库营养现状及浮游生物响应[J]. 生态学报, 2003, 23(6): 1101-1108.
- [21] 金相灿. 中国湖泊富营养化[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [22] 刘景红, 张晟, 陈玉成, 等. 重庆市水库富营养化调查及评价[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 131-134.
- [23] 李培培, 史文, 刘其根, 等. 千岛湖叶绿素 a 的时空分布及其与影响因子的相关分析[J]. 湖泊科学, 2011, 23(4): 568-574.
- [24] 吴阿娜, 朱梦杰, 汤琳, 等. 淀山湖蓝藻水华高发期叶绿素 a 动态及相关环境因子分析[J]. 湖泊科学, 2011, 23(1): 67-72.
- [25] 孟睿, 何连生, 过龙根, 等. 长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2588-2596.
- [26] 苏玉, 文航, 王东伟, 等. 太湖武进港区域浮游植物群落特征及其主要水质污染影响因素分析[J]. 环境科学, 2011, 32(7): 1945-1951.
- [27] 王丽卿, 许莉, 卢子园, 等. 淀山湖浮游植物数量消长及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 2011, 32(10): 2868-2874.
- [28] Dokulil M T, Teubner K. Cyanobacterial dominance in lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2000, 438(1-3): 1-12.
- [29] 栾青杉, 孙军, 宋书群, 等. 长江口夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J]. 植物生态学报, 2007, 3(3): 445-450.

CONTENTS

Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in Chongqing	WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i> (759)
Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Beijing During 2012-2013	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (768)
Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM _{1.1} from Nanjing	JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (774)
Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Taiyuan, China	ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (780)
Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shouzhou City	LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (787)
Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China	XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i> (794)
Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i> (801)
Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing	QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i> (809)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan	LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (817)
Organic and Element Carbon in Foliar Smoke	CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i> (824)
Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge	JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (831)
Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas	MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i> (839)
Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors	WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i> (847)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (855)
Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River	LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo (862)
Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i> (869)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (879)
Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season	LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (888)
Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation	CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i> (898)
Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors	YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei (905)
Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i> (914)
Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake	WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (922)
Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China	HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (928)
Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu	JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (936)
Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beiji River	GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (946)
Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus	SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (955)
Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation	YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i> (963)
Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material	WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i> (969)
Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles	HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> (980)
Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst	SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i> (989)
Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange	WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (995)
Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System	LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (1000)
Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content	ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i> (1006)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR	GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i> (1013)
Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell	TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (1021)
Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite	HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i> (1027)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China	LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i> (1037)
Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions	QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i> (1045)
Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province	ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i> (1053)
Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk	JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i> (1060)
Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i>	ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> (1069)
Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow	LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i> (1075)
Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China	LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1084)
Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts	YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i> (1092)
Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials	DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1098)
Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing	SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i> (1105)
Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants	DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (1117)
Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi	CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (1123)
Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria	SHEN Li-dong (1133)

《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)

2015年3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行