

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、冬季降水中溶解性有机质 (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, 刘云飞 (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)

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

(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)

摘要: 为探明三峡蓄水后汉丰湖消落区水质营养状态的变化特征, 于 2013 年 10 月至 2014 年 2 月对水质进行连续观察, 测定了水质物理参数、营养盐与叶绿素(Chl-a)的质量浓度。结果表明, 水体中营养盐与 Chl-a 质量浓度的增加, 在淹水后营养程度有升高现象, 2014 年 2 月与 2013 年 10 月相比, TN、TP、高锰酸盐指数与 Chl-a 质量浓度分别增加了 4.7、1.0、0.2、3.27 倍, TN、TP 质量浓度均超过藻类生长限值, 随滞留时间延长易造成水体富营养化, 应引起重视。Chl-a 单因子评价反映出水质由贫营养向富营养演变。TN/TP 结果表明, TN、TP 分别在不同时间内制约着藻类的生长; 2013 年 10~12 月与 2014 年 2 月, 藻类生长受 TN 限制; 2014 年 1 月, 藻类生长受 TP 限制。Chl-a 与 pH、DO、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN、高锰酸盐指数及 TP 呈显著正相关, 而与 SD、水温呈显著负相关; 蓄水期间, 水质受到了同一污染源的影响。因子分析结果表明, 汉丰湖消落区水质主要受 pH、DO、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 的影响, 同时 Chl-a、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与好氧性有机物的污染不可忽视; 在蓄水稳定初期水体具有自净能力, 随蓄水滞留时间的延长, 水质污染程度整体上呈现逐步恶化的趋势, 应加以控制; 三峡蓄水期间, 南河、东河营养程度相对较高, 应加强治理。

关键词: 三峡蓄水; 汉丰湖消落区; 水质; 营养状态; 时间变化

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-0928-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.03.023

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, WANG Yu-fei

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

Abstract: In order to explore the temporal variations of nutrient and biomass in drawdown area of Hanfeng Lake of the Three Gorges Reservoir region, this paper continuously observed the water quality in the storage period of 2013 October to 2014 February. And the concentrations of nutrients, water physical parameters and chlorophyll were determined. The results showed that the concentrations of nutrients and chlorophyll increased, and the nutrition degree increased after the flooding. The concentrations of TN, TP, permanganate index and Chl-a in water in February 2014 were 4.7 times, 1.0 time, 0.2 times and 3.27 times the amount in October 2013. It should be noticed that the concentrations of TN and TP were above the algae growth limit value, which would be easy to cause water eutrophication with prolonged residence time. The single-factor evaluation of Chl-a reflected that the water quality was changed from poor nutrient to eutrophic. The results of N/P showed that TN in Han Feng Lake was a factor limiting the growth of algae in different period. In October to December 2013 and February 2014, TN limited the growth of algae. In January 2014, TP limited the growth of algae. The Chl-a had a significant positive correlation to pH, DO, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, TN, permanganate index and TP, but significant negative correlations were observed with SD and TEMP. The water quality was influenced by the same source of pollution during the storage period. The result of factor analysis showed that the water quality in riparian zone of Hanfeng Lake was mainly affected by pH, DO, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, TN, while Chl-a, TP, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and aerobic organics pollution could not be ignored. The water had self-purification capacity in the early phase of the storage period, the eutrophication aggravated with the increase of retention time, and it should be controlled. During the storage period of the Three Gorges Reservoir, the nutrition levels of south river and east river were relatively high, and the management should be strengthened.

Key words: water storage in Three Gorges Reservoir; drawdown area of Hanfeng Lake; water quality; trophic state; temporal variation

消落带是指水库、河流、湖泊水位随时间呈季节性涨落, 处于淹没状态的土壤按水位周期性的变化出露于地表的現象。自 2009 年以来, 三峡库区冬季正常蓄水高程为 175 m, 位于 145~175 m 高程之间将有 30 m 的消落区处于淹水状态。农业生产中污染物质、库区居民生活垃圾及地表径流携带的营养物质在落干期间沉积于消落带土壤中^[1,2], 在淹

水状态下将向水中释放氮、磷以及有机污染物, 使水体呈现不同程度的营养状态^[3,4], 给库区生态环境带来严重的影响。

收稿日期: 2014-08-25; 修订日期: 2014-10-17

基金项目: 国务院三峡工程建设委员会办公室生态与环境系统重点支流水质监测项目(JJ2013-016)

作者简介: 黄祺(1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为城市水土保持, E-mail: hq13168017@163.com

* 通讯联系人, E-mail: hebingshui@swu.edu.cn

近年来,三峡消落区生态环境的治理已成为社会关注焦点,国内科研机构、高等院校在区域内开展了大量的研究工作^[3,5-9],但研究领域上多限于消落区土壤营养盐的吸附与释放,土壤重金属来源与分布以及藻类群落结构等方面,且多注重室内模拟实验,空间尺度上多关注较大支流;而在三峡蓄水期间,消落区水质营养状态变化特征研究甚少,针对蓄水高程 175 m 水质状况鲜见研究. 消落区环境复杂,受干扰的因素较多,在淹水期间水环境需深入探讨. 因此,本文以消落区局部水域开县汉丰湖作为研究对象,在三峡蓄水期间对该水域连续观测,揭示水质营养状态的演变规律,以期对三峡消落区生态环境的治理提供科学依据与参考.

1 材料与方法

三峡水库的运行,在开县境内会形成面积为 45.0 km² 的消落带,最大消落深度 21.52 m,为减少消落面积,在距县城 4.5 km 的乌杨桥修建了水位调节坝,形成了开县“南河、东河、澎溪河”交汇的汉丰湖(N 31°11'13",E 108°25'01")^[10],平均水底高程 160 m. 受三峡库区蓄水影响,汉丰湖消落区 10 月上旬至次年 3 月上旬处于淹没状态,淹水时间约为 150 d^[3].

根据 2013 年三峡水库蓄水的时间安排^[11],2013 年 10 月~2014 年 2 月,每月下旬进行水质取样. 在湖区(图 1)设置了石龙船大桥(C1)、东湖郡(C2)、东河大桥(C3)、湖心(C4)、调节坝(C5)共 5 个采样断面. 每个采样断面中心处取水,取水垂线的设置:按水深分别在 0.5 m、5 m~10 m、10 m~15 m、河床上 0.5 m~1 m(>15 m)处取水约 500 mL,取其总平均值代表该断面水质状况. 现场用美国哈希便携式多参数水质仪(型号:MINISONDE5X)测定水温(*T*)、pH、可溶解氧(DO)

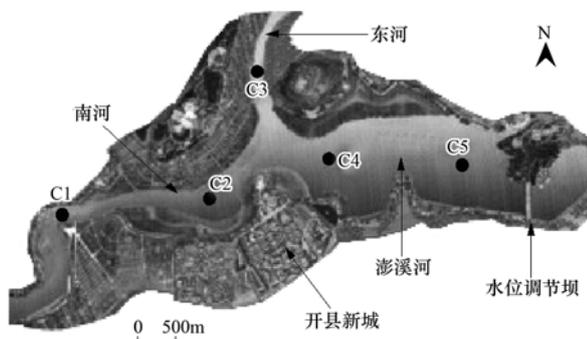


图 1 三峡蓄水期间汉丰湖采样断面分布示意

Fig. 1 Map of sampling point distributions in Hanfeng Lake during the storage period of Three Gorges Reservoir

等物理指标,透明度(SD)采用塞氏盘法;采集水样当日运回实验室,参照文献[12]对总氮(TN)、氨氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、总磷(TP)、高锰酸盐指数等测定;叶绿素(Chl-a)测定采用丙酮萃取分光光度法^[13].

数据处理采用 SPSS 13.0 与 Excel 2010 软件,分析方法采用方差分析、相关分析和因子分析. 在分析前,对三峡蓄水期间汉丰湖 5 个采样断面水质指标进行方差(LSD)分析发现,空间上差异不显著,时间上存在显著差异($P < 0.05$),故本文主要对水质营养状态时间变化特征进行研究.

2 结果与分析

2.1 物理参数时间变化

图 2 为各采样断面水质物理参数时间变化. 水温范围在 10.7~21.4℃,均值为 15.1℃,根据重庆市季节划分^[14],水温季节变化明显,表现为秋季向冬季逐月降低. 各断面 SD 范围在 47~317 cm,均值为 212.6 cm,主要受固体悬浮物和浮游植物的影响,调节坝、东湖郡、石龙船大桥断面 SD 值在 2013 年 11 月达到高峰,东河大桥与湖心断面在 2014 年 1 月达到高峰,各断面在次年 2 月均处于较低水平. 全湖比较,2014 年 2 月较 2013 年 10 月 SD 值减少了 1.9 倍. 各断面 DO 质量浓度范围在 2.47~11.1 mg·L⁻¹,均值为 5.99 mg·L⁻¹,按《国家地面水环境质量标准》(GB 3838-2002)评定,DO 质量浓度处于 I~IV 类地表水;各断面 DO 质量浓度逐月升高,与水温呈极显著负相关关系($R^2 = 0.899, P = 0.00$),在 2013 年 10 月处于低水平,调节坝断面质量浓度最低;随后于 2014 年 2 月达到高峰,石龙船大桥断面质量浓度最高;全湖比较,2014 年 2 月较 2013 年 10 月 DO 质量浓度增加了 2.55 倍. 各断面 pH 值范围在 7.89~9.36,均值为 8.46,pH 值处于 II~劣 V 类地表水,水质为中偏碱性水质;pH 值逐月升高,在 2013 年 10 月处于低水平,调节坝断面值最低;随后于 2014 年 2 月达到高峰,东河大桥断面值最高;全湖比较,2014 年 2 月较 2013 年 10 月 pH 值增加了 0.13 倍.

2.2 有机污染物质量浓度时间变化

各采样断面有机物质量浓度时间变化见图 3,高锰酸盐指数范围在 2.30~5.58 mg·L⁻¹,均值为 3.51 mg·L⁻¹,处在 II~III 类地表水之间. 高锰酸盐指数从 2013 年 10 月下降至 11 月,随后上升至次年 2 月并达到高峰,其中东湖郡(4.14 mg·L⁻¹)、东河

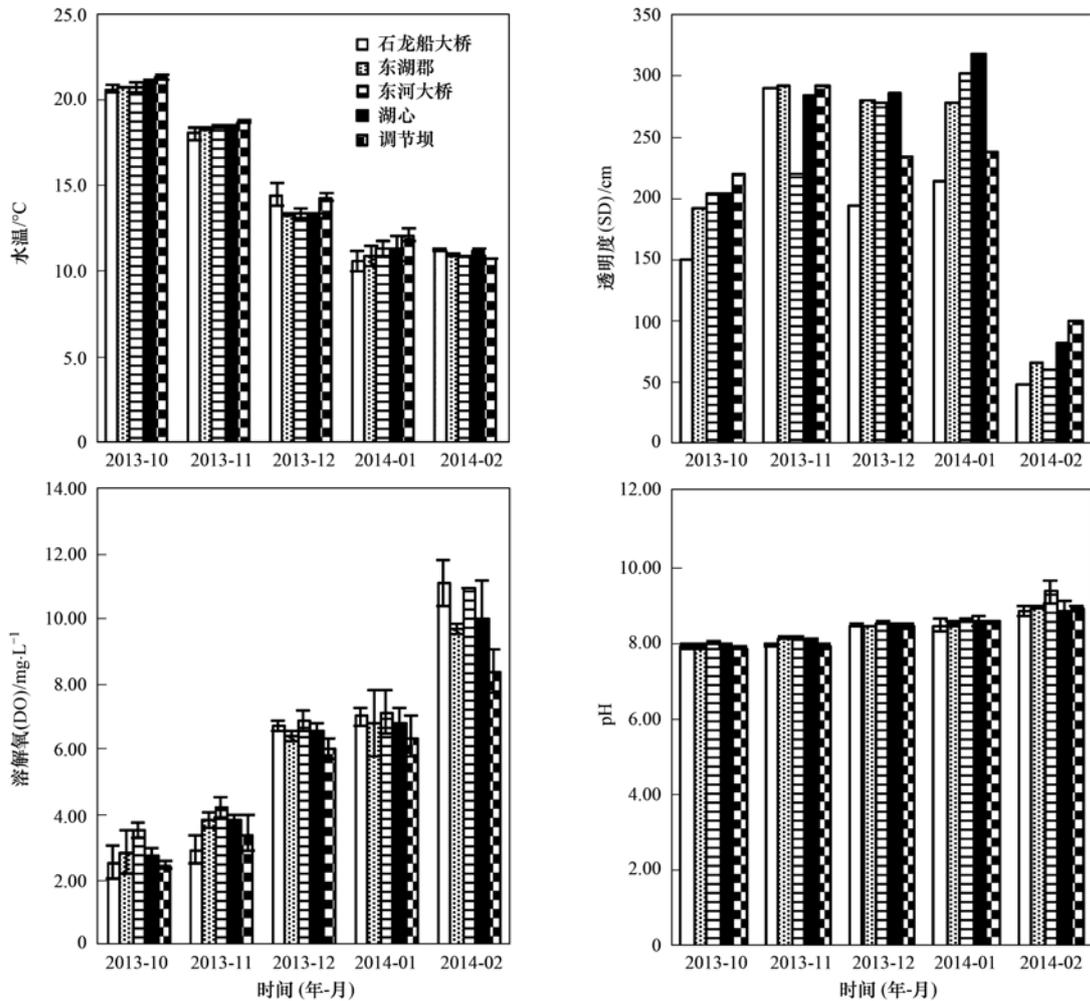


图2 三峡蓄水期间汉丰湖水水质物理参数时间变化

Fig. 2 Changes in physical parameters of water quality with time in Hanfeng Lake during the storage period of Three Gorges Reservoir

大桥($5.58 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、湖心($4.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、石龙船大桥($4.71 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)断面高锰酸盐指数处于有机污染状态^[15]；全湖比较,2014年2月较2013年10月高锰酸盐指数增长了0.2倍。

2.3 氮、磷营养盐质量浓度时间变化

各采样断面氮、磷营养盐质量浓度时间变化见图4。TN质量浓度范围在 $0.43 \sim 3.48 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 $1.56 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,处于II~劣V类地表水； $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度范围在 $0.03 \sim 0.64 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 $0.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,处于II~III类地表水； $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度范围在 $0.09 \sim 1.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 $0.72 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。汉丰湖 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (11%)与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (46%)质量浓度占TN的57%,说明以无机氮形式存在； $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的4倍,说明水体具有自净能力^[16]。随着时间的变化,各断面TN与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度逐月升高,在2014年2月达到高峰,断面最高值均在东湖郡；

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在2013年11月质量浓度较低,次年2月达到高峰,断面最高值在石龙船大桥；汉丰湖2014年2月较2013年10月TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度分别增长了4.7、1.4、6倍。各断面TP质量浓度范围在 $0.09 \sim 0.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 $0.16 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,处在III~劣V类地表水(湖库)；从2013年10月至12月,各断面TP质量浓度逐月升高,随后下降至2014年1月,于2月TP质量浓度达到高峰,断面东湖郡质量浓度最高；全湖比较,2014年2月较2013年10月TP质量浓度增加了1倍。

2.4 叶绿素质量浓度变化特征

各采样断面Chl-a质量浓度随时间变化见图5。Chl-a质量浓度范围在 $0.63 \sim 52.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 $8.99 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。从2013年10月至12月保持升高趋势,至2014年1月降低,随后于2014年2月达到高峰,其中东河大桥质量浓度最高。全湖比较,2014年2月较2013年10月Chl-a质量浓度增加了

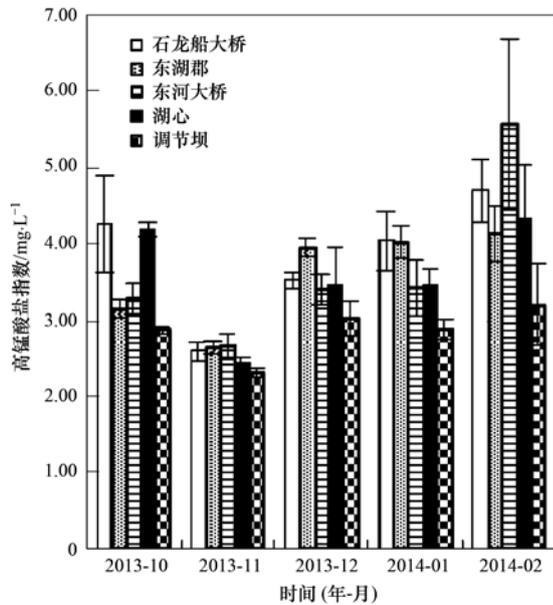


图3 三峡蓄水期间汉丰湖有机污染物质量浓度时间变化
Fig. 3 Change of organic contaminant concentration with time in Hanfeng Lake during the storage period of Three Gorges Reservoir

表1 三峡蓄水期间汉丰湖水环境因子相关关系¹⁾

Table 1 Correlation among environmental factors of water in Hanfeng Lake during the storage period of Three Gorges Reservoir

	Chl-a	水温	SD	pH	DO	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TN	TP	高锰酸盐指数
Chl-a	1									
水温	-0.519a	1								
SD	-0.653a	0.239	1							
pH	0.780a	-0.897a	-0.527a	1						
DO	0.775a	-0.899a	-0.566a	0.968a	1					
NH ₄ ⁺ -N	0.700a	-0.551a	-0.666a	0.655a	0.738a	1				
NO ₃ ⁻ -N	0.523a	-0.916a	-0.445b	0.843a	0.889a	0.654a	1			
TN	0.660a	-0.880a	0.588a	0.899a	0.934a	0.723a	0.961a	1		
TP	0.688a	-0.406b	-0.712a	0.561a	0.645a	0.567a	0.605a	0.668a	1	
高锰酸盐指数	0.716a	-0.456b	-0.664a	0.626a	0.645a	0.781a	0.517b	0.598a	0.535a	1

1) a 字母表示 $P < 0.01$, 相关性极显著; b 字母表示 $P < 0.05$, 相关性显著

P 元素会向上覆水释放; 水位抬高后, 淹没状态的岸边植被通过微生物的作用, 会向水中释放 N、P 元素, 且释放量随 pH 值的增加而提高^[17,18]; 河床底泥在淹水的浸泡下也有向水体释放 N、P 的可能^[5,7,19]; 同时, 受开县城区扰动, 大量的生活污水、生产污水排入湖内, 使营养物质在湖区累积; 经现场调查, 水位抬高后聚集了大量钓鱼者, 向水体中投放饲料, 使水体营养盐浓度得到提升; 且蓄水期处于枯水季节^[10], 地表径流量补给减少, 势必减弱水体自身的交换能力; 加上汉丰湖河床平坦、比降小, 受三峡蓄水的影响, 水体几乎处于静止状态^[3], 湖内累积的营养物质得不到排放, 致使水体 TN、TP 含量趋于升高. 高锰酸盐指数与 NH₄⁺-N 质量浓度在 2013 年 1 月降低可能与水体自净有关. 然而, 湖中

3.27 倍.

3 讨论

3.1 水环境因子关系

三峡蓄水期间, 汉丰湖水环境因子相关关系见表 1. Chl-a 与水温、SD、pH、DO、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TN、高锰酸盐指数、TP 相关性极显著, 其中与水温、SD 呈极显著负相关; 说明藻类的生长与 TP、TN、高锰酸盐指数质量浓度增加有关, 同时也受到 DO、pH 的影响; 藻类的繁殖引起 Chl-a 质量浓度增加, 导致了 SD 的下降. 高锰酸盐指数与营养盐之间呈显著正相关, 说明水质受到了同一污染源的影响. 张晟等^[15]对三峡水库支流回水区的研究中也得出相类似的结论.

3.2 营养盐变化状况

开县以农业为主, 汉丰湖消落区受人为干扰较重, 落干期间当地居民在消落带进行种植活动, 部分肥料被遗留在土壤中, 当这部分土壤被淹没后, N、

TP 质量浓度升高过程中, 在 2014 年 1 月发生了沉降; 由表 1 所示, TP 与水温、DO、pH 相关性均显著, 可能水温、DO、pH 通过影响水生生物与沉积物中微生物活动, 引起水体中 TP 质量浓度呈现升高与沉降交替出现现象^[6,20-26]. 在空间上, 南河与东河采样断面营养盐浓度处于较高水平, 说明南河受人为扰动相对剧烈, 东河次之, 湖心与调节坝受干扰较小, 营养化程度相对较弱.

3.3 TN、TP 与 Chl-a 变化状况

通常认为, 藻类生长的条件需满足 TN 质量浓度 $> 0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 质量浓度 $> 0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 且 N/P 在 8~30 之间^[9]. 经分析, 在三峡蓄水期间, 汉丰湖各断面水体 TN 与 TP 浓度已超过浮游植物生长的标准, 在 2013 年 12 月至 2014 年 2 月期间全湖

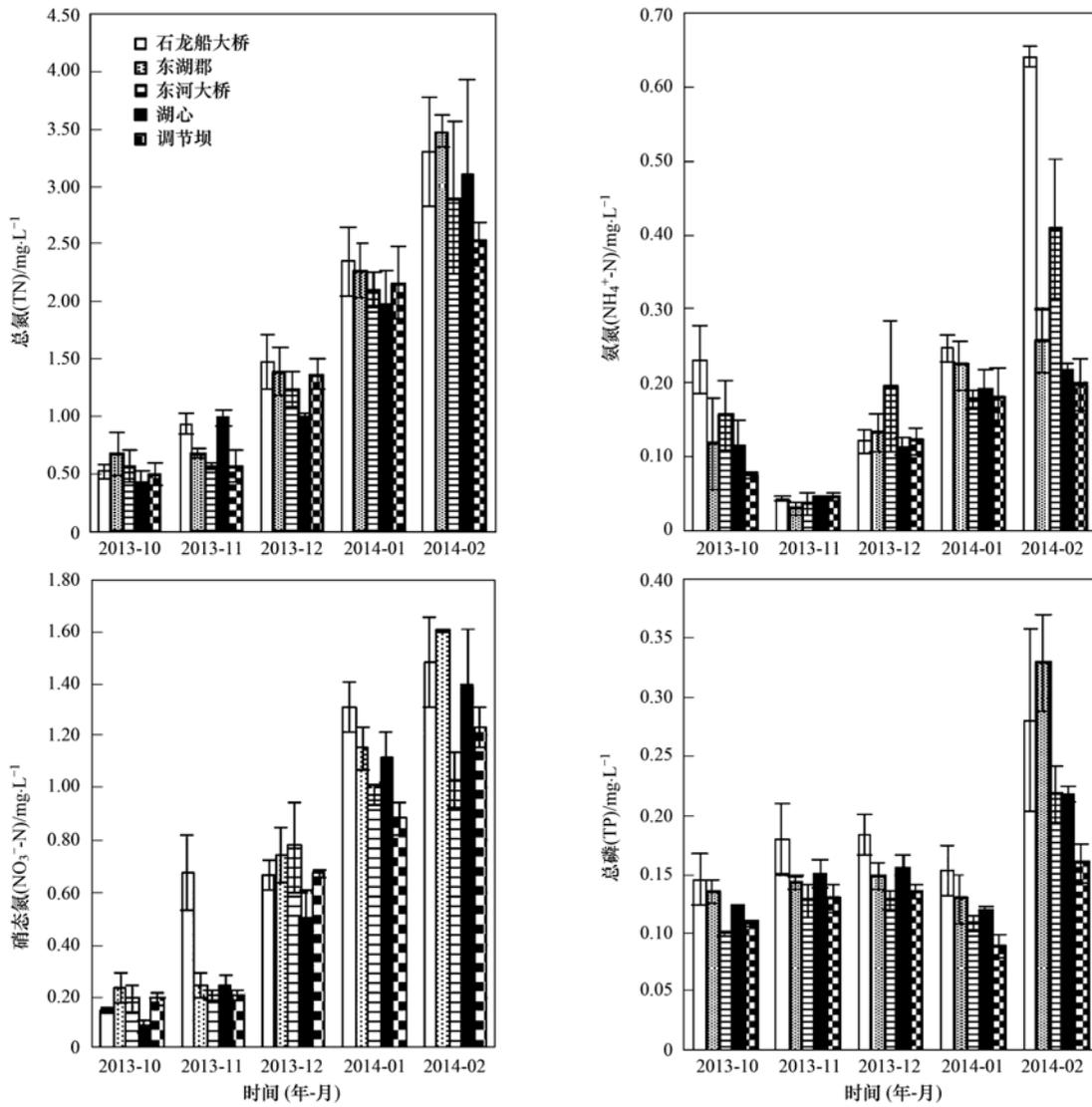


图 4 三峡蓄水期间汉丰湖水质氮、磷营养盐质量浓度时间变化

Fig. 4 Change in N and P concentrations with time in Hanfeng Lake during the storage period of Three Gorges Reservoir

TN/TP 总平均值范围在 9.09 ~ 18.55 之间,随时间推移基本呈现升高趋势;说明随滞留时间延长汉丰湖水体适合藻类的生长,当其他环境因子满足条件下,极易暴发水华,引起水体富营养化^[27,28]. 参照 Chl-a 单因子富营养化评价标准(当 Chl-a 质量浓度 > 78 mg·L⁻¹ 为重富营养, Chl-a 质量浓度在 11 ~ 78 mg·L⁻¹ 为富营养, Chl-a 质量浓度在 3 ~ 11 mg·L⁻¹ 为中营养, Chl-a 质量浓度 < 3 mg·L⁻¹ 为贫营养^[15]),蓄水期间汉丰湖营养状态由贫营养向富营养化演变. 通常认为,藻类生长生理平衡需 TN/TP 为 16:1,当 TN/TP > 16:1 时,TP 为限制藻类增长的因素;而 TN/TP < 16:1 时,限制藻类增长的因素为 TN^[9,29,30]. 表 2 所示,在 2013 年 10 月至 12 月,全湖 TN/TP 值低于 16,藻类生长受 TN 限制. 在 2014 年

1 月,全湖 TN/TP 值高于 16,藻类生长受 TP 限制;在 2014 年 2 月,TP 浓度迅速增加, TN/TP 均值为 13.13,藻类受限因子为 TN. 结合 TN、TP 同 Chl-a 均呈极显著正相关,说明 N、P 浓度的变化影响着藻类的繁殖;且 Chl-a 与 TP 的相关性较强,表明三峡

表 2 三峡蓄水期间汉丰湖氮磷浓度比

Table 2 Nitrogen/phosphorus ratio of Hanfeng Lake during the storage period of Three Gorges Reservoir

采样断面	采样时间				
	2013-10	2013-11	2013-12	2014-01	2014-02
调节坝	4.58	4.37	10.92	24.19	15.83
东湖郡	4.97	4.74	9.38	17.58	10.58
东河大桥	5.61	4.44	10.51	19.34	13.28
湖心	3.47	6.51	6.38	16.35	14.21
石龙船大桥	3.58	5.18	8.24	15.32	11.76
全湖平均值	4.44	5.05	9.09	18.55	13.13

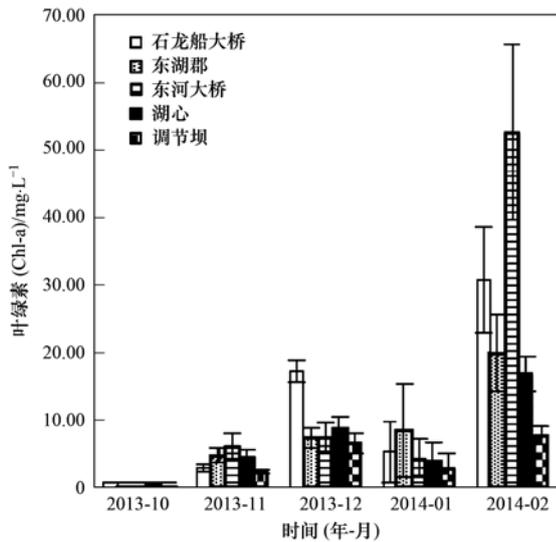


图 5 三峡蓄水期间汉丰湖水质 Chl-a 质量浓度时间变化
Fig. 5 Change in Chl-a concentration with time in Hanfeng Lake during the storage period of Three Gorges Reservoir

蓄水期间汉丰湖水体藻类的生长受 TP 影响强于 TN, 可加强对 TP 浓度的控制, 使藻类繁殖受限.

3.4 水质评价

以该期内汉丰湖水质为研究对象, 进行因子分析, 对水质营养程度进行综合评价, 挖掘出水质营养化的主导因子, 求出得分排名, 分析水质营养状态的变化规律. 在因子分析之前, 进行 KMO 与 Bartlett 检验, KMO 值结果为 0.817, Bartlett 球型检验结果 $P < 0.01$, 表明进行因子分析较优^[31], 各指标之间联系紧密. 按照特征根 ≥ 1 的原则, 在时间和空间上分别提出了两组因子 (表 3), S1 (45.26%)

表 3 三峡蓄水期间汉丰湖水质因子载荷¹⁾

Table 3 Factor loading of water quality in Hanfeng Lake during the storage period of Three Gorges Reservoir

指标	时间因子		空间因子	
	S1	S2	K1	K2
Chl-a	0.42	0.77*	0.43	0.77*
水温	-0.98**	-0.14	-0.98**	-0.14
SD	-0.13	-0.90**	-0.13	-0.90**
pH	0.85**	0.45	0.86**	0.45
DO	0.84**	0.51	0.86**	0.45
NH ₄ ⁺ -N	0.45	0.74*	0.44	0.75*
NO ₃ ⁻ -N	0.90**	0.32	0.89**	0.33
TN	0.85**	0.47	0.84**	0.48
TP	0.33	0.75*	0.31	0.76*
高锰酸盐指数	0.31	0.79*	0.33	0.78*
贡献率/%	45.26	39.46	45.43	38.95
累计贡献率/%	45.26	84.72	45.43	84.37

1) ** 与 * 分别表示较高与中等因子载荷量, 采用最大方差法对原始标准化数据进行旋转

与 S2 (39.46%) 累积贡献率达到了 84.72%; K1 (45.43%) 与 K2 (38.95%) 累积贡献率达 84.37%. S1 与 K1 中水温、pH、DO、NO₃⁻-N、TN 因子载荷较高, 其绝对值均 > 0.8 , 反映了水质含氮营养盐的程度; S2 与 K2 中 Chl-a、SD、NH₄⁺-N、高锰酸盐指数、TP 因子载荷较大, 说明水质受还原性物质、磷酸盐与藻类的影响. 从以上分析可以看出, 三峡蓄水期间引起汉丰湖水体富营养化主要是受 pH、DO、NO₃⁻-N、TN 的干扰, 而 Chl-a、NH₄⁺-N、TP 与高锰酸盐指数的影响次之.

因子得分越高, 说明水质受该类污染越大. 时间分析结果表明 (表 4), 2013 年 10 月至 2014 年 1 月期间 Y1 因子得分较高, 说明在该期内主要受 TN 的污染; 2014 年 2 月, Y2 因子得分较高, 说明受还原性物质和 Chl-a 与磷酸盐的污染. 根据综合得分排名结果, 水质营养化程度为 2014 年 2 月 $>$ 2014 年 1 月 $>$ 2013 年 12 月 $>$ 2014 年 10 月 $>$ 2014 年 11 月; 这说明 2013 年 11 月期间, 汉丰湖水体在进行自净, 但自净能力随滞留时间的延长减弱; 由于营养物质的累积与补充, 污染物得不到降解, 水环境适合藻类的生长, 导致营养化程度的加深.

表 4 三峡蓄水期间汉丰湖水质时间因子得分与综合排名

Table 4 Time factor of water quality score and ranking in Hanfeng Lake during the storage period of Three Gorges Reservoir

时间(年-月)	时间因子得分			排名
	Y1 得分	Y2 得分	综合得分	
2013-10	-2.20	-2.71	-2.07	4
2013-11	-1.84	-3.89	-2.37	5
2013-12	0.05	-0.55	-0.20	3
2014-01	0.90	-0.13	0.36	2
2014-02	3.09	7.28	4.27	1

空间分析结果表明 (表 5), 断面调节坝、湖心 K1 因子得分较高, 表明受 TN 的污染较严重; 东湖郡、东河大桥、石龙船大桥 K2 因子得分较高, 表明主要受还原性物质、Chl-a 与磷酸盐的污染; 根据综合得分排名结果, 断面营养化程度为石龙船大桥 $>$ 东河大桥 $>$ 东湖郡 $>$ 湖心 $>$ 调节坝.

表 5 三峡蓄水期间汉丰湖水质空间因子得分与综合排名

Table 5 Spatial factor of water quality score and ranking in Hanfeng Lake during the storage period of Three Gorges Reservoir

采样断面	空间因子得分			排名
	K1 得分	K2 得分	综合得分	
调节坝	-0.52	-1.71	-0.90	5
东湖郡	0.11	0.18	0.12	3
东河大桥	0.23	0.50	0.30	2
湖心	-0.14	-0.52	-0.27	4
石龙船大桥	0.32	1.56	0.75	1

4 结论

(1) 三峡蓄水期间, 汉丰湖水体中营养盐与(Chl-a)质量浓度时间差异性明显, 在淹水后有升高现象, TN、TP 质量浓度均超过藻类生长限值, 随滞留时间延长易造成水体富营养化, 应引起重视. Chl-a 单因子评价反映出汉丰湖水质由贫营养向富营养演变. TN/TP 在 4.44 ~ 18.55 之间, 2013 年 10 月至 12 月与 2014 年 2 月, 藻类生长受 TN 限制; 在 2014 年 1 月, 藻类生长受 TP 限制; TN、TP 分别在不同时间内制约着藻类的生长.

(2) Chl-a 与 pH、DO、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、TN、高锰酸盐指数及 TP 呈显著正相关, 而与 SD、水温呈显著负相关. 蓄水期间, 水质受到了同一污染源的影响.

(3) 因子分析结果表明, 三峡蓄水期间, 汉丰湖消落区水质受到 N、P 营养盐及好氧性有机物的污染; 根据营养状态时间综合评价结果: 2014 年 2 月 > 2014 年 1 月 > 2013 年 12 月 > 2013 年 10 月 > 2013 年 11 月, 在蓄水稳定初期水体具有自净能力, 随蓄水滞留时间的延长, 水质污染程度整体上呈现逐步恶化的趋势; 根据营养状态空间综合评价结果: 石龙船大桥 > 东河大桥 > 东湖郡 > 湖心 > 调节坝, 南河、东河污染较重, 应加强治理.

致谢: 感谢三峡工程建设委员会办公室对本项目的支持. 杨兵、王涛等在采样和实验方面提供帮助, 在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 谢德体, 范小华, 魏朝富. 三峡水库消落区对库区水土环境的影响研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2007, **29**(1): 39-47.
- [2] 韩勇. 三峡库区消落带污染特性及水环境影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007. 1-117.
- [3] 郭劲松, 谢丹, 李哲, 等. 三峡水库开县消落区水域冬季蓄水期间藻类群落结构与水质评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1129-1135.
- [4] 林玉海, 王楠, 赵秀兰, 等. 三峡库区澎溪河流域消落区土壤氮磷释放研究[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(2): 131-134.
- [5] 袁辉, 王里奥, 胡刚, 等. 三峡库区消落带受淹土壤氮和磷释放的模拟实验[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(1): 103-106.
- [6] 胡刚, 王里奥, 袁辉, 等. 三峡库区消落带下部区域土壤氮磷释放规律模拟实验研究[J]. 长江流域资源与环境, 2008, **17**(5): 780-784.
- [7] 胥焘, 王飞, 郭强, 等. 三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1502-1508.
- [8] 张成, 陈宏, 王定勇, 等. 三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1060-1067.
- [9] 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.
- [10] 秦明海, 高大水, 操家顺, 等. 三峡库区开县消落区水环境治理水位调节坝设计[J]. 人民长江, 2012, **43**(23): 75-77.
- [11] 交通运输部长江航务管理局. 三峡通航信息关于三峡工程 2013 年试验性蓄水实施计划安排的通告[EB/OL]. http://www.cjhy.gov.cn/zhengwufuwu/chuxingfuwu/sxthxx/201309/t20130909_239615.html.
- [12] 魏复盛. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境出版社, 2002.
- [13] 翁笑艳, 林美爱, 严颖. 地表水浮游植物叶绿素 a 测定方法比较研究[J]. 中国环境监测, 2009, **25**(3): 36-38, 76.
- [14] 重庆市气象网. 重庆市气候与气象灾害[EB/OL]. 2007. <http://www.121.cq.cn/service/cqweather.htm>.
- [15] 张晟, 李崇明, 郑坚, 等. 三峡水库支流回水区营养状态季节变化[J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 64-69.
- [16] 郑丙辉, 曹承进, 秦延文, 等. 三峡水库主要入库河流氮营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 1-6.
- [17] 杜立刚. 三峡库区消落带植被淹水碳氮磷释放及消落带氮磷交换通量研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013. 1-81.
- [18] 王建超, 朱波, 汪涛, 等. 三峡库区典型消落带草本植物氮磷养分浸泡释放实验[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1144-1151.
- [19] 储昭升, 张玉宝, 金相灿, 等. 底泥对洋河水库微囊藻和鱼腥藻生长影响的研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(3): 844-848.
- [20] Jiang X, Jin X C, Yao Y, *et al.* Effects of biological activity, light, temperature and oxygen on phosphorus release processes at the sediment and water interface of Taihu Lake, China [J]. Water Research, 2008, **42**(8-9): 2251-2259.
- [21] Wang S R, Jin X C, Zhao H C, *et al.* Phosphorus release characteristics of different trophic lake sediments under simulative disturbing conditions [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **161**(2-3): 1551-1559.
- [22] 孙文彬, 杜斌, 赵秀兰, 等. 三峡库区澎溪河底泥及消落区土壤磷的形态及吸附特性研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 1107-1113.
- [23] 张雷, 秦延文, 贾静, 等. 三峡入库河流澎溪河回水区消落带与岸边土壤磷形态及其分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(9): 1999-2007.
- [24] 尹军, 王建辉, 王雪峰, 等. 污水生物除磷若干影响因素分析[J]. 环境工程学报, 2007, **1**(4): 6-11.
- [25] 李楠, 王秀衡, 亢涵, 等. pH 对低温除磷微生物种群与聚磷菌代谢的影响[J]. 环境科学与技术, 2013, **36**(3): 9-11, 19.
- [26] 何晓祺. 丹江口水库淹没区淅川段土壤氮磷分布及释放影响因素研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2010. 1-66.
- [27] 李如忠, 刘科峰, 钱靖, 等. 合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1718-

- 1726.
- [28] 彭近新, 陈慧君. 水质富营养化与防治[M]. 北京: 中国环境出版社, 1988. 15-47.
- [29] Justic D, Rabalais N N, Turner R E, *et al.* Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters; stoichiometric nutrient balance and its consequences[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1995, **40**(3): 339-336.
- [30] Klausmeier C A, Litchman E, Daufresne T, *et al.* Optimal nitrogen-to-phosphorus stoichiometry of phytoplankton [J]. *Nature*, 2004, **429**(6988): 171-174.
- [31] 姜永明, 吴明, 陈旭, 等. 基于因子分析法的管道外腐蚀因素分析与评价[J]. *油气储运*, 2010, **29**(8): 605-608.
-

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjkx.ac.cn>). 该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能, 欢迎广大作者、读者和审稿专家使用. 目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行. 作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面上给出的提示投稿即可. 如果您在使用过程中有问题, 请及时与我刊编辑部联系.

邮政地址: 北京市海淀区双清路 18 号《环境科学》编辑部

邮 编: 100085

电 话: 010-62941102, 010-62849343

传 真: 010-62849343

E-mail: hjkx@rcees.ac.cn

网 址: www.hjkx.ac.cn

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, <i>et al.</i>	(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, <i>et al.</i>	(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 Beijing 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