

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律	刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)
太原冬季 PM _{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征	杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪博, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)
盘锦市冬季 PM _{2.5} 水溶性离子特征及来源分析	张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)
广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析	古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)
热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋基烯的排放特征	金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)
天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用	蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬乐 (2548)
亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较	朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)
京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估	卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)
北京北运河河流生态系统健康评价	顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)
长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析	董磊, 汤显强, 林莉, 郇超, 黎睿, 吴敏 (2588)
福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征	张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张炯 (2600)
三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价	方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)
三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征	潘婊娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)
基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源	孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)
天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响	孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧赞 (2632)
重庆雪玉洞滴水水文地球化学时空变化特征及其环境意义	曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)
岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例	刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九雄, 王正雄, 段世辉 (2651)
托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义	李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲桂, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)
五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响	彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)
西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例	张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)
四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子	郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑忠明, 朱津永 (2688)
营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验	王梦梦, 张伟, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)
植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响	刘森, 陈开宁 (2706)
江汉平原水稻季灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险	华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪媛 (2715)
冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除	柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)
臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制	董秉直, 高昊旸, 胡孟柳 (2732)
中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性	于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)
海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能	曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)
玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性	龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)
硝化细菌的培养及包埋固定化中试	杨宏, 胡银龙 (2763)
不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能	安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)
高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律	詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)
污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化	李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)
丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响	高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)
同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析	孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)
四环素对人工粪堆好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响	时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)
长期定位有机物还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响	袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)
菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)
¹³ C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入	孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)
西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响	杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)
江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布	吕建树, 何华春 (2853)
黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布	于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)
典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价: 以临安市为例	郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林于也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)
西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价	周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)
典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及其风险评价	张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)
生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响	黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)
厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响	王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)
矿业活动影响稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险	田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)
硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响	刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)
吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征	李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)
喷施锌肥对油菜镉锌生物可给性的影响	王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)
贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征	许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)
废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险	付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)
县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态	孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)
颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响	严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)
防晒剂的海洋环境行为与生物毒性	朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)
《环境科学》征订启事 (2527) 《环境科学》征稿简则 (2723) 信息 (2826, 2852, 2910)	

三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征

潘婵娟^{1,2,3}, 黎睿^{2,3}, 汤显强^{2,3,4*}, 夏振尧^{1,4}, 李青云^{2,3}, 杨文俊^{2,3,4}, 许文年^{1,4}

(1. 三峡大学土木与建筑学院, 宜昌 443002; 2. 长江科学院流域水环境研究所, 武汉 430010; 3. 长江科学院流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室, 武汉 430010; 4. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 宜昌 443002)

摘要: 为研究三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物总磷(TP)及各形态磷的分布状况, 2010 年 10 月采集了乌江、茅坪等 13 个断面表层沉积物样品, 分析了有机质、矿物成分、粒径等理化参数, 测定了沉积物总磷、可交换态磷(Ex-P)、铝结合态磷(Al-P)、铁结合态磷(Fe-P)、闭蓄态磷(Oc-P)和钙结合态磷(Ca-P)的含量, 探讨了磷形态赋存与沉积物理化性质间的相关性, 评估了蓄水对沉积物磷的蓄积及生物可利用性的影响。结果表明, 三峡水库干流沉积物有机质含量为 7.79 ~ 55.63 g·kg⁻¹, 主要矿物成分为绿泥石、伊利石和石英。沉积物的主要组成为黏土质粉砂, 中值粒径(d_{50})范围为 3.84 ~ 23.65 μm。沉积物总磷含量为 557.06 ~ 837.92 mg·kg⁻¹, 各采样点总磷富集指数均大于 1, 存在潜在的磷污染风险。沉积物磷形态以 Ca-P 和 Oc-P 为主, Ex-P、Fe-P 和 Al-P 含量相对较低, 生物可利用性磷仅占总磷含量的 2% ~ 8%。与历史资料相比, 蓄水后三峡水库沉积物的粒径有细化变小的趋势, 易风化物组分含量略有增加, 蓄水水位的增加并未导致沉积物总磷含量出现明显升高趋势。未来, 随着三峡水库来沙进一步减少和泥沙颗粒的逐渐细化, 磷在三峡水库部分宽谷河段沉积物有可能逐步蓄积; 蓄水运行过程引起的大面积消落带干湿交替以及近坝段浮泥再悬浮都将影响沉积物中磷的生物可利用性水平。

关键词: 三峡水库; 沉积物; 磷形态; 有机质; 粒径

中图分类号: X703.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2615-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201708175

Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m

PAN Chan-juan^{1,2,3}, LI Rui^{2,3}, TANG Xian-qiang^{2,3,4*}, XIA Zhen-yao^{1,4}, LI Qing-yun^{2,3}, YANG Wen-jun^{2,3,4}, XU Wen-nian^{1,4}

(1. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Basin Water Environmental Research Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 3. Key Laboratory of Basin Water Resource and Eco-environmental Science in Hubei Province, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 4. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, Yichang 443002, China)

Abstract: In order to understand the characteristics of the distribution of sediment total phosphorus (TP) and phosphorus fractions in the mainstream sediments in the Three Gorges Reservoir (TGR) after impounding the water level to 175 m, 13 surface sediment samples were collected from the Wujiang to Maoping sections in October 2010. The physico-chemical properties, including organic matter content, particle grain size distribution, and major mineral analysis, as well as total phosphorus and its fractions in the sediment, were determined. Moreover, the relationships among phosphorus fractions, organic matter contents, and particle grain size were discussed, and the effect of the impoundment on sediment phosphorus accumulation and bioavailability was also evaluated. Results indicated that the sediment organic matter content of the TGR was between 7.79 g·kg⁻¹ and 55.63 g·kg⁻¹, and the main mineral components were chlorite, illite, and quartz. The sediments were dominated with clayey silt with a median diameter (d_{50}) ranging from 3.84 μm to 23.65 μm. The measured total phosphorus content of the sediments were between 557.06 g·kg⁻¹ and 837.92 g·kg⁻¹, and the total phosphorus enrichment index of each sampling site is greater than 1, demonstrating a potential risk for phosphorus pollution. The calcium bound phosphorus (Ca-P) and the reductant soluble phosphorus (Oc-P) were the dominant sediment phosphorus fractions, while the exchangeable phosphorus (Ex-P), the iron bound phosphorus (Fe-P), and aluminum bound phosphorus (Al-P) content were relatively low. Bioavailable P only accounts for 2%-8% of the total phosphorus content. When referring to previous studies, the sediment particle size tended to be smaller and the content of comparatively easy-to-weather minerals

收稿日期: 2017-08-21; 修订日期: 2017-12-12

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CKSF2017047/SH); 国家自然科学基金项目(51379017)

作者简介: 潘婵娟(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为沉积物磷生物地球化学循环, E-mail: 576975038@qq.com

* 通信作者, E-mail: ckyshj@126.com

slightly increased with the increase of the impoundment water level. However, the increase in the impoundment water level did not result in a significant increase tendency in sediment TP content. In the future, a reduction in sediment input and a decline in sediment particle size may facilitate the accumulation of phosphorus in the sediments in the broad valley section of the TGR. Moreover, large scale dry-wet alternation in the water level fluctuation zone and resuspension of floating mud near the dam both potentially impact the bioavailability of phosphorus in the sediments.

Key words: Three Gorges Reservoir; sediment; phosphorus fractions; organic matter; grain size

三峡水库是集航运、蓄水、发电为一体的大型深水水库,三峡水库建设运行给国家带来巨大经济效益的同时,也难免对库区生态环境造成一定影响,大坝的截留作用使长江干流水流变缓,污染物随着泥沙沉积在水库中富集,造成部分回水区出现污染带^[1].自2003年蓄水以来,三峡水库部分支流回水区每年均暴发了不同程度的水华^[2],严重损害了水生态系统健康.

磷是湖库水体富营养化的主要限制性生源元素,沉积物是水体磷素的重要释放源头,当水体环境受到扰动时,沉积物蓄积的磷将再次释放入水体^[3].赋存形态是影响沉积物磷的生物可利用性和磷在泥-水界面交换的重要因素,沉积物中只有部分形态的磷能释放至上覆水^[4,5].当外源磷负荷得到有效控制的情况下,研究沉积物磷的赋存形态对水体富营养化的防控具有重要价值^[6].

三峡水库自蓄水后,磷的运移、转化、释放、沉积等相关问题研究十分活跃.已有研究表明,三峡水库部分沉积物中的磷有向上覆水释放的风险^[7,8].在“蓄清排浑”调度模式下,三峡水库消落带土壤呈现了季节性磷的“源”“汇”转化趋势,消落带沉积物有机磷和铁铝结合态磷是主要的磷释放源^[9];Luo等^[10]和黄俊杰等^[11]还分别对香溪河、澎溪河等水库支流沉积物与土壤的磷赋存进行了调查评估.上述工作对揭示三峡水库沉积物磷的赋存与迁移转化规律具有重要意义,但研究对象多限于消落带或支流沉积物,较少关注干流沉积物自身理化特性与磷的形态赋存状况.

为查明三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物各形态磷分布特征,探讨蓄水对沉积物磷赋存的影响,在三峡水库典型干流设置了13个断面,测定各采样点表层沉积物的基本理化性质参数,总磷及各形态磷含量,探讨蓄水对沉积物理化特性及磷赋存的影响,以期为三峡水库内源磷污染防治提供科学参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

三峡水库位于长江流域上游下段,水域面积

1 864 km².三峡水库1994年正式开工,2003年6月首次蓄水至135 m,2006年5月成功蓄至155 m水位,2008年9月开始首次175 m试验性蓄水,2009年9月第二次启动175 m试验性蓄水,2010年9月三峡工程第三次启动175 m试验性蓄水,至2010年10月三峡水库首次达到175 m正常蓄水位.在不同水位的蓄水条件下形成了不同的回水末端,按照135 m方案调度运行,回水末端位于涪陵,按照155 m方式调度运行,回水末端上延至铜锣峡,按照175 m方案运行,回水末端上延至江津,常以长寿(距坝约535 km)为界,以上至江津称为变动回水区,以下至大坝称为常年回水区.

1.2 样品采集及样品处理

根据三峡水库泥沙淤积特征,参考长江水利委员会水文及泥沙监测断面布置情况,于2010年10月15日至11月25日三峡水库蓄水至175 m期间在常年回水区设置13个采样断面,分别为:乌江(WJ)、汝溪河河口(RX)、小江河口(XJ)、磨刀溪河口(MD)、梅溪河河口(MX)、巫山(WS)、大宁河口(DN)、巴东(BD)、神农溪河口(SN)、青干河河口(QG)、香溪河河口(XX)、龙马溪河口(LM)、茅坪(MP),采样点位见图1.

采用彼得森采泥器采集各断面表层(0~10 cm)沉积物样品,每个采样点均进行3次重复采样.

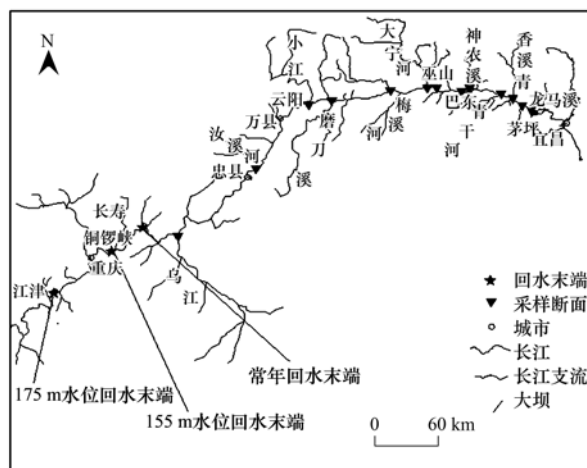


图1 采样点示意

Fig. 1 Map of sampling sites

将采集的新鲜沉积物样混合均匀后,分两份装入密封袋,暂存于温度为 4℃ 的冰箱中,于 5 天内将样品运回实验室.沉积物样品一部分用于颗粒级配分析,另一部分用于测定沉积物的有机质、粒径、矿物质、总磷及各形态磷含量等参数,每个样品分别测试 3 次,试验相对误差 <5%,结果以其算数平均值表示.

1.3 分析方法

采用激光粒度仪(英国 Malvern 3000)^[12,13]分析沉积物颗粒级配.有机质含量采用烧失量法测定^[14].矿物成分用 X 线衍射仪(德国 Bruker D8 Advance)分析^[15].沉积物总磷(TP)含量采用 SMT 法测定.各形态磷含量采用连续分级提取法测定^[16].

1.4 数据收集与处理

三峡水库干流沉积物不同蓄水时期沉积物磷含

量数据源于文献[17~26].三峡水库泥沙粒径数据及泥沙淤积数据源于文献[27].采用 SPSS 19.0 双尾 Pearson 检验对指标间的相关性进行分析,采用 Origin 进行绘图.

2 结果与讨论

2.1 三峡水库沉积物理化性质

三峡水库干流沉积物有机质含量范围为 7.79~55.63 g·kg⁻¹,平均值为 39.95 g·kg⁻¹(表 1).有机质含量总体表现为汝溪河口、磨刀溪河含量较高,乌江有机质含量相对较低.乌江流域矿产资源丰富^[28],矿山开采导致地表覆盖有枯枝落叶、有机质含量较高的表层土壤剥离,而逐渐裸露出有机质含量较低的素土或矿物成分,这可能是乌江有机质含量低的原因.

表 1 干流沉积物理化性质

Table 1 Physico-chemical characteristics of the mainstream sediment								
样品	有机质 /g·kg ⁻¹	d ₁₀ /μm	d ₅₀ /μm	d ₉₀ /μm	矿物成分/%			
					绿泥石	伊利石	石英	其它 ¹⁾
WJ	7.79	2.11	17.19	62.02	23	10	32	33
RX	52.22	1.34	7.20	26.76	30	25	24	21
XJ	40.50	1.03	4.96	18.20	27	25	23	25
MD	55.63	0.91	4.96	18.59	29	27	24	20
MX	43.52	0.88	3.84	13.37	33	27	23	15
WS	25.41	2.15	23.65	123.03	27	10	38	25
DN	35.97	1.09	4.68	24.85	26	25	23	26
BD	40.24	0.78	4.70	25.04	27	25	24	22
SN	42.73	1.05	5.52	19.06	30	25	23	20
QG	46.21	0.86	4.33	16.55	29	27	22	20
XX	38.91	1.32	5.20	18.98	32	29	22	17
LM	46.42	1.12	5.99	20.20	28	23	22	25
MP	43.74	0.99	5.34	25.40	27	22	23	26

1)其它组分为长石、方解石、白云石闪石和黄铁矿

三峡水库干流沉积物主要由绿泥石、伊利石、石英、长石、方解石和白云石等矿物组成,部分沉积物中含有少量的闪石和黄铁矿(表 1).其中绿泥石占 28%、石英占 25%、伊利石占 23%,其它组分占 24%.乌江和巫山采样点石英和长石含量明显较高.这可能是由于库区内不同小流域水土流失差异导致的.有研究表明,三峡蓄水初期石英含量占比达 61.4%~72.4%,蓄水后绿泥石和伊利石含量大幅度上升^[29],伴随着沉积物粒径的减小,沉积物中易风化矿物相对含量有增加趋势.

三峡水库干流沉积物粒径值(表 1),d₁₀ 范围在 0.78~2.15 μm 之间,平均为 1.20 μm;d₅₀ 范围在 3.84~23.65 μm 之间,平均为 7.50 μm;d₉₀ 范围在 13.37~123.03 μm 之间,平均为 31.70 μm.三峡

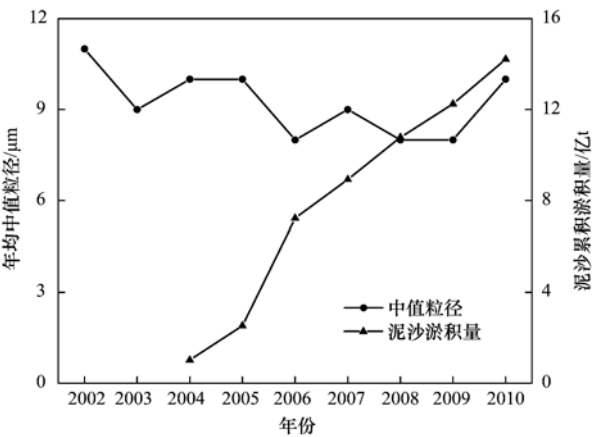
水库干流沉积物主要为黏土质粉砂,其中粉砂(4~63 μm)占 59.68%,黏土(<4 μm)占 33.22%,砂(>63 μm)占 1.12%.与其矿物组成特征类似,巫山和乌江的 d₅₀和 d₉₀值远高于其他采样点,且这两个采样点石英含量也显著高于其他采样点,沉积物中石英含量与 d₅₀呈显著正相关关系(表 2),这表明沉积物颗粒粒径和矿物组成可能受同一因素控制.

三峡水库朱陀断面泥沙平均中值粒径多年平均值蓄水前(1987~2002 年)为 11 μm,蓄水后(2003~2010 年)降低至 9 μm^[27].自 2003 年蓄水后寸滩断面泥沙年平均中值粒径整体呈降低态势(图 2),这表明蓄水后三峡水库干流沉积物有细化趋势.河床沉积物的颗粒大小与河流水动力相适应,水动力越强,沉积物越粗,反之沉积物越细.三峡水库蓄

表 2 沉积物各形态磷含量与有机质, 粒径和矿物成分间的相关性分析¹⁾

	Al-P	Oc-P	TP	Bio-P	d50	伊利石	石英	长石	有机质
Ex-P	0.707 **	0.722 **	0.722 **	0.797 **	-0.624 *	0.475	-0.665 *	-0.401	0.462
Al-P		0.885 **	0.562 *	0.990 **	-0.720 **	0.672 *	-0.717 **	-0.578 *	0.689 **
Oc-P			0.677 *	0.882 **	-0.451	0.328	-0.462	-0.226	0.51
TP				0.617 *	-0.187	0.064	-0.211	0.074	0.153
Bio-P					-0.753 **	0.683 *	-0.758 **	-0.590 *	0.686 **
d50						-0.938 **	0.983 **	0.941 **	-0.733 **
伊利石							-0.917 **	-0.954 **	0.815 **
石英								0.934 **	0.712 **
长石									-0.700 **

1) ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$, $n = 13$



数据源于文献[27]

图 2 寸滩断面泥沙年均中值粒径及三峡水库泥沙淤积量

Fig. 2 Annual median sediment grain size at Cuntan and sediment accumulation in the TGR

水使得干流水体流速减缓, 水体携砂能力降低, 是库区沉积物颗粒变细的因素之一。

2.2 三峡水库沉积物总磷时空变化特征

三峡水库干流沉积物总磷含量范围为 $557.06 \sim 837.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均为 $744.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 3), 其中位于三峡水库中游的巴东和下游的茅坪、龙马溪河口含量相对较高。大宁河口, 长江巫山和神农溪河口含量较低。流域人类活动对沉积物总磷含量影响较为显著, 神农溪与巴东采样点较近却显现出总磷含量较大。这主要是由于三峡水库蓄水后, 人口聚集导致巴东县城附近污染排放居高不下, 水库沉积物因此受到局部污染, 而位于左岸的神农溪则相对较为清洁。据《2010 年恩施州统计年鉴》及巴东县环境保护局网站信息, 巴东县长江干流共有 16 个排污口, 工业废水排放总量 143.50 万 t, 排放达标率仅为 49.5%, 污水排放对长江干流沉积物造成一定程度的污染。

以三峡库区土壤元素均值^[30]为背景值 (507.62

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 采用单因子指数法^[31, 32]对沉积物中的总磷污染程度进行评价。结果表明, 三峡库区各采样点富集指数均大于 1, 三峡水库干流沉积物中总磷存在一定的污染风险。

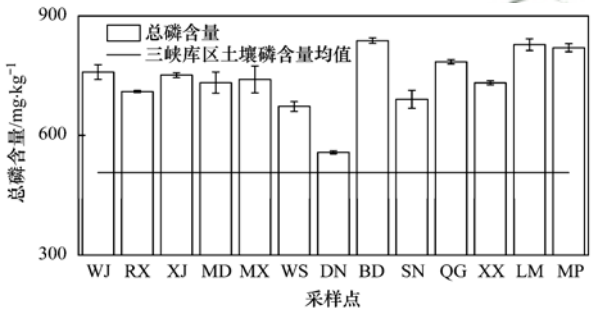
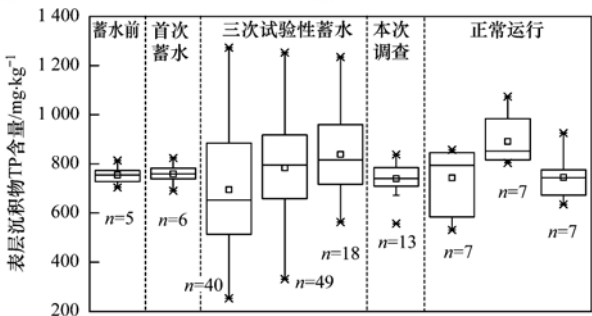


图 3 沉积物总磷含量沿程分布

Fig. 3 Spatial distribution of sediment TP



箱式图上边界代表最大值, 下边界代表最小值, 箱内实线代表中位值; * 则表示数据的 1% 和 99% 分位数, 箱内正方形代表平均值

图 4 不同蓄水时期沉积物总磷含量对比

Fig. 4 Comparison of mainstream sediment TP contents

图 4 为三峡水库干流不同蓄水时期总磷含量的变化情况。从中可以看出, 三峡水库蓄水前至 155 m 蓄水期间总磷含量有着略微的上升趋势。155 m 蓄水至 175 m 蓄水的蓄水过程总磷含量略有下降, 而在 175 m 三次试验性蓄水过程中总磷含量呈缓慢上升趋势。到 2010 年 10 月略有下降, 之后缓慢上

升又下降. 这表明三峡水库蓄水后沉积物总磷含量变化较为复杂, 在“蓄清排浑”的运行模式下, 三峡库区沉积物总磷未出现明显的随蓄水而进一步富集的现象, 这同卓海华等^[17]研究结果一致.

2.3 三峡水库干流沉积物各形态磷分布特征

三峡水库干流沉积物各形态磷含量如图 5 所示, 沉积物 Ex-P 含量范围为 2.64 ~ 12.78 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 8.44 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Al-P 含量范围为 15.22 ~ 52.23 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 35.17 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Fe-P 含量范围为 0.12 ~ 2.17 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 0.69 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Oc-P 含量范围为 227.19 ~ 387.35 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 292.14 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Ca-P 含量范围为 332.83 ~ 592.76 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 479.03 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

沉积物中的 Fe-P、Al-P 和 Ex-P 含量相对较低. Fe-P、Al-P 和 Ex-P 含量一般与流域人类活动, 尤其是与工业及生活污水等的排放情况密切相关^[33]. 流域经济发展水平和开发强度较低可能是三峡水库干流沉积物中 Fe-P、Al-P 和 Ex-P 含量相对较低的原因之一. 在所有形态中 Oc-P 和 Ca-P 含量相对较高, 是三峡水库干流沉积物中磷的主要存在形态. Oc-P 特指紧密包裹在铁、铝等矿物质颗粒中的磷, 属于难被生物利用的磷. Ca-P 是土壤原生颗粒中的磷灰石磷, 这类磷化合物一般难溶于水, 但在酸性条件下会有微弱的释放. 三峡库区是我国酸雨频度较高、酸雨程度极为严重的区域之一^[34], 同时流域内蕴藏着丰富的磷矿资源, 磷矿渣中磷的释放也将影响沉积物中磷的赋存^[35]. 沉积物中 Ca-P 与流域

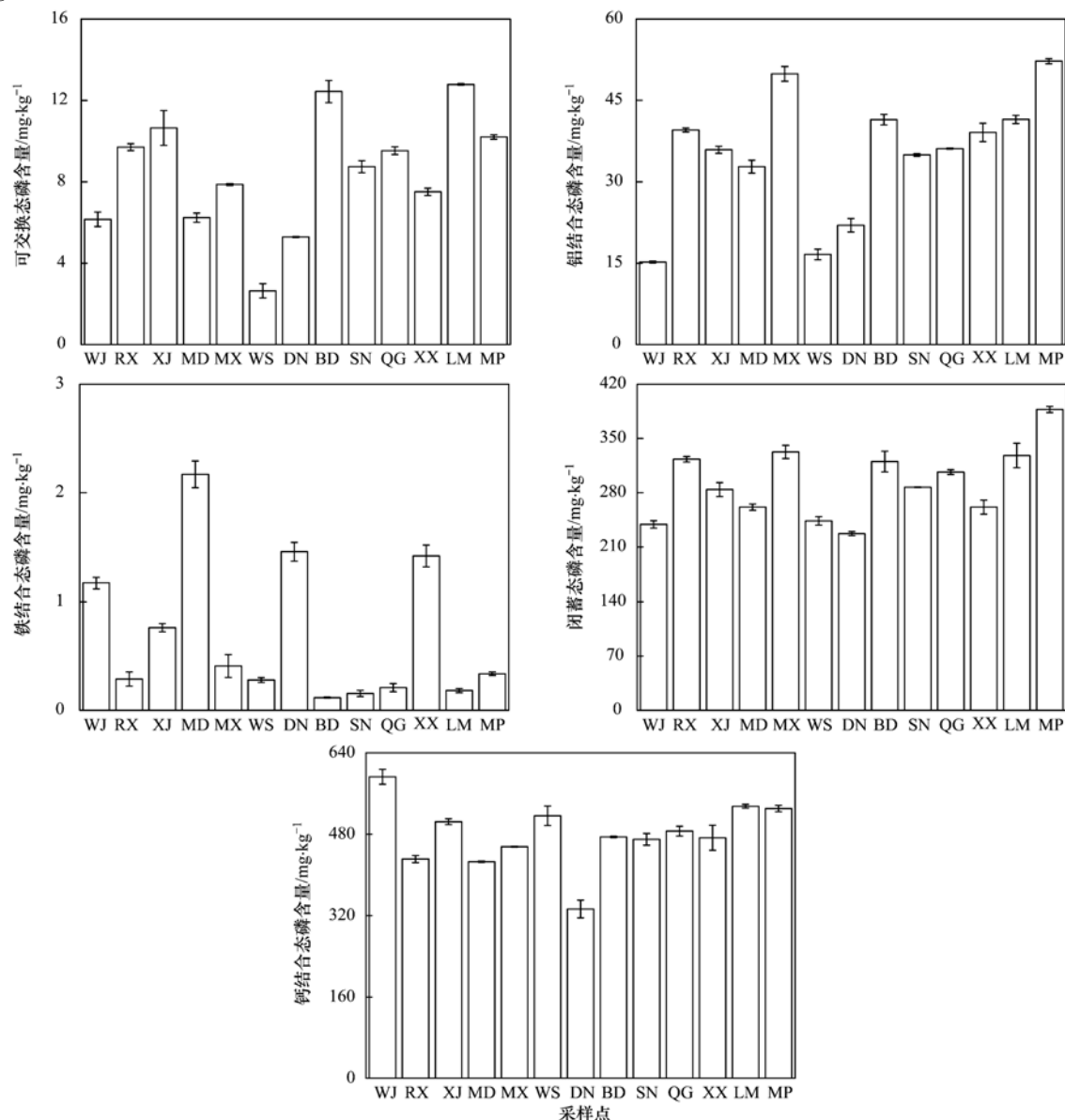


图 5 沉积物不同形态磷含量

Fig. 5 Different P fractions in the sediments

地球化学特征及水土流失状况密切相关^[33], 三峡库区流域内特殊的风化侵蚀条件是三峡水库沉积物中 Ca-P 含量较高的主要原因. 从图 5 可以看出乌江的 Ca-P 含量最高, 这与乌江矿物风化作用有较强烈的联系, 乌江流域属岩溶地貌, 流域矿产资源开发强度较高, 水土流失较为严重因而沉积物中 Ca-P 含量相对较高.

沉积物中磷与不同形态的金属元素及有机质相互作用, 被分化成活性不同的组分, 其中 Al-P、Fe-P 有较强的移动能力, 能够被藻类等生物直接利用, 是内源磷负荷的重要来源^[36]. 通常将 Fe-P、Al-P 和 Ex-P 生物总和为称作生物可利用磷 (Bio-P), 来表征沉积物中能够被生物所利用的磷^[37]. 三峡水库干流沉积物中 Bio-P 约占总磷含量的 2%~8%, 略高于蓄水前 Bio-P 的比例 (<6%)^[38], 而低于支流香溪河上游未受蓄水影响的古夫河^[39] (图 6). Bio-P 的相对含量反映了沉积物中磷污染的程度, 与遭受一定程度污染的十五里河^[37]、图们江^[40]沉积物相比, 三峡水库干流沉积物中 Bio-P 含量相对较低, 沉积物中能够参与上覆水磷循环并影响水体营养状态的能力较弱, 但随着三峡水库的运行, 沉积物中 Bio-P 的比例存在进一步增加的风险.

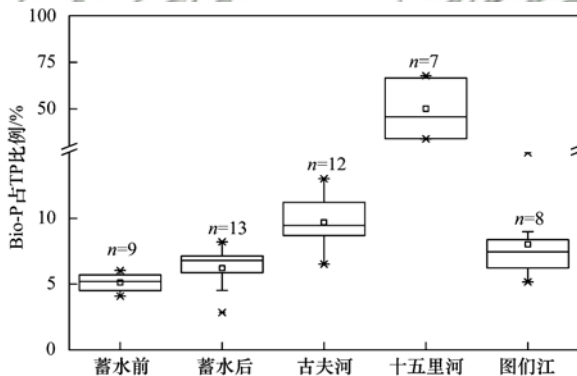


图 6 三峡水库干流与其他河流沉积物生物有效磷所占比例

Fig. 6 Ratio of sediments Bio-P in the TGR and other rivers

各形态间相关性分析表明 Al-P 与 Ex-P 呈显著正相关关系 (表 2). Al-P 与 Ex-P 有着较强的活性均能在水环境变化的情况下通过间隙水向上覆水释放, 这种相关关系有可能是这两种磷之间可以相互转化, 且引起两种磷释放的环境变化因素较为一致. Oc-P 与 Ex-P、Al-P 均呈显著正相关, 这表明 3 种形态的磷可能具有同源性, 有研究发现 Oc-P 含量变化可能是来沙组份或产沙条件发生了改变^[20].

2.4 三峡水库运行对沉积物中磷蓄积与转化的影响

水库沉积物中总磷含量是泥沙淤积及沉积物中

磷吸附-解吸、沉降-再悬浮、溶解-沉淀等多种生物地球化学反应的综合结果. 自 2003~2010 年, 不考虑区间来沙, 三峡水库总淤积量为 14.2 亿 t, 年平均淤积量约为 1.8 亿 t, 常年回水区的淤积量占 90% 以上^[27]. 据此次调查沉积物中总磷含量估算, 三峡水库蓄水以来共有约 10 万 t 总磷淤积在三峡水库中.

三峡水库蓄水对总磷含量影响较为复杂, 三峡水库蓄水运用后, 特别是试验性蓄水以来, 入库泥沙大幅减少^[41], 这对水库内源污染防控较为有利, 但蓄水后干流水体流速减缓, 悬浮泥沙颗粒细化, 更有利于水体中颗粒对磷的沉降和吸附. 三峡水库部分入库河流水体中颗粒态磷高达 75% 以上, 随泥沙迁移的颗粒态磷是水库主要的污染源之一^[42]. 吸附大量磷的泥沙沉降到库底后, 在三峡水库复杂的水体环境中, 这部分泥沙再悬浮, 有可能对库区水质产生影响. 库区泥沙淤积分布特征表现为不连续的宽谷河段淤积和弯道淤积^[43], 因而将来沉积物中总磷空间分布仍不均匀, 在部分宽谷河段沉积物中总磷可能有进一步累积的风险.

有机质、粒径、矿物成分、总磷、各形态磷间的相关性分析发现 Al-P、Ex-P、Bio-P 均与粒径呈负相关, 有机质与 Al-P、Bio-P 呈正相关 (表 2). 这表明沉积物粒径组成和有机质是影响沉积物中 Al-P、Ex-P、Bio-P 含量和分布的重要因素. Ex-P 主要是通过物理吸附到沉积物表面的磷, 沉积物颗粒越小, 其比表面积越高, 对磷吸附越强^[44]. 在上游流域内大规模的水土流失治理和梯级水电站的拦蓄作用下三峡水库入库泥沙将进一步细化, 在这种趋势的影响下三峡水库沉积物中 Bio-P 有可能会进一步上升, 内源磷负荷风险也会随之提高.

三峡水库建成运行后一个重要的变化就是在库区形成一个垂直落差 30 m, 面积达 349 km² 的消落带^[45], 汛期和非汛期不同水位的运行方式引起消落带的干湿交替, 也会导致消落带土壤中的 Bio-P 增加^[36, 46]. 三峡水库沉积物表现出一定的浮泥特性, 汛后干容重 (1.041 t·m⁻³) 比汛前干容重 (1.11 t·m⁻³) 略有减小, 且从库尾至坝前沉积物干容重有逐渐降低趋势^[27]. 此种细颗粒落淤后要经过相当长的时间才能密实^[47], 因此浮泥层中的磷极易在水动力扰动下经再悬浮进入上覆水, 同时疏松的沉积环境更有利于间隙水中磷酸盐的迁移扩散, 促使沉积物-水界面磷释放通量进一步增加^[48]. Zhou 等的研究发现^[49], 在“蓄清排浑”的运行方式下, 枯

水期三峡大坝可以有效降低坝下有效磷的含量,而在丰水期下游有效磷的含量则显著增加,这间接表明水库浮泥层对生物有效磷有一定影响。尽管目前三峡水库沉积物中主要为生物不可利用性磷,内源磷负荷相对较低,但是由于蓄水对三峡水库干流水动力及水环境的特殊影响,仍需引起重视。

3 结论

(1) 三峡水库干流沉积物有机质含量范围为 $7.79 \sim 55.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 主要矿物组成为绿泥石、伊利石、石英、长石、方解石和白云石等。粉砂和黏土分别占沉积物总量的 59.68% 和 33.22%。三峡水库的蓄水位逐步增加后,干流表层沉积物粒径出现了细化趋势。

(2) 三峡水库干流沉积物总磷含量范围为 $557.06 \sim 837.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均超过当地土壤总磷含量的背景值,存在一定的生态污染风险,但三峡水库蓄水位逐步升高后,干流沉积物的总磷含量并未出现明显增加趋势。

(3) 三峡水库干流沉积物 Fe-P、Al-P 和 Ex-P 含量相对较低, Oc-P 和 Ca-P 含量较高。沉积物粒径和有机质含量是影响 Al-P、Ex-P 和 Bio-P 含量及其分布的重要因素。沉积物 Bio-P 仅为总磷的 2%~8%, 其参与上覆水磷循环的能力较弱。

参考文献:

- [1] 刘德富, 杨正健, 纪道斌, 等. 三峡水库支流水华机理及其调控技术研究进展[J]. 水利学报, 2016, **47**(3): 443-454.
Liu D F, Yang Z J, Ji D B, *et al.* A review on the mechanism and its controlling methods of the algal blooms in the tributaries of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, **47**(3): 443-454.
- [2] 彭福利, 何立环, 于洋, 等. 三峡库区蓄水前后长江干流及主要支流氮磷发展趋势研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2017, **47**(8): 845-855.
Peng F L, He L H, Yu Y, *et al.* Studies on the total nitrogen, total phosphorus and chlorophyll a variations in the mainstream and main tributaries of the Yangtze River before and after the impoundment in the Three Gorges Project Area[J]. Scientia Sinica Technologica, 2017, **47**(8): 845-855.
- [3] 罗玉红, 聂小倩, 李晓玲, 等. 香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2345-2354.
Luo Y H, Nie X Q, Li X L, *et al.* Distribution and emission flux estimation of phosphorus in the sediment and interstitial water of Xiangxi River[J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2345-2354.
- [4] Li L P, Liu L, Wang S R, *et al.* Spatial distribution of phosphorus fractions in sediment and the potential mobility of phosphorus in Dianchi Lake[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, **74**(5): 3721-3731.
- [5] Ni Z K, Wang S R, Wang Y M. Characteristics of bioavailable organic phosphorus in sediment and its contribution to lake eutrophication in China[J]. Environmental Pollution, 2016, **219**: 537-544.
- [6] Zaragüeta M, Acebes P. Controlling eutrophication in a mediterranean shallow reservoir by phosphorus loading reduction: the need for an integrated management approach[J]. Environmental Management, 2017, **59**(4): 635-651.
- [7] Wang Y, Shen Z Y, Niu J F, *et al.* Adsorption of phosphorus on sediments from the Three-Gorges Reservoir (China) and the relation with sediment compositions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **162**(1): 92-98.
- [8] Wang Y C, Niu F X, Xiao S B, *et al.* Phosphorus fractions and its summer's release flux from sediment in the China's Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Environmental Informatics, 2015, **25**(1): 36-45.
- [9] Zhang B, Fang F, Guo J S, *et al.* Phosphorus fractions and phosphate sorption-release characteristics relevant to the soil composition of water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir[J]. Ecological Engineering, 2012, **40**: 153-159.
- [10] Luo H J, Liu D F, Huang Y P. Study on phosphorus characteristics in sediments of Xiangxi Bay, China Three-Gorge Reservoir[J]. Journal of Environmental Protection, 2015, **6**(4): 281-289.
- [11] 黄俊杰, 王超, 方博, 等. 三峡澎溪河流域消落区与岸边土壤磷形态特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(9): 3673-3681.
Huang J J, Wang C, Fang B, *et al.* Characterization of phosphorus fractions in the soil of water-level-fluctuation zone and unflooded bankside in Pengxi River, Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2017, **38**(9): 3673-3681.
- [12] 林俊杰, 杨振宇, 刘丹, 等. 干湿交替下三峡支流消落带沉积物粒径组成及氮分布特征[J]. 土壤学报, 2016, **53**(3): 602-611.
Lin J J, Yang Z Y, Liu D, *et al.* Particle size composition of sediment and nitrogen distribution in the water level fluctuating zone of tributaries of the Three Gorges Reservoir as affected by dry-wet alternation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, **53**(3): 602-611.
- [13] 李华勇, 张虎才, 陈光杰, 等. 云南高原湖泊表层沉积物粒度特征及环境指示意义[J]. 沉积学报, 2017, **35**(3): 499-507.
Li H Y, Zhang H C, Chen G J, *et al.* The grain size distribution characteristics of surface sediments from Plateau Lakes in Yunnan Province and their environmental significances[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, **35**(3): 499-507.
- [14] 李乐, 王圣瑞, 焦立新, 等. 滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3384-3393.
- [15] Li L, Wang S R, Jiao L X, *et al.* Vertical variation of phosphorus forms in Lake Dianchi and contribution to release[J]. Environmental Science, 2016, **37**(9): 3384-3393.
- [15] 黎国有, 肖尚斌, 王雨春, 等. 三峡水库干流沉积物的粒度分布与矿物组成特征[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2012, **34**(1): 9-13.
Li G Y, Xiao S B, Wang Y C, *et al.* Distributional characteristics of grain size and mineral composition in sediments

- of Yangtze River in Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2012, **34**(1): 9-13.
- [16] Zhang H, Kovar J L. Fractionation of soil phosphorus[A]. In: Kovar J L, Pierzynski G M, (Eds.). *Methods for Phosphorus Analysis for Soils, Sediments, Residuals, and Waters* [C]. Southern Blacksburg: Virginia Tech University, 2009. 50-54.
- [17] 卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 等. 三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 5020-5031. Zhuo H H, Qiu G S, Zhai W Y, *et al.* Evaluation of temporal and spatial variation characteristics of nutrients in surface sediment in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5020-5031.
- [18] 王颖, 沈珍瑶, 呼丽娟, 等. 三峡水库主要支流沉积物的磷吸附/释放特性[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(8): 1654-1661. Wang Y, Shen Z Y, Hu L J, *et al.* Adsorption and release of phosphorus from sediments from the main branches of the Three-Gorges Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(8): 1654-1661.
- [19] 谭雪梅, 吉芳英, 曹琳, 等. 三峡库区出露期消落带沉积物磷分布特征[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(7): 1691-1696. Tan X M, Ji F Y, Cao L, *et al.* Phosphorus distribution characteristics in sediments of Three Gorges Reservoir Area during the exposed period[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(7): 1691-1696.
- [20] 曹琳, 吉芳英, 林茂, 等. 三峡库区消落区表层沉积物磷吸附特征[J]. *水科学进展*, 2011, **22**(1): 89-96. Cao L, Ji F Y, Lin M, *et al.* Phosphorous adsorption characteristics of upper layer sediments in the water level fluctuating zone of Three Gorges Reservoir Area[J]. *Advances in Water Science*, 2011, **22**(1): 89-96.
- [21] 曹琳, 吉芳英, 林茂, 等. 三峡库区干湿交替消落区土壤磷形态[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, **20**(1): 101-106. Cao L, Ji F Y, Lin M, *et al.* Soil Phosphorus form analysis in fluctuating (dry-wet cycling) zone of Three Gorges Reservoir Area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, **20**(1): 101-106.
- [22] Wu Y H, Wang X X, Zhou J, *et al.* The fate of phosphorus in sediments after the full operation of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **214**: 282-289.
- [23] 张琳, 毕永红, 胡征宇, 等. 三峡水库湖北段沉积物磷形态及其分布特征[J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(6): 6-9. Zhang L, Bi Y H, Hu Z Y, *et al.* Phosphorus forms and its distribution character in sediment of Three Gorges Reservoir in Hubei [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **34**(6): 6-9.
- [24] 林茂. 三峡库区消落区沉积物中磷和有机质分布及其相互影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2010. 21-47. Lin M. Distribution and influence between phosphorous and organic matter in soil/sediment of fluctuating zone in Three Gorges Reservoir Area[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. 21-47.
- [25] 潘婷婷, 赵雪, 袁轶君, 等. 三峡水库沉积物不同赋存形态磷的时空分布[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(8): 2968-2973. Pan T T, Zhao X, Yuan Y J, *et al.* Spatio-temporal distribution characteristics of different phosphorus forms in sediments from the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(8): 2968-2973.
- [26] 张彬. 三峡水库消落带土壤有机质、氮、磷分布特征及通量研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013. 53-65. Zhang B. Study on distribution characteristics and flux of organic matter, nitrogen and phosphorus in the soil of WLFZ of Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. 53-65.
- [27] 水利部长江水利委员会. 长江泥沙公报[M]. 武汉: 长江出版社, 2001-2016.
- [28] 卓海华, 兰静, 吴云丽, 等. 乌江磷污染对三峡水库水质影响研究[J]. *人民长江*, 2014, **45**(4): 66-68. Zhuo H H, Lan J, Wu Y L, *et al.* Study on influence of phosphorus pollution of Wujiang River to water quality in Three Gorge Reservoir[J]. *Yangtze River*, 2014, **45**(4): 66-68.
- [29] 王中波, 杨守业, 李萍, 等. 长江水系沉积物碎屑矿物组成及其示踪意义[J]. *沉积学报*, 2006, **24**(4): 570-578. Wang Z B, Yang S Y, Li P, *et al.* Detrital mineral compositions of the Changjiang River sediments and their tracing implications [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, **24**(4): 570-578.
- [30] 唐将, 李勇, 邓富银, 等. 三峡库区土壤营养元素分布特征研究[J]. *土壤学报*, 2005, **42**(3): 473-478. Tang J, Li Y, Deng F Y, *et al.* Distribution characteristics of nutrition elements in the Three Gorges Reservoir district [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, **42**(3): 473-478.
- [31] 王佩, 卢少勇, 王殿武, 等. 太湖湖滨带底泥氮、磷、有机质分布与污染评价[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(4): 703-709. Wang P, Lu S Y, Wang D W, *et al.* Nitrogen, phosphorous and organic matter spatial distribution characteristics and their pollution status evaluation of sediments nutrients in lakeside zones of Taihu Lake[J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(4): 703-709.
- [32] 王书锦, 刘云根, 梁启斌, 等. 罗时江河口湿地沉积物磷的空间分布及污染风险评价[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(2): 955-962. Wang S J, Liu Y G, Liang Q B, *et al.* Spatial distribution and pollution risk assessment of phosphorus in sediments at estuarine wetland of Luoshijiang River [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(2): 955-962.
- [33] 黎睿, 王圣瑞, 肖尚斌, 等. 长江中下游与云南高原湖泊沉积物磷形态及内源磷负荷[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(6): 1831-1839. Li R, Wang S R, Xiao S B, *et al.* Sediments phosphorus forms and loading in the lakes of the mid-lower reaches of the Yangtze River and Yunnan Plateau, China [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(6): 1831-1839.
- [34] 鲁群岷, 赵亮, 李莉, 等. 三峡库区降水化学组成及时空变化特征[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(6): 1682-1689. Lu Q M, Zhao L, Li L, *et al.* Chemical composition of precipitation and its spatiotemporal variations in the Three Gorges Reservoir region[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(6): 1682-1689.
- [35] 张梦舟, 徐曾和, 梁冰, 等. 三峡库区香溪河流域磷矿废石磷素释放特性研究[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(3): 840-848. Zhang M Z, Xu Z H, Liang B, *et al.* Phosphorus release from

- phosphate waste rocks deposited in Xiangxi River watershed of Three Gorges Reservoir [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(3): 840-848.
- [36] 汤显强, 吴敏. 水位调控对河口沉积物磷赋存及生物可利用性的影响[J]. *长江科学院院报*, 2015, **32**(12): 8-13, 17.
- Tang X Q, Wu M. Impacts of water level regulation on estuary sediment phosphorus storage and bioavailability [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, **32**(12): 8-13, 17.
- [37] 李如忠, 李峰, 周爱佳, 等. 巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1503-1510.
- Li R Z, Li F, Zhou A J, *et al.* Distribution and bioavailability of nitrogen and phosphorus species in the sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1503-1510.
- [38] 臧小平, 邱波, 曾金凤. 长江三峡水体中氮、磷的分布特点及赋存形态研究[A]. 见: *中国环境水力学 2002* [C]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. 317-321.
- [39] 程腊梅. 古夫河表层沉积物磷的形态分布特征及其生物有效性分析[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2013. 20-31.
- Cheng L M. Spatial distribution characteristics of phosphorus forms and bioavailable analysis in surface sediment of Gufu River [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2013. 20-31.
- [40] 姚艳红. 图们江中游表层沉积物中磷的赋存形态研究[J]. *延边大学学报(自然科学版)*, 2013, **39**(1): 33-36.
- Yao Y H. Species of phosphorus in surface sediments from middle reaches of Tumen River [J]. *Journal of Yanbian University (Natural Science)*, 2013, **39**(1): 33-36.
- [41] 胡春宏, 方春明. 三峡工程泥沙问题解决途径与运行效果研究[J]. *中国科学(技术科学)*, 2017, **47**(8): 832-844.
- Hu C H, Fang C M. Research on sediment problem solutions for the Three Gorges Project and its operational effects [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2017, **47**(8): 832-844.
- [42] 曹承进, 秦延文, 郑丙辉, 等. 三峡水库主要入库河流磷营养盐特征及其来源分析[J]. *环境科学*, 2008, **29**(2): 310-315.
- Cao C J, Qin Y W, Zheng B H, *et al.* Analysis of phosphorus distribution characters and their sources of the major input rivers of Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(2): 310-315.
- [43] 李文杰, 杨胜发, 付旭辉, 等. 三峡水库运行初期的泥沙淤积特点[J]. *水科学进展*, 2015, **26**(5): 676-685.
- Li W J, Yang S F, Fu X H, *et al.* Sedimentation characteristics in the Three Gorges Reservoir during the initial operation stage [J]. *Advances in Water Science*, 2015, **26**(5): 676-685.
- [44] 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.
- Sun W B, Du B, Zhao X L, *et al.* Fractions and adsorption characteristics of phosphorus on sediments and soils in water level fluctuating zone of the Pengxi River, a tributary of the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 1107-1113.
- [45] 梁丽, 王永敏, 张成, 等. 三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 955-962.
- Liang L, Wang Y M, Zhang C, *et al.* Effect of soil and dominant plants on mercury speciation in soil and water system of water-level-fluctuation zone in the Three Gorges Area [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 955-962.
- [46] 曹琳, 吉芳英. 三峡库区消落带干湿交替表层沉积物磷分布特征[J]. *地球与环境*, 2013, **41**(2): 126-131.
- Cao L, Ji F Y. Phosphorus distribution characteristics in dry-wet alteration sediment of fluctuation zone in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Earth and Environment*, 2013, **41**(2): 126-131.
- [47] 假冬冬, 邵学军, 张幸农, 等. 三峡水库蓄水初期近坝区淤积形态成因初步分析[J]. *水科学进展*, 2011, **22**(4): 539-545.
- Jia D D, Shao X J, Zhang X N, *et al.* Preliminary analysis on the causes of reservoir sedimentation pattern in the vicinity of Three Gorges Project during its early filling [J]. *Advances in Water Science*, 2011, **22**(4): 539-545.
- [48] 牛凤霞, 肖尚斌, 王雨春, 等. 三峡库区沉积物秋末冬初的磷释放通量估算[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1308-1314.
- Niu F X, Xiao S B, Wang Y C, *et al.* Estimation of releasing fluxes of sediment phosphorous in the Three Gorges Reservoir during late autumn and early winter [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1308-1314.
- [49] Zhou J J, Zhang M, Lin B L, *et al.* Lowland fluvial phosphorus altered by dams [J]. *Water Resources Research*, 2015, **51**(4): 2211-2226.

CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM _{2.5} Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Panjin	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin	CAI Zi-ying, HAN Su-qin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin	LI Yong-ge, LI Zong-xing, GAO Hao-yang, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO ₂ and CH ₄ Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysosporum ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR)	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(<i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ¹³ C Pulse-labeling	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO ₂ Emissions in Chongqing: An Empirical Analysis at the County Level	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)