

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律 张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征 王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征 沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM_{2.5}中元素浓度特征及其源分析 闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM_{2.5}浓度分阶段改善目标情景分析 贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM_{2.5}排放特征及减排潜力估算 杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单 赵庆炎,韩士杰,张轶舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性 乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势 刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征 李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布 黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价 刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价 范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征 陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义 袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素 黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素 周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析 秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力 黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素 李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险 李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析 徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应 蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估 张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征 马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析 刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征 樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响 黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析 吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系 王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析 刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应 毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能 伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制 吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制 黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氯效能 方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制 祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化 吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征 马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃ SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能 孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响 王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响 杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液 刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响 黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异 秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响 王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制 刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响 刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施氮对菜地CH₄排放的影响 倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响 王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH₄和N₂O排放的影响 田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响 曾蔓蔓,慈思,樊晶晶,李江文,翁吴璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价 宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香蓟(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力 张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险 焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应 舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价 吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)

三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力

黎睿^{1,2}, 潘婵娟^{1,2}, 汤显强^{1,3*}, 肖尚斌^{2,3}, 李青云^{1,3}, 杨文俊^{1,3}

(1. 长江水利委员会长江科学院, 流域水环境研究所, 武汉 430010; 2. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 3. 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: 为揭示三峡水库首次蓄水至 175 m 后, 干流柱状沉积物磷的蓄积特征及其影响因素, 于 2010 年 10 月下旬采集了三峡水库干流云阳至秭归等 5 个断面柱状沉积物样品, 分析了沉积物粒径、有机质、矿物成分、总磷等理化特征, 采用分级提取法分析了柱状沉积物各形态磷分布特征, 并对三峡水库柱状沉积物磷的释放贡献率进行估算. 结果表明, 三峡水库干流柱状沉积物 pH 在 7.3~7.8 间, 总体呈中性. 沉积物组成以粉砂为主, 含量为 49.4%~78.6%, 黏土为 20.6%~50.6%, 含砂量低于 4.4%, 各断面中值粒径沿深度呈现出阶段性地增加或降低趋势. 沉积物有机质含量为 12.94~53.43 g·kg⁻¹, 从云阳至秭归断面沉积物有机质含量略有增加, 碳氮比在 4.00~11.64 之间. 三峡水库沉积物总磷为 861.86~1024.54 mg·kg⁻¹, 同一断面沉积物总磷垂向变化较小, 且没有随深度变化呈现规律性变化趋势. 三峡沉积物磷形态以钙磷为主, 约占总磷含量的 47.83%~73.90%, 其余各形态磷所占比例较小. 不同断面间磷形态垂向变化趋势差异较大. 可交换态磷、铝磷及铁磷在个别断面表层 0~4 cm 范围内含量相对较高, 而在 16~20 cm 处大部分断面沉积物各形态磷均不随深度发生变化. 在同一深度下, 不同断面生物可利用磷(可交换态磷、铁磷、铝磷之和, Bio-P)的含量及相对含量沿程分布趋势较为明显, 从云阳至秭归断面均表现为沿程增加趋势. Bio-P 相对含量为 2.78%~7.05%, 整体而言, 三峡水库干流沉积物内源释放风险较小. 沉积物生物可利用磷与有机质含量呈显著正相关($P < 0.05$, $N = 50$), 有机质的分布和转化将影响三峡水库沉积物中磷的迁移和转化.

关键词: 三峡水库; 干流沉积物; 磷形态; 内源磷负荷; 释放潜力

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2160-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201808183

Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m

LI Rui^{1,2}, PAN Chan-juan^{1,2}, TANG Xian-qiang^{1,3*}, XIAO Shang-bin^{2,3}, LI Qing-yun^{1,3}, YANG Wen-jun^{1,3}

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

Abstract: To investigate the vertical distribution characteristics of phosphorus in the main stream sediments of the Three Gorges Reservoir (TGR), column sediment samples were collected from 5 sites in October 2010, and sediment particle size, organic matter contents, and mineral compositions were analyzed. Investigation of the contribution rate of phosphorus released from column sediments in the TGR was also conducted. The results show that the sediment pH is between 7.3-7.8. The mainstream column sediment is mainly constituted by silt and clay, which account for 49.4%-78.6% and 20.6%-50.6% of total sediments, while sand represents less than 4.4%. Median grain size of each sampling site presented a phased increase or decrease trend. The organic matter content was between 12.94 g·kg⁻¹ and 53.43 g·kg⁻¹, and it tended to slightly increase from upstream to downstream. The C/N ratio in the sediment was between 4.00 and 11.64, and organic matter content was mainly affected by terrigenous input. Total phosphorus (TP) content was between 861.86 mg·kg⁻¹ and 1024.54 mg·kg⁻¹, and it exhibited negligible change in vertical distribution. There is no obvious enrichment phenomenon of phosphorus for column sediment. The major component of sediment TP is calcium bound phosphorus (Ca-P, 47.83%-73.90%), and there are various trends for phosphorus distribution in different sampling sites. Exchangeable phosphorus (Ex-P), aluminum-bound phosphorus (Al-P), and iron-bound phosphorus (Fe-P) in the 0-4 cm surface sediment of each sampling sites was relatively high. For most sampling sites, no obvious change of phosphorus fractions in 16-20 cm of sediment was detected. Bioavailable phosphorus (the sum of Ex-P, Al-P, and Fe-P) accounted for 2.78%-7.05% of TP, indicating that bioavailability of phosphorus in the column sediments is low. The contents of bioavailable phosphorus and organic matter were significantly and positively correlated ($P < 0.05$, $N = 50$). The distribution and transformation of organic matter will affect the migration and transformation of sediment phosphorus in the TGR.

Key words: Three Gorges Reservoir; mainstream sediment; phosphorus fraction; internal phosphorus loads; release contribution

收稿日期: 2018-08-23; 修订日期: 2018-12-07

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CKSF2017047/SB)

作者简介: 黎睿(1990~), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为富营养化水体污染防治, E-mail: Leeruiwh@outlook.com

* 通信作者, E-mail: ckyshj@126.com

大坝对悬浮物的截留效应已成为筑坝河流生态环境效应的重要研究内容之一。有研究表明, 无论是汛期还是非汛期超过 75% 的颗粒态磷被截留在三峡水库内^[1]。随泥沙沉积后的颗粒态磷通过吸附与解吸、再悬浮和矿化等转化过程向上覆水扩散, 会直接或间接影响水体营养状态^[2-4]。磷在沉积物中的赋存形态决定其运移转化的难易程度, 沉积物的理化特性对磷的赋存形态有着重要的影响^[5], 因此研究沉积物的理化特性与沉积物磷的赋存形态, 有助于揭示沉积物中磷的迁移转化规律^[6], 为评估三峡水库沉积物的内源污染风险提供参考。

三峡水库蓄水后, 库区水位抬升, 干流水体流速减缓, 输沙能力降低。蓄水后干流平均流速由原来的 $2.00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下降至 $0.17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[7], 大量泥沙因此淤积, 其中 2003 ~ 2013 年间三峡水库共淤积泥沙达 $1.5 \times 10^{10} \text{ t}$ ^[8]。流速减缓导致颗粒态磷的输送和扩散能力降低, 更容易沉积, 水体中的颗粒磷沉积后, 使沉积物成为磷的主要汇集处^[9], 增加了三峡水库的磷蓄积量, 三峡水库底泥内源磷释放风险也有可能随之升高, 但三峡水库沉积物对水体富营养化的贡献程度尚不十分清楚。

磷在沉积物中的剖面分布特征, 能反映沉积物时空分布状况、区分沉积环境的差异、记录历史污染状况等。李乐等^[10]的研究发现滇池沉积物中可还原态磷随着深度增加而逐渐降低。Kpodonu 等^[11]的研究发现, 沉积物中硅藻与稳定态磷含量呈正相关, 而蓝绿藻则与潜在可生物利用磷呈正相关关系。基于不同形态磷的垂向变化特征及其与藻类的关系, 该研究还建立了反演湖泊藻类历史演替特征的新方法。氧化还原波动会促进沉积水界面溶解无机磷的释放, 沉积物中磷的释放主要受铁-磷及有机质-磷等耦合作用影响^[12, 13]。Kwak 等^[14]的研究表明, 对于新建水库而言, 沉积物中可矿物迁移的磷含量较低, 对上覆水的影响较小, 相对而言, 因季节交替导致的藻类沉降和降解引起的磷含量增加对于水库富营养化更为重要。目前, 对三峡水库的研究, 多集中于消落带及表层沉积物磷形态分布特征^[15-18], 仅有部分研究关注了支流及干流个别区域沉积物磷的垂向分布特征。Wang 等^[19]通过调查发现, 在 10 cm 取样深度内, 三峡水库不同柱状沉积物各形态剖面分布变化差异较大。潘雪婷等^[20]的研究发现, 在垂直方向上(深度为 70 cm)各形态磷含量在不同沉积深度没有明显规律, 受钙磷含量影响, 一般情况下总磷、无机磷、钙磷三者垂直方向上动态变化基本一致。三峡水库具有“蓄清排浑”、“削峰补枯”的特殊水沙调控模式^[21], 作为一

个深水水库, 其泥沙淤积、沉积物输移转化特征与浅水湖泊均有着显著的差别, 目前对于三峡水库沉积物磷形态的研究尚未充分体现其特殊性。自 2003 年首次蓄水至三峡水库完成 175 m 蓄水期间, 三峡水库干流逐步由天然河道转换为河道型水库, 冲淤特征的改变是否会影响沉积物中磷的含量及形态尚不清楚。本研究基于三峡水库泥沙淤积特征, 在三峡水库干流常年回水区沿程布置 5 个采样点, 初步分析三峡水库干流磷形态的垂向分布特征及沉积物中不同形态磷对内负荷的贡献程度, 以期为三峡水库沉积物研究提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

2010 年 10 月在三峡水库干流采集沉积物样品, 依据三峡水库淤积特征, 分别在三峡水库干流沿程布置云阳、奉节、巴东、香溪、秭归这 5 个采样点(图 1)。云阳、奉节位于宽谷泥沙淤积段, 秭归位于坝前淤积段, 巴东和香溪位于微淤段。所有采样点均采用 GPS 定位, 使用柱状重力采泥器采集, 每个采样点均进行 3 次重复采样。采集柱状沉积物深度为 20 ~ 22 cm, 以 2 cm 为间隔对柱状样进行分割, 并现场测定 pH(THERMO ORION 3-Star)。随后将采集的样品分成两份, 放入密封袋并隔绝空气, 置于 5℃ 冰箱暂存, 一份用于沉积物粒径分析, 另一份经冷冻干燥后, 研磨并过 100 目筛, 用于磷形态及其它指标分析。

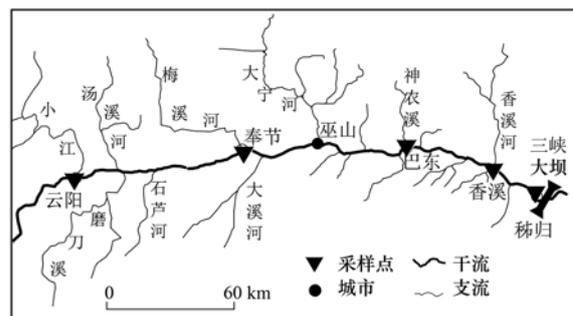


图 1 三峡水库采样点分布示意

Fig. 1 Sediment sampling site in the Three Gorges Reservoir

1.2 样品分析方法

采用激光粒度仪(英国 Malvern 2000)进行颗粒级配分析^[22]。沉积物有机质(TOC)和总氮(TN)采用元素分析仪(Vario III Elementar, 德国)测定^[23], 矿物成分采用 X 线衍射分析仪(德国 Bruker D8 Advance)进行定性及半定量分析^[24], 本文采用连续分级提取法测定沉积物中磷形态, 具体为:称取约 0.5 g 沉积物, 加入 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化铵溶液 25 mL, 于 25℃ 条件下振荡提取 30 min, 离心取上清液

即为可交换态磷(Ex-P);将残渣用饱和氯化钠溶液清洗后,向残渣中加入 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化铵溶液(调节pH为8.2)25 mL,于 25°C 条件下振荡提取1 h,离心取上清液,并向上清液加入 $0.8 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硼酸溶液,以2,6-二硝基酚为指示剂,调节pH后测定磷含量即为铝结合态磷(Al-P);继续用饱和氯化钠溶液清洗残渣,然后加入 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氢氧化钠溶液25 mL,于 25°C 条件下振荡提取2 h,静置16 h,再振荡2 h,离心取上清液,并向上清液加入浓硫酸,摇匀后静置过夜,过滤后测定磷含量即为铁结合态磷(Fe-P);继续用饱和氯化钠清洗残渣,然后加入 $0.3 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化铵溶液20 mL,加入0.5 g保

险粉,水浴加热至 90°C ,搅拌均匀后加入 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氢氧化钠溶液5 mL,继续混合均匀后离心取上清液,用饱和氯化钠溶液清洗残渣,将清洗液及上清液混合,然后采用三酸混合液($\text{H}_2\text{SO}_4:\text{HClO}_4:\text{HNO}_3=1:2:7$)消解上述溶液,测定磷含量即为闭蓄态磷(Oc-P);向清洗后的残渣中加入 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硫酸溶液,于 25°C 条件下振荡提取1 h,离心取上清液测定磷含量即为钙结合态磷(Ca-P)^[25](图2),采用SMT法提取TP含量,以水系沉积物成分分析标准物质GSD-9作为质量控制样品,确保结果准确可靠,总磷含量回收率达96%,磷形态回收率(各形态磷之和/总磷)在80%~117%之间。

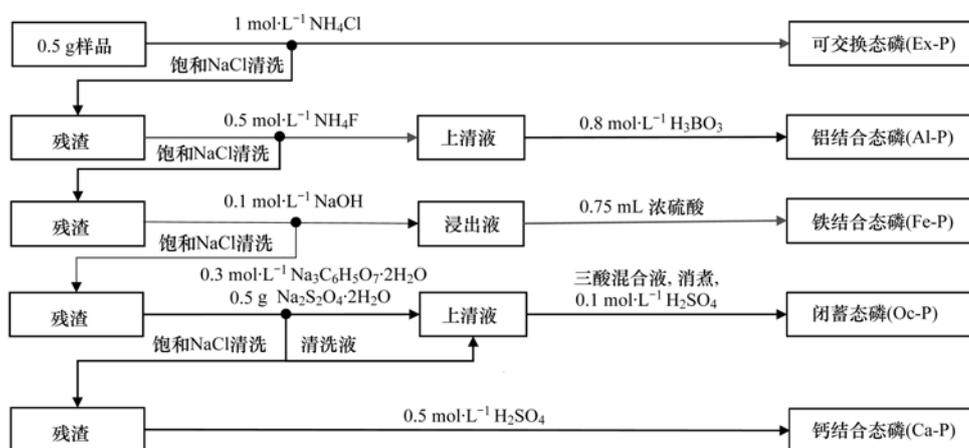


图2 土壤磷形态分级提取步骤

Fig. 2 Sequenced extraction procedures of sediment phosphorus fractions

1.3 数据分析和统计方法

本文图表采用 Origin 2016 绘制. 使用 SPSS 22.0 进行差异分析, $P < 0.05$ 有显著性差异, $P > 0.05$ 无显著性差异.

2 结果与分析

2.1 沉积物理化性质

三峡水库干流柱状沉积物 pH 均值在 7.3~7.8 之间, 总体呈中性(表1). 三峡水库干流柱状沉积物中值粒径(D_{50})为 3.9~12.9 μm , 沿程并无趋势

性变化特征. 不同采样断面沉积物 D_{50} 随沉积物深度的变化如图3所示, 秭归断面 D_{50} 变化较小, 其变化范围为 4.96~6.43 μm , 其余各断面则有一定程度的波动. 香溪、巴东断面 D_{50} 随深度的增加而增大, 至一定深度后略有减小. 云阳、奉节及秭归断面整体呈双峰模式, 其中在 2~4 cm 和 12~16 cm 深度处 D_{50} 较高. 三峡水库沉积物粒径的变化反映了区域水动力特征及岸坡侵蚀的差异^[23], 三峡水库干流沉积物 D_{50} 垂向变化特征可能在一定程度上记录了水库不同状态下颗粒物的沉积物特征.

表1 三峡水库柱状沉积物基本理化性质¹⁾

Table 1 Physico-chemical characteristics of column sediment in the TGR

采样点	距大坝距离/km	沉积物 pH	绿泥石/%	伊利石/%	石英/%	其他矿物/%
云阳	252	7.5~7.8(7.6)	22~32(27)	20~30(24)	21~26(24)	15~32(25)
奉节	170	7.3~7.6(7.4)	26~33(29)	25~30(26)	21~24(22)	17~27(23)
巴东	76	7.5~7.7(7.6)	20~31(27)	15~25(22)	21~27(23)	22~27(28)
香溪	31	7.4~7.6(7.5)	22~32(26)	15~25(20)	23~25(24)	24~29(30)
秭归	3	7.4~7.6(7.4)	28~35(31)	25~30(28)	21~23(21)	14~24(20)

1) 括号内为均值

三峡水库干流柱状沉积物组分以粉砂(0~4 μm)为主, 含量为 49.4%~78.6%, 其次为黏土(4

~63 μm)含量为 20.6%~50.6%, 含砂(>63 μm)量低于 4.4%(图3). 沉积物类型以黏、土质粉砂

为主, 在垂向分布上, 云阳、奉节、香溪黏土所占比例随深度有降低趋势, 巴东呈先降低后上升的趋势, 秭归断面黏土相对含量则基本保持不变. 三峡水库干流柱状沉积物中 3 种主要矿物成分为绿泥石、伊利石、石英, 其中绿泥石为 20% ~ 35%, 伊利石为 15% ~ 30%, 石英为 21% ~ 27%, 其他组分占 14% ~ 32% (表 1), 主要包括长石、方解石、白云石、闪石、黄铁矿等矿物.

三峡水库柱状沉积物有机质含量在 $12.94 \sim 53.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 5 个断面有机质含量变化略有差别 (图 4), 从上游至三峡大坝有机质沿程有增高

趋势, 其中云阳有机质含量最低, 平均为 $24.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 秭归有机质含量最高, 平均为 $43.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 约为云阳断面的 1.8 倍.

三峡水库干流沉积物 C/N 在垂向分布上各断面略有差异 (图 4), 在表层 0 ~ 6 cm 处, C/N 变化较小, 均值在 5.86 ~ 9.16 之间, 除巴东基本不变外, 其余各点均沿深度增加. 在 6 ~ 14 cm 处变幅较大, 云阳、秭归变化较缓, 而其余断面变化较大. 巴东 C/N 先增大后减小, 香溪 C/N 呈“M”型变化趋势, 云阳 C/N 缓慢上升, 秭归、奉节 C/N 沿深度呈先减小后增大的趋势. 在 14 ~ 20 cm 处各点位

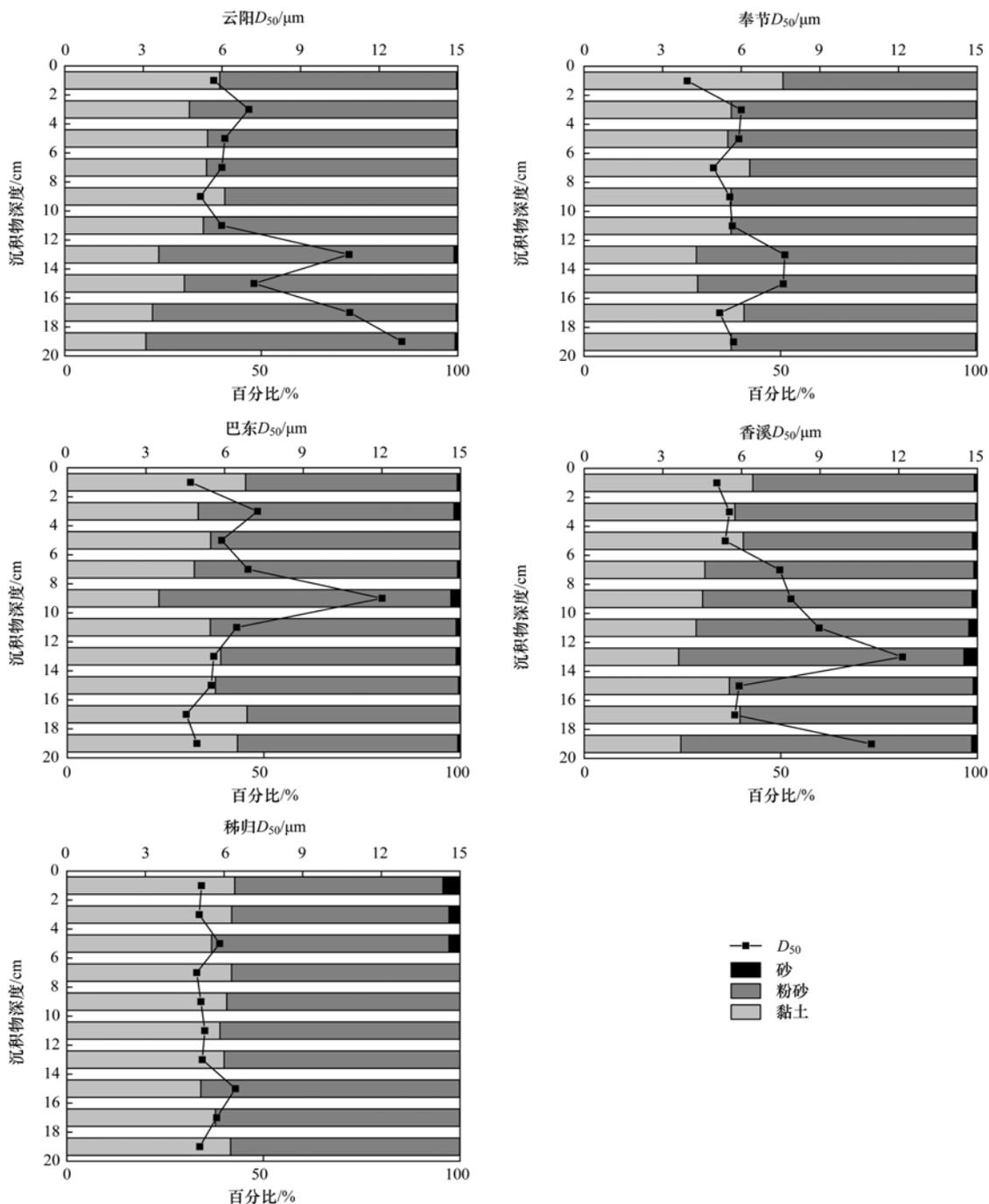


图 3 沉积物中值粒径及组成垂向分布

Fig. 3 Vertical distribution of sediment components and particles median diameter

C/N趋于稳定.

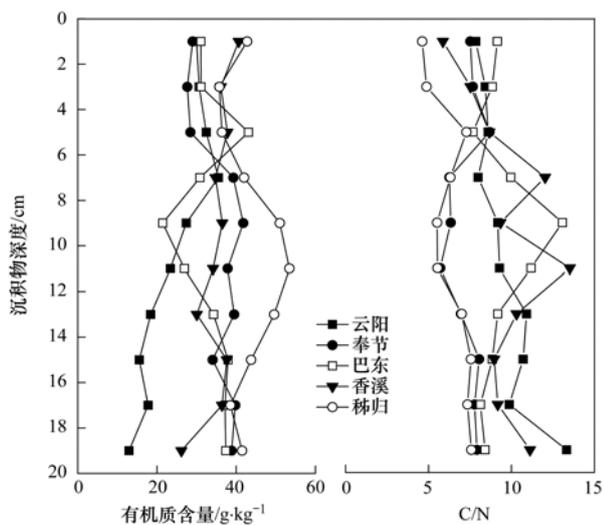


图4 沉积物有机质含量和 C/N

Fig. 4 Vertical distribution pattern of sediment TOC and C/N

2.2 柱状沉积物中总磷及磷形态含量

三峡水库柱状沉积物 TP 含量在 $861.86 \sim 1024.54 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 $936.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 在同一断面 TP 垂向变异系数为 $2.10\% \sim 3.41\%$, 不同断面同一深度变异系数为 $3.76\% \sim 6.19\%$, 这表明三峡水库干流总磷含量沿程及垂向分布均没有明显的差异(图5). 钙磷(Ca-P)沉积物中的主要形态, 占总磷含量的 $47.83\% \sim 73.9\%$, 闭蓄态磷(Oc-P)、铁磷(Fe-P)、铝磷(Al-P)和可交换态磷(Ex-P)所占比例较小, 这与潘婷婷等^[20]对三峡水库表层沉积物的研究结果一致.

三峡水库干流柱状沉积物 Ex-P 含量为 $6.44 \sim 13.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 其中, 下游的香溪和秭归断面 Ex-P 含量相对较高. 云阳、奉节、巴东断面沉积物 Ex-P 含量在垂向分布上主要可分为 2 段, 表层 $0 \sim 12 \text{ cm}$ 深度范围内含量相对较高, 底层 $12 \sim 20 \text{ cm}$ 段 Ex-P 含量相对较低, 平均约为上层的 $70\% \sim 80\%$. 香溪断面 Ex-P 随着深度的增加而逐渐升高, 而在秭归断面 Ex-P 含量则表现为两端高, 中间低, 最低点出现在深度为 $10 \sim 12 \text{ cm}$ 时, 整个断面最高值约为最低的 1.3 倍.

三峡水库柱状沉积物 Al-P 含量变化范围为 $19.78 \sim 52.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 所有断面 Al-P 含量垂向变化趋势较为一致, 均表现为表层 $0 \sim 4 \text{ cm}$ 段含量较高, $4 \sim 10 \text{ cm}$ 段 Al-P 含量随着深度略有减小, $10 \sim 20 \text{ cm}$ 处 Al-P 含量基本稳定.

三峡水库柱状沉积物 Fe-P 含量为 $0 \sim 2.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 云阳、奉节和香溪断面 Fe-P 垂向分布趋势类似, 均表现为表层 $0 \sim 8 \text{ cm}$ 范围内 Fe-P 含量随深度增加而逐渐增加, $10 \sim 20 \text{ cm}$ 段 Fe-P 含量不再

随深度变化.

三峡水库干流沉积物 Oc-P 含量为 $214.30 \sim 392.26 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 云阳和巴东断面 Oc-P 含量在 $0 \sim 8 \text{ cm}$ 随深度略有增加趋势. 而奉节、香溪及秭归断面在 $0 \sim 8 \text{ cm}$ 深度 Oc-P 含量则缓慢降低. $14 \sim 20 \text{ cm}$ 处 Oc-P 含量基本保持稳定.

三峡水库干流柱状沉积物 Ca-P 含量为 $355.66 \sim 715.76 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 根据 Ca-P 纵向变化趋势, 所有断面柱状沉积物可以分为 3 个差异明显的层. $0 \sim 8 \text{ cm}$ 范围内云阳、奉节、秭归断面 Ca-P 含量随深度增加而略有升高, 巴东、香溪断面则基本保持不变. $8 \sim 16 \text{ cm}$ 处云阳、巴东和香溪 Ca-P 含量逐渐增大, 奉节 Ca-P 含量先减小后增大, 秭归 Ca-P 含量逐渐减小. $14 \sim 20 \text{ cm}$ 处所有断面 Ca-P 含量均不随深度发生变化.

3 讨论

3.1 三峡水库干流沉积物磷的垂向分布特征

有研究表明, 沉积物中不同形态磷的垂直分布具有明显的差异性, 且大多呈表层富集的趋势, 说明沉积物中磷的分布趋势与人类活动有关^[10, 26]. 与山美水库^[27]、太湖^[28]等沉积物中磷垂向分布趋势相比, 三峡水库干流柱状沉积物总磷含量沿深度方向没有明显的变化趋势, 这同支流总磷及磷形态垂向分布规律一致^[20, 29].

三峡水库沉积物磷的垂向分布特征可能受 3 个方面的因素影响. 其一, 三峡水库建库时间较短, 柱状沉积物的组成和粒径等未有明显的差异, 沉积物还处于简单的堆积阶段, 因沉积物自生成岩矿化作用导致的不同形态磷垂向分布差异尚未显现. 距大坝 6 km 处的河道断面连续观测表明, 水库蓄水后, 短时间内大量泥沙淤积在河道主槽, 其中 2003 年首次蓄水至 2005 年断面最大淤积深度达 53.4 m ^[30]. Tang 等^[22]通过¹³⁷Cs 定年也发现, 不同年份三峡水库沉积物淤积深度变化较大, 2006~2013 年间所选沉积物钻孔共淤积了约 3.5 m , 每年淤积约 $15 \sim 105 \text{ cm}$ 不等. 本研究断面可能的冲刷或者淤积厚度远高于采集的沉积物深度($\sim 20 \text{ cm}$), 此外, 沉积物中较易矿化磷的转化通常在 10 a 以上, 较为稳定形态的磷最终稳定则超过 100 a ^[31], 因此沉积物中的磷并未反映出矿化成岩作用导致的趋势性变化特征, 即随着深度增加沉积物中磷含量并未呈现规律性的变化; 其二, 三峡水库蓄水后水体 TP 含量变化范围为 $0.05 \sim 0.19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $0.11 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 不同年度水体 TP 含量并没有显著差异(图6), 这表明沉积物中 TP 的污染负荷来源并未

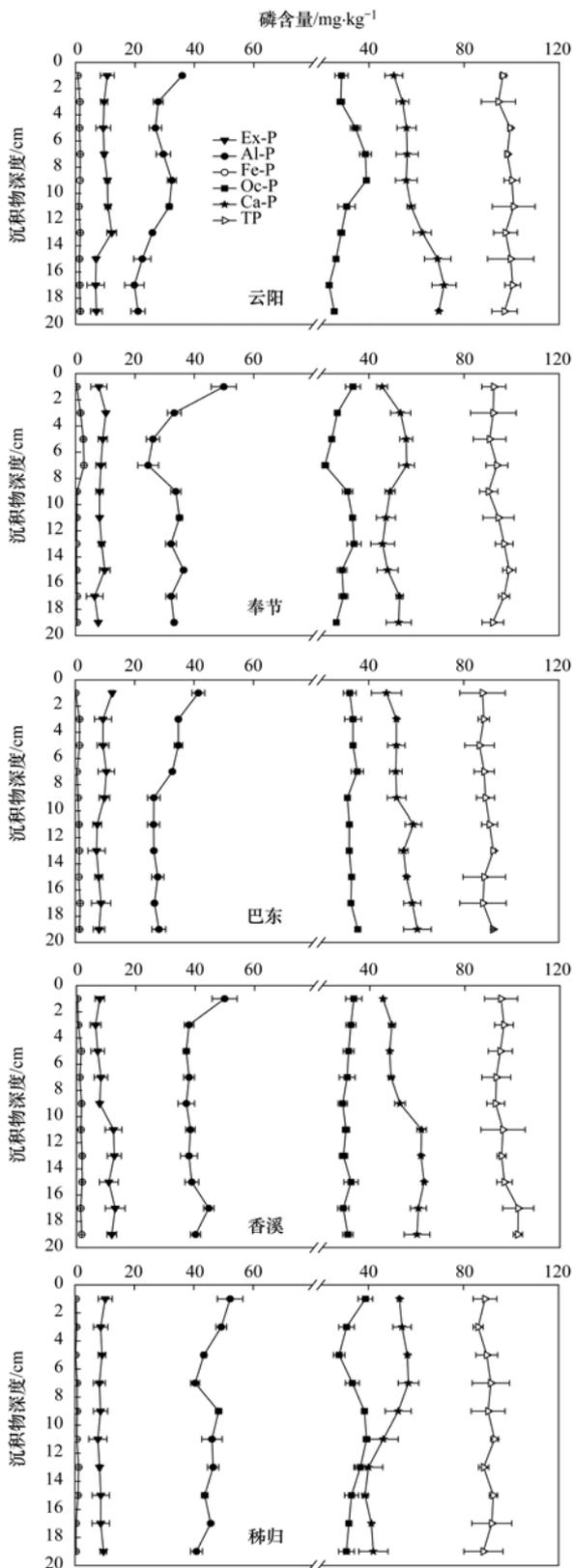


图5 三峡水库沉积物总磷及磷形态垂向分布状况

Fig. 5 Vertical distribution of sediment total phosphorus and phosphorus fractions in the TGR

发生显著变化, 因而三峡水库沉积物磷形态的剖面变异较小. 在太湖、洪湖等受人为污染干扰强烈的湖泊, 会因为污染的加深或者外源污染负荷的大幅削减, 而呈现趋势性的增加或者减少趋势^[28, 32]; 其

三, 三峡水库“蓄清排浑”的运行方式, 可能导致沉积物交替处于淤积与冲刷过程, 枯水期因蓄水而累积的细颗粒沉积物将在汛期随洪水调度而冲刷. 比较而言, 大多数湖泊均处于相对封闭状态, 拥有较为稳定的沉积环境^[33], 湖泊沉积物也具有较为完整的时间序列, 能够较好地记录环境状况的变化特征, 使得沉积物中的磷在垂向分布上表现出较为规律的变化趋势. 而对于某一断面而言, 不同时段剖面形状变化较大^[21], 因而三峡水库干流沉积物中的磷也不易呈现出有规律的垂向分布特征.

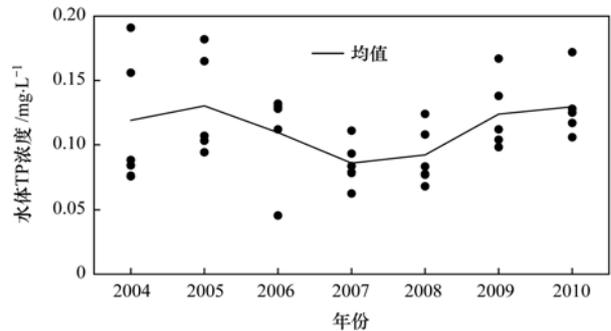
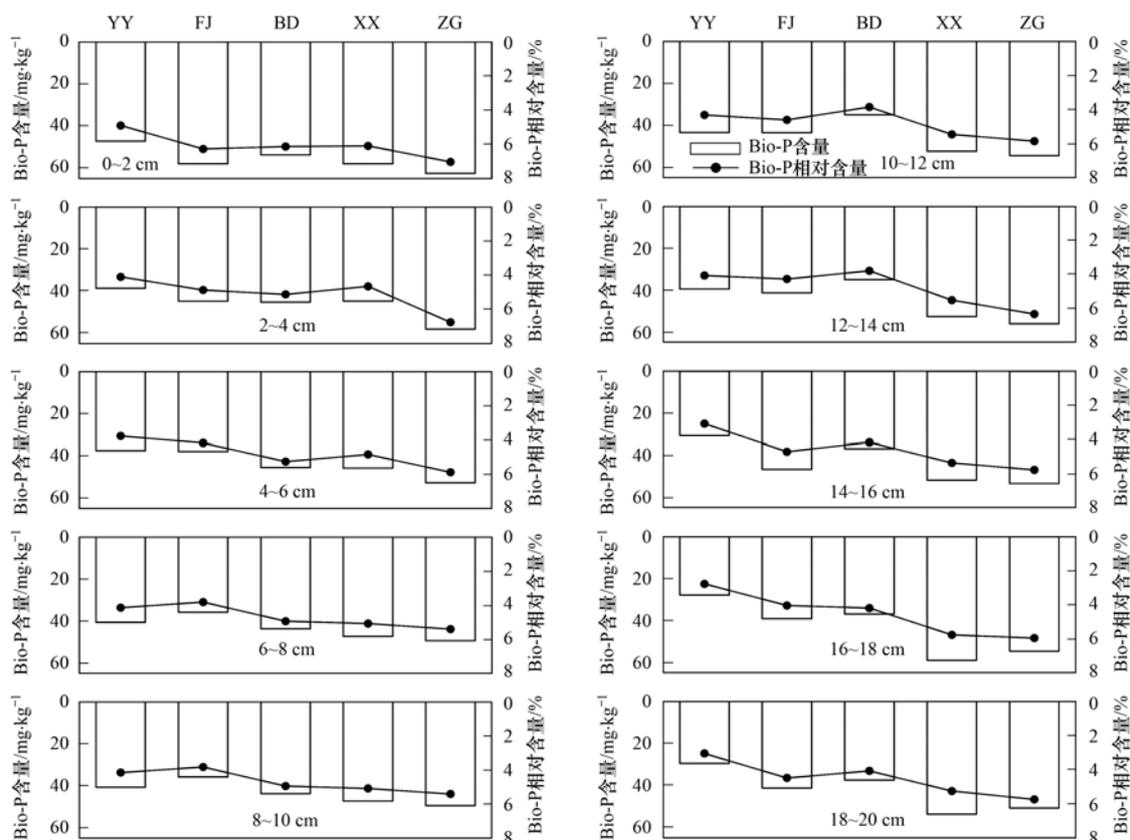


图6 三峡水库蓄水后水体总磷浓度变化特征^[34]

Fig. 6 Concentrations of total phosphorus in the water in of TGR after impoundment

3.2 沉积物磷释放潜力

沉积物中不同形态的磷转化存在显著差异, 通常 Ex-P、Fe-P、Al-P 是能够参与上覆水循环的活性较强的组分, 其能够通过沉积物-水界面进入上覆水被藻类吸收, 为浮游植物等提供必要的生长元素^[35], 因此将其含量之和作为生物可利用磷 (Bio-P). 三峡水库柱状沉积物 Bio-P 含量在 27.50 ~ 79.51 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均为 46.07 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 7). 在表层 0 ~ 6 cm 处, 变化不明显, Bio-P 含量为 38.81 ~ 58.45 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 在 6 ~ 14 cm 处各点变化差异较大, 其中巴东呈先减小后增大趋势, 奉节、秭归先上升后减小, 云阳逐渐减小, 香溪则随深度增加而逐渐上升. 在 14 ~ 20 cm 处所有断面 Bio-P 含量趋于稳定. 在同一深度下, 不同断面 Bio-P 的含量及相对含量沿程分布趋势较为明显, 从云阳至秭归断面均表现为沿程增加趋势, 这可能是三峡水库颗粒磷的沉降差异导致的. 三峡水库上游水体中超过 3% 的溶解性磷酸盐会被吸附到悬浮颗粒物上^[36], 经过颗粒物沉降而进入沉积物中, 成为沉积物中 Bio-P 的重要来源. 有研究发现, 三峡水库悬浮颗粒物中 Ca-P 含量沿程降低^[1], 而富含有机质等活性组分的颗粒物则会逐渐吸附水体中磷酸盐等, 因而沉降颗粒物中 Bio-P 的相对含量可能会沿程增加, 从而使沉积物中 Bio-P 的分布呈现出沿程增加的趋势.



YY、FJ、BD、XX、ZG 分别对应云阳、奉节、巴东、香溪、秭归

图 7 三峡水库沉积物生物可利用磷垂向分布

Fig. 7 Vertical distribution of sediment Bio-P in the TGR

有研究表明沉积物中的磷随着埋藏时间增长(随深度加深),不同形态磷含量变化显著,其中表层 0~4 cm 是磷形态转化最为强烈的区域,而当沉积物达到一定深度时活性较强的磷则因沉积物的矿化成岩作用而减少,钙磷等稳定性较强的磷含量逐渐增加,最终所有形态磷的含量趋于稳定^[19]。本研究也发现各断面沉积物在 0~4

cm 各形态磷变化较大,而在 16~20 cm 则较为稳定。三峡水库干流沉积物中可与上覆水发生交换的 Bio-P 相对含量为 2.78%~7.05%,这高于牛凤霞等^[37]在同一时期进行的三峡水库沉积物秋末冬初的磷释放通量估算结果,但与尹真真^[38]对三峡库区 2015 年总磷污染负荷的估算结果较为一致(表 2)。

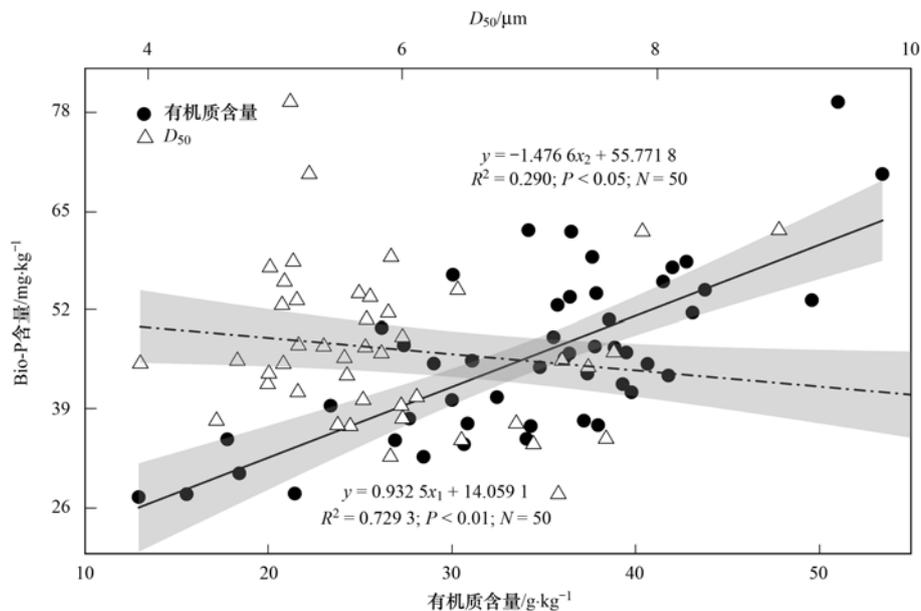
表 2 不同方法对三峡水库内源磷负荷的估算结果

Table 2 Estimated methods and internal phosphorus loading of TGR

方法	调查年份	贡献率	文献
间隙水扩散通量法	2010	磷酸盐释放通量为 $-0.63 \sim 2.02 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 内源磷释放对上覆水的影响程度为 $-0.009\% \sim 0.103\%$	[37]
室内释放模拟法	2015	三峡库区重庆段内源负荷 3.93%, 总磷释放通量为 $0.14 \sim 0.22 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	[38]
生物可利用磷估算法	2010	Bio-P 占比为 2.78%~7.05%	本研究

生物可利用磷含量与有机质呈显著正相关,而与中值粒径呈显著负相关(图 8),这与有机质、生物可利用磷均沿程增加的趋势一致。一般细颗粒沉积物有较大的比表面积,易于有机质营养盐等发生吸附作用^[39],并能够与金属离子形成复合体,为磷酸离子提供更多的吸附点位,从而增加沉积物对磷的吸附作用^[40]。柱状沉积物中生物可利用磷含量与有机质的相关性显著弱于表层沉积物^[25],这表

明沉积物中的磷还发生了一定程度的转化。沉积物 C/N 可以初步区分沉积物中有机质的来源^[41, 42],由图 4 可知,三峡水库沉积物 C/N 变化范围为 4.62~13.52,这表明三峡水库沉积物中的有机碳主要源于藻类和细菌,而陆源高等植物中的有机碳贡献较小。有研究表明,以藻源碎屑为来源的磷降解速度相对较快,且藻类的降解将导致表层沉积物磷的释放^[12, 14],并影响上覆水磷含量,因此,进一



图中 x_1 、 x_2 分别为有机质含量和中值粒径; 阴影区域表示拟合曲线的 95% 置信区间

图 8 Bio-P 含量与有机质含量和 D_{50} 的相关性

Fig. 8 Correlation between sediment Bio-P, D_{50} , and organic matter in the TGR

步研究三峡水库沉积物的来源及沉积物中有机质与磷迁移转化的耦合关系将有助于三峡水库富营养化防治。

由于蓄水导致干流水体流速降低, 水体颗粒磷含量自库尾至坝前呈逐渐降低趋势^[9], 而优先沉积的粗颗粒中 Ca-P 约占 40% 以上^[1], 更为细小的颗粒在沉降过程中, 会持续吸附水体中的磷酸盐等, 因而距大坝越近的颗粒中 Bio-P 的含量会相对增加。随着上游梯级水库的建设及水土流失治理工程的推进, 三峡水库沉积物含量及泥沙粒径正逐步减小^[43], 以寸滩断面为例, 其多年平均含沙量由 $1.24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 降至 $0.598 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[44]。1987 ~ 2002 年寸滩悬移质, 中值粒径为 0.011 mm , 2003 ~ 2010 年减小至 0.009 mm , 粒径 $>0.1 \text{ mm}$ 的颗粒含量也从 10.6% 减少到 6.4%^[45]。由于入库泥沙含量及粒径的降低, 颗粒磷自身粒径导致的沉降差异会逐渐缩小, 水体流速、区间污染物的输入及水化学条件差异引起的颗粒磷沿程沉降, 将逐渐成为沉积物磷形态空间分布差异的重要因素。目前, 三峡水库“蓄清排浑”运行将导致部分河床底部沉积泥沙的剥蚀与再悬浮, 这一过程对沉积物中磷释放潜力的影响尚不清楚, 今后有必要进一步加强相关的研究。

4 结论

(1) 三峡水库干流沉积以粉砂为主, 含量为 49.4% ~ 78.6%。伊利石、石英是沉积物中的主要矿物组分。三峡水库干流沉积物有机质、 D_{50} 等理化

参数沿垂向没有明显的变化趋势。

(2) 沉积物总磷含量为 $861 \sim 1074 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。钙磷是沉积物中的主要形态。总磷及各形态磷垂向分布变化较小, 并未表现出明显变化趋势。

(3) 在同一深度下, 不同断面 Bio-P 的含量及相对含量从云阳至秭归断面均表现为沿程增加趋势, 三峡水库干流沉积物 Bio-P 相对含量为 2.78% ~ 7.05%, 内源释放风险较小。

致谢: 感谢三峡大学水利与环境学院生态水工课题组对本研究的支持, 该课题组提供现场监测数据, 黎国有、过寒超等在采样方面提供帮助, 在此一并致谢!

参考文献:

- [1] Tang X Q, Wu M, Li R. Distribution, sedimentation, and bioavailability of particulate phosphorus in the mainstream of the Three Gorges Reservoir[J]. *Water Research*, 2018, **140**: 44-55.
- [2] James W F. Internal phosphorus loading contributions from deposited and resuspended sediment to the Lake of the Woods[J]. *Lake and Reservoir Management*, 2017, **33**(4): 347-359.
- [3] Kowalczywska-Madura K, Dondajewska R, Goldyn R, et al. The influence of restoration measures on phosphorus internal loading from the sediments of a hypereutrophic lake[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(16): 14417-14429.
- [4] Huang L, Fang H W, He G J, et al. Effects of internal loading on phosphorus distribution in the Taihu Lake driven by wind waves and lake currents[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 760-773.
- [5] Zhang Y, He F, Liu Z S, et al. Release characteristics of sediment phosphorus in all fractions of West Lake, Hang Zhou, China[J]. *Ecological Engineering*, 2016, **95**: 645-651.
- [6] Li W, Joshi S R, Hou G J, et al. Characterizing phosphorus speciation of Chesapeake Bay sediments using chemical

- extraction, ^{31}P NMR, and X-ray absorption fine structure spectroscopy[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(1): 203-211.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Han C N, Zheng B H, Qin Y W, *et al.* Impact of upstream river inputs and reservoir operation on phosphorus fractions in water-particulate phases in the Three Gorges Reservoir[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **610-611**: 1546-1556.
- [10] 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.
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.
- [11] Kpodonu A T N K, Hamilton D P, Hartland A, *et al.* Coupled use of sediment phosphorus speciation and pigment composition to infer phytoplankton phenology over 700 years in a deep oligotrophic lake[J]. *Biogeochemistry*, 2016, **129**(1-2): 181-196.
- [12] Ding S M, Wang Y, Wang D, *et al.* In situ, high-resolution evidence for iron-coupled mobilization of phosphorus in sediments [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 24341.
- [13] Zhu Y R, Feng W Y, Liu S S, *et al.* Bioavailability and preservation of organic phosphorus in lake sediments: Insights from enzymatic hydrolysis and ^{31}P nuclear magnetic resonance [J]. *Chemosphere*, 2018, **211**: 50-61.
- [14] Kwak D H, Jeon Y T, Hur Y D. Phosphorus fractionation and release characteristics of sediment in the Saemangeum Reservoir for seasonal change [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2018, **33**(3): 250-261.
- [15] 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.
- [16] 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, 27.
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, 27.
- [17] 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.
- [18] Luo H J, Liu D F, Huang Y P. Nitrogen characteristics in sediments of Xiangxi Bay, China Three-Gorge Reservoir [J]. *Water and Environment Journal*, 2014, **28**(1): 45-51.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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 it operational effects [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2017, **47**(8): 832-844.
- [22] Tang Q, Bao Y H, He X B, *et al.* Flow regulation manipulates contemporary seasonal sedimentary dynamics in the reservoir fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **548-549**: 410-420.
- [23] 王维, 周俊丽, 裴淑玮, 等. 辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 156-165.
Wang W, Zhou J L, Pei S W, *et al.* Concentrations and distribution of metals in the core sediments from estuary and city section of Liaohe River [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 156-165.
- [24] 王苗苗, 孙志高, 卢晓宁, 等. 调水调沙工程长期实施对黄河河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1256-1262.
Wang M M, Sun Z G, Lu X N, *et al.* Effects of long-term implementation of the flow-sediment regulation scheme on grain and clay compositions of inshore sediments in the Yellow River Estuary [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1256-1262.
- [25] 潘婵娟, 黎睿, 汤显强, 等. 三峡水库蓄水至175m后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2615-2623.
Pan C J, Li R, Tang X Q, *et al.* Assessment of physico-chemical properties and phosphorus fraction distribution characteristics in sediments after impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2615-2623.
- [26] 李必才, 曾淳, 董萌, 等. 北民湖沉积物氮、磷形态竖向分布研究[J]. *湖南城市学院学报(自然科学版)*, 2017, **26**(2): 71-75.
Li B C, Zeng C, Dong M, *et al.* Study about vertical distribution of nitrogen and phosphorus species in the sediments of Beimian Lake [J]. *Journal of Hunan City University (Natural Science)*, 2017, **26**(2): 71-75.
- [27] 邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 等. 山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价[J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1389-1396.
Qiu Z K, Hu X Z, Yao C, *et al.* Pollution characteristics and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic matter in sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1389-1396.
- [28] 冀峰, 王国祥, 韩睿明, 等. 太湖流域农村黑臭河流沉积物中磷形态的垂向分布特征[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(1): 55-63.
Ji F, Wang G X, Han R M, *et al.* Vertical distribution characteristics of phosphorus fractions in the sediments of a rural malodorous black River in Taihu Lake Area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(1): 55-63.

- [29] 刘咏燕, 牛凤霞. 香溪河沉积物中磷形态的垂向分布特征及相关分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2016, **38**(6): 99-107.
Liu Y Y, Niu F X. Vertical distribution and characteristics analysis of phosphorus fractions in sediments at the Xiangxi River [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2016, **38**(6): 99-107.
- [30] 水利部长江水利委员会. 长江泥沙公报 2009-2012 [M]. 武汉: 长江出版社, 2010-2013.
- [31] Ostrofsky M L. Differential post-depositional mobility of phosphorus species in lake sediments [J]. Journal of Paleolimnology, 2012, **48**(3): 559-569.
- [32] 郑煌, 杨丹, 金梦云, 等. 洪湖沉积柱中磷形态的垂直分布及指示意义[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(4): 1540-1547.
Zheng H, Yang D, Jin M Y, *et al.* The vertical distribution of P forms and significance in a sediment core from Honghu Lake, China [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(4): 1540-1547.
- [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] 尹真真, 李璠. 三峡水库蓄水前后长江干流主要污染物浓度变化趋势分析研究[J]. 环境科学与管理, 2014, **39**(3): 42-45.
Yin Z Z, Li J. Variation tendencies of major pollutants concentration in mainstream of Changjiang River before and after in Three Gorges Dam [J]. Environmental Science and Management, 2014, **39**(3): 42-45.
- [35] 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.
- [36] Cao Z J, Zhang X B, Ai N S. Effect of sediment on concentration of dissolved phosphorus in the Three Gorges Reservoir [J]. International Journal of Sediment Research, 2011, **26**(1): 87-95.
- [37] 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.
- [38] 尹真真, 赵丽, 彭昱, 等. 三峡库区重庆段总磷污染源解析及控制对策[J]. 环境工程技术学报, 2018, **8**(1): 51-57.
Yin Z Z, Zhao L, Peng Y, *et al.* Pollution source apportionment and control countermeasure of total phosphorus in Chongqing segment of the Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2018, **8**(1): 51-57.
- [39] 赵忠红, 张乃明, 扈学文, 等. 云南昌宗海表层沉积物有机质组成结构对磷赋存形态特征的影响[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(2): 308-316.
Zhao Z H, Zhang N M, Hu X W, *et al.* Effects of composition and structure of natural organic matter on phosphorus fractions in sediment from Lake Yangzonghai, Yunnan Province [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(2): 308-316.
- [40] 鲍林林, 李叙勇. 河流沉积物磷的吸附释放特征及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(2): 350-356.
Bao L L, Li X Y. Release and absorption characteristics of phosphorus in river sediment and their influential factors [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(2): 350-356.
- [41] 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.
- [42] Lorente F L, Pessenda L C R, Oboh-Ikuenobe F, *et al.* An 11, 000-year record of depositional environmental change based upon particulate organic matter and stable isotopes (C and N) in a lake sediment in southeastern Brazil [J]. Journal of South American Earth Sciences, 2018, **84**: 373-384.
- [43] Gao P, Wang Z Y, Siegel D. Spatial and temporal sedimentation changes in the Three Gorges Reservoir of China [J]. Lakes & Reservoirs: Research and Management, 2015, **20**(4): 233-242.
- [44] 臧小平, 印士勇, 姜保锋, 等. 三峡水库水环境研究 [M]. 武汉: 长江出版社, 2014. 64-71.
- [45] 许全喜, 童辉. 近 50 年来长江水沙变化规律研究[J]. 水文, 2012, **32**(5): 38-47.
Xu Q X, Tong H. Characteristics of flow and sediment change in Yangtze River in recent 50 years [J]. Journal of China Hydrology, 2012, **32**(5): 38-47.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly-and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoideis</i> on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, GUO Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-kan, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiang, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)