

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

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

长三角区域非道路移动机械排放清单及预测	黄成, 安静宇, 鲁君 (3965)
基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率	李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞 (3976)
上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析	杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希 (3987)
广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单	孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启 (3995)
重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布	李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜 (4002)
济南市夏、冬季 PM _{2.5} 中化学组分的季节变化特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰 (4014)
聊城冬季一重污染过程 PM _{2.5} 污染特征及成因分析	张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰 (4026)
夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量	王楠, 马森, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (4034)
晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析	杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林 (4042)
北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价	熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛 (4051)
合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析	孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏桢, 王凤 (4060)
填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质	李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静 (4070)
北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征	李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (4078)
基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析	高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王膜, 滕彦国, 王金生 (4086)
透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估	官曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇 (4096)
黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析	赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸 (4105)
黄河干流宁蒙段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性	席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若绮, 崔锋 (4114)
伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比	李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛 (4122)
马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素	王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡 (4132)
柳江盆地浅层地下水硝化型水特征和成因分析	徐进, 何江涛, 彭毅, 曾颖 (4142)
地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性	张雯, 尹琳, 周念清 (4150)
三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征	张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁 (4161)
蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算	刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明 (4169)
锆改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响	何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静 (4179)
洱海流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响	李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧妹 (4189)
我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应	聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼 (4199)
东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响	储瑜, 何肖微, 曾巾, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙 (4206)
处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程	汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进 (4215)
华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征	胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征 (4222)
制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征	花莉, 李璐, 杨春燕 (4229)
人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较	赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹 (4236)
城市污水管网中不同生化作用的基质流向	姚翔译, 石烜, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌 (4242)
微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染的减缓特性	王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺毓淑, 王磊 (4249)
UV 强化草酸络合 Fe ³⁺ 活化过硫酸盐氧化降解苯胺	韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国 (4257)
焦化废水 A/O ² 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析	吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (4265)
长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响	俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧 (4274)
NaCl 盐度对 A ² /O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响	张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成 (4281)
温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响	陈方敏, 金润, 袁琨, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (4289)
游离氨 (FA) 对氨氧化菌 (AOB) 活性抑制动力学试验	孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓 (4294)
HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响	安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志 (4302)
长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复	李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (4310)
广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析	宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌 (4317)
紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应	罗梅, 田冬, 高明, 黄容 (4327)
秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响	李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳 (4338)
低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力	谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉 (4348)
臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响	周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殷波 (4359)
再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响	韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢 (4366)
黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险	李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇 (4375)
村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析	靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小丹, 於俊颖, 杨惠媛 (4385)
《环境科学》征订启事 (3986)	《环境科学》征稿简则 (4050) 信息 (4085, 4104, 4337)

三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征

张志永^{1,2}, 万成炎², 胡红青^{1*}, 彭建华², 侯娟¹, 丁庆秋², 袁玉洁²

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 武汉 430079)

摘要: 三峡水库完全运行后, 水文节律发生了变化(水位在 145 ~ 175 m 波动), 沉积物和消落带土壤磷的空间分布也有可能发生变化. 2016 年 6 月采集了 11 个样点的沉积物及消落带样品, 利用沉积物中磷形态的标准测试程序(SMT), 对比研究了三峡水库干流表层沉积物及消落带土壤磷形态, 分析了磷形态特征及其在横向(沉积物和消落带土壤)和纵向(回水区末端至三峡大坝)的空间分布特征. 结果表明, 三峡水库回水区末端至三峡坝前, 干流沉积物样品总磷(TP)、NaOH-P 含量呈增加趋势, HCl-P 呈下降趋势, 而消落带土壤磷的各形态含量纵向变化规律不明显. 沉积物 TP、有机磷(OP)、HCl-P 和 NaOH-P 均值依次为(859.6 ± 106.8)、(224.6 ± 113.9)、(435.3 ± 77.7)和(101.5 ± 31.6) mg·kg⁻¹, 均高于消落带土壤含量均值. HCl-P 为沉积物和消落带土壤磷的主要形态, 占 TP 的质量分数分别为 51.3% 和 58.2%, NaOH-P 占 TP 的质量分数分别为 11.7% 和 8.1%. 与沉积物相比, 消落带土壤各形态磷含量变异系数高, 具有较高的空间异质性.

关键词: 三峡水库; 沉积物; 消落带; 磷形态; 空间异质性

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)09-4161-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201711148

Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir

ZHANG Zhi-yong^{1,2}, WAN Cheng-yan², HU Hong-qing^{1*}, PENG Jian-hua², HOU Juan¹, DING Qing-qiu², YUAN Yu-jie²

(1. College of Resource and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, China)

Abstract: Hydrological regimes changed after the Three Gorges Reservoir (TGR) became fully operational, with the water level fluctuating between 145 m and 175 m. This has altered phosphorus (P) distribution within sediments and soils of the water-level-fluctuating zone (WLFZ). Eleven field investigations within the main stream were carried out in June 2016. The aim of the study was to determine lateral (sediment and WLFZ soil) and longitudinal variations (from the end of the backwater area to the Three Gorges Dam) of phosphorus species. P fractions were analyzed using a Standards, Measurements, and Testing (SMT) protocol. Results showed that both TP and NaOH-P content in sediment exhibited a clear increasing trend from the end of the backwater area to the Three Gorges Dam, while HCl-P declined. Average of totals P, OP (organic P), HCl-extracted P (HCl-P, calcium-bound P), and NaOH-extracted P (NaOH-P, metal oxide-bound P) in sediment were (859.6 ± 106.8), (224.6 ± 113.9), (435.3 ± 77.7), and (101.5 ± 31.6) mg·kg⁻¹, respectively. The concentration average of P species in sediment was higher than in WLFZ soil. In both sediment and soil, HCl-P was the main form of P, accounting for 51.3% and 58.2% of TP, while the ratio of NaOH-P to TP was 11.7% and 8.1%, respectively. P fractions with a higher coefficient of variation had greater spatial heterogeneity.

Key words: Three Gorges Reservoir; sediment; water-level-fluctuating zone; phosphorus forms; spatial heterogeneity

由于防洪、发电、灌溉和航运等需要, 世界范围内的河流上构筑了越来越多的大坝. 水资源梯级开发利用的同时势必对流域生态系统保护造成较大压力, 对生境的累积效应逐渐凸显, 日益受到关注. 水电梯级开发显著改变了河流水文、水环境(pH、温度和溶解氧)等, 进而影响到沉积物中磷的沉积与释放, 对于河流、水库磷素的潜在风险评价至关重要^[1]. 磷是水体富营养化的重要限制因子, 沉积物等基质中的磷形态可分为有机磷(OP)和无

机磷(IP). 不同形态的磷, 由于其物理化学性质、水-土界面的迁移转化过程不同, 对上覆水产生的影响有差异. 沉积物中的磷向上覆水释放还是吸收, 取决于多方面的因素, 如沉积物特性、磷赋存

收稿日期: 2017-11-16; 修订日期: 2018-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679154); 国家重点研发计划项目(2016YFC0502208)

作者简介: 张志永(1979~), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为土壤化学与环境, E-mail: zhangzy@mail.ihe.ac.cn

* 通信作者, E-mail: hqhu@mail.hzau.edu.cn

形态、孔隙水和上覆水磷质量浓度,以及水文和水环境条件等^[2-4].

三峡水库是国家战略性淡水资源库,被国家列为环境保护重点区域. 三峡大坝在 2003 年完成第一期蓄水,2010 年 10 月成功蓄水至 175 m. 三峡水库运行后,水位抬高、流速减缓,水体自净能力降低,加之流域入库污染负荷居高不下,水体污染物滞留导致局部水域富营养化加剧. 消落带土壤氮、磷的运移及释放对三峡水库水体富营养化具有一定的影响,在落干周期内,土壤氮、磷以地表径流的形式汇入水体,在淹没周期内,消落带土壤氮、磷会释放入水体,也有可能吸附水体中的氮、磷,因此消落带既有可能是氮、磷污染的源,也有可能是氮、磷污染的汇^[5,6]. 目前针对三峡水库沉积物及消落带土壤磷的研究,集中在磷的赋存形态^[7-9]、磷的吸附与释放特性^[5,10]、上覆水和孔隙水中的正磷酸盐含量^[11]等,对深入了解三峡水库水体富营养化现状和进程具有重要的意义. 考虑到三峡水库消落带土壤类型多样,底泥特性复杂,人类活动干扰大,全面认识水库沉积物及消落带土壤磷的空间变化规律尚需更多的数据支撑. 本文将三峡水库干流沉积物及消落带土壤结合起来进行研究,分析磷形态特征及其在横向和纵向的空间分布特征,对全面、客观评价三峡水库沉积物及消落带土壤磷的积累和释放风险提供重要的参考依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

三峡库区是指三峡水库淹没涉及的区县,位于东经 $105^{\circ}44' \sim 111^{\circ}39'$,北纬 $28^{\circ}32' \sim 31^{\circ}44'$ 之间. 工程坝址以上控制流域面积 100 万 km^2 . 地处我国中亚热带湿润地区,年平均气温 $14.9 \sim 18.5^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 1 000 ~ 1 300 mm. 三峡工程试验性蓄水期间(2008 ~ 2012 年),长江干流国控断面总磷质量浓度呈上升趋势,若按河流评价为 III 类水质,若按湖库评价则为 V,属中度污染. 总氮质量浓度一直为 V 类,属中度污染,38 条支流总磷、总氮污染持续加重. 虽然支流水华发生频次较 2003 年蓄水后 4 a(2004 ~ 2007 年)有所下降,但水体的富营养化物质并没有改善,仍需高度关注并加以防范^[12].

1.2 样品采集

2016 年 6 月在长江干流江津区珞璜镇、渝北区洛碛镇、涪陵区南沱镇、忠县石宝寨、万州区新田镇、云阳县双江镇、巫山县巫峡镇、巴东县官渡口镇、秭归县沙镇溪镇、秭归县水田坝乡、秭归县郭家坝乡等区域设置了 11 个样点(图 1). 利用手动取土钻在消落带高程 145 ~ 175 m 区域呈 S 形状钻取 6 个表层土壤(0 ~ 20 cm),充分混匀后装入聚乙烯密封袋,带回实验室内自然风干. 用彼得森采泥器采集表层沉积物样品,为了取得代表性样品,样

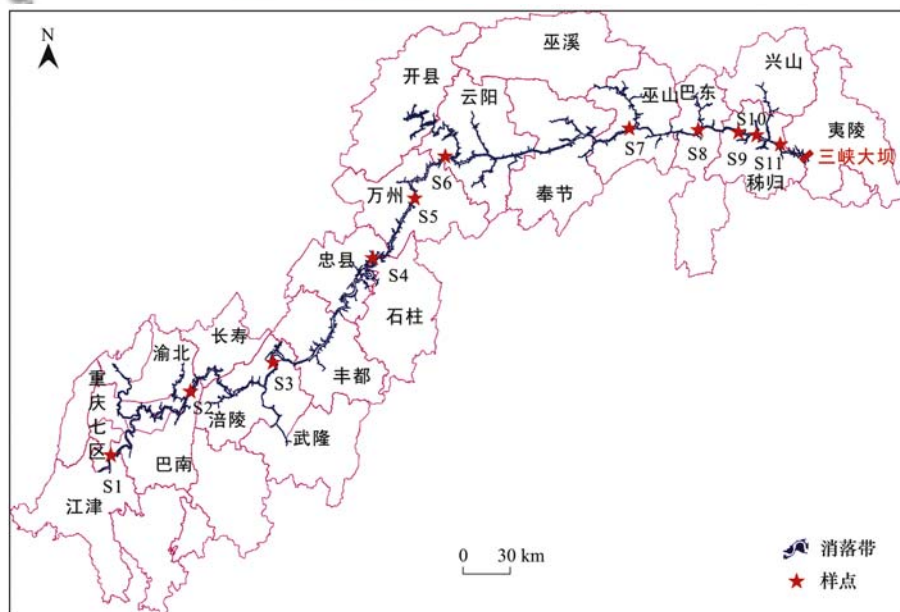


图 1 三峡水库沉积物及土壤采样点分布示意

Fig. 1 Sketch map showing distribution of sediment and soil sampling sites in the Three Gorges Reservoir

点布设时, 根据实际情况, 每个样点设置 3~5 个子样点, 子样点间距 50~100 m, 现场充分混匀后装入清洁的聚乙烯密封袋中, 运回实验室内自然风干. 用玛瑙研钵研磨消落带土壤及沉积物样品, 过 100 目筛, 然后密封低温保存待测.

1.3 沉积物磷形态测定

沉积物磷形态的研究方法中最成熟的是化学连续提取法, 最常用的方法是 SMT (Standard Measurements Testing Program of European Union).

本文采用改进的 SMT 分级法进行沉积物各形态磷的提取(图 2), OP 含量根据差减法得到^[13, 14]. 通过使用不同性质的提取剂 HCl、NaOH 提取, 将沉积物磷分为无机磷(IP)、有机磷(OP)、NaOH 提取态磷(NaOH-P, 主要为 Fe/Al/Mn-P)、HCl 提取态磷(HCl-P, 主要为 Ca-P)及 3.5 mol·L⁻¹ HCl 提取总磷(HCl-TP). 每个提取步骤后, 离心机离心 15 min, 分离固液相, 采用钼锑抗分光光度法测定提取液磷含量^[13].

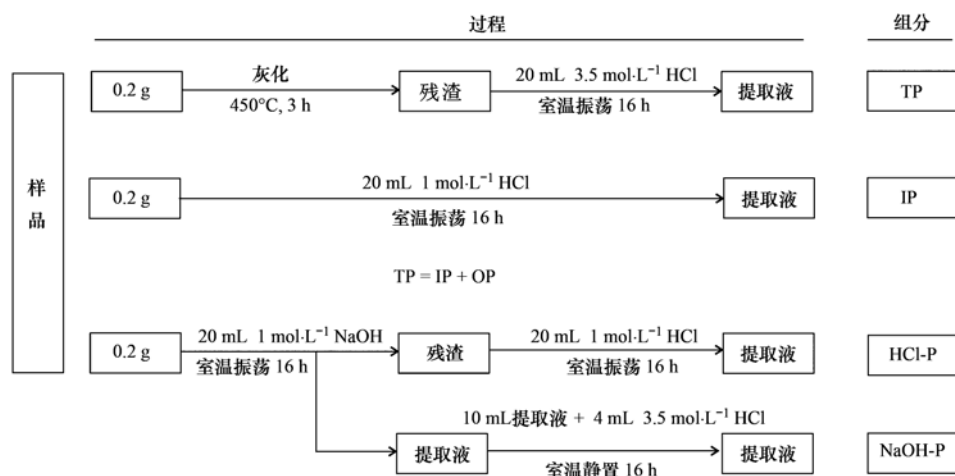


图2 SMT 分级法

Fig. 2 SMT harmonized protocol

1.4 数据分析

采用软件 Microsoft Excel 2007 分析试验数据, Origin 9.0 绘图, SPSS 18.0 分析沉积物及土壤样品中各形态磷的 Pearson 相关性, Two-tailed 检验.

2 结果与分析

2.1 沉积物及消落带土壤总磷分布特征

从上游至下游, 沉积物样品总磷(TP)含量呈增加趋势, 均值为(859.6 ± 106.8) mg·kg⁻¹, 秭归县郭家坝乡(S11)处最大(1080.4 mg·kg⁻¹), 江津区珞璜镇处(S1)最小(716.0 mg·kg⁻¹), 变异系数为 12.4% [图 3(a)].

从上游至下游, 消落带土壤样品 TP 含量没有明显的变化规律, 均值为(627.2 ± 166.9) mg·kg⁻¹, 秭归县沙镇溪镇(S9)处最大(835.2 mg·kg⁻¹), 巴东县官渡口镇(S8)处最小(328.6 mg·kg⁻¹), 除江津区珞璜镇外, 其余样点消落带土壤 TP 含量均低于沉积物样品[图 3(a)]. TP 变异系数高于沉积物样品, 为 26.6%, 这说明消落带土壤 TP 含量具有较高的空间异质性.

2.2 沉积物及消落带土壤有机磷分布特征

从上游至下游, 沉积物样品中有机磷(OP)含量变化规律不明显, 均值为(224.6 ± 113.9) mg·kg⁻¹ [图 4(a)], 秭归县郭家坝(S11)处最大(390.2 mg·kg⁻¹), 江津区珞璜镇(S1)处最小(73.8 mg·kg⁻¹), 变异系数为 50.7% [图 3(b)].

从上游至下游, 消落带土壤样品 OP 含量也没呈现出明显的变化规律, 均值为(129.1 ± 48.1) mg·kg⁻¹, 涪陵区南沱镇(S3)处最大(217.4 mg·kg⁻¹), 秭归县郭家坝(S11)处最小(39.5 mg·kg⁻¹). 消落带土壤 OP 变异系数低于沉积物样品, 为 37.2%. 除江津区珞璜镇(S1)和秭归县沙镇溪镇(S9)外, 其余样点消落带土壤 OP 含量均低于沉积物样品.

沉积物和消落带土壤样品 OP 占 TP 的质量分数范围分别在 8.7%~41.9% 和 5.78%~52.3% 之间, 平均为 25.4% 和 22.6% [图 4(b)].

2.3 沉积物及消落带土壤无机磷分布特征

沉积物样品中无机磷(IP)含量没有明显的空间变化规律, 均值为(635.0 ± 76.7) mg·kg⁻¹, 秭归县沙镇溪镇(S9)处最大(785.8 mg·kg⁻¹), 巫山县巫峡镇处(S7)最小(510.2 mg·kg⁻¹), 变异系数为

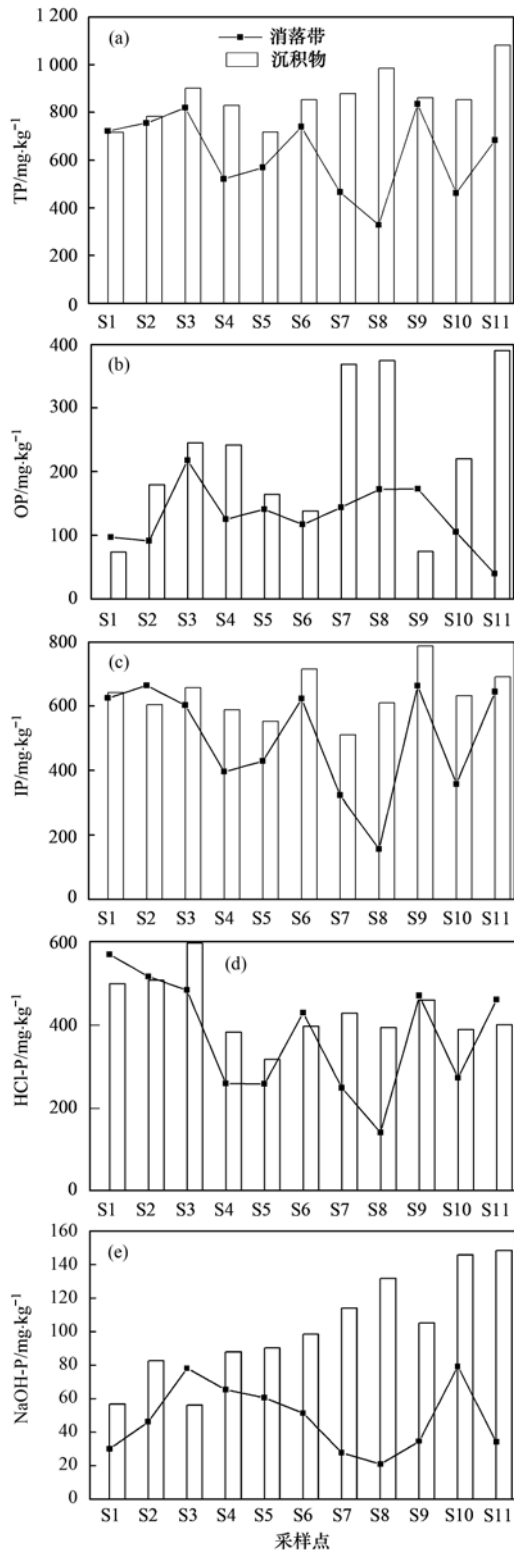


图3 沉积物和消落带土壤中各形态磷的分布

Fig. 3 Distribution of phosphorus forms in sediment and soil of the water-level-fluctuating zone

12.1% [图3(c)]。

消落带土壤样品 IP 含量也没有明显的空间变化规律, 均值为 $(498.0 \pm 173.5) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 渝北区洛碛镇(S2)处最大 $(663.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1})$, 巴东县官渡

口镇(S8)处最小 $(156.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ 。消落带土壤 IP 变异系数高于沉积物样品, 为 34.8%。除渝北区洛碛镇(S2)外, 其余样点消落带土壤 IP 含量均低于沉积物样品。

沉积物和消落带土壤样品中 IP 占 TP 的质量分数范围分别在 58.1%~91.3% 和 47.7%~94.2%, 平均为 74.6% 和 77.4%, 说明 IP 为研究区域内 TP 的主要形态。

应用 SMT 法测得的无机磷 (IP) 包括 HCl-P 和 NaOH-P 两部分。

(1) 沉积物及消落带土壤 HCl-P 从上游至下游, 沉积物样品中 HCl-P 呈下降趋势 [图3(d)], 均值为 $(435.3 \pm 77.7) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [图4(a)], 涪陵区南垞镇(S3)处最大, 秭归县水田坝乡(S10)处最小, 变异系数为 17.9%。

消落带土壤样品 HCl-P 含量在空间分布上没有明显的变化规律, 均值为 $(374.4 \pm 141.5) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 江津区珞璜镇(S1)处最大, 巴东县官渡口镇(S8)处最小。消落带土壤 HCl-P 变异系数高于沉积物样品, 为 37.8%。除江津区珞璜镇(S1)、云阳县双江镇(S6)、秭归县沙镇溪镇(S9)和秭归县郭家坝乡(S11)外, 其余样点消落带土壤 HCl-P 含量均低于沉积物样品 [图3(d)]。

沉积物和消落带土壤样品中 HCl-P 占 TP 的质量分数范围分别在 37.2%~70.0% 和 42.6%~79.2%, 平均为 51.3% 和 58.2% [图4(b)]。

(2) 沉积物及消落带土壤 NaOH-P 从上游至下游, 沉积物样品中 NaOH-P 呈增加趋势, 均值为 $(101.5 \pm 31.6) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 秭归县水田坝乡(S10)处最大, 涪陵区南垞镇(S3)处最小, 变异系数为 31.1%。

消落带土壤样品 NaOH-P 含量在空间分布上没有明显的变化规律, 均值为 $(48.0 \pm 20.5) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 秭归县水田坝乡(S10)处最大, 江津区珞璜镇(S1)处最小, 变异系数高于沉积物样品, 为 42.6%。除涪陵区南垞镇(S3)外, 其余样点消落带土壤 NaOH-P 含量均低于沉积物样品 [图3(e)]。

沉积物和消落带土壤样品中 NaOH-P 占 TP 的质量分数范围分别在 6.2%~17.1% 和 4.2%~17.2%, 平均为 11.7% 和 8.1% [图4(b)]。

2.4 沉积物及消落带土壤各形态磷相关性分析

沉积物样品中 TP 含量与 OP、NaOH-P 含量呈极显著正相关, 与 IP 和 HCl-P 的相关性较弱。消落带土壤样品中 TP 含量与 IP、HCl-P 含量呈极显著正相关, 与 OP 和 NaOH-P 的相关性较弱, IP 与 HCl-P 含量呈极显著正相关 (表1)。

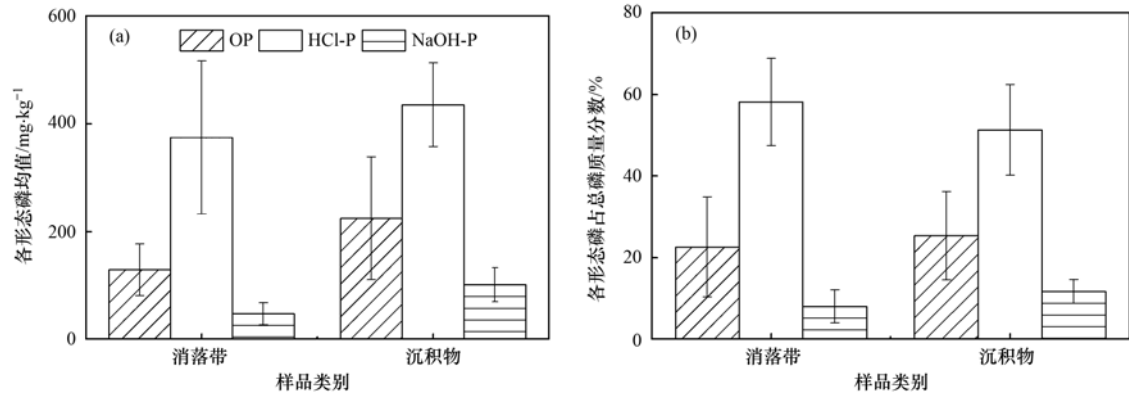


图4 沉积物和消落带土壤中各形态磷均值及其占总磷的百分比均值

Fig. 4 Average content and ratio of phosphorus forms in sediment and soil of the water-level-fluctuating zone

表1 沉积物及消落带土壤中各形态磷间的相关系数¹⁾

Table 1 Correlation coefficients between phosphorus forms in sediment and soil of the water-level-fluctuating zone		TP	IP	OP	HCl-P	NaOH-P
样品类别						
沉积物 (n = 11)	TP	1				
	IP	0.264	1			
	OP	0.760 **	-0.426	1		
	HCl-P	-0.021	0.249	-0.188	1	
	NaOH-P	0.652 **	0.053	0.576	-0.589	1
消落带土壤 (n = 11)	TP	1				
	IP	0.961 **	1			
	OP	0.003	0.274	1		
	HCl-P	0.915 **	0.948 **	-0.246	1	
	NaOH-P	0.127	0.071	0.184	-0.018	1

1) ** 表示 $P < 0.01$

3 讨论

沉积物是水域生态系统的重要组成部分,是巨大的营养和污染物储存库,在生物地球化学循环中起着重要作用. 沉积物磷含量及其赋存形态受到沉积作用、成岩作用、生物扰动等多种因素影响,在不同水体中表现出不同的时空分布特性. 本研究结果表明,从回水区末端(江津区珞璜镇)至三峡大坝,三峡水库干流沉积物 TP 含量呈增加趋势. 在波兰图拉瓦水库(Turawa Reservoir)^[15]和澜沧江梯级水库^[16]中的沉积物磷也有这种变化趋势. 可能是大坝的建设运行导致了河流水体流速减缓,总悬浮颗粒下沉,磷滞留量增加. 已有证据表明水库滞留外源磷负荷可达 42.0%~74.0%,主导机制为颗粒磷的沉降^[17, 18]. 沉积物和消落带土壤氮磷的吸附与解析能力取决于样品的氮磷含量与上覆水质,沉积物和土壤的氮磷含量越高,对水体氮磷的吸附能力就越弱,对水体释放氮磷的能力就越强^[2-5, 10]. 三峡水库干流沉积物 TP 均值为 $(859.6 \pm 106.8) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高于其它研究者的结果^[8, 19],

与长江流域中下游湖泊沉积物 TP 含量相比^[20~22],三峡水库沉积物和消落带土壤磷的含量偏高(表 2). 因此,需要密切关注,加强监测,防范三峡水库沉积物磷的释放风险.

与沉积物相比,三峡水库干流消落带土壤 TP 具有较高的空间异质性,有可能是因为水库水位周期性的涨落,消落带土壤呈周期性干湿交替,也有可能是人类活动的影响. 本研究表明消落带土壤 TP 空间变异系数(26.6%),高于沉积物(12.4%)也说明了这点. 消落带 TP 含量均值 $(627.2 \pm 166.9) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与叶琛等^[23]和张彬等^[24]的研究结果相近,高于刘娜等^[25]的研究. 干流消落带土壤 TP 含量均值低于支流^[26](表 2). 干流沉积物 TP 含量高于消落带土壤,而这与徐德星等^[27]在大宁河的研究结果不尽相同,6 个调查样地中 S6(靠近长江干流区域)和 S2 处的沉积物 TP 含量高于消落带土壤,指出其它 4 个点消落带土壤磷含量高于沉积物的原因是:采样点靠近农业耕种区,农业耕作过程中施用的化肥对消落带土壤磷含量影响较大.

有机磷(OP)的组分相对复杂,主要以肌醇磷酸盐、磷脂、核酸等形式存在,主要来源于农业面源. Rydin 等^[28]指出 50.0% 的 OP 可被同化或矿化,被水生植物和藻类直接利用. 某些组分也可以转化为活性磷被水生生物利用^[29]. 本研究表明,三峡水库沉积物和消落带土壤样品中 OP 占 TP 的质

量分数范围分别在 8.7% ~ 41.9% 和 5.78% ~ 52.3%, 平均值为 25.4% 和 22.6%, 这和张彬等^[24]对消落带土壤的研究结果相近(均值为 21.7%), 而低于徐德星等^[27]在三峡水库支流大宁河的研究结果(沉积物和消落带土壤 OP 含量的质量分数分别为 38.7% 和 43.7%).

表 2 三峡水库、长江中下游湖泊沉积物和消落带土壤 TP 含量比较

Table 2 Comparison of total phosphorus content in sediment and soil of the water-level-fluctuating zone between the Three Gorges Reservoir and lakes of the mid-lower reaches of the Yangtze River

样品类别	研究区域	采样日期(年-月)	TP 范围 /mg·kg ⁻¹	TP 均值 /mg·kg ⁻¹
沉积物	三峡水库干流(本研究)	2016-06 ~ 2016-07	716.0 ~ 1 080.4	859.6 ± 106.8
	三峡水库干流 ^[7]	2014-07	— ¹⁾	906.0 ± 105.0
	三峡水库大宁河 ^[27]	2007-10	483.4 ~ 848.4	569.0
	鄱阳湖 ^[22]	2012-11	297.0 ~ 1 072.0	565.0 ± 293.0
	太湖 ^[21]	2009-05	294.6 ~ 912.8	560.5 ± 153.2
	长江中下游湖泊 ^[20]	2008	217.8 ~ 3 337.2	757.0 ± 694.5
消落带土壤	三峡水库干流(本研究)	2016-06 ~ 2016-07	328.6 ~ 835.2	627.2 ± 166.9
	三峡水库干流 ^[25]	2014-07	152.8 ~ 1 022.7	547.5 ± 169.7
	三峡水库重庆段 ^[24]	2010-04	280.0 ~ 1 320.0	630.0
	三峡水库干流 ^[23]	2008-08 ~ 2008-09	340.0 ~ 1 040.0	630.0 ± 180.0
	三峡水库支流 ^[26]	2008-02 ~ 2008-08	314.0 ~ 2 799.0	676.0 ± 282.0
	三峡水库大宁河 ^[27]	2007-10	488.9 ~ 1 487.7	813.3

1) “—”表示文献中没有相关数据

SMT 法提取的 IP 主要包括 HCl-P 和 NaOH-P. 其中 Ca-P 是沉积物和消落带土壤磷中最主要的赋存形态. 本研究表明沉积物及消落带土壤 Ca-P 均值分别为 (435.3 ± 77.7) mg·kg⁻¹ 和 (374.4 ± 141.5) mg·kg⁻¹, 占 TP 的质量分数均值达 51.3% 和 58.2%. 这说明 Ca-P 是活性较低的惰性磷, 不论是沉积物, 还是淹水过程中的消落带土壤, Ca-P 都很难从基质中向水体释放. 已有其它研究表明 Ca-P 主要来源于碎屑岩, 自然水体中溶解度低, 对间隙水、上覆水磷以及磷潜在释放的影响较小, 一般被认为是生物不可利用的磷^[2], 只有在 pH 骤降时可大量释放, 成为内源磷的潜在来源^[30, 31]. 三峡水库水体常年呈弱碱性, 因此 Ca-P 释放风险较小.

NaOH-P 指被 Al、Fe、Mn 的氧化物及其水合物所包裹的磷, 是不稳定磷形态. 当沉积物中的氧化还原环境发生改变时, NaOH-P 也可以转换成可溶性磷, 通过间隙水进入水体, 影响水库水质, 或被水生植物和藻类直接利用^[32]. NaOH-P 主要来源于生活污水和工业废水, 常被认为沉积物污染程度的依据之一. 本研究表明三峡水库沉积物 NaOH-P 均值为 (101.5 ± 31.6) mg·kg⁻¹, 占 TP 的质量分数仅为 11.7%, 低于太湖 (15.7%)^[21]. 三峡水库沉积物和消落带土壤样品中 NaOH-P 的变异系数均高

于 Ca-P, 分别为 31.1% 和 42.6%, 说明 NaOH-P 对环境变化的敏感程度高于 Ca-P.

分析河岸带土壤及沉积物中各形态磷之间的相关性, 有助于认识和了解各形态磷来源是否存在差异, 以及是否相互转化. 本结果表明沉积物中 TP 和 NaOH-P、OP 均有显著正相关, 而与 IP 和 HCl 的相关性较弱; 消落带土壤 TP 和 IP 与 HCl 显著正相关, 而与 NaOH-P、OP 的相关性较弱(表 1), 这与徐德星等^[27]在大宁河的研究结果相同. 导致这种现象的原因可能是沉积物和消落带所处的环境不同(沉积物一直在水下, 厌氧环境, 而消落带土壤处于干湿交替环境), 也有可能不同形态磷的来源存在着差异, 或者磷形态之间发生了相互转化^[33], 具体原因尚需进一步研究.

不同形态的磷, 由于其物理化学性质、水-土界面的迁移转化过程不同, 对上覆水产生的影响有差异. 其中 NaOH-P 的释放和 OP 的分解作为水体活性磷, 可为水生植物和藻类提供直接利用磷. 因此, 需要特别关注这两种形态磷的释放对三峡水库水体富营养化的影响. 虽然消落带土壤 TP、OP、NaOH-P 的含量均值低于沉积物, 但是由于消落带土壤呈周期性干湿交替, 消落带出露期间, 季节性耕种农作物及放牧牛羊等人类活动, 可能增大淹没

期消落带土壤磷释放风险。

4 结论

(1) 三峡水库回水区末端至三峡坝前, 干流表层沉积物总磷 (TP)、NaOH-P 含量呈增加趋势, HCl-P 呈下降趋势, 而消落带土壤各形态磷含量没有呈现明显的空间变化规律。

(2) 三峡水库沉积物 TP、OP、IP、HCl-P 和 NaOH-P 含量均值分别为 (859.6 ± 106.8) 、 (224.6 ± 113.9) 、 (635.0 ± 76.7) 、 (435.3 ± 77.7) 和 $(101.5 \pm 31.6) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 沉积物各形态磷含量均值大于消落带土壤。

(3) 与沉积物相比, 三峡水库消落带土壤 TP、OP、IP、HCl-P 和 NaOH-P 含量具有较高的空间异质性, 它们的变异系数依次为 26.6%、37.2%、34.8%、37.8% 和 42.6%。其中 Ca-P 是沉积物及消落带土壤中最主要的磷赋存形态, 占 TP 的质量分数均值分别为 51.3% 和 58.2%。

参考文献:

- [1] 龚春生, 范成新. 不同溶解氧水平下湖泊底泥-水界面磷交换影响因素分析[J]. 湖泊科学, 2010, 22(3): 430-436.
Gong C S, Fan C X. Effect factors analysis of phosphorus exchange across lake sediment-water interface under different dissolved oxygen concentration[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(3): 430-436.
- [2] 张路, 范成新, 王建军, 等. 长江中下游湖泊沉积物氮磷形态与释放风险关系[J]. 湖泊科学, 2008, 20(3): 263-270.
Zhang L, Fan C X, Wang J J, et al. Nitrogen and phosphorus forms and release risks of lake sediments from the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(3): 263-270.
- [3] 向速林, 陶术平, 吴代赦. 鄱阳湖沉积物和水界面磷的交换通量[J]. 湖泊科学, 2017, 29(2): 326-333.
Xiang S L, Tao S P, Wu D S. Exchange fluxes of phosphorus at the sediment-water interface in Lake Poyang[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(2): 326-333.
- [4] Hongthanat N, Kovar J L, Thompson M L, et al. Phosphorus source-sink relationships of stream sediments in the Rathbun Lake watershed in southern Iowa, USA[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(8): 453.
- [5] 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.
- [6] 朱强, 张志永, 胡红青, 等. 淹没-出露条件下三峡水库小江消落带土壤性质变化研究[J]. 土壤, 2014, 46(5): 927-932.
Zhu Q, Zhang Z Y, Hu H Q, et al. Soil property changes under drain-flooding condition in Xiaojiang water-level-fluctuating belt of the Three-Gorge-Reservoir region[J]. Soils, 2014, 46(5): 927-932.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Zhang W Q, Jin X, Zhu X L, et al. Phosphorus characteristics, distribution, and relationship with environmental factors in surface sediments of river systems in Eastern China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(19): 19440-19449.
- [10] 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.
- [11] 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 phosphorus in the Three Gorges Reservoir during late autumn and early winter[J]. Environmental Science, 2013, 34(4): 1308-1314.
- [12] 中国工程院三峡工程试验性蓄水阶段评估项目组. 三峡工程试验性蓄水阶段评估报告[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014. 180-187.
- [13] 张文强, 李洁, 金鑫, 等. 基于 ^{31}P -NMR 与 SMT 方法的海河流域典型河流沉积物中磷形态特征研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(6): 1891-1900.
Zhang W Q, Li J, Jin X, et al. Detection of phosphorus components in the sediments of typical river in the Haihe Basin by SMT and ^{31}P -NMR[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(6): 1891-1900.
- [14] Shan B Q, Li J, Zhang W Q, et al. Characteristics of phosphorus components in the sediments of main rivers into the Bohai sea[J]. Ecological Engineering, 2016, 97: 426-433.
- [15] Trojanowska A, Jezierski P. Phosphorus in sediments and pore waters of selected Polish dam reservoirs[J]. Oceanological and Hydrobiological Studies, 2011, 40(2): 72-85.
- [16] Liu Q, Liu S L, Zhao H D, et al. The phosphorus speciations in the sediments up-and down-stream of cascade dams along the middle Lancang River[J]. Chemosphere, 2015, 120: 653-659.
- [17] Kõiv T, Nõges T, Laas A. Phosphorus retention as a function of external loading, hydraulic turnover time, area and relative depth in 54 lakes and reservoirs[J]. Hydrobiologia, 2010, 660(1): 105-115.
- [18] Cunha D G F, Do Carmo Calijuri M, Dodds W K. Trends in nutrient and sediment retention in Great Plains reservoirs (USA)[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(2): 1143-1155.
- [19] 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.
- [20] 金相灿, 庞燕, 王圣瑞, 等. 长江中下游浅水湖沉积物磷形态及其分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(1): 279-285.
- Jin X C, Pang Y, Wang S R, *et al.* Phosphorus forms and its distribution character in sediment of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, **27**(1): 279-285.
- [21] 袁和忠, 沈吉, 刘恩峰, 等. 太湖水体及表层沉积物磷空间分布特征及差异性分析[J]. 环境科学, 2010, **31**(4): 954-960.
- Yuan H Z, Shen J, Liu E F, *et al.* Space distribution characteristics and diversity analysis of phosphorus from overlying water and surface sediments in Taihu lake[J]. Environmental Science, 2010, **31**(4): 954-960.
- [22] 王悦敏, 倪兆奎, 冯明雷, 等. 鄱阳湖枯水期沉积物磷释放特征及对水位变化响应[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(10): 3804-3812.
- Wang Y M, Ni Z K, Feng M L, *et al.* Characteristics of phosphorus release in sediment and its response to the change of water level in Poyang Lake in dry season[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(10): 3804-3812.
- [23] 叶琛, 程晓莉, 张全发. 三峡库区消落区蓄水前土壤养分分布特征[J]. 土壤通报, 2011, **42**(6): 1404-1410.
- Ye C, Cheng X L, Zhang Q F. Characteristics of soil nutrient distribution in the water-level-fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir, China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, **42**(6): 1404-1410.
- [24] 张彬, 方芳, 陈猷鹏, 等. 三峡水库消落区土壤理化特征及磷赋存形态研究[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(3): 713-720.
- Zhang B, Fang F, Chen Y P, *et al.* Phosphorus speciation and physical-chemical characteristics in the soils of water-level-fluctuating zone in the central district of Three Gorges Reservoir area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(3): 713-720.
- [25] 刘娜, 李璐璐, 魏世强. 三峡库区消落带沉积物与土壤磷形态及分配特征研究[J]. 水土保持学报, 2016, **30**(4): 261-267, 287.
- Liu N, Li L L, Wei S Q. Phosphorus forms and distribution characteristics in sediments and soils of water-level-fluctuating zones of Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, **30**(4): 261-267, 287.
- [26] 郭劲松, 贺阳, 付川, 等. 三峡库区腹心地带消落区土壤氮磷含量调查[J]. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(3): 311-317.
- Guo J S, He Y, Fu C, *et al.* Investigation of soil nitrogen and phosphorus in water fluctuation zone in central district of Three Gorges Reservoir area[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, **19**(3): 311-317.
- [27] 徐德星, 秦延文, 张雷, 等. 三峡入库河流大宁河回水区沉积物和消落带土壤磷形态及其分布特征研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(5): 1337-1344.
- Xu D X, Qing Y W, Zhang L, *et al.* Phosphorus forms and its distribution characteristics in sediments and soils of water-level-fluctuating zone of the backwater reach from input river of Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2009, **30**(5): 1337-1344.
- [28] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment[J]. Water Research, 2000, **34**(7): 2037-2042.
- [29] Worsfold P J, Monbet P, Tappin A D, *et al.* Characterisation and quantification of organic phosphorus and organic nitrogen components in aquatic systems: A review[J]. Analytica Chimica Acta, 2008, **624**(1): 37-58.
- [30] Huang Q H, Wang Z J, Wang C X, *et al.* Phosphorus release in response to pH variation in the lake sediments with different ratios of iron-bound P to calcium-bound P[J]. Chemical Speciation & Bioavailability, 2005, **17**(2): 55-61.
- [31] 袁和忠, 沈吉, 刘恩峰, 等. 模拟水体 pH 控制条件下太湖梅梁湾沉积物中磷的释放特征[J]. 湖泊科学, 2009, **21**(5): 663-668.
- Yuan H Z, Shen J, Liu E F, *et al.* Characteristic of phosphorus release with the control of pH of sediments from Meiliang Bay, Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, **21**(5): 663-668.
- [32] Zhu M Y, Zhu G W, Li W, *et al.* Estimation of the algal-available phosphorus pool in sediments of a large, shallow eutrophic lake (Taihu, China) using profiled SMT fractional analysis[J]. Environmental Pollution, 2013, **173**: 216-223.
- [33] 周健, 李春辉, 张志永, 等. 淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(1): 130-136.
- Zhou J, Li C H, Zhang Z Y, *et al.* Effects of flooding and drying on the transformation of soil inorganic phosphorus in the water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(1): 130-136.

CONTENTS

Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China	HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)
Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province	LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (3976)
Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai	YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, <i>et al.</i> (3987)
Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province	SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (3995)
Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (4002)
Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Summer and Winter in Ji'nan City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4014)
PM _{2.5} Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (4026)
Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer	WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (4034)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng	YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, <i>et al.</i> (4042)
Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, <i>et al.</i> (4051)
Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City	MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, <i>et al.</i> (4060)
Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face	LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, <i>et al.</i> (4070)
Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing	LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, <i>et al.</i> (4078)
Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment	GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, <i>et al.</i> (4086)
Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads	GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, <i>et al.</i> (4096)
Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River	 ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, <i>et al.</i> (4105)
Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions	XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, <i>et al.</i> (4114)
Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring	LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4122)
Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin	WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, <i>et al.</i> (4132)
Characteristics and Genesis of NO ₃ Type Water in Shallow Groundwater in Lujiang Basin	XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (4142)
Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution	 ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)
Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir	 ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i> (4161)
Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment	 LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment	HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (4179)
Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin	LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-liang, <i>et al.</i> (4189)
Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China	NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, <i>et al.</i> (4199)
Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu	CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4206)
Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater	WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, <i>et al.</i> (4215)
Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China	HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (4222)
Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes	HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)
Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification	ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, <i>et al.</i> (4236)
Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network	YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, <i>et al.</i> (4242)
Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process	WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, <i>et al.</i> (4249)
Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate	HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (4257)
Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O ² and A/O/H/O Processes	WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, <i>et al.</i> (4265)
Effects of Long-term Side Stream Extract on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System	YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, <i>et al.</i> (4274)
Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A ² /O Process	ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, <i>et al.</i> (4281)
Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process	CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, <i>et al.</i> (4289)
Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB)	SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, <i>et al.</i> (4294)
Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification	AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, <i>et al.</i> (4302)
Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage	LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, <i>et al.</i> (4310)
Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi	SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, <i>et al.</i> (4317)
Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar	LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, <i>et al.</i> (4327)
Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System	LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4338)
Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite	 XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, <i>et al.</i> (4348)
Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves	ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, <i>et al.</i> (4359)
Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms	HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, <i>et al.</i> (4366)
Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment	 LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (4375)
Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis	JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, <i>et al.</i> (4385)