

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第6期

Vol.38 No.6

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

PM _{2.5} 浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例	吴健生,王茜,李嘉诚,涂媛杰 (2191)
北京地区近35年大气污染扩散条件变化	郭淳薇,孙兆彬,李梓铭,张小玲,杨慧玲 (2202)
北京市典型区域夏季降水及其对大气污染物的影响	韩力慧,张海亮,向欣,张鹏,程水源,魏巍 (2211)
北京山谷风环流特征分析及其对PM _{2.5} 浓度的影响	董群,赵普生,王迎春,苗世光,高健 (2218)
北京市建筑施工扬尘排放特征	薛亦峰,周震,黄玉虎,王堃,聂滕,聂磊,秦建平 (2231)
生物质成型燃料锅炉挥发性有机物排放特征	吴昌达,张春林,白莉,沈雨冉,王伯光,刘军,杨立辉 (2238)
广州番禺大气成分站复合污染过程VOCs对O ₃ 与SOA的生成潜势	邹宇,邓雪娇,李菲,殷长泰 (2246)
南京北郊大气臭氧周末效应特征分析	王俊秀,安俊琳,邵平,邹嘉南,林旭,张玉欣 (2256)
亚热带稻区大气氨/铵态氮污染特征及干湿沉降	王杰飞,朱潇,沈健林,曾冠军,王娟,吴金水,李勇 (2264)
宣威肺癌高发区燃煤排放颗粒物中铁的价态及其氧化性	王强翔,谭正莹,赵慧,李继华,田林玮,王青曜,米持真一,吕森林 (2273)
垃圾焚烧厂区二噁英污染及厂区工人呼吸暴露评估	杜国勇,汪倩,张姝琳,张素坤,邓春萍,张洪铭,朱盟翔,蒋昕,朱成旺,任燕玲 (2280)
重庆市新型干法水泥厂汞排放特征	张成,张雅惠,王永敏,王定勇,罗程钟,徐凤,何秀清 (2287)
轻型汽油车简易瞬态工况法与定容全流稀释采样法(CVS)的排放相关性	王鸿宇,黄成,胡馨遥,李莉,陈勇航,徐健 (2294)
不同排放标准公交车燃用生物柴油颗粒物排放特性	楼狄明,赵成志,徐宁,谭丕强,胡志远 (2301)
西江水氢氧同位素组成的空间变化及环境意义	许琦,李建鸿,孙平安,何师意,于爽 (2308)
基于SWAT与DNDC模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程	韩宁,陈维梁,高扬,郝卓,于贵瑞 (2317)
三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较	姜伟,周川,纪道斌,刘德富,任豫霜,Douglas Haffner,谢德体,张磊 (2326)
滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征	王一茹,王圣瑞,焦立新,张云,高秋生,杨枫 (2336)
香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算	罗玉红,聂小倩,李晓玲,戴泽龙,胥焘,黄应平 (2345)
大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价	张家泉,田倩,许大毛,占长林,刘婷,姚瑞珍,刘先利,肖文胜 (2355)
海水淡化低温多效蒸馏工艺(LT-MED)沿程溴代消毒副产物的生成	齐菲,孙迎雪,杨哲,胡春芳,常学明,胡洪营 (2364)
两种水体铜配合容量测试方法的适用性比较及应用	王晨烨,姜括,谢文龙,汪磊 (2373)
高地下水位地区透水铺装控制径流污染的现场实验	金建荣,李田,时珍宝 (2379)
稳定型纳米零价铁去除地下水中2,4-二氯苯酚	张永祥,常杉,李飞,徐毅,高维春 (2385)
超声、紫外增强H ₂ O ₂ /KI降解磺胺甲基嘧啶	魏红,孙博成,杨小雨,李克斌 (2393)
不同铅负载量改性膨润土对水中磷酸盐吸附作用的对比	姜博汇,林建伟,詹艳慧,邢云青,黄宏,储鸣,王星星 (2400)
铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果	郑晓英,朱星,周翔,徐亚东,王菊,韦诚,高雅洁,周橄 (2412)
组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析	张世羊,张胜花,张翔凌,王广军 (2419)
温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响	张玲,彭党聪,常蝶 (2429)
海洋厌氧氨氧化菌的富集培养及其脱氮特性	冯莉,于德爽,李津,单晓静,杨振琳 (2435)
不同生物过滤系统铵态氮转化速率及生物膜特性分析	周洪玉,韩梅琳,仇天雷,高敏,孙兴滨,王旭明 (2444)
磷酸盐对厌氧氨氧化活性污泥脱氮效能的影响	周正,刘凯,王凡,林兴,李祥,黄勇,顾澄伟 (2453)
碳源胁迫下脱氮除磷颗粒污泥性能变化及其机制	秦诗友,陈威,马兆瑞,刘小英,陈晓国,余文韬,夏媛媛,黄健 (2461)
外源Ca ²⁺ 对SBR启动期活性污泥胞外多聚物的动态影响	任丽飞,杨新萍,张雯雯 (2470)
膨胀污泥中丝状菌的分离鉴定与特性分析	张崇森,牛全睿,徐雨梅,王陇梅,王岱,武少华 (2477)
反硝化悬浮填料适用性及其微生物群落结构解析	谭阳,李激,徐巧,付磊,尤世界,王硕 (2486)
硫代硫酸钠对排硫硫杆菌固碳能力的影响及其作用机制	李欢,王磊,王亚楠 (2496)
关帝山森林土壤真菌群落结构与遗传多样性特征	乔沙沙,周永娜,柴宝峰,贾彤,李鑫 (2502)
基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析	陈秀端,卢新卫 (2513)
基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评价:以PAHs为例	佟瑞鹏,杨校毅 (2522)
Eh、pH和铁对水稻土钾释放的影响机制	钟松雄,尹光彩,陈志刚,林亲铁,黄润林,刘德玲,彭焕龙,黄玲,王欣,蒋晓璐 (2530)
典型土壤不同提取态Cd与水稻吸收累积的关系	陈齐,邓潇,陈珊,侯红波,彭佩钦,廖柏寒 (2538)
复合改良剂对Cd污染稻田早晚稻产地修复效果	陈立伟,杨文骏,辜娇峰,周航,高子翔,廖柏寒 (2546)
两种钝化剂对土壤Pb、Cd、As复合污染的菜地修复效果	田桃,雷鸣,周航,杨文骏,廖柏寒,胡立琼,曾敏 (2553)
大豆和小麦根系对非的吸持作用及其生物有效性	王红菊,李倩倩,沈羽,顾若尘,盛好,占新华 (2561)
源自腐殖土的溶解性有机质组分对棕壤和黑土吸附苯并三唑的影响	杨宁伟,毕二平 (2568)
地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响	罗攀,陈浩,肖孔操,杨利琼,文丽,李德军 (2577)
长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤N ₂ O排放的影响	郝耀旭,刘继璇,袁梦轩,周应田,杨学云,顾江新 (2586)
基于大气被动式采样的人体头发中类二噁英多氯联苯暴露的途径	袁浩东,白瑶,李秋旭,王英,金军 (2594)
广西刁江野生鱼类重金属积累特征及其健康风险评价	王俊能,马鹏程,张丽娟,陈棉彪,黄楚珊,柳晓琳,胡国成,许振成 (2600)
活性炭在中高温条件下对玉米秸秆厌氧发酵的影响	甘荣,葛明民,刘勇迪,贾红华,闫志英,雍晓雨,吴夏荒,周俊 (2607)
工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展	王红丽,杨肇勋,景盛翱 (2617)
《环境科学》征稿简则(2452) 《环境科学》征订启事(2560) 信息(2201, 2230, 2384)	

香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算

罗玉红^{1,2,3}, 聂小倩^{2,3}, 李晓玲^{2,3}, 戴泽龙^{2,3}, 胥焘^{2,3}, 黄应平^{1,2,3*}

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 三峡大学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; 3. 三峡大学三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443002)

摘要: 采集香溪河沿程5个样点不同季节、不同深度的沉积物, 用Hedley分级方法分析磷形态及垂向变化特征, 同时研究上覆水和间隙水理化性质对沉积物中磷释放的影响。香溪河上覆水及间隙水pH值范围为4.72~8.55, 夏季呈弱酸性, 秋季、冬季及次年春季pH值呈弱碱性; 沉积物处于较强还原性环境; 上覆水及间隙水总磷质量浓度(TP)年变化范围为0.02~0.48 mg·L⁻¹, 沉积物TP含量为0.48~1.45 g·kg⁻¹; 沉积物中磷形态的含量为HCl-P(HCl提取态) > Res-P(残余磷) > NaOH-P(NaOH提取态磷) > NaHCO₃-P(NaHCO₃提取态磷) > H₂O-P(水提取态磷)。沉积物-上覆水体交界面还原性环境有利于沉积物中磷向上覆水中释放; 春季水体的弱碱性、夏季的弱酸性有利于沉积物向上覆水释磷, 从而增加了上覆水体富营养化的风险; 间隙水TP与沉积物TP含量密切相关; 5个样点中有4个样点的PO₄³⁻-P由间隙水向上覆水扩散, 释放通量为0.01~0.04 mg·(m²·d)⁻¹。沉积物是底层水体营养盐的重要来源。

关键词: 香溪河; 间隙水; 沉积物; TP; 磷形态; 释放通量

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)06-2345-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201610114

Distribution and Emission Flux Estimation of Phosphorus in the Sediment and Interstitial Water of Xiangxi River

LUO Yu-hong^{1,2,3}, NIE Xiao-qian^{2,3}, LI Xiao-ling^{2,3}, DAI Ze-long^{2,3}, XU Tao^{2,3}, HUANG Ying-ping^{1,2,3*}

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, Yichang 443002, China; 3. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The distribution and vertical variation of phosphorus forms in sediments along Xiangxi River were analyzed with Hedley classification method, meanwhile the influences of physical and chemical properties of overlying and interstitial water on the release of phosphorus in sediment were discussed. The major findings showed that the pH values in the overlying and interstitial water increased from 4.72 to 8.55, and were slightly acidic in summer, while weak alkaline in other seasons. The redox potential of sediment was in the reduction state overall. The annual variation range of total phosphorus (TP) content in the overlying and interstitial water, and that in the sediment was 0.02-0.48 mg·L⁻¹ and 0.48-1.45 g·kg⁻¹, respectively. The distribution features of TP content in the sediment were the same with those in the interstitial water along the Xiangxi River. It was interesting that the content of TP in the interstitial water in spring and summer was higher than that in autumn and winter, but that in the sediment of Xiangxi River was opposite. The content of different phosphorus (P) forms decreased successively: HCl-P (HCl extracted phosphorus) > Res-P (residual phosphorus) > NaOH-P (NaOH extracted phosphorus) > NaHCO₃-P (NaHCO₃ extracted phosphorus) > H₂O-P (water-soluble phosphorus). The reductive environment of the interface between sediment and overlying water, and pH of water in spring (weak alkaline) and summer (slightly acidic), were conducive to phosphorus release from sediment into overlying water, increasing the eutrophication risk. TP content in the interstitial water was closely related to that in sediment. The PO₄³⁻-P in 4 sampling areas diffused from the interstitial water into the overlying water with diffusive fluxes in the range of 0.01-0.04 mg·(m²·d)⁻¹. All of these findings indicated that sediments is an important source of nutrient for the overlying water.

Key words: Xiangxi River; interstitial water; sediment; TP; phosphorus forms; emission flux

磷元素作为动植物生长发育所必需的营养元素之一, 是大多数水体富营养化的主要限制性因子^[1,2]。沉积物作为地球环境中的三相物质循环中的一项重要环节, 既是污染的汇, 更是污染的源。当外源污染逐步得到有效控制后, 如何有效控制来自沉积物的内源氮磷污染就成为了湖库治理的关键^[3]。沉积物-水界面平衡浓度EPC₀(沉积物对磷的吸附/解吸平衡浓度, equilibrium phosphate

concentration)高于上覆水体中相应的磷浓度, 沉积物呈现释放状态, 影响水体磷浓度^[4]。沉积物中能参与界面交换及生物可利用的磷含量取决于沉积物

收稿日期: 2016-10-18; 修订日期: 2017-01-12

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07104-003-04); 湖北省科技惠民计划项目(S2013GMD100042); 湖北省自然科学基金创新群体项目(2015CFA021)

作者简介: 罗玉红(1976~), 女, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为生态水力学, E-mail: luoyuhong@ctgu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: chem_ctgu@126.com

中磷的赋存形态,其含量直接决定着沉积物向上覆水释放磷的总量^[5].在沉积物内源营养盐的释放过程中,沉积物间隙水是沉积物与水界面营养盐交换的重要介质,当间隙水中磷浓度超过上覆水中磷浓度时,溶解的磷就可以释放到上覆水体^[6,7].磷的赋存形态决定了沉积物磷的吸附和释放特性及其稳定矿化程度^[8],沉积物所释放的溶解性正磷酸盐,也是水生生物最易吸收的形式.沉积物中磷形态的含量不仅受水体 pH、氧化还原条件、营养状态等影响^[8-11],而且与沉积物的组成密切相关^[12,13].一般来说,上覆水体的酸碱性会影响磷的赋存形态,从而改变磷在沉积物-水界面的迁移过程^[14].

香溪河是三峡库区库首的第一条一级支流^[2],水环境状况将直接影响到三峡库区的水环境质量和水质安全,其富营养化程度日趋加重,并多年连续暴发水华事件^[2,15].三峡水库建成以来,逐步控制外源磷的汇入,沉积物中富集的磷已经成为香溪河水体富营养化的主要来源之一^[3].

本文通过在香溪河库湾布点,沿垂向深度采集水和沉积物样品,进行季节性变化特征分析,比较垂向分布上的不同,并结合 Fick 第一定律对沉积物-水界面磷的扩散通量进行估算,分析磷在水-沉积物界面上的迁移与转化、磷的来源,估算沉积物释放对水体磷营养盐的超标及富营养化形成的贡献,对如何控制水体富营养化提供数据参考.

1 材料与方法

1.1 样品采集和处理

根据三峡水库 175 m 蓄水的回水范围和香溪河

的地形地貌特征、水体的富营养化时空特性,确定本次主要调查范围为库区支流香溪河口至回水末端昭君镇约 30 km 水域,沿香溪河下游(香溪河与长江交汇处)至上游(平邑口)共设置 5 个样带,依次为长江与香溪河交汇处(CJXX)与香溪河交汇的水库干流,三岔沟(XX01)接近支流与干流交汇处,消落带主要为荒地,上缘有住户,这两个样点位于流域下游,主要的污染来源来自于生活废水与柑橘加工打蜡场;贾家店(XX04)为采样流域中段,消落带有农业种植,上缘为林地,无住户,上游峡口镇又是磷矿开采与加工的主要地区,大部分开采,炼矿技术相对落后,污水经尾矿沉淀池后直接排入香溪河中;峡口(XX06),紧靠峡口镇,居民集中,平邑口(XX08)上游有黄磷厂,两个样点之间设有一运矿码头与高速口,船行量与车流量较大.样点布置如图 1.分别于 2013 年 6 月(夏季)、2013 年 10 月(秋季)、2014 年 01 月(冬季)和 2014 年 03 月(春季)这 4 个季节采集沉积物及上覆水样品,沉积物及上覆水采用柱状采样器采集,按 3 cm 一层将沉积物及上覆水分层.上覆水 Eh 和 pH 值现场测量,装瓶保存带回实验室测量;沉积物现场测量 Eh 值后,分装在带刻度的 50mL 聚乙烯离心管内,密封带回实验室测量.所有样品均在 24 h 内处理.

底泥样品自然风干,剔除石头、植物根茎等杂物.研磨、过 200 目筛,装袋保存备用.

1.2 样品测量指标和测量方法

Eh 值:用奥立龙便携式多参现场测量上覆水及沉积物 Eh 值. pH 值:沉积物运回实验室后立即离心过滤,收集上清液,即间隙水;立即用 pH 计测量

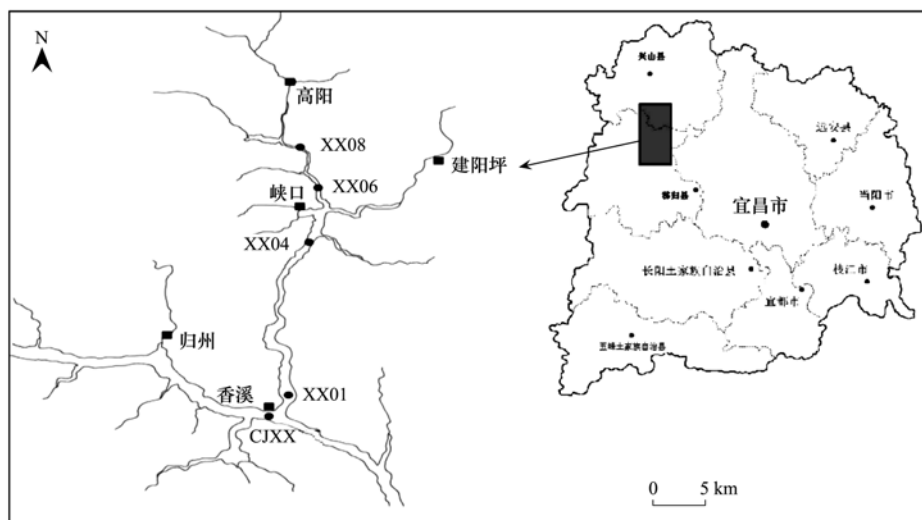


图 1 香溪河沉积物采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites in Xiangxi River

上覆水及间隙水 pH 值并记录. 上覆水及间隙水 P 营养盐含量: 过滤并收集上覆水及间隙水, 采用钼锑抗分光光度法测量 TP 含量^[16]. 沉积物总磷(TP) 含量: 采用碱熔-钼锑抗比色法测定^[17].

磷形态: 采用文献[18]中 Tiessen 等修正的 Hedley 分级方法^[19]. 土壤磷形态分为水可提取态磷($\text{H}_2\text{O-P}$)、 NaHCO_3 提取态磷($\text{NaHCO}_3\text{-P}$)、 NaOH 提取态磷(NaOH-P)、 HCl 提取态磷(HCl-P) 和残余磷(Res-P). 连续分步提取的 $\text{H}_2\text{O-P}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ 、 NaOH-P 及 HCl-P 用过硫酸钾消解后用钼锑抗分光光度法测定^[16]. 最后残渣中的磷为 Res-P , 用测定沉积物总磷的方法测得.

1.3 数据处理

采用 Excel 2010、Origin 8.0 和 SPSS 20.0 数据分析软件对试验结果进行图表绘制和统计分析. 时间变化差异和空间变化差异用单因素方差分析

(One-way ANOVA, Duncan's multiple range test 多重比较); 总磷土层间的差异采用配对 T 检验.

2 结果与讨论

2.1 香溪河库湾间隙水及上覆水理化性质

沿河段沉积物 Eh 各样点均值如表 1, 香溪河沉积物氧化还原电位范围在 $-95.7 \sim -214.7 \text{ mV}$ 之间, 上覆水氧化还原电位范围在 $10.6 \sim 150.8 \text{ mV}$ 之间, 沉积物氧化还原电位总体处于还原性环境, 还原特性表现为 $\text{XX01} > \text{XX08} > \text{XX04} > \text{CJXX} > \text{XX06}$, 支流的还原性强于干流. 垂向上, 沉积物及上覆水氧化还原特性变化随深度的增加变化不大, 基本上处于稳定状态, 下层沉积物比表层还原性略强. 氧化还原特性主要受沉积物中铁锰氧化物和硫化氢体系的影响, NaOH-P 在强还原条件下容易释放, 具有被利用的潜力.

表 1 香溪河上覆水和间隙水基本理化性质¹⁾

Table 1 Basic physical and chemical properties of overlying and interstitial water along the Xiangxi River							
样点	沉积物 Eh /mV	间隙水 pH	上覆水 pH	间隙水 TP /mg·L ⁻¹	上覆水 TP /mg·L ⁻¹	间隙水 TN /mg·L ⁻¹	上覆水 TN /mg·L ⁻¹
CJXX	-163.3	7.26 (5.05 ~ 8.47)	7.14 (5.32 ~ 8.09)	0.17 (0.04 ~ 0.48)	0.14 (0.02 ~ 0.25)	3.87 (0.64 ~ 8.27)	2.50 (1.53 ~ 4.19)
XX01	-210.2	7.45 (5.80 ~ 8.05)	7.27 (5.12 ~ 8.18)	0.17 (0.03 ~ 0.43)	0.16 (0.19 ~ 0.25)	6.27 (1.40 ~ 16.35)	2.02 (1.78 ~ 2.76)
XX04	-169.4	7.44 (5.93 ~ 8.07)	7.28 (4.70 ~ 8.46)	0.20 (0.04 ~ 0.50)	0.17 (0.10 ~ 0.26)	9.11 (2.03 ~ 28.65)	3.14 (1.25 ~ 8.69)
XX06	-145.7	7.28 (5.16 ~ 8.07)	7.42 (4.72 ~ 8.44)	0.18 (0.04 ~ 0.53)	0.19 (0.08 ~ 0.26)	7.36 (1.48 ~ 17.28)	1.78 (1.54 ~ 2.68)
XX08	-177.3	7.19 (5.16 ~ 8.07)	7.36 (4.8 ~ 8.46)	0.19 (0.02 ~ 0.49)	0.18 (0.04 ~ 0.30)	12.45 (4.66 ~ 22.37)	3.51 (1.48 ~ 19.33)
上覆水变化范围 10.6 ~ 150.8							

1) 表中数据为均值, 括号内数据为范围

库湾上覆水及间隙水的 pH 值在空间和季节上存在着较大的差异. 上覆水 pH 值范围在 4.70 ~ 8.46 之间, 间隙水 pH 值范围在 5.05 ~ 8.47 之间. pH 值变化在季节间存在较大的差异, 夏季间隙水及上覆水 pH 值在整体上呈弱酸性, 上覆水均值为 5.33, 间隙水均值为 4.85; 秋季、冬季及次年春季间隙水(均值分别为 7.99、8.33、8.23) 及其上覆水(均值分别为 7.76、7.88、8.05) pH 值在整体上呈弱碱性. 上覆水 pH 值均值在 4 个季节间呈春季 > 冬季 > 秋季 > 夏季的规律; 间隙水 pH 值均值在 4 个季节间呈冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季的规律. 在垂向空间上, 间隙水 pH 值酸性强度和碱性强度均大于上覆水. 上覆水体酸碱度的变化对沉积物中磷的释放会有明显影响^[20]. 金相灿等^[21] 通过研究 pH

对各种形态的磷的影响得出, 在碱性条件下, 促进 NaOH-P (主要是铝、铁、锰的氧化物和水化物结合的磷) 的释放, 而在酸性条件下, 促进 HCl-P (主要是钙磷) 的释放.

2.2 间隙水及上覆水 TP 变化特征

香溪河库湾水体 TP 年变化范围为 $0.02 \sim 0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 年均值为 $0.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 其水体总磷的质量浓度远远超过国际上规定的富营养化 TP 浓度阈值($0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 间隙水 TP 由大到小为 $\text{XX04} > \text{XX08} > \text{XX06} > \text{XX01} > \text{CJXX}$, 间隙水 TP 干流比支流低, 与 Eh 值的趋势基本一致, 说明沉积物的还原性环境影响沉积物 TP 向上的释放. 在垂向上如图 2 所示, 间隙水 TP 浓度随深度的增加变化波动较大, 整体上有随着深度的增加先减小后增大的趋势.

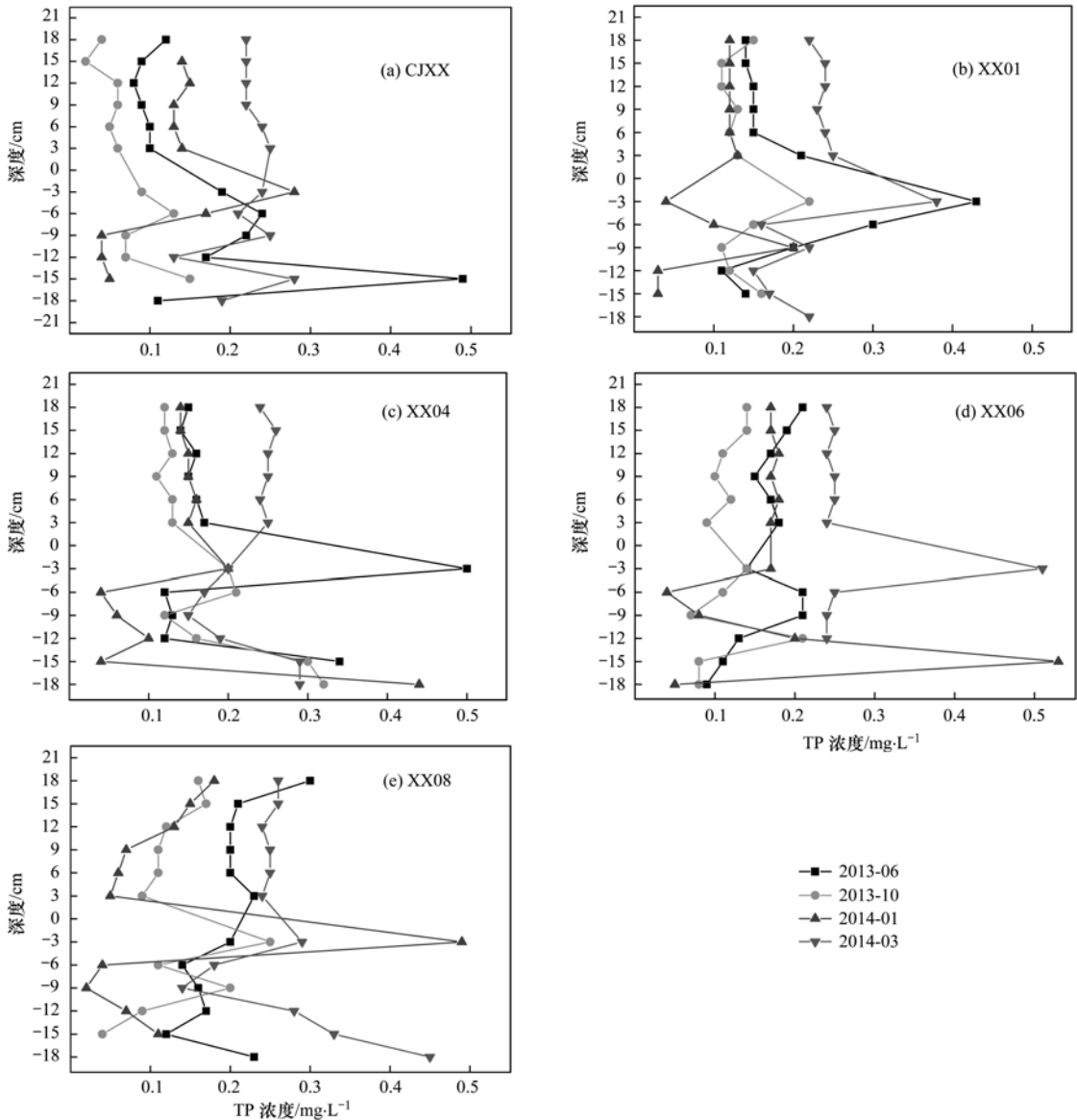


图 2 香溪河上覆水及间隙水 TP 质量浓度变化特征

Fig. 2 Total phosphorus content variation of water and interstitial water along the Xiangxi River

上覆水 TP 质量浓度明显低于间隙水 TP,有向上释放的可能.

间隙水 TP 在 4 个季节均值分别为 0.24、0.20、0.15 和 0.13 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,呈春季 > 夏季 > 秋季 > 冬季的规律;上覆水 TP 均值分别为 0.24、0.18、0.11 和 0.14 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,呈春季 > 夏季 > 冬季 > 秋季. 上覆水及间隙水 TP 质量浓度在季节上呈春季高、秋冬低的规律. 从 pH 值的季节变化来看,2014 年 10 月间隙水和上覆水的 pH 值接近于中性,而从图 2 的结果可以看到这个季节的上覆水和间隙水的 TP 相对来说是最低的. 同一采样点同一深度的上覆水和间隙水的 TP 值在不同季节的变化上是符合王颖^[20]的观点,偏酸和偏碱性条件下都有利于沉积物中 P 的

释放,且在偏酸性条件下 P 释放强度大于偏碱性条件,在中性条件下 P 的释放量最低.

2.3 香溪河库湾沉积物 TP 含量变化特征

沉积物 TP 含量对上覆水富营养化有着不容忽视的影响,是反映香溪河流域水体营养水平的重要指标之一. 本文对香溪河流域沉积物进行了为期 1 a 的时空动态监测,具体变化规律如图 3 所示.

沉积物 TP 全年含量范围为 0.48 ~ 1.65 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,年均值为 0.96 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 沿香溪河上游至河口,沉积物 TP 均值含量分别为 0.98、0.94、1.08、0.91 和 0.87 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 沉积物含量沿程分布与间隙水 TP 含量的沿程分布规律一致,即 XX04 > XX08 > XX06 > XX01 > CJXX,间接说明间隙水 TP 含量与沉

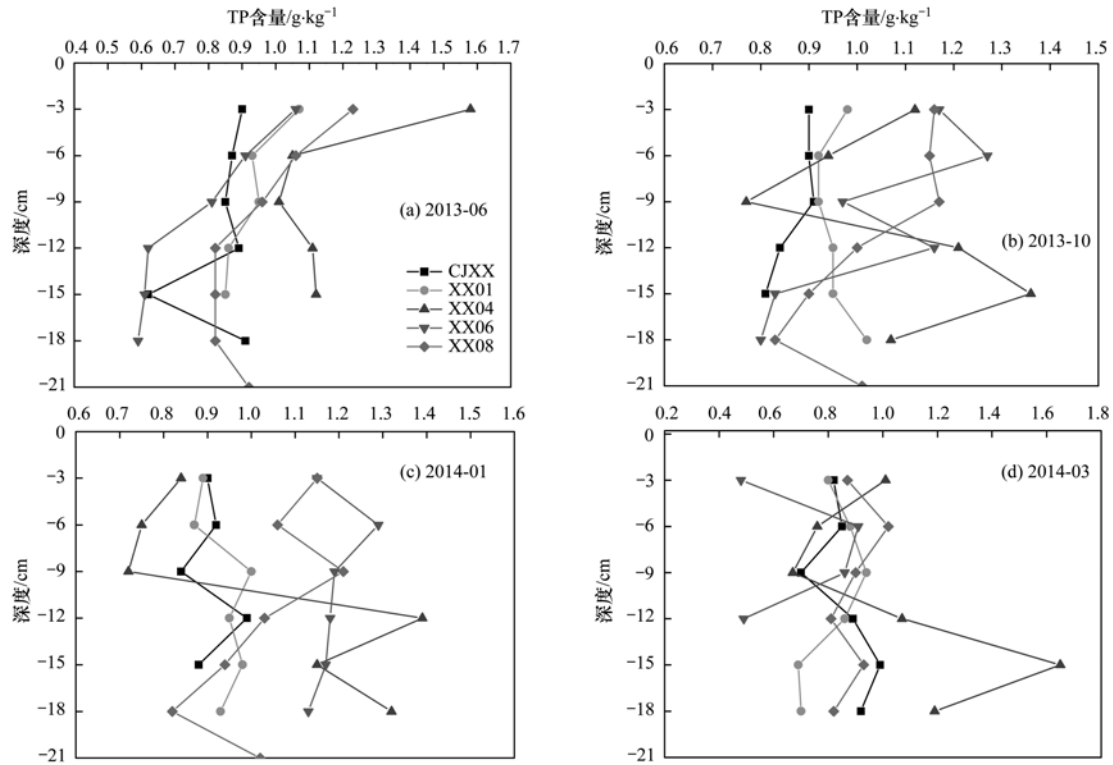


图 3 香溪河沉积物 TP 含量时空分布

Fig. 3 Spatial and temporal distribution variation of total phosphorus content in sediments along the Xiangxi River

积物 TP 含量息息相关。总体上,沉积物 TP 含量沿香溪河呈“中间高,两头低”的规律,干流低于支流。沉积物样品中总磷含量与长江其他支流(寸江、小滩、大宁)、中下游湖泊(太湖)、水库(河口水库)表层沉积物总磷含量^[4,20,21]相比属于中等水平。

如图 3 所示,垂直分布变化规律波动较大。将沉积物中表层 TP 含量与垂向均值含量做比较,夏季与秋季的表层沉积物 TP 含量高于垂向均值含量,至冬季和春季,表层沉积物 TP 含量低于垂向均值含量。在夏季沉积物中 TP 含量所表现出的“表层富集”是一种普遍存在的现象,黄清辉认为主要是外源污染严重而导致沉积物表层磷含量的增加^[22];朱广伟认为这可能是由于沉积物中磷的地球生物化学作用而导致其向表层迁移所致^[23],在本次研究中夏季的雨水丰富,更倾向于“表层富集”主要是外源污染而导致。沉积物 TP 含量在四季的均值含量分别为 0.88、0.92、1.01 和 1.02 g·kg⁻¹,分布规律为冬季>秋季>夏季>春季,与间隙水 TP 含量在季节间的变化规律正好相反,可能是因为夏季的间歇水和上覆水 pH 值偏酸性,春季的 pH 值是偏碱性中较大的,这样会促进沉积物中的 P 向间歇水和上覆水的释放^[21],说明间歇水和上覆水的 TP 与沉积物中 TP 含量密切相关。

2.4 沉积物磷赋存形态分布特征

沉积物磷的赋存形态决定了磷在沉积物-水界面的迁移、转化、沉积的规律,其不同形态将直接影响磷在沉积物-水界面的交换作用。香溪河 6 月和 10 月沉积物 P 赋存形态分布情况见表 2,各样点不同形态的磷在底泥中垂直方向分布具体见图 4 和图 5。

磷形态 质量分数	forms in the sediment/%			
	6 月		10 月	
	范围	均值	范围	均值
H ₂ O-P/TP	0.41 ~ 1.63	0.91	0.47 ~ 1.26	0.80
NaHCO ₃ -P/TP	2.59 ~ 10.82	6.62	2.01 ~ 8.36	5.70
NaOH-P/TP	4.15 ~ 16.07	9.68	5.03 ~ 17.45	10.64
HCl-P/TP	36.18 ~ 82.86	49.62	35.29 ~ 81.72	49.58
Res-P/TP	16.14 ~ 65.17	33.17	16.43 ~ 60.85	33.27

沉积物中,H₂O-P 最容易与上覆水发生交换,发生吸附或解吸,能被植物直接吸收利用。H₂O-P 在沉积物中的含量最低,均值结果表明,6 月沉积物中 H₂O-P(0.91%) 整体上高于 10 月沉积物中 H₂O-P 含量(0.80%)。H₂O-P 在香溪河流域沉积物中是从上游至河口沿程递增的。垂向上,H₂O-P 的含量随深度的增加而逐渐降低。这也说明了 H₂O-P 来源于

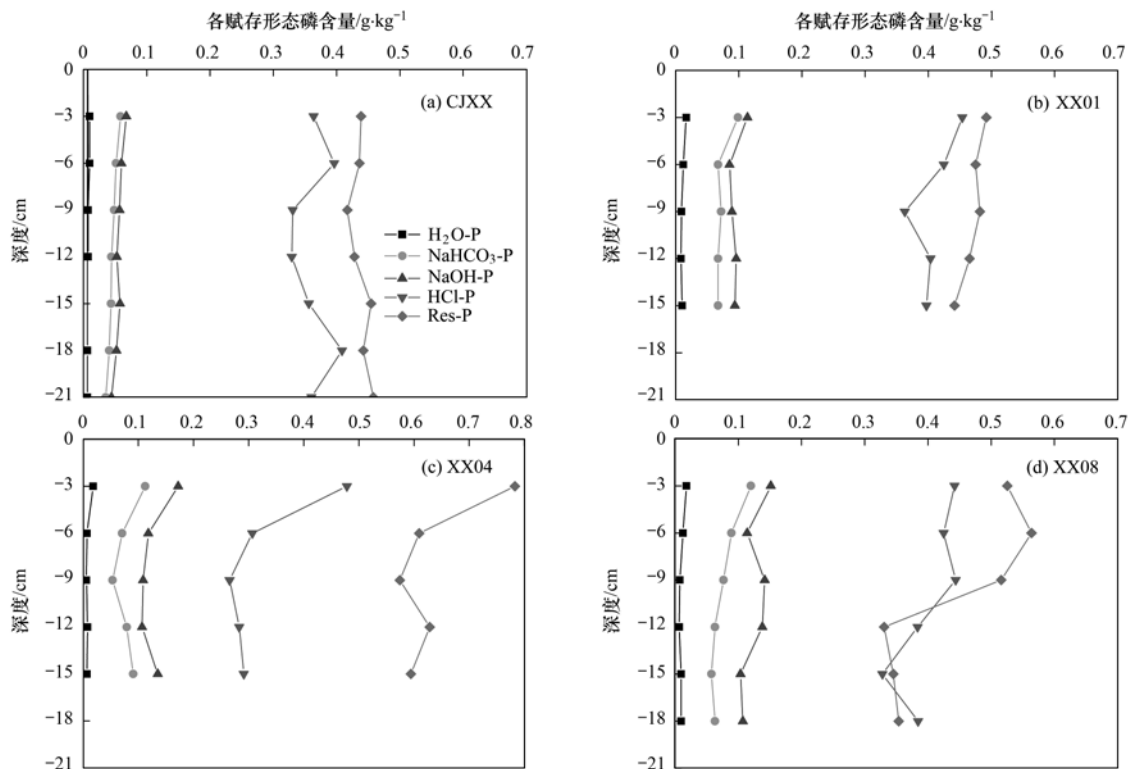


图 4 香溪河 6 月沉积物磷赋存形态

Fig. 4 Variation of Phosphorus forms in sediments along Xiangxi River in June

面源污染,更容易在沉积物表面富集.

$\text{NaHCO}_3\text{-P}$ 是有效性较高的 P 库,可通过水中的阴离子交换或微生物矿化而释放^[24],它能在短时间之内补充 $\text{H}_2\text{O-P}$,因此和 $\text{H}_2\text{O-P}$ 一样被认为对植物有效性较强. 香溪河 6 月沉积物中 $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ 含量略高于 10 月沉积物中 $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ 含量,可能与沿岸农业种植有关,春天正是施肥的季节,而且春夏季的雨水丰富,垂向上, $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ 的含量随深度的增加逐渐降低,也说明主要来源于面源污染^[25]. 整体上香溪河沉积物 $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ 含量高于长江干流 $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ 含量.

NaOH-P 主要包含被 Fe、Al 氧化物及有机质表面吸附的无机磷和与土壤中腐殖酸结合的有机磷,具有中等程度的有效性^[26],在强还原条件下容易释放,具有被利用的潜力,是沉积物中主要活性磷组分,对沉积物-水界面磷的循环起到主要作用^[27]. 香溪河沉积物的还原性环境有利于 NaOH-P 向上释放. 沿香溪河上游至河口,沉积物 NaOH-P 含量在沿程上与 $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ 含量在沿程上的变化规律一致,香溪河支流沉积物 NaOH-P 含量高于长江干流沉积物 NaOH-P 含量,说明支流富营养化较干流高. 这部分磷的来源与人类活动有关,主要来源于生活污水和工业废水,所以可以反映出区域磷污染的情

况^[28, 29]. 由图 4、5 可看出 NaOH-P 含量随深度变化波动较大,样点 XX04、XX06、XX08 沉积物的 NaOH-P 含量明显比样点 XX01、CJXX 高,因为样点 XX04 有农田种植,上游峡口镇恰好又是磷矿开采与加工的主要地,XX06 为峡口镇人口集中区域,XX08 附近有黄铁矿,这些均说明 NaOH-P 含量受人类活动影响较显著^[30]. 整体上来看,表层含量最高,在较深部位的沉积物层,有机质降解不断消耗溶解氧,使环境条件变得相对还原,铁磷矿物还原溶解,释放出的溶解磷酸盐通过孔隙水向上迁移. 在上部沉积物中,由于氧化还原电位较高,重新形成矿物而沉淀下来,造成铁磷矿物在沉积物表层富集^[31].

HCl-P 主要为与钙紧密结合的土壤 P 部分,由于磷酸钙的溶度积 K_{sp} 为 116×10^{-44} ,一般很难被溶解,其在酸性条件下的磷释放量大于碱性条件下的磷释放量^[20, 21, 24]. 香溪河沉积物中 HCl-P 含量范围为 $0.33 \sim 0.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,是沉积物 TP 的主要成分,因此香溪河夏季的偏酸性条件会导致磷释放的增加. 6 月和 10 月沉积物 HCl-P 均值含量分别为 $0.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.57 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,6 月沉积物中 HCl-P 含量与 10 月沉积物中 HCl-P 含量相差不大,说明香溪河沉积物 HCl-P 较稳定,这也说明了 HCl-P 主要是由地

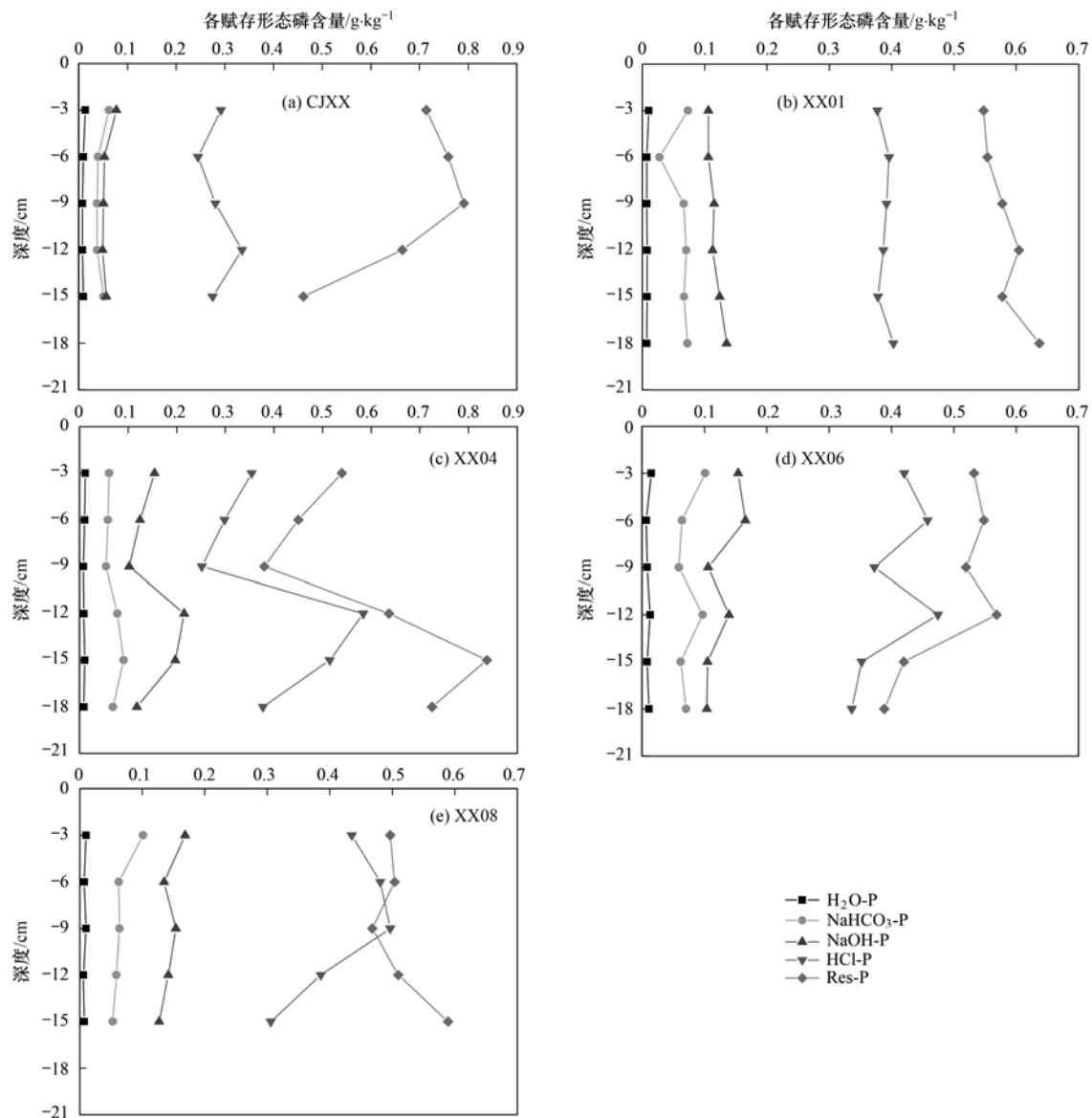


图5 香溪河10月沉积物磷赋存形态
Fig. 5 Variation of Phosphorus forms in sediments along Xiangxi River in October

质环境决定的;6月沉积物 HCl-P 均值含量比 10 月略低一些,可能 6 月水体偏酸性,会促进 HCl-P 的释放^[21]. 随着沉积深度增加,10 月 HCl-P 含量 (XX01、XX04、XX08)在垂直剖面上表现出上升的趋势,说明沉积历史内,钙磷的转化是沉积磷早期成岩作用的优势过程,这与已有的一些研究结论相同^[21];6 月各样点 HCl-P 含量在垂直剖面上表现出下降的趋势,可能是由于河流两岸以居民聚居区和农田为主,春夏季的农业面源中含有大量的磷肥和未利用的农药,随着丰富的降雨径流带入河流,使得河流表层沉积物 HCl-P 含量相对较高^[25,32].

Res-P 是需要破坏土壤晶格结构后才能浸提出的磷形态,通常认为对作物有效性很差甚至无效,一般条件下极难被植物利用^[33]. 香溪河沉积物 Res-P

含量与长江干流沉积物 Res-P 含量相差不大,沉积物 Res-P 较稳定.

2.5 磷释放通量估算

本研究中的 5 个采样点上覆水与沉积物间隙水中氮磷营养盐的分布特征表明,沉积物中的营养盐可能会在浓度梯度作用下,由间隙水向上覆水扩散进而影响水库上层水体水质. 沉积物-水界面磷营养盐的扩散通量可以通过 Fick 第一定律^[34]估算得到:

$$F = \Phi \cdot D \frac{\partial C}{\partial Z} \Big|_{Z=0}$$

式中, Φ 为沉积物孔隙度; D 为实际扩散系数; $\frac{\partial C}{\partial Z} \Big|_{Z=0}$ 为沉积物-水界面处浓度梯度

$[\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{cm})^{-1}]$, 在实际应用中可用线性浓度梯度表示, 此处采用夏季沉积物 4 ~ 6 cm 深处间隙水与沉积物-水界面处上覆水中 TP 浓度差值估算^[34]. D 可由经验公式计算得到^[35]:

$$D = \Phi D_0 \quad (\Phi < 0.7)$$

$$D = \Phi^2 D_0 \quad (\Phi > 0.7)$$

式中, Φ 为沉积物孔隙度; D_0 为无限稀释溶液中的理想扩散系数. 不同温度下营养盐的理想扩散系数 D_0 , 可由 25℃ 时的理想扩散系数换算得到(上覆水中温度)^[36], 其中, PO_4^{3-} -P 在 25℃ 时的理想扩散系数为 $6.12 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. 结果见表 3 (其中自沉积物向上覆水扩散时 F 为正值, 自上覆水向沉积物扩散时 F 为负值). 在夏季, 除了上游样点 XX08 (附近有黄磷厂) 表现为“汇”, 其他 4 个样点均表现为“源”, 间隙水向上覆水释放磷, 沉积物作为内源向水体释放磷, 对水体的富营养化产生了一定贡献, 且下游释放通量更高.

通过与近年国内相关研究的湖库磷扩散通量比较发现, 香溪河沉积物磷的扩散通量 $[-0.02 \sim 0.04 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}]$ 比长江上游其他支流高^[37] [冬季 $-0.60 \sim 2.47 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$], 比滇池^[38] $[0.90 \sim 2.06 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}]$ 、太湖^[39] $[1.09 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}]$ 的要低. 香溪河内源释放对水体磷的超标及水体富营养化形成的影响不可忽略, 而造成营养盐扩散通量高的原因包括沉积物类型、孔隙度、溶解氧渗透深度、季节因素等等^[40].

表 3 5 个采样点沉积物-水界面磷的扩散通量¹⁾

Table 3 Diffusion flux of phosphorus in the sediment-water interface of five sampling locations

采样点	Φ	$D_0 \times 10^{-6}$ $/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$D \times 10^{-6}$ $/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	F $/\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$
CJXX	0.70	5.71	2.80	0.04
XX01	0.71	5.70	2.87	0.04
XX04	0.68	5.64	3.83	0.02
XX06	0.66	5.61	3.70	0.01
XX08	0.63	5.37	3.38	-0.02

1) 扩散通量 F 为正值时表示沉积物释放磷, F 为负值时表示沉积物吸收磷

3 结论

(1) 香溪河上覆水及间隙水夏季呈弱酸性, 春季呈弱碱性, 在春夏水温升高的情况下, 沉积物活性磷更容易向上覆水体释放; 夏季沉积物氧化还原电位处于较强还原性环境, 沉积物中的 NaOH-P 容易释放. 上覆水及间隙水 TP 含量在季节上呈现出春夏季含量高、秋冬含量低的规律, 增加了富营养化

的风险.

(2) 香溪河沉积物磷形态中 $\text{H}_2\text{O-P}$ 的含量最低, $\text{H}_2\text{O-P}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}$ 和 NaOH-P 为活性态磷, 占 TP 不到 18%; 非活性磷主要成分 HCl-P 质量分数均值为 49.6%, Res-P 质量分数均值为 33.22%, 香溪河沉积物各形态磷的含量顺序为 $\text{HCl-P} > \text{Res-P} > \text{NaOH-P} > \text{NaHCO}_3\text{-P} > \text{H}_2\text{O-P}$; 间隙水和上覆水的 Eh 和 pH 主要影响沉积物中活性磷的释放; 垂直方向上随深度增加各形态磷含量变化并无一定规律.

(3) 夏季香溪河中下游样点沉积物中的磷表现为“源”, 释放通量范围为 $0.01 \sim 0.04 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 下游释放通量更高.

参考文献:

- [1] Zeng L, Li X M, Liu J D. Adsorptive removal of phosphate from aqueous solutions using iron oxide tailings[J]. Water Research, 2004, 38(5): 1318-1326.
- [2] 姚绪姣, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾冬季甲藻水华生态机理初探[J]. 环境科学研究, 2012, 25(6): 645-651.
- [3] Yao X J, Liu D F, Yang Z J, et al. Preliminary studies on the mechanism of winter dinoflagellate bloom in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(6): 645-651.
- [4] Søndergaard M, Bjerring R, Jeppesen E. Persistent internal phosphorus loading during summer in shallow eutrophic lakes [J]. Hydrobiologia, 2013, 710(1): 95-107.
- [5] 金晓丹, 吴昊, 陈志明, 等. 长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性[J]. 环境科学, 2015, 36(2): 448-456.
- [6] Jin X D, Wu H, Chen Z M, et al. Phosphorus fractions, sorption characteristics and its release in the sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China[J]. Environmental Science, 2015, 36(2): 448-456.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 何佳, 陈春瑜, 邓伟明, 等. 滇池水-沉积物界面磷形态分布及潜在释放特征[J]. 湖泊科学, 2015, 27(5): 799-810.
- [10] He J, Chen C Y, Deng W M, et al. Distribution and release characteristics of phosphorus in water-sediment interface of Lake Dianchi [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(5): 799-810.
- [11] 王志齐, 李宝, 梁仁君, 等. 南四湖沉积物磷形态及其与间隙水磷的相关性分析[J]. 环境科学学报, 2013, 33(1): 139-146.
- [12] Wang Z Q, Li B, Liang R J, et al. Correlation analyses of sediment phosphorus forms and soluble phosphorus concentrations in the interstitial water of Nansi Lake, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(1): 139-146.
- [13] 马利民, 张明, 滕衍行, 等. 三峡库区消落区周期性干湿交

- 替环境对土壤磷释放的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(4): 1035-1039.
- Ma L M, Zhang M, Teng Y H, *et al.* Characteristics of phosphorous release from soil in periodic alternately waterlogged and drained environments at WFZ of the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(4): 1035-1039.
- [9] Gomez E, Durillon C, Rofes G, *et al.* Phosphate adsorption and release from sediments of brackish lagoons: pH, O₂ and loading influence[J]. *Water Research*, 1999, **33**(10): 2437-2447.
- [10] Jalali M, Peikam E N. Phosphorus sorption-desorption behaviour of river bed sediments in the Abshineh river, Hamedan, Iran, related to their composition[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(1): 537-552.
- [11] Kim L H, Choi E, Stenstrom M K. Sediment characteristics, phosphorus types and phosphorus release rates between river and lake sediments[J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(1): 53-61.
- [12] Wang S R, Jin X C, Zhao H C, *et al.* Phosphorus release characteristics of different trophic lake sediments under simulative disturbing conditions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **161**(2-3): 1551-1559.
- [13] 尹爱经, 吴鹏豹, 周慧平, 等. 秦淮河干流沉积物磷形态沿程分布特征[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(5): 1366-1373.
- Yin A J, Wu P B, Zhou H P, *et al.* Forms and distribution of phosphorus in Qinhuai River sediments along an urbanization gradient[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(5): 1366-1373.
- [14] 梅裕, 毕永红, 胡征宇. 环境因子对香溪河库湾淹没土壤磷释放的影响[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(3): 11-15.
- Mei Y, Bi Y H, Hu Z Y. Environmental factors on release of phosphorus from submerged soils in Xiangxi Bay [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **35**(3): 11-15.
- [15] 李媛, 刘德富, 孔松, 等. 三峡水库蓄泄水过程对香溪河库湾水华影响的对比分析[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(8): 1882-1893.
- Li Y, Liu D F, Kong S, *et al.* Comparative analysis of the impact of discharging and impounding process of Three Gorges Reservoir on the algal bloom in the Xiangxi Bay [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(8): 1882-1893.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 243-247.
- [17] HJ 632-2011 土壤 总磷的测定 碱熔-钼锑抗分光光度法[S]. HJ 632-2011 Soil-determination of total phosphorus by alkali fusion-Mo-Sb Anti spectrophotometric method[S].
- [18] Carter M R, Gregorich E G. Soil sampling and methods of analysis (2nd ed.) [M]. Florida: CRC Press, 2007. 75-86.
- [19] Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, **46**(5): 970-976.
- [20] 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.
- [21] 金相灿, 王圣瑞, 庞燕. 太湖沉积物磷形态及 pH 值对磷释放的影响[J]. 中国环境科学, 2004, **24**(6): 707-711.
- Jin X C, Wang S R, Pang Y. The influence of phosphorus forms and pH on release of phosphorus from sediments in Taihu Lake [J]. *China Environmental Science*, 2004, **24**(6): 707-711.
- [22] 黄清辉, 王东红, 王春霞, 等. 沉积物中磷形态与湖泊富营养化的关系[J]. 中国环境科学, 2003, **23**(6): 583-586.
- Huang Q H, Wang D H, Wang C X, *et al.* Relation between phosphorus forms in the sediments and lake eutrophication[J]. *China Environmental Science*, 2003, **23**(6): 583-586.
- [23] 朱广伟, 高光, 秦伯强, 等. 浅水湖泊沉积物中磷的地球化学特征[J]. 水科学进展, 2003, **14**(6): 714-719.
- Zhu G W, Gao G, Qin B Q, *et al.* Geochemical characteristics of phosphorus in sediments of a large shallow lake[J]. *Advances in Water Science*, 2003, **14**(6): 714-719.
- [24] 张宪伟, 潘纲, 陈灏, 等. 黄河沉积物磷形态沿程分布特征[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(1): 191-198.
- Zhang X W, Pan G, Chen H, *et al.* Phosphorus forms and distribution in the sediments from different reaches along the Yellow River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(1): 191-198.
- [25] 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.
- [26] 张林, 吴彦, 吴宁, 等. 林线附近主要植被类型下土壤非生长季磷素形态[J]. 生态学报, 2010, **30**(13): 3457-3464.
- Zhang L, Wu Y, Wu N, *et al.* The soil phosphorus forms under different vegetation types near timberline during non-growing season[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(13): 3457-3464.
- [27] 张志斌, 张学杨, 张波, 等. 南四湖微山湖区沉积物磷形态分布特征[J]. 环境科学, 2009, **30**(5): 1345-1350.
- Zhang Z B, Zhang X Y, Zhang B, *et al.* Distribution of phosphorus species in the sediment from Weishanhu district in Lake Nansihu[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(5): 1345-1350.
- [28] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, *et al.* Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments—a synthesis of recent works[J]. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 2001, **370**(2-3): 224-228.
- [29] 张雷, 秦延文, 贾静, 等. 三峡入库河流澎溪河回水区消落带与岸边土壤磷形态及其分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(9): 1999-2007.
- Zhang L, Qin Y W, Jia J, *et al.* Phosphorus forms and its distribution characteristics in soils of water-level-fluctuating zone of the backwater reach of the Pengxi River, input river of the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(9): 1999-2007.
- [30] 宋媛媛, 冯慕华, 苏争光, 等. 抚仙湖不同来源沉积物磷形态垂向分布特征[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(9): 2579-2589.
- Song Y Y, Feng M H, Su Z G, *et al.* Vertical distribution of chemical speciation of phosphorus in sediments from different sources of Fuxian Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*,

- 2013, **33**(9): 2579-2589.
- [31] 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.
- [32] 郭海涛, 张进忠, 魏世强, 等. 长寿湖沉积物中磷形态的季节变化特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 1994-1999.
- Guo H T, Zhang J Z, Wei S Q, *et al.* Seasonal variation characteristics of phosphorus speciation in the sediment of Changshou Lake [J]. Environmental Science, 2011, **32**(7): 1994-1999.
- [33] 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, Qin 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.
- [34] 董慧, 郑西来, 张健. 河口沉积物孔隙水营养盐分布特征及扩散通量[J]. 水科学进展, 2012, **23**(6): 815-821.
- Dong H, Zheng X L, Zhang J. Distribution of nutrients in interstitial water and diffusion flux in estuary [J]. Advances in Water Science, 2012, **23**(6): 815-821.
- [35] Ullman W J, Aller R C. Diffusion coefficients in nearshore marine sediments [J]. Limnology and Oceanography, 1982, **27**(3): 552-556.
- [36] Li Y H, Gregory S. Diffusion of ions in sea water and in deep-sea sediments [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1974, **38**(5): 703-714.
- [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] 李宝, 丁士明, 范成新, 等. 滇池福保湾底泥内源氮磷营养盐释放通量估算[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 114-120.
- Li B, Ding S M, Fan C X, *et al.* Estimation of releasing fluxes of sediment nitrogen and phosphorus in Fubao Bay in Dianchi Lake [J]. Environmental Science, 2008, **29**(1): 114-120.
- [39] 徐徽, 张路, 商景阁, 等. 太湖水土界面氮磷释放通量的流动培养研究[J]. 生态与农村环境学报, 2009, **25**(4): 66-71.
- Xu H, Zhang L, Shang J G, *et al.* Study on ammonium and phosphate fluxes at the sediment-water interface of Lake Taihu using flow-through incubation [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2009, **25**(4): 66-71.
- [40] Ospina-Alvarez N, Caetano M, Vale C, *et al.* Exchange of nutrients across the sediment-water interface in intertidal ria systems (SW Europe) [J]. Journal of Sea Research, 2014, **85**: 349-358.

CONTENTS

Comparison of Models on Spatial Variation of PM _{2.5} Concentration; A Case of Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Jian-sheng, WANG Xi, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (2191)
Change of Atmospheric Pollution Diffusion Conditions in Beijing in Recent 35 Years	GUO Chun-wei, SUN Zhao-bin, LI Zi-ming, <i>et al.</i> (2202)
Precipitation and Its Effects on Atmospheric Pollutants in a Representative Region of Beijing in Summer	HAN Li-hui, ZHANG Hai-liang, XIANG Xin, <i>et al.</i> (2211)
Impact of Mountain-Valley Wind Circulation on Typical Cases of Air Pollution in Beijing	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2218)
Fugitive Dust Emission Characteristics from Building Construction Sites of Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (2231)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Emitted from Biomass-pellets-fired Boilers	WU Chang-da, ZHANG Chun-lin, BAI Li, <i>et al.</i> (2238)
Effect of VOCs on O ₃ and SOA Formation Potential During the Combined Pollution Process in Guangzhou Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (2246)
Characteristic Study on the "Weekend Effect" of Atmospheric O ₃ in Northern Suburb of Nanjing	WANG Jun-xiu, AN Jun-lin, SHAO Ping, <i>et al.</i> (2256)
Atmospheric Ammonia/Ammonium-nitrogen Concentrations and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	WANG Jie-fei, ZHU Xiao, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2264)
Species of Iron in Size-resolved Particle Emitted from Xuanwei Coal Combustion and Their Oxidative Potential	WANG Qiang-xiang, TAN Zheng-ying, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2273)
Dioxin Pollution and Occupational Inhalation Exposure of PCDD/Fs in Municipal Solid Waste Incinerator	DU Guo-yong, WANG Qian, ZHANG Shu-lin, <i>et al.</i> (2280)
Characteristics of Mercury Emissions from Modern Dry Processing Cement Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (2287)
Correlations of Light-duty Gasoline Vehicle Emissions Based on VMAS and CVS Measurement Systems	WANG Hong-yu, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2294)
Emission Characteristics of Particulate Matter from Diesel Buses Meeting Different China Emission Standards Fueled with Biodiesel	LOU Di-ming, ZHAO Cheng-zhi, XU Ning, <i>et al.</i> (2301)
Spatial Variation and Environmental Significance of δ ¹⁸ O and δD Isotope Composition in Xijiang River	XU Qi, LI Jian-hong, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (2308)
Comparative Study of SWAT and DNDC Applied to N Leach and Export from Subtropical Watershed	HAN Ning, CHEN Wei-liang, GAO Yang, <i>et al.</i> (2317)
Comparison of Relationship Between Conduction and Algal Bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir	JIANG Wei, ZHOU Chuan, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2326)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediment Pore Water and Overlying Water of Dianchi Caohai Lake	WANG Yi-ru, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2336)
Distribution and Emission Flux Estimation of Phosphorus in the Sediment and Interstitial Water of Xiangxi River	LUO Yu-hong, NIE Xiao-qian, LI Xiao-ling, <i>et al.</i> (2345)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment from Daye Lake	ZHANG Jia-quan, TIAN Qian, XU Da-mao, <i>et al.</i> (2355)
Formation of Brominated Disinfection By-products in Low Temperature Multi-effect Distillation (LT-MED) Process for Seawater Desalination	QI Fei, SUN Ying-xue, YANG Zhe, <i>et al.</i> (2364)
Applicability Comparison and Application Study of Two Methods for Determination of the Copper Complexing Capacity of Waters	WANG Chen-ye, JIANG Kuo, XIE Wen-long, <i>et al.</i> (2373)
Performance of Applying Scale Permeable Pavements for Control of Runoff Pollution in an Area with High Groundwater Level	JIN Jian-rong, LI Tian, SHI Zhen-bao (2379)
Removal of 2,4-dichlorophenol in Underground Water by Stabilized Nano Zero-valent Iron	ZHANG Yong-xiang, CHANG Shan, LI Fei, <i>et al.</i> (2385)
Enhancement of Sulfamerazine Degradation Under H ₂ O ₂ /KI System by Ultrasound and UVA Irradiation	WEI Hong, SUN Bo-cheng, YANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (2393)
Comparison of Phosphate Adsorption onto Zirconium-Modified Bentonites with Different Zirconium Loading Levels	JINAG Bo-hui, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2400)
Removal of Nitrogen in Municipal Secondary Effluent by a Vertical Flow Constructed Wetland Associated with Iron-carbon Internal Electrolysis	ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, ZHOU Xiang, <i>et al.</i> (2412)
Purification Efficiency and Influencing Factors of Combined Bio-filters for Aquaculture Wastewater	ZHANG Shi-yang, ZHANG Sheng-hua, ZHANG Xiang-ling, <i>et al.</i> (2419)
Effect of Temperature on PAO Activity and Substrate Competition	ZHANG Ling, PENG Dang-cong, CHANG Die (2429)
Enrichment and Nitrogen Removal Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	FENG Li, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2435)
Ammonia Removal Rate and Microbial Community Structures in Different Biofilters for Treating Aquaculture Wastewater	ZHOU Hong-yu, HAN Mei-lin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (2444)
Influence of Phosphate on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	ZHOU Zheng, LIU Kai, WANG Fan, <i>et al.</i> (2453)
Characteristics and Mechanism of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Granular Sludge Under Carbon Source Stress	QIN Shi-you, CHEN Wei, MA Zhao-nui, <i>et al.</i> (2461)
Evolution of Extracellular Polymeric Substances of the Activated Sludge with Calcium Ion Addition During Set-up Period of Sequencing Batch Reactors	REN Li-fei, YANG Xin-ping, ZHANG Wen-wen (2470)
Isolation, Identification and Characterization of the Filamentous Microorganisms from Bulking Sludge	ZHANG Chong-miao, NIU Quan-rui, XU Li-mei, <i>et al.</i> (2477)
Applicability and Microbial Community Structure of Denitrification Suspended Carriers	TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, <i>et al.</i> (2486)
Effect of Thiosulfate on the Carbon Fixation Capability of <i>Thiobacillus thioparus</i> and Its Mechanism	LI Huan, WANG Lei, WANG Ya-nan (2496)
Characteristics of Fungi Community Structure and Genetic Diversity of Forests in Guandi Mountains	QIAO Sha-sha, ZHOU Yong-na, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (2502)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in City Residential Areas Based on the Receptor Model and Geostatistics	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei (2513)
Environmental Health Risk Assessment of Contaminated Soil Based on Monte Carlo Method; A Case of PAHs	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi (2522)
Influencing Mechanism of Eh, pH and Iron on the Release of Arsenic in Paddy Soil	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2530)
Correlations Between Different Extractable Cadmium Levels in Typical Soils and Cadmium Accumulation in Rice	CHEN Qi, DENG Xiao, CHEN Shan, <i>et al.</i> (2538)
Remedying Effects of a Combined Amendment for Paddy Soil Polluted with Cd for Spring and Autumn Rice	CHEN Li-wei, YANG Wen-tao, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (2546)
Effects of Two Amendments on Remedying Garden Soil Complexly Contaminated with Pb, Cd and As	TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (2553)
Sorption of Phenanthrene to Soybean and Wheat Roots and the Bioavailability of Sorbed Phenanthrene	WANG Hong-ju, LI Qian-qian, SHEN Yu, <i>et al.</i> (2561)
Effects of Dissolved Organic Matter Fractions Extracted from Humus Soil on Sorption of Benzotriazole in Brown Soil and Black Soil	YANG Ning-wei, BI Er-ping (2568)
Effects of Topography, Tree Species and Soil Properties on Soil Enzyme Activity in Karst Regions	LUO Pan, CHEN Hao, XIAO Kong-cai, <i>et al.</i> (2577)
Effects of Long-term Organic Amendments on Soil N ₂ O Emissions from Winter Wheat-maize Cropping Systems in the Guanzhong Plain	HAO Yao-xu, LIU Ji-xuan, YUAN Meng-xuan, <i>et al.</i> (2586)
Exposure Route of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in Hair Based on Passive Sampling	YUAN Hao-dong, BAI Yao, LI Qiu-xu, <i>et al.</i> (2594)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wild Fish Species from Diaojiang River, Guangxi	WANG Jun-neng, MA Peng-cheng, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (2600)
Effect of Activated Carbon Addition on the Anaerobic Fermentation of Corn Straw in Mesophilic and Thermophilic Conditions	GAN Rong, GE Ming-min, LIU Yong-di, <i>et al.</i> (2607)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Source Profiles of Industrial Processing and Solvent Use Emissions; A Review	WANG Hong-li, YANG Zhao-xun, JING Sheng-ao (2617)