

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第3期

Vol.34 No.3

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

BP网络框架下MODIS气溶胶光学厚度产品估算中国东部PM _{2.5}	郭建平, 吴业荣, 张小曳, 李小微 (817)
北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究	林海峰, 辛金元, 张文煜, 王跃思, 刘子锐, 陈传雷 (826)
气象因素对长三角背景地区甲烷浓度的影响分析	浦静姣, 徐宏辉, 顾骏强, 马千里, 方双喜, 周凌晔 (835)
密闭化填埋作业条件下的场内恶臭污染分布情况与分析	路鹏, 吴世新, 戴志锋, 张晓辉, 苏昭辉, 周小飞, 代占国, 卢旭飞, 郑斌, 沈凯, 卫潘明 (842)
冬季中国东海海水中挥发性卤代烃的分布特征和海-气通量	何真, 陆小兰, 杨桂朋 (849)
2000~2010年大鹏湾颗粒有机物的年变化和年际变化	李绪录, 周毅频, 夏华永 (857)
渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析	周然, 彭士涛, 覃雪波, 石洪华, 丁德文 (864)
青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化	王鹏, 尚英男, 沈立成, 伍坤宇, 肖琼 (874)
漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选	徐华山, 徐宗学, 刘品 (882)
面向对象的湖泊污染控制智能工程设计方法	邹锐, 周璟, 刘永, 朱翔, 赵磊, 阳平坚, 郭怀成 (892)
九龙江口湿地植物凋落物对沉积物有机质赋存的贡献	罗专溪, 邱昭政, 王振红, 颜昌宙 (900)
修复达标土壤回填对地下水环境影响的层次化评估方法应用研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 樊艳玲, 夏天翔, 李婷婷, 田美影 (907)
去除地下水中硝酸盐的渗透性反应墙研究	李秀利, 杨君君, 卢晓霞, 张姝, 侯珍 (914)
北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究	李海燕, 徐波平, 徐尚玲, 崔爽 (919)
城市污水处理厂及其受纳水体中5种典型PPCPs的赋存特征和生态风险	温智皓, 段艳平, 孟祥周, 陈玲 (927)
城市景观娱乐水体微生物风险评价	孙傅, 沙婧, 张一帆, 刘彦华 (933)
模拟曝气生物滤池去除邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯试验研究	李伟, 赵晶, 余健, 任文辉 (943)
膜生物反应器处理工业废水中膜污染及膜过滤特性研究	范举红, 余素林, 张培帅, 兰亚琼, 刘锐, 陈吕军 (950)
γ -Al ₂ O ₃ 负载磷钨酸催化强化电化学法处理水中酸性大红3R的研究	岳琳, 王开红, 郭建博, 杨景亮, 刘宝友, 廉静, 王涛 (955)
活性炭催化过硫酸钠降解金橙G动力学	杨梅梅, 周少奇, 刘琳, 郑可 (962)
ABR反应器处理碱减量印染废水的启动研究	杨波, 钟启俊, 李方, 田晴 (968)
O ₃ -BAF深度处理制革废水中沿程污染物降解规律	余彬, 刘锐, 程家迪, 范举红, 李昌湖, 冉坤, 曹国华, 陈吕军 (974)
规模化猪场养殖废水UASB-SFSBR-MAP处理工艺中试研究	王亮, 陈重军, 陈英旭, 吴伟祥 (979)
连续流态下以城市污水培养好氧颗粒污泥及颗粒特性研究	牛姝, 段百川, 张祚薰, 刘士峰, 张家铭, 王聪, 周丹丹 (986)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅰ)——模型的建立	张超, 陈银广 (993)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅱ)——动力学模拟	张超, 陈银广 (998)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅲ)——模型的应用	张超, 陈银广 (1004)
三峡水库两条支流水-气界面CO ₂ 、CH ₄ 通量比较初探	李哲, 白镭, 郭劲松, 方芳, 蒋滔 (1008)
不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素	陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 刘艳, 任景全, 谢薇 (1017)
黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素	周小刚, 张彦军, 南雅芳, 刘庆芳, 郭胜利 (1026)
层次化健康风险评估方法在苯污染场地的应用及效益评估	姜林, 钟茂生, 梁竞, 姚珏君, 夏天翔, 樊艳玲, 李敬东, 唐振强 (1034)
海州湾滩涂重金属污染的历史记录	张瑞, 张帆, 刘付程, 尹福军, 丁迎军, 高金荣, 陈晶, 邵威 (1044)
草海典型高原湿地表层沉积物重金属的积累、分布与污染评价	张清海, 林昌虎, 谭红, 林绍霞, 杨鸿波 (1055)
大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析	程芳, 程金平, 桑恒春, 于金莲, 席磊, 皮帅帅 (1062)
典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估	李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 陈婧, 徐晶晶 (1067)
典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估	李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 陈婧, 姜艳敏 (1076)
城市表层土壤磁化率与重金属含量分布的相关性研究	陈秀端, 卢新卫, 杨光 (1086)
典型热带林地土壤团聚体颗粒中重金属的分布特征及其环境意义	龚仓, 徐殿斗, 成杭新, 任雅阁, 刘志明, 刘应汉, 刘飞, 聂海峰, 郑祥, 马玲玲 (1094)
生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究	张树楠, 贾兆月, 肖润林, 杨凤飞, 余红兵, 刘锋, 吴金水 (1101)
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	孙文彬, 杜斌, 赵秀兰, 何丙辉 (1107)
Triton X-100在黄土上的吸附行为及影响因素	钟金魁, 赵保卫, 朱琨, 钱小龙, 张杰西 (1114)
新疆哈密地区有机氯农药大气、土壤残留特征、气-土交换及潜在生态风险	马子龙, 毛蒲萱, 丁中原, 高宏, 黄韬, 田慧, 郭强 (1120)
青海省西宁市与天峻县大气中得克隆与十溴联苯醚的水平与来源	何畅, 金军, 马召辉, 王英, 扎西卓玛, 马丽花 (1129)
太湖沉积物中多溴联苯醚和类二噁英多氯联苯的水平垂直分布	马召辉, 金军, 元学奎, 王英, 姜霞, 何松洁, 李明圆 (1136)
典型电器工业区河涌沉积物中有机污染物特征分析	刘近, 邓代永, 许玫英, 孙国萍 (1142)
柴油轿车颗粒多环芳烃的排放特性	谭丕强, 周舟, 胡志远, 楼狄明 (1150)
机械炼焦过程生成飞灰中多环芳烃分布特征研究	牟玲, 彭林, 刘效峰, 白慧玲, 张建强 (1156)
污泥干化床与芦苇床稳定化污泥中多环芳烃的含量比较	崔玉波, 孙红杰, 冉春秋, 李金凤, 谢瑶 (1161)
固体添加剂对污泥焚烧过程中重金属迁移行为的影响	刘敬勇, 孙水裕, 陈涛 (1166)
铸造废砂的环境毒性研究	张海凤, 王玉珏, 王劲磷, 黄天佑, 熊鹰 (1174)
Cr ⁶⁺ 生物可利用度检测的微生物全细胞传感器CB10的构建及其响应特征	侯启会, 马安周, 庄绪亮, 庄国强 (1181)
反硝化脱硫工艺中微生物群落结构及动态分析	于皓, 王爱杰, 陈川 (1190)
农业废物好氧堆肥中环境因子对nirK、nirS和nosZ数量的影响	胡春晓, 陈耀宁, 张嘉超, 唐聪, 曾光明 (1196)
蚯蚓体内过氧化物还原蛋白PRDX基因对土壤PAHs污染胁迫的转录响应	林康丽, 郑森林, 宋玉芳, 邱晓燕, 薛文玲 (1204)
有序介孔碳载金/L-赖氨酸/纳米金修饰电极的制备及其对邻苯二酚、对苯二酚的检测响应研究	周耀渝, 汤琳, 李贞, 刘媛媛, 杨贵德, 伍梦诗, 雷晓霞, 曾光明 (1211)
新建核电站风险信息沟通实证研究	贺桂珍, 吕永龙 (1218)
《环境科学》征订启事(942) 《环境科学》征稿简则(992) 信息(932, 949, 1061, 1210) 专辑征稿通知(1173)	

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

孙文彬^{1,2}, 杜斌^{1,2}, 赵秀兰^{1,2*}, 何丙辉^{1,2}

(1. 西南大学资源环境学院, 教育部三峡库区生态环境重点实验室, 重庆 400715; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716)

摘要: 沉积物是自然水域的重要生态组成部分, 是形成湖泊、水库富营养化的关键因素之一. 为研究三峡库区澎溪河流域沉积物中磷的赋存形态特征及迁移转化规律, 采用连续提取法对澎溪河底泥3个断面及消落区3种土壤类型中磷赋存形态进行分析, 并通过等温吸附实验研究了磷的吸附规律, 确定了零净吸附磷浓度(EPC_0). 结果表明, 澎溪河底泥中的总磷含量在 $0.80 \sim 1.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 赋存形态以无机磷为主, 其中钙结合磷和蓄闭态磷比例在80%以上, 铁铝结合磷含量较低, 该流域底泥受自然岩石状态及沉积环境的影响较大, 而人为活动对其影响较小; 消落区土壤总磷含量在 $0.65 \sim 1.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 磷的赋存形态也以无机磷为主, 冲积土和紫色土也以钙结合态磷和蓄闭态磷为主, 水稻土中则以蓄闭态磷含量最高. 澎溪河高阳、黄石和双江3个断面底泥的 EPC_0 分别为 0.08 、 0.13 和 $0.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 消落区冲积土、紫色土和水稻土的 EPC_0 分别为 0.08 、 0.09 和 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. EPC_0 值与沉积物中总磷、pH、Ca-P、黏粒含量呈正相关性, 其中与pH和Ca-P相关性显著. 根据澎溪河上覆水中磷浓度的季节变化, 初步判定底泥及消落区土壤在夏秋季节为磷的“汇”, 在冬春季节则成为其“源”. EPC_0 高于水体富营养化临界值, 底泥及消落区土壤中磷的释放依然是不可忽视的潜在问题.

关键词: 澎溪河; 磷形态; 零净吸附磷浓度; 底泥; 消落区土壤

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)03-1107-07

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

SUN Wen-bin^{1,2}, DU Bin^{1,2}, ZHAO Xiu-lan^{1,2}, HE Bing-hui^{1,2}

(1. Key Laboratory of Eco-Environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment of Chongqing, Chongqing 400716, China)

Abstract: The sediment, one of the key factors leading to the eutrophication of water bodies, is an important ecological component of natural water body. In order to investigate the morphological characteristics and moving-transiting rule of phosphorus in the sediments of the Pengxi River, a tributary of the Three Gorges Reservoir, the distributions of different phosphorus forms on the three cross-section in the sediments and three soil types of riparian zone were investigated using the sequential extraction method. The characteristics of phosphorus adsorption on the sediments were also investigated by batch experiments. The equilibrium phosphorus concentrations at zero adsorption (EPC_0) on those sediments were estimated using the Henry linear models. The results show that the total phosphorus (TP) contents of these sediments and soils of riparian zone were $0.80 \sim 1.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.65 \sim 1.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. Phosphorus in sediments and soils were divided into inorganic phosphorus (IP) and organic phosphorus (Or-P), and the inorganic phosphorus was the dominant component of TP. Of the inorganic phosphorus fractions, the percentages of phosphorus bounded to calcium (Ca-P) and occluded phosphorus (O-P) from sediments were higher than 80%, implying that the contents of phosphorus were mainly influenced by their bedrocks and the sedimentary environmental conditions, not by the activities of human beings. The fractions of Ca-P and O-P were the dominant components of inorganic phosphorus in alluvial soil and purple soil, while the fraction of O-P was the highest in the paddy soil. The EPC_0 values of the sediments from the sections of Huangshi, Shuangjiang and Gaoyang were 0.08 , 0.13 and $0.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively, but the EPC_0 values of the alluvial soil, purple soil and paddy soil located in riparian zone were 0.08 , 0.09 and $0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. Correlation analysis shows that the values of EPC_0 positively related to the contents of total phosphorus and clay content, and significantly related to the content of Ca-P and pH values. According to the phosphorus concentration in the water of Pengxi River, it concludes that sediments and soils in the zone of fluctuating water level of the Pengxi river can be the sink of

收稿日期: 2012-05-08; 修订日期: 2012-08-09

基金项目: 国务院三峡建设委员会资助项目(2007AA10Z123); 西南大学生态学重点学科“211工程”建设项目

作者简介: 孙文彬(1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: qqlswb@126.com

* 通讯联系人, E-mail: zxl@swu.edu.cn

phosphorus in summer and autumn, while can be the source of phosphorus in the spring and winter. Therefore, the inherent phosphorus present in sediments and soils would be a major threat to the water quality and ecosystem reservation in the watershed of the Pengxi River.

Key words: Pengxi River; phosphorus forms; equilibrium phosphorus concentrations at zero sorption (EPC_0); sediment; the zone of fluctuating water level

沉积物是自然水域的重要生态组成部分,是底栖生物的栖息地和细菌活动的重要场所,是水体中营养物质的重要蓄积库,对污染物的沉积和释放起着重要作用,是形成湖泊、水库富营养化的关键因素之一^[1]. 长期的外源输入和水生生物残渣的沉积,使得沉积物中往往富集了大量的有机质、氮、磷等营养元素,而这些营养物质在环境条件如 pH、温度等变化时,又可向水体中释放,影响上覆水体水质,进而对水生生物、人类健康和水体生态环境产生很大的影响^[2]. 水体沉积物中的磷究竟是“源”还是“汇”不仅与各种环境因素有关,也与沉积物中磷的形态分布有关,其中,沉积物中磷的结合形态是控制沉积物-水界面间磷循环的一个主要因子^[3],它决定了内源磷的吸附特性及其稳定矿化程度,也直接影响水体中磷的浓度及初级生产力,对水体富营养化影响至关重要^[2,4]. 因而对沉积物磷形态特征以其迁移转化规律的研究受到重视,并在不同生态类型的浅水湖泊中进行了大量研究^[5~7].

三峡水库蓄水后,库区河流水文条件会发生根本转变,水体流速变慢,引起泥沙沉积,水质变清,有利于阳光在水中传播,给库区水体富营养化的发生发展提供了有利条件^[8]. 澎溪河位于三峡库区核心地带,流域覆盖重庆开县、云阳县,是长江北岸流域面积最大的一条支流. 自 2003 年蓄水

以来,水体富营养化程度逐渐增加,2007 年及 2008 年春夏及夏秋之交部分河段暴发了水华现象^[9]. 磷是水体富营养化最重要的限制因子之一,研究三峡水库沉积物磷形态及水-沉积物界面磷循环,对弄清三峡水库磷的来源及水体富营养化控制具有十分重要意义. 目前针对该流域的研究多集中在水体水质、营养盐含量变化及其藻类结构和功能等方面^[10~12],对磷的环境化学行为及迁移转化规律的研究报道较少. 本研究选取三峡库区澎溪河流域黄石、高阳和双江这 3 个断面的底泥以及其流域内水稻土、紫色土、冲积土这 3 种主要消落区土壤为对象,对其磷形态及吸附规律进行了分析,确定了零净吸附磷浓度(EPC_0),探讨了磷在水-土壤/沉积物界面的源汇转化规律,以期为水体富营养化的治理提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

根据澎溪河水文特征及沿岸城镇分布状况,设黄石、高阳和双江断面 3 个采样断面,用蚌式采样器在河底表层采集底泥样品. 消落区土壤主要有水稻土、冲积土和紫色土,其中水稻土采自重庆开县渠口镇,冲积土和紫色土采自重庆云阳县高阳镇,其基本理化性质见表 1.

表 1 澎溪河底泥及消落区土壤基本性质

Table 1 Basic characteristics of sediments and soils in the zone of fluctuating water level of Pengxi River

沉积物	pH	有机质 /g·kg ⁻¹	总磷 /g·kg ⁻¹	有效磷 /mg·kg ⁻¹	粒级组成/%				
					2~0.05 mm	0.05~0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm	
底泥	高阳	7.53	28.63	1.21	25.57	10.80	20.71	49.49	19.00
	黄石	7.65	31.75	1.45	30.58	2.05	20.00	60.00	17.95
	双江	7.83	17.91	0.80	32.71	8.90	14.02	60.08	17.00
消落区土壤	冲积土	7.79	22.27	0.76	37.15	32.90	31.03	27.04	9.03
	紫色土	7.51	17.01	1.16	5.42	76.70	6.07	14.03	3.20
	水稻土	5.91	22.01	0.65	26.72	41.30	18.10	31.10	9.50

实验用水为澎溪河的河水,其 pH、 NH_4^+-N 和 TP 分别为 8.16、0.45 和 0.18 mg·L⁻¹.

1.2 分析方法

1.2.1 澎溪河流域沉积物基本性质测定及磷的形态分级

澎溪河流域底泥和消落区土壤基本性质测定参

照文献[13]中的方法进行. 其中,有机质含量采用重铬酸钾容量法测定; pH 值采用电位法测定; 机械组成采用比重计法测定; 总磷含量由 $HClO_4-H_2SO_4$ 消解,钼锑抗比色法测定; 有效磷含量经 0.5 mol·L⁻¹ $NaHCO_3$ 提取,钼锑抗比色法测定; 沉积物经 550℃ 灼烧,与未经灼烧的同一沉积物样品,分别

用 $0.2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 H_2SO_4 浸提, 灼烧前后测得的磷量差值即为有机磷。

澎溪河底泥和消落区土壤磷形态分级参照 Jackson 等提出的连续浸提法进行^[13], 具体步骤为: 称取 1.00 g 沉积物样品, 依次以 $50 \text{ mL } 1.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_4\text{Cl}$ ($20 \sim 25^\circ\text{C}$ 振荡 30 min , Ex-P)、 $50 \text{ mL } 0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_4\text{F}$ ($20 \sim 25^\circ\text{C}$ 振荡 1 h , Al-P)、 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaOH}$ ($20 \sim 25^\circ\text{C}$ 振荡 2 h , 静置 16 h , 再振 2 h , Fe-P)、 $0.3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 柠檬酸钠 + 1.0 g 连二亚硫酸钠 + $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaOH}$ (加 40 mL 柠檬酸钠和 1 g 连二亚硫酸钠, $80 \sim 90^\circ\text{C}$ 水浴加热, 搅拌 15 min , 加 $10 \text{ mL } 0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaOH}$, 继续搅拌 10 min , O-P) 和 $50 \text{ mL } 0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 H_2SO_4 (振荡 1 h , Ca-P) 为浸提剂浸提, 每次浸提后离心, 取上层清液用钼锑抗比色法测定其中的磷含量。

1.2.2 磷的等温吸附实验

称取风干并过 2 mm 筛的消落区土壤或底泥样品 2.50 g 于 100 mL 聚乙烯离心管中, 加入含不同磷浓度的江水 50 mL , 加 3 滴甲苯并加塞, 于 $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 条件下振荡 60 min , 放入 $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 的恒温箱中培养 24 h , 培养结束后离心分离, 取上清液, 用钼锑抗比色法测定磷含量。根据吸附前后溶液磷浓度之差, 计算出消落区土壤或底泥磷的吸附量。根据澎溪河水中磷的浓度范围, 将磷浓度设为 0 、 0.05 、 0.10 、 0.20 、 0.40 、 0.80 、 1.60 、 3.20 、 5.00 和 $10.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.3 数据处理方法

实验数据的统计分析使用 SPSS 13.0 软件, 图表制作使用 Excel 2003 软件。

2 结果与分析

2.1 澎溪河流域沉积物磷含量特征

2.1.1 总磷、有机磷和有效磷含量

由图 1 可知, 澎溪河 3 个断面底泥总磷含量在 $0.80 \sim 1.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 总磷含量与长江中下游干流及其湖泊底泥相比处于中上游水平^[14,15]。澎溪河底泥有机磷含量在 $93.26 \sim 243.62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中高阳断面所占质量分数较高, 为 20.16% , 黄石和双江断面相对较低, 分别为 11.71% 和 8.82% , 这可能是由高阳河段宽阔, 水流速度变缓, 沉积速率较快, 以及含有机质的外来输入物沉积引起^[16]。澎溪河底泥有效磷含量在 $25.57 \sim 32.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 各断面差异较小, 占总磷含量的 $2.12\% \sim 4.11\%$ 。

消落区 3 种类型土壤总磷含量在 $0.65 \sim 1.16$

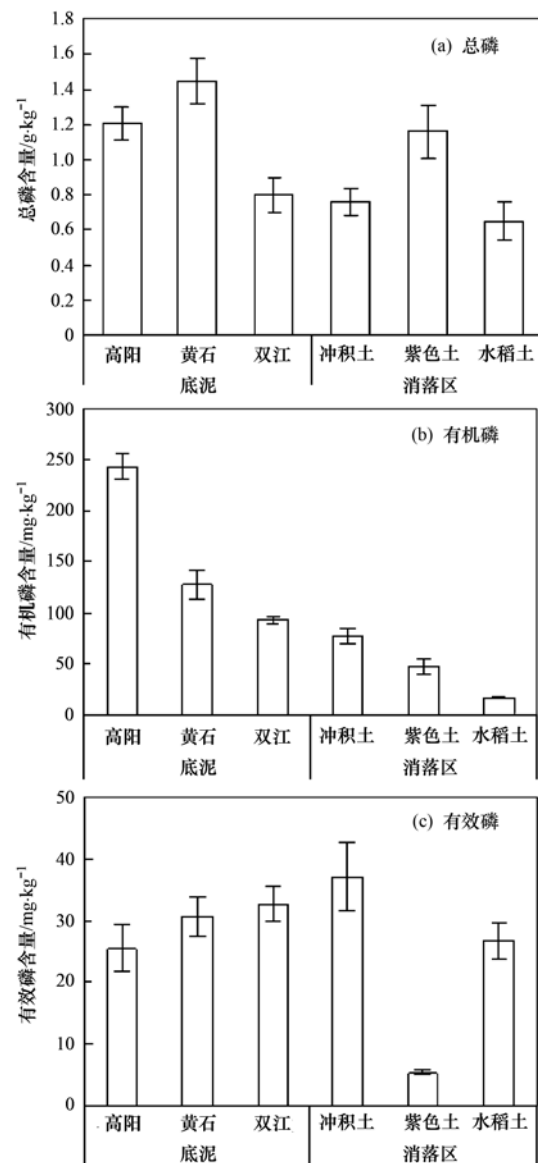


图 1 澎溪河底泥及消落区土壤总磷、有机磷及有效磷含量

Fig. 1 TP, Or-P and Olsen-P in sediments and soils in the zone of fluctuating water level of Pengxi River

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 平均含量低于底泥 3 个断面总磷含量, 表明了底泥对磷的富集特征。不同土壤间有机磷含量有一定差异, 冲积土有机磷含量较高, 为 $78.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占总磷的 10.30% , 紫色土和水稻土有机磷含量仅占总磷的 4.11% 和 2.63% ; 有效磷含量在 $5.42 \sim 37.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 以紫色土含量最低, 仅占总磷含量的 0.47% , 这是因为虽然紫色土总磷含量较高, 但为幼年土, 风化程度低, 原生矿物较多, 且土壤中游离碳酸钙使磷形成难溶的磷酸三钙, 导致有效磷比例较低^[17]。

2.1.2 沉积物无机磷形态分级

连续提取法^[13]将沉积物无机磷分为交换态磷

(Ex-P)、铝磷(Al-P)、铁磷(Fe-P)、闭蓄态磷(O-P)和钙磷(Ca-P)。其中,交换态磷(Ex-P),又被称为 NH_4Cl 提取磷,主要指被沉积物矿物颗粒表面吸附的磷酸盐,是最容易被沉积物释放进入到上覆水中;Al-P是指与铝结合的磷酸盐,也较容易进入上覆水体中,从而影响水体磷酸盐浓度,其含量受沉积物粒度、形成时间及沉积物成因等因素的影响;Fe-P主要指与铁的氧化物通过表面结合的磷,它们是不稳定的、可溶的,经常被认为是沉积物中易解析的部分,直接影响底泥-水界面磷的交换,其含量与人类的干扰相关,受外源输入、沉降速率、氧化还原环境和温度等条件影响较大^[18];O-P主要来自表

面被铁、铝水合氧化物膜覆盖的结合态磷和自然岩石状态的磷,这一部分磷难以成为溶解磷而释放到上覆水中,对水体富营养化几乎没有贡献^[19];Ca-P主要是指与自生磷灰石、碳酸钙以及生物骨骼等的含磷矿物有关的沉积磷,受沉积环境及其间隙水中磷酸根含量等的影响^[20]。在这些形态中,吸附态磷、铝磷和铁磷易在氧化还原电位等环境条件发生变化时转化成溶解性磷,并通过间隙水向上覆水释放,有较强的释放活性,被称为活性磷,已成为水体内源磷负荷的主要来源^[21]。本研究将交换态磷归于铝磷中,澎溪河底泥和消落区土壤各形态磷所占比例见图2。

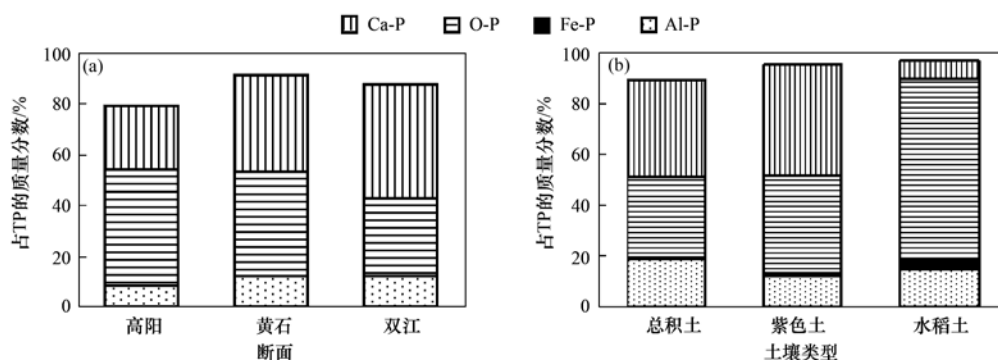


图2 澎溪河沉积物磷形态分布

Fig. 2 Distribution of P forms in sediments of Pengxi River

从图2(a)可知,澎溪河流域底泥活性磷(Al-P + Fe-P)所占质量分数较低,均在总磷的20%以下,而O-P、Ca-P所占质量分数较高,均在80%以上。Fe-P所占质量分数最低,各断面之间差异很小;Al-P所占质量分数在8.49%~12.15%之间,以高阳断面最低,双江断面最高,之间差异略高于Fe-P;Ca-P占总磷的质量分数在25.52%~45.14%之间,各断面间差异较大,表现为双江>黄石>高阳。由此可见,澎溪河底泥受到自然岩石状态及沉积物的影响较大,而受人为活动的影响较小。双江断面底泥Ca-P含量较高,表明其更易受到沉积环境及其间隙水中磷酸根含量的影响^[20]。有研究表明^[21],上覆水体pH值对沉积物磷释放有明显的影响,酸性条件下会导致Ca-P的大量溶解释放,澎溪河沉积物中Ca-P所占质量分数较高,因此水体的酸化易增加磷释放风险。

消落区土壤中活性磷所占质量分数也较低,在13.51%~19.41%之间,而O-P和Ca-P所占质量分数较高,这与多数关于三峡库区消落区的研究结果相似^[22~24]。不同土壤类型之间有一定差异,紫色土

活性磷所占质量分数最低,这是由于紫色土是幼年土,风化程度低,大量游离的碳酸钙导致其活性磷质量分数较低^[17]。水稻土中Fe-P所占质量分数(3.63%)高于冲积土和紫色土(0.08%~1.09%),可能是由于水稻土中O-P含量较高,长期淹水虽然不能导致O-P的直接释放,却可以活化O-P,其在落干氧化时转化为Fe-P并在下一次淹水时释放出来^[3]。可见,O-P虽然较为稳定,但是在消落区干湿交替的环境下,依然是内源性磷的潜在来源。

由图2(b)看出,水稻土磷形态与冲积土和紫色土存在明显的差异,其中O-P所占质量分数高达71.59%,而Ca-P所占质量分数较低,仅为7.29%,这是由于土壤来源及性质的不同所导致。本研究在消落区采集的水稻土为酸性土,风化程度较高,盐基淋溶较强,导致其钙含量较低,从而使得土壤中Ca-P含量较低^[25],O-P含量明显高于紫色土和冲积土,可能是水稻土中铁锰还原淋溶和氧化沉淀交替进行,导致蓄闭态磷含量增加,且其形态较为稳定不易向水体释放^[26]。

2.2 澎溪河流域底泥及消落区土壤磷的吸附特性

天然水体中磷的质量浓度大约在 $0.01 \sim 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内^[27]. 本研究在 $0 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 磷浓度范围内对底泥和消落区土壤进行磷的等温吸附实验. 由于沉积物有足够的吸附位点, 对磷的吸附随江水中磷浓度的提高而线性增加 (图 3). 采用 Henry 线性方程、Freundlich 方程和 Langmuir 方程等表达式对等温吸附过程进行拟合, 发现线性吸附方程拟合效果较好. 因而采用 Henry 线性方程讨论澎溪河流域沉积物磷的吸附特性.

表 2 澎溪河流域底泥和消落区土壤磷吸附的 Henry 线性方程拟合结果¹⁾

断面	底泥		消落区土壤		
	直线回归方程	<i>R</i>	土壤类型	直线回归方程	<i>r</i>
高阳	$y = 151.84x - 11.806$	0.973 8 **	冲积土	$y = 217.19x - 17.658$	0.927 1 **
黄石	$y = 144.66x - 18.223$	0.921 4 **	紫色土	$y = 135.01x - 12.106$	0.932 1 **
双江	$y = 277.94x - 31.543$	0.943 2 **	水稻土	$y = 152.43x - 5.906$	0.933 0 **

1) $r_{(8,0.05)} = 0.632, r_{(8,0.01)} = 0.765$

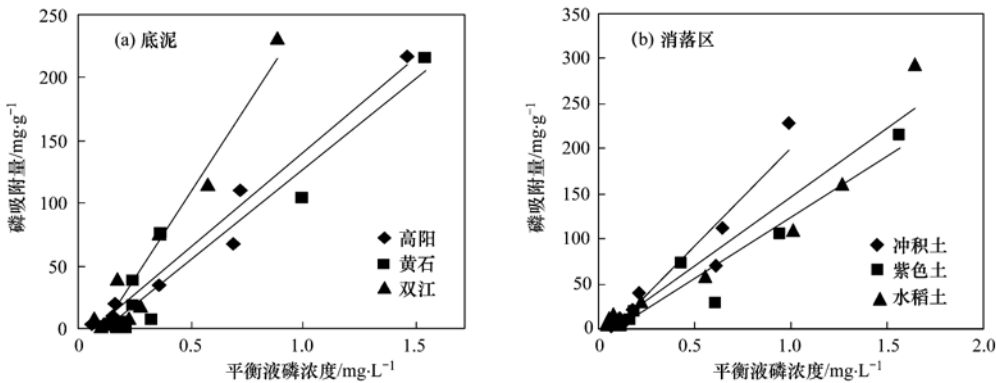


图 3 澎溪河流域底泥和消落区土壤磷吸附等温线

Fig. 3 Adsorption isotherms of P on sediments and soils in the zone of fluctuating water level of Pengxi River

Henry 线性方程分配系数 a 反映固体颗粒对污染物吸附程度的量. 表 2 表明, 澎溪河底泥中高阳与黄石的吸附能力较为相似, 均低于双江断面, 这可能与双江断面有效磷含量和 pH 值较高有关. 消落区土壤吸附能力, 以冲积土最强, 水稻土次之, 紫色土最弱, 这同样可能与沉积物中有效磷含量和 pH 值差异有关, 冲积土有效磷含量和 pH 值较高, 在吸附过程中磷能迅速与沉积物中钙质矿物质结合, 吸附能力最强; 水稻土虽然有效磷含量较高, 但是酸性水稻土吸附过程中, 磷主要是被铁铝氧化物和黏粒矿物吸附, 由于水稻土铁铝磷所占比例较低, 因此其吸附能力小于冲积土; 紫色土最弱是因为有效磷含量最低, 且风化程度较低, 为壤质沙土, 比表面积较小, 吸附能力较弱^[28].

从图 3 可知, 沉积物的吸附等温线是穿过浓度坐标而不是通过原点的交叉式曲线, 这是由于天

Henry 线性方程如下:

$$Q_e = a \cdot c_e - b \tag{1}$$

式中, Q_e 为单位质量固体颗粒所吸附的污染物的量 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$); c_e 为水相中污染物浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); a 为分配系数, 即固体颗粒对污染物吸附程度的量 ($\text{L} \cdot \text{g}^{-1}$); b 为纵截距, 即添加磷浓度为 0 时土壤磷的解吸量 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$).

利用 Henry 线性吸附模式拟合的澎溪河沉积物吸附等温回归方程相关系数见表 2.

然水体上覆水中的颗粒物往往含有一定量磷的吸附质, 而这部分原先结合在固体上的磷与吸附实验中吸附的磷在固液分配性质和结合力上可能不同造成的^[29]. 当固体颗粒物上原有磷酸盐的可解吸量大于吸附实验中被吸附的磷酸盐量时, 沉积物表现为解吸, 而当固体颗粒物上原有磷酸盐的可解吸量小于吸附实验中被吸附的磷酸盐量时, 沉积物则表现为吸附. 当沉积物上原有磷酸盐的可解吸量等于吸附实验中被吸附的磷量时, 沉积物对磷的表现吸附量为 0, 此时溶液的磷浓度为零净吸附磷浓度 (EPC_0), 可以显示水体沉积物磷的“源”和“汇”的功能^[30,31]. 根据 Henry 线性方程计算出高阳、黄石、双江这 3 个断面底泥的 EPC_0 分别为 0.08 、 0.13 和 $0.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 消落区冲积土、紫色土和水稻土的 EPC_0 分别为 0.08 、 0.09 和

0.04 mg·L⁻¹. 2007 ~ 2009 年对澎溪河水体水质指标进行取样检测^[32], 澎溪河总磷含量在 0.02 ~ 0.12 mg·L⁻¹ 之间, 随季节变化幅度较大, 磷浓度自上游到下游有明显的增加趋势. 第二、三季度为汛期, 消落区土壤营养和强降水导致土壤侵蚀将表层土壤中相当数量的磷输入水体, 使得总磷浓度较高, 水体磷浓度略高于实验所得 EPC₀ 值, 可初步判断此时沉积物作为磷的“汇”; 第一、四季度降水量减少, 外源磷输入降低, 水体总磷含量减少, 水体浓度低于沉积物 EPC₀ 值, 沉积物成为磷的“源”. 由于 EPC₀ 值的获得是模拟实验的结果, 因此仅为水体环境营养状况的预测、控制和管理提供一定的理论和实际指导意义, 最终沉积物究竟是作为“源”还是“汇”还会受到具体的水环境, 水文地质条件及其周围的污染状况等多种因

素的影响. 但是由于澎溪河上覆水中的磷浓度始终高于水体富营养化的临界值, 且沉积物中含磷量较高, 水体富营养化的风险依然很大. 因此, 防治澎溪河流域水体富营养化仅靠控制外源输入是远远不够的, 控制内源输入和底泥磷的释放, 建立良好的水生生态系统以改善水质才是关键.

2.3 沉积物性质对 EPC₀ 的影响

沉积物 EPC₀ 值反映了底泥对外源磷的缓冲能力和对内源磷的固定能力, 低的 EPC₀ 值反映了底泥具有较强的对外源磷的缓冲能力和对内源磷具有较强的固定作用^[33]. 沉积物中有机质、pH、黏粒含量及磷形态的差异都会影响磷的吸附, 从而影响 EPC₀ 值, 进而影响沉积物对水体中磷的固定和缓冲能力^[34]. 将澎溪河流域沉积物基本性质和磷形态与 EPC₀ 进行相关性分析, 结果见表 3.

表 3 EPC₀ 与底泥及土壤基本理化性质及磷形态的相关性分析¹⁾

Table 3 Correlation coefficients between EPC₀ and the basic characteristics and P forms of sediments and soils

项目	pH	有机质	TP	Olsen-P	活性磷	O-P	Ca-P	Or-P	<0.002 mm 颗粒
相关系数	0.814 *	0.214	0.612	0.113	-0.536	-0.749	0.818 *	0.260	0.534

1) * 显著相关 ($P < 0.05$)

由表 3 可以看出, EPC₀ 与沉积物 pH、Ca-P 呈显著正相关, 与有机质、TP、Olsen-P、Or-P 及 <0.002 mm 黏粒含量亦呈正相关, 但不达显著水平 ($P > 0.05$), 与活性磷及 O-P 呈负相关关系, 也不达显著水平, 表明在沉积物性质中 pH 和 Ca-P 含量对 EPC₀ 有显著影响 ($P < 0.05$). 对于 EPC₀ 与沉积物性质及磷形态关系的研究, 目前有诸多结果. 如郭胜利等^[35]发现土壤 EPC₀ 与 Ca-P (包含 Ca₂-P, Ca₈-P, Ca₁₀-P)、Al-P、Fe-P 和 O-P 呈正相关关系, 但只与有机磷间存在显著的相关关系; 李大鹏等^[33]报道, 河道底泥再悬浮状况下, 其 EPC₀ 与铁结合态磷 (Fe-P) 呈显著负相关, 与其他形态磷之间的相关性并不显著; 庞燕等^[27]和王圣瑞^[36]等报道, 长江中下游沉积物 EPC₀ 与其有机质, 总磷以及各形态磷含量均有显著的正相关关系; 而安文超等^[37]发现, 由于南四湖沉积物中 Fe-P 和 Al-P 的含量相对较低, 其沉积物 EPC₀ 等磷吸附特征参数与 Fe-P 和 Al-P 间有不明显的负相关性, 但与 TP、Ca-P 之间具有较好的正相关性. 本研究结果与文献^[37]的结果相似. 上述结果也表明影响沉积物性质对其 EPC₀ 的因素极其复杂, 对于一个大型水体, 应增加采样点数进行广泛研究和验证, 以明确研究水体 EPC₀ 与沉积物性质的关系.

3 结论

(1) 澎溪河底泥总磷含量在 0.80 ~ 1.45 g·kg⁻¹ 之间, 磷形态以无机磷为主, 其中 Ca-P 和 O-P 所占质量分数较高, 该流域底泥受自然岩石状态及沉积环境的影响较大, 而人为活动对其影响较小; 消落区土壤总磷含量在 0.65 ~ 1.16 g·kg⁻¹ 之间, 其中冲积土和紫色土以 Ca-P 为主, 水稻土以 O-P 为主.

(2) 高阳、黄石和双江断面底泥的 EPC₀ 分别为 0.08、0.13 和 0.11 mg·L⁻¹, 消落区冲积土、紫色土和水稻土的 EPC₀ 分别为 0.08、0.09 和 0.04 mg·L⁻¹. 该值与沉积物总磷含量、pH 值、Ca-P 含量及土壤黏粒含量呈正相关, 其中与 pH 值和 Ca-P 含量相关性达显著水平.

(3) 根据澎溪河沉积物的 EPC₀ 值大小及河水中磷浓度的季节变化, 可初步判定夏秋季节沉积物为磷的“汇”, 冬春季节则成为“源”. 但实际情况还要取决于具体的水环境, 水文地质条件及其周围的污染状况等多种因素的影响.

参考文献:

- [1] 储昭升, 张玉宝, 金相灿, 等. 底泥对洋河水库微囊藻和鱼腥藻生长影响的研究[J]. 环境科学, 2012, 33(3): 844-848.
- [2] 王春雨, 万国江, 黄荣贵, 等. 湖泊现代化沉积物中磷的地

- 球化学作用及环境效应[J]. 重庆环境科学, 2000, **22**(4): 39-41, 59.
- [3] 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.
- [4] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment [J]. Water Research, 2000, **34**(7): 2037-2042.
- [5] 王立志, 王国祥, 俞振飞, 等. 苦草(*Vallisneria natans*)生长期对沉积物磷形态及迁移的影响[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(5): 753-760.
- [6] 江敏, 刘金金, 胡文婷, 等. 滴水湖沉积物对磷的吸附特性初探[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(5): 18-23.
- [7] Xiang S L, Zhou W B. Phosphorus forms and distribution in the sediments of Poyang Lake, China [J]. International Journal of Sediment Research, 2011, **26**(2): 230-238.
- [8] 邓春光, 龚玲. 三峡库区富营养化发展趋势研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(增刊): 279-282.
- [9] 林玉海, 王楠, 赵秀兰, 等. 三峡库区澎溪河流域消落区土壤氮磷释放研究[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(2): 131-134, 140.
- [10] 张晟, 李崇明, 郑炳辉, 等. 三峡库区次级河流营养状态及营养盐输出影响[J]. 环境科学, 2007, **28**(3): 500-505.
- [11] 许川, 舒为群, 曹佳, 等. 三峡库区消落带富营养化及其危害预测和防治[J]. 长江流域资源与环境, 2005, **14**(4): 440-444.
- [12] 张晟, 刘景红, 张全宇, 等. 三峡水库成库初期氮、磷分布特征[J]. 水土保持学报, 2005, **19**(4): 123-126.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] Wang S R, Jin X C, Zhao H C, *et al.* Phosphorus fractions and its release in the sediments from the shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River area in China [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2006, **273**(1-3): 109-116.
- [15] 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系[J]. 环境科学学报, 2004, **42**(3): 383-388.
- [16] 扈传昱, 潘建明, 刘小涯. 珠江口沉积物中磷的赋存形态[J]. 海洋环境科学, 2001, **20**(4): 21-25.
- [17] 中国科学院成都分院土壤研究室. 中国紫色土: 上篇[M]. 北京: 科学出版社, 1991. 210-213.
- [18] Ruban V, Brigault S, Demare D, *et al.* An investigation of the origin and mobility of phosphorus in freshwater sediments from Bort-Les-Orgues Reservoir, France [J]. Journal of Environmental Monitoring, 1999, **1**(4): 403-407.
- [19] 田忠志, 邢友华, 姜瑞雪, 等. 东平湖表层沉积物中磷的形态分布特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(6): 719-723.
- [20] 章婷曦, 王晓蓉, 金相灿. 太湖不同营养水平湖区沉积物中磷形态的分布特征[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(4): 1207-1213.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 吉芳英, 曹琳, 林茂, 等. 三峡库区新生消落区沉积物磷形态分析[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(8): 882-886.
- [24] 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.
- [25] 杨锦. 四川盆地水稻土钙含量及钙肥效应研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2006. 4-7.
- [26] 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.
- [27] 庞燕, 金相灿, 王圣瑞, 等. 长江中下游浅水湖沉积物对磷的吸附特征——吸附等温线和吸附/解吸平衡质量浓度[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(增刊): 18-23.
- [28] 林荣根, 吴景阳. 黄河口沉积物对磷酸盐的吸附与释放[J]. 海洋学报, 1994, **16**(4): 82-90.
- [29] 潘纲. 亚稳平衡态吸附(MEA)理论——传统吸附热力学理论面临的挑战与发展[J]. 环境科学学报, 2003, **23**(2): 156-173.
- [30] Wang Y Z, 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.
- [31] Palmer-Felgate E J, Bowes M J, Stratford C, *et al.* Phosphorus release from sediments in a treatment wetland: Contrast between DET and EPC₀ methodologies [J]. Ecological Engineering, 2011, **37**(6): 826-832.
- [32] 王娟, 胡正峰, 张磊, 等. 三峡库区支流澎溪河回水区水质调查与评价[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, **33**(7): 67-73.
- [33] 李大鹏, 黄勇, 李伟光. 河道底泥再悬浮状态对磷平衡浓度的影响[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(5): 476-480.
- [34] Wu F, Qing H, Wan G. Regeneration of N, P and Si near the sediment/water interface of lakes from Southwestern China Plateau [J]. Water Research, 2001, **35**(5): 1334-1337.
- [35] 郭胜利, 党廷辉, 刘守赞, 等. 磷素吸附特性演变及其与土壤磷素形态、土壤有机碳含量的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, **11**(1): 33-39.
- [36] 王圣瑞, 金相灿, 赵海超, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物对磷的吸附特征[J]. 环境科学, 2005, **26**(3): 38-43.
- [37] 安文超, 李小明. 南四湖及主要入湖河流表层沉积物对磷酸盐的吸附特征[J]. 环境科学, 2008, **29**(5): 1295-1302.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} over Eastern China from MODIS Aerosol Optical Depth Using the Back Propagation Neural Network	GUO Jian-ping, WU Ye-rong, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (817)
Comparison of Atmospheric Particulate Matter and Aerosol Optical Depth in Beijing City	LIN Hai-feng, XIN Jin-yuan, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i> (826)
Impacts of Meteorological Factors on Atmospheric Methane Mole Fractions in the Background Area of Yangtze River Delta	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, GU Jun-qiang, <i>et al.</i> (835)
Dispersion and Analysis of Odor Pollution in Landfill Area Under the Enclosed Operation Condition	LU Peng, WU Shi-xing, DAI Zhi-feng, <i>et al.</i> (842)
Distribution Characteristics and Sea-Air Fluxes of Volatile Halocarbons in the East China Sea in Winter	HE Zhen, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng (849)
Intra- and Inter-annual Variabilities of Particulate Organic Matter in the Mirs Bay from 2000 to 2010	LI Xu-lu, ZHOU Yi-pin, XIA Hua-yong (857)
Phytoplankton Assemblages and Their Relation to Environmental Factors by Multivariate Statistic Analysis in Bohai Bay	ZHOU Ran, PENG Shi-tao, QIN Xue-bo, <i>et al.</i> (864)
Characteristics and Evolution of Hydrochemical Compositions of Freshwater Lake in Tibetan Plateau	WANG Peng, SHANG Ying-nan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (874)
Estimation of Nonpoint Source Pollutant Loads and Optimization of the Best Management Practices (BMPs) in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, LIU Pin (882)
An Object-Oriented Intelligent Engineering Design Approach for Lake Pollution Control	ZOU Rui, ZHOU Jing, LIU Yong, <i>et al.</i> (892)
Contribution of Plant Litters to Sediments Organic Matter in Jiulong River Estuary Wetland	LUO Zhuang-xi, QIU Zhao-zheng, WANG Zhen-hong, <i>et al.</i> (900)
Application of Tiered Approach to Assess the Impact of Backfilling Remediated Soil on Groundwater	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (907)
Removal of Nitrate from Groundwater Using Permeable Reactive Barrier	LI Xiu-li, YANG Jun-jun, LU Xiao-xia, <i>et al.</i> (914)
Research on Pollution Load of Sediments in Storm Sewer in Beijing District	LI Hai-yan, XU Bo-ping, XU Shang-ling, <i>et al.</i> (919)
Occurrence and Risk Assessment of Five Selected PPCPs in Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	WEN Zhi-hao, DUAN Yan-ping, MENG Xiang-zhou, <i>et al.</i> (927)
Microbial Risk Assessment of Urban Water Bodies for Aesthetical and Recreational Uses	SUN Fu, SHA Jing, ZHANG Yi-fan, <i>et al.</i> (933)
Study on Removal of Di-(2-Ethylhexyl) Phthalate by Using of Small-Scale Biological Aerated Filter	LI Wei, ZHAO Jing, YU Jian, <i>et al.</i> (943)
Mechanism of Membrane Fouling and Filtration Characteristics in a Membrane Bioreactor for Industrial Wastewater Treatment	FAN Ju-hong, YU Su-lin, ZHANG Pei-shuai, <i>et al.</i> (950)
Enhanced Electro-Chemical Oxidation of Acid Red 3R Solution with Phosphotungstic Acid Supported on γ -Al ₂ O ₃	YUE Lin, WANG Kai-hong, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (955)
Degradation Kinetics of Activated Carbon Catalyzed Persulfate Oxidation Orange G	YANG Mei-mei, ZHOU Shao-qi, LIU Dan, <i>et al.</i> (962)
Study on the Start-up of the Anaerobic Baffled Reactor for Treating Alkali-dewighting and Dyeing-printing Wastewater	YANG Bo, ZHONG Qi-jun, LI Fang, <i>et al.</i> (968)
Study on the Pollutants Removal Performance Along the Advanced Treatment in Tannery Wastewater by O ₃ -BAF	YU Bin, LIU Rui, CHENG Jia-di, <i>et al.</i> (974)
Effect of Pilot UASB-SFSBR-MAP Process for the Large Scale Swine Wastewater Treatment	WANG Liang, CHEN Chong-jun, CHEN Ying-xu, <i>et al.</i> (979)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Municipal Wastewater and Studies on Its Characteristics Under the Continuous Flow	NIU Shu, DUAN Bai-chuan, ZHANG Zuo-li, <i>et al.</i> (986)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (I) : Model Constitution	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (993)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (II) : Process Simulation	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (998)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (III) : Model Application	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (1004)
Comparative Study on Water-air CO ₂ , CH ₄ Flux in Two Tributaries in the Three Gorges Reservoir, China	LI Zhe, BAI Lei, GUO Jin-song, <i>et al.</i> (1008)
Factors Influencing the Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Regimes	CHEN Shu-tao, LIU Qiao-hui, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1017)
Differences in Soil Respiration Between Cropland and Grassland Ecosystems and Factors Influencing Soil Respiration on the Loess Plateau	ZHOU Xiao-gang, ZHANG Yan-jun, NAN Ya-fang, <i>et al.</i> (1026)
Application and Benefit Evaluation of Tiered Health Risk Assessment Approach on Site Contaminated by Benzene	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, LIANG Jin, <i>et al.</i> (1034)
History of Heavy Metal Pollution from Tidal Flat in Haizhou Bay	ZHANG Rui, ZHANG Fan, LIU Fu-cheng, <i>et al.</i> (1044)
Accumulation, Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Surface Sediment of Caohai Plateau Wetland, Guizhou Province	ZHANG Qing-hai, LIN Chang-hu, TAN Hong, <i>et al.</i> (1055)
Assessment and Correlation Analysis of Heavy Metals Pollution in Soil of Dajinshan Island	CHENG Fang, CHENG Jin-ping, SANG Heng-chun, <i>et al.</i> (1062)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Stream Sediments from a Typical Nonferrous Metals Mining City	LI Ru-zhong, JIANG Yan-min, PAN Cheng-rong, <i>et al.</i> (1067)
Contamination and Health Risk for Heavy Metals via Consumption of Vegetables Grown in Fragmentary Vegetable Plots from a Typical Nonferrous Metals Mine City	LI Ru-zhong, PAN Cheng-rong, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1076)
Correlativity Study of the Distribution of Soil Magnetic Susceptibility and the Heavy Metal Contents in Xi'an City	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, YANG Guang (1086)
Distribution Characteristics and Environmental Significance of Heavy Metals in Soil Particle Size Fractions from Tropical Forests in China	GONG Cang, XU Dian-dou, CHENG Hang-xin, <i>et al.</i> (1094)
Study on Phosphorus Adsorption Characteristic of Sediments in an Ecological Ditch	ZHANG Shu-nan, JIA Zhao-yue, XIAO Run-lin, <i>et al.</i> (1101)
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	SUN Wen-bin, DU Bin, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1107)
Sorption Behavior of Triton X-100 on Loess and Affecting Factors	ZHONG Jin-kui, ZHAO Bao-wei, ZHU Kun, <i>et al.</i> (1114)
Residual Levels in Air, Soil and Soil-Air Exchange of Organochlorine Pesticides in Hami Region of Xinjiang and Its Potential Ecological Risk	MA Zi-long, MAO Xiao-xuan, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (1120)
Levels and Sources of Decabromodiphenyl Ether and Dechlorane Plus in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	HE Chang, JIN Jun, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of PBDEs and DL-PCBs in Sediments of Taihu Lake	MA Zhao-hui, JIN Jun, QI Xue-kui, <i>et al.</i> (1136)
Characteristics of Organic Pollutants in the Sediments from a Typical Electronics Industrial Zone	LIU Jin, DENG Dai-yong, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (1142)
Emission Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Exhaust Particles from a Diesel Car	TAN Pi-qiang, ZHOU Zhou, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (1150)
Characterization of PAHs in Fly Ashes from Coke Production	MU Ling, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (1156)
Comparison of PAHs Distribution in Stabilized Sludge by Sludge Drying Bed and Reed Bed	CUI Yu-bo, SUN Hong-jie, RAN Chun-qiu, <i>et al.</i> (1161)
Effects of Adsorbents on Partitioning and Fixation of Heavy Metals in the Incineration Process of Sewage Sludge	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu, CHEN Tao (1166)
Environmental Toxicity of Waste Foundry Sand	ZHANG Hai-feng, WANG Yu-jue, WANG Jin-lin, <i>et al.</i> (1174)
Construction and Properties of a Microbial Whole-cell Sensor CB10 for the Bioavailability Detection of Cr ⁶⁺	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xu-liang, <i>et al.</i> (1181)
Structure and Dynamics of Microbial Community in the Denitrifying Sulfide Removal Process	YU Hao, WANG Ai-jie, CHEN Chuan (1190)
Effects of Physico-chemical Parameters on the Abundance of the Denitrification-associated Genes <i>nirK</i> , <i>nirS</i> and <i>nosZ</i> During Agricultural Waste Composting	HU Chun-xiao, CHEN Yao-ning, ZHANG Jia-chao, <i>et al.</i> (1196)
Impact of PAHs on the Expression of PRDX in Earthworm (<i>Eisenia fetida</i>)	LIN Kang-li, ZHENG Sen-lin, SONG Yu-fang, <i>et al.</i> (1204)
Preparation of OMC-Au/L-Lysine/Au Modified Glassy Carbon Electrode and the Study on Its Detection Response to Hydroquinone and Catechol	ZHOU Yao-yu, TANG Lin, LI Zhen, <i>et al.</i> (1211)
Risk Communication in Construction of New Nuclear Power Plant	HE Gui-zhen, LÜ Yong-long (1218)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年3月15日 34卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 3 Mar. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行业