

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

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

南京地区大气气溶胶 PM_{2.5} 中稳定碳同位素组成研究 吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)

太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析 胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩锋, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)

交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究 罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)

公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性 楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)

兰州及其周边区域大气降水 δ¹⁸O 特征及其水汽来源 陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析 岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)

O₃/H₂O₂ 氧化苯乙烯气体性能及机制 何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)

马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪 关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)

江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究 李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)

辽河流域非点源污染空间特征遥感解析 王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)

景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究 杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)

金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征 游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)

崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探 韩建刚, 曹雪 (3810)

FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性 刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)

中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析 袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)

深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价 孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)

PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源 边璐, 李田, 侯娟 (3840)

三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究 余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)

小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究 李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)

太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟 韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)

湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究 陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)

水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究 周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)

底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响 区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)

区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究 易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)

4 种人工湿地填料的 f2 噬菌体吸附特性 陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)

稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究 纪菅雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)

紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究 王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)

基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较 朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)

nTiO₂ 在水中的分散沉降行为研究 陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)

微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响 谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)

两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究 周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)

化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究 周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)

珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价 李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)

污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响 金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)

活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素 李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)

不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响 郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)

生物陶粒反应器的氨自养反硝化研究 陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)

亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究 严俊霞, 李君剑, 王洪建, 张义辉 (3992)

SiB3 模式对作物区 CO₂ 通量的模拟研究 张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)

缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响 徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)

典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例 闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)

苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯 史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)

废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性 吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)

铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究 王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)

典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究 李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)

3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中迁移行为研究 方婧, 余博阳 (4050)

多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征 李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)

毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究 白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)

珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究 梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)

江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价 刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)

铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响 张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)

利用高通量测序对封存 CO₂ 泄漏情景下土壤细菌的研究 田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)

酸性矿山水区域废矿石中真核生物多样性分析 李思远, 郝春博, 王丽华, 吕铮, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)

十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析 常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)

硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响 胡莹, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)

外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响 刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)

电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析 李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)

《环境科学》征稿简则 (3926) 《环境科学》征订启事 (4057) 信息 (3878, 3953, 3999, 4041)

区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究

易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷

(安徽理工大学地球与环境学院, 淮南 232001)

摘要: 在淮南潘谢采煤沉陷区水域的潘集(PJ)、顾桥(GQ)、谢桥(XQ)各选一研究站点, 研究区域水化学条件下溶液离子组分对表层沉积物磷(P)吸附特征的影响. 等温吸附实验分别在纯水、NaCl、CaCl₂、NaHCO₃ 和 NaHCO₃ + CaCl₂ 共 5 组环境溶液中进行, 其中前 4 组设置为探讨各组分对 P 吸附的单独作用, 最后 1 组代表各组分的综合作用. 结果表明, 环境溶液设置对 P 的吸附特征有重要影响, Ca²⁺ 能显著增强沉积物对 P 的吸附潜能, 而弱碱性环境(NaHCO₃ 组)则不利于沉积物对 P 的吸附, 实际水化学条件下的作用则表现为二者的综合, 但 Ca²⁺ 增强作用要显著大于碳酸盐弱碱性缓冲体系的弱化作用. 3 个站点沉积物 P 的零吸附平衡浓度(EPC₀)的均值分别为 0.059、0.032 和 0.040 mg·L⁻¹, 总体上有向水体释磷的趋势, PJ 站点释放潜能要高于 GQ 和 XQ 站点, 与研究水域营养水平密切相关. 由于特殊的沉积环境, 研究水域 P 释放潜能比富营养化程度较高的湖泊要弱, 接近于营养水平较低的水体.

关键词: 煤矿; 沉陷区; 沉积物; 磷; 水化学; 等温吸附

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-3894-10

Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas

YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, QU Xi-jie, WANG Ting-ting

(School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Three research sites of subsidence waters, including Panji (PJ), Guqiao (GQ) and Xieqiao (XQ) located in the Huainan "Panxie" Mine Area have been selected to address their phosphorus (P) adsorption behavior in the sediments considering the site-specific regional water chemistry. The P isothermal adsorption was measured in pure water and four different types of ion solutions, prepared through additions of sodium chloride (NaCl), calcium chloride (CaCl₂), sodium bicarbonate (NaHCO₃), and a mixture of sodium bicarbonate and calcium chloride (NaHCO₃ + CaCl₂). The first four settings were studied to analyze the individual impact of each solution on P adsorption while the last one was to study their combined effect. In general, Ca²⁺ could enhance P adsorption on sediment surfaces while weakly alkaline conditions caused by bicarbonates were unfavorable for its adsorption. As a comprehensive effect, the positive effect of the former was greater than the negative effect of the latter. The zero equilibrium phosphorus concentrations (EPC₀) in the three sites were 0.059, 0.032 and 0.040 mg·L⁻¹, respectively, showing trends of P releasing to the overlying water column. The site of PJ showed greater P releasing potential than those at the GQ and XQ sites, probably due to its higher nutrient level. Overall, P releasing risks in the researched sediments are weaker than those in eutrophic lakes, while they are very similar to lakes with lower trophic levels, because of their unique sedimentary environments from inundated agricultural soils.

Key words: coal mines; subsidence areas; sediments; phosphorus; water chemistry; isothermal adsorption

我国煤炭资源的持续大规模开采导致了广泛的土地资源破坏和地表沉陷, 相对于西部矿区干旱脆弱的生态环境特征, 两淮(淮南和淮北)采煤沉陷区是我国煤炭资源开采对生态环境改变的另一方面典型代表. 这些矿区煤层上覆较厚的第四系松散沉积物, 河网发达、地下潜水位较高, 为水资源赋存创造了良好的地理地质条件. 调查资料表明淮南矿区 2010 年沉陷区面积约 140 km², 积水区面积占 30%~50%, 并呈快速扩张的趋势, 预计至 2020 年淮南沉陷区面积将增至 200 km² 以上, 可储备约 7~10 亿 m³ 的淡水资源, 对区域社会、经济及环境可持续

发展意义重大, 其资源管理与水质保护亦非常关键.

这些采煤沉陷积水区属小型湖泊或水库类水体, 其沉积环境起源于沉陷覆水的农业土壤, 其中两个重要问题包括: ①原有耕层中营养元素是否能够向表层或上覆水迁移而影响水体的营养盐含量和结构, 从而造成重要的生态环境效应? ②淹水的农业土壤特征是否会不同于一般的湖泊沉积物, 进而对

收稿日期: 2013-01-19; 修订日期: 2013-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41202242); 安徽省级高校自然科学研究重点项目(KJ2011A084); 教育部留学回国人员科研启动基金项目(第 45 批)

作者简介: 易齐涛(1979~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为矿区环境生态学, E-mail: yiqitao@163.com

营养元素的迁移产生显著的影响?

由于在水体富营养化进程中的重要作用,沉积物中磷(P)元素在“上覆水-沉积物”界面上的生物地化过程一直是近现代河流、湖泊、水库、河口等生态系统研究的焦点,其中界面上 P 的吸附和解吸平衡是表征沉积物“源”或“汇”的重要衡量标准之一. P 内源负荷的相关研究中,沉积物 P 的赋存形态^[1]和相关理化性质、驱动 P 释放的生物动力学机制^[2]或水动力条件^[3]等重要因素受到了广泛的关注,诸多研究表明碱性条件^[4]、光照与藻类活动^[5]、还原环境与风浪扰动^[6]等易导致 P 的释放. 然而,“上覆水-沉积物”界面中实际环境溶液水化学特征对 P 吸附解吸行为的影响很大程度上为研究者所忽视,许多环境条件设置主观性较强,如加入 NaOH 调节 pH 值,或用蒸馏水直接配制磷酸盐浓度,另外一些研究则采用原水样或调节离子强度进行实验条件的模拟. 实际上在淡水河流、湖泊和湿地等水体中,水化学主要特征是受碳酸盐缓冲溶液体系控制的平衡体系,包括常量离子 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等在内的不同组分及比例结构的盐溶液. 基于这一基本原理,本研究将就环境溶液中水化学条件设置对 P 吸附特征可能产生的影响进行分析,并探索其中的主导因素,这不仅对采煤沉陷区水域这一特定淡水生态系统内源负荷研究具有实际意义,而且能为统一评判或比较不同类型水生态系统 P 的内源负荷及吸附特征提供更加科学的依据和有价值的参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况及研究站点设置

研究区域潘谢矿区位于安徽省淮河北岸,矿区东西长近 58 km,南北宽 6~25 km,面积达 865 km². 数十年的煤炭开采已经造就了大规模的沉陷积水区,水域面积约 70 km²,大大小小分布在不同的矿区,形成了大量湖泊、湿地、水塘类等不同景观的水体. 这些水体有的保持较为自然和封闭状态,有的受到养殖排污影响,有的则和当地的河流沟渠等地表水系贯通. 本研究在潘谢沉陷区东部、中部及西部各选一代表性水域为研究对象,分别命名为潘集(PJ)、顾桥(GQ)、谢桥(XQ)站点,如图 1 所示.

PJ 研究水域位于潘一矿东侧沉陷区内,上游和区内主要河流泥河连通,下游建有节制闸. 其水域面积约 3.5 km²,平均水深 3.6 m,主要用于当地农民的渔业活动,每年有鱼苗投放,但无饵料添加,为

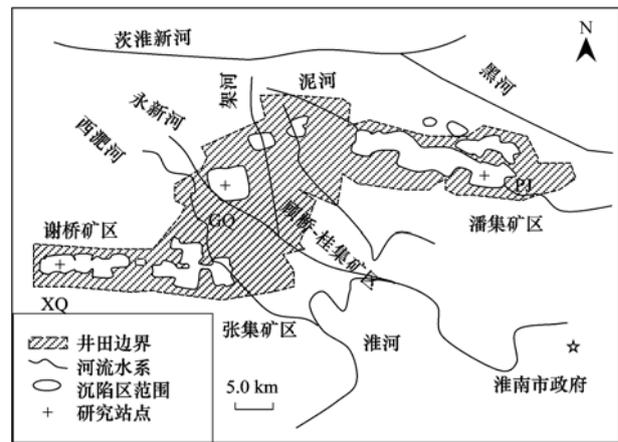


图 1 淮南潘谢矿区地理位置及研究站点设置示意

Fig. 1 Location of the Panxie Mine Areas and the distribution of research sites

自然散养型. 沉陷积水历史为 20 年左右,主要污染源于泥河排污和周围农业活动,其中泥河流经矿区的途中接纳周围村庄污水和部分矿井排水,水质污染程度较为严重. 本研究站点共设 PJ-1~PJ-9 共 9 个水质采样点,其中 PJ-1、PJ-3、PJ-5、PJ-7、PJ-9 这 5 个采样点同时设置为沉积物采样点(图 2).

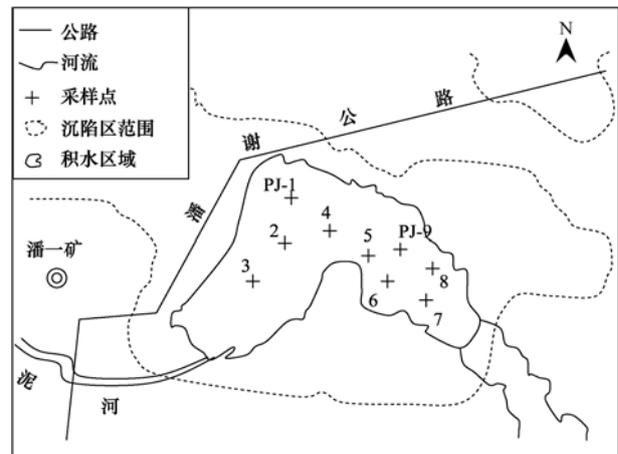


图 2 东部潘集(PJ)研究站点水域采样点设置示意

Fig. 2 Distribution of sampling sites in the Panji (PJ) waters

GQ 研究水域位于顾桥矿区西侧的沉陷区内,整个水域面积超过 10 km²,平均水深 4.0 m,由矿区内道路分割为 4 个部分,本研究选取其西北部较为稳定的水域为研究对象,面积约 4.0 km². 本水域渔业活动亦为自然散养型,沉陷积水历史较短(约 5 年左右),和外界水系无联通渠道,水质状态较好. 本研究站点共设 GQ-1~GQ-9 共 9 个水质采样点,其中 GQ-1、GQ-3、GQ-5、GQ-7 和 GQ-9 这 5 个点同时设置为沉积物采样点(图 3).

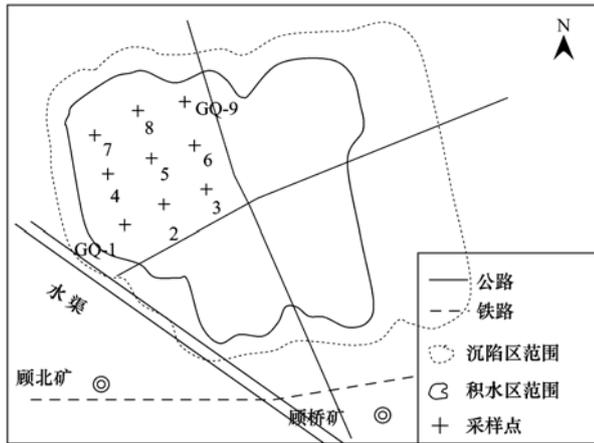


图3 中部顾桥(GQ)研究站点水域采样点设置示意

Fig. 3 Distribution of sampling sites in the Guqiao (GQ) waters

XQ 研究水域位于谢桥矿西部沉陷区内, 整个水域面积亦超过 10 km², 平均水深 4.5 m, 本研究选取其西部水域为研究对象, 面积约 3.0 km², 沉陷积水历史约 15 年, 和区内主要农业渠道谢展河连通, 接纳周围农业活动排水, 本水域渔业活动亦为自然散养型. 本研究站点共设 XQ-1 ~ XQ-7 共 7 个水质采样点, 其中同时在 XQ-2、XQ-3、XQ-5、XQ-6 和 XQ-7 这 5 个点设置沉积物采样点(图 4).

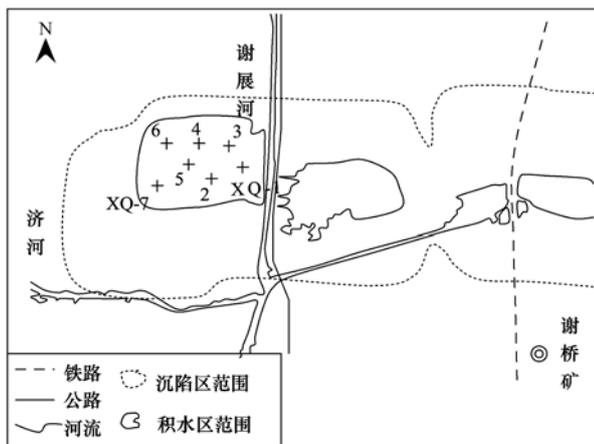


图4 西部谢桥(XQ)研究站点水域采样点设置示意

Fig. 4 Distribution of sampling sites in the Xieqiao (XQ) waters

1.2 水样、沉积物采样及分析

3 个研究站点于 2011 年分 4 个季度采集表层水样, 采样主要根据文献[7]中相关方法进行. 水质分析主要包括总磷(TP)、正磷酸盐(PO₄³⁻-P)和表征水化学特征的离子浓度(Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻、Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺), 常量离子仅在平水期(2011 年 4 月)和丰水期(2011 年 8 月)两个季度进行. 水质分析方法按国家相关标准进行[8], TP 用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法, HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻

用酚酞-甲基橙滴定法. 常量离子用离子色谱分析仪(ICS1000, 美国戴安公司)进行分析, 其标准溶液为国家标准物质研究中心标准溶液, 实验过程用水均为超纯水. 质量控制过程中, 以阴阳离子的当量浓度比保证样品的准确测定, 当其比值范围在 1.00 ± 0.25 之间时[9], 认为离子平衡, 否则重新测定.

于 2011 年 4 月使用沉积物柱状采样器进行原位沉积物样品采集和分层, 沉积物采集深度至整个耕作层厚度(20 ~ 30 cm), 根据沉积物的具体性状由上至下分为 5 层, 表层沉积物注意区分农业土壤上覆的淤泥质湖相沉积物(约 1 ~ 4 cm), 本研究仅对“上覆水-沉积物”界面过程中重要的表层沉积物样品 P 的吸附特征进行分析. 沉积物样品带回实验室后, 按照不同需要分别处理. 部分样品自然风干后, 用研钵捣碎研细, 分别过 60 目和 100 目筛后, 贮存于自封袋中备用. 沉积物主要分析指标: 有机质(OM)、TP、有机磷(OP)、无机磷(IP)及其分级赋存形态(NH₄Cl-P、BD-P、NaOH-P、HCl-P)、非晶质氧化铁(Fe_o), 沉积物具体采集过程、分析指标表征意义及分析方法同文献[10].

1.3 基于区域水化学条件的等温吸附实验

以研究区域水化学实际分析结果为基础, 研究环境溶液中各离子组分对沉积物 P 吸附特征的影响. 实验设置 4 组环境溶液作为综合水化学体系特征的独立组分(表 1), 纯水体系为对照, NaCl 组和 CaCl₂ 组分别用来研究 Na⁺ 和 Ca²⁺ 两种盐溶液在 P 吸附过程中所起到的作用, NaHCO₃ 组表征研究水体的弱碱性环境, 而 NaHCO₃ + CaCl₂ 组则体现实际水化学条件下各离子的综合作用. 一般的实际淡水环境溶液中, 主要为碳酸盐化学平衡组成的弱碱体系, 因此单独设置 NaHCO₃ 组, 根据土壤/沉积物阴阳离子吸附性能, Ca²⁺、Mg²⁺ 要强于 Na⁺, 也是界面上可能和含 P 矿物作用的重要因子, 同时 Na⁺、Cl⁻ 为相对保守性元素, 因此设置 NaCl 和 CaCl₂ 组区分一般盐溶液和 Ca²⁺ 的独立作用.

等温吸附实验在接近于自然水体的低 P 浓度

表 1 等温吸附实验环境溶液离子组别设置

离子组别	浓度/meq·L ⁻¹	pH	环境溶液特征
纯水组	—	6.9	对照, 环境溶剂
NaCl 组	4.0	7.1	Na ⁺ /盐溶液
CaCl ₂ 组	4.0	7.0	Ca ²⁺
NaHCO ₃ 组	3.0	8.2	Na ⁺ /弱碱性
NaHCO ₃ + CaCl ₂ 组	3.0 + 4.0	8.1	Na ⁺ + Ca ²⁺ /弱碱性

范围内进行,设 0.00、0.01、0.02、0.04、0.08、0.10、0.16 和 0.20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 共 8 个 P 浓度梯度,分别在上述 5 组溶液环境中配置. 每组实验具体步骤如下:称取沉积物自然风干样品 0.25 g 若干份,置于 50 mL 聚乙烯离心管中,分别加入不同浓度的 KH_2PO_4 系列溶液(以 P 计)25 mL,在恒温($25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$)摇床上振荡 24 h,然后在 $5000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下离心 20 min,分离上清液,过 $0.45 \mu\text{m}$ 混合纤维素膜后,用磷钼蓝比色法测定其中的可溶性正磷酸盐含量. 根据以上测定值,作吸附等温曲线并得出吸附等温式及特征值. 等温吸附特征实验工作量总计为:3 个研究站点共 15 个表层沉积物样品、5 组环境溶液、8 个浓度梯度,历时一个多月共获取 600 对实验数据,能够充分保证数据的质量、精度和统计学上的准确性. 各组溶液环境体系下沉积物 P 吸附特征参数和沉积物理化指标等数据分析用统计分析软件 SPSS 11.5 进行,分别在 95% ($P < 0.05$) 和 99% ($P < 0.01$) 两种置信度水平下检验各参数之间的显著相关性,并进行体现差别性的均值比较.

2 结果与分析

2.1 研究区域水化学特征

表 2 显示了 2011 年度 3 个研究站点水体中常量离子的浓度均值和标准差,从阴阳离子的总体平衡来看,存在 2% ~ 14% 的误差范围,可能主要归于以下 3 点原因:① HCO_3^- 采用的是酸碱滴定法,而没有采用更精确的电位滴定或 DIC(溶解无机碳)仪器分析;②水体中其他阴阳离子未计入;③不同水质采样点存在一定的波动. 但结果总体上仍然低于文献[9]给出的误差范围,能够准确表征区域水化学特征. 3 个站点的丰水期离子浓度低于平水期,可能水体受到一定程度的稀释,PJ 站点表现尤为显著,受汛期泥河冲淡作用影响显著,丰水期总离子含量不到平水期的 50%. 总体上,XQ 站点离子含量大于 PJ 和 GQ,pH 值范围为 7.8 ~ 9.0,体现了由碳

酸盐平衡体系控制弱碱性环境,等温吸附环境溶液设置体现了区域主要水化学特征, Na^+ 浓度设为 $4.0 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 以 Ca^{2+} 离子作用表征,设 Ca^{2+} 浓度为 $4.0 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$ 、而 HCO_3^- 平均设为 $3.0 \text{ meq}\cdot\text{L}^{-1}$,为便于各组环境溶液和各站点之间的比较,研究站点及盐溶液离子强度的微小差异未予以特别考虑.

2.2 基于区域水化学条件的沉积物等温吸附特征

等温吸附特征曲线以吸附平衡浓度 (c_e , $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 为横轴、吸附量 (Q , $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 为纵轴作图. 在低 PO_4^{3-} -P 浓度条件下,P 的吸附符合线性模型,即 $Q = Kc_e + b$ (式中, K 为拟合直线斜率,单位 $\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$; b 为 y 轴截距,单位 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),而不符合高浓度条件下典型的 Langmuir 及其他等温吸附模型,这和湖泊沉积物相关研究结果一致^[11,12]. 每组图中 1 ~ 5 个小图为各采样点沉积物等温吸附线性拟合,最后一个代表所有数据综合. 等温吸附曲线特征参数以斜率 K 、截距 b 及零吸附平衡浓度 EPC_0 来表征,其环境意义分别为: K 值体现沉积物对外界 P 元素添加缓冲能力(取决于沉积物的吸附位能), K 值越大,表明沉积物对 P 吸附性能越强; b 值代表了沉积物本底吸附 P 的能力;而 EPC_0 则是区分 P 吸附或解吸的临界值,当水环境溶液中 P 浓度大于 EPC_0 时,沉积物吸附 P,反之则向水体释放 P. R^2 和 P 值判断线性相关的显著性,由于数据对较多且存在一定重合,拟合直线未在图 5 ~ 图 7 中标示.

2.2.1 PJ 研究站点结果

如图 5 所示,PJ 站点 5 个采样点沉积物 P 的吸附均表现出相似的特征,而在 5 组离子环境溶液中出现明显的分带性,纯水组位于图形区域的右下侧,NaCl 组和 NaHCO_3 组位于中间区域,而 CaCl_2 组和 $\text{NaHCO}_3 + \text{CaCl}_2$ 组则位于左上侧,初步判断不同环境溶液体系下 P 具有不同的等温吸附特征.

5 个采样点等温吸附拟合曲线及特征参数见表 3, CaCl_2 组沉积物 P 的吸附能力最强 (K 总体均值

表 2 3 个研究站点水化学指标统计分布情况/ $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Ion statistics of water chemistry in the three studied sites/ $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$

站点	时间	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	\sum^-	\sum^+
PJ	平水期	3.04 ± 0.05	3.67 ± 0.19	1.91 ± 0.05	4.19 ± 0.11	0.12 ± 0.00	1.71 ± 0.07	1.71 ± 0.05	8.62	7.74
	丰水期	2.38 ± 0.05	0.98 ± 0.39	0.43 ± 0.14	1.37 ± 0.50	0.05 ± 0.01	1.17 ± 0.19	0.70 ± 0.14	3.79	3.29
GQ	平水期	3.24 ± 0.02	1.44 ± 0.02	0.93 ± 0.03	2.34 ± 0.02	0.07 ± 0.01	1.93 ± 0.04	1.41 ± 0.02	5.61	5.76
	丰水期	3.06 ± 0.06	1.69 ± 0.02	0.74 ± 0.03	2.35 ± 0.02	0.08 ± 0.00	1.51 ± 0.03	1.45 ± 0.01	5.50	5.39
XQ	平水期	3.89 ± 0.08	3.42 ± 0.05	4.01 ± 0.03	5.07 ± 0.13	0.16 ± 0.01	2.52 ± 0.18	1.98 ± 0.03	11.3	9.72
	丰水期	2.80 ± 0.03	3.12 ± 0.02	2.71 ± 0.26	4.44 ± 0.26	0.18 ± 0.01	1.48 ± 0.27	1.69 ± 0.02	8.63	7.79

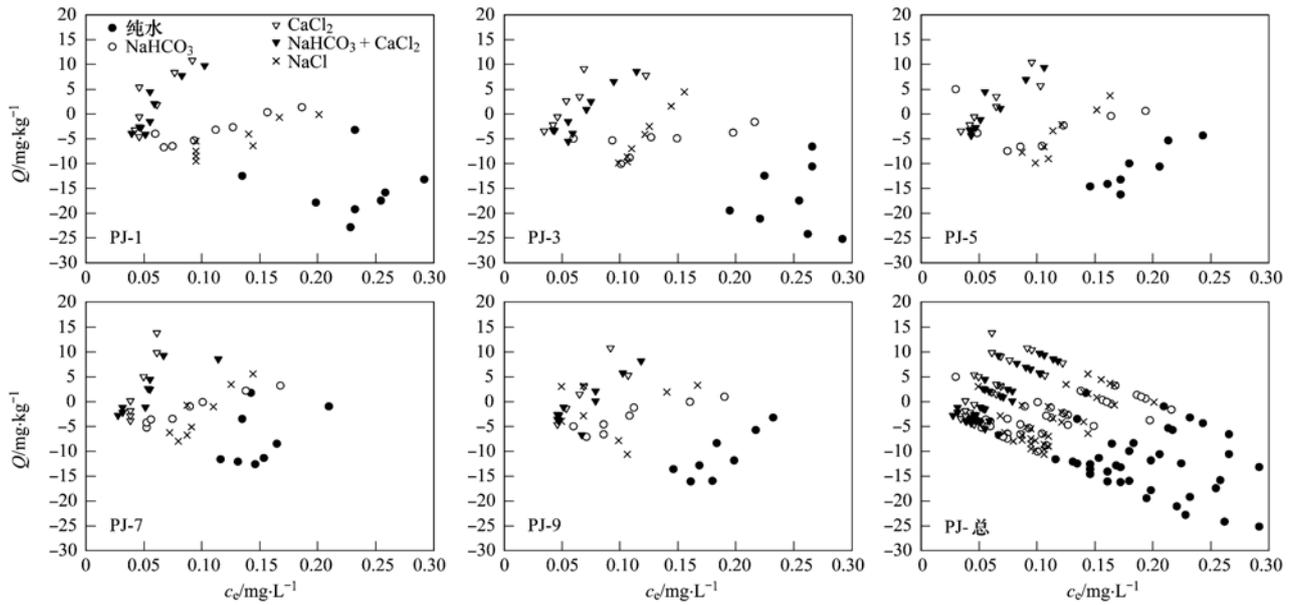


图 5 PJ 站点沉积物 P 等温吸附曲线

Fig. 5 P adsorption isotherms for the five solution groups in the sediments from different sites of PJ waters

表 3 不同环境溶液体系下 PJ 站点各采样点沉积物 P 等温吸附曲线及特征参数统计¹⁾

Table 3 Parameters for P adsorption isotherms within the different groups in the sediments of the PJ sites

环境溶液组别	采样点	$y = Kc_e + b$	K /L·kg ⁻¹	b /mg·kg ⁻¹	R^2	P	EPC ₀ /mg·L ⁻¹
纯水	PJ-1	$y = 68.9826x - 34.523$	69.0	-34.5	0.46	0.139	0.50
	PJ-3	$y = 139.493x - 47.717$	139.5	-47.7	0.51	0.111	0.34
	PJ-5	$y = 122.208x - 33.828$	122.2	-33.8	0.80	0.003**	0.28
	PJ-7	$y = 124.461x - 28.589$	124.5	-28.6	0.83	0.012*	0.23
	PJ-9	$y = 137.779x - 36.511$	137.8	-36.5	0.70	0.009**	0.26
总体均值	PJ	$y = 118.6x - 36.2$	118.6	-36.2			0.32
NaCl	PJ-1	$y = 75.5665x - 15.000$	75.6	-15.0	0.79	0.003**	0.20
	PJ-3	$y = 265.041x - 36.477$	265.0	-36.5	0.99	0.000**	0.14
	PJ-5	$y = 172.891x - 24.827$	172.9	-24.8	0.85	0.001**	0.14
	PJ-7	$y = 185.344x - 20.765$	185.3	-20.8	0.84	0.001**	0.11
	PJ-9	$y = 66.2869x - 10.271$	66.3	-10.3	0.29	0.274	0.15
总体均值	PJ	$y = 153.0x - 21.5$	153.0	-21.5			0.15
NaHCO ₃	PJ-1	$y = 60.8543x - 9.9717$	60.9	-10.0	0.85	0.001**	0.16
	PJ-3	$y = 60.2535x - 14.637$	60.3	-14.6	0.81	0.015*	0.24
	PJ-5	$y = 72.7079x - 12.772$	72.7	-12.8	0.93	0.002**	0.18
	PJ-7	$y = 71.4293x - 8.0159$	71.4	-8.0	0.95	0.000**	0.11
	PJ-9	$y = 60.2890x - 9.8348$	60.3	-9.8	0.81	0.002**	0.16
总体均值	PJ	$y = 65.1x - 11.0$	65.1	-11.0			0.17
CaCl ₂	PJ-1	$y = 305.795x - 16.388$	305.8	-16.4	0.95	0.000**	0.05
	PJ-3	$y = 339.488x - 16.188$	339.5	-16.2	0.90	0.001**	0.05
	PJ-5	$y = 229.860x - 11.916$	229.9	-11.9	0.97	0.000**	0.05
	PJ-7	$y = 481.913x - 20.477$	481.9	-20.5	0.87	0.002**	0.04
	PJ-9	$y = 309.904x - 17.932$	309.9	-17.9	0.98	0.000**	0.06
总体均值	PJ	$y = 333.4x - 16.6$	333.4	-16.6			0.05
NaHCO ₃ + CaCl ₂	PJ-1	$y = 235.603x - 12.997$	235.6	-13.0	0.81	0.002**	0.06
	PJ-3	$y = 204.526x - 13.931$	204.5	-13.9	0.89	0.000**	0.07
	PJ-5	$y = 199.084x - 11.253$	199.1	-11.3	0.84	0.001**	0.06
	PJ-7	$y = 129.639x - 5.5695$	129.6	-5.6	0.85	0.003**	0.04
	PJ-9	$y = 163.117x - 11.776$	163.1	-11.8	0.74	0.006**	0.07
总体均值	PJ	$y = 186.4x - 11.1$	186.4	-11.1			0.06

1) * 表示 $P < 0.05$ 水平下显著相关, ** 表示 $P < 0.01$ 水平下显著相关,下同

为 $333.4 \text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}$, EPC_0 总体均值为 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 高于其他组别 (K 和 EPC_0 均值比较, $P < 0.05$), 而 NaHCO_3 组沉积物吸附能力最弱, 特别是 K 均值仅为 $65.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 对环境溶液 P 浓度变化缓冲能力较弱. 总体上不同环境溶液中沉积物 P 的吸附能力表现为: CaCl_2 组 $>$ $\text{NaHCO}_3 + \text{CaCl}_2$ 组 $>$ NaCl 组、纯水组和 NaHCO_3 组.

2.2.2 GQ 研究站点结果

如图 6 所示, GQ 5 个采样点沉积物 P 的吸附在 5 组离子环境溶液中出现明显的分带性, 纯水组和 NaHCO_3 组位于右下侧, NaCl 组位于中间区域, CaCl_2 组和 $\text{NaHCO}_3 + \text{CaCl}_2$ 组位于左上侧, 顺序和 PJ 研究站点略有不同, 整体上较 PJ 站点分布略微向左上角偏移, 表明此站点沉积物 P 释放潜能相对较弱.

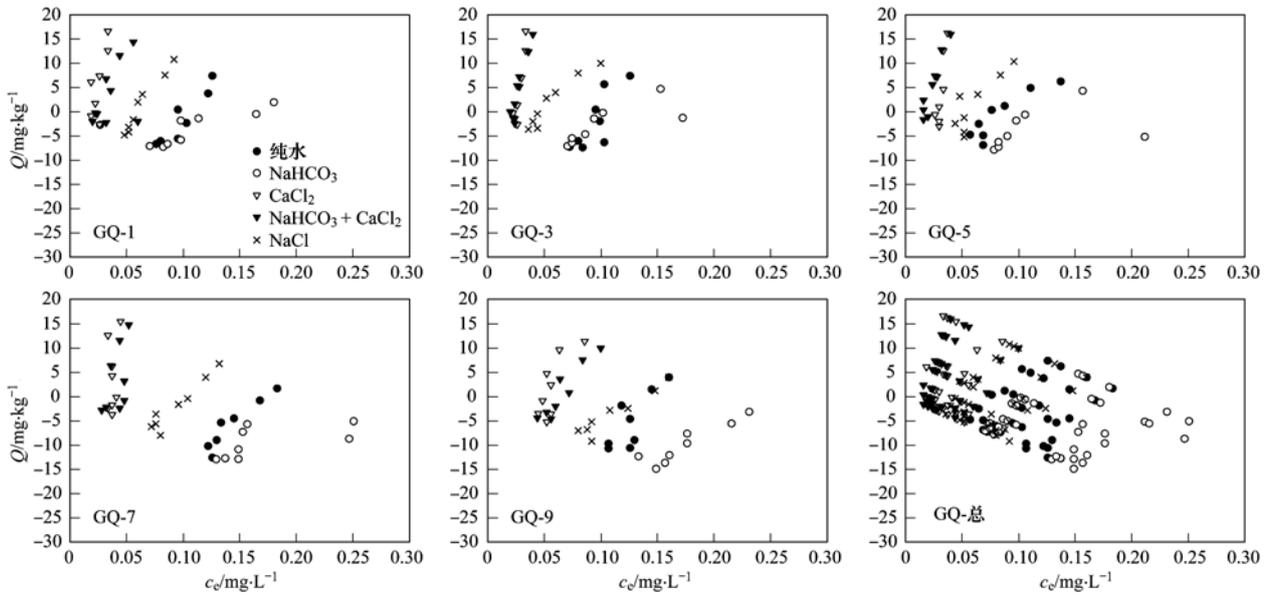


图 6 GQ 站点沉积物 P 等温吸附曲线

Fig. 6 P adsorption isotherms for the five solution groups in the sediments from different sites of GQ waters

含 Ca^{2+} 环境溶液体系中沉积物 P 的吸附能力明显高于其他组别, K 和 EPC_0 总体均值分别为 $1056.4 \text{ L}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 4), 而 NaHCO_3 组中沉积物 P 能力吸附能力最弱, K 均值仅为 $110.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, EPC_0 则高达 $0.19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 各组溶

液体系中 P 吸附能力顺序为: CaCl_2 组 $>$ $\text{NaHCO}_3 + \text{CaCl}_2$ 组 $>$ NaCl 组、纯水组 $>$ NaHCO_3 组.

2.2.3 XQ 研究站点结果

如图 7 所示, XQ 的 5 个采样点沉积物 P 吸附特征在 5 组离子环境溶液中也出现明显的差异, 顺序

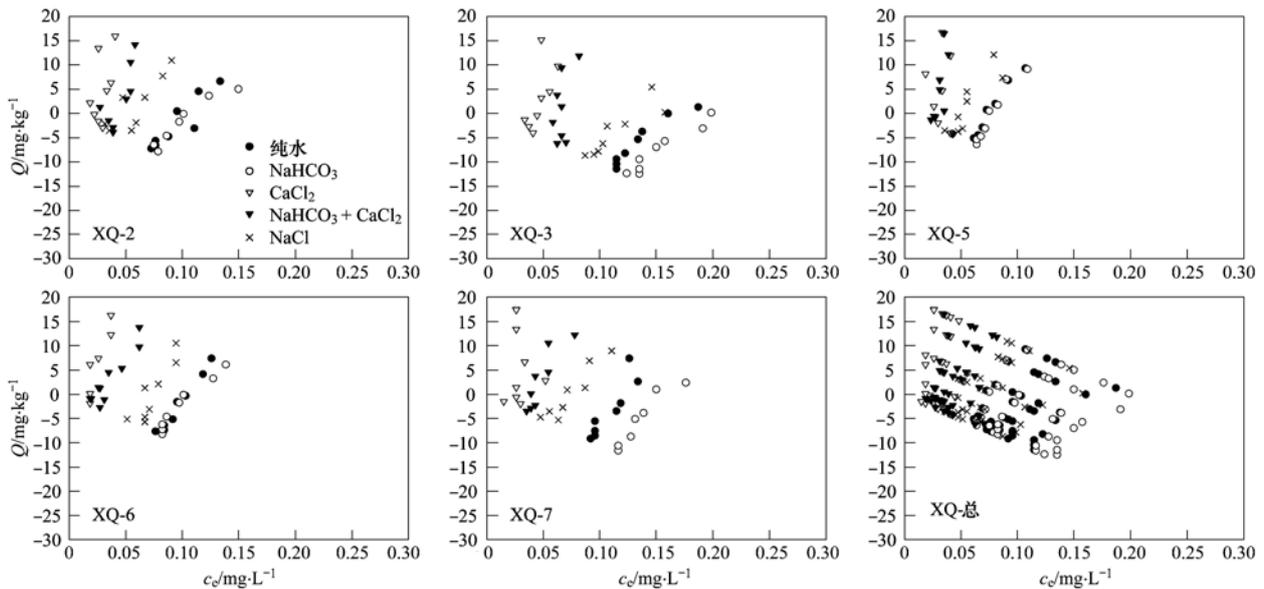


图 7 XQ 站点沉积物 P 等温吸附曲线

Fig. 7 P adsorption isotherms for the five solution groups in the sediments from different sites of XQ waters

表 4 不同环境溶液体系下 GQ 站点各采样点沉积物 P 等温吸附曲线及特征参数统计

Table 4 Parameters for P adsorption isotherms within the different groups in the sediments of the GQ sites

环境溶液组别	采样点	$y = Kc_e + b$	K /L·kg ⁻¹	b /mg·kg ⁻¹	R^2	P	EPC ₀ mg·L ⁻¹
纯水	GQ-1	$y = 261.545x - 27.339$	261.5	-27.3	0.85	0.003 **	0.10
	GQ-3	$y = 285.421x - 29.129$	285.4	-29.1	0.65	0.016 **	0.10
	GQ-5	$y = 158.482x - 14.066$	158.5	-14.1	0.81	0.002 **	0.09
	GQ-7	$y = 218.928x - 37.994$	218.9	-38.0	0.78	0.004 **	0.17
	GQ-9	$y = 254.404x - 37.493$	254.4	-37.5	0.64	0.017 **	0.15
总体均值	GQ	$y = 235.8x - 29.2$	235.8	-29.2			0.12
NaCl	GQ-1	$y = 348.917x - 20.873$	348.9	-20.9	0.95	0.000 **	0.06
	GQ-3	$y = 221.648x - 10.703$	221.6	-10.7	0.91	0.000 **	0.05
	GQ-5	$y = 295.149x - 17.485$	295.1	-17.5	0.89	0.001 **	0.06
	GQ-7	$y = 218.828x - 22.495$	218.8	-22.5	0.92	0.000 **	0.10
	GQ-9	$y = 142.765x - 19.435$	142.8	-19.4	0.91	0.000 **	0.14
总体均值	GQ	$y = 245.5x - 18.2$	245.5	-18.2			0.08
NaHCO ₃	GQ-1	$y = 79.7585x - 12.447$	79.8	-12.4	0.80	0.003 **	0.16
	GQ-3	$y = 142.882x - 16.274$	142.9	-16.3	0.94	0.000 **	0.11
	GQ-5	$y = 153.217x - 18.657$	153.2	-18.7	0.91	0.001 **	0.12
	GQ-7	$y = 60.4988x - 19.354$	60.5	-19.4	0.49	0.079	0.32
	GQ-9	$y = 114.869x - 29.943$	114.9	-29.9	0.86	0.001 **	0.26
总体均值	GQ	$y = 110.2x - 19.3$	110.2	-19.3			0.19
CaCl ₂	GQ-1	$y = 869.289x - 16.771$	869.3	-16.8	0.56	0.034	0.02
	GQ-3	$y = 1424.23x - 34.291$	1424.2	-34.3	0.83	0.002 **	0.02
	GQ-5	$y = 1214.00x - 32.800$	1214.0	-32.8	0.44	0.073	0.03
	GQ-7	$y = 1389.12x - 50.684$	1389.1	-50.7	0.53	0.063	0.04
	GQ-9	$y = 385.186x - 20.191$	385.2	-20.2	0.61	0.022 *	0.05
总体均值	GQ	$y = 1056.4x - 30.9$	1056.4	-30.9			0.03
NaHCO ₃ + CaCl ₂	GQ-1	$y = 492.317x - 12.497$	492.3	-12.5	0.81	0.006 **	0.03
	GQ-3	$y = 937.811x - 21.425$	937.8	-21.4	0.90	0.000 **	0.02
	GQ-5	$y = 701.711x - 11.610$	701.7	-11.6	0.91	0.000 **	0.02
	GQ-7	$y = 646.868x - 21.201$	646.9	-21.2	0.54	0.096	0.03
	GQ-9	$y = 287.220x - 18.117$	287.2	-18.1	0.88	0.001 **	0.06
总体均值	GQ	$y = 613.2x - 17.0$	613.2	-17.0			0.03

和 GQ 研究站点整体差异不大。

同 GQ 站点一样, CaCl₂ 组 ($K = 642.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $\text{EPC}_0 = 0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 及 NaHCO₃ + CaCl₂ 组 ($K = 567.2 \text{ L} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $\text{EPC}_0 = 0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 两组环境溶液中 P 的吸附能力最强, 其他 3 组相对较弱 (表 5)。

值得指出的是, Ca²⁺ 存在的体系中, 一些采样点用线性拟合并没有显示统计学上的显著相关性, 这主要是由于在 PO₄³⁻-P 较高的平衡浓度下, 吸附量明显增大, 吸附曲线发生了向上的弯曲, 进一步表明 Ca²⁺ 存在环境溶液中对 P 的缓冲能力有高度增强作用。综上所述, 3 个研究站点中, PJ 站点沉积物 P 吸附作用较弱, GQ 和 XQ 站沉积物 P 吸附潜能相对较大。体系中 Ca²⁺ 离子的引入能够显著增强沉积物 P 的吸附位能 (高 K 值和低 EPC_0 值)、而 HCO₃⁻ 则不利于沉积物 P 的吸附, 实际水化学平衡体系中, Ca²⁺ 的增强作用要大于 HCO₃⁻ 的弱化作用, 总体上表现接近 CaCl₂ 组。

3 讨论

在各类水体沉积物“水-沉积物”界面 P 行为研究中, “沉积物相”如沉积物 P 的赋存形态、沉积物理化性质等受到更多的重视, 实际上, “水相” (上覆水或孔隙水) 所处的溶液环境的水化学平衡体系可能对 P、Fe 等生物活性元素起着重要的控制作用^[13]。河流、湖泊等淡水溶液中, 溶解了体现流域生态环境特征的不同组分和浓度的离子^[14,15], 它们可能通过离子交换、吸附解吸、溶解沉淀等化学平衡直接或间接影响沉积物中含 P 矿物中 P 的迁移性能。

鉴于 Ca²⁺ 对沉积物 P 吸附的重要影响, 研究过程中, 对 GQ 站点平衡溶液中 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 浓度进行了测定 (表 6)。可以看出, 纯水组 Ca²⁺、Mg²⁺ 浓度最低, 5 个采样点的均值分别为 $0.022 \text{ meq} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.008 \text{ meq} \cdot \text{L}^{-1}$; NaCl 盐溶液使得沉积物 Ca²⁺ 与

表 5 不同环境溶液体系下 XQ 站点各采样点沉积物 P 等温吸附曲线及特征参数统计

Table 5 Parameters for P adsorption isotherms within the different groups in the sediments of the XQ sites

环境溶液组别	采样点	$y = Kc_e + b$	K /L·kg ⁻¹	b mg·kg ⁻¹	R^2	P	EPC ₀ /mg·L ⁻¹
纯水	XQ-2	$y = 219.508x - 22.996$	219.5	-23.0	0.83	0.002 **	0.10
	XQ-3	$y = 175.353x - 29.661$	175.4	-29.7	0.91	0.000 **	0.17
	XQ-5	$y = 254.796x - 18.427$	254.8	-18.4	0.85	0.001 **	0.07
	XQ-6	$y = 317.488x - 32.983$	317.5	-33.0	0.97	0.000 **	0.10
	XQ-7	$y = 322.945x - 38.354$	322.9	-38.4	0.82	0.002 **	0.12
总体均值	XQ	$y = 258.0x - 28.5$	258.0	-28.5			0.11
NaCl	XQ-2	$y = 219.884x - 11.121$	219.9	-11.1	0.71	0.008 **	0.05
	XQ-3	$y = 173.827x - 23.659$	173.8	-23.7	0.79	0.003 **	0.14
	XQ-5	$y = 295.172x - 14.949$	295.2	-14.9	0.76	0.005 **	0.05
	XQ-6	$y = 357.282x - 26.153$	357.3	-26.2	0.79	0.003 **	0.07
	XQ-7	$y = 241.395x - 17.593$	241.4	-17.6	0.87	0.001 **	0.07
总体均值	XQ	$y = 257.5x - 18.7$	257.5	-18.7			0.08
NaHCO ₃	XQ-2	$y = 175.623x - 19.574$	175.6	-19.6	0.91	0.001 **	0.11
	XQ-3	$y = 160.050x - 32.161$	160.1	-32.2	0.93	0.000 **	0.20
	XQ-5	$y = 363.374x - 28.362$	363.3	-28.4	0.93	0.000 **	0.08
	XQ-6	$y = 229.536x - 25.216$	229.5	-25.2	0.94	0.000 **	0.11
	XQ-7	$y = 245.205x - 38.641$	245.2	-38.6	0.89	0.001 **	0.16
总体均值	XQ	$y = 234.8x - 28.8$	234.8	-28.8			0.13
CaCl ₂	XQ-2	$y = 572.433x - 11.190$	572.4	-11.2	0.35	0.221	0.02
	XQ-3	$y = 424.654x - 18.219$	424.7	-18.2	0.84	0.004 **	0.04
	XQ-5	$y = 948.038x - 24.391$	948.0	-24.4	0.51	0.111	0.03
	XQ-6	$y = 718.587x - 12.776$	718.6	-12.8	0.77	0.004 **	0.02
	XQ-7	$y = 547.944x - 14.000$	547.9	-14.0	0.23	0.413	0.03
总体均值	XQ	$y = 642.3x - 16.1$	642.3	-16.1			0.03
NaHCO ₃ + CaCl ₂	XQ-2	$y = 668.231x - 28.037$	668.2	-28.0	0.82	0.005 **	0.04
	XQ-3	$y = 524.166x - 33.831$	524.2	-33.8	0.28	0.177	0.06
	XQ-5	$y = 927.961x - 23.750$	928.0	-23.8	0.51	0.073	0.03
	XQ-6	$y = 330.424x - 9.0685$	330.4	-9.1	0.87	0.001 **	0.03
	XQ-7	$y = 385.195x - 15.662$	385.2	-15.7	0.78	0.004 **	0.04
总体均值	XQ	$y = 567.2x - 22.1$	567.2	-22.1			0.04

Mg²⁺ 一定程度交换下来,平衡溶液中浓度升高至 0.140 meq·L⁻¹ 和 0.051 meq·L⁻¹, NaHCO₃ 组二者浓度则为 0.09 meq·L⁻¹ 和 0.037 meq·L⁻¹, 介于纯水组和 NaCl 组之间; CaCl₂、NaHCO₃ + CaCl₂ 体系中 Ca²⁺、Mg²⁺ 平衡浓度最高,分别为 0.818、0.179 和 0.163 meq·L⁻¹,所加入的 Ca²⁺ 75% 左右为沉积物所吸附。很明显, Ca²⁺ 在沉积物表面上的吸附和环境溶液中的 P 发生了某种作用而显著增强了其吸附潜能,这和其他相关研究结果一致^[16], Tunesi 等^[17] 也发现土壤溶液中的交换性钙离子能显著增强 P 的固定。水体富营养化恢复实践中, Ca 引入常作为固 P 的重要策略之一,如 Dittrich 等^[18] 报道了 Ca(OH)₂ 对温跃层湖泊的治理效果,发现其能显著加强 Ca-P 的沉积并降低沉积物 P 释放通量和内源负荷,由于 Ca²⁺ 在吸附剂土壤或沉积物中吸附能力高于 Na⁺, PO₄³⁻-P 和 Ca²⁺ 可能在矿物表面通过共沉淀作用加强对 P 的吸附。

弱碱性不利于 P 的吸附, OH⁻ 和 PO₄³⁻-P 竞争吸附位点,在更强的碱性环境下,则使得整个体系带负电荷,使铁锰铝氧化物结合 P 解体,从而造成内源负荷风险,这在中国湖泊研究中有较多的报道^[19], 本研究中环境溶液设置 NaHCO₃ 缓冲体系更加接近于实际环境,一些研究用 NaOH 或 HCl 调节水体的 pH 值至大幅度的变化范围来研究 pH 对沉积物 P 吸附行为的影响,但是可能已经从一定程度上破坏

表 6 GQ 站点平衡体系 Ca²⁺/Mg²⁺ 浓度Table 6 Equilibrium concentrations of Ca²⁺

环境溶液组别	and Mg ²⁺ at the GQ sampling sites			
	Ca ²⁺		Mg ²⁺	
	均值 /meq·L ⁻¹	标准差 /meq·L ⁻¹	均值 /meq·L ⁻¹	标准差 /meq·L ⁻¹
纯水	0.022	0.010	0.008	0.004
NaCl	0.140	0.045	0.051	0.013
NaHCO ₃	0.090	0.037	0.037	0.014
CaCl ₂	0.818	0.054	0.179	0.039
NaHCO ₃ + CaCl ₂	0.784	0.046	0.163	0.037

了“沉积物-上覆水”界面上的化学平衡(包括沉积物对酸碱环境的缓冲能力),进而得出不太准确的结果。

表 7 列出了 3 个研究站点体现实际环境溶液特征的 $\text{NaHCO}_3 + \text{CaCl}_2$ 组 EPC_0 , 水体 TP 和 PO_4^{3-} -P 浓度均值, 以及沉积物 P 的赋存形态、OM 及 Fe_0 均

表 7 研究站点 P 的赋存形态、有机质及铁氧化物均值统计¹⁾

Table 7 Statistics of EPC_0 , P fractions, OM and Fe_0 at the three sites

站点	EPC_0 ($\text{NaHCO}_3 + \text{CaCl}_2$)	TP / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	PO_4^{3-} -P / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	BD-P / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	NaOH-P / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	HCl-P / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	OP / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	TP / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	OM /%	Fe_0 /%
PJ	0.059	0.126	0.025	64.1	105.5	96.6	101.3	357.5	2.4	0.68
GQ	0.032	0.064	0.009	59.9	123.3	109.9	107.4	361.8	1.7	0.50
XQ	0.040	0.092	0.006	80.0	97.0	85.5	86.5	322.2	1.6	0.47

1) BD-P、NaOH-P 和 HCl-P 表示用不同提取试剂提取的无机磷, 分别代表氧化还原敏感态磷, 金属(水合)氧化物结合态磷, Ca 结合态磷

PJ 站点沉积物 OM 含量均值为 2.4%, 远高于另外 2 个站点, 同时 PJ 站点水体中 TP 及 PO_4^{3-} -P 浓度也较高。由于 PJ 水域受到泥河排污影响, 表层沉积物为泥质沉积物, 其他 2 个站点土壤成分所占比例较大, 这可能是等温吸附特征曲线及参数差异的主要原因所在^[20]。许多研究表明, P 的迁移转化和 OM 关系密切^[21,22], 一方面, 有机质体系表面通常带有弱酸根离子, 不利于磷的吸附, 另一方面, 高含量有机质环境通常代表活跃的微生物活动, 营养盐循环与周转更加活跃。3 个站点 EPC_0 值分别为 0.059、0.032、0.040 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均有向水体释放 P 的趋势, K 值分别为 186.4、613.2、567.2 $\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$, 和其他同类别研究中(沉积物土壤成分较大)报道范围一致^[23,24], 也是 PJ 站点 P 吸附能力较弱, 亦体现了水体营养水平状态的差异。

我国湖泊相关研究中, 直接用纯水配制环境溶液用于 P 吸附解析实验较多, 结果可以和本研究纯水组进行类比, 如姜霞等^[12] 近期报道了太湖整个湖泊系统 NP 吸附解吸特征, 太湖多数湖区 EPC_0 均在 0.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之上, 和本研究 PJ 站结果一致, 即在低的 PO_4^{3-} -P 浓度条件下, 富营养水体沉积物中向水体释 P 趋势较大, 王圣瑞等^[25] 也曾经报道了长江中下游浅水湖泊沉积物对 P 的吸附特征, 其线性拟合结果得出的吸附等温方程特征参数范围也和本研究中纯水组结果一致。何宗健等^[26] 在保护较好的高原湖泊洱海类似研究表明, 洱海沉积物 P 吸附特征参数 K 值较大、 EPC_0 较小, P 释放风险比富营养化湖泊要小得多, 和本研究在实际水化学条件下得出的参数值范围和结果极为接近, 尽管洱海 TP 含量较大(均值 964.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 高有机质和碳酸钙含量

值。3 个站点表层沉积物 TP 均值分别为 357.5、361.8、322.2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, IP 是 TP 的主要组成部分, OP 所占比例相对较小(小于 30%)。其 IP 中, NaOH-P、HCl-P 所占比例较大。 Fe_0 含量较高, 均值范围从 0.47% ~ 0.68%, 表明沉积物铁氧化还原处于较为活跃的状态, 此前相关研究中已有论述^[10]。

使得其 P 浓度释放风险远低于富营养的长江中下游湖泊。

总体上来看, 淮南采煤沉陷区沉积物由于其特殊的成因(淹水土壤), P 的释放潜能小于一般的富营养化湖泊沉积物, 从其相对较低的 P 含量、铁氧化物的丰度^[10], 吸附特征参数等可以综合判断。农业土壤淹水后 Fe 和 P 的相互作用相关报道较多^[27,28], 淹水条件下土壤内部 Fe 还原向表层迁移导致铁氧化物的富集, 进而对本区域 P 的迁移产生显著影响。

值得指出的是, 由于水体 PO_4^{3-} -P 的变化具有季节周期性, 沉积物 P 的吸附和解吸亦会发生相应变化, 同时藻类生长和相关生态环境因子的季节变化均可能影响沉积物 P 的内源负荷, 采煤沉陷区沉积环境对水体营养结构的调控作用需要进一步深入研究。

4 结论

(1) 相对于纯水环境溶液体系, 溶液离子环境设置对 P 的吸附具有重要影响, 体系中 Ca^{2+} 能显著增强 P 的吸附潜能, 减小内源负荷, NaHCO_3 弱碱性环境则不利于 P 的吸附, 实际水化学条件下为二者作用的综合, 但 CaCl_2 的强化作用要大于 NaHCO_3 的弱化作用。

(2) 淮南矿区的 3 个研究水域, 由于受人为活动影响强弱不同、水体营养水平和底质的差异, PJ 站点表层沉积物 P 内源负荷要强于 GQ 和 XQ 站点, 起源于淹水农业土壤的沉积环境使得本研究区域沉积物 P 的释放潜能低于一般的富营养化湖泊, 和营养状态较低的湖泊接近。

(3) 在沉积物 P 吸附特征等相关实验研究中,

“水相”的实际水化学特征要加以考虑,用实际站点的原水样或等量原则配制的盐溶液体系可能更加接近真实情况,但是具体水域沉积物 P 释放潜能需要综合考虑沉积物理化性质、水动力学条件、生物活动等多重因素的影响,方能得出准确而全面的结果。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 谢平. 浅水湖泊内源磷负荷季节变化的生物驱动机制[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, **35**(增刊 II): 11-23.
- [3] 秦伯强, 范成新. 大型浅水湖泊内源营养盐释放的概念性模式探讨[J]. 中国环境科学, 2002, **22**(2): 150-153.
- [4] 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.
- [5] Jiang X, Jin X C, Yao Y, *et al.* Effects of biological activity, light, temperature and oxygen on phosphorus release processes at the sediment and water interface of Taihu Lake, China [J]. Water Research, 2008, **42**(8-9): 2251-2259.
- [6] 朱广伟, 秦伯强, 高光. 浅水湖泊沉积物磷释放的重要因子——铁和水动力[J]. 农业环境科学学报, 2003, **22**(6): 762-764.
- [7] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [8] 尹航. 环境监测方法标准汇编: 水环境[M]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [9] 林雨霏, 刘素美, 纪雷, 等. 黄海春夏季降水中常量离子化学特征分析[J]. 海洋环境科学, 2007, **26**(2): 116-120.
- [10] 谢凯, 张雁秋, 易齐涛, 等. 淮南潘一矿塌陷水域沉积物中磷的赋存和迁移转化特征[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(10): 1867-1874.
- [11] 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.
- [12] 姜霞, 王秋娟, 王书航, 等. 太湖沉积物氮磷吸附/解吸特征分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1285-1291.
- [13] Weston N B, Porubsky W P, Samarkin V A, *et al.* Porewater stoichiometry of terminal metabolic products, sulfate, and dissolved organic carbon and nitrogen in estuarine intertidal creek-bank sediments[J]. Biogeochemistry, 2006, **77**(3): 375-408.
- [14] 张利田, 陈静生. 我国河水主要离子组成与区域自然条件的关系[J]. 地理科学, 2000, **20**(3): 236-240.
- [15] 叶宏萌, 袁旭音, 葛敏霞, 等. 太湖北部流域水化学特征及其控制因素[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(1): 23-27.
- [16] 刘冠男, 董黎明. 水体中 Ca^{2+} 对湖泊沉积物磷吸附特征的影响[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(2): 36-41.
- [17] Tunesi S, Poggi V, Gessa C, *et al.* Phosphate adsorption and precipitation in calcareous soils; the role of calcium ions in solution and carbonate minerals [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1999, **53**(3): 219-227.
- [18] Ditttrich M, Gabriel O, Rutzen C, *et al.* Lake restoration by hypolimnetic $\text{Ca}(\text{OH})_2$ treatment: Impact on phosphorus sedimentation and release from sediment[J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(8): 1504-1515.
- [19] 谢平. 论蓝藻水华发生的机制——从生物进化、生物地球化学和生态学观点[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 89-104.
- [20] Xie K, Zhang Y Q, Yi Q T, *et al.* Effects of various ion solutions on phosphorus adsorption in the sediments of a water body that originated from agricultural land subsidence and submergence caused by coal mining activities[J]. Desalination and Water Treatment, 2012, **50**(1-3): 423-439.
- [21] 曹琳, 吉芳英, 林茂, 等. 有机质对三峡库区消落区沉积物磷释放的影响[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(2): 185-190.
- [22] 陈芳, 夏卓英, 宋春雷, 等. 湖北省若干浅水湖泊沉积物有机质与富营养化的关系[J]. 水生生物学报, 2007, **31**(4): 467-472.
- [23] Machesky M L, Holm T R, Slowikowski J A. Phosphorus speciation in stream bed sediments from an agricultural watershed: solid-phase associations and sorption behavior[J]. Aquatic Geochemistry, 2010, **16**(4): 639-662.
- [24] Kerr G J, Burford M, Olley J, *et al.* Phosphorus sorption in soils and sediments; implications for phosphate supply to a subtropical river in southeast Queensland, Australia[J]. Biogeochemistry, 2011, **102**(1-3): 73-85.
- [25] 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.
- [26] 何宗健, 刘文斌, 王圣瑞, 等. 洱海表层沉积物吸附磷特征[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(11): 1242-1248.
- [27] Chacon N, Dezzio N, Munoz B, *et al.* Implications of soil organic carbon and the biogeochemistry of iron and aluminum on soil phosphorus distribution in flooded forests of the lower Orinoco River, Venezuela [J]. Biogeochemistry, 2005, **73**(3): 555-566.
- [28] Chacon N, Silver W L, Dubinsky E A, *et al.* Iron Reduction and soil phosphorus solubilization in humid tropical forests soils: the roles of labile carbon pools and an electron shuttle Compound [J]. Biogeochemistry, 2005, **78**(1): 67-84.

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of δ ¹⁸ O in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O ₃ /H ₂ O ₂	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	Ji Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jun-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《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10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 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