

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化 祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)

基于重庆本地碳成分谱的 PM_{2.5} 碳组分来源分析 张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)

重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究 徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)

基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析 王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)

基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)

典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析 徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)

火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究 王占山, 潘丽波 (853)

国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性 楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)

稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇 刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)

河口湿地近地面大气 CO₂ 浓度日变化和季节变化 张林海, 仝川, 曾从盛 (879)

三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量 李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)

施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH₄、N₂O 和 NH₃ 排放特征 万合锋, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)

干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响 张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)

长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究 吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)

汾河中下游浮游藻类群落特征及水质分析 王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)

基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究 陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)

三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征 李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)

黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析 于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)

太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素 揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)

黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系 董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)

纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究 杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)

铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究 唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)

磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响 张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)

预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响 赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)

陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行 付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)

冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征 黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)

烷基多苷促进污泥水解产酸的研究 陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)

高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响 操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)

兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)

珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价 郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)

海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价 李飞, 徐敏 (1035)

再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险 吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)

瓦埠湖流域庄集镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估 李如忠, 邹阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)

三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评估 张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)

基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价 陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)

干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究 薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)

缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入 孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)

三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响 韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)

黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)

天然林土壤有机碳及矿化特征研究 杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)

不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化 张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)

硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响 杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)

6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应 山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)

基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究 张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)

人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究 吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)

农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)

中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态 宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)

苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析 周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)

UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响 刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)

Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响 张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)

对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究 宋彩霞, 邓新平, 厉阆, 肖伟 (1176)

克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用 刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)

铅元素人为循环环境释放物形态分析 梁静, 毛建素 (1191)

污染排放与环境质量关系模型构建与应用 李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)

微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展 闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)

《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)

黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析

于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯*, 陈洪涛, 于志刚

(中国海洋大学海洋化学理论与工程教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 于 2009 年 4 月在黄河口湿地采集表层沉积物, 利用改进后的 SEDEX 方法对沉积物样品进行了磷形态的分析. 结果表明, 表层沉积物中总磷含量变化范围为 12.12 ~ 25.37 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 20.70 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 其中自生磷灰石磷和碎屑磷灰石磷为表层沉积物中磷的主要赋存形式. 中值粒径与各形态磷含量密切相关, 弱吸附态磷、自生磷灰石磷、活性有机磷含量与中值粒径呈显著负相关关系; 碎屑磷灰石磷含量与中值粒径呈显著正相关关系. 有机质含量影响各形态磷在沉积物中含量, 弱吸附态磷、活性有机磷、自生磷灰石磷含量均随 TOC 含量增加而升高. 包括弱吸附态磷、活性有机磷和铁结合态磷在内的生物可利用磷含量变化为 1.15 ~ 6.74 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 4.27 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 占总磷的摩尔分数为 6.35% ~ 30.4%.

关键词: 黄河口湿地; 沉积物; 磷赋存形态; 中值粒径; 有机碳

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-0942-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.03.018

Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland

YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, YU Zhi-gang

(Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Surface sediments were collected from Yellow River estuary wetland. The distribution of phosphorus in sediments was analyzed with modified SEDEX. The results indicated that the contents of TP in surface sediments varied from 12.12 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ to 25.37 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, and the mean value was 20.70 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, in which the Detrital P and Authigenic P were the main forms. Median particle size was closely related with the distribution of phosphors, Exchangeable P, Authigenic P and Organic P mainly consisted of smaller sediment size, while Detrital P mainly consisted of larger sediment size. The distribution of P in sediment was affected by organic matter. Exchangeable P, organic P and refractory P increased with the increasing TOC. The bio-available phosphorus included exchangeable P, iron-bound P, organic P and ranged from 1.15-6.74 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, with an average of 4.27 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ for all sediment samples. The contribution of BAP to TP was 6.35%-30.4%.

Key words: Yellow River estuary wetland; sediments; sedimentary phosphorus forms; median particle size; organic carbon

磷是浮游植物生长的重要营养元素, 是引起水体富营养化的主要因素, 一般认为河流输送是近岸海域磷的主要来源^[1]. 河口沉积物在受到某些人为或者自然因素的干扰时, 可以向周围水体中不断释放或者吸收不同形态磷, 进而对周围环境产生影响, 是不同形态磷重要的源和汇^[2-4].

湿地沉积物中的磷以多种复杂结合形式存在, 包括了弱吸附态磷、活性有机磷、铁结合态磷、自生磷灰石磷、碎屑磷灰石磷和非活性有机磷等 6 种主要形式, 其不同存在形态具有显著不同的物理、化学及生物特性^[5]. 目前国内已有许多学者对黄河流域沉积物的磷形态、分布及影响因素进行了研究, 主要集中于流域中上游以及下游河道部分站位^[6-8], 黄河口新生湿地沉积物的磷形态分布及影响因素尚鲜见报道.

近年来的黄河调水调沙过程使得大量泥沙在河

口处堆积, 显著改变了黄河径流分布并加速了黄河河口湿地的形成^[9]. 同时, 湿地植被的种类组成分布与湿地演替过程密切相关, 植被演替的发生往往与环境条件变化同步并相互作用^[10]. 芦苇、碱蓬等湿地植被有强大根系, 再生力强, 对磷的富集效应大于无水生植物区^[11]. 上述原因共同作用导致黄河河口湿地沉积物中各种磷的赋存形态及分布变化. 因此本文通过研究黄河口湿地沉积物中各种磷的赋存形态和分布特征, 以期为进一步研究黄河口湿地营养盐的迁移、转化及沉积物中营养盐的再生循环提供基础数据, 结果对研究黄河口环境和生态变化

收稿日期: 2013-07-10; 修订日期: 2013-09-16

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2010DM003); 国家自然科学基金项目(41276070)

作者简介: 于子洋(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋化学, E-mail: 814471834@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: qzhyao@ouc.edu.cn

有重要意义.

1 材料与方法

1.1 样品采集

于2009年4月,根据湿地不同植被和环境条件,在黄河口湿地设置A、B、C这3个断面,18个站位,分别采集表层沉积物样品,采样站位如图1所示. A断面植被以芦苇为主,土壤质地松软,表层湿润,常被水体覆盖,其中A2站位于核心恢复区,A4站无植被覆盖,离水较近. B断面植被复杂,既有芦苇又有碱蓬和怪柳,其中B1、B2站位处于芦苇丛,B3站位以怪柳为主,B6、B7、B8站位植被稀少. C断面位于黄河故道,有海水入侵,其中C1站以碱蓬为主,C3以芦苇为主,C4站既有芦苇又有怪柳,C5站位于潮沟. 采集样品放入洁净封口袋, -20℃冷冻保存.

1.2 分析方法

将沉积物样品冷冻干燥,研磨过100目筛,充分混合后采用改进后的SEDEX方法^[12-14]测定磷的形态. 此方法依次采用氯化镁溶液、十二烷基硫酸钠溶液、CDB(柠檬酸钠-连二亚硫酸钠-碳酸氢钠)溶液、醋酸缓冲溶液、盐酸溶液和灼烧+盐酸溶液将颗粒磷形态划分为弱吸附态磷、活性有机磷、铁结合态磷、自生磷灰石磷、碎屑磷灰石磷和非活性有机磷6个形态,各形态磷含量总和即为总磷含量. 弱吸附态磷、活性有机磷、铁结合态磷、自生磷灰石磷、碎屑磷灰石磷以及非活性有机磷标准样品分

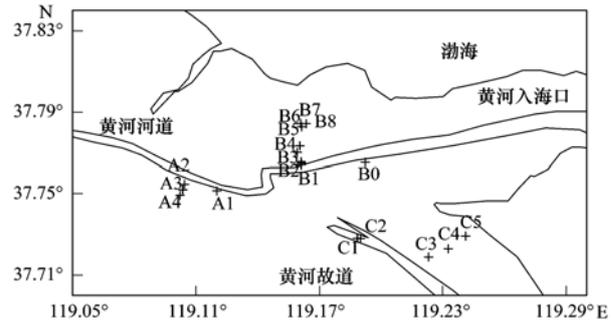


图1 黄河口湿地采样站位示意

Fig. 1 Sample stations in the Yellow River estuary wetland

别测定6次,计算标准偏差分别为4.15%、6.19%、8.17%、1.31%、5.19%和9.19%.

将沉积物湿样先后经过过量的双氧水(30%)和稀盐酸(0.2 mol·dm⁻³)处理后,采用Malvern2000激光粒度仪进行粒度测量,测量范围0.02~2000 μm,测量误差小于3%.

将沉积物冷冻干燥,用玛瑙研钵研碎过滤(100目). 取一定质量干燥样品,用2 mol·L⁻¹的HCl去除沉积物中无机碳并干燥. 用TF2000元素分析仪检测沉积物中有机碳含量(测量标样为硝基苯胺,其标准偏差为0.1%).

2 结果与讨论

2.1 黄河口湿地表层沉积物的粒径组成

如图2所示,A断面砂(>63 μm)、粉砂(4~63 μm)、黏土(<4 μm)占的比例(质量分数)分别为

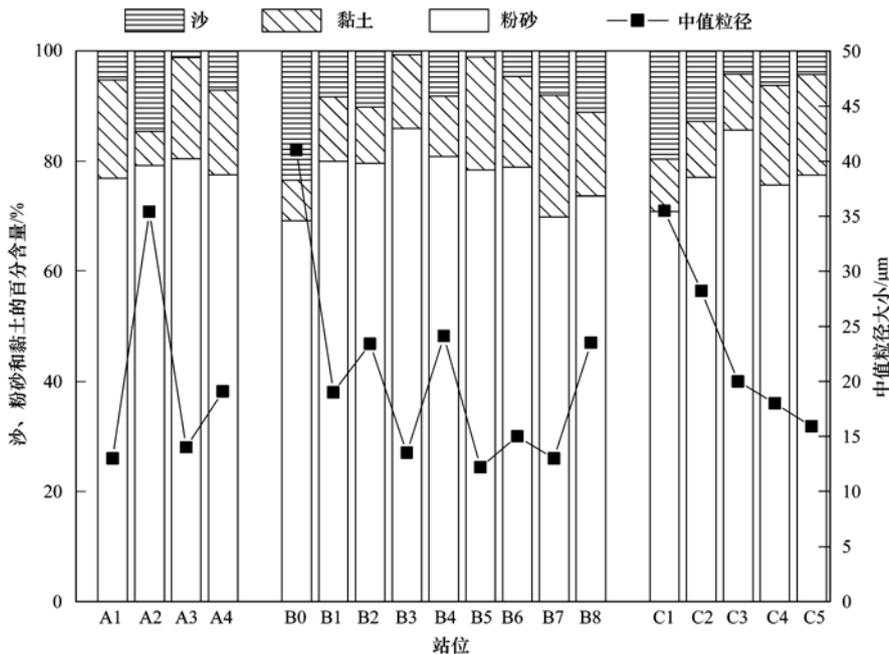


图2 各站位沉积物中值粒径及粒度组成

Fig. 2 Distribution of particle size and median size in surface sediment at different stations

1.18% ~ 14.59%、76.89% ~ 80.43%、6.21% ~ 18.39%，平均值分别为 7.03%、78.51%、14.46%；B 断面砂、粉砂、黏土占的比例分别为 0.67% ~ 23.45%、69.19% ~ 85.94%、7.37% ~ 22.12%，平均值分别为 8.40%、77.39%、14.21%；C 断面砂、粉砂、黏土占的比例分别为 4.21% ~ 19.61%、70.85% ~ 85.62%、9.54% ~ 18.28%，平均值分别为 9.40%、77.33%、13.26%。从上可以看出，粉砂是黄河口湿地表层沉积物的主要存在形式，这与上中游表层沉积物相仿^[15]。

2.2 黄河口湿地表层沉积物中总磷的含量与分布

黄河口湿地表层沉积物中各形态磷含量如图 3 所示，弱吸附态磷、活性有机磷、铁结合态磷、自生磷灰石磷、碎屑磷灰石磷、非活性有机磷含量分别为 0.31 ~ 0.96、0.48 ~ 2.99、0.18 ~ 4.05、1.78 ~ 11.04、2.21 ~ 12.92、0.02 ~ 4.47 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。各形态磷在总磷中所占的比例(摩尔分数,下同)为:碎屑磷灰石磷 > 自生磷灰石磷 > 铁结合态磷 > 非活性有机磷 > 活性有机磷 > 弱吸附态磷。碎屑磷灰石磷和自生磷灰石磷是黄河口湿地沉积物中磷的主要赋存形态。

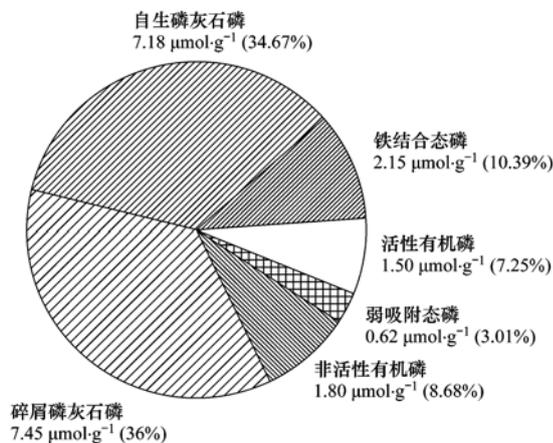


图 3 各种形态磷占总磷的平均比例

Fig. 3 Average specific gravity of different P forms in TP

A 断面总磷含量变化范围为 17.4 ~ 24.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 21.34 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, A4 站位总磷含量最高, A2 站位含量最低(图 4)。B 断面总磷各站含量差异很大, 其变化范围 12.1 ~ 25.4 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 19.7 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。B5 站含量最低, B1 站含量最高。C 断面总磷含量 18.1 ~ 25.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 22.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。C1 站位于黄河故道, 其总磷含量最低; 由黄河故道向海的方向总磷含量逐渐增加。表层沉积物中总磷的分布特征

与颗粒物粒径的分布一致, 中值粒径小的站位总磷含量高, 而中值粒径大的站位总磷含量低。黄河口湿地表层沉积物总磷含量低于巢湖、贵州红枫湖、太湖等淡水湖泊沉积物^[16~18]。

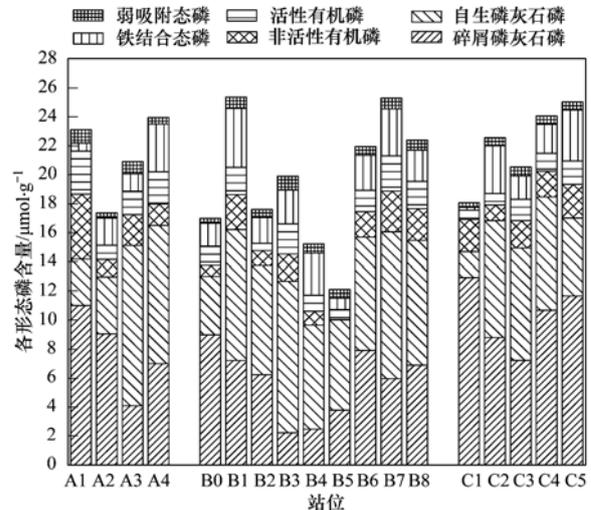


图 4 黄河口湿地表层沉积物中总磷和各形态磷含量

Fig. 4 Distribution of TP in surface sediment

2.3 黄河口湿地表层沉积物中弱吸附态磷的含量与分布

弱吸附态磷是指那些易于被颗粒物吸附, 并可由水、稀电解质溶液、离子交换树脂或磷同位素置换得到的磷。它的吸附和解吸是部分可逆过程, 并受 pH、Eh 等环境因素影响, 包括间隙水、释放于碳酸钙结合的磷、有机残骸释放的磷, 受季节影响大, 是最易被生物直接利用的 P 形态, 也是颗粒物中最不稳定的、最容易进入水体的部分^[19,20]。表 1 为不同形态磷与中值粒径和 TOC 的相关性统计。

表层沉积物中弱吸附态磷分布分别为: A 断面弱吸附态磷含量 0.35 ~ 0.93 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 0.65 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$; B 断面弱吸附态磷含量 0.34 ~ 0.96 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 0.66 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$; C 断面弱吸附态磷含量 0.31 ~ 0.63 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 0.53 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ (图 5)。

弱吸附态磷与中值粒径呈现显著负相关($r = -0.78, n = 18, P < 0.01$, 图 6), 说明其主要存在于较小粒径颗粒中。这是因为弱吸附磷是各种磷形态中最易被吸附且化学性质不稳定形态, 小颗粒物具有较大比表面积, 易与有机质、营养盐发生吸附作用, 这与早先的文献研究结论一致^[21]。弱吸附态磷与有机碳含量呈显著正相关($r = 0.56, n = 18, P < 0.05$), 说明有机碳含量越高, 弱吸附态磷含量越大。这是因为沉积物有机质对磷等营养

物质有吸附作用^[22], 而有机碳变化能反映有机质的变化. 弱吸附态磷易受水体中磷影响, 黄河口湿地表层沉积物主要成分是二氧化硅, 可吸附介质较少, 所以沉积物弱吸附磷含量较于宇等^[23]研究的长江口区域要低.

A、B 断面弱吸附态磷变化剧烈, C 断面含量整体稍低, 可能是受入侵海水中低磷含量影响. 受自然环境中表层植被和沉积物粒径影响, A1、A3 和 B3 站位弱吸附态磷含量相对较高. A1、A3 站位

于芦苇丛中, 土壤中根系众多, 致使可吸附磷的有机质含量较大^[24]; 且其沉积物中值粒径为 A 断面最小(分别为 13.0 μm 、14.0 μm), 使颗粒表面积相对较大, 二者共同作用使弱吸附态磷出现含量高值. A2 站位植被少, 沉积物颗粒粒径大(为 35.37 μm); 而 A4 站位无植被覆盖, 导致两站沉积物颗粒吸附能力小, 弱吸附态磷含量低. B3 站位覆盖大量碱蓬和怪柳, 且沉积物中值粒径较小(为 13.50 μm), 导致其弱吸附态磷含量亦相对较高.

表 1 不同形态磷与中值粒径和 TOC 的相关性统计¹⁾

Table 1 Linear correlation coefficients between P forms and median particle size and TOC

相关性	弱吸附态磷	活性有机磷	铁结合态磷	自生磷灰石磷	碎屑磷灰石磷	非活性有机磷
中值粒径	-0.781**	-0.503*	-0.166	-0.563*	0.376	-0.365
TOC	0.564*	0.712**	0.176	0.304	-0.215	0.485

1) ** 表示显著性在 0.01 水平, * 表示显著性在 0.05 水平

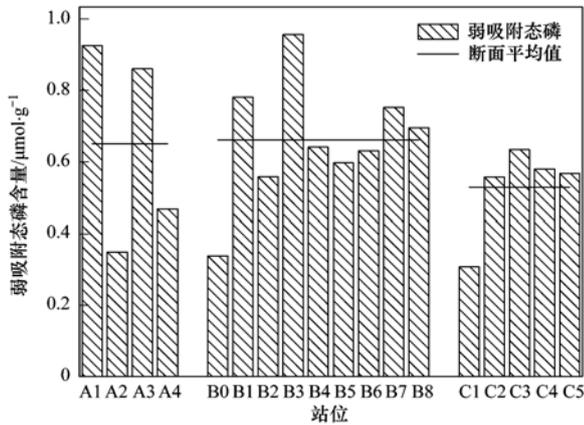


图 5 表层沉积物中弱吸附态磷分布

Fig. 5 Distribution of Exchangeable P in surface sediment

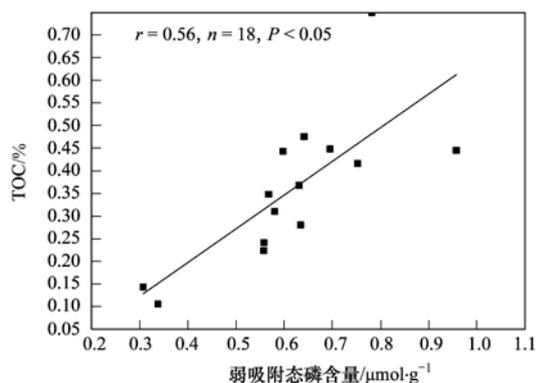
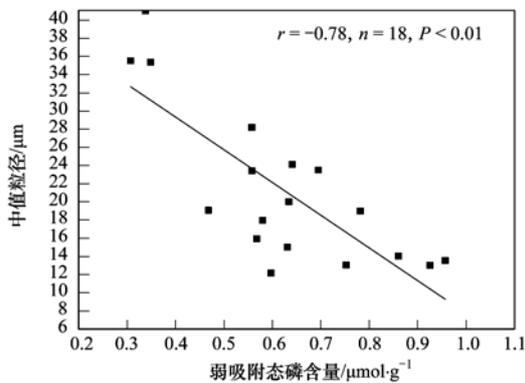


图 6 弱吸附态磷与中值粒径和 TOC 的相关性统计

Fig. 6 Linear correlation coefficients between Exchangeable P and median particle size and TOC

1.86 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$.

有机磷的分布规律如图 7、8 所示, A 断面活性有机磷变化幅度较大, A1 站含量最高, A2 站含量最

低. B 断面含量波动剧烈, B3 ~ B5 逐渐降低, B5 ~ B8 逐渐升高; C 断面含量相差不大, C1 ~ C5 缓慢升高, 且 A、B、C 这 3 个断面含量递减. 非活性有

机磷在 A、B 断面含量变化剧烈, A1、A3 站位含量较高, A2、A4 站位含量较低; B1 ~ B5 含量逐渐降低, 随后逐渐增加; C 断面各站位含量均匀, 变化不大. B 断面的活性有机磷和非活性有机磷的变化趋势较为相近.

沉积物粒径大小和有机碳含量是影响有机磷含量的重要因素. 如图 9、10 所示, 活性有机磷与中值粒径呈现显著负相关关系 ($r = -0.50, n = 18, P < 0.05$), 因有机磷与颗粒物结合的主要作用是吸附, 颗粒物粒径小比表面积大更易富集有机磷. 活性有

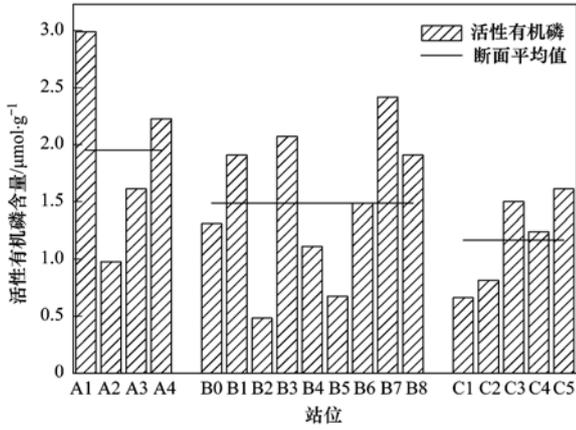


图 7 表层沉积物中活性有机磷分布

Fig. 7 Distribution of organic P in surface sediment

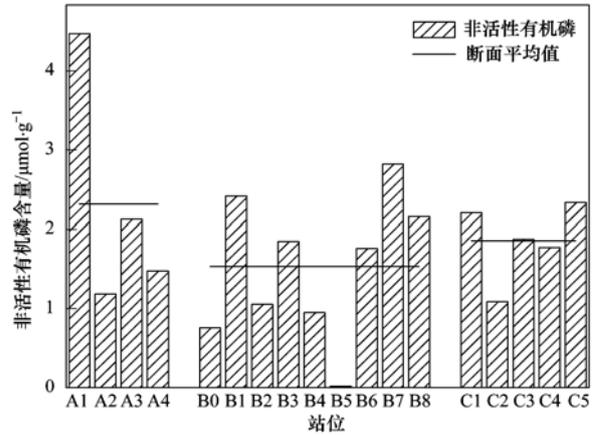


图 8 表层沉积物中非活性有机磷分布

Fig. 8 Distribution of refractory P in surface sediment

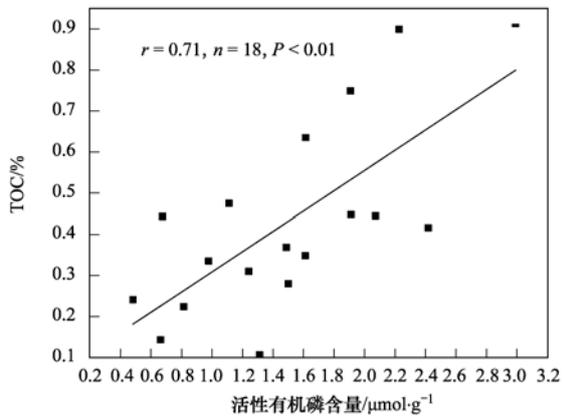
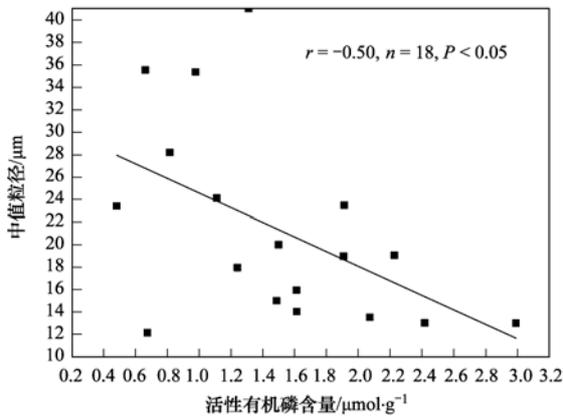


图 9 活性有机磷与中值粒径和 TOC 的相关性统计

Fig. 9 Linear correlation coefficients between organic P and median particle size and TOC

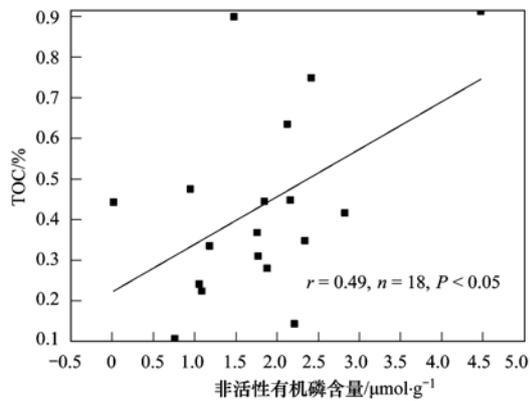
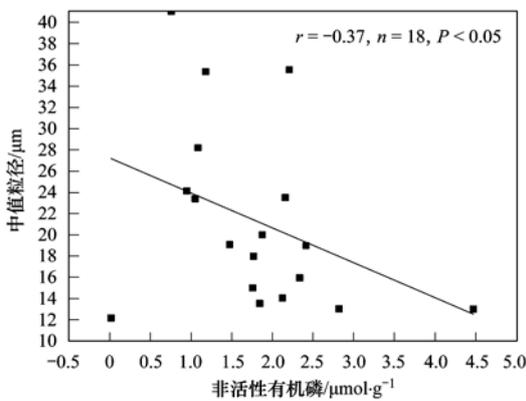


图 10 非活性有机磷与中值粒径和 TOC 的相关性统计

Fig. 10 Linear correlation coefficients between refractory P and median particle size and TOC

机磷和非活性有机磷与有机碳含量呈显著正相关 ($r_1 = 0.71, n = 18, P < 0.01$; $r_2 = 0.49, n = 18, P < 0.05$), 表明有机质对有机磷有吸附作用, 会较大程度影响其含量^[26].

植被种类和密度对土壤中活性有机磷含量有影响. 不同植被覆盖土壤中有机质含量大小顺序为拂子茅 > 芦苇 > 潮上带怪柳 > 滩涂碱蓬 > 滩涂怪柳 > 裸滩^[27], A 断面植被以芦苇为主, B 断面植被为芦苇和怪柳, C 断面植被以碱蓬为主, 使有机质含量 A 断面 > B 断面 > C 断面, 这与有机磷含量断面变化大致相同. A 断面植被较 B、C 断面植被密度大, 利于植被从表层土壤中吸收更多无机磷同化为有机磷, 亦是有机磷含量相对较高的重要原因之一.

2.5 黄河口湿地表层沉积物中铁结合态磷的含量与分布

铁结合态磷是指与铁的氧化物或氢氧化物发生共沉淀的磷酸盐. 铁的氧化物和氢氧化物表面对磷有很强的亲和力, 但其含量变化会随氧化还原环境而变化, 当 Eh 降低时, 三价铁被还原同时溶出, 其携带的 P 会被活化进入水体^[28], 因此铁结合态磷被认为是沉积物中易被解吸的部分^[29]. 另外, 铁结合态磷受外源输入影响很大, 主要来自于市政、工业废水, 所以可以反映区域磷污染情况^[30].

表层沉积物中铁结合态磷分布为: A 断面铁结合态磷含量为 $0.54 \sim 3.29 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 $1.73 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$; B 断面铁结合态磷含量为 $0.80 \sim 4.85 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 $2.36 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$; C 断面铁结合态磷含量为 $0.18 \sim 3.51 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 $2.11 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$.

铁结合态磷分布如图 11 所示, 各站之间铁结合态磷含量差异明显, 各断面无明显分布规律, A 断面含量平均值较 B、C 断面稍低. 黄河流域铁结合态

磷和粒径关系曾有报道^[6~8], 但就其规律未达成一致意见. 本研究亦未发现沉积物中铁结合态磷与粒径和 TOC 的明显关系(图 12). 一般说来, 铁的活性从淡水向海相沉积物逐渐降低, 钙的活性随着盐度的增大而增大^[31], 导致铁结合态磷在盐度高的区域含量较低且与钙结合态磷表现相反分布趋势^[32]. 氧化还原环境是造成沉积物中铁结合态磷含量差异的最主要因素, A 断面泥质松软、湿润, 长时间被水体覆盖, 相较 B 断面表现为强还原环境, 铁结合态磷被还原溶出进入周围水体, 导致 A 断面整体铁结合态磷含量下降. 与黄河口湿地不同, 国内主要淡水湖泊沉积物磷形态以铁结合态磷为主, 反映人类活动和污染对水下沉积物的影响^[16~18].

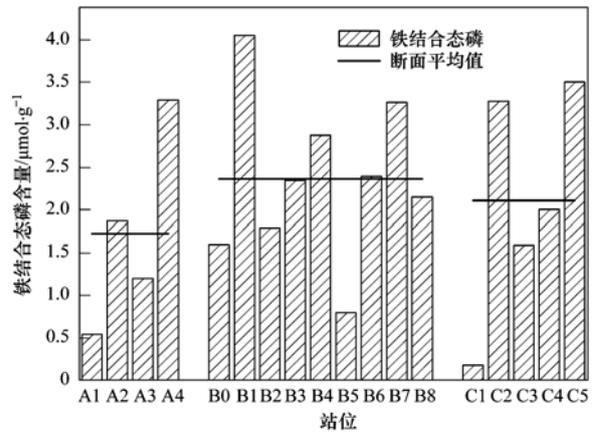


图 11 表层沉积物中铁结合态磷分布

Fig. 11 Distribution of iron-bound P in surface sediment

2.6 黄河口湿地表层沉积物中钙结合磷的含量与分布

钙结合磷是沉积物中分布最广的一种磷形态, 主要指与自生磷灰石、沉积碳酸钙以及生物骨骼等的含磷矿物有关的沉积磷存在形态. 钙结合磷按其来源可分为自生钙结合磷和碎屑磷灰石磷^[8,33]. 其

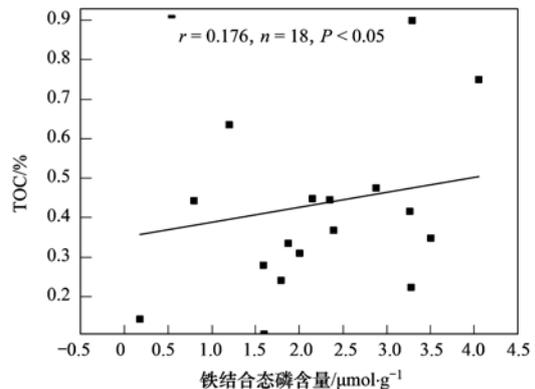
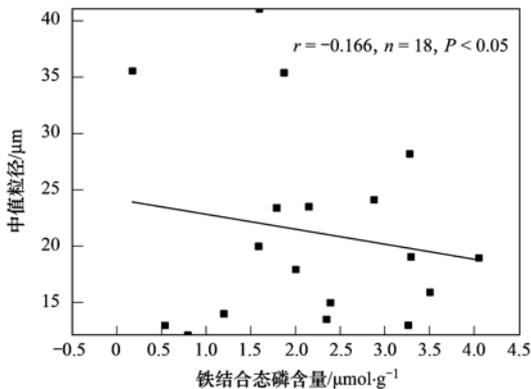


图 12 铁结合态磷与中值粒径和 TOC 的相关性统计

Fig. 12 Linear correlation coefficients between iron-bound P and median particle size and TOC

中前者主要是自生成因和生物成因的自生磷灰石磷,以及与自生碳酸钙共同沉淀的磷(包括生物残骸等)^[34],或者说是沉积物早期成岩过程中内生过程形成或生物成因的钙结合态磷;后者主要是来源于流域内风化侵蚀产物中磷灰石矿物晶屑等^[8],其被普遍认为在一般条件下不能够被生物再次利用。

表层沉积物中钙结合磷分布为:A断面自生磷灰石磷含量 $3.18 \sim 11.0 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,平均值为 $6.91 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,B断面自生磷灰石磷含量 $4.01 \sim 10.5 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,平均值为 $7.88 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,C断面自生磷灰石磷含量 $1.78 \sim 8.02 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,平均值为 $6.13 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。A断面碎屑磷灰石磷含量 $4.08 \sim 11.0 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,平均值为 $7.79 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$;B断面碎屑磷灰石磷含量 $2.21 \sim 8.99 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,平均值为 $5.74 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$;C断面碎屑磷灰石磷含量 $7.23 \sim 12.9 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,平均值为 $10.3 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

分布规律如图13、14所示,自生磷灰石磷A断面A3、A4站位含量较高;B断面B3~B5含量逐渐下降,B5~B7逐渐上升;C断面C2~C4站位变化不大,自生磷含量平均值B断面最大,C断面最小;碎屑磷灰石磷A断面、C断面分布趋势与自生磷变化趋势相反,B断面分布趋势与自生磷基本一致,碎屑磷含量平均值为B断面最小C断面最大,与自生磷含量平均值变化相反。

钙结合态磷的变化趋势主要受颗粒物粒径的影响,自生磷灰石磷是吸附于碳酸钙颗粒上并共同沉积下来的生物碎屑磷^[35],碎屑磷灰石磷属于碎屑矿物,存在于颗粒物内部,主要存在于粗颗粒物中,含量随粒径增大而增大^[36]。如图15、16所示,黄河口湿地表层沉积物的碎屑磷灰石磷含量与粒径变化趋势一致,自生磷灰石磷含量与中值粒径变化相反,存在显著负相关($r = -0.56, n = 18, P < 0.05$)。各站位钙磷含量变化较大也与水温,酸碱度等微环境因

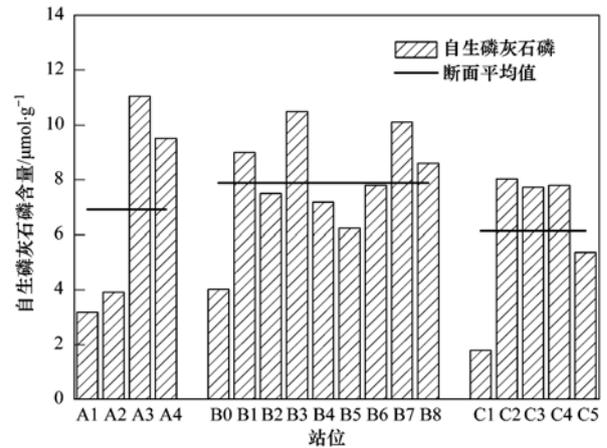


图13 表层沉积物中自生磷灰石磷分布

Fig. 13 Distribution of authigenic P in surface sediment

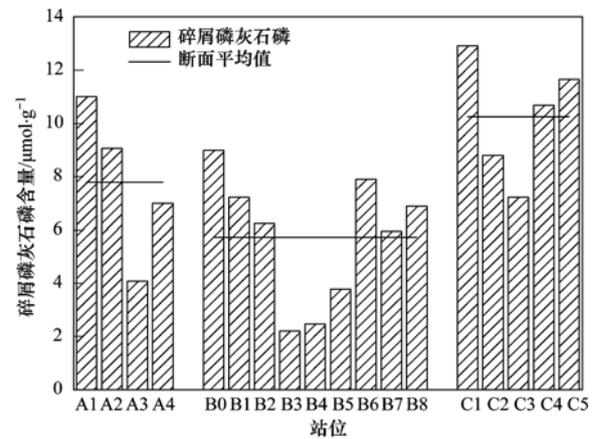


图14 表层沉积物中碎屑磷灰石磷分布

Fig. 14 Distribution of detrital P in surface sediment

素密切相关^[37]。A断面的自生磷灰石磷与碎屑磷灰石磷含量平均值大体相当;在B断面,自生磷灰石磷含量平均值高于碎屑磷灰石磷;而在黄河故道C断面,碎屑磷灰石磷含量均值大大高于自生磷灰石磷,这与颗粒粒度和土壤生物组成有关。钙磷含量在总磷中占 $61.39\% \sim 89.88\%$,占绝对优势,与

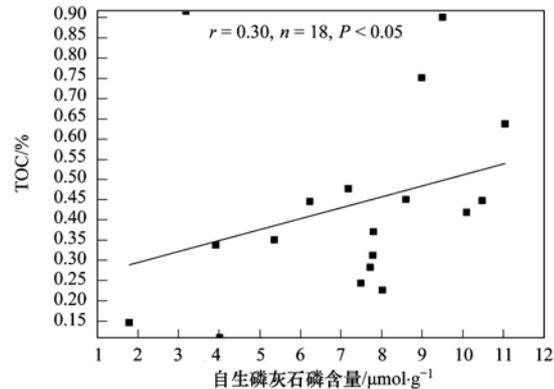
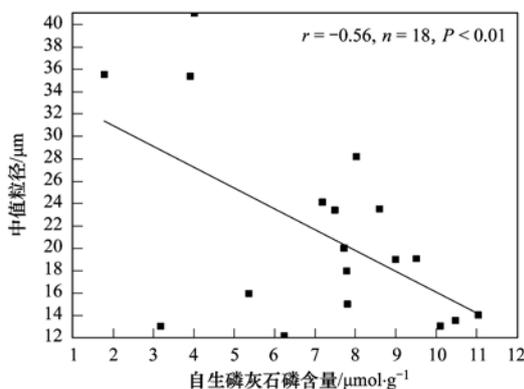


图15 自生磷灰石磷与中值粒径和TOC的相关性统计

Fig. 15 Linear correlation coefficients between authigenic P and median particle size and TOC

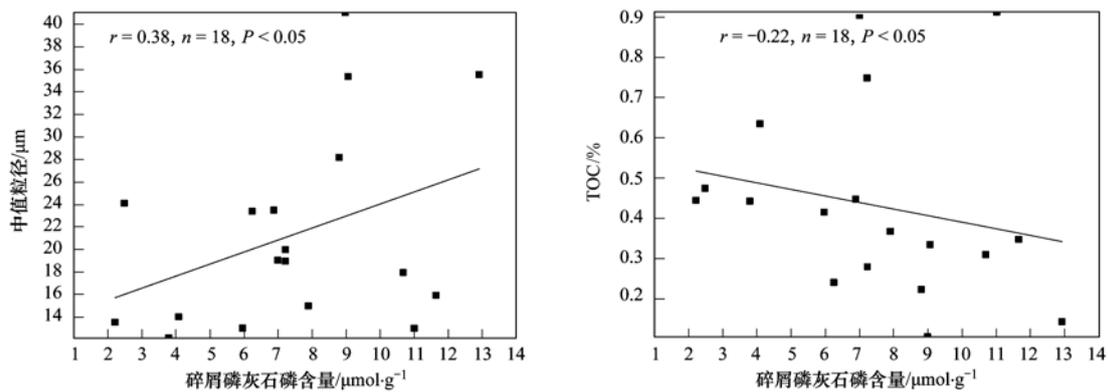


图 16 碎屑磷灰石磷与中值粒径和 TOC 的相关性统计

Fig. 16 Linear correlation coefficients between detrital P and median particle size and TOC

王晓丽研究结果相同^[38], 主要是我国北方的石灰性土壤使得黄河河水具有高硬度的特点导致, 该特点与珠江口、大亚湾的大鹏澳和厦门湾的胡里山沉积物相一致^[39].

2.7 黄河口湿地沉积物中生物可利用磷的含量分布

在各种不同形态磷中, 活性有机磷可以通过微生物的矿化降解变为无机溶解磷进入水体参与生物循环; 当外界磷酸盐含量降低时, 沉积物中的弱吸附态磷会通过离子交换释放到上覆水体中, 进而被生物利用; 铁结合态磷在滨岸水体中易被还原, 进而导致铁结合磷的还原释放; 钙形态磷溶解度系数大, 相对惰性, 难以转化为磷酸盐, 基本上对孔隙水和上覆水体中的磷酸盐富集没有贡献, 不能被生物利用, 容易被埋藏在河口滨岸地区或在外海沉积。综上所述, 生物可利用磷主要包括活性有机磷、弱吸附态磷和铁结合态磷, 这些磷形态在春夏季等藻类浮游生物生长的季节容易被释放到上覆水体, 从而对水体初级生产力产生巨大的促进作用。

在本研究的采集黄河口湿地表层沉积物中, 各断面生物可利用磷含量为 $1.15 \sim 6.74 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $4.27 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 含量占总磷的比例为 $6.35\% \sim 30.38\%$, 平均比例为 20.4% , 较长江口沙洲含量低^[40]。其中, A 断面的含量为 $3.20 \sim 5.99 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $4.33 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$; B 断面含量为 $2.07 \sim 6.74 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $4.51 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$; C 断面含量为 $1.15 \sim 5.69 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $3.81 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。C 断面的生物可利用磷含量最低, 主要是由其较低的活性有机磷含量造成。自生磷灰石磷包含生物残骸中的磷, 这部分磷在一定条件下是可以转化为生物可利用磷并被浮游生物所利用, 但是具体含量尚无法测定。因此, 实际生物可利用磷含量要高于上述估算值。根据目前调查结果显示, 磷

已经成为黄河口及附近海域浮游植物生长的限制因子, 而黄河口湿地沉积物中的生物可利用磷可成为潜在的磷源。因此, 假使如此高比例的生物可利用磷在适当条件下被释放并随河流入海, 必将对渤海及附近海域的浮游植物的数量种群、初级生产力以及生物多样性造成一定影响。

3 结论

(1) 黄河口湿地表层沉积物中总磷含量变化范围为 $12.1 \sim 25.4 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $20.7 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。其中碎屑磷灰石磷含量变化范围为 $2.21 \sim 12.9 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $7.45 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 其含量占总磷比例为 $11.1\% \sim 70.65\%$; 自生磷灰石磷含量变化范围为 $1.78 \sim 11.0 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $7.17 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 其含量占总磷比例为 $12.1\% \sim 82.6\%$ 。自生磷灰石磷和碎屑磷灰石磷是表层沉积物中磷的主要存在形式。

(2) 粒径与各形态磷含量密切相关, 可交换有机磷、自生磷灰石磷、活性有机磷主要存在于较小粒径颗粒中; 碎屑磷灰石磷主要存在于较大粒径颗粒中。

(3) 有机质含量影响各形态磷在沉积物中含量, 弱吸附态磷、可交换有机磷、自生磷灰石磷含量均随 TOC 含量增加而升高。

(4) 生物可利用磷含量变化为 $1.15 \sim 6.74 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $4.27 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, 含量占总磷比例为 $6.35\% \sim 30.38\%$ 。由于部分具有生物活性的自生磷灰石磷并未计算在内, 因此, 实际生物可利用磷含量可能要高于上述含量。

参考文献:

- [1] Benitez-Nelson C R. The biogeochemical cycling of phosphorus in marine systems[J]. Earth-Science Reviews, 2000, 51(1-4):

- 109-135.
- [2] Ramm K, Scheps V. Phosphorus balance of a polytrophic shallow lake with consideration of phosphorus release[J]. *Hydrobiologia*, 1997, **342-343**: 43-53.
- [3] Klump J V, Martens C S. Biogeochemical cycling in an organic rich coastal marine basin-II: Nutrient sediment-water exchange processes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, **45** (1): 101-121.
- [4] 尹大强, 覃秋荣, 阎航. 环境因子对五里湖沉积物磷释放的影响[J]. *湖泊科学*, 1994, **6**(3): 240-244.
- [5] 苏玉萍, 郑达贤, 林婉珍, 等. 福建省富营养化水库沉积物磷形态及对水体的贡献[J]. *湖泊科学*, 2005, **17**(4): 311-316.
- [6] 王晓丽, 包华影, 郭博书. 黄河中下游表层沉积物磷的赋存形态及生物有效性[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(5): 1620-1624.
- [7] 马钦, 李北罡, 焦小宝. 黄河表层沉积物中磷的分布特征及磷的生物可利用性[J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(11): 2379-2384.
- [8] 王晓丽, 包华影. 黄河上中游表层沉积物磷的赋存形态特征[J]. *生态环境学报*. 2010, **26**(6): 1358-1362.
- [9] 王开荣. 黄河调水调沙对河口及其三角洲的影响和评价[J]. *泥沙研究*, 2005, (6): 29-33.
- [10] Halpern C B. Early successional pathways and the resistance and resilience of forest communities [J]. *Ecology*, 1988, **69** (6): 1703-1715.
- [11] 徐德兰, 雷泽湘, 王洪君, 等. 太湖滨岸带芦苇区沉积物磷的特征[J]. *湿地科学*, 2007, **5**(2): 133-139.
- [12] Ruttenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments [J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, **37**(7): 1460-1482.
- [13] Jensen H S, McGlathery K J, Marino R, *et al.* Forms and availability of sediment phosphorus in carbonate sand of Bermuda seagrass beds[J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, **43**(5): 799-810.
- [14] Vink S, Chambers R M, Smith S V. Distribution of phosphorus in sediments from Tomales Bay, California[J]. *Marine Geology*, 1997, **139**(1-4): 157-179.
- [15] 王晓丽, 包华影, 郭博书. 黄河上中游沉积物理化特征及磷赋存形态研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 720-725.
- [16] 徐康, 刘付程, 安宗胜, 等. 巢湖表层沉积物中磷赋存形态的时空变化[J]. *环境科学*, 2011, **32**(11): 3255-3263.
- [17] 王敬富, 陈敬安, 曾艳, 等. 贵州红枫湖沉积物磷赋存形态的空间变化特征[J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(5): 789-796.
- [18] 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.
- [19] Pettersson K. Phosphorus characteristics of settling and suspended particles in Lake Erken [J]. *Science of the Total Environment*, 2001, **266**(1-3): 79-86.
- [20] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in lake Erken sediment [J]. *Water Research*, 2000, **34**(7): 2037-2042.
- [21] 魏俊峰, 陈洪涛, 刘月良, 等. 2008 年调水调沙期间黄河下悬浮颗粒物中磷的赋存形态[J]. *环境科学*, 2011, **32** (2): 368-374.
- [22] 迟杰, 赵旭光, 董林林. 有机质和低相对分子量有机酸对沉积物中磷吸附/解吸行为的影响[J]. *天津大学学报*, 2011, **44**(11): 968-972.
- [23] 于宇, 宋金明, 李学刚. 长江口海域表层沉积物中磷的形态分布及环境意义[J]. *地球科学进展*, 2011, **26**(8): 870-880.
- [24] 贾晓红, 李新荣, 陈应武. 植被恢复对旱区表土颗粒中有机碳和氮分布的影响[J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(5): 560-564.
- [25] Jensen H S, Mortensen P B, Andersen F O, *et al.* Phosphorus cycling in a coastal marine sediment, Aarhus Bay. Denmark[J]. *Limnology and Oceanography*, 1995, **40**(5): 908-917.
- [26] Kastelan-Macan M, Petrovic M. The role of fulvic acids in phosphorus sorption and release from mineral particles[J]. *Water Science and Technology*, 1996, **34**(7-8): 259-265.
- [27] 陈为峰, 史衍玺, 田素锋, 等. 黄河口新生湿地土壤氮磷分布特征研究[J]. *水土保持学报*, 2008, **22**(1): 69-73.
- [28] 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.
- [29] Huerta-Diaz M A, Tovar-Sánchez A, Filippelli G, *et al.* A combined CDB-MAGIC method for the determination of phosphorus associated with sedimentary iron oxyhydroxides[J]. *Applied Geochemistry*, 2005, **20**(11): 2108-2115.
- [30] 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.
- [31] 李莹, 周新革, 郭博书. 黄河(黄河口, 渤海, 三门峡)沉积物中磷的赋存形态[J]. *集宁师专学报*, 2008, **30**(4): 38-40.
- [32] 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): 82-89.
- [33] Frankowski L, Bolałek J, Szostek A. Phosphorus in bottom sediments of Pomeranian Bay (Southern Baltic-Poland) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, **54** (6): 1027-1038.
- [34] 王雨春, 马梅, 万国江, 等. 贵州红枫湖沉积物磷赋存形态及沉积历史[J]. *湖泊科学*, 2004, **16**(1): 21-27.
- [35] Boström B, Andersen J M, Fleischer S, *et al.* Exchange of phosphorus across the sediment-water interface [J]. *Hydrobiologia*, 1988, **170**(1): 229-244.
- [36] Du D W, Shi X F, Meng X W, *et al.* Geochemical granularity effect of sediment in the Yellow Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2003, **21**(1): 78-82.
- [37] 许金树, 李亮歌. 台湾海峡中、北部沉积物中磷的存在形态[J]. *海洋与湖沼*, 1990, **21**(1): 62-69.
- [38] 王晓丽, 张丽坤. 黄河中下游表层沉积物磷的赋存形态特征[J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(5): 904-907.
- [39] 郑爱榕, 沈海维, 李文权. 沉积物中磷的存在形态及其生物可利用性研究[J]. *海洋学报*, 2004, **26**(4): 49-57.
- [40] 侯立军, 陆健健, 刘敏, 等. 长江口沙洲表层沉积物磷的赋存形态及生物有效性[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(3): 488-494.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron: Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangnu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Xiong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《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)

2014年3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 15, 2014

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