

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铎, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期
Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析	刘春景, 吕建毅, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳 (3375)
基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟	庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏 (3386)
基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨	王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰 (3396)
厦门港大气 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平 (3404)
南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征	张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇 (3416)
晋中盆地主要城市冬季 PM _{2.5} 传输特征分析	王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣 (3423)
鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析	孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳峰 (3439)
济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP	王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋 (3451)
长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析	罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧 (3463)
2019 年 7 月石家庄市 O ₃ 生成敏感性控制策略解析	朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇 (3473)
华北平原 AOD 时空演化与影响因素	郭霖, 孟飞, 马明亮 (3483)
基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系	郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康 (3494)
基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征	王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威 (3508)
近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析	陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏 (3523)
高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素	杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强 (3532)
三峡水库不同支流库湾蓄水期溶解氧分层特性及差异性	纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽 (3543)
典型喀斯特城市湖泊溶解性有机质成分特征及来源解析	倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康 (3552)
骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估	黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕 (3562)
千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素	王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军 (3575)
泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征	张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮 (3587)
降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响	周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕 (3597)
典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价	储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏 (3608)
筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响	王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜 (3623)
天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识	刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德 (3635)
地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制	彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪 (3645)
北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析	门聪, 李頔, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵 (3656)
微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响	胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明 (3664)
不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响	任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟 (3672)
微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd ²⁺ 吸附机制	马文艳, 裴鹏刚, 高歌, 孙约兵 (3682)
不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素	连宁海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水 (3692)
Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能	印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨根, 何世颖, 薛利红 (3699)
一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析	李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送 (3708)
丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性	高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程阳阳, 彭永臻 (3718)
2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测	徐勇, 郑志威, 郭振东, 宴世卿, 黄雯婷 (3730)
近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估	陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明 (3741)
土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响	何宇, 盛茂根, 王轲, 王霖娇 (3752)
长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价	张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁 (3763)
煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性	尚誉, 桑楠 (3773)
燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价	李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚 (3781)
广州市南沙区第四剖面镉富集特征及生物有效性	王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏 (3789)
黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准	徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀 (3799)
土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测	张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南 (3811)
添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响	鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利 (3825)
不同稻作系统土壤的 CH ₄ 产生潜力与产生途径	沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华 (3835)
东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程	马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮 (3844)
同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐潞, 马飞 (3854)
岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较	肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛 (3865)
紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异化响应	王智慧, 蒋先军 (3876)
有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响	肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全 (3884)
《环境科学》征订启事 (3403) 《环境科学》征稿简则 (3462) 信息 (3493, 3655, 3834)	

泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征

张子涵¹, 张鑫茹¹, 贾传兴^{1,2}, 甘延东¹, 王世亮^{1,2,*}

(1. 曲阜师范大学生命科学学院, 曲阜 273165; 2. 山东省鲁南地质工程勘察院, 兖州 272100)

摘要: 基于对南水北调东线工程典型河流——泗河水系表层与柱状沉积物中磷的含量、存在形态和空间分布特征进行研究的基础上, 进一步探讨了总磷(TP)及各形态磷与沉积物基本理化性质之间的关系和生态学意义。运用连续提取法将沉积物中的磷划分为可溶态或弱吸附态磷(S/L-P)、铝结合态磷(Al-P)、铁结合态磷(Fe-P)、还原态磷(RS-P)、钙结合态磷(Ca-P)和残渣态磷(RES-P)。结果表明, 泗河水系表层沉积物 ω (TP) 为 421.84 ~ 1 188.65 mg·kg⁻¹; 6 种磷的形态中, 含量最高的是 Ca-P, 占 TP 的 40% 以上; 其次为 Fe-P, 占 TP 的 20% 以上; 含量最低的是 S/L-P, 仅占 TP 的 0.4% 左右; 河流下游表层沉积物中 TP 及各形态磷的含量普遍高于上游, 这可能与下游附近城区工业废水和生活污水的大量排入有关。沉积物剖面 TP 含量上层样品中呈明显高于下层, 说明近年来泗河水体磷污染呈加剧趋势; 沉积物剖面各形态磷中 Ca-P 所占质量分数最大, 其次是 RES-P。相关性分析结果表明, 表层沉积物中 Fe 与 Fe-P、Al 与 Al-P、Ca 与 Ca-P 和 TOC 与 RS-P 之间呈显著相关性; 而在沉积物剖面中, 上述相关性不显著。Fe 与 TP 量比的计算结果表明, 泗河水系沉积物具有进一步积累磷的能力; 沉积物中生物可利用磷(BAP)占 TP 的质量分数为 25% ~ 50%。

关键词: 沉积物; 磷(P); 形态; 分布; 泗河

中图分类号: X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2022)07-3587-10 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202108226

Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River

ZHANG Zi-han¹, ZHANG Xin-ru¹, JIA Chuan-xing^{1,2}, GAN Yan-dong¹, WANG Shi-liang^{1,2,*}

(1. School of Life Science, Qufu Normal University, Qufu 273165, China; 2. Shandong Lunan Geological Engineering Survey Institute, Yanzhou 272100, China)

Abstract: Based on the study of the content, forms, and spatial distribution of phosphorus (P) in the surface and columnar sediments of the Sihe River, the relationships between the total phosphorus (TP) and various forms of P and the basic physical and chemical properties of sediment and their ecological significance were deeply discussed. The forms of P in the sediment were defined including soluble and loosely bound P (S/L-P), Al-bound P (Al-P), Fe-bound P (Fe-P), reductant soluble P (RS-P), Ca-bound P (Ca-P), and residual P (RES-P) using the method of selectively sequential extraction. The results indicated that ω (TP) was 421.84-1 188.65 mg·kg⁻¹ in the surface sediment. Among the six forms of P, the content of Ca-P was the highest, accounting for more than 40% of TP, followed by the content of Fe-P, accounting for more than 20% of TP. The content of S/L-P was the lowest, which only accounted for approximately 0.4% of TP. The contents of TP and various forms of P in the surface sediments of the downstream area of the Sihe River were higher than those of the upstream area of the river, which was induced by the discharge of industrial wastewater and domestic sewage in the urban areas nearby the downstream portion of the Sihe River. The contents of TP in the upper samples of the two sediment profiles were obviously higher than those in the bottom samples, indicating that the P pollution in the water environment of the Sihe River has been intensifying in recent years. Among all forms of P in the sediment profiles, Ca-P accounted for the largest proportion, followed by Res-P. The correlation analysis results showed that significant correlations were observed between Fe and Fe-P, Al and Al-P, Ca and Ca-P, and TOC and RS-P in the surface sediments; the same correlations had not been found in the sediment profiles. The calculated results of Fe and TP molar ratio indicated that the sediments of the Sihe River could further accumulate P. The percentage of bioavailable P (BAP) in sediment was 25%-50%.

Key words: sediment; phosphorus (P); forms; distribution; Sihe River

磷(P)是整个陆生和水生生物生命活动必需的营养元素, 但过量的 P 又会导致河湖等地表水体富营养化^[1~4]。近年来随着工农业的快速发展, 大量的 P 随着生活污水、工业废水和农业退水被排放到水体环境中。水中的 P 又可通过吸附作用或与铁(Fe)和铝(Al)等元素发生共沉淀等过程向沉积物中聚集, 沉积物成为 P 的“汇”; 沉积物中的 P 又可通过再悬浮、生物扰动和梯度扩散等过程再次释放到上覆水体中, 沉积物也可成为 P 的“源”^[4~11]。因此, 沉积物 P 污染引起了广泛关注, 沉积物 P 污染的研究对于系统剖析 P 地球化学过程也具有重要意义^[12~14]。

沉积物中与不同矿物结合的 P, 根据其结合强度分为不同形态^[15~17]; 研究沉积物中 P 的结合形

态对系统探讨水体环境中 P 的迁移转化、生态风险及其环境演变过程有重要意义^[18~23]。因此, 沉积物中 P 环境行为与过程的研究成为学术界关注的热点问题。学者对国内典型河湖水域沉积物中 P 的污染状况开展了一系列研究^[24~29], 结果表明这些水域水体和沉积物普遍受到 P 的污染, 沉积物理化性质对 P 在水-沉积物系统中的迁移转化有重要影响。

收稿日期: 2021-08-21; 修订日期: 2021-11-24

基金项目: 山东省鲁南地质工程勘察院开放基金项目(LNY2020-Z05); 山东省自然科学基金项目(ZR2018MD007); 山东省重点研发计划项目(2018GSF117035); 山东省高等学校科技计划项目(J17KA112); 国家自然科学基金项目(41301532)

作者简介: 张子涵(2000~), 女, 硕士, 主要研究方向为沉积物磷迁移转化, E-mail: stxyjz@126.com

* 通信作者, E-mail: wangshiliang@tsinghua.org.cn

泗河是山东省中部的较大河流,是淮河流域沂沭泗水系的重要河流.该河流发源于山东省新泰市太平顶西侧,流经泗水、曲阜、兖州和邹城,最后经济宁注入南四湖,总流域面积 $2\,361\text{ km}^2$,多年平均流量为 $12.2\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ^[30].多年的监测数据表明:泗河是南四湖 10 条主要排污河流之一,泗河水体环境质量对南水北调东线水体水质有重要影响^[31].泗河流域内工农业发达,特色工业为煤矿开采、冶炼和医药等.近年来随着工农业的快速发展,泗河流域水体污染呈加重的趋势,下游流经兖州和济宁地区的河段,深受工矿业发展的严重影响,水体污染形势更加严峻.然而,到目前为止,有关泗河流域水体沉积物 P 污染状况的相关研究还非常缺乏.因此,对泗河水体沉积物中 P 存在形态及潜在生态风险进行研究具有重要意义.

本文以泗河水体表层沉积物和柱状沉积物为研究对象,对沉积物中 P 的含量、存在形态和空间分布状况进行分析,在此基础上揭示其空间分布规律和潜在生态风险,以期对该水系沉积物中 P 污染防治提供重要基础数据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

2020 年 5 月,自泗河上游开始至下游南四湖入湖口,在 10 个采样点(S1~S10 点)采集表层沉积物,并在 S1 点和 S9 点用柱状采样器采集两个柱状沉积物剖面(图 1);在采样现场,对柱状沉积物以间隔 2 cm(或 3 cm)进行切分处理;所有沉积物样品均装入聚乙烯袋中,并立即带回实验室;进行风干、研磨,过 20 目筛,放入棕色玻璃瓶中保存以备.

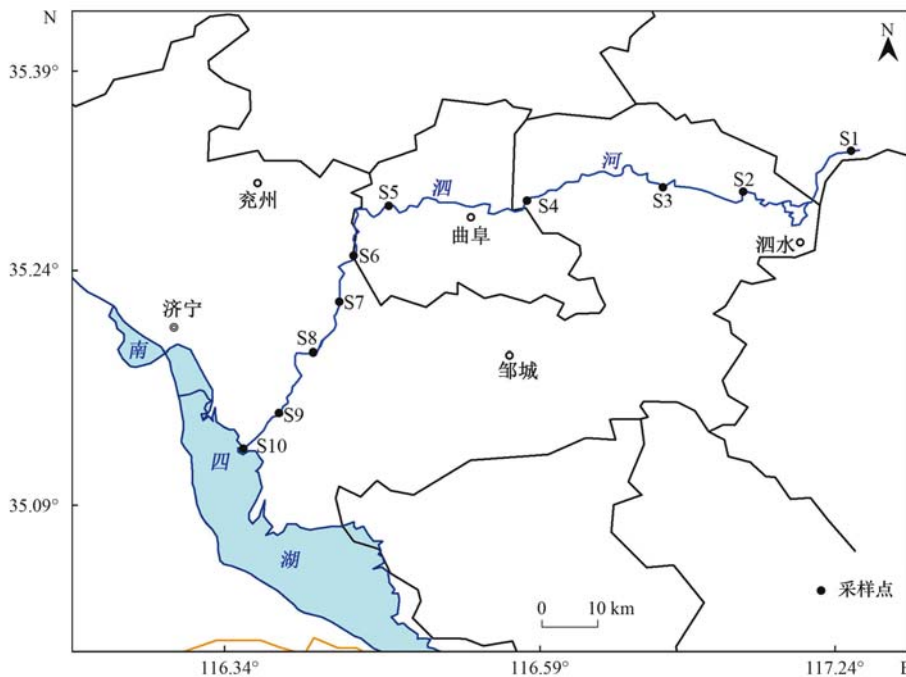


图 1 采样点位置示意

Fig. 1 Schematic of the sampling sites

1.2 样品处理及分析测试

取沉积物样品 0.5 g,用硝酸-氢氟酸-高氯酸对样品进行消解处理,沉积物中的 P 和 Fe、Al、钙(Ca)的含量用 ICP-OES(IRIS Instrepid II 型,美国热电公司)进行分析测定.基于平行样品和基准物质分析检验实验结果的准确性.检测结果表明:基准物质中 Fe、Al、Ca 和 P 的回收率分别为 $-8.62\%\sim 9.54\%$ 、 $-6.45\%\sim 8.47\%$ 、 $-9.62\%\sim 6.31\%$ 和 $-5.27\%\sim 9.18\%$;平行样品中 Fe、Al、Ca 和 P 变异系数的平均值分别为 3.57%、5.24%、2.95%和 1.68%.

1.3 沉积物中 P 形态分析

采用 Zhang^[32]的连续提取方法把沉积物中的 P 分为 6 种形态:①可溶态或弱吸附态 P(S/L-P, F1)、②Al 结合态 P(Al-P, F2)、③Fe 结合态 P(Fe-P, F3)、④闭蓄态 P(RS-P, F4)、⑤Ca 结合态 P(Ca-P, F5)和⑥残渣态 P(RES-P, F6).其中残渣态 P 主要是有机 P,其含量由总 P(TP)与其它 5 种形态 P 含量的差值所得.通过平行样品的提取和分析测定对该计算方法的准确性进行验证,分析结果表明:F1、F2、F3、F4 和 F5 这 5 种形态 P 的变异系数分别为 9.56%、5.64%、6.24%、3.67%和 4.87%;

因此,该计算方法是有效的。

2 结果与讨论

2.1 沉积物基本理化性质

泗河水体表层沉积物 pH 值为 6.23 ~ 8.02, 平均值为 7.60, 整体上呈中性; ω [总有机碳 (TOC)] 平均值为 3.75%, 范围为 1.65% ~ 6.24%, S9 和 S10 两个采样点有机碳含量较高; 沉积物黏土、沙砾和砾石的平均值分别为 10.07%、35.78% 和 54.16%, 下游沉积物中的黏土含量普遍高于上游; 沉积物中 $\omega(\text{Fe})$ 、 $\omega(\text{Al})$ 和 $\omega(\text{Ca})$ 范围分别为 10.91 ~ 42.32 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、49.22 ~ 78.98 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.78 ~ 14.68 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中上下游沉积物中 Al 和 Ca 的含量差别不大, 而下游沉积物中 Fe 的含量明显高于上游, 呈现明显的空间差异。

2.2 表层沉积物 P 含量和形态

泗河水体表层沉积物 $\omega(\text{TP})$ 范围为 421.84 ~ 1188.65 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 805.25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中 S1 点最低, S10 点最高. 从河流上游到下游, TP 的含量呈升高趋势, 如 S1 ~ S6 点 $\omega(\text{TP})$ 均低于 700 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而 S7 ~ S10 沉积物 $\omega(\text{TP})$ 均高于 800

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 泗河上游主要是以农业为主的流域, 影响泗河水质的主要是农业面源污染, 近些年来该流域内农药和化肥使用量大幅度升高, 面源污染日益加重, 加剧该区域的水环境污染^[31]. 而下游所流经区域主要为兖州和济宁城区, 人口密度大, 工业发达, 而且兖州拥有山东省最大的煤炭生产基地, 煤炭生产过程中产生的大量工业废水及附近的城市生活污水都经泗河最终排入南四湖; 因此, 工业废水和生活污水的排放是导致下游沉积物中 P 含量显著升高的主要原因。

表层沉积物 P 含量在 6 种形态 (F1、F2、F3、F4、F5 和 F6) 的平均值分别为 1.83、96.72、154.82、79.53、303.58 和 104.65 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其范围分别为 0.49 ~ 5.74、21.53 ~ 236.51、72.56 ~ 271.19、43.80 ~ 143.25、204.35 ~ 393.67 和 56.62 ~ 162.48 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 2); 从各形态占 TP 的质量分数来看, F1、F2、F3、F4、F5 和 F6 占 TP 质量分数的平均值分别为 0.23%、12.05%、20.57%、10.69%、41.94% 和 14.52%. 因此, 在 P 的 6 种形态中, F5 占绝对优势, 其次是 F3, 含量最低的是 F1. 在所有采样点中, 除了 F2 和 F6, 其它 4 种形态 P 的

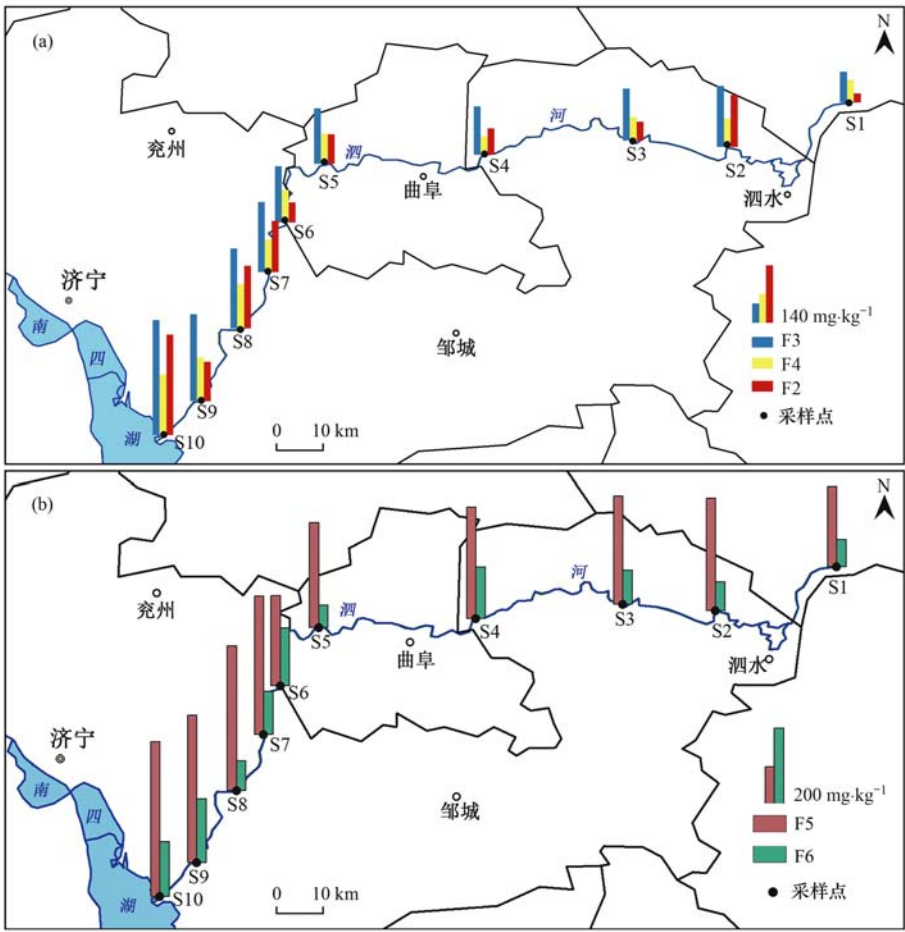


图 2 各采样点沉积物中主要 P 形态的含量

Fig. 2 Concentration of the main phosphorus forms at each sampling site

含量随着 TP 含量的升高而升高(图 2);如 TP 含量最高的 S9 和 S10 点,F1 形态的 $\omega(\text{P})$ 都超过 $3.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,F3 和 F5 形态的 $\omega(\text{P})$ 分别高于 $200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $370\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

F2 和 F3 是沉积物中活性 P 的主要组分,主要是指一些通过物理和化学作用吸附在 Fe(Al)氧化物和氢氧化物胶体表面上的 P,在沉积物-水界面的 P 循环中具有主要作用^[33].有研究表明,对于接纳污水较多的河流,沉积物一般都含有较高的 F3 形态的 P 含量^[34].泗河接纳污水较多的下游水体沉积物 F3 形态的 P 含量及其占 TP 的百分比都普遍高于上游.F5 在沉积物的 P 形态中表现为惰性,在自然界较为稳定,一般很难被生物所利用^[33];在沉积物中 F5 形态的 P 含量一般都较高,如大辽河水系沉积物中含量最高的也是 F5 形态的 P^[35];F6 主要是来源于流域内风化侵蚀产物中磷灰石矿物晶屑等,可以反映流域内侵蚀速率的大小及侵蚀程度的强弱,也是 P 在自然界中较为稳定的结合形态^[36].

从河流的上游到下游,各形态 P 的含量虽有些轻微波动,特别是 S2 点的 TP 及各形态 P 含量明显升高,这可能与 S2 点有两条河流汇入,导致 TP 和各形态 P 含量增加;但整体均呈递增的趋势,如 S1 ~

S6 点 TP 和各形态 P 的含量平均值明显低于 S7 ~ S10 点的值(图 3);而各形态 P 所占 TP 的质量分数从上游到下游并未有明显的变化趋势,所以,导致各形态 P 含量变化的主要原因是 TP 的变化.从其相关性分析结果可以看出,TP 含量与各形态 P 含量之间呈显著相关关系(图 4),所以 TP 含量的升高是导致各形态 P 含量升高的主要原因.下游的 TP 含量相对上游明显增加,可能与泗河下游河道接纳了大量生活污水和工业废水有关.

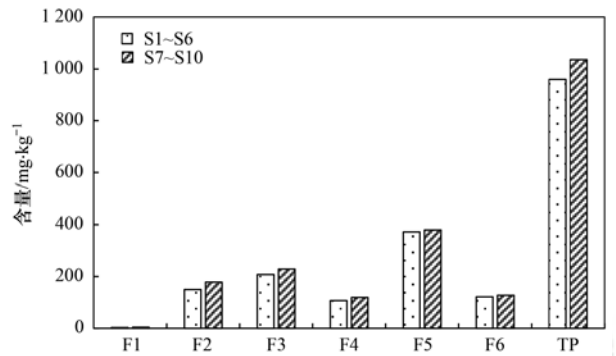
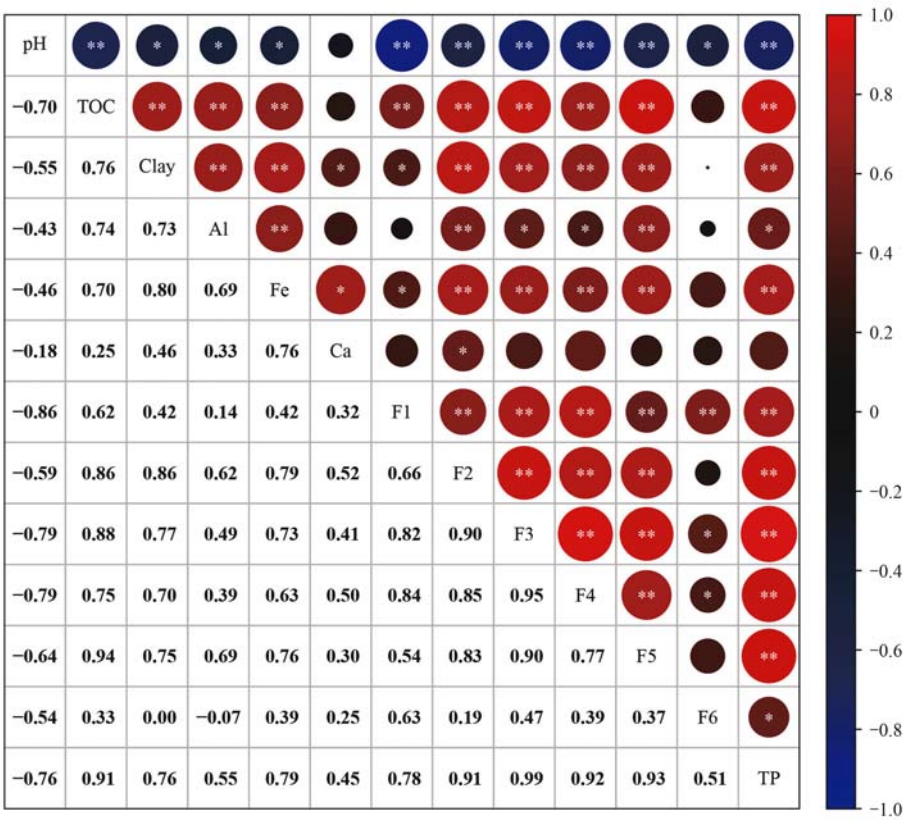


图 3 泗河上游(S1~S6 点)和下游(S7~S10 点)沉积物 TP 和各形态 P 含量对比

Fig. 3 Comparison of content of total phosphorus and various forms of phosphorus in the sediments of upstream (S1-S6) and downstream (S7-S10) of Sihe River



彩色圆大小表示相关性大小; * 表示显著相关, $P < 0.05$, ** 表示极显著相关, $P < 0.01$; Clay 表示黏土

图 4 表层沉积物 TP 及各形态 P 与沉积物基本理化性质之间的相关性

Fig. 4 Correlation of the total phosphorus and various forms of phosphorus in the surface sediment with basic physical and chemical properties of sediment

2.3 沉积物剖面 P 的含量和形态

2.3.1 S1 沉积物剖面

S1 剖面 $\omega(\text{TP})$ 范围为 $323 \sim 445 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 5), 其中, $6 \sim 8 \text{ cm}$ 深度处 $\omega(\text{TP})$ 最低, 为 $323 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $2 \sim 4 \text{ cm}$ 深度 $\omega(\text{TP})$ 最高, 为 $445 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 随着剖面深度其 TP 呈现波动性变化, 从 $22 \sim 25 \text{ cm}$ 深处到 $6 \sim 8 \text{ cm}$ 深处, TP 总体上呈降低的趋势; 而从 $6 \sim 8 \text{ cm}$ 深处到表层, TP 含量总体上呈升高的趋势.

该沉积物剖面采自泗河上游, 采样点沉积物剖面受到外界干扰较小, 基本反映了当地 TP 含量的历史变化过程. 从该沉积物剖面 TP 含量随深度的变化可以看出, 20 世纪 90 年代, 本地区 TP 污染较重, 由于该采样点所在位置周边主要是农田, 并没有工业污染直接排放的影响; 近年来, 该区域农田施用大量农药化肥, 农田面源污染排放负荷显著增加, 所以, 导致了沉积物中较高的 TP 含量 [图 5(a)].

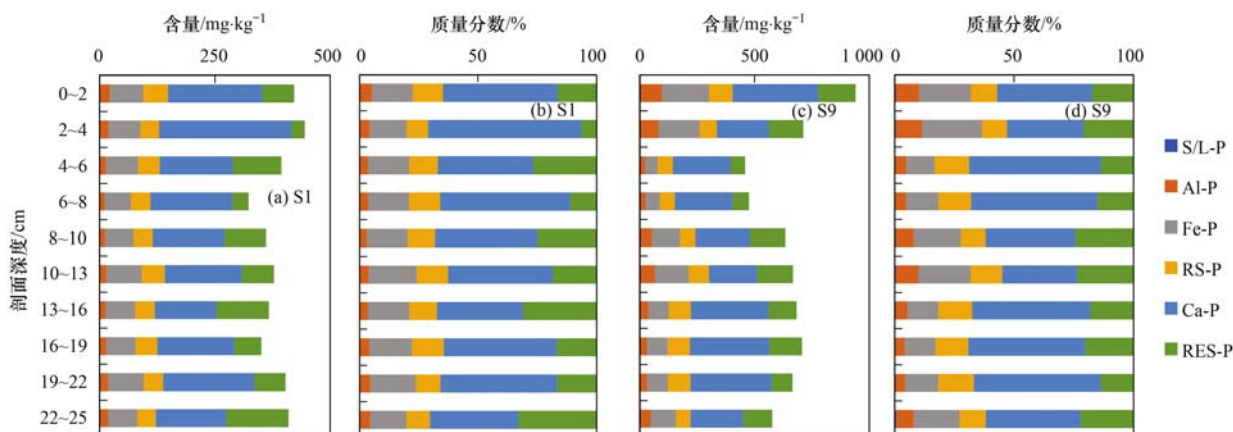


图 5 沉积物剖面中各形态 P 含量及其占 TP 的质量分数

Fig. 5 Contents of various forms of phosphorus and their percentage out of the total phosphorus in the sediment profiles

S1 点沉积物剖面各形态 P 的含量及其变化情况如下: $\omega(\text{S/L-P})$ 范围为 $0.52 \sim 1.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $0.97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 TP 质量分数的平均值为 0.25% , 是各种形态中含量最低的, 其中, $4 \sim 6 \text{ cm}$ 深度 S/L-P 含量最低, $22 \sim 25 \text{ cm}$ 深度 S/L-P 含量最高; 从 4 cm 以下深度, $\omega(\text{S/L-P})$ 呈逐渐升高的趋势, 从 $0.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 升高到 $1.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其占 TP 的质量分数从 0.13% 升高至 0.39% ; $\omega(\text{Al-P})$ 范围为 $10.91 \sim 21.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 TP 的质量分数为 $3.03\% \sim 5.10\%$, 平均值为 3.82% ; 在整个采样深度, 除了 $0 \sim 2 \text{ cm}$ 和 $6 \sim 10 \text{ cm}$ 沉积物样品中 Al-P 含量有较明显变化外, 其它深度 Al-P 含量并没有明显变化; $\omega(\text{Fe-P})$ 范围为 $56.52 \sim 77.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 TP 的质量分数为 $15.39\% \sim 20.27\%$, 平均值为 17.55% , 显著高于 S/L-P 和 Al-P 含量; 其中, $6 \sim 8 \text{ cm}$ 深度 Fe-P 含量最低, $19 \sim 22 \text{ cm}$ 深度 Fe-P 含量最高. 而且, 随着深度的增加, Fe-P 含量并没有呈明显的变化, 基本都在 $60 \sim 80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的范围; $\omega(\text{RS-P})$ 范围为 $39.94 \sim 53.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 TP 的质量分数为 $8.98\% \sim 13.36\%$, 平均值为 11.68% , 高于 S/L-P 和 Al-P 含量; 其中 $2 \sim 4 \text{ cm}$ 深度 RS-P 含量最低, $4 \sim 6 \text{ cm}$ 深度 RS-P 含量最高. 随着深度的增加, $\omega(\text{RS-P})$ 基本稳定在 $40 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 并没有出现明显的变化; $\omega(\text{Ca-P})$ 范围为 $133.68 \sim 287.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中 $22 \sim 25 \text{ cm}$ 深度 Ca-P 含量最低, $2 \sim$

4 cm 深度 Ca-P 含量最高. 但整个采样深度所有沉积物样品 $\omega(\text{Ca-P})$ 均超过 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (除 $13 \sim 16 \text{ cm}$ 深处外), 占 TP 的平均值为 46.59% , 是 6 种 P 的形态中含量最高的; $\omega(\text{RES-P})$ 范围为 $28.77 \sim 135.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中 $6 \sim 8 \text{ cm}$ 深度 RES-P 含量最低, $22 \sim 25 \text{ cm}$ 深度 RES-P 含量最高. 在整个采样深度, RES-P 含量呈明显波动性.

总体上, S1 点沉积物剖面, 在深度 $2 \sim 4 \text{ cm}$ 处 TP 含量最高, 在各深度各形态 P 中 Ca-P 含量最高, 占 TP 的质量分数都超过 40% , 其次为 RES-P 和 Fe-P, 其占 TP 质量分数的平均值分别为 20.11% 和 17.55% ; 含量最低的为 S/L-P, 占 TP 的质量分数均低于 0.40% . 随着深度的增加, 除 RES-P 之外, 其余各形态 P 占 TP 的质量分数未出现明显变化.

2.3.2 S9 点沉积物剖面

S9 剖面 $\omega(\text{TP})$ 范围为 $458 \sim 941 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [图 5 (c)], 随着深度的增加, 其含量呈明显波动性变化趋势, 可以看出该处沉积物受到外界因素的剧烈影响; 其中, $0 \sim 2 \text{ cm}$ 深处 $\omega(\text{TP})$ 最高, 为 $941 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $4 \sim 6 \text{ cm}$ 深度 $\omega(\text{TP})$ 最低, 为 $445 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 在 $0 \sim 6 \text{ cm}$ 深度, 随着深度的减小, TP 含量出现较大幅度增加, 说明该处沉积物近年来受到严重的含 P 废水的污染, 由于该处沉积物位于泗河注入南四湖的入湖口处, 上游所有来水都经此处注入南四湖, 此结果也表明, 近年来泗河上游来水中 P

含量的升高。

S9 点柱状沉积物各形态 P 的平均值为: $\text{Ca-P} > \text{RES-P} > \text{Fe-P} > \text{RS-P} > \text{Al-P} > \text{S/L-P}$ [图 5(c)], 该柱状沉积物中各形态 P 的垂直分布比较复杂, 变化特征均呈明显波动性变化; $\omega(\text{S/L-P})$ 最低, 仅为 $1.17 \sim 3.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 TP 的质量分数范围为 $0.26\% \sim 0.52\%$, 其平均值为 0.38% , 垂直分布无明显规律性; $\omega(\text{Al-P})$ 范围为 $21.21 \sim 92.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 TP 的质量分数范围为 $3.91\% \sim 11.04\%$, 其平均值为 6.76% , $0 \sim 4 \text{ cm}$ 的 Al-P 含量最高, 在整个深度中, 其含量并未出现明显规律性变化; $\omega(\text{Fe-P})$ 范围为 $54.59 \sim 205.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占 TP 的质量分数范围为 $11.92\% \sim 25.03\%$, 其平均值为 17.27% , 低于南京玄武湖和莫愁湖 $\omega(\text{Fe-P})$, 其范围为 $30 \sim 50\%$ [37], 虽然其含量明显高于 Al-P 含量, 但其在整个深度的变化趋势跟 Al-P 相似, 在 $0 \sim 4 \text{ cm}$ 处也出现最高的含量; $\omega(\text{RS-P})$ 的范围为 $63.14 \sim 102.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其所占 TP 的质量分数范围为 $10.31\% \sim 14.73\%$, 其平均值为 12.66% , 在整个深度中, 其占 TP 的质量分数变化不大; $\omega(\text{Ca-P})$ 范围在 $210.52 \sim 375.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 占 TP 的质量分数范围为 $31.52\% \sim 55.28\%$, 其平均值为 44.08% , 是各形态 P 中含量最高的, 在整个深度中, 其占 TP 的质量分数呈波动性变化; $\omega(\text{RES-P})$ 范围为 $62.28 \sim 162.48$

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其占 TP 的质量分数范围为 $13.59\% \sim 24.27\%$, 其平均值为 18.85% , 在 P 的 6 种形态中, 其含量也是较高的; 而且 RS-P、Ca-P 和 RES-P 这 3 种形态 P 占 TP 的百分比在 $0 \sim 4 \text{ cm}$ 深处都相对较低, 这与 S/L-P、Al-P 和 Fe-P 表现出明显不同。

总体而言, S9 点沉积物剖面, 在深度 $0 \sim 2 \text{ cm}$ 深度 TP 的含量最高, Ca-P 含量占绝对优势, 占 TP 的质量分数都高于 30% , 其次为 Fe-P 和 RES-P, 其占 TP 的质量分数平均值分别为 18.85% 和 17.27% ; 含量最低的是 S/L-P, 占 TP 的质量分数平均值低于 0.50% , 各形态 P 的含量随深度的增加呈明显波动性变化。

2.3.3 S1 点与 S9 点两沉积物剖面 TP 与各形态 P 含量差异分析

S1 点和 S9 点两沉积物剖面中 TP 和各形态 P 的含量与空间变化有明显差异(图 6), S9 点沉积物样品的值明显高于 S1 点, 这与 S9 点受到更严重环境污染有关; 两沉积物剖面中含量最高的 P 形态都是 Ca-P, 其次是 Fe-P 和 RES-P, 含量最低的 P 形态是 S/L-P; 在两沉积物剖面 $0 \sim 4 \text{ cm}$ 处 TP 含量达到最高值, 在 8 cm 以上, TP、Al-P 和 Fe-P 含量都呈明显升高趋势, 说明近年来泗河水体 P 污染呈加重趋势。两沉积物剖面 TP 及各形态 P 含量及其空间变化在一定程度上反映了人类活动对泗河水体 P 污

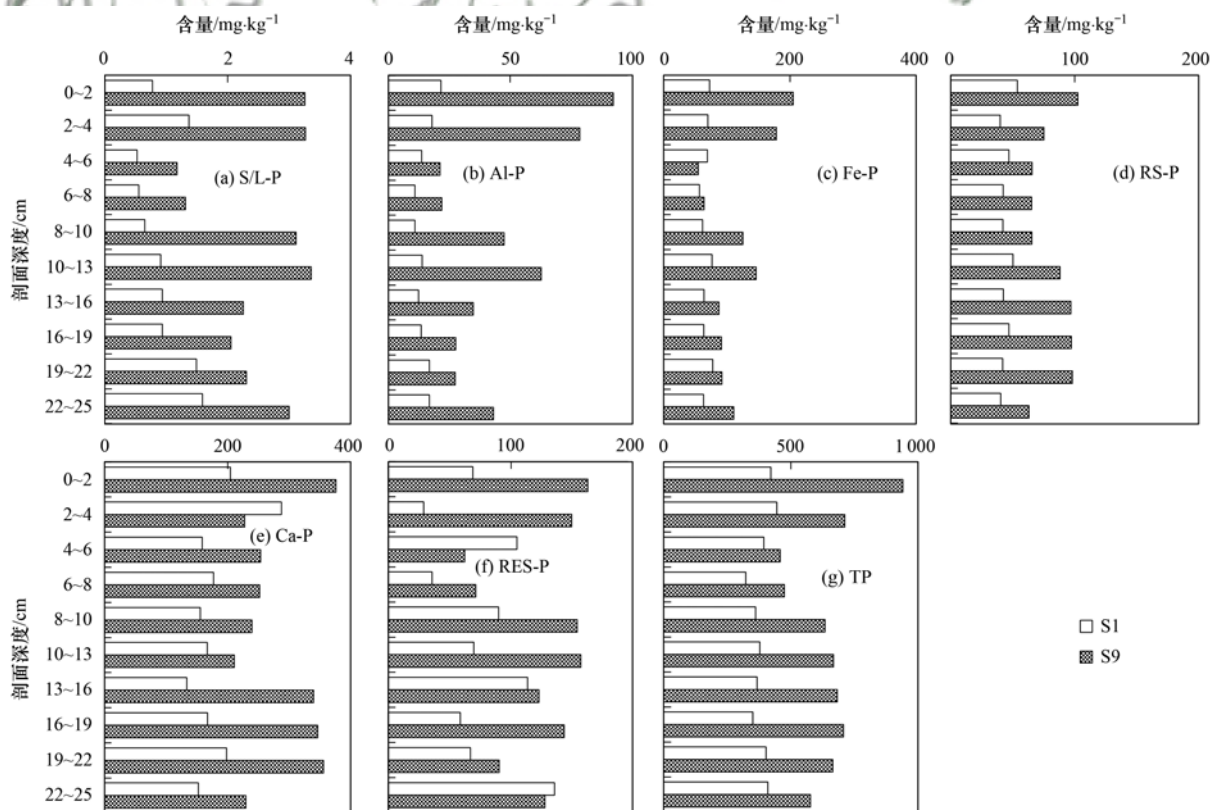


图 6 沉积物剖面(S1 点和 S9 点)各形态 P 含量及 TP 的含量差异

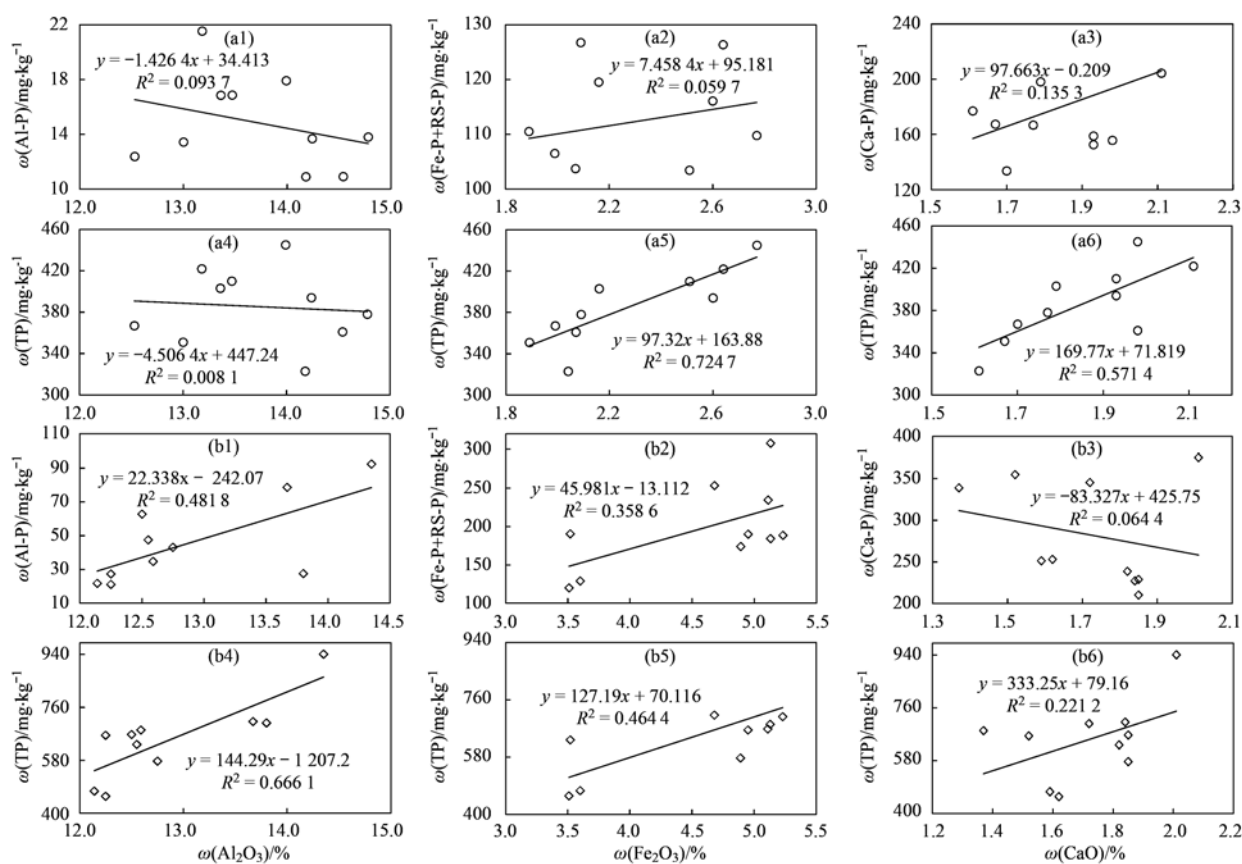
Fig. 6 Content differences of various forms of phosphorus and total phosphorus between the sediment profile S1 and S9

染的影响及其程度。

2.4 P 形态与 Al、Fe 和 Ca 的关系

分析沉积物中各种 P 形态之间的关系,有利于认识 P 形态的分布特征,从而可以更好地服务于河流治理及管理。沉积物的矿物组成是影响沉积物 P 的化学形态分布的决定因素。对泗河水体表层沉积物各 P 的形态进行 Pearson 相关性分析得出,TOC 与 Al-P、Fe-P、Ca-P 和 TP 呈极显著相关性 ($P < 0.01$,图 4),此结果说明该区域沉积物中 TOC 与 P 的同源性及其对 P 生物地球化学过程有重要影响。表层沉积物中 Fe 与 Fe-P、Al 与 Al-P 和 TOC 与 RS-P 之间呈极显著相关性, Ca 与 Ca-P 之间呈显著相关性。

S1 点和 S9 点两沉积物剖面中 Fe-P、Al-P、Ca-P 和 TP 与 Fe、Al 和 Ca 之间的相关性分析结果表明:两柱状沉积物呈现不同的相关性,在 S1 剖面中,TP 与 Fe 和 Ca 具有显著相关性[图 7(a5)和 7(a6)],而与 Al 呈不相关性[图 7(a4)];对于各形态 P 中,只有 Ca-P 与 Ca 呈弱相关关系,Fe-P 与 Fe 和 Al-P 与 Al 都呈不相关性;此结果表明在该沉积物样品中其它环境因素对 P 的各形态有重要影响。在 S9 点沉积物样品中,TP 与 Fe、Al 和 Fe 结合态 P (Fe-P + RS-P) 呈较好相关关系[图 7(b2)、7(b5)和 7(b6)],Al-P 和 Ca-P 分别与沉积物 Fe、Al 和 Ca 之间相关性也较好,而只有 TP 与 Ca 无相关性;说明沉积物中 P 与 Fe、Al 和 Ca 具有较好的同源性。



(a1) ~ (a6) 为 S1 剖面, (b1) ~ (b6) 为 S9 剖面

图 7 沉积物剖面中 P 的形态及 TP 与沉积物 Fe₂O₃、Al₂O₃ 和 CaO 之间的关系

Fig. 7 Correlation analysis of the total phosphorus and various forms of phosphorus in the sediments profiles with the contents of Fe₂O₃, Al₂O₃, and CaO of sediment

有研究显示:在河湖沉积物中 Fe 与 Fe-P 呈显著相关性^[38~40], Ca-P 与 Ca、Fe-P 与 Fe 呈显著相关性可能是由于沉积物中的磷酸盐与碳酸盐和铁离子的吸附、沉淀作用所致; Al-P 与 Al 呈显著相关性说明沉积物中铝硅酸盐矿物与 P 的结合性较好。泗河水系表层沉积物 TP 与 Fe、Al 和 TOC 呈正相关性,而与 Ca 呈弱相关关系(图 4);沉积物 TP 与 Fe 的相关性和 Fe-P 与 Fe 的相关性基本一致,此结果

表明沉积物 Fe 和 Al 的氧化物不仅能结合 P,而且能预测 TP 的含量。有研究表明:当淡水沉积物中 Fe 与 TP 量比低于 8.5 时,沉积物具有释放 P 的风险;而当量比高于 8.5 时,该沉积物能够积累 P^[38]。泗河水系表层沉积物中 Fe 与 TP 的量比为 10.31 ~ 29.66, S1 点和 S9 点柱状沉积物中 Fe 与 TP 的量比分别为 37.52 ~ 46.19 和 38.16 ~ 59.32;因此,此结果表明泗河水系沉积物具有进一步积累 P 的潜力,

在后续的水环境管理中应注意控制含 P 废污水的排放。

2.5 泗河水系沉积物中生物有效态磷

泗河流域是我国重要的工业基地,机械制造、煤炭和化工等重工业发达,近年来随着城市化程度的提高和社会经济的快速发展,工农业废水和生活污水的排放量激增,使南四湖流域水体中氮 P 营养盐含量显著增加,水质污染加剧。然而,沉积物作为污染物的“源”和“汇”,对沉积物中 P 的污染及释放风险进行系统评价可以为该地区水环境管理和保护起到重要作用。

沉积物中不同存在形态的 P 其生物可利用的程度明显不同。在预测水体环境沉积物中 P 的生态环境风险时,生物可利用磷(BAP)具有重要的指示意义^[41]; BAP 可通过生物与化学作用转化为溶解态的活性 P 进入水体,从而影响磷酸盐在水土界面的迁移和释放;因此,一般用 BAP 含量来表示沉积物中潜在的可供生物利用活性 P 的含量^[42]。沉积物中不同存在形态的 P 其生物可利用程度具有明显差异,如 F1 很容易被生物利用,而 F2 和 F3 其生物可利用性稍差,在一定环境条件下才能进入水体,是潜在的活性 P^[43]。有研究把 F1、F2 和 F3 三者之和定义为 BAP^[44, 45],本研究结果表明泗河水系表层沉积物 $\omega(\text{BAP})$ 为 127.15 ~ 599.39 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占 TP 的质量分数为 30% ~ 50%; S1 点和 S9 点两沉积物剖面中 $\omega(\text{BAP})$ 分别为 93.30 ~ 127.15 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 116.32 ~ 362.36 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占 TP 的质量分数分别为 25% ~ 32% 和 25% ~ 43%。

3 结论

(1)泗河水系表层沉积物 $\omega(\text{TP})$ 为 421.84 ~ 1188.65 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,上游沉积物含量明显低于下游,说明工业废水和生活污水的排放对该水系下游沉积物 TP 污染有重要影响;两沉积物剖面 $\omega(\text{TP})$ 分别为 323.00 ~ 445.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 458.00 ~ 941.12 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,上层沉积物 TP 含量明显高于下层,说明近年来泗河水系 P 污染有加重趋势。

(2)泗河水系表层和柱状沉积物各形态 P 中 F5 含量占绝对优势,含量最低的为 F1,占 TP 的质量分数都高于 30%; F3 和 F6 在所有沉积物样品中含量也较高,占 TP 的平均质量分数都高于 10%。

(3)表层沉积物 F2、F3 和 F5 分别与沉积物 Fe、Al 和 Ca 呈显著正相关,TP 与 Fe、Al 和 Ca 也呈显著正相关;但上下游不同沉积物剖面,TP 与 Fe、Al 和 Ca 及 F2、F3 和 F5 与沉积物 Fe、Al 和 Ca 呈不同的相关性。

(4)Fe 与 TP 量比的计算结果表明,泗河水系表层和柱状沉积物具有进一步积累 P 的能力;所有沉积物中 $\omega(\text{BAP})$ 为 93.30 ~ 599.39 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占 TP 的质量分数为 25% ~ 50%。

参考文献:

- [1] 王艳平,徐伟伟,韩超,等.巢湖沉积物氮磷分布及污染评价[J].环境科学,2021,42(2):699-711.
Wang Y P, Xu W W, Han C, et al. Distribution of nitrogen and phosphorus in Lake Chaohu sediments and pollution evaluation [J]. Environmental Science, 2021, 42(2): 699-711.
- [2] Wang Y D, Ouyang W, Lin C Y, et al. Higher fine particle fraction in sediment increased phosphorus flux to estuary in restored Yellow River basin [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(10): 6783-6790.
- [3] 李慧,雷沛,李珣,等.天津市北大港湿地沉积物氮磷分布特征及污染评价[J].环境科学学报,2021,41(10):4086-4096.
Li H, Lei P, Li X, et al. Distribution characteristics and pollution assessment of nitrogen and phosphorus in sediments from Beidagang Wetland in Tianjin City [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(10): 4086-4096.
- [4] Ma S N, Wang H J, Wang H Z, et al. Effects of nitrate on phosphorus release from lake sediments [J]. Water Research, 2021, 194, doi: 10.1016/j.watres.2021.116894.
- [5] 刘园园,褚克坚,陆滢,等.垂向环流作用下湖泊沉积物磷迁移行为[J].中国环境科学,2021,41(6):2843-2852.
Liu Y Y, Chu K J, Lu Y, et al. Migration of phosphorus in lake sediments under vertical circulations [J]. China Environmental Science, 2021, 41(6): 2843-2852.
- [6] Yuan H Z, Wang H X, Zhou Y W, et al. Water-level fluctuations regulate the availability and diffusion kinetics process of phosphorus at lake water-sediment interface [J]. Water Research, 2021, 200, doi: 10.1016/j.watres.2021.117258.
- [7] Yuan H Z, Cai Y W, Yang Z, et al. Phosphorus removal from sediments by *Potamogeton crispus*: new high-resolution *in-situ* evidence for rhizosphere assimilation and oxidization-induced retention [J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, 109: 181-192.
- [8] 朱雅,李一平,唐春燕,等.南方水库季节性热分层消亡对沉积物铁和磷迁移的影响——以南宁市天雹水库为例[J].湖泊科学,2021,33(4):1153-1162.
Zhu Y, Li Y P, Tang C Y, et al. Effects of the disappearance of seasonal thermal stratification on the mobilization of iron and phosphorus in reservoirs, southern China—A case of Tianbao Reservoir, Nanning City [J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(4): 1153-1162.
- [9] Stutter M, Richards S, Ibiyemi A, et al. Spatial representation of in-stream sediment phosphorus release combining channel network approaches and in-situ experiments [J]. Science of the Total Environment, 2021, 795, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148790.
- [10] Xing X L, Chen M S, Wu Y X, et al. The decomposition of macrozoobenthos induces large releases of phosphorus from sediments [J]. Environmental Pollution, 2021, 283, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117104.
- [11] 潘峰,郭占荣,蔡宇,等.厦门潮间带沉积物磷、铁和硫的时空分布及磷释放风险研究[J].海洋学报,2021,43(4):14-26.
Pan F, Guo Z R, Cai Y, et al. Spatio-temporal variation of

- phosphorus, iron and sulfur in intertidal sediments of Xiamen and associated release risk of phosphorus [J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, **43**(4): 14-26.
- [12] Campos M, Rilling J I, Acuña J J, *et al.* Spatiotemporal variations and relationships of phosphorus, phosphomonoesterases, and bacterial communities in sediments from two Chilean rivers [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **776**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145782.
- [13] Wang X J, Kong F L, Li Y, *et al.* Effect of simulated tidal cycle on DOM, nitrogen and phosphorus release from sediment in Dagu River-Jiaozhou Bay estuary [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **783**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147158.
- [14] Chen Q Y, Ni Z K, Wang S R, *et al.* Climate change and human activities reduced the burial efficiency of nitrogen and phosphorus in sediment from Dianchi Lake, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **274**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122839.
- [15] 潘成荣, 汪家权, 郑志侠, 等. 巢湖沉积物中氮与磷赋存形态研究 [J]. *生态与农村环境学报*, 2007, **23**(1): 43-47.
Pan C R, Wang J Q, Zheng Z X, *et al.* Forms of phosphorus and nitrogen existing in sediments in Chaohu Lake [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, **23**(1): 43-47.
- [16] 丁瑶, 欧阳莉莉, 石清, 等. 特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性: 以成都市为例 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 219-227.
Ding Y, Ouyang L L, Shi Q, *et al.* Distribution and bioavailability of phosphorus in surface sediments in megalopolis: a case study of Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 219-227.
- [17] Nguyen D N, Grybos M, Rabiet M, *et al.* Effect of extraction methods on mobilizable colloids and associated phosphorus from reservoir sediment [J]. *Chemosphere*, 2021, **284**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131321.
- [18] 肖洋, 李一彤, 张涛涛, 等. 上覆水磷浓度对沉积物孔隙水中磷垂向分布的影响 [J]. *水资源与水工程学报*, 2021, **32**(4): 24-28, 37.
Xiao Y, Li Y T, Zhang T T, *et al.* Effects of phosphorus concentration in overlying water on the vertical distribution of phosphorus in sediment pore water [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, **32**(4): 24-28, 37.
- [19] 周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 等. 基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 4781-4788.
Zhou Y T, Chen X H, Li L Q, *et al.* Identification of dredging depths based on sediment vertical distribution profiles of total nitrogen and total phosphorus and their adsorption-desorption equilibria [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4781-4788.
- [20] Mao C P, Li T N, Rao W B, *et al.* Chemical speciation of phosphorus in surface sediments from the Jiangsu Coast, East China: influences, provenances and bioavailabilities [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, **163**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111961.
- [21] 杨耿, 秦延文, 韩超南, 等. 岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2165-2173.
Yang G, Qin Y W, Han C N, *et al.* Distribution of phosphorus fractions in surface sediments of Minjiang mainstreams [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2165-2173.
- [22] 万杰, 袁旭音, 叶宏萌, 等. 洪泽湖不同入湖河流沉积物磷形态特征及生物有效性 [J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(10): 4568-4579.
- Wan J, Yuan X Y, Ye H M, *et al.* Characteristics and bioavailability of different forms of phosphorus in sediments of rivers flowing into Hongze Lake [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(10): 4568-4579.
- [23] 刘永九, 黄素珍, 张璐, 等. 洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3198-3205.
Liu Y J, Huang S Z, Zhang L, *et al.* Spatial distribution characteristics of phosphorus fractions and release risk in sediments of Honghu international importance wetland [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3198-3205.
- [24] 陈月, 林琪, 刘恩峰, 等. 泸沽湖沉积物中磷累积的时空变化及其环境意义 [J]. *第四纪研究*, 2021, **41**(4): 1206-1215.
Chen Y, Lin Q, Liu E F, *et al.* Spatio-temporal variations of sedimentary phosphorus in Lugu Lake and its environmental implications [J]. *Quaternary Sciences*, 2021, **41**(4): 1206-1215.
- [25] 刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 等. 洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 734-742.
Liu S R, Zhao J D, Xiao S B, *et al.* Spatio-temporal variation of release flux of sediment nitrogen and phosphorus in high-risk period of algal bloom in Lake Erhai [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 734-742.
- [26] Wu P, Wang N R, Zhu L J, *et al.* Spatial-temporal distribution of sediment phosphorus with sediment transport in the Three Gorges Reservoir [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **769**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.144986.
- [27] 张志永, 万成炎, 胡红青, 等. 三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4161-4168.
Zhang Z Y, Wan C Y, Hu H Q, *et al.* Phosphorus forms and distribution characteristics in the sediment and soil of the water-level-fluctuating zone in the main stream of the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4161-4168.
- [28] Li R, Gao L, Wu Q R, *et al.* Release characteristics and mechanisms of sediment phosphorus in contaminated and uncontaminated rivers: a case study in South China [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **268**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115749.
- [29] Yang Y, Gao B, Hao H, *et al.* Nitrogen and phosphorus in sediments in China: a national-scale assessment and review [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **576**: 840-849.
- [30] 孔令昊, 杨丽原. 泗河表层沉积物重金属污染特征及潜在生态危害评价 [J]. *中国农村水利水电*, 2013, (3): 41-44.
Kong L H, Yang L Y. Pollution characteristic and potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from the Sihe River [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2013, (3): 41-44.
- [31] 武周虎, 慕金波, 谢刚, 等. 南四湖及入出湖河流水环境质量变化趋势分析 [J]. *环境科学研究*, 2010, **23**(9): 1167-1173.
Wu Z H, Mu J B, Xie G, *et al.* Analysis of water environmental quality variation trends in Nansi Lake and its joined rivers [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, **23**(9): 1167-1173.
- [32] Zhang H. Phosphorus fractionation [A]. In: Pierzynski G M (Ed.). *Methods of Phosphorus Analysis for Soils, Sediments, Residuals, and Waters* [M]. Raleigh: North Carolina State

- University, 2000. 50-59.
- [33] 拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 等. 包头南海湿地磷形态及污染源定量识别[J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4275-4286.
Bai Y H, Qian C G, Yuan S J, *et al.* Phosphorus fractions and quantitative identification of pollution sources in Nanhai Wetland, Baotou[J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4275-4286.
- [34] 杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 等. 三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 688-698.
Yang F, Wang L J, Ji D B, *et al.* Characteristics of phosphorus speciation and genesis in typical tributaries of the Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 688-698.
- [35] 王世亮, 王志刚, 王萍, 等. 大辽河水系沉积物剖面磷的形态和分布特征[J]. 环境科学, 2009, **30**(12): 3494-3501.
Wang S L, Wang Z G, Wang P, *et al.* Chemical forms and distribution of phosphorus in the sediment profiles of the Daliaohe River systems[J]. Environmental Science, 2009, **30**(12): 3494-3501.
- [36] 王卓, 李思敏, 张文强, 等. 白洋淀沟壕系统水陆交错区生物磷形态特征研究[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(5): 1960-1969.
Wang Z, Li S M, Zhang W Q, *et al.* Morphological characteristics of biogenic phosphorus in aquatic-terrestrial ecotone of Baiyangdian[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(5): 1960-1969.
- [37] 王超, 邹丽敏, 王沛芳, 等. 典型城市浅水湖泊沉积物中磷与铁的形态分布及相关关系[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3400-3404.
Wang C, Zou L M, Wang P F, *et al.* Distribution and correlation of P and Fe fractions in sediments of typical urban shallow lakes[J]. Environmental Science, 2008, **29**(12): 3400-3404.
- [38] Jensen H S, Kristensen P, Jeppesen E, *et al.* Iron: phosphorus ratio in surface sediment as an indicator of phosphate release from aerobic sediments in shallow lakes[J]. Hydrobiologia, 1992, **235-236**(1): 731-743.
- [39] 聂丽娟, 田文龙, 管锡东, 等. 武汉市湖泊表层沉积物磷形态组成特征[J]. 生态与农村环境学报, 2020, **36**(12): 1540-1548.
Nie L J, Tian W L, Guan X D, *et al.* The characteristics of the composition of various phosphorus forms in lake surface sediments in Wuhan City[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, **36**(12): 1540-1548.
- [40] Andrieux-Loyer F, Aminot A. Phosphorus forms related to sediment grain size and geochemical characteristics in French coastal areas[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001, **52**(5): 617-629.
- [41] 宋金明. 黄河口邻近海域沉积物中可转化的磷[J]. 海洋科学, 2000, **24**(7): 42-45.
Song J M. Transferable phosphorus in sediments of the Huanghe River estuary adjacent waters[J]. Marine Sciences, 2000, **24**(7): 42-45.
- [42] Reynolds C S, Davies P S. Sources and bioavailability of phosphorus fractions in freshwaters: a British perspective[J]. Biological Reviews, 2001, **76**(1): 27-64.
- [43] 郑培儒, 李春华, 叶春, 等. 镜泊湖沉积物各形态磷分布特征及释放贡献[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(2): 883-890.
Zheng P R, Li C H, Ye C, *et al.* Distribution characteristics and release contribution of different phosphorus forms in sediments of Jingpo Lake[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(2): 883-890.
- [44] 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, **24**(3): 381-388.
Zhu G W, Qin B Q, Gao G, *et al.* Fractionation of phosphorus in sediments and its relation with soluble phosphorus contents in shallow lakes located in the middle and lower reaches of Changjiang River, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, **24**(3): 381-388.
- [45] 刘晓端, 徐清, 刘浏, 等. 密云水库沉积物-水界面磷的地球化学作用[J]. 岩矿测试, 2004, **23**(4): 246-250.
Liu X D, Xu Q, Liu L, *et al.* The Study on phosphorus geochemical effects of sediment-water interface in Miyun Reservoir[J]. Rock and Mineral Analysis, 2004, **23**(4): 246-250.

CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model	PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method	WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} in Xiamen Port	XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing	ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM _{2.5} Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter	WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan	WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area	LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019	ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain	GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatial-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data	WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze	CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors	YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period	Ji Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region	NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake	HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake	WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River	ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff	ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems	CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths	WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin	LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water	PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing	MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment	REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺	MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors	LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater	YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge	GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years	CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst	HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt	ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area	SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area	LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China	WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province	XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility	ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan	LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems	SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas	MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas	XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils	WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil	XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)