

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

肆秩芳华担使命 踔厉扬帆向未来  
——庆祝厦门大学环境学科创立40周年



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年11月

第43卷 第11期  
Vol.43 No.11

目次

厦门大学环境学科创立 40 周年专栏

|                                             |                                              |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 新污染物共排放对生态环境监测和管理的挑战 .....                  | 王佩, 黄欣怡, 曹致纬, 吴朝阳, 吕永龙 (4801)                |
| 河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险 .....                | 王新红, 于晓璇, 王思权, 殷笑晗, 钱韦旭, 林晓萍, 吴越, 刘畅 (4810)  |
| 海水痕量营养盐和金属的分子光谱分析方法研究进展 .....               | 袁东星, 黄勇明, 王婷 (4822)                          |
| 环境水体中硫化物的分析方法: 从实验室分析到原位监测 .....            | 李鹏, 林坤德, 袁东星 (4835)                          |
| 环境水体中无机砷现场分析方法研究进展 .....                    | 薄光永, 陈钊英, 弓振斌, 马剑 (4845)                     |
| 海洋痕量元素采样技术和分析方法的发展及展望: 厦门大学痕量元素平台建设进展 ..... | 黄勇明, 周宽波, 陈耀瑾, 张楠, 杨俊波, 戴民汉, 曹知勉, 蔡毅华 (4858) |

|                                        |                                          |
|----------------------------------------|------------------------------------------|
| 聚乙烯微塑料的微生物降解研究进展 .....                 | 骆苑蓉, 钱义谦, 齐雅楠 (4869)                     |
| 水稻土中氮素对微生物固氮的扰动及效应机制 .....             | 王锋, 张静, 周少余, 王鸿辉, 李建, 赵聪媛, 黄鹏, 陈铮 (4876) |
| 中国海洋生态毒理学研究中的毒性测试生物 .....              | 史天一, 洪海征, 王明华, 谭巧国, 史大林 (4888)           |
| 中国油气系统甲烷逸散排放估算 .....                   | 陈春赐, 吕永龙, 贺桂珍 (4905)                     |
| 2015 ~ 2020 年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征 .....   | 李香, 吴水平, 姜炳祺, 刘怡靖 (4914)                 |
| 九龙江口微塑料与抗生素抗性基因污染分布特征 .....            | 程宏, 陈荣 (4924)                            |
| 厦门湾沙滩沉积物微塑料污染特征 .....                  | 姚蕊, 刘花台, 李永玉, 刘潇雅, 吴海波, 王新红 (4931)       |
| 九龙江口-厦门湾海域中溶解态痕量金属的时空分布特征与影响机制 .....   | 戚柳倩, 岳新利, 钟灏文, 王棋, 王德利, 陈能汪 (4939)       |
| 福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制 .....           | 杨艾琳, 杨芳, 李少斌, 余其彪, 陈能汪 (4950)            |
| 厦门西溪河口沉积物活性磷的分布特征及迁移转化机制 .....         | 潘峰, 蔡宇, 郭占荣, 王新红 (4961)                  |
| 改性生物炭固定床对模拟湖水体中 $Mn^{2+}$ 的吸附 .....    | 赵洁, 叶志隆, 王佳妮, 蔡冠竟 (4971)                 |
| 基于表面增强拉曼光谱技术的饮用水中痕量恩诺沙星和环丙沙星快速检测 ..... | 徐婧, 郑红, 卢江龙, 刘国坤 (4982)                  |
| 紫外驱动高级氧化法降解水体中的磷酸三苯酯 .....             | 徐子文, 印红玲, 熊远明, 宋娇娇, 譙杨 (4992)            |

研究报告

|                                                              |                                                 |
|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 2019 年秋季海南省 4 次臭氧污染过程特征及潜在源区分析 .....                         | 符传博, 陈红, 丹利, 徐文帅 (5000)                         |
| 伊犁河谷夏季 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 中水溶性无机离子浓度特征和形成机制 .....        | 陈巧, 谷超, 徐涛, 周春华, 张国涛, 赵雪艳, 吴丽萍, 李新琪, 杨文 (5009)  |
| 城区与郊区 $PM_{2.5}$ 污染及传输特征差异性 .....                            | 齐鹏, 周颖, 程水源, 白伟超 (5018)                         |
| 南京北郊 BTESX 特征及健康风险评估 .....                                   | 冯悦政, 安俊琳, 张玉欣, 王俊秀 (5030)                       |
| 我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估 .....                                  | 孙晓楠, 陈浩, 贾其隆, 朱奔, 马长文, 叶建锋 (5040)               |
| 东江流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析 .....                                  | 陈优良, 邹文敏, 刘星根, 曾金凤, 李丹, 郑汉奕 (5053)              |
| 长江与黄河源丰水期地表水中汞的分布特征、赋存形态及来源解析 .....                          | 刘楠涛, 吴飞, 袁巍, 王训, 王定勇 (5064)                     |
| 青藏高原湖泊水环境特征及水质评价 .....                                       | 刘智琦, 潘保柱, 韩谔, 李刚, 王韬轶 (5073)                    |
| 基于水化学与硫同位素的卡林型金矿区岩溶水文地球化学特征及控制因素 .....                       | 查学芳, 吴攀, 李学先, 陈世万, 黄家琰, 李清光, 陈思睿 (5084)         |
| 丹江口水库真核浮游植物群落分布特征及其与环境因子的关系 .....                            | 贺玉晓, 买思婕, 任玉芬, 李卫国, 赵同谦, 马寅男 (5096)             |
| 铜沸石对磷和重金属的吸附与底泥钝化性能 .....                                    | 王哲, 朱俊, 李雯, 闫德馨, 董雯, 刘玉玲, 李家科 (5106)            |
| 基于宏基因组与宏转录组分析石化废水生物处理系统脱氮功能菌群 .....                          | 章旭, 周佳佳, 周珉, 罗西子, 严新杰, 刘勇弟, 厉巍 (5115)           |
| 寒冷地区 IFAS + 磁混凝污水厂菌群结构和抗生素抗性基因分析 .....                       | 杜文琰, 姚俊芹, 马辉英, 胡渊鑫, 张春雷, 陈银广 (5123)             |
| 中国旱作农田一氧化氮排放及减排: Meta 分析 .....                               | 田政云, 吴雄伟, 吴媛媛, 魏佳楠, 白鹤, 顾立新 (5131)              |
| 硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响: Meta 分析 .....              | 刘发波, 马笑, 张芬, 梁涛, 黎亮武, 王军杰, 陈新平, 王孝忠 (5140)      |
| 不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤 $CH_4$ 和 $N_2O$ 排放的影响 .....              | 邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 伍延正, 李金秋, 张广林 (5149)              |
| 不同水分条件下土地利用方式对我国热带地区土壤硝化过程及 $NO$ 和 $N_2O$ 排放的影响 .....        | 唐瑞杰, 胡煜杰, 赵彩悦, 赵炎, 袁新生, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (5159)     |
| 基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征 .....                              | 刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 吴秋梅, 胡文友, 田康, 黄标 (5169)           |
| 基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析 .....              | 高浩然, 周勇, 刘甲康, 程晓明, 郭嵩, 江衍, 谭恒鑫 (5180)           |
| 基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析 .....                             | 张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 魏琪琪, 陈锋 (5192)                    |
| 老化作用对生物炭钝化白云鄂博矿区碱性土壤中 $Cd^{2+}$ 的影响 .....                    | 王哲, 程俊丽, 卞园, 郑春丽, 王维大, 姜庆宏 (5205)               |
| 磁性氧化铁/桑树杆生物炭的制备及其对砷污染土壤溶解性有机碳和砷形态的影响 .....                   | 芦琳, 颜利玲, 梁美娜, 成官文, 朱宗强, 朱义年, 王敦球 (5214)         |
| 牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响 .....                          | 赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 卢升高 (5224)                       |
| 磷、锌和镉交互作用对小白菜生长和锌镉累积的影响 .....                                | 帅祖华, 刘汉燧, 崔浩, 魏世强 (5234)                        |
| 重庆开州区农地土壤抗生素污染特征及潜在生态环境风险评估 .....                            | 方林发, 叶萃萃, 方标, 范晓霞, 高坤鹏, 李士洋, 陈新平, 肖然 (5244)     |
| 基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应 ..... | 侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 周国清, 尤号田, 韩小文 (5253)             |
| 黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征 .....                                     | 许小明, 张晓萍, 何亮, 郭晋伟, 薛帆, 邹亚东, 易海杰, 贺洁, 王浩嘉 (5263) |
| 土壤多功能性对微生物多样性降低的响应 .....                                     | 陈桂鲜, 吴传发, 葛体达, 陈剑平, 邓扬悟 (5274)                  |
| 氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性的影响 .....                               | 苏晓雪, 李希来, 李成一, 孙华方 (5286)                       |
| 碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比 .....                          | 李辉, 庞博, 朱法华, 孙雪丽, 徐静馨, 王圣 (5294)                |
| 中国能源消费碳排放的空间化与时空动态 .....                                     | 郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 颜斌斌, 杜海波 (5305)                   |
| 京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的 $CO_2$ 协同减排效益评估 .....               | 杨添祺, 王洪昌, 张辰, 朱金伟, 崔宇韬, 谭玉玲, 束轲 (5315)          |
| 我国塑料污染防治政策分析与建议 .....                                        | 李欢, 朱龙, 沈茜, 贺亚楠, 邓义祥, 安立会 (5326)                |

# 厦门西溪河口沉积物活性磷的分布特征及迁移转化机制

潘峰<sup>1,2</sup>, 蔡宇<sup>3</sup>, 郭占荣<sup>3\*</sup>, 王新红<sup>1,2</sup>

(1. 厦门大学环境与生态学院, 厦门 361102; 2. 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门 361102; 3. 厦门大学海洋与地球学院, 厦门 361102)

**摘要:** 为探索不同河口区域锰、铁和硫地球化学行为对活性磷分布的影响, 选择厦门西溪河口, 应用薄膜扩散梯度 (DGT) 采样技术, 对沉积物 DGT 有效态磷 (DGT-P)、锰、铁和硫进行原位和高分辨监测。结果表明, 在垂向剖面中, DGT-P 的分布与铁和硫的氧化还原转化以及沉积物活性磷背景值关系密切, 磷的钝化/活化主要受控于铁氧化物对磷的氧化吸附和还原溶解, 以及硫酸盐还原和硫化物积累引发的磷活化; 沿采样点分布, DGT-P 的浓度平均值差异大 ( $0.075 \sim 0.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 与盐度无关, 而是与氧化还原条件密切相关, 即氧化带越深磷浓度平均值越低; 模型模拟结果表明, 表层沉积物对孔隙水磷的再补给能力与 DGT-P 浓度及氧化还原条件相关, 即氧化环境不利于沉积物磷的解吸再补给, 而还原环境中与铁和硫地球化学的耦合有利于维持高活性磷浓度以及磷的持续释放。

**关键词:** 活性磷; 磷-铁-硫耦合; 河口沉积物; 氧化还原地球化学; 吸附/解吸动力学

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)11-4961-10 DOI: 10.13227/j.hjks.202206016

## Distribution, Migration, and Transformation Mechanism of Labile Phosphorus in Sediments of Xixi River Estuary, Xiamen

PAN Feng<sup>1,2</sup>, CAI Yu<sup>3</sup>, GUO Zhan-rong<sup>3\*</sup>, WANG Xin-hong<sup>1,2</sup>

(1. College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 2. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361102, China; 3. College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

**Abstract:** To explore the effect of manganese, iron, and sulfur geochemistry on the distribution of labile phosphorus in different estuarine areas, the diffusion gradient in thin-film (DGT) sampling technique was used for in-situ high-resolution monitoring of available phosphorus (DGT-P), manganese, iron, and sulfur in sediments from Xixi River estuary in Xiamen. The results showed that the distribution of DGT-P in the vertical profile was closely related to the redox transformation of iron and sulfur and the background value of active phosphorus in sediments. The passivation/activation of phosphorus was mainly controlled by the oxidative adsorption/reductive dissolution of phosphorus by iron oxides and the activation of phosphorus induced by sulfate reduction and sulfide accumulation. Along the sampling sites, the average concentration of DGT-P varied greatly ( $0.075 \sim 0.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), which was not related to salinity but closely related to redox conditions, that is, the deeper the oxidation zone, the lower the average concentration of DGT-P. The simulation results showed that the phosphorus resupply capacity from surface sediments to porewater was correlated with DGT-P concentration and redox conditions, that is, the oxidative environment was un conducive to the desorption and resupply of sediment phosphorus, whereas the coupling with iron and sulfur geochemistry in the reducing environment was conducive to the maintenance of high labile phosphorus concentration and the continuous release of phosphorus.

**Key words:** labile phosphorus; P-Fe-S coupling; estuarine sediments; redox geochemistry; kinetics of adsorption/desorption

磷作为一种重要的常量营养元素, 在很大程度上决定了海洋初级生产力, 但是过量的磷容易引发海水富营养化、赤潮和缺氧等环境问题<sup>[1,2]</sup>。近代, 随着工农业发展, 磷被大量排放到海洋中, 我国和许多沿海国家正面临着严峻的磷污染问题<sup>[3,4]</sup>。陆源输入尤其河流径流输入是近海磷的主要来源, 因此河口作为海-陆相互作用和物质循环的活跃地带, 在近海乃至全球海洋磷循环中扮演了重要角色。陆源输入的磷, 无论以何种形式经历了何种循环, 大部分都会沉降在沉积物中, 并同铁、锰、硫和碳等元素的地球化学相耦合, 经过一系列的活化、钝化、迁移和转化等过程, 最终或者埋藏在沉积物中, 或者重新释放到上覆水中<sup>[5~8]</sup>。沉积物内源磷的活化再释放已经引起学界的广泛关注, 被认为是维持上覆水高营养水平的重要原因<sup>[9,10]</sup>。

近年来, 对沉积物活性磷组分和孔隙水的研究

不断被重视。鉴于河口沉积物普遍的高时空异质性以及磷循环相关过程的氧化还原敏感性, 高分辨的原位采样技术如薄膜扩散梯度技术 (DGT) 和渗析技术 (peeper) 等逐渐被广泛应用到各类沉积物研究中<sup>[11~13]</sup>, 比如湖库和河流等陆地淡水环境<sup>[14~16]</sup>。而在河口和近海环境, 虽然磷相关研究偏少, 但近几年在国内迅速兴起, 从北到南如: Sun 等<sup>[17]</sup>在烟台鱼鸟河口的研究发现沉积物活性磷分布随深度增加并主要受控于铁还原; Ma 等<sup>[18,19]</sup>在东海和胶州湾的研究发现铁还原主导有机质矿化以及活性磷的分布; Hu 等<sup>[20]</sup>在闽江口的研究发现铁和硫循环共同影响活性磷分布; Pan 等<sup>[21]</sup>在厦门湾和九龙江口的

收稿日期: 2022-06-01; 修订日期: 2022-07-19

基金项目: 中国博士后科学基金项目 (2020M682085); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (42106038)

作者简介: 潘峰 (1990 ~), 男, 博士, 主要研究方向为沉积物磷地球化学, E-mail: fengpan@xmu.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: gzc@xmu.edu.cn

研究<sup>[22~27]</sup>发现不同研究区域磷、铁和硫之间复杂的耦合关系影响活性磷的不同分布格局; Gao 等<sup>[28]</sup>在珠江口的研究发现陆源磷输入和水文条件影响着活性磷的积累等. 但是, 目前对于沿盐度梯度从河到海的小型河口沉积物活性磷分布和迁移转化机制的研究和认识不足, 小型河口被认为存在更为严重的磷污染状况和复杂的磷循环模式<sup>[21]</sup>, 其对于陆源输入的响应也更为敏感. 此外, 将 DGT 同 DIFS (DGT induced fluxes in sediments) 模型结合, 可以很好地模拟目标元素在沉积物和孔隙水之间的吸附解吸动力学<sup>[29,30]</sup>. DIFS 模型在应用中一般以目标元素总溶解态浓度代表孔隙水浓度, 如多种重金属的研究<sup>[31~33]</sup>, 但以往对磷的研究均用溶解活性磷 (DRP) 代表孔隙水磷浓度, 而忽略了总溶解磷 (TDP)<sup>[24,34]</sup>, 这可能在一定程度上影响了对磷吸附解吸动力学的判断.

厦门西溪是同安区乃至厦门市的最大河流, 是区内主要的工农业和生活用水来源. 西溪是典型的亚热带山溪性小河, 具有流程短, 汛期水量大, 河口范围广等特点. 近年来虽然西溪流域在大力的环境整治下水质明显好转, 但河口区由于历史污染等原因, 沉积物环境问题依然较为突出. 长期以来, 针对西溪河口沉积物环境的研究十分匮乏, 尤其缺乏磷的研究. 本文应用原位、高分辨的 DGT 技术, 同步分析沉积物垂向剖面中的 DGT 有效态磷 ( $\text{DGT}^{3-}\text{-P}$ ) 以及锰 (DGT-Mn)、铁 (DGT-Fe) 和硫 (DGT-S), 辅以孔隙水 DRP 和 TDP, 并结合沉积物和上覆水基本理化特征, 来探究河口沉积物活性磷的时空分布特征及影响因素; 利用 DIFS 模型模拟分别以 DRP 和 TDP 为孔隙水浓度的磷吸附解吸动力学差异, 以期小型河口沉积物磷的环境地球化学研究提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

西溪是厦门市最大的河流, 全长 34 km, 流域面积 494 km<sup>2</sup>, 是同安区主要的工农业和生活用水来源, 注入同安湾入海 (图 1). 本区属于亚热带海洋性季风气候, 年均气温 21℃, 年均降水量超过 1 000 mm. 潮汐类型为正规半日潮, 平均潮差约为 4 m. 邻近的厦门湾海域 N/P 值普遍大于 Redfield 比值, 为典型的磷限制海域<sup>[35]</sup>. 6 个采样点中, X1 位于河流下游, 代表河流端; X1 和 X2 之间有一小坝, 构成河口的人为上边界, X2 ~ X5 位于典型的河口区, 盐度依次升高; X6 位于同安湾, 代表海岸带.

### 1.2 样品采集

DGT 和 peeper 的原理此前已被多次报道<sup>[11,12]</sup>,



图 1 研究区位置示意

Fig. 1 Map of the study area

故不再赘述. 本研究选择 ZrO-Chelex DGT 同步测定  $\text{DGT-P}(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 、 $\text{Mn}(\text{Mn}^{2+})$  和  $\text{Fe}(\text{Fe}^{2+})$ , 用 AgI DGT 测定  $\text{DGT-S}(\text{S}^{2-})$ , HR-Peeper 来采集并测定孔隙水 (表层 5 cm) DRP 和 TDP. 所有装置均保存在氮气和黑暗环境中.

采样于 2019 年夏季进行. 在采样第 1 d, 待低潮时将 HR-Peeper 垂直插入低潮线以下的沉积物中, 第 2 d 在同样的位置放置 DGT, 第 3 d 用 PVC 采样管将 HR-Peeper 和 DGT 装置连同沉积物一起取出, 记录 DGT 放置时间, 随后立即返回实验室. 采样期间使用多参数水质分析仪 (YSI) 监测上覆水盐度、温度、pH 和溶氧 (DO).

### 1.3 样品处理和分析

将清洁后的 HR-Peeper 平放于干净台面上, 用移液枪将孔隙水取出至离心管中. 孔隙水中的 DRP 使用磷钼蓝显色法测定<sup>[36]</sup>; TDP 利用改进的过硫酸钠水浴消解法将水体磷消解<sup>[37]</sup>, 并用磷钼蓝显色法测定, 二者之差可基本认为是 DOP. 上覆水 DRP 和 TDP 的测试同理.

AgI DGT 固定膜从装置上切割后, 洗净放置于扫描仪上, 设置分辨率为 600 dpi (0.042 3 mm × 0.042 3 mm), 利用 ImageJ 软件将扫描获得的颜色转换成灰度, 再利用事先建立的校正曲线<sup>[38]</sup>, 将得到的灰度转化成 DGT-S 的浓度. ZrO-Chelex DGT 固定膜从装置上切割后, 以垂向 5 mm 间距切割成条, 按照 Wang 等<sup>[39]</sup>的方法分别提取 DGT-Fe/Mn 和 DGT-P. DGT-P 用磷钼蓝显色法测定, DGT-Fe/Mn 用电感耦合等离子体质谱仪 ICP-MS 7700X (美国 Agilent) 测定.

将沉积物湿样用激光粒度仪 Mastersizer 3000 (英国 Malvern) 测试粒度组成; 其余样品冻干处理后, 总有机碳 (TOC) 和总硫 (TS) 使用元素分析仪 (德国 Elementar vario MACRO cube) 测定; 无定形

铁锰氧化物(ASC-Fe/Mn)及其结合的活性磷(ASC-P)用抗坏血酸提取<sup>[40]</sup>,提取液铁、锰和磷的测试方法同上.采用空白样、平行样和标准物质进行质量控制和质量保证.每隔10个样品测定标准物质,每个样品进行3次平行测试.

1.4 数据处理

利用已经建立好的灰度( $y$ )与积累量( $x$ )的校准曲线计算DGT-S在放置时间内的积累量( $x$ )<sup>[38]</sup> ( $M_s, \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ):

$$y = -171e^{-x/7.23} + 220 \tag{1}$$

DGT-P、DGT-Mn和DGT-Fe的积累量( $M, \mu\text{g}$ )以及最终的DGT有效态浓度( $c_{\text{DGT}}, \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )根据以下公式计算<sup>[41]</sup>:

$$M = c_e \times V/f \tag{2}$$

$$c_{\text{DGT}} = \frac{M \times \Delta g}{D \times A \times t} = \frac{M_s \times \Delta g}{D \times t} \tag{3}$$

式中, $c_e$ 为提取液中测定的元素浓度( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ); $V$ 为提取液体积(mL); $f$ 为提取效率<sup>[42]</sup>;  $A$ 为固定膜的有效面积( $\text{mm}^2$ );  $t$ 为放置时间(h);  $\Delta g$ 为扩散层厚度(0.8 mm);  $D$ 为待测溶质在扩散层中的扩散系数( $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )<sup>[39]</sup>.

使用DIFS模型模拟磷在沉积物和孔隙水之间的吸附/解吸动力学,该模型基于一对相互关联的抛物型偏微分方程,描述了沉积物和DGT系统中溶解和吸附/固相磷浓度的变化<sup>[29]</sup>.该模型主要的输入参数可通过溶解态浓度( $c_d$ )、DGT有效态浓度( $c_{\text{DGT}}$ )和活跃态固相组分浓度( $c_s$ )以及其他泥沙参数计算.其中再补给系数 $R$ 定义为 $c_{\text{DGT}}$ 与 $c_d$ 之比[式(4)], $R$ 值越大,说明再补给能力越强;分配系数 $K_d$ 为 $c_s$ 与 $c_d$ 之比[式(5)],其值越大,说明潜在

的参与再补给的固相磷含量越高.利用这些输入参数,DIFS模型可以模拟输出参数 $T_c$ 和 $R$ 值随放置时间的变化曲线.输出参数 $T_c$ 定义为被扰动系统达到平衡态63%所需的时间,数值越小,说明达到平衡越快;吸附速率常数 $k_1$ 和解吸速率常数 $k_{-1}$ 按[式(6)]和[式(7)]计算,数值越大,说明沉积物磷吸附/解吸所需时间越短.

$$R = c_{\text{DGT}}/c_d \tag{4}$$

$$K_d = c_s/c_d \tag{5}$$

$$T_c = \frac{1}{k_1 + k_{-1}} \tag{6}$$

$$k_1 = k_{-1} \times K_d \times P_c \tag{7}$$

2 结果与讨论

2.1 上覆水、沉积物和孔隙水理化特征

上覆水基本理化特征如表1所示,水温介于27.9~30.4℃;盐度在河流为0.06 PSU,河口介于0.43~23.6 PSU,海岸为33.9 PSU; pH呈弱碱性,介于7.88~8.35; DO介于3.47~6.16  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,无明显的水体缺氧;DRP和TDP浓度在不同研究区差异较大,如图2所示,上覆水中二者均在X4浓度最高,X2次之,河口区4个地点DRP浓度均明显高于《海水水质标准》(GB 3097-1997)最高的第四类(表1),而河流和海岸(X1和X6)最低,低于第四类水质标准.孔隙水DRP和TDP的分布与上覆水类似,不同的是X6相对较高.孔隙水浓度普遍远高于上覆水, $\rho$ (DRP)介于0.19~0.94  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , $\rho$ (TDP)介于0.26~4.12  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .此外孔隙水中DOP的质量分数(占TDP)在河口区较高,河流和海岸偏低.

表1 上覆水基本理化特征

Table 1 Basic physicochemical characteristics of the overlying water

| 采样点 | $T/^\circ\text{C}$ | 盐度/PSU | pH   | DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | $\rho(\text{DRP})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | $\rho(\text{TDP})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ | $R^{1)}$ |
|-----|--------------------|--------|------|-----------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------|
| X1  | 27.9               | 0.06   | 8.35 | 5.36                              | 0.024                                          | 0.086                                          | 0.5      |
| X2  | 30.7               | 0.43   | 8.28 | 5.38                              | 0.134                                          | 0.184                                          | 3.0      |
| X3  | 30.0               | 0.54   | 8.36 | 6.16                              | 0.063                                          | 0.103                                          | 1.4      |
| X4  | 30.4               | 6.73   | 7.93 | 3.47                              | 0.167                                          | 0.455                                          | 3.7      |
| X5  | 29.0               | 23.58  | 7.88 | 4.22                              | 0.060                                          | 0.078                                          | 1.3      |
| X6  | 28.3               | 33.87  | 8.04 | 4.20                              | 0.041                                          | 0.052                                          | 0.9      |

1)  $R$ 表示上覆水DRP与海水水质标准(GB 3097-1997)第四类水质活性磷酸盐浓度(0.045  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )的比值

表层沉积物主要理化特征如图3所示, $\omega(\text{TOC})$ 在X4最高(1.79%),X1~X3次之(1.33%~1.41%),X5和X6最低(0.70%~0.98%),除X4外基本呈现从陆到海降低的分布格局; $\omega(\text{TS})$ 也是在X4极高(0.68%),X1极低(0.11%).笔者在采样期间发现X4附近疑似有污水排放,水体和沉积物有明显的黑臭现象,偏高的

TOC和TS很可能与排污有关.粒度组成上主要以粉砂为主,只有X1为砂质粉砂和X6为粉砂质砂. $\omega(\text{ASC-P})$ 在X1和X6偏低(65~69  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),河口区较高(86~105  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); $\omega(\text{ASC-Fe})$ 与之类似,只是X6极低(0.86  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),其他研究区均在2  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上;ASC-Mn在X4最低,X5和X6最高.与邻近的厦门湾其他海岸带沉积物相比<sup>[21,22,24]</sup>,虽然

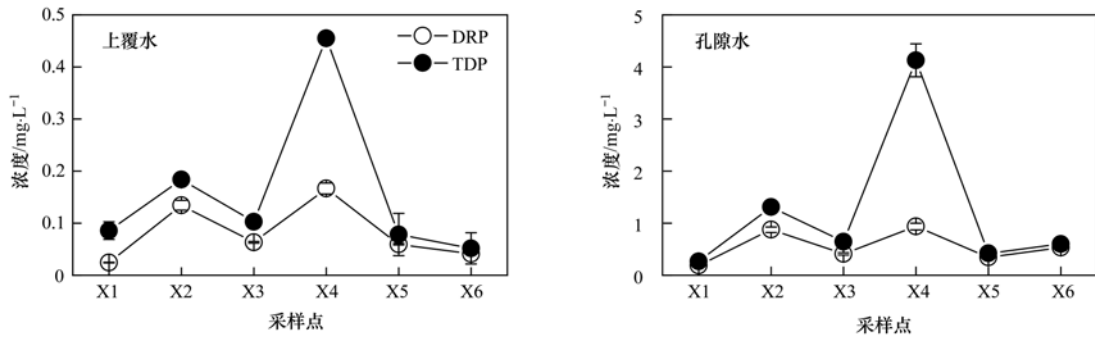


图2 上覆水和孔隙水中溶解活性磷(DRP)和总溶解磷(TDP)的分布

Fig. 2 Distributions of DRP and TDP in overlying water and porewater

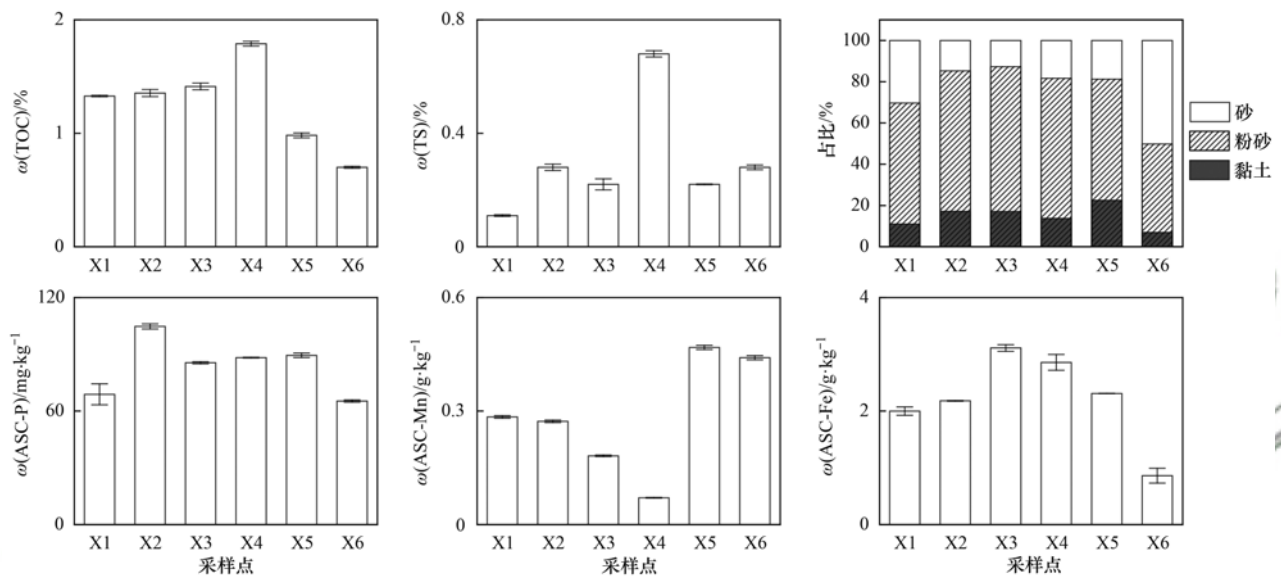


图3 沉积物主要理化特征

Fig. 3 Main physicochemical characteristics of sediments

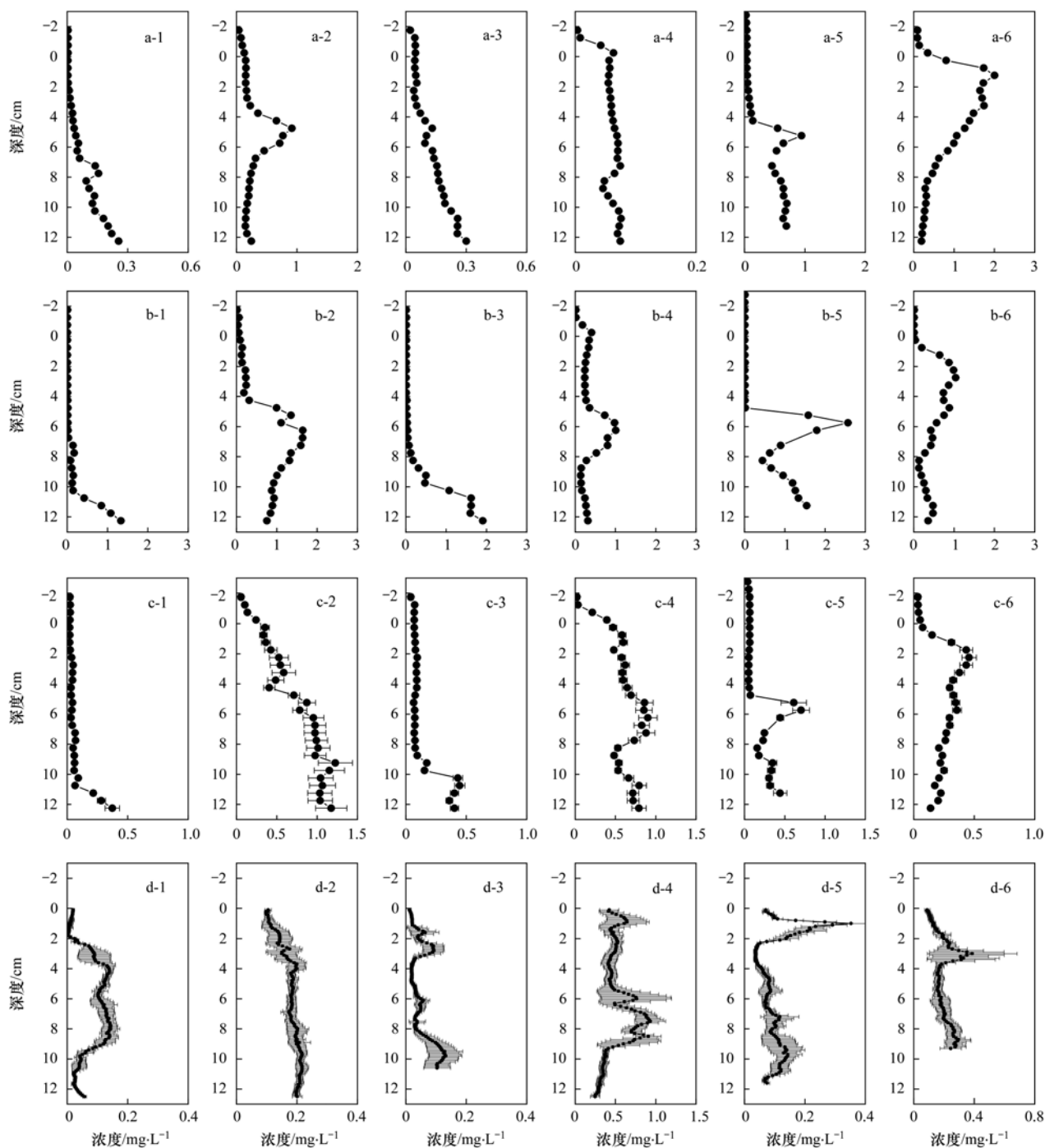
TOC 含量各有高低,但本研究区的活性 ASC-P 含量要明显偏高。

## 2.2 DGT 有效态铁、锰和硫的分布特征

垂向剖面中 DGT-Mn、DGT-Fe、DGT-P 和 DGT-S 的浓度分布如图 4 所示,其中 DGT-Mn、DGT-Fe 和 DGT-S 的数据引自文献[43]。作为氧化还原敏感元素,DGT-Mn、DGT-Fe 和 DGT-S 的分布基本上指示了相对的氧化还原环境,即在氧化环境中易被氧化,浓度极低,而在还原环境中随着锰还原、铁还原和硫酸盐还原浓度依次升高<sup>[44]</sup>。DGT-Mn 和 DGT-Fe 垂向变化较为一致,6 个剖面可以分为 3 种类型:第一种是 X1 和 X3,氧化带最深,普遍在 6 cm 深度以下,DGT-Mn 浓度缓慢升高,而 DGT-Fe 浓度快速升高;第二种是 X2、X5 和 X6,前两者氧化带深度约为 2~4 cm,后者不足 1 cm,DGT-Mn/DGT-Fe 浓度在锰铁还原带迅速升高达到峰值后随深度呈现不同程度的降低;最后一种是 X4,DGT-Mn 浓度在整个剖面都很低,DGT-Fe 在最表层的初始浓度( $>0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )较其他剖面( $<0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )高,但随后的

峰值以及浓度平均值均偏低。DGT-S 的垂向分布则要更为复杂,在多数剖面表层浓度低,随深度升高并不断波动;在 X5 表层即出现高值,并随深度降低随后不断波动;在 X4 处浓度最高,均值可达  $0.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,表层即为高值区,随深度先升高后降低。

从 DGT-Mn、DGT-Fe 和 DGT-S 浓度的箱型图来看(图 5),DGT-Mn 和 DGT-Fe 的分布并不一致,且 DGT-Mn 和 ASC-Mn 的分布一致,而 DGT-Fe 和 ASC-Fe 的分布不一致。表明沉积物活性锰氧化物作为锰还原的底物,是影响 DGT-Mn 浓度的重要因素,而铁氧化物并非是影响 DGT-Fe 浓度的关键因素。同样,DGT-S 的分布也同 TS 一致,此处的因果关系同铁锰恰恰相反:高浓度 DGT-S 代表了强烈的硫酸盐还原和硫化氢积累,从而导致硫化环境和总硫含量的升高<sup>[24]</sup>。DGT-Mn/DGT-Fe 和 DGT-S 在垂向剖面 and 不同研究区的变化虽然不一致,但并未表现出明显的排他性,甚至在 X6 表层三者浓度的升高较为同步。但是 X4 例外,在高有机质输入的黑臭环境中,水体缺氧,硫酸盐还原占据绝对主导,抑制了锰铁还原的



1~6 分别表示 X1~X6, a~d 分别表示 DGT-Mn、DGT-Fe、DGT-P 和 DGT-S

图4 深度剖面中 DGT-Mn、DGT-Fe、DGT-P 和 DGT-S 的浓度分布

Fig. 4 Distributions of concentrations for DGT-Mn, DGT-Fe, DGT-P, and DGT-S in depth profiles

发生,且硫化氢会与  $\text{Mn}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{2+}$  共沉淀,导致 DGT-Mn/DGT-Fe 浓度极低。总体来看,沉积物和 DGT 的锰、铁和硫组分的空间变异性较大且规律各不相同,表明河口区复杂的水动力和沉积环境,以及人类活动的干扰,深刻影响着不同元素的环境行为。

### 2.3 DGT 有效态磷的分布特征及影响因素

同 DGT-Mn 和 DGT-Fe 类似,DGT-P 在垂向变化上可以分为 3 种类型(图 4):第一种是 X1 和 X3,氧化带最深,在还原带随 DGT-Mn/DGT-Fe 同步升

高,但浓度较低,峰值浓度不足  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;第二种是 X5 和 X6,在表层氧化带浓度低,在还原带随 DGT-Mn/DGT-Fe 浓度同步升高达到峰值( $0.5 \sim 0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )后随深度呈明显的降低,浓度平均值高于 X1 和 X3;最后一种是 X2 和 X4,DGT-P 浓度随深度不断升高,即峰值出现在剖面(次)底层( $0.9 \sim 1.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),浓度较其他剖面明显偏高(图 5)。

如表 2 所示,在各垂向剖面中 DGT-P 同 DGT-Fe 相关性极佳,同 DGT-Mn 相关性也较好,同 DGT-

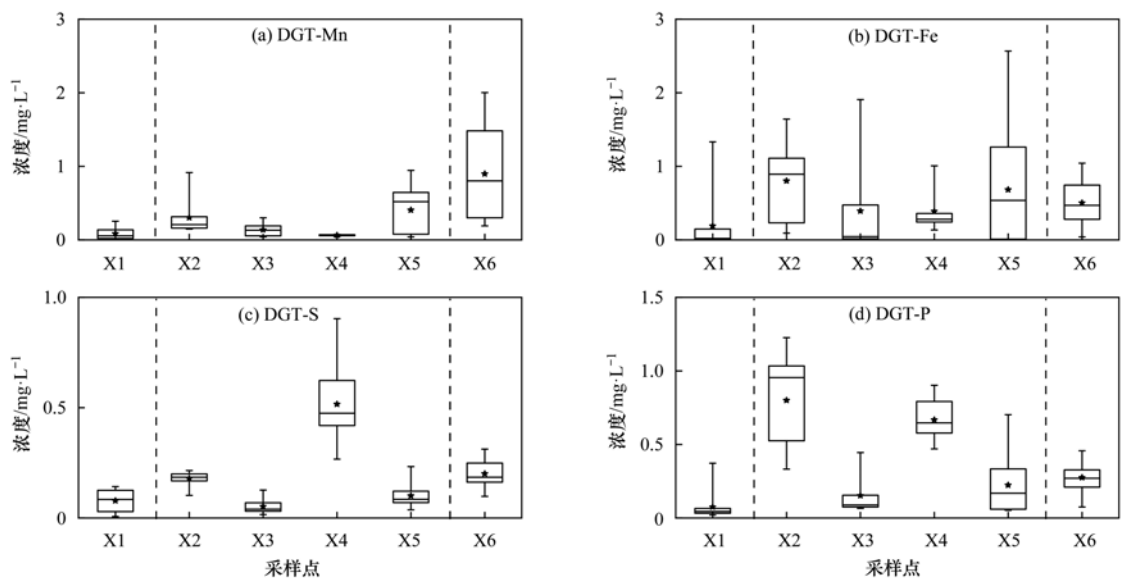


图 5 各剖面 DGT-Mn、DGT-Fe、DGT-P 和 DGT-S 浓度的箱型图

Fig. 5 Box-plot of concentrations for DGT-Mn, DGT-Fe, DGT-P, and DGT-S in each sampling site

S 相关性较差. 这与此前多数同类型的研究结果一致,即 DGT-P 的分布和迁移转化主要受控于铁的氧化还原循环<sup>[44]</sup>. 一般来说在氧化条件下,DRP 极易被无定形铁氧化物(氢氧化物)如水铁矿和针铁矿等吸附固定而被钝化;在还原条件下铁还原发生时,被固定的铁结合态磷会由于铁氧化物的还原溶解被再活化从而释放到孔隙水中<sup>[44]</sup>,从而导致从氧化到还原带,DGT-P 随 DGT-Fe 浓度同步变化,这在此前许多 DGT 研究中被广泛报道<sup>[18,22,28]</sup>. 相关性分析结果显示,与铁相比,在本研究中锰地球化学对磷的影响较小,这主要是因为 ASC-Mn 含量较低,锰的氧化还原循环不可能贡献如此高浓度的 DGT-P. 至于硫循环对磷的影响,此前有研究证实,在硫酸盐还原强烈和 DGT-S 浓度高的情况下,硫酸盐还原对有机磷的矿化以及硫化氢引发的铁结合态磷的化学还原可能会主导沉积物磷的活化释放<sup>[21]</sup>. 在本文中,从垂向变化来看,DGT-S 和 DGT-P 仅在 X2 较好,但 DGT-S 偏低,未必是控制磷活化的直接因素,而在 DGT-S 最高的 X4,二者相关性不佳.

表 2 垂向剖面中 DGT 有效态 P 与 Fe、Mn 和 S 的相关系数( $r$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Correlation coefficient ( $r$ ) between DGT-labile P with

Fe, Mn, and S in vertical profiles

| 采样点 | P vs. Fe | P vs. Mn | P vs. S |
|-----|----------|----------|---------|
| X1  | 0.98 **  | 0.81 **  | -0.27   |
| X2  | 0.77 **  | -0.07    | 0.83 ** |
| X3  | 0.96 **  | 0.81 **  | 0.61 *  |
| X4  | 0.78 **  | 0.86 **  | 0.16    |
| X5  | 0.97 **  | 0.80 **  | -0.09   |
| X6  | 0.87 **  | 0.64 **  | 0.41    |

1) \*\* 表示  $P < 0.01$ , \* 表示  $P < 0.05$

候,不仅要看元素之间垂向的耦合/相关关系,也要看它们的浓度平均值在不同研究区间的变化. 一个典型的例子是 X4 采样点,DGT-Mn 和 DGT-P 虽在垂向的相关性极好( $r = 0.86^{**}$ ),但 DGT-Mn 浓度太低( $0.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )而 DGT-P 浓度极高( $0.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),锰磷比低至不足 0.1,如此微弱的锰还原不可能导致如此多的磷释放,因此 X4 锰还原并非控制 DGT-P 分布主要因素. 相对而言,X4 虽然仅从数据上看 P 与 S 之间的相关性差( $r = 0.16$ ),但从垂向上看二者在至少 7 cm 深度以内变化较为一致(图 4),只是随后 DGT-S 的降低相对 DGT-P 更为明显,导致二者整体相关性较差. 整体来看,污染严重的 X4 硫酸盐还原占据绝对主导,DGT-S 浓度极高而 DGT-Fe 和 DGT-Mn 浓度很低,与硫酸盐还原有关的有机磷矿化和铁锰结合态磷还原溶解应该是此处高 DGT-P 浓度的主要贡献者,且导致上覆水和孔隙水中磷浓度的异常升高(图 2). 此外,从各剖面平均值的分布及相关性可以发现(图 6),排除 X2 后 S vs. P 和 Fe vs. P(排除 X4)相关性很好( $r > 0.9$ )因此在铁之外,硫地球化学可能也是影响磷循环的重要因素. X4 站位的 Fe-P 解耦是因为强烈的硫化环境,而 X2 偏高的 DGT-P 应归因于最高的 ASC-P 含量(图 3),随较强的铁还原被再活化释放出来.

图 6 中 DGT-P 的分布与盐度并不相关,沿河口盐度梯度,DGT-P 浓度的平均值差异大( $0.075 \sim 0.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )且未表现出盐度和区域规律性,而是与氧化还原条件及其影响下的铁硫循环密切相关,即氧化带越深,铁氧化物对磷的吸附能力越强,铁还原和硫酸盐还原被抑制,DGT-P 浓度越

然而,在判断影响 DGT-P 分布影响因素的时

低;氧化带越浅,铁氧化物对磷的吸附能力越弱,铁还原和硫酸盐还原越强,磷活化程度越高,DGT-P 浓度越高.

DGT-P 在沉积物-水界面的浓度梯度显示(图 4),X2、X4 和 X6 有明显的向上覆水释放的趋势,

这与 X1、X3 和 X5 极低的 DGT-P 浓度以及几乎可忽略的浓度梯度形成鲜明对比. 进一步表明氧化环境有利于表层沉积物磷的钝化并抑制内源磷的释放,而还原环境通过与铁和硫循环相耦合,内源磷被活化并向上覆水迁移<sup>[45,46]</sup>.

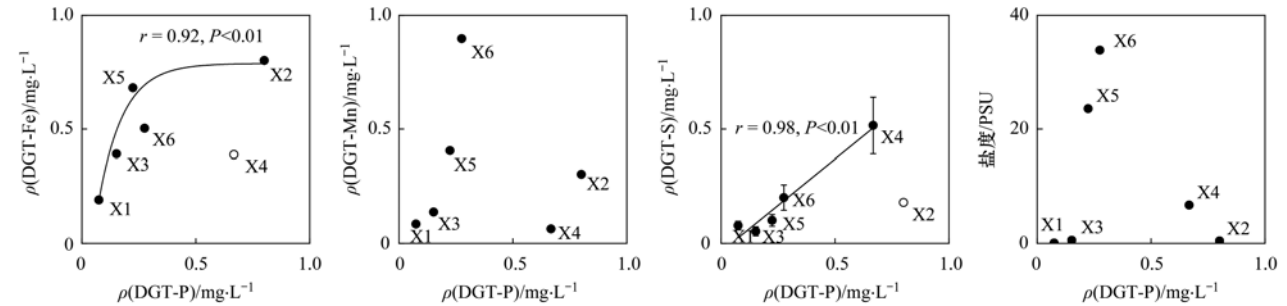


图 6 各剖面 DGT-P 平均值与 DGT-Fe、DGT-Mn、DGT-S 和盐度的分布及相关性

Fig. 6 Distributions and correlation between profile-averaged DGT-P with DGT-Fe, DGT-Mn, DGT-S, and salinity

2.4 磷的吸附-解吸动力学分析

在 DGT 研究中,使用 DIFS 模型模拟元素在沉积物和孔隙水之间的吸附/解吸动力学成为一种趋势<sup>[24,31-33]</sup>. 输入参数中的  $c_d$  一般用孔隙水总溶解态元素的浓度<sup>[31-33]</sup>,然而过往磷研究中仅有用 DRP 浓度而非 TDP 浓度<sup>[24,34]</sup>,这势必会影响模拟结果,造成对磷从沉积物向孔隙水再补给能力的高估. 本文针对这一不足分别以 DRP 和 TDP 浓度为  $c_d$ ,利用 DIFS 模型分别模拟磷在沉积物和孔隙水之间的吸附/解吸动力学. 主要输入和输出参数分别如表 3 和表 4 所示. 在表 3 DRP 的结果中,再补给系数  $R$  值在 X2、X4 和 X6 要明显高于其他 3 个研究区,这与氧化还原条件和 DGT-P 的浓度分布是一致的,表明还原环境中高 DGT-P 浓度背景下沉积物对孔隙水 DRP 的再补给能力更强. 分配系数  $K_d$

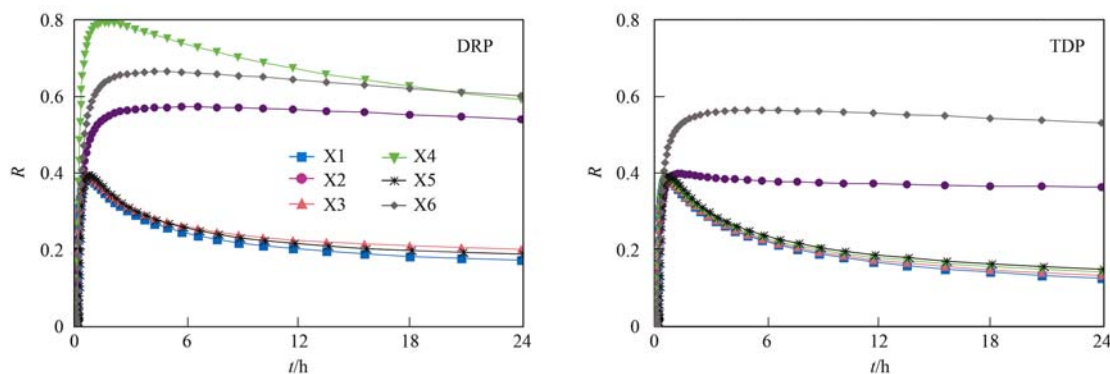
则是完全相反,在 X2、X4 和 X6 更低,表明参与再补给的固相磷相对含量偏低. 与之对应的是,它们的  $T_c$  更小,  $k_1$  和  $k_{-1}$  更大,即达到吸附/解吸速率和平衡更快. 这导致的典型结果是,在  $R$  值随 DGT 放置时间的变化曲线中(图 7),在初始时间扩散平衡的建立过程中,  $R$  值达到峰值会维持稳定,仅随时间缓慢降低来趋于平衡,而 X1、X3 和 X5 虽然参与再补给的固相磷相对含量高,但吸附/解吸速率和平衡慢,沉积物库补给慢,难以维持  $R$  的峰值. 但是 X4 又不同于 X2 和 X6,  $R$  值达到峰值后随时间降低的程度更突出,而不是缓慢降低趋于稳定. 这是因为 X4 的磷(DGT-P 和 DRP)浓度太高,而  $K_d$  偏低,随着 DGT 的吸附和沉积物的再补给,沉积物磷库不足以维持如此高的磷消耗,即  $R$  值随时间不断降低<sup>[24]</sup>.

表 3 表层沉积物中磷的 DIFS 模型输入和输出参数值(DRP)

| Table 3 Values of the input and output parameters modeled by DIFS for P (DRP) in the surficial sediments |                                     |         |         |         |         |         |         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 参数                                                                                                       |                                     | 采样点     |         |         |         |         |         |
|                                                                                                          |                                     | X1      | X2      | X3      | X4      | X5      | X6      |
| 输入参数                                                                                                     | $c_d/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   | 0.19    | 0.88    | 0.41    | 0.94    | 0.35    | 0.53    |
|                                                                                                          | $R$                                 | 0.17    | 0.54    | 0.20    | 0.62    | 0.18    | 0.60    |
|                                                                                                          | $K_d/\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ | 364     | 120     | 208     | 94      | 259     | 122     |
| 输出参数                                                                                                     | $T_e/\text{s}$                      | 6.5E+04 | 7.0E+02 | 3.6E+04 | 4.3E-02 | 5.2E+04 | 3.0E+02 |
|                                                                                                          | $k_1/\text{s}^{-1}$                 | 1.5E-05 | 1.4E-03 | 2.7E-05 | 2.3E+01 | 1.9E-05 | 3.3E-03 |
|                                                                                                          | $k_{-1}/\text{s}^{-1}$              | 4.2E-08 | 1.2E-05 | 1.3E-07 | 2.4E-01 | 7.4E-08 | 2.7E-05 |

表 4 表层沉积物中磷的 DIFS 模型输入和输出参数值(TDP)

| Table 4 Values of the input and output parameters modeled by DIFS for P (TDP) in the surficial sediments |                                     |         |         |         |         |         |         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 参数                                                                                                       |                                     | 采样点     |         |         |         |         |         |
|                                                                                                          |                                     | X1      | X2      | X3      | X4      | X5      | X6      |
| 输入参数                                                                                                     | $c_d/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   | 0.27    | 1.31    | 0.65    | 4.13    | 0.42    | 0.60    |
|                                                                                                          | $R$                                 | 0.12    | 0.36    | 0.13    | 0.14    | 0.14    | 0.53    |
|                                                                                                          | $K_d/\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ | 259     | 80      | 133     | 21      | 212     | 109     |
| 输出参数                                                                                                     | $T_e/\text{s}$                      | 1.0E+07 | 4.3E+03 | 4.5E+05 | 1.8E+05 | 1.9E+05 | 7.5E+02 |
|                                                                                                          | $k_1/\text{s}^{-1}$                 | 1.0E-07 | 2.3E-04 | 2.2E-06 | 5.2E-06 | 5.2E-06 | 1.3E-03 |
|                                                                                                          | $k_{-1}/\text{s}^{-1}$              | 3.8E-10 | 2.9E-06 | 1.7E-08 | 2.5E-07 | 2.5E-08 | 1.2E-05 |

图 7 DGT 放置期间  $R$  值随时间的拟合曲线Fig. 7 Fitting curve of  $R$  values with time during DGT deployment

与 DRP 相比,在表 4 TDP 的结果中,由于以 TDP 浓度为  $c_d$ ,  $R$ 、 $K_d$ 、 $k_1$  和  $k_{-1}$  均减小,  $T_e$  增大,即沉积物再补给能力降低,吸附/解吸速率和达到平衡慢. 其中 X4 由于孔隙水极高的 TDP 浓度,其  $R$  和  $K_d$  值的降低最为明显,输出参数相比其他研究区增大/减小的程度也更大. 这就导致在图 7 的  $R$  值曲线中, X4 的降幅最大. 而其他曲线仅仅是数值降低,随时间变化趋势基本不变. 这个结果表明,在铁控制磷循环的沉积物体系中, DRP 相对 TDP 浓度较为稳定,用 DRP 模拟表征的沉积物再补给能力有所高估,但整体规律不变,即还原环境和高沉积物活性磷背景 (X2 和 X6) 下再补给能力强,吸附/解吸速率和达到平衡快;而氧化环境中 (X1、X3 和 X5) 沉积物对磷的吸附钝化强,再补给能力弱,吸附/解吸速率和达到平衡慢. 但是在人为影响污染严重的 X4, DOP 相对浓度高,用 DRP 模拟表征的沉积物再补给能力过于高估,说明过量的 DOP 很难作为磷源来补给被 DGT 吸附移除的磷酸盐 (DGT-P).

### 3 结论

(1) 在沉积物垂向剖面中,磷的钝化/活化主要受控于铁氧化物对磷的氧化吸附和还原溶解. 在各采样点分布中, DGT-P 浓度与盐度关系不大,而是与氧化还原条件和铁硫循环密切相关,即还原环境下活跃的铁和硫酸盐还原有利于磷活化.

(2) DGT-P 在沉积物-水界面的浓度梯度表明,氧化环境有利于表层沉积物磷的钝化并抑制内源磷的释放,而还原环境通过与铁和硫循环相耦合,促进内源磷活化并向上覆水迁移.

(3) DIFS 模拟结果表明,沉积物磷的再补给能力与氧化还原条件和 DGT-P 的浓度密切相关,即还原环境中高 DGT-P 浓度背景下沉积物对孔隙水 DRP 的再补给能力更强,吸附/解吸速率和达到平衡快.

### 参考文献:

- [1] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, *et al.* Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus [J]. *Science*, 2009, **323**(5917): 1014-1015.
- [2] 刘军, 臧家业, 冉祥滨, 等. 长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(8): 3243-3253.  
Liu J, Zang J Y, Ran X B, *et al.* Sedimentary phosphorus speciation in the coastal hypoxic area of Changjiang Estuary and its environmental significance [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3243-3253.
- [3] Seitzinger S P, Mayorga E, Bouwman A F, *et al.* Global river nutrient export: a scenario analysis of past and future trends [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, **24**(4). doi: 10.1029/2009GB003587.
- [4] 李少斌, 余丹, 孔俊, 等. 海岸带陆海气氮磷污染协同治理: 监测、模拟与决策 [J]. *环境工程*, 2022, **40**(6): 12-21.  
Li S B, Yu D, Kong J, *et al.* Coastal land-ocean-atmosphere cooperative management of nitrogen and phosphorus pollution: monitoring, modeling and decision-making [J]. *Environmental Engineering*, 2022, **40**(6): 12-21.
- [5] 肖丽, 王迪, 马伟伟, 等. 长江河口及邻近海域表层沉积物中铁溶解和磷释放活性的动力学表征 [J]. *海洋学报*, 2019, **41**(12): 1-13.  
Xiao L, Wang D, Ma W W, *et al.* Kinetic characterization of reactivity of iron dissolution and phosphorus release in surface sediments of the Changjiang (Yangtze) River Estuary and the adjacent East China Sea [J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, **41**(12): 1-13.
- [6] 金晓丹, 吴昊, 陈志明, 等. 长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 448-456.  
Jin X D, Wu H, Chen Z M, *et al.* Phosphorus fractions, sorption characteristics and its release in the sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 448-456.
- [7] 张雷, 曹伟, 马迎群, 等. 大辽河感潮河段及近河口氮、磷的分布及潜在性富营养化 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1677-1684.  
Zhang L, Cao W, Ma Y Q, *et al.* Distribution of nitrogen and phosphorus in the tidal reach and estuary of the Daliao River and analysis of potential eutrophication [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1677-1684.
- [8] 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 等. 互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5414-5423.  
Sha M Q, Chai N, Zhao H T, *et al.* Effects of *Spartina alterniflora* invasion on soil phosphorus forms in the Jiaozhou Bay

- Wetland[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5414-5423.
- [9] Puttonen I, Kohonen T, Mattila J. Factors controlling phosphorus release from sediments in coastal archipelago areas[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, **108**(1-2): 77-86.
- [10] Rydin E, Malmaeus J M, Karlsson O M, *et al.* Phosphorus release from coastal Baltic Sea sediments as estimated from sediment profiles[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, **92**(1): 111-117.
- [11] Davison W, Zhang H. *In situ* speciation measurements of trace components in natural waters using thin-film gels[J]. *Nature*, 1994, **367**(6463): 546-548.
- [12] Teasdale P R, Batley G E, Apte S C, *et al.* Pore water sampling with sediment peepers[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 1995, **14**(6): 250-256.
- [13] 林建宇, 苏雅玲, 韩超, 等. 骆马湖泥-水界面磷铁硫原位同步变化特征[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(12): 5637-5645. Lin J Y, Su Y L, Han C, *et al.* *In situ* and combined variations of phosphorus, iron and sulfur across the sediment-water interface of Lake Luoma[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(12): 5637-5645.
- [14] Chen M S, Ding S M, Chen X, *et al.* Mechanisms driving phosphorus release during algal blooms based on hourly changes in iron and phosphorus concentrations in sediments[J]. *Water Research*, 2018, **133**: 153-164.
- [15] Ding S M, Han C, Wang Y P, *et al.* *In situ*, high-resolution imaging of labile phosphorus in sediments of a large eutrophic lake[J]. *Water Research*, 2015, **74**: 100-109.
- [16] Xu D, Wu W, Ding S M, *et al.* A high-resolution dialysis technique for rapid determination of dissolved reactive phosphate and ferrous iron in pore water of sediments[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **421-422**: 245-252.
- [17] Sun Q Y, Sheng Y Q, Yang J, *et al.* Dynamic characteristics of sulfur, iron and phosphorus in coastal polluted sediments, north China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 588-595.
- [18] Ma W W, Zhu M X, Yang G P, *et al.* *In situ*, high-resolution DGT measurements of dissolved sulfide, iron and phosphorus in sediments of the East China Sea: Insights into phosphorus mobilization and microbial iron reduction[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, **124**(1): 400-410.
- [19] Ma W W, Zhu M X, Yang G P, *et al.* Diagenesis of sulfur, iron and phosphorus in sediments of an urban bay impacted by multiple anthropogenic perturbations[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **146**: 366-376.
- [20] Hu M J, Sardans J, Le Y X, *et al.* Phosphorus mobilization and availability across the freshwater to oligohaline water transition in subtropical estuarine marshes[J]. *CATENA*, 2021, **201**, doi: 10.1016/j.catena.2021.105195.
- [21] Pan F, Guo Z R, Cai Y, *et al.* Cyclical patterns and (im) mobilization mechanisms of phosphorus in sediments from a small creek estuary: Evidence from *in situ* monthly sampling and indoor experiments[J]. *Water Research*, 2020, **171**, doi: 10.1016/j.watres.2020.115479.
- [22] Pan F, Guo Z R, Cai Y, *et al.* Remobilization and hypoxia-dependent migration of phosphorus at the coastal sediment-water interface[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **411**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125078.
- [23] Pan F, Guo Z R, Cai Y, *et al.* High-resolution imaging of labile P & S in coastal sediment: Insight into the kinetics of P mobilization associated with sulfate reduction[J]. *Marine Chemistry*, 2020, **225**, doi: 10.1016/j.marchem.2020.103851.
- [24] Pan F, Guo Z R, Cai Y, *et al.* Kinetic exchange of remobilized phosphorus related to phosphorus-iron-sulfur biogeochemical coupling in coastal sediment[J]. *Water Resources Research*, 2019, **55**(12): 10494-10517.
- [25] Pan F, Liu H T, Guo Z R, *et al.* Effects of tide and season changes on the iron-sulfur-phosphorus biogeochemistry in sediment porewater of a mangrove coast[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, **568**: 686-702.
- [26] 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.
- [27] 潘峰, 郭占荣, 刘花台, 等. 潮滩沉积物-水界面磷、铁的高分辨率分布特征及生物地球化学行为[J]. *地球科学*, 2018, **43**(11): 4109-4119. Pan F, Guo Z R, Liu H T, *et al.* High-resolution distribution and biogeochemical behavior of phosphorus and iron at sediment-water interface of tidal flat[J]. *Earth Science*, 2018, **43**(11): 4109-4119.
- [28] Gao L, Li R, Liang Z B, *et al.* Remobilization mechanism and release characteristics of phosphorus in saline sediments from the Pearl River Estuary (PRE), South China, based on high-resolution measurements[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **703**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134411.
- [29] Harper M P, Davison W, Tych W. DIFS-a modelling and simulation tool for DGT induced trace metal remobilisation in sediments and soils[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2000, **15**(1): 55-66.
- [30] Harper M P, Davison W, Zhang H, *et al.* Kinetics of metal exchange between solids and solutions in sediments and soils interpreted from DGT measured fluxes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, **62**(16): 2757-2770.
- [31] Pan F, Cai Y, Guo Z R, *et al.* Kinetic characteristics of mobile Mo associated with Mn, Fe and S redox geochemistry in estuarine sediments[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **418**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126200.
- [32] Fu Y Y, Guo Z R, Pan F, *et al.* Distribution characteristics and release mechanisms of Pb in surface sediments in different aquatic environments[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2020, **235**, doi: 10.1016/j.jconhyd.2020.103704.
- [33] Xu D Y, Gao B, Peng W Q, *et al.* Application of DGT/DIFS and geochemical baseline to assess Cd release risk in reservoir riparian soils, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **646**: 1546-1553.
- [34] Heidari S, Reyhanitabar A, Oustan S. Kinetics of phosphorus desorption from calcareous soils using DGT technique[J]. *Geoderma*, 2017, **305**: 275-280.
- [35] 欧阳玉蓉, 王翠, 李青生, 等. 厦门湾海域营养盐时空分布与富营养化状况分析[J]. *福建农业学报*, 2014, **29**(1): 88-93. Ouyang Y R, Wang C, Li Q S, *et al.* Analysis of the space-time distribution of nutrients and the degree of eutrophication in Xiamen Bay[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2014, **29**(1): 88-93.
- [36] Laskov C, Herzog C, Lewandowski J, *et al.* Miniaturized photometrical methods for the rapid analysis of phosphate, ammonium, ferrous iron, and sulfate in pore water of freshwater

- sediments[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2007, **5** (1): 63-71.
- [37] Ma J, Yuan Y, Zhou T J, *et al.* Determination of total phosphorus in natural waters with a simple neutral digestion method using sodium persulfate [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2017, **15**(4): 372-380.
- [38] Ding S M, Sun Q, Xu D, *et al.* High-resolution simultaneous measurements of dissolved reactive phosphorus and dissolved sulfide: The first observation of their simultaneous release in sediments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46** (15): 8297-8304.
- [39] Wang Y, Ding S M, Gong M D, *et al.* Diffusion characteristics of agarose hydrogel used in diffusive gradients in thin films for measurements of cations and anions [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2016, **945**: 47-56.
- [40] Rozan T F, Taillefert M, Trouwborst R E, *et al.* Iron-sulfur-phosphorus cycling in the sediments of a shallow coastal bay: Implications for sediment nutrient release and benthic macroalgal blooms[J]. *Limnology and Oceanography*, 2002, **47**(5): 1346-1354.
- [41] Zhang H, Davison W, Miller S, *et al.* In situ high resolution measurements of fluxes of Ni, Cu, Fe, and Mn and concentrations of Zn and Cd in porewaters by DGT [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, **59**(20): 4181-4192.
- [42] Wang Y, Ding S M, Shi L, *et al.* Simultaneous measurements of cations and anions using diffusive gradients in thin films with a ZrO-Chelex mixed binding layer[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2017, **972**: 1-11.
- [43] Pan F, Wang B, Zhang Y L, *et al.* Bioavailability, (im) mobilization kinetics, and spatiotemporal patterns of arsenic and cadmium in surficial sediments of a river-estuary-coast system [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, **612**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128140.
- [44] Lovley D R, Phillips E J P. Competitive mechanisms for inhibition of sulfate reduction and methane production in the zone of ferric iron reduction in sediments [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1987, **53**(11): 2636-2641.
- [45] 孙清清, 陈敬安, 王敬富, 等. 阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2810-2818.
- Sun Q Q, Chen J A, Wang J F, *et al.* High-resolution distribution characteristics of phosphorous, iron and sulfur across the sediment-water interface of Aha Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2810-2818.
- [46] 郝文超, 王从锋, 杨正健, 等. 氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律[J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 640-648.
- Hao W C, Wang C F, Yang Z J, *et al.* Speciation and transformation of phosphorus in sediments during the redox cycle [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 640-648.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                       |                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Challenges Regarding the Co-emission of Emerging Pollutants to Eco-environmental Monitoring and Management .....                                                                                      | WANG Pei, HUANG Xin-yi, CAO Zhi-wei, <i>et al.</i> (4801)               |
| Environmental Process, Effects and Risks of Emerging Contaminants in the Estuary-Coastal Environment .....                                                                                            | WANG Xin-hong, YU Xiao-xuan, WANG Si-quan, <i>et al.</i> (4810)         |
| Research Progress of Analytical Methods with Molecular Spectroscopy for Determination of Trace Nutrients and Metals in Seawaters .....                                                                | YUAN Dong-xing, HUANG Yong-ming, WANG Ting (4822)                       |
| Research Progress on the Determination of Sulfide in Natural Waters: From Laboratory Analysis to In-Situ Monitoring .....                                                                             | LI Peng, LIN Kun-de, YUAN Dong-xing (4835)                              |
| Advances in On-site Analytical Methods for Inorganic Arsenic in Environmental Water .....                                                                                                             | BO Guang-yong, CHEN Zhao-ying, GONG Zhen-bin, <i>et al.</i> (4845)      |
| Advances and Prospect of Sampling Techniques and Analytical Methods for Trace Elements in the Ocean; Progress of Trace Element Platform Construction in Xiamen University .....                       | ..... HUANG Yong-ming, ZHOU Kuan-bo, CHEN Yao-jin, <i>et al.</i> (4858) |
| Biodegradation of Polyethylene Microplastic: A Review .....                                                                                                                                           | ..... LUO Yuan-rong, QIAN Yi-qian, QI Ya-nan (4869)                     |
| Mechanism and Environmental Effect on Nitrogen Addition to Microbial Process of Arsenic Immobilization in Flooding Paddy Soils .....                                                                  | WANG Feng, ZHANG Jing, ZHOU Shao-yu, <i>et al.</i> (4876)               |
| Toxicity Testing Organisms for Marine Ecotoxicological Research in China .....                                                                                                                        | SHI Tian-yi, HONG Hai-zheng, WANG Ming-hua, <i>et al.</i> (4888)        |
| Estimating Methane Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Systems in China .....                                                                                                                 | CHEN Chun-ci, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen (4905)                          |
| Atmospheric NH <sub>3</sub> Emission Inventory and Its Tempo-spatial Changes in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region from 2015 to 2020 .....                                                              | LI Xiang, WU Shui-ping, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (4914)             |
| Distribution of Microplastic and Antibiotic Resistance Gene Pollution in Jiulong River Estuary .....                                                                                                  | CHENG Hong, CHEN Rong (4924)                                            |
| Pollution Characteristics of Microplastics in Sediments of Xiamen Bay Beach .....                                                                                                                     | YAO Rui, LIU Hua-tai, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (4931)                  |
| Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors of Dissolved Trace Metals in Jiulong River Estuary and Xiamen Bay .....                                                                     | QI Liu-qian, YUE Xin-li, ZHONG Hao-wen, <i>et al.</i> (4939)            |
| Spatiotemporal Characteristics of Dissolved Oxygen and Control Mechanism of Hypoxia (Low Oxygen) in the Watershed-Coastal System in Fujian Province .....                                             | ..... YANG Ai-lin, YANG Fang, LI Shao-bin, <i>et al.</i> (4950)         |
| Distribution, Migration, and Transformation Mechanism of Labile Phosphorus in Sediments of Xixi River Estuary, Xiamen .....                                                                           | PAN Feng, CAI Yu, GUO Zhan-rong, <i>et al.</i> (4961)                   |
| Adsorption of Mn <sup>2+</sup> by Modified Biochar Fixed Bed in Simulated Lakes and Reservoir Waters .....                                                                                            | ZHAO Jie, YE Zhi-long, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (4971)                |
| Rapid Detection of Trace Enrofloxacin and Ciprofloxacin in Drinking Water by SERS .....                                                                                                               | XU Jing, ZHENG Hong, LU Jiang-long, <i>et al.</i> (4982)                |
| Degradation of Triphenyl Phosphate in Water by UV-driven Advanced Oxidation Processes .....                                                                                                           | XU Zi-wen, YIN Hong-ling, XIONG Yuan-ming, <i>et al.</i> (4992)         |
| Characteristics and Potential Sources of Four Ozone Pollution Processes in Hainan Province in Autumn of 2019 .....                                                                                    | FU Chuan-bo, CHEN Hong, DAN Li, <i>et al.</i> (5000)                    |
| Characterization and Formation Mechanism of Water-soluble Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> in Summer in the Urban Agglomeration of the Ili River Valley .....                 | ..... CHEN Qiao, GU Chao, XU Tao, <i>et al.</i> (5009)                  |
| Difference in PM <sub>2.5</sub> Pollution and Transport Characteristics Between Urban and Suburban Areas .....                                                                                        | QI Peng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (5018)               |
| Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Northern Suburbs of Nanjing .....                                                                                                           | FENG Yue-zheng, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (5030)          |
| Ecological Risk Assessment of Microplastics Occurring in Surface Water of Terrestrial Water Systems across China .....                                                                                | SUN Xiao-nan, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i> (5040)               |
| Scale Effects of Landscape Pattern on Water Quality in Dongjiang River Source Watershed .....                                                                                                         | CHEN You-liang, ZOU Wen-min, LIU Xing-gen, <i>et al.</i> (5053)         |
| Mercury Speciation, Distribution, and Potential Sources in Surface Waters of the Yangtze and Yellow River Source Basins of Tibetan Plateau During Wet Season .....                                    | ..... LIU Nan-tao, WU Fei, YUAN Wei, <i>et al.</i> (5064)               |
| Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau .....                                                                                                    | LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (5073)                   |
| Karst Hydrogeochemical Characteristics and Controlling Factors of Carlin-type Gold Mining Area Based on Hydrochemistry and Sulfur Isotope .....                                                       | ..... ZHA Xue-fang, WU Pan, LI Xue-xian, <i>et al.</i> (5084)           |
| Characteristics of Eukaryotic Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Danjiangkou Reservoir .....                                                        | HE Yu-xiao, MAI Si-jie, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (5096)                |
| Adsorption of Phosphate and Heavy Metals by Lanthanum Modified Zeolite and Its Performance in Sediment Inactivation .....                                                                             | WANG Zhe, ZHU Jun, LI Wen, <i>et al.</i> (5106)                         |
| Metagenomic and Metatranscriptomic Analysis of Nitrogen Removal Functional Microbial Community of Petrochemical Wastewater Biological Treatment Systems .....                                         | ..... ZHANG Xu, ZHOU Jia-jia, ZHOU Min, <i>et al.</i> (5115)            |
| Bacterial Community Structure and Antibiotic Resistance Gene Changes in IFAS + Magnetic Coagulation Process Wastewater Treatment Plant in Cold Regions .....                                          | ..... DU Wen-yan, YAO Jun-qin, MA Hui-ying, <i>et al.</i> (5123)        |
| Nitric Oxide Emissions from Chinese Upland Cropping Systems and Mitigation Strategies: A Meta-analysis .....                                                                                          | ..... TIAN Zheng-yun, WU Xiong-wei, WU Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5131)  |
| Impact of Nitrification Inhibitors on Vegetable Production Yield, Nitrogen Fertilizer Use Efficiency and Nitrous Oxide Emission Reduction in China: Meta Analysis .....                               | ..... LIU Fa-bo, MA Xiao, ZHANG Fen, <i>et al.</i> (5140)               |
| Effect of Different Fertilization Treatments on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region, China .....                                                    | ..... SHAO Xiao-hui, TANG Shui-rong, MENG Lei, <i>et al.</i> (5149)     |
| Effects of Land-use Conversion on Soil Nitrification and NO & N <sub>2</sub> O Emissions in Tropical China Under Different Moisture Conditions .....                                                  | TANG Rui-jie, HU Yu-jie, ZHAO Cai-yue, <i>et al.</i> (5159)             |
| Characteristics of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of the Yangtze River Economic Belt Based on Bibliometric Analysis .....                                                                     | LIU Xiao-yan, FAN Ya-nan, LIU Peng, <i>et al.</i> (5169)                |
| Spatial and Temporal Distribution and Source Variation of Heavy Metals in Cultivated Land Soil of Xiangzhou District Based on EBK Interpolation Prediction and GDM Model .....                        | ..... GAO Hao-ran, ZHOU Yong, LIU Jia-kang, <i>et al.</i> (5180)        |
| Identification of Soil Heavy Metal Sources Around a Copper-silver Mining Area in Ningxia Based on GIS .....                                                                                           | ZHANG Kou-kou, HE Jing, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5192)             |
| Effect of Aging on Stabilization of Cd <sup>2+</sup> Through Biochar Use in Alkaline Soil of Bayan Obo Mining Area .....                                                                              | WANG Zhe, CHENG Jun-li, BIAN Yuan, <i>et al.</i> (5205)                 |
| Preparation of Magnetic Iron Oxide/Mulberry Stem Biochar and Its Effects on Dissolved Organic Carbon and Arsenic Speciation in Arsenic-Contaminated Soils .....                                       | ..... LU Lin, YAN Li-ling, LIANG Mei-na, <i>et al.</i> (5214)           |
| Effects of Oyster Shell Powder and Lime on Availability and Forms of Phosphorus and Enzyme Activity in Acidic Paddy Soil .....                                                                        | ZHAO Li-fang, HUANG Peng-wu, YANG Cai-di, <i>et al.</i> (5224)          |
| Effects of Interaction of Zinc and Cadmium on Growth and Cadmium Accumulation of <i>Brassica campestris</i> L. ....                                                                                   | SHUAI Zu-ping, LIU Han-yi, CUI Hao, <i>et al.</i> (5234)                |
| Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in Vegetable Field in Kaizhou, Chongqing .....                                                                                | FANG Lin-fa, YE Ping-ping, FANG Biao, <i>et al.</i> (5244)              |
| Temporal and Spatial Variation Characteristics of Carbon Storage in the Source Region of the Yellow River Based on InVEST and GeoSoS-FLUS Models and Its Response to Different Future Scenarios ..... | ..... HOU Jian-kun, CHEN Jian-jun, ZHANG Kai-qi, <i>et al.</i> (5253)   |
| Carbon Sequestration Characteristics of Different Restored Vegetation Types in Loess Hilly Region .....                                                                                               | XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, HE Liang, <i>et al.</i> (5263)           |
| Response of Soil Multifunctionality to Reduced Microbial Diversity .....                                                                                                                              | CHEN Gui-xian, WU Chuan-fa, GE Ti-da, <i>et al.</i> (5274)              |
| Effect of Nitrogen Addition on Soil Fungal Diversity in a Degraded Alpine Meadow at Different Slopes .....                                                                                            | SU Xiao-xue, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (5286)               |
| Comparative Energy Consumption Structure and Mode between China and Major Energy-Consuming Countries Under the Background of Carbon Emission Reduction .....                                          | ..... LI Hui, PANG Bo, ZHU Fa-hua, <i>et al.</i> (5294)                 |
| Spatialization and Spatio-temporal Dynamics of Energy Consumption Carbon Emissions in China .....                                                                                                     | HAO Rui-jun, WEI Wei, LIU Chun-fang, <i>et al.</i> (5305)               |
| Carbon Dioxide Mitigation Co-effect Analysis of Structural Adjustment Measures in the "2 + 26" Cities in the Jing-Jin-Ji Region and Its Surroundings .....                                            | ..... YANG Tian-qi, WANG Hong-chang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (5315)   |
| Policy Analysis in Plastic Pollution Governance and Recommendations in China .....                                                                                                                    | LI Huan, ZHU Long, SHEN Qian, <i>et al.</i> (5326)                      |