

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

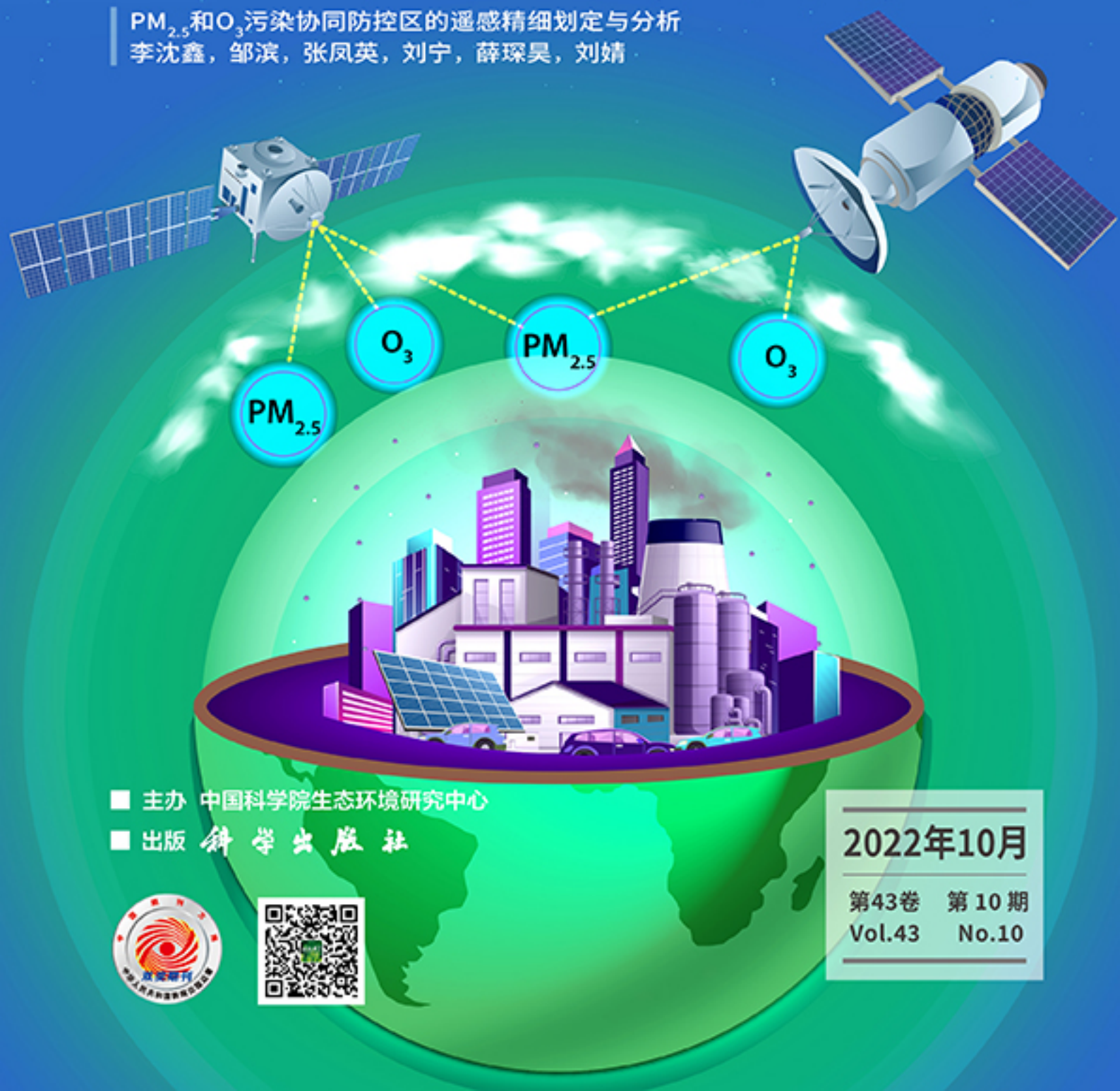
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析
李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年10月

第43卷 第10期
Vol.43 No.10

目次

PM _{2.5} 和O ₃ 污染协同防控区的遥感精细划定与分析	李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧 (4293)
广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析	裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 张涛, 邱晓暖, 王瑜, 王在华, 李梅 (4305)
佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用	陈辰, 洪莹莹, 谭浩波, 司徒淑婷, 程银琳, 步巧利, 吴蒙, 潘巧英 (4316)
乌海市高分辨率大气污染源排放清单构建及其在臭氧污染成因探究中的应用	张瑞欣, 楚波, 尚春林, 曹喜萍, 李光耀, 朱玉凡, 刘晓, 夏佳琦, 陈强 (4327)
结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征	邱浩, 刘丹彤, 吴杨周, 李思远, 丁朔, 胡康, 张家乐, 陈梅汀 (4338)
机动车制动磨损颗粒物及挥发性有机物的组分特征	门正宇, 刘笃优, 郭全有, 张静, 彭剑飞, 吴琳, 毛洪钧 (4348)
笼养鸡舍冬季挥发性有机物排放特征	曹甜甜, 郑云昊, 张羽, 王悦, 丛群欣, 王源昊, 董红敏 (4357)
上海市生活垃圾房气溶胶中可培养细菌污染状况及种群特征	卢冰洁, 张翔, 王川, 邱俊, 李丹 (4367)
浙江省2008~2018年人为源氨排放清单及分布特征	方利江, 杨一群, 叶观琼 (4380)
“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图	薛英岚, 张静, 刘宇, 陈瑜, 孙健, 蒋洪强, 张伟, 曹东 (4392)
空间关联网络结构特征的减排效应: 基于城市群视角	郑航, 叶阿忠 (4401)
中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制	白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 张楠, 罗宏 (4408)
近年全国地表水水质变化特征	嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 杨凯 (4419)
湟水河流域地表水体微塑料分布、风险及影响因素	范梦苑, 黄懿梅, 张海鑫, 李好好, 黄倩 (4430)
汾河流域地表水化学同位素特征及其影响因素	赵春红, 申豪勇, 王志恒, 梁永平, 赵一, 谢浩, 唐春雷 (4440)
城镇化进程中珠江三角洲高锰地下水赋存特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 李海军 (4449)
喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析	鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 孙英 (4459)
重庆市老龙洞地下河流域硝酸盐来源和生物地球化学过程的识别	王雨畅, 杨平恒, 张洁茹 (4470)
蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析	欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李佳欣, 李玉鑫, 施军琼, 吴忠兴 (4480)
珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子	张茉莉, 王思瑞, 昌盛, 王山军, 金德才, 樊月婷, 张坤峰, 谢琼, 付青 (4489)
营养物质对铜绿微囊藻生长和藻际细菌的影响	吕萍, 李慧莉, 徐勇, 郑效旭, 黄振华, 王聪, 徐圣君, 庄绪亮 (4502)
老化作用对微塑料吸附四环素的影响及其机制	王林, 王姝歆, 曾祥英, 何杨, 黄雯, 郑世界, 张建强 (4511)
沉积物和土壤中胶体对氯霉素吸附行为的影响	晏彩霞, 罗燕清, 聂明华, 周旋, 丁明军 (4522)
历史抗生素胁迫改变磺胺甲噁唑和甲氧苄啶对活性污泥的影响: ARGs及其潜在宿主	张忠兴, 樊晓燕, 李星, 高玉玺, 赵君如 (4536)
阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析	陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 王耀耀, 张睿东 (4545)
白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估	郑飞, 郭欣, 汤名扬, 朱冬, 董四君, 康乐, 陈兵 (4556)
基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析	龚仓, 王亮, 王顺祥, 张志翔, 董航, 刘玖芬, 王德伟, 严步青, 陈映 (4566)
燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险	车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 范辉, 魏明磊, 罗蓬, 郁金星 (4578)
海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别	杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 高健翁, 杨建坤, 胡树起, 唐世新 (4590)
九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价	张华兰, 于瑞莲, 王瑞安, 胡恭任, 黄华斌, 吴雅清 (4601)
我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状	伊晓云, 方丽, 杨向德, 马立峰, 刘美雅, 张群峰, 倪康, 石元值 (4613)
甘肃省农业土壤邻苯二甲酸酯累积特征及来源分析	陈玉玉, 张光全, 张杨, 李明凯, 郝佳欣, 熊有才, 李崇霄, 曹靖 (4622)
三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征	高艺伦, 方芳, 唐子超, 张蕊, 蒋艳雪, 郭劲松 (4630)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性	李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 罗艳, 丁肇龙, 朱海强, 张涵, 李蕊希 (4639)
黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤湿度的响应	孙亚荣, 王亚娟, 赵敏, 薛文艳, 梁思琦, 刘乐, 刘超, 陈云明 (4648)
基于Meta-analysis的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响	姜志翔, 崔爽, 张鑫, 郝敏, 孙德茂 (4658)
低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制	方治国, 谢俊婷, 杨青, 卢焯桢, 黄海, 朱芸娟, 尹思敏, 吴鑫涛, 都韶婷 (4669)
无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制	张剑, 孔繁艺, 卢升高 (4679)
改良铅锌矿渣对栎树幼苗铅锌富集与耐性机制	谢天志, 陈永华, 苏荣葵, 刘慧, 姚海松 (4687)
CaO ₂ /FA复合材料富集磷效能及其回收物对土壤改良作用	岳薇, 李大鹏, 吴玲予, 王璐, 汤尧禹, 朱企, 黄勇 (4697)
早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响	黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 吴永沛, 李苹, 付弘婷, 唐拴虎, 刘一峰, 徐培智 (4706)
秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响	蔡影, 付思伟, 张博睿, 胡宏祥, 刘文雯, 俞金涛, 贾临东, 刘运峰 (4716)
化肥减量配施秸秆对双季稻田固氮微生物群落的影响	陈凯鹏, 韦菊娟, 陈丹, 王聪, 沈健林, 李勇, 吴金水 (4725)
化肥减量与有机物料添加对华北潮土微生物氮循环功能基因丰度和氮转化遗传潜力的影响	李胜君, 胡荷, 李刚, 王蕊, 赵建宁, 张贵龙, 修伟明 (4735)
长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征	胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 李剑虹, 陈剑平, 葛体达, 鲁顺保 (4745)
长期秸秆还田对潮土真菌群落、酶活性和小麦产量的影响	马垒, 李燕, 魏建林, 李子双, 周晓琳, 郑福丽, 吴小宾, 王利, 刘兆辉, 谭德水 (4755)
土壤改良剂对再生水滴灌根际土壤菌群多样性及病原菌和抗生素抗性基因丰度的影响	崔丙健, 崔二革, 刘春成, 胡超, 樊向阳, 李中阳, 高峰 (4765)
氮素对苜蓿植物修复垃圾堆场镉-多环芳烃复合污染土壤及土壤细菌群落结构的影响	李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 肖琛, 沈心怡, 牛云, 陈家军 (4779)
抗生素降解剂对猪粪堆肥腐熟和细菌群落演替的影响	李琳琳, 张昕, 马军伟, 孙万春, 成琪璐, 林辉 (4789)
《环境科学》征订启事 (4337) 《环境科学》征稿简则 (4407) 信息 (4521, 4705, 4800)	

九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价

张华兰^{1,2}, 于瑞莲^{1,2}, 万瑞安¹, 胡恭任^{1,2*}, 黄华斌³, 吴雅清⁴

(1. 华侨大学化工学院, 厦门 361021; 2. 华侨大学环境生态工程研究所, 厦门 361021; 3. 环境监测福建省高校重点实验室, 厦门 361021; 4. 华侨大学分析测试中心, 厦门 361021)

摘要: 采用改进的BCR四步提取法分析了九龙江口红树林表层沉积物中16种重金属元素的赋存形态特征, 运用次生相与原生相分布比值法(RSP)、风险评价编码法(RAC)和改进的潜在生态风险指数法(MRI)评价了重金属的污染水平和生态风险。BCR提取结果表明, Cd(52.55%)和Mn(47.71%)以弱酸溶态为主要存在形态, Pb、Y和Cu以可还原和可氧化态为主要存在形态, Ba、Tl、V、Th、Cr、As、U、Hg、Ni、Zn和Co主要以残渣态存在。RSP评价结果表明, 沉积物受到Cd和Mn的重度污染, 受到Pb的中度污染; Cu、Y和Co表现为轻度污染, Zn、Hg、As、U、Ni、Cr、Th、V、Ba和Tl表现为无污染; RAC评价结果表明, Cd和Mn具有极高风险, Co和Zn有中度风险, Ni、Cu、Hg和Y有轻度风险, 其余元素(U、As、Pb、Cr、V、Tl、Ba和Th)无风险; MRI评价结果表明, 研究区沉积物重金属综合潜在生态风险表现为严重风险, Hg和Cd是主要贡献因子, Hg有严重的潜在生态危害, Cd有较重的潜在生态危害, Tl有中等潜在生态危害, 其余元素为低潜在生态危害。

关键词: 九龙江口; 红树林; 沉积物; 重金属; BCR提取; 生态风险

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)10-4601-12 DOI: 10.13227/j.hjkk.202201010

Speciation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments in Jiulong River Estuary

ZHANG Hua-lan^{1,2}, YU Rui-lian^{1,2}, WAN Rui-an¹, HU Gong-ren^{1,2*}, HUANG Hua-bin³, WU Ya-qing⁴

(1. College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. Institute of Environmental and Ecological Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 3. Key Laboratory of Fujian Universities for Environmental Monitoring, Xiamen 361021, China; 4. Instrumental Analysis Center of Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The speciation of heavy metals was analyzed using modified BCR four-step extraction methods to analyze the pollution of heavy metals in surface sediments collected from the mangrove wetland in Jiulong River Estuary. Subsequently, the pollution degree and the ecological risk of heavy metals were evaluated by using the ratio of secondary phase to primary phase (RSP), risk assessment code (RAC), and modified potential ecological risk index (MRI) assessment methods. The results of BCR four-step extraction showed that Cd (52.55%) and Mn (47.71%) mainly existed in weak-acid extractable fractions. Pb, Y, and Cu mainly existed in reducible and oxidizable fractions. Ba, Tl, V, Th, Cr, As, U, Hg, Ni, Zn, and Co mainly existed in residue fractions. The results of RSP showed that the sediments were heavily polluted by Cd and Mn and moderately polluted by Pb. Cu, Y, and Co were slightly polluted, whereas Zn, Hg, As, U, Ni, Cr, Th, V, Ba, and Tl were not polluted. The results of RAC showed that Cd and Mn were high risk, whereas Co and Zn were moderate risk. Ni, Cu, Hg, and Y were slight risk, and the other elements (U, As, Pb, Cr, V, Tl, Ba, and Th) presented no risk. The MRI results showed that the comprehensive potential ecological risk of heavy metals was serious in the surface sediments, whereas Hg and Cd were the main contribution factors. Hg was a serious potential hazard, followed by Cd. Tl was a medium potential hazard, and the other elements were low potential hazards. These results demonstrated that the mangroves were polluted by heavy metals in Jiulong River Estuary, and effective strategies should be employed to remediate the mangrove sediment in the future.

Key words: Jiulong River estuary; mangrove; sediment; heavy metals; BCR extraction; ecological risk

作为沿海地区海岸线重要的潮间带生态系统, 红树林具有提供经济、生态和社会服务等价值^[1]. 随着工业化和城市化的快速发展, 红树林沉积物成了重金属污染物重要的汇集地, 对重金属具有富集作用^[2]. 重金属具有高毒性、持久性和隐蔽性等特点, 在沉积物中有二次释放风险, 可以通过食物链在生物体内积累, 对生态系统稳定和人体健康造成威胁, 因此受到广大研究者的关注^[3].

重金属的化学活性、迁移率、生物有效性和潜在毒性易受到其化学组分的强烈影响^[4]. 因此, 基于重金属总量的分析不足以说明沉积物复杂的地球化学过程、重金属污染特性和危害性, 需要重点关注沉积物中重金属的赋存形态和各形态的相对含

量, 尤其是易被生物吸收利用的重金属形态^[5]. 所以, 研究红树林沉积物重金属赋存形态及其在环境中的生态风险更具实际意义.

酸溶态(F1)重金属主要通过静电作用吸附在沉积物表面, 易被生物吸收利用, 具有较高的生态风险^[6]. 因此, 基于重金属F1态的风险评价编码法(RAC)和改进的潜在生态风险指数法(MRI)成为有效评估重金属生态风险的重要手段^[7]. 沉积物重金属的化学形态受沉积物pH、环境氧化还原电位

收稿日期: 2022-01-02; 修订日期: 2022-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(21777049)

作者简介: 张华兰(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染化学与环境监测评价, E-mail: 1264379206@qq.com

* 通信作者, E-mail: grhu@hqu.edu.cn

(Eh)、TOC 和粒径等理化性质的影响而发生迁移转化^[8]. 可还原态(F2)和可氧化态(F3)在 Eh 发生改变时会转化成 F1 态, F3 态重金属在微生物作用下也会发生矿化分解, 释放到上覆水中被生物吸收利用^[9]. 因此, 基于生物可利用态(F1 + F2 + F3)重金属的次生相与原生相分布比值法可有效评估重金属的潜在生态风险.

本研究采用改进的 BCR 四步法提取九龙江口红树林表层沉积物中 16 种重金属的赋存形态含量, 运用次生相与原生相分布比值法、风险评价编码法和改进的潜在生态风险指数法对重金属进行污染水平和生态风险评价, 并运用相关性分析和冗余分析方法探究理化性质对重金属形态和生态风险的影响, 以期为进一步研究沉积物中重金属元素的迁移和形态转化机制提供科学依据, 对于保护红树林生态系统健康具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样品采集

九龙江作为福建省第二大河流, 为海峡西岸经济区的工农业生产用水和生活饮用水提供重要保障. 该流域是华南地区著名的农业基地, 上游区域有较多农业和采矿活动, 下游地区分布着小型工厂集聚的工业区, 工业废水和生活用水经常排入河口^[10]. 九龙江河口位于九龙江流域东南部海岸, 是典型的亚热带沉溺型河口, 平均潮差约 4 m, 属于径流与潮流相互作用的强潮海区. 九龙江口红树林保护区(24° 23' 33" ~ 24° 27' 38" N, 117° 54' 11" ~ 117° 56' 02" E)是福建省内面积最大的红树林分布区, 红树林沼泽占地约 288 hm², 以秋茄为主要红树种. 红树林湿地周围村庄以海产养殖为主要产业, 养殖塘排放水和生活污水通过潮沟流经红树林湿地排入海中, 给红树林湿地生态系统带来一系列环境和生态问题^[11].

本研究区域为福建省漳州市龙海市紫泥镇浒茂州的九龙江口红树林湿地(图 1), 2018 年 3 月采集了 26 个表层沉积物(0 ~ 5 cm)样品. 分别沿 7 个潮沟深入红树林湿地 200 ~ 300 m, 每隔约 50 m 采集一个样品, 两条潮沟之间分别采集 1 个样品. 样品采集后装入干净密封塑料袋中, 注明采样时间、地点和样品编号等; 样品保存在装有冰块的保温箱中运回实验室, 置于冰箱 -20℃ 冷冻保存后使用冷冻干燥机冷冻干燥, 用玛瑙研钵轻轻研磨样品, 过 2 mm 尼龙筛后装入密封袋中保存备用, 研磨后的沉积物样品过 63 μm 尼龙筛用于提取和测定重金属赋存形态.

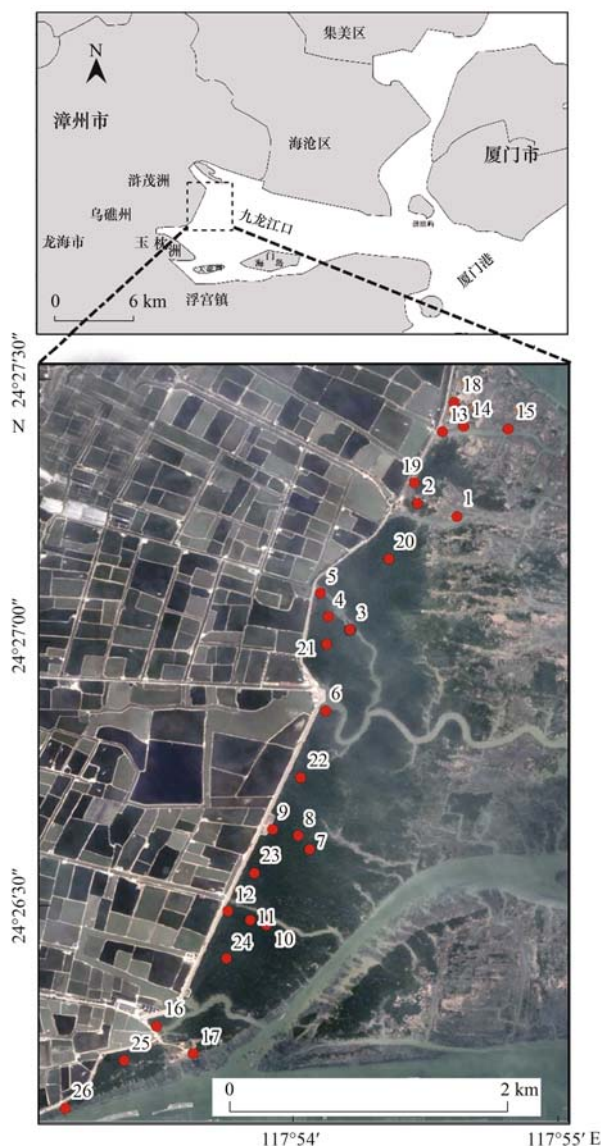


图 1 研究区域及沉积物采样点示意

Fig. 1 Study area and sediment sampling sites

1.2 沉积物理化性质测定

现场分别使用 pH 计(中国上海仪电科学仪器有限公司, PHBJ-260)和氧化还原电位仪(中国南京传滴仪器设备有限公司, FJA-15)测定沉积物 pH 和氧化还原电位; 在实验室, 分别使用盐度计(中国台湾衡欣仪表公司, AZ8371)和粒度分析仪(英国马尔文仪器有限公司, Mastersizer 3000)测定沉积物(过 2 mm 筛)的盐度和粒度; 使用总有机碳(TOC)仪(德国耶拿分析仪器公司, Multi N/C 2100)测定用 1 mol·L⁻¹ 盐酸预酸化的沉积物样品 TOC^[12].

1.3 重金属赋存形态提取及测定

采用改进的 BCR 四步法提取重金属的 4 种赋存形态^[13]: 弱酸溶态(F1)、可还原态(F2)、可氧化态(F3)和残渣态(F4), 使用电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7800 ICP-MS)测定各形态提取液的重金属含量.

实验所用试剂均为优级纯(GR),用水均为超纯水,每 10 个样品随机抽取一个作 3 次平行实验,同时采用平行空白实验保证结果的准确性,采用国家标准土壤样品 GBW07407 (GSS-7)和近海海洋沉积物标准物质(GBW 07314)进行质量控制.标准物质 GSS-7 中各元素的回收率(四态含量实测值之和与总量的比值)为 89%~110%,标准物质 GBW 07314 各元素的回收率(四态含量实测值之和与总量的比值)为 82%~119%,平行样的各元素标准偏差 RSD 小于 10%.

1.4 基于重金属赋存形态的污染评价方法

1.4.1 次生相与原生相分布比值法(RSP)

根据地球化学自身的起源和其中重金属的来源可以把沉积物划分为原生相和次生相,存在于原生矿物晶格中的残渣相重金属称为原生相,其余的重金属形态称为次生相.次生相重金属具有生物可利用性,而原生相重金属不具有生物可利

用性.用次生相中的重金属总质量分数与原生相中重金属的质量分数比值来反映和评价沉积物中重金属污染水平的方法称为次生相与原生相分布比值法^[14],计算式:

$$RSP_i = S_i/P_i$$

式中,RSP_i为第*i*种重金属污染程度;*S_i*为沉积物中第*i*种重金属次生相含量;*P_i*为沉积物中第*i*种重金属原生相含量.根据 RSP 结果的污染等级划分如表 1.

1.4.2 风险评价编码法(RAC)

由于 F1 态重金属容易被生物直接利用,具有较大的危害性,因此基于 F1 态含量与总含量比值的风险评价编码法能够评价沉积物中重金属的迁移和生物可利用性^[15],计算式:

$$RAC = (C_e/C_t) \times 100\%$$

式中,*C_e*为重金属 F1 态的含量,*C_t*为重金属的总含量.RAC 评价结果分类如表 1.

表 1 RSP、RAC、δ、E_rⁱ 和 MRI 评价结果分类

Table 1 Classification of RSP, RAC, δ, E_rⁱ, and MRI evaluation results

RSP	污染程度	RAC/%	污染风险	δ	E _r ⁱ	MRI	生态风险水平
<1	无污染	<1	无风险	1.0	<40	<190	低
≥1~2	轻度污染	≥1~10	轻度风险	1.0	≥40~80	≥190~380	中等
≥2~3	中度污染	≥10~30	中度风险	1.2	≥80~160	≥380~760	较重
≥3	重度污染	≥30~50	高风险	1.4	≥160~320	≥760	重
—	—	≥50	极高风险	1.6	≥320	—	严重

1.4.3 改进的潜在生态风险指数(MRI)

RSP 和 RAC 缺乏对重金属背景值的考虑,近年来提出了一种改进的潜在生态风险指数(MRI)综合评估重金属的污染情况^[16].该方法引入了生物毒性系数(*T_rⁱ*)和 F1 活性形态的风险系数(*Ω*),既消除了重金属背景值,又考虑了重金属生物毒性、总浓度和生物可利用性的影响,可以反映多种重金属的综合影响.MRI 的计算式:

$$MRI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times (C_D^i \times \Omega / C_r^i)$$
$$\Omega = A(\delta - 1) + 1$$

式中,*E_rⁱ*为第*i*种重金属的潜在危害指数;*T_rⁱ*为第*i*种重金属的毒性系数^[17~20],具体如表 2;*C_Dⁱ*为第*i*种重金属的平均含量;*Ω*为 F1 活性形态风险系数;*A*为重金属 F1 态的百分比;*δ*为重金属的毒性指数,*δ*值取决于 RAC 值,具体如表 1;*C_rⁱ*为第*i*种重金属参比值,本研究选用福建省海岸带土壤元素背景值^[21]和厦门市土壤元素背景值^[22]作为参比,详见表 2;MRI 污染风险分类与 RI 相似,本研究涉及 14 种重金属的综合潜在生态风险评估,因此对 Hakanson^[23]的评价风险等级 RI 限值进行调整,调整后的评价等级见表 1.

表 2 重金属的毒性系数和元素背景值

Table 2 Toxicity coefficient of heavy metals and background values of elements

重金属	Pb	Cd	Cu	Zn	As	Cr	Hg	V
毒性系数	5	30	5	1	10	2	40	2
福建省海岸带土壤元素背景值/mg·kg ⁻¹	39	0.06	22.4	83.6	6.38	40.07	0.063	79.7
重金属	Co	Mn	Ni	重金属	Ba	U	Tl	
毒性系数	5	1	5	毒性系数	2	20	40	
福建省海岸带土壤元素背景值/mg·kg ⁻¹	9.48	507	17.4	厦门市土壤元素背景值	423	10.2	0.683	

2 结果与讨论

2.1 沉积物理化性质

九龙江口红树林表层沉积物理化性质见表 3. 沉积物 pH 范围为 6.12 ~ 8.05, 氧化还原电位 (Eh) 为 -34 ~ 67 mV, 整体为弱酸性还原环境; 盐度变化范围为 1.99‰ ~ 7.04‰; 沉积物主要由粉砂组成 (70.06%), 黏土占 23.88%, 砂占 6.06%; ω (TOC) 变化范围为 11.10 ~ 61.93 g·kg⁻¹, 平均值为 23.77 g·kg⁻¹, 该结果与于宇等^[24]的研究结果相似. 与九

龙江口浮宫红树林相比, 本研究区域沉积物 TOC 相对较高^[25].

从空间分布看, 沉积物 Eh、TOC、砂含量差异明显, 变异系数 (CV) 分别为 71.79%、41.40% 和 67.46%, pH、盐度、黏土和粉砂含量相对稳定. 由于红树植物分布和人类活动的影响, 沉积物理化性质存在一定空间差异. 红树植物对沉积物理化性质存在影响表现为红树林边缘的沉积物 pH (8.05) 为碱性的特性. 人类活动如当地排放的污染物也会导致沉积物样品之间的理化性质存在一定差异.

表 3 九龙江口红树林表层沉积物理化性质¹⁾

Table 3 Physicochemical properties of surface sediments of mangrove wetland in Jiulong River estuary							
理化性质	pH	Eh/mV	ω (TOC) /g·kg ⁻¹	盐度/‰	ω (黏土) /%	ω (粉砂) /%	ω (砂) /%
最小值	6.12	-34	11.10	1.99	16.54	56.84	0.17
最大值	8.05	67	61.93	7.04	31.08	77.54	15.81
平均值	6.89	25.31	23.77	3.92	23.88	70.06	6.06
SD	0.34	18.17	9.84	0.98	4.15	5.51	4.09
CV/%	4.90	71.79	41.40	25.00	17.37	7.87	67.46

1) 黑体字表示较大 CV 值

2.2 重金属赋存形态特征

采用改进的 BCR 四步法提取九龙江口红树林表层沉积物 16 种重金属 (Cd、Mn、Pb、Y、Cu、Co、Zn、Ni、Hg、U、As、Cr、Th、V、Tl、Ba) 的 4 种化学形态, 结果如图 2.

释放或直接被生物利用, 需要重点关注^[16]. 第二类重金属主要以 F2 + F3 态为主, 包括 Pb、Y 和 Cu, 其中 Pb (57.35%) 和 Y (39.09%) 的 F2 态占比较大, F2 态含量分别为 40.57 mg·kg⁻¹ 和 12.01 mg·kg⁻¹, Cu 的 F3 态 (34.69%) 占比高于 F2 态 (20.43%). 该类重金属主要以铁锰氧化物、硫化物和有机结合态形式存在, 随 Eh 改变而发生迁移, 造成水体二次污染. 第三类重金属以 F4 态为主要存在形态, 包括 Ba、Tl、V、Th、Cr、As、U、Hg、Ni、Zn 和 Co, 残渣态重金属主要分布在原生和次生硅酸盐矿物晶格中, 性质稳定, 难以迁移和被生物利用, 不易对环境产生危害^[26]. 虽然 Zn 和 Co 主要以 F4 态存在, 但是其生物可利用态含量较高, 分别为 76.91 mg·kg⁻¹ 和 7.64 mg·kg⁻¹, 也具有一定的环境风险. 此外, Liu 等^[27]的研究发现九龙江口红树林沉积物中 Cd、Mn、Pb 和 Cu 主要以生物可利用态存在, 且受到了一定程度污染, 本研究结果与其一致. Tian 等^[28]的研究发现水产养殖废水是九龙江口红树林沉积物污染重金属的重要来源.

沉积物中重金属赋存形态存在空间差异性. Cd 除了在 12 号采样点主要以 F2 态为主, 其余采样点都是以 F1 态为主. 此外, Y、Pb、Cu、As、Cr 和 V 的 F1 态含量 CV 较大 (41.33% ~ 154.26%), 说明沉积物受到这些重金属不同程度污染和具有不同的释放迁移性, 生态风险存在差异. 除了 Cd 的 F4 态 CV 较大 (38.50%), 其他元素 F4 态含量的 CV 较小, 表明整片红树林表层沉积物中重金属 F4 态含量相对稳定, 进一步说明红树林沉积物具有相似的母质成分^[29].

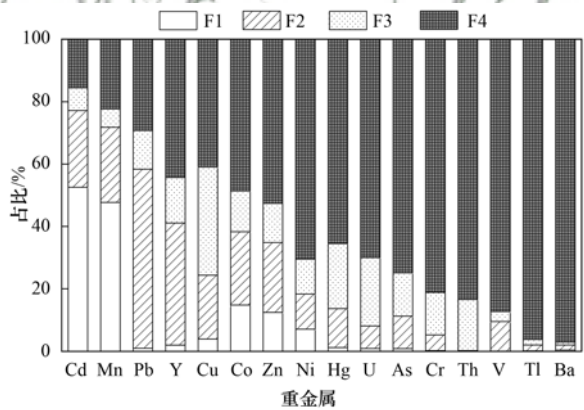


图 2 九龙江口红树林表层沉积物重金属 BCR 四态占比

Fig. 2 BCR speciation of heavy metals in surface sediments of mangrove wetland in Jiulong River estuary

不同重金属 BCR 四态占比不同, 按照主要存在形态可以将 16 种重金属分为 3 类. 第一类主要以 F1 态为主, 包括 Cd (52.55%) 和 Mn (47.71%), F1 态含量分别为 0.15 mg·kg⁻¹ 和 538.01 mg·kg⁻¹, 表明两种元素在酸性条件下容易释放, 生物可利用性高. 沉积物中 Cd 主要以 F1 态存在可能是因为 Cd 和 Ca 的原子半径相似, 易吸附在颗粒物表面与 Ca 发生替代反应, 所以 Cd 易与碳酸盐结合形成金属结合物^[7]. F1 态重金属相对其他形态更易在环境中

结合重金属的总量数据^[30],以 F1 态为主要存在形态的 Cd 和 Mn 总量均值分别为 0.24 mg·kg⁻¹ 和 1 033.09 mg·kg⁻¹,是背景值的 2 倍以上,且元素的 CV 值较大,表明这 2 种重金属在不同采样点的含量存在差异,反映了不同程度的污染. ω(Ba)、ω(U) 和 ω(Th) 接近土壤元素背景值,分别为 367.46、4.48 和 28.67 mg·kg⁻¹. 重金属的总量和赋存形态结果表明,九龙江口红树林表层沉积物中 Cd 和 Mn 受到了污染,且 F1 态含量较高,易在酸性环境中释放到水体,具有较高的迁移性和生物可利用性,且本研究区沉积物整体呈偏酸性条件,Cd 和 Mn 极易以离子形式释放到水体环境中,对环境的潜在风险较大. Ba、U 和 Th 的含量接近土壤元素背景值,且 F4 态含量较高,不易受环境因子改变而发生二次释放,反映土壤母质来源.

对比国内其他红树林沉积物重金属赋存形态(表 4). 鉴于其他地区研究的重金属只有 Cu、Pb、Zn、Cd 和 Cr 这 5 种元素,故只选 Cu、Pb、Zn、Cd 和 Cr 进行比较. 本研究区沉积物中 Cu、Pb、Cd 和 Cr 的四态情况与九龙江流域表层沉积物重金属赋存形态情况相似,Cd 主要以 F1 态存在,Pb 主要以 F2 态存在,Cr 和 Cu 主要以 F4 态存在,九龙江流域表层沉积

物中 Zn 的四态含量占比相近,而本研究区 Zn 主要以 F4 态存在. 与其他 3 个红树林相比,海南清澜港红树林表层沉积物中 Cu 和 Zn 的 F1 态含量占比较高,本研究区 Cu 和 Zn 主要以 F4 态存在;除了广西山口红树林,Pb 在沉积物中主要以 F2 态存在,Cd 主要以 F1 态存在,表明红树林沉积物中 Cd 有较高的生物可利用性和迁移性;Cr 在湛江湾、本研究区主要以 F3、F4 态存在,F1 态占比很低,生物可迁移性较低. 综上,广西山口红树林重金属主要以 F4 态存在,重金属迁移能力低,且该红树林位于保护区内,受到人类活动干扰小;海南和湛江湾红树林重金属多以 F1 态存在,生物可迁移性高,且这些红树林周边分布较多的工业区,受到较为强烈的人类活动影响;本研究区红树林表层沉积物重金属多以 F4 态存在,少数以 F1 和 F2 态存在. 造成不同地区红树林沉积物重金属形态差异的原因不仅与人类活动排放的污染物有关,土壤母质成分也会对重金属形态产生影响. 土壤母质决定土壤颗粒和矿物组成,从而影响重金属的吸附能力和吸附形态,还影响沉积物 pH,进而影响重金属的活性和形态^[31]. 因此,对比不同地区红树林沉积物重金属形态差异与人为污染时,需要考虑各地区土壤母质差异的影响^[32].

表 4 九龙江口和其他红树林以及九龙江流域表层沉积物重金属赋存形态的比较¹⁾/%

研究区域		广东湛江湾 ^[33]	海南清澜港 ^[34]	广西山口 ^[35]	九龙江流域 ^[36]	本研究
Cu	F1	25.31	35.78	12.45	9.79	3.96
	F2	36.49	21.35	12.37	23.48	20.43
	F3	30.63	9.57	18.15	24.50	34.69
	F4	7.57	33.3	57.02	42.23	40.92
Pb	F1	7.33	6.35	12.73	2.88	1.00
	F2	67.44	64.33	14.03	62.45	57.35
	F3	6.43	5.75	17.67	10.13	12.41
	F4	18.80	23.57	55.47	24.54	29.24
Zn	F1	51.55	32.56	15.73	27.05	12.49
	F2	17.86	22.37	14.40	23.59	22.38
	F3	19.82	7.82	15.42	24.06	12.53
	F4	10.77	37.25	54.50	25.30	52.60
Cd	F1	76.09	48.1	14.78	33.44	52.55
	F2	15.22	6.01	13.48	25.11	24.62
	F3	6.52	2.06	15.33	21.48	7.26
	F4	2.17	43.83	56.42	19.97	15.57
Cr	F1	1.48	—	—	0.93	0.24
	F2	27.16	—	—	12.08	5.04
	F3	45.13	—	—	15.40	13.60
	F4	26.23	—	—	71.59	81.12

1) 黑体字表示重金属主要存在形态的占比

2.3 重金属生态风险评价

2.3.1 基于次生相与原生相分布比值法评价结果

基于 RSP 对九龙江口红树林表层沉积物重金属进行生态风险评价,结果如图 3 所示. RSP 平均值

依次为: Cd (6.55) > Mn (3.95) > Pb (2.50) > Cu (1.55) > Y (1.29) > Co (1.07) > Zn (0.91) > Hg (0.56) > As (0.35) > U (0.44) > Ni (0.42) > Cr (0.23) > Th (0.20) > V (0.15) > Ba (0.03) >

Tl(0.04),表明 Cd 和 Mn 受到重度污染,Pb 受到中度污染,3 种重金属总量均值分别为 0.24、1.033 和 73.69 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均超过了土壤元素背景值,表明存在污染的情况,这与前人的研究结果一致^[30]; Cu、Y 和 Co 受到轻度污染,部分采样点受到 Zn 的轻度污染,Hg、As、U、Ni、Cr、Th、V、Ba 和 Tl 没有受到污染.受污染重金属元素以次生相为主,反映九

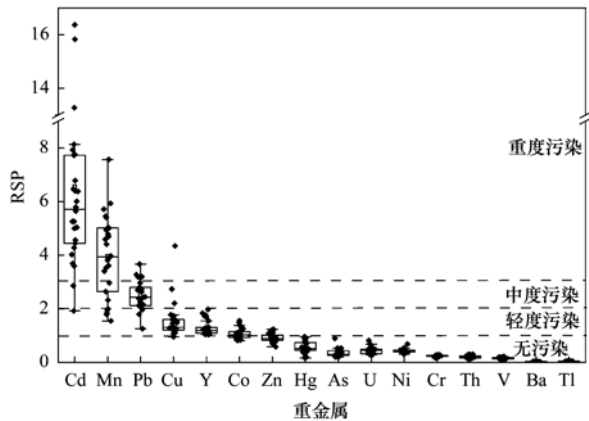


图3 九龙江口红树林表层沉积物重金属 RSP 评价结果

Fig. 3 RSP of heavy metals in the surface sediments of mangrove wetland in Jiulong River estuary

江口红树林表层沉积物重金属生物有效性较高,再次释放到环境中的风险较大.

对平均 RSP 值表现为中度污染以上的 Cd、Mn 和 Pb 进行空间分析,结果如图 4 所示. 92% 的采样点受到 Cd 的重度污染,8% 的采样点受到 Cd 中度污染(5 号点)和轻度污染(3 号点). Mn 在 69% 的点表现为重度污染,12% 的点表现为中度污染,19% 的点表现为轻度污染. Pb 在 19% 的点表现为重度污染,69% 的点表现为中度污染,12% 的点表现为轻度污染. 从各元素 RSP 评价结果的空间分布看,本研究区整体受到 Cd 的重度污染,大量使用含 Cd 的肥料会造成严重的 Cd 污染;中到北部的红树林表层沉积物受到 Mn 的重度污染,南部受到轻度至中度污染,可能是北部红树林受到大量来自周边工业区和水产养殖废水的污染;九龙江口红树林表层沉积物主要受到 Pb 的中度污染. 综上,九龙江口红树林所有采样点的 Cd、Mn 和 Pb 具有较高的二次释放能力,尤其是北部和中部红树林沉积物中重金属元素的环境风险应引起高度重视.

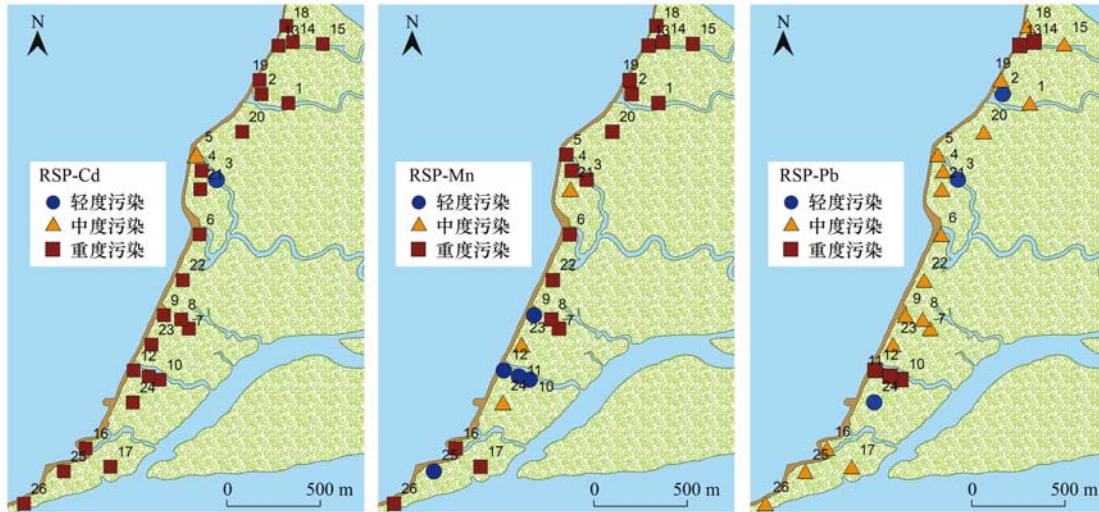


图4 九龙江口红树林表层沉积物 Cd、Mn 和 Pb 的 RSP 评价结果

Fig. 4 RSP results of Cd, Mn, and Pb in the surface sediments of mangrove wetland in Jiulong River estuary

2.3.2 基于风险评价编码法评价结果

基于重金属 F1 态的 RAC 可以评价重金属的生物利用性和迁移性. 九龙江口红树林表层沉积物重金属 RAC 评价结果如图 5 所示,RAC 平均值依次为: Cd(52.98%) > Mn(50.66%) > Co(14.84%) > Zn(14.03%) > Ni(7.12%) > Cu(3.96%) > Y(2.01%) > Hg(1.25%) > Pb(1.00%) > U(0.91%) > As(0.89%) > Ba(0.42%) > Cr(0.26%) > Tl(0.14%) > V(0.072%) > Th(0.028%). 九龙江口红树林表层沉积物重金属 Cd 和 Mn 具有极高风险,Co 和 Zn 为中度风险,Ni、Cu、

Hg 和 Y 为轻度风险,U、As、Pb、Cr、V、Tl、Ba 和 Th 无风险. 与 RSP 结果相比,As、U、Cr、Th、V、Ba 和 Tl 的 RAC 结果与其相一致,即这 7 种重金属没有受到污染且无环境风险.

对平均 RAC 值表现为中度风险以上的 Cd、Mn、Co 和 Zn 进行空间分析,结果如图 6 所示. Cd 在 62% 的点具有极高风险,38% 的点具有高风险. Mn 在 50% 的点具有极高风险,46% 的点具有高风险,4% 的点为中风险. Co 和 Zn 整体表现为中度风险. 从各元素的 RAC 结果的空间分布来看,Co 和 Zn 的风险等级空间差异小,整体表现为中度风

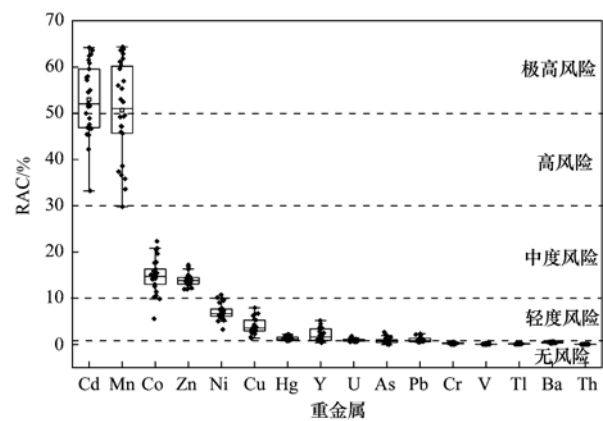


图5 九龙江口红树林表层沉积物重金属 RAC 评价结果

Fig. 5 RAC results of heavy metals in the surface sediments of mangrove wetland in Jiulong River estuary

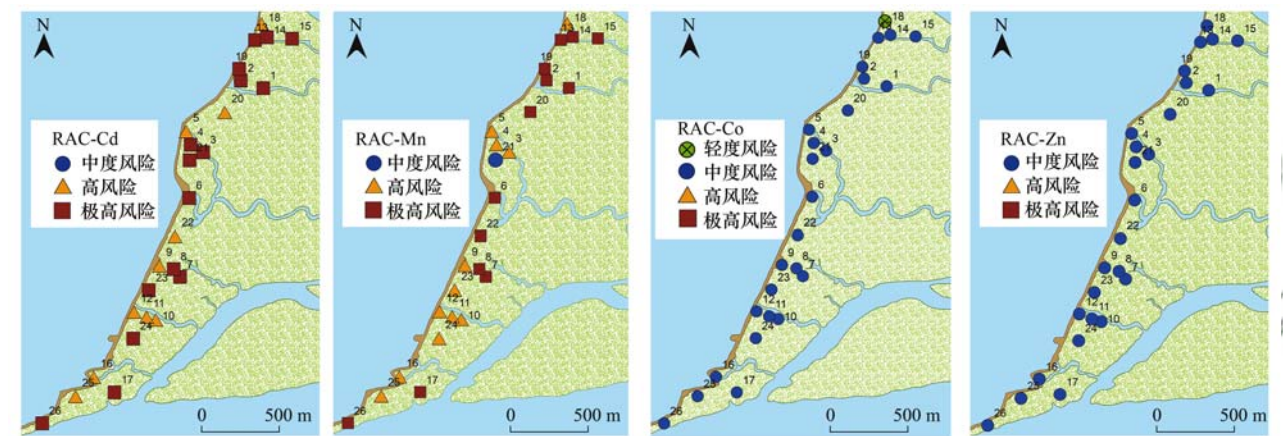


图6 九龙江口红树林表层沉积物 Cd、Mn、Co 和 Zn 的 RAC 评价结果空间分布

Fig. 6 RAC results of Cd, Mn, Co, and Zn in the surface sediments of mangrove wetland in Jiulong River estuary

$> \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Co} > \text{Cr} > \text{Mn} > \text{V} > \text{Ba} > \text{Zn}$. Hg 和 Cd 具有高的潜在生态危害,而其他重金属为低-中等的潜在生态危害. Hg 的高潜在生态危害评价结果与九龙江河口水域表层沉积物重金属潜在生态风险评价结果相一致^[38]. Yan 等^[30]调查发现水产养殖源是造成九龙江口红树林 Hg 和 Cd 高生态风险的重要来源. 而相比之前关于 Hg 的调查结果,近些年九龙江口红树林沉积物中 Hg 的污染程度开始降低,但其潜在生态风险仍不容小觑^[39]. 总体上看,九龙江口红树林表层沉积物受到了 Cd 的严重污染,且具有较重的生态风险;虽然 RSP 和 RAC 结果显示沉积物中 Hg 为无至轻度污染,但是由于其具有较强的

险;中部和北部红树林采样点 Cd 和 Mn 具有极高风险,南部潮沟(10~12 号点) Cd 和 Mn 具有高风险,总之,九龙江口南部红树林表层沉积物 Cd、Mn 较中部和北部的风险低,造成这种空间差异的原因可能与红树林受到的人为污染程度不同有关.

2.3.3 基于改进的潜在生态风险指数评价结果

单个重金属的 E_r^i 值可以评估表层沉积物重金属的生态风险^[37]. 由于 F1 态重金属具有较大的可迁移性和危害性,因此 MRI 重点考虑 F1 态重金属的毒性和浓度,相比 RI 法能更好地评估重金属的潜在生态风险. 由于缺乏 Y 和 Th 的 T_r^i 值,故只评价 14 种重金属的潜在生态风险, E_r^i 结果如表 5 所示. 14 种重金属 E_r^i 值顺序为: $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{Tl} > \text{As} > \text{Pb} > \text{U}$

生物毒性 ($T_r^i = 40$), 且 $\omega(\text{Hg})$ ($0.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 大于福建省海岸带土壤元素背景值 ($0.063 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 因此 E_r^i 法结果表明 Hg 具有高生态风险,应该列入本研究区域的优先污染物名录中. Cd 在其他红树林沉积物中也发现了高生态风险,如福田红树林、云霄红树林、湛江红树林^[1], 且与九龙江流域农田土壤 Cd 具有同样的高生态风险^[40]. 此外, RSP 和 RAC 结果显示红树林沉积物受到 Mn 的中度至重度污染,具有极高生态风险,但其生物毒性系数较低,故表现为较低生态危害. 因此结合多种评价方法才能更准确和全面地评价沉积物的污染水平和生态风险.

表5 九龙江口红树林表层沉积物中重金属 E_r^i 的评价结果

Table 5 The E_r^i results of metal in the surface sediments of mangrove wetland in Jiulong River estuary							
重金属	Pb	Cu	Zn	As	Cr	V	Mn
平均值	9.45	7.88	1.73	20.52	3.18	2.37	2.56
风险等级	低	低	低	低	低	低	低
重金属	Co	Ni	Ba	U	Tl	Cd	Hg
平均值	7.54	8.27	1.74	8.79	48.26	152.26	794.59
风险等级	低	低	低	低	中等	较重	严重

14 种重金属的综合潜在生态风险指数结果如图 7 所示,九龙江口红树林表层沉积物重金属的综合潜在生态风险 MRI 为 1069,属于严重风险,其中 Hg 对综合潜在生态风险的贡献最大(70.11%),Cd(14.24%)次之,说明 Hg 和 Cd 是九龙江口红树林表层沉积物主要风险贡献因子。Hg 的 E_i^r 结果显示其具有严重的生态风险,可能是 Hg 的毒性系数较大以及考虑了自然背景值的影响。若没有选取毒性系数大的 Hg,本研究区重金属的生态风险评价结果与李柳强等^[41]的研究结果一致,即 Cd 存在较重生态风险,综合潜在生态风险表现为中等生态风险,说明了重金属参数的选择会极大地影响评价的结果。

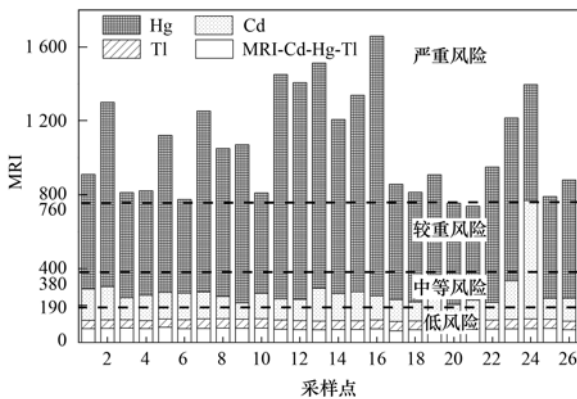


图 7 九龙江口红树林表层沉积物 14 种重金属 MRI 的评价结果

Fig. 7 MRI results of heavy metals in the surface sediments of mangrove wetland in Jiulong River estuary

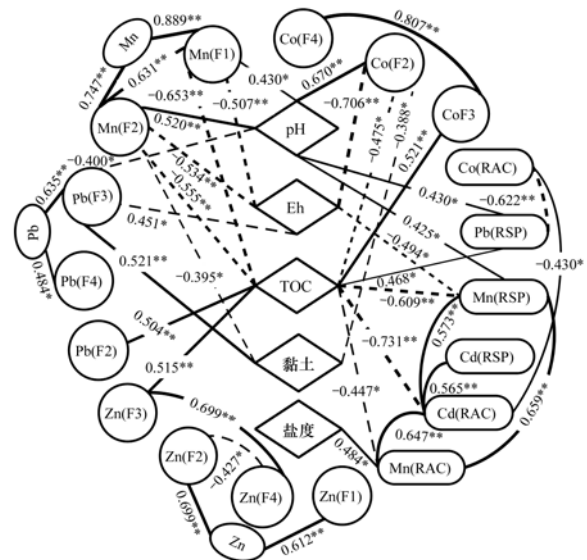
2.4 理化性质与重金属形态之间关系的统计分析

沉积物理化性质影响重金属的赋存形态,利用 Pearson 相关性分析法探讨理化性质与生态风险较高的 6 种重金属形态(Cd、Mn、Pb、Zn、Co 和 Hg)的相关性,将相关性结果绘制成如图 8 所示的可视化相关性网络。Cd 和 Hg 的四态含量与沉积物理化性质无显著相关性,故没有标出。由图 8 可知,pH 与 Mn(F1)、Mn(F2) 和 Co(F2) 呈显著正相关,与 Pb(F3) 呈负相关。Eh 与 Mn(F1)、Mn(F2) 和 Co(F2) 呈显著负相关,与 Pb(F3) 呈正相关。TOC 与 Zn(F3) 和 Co(F3) 态呈显著正相关,表明九龙江口红树林表层沉积物 Zn 和 Co 受有机质影响显著,在 TOC 含量高的沉积物中易与有机质结合,从而降低其迁移能力和生物毒性^[42]。重金属赋存形态与沉积物粒径组分(粉砂、黏土、砂)相关性分析表明,黏土与 Pb(F3) 呈显著正相关,与 Mn(F2) 和 Co(F2) 呈显著负相关。

一般情况下,重金属会随着 pH 降低逐渐向易被植物吸收利用的形态转化。但是本研究区 F1 态 Mn 含量随着 pH 升高而增加,其他 F1 态重金属与 pH 无显著相关,没有明显的规律。而沉积物 pH 增

加导致 Mn(F2) 和 Co(F2) 增加,可能是由氧化物表面专属吸附会随着 pH 升高而增强引起的^[43]。由于 pH 值升高引起有机质的溶解度增加,与重金属离子的络合能力增强,大多数重金属有机结合态含量随 pH 值升高呈增加趋势,本研究区沉积物大多数重金属的 F3 态与 pH 无显著相关,而与 Pb(F3) 呈正相关,可能和研究区有外源重金属输入有关^[32]。通常沉积物 Eh 降低会增加重金属有效态含量。当 Eh 降低时,大量的 Fe^{3+} 和 Mn^{4+} 被还原为 Fe^{2+} 和 Mn^{2+} 离子,与其他重金属离子竞争而导致 F1 态和 F2 态重金属被释放,增加了 F1 和 F2 态重金属的含量,因此本研究区沉积物 Mn(F1)、Mn(F2) 和 Co(F2) 的含量随着 Eh 降低而增加^[8,44]。

由于 TOC 与重金属具有络合作用,常被认为是重金属的主要吸附载体,是影响重金属迁移转化的重要因素^[45],F3 态重金属主要以硫化物和有机结合态形式存在。本研究区 TOC 与 F3 态重金属呈显著正相关,与 F1 态呈显著负相关,是因为有机质能与沉积物中 F1 态重金属结合形成 F3 态,导致 F1 态含量下降^[46]。TOC 对重金属形态的影响较为复杂,通常还会受到土壤其他理化性质、微生物的作用等综合因素的影响,与重金属的种类和含量不同而有所差异,需要进行深入研究^[47]。由于富含黏粒的沉积物土质致密,透水性差,呈还原环境,此时沉积物中 Pb 离子易与硫结合形成硫化物沉淀,而黏性沉积



虚、实线连接线表示负、正相关;连接线的粗细表示相关性大小; * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$; Mn(F1) 表示弱酸态 Mn, 以此类推

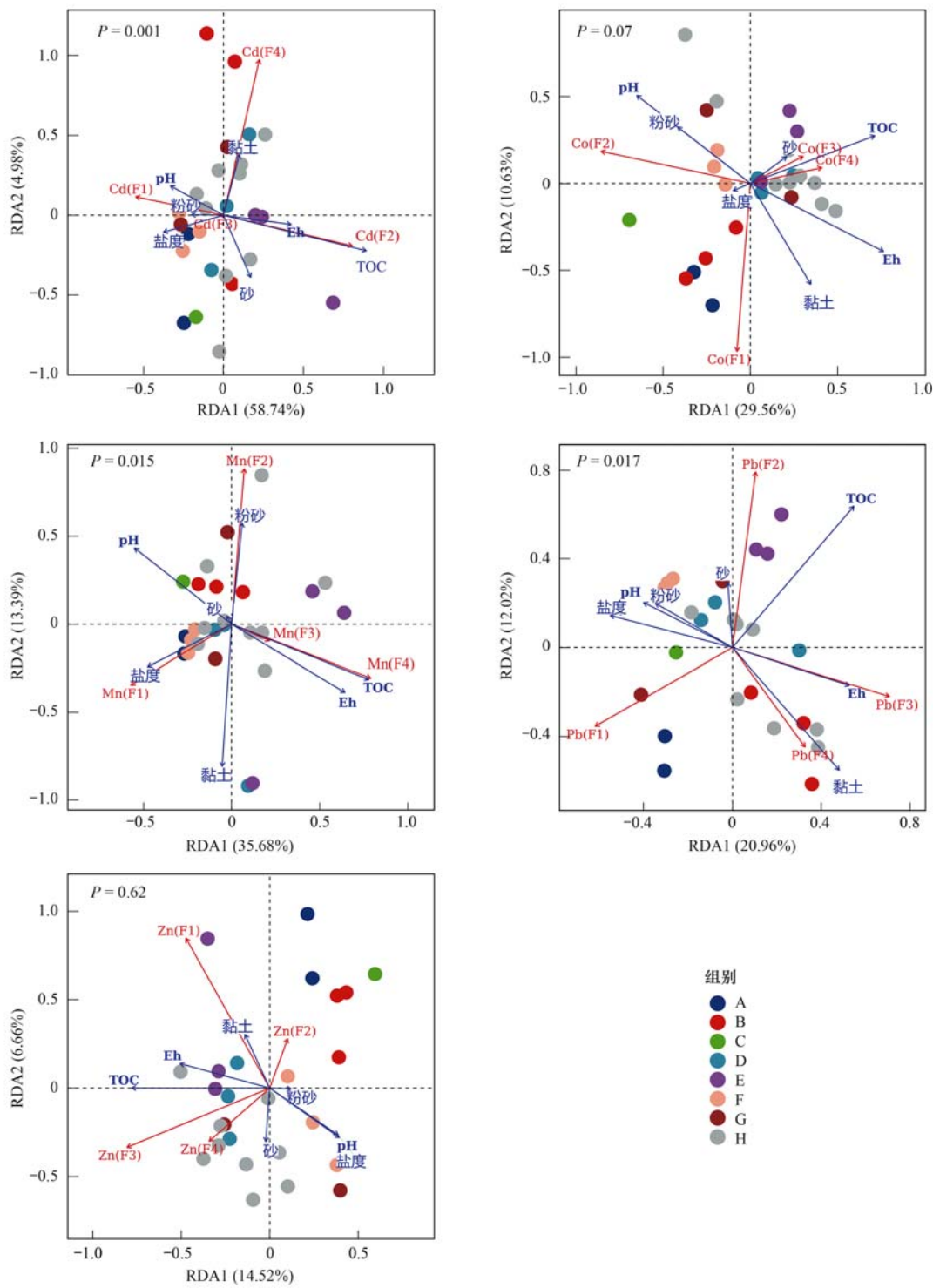
图 8 九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态、RSP、RAC 与理化性质的相关性可视化网络

Fig. 8 Correlation network analysis between the speciation of metals and physicochemical properties, RSP and RAC in the surface sediments of mangrove wetland in Jiulong River estuary

物中有机质含量较高,也会增加有机结合态 Pb 的含量.

采用冗余分析(RDA)探究九龙江口红树林表

层沉积物理化性质对重金属形态的影响,结果如图 9 所示. 位于同一条潮沟的采样点重叠(同颜色圆点分布位置相近)表示这些采样点具有相同的理化性



蓝色箭头表示理化性质,长度表示影响大小;箭头与坐标轴夹角表示理化性质与坐标轴相关性,夹角大小表示相关性大小;箭头之间的夹角表示理化性质之间的相关性,锐角为正相关,直角为不相关,钝角为负相关. 采样点之间的距离表示沉积物性质相似程度;坐标轴括号百分比代表对应坐标轴所能解释的原始数据中差异的比例;A~G 表示红树林从北到南 7 条潮沟的采样点分组,相同颜色的点表示位于同一条潮沟的采样点,H 表示相邻两条潮沟之间的采样点(18~26 号)

图 9 九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态与理化性质的 RDA 结果

Fig. 9 Results of RDA between the speciation of heavy metals and physicochemical properties in the surface sediments of mangrove wetland in Jiulong River estuary

质和重金属污染情况. 可见, 粉砂对 Mn(F2) 具有显著正影响, TOC 对 Mn(F1) 和 Mn(F2) 影响较小, 盐度和 pH 对 Mn(F1) 有正影响, 而 TOC 对 Mn(F1) 和 Mn(F2) 为显著负相关的影响, 与 Pearson 相关性分析结果一致. 沉积物砂组分对重金属形态影响很小, 但粉砂对 Mn(F2) 具有一定影响. 综上, 沉积物理化性质对重金属的赋存形态起到重要影响作用.

2.5 沉积物理化性质与重金属生态风险的相关性

基于重金属赋存形态的评价方法能够有效地评价重金属的迁移能力和生物可利用性, 目前已有较多研究环境因素对重金属赋存形态的影响. 利用 Pearson 相关性分析探究 RSP 和 RAC 评价结果和沉积物理化性质之间的相关性, 有助于理解环境因素对重金属生态风险的影响机制. 由图 8 可看出 Mn 的 RSP 值与沉积物 pH 呈显著正相关, 与 Eh 呈显著负相关, 表明 Mn 的污染水平受到 pH 和 Eh 增加而发生增加和降低, pH 对 Mn 污染水平的影响主要是通过影响 Mn(F1) 和 Mn(F2) 而实现的, F1 态重金属会随着 pH 降低逐渐溶解和释放, 主要是由于沉积物中 H^+ 等阳离子的增加加剧了重金属离子在土壤中的交换位点竞争, 减少沉积物对重金属离子的吸附^[46]. TOC 与 Pb 的 RSP 值呈显著正相关, 与 Mn 的 RSP 值和 Cd、Mn 的 RAC 值呈显著负相关, 表明沉积物 TOC 影响 Pb 的污染水平, 富含 TOC 的沉积物与重金属形成有机结合物, 从而降低自由离子的活度系数, 使 F1 态重金属的含量减少, 降低 Cd 和 Mn 的生态风险. 但是有研究表明水产养殖废水的排放会降低重金属与有机质的结合能力, 增加重金属的迁移性和潜在毒性^[28], 所以即使沉积物富含 TOC, 但是 Pb 的生态风险并没有显著降低. TOC 对 Cd 的 RAC 值影响规律与 Liang 等^[9]的研究结果相同. 此外, 沉积物盐度增加导致 Mn 的环境风险增加; Cd 和 Mn 的 RSP 值与 RAC 值呈显著正相关, 表明 Cd 和 Mn 的污染程度增加会提高其环境风险. 以上结果表明环境因子通过改变重金属的形态而影响其迁移转化, 进而影响重金属的污染程度和环境风险. 因此, 在对沉积物重金属进行风险评价时, 也需要将影响重金属形态转化的环境因子考虑在内, 结合环境因子的影响情况, 做出综合分析.

3 结论

(1) 九龙江口红树林表层沉积物整体属于弱酸性还原环境, 主要由粉砂组成, 有机质含量较高.

(2) 九龙江口红树林表层沉积物中 16 种重金属赋存形态存在差异, Cd 和 Mn 主要以弱酸态存在, Pb、Y 和 Cu 以可还原和可氧化态存在; Ba、Tl、

V、Th、Cr、As、U、Hg、Ni、Zn 和 Co 以残渣态存在, 非残渣态重金属生物可利用性和可迁移性较高, 尤其是 Cd 和 Mn.

(3) 污染程度和风险评价结果表明, 九龙江口红树林表层沉积物受到 Cd 和 Mn 的重度污染, 具有极高的环境风险, 且北部红树林污染程度高于南部红树林; Hg 和 Cd 是高潜在生态风险的主要贡献因子, 需要重点关注九龙江口红树林表层沉积物中 Cd、Mn、Pb、Hg、Zn 和 Co 这 6 种重金属的环境风险.

(4) 相关性分析结果显示, 沉积物理化性质主要与非残渣态重金属含量具有显著相关性, 通过影响非残渣态重金属的含量影响其污染水平(RSP) 和生态风险(RAC); 残渣态含量与理化性质无显著相关, 表明残渣态中重金属不易受环境因素影响.

(5) 冗余分析结果显示, 位于相同潮沟的沉积物具有相似的理化性质和重金属污染情况; pH、Eh 和 TOC 对 Mn 的弱酸溶态和可还原态的影响结果与相关性分析的结果相似, 但影响其可还原态的主导环境因素是粉砂含量.

参考文献:

- [1] Shi C, Ding H, Zan Q J, *et al.* Spatial variation and ecological risk assessment of heavy metals in mangrove sediments across China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **143**: 115-124.
- [2] Chai M W, Li R L, Ding H, *et al.* Occurrence and contamination of heavy metals in urban mangroves: A case study in Shenzhen, China[J]. *Chemosphere*, 2019, **219**: 165-173.
- [3] Yan Z Z, Sun X L, Xu Y, *et al.* Accumulation and tolerance of mangroves to heavy metals: a review [J]. *Current Pollution Reports*, 2017, **3**(4): 302-317.
- [4] Lintern A, Leahy P J, Heijnis H, *et al.* Identifying heavy metal levels in historical flood water deposits using sediment cores[J]. *Water Research*, 2016, **105**: 34-46.
- [5] Delgado J, Barba-Brioso C, Nieto J M, *et al.* Speciation and ecological risk of toxic elements in estuarine sediments affected by multiple anthropogenic contributions (Guadiana saltmarshes, SW Iberian Peninsula): I. Surficial sediments[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(19): 3666-3679.
- [6] Jiang Z G, Xu N, Liu B X, *et al.* Metal concentrations and risk assessment in water, sediment and economic fish species with various habitat preferences and trophic guilds from Lake Caizi, Southeast China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **157**: 1-8.
- [7] Zhang G L, Bai J H, Xiao R, *et al.* Heavy metal fractions and ecological risk assessment in sediments from urban, rural and reclamation-affected rivers of the Pearl River Estuary, China[J]. *Chemosphere*, 2017, **184**: 278-288.
- [8] 曹勤英, 黄志宏. 污染土壤重金属形态分析及其影响因素研究进展[J]. *生态科学*, 2017, **36**(6): 222-232.
- [9] Cao Q Y, Huang Z H. Review on speciation analysis of heavy metals in polluted soils and its influencing factors[J]. *Ecological Science*, 2017, **36**(6): 222-232.
- [9] Liang G N, Zhang B, Lin M, *et al.* Evaluation of heavy metal mobilization in creek sediment: Influence of RAC values and

- ambient environmental factors [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **607-608**: 1339-1347.
- [10] 李青生, 王翠, 蒋金龙, 等. 九龙江口表层沉积物重金属的污染特征与来源分析[J]. *海洋科学*, 2020, **44**(12): 32-43.
Li Q S, Wang C, Jiang J L, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of heavy metals in the surface sediments of the Jiulong River Estuary[J]. *Marine Sciences*, 2020, **44**(12): 32-43.
- [11] 李精精. 福建九龙江流域产业结构的水环境污染效应[J]. *亚热带水土保持*, 2017, **29**(1): 7-11.
Li J J. Pollution effects to water-environment of the industry structure in the Jiulong River watershed of Fujian province[J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2017, **29**(1): 7-11.
- [12] 王琳, 孙国鼎. Multi N/C 2100S 总有机碳分析仪校准方法的建立[J]. *环境监控与预警*, 2011, **3**(4): 9-11.
Wang L, Sun G N. Establishment of the method for Multi N/C 2100S calibrating total organic carbon analyzer [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2011, **3**(4): 9-11.
- [13] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. *Analytical Chemistry*, 1979, **51**(7): 844-851.
- [14] 陈静生, 董林, 邓宝山, 等. 铜在沉积物各相中分配的实验模拟与数值模拟研究——以鄱阳湖为例[J]. *环境科学学报*, 1987, **7**(2): 140-149.
Chen J S, Dong L, Deng B S, *et al.* Modeling study on copper partitioning in sediments, a case study of Poyang Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1987, **7**(2): 140-149.
- [15] Perin G, Craboledda L, Lucchese L, *et al.* Heavy metal speciation in the sediments of Northern Adriatic Sea. A new approach for environmental toxicity determination [A]. In: Lakkas T D (Ed.). *Proceeding of the International Conference Heavy Metals in the Environment* [C]. Edinburgh: CEP Consultants Ltd., 1985.
- [16] Ji Z H, Zhang Y, Zhang H, *et al.* Fraction spatial distributions and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments of Baiyangdian Lake[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **174**: 417-428.
- [17] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, **31**(2): 112-115.
Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31**(2): 112-115.
- [18] 林丽钦. 应用毒理学安全评价数据推算重金属毒性系数的探讨[A]. 见: 2009 重金属污染监测、风险评价及修复技术高级研讨会论文集[C]. 青岛: 中华环保联合会, 2009.
- [19] 王晨, 曾祥英, 于志强, 等. 湘江衡阳段沉积物中铊等重金属的污染特征及其生态风险评估[J]. *生态毒理学报*, 2013, **8**(1): 16-22.
Wang C, Zeng X Y, Yu Z Q, *et al.* Distribution and risk assessment of Thallium and other metals in sediments from Hengyang section of Xiangjiang River [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013, **8**(1): 16-22.
- [20] 魏浩, 薛清波, 张国瑞, 等. 某铀尾矿库下游农田土壤重金属污染程度及其风险评价[J]. *矿产保护与利用*, 2018, (6): 132-139.
Wei H, Xue Q P, Zhang G R, *et al.* Heavy metal pollution degree and its risk assessment of farmland soil in the downstream of a uranium tailings pond[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2018, (6): 132-139.
- [21] 刘用清. 福建省海岸带土壤环境背景值研究及其应用[J]. *海洋环境科学*, 1995, **14**(2): 68-73.
Liu Y Q. Study and application of the soil environmental background values in Fujian coastal zone [J]. *Marine Environmental Science*, 1995, **14**(2): 68-73.
- [22] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [23] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [24] 于宇, 李学刚, 袁华茂. 九龙江口红树林湿地沉积物中有机碳和氮的分布特征及来源辨析[J]. *广西科学院学报*, 2017, **33**(2): 75-81, 86.
Yu Y, Li X G, Yuan H M. Distributions and sources of organic carbon and nitrogen in mangrove sediments in the Jiulong River Estuary[J]. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 2017, **33**(2): 75-81, 86.
- [25] Alongi D M, Pfitzner J, Trott L A, *et al.* Rapid sediment accumulation and microbial mineralization in forests of the mangrove *Kandelia candel* in the Jiulongjiang Estuary, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, **63**(4): 605-618.
- [26] Sun J W, Yu R L, Hu G R, *et al.* Tracing of heavy metal sources and mobility in a soil depth profile via isotopic variation of Pb and Sr[J]. *CATENA*, 2018, **171**: 440-449.
- [27] Liu J C, Yan C L, Macnair M R, *et al.* Distribution and speciation of some metals in mangrove sediments from Jiulong River Estuary, People's Republic of China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2006, **76**(5): 815-822.
- [28] Tian Y, Lu H L, Hong H L, *et al.* Potential and mechanism of glomalin-related soil protein on metal sequestration in mangrove wetlands affected by aquaculture effluents [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **420**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126517.
- [29] Wang J K, Zeng X L, Xu D Y, *et al.* Chemical fractions, diffusion flux and risk assessment of potentially toxic elements in sediments of Baiyangdian Lake, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **724**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138046.
- [30] Yan Y, Wan R A, Yu R L, *et al.* A comprehensive analysis on source-specific ecological risk of metal (loid) s in surface sediments of mangrove wetlands in Jiulong River Estuary, China [J]. *Catena*, 2022, **209**, doi: 10.1016/j.catena.2021.105817.
- [31] 林小兵, 张秋梅, 周利军, 等. 不同母质发育及 pH 的农田土壤重金属含量差异[J]. *环境生态学*, 2021, **3**(1): 83-88.
Lin X B, Zhang Q M, Zhou L J, *et al.* Change of heavy metals in farmland soil from different parent material development and pH[J]. *Environmental Ecology*, 2021, **3**(1): 83-88.
- [32] 张倩, 韩贵琳. 贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 3269-3277.
Zhang Q, Han G L. Speciation characteristics and risk assessment of soil heavy metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou province [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 3269-3277.
- [33] 罗松英, 邢雯淋, 梁绮霞, 等. 湛江湾红树林湿地表层沉积物重金属形态特征、生态风险评价及来源分析[J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(2): 348-358.
Luo S Y, Xing W L, Liang Q X, *et al.* Speciation, ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in the surface

- sediments of mangrove wetland in Zhanjiang Bay[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(2): 348-358.
- [34] 王军广, 王鹏, 伏箫诺, 等. 海南清澜港红树林湿地沉积物中重金属形态及生物有效性[J]. *西南农业学报*, 2019, **32**(10): 2425-2431.
- Wang J G, Wang P, Fu X N, *et al.* Speciation and bioavailability of heavy metals in sediments of mangrove wetland in Qinglan Harbor, Hainan Island[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2019, **32**(10): 2425-2431.
- [35] 宋超, 巫冷蝉, 李斌, 等. 山口红树林保护区英罗港表层沉积物重金属形态的分布特征[J]. *广西科学*, 2020, **27**(3): 319-325.
- Song C, Wu L C, Li B, *et al.* Distribution characteristics of heavy metal in surface sediments of Yingluo Bay in Shankou mangrove reserve[J]. *Guangxi Sciences*, 2020, **27**(3): 319-325.
- [36] 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 1002-1009.
- Lin C Q, Hu G R, Yu R L, *et al.* Speciation and ecological risk of heavy metals in surface sediments from Jiulong River[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 1002-1009.
- [37] Peter P O, Rashid A, Hou L Y, *et al.* Elemental contaminants in surface sediments from Jiulong River Estuary, China: pollution Level and ecotoxicological risk assessment[J]. *Water*, 2020, **12**(6), doi: 10.3390/w12061640.
- [38] 林彩, 林辉, 陈金民, 等. 九龙江河口沉积物重金属污染评价[J]. *海洋科学*, 2011, **35**(8): 11-17.
- Lin C, Lin H, Chen J M, *et al.* Pollution assessment of heavy metals in the sediment of Jiulong River Estuary[J]. *Marine Sciences*, 2011, **35**(8): 11-17.
- [39] 丁振华, 刘金铃, 李柳强, 等. 中国红树林湿地沉积物中汞的形态特征、生物可利用性和迁移性[J]. *海洋环境科学*, 2010, **29**(5): 653-656.
- Ding Z H, Liu J L, Li L Q, *et al.* Speciation, bioaccumulation and transportation of mercury in sediments of mangrove wetlands of China[J]. *Marine Environmental Science*, 2010, **29**(5): 653-656.
- [40] Zhang Q, Han G L, Liu M, *et al.* Distribution and contamination assessment of soil heavy metals in the Jiulongjiang River Catchment, Southeast China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **16**(23), doi: 10.3390/ijerph16234674.
- [41] 李柳强, 丁振华, 刘金铃, 等. 中国主要红树林表层沉积物中重金属的分布特征及其影响因素[J]. *海洋学报*, 2008, **30**(5): 159-164.
- Li L Q, Ding Z H, Liu J L, *et al.* Distribution of heavy metals in surficial sediments from main mangrove wetlands of China and their influence factors[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, **30**(5): 159-164.
- [42] Ahmed M M, Doumenq P, Awaleh M O, *et al.* Levels and sources of heavy metals and PAHs in sediment of Djibouti-city (Republic of Djibouti) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, **120**(1-2): 340-346.
- [43] 胡青青, 沈强, 陈飞, 等. 重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2878-2888.
- Hu Q Q, Shen Q, Chen F, *et al.* Reconstructed soil vertical profile heavy metal Cd occurrence and its influencing factors[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2878-2888.
- [44] 毛凌晨, 叶华. 氧化还原电位对土壤中重金属环境行为的影响研究进展[J]. *环境科学研究*, 2018, **31**(10): 1669-1676.
- Mao L C, Ye H. Influence of redox potential on heavy metal behavior in soils: a review [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(10): 1669-1676.
- [45] Clemente R, Bernal M P. Fractionation of heavy metals and distribution of organic carbon in two contaminated soils amended with humic acids[J]. *Chemosphere*, 2006, **64**(8): 1264-1273.
- [46] 韦继康, 余晓霞, 王保欣, 等. 浙江东部沿海典型地区土壤重金属赋存形态、生物有效性及其影响因素研究[J]. *环境污染与防治*, 2021, **43**(10): 1231-1237.
- Wei J K, Yu X X, Wang B X, *et al.* The speciation, bioavailability and influence factors of soil heavy metals in typical areas along the eastern coast of Zhejiang [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021, **43**(10): 1231-1237.
- [47] 孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 铁观音茶园土壤-茶树体系中重金属的生物有效性[J]. *环境化学*, 2020, **39**(10): 2765-2776.
- Sun J W, Hu G R, Yu R L, *et al.* Bioavailability of heavy metals in soil-tea plant system of Tieguanyin tea garden [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(10): 2765-2776.

CONTENTS

Regionalization and Analysis of PM _{2.5} and O ₃ Synergetic Prevention and Control Areas Based on Remote Sensing Data	LI Shen-xin, ZOU Bin, ZHANG Feng-ying, <i>et al.</i>	(4293)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter	PEI Cheng-lei, XIE Yu-tong, CHEN Xi, <i>et al.</i>	(4305)
Establishment and Application of Foshan Ozone Concentration Forecast Equation	CHEN Chen, HONG Ying-ying, TAN Hao-bo, <i>et al.</i>	(4316)
Establishment of High-Resolution Emissions Inventory in Wuhai and Its Application in Exploring the Causes of Ozone Pollution	ZHANG Rui-xin, CHU Bo, SHANG Chun-lin, <i>et al.</i>	(4327)
Investigating the Pollutants of Marine Shipping Emissions Along the East China Sea by Combining in-situ Measurements and Automatic Identification System	QIU Hao, LIU Dan-long, WU Yang-zhou, <i>et al.</i>	(4338)
Chemical Component of Particulate Matters and VOCs Characteristics During Vehicle Brake Processes	MEN Zheng-yu, LIU Du-you, GUO Quan-you, <i>et al.</i>	(4348)
Characterization of VOCs Emissions from Caged Broiler House in Winter	CAO Tian-tian, ZHENG Yun-hao, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(4357)
Concentrations and Community Structures of Culturable Bacteria in Aerosols of Household Garbage Stations in Shanghai	LU Bing-jie, ZHANG Xiang, WANG Chuan, <i>et al.</i>	(4367)
Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emissions in Zhejiang Province from 2008 to 2018	FANG Li-jiang, YANG Yi-qun, YE Guan-qiong	(4380)
Roadmap of Coal Control and Carbon Reduction in the Steel Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target	XUE Ying-lan, ZHANG Jing, LIU Yu, <i>et al.</i>	(4392)
Carbon Emission Reduction Effect of Spatial Correlation Network Structure Characteristics: From the Perspective of Urban Agglomeration	ZHENG Hang, YE A-zhong	(4401)
Pollution and Carbon Reduction Effect of OFDI in China and Its Mechanism	BAI Zi-han, LÜ Lian-hong, ZHAO Ming-xuan, <i>et al.</i>	(4408)
Variation Characteristics of Surface Water Quality in China in Recent Years	JI Xiao-yan, HOU Huan-huan, WANG Shan-shan, <i>et al.</i>	(4419)
Distribution, Risk, and Influencing Factors of Microplastics in Surface Water of Huangshui River Basin	FAN Meng-yuan, HUANG Yi-mei, ZHANG Hai-xin, <i>et al.</i>	(4430)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Surface Water of the Fenhe River Basin and Influence Factors	ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, WANG Zhi-heng, <i>et al.</i>	(4440)
Characteristics and Causes of High-manganese Groundwater in Pearl River Delta During Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(4449)
Characteristics and Causes of Groundwater Salinization in the Plain Area of the Lower Kashgar River	LU Han, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(4459)
Sources and Biogeochemical Processes of Nitrate in the Laolongdong Karst Underground River Basin, Chongqing	WANG Yu-yang, YANG Ping-heng, ZHANG Jie-ru	(4470)
Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors	OUYANG Tian, ZHAO Lu, JI Lu-lu, <i>et al.</i>	(4480)
Structural Characteristics of Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Group of Drinking Water Reservoirs by Water Transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai	ZHANG Mo-li, WANG En-rui, CHANG Sheng, <i>et al.</i>	(4489)
Effects of Nutrients on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and Bacteria in the Phycosphere	LÜ Ping, LI Hui-li, XU Yong, <i>et al.</i>	(4502)
Effect of Aging on Adsorption of Tetracycline by Microplastics and the Mechanisms	WANG Lin, WANG Shu-xin, ZENG Xiang-ying, <i>et al.</i>	(4511)
Effect of Colloids in Sediment and Soil on Their Sorption Behavior of Chloramphenicol	YAN Cai-xia, LUO Yan-qing, NIE Ming-hua, <i>et al.</i>	(4522)
Historical Antibiotic Stress Changed the Effects of Sulfamethoxazole and Trimethoprim on Activated Sludge: ARGs and Potential Hosts	ZHANG Zhong-xing, FAN Xiao-yan, LI Xing, <i>et al.</i>	(4536)
Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-Zinc Mining Area, Yangshuo	CHEN Meng, PAN Yong-xing, HUANG Yi-xiang, <i>et al.</i>	(4545)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Baiyangdian Lake	ZHENG Fei, GUO Xin, TANG Ming-yang, <i>et al.</i>	(4556)
Spatial Differentiation and Influencing Factor Analysis of Soil Heavy Metal Content at Town Level Based on Geographic Detector	GONG Cang, WANG Liang, WANG Shun-xiang, <i>et al.</i>	(4566)
Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils	CHE Kai, CHEN Chong-ming, ZHENG Qing-yu, <i>et al.</i>	(4578)
Enrichment Factors, Health Risk, and Source Identification of Heavy Metals in Agricultural Soils in Semi-arid Region of Hainan Island	YANG Jian-zhou, GONG Jing-jing, WANG Zhen-liang, <i>et al.</i>	(4590)
Speciation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments in Jiulong River Estuary	ZHANG Hua-lan, YU Rui-lian, WAN Rui-an, <i>et al.</i>	(4601)
Status of Heavy Metal in Organic Fertilizers in Main Tea Growing Regions of China	YI Xiao-yun, FANG Li, YANG Xiang-de, <i>et al.</i>	(4613)
Accumulation Characteristics and Sources of PAEs in Agricultural Soils in Gansu Province	CHEN Yu-yu, ZHANG Guang-quan, ZHANG Yang, <i>et al.</i>	(4622)
Distribution Characteristics of Soil Phosphorus Forms and Phosphatase Activity at Different Altitudes in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	GAO Yi-lun, FANG Fang, TANG Zi-chao, <i>et al.</i>	(4630)
Characteristics of Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Other Soil Physical and Chemical Factors in Cotton Fields with Different Continuous Cropping Years in the Oasis on the Northern Edge of Tarim Basin	LI Xin-zhu, GONG Lu, TANG Jun-hu, <i>et al.</i>	(4639)
Response of Soil Respiration Rates to Soil Temperature and Moisture at Different Soil Depths of <i>Caragana korshinskii</i> Plantation in the Loess-Hilly Region	SUN Ya-rong, WANG Ya-juan, ZHAO Min, <i>et al.</i>	(4648)
Influence of Biochar Application on Soil Nitrate Leaching and Phosphate Retention: A Synthetic Meta-analysis	JIANG Zhi-xiang, CUI Shuang, ZHANG Xin, <i>et al.</i>	(4658)
Role and Mechanism of Low Molecular-Weight-Organic Acids in Enhanced Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil	FANG Zhi-guo, XIE Jun-ting, YANG Qing, <i>et al.</i>	(4669)
Remediation Effect and Mechanism of Inorganic Passivators on Cadmium Contaminated Acidic Paddy Soil	ZHANG Jian, KONG Fan-yi, LU Sheng-gao	(4679)
Mechanism of Lead-zinc Enrichment and Resistance of Spent Mushroom Compost to Lead-Zinc Slag in <i>Koeleria paniculata</i>	XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua, SU Rong-kui, <i>et al.</i>	(4687)
Phosphorus Enrichment Efficiency of CaO ₂ @FA Composites and the Effect of Its Recovered Material on Soil Improvement	YUE Wei, LI Da-peng, WU Ling-yu, <i>et al.</i>	(4697)
Effects of Early Rice Straw Returning with Reducing Potassium Fertilizer on Late Rice Yield and Soil Fertility	HUANG Qiao-yi, HUANG Jian-feng, HUANG Xu, <i>et al.</i>	(4706)
Effects of Continuous Straw Returning with Chemical Fertilizer on the Carbon Pool and Crop Yield of Rice-Rape Rotation Soils	CAI Ying, FU Si-wei, ZHANG Bo-rui, <i>et al.</i>	(4716)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw Application on Diazotrophic Communities in a Double Rice Cropping System	CHEN Kai-peng, WEI Ju-xian, CHEN Dan, <i>et al.</i>	(4725)
Impacts of Co-application of Chemical Fertilizer Reduction and Organic Material Amendment on Fluvio-aquic Soil Microbial N-cycling Functional Gene Abundances and N-converting Genetic Potentials in Northern China	LI Sheng-jun, HU He, LI Gang, <i>et al.</i>	(4735)
Response Characteristics of Soil Microbial Community Under Long-term Film Mulching	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, DING Ji-na, <i>et al.</i>	(4745)
Effects of Long-term Straw Returning on Fungal Community, Enzyme Activity and Wheat Yield in Fluvio-aquic Soil	MA Lei, LI Yan, WEI Jian-lin, <i>et al.</i>	(4755)
Effects of Soil Amendments on the Bacterial Diversity and Abundances of Pathogens and Antibiotic Resistance Genes in Rhizosphere Soil Under Drip Irrigation with Reclaimed Water	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, LIU Chun-cheng, <i>et al.</i>	(4765)
Effect of Nitrogen on the Phytoremediation of Cd-PAHs Co-contaminated Dumpsite Soil by Alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) and on the Soil Bacterial Community Structure	LI Yi-jia, MA Jun-wei, LI Yu-qian, <i>et al.</i>	(4779)
Effect of Antibiotic-Degrading Bacteria on Maturity and Bacterial Community Succession During Pig Manure Composting	LI Wei-lin, ZHANG Xin, MA Jun-wei, <i>et al.</i>	(4789)