

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策

孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金



制药



喷涂



橡胶

京津冀

长三角

珠三角

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年3月

第42卷 第3期

Vol.42 No.3

目次

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策 孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金 (1023)

长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征 代伶文, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 黄利宏 (1039)

经济快速发展区六氯丁二烯的来源与分布特征 陶誉铭, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 郭立新 (1053)

近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析 马妍, 程芦, 阮子渊, 史鹏飞, 路超君, 运晓彤, 李璐嫣, 徐雁秋, 史怡 (1065)

电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系 柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志 (1073)

焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析 顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅 (1081)

典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟 孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 朱林宇, 王政, 吕建树 (1093)

多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析 曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 雷梅 (1105)

龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析 王蕊, 陈楠, 张二喜, 李小赛 (1114)

基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例 李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云 (1123)

造纸厂土壤中短链和中链氯化石蜡的污染特征和风险评估 张佩萱, 高丽荣, 宋世杰, 乔林, 徐驰, 黄帝, 王爽, 蒋思静, 郑明辉 (1131)

典型再生铜冶炼厂周边土壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征及健康风险评估 胡吉成, 郭静, 许晨阳, 金军 (1141)

柠檬酸与磷共存对土壤吸附镉的影响 宋子腾, 左继超, 胡红青 (1152)

两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积 郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 孙国新, 侯新村, 胡艳霞, 朱毅, 武菊英 (1158)

钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征 孙厚云, 卫晓锋, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健 (1166)

盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 万小铭, 孟晓飞, 陈同斌, 何孟轲, 周小勇, 徐铁兵 (1177)

水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响 汤家庆, 张绪, 黄国勇, 胡红青 (1185)

壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响 杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 王定勇 (1191)

铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响 于皓, 安益君, 金德才, 靳拓, 王兴润 (1197)

研究报告

COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析 赵雪, 沈楠驰, 李令军, 武高峰, 陶静, 赵文吉 (1205)

2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟 刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 隋潇, 许鹏举, 李明燕, 张美根 (1215)

南京北郊 PM_{2.5} 中有机组分的吸光性质及来源 尚玥, 余欢, 茅宇豪, 王成, 谢鸣捷 (1228)

西安市大气棕碳污染特性及发色团种类 陈前, 陈庆彩 (1236)

淄博市道路尘细粒子携带金属元素的来源与健康风险评价 郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 郭丽瑶, 王敬华, 耿春梅, 王晓雨, 王静, 杨文, 白志鹏 (1245)

北京市控制 PM_{2.5} 污染的健康效益评估 杜沛, 王建州 (1255)

西宁市大气污染来源和输送季节特征 刘娜, 余晔, 马学谦 (1268)

青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征 袁刚, 祁建华, 丁雪 (1280)

基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征 王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 楼晟荣, 胡馨遥, 安静宇, 吴宇航, 高伟, 朱亮, 黄成 (1298)

山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析 刘伟诚, 牛月圆, 吴婧, 闫雨龙, 胡冬梅, 邱雄辉, 彭林 (1306)

兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献 王文鹏, 王占祥, 李继祥, 高宏, 黄韬, 毛满萱, 马建民 (1315)

2012~2019 年北京市储油库 VOCs 去除及排放水平变化监测分析 华岚英, 崔彤, 李金香, 邹本东, 杨妍妍, 程刚 (1328)

生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单 马占云, 姜显聪, 任佳雪, 张阳, 冯鹏, 高庆先, 孟丹 (1333)

长江口邻近海域表层沉积物中的细菌藎多醇及对低氧区的响应判别 尹美玲, 段丽琴, 宋金明, 张乃星 (1343)

鄱阳湖流域水体和水产品中苯酚的暴露特征及人体健康风险评估 徐倩云, 艾舜豪, 高祥云, 王晓南, 刘征涛, 赵师晴, 葛刚, 李霖 (1354)

衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析 刘魏魏, 郭子良, 王大安, 张曼胤, 张余广 (1361)

丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征 潘雄, 林莉, 张胜, 翟文亮, 陶晶祥, 李丹文 (1372)

金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价 黄诚, 黄廷林, 李扬, 李楠, 齐允之, 司凡, 华逢耀, 赵凌云 (1380)

汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响 李程遥, 黄廷林, 温成成, 梁伟光, 林子深, 杨尚业, 李凯, 蔡晓春 (1391)

苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 郑凯旋, 李忠磊, 杨婷, 金军 (1403)

娘子关泉群水化学特征及成因 唐春雷, 赵春红, 申豪勇, 梁永平, 王志恒 (1416)

过氧化钙重塑底泥对水中磷酸盐的吸附作用 徐楚天, 李大鹏, 王子良, 吴宇涵, 许鑫澎, 黄勇 (1424)

亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向 王丽莎, 李希, 李裕元, 张满意, 吴金水 (1433)

紫外/亚硫酸盐高级还原工艺加速降解水中难降解含碘造影剂 刘子奇, 仇付国, 赖曼婷, 李津, 董慧岭, 强志民 (1443)

太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能 马萌, 许路, 金鑫, 金鹏康 (1451)

一步法 La@MgFe₂O₄ 的制备及其吸附水中磷的性能 白润英, 宋博文, 张彧, 郝俊峰, 刘建明, 刘宇红 (1461)

工程规模长填龄渗滤液膜生物-纳滤组合设施各单元污染物去除效能 邵立明, 邓樱桃, 仇俊杰, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (1469)

ANAMMOX 培养物中硫酸盐型氨氧化生物转化机制 毕贞, 董石语, 黄勇 (1477)

不同季节城市污水处理厂微生物群落特性 贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 王慰, 樊鹏超, 陈行行, 王军静 (1488)

麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学 殷行行, 郭昌胜, 邓洋慧, 邱紫雯, 张艳, 滕彦国, 徐建 (1496)

内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价 王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春丽, 卞园, 张光宇 (1503)

广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素 马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峰, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金 (1514)

超顺磁性纳米材料对镉污染稻田土壤微生物和酶的影响 方丹丹, 张立志, 王强 (1523)

水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响 陈佳, 赵秀兰 (1535)

四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性 王卫中, 迟苏琳, 徐卫红 (1545)

地膜覆盖对菜地垄沟 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 曾唯, 胡曼利, 涂婷婷, 陈俊江, 郝庆菊 (1559)

对比研究生物炭和秸秆对麦玉米轮作系统 N₂O 排放的影响 唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 李贵春 (1569)

流域生态空间管控下生境监测方法概述 阴琨, 刘海江, 王光, 金小伟 (1581)

《环境科学》征订启事 (1151) 《环境科学》征稿简则 (1342) 信息 (1402, 1415, 1580)

柠檬酸与磷共存对土壤吸附镉的影响

宋子腾, 左继超, 胡红青*

(华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要:以武汉市棕红壤为研究材料,采用室内培养和等温平衡吸附实验,研究了磷和柠檬酸共存下对土壤吸附镉的影响;并模拟干湿交替实验,通过BCR连续提取,研究了不同剂量磷和柠檬酸处理后,经多次干湿交替后镉的形态变化.结果表明,经 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ CdCl_2 溶液处理后的土壤胶体,添加较低质量浓度($40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的磷对其吸附镉的影响不明显,而添加磷质量浓度较高($80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)时可显著提高其对镉的吸附,吸附量较CK处理增加 $78\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,吸附率提高 7.89% ;向经 $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷溶液处理过的土壤胶体中加入柠檬酸,可减弱其对镉吸附,且随柠檬酸浓度增高,抑制效果增加,而且对低剂量磷($40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)处理的土壤胶体抑制作用更明显,加入 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 与 $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 柠檬酸后,土壤胶体对镉的吸附率分别降低了 30.89% 与 40.97% ;而当磷处理质量浓度较高时,柠檬酸的影响则不显著.周期性的干湿交替显著促进土壤中镉由弱酸提取态及可还原态向可氧化态及残渣态的转变,即磷钝化的镉在柠檬酸的影响下,随干湿交替次数的增加,镉的有效性降低.

关键词:土壤; 镉; 磷; 柠檬酸; 干湿交替

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)03-1152-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007116

Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil

SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing*

(College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: In brown-red soil, the effect of phosphorus and citric acid co-existence on the adsorption of cadmium was studied using indoor experiments and isothermal equilibrium adsorption analysis. After treatment with different doses of phosphorus and citric acid, the fractions of cadmium were altered by varying dry and wet conditions. The results showed that: ① Soil treated with $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ of CdCl_2 solution showed no notable effect on cadmium adsorption when a low concentration of phosphorus was added ($40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$); however, higher a concentration of added phosphorus ($80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) significantly increased cadmium adsorption (an increase of $78\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 7.89% compared to the control treatment); ② Using a $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ phosphorus solution, the addition of citric acid proportionally reduced cadmium adsorption. This inhibition effect was more notable for the soil treated with low-dose phosphorus ($40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) than the high-dose treatment with $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ and $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ citric acid (cadmium adsorption decreased by 30.89% and 40.97% , respectively). The effect of citric acid was not significant, however, at higher concentrations of phosphorus. When the concentration of citric acid reached $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, cadmium adsorption was only 1% lower than without citric acid treatment; ③ Periodic dry-wet alternation significantly promoted the transformation of cadmium from a weak acid extractable and reducible state to an oxidizable and residual state in the soil. That is, the availability of cadmium in soil subjected to the combined action of phosphorus and citric acid decreased with an increase in wet and dry alternations.

Key words: soil; cadmium; phosphorus; citric acid; dry and wet alternation

镉是毒性最强的重金属污染物之一,在生产活动中容易被水稻等作物吸收富集,不仅严重影响作物的产量和质量,还通过食物链富集而危害人体健康^[1].近年来,镉中毒事件频发,越来越多的国内外学者关注镉污染及毒害的研究,镉污染土壤的修复治理也成为土壤与环境领域的研究热点^[2,3].重金属污染土壤的修复方法包括机械分离、化学清洗、电化学修复和固定化等^[4].众多土壤重金属污染修复方法中,原位化学钝化技术因其成本低、周期短、效率高、稳定性好的特性被广泛关注,该技术的主导效应包括吸附、表面沉淀、稳定有机配体复合物的形成和相关金属(胶体)的离子交换等^[5],其中对钝化剂的选择是关键^[6].

磷与重金属的交互作用普遍存在,根据磷与镉

的相互作用来降低环境中镉的有效性,进而修复土壤镉污染是国际上该领域的研究热点^[7].土壤难溶性含磷物质可以通过先溶解再与镉离子形成沉淀,或者镉离子与溶液中的磷酸根等形成磷酸镉等沉淀,进而达到固定镉的目的^[8,9].过量的磷还可被植物吸收利用,且有研究报道,磷会影响植物根系对有机酸的分泌,但过量的磷对土壤中镉的固定作用大于有机酸的对镉活化作用^[10].

际土壤中普遍存在低分子量有机酸.有研究

收稿日期: 2020-07-12; 修订日期: 2020-08-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071165); 矿区环境污染控制与修复湖北省重点实验室开放课题基金项目(2019104)

作者简介: 宋子腾(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤重金属污染修复, E-mail: songziteng@webmail.hzau.edu.cn

* 通信作者, E-mail: hqhu@mail.hzau.edu.cn

表明,有机酸可与重金属形成配合物而影响土壤对重金属的吸附和解吸^[11]. 螯合酸类物质能够活化土壤中的重金属,从而使得重金属的毒性增强^[12]. 而当土壤存在有机酸时,可以促进土壤中磷的活化^[13],从而增强对土壤中重金属的吸附作用^[14]. 可见,有机酸在重金属吸附方面有着两面性. 近年来,有机酸与磷、镉的相互作用受到土壤与环境领域研究者的广泛关注,而有关三者相互作用的稳定性研究鲜见报道.

土壤胶体是土壤中物理化学性质最活跃的颗粒,土壤中与重金属发生吸附和解吸等作用主要发生在土壤胶体上. 有研究表明,金属离子以专性吸附方式进入土壤胶体双电层的 stern 层后,会诱导 Zeta 电位的偏移,这些被吸附的金属阳离子会使土壤表面的负电荷减少,并且很难解吸回土壤溶液中^[15]. 因此,本文采用由武汉采集的棕红壤,分离出土壤胶体后,加入镉溶液进行人为污染,通过土壤胶体对 Cd²⁺ 的等温吸附、柠檬酸与磷共存对土壤中镉形态的影响研究,探讨有机酸和磷共存对土壤吸附镉的影响,并将经柠檬酸-磷共存下的镉污染土壤胶体进行连续干湿交替循环,探讨柠檬酸-磷共存下镉形态的转变趋势,阐明磷-有机酸对土壤吸附镉的影响及其在自然环境中的长期稳定性.

1 材料与方法

1.1 实验材料

供试土壤为棕红壤. 采自湖北省武汉市江夏区表层(30°17.804'N, 114°19.246'E). 土壤基本理化性质为:pH 5.3,有机质含量 14.79 g·kg⁻¹,阳离子交换量 12.75 cmol·kg⁻¹,速效磷含量 8.7 mg·kg⁻¹,机械组成为砂粒(0.02~2 mm) 12.46%,粉粒(0.002~0.02 mm) 50.72%,黏粒(<0.002 mm) 36.82%. 土壤自然风干磨细过筛后,沉降法提取 <2 μm 的黏粒部分,制得 Ca 质胶体.

供试试剂:一水合柠檬酸(文中用 cit 表示)、磷酸二氢钾、氯化镉均为分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司.

1.2 土壤胶体对 Cd²⁺ 的等温吸附

向离心管中加入 0.2 g 土壤胶体及 10 mL 20 mg·L⁻¹ Cd²⁺ (CdCl₂)-0.01 mol·L⁻¹ NaNO₃ 混合液(pH=5.5),在 25℃ 和 225 r·min⁻¹ 下振荡 2 h,静置 22 h. 加入不同浓度的 10 mL KH₂PO₄ 溶液(pH=5.5),溶液含 P 量分别为 0、40 和 80 mg·L⁻¹,背景电解质为 0.01 mol·L⁻¹ NaNO₃. 于 25℃ 和 225 r·min⁻¹ 下振荡 2 h,平衡 22 h,在 4 000 r·min⁻¹ 离心 10 min,过滤,测定平衡液 pH、Cd 含量及磷含量. 差减法计算 Cd 和磷吸附量.

1.3 干湿交替模式对土壤中镉释放量的影响

向离心管中加入 0.8 g 土壤胶体,并加 10 mg·L⁻¹ Cd²⁺ (以 CdCl₂ 的形式)溶液培养 1 d,分别加入不同浓度的 P(以 KH₂PO₄ 的形式)溶液培养 1 d,经处理的样品分别加入不同浓度柠檬酸溶液(表 1). 使离心管中溶液总体积为 70 mL,样品中镉含量为 10 mg·L⁻¹,磷加入量分别为 0、40 和 80 mg·L⁻¹,初始柠檬酸浓度为 0、1 和 5 mmol·L⁻¹,pH 为 5.5,背景电解质为 0.01 mol·L⁻¹ NaNO₃. 在 25℃ 和 225 r·min⁻¹ 下振荡 2 h,平衡 22 h. 称重,4 000 r·min⁻¹ 离心 10 min,测定平衡液 pH 和 Cd 含量.

表 1 磷和柠檬酸处理土壤胶体的浓度组合

Table 1 Concentration combination of soil colloids treated with phosphorus and citric acid

项目	处理					
	A	B	C	D	E	F
P/mg·L ⁻¹	80	80	80	40	40	40
cit/mmol·L ⁻¹	0	1	5	0	1	5

经上述处理后的样品,在室温下风干. 按水土比 1:1 加入去离子水,淹水 2 d,所有样品在自然条件下风干. 至恒重后再次加入去离子水(水土比=1:1)将土壤润湿,模拟自然条件下的干湿交替. 在每个周期(0、2、4 和 8)结束时,按照 BCR 三步提取法处理样品(见表 2),测定 Cd 形态的变化.

1.4 数据处理

利用 Excel 2007 和 SPSS 20.0 对数据进行统计分析($P < 0.05$),并用 origin9.0 作图.

表 2 土壤中 Cd 的 BCR 三步提取法

Table 2 Three-step BCR extraction method of Cd in soil

步骤	形态	提取试剂	反应条件
I	酸提取态	0.5 g 土中 20 mL 0.11 mol·L ⁻¹ CH ₃ COOH	25℃ 连续振荡 16 h, 3 900 r·min ⁻¹ 离心 20 min
II	可还原态	水洗后的残渣中加 20 mL 0.5 mol·L ⁻¹ NH ₂ OH·HCl	25℃ 连续振荡 16 h, 3 900 r·min ⁻¹ 离心 20 min
III	可氧化态	蒸馏水洗后的残渣中加: ① 5 mL 300 mg·kg ⁻¹ H ₂ O ₂ ; ② 5 mL 300 mg·kg ⁻¹ H ₂ O ₂ ; ③ 25 mL 1.0 mol·L ⁻¹ NH ₄ OAc	① 25℃ 振荡 1 h; ② 85℃ 水浴 2 h; ③ 25℃ 连续振荡 16 h, 3 900 r·min ⁻¹ 离心 20 min
IV	残渣态	差减法	

2 结果与分析

2.1 不同磷浓度对土壤胶体吸附镉的影响

如表 3 所示,不同浓度的磷处理均可增加土壤胶体对镉的吸附量,土壤胶体对镉的吸附量随初始磷浓度的增加而升高,当初始磷浓度为 $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,磷对土壤胶体吸附镉的促进作用不明显;而当磷添加量达到 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时效果极显著,土壤胶体对镉的吸附量增加了 $78 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,较未经磷处理吸附镉量提高 8.66% . 且通过不同浓度的磷溶液处理后,土壤胶体的 pH 值均比无磷处理有所增加,低浓度比高浓度的磷作用更明显,磷添加量为 $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 及 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,土壤胶体 pH 值分别增加了 0.39 和 0.24 个单位.

表 3 不同磷浓度对土壤胶体吸附镉的影响¹⁾

Table 3 Effect of different phosphorus concentrations on the adsorption of cadmium by a soil colloid

初始磷浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH	镉吸附量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
0	5.56c	901.02b
40	5.95a	905.21b
80	5.80b	979.06a

1) 每列不同小写字母分别代表不同量磷处理后土壤中 pH 和 Cd 含量的差异 ($P < 0.05$),下同

2.2 柠檬酸与磷共存对土壤胶体吸附镉的影响

表 4 为柠檬酸与磷共存对土壤胶体吸附镉的影响. 从中可知,与单独加磷处理相比,添加柠檬酸可降低土壤胶体对镉的吸附量,且随着柠檬酸浓度的上升,其降低土壤胶体吸附镉的程度提高,柠檬酸对添加 $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷处理的影响较 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷处理更显著. 在土壤胶体经 $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷溶液钝化后,再经 $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 及 $5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 柠檬酸处理,其对镉的吸附量分别由未经柠檬酸处理时的 $937.31 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至 $628.35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 及 $526.98 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,即吸附率分别降低了 30.89% 及 40.97% . 而柠檬酸对 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷处理的土壤胶体影响较弱,添加 $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的柠檬酸处理与未添加柠檬酸的处理相比,土壤胶体对镉的吸附量无显著差异;添加

表 4 柠檬酸与磷共存对土壤胶体吸附镉的影响

Table 4 Effect of citric acid and phosphate co-existence on the adsorption of cadmium by a soil colloid

磷处理浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	柠檬酸浓度/ $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	pH	磷吸附率/%	镉吸附量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	镉吸附率/%
	0	5.82	83.69	937.31	93.69
40	1	5.61	91.66	628.35	62.80
	5	5.62	95.03	526.98	52.72
80	0	5.70	84.61	972.72	97.26
	1	5.58	83.79	969.29	96.91
	5	5.57	82.56	962.66	96.26

$1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的柠檬酸处理之间,土壤胶体对镉的吸附量也无明显区别;当柠檬酸浓度为 $5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,土壤胶体对镉的吸附量与未加柠檬酸处理相比,对镉的吸附量降低了 $10.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,吸附率仅降低了 1% .

2.3 周期性干湿交替对土壤胶体中 Cd 形态的影响

2.3.1 干湿交替对土壤中弱酸提取态镉的影响

由图 1 可见,未进行干湿交替时,柠檬酸处理可显著降低土壤中弱酸提取态镉含量,且柠檬酸浓度越高,效果越显著,在高磷水平 ($80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 下,添加 $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 及 $5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 柠檬酸的处理中,弱酸提取态镉含量分别较未添加柠檬酸处理降低 $62.96 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 及 $159.87 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 在低磷水平 ($40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 下,柠檬酸的作用同样显著,E 和 F 处理中弱酸提取态镉含量分别较 D 处理降低了 $73.85 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 及 $161.19 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

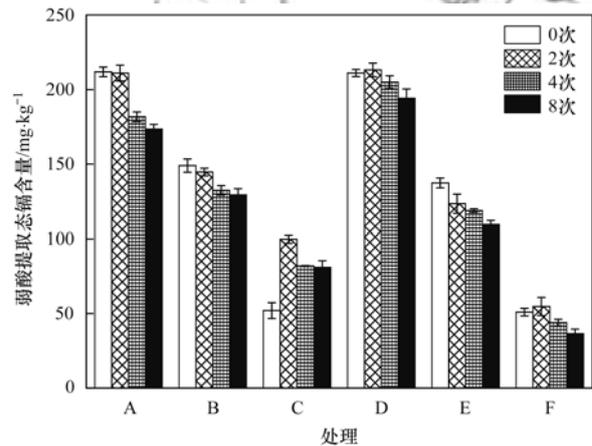


图 1 干湿交替对土壤中弱酸提取态镉的影响

Fig. 1 Effect of dry and wet alternation on weak acid extractable cadmium in soil

除柠檬酸添加浓度为 $5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的处理外,各处理中弱酸提取态镉含量均随干湿交替的次数增加而呈降低趋势,高磷水平时,未添加的处理中弱酸提取态镉含量经 2、4 和 8 次干湿循环后,分别下降了 0.80 、 30.13 和 $38.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,柠檬酸添加量为 $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的处理经同样干湿交替后,弱酸提取态镉含量分别降低了 4.30 、 16.60 和 $19.68 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 在未添加柠檬酸时,弱酸提取态镉含量随干湿交替进行而下降的趋势是低磷水平处理弱于高磷水平时,在几次干湿交替后,D 处理中弱酸提取态镉含量分别下降了 -2.06 、 6.09 和 $17.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而添加 $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 柠檬酸后,低磷水平处理中弱酸提取态镉含量降低趋势比高磷水平明显,在 E 处理中分别降低了 13.91 、 18.55 和 $27.85 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 添加 $5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 柠檬酸的 C 和 F 处理中,弱酸提取态镉含量均在干湿交替 2 次时提高,分别提高了 43.83

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $3.78\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.3.2 干湿交替对土壤中可还原态镉的影响

如图 2 所示, 添加柠檬酸可使土壤胶体中的可还原态镉含量降低, 且作用效果随柠檬酸含量的升高而加强。在未进行干湿交替时, 可还原态镉含量在高磷含量的 3 个处理中分别为 172.6 、 120.0 和 $66.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 添加 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 柠檬酸分别较未添加柠檬酸的处理降低了 $52.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $106.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 在低磷含量的处理中, 柠檬酸对可还原态镉含量的降低效果同样明显, D、E 和 F 处理中可还原态镉含量分别为 176.0 、 118.5 和 $65.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, E 和 F 处理分别较 D 处理降低了 $57.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $110.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

同时, 各处理中可还原态镉含量均随干湿交替次数的增加而减少, 6 个处理 (A ~ F) 经历 8 次干湿交替后, 土壤中还原态镉含量分别下降了 16.55 、 17.51 、 12.37 、 27.22 、 20.45 和 $10.15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 下降率分别为 9.59% 、 14.59% 、 18.60% 、 15.47% 、 17.26% 和 15.53% 。

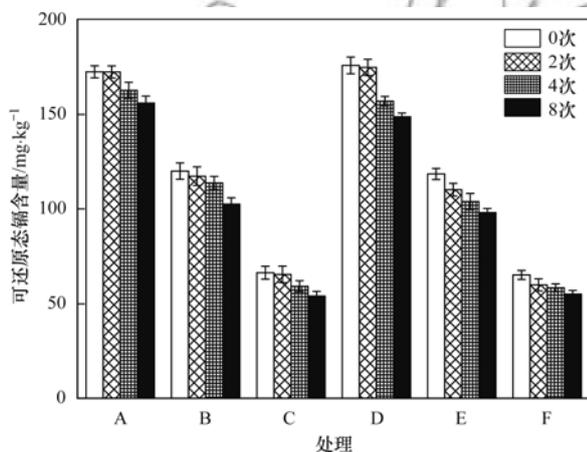


图 2 干湿交替对土壤中可还原态镉的影响

Fig. 2 Effect of dry and wet alternation on reducible cadmium in soil

2.3.3 干湿交替对土壤中可氧化态镉的影响

如图 3 所示, 土壤胶体中可氧化态镉含量经柠檬酸处理后减少, 且随柠檬酸添加浓度的增加而降低, 高磷处理 (B 和 C) 中可氧化态镉含量分别由 A 处理的 $14.44\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降至 $9.50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $6.63\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 分别降低了 $4.94\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $7.81\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 低磷处理 (D、E 和 F) 中可氧化态镉含量分别为 15.54 、 8.74 和 $5.15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, E 和 F 较 D 处理分别降低了 $6.80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $10.38\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

随干湿交替次数增加, 各处理中可氧化态镉含量均上升, 高磷的 3 个处理经 8 次干湿交替后分别增加了 5.73 、 6.02 和 $2.47\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 增长率为 39.64% 、 63.10% 和 37.24% ; 磷添加量较低的 D、E

和 F 处理, 经 8 次干湿交替后分别增加了 4.04 、 3.34 和 $2.31\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 增长率为 26.02% 、 38.20% 和 44.76% 。

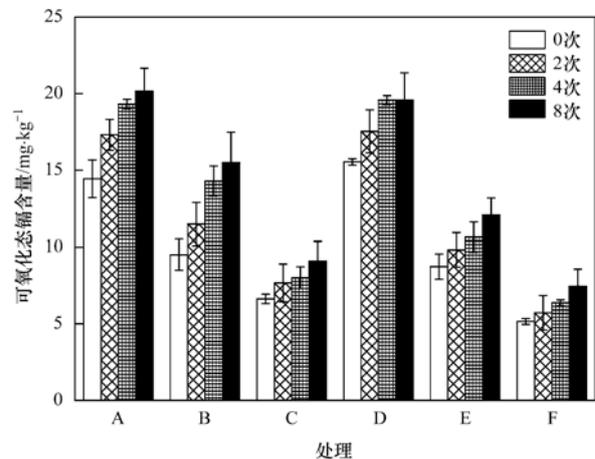


图 3 干湿交替对土壤中可氧化态镉的影响

Fig. 3 Effect of dry and wet alternation on oxidizable cadmium in soil

2.3.4 干湿交替对土壤中残渣态镉的影响

图 4 为残渣态镉的变化趋势。从中可知, 土壤残渣态镉含量为: C 处理 > B 处理 > A 处理 > D 处理 > F 处理 > E 处理。添加磷含量较高的处理中, 残渣态镉含量均高于添加磷含量较低的处理。未添加柠檬酸的 A 和 D 处理中, 残渣态镉含量分别为 $453.21\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $419.62\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高磷比低磷处理高 $33.59\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 柠檬酸添加量为 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 B 和 E 处理中, 残渣态镉含量分别为 $570.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $297.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高磷比低磷处理的高 $273.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 添加 $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 C 和 F 处理残渣态镉含量分别为 $718.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $353.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高磷比低磷处理高 $365.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 即磷添加量越高, 经干湿交替, 更增加残渣态镉含量。

随干湿交替次数的增加, 残渣态镉含量呈上升

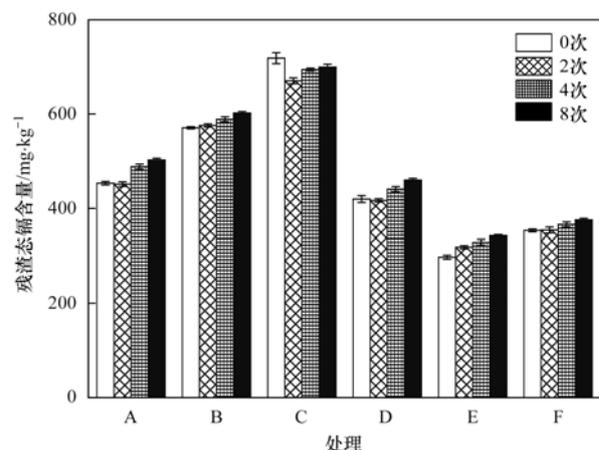


图 4 干湿交替对土壤中残渣态镉的影响

Fig. 4 Effect of dry and wet alternation on residual cadmium in soil

趋势,6个处理经8次干湿交替后,土壤中残渣态镉含量分别增加了49.27、31.19、9.07、40.18、44.96及22.32 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,增长率为:E处理(15.12%)>A处理(10.87%)>D处理(9.58%)>F处理(6.32%)>B处理(5.47%)。

综上,随着干湿交替次数增加,所有处理中的弱酸提取态镉含量及可还原态镉含量均减少,而可氧化态镉含量及残渣态镉含量均增加,即镉污染后的土壤,经过磷的钝化并存在柠檬酸时,随干湿交替次数的增加,镉的有效性降低。

3 讨论

3.1 柠檬酸对磷处理后的土壤胶体吸附镉的影响

磷酸盐钝化土壤重金属已有大量研究^[16]。本实验中,土壤有效态镉含量随磷酸盐添加量的增大而减小,而镉的吸附量及残渣态镉含量均随磷加入量增加而增加,钝化效果明显。普遍认为重金属-磷酸盐沉淀的生成是磷酸盐稳定重金属的主要机制,且有研究表明,土壤中的铁铝氧化物及高岭石等组分能专性吸附磷酸盐,使土壤表面负电荷增加,从而促进重金属的吸附固定^[17]。

柠檬酸在重金属钝化以及磷的有效性方面具有非常复杂的影响。有研究表明,在较强酸性条件下,有机酸可因电性作用力被土壤大量吸附,占据土粒表面吸附位点,导致镉的吸附下降^[18];并且柠檬酸上的羧基、羟基可进行阳离子交换,与重金属发生络合反应,形成带正电的金属配合物,导致对镉的吸附量增加^[19]。柠檬酸可以通过与磷竞争吸附位点、交换、解吸及络合溶解等机制,促进磷的解吸和释放。有机酸浓度越高,其对土壤中磷的活化能力也越强^[20],因此柠檬酸的加入可促进磷对镉的钝化。

本实验中,弱酸提取态镉及可还原态镉含量均与柠檬酸施加浓度成正相关,而可氧化态镉及残渣态镉含量均随柠檬酸添加量的升高而降低,即柠檬酸增强了镉的有效性,这是由于低分子有机酸可通过对重金属的竞争吸附和质子的溶解作用,解吸土壤吸附的重金属,并且有机酸的螯合能力在一定程度上能够把氧化态,甚至残渣态的金属离子溶解出来。这与胡群群等^[21]的研究结果一致,即重金属-有机酸络合物很难被土壤颗粒吸附。

3.2 磷-柠檬酸共存下镉的长期稳定性

本实验结果表明,周期性的干湿交替处理对土壤胶体中镉的有效性有明显的降低。在周期性淹水-干燥条件下,土壤pH值、Eh以及土壤胶体中游离氧化铁含量均会发生变化,对土壤镉和磷的吸附与释放行为均有一定的影响。有研究表明,交替性的干

湿循环会使磷的释放量升高^[22]。有研究发现每次淹水时土壤的有效磷水平都略有增加^[23]。本实验加磷量较高的处理中,土壤残渣态镉含量均明显高于加磷量较低各处理,即磷添加量越高,其对土壤中有有效态镉向残渣态转换的促进作用更明显。随着干湿交替次数增加,所有处理中的弱酸提取态镉含量及可还原态镉含量均减少,而可氧化态镉及残渣态镉含量均增加,即镉污染土壤,经过磷的钝化并受到柠檬酸的影响后,随干湿交替次数的增加,镉的有效性降低。

土壤胶体淹水时,晶形氧化物会向非晶型水合氧化物转变^[24],氧化物的结晶形态对镉离子的固定有极大的影响。其中,结晶好的氧化物比表面积较小,反应活性较低,因此对镉的吸附能力较弱,而非晶型氧化物的比表面积大,更利于对镉离子的吸附。

由于镉离子主要以交换吸附的方式与层状硅酸盐结合,因此容易发生解吸。而在干湿交替过程中,土壤干燥时容易产生胶体态和纳米态等吸附性更强的小颗粒^[22],在土壤复湿时,溶解态镉会释放到土壤溶液中,由于土壤对孔隙水具有很强的保持力,因此在重新复水后,土壤颗粒得以更均匀地分散在水中,更多的镉离子在土壤表面溶解和转化,通过土壤矿物中的微孔隙,逐渐进入其内层。并且重结晶使其成为矿物结构的一部分;或者通过使其表面催化氧化,进入晶体内而降低镉的活性^[25]。干湿交替模式下,原本吸附在粘土矿物表面的易解吸镉可向更难解吸的吸附位点移动,从而提高了土壤对镉的固定能力,其带来的环境风险也随之下降。

4 结论

施磷有利于土壤对镉的吸附,且磷添加量越高,镉吸附越多;向经磷处理后的污染土壤中加入1 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 及5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的柠檬酸溶液,均可促进土壤镉的活化,高浓度柠檬酸更不利于镉的固定;经过磷的钝化且存在柠檬酸时,随干湿交替次数的增加,弱酸提取态镉及可还原态镉含量减少,而可氧化态及残渣态镉含量增加,镉的稳定性增强。

参考文献:

- [1] 王梦梦,何梦媛,苏德纯. 稻田土壤性质与稻米镉含量的定量关系[J]. 环境科学, 2018, 39(4): 1918-1925.
Wang M M, He M Y, Su D C. Quantitative relationship between paddy soil properties and cadmium content in rice grains[J]. Environmental Science, 2018, 39(4): 1918-1925.
- [2] 钟心,钟建,黄占斌. 氮磷肥施用对保水剂钝化土壤重金属铅镉效果的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 88-93.
Zhong X, Zhong J, Huang Z B. Effects of nitrogen and phosphorus fertilizer on passivation of heavy metal Pb and Cd by

- super absorbent polymer in soil[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, **39**(2): 88-93.
- [3] Sterckeman T, Gossiaux L, Guimont S, *et al.* Cadmium mass balance in French soils under annual crops; scenarios for the next century[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **639**: 1440-1452.
- [4] Liu L W, Li W, Song W P, *et al.* Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: principles and applicability[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **633**: 206-219.
- [5] Duncan E, Owens G. Metal oxide nanomaterials used to remediate heavy metal contaminated soils have strong effects on nutrient and trace element phytoavailability[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **678**: 430-437.
- [6] 张静静, 朱爽阁, 朱利楠, 等. 不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 460-468.
Zhang J J, Zhu S G, Zhu L N, *et al.* Effects of different amendments on fractions and uptake by winter wheat in slightly alkaline soil contaminated by cadmium and nickel [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 460-468.
- [7] 张水勤, 王峰源, 姜慧敏, 等. 设施菜地土壤中速效磷是镉生物有效性的关键调控因子[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(9): 1721-1727.
Zhang S Q, Wang F Y, Jiang H M, *et al.* Available phosphorus is a key regulator of cadmium phytoavailability in greenhouse soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(9): 1721-1727.
- [8] Zhang H, Shao J A, Zhang S H, *et al.* Effect of phosphorus-modified biochars on immobilization of Cu(II), Cd(II), and As(V) in paddy soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **390**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121349.
- [9] 王丽, 邹茸, 王秀斌, 等. 适量施磷有效提高莴菜对镉污染土壤的修复能力[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, **26**(2): 354-361.
Wang L, Zou R, Wang X B, *et al.* Effective stimulation of phytoremediation of *Amaranthus mangostanus* L. in cadmium contaminated soils through reasonable phosphorous fertilizer rate [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, **26**(2): 354-361.
- [10] Yang P, Chen H J, Fan H Y, *et al.* Phosphorus supply alters the root metabolism of Chinese flowering cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis* Tsen et Lee) and the mobilization of Cd bound to lepidocrocite in soil [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2019, **167**, doi: 10.1016/j.envexpbot.2019.103827.
- [11] 沈阿林, 李学垣, 吴受容. 土壤中低分子量有机酸在物质循环中的作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 1997, **3**(4): 363-371.
Shen A L, Li X Y, Wu S R. The composition characteristics of low-molecular-weight organic acids in soil and their roles on soil material cycling[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 1997, **3**(4): 363-371.
- [12] 葛艺, 徐军民, 徐绍辉, 等. 铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 996-1003.
Ge Y, Xu M M, Xu S H, *et al.* Effects of copper pollution on microbial communities in wheat root system[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 996-1003.
- [13] 胡红青, 李妍, 贺纪正. 土壤有机酸与磷素相互作用的研究[J]. *土壤通报*, 2004, **35**(2): 222-229.
Hu H Q, Li Y, He J Z. Interaction of organic acids and phosphorus in soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, **35**(2): 222-229.
- [14] Jiang G J, Liu Y H, Huang L, *et al.* Mechanism of lead immobilization by oxalic acid-activated phosphate rocks [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(5): 919-925.
- [15] Jiang J, Xu R K, Jiang T Y, *et al.* Immobilization of Cu(II), Pb(II) and Cd(II) by the addition of rice straw derived biochar to a simulated polluted Ultisol[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **229-230**: 145-150.
- [16] Mignardi S, Corami A, Ferrini V. Evaluation of the effectiveness of phosphate treatment for the remediation of mine waste soils contaminated with Cd, Cu, Pb, and Zn [J]. *Chemosphere*, 2012, **86**(4): 354-360.
- [17] 左继超, 高婷婷, 苏小娟, 等. 外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(10): 3874-3881.
Zuo J C, Gao T T, Su X J, *et al.* Effect of phosphate and organic acid addition on passivation of simulated Pb contaminated soil and the stability of the product[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(10): 3874-3881.
- [18] Burckhard S R, Schwab A P, Banks M K. The effects of organic acids on the leaching of heavy metals from mine tailings [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1995, **41**(2-3): 135-145.
- [19] Ryan P R, Delhaize E, Jones D L. Function and mechanism of organic anion exudation from plant roots[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 2001, **52**: 527-560.
- [20] Liu Y H, Feng L, Hu H Q, *et al.* Phosphorus release from low-grade rock phosphates by low molecular weight organic acids[J]. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 2012, **10**(1): 1001-1007.
- [21] 胡群群, 李志安, 黄宏星, 等. 柠檬酸促进土壤镉解吸的机理研究[J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(8-9): 1338-1342.
Hu Q Q, Li Z A, Huang H X, *et al.* Effects of citric acid on the desorption of Cd from soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, **20**(8-9): 1338-1342.
- [22] 王子琬, 梁新强. 土壤干湿交替对磷素释放的影响机制[J]. *环境生态学*, 2020, **2**(5): 54-58.
Wang Z W, Liang X Q. Effects of alternate drying-rewetting process on migration and transformation of soil phosphorus [J]. *Environmental Ecology*, 2020, **2**(5): 54-58.
- [23] 马利民, 张明, 滕衍行, 等. 三峡库区消落区周期性干湿交替环境对土壤磷释放的影响[J]. *环境科学*, 2008, **29**(4): 1035-1039.
Ma L M, Zhang M, Teng Y H, *et al.* Characteristics of phosphorous release from soil in periodic alternately waterlogged and drained environments at WFZ of the Three Gorges reservoir [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(4): 1035-1039.
- [24] Sah R N, Mikkelsen D S. Effects of temperature and prior flooding on intensity and sorption of phosphorus in soil: II. Effects on p sorption[J]. *Plant and Soil*, 1986, **95**(2): 173-181.
- [25] Ainsworth C C, Pilon J L, Gassman P L, *et al.* Cobalt, cadmium, and lead sorption to hydrous iron oxide: residence time effect[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, **58**(6): 1615-1623.

CONTENTS

Industrial Emission Characteristics and Control Countermeasures of VOCs in Chinese Rapid Economic Development Areas	MENG Bo-wen, LI Yong-bo, MENG Jing, <i>et al.</i>	(1023)
VOCs Emission Inventory and Variation Characteristics of Artificial Sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt	DAI Ling-wen, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1039)
Sources and Distribution Characteristics of HCBd in Rapid Economic Development Areas	TAO Yu-ming, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1053)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors	MA Yan, CHENG Lu, RUAN Zi-yuan, <i>et al.</i>	(1065)
Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China	CHAI Bing-wen, YIN Hua, WEI Qiang, <i>et al.</i>	(1073)
Analysis of the Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking Plant and Its Driving Factors	GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, ZENG Wei-bin, <i>et al.</i>	(1081)
Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City	SUN Xue-fei, ZHANG Li-xia, DONG Yu-long, <i>et al.</i>	(1093)
Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park	ZENG Wei-bin, GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1105)
Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi, <i>et al.</i>	(1114)
Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development	LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, <i>et al.</i>	(1123)
Levels and Risk Assessment of Short and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soil from Paper Mill Area	ZHANG Pei-xuan, GAO Li-rong, SONG Shi-jie, <i>et al.</i>	(1131)
Characterization and Health Risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the Soil Around a Typical Secondary Copper Smelter	HU Ji-cheng, WU Jing, XU Chen-yang, <i>et al.</i>	(1141)
Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil	SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing, <i>et al.</i>	(1152)
Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses; A Field Experiment	ZHENG Rui-lun, SHI Dong, LIU Wen-ju, <i>et al.</i>	(1158)
Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, SUN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1166)
Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Salt Stress	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(1177)
Effect of Water Regimes on Pb and Cd Immobilization by Biochar in Contaminated Paddy Soil	TANG Jia-qing, ZHANG Xu, HUANG Guo-yong, <i>et al.</i>	(1185)
Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice	YANG Xue-ling, WANG Ming-xing, XU Guo-min, <i>et al.</i>	(1191)
Effects of Chromium Pollution on Soil Bacterial Community Structure and Assembly Processes	YU Hao, AN Yi-jun, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(1197)
Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic	ZHAO Xue, SHEN Nan-chi, LI Ling-jun, <i>et al.</i>	(1205)
Impact of Pollutant Emission Reduction on Air Quality During the COVID-19 Pandemic Control in Early 2020 Based on RAMS-CMAQ	LIU Hou-feng, XU Wei, WEI Min, <i>et al.</i>	(1215)
Light-absorbing Properties and Sources of PM _{2.5} Organic Components at a Suburban Site in Northern Nanjing	SHANG Yue, YU Huan, MAO Yu-hao, <i>et al.</i>	(1228)
Pollution Characteristics and Chromophore Types of Brown Carbon in Xi'an	CHEN Qian, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i>	(1236)
Source and Health Risk Assessment of PM _{2.5} -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City	GUO Qing-yuan, BAI Wen-yu, ZHAO Xue-yun, <i>et al.</i>	(1245)
Health Benefit Assessment of PM _{2.5} Pollution Control in Beijing	DU Pei, WANG Jian-zhou, <i>et al.</i>	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian, <i>et al.</i>	(1268)
Concentrations and Patterns of Atmospheric Particulate Nitrogen and Phosphorus During Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	YUAN Gang, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(1280)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China	WANG Hong-li, GAO Ya-qin, JING Sheng-ao, <i>et al.</i>	(1298)
Characteristics and Cause Analysis of Heavy Air Pollution in a Mountainous City During Winter	LIU Zhuo-cheng, NIU Yue-yuan, WU Jing, <i>et al.</i>	(1306)
Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China	WANG Wen-peng, WANG Zhan-xiang, LI Ji-xiang, <i>et al.</i>	(1315)
VOCs Removal and Emission Monitoring of Beijing Bulk Gasoline Terminals in 2012-2019	HUA Lan-ying, CUI Tong, LI Jin-xiang, <i>et al.</i>	(1328)
Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste	MA Zhan-yun, JIANG Yu-cong, REN Jia-xue, <i>et al.</i>	(1333)
Response of Bacteriophage-polysylls to Hypoxic Conditions in the Surface Sediments of the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	YIN Mei-ling, DUAN Li-qin, SONG Jin-ming, <i>et al.</i>	(1343)
Human Health Risk Assessment of Phenol in Poyang Lake Basin	XU Qian-yun, AI Shun-hao, GAO Xiang-yun, <i>et al.</i>	(1354)
Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake	LIU Wei-wei, GUO Zi-liang, WANG Da-an, <i>et al.</i>	(1361)
Composition and Distribution Characteristics of Microplastics in Danjiangkou Reservoir and Its Tributaries	PAN Xiong, LIN Li, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1372)
Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir	HUANG Cheng, HUANG Ting-lin, LI Yang, <i>et al.</i>	(1380)
Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season	LI Cheng-yao, HUANG Ting-lin, WEN Cheng-cheng, <i>et al.</i>	(1391)
Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(1403)
Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring	TANG Chun-lei, ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, <i>et al.</i>	(1416)
Adsorption Behavior of Phosphate by CaO ₂ Remolded Sediment	XU Chu-tian, LI Da-peng, WANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1424)
Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with <i>Myriophyllum elatinooides</i> Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China	WANG Li-sha, LI Xi, LI Yu-yuan, <i>et al.</i>	(1433)
Accelerated Degradation of Aqueous Recalcitrant Iodinated Contrasting Media Using a UV/SO ₃ ²⁻ Advanced Reduction Process	LIU Zi-qi, QIU Fu-guo, LAI Man-ting, <i>et al.</i>	(1443)
Degradation of Dye Rhodamine B by Solar Thermally Activated Persulfate	MA Meng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(1451)
One-step Preparation of Lanthanum-Magnesium Ferrite and Its Phosphate Adsorption Capacity in Aqueous Solutions	BAI Run-ying, SONG Bo-wen, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(1461)
Pollutant Removal Efficiency of Different Units Along a Mature Landfill Leachate Treatment Process in a Membrane Biological Reactor-Nanofiltration Combined Facility	SHAO Li-ming, DENG Ying-tao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(1469)
Biological Conversion Mechanism of Sulfate Reduction Ammonium Oxidation in ANAMMOX Consortia	BI Zhen, DONG Shi-yu, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(1477)
Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons	HE Yun, LI Kui-xiao, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(1488)
Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish (<i>Danio rerio</i>)	YIN Xing-xing, GUO Chang-sheng, DENG Yang-hui, <i>et al.</i>	(1496)
Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia	WANG Zhe, ZHAO Ying-chen, LUO Yi-fei, <i>et al.</i>	(1503)
Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China	MA Hong-hong, PENG Min, GUO Fei, <i>et al.</i>	(1514)
Effects of Superparamagnetic Nanomaterials on Soil Microorganisms and Enzymes in Cadmium-Contaminated Paddy Fields	FANG Dan-dan, ZHANG Li-zhi, WANG Qiang, <i>et al.</i>	(1523)
Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice	CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>	(1535)
Biological Effect of Tetracycline Antibiotics on a Soil-Lettuce System and Its Migration Degradation Characteristics	WANG Wei-zhong, CHI Sun-lin, XU Wei-hong, <i>et al.</i>	(1545)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from the Ridges and Furrows of a Vegetable Field	XIONG Wei-xia, JIANG Chang-sheng, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1559)
Effects of Biochar and Straw on Soil N ₂ O Emission from a Wheat Maize Rotation System	TANG Zhan-ming, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i>	(1569)
Overview on Habitat Monitoring Methods Under Watershed Ecological Space Management	YIN Kun, LIU Hai-jiang, WANG Guang, <i>et al.</i>	(1581)