

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

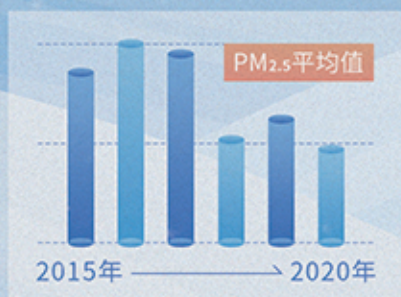
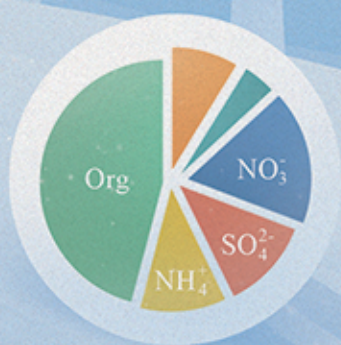
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡罗模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞楠, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志良 (4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉砷复合污染土壤的影响

张雅睿¹, 黄益宗^{1*}, 保琼莉¹, 魏祥东², 铁柏清², 张盛楠¹, 韩廿¹, 黄永春¹

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128)

摘要: 为了提高苍耳对农田 Cd 和 As 污染的修复效率, 探究了不同螯合剂和有机酸(EDTA、SAP、CA 和 MA)对苍耳提取农田土壤 Cd 和 As 的影响。结果表明, 施用 4 种不同螯合剂和有机酸对苍耳的根、茎和叶生物量影响不大。不同螯合剂和有机酸对苍耳各器官 Cd 和 As 含量和积累量影响不同。与 CK 处理相比, 施用 EDTA、SAP、CA 和 MA 均显著提高了苍耳叶部的 Cd 含量, 增幅分别是 44.1%、32.4%、41.2% 和 38.2%, 苍耳根系 As 含量分别提高 89.6%、7.4%、94.8% 和 61.5%。施用 EDTA、SAP、CA 和 MA 处理使苍耳植株总 Cd 积累量分别比 CK 处理提高 70.2%、29.4%、28.9% 和 33.1%, 而 As 积累量分别提高 67.0%、19.6%、81.9% 和 40.8%。施用螯合剂和有机酸对苍耳各器官 Cd 和 As 的富集系数和转运系数也有不同影响。4 种螯合剂和有机酸处理对根际土壤 Cd 和 As 含量影响均比较显著, 与对照相比降幅分别是 32.7%~38.2% 和 14.6%~20.5%。4 种螯合剂和有机酸均可以提高苍耳提取农田土壤 Cd 和 As 的效率。

关键词: 农田; 重金属; 苍耳; 螯合剂; 植物修复; 萃取技术

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4292-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202112012

Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using *Xanthium sibiricum*

ZHANG Ya-rui¹, HUANG Yi-zong^{1*}, BAO Qiong-li¹, WEI Xiang-dong², TIE Bai-qing², ZHANG Sheng-nan¹, HAN Nian¹, HUANG Yong-chun¹

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: In order to improve the phytoextraction efficiency of *Xanthium sibiricum* on farmland soil that had been contaminated by Cd and As, this study explored the effects of chelating agents and organic acids (EDTA, SAP, CA, and MA) on the extraction of Cd and As heavy metals using *X. sibiricum*. The results showed that the four different chelating agents and organic acids had little effect on the biomass of the roots, stems, and leaves of *X. sibiricum*. However, they had different effects on the concentrations and accumulation of Cd and As in various organs of *X. sibiricum*. Compared with the those in the CK treatment, EDTA, SAP, CA, and MA significantly increased the Cd concentrations in the leaves of *X. sibiricum* by 44.1%, 32.4%, 41.2%, and 38.2% and the As concentrations in the roots of *X. sibiricum* by 89.6%, 7.4%, 94.8%, and 61.5%, respectively. The four treatments (EDTA, SAP, CA, and MA) improved the total Cd accumulation of *X. sibiricum*, with increasing ranges, respectively, of 70.2%, 29.4%, 28.9%, and 33.1%, and the As accumulation increased by 67.0%, 19.6%, 81.9%, and 40.8%, respectively, compared with that of the CK treatment. The four chelating agents and organic acids had different effects on the Cd and As bioconcentration factor and transfer factor of various organs of *X. sibiricum*. Treatments with EDTA, SAP, CA, and MA resulted in a decrease of 32.7%-38.2% in soil Cd concentrations and a decrease of 14.6%-20.5% in soil As concentrations. These four chelating agents can be used for enhancing the efficiency of extraction Cd and As heavy metals by *X. sibiricum*.

Key words: farmland; heavy metal; *Xanthium sibiricum*; chelating agent; phytoremediation; extraction technology

农田中的镉(Cd)和砷(As)污染因其复杂性和隐蔽性已经成为非常棘手的环境问题,进入土壤的Cd和As很难去除,且影响不可逆^[1]。植物萃取技术是一种有效地去除土壤重金属的手段,与土壤固化、土壤淋洗等物理化学手段相比,不会对环境造成二次污染。某些植物在Cd和As污染土壤中保持较强生长能力的同时,能通过根系吸收积累农田中的Cd和As进行土壤修复,例如,植物可以通过根系交换吸收和非代谢结合作用,与游离的重金属离子发生结合;植物可以利用共质体途径,把土壤中的Cd和As运输到茎和叶中,通过植物萃取去除土壤中的重金属。

在利用植物进行重金属污染土壤的修复中,土壤未经调控,其中可以被植物提取的有效重金属含

量较低,而且土壤中的有效态重金属是一个缓释过程。这使得自然条件下,植物吸收积累重金属的效率低下,限制了植物修复技术的发展与应用^[2, 3]。目前某些天然或人工螯合物已广泛用于强化植物修复。乙二胺四乙酸(EDTA)是一种人工合成的络合剂和金属掩蔽剂,具有广泛的配位性能^[4],对土壤中的靶金属有很高的螯合效率。祝方等^[5]的研究发现,EDTA能显著活化土壤中Cd,改变土壤中Cd的形态分布,提高Cd的生物活性,从而促进植物对Cd

收稿日期: 2021-12-01; 修订日期: 2022-01-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1808702, 2017YFD0801500)

作者简介: 张雅睿(1995~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤重金属修复, E-mail: zhangyaru87@163.com

* 通信作者, E-mail: yizonghuang@126.com

的吸收,去除率可达 74.6%。Tipu 等^[6]在 EDTA 对镍(Ni)污染土壤修复中发现 EDTA 与 Ni 配施能显著提高玉米中 Ni 的积累,地上部 Ni 积累量比对照提高 4.9 倍,根系提高 2.6 倍。拓朵朵^[7]研究 EDTA 和 EDDS 强化苎麻修复 Hg 和 Cd 复合污染土壤发现,施用 EDTA 时苎麻叶中 Cd 含量是对照的 2.27~4.23 倍。但 EDTA 进入到环境中残留时间较长,很难被降解,因此存在着淋失和残存风险,容易引起二次污染。皂素(SAP)是一种天然的生物表面活性剂,易生物降解。皂素主要通过胶束增溶作用和皂素分子上的酯基和羧基的络合作用来增加土壤中游离重金属的含量^[8]。李榜江等^[9]的研究发现,施加溶液浓度为 0.1~2.5 mmol·L⁻¹的茶皂素有利于 Cd 在苎麻植株内转移。Liu 等^[10]研究茶皂素对黑麦草修复 Cd 和砷复合污染土壤时,发现添加茶皂素能提高黑麦草地上部和地下部中的 Cd 含量,与对照相比黑麦草地上部和地下部 Cd 含量分别提高 10% 和 8%。宋宇超^[11]研究复合型植物源活化剂(水果皮渣提取物与茶皂素等复配)强化植物提取土壤重金属,发现该复合型植物源活化剂显著提高了东南景天对 Cd 和 Pb 的吸收积累。另外,有研究发现有机酸能与离子态金属形成稳定的螯合物,同时具有生物可降解性^[12]。柠檬酸(CA)和苹果酸(MA)是两种小分子有机酸,可以溶解土壤中的重金属进入液相,提高重金属的生物有效性,且这两种小分子有机酸施用于土壤中不会引起二次污染。詹淑威等^[13]探究了 CA 和 MA 等强化小飞扬草(*Euphorbia thymifolia* L.)修复 Cd 污染土壤的可行性,结果发现,2 种有机酸均提高了小飞扬草根和地上部 Cd 含量,强化效果为: CA > MA。添加 5、10 和 20 mmol·kg⁻¹的 CA 和 5、10 mmol·kg⁻¹的 MA 均显著提高了小飞扬草根系的活力和 ATP 酶活性,减小小飞扬草根细胞膜的透性($P < 0.05$)。马叶等^[14]比较 EDTA 和 CA 两种螯合剂诱导红叶苧菜(*Beta vulgaris* var. *cicla* L.)修复土壤 Cd 和 Pb 污染的效果,得出 EDTA 更能促进红叶苧菜对 Pb 的吸收,CA 更能促进红叶苧菜对 Cd 的吸收。向冬芳等^[15]研究三聚磷酸钠与 CA 配施对蜈蚣草修复 As 污染土壤的影响,发现蜈蚣草 As 萃取总量提高 40.4% 以上,土壤脲酶和脱氢酶活性显著提高($P < 0.05$)。Mei 等^[16]探究低分子量有机酸对红树林提取和固定 As 等重金属的动力学机制,得出 CA 和 MA 处理导致红树林的根际 As 含量分别下降 68.3% 和 42.1%。Chen 等^[17]研究小分子酸对植物修复 Cr 污染土壤时,得出有机酸能显著提高植物对 Cr 的提取量,效果为: CA > MA > 其他酸。Taghipour 等^[18]的研究发

现,10 mmol·L⁻¹ MA 最大可以提取磷(P)含量达 1 554.9 mg·kg⁻¹。上述研究表明某些螯合剂和有机酸能有效地加强植物对土壤重金属的修复效果,但在实际应用中各自存在着不同的优势和劣势。

目前植物修复技术中植物的选取已由生物量小的超富集植物转向生物量大且对重金属有较强富集能力的植物^[19]。苍耳(*Xanthium sibiricum*)是菊科一年生草本植物,广泛分布于我国各地,它生物量大,适应性强。陈昌东等^[20]研究了平顶山矿区优势植物对重金属的富集特征时,发现苍耳对 Cd 的生物富集系数(BCF)和生物转移系数(BTF)均大于 1。Yu 等^[21]发现苍耳和鬼针草(*Bidens pilosa* L.)具有更强的重金属提取能力且生物量较大,是用来提取土壤重金属的理想植物。目前有关螯合剂和有机酸强化苍耳萃取土壤重金属的田间试验效果还未见报道。本文通过大田试验 EDTA、SAP、CA 和 MA 强化苍耳萃取土壤 Cd 和 As 的效果,以期为我国 Cd、As 复合污染农田修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试植物为苍耳,菊科一年生草本植物。螯合剂选用两种,分别为乙二胺四乙酸(EDTA)和皂素(SAP)。有机酸选用两种,分别为柠檬酸(CA)和苹果酸(MA)。

1.2 试验设计

本文选取湖南省浏阳市蕉溪乡常丰村沙德组(113°52.504'E, 28°22.983'N)一块污染农田作为试验田。土壤 ω (总 Cd)为 0.91 mg·kg⁻¹, ω (总 As)为 107.73 mg·kg⁻¹(表 1)。2020 年 5 月收集生长一致的野生苍耳苗,以 50 cm × 50 cm 株行距种植,每 m² 约种植 9 株。苍耳种植 2 个月后(2020 年 7 月 4 日)开始施用螯合剂和有机酸。设 5 个不同的螯合剂和有机酸处理:CK、EDTA、SAP、CA 和 MA。每个处理 4 次重复,共 20 小区。每小区面积 2 m²,共 15 株苍耳,各小区随机排列。螯合剂和有机酸用量均为 1.5 g·m⁻²,溶于 500 mL 水中,以溶液形式施于根际土壤中。2020 年 8 月 28 日收获苍耳。

1.3 样品采集及指标测定

在每个小区随机选取 2~3 株长势均匀的苍耳整株采样,并采集苍耳的根际土壤。植物样品和根际土壤分别做好标记,运回实验室。

将收获的植物样品用去离子水冲洗干净后,分根、茎和叶装袋放入烘箱,在 105℃ 杀青 30 min,75℃ 烘干至恒重,称重。将烘干后的植物样品用万能粉碎机粉碎后保存备用。称取 0.25 g 样品,采用

表 1 试验田土壤理化性质和重金属含量

Table 1 Physicochemical property of test field and concentration of heavy metals

项目	pH 值	ω (有机质) /g·kg ⁻¹	阳离子交换量 /mol·kg ⁻¹	ω (总 Cd) /mg·kg ⁻¹	ω (总 As) /mg·kg ⁻¹
参数	5.59	31.40	12.30	0.91	107.73

HNO₃: HClO₄ = 4: 1 (体积比)联合消解,消化液用去离子水定容至 25 mL,定容后采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)直接测定 Cd 和 As 的含量.

土壤样品经自然风干,过 0.15 mm 尼龙筛保存备用,称取 0.25 g 采用王水[HCl: HNO₃ = 3: 1 (体积比)]-高氯酸消解,消化液用去离子水定容至 25 mL. 样品 Cd 和 As 的测定均采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS). 土壤与植物 Cd 和 As 含量测定时,分别用国家土壤标准物质(GWB 07401)和植物标准物质(GBW 07603)来进行质量控制.

1.4 数据处理及统计

各器官重金属积累量反映植物各器官积累重金属的情况:

积累量 = Cd(或 As)含量 × 相应器官的干重(g)

转移系数反映了重金属在植物体内由根部向茎、叶、花等器官转移的能力,能展现出重金属在植物体内的分布规律:

$TF_{根-茎}$ = 茎 Cd(或 As)含量/根 Cd(或 As)含量

$TF_{茎-叶}$ = 叶 Cd(或 As)含量/茎 Cd(或 As)含量

植物富集系数(BAF)能反映植物从土壤中吸取重金属的能力^[22]:

$BAF_{各器官} = \frac{各器官 Cd(或 As) 含量}{根际土壤 Cd(或 As) 含量}$

采用 Microsoft Excel 2013 和 SPSS 25.0 进行平均值和标准差计算及差异显著性检验.

2 结果与分析

2.1 不同螯合剂和有机酸对苍耳生物量的影响

表 2 为不同螯合剂和有机酸处理对苍耳各器官生物量(以干质量计)的影响,从中看出,施用不同螯合剂和有机酸对苍耳的植株总生物量均没有产生影响($P < 0.05$),说明本试验施用的螯合剂和有机酸及其施用剂量对苍耳的生长没有产生毒害作用.

表 2 不同处理的螯合剂和有机酸对苍耳各器官生物量的影响¹⁾

Table 2 Effect of different treatments of chelating agents and organic acids on biomass of *X. sibiricum*

处理	根	茎	叶	总计
CK	79.89 ± 0.51cd	321.20 ± 18.42a	42.73 ± 0.68b	443.82 ± 17.81a
EDTA	100.68 ± 0.80a	326.43 ± 17.38a	20.67 ± 1.25e	447.77 ± 21.81a
SAP	89.41 ± 0.71b	317.11 ± 24.65a	42.04 ± 0.57b	448.55 ± 19.85a
CA	80.98 ± 1.07c	352.91 ± 8.69a	31.22 ± 0.19c	465.10 ± 22.19a
MA	79.27 ± 1.20ce	309.65 ± 5.88a	47.59 ± 0.76a	436.51 ± 13.11a

1) 数值单位为 g·株⁻¹(以干重计); 同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)

表 3 为不同螯合剂和有机酸处理下苍耳的种植密度、生物量和产量情况,在施加螯合剂和有机酸不影响苍耳植株生长的情况下,苍耳单株干重为 0.44 ~ 0.47 kg,每 hm² 产量为 39.60 ~ 42.30 t.

表 3 苍耳的种植密度、生物量和产量情况

Table 3 Planting density, biomass, and yield of *X. sibiricum*

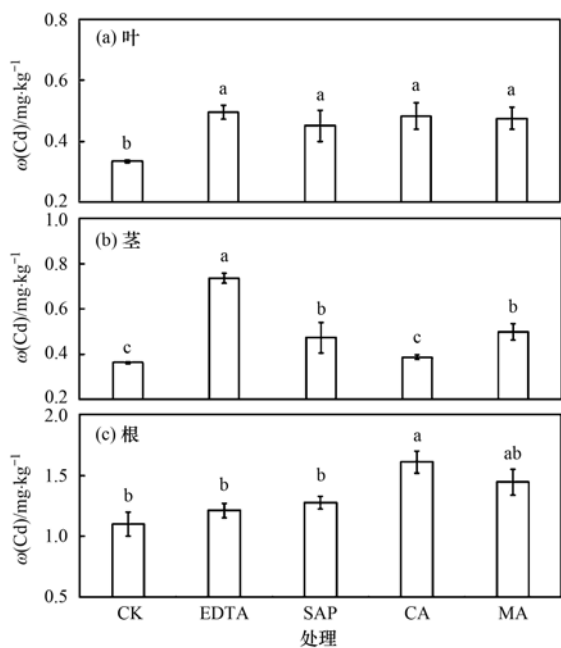
植物	生物量(以干重计) /kg·株 ⁻¹	密度 /株·m ⁻²	产量 /t·hm ⁻²
苍耳	0.44 ~ 0.47	9	39.60 ~ 42.30

2.2 不同螯合剂和有机酸对苍耳吸收积累和转运 Cd 的影响

由图 1 可以看出,与 CK 处理相比,施加 EDTA、SAP、CA 和 MA 处理,均显著提高了苍耳叶中的 Cd 含量($P < 0.05$),提高幅度分别是 44.1%、32.4%、41.2% 和 38.2%. 在苍耳茎中,EDTA、SAP 和 MA

处理对 Cd 含量提升有显著效果,其中 EDTA 处理效果最明显,使 Cd 含量显著增加了 105.6% ($P < 0.05$). 对于苍耳根,施用 CA 处理显著提高了苍耳根中 Cd 含量 31.7% ($P < 0.05$).

利用植物不同部位的生物量与各部位积累重金属含量的乘积,即植株体内重金属积累量来反映植物提取重金属的能力. 从表 4 可以看出,相较于对照,不同螯合剂和有机酸的施用在一定程度上对苍耳 Cd 积累量产生了影响,利于提高苍耳对 Cd 的提取. 比较不同部位发现,在苍耳根系中,CA 处理比对照显著提高了苍耳 Cd 积累量,达 48.4% ($P < 0.05$). EDTA、SAP 和 MA 均使得苍耳茎中 Cd 积累量显著增加,增幅为对照的 17.1% ~ 105.7%,其中 EDTA 效果最显著,增幅是 105.7% ($P < 0.05$). 对于苍耳叶部,4 种外源螯合物的添加均产生了显著



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同
图 1 不同整合剂和有机酸对苍耳植株 Cd 含量的影响

Fig. 1 Effect of different chelating agents and organic acids on concentrations of Cd in *X. sibiricum*

作用,苍耳叶 Cd 积累量分别比 CK 处理提升 32.2% (SAP)、4.2% (CA) 和 57.3% (MA)。

利用植物不同部位的生物量与各部位积累重金属含量的乘积,即植株体内重金属积累量来反映植物提取重金属的能力。从表 4 可以看出,相较于对照,不同整合剂和有机酸的施用在一定程度上对苍耳 Cd 积累量产生了影响,利于提高苍耳对 Cd 的提取。比较不同部位发现,在苍耳根系中,CA 处理比对照显著提高了苍耳 Cd 积累量,达 48.4% ($P < 0.05$)。EDTA、SAP 和 MA 均使得苍耳茎中 Cd 积累量显著增加,增幅为对照的 17.1%~105.7%,其中 EDTA 效果最显著,增幅是 105.7% ($P < 0.05$)。对于苍耳叶部,施用 SAP、CA 和 MA,苍耳叶 Cd 积累量分别比 CK 处理提升 32.2%、4.2% 和 57.3%。

表 4 不同整合剂和有机酸对苍耳植株积累 Cd 的影响¹⁾

Table 4 Effect of different chelating agents and organic acids on accumulation of Cd in *X. sibiricum*

处理	Cd 积累量/ $\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$		
	根	茎	叶
CK	87.86 $\pm$ 0.01b	116.63 $\pm$ 0.01c	14.32 $\pm$ 0.01b
EDTA	122.15 $\pm$ 0.06b	240.04 $\pm$ 0.23a	10.22 $\pm$ 0.02a
SAP	114.23 $\pm$ 0.05b	149.89 $\pm$ 0.68b	18.92 $\pm$ 0.05a
CA	130.52 $\pm$ 0.09a	136.49 $\pm$ 0.01c	15.01 $\pm$ 0.04a
MA	114.64 $\pm$ 0.11ab	154.05 $\pm$ 0.04b	22.51 $\pm$ 0.04a

1) 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

苍耳各部位 Cd 富集系数见图 2, SAP 处理显著提高了叶对 Cd 的富集系数,而 EDTA 对苍耳茎的 Cd 富集系数有显著提升作用 ($P < 0.05$)。

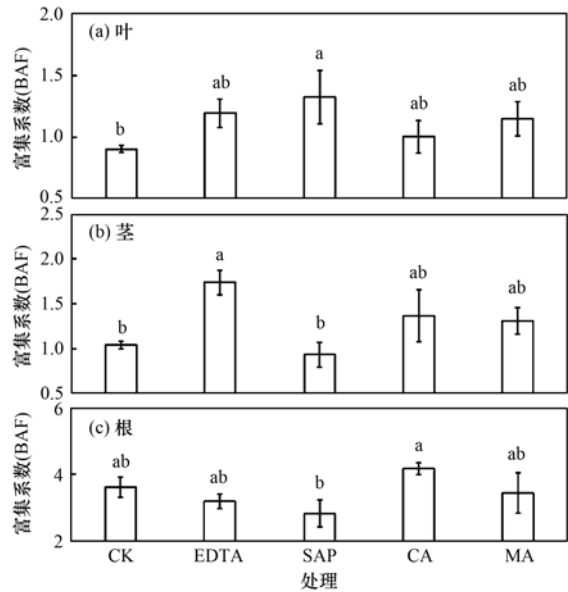


图 2 不同整合剂和有机酸对苍耳植株富集 Cd 的影响
Fig. 2 Effect of different chelating agents and organic acids on BAF of Cd in *X. sibiricum*

不同整合剂和有机酸对苍耳转运 Cd 的影响见表 5, EDTA、SAP、CA 和 MA 一定程度上对苍耳根到茎的 Cd 转运系数 ($TF_{根-茎}$) 和茎到叶的 Cd 转运系数 ($TF_{茎-叶}$) 的增加具有促进作用。相较于对照, SAP 处理显著提高了苍耳茎到叶的 Cd 转运系数,增幅是 96.3% ($P < 0.05$), 转运系数 > 1 , 达到 1.61。添加外源螯合物对苍耳植株根到茎的 Cd 转运系数 ($TF_{根-茎}$) 没有显著影响 ($P > 0.05$)。

表 5 不同整合剂和有机酸对苍耳植株 Cd 转运系数的影响

Table 5 Effect of different chelating agents and organic acids on TF of Cd in *X. sibiricum*

处理	$TF_{根-茎}$	$TF_{茎-叶}$
CK	0.28 $\pm$ 0.03a	0.82 $\pm$ 0.04b
EDTA	0.41 $\pm$ 0.11a	0.98 $\pm$ 0.17b
SAP	0.35 $\pm$ 0.04a	1.61 $\pm$ 0.26a
CA	0.33 $\pm$ 0.07a	0.77 $\pm$ 0.07b
MA	0.40 $\pm$ 0.08a	0.87 $\pm$ 0.02b

2.3 不同整合剂和有机酸对苍耳吸收积累和转运 As 的影响

在 Cd 和 As 复合污染的土壤中,施用 4 种螯合剂和有机酸除了提高苍耳植株体内 Cd 含量之外,对 As 含量也产生了不同程度的影响(图 3)。对比不同处理下苍耳不同部位的 As 含量,大小关系均为:根 $>$ 叶 $>$ 茎,其中根中 As 含量最大,达 2.63 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在苍耳根系中,EDTA 和 CA 使得 As 含量比对照组分别显著提高了 89.6% 和 94.8% ($P < 0.05$)。对于苍耳茎来说,与 CK 处理相比,施用 CA 显著提升茎 As 含量 90.5% ($P < 0.05$),其他 3 种处理下的茎 As 含量均无显著变化 ($P > 0.05$)。CA 和

MA 处理对苍耳叶中 As 含量的增加产生了显著作用,增幅分别是 CK 处理的 18.1% 和 9.6% ($P < 0.05$).

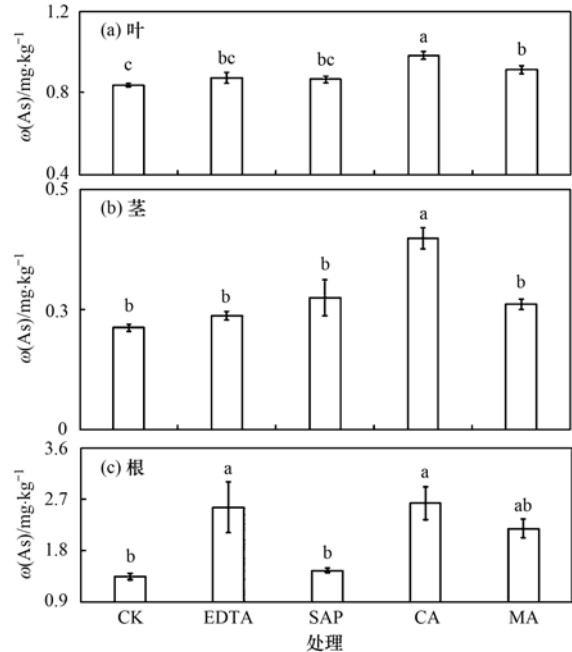


图3 不同整合剂和有机酸对苍耳植株 As 含量的影响
Fig. 3 Effect of different chelating agents and organic acids on concentrations of As in *X. sibiricum*

苍耳植株 As 积累量的变化见表 6,根部是苍耳植株体内 As 积累最多的部位,积累量最高达 $257.42\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$. EDTA 显著提高了苍耳根对 As 的积累,处理后根部 As 积累量是对照的 2.4 倍($P < 0.05$).施用 CA 对苍耳根和茎部的 As 积累都产生了显著提升作用,其 As 积累量分别是对照的 1.98 倍和 2.06 倍($P < 0.05$). MA 处理导致苍耳叶中 As 积累量比 CK 处理提高 21.8% ($P < 0.05$).

表6 不同整合剂和有机酸对苍耳植株积累 As 的影响
Table 6 Effect of different chelating agents and organic acids on accumulation of As in *X. sibiricum*

处理	As 积累量/ $\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$		
	根	茎	叶
CK	$107.50 \pm 0.05\text{b}$	$68.09 \pm 0.01\text{b}$	$35.64 \pm 0.01\text{c}$
EDTA	$257.42 \pm 0.45\text{a}$	$77.44 \pm 0.01\text{b}$	$17.99 \pm 0.03\text{bc}$
SAP	$129.29 \pm 0.04\text{b}$	$87.08 \pm 0.04\text{b}$	$36.31 \pm 0.02\text{bc}$
CA	$213.04 \pm 0.29\text{a}$	$140.46 \pm 0.02\text{a}$	$30.67 \pm 0.02\text{a}$
MA	$173.06 \pm 0.16\text{ab}$	$80.92 \pm 0.01\text{b}$	$43.42 \pm 0.02\text{b}$

图 4 为不同整合剂和有机酸对苍耳各部位富集 As 的影响,从中可以看出,苍耳根系和叶的 As 富集系数均高于茎. CA 处理能显著提高苍耳茎的 As 富集系数,相比对照增加了 34.2% ($P < 0.05$). 其他处理对苍耳植株 As 富集无显著影响($P > 0.05$).

从表 7 可以看出,不同处理下苍耳植株从茎到叶的 As 转运系数 ($\text{TF}_{\text{茎-叶}}$) 均大于 1,最大为 4.16.

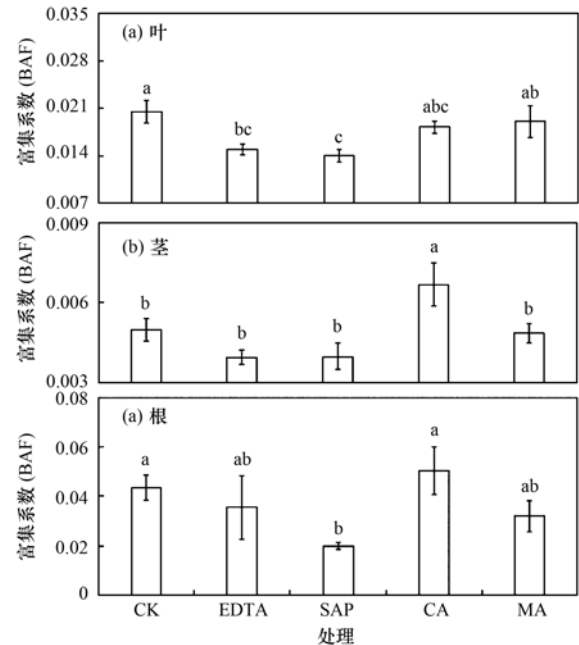


图4 不同整合剂和有机酸对苍耳植株富集 As 的影响
Fig. 4 Effect of different chelating agents and organic acids on BAF of As in *X. sibiricum*

施用 SAP 处理后,苍耳根到茎的 As 转运系数 ($\text{TF}_{\text{根-茎}}$) 与对照相比显著提高了 66.7% ($P < 0.05$).

表7 不同整合剂和有机酸对苍耳植株 As 转运系数的影响
Table 7 Effect of different chelating agents and organic acids on TF of As in *X. sibiricum*

处理	$\text{TF}_{\text{根-茎}}$	$\text{TF}_{\text{茎-叶}}$
CK	$0.12 \pm 0.02\text{b}$	$4.16 \pm 0.33\text{a}$
EDTA	$0.14 \pm 0.03\text{ab}$	$3.81 \pm 0.29\text{ab}$
SAP	$0.20 \pm 0.02\text{a}$	$3.62 \pm 0.27\text{ab}$
CA	$0.14 \pm 0.02\text{ab}$	$2.85 \pm 0.36\text{b}$
MA	$0.17 \pm 0.04\text{ab}$	$4.09 \pm 0.85\text{ab}$

2.4 整合剂和有机酸施用对根际土壤 Cd 和 As 含量的影响

不同整合剂和有机酸施用后对苍耳根际土壤中 Cd 和 As 含量的影响见图 5. 从中可以看出,4 种整合剂和有机酸都对苍耳根际土壤中的 Cd 和 As 含量的降低有显著促进作用. 4 种处理后,与对照处理相比苍耳根际土壤 Cd 含量降幅为 32.7% ~ 38.2%,As 含量降幅为 14.6% ~ 20.5% ($P < 0.05$). 其中,SAP 处理降低效果最显著,使苍耳根际土壤中 Cd 含量与 CK 处理相比降低 38.2%,As 含量降低 20.5%.

3 讨论

植物提取是一种绿色修复技术,可以用于重金属污染土壤的低成本治理,是近年人们关注的热点. 但是目前大部分关于植物提取的研究仅限于实验室

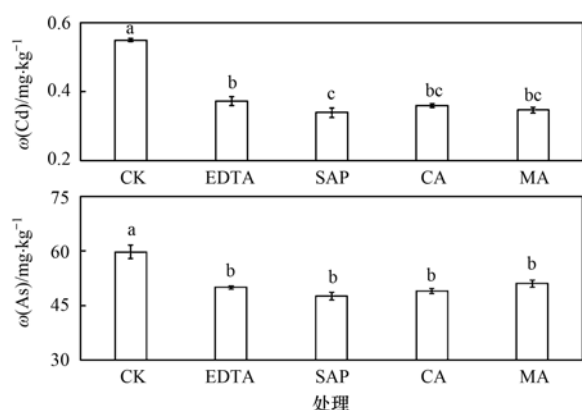


图5 不同整合剂和有机酸对苍耳根际土壤中 Cd 和 As 含量的影响

Fig. 5 Effect of different chelating agents and organic acids on the concentrations of Cd and As in rhizosphere soil of *X. sibiricum*

阶段,大面积的田间植物提取修复试验报道也不多.植物提取技术应用于实际田间修复时受到当地气候变化、土壤重金属含量、水分、养分和植物根系的异质性等各种复杂因素影响,且这些影响无法被量化^[23].因此在植物提取技术的应用层面,比如在重金属农田修复领域大规模商业化的应用、有价金属植物开采等研究还需要进行更广泛的田间试验.本研究在湖南省浏阳市蕉溪乡 Cd 和 As 复合污染农田中进行植物提取的大田试验,得出整合剂和有机酸(EDTA、SAP、CA 和 MA)可以强化苍耳对土壤 Cd 和 As 的提取效率,降低苍耳根际土壤中 Cd 和 As 的含量.

影响植物提取重金属效率的两个关键因素是植物生物量和重金属的生物有效性^[24].植物通过转运蛋白从根系吸收重金属并转运到地上部各器官进行无害化和储存,最终通过收获植物可以达到去除土壤中重金属的目的.因此高生物量是所收获植物提取更多重金属的重要因素^[25].苍耳生长迅速、生物量大、适应性广、对重金属耐受性强和具有发达的根系,它在本试验条件下可以正常生长,未出现显著的重金属中毒现象.而且,苍耳在施加 4 种整合剂和有机酸后生物量也未发生显著变化,这与韩甘等^[26]的研究结果相一致.本试验中成熟期苍耳单株总干质量大于 450 g, Cd 和 As 最大提取量分别可达 372.41 $\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ 和 384.17 $\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$.而一些超富集植物如芥菜在生长环境良好的盆栽试验中单株总干质量仅为 0.36 ~ 0.46 g^[27],东南景天为 5.86 ~ 8.94 g,黑麦草、玉米和大豆为 1.44 ~ 12.78 g,藿香蓟为 ≤ 10 g^[28],香根草为 15.44 ~ 17.56 g^[29].Anning 等^[29]的研究发现利用 EDTA 强化香根草(*Vetiveria zizanioides*)吸收 As 的提取量为 20.00 $\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$.Cd 和锰(Mn)超富集植物青葙(*Celosia argentea* L.)在

中度 Cd 污染土壤中每株提取 Cd 量为 160.74 μg ^[30].因此大多数超富集植物生物量较低,且只能富集一种或几种重金属^[31],很少有发现超富集植物可以同时超积累多种重金属^[32].而苍耳无论从生物量还是从本试验结果得出的其对 Cd 和 As 的复合富集能力来看,都较其他植物有优势.

植物根际土壤中重金属的生物有效性是限制植物提取效率提高的另一个关键因子. As 超富集植物蜈蚣草(*Pteris vittata* L.)根际能分泌草酸、植酸等有机酸,这些根际分泌物有助于增加根际土壤中 As 的溶解度^[33]. Cd 超富集植物也比非超富集植物根际 Cd 的生物有效性更高,同时前者也会比后者分泌更多可以降低根际土壤 pH 值(0.6 ~ 0.8 个单位)的可溶性有机物^[34].这些根系分泌物的作用类似于天然整合剂,可以通过与重金属形成可溶性络合物或降低土壤 pH 值以增加土壤中可交换态重金属含量,从而提高植物根系对 Cd 和 As 等重金属的吸收效率.因此在非超富集植物根际施用天然或合成的整合剂,可以提高非富集植物根际土壤中重金属的生物可利用性. EDTA 是一种常见的人工合成类整合剂,是活化土壤中重金属、辅助非超富集植物提高根系提取效率的常用材料^[35].赵中秋等^[36]向生长在 $\omega(\text{Cd})$ 为 15 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤中的黑麦草根部分施加 5 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 EDTA,结果表明,EDTA 可以显著地提高土壤溶液和黑麦草植株地上部的 Cd 含量. Gul 等^[37]的研究发现土壤中添加 EDTA 分别提高了天竺葵和马蹄纹天竺葵茎中 Pb 含量的 50.9% 和 42.2%.但是陈亚华等^[38]用 EDTA 强化油菜修复 Pb 污染土壤,发现高含量的 EDTA 对植物的毒害作用非常明显, 17.5 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理后植物在 4 d 时全部枯死.不同的是,在本研究中施加 EDTA 对苍耳生长以及生物量都没有产生抑制作用,证明本试验的 EDTA 的施用量对苍耳是安全的.茶皂素是一种天然表面活性剂,具有低毒性,半衰期较短. Liao 等^[39]的研究表明茶皂素的浓度增加能显著提高尾穗苋(*Amaranthus caudatus* L.)对 Cd 的提取. Tao 等^[40]的研究发现添加皂素显著降低了东南景天根际土壤中的 Cd 含量达 40.9%,表明皂素促进了景天对 Cd 的吸收,增强了植物的提取效率.本试验中,施用皂素对苍耳根际土壤 Cd 和 As 含量均产生了显著的影响. SAP 处理导致苍耳根际土壤中 Cd 和 As 含量分别降低了 38.2% 和 20.5%,这证明了皂素活化了土壤中 Cd 和 As,提高它们的溶解度,进而被苍耳根系吸收.土壤中 Cd 溶解度的提高可能与皂素中的羧基在土壤溶液中与 Cd 形成了配合物有关.低分子有机酸(例如 CA 和 MA)是根系分泌

物的重要组成部分,可以提高污染金属的生物有效性,促进植物吸收^[41],且具有比 EDTA 更低的生态风险.另外,有机酸可以通过与重金属形成配合物并将其隔离到液泡中,参与重金属的运输和胞内解毒^[42]. Ma 等^[43]研究 CA、MA 和草酸对土壤 Cd 的活化机制,发现添加 CA 处理导致香菇根际土壤有效态 Cd 含量最高,其次是 MA 处理.同时发现土壤 CA 含量比其他两种有机酸都高,这可能是 CA 处理下土壤有效态 Cd 比较高的原因之一. Onireti 等^[44]探究 CA、MA 和草酸对 Pb 和 As 复合污染土壤中重金属提取的影响,得出 CA 与 MA 和草酸相比提取 As 的量最多,比 MA 处理提取效果更明显,这与本试验的结果基本一致.在本试验中,CA 比 MA 处理导致苍耳地上部 As 含量提高约 2 倍.有机酸对 Cd 和 As 的解吸能力不同可能是因为它们化学结构不同.一方面,CA 的相对分子质量比 MA 高(CA 和 MA 的相对分子质量分别为 192.14 和 134.09),因此 CA 具有更大的表面积和负电荷,它可以螯合更多的金属离子^[45];另一方面,CA 有三个羧基和一个羟基,MA 只有两个羧基和一个羟基.因此,CA 可以解吸更多的 Cd^{2+} ^[46]. Han 等^[47]的研究比较了 EDTA 和 CA 对喜盐鸢尾(*Iris halophila* Pall.) 积累重金属的效率,发现 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 EDTA 比相同含量的 CA 处理导致喜盐鸢尾地上部的 Cd 含量提高更多,因此 EDTA 强化鸢尾花提取 Cd 的效果更好,这与本研究的结果基本一致.本试验中,与对照相比 EDTA 处理导致苍耳茎和叶中 Cd 含量分别提高 105.6% 和 44.1%,比 CA 强化苍耳提取 Cd 效果好一些.然而对于土壤 As 提取来说,本研究得到 CA 比 EDTA 处理效果更好,CA 处理导致苍耳茎和叶 As 含量分别比 CK 处理提高 90.5% 和 18.1%,而 EDTA 处理对苍耳地上部 As 含量的增加没有显著影响.这可能是因为大田试验的环境条件较复杂,许多不可控的因素导致 EDTA 和 CA 的强化效果不稳定,以后还要多次长期的田间修复验证.

本研究结果表明苍耳对 Cd 的积累主要在根部和茎部,对 As 的积累主要在根部,通过苍耳整株挖出的方式可移除土壤中的 Cd 和 As.苍耳根系在土壤里生长较浅,挖除操作的人工成本较低,因此采用苍耳萃取技术修复 Cd 和 As 污染土壤是一种经济有效的方式之一.但长期来看,随着螯合剂和有机酸的添加,土壤中 Cd 和 As 的形态会发生变化,例如可交换态和铁锰氧化物结合态等互相转化,导致土壤中重金属无法完全被植物吸收达到安全值,苍耳对 Cd 和 As 的积累能力会逐步下降,其机制和解决方式还有待进一步研究.

4 结论

(1)4 种螯合剂和有机酸(EDTA、SAP、CA 和 MA)可强化苍耳对土壤 Cd 和 As 的提取效率,其中 CA 和 EDTA 的强化效果比 SAP 和 MA 更好.EDTA 处理导致苍耳 Cd 积累量比对照处理提高 70.2%,CA 使苍耳 As 积累量比对照提高 81.9%.

(2)EDTA、SAP、CA 和 MA 可显著降低苍耳根际土壤中 Cd 和 As 的含量,与对照处理相比,苍耳根际土壤 Cd 含量降低 32.7%~38.2%,As 含量降低 14.6%~20.5%.可以利用这 4 种螯合剂和有机酸来强化苍耳对土壤 Cd 和 As 的提取.

参考文献:

- [1] 黄益宗,郝晓伟,雷鸣,等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3): 409-417.
Huang Y Z, Hao X W, Lei M, et al. The remediation technology and remediation practice of heavy metals-contaminated soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(3): 409-417.
- [2] Huang J W, Chen J J, Berti W R, et al. Phytoremediation of lead-contaminated soils: role of synthetic chelates in lead phytoextraction[J]. Environmental Science & Technology, 1997, 31(3): 800-805.
- [3] Epstein A L, Gussman C D, Blaylock M J, et al. EDTA and Pb-EDTA accumulation in *Brassica juncea* grown in Pb-amended soil[J]. Plant and Soil, 1997, 208(1): 87-94.
- [4] 李振东,刘东方,黄文力,等. EDTA、皂素及其混剂淋洗去除猪粪中 Cu、Zn 的研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1): 220-228.
Li Z D, Liu D F, Huang W L, et al. Removing Cu and Zn from pig manure via the leaching method with EDTA, saponin, and their mixture[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(1): 220-228.
- [5] 祝方,陈雨,刘文庆. 螯合剂对用芥菜型油菜修复镉污染土壤镉形态转化的影响[J]. 能源环境保护, 2013, 27(1): 25-28, 31.
Zhu F, Chen Y, Liu W Q. The effect of chelator on distribution of cadmium from contaminated soil by *Brassica juncea* L. [J]. Energy Environmental Protection, 2013, 27(1): 25-28, 31.
- [6] Tipu M I, Ashraf M Y, Sarwar, N, et al. Growth and physiology of Maize (*Zea mays* L.) in a nickel-contaminated soil and phytoremediation efficiency using EDTA[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2021, 40(2): 774-786.
- [7] 拓朵朵. EDTA 与 EDDS 强化苧麻修复汞镉复合污染土壤的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
Tuo D D. Study on EDTA and EDDS strengthening ramie to restore Hg/Cd contamination soil[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [8] Maity J P, Huang Y M, Fan C W, et al. Evaluation of remediation process with soapberry derived saponin for removal of heavy metals from contaminated soils in Hai-Pu, Taiwan[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(6): 1180-1185.
- [9] 李榜江,李萍. 茶皂素作用下苧麻对镉污染土壤的修复效应[J]. 中国水土保持, 2017, (3): 34-37.
- [10] Li B J, Li P. Effects of *Boehmeria nivea* to the remediation of Chromium contaminated soil under the tea saponin effect[J]. Soil and Water Conservation in China, 2017, (3): 34-37.

- phytoremediation of Cd and pyrene in contaminated soils by *Lolium multiflorum* [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(23): 18946-18952.
- [11] 宋宇超. 复合型植物源活化剂强化植物提取修复重金属污染土壤及其效果评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- Song Y C. The enhancement of compound plant-derived activator on phytoextraction and its effects evaluation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [12] 钱翌, 刘莹, 彭晓丽. 低分子有机酸对土壤中 Pb 形态的影响[J]. 水土保持学报, 2011, **25**(4): 261-264.
- Qian Y, Liu Y, Peng X L. Effects of low molecular weight organic acids on speciation of Pb in soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, **25**(4): 261-264.
- [13] 詹淑威, 潘伟斌, 赖彩秀, 等. 外源有机酸对小飞扬草 (*Euphorbia thymifolia* L.) 修复镉污染土壤的影响[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(10): 5096-5102.
- Zhan S W, Pan W B, Lai C X, et al. Effects of exogenous organic acids on phytoextraction of Cd-contaminated soil by *Euphorbia thymifolia* L. [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(10): 5096-5102.
- [14] 马叶, 赵国梁, 王晓凤, 等. 添加螯合剂诱导-栽培红叶苋菜 (*Beta vulgaris* var. *cicla* L.) 修复铅和镉污染土壤效果的研究[J]. 土壤通报, 2021, **52**(2): 416-424.
- Ma Y, Zhao G L, Wang X F, et al. Remediation of lead and cadmium contaminated soil with chelate-induced-*Beta vulgaris* var. *cicla* L. [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, **52**(2): 416-424.
- [15] 向冬芳, 廖水蛟, 涂书新, 等. 三聚磷酸钠与柠檬酸复合强化蜈蚣草修复砷污染土壤[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(8): 1973-1981.
- Xiang D F, Liao S J, Tu S X, et al. Effect of a sodium tripolyphosphate and citric acid composite on arsenic bioaccumulation caused by arsenic-contaminated soil in *Pteris vittata* L. [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(8): 1973-1981.
- [16] Mei K, Wu G R, Liu J C, et al. Dynamics of low-molecular-weight organic acids for the extraction and sequestration of arsenic species and heavy metals using mangrove sediments [J]. Chemosphere, 2021, **286**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131820.
- [17] Chen H X, Dou J F, Xu H B. The effect of low-molecular-weight organic-acids (LMWOAs) on treatment of chromium-contaminated soils by compost-phytoremediation: kinetics of the chromium release and fractionation [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, **70**: 45-53.
- [18] Taghipour M, Jalali M. Effect of low-molecular-weight organic acids on kinetics release and fractionation of phosphorus in some calcareous soils of western Iran [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, **185**(7): 5471-5482.
- [19] 胡亚虎, 魏树和, 周启星, 等. 螯合剂在重金属污染土壤植物修复中的应用研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(11): 2055-2063.
- Hu Y H, Wei S H, Zhou Q X, et al. Application of chelator in phytoextraction of heavy metals contaminated soils: a review [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, **29**(11): 2055-2063.
- [20] 陈昌东, 张安宁, 腊明, 等. 平顶山矿区矸石山周边土壤重金属污染及优势植物富集特征[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(6): 1216-1223.
- Chen C D, Zhang A N, La M, et al. Soil heavy metal contamination and enrichment of dominant plants in coal waste piles in Pingdingshan area [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, **28**(6): 1216-1223.
- [21] Yu F M, Tang S T, Shi X W, et al. Phytoextraction of metal (loid)s from contaminated soils by six plant species: a field study [J]. Science of the Total Environment, 2022, **804**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150282.
- [22] Khaokaew S, Landrot G. A field-scale study of cadmium phytoextraction in a contaminated agricultural soil at Mae Sot District, Tak Province, Thailand: (1) Determination of Cd-hyperaccumulating plants [J]. Chemosphere, 2015, **138**: 883-887.
- [23] Robinson B H, Anderson C W N, Dickinson N M. Phytoextraction: where's the action? [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, **151**: 34-40.
- [24] Sheoran V, Sheoran A S, Poonia P. Factors affecting phytoextraction: a review [J]. Pedosphere, 2016, **26**(2): 148-166.
- [25] Tassi E, Pouget J, Petruzzelli G, et al. The effects of exogenous plant growth regulators in the phytoextraction of heavy metals [J]. Chemosphere, 2008, **71**(1): 66-73.
- [26] 韩甘, 黄益宗, 魏祥东, 等. 螯合剂对油葵修复镉砷复合污染土壤的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(8): 1891-1900.
- Han N, Huang Y Z, Wei X D, et al. Effect of chelating agents on remediation of cadmium and arsenic complex contaminated soil using oil sunflower [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(8): 1891-1900.
- [27] 胡容平, 石军, 黄廷友, 等. 土施超富集植物秸秆对芥菜生长及镉积累的影响[J]. 水土保持通报, 2015, **35**(5): 217-221.
- Hu R P, Shi J, Huang T Y, et al. Effects of applying hyperaccumulator straw in soil on growth and cadmium accumulation of *Capsella Bursa-pastoris* [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, **35**(5): 217-221.
- [28] Luo C L, Shen Z G, Li X D. Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS [J]. Chemosphere, 2005, **59**(1): 1-11.
- [29] Anning A K, Akoto R. Assisted phytoremediation of heavy metal contaminated soil from a mined site with *Typha latifolia* and *Chrysopogon zizanioides* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **148**: 97-104.
- [30] Liu J, Mo L Y, Zhang X H, et al. Simultaneous hyperaccumulation of cadmium and manganese in *Celosia argentea* Linn [J]. International Journal of Phytoremediation, 2018, **20**(11): 1106-1112.
- [31] Chen L, Yang J Y, Wang D. Phytoremediation of uranium and cadmium contaminated soils by sunflower (*Helianthus annuus* L.) enhanced with biodegradable chelating agents [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121491.
- [32] Tang Y T, Qiu R L, Zeng X W, et al. Zn and Cd hyperaccumulating characteristics of *Pteris divaricata* Vant [J]. International Journal of Environment and Pollution, 2009, **38**(1-2): 26-38.
- [33] Liu X, Fu J W, Guan D X, et al. Arsenic induced phytate exudation, and promoted FeAsO₄ dissolution and plant growth in As-hyperaccumulator *Pteris vittata* [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(17): 9070-9077.
- [34] Li J T, Gurajala H K, Wu L H, et al. Hyperaccumulator plants from China: a synthesis of the current state of knowledge [J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(21): 11980-

- 11994.
- [35] Gul I, Manzoor M, Kallerhoff J, *et al.* Enhanced phytoremediation of lead by soil applied organic and inorganic amendments; Pb phytoavailability, accumulation and metal recovery [J]. *Chemosphere*, 2020, **258**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127405.
- [36] 赵中秋, 席梅竹, 降光宇, 等. 冬氨酸二丁二酸酐(AES)诱导黑麦草提取污染土壤重金属的效应[J]. *环境化学*, 2010, **29**(3): 407-411.
Zhao Z Q, Xi M Z, Jiang G Y, *et al.* The potential of new biodegradable chelator AES for phytoextraction of heavy metals in contaminated soils [J]. *Environmental Chemistry*, 2010, **29**(3): 407-411.
- [37] Gul I, Manzoor M, Silvestre J, *et al.* EDTA-assisted phytoextraction of lead and cadmium by *Pelargonium cultivars* grown on spiked soil [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2019, **21**(2): 101-110.
- [38] 陈亚华, 李向东, 刘红云, 等. EDTA 辅助下油菜修复铅污染土壤的潜力[J]. *南京农业大学学报*, 2002, **25**(4): 15-18.
Chen Y H, Li X D, Liu H Y, *et al.* The potential of India mustard (*Brassica juncea* L.) for phytoremediation of Pb-contaminated soils with the aid of EDTA addition[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2002, **25**(4): 15-18.
- [39] Liao C J, Xu W D, Lu G N, *et al.* Biosurfactant-enhanced phytoremediation of soils contaminated by crude oil using maize (*Zea mays*. L.) [J]. *Ecological Engineering*, 2016, **92**: 10-17.
- [40] Tao Q, Li J X, Liu Y K, *et al.* Ochrobactrum intermedium and saponin assisted phytoremediation of Cd and B[a]P co-contaminated soil by Cd-hyperaccumulator *Sedum alfredii* [J]. *Chemosphere*, 2020, **245**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125547.
- [41] Montiel-Rozas M M, Madejón E, Madejón P. Effect of heavy metals and organic matter on root exudates (low molecular weight organic acids) of herbaceous species; an assessment in sand and soil conditions under different levels of contamination [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **216**: 273-281.
- [42] Li X D, Ma H, Li L L, *et al.* Subcellular distribution, chemical forms and physiological responses involved in cadmium tolerance and detoxification in *Agrocybe aegerita* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, **171**: 66-74.
- [43] Ma H, Li X D, Hou S Y, *et al.* The activation and extraction systems using organic acids and *Lentinus edodes* to remediate cadmium contaminated soil [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **255**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113252.
- [44] Onireti O O, Lin C X, Qin J H. Combined effects of low-molecular-weight organic acids on mobilization of arsenic and lead from multi-contaminated soils [J]. *Chemosphere*, 2017, **170**: 161-168.
- [45] Jing Y D, He Z L, Yang X E. Effects of pH, organic acids, and competitive cations on mercury desorption in soils [J]. *Chemosphere*, 2007, **69**(10): 1662-1669.
- [46] Lu H L, Yan C L, Liu J C. Low-molecular-weight organic acids exuded by Mangrove (*Kandelia candel* (L.) Druce) roots and their effect on cadmium species change in the rhizosphere [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, **61**(2): 159-166.
- [47] Han Y L, Zhang L L, Gu J G, *et al.* Citric acid and EDTA on the growth, photosynthetic properties and heavy metal accumulation of *Iris halophila* Pall. cultivated in Pb mine tailings [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, **128**: 15-21.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i>	(3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i>	(3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i>	(3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i>	(3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i>	(3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i>	(3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i>	(3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i>	(3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i>	(3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i>	(3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i>	(3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i>	(4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i>	(4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i>	(4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i>	(4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i>	(4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i>	(4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i>	(4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i>	(4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i>	(4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i>	(4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i>	(4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i>	(4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i>	(4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shaya County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i>	(4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i>	(4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i>	(4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i>	(4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i>	(4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i>	(4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i>	(4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i>	(4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i>	(4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i>	(4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i>	(4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i>	(4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i>	(4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i>	(4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i>	(4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i>	(4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i>	(4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i>	(4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qi, ZHANG Yun, <i>et al.</i>	(4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i>	(4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i>	(4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i>	(4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i>	(4402)