

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

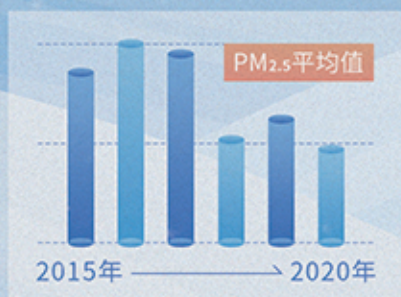
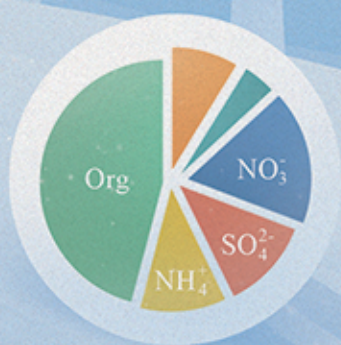
环境科学

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)
基于蒙特卡洛模拟与 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, 朱瑞颖, 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)	

橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力

张恒¹, 熊明彪², 王乾鑫³, 孙博文¹, 饶逸驰¹, 程章¹, 徐小逊¹, 杨占彪¹, 鲜骏仁¹, 朱雪梅¹, 杨绍平², 杨远祥^{1*}

(1. 四川农业大学环境学院, 成都 611130; 2. 四川水利职业技术学院, 成都 611231; 3. 四川工商职业技术学院, 都江堰 611830)

摘要: 橡胶草 (TKS) 是一种可作为天然橡胶原料的能源植物. 为研究橡胶草对铅 (Pb) 和镉 (Cd) 污染农田土壤的修复潜力, 通过人工控制性盆栽试验, 以相关标准的风险筛选值和管制值为区间, 施以 4 种浓度 Pb 和 Cd 复合胁迫处理, 探讨橡胶草对 Pb 和 Cd 的富集及耐性特征. 结果表明, 随着土壤中 Pb 和 Cd 含量增加, 橡胶草的叶绿素含量和生物量均逐渐降低, SOD、POD 和 CAT 酶活性逐渐升高. Cd 富集系数和转运系数在 1.20 ~ 1.50 之间, 具有部分 Cd 超富集植物特征. Pb 富集系数和转运系数在 0.71 ~ 1.11 之间, 是较好的 Pb 富集植物, 具有修复 $\omega(\text{Pb})$ 为 400 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下的土壤的潜力. Pb 和 Cd 积累量逐渐增加, 地上部最大 Cd 积累量为 9.832 $\mu\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$, 最大 Pb 积累量为 1091.185 $\mu\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$. 但在更低浓度的 Pb 和 Cd 复合污染土壤中, 去除率更大, 修复效率更快. 使用橡胶草修复 Pb 和 Cd 污染农田土壤具有较好的应用前景和经济价值.

关键词: 铅 (Pb) 和镉 (Cd); 植物修复; 橡胶草 (TKS); 收益型超富集植物; 农田

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4253-09 DOI: 10.13227/j.hjks.202110142

Remediation Potential of *Taraxacum kok-saghyz* Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil

ZHANG Heng¹, XIONG Ming-biao², WANG Qian-xin³, SUN Bo-wen¹, RAO Yi-chi¹, CHENG Zhang¹, XU Xiao-xun¹, YANG Zhan-biao¹, XIAN Jun-ren¹, ZHU Xue-mei¹, YANG Shao-ping², YANG Yuan-xiang^{1*}

(1. College of Environmental Sciences, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. Sichuan Water Conservancy College, Chengdu 611231, China; 3. Sichuan Technology Business College, Dujiangyan 611830, China)

Abstract: *Taraxacum kok-saghyz* Rodin (TSK) is an energy plant that can be used as a raw material for natural rubber. The aim of this study was to examine the remediation potential of TSK to lead (Pb)- and cadmium (Cd)-contaminated farmland soil. In this study, a pot experiment was conducted, and the "Soil Environmental Quality and Agricultural Land Soil Pollution Risk Control Standard (GB 15618-2018)" was used as reference. We set up four different concentrations of Pb and Cd pollution treatment to study the characteristics of the accumulation and tolerance of TSK to Pb and Cd. The results showed that as the content of Pb and Cd in the soil increased, the chlorophyll content and biomass of TSK gradually decreased, and the SOD, POD, and CAT enzyme activities gradually increased. The BCF and TF of Cd were between 1.20 and 1.50, indicating that TSK presented some characteristics of a Cd hyperaccumulator. The BCF and TF of Pb were between 0.71 and 1.11. Thus, TSK was a good Pb enrichment plant and possessed the potential to repair soil with $\omega(\text{Pb})$ below 400 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The accumulation of Pb and Cd gradually increased, and the maximum accumulation of Cd and Pb in the shoots was 9.832 $\mu\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$ and 1091.185 $\mu\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$, respectively. However, in lower concentrations of Pb- and Cd-contaminated soil, the removal rate was greater, and the remediation efficiency was better. Overall, using TSK to repair Pb- and Cd-contaminated farmland soil has good application prospects and economic value.

Key words: lead (Pb) and cadmium (Cd); phytoremediation; *Taraxacum kok-saghyz* Rodin (TKS); beneficial hyperaccumulator; farmland

有公报显示,我国土壤点位超标率高达 19.4%,其中受重金属污染的耕地约占总耕地面积的 1/5^[1,2]. 张义等^[3]的研究表明,长江经济带工业区的农用地重金属污染较工业用地更严重,分别有 58.49% 和 22.64% 的工业区农用地镉 (Cd) 和铅 (Pb) 含量超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018) 的筛选值. Pb 和 Cd 是首要的土壤重金属污染物,因其致癌性而对生态和人类健康构成威胁^[4]. Cd 易被植物吸收,产生毒害作用,抑制植物生长^[5,6]; Pb 易与土壤成分形成稳定的复合物,造成持久性污染^[7],并抑制光合作用,使植物发育迟缓^[8]. Pb 和 Cd 可通过食物链进入人体,对神经系统、酶和器官构成健康风险,并导致疾病^[9-12].

常用的土壤重金属处理方法有物理、化学和生物修复等^[13]. 在农田重金属修复领域,植物修复因其具有操作简单、环境友好和改良土质的特点而被关注^[14,15]. 但因其修复时间较长、累计成本较高等缺陷,应用推广较困难^[16]. 为此学者们研究出多种强化措施,如施加螯合剂、生长调节剂和联合修复等^[17-20]. 但少有研究关注修复植物的种植成本和经济效益,并且常见的超富集植物并不具有较高的经济价值. 然而,以收益型超富集植物平衡修复效果和经济效益,或许是应用推广植物修复治理农田 Pb 和

收稿日期: 2021-10-19; 修订日期: 2021-12-29

基金项目: 成都水生态文明建设研究重点基地项目 (2018SST-14); 四川省水利厅 2020 研究项目 (CSK2020011)

作者简介: 张恒 (1996 ~), 男, 硕士, 主要研究方向为土壤重金属污染植物修复, E-mail: 1660496566@qq.com

* 通信作者, E-mail: 529877087@qq.com

Cd 污染的突破口.

橡胶草 (*Taraxacum kok-saghyz* Rodin, TKS) 为菊科蒲公英属多年生宿根草本植物, 生长周期短, 喜凉爽气候, 适应性强, 中国西北、华北等地均有栽培, 其根部含有 2.89%~27.89% 的天然橡胶, 有望成为天然橡胶的第二大胶源^[21,22]. 目前对橡胶草的研究主要集中在它的产胶基因及分子机制^[23,24], 育种及割胶工艺等^[25,26], 其对 Pb 和 Cd 的耐受及富集能力尚未见报道, 在国内外并没有关于橡胶草的成功修复案例. 普通蒲公英具有富集土壤中 Pb 和 Cd 的特性^[27,28], 同为蒲公英属的橡胶草也极有可能具有相似的特性.

因此, 本研究采用人工控制性盆栽试验, 施以 4 种浓度 Pb 和 Cd 复合胁迫处理, 通过探讨橡胶草在

不同 Pb 和 Cd 污染程度的农田土壤里的耐性和富集特性, 以期“经济-修复”一体化植物修复的实际应用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为水稻土, 采自四川省成都市 (E 103°52'13", N 30°43'04"). 2019 年 2 月采集表层水稻土 (20~40 cm) 带回实验室, 供试土壤经自然风干后过 4 mm 筛, 充分混匀后, 称取 2 kg 土壤装于 12 cm × 10 cm (直径 × 高) 花盆中备用. 供试土壤基本性质见表 1.

供试植物为橡胶草, 于光照培养箱中育苗, 橡胶草种子由黑龙江省科学院自然与生态研究所提供.

表 1 供试土壤基本性质

Table 1 Basic properties of the tested soil

指标	pH	ω (有机质) /g·kg ⁻¹	ω (碱解氮) /mg·kg ⁻¹	ω (有效磷) /mg·kg ⁻¹	ω (速效钾) /mg·kg ⁻¹	ω (Cd) /mg·kg ⁻¹	ω (Pb) /mg·kg ⁻¹
数值	6.94	23.64	30.43	9.36	224.79	0.022	31.4

1.2 盆栽试验

1.2.1 试验时间与地点

本盆栽试验于 2019 年 2 月至 2019 年 6 月在四川农业大学成都校区第三教学楼人工培养棚内进行. 地理位置为 E 103°51'43", N 30°42'10", 周围无污染源.

1.2.2 试验设计

2019 年 2 月, 将重金属以 CdCl₂·5H₂O 和 Pb(NO₃)₂ 金属盐的形式用超纯水完全溶解后均匀施入每盆土样中. 以《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018) 的风险筛选值和管制值为区间, 设置 1 个对照组, 4 个处理组, 分别为: CK [ω (Pb) = 0 mg·kg⁻¹, ω (Cd) = 0 mg·kg⁻¹], CP1 [ω (Pb) = 100 mg·kg⁻¹, ω (Cd) = 0.5 mg·kg⁻¹], CP2 [ω (Pb) = 200 mg·kg⁻¹, ω (Cd) = 1 mg·kg⁻¹], CP3 [ω (Pb) = 400 mg·kg⁻¹, ω (Cd) = 2 mg·kg⁻¹] 和 CP4 [Pb 700 mg·kg⁻¹, ω (Cd) = 3 mg·kg⁻¹]. 每组设置 3 个平行. 将土壤与金属盐溶液混匀后, 静置 2 个月让 Pb 和 Cd 的形态和含量充分平衡后再移栽幼苗. 于 2019 年 3 月培育橡胶草幼苗, 4 月将长势一致, 约 3~4 片叶的幼苗根部用蒸馏水润洗干净后移栽, 每盆 3 株. 不定时浇水, 使土壤含水量保持在田间持水量的 80% 左右. 为防止污染物淋溶渗漏损失, 在盆下放置塑料托盘并将渗漏液倒回盆中. 植物培养 90 d (2019 年 4~6 月) 后收获分析.

1.3 样品采集与分析

采集花盆中所有橡胶草, 用自来水洗净, 将其切分为地下部和地上部, 再用去离子水冲洗 3~5 次. 取少量样品测鲜样指标后, 于干燥箱中 75℃ 烘干至恒重, 称植物干重. 将烘干后的样品粉碎后装入封口袋中编号保存.

采用丙酮比色法测植物叶片叶绿素含量、氮蓝四唑光化还原法测 SOD 酶活性、愈创木酚法测 POD 酶活性、过氧化氢法测 CAT 酶活性^[29]. 植物样品采用 HNO₃-HClO₄ 法 (EPA 3050B) 消解, 使用质谱法 (NexION 300x ICP-MS) 测定 Pb 和 Cd 含量.

1.4 数据处理

采用 Excel 2018 进行数据整理和绘图, SPSS 23.0 进行方差分析和相关性分析.

相关计算公式如下^[30,31].

Cd (Pb) 富集系数 (bioconcentration factor, BCF):

$$BCF = \frac{\text{植物地上部 Cd(Pb) 含量}}{\text{土壤 Cd(Pb) 含量}}$$

Cd (Pb) 转运系数 (translocation factor, TF):

$$TF = \frac{\text{植物地上部 Cd(Pb) 含量}}{\text{地下部 Cd(Pb) 含量}}$$

植物 Cd (Pb) 积累量 =

植物 Cd (Pb) 含量 × 生物量

$$\text{土壤 Cd (Pb) 去除率} = \frac{\text{植物 Cd (Pb) 积累量}}{\text{土壤 Cd (Pb) 总量}}$$

2 结果与分析

2.1 Pb 和 Cd 胁迫对橡胶草生长的影响

2.1.1 叶绿素含量

随着 Pb 和 Cd 复合胁迫浓度的增加,叶绿素含量显著($P < 0.05$)降低(表 2). 与 CK 相比,CP1、CP2、CP3 和 CP4 分别减少了 24.79%、28.62%、34.92% 和 37.66%. 叶绿素的合成受到了抑制,且抑制程度逐渐增加.

2.1.2 生物量

在不同浓度的 Pb 和 Cd 复合污染土壤中培养 90 d 后,橡胶草的生物量均降低(表 2). 与 CK 相比,CP1、CP2、CP3 和 CP4 的地下部生物量分别减少了 1.03%、10.20% ($P < 0.05$)、31.22% ($P < 0.05$) 和 32.17% ($P < 0.05$),地上部生物量分别减少了 11.44%、27.55% ($P < 0.05$)、30.09%

($P < 0.05$) 和 42.44% ($P < 0.05$). 随着土壤 Pb 和 Cd 含量的增加,地下部生物量和地上部生物量均逐渐降低,但从 CP2 开始,才表现出显著差异($P < 0.05$).

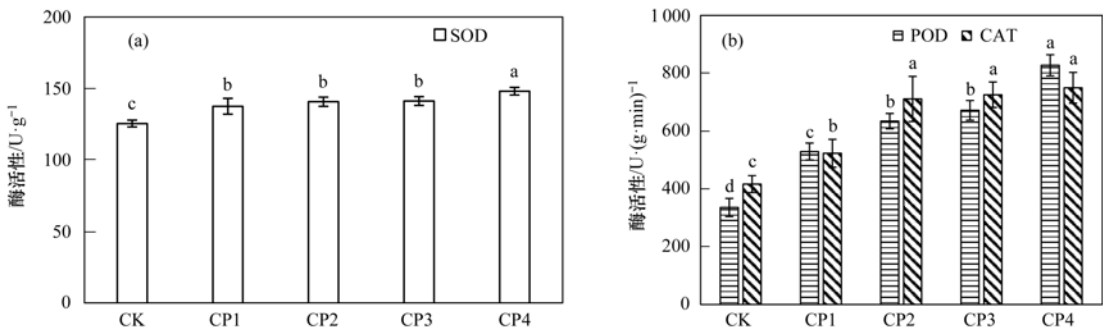
2.2 Pb 和 Cd 胁迫对橡胶草耐性的影响

植物体内的抗氧化酶活性是反映植物对重金属耐性的重要指标. 培养 90 d 后采集橡胶草叶片测定其抗氧化酶活性,结果表明(图 1),不同浓度的 Pb 和 Cd 复合胁迫均使橡胶草叶片的 SOD、POD 和 CAT 酶活性升高. 与 CK 相比,SOD 酶活性显著($P < 0.05$)升高,CP1、CP2、CP3 和 CP4 分别增加了 9.61%、12.16%、12.55% 和 18.03%. POD 酶活性显著($P < 0.05$)升高,分别增加了 57.65%、89.06%、100.20% 和 146.72%. 各组的 CAT 酶活性同样显著($P < 0.05$)升高,分别增加了 25.56%、70.72%、74.25% 和 80.01%.

表 2 不同处理组橡胶草叶绿素含量及生物量¹⁾

Table 2 Chlorophyll content and biomass of TSK in different treatment groups				
处理组	ω (叶绿素) /mg·g ⁻¹	地上部生物量 /g·plant ⁻¹	地下部生物量 /g·plant ⁻¹	整株生物量 /g·plant ⁻¹
CK	1.186 ± 0.067a	3.800 ± 0.280a	1.232 ± 0.005a	5.032 ± 0.283a
CP1	0.892 ± 0.072b	3.365 ± 0.370a	1.219 ± 0.028ab	4.585 ± 0.396b
CP2	0.846 ± 0.078bc	2.753 ± 0.192b	1.106 ± 0.103b	3.660 ± 0.290b
CP3	0.772 ± 0.036c	2.657 ± 0.180b	0.846 ± 0.067c	3.503 ± 0.236bc
CP4	0.739 ± 0.062c	2.187 ± 0.190c	0.836 ± 0.063c	3.023 ± 0.131c

1) 数据为 3 个重复的平均值(±标准差),同列不同小写字母表示处理组间存在显著差异($P < 0.05$)



对于同一种抗氧化酶,不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

图 1 不同处理组橡胶草的抗氧化酶活性

Fig. 1 Antioxidant enzyme activities of TSK in different treatment groups

2.3 Pb 和 Cd 胁迫对橡胶草重金属吸收和积累的影响

2.3.1 Pb 和 Cd 含量

不同浓度的 Pb 和 Cd 复合胁迫均使橡胶草地下部和地上部的 Pb 和 Cd 含量升高(表 3). 就地下部 Cd 含量而言,CP1、CP2、CP3 和 CP4 分别是 CK 的 2.29、5.38、9.05 和 13.59 倍,均达显著水平($P < 0.05$). 各组的地上部 Cd 含量同样显著($P < 0.05$)升高,分别是 CK

的 5.05、10.84、20.67 和 32.42 倍. 地下部 Cd 含量与地上部 Cd 含量表现出显著($P < 0.01$)的正相关性(表 4). 就地下部 Pb 含量而言,CP1、CP2、CP3 和 CP4 分别是 CK 的 15.53、30.69、67.31 和 90.74 倍,均达显著水平($P < 0.05$). 各组的地上部 Pb 含量同样显著($P < 0.05$)升高,分别是 CK 的 13.23、25.55、48.51 和 65.72 倍. 地下部 Pb 含量与地上部 Pb 含量表现出显著($P < 0.01$)的正相关性(表 4).

2.3.2 富集系数、转运系数

各处理下橡胶草的 Cd 富集系数和转运系数并没有明显的变化趋势,但均大于 1(表 3). Cd 富集系数由大到小依次为: $1.50 = CP2 = CP4 > CP3 > CP1 > 1$,而 Cd 转运系数由大到小依次为: $1.42 = CP4 > CP3 > CP1 > CP2 > 1$,橡胶草在 CP4 表现出了

最佳的 Cd 富集效果和转运效果. 而 Pb 富集系数和转运系数逐渐减小(表 3),且在 CP4 差异显著($P < 0.05$),在 CP1 和 CP2, Pb 转运系数大于 1,仅在 CP1, Pb 富集系数大于 1,橡胶草在 CP1 表现出了最佳的 Pb 富集效果和转运效果,在 CP4 富集和转运 Pb 的能力明显下降.

表 3 不同处理组橡胶草的 Pb 和 Cd 含量、富集系数、转运系数和去除率¹⁾

Table 3 Pb and Cd content, BCF, TF, and removal rate of TSK in different treatment groups

处理组	地下部/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		地上部/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		BCF		TF		去除率/%	
	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb
CK	$0.234 \pm 0.028\text{e}$	$5.859 \pm 0.446\text{d}$	$0.139 \pm 0.018\text{e}$	$7.586 \pm 0.799\text{e}$	—	—	—	—	—	—
CP1	$0.537 \pm 0.045\text{d}$	$90.976 \pm 5.043\text{c}$	$0.700 \pm 0.053\text{d}$	$100.383 \pm 5.089\text{d}$	1.40	1.00	1.31	1.11	2.72	2.02
CP2	$1.260 \pm 0.097\text{c}$	$179.824 \pm 18.423\text{b}$	$1.502 \pm 0.034\text{c}$	$193.800 \pm 17.589\text{c}$	1.50	0.97	1.20	1.09	2.49	1.65
CP3	$2.117 \pm 0.125\text{b}$	$394.373 \pm 45.111\text{a}$	$2.865 \pm 0.158\text{b}$	$368.029 \pm 24.672\text{b}$	1.43	0.92	1.35	0.95	2.11	1.47
CP4	$3.181 \pm 0.178\text{a}$	$531.693 \pm 5.079\text{a}$	$4.494 \pm 0.104\text{a}$	$498.529 \pm 37.823\text{a}$	1.50	0.71	1.42	0.94	1.87	0.99

1) 数据为 3 个重复的平均值 $\pm$ 标准差, 同列不同小写字母表示存在显著差异($P < 0.05$); “—”表示文中没有相关数据

2.3.3 Pb 和 Cd 积累量

随着 Pb 和 Cd 胁迫浓度的增加,橡胶草地下部和地上部的 Pb 和 Cd 积累量均显著($P < 0.05$)升高,并在 CP4 达到最大值(图 2). 在 CP4 处理下,地下部 Cd 积累量为 $2.666 \mu\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$,地上部 Cd 积累量为 $9.832 \mu\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$,地下部 Pb 积累量为 $444.397 \mu\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$,地上部 Pb 积累量为 $1091.185 \mu\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$.

2.3.4 土壤 Pb 和 Cd 去除率

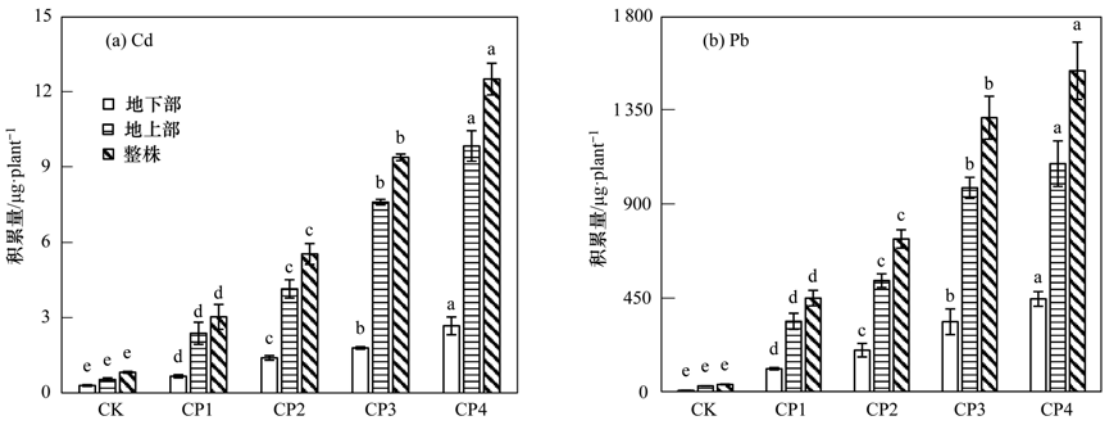
本试验中,每盆栽植了 3 株橡胶草,培养周期为 90 d,根据四川的气候特征,每年可栽植 3 茬,据此计算橡胶草的年重金属去除率. 表 3 显示,每年种植 3 茬橡胶草, Cd 的去除率为 1.87% ~ 2.72%, Pb 的去除率为 0.99% ~ 2.02%. 随着土壤 Pb 和 Cd 含量增加, Pb 和 Cd 去除率均逐渐

降低.

2.4 相关性分析

表 4 显示,橡胶草 Pb 和 Cd 含量与土壤 Pb 和 Cd 含量显著($P < 0.01$)正相关. Pb 富集系数与土壤 Pb 含量显著负相关($P < 0.01$),而 Cd 转运系数与土壤 Cd 含量显著($P < 0.05$)正相关. 橡胶草对 Pb 和 Cd 的去除率与土壤 Pb 和 Cd 含量显著($P < 0.01$)负相关.

表 5 显示,地下部与地上部生物量显著($P < 0.01$)正相关,同时这两者与叶绿素含量显著($P < 0.01$)正相关. 叶绿素含量、生物量与土壤 Pb 和 Cd 含量显著($P < 0.01$)负相关. 3 种抗氧化酶活性之间显著($P < 0.01$)正相关,同时这三者与叶绿素含量和生物量显著($P < 0.01$)负相关,与土壤 Pb 和 Cd 含量显著($P < 0.01$)正相关.



对于植物的同一部位,不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

图 2 不同处理组单株橡胶草的 Pb 和 Cd 积累量

Fig. 2 Pb and Cd accumulation of one TSK in different treatment groups

表 4 富集指标与土壤 Pb 和 Cd 含量的相关性分析¹⁾
Table 4 Correlation analysis of enrichment index with soil Pb and Cd content

	地下部				地上部				Cd 积累量				Pb 积累量				BCF				TF				去除率				土壤			
	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	地下部	地上部	地下部	地上部	地下部	地上部	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd			
地下部	Pb	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
	Cd	0.981 ^{**}	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
地上部	Pb	0.985 ^{**}	0.992 ^{**}	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
	Cd	0.985 ^{**}	0.994 ^{**}	0.987 ^{**}	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Cd 积累量	地下部	0.962 ^{**}	0.985 ^{**}	0.981 ^{**}	0.970 ^{**}	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
	地上部	0.991 ^{**}	0.982 ^{**}	0.989 ^{**}	0.987 ^{**}	0.966 ^{**}	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Pb 积累量	地下部	0.987 ^{**}	0.965 ^{**}	0.977 ^{**}	0.963 ^{**}	0.973 ^{**}	0.980 ^{**}	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
	地上部	0.972 ^{**}	0.957 ^{**}	0.983 ^{**}	0.952 ^{**}	0.956 ^{**}	0.983 ^{**}	0.978 ^{**}	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
BCF	Cd	0.222	0.352	0.292	0.35	0.379	0.332	0.216	0.245	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
	Pb	-0.846 ^{**}	-0.821 ^{**}	-0.775 ^{**}	-0.858 ^{**}	-0.795 ^{**}	-0.827 ^{**}	-0.832 ^{**}	-0.710 ^{**}	-0.31	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
TF	Cd	0.618 [*]	0.514	0.539	0.611 [*]	0.417	0.624 [*]	0.561	0.541	0.083	-0.651 [*]	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
	Pb	-0.591 [*]	-0.438	-0.431	-0.482	-0.417	-0.541	-0.609 [*]	-0.479	0.032	0.726 ^{**}	-0.547	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
去除率	Cd	-0.991 ^{**}	-0.986 ^{**}	-0.990 ^{**}	-0.986 ^{**}	-0.953 ^{**}	-0.992 ^{**}	-0.969 ^{**}	-0.977 ^{**}	-0.297	0.809 ^{**}	-0.575	0.516	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
	Pb	-0.955 ^{**}	-0.985 ^{**}	-0.963 ^{**}	-0.981 ^{**}	-0.978 ^{**}	-0.959 ^{**}	-0.948 ^{**}	-0.914 ^{**}	-0.403	0.856 ^{**}	-0.502	0.462	0.967 ^{**}	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
土壤	Cd	0.993 ^{**}	0.994 ^{**}	0.992 ^{**}	0.998 ^{**}	0.973 ^{**}	0.991 ^{**}	0.976 ^{**}	0.964 ^{**}	0.299	-0.853 ^{**}	0.607 [*]	-0.504	-0.992 ^{**}	-0.977 ^{**}	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
	Pb	0.978 ^{**}	0.989 ^{**}	0.976 ^{**}	0.995 ^{**}	0.964 ^{**}	0.972 ^{**}	0.954 ^{**}	0.929 ^{**}	0.311	-0.879 ^{**}	0.613 [*]	-0.484	-0.973 ^{**}	-0.979 ^{**}	0.993 ^{**}	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		

1) * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; “—”表示文中没有相关数据,下同

表 5 耐性指标与土壤 Pb 和 Cd 含量的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of tolerance index with soil Pb and Cd content

	叶绿素	生物量		抗氧化酶			土壤	
		地上部	地下部	SOD	POD	CAT	Cd	Pb
生物量	地上部	0.841 **	1					
	地下部	0.770 **	0.850 **	1				
抗氧化酶	SOD	-0.897 **	-0.829 **	-0.703 **	1			
	POD	-0.896 **	-0.922 **	-0.820 **	0.888 **	1		
	CAT	-0.777 **	-0.870 **	-0.720 **	0.841 **	0.847 **	1	
土壤	Cd	-0.787 **	-0.891 **	-0.914 **	0.819 **	0.928 **	0.813 **	1
	Pb	-0.732 **	-0.865 **	-0.886 **	0.790 **	0.903 **	0.763 **	0.993 **

3 讨论

3.1 Pb 和 Cd 胁迫对橡胶草生长的影响

叶绿素的含量关系着植物的光合作用效率,影响到植物体内营养物质的生成. 进入植物体内的 Pb 和 Cd 等重金属离子,会取代叶绿体上的 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Zn^{2+} ,破坏叶绿体的正常功能和结构^[32]. 同时也会抑制相关还原酶的活性以阻碍叶绿素的生成,使得叶片的叶色受到影响,甚至可能导致叶片失绿^[33]. 植物受 Pb 和 Cd 危害后,毒性累积在植物体内,抑制植物的发育,延缓生长速度,使植物生物量偏小^[34]. 本研究中,随着 Pb 和 Cd 胁迫浓度增加,橡胶草叶绿素含量和生物量均逐渐降低,在 CP2 表现出显著性. 这与 Wei 等^[35]的研究结果并不一致:在 Cd 含量低于 $25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的土壤中,蒲公英 (*Taraxacum mongolicum*) 的地上部生物量没有显著降低. 这说明 Cd 单一胁迫与 Pb 和 Cd 复合胁迫情况不同,橡胶草的生物量降低,更可能是受到了 Pb 的影响. 同时,CP1 的生物量与 CK 相比无显著降低,说明在相对低的 Pb 和 Cd 污染水平下,橡胶草尚能正常生长.

3.2 Pb 和 Cd 胁迫对橡胶草耐性的影响

重金属进入植物细胞后,能促使细胞产生活性氧自由基,破坏植物的抗氧化系统^[36,37]. 为了应对这种胁迫,植物体内的抗氧化酶活性就会上升,增加抗氧化功能,其中 SOD 是主要将所产生的活性氧自由基歧化成 H_2O_2 和 O_2 , POD 和 CAT 分解 H_2O_2 产生 H_2O 和 O_2 ^[38,39]. 当重金属浓度超过植物能承受的最大值时,将对植物产生毒害作用,影响细胞正常功能,对酶合成产生不利影响,于是抗氧化酶活性开始下降^[40,41]. 因此抗氧化酶活性能反映植物对重金属的耐受能力. 本研究中,随着 Pb 和 Cd 胁迫浓度增加,SOD、POD 和 CAT 酶活性均逐渐升高,抗氧化酶活性与土壤 Pb 和 Cd 含量显著正相关. 这与程海涛^[42]对东北蒲公英 (*Taraxacum ohwianum* Kitam.) 的研究结果相似,在 $0 \sim 60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Cd 胁迫范围

内,CAT 活性保持上升,而 SOD 和 POD 先上升,然后分别在 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 开始下降. 橡胶草的抗氧化酶活性并未出现降低的趋势,说明本试验的最高胁迫浓度尚在橡胶草的耐受范围内. 3 种酶活性显著正相关,表明橡胶草在应对 Pb 和 Cd 胁迫、增加抗氧化功能时,是 3 种抗氧化酶协同起作用.

3.3 Pb 和 Cd 胁迫对橡胶草重金属吸收和积累的影响

目前学术界对于 Pb 和 Cd 超富集植物的衡量标准一般是植物地上部 $\omega(\text{Cd})$ 达 $100 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{Pb})$ 达 $1\,000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,富集系数和转运系数大于 1,且能在重金属污染地正常生长^[43,44]. 本研究中,各处理下橡胶草的 Cd 富集系数和转运系数均大于 1, Pb 富集系数和转运系数逐渐减小,仅在 CP1 大于 1. 从这点来看,橡胶草只具备部分 Cd 超富集植物的特征. 橡胶草地上部的最高 $\omega(\text{Cd})$ 为 $4.494 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,尚未达到超富集植物的判定标准,原因是本试验为探究农田重金属污染而设置的土壤最高 $\omega(\text{Cd})$ 仅为 $3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Cd 富集系数与土壤 Cd 含量无显著相关性,而 Cd 转运系数与土壤 Cd 含量显著正相关,说明 $3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 $\omega(\text{Cd})$ 并不能抑制橡胶草对 Cd 的富集和转运.

Pb 富集系数与土壤 Pb 含量显著负相关,在 CP3 处理下,橡胶草的 Pb 富集系数为 0.92,转运系数为 0.95,但在 CP4 下降幅度较大, $400 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 $\omega(\text{Pb})$ 或许是一个临界点. 这一结果虽不能说明橡胶草属于 Pb 超富集植物,但其富集能力同样不容忽视. 在施加外源活化剂或其他强化措施后,其富集系数和转运系数很可能大于 1.

结果表明橡胶草具备部分 Cd 超富集植物的特征,具有修复达到风险管制值 [$\omega(\text{Cd}) = 3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$] 的 Cd 污染农田的能力,同时是较好的 Pb 富集植物,具有修复 $\omega(\text{Pb})$ 为 $400 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下的农田的潜力. 但本文尚不能定义橡胶草为 Cd 超富集植物,这一结论有待田间试验进行验证.

从土壤 Pb 和 Cd 去除率来看,修复效果并不理想. 由于盆栽试验中的橡胶草植株较小,且栽植较稀疏,使去除率较低. 且 Pb 和 Cd 的去除率与土壤 Pb 和 Cd 含量显著负相关,说明在更低的 Pb 和 Cd 复合污染土壤中,橡胶草的相对修复效率更快. 实际应用过程中,可通过选育优良品种,结合农艺措施调控的方式,提高橡胶草的生物量. 沈光^[45]的研究表明,通过调控灌溉频率,能使橡胶草单株生物量扩大 5 倍以上,而通过调控氮磷钾基肥和栽培密度,也能使橡胶草单株生物量扩大 1~2 倍. 实际应用中橡胶草对 Pb 和 Cd 的去除率有待田间试验验证.

综上所述,在达到农田风险管制值的 Pb 和 Cd 污染土壤中,橡胶草的生长受到一定程度的抑制,但抗氧化酶活性并未出现降低的趋势,说明本试验的最高胁迫浓度尚在橡胶草的耐受范围内. 橡胶草具备部分 Cd 超富集植物特征,可以用于修复达到风险管制值 $[\omega(\text{Cd}) = 3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 的 Cd 污染农田. 是较好的 Pb 富集植物,具有修复 $\omega(\text{Pb})$ 为 400 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下的农田的潜力. 在更低的 Pb 和 Cd 复合污染土壤中,橡胶草的相对修复效率更快,由于盆栽试验栽植密度较稀疏,且橡胶草植株较小,在不添加活化剂的情况下,使盆栽试验中橡胶草对 Pb 和 Cd 的去除率较低. 但橡胶草是否属于 Cd 超富集植物,对 Pb 和 Cd 的修复效果如何,均有待田间试验进行验证. 田间试验和实际应用过程中,可以通过选育优良品种,并且结合活化剂、农艺措施或其他强化措施提高橡胶草的生物量和富集能力. 综合来看,使用橡胶草修复农田 Pb 和 Cd 污染具有较好的应用前景,以后的研究可通过田间试验,从经济效益、环境效益和社会效益等方面探讨橡胶草在我国污染土壤修复工程方面的应用潜力.

4 结论

(1)虽然 Pb 和 Cd 胁迫使橡胶草的叶绿素合成和生长受到一定程度的抑制,但其抗氧化酶活性无下降趋势,表明橡胶草可以耐受达到农用地土壤污染风险管制值 $[\omega(\text{Cd}) = 3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}, \omega(\text{Pb}) = 700 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 的污染水平.

(2)橡胶草具备部分 Cd 超富集植物特征,各处理组的 Cd 富集系数和转运系数均大于 1,可以用于修复达到风险管制值 $[\omega(\text{Cd}) = 3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 的 Cd 污染农田.

(3)橡胶草是较好的 Pb 富集植物, $\omega(\text{Pb})$ 低于 400 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,Pb 转运系数大于 1.

(4)各处理组土壤 Cd 的去除率为 1.87%~2.72%,Pb 的去除率为 0.99%~2.02%,在更低的

Pb 和 Cd 复合污染土壤中,橡胶草的相对修复效率更快.

参考文献:

- [1] 袁峰,唐先进,吴骥子,等. 两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3535-3548.
Yuan F, Tang X J, Wu J Z, et al. Simultaneous immobilization of arsenic, lead, and cadmium in paddy soils using two iron-based materials[J]. Environmental Science, 2021, 42(7): 3535-3548.
- [2] 张丁,黄容,高雪松. 山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 946-956.
Zhang D, Huang R, Gao X S. Spatial characteristics and potential ecological risk factors of heavy metals in cultivated land in transition zone of mountain plain[J]. Environmental Science, 2022, 43(2): 946-956.
- [3] 张义,周心劝,曾晓敏,等. 长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2062-2070.
Zhang Y, Zhou X Q, Zeng X M, et al. Characteristics and assessment of heavy metal contamination in soils of industrial regions in the Yangtze River economic belt[J]. Environmental Science, 2022, 43(4): 2062-2070.
- [4] Gul I, Manzoor M, Hashim N, et al. Challenges in microbially and chelate-assisted phytoextraction of cadmium and lead-a review[J]. Environmental Pollution, 2021, 287, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117667.
- [5] Rizwan M, Ali S, Ur Rehman M Z, et al. Cadmium phytoremediation potential of *Brassica* crop species: a review[J]. Science of the Total Environment, 2018, 631-632: 1175-1191.
- [6] 李欣阳,龙坚,王树兵,等. 典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异[J]. 环境科学, 2018, 39(1): 406-414.
Li X Y, Long J, Wang S B, et al. Differences in Cd accumulation in typical soils under the double rice system[J]. Environmental Science, 2018, 39(1): 406-414.
- [7] Kushwaha A, Hans N, Kumar S, et al. A critical review on speciation, mobilization and toxicity of lead in soil-microbe-plant system and bioremediation strategies[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 147: 1035-1045.
- [8] Wang L, Ji G S. Glutathione and calcium biomineralization of mulberry (*Morus alba* L.) involved in the heavy metal detoxification of lead-contaminated soil[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2021, 21(2): 1182-1190.
- [9] Deep R, Kumar M S. Sources, bioaccumulation, health risks and remediation of potentially toxic metal(loid)s (As, Cd, Cr, Pb and Hg): an epitomised review[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(2), doi: 10.1007/s10661-019-8060-5.
- [10] Kao C S, Wang Y L, Chuang T W, et al. Effects of soil lead exposure and land use characteristics on neurodevelopment among children under 3 years of age in northern Taiwan[J]. Environmental Pollution, 2021, 286, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117288.
- [11] 曹欢,胡钰梅,潘迎捷,等. 水产品中重金属异质性导致的风险[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(6): 161-173.
Cao H, Hu Y M, Pan Y J, et al. Risk caused by heterogeneity of heavy metals in aquatic products[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, 16(6): 161-173.
- [12] 陈月芳,孙善伟,段小丽,等. 兰州市西固区儿童饮用水重金属暴露及健康风险精细化评估[J]. 环境科学, 2020, 41

- (1): 262-272.
- Chen Y F, Sun S W, Duan X L, *et al.* Refined assessment of exposure and health risks of heavy metals in water for the Children in Xigu district, Lanzhou[J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 262-272.
- [13] 骆占斌, 马静, 杨永均, 等. 近年来土壤重金属研究知识图谱分析及关键主题述评[J]. 土壤, 2019, **51**(4): 760-768.
- Luo Z B, Ma J, Yang Y J, *et al.* Knowledge map analysis and key themes of research on soil heavy metals in recent years[J]. Soils, 2019, **51**(4): 760-768.
- [14] Tang X, Li Q, Wu M, *et al.* Review of remediation practices regarding cadmium-enriched farmland soil with particular reference to China[J]. Journal of Environmental Management, 2016, **181**: 646-662.
- [15] 张云霞, 宋波, 宾娟, 等. 超富集植物藿香蓟 (*Ageratum conyzoides* L.) 对镉污染农田的修复潜力[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2453-2459.
- Zhang Y X, Song B, Bin J, *et al.* Remediation potential of *Ageratum conyzoides* L. on cadmium contaminated farmland[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2453-2459.
- [16] 王泓博, 苟文贤, 吴玉清, 等. 重金属污染土壤修复研究进展: 原理与技术[J]. 生态学杂志, 2021, **40**(8): 2277-2288.
- Wang H B, Gou W X, Wu Y Q, *et al.* Progress in remediation technologies of heavy metals contaminated soil: principles and technologies[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, **40**(8): 2277-2288.
- [17] Jan A U, Hadi F, Shah A, *et al.* Plant growth regulators and EDTA improve phytoremediation potential and antioxidant response of *Dysphania ambrosioides* (L.) Mosyakin & Clemants in a Cd-spiked soil[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, **28**(32): 43417-43430.
- [18] Rathika R, Srinivasan P, Alkahtani J, *et al.* Influence of biochar and EDTA on enhanced phytoremediation of lead contaminated soil by *Brassica juncea*[J]. Chemosphere, 2021, **271**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129513.
- [19] Zhu H H, Chen L, Xing W, *et al.* Phytohormones-induced senescence efficiently promotes the transport of cadmium from roots into shoots of plants: A novel strategy for strengthening of phytoremediation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, **388**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122080.
- [20] 张子杨, 郭瞻宇, 管伟豆, 等. 硫磺和放线菌强化植物修复土壤镉污染[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(5): 2106-2114.
- Zhang Z Y, Guo Z Y, Guan W D, *et al.* Combination of sulphur and actinomycete to enhance the efficiency of phytoremediation in cadmium contamination soil[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(5): 2106-2114.
- [21] Bates G M, McNulty S K, Amstutz N D, *et al.* Planting density and growth cycle affect actual and potential latex and rubber yields in *Taraxacum kok-saghyz*[J]. HortScience, 2019, **54**(8): 1338-1344.
- [22] 卓杨鹏, 廖小雪, 张学超, 等. 蒲公英橡胶的提取及其结构性能初探[J]. 热带作物学报, 2021, **42**(12): 3617-3624.
- Zhuo Y P, Liao X X, Zhang X C, *et al.* Analysis of extraction and structure of TKS Rubber[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, **42**(12): 3617-3624.
- [23] Lin T, Xu X, Ruan J, *et al.* Genome analysis of *Taraxacum kok-saghyz* Rodin provides new insights into rubber biosynthesis[J]. National Science Review, 2018, **5**(1): 78-87.
- [24] Panara F, Lopez L, Daddiego L, *et al.* Comparative transcriptomics between high and low rubber producing *Taraxacum kok-saghyz* R. plants[J]. BMC Genomics, 2018, **19**(1), doi: 10.1186/s12864-018-5287-4.
- [25] 王肖肖, 覃碧, 杨玉双, 等. 橡胶草的遗传改良研究进展[J]. 分子植物育种, 2020, **18**(17): 5826-5834.
- Wang X X, Qin B, Yang Y S, *et al.* Research progress on genetic improvement of *Taraxacum kok-saghyz* Rodin [J]. Molecular Plant Breeding, 2020, **18**(17): 5826-5834.
- [26] 谢全亮, 李鸿彬, 王旭初. 橡胶草 90 年来主要研究成果及最新研究进展[J]. 植物科学学报, 2019, **37**(3): 404-412.
- Xie Q L, Li H B, Wang X C. Recent progress in the study of rubber grass (*Taraxacum kok-saghyz* Rodin) and main achievements over the past ninety years [J]. Plant Science Journal, 2019, **37**(3): 404-412.
- [27] Collier M H, Boughter S A, Dameron M P. Uptake and distribution of copper, lead, and zinc in dandelions (*Taraxacum officinale*; Asteraceae) sampled from polluted and nonpolluted soils[J]. The Journal of the Torrey Botanical Society, 2017, **144**(1): 47-57.
- [28] 陆金, 赵兴青, 黄健, 等. 铜陵狮子山矿区尾矿库及周边 17 种乡土植物重金属含量及富集特征[J]. 环境化学, 2019, **38**(1): 78-86.
- Lu J, Zhao X Q, Huang J, *et al.* Heavy metal contents and enrichment characteristics of 17 species indigenous plants in the tailing surrounding in Shizishan, Tongling [J]. Environmental Chemistry, 2019, **38**(1): 78-86.
- [29] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. 71-217.
- [30] 陈迪, 李伯群, 杨永平, 等. 4 种草本植物对镉的富集特征[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 960-966.
- Chen D, Li B Q, Yang Y P, *et al.* Cadmium accumulation characteristics of four herbs[J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 960-966.
- [31] Zou J C, Song F P, Lu Y Y, *et al.* Phytoremediation potential of wheat intercropped with different densities of *Sedum plumbizincicola* in soil contaminated with cadmium and zinc[J]. Chemosphere, 2021, **276**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130223.
- [32] 王书凤. 高低镉积累油菜品种响应镉胁迫的分子机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- Wang S F. Study on the molecular mechanisms of high/low cadmium accumulation rapeseed cultivars respond to Cd Stress [D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [33] Yang Y, Zhang L Q, Huang X, *et al.* Response of photosynthesis to different concentrations of heavy metals in *Davidia involucrata*[J]. PLoS One, 2020, **15**(3), doi: 10.1371/journal.pone.0228563.
- [34] Zamani-Ahmadmarmoodi R, Malekabi M B, Rahimi R, *et al.* Aquatic pollution caused by mercury, lead, and cadmium affects cell growth and pigment content of marine microalga, *Nannochloropsis oculata* [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, **192**(6), doi: 10.1007/s10661-020-8222-5.
- [35] Wei S H, Zhou Q X, Mathews S. A newly found cadmium accumulator-*Taraxacum mongolicum*[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **159**(2-3): 544-547.
- [36] 王爱云, 钟国锋, 徐刚标, 等. 铬胁迫对芥菜型油菜生理特性和镉富集的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(6): 1717-1725.
- Wang A Y, Zhong G F, Xu G B, *et al.* Effects of Cr(VI) stress

- on physiological characteristics of *Brassica Juncea* and its Cr uptake [J]. *Environmental Science*, 2011, **32** (6): 1717-1725.
- [37] Yang P, Gan T, Pi W, *et al.* Effect of using *Celosia argentea* grown from seeds treated with a magnetic field to conduct Cd phytoremediation in drought stress conditions[J]. *Chemosphere*, 2021, **280**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130724.
- [38] 葛依立, 陈心胜, 黄道友, 等. 湿地植物水蓼 (*Polygonum hydropiper* L.) 对镉的富集特征及生理响应[J]. *生态毒理学报*, 2020, **15**(2): 190-200.
- Ge Y L, Chen X S, Huang D Y, *et al.* Accumulation characteristics and physiological responses of the wetland plant, *Polygonum hydropiper* L. to cadmium [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2020, **15**(2): 190-200.
- [39] Małecka A, Konkolewska A, Hanć A, *et al.* Insight into the phytoremediation capability of *Brassica juncea* (v. Malopolska): Metal accumulation and antioxidant enzyme activity [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, **20**(18), doi: 10.3390/ijms20184355.
- [40] Patel A, Pandey V, Patra D D. Metal absorption properties of *Mentha spicata* grown under tannery sludge amended soil-its effect on antioxidant system and oil quality[J]. *Chemosphere*, 2016, **147**: 67-73.
- [41] Tauqeer H M, Ali S, Rizwan M, *et al.* Phytoremediation of heavy metals by *Alternanthera bettzi* (L.) Karst.: growth and physiological response [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, **126**: 138-146.
- [42] 程海涛. 东北蒲公英(*Taraxacum ohwianum* Kitam.)对镉吸收积累规律及耐受性研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019.
- Chen H T. Research on Cd absorption, accumulation and tolerance of *Taraxacum ohwianum* Kitam [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019.
- [43] Gieróń Ż, Sitko K, Zieleźnik-Rusinowska P, *et al.* Ecophysiology of *Arabidopsis arenosa*, a new hyperaccumulator of Cd and Zn [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **412**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125052.
- [44] Huang R, Dong M L, Mao P, *et al.* Evaluation of phytoremediation potential of five Cd (hyper) accumulators in two Cd contaminated soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **721**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137581.
- [45] 沈光. 橡胶草高效繁育、栽培技术与管理优化研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.
- Shen G. Study on efficient propagation, cultivation technology and management optimization for a rubber-producing grass of *Russian dandelion* [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021.



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 Shay 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)