

有机酸强化饲用玉米修复镉铅污染农田效果

陶荣浩, 高羽欣, 谢君豪, 胡婧怡, 曹迟, 胡兆云, 鲁洪娟, 叶文玲, 马友华

引用本文:

陶荣浩, 高羽欣, 谢君豪, 胡婧怡, 曹迟, 胡兆云, 鲁洪娟, 叶文玲, 马友华. 有机酸强化饲用玉米修复镉铅污染农田效果[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(4): 823-834.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0555>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

重金属Pb与抗生素对发光菌的联合毒性研究

李孟涵, 贺子琪, 苗家赫, 王风贺

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1925-1936 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0103>

低分子有机酸去除猪粪中铜锌的效率研究

舒美惠, 张世熔, 王贵胤, 钟钦梅, 徐小逊, 李婷

农业环境科学学报. 2017, 36(11): 2349-2355 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0607>

钝化剂处理对玉米与伴矿景天间作下植株生长及镉累积特征的影响

陈国皓, 祖艳群, 湛方栋, 李博, 李元

农业环境科学学报. 2019, 38(9): 2103-2110 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1446>

土壤重金属钝化效果评估——基于大田试验的研究

何赢, 杜平, 石静, 秦晓鹏, 徐刚, 吴明红

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1734-1740 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1423>

不同玉米品种对镉的富集和转运特性

辛艳卫, 梁成华, 杜立宇, 吴岩, 张亚男, 胡悦

农业环境科学学报. 2017, 36(5): 839-846 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1668>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陶荣浩, 高羽欣, 谢君豪, 等. 有机酸强化饲用玉米修复镉铅污染农田效果[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(4): 823–834.

TAO R H, GAO Y X, XIE J H, et al. Effect of organic acid enhancement on the remediation of cadmium-lead-polluted farmland by feed maize[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(4): 823–834.



开放科学 OSID

有机酸强化饲用玉米修复镉铅污染农田效果

陶荣浩^{1,2}, 高羽欣¹, 谢君豪¹, 胡婧怡³, 曹迟¹, 胡兆云⁴, 鲁洪娟^{1*}, 叶文玲¹, 马友华^{1*}

(1. 农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室, 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 3. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 4. 铜陵市义安区农业技术推广中心, 安徽 铜陵 244000)

摘要:为探究饲用玉米在有机酸强化下对镉铅污染农田的修复和改良效果,本研究采用田间试验比较了柠檬酸(CA)、酒石酸(TA)和聚天冬氨酸(PASP)强化饲用玉米的修复效果和经济效益。结果表明:3种有机酸均能够提高玉米的生物量和产量,与对照相比,产量增幅在2.92%~8.37%。施用有机酸后,玉米籽粒镉、铅含量分别在0.13~0.90 mg·kg⁻¹和0.06~0.25 mg·kg⁻¹之间,均符合国家饲料卫生标准(GB 13078—2017),可作为植物性饲料原料;同时,玉米穗轴、秸秆和根中镉、铅含量较对照提升显著,秸秆和根对镉、铅的富集转运能力得到提高。按照修复0~20 cm耕层土壤计算,在酒石酸处理下,高玉2068和京科968分别对镉和铅提取量最高,达到了3.78 mg·m⁻²和48.97 mg·m⁻²,理论上最短13 a可使该农田达到安全利用类耕地标准。施用有机酸后,玉米成熟期土壤pH值下降了0.09~0.19个单位,有效态镉和铅含量最高增幅达到了52.37%和63.22%,提高了玉米植株的提取能力,进而降低了土壤中全量镉和铅的含量。从经济效益看,在有机酸处理下,种植裕丰303的投入产出比相对较高,在1.18~1.78之间。本研究证明高玉2068在酒石酸和聚天冬氨酸强化下修复效果最显著,而裕丰303在柠檬酸强化下虽修复年限较长,但具有较高经济效益,二者均可推广应用于重金属污染耕地的边生产边修复。

关键词:有机酸;饲用玉米;镉铅污染;强化修复;农田

中图分类号:X173;X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)04-0823-12 doi:10.11654/jaes.2023-0555

Effect of organic acid enhancement on the remediation of cadmium-lead-polluted farmland by feed maize

TAO Ronghao^{1,2}, GAO Yuxin¹, XIE Junhao¹, HU Jingyi³, CAO Chi¹, HU Zhaoyun⁴, LU Hongjuan^{1*}, YE Wenling¹, MA Youhua^{1*}

(1. Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention and Control of Anhui Province, College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 3. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 4. Tongling Yi'an District Agricultural Technology Promotion Center, Tongling 244000, China)

Abstract: In order to explore the restoration and improvement of cadmium-lead polluted farmland by forage maize strengthened with organic acid. In this study, a field experiment was conducted to compare the reparative effects and economic benefits of fortified forage maize enhanced with citric acid (CA), tartaric acid (TA), and polyaspartic acid (PASP). The results showed that: all three organic acids could increase the biomass and yield of maize, with a yield increase of 2.92%–8.37% compared to the control. After the application of organic acids, the cadmium and lead concentrations in maize grains ranged from 0.13 mg·kg⁻¹ to 0.90 mg·kg⁻¹ and 0.06 mg·kg⁻¹ to 0.25 mg·kg⁻¹, respectively, which met the national feed hygiene standard (GB 13078—2017) and can be used as plant-based-feed raw materials. Meanwhile, the concentration of cadmium and lead in maize cobs, straw, and roots significantly increased compared to the control, and the ability of straw and roots to accumulate and transport cadmium and lead improved. During the reparation of 0–20 cm of

收稿日期:2023-07-13 录用日期:2023-09-15

作者简介:陶荣浩(1995—),男,安徽淮南人,博士研究生,从事农田土壤修复研究。E-mail:ronghaotao2022@163.com

*通信作者:鲁洪娟 E-mail:hjlu@ahau.edu.cn; 马友华 E-mail:yhma2020@qq.com

基金项目:安徽省科技重大攻关项目(17030701053)

Project supported: Major Science and Technology Project of Anhui Province(17030701053)

arable soil with TA treatment, Gaoyu 2068 and Jingke 968 extracted the highest amounts of cadmium and lead, respectively, reaching $3.78 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ and $48.97 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively. In theory, the shortest time required to make the farmland meet the standard for safe use of arable land is 13 years. After the application of organic acids, although the soil pH value during the mature period of maize decreased by 0.09–0.19 units, the highest increase in available cadmium and lead concentration reached 52.37% and 63.22%, respectively, improving the extraction ability of maize plants and thereby reducing the total cadmium and lead concentrations in the soil. From the perspective of economic benefits, under organic acid treatment, the input–output ratio of planting Yufeng 303 is relatively high, ranging from 1.18 to 1.78. This study proves that Gaoyu 2068 has the most significant remediation effect under treatment with TA and PASP. Although the repair period of Yufeng 303 under CA reinforcement is relatively long, it has high economic benefits. Both can be promoted and applied for the simultaneous production and remediation of heavy-metal-contaminated farmland.

Keywords: organic acid; forage maize; cadmium and lead pollution; intensive repair; farmland

随着工农业的发展,土壤重金属污染已成为日益突出的环境问题^[1–2]。由于其存在滞后性、累积性和不可降解性等特点,长期积累在土壤中会影响土壤质量和作物生长^[3–4],同时其还可以通过食物链影响人类健康^[5–6]。原位钝化技术虽然能够降低重金属的有效性,但其只能转化重金属的化学形态,而无法将重金属彻底移除^[7–8]。因此,为了维持安全的农业生态系统,从农田中移除重金属尤为重要^[9–10]。1983年,Chaney等^[11]提出利用超富集植物来修复重金属污染土壤,即植物修复。但超富集植物根系短小、生物量低和不能产生经济效益等的局限性,导致修复过程更加漫长且农民生产积极性降低^[12–13]。因此,如何在对土壤进行有效修复的同时进行安全生产,已经成为植物修复能否大规模应用的关键。

为了提高植物修复的效率,许多螯合剂强化植物修复的组合强化技术被推广应用^[14–15]。螯合剂通过与重金属发生螯合反应,形成具有水溶性的金属络合物,从而增加重金属有效性,促进植物对重金属的富集^[16–17]。然而,常见的化学螯合剂(如EDTA、EGTA和DPTA等)易造成重金属浸出风险,引起二次污染,且会降低土壤肥力,在应用中有较大局限性^[18]。有机酸是天然的螯合剂,具有可生物降解性和环境友好性^[19],也是参与重金属反应最多的物质^[20]。研究表明^[21],有机酸能够强化植物对重金属的提取和富集,且具有较强的降解性,不会造成二次污染。虽然有机酸对植物提取重金属具有显著促进效果,但以往的研究多为超积累植物,且以室内盆栽试验为主,研究结果需要在田间试验中进行验证。

《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中规定严格管控类耕地不能种植食用农产品,这进一步减少了我国可利用耕地面积。近年来,一些学者开始着眼于研究大宗经济作

物非食用部位对重金属的修复潜力,并取得一定的进展^[22–23]。玉米作为生物量大的作物,能够弥补超积累植物生物量低的不足,且能够作为植物性饲料产生经济效益,即使没有超富集能力,也能够通过措施强化玉米提取重金属。因此,对广大发展中国家而言,玉米是对受污染耕地边修复边生产的理想作物,具有巨大的修复潜力。本研究在前人研究的基础上,以3种不同品种的饲用玉米为研究材料,进一步采用田间试验探究在柠檬酸(CA)、酒石酸(TA)和聚天冬氨酸(PASP)强化下不同玉米之间对镉、铅吸收积累的特点及差异性,分析修复效果及作物生产安全性,为在有效修复受污染耕地的同时进行安全生产提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本试验田位于安徽省铜陵市义安区某镉、铅复合污染农田,该地区属于丘陵地带,位于亚热带温度带,土壤类型主要为红壤,亚类是黄红壤,土属为细粒黄红壤,土种为薄层细粒黄红壤,成土母质是中性结晶岩残、坡积物。试验小区土壤全量镉含量为 $1.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效态镉含量为 $0.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤全量铅含量为 $198.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效态铅含量为 $55.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验地土壤基本理化性质:土壤容重为 $1.16 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,pH值为5.16,有机质含量为 $21.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量为 $1.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量为 $82.61 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷含量为 $15.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量为 $117.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

基于安徽省农作物审定委员会审定(引种)的品种名录和实验室前期对严格管控类耕地玉米品种筛选的研究成果,本次试验所采用的玉米品种为裕丰303(YM-1)、京科968(YM-2)和高玉2068(YM-3)。

处理1:空白对照(CK),加等量的清水。

处理2:柠檬酸处理(CA),添加浓度为 $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的柠檬酸($192\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$)。

处理3:酒石酸处理(TA),添加浓度为 $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的酒石酸($150\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$)。

处理4:聚天冬氨酸处理(PASP),添加浓度为 $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的聚天冬氨酸($1\,000\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$)。

有机酸浓度根据前期实验室室内研究基础及预实验结果得出,柠檬酸、酒石酸和聚天冬氨酸的用量为 $1.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,溶于 500 mL 水中,CK组施用等量清水。

本试验共计36个小区,区组随机分布,每个处理小区 12 m^2 ($2\text{ m}\times 6\text{ m}$),3次重复。田间试验于2022年6月16日进行玉米点播,按照当地种植模式采用双行种植,行距 65 cm ,株距 30 cm ,每个小区共种植72株,四周设保护行。根据当地长江流域玉米高产栽培技术进行施肥,基肥采用45%(15-15-15)氮磷钾复合肥,每公顷用量为 600 kg ,在种植前1~2 d施入;在大喇叭口期,每公顷追施尿素 375 kg ,采取撒施,水肥结合,采用当地灌溉水,正常田间水肥管理和病虫、草害防治。在玉米生长的穗期,以每穴为单位,在距离每株玉米的根部 5 cm 左右环绕一圈,将柠檬酸、酒石酸和聚天冬氨酸以溶液的形式,均匀施入其对应小区玉米的根际土壤中。当年10月9日进行成熟期采样并收获。

1.3 样品采集与处理

在玉米成熟期对玉米植株样品随机采样,每个试验处理小区随机采集3~5株长势较为均匀的玉米整株样品。土壤样品在采集玉米样品当日采集,用木铲在采取玉米样品的点位处采集相对应的土壤样品($0\sim 20\text{ cm}$)组成混合土样。

采集后的玉米植株样品按照小区进行分类和对应,再将整株分为根部、秸秆、穗轴和籽粒。样品先后用自来水和去离子水清洗干净,植株部于 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下杀青 30 min , $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒质量。称量干质量后,通过不锈钢粉碎机分别进行粉碎,组成混合样。采集的土壤样品在阴凉处风干后,粉碎、研磨,过10目筛和100目筛后装入自封袋备用。

1.4 样品检测

根据《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》(GB 5009.268—2016),用美国赛默飞(iCAP 7000 Series)电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-OES)测定植株各部位镉和铅的含量^[24]。根据《土壤质量 铅、镉的测定》(GB/T 17141—1997),用德国耶拿Z700P原子

吸收分光光度计石墨炉法测定土壤全量镉和铅的含量。根据《土壤质量 有效态铅和镉的测定》(GB/T 23739—2009),用德国耶拿Z700P原子吸收分光光度计火焰法测定土壤有效态镉和铅的含量。土壤pH值采用去 CO_2 蒸馏水浸提(土水比1:2.5),精密pH计(TARTER 2100)测定。根据《土壤农化分析》中的方法测定土壤理化指标。为保证试验结果的准确性,以国家标准参比物质[土壤样品(GBW 07461)和植物样品(GBW 10012)]进行质量控制,分析结果均在允许误差范围内。

相关分析指标根据以下公式计算^[25-26]:

(1)富集系数(BCF)=植株重金属含量/土壤该重金属含量

(2)转运系数(TF)=植株地上部重金属含量/植株地下部该重金属含量

(3)植株提取重金属量=植株体内重金属含量 $\times$ 植物干物质质量

(4)提取效率=植株提取重金属量/(土壤重金属含量 $\times$ 土壤质量) $\times 100\%$

(5)理论相对修复年限=(修复前土壤重金属含量-农用地土壤污染风险管控值) $\times$ 土壤质量/植株提取重金属量

(6)总产出=玉米产量 $\times$ 玉米单价

(7)投入产出比(ROI)=总收入/总成本

1.5 数据分析

试验数据通过Excel 2016整理后,使用SPSS 23.0进行方差分析和相关性分析。采用最小显著差异法(LSD)进行处理间平均数比较,表中数据均采用平均值 $\pm$ 标准差($M\pm SD$)表示,用Duncan's法检验显著性差异($P<0.05$)。采用Origin 2021绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对玉米生物量和产量的影响

由表1分析可知,不同玉米的生物量和产量在3种有机酸处理下均较CK显著提高($P<0.05$),其中产量增幅在 $2.92\%\sim 8.37\%$ 之间,说明3种有机酸的施用在一定程度上促进了玉米的生长。YM-1和YM-3在各处理下的产量分别为 $9.12\sim 9.22\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $9.21\sim 9.32\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,而YM-2在各处理下的产量为 $4.81\sim 4.92\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,说明不同玉米品种产量之间具有差异性。

2.2 不同处理对玉米各部位镉、铅含量的影响

2.2.1 不同处理对玉米籽粒镉含量的影响

由图1分析可知,YM-1在各处理下籽粒镉含量

表 1 不同处理下玉米的生物量和产量
Table 1 Biomass and yield of different maize under organic acid reinforcement

品种 Variety	处理 Treatment	生物量 Biomass/(kg·m ⁻²)				产量 Yield/(t·hm ⁻²)
		根 Root	秸秆 Straw	穗轴 Cob	籽粒 Kernel	
YM-1	CK	0.13±0.01b	1.32±0.04b	0.08±0.01c	0.90±0.01b	8.73±0.12b
	CA	0.14±0.01a	1.38±0.03a	0.09±0.01bc	0.94±0.01a	9.12±0.09a
	TA	0.14±0.01a	1.40±0.02a	0.10±0.01ab	0.96±0.02a	9.22±0.04a
	PASP	0.14±0.01a	1.41±0.01a	0.11±0.01a	0.97±0.03a	9.16±0.08a
YM-2	CK	0.13±0.01b	1.56±0.03c	0.08±0.01b	0.47±0.01b	4.54±0.09b
	CA	0.14±0.01ab	1.64±0.02b	0.10±0.01a	0.51±0.01a	4.81±0.05a
	TA	0.14±0.01a	1.72±0.02a	0.09±0.01a	0.52±0.02a	4.92±0.05a
	PASP	0.15±0.01a	1.70±0.04a	0.09±0.01a	0.53±0.03a	4.91±0.07a
YM-3	CK	0.10±0.01b	1.47±0.05b	0.18±0.01c	0.92±0.01b	8.90±0.07b
	CA	0.12±0.01a	1.57±0.03a	0.19±0.01b	0.97±0.02a	9.21±0.05a
	TA	0.12±0.01a	1.60±0.03a	0.21±0.01a	0.96±0.01a	9.32±0.07a
	PASP	0.12±0.01a	1.60±0.06a	0.22±0.01a	0.97±0.02a	9.31±0.08a

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different lowercases in a column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

为 0.13~0.17 mg·kg⁻¹, 较 CK 增加了 45.35%~96.16%, 增幅最大的是 TA。YM-2 在各处理下籽粒镉含量为 0.31~0.36 mg·kg⁻¹, 较 CK 增加了 28.50%~48.19%, 增幅最大的是 PASP。YM-3 在各处理下籽粒镉含量为 0.81~0.90 mg·kg⁻¹, 较 CK 增加了 28.06%~42.23%, 增幅最大的是 TA。综合分析来看, 对玉米籽粒镉含量

提升最好的是 TA 和 PASP。YM-1 在处理后的籽粒镉含量低于 0.2 mg·kg⁻¹, 达到了《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022) 中规定的标准。YM-2 和 YM-3 在处理后的籽粒镉含量虽然超出了该标准, 但符合《国家饲料卫生标准》(GB 13078—2017) 规定的镉含量低于 1.0 mg·kg⁻¹ 的标准, 可作为植物性饲料原料。

2.2.2 不同处理对玉米籽粒铅含量的影响

由图 2 可知, YM-1 在各处理下籽粒铅含量为 0.06~0.10 mg·kg⁻¹, 较 CK 增加了 61.22%~180.76%; YM-2 在各处理下籽粒铅含量为 0.12~0.14 mg·kg⁻¹, 较 CK 增加了 35.16%~58.23%; YM-3 在各处理下籽粒铅含量为 0.20~0.25 mg·kg⁻¹, 较 CK 增加了 11.22%~38.29%。综合分析可知, 对 3 种玉米籽粒铅

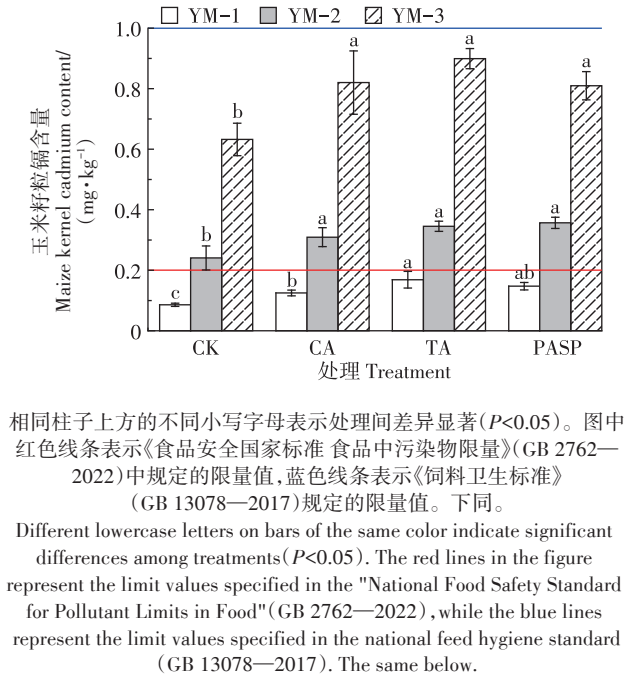


图 1 不同处理下玉米籽粒镉含量

Figure 1 Cadmium content in maize kernel under different treatments

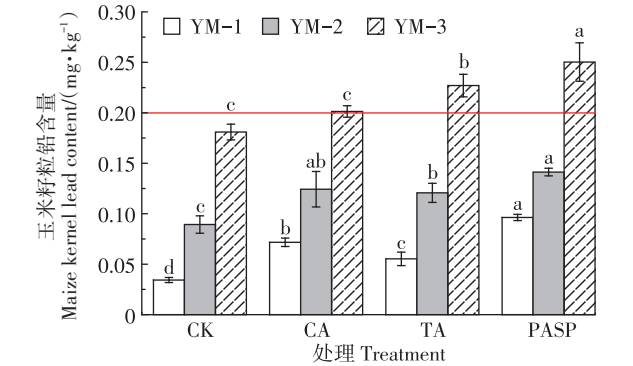


图 2 不同处理下玉米籽粒铅含量

Figure 2 Lead content in maize kernel under different treatments

含量提升最好的均是PASP。YM-1和YM-2在处理后的籽粒铅含量均低于 $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,达到了《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022)中规定的标准。YM-3在处理后的籽粒铅含量虽然超出了该标准,但符合《国家饲料卫生标准》(GB 13078—2017)规定的铅含量低于 $1.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的标准,可作为植物性饲料原料。

2.2.3 不同处理对玉米植株各部位镉含量的影响

由表2分析可知,YM-1在各处理下穗轴、秸秆和根的镉含量分别较CK分别增加了43.01%~61.64%、22.02%~46.38%和29.33%~41.29%,增幅最大的部位是穗轴。YM-2在各处理下穗轴、秸秆和根的镉含量较CK分别增加了27.62%~37.74%、36.82%~49.55%和35.31%~65.03%,增幅最大的部位是根。YM-3在各处理下穗轴、秸秆和根的镉含量较CK分别增加了13.55%~52.00%、42.30%~65.03%和22.70%~30.05%,增幅最大的部位是秸秆。

表2 不同处理下玉米植株各部位镉含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 2 Cadmium content in maize plant parts under different treatments($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

品种 Variety	处理 Treatment	穗轴 Cob	秸秆 Straw	根 Root
YM-1	CK	0.75±0.02b	1.06±0.10b	1.63±0.09b
	CA	1.14±0.10a	1.41±0.20a	2.31±0.02a
	TA	1.20±0.15a	1.29±0.14ab	2.11±0.15a
	PASP	1.07±0.16a	1.55±0.13a	2.18±0.20a
YM-2	CK	0.59±0.03b	1.02±0.09b	1.12±0.02c
	CA	0.77±0.09a	1.41±0.11a	1.51±0.02b
	TA	0.75±0.12ab	1.39±0.13a	1.64±0.17b
	PASP	0.81±0.08a	1.52±0.15a	1.84±0.10a
YM-3	CK	0.28±0.040b	1.00±0.03c	1.13±0.10b
	CA	0.32±0.03ab	1.43±0.03b	1.39±0.13a
	TA	0.41±0.12ab	1.66±0.10a	1.46±0.04a
	PASP	0.43±0.04a	1.62±0.10a	1.38±0.04a

2.2.4 不同处理对玉米植株各部位铅含量的影响

由表3分析可知,YM-1在各处理下穗轴、秸秆和根的铅含量较CK分别增加了17.94%~35.16%、34.43%~44.35%和14.98%~29.12%,增幅最大的部位是秸秆。YM-2在各处理下穗轴、秸秆和根的铅含量较CK分别增加了47.41%~55.08%、69.88%~77.32%和26.98%~60.74%,增幅最大的部位是秸秆。YM-3在各处理下穗轴、秸秆和根的铅含量较CK分别增加了44.45%~53.66%、34.66%~48.25%和26.76%~

表3 不同处理下玉米植株各部位铅含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 3 Lead content in maize plant parts under different treatments($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

品种 Variety	处理 Treatment	穗轴 Cob	秸秆 Straw	根 Root
YM-1	CK	1.62±0.38b	20.02±2.82b	35.56±3.80b
	CA	1.91±0.24ab	26.92±1.85a	43.24±0.45a
	TA	2.19±0.17a	28.90±3.87a	40.88±3.80ab
	PASP	2.04±0.30ab	28.18±4.00a	45.91±2.56a
YM-2	CK	2.00±0.01c	14.43±0.86b	22.67±1.63d
	CA	3.27±0.09a	25.57±2.07a	28.79±1.38c
	TA	2.94±0.30b	25.59±4.41a	31.31±0.61b
	PASP	3.09±0.14ab	24.52±0.63a	36.44±1.09a
YM-3	CK	2.24±0.17b	12.01±1.83b	39.37±2.27c
	CA	3.44±0.18a	16.18±2.23a	54.80±3.54a
	TA	3.36±0.15a	17.81±1.42a	49.91±3.32b
	PASP	3.24±0.31a	16.99±1.04a	57.02±0.27a

44.82%,增幅最大的部位是穗轴。

2.3 不同处理对镉、铅富集和转运的影响

2.3.1 不同处理镉富集和转运的差异

由表4分析可知,YM-1在各处理下秸秆和根的富集系数较CK分别增加了22.95%~47.54%和29.47%~41.05%,秸秆-根和籽粒-秸秆的转运系数分别为0.61~0.71和0.09~0.13。YM-2在各处理下秸秆和根的富集系数较CK分别增加了37.29%~49.15%和35.38%~64.62%,秸秆-根和籽粒-秸秆的转运系数分别为0.83~0.93和0.22~0.25。YM-3在各处理下秸秆

表4 不同处理下玉米对镉富集和转运的影响

Table 4 Effects of different treatments on cadmium accumulation and transport in maize

品种 Variety	处理 Treatment	富集系数BCF		转运系数TF	
		秸秆 Straw	根 Root	秸秆-根 Straw-Root	籽粒-秸秆 Kernel-Straw
YM-1	CK	0.61±0.06b	0.95±0.05b	0.65±0.03a	0.08±0.01b
	CA	0.82±0.12a	1.34±0.01a	0.61±0.08a	0.09±0.01b
	TA	0.75±0.08ab	1.23±0.09a	0.61±0.10a	0.13±0.01a
	PASP	0.90±0.08a	1.27±0.12a	0.71±0.07a	0.10±0.01b
YM-2	CK	0.59±0.05b	0.65±0.01c	0.91±0.08a	0.24±0.06a
	CA	0.82±0.06a	0.88±0.01b	0.93±0.07a	0.22±0.04a
	TA	0.81±0.08a	0.95±0.10b	0.85±0.12a	0.25±0.04a
	PASP	0.88±0.09a	1.07±0.06a	0.83±0.09a	0.24±0.03a
YM-3	CK	0.58±0.02c	0.65±0.06b	0.90±0.08b	0.63±0.07a
	CA	0.83±0.02b	0.81±0.08a	1.04±0.09ab	0.58±0.07ab
	TA	0.96±0.06a	0.85±0.02a	1.13±0.09a	0.54±0.02ab
	PASP	0.94±0.06a	0.80±0.02a	1.18±0.07a	0.50±0.02b

和根的富集系数较CK分别增加了43.10%~65.52%和23.08%~30.77%, 秸秆-根和籽粒-秸秆的转运系数分别为1.04~1.18和0.50~0.58。

2.3.2 不同处理对铅富集和转运的影响

由表5可知, YM-1在各处理下秸秆和根的富集系数较CK分别增加了40.00%~50.00%和16.67%~27.78%, 秸秆-根的转运系数为0.61~0.72。YM-2在各处理下秸秆和根的富集系数较CK分别增加了71.43%~85.71%和25.00%~58.33%, 秸秆-根的转运系数为0.67~0.89。YM-3在各处理下秸秆和根的富集系数较CK分别增加了21.86%~47.96%和14.95%~

44.99%, 秸秆-根的转运系数为0.30~0.36。各处理对籽粒-秸秆转运系数的影响差异均不显著($P>0.05$)。

2.4 不同处理对镉、铅提取能力的影响

不同处理对玉米提取镉、铅的能力具有差异性。由表6分析可知, 在有机酸强化下, YM-1对镉和铅的提取量分别较CK提高了36.24%~56.92%和38.28%~48.79%, PASP和TA分别对镉和铅的提取能力最强。YM-2对镉和铅的提取量分别较CK提高了45.68%~64.90%和80.79%~90.73%, PASP和TA分别对镉和铅的提取能力最强。YM-3对镉和铅的提取量分别较CK提高了46.63%~70.17%和47.68%~59.79%, TA对镉和铅的提取能力均最强。若要使0~20 cm耕层土壤镉含量降低到农用地土壤污染风险管控值($1.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)以下, 理论上YM-3在TA和PASP强化下修复年限最短, 分别为13 a和14 a, 之后可采取安全利用类农艺措施实现可食用农作物的安全生产。由于试验地土壤中铅含量低于农用地土壤污染风险管控值, 因此未计算土壤铅的修复年限。

2.5 不同处理对土壤pH值、全量镉铅及有效态镉铅的影响

2.5.1 不同处理对土壤pH值的影响

不同处理使玉米成熟期土壤pH值呈现出不同程度的下降。由图3分析可知, 在有机酸处理后3种玉米成熟期土壤pH值为4.97~5.09, 较CK均显著性降低。其中YM-1、YM-2和YM-3成熟期土壤pH值较CK分别下降了0.09~0.13、0.10~0.15个和0.10~0.19个单位。

2.5.2 不同处理对土壤全量镉和铅的影响

不同处理下玉米成熟期土壤全量镉和铅均不同

表5 不同处理下玉米对铅富集和转运的影响

Table 5 Effects of different treatments on lead accumulation and transport in maize

品种 Variety	处理 Treatment	富集系数BCF		转运系数TF	
		秸秆 Straw	根 Root	秸秆-根 Straw-Root	籽粒-秸秆 Kernel-Straw
YM-1	CK	0.10±0.02b	0.18±0.02b	0.56±0.02a	<0.01±<0.01a
	CA	0.14±0.01a	0.22±<0.01a	0.62±0.05a	<0.01±<0.01a
	TA	0.15±0.02a	0.21±0.02ab	0.72±0.14a	<0.01±<0.01a
	PASP	0.14±0.02a	0.23±0.01a	0.61±0.06a	<0.01±<0.01a
YM-2	CK	0.07±0.01b	0.12±0.01d	0.64±0.02c	0.01±<0.01a
	CA	0.13±0.01a	0.15±0.01c	0.89±0.05a	0.01±<0.01a
	TA	0.13±0.02a	0.16±<0.01b	0.82±0.14ab	0.01±<0.01a
	PASP	0.12±<0.01a	0.19±0.01a	0.67±0.02bc	0.01±<0.01a
YM-3	CK	0.06±0.01b	0.20±0.01c	0.31±0.04a	0.02±<0.01a
	CA	0.08±0.01a	0.28±0.02a	0.30±0.05a	0.01±<0.01a
	TA	0.09±0.01a	0.26±0.02b	0.36±0.04a	0.01±<0.01a
	PASP	0.09±0.01a	0.29±<0.01a	0.30±0.02a	0.02±<0.01a

表6 不同处理下玉米提取镉、铅的效果

Table 6 Effects of cadmium and lead extraction in maize under different treatments

品种 Variety	处理 Treatment	提取量Extraction/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$)		提取率Extraction percentage/%		修复年限Repair years/a
		Cd	Pb	Cd	Pb	
YM-1	CK	1.76±0.10b	31.47±3.92b	0.44±0.03b	0.07±0.01b	29±2a
	CA	2.50±0.27a	43.61±1.89a	0.63±0.06a	0.09±0.01a	20±2b
	TA	2.39±0.19a	46.82±5.35a	0.60±0.05a	0.10±0.01a	21±2b
	PASP	2.76±0.21a	46.78±6.14a	0.69±0.06a	0.10±0.01a	19±2b
YM-2	CK	1.89±0.10c	25.68±0.97b	0.47±0.02c	0.05±0.01b	27±2a
	CA	2.75±0.16b	46.42±3.11a	0.69±0.04b	0.10±0.01a	19±2b
	TA	2.88±0.20ab	48.97±7.70a	0.72±0.05ab	0.11±0.02a	18±1b
	PASP	3.12±0.26a	47.38±1.35a	0.78±0.07a	0.10±0.01a	16±2b
YM-3	CK	2.22±0.05c	22.22±3.11b	0.56±0.02c	0.05±0.01b	23±0a
	CA	3.26±0.17b	32.81±3.83a	0.82±0.04b	0.07±0.01a	16±1b
	TA	3.78±0.15a	35.50±1.60a	0.95±0.04a	0.08±0.01a	13±1c
	PASP	3.64±0.20a	35.07±2.45a	0.91±0.05a	0.08±0.01a	14±1c

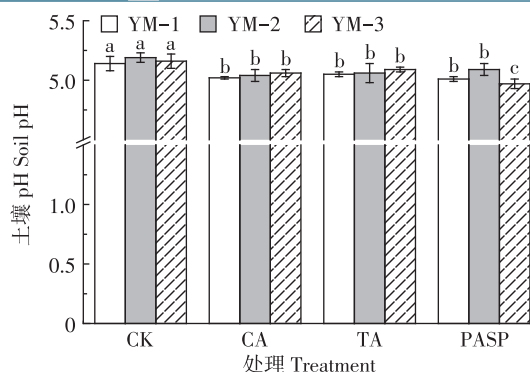


图3 不同处理下玉米成熟期土壤pH值

Figure 3 Soil pH value during maize maturity under different treatments

程度地降低。由图4分析可知, YM-1在各处理下土壤全量镉和铅的含量分别较CK降低了14.54%~19.43%和6.32%~11.02%, PASP对镉和铅的降幅均最大。YM-2在各处理下土壤全量镉和铅的含量较CK分别降低了24.55%~33.79%和8.32%~12.47%, TA和PASP分别对镉和铅的降幅最大。YM-3在各处理下土壤全量镉和铅的含量较CK分别降低了27.10%~31.06%和6.23%~16.60%, CA和PASP分别对镉和铅

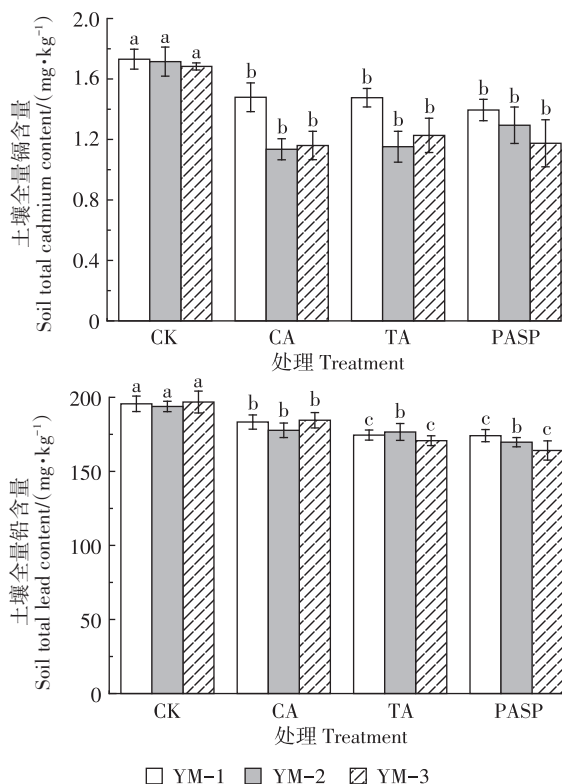


图4 不同处理下玉米成熟期土壤全量镉和铅的含量

Figure 4 Total cadmium and lead content in soil during maize maturity under the same treatment

的降幅最大。

2.5.3 不同处理对土壤有效态镉和铅的影响

不同处理使玉米成熟期土壤有效态镉和铅均不同程度地提高。由图5分析可知, YM-1在各处理下土壤有效态镉和铅的含量分别较CK提高了20.88%~40.94%和35.62%~49.35%, PASP对有效态镉和铅的增幅均最大。YM-2在各处理下土壤有效态镉和铅的含量分别较CK提高了30.81%~52.37%和48.69%~63.22%, TA和PASP分别对有效态镉和铅的增幅最大。YM-3在各处理下土壤有效态镉和铅的含量分别较CK提高了19.61%~31.86%和22.09%~41.75%, TA和CA分别对有效态镉和铅的增幅最大。

2.6 玉米各部位重金属含量与土壤有效态及pH的相关性分析

2.6.1 玉米各部位镉含量与土壤有效态镉及pH的相关性

相关性分析结果如图6所示, 玉米籽粒与穗轴之间呈现出极显著负相关关系($P<0.01$), 籽粒与根之间呈现出显著负相关关系($P<0.05$), 穗轴和根之间呈现出极显著正相关关系($P<0.01$)。有效态镉与秸秆之间呈现出极显著正相关关系($P<0.01$), 土壤pH与有

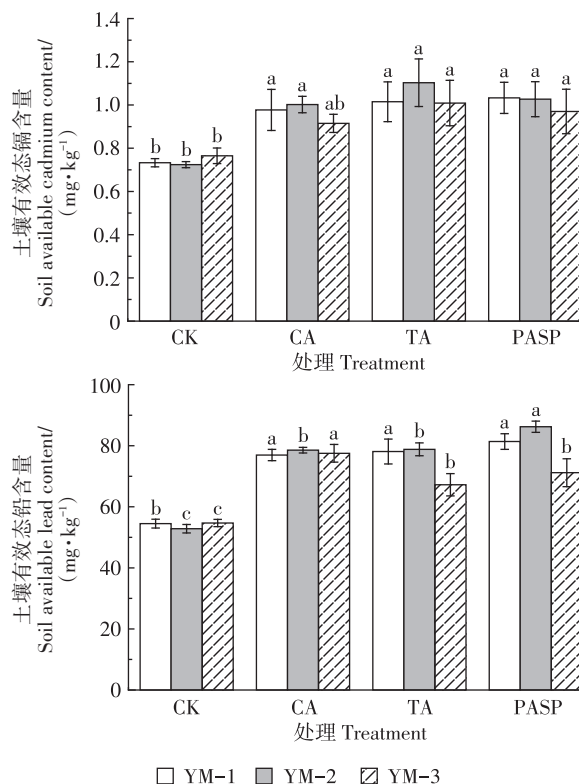
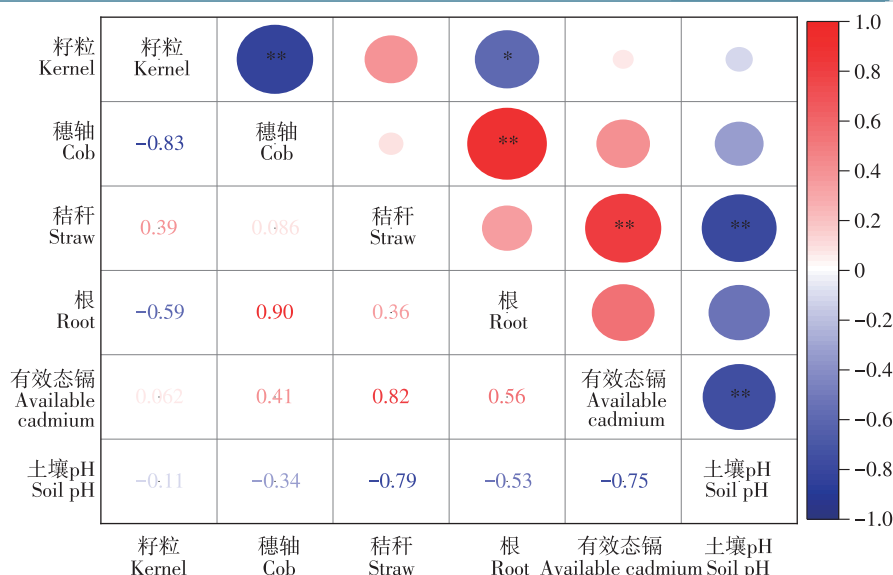


图5 不同处理下玉米成熟期土壤有效态镉和铅的含量

Figure 5 The content of available cadmium and lead in soil during maize maturity under different treatments



** 表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著; *表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著。下同。
 ** indicates the correlation is extremely significant at the level of 0.01(two tailed); * indicates the correlation is significant at the level of 0.05(two tailed).
 The same below.

图6 玉米各部位镉含量与土壤有效态镉及pH的相关性

Figure 6 Correlation between cadmium content in various parts of maize and available cadmium and pH in soil

有效态镉和秸秆之间均呈现出极显著负相关关系($P < 0.01$)。

2.6.2 玉米各部位铅含量与土壤有效态铅及pH的相关性

相关性分析结果如图7所示,玉米籽粒与穗轴之间呈现出极显著正相关关系($P < 0.01$),籽粒与根之间呈显著正相关关系($P < 0.05$)。有效态铅与秸秆之间呈现出极显著正相关关系($P < 0.01$),但有效态铅与土壤pH值之间呈极显著负相关关系($P < 0.01$),土壤pH值与根之间呈显著负相关关系($P < 0.05$)。

2.7 不同处理经济效益分析

本试验中的投入成本主要包括有机酸、种子和其他(如化肥、机械和人工等),成本价格和玉米销售价主要通过对当地农资市场调查得出,具体价格以市场实际价格为准。当玉米籽粒镉含量超出 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,售价仅为正常价格的60%。在其他管理水平一致的基础上,经济效益如表7所示,投入产出比较高的玉米品种是YM-1,最高达到了1.78。在CA处理下,3个不同品种玉米投入产出比均要显著高于其他处理($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 有机酸促进玉米生长并提高生物量

生物量是影响植物提取重金属效率的关键因素

之一^[27],在同等条件下,生物量越大的植物,其植株体内积累的重金属越多,因此种植高生物量的植物对移除农田中重金属效果更显著。但重金属会对植物根系产生危害,在重金属胁迫下植物生物量减少是一种不可逆的植物生长抑制现象^[28]。以往的研究表明,玉米具有生长迅速、生物量大及适应性广等特点,且对重金属具有较强的耐受性^[29]。本试验在镉、铅胁迫下3种玉米均未出现明显的重金属中毒现象,表明玉米在本试验条件下可以正常生长。有机酸能够在土壤中产生解聚腐殖质,通过激活生长素和减轻胁迫对光合器官的损害来促进植物生长^[30]。Farid等^[31]的研究表明,柠檬酸增强了植物对养分的吸收,促进了其生长;Li等^[32]研究发现,苕麻(*Boehmeria nivea* L.)在施用柠檬酸后的鲜质量和干质量分别提高44.6%和74.4%;Tao等^[33]通过添加酒石酸,使东南景天(*Sedum alfredii*)的地上生物量增加了15%。许伟伟等^[34]研究发现施用聚天冬氨酸能够明显提高作物的生物量。但也有研究发现,过量施用有机酸会抑制植物生长,导致植物生物量呈下降趋势^[35]。这说明植物对有机酸浓度存在耐受范围,高浓度的有机酸会使植物根尖附近的侧根发育受到抑制,甚至导致根尖细胞坏死^[36]。在本试验中,3种不同品种的玉米在柠檬酸、酒石酸和聚天冬氨酸强化后,玉米产量显著提高,较对照增产2.92%~8.37%,表明施用浓度为 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$

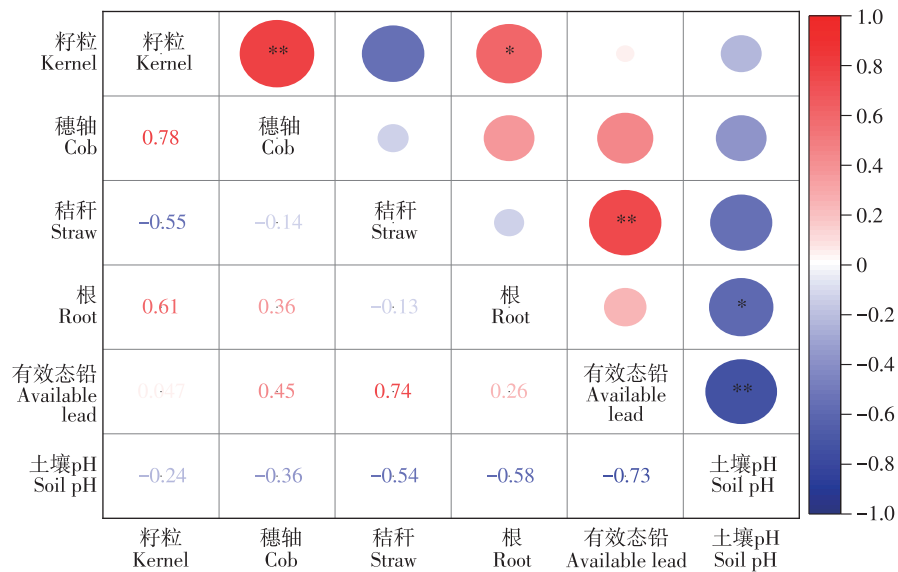


图7 玉米各部位铅含量与土壤铅含量及pH的相关性

Figure 7 Correlation between lead content in various parts of maize and available lead and pH in soil

表7 不同处理经济效益分析

Table 7 Economic benefit analysis of different treatments

品种 Variety	处理 Treatment	投入Input/(元·hm ⁻²)			总投入 Total input/(万元·hm ⁻²)	总产出 Total output/(万元·hm ⁻²)	投入产出比 Input-output ratio
		有机酸Organic acid	种子Seed	其他Other			
YM-1	CK	0	720	12 000	1.27	2.18±0.03b	1.72±0.02b
	CA	115	720	12 000	1.28	2.28±0.02a	1.78±0.02a
	TA	1 350	720	12 000	1.41	2.33±0.03a	1.66±0.02c
	PASP	7 200	720	12 000	1.99	2.34±0.08a	1.18±0.04d
YM-2	CK	0	480	12 000	1.25	0.68±0.01b	0.54±0.01b
	CA	115	480	12 000	1.26	0.74±0.02a	0.59±0.02a
	TA	1 350	480	12 000	1.38	0.75±0.03a	0.55±0.02b
	PASP	7 200	480	12 000	1.97	0.77±0.04a	0.39±0.02c
YM-3	CK	0	540	12 000	1.25	1.33±0.01b	1.07±0.01b
	CA	115	540	12 000	1.27	1.40±0.03a	1.10±0.03a
	TA	1 350	540	12 000	1.39	1.40±0.01a	1.00±0.01c
	PASP	7 200	540	12 000	1.97	1.40±0.03a	0.72±0.02d

的柠檬酸、酒石酸和聚天冬氨酸对玉米的生长是安全的,这为有机酸强化玉米修复镉铅污染农田提供了基础保障。

3.2 有机酸强化玉米提取土壤重金属的能力

土壤重金属有效性一定程度上决定了植物对重金属的提取效率^[37]。重金属在酸性土壤环境下会从相对稳定状态转变为易被植物吸收的有效态,从而提高植物的提取效率^[38]。Antonkiewicz 等^[39]研究发现,柠檬酸能够通过酸化作用,降低土壤pH值,提高土壤中重金属有效态含量,显著增加金银花地上部重金属含量。Evangelou 等^[40]研究发现有机酸能够改变重金

属在土壤中的形态分布,提高活化效果,促进重金属在植物体内富集转运的效果。本试验中,不同处理下土壤pH较对照下降了0.09~0.19个单位,有效态镉和有效态铅分别提高了20.88%~52.37%和22.09%~63.22%,根据相关性分析(图6和图7)可知,土壤有效态镉和有效态铅与土壤pH值之间均呈现极显著负相关关系,表明施用有机酸在降低土壤pH值的同时,显著提高了土壤中有效态镉和有效态铅的含量。土壤有效态镉、有效态铅与玉米秸秆镉、铅含量之间又呈现极显著正相关关系(图6和图7),表明土壤有效态镉和有效态铅的提升显著促进了玉米秸秆对土壤中

镉和铅的吸收。因此,通过合理施用有机酸可以提高土壤重金属的有效性,强化植株对重金属的提取和富集能力。以往的研究表明,不同种类的有机酸对土壤重金属有效态含量的影响存在差异^[41]。本试验中,施用酒石酸对提高土壤有效态镉、铅的能力相对较强,这可能是酒石酸具有较多的含氧基团,其能与重金属离子结合,加速重金属从游离态向可交换态和有机物结合态转化,同时也对土壤中可变电荷位点的正电荷产生影响,降低铁锰氧化物结合态含量,促进碳酸盐结合态向可交换态转化,残渣态向其他形态转化^[42]。基于本研究中玉米提取量及提取率,若要将本试验土壤镉含量降低至农用地安全利用类标准,理论上高玉2068在酒石酸强化下相对修复时间最短为13 a,之后可采取安全利用类农艺措施进行可食用农产品的生产。但也有学者认为大田试验的环境条件较复杂,存在诸多不确定性,实际的修复时间还需要多次长期的田间修复验证。

3.3 不同玉米对重金属富集和转运存在差异性

植物的富集和转运系数分别表示了植物地上部从土壤中提取重金属的能力和重金属由植物根部向地上部转移的能力,能够客观反映出重金属在植物体内的分布规律。以往的研究表明^[43-44],不同品种的玉米之间对重金属的富集和转运存在较为显著的种间差异性。本试验中,3种不同玉米各部位的富集和转运镉、铅的能力存在差异性,在有机酸同等处理下,裕丰303籽粒镉、铅含量均可达到食品安全国家标准限量值 $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下,而高玉2068籽粒镉含量最高达到了 $0.90\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,远超标准限量值,仅可作为植物性饲料原料使用。但通过对玉米穗轴、秸秆和根中的镉、铅含量差异及富集系数研究发现,3个不同品种的玉米各部位镉、铅含量均表现出逐级递减的规律。这一方面可能是由于镉、铅主要富集在玉米植株的根部,如本试验中不同有机酸处理下裕丰303根对镉的富集系数均大于1,3种玉米的根对铅的富集系数均大于秸秆对铅的富集系数;另一方面可能是因为镉、铅在地上部各器官之间转移时,主要富集在秸秆和穗轴中,如高玉2068秸秆对镉的富集系数大于根对镉的富集系数。研究表明,镉、铅富集量较高的玉米植株中与液泡或细胞壁结合的镉、铅活性较高,具有较强的移动性,上一器官无法有效拦截镉、铅向下一器官的转运和积累,而富集量较低的玉米则具有较高的拦截能力^[45]。究其原因,就是不同种类的玉米因其基因类型和对不同生长环境的适应性对重金属的富集转运能

力产生了差异性,此外土壤类型及重金属污染程度也会对试验结果产生影响,因此对不同玉米富集重金属的差异性研究还需要更多的田间试验进行论证。

4 结论

(1)3种不同的玉米在有机酸的强化下均未出现生长抑制现象,且生物量和产量均得到提升,产量最高增幅达到了8.37%。

(2)不同的有机酸均强化了玉米对土壤中镉和铅的吸收,对镉和铅的提取量最高分别提高了70.17%和90.73%,且提取的重金属主要富集在玉米的非食用部位,虽然玉米各器官间的转运能力在增强,但根据国家饲料卫生标准,处理后的玉米籽粒均可以作为植物性饲料原料。

(3)施用有机酸后虽然玉米成熟期土壤pH值下降了0.09~0.19个单位,但土壤有效态镉和有效态铅的含量得到了提高,促进了玉米对镉、铅的提取能力,降低土壤全量镉和全量铅的含量。

(4)高玉2068在酒石酸和聚天冬氨酸处理下的修复效果最佳,而裕丰303在柠檬酸处理下虽修复年限相对较长,但其经济效益最可观,因此,均可作为受污染耕地边生产边修复技术进行推广应用。

参考文献:

- [1] YANG J, YOU S, ZHENG J. Review in strengthening technology for phytoremediation of soil contaminated by heavy metals[J]. *IOP Conference Series:Earth and Environmental Science*, 2019, 242(5):52003.
- [2] CUI L Q, NOERPEL M R, SCHECKEL K G, et al. Wheat straw biochar reduces environmental cadmium bioavailability[J]. *Environment International*, 2019, 126:69-75.
- [3] ZHANG H M, TAO R H, NIE J J, et al. Cadmium distribution, availability, and translocation in soil-oilseed rape (*Brassica napus* L.) system and its risk assessment[J]. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2022, 6:2053-2062.
- [4] 李增飞, 廖国健, 石圣杰, 等. 淹水条件下叶面喷施硒与海泡石联合降低水稻吸收砷镉的风险[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(6): 1208-1218. LI Z F, LIAO G J, SHI S J, et al. Risks of selenium and sepiolite use to reduce arsenic and cadmium uptake in rice under flooding conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(6): 1208-1218.
- [5] LIU L, FAN S S. Removal of cadmium in aqueous solution using wheat straw biochar: effect of minerals and mechanism[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2018, 25(9):8688-8700.
- [6] LUO J, HE W, QI S, et al. A novel phytoremediation method assisted by magnetized water to decontaminate soil Cd based on harvesting senescent and dead leaves of *Festuca arundinacea*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 383:121115.

- [7] MA Z W, TAO R H, HU J Y, et al. Effects of remediation fertilizer and biochar on cadmium and plumbum absorption in maize (*Zea mays* L.) [J]. *Sustainability*, 2023, 15(6):4696.
- [8] 陶荣浩, 袁旭峰, 吴新德, 等. 修复肥料和紫云英对水稻吸收积累镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1):76–86. TAO R H, YUAN X F, WU X D, et al. Effects of repair fertilizer and milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) on cadmium uptake and accumulation in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(1):76–86.
- [9] CUI M, LEE Y, CHOI J, et al. Evaluation of stabilizing materials for immobilization of toxic heavy metals in contaminated agricultural soils in China[J]. *Clean Production*, 2018, 193:748–758.
- [10] DE SOUZA E S, DIAS Y N, DA COSTA H S C, et al. Organic residues and biochar to immobilize potentially toxic elements in soil from a gold mine in the Amazon[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 169:425–434.
- [11] CHANEY R L, MALIK M, LI Y M, et al. Phytoremediation of soil metals[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 1997, 8(3):279–284.
- [12] MA Y, RAJKUMAR, M MORENO, et al. Serpentine endophytic bacterium *Pseudomonas azotoformans* ASS1 accelerates phytoremediation of soil metals under drought stress[J]. *Chemosphere*, 2017, 185:75–85.
- [13] BIAN X G, CUI J, TANG B P, et al. Chelant-induced phytoextraction of heavy metals from contaminated soils: a review[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2018, 27(6):2417–2424.
- [14] TAO R H, HU J Y, CAO C, et al. Effect of LMWOAs on maize remediation of cadmium and plumbum pollution in farmland[J]. *Sustainability*, 2022, 14(21):14580.
- [15] EVANGELOU M W H, EBEL M, SCHAEFFER A. Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil. Effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents[J]. *Chemosphere*, 2007, 68(6):989–1003.
- [16] JALALI M, KHANLARI Z V. Redistribution of fractions of zinc, cadmium, nickel, copper, and lead in contaminated calcareous soils treated with EDTA[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, 53:519–532.
- [17] MEERS E, TACK F M G, VERLOO M G. Degradability of ethylenediaminedisuccinic acid (EDDS) in metal contaminated soils: implications for its use soil remediation[J]. *Chemosphere*, 2008, 70(3):358–363.
- [18] KO C H, CHEN P J, CHEN S H, et al. Extraction of chromium, copper, and arsenic from CCA-treated wood using biodegradable chelating agents[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(5):1528–1531.
- [19] 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, 263:121491.
- [20] DALVI A A, BHALERAO S A. Response of plants towards heavy metal toxicity: an overview of avoidance, tolerance and uptake mechanism [J]. *Annals of Plant Sciences*, 2013, 2(9):362–368.
- [21] 方治国, 谢俊婷, 杨青, 等. 低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制[J]. 环境科学, 2022, 43(10):4669–4678. FANG Z G, XIE J T, YANG Q, et al. Role and mechanism of low molecular-weight-organic acids in enhanced phytoremediation of heavy metal contaminated soil[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(10):4669–4678.
- [22] 张宁, 陶荣浩, 张慧敏, 等. 不同玉米品种对镉积累和转运差异研究[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6):1208–1216. ZHANG N, TAO R H, ZHANG H M, et al. Differences in cadmium accumulation and translocation in different varieties of *Zea mays*[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(6):1208–1216.
- [23] 邓婷, 吴家龙, 卢维盛, 等. 不同玉米品种对土壤镉富集和转运的差异性[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6):1265–1271. DENG T, WU J L, LU W S, et al. Differences in cadmium accumulation and translocation in different *Zea mays* cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6):1265–1271.
- [24] 胡婧怡, 陶荣浩, 周晓天, 等. 硅和硒肥叶面调控对水稻镉铅吸收积累的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(6):1308–1318. HU J Y, TAO R H, ZHOU X T, et al. Effects of silicon and selenium fertilizer on Cd and Pb uptake and accumulation in rice[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(6):1308–1318.
- [25] 李茂林, 陈喆, 周红燕, 等. 天然有机酸强化伴矿景天提取镉的潜力与机制[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4):774–784. LI M L, CHEN Z, ZHOU H Y, et al. Cadmium remediation efficiency and mechanism of enhanced phytoextraction by *Sedum plumbizincicola* with natural organic acids[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(4):774–784.
- [26] 王沛琦, 胡学礼, 赵明辉, 等. 植物激素协同螯合剂对蓖麻修复 Cd 污染土壤的影响[J]. 西南农业学报, 2023, 36(2):241–247. WANG P Q, HU X L, ZHAO M H, et al. Effects of phytohormone and chelating agents on remediation of cadmium contaminated soil using *Ricinus communis* L. [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 36(2):241–247.
- [27] HU J Y, TAO R H, CAO C, et al. Effect of leaf surface regulation of zinc fertilizer on absorption of cadmium, plumbum and zinc in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Sustainability*, 2023, 15(3):1877.
- [28] SENGAR R S, GAUTAM M, SENGAR R S, et al. Lead stress effects on physiobiochemical activities of higher plants[J]. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 2008, 196:73–93.
- [29] CAO C, ZHANG N, TAO R H, et al. Screening for low-cadmium accumulation in maize varieties based on species sensitivity distribution and research on soil environmental thresholds[J]. *Agronomy*, 2023, 13(8):1960.
- [30] NARDI S, CONCHERI G, PIZZEGHELLO D, et al. Soil organic matter mobilization by root exudates[J]. *Chemosphere*, 2000, 41(5):653–658.
- [31] FARID M, ALI S, RIZWAN M, et al. Citric acid assisted phytoextraction of chromium by sunflower; morphophysiological and biochemical alterations in plants[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 145:90–102.
- [32] LI H, LIU Y, ZENG G, et al. Enhanced efficiency of cadmium removal by *Boehmeria nivea* (L.) Gaud. in the presence of exogenous citric and oxalic acids[J]. *Journal of Environmental Science (China)*, 2014, 26(12):2508–2516.

- [33] TAO Q, ZHAO J, LI J, et al. Unique root exudate tartaric acid enhanced cadmium mobilization and uptake in Cd-hyperaccumulator *Sedum alfredii*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 383:121177.
- [34] 许伟伟, 李方洲, 任静华, 等. 活化剂与植物联合修复Cd污染土壤的田间研究[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(7):126-130. XU W W, LI F Z, REN J H, et al. Enhanced phytoextraction for contaminated soil with Cd by cole (*Brassica napus* L.) in field-based research[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42(7):126-130.
- [35] LI Y Q, WANG Y J, KHAN M A, et al. Effect of plant extracts and citric acid on phytoremediation of metal-contaminated soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 211:111902.
- [36] WANG H, WANG Y, YANG Y. Effects of exogenous phenolic acids on roots of poplar hydroponic cuttings[J]. *IEEE*, 2011, 9:7836-7840.
- [37] 鲍广灵, 陶荣浩, 张慧敏, 等. 硫铁矿污染土壤镉铅高富集蓖麻品种筛选[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(12):2693-2703. BAO G L, TAO R H, ZHANG H M, et al. Screening of castor beans with high cadmium and lead enrichment from contaminated soils in a pyrite mining area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(12):2693-2703.
- [38] TANWIR K, AKRAM M S, MASOOD S, et al. Cadmium-induced rhizospheric pH dynamics modulated nutrient acquisition and physiological attributes of maize (*Zea mays* L.)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(12):9193-9203.
- [39] ANTONKIEWICZ J, KOLODZIEJ B, BIELINSKA E J, et al. Using *Jerusalem artichoke* to extract heavy metals from municipal sewage sludge amended soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 27:513-527.
- [40] EVANGELOU M W, EBEL M, SCHAEFFER A. Evaluation of the effect of small organic acids on phytoextraction of Cu and Pb from soil with tobacco *Nicotiana tabacum*[J]. *Chemosphere*, 2006, 63(6):996-1004.
- [41] 寇乐勇, 赵宽, 操璟璟, 等. 低分子量有机酸提取土壤中部分重金属的拟合模型研究[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(7):2260-2268. KOU L Y, ZHAO K, CAO J J, et al. The fitting model of low molecular weight organic acids extracts heavy metals in soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(7):2260-2268.
- [42] HUANG R, DONG M, 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, 721:137581.
- [43] 樊玉, 庄重, 赵丽洁, 等. 不同玉米品种苗期对镉及营养元素的吸收转运特性[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(4):744-753. FAN Y, ZHUANG Z, ZHAO L J, et al. Uptake and transport characteristics of cadmium and nutrients in different varieties of maize (*Zea mays*) at seedling stage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(4):744-753.
- [44] 秦榕璘, 李元, 祖艳群, 等. 不同基因型玉米品种对Pb的富集特征[J]. *农业资源与环境学报*, 2016, 33(3):268-275. QIN R L, LI Y, ZU Y Q, et al. Accumulation characteristics of Pb by *Zea Mays* of different genotypes[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(3):268-275.
- [45] 杜彩艳, 余小芬, 杜建磊, 等. 不同玉米品种对Cd、Pb、As积累与转运的差异研究[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(9):1867-1875. DU C Y, YU X F, DU J L, et al. Variety difference of Cd, Pb and As accumulation and translocation in different varieties of *Zea mays*[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(9):1867-1875.