

不同叶面阻控剂对玉米Cd、Pb积累与转运差异研究

刘奇, 王晟, 赵炫越, 陈文, 包立, 张乃明

引用本文:

刘奇, 王晟, 赵炫越, 陈文, 包立, 张乃明. 不同叶面阻控剂对玉米Cd、Pb积累与转运差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(6): 1247–1256.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1291>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

施加钝化剂及叶面肥对大田小麦-玉米轮作Cd吸收转运的影响

曹阳, 李撑娟, 王辉, 代允超, 孙本华, 张东明, 王晓晶, 吕家珑

农业环境科学学报. 2023, 42(2): 319–326 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0730>

植保无人机喷施锌锰型水稻降Cd叶面阻控剂的飞行参数研究

隆志方, 黄蕊, 王继红, 刘翔, 刘贵阳

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 1869–1876 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0861>

不同钝化剂及其组合对玉米(*Zea mays*)生长和吸收Pb Cd As Zn影响研究

杜彩艳, 木霖, 王红华, 严婷婷, 程在全, 曾民, 段宗颜, 雷梅, 罗红梅

农业环境科学学报. 2016, 35(8): 1515–1522 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0579>

重金属阻控菌剂的制备及其减少生菜吸收Cd和Pb的作用

寇凤莲, 郑金伟, 郑英敏, 贺卓, 盛下放, 何琳燕

农业环境科学学报. 2022, 41(1): 36–45 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0487>

不同玉米(*Zeamays*)品种对镉锌积累与转运的差异研究

杜彩艳, 张乃明, 雷宝坤, 胡万里, 付斌, 陈安强, 毛妍婷, 木霖, 王红华, 严婷婷, 段宗颜, 雷梅

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 16–23 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0872>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘奇, 王晟, 赵炫越, 等. 不同叶面阻控剂对玉米Cd、Pb积累与转运差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(6): 1247-1256.

LIU Q, WANG S, ZHAO X Y, et al. Differences in foliar inhibitor effects on Cd and Pb accumulation and transport in corn[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(6): 1247-1256.

不同叶面阻控剂对玉米Cd、Pb积累与转运差异研究

刘奇^{1,2}, 王晟^{2,3}, 赵炫越^{1,2}, 陈文^{1,2}, 包立^{1,2}, 张乃明^{1,2*}

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 云南省土壤培肥与污染修复工程研究中心, 昆明 650201; 3. 云南农业大学植物保护学院, 昆明 650201)

摘要:为探究不同类型叶面阻控剂对玉米吸收Cd、Pb的阻控效果,实现重金属污染耕地农作物的安全生产,以“华兴单88”为供试玉米,采用田间试验方法,设置8个处理:对照(CK)、YZ-1、YZ-2、YZ-3、YZ-4、降镉灵(JGL)、喷喷富(PPF)和万物生(WWS),研究不同处理玉米生物性状和各部位Cd、Pb富集及转运系数的差异性。结果表明:7种叶面阻控剂处理下,产量相较CK提高了4.8%~30.4%,增产能力表现为WWS<PPF<JGL<YZ-1<YZ-2<YZ-4<YZ-3;供试玉米各部位Cd、Pb含量与富集系数均表现为籽粒<棒芯<茎部<叶部<根部;7种叶面阻控剂处理下,相较于CK,玉米籽粒Cd、Pb含量分别降低了13.9%~69.4%、16.7%~55.6%,玉米籽粒Cd、Pb富集系数分别降低了14.5%~70.8%、11.5%~49.8%,不同处理下供试玉米籽粒Cd、Pb含量与富集系数均表现为CK>WWS>PPF>YZ-4>YZ-3>JGL>YZ-2>YZ-1;供试玉米各部位Cd、Pb转运系数均表现为根部-茎部<茎部-棒芯<棒芯-籽粒<茎部-叶部。通过田间试验证明,供试的7种叶面阻控剂对玉米籽粒的Cd、Pb阻控效果表现为YZ-1>YZ-2>JGL>YZ-3>YZ-4>PPF>WWS。本试验条件下,YZ-3作为增产效果最好的叶面阻控剂,建议在Cd轻中度污染的玉米产区推广使用;YZ-1作为Cd、Pb阻控效果最好且成本最低的叶面阻控剂,建议在Cd重度污染的玉米主产区推广使用。

关键词:叶面阻控剂;玉米;Cd;Pb;积累;转运

中图分类号:X173 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)06-1247-10 doi:10.11654/jaes.2022-1291

Differences in foliar inhibitor effects on Cd and Pb accumulation and transport in corn

LIU Qi^{1,2}, WANG Sheng^{2,3}, ZHAO Xuanyue^{1,2}, CHEN Wen^{1,2}, BAO Li^{1,2}, ZHANG Naiming^{1,2*}

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Yunnan Soil Fertilizer and Pollution Repair Engineering Research Center, Kunming 650201, China; 3. College of Plant Protection, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of different types of foliar inhibitors on Cd and Pb uptake in corn and to achieve safe production of crops in heavy metal-contaminated land. Eight treatments were set up in a field experiment, with "Huaxing dan 88" cultivated variety as the test corn: control(CK), YZ-1, YZ-2, YZ-3, YZ-4, cadmium reduction spirit(JGL), PPF and WWS, to investigate the differences in biological traits, as well as Cd and Pb enrichment and transport coefficients in different parts of corn. The results showed that the yield increased by 4.8%~30.4% under the seven types of foliar inhibitors, compared with CK, showing the following trend: WWS < PPF < JGL < YZ-1 < YZ-2 < YZ-4 < YZ-3. The Cd and Pb contents and enrichment coefficients of each part of the test corn were seed < cob < stalk < leaf < root. The Cd and Pb contents and enrichment coefficients of corn seeds were lower than those of CK. Compared with CK, the Cd and Pb contents in corn seeds decreased by 13.9%~69.4% and 16.7%~55.6%, respectively, and the enrichment coefficients of

收稿日期:2022-12-21 录用日期:2023-02-08

作者简介:刘奇(1996—),男,吉林长春人,硕士研究生,研究方向为农业环境保护和土壤重金属污染修复。E-mail:liuqi6766@163.com

*通信作者:张乃明 E-mail:zhangnaiming@sina.com

基金项目:国家自然科学基金联合基金项目(U2002210);云南省重大科技专项(202002AE32005)

Project supported: The Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China(U2002210); The Special Fund for Key Program of Science and Technology of Yunnan Province, China(202002AE32005)

Cd and Pb decreased by 14.5%–70.8% and 11.5%–49.8%, respectively, under the treatment of 7 foliar inhibitors, following the trend of CK > WWS > PPF > YZ-4 > YZ-3 > JGL > YZ-2 > YZ-1. The transport coefficients of each part of the test corn ranked as root-stalk < stalk-cob < cob-seed < stalk-leaf. The field tests ranked the Cd and Pb control effects of the seven tested foliar inhibitors as YZ-1 > YZ-2 > JGL > YZ-3 > YZ-4 > PPF > WWS. Under the conditions of this test, YZ-3 is the best foliar inhibitor for yield increase, and its use is recommended in corn production areas with light to moderate Cd pollution. YZ-1 is the best foliar inhibitor for Cd and Pb control, and it also has the lowest cost. YZ-1, as the best and cheapest foliar inhibitor for Cd and Pb control, is recommended for use in the main corn producing areas with heavy Cd pollution.

Keywords: foliar inhibitor; corn; Cd; Pb; accumulation; translocation

近年来,随着我国工业化、城市化进程不断加快以及农药化肥的不合理施用,每年都有大量的重金属通过灌溉、大气沉降等途径转移到土壤中^[1-3]。土壤是保障人类生存和发展的重要资源,由于我国人均耕地面积较少,大部分受重金属污染的土壤仍用于农业生产^[4]。土壤中重金属会被农作物富集,通过食物链最终危害人体健康^[5]。因此,在重金属污染耕地上生产安全可食用的农产品,具有重要的现实意义与推广价值^[6]。

耕地土壤重金属污染具有隐蔽性、多源性和持久性等特点,重金属进入作物体内会破坏其叶绿体结构,使叶绿素含量降低,从而抑制作物光合作用导致其生长发育受到影响^[7]。影响农作物吸收与积累重金属的因素众多,目前控制重金属向食物链中转移主要有两种途径,一是筛选出对重金属有耐受性且积累量低的农作物品种^[8],二是通过化学方法抑制农作物从土壤吸收积累重金属到可食用部位。随着土壤重金属污染及粮食安全的社会关注度日益高涨,相应的技术调控措施也得到广泛的研究,在一些中重度污染耕地上,仅仅依靠品种筛选很难实现农产品安全生产,因此成本相对较低的施用土壤钝化剂和喷施叶面阻控剂等技术得到广泛应用^[9-10]。相较于施用土壤钝化剂,喷施叶面阻控剂具有操作简单、成本低、易推广等特点。前人研究表明,在土壤重金属复合污染条件下,叶面施用纳米硅肥后水稻籽粒中Cd和Pb的吸收量显著降低^[11]。于焕云等^[12]在三地开展4年田间试验结果表明,施用一定量的降镉灵,在不同污染程度耕地上种植的稻米,Cd含量降低38%~43%。尹炳等^[13]和熊仕娟等^[14]发现硒可作为重金属抑制剂用于降低玉米和黄瓜中的Cd含量。Wang等^[15]在Cd、Pb污染土壤上种植的水稻,相较于CK,叶面喷施Si、Se复合溶胶的水稻籽粒和叶片中Cd、Pb含量显著降低。詹旭芳等^[16]通过两年的田间试验发现,在Cd污染土壤上通过叶面喷施降镉灵后,玉米籽粒Cd含量有显著下降。

目前有关叶面喷施阻控重金属技术的系统研究主要应用在水稻与蔬菜等作物,关于玉米的叶面阻控剂报道多为Si、Se或二者复合成分对其影响,涉及的重金属以Cd为主。由于不同作物对重金属的响应机制存在差异,不能依据单一作物结果广泛应用于其他农作物^[17]。因此,本研究选取7种类型叶面阻控剂,以田间试验的方式使用同一品种的玉米进行叶面阻控剂喷施试验,探究不同类型叶面阻控剂在相同玉米品种间生物性状以及各部位Cd、Pb的富集与转运差异,以期筛选出针对玉米增产及降低重金属超标风险效果最好的叶面阻控剂,为受Cd、Pb污染耕地玉米安全利用提供科学依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

田间试验地点位于云南省宣威市热水镇格依村(26°03'16"N, 103°50'42"E),地处滇东山地高原区,属喀斯特地貌,土壤类型为红壤。土壤pH值为6.50±0.36,有机质含量为17.25±0.70 g·kg⁻¹,碱解氮含量为218.98±26.28 mg·kg⁻¹,有效磷含量为12.56±5.84 mg·kg⁻¹,速效钾含量为496.67±124.33 mg·kg⁻¹,全Cd含量为2.16±0.04 mg·kg⁻¹,有效Cd含量为0.26±0.04 mg·kg⁻¹,全Pb含量为81.34±4.10 mg·kg⁻¹,有效Pb含量为4.85±0.53 mg·kg⁻¹,根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),试验地土壤Cd含量超过了农用地土壤重金属污染风险管制值,存在Cd超标的情况。

1.2 供试材料

供试玉米品种为云南省主栽杂交品种“华兴单88”(滇审玉米2015018),亲本关系为:ZH08×QR273。供试的叶面阻控剂分别为:YZ-1、YZ-2、YZ-3和YZ-4,由云南农业大学云南省土壤培肥与污染修复工程研究中心自行研制,主成分分别为P+K、腐植酸+B、腐植酸+B+Zn和Ca+Mg,每公顷喷施总成本(以无人

机单次喷施为例,下同)分别为600、750、900元和900元;降镉灵(JGL)和喷喷富(PPF),由佛山市铁人环保科技有限公司提供,主要成分分别为纳米有机硅溶胶和壳聚糖硒+二氧化硅溶胶,每公顷喷施总成本分别为1 000元和1 500元;万物生(WWS),由万物生生物科技控股有限公司提供,主成分含植物干细胞、有效活菌、有益微生物菌群的有机叶面肥,每公顷喷施总成本为1 200元。

1.3 试验设计

试验面积约2 500 m²,地势平坦,所有小区均采用随机区组的排列方式,共设置8个处理,每个处理重复3次,共24个小区。每个试验小区规格为长11 m,宽9 m,面积99 m²,根据当地种植习惯采用双行种植,行距55 cm,株距45 cm。试验地四周设置4行保护行,各小区之间筑坝隔开,以消除边际效应。每穴播3粒玉米种子,使种子入土2~3 cm,保持播种深度一致,玉米长出2片叶片时进行间苗,每穴留1株,各小区定株441株。叶面阻控剂YZ-1、YZ-2、YZ-3和YZ-4按每亩(667 m²)250 mL兑水至20 L喷施,稀释倍数为80倍;JGL和PPF按每亩500 mL兑水稀释至20 L喷施,稀释倍数为40倍;WWS按每亩350 mL兑水稀释至20 L喷施,稀释倍数约为57倍。叶面阻控剂共喷施2次,分别在玉米大喇叭口期和灌浆期进行喷施,避开雨天在下午5点使用背负式农用喷雾器进行人工喷施。玉米播种前按每亩75 kg撒施氮磷钾三元复合肥(15-15-15)作基肥,作物生长期按大田常规操作进行灌溉、除草和除虫等工作,拔节期按每亩追施尿素50 kg进行追肥。2021年4月底播种,同年10月初玉米成熟期取样并收获。

1.4 测定指标与方法

玉米成熟期时每个小区采集1个玉米植株样品和1个对应的土壤样品。土壤样品按5点采样法采集0~20 cm表层土壤,现场混匀为1个样品装入自封袋,带回实验室经室温避光风干后去除碎石和动植物残体等异物,用研钵研磨后过100目尼龙筛装袋待测。玉米植株样品按五点取样法每个小区采集5整株,带回实验室后将玉米植株样品分为根、茎、叶、棒芯和籽粒5部分,先用纯水冲洗后再用去离子水洗净,在105℃烘箱中杀青30 min后调至65℃烘干至质量恒定,测定干质量后使用粉碎机磨碎,过100目尼龙筛装袋待测。土壤理化性质测定参照国标方法和《土壤农化分析》^[18]进行测定。土壤Cd、Pb按照《土壤质量铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》(GB/

T17141—1997),植株Cd、Pb按照《食品安全国家标准 食品中镉的测定》(GB5009.15—2014)和《食品安全国家标准 食品中铅的测定》(GB5009.12—2017),使用原子吸收光度计(Hitachi Z-2000)测定。以国家标准参比物质土壤样品(GBW07405)和植物样品(GBW10012)进行质量控制,标准样品检测结果均在允许误差范围内。

1.5 统计分析

数据使用Excel和SPSS软件进行统计分析,使用Origin软件进行绘图,平均数的比较采用最小显著差数法(LSD),图表中的数据均采用平均值±标准差(M±SD)表示,差异显著水平为 $P<0.05$ 。

富集系数(BCF)是指作物不同组织中某元素的平均含量与土壤中该元素的平均含量之比,表示作物对土壤重金属的积累能力;转运系数(TF)是指作物上部某元素的平均含量与作物下部该元素的平均含量之比,表示作物将重金属从下部向上部运输的能力。

2 结果与讨论

2.1 叶面阻控剂对玉米生物量及性状的影响

表1表明,不同处理下供试玉米根部干质量、茎部干质量、叶部干质量、籽粒干质量、产量、茎粗以及叶面积均存在显著差异。不同处理玉米根部、茎部、叶部、棒芯、籽粒干质量平均值分别为15.0、90.3、77.3、65.4、244.8 g·株⁻¹,变异系数为8.71%~15.94%;不同处理玉米产量平均值为9 890.6 kg·hm⁻²,变异系数为8.71%,YZ-3、YZ-4、YZ-2、YZ-1、JGL、PPF和WWS相较于CK,产量分别提高了30.4%、24.4%、23.8%、20.3%、16.3%、11.1%和4.8%,表现为WWS<PPF<JGL<YZ-1<YZ-2<YZ-4<YZ-3;不同处理玉米株高、茎粗、叶面积平均值分别为225.4 cm、18.4 mm、697.2 cm²,变异系数为2.80%~15.43%。

本试验条件下,叶面阻控剂中所含的营养元素不仅可以及时矫正作物的缺素症状,高效补充作物所需的养分,同时还能弥补根系吸收不足,促进作物生长,供试的叶面阻控剂相较于CK,均具有增产效果,这与王世华等^[11]研究结果一致。YZ-3的增产效果最显著,可能是因为作物受到Cd胁迫时,Zn可以促进叶绿素合成相关基因和蛋白的表达^[19],抑制重金属对作物光合机构的损害^[20],这与李宇航等^[21]叶面喷施ZnSO₄可有效提高玉米叶绿素含量和籽粒产量的研究结果一致。

2.2 叶面阻控剂对玉米Cd、Pb含量及积累量的影响

表2表明,供试玉米各部位Cd含量以及积累量均存在差异。不同处理下供试玉米根部、茎部、叶部、棒芯、籽粒中Cd含量平均值分别为1.64、0.250、

0.676、0.051、0.021 mg·kg⁻¹,各部位Cd含量表现为籽粒<棒芯<茎部<叶部<根部,变异系数为21.17%~41.91%。YZ-1、YZ-2、JGL、YZ-3、YZ-4、PPF和WWS相较于CK,籽粒Cd含量分别降低了69.4%、63.9%、

表1 不同叶面阻控剂处理下玉米的生物量及性状

Table 1 Biomass and traits of corn under different foliar blocker treatments

处理	根部干质量/ (g·株 ⁻¹)	茎部干质量/ (g·株 ⁻¹)	叶部干质量/ (g·株 ⁻¹)	棒芯干质量/ (g·株 ⁻¹)	籽粒干质量/ (g·株 ⁻¹)	产量/ (kg·hm ⁻²)	株高/ cm	茎粗/ mm	叶面积/ cm ²
CK	11.3±0.5f	76.7±1.2b	69.4±1.6c	56.6±2.5a	210.3±4.5g	8 498.3±182.2g	220.5±5.5a	16.4±1.6c	595.4±78.4c
YZ-1	15.3±0.7cd	98.2±12.4a	79.9±2.5ab	68.6±6.5a	253.0±3.6c	10 222.2±145.7c	226.2±5.7a	18.2±1.6bc	718.1±84.1abc
YZ-2	15.7±0.7c	98.1±13.6a	82.1±10.2a	63.0±0.6a	260.3±4.5bc	10 518.5±182.2bc	227.5±5.7a	19.1±2.3ab	748.0±85.5abc
YZ-3	18.8±0.8a	95.5±11.4a	83.3±8.5a	72.4±6.6a	274.3±3.1a	11 084.2±123.4a	230.3±5.8a	20.6±1.7a	839.2±89.8a
YZ-4	17.1±0.8b	92.5±13.6ab	82.3±8.9a	72.5±4.9a	261.7±3.5b	10 572.4±141.9b	228.6±5.7a	19.4±2.9ab	769.8±86.7ab
JGL	14.9±0.7cd	94.5±4.9ab	78.5±2.7abc	63.2±13.7a	244.7±5.5d	9 885.5±222.5d	224.6±5.6a	18.0±2.6bc	668.6±81.9bc
PPF	14.4±0.6d	88.8±7.0ab	73.6±4.3abc	67.8±12.1a	233.7±6.1e	9 441.1±246.9e	223.3±5.6a	17.9±2.4bc	624.1±79.9bc
WWS	12.7±0.6e	81.4±3.4ab	70.1±1.4bc	58.9±14.1a	220.3±4.5f	8 902.4±182.2f	222.0±5.6a	17.7±1.1bc	614.9±79.4bc
平均值	15.0	90.3	77.3	65.4	244.8	9 890.6	225.4	18.4	697.2
变异系数	15.94%	12.14%	9.72%	14.40%	8.71%	8.71%	2.80%	12.72%	15.43%

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 lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at P<0.05, the same below.

表2 不同叶面阻控剂处理下玉米各部位Cd含量以及积累量

Table 2 Cd content and accumulation in various parts of corn under different foliar blocker treatments

处理	Cd含量/(mg·kg ⁻¹)				
	根部	茎部	叶部	棒芯	籽粒
CK	2.18±0.02a	0.338±0.002a	0.875±0.008a	0.084±0.002a	0.036±0.002a
YZ-1	0.79±0.01h	0.177±0.003h	0.506±0.004h	0.032±0.002g	0.011±0.002e
YZ-2	1.04±0.02g	0.203±0.002g	0.524±0.003g	0.036±0.001f	0.013±0.002de
YZ-3	1.71±0.02e	0.218±0.001e	0.616±0.004e	0.043±0.002e	0.016±0.003d
YZ-4	1.88±0.02d	0.237±0.002d	0.651±0.003d	0.047±0.002d	0.022±0.003c
JGL	1.60±0.02f	0.213±0.002f	0.572±0.003f	0.039±0.001f	0.015±0.002d
PPF	1.92±0.02c	0.294±0.003c	0.802±0.004c	0.051±0.002c	0.023±0.002c
WWS	1.99±0.01b	0.323±0.002b	0.861±0.003b	0.074±0.002b	0.031±0.002b
平均值	1.64	0.250	0.676	0.051	0.021
变异系数	28.17%	22.84%	21.17%	35.50%	41.91%

处理	Cd积累量/(mg·株 ⁻¹)				
	根部	茎部	叶部	棒芯	籽粒
CK	0.024 5±0.000 9c	0.025 9±0.000 4a	0.059 8±0.001 3a	0.004 8±0.000 1a	0.007 5±0.000 4a
YZ-1	0.012 1±0.000 7e	0.017 3±0.002 0c	0.040 4±0.001 3d	0.002 2±0.000 2d	0.002 7±0.000 4e
YZ-2	0.016 3±0.000 4d	0.019 9±0.002 6bc	0.043 0±0.005 3d	0.002 3±0.000 1d	0.003 3±0.000 3de
YZ-3	0.032 0±0.001 7a	0.020 8±0.002 4bc	0.051 4±0.005 5bc	0.003 1±0.002cd	0.004 3±0.000 6c
YZ-4	0.032 2±0.001 7a	0.021 9±0.003 3b	0.053 6±0.006 0ab	0.003 4±0.00 3c	0.005 8±0.000 9b
JGL	0.023 8±0.001 3c	0.019 5±0.001 1bc	0.044 9±0.001 4cd	0.002 4±0.000 6d	0.003 7±0.000 4cd
PPF	0.027 5±0.001 0b	0.026 1±0.002 0a	0.059 0±0.003 5a	0.003 5±0.000 7bc	0.005 4±0.000 3b
WWS	0.025 3±0.001 0c	0.026 2±0.001 1a	0.060 4±0.001 1a	0.004 3±0.000 9ab	0.006 7±0.000 2a
平均值	0.024 2	0.022 2	0.051 6	0.003 2	0.004 9
变异系数	28.00%	16.69%	16.00%	30.85%	34.60%

55.6%、38.9%、58.3%、36.1%、13.9%,表现为WWS>PPF>YZ-4>YZ-3>JGL>YZ-2>YZ-1。不同处理下供试玉米根部、茎部、叶部、棒芯、籽粒中Cd积累量平均值分别为0.024 2、0.022 2、0.051 6、0.003 2、0.004 9 mg·株⁻¹,变异系数为16.00%~34.60%。

表3表明,供试玉米各部位Pb含量以及积累量均存在差异。不同处理下供试玉米根部、茎部、叶部、棒芯、籽粒中Pb含量平均值分别为5.36、0.88、2.36、0.32、0.12 mg·kg⁻¹,各部位Pb含量表现为籽粒<棒芯<茎部<叶部<根部,变异系数为9.24%~36.62%。YZ-1、YZ-2、JGL、YZ-3、YZ-4、PPF和WWS相较于CK,籽粒Pb含量分别降低了55.6%、44.4%、33.3%、27.8%、38.9%、22.2%、16.7%,表现为WWS>PPF>YZ-4>YZ-3>JGL>YZ-2>YZ-1。不同处理下供试玉米根部、茎部、叶部、棒芯、籽粒中Pb积累量平均值分别为0.080、0.077、0.179、0.020、0.030 mg·株⁻¹,变异系数为13.69%~31.39%。

本试验所有处理中,玉米籽粒Cd、Pb含量均符合《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—

2022)的要求(Cd≤0.1 mg·kg⁻¹、Pb≤0.2 mg·kg⁻¹),所有处理玉米茎部、叶部和棒芯中Cd、Pb含量均符合《饲料卫生标准》(GB 13078—2017)的要求(Cd≤1.0 mg·kg⁻¹、Pb≤30.0 mg·kg⁻¹)。试验种植的玉米各部位均可用于农业生产,达到了“边生产,边修复”和受污染耕地安全利用的目的。

2.3 不同叶面阻控剂玉米籽粒中Cd、Pb含量的聚类分析

根据供试玉米籽粒中Cd、Pb含量对7种叶面阻控剂进行聚类分析,结果如图1所示,以Cd含量0.020 mg·kg⁻¹和Pb含量0.125 mg·kg⁻¹为基准,将YZ-1、YZ-2、YZ-3和JGL划分Ⅰ类,玉米籽粒中Cd、Pb含量分别为0.011~0.016 mg·kg⁻¹和0.08~0.12 mg·kg⁻¹;将YZ-4、PPF和WWS划分为Ⅱ类,玉米籽粒中Cd、Pb含量分别为0.022~0.031 mg·kg⁻¹和0.13~0.15 mg·kg⁻¹。

2.4 不同叶面阻控剂对玉米Cd、Pb富集系数的影响

不同处理下供试玉米各部位对土壤中Cd的富集系数如图2所示。供试玉米不同处理下根部、茎部、

表3 不同叶面阻控剂处理下玉米各部位Pb含量以及积累量

Table 3 Pb content and accumulation in various parts of corn under different foliar blocker treatments

处理	Pb 含量/(mg·kg ⁻¹)				
	根部	茎部	叶部	棒芯	籽粒
CK	6.20±0.03a	1.40±0.04a	3.63±0.07a	0.53±0.02a	0.18±0.01a
YZ-1	4.63±0.04g	0.45±0.02h	1.29±0.02h	0.19±0.01g	0.08±0.01f
YZ-2	4.86±0.03f	0.57±0.03g	1.47±0.08g	0.21±0.01g	0.10±0.01e
YZ-3	5.28±0.04d	0.71±0.02e	1.99±0.04e	0.28±0.01e	0.12±0.01cd
YZ-4	5.53±0.02c	0.95±0.01d	2.60±0.04d	0.32±0.01d	0.13±0.01c
JGL	5.03±0.04e	0.65±0.02f	1.75±0.04f	0.24±0.01f	0.11±0.01de
PPF	5.58±0.02c	1.07±0.02c	2.92±0.04c	0.36±0.01c	0.14±0.01b
WWS	5.81±0.04b	1.21±0.02b	3.24±0.03b	0.41±0.02b	0.15±0.01b
平均值	5.36	0.88	2.36	0.32	0.12
变异系数	9.24%	36.62%	34.99%	34.98	24.63%
处理	Pb 积累量/(mg·株 ⁻¹)				
	根部	茎部	叶部	棒芯	籽粒
CK	0.070±0.003c	0.108±0.003a	0.248±0.009a	0.030±0.001a	0.037±0.002a
YZ-1	0.071±0.004c	0.044±0.005d	0.103±0.004e	0.013±0.002d	0.020±0.002d
YZ-2	0.076±0.004bc	0.055±0.006cd	0.120±0.012de	0.013±0.001d	0.025±0.001c
YZ-3	0.099±0.005a	0.068±0.009c	0.165±0.015c	0.020±0.001bc	0.032±0.001b
YZ-4	0.095±0.004a	0.088±0.013b	0.214±0.026b	0.023±0.002b	0.033±0.001b
JGL	0.075±0.004bc	0.060±0.004c	0.138±0.005d	0.015±0.004cd	0.026±0.001c
PPF	0.080±0.003b	0.095±0.007b	0.215±0.014b	0.024±0.004b	0.033±0.002b
WWS	0.074±0.003bc	0.098±0.003ab	0.227±0.003ab	0.024±0.004b	0.034±0.001b
平均值	0.080	0.077	0.179	0.020	0.030
变异系数	13.69%	29.75%	29.77%	31.39%	18.58%

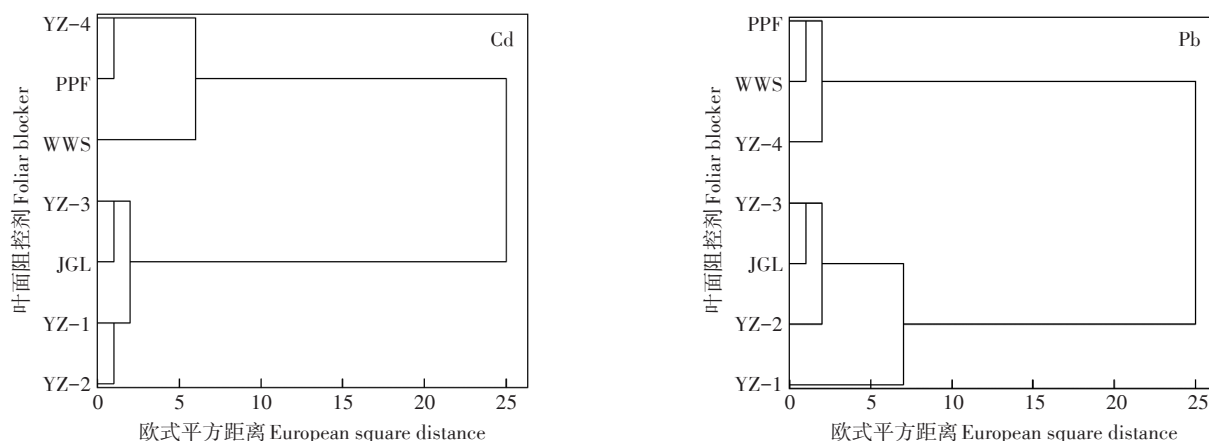


图1 不同叶面阻控剂处理下玉米籽粒Cd、Pb含量聚类分析

Figure 1 Cluster analysis of Cd and Pb content of corn seeds under different foliar blocker treatments

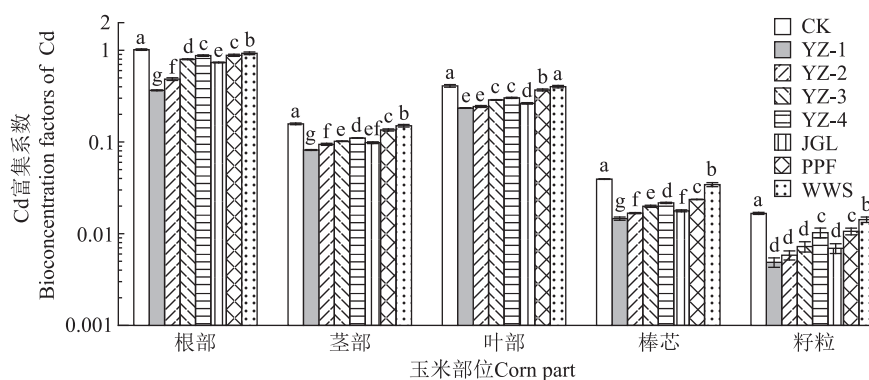
不同小写字母表示同一部位处理间差异显著($P < 0.05$), 下同。Different lowercase letters indicate significant differences between treatments for the same organ ($P < 0.05$), the same below.

图2 不同处理下供试玉米各部位Cd的富集系数

Figure 2 Bioconcentration factors of Cd in each part of the test corn under different treatments

叶部、棒芯、籽粒的Cd富集系数平均值分别为0.760、0.116、0.314、0.023、0.010,各部位Cd富集系数表现为籽粒<棒芯<茎部<叶部<根部,变异系数为21.0%~41.7%。不同处理下供试玉米各部位对Cd的富集能力均存在差异,除CK处理下根部富集系数大于1,其他处理下各部位Cd富集系数均小于1,说明在Cd污染耕地上,直接种植的玉米根部会产生超富集现象。YZ-1、YZ-2、JGL、YZ-3、YZ-4、PPF、WWS相较于CK,籽粒Cd富集系数分别降低了70.8%、65.0%、58.4%、56.5%、38.3%、36.3%、14.5%,表现为WWS>PPF>YZ-4>YZ-3>JGL>YZ-2>YZ-1,与聚类分析结果一致。

不同处理下供试玉米对土壤中Pb的富集系数如图3所示。不同处理下供试玉米根部、茎部、叶部、棒芯、籽粒的Pb富集系数平均值分别为0.066、0.011、0.029、0.004、0.002,各部位Pb富集系数表现为籽粒<棒芯<茎部<叶部<根部,变异系数为7.9%~34.2%。不

同处理下供试玉米各部位对Pb的富集能力均存在差异,供试玉米各部位所有处理的Pb富集系数均小于0.1,说明供试玉米各部位对Pb的吸收能力均处于较弱水平。YZ-1、YZ-2、JGL、YZ-3、YZ-4、PPF、WWS相较于CK,籽粒Pb富集系数分别降低了49.8%、42.9%、36.4%、35.7%、24.8%、15.3%、11.5%,表现为WWS>PPF>YZ-4>YZ-3>JGL>YZ-2>YZ-1,与聚类分析结果一致。

富集系数(BCF)是作物积累重金属的重要指标,可以解释为作物对重金属离子的吸收和富集能力^[22]。本试验中供试的玉米品种以及土壤、施肥等外界环境因素相同,不同处理间玉米各部位Cd、Pb积累能力主要受不同类型的叶面阻控剂影响。喷施叶面阻控剂,首先通过改变作物细胞膜对Cd²⁺、Pb²⁺的通透性,进而影响其在作物体内运输^[23-24],其次通过拮抗作用加大作物对营养元素的吸收,抑制含Cd、Pb的金属酶活性,从而降低作物的蒸腾效率以阻碍Cd、Pb的向上运

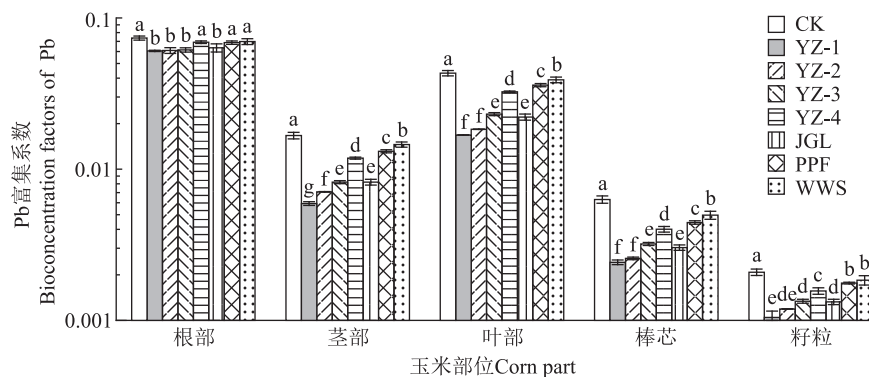


图3 不同处理下供试玉米各部位Pb的富集系数

Figure 3 Bioconcentration factors of Pb in each part of the test corn under different treatments

输^[25-26],最后通过促进抗氧化物质的形成,增加对 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 的吸附及螯合作用,进一步降低作物体内Cd、Pb的吸收累积^[27]。

钙镁磷肥和腐植酸是目前广泛使用的土壤钝化剂^[28-30],但将其主要成分改良为叶面阻控剂以叶面喷施的方式用于降低作物重金属含量还鲜有研究。矿质元素作为作物生长的必需元素,不仅能为作物生长发育提供必要的矿物质营养^[31],还能通过根系上的竞争性吸附和共沉淀来抑制作物吸收重金属^[29],同时对作物可食用部位富集的Cd、Pb还会产生一定的稀释效应^[32]。因此本研究团队以B、Mg、P、K、Ca、Zn等矿质元素和腐植酸作为主要成分,自制了4种叶面阻控剂:YZ-1(P+K)、YZ-2(腐植酸+B)、YZ-3(腐植酸+B+Zn)以及YZ-4(Ca+Mg)。试验结果表明,YZ-1、YZ-2、YZ-3、YZ-4相较于CK,供试玉米籽粒中Cd和Pb的富集系数分别降低了70.8%和49.8%、65.0%和42.9%、56.5%和35.7%、38.3%和24.8%,验证了4种配方的可行性。

JGL和PPF的主要成分分别为Si和Se+ SiO_2 。Si、Se常被认为是对作物生长有益的元素,特别是在重金属胁迫环境下^[33]。相关研究表明,Si、Se具有减少作物中重金属积累和减轻氧化应激的潜力^[34]。喷施含Si、Se的叶面阻控剂,可以通过调节根系吸收、木质部负荷、维管内转移和韧皮部对重金属的运输从而影响重金属在作物不同部位的分布^[35-36]。Si可以提高细胞壁对Cd、Pb的吸附固定能力,进而提高作物的抵抗能力,降低Cd、Pb向地上部位转运,从而抑制作物可食用部位对Cd、Pb的富集^[37-38]。Se可与重金属形成难溶复合物,清除重金属引起的自由基和改变细胞膜的透性来阻碍作物对重金属的吸收^[39]。安志装等^[40]研究发现,Se可移除作物代谢活跃细胞点位上的

重金属或改变作物细胞膜通透性来阻碍重金属转运。

2.5 不同叶面阻控剂对玉米Cd、Pb转运系数的影响

不同处理下供试玉米各部位Cd转运系数如图4所示,供试玉米各部位对Cd的转运系数均存在差异。供试玉米不同处理下根部-茎部、茎部-叶部、茎部-棒芯和棒芯-籽粒的Cd转运系数平均值分别为0.160、2.711、0.198和0.399,变异系数为3.6%~20.1%。供试玉米根部-茎部不同处理下Cd转运系数表现为 $\text{YZ-4} < \text{YZ-3} < \text{JGL} < \text{PPF} < \text{CK} < \text{WWS} < \text{YZ-2} < \text{YZ-1}$;茎部-叶部不同处理下Cd转运系数表现为 $\text{YZ-2} < \text{CK} < \text{WWS} < \text{JGL} < \text{PPF} < \text{YZ-4} < \text{YZ-3} < \text{YZ-1}$;茎部-棒芯不同处理下Cd转运系数表现为 $\text{PPF} < \text{YZ-2} < \text{YZ-1} < \text{JGL} < \text{YZ-3} < \text{YZ-4} < \text{WWS} < \text{CK}$;棒芯-籽粒不同处理下Cd转运系数均表现为 $\text{YZ-1} < \text{YZ-2} < \text{YZ-3} < \text{JGL} < \text{WWS} < \text{CK} < \text{PPF} < \text{YZ-4}$ 。

不同处理下供试玉米各部位Pb转运系数如图5所示,供试玉米各部位对Pb的转运系数均存在差异。供试玉米不同处理下根部-茎部、茎部-叶部、茎部-棒芯和棒芯-籽粒的Pb转运系数平均值分别为0.159、2.711、0.366和0.405,变异系数为3.4%~27.5%。供试玉米根部-茎部不同处理下Pb转运系数表现为 $\text{YZ-1} < \text{YZ-2} < \text{JGL} < \text{YZ-3} < \text{YZ-4} < \text{PPF} < \text{WWS} < \text{CK}$;茎部-叶部不同处理下Pb转运系数表现为 $\text{CK} < \text{YZ-2} < \text{WWS} < \text{JGL} < \text{PPF} < \text{YZ-4} < \text{YZ-3} < \text{YZ-1}$;茎部-棒芯不同处理下Pb转运系数表现为 $\text{PPF} < \text{YZ-4} < \text{WWS} < \text{YZ-2} < \text{JGL} < \text{CK} < \text{YZ-3} < \text{YZ-1}$;棒芯-籽粒不同处理下Pb转运系数表现为 $\text{CK} < \text{WWS} < \text{YZ-4} < \text{PPF} < \text{YZ-3} < \text{YZ-1} < \text{JGL} < \text{YZ-2}$ 。

转运系数(TF)是判断作物吸收、分配和转运重金属的一个重要指标^[41]。本研究使用的叶面阻控剂,富含大量作物生长必需的矿质元素以及Si、Se等有益

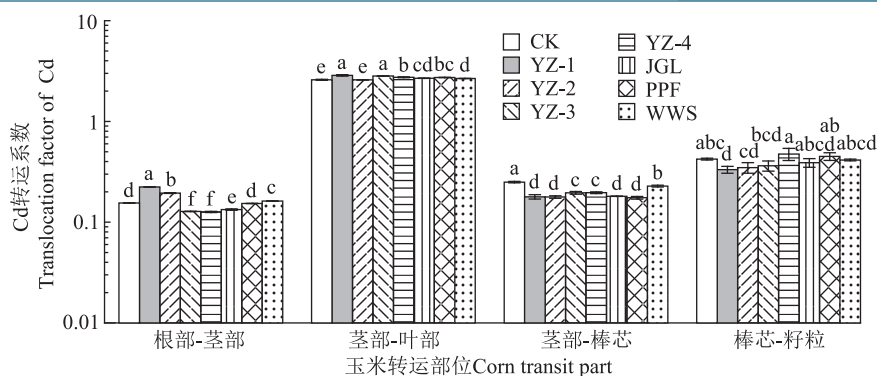


图4 不同处理下供试玉米各部位Cd的转运系数

Figure 4 Translocation factor of Cd in various parts of the test corn under different treatments

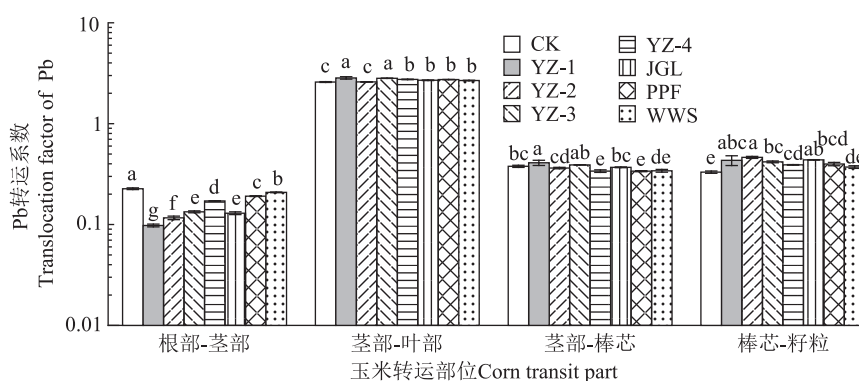


图5 不同处理下供试玉米各部位Pb的转运系数

Figure 5 Translocation factor of Pb in various parts of the test corn under different treatments

于作物生长的元素,喷施在作物叶面上可保湿、成膜,通过叶面直接吸收进入作物体内,不仅能促进作物吸收营养,还能增强其光合作用^[20,42],并能从调控茎叶分配、运输蛋白活性、竞争运输通道等方面抑制作物对重金属的吸收,改变重金属在作物体内的分配,抑制重金属由作物叶片向籽粒运输^[36]。本研究中,玉米各部位Cd、Pb转运系数均表现为根部-茎部<茎部-棒芯<棒芯-籽粒<茎部-叶部,供试玉米各部位Cd、Pb转运系数除茎部-叶部大于1外,其余各部位间Cd、Pb转运系数均小于1,并且叶面阻控剂处理下茎部-叶部的Cd、Pb平均转运系数高于CK,说明Cd、Pb在玉米体内转运过程中,倾向于向叶部富集,而叶面阻控剂的施用会促进这种效果,与王灿等^[36]研究结果一致。本试验YZ-1处理下茎部-叶部的Cd、Pb转运系数在所有处理中最大,YZ-3仅次于YZ-1。结合全文结果综合分析,YZ-1阻控Cd、Pb的效果最好,且成本最低;YZ-3阻控Cd、Pb的能力虽弱于YZ-1,但增产效果最好,且成本低廉。综上所述,YZ-3建议在Cd轻中度污染的玉米主产区推广使用,YZ-1建议在Cd重

度污染的玉米主产区推广使用。

3 结论

(1)通过田间试验证明,7种叶面阻控剂处理下,供试玉米各部位干质量以及株高、茎粗、叶面积等生物性状均高于CK,产量提高了4.8%~30.4%,增产能力表现为WWS<PPF<JGL<YZ-1<YZ-2<YZ-4<YZ-3。

(2)供试玉米各部位的Cd、Pb含量与富集系数均表现为籽粒<棒芯<茎部<叶部<根部;7种叶面阻控剂处理下,相较于CK,玉米籽粒Cd、Pb含量分别降低了13.9%~69.4%、16.7%~55.6%,玉米籽粒富集系数分别降低了14.5%~70.8%、11.5%~49.8%,不同处理下供试玉米籽粒Cd、Pb含量与富集系数均表现为CK>WWS>PPF>YZ-4>YZ-3>JGL>YZ-2>YZ-1。

(3)本试验条件下,YZ-3作为增产效果最好的叶面阻控剂,建议在Cd轻中度污染的玉米产区推广使用;YZ-1作为Cd、Pb阻控效果最好且成本最低的叶面阻控剂,建议在Cd重度污染的玉米主产区推广使用。

参考文献:

- [1] 冯爱煊, 贺红周, 李娜, 等. 基于多目标元素的重金属低积累水稻品种筛选及其吸收转运特征[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6): 988-1000. FENG A X, HE H Z, LI N, et al. Screening of rice varieties with low accumulation of heavy metals based on multiple target elements and their absorption and transport characteristics in rice plants [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(6): 988-1000.
- [2] HU Y, CHENG H, TAO S. The challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China: A critical review[J]. *Environment International*, 2016, 92-93: 515-532.
- [3] 袁鑫奇, 俞乃琪, 郭兆来, 等. 会泽铅锌矿区废弃地优势草本植物的重金属富集特征[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(3): 399-408. YUAN X Q, YU N Q, GUO Z L, et al. The accumulation characteristics of heavy metals in dominant herbaceous plants in the abandoned Pb-Zn mining area of Huize[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, 38(3): 399-408.
- [4] 王爽, 李荣华, 张增强, 等. 陕西潼关农田土壤及农作物重金属污染及潜在风险[J]. 中国环境科学, 2014, 34(9): 2313-2320. WANG S, LI R H, ZHANG Z Q, et al. Assessment of the heavy metal pollution and potential ecological hazardous in agricultural soils and crops of Tongguan, Shaanxi Province[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(9): 2313-2320.
- [5] 焦常锋, 常会庆, 王启震, 等. 碳酸钙和壳聚糖联用对高pH值石灰性土壤砷污染的钝化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 234-240. JIAO C F, CHANG H Q, WANG Q Z, et al. Combined use of calcium carbonate and chitosan to passivate arsenic pollution in high pH calcareous soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(11): 234-240.
- [6] 唐乐斌, 李龙, 宋波, 等. 基于大田试验的铅镉复合污染土壤中甜糯玉米低积累特性[J/OL]. 环境科学, 1-14[2022-12-15]. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202211135>. TANG L B, LI L, SONG B, et al. Low accumulation characteristics of sweet-waxy maize in Pb and Cd complex contaminated soils based on field trials[J/OL]. *Environmental Science*, 1-14[2022-12-15]. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202211135>.
- [7] VACULÍK M, PAVLOVIĆ A, LUX A. Silicon alleviates cadmium toxicity by enhanced photosynthetic rate and modified bundle sheath's cell chloroplasts ultrastructure in maize[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2015, 120: 66-73.
- [8] 杜彩艳, 张乃明, 雷宝坤, 等. 不同玉米(*Zea mays*)品种对镉锌积累与转运的差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 16-23. DU C Y, ZHANG N M, LEI B K, et al. Differences of cadmium and zinc accumulation and translocation in different varieties of *Zea mays* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(1): 16-23.
- [9] YANG Y J, CHEN J M, HUANG Q, et al. Can liming reduce cadmium (Cd) accumulation in rice (*Oryza sativa*) in slightly acidic soils? A contradictory dynamic equilibrium between Cd uptake capacity of roots and Cd immobilisation in soils[J]. *Chemosphere*, 2017, 193: 547-556.
- [10] 武超, 张兆吉, 费宇红, 等. 天津污灌区水稻土壤汞形态特征及其食品安全评估[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 207-212. WU C, ZHANG Z J, FEI Y H, et al. Characteristics of mercury form in soil-rice system and food security assessment in wastewater irrigated paddy fields of Tianjin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(18): 207-212.
- [11] 王世华, 罗群胜, 刘传平, 等. 叶面施硅对水稻籽实重金属积累的抑制效应[J]. 生态环境, 2007, 16(3): 875-878. WANG S H, LUO Q S, LIU C P, et al. Effects of leaf application of nanometer silicon to the accumulation of heavy metals in rice grains[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(3): 875-878.
- [12] 于焕云, 崔江虎, 乔江涛, 等. 稻田镉污染阻控原理与技术应用[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(7): 1418-1426. YU H Y, CUI J H, QIAO J T, et al. Principle and technology application of cadmium and arsenic pollution control in paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(7): 1418-1426.
- [13] 尹炳, 汪建飞, 师胜, 等. 矿业废弃地复垦土壤-作物硒吸收特征及其对重金属拮抗效应[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1904-1913. YIN B, WANG J F, SHI S, et al. Selenium uptake characteristics of reclaimed soil-crop from mining wasteland and its antagonistic effects on heavy metals[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(4): 1904-1913.
- [14] 熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 等. 外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 286-294. XIONG S J, LIU J, XU W H, et al. Effect of exogenous selenium on accumulation and chemical forms of cadmium in cucumber[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(1): 286-294.
- [15] WANG C R, HONG R, ZHANG X B, et al. Effects and mechanisms of foliar application of silicon and selenium composite sols on diminishing cadmium and lead translocation and affiliated physiological and biochemical responses in hybrid rice (*Oryza sativa* L.) exposed to cadmium and lead[J]. *Chemosphere*, 2020, 251: 136347.
- [16] 詹旭芳, 叶雨, 吴聪聪, 等. 土壤钝化剂与叶面阻控剂修复酸性镉污染土壤[J/OL]. 浙江师范大学学报(自然科学版): 1-9[2023-02-12]. <https://doi.org/10.16218/j.issn.1001-5051.2023.011>. ZHAN X F, YU Y, WU C C, et al. Remediation of cadmium-contaminated soil with low pH by soil passivator and foliar barrier agent[J/OL]. *Journal of Zhejiang Normal University(Natural Sciences)*: 1-9[2023-02-12]. <https://doi.org/10.16218/j.issn.1001-5051.2023.011>.
- [17] 焦位雄, 杨虎德, 冯丹妮, 等. Cd、Hg、Pb胁迫下不同作物可食部分重金属含量及累积特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1726-1733. JIAO W X, YANG H D, FENG D N, et al. Content and accumulation characteristics of heavy metals in edible parts of different crops under Cd, Hg and Pb stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9): 1726-1733.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3th Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [19] ZHANG J Y, WANG S F, SONG S H, et al. Transcriptomic and proteomic analyses reveal new insight into chlorophyll synthesis and chloroplast structure of maize leaves under zinc deficiency stress[J]. *Journal of Proteomics*, 2019, 199: 123-134.
- [20] SRIVASTAVA S, SHRIVASTAVA M. Zinc supplementation imparts tolerance to arsenite stress in *Hydrilla verticillate* (L.f.) Royle. [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2017, 19(4): 353-359.
- [21] 李宇航, 杜天庆, 龚芮, 等. 叶面喷锌对糯玉米生理特性、籽粒锌含量及产量的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49(10): 26-32. LI Y H, DU T Q, GONG R, et al. Effects of foliar application of zinc on

- physiological characteristics, grain Zn content and yield of waxy corn [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2020, 49(10): 26–32.
- [22] 管伟豆, 肖然, 李荣华, 等. 土壤镉污染北方小麦生产阈值及产区划分初探[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(5): 969–977. GUAN W D, XIAO R, LI R H, et al. Investigations on the derivation of a safe wheat-producing threshold of soil Cd content and classification of Cd contaminated wheat-producing areas in northern China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(5): 969–977.
- [23] 李虹颖, 唐杉, 王允青, 等. 硒对水稻镉含量及其在亚细胞中的分布的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(2): 320–326. LI H Y, TANG S, WANG Y Q, et al. Mechanism of Se on Cd content and sub-cell distribution in rice[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(2): 320–326.
- [24] 柴冠群, 刘桂华, 罗沐欣健, 等. 硒肥与钝化材料组配对土壤Cd钝化及稻米Cd消减效果[J]. 中国农学通报, 2021, 37(32): 102–107. CHAI G Q, LIU G H, LUO M X J, et al. Effect of selenium and passivator application on available cadmium passivation in soil and cadmium reduction in rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(32): 102–107.
- [25] BOLAN N S, ADRISNO D C, DURASAMY P, et al. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. III. Effect of biosolid compost addition[J]. *Plant and Soil*, 2003, 256(1): 23–241.
- [26] 曹阳, 李撑娟, 王辉, 等. 施加钝化剂及叶面肥对大田小麦-玉米轮作Cd吸收转运的影响[J/OL]. 农业环境科学学报: 1–13[2023–02–12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20221130.1048.004.html>. CAO Y, LI C J, WANG H, et al. Effects of passivating agents and foliar fertilizers on cadmium uptake and transport in wheat-maize rotation[J/OL]. *Journal of Agro-Environment Science*: 1–13[2023–02–12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1347.S.20221130.1048.004.html>.
- [27] 王意锟, 方升佐, 王玉军, 等. 改良剂对重金属复合污染土壤中菜用大豆品质及生理特性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(3): 87–92. WANG Y K, FANG S Z, WANG Y J, et al. Effects of amendments on quality and physiological characteristics of young soybean grown in soil contaminated by heavy metals in combination[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, 27(3): 87–92.
- [28] 谭骏, 潘丽萍, 黄雁飞, 等. 叶面阻隔联合土壤钝化对水稻镉吸收转运的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6): 981–987. TAN J, PAN L P, HUANG Y F, et al. Effects of foliar fertilizer and passivator application on cadmium accumulation and transport in rice [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(6): 981–987.
- [29] WANG G, ZHANG Q, DU W, et al. *In-situ* immobilization of cadmium-polluted upland soil: A ten-year field study[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 207(10): 111275.
- [30] 黄占斌, 郝文静, 冯泽坤, 等. 腐植酸在土壤改良和污染修复中的应用现状及研究展望[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 354–361, 376. HUANG Z B, HAO W J, FENG Z K, et al. Application situation and research prospects of humic acid in soil improvement and pollution remediation[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(2): 354–361, 376.
- [31] WANG Y M, TANG D D, YUAN X Y, et al. Effect of amendments on soil Cd sorption and trophic transfer of Cd and mineral nutrition along the food chain[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 189: 110045.
- [32] 曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 等. 钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 3434–3440. CAO K K, LI C C, HU X Y, et al. Effects of the immobilization of cadmium in soil alone or combined with foliar application of selenium on cadmium accumulation in the plants of different genotypes of tsai-tai[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(6): 3434–3440.
- [33] WU Z C, LIU S, ZHAO J, et al. Comparative responses to silicon and selenium in relation to antioxidant enzyme system and the glutathione-ascorbate cycle in flowering Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis*) under cadmium stress[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2017, 133: 1–11.
- [34] GAO M, ZHOU J, LIU H L, et al. Foliar spraying with silicon and selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 631/632: 1100–1108.
- [35] YUAN K, WANG C R, ZHANG C B, et al. Rice grains alleviate cadmium toxicity by expending glutamate and increasing manganese in the cadmium contaminated farmland[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 262: 114236.
- [36] 王灿, 付天岭, 龚思同, 等. 叶面阻控剂对黔中喀斯特地区水稻Cd富集特征的影响[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(9): 1710–1719. WANG C, FU T L, GONG S T, et al. Effects of foliar control agents on cadmium enrichment characteristics of rice in karst area in central Guizhou[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2021, 33(9): 1710–1719.
- [37] WAN Y, YU Y, WANG Q, et al. Cadmium uptake dynamics and translocation in rice seedling: Influence of different forms of selenium [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 133: 127–134.
- [38] LIN L, ZHOU W H, DAI H X, et al. Selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 235–236: 343–351.
- [39] FILEK M, KESKINEN R, HARTIKAINEN H, et al. The protective role of selenium in rape seedlings subjected to cadmium stress[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2008, 165(8): 833–844.
- [40] 安志装, 王校常, 严蔚东, 等. 镉硫交互处理对水稻吸收累积镉及其蛋白巯基含量的影响[J]. 土壤学报, 2004(5): 728–734. AN Z Z, WANG X C, YAN W D, et al. Effects of cadmium sulfur interaction on cadmium uptake and accumulation and protein sulfhydryl content in rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004(5): 728–734.
- [41] 高敏, 周俊, 刘海龙, 等. 叶面喷施硅硒联合水分管理对水稻镉吸收转运特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2): 215–222. GAO M, ZHOU J, LIU H L, et al. Effect of silica and selenite foliar sprays on the uptake and transport of cadmium by rice under water management[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(2): 215–222.
- [42] 邵粤鹰, 何腾兵, 陈小然, 等. 叶面喷施阻控剂对常淹水稻田水稻吸收转运镉的影响[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(6): 1248–1257. TAI Y Y, HE T B, CHEN X R, et al. Effects of foliar spraying inhibitor on uptake and translocation of cadmium in rice under flooded paddy field[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2022, 34(6): 1248–1257.

(责任编辑:叶飞)