

陈国皓, 祖艳群, 湛方栋, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(9): 2103–2110.

CHEN Guo-hao, ZU Yan-qun, ZHAN Fang-dong, et al. Effects of passivators on the growth and cadmium accumulation of intercropped maize and *Sedum plumbizincicola*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(9): 2103–2110.

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

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘 要:为了探讨玉米与伴矿景天间作与钝化剂处理对植株Cd吸收积累特征的影响,通过盆栽试验,将6种复配钝化剂[石海剂(LS)、石磷剂(LP)、石殖酸(LH)、海磷剂(SP)、海殖酸(SH)、磷殖酸(PH)]施用在Cd污染土壤中后种植玉米,间作超富集植物伴矿景天(*Sedum plumbizincicola*)进行研究。结果表明,玉米与伴矿景天间作与单作相比较,玉米单株生物量显著上升了12.2%~52.4%,玉米植株Cd含量显著降低了10.0%~38.9%,玉米Cd转运系数显著降低,伴矿景天单株生物量显著上升了20.3%~73.4%;两种种植模式中,石海剂处理下的玉米单株生物量最大,玉米茎叶中Cd含量最低,符合国家饲料卫生标准,玉米Cd累积量较对照显著降低;间作模式中,石海剂和石殖酸处理下,伴矿景天单株生物量和Cd累积量最大。石海剂+玉米与伴矿景天间作的联合修复模式可以运用在Cd污染农田土壤修复中达到边修复边生产的目的。

关键词: 镉;钝化剂;玉米;伴矿景天;间作

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)09-2103-08 doi:10.11654/jaes.2018-1446

Effects of passivators on the growth and cadmium accumulation of intercropped maize and *Sedum plumbizincicola*

CHEN Guo-hao, ZU Yan-qun*, ZHAN Fang-dong, LI Bo, LI Yuan

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: Pot experiments were conducted to study the effects of the application of six compounded passivating agents[LS (lime+sepiolite), LP (lime+calcium magnesium phosphate fertilizer), LH (lime+humic acid), SP (sepiolite+calcium magnesium phosphate fertilizer), SH (sepiolite+humic acid), PH (calcium magnesium phosphate fertilizer+humic acid)] on the growth and Cd accumulation of intercropped maize and *Sedum plumbizincicola* in Cd-contaminated soil. The biomass of intercropped maize was significantly higher (by 12.2%~52.4%), the Cd content of intercropped maize was significantly lower (by 10.0%~38.9%), and the Cd transport coefficient of intercropped maize was significantly lower than that with monocultured maize. The biomass of intercropped *S. plumbizincicola* was significantly higher (by 20.3%~73.4%) than that of monocultured *S. plumbizincicola*. Under the two planting systems, the biomass of maize treated with LS was the highest and the Cd content of maize shoots was the lowest; these met the criteria of national food hygiene standards. In the intercropping system with LS and LH treatments, the biomass and Cd accumulation of *S. plumbizincicola* were the highest. The model of LS treatment + intercropping of maize and *S. plumbizincicola* in heavily Cd-polluted soil could be used for agricultural production and soil remediation.

Keywords: cadmium, passivator; maize; *Sedum plumbizincicola*; intercropping system

收稿日期:2018-11-19 录用日期:2019-05-13

作者简介:陈国皓(1993—),男,四川达州人,硕士研究生,从事土壤污染修复研究。E-mail:347623451@qq.com

*通信作者:祖艳群 E-mail:649332092@qq.com

基金项目:国家污染耕地修复示范项目(YNBY2016-002);云南省重点研发项目(2018BB017);云南省农田无公害生产创新团队(2017HC015)

Project supported: The Soil Pollution Comprehensive Treatment Major Projects of Ministry of Environmental Protection (YNBY2016-002); The Yunnan Science and Technology Project(2018BB017); The Innovation Team for Farmland Non-pollution Production of Yunnan Province(2017HC015)

随着矿产资源的大量开发利用,工业生产的迅猛发展和各种化学产品、农药及化肥的广泛使用,重金属的污染物通过各种途径进入环境,造成土壤,尤其是农田土壤重金属污染日益严重^[1]。Cd具有强毒性、强迁移性,易被植物吸收并在植物体内累积,危害农作物生长和人体健康^[2]。因此,Cd污染农田土壤进行改良修复已成为土壤学和环境科学领域工作者研究的重点和热点。

目前国内关于植物修复Cd污染的研究已经开展了许多。植物修复的优点在于成本低、不破坏土壤结构、不引起二次污染等。但是单独用超富集植物修复污染土壤耗时长,采取低积累作物与超富集植物间作,有可能在修复污染土壤的同时收获符合卫生标准的饲料或其他产品,成为一种不需要间断农业生产、较经济合理的处理利用方法。近年来,围绕边生产边修复的理念,植物间作修复技术的研究越来越多,但结果却不尽相同。例如,能凤娇等^[3]研究发现芹菜与超积累植物伴矿景天间作可显著提高超积累植物伴矿景天修复镉污染土壤的效率;刘晨等^[4]研究发现毛竹与伴矿景天间作,与毛竹单作相比Cd转移系数降低了16.9%;李凝玉等^[5]研究7种作物与玉米间作后吸收重金属的结果发现,4种豆科作物大幅提高玉米对Cd的积累量,香青兰(*Dracocephalum moldavica* L.)和籽粒苋(*Amaranthus hypochondriacus* L.)则降低了玉米对Cd的积累。因此,探究适合的超富集植物与低积累作物间作对于植物间作修复技术尤为重要。

化学钝化修复技术通过向土壤中加入一种或多种物质,改变重金属在土壤中的存在形态,降低重金属对植物的危害^[6]。在众多修复技术中,原位化学钝化修复被认为是对重金属Cd污染农田土壤行之有效且成本较低的修复方法^[7]。多项研究显示石灰、海泡石、腐植酸和钙镁磷肥在Cd污染土壤修复上的效果显著。高译丹等^[8]发现施用石灰使土壤中交换性Cd含量降低17.8%~21.7%,土壤中Cd的生物有效性下降;王林等^[9]研究表明海泡石能明显降低土壤中可提取态以及水溶性Cd含量,显著降低Cd的生物有效性和迁移能力;柏宏成等^[10]发现施用腐植酸对土壤中的重金属Cd有较强的络合固定作用;钙镁磷肥能提高土壤的pH值,钝化土壤中重金属元素,降低其有效性,进而限制植物对重金属的吸收和富集^[11]。但有关石灰、海泡石、腐植酸和钙镁磷肥两两联合使用对Cd污染农田土壤的钝化修复效果的比较,目前研究还较少。本文通过室内盆栽试验研究了石灰等4种钝化

剂两两复配对Cd污染土壤的钝化修复效果。

伴矿景天(*S. plumbizincicola*)是近年发现的一种具有镉超积累能力的多年生景天科植物^[12]。由于供试土壤为Cd严重污染土壤,本研究采用了植物间作和化学钝化联合修复,在Cd重度污染土壤上施用6种钝化剂,种植玉米与伴矿景天,通过分析植株生长情况、植株不同部分Cd含量与土壤Cd有效态含量,筛选出钝化效果最佳的钝化剂及钝化剂+种植模式组合,探索在重度污染土壤上运用植物修复的可能性,为合理利用并修复Cd污染农田提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试植物包括超富集植物伴矿景天(*S. plumbizincicola*),由中国科学院南京土壤研究所提供幼苗和玉米品种会单4号(市场购买)。

试验在新井村试验大棚内进行,当地属于低纬山地季风气候,多年平均气温13.7℃,7月份气温最高,平均气温达25.5℃,1月份气温最低,平均气温3.4℃,年平均降水量为1002.4mm,集中在5月下旬至10月中旬。

供试土壤采自云南省怒江州兰坪县金顶镇新井村重金属污染农田土壤,土壤基本理化性质为:pH值6.42,有机质36.2g·kg⁻¹,全N1.31g·kg⁻¹,全P0.60g·kg⁻¹,全K24.7g·kg⁻¹,碱解N75.7mg·kg⁻¹,有效P71.9mg·kg⁻¹,速效K383mg·kg⁻¹,总Cd4.18mg·kg⁻¹。土壤总Cd已超过《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618—2018,2.00mg·kg⁻¹),为严重污染土壤,系周边冶炼厂长期污染造成。

供试土壤钝化剂有6种,分别为石海剂(LS)、石磷剂(LP)、石殖酸(LH)、海磷剂(SP)、海殖酸(SH)、磷殖酸(PH)[由石灰(Lime,L)、海泡石(Sepiolite,S)、腐植酸(Humic acid,H)、钙镁磷肥(Calcium magnesium phosphate fertilizer,P)两两复配而成]。海泡石购自湖南湘潭海泡石有限公司,石灰购自上海凌峰试剂有限公司,腐植酸购自西双版纳旺苍农业科技有限公司(有机质:89%),钙镁磷肥购自浙江农得惠肥业有限公司(P₂O₅:15%,CaO:45%,SiO₂:20%,MgO:12%)。供试土壤和4种钝化剂的pH及Cd浓度见表1。

1.2 试验设计和实施

试验包括单作(单作玉米、单作伴矿景天)和间作(玉米与伴矿景天)两种种植模式;土壤不施用钝化剂的为对照(CK),其余的分别施用6种复配钝化剂。每

表1 供试土壤与钝化剂的pH和Cd含量

Table 1 pH and Cd contents of test soil and passivating agent

钝化剂/土壤 Passivator/soil	pH	全Cd Cd full amount/mg·kg ⁻¹
土壤	5.94	4.18
海泡石	9.42	—
石灰	12.2	0.21
腐植酸	4.86	2.26
钙镁磷肥	9.89	—

种复配钝化剂的施用量见表2。

试验共设置7个单作玉米的处理(CK1、LS1、LP1、LH1、SP1、SH1、PH1),7个玉米与伴矿景天间作的处理(CK2、LS2、LP2、LH2、SP2、SH2、PH2),1个单作伴矿景天的处理(CK3),共15个处理,每个处理3次重复,共计45个样本,于泡沫箱(75 cm×35 m×20 cm)中进行。

称取30 kg过2 mm筛的风干土壤及对应的钝化剂,充分混合均匀,老化2周,放置于泡沫箱中。2017年5月1日在育苗盆中播种玉米种子(播种前用10%的H₂O₂消毒10 min)并喷施玉米杀虫剂(六夫丁);2017年5月15日,玉米幼苗高10~15 cm,向泡沫箱中移栽长势良好,大小均一的玉米苗(单作的每箱移栽2株、间作的移栽1株,株距30 cm),同时扦插大小、长势一致的伴矿景天幼苗(单作的扦插8株伴矿景天苗,行距和株距都为15 cm;间作的扦插4株伴矿景天苗,伴矿景天与玉米间作的行距15 cm)。每日浇水1次,以开始产生下渗水为限。2017年8月13日收获。

1.3 样品前处理、测定指标与方法

收获时先测定玉米株高。伴矿景天植株取地上部分,玉米植株分为根、茎、叶3部分,分别用自来水冲洗后,再用去离子水冲洗干净,沥干水后105℃下烘箱中杀青30 min,然后70℃烘干至恒质量,分别称量、记录干物质量。不锈钢粉碎机粉碎烘干样品、混匀,过0.25 mm筛后装袋备用。抖根法收集植物根际土壤

200 g,风干土壤,研磨过1 mm尼龙筛,装袋备用。

植物Cd含量的测定采用HNO₃-HClO₄消化,原子吸收分光光度计(Thermo Scientific ICE 3000,美国)测定;土壤有效态Cd含量用CaCl₂提取,原子吸收分光光度计(Thermo Scientific ICE 3000,美国)测定。

植物Cd、Pb累积特征用富集系数(Enrichment coefficient, EC)、转移因子(Transfer factor, TF)和生物转移因子(Biological transfer factor, BTF)表示^[13]:

富集系数(EC)=植物体内重金属含量(mg·kg⁻¹)/土壤中重金属含量(mg·kg⁻¹);

转移因子(TF)=植物地上部重金属含量(mg·kg⁻¹)/地下部重金属含量(mg·kg⁻¹);

生物转移因子(BTF)=[植物地上部重金属含量(mg·kg⁻¹)×地上部生物量(g)]/[根部重金属含量(mg·kg⁻¹)×根部生物量(g)]。

1.4 数据处理

数据采用Excel 2018进行常规分析;SPSS 16.0软件进行相关数据统计,运用单、双因素方差分析,并用最低显著性差异法(LSD)进行差异显著性分析($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 植株生长情况

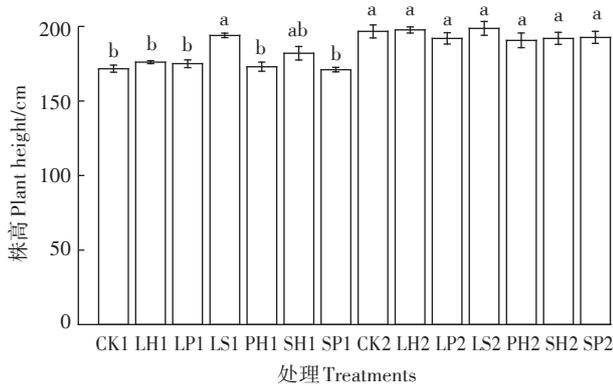
玉米单作模式下,与CK1相比,LS1处理玉米株高显著增加($P < 0.05$),且显著高于LH1、LP1、PH1、SP1处理($P < 0.05$)(图1);间作模式下,不同处理间玉米株高无显著差异($P > 0.05$)(图1)。除LS和SH钝化剂处理外,其余钝化剂处理间作玉米株高显著高于单作玉米($P < 0.05$)(图1)。

与单作伴矿景天相比,间作使伴矿景天单株地上部生物量显著提高($P < 0.05$)(图2),生物量增加幅度为20.3%~73.4%;其中LH2处理生物量最大,其次是LS2处理。由表3可见,从玉米各器官来看,不论是单作还是间作,在同一钝化剂处理下,玉米各器官的生

表2 复配钝化剂的理化性质和施用量

Table 2 Physicochemical properties and application rate of compound passivating agent

钝化剂 Passivator	全P Total P content/g·kg ⁻¹	pH值 pH value	有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	Cd含量 Cd content/g·kg ⁻¹	施用量 Application rate/g·kg ⁻¹
石海剂(LS)	—	9.67	—	0.02	11.55
石磷剂(LP)	26.28	11.26	—	0.13	1.75
石殖酸(LH)	—	5.53	809.09	2.08	11.55
海磷剂(SP)	9.42	8.45	—	—	11.20
海殖酸(SH)	—	7.14	445.00	1.13	21.00
磷殖酸(PH)	9.42	5.18	834.38	2.12	11.20



图中不同字母表示用LSD法测试时5%水平上的差异性显著。下同
The different letters in the figure indicate that the difference is significant at the 5% level when tested by the LSD method. The same below

图1 玉米株高

Figure 1 Plant height of maize

生物量均为茎>叶>根;同一钝化剂处理下单株玉米茎、叶的生物量均为间作>单作。单作时LS1处理单株玉米根、茎和叶的生物量最大,与对照相比分别增加了62.0%、54.1%和81.0%;间作时LS2和LP2处理单株玉米根、茎和叶的生物量最大。CK2处理玉米的生物量较CK1显著提高($P<0.05$)。

2.2 植物根际土壤的Cd有效态含量

单作玉米时,各个钝化剂处理玉米根际土壤Cd有效态含量较CK1有显著降低($P<0.05$),LS1处理玉米根际土壤Cd有效态含量最低。CK2较CK1玉米根际土壤Cd有效态含量显著降低($P<0.05$);LS2处理玉米根际土壤Cd有效态含量为 $0.093 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,低于其他钝化剂处理。相同钝化剂处理,间作时玉米根际土壤Cd有效态含量较单作时显著降低($P<0.05$)(图3)。间作时伴矿景天根际土壤中Cd有效态含量显著高于单作时($P<0.05$),增加幅度为13.0%~25.7%;SP2处理

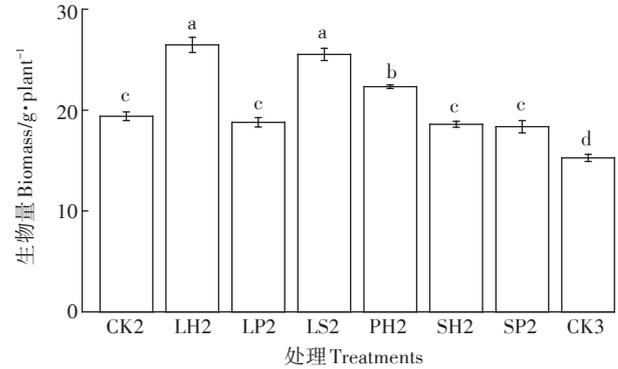


图2 伴矿景天地上部分生物量

Figure 2 Biomass of *S. plumbizincicola* shoots

Cd有效态含量显著高于LH2、LP2、SH2处理(图4)。

2.3 植物的Cd累积特征

单作玉米时,玉米根部Cd含量均比对照显著降低(表4);LP1、LS1和PH1处理玉米茎Cd含量较对照显著降低($P<0.05$),分别降低了29.3%、47.6%和41.5%;玉米叶Cd含量均比对照显著降低。玉米间作时,LS2、LP2、SP2和PH2处理玉米根部均比对照显著下降($P<0.05$);LP2、LS2、PH2和SP2处理玉米茎Cd含量较对照显著降低,分别降低了25.8%、53.2%、59.7%和30.6%;玉米叶Cd含量均比对照显著降低($P<0.05$)。同一钝化剂处理下,玉米根部、茎和叶Cd含量均为间作>单作。间作时伴矿景天地上部分Cd含量与单作无显著差异($P>0.05$)(图5);间作时,单株伴矿景天Cd累积量较单作显著升高(伴矿景天单作时其每泡沫箱Cd去除量最大),提高幅度13.1%~66.6%($P<0.05$),LS2和LH2处理Cd累积量显著高于其他钝化剂处理($P<0.05$)(图6)。SP1处理玉米Cd累积量显著低于CK1处理($P<0.05$),其他处理均显著高于

表3 玉米生物量($\text{g} \cdot \text{plant}^{-1} \text{ DW}$)

Table 3 Biomass of maize($\text{g} \cdot \text{plant}^{-1} \text{ DW}$)

处理 Treatments	单作玉米 Monocultured maize			处理 Treatments	间作玉米 Intercropping maize		
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf		根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
CK1	8.18±0.47b	54.60±0.98d	28.88±0.73f	CK2	6.27±0.50b	82.72±3.23c	49.26±2.12d
LH1	14.59±0.21a	56.52±1.32cd	31.71±1.04e	LH2	6.89±0.77b	91.05±2.23b	54.44±1.31b
LP1	14.55±0.46a	73.12±0.28b	37.11±0.72d	LP2	9.28±0.61a	101.37±1.91a	72.86±0.91a
LS1	13.25±0.39a	84.13±0.50a	52.26±1.09a	LS2	9.13±0.31a	99.77±1.46a	70.73±0.93a
PH1	13.31±0.96a	61.99±7.47cd	48.65±0.73b	PH2	7.20±0.33b	89.49±7.23bc	51.89±1.93c
SH1	9.57±0.59b	66.41±0.74bc	46.39±1.79c	SH2	6.8±0.457b	81.59±2.60c	48.83±0.50d
SP1	8.24±1.52b	53.60±4.59d	27.86±0.98f	SP2	6.50±0.36b	82.78±2.29c	47.45±0.69d

注:表中同列的不同字母表示用LSD法测试时5%水平上的差异性显著。下同。

Note: The different letters in the same column in the table indicate that the difference is significant at the 5% level when tested by the LSD method. The same below.

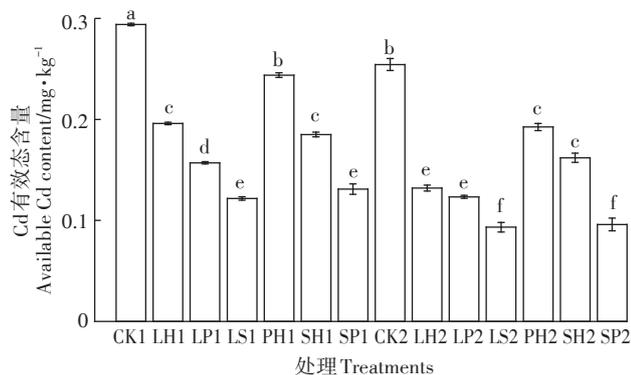


图3 玉米根际土壤的Cd有效态含量

Figure 3 Cd available content in maize rhizosphere soils

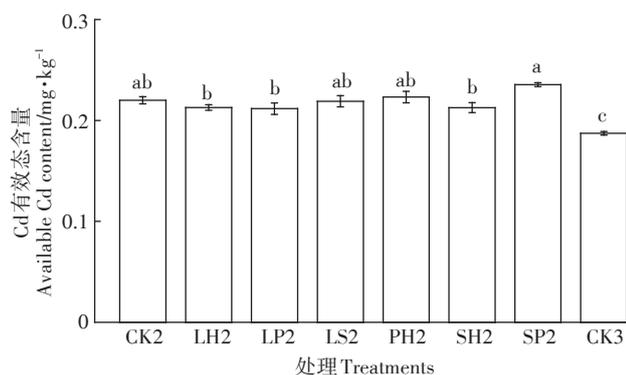


图4 伴矿景天根际土壤的Cd有效态含量

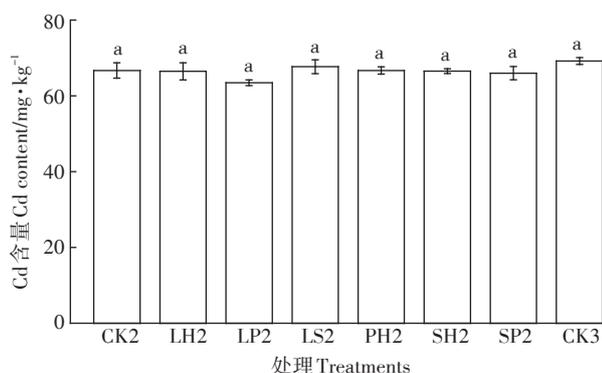
Figure 4 Cd available content in *S. plumbizincicola* rhizosphere soils

图5 伴矿景天地上部分的Cd含量

Figure 5 Cd contents in *S. plumbizincicola* shoots

CK1 处理 ($P < 0.05$); 间作条件下, LS2、PH2、SP2 处理玉米 Cd 累积量显著低于 CK2 处理 ($P < 0.05$), LH2 处理与 CK2 处理无显著差异性 ($P > 0.05$), 其他处理均显著高于 CK2 处理 ($P < 0.05$); LS2 处理较 LS1 处理单株玉米的 Cd 累积量显著下降 ($P < 0.05$), PH2 处理较 PH1 处理单株玉米的 Cd 累积量也显著下降 ($P < 0.05$), 分别降低 10.9%、28.9% (图 7)。

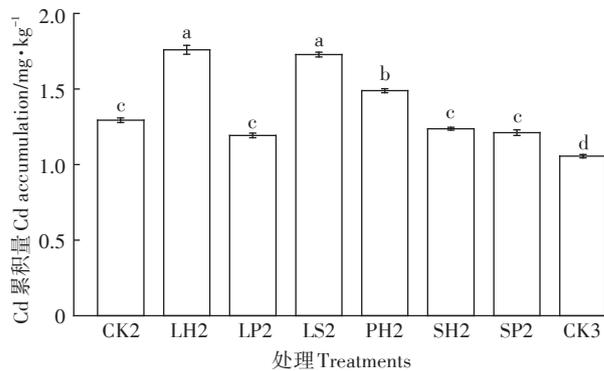


图6 伴矿景天地上部分的Cd累积量

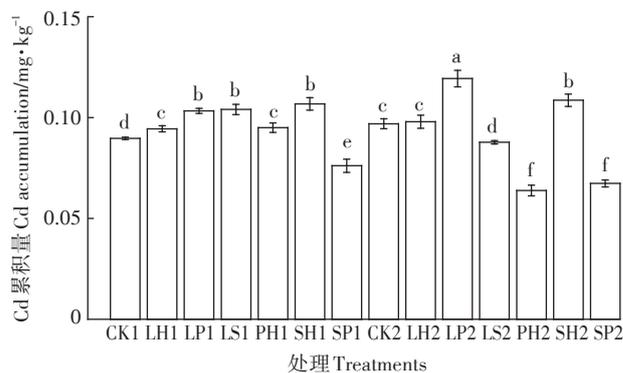
Figure 6 Cd accumulation rates of *S. plumbizincicola* shoots

图7 玉米的Cd累积量

Figure 7 Cd accumulation rates of maize

由表 4 可见, 与 CK1 相比, 单作玉米时钝化剂处理玉米根、茎、叶中 Cd 含量显著降低 ($P < 0.05$); LS1 处理玉米根、茎中的 Cd 含量最低, LH1 处理玉米叶中的 Cd 含量最低; LP1、LS1、PH1 和 SP1 处理 Cd 转运系数显著降低 ($P < 0.05$)。与 CK2 相比, 除 LH2 和 SH2 处理外, 其他间作处理玉米根、茎、叶器官的 Cd 含量均显著降低 ($P < 0.05$) 且 LS2 处理玉米器官中的 Cd 含量最低。CK2 处理玉米各器官中 Cd 含量相较 CK1 显著降低 ($P < 0.05$)。2 种植模式下, 钝化剂处理使玉米的 Cd 富集系数均显著低于对照 ($P < 0.05$); 同一钝化剂处理下, 玉米 Cd 富集系数单作 $>$ 间作。玉米茎、叶中 Cd 含量均低于 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 符合《饲料卫生标准》(GB 13078—2017)。

3 讨论

3.1 不同种植方式对植物生物量和吸收重金属的影响

伴矿景天与玉米间作适合于重金属污染土壤的修复, 间作后伴矿景天单株生物量提高了 20.3%~73.4%, 玉米单株生物量提高了 12.2%~52.4%。间作

表4 玉米的Cd含量及其累积特征

Table 4 Cd contents and accumulation characteristics of maize

处理 Treatments	Cd 含量 Cd content/mg·kg ⁻¹			Cd 累积特征 Cd accumulation characteristics		
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	EC/mS·cm ⁻¹	TF	BTF
CK1	2.21±0.10a	0.82±0.06a	0.93±0.01a	0.26a	0.42a	3.98d
LH1	1.77±0.10bc	0.81±0.02a	0.72±0.02d	0.21b	0.44a	2.67d
LP1	1.94±0.04b	0.58±0.05b	0.85±0.01b	0.20b	0.36b	2.63d
LS1	1.71±0.03c	0.43±0.05c	0.85±0.02b	0.16c	0.35b	3.56d
PH1	1.81±0.02bc	0.48±0.03c	0.85±0.03b	0.18b	0.35b	2.95d
SH1	1.80±0.04bc	0.73±0.07a	0.84±0.04b	0.20b	0.44a	5.20c
SP1	1.93±0.06b	0.72±0.04a	0.73±0.02d	0.20b	0.35b	3.42d
CK2	1.72±0.09c	0.62±0.03b	0.78±0.04c	0.19b	0.36b	8.04a
LH2	1.48±0.07d	0.60±0.07b	0.66±0.03e	0.16c	0.36b	9.03a
LP2	1.69±0.02c	0.46±0.03c	0.70±0.03d	0.16c	0.31c	6.60b
LS2	1.44±0.09d	0.29±0.01d	0.65±0.02e	0.12d	0.29c	5.68bc
PH2	1.34±0.02d	0.25±0.05d	0.71±0.03d	0.11d	0.28c	5.62bc
SH2	1.63±0.10c	0.70±0.05ab	0.73±0.01d	0.18b	0.36b	8.64a
SP2	1.35±0.17d	0.43±0.08c	0.65±0.04e	0.12d	0.30c	6.72b

显著促进了伴矿景天地上部分对Cd的吸收量,降低了玉米各器官中的Cd含量与玉米的有效转运系数。类似的研究支持这一研究结论,赵冰等^[14]研究表明小麦与伴矿景天间作显著提高了小麦单株秸秆和籽粒生物量($P<0.05$),伴矿景天/小麦间作可实现利用伴矿景天修复Zn、Cd污染土壤,达到边生产边修复的效果。其原因可能在于间作后的根际环境发生了变化,土壤pH值和土壤中Cd的生物有效性改变^[15]。促进超富集植物伴矿景天而降低低累积作物玉米对Cd吸收的机理可能是:伴矿景天与玉米间作时,由于养分竞争,伴矿景天和玉米分泌更多的根系分泌物来活化土壤中养分,而低分子有机酸是根系分泌物的主要成分^[16-17],低分子有机酸与Cd形成螯合物,并能降低植物根际pH,从而使土壤中Cd的生物有效性提高,根际土壤中活化的Cd被吸附到伴矿景天根部细胞表面,并进入到根部细胞和向地上部运输,使得间作伴矿景天对Cd的吸收量高于单作;因为伴矿景天和玉米间作在土壤中的根系交互作用,伴矿景天超强的吸Cd能力,使它能优先吸收土壤中的Cd,从而降低了玉米对Cd的吸收。蒋成爱等^[18]研究也表明,超富集植物与非超富集植物混作后,会显著提高超富集植物对专性重金属的吸收。间作后伴矿景天地上部分的Cd含量并没有显著差异,可能是间作后伴矿景天地上部分的生物量显著升高,产生了一定的稀释效应。

3.2 钝化剂对植物生物量和吸收重金属的影响

土壤pH值是影响重金属有效态的一个非常重要

的因素,控制着土壤中重金属的吸附-解析和沉淀-溶解等化学行为^[19]。钝化材料与土壤中的重金属相互作用,通过改善土壤理化性状(pH值等),降低土壤中重金属的生物有效性,抑制植物对重金属的吸收,减轻重金属对植物的毒害,从而使得植物的生物量增加^[20-21]。在本试验条件下,钝化剂处理下单作玉米Cd含量降低的原因与钝化剂的钝化机制有关。石灰为碱性材料,施入土壤后会使得土壤pH值明显上升,一方面,可增加土壤表面可变负电荷,增加对Cd²⁺的吸附;另一方面,可生成碳酸盐沉淀^[22],降低重金属的溶解性^[23]。同样海泡石具有较高的pH值(9.42),呈较强的碱性,导致土壤pH值升高^[24],促进土壤胶体和黏粒对重金属离子的吸附,有利于生成重金属的氢氧化物或碳酸盐沉淀,降低土壤重金属的生物有效性和可迁移性^[25]。钙镁磷肥是一种多元素肥料,水溶液呈碱性,添加磷肥能够大幅度提高土壤中速效磷的含量,TCLP(毒性淋溶提取法)提取态Cd含量会随土壤速效磷含量升高而显著降低^[26]。因此,钝化剂处理下玉米中的Cd含量会降低。由于试验中腐植酸的pH值呈酸性(4.86)且Cd含量较高,使得LH1、SH1、PH1处理下玉米根际土壤Cd有效态含量高于其他钝化处理;石磷剂的pH值(11.26)过高不利于玉米的生长;石海剂的pH值(9.67)较海磷剂的pH值(8.35)更高,在供试土壤为酸性的条件下更有利于土壤中Cd的钝化,改变土壤理化性质,从而给植物提供一个合适的生长环境。综上可见在间作条件下,不同钝化剂处理

下的植物生物量和Cd含量的差异,需要联合钝化剂与植物间作的根际交互作用对根际土壤环境的影响来进行阐释,其中机理有待进一步研究。

虽然单作伴矿景天对土壤Cd修复效率高于间作,但是综合分析来看,所有间作处理下玉米茎叶中Cd含量符合《饲料卫生标准》,收获的玉米秸秆可用做饲料。因此,从边修复边生产的角度来看,在本试验条件下石海剂处理+玉米/伴矿景天间作是一种可行的组合修复模式。

4 结论

(1)单作玉米时,石海剂处理下玉米根际土壤的Cd有效态含量和玉米根、茎中的Cd含量低于其他处理,玉米的生物量高于其他处理。在6种复配钝化剂中石海剂更适合用于Cd污染农田土壤的修复。

(2)间作条件下,玉米的单株生物量增加,根际土壤的Cd有效态含量降低,各器官中的Cd含量降低,且伴矿景天地上部分的Cd累积量增加,说明超富集植物伴矿景天适合与低累积作物玉米间作。

(3)间作条件下,石海剂处理玉米各器官中的Cd含量和累积量显著下降,伴矿景天地上部分的Cd累积量最大。从边修复边生产的角度来看,在本试验条件下石海剂处理+玉米与伴矿景天间作是一种可行的组合修复模式。

参考文献:

- [1] 樊霆,叶文玲,陈海燕,等. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(10):1727-1736.
FAN Ting, YE Wen-ling, CHEN Hai-yan, et al. Review on contamination and remediation technology of heavy metal in agricultural soil[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2013, 22(10):1727-1736.
- [2] 方琳娜,方正,钟豫,等. 土壤重金属镉污染状况及其防治措施:以湖南省为例[J]. 现代农业科技, 2016(7):212-213.
FANG Lin-na, FANG Zheng, ZHONG Yu, et al. Status and countermeasures of Cd-pollution in soil: Taking Hunan Province for example [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2016(7):212-213.
- [3] 能凤娇,吴龙华,刘鸿雁,等. 芹菜与伴矿景天间作对污泥农用镉污染土壤化学与微生物性质的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(5):1428-1434.
NENG Feng-jiao, WU Long-hua, LIU Hong-yan, et al. Effects of intercropping *Sedum plumbizincicola* and *Apium graveolens* on the soil chemical and microbiological properties under the contamination of zinc and cadmium from sewage sludge application[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(5):1428-1434.
- [4] 刘晨,郭佳,赵敏,等. 毛竹幼苗与伴矿景天间作对铜镉锌转运积累的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2017, 43

(5):615-622.

- LIU Chen, GUO Jia, ZHAO Min, et al. Effects of moso bamboo and *Sedum plumbizincicola* intercropping on transport and accumulation of Cu, Cd and Zn in soil-plant system[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2017, 43(5):615-622.
- [5] 李凝玉,李志安,丁永祯,等. 不同作物与玉米间作对玉米吸收累积镉的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6):1369-1373.
LI Ning-yu, LI Zhi-an, DING Yong-zhen, et al. Effects of intercropping different crops with maize on the Cd uptake by maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(6):1369-1373.
- [6] Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments: A review[J]. *Waste Management*, 2008, 28(1):215-225.
- [7] 罗远恒,顾雪元,吴永贵,等. 钝化剂对农田土壤镉污染的原位钝化修复效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5):890-897.
LUO Yuan-heng, GU Xue-yuan, WU Yong-gui, et al. In-situ remediation of cadmium-polluted agriculture land using stabilizing amendments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(5):890-897.
- [8] 高译丹,梁成华,裴中健,等. 施用生物炭和石灰对土壤镉形态转化的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2):258-261.
GAO Yi-dan, LANG Cheng-hua, PEI Zhong-jian, et al. Effects of biochar and lime on the fraction transform of cadmium in contaminated soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(2):258-261.
- [9] 王林,徐应明,孙国红,等. 海泡石和磷酸盐对镉铅污染稻田土壤的钝化修复效应与机理研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2):314-320.
WANG Lin, XU Ying-ming, SUN Guo-hong, et al. Effect and mechanism of immobilization of paddy soil contaminated by cadmium and lead using sepiolite and phosphate[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2012, 21(2):314-320.
- [10] 柏宏成. 低分子有机酸、腐植酸对土壤镉污染淋洗修复研究[D]. 成都:四川农业大学, 2015.
BAI Hong-cheng. Study on leaching and repairing of soil cadmium by low molecular organic acid and humic acid[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2015.
- [11] Miretzky P, Fernandez-Cirelli A. Phosphates for Pb immobilization in soils: A review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2008, 6(3):121-133.
- [12] 吴龙华,周守标,毕德,等. 中国景天科植物一新种—伴矿景天[J]. 土壤, 2006, 38(5):632-633.
WU Long-hua, ZHOU Shou-biao, BI De, et al. *Sedum plumbizincicola*, a new species of the crassulaceae from Zhejiang, China[J]. *Soils*, 2006, 38(5):632-633.
- [13] Zu Y Q, Li Y, Chen J J, et al. Hyperaccumulation of Pb, Zn and Cd in herbaceous grown on lead-zinc mining area in Yunnan, China[J]. *Environment International*, 2005, 31(5):755-762.
- [14] 赵冰,沈丽波,程苗苗,等. 麦季间作伴矿景天对不同土壤小麦-水稻生长及镉吸收性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10):2725-2731.
ZHAO Bing, SHEN Li-bo, CHEN Miao-miao, et al. Effects of intercropping *Sedum plumbizincicola* in wheat growth season under wheat-

- rice rotation on the crops growth and their heavy metals uptake from different soil types[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10):2725-2731.
- [15] 常学秀, 段昌群, 王焕校. 根分泌作用与植物对金属毒害的抗性[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(2):315-320.
CHANG Xue-xiu, DUAN Chang-qun, WANG Huan-xiao. Root excretion and plant resistance to metal toxicity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(2):315-320.
- [16] 涂书新, 孙锦荷, 郭智芬, 等. 植物根系分泌物与根际营养关系评述[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(1):64-67.
TU Shu-xin, SUN Jin-he, GUO Zhi-fen, et al. On relationship between root exudates and plant nutrition in rhizosphere[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1):64-67.
- [17] 李德华, 贺立源, 李建生, 等. 一种根系分泌物中有机酸的前处理和高效液相色谱检测方法[J]. *植物生理学报*, 2004, 40(2):219-222.
LI De-hua, HE Li-yuan, LI Jian-sheng, et al. A method for pretreatment and determination of organic acid in root secretion by high performance liquid chromatography[J]. *Plant Physiology Communications*, 2004, 40(2):219-222.
- [18] 蒋成爱, 吴启堂, 吴顺辉, 等. 东南景天与不同植物混作对土壤重金属吸收的影响[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(9):985-990.
JIANG Cheng-ai, WU Qi-tang, WU Shun-hui, et al. Effect of co-cropping *Sedum alfredii* with different plants on metal uptake[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(9):985-990.
- [19] 陈杰华, 王玉军, 王汉卫, 等. 基于TCLP法研究纳米羟基磷灰石对污染土壤重金属的固定[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(4):645-648.
CHEN Jie-hua, WANG Yu-jun, WANG Han-wei, et al. Assessment of remediation of soil heavy metals with nano-particle hydroxyapatite by toxicity characteristic leaching procedure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(4):645-648.
- [20] 王长伟, 徐应明, 王林, 等. 海泡石与磷酸盐对镉铅复合污染土壤的钝化修复效应[J]. *安全与环境学报*, 2010, 10(4):42-45.
WANG Chang-wei, XU Ying-ming, WANG Lin, et al. Amendment effects of cadmium and lead to the co-contaminated soils through sepiolite and phosphate[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2010, 10(4):42-45.
- [21] 梁学峰, 徐应明, 王林, 等. 天然黏土联合磷肥对农田土壤镉铅污染原位钝化修复效应研究[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(5):1011-1018.
LIANG Xue-feng, XU Ying-ming, WANG Lin, et al. In-situ immobilization of cadmium and lead in a contaminated agricultural field by adding natural clays combined with phosphate fertilizer[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(5):1011-1018.
- [22] Oliver D P, Tiller T L K G, Alston A M, et al. Effects of soil pH and applied cadmium on cadmium concentration in wheat grain[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1998, 36(4):571-583.
- [23] 廖敏, 黄昌勇, 谢正苗. 施加石灰降低不同母质土壤中镉毒性机理研究[J]. *农业环境保护*, 1998(3):101-103.
LIAO Min, HUANG Chang-yong, XIE Zheng-miao. Effects of rare earth element ions on micronucleus frequency in root tip cell and early growth of *Vicia faba*[J]. *Agriculture Environmental Protection*, 1998(3):101-103.
- [24] Castaldi P, Santona L, Melis P. Heavy metal immobilization by chemical amendments in a polluted soil and influence on white lupin growth[J]. *Chemosphere*, 2005, 60(3):365-371.
- [25] 王林, 徐应明, 孙扬, 等. 海泡石及其复配材料钝化修复镉污染土壤[J]. *环境工程学报*, 2010, 4(9):2093-2098.
WANG Lin, XU Ying-ming, SUN Yang, et al. Immobilization of cadmium contaminated soils using sepiolite and its compound materials[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(9):2093-2098.
- [26] 卢一富, 李真理, 阮心玲, 等. 铅冶炼污染石灰性土壤上冬小麦间作伴矿景天的探讨[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(9):1686-1692.
LU Yi-fu, LI Zhen-li, RUAN Xin-ling, et al. Discussion on winter wheat intercropping with *Sedum* in lead-smelted and polluted calcareous soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(9):1686-1692.