

间作对伴矿景天与红背桂花生长及镉锌吸收的影响

关元静, 刘鸿雁, 孙曦, 朱仁凤, 赵婕, 张亚冰, 吴龙华

引用本文:

关元静, 刘鸿雁, 孙曦, 等. 间作对伴矿景天与红背桂花生长及镉锌吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2): 347-354.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0916>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

铅冶炼污染石灰性土壤上冬小麦间作伴矿景天的探讨

卢一富, 李真理, 阮心玲, 李会勇, 张红毅, 田会阳, 李立平

农业环境科学学报. 2015(9): 1686-1692 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.09.009>

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>

不同浓度及不同来源纳米银对伴矿景天生长及重金属吸收的影响研究

王朝阳, 马婷婷, 周通, 李柱, 吴龙华, 周守标, 骆永明

农业环境科学学报. 2017, 36(2): 250-256 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1039>

丝瓜与伴矿景天间作对土壤Cd形态及丝瓜Cd吸收的影响

王京文, 蔡梅, 郑洁敏, 李丹, 王贤波, 张奇春

农业环境科学学报. 2016, 35(12): 2292-2298 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0825>

有机物料对镉污染酸性土壤伴矿景天修复效率的影响

邓月强, 曹雪莹, 谭长银, 孙丽娟, 蔡润众, 彭曦, 柏佳, 黄硕霏, 周青

农业环境科学学报. 2020, 39(12): 2762-2770 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0605>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

关元静, 刘鸿雁, 孙曦, 等. 间作对伴矿景天与红背桂花生长及镉锌吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2): 347–354.

GUAN Yuan-jing, LIU Hong-yan, SUN Xi, et al. Effects of intercropping on growth and Cd/Zn Uptake by *Sedum plumbizincicola* and *Excoecaria cochinchinensis*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(2): 347–354.



开放科学 OSID

间作对伴矿景天与红背桂花生长及镉锌吸收的影响

关元静^{1,2}, 刘鸿雁^{1*}, 孙曦², 朱仁凤³, 赵婕³, 张亚冰², 吴龙华²

(1. 贵州大学农学院, 贵阳 550025; 2. 中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008; 3. 江苏萤火虫环境科技有限公司, 南京 210008)

摘要:为探讨不同根系分隔方式间作对植物生长和Cd、Zn吸收的影响,以伴矿景天与红背桂花为供试植物,开展盆栽及田间试验。盆栽试验设置5个处理:伴矿景天与红背桂花塑料板分隔间作(地上部作用,COP);伴矿景天与红背桂花300目尼龙网分隔间作(土壤溶液作用,COM);伴矿景天与红背桂花无分隔间作(完全作用,CO);红背桂花单作(EcM);伴矿景天单作(SpM)。田间试验仅作无分隔间作处理。结果表明,COP条件下伴矿景天生物量略高于SpM处理,较COM及CO条件下高达100%、149%,差异显著。COP条件下每株伴矿景天的Cd、Zn吸收量分别较SpM显著高28.3%和14.0%。随着根系相互抑制作用的逐渐增强,COM和CO条件下伴矿景天每株Cd、Zn吸收量均显著低于COP及SpM处理。红背桂花的生长及Cd、Zn吸收性趋势与伴矿景天相似。田间条件下,因植物间距较大等因素,间作对二者生长及Cd、Zn吸收性均无显著影响。盆栽条件下,近距离间作时伴矿景天与红背桂花的根系相互作用将显著影响其生长和Cd、Zn吸收,田间条件下保持适宜的植物间距则不会出现抑制作用,二者在田间间作实现Cd/Zn污染土壤的边生产边修复是可行的。

关键词:伴矿景天;红背桂花;间作;镉吸收;锌吸收

中图分类号:S685.13;X53;X173 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2021)02-0347-08 **doi:**10.11654/jaes.2020-0916

Effects of intercropping on growth and Cd / Zn Uptake by *Sedum plumbizincicola* and *Excoecaria cochinchinensis*

GUAN Yuan-jing^{1,2}, LIU Hong-yan^{1*}, SUN Xi², ZHU Ren-feng³, ZHAO Jie³, ZHANG Ya-bing², WU Long-hua²

(1. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Jiangsu Firefly Environmental Science and Technology Co., Ltd., Nanjing 210008, China)

Abstract: This study used both glass pot and field experiments to investigate the influence of root compartment models on plant growth and Cd and Zn uptake by *Sedum plumbizincicola* and *Excoecaria cochinchinensis* under an intercropping system. The pot experiment included the following five treatments: (1) an *S. plumbizincicola*–*E. cochinchinensis* intercropping system with a plastic plate compartment (COP); (2) an *S. plumbizincicola*–*E. cochinchinensis* intercropping system with a 300-mesh nylon mesh compartment (COM); (3) an *S. plumbizincicola*–*E. cochinchinensis* intercropping system without any compartment (CO); (4) a monoculture system of *E. cochinchinensis* (EcM); and (5) a monoculture system of *S. plumbizincicola* (SpM). The results showed that the biomass of *S. plumbizincicola* was slightly higher in the COP treatment than in the SpM treatment, which was significantly higher than that of both COM (by an increase of 100%) and CO (by an increase of 149%). Under the COP treatment, the Cd and Zn uptake by each plant was significantly higher than that of

收稿日期: 2020-08-05 录用日期: 2020-11-03

作者简介: 关元静(1995—),女,贵州独山人,硕士研究生,主要从事土壤重金属污染与修复研究。E-mail: 985969029@qq.com

*通信作者: 刘鸿雁 E-mail: hylu@gzu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41325003)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41325003)

monoculture, with increases of 28.3% and 14.0%, respectively. With a gradual enhancement of root function, the Cd and Zn uptake under the COM and CO treatments were significantly lower than those of the COP and SPM treatments. The results of the field experiment showed that intercropping had no significant effect on the growth and Cd/Zn absorption by the two plants. In the pot experiment, the root system interaction between *S. plumbizincicola* and *E. cochinchinensis* significantly affected the growth and Cd and Zn uptake; however, maintaining a certain plant row spacing under field conditions did not have any inhibitory effect. Therefore, it is feasible to remediate Cd/Zn contaminated soil while intercropping landscape plants in fields.

Keywords: *Sedum plumbizincicola*; *Excoecaria cochinchinensis*; intercropping; cadmium uptake; zinc uptake

因矿产采冶、工业“三废”的排放及化肥不合理施用等导致的土壤重金属污染日益严重,重金属对生态系统和人体均有很大的危害,如Cd对人体具有很强的致癌作用^[1]。植物修复技术具有成本较低、不破坏土壤结构、修复过程中无二次污染等优点,是一种环境友好的修复技术^[2],现被广泛应用于土壤的重金属污染修复,但植物吸取修复效率低、需连续多季重复种植超积累植物才能达到修复目标,且需中断农业生产,农田的经济产出受到一定限制,是其不足之处。超积累植物与经济作物的间套作是植物修复的一种常用方式,可在修复过程中维持一定的经济产出。间作会使土壤中可溶性有机质(DOM)、微生物、根系分泌物等发生变化,从而改变土壤中重金属的形态及超积累植物对重金属的吸收^[3]。印度芥菜-油菜^[4],伴矿景天-苋菜^[5],东南景天与其他作物^[6]等超积累植物-经济作物间作试验研究结果显示,间作后修复效率较单作并未降低,可见超积累植物与经济作物间作在土壤修复中是可行的。观赏植物一般具有较高环境适应性且不进入食物链,同时具有一定经济价值,将其用于土壤重金属污染修复可以实现生态与经济的结合^[7-9],但目前超积累植物与观赏植物的间作研究鲜有报道。

伴矿景天(*Sedum plumbizincicola*)是一种Cd、Zn超积累植物,耐阴,但在夏季高温时生长缓慢甚至停止生长^[10]。红背桂花(*Excoecaria cochinchinensis* Lour.)是一种原产自我国华南地区的木本园艺植物,具有一定的观赏价值和经济价值,且其较高的树形能够为其他矮小植物提供遮阴。前期调研表明,红背桂花在重金属中度污染土壤上生长良好且其经济价值不受影响。两者间作后可提高土地利用率,且红背桂花能为伴矿景天遮阴以缓解夏季高温的不利影响,促进伴矿景天生长。因此,本文通过不同根系分隔方式下伴矿景天与红背桂花盆栽间作试验,研究不同根系作用下二者生长及Cd、Zn吸收的变化,并同时开展田间间作试验比较田间条件下二者的生长和吸收差异,以为超积累植物与观赏植物的间作技术应用提供

理论依据。

1 材料与方法

1.1 田间试验区概况

田间试验研究区位于广东省韶关市仁化县,该区年平均气温19.6℃,年平均降雨量1 619.6 mm,无霜期305 d。区内主要污染来源为铅锌矿开采和冶炼,目前已在受污染的农田建设光伏板。在研究区域选取地势平坦、无明显积水、光伏板较高、易于板下操作的区域进行小区试验,其土壤类型属潜育水耕人为土,土壤中Cd的平均含量为1.54 mg·kg⁻¹,Zn的平均含量为551 mg·kg⁻¹,平均pH值为6.42。

1.2 供试材料

盆栽供试土壤采自广东省北部某农田0~20 cm耕层。土壤风干后过2 mm筛、备用。土壤pH值为5.8,总Cd 4.12 mg·kg⁻¹、总Zn 639 mg·kg⁻¹,有效态Cd 0.55 mg·kg⁻¹、有效Zn 41 mg·kg⁻¹。

试验用红背桂花扦插苗购自广东省仁化县粤北山茶园公司,高约30 cm,根系长度约10 cm,所用苗地上部Cd 4.71 mg·kg⁻¹、Zn 108 mg·kg⁻¹;试验所用伴矿景天枝条取自广东省仁化县董塘镇某修复基地,枝条长5 cm,每个枝条的平均干质量在0.15 g左右,Cd 897 mg·kg⁻¹,Zn 6 844 mg·kg⁻¹。红背桂花植株高于伴矿景天,可对伴矿景天产生一定遮阴作用。

1.3 盆栽试验设计与实施

盆栽试验采用直径25 cm、高30 cm的塑料花盆,共设5个处理,分别是:(1)伴矿景天(Sp)与红背桂花(Ec)塑料板分隔间作(地上部作用,COP);(2)伴矿景天与红背桂花300目尼龙网分隔间作(土壤溶液作用,COM);(3)伴矿景天与红背桂花无分隔间作(完全相互作用,CO);(4)红背桂花单作(EcM);(5)伴矿景天单作(SpM)。其中,两种间隔处理在沿塑料花盆一纵切面分别设置塑料板和300目尼龙网,将花盆均分为两部分,试验每盆装土1.5 kg(烘干质量);无间隔间作处理和单作处理每盆装土3 kg。间作处理每盆移栽伴矿景天和红背桂花1株,分别种植于两个分

隔的部分(COP和COM处理)或与之对应位置(CO处理);单作处理每盆种植2株伴矿景天(EcM处理)或2株红背桂花(SpM处理),种植于COP处理和COM处理对应的位置。每处理设置5次重复,盆栽种植于广东省仁化县某修复基地,室外自然光照培养。2019年8月20日种植、12月15日收获,时长115 d。盆栽直接承接降水,以自来水浇灌,使降水不足时土壤湿度保持在60%田间持水量。种植后将其随机顺序打乱放置,每周进行一次位置更换。

1.4 田间间作试验设计与实施

试验布置为两因素完全试验,分别为3个光照因素和3个植物配置因素(图1)。光照因素即光伏板下不同位置的畦,植物配置因素分别为伴矿景天单作、红背桂花单作、两者间作。伴矿景天单作在每畦种植6行伴矿景天,行间距20 cm,行内株距25 cm;红背桂花单作在每畦种植2行红背桂花,行间距60 cm,行内株距50 cm;间作在每畦内将两种植物镶嵌种植,每种植物行、株距与单作相同。每处理设置4个平行,共36个小区,单一小区面积为 $1.3\text{ m}\times 4\text{ m}=52\text{ m}^2$,试验布置如图1。植物于2019年10月种植,2020年7月收获。

1.5 样品收集与分析

盆栽植物收获时,测量植物株高,将植物样品分为地上部和根系进行收获,根系以挖掘和抖土法与土壤分离。两种植物根系具有明显的形态差异,红背桂花根直径和木质化程度均明显高于伴矿景天,可以此对二者进行区分。田间伴矿景天于7月份花期进行收获,测定地上部鲜质量,洗净烘干后测定干质量和

重金属含量。每个小区内取3株红背桂花,洗涤烘干后测定干质量和重金属含量。

植物组织以自来水洗净,再用去离子水冲洗2~3次,吸水纸吸干表面水分后称取鲜质量,75℃烘干至恒质量。称取干质量,用不锈钢粉碎机磨碎。在进行根土分离的同时,将不进行分隔处理(SpM、EcM)的每盆中的土壤进行充分混匀,对进行分隔处理(COP、COM)的盆栽中种植不同植物的每侧土壤分别进行充分混匀,然后取鲜土约200 g、风干后过10目和100目筛,供土壤pH值与提取态和全量Cd、Zn测定。

pH值采用电位法测定,土水比为1:2.5。样品Cd、Zn全量测定消解:全量测定分别称取植物和过100目的土壤样品0.5 g和0.2 g,植物和土壤样品分别以 $\text{H}_2\text{O}_2\text{-HNO}_3$ (2 mL:6 mL)和 HCl-HNO_3 (5 mL:5 mL)进行消解、定容、过滤。土壤有效态Cd、Zn提取:采用 $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{CaCl}_2$ 溶液提取,液土比为10:1。火焰原子吸收分光光度计(Varian SpectrAA220FS)测定滤液中Zn、Cd浓度。测定所用试剂均为优级纯,采用国家参比物质(GBW 10043和GBW 10014)和空白进行Cd、Zn全量测定的质量控制,标准样品测定结果在允许误差范围内。

1.6 数据处理和统计

统计分析在SPSS 10.0软件中进行,多组数据间首先进行方差分析,随后采用Duncan法进行多重比较,差异显著性水平为0.05。使用Excel 2016作图。

2 结果与分析

2.1 盆栽条件下不同分隔间作对伴矿景天及红背桂花生长状况的影响

塑料板分隔和单作条件下,两种植物的生物量、株高均显著高于尼龙网分隔以及无分隔间作(表1),可见间作中两种植物的根系作用对彼此的生长均有一定抑制作用。伴矿景天的地上部生物量指标在单作和塑料板分隔条件下无显著差异,说明红背桂花的遮阴不影响伴矿景天地上部的生长,但塑料板分隔处理中伴矿景天根部干质量及鲜质量均显著高于其他处理。随间作系统中两种植物根系的相互作用增强,伴矿景天生长受到的抑制增加:4种处理中伴矿景天塑料板分隔处理中生物量最高为 $(71.4\pm 6.9)\text{ g}\cdot\text{株}^{-1}$,地上部干质量分别显著高于尼龙网分隔及无分隔,达100%和149%;根干质量显著高于尼龙网分隔和无分隔处理,分别达11.6%和39.8%。相同处理中,红背桂花生长趋势与伴矿景天相似,其中塑料板分隔处理的

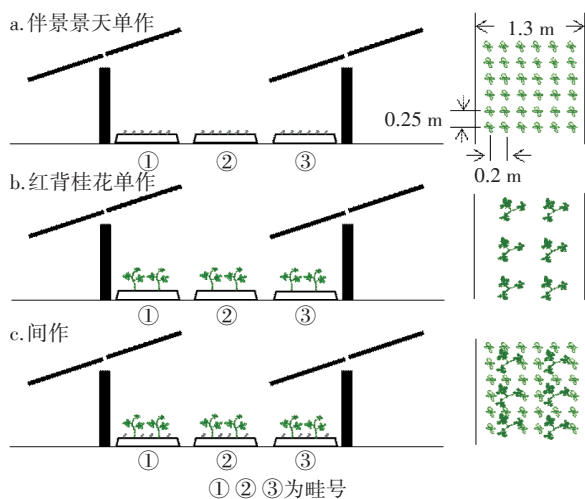


图1 田间小区示意图

Figure 1 Schematic diagram of field plot

表1 盆栽试验不同处理下植株生物量的变化

Table 1 Changes of plant biomass in different treatments under pot experiment condition

植物 Plant	处理 Treatments	地上部质量 Aboveground fresh weight/(g·株 ⁻¹)	根鲜质量 Root fresh weight/ (g·株 ⁻¹)	地上部干质量 Aboveground dry weight/(g·株 ⁻¹)	根干质量 Root dry weight/ (g·株 ⁻¹)	株高 Plant height/ cm
伴矿景天 Sp	SpM	69.9±10.8a	1.43±0.07b	3.96±0.77a	0.15±0.01b	23.6±2.4a
	COP	71.4±6.9a	1.62±0.13a	4.66±0.39a	0.17±0.01a	22.9±2.8a
	COM	38.5±12.7b	1.21±0.28b	2.33±0.39b	0.15±0.03b	17.2±1.8b
	CO	14.2±2.3c	0.85±0.45c	1.87±0.44b	0.12±0.01c	16.8±3.1b
红背桂花 Ec	EcM	25.0±3.6b	3.95±0.61b	3.60±0.21a	0.78±0.05b	41.3±2.2a
	COP	32.1±2.0a	5.72±0.81a	3.96±0.61a	0.87±0.12a	41.6±2.3a
	COM	19.1±2.4c	3.58±0.21b	2.49±0.30b	0.61±0.10c	38.0±3.2a
	CO	14.2±2.7d	2.29±0.31c	2.86±0.70b	0.74±0.06b	37.0±2.2a

注:表中数值为均值±标准差,n=5;不同小写字母表示处理间有显著差异,P<0.05,Duncan 多重检验。下同。
Note: The values in the table are mean±sd, n=5; different letters indicate significant differences, P<0.05. The same below.

地上部干质量显著高于尼龙网分隔和无分隔处理 59.0% 和 38.4%。

2.2 盆栽条件下不同分隔间作对伴矿景天与红背桂花 Cd、Zn 吸收性的影响

无分隔处理下的伴矿景天地上部 Cd 含量最高, 为 595 mg·kg⁻¹, 较塑料板分隔、尼龙网分隔以及伴矿景天单作 3 个处理分别高 45.3%、44.9%、58.5% (图 2A), 差异显著; 不同处理间伴矿景天地上部 Zn 含量无显著差异 (图 2C)。伴矿景天根系 Cd 含量在塑料板分隔条件下最高, 显著高于其他 3 个处理; 而 Zn 含量则在尼龙网分隔和无分隔处理中较高。红背桂花地上部 Cd 含量在无分隔处理下最高, 显著高于单作 14.9%, 但与其他两个处理间差异不显著 (图 2B), 在间作处理中, 红背桂花根系 Cd 含量随根系相互作用增强而增高, 表现为无分隔条件下其根系 Cd 含量显著高于其他 3 个处理。与之相反, Zn 浓度随根系相互作用的增强而降低。4 个处理间地上部 Zn 含量未见显著差异 (图 2D)。

伴矿景天地上部对 Cd、Zn 的转运系数大于 1, 富集系数分别为 115 和 15, 符合超积累植物特性。而红

背桂花对 Cd、Zn 的积累主要在根部, 地上部转运系数小于 1, 但对 Cd 具有一定的富集效应, 富集系数为 2.49。以两种植物地上部干质量和 Cd、Zn 含量计算其地上部每株的吸收量 (表 2)。单株伴矿景天吸收 Cd 和 Zn 的量均以塑料板分隔条件下最高, 分别为 (1.90±0.11) mg·株⁻¹ 和 (29.2±2.5) mg·株⁻¹, 比伴矿景天单作处理条件下单株吸收量高 28.3% 和 14.0%, 且显著高于尼龙网分隔和无分隔两个处理。与此同时, 红背桂花每株吸收 Cd 和 Zn 的最高量也均以塑料板分隔条件下最高, 为 (0.10±0.01) mg·株⁻¹ 和 (1.9±0.4) mg·株⁻¹, 显著高于其他 3 个处理, 分别较红背桂花单作处理高 100% 和 46.1% (表 2)。

2.3 盆栽条件下不同分隔间作方式对土壤 pH 值和土壤全量与 CaCl₂ 提取态 Cd、Zn 浓度的影响

无分隔间作条件下盆栽内土壤 pH 值最低为 5.37, 显著低于红背桂花单作处理 (5.72), 其他处理间及同一处理不同侧间土壤 pH 值无显著差异 (表 3)。

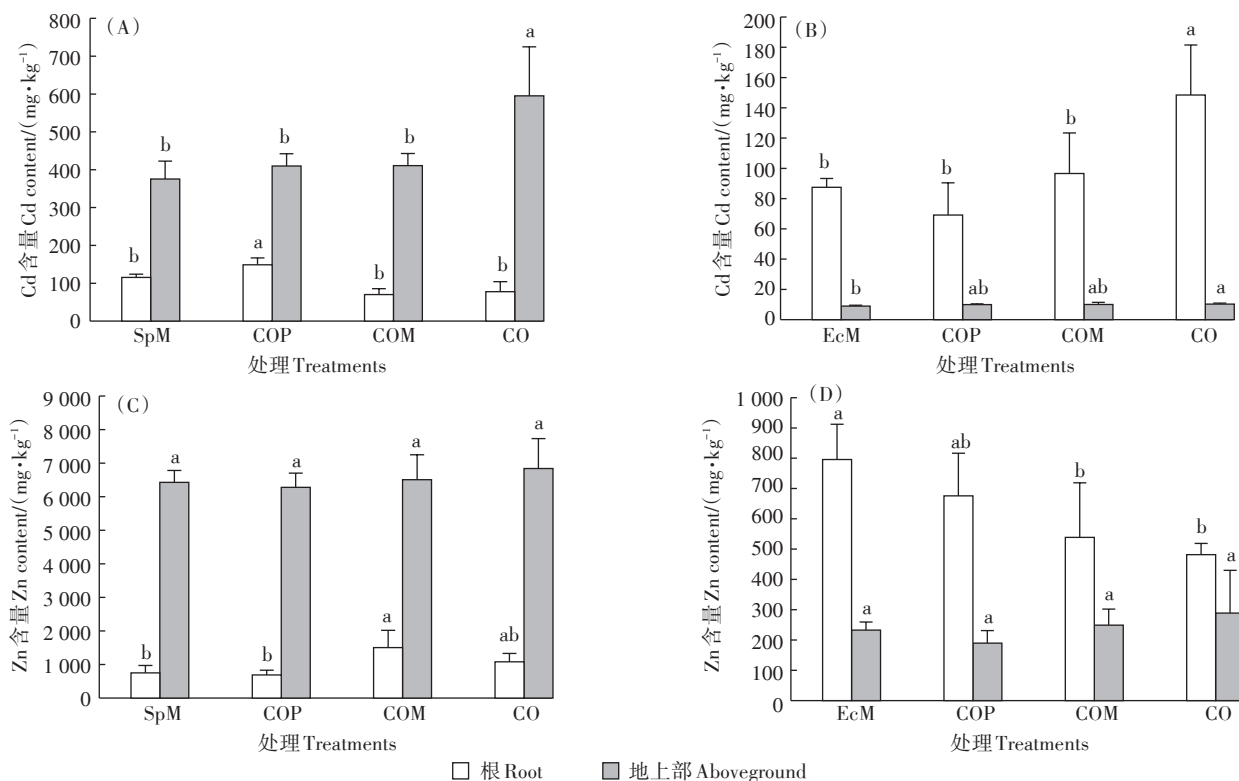
由表 3 可知, 伴矿景天单作处理中土壤 Cd 全量较种植前下降 0.41 mg·kg⁻¹, 修复效率达 9.9%。在两个单作处理 (伴矿景天单作和红背桂花单作) 及塑料

表2 盆栽条件下植物地上部的重金属吸收量

Table 2 Heavy metals uptake in plant shoots under pot experiment condition

处理 Treatments	Cd 的吸收量 Cd absorption/(mg·pot ⁻¹)			Zn 的吸收量 Cd absorption/(mg·pot ⁻¹)		
	伴矿景天 Sp	红背桂花 Ec	总量 Total	伴矿景天 Sp	红背桂花 Ec	总量 Total
SpM	1.48±0.30a	—	2.96±0.30a	25.6±5.1a	—	53.3±5.4a
EcM	—	0.05±0.01c	0.10±0.01d	—	1.3±0.2b	2.4±0.1d
COP	1.90±0.11a	0.10±0.01a	2.01±0.12b	29.2±2.5a	1.9±0.4a	31.6±2.7b
COM	0.95±0.14b	0.07±0.01b	1.02±0.08c	15.0±1.7b	1.8±0.2a	16.8±1.6c
CO	1.09±0.23b	0.05±0.01c	1.13±0.12c	12.7±2.6b	1.2±0.2b	13.9±2.5c

注: “—”表示无数值。下同。
Note: “—”Indicates no value. The same below.



A, C为伴矿景天, B, D为红背桂花;柱状图为均值±标准差, 短栅上的不同小写字母表示在0.05水平差异显著; $n=5$
A and C for *S. plumbizincicola*, B and D for *E. cochinchinensis*; the histogram is the mean $\pm$ SD, and the different letters on the short grid is statistically significant at the level of 0.05; $n=5$.

图2 盆栽不同处理下伴矿景天和红背桂花地上部和根中Cd、Zn含量

Figure 2 Cd and Zn content in the shoot and root of *S. plumbizincicola* and *E. cochinchinensis* under pot experiment condition

板分隔处理中伴矿景天侧土壤Cd全量显著低于红背桂花侧,表明伴矿景天对土壤Cd的吸收强于红背桂花。土壤CaCl₂提取态浓度与其全量变化趋势相似,亦呈现伴矿景天对土壤有效态Cd的吸收更强。盆栽土壤中Zn全量并未在处理间呈现显著差异。红背桂花单作处理中土壤CaCl₂提取态Zn显著高于伴矿景天40.4%;在两个分隔间作处理(塑料板分隔、尼龙网分隔)中伴矿景天侧土壤CaCl₂提取态Zn均显著低于其红背桂花侧,表明伴矿景天对土壤有效态Zn也存在吸收耗竭作用。

2.4 田间间作对伴矿景天与红背桂花的生长及Cd、Zn吸收的影响

田间间作时伴矿景天与红背桂花的生长未受影响(表4),二者的地上部干质量在间作和单作之间无显著差异,不同光照因素下也未见显著差异。地上部植物的Cd、Zn含量各处理间也未见显著差异。由此可见,与盆栽间作不同,在实际生产中伴矿景天与红背桂花间作对二者的生物量以及对重金属的吸收无显著影响。

3 讨论

3.1 盆栽条件下不同根系分隔间作及田间间作对伴矿景天和红背桂花生长的影响

间作是一种常见的农艺措施,可通过物种间的互补优势充分利用土地、光照、水分等自然资源,获得更大的经济产出。当超积累植物与农作物轮作、间套作时,利用间套作植物改善超积累植物的光、热、水分和根际环境条件,能够提高修复效率,实现边生产边修复^[11-13]。部分研究认为间作对超积累植物生长具有促进作用,例如黑麦草促进了与其间作的天蓝遏蓝菜(*Nocca caerulea*)的生长^[14];也有研究认为超积累植物与间作植物相互抑制,如间作后毛茛竹与伴矿景天的生物量同时出现了下降的情况^[15]。超积累植物与作物间的养分竞争可能是造成二者生物量下降的主要因素之一,有学者认为,毛茛竹与伴矿景天间作盆栽中空间的局限造成了二者根系空间养分竞争过于激烈,导致生物量下降^[15]。此外,化感物质也可能是间作植物抑制超积累植物生长的机制。红

表3 盆栽条件下土壤pH和全量与氯化钙提取态Cd/Zn浓度变化

Table 3 Changes of soil pH and total and CaCl₂ extractable Cd and Zn concentrations under pot experiment condition

处理 Treatments	pH		全量Cd Total Cd/(mg·kg ⁻¹)		CaCl ₂ 提取态Cd CaCl ₂ -Cd/(mg·kg ⁻¹)		全量Zn Total Zn/(mg·kg ⁻¹)		CaCl ₂ 提取态Zn CaCl ₂ -Zn/(mg·kg ⁻¹)	
	Sp侧 Sp side	Ec侧 Ec side	Sp侧 Sp side	Ec侧 Ec side	Sp侧 Sp side	Ec侧 Ec side	Sp侧 Sp side	Ec侧 Ec side	Sp侧 Sp side	Ec侧 Ec side
SpM	5.50±0.23ab	—	3.71±0.12b	—	0.61±0.23b	—	513±159a	—	49.2±5.4b	—
EcM	—	5.72±0.08a	—	4.04±0.03a	—	1.20±0.06a	—	423±117a	—	69.1±4.1a
COP	5.51±0.22ab	5.68±0.10ab	3.75±0.18b	4.06±0.15a	0.63±0.08b	0.84±0.12a	438±12a	434±37a	40.5±12.2c	51.0±4.5b
COM	5.60±0.42ab	5.58±0.16ab	4.01±0.05a	4.05±0.07a	0.69±0.13b	0.99±0.09a	454±87a	500±48a	49.1±9.6b	59.0±5.3a
CO	5.37±0.11b	—	3.89±0.15b	—	0.77±0.20ab	—	394±83a	—	53.4±8.4b	—

注:不同小写字母表示同一土壤性质指标不同盆栽间差异显著(P<0.05)。
Note: Different letters indicate significant differences in one column (P<0.05).

表4 田间植物生物量及重金属浓度(n=4)

Table 4 Plant biomass and heavy metal concentrations under field solar panel conditions (n=4)

处理 Treatments	光照 Light treatment	伴矿景天地上部干质量 Aboveground dry weight of Sp/(g·株 ⁻¹)	伴矿景天Cd含量 Cd concentration of Sp/(mg·kg ⁻¹)	伴矿景天Zn含量 Zn concentration of Sp/(mg·kg ⁻¹)	红背桂花地上部干质量 Aboveground dry weight of Ec/(g·株 ⁻¹)	红背桂花Cd含量 Cd concentration of Ec/(mg·kg ⁻¹)	红背桂花Zn含量 Zn concentration of Ec/(mg·kg ⁻¹)
单作 Single	1	0.39±0.08a	180±47a	12 745±1 303a	62.62±7.17a	7.30±1.08a	189±7a
	2	0.30±0.11a	170±43a	13 999±820a	56.33±8.42a	7.25±0.88a	206±48a
	3	0.36±0.08a	171±21a	12 110±2 225a	66.44±0.78a	6.91±0.49a	193±12a
间作 Intercropping	1	0.34±0.09a	200±40a	11 137±1 350a	59.46±7.14a	6.56±0.36a	181±9a
	2	0.30±0.14a	191±16a	12 588±2 258a	57.10±5.26a	6.89±0.47a	180±14a
	3	0.32±0.09a	161±17a	12 520±1 592a	63.55±8.27a	6.50±0.93a	189±20a

背桂花体内含有多酚酸、萜类等次生代谢产物^[16], 这些物质可能通过潜在的化感作用对伴矿景天的生长产生一定的不利影响, 这有待进一步研究证实。间作亦影响超积累植物根际微生物的群落组成、功能, 这可能也是二者相互作用的机制之一^[17]。研究表明, 不同分隔间作改变作物根系形态, 从而增加了作物水分和养分吸收的有效空间, 影响了间作植物的生物量^[18]。在不同分隔间作中发现, 蚕豆的根系分泌物柚皮素在低氮环境下分泌量差异显著, 在无分隔及尼龙网分隔条件下根系分泌物增加, 促进生长的效果增强^[19]。本试验中, 间作处理下随伴矿景天与红背桂花根系相互作用增强(塑料板分隔、尼龙网分隔、无分隔), 伴矿景天生物量逐渐下降, 可能是根系形态发生变化以及根系分泌物量有所改变造成的, 同时也说明不同间作方式对不同超积累植物生长和重金属吸收的影响各异^[20-21]。除根系相互作用外, 伴矿景天和红背桂花地上部相互作用也可对彼此生长产生影响。以塑料板分隔条件下(仅存在地上部相互作用)二者的生物量最大, 可能是高秆的红背桂花通过遮阴缓解了高温对伴矿景天生长的不良影响。在盆栽间作中伴矿景天随着二者根系相互作用的增强, 其生长及重

金属吸收受到的抑制作用逐渐增强。而伴矿景天与红背桂花在田间间作时二者的地上部干质量及对Cd、Zn的吸收较单作均没有显著差异(表4)。可能是因为红背桂花为常绿灌木, 根系垂直分布较深^[22], 伴矿景天属于景天科植物, 根系为须状^[23], 二者具有不同的植物形态特征, 地上部冠层(高和矮)及地下部根系在土壤空间上垂直生长及横向生长, 均可以缓解间作带来的资源竞争和根系之间的相互作用^[24-25]。将地下部根系生态位不同的植物进行间作, 能有效缓解地下部的竞争及化感作用, 达到增产或不减产的效果^[26]。本文田间试验时, 伴矿景天与红背桂花间作时根系之间作用不明显, 对伴矿景天的生长和Cd、Zn的吸收无显著促进或抑制作用, 在不影响修复效率的同时红背桂花能带来一定经济产出。这可能是因为田间条件下两种植物的间作距离较远, 根系接触概率较低, 后续可以研究不同间作距离对二者间作的影响。

3.2 盆栽不同根系分隔间作对伴矿景天和红背桂花Cd、Zn吸收及土壤Cd、Zn含量的影响

本试验中, 间作处理下随伴矿景天与红背桂花根系相互作用增强(塑料板分隔、尼龙网分隔、无分隔), 两种植物Cd和Zn吸收量均显著下降(表2), 可能是

因为二者根系生长受到抑制以及二者根系共存时可能存在Cd与Zn吸收的竞争。伴矿景天在无分隔间作时地上部Cd含量较其他处理高(图2A),可能是该处理中二者生物量生长的稀释作用较弱造成的,陈国皓等^[27]对伴矿景天与玉米的间作研究中也出现了相似的状况。有研究表明,伴矿景天降低了轮作与间作作物可食部分(小麦、茄子)的重金属浓度,可能是超积累植物的竞争性吸收导致的^[28]。

超积累植物与其他植物间作时可通过根系分泌物、土壤微生物、土壤酶活性、土壤pH值等影响植物对重金属的吸收^[29]。超积累植物与豆科植物间作后,根际的固氮、修复效率也有所提高,东南景天与小麦、大豆等植物间作后,土壤酶活性、土壤中氮磷等元素的有效态提高,土壤中的pH值降低、DOM含量明显增加,使得土壤中的重金属溶解性增加,提高了修复效率,促进了东南景天的生长^[6,30]。在本试验中,无分隔间作处理时土壤pH值低于其他处理,二者根系共存时根系有机酸分泌等过程可能发生变化,导致处理间的土壤pH值差异。在蜈蚣草与其他植物间作时发现,土壤中的微生物群落变化也对重金属的吸收有显著影响^[31]。低积累品种玉米与蜈蚣草间作修复砷污染时,玉米对草酸及酒石酸两种有机酸的分泌量影响较大,从而改变了土壤中有效态砷的含量,提高了蜈蚣草对砷的吸收^[32]。本试验中,伴矿景天生长侧土壤中有有效态Cd及Zn均低于红背桂花的生长侧,是由于伴矿景天对Cd和Zn的大量吸收耗竭造成的;此外,红背桂花单作时土壤有效态Cd及Zn含量最高,高于种植前土壤Cd及Zn的CaCl₂提取态,表明红背桂花根系对土壤Cd、Zn可能具有一定的活化效应,但由于本试验未设置未种植植物处理,无法排除无根系作用时土壤培养过程中的Cd、Zn形态变化因素,因此还需要进一步研究证明。

4 结论

(1)盆栽条件下,塑料板分隔下伴矿景天生物量最高,每株的Cd、Zn吸收量也最高,较伴矿景天单作显著提高28.3%和14.0%,这是因为高秆的红背桂花为伴矿景天遮阴,缓解了高温带来的不良生长影响,从而提高了伴矿景天生物量及Cd、Zn的吸收量。

(2)随根系相互作用的增强,间作处理红背桂花对伴矿景天生长和Cd、Zn吸收的抑制逐渐增强,红背桂花的生长及重金属吸收趋势与伴矿景天相似。

(3)田间条件下间作时两种植物的生长和对重金

属的吸收并无显著的相互影响,说明在此合适间作距离下田间伴矿景天与红背桂花间作是可行的,可兼顾污染土壤的重金属去除修复和花卉植物的较高经济效益。

参考文献:

- [1] Ali A M, Ahmad Z, Marjan E, et al. Assessment of heavy metal pollution and human health risks assessment in soils around an industrial zone in Nyshabur, Iran[J]. *Springer US*, 2020, 195(1):343-352.
- [2] Baltas H, Sirin M, Gökbayrak E, et al. A case study on pollution and a human health risk assessment of heavy metals in agricultural soils around Sinop Province, Turkey[J]. *Chemosphere*, 2020, 241:125015.
- [3] 杨佳节, 游少鸿, 吴佳玲, 等. 间套轮作超积累植物技术模式修复Cd污染土壤的研究进展[J]. *农业环境科学学报*: 2020, 39(10): 2122-2133. YANG Jia-jie, YOU Shao-hong, WU Jia-ling, et al. Research progress of intercropping, interplanting, and crop rotation models on remediation of cadmium contaminated soil by hyperaccumulators[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10):2122-2133.
- [4] 王激清, 茹淑华, 苏德纯. 印度芥菜和油菜互作对各自吸收土壤中难溶态镉的影响[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(5):890-894. WANG Ji-qing, RU Shu-hua, SU De-chun. Effects of Indian mustard and oil-seed rape co-cropping on absorbing insoluble cadmium of contaminated soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(5):890-894.
- [5] 唐明灯, 艾绍英, 李盟军, 等. 轮间作对伴矿景天和苋菜生物量及Cd含量的影响[J]. *广东农业科学*, 2012, 39(13):35-37. TANG Ming-deng, AI Shao-ying, LI Meng-jun, et al. Effects of interplanting-rotation on growth and Cd concentration of *Sedum plumbizincicola* and *Amaranthus cruetus*[J]. *Guangdong Agricultural Science*, 2012, 39(13):35-37.
- [6] Li T Q, Tao Q, Liang C F, et al. Complexation with dissolved organic matter and mobility control of heavy metals in the rhizosphere of hyper-accumulator *Sedum alfredii*[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 182:248-255.
- [7] 刘家女, 周启星, 孙挺, 等. 花卉植物应用于污染土壤修复的可行性研究[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(7):1617-1623. LIU Jia-nü, ZHOU Qi-xing, SUN Ting, et al. Feasibility of applying ornamental plants in contaminated soil remediation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(7):1617-1623.
- [8] 陆成云, 黎霞, 王代旺, 等. 花卉修复污染环境的研究现状及发展潜力[J]. *江西农业学报*, 2015, 27(2):49-53. LU Cheng-yun, LI Xia, WANG Dai-wang, et al. Research status and developmental potential of flower remediation technology for polluted environment[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2015, 27(2):49-53.
- [9] Pandey J, Verma R K, Singh S. Suitability of aromatic plants for phytoremediation of heavy metal contaminated areas: A review[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2019, 21(5):405-418.
- [10] 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]. *Soil*, 2006, 38(5):632-633.
- [11] Luo J, He W X, Rinklebe J, et al. Distribution characteristics of Cd in

- different types of leaves of *Festuca arundinacea* intercropped with *Cicer arietinum* L.: A new strategy to remove pollutants by harvesting senescent and dead leaves[J]. *Environmental Research*, 2019, 179: 108801.
- [12] Ma J F, Zheng S J, Matsumoto H, et al. Detoxifying aluminum with buckwheat[J]. *Nature*, 1997, 390(6660): 569.
- [13] Ashraf S, Ali Q, Zahir Z A, et al. Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 174: 714–727.
- [14] Jiang C A, Wu Q T, Sterckeman T, et al. Co-planting can phytoextract similar amounts of cadmium and zinc to mono-cropping from contaminated soils[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(4): 391–395.
- [15] 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 and Life Sciences)*, 2017, 43(5): 615–622.
- [16] 王业玲, 黎平, 郭凯静, 等. 红背桂花化学成分研究[J]. 天然产物研究与开发, 2014, 26(1): 47–49. WANG Ye-ling, LI Ping, GUO Kai-jing, et al. Isolation and identification of chemical constituents of *Excoecaria cochinchinensis* Lour.[J]. *Natural Product Research and Development*, 2014, 26(1): 47–49.
- [17] Zeng P, Guo Z, Xiao X, et al. Dynamic response of enzymatic activity and microbial community structure in metal (loid)-contaminated soil with tree-herb intercropping[J]. *Geoderma*, 2019, 345: 5–16.
- [18] 李玉英, 庞发虎, 孙建好, 等. 根系分隔和施氮对蚕豆/玉米间作体系根系分布和形态的影响[J]. 中国农业大学学报, 2010, 15(4): 13–19. LI Yu-ying, PANG Fa-hu, SUN Jian-hao, et al. Effects of root barrier between intercropped maize and faba bean and nitrogen (N) application on spatial distributions and morphology of crops' roots[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2010, 15(4): 13–19.
- [19] 刘英超, 肖靖秀, 汤利, 等. 施氮对不同分隔方式间作蚕豆根系分泌柚皮素的影响[J]. 植物生理学报, 2017, 53(6): 1097–1103. LIU Ying-chao, XIAO Jing-xiu, TANG Li, et al. Effects of nitrogen application rate on the naringenin exudation from intercropped faba bean's roots in different separation patterns[J]. *Plant Physiology Journal*, 2017, 53(6): 1097–1103.
- [20] 武帅. 伴矿景天与经济作物间作修复 Zn、Cd 复合污染土壤及其产后处理技术[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018. WU Shuai. Phytoremediation of Zn–Cd contaminated soil by intercropping system consisted of *Sedum plumbizincicola* and cash crops and post-treatment of the harvested plant biomass[D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2018: 18–28.
- [21] Liang H M, Lin T H, Chiou J M, et al. Model evaluation of the phytoextraction potential of heavy metal hyperaccumulators and non-hyperaccumulators[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(6): 1945–1952.
- [22] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 7. Chinese Flora Editorial Committee, Chinese Academy of Sciences. Flora of China[M]. Beijing: Science Press, 1993: 7.
- [23] 骆永明, 吴龙华, 胡鹏杰, 等. 镉锌污染土壤的超积累植物修复研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 9–10. LUO Yong-ming, WU Long-hua, HU Peng-jie, et al. Phytoremediation of cadmium and zinc contaminated soil by hyperaccumulation[M]. Beijing: Science Press, 2015: 9–10.
- [24] Lithourgidis A S, Dordas C A, Damalas C A, et al. Annual intercrops: An alternative pathway for sustainable agriculture[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2011, 5(4): 396–410.
- [25] Liu Y X, Zhang W P, Sun J H, et al. High morphological and physiological plasticity of wheat roots is conducive to higher competitive ability of wheat than maize in intercropping systems[J]. *Plant and Soil*, 2015, 397(1/2): 387–399.
- [26] 董楠. 不同作物组间作优势和时空稳定性的生态机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2017: 79–133. DONG Nan. The ecological mechanism of yield advantage and spatio-temporal stability in different crop combinations[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017: 79–133.
- [27] 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.
- [28] 居述云, 汪洁, 宓彦彦, 等. 重金属污染土壤的伴矿景天/小麦-茄子间作和轮作修复[J]. 生态学杂志, 2015, 34(8): 2181–2186. JU Shu-yun, WANG Jie, MI Yan-yan, et al. Phytoremediation of heavy metal contaminated soils by intercropping with *Sedum plumbizincicola* and *Triticum aestivum* and rotation with *Solanum melongena*[J]. *Journal of Ecology*, 2015, 34(8): 2181–2186.
- [29] Zu Y Q, Qin L, Zhan F D, et al. Effects of intercropping of *Sonchus asper* and *Vicia faba* on plant cadmium accumulation and root responses[J]. *Pedosphere*, 2020, 30(4): 457–465.
- [30] Lin T, Yasir H, Afsheen Z, et al. Fava bean intercropping with *Sedum alfredii* inoculated with endophytes enhances phytoremediation of cadmium and lead co-contaminated field[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 265(Pt A): 114861.
- [31] 郭悦. 蜈蚣草-柑橘间作修复系统中砷的迁移转化机制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019: 25–31. GUO Yue. Migration and transformation mechanism of arsenic in *Pteris vittata*-*Citrus* intercropping repair system[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019: 25–31.
- [32] 董祥伟. 低积累玉米与蜈蚣草间作修复土壤砷的效果研究[C]//中国土壤学会土壤环境专业委员会, 中国土壤学会土壤化学专业委员会. 2019年中国土壤学会土壤环境专业委员会, 土壤化学专业委员会联合学术研讨会论文摘要集, 2019: 39. DONG Xiang-wei. Study on the remediation effect of low accumulation corn and *Pteris vittata* intercropping for arsenic in soil[C]//Soil Environment Committee of Soil Society of China and Soil Chemistry Committee of Soil Society of China. Proceedings of Joint Symposium of Soil Environment Committee and Soil Chemistry Committee of Soil Society of China, 2019: 39.