

李昊,雷灿,王德正,等.刺槐间作超富集植物修复镉砷复合污染土壤潜力研究[J].中国环境科学,2025,45(5):2620-2630.

Li H, Lei C, Wang D Z, et al. Phytoremediation potential of Cd and As co-contaminated soil by *Robinia pseudoacacia* L. intercropped with hyperaccumulators [J]. China Environmental Science, 2025,45(5):2620-2630.

## 刺槐间作超富集植物修复镉砷复合污染土壤潜力研究

李昊,雷灿,王德正,余迪凡,曾鹏\*,杜博研,周航,辜娇峰,廖柏寒(中南林业科技大学生态环境学院,湖南长沙410004)

**摘要:** 通过盆栽试验,研究刺槐间作两种不同类型的超富集植物龙葵和蜈蚣草对镉(Cd)和砷(As)复合污染土壤的修复效果.结果表明,间作刺槐可促进超富集植物龙葵和蜈蚣草的生长和Cd和As的吸收,降低土壤中Cd和As有效态含量,并提高土壤酶活性.刺槐-龙葵-蜈蚣草间作处理下,龙葵和蜈蚣草的整株生物量较其单作分别显著( $P<0.05$ )提高50.4%和86.2%,同时龙葵叶部Cd和As含量分别显著( $P<0.05$ )提高78.4%和260.7%.刺槐间作龙葵和蜈蚣草处理下所有植物地上部分As累积总量较刺槐和龙葵单作分别显著( $P<0.05$ )提高1.11倍和2.17倍,Cd累积总量较刺槐和蜈蚣草单作分别显著( $P<0.05$ )提高1.89倍和15.72倍,土壤有效态Cd和As含量较对照分别显著( $P<0.05$ )降低23.6%和17.0%.同时,土壤有机质和碱解氮含量较刺槐、龙葵和蜈蚣草单作明显( $P<0.05$ )提高46.2%~83.2%和18.5%~26.4%,土壤过氧化氢酶活性较刺槐和蜈蚣草单作分别显著( $P<0.05$ )提高43.7%~53.0%,蔗糖酶和脲酶活性较刺槐和龙葵单作分别显著( $P<0.05$ )提高11.5%~28.4%和20.6%~36.4%.上述研究表明,刺槐间作两种不同类型的超富集植物可有效吸收和富集污染土壤中的Cd和As来降低土壤中Cd和As的生物有效性,同时有效改善土壤环境质量,可作为一种具有前景的间作模式应用于矿区Cd和As污染土壤的同步修复.

**关键词:** 刺槐; 超富集植物; 间作; 镉; 砷

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)05-2620-11

**Phytoremediation potential of Cd and As co-contaminated soil by *Robinia pseudoacacia* L. intercropped with hyperaccumulators.** LI Hao, LEI Can, WANG De-zheng, SHE Di-fan, ZENG Peng\*, DU Bo-yan, ZHOU Hang, GU Jiao-feng, LIAO Bo-han (College of Ecology and Environment, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China). *China Environmental Science*, 2025,45(5): 2620~2630

**Abstract:** The remediation effect of *Robinia pseudoacacia* L. intercropped with *Solanum nigrum* L. and *Pteris vittate* L. on Cd and As contaminated soil was studied through a pot experiment. The results showed that the intercropping of *R. pseudoacacia* L. could promote the growth and the uptake of Cd and As in *S. nigrum* L. and *P. vittate* L., and reduce the content of Cd and As in soil, as well as enhance soil enzyme activities. Compared with the monocultures of *S. nigrum* L. and *P. vittate* L., the whole biomass of *S. nigrum* L. and *P. vittate* L. was significantly enhanced ( $P<0.05$ ) by 50.4% and 86.2% when intercropped with *R. pseudoacacia* L. Meanwhile, the contents of Cd and As in the leaves of *S. nigrum* L. were significantly enhanced ( $P<0.05$ ) by 78.4% and 260.7%, respectively. The total accumulation of As in aboveground parts of all plants under the intercropping of *R. pseudoacacia* L. with *S. nigrum* L. and *P. vittate* L. was significantly enhanced ( $P<0.05$ ) by 1.11 and 2.17 times compared with the monocultures of *R. pseudoacacia* L. or *S. nigrum* L., and the total accumulation of Cd was significantly enhanced ( $P<0.05$ ) by 1.89 and 15.72 times compared with the monocultures of *R. pseudoacacia* L. or *P. vittate* L. Moreover, the contents of available Cd and As in soil under the intercropping of *R. pseudoacacia* L. with two hyperaccumulators were significantly reduced ( $P<0.05$ ) by 23.6% and 17.0% compared with the control, respectively. Meanwhile, the contents of soil organic matter and alkaline hydrolysis nitrogen were significantly enhanced ( $P<0.05$ ) by 46.2%~83.2% and 18.5%~26.4% as compared with the monocultures, the activities of soil catalase was significantly enhanced ( $P<0.05$ ) by 43.7%~53.0% compared with the monocultures of *R. pseudoacacia* L. or *P. vittate* L., the soil sucrase and urease activities were also significantly enhanced ( $P<0.05$ ) by 11.5%~28.4% and 20.6%~36.4% compared with the monocultures of *R. pseudoacacia* L. and *S. nigrum* L., respectively. The results suggested that the intercropping of *R. pseudoacacia* L. with two different types of hyperaccumulator could effectively uptake and accumulate Cd and As to reduce the bioavailability of Cd and As in the contaminated soil, and effectively improve the soil environmental quality, which could be considered as a promising intercropping model for the simultaneous remediation of Cd and As contaminated soil in mining areas.

**Key words:** *Robinia pseudoacacia* L.; hyperaccumulator; intercropping; Cd; As

收稿日期: 2024-09-10

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42207008); 湖南省大学生创新创业训练计划项目(S202310538053)

\* 责任作者, 副教授, zengzengpp@foxmail.com

我国工矿业场地及周边土壤中 Cd 和 As 含量与土壤背景值相比分别增加了 964.4%和 310.8%,Cd 和 As 污染达到中度以上的点位分别占 60.9%和 25.6%<sup>[1]</sup>.土壤中 Cd 和 As 会通过食物链和食物网在生物体中累积,进而威胁人体健康<sup>[2]</sup>.因此,Cd 和 As 复合污染土壤问题亟待解决.

植物修复是一种实施简便、投资较少、破坏小、无二次污染的技术来修复重金属污染土壤<sup>[3-4]</sup>.目前,蜈蚣草、龙葵、东南景天等超富集植物被广泛研究<sup>[5]</sup>.然而,上述超富集植物仅对单一重金属具有超富集能力,无法高效修复 Cd 和 As 复合污染土壤.有研究发现,Cd 富集植物黑麦草和皇竹草间作<sup>[6]</sup>、As 超富集植物蜈蚣草和玉米间作<sup>[7]</sup>等间作模式可通过不同植物间的协作来促进植物对重金属污染土壤的修复效率.因此,超富集植物在间作体系修复重金属污染土壤过程中扮演重要的角色.

木本植物具有生物量大、根系发达、对重金属耐受和富集能力强等特点,而逐渐受到关注<sup>[8-9]</sup>.木本与草本植物间作可一定程度改善土壤环境,还能促进植物对矿区重金属污染土壤生态修复的效果<sup>[10-12]</sup>.目前,木本植物间作超富集植物,如构树-蜈蚣草间作<sup>[13]</sup>、柳树-鬼针草间作<sup>[14]</sup>、桑树-东南景天间作<sup>[15]</sup>可有效修复重金属污染土壤.同时,木本植物和草本植物间作可增加植物间的共存性,并促进其对重金属污染土壤生态修复的适应性.针对 Cd 和 As 复合污染土壤,木本植物间作非超富集植物或单一超富集植物无法高效修复.因此,木本植物间作不同类型的超富集植物应能同步高效修复 Cd 和 As 复合污染土壤.然而,鲜有研究利用木本植物间作多种超富集植物来修复 Cd 和 As 复合污染土壤.

刺槐属于豆科落叶乔木,具备耐贫瘠、耐重金属胁迫、生长速度快、观赏价值高等特点,是一种理想的环境污染修复树种<sup>[16]</sup>.龙葵是一种 Cd 超富集植物,在 Cd 污染水平为 25mg/kg 条件下,龙葵茎及叶的 Cd 含量分别达到 103.8mg/kg 和 124.6mg/kg<sup>[17]</sup>.蜈蚣草是一种 As 的超富集植物,可在 As 浓度高达 1500mg/kg 的土壤中正常生长,地上部分积累的 As 可达 22630mg/kg<sup>[18]</sup>.因此,本文选取木本植物刺槐、Cd 超富集植物龙葵和 As 超富集植物蜈蚣草为研究材料,通过盆栽试验,研究刺槐间作超富集植物处理下植物的生长、植物体内各部位的重金属含量、间

作植物对重金属的富集与转运系数、提取总量来探讨间作下植物间的竞争协调机制;通过研究间作处理下土壤的重金属有效性、pH 值、土壤酶活性、有机质、碱解氮等土壤基本理化特征来探讨刺槐间作超富集植物对重金属污染土壤的生态修复潜力,以期为刺槐间作两种不同类型的超富集植物应用于矿区 Cd 和 As 复合污染土壤治理提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤和植物

从湖南省某典型矿冶周边废弃地采集 0~20cm 的表层土壤(27°88'38"N,113°07'57"E),经过土壤自然风干后,过 5mm 筛混合均匀用于盆栽试验.供试土壤的基本理化性质:土壤类型为红壤,土壤 pH 值 7.16,土壤阳离子交换量 33.67cmol/kg,土壤有机质含量 17.56g/kg,土壤总 Cd 含量 26.52mg/kg,土壤总 As 含量 61.92mg/kg,土壤碱解氮含量 73.46mg/kg,土壤有效磷含量 57.44mg/kg.

供试刺槐、龙葵和蜈蚣草幼苗分别采购于江苏宿县某刺槐育苗基地、山东潍坊某龙葵育苗基地和广东韶关某育苗基地.

### 1.2 试验设计

称取 10kg 过 5mm 筛的土壤装入塑料盆(上口直径 29cm、下口直径 18cm 和高 10cm)中,每盆分别加入 0.27g/kg  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 、0.05g/kg  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  和 0.16g/kg  $\text{KNO}_3$  作为基肥,然后加入去离子水保持供试土壤 60%的田间持水量,平衡 14d,统一移栽大小一致的幼苗(刺槐高度约 15cm,蜈蚣草和龙葵高度约 8cm).试验种植模式为:刺槐单作(R,6 株)、龙葵单作(S,6 株)、蜈蚣草(P,6 株)、刺槐-龙葵间作(RS,3 株刺槐和 3 株龙葵)、刺槐-蜈蚣草间作(RP,3 株刺槐和 3 株蜈蚣草)、刺槐-龙葵-蜈蚣草间作(RSP,2 株刺槐、2 株龙葵和 2 株蜈蚣草).每个种植模式 3 次重复.在培养 180d 后收获所有植物和土壤.植物收获后先用自来水冲洗干净后再经超纯水洗净 2 遍,再用吸水纸擦干后分成根、茎和叶(羽叶),于烘箱中首先 105℃杀青 0.5h,然后 65℃烘至恒重,称量干重后粉碎后备用.土壤样品采集后,经过自然风干后分别过 10 目和 100 目筛后,备用.

### 1.3 测试与分析方法

土壤的基本理化性质(pH 值、阳离子交换量、

有机质、碱解氮和有效磷)根据鲁如坤<sup>[19]</sup>的方法进行分析和测定.植物样品采用  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$  消解.土壤有效态 Cd 和有效态 As 含量分别采用  $\text{CaCl}_2$  法(T/HNNMIA XX-2020)<sup>[20]</sup>和 DTPA 法(HJ 804-2016)<sup>[21]</sup>浸提.消解液和浸提液中 Cd 含量采用 ICP-AES(ICP-6300,Thermo)测定,As 含量采用原子荧光分光光度计(AFS-8220,北京吉天仪器有限公司)测定.消解过程中用国家标准物质土壤(GBW(E)-070009)和生物成分标准物质(GBW-10010)进行质量控制,Cd 的回收率为 97.2%~101.3%,As 的回收率为 99%~103.5%.

#### 1.4 数据处理和统计分析

富集系数(BCF)=植物各部位重金属含量(mg/kg)/土壤重金属含量(mg/kg).

转运系数( $\text{TF}_{\text{根-茎}}$ )=植物茎中重金属含量(mg/kg)/植物根系中重金属含量(mg/kg).

转运系数( $\text{TF}_{\text{茎-叶}}$ )=植物叶中重金属含量(mg/kg)/植物茎中重金属含量(mg/kg).

每盆地上部重金属累积总量(mg/pot)=[(植物茎中重金属含量(mg/kg)×植物茎生物量(g)× $10^{-3}$ +植物叶中重金属含量(mg/kg)×植物叶生物量(g)× $10^{-3}$ )×每盆株数(株)].

每盆根重金属累积总量(mg/pot)=[植物根中重金属含量(mg/kg)×植物根生物量(g)× $10^{-3}$ ]×每盆株数(株).

运用 Excel 2016 和 SPSS 20 进行数据分析和统计,采用单因素方差分析(ANOVA)和 Duncan 检验评价各处理组间的统计学差异,显著性水平为  $P<0.05$ ,使用 Origin 2019 进行绘图.采用 R 4.3.1 绘制刺槐间作超富集植物处理下 Cd 和 As 累积总量与土壤环境因子的 Mantel test 相关性图.

## 2 结果与讨论

### 2.1 间作对刺槐和超富集植物生长的影响

植株生物量可反应植物在重金属污染土壤上的生长状况.由图 1 可看出,在 RS 间作下龙葵整株生物量较龙葵单作显著( $P<0.05$ )降低 32.3%,与 Ma 等<sup>[22]</sup>的研究表明,茄子和 Cd 超富集植物东南景天间作降低了东南景天的生物量的研究结果类似.其原因可能是生物量较大的植物生长快速,具有较强的竞争性,进而抑制其他植物的生长<sup>[23]</sup>.然而,与龙葵

单作相比,RSP 间作下龙葵整株生物量显著( $P<0.05$ )提高 50.4%,尤其是其茎部的生物量显著( $P<0.05$ )提高 75.4%.与蜈蚣草单作相比,RP 和 RSP 间作处理下蜈蚣草整株生物量分别显著( $P<0.05$ )提高 54.2%和 86.2%,尤其是蜈蚣草根和茎部的生物量分别显著( $P<0.05$ )提高 163.0%和 128.2%(RP 间作),341.8%和 64.7%(RSP 间作).

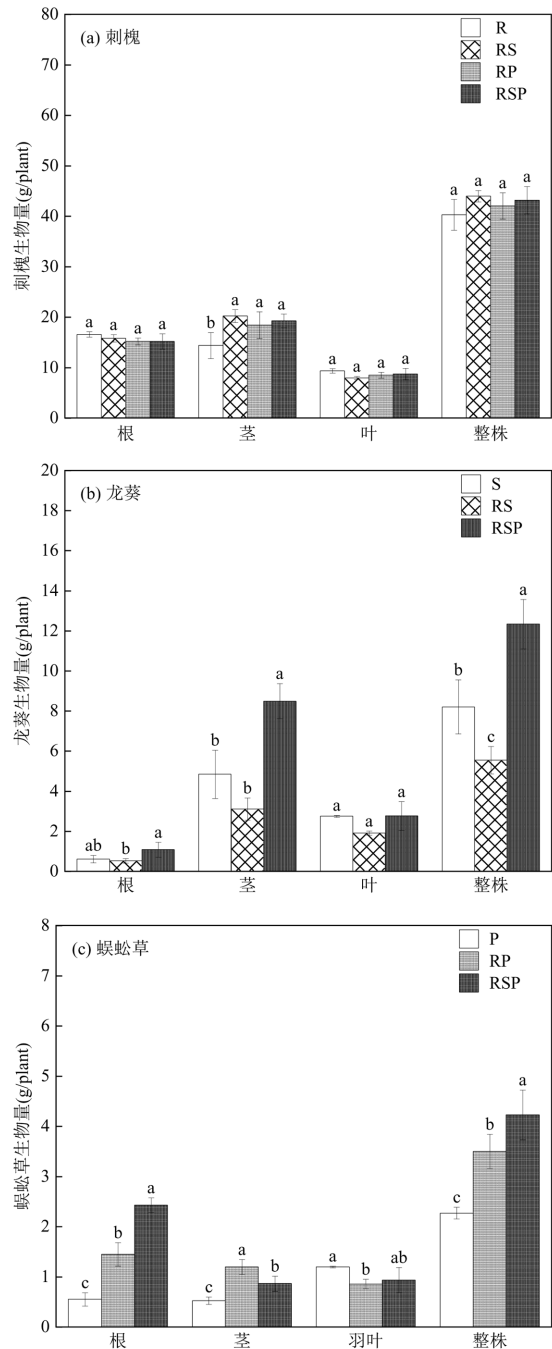


图 1 间作下刺槐和超富集植物生物量的变化  
Fig.1 Change of the biomass of *R. pseudoacacia* L. and hyperaccumulators under the intercropping treatments  
不同字母表示间作与单作处理间具有显著差异,下同

与秦丽等<sup>[24]</sup>研究发现间作后续断菊地上部和根部生物量分别显著增加 30.0%和 35.0%,以及童文彬等<sup>[25]</sup>发现超富集植物东南景天与油菜作物间作时,东南景天生物量增加的研究结果类似.在间作条件下,不同类型的植物具有不同的生态位,进而可充分利用不同的环境空间和资源,避免间作植物间生态位的竞争和滞空,从而达到环境资源利用的最大化<sup>[26]</sup>.本研究中刺槐-龙葵-蜈蚣草间作可有效实现植物间生态位的互补,为间作体系修复 Cd 和 As 复合污染土壤构建有利的前提条件.

## 2.2 刺槐间作超富集植物对植物 Cd 和 As 吸收和富集的影响

刺槐间作超富集植物处理下植物各部位 Cd 和 As 含量的变化见图 2.与刺槐单作相比,RS 和 RP 间作处理下刺槐根和茎部 Cd 和 As 无明显差异,而 RSP 间作处理下刺槐根部 Cd 和叶片 As 含量分别显著 ( $P<0.05$ )提高 415.6%和 98.6%.与龙葵单作相比,RS 间作处理下龙葵根和茎部 Cd 和 As 含量无明显变化,而 RSP 间作处理下龙葵根部 As 含量、叶片部 Cd 和 As 含量分别显著( $P<0.05$ )提高 77.7%、78.4%和 260.7%.与蜈蚣草单作相比,RP 和 RSP 间作处理对蜈蚣草体内 As 含量无明显影响,蜈蚣草根部 Cd 含量分别显著( $P<0.05$ )提高 38.7%和 102.1%,而蜈蚣草叶部 Cd 含量分别显著( $P<0.05$ )降低 20.7%和 19.5%.原因可能是间作处理下蜈蚣草根系分泌物的类型、数量和功能发生了改变,促进了蜈蚣草根部对 Cd 的固定而降低其向地上部的转运,进而增强其对重金属污染环境下的耐受性<sup>[12]</sup>.其次,龙葵属于 Cd 超富集植物,在间作处理下可有效吸收污染土壤中的 Cd,进而可能使蜈蚣草和龙葵对 Cd 的吸收产生竞争作用.本研究中,RSP 间作处理下,蜈蚣草根部 Cd 和龙葵根部 As 含量,以及龙葵叶片 Cd 和 As 含量明显高于蜈蚣草或龙葵单作.超富集植物的根系分泌物可相应提高其富集重金属在根际土壤中的流动性,进而可提高间作植物对其吸收和累积<sup>[15]</sup>.Wang 等<sup>[27]</sup>发现,东南景天和蜈蚣草间作后植物对 Cd 和 As 的累积效果较其单作有效提升.大量研究表明,多种植物根系的交叉可使一种植株的根系分泌物通过土壤扩散到间作植株根际,改变植物根际土壤中重金属的有效性,从而影响间作植株对重金属的吸收<sup>[28-29]</sup>.本研究表明,刺槐间作两种不同类型的超富

集植物可促进蜈蚣草根部 Cd 和龙葵叶片 Cd 和 As 的吸收,有利于 Cd 和 As 复合污染土壤的修复.

由表 1 和表 2 可知,与龙葵单作相比,RS 间作下龙葵地上部 Cd 以及根部 Cd 和 As 富集系数无明显影响,而 RSP 间作下龙葵的  $BCF_{\text{地上部}(Cd)}$ 和  $BCF_{\text{地上部}(As)}$ 分别显著( $P<0.05$ )提高 21.7%和 163.2%, $BCF_{\text{根}(Cd)}$ 和  $BCF_{\text{根}(As)}$ 分别显著( $P<0.05$ )提高 20.0%和 84.6%;同时 RS 和 RSP 间作下龙葵的  $TF_{\text{根-茎}(Cd)}$ 无显著变化,而其  $TF_{\text{茎-叶}(Cd)}$ 分别显著( $P<0.05$ )提高 91.0%和 85.9%,RSP 间作下龙葵的  $TF_{\text{茎-叶}(As)}$ 显著( $P<0.05$ )提高 392.0%,表明 RSP 间作可有效提高龙葵对 Cd 和 As 的富集和转运.与蜈蚣草单作相比,RP 和 RSP 间作下蜈蚣草的  $BCF_{\text{地上部}(Cd)}$ 和  $BCF_{\text{地上部}(As)}$ 以及  $BCF_{\text{根}(As)}$ 无显著变化,而  $BCF_{\text{根}(Cd)}$ 分别显著( $P<0.05$ )提高 20.0%和 86.7%,RSP 间作下蜈蚣草的  $TF_{\text{根-茎}(As)}$ 显著( $P<0.05$ )提高 40.7%,而  $TF_{\text{茎-叶}(Cd)}$ 显著( $P<0.05$ )降低 24.4%,表明间作刺槐和龙葵可促进蜈蚣草对 Cd 的富集,并将大部分 Cd 储存到茎部,同时可提高根到茎部对 As 的转运速率.有研究表明,间作小麦提高了黑麦草根在灌浆期和收获期的 Cd 含量,而降低了小麦对 Cd 的积累以及根向地上部的 Cd 转运<sup>[30]</sup>.这可能是因为间作体系中超富集植物根系间的相互作用,改变了根系分泌物中有机酸的组分,引起土壤中重金属的释放,并使土壤总有机碳和水溶性含量增加,从而促进植物对重金属的吸收和累积<sup>[31-32]</sup>.多种植物间作体系中一种超富集植物根系分泌物可以影响另一种植物对重金属的吸收作用<sup>[33]</sup>.在本研究中,龙葵和蜈蚣草分别是 Cd 和 As 超富集植物,其特殊的根系分泌物可影响相应重金属的结合形式<sup>[34]</sup>,进而在间作体系中进一步促进了龙葵和蜈蚣草对 Cd 和 As 的富集和转运.因此,间作刺槐可促进超富集植物对 Cd 和 As 的富集,同时一定程度上促进龙葵体内 Cd 和 As 向地上部的转运.

从表 3 可看出,龙葵和蜈蚣草单作下地上部对 Cd 和 As 的提取量最高,分别可达 1.72mg/pot 和 0.61mg/pot,表明龙葵和蜈蚣草分别对 Cd 和 As 的提取效果最佳,可用于单一 Cd 或者 As 污染土壤的修复和治理.RSP 间作下植物地上部分 As 累积总量较刺槐和龙葵单作、以及 RS 间作分别显著( $P<0.05$ )提高 1.11 倍,2.17 倍和 1.375 倍,RSP 间作下植物地上部分 Cd 累积总量较刺槐和蜈蚣草单作、以及 RS

和 RP 间作分别显著( $P<0.05$ )提高 1.89 倍、15.72 倍、0.29 倍和 4.35 倍.因此,RSP 间作可同步高效提取污染土壤中的 Cd 和 As.与 Zeng 等<sup>[35]</sup>发现蜈蚣草分别与桑树或构树间作下组合植物地上部 As 的提取量显著( $P<0.05$ )高于桑树和构树单作,Cd 和 Zn 含量显著高于蜈蚣草单作的研究结果类似.此外,繁缕、牛繁缕和猪殃殃 3 种 Cd 富集植物间作处理下植物地上部 Cd 的累积总量约为 0.13mg/pot(3kg 土,土壤总

Cd 含量为 10mg/kg)<sup>[36]</sup>;象草和苦楝间作下地上部 As 的累积总量约为 0.07mg/pot(10kg 土,土壤总 As 含量为 142mg/kg)<sup>[12]</sup>,RSP 间作处理下地上部 Cd 和 As 的累积总量分别可达 1.07mg/pot 和 0.38mg/pot,表明刺槐间作龙葵和蜈蚣草可通过其互补性促进植物对 Cd 和 As 的修复效率.因此,刺槐间作两种不同类型的超富集植物可同步修复和治理 Cd 和 As 复合污染土壤.

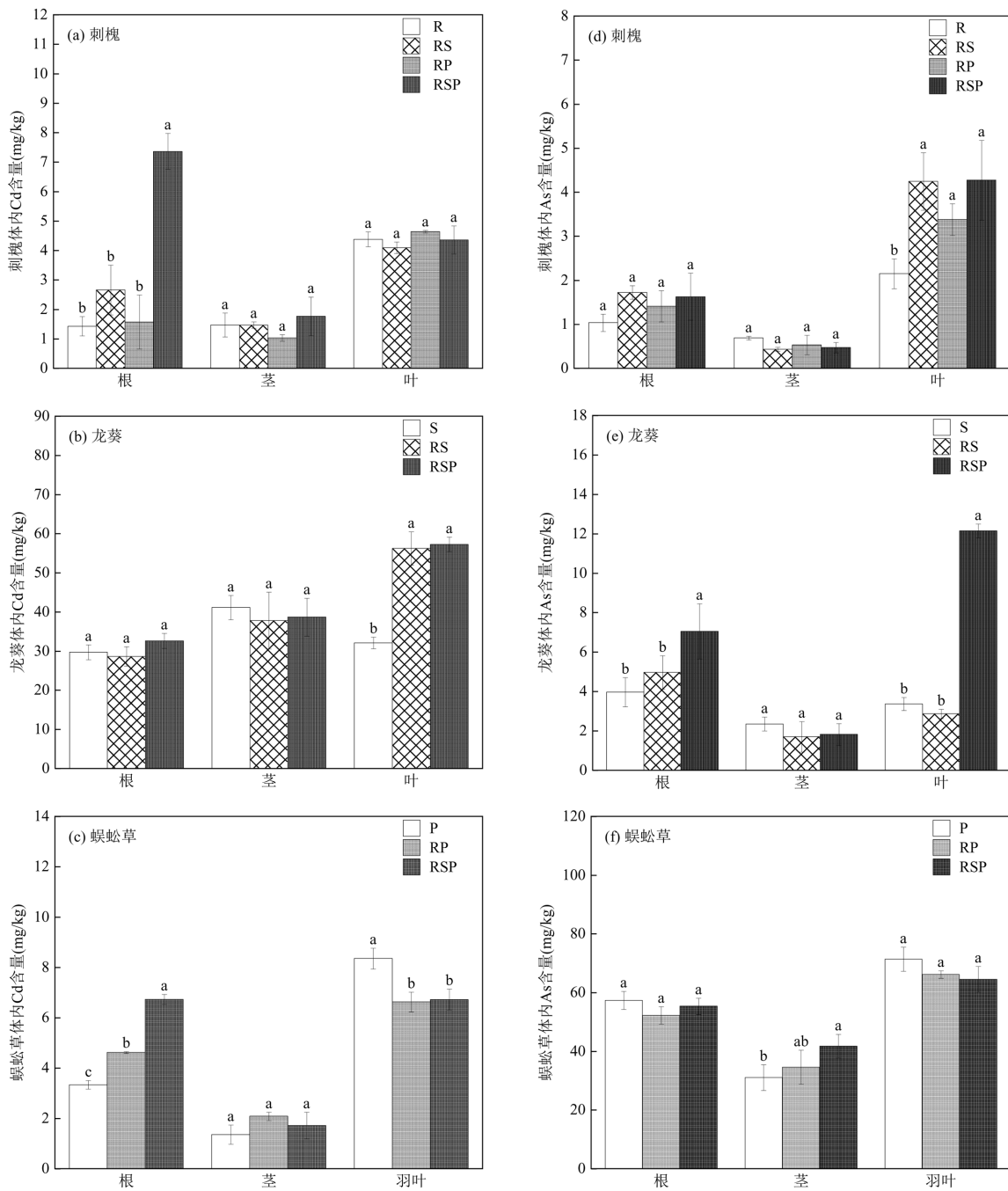


图 2 间作下刺槐和超富集植物体内 Cd 和 As 含量的变化

Fig.2 Changes of Cd and As contents in *R. pseudoacacia* L. and hyperaccumulators under the intercropping treatments

表 1 间作处理下刺槐和超富集植物体内 Cd 和 As 富集系数的变化

Table 1 Change of BCF of Cd and As in *R. pseudoacacia* L. and hyperaccumulators under the intercropping treatments

植物	处理	富集系数(BCF <sub>地上部</sub> )		富集系数(BCF <sub>根</sub> )	
		Cd	As	Cd	As
刺槐	R	0.26±0.022a	0.048±0.0039b	0.065±0.016b	0.017±0.003a
	RS	0.23±0.0022a	0.078±0.011a	0.11±0.030b	0.029±0.0028a
	RP	0.23±0.010a	0.068±0.0083a	0.064±0.041b	0.025±0.0069a
	RSP	0.26±0.046a	0.084±0.015a	0.31±0.029a	0.029±0.009a
龙葵	S	3.32±0.10b	0.095±0.011b	1.30±0.062ab	0.065±0.0095b
	RS	3.83±0.58ab	0.054±0.004c	1.17±0.026b	0.083±0.014b
	RSP	4.04±0.13a	0.25±0.010a	1.56±0.29a	0.12±0.023a
蜈蚣草	P	0.43±0.076a	1.81±0.15a	0.15±0.023c	1.0±0.030a
	RP	0.38±0.051a	1.76±0.12a	0.18±0.014b	0.93±0.053a
	RSP	0.35±0.038a	1.88±0.13a	0.28±0.0074a	0.98±0.026a

注:数据为平均值±标准偏差(n=3),不同字母表示间作和单作处理下富集系数具有显著差异(P<0.05).

表 2 间作对植物体内 Cd 和 As 的转运系数的影响

Table 2 Change of TF of Cd and As in *R. pseudoacacia* L. and hyperaccumulators under the intercropping treatments

植物	处理	转运系数(TF <sub>根-茎</sub> )		转运系数(TF <sub>茎-叶</sub> )	
		Cd	As	Cd	As
刺槐	R	1.11±0.57a	0.67±0.085a	3.12±0.89b	3.13±0.52b
	RS	0.59±0.18ab	0.25±0.048b	2.8±0.28b	9.93±2.3a
	RP	0.81±0.40ab	0.42±0.25ab	4.53±0.51a	7.07±2.72ab
	RSP	0.24±0.10b	0.30±0.072b	2.62±0.64b	9.52±2.92a
龙葵	S	1.31±0.13a	0.60±0.092a	0.78±0.031b	1.44±0.096b
	RS	1.34±0.30a	0.36±0.13b	1.49±0.031a	1.91±0.79b
	RSP	1.06±0.16a	0.27±0.013b	1.45±0.18a	7.08±1.80a
蜈蚣草	P	0.41±0.14b	0.54±0.088b	6.43±1.62a	2.32±0.33a
	RP	0.62±0.047a	0.66±0.095ab	2.32±0.053b	1.95±0.3ab
	RSP	0.23±0.099b	0.76±0.098a	4.86±1.55ab	1.55±0.13b

注:数据为平均值±标准偏差(n=3),不同字母表示间作和单作处理下转运系数具有显著差异(P<0.05).

表 3 单作和间作体系对 Cd 和 As 的累积总量(mg/pot)

Table 3 Total accumulation amounts of Cd and As in the monoculture and intercropping treatments(mg/pot)

金属类型	部位	种植模式					
		R	S	P	RS	RP	RSP
Cd	地上部	0.37±0.053d	1.72±0.25a	0.064±0.0031e	0.83±0.024c	0.20±0.0051de	1.07±0.12b
	根	0.17±0.050b	0.11±0.028c	0.011±0.0029d	0.16±0.036bc	0.050±0.0034d	0.31±0.022a
As	地上部	0.18±0.026c	0.12±0.021c	0.61±0.038a	0.16±0.018c	0.41±0.027b	0.38±0.066b
	根	0.12±0.0073c	0.015±0.0074d	0.19±0.043b	0.11±0.035c	0.28±0.049a	0.33±0.037a

注:数据为平均值±标准偏差(n=3),不同字母表示间作和单作处理下地上部或根重金属累积总量具有显著差异(P<0.05).

### 2.3 刺槐间作超富集植物对土壤基本理化性质的影响

土壤中养分对植物的生存和生态系统的稳定性至关重要,是评价土壤修复效果的重要指标<sup>[37]</sup>.由图 3(a)可知,与对照相比,刺槐、龙葵单作,以及 RS、RP 和 RSP 间作下土壤 pH 值显著(P<0.05)提高 0.39~0.52 个单位.与 Li 等<sup>[38]</sup>研究表明,白羽扇豆与玉米间

作和单作下土壤 pH 值明显增加的研究结果类似.其原因可能与植物吸收土壤中的有效磷,进而使根际土壤碱化<sup>[39]</sup>.同时,间作处理下植物根际分泌的有机酸可供土壤微生物的生长和繁殖而缓解土壤 pH 值的变化<sup>[40]</sup>.王小慧等<sup>[12]</sup>研究发现,象草与苦楝/构树间作可提高土壤溶液 pH 值,同时增加了土壤放线菌门、绿菌门和酸杆菌门丰度.然而,RS、RP 和 RSP

间作下土壤 pH 值较刺槐、龙葵和蜈蚣草单作无显著差异.与 Xia 等<sup>[41]</sup>发现小飞蓬间作球序卷耳或碎米芥的土壤 pH 值较其单作无明显差异的结果类似.也有研究表明,单作和间作下植物根际分泌的有机酸可使土壤 pH 值降低<sup>[42]</sup>.本研究中,单作和间作下土壤 pH 值的变化仅仅是基于 180d 植物修复的结果,后续还需要进一步通过长期田间试验研究刺槐间作超富集植物对土壤酸碱性的影响.

从图 3(b)和(d)可看出,RSP 间作下土壤有机质和碱解氮含量与刺槐、龙葵和蜈蚣草单作相比分别显著( $P<0.05$ )提高 83.2%、59.4%和 46.2%,18.5%、

26.4%和 20.7%.然而,RS、RP 和 RSP 间作下土壤有效磷含量较蜈蚣草单作分别显著( $P<0.05$ )降低 12.0%、10.5%和 19.3%.与谭建波等<sup>[43]</sup>的研究表明,间作续断菊和蚕豆成熟期时其土壤有机质较续断菊单作增加 20.1%,碱解氮含量显著增加 32.7%的研究结果类似.刺槐属豆科植物,其根系具有良好的固氮能力,同时固氮过程中能通过根际一系列活动活化土壤中难溶性磷<sup>[37,44]</sup>,进而改善间作体系下超富集植物氮磷吸收,有利于超富集植物的生长.本研究表明,刺槐间作超富集植物可提高污染土壤的有机质和碱解氮含量,可一定程度改善污染土壤肥力.

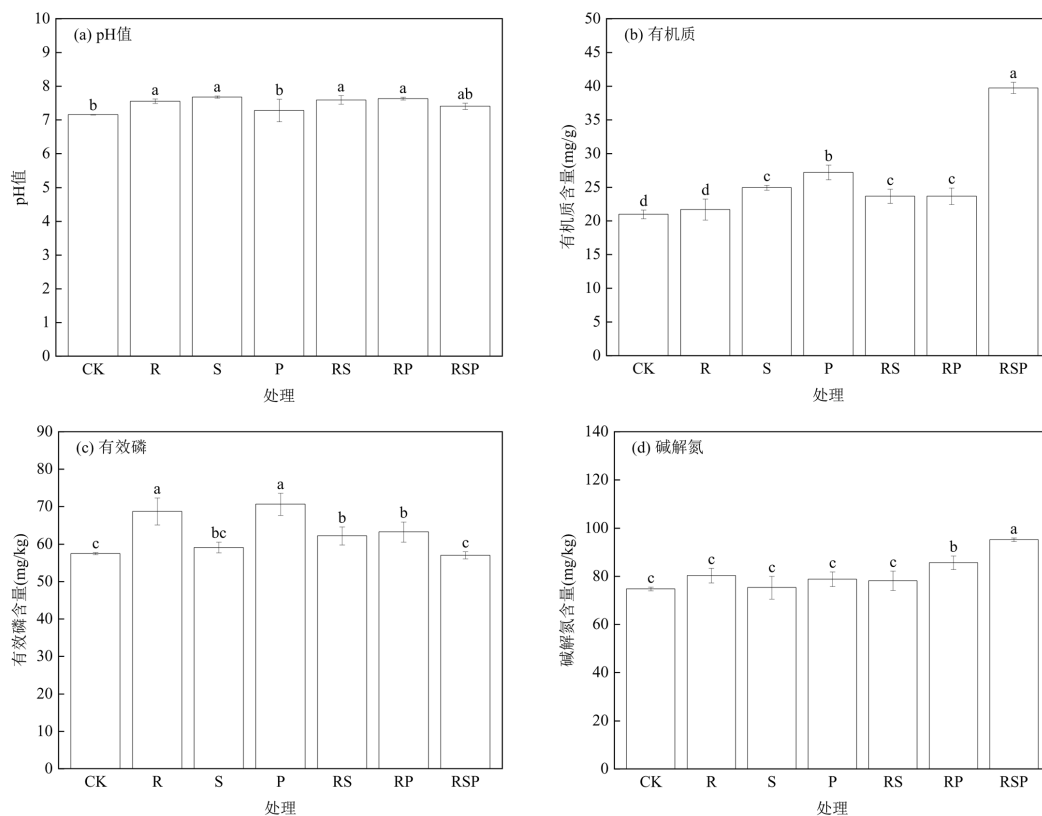


图 3 刺槐-超富集植物间作下土壤 pH 值、有机质、有效磷和碱解氮含量的变化

Fig.3 Change of soil pH, organic matter, available phosphorus and alkaline hydrolysis nitrogen content under the intercropping of *R. pseudoacacia* L. with hyperaccumulators

#### 2.4 刺槐间作超富集植物对土壤 Cd 和 As 生物有效性及土壤酶活性的影响

从图 4 可看出,与 CK 相比,R、S 和 P 处理下土壤有效态 Cd 和 As 含量分别降低 21.4%、58.4%和 25.9%,14.9%、15.5%和 15.0%,表明蜈蚣草和龙葵单作均可有效降低土壤中 Cd 和 As 的生物有效性.同时,RS、RP 和 RSP 间作下土壤有效态 Cd 和 As 含

量较对照分别显著( $P<0.05$ )降低 52.9%、19.0%和 23.6%,5.9%、9.3%和 17.0%,表明刺槐间作超富集植物能有效降低土壤中 Cd 和 As 的生物有效性.与 Ng 等<sup>[45]</sup>的研究表明,半夏和东南景天间作可降低土壤 Cd 有效态的结果类似.这可能是间作处理下植物间的根系分泌物类型改变,与土壤中的重金属发生络合反应,以降低土壤重金属的生物有效性<sup>[46]</sup>.

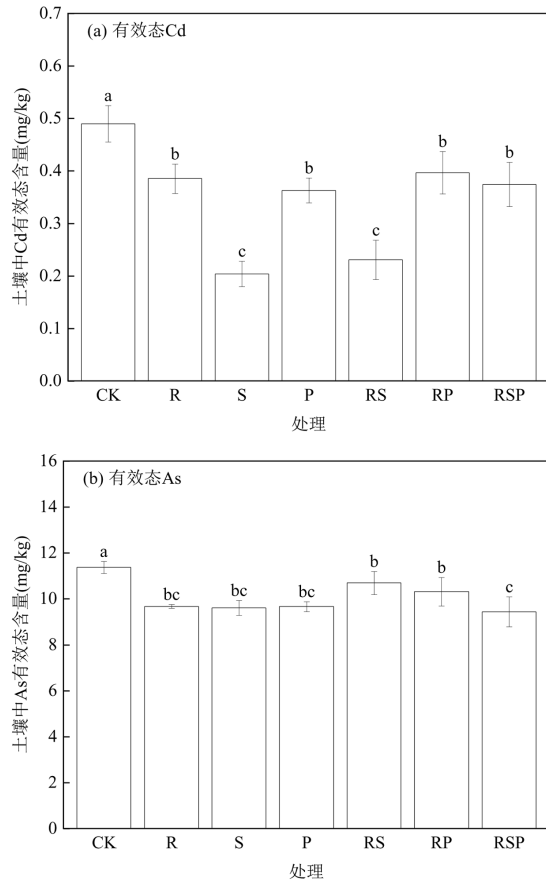


图4 刺槐-超富集植物间作下土壤有效态 Cd 和 As 含量的变化

Fig.4 Changes of available Cd and As contents in soil under the intercropping of *R. pseudoacacia* L. and hyperaccumulators

从图5可看出,R、S、P、RS、RP和RSP处理下,土壤过氧化氢酶活性和蔗糖酶活性较CK处理分别降低10.6%~53.0%和7.8%~28.2%。这可能是植物修复过程中产生的根系分泌物促进了土壤中重金属形态的变化,重金属与酶分子中的活性部位结合,致使酶失去活性<sup>[47]</sup>。然而,RS间作下土壤蔗糖酶活性较刺槐单作显著( $P<0.05$ )提高16.8%,土壤脲酶活性较龙葵和蜈蚣草单作分别显著( $P<0.05$ )提高23.3%和11.7%;RP间作下,土壤过氧化氢酶较刺槐和蜈蚣草单作分别显著( $P<0.05$ )提高78.5%和90.1%,蔗糖酶活性较刺槐单作显著( $P<0.05$ )提高14.2%,土壤脲酶活性较龙葵和蜈蚣草单作分别显著( $P<0.05$ )提高23.9%和12.2%;RSP间作处理下,土壤过氧化氢酶活性较刺槐和蜈蚣草单作分别显著( $P<0.05$ )提高43.7%和53.0%,蔗糖酶活性较刺槐和龙葵单作分别显著( $P<0.05$ )提高28.4%和11.5%,土壤脲酶活性较刺槐、龙葵和蜈蚣草单作分别显著( $P<0.05$ )提高20.6%、36.4%和23.6%。与Zeng等<sup>[48]</sup>研究表明,利用两

种草本植物蜈蚣草和芦竹与两种木本植物桑树与构树间作可有效提高土壤酶活性的研究结果一致。植物间作时其根系发生相互作用,使根系环境因养分含量和生物代谢活性的提高而发生改变,从而促进了植物根际活化土壤所分泌酶的数量<sup>[49]</sup>;另外,植物多样性的改变可增加土壤碳和真菌关键类群的丰富度来增强土壤真菌网络稳定性,从而提高土壤酶活性<sup>[50]</sup>。因此,刺槐间作超富集植物可有效改善土壤酶活性。

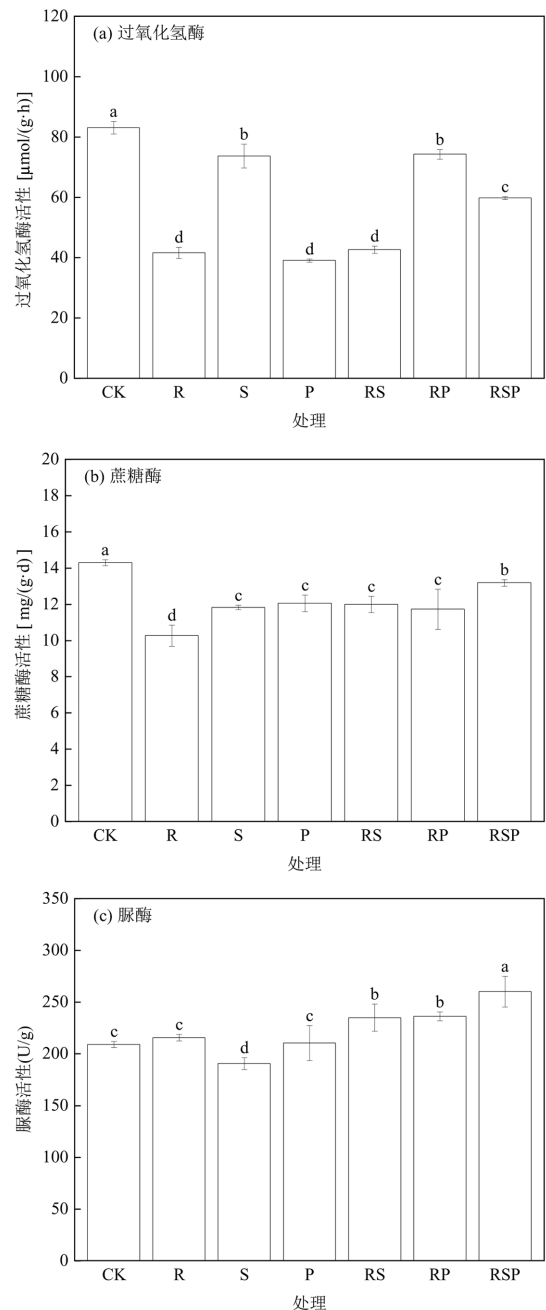


图5 刺槐-超富集植物间作下土壤酶活性的变化  
Fig.5 Changes of soil enzyme activities under the intercropping of *R. pseudoacacia* L. and hyperaccumulators

### 2.5 相关性分析

间作体系下植物根际互作可改变根系分泌物的组成和数量以及影响土壤理化性质(如 pH 值、酶活性以及养分有效性等)来间接影响土壤重金属的有效性<sup>[51]</sup>.从图 6 可看出,土壤 pH 值与植物地上部 Cd、As 和根 Cd 累积总量呈显著( $P<0.05$ )正相关;土壤有效态 Cd 与植物地上部 Cd 累积总量呈显著( $P<0.05$ )正相关,表明刺槐间作超富集植物的根际互作可影响土壤 pH 值和重金属的生物有效性进而影响间作植物对重金属的吸收.间作下植物根系分泌物的交互作用可改变根际环境和土壤重金属的生物有效性,进而促进间作植物对重金属的吸收和累积<sup>[41]</sup>.同时,植物根 Cd 累积含量与土壤过氧化氢酶活性呈显著( $P<0.05$ )正相关,植物根 As 累积含量与土壤过氧化氢酶和脲酶活性呈显著( $P<0.05$ )正相关,

且土壤酶活性与土壤 Cd 和 As 有效态无显著相关性,表明刺槐间作超富集植物可通过间作植物根对 Cd 和 As 的富集来降低土壤重金属的生物有效性,进而降低土壤中 Cd 和 As 对土壤酶活性的不利影响.吴乐诗等<sup>[52]</sup>研究表明,菜心与东南景天间作可明显提高东南景天对 Cd 的累积,进而提高土壤酶活性.此外,土壤脲酶活性与土壤碱解氮含量呈显著( $P<0.05$ )正相关,表明刺槐间作超富集植物可通过影响土壤脲酶活性来提高土壤碱解氮含量,进而提高土壤肥力.与徐华勤等<sup>[53]</sup>研究发现,茶间作三叶草处理下土壤养分含量与脲酶活性呈显著正相关的研究结果类似.综上所述,刺槐间作超富集植物可通过龙葵和蜈蚣草对污染土壤中 Cd 和 As 的同步吸收来降低土壤 Cd 和 As 的生物有效性,进而改善土壤酶活性和土壤肥力.

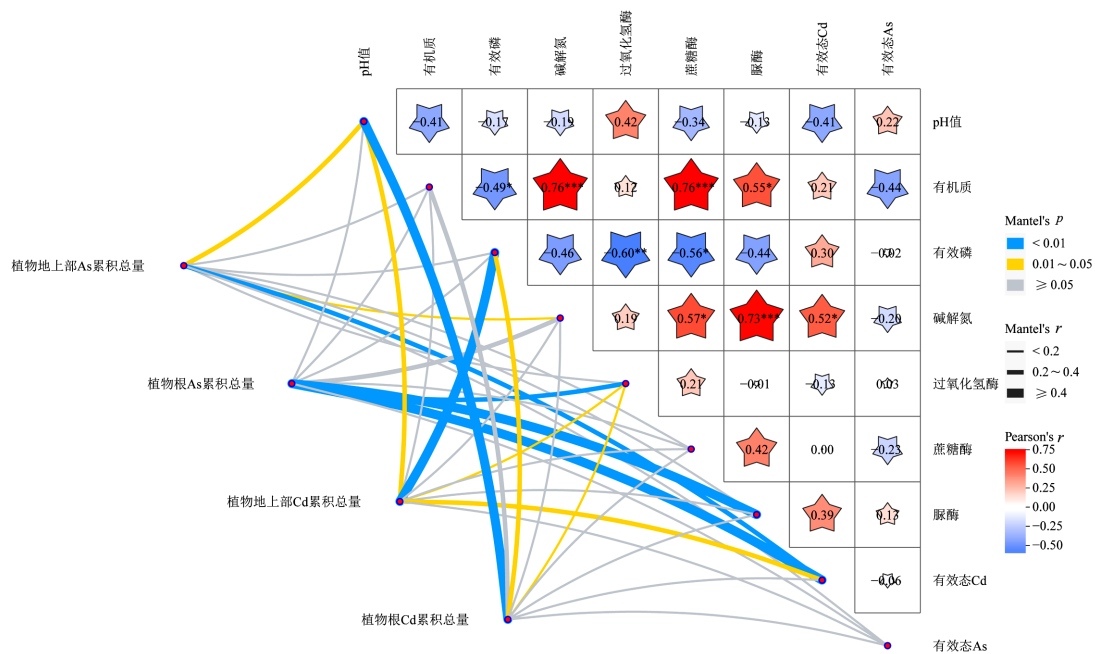


图 6 刺槐间作超富集植物处理下 Cd 和 As 累积总量与土壤环境因子的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis of total Cd and As accumulation and soil environmental factors under intercropping of under the intercropping of *R. pseudoacacia* L. and hyperaccumulators

\*表示  $P<0.05$ , \*\*表示  $P<0.01$ , \*\*\*表示  $P<0.001$

## 3 结论

3.1 间作刺槐可促进超富集植物的生长和 Cd 和 As 的吸收.刺槐间作超富集植物下龙葵与蜈蚣草的整株生物量较其单作分别显著( $P<0.05$ )提高 50.4%和 86.2%,同时龙葵根部 As、叶部 Cd 和 As 含量分

别显著( $P<0.05$ )提高 77.7%、78.4%和 260.7%,蜈蚣草根 Cd 含量显著( $P<0.05$ )提高 102.1%.

3.2 刺槐间作超富集植物可同步高效提取污染土壤中的 Cd 和 As.同时,刺槐-龙葵-蜈蚣草间作处理下植物地上部分 As 累积总量较刺槐和龙葵单作分别显著( $P<0.05$ )提高 1.11 倍和 2.17 倍,Cd 累积总量

较刺槐和蜈蚣草单作分别显著( $P<0.05$ )提高 1.89 倍和 15.72 倍。

3.3 刺槐间作超富集植物可降低土壤中 Cd 和 As 的生物有效性,并改善土壤肥力.刺槐-龙葵-蜈蚣草间作处理下土壤有效态 Cd 和 As 含量较对照分别显著( $P<0.05$ )降低 23.6%和 17.0%.与刺槐、龙葵和蜈蚣草单作相比,刺槐-龙葵-蜈蚣草间作下土壤有机质和碱解氮含量显著( $P<0.05$ )提高 46.2%~83.2%和 18.5%~26.4%,同时土壤过氧化氢酶活性较刺槐和蜈蚣草单作分别显著提高 43.7%和 53.0%,蔗糖酶和脲酶活性较刺槐和龙葵单作分别显著( $P<0.05$ )提高 28.4%和 11.5%,20.6%和 36.4%。

#### 参考文献:

- [1] 晏利晶,姜 淼,赵庆良,等.基于 Meta 分析的中国工矿场地土壤重金属污染评价 [J]. 环境科学研究, 2023,36(1):9-18.  
Yan L J, Jiang M, Zhao Q L, et al. Evaluation of soil heavy metal pollution in China's industrial and mining sites based on meta-analysis [J]. Research of Environmental Sciences, 2023,36(1):9-18.
- [2] Parker G H, Gillie C E, Miller J V, et al. Human health risk assessment of arsenic, cadmium, lead, and mercury ingestion from baby foods [J]. Toxicology Reports, 2022,9:238-249.
- [3] Shah V, Daverey A. Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil [J]. Environmental Technology & Innovation, 2020,18:100774.
- [4] Yaashikaa P R, Kumar P S, Jeevanantham S, et al. A review on bioremediation approach for heavy metal detoxification and accumulation in plants [J]. Environmental Pollution, 2022,301:119035.
- [5] Rascio N, Navari-Izzo F. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? [J]. Plant Science, 2011,180(2):169-181.
- [6] Zou W T, Cao Z, Wang Y J, et al. Intercropping of *Pennisetum sinense* with *Lolium perenne* improved phytoextraction of heavy metal from soil [J]. Restoration Ecology, 2023,31(3):e13702.
- [7] Zeng W B, Wan X M, Lei M, et al. Intercropping of *Pteris vittata* and maize on multimetal contaminated soil can achieve remediation and safe agricultural production [J]. Science of the Total Environment, 2024,915:170074.
- [8] Guo Z H, Zeng P, Xiao X Y, et al. Physiological, anatomical, and transcriptional responses of mulberry (*Morus alba* L.) to Cd stress in contaminated soil [J]. Environmental Pollution, 2021,284:117387.
- [9] Zeng P, Guo Z H, Xiao X Y, et al. Tolerance capacities of *Broussonetia papyrifera* to heavy metal(loid)s and its phytoremediation potential of the contaminated soil [J]. International Journal of Phytoremediation, 2022,24(6):580-589.
- [10] Qu H J, Ma C X, Xiao J, et al. Co-planting of *Quercus nuttallii*, *Quercus pagoda* with *Solanum nigrum* enhanced their phytoremediation potential to multi-metal contaminated soil [J]. International Journal of Phytoremediation, 2021,23(10):1104-1112.
- [11] 曾 鹏,郭朝晖,肖细元,等.芦竹和木本植物间种修复重金属污染土壤 [J]. 环境科学, 2018,39(11):5207-5216.  
Zeng P, Guo Z H, Xiao X Y, et al. Intercropping *Arundo donax* with woody plants to remediate heavy metal contaminated soil [J]. Environmental Science, 2018,39(11):5207-5216.
- [12] 曾 鹏,郭朝晖,肖细元,等.构树修复对重金属污染土壤环境质量的影 响 [J]. 中国环境科学, 2018,38(7):2639-2645.  
Zeng P, Guo Z H, Xiao X Y, et al. Effect of phytoremediation with *Broussonetia papyrifera* on the biological quality in soil contaminated with heavy metals [J]. China Environmental Science, 2018,38(7):2639-2645.
- [13] Zeng P, Guo Z H, Xiao X Y, et al. Complementarity of co-planting a hyperaccumulator with three metal(loid)-tolerant species for metal(loid)-contaminated soil remediation [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019,169:306-315.
- [14] Zhang C, Zha Y, Guang P, et al. Synergistic effects of tree-herb intercropping on the phytoremediation efficiency of cadmium and lead contaminated soil [J]. The Science of the total environment, 2024, 954:176709.
- [15] Zeng P, Guo Z H, Xiao X Y, et al. Facilitation of *Morus alba* L. intercropped with *Sedum alfredii* H. and *Arundo donax* L. on soil contaminated with potentially toxic metals [J]. Chemosphere, 2022, 290:133107.
- [16] 刘金秀,张松彦,周 建,等.镉胁迫对刺槐幼苗生长与光合生理特性的影响 [J]. 林业科学研究, 2023,36(3):168-178.  
Liu J X, Zhang S Y, Zhou J, et al. Effects of cadmium stress on growth and photosynthetic physiological characteristics of *Robinia pseudoacacia* seedlings [J]. Forestry Research, 2023,36(3):168-178.
- [17] 魏树和,周启星,王 新.超积累植物龙葵及其对镉的富集特征 [J]. 环境科学, 2005,26(3):167-171.  
Wei S H, Zhou Q X, Wang X. Cadmium-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and its accumulating characteristics [J]. Environmental Science, 2005,26(3):167-171.
- [18] Zhao F J, Dunham S J, McGrath S P. Arsenic hyperaccumulation by different fern species [J]. New Phytologist, 2002,156(1):27-31.
- [19] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法 [M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.
- [20] Lu R K. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing:China Agricultural Press, 2000.
- [21] T/HNNMIA XX-2020 土壤 重金属元素可提取态 氯化钙法 [S]. T/HNNMIA XX-2020 Soil-Extractable state of heavy metal elements-Calcium chloride method [S].
- [22] HJ 804-2016 土壤 8 种有效态元素的测定 二乙烯三胺五乙酸浸提-电感耦合等离子体发射光谱法 [S]. HJ 804-2016 Soil-Determination of bioavailable form of eight elements-Extraction with buffered DTPA solution/Inductively coupled plasma optical emission spectrometry [S].
- [23] Ma L Y, Huang L K, Liu Q Z, et al. Positive effects of applying endophytic bacteria in eggplant-Sedum intercropping system on Cd phytoremediation and vegetable production in cadmium polluted greenhouse [J]. Journal of Environmental Sciences, 2022,115:383-391.
- [24] Xie Y D, Wang L M, Yang L X, et al. Intercropping with *Eclipta prostrata* and *Crassocephalum crepidioides* decrease cadmium uptake of tomato seedlings [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2021,101(9):1231-1239.
- [25] 秦 丽,何永美,王吉秀,等.续断菊与玉米间作的铅累积及根系低分子量有机酸分泌特征研究 [J]. 中国生态农业学报, 2020,28(6):867-875.  
Qin L, He Y M, Wang J X, et al. Lead accumulation and low-molecular-weight organic acids secreted by roots in *Sonchus asper* L.-*Zea mays* L. intercropping system [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020,28(6):867-875.
- [26] 董文彬,曹雪蕊,江建锋,等.超积累东南景天与油料作物轮间作修复农田镉铅污染的技术模式研究 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2021,47(2):212-222.  
Tong W B, Cao X R, Jiang J F, et al. Study on the remediation patterns of rotation or intercropping between hyperaccumulator *Sedum alfredii* and oil crops in cadmium and lead co-contaminated agricultural soils [J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences,

- 2021,47(2):212-222.
- [26] 贺庭,刘婕,朱宇恩,等.重金属污染土壤木本-草本联合修复研究进展[J].中国农学通报,2012,28(11):237-242.  
He T, Liu J, Zhu Y E, et al. Research progress on remediation of heavy metal pollution in soil by woody plants [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012,28(11):237-242.
- [27] Wang X H, Zhou C, Xiao X Y, et al. Phytoextraction potential of arsenic and cadmium and response of rhizosphere microbial community by intercropping with two types of hyperaccumulators [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022,29(60):91356-91367.
- [28] Li Z R, Wang J X, An L Z, et al. Effect of root exudates of intercropping *Vicia faba* and *Arabis alpina* on accumulation and sub-cellular distribution of lead and cadmium [J]. International Journal of Phytoremediation, 2019,21(1):4-13.
- [29] Wen W, Zhao H Y, Ma J L, et al. Effects of mutual intercropping on Pb and Zn accumulation of accumulator plants *Rumex nepalensis*, *Lolium perenne* and *Trifolium repens* [J]. Chemistry and Ecology, 2018,34(3):259-271.
- [30] 张佳,孙传宇,何晓满,等.黑麦草间作对镉在小麦中积累和转运的影响[J].环境污染与防治,2019,41(5):505-509,514.  
Zhang J Sun C Y, He X M, et al. Intercropping of ryegrass affects the Cd accumulation and transport in wheat [J]. Environmental Pollution & Control, 2019,41(5):505-509,514.
- [31] Haichar F E Z, Marol C, Berge O, et al. Plant host habitat and root exudates shape soil bacterial community structure [J]. The ISME journal, 2008,2(12):1221-1230.
- [32] Yao W B, Huang L, Yang Z H, et al. Effects of organic acids on heavy metal release or immobilization in contaminated soil [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022,32(4):1277-1289.
- [33] 尹晓童,杨浩,于瑞鹏,等.根系分泌物在作物多样性体系中对种间地下部互作的介导作用[J].中国生态农业学报,2022,30(8):1215-1227.  
Yin X T, Yang H, Yu R P, et al. Interspecific below-ground interactions driven by root exudates in agroecosystems with diverse crops [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022,30(8):1215-1227.
- [34] 高松,童新元,王芸,等.淋洗与电化学还原联用处理镉-铅污染土壤[J].中国环境科学,2022,42(4):1788-1794.  
Gao S, Tong X Y, Wang Y, et al. Remediation of Cd-Pb contaminated soil by coupled soil washing and electrochemical reduction [J]. China Environmental Science, 2022,42(4):1788-1794.
- [35] Zeng P, Guo Z H, Xiao X Y, et al. Phytoextraction potential of *Pteris vittata* L. co-planted with woody species for As, Cd, Pb and Zn in contaminated soil [J]. Science of the Total Environment, 2019,650:594-603.
- [36] Lu Q Y, Li J H, Chen F B, et al. Effects of mutual intercropping on the cadmium accumulation in accumulator plants *Stellaria media*, *Malachium aquaticum*, and *Galium aparine* [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017,189(12):622.
- [37] 郭思宇,王海娟,王宏镇.重金属污染土壤间作修复的研究进展[J].中国生态农业学报,2021,29(5):890-902.  
Guo S Y, Wang H J, Wang H B. Advances in the intercropping remediation of heavy metal polluted soil [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021,29(5):890-902.
- [38] Li H G, Shen J B, Zhang F S, et al. Phosphorus uptake and rhizosphere properties of intercropped and monocropped maize, faba bean, and white lupin in acidic soil [J]. Biology and Fertility of Soils, 2010,46(2):79-91.
- [39] Schwerdtner U, Spohn M. Plant Species Interactions in the Rhizosphere Increase Maize N and P Acquisition and Maize Yields in Intercropping [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2022, 22(3):3868-3884.
- [40] 徐双圆,朱家辉,王栋茹,等.植物套作系统修复镉污染农田土壤的效应——以苏南地区为例[J].中国环境科学,2024,44(06):3289-3300.  
Xu S Y, Zhu J H, Wang D R, et al. Effect of plant intercropping system on remediation of cadmium contaminated farmland soil—A case study on the southern Jiangsu province area [J]. China Environmental Science, 2024,44(6):3289-3300.
- [41] Xia H, Liang D, Chen F B, et al. Effects of mutual intercropping on cadmium accumulation by the accumulator plants *Conyza canadensis*, *Cardamine hirsuta*, and *Cerastium glomeratum* [J]. International Journal of Phytoremediation, 2018,20(9):855-861.
- [42] Chi G Y, Fang Y T, Zhu B, et al. Intercropping with *Brassica juncea* L. enhances maize yield and promotes phytoremediation of cadmium-contaminated soil by changing rhizosphere properties [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024,461:132727.
- [43] 谭建波,湛方栋,刘宁宁,等.续断菊与蚕豆间作下土壤部分化学特征与Cd形态分布状况研究[J].农业环境科学学报,2016,35(1):53-60.  
Tan J B, Zhan F D, Liu N N, et al. Soil chemical properties and Cd form distribution in *Vicia faba* and *Sonchus asper* intercropping system [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016,35(1):53-60.
- [44] Fan F, Zhang F, Song Y, et al. Nitrogen Fixation of Faba Bean (*Vicia faba* L.) Interacting with a Non-legume in Two Contrasting Intercropping Systems [J]. Plant and Soil, 2006,283(1/2):275-286.
- [45] Ng C W W, San So P, Wong J T F, et al. Intercropping of *Pinellia ternata* (herbal plant) with *Sedum alfredii* (Cd-hyperaccumulator) to reduce soil cadmium (Cd) absorption and improve yield [J]. Environmental Pollution, 2023,318:120930.
- [46] 孟楠,王萌,陈莉,等.不同草本植物间作对Cd污染土壤的修复效果[J].中国环境科学,2018,38(7):2618-2624.  
Meng N, Wang M, Chen L, et al. Remediation efficiency of Cd polluted soil by intercropping with herbaceous plants [J]. China Environmental Science, 2018,38(7):2618-2624.
- [47] 丁馨茹,徐曼,严宁珍,等.4种改良剂对紫色土Cd生物有效性及土壤酶活性的影响[J].环境科学,2024,45(6):3523-3532.  
Ding X R, Xu M, Yan N Z, et al. Effects of four amendments on cadmium bioavailability and enzyme activity in purple soil [J]. Environmental Science, 2024,45(6):3523-3532.
- [48] Zeng P, Guo Z H, Xiao X Y, 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.
- [49] Vepsäläinen M, Kukkonen S, Vestberg M, et al. Application of soil enzyme activity test kit in a field experiment [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2001,33(12/13):1665-1672.
- [50] Shen C C, Wang J, Jing Z W, et al. Plant diversity enhances soil fungal network stability indirectly through the increase of soil carbon and fungal keystone taxa richness [J]. Science of the Total Environment, 2022,818:151737.
- [51] 闫秀秀,徐应明,王林,等.叶用油菜和孔雀草间作对植物生长和镉累积的影响[J].环境科学,2020,41(11):5151-5159.  
Yan X X, Xu Y M, Wang L, et al. Effects of Intercropping of *Brassica chinensis* L. and *Tagetes patula* L. on the growth and cadmium accumulation of plants [J]. Environmental Science, 2020,41(11): 5151-5159.
- [52] 吴乐诗,余柏仲,李冬琴,等.菜心与东南景天间作修复镉污染农田的生态效应[J].农业环境科学学报,2024,43(7):1483-1491.  
Wu L S, Yu B Z, Li D Q, et al. Ecological effects of intercropping *Brassica parachinensis* and *Sedum alfredii* on the remediation of cadmium contaminated farmland [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024,43(7):1483-1491.
- [53] 徐华勤,肖润林,向佐湘,等.稻草覆盖、间作三叶草茶园土壤酶活性与养分的关系[J].生态学杂志,2009,28(8):1537-1543.  
Xu H Q, Xiao R L, Xiang Z X, et al. Soil enzyme activities and their relations with soil fertility in a tea plantation under straw mulching and white clover intercropping [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009,28(8):1537-1543.

作者简介:李昊(2002-),男,天津人,本科生,主要从事重金属污染土壤修复.lilihaohaoc@163.com.