

杨 姝, 贾 乐, 毕玉芬, 等. 7 种紫花苜蓿对云南某铅锌矿区土壤镉铅的累积特征及品种差异[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(3): 222-228.

YANG Shu, JIA Le, BI Yu-fen, et al. Interspecific Differences and Accumulative Characteristics of Cadmium and Lead About Seven Alfalfa (*Medicago Sativa* L.) cultivars in a Lead-Zinc Mine of Yunnan, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(3): 222-228.

7 种紫花苜蓿对云南某铅锌矿区土壤镉铅的累积特征及品种差异

杨 姝^{1,2}, 贾 乐¹, 毕玉芬³, 湛方栋¹, 陈建军¹, 李 博¹, 祖艳群^{1*}, 李 元^{1*}

(1.云南农业大学资源与环境学院, 云南 昆明 650201; 2.云南农业大学理学院, 云南 昆明 650201; 3.云南农业大学动物科学技术学院, 云南 昆明 650201)

摘 要:以云南某铅锌矿周边的农田为试验地,以 7 个紫花苜蓿(*Medicago Sativa* L.)品种为植物材料开展田间大棚试验,研究各品种的株高、生物量、镉铅含量及累积量、富集系数和转移系数等指标,探讨不同紫花苜蓿对镉、铅的吸收累积特征及存在的品种差异。结果表明,从富集系数看,至开花期时(120 d),Cd 富集能力最强的品种为“游客”,其 Cd 富集系数为 0.054,地上部 Cd 含量为 0.22 mg·kg⁻¹,地上部 Cd 累积量为 40.58 μg·m⁻²,分别为 Cd 富集能力最弱品种“WL525HQ”的 245%、200%和 245%。Pb 富集能力最强的品种为“国产”,其 Pb 富集系数为 0.035,地上部 Pb 含量为 2.67 mg·kg⁻¹,地上部 Pb 累积量为 282.2 μg·m⁻²,分别为 Pb 富集能力最弱品种“WL525HQ”的 152%、153%和 110%。多数受试品种对 Cd、Pb 具有较强的转运能力,其中对 Cd 转运能力最强的品种为“三得利”,其转运系数为 1.545,是最弱品种“国产”的 172%;对 Pb 转运能力最强的品种为“国产”,其转运系数为 2.048,是最弱品种“多叶”的 171%。综上,受试紫花苜蓿品种对 Cd、Pb 的吸收累积存在一定品种差异,若以地上部金属含量为指标,“游客”为 Cd 高累积品种,“国产”为 Pb 高累积品种,“四季旺”为 Cd 低累积品种,“WL525HQ”为 Pb 低累积品种。

关键词:紫花苜蓿;铅锌矿;镉(Cd);铅(Pb);累积特征;品种差异

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)03-0222-07

doi: 10.13254/j.jare.2017.0334

Interspecific Differences and Accumulative Characteristics of Cadmium and Lead About Seven Alfalfa (*Medicago Sativa* L.) cultivars in a Lead-Zinc Mine of Yunnan, China

YANG Shu^{1,2}, JIA Le¹, BI Yu-fen³, ZHAN Fang-dong¹, CHEN Jian-jun¹, LI Bo¹, ZU Yan-qun^{1*}, LI Yuan^{1*}

(1.College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2.College of Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 3.Faculty of Animal Science and Technology, Kunming 650201, China)

Abstract:For studying the interspecific differences and accumulation features of cadmium (Cd) and lead (Pb) about different alfalfa (*Medicago Sativa* L.) varieties, greenhouse experiments were carried out in a lead-zinc mine of Yunnan and the indexes including plant height, biomass, content and accumulation of Cd and Pb, enrichment coefficient and transfer coefficient were measured. The results showed that from the enrichment coefficient, the variety having the strongest Cd accumulation capacity was "Youke", its Cd enrichment coefficient, Cd content of shoot, Cd accumulation of shoot were respectively 0.054, 0.22 mg·kg⁻¹ and 40.58 μg·m⁻² and were higher respectively by 145%, 100% and 145% than that of the weakest varieties "WL525HQ" in anthesis (120 day). The variety having the strongest Pb accumulation capacity was "Guochan", its Pb enrichment coefficient, Pb content of shoot, Pb accumulation of shoot were respectively 0.035, 2.67 mg·kg⁻¹ and 282.2 μg·m⁻² and were higher respectively by 52%, 53% and 10% than that of the weakest varieties "WL525HQ" in anthesis (120 day). From transfer coefficient, most of cultivars used in experiments had a certain capacity for transferring Cd and Pb from root

收稿日期:2017-10-30 录用日期:2017-12-27

基金项目:环境保护部土壤污染综合治理重大专项(YNBY2016-002);NSFC-云南联合基金项目(U1202236);云南省农田无公害生产科技创新团队项目(2017HC015)

作者简介:杨 姝(1976—),女,云南禄丰人,硕士,副教授,主要从事土壤重金属污染方面的研究工作。E-mail:zkun@sina.com

*通信作者:祖艳群 E-mail:zuyanqun@qq.com 李 元 E-mail:liyuan@ynau.edu.cn

to shoot. The variety having the strongest Cd transfer capacity was "Sandeli", its Cd transfer coefficient was 1.545 and was higher by 72% than that of the weakest varieties "Guochan" in anthesis(120 day). The variety having the strongest Pb transfer capacity was "Guochan", its Pb transfer coefficient was 2.048 and was higher by 71% than that of the weakest varieties "Duoye" in anthesis(120 day). In conclusions the inerspecific differences of Cd and Pb accumulative characteristics were existed among alfalfa cultivars used in the experiments, Based on metal content in shoot "Youke" and "Guochan" could be considered as Cd and Pb high accumulation cultivar respectively, whereas "Sijiwang" and "WL525HQ" could be considered as Cd and Pb low accumulation cultivar respectively.

Keywords: alfalfa(*Medicago Sativa* L); lead-zinc mine; cadmium(Cd); lead(Pb); accumulation characteristics; inerspecific differences

随着采矿业、汽车工业的发展和城镇化进程的不断加快,重金属污染已成为世界范围的主要环境问题之一。尤其是矿区周围,由于尾矿、废石、冶炼废渣等的堆放和淋滤^[1],采矿及选矿所产生废水废液的直接排放,使其土壤中积累了大量的重金属^[2]。云南省铅锌矿资源丰富,在多年的开采过程中,对周边的环境造成了较为严重的污染和破坏,尤其是土壤中的Cd、Pb含量超标严重,导致周边农田的农作物也出现Cd、Pb超标的现象,危害食品安全^[3]。对矿区周边的土壤进行治理和综合利用,除了使用植物修复技术^[4],即通过自然生长植物或者遗传工程培育植物体系来吸收、挥发或稳定土壤中的环境污染物外^[5],也可考虑种植低累积植物,使其生产的农作物重金属含量符合国家标准,以达到边治理边生产的目的。

紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)是一种优良的牧草,有“牧草之王”的美誉,其生长较快,对土壤、水肥及气候条件要求不高,易于种植^[6]。Cd、Pb的胁迫会对紫花苜蓿的株高、生物量、光合作用和蛋白质含量等方面产生影响^[7],同时紫花苜蓿对Cd、Pb也具有一定的耐性,在耐受阈值之内可以正常的生长和存活^[8]。Cd、Pb经紫花苜蓿根部吸收后,可以在其植株体内蓄积^[9],一定程度上降低了土壤中Cd、Pb的含量^[10],此外,紫花苜蓿对Cd、Pb的吸收累积存在较大品种差异^[11],选择不同累积特性的品种替代粮食作物在矿区周边种植,不仅可能对Cd、Pb污染土壤起到一定的净化作用,也可以降低Cd、Pb进入人体的风险。

本文以云南省某铅锌矿周边的农田为试验地,以7个紫花苜蓿品种作为植物材料开展田间大棚试验,对种植前后土壤的Cd、Pb含量,植物的株高、生物量、Cd含量、Pb含量及累积量等指标进行了采样和分析,探讨了土壤Cd、Pb污染对试验品种生长的影响,对不同品种的Cd、Pb累积特征及品种差异进行了分析,初步筛选出Cd、Pb的高、低累积品种,对利用紫花苜蓿进行矿区Cd、Pb污染土壤的综合利用、改善矿区周边的生态环境具有重要的实践意义。

1 材料与方法

1.1 试验地点与试验材料

1.1.1 试验地概况

选取的试验区位于云南省某铅锌矿区周边农田,在其上修建大棚作为试验用地,位置坐标为26°22'4" N, 99°23'10" E,海拔3105 m,主要无机污染物为重金属Cd和Pb,土壤基本理化性质如下:pH值为6.63,有机质含量为20.18 g·kg⁻¹,全氮、全磷和全钾含量分别为1.63、7.44 g·kg⁻¹和10.84 g·kg⁻¹,碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为21.01、53.44 mg·kg⁻¹和151.17 mg·kg⁻¹,Cd和Pb全量分别为4.25 mg·kg⁻¹和86.96 mg·kg⁻¹。

1.1.2 试验材料

供试植物材料为紫花苜蓿,共选择7个品种,分别为“国产”“前景”“多叶”“三得利”“游客”“四季旺”和“WL525HQ”,苜蓿种子由云南农业大学动物科学技术学院草业科学试验室提供。挑选大小一致且籽粒饱满的种子,用10% H₂O₂进行表面消毒10 min,再用蒸馏水冲洗多次后晾干备用。

1.2 试验设计

将试验大棚划分为8个小区,每个小区面积为2.5 m×5 m,其中一个为对照小区不进行种植,其余7个小区随机选择种植上述7个品种,每小区播种量为40 g,均匀撒播。所施肥料为复混通用肥(N 10%、P₂O₅ 10%、K₂O 5%),深翻后播种前一次性施入,每小区施肥量为300 g。其余管理措施为常规管理。试验共设置3个大棚作为重复。

1.3 取样和分析

分别在紫花苜蓿分枝期(60 d)和开花期(120 d)时进行采样。按5点取样法在小区中采集植物样品,每点采样面积为20 cm×20 cm,常规方法测量株高。将植物样品用蒸馏水洗净晾干后,按小区将植株分为地上部和地下部,放入真空干燥箱内105℃杀青30 min,而后将温度调至70℃烘至恒重,称量并计算生

物量,研磨干样至粉末状过筛备用。采植物样品同时采根际土,先置于室内自然风干后,研磨过筛备用。植物样品用硝酸-高氯酸(V:V=4:1)湿法消解,采用火焰原子吸收分光光度法测定 Cd、Pb 含量,土壤样品采用王水-HClO₄(V:V=4:1)消煮,原子吸收分光光度法测定 Cd、Pb 含量^[12]。

1.4 数据处理

数据采用 Microsoft Excel 进行常规分析。用 SPSS 22.0 数据软件进行统计分析,用 LSD 法检验各处理平均值在 0.05 水平的差异性。

$$\text{富集系数} = \frac{\text{植物体内重金属含量}}{\text{土壤中重金属含量}}$$

$$\text{转运系数} = \frac{\text{植物地上部重金属含量}}{\text{植物地下部重金属含量}}$$

$$P_N = \sqrt{\frac{P_{\text{ave}}^2 + P_{\text{max}}^2}{2}}$$

式中: P_N 为内梅罗综合污染指数; P_{ave} 和 P_{max} 分别为平均单项污染指数和最大单项污染指数。单项污染指数计算时采用土壤环境质量标准(GB 15618—1995)二级标准^[13]。

2 结果与分析

2.1 土壤 Cd、Pb 胁迫对紫花苜蓿生长的影响及品种差异

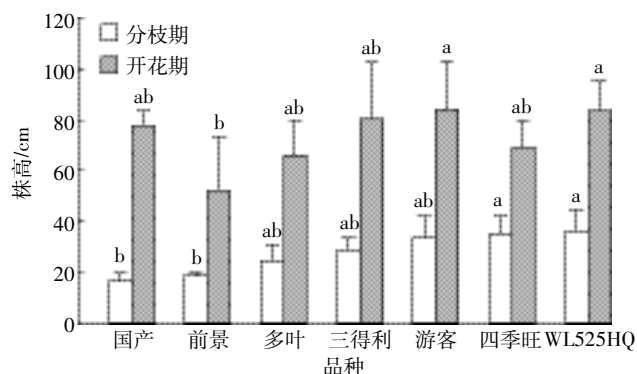
从图 1、图 2 可知,在受试的 7 种紫花苜蓿中,分枝期和开花期株高最高的品种是“WL525HQ”和“游客”,分别为 36.6 cm 和 84.07 cm,分枝期和开花期株高最低的品种是“国产”和“前景”,分别为 16.54 cm 和 52.41 cm。分枝期和开花期地上部生物量最大的品种是“四季旺”和“游客”,分别为 65.06 g·m⁻² 和 186.57 g·m⁻²,分枝期和开花期地上部生物量最小的品种均是“前景”,分别为 22.15 g·m⁻² 和 45.25 g·m⁻²。

由方差分析可知,在 7 种紫花苜蓿中:分枝期“国产”和“前景”的株高分别为“四季旺”和“WL525HQ”的 46.72% 和 51.31%,存在显著差异($P<0.05$);开花期“前景”的株高仅为“游客”和“WL525HQ”的 62.34% 和 62.67%,存在显著差异($P<0.05$,图 1)。从地上部生物量看,在分枝期“前景”“国产”“三得利”和“游客”的生物量分别为“四季旺”的 34.05%、38.20%、58.80% 和 59.80%,均与其存在品种间的显著差异($P<0.05$),而在开花期,“前景”和“多叶”的地上部生物量分别为“游客”的 24.25% 和 32.62%,品种间存在显著差异($P<0.05$,图 2)。从地下部看,在分枝期时,“国产”“前景”“游客”和“三得利”这 4 个品种与“四季旺”存在显

著差异($P<0.05$),它们的生物量分别为“四季旺”的 57.42%、50.44%、59.92% 和 62.96%,而在开花期时,“国产”“前景”和“多叶”与“三得利”存在显著差异($P<0.05$,图 2)。

2.2 紫花苜蓿体内的 Cd、Pb 含量和累积量

不同紫花苜蓿品种对 Cd、Pb 的吸收存在一定差异。在分枝期时(表 1),地上部 Cd 含量和 Cd 累积量



图中不同字母表示品种间差异性显著($P<0.05$),下同
Different letters indicate significant differences among different cultivars at $P<0.05$ level. The same below

图 1 不同品种紫花苜蓿的株高

Figure 1 Plant height of different alfalfas

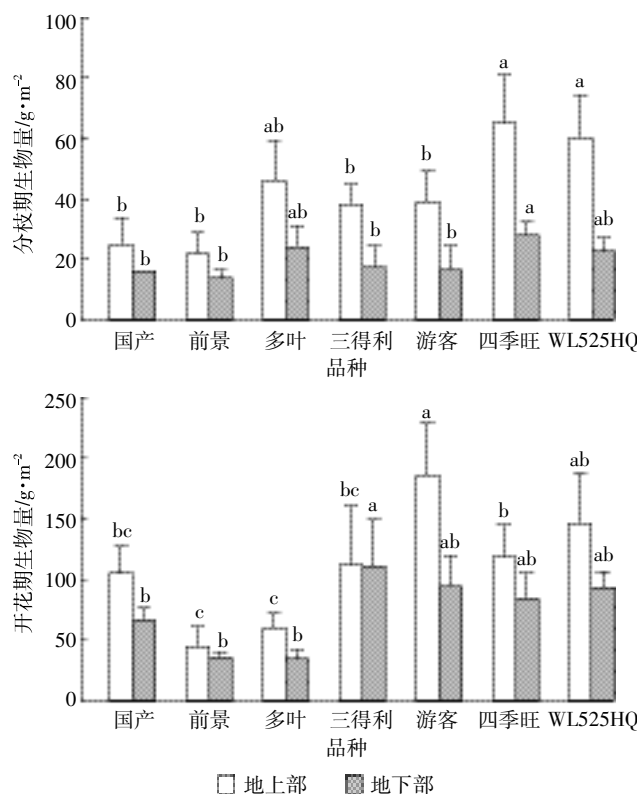


图 2 不同品种紫花苜蓿的生物量

Figure 2 Biomass of different alfalfas

最高的品种均为“游客”,分别达 $0.41\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $23.69\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,地上部 Cd 含量和 Cd 累积量最低的品种均为“WL525HQ”,分别为 $0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $3.87\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,其中“WL525HQ”的 Cd 累积量仅为“游客”的 16.34%,两者之间存在显著差异($P<0.05$)。地下部 Cd 含量和 Cd 累积量最高的品种均为“三得利”,分别达 $0.16\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2.72\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,地下部 Cd 含量和 Cd 累积量最低品种均为“四季旺”,分别为 $0.03\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.97\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,两品种之间存在显著差异($P<0.05$)。地上部 Pb 含量最高的品种为“前景”,达 $6.25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,比 Pb 含量最低品种“WL525HQ”高 1.13 倍,地上部 Pb 累积量最高的品种为“多叶”,达 $283.92\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,比 Pb 累积量最低品种“前景”高 1.24 倍。地下部 Pb 含量最高的品种为“游客”,达 $6.14\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,比 Pb 含量最低品种“四季旺”高 1.01 倍,地下部 Pb 累积量最高的品种为“多叶”,达 $101.93\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,比 Pb 累积量最低品种“三得利”高 0.74 倍。

开花期时,Cd、Pb 累积的规律与分枝期有所不同(表 2):从地上部 Cd 含量、地下部 Cd 含量及地上部 Pb 含量看,在 7 个品种间不存在显著差异,但从地上

部 Cd 累积量看,在最高和最低品种“游客”和“前景”之间存在显著差异($P<0.05$),它们的值分别为 $40.58\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $5.69\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,前者为后者的 7.13 倍。地下部 Pb 含量、地上部和地下部 Pb 累积量在 7 个品种间也存在显著差异($P<0.05$),如地上部 Pb 累积量最高和最低品种是“游客”和“前景”,分别为 $450.76\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $86.48\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,前者是后者的 5.21 倍。

2.3 紫花苜蓿对 Cd、Pb 的富集系数和转运系数

紫花苜蓿对 Cd 和 Pb 有一定的富集作用,在分枝期,对 Cd、Pb 富集系数最大的品种是“三得利”和“前景”(表 3),分别为 0.103 和 0.273,最小的均是“WL525HQ”,分别为 0.030 和 0.121。而在开花期,对 Cd 和 Pb 富集系数最大的品种是“游客”和“国产”,分别为 0.054 和 0.035,最小的均是“WL525HQ”,分别为 0.022 和 0.023。两个生长阶段里所有品种对 Cd 和 Pb 的富集系数均小于 1,其中分枝期所有品种对 Pb 的富集能力均强于 Cd。

紫花苜蓿对 Cd、Pb 有一定的转运能力,在所有受试品种中,转运系数最大的是在分枝期的“四季旺”(表 4),其对 Cd 的转运系数高达 6.314,表明在

表 1 分枝期不同品种紫花苜蓿体内的 Cd、Pb 含量和累积量
Table 1 Content and cumulant of Pb and Cd in different alfalfas at branching period

品种	Cd 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		Cd 累积量/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$		Pb 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		Pb 累积量/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	
	地上部	地下部	地上部	地下部	地上部	地下部	地上部	地下部
国产	$0.23\pm0.06\text{b}$	$0.12\pm0.03\text{ab}$	$5.28\pm0.49\text{cd}$	$1.85\pm0.46\text{ab}$	$5.63\pm1.17\text{ab}$	$5.61\pm0.91\text{a}$	$144.16\pm72.05\text{b}$	$90.11\pm14.94\text{a}$
前景	$0.29\pm0.05\text{ab}$	$0.11\pm0.03\text{b}$	$6.58\pm2.95\text{cd}$	$1.54\pm0.68\text{ab}$	$6.25\pm2.74\text{a}$	$5.23\pm0.90\text{ab}$	$126.48\pm33.17\text{b}$	$73.44\pm14.91\text{a}$
多叶	$0.21\pm0.08\text{b}$	$0.07\pm0.04\text{bc}$	$9.00\pm1.24\text{c}$	$1.82\pm1.33\text{ab}$	$6.08\pm0.82\text{a}$	$4.10\pm0.58\text{ab}$	$283.92\pm99.30\text{a}$	$101.93\pm38.16\text{a}$
三得利	$0.37\pm0.12\text{ab}$	$0.16\pm0.04\text{a}$	$13.74\pm3.81\text{b}$	$2.72\pm0.68\text{a}$	$3.58\pm1.13\text{ab}$	$3.21\pm0.40\text{b}$	$141.40\pm61.75\text{b}$	$58.70\pm26.85\text{a}$
游客	$0.41\pm0.14\text{a}$	$0.08\pm0.03\text{bc}$	$23.69\pm4.14\text{a}$	$1.17\pm0.37\text{b}$	$4.40\pm1.08\text{ab}$	$6.14\pm1.88\text{a}$	$168.31\pm44.02\text{ab}$	$98.57\pm36.68\text{a}$
四季旺	$0.21\pm0.04\text{b}$	$0.03\pm0.01\text{c}$	$13.63\pm1.40\text{b}$	$0.97\pm0.38\text{b}$	$3.71\pm1.82\text{ab}$	$3.05\pm0.49\text{b}$	$232.41\pm88.32\text{ab}$	$83.86\pm1.44\text{a}$
WL525HQ	$0.10\pm0.05\text{b}$	$0.09\pm0.01\text{b}$	$3.87\pm1.18\text{d}$	$1.97\pm0.54\text{ab}$	$2.93\pm1.35\text{b}$	$3.43\pm1.89\text{b}$	$167.86\pm69.28\text{ab}$	$72.21\pm29.28\text{a}$

注:平均数($n=3$)后的不同字母表示品种间差异性显著($P<0.05$),下同。
Note: Different letters after average value($n=3$) indicate significant differences among different cultivars at $P<0.05$ level. The same below.

表 2 开花期不同品种紫花苜蓿体内的 Cd、Pb 含量和累积量
Table 2 Content and cumulant of Pb and Cd in different alfalfas at anthesis period

品种	Cd 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		Cd 累积量/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$		Pb 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		Pb 累积量/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	
	地上部	地下部	地上部	地下部	地上部	地下部	地上部	地下部
国产	$0.12\pm0.02\text{a}$	$0.13\pm0.04\text{a}$	$11.93\pm1.60\text{bc}$	$8.93\pm2.47\text{ab}$	$2.67\pm0.83\text{a}$	$1.3\pm0.205\text{ab}$	$282.24\pm71.2\text{ab}$	$87.5\pm21.82\text{bc}$
前景	$0.12\pm0.01\text{a}$	$0.13\pm0.03\text{a}$	$5.69\pm2.57\text{c}$	$4.62\pm2.48\text{b}$	$1.88\pm0.52\text{a}$	$1.03\pm0.39\text{b}$	$86.48\pm38.25\text{b}$	$37.31\pm16.95\text{c}$
多叶	$0.11\pm0.03\text{a}$	$0.12\pm0.01\text{a}$	$6.97\pm4.21\text{bc}$	$4.27\pm2.62\text{b}$	$2.14\pm1.12\text{a}$	$1.79\pm0.20\text{a}$	$138.73\pm99.51\text{b}$	$61.77\pm9.50\text{c}$
三得利	$0.17\pm0.01\text{a}$	$0.11\pm0.01\text{a}$	$16.03\pm2.65\text{bc}$	$11.89\pm3.78\text{ab}$	$2.56\pm1.05\text{a}$	$1.84\pm0.41\text{a}$	$292.78\pm157.64\text{ab}$	$196.97\pm63.56\text{a}$
游客	$0.22\pm0.03\text{a}$	$0.15\pm0.03\text{a}$	$40.58\pm11.25\text{a}$	$13.62\pm1.79\text{a}$	$2.35\pm0.83\text{a}$	$1.41\pm0.33\text{ab}$	$450.76\pm228.44\text{a}$	$132.56\pm42.74\text{b}$
四季旺	$0.10\pm0.03\text{a}$	$0.10\pm0.01\text{a}$	$12.55\pm6.15\text{bc}$	$8.36\pm2.43\text{b}$	$1.81\pm0.69\text{a}$	$1.23\pm0.06\text{b}$	$223.81\pm132.03\text{ab}$	$104.65\pm30.35\text{bc}$
WL525HQ	$0.11\pm0.03\text{a}$	$0.10\pm0.01\text{a}$	$16.58\pm8.22\text{b}$	$9.67\pm2.91\text{ab}$	$1.74\pm0.21\text{a}$	$1.01\pm0.48\text{b}$	$256.79\pm85.4\text{ab}$	$94.74\pm20.77\text{bc}$

此阶段植株吸收的 Cd 主要分布在地上部分。其余品种中,多数品种对 Cd、Pb 的转运系数均大于 1,仅有少数几个品种小于 1:包括在分枝期的“游客”和“WL525HQ”,其对 Pb 的转运系数分别为 0.718 和 0.855,以及在开花期的“国产”“多叶”和“前景”,它们对 Cd 的转运系数分别为 0.894、0.921 和 0.980。

3 讨论

3.1 紫花苜蓿生长对矿区 Cd、Pb 污染土壤的耐性及品种差异

铅锌矿区堆放的冶炼渣是导致矿区土壤 Cd、Pb 污染的主要污染源,从计算的内梅罗指数看,Cd、Pb 单项污染指数分别为 14.167 和 1.087,综合污染指数为 11.377,已属于 Cd、Pb 重度污染,且 pH 值偏酸性,土壤条件比较恶劣。在试验期间,所有种植的紫花苜蓿品种均能出苗和生长,并未出现死亡的情况,说明受试品种对此类土壤有一定的适应性,对土壤中 Cd、Pb 的胁迫均具有一定耐性,这种耐性可能是通过抗氧化系统的激活^[14]、生物膜透性的改变^[15]、光合作用调节^[16]和渗透调节^[17]等调节措施来获得的。同时,土壤

Cd、Pb 胁迫也会影响紫花苜蓿的生长,具体表现为株高降低^[18]、生物量减少等方面^[19],这种影响在不同的生长阶段有所不同,且存在品种间差异^[20]。本文种植的 7 种紫花苜蓿,在试验的两个生长阶段,其株高和生物量指标在品种间均存在显著差异($P<0.05$),可以从中筛选出受影响较小的品种用于矿区的种植。

3.2 紫花苜蓿对土壤 Cd、Pb 的累积特征

从植物修复的角度出发,希望通过筛选获得超富集植物以净化土壤,降低污染。超富集植物是指能够超量吸收重金属并将其不断转运到地上部的植物^[21]。筛选和确认 Cd、Pb 超富集植物的条件包括:(1)体内 Cd、Pb 的临界含量分别为 100、1 000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,或者达到未受污染的普通植物的 10~100 倍^[22];(2)富集系数和转移系数都大于 1^[23];(3)具有一定的耐性能力^[2,24]。从以上条件看,所有受试品种均未达到超富集植物的标准,主要是临界含量和富集系数方面有较大差距:首先,从 Cd、Pb 含量看,分枝期阶段,所有品种中 Cd 含量范围为 0.034~0.414 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Pb 含量范围为 2.931~6.252 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,开花期阶段,所有品种中 Cd 含量范围为 0.097~0.216 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,Pb 含量范围为 1.011~2.669 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与 Cd、Pb 临界含量相比均差距较大。从富集系数看,最大值为分枝期时品种“前景”对 Pb 的富集系数 0.273,与筛选值 1 尚有较大差距,达不到超富集植物的标准。但是,从转运系数看,除了开花期的“国产”“前景”和“多叶”3 个品种(转运系数分别为 0.894、0.980 和 0.921)小于 1 外,其余品种的转运系数均大于 1,说明受试品种对 Cd、Pb 有较强的转运能力。可见,受试的 7 个紫花苜蓿品种对 Cd 和 Pb 具有一定的富集能力,但尚未达到超富集植物的标准,土壤中的 Cd、Pb 进入植株体内后,主要分布于地上部分。

3.3 不同紫花苜蓿品种对土壤 Cd、Pb 累积的品种差异

不同作物品种间对重金属的吸收累积存在差异^[25],从保障食品安全的角度而言,筛选并种植重金属低累积的农作物品种,是重金属污染土壤综合利用的有效手段之一^[26]。由试验结果可知,受试紫花苜蓿品种对 Cd、Pb 的吸收累积存在一定差异,以开花期的数据看,地上部 Cd 含量由大到小的顺序为游客>三得利>前景≈国产>多叶≈WL525HQ>四季旺,地上部 Pb 含量由大到小的顺序为国产>三得利>游客>多叶>前景>四季旺>WL525HQ,以此为标准,“游客”为 Cd 高累积品种,“国产”为 Pb 高累积品种,“四季旺”为 Cd

表 3 不同品种紫花苜蓿对 Cd、Pb 的富集系数

Table 3 Bioconcentration coefficient of Pb and Cd in different alfalfas

品种	分枝期		开花期	
	Cd	Pb	Cd	Pb
国产	0.064	0.131	0.027	0.035
前景	0.096	0.273	0.026	0.026
多叶	0.053	0.134	0.025	0.033
三得利	0.103	0.192	0.040	0.027
游客	0.094	0.169	0.054	0.032
四季旺	0.058	0.170	0.026	0.024
WL525HQ	0.030	0.121	0.022	0.023

表 4 不同品种紫花苜蓿对 Cd、Pb 的转运系数

Table 4 Transfer coefficient of Pb and Cd in different alfalfas

品种	分枝期		开花期	
	Cd	Pb	Cd	Pb
国产	1.962	1.003	0.894	2.048
前景	2.741	1.194	0.980	1.821
多叶	3.109	1.482	0.921	1.195
三得利	2.278	1.116	1.545	1.391
游客	4.810	0.718	1.467	1.666
四季旺	6.314	1.214	1.056	1.475
WL525HQ	1.391	0.855	1.071	1.723

低累积品种,“WL525HQ”为Pb低累积品种。研究表明,作物高、低累积重金属的特性可能与吸收重金属途径、根际分泌有机物和根-茎转运有关^[27],植物膜上的Ca²⁺通道可能是Cd、Pb进入细胞内的通道之一^[28],根系分泌物通过改变土壤Cd、Pb的有效性从而影响植物对Cd、Pb的累积特性^[29],这些都是产生Cd、Pb累积品种差异的可能机制。

4 结论

试验所选紫花苜蓿对铅锌矿区污染土壤具有较强的适应能力,在种植期间7个品种均未出现不出苗或死亡的情况,且株高和生物量存在显著品种差异。试验品种对土壤中的Cd、Pb具有一定的富集能力和较高的转运能力,其中“游客”和“国产”分别为Cd、Pb高累积品种,而“四季旺”和“WL525HQ”分别为Cd、Pb低累积品种。高累积品种对土壤Cd、Pb具有一定的吸附净化作用,而低累积品种则可作为替代作物在矿区周边污染农田种植,以实现污染土壤的综合治理和利用。

参考文献:

- [1] 刘月莉,伍 钧,唐 亚,等.四川甘洛铅锌矿区优势植物的重金属含量[J].生态学报,2009,29(4):2020-2026.
LIU Yue-li, WU Jun, TANG Ya, et al. An investigation of heavy-metal concentration in cominant plant species in a zinc lead mining area in Ganluo County of Sichuan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4):2020-2026. (in Chinese)
- [2] 秦 丽,祖艳群,李 元,等.会泽铅锌矿渣堆周边7种野生植物重金属含量及累积特征研究[J].农业环境科学学报,2013,32(8):1558-1563.
QIN Li, ZU Yan-qun, LI Yuan, et al. Heavy metal contents and accumulation characteristic of seven wild plants from the slagheap surrounding of Huize lead-zinc tailings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8):1558-1563. (in Chinese)
- [3] 程先锋,宋婷婷,陈 玉,等.滇西兰坪铅锌矿区土壤重金属含量的高光谱反演分析[J].岩石矿物学杂志,2017,36(1):60-69.
CHENG Xian-feng, SONG Ting-ting, CHEN Yu, et al. Retrieval and analysis of heavy metal content in soil based on measured spectra in the Lanping Zn-Pb mining area, western Yunnan Province[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2017, 36(1):60-69. (in Chinese)
- [4] Lorestani B, Cheraghi M, Yousefi N. The potential of phytoremediation using hyperaccumulator plants: A case study at a lead-zinc mine site[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2012, 14(8):786-795.
- [5] Ahmadpour P, Ahmadpour F, Mahmud T M M, et al. Phytoremediation of heavy metals: A green technology[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2012, 11(76):14036-14043.
- [6] 谢开云,何 峰,李向林,等.我国紫花苜蓿主产田土壤养分和植物养分调查分析[J].草业学报,2016,25(3):202-214.
XIE Kai-yun, HE Feng, LI Xiang-lin, et al. Analysis of soil and plant nutrients in alfalfa fields in China[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(3):202-214. (in Chinese)
- [7] Liu Z F, Ge H G, Li C, et al. Enhanced phytoextraction of heavy metals from contaminated soil by plant co-cropping associated with PGPR[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2015, 226(3):1-10.
- [8] Yang J, Teng Y G, Zuo R, et al. Comparison of bioavailable vanadium in alfalfa rhizosphere soil extracted by an improved BCR procedure and EDTA, HCl, and NaNO₃ single extractions in a pot experiment with V-Cd treatments[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(12):8833-8842.
- [9] Benzarti S, Mohri S, Ono Y. Plant response to heavy metal toxicity: Comparative study between the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* (ecotype Ganges) and nonaccumulator plants: Lettuce, radish, and alfalfa[J]. *Environmental Toxicology*, 2008, 23(5):607-616.
- [10] Pajuelo E, Carrasco J A, Romero L C, et al. Evaluation of the metal phytoextraction potential of crop legumes. Regulation of the expression of O-acetylserine (Thiol) Lyase under metal stress[J]. *Plant Biology*, 2007, 9(5):672-681.
- [11] Wang X, Song Y, Ma Y, et al. Screening of Cd tolerant genotypes and isolation of metallothionein genes in alfalfa (*Medicago sativa* L.)[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(12):3627-3633.
- [12] 鲍士旦.土壤农业化学分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
BAO Shi-dan. Soil agrochemistry analysis[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000. (in Chinese)
- [13] 李 元,祖艳群.重金属污染生态与生态修复[M].北京:科学出版社,2016.
LI Yuan, ZU Yan-qun. Heavy metal pollution ecology and ecological remediation[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [14] 苏向楠. NO对Cd胁迫下紫花苜蓿幼苗氧化损伤与Cd积累的调控作用及其机制[D].兰州:兰州交通大学,2015.
SU Xiang-nan. Regulatory role and mechanism of NO on oxidative damage and the accumulation of Cd in alfalfa seedlings under the Cd stress[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [15] 丁晓辉,任丽萍,张春荣,等. Cd²⁺胁迫对紫花苜蓿叶绿素和可溶性糖含量的影响[J].华北农学报,2007,22(S1):64-66.
DING Xiao-hui, REN Li-ping, ZHANG Chun-rong, et al. Effect of Cd²⁺ stress on the content of chlorophyll and soluble sugar of alfalfa[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2007, 22(S1):64-66. (in Chinese)
- [16] Mahmood S, Malik S A, Tabassum A, et al. Biometric and biochemical attributes of alfalfa seedlings as indicators of stress induced by excessive cadmium[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 14(3):546-553.
- [17] 孙宁晓,宋桂龙.紫花苜蓿对镉胁迫的生理响应及积累特性[J].草业科学,2015,32(4):581-585.
SUN Ning-xiao, SONG Gui-long. Physiological response of *Medicago Sativa* to cadmium stress and accumulation property[J]. *Pratacultural Science*, 2015, 32(4):581-585. (in Chinese)
- [18] 徐苏凌,邢承华,方 勇.镉胁迫对紫花苜蓿生长及植株镉含量的影响[J].广东微量元素科学,2008,15(3):23-26.

- XU Su-ling, XING Cheng-hua, FANG Yong. The effect of cadmium stress on growth and Cd content of alfalfa[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2008, 15(3):23-26. (in Chinese)
- [19] 邱丽莉, 范小峰, 许姝娟, 等. 重金属 Pb 对紫花苜蓿幼苗生长及生理生化指标的胁迫效应[J]. *甘肃科技*, 2013, 29(16): 148-151.
QIU Li-li, FAN Xiao-feng, XU Shu-juan, et al. Stress effect of lead on growth and physio-biochemical characteristics indicators of alfalfa seedling[J]. *Gansu Science and Technology*, 2013, 29(16): 148-151. (in Chinese)
- [20] Wang X, Song Y, Ma Y, et al. Screening of Cd tolerant genotypes and isolation of metallothionein genes in alfalfa (*Medicago sativa* L.)[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(12): 3627-3633.
- [21] Brooks R R, Lee J, Reeves R D. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium species of indicator plants[J]. *Journal Geochemical Exploration*, 1997, 7:49-77.
- [22] Zu Y Q, Li Y, Schwartz C, et al. Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in Lanping lead-zinc mine area[J]. *China Environment International*, 2004, 30:567-576.
- [23] 周启星, 魏树和, 张倩茹. 生态修复[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
ZHOU Qi-xing, WEI Shu-he, ZHANG Qian-ru. Ecological remediation[M]. Beijing: Chinese Environmental Press, 2004. (in Chinese)
- [24] Sun Y B, Zhou Q X, Diao C Y. Effects of cadmium and arsenic on growth and metal accumulation of Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L.[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99: 1103-1110.
- [25] Yu H, Wang J, Wei F, et al. Cadmium accumulation in different rice cultivars and screening for pollution-safe cultivars of rice[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 370(2/3): 302-309.
- [26] Grant C A, Clarke J M, Duguid S, et al. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 390(2/3): 301.
- [27] 陈惠君, 谭玲, 李取生, 等. Cr/Pb 低累积菜心品种筛选及其根际机理研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(7): 1249-1256.
CHEN Hui-jun, TAN Ling, LI Qu-sheng, et al. Screening and preliminary rhizosphere mechanisms of low Cr/Pb accumulation cultivars of Chinese flowering cabbages (*Brassica parachinensis* L.)[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(7): 1249-1256. (in Chinese)
- [28] 薛艳, 王超, 王沛芳, 等. 外源添加抑制剂对芦蒿吸收 Cd 和 Pb 的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(11): 2255-2258.
XUE Yan, WANG Chao, WANG Pei-fang, et al. Effect of additive inhibitor on the Cd and Pb uptake of *Artemisia seleirgensis*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(11): 2255-2258. (in Chinese)
- [29] He B, Ling L, Zhang L, et al. Cultivar-specific differences in heavy metal (Cd, Cr, Cu, Pb, and Zn) concentrations in water spinach (*Ipomoea aquatic* 'Forsk') grown on metal-contaminated soil[J]. *Plant and Soil*, 2015, 386(1/2): 251-262.