

紫花苜蓿对钒钛磁铁尾矿重金属铜和镉的吸收、转运特性

卢赛¹, 谷海红^{1,2,3,4}, 艾艳君¹, 李泽钊¹, 李富平^{1,2,3,4}, 周征⁵

(1. 华北理工大学矿业工程学院, 河北 唐山 063210; 2. 河北省矿业开发与安全技术重点实验室, 河北 唐山 063210; 3. 河北省矿区生态修复产业技术研究院, 河北 唐山 063210; 4. 唐山市资源与环境遥感重点实验室, 河北 唐山 063210; 5. 华北理工大学机械工程学院, 河北 唐山 063210)

摘要: 对矿山废弃地进行生态修复时会广泛应用植物修复, 植物吸收尾矿重金属的能力不容小觑。为探究紫花苜蓿对钒钛磁铁尾矿重金属 Cu 和 Cd 的吸收特性, 通过外源添加 Cu 和 Cd 到钒钛磁铁尾矿中模拟不同污染程度, 并分析三个月后钒钛磁铁尾矿中 Cu 和 Cd 的赋存形态、紫花苜蓿长势及其体内对 Cu 和 Cd 吸收、转运情况, 研究 Cu 和 Cd 胁迫下紫花苜蓿重金属的吸收、转运特性。结果表明, 三个月后, Cu 主要以酸溶态形式存在, Cd 主要以可氧化态形式存在, 生态风险都比较高。Cu 的加入会抑制紫花苜蓿出苗及地上部生长, 但紫花苜蓿对 Cu 的吸收量会显著增加, 紫花苜蓿地上部地下部对 Cu 吸收量分别增加了 1.78%~109.62% 和 48.46%~463.11%, 地上部是 Cu 主要富集部位。Cd 主要累积在紫花苜蓿根部, 随着 Cd 胁迫浓度的增加紫花苜蓿从根部向地上部转移 Cd 能力会增强。研究结果可为矿区植物修复研究提供理论基础。

关键词: 钒钛磁铁尾矿; 重金属铜; 重金属镉; 紫花苜蓿; 吸收特性

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2025.02.011

中图分类号: TD982 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 02-0072-09

引用格式: 卢赛, 谷海红, 艾艳君, 等. 紫花苜蓿对钒钛磁铁尾矿重金属铜和镉的吸收、转运特性[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(2): 72-80.

LU Sai, GU Haihong, AI Yanjun, et al. Absorption and transport of heavy metals copper and cadmium in alfalfa from vanadium-titanium magnetite tailings[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(2): 72-80.

矿产资源是国家重要的战略资源, 钒钛磁铁矿是一种铁、钒、钛等多种有价元素共生的复合矿^[1], 选矿作业会将各种共生(伴生)的有用矿物相互分离, 钒钛磁铁尾矿中钒、钛等资源会通过浮选等方式被回收利用^[2], 而有用目标组分含量低的部分会堆积形成尾矿库^[3], 因此, 尾矿库附近普遍存在复杂的重金属污染问题^[4], 尾矿中的重金属长期暴露在自然环境条件下会释放迁移, 污染周边土壤和水体^[5]。目前对于土壤重金属治理主要有

客土置换等物理方法, 土壤淋洗、化学固化等化学方法或生物修复方法, 物理化学修复方法成本昂贵, 还会破坏土壤结构以及微生物区系, 容易造成二次污染^[6]。植物修复技术近些年来受到许多学者的关注^[7], 植物修复技术主要分为植物提取(超累积)、植物降解、根际过滤、植物稳定和植物挥发^[8]等五种类型, 不同修复类型会选择不同吸收特性的修复植物, 植物稳定修复会选择根系网络发达或根系分泌物能与重金属结合的植

收稿日期: 2022-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(52204186); 河北省自然科学基金项目(E2021209152、E2015209300); 河北省高等学校青年拔尖人才计划项目(BJ2014029); 唐山市科学技术研究与发展计划重点项目(19150247E); 唐山市科技计划项目(20130210b); 唐山市科技研发平台培养计划(2020TS003b)

作者简介: 卢赛(1997-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究矿区生态修复方向。

通信作者: 谷海红(1982-), 女, 博士生导师, 副教授, 研究方向为矿区生态修复与重建。

物，植物提取修复会选择地上部生物量大，对重金属富集系数高的超富集植物。先锋植物通常是植物修复的首选植物，抗重金属污染的先锋植物主要是草本及灌木^[9]，豆科草本植物紫花苜蓿（*Medicago sativa* L.）在我国种植范围广、产量高，被誉为“牧草之王”^[10]，因其对重金属忍耐性强，富集系数高^[11]被广泛应用于矿区生态修复中。研究发现，紫花苜蓿对 Cu、Cd 均有较强富集作用^[12]，本研究以承德某钒钛磁铁尾矿为研究对象，以紫花苜蓿为修复植物，外源添加 Cu 和

Cd 两种元素模拟不同程度重金属污染尾矿，研究钒钛磁铁尾矿上的紫花苜蓿在重金属胁迫下的吸收特性。

1 材料与方法

1.1 实验材料

钒钛磁铁尾矿基本理化性质见表 1。由表 1 可以看出，钒钛磁铁尾矿中养分贫瘠，存在重金属污染问题。

表 1 实验材料部分理化性质/(mg/kg)
Table 1 Partical physical and chemical properties of materials

	pH值	碱解氮	速效磷	全量重金属				
				Cu	Zn	Pb	Cd	Cr
尾矿	8.09	1.08	2.13	254.54	336.87	124.11	0.25	541.19
土壤环境质量标准	>7.5	-	-	100	300	170	0.6	250

1.2 实验设计

实验于 2021 年 4 月—2021 年 7 月在华北理工大学温室内进行。

2021 年 4 月 7 日，选择 Cu、Cd 两种重金属元素，人工污染钒钛磁铁尾矿。每种元素分别划分 5 个水平^[13]，每个处理三个重复，以不添加重金属的处理为空白 (CK)，设置重金属元素 Cu、Cd 的全量浓度 (见表 2)。实验用盆为塑料盆，规格为：上口径：12 cm，下内径：11 cm，盆高：11 cm，每盆装尾矿 1 kg。驯化 25 d，其间，尾矿水分保持最大持水量的 70% 左右。

表 2 尾矿重金属元素的添加量
Table 2 Amounts of heavy metal elements added to tailings

种类	化合物	重金属元素添加/(mg/kg)				
		CK	水平1	水平2	水平3	水平4
Cu	CuSO ₄	0	50	100	200	400
Cd	CdCl ₂	0	1	5	10	25

实验植物为课题组前期筛选出的矿区耐性植物紫花苜蓿^[14]。2021 年 5 月 1 日挑选大小一致且颗粒饱满的紫花苜蓿种子，用 10% H₂O₂ 表面消毒 10 min，去离子水漂洗干净，于 25 ℃ 生化培养箱催芽至种子萌动。

2021 年 5 月 2 日种植紫花苜蓿，每盆 100 粒，两天后紫花苜蓿破土，培养期间每 2 d 浇一次超纯水，每次 100 mL/盆。

植物种植 60 d 后收获地上植株。取样时，沿

土面剪取地上部，冲洗干净后放入 20 mmol/L 乙二醇四乙酸二钠溶液中浸泡 15 min，用吸水纸吸干表面水。鲜样先在 105 ℃ 下杀青 30 min 后在 70 ℃ 下烘干至恒重，分别测定地上部和地下根部的干物质量。

1.3 分析方法

植物样品消采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮^[15]：称磨细烘干后植物样品（过 0.85 mm 筛）0.100 0 g，置于 100 mL 开氏瓶中，用水润湿样品后加入 5 mL 浓硫酸，瓶口放一个弯颈漏斗，在消化炉上先低温缓缓加热，待浓硫酸分解冒白烟逐渐升高温度。当溶液全部呈棕黑色时，从消化炉上取下开氏瓶，稍冷，逐滴加入 300 g/L H₂O₂ 10 滴，并不断摇动开氏瓶，以利反应充分进行。再加热至微沸 10~20 min，稍冷后再加入 H₂O₂ 5~10 滴。如此反复 3 次，直至消煮液呈清亮色后，再加热 5~10 min，除尽过剩的双氧水。取出开氏瓶冷却，将消煮液用水定容至 50 mL，取过滤液，采用岛津火焰原子吸收分光光度计和石墨炉原子吸收分光光度计（型号：AA-6880）测定重金属含量。

尾矿样品先置于室内自然风干，过 2 mm 筛后研磨，过 0.15 mm 筛，备用。采用 BCR 四步提取法^[16]分别提取尾矿中酸溶态、可还原态、可氧化态及残渣态重金属，同时设置空白对照。

1.4 数据分析

采用生物富集系数 (bioconcentration factor,

BCF) 评价钒钛磁铁尾矿-紫花苜蓿系统中紫花苜蓿对重金属的富集程度^[17], 植物转移系数 (TF) 反映植物吸收重金属后从根部转移到地上部的能力^[18], 计算公式如下:

$$BCF = C_{\text{植物}} / C_{\text{土壤}} \quad (1)$$

$$TF = C_{\text{地上}} / C_{\text{根部}} \quad (2)$$

式中:

BCF 表示植物富集系数

TF 表示植物转移系数

$C_{\text{植物}}$ 表示植物地上部或地下部的重金属含量, mg/kg;

$C_{\text{地上}}$ 表示植物地上部的重金属含量, mg/kg;

$C_{\text{根部}}$ 表示植物地下部的重金属含量, mg/kg;

植物地上部重金属累积量 = 茎重金属含量 (mg/kg) × 茎生物量 (g) + 叶重金属含量 (mg/kg) × 叶生物量 (g);

植物根部重金属累积量 = 根重金属含量 (mg/kg) × 根生物量 (g)。

1.5 数据处理及分析

实验数据经 Excel 2010 处理后及 SPSS 19.0 软件进行 Duncan 多重比较分析, Origin 9.0 软件作图。

2 结果与分析

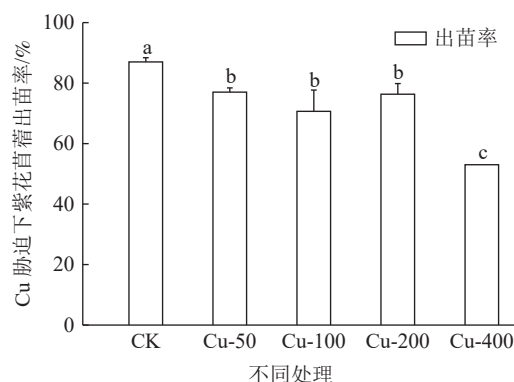
2.1 紫花苜蓿长势

2.1.1 Cu 胁迫下紫花苜蓿出苗率

Cu 的添加显著降低了紫花苜蓿的出苗率 (图 1)。CK 处理紫花苜蓿出苗率为 83.33%, Cu-50、Cu-100、Cu-200、Cu-400 出苗率分别为 74.00%、70.67%、76.33%、53.00%, 说明 Cu 胁迫对紫花苜蓿种子萌发及破土有抑制作用, 且随着 Cu 胁迫浓度增大, 抑制作用增强。

2.1.2 Cu 胁迫下紫花苜蓿生物量

随着钒钛磁铁尾矿中 Cu 胁迫水平的提高, 紫花苜蓿生物量显著降低 (图 2)。CK 处理紫花苜蓿地上部干重质量为 0.83 g, Cu-50 处理紫花苜蓿地上部干重降低了 35.3%, 50~400 mg/kg Cu 处理紫花苜蓿地上部生物量没有显著差异, 说明高浓度 Cu 胁迫会在前期抑制紫花苜蓿出苗, 但并未对紫花苜蓿生长发育产生明显毒害作用。不同浓度 Cu 胁迫水平下根系质量比 CK 处理降低了 9.0%~28.2%, 但与 CK 处理相比差异并不显著。高浓度

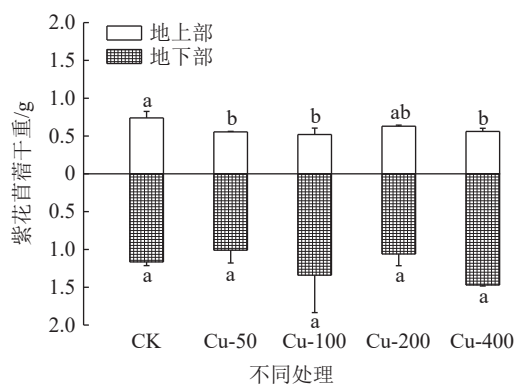


注: 图中字母表示不同处理间差异显著

图 1 Cu 胁迫紫花苜蓿出苗率

Fig.1 Emergence rate of alfalfa under Cu stresses

的 Cu 胁迫对紫花苜蓿发育抑制作用会有所减缓, 据此推断, 在外源添加 Cu 浓度大于 400 mg/kg 的一定幅度范围内, 紫花苜蓿依然能存活。



注: 图中字母表示显著性差异, 地上部、地下部单独比较

图 2 Cu 胁迫紫花苜蓿地上地下部干重

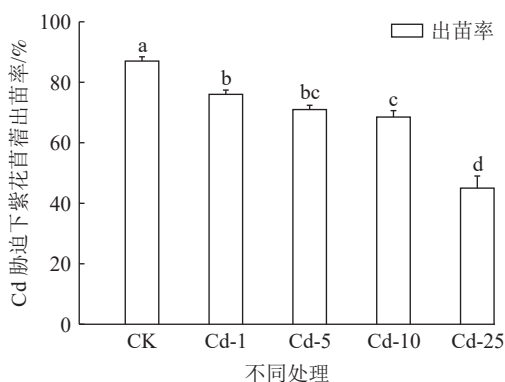
Fig.2 Dry weight of overground and underground parts of alfalfa under Cu stresses

2.1.3 Cd 胁迫下紫花苜蓿出苗率

Cd 胁迫下紫花苜蓿出苗率显著降低 (图 3)。Cd-1、Cd-5、Cd-10、Cd-25 紫花苜蓿出苗率分别为 76.00%、71.00%、68.50% 和 45.00%, 差异显著。说明 Cd 会抑制紫花苜蓿的初期发育, 且 Cd 胁迫浓度越大, 抑制作用越显著。

2.1.4 Cd 胁迫下紫花苜蓿生物量

25 mg/kg 以内的 Cd 胁迫并未对紫花苜蓿生长发育造成显著影响 (图 4)。Cd 的加入会使紫花苜蓿干重略有降低, 但是与 CK 处理相比差异均不显著。紫花苜蓿根部质量随着 Cd 胁迫水平增加而降低, 与 CK 相比分别降低了 12.45%、23.18%、27.47% 和 12.73%。表明 Cd 会抑制紫花苜蓿的根部发育, 但总体与对照组相比抑制作用不显著。



注：图中字母表示不同处理间差异显著

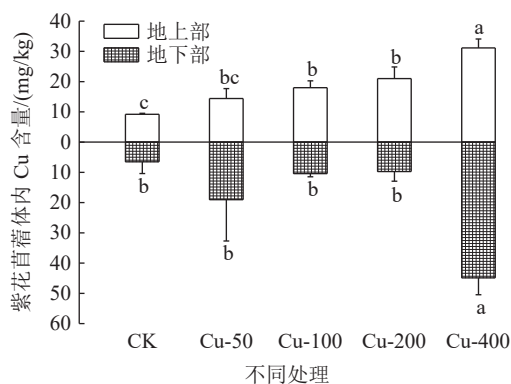
图3 Cd胁迫紫花苜蓿出苗率

Fig.3 Emergence rate of alfalfa under Cd stresses

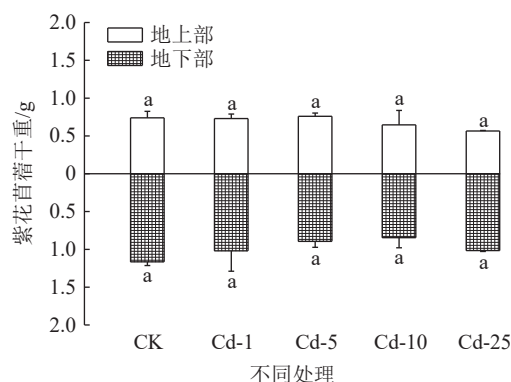
2.2 植物重金属含量及累积量

2.2.1 Cu处理紫花苜蓿重金属含量及累积量

紫花苜蓿地上部及地下根部Cu含量及累积量随着Cu胁迫浓度的增加而增加（图5）。CK处理地上部Cu含量为8.29 mg/kg，Cu-50、Cu-100、Cu-200、Cu-400处理地上部Cu含量分别是CK处理的1.57倍、1.96倍、2.28倍和3.39倍，由于CK处理地上部生物量较大，CK处理地上部Cu累积



(a) 紫花苜蓿不同部位Cu含量

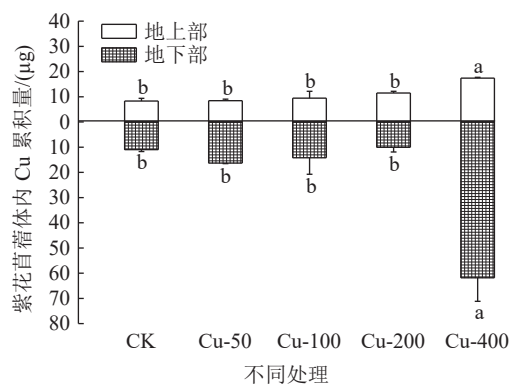


注：图中字母表示显著性差异，地上部、地下部单独比较

图4 Cd胁迫紫花苜蓿地上地下部干重

Fig.4 Dry weight of overground and underground parts of alfalfa under Cd stresses

量与200 mg/kg以内各处理并无显著差异，Cu-400处理地上部Cu累积量达17.38 μg，显著高于其他各组处理。随着Cu添加剂量的增加，紫花苜蓿地下部对Cu的吸收量有所增加，CK处理地下部Cu含量为10.98 mg/kg，由于Cu各处理之间紫花苜蓿地下部生物量并无显著差异，紫花苜蓿体内Cu累积量变化与Cu含量变化一致。



(b) 紫花苜蓿不同部位Cu累积量

注：图中字母表示显著性差异，地上部、地下部单独比较

图5 Cu胁迫下紫花苜蓿不同部位Cu含量及累积量

Fig.5 Content and accumulation of Cu in different parts of Alfalfa under Cu stress

2.2.2 Cd处理紫花苜蓿重金属含量及累积量

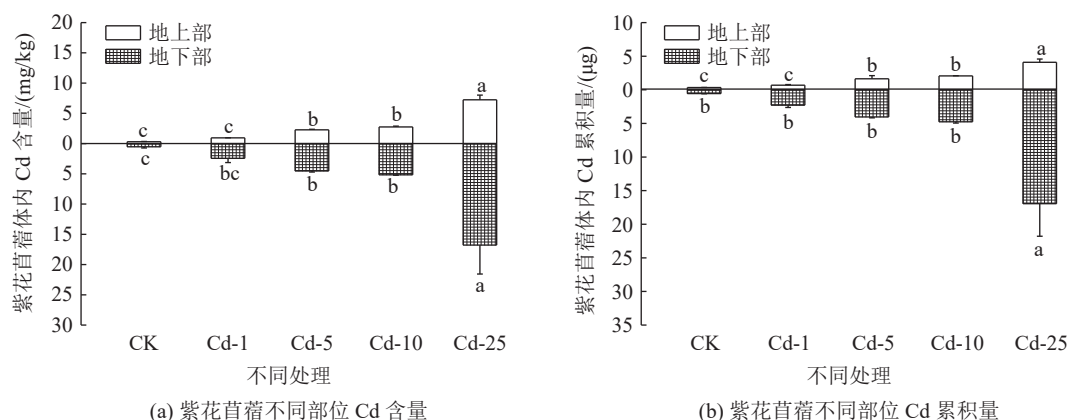
Cd胁迫浓度增加紫花苜蓿地上部及地下根部Cd含量及累积量会显著增加（图6）。CK处理紫花苜蓿地上部Cd含量和Cd累积量分别为0.33 mg/kg和0.31 μg，Cd-1、Cd-5、Cd-10、Cd-25处理紫花苜蓿地上部Cd含量分别是CK处理的2.06倍、4.91倍、6.20倍和12.25倍，地上部累积量分别是CK处理的3.05倍、7.37倍、8.93倍和23.52倍；CK处理紫花苜蓿地下根部Cd含量和Cd累

积量分别为0.53 mg/kg和0.42 μg，Cd-1、Cd-5、Cd-10、Cd-25处理紫花苜蓿地上部Cd含量分别是CK处理的4.57倍、8.50倍、9.70倍和31.51倍，地上部累积量分别是CK处理的4.08倍、7.24倍、8.55倍和30.43倍。由此可知，紫花苜蓿对Cd的吸收量会随Cd浓度增加而增加。

2.3 紫花苜蓿对重金属的富集和转移能力

2.3.1 Cu胁迫下紫花苜蓿对Cu的富集和转移能力

紫花苜蓿不同部位对Cu的富集与转移能力会



注：图中字母表示显著性差异，地上部、地下部单独比较

图 6 Cd 胁迫下紫花苜蓿不同部位 Cd 含量及累积量

Fig.6 Content and accumulation of Cd in different parts of Alfalfa under Cd stress

有所差异（表 3）。低浓度 50 mg/kg 及高浓度 400 mg/kg 处理会显著提高紫花苜蓿特别是地下部对 Cu 的富集能力，50 mg/kg 处理地下根部对 Cu 的富集系数为 0.10 达到中度摄取水平。不同处理紫花苜蓿对 Cu 的转移系数分别为 1.69、0.66、1.75 和 1.20、0.70，说明紫花苜蓿对 Cu 的主要富集部位是地上部。当 Cu 浓度超过 100 mg/kg 转移系数逐渐减小，表明随着 Cu 胁迫浓度的升高，紫花苜蓿体内的 Cu 向地上部转移能力在下降。

表 3 Cu 胁迫下紫花苜蓿不同部位对 Cu 富集系数及转移系数

Table 3 BCF and TF of different parts of Alfalfa for Cu under Cu stress

	地上部富集系数	地下部富集系数	转移系数
CK	0.046±0.007 9b	0.035±0.002 4b	1.69±0.096a
Cu-50	0.063±0.000 95a	0.10±0.027a	0.66±0.16a
Cu-100	0.051±0.002 6b	0.031±0.005 6b	1.75±0.040a
Cu-200	0.044±0.001 4b	0.024±0.001 0b	1.20±0.33a
Cu-400	0.067±0.000 79a	0.097±0.011a	0.70±0.089a

注：图中字母表示显著性差异，地上部、地下部单独比较。

2.3.2 Cd 胁迫下紫花苜蓿对 Cd 的富集和转移能力
紫花苜蓿地上部与地下部对 Cd 的富集和转移能力并未随 Cd 胁迫浓度的变化而产生显著变化（表 4）。随着 Cd 胁迫浓度的升高，地上部富集系数呈降低趋势，各处理地下根部富集系数均高于地上部富集系数，不同处理紫花苜蓿对 Cd 的转移系数分别为 0.60、0.47、0.53、0.47 和 0.44，无显著差异均小于 1，可见，紫花苜蓿根部是 Cd 的主要富集部位。CK 处理转移系数显著高于其他各处理，说明 Cd 胁迫会抑制紫花苜蓿体内 Cd 从根

部向地上部转移。

表 4 Cd 胁迫紫花苜蓿不同部位对 Cd 富集系数及转移系数

Table 4 BCF and TF of different parts of Alfalfa for Cd under Cd stress

	地上部富集系数	地下部富集系数	转移系数
CK	0.47±0.062b	0.65±0.016b	0.60±0.06a
Cd-1	0.57±0.027a	1.87±0.33a	0.47±0.10a
Cd-5	0.51±0.028ab	0.96±0.056b	0.53±0.060a
Cd-10	0.43±0.0055b	0.78±0.027b	0.47±0.10a
Cd-25	0.48±0.030b	1.10±0.27b	0.44±0.08a

注：图中字母表示显著性差异，地上部、地下部单独比较

2.4 钒钛磁铁尾矿重金属形态

2.4.1 Cu 赋存形态

钒钛磁铁尾矿中 Cu 的赋存形态分布为：残渣态>可氧化态>可还原态>酸溶态（图 7）。随着 Cu 施加剂量的增加，酸溶态 Cu 占比显著增加，可还原态和可氧化态 Cu 没有显著变化，残渣态 Cu 占比显著降低，外源施加到钒钛磁铁尾矿中的 Cu 主要以酸溶态形式存在，酸溶态重金属容易被生物吸收利用，有较高的生态风险。

2.4.2 Cd 赋存形态

钒钛磁铁尾矿中 Cd 主要以可氧化态形式存在，外源添加到钒钛磁铁尾矿中的 Cd 主要赋存形态分布为可氧化态>可还原态>酸溶态>残渣态（图 8）。Cd 添加剂量的增加主要增加可氧化态和可还原态 Cd 占比，而酸溶态和残渣态 Cd 占比显著降低，可氧化态重金属在氧化条件下易发生溶解释放，潜在生态危险较高。

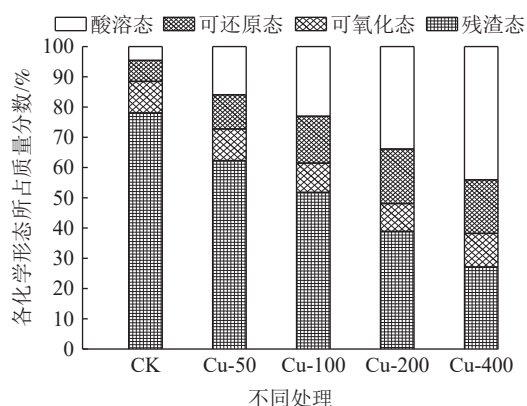


图7 添加不同剂量 Cu 后钒钛磁铁尾矿中 Cu 赋存形态百分比

Fig.7 Percentage of Cu fractionations in vanadium-titanium magnetite tailings after adding different doses of Cu

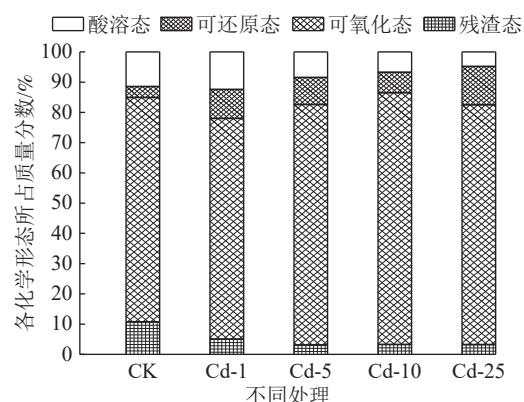


图8 添加不同剂量 Cd 后钒钛磁铁尾矿中 Cd 赋存形态百分比

Fig.8 Percentage of Cd fractionations in vanadium-titanium magnetite tailings after adding different doses of Cd

3 讨论

3.1 Cu 胁迫对紫花苜蓿的影响

外源添加到钒钛磁铁尾矿中的 Cu 主要以酸溶态形式存在，容易被植物直接吸收利用。Cu-400 处理紫花苜蓿出苗率显著降低，毒害作用显著。张志飞^[19]认为高浓度 Cu 胁迫会抑制紫花苜蓿胚根的生长进而抑制种子的萌发。此外，重金属还会通过抑制植物根细胞分裂、降低根活力进而毒害植物根系^[20]，但研究过程中发现各处理之间地下根部生物量并无显著差异，付川等^[21]发现紫花苜蓿在受到低 Cu 胁迫时，会通过改变根部有机酸含量和提高细胞壁阳离子交换能力，将吸收的 Cu 大部分积累在根部；另一方面，低分子量有机酸能够与植物体内有毒重金属络合，降低重金属有效性^[22]，减轻重金属对植物的毒害作用。本研

究表明，Cu 各组处理紫花苜蓿地上部干重显著低于对照组，可能是 Cu 的加入降低了叶片光合色素含量^[23]所导致，表明 Cu 胁迫主要会抑制紫花苜蓿地上部发育。张丽萍发现紫花苜蓿干重随 Cu 浓度的增加呈先下降后升高的特征，并推测可能在超过 50 $\mu\text{mol/L}$ Cu 胁迫时苜蓿体内开始形成某种 Cu 的特殊耐受机制，抵制了重金属的进一步毒害作用，以维持其相对正常的生长^[24]，本研究同样发现 50 mg/kg Cu 处理紫花苜蓿 Cu 累积量高，生物量低，说明外源添加低浓度 50 mg/kg Cu 处理对紫花苜蓿毒害作用较显著。

Cu 胁迫下植物细胞膜通透性会增加^[25]，重金属对根系部分细胞膜的破坏要远大于对叶片部分细胞膜的破坏^[26]，研究中发现钒钛磁铁尾矿上紫花苜蓿对高浓度 Cu 的主要富集部位是地上部，可能是高浓度 Cu 使紫花苜蓿根部细胞膜受损严重，增加了 Cu 向上运输的通道，致使 Cu 向紫花苜蓿地上部富集。

3.2 Cd 胁迫对紫花苜蓿的影响

外源添加到钒钛磁铁尾矿中的 Cd 主要以可氧化态形式存在，相较于酸溶态和可还原态 Cd，可氧化态 Cd 更难直接被紫花苜蓿直接吸收利用。通常认为，种子在受到低浓度重金属胁迫后会呈现出一种“补偿性生长”，新陈代谢增强^[27]，本研究中，Cd 胁迫会显著抑制紫花苜蓿出苗，但是各处理间紫花苜蓿干重并无显著差异，紫花苜蓿后期进行了“补偿性生长”。植物对重金属的耐受性很大程度取决于它们感知和传递金属胁迫信号的能力，以及将信号转化为分子、生化和生理状态的能力^[28]，因此植物对不同重金属富集能力有较大差异。对草本植物而言，当富集系数低于 0.5，说明植物对重金属的富集能力较弱；当富集系数在 0.5~1.0 之间，对重金属有一定的积累能力^[29]。本研究 Cd 胁迫下各处理紫花苜蓿对 Cd 富集系数为 1.12~2.44，证明紫花苜蓿对 Cd 有一定的积累能力。

在低浓度 Cd 胁迫下，紫花苜蓿侧根数量会增加，弥补由于受到镉毒害受损的根系，维持根系功能^[30]。随着 Cd 添加浓度的不断增加，紫花苜蓿体内的超氧阴离子自由基产生速率、 H_2O_2 含量及 MDA 含量均显著持续增加，对植物造成氧化伤害^[31]，根系的根长、表面积、体积会显著降低。研究过程中发现，Cd 主要抑制紫花苜蓿地下根部

的发育,而各处理地下根部富集系数均高于地上部富集系数。

4 结 论

(1) 外源添加 Cu 显著抑制紫花苜蓿初期发育, Cu 的主要富集在紫花苜蓿地上部。

(2) 外源添加 Cd 主要抑制紫花苜蓿地下根部发育, 紫花苜蓿对 Cd 的主要富集部位是地下根部。

(3) 外源添加 Cu 主要以酸溶态形式存在, Cd 主要以可氧化态形式存在, 生态风险较高。

(4) 尾矿中环境复杂, 对于紫花苜蓿-钒钛磁铁矿尾矿体系中重金属形态特征的变化还有待继续研究。

参考文献:

- [1] 郝建璋, 曾冠武. 钒钛磁铁矿铁、钒、钛一步分离试验[J]. *矿产综合利用*, 2020(6):73-78.
- HAO J Z, ZENG G W. New technique for the separation of iron, vanadium and titanium in vanadium titanium magnetite[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(6):73-78.
- [2] 印万忠, 徐东, 杨耀辉, 等. 承德某钒钛磁铁矿尾矿资源化利用技术研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(6):37-42.
- YIN W Z, XU D, YANG Y H, et al. Research on the recycling technology for a vanadium- titanium magnetite tailings in Chengde[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(6):37-42.
- [3] 陈杜娟, 王志丰, 王婷霞. 某尾矿综合回收选矿实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2021(1):104-108.
- CHEN D J, WANG Z F, WANG T X. Experimental study on comprehensive recovery and beneficiation of tailings[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(1):104-108.
- [4] 包扬, 苏德, 杨巍, 等. 铜尾矿库土壤修复效应及周边植被恢复模式研究[J]. *矿产综合利用*, 2022(1):74-81.
- BAO Y, SU D, YANG W, et al. Study on soil remediation effect of copper tailings pond and surrounding vegetation restoration model[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(1):74-81.
- [5] 刘应冬, 徐力, 王先达, 等. 攀枝花钒钛磁铁矿尾矿中主要金属元素淋滤浸出行为研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(6):84-90.
- LIU Y D, XU L, WANG X D, et al. Study on leaching behavior of main metal elements from Panzhihua vanadium-titanium magnetite tailings[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(6):84-90.
- [6] 张英英, 施志国, 李彦荣, 等. 施用改良剂对重度镉胁迫下甜高粱重金属吸收和转运的调控效应[J]. *西南农业学报*, 2021, 34(9):1959-1968.
- ZHANG Y Y, SHI Z G, LI Y R, et al. Effects of amendments on heavy metal uptake and transport in sorghum bicolor L. under severe cadmium stress[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 34(9):1959-1968.
- [7] 艾艳君, 卢赛, 李富平, 等. 施加污泥堆肥对铅锌尾矿中黑麦草长势及重金属稳定性影响[J]. *矿产综合利用*, 2021(4):29-35.
- AI Y J, LU S, LI F P, et al. Effect of sewage sludge compost addition on stabilization of heavy metal and growth of ryegrass in lead/zinc tailings[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):29-35.
- [8] YANQUN Z, YUAN L, SCHVARTZ C, et al. Accumulation of Pb, Cd, Cu and Zn in plants and hyperaccumulator choice in Lanping lead-zinc mine area, China[J]. *Environment international*, 2004, 30(4):567-576.
- [9] 牛学奎, 吴学勇, 王薇, 等. 典型鼓风炉铅冶炼废渣堆场周边优势植物重金属富集特征研究[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(6):1293-1298.
- NIU X K, WU X Y, WANG W, et al. Study on enrichment characteristics of heavy metals from dominant plants around the waste slag yard of lead smelting in a typical blast furnace[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(6):1293-1298.
- [10] 来思彤, 崔清亮, 刘金龙, 等. 紫花苜蓿茎叶功能特性指标的测定与分析[J]. *食品科学*, 2020, 41(7):73-78.
- LAI S T, CUI Q L, LIU J L, et al. Determination and analysis of functional characteristics of alfalfa stems and leaves[J]. *Food Science*, 2020, 41(7):73-78.
- [11] NOUAIRI, MRABET, RABHI, et al. Cu tolerant *Sinorhizobium meliloti* strain is beneficial for growth, Cu accumulation, and mineral uptake of alfalfa plants grown in Cu excess[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2015, 61(12):1707-1718.
- [12] 张杨杨, 李希铭, 高鹏, 等. 不同浓度镉胁迫下 6 种草本植物的耐性及富集特征的比较[J]. *草地学报*, 2021, 29(6):1265-1276.
- ZHANG Y Y, LI X M, GAO P, et al. Comparison of tolerance

and enrichment characteristic for six herbaceous plant under different levels Cd stress[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(6):1265-1276.

[13] 李大乐, 陈建文, 张红, 等. 铜污染对土壤细菌群落结构及重金属抗性基因的影响[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(3):1082-1090.

LI D L, CHEN J W, ZHANG H, et al. Effects of copper pollution on soil bacterial community structure and heavy-metal resistance genes[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(3):1082-1090.

[14] 迟晓杰. 基于高光谱遥感的紫花苜蓿修复金属尾矿效果研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2020.

CHI X J. The remediation effect of alfalfa on mine tailings based on hyperspectral remote sensing[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2020.

[15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

BAO S D. Soil agrochemical analysis [M]. 3th Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[16] CAPPUYNS V, SWENNEN R, NICLAES M, Application of the BCR sequential extraction scheme to dredged pond sediments contaminated by Pb-Zn mining: A combined geochemical and mineralogical approach[J]. *Geochem Explor*, 2007, 93, 78-90.

[17] 孙厚云, 卫晓锋, 孙晓明, 等. 钒钛磁铁尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征[J]. *环境科学*, 2021, 42(3):1166-1176.

SUN H Y, WEI X F, SUN X M, et al. Bioaccumulation and translocation characteristics of heavy metals in a Soil-Maize system in reclaimed land and surrounding areas of typical Vanadium-Titanium magnetite tailings[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(3):1166-1176.

[18] KOBRA M, SEYED MAJID G, TORKZADEH M M. Accumulation and phytoremediation of Pb, Zn and Ag by plants growing on Koshk lead-zinc mining area, Iran[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(5):1310-1320.

[19] 张志飞, 龚梨霞, 文昭竹, 等. 酸铜对紫花苜蓿种子萌发及根系生长的影响[J]. *中国草地学报*, 2017, 39(3):72-76.

ZHANG Z F, GONG L X, WEN Z Z, et al. Effect of acid-copper stress on seed germination and root growth of medicago sativa[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2017, 39(3):72-76.

[20] 朱剑飞, 李铭红, 谢佩君, 等. 紫花苜蓿、黑麦草和狼尾草对 Cu、Pb 复合污染土壤修复能力的研究[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(2):303-313.

ZHU J F, LI M H, XIE P J, et al. Phytoremediation of single and combined pollution of Cu and Pb by *Medicago sativa*, *Lolium perenne*, and *Pennisetum alopecuroides*[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(2):303-313.

[21] 付川, 余顺慧, 黄怡民, 等. 紫花苜蓿对铜胁迫生理响应的傅里叶变换红外光谱法研究[J]. *生态学报*, 2014, 34(5):1149-1155.

FU C, YU S H, HUANG Y M, et al. Physiological response of *Medicago sativa* L. to copper stress by FTIR spectroscopy[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(5):1149-1155.

[22] LU T, KE M, LAVOIE M, et al. Rhizosphere microorganisms can influence the timing of plant flowering[J]. *Microbiome*, 2018, 6(1):231.

[23] 许敏, 韩玉林, 原海燕, 等. 添加铜尾矿矿砂的栽培基质对黄花苜蓿幼苗生长及部分生理指标的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2014, 23(2):74-79.

XU M, HAN Y L, YUAN H Y, et al. Effects of culture substrate added with copper tailing sand on growth and some physiological indexes of *Medicago falcata* seedlings[J]. *Journal of Plants Resources and Environment*, 2014, 23(2):74-79.

[24] 张丽萍, 沈亚婷. 紫花苜蓿对铜的吸收、积累和耐受机制研究[J]. *分析化学*, 2017, 45(8):1129-1136.

ZHANG L P, SHEN Y T. Study on copper absorption, accumulation and tolerance mechanism of alfalfa[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2017, 45(8):1129-1136.

[25] LIU J J, WEI Z, LI J H. Effects of copper on leaf membrane structure and root activity of maize seedling[J]. *Botanical Studies*, 2014, 55:47.

[26] 刘大林, 王秀萍, 胡楷崎, 等. 土壤镉含量对高粱属植物生理生化特性的影响[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(11):2478-2482.

LIU D L, WANG X P, HU K Q, et al. Effects of cadmium stress on the physiological and biochemical indices of sorghum plants[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(11):2478-2482.

[27] 保琼莉, 唐一然, 保万魁, 等. 镉对不同品种苜蓿种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(5):1695-1705.

BAO Q L, TANG Y R, BAO W K, et al. Effects of cadmium on seed germination and seedling growth of different alfalfa varieties[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(5):1695-1705.

[28] EJAZUL I, MUHAMMAD T K, SAMRA I S, et al. Biochemical mechanisms of signaling: Perspectives in plants under arsenic stress[J]. *Ecotoxicology and Environmental*

Safety, 2015, 114:126-133.

[29] 周鹏飞, 张世文, 罗明, 等. 矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征[J]. 环境科学, 2022, 43(2):985-994.

ZHOU P F, ZHANG S W, LUO M, et al. Characteristics of plant diversity and heavy metal enrichment and migration under different ecological restoration modes in abandoned mining areas[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(2):985-994.

[30] 李希铭, 宋桂龙. 镉胁迫对紫花苜蓿镉吸收特征及根系形态影响[J]. *草业学报*, 2016, 25(2):178-186.

LI X M, SONG G L. Cadmium uptake and root morphological changes in *Medicago sativa* under cadmium stress[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(2):178-186.

[31] 尹国丽, 师尚礼, 寇江涛, 等. Cd 胁迫对紫花苜蓿种子发芽及幼苗生理生化特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2013, 33(8):1638-1644.

YIN G L, SHI S L, KOU J T, et al. Seed germination and physiological and biochemical characteristics of alfalfa under cadmium Stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2013, 33(8):1638-1644.

Absorption and Transport of Heavy Metals Copper and Cadmium in Alfalfa from Vanadium-titanium Magnetite Tailings

LU Sai¹, GU Haihong^{1,2,3,4}, AI Yanjun¹, LI Zezhao¹, LI Fuping^{1,2,3,4}, ZHOU Zheng⁵

(1.College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China; 2.Hebei Key Laboratory of Mining Development and Security Technology, Tangshan 063210, Hebei, China; 3.Hebei Industrial Technology Institute of Mine Ecological Remediation, Tangshan 063210, Hebei, China; 4.Tangshan Key Laboratory of Resources and Environmental Remote Sensing, Tangshan 063210, Hebei, China; 5.College of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China)

Abstract: Phytoremediation technology is widely used in ecological restoration process of abandoned mines, and the ability of plants to absorb heavy metals should be taken into account. In order to explore the absorption characteristics of Cu and Cd in the tailings of vanadium-titanium magnetite by the restoration plant alfalfa, Cu and Cd were added externally to the tailings to simulate different pollution levels. After three months, the occurrence forms of Cu and Cd in vanadium-titanium magnetite tailings, the growth of alfalfa and the absorption and transport of Cu and Cd in alfalfa were analyzed to study the absorption and transport characteristics of alfalfa under Cu and Cd stress. The results showed that after three months, Cu mainly existed in acid-soluble form and Cd mainly existed in oxidizable form, the ecological risk was relatively high. The addition of Cu could inhibit the emergence and shoot growth of alfalfa, but the uptake of Cu by alfalfa increased significantly. The uptake of Cu by the shoot and the ground increased by 1.78%~109.62% and 48.46%~463.11%, respectively. The shoot was the main enrichment site of Cu. Cd was mainly accumulated in the roots of alfalfa. With the increase of Cd stress concentration, the ability of alfalfa to transfer Cd from root to shoot increased. The results can provide a theoretical basis for the study of phytoremediation technology in mining areas.

Keywords: Vanadium titanium magnetite tailings; Heavy metal copper; Heavy metal cadmium; Alfalfa; Absorption characteristics