

黑麦草生长对锰渣堆场周边土壤中锰、镉迁移的影响及其修复作用

敖慧¹ 王玉宝²

(1. 贵州省资源节约综合利用协会, 贵州 贵阳 550025;
2. 贵州楚天环境检测咨询有限公司, 贵州 贵阳 550025)

[摘要] 通过采集锰渣堆场周边不同污染程度的土壤,以黑麦草为供试植物,进行盆栽-淋溶试验,探讨黑麦草生长对锰渣堆场周边土壤中 Mn、Cd 淋溶迁移的影响及其修复作用。试验结果表明:种植黑麦草后明显减少了 Mn、Cd 向水体的迁移,不同污染程度的土壤中 Mn、Cd 溶出量总体上均表现为黑麦草组 < 对照组;黑麦草可有效吸收重金属,总体上黑麦草对 Mn、Cd 的富集能力表现为根系 > 地上部分;从黑麦草对重金属的富集能力强弱来看,其根系 Cd 富集系数分别为 0.788、0.739、0.547、0.691、0.316,均高于根系 Mn 富集系数,说明黑麦草对 Cd 的修复效果更好;种植黑麦草后,土壤中有效 Mn、有效 Cd 含量与对照组相比均出现明显增加,但总 Mn 含量、总 Cd 含量低于对照组,总 Mn 含量降低幅度为 206.55~897.41 mg/kg,总 Cd 含量降低幅度为 0.02~0.40 mg/kg。黑麦草生长可以促进重金属活化,增加其有效性,然后通过植物吸收作用将重金属固定在体内,从而降低外环境中重金属含量。黑麦草生长能够减少重金属向外环境迁移,降低重金属对周边环境的影响,对锰渣堆场周边污染土壤起到一定修复作用。

[关键词] 黑麦草; 锰渣堆场; 淋溶; 迁移; 重金属; 修复作用

[中图分类号] TF792; X5 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2024)05-0067-08

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.05.010

0 前言

电解锰渣是电解锰生产过程中产生的浸酸压滤渣,为黑色块状固体,包含了酸浸渣、除铁渣、硫化渣,是一种高含水率工业固体废弃物。电解锰渣酸性较强,含有大量的 Mn、Cd、As、Cr 等重金属元素,由于电解锰渣的 pH 较低,这些重金属元素具有较

强的迁移性。大量露天堆存的锰渣已经成为土壤长期潜在的污染源,其中的有害物质通过地表径流进入周边水环境,造成堆场周边土壤和水体严重污染^[1]。贵州省松桃县是中国著名的“锰三角”之一,享有“中国锰都”之称。目前,该区域共有 27 家锰矿开采企业和 78 家锰粉加工企业,年产能为 110 万 t,电解锰生产企业 10 家,年产能 10 万 t,电解锰渣产量大,且都采用粗放式露天堆存,使得当地的生态环境遭到严重破坏。

黑麦草 (*Lolium perenne*) 是常见的多年生冷季型草坪草,其生长速度快、生物量大,对受重金属污染的土壤具有较强的适应能力。张永兰等^[2]采用多年生黑麦草对覆土作用下铜尾矿进行修复,发现多年生黑麦草在铜尾矿基质中生长较好。张军等^[3]研究发现,在 Zn、Cd、Pb 胁迫下,黑麦草可以通过抗氧化酶系统增强对重金属的耐性。为了探讨黑麦草生长对锰渣堆场周边土壤中 Mn、Cd 淋溶迁移的影响及其修复作用,本文通过采集锰渣堆场周边不同污染程度的土壤,以黑麦草为供试植物,进行盆栽-淋溶试验,为锰渣堆场的生态修复提供科学

[收稿日期] 2024-05-02

[作者简介] 敖慧 (1995—),女,贵州铜仁人,硕士,研究方向为矿山污染治理与生态修复。

[通信作者] 王玉宝 (1996—),男,贵州贵定人,硕士,研究方向为水污染治理工程。

[引用格式] 敖慧,王玉宝. 黑麦草生长对锰渣堆场周边土壤中锰、镉迁移的影响及其修复作用[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(5): 67-74.

AO Hui, WANG Yubao. Effect of *Lolium perenne* growth on Mn and Cd migration in soils around electrolytic manganese residue storage yard and its remediation[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(5): 67-74.

依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试植物为多年生黑麦草,供试土壤为电解锰渣堆场周边不同污染程度的土壤。本次试验所用的土壤采自贵州省松桃县,根据锰渣堆场堆放的年份,选取4个具有代表性的堆场(堆场名称分别简称:YG——堆存年份10年、JR——堆存年份3年、HF——堆存年份5年、JT——堆存年份1年),采样堆场位置分布如图1所示。

根据堆场地表径流、冲沟流水及入田灌溉水的走向,采集距堆场50~500 m范围内的土壤,按照与堆场距离每隔100 m设置一个采样点(每个堆场设置3~5个采样点),采用蛇形布点法布设采样点,每个样点采集3个混合样,用样品袋装好,贴上标签,将采好的土壤样品风干,研磨过5目筛封装置于阴凉干燥处备用。

本次试验共采集锰渣堆场周边土壤样品13个,其土壤理化性质分别见表1。其总Mn含量为1 027.71~17 779.31 mg/kg,均值为6 425.17 mg/kg;总Cd含量为0.79~3.06 mg/kg,均值为1.65 mg/kg;

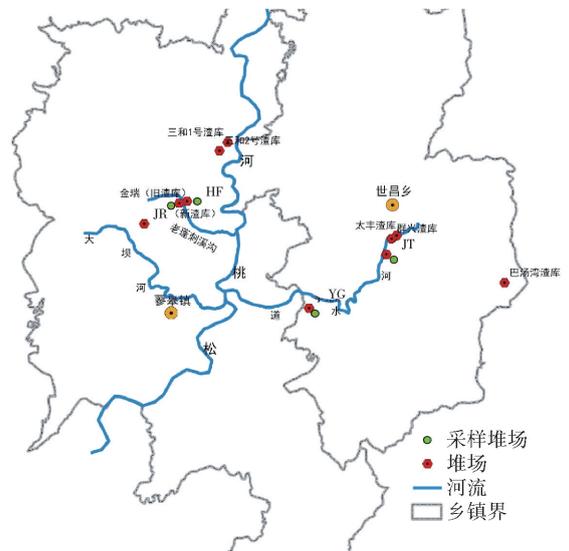


图1 松桃县锰渣堆场分布图

有效Mn含量为5.52~577.42 mg/kg,均值为173.65 mg/kg;有效Cd含量为72.95~397.1 μg/kg,均值为207.78 μg/kg;土壤的pH值为7.11~8.22。有效磷、速效钾、碱解氮和有机质含量分别为1.65~52.67 mg/kg、154.85~475.8 mg/kg、102.67~431.5 mg/kg、12.57~56.47 mg/kg,土壤肥力水平介于中等-丰富,具备植物生长条件。

表1 锰渣堆场周边土壤理化性质

堆场	采样点	pH	有效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	TMn/ (mg·kg ⁻¹)	TCd/ (mg·kg ⁻¹)	有效 Mn/ (mg·kg ⁻¹)	有效 Cd/ (μg·kg ⁻¹)
YG	YG ₁	7.98	7.17	315.20	231.78	46.83	1 383.88	1.78	25.93	331.8
	YG ₂	7.99	10.17	295.69	118.125	29.90	9 911.54	1.74	28.82	72.95
	YG ₃	7.86	3.56	289.43	177.63	22.70	16 886.3	1.87	72.97	113.10
JR	JR ₁	8.10	1.65	154.85	102.67	13.12	1 442.90	1.07	5.52	261.90
	JR ₂	7.91	11.19	429.15	116.38	23.49	5 512.8	1.41	27.31	150.20
	JR ₃	7.97	7.26	189.39	114.625	31.62	7 545.6	1.35	77.22	105.10
	JR ₄	8.22	11.24	405.99	130.38	34.09	17 779.31	1.52	420.20	133.70
HF	HF ₁	7.38	26.13	475.80	231.00	12.57	1 746.34	1.13	63.45	73.53
	HF ₂	7.12	28.71	360.41	390.25	41.38	2 172.2	0.79	204.75	228.90
	HF ₃	7.26	40.00	376.67	378.00	33.65	4 271.8	1.49	374.02	304.20
JT	JT ₁	7.51	5.32	364.67	122.5	30.56	1 027.71	2.04	49.65	271.70
	JT ₂	7.11	52.67	378.94	348.00	24.06	5 903.1	3.06	330.23	256.90
	JT ₃	7.24	32.23	410.73	431.5	56.47	8 443.7	2.14	577.42	397.10
	最大值	8.22	52.67	475.80	431.50	56.47	17 779.31	3.06	577.42	397.10
	最小值	7.11	1.65	154.85	102.67	12.57	1 027.71	0.79	5.52	72.95
	变异系数	0.05	0.88	0.27	0.55	0.40	0.872	0.350	1.089	0.510

1.2 试验设计

选用5目的供试土壤进行盆栽-淋溶试验,根据土壤中总Mn含量,将供试土壤划分为5个污染水平,分别为<2 000 mg/kg、2 000~5 000 mg/kg、

5 000~7 000 mg/kg、7 000~10 000 mg/kg、>10 000 mg/kg,分别记为L1、L2、L3、L4、L5,将总Mn含量在同一范围的土壤样品均匀混合,混合后土壤的理化性质见表2。

表2 混合后土壤的理化性质

污染水平	TMn/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	TCd/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效 Mn/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效 Cd/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH
L1	1 854.89	1.51	36.14	234.73	7.74
L2	3 559.41	1.14	289.39	266.55	7.19
L3	6 287.61	2.27	178.77	203.55	7.51
L4	8 633.61	2.22	227.82	191.72	7.73
L5	17 332.81	1.69	246.59	123.40	8.04

用精确度为0.1 g的天平称取1.2 kg土壤装入直径15 cm、高10 cm的盆中,每个水平设置2次重复,试验组种植黑麦草,以不种植物为对照组。播种前将土壤充分润湿,到达湿度饱和状态,静置24 h。盆栽底部放置一个塑料容器,用于收集淋溶液,口径大小与盆栽底部相接。挑选饱满、大小均一的黑麦草种子,用2%次氯酸钠溶液消毒30 min,并用自来水冲数次后,再用蒸馏水清洗3次,采用吸水纸吸干表面的水分后播种,每盆播种 150 ± 5 粒。盆栽培养过程中,根据贵州省的年均降水量,每天浇200 mL蒸馏水,每隔15天收集一次淋溶液,一共收集4次,记录每次收集淋溶液的体积,用滤纸过滤后加酸保存备用。

1.3 试验方法与数据处理

土壤的理化性质分析均参照《土壤分析技术规范》中的方法。pH按照水土比25:10稀释,然后用pH计测定。有效磷含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;速效钾含量采用乙酸铵浸提-火焰原子吸收光谱仪测定;碱解氮采用碱解扩散法。有机质含量采用石墨消解仪-容重法测定^[4]。土壤重金属全量采用 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 高压消解,土壤重金属

有效态采用DTPA浸提法,植物采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消煮,然后用原子吸收光谱仪进行Mn含量测定,Cd含量采用ICP-MS测定。淋溶液的pH值用pH计直接测定,Mn含量用火焰原子吸收光谱仪测定,Cd含量用ICP-MS测定,然后采用SPSS 22.0进行数据的差异显著性分析。

采用生物富集系数(BCF)评估植物对重金属的富集能力, $\text{BCF} = \text{植物中重金属含量} / \text{土壤中重金属含量}$ 。

2 结果与分析

2.1 黑麦草对土壤中Mn、Cd淋溶迁移的影响

不同污染程度的土壤中黑麦草对重金属淋溶迁移的影响如图2所示。从图2可以看出,在不同污染程度L1~L5的土壤中,对照组和黑麦草组Mn、Cd溶出量总体上均呈现先增加后降低的趋势;在L4土壤中Mn、Cd溶出量最大,到L5出现显著性降低。其中,对照组Mn累计溶出量分别为1.83 mg、8.03 mg、25.35 mg、129.83 mg、14.17 mg,黑麦草组Mn累计溶出量分别为0.23 mg、2.10 mg、20.64 mg、77.81 mg、0.88 mg;对照组Cd累计溶出量分别为0.32 μg 、0.20 μg 、0.59 μg 、5.79 μg 、0.54 μg ,黑麦草组Cd累计溶出量分别为0.11 μg 、0.10 μg 、0.77 μg 、2.51 μg 、0.06 μg 。重金属溶出量与重金属赋存形态、土壤pH值、土壤形貌特征、土壤微生物环境等因素有关^[5-7],尤其是土壤的pH值。很多研究都表明,土壤pH值与重金属赋存形态存及迁移性存在显著相关性^[5]。由表2可知,L5水平土壤中有效Cd含量最低,有效Mn含量相对L4也偏低,并且L5

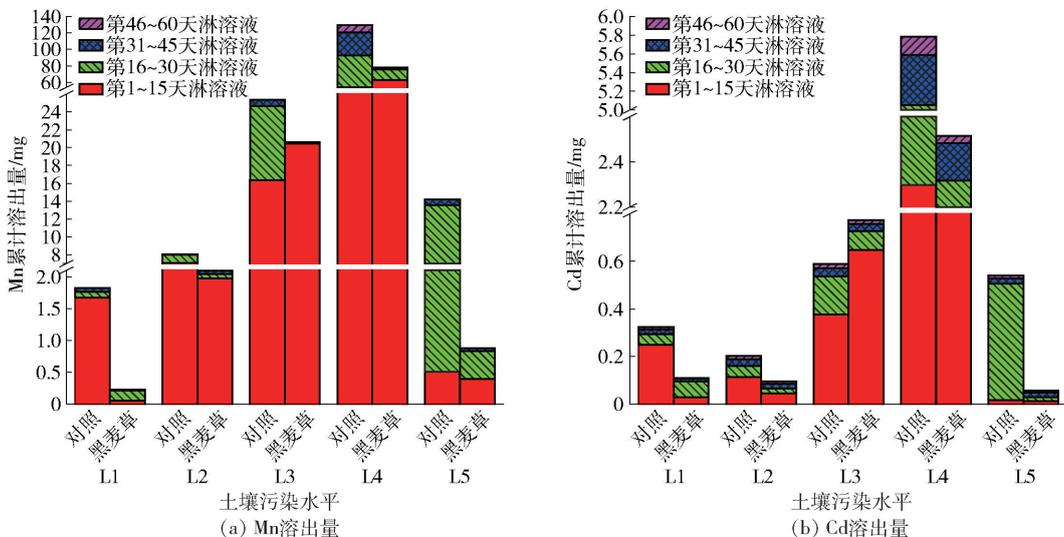


图2 不同污染程度的土壤中黑麦草对重金属淋溶迁移的影响

水平土壤 pH 较高,所以 L5 水平土壤的 Mn、Cd 溶出量出现局部下降。

在 L1 ~ L5 不同锰污染程度的土壤淋溶液中, Mn、Cd 的累计溶出量均表现为对照组 > 黑麦草组。从 L1 至 L5, 对照组中 Mn 的累计溶出量分别比黑麦草组高 1.60 mg、5.93 mg、4.71 mg、52.02 mg、13.29 mg, 这表明黑麦草生长后明显降低了 Mn 向水体的迁移。对照组中 Cd 的溶出量总体上高于黑麦草组, 除了 L3 水平土壤中黑麦草组 Cd 累计溶出量比对照组高出 0.18 μg , 其中在第 1 ~ 15 天, 黑麦草组 Cd 溶出量高出对照组 0.27 μg , 这可能是因为淋溶前期黑麦草根系生长较快, 改变了土壤的形貌特征和理化性质^[7], 使得溶出量较大, 到了淋溶后期, 黑麦草组 Cd 累计溶出量与对照组的差距逐渐缩小。而在其他水平土壤中, 黑麦草组的 Cd 累计溶出量均低于对照组, 尤其是 L4 水平最明显, 比对照低 3.27 μg 。这进一步说明种植黑麦草整体上可以减少重金属向水体迁移。

2.2 黑麦草对 Mn、Cd 的累积特征

不同污染水平黑麦草根系和地上部分对重金属的累积情况如图 3 和表 3 所示。从图 3 可以看出, 随着污染程度增加, 黑麦草对 Mn 的累积整体呈现逐渐增加的趋势, 这表明黑麦草对锰具有一定的富集能力。L4、L5 水平的 Mn 累积量局部降低, 主要是因为 L4、L5 污染水平土壤中, 总 Mn 和有效 Mn 含量均比较高, 污染程度较严重, 黑麦草受重金属胁迫, 生物量低, 从而影响了植物对重金属的吸收, 所以导致 L4、L5 水平的 Mn 累积量局部降低。从表 3 可知, L1 ~ L5 污染水平的土壤中, 黑麦草根系的 Mn 富集系数分别为 0.094、0.053、0.038、0.080、0.034,

地上部分的富集系数分别为 0.170、0.085、0.052、0.016、0.029。在 L1 ~ L3 污染水平的土壤中, 地上部分 Mn 累积量分别为 288.79 mg/kg、308.90 mg/kg、295.66 mg/kg, 根系 Mn 累积量分别为 158.94 mg/kg、193.63 mg/kg、214.02 mg/kg, 黑麦草地上部分和根系中锰的累积量较低, 且富集能力表现为地上部分 > 根系, 这可能因为 L1 ~ L3 污染土壤中, Mn 含量较低, 黑麦草不受重金属胁迫, 并为了维持茎叶的正常生长将大部分锰向地上部分转移^[8]。在 L4、L5 土壤中, 黑麦草地上部分和根系的 Mn 含量均显著升高 ($P < 0.05$), 根系富集量分别为 639.85 mg/kg、540.82 mg/kg, 地上部分富集量为分别 491.67 mg/kg、456.70 mg/kg, 且根系富集能力 > 地上部分富集能力。这表明高污染水平土壤中, 黑麦草通过根系吸收锰并固定在根部, 减少其向地上部分转移, 从而降低锰对地上部分的毒害, 这是黑麦草对锰胁迫的一种耐性机制^[9]。

黑麦草对 Cd 的富集能力均表现为根系 > 地上部分。在 L1 ~ L5 污染水平土壤中, 根系的累积量分别为 0.93 mg/kg、0.58 mg/kg、1.12 mg/kg、1.18 mg/kg、0.47 mg/kg, 地上部分的累积量分别为 0.44 mg/kg、0.21 mg/kg、0.41 mg/kg、0.36 mg/kg、0.16 mg/kg, 根系的累积量比地上部分分别高出 0.49 mg/kg、0.37 mg/kg、0.71 mg/kg、0.82 mg/kg、0.30 mg/kg。黑麦草根系的 Cd 富集系数分别为 0.788、0.739、0.547、0.691、0.316, 地上部分的富集系数分别为 0.373、0.268、0.198、0.211、0.112 (表 3), 即根系的 Cd 富集系数均大于地上部分, 表明黑麦草根系对 Cd 具有较强的富集能力。但从 L1 到 L5, 组间黑麦草的 Cd 累积变化趋势不明显, 这是因为

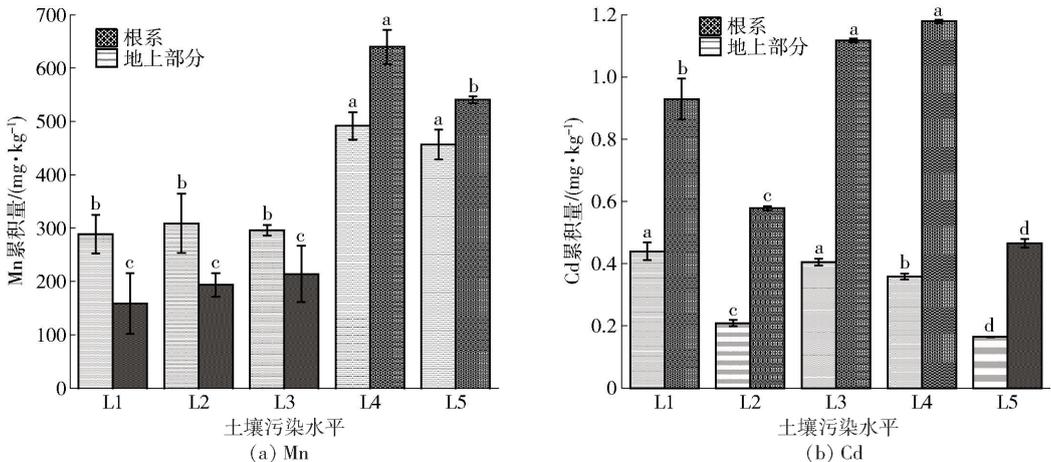


图 3 不同污染水平黑麦草根系和地上部分对重金属的累积情况

L1~L5 土壤中 Cd 含量没有呈现明显的变化趋势。黑麦草属于耐性较强的禾本科草,大部分研究表明,

黑麦草对 Cd、Cu、Pb 等重金属都具有较强的累积能力,尤其根系对重金属的富集能力较强^[10]。

表 3 不同污染水平的土壤中黑麦草根系和地上部分对 Mn、Cd 的富集系数

污染水平	富集系数 _{Mn-地上部分}	富集系数 _{Mn-根系}	富集系数 _{Cd-地上部分}	富集系数 _{Cd-根系}
L1	0.170 ± 0.021 5b	0.094 ± 0.033 6c	0.373 ± 0.027 4a	0.788 ± 0.062 0b
L2	0.085 ± 0.018 7b	0.053 ± 0.004 0c	0.268 ± 0.372c	0.739 ± 0.078 7c
L3	0.052 ± 0.002 4b	0.038 ± 0.008 8c	0.198 ± 0.002 2a	0.547 ± 0.005 3a
L4	0.016 ± 0.002 7a	0.080 ± 0.004 7a	0.211 ± 0.254b	0.691 ± 0.686a
L5	0.029 ± 0.001 5a	0.034 ± 0.000 02b	0.112 ± 0.000 7d	0.316 ± 0.005 2d

2.3 黑麦草对土壤中 Mn、Cd 含量的影响

黑麦草对不同污染程度土壤中重金属含量的影响如图 4 所示。从图 4 可以看出,L1~L4 土壤种植黑麦草后,土壤中有效 Mn 含量明显增加,相比对照组,分别增加了 15.58 mg/kg、23.30 mg/kg、81.28 mg/kg、31.15 mg/kg,其中 L3 最为显著。在 L5 土壤中,黑麦草组有效 Mn 含量出现局部下降,低于对照组,这与土壤自身的有效 Mn 含量有关,这是因为 L5 水平土壤的总 Mn 含量高,黑麦草生长受到抑制,生长状况较差,生物量低,植物根系活化作用不明显。种植黑麦草后,土壤中有效 Cd 含量总体上表现为黑麦草组 > 对照组,增加幅度为 0.013 ~

0.043 mg/kg。有研究表明,植物生长后,根际土壤理化特征及微生物特征都会发生变化,从而影响了土壤中重金属有效性^[7]。这说明黑麦草的生长可以促进土壤中重金属向有效态转化,增加其有效性,然后通过根系螯和作用及植物吸收作用,将其固定在体内,从而减少重金属向外环境的迁移^[11]。

从重金属全量来看,黑麦草土壤中总 Mn、总 Cd 含量较对照组均出现不同程度降低,总锰含量降低幅度为 206.55 ~ 897.41 mg/kg,其中 L5 水平最为显著;总 Cd 降低幅度为 0.02 ~ 0.40 mg/kg,其中 L4 水平最为明显。这是因为黑麦草生长将部分重金属固定到体内,使得土壤中重金属含量降低。这也更加

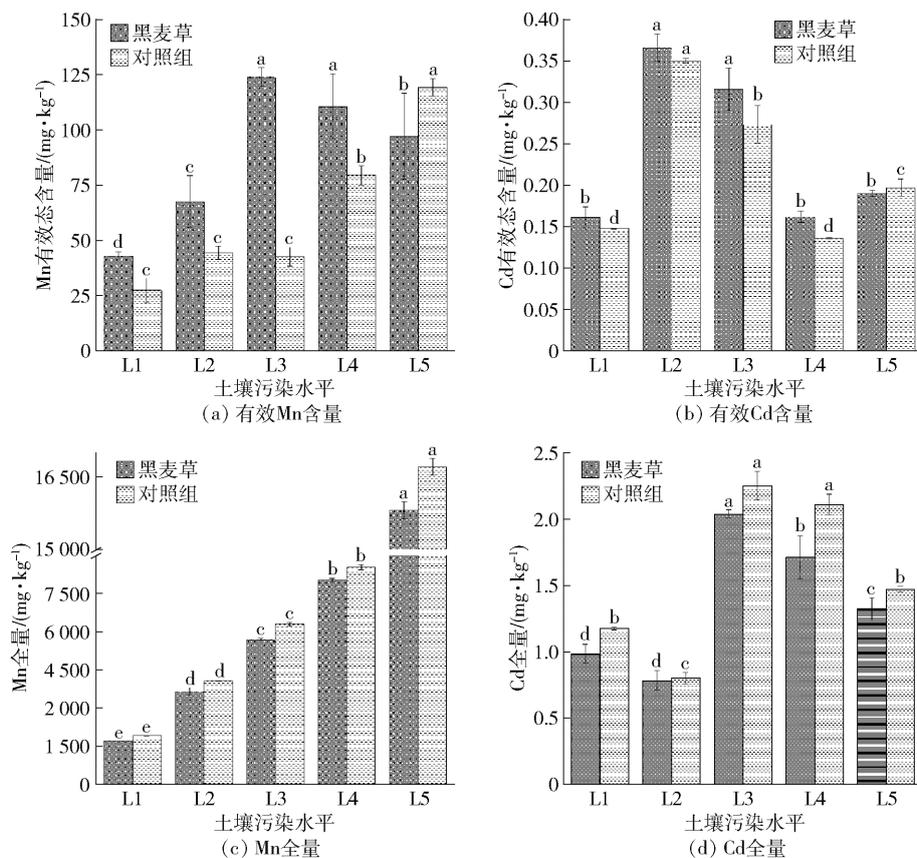


图 4 黑麦草对不同污染程度土壤中重金属含量的影响

说明,黑麦草生长后虽然有效态含量增加,但是通过植物吸收作用,将其固定在体内,有效降低了土壤中总 Mn、总 Cd 含量,表明黑麦草对重金属污染土壤起到了一定的修复作用。

3 讨论

在不同锰污染程度下,对照组和黑麦草组的 Mn、Cd 溶出量总体上均呈现出先增加后降低的趋势,L4 水平土壤的 Mn、Cd 溶出量最大。重金属迁移与土壤 pH 及重金属赋存形态存在显著相关性,大多数研究证明土壤 pH 越低,重金属迁移性越强^[12]。杨帆等^[5]研究显示降低土壤 pH 值能显著提升重金属弱酸可提取态占比,土壤酸化明显促进重金属元素的迁移释放及生物有效性的提升。刘勇等^[13]通过添加石灰石显著提高土壤 pH 值,重金属化学形态总体呈现由水溶态、交换态等活性态向有机态、残渣态等非活性态转化,其生物活性、迁移能力及淋溶能力均有不同程度下降。刘元生等^[14]在煤矸石中添加适量碱性的白云岩砂后,煤矸石基质中重金属的生物有效性和水溶态重金属的质量浓度均降低,从而明显减少煤矸石基质中 Fe、Mn 淋溶迁移对水环境质量的影响。这些研究都表明,土壤重金属的迁移与土壤 pH 呈现明显相关性。

植物生长能够减少重金属向水体迁移,在本文中,黑麦草生长后降低了 Mn、Cd 的溶出量。植物降低重金属迁移的机理是通过根际效应提高锰渣中有机酸和次生矿物的含量,经配合、竞争吸附、离子交换和氧化还原等途径增强了对重金属元素的固定,再加上微生物的参与以及根际效应下被低分子量有机酸和氨基酸活化的部分重金属为植物所吸收,从而减少了锰渣中 Mn、Cd 等元素向水体的迁移^[15]。罗有发^[7]的研究也得出相似结论,植物生长后改善废渣中理化、生物化学、微生物学特性以及植物吸收作用,显著影响土法炼锌废渣中重金属的迁移过程。贾丽娜^[16]利用草坪植物修复堆肥重金属,发现种植黑麦草能够有效减少重金属的迁移;郑志林^[17]的研究也发现黑麦草生长明显降低了淋溶液中重金属的含量。刘方等^[18]通过对贵州省中部废弃煤矿区不同植被条件下煤矸石堆场地表径流进行采样分析,结果也表明植被自然恢复能明显减少降雨过程中煤矸石堆场 Fe、Mn 的淋溶迁移。

本文研究结果显示,黑麦草对污染土壤中重金属具有一定的富集作用,且总体上表现为根系 > 地

上部分。在 L1 ~ L3 污染土壤中,锰富集能力表现为地上部分 > 根系。根据朱园芳等^[19]的研究,Mn 作为植物生长的必需元素,对维持叶绿体膜正常的结构及植物光合作用都有重要的作用,因此,在锰含量较低的土壤中,植物将大部分锰转移至茎叶中,以维持植物正常生长与代谢。在 L4、L5 污染土壤,锰富集能力表现为根系 > 地上部分。而 L1 ~ L5 土壤中黑麦草对 Cd 富集能力均表现为根系 > 地上部分,这是因为在高污染水平下,植物为了降低重金属的毒害,将大部分重金属固定于根部,在根部形成较为稳定且毒性较低的螯合物^[20],这是黑麦草对重金属胁迫的一种耐性机制。大多数研究都表明,黑麦草对重金属具有较强的累积能力。董馨岚^[21]的研究表明黑麦草对 Cd、Zn 均具有一定的耐受性,并且根系富集能力大于地上部分;马婵华^[22]研究表明,黑麦草对 Cd 的累积效果较好,能有效降低土壤中 Cd 的含量;赵满满等^[23]在煤矸石污染土壤上种植黑麦草,结果也表明黑麦草根对 Fe、Mn、Cu、Zn、Pb、Cd 的富集能力均大于黑麦草地上部分。这是因为黑麦草具有非常发达的侧根,植物通过根系分泌物活化土壤中的重金属,增加了重金属的有效性,促进根系吸收与富集并固定,从而减少对茎叶的毒害^[24]。根系分泌物活化重金属的机理主要是通过有机酸还原、酸化、螯合等作用方式将土壤中难溶态重金属转化为有效态^[25],同时,提高根际土壤微生物数量和酶活性,分泌大量 H⁺,降低根际土壤 pH 值,从而促进植物对重金属的吸收^[26]。

4 结论

1) 黑麦草生长后明显减少了重金属向水体的迁移,在不同锰污染程度的土壤中,淋溶液中 Mn、Cd 的累计溶出量总体上表现为对照组 > 黑麦草组。

2) 黑麦草对重金属具有很强的累积能力,对重金属的富集能力表现为 Cd > Mn,对 Mn、Cd 的富集总体上都表现为根系 > 地上部分;黑麦草生长均不同程度增加 Mn、Cd 有效态含量,然后通过植物吸收,土壤中 Mn、Cd 全量出现不同程度降低,表明黑麦草对重金属吸收固定,减少了重金属向外环境迁移。

3) 黑麦草属于耐性较强的禾本科草,根系富集能力较强,尤其是对 Cd,具有很好的富集效果,可作为锰渣堆场周边污染土壤修复的先锋植物。

[参考文献]

- [1] 罗乐,王金霞,周皓. 锰渣中重金属在模拟酸雨环境下的浸出规律[J]. 湿法冶金,2019,38(5):352-357.
- [2] 张永兰,王友保. 多年生黑麦草对覆土作用下铜尾矿的修复[J]. 草业科学,2019,36(1):3-10.
- [3] 张军,王文科,耿雅妮,等. 黑麦草抗氧化酶对 Cd、Zn 和 Pb 复合污染的响应[J]. 农业环境科学学报,2018,37(6):1117-1124.
- [4] 张土秀,何文静. 石墨消解仪消解——容量法测定土壤有机质[J]. 环境保护与循环经济,2018,38(7):56-57.
- [5] 杨帆,喻君保,武欣怡,等. 黔西南露天煤矿废弃物地重金属污染特征研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2024,44(2):101-110.
- [6] 陈佳,范萍萍,龙文涛,等. 土壤侵蚀对重金属迁移的作用规律与机制研究进展[J]. 水土保持研究,2024,31(1):460-470.
- [7] 罗有发. 植物修复对土法炼锌废渣中重金属的生物地球化学过程的影响[D]. 贵阳:贵州大学,2018.
- [8] 熊作明,杨佳欢,王丽楠. 3种草坪草对土壤重金属铅、镉胁迫的响应[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版),2019,40(6):117-121.
- [9] 张茂,徐彦红,席溢,等. 铅、锌、镉胁迫对多年生黑麦草生长及生理生化特性的影响[J]. 中国农业科技导报,2021,23(3):41-50.
- [10] 杨卓,王伟,李博文,等. 高羊茅和黑麦草对污染土壤 Cd、Pb、Zn 的富集特征[J]. 水土保持学报,2008(2):83-87.
- [11] 侯琪琪. Cd、Zn 土壤污染物对土壤酶活性及修复植物黑麦草的影响研究[D]. 西安:长安大学,2018.
- [12] 王哲,骆逸飞,郑春丽,等. 淋溶条件下生物炭对矿区土壤中重金属迁移的影响[J]. 化工进展,2020,39(2):738-746.
- [13] 刘勇,刘燕,朱光旭,等. 石灰对 Cu、Cd、Pb、Zn 复合污染土壤中重金属化学形态的影响[J]. 环境工程,2019,37(2):158-164.
- [14] 刘元生,陈祖拥,刘方,等. 白云岩砂改良煤矸石基质对黑麦草生长及重金属淋溶影响[J]. 中国水土保持科学(中英文),2023,21(5):138-145.
- [15] 罗洋. 锰渣重金属迁移转化特征与植物修复的调控效应及其作用机制[D]. 贵阳:贵州大学,2023.
- [16] 贾丽娜. 草坪植物修复堆肥重金属的强化及其淋溶研究[D]. 天津:天津师范大学,2012.
- [17] 郑志林. 改良剂—植物联合修复对铅锌废渣重金属地球化学特征影响及作用机制[D]. 贵阳:贵州大学,2019.
- [18] 刘方,陈祖拥,刘元生,等. 植被自然恢复对煤矸石堆场 Fe/Mn 淋溶迁移的影响及其作用效果[J]. 水土保持通报,2020,40(6):181-186.
- [19] 朱园芳,刘杰,王怡璇,等. 两种青箱属植物对土壤锰的耐受性和富集差异[J]. 工业安全与环保,2019,45(3):97-101.
- [20] SMITH G S, EDMEADES D C, UPSDELL M. Manganese status of new zealand pastures 1. toxicity in ryegrass, white clover, and lucerne[J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2012, 26(2): 215-221.
- [21] 董馨岚. 高羊茅、黑麦草对镉、锌复合污染土壤的修复潜力研究[D]. 金华:浙江师范大学,2020.
- [22] 马婵华. 黑麦草植物对农田重金属镉污染土壤的修复效果研究[J]. 现代农业科技,2019(3):148,152.
- [23] 赵满满,徐秀月,王宁宁,等. 秸秆与粉煤灰联合施加对煤矸石污染土壤中黑麦草富集重金属的影响[J]. 环境工程,2023,41(12):221-226,287.
- [24] 李金波,李诗刚,宋桂龙,等. 两种黑麦草砷吸收特征及其与茎叶营养元素积累的关系研究[J]. 草业学报,2018,27(2):79-87.
- [25] 吴丽萍,白雯宇,文科军,等. 模拟根系分泌有机酸对焚烧炉渣重金属的溶出特征[J]. 环境工程学报,2018,12(8):2220-2230.
- [26] 徐炜杰,郭佳,赵敏,等. 重金属污染土壤植物根系分泌物研究进展[J]. 浙江农林大学学报,2017,34(6):1137-1148.

Effect of *Lolium perenne* Growth on Mn and Cd Migration in Soils Around Electrolytic Manganese Residue Storage Yard and Its Remediation

AO Hui¹, WANG Yubao²

(1. Guizhou Province Resources Conservation and Comprehensive Utilization Association, Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Chutian Environmental Inspection Consulting Co., Ltd., Guiyang 550025, China)

Abstract: The effects of ryegrass growth on the leaching and migration of Mn and Cd in the soil around

the manganese slag yard and its remediation were discussed by collecting the soil with different pollution levels around the manganese slag yard and using ryegrass as the test plant for pot-leaching test. The results showed that the migration of Mn and Cd to water was significantly reduced after planting ryegrass, and the dissolution of Mn and Cd in soil with different pollution levels was generally expressed as the aboveground part of ryegrass group. From the enrichment ability of ryegrass to heavy metals, the enrichment coefficients of Cd in roots were 0.788, 0.739, 0.547, 0.691 and 0.316, respectively, which were higher than those of Mn in roots, indicating that ryegrass had better remediation effect on Cd. After planting ryegrass, the content of available Mn and available Cd in soil increased significantly compared with the control group, but the total Mn content and total Cd content were lower than the control group. The total Mn content decreased by 206.55 – 897.41 mg/kg, and the total Cd content decreased by 0.02 – 0.40 mg/kg. The growth of ryegrass can promote the activation of heavy metals and increase their effectiveness, and then fix heavy metals in the body through plant absorption, thereby reducing the content of heavy metals in the external environment. The growth of ryegrass can reduce the migration of heavy metals to the external environment, reduce the impact of heavy metals on the surrounding environment, and play a certain role in repairing the contaminated soil around the manganese slag yard.

Key words: ryegrass; manganese slag yard; leaching; migration; heavy metals; repairing effect

(上接第 66 页)

mechanism of the butterfly-degradation trend of the plastic zone of the surrounding rock ahead of the working face under the effect of large-diameter unloading boreholes was explained. The results show that when the advancing length is greater than two square, the stress around the goaf tends to be stable, and the minimum principal stress P_3 along the goaf is affected by stress unloading, and there is an inflection point at the boundary of the goaf. The maximum principal stress P_1 increases sharply within 30 m in the vertical goaf, and the significant influence distance can reach 90 m. The confining pressure ratio changes obviously within 10 m in the goaf, the axial lateral pressure coefficient changes more stably, and the vertical lateral coefficient fluctuates greatly near the goaf. The surrounding rock of the hole shows RPP expansion characteristics in the non-isostatic stress field, that is, when the confining pressure ratio continues to increase, the plastic zone of the surrounding rock of the hole will appear the evolution law of circular-elliptical-butterfly shape, and its sensitivity is more and more intense and finally shows plastic deterioration, surrounding rock instability, energy release, which explains the pressure relief mechanism of large diameter borehole in front of the working face. Based on the above research, the layout parameters of large-diameter boreholes ahead of the working face in a certain mine were designed with a borehole diameter of 600 mm and a spacing of 7.5 m. After on-site application, monitoring points were respectively set up in the working face and roadway for electromagnetic monitoring. The monitoring results showed a weaker pressure ahead of the working face and a significant effect of the unloading boreholes.

Key words: stress distribution; butterfly plastic zone; RPP extension; large diameter drilling; relieve pressure and relieve danger