

DOI: 10.11686/cyxb2020005

http://cyxb.magtech.com.cn

罗洋, 刘方, 任军, 等. 改良剂对电解锰渣上4种能源草种子萌发及幼苗生长的影响. 草业学报, 2020, 29(11): 118-128.

Luo Y, Liu F, Ren J, et al. Effects of rooting media amendments on seed germination and seedling growth of four bioenergy grass species grown on electrolytic manganese residue. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(11): 118-128.

改良剂对电解锰渣上4种能源草种子萌发及幼苗生长的影响

罗洋^{1,2}, 刘方^{1*}, 任军^{1,2}, 朱健¹

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州师范学院地理与资源学院, 贵州 贵阳 550018)

摘要:以杂交狼尾草、甜象草、皇竹草和苏丹草为材料, 探讨硅藻土、木炭和木炭+硅藻土等3种改良剂施用后电解锰渣基质上4种能源草种子萌发和幼苗生长规律。结果表明:4种能源草在电解锰渣基质上的发芽率大小顺序为甜象草>杂交狼尾草>苏丹草>皇竹草。3种改良剂均能明显提高皇竹草的发芽率、发芽势和发芽指数, 硅藻土与木炭的混合施用组使苏丹草的发芽势和发芽指数与对照相比也有明显提升($P<0.05$)。改良剂的添加还促进了能源草幼苗的生长, 与对照相比, 杂交狼尾草、甜象草、皇竹草和苏丹草的地上部单株鲜重最大增幅分别达36.54%、7.69%、35.71%和23.88%。同时, 施用改良剂还提高了能源草的叶绿素含量和抗氧化酶(超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶)活性, 降低了叶片丙二醛(MDA)含量。综合各项发芽指标、生长指标和生理指标, 在电解锰渣上最适宜种植的是甜象草, 以2.5%的木炭和2.5%的硅藻土混合施用改良效果最优; 其次是杂交狼尾草, 以5%硅藻土单独施用改良效果最优。

关键词:电解锰渣; 能源草; 发芽; 改良剂

Effects of rooting media amendments on seed germination and seedling growth of four bioenergy grass species grown on electrolytic manganese residue

LUO Yang^{1,2}, LIU Fang^{1*}, REN Jun^{1,2}, ZHU Jian¹

1. College of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. School of Geography and Resources, Guizhou Education University, Guiyang 550018, China

Abstract: This research investigated seed germination and seedling growth of four species of bioenergy grass (*Pennisetum americanum* × *Pennisetum purpureum*, *Pennisetum purpureum*, *Pennisetum hybridum* and *Sorghum sudanense*), grown on electrolytic manganese residue (control) or electrolytic manganese residue after adding one of three amendments (5% diatomite, 5% charcoal or 2.5% charcoal+2.5% diatomite). Germination percentage for the four bioenergy grasses ranked: *P. purpureum* > *P. americanum* × *P. purpureum* > *S. sudanense* > *P. hybridum*. The three amendments all significantly improved the germination percentage, germination energy and germination index of *P. hybridum*, and for the other three grasses the germination energy and germination index in the mixed amendment treatment of diatomite and charcoal were also significantly higher than those of the control group ($P<0.05$). Compared with the control group, in the amendment treatments, the fresh weights of *P. americanum* × *P. purpureum*, *P. purpureum*, *P. hybridum* and *S. sudanense*

收稿日期: 2020-01-07; 改回日期: 2020-02-11

基金项目: 国家自然科学基金委员会—贵州省人民政府喀斯特科学研究中心项目(U1612442-3), 国家自然科学基金项目(41661094)和贵州省科技计划项目(黔科合基础[2019]1247号)资助。

作者简介: 罗洋(1989-), 男, 贵州开阳人, 在读博士。E-mail: luoyang2007730@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: lfang6435@163.com

were increased by 36.54%, 7.69%, 35.71% and 23.88%, respectively. Amendment application also enhanced chlorophyll content and the activities of antioxidant enzymes (superoxide dismutase, peroxidase, catalase), while the malondialdehyde content of leaves was decreased. Based on the germination, growth and physiological parameters, for the tested bioenergy grasses grown on the electrolytic manganese residue, *P. purpureum* with 2.5% charcoal and 2.5% diatomite amendment performed best, followed by *P. americanum* × *P. purpureum* with 5% diatomite amendment.

Key words: electrolytic manganese residue; energy grass; germination; amendment

金属锰作为一种重要的冶金、化工原料,是国民经济重要的基础物资,有“战略金属”之称^[1]。电解锰工艺是指将锰矿石经酸浸出获得锰盐,再送电解槽电解析出单质金属锰。在电解锰的生产过程中,会产生大量的废渣,包括酸浸渣、阳极泥、硫化渣、含铬废渣等^[2]。从目前的电解金属锰技术和锰矿品位来看,每生产 1 t 电解金属锰就会产生 5~6 t 废渣。2010—2017 年,我国的电解金属锰年均产量约为 206 万 t,电解锰渣的储量约以 1000 万 t·年⁻¹的速度逐渐增加^[3]。一方面,电解锰渣含有机质、锰和氮等营养元素或物质,具有作为植物生长基质或肥料的潜力;另一方面,电解锰渣也含有 Mn、Cd 等重金属元素,在风化淋溶作用下具有迁移至周围土壤、水体从而导致污染的可能^[4-7]。因此,从资源利用和环境保护的角度出发,在电解锰渣堆场种植经济植物,既能通过根系的吸收、固定等作用降低有害元素对周围环境的污染风险,又能充分利用废弃锰渣资源促进经济社会的可持续发展,其中的关键步骤是筛选出合适的植物类型和理想的基质改良措施。

能源草是可直接作燃料及用于生产生物质能源的草本植物的统称,多为两年或多年生,由于具有根系发达、抗性较强、适生范围广等特点,也常被用作水土保持和荒滩地治理植物^[8]。能源草对重金属的富集能力没有超积累植物强,但因其植株高大、生长迅速、生物质产量高,并且种植、管理、收获、运输、贮藏、预处理及加工等方面可实现机械化操作,生产成本低,在环境修复领域仍存在着独特的优势^[9]。因此,有学者建议在矿区废弃地规模化种植能源草,既能充分利用边际土地资源,又能实现生物质原料生产与生态恢复的双赢^[10-12]。

目前,国内外关于对电解锰渣堆场周边环境调查、锰渣重金属浸出、锰渣及其浸出液对黑麦草(*Lolium perenne*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、小白菜(*Brassica chinensis*)等植物生长的影响的研究较多^[13-15],但以能源草为试验材料开展其在电解锰渣上生长的对比性研究却鲜见报道。种子萌发是植物生命历程的起点,其萌发率高低,萌发参数改变,皆关乎植物后期生育状况、生物量高低、种群动态乃至竞争格局的走向^[16]。幼苗生长阶段是植物对外界环境响应最为敏感的时期,当气温、湿度、光照和生长基质等综合条件不佳时,会对幼苗产生胁迫作用,导致其体内代谢紊乱,生长发育受到抑制^[17-18]。有研究表明,直接在锰渣堆场废弃地上用植物进行修复效果并不理想,通过施用不同的改良剂可以改善基质理化性状,吸附有害重金属,对土壤微生物产生积极影响,进而改善植物生长环境^[19]。因此,本研究选取 4 种代表性的能源草,探讨无机改良剂硅藻土、有机改良剂木炭及两者的混合改良剂施用对其在电解锰渣基质上种子萌发和幼苗生长的影响,旨在筛选出适宜的能源草和改良剂类型,以期为电解锰渣的资源化利用和堆场生态恢复提供参考。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

电解锰渣:采自遵义锰矿长沟矿段,该地已经有 60 多年的开采加工历史。废渣散落在山坡、河道旁边,对周围生态环境造成严重影响。电解锰渣是在碳酸锰矿粉中加入硫酸溶液电解生产锰的滤渣^[20]。样品挑出石头、废物后于室内自然风干。分别过 5.00 和 0.15 mm 尼龙筛,用于发芽试验和性质测定,其基本理化性质和重金属含量见表 1。

能源草:分别为甜象草(*Pennisetum purpureum*)、皇竹草(*Pennisetum hybridum*)、苏丹草(*Sorghum sudanense*)和杂交狼尾草(*Pennisetum americanum* × *Pennisetum purpureum*),其种子购于西安彩虹草业公司,发芽率分别为 92.03%、85.42%、88.79%和 85.91%;改良剂:木炭和硅藻土购于贵州平兴源工贸有限公司,分别过 0.15 mm 尼龙筛备用。其基本理化性质及重金属含量见表 1。

表 1 电解锰渣及改良剂基本性质

Table 1 The physicochemical properties of amendment and electrolytic manganese residue

样品 Sample	pH	有机质 Organic matter (g · kg ⁻¹)	碱解氮 Alkaline nitrogen (mg · kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus (mg · kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (mg · kg ⁻¹)	锰 Mn (g · kg ⁻¹)	镉 Cd (mg · kg ⁻¹)	铜 Cu (mg · kg ⁻¹)	锌 Zn (mg · kg ⁻¹)	铬 Cr (mg · kg ⁻¹)	镍 Ni (mg · kg ⁻¹)	铅 Pb (mg · kg ⁻¹)
电解锰渣 manganese residue	8.03	23.61	14.70	6.14	107.42	63.980	2.34	79.74	223.91	214.56	96.38	52.65
硅藻土 Diatomite	9.90	1.45	—	—	—	0.003	0.11	9.85	20.79	12.34	6.31	11.45
木炭 Charcoal	9.85	303.62	—	—	—	0.006	0.12	8.23	25.97	6.55	7.08	1.23

“—”表示未检出 Means not detected.

1.2 试验设计

本试验于2019年5月19日—6月1日在贵州师范学院农业资源与环境实验室进行。共设计4个处理,每个处理重复3次,改良剂的添加量参照陈然等^[21]的研究,分别为:1)5%硅藻土;2)5%木炭;3)2.5%硅藻土+2.5%木炭;4)CK(不加改良剂)。按照每个80g的用量将基质与改良剂充分混匀后平铺于直径为12cm的培养皿中,静置钝化3d,制成种子发芽床。挑选颗粒饱满、均匀的草种置于1%的H₂O₂溶液浸种10min进行消毒,用自来水流水清洗,再用去离子水冲洗3次后,用滤纸吸干种子表面水分。每个培养皿中均匀放入30粒处理后的种子,盖上皿盖并置于阴凉通风处,利用自然光源对其进行光照处理,每日按照称量法加去离子水保持基质湿润。逐日观察发芽数并及时清理发霉腐烂的种子(以胚根长大于或等于种子长、胚芽长度达到种子一半或胚根突破种皮1mm为判断种子发芽的标准),第14天结束发芽试验。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 发芽指标 发芽率=第7天发芽粒数/供试种子数×100%;发芽势=发芽初期发芽粒数/供试种子粒数×100%,以第3天发芽种子数计算;发芽指数(germination index, GI) = $\sum(Gt/Dt)$, Gt为t时间的发芽粒数, Dt为相应的发芽天数。

1.3.2 幼苗生长指标 在试验结束后,每皿随机挑选10株苗,用尺子测量株高、根长,用万分之一天平称量地上部鲜重。

1.3.3 幼苗生理生化指标 叶绿素:采用95%乙醇提取,分别于649nm(叶绿素b)和665nm(叶绿素a)下测定吸光度并计算其含量;丙二醛(malondialdehyde, MDA):采用硫代巴比妥酸显色法,以鲜重计^[22];酶活性:取植株幼苗0.10g,置于5mL(pH值7.8,2%聚乙烯吡咯烷酮)预冷的磷酸缓冲液中匀浆,4℃下10000r·min⁻¹高速离心15min,上清液即为粗酶液,用0.05mol·L⁻¹磷酸缓冲液定容至10mL。然后分别采用氮蓝四唑比色法测定超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性,采用愈创木酚法测定过氧化物酶(peroxidase, POD)活性,采用过氧化氢法测定过氧化氢酶(catalase, CAT)活性^[23-25]。

1.4 数据处理

用SPSS 22.0及Excel 2007进行数据的处理与分析,相关指标数据以平均值±标准差表示,用LSD法在0.05水平上进行处理间差异性比较。

2 结果与分析

2.1 改良剂对电解锰渣上4种能源草种子萌发的影响

能源草在试验周期内的生长状况如图1所示。将4种能源草种子直接播种在电解锰渣基质上时,发芽率最高的是甜象草,达95.56%,其次是杂交狼尾草,为80.00%。发芽率较低的是苏丹草和皇竹草,分别只有73.33%和42.22%(表2)。随着改良剂的添加,不同草种发芽率变化趋势不同。硅藻土、木炭及两者的混合改良剂处理

组杂交狼尾草的发芽率在对照组基础上分别提高了 5.56、5.00 和 2.22 个百分点。施用硅藻土及混合改良剂使甜象草种子萌发率略有下降,与对照相比未达显著水平,而木炭处理组的发芽率与对照相比无明显变化,但显著高于混合改良剂处理组。3 种改良剂均能显著提高皇竹草发芽率($P < 0.05$),但发芽率最大值也不足 70.00%,改良剂处理组之间无明显差别。除木炭处理组的苏丹草发芽率略有降低外,其他两种改良剂添加后能一定程度提高其发芽率,但与对照组差异未达显著水平。

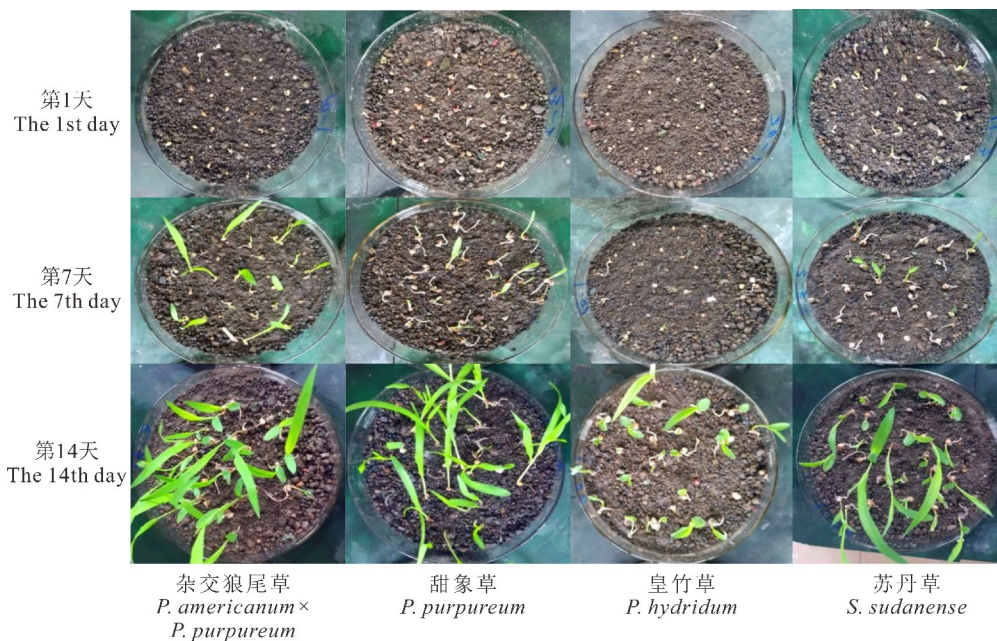


图 1 电解锰渣上 4 种能源草生长过程

Fig. 1 The growth process of 4 energy grasses on electrolytic manganese residue

发芽势是评估种子发芽整齐度及发芽速率的重要指标之一。由表 2 可以看出,木炭和硅藻土单独施用后,两者对杂交狼尾草发芽势的影响呈相反趋势且有显著差异,其中木炭处理组比对照组低了 7.78 个百分点,而硅藻土处理组则升高了 6.67 个百分点,混合处理组其发芽势与对照无明显区别。硅藻土和混合改良剂添加后并未对甜象草的发芽势造成明显影响,而木炭处理组其发芽势与对照相比显著降低了 13.89 个百分点($P < 0.05$),说明木炭对甜象草的发芽速度有一定的减缓作用。除木炭处理组皇竹草的发芽势与对照无明显区别外,硅藻土和混合改良剂处理组其发芽势较对照显著提高了 11.11% 和 8.88% ($P < 0.05$)。单施硅藻土或木炭对苏丹草的发芽势影响一致,均比对照提高了 5.56 个百分点,而混合改良剂处理组其发芽势达到了 55.56%,显著高于其他 3 个处理($P < 0.05$)。

3 种改良剂的添加对杂交狼尾草和甜象草的发芽指数无明显影响(表 2),其值分别介于 23.10~26.73 和 27.65~29.16,各改良剂之间,改良剂与对照组之间差异均不显著。皇竹草的发芽指数大小顺序为:硅藻土>混合改良剂>木炭>CK,说明改良剂的添加使皇竹草的发芽指数有了明显增加,以硅藻土处理组值最高。木炭处理组和对照组的苏丹草发芽指数无明显差异,而硅藻土和混合改良剂使其较对照增加了 8.81% 和 20.08%,其中混合改良剂处理组的苏丹草发芽指数显著高于其他处理($P < 0.05$)。

2.2 改良剂对电解锰渣上 4 种能源草幼苗生长的影响

发芽试验进行 14 d 后,各处理间能源草的长势有所不同(表 3)。硅藻土和木炭的混施没有使杂交狼尾草的株高、根长和鲜重发生明显改变,而单独施用硅藻土和木炭却能使其鲜重与对照相比分别显著增加 36.54% 和 30.77% ($P < 0.05$)。施用混合改良剂处理组甜象草生长指标优于其他处理,其株高和根长与未施改良剂处理组相比分别增加了 25.00% 和 30.16%,且达显著水平($P < 0.05$)。与对照相比,木炭和混合改良剂处理组甜象草

表 2 改良剂对电解锰渣上 4 种能源草种子萌发的影响

Table 2 Seed germination of 4 energy grasses on electrolytic manganese residue by applications of amendments

草种 Grass	改良剂 Amendment	发芽率 Germination percentage (%)	发芽势 Germination vigor (%)	发芽指数 Germination index
杂交狼尾草 <i>P. americana</i> × <i>P. purpureum</i>	CK	80.00 ± 3.33a	71.11 ± 8.39ab	24.15 ± 1.94a
	硅藻土 Diatomite	85.56 ± 5.09a	77.78 ± 7.70a	26.73 ± 2.21a
	木炭 Charcoal	85.00 ± 5.00a	63.33 ± 6.67b	23.10 ± 0.16a
	硅藻土 + 木炭 Diatomite and charcoal	82.22 ± 8.39a	70.00 ± 3.33ab	25.93 ± 3.73a
甜象草 <i>P. purpureum</i>	CK	95.56 ± 1.92ab	78.89 ± 5.09a	28.40 ± 0.66a
	硅藻土 Diatomite	91.11 ± 7.70ab	76.67 ± 8.82a	27.65 ± 1.51a
	木炭 Charcoal	97.78 ± 1.92a	65.00 ± 5.00b	29.16 ± 2.74a
	硅藻土 + 木炭 Diatomite and charcoal	88.89 ± 3.85b	77.78 ± 1.92a	28.91 ± 0.84a
皇竹草 <i>P. hybridum</i>	CK	42.22 ± 3.85b	25.56 ± 1.92b	10.89 ± 0.06c
	硅藻土 Diatomite	65.56 ± 5.09a	36.67 ± 3.33a	17.72 ± 0.26a
	木炭 Charcoal	63.33 ± 5.77a	27.78 ± 1.92b	15.19 ± 0.83b
	硅藻土 + 木炭 Diatomite and charcoal	60.00 ± 6.67a	34.44 ± 5.09a	16.40 ± 1.21ab
苏丹草 <i>S. sudanense</i>	CK	73.33 ± 6.67a	42.22 ± 5.09b	19.42 ± 0.27c
	硅藻土 Diatomite	77.78 ± 1.92a	47.78 ± 3.85b	21.13 ± 0.44b
	木炭 Charcoal	70.00 ± 5.77a	47.78 ± 3.85b	18.35 ± 1.32c
	硅藻土 + 木炭 Diatomite and charcoal	77.78 ± 7.70a	55.56 ± 1.92a	23.32 ± 0.61a

注：同列同一草种不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column and same grass indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

表 3 改良剂对电解锰渣上 4 种能源草幼苗生长的影响

Table 3 Seeding growth of 4 energy grasses on electrolytic manganese residue by applications of amendments

草种 Grass	改良剂 Amendment	株高 Plant height (cm)	根长 Root length (cm)	鲜重 Fresh weight ($\text{g} \cdot \text{plant}^{-1}$)
杂交狼尾草 <i>P. americana</i> × <i>P. purpureum</i>	CK	9.69 ± 0.57a	8.33 ± 0.53a	0.052 ± 0.004b
	硅藻土 Diatomite	10.73 ± 0.40a	8.22 ± 0.61a	0.071 ± 0.004a
	木炭 Charcoal	10.08 ± 0.78a	9.10 ± 0.42a	0.068 ± 0.007a
	硅藻土 + 木炭 Diatomite and charcoal	9.90 ± 0.47a	8.59 ± 0.37a	0.053 ± 0.001b
甜象草 <i>P. purpureum</i>	CK	11.20 ± 0.64bc	6.40 ± 0.68b	0.065 ± 0.005ab
	硅藻土 Diatomite	10.45 ± 0.07c	8.11 ± 0.13a	0.059 ± 0.004b
	木炭 Charcoal	12.40 ± 1.23b	8.49 ± 0.35a	0.067 ± 0.003a
	硅藻土 + 木炭 Diatomite and charcoal	14.00 ± 0.26a	8.33 ± 0.17a	0.070 ± 0.002a
皇竹草 <i>P. hybridum</i>	CK	6.17 ± 0.16c	5.91 ± 0.30b	0.028 ± 0.007c
	硅藻土 Diatomite	8.35 ± 0.65a	6.01 ± 0.30b	0.038 ± 0.002a
	木炭 Charcoal	7.67 ± 0.54ab	7.00 ± 0.34a	0.030 ± 0.002bc
	硅藻土 + 木炭 Diatomite and charcoal	7.02 ± 0.18b	6.11 ± 0.28b	0.036 ± 0.004ab
苏丹草 <i>S. sudanense</i>	CK	10.13 ± 0.15c	8.60 ± 0.36b	0.067 ± 0.007b
	硅藻土 Diatomite	13.21 ± 0.75a	8.41 ± 0.19b	0.083 ± 0.008a
	木炭 Charcoal	11.91 ± 0.03b	9.16 ± 0.08a	0.075 ± 0.003ab
	硅藻土 + 木炭 Diatomite and charcoal	10.79 ± 0.34c	8.69 ± 0.13b	0.072 ± 0.006ab

的地上部单株鲜重分别增加了 3.08% 和 7.69%，而硅藻土单独施用其鲜重却下降了 9.23%，显著低于其他两种改良剂 ($P < 0.05$)，但各处理组与对照组之间差异不显著，说明硅藻土对甜象草地上部生长有一定抑制作用。硅藻土施用对皇竹草根部长无明显影响，但能促进其地上部生长，使其株高和鲜重分别显著增加了 35.33% 和 35.71% ($P < 0.05$)；施用木炭能使皇竹草的根长由 5.91 cm 显著增加到 7.00 cm ($P < 0.05$)，但对其单株鲜重无显著影响；硅藻土与木炭混合施用后，皇竹草的各项生长指标均有所增加，其中株高和鲜重显著高于对照 ($P < 0.05$)。与皇竹草施用效果类似，硅藻土能显著促进苏丹草地上部生长，使其株高和鲜重较对照有明显提升；而木炭能显著促进其根部延伸 ($P < 0.05$)，两者的混合施用使其株高、根长和鲜重与对照相比分别增加了 6.52%、1.05% 和 7.46 个百分点，但处理间差异未达显著水平。

2.3 改良剂对电解锰渣上 4 种能源草幼苗部分生理指标的影响

2.3.1 叶绿素含量

3 种改良剂对 4 种能源草叶绿素含量的影响状况见表 4。施加改良剂后，杂交狼尾草的叶绿素 a 含量与对照相比有小幅增加，但差异并不显著；叶绿素 b 含量也与对照无明显差异，但混合改良剂处理组的叶绿素 b 含量比单一木炭施用情况下有显著降低 ($P < 0.05$)；杂交狼尾草总叶绿素含量介于 1.38~1.42 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ，各处理间无明显差异。除了混合改良剂处理组甜象草的叶绿素 a 含量与对照和硅藻土处理组相比分别显著增加了 12.95% 和 13.77% 外，其余处理间差异不显著；施加硅藻土处理组甜象草的叶绿素 b 含量最低，为 0.66 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ，显著低于其他 3 个处理，表明硅藻土对于甜象草的叶绿素 b 的合成有一定抑制作用；甜象草的总叶绿素含量大小顺序为混合改良剂 > 木炭 > CK > 硅藻土，除混合改良剂处理组含量显著高于对照组外 ($P < 0.05$)，其余两种改良剂与对照间无显著差异。施用改良剂还显著提高了皇竹草的叶绿素 a 和总叶绿素含量 ($P < 0.05$)，提高幅度分别为 28.95% (硅藻土)、25.00% (木炭) 和 27.63% (硅藻土+木炭) 及 29.20% (硅藻土)、19.47% (木炭) 和 26.55% (硅藻土+木炭)。改良剂也能增加苏丹草叶绿素 a 含量，硅藻土、木炭及混合改良剂的增加幅度分别为 17.69%、14.97% 和 9.52%，其中硅藻土处理组与对照组差异显著。4 个处理的苏丹草的叶绿素 b 含量无显著差异，而总叶绿素含量大小为硅藻土 > 木炭 > 硅藻土+木炭 > CK，其中硅藻土含量增幅为 13.74%，与对照相比达显著水平 ($P < 0.05$)。

表 4 改良剂对电解锰渣上 4 种能源草幼苗叶绿素含量的影响

Table 4 Chlorophyll content of 4 energy grasses on electrolytic manganese residue by applications of amendments

草种 Grass	改良剂 Amendment	叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ FW)	叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ FW)	总叶绿素含量 Total chlorophyll content ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ FW)
杂交狼尾草 <i>P. americana</i> × <i>P. purpureum</i>	CK	0.91 ± 0.01a	0.47 ± 0.02ab	1.38 ± 0.02a
	硅藻土 Diatomite	0.95 ± 0.03a	0.46 ± 0.01ab	1.41 ± 0.04a
	木炭 Charcoal	0.94 ± 0.04a	0.48 ± 0.02a	1.42 ± 0.05a
	硅藻土+木炭 Diatomite and charcoal	0.93 ± 0.04a	0.45 ± 0.01b	1.38 ± 0.02a
甜象草 <i>P. purpureum</i>	CK	1.39 ± 0.03b	0.73 ± 0.03a	2.11 ± 0.04bc
	硅藻土 Diatomite	1.38 ± 0.03b	0.66 ± 0.03b	2.04 ± 0.58c
	木炭 Charcoal	1.50 ± 0.14ab	0.75 ± 0.04a	2.25 ± 0.18ab
	硅藻土+木炭 Diatomite and charcoal	1.57 ± 0.01a	0.76 ± 0.02a	2.33 ± 0.01a
皇竹草 <i>P. hybridum</i>	CK	0.76 ± 0.01b	0.37 ± 0.01b	1.13 ± 0.01c
	硅藻土 Diatomite	0.98 ± 0.05a	0.48 ± 0.03a	1.46 ± 0.04a
	木炭 Charcoal	0.95 ± 0.02a	0.40 ± 0.02b	1.35 ± 0.01b
	硅藻土+木炭 Diatomite and charcoal	0.97 ± 0.05a	0.46 ± 0.02a	1.43 ± 0.04a
苏丹草 <i>S. sudanense</i>	CK	1.47 ± 0.15b	0.65 ± 0.04a	2.11 ± 0.18b
	硅藻土 Diatomite	1.73 ± 0.07a	0.67 ± 0.02a	2.40 ± 0.05a
	木炭 Charcoal	1.69 ± 0.14ab	0.63 ± 0.03a	2.33 ± 0.16ab
	硅藻土+木炭 Diatomite and charcoal	1.61 ± 0.12ab	0.65 ± 0.02a	2.26 ± 0.14ab

2.3.2 丙二醛含量 从图2可知,由于草种不同,其体内丙二醛含量范围也有所不同。除了混合改良剂以外,添加硅藻土及木炭使杂交狼尾草叶片的丙二醛含量明显降低,由 $2.57 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 分别降至 1.88 和 $1.92 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。改良剂对甜象草丙二醛的降低效果以木炭及混合改良剂最优,与对照相比降幅分别为 25.22% 和 29.36% ,显著低于 CK 和硅藻土处理组 ($P < 0.05$)。各处理下皇竹草体内丙二醛含量分别为 3.43 (硅藻土)、 4.85 (木炭)、 3.51 (硅藻土+木炭)和 5.08 (CK) $\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$,其中硅藻土和混合改良剂处理组显著低于另外两个组。未施加改良剂的情况下,电解锰渣基质上苏丹草幼苗叶片的丙二醛含量达到了 $7.46 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$,而随着硅藻土、木炭及混合改良剂的施入,其值分别降低了 42.65% 、 29.43% 和 28.45% ,且硅藻土处理显著低于其他处理组,而木炭和混合改良剂之间差异不显著,但都显著低于对照 ($P < 0.05$)。

2.3.3 抗氧化酶活性 改良剂添加后,能源草体内抗氧化酶活性发生了变化(图3)。单独施用硅藻土和木炭的处理组,杂交狼尾草的超氧化物歧化酶(SOD)活性分别比对照显著提高了 36.11% 和 27.67% ($P < 0.05$),而混合改良剂处理组和对照无显著差异。甜象草的 SOD 在各处理组之间均有显著差异,其中木炭及混合改良剂的施入使其 SOD 活性分别提高了 14.97% 和 24.90% ,而硅藻土施入却使其在对照基础上下降了 16.31% 。木炭、硅藻土及混合改良剂添加后皇竹草的 SOD 活性的增幅分别为 9.97% 、 69.41% 和 61.98% ,其中后两者与对照相比达显著水平。3种改良剂添加均能提高苏丹草的 SOD 活性,以硅藻土处理组活性最高,为 $301.52 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$,显著高于对照和其他两种改良剂处理组 ($P < 0.05$)。

杂交狼尾草单独施用木炭和硅藻土处理组的过氧化物酶(POD)活性分别是对照的 2.44 和 1.98 倍,说明这两种改良剂的运用使其 POD 活性显著提升,而混合组的 POD 活性与对照相比无显著差异。与 SOD 活性几乎一致,硅藻土施入使甜象草的 POD 活性显著降低了 37.50% ,而木炭及混合改良剂的施用则使其分别提高了 33.36% 和 50.97% 。各处理之间、处理与对照之间差异均达显著水平。皇竹草硅藻土和混合改良剂处理组的 POD 活性分别为 9.13 和 $8.46 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$,显著高于对照 ($2.91 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$) 和木炭处理组 ($3.12 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$)。木炭和混合改良剂处理条件下苏丹草的 POD 活性无显著差异,但显著高于对照,且显著低于硅藻土处理组 ($P < 0.05$)。

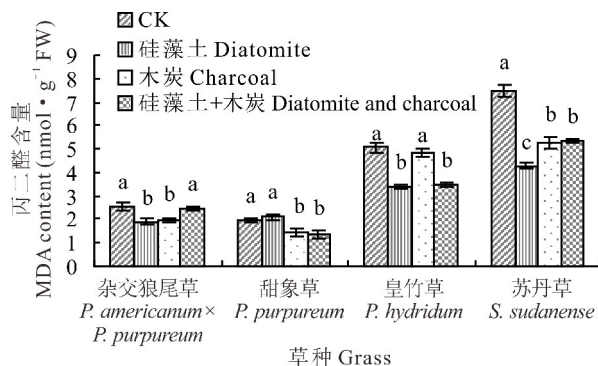


图2 改良剂对电解锰渣上4种能源草丙二醛含量的影响
Fig. 2 MDA content of 4 energy grasses on electrolytic manganese residue by applications of amendments

不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) among different treatments, the same below.

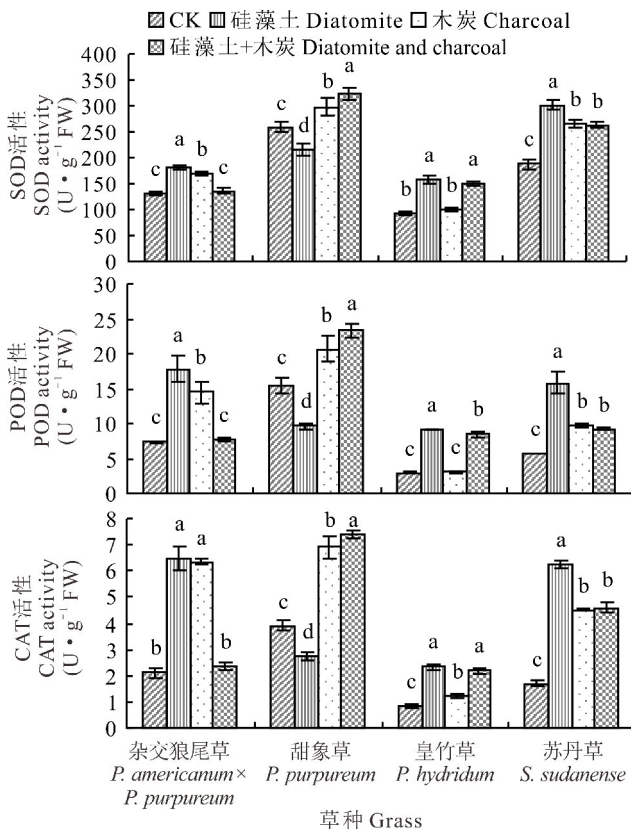


图3 改良剂对电解锰渣上4种能源草抗氧化酶活性的影响
Fig. 3 Antioxidant enzymes activity of 4 energy grasses on electrolytic manganese residue by applications of amendments

由图 3 可知,硅藻土和木炭的加入使杂交狼尾草的过氧化氢酶(CAT)活性由 $2.10 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 分别显著增加至 6.47 和 $6.33 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ ($P < 0.05$),混合改良剂处理组却和对照无显著差异。不同处理条件下甜象草的 CAT 活性大小顺序为硅藻土+木炭>木炭>CK>硅藻土,各处理间均有显著差异($P < 0.05$),除硅藻土处理组有所下降外,另外两种改良剂添加均使甜象草 CAT 活性呈上升趋势。硅藻土、木炭及混合改良剂均能显著提升皇竹草的 CAT 活性($P < 0.05$),其分别是对照的 2.88、1.51 和 2.70 倍。硅藻土处理条件下,苏丹草的 CAT 活性为 $6.25 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$,比对照高 264.59%,比木炭处理组和混合改良剂处理组分别显著增加了 38.20% 和 35.70% ($P < 0.05$)。

3 讨论

能源草在新的环境能否定植成功,种子萌发阶段是关键^[26]。一般来说只要土壤温度和水分条件适宜,大部分种子均能发芽。然而本研究却发现,除甜象草外,种植在电解锰渣上的其余 3 种能源草的发芽率与滤纸试验相比都有不同程度的下降,显示出了一定的抑制作用,尤其是皇竹草,发芽率只有 42.22%。可能是因为本研究所选用的基质中重金属含量仍然较高^[27],尤其是 Mn,是贵州土壤 Mn 含量最高值的 20.91 倍^[28],而 Mn 胁迫环境下种子内部储存物质的分解及转化受到抑制,进而影响种子萌发^[29]。此外,锰渣中 Cd 含量也达 $2.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是农用地土壤污染筛选值的 3.90 倍^[30],也可能会抑制种子的萌发。添加 3 种改良剂(包括养分含量低的硅藻土)后,其发芽指标有显著提升的现象也从侧面证实了这一点。

新鲜电解锰渣由于存在着酸度大、重金属总量和有效性高等限制因素,并不适合植物生长。本研究所用电解锰渣已在野外堆存几十年,经过长时间的物理、化学和生物风化,加之风力和水力运移作用下与周围自然土壤的机械混合,使其 pH 值已提高至微碱性,并具备了一定肥力特征(表 1),使能源草幼苗在该基质上生长成为可能。研究发现,4 种能源草幼苗在电解锰渣基质上生长状况不一。其中添加硅藻土处理组的杂交狼尾草、皇竹草和苏丹草的株高及地上部单株鲜重与对照相比均有明显提高($P < 0.05$),是因为硅藻土具有较大的比表面积、毛管孔隙度、最大持水量和较多的负电荷,对于电解锰渣中的重金属有较好的吸附作用,从而减少其对种子的毒害作用和向地上部的迁移,促进了植物生长^[31]。值得注意的是,硅藻土对于甜象草的地上部生长有明显抑制作用,可能是由于其施入土壤后也一定程度降低了养分的有效性,而甜象草在苗期对重金属的耐性高,对营养元素的要求也相对较高^[32]。木炭富含 C、N、P 等元素,施入土壤可改善电解锰渣基质营养状况,疏松土壤,促进土壤团聚体的形成,有利于根系的发育和伸展^[33]。本研究发现木炭处理组 4 种草的根长较对照均有一定的提高,幅度在 6.51%~32.66%,这与孙嘉曼等^[34]的研究结果一致。将硅藻土与木炭混施后,皇竹草和苏丹草的幼苗生长指标和单施无明显差异,而对甜象草的生长则体现出了协同作用,效果优于单施改良剂,可能是因为两者复配后,从提高植物营养和降低重金属有效性两方面共同作用造成的。

叶绿素含量的变化反映了植物叶片光合作用功能的强弱,也可用以表征逆境胁迫下植物组织、器官的衰老状况。叶利勇等^[35]的研究表明,改良剂可缓解植物逆境胁迫,使叶绿素含量增加。本试验得出了类似的结果,混合改良剂处理组的甜象草的叶绿素 a 含量、3 种改良剂处理组的皇竹草叶绿素 a 和总叶绿素含量、硅藻土处理组的苏丹草的叶绿素 a 和总叶绿素含量均显著高于各自草种的对照组。硅藻土处理组的甜象草叶绿素含量低于对照组,可能是因为硅藻土吸附性较强,阻碍了 Ca、Mg 等矿质元素进入叶片,抑制了甜象草叶绿素的合成。植物器官在逆境条件下往往发生膜脂过氧化作用,产生丙二醛(MDA),造成细胞膜系统的破坏。丙二醛含量的高低可以反映生物膜脂过氧化强度以及膜系统受伤害的程度,是逆境生理研究中的一项重要指标^[36]。植物进化过程中形成的抗氧化酶(主要包括 SOD、POD 和 CAT)有助于维持活性氧代谢平衡,从而阻止其对于细胞膜的伤害^[37]。本研究结果显示,改良剂处理组能源草幼苗的丙二醛含量与对照组相比有不同程度的下降,而 SOD、POD 和 CAT 活性则呈上升趋势。说明改良剂的添加能抑制电解锰渣中重金属在能源草中的迁移,提供了植物需要的部分营养,改善植物生长微环境,促进了幼苗生长,增强了幼苗的抗逆性。

本研究所采用的硅藻土呈碱性,对重金属有着良好的固化效果,使得杂交狼尾草、皇竹草和苏丹草的发芽、生长和生理指标均有一定的提高。然而也有研究表明硅藻土能使土壤碱解氮、速效磷和速效钾的含量降低

25.80%、48.00%和12.00%，到生长后期可能造成植物缺素，还有可能使土壤板结^[38-39]。木炭作为一种有机改良剂，和硅藻土等比起来其对重金属离子的吸附作用结合力较弱，易发生解吸^[40]，因此在本研究中单独施用并未展示出较好的改良效果。但如果延长种植时间，随着其中养分的释放，也有可能产生一定的促进效果。本试验证实甜象草和杂交狼尾草在老化的电解锰渣基质上有较好的适宜性，但随着生长发育过程的推进，基质中的重金属可能会不断被吸收进入植物体内，累积到一定程度而引起中毒现象，也有可能因为基质中养分的逐渐消耗引起枯萎现象。因此，能源草不同生育时期在电解锰渣基质上的生长表现、木炭和硅藻土混施过程中两者的配比问题、改良剂施用效果的持久性等都需要进一步观察。此外，能源草不同生长阶段对应的基质养分状况、重金属有效态状况、基质物理结构状况及微生物状况等也需要综合研究，找出限制因子，才能更好地在电解锰渣基质上开展以能源草为先锋植物的生态恢复工作，使其种植真正做到“不与民争粮，不与粮争地”。

4 结论

1) 无改良剂添加条件下，4种能源草的发芽率大小顺序为：甜象草>杂交狼尾草>苏丹草>皇竹草；3种改良剂添加能显著提高皇竹草的发芽率、发芽势和发芽指数；硅藻土与木炭的混合施用组的苏丹草的发芽势和发芽指数与对照相比也有明显提升。

2) 改良剂的添加促进了能源草幼苗的生长，与对照相比，能源草的株高、根长和地上部单株鲜重最大增幅分别达35.33%、32.66%和36.54%。

3) 施用改良剂提高了能源草的叶绿素含量和SOD、POD和CAT活性，且降低了叶片丙二醛含量。

4) 在电解锰渣上适宜种植的是甜象草和杂交狼尾草，前者以2.5%的木炭和2.5%的硅藻土混合施用改良效果最优，后者以5%硅藻土单独施用改良效果最优。

参考文献 References:

- [1] Wu J F, Song M S, Xu X H, *et al.* Prospects and advances of comprehensive utilization of electrolytic manganese residue. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(7): 2645-2652.
吴建锋, 宋谋胜, 徐晓虹, 等. 电解锰渣的综合利用进展与研究展望. *环境工程学报*, 2014, 8(7): 2645-2652.
- [2] Fan X, Luo J, Yang M, *et al.* Electrolytic manganese industry parsing the prevention and control of environmental pollution and reasonable advice. *China's Manganese Industry*, 2016, 34(3): 136-137.
樊欣, 罗静, 杨梦, 等. 电解金属锰行业环境污染及合理防治建议解析. *中国锰业*, 2016, 34(3): 136-137.
- [3] Zhu Z G. A review and prospect of China's electrolytic manganese industry in the 2017. *China's Manganese Industry*, 2018, 36(1): 1-5.
朱志刚. 2017年中国电解锰工业回顾及未来展望. *中国锰业*, 2018, 36(1): 1-5.
- [4] Huang X J, Jiang C S, Hao Q J. Assessment of heavy metal pollutions in soils and bioaccumulation of heavy metals by plants in Rongxi manganese mineland of Chongqing. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(15): 4201-4211.
黄小娟, 江长胜, 郝庆菊. 重庆溶溪锰矿区土壤重金属污染评价及植物吸收特征. *生态学报*, 2014, 34(15): 4201-4211.
- [5] Lu F, Chen M, Chen L L. Characteristics of heavy metal pollution in manganese residues of electrolytic manganese in Songtao, Guizhou and its toxic effects on plant growth. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(5): 124-129.
陆凤, 陈森, 陈兰兰. 贵州松桃某电解锰企业锰渣重金属污染特征及对植物生长的毒性效应. *科学技术与工程*, 2018, 18(5): 124-129.
- [6] Xu F Y, Jiang L H, Dan Z G, *et al.* Water balance analysis and wastewater recycling investigation in electrolytic manganese industry of China—A case study. *Hydrometallurgy*, 2014, 149: 12-22.
- [7] Shu J C, Liu R L, Liu Z H, *et al.* Electrokinetic remediation of manganese and ammonia nitrogen from electrolytic manganese residue. *Environmental Science & Pollution Research*, 2015, 22(20): 16004-16013.
- [8] Ma Z L, Feng C S. Comparative advantage and strategic potential of energy grass development. *Soil and Water Conservation in China*, 2016, (4): 22-25, 43.
马志林, 冯长松. 能源草发展的比较优势和战略潜力研究. *中国水土保持*, 2016, (4): 22-25, 43.
- [9] Hou X C, Fan X F, Wu J Y, *et al.* Potentiality of herbaceous bioenergy plants in remediation of soil contaminated by heavy metal. *Chinese Journal of Grassland*, 2012, 34(1): 59-64, 76.
侯新村, 范希峰, 武菊英, 等. 草本能源植物修复重金属污染土壤的潜力. *中国草地学报*, 2012, 34(1): 59-64, 76.

- [10] Witters N, Mendelsohn R O, Slycken S V, *et al.* Phytoremediation, a sustainable remediation technology? Conclusions from a case study. I: Energy production and carbon dioxide abatement. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 39: 454–469.
- [11] Zhang X F, Tian C, Gao B. Heavy metal tolerance and phytoremediation potential of energy crop, king grass. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(5): 3204–3213.
张杏锋, 田超, 高波. 能源植物皇草对重金属的耐性及修复潜力. *环境工程学报*, 2017, 11(5): 3204–3213.
- [12] Zhang M, Yang C, Jing Y, *et al.* Effect of energy grass on methane production and heavy metal fractionation during anaerobic digestion of sewage sludge. *Waste Management*, 2016, 58: 316–323.
- [13] Chen L L, Ma X J, Lu F, *et al.* Characteristics of heavy metals in manganese slag and its toxic effects on seeds in typical manganese ore areas of Guizhou Province. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2019, 42(4): 56–62.
陈兰兰, 马先杰, 陆凤, 等. 贵州典型锰矿区锰渣重金属含量特征及对种子萌发的毒性效应. *河北农业大学学报*, 2019, 42(4): 56–62.
- [14] Wang J Z, Hu W M, Li D Y, *et al.* Growth and physiological responses of perennial ryegrass to electrolytic manganese residue stress. *Northern Horticulture*, 2019, (17): 72–76.
王加真, 胡万明, 李大勇, 等. 电解锰渣液处理下多年生黑麦草的生长与生理响应. *北方园艺*, 2019, (17): 72–76.
- [15] Lü Y, Li J, Ye H P, *et al.* Bioleaching behaviors of silicon and metals in electrolytic manganese residue using silicate bacteria. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 228: 901–909.
- [16] Zhou Q, Zeng Q L, Huang X H, *et al.* Effects of acid rain on seed germination of various acid-fast plant. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9): 2029–2036.
周青, 曾庆玲, 黄晓华, 等. 三类抗性种子萌发对酸雨胁迫响应. *生态学报*, 2004, 24(9): 2029–2036.
- [17] Ao C H, Liu F, Luo Y. Growing status of various grasses during seeding stages in the zinc smelting slag in Northwestern Guizhou. *Pratacultural Science*, 2013, 30(8): 1212–1216.
敖成红, 刘方, 罗洋. 黔西北炼锌废渣基质上不同草种苗期生长状况. *草业科学*, 2013, 30(8): 1212–1216.
- [18] Wang Y Z, Huang X, Cai L P, *et al.* Effects of soil particle composition on seed germination and seeding growth of *Paspalum wettsteinii* under different temperatures. *Acta Prataculturæ Sinica*, 2018, 27(9): 45–55.
王玉珍, 黄晓, 蔡丽平, 等. 不同温度条件下土壤颗粒组成对宽叶雀稗种子发芽与幼苗生长的影响. *草业学报*, 2018, 27(9): 45–55.
- [19] He W. Research on the repair effect of woody plant after the improvement of manganese slag. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2018.
何蔚. 锰矿渣基质改良下木本植物修复效果研究. 长沙: 中南林业科技大学, 2018.
- [20] Liu R, Liu F, Shang Z S. Release characteristics of heavy metals of different manganese slags under the conditions of release and its effect on plant growth of seedlings. *Environmental Science Survey*, 2011, 30(1): 5–9.
刘荣, 刘方, 商正松. 不同类型锰矿废渣浸提条件下重金属释放特征及其对植物种苗生长的影响. *环境科学导刊*, 2011, 30(1): 5–9.
- [21] Chen R, Liu F, Li Y. Adsorption and fixation of manganese in electrolytic manganese slag by nano-titanium oxide attached natural clay materials. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2019, 39(4): 442–446.
陈然, 刘方, 李艳. 天然黏土材料附着纳米 TiO₂ 对电解锰渣中锰的吸附固定. *化工环保*, 2019, 39(4): 442–446.
- [22] Chen G, Li S. Plant physiology experiments. Beijing: Higher Education Press, 2016.
陈刚, 李胜. 植物生理学实验. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [23] Wei Z Z, An Z N, Zhang L, *et al.* Effects of simulated acid rain on seed germination and seeding growth of 4 turf-grass seeds. *Seed*, 2019, 38(2): 93–97.
魏祯祯, 安子宁, 张蕾, 等. 模拟酸雨对 4 种草坪草种子萌发和幼苗生长的影响. *种子*, 2019, 38(2): 93–97.
- [24] Zhang H J, Zhang N, Yang R C, *et al.* Melatonin promotes seed germination under high salinity by regulating antioxidant systems, ABA and GA₄ interaction in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Journal of Pineal Research*, 2014, 57(3): 269–279.
- [25] Zhang W P, Yang Z, Wu P J, *et al.* Effect of exopolysaccharides of lactic acid bacteria on seed germination and seedling growth of rice under different stress. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(1): 138–147.
张文平, 杨臻, 吴佩佳, 等. 乳酸菌胞外多糖对逆境胁迫下水稻种子萌发及幼苗生长的影响. *核农学报*, 2019, 33(1): 138–147.
- [26] Xu Z P, Wan T, Cai P, *et al.* Effects of PEG simulated drought stress on germination and physiological properties of *Apocynum venetum* seeds. *Chinese Journal of Grassland*, 2015, 37(5): 75–80.
徐振朋, 宛涛, 蔡萍, 等. PEG 模拟干旱胁迫对罗布麻种子萌发及生理特性的影响. *中国草地学报*, 2015, 37(5): 75–80.
- [27] Wang Y, Wei F S, Yang G Z. Elemental chemistry of soil environment. Beijing: China Environmental Science Press, 1995.
王云, 魏复盛, 杨国治. 土壤环境化学元素. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.

- [28] He Y L. Mn in soils of Guizhou. Guizhou Science, 1995, (4): 20–23.
何亚琳. 贵州土壤中的锰. 贵州科学, 1995, (4): 20–23.
- [29] Xiao Z H, Li X H, Pan G, *et al.* Effects of manganese stress on seed germination, and seedling physiological and biochemical characteristics of *Cleome viscosa*. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(12): 75–84.
肖泽华, 李欣航, 潘高, 等. 锰胁迫对黄花草种子萌发及幼苗生理生化特征的影响. 草业学报, 2019, 28(12): 75–84.
- [30] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land, GB15618-2018. Beijing: China Environmental Science Press, 2018.
生态环境部. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行), GB15618-2018. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
- [31] Bateman A M, Erickson T E, Merritt D J, *et al.* Inorganic soil amendments alter seedling performance of native plant species in post-mining arid zone rehabilitation. Journal of Environmental Management, 2019, 241: 179–186.
- [32] Cao C, Liang Q W, Tian Y, *et al.* Adsorption and slow-release effect of diatomite and modified sepiolite on NPK. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(18): 136–141.
曹畅, 梁绮雯, 田宇, 等. 硅藻土、改性海泡石对氮磷钾吸附和缓释作用的研究. 中国农学通报, 2016, 32(18): 136–141.
- [33] Yang S X, Li F M, Peng X Z, *et al.* Effects of amendments with different C/N/P ratios on plant and soil properties of a Pb–Zn mine tailings. Environmental Science, 2019, 40(9): 4253–4261.
杨胜香, 李凤梅, 彭禧柱, 等. 不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响. 环境科学, 2019, 40(9): 4253–4261.
- [34] Sun J M, Bu X L, Wu Y B, *et al.* Effects of biochar application on the growth of *Robinia pseudoacacia* L. seedlings and soil properties in limestone soil in a karst mountain site. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(12): 3250–3257.
孙嘉曼, 卜晓莉, 吴永波, 等. 喀斯特山地石灰土施用生物炭对刺槐幼苗生长和土壤特性的影响. 生态学杂志, 2016, 35(12): 3250–3257.
- [35] Ye L Y, Wu Q, Shui D J, *et al.* Effects of biochar on seed germination and seedlings of turnip under copper stress. Northern Horticulture, 2018, (8): 59–63.
叶利勇, 吴琦, 水德聚, 等. 生物炭对铜胁迫下盘菜种子萌发及幼苗生长的影响. 北方园艺, 2018, (8): 59–63.
- [36] Xu Y M, Wang C Q, Wu J X, *et al.* Effects of Mn^{2+} and Pb^{2+} on seed germination and seedling growth of *Elymus nutans*. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(3): 194–200.
徐雅梅, 王传旗, 武俊喜, 等. Mn^{2+} 、 Pb^{2+} 对野生垂穗披碱草种子萌发与幼苗生长的影响. 草业学报, 2018, 27(3): 194–200.
- [37] Zhang Y N, Lei L, Xia B. Effects of drought stress and rewatering on seedling growth and physiological characteristics of *Lysimachia davurica*. Pratacultural Science, 2016, 33(9): 1681–1689.
张彦妮, 雷蕾, 夏斌. 干旱胁迫及复水对黄连花幼苗生长和生理特性的影响. 草业科学, 2016, 33(9): 1681–1689.
- [38] Zhang J X, He Y M, Li B, *et al.* Effects of three clay minerals on the growth and heavy metal content in *Vicia faba*. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(4): 845–854.
张金秀, 何永美, 李博, 等. 三种黏土矿物对蚕豆生长和重金属含量的影响. 农业环境科学学报, 2019, 38(4): 845–854.
- [39] Aksakal E L, Angin I, Oztas T. Effects of diatomite on soil physical properties. Catena, 2012, 88(1): 1–5.
- [40] Du C Y, Wang P L, Du J L, *et al.* Influence of fixed addition of biochar, zeolite and bentonite on growth and Cd, Pb, Zn uptake by maize. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(1): 190–198.
杜彩艳, 王攀磊, 杜建磊, 等. 生物炭、沸石与膨润土混施对玉米生长和吸收 Cd、Pb、Zn 的影响研究. 生态环境学报, 2019, 28(1): 190–198.