

粉煤灰与煤矸石配比对苜蓿植株生长及其修复效果的影响

李 侠,裴瑶琛,韩志平*,杨俊霞,高志慧,甄莉娜,吕 雪
(山西大同大学 生命科学学院/设施农业技术研发中心,山西 大同 037009)

摘要:为探明苜蓿对煤矸石和粉煤灰栽培基质的修复效果,采用盆栽法,研究了粉煤灰与煤矸石不同配比对紫花苜蓿生长及基质 pH 值和电导率(EC)的影响。结果表明:T_{4:6}处理(下标数字表示粉煤灰与煤矸石质量比,下同)的苜蓿地上部、根系干质量最大,分别是 T_{2:8}、T_{3:7}、T_{5:5} 处理的 1.24~2.73 倍、1.30~1.98 倍,植株地上部吸收 N、P 量也明显高于 T_{2:8}、T_{3:7}、T_{5:5} 处理,分别是其他处理的 1.33~3.23 倍、1.16~3.66 倍;粉煤比对苜蓿地上部铜(Cu)、镉(Cd)吸收量有显著影响,T_{3:7}、T_{4:6}、T_{5:5} 处理的 Cu、Cd 吸收量分别是 T_{2:8} 处理的 2.47~3.42 倍、1.75~2.46 倍;T_{4:6} 处理基质 pH 值接近中性,EC 值较小,盐化程度较低,植物修复效果较好。研究表明,修复效果最佳的粉煤比为 4:6。
关键词:粉煤灰;煤矸石;苜蓿;植物修复;pH 值;电导率
中图分类号:S551+.7;X752 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-3268(2017)11-0069-05

Effects of Different Proportion of Coal Ash and Gangue on Plant Growth and Bioremediation Effect of *Medicago sativa*

LI Xia, PEI Yaochen, HAN Zhiping*, YANG Junxia, GAO Zhihui, ZHEN Lina, LÜ Xue
(School of Life Science/Protected Agricultural Technology Development Center,
Shanxi Datong University, Datong 037009, China)

Abstract: To explore the effects of phytoremediation on gangue and coal ash resulted from coal mining and using waste, the effects of different ratios of coal ash and coal gangue mixed substrates on the growth of alfalfa (*Medicago sativa*) and pH, EC of substrates after planting in pot were studied. The results showed that the growth of alfalfa of T_{4:6} (subscript numbers represented the mass ratio of coal ash to gangue, the same below) treatment was the best, and the aerial part and root dry weights of plants were significantly higher than T_{2:8}, T_{3:7}, T_{5:5} treatments, and reached 1.24—2.73 times and 1.30—1.98 times that of other treatments, respectively. Shoot nitrogen and phosphorus contents of T_{4:6} treatment were also significantly higher than other treatments, and reached 1.33—3.23 times and 1.16—3.66 times that of other treatments, respectively. The ratio of coal ash to gangue had significant effects on the uptake of Cu and Cd by the aerial part of alfalfa, and the amount of Cu and Cd absorbed by T_{3:7}, T_{4:6} and T_{5:5} treatments were 2.47—3.42 times and 1.75—2.46 times that of T_{2:8} treatment, respectively. The pH of the T_{4:6} treatment substrate after planting alfalfa was close to neutralization, and EC was smaller, indicating that its phytoremediation effect was better. Therefore, the substrate in the ratio of 4:6 was more helpful for the growth of *Medicago sativa*, and it could be the optimal ratio in phytoremediation of coal gangue and coal ash.
Key words: coal ash; coal gangue; *Medicago sativa*; phytoremediation; pH; EC

收稿日期:2017-05-02
基金项目:大同市科技攻关项目(2015099);山西大同大学科研项目(2011K9);山西大同大学大学生创新项目(2015-XDC2015141);国家自然科学基金项目(31400479);山西省科技攻关项目(20150311010-1);大同市基础研究项目(2015106)
作者简介:李 侠(1981-),女,山西稷山人,讲师,硕士,主要从事环境生态过程与调控研究。E-mail:lixia810504@163.com
* 通讯作者:韩志平(1976-),男,山西孟县人,副教授,博士,主要从事植物逆境生理研究。
E-mail:hanzhiping0215@163.com

煤矸石是煤炭开采、洗选、利用过程中产生的废弃物。据报道,截止 2011 年我国煤矸石积存达 50 亿^[1],而且以年排放量 1.5 ~ 2.0 亿 t 的速度增长。煤矸石堆积不仅占用大量土地和耕地,还污染空气、水体、土壤,诱发滑坡、泥石流、矸石山爆炸等自然灾害,是矿区环境污染和生态恶化的主要原因之一^[2]。粉煤灰是火力发电时产生的主要固体废弃物,其颗粒细小,主要以飞灰形式造成污染^[3]。因此,对煤矸石、粉煤灰等废弃物的治理和利用是煤矿区亟需解决的一大难题。

植物修复是废弃物治理的一种重要方式,是一种成本低廉、修复效果较好的原位修复,近年来已经成为治理矿区废弃物的新技术^[4]。胡振琪等^[5]研究了煤矸石的植物修复,发现植被能减小矸石山孔隙度,提高矸石山保水、持水的能力。张坤英等^[6]研究了白茅、白三叶、蕨对粉煤灰堆场土理化性质的影响,发现 3 种草本植物均可改善堆场粉煤灰基质的水分、pH 值、电导率(EC)等理化性状,优化堆场土体的生物生存环境。但目前关于矿区植物修复效果研究大多集中于单一固体废弃物的改良。有研究表明,将煤矸石和粉煤灰掺混后进行复垦或将两者作为煤矿沉陷区的充填材料,可实现废弃物循环利用,降低复垦成本^[7]。但有关植物对粉煤灰和煤矸石混合后修复效果的报道较少。鉴于此,将粉煤灰和煤矸石以不同比例混合后种植紫花苜蓿,研究了不同配比对紫花苜蓿生长及其修复效果的影响,以期为我国北方矿区土地复垦提供理论依据和技术支持。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验于 2015 年 3 月 15 在山西大同大学生命科学实验中心进行。供试植物为紫花苜蓿 (*Medicago sativa*),选取籽粒饱满、大小均一的种子用 10% H₂O₂ 浸泡消毒 10 min,再用蒸馏水洗净备用。供试基质为大同煤矿集团公司晋华宫矿排放的煤矸石、大同第二发电厂排放的粉煤灰、山西大同大学北校区的土壤。将煤矸石粉碎后,与粉煤灰、土壤分别过 2 mm 筛后备用。供试基质基本理化性质见表 1。

表 1 供试基质基本理化性质

供试基质	pH	全氮/%	速效磷/(mg/kg)	速效钾/(mg/kg)
煤矸石	8.7	0.13	6.9	47.3
粉煤灰	8.4	0.08	7.5	76.8
土壤	7.5	0.17	15.3	119.2

1.2 试验设计

试验设 4 个处理,粉煤灰和煤矸石分别以质量比 2:8、3:7、4:6、5:5 混合装盆,分别标识为 T_{2:8}、T_{3:7}、T_{4:6}、T_{5:5},每盆装粉煤灰和煤矸石共 200 g、土壤 100 g,每组重复 4 次,共 16 盆。播种前在基质中按 100、50、150 mg/kg 用量分别施用 N、P、K 肥料,避免因基质缺乏营养使植株生长受到抑制,对试验结果产生干扰。每盆均匀播种 20 粒种子,出苗后间苗,每盆留长势均一的苗 10 株。采用生物镱灯补充光照,保持室内温度 20 ~ 25 ℃、相对湿度约 60%,称质量法维持基质含水量在饱和持水量的 60% 左右。

1.3 测定项目及方法

出苗 1 个月时,测量株高并收割。将地上部和根部用去离子水洗净擦干后,105 ℃下杀青 30 min,70 ℃烘干,称得干质量后将地上部磨碎过筛备用。植株样品经 H₂SO₄ - H₂O₂ 消煮后,消煮液分别用凯氏定氮仪测量地上部氮(N)含量、钼锑抗比色法测定地上部磷(P)含量;原子吸收分光光度计(火焰原子化法)测定地上部铜(Cu)含量,原子吸收分光光度计(石墨炉原子化法)测定地上部镉(Cd)含量;基质 pH 值采用玻璃电极法测定,EC 值采用电导法测定^[8]。

1.4 数据处理

数据采用 Excel 2010 进行处理,SPSS 22.0 进行方差分析,Duncan 氏法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 苜蓿植株生长状况

由图 1 可知,T_{3:7}、T_{4:6}、T_{5:5}处理苜蓿株高显著高于 T_{2:8}处理,而 T_{3:7}、T_{4:6}、T_{5:5}处理间苜蓿株高差异不显著;T_{2:8}、T_{3:7}、T_{4:6}处理植株根长显著高于 T_{5:5}处理,而 T_{2:8}、T_{3:7}、T_{4:6}处理间植株根长差异不显著。随基质中粉煤灰所占比例增大,苜蓿地上部和根系干质量呈增加一减小的趋势,在粉煤比为 4:6 时达到最大值;T_{4:6}处理地上部干质量显著高于其他处理,分别为 T_{3:7}、T_{5:5}、T_{2:8}处理的 1.24、1.47、2.73 倍,T_{3:7}、T_{5:5}处理地上部干质量显著高于 T_{2:8}处理,分别为 T_{2:8}处理的 2.20、1.86 倍;T_{4:6}处理根系干质量高于 T_{2:8}、T_{3:7}、T_{5:5}处理,分别为 T_{2:8}、T_{3:7}、T_{5:5}处理的 1.98、1.30、1.45 倍,但 T_{3:7}处理根系干质量与 T_{2:8}、T_{4:6}、T_{5:5}处理间差异均不显著。说明不同粉煤比对苜蓿的株高、根长、地上部干质量、根系干质量有显著的影响。

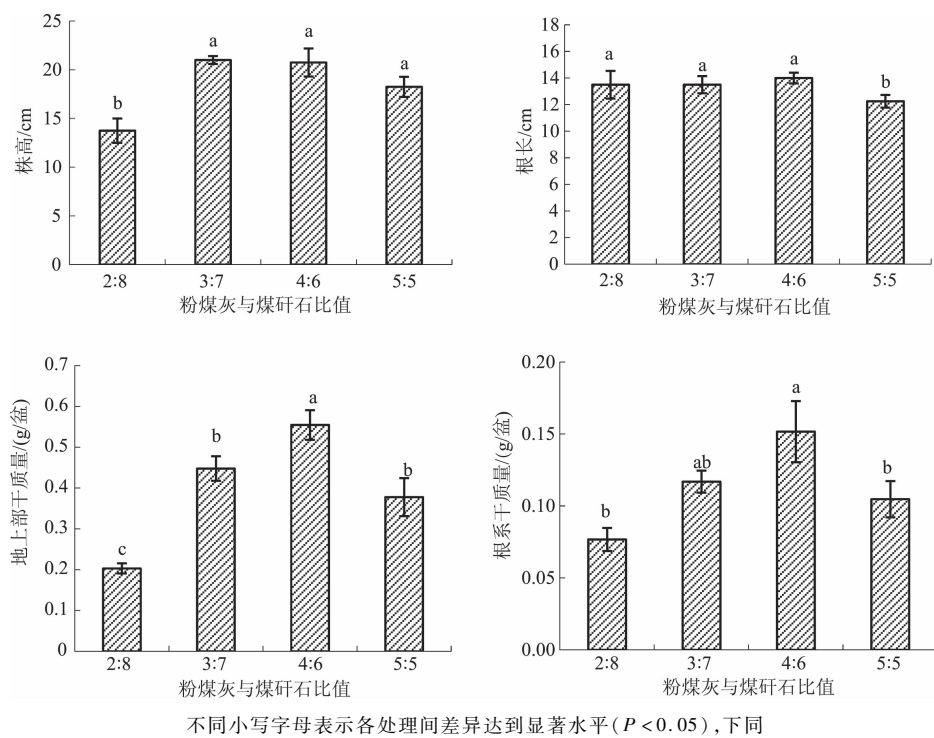


图 1 粉煤灰与煤矸石不同配比对苜蓿植株生长的影响

2.2 苜蓿植株 N、P 营养状况

由图 2 可知, $T_{5:5}$ 处理植株地上部 N 含量显著高于 $T_{2:8}$ 处理, 是 $T_{2:8}$ 处理的 1.23 倍, $T_{3:7}$ 、 $T_{4:6}$ 处理植株地上部 N 含量与 $T_{5:5}$ 、 $T_{2:8}$ 处理差异均不显著; $T_{3:7}$ 、 $T_{5:5}$ 处理植株地上部 P 含量显著高于 $T_{2:8}$ 处理, 分别是 $T_{2:8}$ 处理的 1.44、1.56 倍, $T_{4:6}$ 处理植株地上部 P 含量与 $T_{2:8}$ 、 $T_{3:7}$ 、 $T_{5:5}$ 处理差异均不显著。 $T_{4:6}$ 处理植株地上部吸 N 量显著高于其他处理, 为其他处理的

1.33 ~ 3.23 倍, $T_{3:7}$ 、 $T_{5:5}$ 处理植株地上部吸 N 量显著高于 $T_{2:8}$ 处理; $T_{3:7}$ 、 $T_{4:6}$ 、 $T_{5:5}$ 处理植株地上部吸 P 量显著高于 $T_{2:8}$ 处理, 分别为 $T_{2:8}$ 处理的 3.16、3.66、2.93 倍, 而 $T_{3:7}$ 、 $T_{4:6}$ 、 $T_{5:5}$ 处理间植株地上部吸 P 量差异不显著。随粉煤灰所占比例增大, 植株地上部吸 N 量和吸 P 量呈增加—减小的趋势, 在粉煤比为 4:6 时达到最大值。说明不同粉煤比对植株地上部 N、P 含量及地上部 N、P 吸收量均有显著影响。

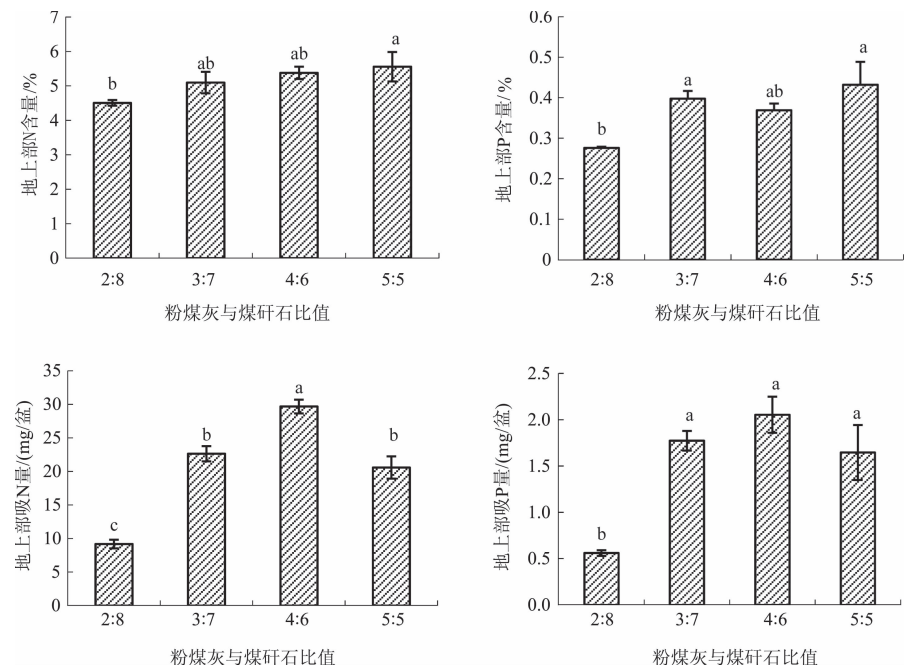


图 2 粉煤灰与煤矸石不同配比对苜蓿植株 N、P 营养状况的影响

2.3 苜蓿植株 Cu、Cd 含量和吸收量

由图 3 可知, $T_{3:7}$ 、 $T_{4:6}$ 、 $T_{5:5}$ 处理植株地上部 Cu 含量显著高于 $T_{2:8}$ 处理, 分别为 $T_{2:8}$ 处理的 1.20、1.26、1.28 倍, 而 $T_{3:7}$ 、 $T_{4:6}$ 、 $T_{5:5}$ 处理间无显著差异; 不同处理间植株地上部 Cd 含量无显著差异。随粉煤灰所占比例增大, 地上部吸 Cu 量和吸 Cd 量均呈增加—减小的趋势, 分别在 $T_{4:6}$ 、 $T_{3:7}$ 处理时达到最大值; $T_{3:7}$ 、 $T_{4:6}$ 、 $T_{5:5}$ 处理植株地上部吸 Cu 量显著高

于 $T_{2:8}$ 处理, 分别为 $T_{2:8}$ 处理的 2.67、3.42、2.47 倍, $T_{3:7}$ 、 $T_{4:6}$ 、 $T_{5:5}$ 处理植株地上部吸 Cd 量分别为 $T_{2:8}$ 处理的 2.46、2.23、1.75 倍, 但 $T_{5:5}$ 与 $T_{2:8}$ 处理间差异不显著, 且 $T_{3:7}$ 、 $T_{4:6}$ 、 $T_{5:5}$ 处理间植株地上部吸 Cu 量和吸 Cd 量差异均不显著。说明粉煤比对苜蓿地上部 Cu、Cd 含量影响不大, 但对地上部 Cu、Cd 吸收量有显著影响。

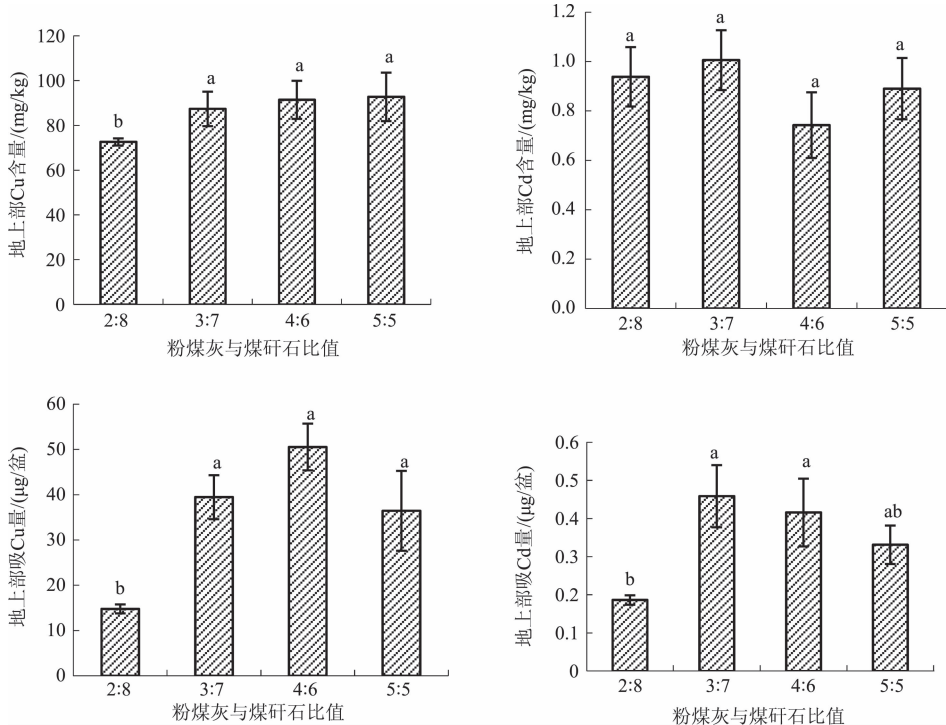


图 3 粉煤灰与煤矸石不同配比对苜蓿植株地上部 Cu、Cd 含量和吸收量的影响

2.4 栽培基质 pH 值、EC 值的变化

由图 4 可知, 种植苜蓿后, $T_{3:7}$ 、 $T_{4:6}$ 、 $T_{5:5}$ 处理基质 pH 值较 $T_{2:8}$ 处理低约 0.2 个单位, 而 $T_{3:7}$ 、 $T_{4:6}$ 、 $T_{5:5}$ 处理间 pH 值差异不显著, 接近中性, 更适宜植物的生长; $T_{2:8}$ 、 $T_{5:5}$ 处理基质 EC 值显著高于 $T_{3:7}$ 、

$T_{4:6}$ 处理, 分别为 $T_{3:7}$ 、 $T_{4:6}$ 处理的 1.15 ~ 1.38 倍, 而 $T_{5:5}$ 与 $T_{2:8}$ 处理间、 $T_{3:7}$ 与 $T_{4:6}$ 处理间基质 EC 值差异不显著。说明粉煤比对种植后基质的 pH 值和 EC 值有显著影响。

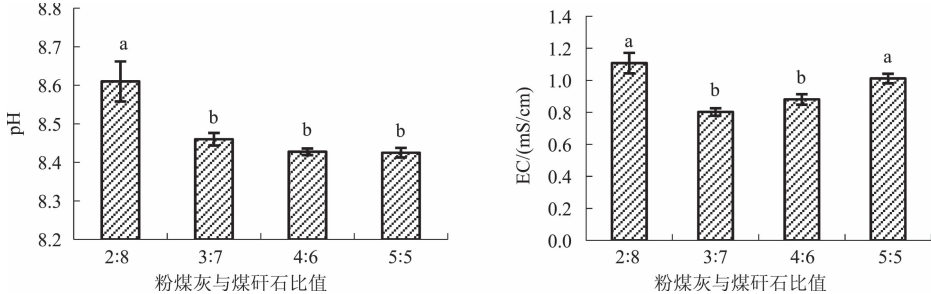


图 4 粉煤灰与煤矸石不同配比对基质 pH 值和 EC 值的影响

3 结论与讨论

煤矸石风化物颗粒粗, 无结构性, 保水、保肥作

用弱, 营养元素含量低, 植物难以利用^[9]。粉煤灰颗粒细小, 与煤矸石混合, 可优化土壤结构, 提高土壤保水保肥能力^[10]; 此外, 植株还可以从粉煤灰中

吸收钾(K)、钙(Ca)、铁(Fe)、硼(B)等营养元素以供生长利用^[11]。安林萍^[12]研究发现,大豆种植在粉煤灰与煤矸石混合基质上比在单纯的煤矸石上好,出苗率、成活率、生物量均随粉煤灰添加比例增大而升高。本研究中,粉煤灰与煤矸石的混合比例对于植物的生长具有显著影响,其中粉煤比 4:6 时苜蓿地上部和根系干质量均显著高于其他处理,株高、根长也较大,说明粉煤比 4:6 是苜蓿生长的最佳配比。

栽培基质主要通过植物的营养状况以及基质中的有害成分对植物生长产生影响^[2,11]。本研究中,粉煤比为 4:6 时植物生物量最大,这可能与地上部的营养元素 N、P 吸收量多,而对植物有毒害作用的 Cd 含量较低有关,具体机制有待进一步研究。有研究发现,铜川市三里洞煤矸石废弃地土壤中 Cd 为强度污染,土壤上生长的草本植物中 Cu、Cd、镍(Ni)元素均超出国家标准^[13]。贵州水城地区煤矸石风化物中 Cu、Cd、锌(Zn)、铅(Pb)等重金属有明显积累,抑制了植物对营养元素的吸收及根系的生长^[14-15]。本研究中,苜蓿地上部 Cu 含量为 72.65 ~ 92.79 mg/kg, Cd 含量为 0.74 ~ 1.01 mg/kg, 远高于国家卫生标准(Cu 10 mg/kg、Cd 0.2 mg/kg)^[15],其中粉煤比为 4:6 时苜蓿地上部吸收的 Cu、Cd 量较多,植物修复效果较好,适宜后续植物的生长。复垦后基质的物理性状、营养状况、重金属状况会影响后续植被的生长,进而影响矿区植被的恢复。煤矸石和粉煤灰通常具有过高或过低的 pH 值,植物很难生长。煤矸石成分不同,pH 值不同,河南平顶山煤矸石 pH 值呈碱性,宁夏、贵州花溪区煤矸石 pH 值却呈酸性^[16-17]。矿区固体废弃物属于中盐化土壤,加之矿区大多水分条件恶劣,随着植物的生长盐化程度有逐渐加重的趋势,因此盐碱化也是限制矿区植物生长的因素之一。EC 值是基质溶液中盐离子浓度的反映,EC 值越高,基质中盐离子浓度越大。本研究中,粉煤比为 4:6 的基质种植苜蓿后,pH 值更接近中性,EC 值较小,盐化程度较低,对后续植物的生长更有利。

总之,粉煤灰与煤矸石配比为 4:6 时苜蓿生长势显著优于其他处理,种植苜蓿后栽培基质的 pH 值更接近中性,EC 值较小,且地上部吸收的 Cu、Cd 量较多,更有利于后续植物的生长,具备良好的土壤改良、植物修复潜力。但本研究的盆栽试验结果能否用于矿区土地复垦,需要进行下一步野外试验研究。

参考文献:

[1] 王玖玲,童文彬,陈民,等. 中国煤矸石堆存现状的统

计分析[J]. 煤炭加工与综合利用,2014(1):61-64.

[2] 赵陟峰,王冬梅,赵廷宁. 保水剂对煤矸石基质上高羊茅生长及营养吸收的影响[J]. 生态学报,2013,33(16):5101-5108.

[3] 崔楠. 粉煤灰改良盐碱土壤理化性状及对植物生理性状影响研究[D]. 北京:北京工业大学,2012:1-3.

[4] 江春玉,盛下放,何琳燕,等. 一株铅镉抗性菌株 WS34 的生物学特性及其对植物修复铅镉污染土壤的强化作用[J]. 环境科学学报,2008,28(10):1961-1968.

[5] 胡振琪,张光灿,毕银丽,等. 煤矸石山刺槐林分生产力及生态效应的研究[J]. 生态学报,2002,22(5):621-628.

[6] 张坤英,吴永贵,付天岭,等. 3 种草本植物对粉煤灰堆场介质理化与生物学特性的影响[J]. 贵州农业科学,2013,41(9):47-52.

[7] 郝园园,朱宗泽,郝成元. 王庄煤矿采煤沉陷区充填复垦现状及改进措施[J]. 中国水土保持,2012(1):60-62.

[8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000:76-79.

[9] 李文,任晓旭,蔡体久. 不同排矸年限煤矸石废弃地养分含量及重金属污染评价[J]. 林业科学,2011,47(6):162-166.

[10] 韩丽萍,高从平,郭友红,等. 粉煤灰改良盐碱土后对 6 种园林植物生长的影响[J]. 宁夏农林科技,2013,54(5):59,66.

[11] 毕银丽,胡振琪,司继涛,等. 接种菌根对充填复垦土壤营养吸收的影响[J]. 中国矿业大学学报,2002,31(3):252-257.

[12] 安林萍. 煤矸石风化物复垦基质改良措施初探[J]. 山西水土保持科技,2009(1):14-16.

[13] 闫宝环,李凯荣,时亚坤. 铜川市三里洞煤矸石堆积地风化物土壤重金属污染及植物富集特征[J]. 水土保持通报,2012,32(3):47-50.

[14] 丁伟,黄智龙,周家喜,等. 贵州水城地区煤矸石中微量元素综合利用评价[J]. 矿物学报,2011,31(3):502-508.

[15] 刘玉荣,党志,尚爱安. 煤矸石风化土壤中重金属的环境效应研究[J]. 农业环境科学学报,2003,22(1):64-66.

[16] 毕银丽,吴福勇. 煤矸石和粉煤灰 pH 与电导率动态变化规律及其相关性研究[J]. 环境污染与防治,2004,26(5):384-386.

[17] 李婷婷. 煤矸石堆场地表径流 Fe、Mn、SO₄²⁻ 污染特征及其对植物种苗生长的影响——以贵阳市废弃煤矿区为例[J]. 贵州化工,2011,36(2):50-53.