

况欣宇, 曹银贵, 罗古拜, 等. 基于不同重构土壤材料配比的草木樨生物量差异分析[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(4): 453-461.

KUANG Xin-yu, CAO Yin-gui, LUO Gu-bai, et al. Analysis of biomass differences in *Melilotus suaveolens* Ledeb. based on different ratios of reconstructed soil materials[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(4): 453-461.

基于不同重构土壤材料配比的草木樨生物量差异分析

况欣宇¹, 曹银贵^{1,2*}, 罗古拜¹, 李树志³, 白中科^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035; 3. 中国煤炭科工集团唐山研究院有限公司, 河北 唐山 063012)

摘要:为揭示不同重构土壤材料对草木樨生物量影响的差异,探寻最适宜草木樨生长的重构土壤材料配比。以内蒙古胜利矿区的表土、煤矸石、粉煤灰及岩土剥离物为原料,在温室大棚内按照不同的配比进行分层和混合盆栽试验,并采用方差分析法对盆栽试验中的草木樨地上生物量进行差异性分析。结果表明:材料间不同的组合、不同的比例都会对草木樨生物量造成影响,且差异显著;表土、煤矸石及岩土剥离物以3:3:4的比例混合时,草木樨生物量较纯表土盆栽生物量提高近30%;煤矸石含量控制在20%~30%、粉煤灰含量控制在10%以下时,重构土壤条件对草木樨生物量促进作用明显。研究表明,煤矸石、岩土剥离物、粉煤灰等可作为表土替代材料,表土替代材料的不同配比会对草木樨生物量产生不同的影响,且当表土:煤矸石:岩土剥离物=3:3:4时,重构效果最佳。

关键词:土地复垦;土壤重构;生物量;表土替代物;草原矿区

中图分类号:S28

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)04-0453-09

doi: 10.13254/j.jare.2018.0354

Analysis of biomass differences in *Melilotus suaveolens* Ledeb. based on different ratios of reconstructed soil materials

KUANG Xin-yu¹, CAO Yin-gui^{1,2*}, LUO Gu-bai¹, LI Shu-zhi³, BAI Zhong-ke^{1,2}

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China; 3. Tangshan Research Institute Company Limited, China Coal Technology and Engineering Group, Tangshan 063012, China)

Abstract: The purpose of this study is to reveal the effects of different reconstructed soil materials on the biomass of *Melilotus suaveolens* Ledeb., and to explore the optimum ratio of reconstructed soil materials for the growth of this species. Using topsoil, coal gangue, fly ash, and geotechnical strippings from the Shengli mining area in Inner Mongolia as raw materials, stratification and mixing pot experiments were carried out in greenhouses using different ratios, and analysis of variance was used to test the significance of the differences. Studies showed that different combinations of materials, and different proportions, significantly affected the biomass of the grass crop; when topsoil, coal refuse, and geotechnical strippings were mixed in a ratio of 3:3:4, the biomass was 30% higher than with pure topsoil. When the gangue content was controlled at 20%~30%, and the fly ash content was controlled at below 10%, the increase in biomass was evident. The use of coal refuse, waste rock and soil, fly ash, etc. as surface topping materials could solve the problem of topsoil scarcity in land reclamation work. Different ratios of topsoil substitute materials would cause differences in the biomass of hibiscus, and optimum results were obtained when the topsoil:coal gangue:geotechnical strippings ratio=3:3:4.

Keywords: land reclamation; soil reconstruction; biomass; topsoil substitute material; grassland mining area

收稿日期:2018-12-10 录用日期:2019-02-12

作者简介:况欣宇(1994—),男,江西高安人,硕士研究生,主要从事土地复垦与生态修复方面研究。E-mail:1528084722@qq.com

*通信作者:曹银贵 E-mail:caoyingui1982@126.com

基金项目:国家重点研发计划项目子课题(2016YFC0501105-2);中央高校基本科研业务费优秀教师项目(2-9-2018-025)

Project supported: Sub-Project of the National Key Research and Development Program of China (2016YFC0501105-2); The Basic Scientific Research Foundation for Excellent Supervisors (2-9-2018-025)

煤炭资源的大规模开采,一方面满足了我国经济建设的需要,另一方面也带来了一系列生态环境问题^[1]及社会问题^[2-3]。相比较井工开采而言,露天开采造成的土地损毁更为严重。而恰恰我国露天煤矿区主要分布在生态脆弱的山西、陕西、内蒙古等丘陵区、荒漠区和草原区^[4],使得这些区域的生态系统更为脆弱。因此,作为推进生态文明建设的重要措施,土地复垦工作势在必行。

土壤是植被生长的基础,复垦后的土壤条件直接影响着植被恢复状况。因此,土壤重构是土地复垦的研究重点和核心任务^[5]。土壤重构的最终目标是要让植被生长达到甚至超过当地的背景值。表土是土地净第一生产力的重要基础^[6],而在表土稀缺地区(如内蒙古草原区),因缺少表土这一重要资源,排土场覆土较薄,严重影响了排土场重构土壤质量提升。因此,对于表土替代材料的研究是很有必要的。

表土替代物的首选物一般以矿区采矿产生的煤矸石等工业固体废弃物为主,现有研究表明Ⅲ层亚黏土^[7-8]、板岩粉末^[9]、粉煤灰搭配底板土^[10]、风化黄土^[11]及风化的褐色砂岩^[12]等都可以用作表土替代材料。同时,在此基础上,基于固体废弃物的土壤改良剂及其改良效果的研究也屡见报道^[13-21],如胡振琪等^[16]以风化煤、煤矸石及粉煤灰等材料为原料研发了煤基生物土^[16]。

目前,关于表土替代材料的研究,国内外学者主要聚焦于采用固体废弃物作为表土替代材料及基于此的土壤改良剂研究,但关于植物生物量对表土替代材料含量的响应研究却较少。由于各地成矿地质条件不同,采矿固体废弃物理化性质不一,固体废弃物的配比具有很强的地域性^[22]。因此从解决区域问题的角度入手,选取区域典型矿区进行表土替代材料配比试验,揭示不同重构土壤材料对植被生物量影响的

差异,寻求最佳配比,是解决矿区表土稀缺问题的最佳途径。

内蒙古是我国重要的露天煤矿开采区,属于生态脆弱区。内蒙古胜利矿区位于我国东部草原区,该区域原生表层土壤贫瘠、厚度小,成为该区域土地复垦的瓶颈。这一制约因素造成矿区土地复垦中存在覆土厚度不足、植被生长状况不佳等一系列问题。因此选取内蒙古锡林浩特胜利矿区为典型矿区,针对东部草原露天矿区土地复垦过程中存在的障碍因子,从充分利用矿区当地常见原材料出发,用表土、煤矸石、粉煤灰及岩土剥离物等材料复合成不同配方的重构土壤,提出重构土壤的应用方法。草木樨为内蒙古矿区适生植物,且属于豆科,具有培肥土壤的作用,因此选择草木樨为盆栽所用植物,通过其生长状况,探讨重构方法的优劣性。本研究旨在降低矿区土地生态修复成本,解决煤矸石和粉煤灰等固体废弃物堆置造成的环境问题,为矿区土壤重构及煤矸石、粉煤灰的合理利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

试验材料包括表土(砂壤土)、粉煤灰、煤矸石、岩土剥离物(母质与生土混合物),上述试验材料均来自于内蒙古胜利矿区,其背景值如表1所示。

实验仪器包括CP114电子天平、101-2AB型电热鼓风干燥箱、直尺、相机。

1.2 试验方法

试验在中国地质大学(北京)校内大棚内进行,坐标为39°59′34.4″N,116°21′09.0″E,海拔43.5 m。花盆直径20 cm,盆高22 cm,其中重构土壤厚度为20 cm。按不同重构方式分成分层方案和混合方案两组,并用全表土方案(编号D1)作为对照方案。在试

表1 不同材料背景值

Table 1 Background values of different materials

材料 Materials	有机质 Organic matter/ %	全氮 Total nitrogen/ %	有效磷 Available phosphorus/ mg·kg ⁻¹	速效钾 Available potassium/ mg·kg ⁻¹	质地/粒径 Texture/Particle size
表土 Top soil	3.54	0.20	5.30	133.00	砂质壤土
煤矸石 Coal refuse	4.39	0.07	2.63	145.83	2~5 cm
粉煤灰 Fly ash	—	—	—	—	砂粒
岩土剥离物 Waste rock and soil	0.36	0.02	2.90	35.00	砂质黏壤土

注:粉煤灰属于煤炭燃烧副产品,经过燃烧后,保留的多为一些化学元素,如Si、Al等,营养元素主要为微量元素,如As、Mn等。

Note: Fly ash is a byproduct of coal combustion. After combustion, it retains some chemical elements, such as Si and Al. The nutrients are mainly trace elements such as As and Mn.

验过程中,为确保配比的均匀度,采用的混合方式为:将所需材料按照配比依次倒在已铺好的帆布上,之后用手将材料自下而上翻动,使各材料混合,如此反复至少5次直至所有材料混合均匀。设置梯度试验,将矿区表土、岩土剥离物、粉煤灰、煤矸石按不同比例进行搭配,形成重构土壤,具体见表2和表3。盆栽试验之前用掺有牛羊粪便的火土作为底肥,每盆施肥2 cm厚。

1.3 测定项目与方法

地上生物量是指某一时刻单位面积内积存的地上部分有机质总量(干质量)。地上生物量测定采用收获法,收割盆栽内植被的地上部分,编号后装在准备好的密封袋中。之后在室内烘箱中65℃的条件下,将样品烘干至恒重,测定质量并记录。数据分析采用SPSS 20.0软件,对生物量数据进行单因素方差分析。

表2 分层盆栽试验方案

Table 2 Layered potting experimental schemes

处理 Treatments	表层材料 Surface material	表层厚度 Surface depth/cm	下层材料 Bonding material	下层厚度 Bonding depth/cm
C1	表土	5	煤矸石	15
C2	表土+剥离物	5	煤矸石	15
C3	表土	10	煤矸石	10
C4	表土+剥离物	10	煤矸石	10

表3 混合盆栽试验方案

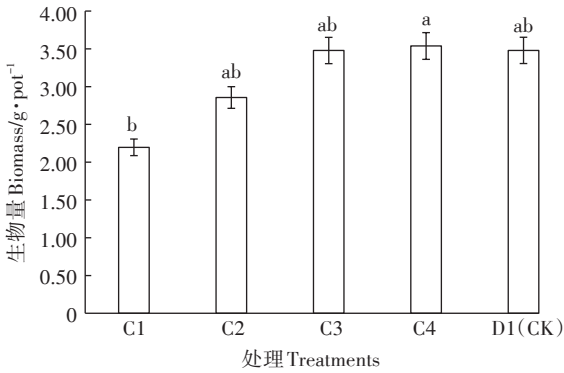
Table 3 Mixed potting experimental schemes

处理 Treatments	表土 Top soil/%	煤矸石 Coal refuse/%	岩土剥离物 Waste soil and rock/%	粉煤灰 Fly ash/%
H1	20	10	60	10
H2	20	40	40	—
H3	25	15	60	—
H4	30	10	30	30
H5	30	20	50	—
H6	30	30	40	—
H7	30	50	20	—
H8	30	—	60	10
H9	30	10	—	60
H10	40	—	60	—
H11	40	30	30	—
H12	40	40	20	—
H13	40	20	40	—
H14	40	—	—	60
H15	50	20	30	—
H16	50	30	20	—
H17	60	10	—	30

2 结果与分析

2.1 不同分层方式下生物量的差异

植物生物量是评价重构土壤质量的重要指标。不同分层方式下的生物量差异情况见图1。



不同字母表示在P≤0.05水平上差异显著。下同
Different letters denote significant difference at 0.05 level. The same below

图1 分层方案生物量

Figure 1 Biomass of stratified schemes

方差分析结果表明:不同分层方式下生物量与对照方案生物量之间不存在显著差异,只有C4处理生物量与C1处理的生物量存在显著差异。

分层堆置重构土壤或纯表土与煤矸石,草木樨生物量范围在2.20~3.54 g·pot⁻¹,其中C4生物量(3.54 g·pot⁻¹)高于纯表土C3处理(3.48 g·pot⁻¹)。分层方案中,只有C4生物量与C1生物量存在显著差异。上层为表土与岩土剥离物混合物的处理生物量大于上层为纯表土的处理。这说明针对草木樨而言,上层覆土厚度在5 cm以上时,即可满足草木樨生长的需要,但当覆土厚度在10 cm时,草木樨生长状况更优。

2.2 不同材料配比下生物量的差异

混合方案生物量的范围为1.57~4.01 g·pot⁻¹。其中,H6处理(30%表土、30%煤矸石、40%岩土剥离物混合物)的生物量(4.01 g·pot⁻¹)明显高于其他混合方案,同时也高于对照方案。即从生物量指标来看,H6处理为最优方案。除H6外,其他混合方案的生物量都低于对照方案。

混合方案是本次研究的重点,处理较多,因此从不同材料组合及不同材料含量配比的差别来对生物量进行方差分析,探寻适宜草木樨生长的最佳材料组合及最佳材料含量配比。

2.2.1 不同混合材料下草木樨生物量差异

由于各材料在理化性质上存在明显的不同,不同

的组合对于草木樨生物量的影响也存在差别。因此,根据各处理中各材料的区别进行分组,探究各材料不同组合对草木樨生物量影响的差异。

(1)表土与岩土剥离物/粉煤灰混合

组合1以岩土剥离物/粉煤灰作为主材,搭配表土,混合得到重构土壤,其生物量差异如图2所示。

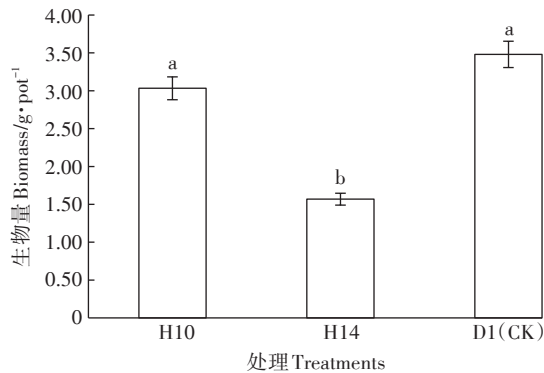


图2 组合1生物量

Figure 2 Biomass of group 1

组合1两种重构土壤生物量都低于对照方案。但方差分析结果表明:岩土剥离物与表土混合得到的重构土壤(H10)生物量($3.03 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$)与对照方案不存在显著差异;而粉煤灰与表土混合得到的重构土壤(H14)生物量($1.57 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$)与对照方案有显著差异;岩土剥离物与表土混合得到的重构土壤(H10)与粉煤灰和表土混合得到的重构土壤(H14)相比,二者生物量也存在显著差异。

这一结果说明,在表土稀缺而岩土剥离物数量较多时,可以采用二者混合来重构土壤。而表土与粉煤灰组合的草木樨生物量偏低,即重构土壤质量较差。因此,在表土稀缺的复垦条件下进行表土替代材料的选择时,岩土剥离物的优先级高于粉煤灰。

(2)表土+煤矸石/岩土剥离物+粉煤灰

组合2以岩土剥离物/粉煤灰作为主材,搭配表土,混合得到重构土壤,其生物量差异如图3所示。从图3可以看出,组合2三种重构土壤(H8、H9和H17处理),草木樨生物量分别为 1.95 、 1.89 、 $2.45 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$,都低于对照方案,且方差分析结果也表明生物量差异显著。这说明,仅从生物量来看,这三种配方都不适合作为重构土壤配方。30%表土的条件下,H8(60%岩土剥离物+10%粉煤灰)与H9(10%煤矸石+60%粉煤灰)相比,草木樨生物量几乎一致。

(3)表土+煤矸石+岩土剥离物

在煤炭开采过程中,表土、岩土剥离物以及煤矸

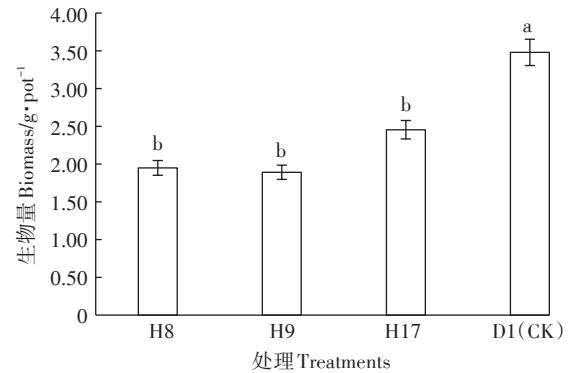


图3 组合2生物量

Figure 3 Biomass of group 2

石是最易获取的表土替代材料,也是最为经济的材料。因此以这三种材料混合(组合3)来进行土壤重构,是本次试验研究的重点,其生物量差异如图4所示。试验结果表明,这三种材料以不同比例混合得到的重构土壤,生长的草木樨最终的地上生物量范围为 $2.06 \sim 4.01 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$,各处理之间生物量差异显著,同时本次试验得到的最佳配方H6也是这三种材料的混合。方差分析结果也表明,只有H12($2.06 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$)与对照方案存在显著差异,H7($3.41 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$)、H15($3.37 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$)及对照与H6($4.01 \text{ g} \cdot \text{pot}^{-1}$)之间差异不显著,其余处理与H6之间存在显著差异。这一结果说明采用这三种材料混合得到的重构土壤具有可行性,但要求这三种材料以一定的比例来进行混合,从方差分析结果来看,表土应控制在30%~50%、煤矸石20%~50%、岩土剥离物20%~30%。并且当表土、煤矸石及岩土剥离物以3:3:4的比例混合时,效果最佳。

(4)四种材料混合

组合4将四种材料以一定比例进行混合得到重构土壤,其生物量差异如图5所示。方差分析结果表

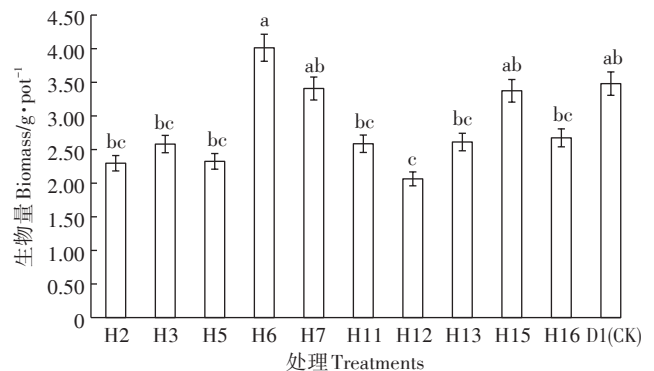


图4 组合3生物量

Figure 4 Biomass of group 3

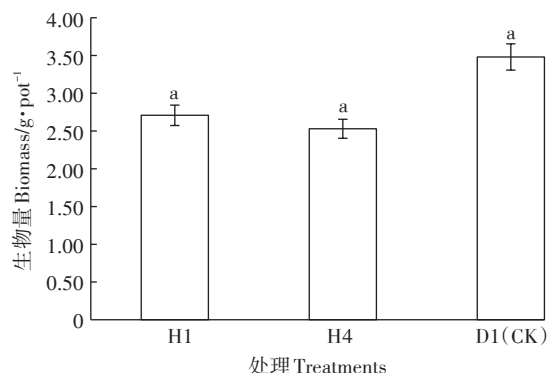


图5 组合4生物量

Figure 5 Biomass of group 4

明:以四种材料混合得到的重构土壤 H1(2.71 g·pot⁻¹)、H4(2.53 g·pot⁻¹)生物量与对照方案不存在显著差异;同时 H1 生物量与 H4 生物量之间不存在显著差异。综上所述,这两种重构土壤配方可行,但在实际效果上要差于纯表土。

2.2.2 各材料不同含量下草木樨生物量差异

由于各材料在理化性质上存在明显的不同,对于草木樨生物量的影响也存在差别。在控制变量的基础上,通过方差分析法探究各材料对草木樨生物量的影响。

先将配方中分别含有粉煤灰、岩土剥离物及煤矸石的处理进行分组,得到粉煤灰组、岩土剥离物组及煤矸石组。然后在岩土剥离物组内根据岩土剥离物含量分成4小组,对各小组分别进行方差分析;煤矸石组内根据煤矸石含量分成4小组,同样对各小组分别进行方差分析;粉煤灰组由于案例较少,在一组进行方差分析。

(1)粉煤灰含量对草木樨生物量的影响

粉煤灰是火力发电厂燃煤产生的固体废物,目前被广泛应用于建材领域,近几年来也用作土壤的改良剂。图6为粉煤灰组草木樨的生物量,由图6可知,有粉煤灰加入的处理,除 H1 外,其余处理在 0.05 水平下与对照方案存在显著差异,对照方案生物量比 H1(2.71 g·pot⁻¹)高出约 30%;H1 生物量只与 H14 生物量(1.57 g·pot⁻¹)存在显著差异;H8(1.95 g·pot⁻¹)、H4(2.53 g·pot⁻¹)、H17(2.45 g·pot⁻¹)、H9(1.89 g·pot⁻¹)四者之间生物量差异不显著。

H14 生物量最低,这说明仅用表土搭配粉煤灰进行土壤重构效果不佳。H4 与 H17 生物量几乎一致,二者配比的差异在于 H4 用 30% 岩土剥离物代替了等量的表土,这说明,在保证一定量表土与煤矸石的

条件下,岩土剥离物的加入对草木樨生长影响不大。

试验表明有粉煤灰加入的处理,整体生物量较低,最高值(H1)仅为 2.71 g·pot⁻¹。在盆栽实验过程中观察发现,H14 与 H9 处理叶片发黄,从而造成生物量偏低。

(2)岩土剥离物含量对草木樨生物量的影响

岩土剥离物属于岩石与生土的混合物,是在煤矿开采剥离岩层与土层时产生的。图7为岩土剥离物组草木樨的生物量,方差分析结果表明:当岩土剥离物含量为 60% 时,除 H8(1.95 g·pot⁻¹)外,其余重构土壤处理生物量与纯表土对照不存在显著差异,H8 处理与 H10(3.03 g·pot⁻¹)处理区别在于添加 10% 粉煤灰作为替代材料,这说明,粉煤灰的加入是导致二者差异显著的原因,与前文中结果一致。当岩土剥离物含量为 50% 时,H5 生物量(2.32 g·pot⁻¹)与对照方案不存在显著差异。当岩土剥离物含量为 40% 时,H2(2.30 g·pot⁻¹)、H6(4.01 g·pot⁻¹)、H13(2.61 g·pot⁻¹)均与对照不存在显著差异。当岩土剥离物含量为 30% 时,各重构土壤处理生物量与纯表土对照方案均不存在差异,各处理之间也不存在差异。当岩土剥离物含量为 20% 时,H7(3.41 g·pot⁻¹)、H16(2.67 g·pot⁻¹)生物量与对照生物量不存在差异,H12(2.06 g·pot⁻¹)生物量与 H7、对照均存在显著差异。

这一结果表明,在土壤重构过程中,岩土剥离物含量控制在 20%~40% 之间时,草木樨生长状况较优。

(3)煤矸石含量对草木樨生物量的影响

煤矸石是煤炭生产带来的副产品。图8为煤矸石组草木樨的生物量,有煤矸石加入的重构土壤组,草木樨生物量差异较大。当煤矸石含量为 10% 时,草木樨生物量与纯表土对照生物量差异显著。只有 H1 生物量(2.71 g·pot⁻¹)与对照方案不存在显著差

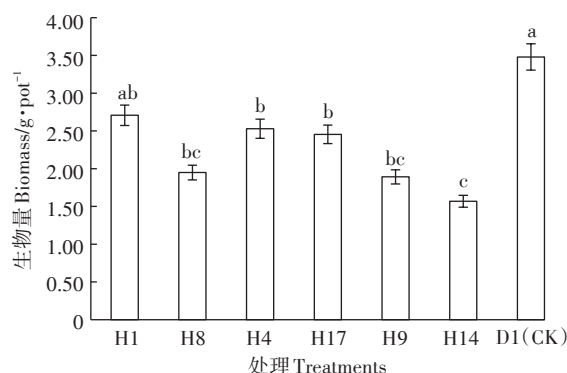


图6 粉煤灰组生物量

Figure 6 Biomass of fly ash group

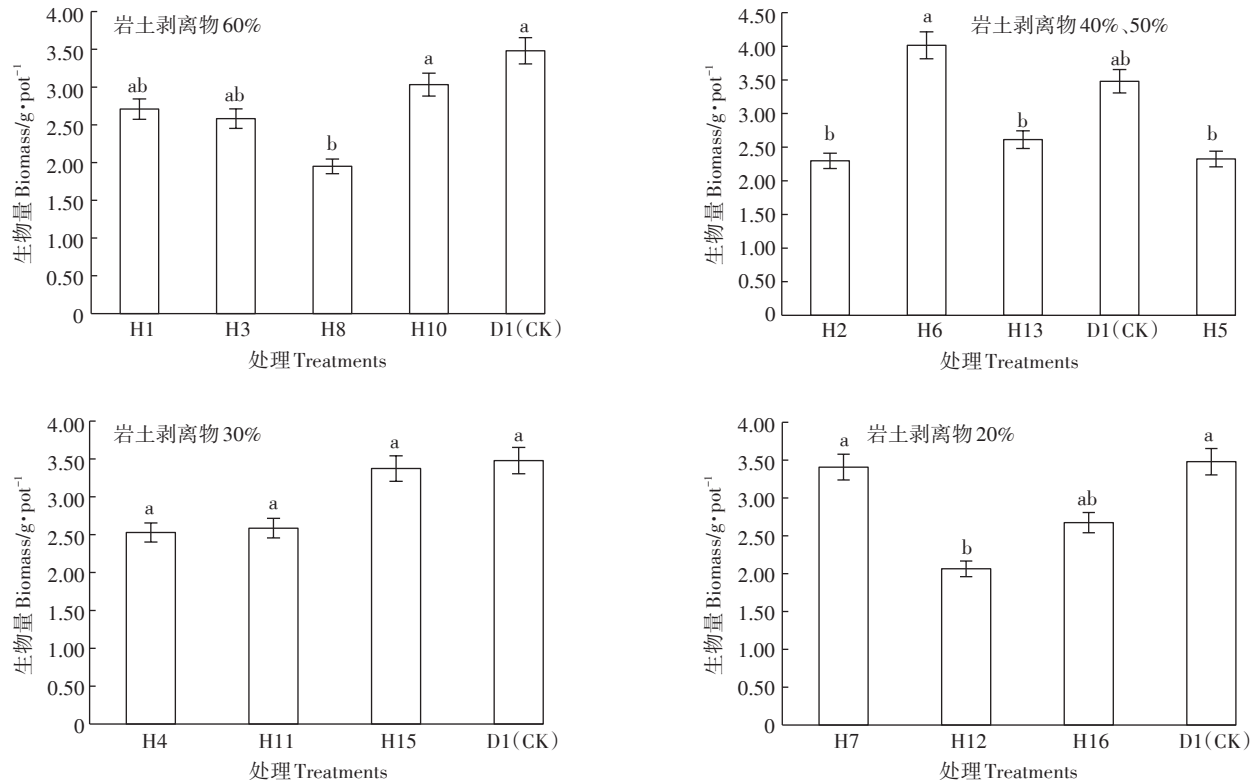


图7 岩土剥离物组生物量

Figure 7 Biomass of the waste rock and soil group

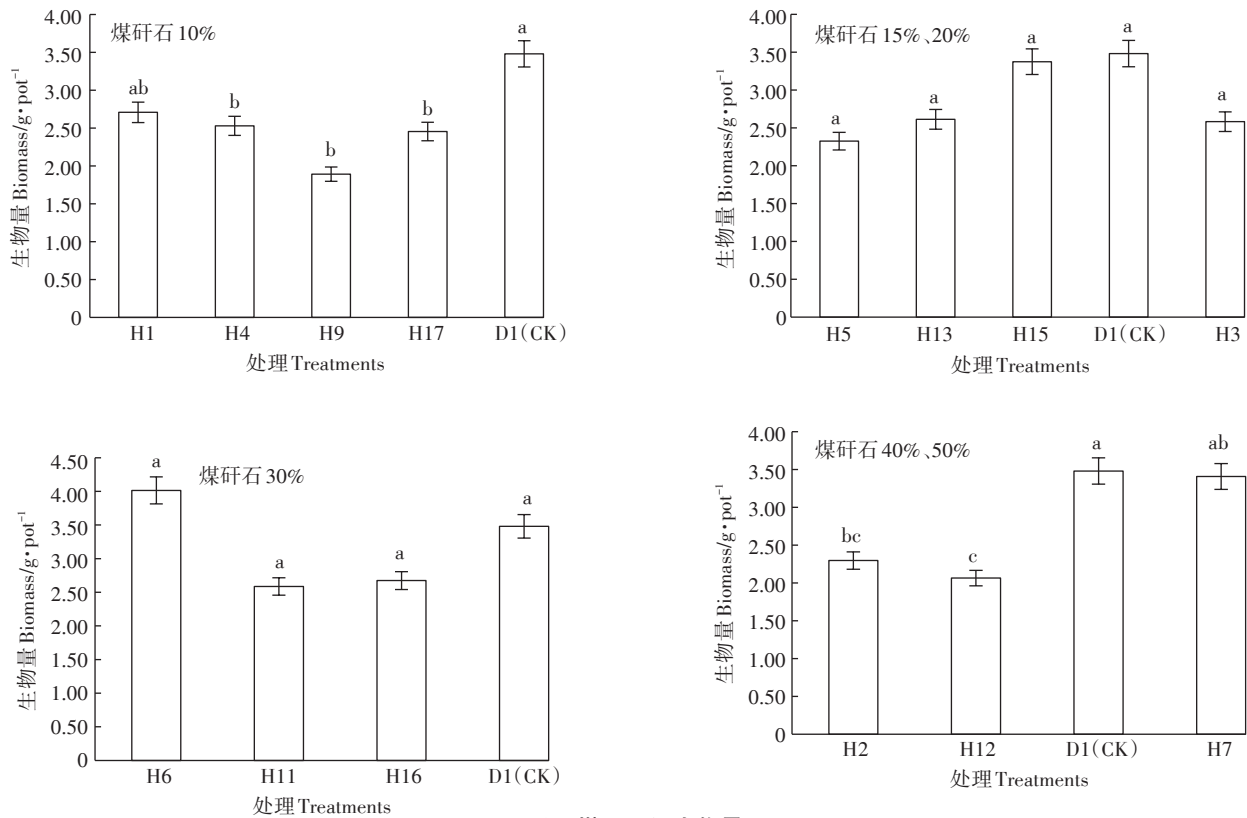


图8 煤矸石组生物量

Figure 8 Biomass of the coal refuse group

异,H4($2.53\text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$)、H9($1.89\text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$)、H17($2.45\text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$)与对照方案存在显著差异。当煤矸石含量为15%、20%、30%时,草木樨生物量与纯表土对照方案生物量都不存在显著差异,同时各混合方案处理之间也不存在显著差异。当煤矸石含量为40%时,H2($2.30\text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$)、H12($2.06\text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$)与对照方案都存在显著差异,但两处理之间不存在显著差异。当煤矸石含量为50%时,H7生物量($3.41\text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$)与对照方案不存在显著差异。

从方差分析结果看,煤矸石在重构土壤中的比例控制在20%~30%之间时,草木樨生物量较优。

3 讨论

成土因素学说表明,土壤是母质、生物、气候、地形和时间综合作用的产物,煤矸石、岩土剥离物及粉煤灰都属于母质。利用采矿产生的固体废弃物作为表土替代材料,理论基础正是成土因素学说。母质是土壤肥力的基础,会影响土壤的理化性质。煤矸石本身颗粒大,有机质含量较高^[23];粉煤灰粒级大^[24],具有亲水性^[25],但养分状况较差^[26];岩土剥离物物理性质与表土相近,但有机质含量较低。因此不同的物料组合下,重构土壤理化性质有很大差异。当岩土剥离物与粉煤灰含量过高时,重构土壤养分状况较差,而煤矸石则能够改善土壤养分状况,使两种组合草木樨生物量差异明显。而草木樨是草原生产力的基础,因此采用其生物量作为筛选配方的指标是可行的^[27]。

煤矸石是煤炭生产带来的副产品,露天堆放的煤矸石会带来一系列环境问题^[28]。目前煤矸石的回收利用技术主要有烧砖、制水泥、制混凝土、铺路、制备化工用品等^[29],但煤矸石的资源化综合利用率不足30%^[8]。研究表明,当煤矸石含量在20%~30%时,生物量结果最优。煤矸石自身颗粒大,大孔隙多,层叠堆放时,煤矸石之间孔隙多而大。这一特性导致煤矸石堆放时,水分易于下渗^[30],因此煤矸石含量不宜过高。但煤矸石能够改良土壤养分状况^[23],同时煤矸石随着风化程度的提高,内部风化裂隙增多,从而使得煤矸石具有保水性能^[31],因此有利于植被的生长。即煤矸石对草木樨生长同时存在正向与反向的作用:煤矸石量过少时,对土壤养分状况的改良作用较小;煤矸石量过多时,会导致土壤含水量较低,不利于草木樨生长。因此煤矸石含量处于一定范围时,草木樨生长效果最佳,这一结果也符合耐受性定律。耐受性定律,亦称谢福德耐受性定律,是美国生态学

家 Shelford 于 1913 年首次提出。这一定律表明在适宜植被生长范围的中心——最适点或最适点附近的一个领域内,生物的机能最旺^[32]。从生物量分析结果来看,草木樨生长的煤矸石含量最适点应在20%~30%之间,但由于实验组案例较少,因此这一最适点暂时无法从实验中得出,有待进一步研究。分层叠置煤矸石与重构土壤或表土,草木樨根系能够深入煤矸石层,煤矸石内部缝隙的发育能给草木樨提供必需的水分与养分,因此草木樨能够生长良好。

粉煤灰是火力发电厂燃煤产生的固体废物,目前被广泛应用于建材领域,近几年来也用作土壤的改良剂。粉煤灰粒级较大,因此主要用于改良黏土的物理结构^[24],对本试验采用的砂壤土而言则不具有改良作用。在保证植被生长所需水分的条件下,粉煤灰的亲水性^[25]对植物生长影响不大。但由于粉煤灰中几乎不含有氮^[26],所以试验过程中发现草木樨叶片发黄,草木樨生长不良。根据利比希最小因子定律,这一特性就成为限制草木樨生长的限制因子。也就是说,在室内盆栽试验条件下,随着粉煤灰含量的增加,土壤养分状况随之变差,导致草木樨生物量较低。陈静等^[33]的研究也表明,随着粉煤灰用量增加,植物的生长状况也随之变差。根据盆栽试验结果,粉煤灰含量控制在10%以下时,对草木樨生长影响较小。

另外,以上结果均来自室内盆栽试验,而实地是否适用目前还未可知。需要在室内试验的基础上进行实地的小区试验,并对小区试验的结果进行研究才能得出最优的、适合当地的重构土壤配比。

4 结论

(1)从生物量指标来看,用采矿固体废弃物作为表土替代物是可行的。且当表土:煤矸石:岩土剥离物=3:3:4时,土壤重构效果最佳,草木樨生物量较对照方案差异不明显,但高出约30%。

(2)材料间不同的组合、不同的比例都会对草木樨生物量造成影响,且差异显著。表土、岩土剥离物及煤矸石以一定比例混合得到的重构土壤方案与表土、岩土剥离物及粉煤灰三者混合得到的重构土壤方案,草木樨生物量差异明显。

(3)当煤矸石用量控制在20%~30%之间时,草木樨生物量与其他煤矸石含量处理差异显著,与对照差异不显著;含粉煤灰的处理,整体生物量较低,与对照差异明显。层叠放置重构土壤与煤矸石,当上层重构土壤厚度大于10 cm时,草木樨生物量高于

纯表土对照;且上层放置重构土壤时,生物量高于放置表土处理。

参考文献:

- [1] 卞正富. 我国煤矿区土地复垦与生态重建研究[J]. 资源·产业, 2005, 7(2):18-24.
BIAN Zheng-fu. Research on the recultivation and ecological reconstruction in coal mining area in China[J]. *Resources & Industries*, 2005, 7(2):18-24.
- [2] Cao Y G, Dallimer M, Stringer L C, et al. Land expropriation compensation among multiple stakeholders in a mining area: Explaining "skeleton house" compensation[J]. *Land Use Policy*, 2018, 74:97-110.
- [3] Cao Y G, Bai Z K, Sun Q, et al. Rural settlement changes in compound land use areas: Characteristics and reasons of changes in a mixed mining-rural-settlement area in Shanxi Province, China[J]. *Habitat International*, 2017, 61:9-21.
- [4] 张世文, 黄元仿, 王 军. 如何在露天煤矿复垦中实现生态文明[J]. 青海国土经略, 2016(3):38-39.
ZHANG Shi-wen, HUANG Yuan-fang, WANG Jun. How to realize ecological civilization in the reclamation of open pit mines[J]. *Management & Strategy of Qinghai Land & Resources*, 2016(3):38-39.
- [5] 胡振琪, 魏忠义, 秦 萍. 矿山复垦土壤重构的概念与方法[J]. 土壤, 2005, 37(1):8-12.
HU Zhen-qi, WEI Zhong-yi, QIN Ping. Concept of and methods for soil reconstruction in mined land reclamation[J]. *Soil*, 2005, 37(1):8-12.
- [6] 付梅臣, 陈秋计. 矿区生态复垦中表土剥离及其工艺[J]. 金属矿山, 2004(8):63-65.
FU Mei-chen, CHEN Qiu-ji. Surface soil stripping and its technology in ecological reclamation in mine area[J]. *Metal Mine*, 2004(8):63-65.
- [7] 胡振琪, 位蓓蕾, 林 杉, 等. 露天矿上覆岩土层中表土替代材料的筛选[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19):209-214.
HU Zhen-qi, WEI Bei-lei, LIN Shan, et al. Selection of topsoil alternatives from overburden of surface coal mines[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(19):209-214.
- [8] 胡振琪, 康惊涛, 魏秀菊, 等. 煤基混合物对复垦土壤的改良及苜蓿增产效果[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11):120-124.
HU Zhen-qi, KANG Jing-tao, WEI Xiu-ju, et al. Experimental research on improvement of reclaimed soil properties and plant production based on different ratios of coal-based mixed materials[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(11):120-124.
- [9] Paradelo R, Moldes A B, Barral M T. Characterization of slate processing fines according to parameters of relevance for mine spoil reclamation[J]. *Applied Clay Science*, 2007, 41(3):172-180.
- [10] 马彦卿, 李小平, 冯 杰, 等. 粉煤灰在矿山复垦中用于土壤改良的试验研究[J]. 矿冶, 2000, 9(3):15-19.
MA Yan-qing, LI Xiao-ping, FENG Jie, et al. Research on application of fly ash in soil amelioration in mine land reclamation[J]. *Mining & Metallurgy*, 2000, 9(3):15-19.
- [11] Nicolini F, Topp W. Soil properties in plantations of sessile oak (*Quercus petraea*) and red oak (*Quercus rubra*) in reclaimed lignite open-cast mines of the Rhineland[J]. *Geoderma*, 2004, 129(1):65-72.
- [12] Wilson-Kokes L, Skousen J. Nutrient concentrations in tree leaves on brown and gray reclaimed mine soils in west Virginia[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 481(1):418-424.
- [13] Li S, Wu D, Zhang J. Effects of vegetation and fertilization on weathered particles of coal gob in Shanxi mining areas, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 124(1):1-3.
- [14] 秦 玲, 康文怀, 李嘉瑞, 等. 草炭及其改良土壤对氮、磷、钾的吸附特性[J]. 中南林业科技大学学报, 2009, 29(1):20-24.
QIN Ling, KANG Wen-huai, LI Jia-rui, et al. Nitrogen, phosphorus and potassium adsorption characteristics of peat, sandy soil, loamy soil and their mixture[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2009, 29(1):20-24.
- [15] 黄继民, 耿宝军, 马险锋. 矿物肥料对排土场土壤物理性质的改良效应[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2009, 28(S2):169-171.
HUANG Ji-min, GENG Bao-jun, MA Xian-feng. Ameliorative effect of mineral fertilizers on soil physical properties of dump[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition)*, 2009, 28(S2):169-171.
- [16] 胡振琪, 高爱林, 杨秀红. 一种用于替代表土的煤基生物土: ZL200510063339.7[P]. 2006-10-18.
HU Zhen-qi, GAO Ai-lin, YANG Xiu-hong. A coal-based bio-soil used to replace topsoil: ZL200510063339.7[P]. 2006-10-18.
- [17] 纪 妍, 位蓓蕾, 杨 洁, 等. 草炭对露天矿表土替代材料改良效果初报[J]. 广东农业科学, 2013, 40(3):139-141, 146.
JI Yan, WEI Bei-lei, YANG Jie, et al. Preliminary study on the improvement of topsoil alternatives by peat in a surface coal mine[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013, 40(3):139-141, 146.
- [18] 杨 洁, 位蓓蕾, 陈玉玖, 等. 改性秸秆改良褐土对苗期紫花苜蓿生长及生理特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(5):320-322.
YANG Jie, WEI Bei-lei, CHEN Yu-jiu, et al. Modified straw improved brown soil to grow alfalfa at seedling stage[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2013, 41(5):320-322.
- [19] 林 杉, 位蓓蕾, 胡振琪, 等. 紫花苜蓿苗期对腐植酸改良露天矿表土替代材料的响应[J]. 河南农业科学, 2013, 42(8):48-52.
LIN Shan, WEI Bei-lei, HU Zhen-qi, et al. Response of seedling stage alfalfa (*Medicago sativa* L.) to topsoil substituted material improved by humic acid in open pit mine area[J]. *Henan Agricultural Sciences*, 2013, 42(8):48-52.
- [20] 位蓓蕾, 胡振琪, 林 杉, 等. 分枝期紫花苜蓿对改良露天矿表土替代材料的响应[J]. 西北农业学报, 2013, 22(8):193-198.
WEI Bei-lei, HU Zhen-qi, LIN Shan, et al. Response of branching alfalfa to topsoil amendment substitutes for open-pit mine[J]. *Acta Agricultrae Boreali-occidentalis Sinica*, 2013, 22(8):193-198.
- [21] 位蓓蕾, 胡振琪, 张建勇, 等. 紫花苜蓿对草炭改良露天矿表土替代材料的响应[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(10):2020-2026.
WEI Bei-lei, HU Zhen-qi, ZHANG Jian-yong, et al. The response of the peat improved open pit mine topsoil alternative materials for *Medicago sativa*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(10):

- 2020-2026.
- [22] 刘雪冉, 胡振琪, 许涛, 等. 露天煤矿表土替代材料研究综述[J]. 中国矿业, 2017, 26(3):81-85.
LIU Xue-ran, HU Zhen-qi, XU Tao, et al. Summarizing research on topsoil substitute material of open-pit coal mine[J]. *China Mining Magazine*, 2017, 26(3):81-85.
- [23] 郭友红, 李树志, 鲁叶江. 塌陷区矸石充填复垦耕地覆土厚度的研究[J]. 矿山测量, 2008(2):59-61.
GUO You-hong, LI Shu-zhi, LU Ye-jiang, et al. Research on depth of the covering layer on reclaimed cultivated land backfilled with coal refuse in subsidence area[J]. *Mine Surveying*, 2008(2):59-61.
- [24] 高占国, 华璐, 郑海金, 等. 粉煤灰的理化性质及其资源化的现状与展望[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2003, 24(1):70-77.
GAO Zhan-guo, HUA Luo, ZHENG Hai-jin, et al. Physicochemical characteristics of fly ashes and situation & prospect of its utilization as resources[J]. *Journal of Capital Normal University(Natural Sciences Edition)*, 2003, 24(1):70-77.
- [25] 杨剑虹, 车福才, 王定勇, 等. 粉煤灰的理化性质与农业化学行为的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 1997, 3(4):341-348.
YANG Jian-hong, CHE Fu-cai, WANG Ding-yong, et al. Study on physical and chemical properties of fly ashes and their agrochemical behaviours[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1997, 3(4):341-348.
- [26] 杨安中. 粉煤灰理化性质及改土增产效应研究[J]. 广东微量元素科学, 2000, 7(2):54-57.
YANG An-zhong. Study on physical and chemical of fly ash and effects of fly ash on soil amelioration and increasing yield[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2000, 7(2):54-57.
- [27] 陈光耀. 天然草地上生物量季节动态初探[J]. 中国草业科学, 1987, 4(4):47-51.
CHEN Guang-yao. A preliminary study on the seasonal dynamics of aboveground biomass in natural grassland[J]. *Pratacultural Science*, 1987, 4(4):47-51.
- [28] 范英宏, 陆兆华, 程建龙, 等. 中国煤矿区主要生态环境问题及生态重建技术[J]. 生态学报, 2003, 23(10):2144-2152.
FAN Ying-hong, LU Zhao-hua, CHENG Jian-long, et al. Major ecological and environmental problems and the ecological reconstruction technologies of the coal mining areas in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10):2144-2152.
- [29] 姜振泉, 李雷. 煤矸石的环境问题及其资源化利用[J]. 环境科学研究, 1998, 11(3):62-64.
JIANG Zhen-quan, LI Lei. Environmental problems and resources utilization on coal slag[J]. *Research of Environmental Sciences*, 1998, 11(3):62-64.
- [30] 段永红, 白中科, 赵景逵. 阳泉煤矸石山浅层矸石风化物水分特性初探[J]. 煤炭学报, 1999, 24(5):533-537.
DUAN Yong-hong, BAI Zhong-ke, ZHAO Jing-kui. The preliminary study on water properties of the weathered products of gangue in the shallow layers of gangue mountains in Shanxi Province[J]. *Journal of China Coal Society*, 1999, 24(5):533-537.
- [31] 蔡毅, 严家平, 陈孝杨, 等. 表生作用下煤矸石风化特征研究——以淮南矿区为例[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(5):937-943, 958.
CAI Yi, YAN Jia-ping, CHEN Xiao-yang, et al. Weathering characteristics of coal gangue in hypergenesis: A case study on Huainan coal mining area[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44(5):937-943, 958.
- [32] 杨凤翔, 王顺庆. 耐受性定律的一个数学注记[J]. 生态学杂志, 1990, 9(6):55-57.
YANG Feng-xiang, WANG Shun-qing. A mathematical note for the law of tolerance[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1990, 9(6):55-57.
- [33] 陈静, 宋子岭, 祁萃萃. 粉煤灰改良露天矿排土场土壤的实验研究[J]. 能源与环境, 2008(5):101-108.
CHEN Jing, SONG Zi-ling, QI Cui-cui. Experimental study on improvement of soil in dump pit of open pit mine with fly ash[J]. *Energy and Environment*, 2008(5):101-108.