

DOI: 10.5846/stxb201703290543

王志刚, 毕银丽, 宋子恒, 张健, 蔡云, 龚云丽, 胡晶晶. 东部草原露天矿区粘土改良的模拟研究. 生态学报, 2018, 38(16): - .

Wang Z G, Bi Y L, Song Z H, Zhang J, Cai Y, Gong Y L, Hu J J. Substrate compositions facilitate clay restoration of the simulation study in an opencast coal mine in the eastern steppe of China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(16): - .

东部草原露天矿区粘土改良的模拟研究

王志刚, 毕银丽*, 宋子恒, 张健, 蔡云, 龚云丽, 胡晶晶

中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室 地球科学与测绘工程学院北京 100083

摘要:以我国东部草原露天矿区粘土为研究对象,采用盆栽试验方法,以粘土与表土和沙土混合物为培养基质,三叶草(*Trifolium repens* Linn)为供试植物,研究不同比例下三叶草生物量、养分吸收量、土壤理化和生物学性状的差异,为寻找最佳配比提供依据。结果表明:不同混合比例显著影响三叶草生物量,粘土+表土(1:1、1:2 和 1:3)生物量最高(26.5—40.0 g/盆),平均为 31.2 g/盆,粘土+沙土(1:1、1:2 和 1:3)次之(14.9—20.3 g/盆),平均为 18.9 g/盆,粘土、沙土和表土平均分别是 9.0、5.4 g/盆和 41.7 g/盆,同样地,粘土+表土混合基质上三叶草氮吸收量平均为 1071 mg/盆,分别是粘土+沙土、粘土和沙土氮吸收量 660、321 mg/盆和 190 mg/盆的 1.62、3.34 倍和 5.64 倍,磷和钾吸收量具有相似变化规律,这与三叶草根直径、根长、根表面积和根尖数有显著关联性;粘土和表土与粘土和沙土混合基质的容重和最大持水量分别显著下降 7.4%—21.5%和 24.5%—71.8%,饱和入渗率、孔隙度和标准化平均重量直径分别显著增加 26.9%—96.3%、45%—218%和 34%—72%;全氮、有机质、速效磷、速效钾、饱和电导率显著增加 23.0%—88.3%、25.1%—146%、44.0%—91.5%、70.3%—114.8%和 3.5%—59.3%;磷酸酶、脲酶、蔗糖酶、硝酸还原酶和固氮酶活性显著提高 45.5%—105%、65.2%—172.3%、160%—252%、53.4%—62.7%和 197%—374%;真菌、细菌和放线菌数量增幅为 119%—142%、93.5%—107%和 83%—147%。相关性分析表明,生物量与土壤理化性状、酶活性和微生物数量呈显著或极显著正相关,表现为粘土+表土=表土>粘土+沙土>粘土>沙土。因此,表土或沙土均能改良粘土性状,其中粘土和表土 1:2 配比效果最优。

关键词:露天矿区;粘土;三叶草;模拟试验;改良效应

Substrate compositions facilitate clay restoration of the simulation study in an opencast coal mine in the eastern steppe of China

WANG Zhigang, BI Yinli*, SONG Ziheng, ZHANG Jian, CAI Yun, GONG Yunli, HU Jingjing

State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract: A pot experiment was conducted to study the differences between clovers (*Trifolium repens* Linn) in biomass, nutrient uptake, physical, chemical, and biological properties of substrates among various mixtures with clay, topsoil, or sandy soil, in order to obtain the optimal mixture ratio. The results showed that the substrates with different mixture proportions significantly influenced clover productivity; the biomass varied with the type of substrate and was in the range of 26.5—40.0 g/pot (average = 31.2 g/pot) for the clay and topsoil combinations and in the range of 14.9—20.3 g/pot (average = 18.9 g/pot) for the clay and sandy soil combinations; the biomass was 9.0 g/pot, 5.4 g/pot, and 41.7 g/pot for the clay, sandy soil, and topsoil, respectively. Similarly, the highest N acquisition was 1071 mg/pot of clover in the clay and topsoil combinations, which was 1.62, 3.34, and 5.64 times higher for the clay and sandy soil combination, clay, and sandy soils, as were P and K acquisition, which was significantly altered by the difference in root diameter, root

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0501106);首都科技领军人才工程(Z18110006318021)

收稿日期:2017-03-29; **网络出版日期:**2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ylb88@126.com

length, root surface area, and tip numbers. In comparison with the clay and sandy soil, the soil bulk density and maximum moisture holding capacity were significantly decreased by 7.4%—21.5% and 24.5%—71.8%, respectively, whereas the infiltration rate, porosity, normalized mean weight diameter, total N, organic matter, Olsen P, available K, electric conductivity of the clay with topsoil and clay with sandy soil combination were markedly enhanced by 26.9%—96.3%, 45%—218%, 34%—72%, 23.0%—88.3%, 25.1%—146%, 44.0%—91.5%, 70.3%—114.8%, and 3.5%—59.3%; the activities of phosphatase, urease, nitrate reductase, invertase, and nitrogenase were significantly increased by 45.5%—105%, 65.2%—172.3%, 160%—252%, 53.4%—62.7%, 197%—374%; the numbers of fungi, bacteria, and actinomycetes were also increased by 119%—142%, 93.5%—107%, and 83%—147%, respectively. Significant positive correlations were observed between clover productivity and soil physicochemical or biological properties via correlation analysis; overall, the effect of substrates occurred in the order clay+topsoil = topsoil > clay+sandy soil > clay > sandy soil. Thus, the clay and topsoil or sandy soil mixtures provided significantly enhanced substrate conditions; in particular, the 1:2 clay and topsoil ratio was the optimum choice in the opencast coal mine in the eastern steppe of China.

Key Words: opencast coal mine; clay; clover; simulation experiment; soil restoration

煤炭是我国重要能源,约占一次性能源的 71%,远高于其它不可再生能源比例^[1];露天矿开采技术简单、成本低和安全系数高,未来 20 年将由目前 4% 提高到 15%^[2]。但是,露天开采极易造成土地破坏、水土流失、滑坡甚至泥石流。据统计,我国露天矿平均开采万吨煤炭破坏土地 0.22 hm²,挖损 0.12 hm²,排土场压占 0.10 hm²;2000 年后破坏土地以每年 8%—9% 递增,到 2020 年将达 6.6 万 hm²/a^[3]。因此,排土场生态恢复成为露天矿区建设的紧迫问题。

我国露天煤矿大多集中在降水稀少、土层瘠薄和气候酷寒的东部干旱草原区;但是表土下含有 20 m 厚的具有丰富营养的粘土未利用,不仅严重浪费资源更破坏环境^[4-6]。近年来,微生物技术(菌根技术)对矿区受损环境具有良好修复效果^[6-9],通过接种 AM 真菌形成庞大菌丝网络提高植物抗逆性和土壤肥力重建生态系统,但时间较长是其不足之处^[9-13],特别是露天矿排土场粘土基质改良尚处于空白,因此研发新技术实现大规模的快速修复势在必行。当前,研究主要关注粘土持水能力、团聚体水稳性、土壤胀缩性及阻水滞盐效果^[14-15],多集中在农业领域。东部露天矿区是我国重要露天煤炭基地,除极少部分露天矿进行科学复垦,但是对排土场基质恢复缺乏有效手段。纵观国内外露天矿复垦实践,露天矿上覆岩土层基质改良是重要课题之一。例如,岳殷萍等测定粘土和沙土不同配比下理化性状和微生物的变化表明粘土提供稳定的矿质营养,增加细菌、真菌和放线菌数量,提高基质保水保肥能力,为矿区粘土基质利用提供了重要依据^[8]。

表土和风沙土通气透水性好,合理的孔隙结构和巨大比表面积及丰富的微生物,混合后有利于粘土基质熟化,是露天矿粘土基质重要的改良材料^[7-9]。三叶草是豆科固氮植物,具有培肥土壤的效果^[10-13]。因此,本文采用粘土与沙土和表土混合的模拟研究,分析东部草原露天矿区粘土改良规律,为粘土应用提供技术依据。

1 材料和方法

1.1 样品采集区概况

采样地点位于内蒙古自治区东北部鄂温克旗伊敏露天矿区(48°30′45″—48°50′32″N, 119°30′29″—119°50′36″E),海拉尔盆地东部,年均气温低于 0℃,≥10℃ 积温 1500℃,年降水量 200—300 mm,蒸发量大于 2000 mm,无霜期 110 d,年日照时数 4000 h,属大陆性季风气候。粘土母质主要是白垩纪和第三纪含碳酸钙石灰土,同时矿区周边有大量沙土和剥离的表土,为排土场复垦提供材料,伊敏矿区位置见图 1。

研究区地质柱状图上覆岩土共 7 层:Ⅰ层为腐殖质层(最大厚度仅为 0.3 m),Ⅱ层为黄土(厚度 18.4 m),Ⅲ层为亚粘土(厚度为 16 m),Ⅳ层为沙砾层(厚度为 8 m),Ⅴ层为中砂(厚度为 6 m),Ⅵ层仍为砂砾石(厚度为 26 m),Ⅶ层为砂岩(厚度为 0.8 m)。由于Ⅳ层及以下基质分别为砂砾石、中砂、砂岩,这些基质属于较硬的



图1 研究区地理位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of geographic location of study region

岩石层不适于功能提升,因此本研究将Ⅲ层原状基质作为研究对象,分析其替代材料开发的可能性。如图2所示

1.2 试验材料采集

2016年7月在伊敏矿区新形成排土场上按“S”型采集粘土(表土剥离后将粘土堆放形成排土场,表土用于边坡绿化),退化草场采集表土和沙土,采样深度均为0—30 cm。试验开始前粘土、表土和沙土基本理化性状:有机质 13.8、16.3 和 5.70 g/kg,全氮 0.90、1.02 和 0.54 g/kg,速效磷 3.54、11.23 mg/kg 和 2.00 mg/kg,速效钾 29.6、87.2 mg/kg 和 21.6 mg/kg, pH 值 7.31、7.45 和 7.91;该地区粘土、表土和沙土类型分别是粉质粘土、黑钙土和典型风沙土,其中黑钙土粉粒占 40%,粘粒占 60%,具有良好通气、保水保肥能力,粘土采样位置见表1。

1.3 试验设计

2016年8月5日—2016年12月5日(120 d)试验在中国矿业大学(北京)日光温室进行,共9个处理,即粘土(Clay)、沙土(Sandy)、表土(Topsoil)、粘土与表土(质量比 1:1、1:2 和 1:3)、粘土与沙土(1:1、1:2 和 1:3),3次重复,共27盆,随机区组排列。试验开始时将混合基质均匀搅拌,装入19 cm(高)×20 cm(盆口直径)×16 cm(盆底直径)塑料盆内,每盆5 kg。供试三叶草(*Trifolium repens* Linn)属多年生豆科植物,由中国农业科学院草原研究所提供。三叶草种子用10% H₂O₂溶液浸泡10 min,清水冲洗10次,每盆均匀播种120粒,出苗一周后定植100株/盆。称重法将浇水量控制在最大持水量70%,即粘土与表土和沙土(1:1、1:2 和

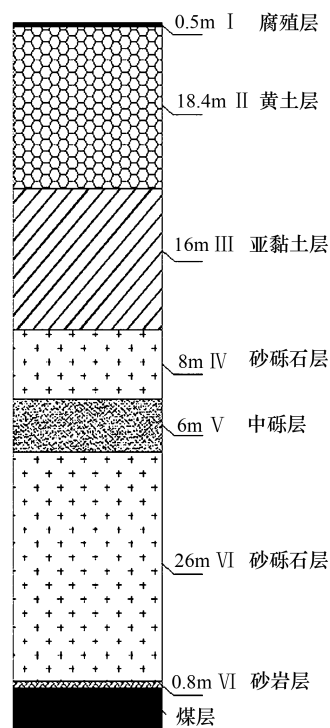


图2 研究区地质剖面示意图

Fig.2 Geologic profile of study area

1:3) 混合基质,分别为 40.2%、38.5%、34.6%和 31.9%、28.6%、24.3%。每隔 5 d 称重 1 次,补充水分至初始重量。出苗 30 天加入 NH_4NO_3 、 KH_2PO_4 、 KNO_3 营养液,N、 P_2O_5 和 K_2O 浓度分别为 100、30 mg/kg 和 150 mg/kg。试验期间平均温度保持在 20℃,适宜三叶草生长发育。

表 1 样地情况表
Table 1 Sample situation list

样地代码 Code	形成年限 Duration/a	样地坐标 Coordinate		样地位置 Site	植被类型 Vegetation type
		X	Y		
I	1	119.7086	48.5817	西排土场平台	菊叶委陵菜 车前 扁蓿 猪毛菜
II	3	119.7063	48.5595	内排土场南坡平台	羊草 大针茅 羽毛 隐子
III	5	119.6882	48.5693	西排土场平台	猪毛菜 芦苇 黄蒿 藜
IV	7	119.6924	48.5598	西排土场平台	羊草 大针茅 二裂 黄蒿 阿狗 隐子
V	9	119.7081	48.5573	内排土场平台	沙打旺 黄蒿 黄花苜蓿 狗尾草

1.4 样品收获

2016 年 12 月 5 日收获,土样混合均匀装入自封袋,放入 4℃ 冰箱保存。一部分新鲜土样测定土壤生物指标;其余部分自然风干过 2 mm 土壤筛测定养分指标;盆中原位土壤用于测定其物理指标。然后,将三叶草地上部植株和根系分别收获,地上部于 105℃ 烘箱内杀青 30 min,75℃ 烘至恒重;轻轻抖落根附着土壤,用清水洗净,4℃ 冰箱内保存测定根参数指标。

1.5 指标测定

土壤容重采用环刀法测定:容重(d , g/cm^3) = $(M-G) \times 100 / V(100+W)$ (1)

式中, M 代表环刀和湿土重(g); G 代表环刀重(g); V 代表环刀容积(cm^3); W 代表土壤含水量(%)

土壤饱和入渗率采用土柱法测定^[16],即土柱由有机玻璃管用玻璃胶粘合而成,每个有机玻璃管外径为 10.0 cm,内径为 8.9 cm,平均高度为 5.1 cm。采取边接高有机玻璃管边填装砂土方式,通过计算控制每层砂土用量并击实,使试样达到“控制干密度” $1.43 \text{ mg}/\text{cm}^3$,整个土柱密实程度均匀,土柱高度为 107.1 cm,用砂土填满,竖立于高度为 2.5 cm 的浅口盘上。从顶部浇水若干次,直到水从土柱底部流出并沿浅口盘边缘不断漫溢,形成固定水位。之后在柱顶覆盖双层铝箔纸,用皮筋固定,阻止水分蒸发。在无蒸发条件下,理论上可以取得 0 到 10 KPa (取 $g=9.81 \text{ N}/\text{kg}$) 的吸力范围。土柱试验进行 39 d,在此期间不断往浅口盘加水,保证自由水位不变。试验过后,用自制的扁口刀沿玻璃胶一节一节地切割土柱,测量每节有机玻璃管中土的含水量,作为该节中部高度对应的含水量。

土壤孔隙度通过土壤密度和容重计算得出,总孔隙度(P_1) = $(1 - \text{容重}/\text{密度}) \times 100\%$ (2)

式中,土壤密度采用密度值 $2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$

土壤最大持水量采用环刀取土,带回实验室后在环刀下垫一张滤纸,用皮筋固定在环刀上(防止土粒散出)之后将环刀放在一个盘子里,给盘中倒水,没过滤纸即可,隔天将环刀中的土壤取出,放在已知重量的铝盒中称重,得到最大持水量时质量 W_1 ,之后将铝盒(注意盒盖打开)放在烘箱中 105℃ 烘干 10 小时以上,至恒重,称重即可,得到干土质量 W_2 。

最大持水量 = $(W_1 - W_2) \times 100 / W_2$ (3)

土壤团聚体采用湿筛法测定^[16]。湿筛法采用 Yoder 法,分别通过 5、2、1、0.5 mm 和 0.25 mm 共 5 个筛级。为了比较不同粒径团聚体的稳定性,平均重量直径采用式(4)标准化。标准化平均重量直径(NMWD)是衡量团聚体稳定性的一个指标,其值越低,表示团聚体稳定性越小。本文所需计算公式如下:

$\text{NMWD} = \text{MWD} / (r_{\max} - r_{\min})$ (4)

式中,NMWD 表示标准化平均重量直径, $r_{\max}$ 为最大初始筛子孔径, $r_{\min}$ 为最小筛子孔径。

其中团聚体稳定性采用平均重量直径(MWD)描述。

$$MWD = \sum_{i=1}^n \overline{x_i w_i} \quad (5)$$

式中 x_i 表示每一粒级的平均直径; w_i 表示每一粒级所占的重量比例; n 表示分级。

将部分三叶草植株样品研磨至粉末状, $H_2SO_4-H_2O_2$ 混合消化样品, 采用凯氏定氮法测定植株全氮含量, 钒钼黄比色法测定全磷含量, 火焰光度法测定全钾含量^[16]。根系用 EPSON PERFECTION V750 PRO (Epson Inc., Beijing, China) 扫描, Win-RHIZO™ (Régent Instrument Inc., Québec, Canada) 软件处理, 获得根直径、根长、根表面积和根尖数指标。

土壤全氮采用半微量开氏法测定; 有机质采用重铬酸钾外加热法测定; 速效磷采用钼锑抗比色法测定; 速效钾采用 pH 7.0 醋酸铵浸提-火焰光度法测定; pH 值采用电位法 (土:水 1:2.5) 测定; 电导率采用电极法测定; 酸性磷酸酶活性采用改进 Tabatabai 和 Brimmer 方法测定; 蔗糖酶活性采用水杨酸比色法测定; 脲酶活性采用改进的 Hoffmann 和 Teiche 比色法测定; 硝酸还原酶活性采用亚硝酸还原比色法测定; 固氮酶活性采用乙炔还原法测定^[16]; 细菌、真菌和放线菌总数采用稀释平板计数法^[17]。

1.6 数据分析

数据采用 Microsoft Excel 计算并作图; 利用 SAS 8.0 进行方差分析 (ANOVA), 差异显著性水平 ($P < 0.05$) 通过最小显著差异法 (LSD) 检验。

2 结果与分析

2.1 不同基质对三叶草生长的影响

由表 2 可知, 粘土与沙土或表土混合显著促进三叶草生长状况。粘土与表土混合, 三叶草生物量、氮、磷、钾吸收量、根直径、根长、根表面积和根尖数比粘土显著提高 194%—344%、187%—326%、203%—325%、211%—328%、32.2%—82.7%、25.3%—51.8%、7.5%—45.9%、26.2%—47.6%; 其中, 粘土和表土 1:2 质量比达最高值。同样地, 粘土与沙土混合比沙土平均显著提高 2.51、2.81、2.42、2.44、0.63、0.31、0.38 和 0.32 倍。总体上看, 粘土添加沙土效果低于表土改良效应, 粘土和表土 1:2 配比效果最优化, 与表土间无差异。其中, 根系表面积表征养分吸收能力, 图 3 看出, 生物量、养分吸收量与根系比表面积显著正相关, 系数达 0.80 以上。因此, 三叶草通过吸收充足营养, 提高光合效率促进同化产物合成。

表 2 不同配比对三叶草生长指标的影响

Table 2 Effect of different substrates composition on the clover growth conditions

处理 Treatments	生物量 Biomass /(g/盆)	吸氮量 N uptake /(mg/盆)	吸磷量 P uptake /(mg/盆)	吸钾量 K uptake /(mg/盆)	根直径 Root diameter /mm	根长 Root length /(mm/cm ³)	根表面积 Root surfacearea /(mm ² /cm ³)	根尖数 Tips numbers /个
粘土 Clay	9.0±0.5e	321±13e	7.8±0.5e	20.3±1.4e	3.23±0.22e	37.1±3.9e	159±11d	42±3f
粘土:表土 1:1 Clay: Topsoil 1:1	26.5±1.6b	924±35b	23.6±3.1b	61.5±6.2b	4.27±0.35c	46.5±2.8b	171±15c	53±6c
粘土:表土 1:1 Clay: Topsoil 1:2	40.0±3.8a	1367±64a	33.2±2.9a	86.8±7.5a	5.90±0.18a	56.3±4.6a	232±21a	62±7a
粘土:表土 1:1 Clay: Topsoil 1:3	27.0±2.2b	921±39b	24.2±2.2b	63.1±4.8b	5.07±0.31b	47.5±3.7b	181±13b	55±4b
粘土:沙土 1:1 Clay: Sandy soil 1:1	20.3±1.9c	704±32c	17.9±1.8cd	47.5±3.9c	4.47±0.37c	42.5±5.5c	161±14d	48±4d
粘土:沙土 1:1 Clay: Sandy soil 1:2	21.6±2.5c	757±48c	19.9±2.3c	51.9±4.1c	3.63±0.19d	38.5±2.9d	170±17c	44±3e
粘土:沙土 1:1 Clay: Sandy soil 1:3	14.9±1.6d	520±33d	14.6±1.3d	37.9±3.2d	3.03±0.22e	34.8±3.2e	147±9e	46±5e
沙土 Sandy soil	5.4±0.3f	190±15f	5.1±0.3e	13.3±2.6e	2.27±0.15f	29.6±4.4f	116±8f	35±2g
表土 Topsoil	41.7±4.2a	1388±65a	32.9±3.1a	87.2±6.4a	6.01±0.21a	55.7±3.9a	229±18a	61±8a

表中数值为 3 个重复的平均值; 不同小写字母表示同一指标在不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) (垂直方向比较), 下同

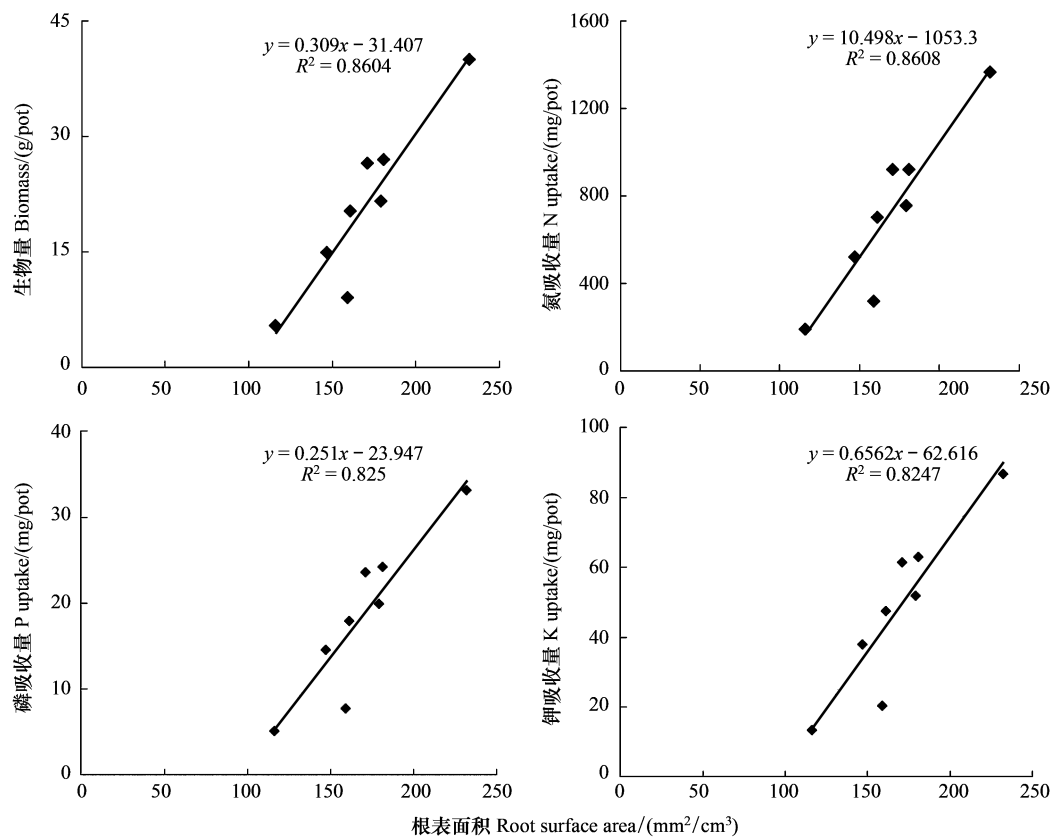


图3 三叶草生物量、养分吸收量与其根比表面积相关关系

Fig.3 The relationship between biomass, nutrient (N, P and K) facilitation and root surface area of clover

2.2 不同基质物理性状

由表3可知,添加表土或沙土改变土壤物理性状,与粘土相比,粘土与表土和粘土与沙土 1:1、1:2、1:3 配 比容重显著下降7.4%、16.1%、20.1%、10.8%、19.5%、21.5%;饱和入渗率显著上升26.9%、45.7%、51.6%、

表3 不同配比对土壤物理性状的影响

Table 3 Effect of different substrates composition on soil physical properties

处理 Treatment	容重 Bulk density /(g/cm ³)	饱和入渗率 Infiltration rate /(mm/h)	孔隙度 Porosity/%	最大持水量 Maximum moisture holding capacity/%	标准化平均重量直径 Normalization mean weight diameter/mm		
					1—2	2—3	3—5
粘土 Clay	1.49±0.05a	0.3325±0.02f	4.8±0.5g	54.7±5.4a	0.11±0.01e	0.16±0.01h	0.21±0.01h
粘土:表土 1:1 Clay : Topsoil 1:1	1.38±0.04b	0.4218±0.04e	12.9±1.1f	41.3±4.7b	0.18±0.02d	0.23±0.02g	0.28±0.02g
粘土:表土 1:1 Clay : Topsoil 1:2	1.25±0.06d	0.4846±0.05d	23.4±2.8d	37.4±3.5c	0.22±0.02b	0.27±0.02f	0.32±0.02f
粘土:表土 1:1 Clay : Topsoil 1:3	1.19±0.04e	0.5042±0.05d	21.9±2.6d	31.7±2.9d	0.25±0.03a	0.30±0.03e	0.35±0.03f
粘土:沙土 1:1 Clay : Sandy soil 1:1	1.33±0.05c	0.5525±0.06c	35.4±3.1c	25.1±3.1e	0.21±0.03b	0.34±0.03d	0.41±0.03d
粘土:沙土 1:1 Clay : Sandy soil 1:2	1.20±0.03e	0.6127±0.04b	39.8±4.2b	20.2±1.9f	0.25±0.03a	0.37±0.03c	0.45±0.03c
粘土:沙土 1:1 Clay : Sandy soil 1:3	1.17±0.05f	0.6528±0.06b	42.3±2.9b	15.4±1.4g	0.22±0.04b	0.44±0.04b	0.52±0.04b
沙土 Sandy soil	1.12±0.04g	0.8548±0.05a	50.8±4.7a	8.7±0.9h	0.19±0.04c	0.58±0.04a	0.79±0.04a
表土 Topsoil	1.26±0.03d	0.4019±0.03e	18.4±3.9e	20.4±1.9f	0.23±0.02b	0.34±0.02d	0.38±0.02e

66.2%、84.3%、96.3%,同时,孔隙度显著增加,与入渗率变化趋势一致;最大持水量则显著下降了 24.5%、31.6%、42.0%、54.1%、63.1%、71.8%;团聚体稳定性随粒级增大而显著降低($P<0.05$)。同一粒级下,粘土与沙土 1:3 配比团聚体稳定性显著高于其它处理($P<0.05$),粘土团聚体稳定性最低($P<0.05$)。

2.3 不同基质化学性状

由表 4 可知,与粘土或沙土相比,粘土混合基质显著改善土壤化学性状。粘土与表土 1:2 混合基质全氮、有机质、速效磷、速效钾及电导率均最高,分别为粘土的 1.34、1.15、1.79、2.05、1.06 倍和 1.87 倍;优于 1:1 和 1:3 配比效果。粘土与沙土混合基质全氮、有机质、速效磷、速效钾含量比沙土高 85.1%—90.7%、45.7%—68.6%、81.5%—102.5%和 95.3%—133.3%。粘土和表土 1:2 配比效果与表土相似,原因是表土促进粘土营养释放。

表 4 不同配比对土壤化学性状的影响

Table 4 Effect of different substrates composition on soil chemical properties

处理 Treatments	全氮 Total N /(g/kg)	有机质 Organic matter /(g/kg)	速效磷 Olsen P /(mg/kg)	速效钾 Available K /(mg/kg)	pH	电导率 Electric conductivity /($\mu\text{s}/\text{cm}$)
粘土 Clay	0.90±0.07d	13.8±1.5d	3.54±0.33f	29.6±2.2g	7.31±0.42e	118±12e
粘土:表土 1:1 Clay: Topsoil 1:1	1.02±0.11c	17.5±1.3b	4.28±0.25c	36.6±3.1f	7.51±0.37d	161±15c
粘土:表土 1:1 Clay: Topsoil 1:2	1.21±0.17a	15.9±1.2c	6.32±0.36a	60.7±5.4a	7.73±0.45b	221±16a
粘土:表土 1:1 Clay: Topsoil 1:3	1.09±0.12b	18.4±2.1a	4.69±0.41b	53.9±4.9b	7.65±0.29c	182±21b
粘土:沙土 1:1 Clay: Sandy soil 1:1	1.02±0.10c	11.8±1.1e	4.05±0.29d	50.4±4.2c	7.63±0.34c	160±14c
粘土:沙土 1:1 Clay: Sandy soil 1:2	1.03±0.15c	10.9±0.9f	3.63±0.23f	46.6±3.8d	7.65±0.41c	149±10d
粘土:沙土 1:1 Clay: Sandy soil 1:3	1.00±0.08c	10.2±0.5g	3.82±0.21e	42.2±3.7e	7.64±0.46c	147±13d
沙土 Sandy soil	0.54±0.05e	0.7±0.1h	2.00±0.17g	21.6±2.9h	7.91±0.47a	160±15c
表土 Topsoil	1.20±0.09a	18.3±0.8a	6.29±0.31a	60.2±5.1a	7.90±0.38a	219±17a

2.4 不同基质生物学性状

生物活性是表征养分转化能力重要指标。由表 5 可知,添加表土或沙土显著提高酶活性并增加微生物数量。粘土与表土混合基质磷酸酶、脲酶、蔗糖酶、硝酸还原酶和固氮酶活性比粘土提高 63.8%—153.8%、35.6%—113.3%、90%—460%、30.0%—93.1%和 133%—555%,细菌、真菌和放线菌数量增加 2 倍以上;与沙土相比,粘土与沙土混合基质磷酸酶、脲酶、蔗糖酶、硝酸还原酶、固氮酶活性及细菌、真菌、放线菌数量显著升高 45.4%、172%、159%、62.8%、193%、119%、93.6%和 83%,粘土和表土 1:2 配比效果最佳。

2.5 有机质与生物指标的相关性

本研究采用线性模型表达土壤指标变化趋势。从图 3 看出,土壤磷酸酶活性与速效磷含量显著正相关,反映粘土与表土或沙土混合提高磷酸酶活性和速效磷含量;图 4 表明,微生物促进有机质分解,释放营养,改善土壤结构,粘土与表土或沙土混合增加基质真菌、细菌和放线菌数量。微生物种类和数量是土壤改良关键,加速粘土熟化,为植被恢复提供载体和物质基础。

2.6 生物量与指标的 Pearson 相关性分析

由表 6 可知,生物量与基质全氮、有机质、速效磷、速效钾、电导率、酸性磷酸酶、脲酶、蔗糖酶、硝酸还原酶和固氮酶活性及细菌、真菌、放线菌数量显著或极显著正相关。可见,理化性状、酶活性和微生物数量越高,生物量增加越显著,但对生物指标和养分响应程度不同。pH 值与有机质显著负相关,与电导率显著正相关;酸性磷酸酶活性与微生物群落显著正相关;脲酶、蔗糖酶、硝酸还原酶和固氮酶与 pH 值无显著相关性。全氮与脲酶、硝酸还原酶和固氮酶活性极显著正相关,与细菌、真菌和放线菌数量具有相同趋势;有机质与蔗糖酶活

性和放线菌数量无显著相关,与其它酶活性或微生物数量均显著或极显著相关;速效磷与酶活性和微生物数量显著正相关;速效钾和电导率具有类似趋势;但与 pH 值无明显相关性。结果表明,三叶草生长与基质理化性状、酶活性和微生物间存在协同效应。

表 5 不同配比对土壤生物指标的影响

Table 5 Effect of different substrates composition on soil biological properties								
处理 Treatments	磷酸酶 Phosphatase / $\mu\text{g Pi. mg protein}^{-1}$ $\pm \text{h}^{-1}$	脲酶 Urease / $\text{mg NH}_4^+-\text{N}$ $\text{g}^{-1} \text{d}$	蔗糖酶 Invertase / mg g^{-1} $\pm \text{d}$	硝酸还原酶 Nitrate reductase / $\mu\text{g NO}_2^--\text{N}$ $\text{g}^{-1} \pm \text{h}^{-1}$	固氮酶 Nitrogenase / $\mu\text{g C}_2\text{H}_4$ $\text{g}^{-1} \pm \text{h}^{-1}$	细菌 Fungi / $(\times 10^4)$ $\text{CFU/g } \pm$	真菌 Bacteria/ $(\times 10^4)$ $\text{CFU/g } \pm$	放线菌 Actinomycetes / $(\times 10^4)$ $\text{CFU/g } \pm$
粘土 Clay	80 $\pm$ 9f	0.90 $\pm$ 0.13f	10.1 $\pm$ 1.2f	8.3 $\pm$ 1.2f	0.09 $\pm$ 0.01f	110 $\pm$ 10h	0.31 $\pm$ 0.04f	24 $\pm$ 2f
粘土:表土 1:1 Clay : Topsoil 1:1	131 $\pm$ 15d	1.22 $\pm$ 0.17c	19.3 $\pm$ 1.3e	10.7 $\pm$ 1.4d	0.21 $\pm$ 0.04e	210 $\pm$ 30f	0.44 $\pm$ 0.05e	38 $\pm$ 4d
粘土:表土 1:1 Clay : Topsoil 1:2	203 $\pm$ 23a	1.92 $\pm$ 0.22a	56.2 $\pm$ 4.5a	15.9 $\pm$ 1.6a	0.59 $\pm$ 0.07a	590 $\pm$ 50a	1.07 $\pm$ 0.08a	89 $\pm$ 7a
粘土:表土 1:1 Clay : Topsoil 1:3	158 $\pm$ 14b	1.32 $\pm$ 0.15b	31.5 $\pm$ 2.8c	11.6 $\pm$ 1.1c	0.48 $\pm$ 0.05b	490 $\pm$ 60b	0.62 $\pm$ 0.05c	51 $\pm$ 3c
粘土:沙土 1:1 Clay : Sandy soil 1:1	124 $\pm$ 11d	1.11 $\pm$ 0.09d	36.6 $\pm$ 3.3b	11.6 $\pm$ 0.9c	0.31 $\pm$ 0.03c	400 $\pm$ 30c	0.70 $\pm$ 0.06b	59 $\pm$ 3b
粘土:沙土 1:1 Clay : Sandy soil 1:2	148 $\pm$ 9c	1.20 $\pm$ 0.13c	39.2 $\pm$ 3.9b	12.6 $\pm$ 1.5b	0.32 $\pm$ 0.03c	360 $\pm$ 40d	0.60 $\pm$ 0.04c	59 $\pm$ 5b
粘土:沙土 1:1 Clay : Sandy soil 1:3	112 $\pm$ 8e	1.04 $\pm$ 0.14e	24.7 $\pm$ 2.4d	9.0 $\pm$ 0.8e	0.25 $\pm$ 0.02d	290 $\pm$ 20e	0.50 $\pm$ 0.05d	52 $\pm$ 3c
沙土 Sandy soil	88 $\pm$ 10f	0.41 $\pm$ 0.6g	12.9 $\pm$ 1.2f	6.8 $\pm$ 0.7g	0.10 $\pm$ 0.01f	160 $\pm$ 20g	0.31 $\pm$ 0.03f	31 $\pm$ 2e
表土 Topsoil	199 $\pm$ 18a	1.91 $\pm$ 0.17a	55.9 $\pm$ 2.9a	15.8 $\pm$ 1.3a	0.60 $\pm$ 0.06a	600 $\pm$ 40a	1.06 $\pm$ 0.06a	88 $\pm$ 6a

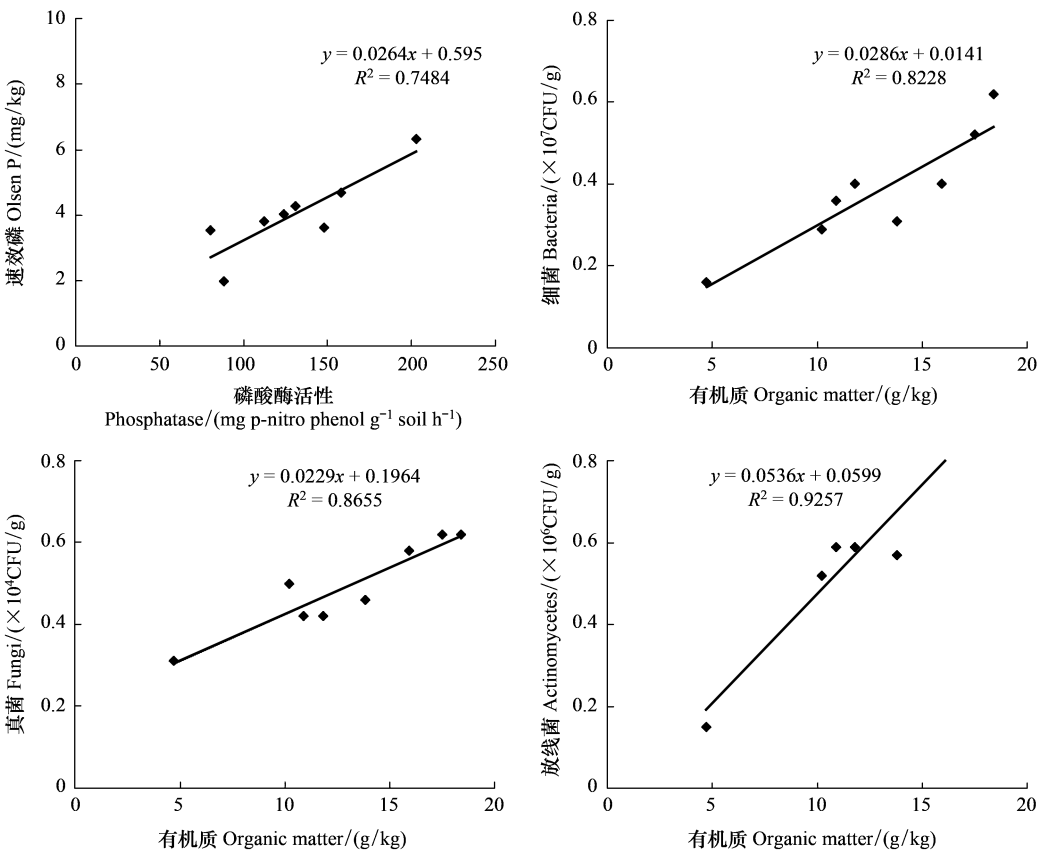


图 4 不同配比对土壤磷酸酶活性和微生物数量的影响

Fig.4 Soil acid phosphatase activity and microbe numbers as affected by different substrates composition

表 6 生物量与土壤各指标 Pearson 相关性分析 ($r, n=27$)

Table 6 The Pearson correlations analysis between clover productivity and different soil indicators ($r, n=27$)															
指标 Indicator	生物量 Biomass	全氮 Total N	有机质 Organic matter	速效磷 Olsen P	速效钾 Available K	pH	电导率 Electric conductivity	磷酸酶 Phosphatase	脲酶 Urease	蔗糖酶 Invertase	硝酸还原酶 Nitrate reductase	固氮酶 Nitrogenase	细菌 Bacteria	真菌 Fungi	放线菌 Actinomycetes
生物量 Biomass	1														
全氮 Total N	0.84 **	1													
有机质 Organic matter	0.71 **	0.84 **	1												
速效磷 Olsen P	0.93 **	0.90 **	0.78 **	1											
速效钾 Available K	0.86 **	0.88 **	0.62 **	0.86 **	1										
pH 值 pH value	0.06	-0.33	-0.58 **	-0.14	0.07	1									
电导率 Electric conductivity	0.80 **	0.46 *	0.28	0.71 **	0.67 **	0.53 **	1								
磷酸酶 Phosphatase	0.95 **	0.78 **	0.55 **	0.86 **	0.88 **	0.24	0.85 **	1							
脲酶 Urease	0.95 **	0.92 **	0.75 **	0.98 **	0.88 **	-0.11	0.70 **	0.91 **	1						
蔗糖酶 Invertase	0.82 **	0.73 **	0.36 *	0.77 **	0.90 **	0.28	0.74 **	0.90 **	0.84 **	1					
硝酸还原酶 Nitrate reductase	0.93 **	0.83 **	0.59 **	0.87 **	0.90 **	0.08	0.73 **	0.93 **	0.93 **	0.93 **	1				
固氮酶 Nitrogenase	0.89 **	0.78 **	0.54 **	0.86 **	0.94 **	0.25	0.84 **	0.95 **	0.88 **	0.90 **	0.89 **	1			
细菌 Bacteria	0.84 **	0.73 **	0.44 *	0.79 **	0.95 **	0.33	0.81 **	0.91 **	0.82 **	0.92 **	0.87 **	0.98 **	1		
真菌 Fungi	0.85 **	0.75 **	0.42 *	0.86 **	0.90 **	0.24	0.82 **	0.90 **	0.88 **	0.94 **	0.92 **	0.91 **	0.92 **	1	
放线菌 Actinomycetes	0.80 **	0.71 **	0.31	0.77 **	0.88 **	0.33	0.78 **	0.88 **	0.82 **	0.96 **	0.89 **	0.89 **	0.90 **	0.96 **	1

* 和 ** 分别表示相关性达到显著 ($P<0.05$) 和极显著水平 ($P<0.01$)

3 讨论

3.1 不同对比对三叶草生长和基质理化性状的影响

东部露天矿区气候干旱、降水集中导致侵蚀严重;同时,高强度露天开采,对土壤结构造成严重破坏^[18-20]。研究表明,粘土与沙土和表土不同配比均能改善土壤状况和显著促进三叶草生长,其中粘土与表土 1:2 配比,三叶草生物量、养分吸收显著高于其它处理,该配比下表土微生物和酶活性激发粘土养分转化,提高营养浓度的效率最高;根表面积、根长、根直径增大和根尖数增多也证实了这一点^[21],这与土壤物理结构改善有关。例如,贵州红粘土上覆盖 15 cm 和 30 cm 厚度粉煤灰土壤容重下降到原来的 87%和 80%,孔隙度增加 3.22%和 5.94%,含水量增加 25%^[22];黄淮海平原黑粘土地区,通过施用有机肥增加胶结粘粒和孔隙度抑制蒙脱石胀缩性,提高水稳性团聚体含量,增大热容和水分储蓄能力,调节养分供应,实现黑粘土改良^[22]。外源物通过降低粘粒含量,缓解土壤板结,加速有机质分解和养分转化,恢复微生物活动,促进粘土质量提升。土壤熟化是东部草原露天矿区粘土改良的关键,三叶草生物固氮为微生物提供氮源,参与微生物群落构

建^[13,20,23]。表土改善透气性,增加有效孔隙和提高导水率^[23]。土壤环境因子与植物生长相互制约,表明土壤对植物生长的作用,也说明植物对土壤恢复的指示效果。

3.2 不同对比对基质生物性状的影响

一般来讲,粘土微生物数量和种类少导致酶活性低,营养转化能力弱,添加物促进生物活性提高,原因是(1)不同添加物含有微生物种类和数量不同,很大程度上决定酶活性强弱;(2)粘土类型和分布具有明显地域特征。因此,添加物增加粘土生物学指标的复杂性。本研究与粘土相比,粘土和表土比粘土和沙土生物活性平均增加 13%—22%,说明表土比沙土效果更佳,粘土与表土 1:2 混合基质效果最好。同时,磷酸酶活性与速效磷、有机质与真菌、细菌和放线菌数量显著正相关,主要是微生物改善根际营养提高理化性状^[24-26],粘土和表土 1:2 混合酶活性和微生物数量最大,是表土中真菌、细菌和放线菌分泌物的协同作用^[27-28],与 Juge 和宋福强等结果基本一致。蔗糖酶参与碳循环,添加后活性升高有机质增加^[13,29];磷酸酶促进磷转化^[30],例如钱奎梅发现煤矸石、粉煤灰和污泥混合基质酶活性高于单一基质也是基于这一原因^[31]。粘土基质吸收更多水分,巨大比表面积为微生物提供栖息场所,因此,粘土与表土 1:2 配比是适宜东部草原矿区粘土改良的最佳模式。

3.3 室内模拟与实地研究的相似性

本研究采用室内培养试验,与研究区土壤构型、质地、有机质等有差异。土体构型对水、肥、气、热诸肥力和水盐运移有影响,良好的土体结构是肥力基础,质地是影响构型的主要因素。黑钙土和栗钙土是研究区主要土壤类型,降雨量少导致风化程度低,土层排列相对简单,属于上虚下实,上轻下粘的蒙金型,黄土和粘土透水性差,干燥时坚硬,浸湿后不易干燥,强度急剧下降,对理化性状影响巨大,虽然保水性强,但透气性弱,土性冷,施肥后容易烧苗^[32-33]。较大颗粒沙土和表土调控粘土物理组成,为排土场改良提供参考。在野外条件下,降雨增加土壤湿度、激发土壤生物活性,影响温度进而改变基质性状。

3.4 粘土功能提升的机理

粘土最大特点是通气透水性差,有效养分、微生物数量少,生物活性低,模拟试验表明粘土掺入沙土和表土提高粘土物理、化学和生物学性状^[8],原因是粘土胶体数量多,比表面积大,吸附能力强,粒间孔隙小,通气透水性差,沙土增加粒间孔隙度^[34]。混合基质 2—0.25 mm 团聚体含量增加,容重降低,养分有效性提高,土壤水分与组分特别是次生物发生反应,降低水分蒸发,形成合理结构,协调土壤水、肥、气、热的关系^[35]。因此,粘土肥力提高对露天矿区生态恢复具有重要意义。

4 结论

本文通过对我国东部露天矿区排土场改良的模拟研究,表明粘土与表土 1:2 配比效果最优,三叶草生物量、氮、磷和钾吸收量,根形态参数和根尖数最大;基质理化、酶活性及微生物数量最佳;指标间具有显著正相关性,证实添加表土和沙土对粘土具有积极效果。

参考文献(References):

- [1] 武承厚. 2008 年煤炭市场发展趋势分析. 中国煤炭, 2008, 34(1): 14-17.
- [2] 白中科, 赵景逵, 李晋川, 王文英, 卢崇恩, 丁新启, 柴书杰, 陈建军. 大型露天煤矿生态系统受损研究——以平朔露天煤矿为例. 生态学报, 1999, 19(6): 870-875.
- [3] 张建勇, 王立春, 高士友, 冯万国, 才庆祥. 谈我国露天煤矿复垦与可持续发展. 露天采煤技术, 1996, (S1): 19-22.
- [4] 李全生. 东部草原区煤电基地开发生态修复技术研究. 生态学报, 2016, 22(36): 7049-7053.
- [5] 常英, 包俊江. 黑岱沟煤矿排土场土壤微生物分布特征研究. 内蒙古工业大学学报: 自然科学版, 2012, 31(2): 27-33.
- [6] 朱琳, 裴宗平, 卢中华, 周江. 不同基质对比对边坡修复植物生长的影响研究. 中国农学通报, 2012, 28(19): 260-265.
- [7] 侯建伟, 索全义, 梁恒, 刘长涛. 有机物料对沙蒿生物炭改良沙土中有效养分的增效作用. 土壤, 2016, 48(3): 463-467.
- [8] 岳殷萍, 张伟华. 沙土掺黏土后土壤保水保肥性研究. 湖北农业科学, 2016, 55(21): 5529-5531, 5558-5558.
- [9] 岳辉, 毕银丽, Zhakypbek Y, 蒋明明, 高斐. 接种菌根对神东矿区采煤沉陷地的生态修复效应. 科技导报, 2012, 30(36): 56-60.

- [10] Peoples M B, Herridge D F, Ladha J K. Biological nitrogen fixation: an efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production. *Plant and Soil*, 1995, 174(1/2): 3-28.
- [11] Mnasri B, Tajini F, Trabelsi M, Aouani M E, Mhamdi R. *Rhizobium gallicum* as an efficient symbiont for bean cultivation. *Agronomy for Sustainable Development*, 2007, 27(4): 331-336.
- [12] Carof M, De Tourdonnet S, Saulas P, Le Floch D, Le Floch J. Undersowing wheat with different living mulches in a no-till system. I. Yield analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 2007, 27(4): 347-356.
- [13] 李建华, 郜春花, 卢朝东, 张强, 靳东升, 范继香. 菌剂与肥料配施对矿区复垦土壤白三叶草生长的影响. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 280-284.
- [14] 李卫东, 唐登银, 王庆云, 杨补勤. 黑粘土的水分物理特性及其改良对策. *中国农业科学*, 1997, 30(6): 30-35.
- [15] 马德海, 张新民, 吴婕, 王军德. 粘土夹层盐碱地土壤竖孔排盐改良技术试验研究. *灌溉排水学报*, 2007, 26(5): 51-54.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] 杨恋, 杨朝辉, 曾光明, 肖勇, 刘有胜, 骆滨, 石文军. 好氧堆肥高温期的嗜热真菌和嗜热放线菌群落结构. *环境科学学报*, 2008, 28(12): 2514-2521.
- [18] Wright S F, Upadhyaya A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil*, 1998, 198(1): 97-107.
- [19] Janos D P, Garamszegi S, Beltran B. Glomalin extraction and measurement. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(3): 728-739.
- [20] 胡宜刚, 张鹏, 赵洋, 黄磊, 虎瑞. 植被配置对黑岱沟露天煤矿区土壤养分恢复的影响. *草业科学*, 2015, 32(10): 1561-1568.
- [21] 王进鑫, 王迪海, 刘广全. 刺槐和侧柏人工林有效根系密度分布规律研究. *西北植物学报*, 2004, 24(12): 2208-2214.
- [22] 刘丽霞, 辛克民, 张德美, 罗秀全, 龙波. 粉煤灰的理化性质及其对粘土影响研究初报. *贵州科学*, 1998, 16(1): 62-68.
- [23] 陈永亮, 陈保东, 刘蕾, 胡亚军, 徐天乐, 张莘. 丛枝菌根真菌在土壤氮素循环中的作用. *生态学报*, 2014, 34(17): 4807-4815.
- [24] 于森, 李少朋, 毕银丽, 邓穆彪, 裘浪, 洪天才. 西部矿区接菌对风化煤与黄土配比的土壤改良效应. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(2): 130-135.
- [25] 王瑾, 毕银丽, 张延旭, 洪天才, 裘浪, 陈书琳. 接种丛枝菌根对矿区扰动土壤微生物群落及酶活性的影响. *南方农业学报*, 2014, 45(8): 1417-1423.
- [26] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 北京农业出版社, 1986: 274-310.
- [27] Juge C, Prévost D, Bertrand A, Bipfubusa M, Chalifour F P. Growth and biochemical responses of soybean to double and triple microbial associations with *Bradyrhizobium*, *Azospirillum* and arbuscular mycorrhizae. *Applied Soil Ecology*, 2012, 61: 147-157.
- [28] 宋福强, 程姣, 常伟, 王倡宪, 孔祥仕, 王健. 田间施加 AM 菌剂对大豆生长效应的影响. *中国农学通报*, 2013, 29(6): 69-74.
- [29] 解媛媛, 谷洁, 高华, 张社奇, 夏雪, 刘磊, 郭星亮. 微生物菌剂酶制剂化肥不同配比对秸秆还田后土壤酶活性的影响. *水土保持研究*, 2010, 17(2): 233-238.
- [30] 孙瑞莲, 赵秉强, 朱鲁生, 徐晶, 张夫道. 长期定位施肥田土壤酶活性的动态变化特征. *生态环境*, 2008, 17(5): 2059-2063.
- [31] 钱奎梅, 王丽萍, 李江. 矿区复垦土壤的微生物活性变化. *生态与农村环境学报*, 2011, 27(6): 59-63.
- [32] 李学敏, 翟玉柱, 李雅静, 刘全凤, 王振明. 土体构型与土壤肥力关系的研究. *土壤通报*, 2005, 36(6): 975-977.
- [33] 甄庆, 摄晓燕, 张应龙, 韩凤朋, 张兴昌. 晋陕蒙能源区不同构型土体水分入渗特性模拟. *农业机械学报*, 2015, 46(8): 90-96.
- [34] 孙向阳, 陈金林, 崔晓阳. 土壤学. 北京: 中国林业出版社, 2005.
- [35] 曹丽花, 赵世伟, 赵勇钢, 梁向锋, 杨永辉, 刘合满. 土壤结构改良剂对风沙土水稳性团聚体改良效果及机理的研究. *水土保持学报*, 2007, 21(2): 65-68.