西部矿区接菌对风化煤与黄土配比的土壤改良效应

于 森^{1,2}, 李少朋^{1,2}, 毕银丽^{1,2}, 邓穆彪^{1,2}, 裘 浪^{1,2}, 洪天才^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083;

2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对西部矿区土壤贫瘠、有效养分缺乏和作物难以生长的现状, 采用盆栽试验方法, 风化煤与黄土按不同配比混合为供试基质, 玉米为供试植物, 研究接种丛枝菌根真菌对玉米生长的影响及其对不同混合基质的改良效应, 寻求风化煤与黄土最佳配比。结果表明: 接种丛枝菌根真菌促进了玉米的生长和对矿质元素的吸收, 在风化煤与黄土质量比(1:1)时菌根生态效应达到最大, 玉米干质量、叶色值、地上部分氮磷钾累积量分别达到 4.61 g·株⁻¹, 41.17, 53.01 mg·株⁻¹, 7.15 mg·株⁻¹, 79.42 mg·株⁻¹; 风化煤与黄土(1:1)处理菌丝密度达到 4.91 m·g⁻¹, 且玉米根系侵染率达到最大。随着风化煤比例的增加, 根际土壤中球囊霉素相关蛋白和酸性磷酸酶活性逐渐递增。丛枝菌根与风化煤的协同作用促进了作物的生长, 改善了根际土壤微环境, 实现了对沟壑区土壤的改良和培肥。

关键词: 丛枝菌根真菌; 风化煤; 黄土; 玉米; 改良效应

中图分类号: S154.3 **文献标志码:** A

Soil remediation after inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi on the ratio of weathered coal and loess in the mining area of western China

YU Miao^{1,2}, LI Shao-peng^{1,2}, BI Yin-li^{1,2}, DENG Mu-biao^{1,2}, QIU Lang^{1,2}, HONG Tian-cai^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Resource and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the characteristics of poor soil, lack of effective nutrient and difficulty in crop growth in western mining area of China, a pot experiment method was carried out in this study to have weathered coal and loess mixed in different proportions as the trial matrix and employ maize as the test. The effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on maize growth and the improvement of different mixed matrix were investigated to find out the best ratio between weathered coal and loess. The results showed that inoculation with AMF promoted the growth of maize and the absorption of mineral elements. Mycorrhizal ecological effect became maximized when the weathered coal and loess mass ratio reached 1:1. At the same time, the above ground dry weight and leaf color values of maize were 4.61 g, 41.17, respectively, and nitrogen, phosphorus, and potassium accumulations were 53.01 mg, 7.15 mg, 79.42 mg per plant respectively. When the weathered coal and loess mass ratio was 1:1, the density of hyphae was 4.91 m·g⁻¹, and the mycorrhizal root infection rate of maize reached maximum. With the increase of weathering coal ratio, the glomalin and the acid phosphatase (ACP) in maize rhizosphere soil were gradually increased as well. In conclusion, the synergy of AMF and weathered coal promoted the growth of the crops, improved the rhizosphere soil microenvironment, and implemented the enhancement of soil fertility in the gully region.

Keywords: arbuscular mycorrhizal fungi; weathered coal; loess; maize; soil remediation

西部矿区大多位于干旱半干旱地区, 半干旱黄土沟壑区是黄土高原水土流失比较严重的地区, 沟壑区植被覆盖率低, 土壤质地疏松, 土壤侵蚀作用十

分强烈^[1]。沟壑区土壤贫瘠, 基础肥力低, 供植物生长的有效养分缺乏^[2]。采煤扰动加剧了土壤中水分和养分的流失, 生态环境遭到破坏, 生物多样性降

收稿日期: 2015-04-03

基金项目: 863 计划资助项目(2013AA102904)

作者简介: 于 森(1991—), 女, 内蒙古赤峰人, 硕士生, 研究方向为土地复垦。E-mail: yumiao1009@163.com。

通信作者: 毕银丽(1971—), 女, 陕西米脂人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土地复垦及生态重建技术研究。E-mail: byl@cumt.edu.cn。

低,生态系统的稳定性差,土壤退化较为严重^[3]。黄土沟壑区土地质量的降低是陕北地区农业发展的限制性因子,也是沟壑区生态环境保护的瓶颈所在。因此,必须通过一定措施来改良退化土壤,提高土地生产力。风化煤是指暴露于地表或位于地表浅层的煤,俗称露头煤^[4]。风化煤作为煤矿生产的废煤,广泛存在于煤矿区,由于受长期风化作用的影响,风化煤含氧量高,发热量低^[5]。但风化煤中含有丰富的活性物质腐殖酸,腐殖酸具有的多种活性基团赋予了腐殖酸的多种功能,广泛应用于土壤改良剂、植物生长刺激剂和肥效增进剂领域^[6]。大量的研究表明,施用风化煤可以改善土壤团聚体的质量、水稳性团聚体和阳离子交换量^[7]。风化煤和微生物配合使用加速了土壤物质的生物学循环,且提高土壤生物活性,有利于土壤熟化培肥^[8]。风化煤与草炭的配合使用改善了盐碱土的养分供应状况,提高根系活力和对养分的吸收,提高作物的产量^[9]。

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)是一种自然界中普遍存在的微生物,它能够与80%以上的陆生植物形成共生体^[10]。大量研究表明,AMF能促进植物对矿质营养的吸收,改善植物的水分状况,提高植物的抗逆性,增加植物的生物量^[11-12]。AMF分泌的球囊霉素相关蛋白是土壤的重要碳源,同时增加了土壤团聚体的稳定性,对土壤具有改良效应。由于风化煤燃烧热量较低,对其研究主要集中在腐植酸提取等工艺上,但其运输和工业生产过程中成本较高,燃烧和加工过程往往会造成环境污染。基于此,本研究将未做任何处理的风化煤和陕北沟壑区贫瘠黄土混合使用,通过接种丛枝菌根真菌,研究接种丛枝菌根真菌对玉米生长的影响及其对不同混合基质的改良效应,寻找风化煤与黄土最佳配比,从而为菌根真菌在陕北沟壑区的推广应用提供参考,以风化煤为改良剂,为后期丛枝菌根改良菌剂的生产提供理论参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试土壤为陕北沟壑区黄土,其基本性状为pH值7.72,最大持水量40%,有机质 $4.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $12.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $59.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。风化煤于2014年3月采自陕西省神木县李家畔镇大柳塔矿区,风干,其基本性状为pH值6.25,最大持水量64%,有机质 $853.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷为痕量,速效钾 $19.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。供试作物为玉米,品种为品糯28,由中国农业科学院提供。供试菌种为北京市农林科学

院植物营养与资源研究所微生物室提供,经本实验室增殖培养的内生菌 *Glomus mosseae*(简称 G.m)。

1.2 试验方法

试验于2014年5月在中国矿业大学(北京)温室内进行,试验分别设风化煤与黄土按不同质量比混合,即黄土(L),风化煤与黄土质量比分别为(1:3), (1:2), (1:1), (2:1), (3:1), 风化煤(W),共7组,同时每一种比例分别设接菌和不接菌处理(+M和CK),每个处理设3个重复,并将不同基质放入规格为12 cm(高)×14 cm(盆口直径)×10 cm(盆底直径)的塑料盆里,接菌组每盆加50 g G.m 菌剂充分混合,不接菌处理中加入50 g 灭活菌剂以确保基质质量一致,最终使每盆总质量保持在1 100 g。播种玉米前,每盆浇水达到最大饱和持水量,水分平衡1 d后,播种。将玉米种子用10% H_2O_2 溶液浸泡10 min 做表面消毒,再用去离子水清洗10次,每个小盆播种玉米5粒,玉米出苗5 d后间苗,每盆保持2株,最终定植1株。利用称重法控制浇水量,浇水量为基质最大持水量的70%。风化煤与黄土质量比为(1:3), (1:2), (1:1), (2:1), (3:1)的基质最大持水量分别为46%, 47%, 49%, 54%, 56%。种植玉米后18 d向土壤加入 NH_4NO_3 , KH_2PO_4 , KNO_3 配置的营养液,使土壤中N、P、K质量分数分别为100、30、150 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.3 测定数据和和方法

1.3.1 玉米干质量、叶面积和叶色值测定 苗期玉米生长到70 d后,将植株地上部分和根系分开,用自来水清洗根系附着的泥土,在105℃烘箱内杀青30 min,然后放到80℃烘箱内直至烘干。分别称量每盆玉米的地上部分和根系的干质量。叶面积由YMJ-C活体叶面积测定仪(浙江托普生产)测定,选取植株同一侧倒二叶进行测量。玉米叶片的叶色值(SPAD值)由SPAD-502(日本生产)来测定,测量时均匀选取叶片上20~25个点,取平均得该叶片的叶色值。

1.3.2 玉米地上部分全氮、全磷、全钾 将烘干后的玉米地上部分用研磨机研磨至粉状,过0.2 mm筛,用 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 法消煮^[13]。利用凯氏定氮法测定玉米地上部分全氮含量,利用ICP测定玉米地上部分全磷和全钾含量。

1.3.3 侵染率和菌丝密度 菌根侵染率采用Phillips和Hayman法,采用网格交叉法测定菌丝密度^[14]。

1.3.4 球囊霉素相关土壤蛋白 球囊霉素是由球囊霉属AM真菌分泌产生的一类糖蛋白。然而由于

目前土壤中提取球囊霉素的方法为非专性的方法,尚不能得到高纯度的球囊霉素,基于此 Rillig 等称之为球囊霉素相关土壤蛋白 (GRSP)^[15]。按照 Wright 及 Janos 的方法稍加修改,测定易提取球囊霉素相关土壤蛋白和总球囊霉素相关土壤蛋白^[16]。

1.3.5 土壤速效磷含量、速效钾含量和酸性磷酸酶活性 土壤速效磷含量采用钼锑抗比色法。土壤速效钾含量采用 NH_4OAC 浸提法^[13]。采用改进的 Tabatabai & Brimmer 法测定土壤酸性磷酸酶活性^[17]。

1.4 数据分析

本研究采用 SAS 统计软件对试验数据进行分析,采用 LSD 方法比较不同处理之间的差异显著性,显著水平设置为 5%。

2 结果与分析

2.1 接种丛枝菌根真菌对不同处理玉米生长的影响

接种丛枝菌根真菌能够显著促进玉米干质量的积累,其表现为接菌组高于不接菌组,且玉米叶片叶色值和叶面积表现出相同的规律(表 1 所示)。施加适量的风化煤,更有利于玉米的生长。不接菌组中,随着风化煤施加量的增加,玉米各项生长指标都呈增加趋势,当风化煤与黄土质量比为(1:2)时,玉米地上部分干质量、叶面积都达到最大,分别为(L)组的 1.5 倍、1.17 倍,当风化煤的比重继续增加时,玉米各项生长指标呈下降趋势。接菌组中玉米各项生长指标随风化煤施用量的增加而增大,当风化煤与黄土质量比为(1:1)时,玉米地上部分干质量、叶片叶色值最高,分别为(L)组的 1.29 倍、1.22 倍,煤土质量比(1:3)的 1.18 倍、1.17 倍。当基质中风化煤高出 50%时,玉米各项生长指标呈下降趋势。对于黄土来说,维持较高的持水量时易造成土壤粘结,土壤孔隙度下降,通透性变差,造成了土壤氧气含量降低,根系和土壤微生物呼吸减弱,根系生长受阻,从而影响整个植株的生长^[18]。

2.2 接种丛枝菌根真菌对不同处理玉米地上部分矿质元素影响

玉米地上部分氮磷钾的含量是表征其生长好坏的最直观指标,研究发现,接种 AMF 能够明显促进宿主植物对矿质养分的吸收和利用(表 2 所示)。在所有不接菌组处理中,玉米地上部分氮磷钾的含量呈先升后降趋势,当煤土质量比为(1:2)时,玉米地上部分的氮磷钾含量达到最大,且分别是纯黄土组的 1.45 倍、2.22 倍、1.53 倍,是煤土质量比(1:3)的 1.35 倍、1.98 倍、1.27 倍。煤土质量比大于(1:2)的各組与(1:2)玉米地上部分氮磷钾含量无明显变化。

在所有的接菌处理组中,在基质中风化煤含量低于 50%时,玉米地上部分氮、磷、钾的累积量均随风化煤比重的增加而增加,当煤土质量比为(1:1)时,达到最大。且氮磷钾含量为不接菌处理煤土质量比(1:1)的 2.83 倍、7.45 倍、2.16 倍。当接菌处理中风化煤用量高于 50%,各处理矿质元素的累积量都呈下降趋势。

表 1 接种丛枝菌根真菌对不同处理玉米生长的影响

Table 1 Effects of different treatments with AMF on the growth of maize

处理 Treatment		地上部分干质量/(g·株 ⁻¹) Aboveground dry weight/(g·plant ⁻¹)	叶色值 SPAD	叶面积指数/cm ² Leaf area
CK	L	1.22 ± 0.10f	24.47 ± 1.23g	23.10 ± 2.62e
+ M	L	3.56 ± 0.06d	33.77 ± 2.21d	31.61 ± 1.60c
CK	1:3	1.23 ± 0.07f	26.80 ± 2.08fg	24.16 ± 1.97de
+ M	1:3	3.91 ± 0.12cd	35.07 ± 0.67cd	33.60 ± 2.09c
CK	1:2	1.83 ± 0.32e	30.27 ± 1.82e	27.10 ± 2.62d
+ M	1:2	4.44 ± 0.68ab	38.83 ± 1.55ab	40.72 ± 0.68a
CK	1:1	1.50 ± 0.05ef	30.77 ± 1.37e	25.54 ± 2.56de
+ M	1:1	4.61 ± 0.23a	41.17 ± 0.85a	38.93 ± 1.78ab
CK	2:1	1.46 ± 0.25ef	28.77 ± 0.35ef	25.10 ± 2.09de
+ M	2:1	4.31 ± 0.29abc	37.50 ± 0.96b	37.92 ± 1.50ab
CK	3:1	1.49 ± 0.04ef	28.73 ± 1.04ef	24.93 ± 2.17de
+ M	3:1	4.29 ± 0.19abc	37.20 ± 1.15bc	37.35 ± 1.58b
CK	W	1.48 ± 0.07ef	27.50 ± 0.96f	24.36 ± 1.24de
+ M	W	4.07 ± 0.38bc	37.17 ± 1.38bc	36.98 ± 1.85b

注:表中数值为 3 个重复的平均值;± 表示标准误差;不同小写字母代表 5% 水平上差异显著(垂直方向);下同。

Notes: The values denoted that the averages of three replicates; ± denoted that the STDEV values; lowercase letters denoted that the significant differences among different treatments by LSD at 5% level (vertical comparison); the same below.

2.3 不同基质中丛枝菌根真菌与玉米共生关系及其对根际球囊霉素影响

菌根侵染率是反映植物根系被菌根真菌感染程度的指标,其反映的是菌根真菌与植物根系之间的亲和程度^[19],研究发现,本研究所选的 AMF 和玉米保持较好的共生关系,接菌后各种配比的菌根侵染率均达到 90% 以上,接菌处理中风化煤与黄土质量比为(1:1)时,菌根完全侵染,且菌丝密度最大为 $4.91 \text{ m} \cdot \text{g}^{-1}$,显著高于其他处理。在风化煤与黄土质量比为(1:1)时,基质与菌根的共生关系最优,适合菌根的生长,有利于菌丝的伸长与繁殖,从而促进植物根系对营养与水分的吸收和利用,促进植物生长。球囊霉素相关蛋白是从丛枝菌根真菌特有的产

物,由表3可见,接菌处理组总球囊霉素和易提取球囊霉素均高于对照组,且随着风化煤比重的增大而呈增加趋势。

表2 接种从枝菌根真菌对不同处理玉米地上部分矿质元素的影响

Table 2 Effects of different treatments with AMF on the aboveground mineral elements of maize

处理 Treatment	氮元素 /(mg·株 ⁻¹) TN/(mg·plant ⁻¹)	磷元素 /(mg·株 ⁻¹) TP/(mg·plant ⁻¹)	钾元素 /(mg·株 ⁻¹) TK/(mg·plant ⁻¹)
CK L	13.67 ± 0.27f	0.58 ± 0.01e	26.22 ± 1.86f
+ M L	42.55 ± 2.08d	5.18 ± 0.53c	57.41 ± 2.60c
CK 1:3	14.67 ± 0.91f	0.65 ± 0.14e	31.66 ± 2.04ef
+ M 1:3	44.02 ± 3.63cd	5.44 ± 0.68c	63.11 ± 3.53c
CK 1:2	19.86 ± 1.04e	1.29 ± 0.14d	40.12 ± 2.93d
+ M 1:2	49.53 ± 3.53ab	6.65 ± 0.56ab	74.05 ± 8.82ab
CK 1:1	18.71 ± 1.15e	0.96 ± 0.05de	36.79 ± 2.49de
+ M 1:1	53.01 ± 2.69a	7.15 ± 0.82a	79.42 ± 9.78a
CK 2:1	16.67 ± 2.00ef	0.83 ± 0.01de	35.17 ± 3.79de
+ M 2:1	48.45 ± 5.00b	6.41 ± 0.5b	72.28 ± 1.63ab
CK 3:1	17.16 ± 1.59ef	0.73 ± 0.07de	35.04 ± 2.35de
+ M 3:1	47.36 ± 1.86bc	6.30 ± 0.15b	72.21 ± 7.71ab
CK W	16.35 ± 1.28ef	0.73 ± 0.12de	34.79 ± 1.40de
+ M W	47.56 ± 1.37bc	6.10 ± 0.34b	71.32 ± 6.66bp

2.4 接种从枝菌根真菌对不同处理玉米根际土壤速效养分和酶活性的影响

如表4所示,接菌处理组玉米根际土壤中速效磷、速效钾含量均低于对照组,且接菌处理根际土壤中速效磷和速效钾呈先降低后增加的趋势,当煤土

质量比为(1:1)时,玉米根际土壤速效磷、速效钾含量最低。这可能是由于菌根菌丝体促进玉米根系对有效磷、钾的吸收和利用,土壤中的速效磷、速效钾更多地转移到植株体内,从而造成土壤中速效磷、速效钾含量降低。这与玉米地上部分矿质元素的结果相吻合,同时也说明干质量最大,生长最好的玉米吸收的养分最多。土壤酶是土壤肥力形成的一个重要因素,土壤酸性磷酸酶可以促进有机磷向无机磷的转化,其含量的多少可以反映出土壤肥力状况,特别是土壤磷肥。研究发现,接菌有利于提高土壤酸性磷酸酶活性,且表现为接菌组高于未接菌组。无论接菌与否,土壤中酸性磷酸酶活性都呈先增加后降低趋势,在风化煤和黄土质量比为(2:1)时,接菌处理玉米根际土壤中酸性磷酸酶活性达到最大,和其它处理相比表现出显著的差异性。

3 讨论

西部矿区气候干旱,降水集中,植被稀疏,水土流失、土壤侵蚀较为严重。由于矿区高强度的地下开采,导致采空区地表大面积沉陷,对矿区土地资源及生态环境造成了严重的破坏^[20]。因此,必须通过一定的技术手段缓解因自然条件及采煤扰动对植物生长及土壤退化的影响。研究发现,风化煤与黄土不同配比基质上接种从枝菌根明显促进了玉米的生长,接菌组风化煤与黄土质量比为(1:1)时,玉米地上部分干质量、叶片叶色值最高,分别达到4.61 g, 41.17,且叶面积也较高为38.93 cm²。这可能是由于

表3 接种从枝菌根真菌对玉米根际球囊霉素相关蛋白的影响

Table 3 Effects of AMF inoculation on glomalin in maize rhizosphere soil

处理 Treatment	侵染率 Infection rate/%	菌丝密度 Hyphal density /(m·g ⁻¹)	总球囊霉素 TG /(mg·g ⁻¹)	易提取 球囊霉素 EEG/(mg·g ⁻¹)
CK L	17.78 ± 1.92e	0.47 ± 0.04i	1.15 ± 0.06j	0.23 ± 0.01j
+ M L	91.11 ± 3.85b	2.12 ± 0.28f	1.34 ± 0.04i	0.24 ± 0.01j
CK 1:3	18.89 ± 1.92de	0.58 ± 0.06hi	1.77 ± 0.13h	0.32 ± 0.03i
+ M 1:3	92.22 ± 6.94b	3.13 ± 0.27e	1.95 ± 0.04fg	0.34 ± 0.02hi
CK 1:2	26.67 ± 3.33c	0.96 ± 0.06g	1.83 ± 0.02gh	0.35 ± 0.03hi
+ M 1:2	94.44 ± 3.85ab	3.99 ± 0.11b	2.06 ± 0.12ef	0.38 ± 0.02gh
CK 1:1	24.44 ± 1.92cd	0.81 ± 0.07gh	1.98 ± 0.07efg	0.40 ± 0.02fg
+ M 1:1	100.00 ± 0.00a	4.91 ± 0.23a	2.11 ± 0.18e	0.41 ± 0.01efg
CK 2:1	21.11 ± 1.92cde	0.71 ± 0.06ghi	2.33 ± 0.02d	0.44 ± 0.02def
+ M 2:1	94.44 ± 5.09ab	3.86 ± 0.28bc	2.42 ± 0.10cd	0.45 ± 0.02de
CK 3:1	20.00 ± 3.33de	0.66 ± 0.04hi	2.44 ± 0.11cd	0.48 ± 0.01de
+ M 3:1	93.33 ± 3.33b	3.60 ± 0.19cd	2.57 ± 0.02c	0.50 ± 0.01c
CK W	21.11 ± 1.92cde	0.64 ± 0.06hi	3.10 ± 0.12b	0.66 ± 0.03b
+ M W	92.22 ± 5.09b	3.56 ± 0.20d	3.62 ± 0.13a	0.78 ± 0.07a

表 4 接种从枝菌根真菌对不同处理玉米根际土壤速效养分和酶活性的影响

Table 4 Effects of different treatments with AMF on the available nutrients and ACP in maize rhizosphere soil

处理 Treatment	土壤速效钾 Soil available K/(mg·kg ⁻¹)	土壤速效磷 Soil available P/(mg·kg ⁻¹)	酸性磷酸酶活性 ACP /($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)
CK L	70.43 ± 4.08a	12.23 ± 0.36a	3.89 ± 0.18f
+ M L	63.93 ± 1.19bc	9.28 ± 0.33d	4.21 ± 0.29def
CK 1:3	67.59 ± 5.93ab	12.11 ± 0.51a	4.02 ± 0.13ef
+ M 1:3	62.10 ± 0.73bc	7.50 ± 0.42e	4.33 ± 0.29cde
CK 1:2	60.29 ± 2.41cd	8.06 ± 0.73e	4.48 ± 0.19bcd
+ M 1:2	56.11 ± 2.83de	7.27 ± 0.22e	4.54 ± 0.13bcd
CK 1:1	63.60 ± 3.62bc	9.98 ± 0.25cd	4.30 ± 0.12cde
+ M 1:1	48.91 ± 2.15f	4.99 ± 0.42g	4.85 ± 0.16ab
CK 2:1	64.03 ± 2.82bc	10.74 ± 0.61bc	4.23 ± 0.10def
+ M 2:1	52.21 ± 3.59ef	5.89 ± 0.76f	5.09 ± 0.07a
CK 3:1	64.69 ± 2.75abc	11.02 ± 0.94b	4.19 ± 0.15def
+ M 3:1	52.50 ± 4.46ef	5.97 ± 0.54f	4.68 ± 0.54abc
CK W	65.94 ± 4.83abc	10.99 ± 0.57b	4.16 ± 0.10def
+ M W	52.59 ± 2.00ef	6.27 ± 0.15f	4.78 ± 0.04ab

接菌能够促进根系对水分和养分的吸收和利用;同时维持较高的持水量易造成黄土沉陷和粘结,通透性变差,风化煤质地疏松,施加适量的风化煤提高了黄土的通透性,有利于根系和土壤微生物呼吸作用,促进了玉米植株的生长。氮、磷、钾是植物生长所必需的大量矿质元素,研究发现,接菌组所有配比的玉米地上部分氮、磷、钾的累积量均显著高于对照组,这可能是丛枝菌根的菌丝可以伸展到矿质元素亏缺区外,有效地吸收根系不能吸收的矿质元素^[16]。与此同时,AMF 还可通过地下菌丝网络在植物间矿质营养元素的再分配中起到重要的作用^[21]。无论接菌与否,施加适当比例的风化煤都促进了玉米对营养元素的吸收,可能是由于风化煤中的腐植酸在分解过程中产生的有机酸或中间产物,其生理活性物质积累在根系周围,具有促进根伸长、呼吸作用保湿作用增加和提高根系活力等作用^[9],从而促进了更多的矿质养分转移到植株体内。然而风化煤比重过高(>50%)对玉米生长的促进作用有所降低,可能是由于风化煤过高导致风化煤中的腐植酸类物质和有害元素累积量过高,破坏植物根际的微环境,抑制植物的生长。

接菌有效地促进了玉米根系的菌根侵染率,所有配比的菌根侵染率均达到 90% 以上,接菌处理中煤土比为(1:1)时,菌丝密度最大为 $4.91 \text{ m}\cdot\text{g}^{-1}$,显著高于其他处理,可能是由于在此基质中,风化煤分泌适量的酸性物质和中间产物营造了适合菌根生长的环境。同时,接菌组总球囊霉素和易提取球囊霉

素均高于对照组,且随着风化煤比重的增大而呈增加趋势。分析原因可能是球囊霉素相关蛋白是菌根特有的产物,因此接菌能够提高其含量;风化煤中有机碳含量较高,球囊霉素相关蛋白是有机碳的一种,由于球囊霉素提取的非专一性,风化煤施用量越大,球囊霉素相关蛋白的含量越高。研究发现,根际土壤速效磷、速效钾含量与玉米地上部分矿质元素累积量呈反比关系,是因为菌根与风化煤协同作用有效地促进根系将基质中的矿质元素转运到玉米植株体内,使得基质中速效养分降低。菌根与风化煤的施用提高了基质酸性磷酸酶活性,分析原因可能是由于风化煤分泌的有机酸等产物促使菌根在低磷条件下,通过促进酸性磷酸酶的合成实现有机磷向无机磷的转化。

4 结 论

1) 菌根与风化煤协同作用有效地促进了玉米的生长,在煤土比为 1:1 时,最有利于玉米生长,玉米地上部分干质量、叶色值高于其它处理,分别达到 4.61 g、41.17。

2) 菌根与风化煤的联合施用显著促进了玉米对基质中氮磷钾的吸收和利用,同时提高了玉米地上部分氮磷钾的累积量。接菌组煤土比为 1:1 时,玉米地上部分全氮、全磷、全钾含量最高,分别达到 53.01、7.15、79.42 $\text{mg}\cdot\text{株}^{-1}$,且土壤中相应的速效磷、速效钾含量最低。

3) 接菌显著提高了菌根侵染率和菌丝密度,风化煤与黄土质量比为 1:1 时,玉米根系被完全侵染,菌丝密度增加到 $4.91 \text{ m}\cdot\text{g}^{-1}$;菌根和风化煤协同作用均能提高球囊霉素相关土壤蛋白的含量,且随着风化煤的增加而增加。

4) 接菌促进了玉米的生长,其和风化煤联合施用实现了沟壑区黄土的改良和培肥,改善了玉米根际的微环境,风化煤与黄土的最佳配比为 1:1。

参 考 文 献:

- [1] 朱秋莲,邢晋毅,张宏,等.黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J].生态学报,2013,33(15):4674-4682.
- [2] 郝文芳,单长卷,梁宗锁,等.陕北黄土丘陵沟壑区人工刺槐林土壤养分背景和生产力关系研究[J].中国农学通报,2005,21(9):129-135.
- [3] 杜善周,毕银丽,吴王燕,等.丛枝菌根对矿区环境修复的生态效应[J].农业工程学报,2008,24(4):113-116.
- [4] 李善祥,窦诱云.我国风化煤利用现状与展望[J].腐植酸,1998,16(1):16-20.
- [5] 武瑞平,李华,曹鹏.风化煤施用对复垦土壤理化性质酶活

- 性及植被恢复的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(9): 1855-1861.
- [6] 刘秀梅, 张夫道, 冯兆滨, 等. 风化煤腐殖酸对氮、磷、钾的吸附和解吸特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 641-646.
- [7] 李 华, 李永青, 沈成斌, 等. 风化煤施用对黄土高原露天煤矿区复垦土壤理化性质的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5): 1752-1756.
- [8] 段学军, 闵 航, 陆 欣. 风化煤玉米秸配施熟化土壤的生物学效应研究[J]. 土壤通报, 2003, 34(6): 517-520.
- [9] 宋 轩, 曾德慧, 林鹤鸣, 等. 草炭和风化煤对水稻根系活力和养分吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(6): 867-870.
- [10] Smith S E, Read D J. Mycorrhizal Symbiosis[M]. San Diego: Academic Press, 1997.
- [11] 毕银丽, 吴福勇, 武玉坤. 丛枝菌根在煤矿区生态重建中的应用[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 2068-2072.
- [12] Newsham K K, Fitter A H, Watkinson A R. Multifunctionality and biodiversity in arbuscular mycorrhizas. Trends[J]. Ecol Evo, 1995, 10(10): 407-411.
- [13] 鲍士旦. 土壤酸化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing and staining parasitic and Vesicular arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection[J]. Trans Br Mycol Soc., 1970, 55(1): 158-161.
- [15] 田 慧, 刘晓蕾, 盖京苹, 等. 球囊霉素及其作用研究进展[J]. 土壤通报, 2009, 40(5): 1215-1219.
- [16] 李少朋, 毕银丽, 陈咄圳, 等. 外源钙与丛枝菌根真菌协同对玉米生长的影响与土壤改良效应[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 109-116.
- [17] Ruiz-Lozano J M, Azón R. Symbiotic efficiency and infectivity of an autochthonous arbuscular mycorrhizal *Glomus sp.* from saline soils and *Glomus deserticola* under salinity[J]. Mycorrhiza, 2000, 10(3): 137-143.
- [18] 陈伏生, 曾德慧, 陈广生, 等. 风沙土改良剂对白菜生理特性和生长状况的影响[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 153-155.
- [19] 盖京苹, 冯 固, 李晓林. 丛枝菌根真菌在田间的分布特征、代谢活性及其对甘薯生长的影响[J]. 应用生学报, 2005, 16(1): 147-150.
- [20] 杨 逾, 刘文生, 缪协兴, 等. 我国采煤沉陷及其控制研究现状与展望[J]. 中国矿业, 2007, 16(7): 43-46.
- [21] 陈永亮, 陈保冬, 刘 蕾, 等. 丛枝菌根真菌在土壤氮素循环中的作用[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 4807-4815.

(上接第 107 页)

- [6] 谷 洁, 高 华. 提高化肥利用率技术创新展望[J]. 农业工程学报, 2004, 16(2): 17-20.
- [7] 叶全宝, 张洪程, 魏海燕, 等. 不同土壤及氮肥条件下水稻氮利用效率和增产效应研究[J]. 作物学报, 2004, 31(11): 1422-1428.
- [8] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6.
- [9] Shenoy V V. Enhancing plant phosphorus use efficiency for sustainable cropping[J]. Biotechnology Advances, 2005, (23): 501-513.
- [10] Roberto A. Gaxiola, Mark Edwards, James J. Elser. A transgenic approach to enhance phosphorus use efficiency in crops as part of a comprehensive strategy for sustainable agriculture[J]. Chemosphere, 2011, 36(24): 840-845.
- [11] 翁 瑞. 环境材料学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 3-4.
- [12] 张志峰. 保水剂研究进展[J]. 磷肥与复肥, 2010, 25(5): 63-66.
- [13] 冯圆圆. 环境材料对土壤保水及氮肥增效性的研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2010.
- [14] 李嘉竹, 黄占斌, 陈 威, 等. 环境功能材料对半干旱地区土壤水肥利用效率的协同效应[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 232-236.
- [15] 黄 震, 黄占斌, 孙朋成, 等. 环境材料对作物吸收重金属 Pb、Cd 及土壤特性研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(10): 2490-2499.
- [16] 章智明, 黄占斌, 单瑞娟, 等. 环境材料对铅镉污染土壤玉米生长和重金属累积的影响[J]. 河北农业大学学报, 2013, 36(3): 21-24.
- [17] 王晓岚, 卡丽毕努尔, 杨文念. 土壤碱解氮测定方法比较[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(1): 76-78.
- [18] 李嘉竹. 高吸水性树脂及增效剂对土壤水分和氮素的保持效能研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2012: 32-35.
- [19] 王璐娜. 环境材料组合对土壤水肥保持和植物生长的效应研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.
- [20] 陈 宇. 环境材料对磷肥增效和植物生长效应的研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014.
- [21] 易镇邪, 王 璞, 刘 明, 等. 不同类型氮肥与施氮量下夏玉米水、氮利用及土壤氮素表现盈亏[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 63-67.
- [22] 闫洪奎, 李 娜, 郭志友, 等. 玉米株高及叶片的相关性[J]. 延边大学农学学报, 2002, 24(4): 254-256.
- [23] 陆文娟. 不同水肥条件下灌溉方式对玉米生理和水分养分利用的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2011.
- [24] 韦彩会, 李伏生, 徐春晖, 等. 调亏灌溉及施肥对玉米干物质积累和相关生理性状的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(4): 76-84.
- [25] 阎 勇, 罗兴录, 张兴思, 等. 不同供水条件下玉米耐旱生理特性比较[J]. 中国农学通报, 2007, 23(9): 323-326.
- [26] 黄绍文, 孙桂芳, 金继运, 等. 氮、磷和钾营养对优质玉米籽粒产量和营养品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 225-230.
- [27] 于群英. 土壤磷酸酶活性及其影响因素研究[J]. 安徽师范大学学报, 2001, 15(4): 5-8.