

模拟矿区复垦接种丛枝菌根缓解伤根对玉米生长影响

李少朋, 毕银丽^{*}, 余海洋, 孔维平, 冯颜博, 秦亚非

(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对煤炭开采过程中地表塌陷造成植物根系损伤问题, 通过人为伤根模拟煤炭开采造成植物根系受损的盆栽试验, 以玉米为宿主植物, 矿区退化土壤为供试基质, 研究接种丛枝菌根真菌对根系受损玉米生长的缓解作用。结果表明, 玉米根系受损条件下, 接种丛枝菌根真菌缓解了伤根对玉米生长造成的不利影响, 促进了玉米的生长, 接菌组玉米干质量平均每株要比对照组高出 9.74 g。强化接种菌根真菌提高了玉米对土壤中矿质元素的吸收, 增加了受损玉米根际土壤中球囊霉素和有机质含量, 接菌组玉米根际土壤中总球囊霉素和有机质含量分别比对照组高出 48.1%和 24.5%。接种菌根改善了玉米根际微环境, 有利于矿区退化土壤改良和培肥。通过研究菌根真菌对根系受损植物生长效应, 为采煤塌陷区土地复垦与生态重建提供技术支撑。

关键词: 煤矿复垦, 土壤, 微生物, 丛枝菌根, 玉米, 根系损伤, 球囊霉素

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.23.029

中图分类号: X172

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-23-0211-06

李少朋, 毕银丽, 余海洋, 等. 模拟矿区复垦接种丛枝菌根缓解伤根对玉米生长影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 211-216.

Li Shaopeng, Bi Yinli, Yu Haiyang, et al. Simulation on relieving negative influence of damage roots on growth of maize by application of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(23): 211-216. (in Chinese with English abstract)

0 引言

煤炭开采过程中往往会造成地表大面积的塌陷, 同时伴随着大量裂缝的产生, 地表裂缝一方面造成土壤水分和养分流失, 影响矿区植物的生长, 另一方面大量裂缝的产生往往会造成植物根系的拉伤^[1]。根系损伤问题是矿区复垦和生态重建的瓶颈所在, 目前有学者认为在人为控制环境中, 通过保证土壤水分和养分合理供应, 一定量的根系修剪能促进根系发生、是调节根系组成的有效手段^[2-4]。但神东地区干旱少雨, 矿区土壤贫瘠且沙化严重, 根系的损伤将会限制植物的生长发育。神东矿区煤炭开采厚度较大, 地表垮塌的强度相对较大, 地表塌陷过程中产生的拉力对植物根系的损伤较为严重, 从而影响矿区植物的生长。且西部矿区干旱缺

水, 煤炭开采造成塌陷区土壤更为贫瘠, 根系的损伤加剧了矿区生态环境退化。

煤炭开采造成植物根系损伤研究国内外报道较少, 这主要是由于植物根系在土壤中形成“黑箱”, 很难对其进行观测, 加之植物根系在土壤中分布和地表沉陷产生作用力的不规则, 对矿区植物根系全方位的研究难度较大。目前对煤矿区损伤植物根系修复研究还没有完备的技术, 虽然物理化学方法在一定程度上能缓解煤炭开采造成的不利影响, 但其不能从根本上解决根系损伤造成矿区环境退化问题, 同时其治理成本高, 在矿区难以推广应用。而生物手段是国内外比较倡导方法之一, 其中丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)作为一种良好的生物“菌肥”, 在生态环境治理中具有较大的应用价值和潜力。本研究通过人为模拟伤根, 通过接种 AMF, 研究 AMF 对矿区伤根作物生长的影响, 为 AMF 在矿区塌陷地治理中应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试土壤

2011年4月采自陕西省神木县李家畔镇活鸡兔矿塌陷区, 为沙质退化矿区土, 风干, 过 1 mm 筛。供试土壤基本性状为 pH 值 7.48; 电导率 35.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 最大持水量为 22.86%; 有机质

收稿日期: 2013-07-11 修订日期: 2013-10-30

基金项目: 十二五“863”作物生境过程模拟与动态优化决策技术(2013AA102904); 十二五科技支撑计划—晋陕蒙接壤区煤炭基地生态建设关键技术与示范(2012BAC10B03)

作者简介: 李少朋(1982—), 男, 安徽六安人, 博士, 从事矿区环境治理和生态重建研究。北京 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 100083。Email: lishaopeng518896@163.com

通信作者: 毕银丽(1971—), 女, 陕西西脂人, 博士, 教授, 博士生导师。主要从事微生物(主要是菌根)在矿区生态重建方面的研究。北京 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 100083。

Email: ylb188@126.com

6.07 g/kg; 总氮为 0.34 g/kg; 全磷 0.41 g/kg; 有效磷为 7.2 g/kg; 速效钾 50 g/kg。

1.1.2 供试玉米和菌种

供试玉米种子由中国农业科学院种子公司提供, 玉米品种为农大 CFO24。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 2012 年 6 月在中国矿业大学(北京)温室内进行, 试验分别接菌组(+M), 不加菌根组(CK)。栽种玉米的塑料盆规格为: 11 cm (高) × 13 cm (盆口直径) × 9 cm (盆底直径), 每盆加矿区土量为 1 400 g, AMF 接种量按每 1 kg 灭菌后的风干矿区退化沙土加 50 g 的菌剂充分混合。种植玉米前向矿区退化土壤加入 NH_4NO_3 、 KH_2PO_4 、 K_2SO_4 配置营养液作为底肥, 使供试土壤中 N、P、K 含量分别为 100、10、150 mg/kg, 每个处理 5 个重复, 浇水达到最大饱和持水量, 水分平衡 1 天后, 播种。将玉米种子用质量分数为 10% H_2O_2 溶液浸泡 10 min 做表面消毒, 在用去离子水清洗 10 次, 每个小盆播种玉米 5 棵, 玉米出苗 4 d 后间苗, 每盆保持 1 株。30 d 后取出玉米根系, 通过测量每根玉米根系长度并剪去根长的 1/3, 使剪去的玉米根系长度为根系总长度的 1/3。伤根后将玉米复种到塑料盆中, 1 个月后收割玉米的地上和地下部分, 同时收集玉米根际土, 进行相关指标的测定。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 生物量测定

苗期玉米生长到 60 d 后, 分别收割玉米地上和地下部分, 用自来水清洗根系附着的泥土, 同时将植物地上部分和根系分开, 在 100℃烘箱内杀青 30 min, 然后放到 70℃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。

1.3.2 叶色值测定

苗期玉米叶片 SPAD 值(叶色值)采用 SPAD-502 (浙江托普生产)测定。

1.3.3 侵染率、菌丝密度和根际土有机质测定方法

玉米生长 60 d 后, 拣出较细的玉米根系, 用清水清洗干净, 剪成 1 cm 长根段, 混匀后取鲜根测定菌根侵染率^[5]。菌丝密度采用网格交叉法测定^[6]。采集玉米根际土, 采用重铬酸钾外加热法($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{-H}_2\text{SO}_4$ 法)测定有机质含量。

1.3.4 球囊霉素提取和测定方法

球囊霉素是由丛枝菌根真菌分泌的一种含金属离子的糖蛋白, 因被非专一性提取而称为球囊霉素相关土壤蛋白(glomalin-related soil protein, GRSP), 通常定义为 Bradford-反映土壤蛋白, 从

土壤样品中提取出来, 分为易提取球囊霉素(easily extractable glomalin, EEG)和总球囊霉素(total glomalin, TG), 按照 Wright 及 Janos 的方法稍加修改^[7-8]。

1) 球囊霉素相关土壤蛋白的提取:

易提取球囊霉素相关土壤蛋白的提取方法为: 分别称取土样 1.00 g 于带刻度离心管中, 对应加入 8 mL 柠檬酸钠浸提剂(20 mmol/L、pH 值 7.0), 加盖, 摇匀, 在 103 kPa、121℃下提取 30 min, 10 000×g 下离心 6 min, 收集上清液, 每个处理重复 4 次。总球囊霉素相关土壤蛋白的提取: 分别称取土样 1.00 g 于带刻度离心管中, 对应加入 8 mL 柠檬酸钠浸提剂(50 mmol/L、pH 值 8.0), 加盖, 摇匀, 在 103 kPa、121℃下提取 60 min, 再重复提取 5 次, 每次重复提取时, 保证提取液体积固定且摇匀土样, 使土样与浸提剂充分接触; 每提取 1 次之后迅速在 10 000×g 下离心 6 min, 将上浮物从土壤中分离出去, 收集上清液, 每个处理重复 4 次。上清液储藏在 4℃下直至第 2 天分析。

2) 球囊霉素相关蛋白的测定:

分别吸取 0.5 mL 的上清液, 加 5 mL 考马斯亮蓝 G-250 染色剂(使用之前过滤), 加盖, 颠倒, 显色 10 min, 于 595 nm 波长下比色。用牛血清白蛋白(bovine serum albumin, BSA)作标准液, 考马斯亮蓝法显色, 绘制标准曲线, 以 1.00 g 土壤中蛋白质的微克数表示球囊霉素相关土壤蛋白的含量。

1.3.5 玉米 TN、TP、K 和 Ca 的测定

玉米叶片和根系中全氮和全磷含量的测定参考鲍士旦^[9]的方法。玉米矿质元素离子含量测定, 将植物的地上部分和根部的分开, 将烘干样品烘干粉碎后, 精确称量 0.5000 g, 用 HNO_3 消煮, 定容于 50 mL, 用 ICP-AES (inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy, 电感耦合等离子体发射光谱仪)测定 K^+ 、 Ca^{2+} 含量。

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, 显著水平设置为 5%。

2 结果与分析

2.1 AMF 对根系受损玉米生长的影响

玉米根系受损条件下, 接种 AMF 能缓解伤根对玉米生长造成的不利影响。如表 1 所示, 接种组玉米地上部分和根系部分的生物量都明显高于对照组, 且两者差异性达到显著水平。接种 AMF 提高了玉米叶色值(SPAD 值), 接种组玉米叶片 SPAD 值可达到 29.4, 比对照组高出 19.8%。SPAD 值是玉米叶片叶绿素含量最直观的体现, 可间接反映玉

米光合作用效果。玉米根系损伤条件下，玉米对土壤水分和养分吸收通道被打断，而 AMF 产生的菌丝很大程度上协助了根系对土壤养分和水分的吸

收，缓解了根系损伤对玉米生长造成的伤害，接种 AMF 更促进了玉米叶片进行光合作用，有利于玉米生长。

表 1 菌根对根系受损玉米干质量的影响

Table 1 Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on dry weight of Maize with injured root

处理 Treatment	地上部分干质量 Dry weight of shoot (g·株 ⁻¹)	根系部分干质量 Dry weight of root (g·株 ⁻¹)	干质量 Dry weight (g·株 ⁻¹)	侵染率 Infection rate/%	菌丝密度 Hyphal density (m·g ⁻¹)	叶色值 SPAD
对照组 CK	9.37b	2.06b	11.43b	0	0	24.49b
接种组+M	17.88a	3.29a	21.17a	88	4.19	29.4a

注：表中数值为 3 个重复的平均值，其后不同字母代表 5% 水平上的差异显著性。下同。

Notes: Values were the means of three replicates. Mean followed by different letters indicated significant difference at 5% level. The same as below.

2.2 AMF 对根系受损玉米侵染率和菌丝密度的影响

AMF 能很好实现对玉米根系的侵染，接种 AMF 玉米根系的侵染率高达 88%，在供试玉米根系受损条件下，AMF 和玉米根系具有很好的共生关系（表 1 所示）。菌丝密度反映了菌根在促进植物生长、营养吸收和抗逆性等方面的能力大小。玉米根系损伤条件下，接种组玉米根际土壤中菌丝密度可达到 4.19 m/g，AMF 菌丝扩大了受损玉米根系与土壤接触面积，有利于玉米植株对土壤养分和水分的吸收，缓解了伤根对玉米植株根系造成的不利影响。

2.3 AMF 对根系受损玉米养分运移的影响

接种 AMF 影响玉米对土壤中矿质元素的吸收，

接种组玉米矿质元素含量明显高于不接种组（表 2 所示）。氮磷钾是玉米生长所需要的大量元素，无论接种与否，玉米地上部分氮磷钾含量都要高于根系部分，且表现为接种组大于对照组。镁是植物叶绿素最主要的组成成分，是植物体多种酶的活化剂，也是植物生长和发育过程所必需的元素之一^[10]。根系受损条件下，接种组玉米镁元素含量明显高于 CK 组，且表现出显著差异性。接种 AMF 有利于玉米植株对微量元素的吸收，根系受损玉米地上部分和地下部分的 Na、Fe、Cu、Mn、Zn 含量都高于对照组，由于微量元素在植物体难以被运输，植物根系部分微量元素含量都高于地上部分。

表 2 接种菌根对根系受损玉米矿质元素吸收的影响

Table 2 Effect of AMF on mineral elements of Maize with injured root

矿质元素 Mineral elements	地上部 Shoot(g·kg ⁻¹)		地下部 Root(g·kg ⁻¹)	
	接种组+M	对照组 CK	接种组+M	对照组 CK
氮 (N)	55.21a	42.878b	19.171c	10.921d
磷 (P)	1.16a	0.75b	0.682b	0.505c
钾 (K)	34.41a	26.665a	11.908c	6.793d
钙 (Ca)	9.058b	5.443c	10.493a	9.081b
镁 (Mg)	2.996a	2.507b	2.978a	2.595b
钠 (Na)	0.085c	0.066c	1.15a	1.055b
铁 (Fe)	0.441c	0.351c	7.955a	5.641b
铜 (Cu)	0.009b	0.004c	0.023a	0.01b
锰 (Mn)	0.118b	0.048c	0.191a	0.126b
锌 (Zn)	0.017c	0.014d	0.028a	0.024b

2.4 接种 AMF 对土壤中微生物含量的影响

由表 3 可见，接种 AMF 显著提高了根际土壤中微生物数量，接种菌根组根际土壤中细菌、放线菌和真菌显著高于对照组，其中细菌数量增加最为明显，放线菌次之，真菌最少。土壤中微生物的种类较多，有细菌、真菌、放线菌等。且土壤微生物数量较大，1 克土壤中就有几亿到几百亿个。土壤微生物对土壤的形成、发育、物质循环和肥力演变等均有不可替代的作用^[11]。在植物根系周围生活着的土壤微生物对植物生长起到不可替代的作用，其参与并调节植物的生长。植物共生微生物如根瘤菌、菌

根和真菌等能为植物直接提供氮素、磷素和其它矿质元素的营养元素等。微生物数量是反映土壤微环境优劣的一个重要指标，接种 AMF 改善受损玉米根际微环境，更加有利于根系受损玉米生长。

表 3 接种菌根对根系受损玉米根际土壤微生物的影响

Table 3 Effect of AMF on microorganism of maize with injured root

处理 Treatment	细菌 Bacterial (10 ⁷ cfu·g ⁻¹)	放线菌 Actinomycetes (10 ⁶ cfu·g ⁻¹)	真菌 Mildew (10 ⁵ cfu·g ⁻¹)
对照组 CK	0.85b	1.47b	0.47b
接种组+M	1.43a	2.03a	1.52a

2.5 接种 AMF 对根际土壤改良效应研究

由表 4 可见,玉米根系损伤条件下,接种 AMF 不但能够提高玉米根际土壤中球囊霉素含量,同时玉米根际土壤中易提取球囊霉素含量增加显著,且

都表现为接种 AMF 组高于对照组。接种 AMF 还可提高玉米根际土壤中有有机质含量。对于神东矿区采煤塌陷地退化土壤来说,接种 AMF 增加了土壤中有有机碳含量,有利于矿区退化土壤的改良和培肥。

表 4 接种菌根对受损玉米根际土壤改良效应

Table 4 Effects of AMF cooperating with exogenous calcium on degraded soil in mining area

处理 Treatment	总球囊霉素 Total glomalin (mg·g ⁻¹)	易提取球囊霉素 Easily extractable glomalin/(mg·g ⁻¹)	有机质 Organic matter (mg·g ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus (mg·kg ⁻¹)	酸性磷酸酶 Acid phosphatase activity/(mmol·(h·g) ⁻¹)
对照组 CK	2.32b	0.79b	6.46b	3.45b	3.14b
接种组+M	3.44a	1.19a	8.04a	4.92a	5.18a

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。由表 4 可见,玉米根系受损条件下,接种组玉米根际土壤中酸性磷酸酶活性明显高于对照组,且两者的差异性显著。土壤有效磷是土壤磷素养分供应水平高低的指标,土壤磷素含量高低在一定程度上反映了土壤中磷素的贮量和供应能力。接种 AMF 能显著提高玉米根际土壤中有效磷的含量(表 4 所示)。这主要是 AMF 改变了伤根玉米根际微环境,同时提高了根际土壤中酸性磷酸酶活性,促进了土壤中磷活化^[12]。

3 讨论

植物根系是植物生长赖以生存的基础,根系也是植物吸收水分和无机盐重要通道,植物根系还具备其他功能,诸如将植物的地上部分固着在土壤中,从而进行一系列有机化合物的合成转化,同时植物根系还具备贮藏物质和输导功能。当植物根系受到外界胁迫时,整个植株将会受到影响。现代煤炭开采条件下,煤炭开采往往会造成大面积的地表塌陷,地表塌陷过程中产生的大量裂缝往往会造成植物根系损伤,因此,对于矿区生态环境治理来说,植物根系损伤是矿区生态环境治理和生态重建的一个瓶颈和关键所在。目前也有研究表明,对植物根系进行适当修剪,往往更有利于植物生长,造成此种现象主要原因是当光合产物过多地用于根系时,分配到冠部的必然减少。根系适当修剪对植物生长具有促进作用的研究多集中在人为调控水肥的理想状态下,对于神东矿区来说,该区位于干旱半干旱地区,干旱缺水是该区环境的一个主要特征,煤炭开采造成的根系损伤影响着神东矿区植物的生长发育,不利于塌陷区生态环境的改善。因此,通过一定的生物手段来调节伤根对植物生长造成的不利影响就变的更加重要。

AMF 在逆境条件下能促进植物生长,在矿区生态环境治理中生态效应明显,适合在神东矿区生态

环境治理中推广应用^[12]。本研究通过室内模拟根系损伤试验发现,接种 AMF 能显著促进根系损伤玉米生长,缓解了伤根对玉米生长造成的不利影响。经实验室驯化的 AMF 菌剂与宿主植物玉米有很好的共生关系,接种 AMF 组玉米根系都具有较高的侵染率,且根际土壤中菌丝密度较高。在玉米根系受损条件下,玉米为了在土壤中获得更多养分供其生长,加速了 AMF 和玉米根系之间共生关系,加之矿区土壤理化性状退化严重,保水和保持养分能力较差,植物根系在土壤中获得矿质养分难度加大,从而迫使根系与 AMF 进行一定程度的耦合。研究发现,玉米根系受损条件下,接种 AMF 明显提高了伤根玉米的生物量,促进了伤根玉米的生长发育。

氮、磷和钾是植物生长所必需的 3 大元素,其吸收状况关系着玉米植株的生长发育,同时也影响玉米后期产量和品质的形成,在玉米生长不同时期,必须保证根际土壤中 3 种元素的充分供给。有研究表明,玉米对土壤中氮素吸收最大,钾元素次之,磷的吸收量最小,同时随着玉米产量的增加,氮磷钾的吸收量也随之增加^[13-14]。对于神东矿区农业生产来说,养分的合理供给就变的尤为重要,神东矿区由于煤炭开采对土壤质地的破坏较大,土壤养分流失较为严重,加之该区位于毛乌苏沙地边缘,土壤养分含量较低,从而影响植物根系对土壤中矿质元素的吸收。神东矿区土壤保肥能力较差,通过单一的施肥手段很难实现作物产量最大化,也不利于从根本上解决问题。在玉米生长的不同时期,施入的氮和钾元素含量必须保持合理的比值,重氮轻钾的现象往往会影响植株对其他矿质养分的吸收,也会造成土壤中矿质养分的失调,在神东矿区塌陷区,保持退化土壤合理的氮磷钾合理供给往往难度较大,因此,必须通过生物自身来调节土壤的微环境,从而保持土壤的合理结构。根系损伤条件下,接种 AMF 在一定程度上改善了玉米植株对土壤中氮和钾的吸收,在逆境条件下,AMF 和玉米根系具有很好的共生关系,侵染在玉米根系上菌丝

体扩大了植物根系和土壤接触面积,同时菌丝体还可以伸展到土壤养分亏缺区,吸收植物根系难以触及的矿质元素,从而促进了玉米植株的生长^[15]。土壤中全磷含量一般较高,但能被作物吸收的有效磷含量较低。大量的研究表明,接种 AMF 有利于提高植物对土壤中磷元素的吸收^[16-18]。接种 AMF 还可以提高玉米根系对中量元素镁钙和微量元素铁锌锰等吸收。

接种 AMF 实现了矿区退化土壤改良和培肥,AMF 分泌的球囊霉素相关蛋白不但能够为退化土壤提供碳源,而且也是矿区退化土壤的一个重要改良剂^[19-20]。对于神东矿区塌陷区土壤来说,土壤改良是一个复杂工程,矿区土壤沙化严重,煤炭开采导致地表水分和养分流失,采煤塌陷区土壤处于一种退化状态。随着科学技术的不断发展,针对神东矿区土壤的不良性状和障碍因素,各种治理方法也相继出现,其中物理化学措施是改良土壤的主要手段之一,通过该方法改善土壤性状,提高土壤肥力,增加作物产量。但是物理化学方法不具备可持续性,不能从根本上实现退化土壤的可耕性。因此,必需通过生物手段对退化土壤进行改良,实现矿区土壤自修复,使根际土壤微环境朝着健康的方向发展。AMF 作为生物“菌肥”在农业生态领域得到了广泛应用,目前在矿区生态环境治理中也受到了广泛关注。接种 AMF 显著提高了根际土壤中的酸性磷酸酶活性,酸性磷酸酶是将土壤中有机磷转化成游离态磷的一个重要物质,这也是玉米根际土壤中有效磷显著增加的一个重要原因。同时,接种 AMF 可以显著提高伤根玉米根际微生物量。因此,针对煤炭开采造成矿区土壤日益退化问题,可以有目的调理土壤微生物数目和种类,制定农业生产措施;也可以根据土壤微生物客观条件制定耕作制度。通过改进施肥、栽培制度、人为引入有益的土壤微生物等措施,来恢复原有的微生物群落或增加某些功能,提高土壤微生物多样性,有助于土壤生态肥力的提高,可从根本上解决土壤退化对植物生长造成的不利影响。

4 结 论

1) 玉米根系受损条件下,接种 AMF 提高了玉米的生物量和叶色值,接菌组玉米干质量平均每株要比对照组高出 9.74 g,叶片 SPAD 值比对照组高出 19.8%。玉米根系侵染率和土壤中菌丝密度增加显著,接种菌根缓解了伤根对玉米生长造成的不利影响。

2) 接种菌根提高了根系受损玉米对矿质元素的吸收,玉米地上部分 N、P、K 分别比对照组高出 123.32、4.14 和 77.43 g/kg,且根际土壤中酸性磷酸酶活性和有效磷含量显著增加。

3) 接种菌根提高了根际土壤中球囊霉素和易提取球囊霉素含量,分别达到 3.44 和 1.19 g/kg,比对照组分别高出 48 和 17.1 g/kg。接种菌根提高土壤有机质含量,实现了对矿区退化土壤的改良和培肥。

4) 对于干旱缺水的神东矿区来说,通过引入丛枝菌根真菌可以缓解煤炭开采导致植物根系损伤而造成的影响,有利于采煤塌陷区生态环境恢复和系统的稳定。

[参 考 文 献]

- [1] 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—2153.
Fan Yinghong, Lu Zhaohua, Cheng Jianlong, 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—2153. (in Chinese with English abstract)
- [2] 吕德国, 秦秀霞. 3 年生盆栽苹果树根系修剪的研究[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2000, 31(4): 389—394.
Lu Deguo, Qin Xiuxia. Study on the root system pruning of three year old potted apple trees[J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science, 2000, 31(4): 389—394. (in Chinese with English abstract)
- [3] 白岗栓, 杜社妮, 侯喜录. 不同修剪措施对苹果幼树生物量的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2005, 33(1): 91—94.
Bai Gangshuan, Du Sheni, Hou Xilu. Effect of different pruning treatments on young apple trees biomass[J]. Journal of Northwest Agriculture & Forestry University, 2005, 33(1): 91—94. (in Chinese with English abstract)
- [4] 马守臣, 徐炳成, 李凤民. 根修剪对黄土旱塬冬小麦根系分布、根系效率及产量形成的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 6172—6177.
Ma Shouchen, Xu Bingcheng, Li Fengmin. Effect root pruning on root distribution, root efficiency and yield formation of winter wheat in Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6172—6177. (in Chinese with English abstract)
- [5] Giovannetti M, Mosse B. An evaluation of techniques for measuring vesicular-arbuscular infection in roots[J]. New Phytologist, 1980, 84(3): 489—500.
- [6] Abbott L K, Robson A D, De Boer G. The effect of phosphorus on the formation of hyphae in soil by the vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus fasciculatum*[J]. New Phytologist, 1984, 97(2): 437—446.
- [7] Wright S F, Upadhyaya A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Plant and Soil, 1998, 198(1): 97—107.
- [8] Janos D P, Garamszegi S, Beltran B. Glomalin extraction and measurement[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(3): 728—739.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 2000.
- [10] 许畅, 高明. 土壤中镁的化学行为及生物有效性研究进展. 微量元素与健康研究, 2007, 24(5): 51—53.
Xu Chang, Gao Ming. The development of research about transformation and bioavailability of magnesium in soil[J]. Studies of Trace Elements and Health, 2007, 24(5): 51—53. (in Chinese with English abstract)

- [11] 崔俊涛. 微生物在土壤腐殖质形成与转化中作用的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2006.
Cui Juntao. Studies on the Role of Microorganism in the Formation and Transformation of Humus[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李少朋, 毕银丽, 陈咄圳, 等. 干旱胁迫下外源钙与丛枝菌根真菌协同对神东矿区玉米生长影响与土壤改良效应[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 109—116.
Li Shaopeng, Bi Yinli, Chen Peizhen, et al. Effects of AMF cooperating with exogenous calcium on maize growth and soil improvement[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(1): 109—116. (in Chinese with English abstract)
- [13] 宋海星, 李生秀. 玉米生长量、养分吸收量及氮肥利用率的动态变化[J]. 中国农业科学, 2003, 36(1): 71—76.
Song Haixing, Li Shengxiu. Dynamics of nutrient accumulation in maize plants under different water and N supply conditions[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(1): 71—76. (in Chinese with English abstract)
- [14] 贺冬梅, 张崇玉. 不同水氮磷钾耦合条件下玉米干物质与养分累积动态变化[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(3): 124—127.
He Dongmei, Zhang Chongyu. Dynamic varieties of dry matter and nutrient accumulation in maize plants under different water and N, P, K supply condition[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(3): 124—127. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李晓林, 冯固. 丛枝菌根生态生理[M]. 北京: 华文出版社, 2001, 345—358.
- [16] 杨如意. 丛枝菌根对环境变化的响应及其对宿主植物的调节[D]. 浙江: 浙江大学, 2007.
Yang Ruyi. The Responses of Arbuscular Mycorrhizae to Environmental Changes and their Feedbacks on Host Plants[D]. Zhejiang: Zhenjiang University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [17] Verena B, Markus W, Carsten R, et al. Arbuscular Mycorrhizas in Phosphate-Polluted Soil: Interrelations between Root Colonization and Nitrogen[J]. Plant Soil, 2011, 343(1/2): 379—392.
- [18] Lalitha S, Rajeshwara K, Senthil K P, et al. Role of AM fungi and rhizobial inoculation for reclamation of phosphorus deficient soil[J]. Asian Journal of Plant Sciences, 2011, 10(3): 227—232.
- [19] Lovelock C E, Wright S F, Clark D A, et al. Soil stocks of glomalin produced by arbuscular mycorrhizal fungi across a tropical rain forest landscape[J]. Journal of Ecology, 2004, 92(2): 278—287.
- [20] Rillig M C, Wright S F, Eviner V T. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: Comparing effects of five plant species[J]. Plant and Soil, 2002, 238(2): 325—333.

Simulation on relieving negative influence of damage roots on growth of maize by application of arbuscular mycorrhizal fungi

Li Shaopeng, Bi Yinli^{*}, Yu Haiyang, Kong Weiping, Feng Yanbo, Qin Yafei

(College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Relieving affection of damage roots on growth of maize by application of arbuscular mycorrhizal fungi
Abstract: With the first coal output and larger subsidence area in China, the Shendong mining area is the largest coal field in China and one of the seven major coalfields in the world now. Underground mining would cause ground subsidence damage and large amounts of cracks, which would result a loss of surface moisture and nutrient and intensifying drought. There are a few reports about damage to plant roots caused by coal mining at home and abroad. The main reasons are that plant roots in soil would form a “black box” which is difficult to observe. In addition, the irregular distribution of plant roots in soil and the different forces generated in process of surface subsidence are difficult to study comprehensively. The technologies to repair damaged plant roots have not been completely perfected yet. Although the physical methods and chemical methods would alleviate the adverse effects of coal mining to some extent, they can not fundamentally solve the environmental degradation caused by root damage in coal mining. Moreover they are difficult to spread and apply in mining area as their treatment cost is high. The bioremediation method is one of the most popular and advocated methods at home and abroad. As a good function of biological “fertilizer” arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) has greater value and potential in an ecological environment treatment. In the process of coal mining, surface subsidence leads to plant root injury. For this problem, in this study, the mitigation effects of an arbuscular mycorrhizal fungus inoculation on the growth of root injured maize were investigated by soil pot experiments, which artificially simulated root damage caused by coal mining, with corn as the host plant and mining area degraded soils as the test matrix. The results indicated that AMF inoculation alleviated the adverse effects caused by root harm, and contributed to the growth of maize. The average dry weight per plant of the inoculation group was higher than that of the control group by 9.74 g. In addition, AMF inoculation significantly promoted the maize to take up mineral elements from the soil, and increased the content of glomalin and organic matter which existed in the rhizosphere soil of the injured maize. The contents of total glomalin and organic matter in the maize rhizosphere soil of the inoculation group were higher than that of the control group by 48.1% and 24.5% respectively. AMF inoculation improved the micro-environment of rhizosphere and made a contribution to the amelioration and fertilization of degraded soil in the mining area. It will provide technical support for land reclamation and ecological reconstruction by studying the effects of AMF on the growth of damaged plants.

Key words: coal mining area, soils, arbuscular mycorrhizae, maize, root harm, glomalin

(责任编辑: 刘丽英)