

河北井陉矿区红花刺槐根围 AM 真菌与土壤因子相关性

贺学礼, 荣心瑞, 牛 凯, 王 雷

(河北大学生命科学学院, 河北 保定 071002)

摘要:为了探明煤矿区土壤 AM 真菌资源和生态分布特点,2011 年 8 月从河北井陉矿区选取工业园、大兰山和贾庄镇 3 个样地,以矿区优势植物红花刺槐(*Robinia hispida*)为目标植物,分 0~10、10~20、20~30、30~40 cm 和 40~50 cm 5 个土层采集根围土壤样品,系统研究了 AM 真菌生态分布及土壤因子的生态作用。共分离鉴定出 AM 真菌 4 属 21 种,其中球囊霉属(*Glomus*)13 种,无梗囊霉属(*Acaulospora*)6 种,多孢囊霉属(*Diversispora*)和内生囊霉属(*Entrophospora*)各 1 种。AM 真菌与红花刺槐根系能形成良好共生关系,AM 真菌生态分布具有明显空间异质性,最大孢子密度出现在 0~20 cm 土层,最高定殖率多在 0~30 cm 土层。相关性分析发现,孢子密度与易提取球囊霉素、总球囊霉素和土壤碱解氮极显著正相关,与土壤酸性磷酸酶显著正相关;总定殖率与土壤脲酶和有机质极显著正相关。主成分分析表明,土壤脲酶、碱解氮、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶是影响井陉矿区 AM 真菌与植物共生的主要因子。易提取球囊霉素占有有机质百分比均值为 0.416%,总球囊霉素占有有机质百分比均值为 0.511%,说明球囊霉素是井陉矿区土壤有机碳库的重要来源。

关键词:AM 真菌;土壤因子;红花刺槐;煤矿区;河北井陉县

中图分类号:X172 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)12-2381-08

Relativity Analysis Between AM Fungi and Soil Factors of *Robinia hispida* from Jingxing Mining Area in Hebei Province, China

HE Xue-li, RONG Xin-rui, NIU Kai, WANG Lei

(College of Life Sciences, Hebei University, Baoding 071002, China)

Abstract:To elucidate AM fungal resources and distribution in coal mine area, soil samples were collected from a depth of 50 cm in the rhizosphere of *Robinia hispida* and were divided into five depth intervals:0~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50 cm in the three sampling sites including Gongyeyuan, Dalanshan and Jiahuangzhen from Jingxing mining area in Hebei Province. Among 21 AM fungal species were isolated from the tested soil samples, 13 species belonged to *Glomus*, six to *Acaulospora*, one to *Diversispora* and one to *Entrophospora*. Spore density and colonization of AM fungi had significant spatial differences. The highest spore density and colonization were found at 0~20 cm and 0~30 cm soil layer, respectively. Relativity analysis showed that spore density was positively correlated with TG (total glomalin), EEG(easily extractable glomalin) and soil available N, and was positively correlated with soil acid phosphatase. Colonization intensity had a significantly positive correlation with soil urease and organic matter. Principal component analysis showed that soil urease, available N, acid and alkaline phosphatase were the key factors affecting distributions and activities of AM fungi in the mining area of Jingxing. EEG and TG accounted for 0.511% and 0.416% of soil organic matter. The results supported that glomalin was an important source of soil organic carbon in Jingxing mining area.

Keywords:arbuscular mycorrhizal fungi; soil factor; *Robinia hispida*; coal mining area; Jingxing in Hebei

煤炭在开采过程中产生的废弃物堆放不仅严重污染环境,造成土地退化和资源浪费,而且严重影响矿区植被恢复和生态环境建设^[1]。

大量研究表明,AM 真菌能与绝大多数高等植物

形成共生关系,扩大植物根系水分和营养物质吸收范围和效率,增强植物抗逆性,促进植物生长,根外菌丝形成庞大菌丝网络以及分泌的球囊霉素(Glomalin)等代谢产物,能将不同植物根系连接起来,这对生态系统不同组分之间物质交换,能量、信息传递,生物演化与分布,保持植物多样性和稳定性具有重要意义^[2]。球囊霉素是 AM 真菌产生的含金属离子的糖蛋白,是 AM 真菌对宿主植物生长环境调整和适应的一种积

收稿日期:2012-07-10

基金项目:国家自然科学基金项目(31170488)

作者简介:贺学礼(1963—),男,博士,教授,主要从事菌根生物学和生态修复研究工作。E-mail:xuelh1256@yahoo.com.cn

极应答机制,是土壤有机质的重要来源,可以增强土壤颗粒黏附能力,改良土壤质量^[3]。毕银丽等^[4]研究表明,在矿区条件下 AM 真菌与豆科植物共生,能够促进植物生长。杜善周等^[5]研究表明,接种 AM 真菌对植物幼苗生长具有明显促进作用,有助于矿区生态修复。张淑彬等^[6]通过盆栽试验,以露天煤矿回填土为基质,研究 8 种 AM 真菌对沙打旺根系侵染的影响,表明 AM 真菌能有效改善矿区植株磷和氮营养。

红花刺槐(*Robinia hispida*)为豆科刺槐属,根系发达,萌蘖较多,具有耐沙、耐旱、抗逆性强等特点,是矿区生态修复的先锋树种。目前,红花刺槐作为矿区土壤复垦先锋植物已大面积在河北省煤矿区种植,并取得了良好的生态效应。本文通过对河北井陘矿区红花刺槐根围土壤采集和分析,研究 AM 真菌与宿主植物共生关系及其生态分布,以期充分利用 AM 真菌资源促进植物生长和矿区植被恢复提供依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

井陘煤矿区位于河北省井陘县,年均气温 12.7℃,年降水量 580 mm,土壤质地为亚粘土。在矿区选取工业园(114°02'E,28°07'N)、大兰山脚(114°03'E,28°12'N)和贾庄镇(114°03'E,38°10'N)3 个样地采集红花刺槐根围土壤样品。

2011 年 8 月从每个样地分别随机选取 3 株红花刺槐,去除根围枯枝落叶层,分 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm 5 个土层采集土样约 1 kg。将土样装入塑料袋密封后带回实验室,过 2 mm 筛,用于 AM 真菌孢子密度、球囊霉素和土壤理化性质测定;过筛后收集根样用于 AM 真菌定殖率测定。

1.2 测定方法

AM 真菌定殖率采用 Phillips 和 Hayman^[7]方法测定。从每份土样中称取 20 g 风干土,用湿筛倾析-蔗糖离心法分离 AM 真菌孢子,在体视显微镜下记录孢子数量,以每 100 g 风干土含孢量计为孢子密度。

用湿筛倾析-蔗糖离心法分离孢子,记录孢子数目和孢子分类特征,然后用微吸管挑取孢子置于载玻片上,加浮载剂观察压片,并辅助使用 Melzer's 试剂观察孢子壁及内含物特异性反映。根据 Morton 和 Redecker^[8]提出的分类系统及国际 AM 真菌保藏中心(INVAM)在 <http://invam.caf.wvu.edu> 上最新分类描述及图片并参阅有关鉴定材料和近年来发表的新种描述文献等进行种属鉴定。土壤有机质用灼烧法^[9],速效

P 用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,碱解 N 用扩散法,pH 用 pH 计测定。土壤脲酶用改进的 Hoffmann 与 Teicher 比色法^[10]测定。磷酸酶用改进的 Taba-tabai 和 Brimmer 方法^[11]测定。球囊霉素按 Wright 等^[12]的方法测定。

1.3 数据分析

采用 SPSS19.0 生物统计软件对试验数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 AM 真菌资源

本试验共分离鉴定 AM 真菌 4 属 21 种,其中球囊霉属(*Glomus*)13 种,无梗囊霉属(*Acaulospora*)6 种,多孢囊霉属(*Diversispora*)和内养囊霉属(*Entrophospora*)各 1 种。有 11 种 AM 真菌为 3 个样地共有种,聚丛球囊霉(*G. aggregatum*)等 5 种 AM 真菌只在单一样地出现(表 1、图 1)。

2.2 AM 真菌空间分布

由表 2 可知,同一样地,工业园土层间丛枝定殖率无显著差异;大兰山丛枝定殖率在 10~20 cm 土层显著高于 0~10 cm 和 20~30 cm 土层,30~50 cm 土层丛枝定殖率显著低于其他土层;贾庄镇仅 0~10 cm 土层丛枝定殖率与其他土层差异显著。不同样地,丛枝定殖率 0~10 cm 土层大兰山显著高于工业园和贾庄镇,10~20 cm 土层间无显著差异,20~30 cm 土层贾庄镇和大兰山显著高于工业园,30~40 cm 土层贾庄镇显著高于工业园和大兰山,40~50 cm 土层贾庄镇和工业园显著高于大兰山。

工业园泡囊定殖率仅 30~40 cm 土层显著高于其他土层;大兰山泡囊定殖率 0~10 cm 土层显著高于 10~30 cm 土层,10~20 cm 土层显著高于 30~40 cm 土层,20~40 cm 土层显著高于 40~50 cm 土层;贾庄镇泡囊定殖率 10~50 cm 土层显著高于 0~10 cm 土层。样地间泡囊定殖率仅 0~20 cm 土层大兰山显著高于工业园和贾庄镇。

工业园菌丝和总定殖率 30~50 cm 土层显著高于其他土层,10~30 cm 土层显著高于 0~10 cm 土层;大兰山 10~20 cm 土层菌丝和总定殖率显著高于其他土层,0~10 cm 土层显著高于 20~50 cm 土层;贾庄镇菌丝和总定殖率 30~40 cm 土层显著高于其他土层,10~30 cm 土层显著高于 0~10 cm 和 40~50 cm 土层。样地间菌丝和总定殖率 0~20 cm 和 40~50 cm 土层大兰山显著高于贾庄镇和工业园,20~30 cm 土层大兰山和

表 1 红花刺槐根围 AM 真菌空间分布
Table 1 The spatial distribution of AM fungi in the rhizosphere of *Robinia hispida*

AM 真菌种类AM fungi species	工业园土层/cm					大兰山土层/cm					贾庄镇土层/cm				
	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50
近明球囊霉 <i>Glomus claroideum</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
粘质球囊霉 <i>G. viscosum</i>	+	+	+	+								+	+	+	
摩西球囊霉 <i>G. mosseae</i>	+	+	+	+	+		+	+			+	+	+	+	+
聚丛球囊霉 <i>G. aggregatum</i>							+	+	+						
多产球囊霉 <i>G. fecundisporum</i>							+	+	+		+		+	+	
网状球囊霉 <i>G. reticulatum</i>	+	+	+	+		+	+	+			+	+	+		
多梗球囊霉 <i>G. multicaule</i>												+	+	+	
沙荒球囊霉 <i>G. deserticola</i>		+	+	+	+		+	+	+	+			+	+	+
聚集球囊霉 <i>G. glomerulatum</i>	+	+	+	+	+	+	+	+							
明球囊霉 <i>G. clarum</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
集球囊霉 <i>G. fasciculatum</i>						+	+	+	+	+	+	+			
黑球囊霉 <i>G. melanosporum</i>	+	+	+												
地球囊霉 <i>G. geosporum</i>			+	+	+		+	+	+	+				+	+
光壁无梗囊霉 <i>Acaulospora laevis</i>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
孔窝无梗囊霉 <i>A. foveata</i>	+	+	+			+	+	+				+	+	+	
凹坑无梗囊霉 <i>A. excavata</i>	+	+	+	+	+					+		+		+	+
双网无梗囊霉 <i>A. bireticulata</i>										+	+	+	+	+	
细凹无梗囊霉 <i>A. scrobiculata</i>	+	+	+												
刺无梗囊霉 <i>A. spinosa</i>		+	+					+	+	+			+	+	+
幼套多孢囊霉 <i>Diversispora etunicatum</i>			+	+	+										
稀有内养囊霉 <i>Entrophospora infrequens</i>	+		+			+	+	+							

注: +表示有 AM 真菌分布。

贾庄镇显著高于工业园,30~40 cm 土层贾庄镇显著高于大兰山和工业园。

贾庄镇孢子密度显著高于工业园和大兰山。工业园孢子密度 10~20 cm 土层最高,随土层加深孢子密度显著减少;大兰山和贾庄镇孢子密度 0~10 cm 土层显著高于其他土层。样地间孢子密度 0~20 cm 和 30~50 cm 土层贾庄镇显著高于大兰山和工业园,20~30 cm 土层工业园显著高于大兰山和贾庄镇。

2.3 土壤因子空间分布

由表 3 可知,土壤有机质工业园 0~20 cm 土层最高,并随土层加深含量显著降低;大兰山有机质 0~20 cm 土层显著高于 30~40 cm 土层,30~40 cm 土层显著高于 20~30 cm 土层,20~30 cm 土层显著高于 40~50 cm 土层;贾庄镇有机质 0~10 cm 和 30~40 cm 土层显著高于其他土层。样地间有机质 0~20 cm 和 30~40 cm 土层大兰山显著高于工业园和贾庄镇,20~30 cm 大兰山和贾庄镇显著高于工业园,40~50 cm 土层贾庄镇显著高于大兰山和工业园。

工业园仅 0~10 cm 土层速效磷显著高于其他土

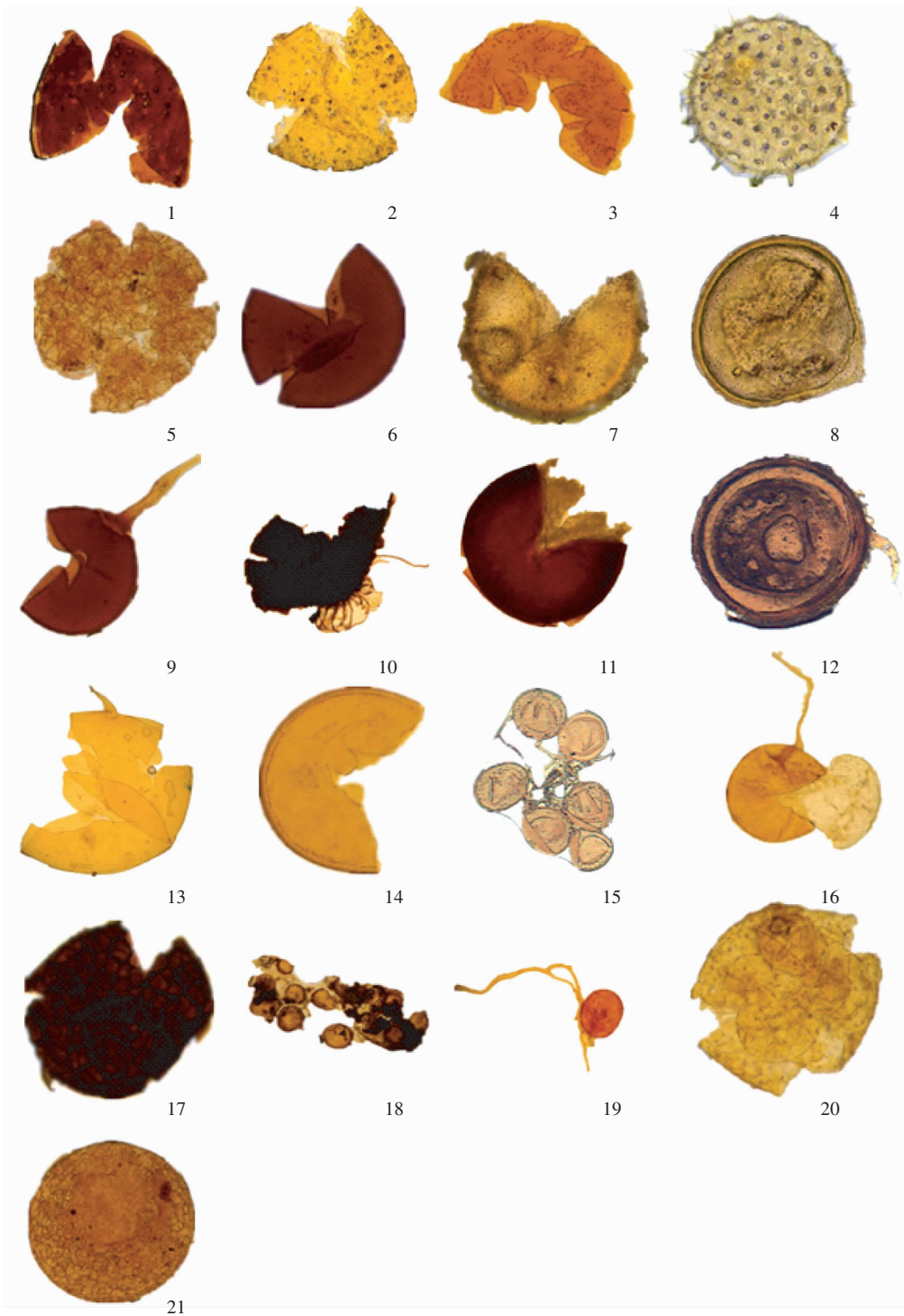
层;大兰山速效磷 30~40 cm 土层显著高于其他土层,0~20 cm 土层显著高于 20~30 cm 土层;贾庄镇速效磷 0~10 cm 和 20~30 cm 土层显著高于其他土层。样地间速效磷 0~10 cm 和 20~30 cm 土层贾庄镇显著高于工业园和大兰山,30~50 cm 土层大兰山显著高于贾庄镇和工业园。

工业园和大兰山碱解氮 0~10 cm 土层最高,随土层加深显著降低;贾庄镇碱解氮含量 0~10 cm 和 20~40 cm 土层显著高于其他土层。样地间碱解氮贾庄镇显著高于大兰山和工业园。

土壤 pH 值在贾庄镇 0~10 cm 土层最大,其他样地和土层差异均不显著。

土壤酸性磷酸酶工业园 0~20 cm 土层显著高于其他土层;在大兰山随土层加深酶活显著增强;贾庄镇与大兰山相反,酸性磷酸酶随土层加深酶活显著减弱。样地间酸性磷酸酶各土层贾庄镇均显著高于工业园和大兰山。

工业园碱性磷酸酶 0~10 cm 土层显著低于其他土层;大兰山碱性磷酸酶仅 10~30 cm 土层显著高于



1.*A.foveata*;2.*A.excauata*;3.*A.scrobiculata*;4.*A.spinosa*;5.*A.bireticulata*;6.*A.laevis*;7.*G.viscosum*;8.*G.fecundisporum*;9.*G.deserticola*;10.*G.multicaule*;
11.*G.melanosporum*;12.*G.geosporum*;13.*G.mosseae*;14.*G.clarum*;15.*G.glomerulatum*;16.*G.claroideum*;17.*G.reticulatum*;18.*G.fecundisporum*;
19.*G.aggregatum*;20.*D.etunicatum*;21.*E.infrequens*

图 1 AM 真菌孢子图片

Figure 1 Photos of AM fungal spore

其他土层;贾庄镇碱性磷酸酶仅 30~50 cm 土层显著高于其他土层。样地间碱性磷酸酶 0~10 cm 和 20~50 cm 土层贾庄镇显著高于工业园和大兰山,10~20 cm

土层工业园显著高于贾庄镇和大兰山。

工业园脲酶随土层加深显著降低;大兰山脉酶活性在 30~40 cm 土层最高;贾庄镇脲酶活性在 10~20 cm

表 2 红花刺槐根围 AM 真菌孢子密度和定殖率

Table 2 AM fungal colonization and spore density in the rhizosphere of *Robinia hispida*

样地 Site	土层 Soil Layer/cm	丛枝定殖率 Arbuscule/%	泡囊定殖率 Vesicle/%	菌丝定殖率 Hypha/%	总定殖率 Total/%	孢子密度 Spore density/个·100 g ⁻¹
工业园	0~10	6.34Ab	13.89Cb	27.98Cc	28.74Cc	173.65Bc
	10~20	8.49Aa	16.93Bb	31.35Bc	32.06Bc	189.02Ab
	20~30	7.66Ab	17.12Ba	32.27Bb	32.46Bb	178.57Ba
	30~40	8.87Ab	20.33Aa	38.45Ac	39.51Ac	167.06Cb
	40~50	8.29Aa	16.47Ba	36.15Ac	38.91Ab	164.94Cb
	均值	7.95A	16.94B	33.24B	33.94B	174.65B
大兰山	0~10	10.87Ba	26.67Aa	57.47Ba	58.42Ba	201.38Ab
	10~20	12.54Aa	22.86Ba	65.60Aa	66.41Aa	175.29Bc
	20~30	10.39Ba	21.34BCa	49.07Ca	50.58CDa	165.01Cb
	30~40	2.52Dc	18.24Ca	51.21Cb	51.74CDb	156.47Dc
	40~50	2.85Db	14.41Da	48.13Ca	48.94Da	163.47Cb
	均值	7.83C	20.71BC	54.29BC	55.22BC	172.32B
贾庄镇	0~10	4.99Bb	12.46Bb	38.22Db	37.98Cb	226.65Aa
	10~20	11.42Aa	18.42Ab	45.91Ca	46.75Bb	200.07Ba
	20~30	11.22Aa	18.65Aa	49.79Ba	50.67Ba	171.34Cb
	30~40	11.28Aa	18.58Aa	55.57Aa	56.18Aa	190.42Ba
	40~50	8.96Aa	16.42Aa	40.42Db	41.12Cb	189.16Ba
	均值	9.58A	16.91A	45.78C	46.54B	195.52B

注:同列数据后不同大写字母表示同一样地不同土层之间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示同一土层不同样地之间差异显著($P<0.05$)。下表同。

表 3 红花刺槐根围土壤因子空间分布

Table 3 The spatial distribution of soil factors in the rhizosphere of *Robinia hispida*

样地 Site	土层 Soil layer/ cm	有机质 Organic matter/ mg·g ⁻¹	速效磷 P/ μg·g ⁻¹	碱解氮 N/ μg·g ⁻¹	pH	酸性磷酸酶 Acid phosphatase/ μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase/ μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹	脲酶 Urease/ μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹	EEG/ mg·g ⁻¹	TG/ mg·g ⁻¹
工业园	0~10	34.08Ac	7.50Aa	32.48Ab	7.87Ab	24.39Ab	27.31Db	14.42Ac	0.47Ab	0.58Ab
	10~20	34.84Ab	5.23Ba	24.35Bb	7.76Aa	24.35Ac	69.01Aa	12.20Cc	0.45Ab	0.54ABb
	20~30	32.15Bb	4.66Bb	21.35Cc	7.91Aa	18.83Cc	52.60Cb	12.57Bc	0.43Ab	0.50BCa
	30~40	32.42Bc	4.85Bb	16.62Dc	7.86Aa	20.63Bc	53.21Cb	10.09Dc	0.34Bb	0.46Cb
	40~50	27.86Cb	3.17Cb	17.57Dc	7.83Aa	15.33Dc	59.32Bb	9.90Dc	0.25Cc	0.33Dc
	均值	32.27B	5.08B	22.47BC	7.85A	20.70B	52.29C	11.83C	0.38B	0.48C
大兰山	0~10	51.06Aa	4.38Cc	31.29Ab	7.72Ac	16.63Dc	24.79Dc	20.56Db	0.58Aa	0.69Aa
	10~20	50.99Aa	4.92Ca	24.24Bb	7.92Aa	27.27Cb	40.94Ac	25.18Bb	0.54ABa	0.67Aa
	20~30	37.74Ca	3.29Dc	23.29Bb	7.84Aa	27.34Cb	40.83Ac	26.44Ba	0.37Cb	0.45Cb
	30~40	43.21Ba	6.37Aa	23.15Bb	7.79Aa	31.58Bb	39.17Bc	29.73Aa	0.48Ba	0.59Ba
	40~50	34.05Db	6.37Aa	22.97Bb	7.74Aa	37.38Ab	38.94Bc	22.57Cb	0.33Cb	0.44Cb
	均值	43.41B	5.11B	24.99B	7.80A	28.04C	36.94C	24.90B	0.46B	0.57B
贾庄镇	0~10	40.62Ab	6.11Ab	38.67Aa	8.14Aa	44.06Ba	54.27Da	28.51Ba	0.57Aa	0.68Aa
	10~20	32.32Cc	5.07Ba	38.45Aa	7.81ABa	44.71Aa	57.37Cb	33.01Aa	0.45Bb	0.54Bb
	20~30	38.90Aba	5.64Aa	29.79Ca	7.79ABa	40.39Da	59.91Ca	21.69Db	0.45Ba	0.54Ba
	30~40	40.74Ab	3.60Cb	32.62Ba	7.78ABa	40.62Da	65.64Aa	21.01Db	0.39Cb	0.48Cb
	40~50	37.08Ba	2.69Dc	27.10Da	7.52Ba	42.26Ca	65.49Aa	27.09Ca	0.46Ba	0.53Ba
	均值	37.93B	4.62B	33.33B	7.81AB	42.41C	60.14B	26.27C	0.43B	0.55B

注:EEG 易提取球囊霉素;TG 总球囊霉素。下表同。

土层最高,20~40 cm 土层差异不显著。样地间脲酶 0~20 cm 和 40~50 cm 土层贾庄镇显著高于大兰山和工业园,20~40 cm 土层大兰山显著高于贾庄镇和工业园。

3 个样地易提取球囊霉素均为表层含量最高,工业园随土层加深含量降低,大兰山和贾庄镇随土层加深波动降低。易提取球囊霉素 0~10 cm 土层大兰山和贾庄镇显著高于工业园,10~20 cm 和 30~40 cm 土层大兰山显著高于工业园和贾庄镇,20~30 cm 和 40~50 cm 土层贾庄镇显著高于大兰山和工业园。总球囊霉素和易提取球囊霉素在土层间分布规律相似。

2.4 AM 真菌与土壤因子的相关性

由表 4 可知,孢子密度与易提取球囊霉素、总球囊霉素和土壤碱解氮极显著正相关,与酸性磷酸酶显著正相关;泡囊定殖率与土壤有机质极显著正相关,与速效磷极显著负相关,与酸性和碱性磷酸酶显著负相关;丛枝定殖率与土壤速效磷极显著负相关;总定殖率和菌丝定殖率与土壤脲酶和有机质极显著正相关。

2.5 球囊霉素和土壤有机质的关系

本试验中土壤易提取球囊霉素含量为 0.25~0.58 mg·g⁻¹,总球囊霉素含量 0.33~0.69 mg·g⁻¹;有机质含量 27.86~51.06 mg·g⁻¹。3 个样地易提取球囊霉素占有有机质百分比平均值 0.416%,总球囊霉素占有有机质百分比平均值 0.511%,易提取球囊霉素和总球囊霉素均为工业园占的比例最高,大兰山最低。

2.6 土壤因子主成分分析

由于土壤因子间存在复杂相关性,在土壤因子分析时可能出现信息重叠,因此通过主成分分析筛选出矿区主要土壤因子。根据相关矩阵特征值大于 1,方差累计贡献率大于 70%的原则,入选 3 个主成分。入选的 3 个主成分方差累积贡献率 77.006%(表 5)。第一主成分中酸性磷酸酶、碱解氮和脲酶有较高的载荷(权重为 0.831~0.884)。第二主成分中速效磷有较高

表 5 主成分载荷矩阵、特征值、贡献率
Table 5 Principle component loading matrix, eigenvalue and contribution rate

理化因子 Physico-chemical factors	第一主成分 PC1	第二主成分 PC2	第三主成分 PC3
pH	0.105	0.388	0.613
速效磷 Available P	0.261	0.579	0.551
碱解氮 Available N	0.846	0.022	0.174
有机质 Organic matter	0.370	0.482	-0.654
酸性磷酸酶 Acid phosphatase	0.831	-0.467	0.134
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	-0.058	-0.885	0.223
脲酶 Urease	0.884	-0.059	-0.239
特征值(λ)Eigenvalue	2.407	1.723	1.261
贡献率 Contribution rate/%	34.383	24.610	18.013

荷载(权重为 0.579),碱性磷酸酶有较高负载荷(权重为-0.885)。第三主成分中 pH 具较高载荷(权重为 0.613),速效磷次之(权重为 0.551),有机质具有较高负载荷(权重为-0.654)。第一和第二主成分占的贡献率较大,选取载荷权重较高(0.8 以上)的视为主成分。所以脲酶、碱解氮、酸性和碱性磷酸酶是主要因子,能首先反映矿区土壤营养状况。

3 讨论

3.1 AM 真菌资源及空间分布

本试验共分离 AM 真菌 4 属 21 种,工业园样地有 AM 真菌 17 种,大兰山 16 种,贾庄镇 15 种。3 个样地平均孢子密度分别是工业园 174.65 个·100 g⁻¹土、大兰山 172.32 个·100 g⁻¹土和贾庄镇 195.52 个·100 g⁻¹土;平均定殖率分别是工业园 33.94%、大兰山 55.22%和贾庄镇 46.54%。说明河北井陘矿区 AM 真菌能与红花刺槐根系形成良好共生关系。3 个样地孢子密度最大值均出现在 0~20 cm 土层,最高定殖率大多在 0~30 cm 土层。这与 AM 真菌是好气性真菌,浅土层环境更适合 AM 真菌生长发育有关^[13]。毕银丽

表 4 AM 真菌与土壤因子相关性分析
Table 4 Relativity analysis between AM fungi and soil factors

项目 Item	pH	EEG	TG	速效磷 Available P	碱解氮 Available N	有机质 Organic matter	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	脲酶 Urease	孢子密度 Spore density
孢子密度 Spore density	0.220	0.555**	0.499**	-0.024	0.747**	0.220	0.370*	0.216	0.290	1
泡囊 Vesicle	-0.107	0.190	0.238	-0.434**	-0.155	0.594**	-0.367*	-0.302*	0.053	-0.085
丛枝 Arbuscule	-0.056	0.880	0.390	-0.520**	0.141	0.238	-0.043	0.222	-0.080	0.199
菌丝 Hypha	-0.089	0.240	0.292	-0.190	0.102	0.752**	0.199	-0.261	0.520**	-0.062
总定殖率 Total	-0.088	0.235	0.290	-0.193	0.101	0.748**	0.196	-0.264	0.519**	-0.063

注:* 表示两者之间在 P<0.05 水平上有显著相关性;** 表示两者之间在 P<0.01 水平上有极显著相关。

等^[14]在宁夏大武口洗煤厂煤矸石山复垦地人工接种 AM 真菌有效提高了白蜡幼苗存活率,未接种 AM 真菌植株定殖率 40%左右,与井陉矿区红花刺槐根围 AM 真菌定殖率接近,接种 AM 真菌定殖率达到 90%以上,这为井陉矿区利用人工接种 AM 真菌进行生态修复提供了参考。

3.2 AM 真菌与土壤因子的关系

主成分分析表明,土壤脲酶、碱解氮、酸性和碱性磷酸酶是影响 AM 真菌的主要因子。孢子密度与易提取球囊霉素、总球囊霉素和碱解氮极显著正相关,AM 真菌吸收碱解氮在根外菌丝中转化成氨基酸后转入植物体,供植物体代谢使用,其中 NH_4^+ 是 AM 真菌吸收同化的主要 N 素形态^[15-16]。井陉矿区属于碱性土壤,AM 真菌吸收 NH_4^+ 的同时释放 H^+ 可导致土壤 pH 下降,改善土壤酸碱度利于 AM 真菌生长^[17]。菌丝定殖率与脲酶极显著正相关,因为脲酶催化尿素水解释放出氨为 AM 真菌提供大量 NH_4^+ ,有利于 AM 真菌与矿区植物共生。孢子密度与土壤酸性磷酸酶显著正相关,而 AM 真菌侵染植物根系后能够促使 AM 真菌分泌磷酸酶,磷酸酶加速有机磷矿化^[18],而井陉矿区速效磷含量较低,低磷环境诱导磷酸酶活性增加,改善土壤营养环境,利于矿区植物生长。

3.3 球囊霉素与土壤有机质的关系

AM 真菌分泌的球囊霉素是土壤有机碳库的重要组成部分。它能有效增强土壤团聚体的稳定性,改善土壤质量^[19]。球囊霉素还可和重金属元素结合,在土壤重金属形态转化中具有潜在意义^[20]。本试验中,易提取球囊霉素占有有机质百分比均值为 0.416,总球囊霉素占有有机质百分比均值为 0.511(表 6),说明球囊霉素是矿区土壤有机碳库的重要来源。贺学礼等^[21-24]研究荒漠植物根围土壤球囊霉素含量与井陉矿区含量相近,但占有有机质比例远高于井陉矿区,主要是由于矿区煤炭开采运输大量煤渣散落导致矿区有机质含量偏高。河北安国市中药材根围球囊霉素高于井陉矿

区红花刺槐^[23-24]。井陉矿区球囊霉素含量水平较低,说明 AM 真菌生长并未达到理想状态,其与植物共生并改善土壤环境有很大的提升空间。

4 结 论

(1)井陉矿区 AM 真菌能与红花刺槐根系形成良好共生关系。孢子密度和菌根定殖率均为表层土壤高。利用人工接种 AM 真菌进行环境修复的空间很大。

(2)土壤脲酶、碱解氮、酸性和碱性磷酸酶是影响 AM 真菌的主要因子。球囊霉素是井陉矿区土壤有机碳库的重要来源。

(3)井陉矿区在煤炭开采和运输过程中对矿区土壤结构造成破坏,自然环境中 AM 真菌与植物共生对环境修复进行缓慢。因此,发掘和筛选 AM 真菌资源,充分利用菌根技术提高矿区红花刺槐抗逆性,加快污染土壤修复具有广阔前景。

参考文献:

[1] 束文圣, 张志权, 蓝崇钰. 中国矿业废弃地的复垦对策(I)[J]. 生态科学, 2000, 19(2): 24-29.
SHU W S, ZHANG Z Q, LAN C Y. Strategies for restoration of mining wastelands in China(I)[J]. *Ecologic Science*, 2000, 19(2): 24-29.

[2] 杨宏宇, 赵丽莉, 贺学礼. 丛枝菌根在退化生态系统恢复和重建中的作用[J]. 干旱区地理, 2005, 28(6): 836-841.
YANG H Y, ZHAO L L, HE X L. Function of arbuscular mycorrhiza in the reiteration and reconstruction of degraded ecosystems [J]. *Arid Land Geography*, 2005, 28(6): 863-841.

[3] Rillig M C, Steinberg P D. Glomalin production by an arbuscular mycorrhizal fungus: A mechanism of habitat modification [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34: 1371-1374.

[4] 毕银丽, 吴福勇, 全文智. 菌根与豆科植物组合在煤矿区废弃物的生态效应[J]. 中国矿业大学学报 2006, 6(3): 329-335.
BI Y L, WU F Y, QUAN W Z. Ecological effects of matching between mycorrhizal fungus and leguminous plants in solid wastes of mine area[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2006, 6 (3): 329-335.

[5] 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, 4(4): 113-116.
DU S Z, BI Y L, WU W Y, et al. Ecological effects of arbuscular mycorrhizal fungi on environmental phytoremediation in coal mine areas[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 4(4): 113-116.

[6] 张淑彬, 纪晶晶, 王幼珊, 等. 内蒙古露天煤矿区回填土壤具生态适应能力丛枝菌根真菌的筛选[J]. 生态学报, 2009, 7(7): 3729-3736.
ZHANG S B, JI J J, WANG Y S, et al. The screening of arbuscular mycorrhizal fungi with high ecological adaptations in backfill soil of open pit mining area in Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 7(7): 3729-3736.

表 6 红花刺槐根围球囊霉素占土壤有机质质量百分比

Table 6 Percentages of glomalin in soil organic carbon in the rhizosphere of *Robinia hispida*

样地 Site	EEG/有机质 m(EEG)/m(Organic matter)	TG/有机质 m(TG)/m(Organic matter)
工业园	0.436	0.550
大兰山	0.392	0.486
贾庄镇	0.419	0.537
平均值	0.416	0.511

- [7] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection[J]. *Transactions of the British Mycological Society*, 1970, 55: 158–161.
- [8] Morton J B, Redecker D. Two new families of glomales, archaeosporaceae and paraglomaceae, with two new genera *Archaeospora* and *Paraglomus*, based on concordant molecular and morphological characters[J]. *Mycologia*, 2001, 93(1): 181–195.
- [9] 张文河, 穆桂金. 烧失法测定有机质和碳酸盐的精度控制[J]. 干旱区地理, 2007, 30(3): 455–459.
- ZHANG W H, MU G J. Precision control on measuring organic and carbonate content with loss on ignition method[J]. *Arid Land Geography*, 2007, 30(3): 455–459.
- [10] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 275–276.
- ZHOU L K. Soil enzymology[M]. Beijing: Science Press, 1987: 275–276.
- [11] 宋勇春, 李晓林, 冯 固. 菌根真菌磷酸酶活性对红三叶草生境中土壤有机磷亏缺的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1130–1135.
- SONG Y C, LI X L, FENG G. Effect of phosphatase activity on soil organic phosphorus loss in the environment of clover growth [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7): 1130–1135.
- [12] 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.
- [13] 杨 静, 贺学礼, 赵丽莉. 内蒙古荒漠沙柳 AM 真菌物种多样性[J]. 生物多样性, 2011, 19(3): 377–385.
- YANG J, HE X L, ZHAO L L. Species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of *Salix psammophila* in Inner Mongolia desert[J]. *Biodiversity Science*, 2011, 19(3): 377–385.
- [14] 毕银丽, 吴王燕, 刘银平. 丛枝菌根在煤矿矸石山土地复垦中的应用[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3738–3743.
- BI Y L, WU W Y, LIU Y P. Application of arbuscular mycorrhizas in land reclamation of coal spoil heap[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9): 3738–3743.
- [15] Manjula G, Philip E P, Hairu J, et al. Nitrogen transfer in the arbuscular mycorrhizal symbiosis[J]. *Nature*, 2005, 435: 819–823.
- [16] Tanaka Y, Yano K. Nitrogen delivery to maize via mycorrhizal hyphae depends on the form of N supplied[J]. *Plant Cell Environ*, 2005, 28: 1247–1254.
- [17] Muthukumar T, Udaiyan K. Growth and yield of cowpea as influenced by changes in arbuscular mycorrhiza in response to organic manuring [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2002, 188(2): 123–132.
- [18] Bai C M, He X L, Tang H L, et al. Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi, glomalin and soil enzymes under the canopy of *Astragalus adsurgens* Pall. in the Mu Us sandland, China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41: 941–947.
- [19] 田 慧, 刘晓蕾, 盖京苹, 等. 球囊霉素及其作用研究进展 [J]. 土壤学报, 2009, 10(5): 1215–1220.
- TIAN H, LIU X L, GAI J P, et al. Review of Glomalin-related soil protein and its function[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 10(5): 1215–1220.
- [20] Vodnik D, Grčman H, Mačec I, et al. The contribution of glomalin-related soil protein to Pb and Zn sequestration in polluted soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 392: 130–136.
- [21] 贺学礼, 杨 静, 赵丽莉. 荒漠沙柳根围 AM 真菌空间分布[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2159–2168.
- HE X L, YANG J, ZHAO L L. Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in *Salix psammophila* root-zone soil in Inner Mongolia desert[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(8): 2159–2168.
- [22] 贺学礼, 陈 程, 何 博. 北方两省农牧交错带沙棘根围 AM 真菌与球囊霉素空间分布[J]. 生态学报, 2011, 31(6): 1653–1661.
- HE X L, CHEN C, HE B. Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin of *Hippophae rhamnoides* L. in farming-pastoral zone from the two northern provinces of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(6): 1653–1661.
- [23] 贺学礼, 许 珂, 郭辉娟. 黄芩根围 AM 真菌分布与土壤碳氮相关性研究[J]. 河北农业大学学报, 2011, 34(5): 63–68.
- HE X L, XU K, GUO H J. Relationship between distribution of AM fungi in the rhizosphere of *Scutellaria baicalensis* and soil C and N[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2011, 34(5): 63–68.
- [24] 张翔鹤, 贺学礼, 王 雷. 金银花根围 AM 真菌分布与土壤碳氮关系[J]. 河北大学学报, 2011, 31(5): 522–527.
- ZHANG X H, HE X L, WANG L. AM fungal distribution and the relationship with soil carbon and nitrogen in the rhizosphere of *Lonicera japonica*[J]. *Journal of Hebei University (Natural Science Edition)*, 2011, 31(5): 522–527.