

DOI:10.11937/bfyy.201613045

紫花苜蓿根际丛枝菌根真菌与土壤理化性质的相关性研究

张鑫^{1,2}, 裴宗平^{1,2}, 孙干^{1,2}, 王瑜^{1,2}, 苏雪鹏^{1,2}

(1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116; 2. 江苏省资源环境信息工程重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要:为调查山西省大同矿区紫花苜蓿草地中丛枝菌根真菌(AMF)与根际土壤性质之间的相关性,于2014年10月采集浑源县、南郊区、大同县、矿区4块样地中不同深度的紫花苜蓿根茎和根际土壤,并分析了紫花苜蓿的菌根侵染率以及土壤的理化性质。结果表明:4块样地中紫花苜蓿根部菌根侵染率均在70%以上;除大同县规律不明显以外,其它3块样地中菌根侵染率与孢子密度均表现出随着土层深度增加而降低的规律。分析总相关性得知,菌根侵染率与有机质、硝态氮、速效磷、易提取球囊霉素(EEG)和总球囊霉素(TEG)呈显著正相关性($P < 0.05$);TEG和EEG均与菌根侵染率、有机质、硝态氮和速效磷呈极显著正相关($P < 0.01$)。分析同土层各因素的相关性则发现,只有在20~30 cm土层,菌根侵染率和孢子密度与硝态氮、速效磷、速效钾和EEG有显著相关性($P < 0.05$)。以上结果说明,大同地区丛枝菌根真菌与紫花苜蓿可以形成良好的共生关系,菌根真菌对土壤营养成分具有重要的作用,尤其在20~30 cm土层更有效。

关键词:紫花苜蓿;丛枝菌根真菌;根际土壤;相关性

中图分类号:S 551⁺.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2016)13-0172-06

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)是一种可以与90%以上的高等植物形成共生体的土壤有益菌^[1-2]。AMF可以改善植物的水分状况,其菌丝可以增大根系吸收范围,促进植物对水分和矿物质的吸收,尤其是对磷元素的吸收,促进植物生命调节能力,从

而提高植物的抗旱、抗盐以及耐低温胁迫的能力^[3-4]。

紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)是重要的豆科牧草,其营养、饲用价值居于各种牧草之首,其根系发达,适应性广;同时叶片具有排盐机制,具有较强的耐盐性和抗旱性^[5-6]。紫花苜蓿也可作为煤矿复垦区的前期绿化用草,为土壤提供大量的有机物质,提高土壤肥力,改善土壤理化性状,有助于水土保持^[7]。

目前,关于AM真菌与植物共生状况的研究已有很多,但针对干旱矿区紫花苜蓿草地中土壤理化性质和AM真菌侵染状况关系的研究较少。该试验通过调查大同地区4块紫花苜蓿草地中AM真菌的侵染状况和土壤的理化性质,并分析土壤理化性质与AM真菌之间的相关性,以期改善干旱矿区土壤生态系统功能提供

第一作者简介:张鑫(1991-),女,山西长治人,硕士研究生,现主要从事矿山生态修复和污染场地修复等研究工作。E-mail:zhangxin7698030@126.com.

责任作者:裴宗平(1963-),男,江苏丰县人,博士,教授,硕士生导师,现主要从事矿区生态修复与环境规划及地下水污染治理等教学与科研工作。E-mail:peizp689@163.com.

基金项目:山西省“十二五”重大专项资助项目(20121101008)。

收稿日期:2016-02-14

Abstract: Meadow wetland was prone to salt accumulation in arid area. In this study, the method of field experiment and laboratory experiment were used to find out the main component of salt in the meadow wetland of Yinchuan plain, and to provide scientific guidance for the restoration of wetland. The results showed that soil salinity factors indicated that soil salinity, pH and most of salt ions appeared to be significant or very significant positive or negative correlation. There was a significant or very significant correlation between Na^+ , Cl^- and most of the ions. All the main components analysis of salt ions showed that, in 0—30 cm, Na^+ , Cl^- , $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ were main salt ions in the study area; in 30—100 cm, Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- were main the salt ions of salt accumulation in the study area. Therefore, Na^+ and Cl^- were the main salt ions in the Yinchuan plain, which should focus on the two kinds of ions.

Keywords: soil salt; composition characteristic; Yinchuan plain; meadow wetland

理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域选择山西省大同市的浑源县、南郊区、矿区和大同县 4 个样地,各样地间距大概 50 km,其基本情况如表 1 所示。

表 1 采样地基本情况

Table 1 Environmental conditions of sampling sites

样地 Sample plot	海拔 Altitude/m	年降雨量 Annual rainfall/mm	年平均气温 Mean temperature/℃
浑源 HY	1 090	424.6	6.2
南郊 NJ	926	395.0	6.4
矿区 KQ	895	400.0	6.3
大同 DT	1 057	389.0	6.4

1.2 试验材料

2014 年 10 月 25 日于山西省大同市浑源县、南郊区、矿区和大同县 4 个样地分别采集野生的紫花苜蓿及其根际土壤,在每个样地选取 3 块 1 m×1 m 的样方,保证样方内均为野生紫花苜蓿。

1.3 试验方法

在每个样方内随机选取一株高约 20 cm、长势良好的紫花苜蓿植株,分别采集 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm 5 个土层中紫花苜蓿的小根、须根和根际土壤装入土袋中,附上标签,记录采样人、采样时间、地点及周围环境等,密封带回实验室,在 4 ℃ 的冰箱中保存。

1.4 项目测定

菌根侵染率采用墨水醋染色法^[8]测定,菌根侵染率(%)=1 cm 根段真菌侵染的百分比之和/总观察根段长度×100;丛枝菌根真菌孢子密度采用湿筛倾析法分离 AMF 孢子^[8],在体视显微镜下记录 AMF 孢子数量,将 1 g 风干土中的孢子数计为孢子密度;土壤 pH 用 pH 计测定;土壤有机碳含量采用水合热重铬酸钾氧化—比色

法测定;速效磷含量、铵态氮含量和速效钾含量采用由北京强盛分析仪器制造中心生产的好当家系列 TFC-203 综合型土壤养分速测仪测定。

土壤球囊霉素的测定:土壤样品过孔径 2 mm 的筛后风干,称取 2 g 土样 2 份;将 1 份土样加入 16 mL pH 7.0、20 mmol·L⁻¹的柠檬酸钠溶液,121 ℃ 提取 30 min 浸提易提取球囊霉素(EEG),6 000 r·min⁻¹离心 15 min,收集上清液;另 1 份加入 16 mL pH 8.0、50 mmol·L⁻¹的柠檬酸钠溶液,121 ℃ 提取 60 min 浸提总球囊霉素(TEG),离心,收集上清液;重复提取上清液至红棕色消失,合并上清液。吸取上清液 1 mL,再加入 10 mL 考马斯亮蓝 G-250 染色剂,在波长 595 nm 处测定吸光度值。配制牛血清蛋白标准溶液,绘制标准曲线,计算球囊霉素含量^[9]。

1.5 数据分析

采用 Excel 2010 软件对试验数据进行基本计算、整理;采用 Orange 软件绘图;采用 DPS 软件对数据进行显著性差异及灰色关联度分析,采用 SPSS 19.0 软件对数据进行主成分分析。

2 结果与分析

2.1 根际土壤理化性质

由表 2 可知,浑源县、南郊区、矿区、大同县 4 块样地土壤的 pH 均值依次为 7.89、8.18、7.77、8.17,均属碱性土壤,而同块样地不同土层间 pH 并没有显著变化。观察其它指标数据,可以看出同块样地中 OM、NO₃⁻-N、AP 三者均随土层深度加深有下降的趋势,其中 NO₃⁻-N 变化最为显著;比较不同样地,发现 AP 含量差别较大,其中最高是南郊区的 7.59 mg·kg⁻¹,最低是矿区 2.59 mg·kg⁻¹。相比而言 NH₄⁺-N 含量与土层深度并没有规律性的变化,不同样地之间差别也不大,其中大同县含量最高(3.39 mg·kg⁻¹)。

表 2 不同样地各土层土壤理化性质

Table 2 The physical and chemical properties in different soil layer

样地 Sample plot	土层 Solum/cm	pH	有机质 OM/%	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/(mg·kg ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/(mg·kg ⁻¹)	速效磷 AP/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK/(mg·kg ⁻¹)
浑源 HY	0~10	7.94±0.03a	7.75±0.07b	1.85±0.11c	1.86±0.07a	8.55±0.24a	12.05±0.52a
	10~20	7.91±0.03a	8.21±0.03a	2.53±0.14b	1.60±0.13b	7.83±0.14b	6.71±0.65b
	20~30	7.86±0.04a	7.01±0.07c	2.82±0.14ab	1.56±0.07b	5.44±0.19c	3.80±0.29c
	30~40	7.89±0.03a	7.11±0.09c	3.10±0.05a	0.74±0.03c	4.29±0.17d	4.40±0.20c
	40~50	7.86±0.05a	6.84±0.20c	2.96±0.10a	0.73±0.02c	4.15±0.15d	2.68±0.09d
	均值 Mean	7.89	7.39	2.65	1.29	6.05	5.93
南郊 NJ	0~10	8.20±0.04a	8.81±0.06a	2.52±0.07b	2.71±0.10a	7.13±0.16b	5.66±0.15a
	10~20	8.19±0.04a	8.67±0.08a	2.15±0.04c	2.36±0.05b	9.14±0.13a	3.67±0.16c
	20~30	8.18±0.03a	7.62±0.08b	2.89±0.05a	2.38±0.09b	7.37±0.06c	4.78±0.12b
	30~40	8.15±0.08a	7.81±0.04bc	2.76±0.02a	1.52±0.05c	6.50±0.17d	2.42±0.16d
	40~50	8.19±0.03a	7.75±0.06c	2.46±0.13b	0.72±0.06d	7.83±0.15c	1.82±0.08e
	均值 Mean	8.18	8.13	2.53	1.93	7.59	3.67

表 2(续)

Table 2(Continued)

样地 Sample plot	土层 Solum/cm	pH	有机质 OM/%	铵态氮 $\text{NH}_4^+-\text{N}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	硝态氮 $\text{NO}_3^--\text{N}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	速效磷 $\text{AP}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	速效钾 $\text{AK}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$
矿区 KQ	0~10	7.79±0.03a	6.56±0.03b	2.18±0.04c	2.72±0.17a	1.45±0.12c	2.70±0.16b
	10~20	7.75±0.03a	7.35±0.04a	2.77±0.08b	1.81±0.09b	2.58±0.14b	2.98±0.13a
	20~30	7.77±0.02a	5.75±0.07c	1.91±0.06d	1.37±0.16c	3.20±0.04a	2.61±0.06c
	30~40	7.76±0.04a	5.60±0.09c	2.88±0.04b	0.71±0.04d	2.46±0.03b	2.26±0.14c
	40~50	7.79±0.05a	5.63±0.03c	3.36±0.11a	0.71±0.05d	3.26±0.06a	2.51±0.17c
	均值 Mean	7.77	6.17	2.62	1.46	2.59	2.61
大同 DT	0~10	8.20±0.06a	6.68±0.04b	2.67±0.13c	1.68±0.10a	3.36±0.09a	10.74±0.35a
	10~20	8.18±0.02a	6.93±0.06a	3.63±0.19ab	1.12±0.08b	2.74±0.22b	6.84±0.10b
	20~30	8.17±0.03a	5.47±0.06c	3.36±0.14b	1.05±0.04b	3.37±0.13a	4.83±0.14c
	30~40	8.15±0.02a	5.51±0.09c	3.80±0.07a	0.69±0.05c	3.39±0.12a	3.80±0.16d
	40~50	8.17±0.04a	5.54±0.11c	3.49±0.10ab	0.72±0.05c	2.47±0.09b	2.55±0.13e
	均值 Mean	8.17	6.02	3.39	1.05	3.06	5.75

注:表中同列数据后不同字母表示该指标在 5%水平上差异显著,下同。

Note: Different letters in the same column mean significant different at 0.05 level, the same below.

2.2 根际 AMF 和球囊霉素垂直空间分布

球囊霉素是土壤有机质的重要组成部分,对维持土壤有机碳平衡和土壤团聚体稳定性具有明显作用,其中易提取球囊霉素(EEG)包含的是土壤中新鲜的球囊霉

素,总提取球囊霉素(TEG)反映了土壤中累积球囊霉素的水平^[10]。不同土层紫花苜蓿根际 AMF 和根际土壤中球囊霉素垂直空间分布如表 3 所示。

表 3 根际 AMF 和球囊霉素垂直空间分布

Table 3 The spatial distribution of AMF and glomalin in rhizosphere

样地 Sample plot	土层 Solum/cm	菌根侵染率 CR/%	孢子密度 SD/(个·g ⁻¹)	总提取球囊霉素 TEG/(mg·g ⁻¹)	易提取球囊霉素 EEG/(mg·g ⁻¹)	TEG/OM /(mg·kg ⁻¹)	EEG/OM /(mg·kg ⁻¹)
浑源 HY	0~10	93.16±0.72a	1.37±0.13a	2.11±0.08a	1.18±0.06a	0.27±0.01a	0.15±0.01a
	10~20	89.08±3.36a	1.01±0.09b	2.02±0.04b	1.15±0.08a	0.24±0.01b	0.14±0.01ab
	20~30	81.32±4.34b	0.59±0.08c	1.67±0.07c	0.87±0.02b	0.24±0.01b	0.12±0.00c
	30~40	66.05±3.30c	0.26±0.02d	1.72±0.03c	0.93±0.08b	0.24±0.01b	0.13±0.00bc
	40~50	65.66±2.12c	0.30±0.05d	1.51±0.05d	0.70±0.04c	0.22±0.00b	0.10±0.01d
	均值 Mean	79.05	0.71	1.80	0.96	0.24	0.13
南郊 NJ	0~10	95.00±0.00a	1.18±0.07a	3.64±0.09a	2.10±0.06a	0.56±0.02a	0.32±0.02c
	10~20	94.27±0.86a	0.91±0.04b	2.76±0.09b	1.59±0.11b	0.38±0.02c	0.22±0.01b
	20~30	89.81±3.03b	0.72±0.08c	2.60±0.09b	1.46±0.05c	0.45±0.02b	0.25±0.01b
	30~40	76.75±3.33c	0.39±0.06d	2.09±0.07c	1.04±0.03d	0.37±0.02c	0.19±0.01d
	40~50	72.93±2.72c	0.09±0.02e	2.02±0.10c	1.08±0.09d	0.36±0.02c	0.19±0.01d
	均值 Mean	85.75	0.67	2.62	1.45	0.42	0.23
矿区 KQ	0~10	94.20±0.84a	0.67±0.02a	2.18±0.15a	1.15±0.07a	0.25±0.02a	0.13±0.01a
	10~20	91.88±2.18a	0.46±0.03b	1.91±0.05b	0.92±0.06ab	0.22±0.01a	0.10±0.01b
	20~30	79.89±2.81b	0.40±0.04b	1.85±0.05bc	0.83±0.05c	0.24±0.01a	0.11±0.01ab
	30~40	70.52±1.15c	0.09±0.02c	1.86±0.03bc	0.88±0.06bc	0.24±0.01a	0.11±0.01ab
	40~50	69.53±3.36c	0.13±0.02c	1.36±0.08c	0.67±0.03c	0.17±0.02b	0.08±0.01c
	均值 Mean	81.00	0.35	1.83	0.89	0.22	0.11
大同 DT	0~10	74.87±5.82a	0.05±0.01c	0.98±0.10a	0.46±0.06ab	0.15±0.01a	0.07±0.01a
	10~20	68.65±3.10a	0.55±0.07a	1.01±0.10a	0.53±0.04a	0.15±0.02a	0.08±0.01a
	20~30	67.05±2.44a	0.32±0.03b	0.88±0.12ab	0.43±0.04ab	0.16±0.02a	0.06±0.01a
	30~40	74.97±4.08a	0.39±0.04b	0.70±0.4b	0.36±0.03b	0.13±0.01a	0.06±0.01a
	40~50	69.28±5.14a	0.16±0.03c	0.70±0.09b	0.37±0.02b	0.13±0.02a	0.07±0.01a
	均值 Mean	70.96	0.29	0.85	0.43	0.14	0.07

分析表 3 数据可知,AMF 侵染率均值均在高于 70%,其中南郊区的侵染率平均值最高为 85.75%,然后依次为矿区(81.00%)>浑源县(79.05%)>大同县(70.96%),这充分说明该试验选取的 4 块样地中 AMF 可以与宿主植物紫花苜蓿形成良好的共生关系;而比较

同块样地不同土层的侵染率可知,随着土层深度增加,侵染率也呈不同程度的下降趋势(除了大同县外,大同县最高侵染率位于 30~40 cm 土层中,为 74.97%)。

从表 3 还可以看出,4 块样地中 AMF 孢子密度均值从大到小依次:浑源县(0.71 个·g⁻¹)>南郊区

($0.67 \text{ 个} \cdot \text{g}^{-1}$) > 矿区 ($0.35 \text{ 个} \cdot \text{g}^{-1}$) > 大同县 ($0.29 \text{ 个} \cdot \text{g}^{-1}$); 孢子密度随土层的变化规律与侵染率一致, 除大同县以外(大同样地孢子密度在 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 最高, 为 $0.55 \text{ 个} \cdot \text{g}^{-1}$), 其它 3 块样地中均表现出随着土层深度增加, 孢子密度不断降低。

比较 4 块样地中 TEG 和 EEG 含量均值, 其中, TEG 含量由高至低顺序为南郊 ($2.62 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > 矿区 ($1.83 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > 浑源县 ($1.80 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > 大同县 ($0.85 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$); EEG 含量由高至低顺序为南郊 ($1.45 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > 浑源县 ($0.96 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > 矿区 ($0.89 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) > 大同 ($0.43 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$), 比较可知南郊区 TEG 和 EEG 的含量均最高。通过分析同块样地不同土层间的变化可知: 浑源、南郊、矿区 3 块样地中, TEG 和 EEG 含量与土层深度表现出较好的规律性变化, 即随着土层深度增加二者含量降低; 大同县 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 土层中 TEG

($1.01 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 和 EEG ($0.53 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 二者含量最高。

TEG、EEG 与有机质含量的比值在不同样地间存在较大差异, TEG/OM 的顺序为南郊 ($0.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 浑源县 ($0.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 矿区 ($0.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 大同县 ($0.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); EEG/OM 顺序为南郊 ($0.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 浑源县 ($0.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 矿区 ($0.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 大同县 ($0.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。观察同块样地二者含量随土层深度的变化, 并没有明显的差异。

2.3 AMF 与土壤各指标相关性分析

分析表 4 可知, 紫花苜蓿根际菌根侵染率与孢子数目并不存在直接的相关性关系。菌根侵染率与有机质、硝态氮、速效磷、EEG 和 TEG 呈显著正相关 ($P < 0.05$)。TEG 和 EEG 二者均与菌根侵染率、有机质、硝态氮和速效磷呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 而且二者之间存在极显著的正相关 ($P < 0.01$)。

表 4

AMF 与土壤各指标相关性分析

Table 4

Correlation analysis among indicators of AMF and soil

	菌根侵染率 CR	孢子密度 SD	pH	有机质 OM	铵态氮 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$	硝态氮 $\text{NO}_3^- \text{-N}$	速效磷 AP	速效钾 AK	总提取球囊霉素 TEG	易提取球囊霉素 EEG
菌根侵染率 CR	1.00									
孢子密度 SD	0.29	1.00								
pH	0.01	-0.12	1.00							
有机质 OM	0.68**	-0.08	0.25	1.00						
铵态氮 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$	-0.07	-0.45*	0.23	0.25	1.00					
硝态氮 $\text{NO}_3^- \text{-N}$	0.89**	0.42	0.10	0.62**	-0.11	1.00				
速效磷 AP	0.51*	-0.35	0.35	0.81**	0.36	0.37	1.00			
速效钾 AK	0.28	0.36	0.26	0.27	-0.48*	0.28	0.28	1.00		
总提取球囊霉素 TEG	0.72**	-0.17	-0.04	0.77**	0.22	0.72**	0.62**	-0.02	1.00	
易提取球囊霉素 EEG	0.75**	-0.19	0.06	0.81**	0.21	0.74**	0.68**	0.05	0.99**	1.00

注: ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$, 下同。

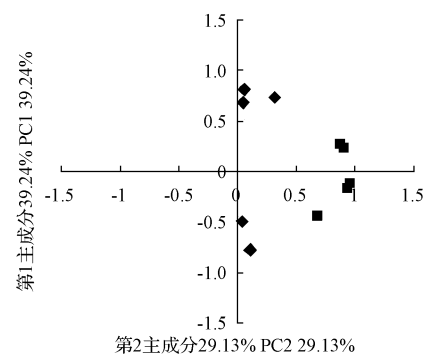
Note: ** $P < 0.01$, * $P < 0.05$, the same below.

由表 5 可以看出, 不同土层的紫花苜蓿 AMF 和土壤指标相关性分析表明, 菌根侵染率在 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 土层中, 与硝态氮、TEG 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 在 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 土层中与速效磷、速效钾、硝态氮和 EEG 呈显著相关 ($P < 0.05$), 在 $30 \sim 40 \text{ cm}$ 土层中与硝态氮呈显著正相关; 孢子密度在 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 土层中与速效磷呈显著相关 ($P < 0.05$), $20 \sim 30 \text{ cm}$ 土层中与硝态氮、速效磷、速效钾和 EEG 有显著相关性 ($P < 0.05$), 在 $40 \sim 50 \text{ cm}$ 土层中与硝态氮有显著相关性 ($P < 0.05$)。由此可知, 在 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 土层中菌根侵染率和孢子数对于土壤的理化性质影响更具有效性。

2.4 AMF 与土壤各指标主成分分析

由表 6 和图 1 可知, 第 1 主成分的贡献率为 39.24%, 包括菌根侵染率、硝态氮、速效磷、总球囊霉和易提取球囊霉, 第 2 主成分贡献率为 29.13%, 主要有孢子数、pH、铵态氮、速效钾, 第 3 主成分贡献率为 15.71%, 所含指标为有机质。说明菌根侵染率、硝态氮、

速效磷、总球囊霉和易提取球囊霉对土壤生态环境起着主要作用。



注: ■代表第 1 主成分; ◆代表第 2 主成分。

Note: ■ the first principal component; ◆ the second principal component.

图 1 AMF 与土壤各指标对主成分的贡献

Fig. 1 Contribution of each component of AMF and soil in the PCA

表 5

菌根侵染率与不同土层土壤因子的相关性分析

Table 5

Correlation analysis among indicators in the rhizosphere of *Medicago sativa*

	土层 Solum	pH	有机质 OM	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	速效磷 AP	速效钾 AK	总提取球囊霉素 TEG	易提取球囊霉素 EEG
菌根侵染率 CR	0~10	-0.51	0.45	-0.32	0.73	0.34	-0.52	0.80	0.79
	10~20	-0.44	0.61	0.83	0.88*	0.60	-0.71	0.92*	0.85
	20~30	0.21	-0.15	0.66	0.95*	0.99*	-0.95*	0.83	0.91*
	30~40	0.43	-0.47	0.69	0.89*	0.63	-0.76	0.44	0.36
	40~50	0.82	-0.72	-0.05	-0.79	0.22	0.54	-0.32	-0.16
孢子密度 SD	0~10	-0.52	0.60	-0.31	-0.25	-0.81	0.41	-0.80	-0.82
	10~20	-0.27	0.08	-0.42	-0.40	-0.95*	-0.09	-0.60	-0.71
	20~30	0.02	-0.08	-0.49	-0.90*	-0.92*	0.92*	-0.85	-0.90*
	30~40	0.06	-0.11	0.78	0.82	0.62	-0.63	0.73	0.64
	40~50	0.17	-0.10	-0.42	-0.95*	-0.60	0.43	-0.85	-0.77

表 6

AMF 与土壤各指标对主成分的贡献

Table 6

Contribution of each component of AMF and soil in the PCA

主成分 Principal component	菌根侵染率 CR	孢子密度 SD	pH	有机质 OM	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N	速效磷 AP	速效钾 AK	总提取球囊霉素 TEG	易提取球囊霉素 EEG	贡献率 CRNP/%
1	0.90	0.06	0.04	0.32	0.11	0.87	0.68	0.05	0.93	0.95	39.24
2	0.23	0.81	-0.50	0.73	-0.78	0.27	-0.44	0.68	-0.17	-0.20	29.13
3	0.10	0.29	0.82	-0.54	-0.20	0.19	0.25	0.56	-0.21	-0.12	15.17

对植物 AMF 和土壤各指标主成分分析结果(表 7 和图 2)表明,南郊区和矿区在第 1 主成分分析中差异显著,浑源县在第 2 主成分分析中差异显著,浑源县在第 1 主成分分析中差异显著,浑源县在第 2 主成分中均差异显著。

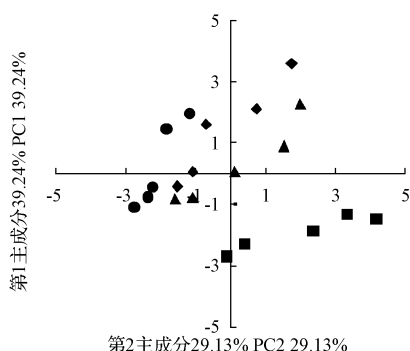
表 7

AMF 与土壤各指标主成分分析

Table 7

PCA of each component of AMF and soil

主成分 PC	浑源 1 HY1	浑源 2 HY2	浑源 3 HY3	浑源 4 HY4	浑源 5 HY5	南郊 1 NJ1	南郊 2 NJ2	南郊 3 NJ3	南郊 4 NJ4	南郊 5 NJ5
1	2.00	1.53	0.12	-1.08	-1.58	4.17	3.33	2.37	0.40	-0.12
2	2.27	0.90	0.06	-0.78	-0.82	-1.49	-1.32	-1.87	-2.30	-2.70
3	1.42	-0.15	-0.61	-1.10	-1.23	0.19	0.29	0.66	0.37	0.34
主成分 PC	矿区 1 KQ1	矿区 2 KQ2	矿区 3 KQ3	矿区 4 KQ4	矿区 5 KQ5	大同 1 DT1	大同 2 DT2	大同 3 DT3	大同 4 DT4	大同 5 DT5
1	1.75	0.75	-0.70	-1.07	-1.52	-1.16	-1.84	-2.23	-2.36	-2.76
2	3.59	2.10	1.60	0.06	-0.42	1.97	1.45	-0.43	-0.76	-1.09
3	-0.65	-1.45	-0.96	-2.14	-2.00	2.49	1.47	1.39	0.98	0.70



注:▲代表浑源县,■代表南郊区,◆代表矿区,●代表大同县。
Note:▲HY,■NJ,◆KQ,●DT.

图 2 AMF 与土壤各指标主成分分析

Fig. 2 The PCA of each component of AMF and soil

3 结论

3.1 菌根侵染率与孢子密度的分布规律

大同地区紫花苜蓿根际的菌根侵染率均在 70%以

上,这充分说明 AMF 与紫花苜蓿能够形成良好的共生关系。4 个地区中的菌根侵染率和孢子密度均存在一定的差异,这可能是由于不同的样地周围土壤环境状况的存在差异性造成的。除大同县规律不明显以外,其它 3 块样地中菌根侵染率与孢子密度均表现出随着土层深度增加而降低的规律,这可能是由于 AM 真菌为好氧性真菌,其生长发育均需要一定的氧气,需要土壤良好的透气性。

3.2 菌根侵染率、孢子密度与土壤因子的相关性

菌根侵染率与孢子密度的变化没有对应关系,二者不具有相关性。不同样地土壤因子性质的不同会影响到菌根侵染率以及孢子的密度,而且菌根的有效性也与土壤因子密切相关。4 块样地土壤 pH 相差不大,而且与菌根侵染率以及孢子密度均没有相关性;菌根侵染率与有机质、硝态氮、速效磷、EEG 和 TEG 呈显著正相关性($P<0.05$),这与前人研究的土壤有机质和氮素含量越高,土壤肥力和养分越丰富,就越有利于 AM 真菌的

形成结论一致^[11-12]。

AM 真菌能分泌球囊霉素相关土壤蛋白(glomalin-related soil protein, GRSP),从菌丝表面脱落进入土壤中,并且可以在有机质分解、营养循环和土壤团聚体的形成及稳定过程中发挥重要作用^[13-14]。球囊霉素含量占有机碳含量的 14%~42%不等,TEG 和 EEG 二者均与菌根侵染率、有机质、硝态氮和速效磷呈极显著正相关($P<0.01$),而且二者之间存在极显著的正相关($P<0.01$)。这与 STEINBERG 等^[15]、刘润进等^[1]研究成果一致,说明土壤 AMF 及其产生的球囊霉素是草地生态系统非常重要的有机碳的来源,同时球囊霉素可以稳固土壤颗粒,有效防止了有机碳的流失。此外,该试验中菌根侵染率与土壤因子的相关性在 20~30 cm 土层表现明显,这也说明了在大同地区土壤中,菌根真菌在 20~30 cm 土层中的对土壤各因子的作用更有效。

参考文献

- [1] 刘润进,陈应龙. 菌根学[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [2] 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):2068-2071.
- [3] 曾秀华,叶少萍,白昌军,等. 接种丛枝菌根及施磷量对狗牙根抗旱性的影响[J]. 热带作物学报,2011,32(6):1069-1074.
- [4] 朱先灿,宋凤斌,徐洪文. 低温胁迫下丛枝菌根真菌对玉米光合特性的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(2):470-475.
- [5] 田瑞娟,杨静慧,梁国鲁,等. 不同品种紫花苜蓿耐盐性研究[J]. 西南

农业大学学报(自然科学版),2006,28(6):933-936.

- [6] 韩瑞宏,卢欣石,高桂娟,等. 紫花苜蓿(*Medicago sativa*)对干旱胁迫的光合生理响应[J]. 生态学报,2007,27(12):5229-5237.
- [7] 元炳成. 紫花苜蓿改良盐渍土对土壤微生物活性和养分含量的影响[J]. 生态环境学报,2011,20(3):137-141.
- [8] 王幼珊,张淑彬,张美庆. 中国丛枝菌根真菌资源与种质资源[M]. 北京:中国农业出版社,2007.
- [9] BEDINI S, PELLEGRINO E, AVIO L, et al. Changes in soil aggregation and glomalin-related soil protein content as affected by the arbuscular mycorrhizal fungal species *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices*[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(7):1491-1496.
- [10] 袁丽环,闫桂琴,朱志敏. 丛枝菌根(AM)真菌对翅果油树幼苗根系的影响[J]. 西北植物学报,2009,29(3):580-585.
- [11] SHENG M, TANG M, ZHANG F F, et al. Effect of soil factors on arbuscular mycorrhizal fungi in saline alkaline soils of Gansu, Inner Mongolia and Ningxia[J]. Biodiversity Science, 2011, 19(1):85-92.
- [12] 岳英男,杨春雪. 松嫩盐碱草地土壤理化特性与丛枝菌根真菌侵染的相关性[J]. 草业科学,2014,31(8):1437-1444.
- [13] MIRANSARI M. Contribution of arbuscular mycorrhizal symbiosis to plant growth under different types of soil stress[J]. Plant Biology, 2010(12):563-569.
- [14] 徐丽娟,刁志凯,李岩,等. 菌根真菌的生理生态功能[J]. 应用生态学报,2012,23(1):285-292.
- [15] STEINBERG P D, RILLIG M C. Differential decomposition of arbuscular mycorrhizal fungal hyphae and glomalin[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(1):191-194.

Correlation Between Physicochemical Properties of Rhizosphere Soil and Arbuscula Mycorrhizae Fungi in *Medicago sativa* L. Grassland

ZHANG Xin^{1,2}, PEI Zongping^{1,2}, SUN Gan^{1,2}, WANG Yu^{1,2}, SU Xuepeng^{1,2}

(1. School of Environmental and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116; 2. Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, Xuzhou, Jiangsu 221116)

Abstract: To investigate the correlation of soil physicochemical properties and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) of *Medicago sativa* L. grassland in the mining area of Datong city, Shanxi Province, we sampled rhizome and rhizosphere soil of *Medicago sativa* L. distributed in different soil layer of four sample plots (Hunyuan county, Nanjiao district, Datong county and the mining area) in October, 2014, and analyzed the physiochemical properties of rhizosphere and the colonization rate of AMF. The results showed that the colonization rates of AMF with all above 70% and spore density decreased with the increasing of soil depth in all sample plots except Datong county. The colonization rate of AMF significantly and positively correlated with organic matter, NO_3^- -N, AP, EEG and TEG ($P<0.05$). Moreover, TEG and EEG performed very significantly positive correlation with the colonization rate, organic matter, NO_3^- -N and AP ($P<0.01$). Significant correlation of colonization rate and NO_3^- -N, AP, AK and EEG ($P<0.05$) only showed in the soil layer of 20—30 cm depth through analyzing total correlatings. What was more, the spore density acted in the same way with the colonization rate. These experimental results indicated that AMF could build a good symbiotic relationship with *Medicago sativa* L. and played an important role in soil nutrients, especially in the soil layer of 20—30 cm depth.

Keywords: *Medicago sativa* L.; AMF; rhizosphere soil; correlation