

松嫩盐碱草地兔儿伞根际 AM 真菌侵染情况及种类多样性

徐嘉美,方林林,杨春雪*

(东北林业大学,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:为了解兔儿伞与 AM 真菌之间是否存在共生关系,同时调查松嫩盐碱草地兔儿伞根际 AM 真菌多样性,采用染色法与形态学鉴定的方法探究兔儿伞根系的 AM 真菌侵染情况及根际土壤中的 AM 真菌种类。结果表明,9 个采样地的兔儿伞根系均被 AM 真菌侵染,且各采样地的侵染率均达到 100%、侵染强度为 40.57%~79.05%、丛枝丰度为 5.52%~29.99%、泡囊丰度为 14.76%~43.04%;相关性分析结果表明,土壤 pH 与侵染强度、泡囊丰度之间存在显著正相关关系,侵染强度与丛枝丰度、泡囊丰度之间均呈极显著正相关,孢子密度与侵染强度、泡囊丰度之间呈显著正相关;鉴定得到 AM 真菌 13 属 34 种,球囊霉属(*Glomus*)9 种,无梗囊霉属(*Acaulospora*)8 种,斗管囊霉属(*Funneliformis*)4 种,双型囊霉属(*Ambispora*)、根孢囊霉属(*Rhizophagus*)、隔球囊霉属(*Septoglomus*)各 2 种,近明球囊霉属(*Claroideoglomus*)、多样孢囊霉属(*Diversispora*)、多氏囊霉属(*Dominikia*)、内养囊霉属(*Entrophospora*)、巨孢囊霉属(*Gigaspora*)、和平囊霉属(*Pacispora*)和硬囊霉属(*Sclerocystis*)各 1 种;其中,无梗囊霉属为最具优势属,沙荒隔球囊霉(*Septoglomus deserticola*)为最具优势种。表明松嫩盐碱草地兔儿伞与 AM 真菌形成了良好的共生关系,且兔儿伞根际 AM 真菌种类丰富。

关键词:兔儿伞;AM 真菌;侵染情况;多样性

中图分类号:Q939.5

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)02-0173-07

Infection and Species Diversity of AM Fungi in the Rhizosphere of *Syneilesis aconitifolia* in Songnen Saline-alkali Grassland

XU Jia-mei, FANG Lin-lin, YANG Chun-xue*

(Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: In order to understand whether there is a symbiotic relationship between *Syneilesis aconitifolia* and AM fungi, and to investigate the diversity of AM fungi in the rhizosphere of *S. aconitifolia* in Songnen saline-alkali grassland, this study used staining and morphological identification methods to explore the infection of AM fungi in the roots of *S. aconitifolia* and AM fungi species in the rhizosphere soil. The results showed that the roots of the 9 sampling sites were all infected by AM fungi, and the infection rate of each sampling site reached 100%, the infection intensity was 40.57%–79.05%, the arbuscular abundance was 5.52%–29.99%, and the abundance of vesicles ranged from 14.76% to 43.04%. The results of correlation analysis demonstrated that there were significant positive correlations between soil pH, infestation intensity, and vesicle abundance. Very significant and positive correlations were also found between infestation intensity, arbuscular abundance and vesicle abundance, and significant and positive correlations between spore density, infection intensity, and vesicle abundance. Thirty-four species of AM fungi belonging to 13 genera were identified, including 9 species of *Glomus*, 8 species of *Acaulospora* and 4 species of *Fun-*

收稿日期:2022-02-24 修回日期:2022-04-15

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(31601986);黑龙江省博士后科研启动金(LBH-Q16005)。

第一作者:徐嘉美。研究方向:菌根生理生态。E-mail:942096181@qq.com

*通信作者:杨春雪,副教授,硕士生导师。研究方向:菌根生理生态。E-mail:senxiu99@163.com

neliformis, two species of *Ambispora*, *Rhizophagus* and *Septoglomus*, respectively, and *Claroideoglomus*, *Diversispora*, *Dominikia*, *Entrophospora*, *Gigaspora*, *Pacispora*, *Sclerocystis*, 1 species each; among them, *Acaulospora* is the most dominant genus, and *Septoglomus deserticola* is the most dominant species. The results showed that there was a good symbiotic relationship between *S. aconitifolia* and AM fungi in the Songnen saline-alkali grassland, and there were abundant species of AM fungi in the rhizosphere of *S. aconitifolia*.

Key words: *Syneilesis aconitifolia*; AM fungus; infection situation; diversity

丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)真菌普遍存在于包括盐渍土生境^[1]、高寒草地^[2]、荒漠地区^[3]在内的多种自然环境及农田生态系统中,是土壤中分布最为广泛的一类微生物,能与绝大多数陆生植物形成共生关系^[4-5]。AM真菌与植物共生后可以提高宿主植物体内的抗氧化酶活性与渗透调节物质含量,进而增强植物的耐盐性与耐旱性^[6-7]。同时,AM真菌在调节植物的营养元素吸收、提高宿主植物根冠比、增强植物光合作用方面也具有重要作用^[8-9]。在盐碱土中,AM真菌一方面可以通过调控植物体内的离子稳态、调节植物根际细菌群落结构等方式促进植物适应盐碱环境^[10];另一方面还可以促进土壤团聚体形成,提高土壤养分有效性^[11]。

兔儿伞(*Syneilesis aconitifolia*)是菊科兔儿伞属的多年生草本植物,因其含有生物碱类、萜类等多种活性成分而被广泛用作中药材,幼苗及嫩叶可食用^[12-13]。主要分布在东北、华北、华中地区,兔儿伞叶形奇特、花朵繁多、花色淡雅,喜荫也耐强光、耐干旱,是极具应用潜力的地被植物和花境材料^[14]。在松嫩盐碱草地调研时发现,兔儿伞在该地呈不均匀团块状分布,株丛茂密且生长状态良好,由此推测兔儿伞具有一定程度的耐盐性。研究表明,松嫩盐碱草地蕴含丰富的AM真菌种类,且该环境下多种植物可以被AM真菌侵染^[15-16],但目前未见有关兔儿伞与AM真菌之间侵染情况的研究。本试验通过调查松嫩盐碱草地兔儿伞根际AM真菌侵染情况与种类多样性,一方面能够了解兔儿伞与AM真菌之间是否存在共生关系,为进一步探究AM真菌对兔儿伞生长的影响提供一定的理论依据;另一方面通过调查松嫩盐碱草地兔儿伞根际AM真菌多样性从而丰富对该地区AM真菌资源的认知。

1 材料与方法

1.1 样品采集

试验样品于2021年05月24日采集自松嫩草地西南段的黑龙江省肇东市中北部盐碱草地。采样地处于中纬度地区,属于温带半湿润、半干旱的森林草甸与草甸草原地带,主要气候特征为大陆性季风

型气候,表现为夏季温暖多雨;冬季寒冷少雪^[17]。采样地主要植物种类除兔儿伞外包括:星星草(*Puccinellia tenuiflora*)、羊草(*Leymus chinensis*)、旋覆花(*Inula japonica*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、碱蒿(*Artemisia anethifolia*)、马蔺(*Iris lactea*)、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)、狼毒(*Stellera chamaejasme*)、虎耳草(*Saxifraga stolonifera*)、多花筋骨草(*Ajuga multiflora*)、碱蓬(*Suaeda glauca*)等。该地区土壤类型主要是草甸土和盐碱化草甸土,草地类型为草甸草原^[18]。根据兔儿伞在该地区的分布随机选取9个生长地作为采样地,采集兔儿伞植株及根际土壤。去除地表石块及枯草等杂物,沿植株周围向下挖10~20 cm深,将植株根系及土壤收集于密封袋中,每个样地保留约1 kg土壤及根系,对样品编号并注明采样地经纬度(表1)后带回实验室。将植株根系用蒸馏水冲洗干净并晾干后剪成约1 cm的根段,浸泡于甲醛-冰醋酸-乙醇固定液(FAA)中,土壤样品置于阴凉通风处自然风干,用20目筛子筛除杂物,分别装入密封袋,将处理过的根系与土壤于4℃条件下密封保存。

1.2 土壤 pH 测定

用pH计(PHS-3C,上海仪天科学仪器有限公司,上海)按照土水比1:2.5测定土壤pH,即将10 g土壤样品溶于25 mL去离子水中,充分搅拌后静置20 min,将pH计的电极插入上层清液中,待读数稳定后记录pH,每个土壤样品均重复测定3次。

1.3 AM 真菌侵染指标测定

参考Phillips等^[19]的方法对兔儿伞根系染色。将固定液中的根系取出后用蒸馏水冲洗数遍至无刺激性气味,放入10%(w/v)KOH溶液于沸水浴中加热30 min左右,直至根系变软且较透明后取出,用蒸馏水洗3遍后加入10% H₂O₂溶液浸泡20 min,用蒸馏水洗3遍后再用2% HCl浸泡10 min,最后于沸水浴条件下用0.05%(w/v)的台盼蓝试剂染色30 min。将经上述处理后的根系制片,每30个根段为一组,每个样地3组重复,于光学显微镜(zeiss axio scope A1)下观察根系侵染情况,记录侵染等级并拍照,用MYCOCALC软件计算侵染率

(%)、侵染强度(%)、泡囊与丛枝丰度(%)^[20]。

1.4 AM真菌孢子的分离与种类鉴定

采用湿筛倾析-蔗糖离心法^[21]分离兔儿伞根际土壤中的AM真菌孢子。将获得的孢子放到培养皿中,在体视显微镜(Leica MDG33)下用目测视野法^[22]统计孢子个数。用移液枪吸取单个孢子置于滴有乳酸的载玻片上,制片后在光学显微镜(zeiss axio scope A1)下观察孢子颜色、大小、孢壁结构、内含物、连孢菌丝形态等特征,接着用Melzer's试剂对孢子染色,观察染色反应并拍照。参考《中国丛枝菌根真菌资源与种质资源》、国际丛枝菌根真菌保藏中心(INVAM)及已经发表的文献中的种类描述和图片鉴定AM真菌,同时参考王幼珊等^[23]整理的丛枝菌根真菌名录中的描述确定菌种名称。

1.5 AM真菌多样性指标分析

参考赵文娜^[24]和宋娟等^[25]的方法计算以下各项指标。孢子密度(Spore density,SD):每20 g土壤样品中的AM真菌孢子数目;分离频度(occurrence frequency,F):某种或属AM真菌出现次数/土壤样品数;相对多度(Relative abundance,RA):某种或属AM

真菌孢子总数/所有土壤样品中已鉴定孢子总数;重要值(Importance value,IV):分离频度与相对多度的平均值, $IV \geq 50\%$ 为优势属或种, $10\% < IV < 50\%$ 为常见属或种, $IV \leq 10\%$ 为稀有属或种。

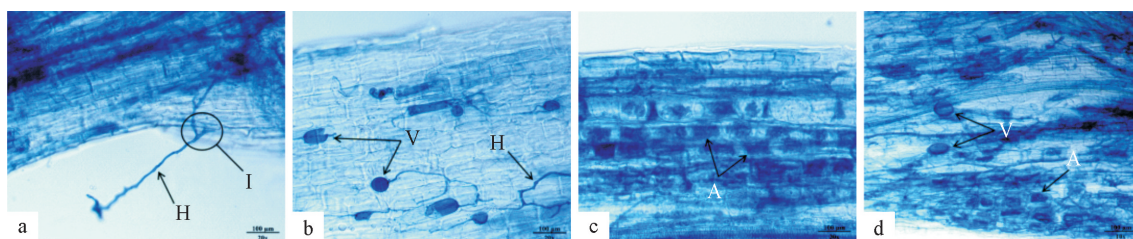
1.6 数据处理

使用IBM SPSS Statistics 23软件对数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)、Duncan法多重比较($P < 0.05$)以及Spearman相关性分析。用Excel 2019软件整理数据,Word 2019软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 兔儿伞与AM真菌共生结果

本研究发现,采集于各样地的兔儿伞根系均可被AM真菌侵染,说明AM真菌能够与兔儿伞建立共生关系。兔儿伞根际土壤中的AM真菌以菌丝的形式与兔儿伞建立联系并在兔儿伞根系形成侵入点(图1a),菌丝进入根系后,在根细胞间与根细胞内不断延伸的过程中形成球形、椭圆形、长圆形等各种形状的泡囊(图1b、图1d),同时菌丝通过分支进入根细胞内形成枝状结构——丛枝(图1c)。



注:A表示丛枝,H表示菌丝,I表示侵入点,V表示泡囊。

图1 兔儿伞根系AM真菌侵染情况

Fig. 1 Infection status of AM fungi in the roots of *Syneilesis aconitifolia*

2.2 兔儿伞根际AM真菌侵染指标与孢子密度

9个采样地土壤pH在7.65~8.22,呈弱碱性,不同样地间土壤pH差异较显著(表1)。各样地中的兔儿伞均被AM真菌侵染,在不同土壤pH条件下,AM真菌在兔儿伞根系的侵染率非常高,均达到了100%。在土壤pH为8.08时,侵染强度、丛枝丰度与泡囊丰度均达到最高值,分别为79.05%、29.99%、43.04%,孢子密度在土壤pH为8.04和8.11时最高(1248.45个/20 g土);在土壤pH为7.96时,侵染强度和泡囊丰度都呈现最低值,分别为40.57%和14.76%,而丛枝丰度和孢子密度均在土壤pH为7.97时最低,分别为5.52%和1038.68个/20 g土。总体来看,不同样地AM真菌的侵染强度较高(40.57%~79.05%);兔儿伞根系AM真菌的泡囊丰度(14.76%~43.04%)高于丛枝丰度(5.52%~29.99%)。

2.3 土壤pH与侵染指标及孢子密度间的相关性

相关性分析结果(表2)表明,土壤pH与侵染强度、泡囊丰度之间分别存在显著正相关和极显著正相关关系,侵染强度与丛枝丰度、泡囊丰度之间均呈极显著正相关,同时,孢子密度与侵染强度、泡囊丰度之间呈显著正相关。

2.4 兔儿伞根际AM真菌多样性

本试验从松嫩盐碱草地兔儿伞根际通过形态鉴定共得到AM真菌13属34种(图2)。其中无梗囊霉属(*Acaulospora*)8种,占总数的23.53%;双型囊霉属(*Ambispora*)、根孢囊霉属(*Rhizophagus*)、隔球囊霉属(*Septoglomus*)各2种,各占总数的5.88%;近明球囊霉属(*Claroideoglomus*)、多样孢囊霉属(*Diversispora*)、多氏囊霉属(*Dominikia*)、内养囊霉属(*Entrophospora*)、巨孢囊霉属(*Gigaspora*)、和平囊霉属(*Pacispora*)和硬囊霉属

(*Sclerocystis*)各1种,各占总数的2.94%;斗管囊霉属(*Funneliiformis*)4种,占总数的11.76%;球囊霉属(*Glomus*)9种,占总数的26.47%。

2.5 兔儿伞根际优势AM真菌种属

通过试验分离得到的不同AM真菌属和种重要值差异较大(表3)。其中,无梗囊霉属、双型囊霉属、多样孢囊霉属、多氏囊霉属、斗管囊霉属、球囊霉属、硬囊霉属、隔球囊霉属的重要值分别为62.54%、53.84%、53.15%、51.87%、52.24%、61.23%、53.54%、59.51%,>50%,为兔儿伞根际优势AM真菌属。同时,双网无梗囊霉(*A. biretic-*

ulata)、脆无梗囊霉(*A. delicata*)、薄壁双型囊霉(*Am. leptoticha*)、网纹双型囊霉(*Am. reticulata*)、橙黄多样孢囊霉(*D. aurantia*)、黄金多氏囊霉(*Do. aurea*)、恺撒球囊霉(*Gl. caesaris*)、黑孢球囊霉(*Gl. melanosporum*)、凹坑球囊霉(*Gl. multiforum*)、网状球囊霉(*Gl. reticulatum*)、弯丝硬囊霉(*S. sinuosa*)、沙荒隔球囊霉(*Se. deserticola*)的重要值分别为53.93%、57.01%、52.16%、51.68%、53.15%、51.87%、50.56%、53.54%、51.92%、53.02%、53.54%、58.39%,>50%,为松嫩盐碱草地兔儿伞根际的优势AM真菌种。

表1 样地土壤pH、兔儿伞根际AM真菌侵染指标与孢子密度

Table 1 Soil pH, rhizosphere AM fungi infection index and spore density of *S. aconitifolia* in the sample plot

样地	经纬度	pH	侵染率 (%)	侵染强度 (%)	丛枝丰度 (%)	孢囊丰度 (%)	孢子密度/ (个·20 g± ⁻¹)
1	125°53'42.1",46°2'55.8"	8.04±0.03bcd	100.00	57.96±6.66bc	21.43±4.89ab	19.66±5.92bcd	1248.45±97.93a
2	125°53'34.0",46°2'58.0"	8.10±0.03b	100.00	64.22±2.88bc	22.69±1.28ab	27.13±2.82bc	1224.77±45.42a
3	125°53'37.4",46°3'00.2"	8.08±0.06bc	100.00	79.05±2.50a	29.99±1.54a	43.04±3.43a	1233.23±36.71a
4	125°52'09.9",46°2'46.9"	8.11±0.03b	100.00	69.42±4.21ab	29.22±4.12a	29.66±0.94b	1248.45±54.89a
5	125°52'09.4",46°2'45.8"	7.99±0.01cd	100.00	64.22±3.68bc	23.40±2.55ab	17.87±2.65cd	1045.45±10.56b
6	125°52'08.4",46°2'46.4"	7.65±0.02e	100.00	55.57±4.43c	19.81±5.49ab	17.46±1.03cd	1131.73±45.49ab
7	125°51'59.2",46°2'48.8"	7.97±0.02cd	100.00	51.83±3.58cd	5.52±0.95d	23.74±4.99bcd	1038.68±34.71b
8	125°51'58.8",46°2'49.4"	8.22±0.04a	100.00	60.87±3.03bc	7.20±2.72cd	26.46±1.29bc	1114.81±16.92ab
9	125°52'05.9",46°2'48.7"	7.96±0.03d	100.00	40.57±2.74d	16.82±2.64bc	14.76±1.57d	1060.68±11.72b

注:同一列不同小写字母表示不同样地间差异显著($P<0.05$)。

表2 土壤pH、侵染指标及孢子密度间相关性分析

Table 2 Correlation analysis among soil pH, infection index and spore density

指标	土壤 pH	侵染强度	丛枝丰度	孢囊丰度	孢子密度
土壤 pH	1.000				
侵染强度	0.409*	1.000			
丛枝丰度	0.075	0.701**	1.000		
孢囊丰度	0.522**	0.741**	0.350	1.000	
孢子密度	0.347	0.447*	0.350	0.486*	1.000

注:*表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关,**表示在 $P<0.01$ 水平上极显著相关。

3 结论与讨论

3.1 结论

本试验对松嫩盐碱草地兔儿伞根际AM真菌侵染情况及种类多样性进行调查,结果显示,兔儿伞能被AM真菌侵染并表现出极高侵染率与较高侵染强度,土壤pH与侵染强度、孢囊丰度之间存在正相关关系,侵染强度与丛枝丰度、孢囊丰度之间均呈极显著正相关,孢子密度与侵染强度、孢囊丰度之间呈显著正相关。同时,通过形态鉴定的方法从松嫩盐碱草地兔儿伞根际共得到AM真菌13属34种,其中无梗囊霉属为最具优势属,沙荒隔球囊霉为最具优势种。

3.2 讨论

本研究结果表明,松嫩盐碱草地兔儿伞与AM真菌之间存在共生关系。土壤pH为7.65~8.22条件下,AM真菌对兔儿伞的侵染率极高,达到100%,同时侵染强度也在该条件下达到40.57%~79.05%。与本试验结果相似,前人对松嫩盐碱草地鹅绒委陵菜^[26]、蒲公英^[27]、旋覆花^[28]与AM真菌之间侵染情况调查时发现,不同植物在该盐碱地中均与AM真菌形成了高水平侵染。AM真菌与植物之间的共生通常被认为是非特异性的,两者之间表现出不同程度的侵染可能是AM真菌群落与寄主植物所处植物群落之间复杂相互作用的结果^[29],具体机制还有待于深入研究。

土壤有机质、土壤TN、TP、TK含量会通过影响土壤酶活性与土壤肥力进而对AM真菌的侵染产生影响^[30]。有研究发现^[31-32],土壤pH对土壤养分的有效性、土壤中离子的迁移、植物及AM真菌对离子的吸收有重要影响,较低的土壤pH会对AM真菌的生长发育产生不良影响,而在本试验中,土壤pH与AM真菌的侵染强度、孢囊丰度表现出了显著的正相关关系,说明在弱碱性土壤条件下,高土壤pH更有利于AM真菌与植物建立共生关系,王化秋等^[33]研究结果支持了这一观点,这可能是由

于一定范围内的高土壤 pH 提高了土壤养分的有效性^[34],从而为 AM 真菌积极生长创造有利条件。试验结果还显示,兔儿伞根际 AM 真菌的侵染强度与丛枝丰度、泡囊丰度之间均呈极显著正相关关系,同时,孢子密度与侵染强度、泡囊丰度之间呈显著正相关。说明土壤中的孢子数量会在一定程度上对 AM 真菌侵染植物造成影响,这与马俊卿等^[35]、袁钟鸣等^[36]的研究结果一致。

尽管植物与 AM 真菌之间不存在绝对的特异性共生关系,但 AM 真菌会表现出寄主偏好性,AM 真菌在感知植物种类时会以不同的组合方式与植物共生,因此特定的植物群落会影响 AM 真菌的物种组成^[29,37]。本试验调查了松嫩盐碱草地兔儿伞根际 AM 真菌种类,通过形态学鉴定的方法,得到 AM 真菌 13 属 34 种。其中球囊霉属 (*Glomus*) 9 种,占试验鉴定出种类数的 26.47%,是 AM 真菌种



图 2 兔儿伞根际 AM 真菌种类

Fig. 2 Rhizosphere AM fungi species of *S. aconitifolia*

表 3 松嫩盐碱草地兔儿伞根围 AM 真菌分离频度、
相对多度及重要值

Table 3 Isolation frequency, relative abundance and important value
of AM fungi in the rhizosphere of *S. aconitifolia*
in Songnen saline-alkali grassland %

序号	AM 真菌属种	分离 频度	相对 多度	重要值
一	无梗囊霉属 <i>Acaulospora</i>	100.00	25.08	62.54
1	双网无梗囊霉 <i>A. bireticulata</i>	100.00	7.86	53.93
2	脆无梗囊霉 <i>A. delicata</i>	100.00	14.01	57.01
3	孔窝无梗囊霉 <i>A. foveata</i>	44.44	0.19	22.32
4	格但无梗囊霉 <i>A. gedanensis</i>	88.89	0.71	44.80
5	光壁无梗囊霉 <i>A. laevis</i>	77.78	1.42	39.60
6	毛氏无梗囊霉 <i>A. morrowiae</i>	44.44	0.26	22.35
7	瑞氏无梗囊霉 <i>A. rehmi</i>	55.56	0.26	27.91
8	细凹无梗囊霉 <i>A. scrobiculata</i>	44.44	0.37	22.41
二	双型囊霉属 <i>Ambispora</i>	100.00	7.67	53.84
9	薄壁双型囊霉 <i>Am. leptoticha</i>	100.00	4.32	52.16
10	网纹双型囊霉 <i>Am. reticulata</i>	100.00	3.35	51.68
三	近明球囊霉属 <i>Claroideoglo-</i> <i>mus</i>	33.33	0.86	17.10
11	近明球囊霉 <i>C. claroideum</i>	33.33	0.86	17.10
四	多样孢囊霉属 <i>Diversispora</i>	100.00	6.30	53.15
12	橙黄多样孢囊霉 <i>D. aurantia</i>	100.00	6.30	53.15
五	多氏囊霉属 <i>Dominikia</i>	100.00	3.73	51.87
13	黄金多氏囊霉 <i>Do. aurea</i>	100.00	3.73	51.87
六	内养囊霉属 <i>Entrophospora</i>	66.67	0.63	33.65
14	波罗的海内养囊霉 <i>E. baltica</i>	66.67	0.63	33.65
七	斗管囊霉属 <i>Funneliformis</i>	100.00	4.48	52.24
15	褐色斗管囊霉 <i>F. badii</i>	44.44	0.45	22.45
16	副冠斗管囊霉 <i>F. coronatum</i>	66.67	0.30	33.49
17	地斗管囊霉 <i>F. geosporum</i>	88.89	2.50	45.70
18	疣突斗管囊霉 <i>F. verruculosum</i>	88.89	1.23	45.06
八	巨孢囊霉属 <i>Gigaspora</i>	11.11	0.04	5.58
19	球状巨孢囊霉 <i>G. margarita</i>	11.11	0.04	5.58
九	球囊霉属 <i>Glomus</i>	100.00	22.46	61.23
20	布氏球囊霉 <i>Gl. brohultii</i>	77.78	1.19	39.49
21	恺撒球囊霉 <i>Gl. caesaris</i>	100.00	1.12	50.56
22	卷曲球囊霉 <i>Gl. convolutum</i>	33.33	0.22	16.78
23	海得拉巴球囊霉 <i>Gl. hydera-</i> <i>badensis</i>	11.11	0.07	5.59
24	黑孢球囊霉 <i>Gl. melanospo-</i> <i>rum</i>	100.00	7.08	53.54
25	凹坑球囊霉 <i>Gl. multi forum</i>	100.00	3.84	51.92
26	膨果球囊霉 <i>Gl. pansihalos</i>	77.78	2.38	40.08
27	具孢球囊霉 <i>Gl. pustulatum</i>	66.67	0.52	33.60
28	网状球囊霉 <i>Gl. reticulatum</i>	100.00	6.04	53.02
十	和平囊霉属 <i>Pacispora</i>	77.78	0.56	39.17
29	方竹和平囊霉 <i>P. chimono-</i> <i>bambusae</i>	77.78	0.56	39.17
十一	根孢囊霉属 <i>Rhizophagus</i>	88.89	2.12	45.51
30	聚生根孢囊霉 <i>R. fasciculatus</i>	33.33	0.15	16.74
31	根内根孢囊霉 <i>R. intraradices</i>	88.89	1.97	45.43
十二	硬囊霉属 <i>Sclerocystis</i>	100.00	7.08	53.54
32	弯丝硬囊霉 <i>S. sinuosa</i>	100.00	7.08	53.54
十三	隔球囊霉属 <i>Septoglomus</i>	100.00	19.01	59.51
33	缩隔球囊霉 <i>Se. constrictum</i>	88.89	2.24	45.57
34	沙荒隔球囊霉 <i>Se. deserticola</i>	100.00	16.77	58.39

注:表中第一列以不同的中文序号表示不同属名,以不同的阿拉伯数字表示不同种名。

类最多的属,其次是无梗囊霉属(*Acaulospora*),鉴定出 AM 真菌 8 种。同时,球囊霉属与无梗囊霉属也是兔儿伞根际的优势 AM 真菌属。这与李铭杰等^[38]、周时艺等^[39]、郑亚茹^[40]的研究结果相似。球囊霉属与无梗囊霉属 AM 真菌在不同环境下都表现出优势可能与这两个属的孢子体型较小、较高的产孢效率且易于在土壤中传播有关^[41]。同时,结果表明沙荒隔球囊霉(*Se. deserticola*)、脆无梗囊霉(*A. delicata*)分别以重要值 58.39%、57.01%成为兔儿伞根际最具优势及次优势 AM 真菌种,说明某些 AM 真菌种可能在与特定植物共生时会表现出更高的亲和力与竞争力。AM 真菌与植物之间的联系是普遍存在并且紧密复杂的,本研究结果揭示了兔儿伞与 AM 真菌之间的共生关系,同时在一定程度上丰富了对松嫩盐碱草地 AM 真菌资源的认知。

参考文献:

- [1] 张新璐.盐渍土中刺槐根际 AMF 群落特征及其提高刺槐耐盐性机制的研究[D].杨陵:西北农林科技大学,2020.
- [2] 李聪聪,周亚星,谷强,等.三江源区典型高寒草地丛枝菌根真菌多样性及构建机制[J].草业学报,2021,30(1):46-58.
LI C C,ZHOU Y X,GU Q,et al. The species diversity and community assembly of arbuscular mycorrhizal fungi in typical alpine grassland in Sanjiangyuan region[J]. Acta Prataculturae Sinica,2021,30(1):46-58. (in Chinese)
- [3] 王文彬,贺学礼,赵丽莉,等.西北荒漠带油蒿丛枝菌根真菌空间分布特征[J].菌物研究,2020,18(1):20-30.
- [4] 杨帆,曹涵铭,陈园园,等. AM 真菌结构及鉴定方法的研究进展[J].现代农业科技,2019(16):152-154,157.
- [5] 卯吉华,李荣波,景跃波,等.核桃园土壤丛枝菌根真菌多样性及接种效应[J].森林与环境学报,2022,42(1):71-80.
- [6] 徐萌丽,杨俊华,谢宏鑫,等.盐胁迫下 AM 真菌对西瓜幼苗叶片防御酶和内源激素的影响[J].青岛农业大学学报:自然科学版,2021,38(4):235-239,255.
XU M L,YANG J H,XIE H X,et al. Effects of AM fungus on defense enzymes and endogenous hormones in leaves of water-melon seedlings under salt stress[J]. Journal of Qingdao Agricultural University: Natural Science, 2021, 38 (4): 235-239, 255. (in Chinese)
- [7] 齐晨汐,易观涛,付晓璇,等.丛枝菌根真菌对干旱胁迫下鹅绒委陵菜生理指标的影响[J].草地学报,2021,29(11):2407-2412.
QI C X,YI G T,FU X X,et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on physiological indexes of *Potentilla anserina* under drought-stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29 (11): 2407-2412. (in Chinese)
- [8] 周生亮,郭良栋.荒漠地区植物丛枝菌根真菌研究进展[J].菌物学报,2021,40(10):2523-2536.
- [9] 孙红,郑玉龙,林炎丽,等.生物炭、磷及 AMF 对 Cd 胁迫下柳枝稷生长及土壤性质的影响[J].草业学报,2021,30(12):71-80.
- [10] 丁胜利. AM 真菌提高牧草在盐碱化土壤中耐受性的作用机制[D].呼和浩特:内蒙古大学,2021.

- [11] 金文豪,邵帅,陈俊辉,等. 不同类型菌根对土壤碳循环的影响差异研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(5): 953-962.
- JIN W H, SHAO S, CHEN J H, *et al.* Research progress in the impact of different mycorrhizal types on soil carbon cycling[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2021, 38(5): 953-962. (in Chinese)
- [12] 王富强,孙立秋,王金龙,等. 兔儿伞化学成分研究(II)[J]. 中草药, 2020, 51(11): 2878-2885.
- [13] 吴素珍,李加林,朱秀志. 兔儿伞醇提物的抗肿瘤实验[J]. 中国医院药学杂志, 2011, 31(2): 102-104.
- [14] 石喜梅. 兔儿伞种子繁殖及抗旱性的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [15] 张伟溪,王洪峰,赵昕,等. 松嫩盐碱草地植物丛枝菌根的初步调查[J]. 土壤通报, 2010, 41(6): 1380-1385.
- [16] 杨春雪,陈飞,岳英男,等. 松嫩盐碱草地 26 种植物根围丛枝菌根真菌多样性特征[J]. 草业科学, 2015, 32(12): 2008-2020.
- [17] 王浩男. 松嫩平原盐碱地景观格局演化及驱动力分析[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [18] 王智颖. 松嫩平原盐碱地分布及空间变化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2020.
- [19] PHILLIPS J M, HAYMAN D S. Improved producers 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(1): 158-161.
- [20] TROUVELOT A, KOUGH J L, GIANINAZZI-PEARSON V. Physiological and genetic aspects of mycorrhizae[M]. Paris: Inra Press, 1986: 217-221.
- [21] LANSON D C, ALLEN M F. The effects of soil texture on extraction of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungal spores from arid aites[J]. Mycologia, 1986, 78(2): 164-168.
- [22] 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, 2012: 170.
- [23] 王幼珊,刘润进. 球囊菌门丛枝菌根真菌最新分类系统菌种名录[J]. 菌物学报, 2017, 36(7): 820-850.
- [24] 赵文娜. 松嫩盐碱草地紫花地丁根围 AM 真菌多样性与功能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.
- [25] 宋娟,吴祝华,翁行良,等. 枫香根际丛枝菌根真菌多样性[J]. 林业科学, 2021, 57(9): 98-109.
- SONG J, WU Z H, WENG H L, *et al.* Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in rhizosphere of *Liquidambar formosana* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(9): 98-109. (in Chinese)
- [26] 王玉丹,杨春雪. 鹅绒委陵菜根际 AM 真菌侵染特性及物种多样性[J]. 西北农业学报, 2020, 29(2): 254-265.
- WANG Y D, YANG C X. Infection characteristics and diversity of AM fungi in rhizosphere of *Potentilla anserina* [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2020, 29(2): 254-265. (in Chinese)
- [27] 高曙濛,王玉丹,杨春雪. 松嫩盐碱草地蒲公英根围 AM 真菌侵染特性及种类多样性[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(5): 90-97.
- GAO X M, WANG Y D, YANG C X. Mycorrhizal fungal infection characteristics and the diversity of *Taraxacum mongolicum* rhizosphere in Songnen saline-alkaline grassland[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(5): 90-97. (in Chinese)
- [28] 杨春雪,黄寿臣,陈飞,等. 松嫩盐碱草地旋覆花根围 AM 真菌侵染特性及多样性[J]. 草业科学, 2017, 34(2): 231-239.
- [29] SANDERS I R. Preference, specificity and cheating in the arbuscular mycorrhizal symbiosis[J]. Trends in Plant Science, 2003, 8(4): 143-145.
- [30] 杨韧,张好强,唐明. 陕北地区油松根际真菌资源初步调查及其与土壤理化性质的关系[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(5): 203-210.
- YANG R, ZHANG H Q, TANG M. A survey of root fungal resources of *Pinus tabulaeformis* and its relationship with soil physicochemical in Northern Shaanxi[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(5): 203-210. (in Chinese)
- [31] JAMIOKOWSKA A, KSINIĄK A, GAZKA A, *et al.* Impact of abiotic factors on development of the community of arbuscular mycorrhizal fungi in the soil: a review[J]. International Agrophysics, 2018, 32(1): 133-140.
- [32] 任玉连,曹乾斌,李聪,等. 南滚河自然保护区森林群落特征与土壤性质之间关联分析[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(3): 50-59.
- REN Y L, CAO Q B, LI C, *et al.* Correlation analysis between forest community characteristics and soil characteristics in Nangunhe Nature Reserve[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(3): 50-59. (in Chinese)
- [33] 王化秋,程巍,郝俊,等. 贵州煤矸石山香根草根系及根际土丛枝菌根真菌(AMF)群落季节动态研究[J]. 菌物学报, 2021, 40(3): 514-530.
- [34] LI X, HAN S, LUO X, *et al.* Arbuscular mycorrhizal-like fungi and glomalin-related soil protein drive the distributions of carbon and nitrogen in a large scale[J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(2): 963-972.
- [35] 马俊卿,侯宁,孙晨瑜,等. 宿主不同对丛枝菌根真菌扩繁效应的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(1): 7-14.
- [36] 袁钟鸣,程雪飞,王金平,等. 苏北泥质海岸带滩涂区丛枝菌根真菌侵染及土壤因子[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(7): 123-129.
- YUAN Z M, CHENG X F, WANG J P, *et al.* Effects of edaphic factors on arbuscular mycorrhizal fungi colonization in muddy coastal area of Northern Jiangsu Province[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(7): 123-129. (in Chinese)
- [37] 赖文珍,王思佳,胡文涛,等. 华南主要树木丛枝菌根真菌物种多样性调查研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(6): 171-179.
- LAI W Z, WANG S J, HU W T, *et al.* Investigation on species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi occurring in the main tree species in Southern China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(6): 171-179. (in Chinese)
- [38] 李铭杰,周志杰,邢礼军,等. 北苍术根区土壤中 AM 真菌多样性及其与土壤养分相关性分析[J]. 中国生物防治学报, 2021, 37(6): 1288-1297.
- [39] 周时艺,韦云东,陈蕊蕊,等. 木薯根域 AMF 群落结构特征及多样性研究[J]. 农业研究与应用, 2021, 34(4): 54-61.
- [40] 郑亚茹. 桑树根际丛枝菌根真菌(AMF)多样性及对宿主耐盐性的影响[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2021.
- [41] YANG A N, LU L, ZHANG N. The diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the subtropical forest of Huangshan (Yellow Mountain), East-Central China[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2011, 27(10): 2351-2358.