

云南金顶铅锌矿区丛枝菌根真菌多样性的研究

肖艳萍 李涛 费洪运 赵之伟*

云南大学省部共建生物资源保护与利用国家重点实验室培育基地 微生物多样性可持续利用教育部重点实验室 昆明 650091

摘要: 对云南金顶铅锌矿区丛枝菌根真菌 (Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF) 资源进行了调查, 从32种植物的83个根际土壤样本中分离鉴定出5属36种丛枝菌根真菌, 其中无梗囊霉属 *Acaulospora* 5种、内养囊霉属 *Entrophospora* 2种、巨孢囊霉属 *Gigaspora* 1种、球囊霉属 *Glomus* 24种及盾巨孢囊霉属 *Scutellospora* 4种。球囊霉属和无梗囊霉属为金顶铅锌矿区中丛枝菌根真菌的优势属, 沃克球囊霉 *Glomus walkeri* 是我国的新记录种。近明球囊霉 *Glomus claroideum*、明球囊霉 *G. clarum*、缩球囊霉 *G. constrictum*、地球囊霉 *G. geosporum*、摩西球囊霉 *G. mossae*、膨胀球囊霉 *G. pansihalos* 和疣突球囊霉 *G. verruculosum* 是金顶铅锌矿区的优势种; 金顶铅锌矿区土壤中丛枝菌根真菌的孢子密度为495-11175个/100g土, 平均 3368 ± 291 (SE, 标准误差) 个/100g土, 每种植物根际土壤中丛枝菌根真菌的物种丰富度为2-20种, 平均11.5种; 金顶铅锌矿区植物根际土壤中较高的AMF孢子密度和物种丰富度说明AMF对重金属污染具有较强的抗(耐受)性。

关键词: 优势种, 孢子密度, 丰富度, 相对多度, 新记录种

Species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in Jinding Pb-Zn mining area of Lanping, Yunnan

XIAO Yan-Ping LI Tao FEI Hong-Yun ZHAO Zhi-Wei*

Laboratory for Conservation and Utilization of Bioresources and Key Laboratory for Microbial Resources of the Ministry of Education, Yunnan University, Kunming 650091, China

基金项目: 国家重大基础研究前期研究专项 (No. 2005CCA05700); 国家自然科学基金 (No. 3770052, 40763003); 云南省自然科学基金 (No. 2007C007M)

*Corresponding author. E-mail: zhaozhw@ynu.edu.cn

收稿日期: 2007-11-07, 接受日期: 2008-03-24

Abstract: The species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in Jinding Pb-Zn mining area of Lanping, Yunnan, was investigated. Thirty-six species belonging to five genera were isolated and identified from 83 rhizosphere soil samples of 32 plant species, including 5 species of *Acaulospora*, 2 species of *Entrophospora*, 1 species of *Gigaspora*, 24 species of *Glomus* and 4 species of *Scutellospora*. *Acaulospora* and *Glomus* were the dominant genera and *Glomus walkeri* was new record in China. *Glomus claroideum*, *G. clarum*, *G. constrictum*, *G. geosporum*, *G. mossaea*, *G. pansihalos* and *G. verruculosum* were dominant in Jinding Pb-Zn mining area. AMF spore density ranged from 495 to 11175 per 100g soil with an average of 3368 ± 291 (SE, standard error), and the species richness in each plant sample was 2-20 with an average of 11.5. The relatively high spore density and species richness of AMF in the rhizosphere soils of Jinding Pb-Zn mining area suggested that AMF have a strong tolerance to soil heavy metal pollution.

Key words: dominant species, spore density, species richness, relative abundance, new record

丛枝菌根真菌 (AMF) 资源丰富, 生态适应性强, 可发生在各种生态环境中。除大量分布于农业和森林土壤中外, 沙漠、珊瑚礁、沿海滩涂、盐碱土壤、贫瘠土壤及一些工业污染区、废矿区土壤、侵蚀土壤中都发现有AMF存在 (盖京苹等 2005)。我国学者自20世纪80年代开始对不同地区的AMF资源进行了调查, 例如, 我国东南沿海地区 (王幼珊等 1998; 张美庆等 1998)、都江堰地区 (张英等 2003)、西双版纳热带雨林 (Zhao *et al.* 2001)、黄河三角洲盐碱土壤 (王发园和刘润进 2002)、金沙江干热河谷 (李建平等 2003; 赵丹丹等 2006) 以及河流湿地 (Wang & Zhao 2006) 等环境中都蕴藏着丰富的AMF资源。我国矿产资源丰富, 但长期的开矿和冶炼也留下了许多重金属污染区, 寻找和筛选耐 (抗) 土壤重金属污染的植物-AMF组合, 并将其应用于矿区植被恢复是近年来国内外土壤重金属污染生物修复的重要途径。从具有重金属污染背景来源的AMF资源中筛选耐 (抗) 重金属的AMF菌株也是目前这一研究领域的有效方法 (Göhre & Paszkowski 2006)。目前, 我国对重金属污染区的AMF资源调查工作还很少 (牛振川等 2007)。兰坪金顶凤凰山铅锌矿区位于云南省西南部兰坪县金顶镇凤凰山 (东经 $99^{\circ}25'$, 北纬 $26^{\circ}25'$), 矿山于二十世纪七十年代初开始开采冶炼。进入80年代后, 经历了一个相当长的群采阶段, 遗留大量的尾矿堆和贫矿堆, 土壤中含有大量的重金属, 主要是铅 ($10192.20 \pm 2665.48 \text{mg/kg}$), 锌 ($54298.86 \pm 14149.45 \text{mg/kg}$) 和镉 ($1811.36 \pm 576.39 \text{mg/kg}$), 是云南规模最大、最为典型的土壤重金属污染矿区。本研究对该区域自然生长的植物根际土壤中的AMF资源进行了调查, 旨在了解该区AMF的多样性和生态分布规律, 同时收集一批来自重金属污染区的AMF资源, 为该区域土著耐铅锌AMF菌种的筛选、重金属污染的植物-菌根联合修复奠定基础。

1 材料和方法

1.1 材料采集

2006年8月于兰坪县金顶镇凤凰铅锌矿区内随机选取32种自然生长的植物, 采取

5-30cm土层的贴近根系的根际土样（每份土样1kg左右）。采集的土样装于无菌塑料袋中，带回实验室，自然风干后存于4℃冰箱中，在4个月内处理完。

1.2 材料处理

每份土样分别称取20g，用湿筛-沉淀法处理（Koske & Walker 1984），在体视显微镜下分别计数100目、140目、200目筛面上的孢子数。

1.3 AMF的鉴定

经湿筛获得的孢子，按孢子的大小、形状、颜色等进行初步分类后，分别用PVA和Melzer's试剂（等量混合）等制成标本片（Morton 1988），然后在光学显微镜下观察。参照国际VA菌种保藏中心（International Collection Center of Vesicular and Arbuscular Mycorrhizal Fungi, INVAM）提供的菌根菌的描述及图片（<http://invam.caf.wvu.edu>）以及相应的真菌分类文献进行AMF种的鉴定。

1.4 统计分析方法

1.4.1 出现次数（occurrence times, *OT*）：某个AMF物种在所有土壤样本中被鉴定出的次数。

1.4.2 出现频率（occurrence frequency, *OF*）：该种真菌的出现次数占所有物种出现次数之和的比例，表征一个生境中物种分布的广泛程度。

1.4.3 物种丰富度（species richness, *SR*）：一个生境中物种数目的多寡，本文指一种宿主植物20g根际土壤样本中的AMF种数。

1.4.4 相对多度（relative abundance, *RA*）：某个种的孢子数在总孢子数中的比率，本文采用公式： $RA = (\text{某个已经鉴定出来的种或属的孢子数} / \text{所有鉴定出来的总孢子数}) \times 100\%$ 。

1.4.5 孢子密度（spore density, *SD*）：指单位体积中的孢子个数，本文指100克根际土样中的AMF孢子数。

运用Microsoft Excel 2000版统计软件对孢子密度和物种丰富度进行相关系数的显著性检验分析。

2 结果和分析

2.1 AMF的组成

从32种植物的83个根际土壤样本中，共分离鉴定出了5属36种AMF，其中球囊霉属*Glomus* 24种，占67%；无梗囊霉属*Acaulospora* 5种，占14%；这两属AMF占已鉴定种数的81%，在金顶铅锌矿区中占明显的优势，是优势属。另外，还分离鉴定出盾巨孢囊霉属*Scutellospora* 5种，占11%；巨孢囊霉属*Gigaspora* 1种和内养囊霉属*Entrophospora* 2种，分别占3%和6%。各AMF的鉴定和分析结果见表1。

表1 金顶铅锌矿区丛枝菌根真菌的种类、出现频率及相对多度

Table 1 AMF species and their occurrence frequency and relative abundance in Jinding Pb-Zn mining area, Yunnan

序号 No.	丛枝菌根真菌种类 AMF species	孢子数 SA	出现次数 OT	出现频率 OF (%)	相对多度 RA (%)
	无梗囊霉属 <i>Acaulospora</i>	172	62	10.28	3.4
1	双网无梗囊霉 <i>A. bireticulata</i> F.M.Rothwell & Trappe	3	3	0.5	0.06
2	格但无梗囊霉 <i>A. gedanensis</i> Blaszk.	36	4	0.66	0.71
3	细凹无梗囊霉 <i>A. scrobiculata</i> Trappe	12	7	1.16	0.24
4	刺状无梗囊霉 <i>A. spinosa</i> C.Walker & Trappe	8	5	0.83	0.16
5	瘤突无梗囊霉 <i>A. tuberculata</i> Janos & Trappe	113	43	7.13	2.24
	内养囊霉属 <i>Entrophospora</i>	60	20	3.32	1.19
6	波罗的海内养囊霉 <i>E. baltica</i> Blaszk.	3	3	0.5	0.06
7	稀有内养囊霉 <i>E. infrequens</i> (I.R. Hall) R.N.Ames & R.W.Schneid.	57	17	2.82	1.13
	球囊霉属 <i>Glomus</i>	4747	486	80.6	93.93
8	聚丛球囊霉 <i>G. aggregatum</i> N.C.Schenck & G.S.Sm.	2	1	0.17	0.04
9	双型球囊霉 <i>G. ambisporum</i> G.S.Sm. & N.C.Schenck	8	1	0.17	0.16
10	苏格兰球囊霉 <i>G. caledonium</i> (T.H.Nicolson & Gerd.) Trappe & Gerd.	10	2	0.33	0.2
11	近明球囊霉 <i>G. clarioideum</i> N.C.Schenck & G.S.Sm. emend C. Walker & Vestberg	517	70	11.61	10.23
12	明球囊霉 <i>G. clarum</i> T.H.Nicolson & N.C.Schenck	352	49	8.13	6.96
13	缩球囊霉 <i>G. constrictum</i> Trappe	420	42	6.97	8.31
14	象牙白球囊霉 <i>G. eburneum</i> L.J.Kenn., J.C.Stutz & J.B.Morton	56	7	1.16	1.11
15	束球囊霉 <i>G. fasciculate</i> (Thaxt.) Gerd. & Trappe	73	14	2.32	1.44
16	地球囊霉 <i>G. geosporum</i> (T.H.Nicolson & Gerd.) C.Walker	283	51	8.46	5.6
17	海德拉巴球囊霉 <i>G. hyderabadensis</i> Rani, Kunwar, Prasad & Manohar.	6	3	0.5	0.12
18	根内球囊霉 <i>G. intraradices</i> N.C.Schenck & G.S.Sm.	164	7	1.16	3.24
19	大果球囊霉 <i>G. macrocarpum</i> Tul. & C.Tul.	12	4	0.66	0.24
20	微丛球囊霉 <i>G. microaggregatum</i> Koske, Gemma & P.D.Olexia	1	1	0.17	0.02
21	小果球囊霉 <i>G. microcarpum</i> Tul. & C.Tul.	10	2	0.33	0.2
22	单孢球囊霉 <i>G. monosporum</i> Gerd. & Trappe	5	4	0.66	0.1
23	摩西球囊霉 <i>G. mossaea</i> (T.H.Nicolson & Gerd.) Gerd. & Trappe	319	31	5.14	6.31
24	膨胀球囊霉 <i>G. pansihalos</i> S.M.Berch & Koske	1822	74	12.27	36.05
25	悬钩子球囊霉 <i>G. rubiforme</i> (Gerd. & Trappe) R.T.Almeida & N.C. Schenck	51	24	3.98	1.01
26	扭形球囊霉 <i>G. tortuosum</i> N.C.Schenck & S.M.Sm.	4	2	0.33	0.08

						续表 1
27	疣突球囊霉	<i>G. verruculosum</i> Blaszk.	187	53	8.79	3.7
28	地表球囊霉	<i>G. versiforme</i> (P. Karst.) S.M.Berch	13	6	1	0.26
29	沃克球囊霉	<i>G. walkeri</i> Blaszk., C.Renker & F.Buscot	324	12	1.99	6.41
30	<i>Glomus</i> sp. I		50	22	3.65	1
31	<i>Glomus</i> sp. II		58	4	0.66	1.15
	巨孢囊霉属	<i>Gigaspora</i>	18	9	1.49	0.36
32	极大巨孢囊霉	<i>G. gigantean</i> (T.H. Nicolson & Gerd.) Gerd. & Trappe	18	9	1.49	0.36
	盾巨孢囊霉属	<i>Scutellospora</i>	57	26	4.31	1.13
33	圆齿盾巨孢囊霉	<i>S. crenulata</i> Herrera-Peraza, Cuenca & C.Walker	1	1	0.17	0.02
34	异配盾巨孢囊霉	<i>S. heterogama</i> (T.H.Nicolson & Gerd.) C.Walker & F.E.Sanders	24	12	1.99	0.47
35	桃形盾巨孢囊霉	<i>S. persica</i> (Koske & C.Walker) C.Walker & F.E.Sanders	29	10	1.66	0.57
36	疣壁盾巨孢囊霉	<i>S. verrucosa</i> (Koske & C.Walker) C.Walker & F.E.Sanders	3	3	0.5	0.06
总计		36 种	5054	603	100	100

注：SA：孢子数量；OT：出现次数；OF：出现频率；RA：相对多度。
Note: SA, spore amount; OT, occurrence times; OF, occurrence frequency; RA, relative abundance.

在已经鉴定出的5属AMF中，球囊霉属*Glomus*和无梗囊霉属*Acaulospora*的出现频率较高，分别为80.6%和10.3%；其相对多度也较高，前者达到93.9%，后者为3.4%。研究结果表明球囊霉属和无梗囊霉属广泛存在于重金属污染的铅锌矿区土壤中，特别是球囊霉属，不仅分布范围广，而且产孢力较强。

在36种AMF中，出现频率大于5%、相对多度大于3%的AMF种主要有近明球囊霉*Glomus claroideum* N.C. Schenck & G.S. Sm. emend C. Walker & Vestberg、明球囊霉*G. clarum* T.H. Nicolson & N.C. Schenck、缩球囊霉*G. constrictum* Trappe、地球囊霉*G. geosporum* (T.H. Nicolson & Gerd.) C.Walker、摩西球囊霉*G. mossaea* (T. H. Nicolson & Gerd.) Gerd. & Trappe、膨胀球囊霉*G. pansihalos* S. M. Berch & Koske和疣突球囊霉*G. verruculosum* Blaszk.，这7种AMF仅占已鉴定种(36种)的19.4%，但出现频率和相对多度累计分别达52.6%和73.5%，它们是金顶铅锌矿区的优势种。它们不仅分布范围较广，而且也具有较强的产孢能力，是筛选抗（耐）重金属污染优先考虑的候选种。其中，膨胀球囊霉*G. pansihalos*最为典型，其出现频率和相对多度分别高达12.3%和36.1%，它在32种被调查植物的29种植物的根际土壤中都被分离到，表明其具有较强的耐受土壤金属污染的能力。和本研究结果相似，Pawlowska *et al.*（1996）也在富含大量铅、锌和镉的重金属污染土壤中分离到膨胀球囊霉，平均每100克土壤中膨胀球囊霉的孢子数达到100±63个。

此外, 瘤突无梗囊霉 *Acaulospora tuberculata* Janos & Trappe 和悬钩子球囊霉 *Glomus rubiforme* (Gerd. & Trappe) R.T. Almeida & N.C. Schenk 出现频率也较高, 分别为 7.1% 和 4%; 根内球囊霉 *G. intraradices* N.C. Schenk & G.S. Sm. 和沃克球囊霉 *G. walkeri* Blaszk., Renker & Buscot 出现频率较低, 但是其相对多度却较高, 分别为 3.2% 和 6.4%。其中, 沃克球囊霉 *Glomus walkeri* 是新记录种, 现将其主要特征描述如下:

沃克球囊霉 *Glomus walkeri* Blaszk., C. Renker & F. Buscot, *Mycological Research*, **110**: 555, 2006.

图 1

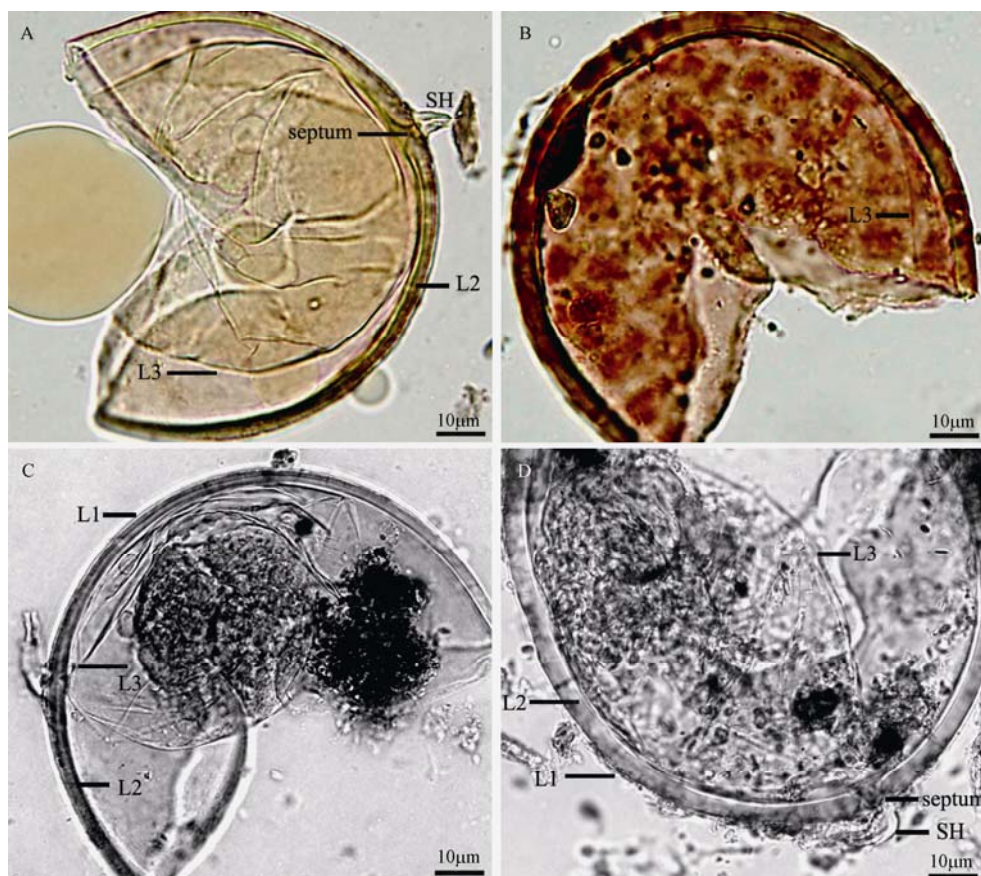


图1 沃克球囊霉的形态学特征 A-B: 孢子在 PVLG+Melzer's试剂中的颜色反应. A: 沃克球囊霉的孢子, 连孢菌丝(SH), 与L2分开的第三层孢子壁(L3)及由L3形成的连孢菌丝的隔膜; B: 渐消逝的最外层(L1)在 PVLG+Melzer's试剂中的不均匀颜色反应; C: 孢子壁的结构(L1, L2, L3), 及L2与L3分离和相连接的部分; D: 连孢菌丝(SH)及L3弯曲形成的隔膜.

Fig. 1 Morphological characters of *Glomus walkeri*. A-B: Stain reaction of spores in PVLG+Melzer's reagent. A: Spore of *Glomus walkeri* and its subtending hypha (SH), spore wall layer 3 (L3), and curved septum of subtending hypha formed by L3; B: Deteriorated layer 1 with uneven reddish stained reaction in Melzer's reagent; C: Spore wall layers 1-3 (L1, L2, L3), the separation layer 3 from layer 2, and small protrusion attaching to layer 2; D: A mature spore showing the subtending hypha (SH) with a curved septum.

孢子单生于土壤中, 白色至淡黄色。球形至近球形, 直径(85-)129(-170) μm 。孢子壁三层(L1-L3), L1为孢子最外层, 厚(0.25-)0.65(-2.5) μm , 是透明的半永久性壁, 易随着年龄消逝; L2为光滑的层状壁, 白色至淡黄色, 厚(2.5-)4.5(-7.5) μm 。L3为光滑, 无色透明膜状壁, 厚(0.25-)0.4(-2.5) μm , 通常易与L2分离。连孢菌丝单根, 长(12.5-)16(-20) μm , 白色至淡黄色, 直或弯曲, 管状或扩张, 连点基部宽(9-)13(-15) μm , 连丝基部壁厚(4-)5.4(-7.5) μm ; 连点孔, 宽(1.2-)2.5(-3.7) μm , 通常由L3延伸的隔膜(septum)所封闭, 且L3形成的隔膜沿孢子基部下延(3.5-)4(-5) μm 。在Melzer's试剂中只有L1有颜色反应, 呈均匀的淡红色或不均匀斑块状。与原始描述相比(Blaszkowski *et al.* 2006), 本研究所收集到孢子的基本特征与原始描述基本一致, 但是孢子较原始描述的孢子大一些, 并且在Melzer's试剂中, 有的孢子颜色反应呈斑块分布, 且颜色较深(图1-B)。

标本: YMF 1-30122, YMF 1-27321, YMF 1-23121, YMF 1-32122, YMF 1-32222。孢子标本保存在云南大学生物资源保护与利用重点实验室。

生境: 从云南省兰坪县金顶铅锌矿山野灯心草 *Juncus setchuensis* Buchen.、白花三叶草 *Trifolium repens* L.、川续断 *Dipsacus asper* Wall.、大理蓟 *Cirsium taliense* (Jeffrey) Lévl. 根际土壤中分离得到。

2.2 AMF的分布、孢子密度和物种丰富度

从32种植物的83个根际土壤样本中都分离到了AMF的孢子, 但各样品中的AMF的孢子密度变化较大, 变化范围为495-11175个/100g土, 所有样品中AMF的孢子的平均密度为3368 $\pm$ 291个/100g土, 土壤样品的物种丰富度在2-20之间, 平均为11.5种(表2)。

已有研究表明, 在重金属污染土壤中, AMF的孢子数量受到土壤中重金属的影响(Claudia Elizabete *et al.* 2006; Del Val *et al.* 1999)。但在本研究中, AMF平均孢子密度为3368 $\pm$ 291个/100g土, 其孢子数量变化范围在495-11175个/100g土。与其它重金属污染区域(Zak & Parkinson 1982; Pawlowska *et al.* 1996; Ortega-Larrocea *et al.* 2007)相比, 兰坪金顶矿区具有较高的孢子密度, 表明该区域中的AMF对重金属污染土壤具有较好的适应能力。

在调查中还发现, 同一区域不同植物根际土壤中AMF孢子呈不均匀分布。这可能是由植物和AMF的生物学特性决定的, AMF虽然没有宿主专一性, 但宿主植物对AMF却具有一定的选择性或亲和性, 植物选择了不同的AMF, 由于不同种类的AMF其产孢能力不同, 因而导致AMF孢子的团块分布; 即使是同种AMF, 与其共生的宿主植物不同, 植物所处的生长状况(提供AMF碳水化合物的能力)不同, AMF在根际土壤中产生、积累的孢子也会不同(He *et al.* 2002; Kennedy *et al.* 2002)。不同植物与不同的AMF组合可以引起不同植物根际土壤中孢子密度的差异。另外, 不同植物根系的相互交错也会影响植物根际土壤中AMF孢子的分布(Zhao *et al.* 2001)。

一般认为, 植物根际土壤中AMF的物种多样性与孢子密度应是一致的, 在重金属污染的严重铅锌矿区, 植物根际土壤中AMF的孢子密度与物种丰富度之间也表现出了这种相关性, 即孢子密度值较大的土壤, 其物种丰富度也较高。利用Microsoft Excel 2000版统计软

件对两者进行了相关系数的显著性检验表明, 两者的相关系数 $r = 0.438 > r_{0.01}(0.302)$, 即 $|r| > r_{0.01}$, 说明孢子密度和物种丰富度的相关性高度显著, 即矿区植物根际土壤中AMF的孢子密度和物种丰富度之间有极显著的正相关性。

表 2 金顶铅锌矿区土壤中AMF 的分布、孢子密度和物种丰富度

Table 2 Distribution, spore density and species richness of AMF in Jinding Pb-Zn mining area, Yunnan

宿主植物 Host plants	根际土壤中的丛枝菌根真菌 AMF in the rhizosphere soil	SD	SR
菊科 <i>Asteraceae</i>			
青蒿 <i>Artemisia apiacea</i> Hance	5, 11, 13, 15, 16, 24, 27, 30	1012±198	8
大理薊 <i>Cirsium taliense</i> (Jeffrey) Lévl.	7, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 23, 24, 27, 29, 31	1372±295	12
滇毛莲菜 <i>Picris divaricata</i> Vant.	5, 7, 11, 12, 13, 16, 18, 23, 24, 27, 30, 32, 35, 36	4080±761	14
苦买菜 <i>Sonchus arvensis</i> L.	5, 11, 12, 13, 16, 24, 25, 27	4393±443	8
紫草科 <i>Boraginaceae</i>			
倒提壶 <i>Cynoglossum amabile</i> Stapf et Drumm.	3, 5, 6, 11, 12, 13, 14, 16, 23, 24, 25, 27, 28, 30	4614±999	14
石竹科 <i>Caryophyllaceae</i>			
女娄菜 <i>Melandrium apricum</i> (Turcz.) Rohrb.	5, 11, 12, 13, 15, 16, 19, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 30, 32	3401±984	15
藜科 <i>Chenopodiaceae</i>			
灰条菜 <i>Chenopodium album</i> L.	11, 13, 23, 24, 30	4040±485	5
鸭跖草科 <i>Commelinaceae</i>			
心叶吉祥草 <i>Spatholirion volubile</i> Eddew.	4, 5, 7, 11, 12, 15, 16, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 30, 32, 34, 35, 36	4634±549	18
莎草科 <i>Cyperaceae</i>			
云雾苔草 <i>Carex nubigena</i> D. Don	5, 7, 11, 12, 16, 23, 24, 25, 27, 28, 30, 33	1683±635	12
川续断科 <i>Dipsacaceae</i>			
川续断 <i>Dipsacus asper</i> Wall.	7, 11, 12, 15, 16, 24, 25, 27, 28, 29	3613±163	10
紫堇科 <i>Fumariaceae</i>			
纤细黄堇 <i>Corydalis gracillima</i> C. Y. Wu	1, 3, 5, 7, 11, 12, 13, 16, 21, 24, 27, 34, 35	3180±543	13
牻牛儿苗科 <i>Geraniaceae</i>			
尼泊尔老鹳草 <i>Geranium nepalense</i> Sweet	3, 5, 11, 12, 13, 16, 23, 24, 25, 27	4941±2379	10
八仙花科 <i>Hydrangeaceae</i>			
长叶溲疏 <i>Deutzia longifolia</i> Franch.	3, 5, 6, 7, 11, 12, 13, 15, 16, 24, 25, 27, 30	1636±297	13
金丝桃科 <i>Hypericaceae</i>			
芒种花 <i>Hypericum uralum</i> Buch.-Ham.	2, 3, 5, 11, 12, 13, 16, 24, 25, 27	7678±1723	10
灯心草科 <i>Juncaceae</i>			
野灯心草 <i>Juncus setchuensis</i> Buchen.	11, 12, 15, 16, 23, 26, 27, 29, 30	1268±538	9
唇形科 <i>Labiatae</i>			

续表 2			
匍匐风轮菜 <i>Clinopodium repens</i> (D. Don) Wall.	4, 5, 7, 11, 12, 13, 15, 16, 22, 24, 27, 32, 36	2828±1031	13
圆穗香薷 <i>Elsholtzia cypriani</i> (Pavol.) C. Y. Wu & S.Chow	4, 5, 7, 11, 12, 19, 24, 27, 30, 32, 34, 35	5398±1383	12
柳叶菜科 <i>Onagraceae</i>			
红花月见草 <i>Oenothera rosea</i> Ait.	1, 5, 7, 11, 12, 13, 14, 16, 23, 24, 25, 27, 30	3183±811	13
蝶形花科 <i>Papilionaceae</i>			
百脉根 <i>Lotus corniculatus</i> L.	10, 11, 12, 13, 16, 23, 27, 29, 31	495±190	9
天蓝木宿 <i>Medicago lupulina</i> L.	11, 23	585±243	2
白花三叶草 <i>Trifolium repens</i> L.	3, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 23, 24, 27, 29, 34	1167±240	12
车前草科 <i>Plantaginaceae</i>			
车前草 <i>Plantago depressa</i> Willd.	5, 11, 13, 16, 17, 23, 24, 27, 30, 32, 34	1553±585	11
禾本科 <i>Poaceae</i>			
短柄草 <i>Brachypodium sylvaticum</i> (Huds.) Beauv.	4, 5, 10, 11, 12, 13, 16, 20, 24, 25, 27, 34	1155	12
蔗茅 <i>Erianthus rufipilus</i> (Steud.) Griseb.	7, 11, 16, 18, 23, 24, 27, 30, 32	1555±235	9
蓼科 <i>Polygonaceae</i>			
尼泊尔蓼 <i>Polygonum nepalense</i> Meisn.	11, 12, 24, 30	3345±1320	4
翅果酸模 <i>Rumex nepalensis</i> Spreng.	5, 11, 12, 13, 15, 16, 23, 24, 25, 27, 30	2962±116	11
毛茛科 <i>Ranunculaceae</i>			
南马尾黄连 <i>Thalictrum delavayi</i> Franch.	2, 5, 7, 8, 11, 12, 13, 15, 16, 21, 22, 24, 25, 27, 30, 34	11135±2580	16
蔷薇科 <i>Rosaceae</i>			
白蘼 <i>Fragaria nilgerrensis</i> Gay	11, 13, 18, 23, 24, 29, 30, 31	1103±243	8
水杨梅 <i>Geum japonicum</i> Thunb.	1, 2, 5, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 19, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 32, 34, 35	7693±814	20
茜草科 <i>Rubiaceae</i>			
猪殃殃 <i>Galium aparine</i> L.	5, 9, 11, 16, 24, 25, 27, 34, 35	3935	9
伞形科 <i>Umbelliferae</i>			
小窃衣 <i>Torilis japonica</i> (Houtt.) DC.	3, 4, 5, 11, 12, 13, 16, 23, 24, 25, 27, 34, 35	3095±1195	13
败酱科 <i>Valerianaceae</i>			
长序缬草 <i>Valeriana hardwickii</i> Wall.	5, 6, 11, 12, 13, 16, 18, 19, 24, 25, 27, 28	7445±1011	12
计: 孢子密度 495-11175 个/100g 土, 平均 3368±291 (SE)个/100g 土; 物种丰富度 2-20, 平均 11.5.			

注: “根际土壤中的真菌”栏中的数字为表1中丛枝菌根真菌的序号. SD: 孢子密度; SR: 物种丰富度; SE: 标准误差.

Note: Numbers in the column ‘AMF in the rhizosphere soil’ are corresponding to the ordinal numbers of AMF species listed in table 1.

SD, spore density; SR, species richness; SE, standard error.

致谢: 在样品采集中得到了云南大学生态学与地植物学研究所陆树刚教授, 中科院西双版纳热带植物园房辉老师, 本室李凌飞、张燕和梁昌聪等同学的帮助; 植物标本由陆树刚教授帮助鉴定, 在此一并表示感谢。

[REFERENCES]

- Blaszkowski J, Renker C, Buscot F, 2006. *Glomus drummondii* and *G. walkeri*, two new species of arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). *Mycological Research*, **110**: 555-566
- Claudia Elizabete LL, Cavalcante Uided Maaze T, Sampaio Everardo VSB, Arminda SM, Leonor CM, 2006. Growth of mycorrhized seedlings of *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. in a copper contaminated soil. *Applied Soil Ecology*, **31**: 181-185
- Del Val C, Barea JM, Azcón-Aguilar C, 1999. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungus populations in heavy-metal-contaminated soils. *Applied and Environmental Microbiology*, **65**: 718-723
- Gai JP, Feng G, Li XL, 2005. Review of researches on biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soils*, **37**(3): 236-242 (in Chinese)
- Göhre V, Paszkowski U, 2006. Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation. *Planta*, **223**: 1115-1222
- He X, Mouratov S, Steinberger Y, 2002. Spatial distribution and colonization of arbuscular mycorrhizal fungi under the canopies of desert halophytes. *Arid Land Research and Management*, **16**: 149-160
- Kennedy LJ, Tiller RL, Stutz JC, 2002. Associations between arbuscular mycorrhizal fungi and *Sporobolus wrightii* in riparian habitats in arid South-western North America. *Journal of Arid Environments*, **50**: 459-475
- Koske RE, Walker C, 1984. *Gigaspora erythropha*, a new species forming arbuscular mycorrhizae. *Mycologia*, **76**: 250-255
- Li JP, Li T, Zhao ZW, 2003. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the hot-dry valley of Jinsha river. *Mycosystema*, **22**(4): 604-612 (in Chinese)
- Morton JB, 1988. Taxonomy of VA mycorrhizal fungi: classification, nomenclature, and identification. *Mycotaxon*, **32**: 267-324
- Niu ZC, Tan M, Huang JC, Wang S, Sheng M, 2007. Effects of lead and zinc in the soil on the distribution of arbuscular mycorrhizal fungi. *Acta Botanica Boreali –occidentalis Sinica*, **27**(6): 1233-1238 (in Chinese)
- Ortega-Larrocea MP, Siebe C, Estrada A, Webster R, 2007. Mycorrhizal inoculum potential of arbuscular mycorrhizal fungi in soils irrigated with wastewater for various lengths of time, as affected by heavy metals and available P. *Applied Soil Ecology*, **37**: 129-138
- Pawlowska TE, Blaszkowski J, Rühling Å, 1996. The mycorrhizal status of plants colonizing a calamine spoil mound in southern Poland. *Mycorrhiza*, **6**: 499-505
- Wang YS, Zhang MQ, Wang KN, Xing LJ, 1998. VA mycorrhizal fungi of southeast coast of China IV. four new records. *Mycosystema*, **17**(4): 301-303 (in Chinese)
- Wang FY, Liu RJ, 2002. Arbuscular mycorrhizal fungi in saline-alkaline soils of Yellow River delta. *Mycosystema*, **21**(2): 196-202 (in Chinese)
- Wang K, Zhao ZW, 2006. Occurrence of arbuscular mycorrhizas and dark septate endophytes in hydrophytes from lakes and streams in Southwest China. *International Review of Hydrobiology*, **91**(1): 29-37
- Zak JC, Parkinson D, 1982. Initial vesicular-arbuscular mycorrhizal development of slender wheat grass on two amended mine spoils. *Canadian Journal of Botany*, **60**: 2241-2248

- Zhang MQ, Wang YS, Wang KN, Xing LJ, 1998. VA mycorrhizal fungi of south and east coast of China III. Seven new records of *Acaulospora*. *Mycosystema*, **17**(1): 15-18 (in Chinese)
- Zhang Y, Guo LD, Liu RJ, 2003. Diversity and ecology of arbuscular mycorrhizal fungi in Dujiangyan. *Acta Phytoecologica Sinica*, **27**(4): 537-544 (in Chinese)
- Zhao DD, Liang CC, Zhao ZW, 2006. Arbuscular mycorrhizas in the tributary dry-hot valleys (Puduhe and Xiaojiang) of Jinsha River. *Acta Botanica Yunnanica*, **28**(3): 250-256 (in Chinese)
- Zhao ZW, Xia YM, Qin XZ, 2001. Arbuscular mycorrhizal status of plants and the spore density of arbuscular mycorrhizal fungi in the tropical rainforest of Xishuangbanna, Southeast China. *Mycorrhiza*, **11**: 159-162

[附中文参考文献]

- 盖京苹, 冯固, 李晓林, 2005. 丛枝菌根真菌的生物多样性研究进展. *土壤*, **37**(3): 236-242
- 李建平, 李涛, 赵之伟, 2003. 金沙江干热河谷(元谋段)丛枝菌根真菌多样性研究. *菌物系统*, **22**(4): 604-612
- 牛振川, 唐明, 黄继^望, 王森, 盛敏, 2007. 土壤铅和锌对植物根际丛枝菌根真菌分布的影响. *西北植物学报*, **27**(6): 1233-1238
- 王发园, 刘润进, 2002. 黄河三角洲盐碱地的丛枝菌根真菌. *菌物系统*, **21**(2): 196-202
- 王幼珊, 张美庆, 王克宁, 邢礼军, 1998. 我国东南沿海地区的AM真菌IV. 四个我国新记录种. *菌物系统*, **17**(4): 301-303
- 张美庆, 王幼珊, 王克宁, 邢礼军, 1998. 我国东南沿海地区的VA菌根真菌III. 无梗囊霉属7个我国新记录种. *菌物系统*, **17**(1): 15-18
- 张英, 郭良栋, 刘润进, 2003. 都江堰地区丛枝菌根真菌多样性与生态研究. *植物生态学报*, **27**(4): 537-544
- 赵丹丹, 梁昌聪, 赵之伟, 2006. 金沙江支流普渡河、小江干热河谷的丛枝菌根. *云南植物研究*, **28**(3): 250-256