

紫背天葵丛枝菌根真菌多样性研究*

苏 洋 刘璐冰 蔡欣哲 朱楚萌 梁京威 唐光大

(华南农业大学南方石灰岩植物研究中心 / 华南农业大学林学与风景园林学院, 广东 广州 510640)

摘要 紫背天葵 (*Begonia fimbristipula*) 是集营养保健和特殊风味为一身的野生高档蔬菜之一, 也是南方传统中药材, 但人工栽培尚存在较大的技术障碍。以紫背天葵为研究对象, 对分布于广西壮族自治区贺州市姑婆山国家森林公园的野生植株根际土丛枝菌根真菌 (Arbuscular Mycorrhiza Fungi, AMF) 孢子、菌根侵染率和土壤营养元素等开展研究, 以期对后期的菌根化栽培提供技术支撑。结果表明: 紫背天葵根际土中 AMF 种类丰富, 孢子密度大, 菌根侵染率较高, 共统计真菌孢子 26 种, 主要属为球囊霉属 (*Glomus*)、无梗囊霉属 (*Acaulospora*)、盾孢囊霉 (*Scutellospora*) 和巨孢囊霉属 (*Gigaspora*); 根际土孢子密度和菌根侵染率在不同采样点间存在显著性差异, 而且均与土壤的全 K 含量呈负相关, 与交换性 Ca 含量呈正相关, 另外, AMF 孢子丰富度与速效 K 呈负相关, 菌根侵染率与有机质含量呈正相关。可见紫背天葵野生根际土的真菌孢子在 K 含量较低时, 多样性较高, 主要为球囊霉属和无梗囊霉属的种类。

关键词 丛枝菌根真菌; 多样性; 孢子密度; 菌根侵染率; 紫背天葵

中图分类号: S718.81 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2053 (2018) 06-0008-07

Diversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi of *Begonia fimbristipula*

SU Yang LIU Lubing CAI Xinzhe ZHU Chumeng
LIANG Jingwei TANG Guangda

(South China Limestone Plants Research Center/College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract *Begonia fimbristipula* is not only the very healthy and nourishing wild vegetable, but also a kind of traditional Chinese medicine in South China. However, it is difficult to cultivate artificially up to now. In order to provide technical support of mycorrhizal cultivation of *B. fimbristipula*, the soil nutrient elements, spores of Arbuscular Mycorrhiza Fungi (AMF) and mycorrhizal infection rate with its rhizosphere soil and roots samples collected from Gopu Mountain, Hezhou, Guangxi were studied. The results showed that there were high species richness and spore density of AMF spores, as well as the high mycorrhizal infection rate in the rhizosphere soil of *B. fimbristipula*. Totally, 26 AMF species were identified, belonging to four genera *Glomus*, *Acaulospora*, *Scutellospora* and *Gigaspora*. There were significant differences in spore density and mycorrhizal infection rate among different sampling points. Additionally, the soil total K content was negatively correlated with AMF spore density and mycorrhizal infection rate. The soil exchangeable Ca content was positively correlated with the spore density and mycorrhizal infection rate. The available K content was negatively correlated with the abundance of AMF spores, and the organic matter content was positively correlated with mycorrhizal infection rate. Therefore,

* 基金项目: 广东省林业厅科技项目 (粤财农 [2017]83 号)。

第一作者: 苏洋 (1994—), 男, 本科, 研究方向为植物学, E-mail: 451191165@qq.com。

通信作者: 唐光大 (1982—), 男, 副教授, 主要从事植物资源相关研究, E-mail: gdtang@scau.edu.cn。

the AMF diversity was higher when K content was lower in rhizosphere soil *B. fimbristipula*, most fungi species were the two genera of *Glomus* and *Acaulospora*.

Key words AMF; diversity; spore density; mycorrhizal infection rate; *Begonia fimbristipula*

紫背天葵 (*Begonia fimbristipula*) 是我国特有植物, 在浙江、江西、湖南、福建、广西、广东、贵州、海南省均有分布, 集中分布于生态公益林和地带性植被保存较好的区域。性喜温暖湿润、透气的环境, 一般生长在海拔 300~800 m 的荫蔽石壁上, 在海拔 100 m 左右的地方偶见^[1-2]。紫背天葵性味甘、凉, 具有清热解毒、润肺止咳、凉血止血、消炎散瘀、散癌消肿等功效^[3], 是重要的药用植物资源。另外, 其植株的钙、铁等元素含量是大白菜、萝卜和瓜类蔬菜的 20 多倍^[4-5], 在肇庆地区已制作成保健产品, 广泛用作为袋茶饮料, 清香可口^[6-8], 是集营养保健和特殊风味为一身的野生高档蔬菜之一。然而, 在人工栽培方面, 虽有少量相关组织培养的研究^[8], 但未见广泛栽培。丛枝菌根 (Arbuscular Mycorrhiza, AM) 是植物界中常见的植物与真菌的共生体, 已知有约 80% 以上的陆生维管植物可与丛枝菌根真菌 (Arbuscular Mycorrhiza Fungi, AMF) 形成共生关系^[9], 这种共生结构对植物适应逆境胁迫具有重要作用^[10-11], 能提高植物对土传病菌害的抗性^[12], 增强植物对土壤水分的吸收和运输能力^[13], 促进植物对 P 和 N 元素的吸收利用^[14]。AMF 群落结构与多样性研究对了解土壤微生物环境和地下生态系统有重要意义, 其形成的菌丝网促进了植物与真菌之间的营养交换, 以及植物之间的信息传递, 间接促进了植物间的协同进化和物种分化等^[15], 是探索地下生态网络非常理想的对象。然而, 由于 AMF 不能离体纯培养, 须与植物共生才能萌发、侵染和产孢, 早期的研究大多是通过形态差异来区分和鉴定不同类群, 包括孢子形态 (细胞壁的层数、厚度、颜色、折射率等)、产孢方式、菌丝侵染、丛枝与泡囊的特征等^[16]。土壤中的 AMF 孢子可用湿筛倾析-蔗糖离心法分离, 在记录孢子的数量和分类特征后, 对照国际 AM 真菌保藏中心网站 (<http://invam.caf.wvu.edu>) 的分类描述及图片, 并参阅有关鉴定材料和新近发表的新种描述等进行种属鉴定^[17-18]。但有学者对仅依据孢子形态进行多样性研究结果的准确性提

出争议^[19], 认为人为观察判定的标准不同形成形态描述上的差异。

开展紫背天葵野生群落的菌根多样性研究, 可较为全面的了解野生紫背天葵的根系生长环境, 对人工培养过程中基质配备、菌种筛选等, 有较好的理论指导意义和实践意义。本研究对紫背天葵的根系和根际土壤进行采样, 采用 AMF 孢子可用湿筛倾析-蔗糖离心法分离真菌孢子, 统计土壤中 AMF 孢子丰富度、密度和根系菌根侵染率, 对不同生境的 AMF 统计数据与土壤营养元素进行相关分析, 以期充分了解紫背天葵野生群落的土壤根系微生物环境, 同时筛选出紫背天葵根部最常见的共生菌根真菌种类, 为后期人工菌根化育苗提供有价值的参考资料。

1 材料与方法

1.1 采样地概况

姑婆山国家森林公园位于广西壮族自治区东北部, 与湖南省交界, 24° 34' 26" ~24° 42' 05" N, 110° 30' 30" ~111° 37' 30" E, 属亚热带季风气候, 山高谷深, 地形封闭, 森林小气候明显。因受季风影响, 冷、热、旱、涝变化大, 极端高温可达 39.5℃, 极端最低温 -4℃, 年降水量 1 704 mm, 年蒸发量 1 650 mm; 母岩以花岗岩为主, 局部为砂页岩和变质岩, 地带性土壤为红壤, 但由于海拔高差大, 土壤垂直分异明显; 500 m 以下为红壤, 500~800 m 为黄红壤, 800 m 以上为黄壤^[20]。2016 年 8 月, 选择紫背天葵群落生长较为集中、海拔和生境不同的 3 个采样地, 随机选择了共 6 个采样点, 生境记录见表 1。

1.2 取样方法

在每个样地内, 根据 5 点取样法, 采集样地内 5 株紫背天葵根系周围的土壤样品, 每个样品约 500 g, 充分混合后装入塑料袋中; 每个样地采集 20 株紫背天葵的根系, 分别洗净后放入 FAA 固定液中。共采集了土壤样品 6 份, 根系样品 120 份, 带回实验室进行土壤理化性质检测和 AMF 多样性、孢子密度、菌根侵染率的测定。

表 1 采样地基本情况
Tab 1 Basic status of sample plots

采样点 Sites	生境 Habitat	北纬 Northern Latitude	东经 Eastern longitude	海拔 /m Altitude
S1	潮湿石壁	24° 37′ 58.30″ N	111° 31′ 36.24″ E	973
S2	潮湿石壁	24° 37′ 58.30″ N	111° 31′ 36.24″ E	973
S3	干旱石壁	24° 37′ 55.00″ N	111° 33′ 18.00″ E	714
S4	干旱石壁	24° 37′ 55.00″ N	111° 33′ 18.00″ E	714
S5	干旱石壁	24° 37′ 55.00″ N	111° 33′ 18.00″ E	714
S6	干旱石壁	24° 37′ 47.86″ N	111° 31′ 47.39″ E	862

1.3 土壤理化性质分析

采用电位法测定土壤 pH 值；K₂Cr₂O₇ 滴定法测定有机质含量；TOC-VCPN 测定仪测定全 N 含量；H₂SO₄-H₂O₂ 消煮 - 钒钼黄比色法测定全 P 含量；H₂SO₄-HClO₄ 消煮法测定全 K 含量；碱解扩散法测定基质碱解 N 含量；NaHCO₃ 浸提 - 钼锑抗比色法测定有效 P 含量；火焰光度法测定速效 K 含量；EDTA 容量法测定交换性 Ca 含量；KSCN 分光光度法测定有效 Fe 含量^[21]。

1.4 AMF 多样性测定方法

1.4.1 湿筛倾斜 - 蔗糖离心法 利用四分法称取 5 g 土样，放入大烧杯中加水浸泡，充分搅拌土壤，使其松散并静置 15 min；利用孔径分别为 250、75、54 和 38.5 μm 的不锈钢筛网进行过滤，土筛由大孔径到小孔径依次排放，并使得筛面倾斜；将烧杯中的土壤倒在筛面倾斜区，多次冲洗烧杯和筛面倾斜区域；将留在 75、54 和 38.5 μm 孔径筛子表面的筛出物用蒸馏水分别冲入 3 个离心管中，贴好标签；以 2 000 r/min，离心 2 min，去除上清液；在离心管中加入 50% 蔗糖，搅匀，再次以 2 000 r/min，离心 1 min；将上清液倒在铺了滤纸的布氏漏斗上，开启抽滤机，并迅速用蒸馏水多次冲洗，去除蔗糖；用镊子将抽滤后的滤纸转移到培养皿中，显微镜下挑出 AMF 孢子，镜检。根据筛网孔径的大小（75、54 μm 和 38.5 μm），将孢子大小分为 I、II、III 3 个等级。

1.4.2 生物多样性指数

（1）Shannon-Wiener 指数： $H' = -\sum (P_i)(\ln P_i)$

式中， P_i 为第 i 种 AMF 孢子数占总孢子数的比例。

（2）均匀度指数： $J = H' / H_{\max}$

式中 $H_{\max}$ 为最大多样性， $H_{\max} = \ln S$ ， S 为 AMF 孢子种数。

（3）Simpson 指数： $D = N(N-1) / \sum n_i(n_i-1)$

式中 N 为群落总个体数， n_i 为第 i 个 AMF 孢子的个体数。

1.5 菌根侵染率测定

将采集的根样从 FAA 固定液中取出，剪成约 1 cm 长的根段，置于装有 10% KOH 溶液的玻璃瓶中，放在 90℃ 水浴锅中，直到根系透明，并产生明显气泡，取出根样，锥虫蓝乳酸甘油溶液（锥虫蓝：0.24 g；乳酸：10 mL；甘油：160 mL；蒸馏水：160 mL）染色 15~60 min，将根段整齐摆放在载玻片上，盖片，镜检。菌根侵染率的计算采用根段频率常规法^[16]，在 Leica 光学显微镜下观察每条根段的侵染情况，根据侵染点、菌丝、丛枝和泡囊等菌根结构所占比例，分为 0~5 共 6 个等级，然后根据丛枝和泡囊在菌根结构中的有无及丰富度，将 1~5 级划分为 A0，A1，A2，A3 共 4 个级别，统计 AMF 菌根侵染情况。每个样品随机选取 30 条根段，将数据输入菌根侵染率计算表格，进行统计分析。

1.6 统计分析

使用 Microsoft Excel 2013 软件对数据进行整理。使用 SPSS 18.0 软件进行单因素方差分析和计算 Pearson 相关系数。采用单因素方差分析法（LSD 法）对 AMF 孢子密度、不同大小等级孢子的百分率和菌根侵染率进行差异显著性检验；通过计算 Pearson 相关系数检验土壤理化性质与 AMF 孢子密度等的相关性。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

紫背天葵所生长的石壁以酸性环境为主，干旱和潮湿石壁的 pH 值均较低，明显为酸性或强酸性土壤，整体来说，干旱石壁的 pH 值更低（最低可达 3.88），酸性更强；潮湿生境采集的土壤样品 S1 的有机质、全 N、碱解 N、速效 K 和交换性 Ca 的含量均小于其他采样点和干旱生境（表 2）。

2.2 AMF 多样性

从 6 份土样样品的 12 g 干土中，共分离出 4 669 个孢子，根据孢子的主要形态特征，将分离出的孢子划分为 26 种孢子类型，分别属于 3 个科 4 个属。其中，球囊霉属（*Glomus*）有 12 种类型，占比 46.15%；无梗囊霉属（*Acaulospora*）有 10 种类型，占比 38.46%；盾巨孢囊霉属（*Scutellospora*）有 3 种类型，占比 11.54%；巨孢囊霉属

（*Gigaspora*）仅有 1 种类型，占比 3.85%。球囊霉属和无梗囊霉属是优势属，无梗囊霉属的 Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数均高于其他属，盾孢囊霉属的均匀度高于其他属（表 3）。

6 个采样点间孢子丰富度存在一定的差异，干旱石壁生境的 4 个根际土样品中，共分离出 19 种类型孢子，潮湿石壁的 2 个根际土样品中，分离出 10 种类型孢子。

2.3 不同等级孢子的比例、孢子密度和菌根侵染率

干旱和潮湿石壁根际土中，等级 I 和 II 的真菌孢子存在显著性差异，而等级 III 的差异不明显；不同生境的孢子密度存在差异，最高可达 176.86 个 /g，最低仅 18.57 个 /g（表 4）。干旱生境的 S5 样点真菌孢子密度最高，其次是潮湿生境的 S2 样点。

紫背天葵的 AM 真菌菌根侵染率较高，显微

表 2 紫背天葵根际土理化性质
Tab. 2 Soil properties in the rhizosphere soil of *B. fimbristipula*

理化性质 Soil properties	潮湿石壁 Wet Cliff		干旱石壁 Dry Cliff			
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
pH	4.81	5.33	3.93	3.88	4.40	5.06
有机碳 Soil organic carbon/（g·kg ⁻¹ ）	96.32	387.32	445.73	392.10	165.06	378.36
全氮 Total nitrogen/（g·kg ⁻¹ ）	3.45	13.16	10.65	13.36	6.64	10.88
全磷 Total phosphorus/（g·kg ⁻¹ ）	0.32	0.57	0.52	0.75	0.34	0.43
全钾 Total potassium/（g·kg ⁻¹ ）	28.46	15.41	13.74	22.48	28.64	22.68
有效氮 Available nitrogen/（mg·kg ⁻¹ ）	289.70	1394.27	852.26	1168.13	605.56	764.42
有效磷 Available phosphorus/（mg·kg ⁻¹ ）	0.40	23.70	12.00	23.40	0.90	8.70
速效钾 Available potassium/（mg·kg ⁻¹ ）	90.25	963.82	197.86	233.59	132.39	402.16
交换性钙 Exchangeable calcium/（mg·kg ⁻¹ ）	35.00	595.50	862.51	402.24	55.74	240.56
有效铁 Available iron/（mg·kg ⁻¹ ）	476.61	226.28	843.62	641.34	71.75	48.27

表 3 紫背天葵根际土的 AMF 多样性指数
Tab. 3 Diversity index of AMF in the rhizosphere soil of *B. fimbristipula*

属 Genus	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener Index	均匀度指数 Pielou Index	Simpson 指数 Simpson Index
球囊霉属 <i>Glomus</i>	1.75	0.70	4.29
无梗囊霉属 <i>Acaulospora</i>	1.77	0.78	4.82
盾巨孢囊霉属 <i>Scutellospora</i>	0.97	0.88	2.72
巨孢囊霉属 <i>Gigaspora</i>			

镜下可观测到典型的丛枝、泡囊和菌丝结构，不同生境的根际土间菌根侵染率存在显著性差异（表 4），干旱生境的平均菌根侵染率略高于潮湿生境，虽然潮湿生境 S2 的侵染率较高（41.31%）。菌根侵染率和孢子密度变化趋势相似，孢子密度越大，侵染率越高。采样点 S3 至 S6 为干旱石壁，其菌根侵染率平均值为 36.97%，孢子密度平均值为 125.4 个/g；采样点 S1 和 S2 为潮湿石壁，其菌根侵染率平均值为 38.01%，孢子密度平均值为 80.585 个/g。

2.4 AMF 群落结构与土壤理化性质间的关系

根据 AMF 孢子密度和丰富度与土壤理化性质

的 Pearson 相关系数分析（表 5），孢子密度与全 K 的相关系数为 -0.906，在 0.05 水平显著负相关；与交换性 Ca 的相关系数为 0.953，在 0.01 水平呈显著正相关。AMF 孢子丰富度与速效 K 的相关系数为 -0.966，在 0.01 水平呈显著负相关。菌根侵染率与有机质的相关系数为 0.828，在 0.05 水平呈显著相关；与全 K 的相关系数为 -0.935，在 0.01 水平呈显著负相关；与交换性 Ca 的相关系数为 0.970，在 0.01 水平呈显著正相关。土壤的全 K 含量与 AMF 孢子密度呈负相关，与菌根侵染率呈负相关；交换性 Ca 含量与孢子密度呈正相关，与菌根侵染率呈正相关；速效 K 含量与 AMF 孢子丰富

表 4 土壤 AMF 孢子密度、孢子比例和菌根侵染率

Tab. 4 Density and proportion of spores in soil, and Mycorrhizal infection rate in roots

样点 Sites	孢子密度 / (个 /g) Spore density	菌根侵染率 /% Root infection rate	不同大小的孢子比例 /% Proportion of spores between different sizes		
			I	II	III
S1 (潮湿 wet)	18.57 c	18.33 d	42.17 ab	45.76 c	12.06 a
S2 (潮湿 wet)	142.60 ab	41.31 ab	22.16 b	72.37 a	5.47 a
S3 (干旱 dry)	113.56 bc	35.20 bc	59.07 a	26.05 d	14.87 a
S4 (干旱 dry)	68.59 c	24.94 cd	28.70 b	51.88 cb	19.42 a
S5 (干旱 dry)	176.86 a	46.44 a	13.86 b	61.86 ab	24.28 a
S6 (干旱 dry)	57.44 c	25.23 cd	24.15 b	55.80 ac	20.05 a

注：不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ） Note: Different letters denote significant differences at $P<0.05$

表 5 AMF 与土壤理化性质的相关性

Tab. 5 Correlations between AMF and soil properties

理化性质 Soil properties	孢子密度 Spore density		孢子丰富度 Spore richness		菌根侵染率 Root infection rate	
	Pearson	P-value	Pearson	P-value	Pearson	P-value
pH	-0.349	0.498	-0.626	0.184	-0.301	0.562
有机碳 Soil organic carbon	0.806	0.053	-0.459	0.360	0.828*	0.042
全氮 Total nitrogen	0.720	0.107	-0.531	0.279	0.741	0.092
全磷 Total phosphorus	0.640	0.171	-0.240	0.646	0.664	0.151
全钾 Total potassium	-0.906*	0.013	0.684	0.134	-0.935**	0.006
有效氮 Available nitrogen	0.729	0.100	-0.693	0.127	0.752	0.085
有效磷 Available phosphorus	0.684	0.134	-0.580	0.228	0.722	0.105
速效钾 Available potassium	0.401	0.431	-0.966**	0.002	0.446	0.375
交换性钙 Exchangeable calcium	0.953**	0.003	-0.517	0.294	0.970**	0.001
有效铁 Available iron	0.513	0.298	0.204	0.698	0.526	0.284

注：“*”和“**”分别表示 0.05 和 0.01 水平上显著相关 (Pearson 法)

Note: “*”and “**” indicate significant correlation on the level of 0. 05 and 0.01 individually (Pearson methods)

度呈负相关; 有机质含量与菌根侵染率呈正相关。

3 讨论

在自然环境中, 菌根真菌种类以球囊霉属和无梗囊霉属较常见^[22], 本研究结果显示, 紫背天葵根际土的真菌孢子中, 球囊霉属和无梗囊霉属的多样性指数最高。不同植物与 VA 菌根共生机制可能有差异。紫背天葵的根际土的孢子密度平均值为 96.27 个/g, 密度较大, 但根系菌根侵染率平均值仅为 32.12%。相较其他研究结果, 存在较大差异, 如铁仔 *Myrsine africana* 孢子密度为 17.80 个/g, 菌根侵染率却高达 60.47%; 中华蚊母 *Distylium chinense* 孢子密度为 8.80 个/g, 菌根侵染率为 25.23%; 盐肤木 *Rhus chinensis* 孢子密度为 9.80 个/g, 盐肤木侵染率为 18.46%; 绣线菊 *Spiraea pubescens* 孢子密度为 1.99 个/g, 菌根侵染率为 15.00%^[23-24]。由此可见不同植物种类的根际土孢子密度大小, 与菌根侵染率高低并非明显相关。本研究中, 紫背天葵的菌根侵染率与其根际土的孢子密度的变化趋势一致, 孢子密度越大, 菌根侵染率越高, 说明紫背天葵与 AM 真菌形成非常紧密的共生关系。总体来说, 紫背天葵在干旱石壁生境, 平均菌根侵染率和平均孢子密度略高于潮湿生境, 可能其菌根共生体对水分吸收有促进作用^[13], 从而提高其抗旱能力。

AMF 的侵染和分布可能更多地依赖于环境^[25]。如土壤 pH 值对孢子密度和菌根侵染率存在明显影响, 这在暴马丁香 *Syringa reticulata*、领春木 *Euptelea pleiospermum* 等研究中已被证实^[26]。速效 P、碱解 N 和有机质等对菌根真菌多样性也存在较大影响, 土壤中的碱解 N、有机质含量对烟草 *Nicotiana tabacum* 菌根侵染率呈负相关, 有效 P、速效 K、pH 和蔗糖酶活性则呈正相关^[27]; 有效 N、速效 P 含量与各采样地菌根侵染率和孢子密度均呈正相关; 有机质含量与刺槐 *Robinia pseudoacacia* 的菌根侵染率、孢子密度均呈正相关, 与小叶杨 *Populus simonii* 及刺槐均呈负相关^[28]。本研究结果表明, 土壤的全 K 含量与 AMF 孢子密和菌根侵染率呈负相关, 有机质含量与菌根侵染率呈正相关, 交换性 Ca 含量与孢子密度和菌根侵染率呈正相关。土壤中的交换性 Ca 和溶液态 Ca 保持着动态平衡, 溶液态 Ca 因被植物吸收或淋失, 其浓度降低时, 交换性 Ca 即释放到

溶液中。紫背天葵 100 g 干物质中含 Ca 22 mg^[4], 可见紫背天葵对土壤交换性 Ca 元素的需求较高, 其共生菌根可能对其 Ca 的吸收和转运有一定的贡献。

本研究结果显示: 紫背天葵根系在干旱生境的菌根侵染和孢子密度略高于潮湿生境, 最常见的菌根真菌类型为球囊霉属和无梗囊霉属。在后期人为菌根育苗过程中, 可选择摩西球囊霉 *Glomus mosseae*、疣状无梗囊霉 *Acaulospora tuberculata* 等菌种作为试验菌种, 尝试菌根化育苗工作。

参考文献

- [1] 汪越, 陈雄伟, 邵玲, 等. 珍稀濒危植物紫背天葵的生态生物学研究进展[J]. 中国野生植物资源, 2014, 33(6): 26-32.
- [2] 邵玲, 陈雄伟, 梁广坚, 等. 广东肇庆鼎湖地区野生紫背天葵种质资源研究[J]. 中药材, 2014, 37(2): 202-206.
- [3] 陈少卿, 张桂才, 李泽贤, 等. 广东药用植物手册[M]. 广州: 中国科学院华南植物研究所, 1982: 184.
- [4] 李乃明, 陈光浩, 吴海珊, 等. 紫背天葵化学成分的分析[J]. 广州医学院学报, 1993(1): 62-64.
- [5] 李晖. 保健佳品紫背天葵的营养与栽培[J]. 农村新技术, 1999(1): 45-46.
- [6] 段志芳, 麦焕钿. 紫背天葵营养成分分析及饮料的研制[J]. 食品工业科技, 2007(11): 162-163; 166.
- [7] 邵玲, 梁广坚, 梁廉, 等. 鼎湖山濒危植物紫背天葵的人工栽培[J]. 植物生理学报, 2012, 48(10): 979-985.
- [8] 邵玲, 梁廉, 陈雄伟, 等. 蔗糖对鼎湖山紫背天葵组培苗生长和花色苷积累的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(22): 242-246.
- [9] 刘润进, 李晓林. 丛枝菌根及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-18.
- [10] 向丹, 徐天乐, 李欢, 等. 丛枝菌根真菌的生态分布及其影响因子研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(11): 1-10.
- [11] 陈羽, 仲崇禄, 姜清彬, 等. 黎蒴苗木与菌根食药菌共生体的构建与筛选[J]. 林业与环境科学, 2016, 32(3): 30-34.
- [12] 高秀兵, 陈娟, 姚雍静, 等. 丛枝菌根真菌提高植物对土传植物病害抗性的研究进展[J]. 贵州茶叶, 2010, 38(3): 5-13.
- [13] 祝英, 熊俊兰, 吕广超, 等. 丛枝菌根真菌与植物共生对植物水分关系的影响及机理[J]. 生态学报, 2015, 35(8): 2419-2427.
- [14] 李元敬, 刘智蕾, 何兴元, 等. 丛枝菌根共生体的N代谢运输及其生态作用[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3):

- 861-868.
- [15] OSBORNE O G, DE-KAYNE R, BIDARTONDO MI, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi promote coexistence and niche divergence of sympatric palm species on a remote oceanic island[J]. *New Phytologist*, 2018, 217(3): 1254-1266.
- [16] BIERMANN B, LINDERMAN R G. Quantifying vesicular-arbuscular mycorrhizae: A proposed method towards standardization[J]. *New Phytologist*, 1981, 87(1): 63-67.
- [17] 王宇涛, 辛国荣, 李韶山. 丛枝菌根真菌最新分类系统与物种多样性研究概况[J]. *生态学报*, 2013, 33(3): 834-843.
- [18] 林先贵, 胡君利, 戴珏, 等. 丛枝菌根真菌群落结构与多样性研究方法概述及实例比较[J]. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(2): 343-350.
- [19] SANDERS I R, CLAPP J P, WIEMKEN A. The genetic diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in natural ecosystems—a key to understanding the ecology and functioning of the mycorrhizal symbiosis[J]. *New Phytologist*, 1996, 133(1): 123-134.
- [20] 黄道京, 吕勇, 岑巨延. 广西姑婆山国家森林公园森林生态服务功能评价研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[D]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [22] 蒋胜亮, 刘永俊, 石国玺, 等. 丛枝菌根真菌物种多样性及其群落构建机制研究进展[J]. *生命科学*, 2014, 26(2): 169-180.
- [23] 罗协. 三峡库区消落带常见野生植物AM真菌多样性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [24] 赵敏, 峥嵘, 白淑兰, 等. 内蒙古大青山土庄绣线菊根围丛枝菌根真菌多样性[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(12): 3323-3328.
- [25] POWELL M J, BOOMER D W, MCVICARS R J. Introduction of gaseous hydrides into an inductively coupled plasma mass spectrometer[J]. *Analytical Chemistry*, 1986, 58(13): 2864-2867.
- [26] 王森, 唐明, 牛振川, 等. 山西历山珍稀药用植物AM真菌资源与土壤因子的关系[J]. *西北植物学报*, 2008, 28(2): 355-361.
- [27] 赵方贵, 刘广富, 管志坤, 等. 土壤根际环境对烟草AM真菌定殖率和孢子密度的影响[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(7): 4220-4221.
- [28] 方燕, 唐明, 孙学广, 等. 不同气候条件下AM真菌资源与土壤理化性质的关系[J]. *西北农林科技大学学报*, 2010, 38(10): 77-82.