

剑门蜀道大型真菌资源调查与鉴定分析

吴俊洁¹, 禹云霜², 张文杰¹, 沙 龙¹, 刘尹领¹, 丁 祥^{1,3}

(1. 西华师范大学环境科学与工程学院 四川南充 637009; 2. 重庆巴蜀中学校 重庆 400013;
3. 西华师范大学生命科学学院·西南野生动植物资源保护教育部重点实验室 四川南充 637009)

摘要: 为探究剑门蜀道沿线大型真菌资源状况, 本研究对区域内的大型真菌进行随机采样, 利用形态学鉴定和 ITS 序列分析相结合的方式, 从 255 份样本中鉴定出 56 株, 分别隶属于 1 门 1 纲 4 目 13 科 30 属。结果显示, 优势科有 5 科, 依次为伞菌科(Agaricaceae)、牛肝菌科(Boletaceae)、红菇科(Russulaceae)、粉褶菌科(Entolomataceae)、鹅膏菌科(Amanitaceae), 共 41 株, 占总株数的 73.21%, 占总科数的 38.46%; 优势属有 5 属, 依次为伞菌属(*Agaricus*)、鹅膏菌属(*Amanita*)、白伞菌属(*Leucoagaricus*)、乳菇属(*Lactarius*)、牛肝菌属(*Boletus*), 共 24 株, 占总株数的 42.86%, 占总属数的 16.67%。剑门蜀道的大型真菌按区系地理成分分类以北温带分布属为主, 占总株数的 76.79%。本研究首次对剑门蜀道大型真菌的菌种进行鉴定, 发现 23 种可食用菌、1 种珍稀食药兼用菌、7 种有毒菌以及 5 种工业用菌。其中包括营养丰富的酒红褐红菇(*Russula vinosobrunneola*), 具有药用价值的白肉灵芝(*Ganoderma leucocontextum*), 具备毒性的蓝绿鹅膏(*Amanita cyanochlorinosma*), 以及具备一定工业价值的双层栓菌(*Trametes duplexa*)等, 这些真菌不仅在生态系统中发挥着重要作用, 还在医药、食品和生物技术等领域具有丰富的开发潜力。本研究构建了剑门蜀道大型真菌资源库, 鉴定出 56 株 30 属, 基于 23 种食用菌、1 种珍稀食药兼用菌等应用价值分类, 揭示了该区域大型真菌在药物研发、功能性食品开发中的潜在价值, 研究中的 ITS 序列鉴定数据与种质资源信息为该地区大型真菌的可持续利用与生物多样性保护提供了直接的数据支撑。

关键词: 大型真菌; ITS 序列; 菌种鉴定; 剑门蜀道

中图分类号: S646

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2026)02-170-12

Investigation and identification analysis of macrofungi resources in Jianmen Shu Road

WU Junjie¹, YU Yunshuang², ZHANG Wenjie¹, SHA Long¹, LIU Yinling¹, DING Xiang^{1,3}

(1. College of Environmental Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong 637009, Sichuan, China; 2. Chongqing Bashu Middle School, Chongqing 400013, China; 3. College of Life Science, China West Normal University/Key Laboratory of South-west China Wildlife Resources Conservation of Ministry of Education, Nanchong 637009, Sichuan, China)

Abstract: In order to explore the status of macrofungal resources, this study randomly sampled macrofungi. By combining morphological identification and ITS sequence analysis, 56 strains were identified from 255 samples. These strains belonged to 1 phylum, 1 class, 4 orders, 13 families, and 30 genera, respectively. The results showed that 5 families were predominant, namely Agaricaceae, Boletaceae, Russulaceae, Entolomataceae, and Amanitaceae. These 5 families accounted for 73.21% of the total number of strains and 38.46% of the total number of families. There were 5 dominant genera, which were *Agaricus*, *Amanita*, *Leucoagaricus*, *Lactarius*, and *Boletus*. These 5 genera accounted for 42.86% of the total number of strains and 16.67% of the total number of genera. The macrofungi of Jianmen Shu Road are classified as northern temperate distribution types by floristic geographical composition, accounting for 76.79% of the total strains. This study represents the first identification of macrofungal species from the Jianmen Shu Road, revealing 23 edible fungi, 1 rare edible-medicinal fungus, 7 toxic fungi, and 5 industrial fungi. Among these are nutrient-rich *Russula vinosobrunneola*, *Ganoderma leucocontextum* with medicinal value, toxic *Amanita cyanochlorinosma*, and *Trametes duplexa* with industrial value. These fungi not only play vital roles in ecosystems but also offer significant development potential for medi-

收稿日期: 2025-04-18; 修回日期: 2025-09-22

基金项目: 四川省科技厅农业科技成果转化资金项目(2022NZJ0003); 四川省转移支付科技成果转化示范项目(22ZYZFSF0009, 23ZHSF0082); 四川省科技厅应用基础面上项目(2022NSFS0107); 老君山保护区综合科学考察项目(KH2025-188)

作者简介: 吴俊洁, 男, 在读硕士研究生, 研究方向为资源微生物多样性保护与利用。E-mail: w17765526135@126.com

通信作者: 丁 祥, 男, 教授, 研究方向为资源微生物多样性保护与利用。E-mail: biostart8083@126.com

cine, food, and biotechnology. The study constructed a macrofungal resource library for Jianmen Shu Road, identifying 56 strains across 30 genera. Based on application value classifications, including edible and rare edible-medicinal fungi, the study revealed the potential value of regional fungi in drug development and functional food innovation. The ITS sequence identification data and germplasm resource information provide direct data support for the sustainable utilization and biodiversity conservation of macrofungi in this region.

Key words: Macrofungi; ITS sequence; Strain identification; Jianmen Shu Road

大型真菌包括担子菌门(Basidiomycota)和子囊菌门(Ascomycota)的真菌,是具有经济价值的生物资源,也是生态系统重要的组成部分。近年来,研究人员在中国发现了大量新的真菌物种,这些新物种涵盖了多个纲、目、科和属。李冰寒等^[1]、戴玉成等^[2]在近 30 年对中国不同地区的大型真菌资源进行了系统的调查和研究,共鉴定出中国森林大型真菌 4250 种,发现和发表了 885 个新种。传统的真菌鉴定通常采用形态学鉴定,主要依赖于真菌的形态特征,如菌盖、菌褶、菌柄等的形状和颜色,但对于生长条件特殊或形态极其相似的真菌,即使具有丰富鉴定经验的鉴定者也难以准确识别^[3]。

真菌基因组中有 4 个编码核糖体 rRNA 基因,包括 28S、5S、18S 和 5.8S^[4],这些基因存在广泛的异种同源性。由于基因间隔序列(ITS)区间不参与成熟核糖体的组装,因此在进化过程中承受的自然选择压力较小,能够积累更多的突变^[4]。故在绝大多数真核生物中,即使是亲缘关系非常近的两个物种,其 ITS 序列仍然具有差异,并反映近期的进化信息^[5],这是 ITS 序列用于微生物种类鉴定的理论依据。ITS 序列分析能显著体现属间、种间以及菌株间的碱基对差异,因此目前已被广泛应用于真菌属内不同种间或近似属间的系统发育研究。例如,Yuan 等^[6]通过 ITS 序列分析和形态学比较,对曾被一些人认为是同种异名的 *Phialophora americana* 和 *P.verrucose* 进行研究,得出两者是不同种的结论。Vassili 等^[7]通过使用来自 3 个线粒体(mt)基因的序列和 ITS 区域将蜡蚧轮枝孢(*Verticillium lecanii*)和轮枝菌(*Verticillium* sp.)归入 *Lecanicillium* 物种。

剑门蜀道是南段蜀道(四川盆地至汉中盆地)中剑门关到昭化古城的古代道路,位于青藏高原东缘龙门山构造带,地形地貌以丹霞地貌为主,受环境影响显著,坡面特征明显^[8]。嘉陵江与白龙江在昭化交汇,受亚热带季风气候影响,该区域雨水充沛、植被丰富^[9],为大型真菌的生长提供了条件。已有的研究表明,不同的地形和气候条件对大型真菌的多样性有显著影响。例如,对海南热带雨

林国家公园的研究中发现,在不同的植被类型中,针阔混交林型中大型真菌物种丰富度最高,其土壤条件也更适合大型真菌的生长^[10]。而在荒漠地区,因降水稀少、植被稀疏且土壤贫瘠,仅有一些耐旱和耐盐碱的大型真菌能够生长,如多孔菌科(Polyporaceae)和锈革孔菌科(Hymenochaetaceae)。

目前,关于剑门蜀道或整个蜀道沿线的大型真菌资源分布状况的研究缺乏。本研究通过形态学鉴定与 ITS 序列分析相结合的方式,构建系统发育进化树,对剑门蜀道的大型真菌样本进行鉴定分类,拟为剑门蜀道沿线区域大型真菌的认知、保护及开发利用提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 大型真菌样本采集

于 2024 年 7—8 月在四川省广元市剑阁县、昭化区附近的剑门蜀道沿线采集大型真菌样本,共 10 个采样点,沿线采样点信息如表 1 所示。采集过程中记录其编号、生境信息、形态特征(子实体大小、菌盖、菌环、菌托等特征),用酒精消毒过的镊子和手术刀,切割菌柄、挑取其内部菌肉约 800 mg,每个样本重复 2~3 次,将其完全浸沉在含有 1 mL RNASTore 样本保存液的 2.0 mL 冻存管中保存。

表 1 沿线采样点情况
Table 1 Sampling point information

采样点序号 Sample point No.	经纬度 Geographic coordinate	海拔 Elevation/m
1	32°11'16.68"N, 105°56'01.89"E	970.6
2	32°19'44.57"N, 105°38'49.98"E	925.7
3	32°19'31.68"N, 105°43'35.71"E	495.0
4	32°16'24.68"N, 105°36'54.26"E	1 020.5
5	32°19'31.76"N, 105°39'03.66"E	1 021.9
6	32°10'02.06"N, 105°57'16.19"E	927.1
7	32°15'51.56"N, 105°36'19.72"E	982.4
8	32°13'19.29"N, 105°35'25.27"E	911.5
9	32°12'26.04"N, 105°34'5.84"E	956.4
10	32°9'15.03"N, 105°32'19.38"E	939.9

1.2 大型真菌的形态学鉴定

参照《中国大型真菌》^[1],对大型真菌子实体进行宏观形态特征鉴定,包括形状、大小、颜色、质地、菌盖、菌褶等。其中,子实体大小主要依据菌盖直径划分(辅以菌柄长度评估),分为七级:较大(>15 cm)、大(>10~15 cm)、中等大(>7~10 cm)、中等(>5~7 cm)、中等小(>3~5 cm)、小(1~3 cm)、较小(<1 cm)。该分级体系结合研究对象实际情况制定,便于后续统计分析。

1.3 大型真菌的分子生物学鉴定

1.3.1 真菌 DNA 提取 从 2.0 mL 冻存管中取出保存好的菌肉,用无菌滤纸吸干水分后置于 1.5 mL 离心管中。使用 CTAB 法^[12]提取 DNA,再利用超微量紫外分光光度计检测其浓度和纯度,存于-20℃备用。

1.3.2 PCR 扩增 本研究中,PCR 引物、扩增体系及扩增程序均经过查阅相关文献[13],并通过预试验优化而确定。扩增引物为通用引物 ITS4 (5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3')、通用引物 ITS5 (5'-GGAAGTAAAAGTCGTAACAAGG-3'); PCR 扩增体系(25 μL):12.5 μL 2×Tap PCR 预混液、1 μL 模板、0.5 μL ITS4、0.5 μL ITS5、10.5 μL dd H₂O;PCR 扩增程序:94℃预变性 5 min、94℃变性 30 s、58℃退火 30 s、72℃延伸 45 s、35 个循环、72℃末端延伸 10 min、4℃保温。

1.3.3 PCR 结果检测 取 5.0 μL 扩增产物点样于 1%琼脂糖凝胶上,置于 1×TAE 缓冲液中进行电泳检测,电压为 110 V。电泳结束后,取出凝胶置于凝胶成像系统拍照记录。PCR 产物送生工生物工程股份有限公司进行 ITS 双向测序。

1.3.4 ITS 序列比对及同源性分析 将测序结果上传至 NCBI(national center for biotechnology information)数据库,进行 BLAST 工具比对,在 MEGA 7.0 软件中采用 N-J 法(neighbor-joining)构建系统发育进化树,根据置信度与序列相似度,结合形态学鉴定结果,确定样本种属,将鉴定结果上传至 GenBank 获得登录号。

1.4 大型真菌的分类

对采集到的大型真菌样本进行系统分类,分类依据为形态学特征和分子生物学鉴定结果。具体分类层级包括门(Phylum)、纲(Class)、目(Order)、科(Family)和属(Genus)。并绘制旭日图(Sunburst chart)清晰展示从目到属的分类层级以及样本数量。

1.5 优势科、属分析

参照戴玉成等^[2]对大型真菌优势类群的划分方

法,按照“物种数≥5 的科”定为优势科,“物种数≥4 的属”定为优势属的标准,对样本进行优势科、属分析,分别记录优势科、属的菌种类别以及占比。

1.6 大型真菌的区系地理成分分析

参照李冰寒等^[1]的方法,对样本的地理成分按照世界广布属、北温带分布属、热带-亚热带分布属等类型进行分析。

1.7 大型真菌资源评价

参照相关文献[14-26]按照可食用菌、药用菌、有毒菌、工业用菌对样本进行分类与资源评价。

1.8 数据处理

采用 WPS 进行数据整理,采用 Adobe Photoshop 2021 和 origin 2022 进行图像处理。

2 结果与分析

2.1 形态学鉴定结果

在剑门蜀道沿线共采集得到 255 份野生大型真菌样本,命名为 SD-1~SD-255。对 56 份 DNA 片段质量合格的样本,基于样本形态特征进行初步形态学鉴定,结果如表 2 所示。

2.2 分子生物学鉴定结果

2.2.1 PCR 扩增结果 对剑门蜀道沿线共采集得到的 255 份野生大型真菌样本提取 DNA 并进行 PCR 扩增,凝胶成像系统结果显示,37 份样本在 500~750 bp 范围内出现清晰、明亮且无杂质的目的条带,表明所提取 DNA 片段质量良好,19 份样本因 ITS 区域 GC 含量较高导致电泳迁移率异常,条带位置略高于预期范围(1000~1200 bp),但经测序验证,其实际片段大小符合预期。总计 56 份样本,可进行下一步试验操作(图 1)。

2.2.2 ITS 序列分析 PCR 产物送生工生物工程股份有限公司进行 ITS 双向测序。将测序结果输入 Genbank 数据库进行 Blast 比对,下载相似度(Per. Ident)≥80%的序列,利用 MEGA7.0 软件对样本与已知物种构建系统发育进化树,结合真菌的形态特征和进化关系确定种属关系,确认分子生物学鉴定结果与形态学鉴定结果无异。

以样本 SD-1 为例,根据 ITS 测序所得的序列在 NCBI 网站 Genbank 中 Blast 比对的结果显示,样本 SD-1 与已知物种 *Russula vinosobrunneola*(酒红褐红菇)相似度为 94.91%,所构建系统发育进化树结果显示,两者置信度为 100%,样本 SD-1 形态特征符合红菇属特征,因此将其鉴定为红菇属。最后将样本 ITS 序列上传至 NCBI 网站获得登录号:

表 2 真菌形态学鉴定结果
Table 2 The identification results of fungal morphology

序号 No.	样本编号 Sample No.	形态学特征 Morphological characteristics	初步鉴定结果 Preliminary identification results
1	SD-1	子实体中等。菌盖扁半球形,中部红色,边缘淡红 The fruiting body is medium. The pileus is flat and hemispherical, with a red center and light red edges	红菇属 <i>Russula</i>
2	SD-3	子实体中等小,有柄。菌盖未完全展开,红褐色,有漆样光泽 The fruiting body is medium-small and has a stipe. The pileus is not fully expanded, reddish-brown, and has a lacquer-like sheen	灵芝属 <i>Ganoderma</i>
3	SD-10	子实体中等。菌盖白色,表面有一层粉末状的土黄色孢子 The fruiting body is medium. The pileus is white and covered with a layer of powdery, earth-yellow spores	星孢寄生菇属 <i>Asterophora</i>
4	SD-29	子实体中等小。菌盖呈半球形,棕色,光滑,菌环膜质 The fruiting body is medium-small. The pileus is hemispherical, brown, and smooth, the annulus is membranous	鹅膏菌属 <i>Amanita</i>
5	SD-32	子实体中等。菌盖扁半球形,污白色。菌褶白色,不与菌柄相连 The fruiting body is medium. The pileus is flat and hemispherical, with a dingy white color. The gills are white and not attached to the stipe	伞菌属 <i>Agaricus</i>
6	SD-37	子实体大型。菌盖黄色,卵圆形,边缘明显条纹,光滑 The fruiting body is large. The pileus is yellow, ovate, smooth, and has distinct striations on the margin	鹅膏菌属 <i>Amanita</i>
7	SD-39	子实体小。菌盖半球形,表面有细小的鳞片 The fruiting body is small. The pileus is hemispherical, with tiny scales on its surface	囊盖伞属 <i>Cystolepiota</i>
8	SD-46	子实体较小。菌盖扁半球形,有密集鳞片。菌环松软,质脆易碎 The fruiting body is very small. The pileus is flattened hemispherical and covered with dense scales. The annulus is soft and fragile, easily broken	环柄菇属 <i>Lepiota</i>
9	SD-57	子实体小。菌盖扁平,橙色,无菌柄,新鲜时肉质,干后木栓质 The fruiting body is small. The pileus is flat, orange, and sessile. It is fleshy when fresh and becomes corky when dried	栓菌属 <i>Trametes</i>
10	SD-59	子实体小。菌盖扁半球,中部稍凸,边缘有白色纤维状物 The fruiting body is small. The pileus is flat and hemispherical, slightly convex in the center, with white fibrillose material on the margin	皮伞属 <i>Cortinarius</i>
11	SD-61	子实体较小。菌盖钟形,中部下凹,白色。菌柄浅灰色,质地较硬 The fruiting body is very small. The pileus is campanulate, with a central depression, and white. The stipe is pale gray and has a relatively hard texture	光柄菇属 <i>Pluteus</i>
12	SD-62	子实体较小。菌肉色浅,初结实,后松软,乳汁白色,气味弱 The fruiting body is very small. The flesh is initially firm and later becomes soft, with white latex and a faint odor	乳菇属 <i>Lactarius</i>
13	SD-65	子实体小。菌盖亮橘色。菌肉薄,质脆,伤破流白色乳汁 The fruiting body is small. The pileus is bright orange. The flesh is thin and brittle, exuding white latex when damaged	乳菇属 <i>Lactarius</i>
14	SD-68	子实体较小。菌盖近白色,中部下凹,呈脐状,表面湿润光泽 The fruiting body is very small. The pileus is nearly white, with a central depression, umbilicate in shape, and has a moist, shiny surface	杯伞属 <i>Clitocybe</i>
15	SD-69	子实体中等。菌盖凸形,边缘呈双层状,无菌褶。菌柄坚韧无乳汁 The fruiting body is medium. The pileus is convex with a double-layered margin and lacks gills. The stipe is tough and without latex	香菇属 <i>Lentinula</i>
16	SD-70	子实体中等。菌盖凸平,表面有灰褐色菌被残余 The fruiting body is medium. The pileus is convex and flat, with remnants of a gray-brown mycelial veil on the surface	鹅膏菌属 <i>Amanita</i>
17	SD-82	子实体中等大。菌盖浅红色,中心有小鳞片菌柄白色,基部膨大 The fruiting body is medium-large. The pileus is pale red with small scales at the center, the stipe is white and enlarged at the base	红菇属 <i>Russula</i>
18	SD-83	子实体中等。菌盖平展,菌褶白色,菌柄偏生,表面白色 The fruiting body is medium. The pileus is expanded and flat, the gills are white, the stipe is eccentric, with a white surface	伞菌属 <i>Agaricus</i>

表 2 （续）
Table 2 （Continued）

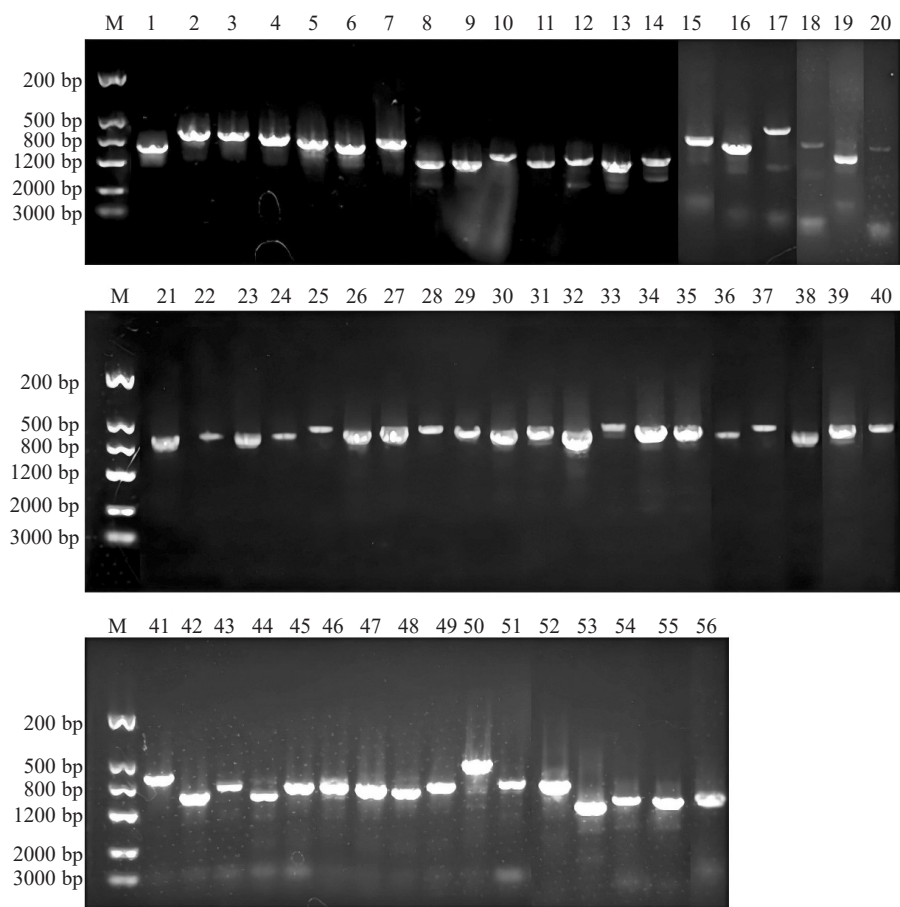
序号 No.	样本编号 Sample No.	形态学特征 Morphological characteristics	初步鉴定结果 Preliminary identification results
19	SD-84	子实体小。菌盖半圆形,质地薄,菌柄侧生 The fruiting body is small. The pileus is semicircular and has a thin texture, the stipe is lateral	栓菌属 <i>Trametes</i>
20	SD-85	子实体中等。菌盖白色,椭圆形,菌柄光滑中空,有白色的菌环 The fruiting body is medium. The pileus is white and elliptical, the stipe is smooth, hollow, and bears a white annulus	白伞菌属 <i>Leucoagaricus</i>
21	SD-87	子实体较大。菌盖深紫色,表面干燥有纤维状鳞片,菌褶较宽 The fruiting body is very large. The pileus is dark purple, with a dry surface covered in fibrous scales, the gills are relatively broad	伞菌属 <i>Agaricus</i>
22	SD-89	子实体较小。菌盖黄色,卵圆形,表面覆盖有浅棕色粉末状菌被层 The fruiting body is very small. The pileus is yellow, ovate, and covered with a layer of light brown, powdery mycelium	鹅膏菌属 <i>Amanita</i>
23	SD-98	子实体中等大。菌盖红棕色,菌柄白色,具白霜,乳汁白色 The fruiting body is medium-large. The pileus is reddish-brown, the stipe is white and pruinose, the latex is white	乳菇属 <i>Lactarius</i>
24	SD-99	子实体中等。菌盖白色,平坦形,菌褶间距适中,菌柄亚圆柱形 The fruiting body is medium. The pileus is white and flat, the gills are spaced moderately, the stipe is subcylindrical	伞菌属 <i>Agaricus</i>
25	SD-102	子实体中等大。菌盖半球形,肉质,质地较厚,菌褶孔圆形 The fruiting body is medium-large. The pileus is hemispherical, fleshy, and thick in texture, the gills are rounded	牛肝菌属 <i>Boletus</i>
26	SD-109	子实体中等大。菌盖表面光滑,菌褶黄色,孔圆形,菌柄膨大 The fruiting body is medium-large. The pileus has a smooth surface, the gills are yellow and rounded, the stipe is enlarged	牛肝菌属 <i>Boletus</i>
27	SD-112	子实体中等。菌盖橙色平展,菌褶黄色,孔圆形,菌柄深红短粗 The fruiting body is medium. The pileus is orange and expanded, the gills are yellow and rounded, the stipe is dark red, short, and thick	牛肝菌属 <i>Boletus</i>
28	SD-118	子实体中等。菌盖黄色,平展,菌褶黄色,孔圆形,菌柄柱状 The fruiting body is medium. The pileus is yellow and expanded, the gills are yellow and rounded, the stipe is cylindrical	牛肝菌属 <i>Boletus</i>
29	SD-122	子实体中等。菌盖平展中部偏黄,菌褶黄色,孔圆形,菌柄柱状 The fruiting body is medium. The pileus is expanded with a yellowish center, the gills are yellow and rounded, the stipe is cylindrical	牛肝菌属 <i>Boletus</i>
30	SD-125	子实体大。菌盖平展,浅黄色,菌褶孔圆形,菌柄膨大 The fruiting body is large. The pileus is expanded and light yellow, the gills are rounded, the stipe is enlarged	牛肝菌属 <i>Boletus</i>
31	SD-129	子实体大。菌盖半球形,浅黄色,菌褶孔圆形,白色,菌柄膨大 The fruiting body is large. The pileus is hemispherical and light yellow, the gills are rounded and white, the stipe is enlarged	牛肝菌属 <i>Boletus</i>
32	SD-130	子实体大。菌盖半球形,菌褶孔圆形,菌柄棒状,半偏生 The fruiting body is large. The pileus is hemispherical, the gills are rounded, the stipe is clavate and eccentric	牛肝菌属 <i>Boletus</i>
33	SD-131	子实体大。菌盖平展,浅黄色,菌褶孔圆形,黄色,菌柄偏生 The fruiting body is large. The pileus is expanded and light yellow, the gills are rounded and yellow, the stipe is eccentric	牛肝菌属 <i>Boletus</i>
34	SD-144	子实体中等。菌盖白色,漏斗状,肉质较厚,乳汁白色 The fruiting body is medium. The pileus is white and funnel-shaped, with thick flesh, the latex is white	乳菇属 <i>Lactarius</i>
35	SD-178	子实体中等。菌盖半圆形,浅绿色,菌褶等长,白色,菌柄柱状 The fruiting body is medium. The pileus is semicircular and light green, the gills are of equal length and white, the stipe is cylindrical	伞菌属 <i>Agaricus</i>
36	SD-188	子实体中等。菌盖钟形,土黄色,菌柄棒状,白色,菌褶边缘全缘 The fruiting body is medium. The pileus is campanulate and earth-yellow, the stipe is clavate and white, the gills have entire edges	伞菌属 <i>Agaricus</i>
37	SD-189	子实体中等小。菌盖平展,中间稍凸,白色,菌柄棒状,白色 The fruiting body is medium-small. The pileus is expanded, slightly convex in the center, and white, the stipe is clavate and white	白伞菌属 <i>Leucoagaricus</i>
38	SD-197	子实体小。菌盖菌柄棕色,菌褶孔圆形,白色 The fruiting body is small. The pileus and stipe are brown, the gills are rounded and white	牛肝菌属 <i>Boletus</i>

表 2 (续)
Table 2 (Continued)

序号 No.	样本编号 Sample No.	形态学特征 Morphological characteristics	初步鉴定结果 Preliminary identification results
39	SD-200	子实体中等。菌盖浅灰色,肉质,平凸边缘开裂内卷,菌肉厚 The fruiting body is medium. The pileus is light gray, fleshy, and convex with a slightly raised center and an edge that is split and incurved, the flesh is thick	肉齿菌属 <i>Sarcodon</i>
40	SD-201	子实体大。菌盖菌柄红色,菌褶孔圆形,浅黄色 The fruiting body is large. The pileus and stipe are red, the gills are rounded and light yellow	牛肝菌属 <i>Boletus</i>
41	SD-210	子实体小,白色。菌盖表面细绒毛状,菌褶管状,有乳汁 The fruiting body is small and white. The pileus has a finely pubescent surface, the gills are tubular. it has latex	乳牛肝菌属 <i>Suillus</i>
42	SD-213	子实体小,橙黄色。菌盖半球形,表面有粗糙鳞片 The fruiting body is small and orange-yellow. The pileus is hemispherical with a surface covered in rough scales	隐口蘑属 <i>Cyptotrama</i>
43	SD-214	子实体中等。菌盖平展边缘翻卷,褐色,木质,菌孔近圆形,白色 The fruiting body is medium. The pileus is expanded with an upturned margin, brown, and woody, the pores are nearly round and white	多孔菌属 <i>Polyporus</i>
44	SD-216	子实体中等小。菌盖漏斗,白色,质地柔软,菌柄偏生,圆柱形 The fruiting body is medium-small. The pileus is funnel-shaped and white, with a soft texture, the stipe is eccentric and cylindrical	斜盖菇属 <i>Clitopilus</i>
45	SD-217	子实体中等,灰褐色。菌柄圆柱形,下半部有纤维状鳞片 The fruiting body is medium and gray-brown, the stipe is cylindrical with fibrous scales on the lower half	鹅膏菌属 <i>Amanita</i>
46	SD-218	子实体中等。菌盖平展粉红色,菌褶覆盖薄膜 The fruiting body is medium. The pileus is expanded and pink, the gills are covered with a membrane	丝膜菌属 <i>Cortinarius</i>
47	SD-225	子实体中等小,白色。菌盖平展,菌柄柱状,菌褶延生,窄条状 The fruiting body is medium-small and white. The pileus is expanded, the stipe is cylindrical, the gills are decurrent and narrow	粉褶菌属 <i>Entoloma</i>
48	SD-226	子实体小。菌盖斗笠形,光滑,菌褶延生,菌柄圆柱形,质地脆 The fruiting body is small. The pileus is cap-shaped and smooth, the gills are decurrent, the stipe is cylindrical and brittle	小菇属 <i>Mycena</i>
49	SD-232	子实体中等小,白色。菌盖平凸,菌褶延生,窄条状,菌柄柱形 The fruiting body is medium-small and white. The pileus is convex with a flat top, the gills are decurrent and narrow, the stipe is cylindrical	粉褶菌属 <i>Entoloma</i>
50	SD-236	子实体中等。菌盖半圆形,有棘刚毛,褐色,菌柄圆柱形 The fruiting body is medium. The pileus is semicircular, with brownish spines, the stipe is cylindrical	棘皮菌属 <i>Echinoderma</i>
51	SD-239	子实体中等大,白色。菌盖贝壳形,表面有绒毛状纹理,质地脆 The fruiting body is medium-large and white. The pileus is shell-shaped with a velvety texture on the surface, the flesh is brittle	脆皮菇属 <i>Psathyrella</i>
52	SD-240	子实体小。覆瓦状生长,木栓质,表面细小绒毛 The fruiting body is small. Growing in imbricate clusters, corky in texture, with a surface covered in fine velvety hairs	栓菌属 <i>Trametes</i>
53	SD-242	子实体较大。菌肉厚,菌盖平凸,菌褶离生,不等长,菌柄圆柱形 The fruiting body is very large. The flesh is thick, the pileus is convex with a flat top, the gills are free and of unequal length, the stipe is cylindrical.	伞菌属 <i>Agaricus</i>
54	SD-252	子实体小。菌盖平凸,边缘翻卷,菌褶延生,窄条状 The fruiting body is small. The pileus is convex with a flat top and has an upturned margin, the gills are decurrent and narrow	粉褶菌属 <i>Entoloma</i>
55	SD-254	子实体中等小。菌盖钟形,橙黄色,菌柄白色,圆柱形,基部膨大 The fruiting body is medium-small. The pileus is campanulate and orange-yellow, the stipe is cylindrical, white, and enlarged at the base	白伞菌属 <i>Leucoagaricus</i>
56	SD-255	子实体中等小。菌盖钟形,土黄色,菌柄白色,圆柱形,中空 The fruiting body is medium-small. The pileus is campanulate and earth-yellow, the stipe is cylindrical, white, and hollow	白伞菌属 <i>Leucoagaricus</i>

注:子实体从大到小依次为“较大”“大”“中等大”“中等”“中等小”“小”“较小”。

Note: Fruiting body size are classified from largest to smallest as follows“very large”“large”“medium-large”“medium”“medium-small” “small”“very small”.



注:图中上侧数字 1~56 分别对应 DNA 片段质量合格的 56 份样本;左侧数字为 DNA 梯度标记,用于估算样本中的 DNA 片段的大小;M 为标准 DNA 梯度。

Note: In the figure, the numbers 1 to 56 on the upper side of the graph correspond to the 56 samples with qualified DNA fragment quality respectively; The numbers on the left side represent the DNA ladder markers, which are used to estimate the size of the DNA fragments in the samples; M represents the standard DNA ladder.

图 1 大型真菌 DNA 的凝胶电泳结果

Fig. 1 Gel electrophoresis results of DNA from macrofungi

PV165796。

56 株真菌样本的登录号及菌种鉴定情况如表 3 所示。

2.3 大型真菌资源的分类

将剑门蜀道沿线区域大型真菌样本的分类结果用 Origin 2022 软件构建旭日图,如图 2 所示,56 株真菌样本分别隶属 1 门 1 纲 4 目 13 科 30 属。其中,有 5 个科仅含有 1 株菌株,1 个科含有 2 株菌株,2 个科含有 4 株菌株,共占总科数的 61.54%;含有 5 株及以上的科有 5 个,分别为伞菌科(Agaricaceae)、牛肝菌科(Boletaceae)、红菇科(Russulaceae)、粉褶菌科(Entolomataceae)、鹅膏菌科(Amanitaceae),共占总科数的 38.46%,其中伞菌科(Agaricaceae)和牛肝菌科(Boletaceae)均含有 12 株菌株。

2.4 优势科、属分析

由图 2 及表 4 可知,剑门蜀道沿线的大型真菌优势科(≥ 5 株)共有 5 科,包含 41 株菌株,占总株数的 73.21%。其中,伞菌科(Agaricaceae)与牛肝菌科(Boletaceae)均有 12 株菌株,均占总株数的 21.42%;红菇科(Russulaceae)有 7 株菌株,占总株数的 12.50%;粉褶菌科(Entolomataceae)与鹅膏菌科(Amanitaceae)均有 5 株菌株,均占总株数的 8.93%(表 4)。优势属(≥ 4 株)5 个,共包含 24 株菌株,占总株数的 42.86%。其中伞菌属(Agaricus)数量最多,包含 6 株菌株,占总株数的 10.71%;其次为鹅膏菌属(Amanita)、乳菇属(Lactarius),均有 5 株菌株,均占总株数的 8.93%;白伞菌属(Leucoagaricus)与牛肝菌属(Boletus),均有 4 株菌株,均占总株数的 7.14%(表 5)。以上结果表明,剑门蜀道大型

表3 真菌的登录号及拉丁学名
Table 3 Login number and cientific name of the fungus

序号 No.	样本编号 Sample No.	拉丁学名 Cientific name	登录号 Login number	相似度 Percent identify/%
1	SD-1	<i>Russula vinosobrunneola</i>	PV165796	94.91
2	SD-3	<i>Ganoderma leucocontextum</i>	PV165797	99.12
3	SD-10	<i>Asterophora mirabilis</i>	PV165798	96.30
4	SD-29	<i>Amanita brunneolimbata</i>	PV165800	88.71
5	SD-32	<i>Agaricus gregariomyces</i>	PV165801	95.12
6	SD-37	<i>Amanita brunneolimbata</i>	PV165802	88.45
7	SD-39	<i>Cystolepiota pseudoseminuda</i>	PV165803	86.88
8	SD-46	<i>Lepiota omninoflava</i>	PV165804	85.69
9	SD-57	<i>Trametes duplexa</i>	PV165806	88.75
10	SD-59	<i>Cortinarius calopus</i>	PV165807	95.29
11	SD-61	<i>Pluteus atrofibrillosus</i>	PV165808	93.75
12	SD-62	<i>Lactarius spinosporus</i>	PV165809	89.55
13	SD-65	<i>Lactarius mitratus</i>	PV165811	99.09
14	SD-68	<i>Clitocybe salmonilamella</i>	PV165813	87.09
15	SD-69	<i>Lentinula aciculospora</i>	PV165814	90.19
16	SD-70	<i>Amanita cingulata</i>	PV165815	82.01
17	SD-82	<i>Russula westii</i>	PV165817	97.34
18	SD-83	<i>Agaricus aurantipileatus</i>	PV165818	97.72
19	SD-84	<i>Trametes duplexa</i>	PV165819	86.21
20	SD-85	<i>Leucoagaricus badius</i>	PV165820	93.96
21	SD-87	<i>Agaricus brunneogracilis</i>	PV165821	93.64
22	SD-89	<i>Amanita cyanochlorinosma</i>	PV165822	94.92
23	SD-98	<i>Lactarius pallidozonarius</i>	PV165827	97.84
24	SD-99	<i>Agaricus microvolvatulus</i>	PV165828	95.05
25	SD-102	<i>Suillellus pinophilus</i>	PV165829	88.83
26	SD-109	<i>Fistulinella olivaceoalba</i>	PV165830	91.25
27	SD-112	<i>Suillellus mendax</i>	PV165832	90.91
28	SD-118	<i>Boletus neotropicus</i>	PV165833	82.19
29	SD-122	<i>Suillus pseudoalbivelatus</i>	PV165835	94.01
30	SD-125	<i>Boletus projectelloides</i>	PV165836	89.45
31	SD-129	<i>Chalciporus radiatus</i>	PV165837	89.27
32	SD-130	<i>Boletus bainiugan</i>	PV165838	98.76
33	SD-131	<i>Boletus pseudopinophilus</i>	PV165839	87.32
34	SD-144	<i>Lactarius spinosporus</i>	PV165840	89.55
35	SD-178	<i>Ypsilina buttingtonensis</i>	PV165848	93.28
36	SD-188	<i>Agaricus phaeolepidotus</i>	PQ804883	99.05
37	SD-189	<i>Leucoagaricus vassiljevae</i>	PQ804884	99.72
38	SD-197	<i>Gyroporus</i> sp.	PQ804885	93.53
39	SD-200	<i>Sarcodon</i> sp.	PQ804886	95.60
40	SD-201	<i>Heimioporus</i> sp.	PQ804887	90.00
41	SD-210	<i>Suillus huapi</i>	PQ804888	99.57
42	SD-213	<i>Cyptotrama asprata</i>	PQ804889	99.01
43	SD-214	<i>Polyporus brevibasidiosus</i>	PQ804890	99.07
44	SD-216	<i>Clitopilus</i> cf.	PQ804891	98.82
45	SD-217	<i>Amanita griseofolia</i>	PQ804892	99.85
46	SD-218	<i>Cortinarius</i> sp.	PQ804893	93.79
47	SD-225	<i>Entoloma subserrulatum</i>	PQ804894	93.66
48	SD-226	<i>Mycena yuezhui</i>	PQ804895	98.38
49	SD-232	<i>Entoloma</i> sp.	PQ804896	99.42
50	SD-236	<i>Echinoderma</i> sp.	PQ804898	93.42

表 3 (续)
Table 3 (Continued)

序号 No.	样本编号 Sample No.	拉丁学名 Cientific name	登录号 Login number	相似度 Percent identify/%
51	SD-239	<i>Psathyrella</i> sp.	PQ804899	97.78
52	SD-240	<i>Trametes elegans</i>	PQ804900	99.35
53	SD-242	<i>Agaricus abruptibulbus</i>	PQ804901	97.35
54	SD-252	<i>Entoloma</i> sp.	PQ804903	95.57
55	SD-254	<i>Leucoagaricus</i> sp.	PQ804904	99.00
56	SD-255	<i>Leucoagaricus</i> sp.	PQ804905	98.29

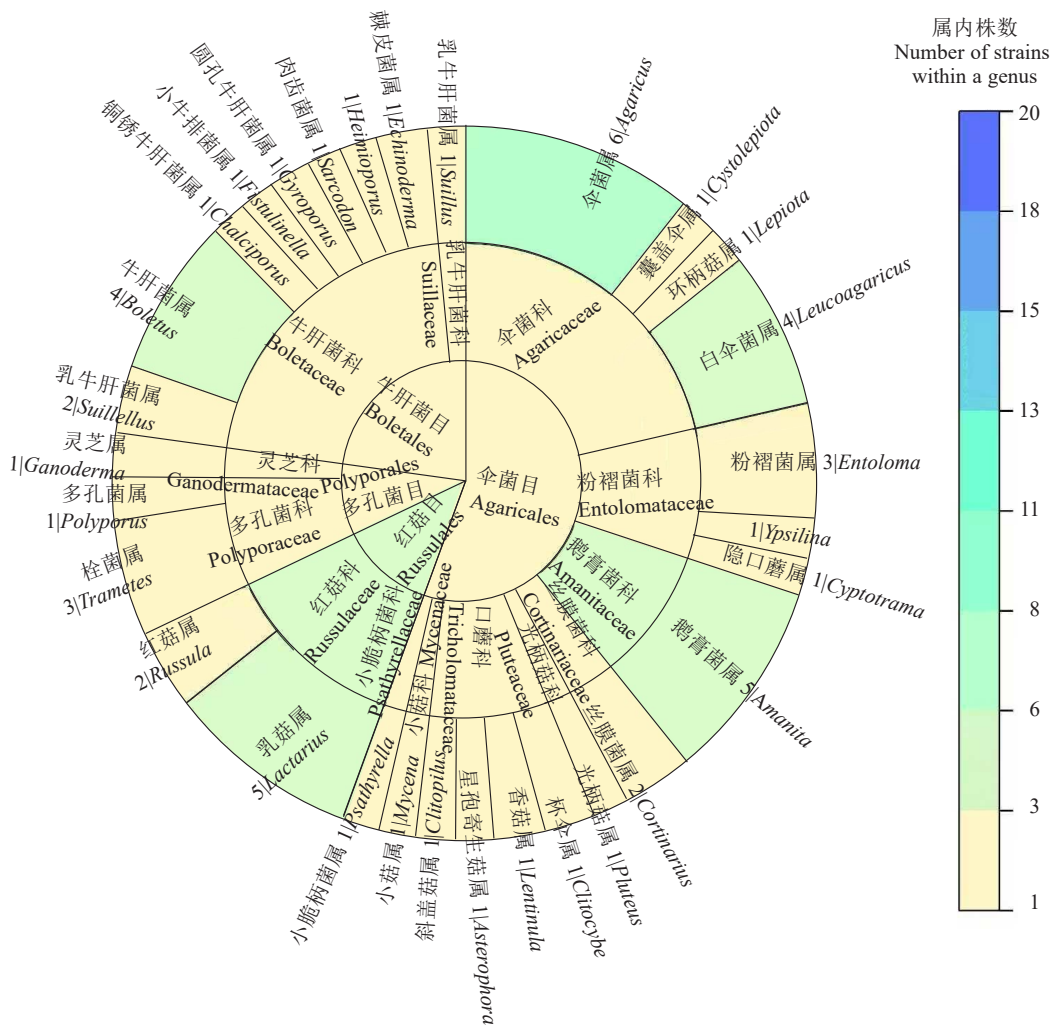


图 2 大型真菌目、科、属旭日图

Fig. 2 Sunburst chart of macrofungi in the order, family and genus

真菌生物多样性丰富,且优势科属明显。

2.5 剑门蜀道大型真菌区系地理成分分析

通过对剑门蜀道大型真菌进行属水平的区系地理成分分析发现,本研究样本包含的世界广布属包括伞菌属(*Agaricus*)、栓菌属(*Trametes*)、杯伞属(*Clitocybe*),共计 3 属 10 种;北温带分布属包括红菇属(*Russula*)、星孢寄生菇属(*Asterophora*)、鹅膏菌属(*Amanita*)、囊盖伞属(*Cystolepiota*)、丝膜菌属(*Cortinarius*)、光柄菇属(*Pluteus*)、乳菇属(*Lactari-*

us)、白伞菌属(*Leucoagaricus*)、乳牛肝菌属(*Suilellus*)、小牛排菌属(*Fistulinella*)、牛肝菌属(*Boletus*)、铜锈牛肝菌属(*Chalciporus*)、*Ypsilina*、圆孔牛肝菌属(*Gyroporus*)、肉齿菌属(*Sarcodon*)、*Heimioporus*、乳牛肝菌属(*Suillus*)、隐口蘑属(*Cyptotrama*)、多孔菌属(*Polyporus*)、斜盖菇属(*Clitopilus*)、粉褶菌属(*Entoloma*)、小菇属(*Mycena*)、棘皮菌属(*Echinoderma*)、小脆柄菇属(*Psathyrella*),共计 24 属 43 种;热带-亚热带分

表 4 剑门蜀道大型真菌优势科
Table 4 Dominant families of macrofungi in the Jianmen Shu Road

科名 Family name	科内株数 Number of strains within the family	占总株数的百分比 Percentage of the total number/%
伞菌科 Agaricaceae	12	21.42
牛肝菌科 Boletaceae	12	21.42
红菇科 Russulaceae	7	12.50
粉褶菌科 Entolomataceae	5	8.93
鹅膏菌科 Amanitaceae	5	8.93
总计 Total	41	73.21

表 5 剑门蜀道大型真菌优势属
Table 5 Dominant genera of macrofungi in the Jianmen Shu Road

属名 Genus name	属内株数 Number of strains within the genus	占总株数的百分比 Percentage of the total number/%
伞菌属 <i>Agaricus</i>	6	10.71
鹅膏菌属 <i>Amanita</i>	5	8.93
乳菇属 <i>Lactarius</i>	5	8.93
白伞菌属 <i>Leucoagaricus</i>	4	7.14
牛肝菌属 <i>Boletus</i>	4	7.14
总计 Total	24	42.86

表 6 剑门蜀道大型真菌分类用途统计

Table 6 Classification and usage statistics of macrofungi in the Jianmen Shu Road

样本编号 Sample No.	名称 Number	分类 Classification
SD-1	酒红褐红菇 <i>Russula vinosobrunneola</i>	食用菌 Edible fungi
SD-3	白肉灵芝 <i>Ganoderma leucocontextum</i>	食药兼用菌 Edible-medicinal fungi
SD-29	褐边鹅膏 <i>Amanita brunneolimbata</i>	有毒菌 Toxic fungi
SD-32	群生蘑菇 <i>Agaricus gregariomyces</i>	有毒菌 Toxic fungi
SD-37	褐边鹅膏 <i>Amanita brunneolimbata</i>	有毒菌 Toxic fungi
SD-46	环柄菇 <i>Lepiota omniinflava</i>	有毒菌 Toxic fungi
SD-57	双层栓菌 <i>Trametes duplexa</i>	工业用菌 Industrial fungi
SD-61	光柄菇 <i>Pluteus atrofibrillosus</i>	工业用菌 Industrial fungi
SD-62	乳菇 <i>Lactarius spinosporus</i>	食用菌 Edible fungi
SD-65	乳菇 <i>Lactarius mitratus</i>	食用菌 Edible fungi
SD-68	杯伞 <i>Clitocybe salmonilamella</i>	食用菌 Edible fungi
SD-69	尖针香菇 <i>Lentinula aciculospora</i>	食用菌 Edible fungi
SD-70	腹带鹅膏 <i>Amanita cingulata</i>	有毒菌 Toxic fungi
SD-82	西红菇 <i>Russula westii</i>	食用菌 Edible fungi
SD-84	双层栓菌 <i>Trametes duplexa</i>	工业用菌 Industrial fungi
SD-89	蓝绿鹅膏 <i>Amanita cyanochlorinosma</i>	有毒菌 Toxic fungi
SD-99	伞菌 <i>Agaricus microvolvatulus</i>	食用菌 Edible fungi
SD-102	乳牛肝菌 <i>Suillellus pinophilus</i>	食用菌 Edible fungi
SD-109	小牛排菌 <i>Fistulinella olivaceoalba</i>	食用菌 Edible fungi
SD-112	乳牛肝菌 <i>Suillellus mendax</i>	食用菌 Edible fungi
SD-118	牛肝菌 <i>Boletus neotropicus</i>	食用菌 Edible fungi
SD-122	乳牛肝菌 <i>Suillus pseudoalbivelatus</i>	食用菌 Edible fungi
SD-125	拟松茸牛肝菌 <i>Boletus projectelloides</i>	食用菌 Edible fungi
SD-129	铜锈牛肝菌 <i>Chalciporus radiatus</i>	食用菌 Edible fungi

布属包括灵芝属(*Ganoderma*)、环柄菇属(*Lepiota*)、香菇属(*Lentinula*),共计 3 属 3 种。以上结果显示,剑门蜀道沿线区域内的大型真菌,具有显著的北温带分布特征,占样本总株数的 76.79%,其次为世界广布属、热带-亚热带分布属。

2.6 剑门蜀道大型真菌资源评价

大型真菌营养丰富,富含多糖、蛋白质、脂类、维生素、氨基酸等化学成分。将剑门蜀道大型真菌样本按照食用菌、食药兼用菌、药用菌、有毒菌、工业用菌进行分类统计(表 6)。其中食用菌包括酒红褐红菇(*Russula vinosobrunneola*)、尖针香菇(*Lentinula aciculospora*)、白牛肝菌(*Boletus bainiugan*)等 23 种。这类食用菌富含蛋白质、维生素和矿物质,可作为功能食品原料,兼具营养与经济价值。另发现 1 种食药兼用真菌:白肉灵芝(*Ganoderma leucocontextum*),则具有显著的抗肿瘤活性和免疫调节功能。

此外,在剑门蜀道还发现有 7 种有毒菌,如蓝绿鹅膏(*Amanita cyanochlorinosma*)、褐边鹅膏(*Amanita brunneolimbata*)、灰鳞鹅膏(*Amanita griseofolia*)等有毒鹅膏菌,这些物种含鹅膏肽类毒素(ama-

表 6 (续)
Table 6 (Continued)

样本编号 Sample No.	名称 Number	分类 Classification
SD-130	白牛肝菌 <i>Boletus bainiugan</i>	食用菌 Edible fungi
SD-131	牛肝菌 <i>Boletus pseudopinophilus</i>	食用菌 Edible fungi
SD-144	乳菇 <i>Lactarius spinosporus</i>	食用菌 Edible fungi
SD-188	伞菌 <i>Agaricus phaeolepidotus</i>	食用菌 Edible fungi
SD-210	乳牛肝菌 <i>Suillus huapi</i>	食用菌 Edible fungi
SD-214	多孔菌 <i>Polyporus brevibasidiosus</i>	工业用菌 Industrial fungi
SD-216	斜盖菇 <i>Clitopilus</i> cf.	食用菌 Edible fungi
SD-217	灰鳞鹅膏 <i>Amanita griseofolia</i>	有毒菌 Toxic fungi
SD-240	栓菌 <i>Trametes elegans</i>	工业用菌 Industrial fungi
SD-242	伞菌 <i>Agaricus abruptibulbus</i>	食用菌 Edible fungi
SD-254	白伞菌 <i>Leucoagaricus</i> sp.	食用菌 Edible fungi
SD-255	白伞菌 <i>Leucoagaricus</i> sp.	食用菌 Edible fungi

toxins)和鬼笔肽类毒素(phallotoxins),误食将导致严重的中毒甚至死亡。

还发现 5 种工业用菌,如双层栓菌(*Trametes duplexa*),其参与木质素与纤维素的分解,在木材腐朽过程中发挥关键作用。同时,这类木材腐朽菌在工业领域具有潜在应用价值,可用于生物制浆替代传统化学制浆,减少环境污染,实现经济发展与环境保护的双赢。

3 讨论与结论

目前,已有多个西部山地生态系统区域和自然保护区进行了大型真菌资源调查并发布了相关报告^[1,27-33],这些研究为深入了解这些地区的大型真菌资源多样性提供了宝贵的数据,也为后续生态环境保护与资源开发利用提供了理论依据。然而,剑门蜀道作为四川北部的重要生态廊道,其真菌物种多样性仍缺乏充分的探索,亟待深入研究。

本研究首次系统揭示了剑门蜀道大型真菌的群落结构与资源特征,填补了该区域真菌多样性研究的空白。通过野外采样与 ITS 分子鉴定相结合的方法,共鉴定出 56 份样本,隶属于 1 门 1 纲 4 目 13 科 30 属,伞菌科(Agaricaceae)、牛肝菌科(Boletaceae)、红菇科(Russulaceae)、粉褶菌科(Entolomataceae)和鹅膏菌科(Amanitaceae)为优势科,构成了该区域大型真菌类群的主体框架。这与米仓山^[1]、秦岭^[32]的调查相比,其优势科组成具有相似性。其中,米仓山的调查显示,其优势科有红菇科(Russulaceae)、牛肝菌科(Boletaceae)、多孔菌科(Polyporaceae)、鹅膏科(Amanitaceae)、口蘑科(Tricholomataceae)、伞菌科(Agaricaceae)、小皮伞科(Marasmiaceae)、丝膜菌科(Cortinariaceae)、锈革菌科(Hymeno-

chaetaceae),秦岭的调查显示,其优势科同样含有红菇科(Russulaceae)、牛肝菌科(Boletaceae)、伞菌科(Agaricaceae)、鹅膏菌科(Amanitaceae)等。这体现了秦岭山系真菌区系的西南延伸特征。另外,剑门蜀道优势科中典型外生菌根真菌,如牛肝菌科(Boletaceae)、红菇科(Russulaceae)与鹅膏菌科(Amanitaceae),共占总株数的 42.85%,这反映了外生菌根真菌与该区域内针阔混交林宿主植物长期协同进化的影响——菌丝网络显著扩展植物根系吸收面积,形成稳定的互惠共生系统,表明植被类型对真菌群落结构具有强烈的塑造作用。

从区系地理成分上看,剑门蜀道表现出温带成分占优的特征,北温带分布属的大型真菌占总株数的 76.79%。远超米仓山(22.48%)^[1]和六盘山(39.76%)^[33]。该特征可能与该区域地处秦巴山地与四川盆地过渡带有关,其温凉湿润的微环境更加适配北温带菌根真菌的需求。同时,研究采样空间的局限性也可能放大了局部环境的筛选效应。

资源评价方面,本研究共鉴定出 23 种食用菌、1 种食药兼用菌、7 种有毒菌及 5 种工业用菌,表明区域资源兼具开发潜力与公共安全风险。其中,食用菌酒红褐红菇(*Russula vinosobrunneola*)可借鉴 Zhang 等^[34]关于红菇属多糖提取的工艺优化研究,开发为免疫调节剂。7 种有毒菌包括蓝绿鹅膏(*Amanita cyanochlorinosma*)、褐边鹅膏(*Amanita brunneolimbata*)和灰鳞鹅膏(*Amanita griseofolia*)等,集中在鹅膏菌属,其中含有的毒素耐高温,常规烹饪无法破坏,中毒死亡率为 15%~20%^[35],这种科属集中性远超秦岭地区^[32]毒菌分属多科的情况;5 种工业用菌包括栓菌属的双层栓菌(*Trametes duplexa*)等,这类真菌分泌的木质素降解酶在生物制浆中具

有替代化学法的潜力^[36],可降低环境污染。

综上,本研究共鉴定出大型真菌 56 份,隶属于 1 门 1 纲 4 目 13 科 30 属,优势科有伞菌科(Agaricaceae)、牛肝菌科(Boletaceae)、红菇科(Russulaceae)、粉褶菌科(Entolomataceae)与鹅膏菌科(Amanitaceae)。优势属包含伞菌属(*Agaricus*)、鹅膏菌属(*Amanita*)、乳菇属(*Lactarius*)、白伞菌属(*Leucoagaricus*)与牛肝菌属(*Boletus*)。资源评价鉴定出食用菌 23 种、食药兼用菌 1 种、有毒菌 7 种以及工业用菌 5 种。通过形态学与分子生物学相结合的方法,确认剑门蜀道大型真菌资源是以北温带分布属为主导、食用菌为主体、兼具高经济价值与高安全风险的真菌库。后续研究需在剑门蜀道全线及不同季节开展系统调查,厘清优势类群的动态变化规律,为可持续的资源开发与中毒防控提供科学依据。

参考文献

- [1] 李冰寒,李奇缘,章世鹏,等.四川米仓山自然保护区大型真菌区系多样性调查分析[J].食药菌,2020,28(6):398-402.
- [2] 戴玉成,杨祝良,崔宝凯,等.中国森林大型真菌重要类群多样性和系统学研究[J].菌物学报,2021,40(4):770-805.
- [3] 张家晨,贾福晨,罗章,等.基于 ITS 序列对林芝市售七种野生大型食用真菌的鉴定[J].北方园艺,2020(8):122-129.
- [4] 陈剑山,郑服丛.ITS 序列分析在真菌分类鉴定中的应用[J].安徽农业科学,2007,35(13):3785-3786.
- [5] 郑雪松,杨虹,李道荣,等.基因间隔序列(ITS)在细菌分类鉴定和种群分析中的应用[J].应用与环境生物学报,2003,9(6):678-684.
- [6] YUAN G F, LIU C S, CHEN C C. Differentiation of *Aspergillus parasiticus* from *aspergillus sojae* by random amplification of polymorphic DNA[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1995, 61(6):2384-2387.
- [7] VASSILI N K, APHRODITE S, MILTON A T. Typas. Mitochondrial gene sequences alone or combined with ITS region sequences provide firm molecular criteria for the classification of *Lecanicillium* species[J]. Mycological Research, 2008, 112(7):829-844.
- [8] 单莉莉.四川剑门关景区沉积相及成景机制研究[D].成都:成都理工大学,2007.
- [9] 张奕,宋戈.川北水陆重镇:广元昭化[J].华中建筑,2015,33(11):148-151.
- [10] 李国华,郭向阳,李霖明,等.海南热带雨林国家公园不同植被类型的大型真菌多样性[J].生物多样性,2022,30(7):180-192.
- [11] 卯晓岚.中国大型真菌[M].郑州:河南科学技术出版社,2000.
- [12] XIN Z G, CHEN J P. A high throughput DNA extraction method with high yield and quality[J]. Plant Methods, 2012, 8(1):26.
- [13] 苏锡钧.苍山大型真菌资源调查及多样性研究[D].云南大理:大理大学,2025.
- [14] 吴兴亮,卯晓岚,图力古尔,等.中国药用真菌[M].北京:科学出版社,2013.
- [15] 图力古尔,李海蛟,包海鹰,等.中国毒蘑菇新修订名录[J].菌物研究,2024,22(4):301-321.
- [16] 戴玉成,周丽伟,杨祝良,等.中国食用菌名录[J].菌物学报,2010,29(1):1-21.
- [17] 戴玉成,杨祝良.中国药用真菌名录及部分名称的修订[J].菌物学报,2008,27(6):801-824.
- [18] 王向华.红菇科可食真菌的若干分类问题[J].菌物学报,2020,39(9):1617-1639.
- [19] 王科,刘芳,蔡磊.中国农业植物病原菌物常见种属名录[J].菌物学报,2022,41(3):361-386.
- [20] GUI Y, ZHU G S, PHILIPPE C, et al. *Agaricus* section *arvenses*: Three new species in highland subtropical southwest China[J]. Fungal Biology, 2015, 119(2/3):79-94.
- [21] ZHAO Z Z, CHEN H P, LI Z H, et al. Leucocontextins A-R, lanostane-type triterpenoids from *ganoderma leucocontextum*[J]. Fitoterapia, 2016, 109:91-98.
- [22] CUI Y Y, FENG B, WU G, et al. Porcini mushrooms (*Boletus* sect. *Boletus*) from China[J]. Fungal Diversity, 2016, 81:189-212.
- [23] WU G, LI Y C, ZHU X T, et al. One hundred noteworthy boletes from China[J]. Fungal Diversity, 2016, 81(1):25-188.
- [24] ZHANG P, CHEN Z H, XIAO B, et al. Lethal amanitas of east Asia characterized by morphological and molecular data[J]. Fungal Diversity 2010, 42(1):119-133.
- [25] 何正蜜.剧毒鹅膏等温扩增检测及鹅膏毒素基因多样性研究[D].长沙:湖南师范大学,2019.
- [26] 张璐,李卓识,李玉.鹅膏属真菌形态特征的主成分与聚类分析[J].菌物学报,2018,37(5):559-564.
- [27] 李付杰,张丹,沈飞,等.四川海螺沟风景区大型真菌资源调查及评价[J].应用与环境生物学报,2014,20(2):249-253.
- [28] 张明旭,汪之波,张玺,等.白水江国家级自然保护区大型真菌多样性与区系特征[J].干旱区资源与环境,2019,33(7):152-156.
- [29] 李奇缘,李冰寒,文英杰,等.卧龙国家级自然保护区大型真菌多样性调查及资源分析[J].四川农业科技,2020(2):73-77.
- [30] 陈茜.四川西部横断山脉地区大型真菌资源调查利用及灰褐纹口蘑与鸡枞菌多糖的结构鉴定、活性研究[D].四川南充:西华师范大学,2022.
- [31] 郭婷,杨瑞恒,汤明霞,等.黄山大型真菌的物种多样性[J].菌物学报,2022,41(9):1398-1415.
- [32] 祁鹏,李峻志,李安利,等.秦岭中段地区大型真菌种质资源调查初报[J].中国食用菌,2013,32(1):8-13.
- [33] 李敏奇,闫兴富,任玉峰,等.六盘山国家级自然保护区大型真菌多样性[J].菌物学报,2023,42(9):1889-1905.
- [34] ZHANG G J, CHEN J L, TAO H Z. Optimization of polysaccharide extraction process from *Aralia elata* (Miq.) Seem by complex enzymes and the research of its antioxidant activity[J]. Food and Machinery 2021, 37(8):32.
- [35] 中国疾病预防控制中心.2022 年全国毒蘑菇中毒监测数据[R].北京:中国疾病预防控制中心,2022.
- [36] HAKALA T K, MAIJALA P, KONN J, et al. Evaluation of novel wood rotting polypores for the decay and bio-pulping of Norway spruce wood[J]. Enzyme Microb Technol, 2004, 34(3-4):255-263.