

四川九株松树火烧地羊肚菌驯化栽培

王建生^{1,2}, 刘询², 刘天海², 王迪², 余洋², 梁欣敏², 李玉^{1*}, 何晓兰^{2*}

1 吉林农业大学植物保护学院 菌物学院, 吉林 长春 130118

2 四川省食用菌研究所, 四川 成都 610066

摘要: 对采自四川雅江火烧地的9株野生羊肚菌菌株进行了鉴定和驯化栽培。通过形态学特征及DNA序列分析, 确认所有供试菌株均为七妹羊肚菌 *Morchella eximia*。在PDA培养基上, 菌株6278菌丝生长速度最快、形成菌核最多, YJ082186生长最慢, 6288不形成菌核。依照当前栽培模式进行大田出菇试验, 其中6751-1产量最高, 达到1.33 kg/m², 6288次之, 达到1.31 kg/m², 6288的商品性状最好; YJ082176的出菇密度最大, 6283子实体平均大小最大。本研究为进一步七妹羊肚菌新品种选育奠定了基础。

关键词: 羊肚菌; 鉴定; 驯化栽培

[引用本文]

王建生, 刘询, 刘天海, 王迪, 余洋, 梁欣敏, 李玉, 何晓兰, 2026. 四川九株松树火烧地羊肚菌驯化栽培. 菌物学报, 45(1): 250230

Wang JS, Liu X, Liu TH, Wang D, Yu Y, Liang XM, Li Y, He XL, 2026. Domestication of nine *Morchella* strains from pine forest post-fire area in Sichuan. Mycosystema, 45(1): 250230

Domestication of nine *Morchella* strains from pine forest post-fire area in Sichuan

WANG Jiansheng^{1,2}, LIU Xun², LIU Tianhai², WANG Di², YU Yang², LIANG Xinmin², LI Yu^{1*}, HE Xiaolan^{2*}

1 College of Plant Protection, College of Mycology, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, Jilin, China

2 Sichuan Institute of Edible Fungi, Chengdu 610066, Sichuan, China

Abstract: Nine wild *Morchella* strains collected from pine forest post-fire area in Yajiang County, Sichuan Province were identified and domesticated. Based on morphological observation and DNA sequence

资助项目: 国家自然科学基金(32370019); 四川省科技计划项目(2021YFYZ0026)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (32370019) and the Sichuan Province Science and Technology Program (2021YFYZ0026).

*Corresponding authors. E-mails: LI Yu, yuli966@126.com; HE Xiaolan, xiaolanhe1121@aliyun.com

Received: 2025-07-23; Accepted: 2025-10-20

analysis, the tested strains were identified as *Morchella eximia*. On PDA medium, strain 6278 showed the fastest mycelial growth and formed the most quantity of sclerotia; mycelial growth of YJ082186 was the slowest, and 6288 did not form sclerotia. Under the current cultivation mode, 6751-1 had the highest yield (1.33 kg/m²), and 6288 was next in yield (1.31 kg/m²). Among the nine strains, 6288 showed the best commercial traits, while YJ082176 has the highest density of fruiting, and the basidioma average size of 6283 was the largest. This study laid a foundation for the screening and breeding of *M. eximia* cultivars.

Keywords: *Morchella*; identification; domestication and cultivation

羊肚菌 *Morchella* spp. 隶属于子囊菌门 Ascomycota、盘菌纲 Pezizomycetes、盘菌目 Pezizales、羊肚菌科 Morchellaceae, 独特的菌盖形态与羊肚相似而得名, 具备显著的食用、药用和经济价值。羊肚菌富含多种营养成分, 包括蛋白质、脂肪、膳食纤维、碳水化合物、维生素、矿物质等(Tietel & Masaphy 2017; Yu *et al.* 2020; Qiu *et al.* 2024; 吴玉勇等 2024; Xu *et al.* 2025)。研究显示, 羊肚菌的提取物具有抗肿瘤、抗氧化、抗炎以及调节免疫力等作用(Liu *et al.* 2016; Wu *et al.* 2019; Xu *et al.* 2021; Tian *et al.* 2024; Haider *et al.* 2025)。

羊肚菌属种类繁多, 仅依赖形态学特征难以实现准确区分。目前, 羊肚菌属的物种鉴定主要基于形态学特征结合多基因联合分析。近年来, 通过 ITS、LSU、*EF1- α* 、*RPB1* 和 *RPB2* 等进行多基因联合矩阵分析, 研究者将羊肚菌属物种分为黑色羊肚菌支系(Eлата Clade)、黄色羊肚菌支系(Esculenta Clade)和变红羊肚菌支系(Rufobrunnea Clade) (O'Donnell *et al.* 2011)。

自 2013 年以来, 羊肚菌大田商业化栽培在我国迅速发展(戴玉成 2022)。目前, 在生产中应用的羊肚菌属物种主要包括梯棱羊肚菌 *Morchella importuna* M. Kuo *et al.*、六妹羊肚菌 *M. sextelata* M. Kuo 和七妹羊肚菌 *M. eximia* Boud., 其中六妹羊肚菌的栽培面积最大。七妹羊肚菌因抗逆性明显优于六妹羊肚菌和梯棱羊肚菌, 近年来栽培面积有所扩大, 但其商品性和菌株稳定性是限制其进一步发展的主要因素。野生资源驯化后系统选育是目前羊肚菌新品种选育的主要方法之一(彭卫红等 2025), 野生羊肚菌种质资源收集和发掘也一直是业内关注的重点。

野生羊肚菌有部分物种偏好生长于过火后的针叶林地上, 包括七妹羊肚菌、六妹羊肚菌等(Miller *et al.* 2017)。然而, 关于火烧地羊肚菌在我国分布和生长特点, 尚未见报道。2024 年 3 月, 雅江县发生森林火灾。2024 年 7 月至 8 月, 笔者调查了雅江县部分过火森林, 从过火的松树林中采集到了野生羊肚菌。本研究拟以采集自雅江县火烧地的 9 株野生羊肚菌为研究对象, 在物种鉴定的基础上对其进行驯化栽培, 旨在发掘有商业化应用潜力的菌株, 为选育羊肚菌新品种奠定基础。

1 材料与方 法

1.1 标本采集

供试标本采自四川省甘孜藏族自治州雅江县过火松树林中, 采集地海拔约 3 100 m。其中, 编号为 6278、6280、6283、6285、6288、6751-1 及 6755-1 的羊肚菌子实体采集于 2024 年 7 月 30 日; 82183 和 YJ082176 采集于 2024 年 8 月 21 日。所有子实体标本保存于四川省食用菌研究所。

1.2 菌株分离及纯化

采用多孢分离法分离菌种, 待菌丝生长后, 在无菌条件下挑取尖端菌丝进行纯化培养, 最终获得纯菌种。纯化后的菌种均保存于 4 °C 冰箱中备用。

1.3 菌丝生长速度测定

挑取小块供试菌株的菌种接种至 PDA 培养基上, 置于 25 °C 培养箱中进行活化培养。待菌丝长满培养基后, 用打孔器(直径 5 mm)取边缘菌丝, 接种至 PDA 培养基中心, 继续置于 25 °C 培养箱中培养, 每个菌株设置 3 个重复。以菌丝生长最快的菌落为参照, 当该菌落菌丝快长满培

培养基时,作为测量终点,同步对其他菌落进行测量。每日记录各菌落菌丝生长直径,最终取 3 次测量数据的平均值。日均生长速度(V , mm/d)的计算公式为:

$$V=(R_2-R_1)/D$$

式中: R_2 为最后 1 次测量菌落直径(mm); R_1 为第 1 次测量菌落直径(mm); D 为菌落培养时间(d)。

1.4 形态学鉴定及分子生物学鉴定

1.4.1 形态学鉴定

观察子实体的菌盖颜色、形状、横纹,菌柄颜色等;取成熟子实体的菌盖组织,切片后以 5% KOH 溶液作为浮载剂,在显微镜下进行观察,拍照记录子囊、子囊孢子等显微结构。

1.4.2 分子生物学鉴定

DNA 的提取:采用 CTAB 法提取供试菌株的 DNA,利用引物(表 1)进行 PCR 扩增。PCR 反应体系为:2× Phanta Flash Master Mix 12.5 μL、引物各 1 μL、模板 DNA 1 μL,最后用 ddH₂O 将体积定至 25 μL。ITS 序列的 PCR 反应程序为:95 °C 预变性 5 min; 95 °C 变性 30 s, 53 °C 退火 30 s, 72 °C 延伸 1 min, 35 个循环; 72 °C 终延伸 10 min; 4 °C 保存。LSU、*EF1-α*、*RPB1* 和 *RPB2* 的 PCR 反应程序为: 98 °C 预变性 30 s; 98 °C 变性 10 s, 其中 LSU、*RPB1*、*RPB2* 在 50 °C 退火, *EF1-α* 在 53 °C 退火, 72 °C 延伸 1 min, 35 个循环; 72 °C 终延伸 10 min; 4 °C 保存。PCR 产物经 1% 琼脂糖凝胶电泳检测后,送至擎科生物(四川)科技有限公司进行测序。

系统发育树的构建:对 ITS、*RPB1*、*RPB2*、

EF1-α、LSU 序列进行处理后,从 GenBank 中下载七妹羊肚菌及相近种类的 *RPB1*、*RPB2*、*EF1-α*、ITS 和 LSU 序列。将上述序列用 Muscle (Edgar 2022)进行比对,经 Mega (Tamura *et al.* 2021) 编辑后,再用 PhyloSuite (Xiang *et al.* 2023)进行拼接。最后,以变红羊肚菌 *Morchella rufobrunnea* 作为外类群,利用 RAxML 软件(<http://www.phylo.org/subsections/portal/>)基于最大似然法构建系统发育树。

1.5 驯化栽培试验

1.5.1 培养基和菌种的制作

PDA 培养基:马铃薯 200 g、葡萄糖 20 g、琼脂 15 g、去离子水定容至 1 000 mL, pH 自然。原种培养基:小麦 68.3%、木屑 29.3%、石灰 1.5%、石膏 0.9%、pH 自然。栽培种培养基:小麦 61.1%、木屑 36.5%、石灰 1.5%、石膏 0.9%、pH 自然。营养袋配方:小麦 61.1%、木屑 36.5%、石灰 1.5%、石膏 0.9%、pH 自然。

母种的制备:在超净工作台内,挑取已纯化的尖端菌丝,将其转接至 PDA 斜面培养基,置于 25 °C 暗培养。培养 10 d 后,选取无污染且菌丝长势好的菌种备用。原种的制备:按原种培养基配方制备菌袋,经灭菌处理 2–3 h;待菌袋冷却后,于无菌环境下将母种转接至菌袋,接种量以每支试管(18 mm × 180 mm)转接 4–6 袋为宜。待菌丝长满菌袋后,剔除生长不良或染杂菌的菌袋,保留生长健壮的菌袋作为原种。栽培种的制备:在无菌环境下,将原种转接至菌袋,接种量以每袋原种转接 20–30 袋为宜。接种后的菌袋在 22 °C 暗培养 25 d。

表 1 PCR 和测序引物

Table 1 PCR and sequencing primers

位点	引物	序列	参考文献
Locus	Primer	Sequence (5'→3')	Reference
<i>RPB1</i>	RPB1B-F	AACCGGTATATCACGTYGGTAT	Du <i>et al.</i> 2019
	RPB1B-R	GCCTCRAATTCGTTGACRACGT	Du <i>et al.</i> 2019
<i>RPB2</i>	RPB2B-F	TAGGTAGGTCCCAAGAACACC	Du <i>et al.</i> 2019
	RPB2B-R	GATACCATGGCGAACATTCTG	Du <i>et al.</i> 2019
<i>EF1-α</i>	EF-595F	CGTGACTTCATCAAGAACATG	Kauserud & Schumacher 2001
	EF-1R	GGARGGAAYCATCTTGACGA	Du <i>et al.</i> 2019
ITS rDNA	ITS4	TCCTCCGCTTATTGATATGC	White <i>et al.</i> 1990
	ITS5	GGAAGTAAAAGTCGTAACAAGG	White <i>et al.</i> 1990
LSU rDNA	NL1	GCAATCAATAAGCGGAGG	O'Donnell <i>et al.</i> 1997
	NL4	GGTCCGTGTTTCAAGACGG	O'Donnell <i>et al.</i> 1997

1.5.2 栽培

栽培地的选择及处理:选择无污染且靠近水源的地方,翻耕前先均匀撒施生石灰消毒,再施用氮磷钾复合肥将土壤 pH 值调节至 6.5–7.5;土壤改良后进行翻耕并修筑厢面,厢面规格为长 20 m、宽 1 m,厢间设宽约 0.4 m 的沟(陈影等 2016);最后浇透水,使土壤保持适宜湿度。

播种:于 11 月下旬进行,播种前一周搭建简易大棚。将菌种揉散后均匀撒播于厢面,播种量控制在 0.3–0.5 kg/m²;播种后,在厢面表层覆盖厚度约 1–2 cm 的土壤。

营养袋的放置:播种一周后,当土壤表层或间隙出现白色菌丝时,即可放置营养袋。先在营养袋一侧划 3–4 个口或打若干小孔,将有口或有孔的一面朝下摆放,轻压营养袋使其与土壤表面充分接触,摆放密度为 6 袋/m²。

1.5.3 出菇管理

催菇管理:此期间需要大量浇水,以浇透为主,厢面不要有大量的积水,白天根据天气情况打开大棚两侧的遮阳网,保证棚内空气流通,使棚内温度保持在 18 °C 以下、空气相对湿度保持在 90% 左右。

出菇后管理:棚内温度保持在 10–22 °C,避免低温导致菇体冻伤或高温引发菇体萎蔫死亡。此期间适当浇水,使土壤表层保持湿润,棚内空

气相对湿度保持在 60%–75%。

采收:当子实体长至 11–15 cm 时,即可采收;采收时,用小刀将子实体连同底部附着的土壤等杂质一并削除,装入洁净容器中。

2 结果与分析

2.1 形态学及分子鉴定结果

2.1.1 形态学鉴定

子实体高 85–185 mm。菌盖高 60–120 mm,最宽处宽 40–80 mm,近圆柱形至圆锥形,有时呈卵形,中空,内壁具有乳白色颗粒;竖直方向上有 14–22 条脊,具较多横纹;污黄色至褐色,成熟后脊纹颜色较深(图 1)。菌柄黄白色至污黄色,圆柱形,长 25–65 mm,直径 1.5–3.2 cm,表面具白色粉状颗粒,中空。菌肉白色至米白色;菌肉厚约 1–2 mm。子囊孢子 16.30–20.17 × 10.84–13.70 μm、椭圆形、透明、内容物均匀(图 2A)。子囊 231–321 × 16–22 μm,近圆柱形至棒状,内有 8 个子囊孢子(图 2B)。

2.1.2 分子鉴定

本研究中获得 9 株野生羊肚菌序列均已上传至 GenBank,序列登录号见表 2。

采用最大似然法(maximum likelihood, ML)构建的 ITS 系统发育树(图 3)显示,9 株野生羊肚菌(6278、6280、6283、6285、6288、6751-1、

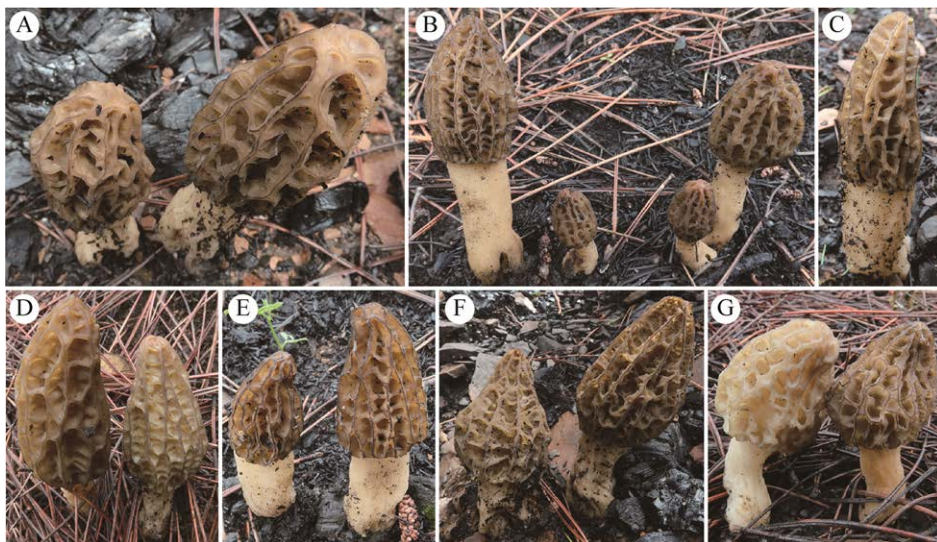


图 1 子实体

Fig. 1 Fruiting bodies of *Morchella* strains. A: 6285; B: 6751-1; C: 6278; D: 6283; E: 6755-1; F: 6288; G: 6280.

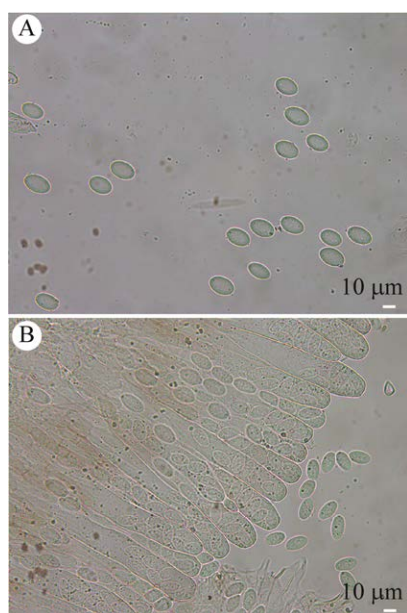


图2 显微形态 A: 子囊孢子; B: 子囊和子囊孢子
Fig. 2 Microscopic morphology. A: Ascospores; B: Asci and ascospores.

6755-1、82183、YJ082176)均与七妹羊肚菌 *M. eximia* (HKAS62863、HKAS62864)形成一个稳定的单系分支, 分支支持率为 81%。

联合 ITS、LSU、*EF1- α* 、*RPB1*、*RPB2* 这 5 个基因片段构建系统发育树(图 4)也显示, 9 株野生羊肚菌与七妹羊肚菌 *M. eximia* (HKAS62863、HKAS62864)聚于同一分支, 其支持率达 100%。这一结果与基于 ITS 序列构建的系统发育树所得结论一致。遵循谱系一致性系统发育物种识别 (genealogical concordance phylogenetic species recognition, GCPSR) 方法并结合形态学特征, 可确定 9 株野生羊肚菌均为七妹羊肚菌 *M. eximia*。

2.2 菌丝生长特性

菌株 6278、6755-1、6751-1、6288、6278、6280、6285、6283、82183、YJ082176 在 PDA 培养基上 25 °C 培养 2 d 后菌丝生长情况见图 5 和表 3, 具体表现为: 菌株 6278 的菌丝生长速度显著快于其他 8 个菌株, 达到 16.54 mm/d; 菌株 YJ082176 的菌丝生长速度最慢, 为 12.09 mm/d; 菌株 6755-1 的菌丝最为浓密, 其余菌株无明显差异; 菌株 82183 的气生菌丝最多, 其余菌株无明显差异。

菌株 6278、6755-1、6280、6285、6283 在培养第 4 天开始形成菌核, 其中 6278 形成的菌核数量最多。6751-1、82183 第 5 天开始形成菌核, YJ082176 则在第 7 天开始形成菌核。6288 未形成菌核。所有菌株菌丝初期均为白色, 后期逐渐产生色素并转变为黄色、浅棕色或棕色。其中, 6283 和 6751-1 产生的色素最多、颜色最深, 其余菌株产生色素无明显差异。

2.3 农艺性状

驯化栽培出菇结果发现, 在相同环境条件下不同菌株出菇时间存在差异, 其中, 6751-1、6288 最先出菇(67 d), 6755-1、82183 最晚出菇(75 d)。同时产量也存在差异, 其中 6751-1 产量最高, 达到 1.33 kg/m²。6288 产量次之, 达到 1.31 kg/m²。6755-1 产量最低, 为 0.62 kg/m²。

出菇试验结果还显示, 不同菌株农艺性状存在明显差异(图 6, 表 4)。供试 9 株羊肚菌中 6283 子实体平均尺寸最大(高 13.6–17.9 cm、宽 5.1–8.4 cm), 菌柄较细较短(柄长 2.5–3.9 cm、粗 2.3–

表 2 供试羊肚菌菌株的基因号

Table 2 GenBank accession numbers of the tested *Morchella* strains

菌株号 Strain	登录号 GenBank accession number				
	ITS	LSU	<i>EF1-α</i>	<i>RPB1</i>	<i>RPB2</i>
6278	PV874425	PV875635	PV877865	PV877847	PV877856
6280	PV874424	PV875634	PV877864	PV877846	PV877855
6283	PV874423	PV875633	PV877863	PV877845	PV877854
6285	PV874422	PV875627	PV877862	PV877844	PV877853
6288	PV874421	PV875632	PV877861	PV877843	PV877852
6751-1	PV874420	PV875631	PV877860	PV877842	PV877851
6755-1	PV874419	PV875630	PV877859	PV877841	PV877850
82183	PV874418	PV875629	PV877858	PV877840	PV877849
YJ082176	PV874417	PV875628	PV877857	PV877839	PV877848

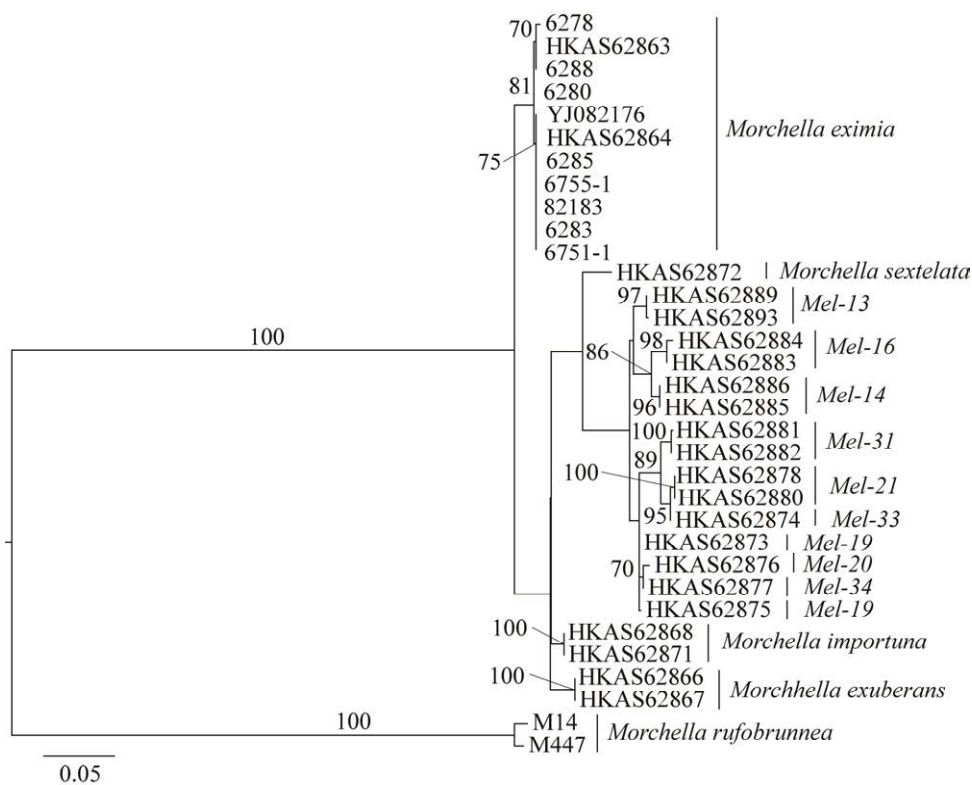


图 3 ITS 系统发育树
Fig. 3 Phylogenetic tree based on ITS sequences.

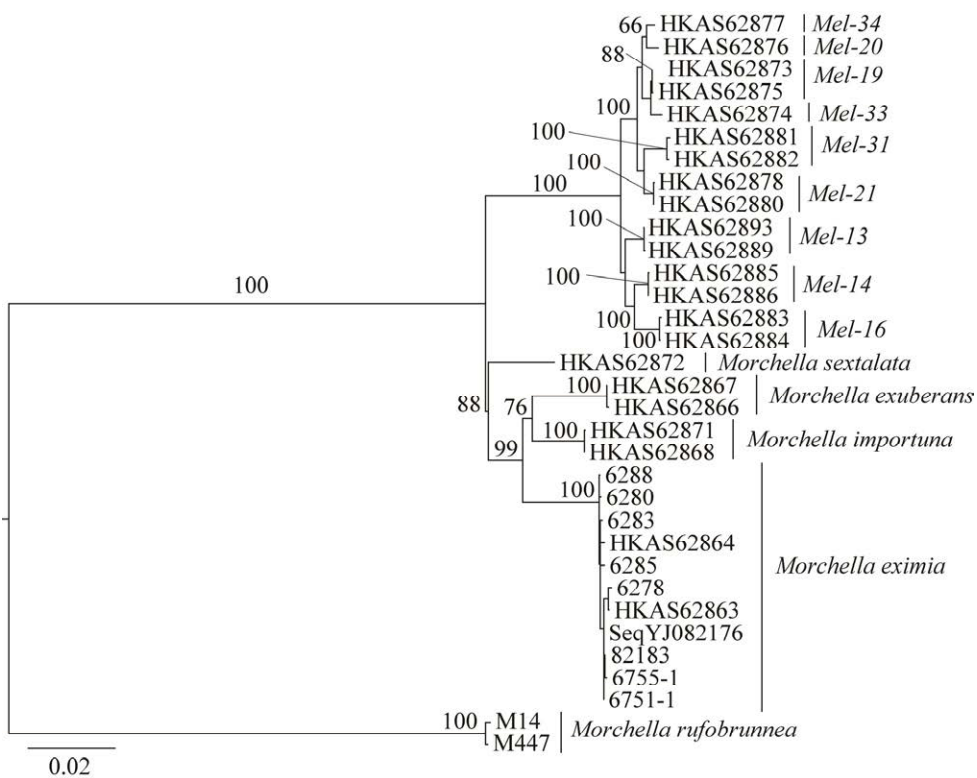


图 4 基于 5 个基因片段联合矩阵分析构建的系统发育树
Fig. 4 Phylogenetic tree constructed based on the combined five-gene dataset.

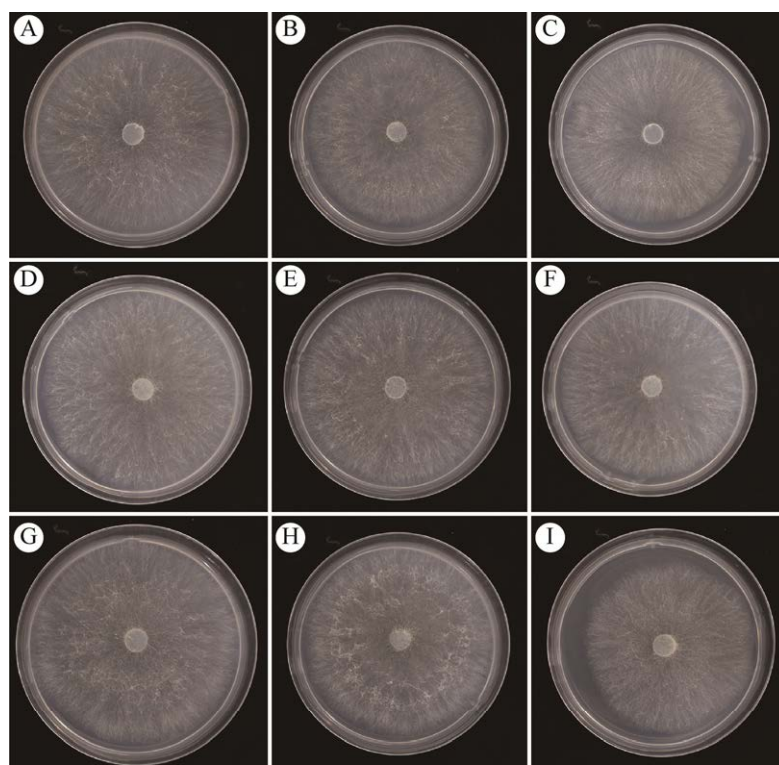


图 5 PDA 平板培养 2 d 后菌落形态特征

Fig. 5 Colony morphology characteristics in 2 days on PDA medium. A: 6278; B: 6280; C: 6283; D: 6285; E: 6288; F: 6751-1; G: 6755-1; H: 82183; I: YJ082176.

表 3 菌丝生长特性

Table 3 Mycelial growth characteristics

菌株 Strain	菌丝 Mycelial		菌核数量 Quantity of sclerotia	显著性 Significance ($P<0.05$)
	生长速度 Growth rate/(mm/d)	颜色 Color		
6278	16.54±0.11	初期白色, 后期棕色 Initially white, becoming brown	+++	a
6288	13.59±0.03	初期白色, 后期棕色 Initially white, becoming brown	-	b
6751-1	12.90±0.14	初期白色, 后期棕色 Initially white, becoming brown	+	c
82183	12.86±0.14	初期白色, 后期棕色 Initially white, becoming brown	++	c
6755-1	12.52±0.15	初期白色, 后期浅棕色 Initially white, becoming light brown	++	d
6285	12.50±0.01	初期白色, 后期棕色 Initially white, becoming brown	++	d
6280	12.38±0.03	初期白色, 后期浅棕色 Initially white, becoming light brown	++	d
6283	12.54±0.03	初期白色, 后期棕色 Initially white, becoming brown	+	d
YJ082176	12.09±0.07	初期白色, 后期棕色 Initially white, becoming brown	++	e

注: +表示菌核少量, ++表示菌核较多, +++表示菌核大量, -表示无菌核; 不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平的差异显著性

Note: + Indicates a small number of sclerotia; ++ Indicates a moderate number of sclerotia; +++ Indicates an abundant number of sclerotia; - Indicates the absence of sclerotia. Different lowercase letters indicate significant differences at $P<0.05$.



图 6 菌株的出菇情况

Fig. 6 Fruiting of the nine strains. A: 6278; B: 6280; C: 6283; D: 6285; E: 6288; F: 6751-1; G: 6755-1; H: 82183; I: YJ082176.

2.7 cm), 易倒伏, 肉质较脆, 不易运输保存; YJ082176 的出菇密度最大, 但子实体平均尺寸最小(高 10.1–13.2 cm、宽 4.7–5.4 cm)。

不同菌株子实体出菇形态特征如下: 6755-1 菌盖灰褐色, 近圆柱形, 横纹较少; 菌柄乳白色。6751-1 菌盖灰褐色至褐色, 近圆柱形, 横纹较多; 菌柄乳白色偏黄。6288 菌盖褐色, 圆锥形, 横纹较多; 菌柄乳白色, 较短。6280 菌盖浅褐色至褐色, 圆锥形, 横纹较少; 菌柄乳白色偏黄。6285 菌盖黄褐色、橄榄褐色至浅褐色, 圆锥形, 横纹少; 菌柄乳白色、较短。6283 菌盖橄榄褐色, 近圆柱形, 横纹较多; 菌柄乳白色、较短。82183 菌盖呈浅褐色, 近圆柱形至圆锥形, 横纹较多; 菌柄乳白色、较长。YJ082176 菌盖橄榄褐色至灰褐色, 近圆柱形, 横纹较多; 菌柄乳白色。6278 菌盖灰褐色, 近圆柱形, 横纹较少; 菌柄乳白色偏黄。

综合产量和子实体性状, 菌株 6751-1、6288 和 6280 可作为七妹羊肚菌新品种选育的材料来源。

3 讨论

目前, 商业化栽培羊肚菌种源多依赖于从野生资源中驯化并经过系统选育获得的品种(张盼盼等 2024)。四川蕴藏着丰富的野生羊肚菌资源, 尤其是在种类多样性方面具有显著优势(贺新生 2017)。本研究对采自四川雅江县火烧地的 9 株野生羊肚菌进行鉴定和驯化栽培, 以为野生羊肚菌资源有效利用和新品种选育奠定基础。

羊肚菌属中部分物种有明显的火烧地偏好性, 能快速在森林火灾后的土地上定殖(Miller *et al.* 2017), 我国商业化栽培的六妹羊肚菌、七妹羊肚菌均是典型的火烧地物种。本研究中的 9 株羊肚菌均采自过火后的松树林下, 过火当年即大量发生, 但过火严重、松树已完全烧死的林地中并未有羊肚菌生长。通过形态学特征和 GCPSR 分析, 这 9 株羊肚菌均被鉴定为七妹羊肚菌。六妹羊肚菌作为生产上的另一主要栽培品种, 同样对火烧地生境表现出偏好。然而, 本研究在气温相对较高的 7 月底及 8 月下旬对雅江县火烧地羊肚

表 4 子实体性状及产量

Table 4 Morphologic characteristics and production of the nine strains

菌株 Strain	菌盖 Pileus				菌柄 Stipe			折干率 Discount rate/%	产量 Production /(kg/5m ²)
	颜色 Color	长度 Length /cm	直径 Diameter /cm	形状 Morphology	颜色 Color	长度 Length /cm	直径 Diameter /cm		
6751-1	灰褐色至褐色 Grayish brown to brown	6.7-8.7	4.1-5.1	近圆柱形 Subcylindrical	乳白色偏黄 Milk white with yellowish tint	3.5-4.4	1.6-2.1	9.98	6.65
6288	褐色 Brown	7.4-11.3	4.8-6.8	圆锥形 Conical	乳白色 Milk white	3.1-4.1	1.6-2.9	9.50	6.54
YJ082176	橄榄褐色 至灰褐色 Olive brown to grayish brown	8.3-9.5	4.7-5.4	近圆柱形 Subcylindrical	乳白色 Milk white	1.8-3.7	1.6-2	11.35	5.40
6280	浅褐色至褐色 Pale brown to brown	8-10.7	3.9-5.5	圆锥形 Conical	乳白色偏黄 Milk white with yellowish tint	2.2-5.6	1.7-2.6	11.17	4.90
6278	灰褐色 Grayish brown	9.1-11	3.7-4.3	近圆柱形 Subcylindrical	乳白色偏黄 Milk white with yellowish tint	2.5-4.2	2.1-2.9	11.66	4.36
6285	黄褐色、 橄榄褐色 至浅褐色 Yellowish brown, olive brown to pale brown	7.9-10.1	3.9-4.7	圆锥形 Conical	乳白色 Milk white	2.0-3.3	1.4-2.4	11.68	4.46
6283	橄榄褐色 Olive brown	11.1-14	5.1-8.4	近圆柱形 Subcylindrical	乳白色 Milk white	2.5-3.9	2.3-2.7	8.75	4.21
82183	浅褐色 Pale brown	9-11.2	3.7-5.4	近圆柱形至 圆锥形 Subcylindrical to conical	乳白色 Milk white	3.6-6.2	1.4-3.1	9.82	3.31
6755-1	灰褐色 Grayish brown	7.5-9.9	3.7-4.7	近圆柱形 Subcylindrical	乳白色 Milk white	2.5-4.4	1.3-1.7	10.72	3.11

菌物种进行调查时,并未发现六妹羊肚菌,这一结果从侧面为“七妹羊肚菌较六妹羊肚菌更耐高温”的观点提供了佐证。近年来,七妹羊肚菌因其抗逆性和风味优于梯棱羊肚菌和六妹羊肚菌,栽培面积不断扩大,但种植户普遍认为,七妹羊肚菌菌株变异较快,且种内变异较大。本文中6278、6280、6283、6285、6288、6751-1和6755-1于同一天采集自同一区域,但栽培出菇后表现却极为不同,进一步证实七妹羊肚菌不同菌株间遗传差异较大,种内遗传多样性丰富。目前,羊肚

菌生产中种源的获取多采用多孢分离法,这在一定程度上不利于优良性状的保持,也加速了菌株的变异。

本研究中,菌株6278形成菌核最多,但其产量表现却较为一般,而6288虽不形成菌核,但其产量表现却极好。这一发现支持了贺新生等(2016)的研究:菌核与出菇和产量高低之间并无必然联系。需要注意的是,这些菌核数据仅取自PDA平板培养条件,其在实际大田条件下的表现及产量潜力则尚需进一步验证。此外,所有9个

栽培出菇的菌株均形成“菌霜”，但“菌霜”形成的程度与最终产量并无直接关联。

近十年来，中国羊肚菌栽培产业迅速发展，同时面临的产业问题也不断显现。毫无疑问，优质高产的新品种是产业发展的基石。目前，针对羊肚菌的育种基本理论仍有待完善，受限于育种方法和技术体系的不成熟，尤其对比以担子菌研究为基础的食用菌育种理论体系，羊肚菌的育种研究还处于起步阶段。预计在今后相当长的时期内，以野生资源为基础进行系统选育仍将是羊肚菌新品种选育的主要路径。

作者贡献

王建生：实验、数据整理和初稿撰写；刘询：参与实验设计和论文修改；刘天海、王迪、余洋：参与实验设计和指导；梁欣敏：参与实验和数据分析；李玉和何晓兰：指导实验设计、数据处理和论文写作及修改。

利益冲突声明

该研究不存在任何潜在利益冲突的商业或财务关系。

[REFERENCES]

- Chen Y, Tang J, Peng WH, Gan BC, Huang ZQ, Wang Y, Jiang L, Min J, Liu LX, 2016. High-efficiency cultivation models and techniques for *Morchella* in Sichuan Province. *Edible and Medicinal Mushrooms*, 24(3): 151-154 (in Chinese)
- Dai YC, 2022. New trend of edible and medicinal fungi research in China—based on publications in *Mycosystema* during 2000–2021. *Journal of Fungal Research*, 20: 141-156 (in Chinese)
- Du XH, Wu DM, He GQ, Wei W, Xu N, Li TL, 2019. Six new species and two new records of *Morchella* in China using phylogenetic and morphological analyses. *Mycologia*, 111(5): 857-870
- Edgar RC, 2022. Muscle 5: high-accuracy alignment ensembles enable unbiased assessments of sequence homology and phylogeny. *Nature Communications*, 13(1): 6968
- Haider R, Agnello L, Shah SM, Sufyan M, Khan N, Nazir A, Ciaccio M, Rehman S, 2025. Evaluating the antioxidant, anti-inflammatory, and neuroprotective potential of fruiting body and mycelium extracts from edible yellow morel [*Morchella esculenta* (L.) Pers.]. *Journal of Food Science*, 90(1): 17619
- He XS, 2017. Biological fundamentals spawn isolation and production, and high-yield cultivation techniques of *Morchella*. Science Press, Beijing. 1-60 (in Chinese)
- He XS, Zhang N, Zhao M, Xie JY, Wang Y, Chen B, Liu CY, 2016. Morphogenetic analysis of cultivated *Morchella*. *Edible and Medicinal Mushrooms*, 24(4): 222-229, 238 (in Chinese)
- Kausserud H, Schumacher T, 2001. Outcrossing or inbreeding: DNA markers provide evidence for type of reproductive mode in *Phellinus nigrolimitatus* (Basidiomycota). *Mycological Research*, 105(6): 676-683
- Liu C, Sun YH, Mao Q, Guo XL, Li P, Liu Y, Xu N, 2016. Characteristics and antitumor activity of *Morchella esculenta* polysaccharide extracted by pulsed electric field. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(6): 986
- Miller AN, Raudabaugh DB, Iturriaga T, Matheny PB, Petersen RH, Hughes KW, Gube M, Powers RA, James TY, O'Donnell K, 2017. First report of the post-fire morel *Morchella exuberans* in eastern North America. *Mycologia*, 109(5): 710-714
- O'Donnell K, Cigelnik E, Weber NS, Trappe JM, 1997. Phylogenetic relationships among ascomycetous truffles and the true and false morels inferred from 18S and 28S ribosomal DNA sequence analysis. *Mycologia*, 89(1): 48-65
- O'Donnell K, Rooney AP, Mills GL, Kuo M, Weber NS, Rehner SA, 2011. Phylogeny and historical biogeography of true morels (*Morchella*) reveals an early cretaceous origin and high continental endemism and provincialism in the holarctic. *Fungal Genetics and Biology*, 48(3): 252-265
- Peng WH, Yan SJ, Zhou J, Luo JH, Wang Y, 2025. Key issues in *Morchella* research that deserve attention. *Edible and Medicinal Mushrooms*, 33(2): 86-92 (in Chinese)
- Qiu Z, Ren S, Zhao J, Cui L, Li H, Jiang B, Zhang M, Shu L, Li T, 2024. Comparative analysis of the nutritional and biological properties between the pileus and stipe of *Morchella sextelata*. *Frontiers in Nutrition*, 10: 1326461
- Tamura K, Stecher G, Kumar S, 2021. MEGA11: molecular evolutionary genetics analysis version 11. *Molecular Biology and Evolution*, 38(7): 3022-3027
- Tian JF, Zhang Z, Shang YH, Zheng Y, 2024. Extraction, structure and antioxidant activity of the polysaccharides from morels (*Morchella* spp.): a review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 264(2): 130656

- Tietel Z, Masaphy S, 2017. True morels (*Morchella*)—nutritional and phytochemical composition, health benefits and flavor: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(11): 1888-1901
- White TJ, Bruns T, Lee S, Taylor J, 1990. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: Innis MA, Gelfand DH, Sninsky JJ, White TJ, (eds.) *PCR protocols: a guide to methods and applications*. Academic Press, New York. 315-322
- Wu F, Zhou LW, Yang ZL, Bau T, Li TH, Dai YC, 2019. Resource diversity of Chinese macrofungi: edible, medicinal and poisonous species. *Fungal Diversity*, 98: 1-76
- Wu YY, Jiang X, Dong HL, Gu TF, Yu AY, Zhu LJ, 2024. Comparison of agronomic characteristics and nutritional components of different morel varieties. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 65(5): 1184-1189 (in Chinese)
- Xiang CY, Gao FI, Jakovlić I, Lei HP, Hu Y, Zhang H, Zou H, Wang GT, Zhang D, 2023. Using phyloSuite for molecular phylogeny and tree-based analyses. *Imeta*, 2(1): 87
- Xu CX, Qian LJ, Meng Q, Sun YJ, 2025. State-of-the-art review of morel: from chemistry to nutrition and health benefits. *Journal of Food Composition and Analysis*, 141: 107351
- Xu YY, Xie LY, Tang J, He XL, Zhang ZY, Chen Y, Zhou J, Gan BC, Peng WH, 2021. *Morchella importuna* polysaccharides alleviate carbon tetrachloride-induced hepatic oxidative injury in mice. *Frontiers in Physiology*, 12: 669331
- Yu QN, Guo MJ, Zhang B, Wu H, Zhang Y, Zhang L, 2020. Analysis of nutritional composition in 23 kinds of edible fungi. *Journal of Food Quality*, 2020: 8821315
- Zhang PP, Li GJ, Li X, Li M, Tian JH, Wang JL, Li SM, 2024. Biological characteristics and agronomic traits of a wild *Morchella sextelata* strain from Zhouqu, northwest China. *Mycosystema*, 43(12): 240162 (in Chinese)
- [附中文参考文献]
- 陈影, 唐杰, 彭卫红, 甘炳成, 黄忠乾, 王勇, 姜玲, 闫江, 刘理旭, 2016. 四川羊肚菌高效栽培模式与技术. *食药菌*, 24(3): 151-154
- 戴玉成, 2022. 中国食药真菌研究发展的新趋势——以《菌物学报》2000–2021年发表论文分析. *菌物研究*, 20(2): 141-156
- 贺新生, 2017. 羊肚菌生物学基础、菌种分离制作与高产栽培技术. 北京: 科学出版社. 1-60
- 贺新生, 张能, 赵苗, 谢敬宜, 王银, 陈波, 刘超洋, 2016. 栽培羊肚菌的形态发育分析. *食药菌*, 24(4): 222-229, 238
- 彭卫红, 闫世杰, 周洁, 罗建华, 王勇, 2025. 羊肚菌研究中几个值得关注的问题. *食药菌*, 33(2): 86-92
- 吴玉勇, 蒋芯, 董荷玲, 顾天飞, 俞爱英, 朱丽娟, 2024. 羊肚菌不同品种子实体农艺性状及营养成分比较. *浙江农业科学*, 65(5): 1184-1189
- 张盼盼, 李国杰, 李肖, 李明, 田景花, 王俊玲, 李守勉, 2024. 采自舟曲的野生六妹羊肚菌菌株的生物学特性及农艺性状. *菌物学报*, 43(12): 240162