

# 桦栓孔菌生物学特性及驯化栽培

张晋铭<sup>1</sup>, 王丽蓉<sup>1,2</sup>, 马迎迎<sup>1,2</sup>, 宋子璐<sup>1,2</sup>, 王雪明<sup>3</sup>, 杨琴<sup>1\*</sup>

1 甘肃省农业科学院蔬菜研究所, 甘肃 兰州 730070

2 西北师范大学生命科学学院, 甘肃 兰州 730070

3 舟曲县农业技术推广站, 甘肃 舟曲 746300

**摘要:** 在甘肃省甘南藏族自治州舟曲县采集到一株野生真菌, 采用组织分离法获得纯培养菌株, 结合形态学和 ITS 序列分析鉴定为桦栓孔菌 *Trametes betulina*, 对其开展生物学特性及其驯化栽培研究。研究表明, 桦栓孔菌菌丝生长的最适碳源为果糖、氮源为酵母粉、pH 为 6.0、温度为 32 °C。正交试验表明影响菌丝生长的主要因素为温度, 其次是 pH、氮源和碳源。驯化栽培试验结果表明, 桦栓孔菌的最佳原种培养基为: 麦粒 20%、木屑 70%、麸皮 7%、石膏 2%、石灰 1%。最佳栽培配方为: 麦粒 25%、木屑 25%、棉籽壳 20%、玉米芯 20%、麸皮 7%、白糖 1%、石膏 1%、石灰 1%, 接种后, 25 °C 条件下培养 26 d 即可出菇, 总产量鲜重为 144.54 g/袋。栽培子实体超声水提物抗氧化性随添加量增加而增强, 添加量 5 mg/mL 时, DPPH 和羟自由基清除率最大, 分别为 95.69%, 71.59%, ABTS<sup>+</sup>清除率在 0.25 mg/mL 时清除率最大, 为 98.19%。本研究结果为我国野生菌种质资源的开发利用提供参考数据。

**关键词:** 桦栓孔菌; 正交试验; 驯化栽培; 抗氧化活性

## [引用本文]

张晋铭, 王丽蓉, 马迎迎, 宋子璐, 王雪明, 杨琴, 2026. 桦栓孔菌生物学特性及驯化栽培. 菌物学报, 45(3): 250200

Zhang JM, Wang LR, Ma YY, Song ZL, Wang XM, Yang Q, 2026. Biological characteristics and domestication cultivation of *Trametes betulina*. Mycosystema, 45(3): 250200

资助项目: 甘肃省农业农村厅种业公关项目(ZYGG-2025-20); 甘肃省科技计划项目(24ZDNA005-1); 甘肃省农业科学院院级科研计划项目(2024GAAS13)

This work was supported by the Gansu Provincial Department of Agriculture and Rural Affairs Seed Industry Public Relations Project (ZYGG-2025-20), the Gansu Provincial Science and Technology Plan Project (24ZDNA005-1), and the Gansu Academy of Agricultural Sciences Research Project (2024GAAS13).

\*Corresponding author. E-mail: gsyangqin06@163.com

ORCID: ZHANG Jinming (0009-0002-6902-2585)

Received: 2025-07-07; Accepted: 2025-09-14

# Biological characteristics and domestication cultivation of *Trametes betulina*

ZHANG Jinming<sup>1</sup>, WANG Lirong<sup>1,2</sup>, MA Yingying<sup>1,2</sup>, SONG Zilu<sup>1,2</sup>, WANG Xueming<sup>3</sup>, YANG Qin<sup>1\*</sup>

1 Institute of Vegetable Research, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, Gansu, China

2 College of Life Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China

3 Zhouqu County Agricultural Technology Extension Station, Zhouqu 746300, Gansu, China

**Abstract:** A pure culture strain of a wild fungus from Zhouqu County of Gannan Tibetan Autonomous Prefecture in Gansu Province was obtained by tissue separation method. Morphological observation and ITS sequence analysis confirmed that the fungus was *Trametes betulina*, and its biological characteristics and domestication cultivation were studied. The results of biological characteristic investigation showed that the optimum carbon source was fructose, and the nitrogen source was yeast powder. The mycelia grew well under pH 6.0 and temperature of 32 °C. The orthogonal test showed that the main factor affecting mycelial growth was temperature, and pH, nitrogen source and carbon source were secondary. The results of domestication cultivation experiments showed that the best spawn culture medium was: wheat grain 20%, sawdust 70%, bran coat 7%, gypsum 2%, lime 1%. The best expanded cultivation substrate formula was: wheat grain 25%, sawdust 25%, cottonseed hull 20%, corncob 20%, wheat bran 7%, sugar 1%, gypsum 1%, lime 1%. After inoculation, fruiting body could be harvested in 26 days under 25 °C condition. The total yield of fresh weight was 144.54 g/bag. The antioxidant activity of ultrasonic water extract of cultivated fruiting body increased with the increase of additional quantity of the extract. When the additional quantity of the extract was 5 mg/mL, the DPPH and hydroxyl radical scavenging rates were the highest, reaching 95.69% and 71.59%, respectively, while the ABTS<sup>+</sup> scavenging rate peaked at 0.25 mg/mL, reaching 98.19%. The results provide a reference for the development and utilization of wild germplasm resource of *Trametes betulina* in China.

**Keywords:** *Trametes betulina*; orthogonal test; domestication cultivation; antioxidant activity

桦栓孔菌 *Trametes betulina* (L.) Pilát 隶属于担子菌门 Basidiomycota、蘑菇纲 Agaricomycetes、多孔菌目 Polyporales、多孔菌科 Polyporaceae, 夏秋季覆瓦状群生桦树、椴树等阔叶树死树、腐木上及树桩上, 广泛分布于北半球, 造成木材白色腐朽(Dai & Penttilä 2006; Dai *et al.* 2006, 2007; Dai 2010; Wen *et al.* 2017; Cui *et al.* 2019; Welti *et al.* 2022; Wu *et al.* 2022; Vukajlović *et al.* 2024; Zhao *et al.* 2024)。其味淡, 性温, 能祛风散寒、舒筋活络, 是山西中药“舒筋丸”原料之一(陈康林等 2013; 朱学泰和蒋长生 2021)。

桦栓孔菌子实体含矿物质元素(Vukajlović *et al.* 2024)、多糖(郭磊等 2020)、酚类、单宁、黄酮、皂苷和麦角甾醇类等化合物(鲁斌等 2023), 有很好的清除 DPPH 自由基和超氧阴离

子自由基活性, 并具有抗炎抗真菌活性(Fakoya & Oloketuyi 2012; Milovanovic *et al.* 2015; 申翔宇等 2017; Mukai *et al.* 2018; 舒翔等 2022)。Vukajlović *et al.* (2024)研究发现桦栓孔菌提取物富含绿原酸、槲皮素等抗氧化成分, 能显著减轻急性冠脉综合征(ACS)患者治疗诱导的淋巴细胞 DNA 损伤, 展现出潜在的心血管保护功能。Caka *et al.* (2022)发现该菌子实体胞外多糖对大鼠胶质瘤细胞的增殖有抑制作用。Hoan *et al.* (2016)发现桦栓孔菌可以发酵多种糖类, 同时水解纤维素, 将其转化为糖类, 并进而转化为乙醇。曹文娟和袁海生(2016)对桦栓孔菌漆酶进行固定化降解研究, 发现其能够有效降解合成染料。桦栓孔菌培养物中含纤维素分解酶、木质素降解酶、吡喃糖-2-氧化酶、过氧化物酶等多种酶(Hoshino *et al.* 2002; Knežević *et al.* 2011, 2013),

可用作生物试剂、轻工印染、漂洗、制造涂料等,也可用于降解多种污染物的生物修复(Ćilerdžić *et al.* 2017; Khan *et al.* 2020; Singh & Roy 2021)。

食药菌中含有丰富的生物活性化合物,如生物碱、类固醇、多酚、多糖、黄酮等,不仅具有抗氧化、抗肿瘤、免疫调节等多种功能,还成为预防和治疗多种疾病的潜在天然药物来源(戴玉成和杨祝良 2008; 冯娜等 2022; 沈若茗等 2024)。例如猴头菇的多糖,主要用于治疗胃炎、降血压,促进消化(甘泽隆等 2023)。灵芝三萜类化合物具有抗炎和抗氧化特性,已被发现能提高糖尿病动物模型的胰岛素敏感性并降低血糖水平(滕李铭等 2021; Ekiz *et al.* 2023)。粗毛纤孔菌子实体水提物能提高小鼠五羟色胺、多巴胺和谷氨酸的水平和降低去甲肾上腺素水平,起到安神作用(包海鹰等 2023)。

近年来,我国对大型野生真菌的驯化栽培研究取得了重要进展(戴玉成 2023; 侯娣等 2023),随着我国对食药菌种质资源的重视(戴玉成等 2021),越来越多的食药菌被成功地进行了驯化栽培(戴丹等 2024; 高志远等 2024; 郭志豪等 2024; 林建添等 2024; 王圣铨和张君丽 2024; 陈俊良等 2025; 马思宇等 2025)。这为树立大食物观,构建多元化食物供给体系,保护野生食药菌资源、促进种质资源开发提供了有力的资源和技术支撑。

目前关于桦栓孔菌的研究多数还局限于分类、资源调查及化学成分分析方面,对其在生物学特性、驯化栽培方面的报道尚为不足。为此,本文对桦栓孔菌进行生物学特性、驯化栽培研究,可进一步丰富野生大型真菌驯化栽培种类,为后续栽培技术的提升和开发利用奠定了基础。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 供试材料

#### 1.1.1 供试菌株

供试桦栓孔菌野生子实体采自甘肃省甘南藏族自治州舟曲县(104.200 3°E, 33.7676 7°N, 海拔 1 799.82 m),采用组织分离法获得桦栓孔菌菌种,现保存于甘肃省农业科学院蔬菜研究所

食用菌研究室,菌株编号 NK062。

#### 1.1.2 供试培养基

PDA 培养基:马铃薯(去皮切片) 200 g/L、葡萄糖 20 g/L、琼脂 20 g/L、蒸馏水 1 000 mL。碳源基础培养基:酵母浸粉 5 g,琼脂 20 g,磷酸二氢钾 1.5 g,硫酸镁 0.5 g,水 1 000 mL。氮源基础培养基:葡萄糖 20 g,琼脂 20 g,磷酸二氢钾 1.5 g,硫酸镁 0.5 g,水 1 000 mL。

### 1.2 菌株鉴定

#### 1.2.1 形态学鉴定

参考张婧仪等(2024)的方法,对子实体宏观特征如菌盖大小、颜色、表面特征等进行观察记载。采取徒手切片法,将切好的菌褶放在干净的载玻片上,滴 5% KOH 溶液,加盖玻片后置于显微镜下观察菌丝、孢子显微特征。

#### 1.2.2 分子生物学鉴定

采用 OMEGA 公司 Fungal DNA Kit (D3195-01) 试剂盒提取该菌株 DNA,对内转录间隔区片段(internal transcribed spacer, ITS)进行扩增,引物为 ITS5/ITS4 (ITS5: 5'-GGAAGGTTAAAGTCAAG G-3', ITS4: 5'-TCCTCCGCTTATTGATATG C-3')。PCR 扩增反应体系包括 12.5 μL Mix (2× F 8 Fast Long PCR Master Mix)、0.5 μL 上游引物 ITS5、0.5 μL 下游引物 ITS4、3 μL DNA 模板和 8.5 μL ddH<sub>2</sub>O,总反应体系体积为 25 μL。PCR 扩增反应程序条件为:94 °C 预变性 3 min; 94 °C 变性 10 s, 53 °C 退火 15 s, 72 °C 延伸 10 s, 30 个循环; 72 °C 延伸 5 min, 保存温度为 4 °C。PCR 产物经 1.0% 琼脂糖凝胶电泳检测,观察到明亮条带后,将扩增产物送至北京奥科鼎盛生物科技有限责任公司进行测序。所得的基因序列用 BioEdit 进行手动校对调整,测序结果在 NCBI (National Center for Biotechnology Information) 数据库 (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>) 中进行 Blast 比对,并用 MEGA11 软件采用最大似然法(maximum likelihood, ML)构建系统发育树,Bootstrap 重复 1 000 次以获得统计学支持。

### 1.3 生物学特性

#### 1.3.1 碳源对菌丝生长的影响

在无碳基础培养基中,以 20 g/L 的含量分别加入葡萄糖、麦芽糖、果糖、乳糖、蔗糖、

可溶性淀粉作为碳源(林建添等 2024)。每个处理 3 个重复,于平板中央接入直径为 8 mm 大小的菌块,28 °C 恒温避光培养,每 24 h 观察 1 次,并记录菌落形态、颜色及菌丝长势,用十字交叉法测量菌落直径,计算菌丝生长速度  $V$  (cm/d)。

### 1.3.2 氮源对菌丝生长的影响

在无氮基础培养基中,以 5 g/L 的含量分别加入胰蛋白胍、酵母粉、蛋白胍、硫酸铵、氯化铵、硝酸钾作为氮源(林建添等 2024)。处理方法同 1.3.1。

### 1.3.3 营养源对菌丝生长的影响

以 PDA 为基础培养基,用等量的棉籽壳、麦粒、木屑、菜籽饼、玉米芯、麸皮、豆粕作为营养源,代替马铃薯制作培养基。处理方法同 1.3.1。

### 1.3.4 pH 对菌丝生长的影响

以 PDA 为基础培养基,使用 1 mol/L 的 HCl 和 NaOH 调节培养基初始 pH 值分别为 5、6、7、8 这 4 个梯度。处理方法同 1.3.1。

### 1.3.5 温度对菌丝生长的影响

以 PDA 为基础培养基,设置培养温度为 20、24、28、32、36 °C 共 5 个梯度。处理方法同 1.3.1。

### 1.3.6 正交试验

以桦栓孔菌碳源、氮源、温度、pH 的试验结果为依据,按照正交表  $L_9(3^4)$  设计进行 4 因素

3 水平的正交试验(表 1),每个处理 6 个重复。

表 1 正交试验设计

Table 1 Orthogonal experimental design

水平	因素			
Level	Factors			
	碳源	氮源	温度	pH
	Carbon source	Nitrogen source	Temperature /°C	
1	麦芽糖	酵母粉	24	5
2	果糖	蛋白胍	28	6
3	葡萄糖	胰蛋白胍	32	7
	Maltose	Yeast extract		
	Fructose	Peptone		
	Glucose	Tryptone		

### 1.4 驯化栽培

#### 1.4.1 原种培养基筛选

根据菌丝体营养特性,设计以下 14 种原种培养基配方进行培养(表 2)。按照上述配方把菌种扩繁培养料混匀配制,加水搅拌均匀使培养料含水量为 60%–65%,装入直径 13.5 cm 玻璃培养罐,每个培养罐内放 500 g 培养基,每个处理设 6 个重复,于 121 °C 高压灭菌 2 h,冷却至 28 °C 以下接种,接入直径为 1 cm 大小的菌块 7–8 块,28 °C 恒温培养,每 24 h 观察 1 次,记录菌落形态、颜色及菌丝长势,并测量菌落直径,计算菌丝生长速度  $V$  (cm/d)。

表 2 原种培养基配方

Table 2 Formulation of spawn cultivation substrate

配方	主料	辅料
Formula	Main ingredient	Auxiliary material
1	麦粒 20%、玉米芯 70% Wheat grain 20%, corncob 70%	麸皮 7%、
2	麦粒 20%、木屑 70% Wheat grain 20%, sawdust 70%	石膏 2%、
3	麦粒 20%、小木屑 70% Wheat grain 20%, small sawdust 70%	石灰 1%
4	麦粒 20%、棉籽壳 70% Wheat grain 20%, cottonseed hull 70%	Wheat bran 7%、
5	麦粒 20%、稻壳 70% Wheat grain 20%, rice husk 70%	gypsum 2%、
6	木屑 35%、棉籽壳 35%、麸皮 20% Sawdust 35%, cottonseed hull 35 %, wheat bran 20%	lime 1%
7	木屑 35%、棉籽壳 35%、豆粕 20% Sawdust 35%, cottonseed hull 35 %, bean meal 20%	
8	木屑 35%、棉籽壳 35%、菜籽饼 20% Sawdust 35%, cottonseed hull 35%, rape cake 20%	
9	木屑 10%、棉籽壳 10%、麦粒 70% Sawdust 10%, cottonseed hull 10%, wheat grain 70%	
10	木屑 15%、棉籽壳 15%、麦粒 60% Sawdust 15%, cottonseed hull 15%, wheat grain 70%	
11	木屑 20%、棉籽壳 20%、麦粒 50% Sawdust 20%, cottonseed hull 20%, wheat grain 50%	
12	木屑 25%、棉籽壳 25%、麦粒 40% Sawdust 25%, cottonseed hull 25%, wheat grain 40%	
13	木屑 30%、棉籽壳 30%、麦粒 30% Sawdust 30%, cottonseed hull 30%, wheat grain 30%	
14	木屑 35%、棉籽壳 35%、麦粒 20% Sawdust 35%, cottonseed hull 35%, wheat grain 20%	

注:木屑颗粒度为 0.6–1 cm,小木屑颗粒度为 0.3–0.5 cm

Note: The particle size of sawdust is 0.6–1 cm, and the particle size of small sawdust is 0.3–0.5 cm.

### 1.4.2 栽培培养基筛选

根据原种配方结果和菌丝体营养特性,设计2种栽培种培养料配方(表3)。按照上述配方把栽培培养料混匀配制,加水搅拌均匀使培养料含水量为60%–65%,用16 cm × 30 cm 聚丙烯袋分装10袋后于121 °C高压灭菌2 h,冷却至25 °C以下,接入适量原种后,放入25 °C恒温培养箱避光培养至菌丝长满袋,获得栽培种。

### 1.4.3 出菇管理

菌丝长满菌袋后,用小刀(75%乙醇消毒后)在菌袋上十字交叉划8–10 cm 的出菇口,出菇条件为温度20–25 °C,空气相对湿度80%–90%,光照200–400 lx,早晚各通风一次。记录原基形成至子实体采收的时间,采收子实体并称量。

## 1.5 子实体抗氧化活性测定

### 1.5.1 子实体水提物制备

收集品质较优的子实体,55 °C烘干过夜,液氮研磨后取1 g 粉末加入25 mL 双蒸水,60 °C,55 Hz 超声提取30 min,12 000 r/min 离心5 min 后保留上清液,作为样品待用。

### 1.5.2 DPPH 清除率测定方法

参照张宏岐等(2024)的方法稍作改进,将1.5.1 水提物配制成不同浓度(1、2、3、4、5 mg/mL),用无水乙醇将DPPH配成0.1 mg/mL的储备液,用1 mL 不同浓度待测提取液和2 mL DPPH 乙醇溶液,25 °C避光反应30 min,在517 nm 下测定吸光度,每组试验重复3次,按照公式(1)计算DPPH 清除率。

$$R_1=[1-(A_1-A_2)/A_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $A_1$  为待测样品与DPPH 溶液反应后的吸光度;  $A_2$  为以相同体积无水乙醇代替DPPH 溶液测得的吸光度;  $A_0$  为以相同体积纯水代替样品测得的吸光度。

### 1.5.3 ABTS<sup>+</sup>清除率测定方法

参照张宏岐等(2024)的报道,将1.5.1 水提

物配制成不同浓度(0.05、0.1、0.15、0.2、0.25 mg/mL),使用前将ABTS<sup>+</sup>溶液用无水乙醇稀释至734 nm 处的吸光度为0.70±0.02。将1 mL 不同浓度待测提取液和2 mL ABTS<sup>+</sup>溶液,25 °C避光反应30 min,用酶标仪在734 nm 下测定吸光度,每组试验重复3次,按照公式(2)计算ABTS<sup>+</sup>清除率。

$$R_2=[1-(A_1-A_2)/A_0] \times 100\% \quad (2)$$

式中  $A_1$  为待测样品与ABTS<sup>+</sup>溶液反应后的吸光度;  $A_2$  为以相同体积无水乙醇代替ABTS<sup>+</sup>溶液测得的吸光度;  $A_0$  为以相同体积纯水代替样品测得的吸光度。

### 1.5.4 羟自由基清除率测定方法

参照 Zhang *et al.* (2018)的报道,将1.5.1 水提物配制成不同浓度(1、2、3、4、5 mg/mL),取1 mL 9 mmol/L 的硫酸亚铁溶液和9 mmol/L 水杨酸-乙醇溶液混匀,分别加入1 mL 不同浓度待测提取液和2 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液,37 °C反应30 min后,冷却至室温,用酶标仪在510 nm 下测定吸光度,每组试验重复3次,按照公式(3)计算羟自由基清除率。

$$R_3=[1-(A_1-A_2)/A_0] \times 100\% \quad (3)$$

式中  $A_1$  为待测样品的吸光度;  $A_2$  为以相同体积纯水代替H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的吸光度;  $A_0$  为以相同体积纯水代替待测样品测得的吸光度。

## 1.6 数据分析

试验数据采用Excel 2016 软件和IBM SPSS Statistics 27 软件进行数据分析,运用Origin 2025 软件进行图表绘制,使用MEGA 11 软件构建系统发育树(宋利茹等 2025)。

## 2 结果与分析

### 2.1 菌株分离和鉴定结果

#### 2.1.1 形态学鉴定

桦栓孔菌子实体中至大型,一年生,半圆形

表3 栽培培养基配方

Table 3 Formulation of domesticated cultivation medium

配方	主料	辅料
Formula	Main ingredient	Auxiliary material
1	木屑 50%、玉米芯 20%、棉籽壳 20% Sawdust 50%, corncob 20%, cottonseed hull 20%	麸皮 7%、白糖 1%、石膏 1%、石灰 1% Wheat bran 7%, sugar 1%, gypsum 1%, lime 1%
2	麦粒 25%、木屑 25%、玉米芯 20%、棉籽壳 20% Wheat grain 25%, sawdust 25%, corncob 20%, cottonseed hull 20%	

至扇形。菌盖外伸可达 5 cm，宽达 8 cm，基部厚达 1.5 cm；表面污白色至浅灰褐色，具同心环带，被粗绒毛；边缘薄，色浅。菌肉较薄，浅黄色。子实层体褶状，初期奶油色，后变浅黄褐色至浅褐色；菌褶较厚，密集，不等长(图 1A, 1B)。菌丝无隔，分枝较少，呈白色(图 1C)；担孢子长椭圆形至腊肠形， $4.5\text{--}5.5 \times 1.5\text{--}2 \mu\text{m}$ ，无色，光滑(图 1D)。

### 2.1.2 分子生物学鉴定

参照 Welti *et al.* (2022) 研究结果进行建树，结果表明野生子实体(SJQ62)测序得 ITS 序列 PV810781 与 KC848304 (Cui 7234) 聚为一支，支持率为 99% (图 2)，综合子实体形态特征，确定该菌株为桦栓褶菌 *Trametes betulina*。

## 2.2 生物学特性试验结果

### 2.2.1 碳源试验

碳源是菌株生长的六大营养要素之一，需求量最大且种类也较多。桦栓孔菌在几种不同的供试碳源下，菌丝生长速度和长势存在显著性差异(图 3，表 4)。以果糖和麦芽糖为碳源时

菌丝生长速度最快，但果糖菌丝更为浓密；蔗糖和葡萄糖为供试碳源时，菌丝生长速率次之；以乳糖、可溶性淀粉为碳源时，生长缓慢，不加碳源时，长势最差。综合菌丝长势以及生长速率，桦栓孔菌对碳源的适应性较广泛，但以果糖最佳。

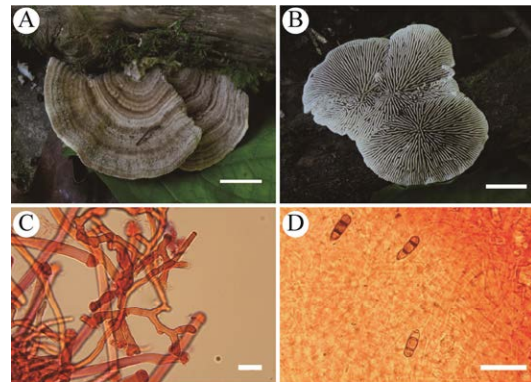


图 1 桦栓孔菌子实体 A, B: 野生子实体; C: 菌丝形态; D: 孢子; 标尺: A, B=1 cm; C, D=10 μm

Fig. 1 Fruiting bodies of wild *Trametes betulina*. A, B: Wild fruiting body; C: Mycelia; D: Spores. Bars: A, B=1 cm; D=10 μm.

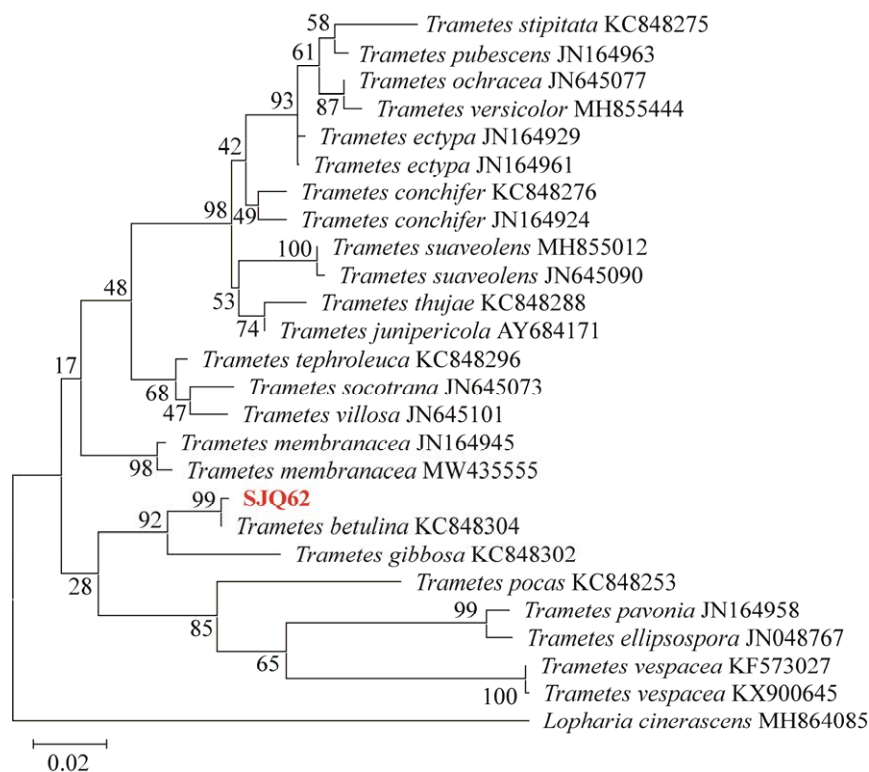


图 2 基于 ITS 序列构建系统发育树(最大似然法) 菌株 SJQ62 为桦栓褶菌 *Trametes betulina*

Fig. 2 Phylogenetic tree constructed based on ITS sequences (maximum likelihood). Strain SJQ62 was identified as *Trametes betulina*.

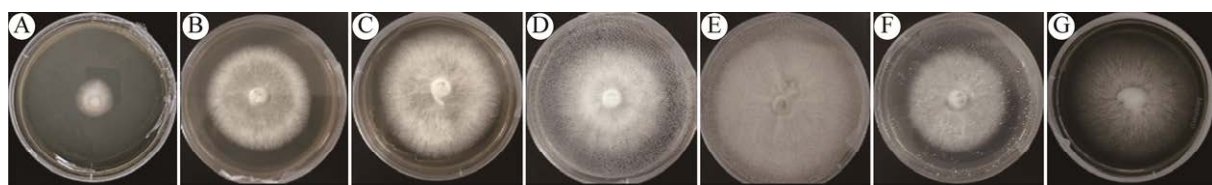


图3 不同碳源对菌丝生长速度的影响 A: 空白; B: 乳糖; C: 果糖; D: 蔗糖; E: 麦芽糖; F: 可溶性淀粉; G: 葡萄糖

Fig. 3 Effects of different carbon source on the mycelial growth of *Trametes betulina*. A: CK; B: Lactose; C: Fructose; D: Sucrose; E: Maltose; F: Soluble starch; G: Glucose.

表4 不同碳源对菌丝生长的影响

Table 4 Effects of different carbon sources on mycelial growth

碳源 Carbon source	生长速度 Mycelial growth rate/(cm/d)	显著性差异 Significance levels (0.05)	菌丝长势 Hyphal growth vigour
空白 CK	0.45±0.14	d	+
乳糖 Lactose	1.43±0.03	c	++
果糖 Fructose	1.75±0.03	a	+++
蔗糖 Sucrose	1.52±0.05	bc	++
麦芽糖 Maltose	1.73±0.15	a	+++
可溶性淀粉 Soluble starch	1.43±0.04	c	++
葡萄糖 Glucose	1.60±0.03	b	+++

注: ++++表示菌丝生长势极强, +++表示菌丝生长势较强, ++表示菌丝生长势一般, +表示菌丝生长势弱; 不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ ), 下同

Note: +++++, extremely strong; +++, strong; ++, moderate; +, weak. Different lowercase letters indicated significant difference ( $P<0.05$ ). The same below.

### 2.2.2 氮源试验

在不同氮源条件下桦栓孔菌菌丝均能生长, 菌丝生长速率和长势存在显著性差异(图4, 表5)。酵母粉、胰蛋白胨、蛋白胨这3种有机氮源下生长速度较快, 显著高于无机氮源( $P<0.05$ )。NH<sub>4</sub>Cl作为氮源时菌丝生长速度最慢, 为0.64 cm/d。结合菌丝长速和长势, 桦栓孔菌最佳氮源为酵母粉。

### 2.2.3 营养源试验

在不同营养源条件下菌丝生长速率和长势存在显著性差异(图5, 表6)。以玉米芯为营养源时生长速度最快, 菌丝白色致密; 以棉籽壳、菜籽饼、麸皮、豆粕为营养源时次之, 与玉米芯

存在显著性差异( $P<0.05$ ); 以麦粒、木屑为营养源时菌丝生长速度最慢。因此, 桦栓孔菌对营养源有广泛的适应性, 但以玉米芯最佳。

### 2.2.4 pH 试验

pH值作为影响菌株生长的重要环境因子, 对菌丝的生长速率和长势具有显著影响。在不同pH条件下桦栓孔菌菌丝均可生长, pH 5–7时, 生长速度无显著性差异(图6, 表7)。pH为6.0时, 菌丝生长速度最高, 达到1.63 cm/d, 菌丝白色浓密; 当pH值超过7.0时, 菌丝的生长速率随着pH的升高而下降, 在碱性环境中不利于菌丝生长。桦栓孔菌最适pH为6.0。

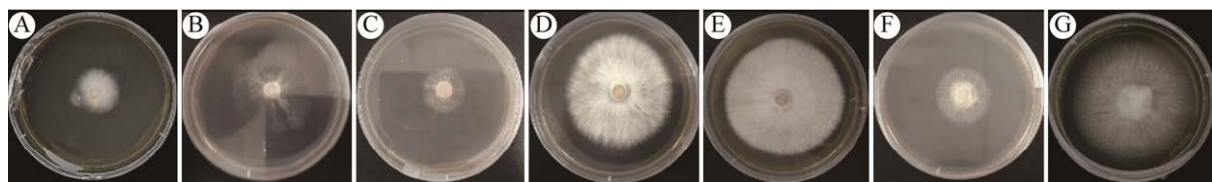


图4 不同氮源对菌丝生长速度的影响 A: 空白; B: 硝酸钾; C: 氯化铵; D: 蛋白胨; E: 酵母粉; F: 硫酸铵; G: 胰蛋白胨

Fig. 4 Effects of different nitrogen source on the mycelial growth of *Trametes betulina*. A: CK; B: KNO<sub>3</sub>; C: NH<sub>4</sub>Cl; D: Peptone; E: Yeast extract; F: (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; G: Tryptone.

表 5 不同氮源对菌丝生长的影响

Table 5 Effects of different nitrogen source on mycelial growth

氮源 Nitrogen source	生长速度 Mycelial growth rate/(cm/d)	显著性差异 Significance levels (0.05)	菌丝长势 Hyphal growth vigour
空白 CK	0.63±0.25	d	+
硝酸钾 KNO <sub>3</sub>	1.13±0.11	b	++
氯化铵 NH <sub>4</sub> Cl	0.64±0.06	d	+
蛋白胨 Peptone	1.51±0.04	a	+++
酵母粉 Yeast extract	1.60±0.07	a	+++
硫酸铵 (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.77±0.05	c	+
胰蛋白胨 Tryptone	1.60±0.03	a	+++

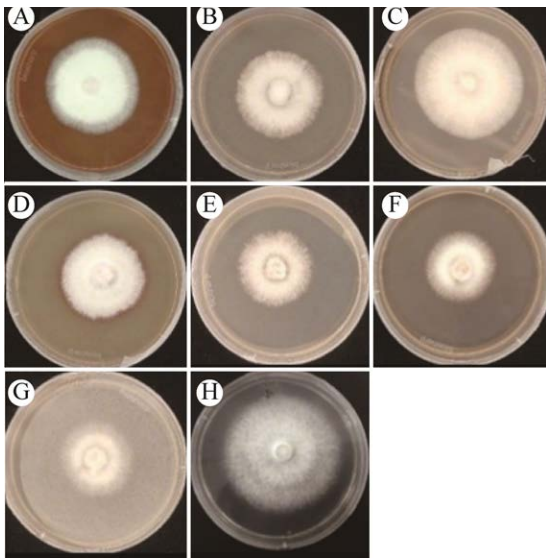


图 5 不同混合碳氮源对菌丝生长速度的影响 A: 棉籽壳; B: 麸皮; C: 玉米芯; D: 菜籽饼; E: 豆粕; F: 木屑; G: 麦粒; H: 马铃薯

Fig. 5 Effects of different mixed carbon and nitrogen sources on mycelial growth rate. A: Cottonseed hull; B: Wheat bran; C: Corn cob; D: Rape cake; E: Bean waste; F: Sawdust; G: Wheat grain; H: Potato.

### 2.2.5 温度试验

温度作为菌株生长的重要环境因子,对菌丝的生长速率和长势具有显著影响。桦栓孔菌菌丝在 20–36 °C 范围内均能生长,但存在不同程度差异(图 7, 表 8)。当温度在 24–32 °C 时,菌丝生长速度随着温度的升高而上升;温度在 32 °C 时,菌丝生长速度最高,达到 1.84 cm/d,菌丝白色较密;在温度为 36 °C 时,菌丝生长速度骤降。综上所述,桦栓孔菌生长最适的温度为 32 °C。

表 6 不同营养源对菌丝生长的影响

Table 6 Effects of different nutrient source on mycelial growth

营养源 Nutrient source	生长速度 Mycelial growth rate/(cm/d)	显著性差异 Significance levels (0.05)	菌丝长势 Hyphal growth vigour
棉籽壳 Cottonseed hull	1.20±0.00	c	+++
麸皮 Wheat bran	1.22±0.03	c	++
玉米芯 Corn cob	1.60±0.03	b	+++
菜籽饼 Rape cake	1.23±0.08	c	+++
豆粕 Bean waste	1.14±0.08	c	++
木屑 Sawdust	0.98±0.07	d	+
麦粒 Wheat grain	1.05±0.05	d	+
马铃薯 Potato	1.51±0.01	a	+++

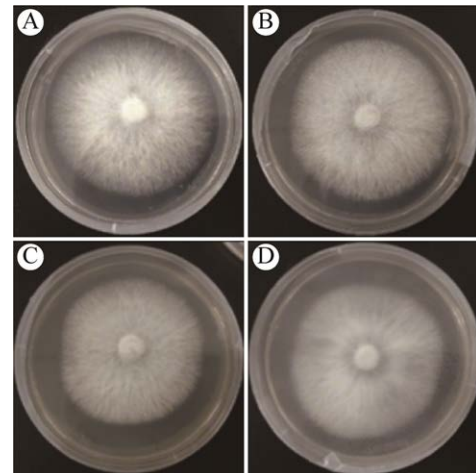


图 6 不同 pH 对菌丝生长速度的影响

Fig. 6 Effects of different pH on mycelial growth of *Trametes betulina*. A: pH 5; B: pH 6; C: pH 7; D: pH 8.

表 7 不同 pH 对菌丝生长的影响

Table 7 Effects of different pH on mycelial growth

pH	生长速度 Mycelial growth rate/(cm/d)	显著性差异 Significance levels (0.05)	菌丝长势 Hyphal growth vigour
5	1.54±0.06	a	+++
6	1.63±0.04	a	+++
7	1.54±0.04	a	+++
8	0.93±0.57	b	++

### 2.2.6 正交试验结果分析

选取最佳碳源、氮源、温度及 pH 进行 4 因素 3 水平正交试验。试供因素中,温度极差值最大(R=2.207),其次为 pH、氮源和碳源,分别为 1.71、0.833、0.253(图 8, 表 9)。表明温度是影响桦栓孔菌生长的主要因素,而碳源对其生长影

响最小。综合考虑桦栓孔菌的最佳生长条件为 A2B3C3D1, 即碳源为果糖, 氮源为胰蛋白胨, 温度为 32 °C, pH 为 5。对试验结果进行方差分析(表 10), 温度、pH、氮源这 3 种因素对桦栓孔菌菌丝生长有极显著影响( $P<0.01$ ), 4 种因素的  $F$  值大小依次为温度>pH>氮源>碳源, 与直观分析表的结果一致。

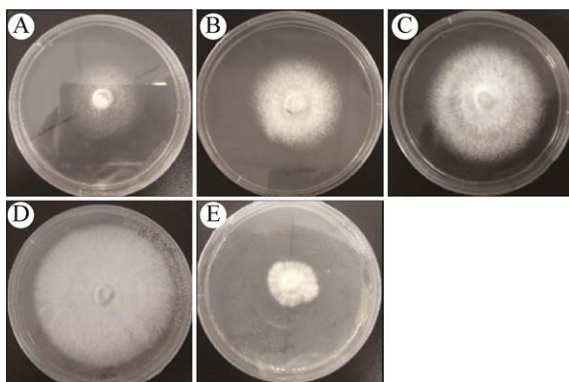


图 7 不同温度对菌丝生长速度的影响  
Fig. 7 Effects of different temperature on mycelial growth of *Trametes betulina*. A: 20 °C; B: 24 °C; C: 28 °C; D: 32 °C; E: 36 °C.

表 8 不同温度对菌丝生长的影响  
Table 8 Effects of different temperatures on mycelial growth

温度 Temperature /°C	生长速度 Mycelial growth rate (cm/d)	显著性差异 Significance levels (0.05)	菌丝长势 Hyphal growth vigour
20	1.03±0.05	d	++
24	1.21±0.14	c	+++
28	1.63±0.01	b	+++
32	1.84±0.08	a	+++
36	0.50±0.13	e	+

### 2.3 原种配方筛选结果

不同的原种配方对桦栓孔菌菌丝形态及生长速度的影响均存在差异(表 11, 图 9), 在配方 1-5 中, 在主料中麦粒 20% 的情况下, 玉米芯、大木屑、小木屑、棉籽壳、稻壳的生长速度存在显著性差异( $P>0.05$ ), 配方 2 (木屑)菌丝生长最快, 为 0.76 cm/d, 比最慢的配方 4 (稻壳) 0.46 cm/d 快 39.47%。在木屑和棉籽壳均为 35% 的情况下, 20% 的小麦添加量更适合桦栓孔菌的生长, 而麸皮含量过高则不利于其生长。配方 9-14 之间无显著差异性, 证明木屑、棉籽壳、麦粒的不同配比对桦栓孔菌菌丝生长速度无影响。

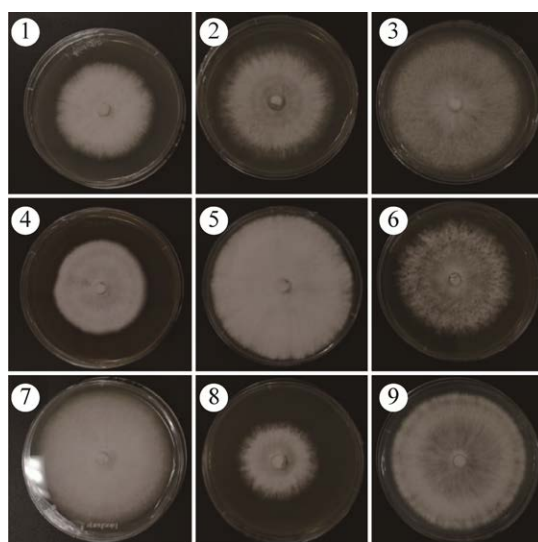


图 8 桦栓孔菌正交试验不同实验号(1-9)菌落形态  
Fig. 8 Colony characteristics of *Trametes betulina* under different culture condition (See Table test 1-9).

### 2.4 驯化栽培结果

桦栓孔菌在人工驯化条件下, 其子实体的形态特征与野生子实体相似, 其子实体为小至中等大小, 硬革质, 形态较为规整; 菌盖呈半圆形或近扇形, 无柄, 表面略有皱纹, 但颜色为污白色, 与野生子实体浅灰褐色不同; 菌褶多层, 褶缘整齐, 颜色与菌盖相近, 呈白色或淡黄色(图 10)。菌株在两种栽培配方均能生长, 接种后, 在 25 °C 条件下培养, 配方 2 在 26 d 开始出菇, 配方 1 在 42 d 开始出菇。子实体生长 4-5 d 后不再生长, 进行采摘, 可采集 3 茬。配方 2 的菌丝生长速度、满袋时间及现蕾时间均较配方 1 快, 且鲜重总产量为 144.54 g, 较配方 1 (66.48 g) 高 117.42% (表 12)。

### 2.5 抗氧化活性研究

桦栓孔菌 DPPH、ABTS<sup>+</sup>、羟自由基清除率在测定范围内, 均随子实体水提物浓度增大而增大(图 11)。DPPH 清除率在 1-3 mg/mL 时增长较快, 之后清除率增长放缓, 5 mg/mL 时达到最大, 为 95.69%; ABTS<sup>+</sup>清除率在 0.05-0.15 mg/mL 时增长较快, 0.15 mg/mL 之后随子实体水提物浓度增加, 清除率趋于平稳, 0.25 mg/mL 时清除率最大, 为 98.19%; 羟自由基的清除率随子实体水提物浓度增加呈线性关系, 5 mg/mL 时清除率最大, 为 71.59%。

表 9 正交结果直观分析

Table 9 The results of the orthogonal test

试验号 Test No.	碳源 Carbon sources	氮源 Nitrogen sources	温度 Temperature/°C	pH	菌丝生长速度 Mycelial growth rate/(cm/d)	菌丝长势 Hyphal growth vigour
1	1 麦芽糖 Maltose	1 酵母粉 Yeast extract	1 (24)	1 (5)	1.51±0.19	++
2	1 麦芽糖 Maltose	2 蛋白胨 Peptone	2 (28)	2 (6)	1.64±0.04	++
3	1 麦芽糖 Maltose	3 胰蛋白胨 Tryptone	3 (32)	3 (7)	1.84±0.09	+++
4	2 果糖 Fructose	1 酵母粉 Yeast extract	2 (28)	3 (7)	1.39±0.16	++
5	2 果糖 Fructose	2 蛋白胨 Peptone	3 (32)	1 (5)	2.13±0.00	++++
6	2 果糖 Fructose	3 胰蛋白胨 Tryptone	1 (24)	2 (6)	1.67±0.04	++
7	3 葡萄糖 Glucose	1 酵母粉 Yeast extract	3 (32)	2 (6)	1.96±0.14	+++
8	3 葡萄糖 Glucose	2 蛋白胨 Peptone	1 (24)	3 (7)	1.09±0.04	+
9	3 葡萄糖 Glucose	3 胰蛋白胨 Tryptone	2 (28)	1 (5)	1.98±0.09	+++
K1	20	19.44	17.08	22.44		
K2	20.74	19.44	20.04	21.07		
K3	20.1	21.94	23.7	17.31		
k1	6.66	6.48	5.693	7.48		
k2	6.913	6.48	6.68	7.023		
k3	6.7	7.313	7.9	5.77		
R	0.253	0.833	2.207	1.71		

表 10 正交试验方差分析表

Table 10 Analysis of variance table

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value	显著性 Significance levels
碳源 Carbon source	0.334	2	0.167	0.910	0.420	-
氮源 Nitrogen source	4.161	2	2.081	11.348	0.001	**
温度 Temperature	22.061	2	11.030	60.165	<0.001	**
pH	14.150	2	7.075	38.590	<0.001	**
误差 Error	3.300	18	0.183			
总和 Total	44.006	26				

注：\*、\*\*分别表示差异达到 0.05 显著水平、0.01 的极显著水平，-表示差异不显著

Note: \* and \*\* indicate that the difference reaches a significant level of 0.05 and a very significant level of 0.01, respectively. - indicates that the difference is not significant.

表 11 不同原种配方对菌丝生长的影响

Table 11 Effects of different spawn cultivation substrate formula (see Table 2) on mycelial growth

配方 Formula	生长速度 Mycelial growth rate/(cm/d)	显著性差异 Significance levels (0.05)	菌丝长势 Hyphal growth vigour
1	0.61±0.01	c	+++
2	0.76±0.01	a	++++
3	0.58±0.02	cd	++
4	0.46±0.02	f	+
5	0.55±0.02	d	++
6	0.44±0.01	f	+
7	0.52±0.04	e	+
8	0.50±0.04	e	+
9	0.65±0.01	b	+++
10	0.68±0.01	b	+++
11	0.67±0.03	b	+++
12	0.67±0.02	b	+++
13	0.66±0.02	b	+++
14	0.69±0.02	b	+++

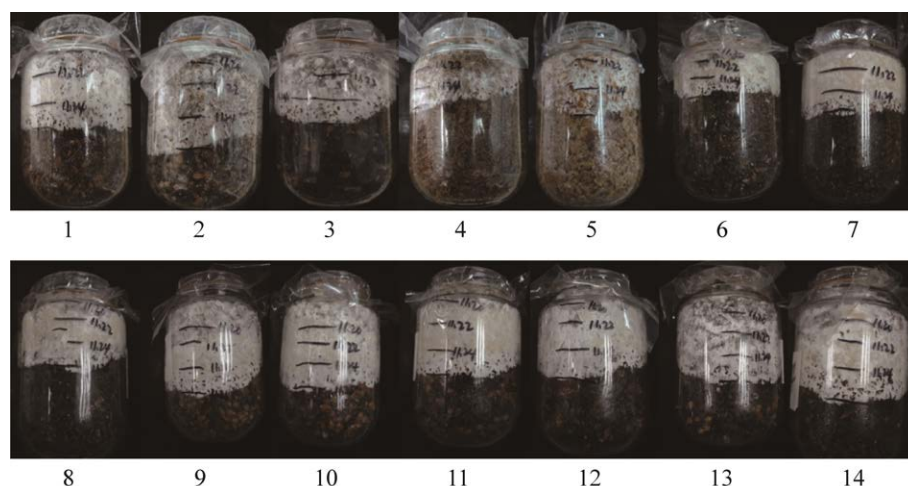


图 9 不同原种配方对桦栓孔菌生长速度的影响

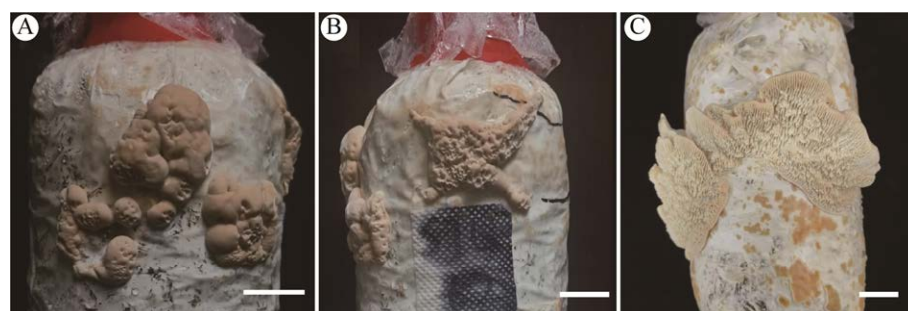
Fig. 9 Effects of different spawn cultivation substrate formulations (see Table 2) on the growth rate of *Trametes betulina*.

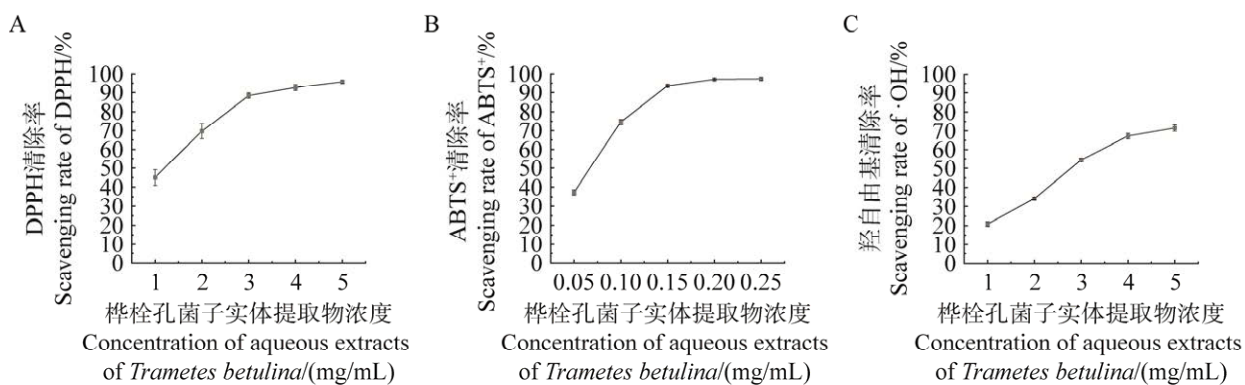
图 10 桦栓孔菌子实体的驯化栽培 A: 原基期; B: 分化期; C: 成熟期 标尺: 1 cm

Fig. 10 Domesticated fruiting bodies of *Trametes betulina*. A: Primordial initiation period; B: Primordial differentiation period; C: Mature fruiting body. Bars=1 cm.

表 12 桦栓孔菌不同栽培配方生长差异

Table 12 *Trametes betulina* growth differences under different cultivation formulas

配方 Formula	菌丝生长速度 Mycelium growth rate/(cm/d)	菌丝满袋时间 Bagful mycelial colonization time/d	现蕾时间 Primordium formation time/d	产量 Production/g
1	0.58±0.03	35	7	66.48±1.69
2	1.03±0.05	21	5	144.54±4.59

图 11 桦栓孔菌子实体的水提物对 ABTS<sup>+</sup> (A)、DPPH (B) 及羟自由基 (C) 的清除能力Fig. 11 The scavenging ability of the aqueous extract from the fruiting body of *Trametes betulina* to ABTS<sup>+</sup> (A), DPPH (B) and hydroxyl radical (C).

### 3 讨论

通过单因素试验,表明桦栓孔菌对碳源有广泛的适应性,在不同碳源中均可生长,其中以果糖最佳,麦芽糖次之。在氮源试验中,其对有机氮源的利用显著高于无机氮源,在无机氮源中菌丝生长缓慢且稀疏,与 Vrabl *et al.* (2019)的研究一致,这可能是由于无机氮中缺乏桦栓孔菌生长所必需的一些营养因子(Anderson *et al.* 2001; Brearley *et al.* 2005)。在 pH 方面,桦栓孔菌表现出良好的适应性,在 pH 5–8 范围内均可良好生长。在不同的温度条件下,桦栓孔菌菌丝增长速度先随温度升高而不断增长,在 32 °C 之后骤降,可能是因为高温胁迫诱导 ROS 积累(Liu *et al.* 2018),导致生物膜氧化、细胞膜稳定性遭到破坏、大分子蛋白降解等,影响食用菌次生代谢物合成,进而影响其生长发育(Cao *et al.* 2013; Song *et al.* 2014; 常婷婷等 2021)。正交试验表明对桦栓孔菌菌丝生长的影响程度:温度>pH>氮源>碳源,在菌丝生长阶段应首先考虑环境温度以保证菌丝的生长速度。正交试验中最佳氮源为胰蛋白胨,与单因素试验最佳氮源为酵母粉不同,但两者在单因素试验中差异不显著,说明两者均可作为桦栓孔菌生长的氮源。

驯化栽培方面,本研究设计了 14 种不同的原种配方,在棉籽壳 70% 的配方中生长最慢,可能是由于棉籽壳保水能力较差,且内部空隙较大,不利于菌丝的生长。木屑颗粒尺寸也影响菌丝生长,大木屑相较小木屑生长速度快,可能是因为小木屑制作的配料较为致密,会导致培养基透气性变差(于海龙等 2017),使好气性的菌丝因缺氧而生长缓慢,而大木屑则兼顾了持水力和透气性,从而使菌丝良好生长(陈爱靖等 2024)。栽培子实体颜色为污白色,与野生子实体灰褐色不同,可能是由于光照强度不足、基质配方、温差等因素引起(沈真辉等 2023),在栽培过程中发现料袋顶部也能形成原基,但并不分化,只有袋身割口处原基能分化成正常形态。栽培种配方中添加麦粒可显著缩短其栽培周期并增加产量,这与羊肚菌营养袋对其产量的影响一致(向刚等 2022)。

在抗氧化性方面,发现桦栓孔菌对 DPPH、ABTS<sup>+</sup>、羟自由基均具有清除能力,抗氧化性随子实体提取液浓度增加而增强,尤其对 ABTS<sup>+</sup>有良好的清除效果,在 0.15 mg/mL 时,清除率达到 93.57%,证明桦栓孔菌有良好的抗氧化活性。

蘑菇含有多种具有药用价值的生物活性化合物,是潜在天然新生物活性代谢物来源。目前国内外对野生食药菌的驯化栽培研究越来越重视,越来越多的珍稀类野生菌被人们所驯化,本研究成功实现了桦栓孔菌的生物学特性研究以及驯化栽培及抗氧化活性研究,为该物种的进一步开发利用奠定了基础。下一步可以优化栽培培养基、控制温度、湿度、氧气、二氧化碳以及光照等影响因子,继续深入研究,以便提高子实体产量和质量。

### 作者贡献

张晋铭: 论文撰写、实验、作图; 王丽蓉: 实验、作图; 马迎迎: 实验; 宋子璐: 软件分析; 王雪明: 标本采集; 杨琴: 实验指导、写作指导。

### 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]

- Anderson IC, Chambers SM, Cairney JW, 2001. Variation in nitrogen source utilisation by *Pisolithus* isolates maintained in axenic culture. *Mycorrhiza*, 11: 53-56
- Bao HY, Zou HM, Wang QC, Han C, Liu Y, 2023. Sedative effects of water extracts of *Inonotus hispidus* at different developmental stages. *Mycosystema*, 42(7): 1622-1634 (in Chinese)
- Brearley FQ, Scholes JD, See LS, 2005. Nitrogen nutrition and isotopic discrimination in tropical ectomycorrhizal fungi. *Research in Microbiology*, 156(2): 184-190
- Caka SC, Vatan PÖ, Kabadere S, Yamaç M, Uyar R, 2022. Determination of antiproliferative effects of exopolysaccharides from six mushroom species on glioma cells. *Cumhuriyet Science Journal*, 43(3): 365-369
- Cao J, Barbosa JM, Singh NK, Locy RD, 2013. GABA shunt mediates thermotolerance in *Saccharomyces cerevisiae*

- by reducing reactive oxygen production. *Yeast*, 30(4): 129-144
- Cao WJ, Yuan HS, 2016. Immobilization and dye degradation of laccase from *Lenzites betulina*. *Mycosystema*, 35(3): 343-354 (in Chinese)
- Chang TT, Zhao Y, Yang HL, Song XX, Yu CX, Cha L, Dong Q, Chen JM, 2021. Research progress on heat stress response in edible and medicinal fungi. *Acta Edulis Fungi*, 28(1): 124-134 (in Chinese)
- Chen AJ, Wu HQ, Fang HF, Zhao GH, Lan LY, 2024. Experiment on the effect of wood chip substrate particle size on the growth of *Pleurotus geesteranus*. *Edible and Medicinal Mushrooms*, 32(4): 273-276, 280 (in Chinese)
- Chen JL, Yang YK, Wu GF, Liu P, Li Y, 2025. Biological characteristics and domestic cultivation of a wild *Bondarzewia dickinsii* strain. *Mycosystema*, 44(5): 240267 (in Chinese)
- Chen KL, Mao XL, Huang MD, 2013. Illustration of anti-tumor large medicinal fungi in China. Science Press, Beijing. 1-216 (in Chinese)
- Čilerdžić J, Galić M, Vukojević J, Brčeski I, Stajić M, 2017. Potential of selected fungal species to degrade wheat straw, the most abundant plant raw material in Europe. *BMC Plant Biology*, 17: 75-81
- Cui BK, Li HJ, Ji X, Zhou JL, Song J, Si J, Yang ZL, Dai YC, 2019. Species diversity, taxonomy and phylogeny of Polyporaceae (Basidiomycota) in China. *Fungal Diversity*, 97: 137-392
- Dai D, Wang Z, Hu J, Dai JC, Peng XH, Sun P, Chen XT, Wang ZW, Wei YH, Li Y, 2024. Biological characteristics and domestication of *Piptoporellus soloniensis* (Piptoporellaceae, Basidiomycota). *Mycosystema*, 43(7): 230333 (in Chinese)
- Dai YC, 2010. Species diversity of wood-decaying fungi in Northeast China. *Mycosystema*, 29: 801-818
- Dai YC, 2023. Research progress on polypore domesticated cultivation in China. *Journal of Fungal Research*, 21(Z1): 151-156 (in Chinese)
- Dai YC, Penttilä R, 2006. Polypore diversity of Fenglin Nature Reserve, northeastern China. *Annales Botanici Fennici*, 43: 81-96
- Dai YC, Yang ZL, 2008. A revised checklist of medicinal fungi in China. *Mycosystema*, 27: 801-824 (in Chinese)
- Dai YC, Yang ZL, Cui BK, Wu G, Yuan HS, Zhou LW, He SH, Ge ZW, Wu F, Wei YL, Yuan Y, Si J, 2021. Diversity and systematics of the important macrofungi in Chinese forests. *Mycosystema*, 40: 770-805 (in Chinese)
- Dai YC, Yu CJ, Wang HC, 2007. Polypores from eastern Xizang, western China. *Annales Botanici Fennici*, 44: 135-145
- Dai YC, Yuan HS, He W, Decock C, 2006. Polypores from Beijing area, northern China. *Mycosystema*, 2225: 368
- Ekiz E, Oz E, Abd El-Aty AM, Proestos C, Brennan C, Zeng M, Tomasevic I, Elobeid T, Çadırcı K, Bayrak M, Oz F, 2023. Exploring the potential medicinal benefits of *Ganoderma lucidum*: from metabolic disorders to coronavirus infections. *Foods*, 12(7): 1512
- Fakoya S, Oloketuyi SF, 2012. Antimicrobial efficacy and phytochemical screening of mushrooms, *Lenzites betulinus*, and *Coriolopsis gallica* extracts. *TAF Preventive Medicine Bulletin*, 11(6): 695-698
- Feng N, Yue YW, Cheng CL, Yang M, Wang C, Zhang JS, 2022. Research progress of triterpenes from mycelia of *Ganoderma lingzhi* and its pharmacological effects. *Mycosystema*, 41(9): 1341-1353 (in Chinese)
- Gan ZL, Xie GB, Xie LY, 2023. Potential mechanism of *Hericium erinaceus* in the treatment of chronic gastritis analysed by network pharmacology and molecular docking techniques. *Mycosystema*, 42(12): 2422-2441 (in Chinese)
- Gao ZY, Han HL, Feng LN, Cheng XY, Zhang JZ, Wang XH, Sun WM, 2024. Domestic cultivation of *Trametes sanguinea*. *Mycosystema*, 43(12): 240067 (in Chinese)
- Guo L, Gao R, Tian Y, Xu H, Kong DX, Hua Y, 2020. Evaluation of the antioxidant properties of various solvent extracts from *Lenzites betulina*. *Journal of West China Forestry Science*, 49(2): 17-23 (in Chinese)
- Guo ZH, Geng BB, Zhang GL, Zhang YH, Tian XM, 2024. Domestication and cultivation of a wild *Pholiota limonella* strain. *Mycosystema*, 43(12): 240140 (in Chinese)
- Hoan KI, Kien TN, Jaehyuk C, Soo LT, 2016. Ethanol production from various sugars and cellulosic biomass by white rot fungus *Lenzites betulinus*. *Mycobiology*, 44(1): 48-53
- Hoshino F, Kajino T, Sugiyama H, Asami O, Takahashi H, 2002. Thermally stable and hydrogen peroxide tolerant manganese peroxidase (MnP) from *Lenzites betulinus*. *FEBS Letters*, 530(1-3): 249-252
- Hou D, Yang RH, Bao DP, 2023. Checklist of edible and officinal fungi domesticated and cultivated species in China. *Journal of Microbiology*, 43(6): 62-74 (in Chinese)
- Khan MA, Sharma A, Yadav S, Sharma S, 2020. Rhizospheric microbes as potential tool for remediation of carbofuran: an overview. *Rhizosphere Microbes: Soil and Plant Functions*, 23: 557-571
- Knežević AZ, Milovanović IN, Stajić MM, Lončar N, Brčeski I, Vukojević JB, Čilerdžić J, 2013. Lignin degradation by selected fungal species. *Bioresource Technology*, 138: 117-123
- Knežević AZ, Milovanović IN, Stajić MM, Vukojević JB,

2011. Ligninolytic enzyme production by *Lenzites betulinus* on selected plant raw materials. *Zbornik Matice Srpske za Prirodne Nauke*, 2011(120): 333-338
- Lin JT, Huang FC, Liang YL, Li MM, Wang SW, 2024. Domestication and antioxidant activities of *Fulvifomes nonggangensis*. *Mycosystema*, 43(12): 240108 (in Chinese)
- Liu R, Zhang X, Ren A, Shi DK, Shi L, Zhu J, Yu HS, Zhao MW, 2018. Heat stress-induced reactive oxygen species participate in the regulation of HSP expression, hyphal branching and ganoderic acid biosynthesis in *Ganoderma lucidum*. *Microbiological Research*, 209: 43-54
- Lu B, Quan W, Chen YX, Shen KZ, Hua Y, 2023. Studies on the chemical constituents and antioxidant activities of ergosterol from *Lenzites betulinus*. *Journal of Southwest Forestry University*, 43(6): 173-178 (in Chinese)
- Ma SY, Chen S, Wang JF, Qu Z, Liu S, Sun JF, Zhu AH, 2025. Biological characteristics and domestication cultivation of *Ganoderma orbiforme*. *Mycosystema*, 44(7): 250069 (in Chinese)
- Milovanovic IN, Stanojkovic TP, Stajic MM, Brcesi ID, Knezevic AZ, Cilerdzic JLJ, Vukojevic JB, 2015. Effect of selenium enrichment of *Lenzites betulinus* and *Trametes hirsuta* mycelia on antioxidant, antifungal and cytostatics potential. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 16(10): 920-926
- Mukai A, Takahashi K, Ashitani T, 2018. Antifungal activity of longifolene and its autoxidation products. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76: 1079-1082
- Shen RM, Lu JY, Zhang Y, Wei H, Lu L, 2024. Hypolipidemic functions of edible and medicinal mushrooms: a review. *Mycosystema*, 43(8): 240050 (in Chinese)
- Shen XY, Ma T, Ma X, HuangYT, Liu CL, 2017. Isolation, purification and free radical scavenging activities of polysaccharide from *Lenzites betulina*. *Mycosystema*, 36(9): 1271-1277 (in Chinese)
- Shen ZH, Luo XY, Zhao XW, Li MJ, Cao Y, Yang LL, Lu QQ, Li CR, 2023. Transcriptome analysis revealed impact of light quality on coloration of *Naematelia aurantialba* fruiting bodies. *Acta Edulis Fungi*, 30(6): 12-27 (in Chinese)
- Shu X, Chen J, Liu M, Lin SH, Yu NC, Liu XG, 2022. Identification of *Lenzites betulina* from *Coriolus versicolor* and identify anti-inflammatory chemical components from *Lenzites betulina*. *Chinese Journal of Hospital Pharmacy*, 42(12): 1221-1224 (in Chinese)
- Singh A, Roy A, 2021. Fungal communities for the remediation of environmental pollutants. *Recent Trends in Mycological Research*, 2: 127-165
- Song C, Chen Q, Wu X, Zhang J, Huang C, 2014. Heat stress induces apoptotic-like cell death in two *Pleurotus* species. *Current Microbiology*, 69: 611-616
- Song LR, Li WL, Han JX, Tang QW, Ke SW, Yang SY, Li R, 2025. Biological characteristics and domestication cultivation of wild *Volvariella bombycine*. *Mycosystema*, 44(10): 250083 (in Chinese)
- Teng LM, Tian XM, Wu F, Dai YC, 2021. A comparison of triterpenoids and polysaccharides in 13 species of wild *Ganoderma*. *Mycosystema*, 40: 1811-1819 (in Chinese)
- Vrabl P, Schinagl CW, Artmann DJ, Heiss B, Burgstaller W, 2019. Fungal growth in batch culture—what we could benefit if we start looking closer. *Frontiers in Microbiology*, 10: 2391
- Vukajlović JT, Djordjević K, Tosti T, Simić I, Grbović F, Djordjević OM, 2024. *In vitro* effect of *Lenzites betulinus* mushroom against therapy-induced DNA damage in peripheral blood lymphocytes of patients with acute coronary syndrome. *Journal of Ethnopharmacology*, 335: 118640
- Wang SY, Zhang JL, 2024. Biological characterization and domestication of a wild *Panus conchatus* strain. *Mycosystema*, 43(12): 240152 (in Chinese)
- Welti S, Youcef Khodja L, Dumez S, Chaduli D, Favel A, Rahmania F, Courtecuisse R, Moreau PA, 2022. *Cellulariella warnieri* (Basidiomycota, Polyporales) and its doubles. *Journal of Fungal Biology*, 12(1): 75-94
- Wen CN, Chen HP, Zhao ZZ, Hu DB, Li ZH, Feng T, Liu JK, 2017. Two new  $\gamma$ -lactones from the cultures of basidiomycete *Lenzites betulinus*. *Phytochemistry Letters*, 20: 9-12
- Wu F, Man XW, Tohtirjap A, Dai YC, 2022. A comparison of polypore funga and species composition in forest ecosystems of China, North America, and Europe. *Forest Ecosystems*, 9: 100051
- Xiang G, Ma YH, Liu P, Li ZM, Chai HM, Zhao YC, 2022. Relationship between morel yield and nutrient consumption in spawn bottles. *Acta Edulis Fungi*, 29(2): 39-47 (in Chinese)
- Yu HL, Gao C, Wang QL, Zhang LJ, Shang XD, Song CY, Zhang MY, Li Y, Zhou F, Tan Q, 2017. Effects of sawdust particle size on selected growth parameters of a *Lentinula edodes* cultivar. *Acta Edulis Fungi*, 24(2): 5-9 (in Chinese)
- Zhang HQ, Zhu LQ, Zeng YN, Cui M, Zhou YX, Du J, 2024. Optimization of extraction process of *Phellinus lonicerinus* polysaccharide and analysis of its antioxidant activity *in vitro*. *Natural Product Research and Development*, 36(4): 581-588, 668 (in Chinese)
- Zhang JY, Luo KY, Yuan Y, Bian LS, 2024. A new species of *Coltricia* (Hymenochaetaceae, Basidiomycota) and a key to species in China. *Mycosystema*, 43(5): 230365 (in

- Chinese)
- Zhang N, Wang DX, Jiao L, Tan Y, Wang J, Li H, Wu W, Jiang DC, 2018. Structural analysis and antioxidant activities of neutral polysaccharide isolated from *Epimedium koreanum* Nakai. *Carbohydrate Polymers*, 196: 246-253
- Zhao H, Wu YD, Yang ZR, Liu HG, Wu F, Dai YC, Yuan Y, 2024. Polypore funga and species diversity in tropical forest ecosystems of Africa, America and Asia, and a comparison with temperate and boreal regions of the Northern Hemisphere. *Forest Ecosystems*, 11: 100200
- Zhu XT, Jiang CS, 2021. Illustration of macrofungi in Liancheng Nature Reserve, Gansu. Chinese Forestry Publishing House, Beijing. 1-310 (in Chinese)
- [附中文参考文献]**
- 包海鹰, 邹鹤鸣, 王青春, 韩晨, 刘颖, 2023. 不同发育时期粗毛纤孔菌子实体水提物安神作用研究. *菌物学报*, 42(7): 1622-1634
- 曹文娟, 袁海生, 2016. 桦褶孔菌漆酶固定化及其对染料的降解. *菌物学报*, 35(3): 343-354
- 常婷婷, 赵妍, 杨焕玲, 宋晓霞, 余昌霞, 查磊, 董沁, 陈明杰, 2021. 食药菌高温胁迫应答研究进展. *食用菌学报*, 28(1): 124-134
- 陈爱靖, 吴汉琼, 方洪枫, 赵光辉, 兰凉英, 2024. 木屑基质颗粒度对秀珍菇生长的影响试验. *食用菌*, 32(4): 273-276, 280
- 陈俊良, 杨应昆, 吴国锋, 刘朴, 李玉, 2025. 一株野生狄更斯邦氏孔菌的生物学特性及驯化栽培. *菌物学报*, 44(5): 240267
- 陈康林, 卯晓岚, 黄明达, 2013. 中国抗肿瘤大型药用真菌图鉴. 北京: 科学出版社. 1-216
- 戴丹, 王振, 胡佳, 戴建成, 彭新红, 孙鹏, 陈绪涛, 王志伟, 魏云辉, 李玉, 2024. 梭伦小剥管孔菌生物学特性和驯化栽培. *菌物学报*, 43(7): 230333
- 戴玉成, 2023. 中国多孔菌驯化栽培研究进展. *菌物研究*, 21(Z1): 151-156
- 戴玉成, 杨祝良, 2008. 中国药用真菌名录及部分名称的修订. *菌物学报*, 27: 801-824
- 戴玉成, 杨祝良, 崔宝凯, 吴刚, 袁海生, 周丽伟, 何双辉, 葛再伟, 吴芳, 魏玉莲, 员瑗, 司静, 2021. 中国森林大型真菌重要类群多样性和系统学研究. *菌物学报*, 40: 770-805
- 冯娜, 岳亚文, 程池露, 杨梅, 汪昆, 张劲松, 2022. 灵芝菌丝体三萜及其药理活性的研究进展. *菌物学报*, 41(9): 1341-1353
- 甘泽隆, 谢光波, 谢丽源, 2023. 基于网络药理学及分子对接技术探究猴头菇治疗慢性胃炎的潜在作用机制. *菌物学报*, 42(12): 2422-2441
- 高志远, 韩会玲, 冯丽娜, 程晓园, 张京政, 王晓晗, 孙伟明, 2024. 血红栓孔菌的驯化栽培. *菌物学报*, 43(12): 240067
- 郭磊, 高然, 田野, 徐海, 孔德仙, 华燕, 2020. 桦褶孔菌不同溶剂萃取物抗氧化活性研究. *西部林业科学*, 49(2): 17-23
- 郭志豪, 耿彬彬, 张国利, 张英昊, 田雪梅, 2024. 野生柠檬鳞伞的驯化栽培. *菌物学报*, 43(12): 240140
- 侯娣, 杨瑞恒, 鲍大鹏, 2023. 我国食药菌驯化栽培物种名录. *微生物学杂志*, 43(6): 62-74
- 林建添, 黄福常, 梁云龙, 李苗苗, 王斯炜, 2024. 弄岗黄层孔菌的驯化栽培及其抗氧化活性. *菌物学报*, 43(12): 240108
- 鲁斌, 全伟, 陈勇杏, 申开泽, 华燕, 2023. 桦褶孔菌中麦角甾醇类化学成分及其抗氧化活性研究. *西南林业大学学报*, 43(6): 173-178
- 马思宇, 陈爽, 王军芳, 屈直, 刘爽, 孙景芳, 朱安红, 2025. 无柄紫灵芝的生物学特性及其驯化栽培. *菌物学报*, 44(7): 250069
- 申翔宇, 马涛, 马希, 黄雅婷, 刘春兰, 2017. 桦褶孔菌多糖的分离纯化及清除自由基活性. *菌物学报*, 36(9): 1271-1277
- 沈若茗, 陆俊佑, 张煜, 魏华, 陆玲, 2024. 大型食药菌的降血脂功能研究进展. *菌物学报*, 43(8): 240050
- 沈真辉, 罗祥英, 赵仙伟, 李梦杰, 曹瑶, 杨林雷, 陆青青, 李荣春, 2023. 利用转录组分析光照对金耳子实体转色的影响. *食用菌学报*, 30(6): 12-27
- 舒翔, 陈军, 刘敏, 林世和, 余南才, 刘新国, 2022. 云芝伪品桦褶孔菌的鉴别及其抗炎活性成分分析. *中国医院药学杂志*, 42(12): 1221-1224
- 宋利茹, 李汶玲, 韩菊学, 汤琴文, 柯善文, 杨思宇, 李荣, 2025. 野生银丝草菇生物学特性和驯化栽培. *菌物学报*, 44(10): 250083
- 滕李铭, 田雪梅, 吴芳, 戴玉成, 2021. 13 种野生灵芝菌丝体中胞内三萜与多糖含量的比较. *菌物学报*, 40: 1811-1819
- 王圣销, 张君丽, 2024. 一株野生贝壳革耳的生物学特性及驯化栽培. *菌物学报*, 43(12): 240152
- 向刚, 马渊浩, 刘萍, 李仔密, 柴红梅, 赵永昌, 2022. 羊肚菌产量与种袋营养变化关系. *食用菌学报*, 29(2): 39-47
- 于海龙, 高成, 王秋兰, 章炉军, 尚晓冬, 宋春艳, 张美彦, 李玉, 周峰, 谭琦, 2017. 不同木屑颗粒度对工厂化压块香菇生长的影响. *食用菌学报*, 24(2): 5-9
- 张宏岐, 朱烈琴, 曾亚妮, 崔敏, 周莹霞, 杜娟, 2024. 忍冬木层孔菌多糖的提取工艺优化及其体外抗氧化活性研究. *天然产物研究与开发*, 36(4): 581-588, 668
- 张婧仪, 罗凯月, 员瑗, 边禄森, 2024. 集毛孔菌属(担子菌门锈革孔菌科)一新种和该属中国种类鉴定检索表. *菌物学报*, 43(5): 230365
- 朱学泰, 蒋长生, 2021. 甘肃连城自然保护区大型真菌图鉴. 北京: 中国林业出版社. 1-310