

# 中华腐生牛肝菌生物学特性及栽培

李凡, 罗成才, 曹瑶, 马云蕊, 李荣平, 罗祥英, 李荣春\*

云南菌视界生物科技有限公司 云南省级(珍稀食用菌)企业工程技术中心 昆明市级(食用菌)企业工程技术中心, 云南 昆明 650200

**摘要:** 中华腐生牛肝菌 *Buchwaldoboletus xylophilus* 为第二个可实现人工栽培的牛肝菌目的物种, 科研及商业价值潜力较大。为更好地开发利用其野生资源, 本研究以野生菌株 JSJ-Bx1 开展形态及分子鉴定, 并对分离菌株进行生物学特性研究及人工栽培试验。结果表明, 供试菌株为中华腐生牛肝菌; 菌丝生长最适温度为 35 °C, 最适 pH 为 4.0, 最适碳源为葡萄糖, 最适氮源为酵母膏, 最佳无机盐为 FeSO<sub>4</sub>; 菌丝生长最优培养基配方为葡萄糖 20 g、酵母膏 2 g、FeSO<sub>4</sub> 1.5 g、1/2 MS 培养基 0.3 g、琼脂 20 g、水 1 L; 在此培养基上及优化培养条件下菌丝生长速率为 11.38 mm/d。栽培结果表明, 最佳栽培料配方为木屑 20%、棉籽壳 30%、麦粒 20%、玉米粉 10%、红壤 10%、麸皮 8%、石膏粉 1%、葡萄糖 1%、KH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.1%、FeSO<sub>4</sub> 0.1%; 该配方菌丝培养时期约 20 d, 原基形成约 5 d, 子实体形态建成约 7 d, 平均产量为 96.64 g/瓶, 生物学效率为 31.58%。

**关键词:** 中华腐生牛肝菌; 生物学特性; 人工栽培

## [引用本文]

李凡, 罗成才, 曹瑶, 马云蕊, 李荣平, 罗祥英, 李荣春, 2026. 中华腐生牛肝菌生物学特性及栽培. 菌物学报, 45(3): 250227  
Li F, Luo CC, Cao Y, Ma YR, Li RP, Luo XY, Li RC, 2026. Biological characteristics and cultivation of *Buchwaldoboletus xylophilus*. *Mycosystema*, 45(3): 250227

## Biological characteristics and cultivation of *Buchwaldoboletus xylophilus*

LI Fan, LUO Chengcai, CAO Yao, MA Yunrui, LI Rongping, LUO Xiangying, LI Rongchun \*

Yunnan Junshijie Biotechnology Co. Ltd., Yunnan (Rare Edible Fungi) Enterprise Technology Center, Kunming (Edible Fungi) Enterprise Technology Center, Kunming 650200, Yunnan, China

**Abstract:** *Buchwaldoboletus xylophilus* is the second cultivatable species of Boletales with significant scientific and commercial potential value. To better develop and utilize this wild resource, the morphological and molecular identification and the biological characteristic investigation of a wild strain,

资助项目: 云南省(珍稀食用菌)企业技术中心专项资金(JSJ2023016KJ)

This work was supported by the Yunnan Province (Rare Edible Fungi) Enterprise Technology Center Special Fund (JSJ2023016KJ).

\*Corresponding author. E-mail: rongchunli@126.com

ORCID: LI Fan (0009-0002-9069-508X)

Received: 2025-07-22; Accepted: 2025-08-05

JSJ-Bx1, were carried out. The results show that this wild strain belongs to *B. xylophilus*. The hyphae grow well under the temperature of 35°C and pH 4.0 on the medium using glucose as carbon source, and yeast extract as nitrogen source with the addition of inorganic salt FeSO<sub>4</sub>. The optimal medium formula consists of 20 g glucose, 2 g yeast extract, 1.5 g FeSO<sub>4</sub>, 0.3 g 1/2 MS medium, 20 g agar, and 1 L water. The hypha growth rate is 11.38 mm/d. The optimal expanded cultivation substrate formula consists of 20% sawdust, 30% cottonseed hulls, 20% wheat grains, 10% corn flour, 10% red soil, 8% bran, 1% gypsum powder, 1% glucose, 0.1% KH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, and 0.1% FeSO<sub>4</sub>. The mycelial colonization period is about 20 days; primordial formation takes about 5 days, and the growth and maturation of the fruiting bodies takes about 7 days. The average yield is 96.64 g/bottle and the biological efficiency is 31.58%.

**Keywords:** *Buchwaldoboletus xylophilus*; biological characteristics; cultivation

目前, 全球有 3 000 余种食药菌(Boa 2004; Wu *et al.* 2019), 我国已有报道的食用菌超过 1 000 种, 包括 500 多种菌根食用菌(戴玉成和杨祝良 2008; 戴玉成等 2010, 2021; 魏杰等 2021; Zhou *et al.* 2023), 其中已经成功驯化栽培的大型真菌有近 200 种(侯娣等 2023), 如雅致栓孔菌 *Trametes elegans* (李苗苗等 2023)、亚弯柄灵芝 *Ganoderma subflexipes* (田润等 2024)、暗褐脉柄牛肝菌 *Phlebopus portentosus* (李凡等 2024, 2025)、中华包革耳 *Naematelia sinensis* (沈真辉等 2024, 2025)和双孢蘑菇 *Agaricus bisporus* (梁倩倩等 2025)等, 为我国食药菌真菌资源的开发利用提供了重要基础数据(戴玉成 2022, 2023; 李婉莹等 2023)。

中华腐生牛肝菌 *Buchwaldoboletus xylophilus* (Petch) Both & B. Ortiz 在分类上隶属于牛肝菌科 Boletaceae 辣牛肝菌亚科 Chalciporoideae, 又名香妃牛肝菌, 是一种典型的热带、亚热带珍稀牛肝菌, 为非外生菌根真菌, 具有腐生能力, 可食用, 该种最早描述于斯里兰卡, 之后在马来西亚、菲律宾、印度、中国等国均有报道。中国仅在云南省西双版纳傣族自治州、海南省、香港等极少数地区发现野生子实体(Natarajan & Purushothama 1988; Xie *et al.* 2021; Nanu & Kumar 2022; 蒋帅等 2024; Yang *et al.* 2025; 朱安红和马海霞 2025)。

中华腐生牛肝菌野生资源非常稀少, 且产量较低, 很可能是一种濒危物种(蒋帅等 2024)。杨质高(2021)报道称张春霞研究员及其团队首次实现了中华腐生牛肝菌室内栽培, 但现阶段中华腐生牛肝菌基础生物学研究较为薄弱, 该物种有关生物学特性、人工栽培或分子生物学等研究

报道较少。中华腐生牛肝菌已授权或公开的相关专利主要涉及菌株选育、液体菌种、固体菌种及栽培料配方等(何明霞等 2021; 杨天伟等 2021; 张春霞等 2021; 王元忠等 2024); 其作为第二个可实现人工栽培的牛肝菌目的物种, 具有较大的科研及商业价值。本研究为深入了解中华腐生牛肝菌的生物学特性, 在基于前期收集到的一株野生中华腐生牛肝菌基础上较为系统地对其培养环境条件、不同营养源及人工栽培等进行研究, 以期中华腐生牛肝菌野生资源开发利用及工厂化栽培等提供基础数据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 供试菌株

供试菌株 JSJ-Bx1 子实体采自云南西双版纳傣族自治州, 保藏于云南菌视界生物科技有限公司菌种保藏中心; 分离纯化菌株保存于中国微生物菌种保藏管理委员会普通微生物中心, 保藏编号为 CGMCC No. 42007。

#### 1.1.2 供试培养基

基础培养基: 马铃薯(去皮) 200 g, 葡萄糖 20 g, 酵母膏 2 g, MgSO<sub>4</sub> 1.5 g, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 3 g, 琼脂 20 g, 蒸馏水 1 000 mL, pH 自然。碳源基础培养基: 酵母膏 2 g, MgSO<sub>4</sub> 1.5 g, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 3 g, 琼脂 20 g, 蒸馏水 1 000 mL, pH 自然。氮源基础培养基: 葡萄糖 20 g, MgSO<sub>4</sub> 1.5 g, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 3 g, 琼脂 20 g, 蒸馏水 1 000 mL, pH 自然。无机盐基础培养基: 葡萄糖 20 g, 酵母膏 2 g, 琼脂 20 g, 蒸馏水 1 000 mL, pH 自然。生长因子基础培养基: 葡萄糖 20 g, 酵母膏 2 g, MgSO<sub>4</sub> 1.5 g, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 3 g, 琼脂 20 g, 蒸馏水 1 000 mL,

pH 自然。液体培养基: 马铃薯 200 g, 麸皮 25 g, 葡萄糖 15 g, 酵母粉 3 g, CaCO<sub>3</sub> 2 g, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 3 g, MgSO<sub>4</sub> 2 g, 维生素 B<sub>1</sub> 2 片, 水 1 000 mL (杨天伟等 2021)。栽培料配方: 6 个栽培配方以木屑为栽培主料, 搭配不同比例棉籽壳及辅料(麦粒 20%、玉米粉 10%、红壤 10%、麸皮 8%、石膏粉 1%、葡萄糖 1%、KH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.1%、FeSO<sub>4</sub> 0.1%) 混匀得栽培基质(张春霞等 2021; 李凡等 2024) (表 1)。

表 1 不同栽培料中木屑和棉籽壳的占比

Table 1 Percentage of sawdust and cotton seed hulls in different cultivation substrate

配方	木屑	棉籽壳
Formula	Sawdust/%	Cotton seed hulls/%
1	50	0
2	40	10
3	30	20
4	20	30
5	10	40
6	0	50

## 1.2 子实体分离鉴定

采用组织分离法进行菌株分离纯化。同时对子实体进行形态观察记录, 采用徒手切片方法在光学显微镜下观察担孢子、担子、囊状体、菌盖菌髓、菌柄髓部、菌丝等形态特征。根据 rDNA ITS 序列进行分子系统发育树的构建, 其构建方法参照 Xie *et al.* (2021) 的方法。

## 1.3 菌丝生物学特性研究

对不同培养温度、pH、光照时间、碳源、

氮源、无机盐及生长因子进行单因素试验(表 2), 用直径 0.65 cm 打孔器从母种培养基同一半径处打孔取菌块, 接种在供试培养基上, 每组 6 个重复; 当同一单因素中一种处理下菌丝覆盖整个培养基表面时, 停止培养, 用十字交叉法测量菌落直径, 并观察记录菌丝生长势(田润等 2024)。

## 1.4 培养基优化试验

根据单因素试验结果, 选择碳源、氮源、无机盐和生长因子为直接因素进行 L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) 正交试验(表 3), 每个处理重复 6 次, 分别在这 9 组组合培养基上接种, 并于优化后的培养条件下培养, 正交试验操作步骤和记录数据与单因素试验相同(李苗苗等 2023; 田润等 2024)。

## 1.5 栽培研究

用直径 0.65 cm 打孔器取 5 块菌种块接种于液体培养基中, 将其置于 30 °C、150 r/min 下暗培养 7 d; 将培养好的液体接种到木屑为主的栽培料中于 30 °C、暗条件下发菌培养; 菌丝长满栽培瓶后, 将红壤与草炭土等体积比混匀得覆土材料, 含水量为 55%, 覆土厚度为 3 cm; 覆土后放入 26–28 °C、空气相对湿度 80%–90%、光照 300–500 lx、CO<sub>2</sub> 浓度 1 000–1 500 mL/m<sup>3</sup> 的出菇房中进行子实体诱导出菇。

## 1.6 数据处理

采用 Excel 和 SPSS 25 软件进行数据处理、差异显著性分析和方差分析等。

表 2 单因素试验培养基成分及栽培条件

Table 2 Culture medium composition and culture condition in single factor experiment

因素	处理
Factors	Treatments
温度	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40
Temperature/°C	
pH	4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0
光照时间	24 h 光照、12 h/12 h 光暗交替、24 h 黑暗
Illumination time	24 h illumination, alternation of dark and illumination, 24 h dark
碳源	空白、葡萄糖、麦芽糖、可溶性淀粉、乳糖、蔗糖、果糖、甘露醇
Carbon source	CK, glucose, maltose, soluble starch, lactose, sucrose, fructose, mannitol
氮源	空白、酵母膏、蛋白胨、牛肉膏、尿素、酒石酸铵、硫酸铵、氯化铵
Nitrogen source	CK, yeast extract, peptone, beef extract, urea, ammonium tartrate, (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , NH <sub>4</sub> Cl
无机盐	空白、硫酸镁、硫酸锰、硫酸亚铁、磷酸二氢钾、硫酸钙、硫酸锌、氯化钾
Inorganic salt	CK, MgSO <sub>4</sub> , MnSO <sub>4</sub> , FeSO <sub>4</sub> , KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> , CaSO <sub>4</sub> , ZnSO <sub>4</sub> , KCl
生长因子	空白、维生素 B <sub>1</sub> 、1/2 MS、腺嘌呤、L-精氨酸、L-酪氨酸、6-苄氨基嘌呤、吡啶-3-丁酸
Growth factor	CK, VB <sub>1</sub> , 1/2 MS, adenine, L-arginine, L-tyrosine, 6-BA, IBA

表 3  $L_9(3^4)$  正交试验设计因素水平表  
Table 3  $L_9(3^4)$  design form of orthogonal experiment

水平	因素			
Levels	Factors			
	A	B	C	D
	葡萄糖	酵母膏	硫酸亚铁	1/2 MS
	Glucose	Yeast	FeSO <sub>4</sub>	/(g/L)
	/(g/L)	extract/(g/L)	/(g/L)	
1	10	2	1	0.1
2	20	4	1.5	0.2
3	30	6	3	0.3

## 2 结果与分析

### 2.1 鉴定结果

#### 2.1.1 子实体及显微形态特征

中华腐生牛肝菌子实体小型至中型, 单生或群生; 菌盖呈半球形, 直径 4–10 cm, 厚 2–3 cm, 边缘内卷或下弯; 表面干燥, 偶有绒毛, 黄褐色、成熟后略带红色(图 1A); 菌肉黄色, 受伤

后变蓝至蓝黑色; 菌柄中生, 近圆柱形或基部膨大, 长 6–9 cm, 粗 2–5 cm; 表面黄色至黄褐色; 基部菌丝黄色(图 1B); 具菌香气。担孢子侧面观呈近球形或椭圆形, 薄壁, 表面光滑(图 1C)。担子棒状, 具 4 个小梗(图 1D, 1E)。管缘囊状体(图 1F)和侧生囊状体(图 1G)近纺锤形至纺锤形, 薄壁。菌盖髓部由交织的菌丝构成(图 1H), 菌柄髓部菌丝纵向排列(图 1I)。子实体各部位及母种培养后的菌丝体均未发现锁状联合(图 1J)。

#### 2.1.2 ITS 物种鉴定

运用 DNAMAN 软件序列相似性比对结果表明, JSJ-Bx1 的子实体和菌丝体 ITS 序列一致, 其 ITS 序列提交至国家微生物科学数据中心 NMDC, 序列号为 NMDCN00092US。分子系统发育树研究表明, JSJ-Bx1 ITS 序列与已报道的

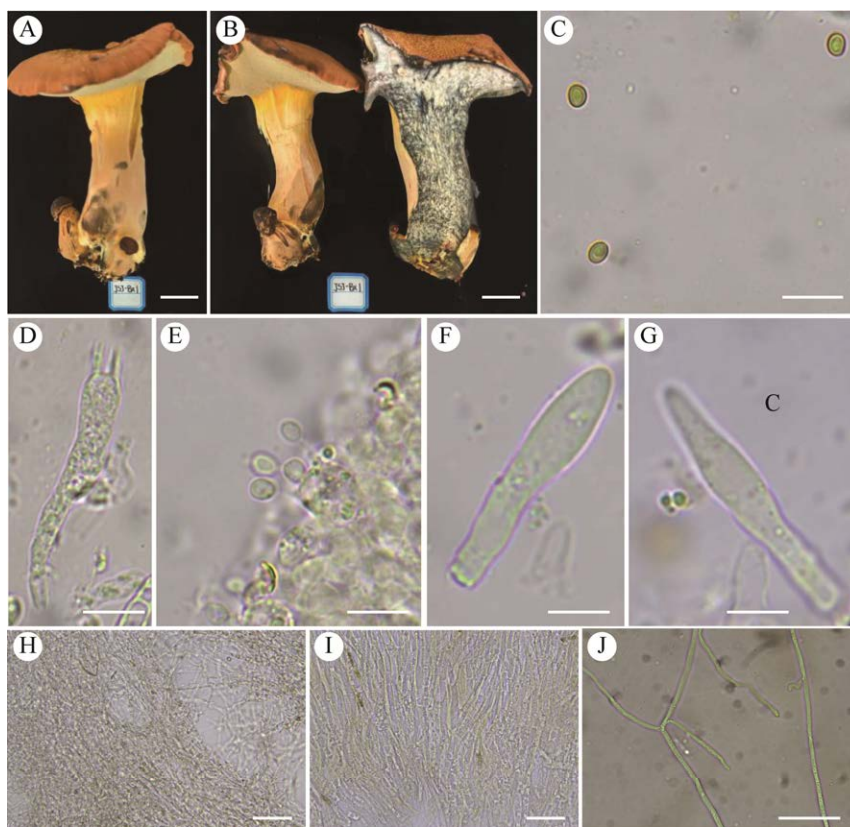


图 1 中华腐生牛肝菌子实体及显微结构 A: 成熟子实体; B: 子实体剖面; C: 担孢子; D, E: 担子; F: 管缘囊状体; G: 侧生囊状体; H: 菌盖髓部; I: 菌柄表面菌丝; J: 母种培养皿菌丝. 比例尺: A, B=1 cm; C–G, J=10  $\mu$ m; H, I=20  $\mu$ m

Fig. 1 Basidiomata and microscopic features of *Buchwaldoboletus xylophilus* JSJ-Bx1. A: Basidioma; B: Longitudinal section of basidioma; C: Basidiospores; D, E: Basidia; F: Cheilocystidium; G: Pleurocystidium; H: Pileipellis; I: Stiptipellis; J: Hyphae from an isolate. Scale bars: A, B=1 cm; C–G, J=10  $\mu$ m; H, I=20  $\mu$ m.

中华腐生牛肝菌聚在一起,支持率为88%(图2)。因此,供试菌株 JSJ-Bx1 鉴定为中华腐生牛肝菌 *Buchwaldoboletus xylophilus*。

## 2.2 不同培养条件对菌丝生长影响

### 2.2.1 温度对菌丝生长影响

中华腐生牛肝菌菌丝在 5–15 °C 范围内不能萌发生长,在 20–35 °C 范围内菌丝生长速率与温度呈正相关,且在 35 °C 时,菌丝生长速率最快,为 5.19 mm/d,菌丝浓密,无色素;在 25 °C 或 30 °C 条件下培养时菌丝生长较慢,菌丝较密,有黄色色素产生;在 40 °C 条件下菌丝生长明显受到抑制(表4,图3)。由此表明,中华腐生牛肝菌为典型的热带或亚热带高温真菌,最适平板菌丝培养温度为 35 °C。

### 2.2.2 培养基初始 pH 对菌丝生长影响

中华腐生牛肝菌菌丝在 pH 4.0–9.0 范围内生长差异极为显著(表4,图3);在酸性条件下菌丝生长较好,且在 pH 4.0 时菌丝生长旺盛,生长速率最快,为 5.32 mm/d;在 pH 6.0 时菌丝生长较慢,仅为 0.90 mm/d;菌丝在中性及碱性条件下均不能萌发生长。因此,酸性条件下更适合中华腐生牛肝菌菌丝生长,而中性和碱性条件下均不利于其菌丝萌发生长。

### 2.2.3 光照对菌丝生长影响

中华腐生牛肝菌菌丝在 3 种光照处理条件下均能正常生长,但不同光照处理对菌丝生长存在差异(表4,图3);其中光照一定程度上抑制了菌丝生长,并以 24 h 光照处理菌丝生长速率最慢,但其菌丝浓密;而 24 h 暗处理菌丝生长速率最快,菌丝较密。

## 2.3 不同营养源对菌丝生长影响

### 2.3.1 碳源对菌丝生长影响

中华腐生牛肝菌菌丝在 7 种碳源中均能生长,但菌丝生长速率和菌丝长势存在差异;与碳源空白组相比,供试碳源均对中华腐生牛肝菌菌丝生长具有促进作用(表4,图3)。其中,以葡萄糖为碳源时菌丝生长速率最快,为 4.73 mm/d,菌丝长势旺盛,菌丝浓密;以麦芽糖、果糖和可溶性淀粉为碳源时菌丝生长速率次之;以蔗糖和甘露醇为碳源时菌丝生长速率较慢,菌丝稀疏;以乳糖为碳源时菌丝生长速率最慢,但菌丝浓密。综合来看,中华腐生牛肝菌碳源适应性范围较广,以葡萄糖、麦芽糖和果糖为适宜碳源,葡萄糖为最适碳源。

### 2.3.2 氮源对菌丝生长影响

中华腐生牛肝菌菌丝在 7 种氮源中生长差异明显(表4,图3)。与氮源空白组相比,以尿素为氮源时菌丝不生长;以酵母膏为氮源时菌丝生长速率较快,为 4.31 mm/d,菌丝浓密,长势较好;以酒石酸铵、硫酸铵和氯化铵 3 种铵类盐为氮源时菌丝生长速率快,但菌丝纤弱、稀疏,长势较差;以蛋白胨为氮源时对菌丝促进作用不明显;以牛肉膏为氮源时菌丝长势最差,且菌落边缘不整齐。综合来看,酵母膏、硫酸铵和氯化铵为中华腐生牛肝菌适宜氮源,酵母膏为最适氮源。

### 2.3.3 无机盐对菌丝生长影响

中华腐生牛肝菌菌丝在 7 种无机盐中生长差异显著,与无机盐空白组相比,可将其分为促进菌丝生长、菌丝生长作用不明显及抑制菌丝生

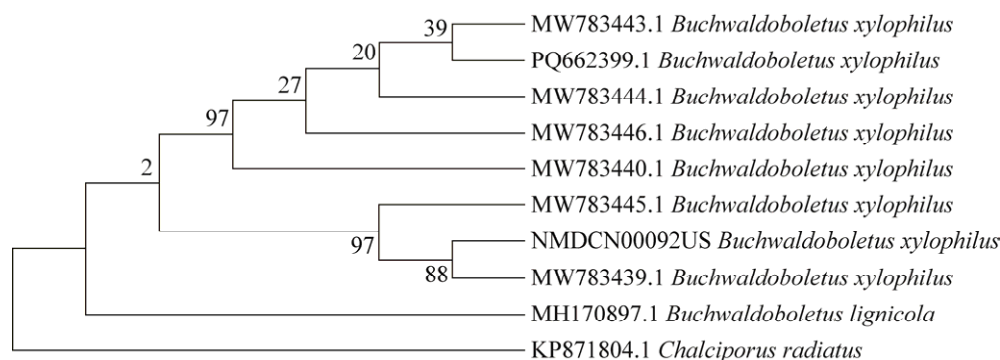


图2 基于 ITS 序列构建的系统发育树

Fig. 2 Phylogenetic tree constructed based on ITS sequence.

表 4 不同单因素条件对中华腐生牛肝菌菌丝生长影响

Table 4 Effects of single factor on mycelial growth of *Buchwaldoboletus xylophilus* JSJ-Bx1 ( $\pm$ SD,  $n=6$ )

培养条件 Conditions	不同因素 Different factors	菌丝长势 Mycelial growth vigor	菌丝密度 Mycelial density	菌丝生长速率 Mycelial growth rate (mm/d)
温度 Temperature /°C	5	—	—	—
	10	—	—	—
	15	—	—	—
	20	+	+	1.03±0.22 d
	25	++	++	3.69±0.32 c
	30	+++	++	4.47±0.20 b
pH	35	++++	++++	5.19±0.38 a
	40	+	+	1.05±0.17 d
	4.0	++++	+++	5.32±0.06 a
	5.0	++	+++	3.93±0.60 b
	6.0	+	+++	0.90±0.13 c
	7.0	—	—	—
光照时间 Illumination time	8.0	—	—	—
	9.0	—	—	—
	24 h 光照 24 h illumination	+++	++++	4.51±0.04 c
碳源 Carbon source	12 h/12 h 光暗交替 Alternation of dark and illumination	++++	+++	5.30±0.38 b
	24 h 黑暗 24 h dark	++++	++	5.58±0.14 a
氮源 Nitrogen source	空白 CK	+	++++	1.16±0.32 g
	葡萄糖 Glucose	+++	+++	4.73±0.84 a
	麦芽糖 Maltose	+++	+++	4.57±0.48 b
	可溶性淀粉 Soluble starch	+++	+++	4.39±0.48 c
	乳糖 Lactose	+	++++	1.77±0.09 f
	蔗糖 Sucrose	+++	++	4.07±0.24 d
	果糖 Fructose	+++	+++	4.42±0.14 c
	甘露醇 Mannitol	++	++	3.56±0.15 e
	空白 CK	++	++	3.61±0.36 d
无机盐 Inorganic salt	酵母膏 Yeast extract	+++	+++	4.31±0.80 b
	蛋白胨 Peptone	++	++	3.59±0.30 d
	牛肉膏 Beef extract	++	+	3.15±0.22 e
	尿素 Urea	—	—	—
	酒石酸铵 Ammonium tartrate	++	+	3.91±0.47 c
	硫酸铵 (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	+++	+	4.25±0.43 b
	氯化铵 NH <sub>4</sub> Cl	+++	+	4.40±0.21 a
生长因子 Growth factor	空白 CK	+	+++	1.96±0.32 f
	硫酸镁 MgSO <sub>4</sub>	++	+++	3.72±0.71 c
	硫酸锰 MnSO <sub>4</sub>	+++	++	4.61±0.48 b
	硫酸亚铁 FeSO <sub>4</sub>	++++	+++	8.77±0.69 a
	磷酸二氢钾 KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	+	+	2.57±0.18 e
	硫酸钙 CaSO <sub>4</sub>	++	+	3.06±0.19 d
	硫酸锌 ZnSO <sub>4</sub>	—	—	—
	氯化钾 KCl	—	—	—
	空白 CK	+++	+++	4.38±0.60 c
维生素 B <sub>1</sub> VB <sub>1</sub>	维生素 B <sub>1</sub> VB <sub>1</sub>	+++	+++	4.54±0.34 b
	1/2 MS	+++	+++	4.87±0.39 a
	腺嘌呤 Adenine	++	+++	3.81±0.43 d
	L-精氨酸 L-arginine	++	+++	3.81±0.31 d
	L-酪氨酸 L-tyrosine	+++	+++	4.57±0.20 b
	6-苄氨基嘌呤 6-BA	—	—	—
吲哚-3-丁酸 IBA	+	++++	1.20±0.56 e	

注: +++++表示菌丝密、长势壮; +++表示菌丝较密; ++表示菌丝长势一般; +表示菌丝稀疏、长势较弱; —表示菌丝不生长。同一列中小写字母表示  $P<0.05$  水平存在显著性差异。下同

Note: Data is the average of six replicates. +++++, +++, ++ and + represent vigorous, comparatively vigorous, normal and weak mycelial growth respectively. — represent no mycelial growth. Different lowercase letters represent significant differences at  $P<0.05$  level. The same below.

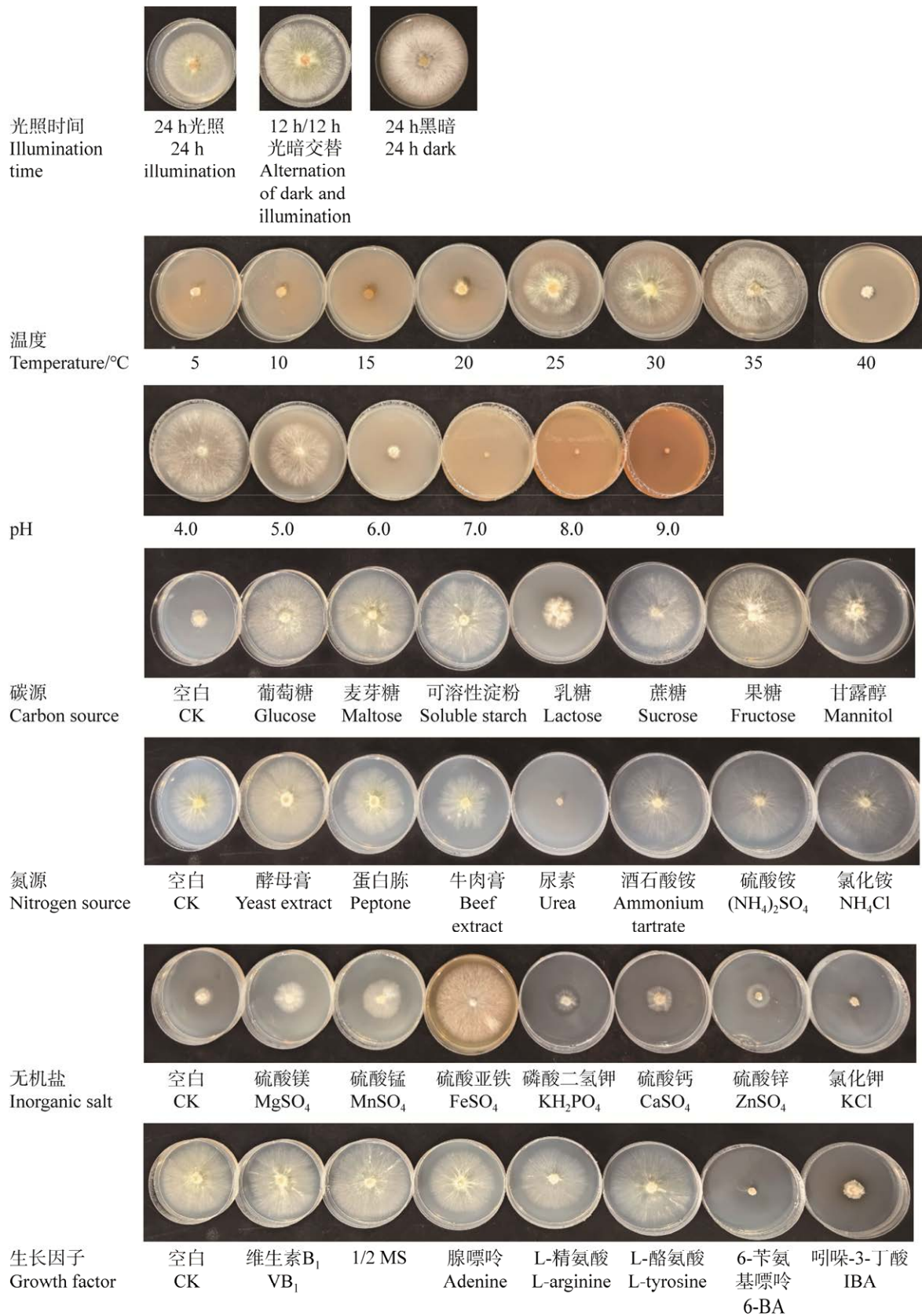


图 3 不同单因素条件对中华腐生牛肝菌菌丝生长影响  
Fig. 3 Effects of single optimal factor on mycelial growth of *Buchwaldoboletus xylophilus* JSJ-Bx1.

长3类(表4,图3)。中华腐生牛肝菌菌丝以  $ZnSO_4$  为无机盐时不生长,以  $KCl$  为无机盐时接种块仅萌发,无明显生长;二者均抑制了菌丝生长,且  $ZnSO_4$  抑制作用最为显著;以  $KH_2PO_4$  和  $CaSO_4$  为无机盐时,其对菌丝促生作用不明显,菌丝生长势不佳、菌丝较为稀疏;以  $MgSO_4$ 、 $MnSO_4$  和  $FeSO_4$  为无机盐时,其显著促进菌丝生长,菌丝长势旺盛,菌丝较为浓密,且以  $FeSO_4$  促生作用最为显著。综合来看,  $MgSO_4$ 、 $MnSO_4$  和  $FeSO_4$  为中华腐生牛肝菌适宜无机盐,  $FeSO_4$  为最适无机盐。

### 2.3.4 生长因子对菌丝生长影响

中华腐生牛肝菌菌丝在供试的7种生长因子中生长差异明显(表4,图3)。与生长因子空白组相比,以6-苄氨基嘌呤(6-BA)为生长因子时,菌丝不生长;以吲哚-3-丁酸(IBA)为生长因子时,显著抑制菌丝生长,其菌丝生长速率最慢,仅为1.20 mm/d,但菌丝浓密;以腺嘌呤和精氨酸为生长因子时,菌丝生长受到抑制,但菌丝长势较好,菌丝浓密;以  $VB_1$ 、1/2 MS 和酪氨酸为生长因子时,菌丝促生作用不明显。由此表明,生长因子基础培养基所含营养成分已能够满足中华腐生牛肝菌菌丝正常生长;但添加1/2 MS 为生长因子时,菌丝长势较好,且可增加菌丝密度和生物量;因此,可将1/2 MS 视为中华腐生牛肝菌适宜生长因子。

## 2.4 培养基优化试验

通过4因素3水平正交试验,对中华腐生牛肝菌菌丝培养的碳源、氮源、无机盐及生长因子进行优化(表5,图4)。结果表明,氮源是影响中华腐生牛肝菌菌丝生长的最主要因素,其极差值最大,为1.38;其次是生长因子、无机盐和碳源。在均值中,碳源的K2、氮源的K1、无机盐的K2和生长因子的K3组合(实验号4)优于其他条件。此外,中华腐生牛肝菌菌丝生长速率在碳源和无机盐水平中均表现出先上升后下降的趋势,且在K2水平达到最高;在氮源水平中表现出逐渐降低趋势,为负相关性;而在生长因子水平中表现为逐渐增加趋势,为正相关性。由此表明,适宜的碳源能明显促进中华腐生牛肝菌菌丝生长,而少量的氮源即可满足菌丝生长,适量的无机盐也能促进菌丝生长,生长因子的添加量有待进一步优化。

正交试验方差分析结果表明(表6),氮源的F值最大,生长因子、无机盐和碳源次之,这与直观分析结果(表5)一致;4个因素的P值均小于0.05,表现出显著性差异,说明4种营养元素均对中华腐生牛肝菌菌丝生长速率影响显著。

## 2.5 栽培研究

### 2.5.1 不同配方对菌丝生长影响

中华腐生牛肝菌菌丝在不同栽培配方中均能生长(表7),其菌丝生长范围为2.58–4.12 mm/d,

表5  $L_9(3^4)$ 正交试验结果

Table 5  $L_9(3^4)$  results of orthogonal experiment ( $\pm$ SD,  $n=6$ )

实验号 Exp. No.	A 葡萄糖 Glucose	B 酵母膏 Yeast extract	C 硫酸亚铁 $FeSO_4$	D 1/2 MS	菌丝生长速率 Mycelial growth rate/(mm/d)	菌丝生长势 Mycelial growth vigor	菌丝密度 Hyphal density
1	1	1	1	1	10.05±0.14 c	++++	+++
2	1	2	2	2	9.47±0.52 d	++++	+++
3	1	3	3	3	8.49±0.41 f	++++	++++
4	2	1	2	3	11.38±0.16 a	++++	+++
5	2	2	3	1	8.97±0.62 e	++++	+++
6	2	3	1	2	8.77±0.35 e	++++	++++
7	3	1	3	2	8.42±0.09 f	++++	++
8	3	2	1	3	10.37±0.41 b	++++	++++
9	3	3	2	1	8.44±0.08 f	++++	++++
K1	28.01	29.85	29.19	27.46			
K2	29.12	28.81	29.29	26.66			
K3	27.23	25.70	25.88	30.24			
k1	9.34	9.95	9.73	9.15			
k2	9.71	9.60	9.76	8.89			
k3	9.08	8.57	8.63	10.08			
R	0.63	1.38	1.13	1.19			



实验号 1 2 3 4 5 6 7 8 9  
Exp. No.

图 4 不同实验组对中华腐生牛肝菌菌丝生长影响

Fig. 4 Effects of different experimental groups on mycelial growth of *Buchwaldoboletus xylophilus* JSJ-Bx1.

表 6 菌丝生长正交试验结果方差分析

Table 6 The results of *F*-test of mycelium growth

来源 Sources	偏差平方和 Sum of squares	自由度 <i>df</i>	均方 Mean square	<i>F</i>	显著性 Significance
碳源 Carbon source	1.795	2.000	0.898	47.957	0.000
氮源 Nitrogen source	9.706	2.000	4.853	259.302	0.000
无机盐 Inorganic salt	8.087	2.000	4.044	216.066	0.000
生长因子 Growth factor	8.456	2.000	4.228	225.906	0.000
误差 Error	0.337	18.000	0.019		

表 7 不同配方对菌丝和子实体农艺性状生长影响

Table 7 Effects of different cultivated substrate formulations on mycelial growth and agronomic characters of *Buchwaldoboletus xylophilus* JSJ-Bx1

配方 Formula	生长速率 Mycelial growth rate (mm/d)	菌丝长势 Mycelial growth vigor	原基形成时间 Days of primordial formation /d	菌盖直径 Pileus diameter /mm	菌盖厚度 Thickness of the cap /mm	菌柄直径 Stipe diameter /mm	菌柄长度 Stipe length /mm	产量 Yield (g/bottle)	生物学效率 Biological efficiency /%
1	3.64±0.11 b	++	7	36.42±1.40 c	12.18±1.06 c	23.61±1.49 b	56.36±1.46 c	45.69±1.19 d	14.93±0.39 d
2	2.93±0.25 d	+	5	40.52±1.98 b	21.41±1.28 b	26.68±1.33 b	63.57±1.19 b	54.38±0.83 c	17.77±0.27 c
3	3.18±0.10 c	++	5	57.69±0.68 a	25.85±0.66 a	25.60±1.33 b	75.92±1.45 a	86.75±1.41 b	28.35±0.46 b
4	4.12±0.15 a	+++	5	59.49±1.99 a	26.43±0.97 a	42.47±0.75 a	66.67±1.15 b	96.64±2.48 a	31.58±0.81 a
5	2.62±0.07 e	+	6	28.57±0.86 d	13.33±1.18 c	17.95±1.59 c	35.37±0.83 d	37.39±1.22 e	12.22±0.40 e
6	2.58±0.27 e	+	8	—	—	—	—	12.17±0.79 f	3.98±0.26 f

配方 4 菌丝生长速率最快，且菌丝浓白、长势旺盛；配方 6 生长速率最慢。在配方筛选试验中，随棉籽壳比例的增加，菌丝生长速率表现出先升高后下降的趋势，并以 30%棉籽壳为主的栽培料配方菌丝生长最快，由此表明配方 4 更适合于中华腐生牛肝菌菌丝培养。

### 2.5.2 不同配方对中华腐生牛肝菌农艺性状影响

试验表明，所有供试配方均能分化出原基，但除配方 6 外，其他配方分化的原基均能正常发育并形成完整子实体，不同配方之间子实体形态、产量和生物学效率等农艺性状差异较大(表 7)。供试栽培料配方子实体农艺性状：菌盖直径范围约为 3–6 cm，菌盖厚度约为 1–3 cm，菌柄长度约为 3–8 cm，菌柄直径约为 2–4 cm；其中，

所有供试配方 5–8 d 可诱导出原基，但配方 6 原基形成时间最晚；此外，配方 1–6 子实体产量呈先升高后下降趋势。显著性结果表明，配方 4 各农艺性状均优于其他配方，且产量最高，平均每瓶达到 96.64 g，生物学转化效率为 31.58%；而配方 6 原基不能发育为完整子实体，可能是因为该配方碳氮比例较低，氮含量过高，导致子实体发育畸形。由此表明，配方 4 为优质的高产配方。

### 2.5.3 中华腐生牛肝菌子实体发育过程

中华腐生牛肝菌菌丝培养时期为 20–25 d，菌丝覆土后 3–5 d 可长满覆土层，覆土后 5–7 d 可明显看到原基分化，子实体 7–10 d 可发育成熟，整个栽培周期较短为 32–42 d (图 5)。根据形态差异，初步将子实体发育过程划分为原基分

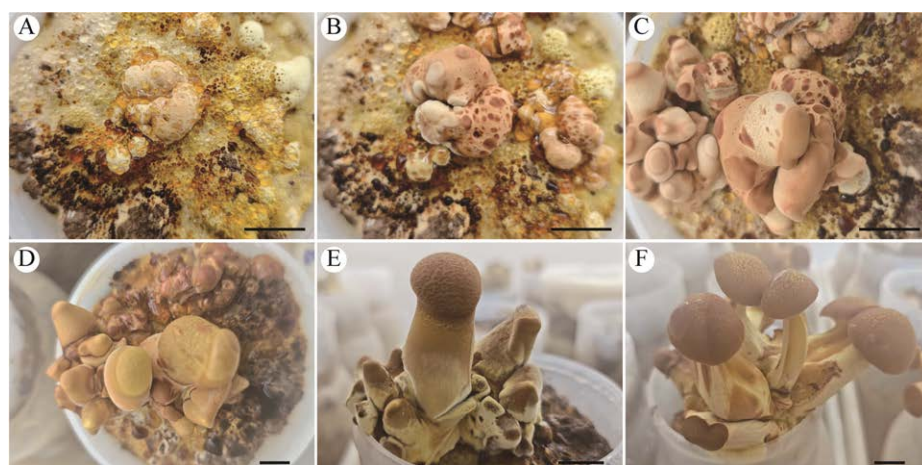


图 5 中华腐生牛肝菌子实体发育过程 A: 原基分化初期; B: 原基分化中期; C: 原基分化后期; D: 子实体发育初期; E: 子实体发育中期; F: 子实体成熟期. 比例尺: A-F=1 cm

Fig. 5 Development of basidiomata of *Buchwaldoboletus xylophilus* JSJ-Bx1. A: Early stage of primordium; B: Middle stage of primordium; C: Late stage of primordium; D: Early stage of basidiomata; E: Middle stage of basidiomata; F: Mature stage of basidiomata. Scale bars: A-F=1 cm.

化初期(菌丝扭结分化为块状组织, 图 5A)、原基分化中期(块状组织分化出凸起结构, 图 5B)、原基分化后期(凸起结构分化为小原基, 图 5C)、子实体发育初期(图 5D)、子实体发育中期(图 5E)和子实体成熟期(图 5F)这 6 个阶段。

### 3 讨论

本研究通过结合单因素试验筛选及正交试验优化, 以中华腐生牛肝菌菌丝生长速率及菌丝长势等为指标, 对其适宜生长环境条件和不同营养源等进行研究; 在此基础上, 进行人工栽培。结果表明, 温度在中华腐生牛肝菌菌丝生长和发育过程中影响显著, 这与 Yang *et al.* (2025) 研究结果一致; 中华腐生牛肝菌菌丝生长适宜温度为 25–35 °C, 为典型的高温型真菌(黄年来 1998), 这与其分布在热带和亚热带地区的气候类型特征相符(Xie *et al.* 2021; Nanu & Kumar 2022; 蒋帅等 2024)。同为牛肝菌科的暗褐脉柄牛肝菌菌丝生长适宜温度为 25–30 °C, 温度超过 30 °C, 菌丝生长急剧下降, 而本研究发现 JSJ-Bx1 菌株最适培养温度为 35 °C; 由此表明, 中华腐生牛肝菌高温适应性更强, 可以在高温地区推广栽培。此外, 参考暗褐脉柄牛肝菌菌种最佳保藏温度为 15 °C (何明霞等 2020), 本研究发现中华腐生牛肝菌在 20 °C 条件下几乎不萌发生长, 可以

为其菌种保藏工作提供借鉴。pH 对中华腐生牛肝菌菌丝生长影响显著, 其中性及碱性环境中均不能萌发生长, 但在酸性环境中菌丝生长速度较快且长势较好; 这与暗褐脉柄牛肝菌和兰茂牛肝菌等研究结果相似(詹晓坤 2020; 李凡等 2024), 表明牛肝菌科真菌可能更适合在酸性环境中培养。

碳源和氮源作为大型真菌中重要的生命元素和营养成分, 对真菌的生长和代谢有着显著影响(Tang *et al.* 2008)。研究表明, 中华腐生牛肝菌与暗褐脉柄牛肝菌、雅致栓孔菌、亚弯柄灵芝及褐色双孢蘑菇等在多种碳源中均能生长, 表明对碳源的适应性均比较广泛; 且在众多碳源中可将葡萄糖视为食药真菌菌丝培养的广谱性碳源(张春霞等 2009; 李苗苗等 2023; 李凡等 2024; 田润等 2024; 梁倩倩等 2025)。中华腐生牛肝菌最适氮源为酵母膏, 适宜无机氮源为氯化铵, 在尿素中不生长, 该结果与暗褐脉柄牛肝菌一致(李凡等 2024); 此外, 研究表明多数食药真菌在有机氮源环境中比无机氮源长势更佳(李苗苗等 2023; 田润等 2024), 而本研究发现无机铵类氮源可作为中华腐生牛肝菌的适宜氮源。由此表明, 不同真菌物种对碳氮源的需求存在差异, 在菌丝培养过程中需针对性地选择其最佳碳氮源种类。

无机盐是真菌生长过程中不可缺少的营养物质,具有促进真菌体内生物酶活性、调节渗透压及调节菌丝生长分化等功能(Chen *et al.* 2022)。本研究发现,硫酸亚铁能够显著促进中华腐生牛肝菌菌丝生长,可能是铁离子或亚铁离子促进了中华腐生牛肝菌体内的生物酶活性,或者是硫酸根离子水解呈酸性促进了菌丝生长。研究表明,硫酸亚铁还能促进亚高山绣球菌菌丝生长(葛彦宏等 2024);而其也会显著抑制亚弯柄灵芝菌丝生长(田润等 2024)。由此表明,不同真菌对硫酸亚铁的需求有所不同,可能在真菌生长发育过程中其发挥的功能作用各不相同,具体机理有待进一步研究。

显微观察结果表明,中华腐生牛肝菌显微结构与其他研究报道一致,其担子具有4个孢子小梗,且平板菌丝未观察到锁状联合(Xie *et al.* 2021; Nanu & Kumar 2022)。此外,中华腐生牛肝菌作为担子菌物种,其子实体发育过程较为复杂,本研究发现该物种原基发生方式较为特殊,与同为牛肝菌科的暗褐脉柄牛肝菌结实差异较大(李凡等 2024),其子实体发育划分阶段及内在机理有待深入研究。栽培过程中6种配方均能分化出原基,除配方6外其他配方均能发育成完整子实体;其中配方4仅需20 d即可长满出菇瓶,比目前报道的45 d更早(何明霞等 2021; 张春霞等 2021);整个栽培周期为35 d左右,平均每瓶产量为96.64 g,生物学转化效率为31.58%。

Yang *et al.* (2025)研究结果表明,中华腐生牛肝菌 BU001 菌丝培养最适碳源为麦芽糖,最适氮源为酒石酸铵,最适无机盐为硫酸镁,最适 pH 为 5.0–6.0; 正交试验最佳组合为葡萄糖、硝酸铵、磷酸二氢钾; 最适培养环境条件为 28 °C 暗培养。本研究对 JSJ-Bx1 菌株进行了系统生物学特性研究,结果表明试验菌株最适碳源为葡萄糖、最适氮源为酵母膏、最适无机盐为硫酸亚铁、最适生长因子为 1/2 MS, 最适 pH 为 4.0, 最适培养条件为 35 °C 暗培养; 单因素试验符合正交试验结果,且正交试验直观分析与方差分析结果一致。相比之下,本研究筛选并优化的培养基菌

丝生长速率更快、菌丝浓密、菌落边缘整齐且无色素产生。此外, BU001 菌株原基发生时间为 9–14 d, 而 JSJ-Bx1 菌株原基发生时间仅需 5–7 d; 从产量来看, BU001 菌株单袋产量为(131.07±29.38) g, 而 JSJ-Bx1 单瓶产量相对较低, 为(96.64±2.48) g; 这可能是不同菌株之间的生物学特性或不同栽培模式差异所造成的。

综合来看,本研究系统地探讨了中华腐生牛肝菌生物学特性并实现了人工栽培,初步探讨了其子实体发育过程,为完善中华腐生牛肝菌生物学特性,开发利用其野生资源及加快该物种工厂化栽培进程等提供了数据基础。

## 致谢

感谢海南师范大学生命科学学院曾念开老师对本论文的修改与帮助。

## 作者贡献

李凡: 试验操作、数据分析、论文撰写; 罗成才、曹瑶、马云蕊、李荣平: 试验操作; 罗祥英: 试验技术指导; 李荣春: 试验方案指导、论文修改。

## 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]

- Boa ER, 2004. Wild edible fungi: a global overview of their use and importance to people. *Non-woodforest Products*, 17: 1-147
- Chen J, Lan X, Jia R, Hu L, Wang Y, 2022. Response surface methodology (RSM) mediated optimization of medium components for mycelial growth and metabolites production of *Streptomyces alfalfae* XN-04. *Microorganisms*, 10(9): 1854
- 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(2): 151-156 (in Chinese)
- Dai YC, 2023. Research progress on polypore domesticated cultivation in China. *Journal of Fungal Research*, 21:

- 151-156 (in Chinese)
- 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(4): 770-805 (in Chinese)
- Dai YC, Zhou LW, Yang ZL, Wen HA, Bau T, Li TH, 2010. A revised checklist of edible fungi in China. *Mycosystema*, 29(1): 1-21 (in Chinese)
- Ge YH, He JQ, Han Z, Xu D, Liu HX, 2024. Biological characteristics and domestication cultivation of *Sparassis subalpina*. *Mycosystema*, 43(12): 156-173 (in Chinese)
- He MX, Liu J, Yang TW, Xu XJ, Gao F, Fang YW, Wang WB, Zhang CX, 2020. Studies on spawn preservation of *Phlebopus portentosus*. *Tropical Agricultural Science & Technology*, 43(3): 34-36 (in Chinese)
- He MX, Yang TW, Zhang CX, Xu XJ, Zeng NK, Liu J, Gao F, Fang YW, Wang WB, 2021. A *Buchwaldoboletus xylophilus* strain: CN202110631616.9. 2021-11-23 (in Chinese)
- 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)
- Huang NL, 1998. Primary color atlas of macrofungi in China. China Agriculture Press, Beijing. 1-293 (in Chinese)
- Jiang S, Fu YQ, Fu XH, Chen Y, Deng XH, Chen XM, Mi HX, 2024. Species diversity and resource evaluation of Boletales in Yinggeling area of National Park of Hainan Tropical Rainforest. *Journal of Tropical Crops*, 45(10): 2086-2096 (in Chinese)
- Li F, Cao Y, Jin ZS, Dong CH, Li RC, 2024. Research progress of biological characteristics and cultivation techniques of *Phlebopus portentosus*. *Journal of Fungal Research*, <https://doi.org/10.13341/j.jfr.2024.1781> (in Chinese)
- Li F, Cao Y, Yang AX, Luo XY, Lei HT, Meng GL, Dong CH, Li RC, 2025. Genetic diversity of *Phlebopus portentosus* germplasm resources. *Mycosystema*, 44(5): 4-17 (in Chinese)
- Li MM, Lin JT, Huang ZX, Liang YL, Huang FC, Liu B, 2023. Biological characteristics and domestication cultivation of *Trametes elegans*. *Mycosystema*, 42(7): 1506-1516 (in Chinese)
- Li WY, Gao L, Wu F, Dou ZP, 2023. Research progress of edible and medicinal mushroom domesticated and cultivated in China during the last 10 years. *Mycosystema*, 42(10): 2011-2024 (in Chinese)
- Liang QQ, Ding LQ, Tian LW, Wang YZ, Niu X, Shan HJ, 2025. Domestication and cultivation of a wild brown strain of *Agaricus bisporus* collected from Qilian mountains. *Mycosystema*, 44(1): 119-131 (in Chinese)
- Nanu S, Kumar TKA, 2022. *Buchwaldoboletus xylophilus*, a boletoid fungus new to India. *Mycology*, 7(1): 95-98
- Natarajan K, Purushothama KB, 1988. *Pulveroboletus parvulus* sp. nov. from South India. *Transactions of the British Mycological Society*, 90: 144-146
- Shen ZH, Cao Y, Li MJ, Yang LL, Luo XY, Li RC, 2024. Analyses of the *A* and *B* mating-type locus structure from *Naematelia aurantialba* based on genomic data. *Mycosystema*, 43(2): 19-40 (in Chinese)
- Shen ZH, Yang LL, Cao Y, Luo XY, Yang AX, Lu QQ, Zi LS, Li RC, 2025. Identification markers for *Naematelia sinensis* strains based on genome resequencing. *Mycosystema*, 44(4): 47-61 (in Chinese)
- Tang YJ, Zhu LL, Li DS, Mi ZY, Li HM, 2008. Significance of inoculation density and carbon source on the mycelial growth and *Tuber* polysaccharides production by submerged fermentation of Chinese truffle *Tuber sinense*. *Process Biochemistry*, 43(5): 576-586
- Tian R, Chen LF, Zhao RX, Zeng NK, 2024. Biological characteristics and cultivation of *Ganoderma subflexipes*. *Mycosystema*, 43(10): 48-65 (in Chinese)
- Wang YZ, Zhu XY, Deng GM, Deng CM, 2024. A culture method for *Buchwaldoboletus xylophilus*: CN202411252463.7. 2024-12-06 (in Chinese)
- Wei J, Gao W, Huang CY, 2021. A checklist of edible ectomycorrhizal mushrooms in China. *Mycosystema*, 40(8): 1938-1957 (in Chinese)
- 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
- Xie HJ, Zhang CX, He MX, Liang ZQ, Deng XH, Zeng NK, 2021. *Buchwaldoboletus xylophilus* and *Phlebopus portentosus*, two non-ectomycorrhizal boletes from tropical China. *Phytotaxa*, 520(2): 137-154
- Yang TW, Mu HJ, Dai LM, Liu J, Xu XJ, Gao F, Fang YW, Jian SP, He MX, Zhang CX, 2025. First report on the artificial cultivation techniques of *Buchwaldoboletus xylophilus* (Boletales, Boletaceae, *Buchwaldoboletus*) in southwest China. *Journal of Fungi*, 11(3): 172
- Yang TW, Zhang CX, He MX, Xu XJ, Gao F, Liu J, Fang YW, Wang WB, 2021. A *Buchwaldoboletus xylophilus* liquid culture medium and culture method: CN202110631618.8. 2021-09-07 (in Chinese)
- Yang ZG, Mao L, Yang TW, 2021. *Buchwaldoboletus xylophilus* realized artificial indoor cultivation. *Edible*

- and Medicinal Mushrooms, 29(5): 439 (in Chinese)
- Zhan XK, 2020. Study on the metabonomics of pure cultural *Lanmaoa asiatica* based on LC-MS method. MS Thesis, Yunnan University, Kunming. 1-117 (in Chinese)
- Zhang CX, He MX, Ji KP, Cao Y, Liu J, Wang WB, 2009. Study on selection of mother culture media of *Phlebopus portentosus*. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2009(6): 1699-1701 (in Chinese)
- Zhang CX, Yang TW, Xu XJ, He MX, Fang YW, Gao F, Liu J, Wang WB, 2021. A method for artificial cultivation of *Buchwaldoboletus xylophilus*: CN202110631620.5. 2021-09-07 (in Chinese)
- Zhou M, Ji XH, Liu HG, Miller K, Yuan Y, Vlasák J, 2023. Two new species of Hymenochaetaceae from tropical Asia and America. Frontiers in Cellular and Infection Microbiology, 12: 1100044
- Zhu AH, Ma HX, 2025. Diversity of edible and medicinal fungi from National Park of Hainan Tropical Rainforest, China. Mycosystema, 44(7): 250091 (in Chinese)
- [附中中文参考文献]**
- 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
- 戴玉成, 2023. 中国多孔菌驯化栽培研究进展. 菌物研究, 21: 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(4): 770-805
- 戴玉成, 周丽伟, 杨祝良, 文华安, 图力古尔, 李泰辉, 2010. 中国食用菌名录. 菌物学报, 29(1): 1-21
- 葛彦宏, 何建清, 韩振, 徐东, 刘海鑫, 2024. 亚高山绣球菌的生物学特性及驯化栽培. 菌物学报, 43(12): 156-173
- 何明霞, 刘静, 杨天伟, 徐欣景, 高锋, 方艺伟, 王文兵, 张春霞, 2020. 暗褐网柄牛肝菌菌种不同保藏方法的效果研究. 热带农业科技, 43(3): 34-36
- 何明霞, 杨天伟, 张春霞, 许欣景, 曾念开, 刘静, 高锋, 方艺伟, 王文兵, 2021. 一株中华腐生牛肝菌菌株: CN202110631616.9. 2021-11-23
- 侯娣, 杨瑞恒, 鲍大鹏, 2023. 我国食药真菌驯化栽培物种名录. 微生物学杂志, 43(6): 62-74
- 黄年来, 1998. 中国大型真菌原色图鉴. 北京: 中国农业出版社. 1-293
- 蒋帅, 符永清, 符新华, 陈运, 邓晓华, 陈徐敏, 米红旭, 2024. 海南热带雨林国家公园鹦哥岭片区牛肝菌目真菌物种多样性及资源评价. 热带作物学报, 45(10): 2086-2096
- 李凡, 曹瑶, 金卓诗, 董彩虹, 李荣春, 2024. 暗褐网柄牛肝菌生物学特性及栽培技术进展. 菌物研究, <https://doi.org/10.13341/j.jfr.2024.1781>
- 李凡, 曹瑶, 杨爱霞, 罗祥英, 雷洪涛, 孟国良, 董彩虹, 李荣春, 2025. 暗褐脉柄牛肝菌种质资源遗传多样性. 菌物学报, 44(5): 4-17
- 李苗苗, 林建添, 黄在兴, 梁云龙, 黄福常, 刘斌, 2023. 雅致栓孔菌生物学特性及驯化栽培. 菌物学报, 42(7): 1506-1516
- 李婉莹, 高磊, 吴芳, 豆志鹏, 2023. 中国蘑菇类食药真菌近十年驯化栽培研究进展. 菌物学报, 42(10): 2011-2024
- 梁倩倩, 丁玲强, 田丽雯, 王玉臻, 牛鑫, 单华佳, 2025. 祁连山褐色双孢蘑菇的驯化栽培. 菌物学报, 44(1): 119-131
- 沈真辉, 曹瑶, 李梦杰, 杨林雷, 罗祥英, 李荣春, 2024. 基于基因组数据解析金耳 *A* 和 *B* 交配型位点结构. 菌物学报, 43(2): 19-40
- 沈真辉, 杨林雷, 曹瑶, 罗祥英, 杨爱霞, 陆青青, 子灵山, 李荣春, 2025. 基于基因组重测序开发中华包革耳(金耳菌)菌株的鉴别标记. 菌物学报, 44(4): 47-61
- 田润, 陈丽芳, 赵润祥, 曾念开, 2024. 亚弯柄灵芝的生物学特性及其驯化栽培. 菌物学报, 43(10): 48-65
- 王元忠, 朱新焰, 邓光美, 邓传毛, 2024. 一种中华腐生牛肝菌菌种培养方法: CN202411252463.7. 2024-12-06
- 魏杰, 高巍, 黄晨阳, 2021. 中国菌根食用菌名录. 菌物学报, 40(8): 1938-1957
- 杨天伟, 张春霞, 何明霞, 徐欣景, 高锋, 刘静, 方艺伟, 王文兵, 2021. 一种中华腐生牛肝菌液体菌种培养基及培养方法: CN202110631618.8. 2021-09-07
- 杨质高, 毛丽, 杨天伟, 2021. 中华腐生牛肝菌实现人工室内栽培. 食药菌, 29(5): 439
- 詹晓坤, 2020. 基于 LC-MS 方法的纯培养兰茂牛肝菌代谢组学研究. 云南大学硕士论文, 昆明. 1-117
- 张春霞, 何明霞, 纪开萍, 曹旸, 刘静, 王文兵, 2009. 暗褐网柄牛肝菌母种培养基的筛选. 西南农业学报, 2009(6): 1699-1701
- 张春霞, 杨天伟, 许欣景, 何明霞, 方艺伟, 高锋, 刘静, 王文兵, 2021. 一种中华腐生牛肝菌人工栽培方法: CN202110631620.5. 2021-09-07
- 朱安红, 马海霞, 2025. 中国海南热带雨林国家公园食药真菌多样性. 菌物学报, 44(7): 250091