

桦褐孔菌的化学成分及抗过敏活性

李海燕¹, 张慧敏¹, 陈烜著¹, 吴峰², 陈维广², 郑永标^{1*}

1 福建师范大学生命科学学院, 福建 福州 350117

2 福州碧昂缇生物科技有限公司, 福建 福州 350108

摘要: 桦褐孔菌 *Inonotus obliquus* 是一种珍贵的食药两用真菌, 传统医学中常用于治疗糖尿病、高血脂、肝炎等疾病。为进一步开发桦褐孔菌的功效, 作者综合采用溶剂萃取和各种色谱技术(反相硅胶、正相硅胶及凝胶 LH-20 等), 从桦褐孔菌中分离得到 8 个化合物, 并根据核磁共振波谱数据, 将这些化合物分别鉴定为原儿茶酸(1)、丁香酸(2)、咖啡酸(3)、4-(3,4-二羟苯基)-3-丁烯-2-酮(4)、桦褐孔菌醇(5)、栓菌酸(6)、羊毛甾醇(7)和过氧麦角甾醇(8)。抗过敏活性实验显示, 桦褐孔菌醇(5)在 4.96、9.92 和 15.50 $\mu\text{mol/L}$ 浓度的脱颗粒率分别为 51.03%、30.53% 和 23.07%, 均能显著抑制肥大细胞脱颗粒, 具有明显的抗敏舒缓效果。此外, 桦褐孔菌醇(5)在 15.50 $\mu\text{mol/L}$ 浓度以下未表现出明显的细胞毒性, 有望用于开发新型抗敏药物。本文研究结果为桦褐孔菌功能性产品开发提供了重要参考。

关键词: 桦褐孔菌; 桦褐孔菌醇; 羊毛甾醇; 抗过敏活性

[引用本文]

李海燕, 张慧敏, 陈烜著, 吴峰, 陈维广, 郑永标, 2026. 桦褐孔菌的化学成分及抗过敏活性. 菌物学报, 45(1): 250204

Li HY, Zhang HM, Chen XZ, Wu F, Chen WG, Zheng YB, 2026. Chemical constituents and anti-allergic activities of *Inonotus obliquus*. Mycosystema, 45(1): 250204

资助项目: 福建省高校产学研合作计划(2024N5005)

This work was supported by the Fujian Provincial University-Industry Collaboration Program (2024N5005).

*Corresponding author. E-mail: yongbiaozheng@fjnu.edu.cn

ORCID: LI Haiyan (0009-0003-5846-4684); ZHENG Yongbiao (0000-0003-1557-7542)

Received: 2025-07-07; Accepted: 2025-09-10

Chemical constituents and anti-allergic activities of *Inonotus obliquus*

LI Haiyan¹, ZHANG Huimin¹, CHEN Xuanzhu¹, WU Feng², CHEN Weiguang², ZHENG Yongbiao^{1*}

¹ College of Life Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, Fujian, China

² Fuzhou Beyonte Biotechnology Co. Ltd., Fuzhou 350108, Fujian, China

Abstract: *Inonotus obliquus* is a medicinal and edible fungus traditionally used for treating diabetes, hyperlipidemia, hepatitis, and related disorders. In this study, by use of solvent extraction and chromatographic techniques (reversed-phase silica gel, normal-phase silica gel, and Sephadex LH-20), eight compounds were isolated from *I. obliquus*. Based on nuclear magnetic resonance spectroscopic data, these compounds were identified as gallic acid (1), syringic acid (2), caffeic acid (3), 4-(3,4-dihydroxyphenyl)-3-buten-2-one (4), inotodiol (5), cortinellin (6), lanosterol (7), and peroxide ergosterol (8). Anti-allergic activity assays demonstrated that inotodiol (5) significantly inhibited mast cell degranulation at concentrations of 4.96, 9.92, and 15.50 $\mu\text{mol/L}$, with inhibition rates of 51.03%, 30.53%, and 23.07%, respectively, indicating potent anti-allergic efficacy. Notably, inotodiol (5) exhibited unobserved cytotoxicity at concentrations up to 15.50 $\mu\text{mol/L}$, highlighting its potential as a candidate for novel anti-allergic drug development.

Keywords: *Inonotus obliquus*; inotodiol; lanosterol; anti-allergic activity

桦褐孔菌 *Inonotus obliquus* (Fr.) Pilát 俗称为白桦茸(姜李红等 2022; Ern *et al.* 2024), 属于真菌界 *Fungi*、担子菌门 Basidiomycota、蘑菇纲 Agaricomycetes、锈革孔菌目 Hymenochaetales、锈革孔菌科 Hymenochaetaceae、纤孔菌属 *Inonotus* 真菌(戴玉成和李玉 2011; Wu *et al.* 2022; 孙勇等 2023), 主要分布于亚洲、欧洲以及北美地区(Yang *et al.* 2021)。桦褐孔菌含多糖(Lu *et al.* 2021)、多酚(郝瑞林等 2023)、甾醇类化合物(Szychowski *et al.* 2021)、萜类化合物(Zou *et al.* 2020)、黑色素(Burmasova *et al.* 2019)等多种活性物质, 具有抗菌(Garádi *et al.* 2021)、抗炎(Kou *et al.* 2021)、抗癌(魏艳梅等 2020)、抗氧化(张博川 2020)、抗过敏(Tian *et al.* 2022)、降血脂(Ding *et al.* 2024)等多种药理作用, 已广泛用于治疗炎症、心血管疾病、糖尿病和癌症等(Szychowski *et al.* 2018; Anwaier *et al.* 2021)。如 Yang *et al.* (2021) 通过建立油酸诱导的 HepG2 (人肝癌细胞) 细胞模型和高脂肪饮食诱导的小鼠模型发现了桦褐

孔菌多糖在体内和体外均具有一定的降脂作用; Park *et al.* (2021) 从桦褐孔菌中分离出两种羊毛甾烷型三萜化合物(inotodiol 和 inonotsutriols A), 在 BV2 细胞中评估了它们对脂多糖诱导的 NO 产生的抑制活性, 结果显示, 在 30 $\mu\text{mol/L}$ 浓度下这两种化合物可以显著抑制 NO 的产生, 表现出一定的抗炎活性。Wang *et al.* (2021) 以 DPPH 和羟自由基清除率为指标, 评价了桦褐孔菌多酚的抗氧化活性, 结果表明其具有较强的铁离子还原抗氧化能力。Cui *et al.* (2005) 使用 HaCaT 细胞(人永生化角质形成细胞) 构建了过氧化氢诱导的氧化应激模型, 发现桦褐孔菌多酚类提取物可以有效防护过氧化氢所诱导的氧化损伤; Niu *et al.* (2016) 从桦褐孔菌碱提取物中分离得到了 3 种木质素复合物, 在体外均表现出显著的还原能力, 对 DPPH 和羟基自由基也具有较强的清除活性, 这些研究都表明, 桦褐孔菌多酚具有开发天然抗氧化剂的潜力。桦褐孔菌提取物能有效降低 2 型糖尿病小鼠模型的血糖

水平,改善脂质代谢紊乱与氧化应激水平(马传贵等 2022)。刘超楠和周晓霜(2024)通过建立小鼠糖尿病肾病模型发现,桦褐孔菌黄酮可以改善糖尿病肾病小鼠的免疫功能。乔羽等(2023)通过动物模型及细胞学实验发现,桦褐孔菌醇提取物对胃癌模型呈现出显著的抑制效果。Wold *et al.* (2020)从桦褐孔菌菌核中获得的水溶性黑色素可以抑制脂多糖和干扰素 γ 诱导的 C57BL/6 原代巨噬细胞中 NO 产生,同时在人补体实验中也表现出了一定的活性,这表明桦褐孔菌黑色素具有抗炎和免疫调节作用。由此可见,桦褐孔菌的活性成分具有广阔的应用前景。

本文采用溶剂萃取和多种色谱技术对桦褐孔菌主要的小分子化学成分进行系统分离和鉴定,为桦褐孔菌的功能性产品研发提供化学物质基础,并开展相关的生物活性测试。

1 材料与amp;方法

1.1 供试材料

1.1.1 材料

桦褐孔菌菌核由福州碧昂缇生物科技有限公司提供。

1.1.2 主要试剂

氘代甲醇、氘代 DMSO (二甲基亚砜)、氘代氯仿、氘代水(青岛腾龙微波科技有限公司)、核磁管(Norell ST500-7)、高糖 DMEM 培养液(VivaCell)、胎牛血清(Gibco)、PBS (VivaCell)、CCK-8 (碧云天)、胰蛋白酶(Gibco)。

1.1.3 仪器和设备

核磁共振(JNM-ECZ600R/S1)、中压制备色谱(QuikSepP0050D-II)、高效液相色谱仪(Thermo UltiMate 3000)、超净工作台(ZHJH-C1112B)、离心浓缩仪(Centri Vap, Labconco 公司)、旋转蒸发仪(Buchi)、高压灭菌锅(Autoclave G154DW)、自动收集器(BS-100N, 上海沪西)、电子天平(BSA224S, Sartorius)、生化培养箱(SHP-150, 精宏实验设备有限公司)、恒温摇床(ZEIWY-2112B, 青岛腾龙)、纯水仪(RODI-220A1, 厦门锐思捷纯化技术公司)、CO₂ 培养箱(160i, Thermo)、生物安全柜(BSC-1604IIA2, 苏净安泰)、倒置显

微镜(DMi8, 徕卡)、酶标仪(Tecan, Spark)。耗材包括:反相柱层析硅胶 RP C-18(青岛海洋化工有限公司)、正相柱层析硅胶(200-300 目, 青岛海洋化工有限公司)、凝胶柱层析 Sephadex LH-20 (GE Life Science 生物制药有限公司)、薄层层析硅胶板(HSGF254, 烟台江友硅胶开发有限公司)。

1.2 方法

1.2.1 粗提物的制备

将 200 g 桦褐孔菌菌核粉末用 1 L 甲醇超声辅助提取 30 min, 静置过夜后, 使用旋转蒸发仪浓缩至膏状, 得到 7.50 g 甲醇提取物。然后加入等量的纯水和乙酸乙酯萃取 3 次, 有机相用无水硫酸钠脱水过滤后, 浓缩至膏状, 得到 4.90 g 桦褐孔菌粗提物。

1.2.2 桦褐孔菌化学成分的分离及纯化

将 4.90 g 粗提物通过反相硅胶柱层析(RP-18, 170g)分离, 使用不同浓度的甲醇水(0、30%、50%、70%和 100%)作为洗脱剂进行梯度洗脱, 每个梯度洗脱 1.5 L, 根据 TLC 分析结果, 将相似组分合并。以纯水为洗脱剂, 获得组分 Fr.1 (100.3 mg)和 Fr.2 (27.0 mg); 以 30%甲醇为洗脱剂, 获得组分 Fr.3 (385.6 mg)和 Fr.4 (346.4 mg); 以 50%甲醇为洗脱剂, 获得组分 Fr.5 (1 002.9 mg); 以 70%甲醇为洗脱剂, 获得组分 Fr.6 (770.6 mg); 以 100%甲醇为洗脱剂, 获得组分 Fr.7 (1 716.3 mg)和 Fr.8 (250.5mg)。

组分 Fr.2 (27.0 mg)通过液相制备柱(HYPRRGLD, 250 mm × 10 mm, 5 μ m)进行分离纯化, 流动相为 10%甲醇, 流速 5.0 mL/min, 进样量 100 μ L, 温度 25 $^{\circ}$ C, 检测波长 220、254、280 和 365 nm, 收集保留时间为 20 min 的洗脱峰, 获得化合物 1 (7.5 mg)。组分 Fr.3 (385.6 mg)采用 Sephadex LH-20 凝胶层析作进一步纯化, 分离得到 6 个亚组分(Fr.3.1-Fr.3.6), 将 Fr.3.3 进行正相硅胶柱层析, 然后进行 HPLC 制备(甲醇-水 20:80, 5.0 mL/min, t_R =14.5 min), 获得化合物 2 (3.9 mg)。将 Fr.3.5 进行正相硅胶柱层析, 以不同比例的氯仿-甲醇为洗脱液, 当氯仿:甲醇为 200:1 时, 洗脱得到化合物 3 (2.5 mg)。组分

Fr.4 (346.4 mg)使用 Sephadex LH-20 凝胶层析进行分离纯化,得到 8 个亚组分(Fr.4.1–Fr.4.8),将 Fr.4.6 使用反相硅胶柱层析进行分离,以不同浓度的甲醇水为洗脱剂,当以 30%甲醇为洗脱剂时,获得组分 Fr.4.6.3 (37.3 mg),然后继续使用正相硅胶柱层析,当氯仿:甲醇为 100:1 时,洗脱得到化合物 **4** (5.0 mg)。组分 Fr.7 (1 716.3 mg)与 Fr.8 (250.5 mg)合并为 Fr.9 (1 966.8 mg),经反相硅胶柱层析(甲醇-水,体积比, 70:30、85:15、100:1),得到了 6 个亚组分(Fr.9.1–Fr.9.4)。将 Fr.9.3 与 Fr.9.4 合并为 Fr.9.7, Fr.9.7 继续使用 Sephadex LH-20 凝胶层析,得到了 Fr.9.7.2,然后进行 HPLC 制备,当甲醇:水=90:10,流速为 5.0 mL/min, $t_R=16.0$ min, 获得了化合物 **5** (14.2 mg);当甲醇:水=95:5,流速为 5.0 mL/min, $t_R=23.0$ min, 获得了化合物 **6** (5.3 mg)。组分 Fr.9.5 继续进行正相硅胶柱层析,当石油醚:乙酸乙酯=500:1 获得 Fr.9.5.1、石油醚:乙酸乙酯=15:1 获得 Fr.9.5.2, Fr.9.5.1 进行 HPLC 制备(甲醇-水 100:0, 5.0 mL/min, $t_R=6.5$ min)获得化合物 **7** (4.2 mg), Fr.9.5.2 进行 HPLC 制备(甲醇-水 100:0, 5.0 mL/min, $t_R=5.0$ min)获得化合物 **8** (3.4 mg)。

1.2.3 核磁共振检测

将分离所得的化合物选择合适的氘代试剂充分溶解之后,进行 $^1\text{H-NMR}$ 和 $^{13}\text{C-NMR}$ 波谱检测分析。

1.2.4 抗过敏活性

化合物 **5** 是桦褐孔菌特有的、含量较为丰富的化合物之一,因此选用其进行抗过敏活性实验,本文抗过敏活性实验采用 Hawk *et al.* (1980)的方法并稍作修改,先以 CCK-8 法来检测细胞毒性,通过细胞存活率检测化合物对小鼠肥大细胞瘤细胞(P815)的毒性。采用 C48/80 刺激肥大细胞建立脱颗粒模型,通过细胞形态学观察和脱颗粒率来评价化合物的舒缓功效。

细胞毒性实验:将 P815 细胞接种至 96 孔板,过夜培养(37 °C、5% CO₂),实验设样品组、对照组、阳性对照组、调零组(吸光值校正)。样品组设置 8 个浓度梯度,初始浓度为 1.24 mmol/L,

使用 PBS 依次稀释为 124.00、62.00、31.00、15.50、7.75、3.88、1.94、0.97 μmol/L。待细胞铺板率达到 40%–60%时,样品组加入 200 μL 含有相应浓度样品的培养液;对照组加入 200 μL 10%的 PBS;阳性对照组加入 200 μL 10%的 DMSO;调零组无细胞仅加入 200 μL 细胞培养液,然后培养 2 h (37 °C、5% CO₂),弃去上清,加入 CCK-8 工作液,避光培养 2 h (37 °C),最后在 450 nm 处测量 OD 值,细胞相对活力依据公式(1)计算。

P815 细胞脱颗粒实验:将 P815 细胞接种至 24 孔板,过夜培养(37 °C、5% CO₂),实验设空白对照组(BC)、阴性对照组(NC)、阳性对照组(PC)和样品组,其中样品组设 3 个浓度:15.50、9.92 和 4.96 μmol/L,每组设有 3 个重复。待细胞铺板率达到 40%–50%时,空白组加入 1 mL 无血清高糖 DMEM 培养液;阴性对照组加入 1 mL 含 C48/80 (100 μg/mL)的无血清高糖 DMEM 培养液;阳性对照组添加 1 mL 含有 C48/80 和色甘酸钠(1 mg/mL)的无血清高糖 DMEM 培养液;样品组加入 1 mL 含 C48/80 和相应样品给药浓度的无血清高糖 DMEM 培养液。培养 2 h (37 °C、5% CO₂),弃液。再加入 C48/80 刺激 45 min,用冰浴终止反应,然后在显微镜下观察各组细胞的脱颗粒情况,并拍照记录,脱颗粒率依据公式(2)计算。

$$\text{细胞相对活力} = \frac{OD_{\text{样品孔}} - OD_{\text{调零孔}}}{OD_{\text{溶剂对照孔}} - OD_{\text{调零孔}}} \quad (1)$$

$$\text{脱颗粒率(100\%)} = \frac{\text{脱颗粒细胞总数}}{\text{脱颗粒细胞总数} + \text{未脱颗粒细胞总数}} \times 100\% \quad (2)$$

2 结果与分析

2.1 化合物的结构解析

化合物 **1** (7.5 mg),白色粉末状,易溶于水。 $^1\text{H NMR}$ (600 MHz, D₂O): δ_{H} 7.45 (1H, d, $J=9.7$ Hz, H-2), 7.44 (1H, s, H-6), 6.90 (1H, d, $J=8.1$ Hz, H-5); $^{13}\text{C NMR}$ (151 MHz, D₂O): δ_{C} 122.08 (C-1), 117.19 (C-2), 143.67 (C-3), 149.44 (C-4), 115.59 (C-5), 123.72 (C-6), 170.60 (C-7)。根据 $^1\text{H NMR}$ 和 $^{13}\text{C NMR}$ 数据,化合物 **1** 被鉴

定为原儿茶酸(图 1) (Lv *et al.* 2014)。膳食补充原儿茶酸可以抑制肠道粪肠球菌 *Enterococcus faecalis* 介导的肉碱棕榈酰转移酶-1 α (CPT1 α)和成纤维细胞生长因子 1 (Fgf1)表达下调, 对预防代谢相关脂肪性肝病具有一定的作用(Tan *et al.* 2023)。此外, 在抗皱或抗皮肤衰老治疗中也显示出潜力(Shin *et al.* 2020)。

化合物 2 (3.9 mg), 白色粉末状, 可溶于甲醇。¹H NMR (600 MHz, CD₃OD): δ_{H} 7.33 (2H, s, H-2, H-6), 3.89 (6H, s, 3, 5-OCH₃); ¹³C NMR (151 MHz, CD₃OD): δ_{C} 121.84 (C-1), 108.31 (C-2, C-6), 148.82 (C-3, C-5), 141.54 (C-4), 170.46 (C-7), 56.76 (3, 5-OCH₃)。根据 ¹H NMR 和 ¹³C NMR 数据, 化合物 2 被鉴定为丁香酸(图 1) (Phadungkit & Luanratana 2006)。丁香酸可通过弱化 DEP-1/PTP1B/ $\alpha_{\text{IIb}}\beta_3$ 激酶通路, 抑制纤维蛋白凝块形成、凝血因子活化和血小板刺激, 从而减轻血栓形成及血栓栓塞的发展(Choi & Kim 2018)。

化合物 3 (2.5 mg), 黄色粉末状, 可溶于甲醇。¹H NMR (600 MHz, CD₃OD): δ_{H} 7.53 (1H, d, $J=15.8$ Hz, H-7), 7.03 (1H, d, $J=2.1$ Hz, H-5), 6.93 (1H, dd, $J=8.2, 2.1$ Hz, H-6), 6.78 (1H, d, $J=8.1$ Hz, H-2), 6.22 (1H, d, $J=15.8$ Hz, H-8); ¹³C NMR (151 MHz, CD₃OD): δ_{C} 127.82 (C-1), 115.58

(C-2), 146.83 (C-3), 149.47 (C-4), 115.09 (C-5), 122.83 (C-6), 147.01 (C-7), 116.49 (C-8), 171.03 (-COOH)。根据 ¹H NMR 和 ¹³C NMR 数据, 化合物 3 被鉴定为咖啡酸(图 1) (Zhou *et al.* 2007)。咖啡酸可通过抑制 PI3K/Akt 通路、MAPK 通路和 NF- κ B 信号传导, 进而抑制血管内皮生长因子 (VEGF), 显示抑制癌细胞生长的作用 (Pavliková 2023)。

化合物 4 (5.0 mg), 黄色粉末状, 溶于甲醇。¹H NMR (600 MHz, CD₃OD): δ_{H} 7.47 (1H, d, $J=16.2$ Hz, H-7), 7.05–7.03 (2H, m, H-2), 6.95 (1H, ddd, $J=8.1, 2.1, 0.5$ Hz, H-6), 6.75 (1H, d, $J=8.2$ Hz, H-5), 6.51 (1H, d, $J=16.2$ Hz, H-8), 2.29 (3H, s, H₃-10); ¹³C NMR (151 MHz, CD₃OD): δ_{C} 127.75 (C-1), 115.33 (C-2), 146.89 (C-3), 149.96 (C-4), 116.57 (C-5), 123.52 (C-6), 146.83 (C-7), 124.72 (C-8), 201.62 (C-9), 26.99 (C-10)。根据 ¹H NMR 和 ¹³C NMR 数据, 化合物 4 被鉴定为 4-(3,4-二羟苯基)-3-丁烯-2-酮(图 1) (Ohmura *et al.* 1989)。4-(3,4-二羟苯基)-3-丁烯-2-酮可通过抑制脂质过氧化和激活自由基清除酶来对抗 NAP 诱导的胃窦溃疡(Kim *et al.* 2016)。

化合物 5 (14.2 mg), 白色粉末状, 溶于氯仿。¹H NMR (600 MHz, CDCl₃): δ_{H} 5.18 (1H, d, $J=7.3$ Hz, H-24), 3.66 (1H, dd, $J=8.4, 4.2$ Hz,

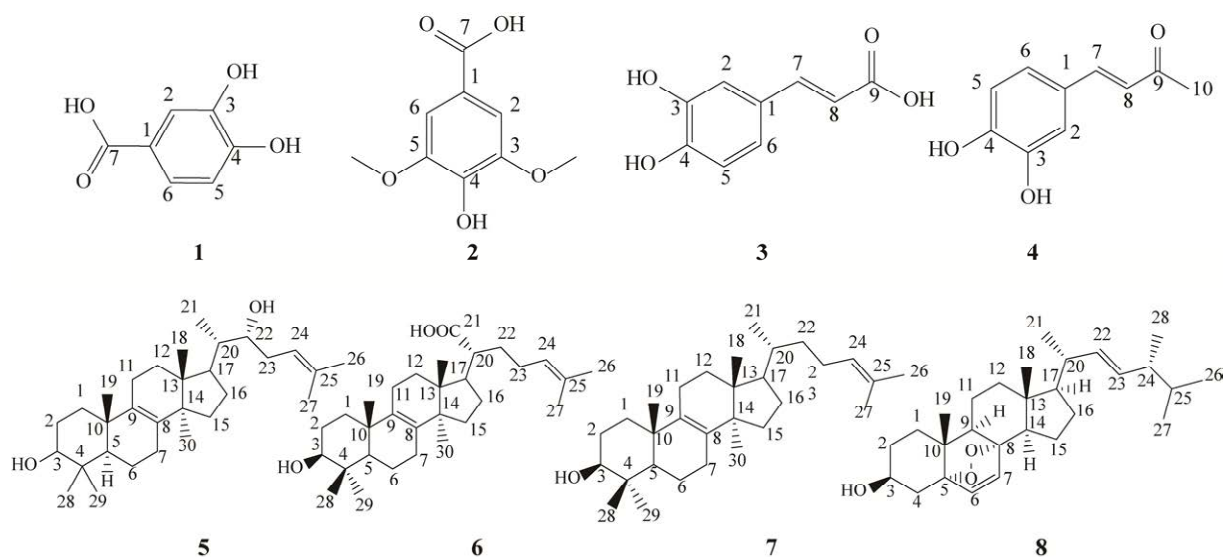


图 1 化合物 1-8 结构图

Fig. 1 The structures of compounds 1-8.

H-22), 3.23 (1H, dd, $J=11.7, 4.4$ Hz, H-3), 2.05 (1H, s, H-23), 2.02 (1H, s, H-7), 1.81 (1H, s, H-11), 1.78 (1H, d, $J=9.4$ Hz, H-16), 1.74 (3H, s, H₃-27), 1.72 (1H, s, H-2), 1.69 (1H, d, $J=2.6$ Hz, H-1), 1.65 (3H, s, H₃-26), 1.62 (1H, d, $J=7.6$ Hz, H-12), 1.58–1.55 (1H, m, H-6), 1.45–1.38 (1H, m, H-15), 1.20 (1H, d, $J=8.3$ Hz, H-20), 1.06 (1H, s, H-17), 1.03 (1H, s, H-5), 0.99 (3H, s, H₃-29), 0.97 (3H, s, H₃-19), 0.94 (3H, d, $J=6.7$ Hz, H₃-21), 0.87 (3H, s, H₃-30), 0.80 (3H, s, H-18), 0.72 (3H, s, H₃-28); ¹³C NMR (151 MHz, CDCl₃): δ_c 35.68 (C-1), 28.08 (C-2), 79.09 (C-3), 39.01 (C-4), 50.48 (C-5), 19.26 (C-6), 29.19 (C-7), 134.67 (C-8), 134.30 (C-9), 37.13 (C-10), 21.11 (C-11), 26.62 (C-12), 44.96 (C-13), 49.51 (C-14), 31.07 (C-15), 31.05 (C-16), 47.36 (C-17), 15.80 (C-18), 18.35 (C-19), 41.76 (C-20), 12.74 (C-21), 73.47 (C-22), 27.35 (C-23), 121.47 (C-24), 135.36 (C-25), 26.14 (C-26), 17.91 (C-27), 27.94 (C-28), 15.55 (C-29), 24.43 (C-30)。根据 ¹H NMR 和 ¹³C NMR 数据, 化合物 5 被鉴定为桦褐孔菌醇(图 1) (Yan *et al.* 2014)。桦褐孔菌醇在 25–100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 浓度范围内, 可以使 Ki-67 抗原表达下调, 并呈浓度依赖效应, 表明桦褐孔菌醇具有抗人卵巢癌 SKOV3 细胞增殖和诱导细胞凋亡的作用(白杨等 2013); 桦褐孔菌醇还能显著抑制二甲苯诱导的小鼠耳肿胀, 并可显著降低血管通透性, 具有良好的抗炎活性, 它还可以防止基因突变, 从基因水平上预防肿瘤的发生(赵卓卓等 2018)。此外, 桦褐孔菌醇提取物还具有抗氧化和降血脂功能(梁丽雅等 2012)。

化合物 6 (5.3 mg), 白色粉末状, 溶于氯仿。¹H NMR (600 MHz, DMSO): δ_H 5.07 (1H, d, $J=7.3$ Hz, H-24), 4.02 (1H, d, $J=7.2$ Hz, H-3), 2.99 (1H, d, $J=6.5$ Hz, H-3a), 2.07 (1H, d, $J=3.6$ Hz, H-20), 1.91 (1H, s, H-7), 1.88 (1H, s, H-11), 1.85 (1H, s, H-24), 1.84 (1H, s, H-16), 1.63 (3H, s, H₃-27), 1.56 (1H, s, H-6), 1.54 (1H, s, H-22), 1.53 (3H, s, H₃-26), 1.48 (1H, s, H-17), 1.45 (1H, s, H-2), 1.40 (1H, s, H-1), 1.38 (1H, s, H-12), 1.28 (1H, s, H-15), 1.23 (1H, s, H-5), 1.17 (3H, s,

H₃-29), 0.90 (3H, s, H₃-30), 0.82 (3H, s, H₃-28), 0.69 (3H, s, H₃-18), 0.68 (3H, s, H₃-19); ¹³C NMR (151 MHz, DMSO): δ_c 35.25 (C-1), 28.40 (C-2), 76.79 (C-3), 43.82 (C-4), 50.07 (C-5), 19.00 (C-6), 28.14 (C-7), 134.31 (C-8), 133.42 (C-9), 36.60 (C-10), 20.79 (C-11), 25.98 (C-12), 46.61 (C-13), 49.01 (C-14), 32.31 (C-15), 30.05 (C-16), 48.63 (C-17), 15.86 (C-18), 17.89 (C-19), 47.66 (C-20), 177.18 (C-21), 26.50 (C-22), 25.61 (C-23), 123.95 (C-24), 131.12 (C-25), 25.50 (C-26), 17.48 (C-27), 15.66 (C-28), 27.60 (C-29), 24.09 (C-30)。根据 ¹H NMR 和 ¹³C NMR 数据, 化合物 6 被鉴定为栓菌酸(图 1) (Zhao *et al.* 2016)。栓菌酸可通过激活 Nrf2/HO-1 通路增强抗氧化能力, 同时抑制 NF- κ B 通路减少炎症因子释放, 从而改善肾功能和肾纤维化(Duan *et al.* 2022)。

化合物 7 (4.2 mg), 白色粉末, 溶于氯仿。¹H NMR (600 MHz, CDCl₃): δ_H 5.10 (1H, d, $J=7.2$ Hz, H-24), 3.23 (1H, dd, $J=11.5, 4.5$ Hz, H-3), 2.03 (1H, s, H-7), 2.01 (1H, s, H-11), 2.00 (1H, s, H-23), 1.92 (1H, s, H-16), 1.85 (1H, s, H-2), 1.68 (3H, s, H₃-26), 1.60 (3H, s, H₃-27), 1.58 (1H, s, H-1), 1.56 (1H, s, H-12), 1.52 (1H, s, H-6), 1.50 (1H, s, H-22), 1.49 (1H, s, H-15), 1.30 (1H, s, H-20), 1.17 (1H, s, H-17), 1.06 (1H, s, H-5), 1.00 (1H, s, H₃-28), 0.98 (3H, s, H₃-19), 0.91 (3H, d, $J=6.3$ Hz, H₃-21), 0.87 (3H, s, H₃-30), 0.81 (3H, s, H₃-29), 0.69 (3H, s, H₃-18); ¹³C NMR (151 MHz, CDCl₃): δ_c 35.71 (C-1), 26.63 (C-2), 79.14 (C-3), 39.02 (C-4), 50.52 (C-5), 18.77 (C-6), 27.98 (C-7), 134.52 (C-8), 134.54 (C-9), 37.15 (C-10), 21.13 (C-11), 28.34 (C-12), 44.60 (C-13), 49.94 (C-14), 31.11 (C-15), 30.98 (C-16), 53.58 (C-17), 15.88 (C-18), 19.28 (C-19), 36.40 (C-20), 18.38 (C-21), 36.49 (C-22), 25.05 (C-23), 125.39 (C-24), 131.09 (C-25), 25.88 (C-26), 17.78 (C-27), 28.09 (C-28), 15.56 (C-29), 24.39 (C-30)。根据 ¹H NMR 和 ¹³C NMR 数据, 化合物 7 被鉴定为羊毛甾醇(图 1) (Leong & Harrison 1999)。羊毛甾醇可通过诱导线粒体解偶联, 减少活性氧生成, 保护多巴胺能神经元免受氧化损伤, 在构建的帕金森病小鼠模

型中表现出了一定的神经保护作用(Lim *et al.* 2012)。

化合物 **8** (3.4 mg), 白色粉末, 溶于氯仿。¹H NMR (600 MHz, CDCl₃): δ_H 6.50 (1H, d, *J*=8.3 Hz, H-7), 6.24 (1H, d, *J*=8.5 Hz, H-6), 5.22 (1H, dd, *J*=15.4, 7.6 Hz, H-23), 5.14 (1H, dd, *J*=15.5, 8.1 Hz, H-22), 3.97 (1H, dt, *J*=11.5, 7.3 Hz, H-3), 2.11 (1H, dd, *J*=13.9, 4.9 Hz, H-20), 2.01 (1H, d, *J*=7.8 Hz, H-24), 1.95 (1H, d, *J*=5.4 Hz, H-15), 1.90 (1H, d, *J*=13.3 Hz, H-16), 1.85 (1H, d, *J*=7.0 Hz, H-4), 1.70 (1H, s, H-2), 1.68 (1H, s, H-25), 1.59 (1H, s, H-11), 1.55 (1H, s, H-12), 1.50 (1H, s, H-1), 1.24 (1H, s, H-17), 1.22 (2H, s, H-9, H-14), 1.00 (3H, d, *J*=6.0 Hz, H₃-21), 0.92–0.89 (3H, m, H₃-28), 0.88 (3H, s, H₃-19), 0.83(3H, s, H₃-26), 0.82 (3H, s, H₃-18), 0.81 (3H, s, H₃-27); ¹³C NMR (151 MHz, CDCl₃): δ_C 34.82 (C-1), 30.25 (C-2), 66.62 (C-3), 37.09 (C-4), 82.30 (C-5), 135.56 (C-6), 130.89 (C-7), 79.57 (C-8), 51.20 (C-9), 37.06 (C-10), 23.53 (C-11), 39.47 (C-12), 44.69 (C-13), 51.81 (C-14), 20.76 (C-15), 28.79 (C-16), 56.32 (C-17), 13.00 (C-18), 18.31 (C-19), 39.88 (C-20), 21.01 (C-21), 135.35 (C-22), 132.45 (C-23), 42.90 (C-24), 33.20 (C-25), 19.78 (C-26), 20.09 (C-27), 17.69 (C-28)。根据 ¹H NMR 和 ¹³C NMR 数据, 化合物 **8** 被鉴定为过氧麦角甾醇(图 1)(姜李红等 2022)。过氧麦角甾醇具有促进肿瘤细胞凋亡、抗氧化、抗动脉粥样硬化等广泛药理作用(黄花芳 2020)。

2.2 抗过敏性

细胞毒性实验是通过细胞的存活率来评价化合物 **5** 对 P815 细胞的毒害作用, 结果显示, 对照组细胞活率为(100±3.05)%; 阳性对照组细胞活率为(20.30±5.59)%; 样品组在 124.00、62.00、31.00、15.50、7.75、3.88、1.94、0.97 μmol/L 浓度下的细胞活率分别为(17.33±0.93)%、(45.94±2.64)%、(69.22±1.93)%、(95.86±1.76)%、(103.75±0.30)%、(102.43±0.90)%、(108.38±4.87)%、(124.62±1.52)%。实验结果表明样品在 15.50 μmol/L 浓度范围内未表现出 P815 细胞毒性, 在该浓度内设置 3 个浓度梯度, 进行下一步肥大细胞脱颗粒

实验。

细胞脱颗粒实验是以 C48/80 为刺激剂, 刺激肥大细胞从而建立脱颗粒模型, 以可以稳定肥大细胞膜抑制脱颗粒的色甘酸钠为阳性对照, 脱颗粒率与抗过敏活性成反比。空白对照组(BC)细胞形态完整, 胞质内颗粒密集且分布均匀, 几乎无颗粒释放现象, 脱颗粒率均值为(0.63±0.26)%; 阴性对照组(NC)细胞肿胀破裂, 边界模糊, 胞质内颗粒减少或出现空泡, 细胞周边可见有大量颗粒物质, 脱颗粒率为(79.08±2.85)%; 与 BC 组相比脱颗粒率显著提高(*P*<0.01)(图 2, 图 3), 说明本实验脱颗粒模型建立成功; 阳性对照组(PC)细胞形态接近空白对照组, 细胞膜边界清晰, 胞质内颗粒完整, 几乎无颗粒向外释放, 脱颗粒率为(2.79±0.43)%; 显著低于阴性对照组(*P*<0.01), 表明阳性对照检测有效。当样品浓度为 4.96 μmol/L 时, 部分细胞出现肿胀破裂, 颗粒物质释放, 脱颗粒率为(51.03±3.54)%; 浓度为 9.92 μmol/L 时, 多数细胞形态完整, 少数细胞周围可见颗粒物质释放, 脱颗粒率为(30.53±1.16)%; 浓度为 15.50 μmol/L 时, 多数细胞形态完整, 胞质内颗粒清晰可见,

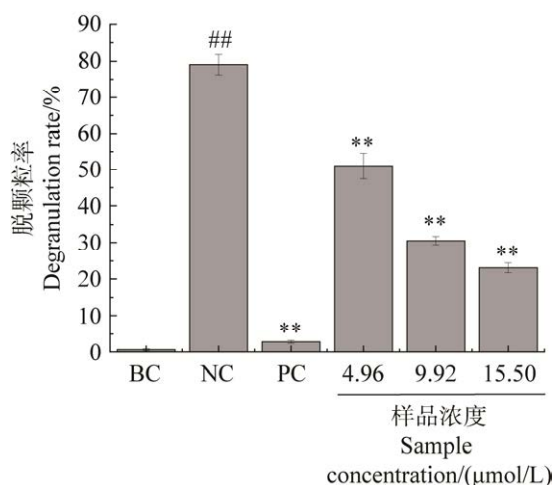


图 2 肥大细胞脱颗粒率柱状图 BC: 空白对照; NC: 阴性对照; PC: 阳性对照; NC 组与 BC 组相比, #表示 *P*<0.05, ##表示 *P*<0.01; 样品组、PC 组与 NC 组相比, *表示 *P*<0.05, **表示 *P*<0.01

Fig. 2 Bar chart of mast cell degranulation rate. BC: Black control; NC: Negative control; PC: Positive control. For the comparison between the NC group and the BC group, # indicates *P*<0.05 and ## indicates *P*<0.01. For the comparisons between the sample groups, PC group and the NC group, * indicates *P*<0.05 and ** indicates *P*<0.01.



图 3 肥大细胞脱颗粒形态 A: 空白组; B: 阴性对照组; C: 阳性对照组; D: 4.96 $\mu\text{mol/L}$; E: 9.92 $\mu\text{mol/L}$; F: 15.50 $\mu\text{mol/L}$

Fig. 3 Morphology of mast cell degranulation. A: Blank group; B: Negative control group; C: Positive control group; D: 4.96 $\mu\text{mol/L}$; E: 9.92 $\mu\text{mol/L}$; F: 15.50 $\mu\text{mol/L}$.

脱颗粒率为 $(23.07 \pm 1.40)\%$ 。结果表明, 桦褐孔菌醇(5)在 4.96、9.92 和 15.50 $\mu\text{mol/L}$ 浓度下, 均能显著抑制肥大细胞脱颗粒($P < 0.01$), 且呈现明显的剂量-效应关系。

3 讨论

本文从桦褐孔菌菌核分离得到 8 个化合物。其中 3 个为酚酸类化合物: 原儿茶酸(1)、丁香

酸(2)、咖啡酸(3)。这些化合物是中药中常见的次生代谢产物,广泛分布于植物界中,许多酚酸及其衍生物已被用于药物研发,如阿司匹林通过不可逆抑制环氧化酶的活性,减少炎性介质和血管活性物质的产生(王学蕾 2025)。1个为多酚类化合物:4-(3,4-二羟苯基)-3-丁烯-2-酮(4),该化合物对人肺癌细胞系 H526、人前列腺癌细胞系 DU145 和白血病细胞系 HEL 具有明显抑制效果,且对正常仓鼠细胞无明显毒性(丁云云等 2016),具有抗癌药物的研发潜力。3个为三萜类化合物:桦褐孔菌醇(5)、栓菌酸(6)、羊毛甾醇(7),对各种癌细胞都具有一定的抑制作用(Kim *et al.* 2020),对 d-半乳糖胺诱导的 WB-F344 细胞损伤有保肝作用(Liu *et al.* 2014),其衍生物还具有抗肿瘤、抗炎、免疫调节及脏器保护等多种药理活性(Taji *et al.* 2008; 邓丽颖等 2018)。1个为甾醇类化合物:过氧麦角甾醇(8),桦褐孔菌甾醇以羊毛甾烷型三萜类化合物为主,具有抗肿瘤、抗氧化、抗炎活性等活性(向超 2012; 赵芬琴等 2012; 鞠春梅 2022)。

过敏是人体接触过敏原后引起的一系列超敏反应(潘金晓等 2024)。当机体首次接触过敏原时,会产生 IgE,它会与肥大细胞表面的高亲和力受体(FcεRI)结合,使机体致敏。再次接触相同过敏原时,过敏原会与肥大细胞表面的 IgE 特异性结合,释放一系列过敏介质至细胞外。随后,肥大细胞会产生血小板活化因子(PAF)和细胞因子,维持过敏反应。因此,常见的抗过敏策略是抑制肥大细胞活化(傅斯琪等 2025)。本研究的抗过敏活性实验显示,桦褐孔菌醇(5)在 15.50 μmol/L 浓度内无明显细胞毒性,且能显著抑制肥大细胞脱颗粒,具有一定的抗敏舒缓效果。抗过敏活性可以抑制免疫细胞异常活化,调节 Th1/Th2 免疫失衡,阻断炎症信号通路,缓解过敏性疾病引发的组织损伤与功能障碍。一些天然化合物具有抗过敏作用,如黄连多糖可缓解 IgE 介导的过敏症状,减少炎症标志物,恢复肠道微生物群的丰富性和多样性(Yin *et al.* 2025); 槲皮素可通过稳定肥大细胞的细胞膜,抑制组胺及其他过敏介质的产生(Mlcek *et al.* 2016); 人参

皂苷对免疫调节有显著影响,也具有一定的抗过敏作用(Liu *et al.* 2018)。桦褐孔菌醇作为天然来源的三萜类化合物,具有低毒性、多靶点等优势,有望开发为新型抗敏药物。本文研究进一步揭示了桦褐孔菌的药用价值,其活性成分在医疗、生物防治、食品、保健等领域具有较大的开发潜力。

作者贡献

李海燕: 论文构思与撰写、实验数据整理; 张慧敏: 论文构思、实验与数据管理; 陈焜著: 实验数据整理; 吴峰、陈维广: 提供实验材料与部分实验; 郑永标: 论文指导、审核与修改。

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]

- Anwaier G, Cong W, Cao YN, Qi R, 2021. A review of the bioactive ingredients, pharmacological functions and mechanisms of *Inonotus obliquus*. *Mini-Reviews in Organic Chemistry*, 18(4): 529-538
- Bai Y, Ye L, Li XJ, Bi JX, Lu Y, Wei XM, Ding SF, Zhong XH, Zhao LW, Yang NJ, 2013. Effect of inotodiol on cell proliferation and apoptosis in human ovary cancer SKOV3 cells. *Journal of Practical Obstetrics and Gynecology*, 29(6): 441-444 (in Chinese)
- Burmasova MA, Utebaeva AA, Sysoeva EV, Sysoeva MA, 2019. Melanins of *Inonotus obliquus*: bifidogenic and antioxidant properties. *Biomolecules*, 9(6): 248
- Choi JH, Kim S, 2018. Mechanisms of attenuation of clot formation and acute thromboembolism by syringic acid in mice. *Journal of Functional Foods*, 43: 112-122
- Cui Y, Kim DS, Park KC, 2005. Antioxidant effect of *Inonotus obliquus*. *Journal of Ethnopharmacology*, 96(1): 79-85
- Dai YC, Li Y, 2011. Notes on the nomenclature of six important medicinal fungi in China. *Mycosystema*, 30(4): 515-518 (in Chinese)
- Deng LY, Yang CY, Yan YH, Li JW, Cen RY, Zhao H, 2018. Synthesis of acylated triterpenes of *Inonotus obliquus* and their antitumor activities. *Tianjin Journal of Traditional Chinese Medicine*, 35(11): 868-873 (in Chinese)
- Ding GW, Guo X, Li X, An LP, Shi HW, 2024. Study of

- active components and mechanisms mediating the hypolipidemic effect of *Inonotus obliquus* polysaccharides. *Food Science & Nutrition*, 12(4): 2833-2845
- Ding YY, Liu F, Shi C, Zhang Y, Li N, 2016. Chemical constituents from *Phellinus igniarius* and their anti-tumor activity *in vitro*. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 41(16): 3042-3048 (in Chinese)
- Duan Q, Tian LL, Feng JB, Ping XB, Li LH, Yaigoub H, Li RS, Li YF, 2022. Trametenolic acid ameliorates the progression of diabetic nephropathy in db/db mice *via* Nrf2/HO-1 and NF- κ B-mediated pathways. *Journal of Immunology Research*, 2022(1): 6151847
- Ern PTY, Quan TY, Yee FS, Yin ACY, 2024. Therapeutic properties of *Inonotus obliquus* (Chaga mushroom): a review. *Mycology*, 15(2): 144-161
- Fu SQ, Liu Y, Zhang C, Yang F, Xie RF, Wang XD, Li X, Chen HB, 2025. Evaluation of the anti-allergic activity of bovine milk exosomes using mast cell degranulation model. *Food Science*, 46(12): 226-232 (in Chinese)
- Garádi Z, Dékány M, Móricz AM, Gaál A, Papp V, Béni S, Ványolós A, 2021. Antimicrobial, antioxidant and antiproliferative secondary metabolites from *Inonotus nidus-pici*. *Molecules*, 26(18): 5453
- Hao RL, Shan SH, Hu XY, Zhang ZY, Li RS, Li ZY, 2023. Activation of catalase by phenolic compounds of *Inonotus obliquus* and its mechanism. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 51(9): 1050-1059 (in Chinese)
- Hawk JL, Eady RA, Challoner AV, Kobza-Black A, Keahey TM, Greaves MW, 1980. Elevated blood histamine levels and mast cell degranulation in solar urticaria. *British Journal of Clinical Pharmacology*, 9: 183-186
- Huang HF, 2020. Effects of ergosterol peroxide on tumor cells in different proliferation stages. MS Thesis, Fujian Medical University, Fuzhou. 1-47 (in Chinese)
- Jiang LH, Zhang SN, Gong GF, Liu CP, Fang J, He DY, Pan ZH, Tan QG, 2022. Chemical constituents of *Bidens pilosa* and their α -glucosidase inhibitory activity. *Central South Pharmacy*, 20(12): 2740-2746 (in Chinese)
- Ju CM, 2022. Extraction and isolation of triterpenoids from *Inonotus obliquus* biological activity research. MS Thesis, Changchun University of Chinese Medicine, Changchun. 1-74 (in Chinese)
- Kim J, Yang SC, Hwang AY, Cho H, Hwang KT, 2020. Composition of triterpenoids in *Inonotus obliquus* and their anti-proliferative activity on cancer cell lines. *Molecules*, 25(18): 4066
- Kim JH, Kwon HJ, Kim BW, 2016. Protective effect of 4-(3,4-dihydroxyphenyl)-3-buten-2-one from *Phellinus linteus* on naproxen-induced gastric antral ulcers in rats. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 26(5): 823-828
- Kou RW, Han R, Gao YQ, Li D, Yin X, Gao JM, 2021. Anti-neuroinflammatory polyoxygenated lanostanoids from Chaga mushroom *Inonotus obliquus*. *Phytochemistry*, 184: 112647
- Leong YW, Harrison LJ, 1999. (20R,23E)-Eupha-8,23-diene-3 β ,25-diol from *Tripetalum cymosum*. *Phytochemistry*, 50(5): 849-857
- Liang LY, Yan SJ, Zhang ZS, 2012. Study on antioxidant and hyperlipidemic function of *Inonotus obliquus* ethanol extract *in vivo*. *Food Research and Development*, 33(10): 162-165 (in Chinese)
- Lim L, Jackson-Lewis V, Wong LC, Shui GH, Goh AXH, Kesavapany S, Jenner AM, Fivaz M, Przedborski S, Wenk MR, 2012. Lanosterol induces mitochondrial uncoupling and protects dopaminergic neurons from cell death in a model for Parkinson's disease. *Cell Death & Differentiation*, 19(3): 416-427
- Liu C, Zhao C, Pan HH, Kang J, Yu XT, Wang HQ, Li BM, Xie YZ, Chen RY, 2014. Chemical constituents from *Inonotus obliquus* and their biological activities. *Journal of Natural Products*, 77(1): 35-41
- Liu CN, Zhou XS, 2024. Therapeutic effect of *Inonotus obliquus* flavonoids on diabetic nephropathy in mice. *Acta Chinese Medicine and Pharmacology*, 2024(1): 27-32 (in Chinese)
- Liu Y, Li XW, Zhang HQ, Wu Q, Shi XL, Jin YR, 2018. Anti-allergic effects of ginsenosides extracted by high temperature and high pressure method. *Chemical Research in Chinese Universities*, 34(3): 382-388
- Lu YP, Jia YN, Xue ZH, Li NN, Liu JY, Chen HX, 2021. Recent developments in *Inonotus obliquus* (Chaga mushroom) polysaccharides: isolation, structural characteristics, biological activities and application. *Polymers*, 13(9): 1441
- Lv YY, Xiao J, Pan L, 2014. Type III polyketide synthase is involved in the biosynthesis of protocatechuic acid in *Aspergillus niger*. *Biotechnology Letters*, 36(11): 2303-2310
- Ma CG, Zhang ZX, Xiao B, Zhong YQ, 2022. Study on bioactivity and application of *Inonotus obliquus*. *Edible Fungi*, 44(2): 1-4 (in Chinese)
- Mlcek J, Jurikova T, Skrovankova S, Sochor J, 2016. Quercetin and its anti-allergic immune response. *Molecules*, 21(5): 623
- Niu H, Song D, Mu HB, Zhang WX, Sun FF, Duan JY, 2016. Investigation of three lignin complexes with antioxidant and immunological capacities from *Inonotus obliquus*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 86: 587-593
- Ohmura K, Miyase T, Ueno A, 1989. Sesquiterpene

- glucosides and a phenylbutanoid glycoside from *Hypochoeris radicata*. *Phytochemistry*, 28(7): 1919-1924
- Pan JX, Wang N, Li FX, Duan XL, Guo JX, Ma C, Zhang Z, Liu XY, Shang QH, Chang J, He Y, Yan ZB, 2024. Basic research and technical application of allergic reaction. 2024 China Household Electrical Appliances Technology Conference, Hefei. 1-8 (in Chinese)
- Park S, Shin H, Park D, Kim H, Byun Y, Lee KY, 2021. Structure elucidation of a new triterpene from *Inonotus obliquus*. *Magnetic Resonance in Chemistry*, 59(4): 489-494
- Pavlíková N, 2023. Caffeic acid and diseases – mechanisms of action. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(1): 588
- Phadungkit M, Luanratana O, 2006. Anti-salmonella activity of constituents of *Ardisia elliptica* Thunb. *Natural Product Research*, 20(7): 693-696
- Qiao Y, Guo YD, Zhou ZG, Liu X, Dong FX, 2023. Anti-gastric cancer mechanism of ethanol extract of *Inonotus obliquus*. *Journal of Cancer Control and Treatment*, 36(8): 623-630 (in Chinese)
- Shin S, Cho SH, Park D, Jung E, 2020. Anti-skin aging properties of protocatechuic acid *in vitro* and *in vivo*. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 19(4): 977-984
- Sun Y, Zhang YJ, Cao XY, Zhou JS, Jiang JH, 2023. Characteristics related to sexual reproduction and mating type locus of *Inonotus obliquus*. *Mycosystema*, 42(2): 520-529 (in Chinese)
- Szychowski KA, Rybczyńska-Tkaczyk K, Tobiasz J, Yelnytska-Stawasz V, Pomianek T, Gmiński J, 2018. Biological and anticancer properties of *Inonotus obliquus* extracts. *Process Biochemistry*, 73: 180-187
- Szychowski KA, Skóra B, Pomianek T, Gmiński J, 2021. *Inonotus obliquus* – from folk medicine to clinical use. *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, 11(4): 293-302
- Taji S, Yamada T, Wada SI, Tokuda H, Sakuma K, Tanaka R, 2008. Lanostane-type triterpenoids from the sclerotia of *Inonotus obliquus* possessing anti-tumor promoting activity. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 43(11): 2373-2379
- Tan JJ, Hu RZ, Gong JT, Fang CK, Li YL, Liu M, He ZY, Hou DX, Zhang HF, He JH, Wu SS, 2023. Protection against metabolic associated fatty liver disease by protocatechuic acid. *Gut Microbes*, 15(1): 2238959
- Tian LL, Wang Y, Qing JB, Zhou WJ, Sun L, Li RS, Li YF, 2022. A review of the pharmacological activities and protective effects of *Inonotus obliquus* triterpenoids in kidney diseases. *Open Chemistry*, 20(1): 651-665
- Wang XL, 2025. Research progress on the application of aspirin in different disease areas. *Journal of Shandong Medical College*, 47(3): 29-31 (in Chinese)
- Wang Y, Ouyang FJ, Teng CY, Qu JJ, 2021. Optimization for the extraction of polyphenols from *Inonotus obliquus* and its antioxidation activity. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 51(9): 852-859
- Wei YM, Chen HQ, Yang L, Mei WL, Chen ZB, Dai HF, 2020. Cholinesterase inhibitory and cytotoxic activity of chemical constituents from *Inonotus obliquus*. *Natural Product Research and Development*, 32(7): 1156-1163 (in Chinese)
- Wold CW, Gerwick WH, Wangenstein H, Inngjerdingen KT, 2020. Bioactive triterpenoids and water-soluble melanin from *Inonotus obliquus* (Chaga) with immunomodulatory activity. *Journal of Functional Foods*, 71: 104025
- Wu F, Zhou LW, Vlasák J, Dai YC, 2022. Global diversity and systematics of Hymenochaetaceae with poroid hymenophore. *Fungal Diversity*, 113: 1-192
- Xiang C, 2012. The study on triterpenoids biosynthesis by *Inonotus obliquus* submerged fermentation. MS Thesis, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou. 1-81 (in Chinese)
- Yan ZF, Yang Y, Tian FH, Mao XX, Li Y, Li CT, 2014. Inhibitory and acceleratory effects of *Inonotus obliquus* on tyrosinase activity and melanin formation in B16 melanoma cells. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2014(1): 259836
- Yang M, Hu D, Cui ZY, Li HX, Man CX, Jiang YJ, 2021. Lipid-lowering effects of *Inonotus obliquus* polysaccharide *in vivo* and *in vitro*. *Foods*, 10(12): 3085
- Yin DY, Cao XY, Li SS, Zhang Y, Gao CY, Zhu MQ, Li DB, 2025. Antiallergic activities of polysaccharides derived from *Coptis chinensis*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 315: 144681
- Zhang BC, 2020. Study on the mechanism of inhibitory effect of *Inonotus obliquus* polysaccharide on breast cancer immune infiltration. PhD Dissertation, Shenyang Agricultural University, Shenyang. 1-108 (in Chinese)
- Zhao FQ, Xia GY, Chen LX, Zhao JL, Xie ZF, Qiu F, Han G, 2016. Chemical constituents from *Inonotus obliquus* and their antitumor activities. *Journal of Natural Medicines*, 70(4): 721-730
- Zhao FQ, Yan L, Cui XH, Lin S, Wang C, Zhang H, Kang XY, Ji BS, 2012. Triterpenoids from *Inonotus obliquus* protect mice against oxidative damage induced by CCl₄. *Acta Pharmaceutica Sinica*, 47(5): 680-684 (in Chinese)
- Zhao ZZ, Ran Q, Ding H, Liu XK, Yu HS, Song XB, Zhang LJ, 2018. Advances in inotodiol research. *Acta Edulis Fungi*, 25: 121-129 (in Chinese)
- Zhou LG, Li D, Wang JG, Liu YS, Wu JY, 2007. Antibacterial phenolic compounds from the spines of *Gleditsia sinensis* Lam. *Natural Product Research*, 21(4): 283-291

Zou CX, Dong SH, Hou ZL, Yao GD, Lin B, Huang XX, Song SJ, 2020. Modified lanostane-type triterpenoids with neuroprotective effects from the fungus *Inonotus obliquus*. *Bioorganic Chemistry*, 105: 104438

[附中文参考文献]

白杨, 叶龙, 李晓京, 毕继鑫, 路阳, 魏秀梅, 丁帅芳, 钟秀宏, 赵丽微, 杨宁江, 2013. 桦褐孔菌醇对人卵巢癌 SKOV3 细胞增殖和凋亡的影响. *实用妇产科杂志*, 29(6): 441-444

戴玉成, 李玉, 2011. 中国六种重要药用真菌名称的说明. *菌物学报*, 30(4): 515-518

邓丽颖, 杨灿宇, 闫亚辉, 李佳伟, 岑如月, 赵辉, 2018. 桦褐孔菌三萜的酰化对其抗肿瘤活性的影响. *天津中医药*, 35(11): 868-873

丁云云, 刘锋, 施超, 张月, 李宁, 2016. 桑黄化学成分及体外抗肿瘤活性研究. *中国中药杂志*, 41(16): 3042-3048

傅斯琪, 刘艳, 张超, 杨帆, 谢若凡, 王晓东, 李欣, 陈红兵, 2025. 基于肥大细胞脱颗粒模型研究牛乳外泌体的抗过敏活性. *食品科学*, 46(12): 226-232

郝瑞林, 单树花, 胡晓燕, 张志怡, 李荣山, 李卓玉, 2023. 桦褐孔菌酚类化合物激活过氧化氢酶的作用及机制. *山西农业科学*, 51(9): 1050-1059

黄花芳, 2020. 过氧化麦角甾醇对不同增殖状态肿瘤细胞的作用. *福建医科大学硕士论文*, 福州. 1-47

姜李红, 张胜男, 龚桂芬, 柳彩萍, 方娟, 何东义, 潘争红, 谭钦刚, 2022. 鬼针草化学成分及 α -葡萄糖苷酶抑制活性研究. *中南药学*, 20(12): 2740-2746

鞠春梅, 2022. 桦褐孔菌三萜类化合物的提取分离及生物活性研究. *长春中医药大学硕士论文*, 长春. 1-74

梁丽雅, 闫师杰, 张泽生, 2012. 桦褐孔菌醇提取物抗氧化

和降血脂功能的研究. *食品研究与开发*, 33(10): 162-165

刘超楠, 周晓霜, 2024. 桦褐孔菌黄酮对糖尿病肾病小鼠的治疗作用研究. *中医药学报*, 2024(1): 27-32

马传贵, 张志秀, 肖宝, 钟耀强, 2022. 桦褐孔菌的生物活性及其应用研究. *食用菌*, 44(2): 1-4

潘金晓, 王宁, 李方旭, 段小丽, 郭嘉兴, 马成, 张展, 刘祥宇, 商庆浩, 常江, 何燕, 颜志斌, 2024. 关于过敏反应的基础研究与技术应用. 2024 年中国家用电器技术大会, 合肥. 1-8

乔羽, 郭亚迪, 周忠光, 刘旭, 董霏雪, 2023. 桦褐孔菌醇提取物抗胃癌作用机制研究. *肿瘤预防与治疗*, 36(8): 623-630

孙勇, 张艺嘉, 曹小迎, 周降生, 蒋继宏, 2023. 桦褐孔菌有性生殖相关特征及交配型位点分析. *菌物学报*, 42(2): 520-529

王学蕾, 2025. 阿司匹林在不同疾病领域应用的研究进展. *山东医学高等专科学校学报*, 47(3): 29-31

魏艳梅, 陈惠琴, 杨理, 梅文莉, 陈志宝, 戴好富, 2020. 桦褐孔菌化学成分的胆碱酯酶抑制和细胞毒活性研究. *天然产物研究与开发*, 32(7): 1156-1163

向超, 2012. 液体深层发酵培养的桦褐孔菌三萜化合物的生物合成研究. *浙江理工大学硕士论文*, 杭州. 1-81

张博川, 2020. 桦褐孔菌多糖抑制乳腺癌的免疫浸润的机制的研究. *沈阳农业大学博士论文*, 沈阳. 1-108

赵芬琴, 严琳, 崔仙红, 林昇, 王聪, 张慧, 康晓燕, 姬汴生, 2012. 桦褐孔菌三萜对 CCl_4 致小鼠氧化应激损伤的保护作用. *药学学报*, 47(5): 680-684

赵卓卓, 冉棋, 丁辉, 刘秀琨, 余河水, 宋新波, 张丽娟, 2018. 桦褐孔菌醇研究进展. *食用菌学报*, 25: 121-129