

研究报告

粗毛纤孔菌的营养及活性成分分析

邵蕴和¹, 陆琦², 李晓敏^{1,3}, 黄秋茹^{1,3}, 孙慧娟⁴, 张君丽⁴, 傅俊生^{*1,3}

1 福建农林大学 生命科学学院, 福建 福州 350002

2 福建农林大学 海洋学院, 福建 福州 350002

3 福建农林大学 菌物研究中心, 福建 福州 350002

4 西藏自治区农牧科学院蔬菜研究所, 西藏 拉萨 850000

邵蕴和, 陆琦, 李晓敏, 黄秋茹, 孙慧娟, 张君丽, 傅俊生. 粗毛纤孔菌的营养及活性成分分析[J]. 微生物学通报, 2024, 51(9): 3614-3628.

SHAO Yunhe, LU Qi, LI Xiaomin, HUANG Qiuru, SUN Huijuan, ZHANG Junli, FU Junsheng. Nutritional value and active components of *Inonotus hispidus*[J]. Microbiology China, 2024, 51(9): 3614-3628.

摘要:【背景】桑黄具有多糖、甾醇、三萜和总酚等活性成分, 并体现出良好的抗氧化、清除自由基、增强免疫力、抗肿瘤等药用价值。粗毛纤孔菌(*Inonotus hispidus*)是桑黄的一种。目前, 有关粗毛纤孔菌的营养成分分析的报道较少。【目的】探究粗毛纤孔菌的营养价值及活性成分含量。【方法】探究 MS-5 子实体(金黄)、MS-5 子实体(黑色)和 MS-9 子实体(金黄)的基本营养、活性成分含量及农药重金属残留情况, 与灵芝进行对比, 分析差异。【结果】三种粗毛纤孔菌子实体的蛋白含量和灰分含量均显著高于灵芝, 蛋白质和灰分含量分别是灵芝的 1.96–2.20 倍和 3.69–5.66 倍; 粗毛纤孔菌子实体含有的 7 种人体必需氨基酸均高于灵芝, 并且必需氨基酸含量最高的 MS-9 子实体(金黄)是灵芝的 2.28 倍, 是鸡蛋的 1.62 倍。三种粗毛纤孔菌子实体的多糖含量和总酚及总黄酮含量均高于灵芝, 分别是灵芝的 1.48–1.56、3.42–5.70 和 3.67–4.83 倍; 此外, 粗毛纤孔菌子实体农药及重金属残留均低于国家标准。【结论】粗毛纤孔菌具有优良的营养价值和富有前景的药用价值且绿色安全, 为其药用开发提供科学基础。

关键词: 粗毛纤孔菌; 营养分析; 活性成分含量

资助项目: 西藏自治区科技计划(XZ202301ZY0013N); 福建省科技厅农业引导性项目(2019N0006); 西藏自治区自然科学基金(XZ202101ZR0059G)

This work was supported by the Science and Technology Project of Xizang Autonomous Region (XZ202301ZY0013N), the Department of Science and Technology Agricultural Guidance Project of Fujian Province (2019N0006), and the Natural Science Foundation of Xizang Autonomous Region (XZ202101ZR0059G).

*Corresponding author. E-mail: fujunsheng81@163.com

Received: 2023-12-13; Accepted: 2024-03-01; Published online: 2024-04-09

Nutritional value and active components of *Inonotus hispidus*

SHAO Yunhe¹, LU Qi², LI Xiaomin^{1,3}, HUANG Qiuru^{1,3}, SUN Huijuan⁴, ZHANG Junli⁴, FU Junsheng^{*1,3}

1 College of Life Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China

2 College of Marine Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China

3 Mycological Research Center, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China

4 Institute of Vegetables, Xizang Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Lhasa 850000, Xizang, China

Abstract: [Background] The Chinese medicine Sanghuang contains active components such as polysaccharides, sterols, triterpenoids, and total phenols, exhibiting exceptional medicinal values including antioxidant, free radical-scavenging, immune-enhancing, and anti-tumor properties. *Inonotus hispidus* is a type of Sanghuang. Currently, there are limited research reports on the nutrient composition of *I. hispidus*. **[Objective]** To explore the nutritional value and content of active components in *I. hispidus*. **[Methods]** The levels of basic nutrients, active components, and pesticide and heavy metal residues were measured in the golden-colored MS-5 fruiting bodies, black MS-5 fruiting bodies, and golden-colored MS-9 fruiting bodies of *I. hispidus* and compared the measured results with those in the fruiting bodies of *Ganoderma lucidum*. **[Results]** The protein content and ash content in the three types of *I. hispidus* fruiting bodies increased by 1.96–2.20 times and 3.69–5.66 times compared with that of *G. lucidum*, respectively. The fruiting bodies of *I. hispidus* contained seven essential amino acids required by the human body. Moreover, the MS-9 (golden) fruiting bodies had the highest level of essential amino acids, which was 2.28 times and 1.62 times of that in *G. lucidum* and eggs, respectively. The content of polysaccharides, total phenols, and total flavonoids in the three types of *I. hispidus* fruiting bodies was 1.48–1.56, 3.42–5.70, and 3.67–4.83 times of that in *G. lucidum*, respectively. Furthermore, the levels of pesticide and heavy metal residues in *I. hispidus* fruiting bodies were below the national standards. **[Conclusion]** This study demonstrates that *I. hispidus* has a remarkable nutritional value and promising medicinal value, as well as being safe and environmentally friendly, providing a scientific basis for its medicinal development.

Keywords: *Inonotus hispidus*; nutritional analysis; content of active components

桑黄含有多种活性成分,如多糖类、甾类、三萜类、黄酮类、吡喃酮类、多酚类、生物碱等^[1-4];并且具有增强免疫力、抗炎症、抗氧化、抗肿瘤、降血压、降血脂、降尿酸等药用价值^[4-5]。粗毛纤孔菌(*Inonotus hispidus*)是桑黄的一类^[6-7],属于担子菌门(*Basidiomycota*)伞菌纲(*Agaricomycetes*)锈革孔菌目(*Hymenochaetales*)锈

革孔菌科(*Hymenochaetaceae*)纤孔菌属(*Inonotus*)^[8]。唐少军等^[9]发现,粗毛纤孔菌胞外多糖具有显著抑菌的作用,而且能够促进宫颈癌细胞凋亡。另外,王婷等^[10]发现粗毛纤孔菌固体发酵菌粉可能通过提高机体抗氧化能力和免疫力并减少相关组织血管生成等机制发挥抗癌作用。显然,粗毛纤孔菌具有深远的研究价值。

粗毛纤孔菌为一年生食药食用菌, 无常见食用菌的柄盖形^[11], 生长前期多为浅色、黄褐色或金黄色, 后期逐渐变黑^[6]。目前, 粗毛纤孔菌(*Inonotus hispidus*)成为人工栽培的桑黄品种之一^[7]。近年来, 粗毛纤孔菌药用价值的研究不断深入, 但目前鲜有分析粗毛纤孔菌营养成分的相关研究。本研究将实验室前期鉴定分离的粗毛纤孔菌 MS-5 子实体(寄生在野生枣树上)^[12-13]、MS-5 菌株后期转黑的子实体及粗毛纤孔菌 MS-9 子实体与灵芝进行营养和活性成分的对比分析, 旨在揭示其营养价值及活性成分含量, 为粗毛纤孔菌及其活性物质的开发应用提供科学的参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 实验菌种

粗毛纤孔菌 MS-9 子实体(金黄)于甘肃省野生桃树上采集、分离并人工驯化获得; MS-5 子实体(金黄) (图 1A)于宁夏回族自治区野生枣树上采集、分离并人工驯化获得; MS-5 子实体(黑色) (图 1B-1C)为 MS-5 子实体(金黄)实验室栽培后期转黑获得; 赤芝 102 子实体购于福建省古田食用菌市场。

1.1.2 培养基

加富 PDA 培养基^[13] (g/L): 马铃薯 200.0,

葡萄糖 20.0, 琼脂 20.0, 蛋白胨 5.0, KH_2PO_4 2.0, MgSO_4 1.5, 维生素 B_1 10.0 mg/L。

1.1.3 主要试剂和仪器

试剂均为分析纯, 福州南江生物科技有限公司。高压蒸汽灭菌锅, 上海施都凯仪器设备有限公司; 超净工作台, 苏州净化设备有限公司; 旋转蒸发仪, 上海亚荣生化仪器厂; 电子天平, 奥豪斯仪器有限公司。

1.2 子实体常规营养成分检测

由福建省分析检测中心进行, 各指标测定均重复 3 次。水分含量参考 GB 5009.3—2016^[14]; 灰分含量参考 GB 5009.4—2016^[15]; 蛋白含量参考 GB 5009.5—2016^[16]; 粗多糖含量参考 NY/T 1676—2008^[17]; 粗纤维含量参考 GB/T 5009.10—2003^[18]; 氨基酸组成检测参照 GB 5009.124—2016^[19]。

1.3 蛋白质质量评价方法

1.3.1 氨基酸评分(amino acid score, AAS)

氨基酸评分以待测蛋白质中必需氨基酸(essential amino acids, EAA)组成情况与联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)/世界卫生组织(World Health Organization, WHO)模式的对比结果, 来预测蛋白质的营养价值^[20-21], 参照彭智华等^[22]的方法。 $\text{AAS}(\%) = [\text{试样蛋白质中的 EAA 含量}(\text{mg/g}) / (\text{FAO/WHO 模式谱中相应 EAA 含量}(\text{mg/g}))] \times 100$ (1)



图 1 MS-5 子实体 A: MS-5 子实体(金黄)前期. B 和 C: MS-5 子实体(黑)后期转黑

Figure 1 MS-5 fruiting body. A: Prophase MS-5 fruiting body (golden). B and C: MS-5 Fruiting body (black) in the later stage.

1.3.2 化学评分(chemical score, CS)

通过待测蛋白质与标准蛋白的对比来直观预测营养价值^[20-21], 参照彭智华等^[22]的方法计算。

$CS(\%) = (\text{蛋白质中 EAA 含量 mg/g}) / (\text{标准鸡蛋白中该 EAA 含量 mg/g}) \times 100$ (2)

1.3.3 氨基酸比值系数(ratio coefficient of amino acid, RC)

RC 参照朱圣陶等^[20]的方法, 该法避免了待测蛋白质中不同 EAA 绝对含量的差异对计算结果造成的影响, 反映各 EAA 供应的平衡情况^[21]。

$RC = \text{单一氨基酸评分} / \text{平均氨基酸评分}$ (3)

1.3.4 必需氨基酸指数(essential amino acid index, EAAI)

必需氨基酸指数反映待测蛋白质中 EAA 的平均情况, EAAI 为待测蛋白质内各必需氨基酸的 AAS 值的几何平均数, 参照陈艳芳等^[21]的方法。

$EAAI =$

$$^n \sqrt{\left(\frac{\text{样品必需氨基酸1}}{\text{标准必需氨基酸1}} \times \frac{\text{样品必需氨基酸2}}{\text{标准必需氨基酸2}} \times \frac{\text{样品必需氨基酸3}}{\text{标准必需氨基酸3}} \times \dots \times \frac{\text{样品必需氨基酸n}}{\text{标准必需氨基酸n}} \right)} \quad (4)$$

式中: n 为样品中 EAA 的数量。

1.3.5 营养指数(nutrient index, NI)

相较于以上评价方式, NI 作为营养指数对样品的蛋白质的含量与其氨基酸组成进行综合性评价, 参照文献^[22]的方法计算。

$NI = (EAAI \times \text{待测蛋白质百分含量}) / 100$ (5)

1.4 活性成分含量的测定

活性成分含量的测定指标由飞凡标准技术服务(苏州)有限公司进行检测, 各指标测定均重复 3 次。

1.4.1 苯酚-硫酸法测定多糖

浓硫酸加入多糖后, 多糖迅速水解成单糖并脱水糖醛衍生物。苯酚与衍生物反应, 形成具有特殊吸收特征的橙黄色溶液。制备一定浓度梯度的对照品溶液, 检测其在 490 nm 下的吸

光度, 绘制标准曲线。取已粉碎的样品 0.500 g 于离心管, 加 5 mL 水, 无水乙醇 20 mL, 振荡。利用超声提取器提取 30 min, 4 000 r/min 离心 10 min, 弃上清。沉淀物用 80%乙醇溶液洗涤后, 4 000 r/min 离心 10 min, 将沉淀移入圆底烧瓶, 加入 20 mL 蒸馏水, 沸水浴 2 h。圆底烧瓶内液体冷却到室温后, 数次洗涤残渣的洗涤液与液体一起转至 50 mL 容量瓶中, 定容, 再过滤, 样品测定液为滤液。吸取 1 mL 样品, 测定吸光度, 将吸光度代入方程(6), 求出多糖含量。

$\text{多糖含量(mg/g)} = (C \times N \times V_t) / (V \times m) \times 0.9 \times 0.001$ (6)

式中: C 为从标准曲线查得糖的含量(μg); N 为稀释倍数; V_t 为提取液总体积(mL); V 为测定取液量(mL); 0.001 为将 μg 换算为 mg; m 为样品称重量(g); 0.9 为葡萄糖换算为葡聚糖的校正系数。

1.4.2 香草醛-冰乙酸法测定总三萜

在高氯酸作用下灵芝中的三萜类物质与香草醛反应形成在 560 nm 下有吸收特征的有色物质。测定不同浓度的齐墩果酸标准溶液在 550 nm 的吸光值, 以吸光度为横坐标、齐墩果酸含量为纵坐标制作标准曲线。取粉碎后的粉状样品 0.500 g, 加入无水乙醇 20 mL, 在 45 °C 超声功率 150 W 提取 30 min, 8 000 r/min 离心 10 min。取 50 mL 容量瓶, 留上清液, 用无水乙醇洗涤残渣, 将洗涤液与上清液一起转移至容量瓶中, 经过定容后所得滤液为样液。吸取 1 mL 试样测试液, 测得吸光度, 利用标准曲线和公式(7)计算总三萜含量。

$\text{总三萜含量(mg/g)} = (C \times N \times V_t \times 0.001) / (V_s \times m)$ (7)

式中: C 为从标准曲线查得样品的含量(μg); N 为稀释倍数; V_t 为提取液总体积(mL); V_s 为测定取液量(mL); m 为样品称重量(g)。

1.4.3 香草醛-冰乙酸法测定三萜及甾醇

测定不同浓度的齐墩果酸标准溶液在 546 nm 的吸光值, 制作标准曲线。称取粉状样

品 0.500 0 g 移至容器内, 在容器中加入无水乙醇 25 mL, 在 45 °C 超声功率 150 W 提取 45 min, 8 000 r/min 离心 10 min, 获得上清液。选择 50 mL 容量瓶, 将上清液转移入, 加入无水乙醇洗涤残渣, 超声提取 30 min, 重复以上操作, 合并 2 次提取液并定容。取 1.0 mL 试样液在 546 nm 下测得吸光度, 以标准曲线和公式(8)计算三萜及甾醇含量。

$$\text{三萜及甾醇含量(mg/g)} = (C \times N \times V_t) / (V_s \times m) \quad (8)$$

式中: C 为从标准曲线查得样品的含量(μg); N 为稀释倍数; V_t 为提取液总体积(mL); V_s 为测定取液量(mL); m 为样品称重量(g)。

1.4.4 福林酚比色法测定总酚

福林酚(Folin & Ciocalteu's phenol, FC)试剂会与多酚发生特异性反应, 反应产物在特定波长下有最大吸收。取试样 0.200 0 g, 加入蒸馏水 10 mL, 100 °C 沸水浴保温 30 min。冷却后, 定容, 过滤, 留滤液。吸取滤液, 加入 1 mL FC 试剂和 3 mL 7.5% Na_2CO_3 溶液, 定容至 10 mL, 溶液在室温下显色, 测定溶液在 765 nm 下的吸光度, 通过标准曲线和公式计算, 计算样品多酚含量。

$$\text{总酚含量(mg/g)} = (C \times N \times V_t) / (V_s \times m) \times 0.001 \quad (9)$$

式中: C 为从标准曲线查得多酚的含量(μg); N 为稀释倍数; V_t 为提取液总体积(mL); V_s 为测定取液量(mL); 0.001 为将 μg 换算为 mg; m 为样品称重量(g)。

1.4.5 硝酸铝盐比色法测定总黄酮

铝盐能与黄酮类化合物形成配合物, 在 510 nm 测定配合物波长。利用不同浓度的芦丁对照品溶液在 510 nm 的吸光值, 绘制标准曲线。取 0.200 g 样品, 加入 10 mL 60% 乙醇回流提取 2 次, 冷却, 定容, 过滤后保留滤液。量取样品溶液于 10 mL 容量瓶中, 按照制作标准曲线的方法测定样品吸光度, 利用标准曲线和计算公式计算样品黄酮含量。

$$\text{黄酮含量(mg/g)} = (C \times N \times V_t) / (V_s \times m) \times 0.001 \quad (10)$$

式中: C 为从标准曲线查得多酚的含量(μg); N 为稀释倍数; V_t 为提取液总体积(mL); V_s 为测定取液量(mL); 0.001 为将 μg 换算为 mg; m 为样品称重量(g)。

1.5 农药残留与重金属检测

由福建省分析检测中心参照以下标准进行检测: 铅含量的检测参照 GB 5009.12—2017^[20]; 总砷及无机砷含量的检测参照 GB 5009.11—2014^[24]; 镉含量的检测参照 GB 5009.15—2014^[25]; 总汞及有机汞含量的检测参照 GB 5009.17—2014^[26]; 农药残留的检测参照文献[27-28]。

1.6 统计处理

实验数据用“平均值 \pm 标准差”表示。实验通过 SPSS 13.0 软件进行数据处理, 单因素方差分析和最小显著差异方法(least significant difference, LSD)多重比较, $P < 0.05$ 表示存在显著性差异, 即数据有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 子实体常规营养成分

2.1.1 蛋白质

蛋白质是生物不可或缺的物质基础, 是人体所需的重要营养成分。食用菌中富含蛋白质, 其中粗蛋白质占干重的 13%—46%, 与肉、蛋类食物相媲美, 营养价值高^[29]。从表 1 可知, 粗毛纤孔菌 MS-9 子实体(金黄)、MS-5 子实体(金黄)和 MS-5 子实体(黑色)的蛋白质含量分别为 27.70%、26.70%、24.75%, 均高于灵芝(12.60%), 分别为灵芝的 2.20、2.12 和 1.96 倍。

2.1.2 粗多糖

多糖是一类复杂的天然大分子化合物。众多研究表明, 多糖具有清除自由基、抗氧化等多重药理作用^[1-2, 29]。由表 1 可知, MS-5 子实体(黑)与 MS-9 子实体(金黄)的粗多糖含量无显著性差异, 都高于 MS-5 子实体(金黄), 分别为 MS-5 子

表 1 常规营养成分检测结果

Table 1 Test results of routine nutrition components

检测成分 Detection component	灵芝 <i>Ganoderma lucidum</i>	MS-5 子实体(黑色) MS-5 fruiting body (black)	MS-5 子实体(金黄) MS-5 fruiting body (golden)	MS-9 子实体(金黄) MS-9 fruiting body (golden)
蛋白 Protein (%)	12.60±0.01d	24.75±0.01c	26.70±0.19b	27.70±0.01a
粗多糖 Crude polysaccharide (g/100 g)	3.38±0.14a	2.99±0.07b	2.53±0.31c	2.80±0.12b
粗纤维 Coarse fiber (%)	46.86±0.08a	26.13±0.00b	19.94±0.04c	17.04±0.12d
灰分 Ash (%)	2.22±0.07c	12.48±0.23a	8.20±0.08b	8.30±0.04b
水 Water (%)	10.51±0.01a	9.72±0.01b	8.20±0.13c	7.90±0.04d

同一检测成分的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

The different lowercase letters of the same detection component indicate significant difference ($P<0.05$).

实体(金黄)的 1.18 倍和 1.11 倍。三种粗毛纤孔菌的粗多糖含量均低于灵芝,灵芝粗多糖含量分别是 MS-5 子实体(金黄)的 1.13 倍、MS-9 子实体(金黄)的 1.2 倍、MS-5 子实体(金黄)的 1.33 倍。

2.1.3 粗纤维

膳食纤维是在人体肠道内发酵的可食用的植物性成分、碳水化合物及类似物质的总和^[30],具有调节人体营养平衡、预防糖尿病等疾病的功能,因此被列为八大营养素之一。食用菌内富含膳食纤维,其中最重要的成分为 β -葡聚糖^[30]。粗纤维能够一定程度反映膳食纤维的含量。三种粗毛纤孔菌中,粗纤维含量从高到低依次为 MS-5 子实体(黑) (26.13%)、MS-5 子实体(金黄) (19.94%)、MS-9 子实体(金黄) (17.04%) (表 1)。灵芝粗纤维含量(46.86%)远高于 3 种粗毛纤孔菌子实体,是粗毛纤孔菌中粗纤维含量最高的 MS-5 子实体(黑)的 1.79 倍,粗纤维含量最低的 MS-9 子实体(金黄)的 2.35 倍。

2.1.4 灰分

食用菌中富含多种矿质元素,矿质元素的总量约在 2.37%–4.5%^[29],经过高温灼烧后留下的无机残留物就是灰分,主要为无机盐和氧化物,灰分含量可以一定程度上体现食用菌中矿质元素含量。MS-5 子实体(黑)灰分含量最高为 12.48%,MS-5 子实体(金黄)和 MS-9 子实体(金黄)的灰分含量分别为 8.20%和 8.30%,无显著

差异(表 1)。此外,灵芝的灰分含量(2.22%)远低于 3 种粗毛纤孔菌,灰分含量最高的 MS-5 子实体(黑)是灵芝的 5.66 倍,灰分含量最低的 MS-5 子实体(金黄)是灵芝的 3.69 倍。可见,粗毛纤孔菌含有更丰富的矿质元素,能够补充人体所需的部分微量元素。灰分含量最高的 MS-5 子实体(黑)含有大量真菌黑色素,真菌黑色素具有结合金属离子活性的化学结构^[31],因此推测其灰分含量高与黑色素有关。

2.1.5 水分

水分是食用菌生长至关重要的因素之一,食用菌的含水量极大程度地影响食用菌的储存。郑素月等^[32]的研究中,香菇、草菇、鸡腿菇水分含量越低,贮存时间越长;同时温度越高,同一种食用菌含水量越低贮藏时间越久。常温及室温下,香菇和草菇的长期贮存的含水量应低于 30%,鸡腿菇应低于 20%^[32]。如表 1 所示,3 种粗毛纤孔菌含水量均低于 20%,从低到高依次为 MS-9 子实体(金黄) (7.90%)、MS-5 子实体(金黄) (8.20%)、MS-5 子实体(黑) (9.72%)。三种粗毛纤孔菌子实体的含水量均低于灵芝含水量(10.51%)。

2.2 蛋白质质量评价

蛋白质是人体结构的重要组成部分,基本单位是氨基酸,人体摄入的蛋白质经消化系统分解后,以多肽或氨基酸的形式被吸收。表 2 数据表

表 2 不同子实体中氨基酸含量

Table 2 Amino acid content of different fruiting body (g/100 g)

检测氨基酸 Detection of amino acids (g/100 g)	灵芝 <i>Ganoderma lucidum</i>	MS-5 子实体(黑) MS-5 fruiting body (black)	MS-5 子实体(金黄) MS-5 fruiting body (golden)	MS-9 子实体(金黄) MS-9 fruiting body (golden)	鸡蛋蛋白 ^[33] Egg white
天冬氨酸 Asp	0.90±0.01a	1.68±0.04b	2.08±0.04c	2.16±0.03d	1.21
苏氨酸 Thr*	0.56±0.01a	0.88±0.02b	1.04±0.02c	1.10±0.02d	0.59
丝氨酸 Ser	0.49±0.01a	0.87±0.02b	1.08±0.02c	1.15±0.02d	0.91
谷氨酸 Glu	0.81±0.02a	2.72±0.11b	3.23±0.07c	3.83±0.07d	1.59
甘氨酸 Gly	0.48±0.00a	0.82±0.01b	0.96±0.02c	1.04±0.02d	0.39
丙氨酸 Ala	0.59±0.01a	1.02±0.02b	1.39±0.03c	1.45±0.04d	0.66
缬氨酸 Val*	0.56±0.00a	0.90±0.01b	1.10±0.02c	1.20±0.02d	0.64
蛋氨酸 Met*	0.06±0.01c	0.11±0.00b	0.17±0.01a	0.11±0.01b	0.33
异亮氨酸 Ile*	0.52±0.02c	0.82±0.03b	1.11±0.08a	1.08±0.02a	0.65
亮氨酸 Leu*	0.73±0.01a	1.26±0.02b	1.60±0.03c	1.72±0.02d	1.05
酪氨酸 Tyr	0.24±0.01a	0.38±0.00b	0.53±0.00c	0.57±0.00d	0.50
苯丙氨酸 Phe*	0.45±0.02a	0.72±0.02b	0.93±0.01c	0.99±0.02d	0.65
赖氨酸 Lys*	0.39±0.01a	0.79±0.01b	1.20±0.04c	1.25±0.01d	0.85
组氨酸 His	0.18±0.03c	0.50±0.02b	0.67±0.02a	0.47±0.01b	0.27
精氨酸 Arg	0.39±0.00a	0.97±0.00b	1.47±0.04c	1.62±0.02d	0.74
脯氨酸 Pro	0.63±0.02a	2.00±0.05b	2.38±0.03c	2.65±0.05d	0.34
苯丙氨酸+酪氨酸(Phe+Tyr)	0.70±0.02d	1.10±0.01c	1.45±0.01b	1.56±0.01a	—
EAA	3.51±0.06d	5.85±0.07c	7.67±0.07b	8.02±0.10a	4.93
NEAA	4.47±0.03d	10.58±0.25c	13.25±0.07b	14.36±0.25a	7.11
TAA	7.98±0.09d	16.44±0.31c	20.92±0.12b	22.38±0.34a	12.04

同一检测成分的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$); *: 必需氨基酸; EAA: 必需氨基酸含量; NEAA: 非必需氨基酸含量; TAA: 总氨基酸含量; —: 该值未提及

The different lowercase letters of the same detection component indicate significant difference ($P<0.05$); *: Essential amino acids; EAA: Essential amino acids; NEAA: Non-essential amino acids; TAA: Total amino acids; —: This value is not mentioned.

明, 3 种粗毛纤孔菌含有人体必需的 7 种氨基酸, 均高于灵芝(3.51 g/100 g)。其中, MS-9 子实体(金黄)必需氨基酸含量最高(8.02 g/100 g), 是鸡蛋的 1.62 倍, 灵芝的 2.28 倍; MS-5 子实体(金黄)必需氨基酸含量(7.67 g/100 g)和 MS-5 子实体(黑)必需氨基酸含量(5.85 g/100 g)分别是灵芝的 1.04 倍和 1.37 倍。

此外, 3 种粗毛纤孔菌的各氨基酸含量不仅高于灵芝, 且基本高于鸡蛋的各氨基酸含量。谷氨酸是 3 种粗毛纤孔菌含量最高的氨基酸, 其次为天冬氨酸。谷氨酸和天冬氨酸都是呈味氨基酸中的鲜味氨基酸, 谷氨酸可以用于肝脏疾病的治疗, 天冬氨酸可以用于心血管疾病的

治疗等^[34]。MS-9 子实体(金黄)的谷氨酸(3.83 g/100 g)和天冬氨酸(2.16 g/100 g)含量均最高。MS-9 子实体(金黄)、MS-5 子实体(黑)和 MS-5 子实体(金黄)的谷氨酸含量分别是灵芝的 4.73、1.41 和 1.19 倍; MS-9 子实体(金黄)、MS-5 子实体(黑)和 MS-5 子实体(金黄)的天冬氨酸含量分别是灵芝的 2.40、1.29 和 1.03 倍。

氨基酸评分 AAS 是将被测食物中某必需氨基酸的含量与 WHO 联合 FAO 模式相比。当氨基酸评分越高且与 100 差距越小, 说明样品中某种必需氨基酸与评分模式氨基酸组成越相似, 营养价值越高。通过被测蛋白中某种必需氨基酸的含量与标准鸡蛋蛋白模式中该氨基酸

含量相比, 所得到的比值为氨基酸化学评分 CS。CS 值越接近 100, 与标准鸡蛋蛋白模式越接近^[21-22]。

由表 3 可知, 在 AAS 评分中, MS-5 子实体(黑)最接近 WHO 联合 FAO 模式的氨基酸依次为苏氨酸(88.64)、异亮氨酸(82.67)、苯丙氨酸+酪氨酸(80.60); MS-5 子实体(金黄)依次为异亮氨酸(103.57)、苯丙氨酸+酪氨酸(98.88)、苏氨酸(97.64); MS-9 子实体(金黄)依次为苯丙氨酸+酪氨酸(102.61)、苏氨酸(99.26)、异亮氨酸(97.44)。在 CS 评分中, MS-5 子实体(黑)最接近标准鸡蛋蛋白模式的氨基酸依次为苏氨酸(75.44)、苯丙氨酸+酪氨酸(63.33)、异亮氨酸(61.24); MS-5 子实体(金黄)依次为苏氨酸

(83.09)、苯丙氨酸+酪氨酸(77.69)、异亮氨酸(76.72); MS-9 子实体(金黄)依次为苏氨酸(84.47)、苯丙氨酸+酪氨酸(80.62)、异亮氨酸和亮氨酸(72.18)。灵芝的 AAS 和 CS 评分中, 苏氨酸(110.90、94.38)评分高于 3 种粗毛纤孔菌子实体, 异亮氨酸以及苯丙氨酸+酪氨酸与 MS-5 子实体(金黄)和 MS-9 子实体(金黄)的评分结果无显著性差异。总体而言, 3 种粗毛纤孔菌的苏氨酸、苯丙氨酸+酪氨酸、异亮氨酸 3 种氨基酸评分较高, 整体上 MS-5 子实体(黑)评分略低于另外 2 种粗毛纤孔菌子实体。

氨基酸比值系数 RC, 通过某个必需氨基酸的 AAS 与所有必需氨基酸的 AAS 的平均值的比值, 得到该氨基酸对氨基酸平衡的贡献作用^[21-22]。

表 3 子实体蛋白质评价表

Table 3 Fruiting body protein evaluation table

评分方法 Scoring method	子实体 Fruiting body	苏氨酸 Thr	缬氨酸 Val	蛋氨酸 Met	异亮氨酸 Ile	亮氨酸 Leu	苯丙氨酸和 酪氨酸 Phe and Tyr
氨基酸 评分 Amino acid score (AAS)	灵芝 <i>Ganoderma lucidum</i>	110.90±1.58a	89.15±0.48a	13.05±2.84b	102.76±3.06a	82.96±1.63b	100.47±3.24a
	MS-5 子实体(黑)	88.64±2.77c	72.80±0.92d	12.85±0.16b	82.67±3.94b	72.51±0.71c	80.60±1.49b
	MS-5 fruiting body (black)						
	MS-5 子实体(金黄)	97.64±1.28b	82.33±1.88c	17.71±0.67a	103.57±6.88a	85.60±2.00b	98.88±1.12a
	MS-5 fruiting body (golden)						
	MS-9 子实体(金黄)	99.26±1.55b	86.61±1.23b	11.11±0.82b	97.44±1.78a	88.68±0.88a	102.61±0.79a
化学评分 Chemical score (CS)	灵芝 <i>Ganoderma lucidum</i>	94.38±1.34a	67.54±0.37a	8.01±1.74b	76.12±2.27a	67.52±1.33b	78.94±2.54a
	MS-5 子实体(黑)	75.44±2.36c	55.15±0.70d	7.89±0.10b	61.24±2.92b	59.02±0.58c	63.33±1.17b
	MS-5 fruiting body (black)						
	MS-5 子实体(金黄)	83.09±1.09b	62.37±1.42c	10.87±0.41a	76.72±5.09a	69.68±1.63b	77.69±0.88a
	MS-5 fruiting body (golden)						
	MS-9 子实体(金黄)	84.47±1.32b	65.62±0.93b	6.82±0.51b	72.18±1.32a	72.18±0.72a	80.62±0.62a
氨基酸比 值系数 Ratio coefficient of amino acid (RC)	灵芝 <i>Ganoderma lucidum</i>	1.51±0.00a	1.21±0.01a	0.18±0.04bc	1.39±0.02a	1.13±0.01c	1.28±0.02a
	MS-5 子实体(黑)	1.42±0.02b	1.17±0.01b	0.21±0.00ab	1.33±0.04a	1.16±0.02ab	1.22±0.01b
	MS-5 fruiting body (black)						
	MS-5 子实体(金黄)	1.30±0.02c	1.10±0.03c	0.24±0.01a	1.38±0.09a	1.14±0.03bc	1.23±0.01b
	MS-5 fruiting body (golden)						
	MS-9 子实体(金黄)	1.33±0.01c	1.16±0.00b	0.15±0.01c	1.30±0.01a	1.19±0.01a	1.28±0.01a
	MS-9 fruiting body (golden)						

每种评分方法中同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

In each scoring method, different lowercase letters within the same column indicate significant differences ($P<0.05$).

当 RC 值上下偏离 1 时,代表某必需氨基酸偏离氨基酸模式,RC 值最小的氨基酸的平衡性最差,是限制氨基酸。数据表明(表 3),灵芝和 3 种粗毛纤孔菌子实体的限制氨基酸皆为蛋氨酸,与 AAS 评分结果一致。四种子实体对蛋氨酸的限制性从强到弱依次为,MS-9 子实体(金黄)(0.15)、灵芝(0.18)、MS-5 子实体(黑)(0.21)、MS-5 子实体(金黄)(0.24)。

EAAI 的值与 100 的差距越小,说明样品与标准蛋白的 EAA 组成越相似,蛋白的平衡性越好。同样地,NI 值就越高,营养价值越高^[22]。由表 4 可知,灵芝和 3 种粗毛纤孔菌子实体 EAAI 分值高低依次为 MS-5 子实体(金黄)、MS-9 子实体(金黄)和灵芝(无显著性差异)、MS-5 子实体(黑)。同时,MS-5 子实体(金黄)(71.25)的 EAAI 还高于糙皮侧耳(平菇)(68.8)^[22]、双孢蘑菇(68.0)^[22]等常见食用菌。在 NI 评分中,灵芝和 3 种粗毛纤孔菌子实体评分结果高低依次是 MS-5 子实体(金黄)和 MS-9 子实体(金黄)、MS-5 子实体(黑)、灵芝。

表 4 子实体 EAAI、NI 评价表

Table 4 Evaluation of EAAI and NI of fruiting body

评价对象 Evaluation subject	必需氨基酸 指数 Essential amino acid index (EAAI)	营养指数 Nutrient index (NI)
灵芝 <i>Ganoderma lucidum</i>	66.22±1.02b	8.34±0.13c
MS-5 子实体(黑) MS-5 fruiting body (black)	57.74±1.08c	14.29±0.16b
MS-5 子实体(金黄) MS-5 fruiting body (golden)	71.25±0.69a	19.03±0.19a
MS-9 子实体(金黄) MS-9 fruiting body (golden)	67.46±1.37b	18.69±0.39a

同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$).

2.3 生物活性物质含量的测定情况

2.3.1 多糖含量

多糖是食用菌的主要活性成分,现有的研究中已发现多糖的多种功效包括抗氧化、抗肿瘤、提高免疫力、降低血糖等^[35]。灵芝与桑黄含有丰富的多糖,目前灵芝内分离出的百种多糖大部分为 β 型葡聚糖^[36],而桑黄多糖为蛋白多糖、 β -葡聚糖和杂多聚糖等^[4]。如表 5 所示,3 种粗毛纤孔菌子实体的多糖含量均高于灵芝。其中,多糖含量最高的是 MS-5 子实体(金黄)(40.06 mg/g),是灵芝多糖含量的(25.60 mg/g)的 1.56 倍;多糖含量最低的 MS-5 子实体(黑)(37.95 mg/g),也达到了灵芝多糖含量的 1.48 倍。此外,3 种子实体的多糖含量均高于秀珍菇(3.57%)^[37]和双孢菇(2.10%)^[37]。

2.3.2 三萜及甾醇含量分析

目前已发现的大概 50 000 种萜类化合物,其中绝大部分具有抗肿瘤、抗氧化、抗炎等多种功效,食用菌中多为倍半萜、二萜和三萜^[38]。由表 5 数据可见,3 种粗毛纤孔菌子实体的总三萜、三萜及甾醇含量高到低排序依次为 MS-9 子实体(金黄)(4.97 mg/g 和 6.36 mg/g)、MS-5 子实体(金黄)(4.02 mg/g 和 4.91 mg/g)、MS-5 子实体(黑)(3.65 mg/g 和 4.45 mg/g)。三种粗毛纤孔菌子实体总三萜、三萜及甾醇的含量均远低于灵芝(8.51 mg/g 和 9.76 mg/g),其中含量最高的 MS-9 子实体(金黄)的总三萜和三萜及甾醇含量分别是 MS-5 子实体(黑)子实体的 1.36 倍和 1.43 倍。

2.3.3 总酚和总黄酮含量分析

多酚类化合物是重要的天然抗氧化剂之一,主要为植物次生代谢产物。黄酮就是一种分子量低且广泛分布的植物多酚类代谢产物^[39-40]。这类物质拥有强抗氧化能力,还具有抗肿瘤、降血脂、降血糖等作用^[41]。表 5 数据表明 3 种粗毛纤孔菌的总酚和总黄酮含量皆显著高于灵

表 5 子实体活性成分含量表

Table 5 Scale of active components in fruiting bodies

检测对象 Testing subject	单位 Unit	多糖 Polysaccharides	总三萜 Total triterpenes	三萜及甾醇 Triterpenes and sterols	总酚 Total phenols	总黄酮 Total flavonoids
灵芝	mg/g	25.60±0.70c	8.51±0.08a	9.76±0.11a	7.70±0.10d	5.08±0.09d
<i>Ganoderma lucidum</i>	%	2.56±0.07	0.85±0.01	0.98±0.01	0.77±0.01	0.51±0.01
MS-5 子实体(黑)	mg/g	37.95±0.35b	3.65±0.13d	4.45±0.21d	12.85±0.45c	6.69±0.21c
MS-5 fruiting body (black)	%	3.80±0.04	0.37±0.01	0.44±0.21	1.28±0.05	0.67±0.02
MS-5 子实体(金黄)	mg/g	40.06±1.62a	4.02±0.18c	4.91±0.11c	37.64±2.18b	22.01±0.18b
MS-5 fruiting body (golden)	%	4.01±0.16	0.40±0.02	0.49±0.01	3.76±0.22	2.20±0.02
MS-9 子实体(金黄)	mg/g	39.83±0.9 ab	4.97±0.31b	6.36±0.10b	43.89±1.33a	24.55±0.29a
MS-9 fruiting body (golden)	%	3.98±0.09	0.50±0.03	0.64±0.01	4.39±0.13	2.46±0.03

同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$); mg/g: 每克子实体含多少毫克某活性成分

Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$); mg/g: Content of an active ingredient per gram of fruiting bodies.

芝。特别是 MS-9 子实体(金黄),其总酚含量是灵芝(7.70 mg/g)的 5.70 倍,总黄酮含量是灵芝(5.08 mg/g)的 4.83 倍;并且其总酚和黄酮两种活性成分的含量分别是粗毛纤孔菌中含量最低的 MS-5 子实体(黑) (12.85 mg/g 和 6.69 mg/g) 的 3.42 倍和 3.67 倍。

2.4 农药残留与重金属残留量

食用菌的农药残留以及重金属污染物是食用菌安全的一大重要问题,极大程度影响食用菌的食品安全以及其销售与出口。在重金属检测结果中,3 种粗毛纤孔菌子实体内所含毒性元素的汞、铅、镉等的含量均基本低于国家食品安全标准;同时 3 种粗毛纤孔菌子实体内的农药残留量均低于 GB 2763—2021,其中六六六、滴滴涕、敌敌畏、溴氰菊酯均未检出^[42-43] (表 6)。检测结果表明 3 种粗毛纤孔菌子实体的农药残留与重金属污染度极低,符合国家标准,绿色安全,可放心食用。

3 讨论与结论

粗毛纤孔菌药用价值高,活性物质丰富。近年来,粗毛纤孔菌各方面的研究不断深入,

胥立峰等^[44]对粗毛纤孔菌子实体进行全面的化学成分分析;杨树东等^[45]进一步对粗毛纤孔菌的化学成分进行研究,第一次从自然界分离出 3,3'-亚甲基双[6-[2-(3,4-二羟苯基)乙烯基]-4-羟基-2H-吡喃-2-酮] (3,3'-methylene-bis[6-(3,4-dihydroxystyryl)-4-hydroxy-2H-pyran-2-one], MBP),明确了从粗毛纤孔菌提取 MBP 的方法,并初步确定 MBP 诱导人肝癌细胞 HepG2 细胞凋亡;刘鑫等^[46]利用粗毛纤孔菌深层发酵液正丁醇提取物处理 MDA-MB-231 细胞,发现其深层发酵液具有抗乳腺癌的活性;韩晨等^[47]通过粉碎粗毛纤孔菌子实体对急性肾脏损伤和睾丸损伤的小鼠给药,发现老化粗毛纤孔菌子实体能够一定程度修复肾脏和睾丸的损伤。付立忠等^[48]比较人工栽培杨树桑黄、鲍姆桑黄、桑树桑黄及野生桑树桑黄子实体的营养以及活性成分的差异,发现 3 种人工培养桑黄在总黄酮、总酚、多糖、三萜含量上各有所长。上述报道多针对粗毛纤孔菌提取物及其功效展开研究,少有报道针对桑黄营养成分进行报道。粗毛纤孔菌营养丰富,对其营养成分及活性成分研究和分析,有益于粗毛纤孔菌在食品、医药等领域开发利用。

表 6 农药残留与重金属残留量表

Table 6 Pesticide residues and heavy metal residues scale

检测成分 Detection component (mg/kg)	灵芝 <i>Ganoderma</i> <i>lucidum</i>	MS-5 子实体(黑) MS-5 fruiting body (black)	MS-5 子实体(金黄) MS-5 fruiting body (golden)	MS-9 子实体(金黄) MS-9 fruiting body (golden)	食品中污染物限量/食品中农药最大残留限量 Limit of contaminants in food*/ Maximum residue limits for pesticides in food**
汞 Hg	<0.05	<0.5	<0.05	<0.05	0.1*
铅 Pb	<0.05	<0.5	<0.05	<0.05	0.5*
砷 As	<0.05	0.57	0.5	<0.05	0.5*
镉 Cd	<0.05	<0.5	<0.05	<0.05	0.2*
六六六 HCH	—	未检出 Not checked out	未检出 Not checked out	未检出 Not checked out	0.05**
滴滴涕 DDT	—	未检出 Not checked out	未检出 Not checked out	未检出 Not checked out	0.05**
敌敌畏	—	未检出 Not checked out	未检出 Not checked out	未检出 Not checked out	0.2**
Dichlorvos	—	未检出 Not checked out	未检出 Not checked out	未检出 Not checked out	0.2**
百菌清 Chlorothalonil	—	0.008 5	0.005 2	0.005 6	5**
溴氰菊酯	—	未检出	未检出	未检出	0.2**
Deltamethrin	—	Not checked out	Not checked out	Not checked out	0.2**

*: 食品中污染物限量检测参照 GB 2762—2022^[42]; **: 食品中农药最大残留限量检测参照 GB 2763—2021^[43]; —: 未进行检测

*: The detection of contaminants in food shall refer to GB 2762—2022 National Standard for Food Safety^[42]; **: Maximum residue limits for pesticides in food shall be determined in accordance with GB 2763—2021 National Standard for Food Safety^[42]; —: No detection was performed.

本研究针对 3 种粗毛纤孔菌子实体的常规营养、蛋白质质量、活性成分, 以及重金属和农药残留开展研究, 并与灵芝进行比对。在常规营养上, 3 种粗毛纤孔菌的灰分和蛋白质含量远高于灵芝, 其中蛋白质含量最高的 MS-9 子实体(金黄)和灰分含量最高的 MS-5 子实体(黑)分别是灵芝的 2.20 倍和 5.66 倍; 相较灵芝, 粗毛纤孔菌水分含量更低, 贮藏时间更长。蛋白质质量评价结果表明, 3 种粗毛纤孔菌的各氨基酸及必需氨基酸含量均高于灵芝以及鸡蛋蛋白中对应氨基酸含量。从本研究中 EAAI 与 NI 评分结果可知, MS-9 子实体(金黄)和 MS-5 子实体(金黄)的蛋白质营养价值高于 MS-5 子实体(黑)。以上结果表明, 粗毛纤孔菌具有良好的营养价值, 尤其在蛋白质含量及灰分含量上优于灵芝。此外, 其在各氨基酸含量与必需氨基酸含量

优于标准鸡蛋白, 能够补充人体所需的营养。

在活性成分测定中, 我们发现 3 种粗毛纤孔菌子实体除了三萜及甾醇外, 多糖、总酚以及总黄酮都远高于灵芝; 特别是 MS-9 子实体(金黄), 多糖、总酚和总黄酮的含量分别是灵芝的 1.56、5.70、4.83 倍。此外, MS-9 子实体(金黄)、MS-5 子实体(金黄)的总酚和黄酮含量还高于部分常见食用菌, 两种粗毛纤孔菌的总酚含量高于金针菇的总酚含量(34.1 mg/g)、平菇(33.3 mg/g)、杏鲍菇(27.7 mg/g)等^[41]; 黄酮含量高于香菇(0.107%)、双孢菇(0.102%)、金针菇(0.175%)和平菇(0.155%)^[49]。多糖是粗毛纤孔菌主要的药效成分之一, 刘鑫等^[50]的研究中发现, 相较于菌丝体多糖, 粗毛纤孔菌子实体多糖对肝损伤的预防和保护作用更显著。

综上所述, 粗毛纤孔菌营养价值高且富含

活性成分,尤其是蛋白质、灰分、氨基酸含量和活性成分含量优于灵芝。总体而言,MS-9子实体(金黄)和MS-5子实体(金黄)的常规营养评价和活性成分都高于MS-5子实体(黑)。另外,本实验室前期发现,MS-5产生大量真菌黑色素是MS-5子实体(金黄)后期转变为子实体(黑)的原因^[51-52]。本研究推测与MS-5子实体(黑)产生的真菌黑色素与其灰分含量高有关。真菌黑色素具有抗氧化、抗炎、抗肿瘤等多种生物活性^[31]。李晓敏等^[53]对粗毛纤孔菌胞外产黑色素的条件进行优化,最优条件下提高了黑色素的产量,并表明其黑色素具有良好的抗氧化能力。后续可深入探究粗毛纤孔菌黑色素生产、开发与应用。本研究为粗毛纤孔菌的药理基础及应用提供理论依据。

REFERENCES

- [1] 史帧婷,包海鹰. 桑黄类真菌有效成分及功效研究进展[J]. 中国实验方剂学杂志, 2016, 22(22): 197-202.
SHI ZT, BAO HY. Research progress on effective components and efficacy of *Phellinus igniarius*[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2016, 22(22): 197-202 (in Chinese).
- [2] 张洋洋,吕国英,方立林,张作法,宋婷婷,蔡为明. 桑黄主要活性物质的提取方法及药理活性研究进展[J]. 食用菌, 2021, 29(5): 404-408.
ZHANG YY, LÜ GY, FANG LL, ZHANG ZF, SONG TT, CAI WM. Research progress on extraction methods and pharmacological activities of main active substances from Sanghuang[J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2021, 29(5): 404-408 (in Chinese).
- [3] 李雨鸿,殷朝敏,范秀芝,史德芳,姚芬,李晨,刘颖,程雅清,高虹. 桑黄提取物的体外抗氧化、降血糖及降尿酸活性[J]. 现代食品科技, 2022, 38(5): 71-80.
LI YH, YIN CM, FAN XZ, SHI DF, YAO F, LI C, LIU Y, CHENG YQ, GAO H. *In vitro* anti-oxidant, hypoglycemic, and hypouricemic activities of *Sanghuangporus vaninii* extracts[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(5): 71-80 (in Chinese).
- [4] 李志军,包海鹰. 中药桑黄粗毛纤孔菌的化学成分与药理作用研究进展[J]. 菌物研究, 2022, 20(3): 203-213.
LI ZJ, BAO HY. Research advances on chemical constituents and pharmacological effects of traditional Chinese medicine Sanghuang: *Inonotus hispidus*[J]. Journal of Fungal Research, 2022, 20(3): 203-213 (in Chinese).
- [5] 管立峰,包海鹰. 粗毛纤孔菌的研究进展[J]. 食用菌学报, 2011, 18(1): 78-82.
ZAN LF, BAO HY. Progress in *Inonotus hispidus* research[J]. Acta Edulis Fungi, 2011, 18(1): 78-82 (in Chinese).
- [6] 包海鹰,杨烁,李庆杰,图力古尔,李玉. “桑黄”的本草补充考证[J]. 菌物研究, 2017, 15(4): 264-270.
BAO HY, YANG S, LI QJ, BAU Tolgor, LI Y. Supplementary textual research on “Sanghuang”[J]. Journal of Fungal Research, 2017, 15(4): 264-270 (in Chinese).
- [7] 杨焱,陈晓华,戴玉成,周丽伟,蔡为明,郭良栋,崔宝凯,李宁,雷萍,李长田,李正鹏,施维,陆本坤,秦绍新,王荣祥,李喜范,宋金梯,姚生良,张安强,蒋宁,等. 我国桑黄产业发展现状、问题及展望: 桑黄产业发展千岛湖宣言[J]. 菌物学报, 2023, 42(4): 855-873.
YANG Y, CHEN XH, DAI YC, ZHOU LW, CAI WM, GUO LD, CUI BK, LI N, LEI P, LI CT, LI ZP, SHI W, LU BK, QIN SX, WANG RX, LI XF, SONG JD, YAO SL, ZHANG AQ, JIANG N, et al. Sanghuang industry in China: current status, challenges and perspectives: the Qiandao Lake declaration for Sanghuang industry development[J]. Mycosystema, 2023, 42(4): 855-873 (in Chinese).
- [8] 崔宝凯,戴玉成,杨宏. 药用真菌粗毛纤孔菌概述[J]. 中国食用菌, 2009, 28(4): 6-7.
CUI BK, DAI YC, YANG H. Notes on the medicinal fungus of *Inonotus hispidus*[J]. Edible Fungi of China, 2009, 28(4): 6-7 (in Chinese).
- [9] 唐少军,雷平,邵晨霞,吴胜莲,杨祎,靳磊,刘宇波,贺月林,许隽. 粗毛纤孔菌液体发酵工艺优化及胞外多糖的抗菌和抗肿瘤活性[J]. 食品工业科技, 2021, 42(5): 93-99.
TANG SJ, LEI P, SHAO CX, WU SL, YANG Y, JIN L, LIU YB, HE YL, XU J. Optimization of liquid fermentation process of *Inonotus hispidus* and antibacterial and antitumor activities of exopolysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(5): 93-99 (in Chinese).
- [10] 王婷,包海鹰,图力古尔,李玉. 粗毛纤孔菌固体发酵菌种对 H₂₂ 荷瘤小鼠抗肿瘤作用研究[J]. 中药材, 2016, 39(2): 389-394.
WANG T, BAO HY, BAU Tolgor, LI Y. Antitumor effect of solid state fermentation powder of *Inonotus hispidus* on H₂₂ bearing mice[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2016, 39(2): 389-394 (in Chinese).
- [11] 崔宝凯,戴玉成,杨宏. 对药用真菌——粗毛纤孔菌(“桑黄”)的再认识[C]//2008 全国药用真菌学术研讨会论文集: F 集, 2008.
CUI BK, DAI YC, YANG H. Re-recognition of medicinal fungi: *Inonotus hispidus* (“Sanghuang”)[C]//

- Proceedings of the 2008 National Symposium on Medicinal Fungi: Collection F, 2008 (in Chinese).
- [12] 金珊珊, 刘鑫, 侯若琳, 俞全明, 王丹亭, 胡开辉, 郑明锋, 傅俊生. 1 株药用纤孔菌的鉴定及其生物活性[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(12): 130-139.
- JIN SS, LIU X, HOU RL, YU QM, WANG DT, HU KH, ZHENG MF, FU JS. Identification and biological activity of a medicinal *Inonotus*[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2018, 46(12): 130-139 (in Chinese).
- [13] 刘鑫, 侯若琳, 任亚倩, 金珊珊, 陈磊, 林文雄, 郑明锋, 傅俊生. 寄生枣树的野生粗毛纤孔菌菌丝培养及其子实体大米栽培条件[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(6): 1283-1289.
- LIU X, HOU RL, REN YQ, JIN SS, CHEN L, LIN WX, ZHENG MF, FU JS. Mycelial culture of wild *Inonotus hispidus* parasitizing the jujube tree and the cultivation conditions of its fruit body on rice medium[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24(6): 1283-1289 (in Chinese).
- [14] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard-Determination of moisture content in foods: GB 5009.3—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016 (in Chinese).
- [15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中灰分的测定: GB 5009.4—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard-Determination of ash in foods: GB 5009.4—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016 (in Chinese).
- [16] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定: GB 5009.5—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard-Determination of protein content in foods: GB 5009.5—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016 (in Chinese).
- [17] 中华人民共和国农业部. 食用菌中粗多糖含量的测定: NY/T 1676—2008[S]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Determination of crude mushroom polysaccharides: NY/T 1676—2008[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2008 (in Chinese).
- [18] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 植物类食品中粗纤维的测定: GB/T 5009.10—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Determination of crude fiber in vegetable foods: GB/T 5009.10—2003[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003: 8 (in Chinese).
- [19] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定: GB 5009.124—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard-Determination of amino acid content in foods: GB 5009.124—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016 (in Chinese).
- [20] 朱圣陶, 吴坤. 蛋白质营养价值评价: 氨基酸比值系数法[J]. 营养学报, 1988, 10(2): 187-190.
- ZHU ST, WU K. Nutritional evaluation of protein: ratio coefficient of amino acid[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 1988, 10(2): 187-190 (in Chinese).
- [21] 陈艳芳, 鲍大鹏, 陈洪雨, 吴莹莹, 王莹, 万佳宁, 赵勇. 蛋白质品质评价方法及其在食用菌中的应用进展[J]. 食用菌学报, 2020, 27(3): 92-104.
- CHEN YF, BAO DP, CHEN HY, WU YY, WANG Y, WAN JN, ZHAO Y. Advances in protein quality assessment methods and their applications on edible fungi[J]. Acta Edulis Fungi, 2020, 27(3): 92-104 (in Chinese).
- [22] 彭智华, 龚敏方. 蛋白质的营养评价及其在食用菌营养评价上的应用[J]. 食用菌学报, 1996, 3(3): 56-64.
- PENG ZH, GONG MF. Protein nutrition evaluation and its application in nutrition evaluation of edible fungi[J]. Acta Edulis Fungi, 1996, 3(3): 56-64 (in Chinese).
- [23] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中铅的测定: GB 5009.12—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard-Determination of lead in food: GB 5009.12—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017 (in Chinese).
- [24] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中总砷及无机砷的测定: GB 5009.11—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard-Determination of total arsenic and abio: arsenic in food: GB 5009.11—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015 (in Chinese).
- [25] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中镉的测定: GB 5009.15—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- National Health and Family Planning Commission of

- the People's Republic of China. National Food Safety Standard-Determination of cadmium in food: GB 5009.15—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015 (in Chinese).
- [26] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中总汞及有机汞的测定: GB 5009.17—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015. National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National Food Safety Standard-Determination of total mercury and organic: mercury in foods: GB 5009.17—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015 (in Chinese).
- [27] 中华人民共和国农业部. 蔬菜和水果中有机磷、有机氯、拟除虫菊酯和氨基甲酸酯类农药多残留的测定: NY/T 761—2008[S]. 北京: 中国农业出版社, 2008. Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Pesticide multiresidue screen methods for determination of organophosphorus pesticides, organochlorine pesticides, pyrethroid pesticides and carbamate pesticides in vegetables and fruits: NY/T 761—2008[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2008 (in Chinese).
- [28] 中华人民共和国农业部. 蔬菜水果中多菌灵等4种苯并咪唑类农药残留量的测定高效液相色谱法: NY/T 1680—2009[S]. 北京: 中国农业出版社, 2009. Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Determination of carbendazim and other 3 benzimidazoles in vegetable and fruit by HPLC: NY/T 1680—2009[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2009 (in Chinese).
- [29] 刘宏. 食用菌营养价值及开发利用[J]. 中国食物与营养, 2007, 13(12): 25-27. LIU H. Nutritional value and development and utilization of edible fungi[J]. Food and Nutrition in China, 2007, 13(12): 25-27 (in Chinese).
- [30] 陈龙, 郭晓晖, 李富华, 夏春燕, 明建. 食用菌膳食纤维功能特性及其应用研究进展[J]. 食品科学, 2012, 33(11): 303-307. CHEN L, GUO XH, LI FH, XIA CY, MING J. Research progress on the function and application of dietary fiber from edible fungi[J]. Food Science, 2012, 33(11): 303-307 (in Chinese).
- [31] 薛帆正, 黄海辰, 吴福泉, 李晓敏, 吴小平, 傅俊生. 真菌黑色素研究现状与产业应用[J]. 生物技术通报, 2021, 37(11): 32-41. XUE FZ, HUANG HC, WU FQ, LI XM, WU XP, FU JS. Research status and industrial application of fungal melanin[J]. Biotechnology Bulletin, 2021, 37(11): 32-41 (in Chinese).
- [32] 郑素月, 张国庆, 章晓庆, 崔黎, 王贺祥. 不同温度对不同含水量食用菌贮藏效果的影响[J]. 中国食用菌, 2008, 27(6): 52-53. ZHENG SY, ZHANG GQ, ZHANG XQ, CUI L, WANG HX. Effect of different temperature on the storage of different water content of edible mushrooms[J]. Edible Fungi of China, 2008, 27(6): 52-53 (in Chinese).
- [33] 杨月欣. 中国食物成分表-第二册: 标准版[M]. 6 版. 北京: 北京大学医学出版社, 2019. YANG YX. China Food Composition Tables - Volume Two: Standard Edition[M]. 6th ed. Beijing: Peking University Medical Press, 2019 (in Chinese).
- [34] 王远山, 徐建妙, 陈小龙, 郑裕国. 药用氨基酸的应用及其生物催化与生物转化法生产[J]. 中国现代应用药学, 2005, 22(S3): 825-828. WANG YS, XU JM, CHEN XL, ZHENG YG. Applications, biocatalytic synthesis and biotransformation of pharmaceutical amino acids[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2005, 22(S3): 825-828 (in Chinese).
- [35] 刘苏, 姜玥, 罗建平, 潘利华, 查学强. 5 种食用菌多糖理化性质及免疫活性的比较研究[J]. 食品科学, 2015, 36(13): 252-256. LIU S, JIANG Y, LUO JP, PAN LH, ZHA XQ. Physicochemical properties and immunomodulating activities of polysaccharides from five species of edible mushrooms[J]. Food Science, 2015, 36(13): 252-256 (in Chinese).
- [36] 刘美琴, 李建中, 孔繁祚. 灵芝多糖的研究进展[J]. 微生物学通报, 1998, 25(3): 173-175. LIU MQ, LI JZ, KONG FZ. Research progress of ganoderma lucidum polysaccharide[J]. Microbiology China, 1998, 25(3): 173-175 (in Chinese).
- [37] 张慢, 邢苏徽, 千春录, 刘俊, 阚娟, 金昌海. 7 种食用菌的营养成分及抗氧化性分析[J]. 食品科技, 2022, 47(6): 120-126. ZHANG M, XING SH, QIAN CL, LIU J, KAN J, JIN CH. Analysis of the nutritional components and antioxidant properties of seven species of edible mushrooms[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(6): 120-126 (in Chinese).
- [38] 杨亚兰, 任佳丽, 张慧. 食用菌中萜类物质及其生物活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(1): 305-310. YANG YL, REN JL, ZHANG H. Research progress of terpenoids and bioactivities in edible mushroom[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(1): 305-310 (in Chinese).
- [39] 裴凌鹏, 惠伯棣, 金宗濂, 张静. 黄酮类化合物的生理活性及其制备技术研究进展[J]. 食品科学, 2004, 25(2): 203-207. PEI LP, HUI BD, JIN ZL, ZHANG J. Review on health function processing technology and market prospects of flavonoids[J]. Food Science, 2004, 25(2): 203-207 (in Chinese).

- [40] 肖星凝, 袁娅, 廖霞, 王丽颖, 石芳, 明建. 食用菌抗氧化活性成分及其抗氧化作用机制研究进展[J]. 食品与机械, 2016, 32(11): 207-211.
XIAO XN, YUAN Y, LIAO X, WANG LY, SHI F, MING J. Research advance on antioxidant active composition and antioxidant mechanisms of edible fungi[J]. Food & Machinery, 2016, 32(11): 207-211 (in Chinese).
- [41] 孙延芳, 刘艳凯, 梁宗锁, 刘莹, 刘政. 6种食用菌多酚及其抗氧化活性研究[J]. 广东农业科学, 2011, 38(16): 76-78.
SUN YF, LIU YK, LIANG ZS, LIU Y, LIU Z. Antioxidant activities of polyphenols in six edible fungus[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 38(16): 76-78 (in Chinese).
- [42] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中污染物限量: GB 2762—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard-Contamination limit in food: GB 2762—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022 (in Chinese).
- [43] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量: GB 2763—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard-Maximum residue limits for pesticides in food: GB 2763—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021 (in Chinese).
- [44] 咎立峰, 包海鹰, 图力古尔, 李玉, 朱艳萍. 粗毛纤孔菌子实体化学成分[J]. 菌物学报, 2013, 32(1): 150-156.
ZAN LF, BAO HY, BAU Tolgor, LI Y, ZHU YP. Chemical composition in fruiting body of *Inonotus hispidus* (Hymenochaetales, Basidiomycota)[J]. Mycosystema, 2013, 32(1): 150-156 (in Chinese).
- [45] 杨树东, 包海鹰, 王辉. 粗毛纤孔菌的化学成分及抗肿瘤活性成分[J]. 菌物学报, 2019, 38(1): 127-133.
YANG SD, BAO HY, WANG H. Chemical components and anti-tumour compounds from *Inonotus hispidus*[J]. Mycosystema, 2019, 38(1): 127-133 (in Chinese).
- [46] 刘鑫, 侯若琳, 金珊珊, 戚梦, 胡开辉, 郑明锋, 傅俊生. 药用真菌粗毛纤孔菌的分子甄别及其发酵液抗乳腺癌活性研究[J]. 菌物学报, 2018, 37(2): 215-225.
LIU X, HOU RL, JIN SS, QI M, HU KH, ZHENG MF, FU JS. Molecular screening of medicinal fungus *Inonotus hispidus* and anti-breast cancer activities of its submerged fermentation broth[J]. Mycosystema, 2018, 37(2): 215-225 (in Chinese).
- [47] 韩晨, 包海鹰, 刘颖, 李志军, 宋永学. 粗毛纤孔菌对小鼠急性肾脏损伤和睾丸损伤的修复作用[J]. 食用菌学报, 2021, 28(2): 60-68.
HAN C, BAO HY, LIU Y, LI ZJ, SONG YX. Repairing effects of *Inonotus hispidus* on acute kidney and testicular injuries in mice[J]. Acta Edulis Fungi, 2021, 28(2): 60-68 (in Chinese).
- [48] 付立忠, 陆娜, 闫静, 王伟科, 宋吉玲, 袁卫东, 周祖法. 三种桑黄属真菌人工栽培子实体营养、药效成分及抗氧化活性分析评价[J]. 菌物学报, 2021, 40(8): 2148-2158.
FU LZ, LU N, YAN J, WANG WK, SONG JL, YUAN WD, ZHOU ZF. Analyses and evaluation of nutrition, active component and antioxidant activities of fruiting bodies of three species of *Sanghuangporus*[J]. Mycosystema, 2021, 40(8): 2148-2158 (in Chinese).
- [49] 杨文慧, 孟敏, 王晓飞, 孙延庆. 不同食用菌的抗氧化活性及总黄酮含量测定研究[J]. 时珍国医国药, 2020, 31(2): 300-303.
YANG WH, MENG M, WANG XF, SUN YQ. Study on antioxidant activity of different edible fungi and determination of total flavonoids[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2020, 31(2): 300-303 (in Chinese).
- [50] 刘鑫, 侯若琳, 麦梦贤, 吴小平, 林文雄, 郑明锋, 傅俊生. 粗毛纤孔菌子实体与菌丝体粗多糖改善小鼠急性酒精肝损伤的比较研究[J]. 菌物学报, 2018, 37(11): 1532-1539.
LIU X, HOU RL, MAI MX, WU XP, LIN WX, ZHENG MF, FU JS. Comparison of effects of crude polysaccharide from fruiting body and mycelia of *Inonotus hispidus* on acute alcoholic liver injury in mice[J]. Mycosystema, 2018, 37(11): 1532-1539 (in Chinese).
- [51] HOU RL, LIU X., XIANG KK, CHEN LT, WU XP, LIN WX, ZHENG MF, FU JS. Characterization of the physicochemical properties and extraction optimization of natural melanin from *Inonotus hispidus* mushroom[J]. Food Chemistry, 2019, 277:533-542.
- [52] LI XM, WU WY, ZHANG FP, HU X, YUAN Y, WU XP, FU JS. Differences between water-soluble and water-insoluble melanin derived from *Inonotus hispidus* mushroom[J]. Food Chemistry: X, 2022, 16: 100498.
- [53] 李晓敏, 袁源, 薛帆正, 吴小平, 傅俊生. 粗毛纤孔菌产胞外黑色素发酵条件优化及其抗氧化活性研究[J]. 核农学报, 2023, 37(3): 531-539.
LI XM, YUAN Y, XUE FZ, WU XP, FU JS. Optimization of fermentation conditions for extracellular melanin production from *Inonotus hispidus* and its antioxidant activity[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2023, 37(3): 531-539 (in Chinese).