

不同食用菌水提物与醇提物活性成分含量及抗氧化活性分析

刘梦晨^{1,2},张琳¹,黄橙紫²,张皓越²,彭源德²,谢纯良²,周映君²,朱作华²,龚文兵^{2*},胡颂平^{1*}
(1. 江西农业大学生物科学与工程学院,江西 南昌 330045;2. 中国农业科学院麻类研究所,湖南 长沙 410205)

摘要: 该文对19种食用菌水提物与醇提物活性成分含量及抗氧化活性进行检测与比较。结果表明,不同食用菌提取物活性成分含量及抗氧化能力具有明显差异。其中猪肚菇水提物中多糖含量最高,为4331.65 μg/mL;蛹虫草水提物中总多酚和总黄酮含量最高,分别为556.88 μg/mL和68.38 μg/mL。抗氧化活性方面,灵芝醇提物DPPH·清除能力、蛹虫草水提物ABTS⁺清除能力、姬松茸醇提物羟自由基清除能力较强,分别为92.36%、90.07%、92.31%。同种食用菌的水提物与醇提物活性成分含量及抗氧化能力也存在明显差异。以吸光度大小衡量总还原力强弱,竹荪醇提物总还原力达到1.35,而其水提物为0.62。相关性分析结果表明,总多酚和总黄酮含量与抗氧化活性相关性较强,与DPPH·清除能力、ABTS⁺清除能力和总还原力呈极显著正相关。

关键词: 食用菌;水提物;醇提物;活性成分;抗氧化活性

Evaluation of Active Components and Antioxidant Activity of Water and Alcohol Extracts of Different Edible Mushrooms

LIU Mengchen^{1,2},ZHANG Lin¹,HUANG Chengzi²,ZHANG Haoyue²,PENG Yuande²,XIE Chunliang²,
ZHOU Yingjun²,ZHU Zuohua²,GONG Wenbing^{2*},HU Songping^{1*}

(1. College of Bioscience and Bioengineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi, China;2. Institute of Bast Fiber Crops, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: The content of active components and antioxidant activity of water and alcohol extracts from nineteen edible mushrooms were evaluated and compared. The results showed that there were significant differences in active component content and antioxidant activity among different edible mushroom extracts. Among the surveyed mushrooms, the highest polysaccharide content was observed in the water extract of *Clitocybe maxima*, which was 4331.65 μg/mL. The highest content of total polyphenols and total flavonoids was found in the water extract of *Cordyceps militaris*, which was 556.88 μg/mL and 68.38 μg/mL, respectively. For antioxidant activity, the alcohol extract of *Ganoderma lingzhi* (with 92.36% DPPH· scavenging ability), the water extract of *C. militaris* (with 90.07% ABTS⁺ scavenging ability), and the alcohol extract of *Agaricus blazei* (with 92.31% hydroxyl radical scavenging ability) demonstrated good performances. In addition, there were also significant differences in active component content and antioxidant activity between water and alcohol extracts of the same edible mushroom. As measured by absorbance, the total reducing power of *Dictyophora indusiata* alcohol extract reached 1.35, while that of its water extract was 0.62. The results of correlation analysis showed that the content of total polyphenols and total flavonoids has strong correlation with antioxidant activity, exhibiting highly significant positive correlation with DPPH· scavenging capacity, ABTS⁺ scavenging capacity, and total reducing power.

基金项目:湖南省自然科学基金面上项目(2023JJ30619);中国农业科学院麻类研究所基本科研业务费专项所级统筹项目(1610242023005);中央引导地方科技发展资金项目(20241ZDF02102)

作者简介:刘梦晨(1998—),女(汉),硕士研究生,研究方向:食用菌挖掘与利用。

*通信作者:龚文兵(1986—),男(汉),副研究员,博士,研究方向:食用菌挖掘与利用;胡颂平(1969—),男(汉),教授,博士,研究方向:植物细胞工程。

Key words: edible mushrooms; water extracts; alcohol extracts; active components; antioxidant activity

引文格式:

刘梦晨,张琳,黄橙紫,等.不同食用菌水提取物与醇提取物活性成分含量及抗氧化活性分析[J].食品研究与开发,2025,46(2):40-48.

LIU Mengchen, ZHANG Lin, HUANG Chengzi, et al. Evaluation of Active Components and Antioxidant Activity of Water and Alcohol Extracts of Different Edible Mushrooms[J]. Food Research and Development, 2025, 46(2): 40-48.

食用菌子实体硕大,味道鲜美,营养价值丰富,是食药两用的大型真菌,对于人们健康非常有益^[1]。因食用菌具有高蛋白、低脂肪、富含维生素和矿物质的营养特点,备受广大消费者的关注和青睐。此外,食用菌还富含多糖、多酚类、活性蛋白、萜类、核苷类和甾醇类等多种功效成分,具有提高机体免疫力、抗氧化、抗肿瘤、抗病毒、降血脂、降血糖和抗衰老等功能活性,广泛应用于功能性食品研发^[2]。

鉴于丰富的营养价值与显著的生理功能,食用菌在食品工业中具有广阔的应用前景^[3]。我国食用菌资源丰富,不同食用菌种类活性成分的差异赋予了其生理功能的多样性^[4]。然而目前食用菌活性成分提取与功能评价研究多集中于香菇、灵芝、虫草等,不利于丰富和创新我国食用菌功能食品原料。因此,亟需系统开展相关研究,充分挖掘和利用不同食用菌种类的价值。

不同溶剂对食用菌活性成分提取具有显著影响,而多糖、多酚类化合物等活性成分含量与其抗氧化活性紧密相关。Fogarasi 等^[5]研究表明酸性水、乙醇/水/醋酸、乙烷等不同溶剂类型对香菇总多酚含量和总抗氧化能力具有显著影响。因此,评价不同提取溶剂对食用菌活性成分含量以及抗氧化活性的影响十分必要。

本研究测定 19 种主要栽培的食用菌水提取物与醇提取物中多糖、总多酚和总黄酮等活性成分含量,通过测定 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH) 自由基清除能力、2,2-联氨-双-(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS]阳离子自由基清除能力、·OH 清除能力和总还原力对其抗氧化活性进行研究,并对活性成分和抗氧化活性进行相关性分析,以期为促进食用菌资源的挖掘与利用提供参考。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

本试验所用的 19 种食用菌子实体样本如表 1 所示。

1.2 主要试剂与仪器

硫酸、DPPH、铁氰化钾、过二硫酸钾(均为分析纯):国药集团化学试剂有限公司;三氯乙酸(分析纯)、D-无水葡萄糖(98%):上海麦克林生化科技股份有限

表 1 19 种食用菌子实体样本

Table 1 Fruiting body samples of nineteen edible mushrooms

食用菌种类	拉丁学名	来源
糙皮侧耳	<i>Pleurotus ostreatus</i>	市售
香菇	<i>Lentinula edodes</i>	市售
双孢蘑菇	<i>Agaricus bisporus</i>	市售
猪肚菇	<i>Clitocybe maxima</i>	市售
秀珍菇	<i>Pleurotus pulmonarius</i>	市售
鹿茸菇	<i>Lyophyllum decastes</i>	市售
蟹味菇	<i>Hyjsizygyus marmoreus</i>	市售
黑木耳	<i>Auricularia auricula</i>	市售
毛木耳	<i>Auricularia polytricha</i>	市售
姬松茸	<i>Agaricus blazei</i>	市售
竹荪	<i>Dictyophora indusiata</i>	市售
银耳	<i>Tremella fuciformis</i>	市售
金耳	<i>Tremella aurantialba</i>	自行栽培种植
灵芝	<i>Ganoderma lingzhi</i>	市售
胶质鳞伞	<i>Pholiota gummosa</i>	市售
黑皮鸡枞	<i>Oudemansiella raphanipies</i>	市售
金针菇	<i>Flammulina filiformis</i>	市售
猴头菇	<i>Hericiium erinaceus</i>	自行栽培种植
蛹虫草	<i>Cordyceps militaris</i>	市售

公司;水杨酸(分析纯)、ABTS(优级纯)、没食子酸(99%)、芦丁(98%)、牛血清白蛋白:北京索莱宝科技有限公司;二水合磷酸二氢钠、十二水合磷酸氢二钠、无水乙醇(均为分析纯):湖南汇虹试剂有限公司。

酶标仪(I510):赛默飞世尔科技公司;数控超声波清洗器(KQ-5000D):昆山市超声仪器有限公司;循环水真空泵(BSH-3A):上海一恒科学仪器有限公司;电子天平(LQ-C3002):上海瑶新电子科技有限公司;高速离心机(TG18):长沙英泰仪器有限公司;高速多功能粉碎机(1000Y):永康市铂欧五金制品有限公司;水浴锅(SHJ-A6):常州市亿能实验仪器厂。

1.3 水提取物与醇提取物的制备

将不同食用菌子实体样本切成小块,使用高速多功能粉碎机粉碎,过 40 目筛网,密封保存备用。

1.3.1 食用菌水提取物制备

分别称取 19 种食用菌菌粉 1 g,按 1:40 (g/mL)的料液比加入去离子水,在温度 60 °C、超声功率 100 W 条件下连续超声提取 3 h。使用高速离心机 8 000 r/min

离心 15 min, 取上清液, 使用 1.2 μm 微孔滤膜进行抽滤, 收集滤液, 得到水提物。

1.3.2 食用菌醇提物制备

分别称取粉碎过筛的 19 种食用菌菌粉 1 g, 按 1:40 (g/mL) 的料液比加入体积分数 70% 的乙醇溶液, 并按 1.3.1 的条件参数进行超声辅助提取, 得到醇提物, 冷藏保存, 备用。

1.4 活性成分含量测定

1.4.1 多糖与还原糖含量测定

19 种食用菌水提物与醇提物中多糖含量采用苯酚硫酸法进行测定^[6]。以 D-无水葡萄糖为标准品, 其质量浓度为横坐标, 490 nm 波长处的吸光度为纵坐标, 绘制的标准曲线为 $y=0.0084x+0.1174$ ($R^2=0.9955$)。还原糖含量采用 3,5-二硝基-水杨酸法进行测定^[7]。以 D-无水葡萄糖为标准品, 其质量浓度为横坐标, 540 nm 波长处的吸光度为纵坐标, 绘制的标准曲线为 $y=35.659x-0.1811$ ($R^2=0.9987$)。将样品反应后所得的吸光度, 分别代入多糖与还原糖的标准曲线计算其含量。

1.4.2 总多酚与总黄酮含量测定

总多酚含量采用福林酚法测定^[8]。以没食子酸含量为横坐标, 760 nm 波长处的吸光度为纵坐标, 绘制的标准曲线为 $y=0.0062x+0.0091$ ($R^2=0.9977$)。总黄酮含量采用 AlCl_3 法测定^[9], 以芦丁含量为横坐标, 510 nm 波长处的吸光度为纵坐标, 绘制的标准曲线为 $y=1.2926x+0.0021$ ($R^2=0.9994$)。将样品反应后所得的吸光度, 分别代入总多酚与总黄酮的标准曲线计算其含量。

1.4.3 总蛋白含量测定

总蛋白含量采用考马斯亮蓝法测定^[10]。以牛血清白蛋白为标准品, 其含量为横坐标, 595 nm 波长处的吸光度为纵坐标, 绘制的标准曲线为 $y=0.0021x+0.5718$ ($R^2=0.9991$)。将样品反应后所得的吸光度, 代入标准曲线计算总蛋白含量。

1.5 抗氧化活性研究

1.5.1 DPPH·清除率测定

参考 Choe 等^[11]和 Luan 等^[12]的检测方法, 对 19 种食用菌水提物与醇提物的 DPPH·清除率进行测定。取 1 mL 样品提取液与 1 mL 0.2 mol/L DPPH 溶液混合均匀, 室温静置反应 30 min 后, 在 517 nm 波长处测定混合液的吸光度, 得到吸光度 A_1 ; 试验对照组用 1 mL 无水乙醇与样品提取液混合, 得到吸光度 A_2 ; 用 1 mL 无水乙醇替代样品提取液与 DPPH 混合, 得到空白对照组吸光度 A_0 。DPPH·清除率 ($W, \%$) 计算公式如下。

$$W = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0} \right) \times 100$$

1.5.2 ABTS⁺·清除率测定

参考刘宇琪等^[13]的检测方法, 进行 ABTS⁺·清除率的测定。取 0.2 mL 样品提取液与 0.8 mL ABTS 工作液混合均匀, 室温静置反应 6 min 后, 测定 734 nm 波长处的吸光度, 得到吸光度 A_1 ; 空白对照组用无水乙醇替代样品提取液, 得到吸光度 A_0 。ABTS⁺·清除率 ($R, \%$) 计算公式如下。

$$R = \left(1 - \frac{A_1}{A_0} \right) \times 100$$

1.5.3 ·OH 清除率测定

参考 Zhang 等^[14]的检测方法, 对 19 种食用菌水提物与醇提物的·OH 清除率进行测定。将 1 mL 6 mmol/L FeSO_4 溶液、1 mL 样品提取液与 1 mL 6 mmol/L H_2O_2 溶液混合, 反应 10 min 后加入 1 mL 6 mmol/L 水杨酸溶液, 振荡摇匀, 室温静置反应 30 min 后, 检测混合液 510 nm 波长处的吸光度, 得到吸光度 A_1 ; 空白对照组用去离子水代替样品提取液, 得到吸光度 A_0 。·OH 清除率 ($O, \%$) 计算公式如下。

$$O = \left(1 - \frac{A_1}{A_0} \right) \times 100$$

1.5.4 总还原力的测定

参考 Zhang 等^[15]的检测方法, 进行总还原力测定。将 1 mL 样品提取液、2.5 mL 0.2 mol/L 磷酸缓冲盐溶液 (pH6.6) 和 2.5 mL 质量分数 1% 的铁氰化钾溶液混合均匀, 于 50 $^\circ\text{C}$ 水浴锅中保温 20 min, 加入 2.5 mL 质量分数 10% 的三氯乙酸溶液, 3 500 r/min 离心 10 min, 取 2.5 mL 上清液与 2.5 mL 去离子水、0.5 mL 质量分数 0.1% 的 FeCl_3 溶液混合均匀, 室温下静置反应 10 min 后, 在 700 nm 波长处测定吸光度, 以吸光度代表总还原力的强弱。

1.6 数据处理

设置 3 次重复试验, 使用 Excel 软件进行数据整理和作图, 使用 GraphPad Prism 9.0 进行方差分析和相关性分析, 采用 Tukey 检验进行多重比较, $p < 0.05$ 表示具有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 活性成分含量结果分析

2.1.1 食用菌水提物与醇提物中多糖与还原糖含量

多糖是食用菌最主要的活性成分之一, 被称为“生物反应调节物”, 具有多种生物功能, 常被用于功能性食品原料研发。食用菌水提物与醇提物中多糖含量见图 1。

由图 1 可知, 不同食用菌水提物中多糖含量均高于其醇提物。水提物中多糖含量为 519.84~4 331.65 $\mu\text{g/mL}$, 醇提物中多糖含量为 379.29~3 232.58 $\mu\text{g/mL}$ 。食用菌

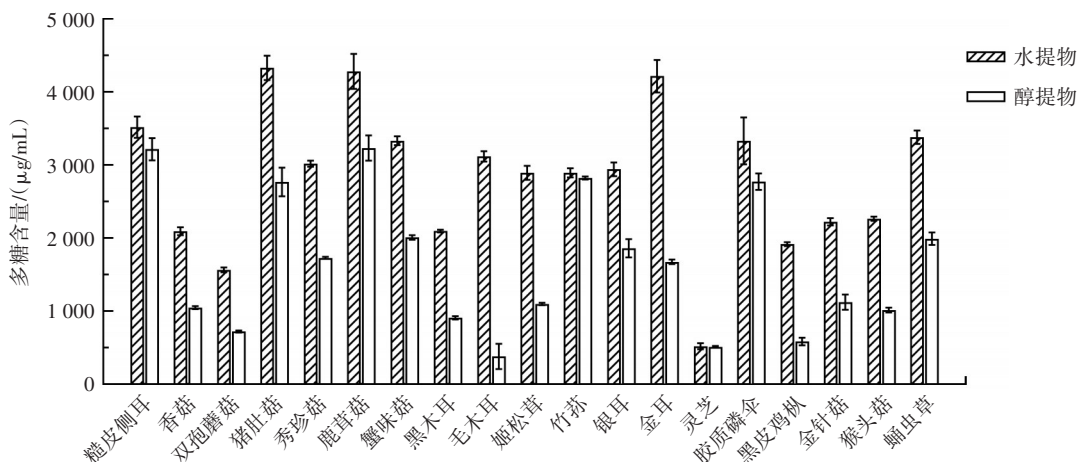


图1 19种食用菌水提取物与醇提取物中多糖含量

Fig.1 Polysaccharide content in water and alcohol extracts of nineteen edible mushrooms

种间差异明显,其中猪肚菇、鹿茸菇和金耳水提取物中多糖含量较高,分别为 4 331.65、4 283.31 μg/mL 和 4 216.76 μg/mL,明显高于其余食用菌水提取物。鹿茸菇和糙皮侧耳醇提取物中多糖含量较高,分别为 3 232.58 μg/mL 和 3 217.00 μg/mL,明显高于其余食用菌醇提取物。综合来看,鹿茸菇提取物中多糖含量丰富。

灵芝提取物中多糖含量较低,其水提取物与醇提取物中多糖含量分别为 519.84 μg/mL 和 508.77 μg/mL。

还原糖是指含有自由醛基或者酮基的具有还原性的糖类,食用菌体内的还原糖主要是葡萄糖、果糖和麦芽糖^[16]。食用菌水提取物与醇提取物中还原糖含量见图 2。

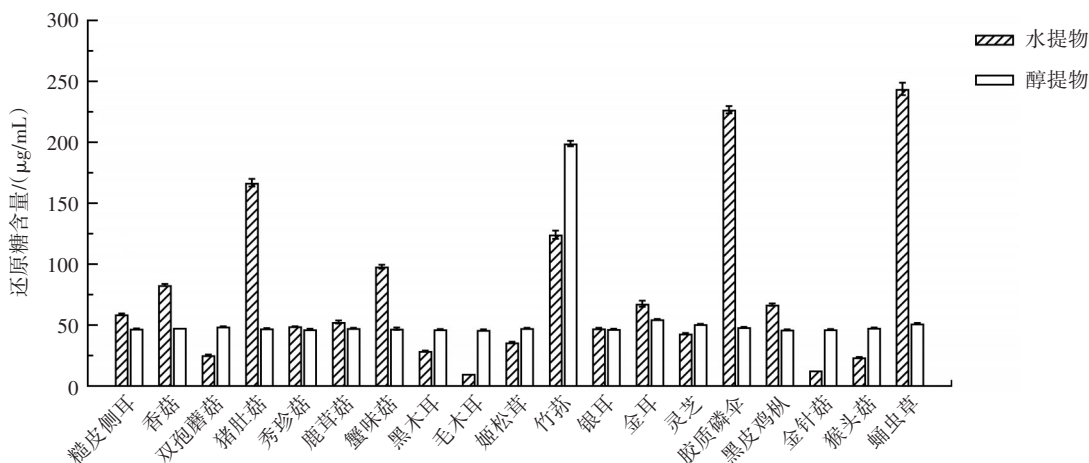


图2 19种食用菌水提取物与醇提取物中还原糖含量

Fig.2 Reducing sugar content in water and alcohol extracts of nineteen edible mushrooms

由图 2 可知,大部分食用菌水提取物中还原糖含量高于其醇提取物。水提取物中还原糖含量为 10.13~243.98 μg/mL,醇提取物中还原糖含量为 46.13~199.09 μg/mL。蛹虫草、胶质鳞伞、猪肚菇和竹荪水提取物中还原糖含量较高,分别为 243.98、226.89、166.94 μg/mL 和 124.30 μg/mL,明显高于其余食用菌水提取物。竹荪醇提取物中还原糖含量最高,为 199.09 μg/mL,明显高于其余食用菌醇提取物;金耳、灵芝醇提取物中还原糖含量较高,分别为 54.99 μg/mL 和 50.91 μg/mL。综合来看,竹荪、蛹虫草、胶质鳞伞和猪肚菇提取物中还原糖含量丰富,而毛木耳提取物中还原糖含量相对较低。

2.1.2 食用菌水提取物与醇提取物中总多酚与总黄酮含量
多酚类化合物具有较强的抗氧化、降血糖和抑菌等生理活性,食用菌富含此物质,使其成为潜在的保健食品,备受消费者的喜爱^[17]。食用菌水提取物与醇提取物中总多酚含量见图 3。

由图 3 可知,不同食用菌水提取物中总多酚含量均高于其醇提取物,除毛木耳、银耳和金耳外,其余种类水提取物与其醇提取物中的总多酚含量均具有明显差异。水提取物中总多酚含量为 80.05~556.88 μg/mL,醇提取物中总多酚含量为 74.26~204.68 μg/mL。蛹虫草水提取物中总多酚含量最高,为 556.88 μg/mL,明显高于其余食用菌水提取物;糙皮侧耳、秀珍菇、姬松茸和竹荪水提取物中

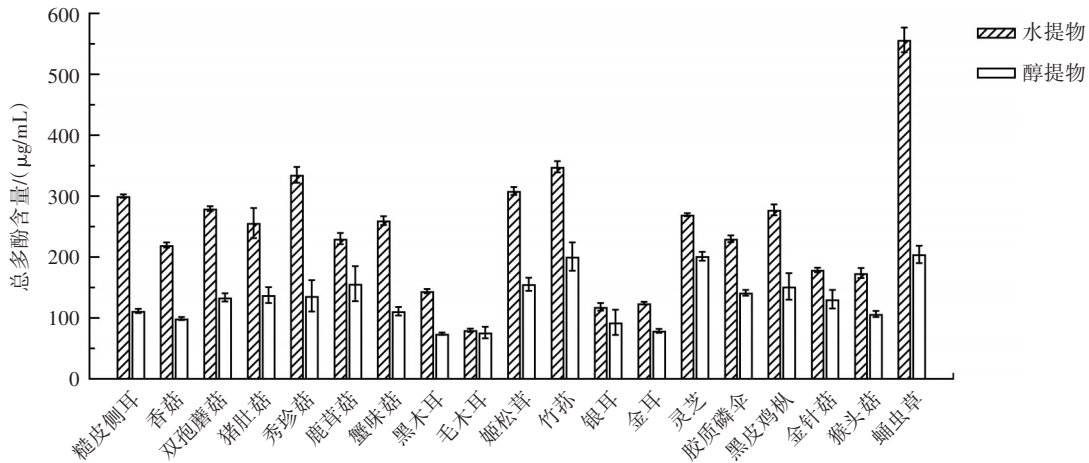


图3 19种食用菌水提取物与醇提取物中总多酚含量

Fig.3 Total polyphenol content in water and alcohol extracts of nineteen edible mushrooms

总多酚含量较高,均大于 300 $\mu\text{g/mL}$ 。蛹虫草、灵芝和竹荪醇提取物中总多酚含量较高,分别为 204.68、201.72 $\mu\text{g/mL}$ 和 200.90 $\mu\text{g/mL}$;而黑木耳、毛木耳和金耳醇提取物中总多酚含量较低,均低于 80 $\mu\text{g/mL}$ 。综合来看,蛹虫草、灵芝和竹荪提取物中总多酚含量较高,

均高于 200 $\mu\text{g/mL}$ 。

黄酮类化合物属于多酚类化合物,具有抗氧化、抗菌等作用,被广泛应用于食品行业,具有很广阔的市场应用前景^[18]。食用菌水提取物与醇提取物中总黄酮含量见图4。

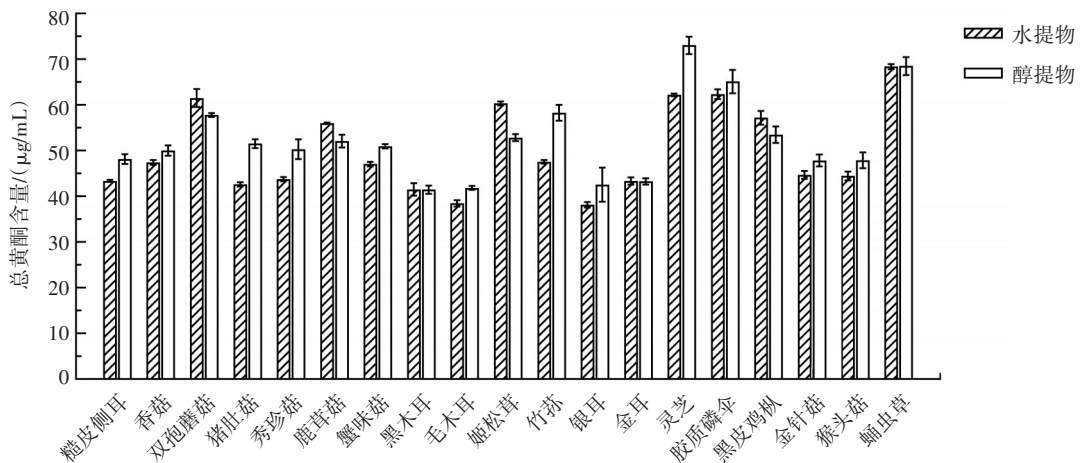


图4 19种食用菌水提取物与醇提取物中总黄酮含量

Fig.4 Total flavonoid content in water and alcohol extracts of nineteen edible mushrooms

由图4可知,大部分食用菌醇提取物中总黄酮含量高于其水提取物,此外,猪肚菇、秀珍菇、姬松茸、竹荪和灵芝水提取物与醇提取物中总黄酮含量存在明显差异。水提取物中总黄酮含量为 38.15~68.38 $\mu\text{g/mL}$,醇提取物中总黄酮含量为 41.48~73.08 $\mu\text{g/mL}$ 。蛹虫草、胶质磷伞、灵芝、双孢蘑菇和姬松茸水提取物中总黄酮含量较高,均大于 60 $\mu\text{g/mL}$,明显高于其余食用菌水提取物。灵芝、蛹虫草和胶质磷伞醇提取物中总黄酮含量较高,均大于 65 $\mu\text{g/mL}$,明显高于其余食用菌醇提取物。综合来看,灵芝、蛹虫草和胶质磷伞提取物中总黄酮含量较高,而黑木耳、毛木耳和银耳提取物中总黄酮含量较低。

2.1.3 食用菌水提取物与醇提取物中总蛋白含量

蛋白质在食用菌中含量丰富,其对于抗氧化、免疫

调节等方面都有重要作用^[19]。食用菌水提取物与醇提取物中总蛋白含量见图5。

由图5可知,除双孢蘑菇外,其余食用菌醇提取物中总蛋白含量均明显高于其水提取物。水提取物中总蛋白含量为 171.68~823.71 $\mu\text{g/mL}$,醇提取物中总蛋白含量为 597.23~1 076.27 $\mu\text{g/mL}$ 。双孢蘑菇水提取物中总蛋白含量最高,为 823.71 $\mu\text{g/mL}$,明显高于其余食用菌水提取物;姬松茸、秀珍菇和猴头菇水提取物中总蛋白含量较高,分别为 697.06、696.06、696.00 $\mu\text{g/mL}$;而金耳和毛木耳水提取物中总蛋白含量较低,分别为 171.68 $\mu\text{g/mL}$ 和 289.62 $\mu\text{g/mL}$ 。胶质磷伞、灵芝、糙皮侧耳和姬松茸醇提取物中总蛋白含量较高,分别为 1 076.27、1 045.05、975.30 $\mu\text{g/mL}$ 和 964.18 $\mu\text{g/mL}$;黑木耳、毛木耳和银耳

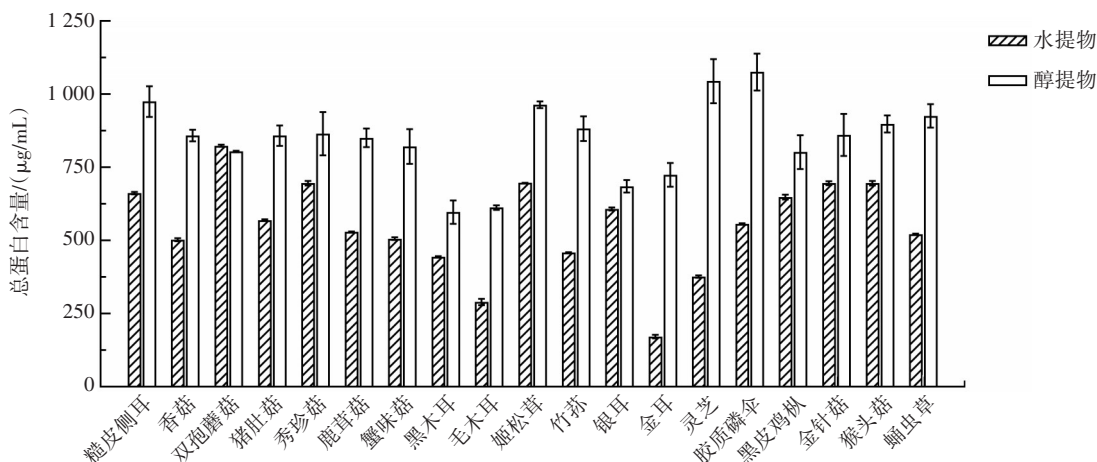


图5 19种食用菌水提取物与醇提取物中总蛋白含量

Fig.5 Total protein content in water and alcohol extracts of nineteen edible mushrooms

醇提取物中总蛋白含量较低,均低于700 µg/mL。综合来看,姬松茸提取物中总蛋白含量丰富。

2.1.4 方差分析

为考察食用菌种类与提取方式对活性成分含量的影响,进行双因素方差分析,结果见表2。

表2 方差分析结果

Table 2 Results of analysis of variance

项目	误差来源	平方和	自由度	均方	p 值	
多糖含量	食用菌种类	172 194 177	18	9 566 343	<0.000 1	
	提取方法	79 331 996	1	79 331 996	<0.000 1	
	交互作用	26 005 790	18	1 444 766	<0.000 1	
	残差	2 384 819	189	12 618		
	还原糖含量	食用菌种类	241 207	18	13 400	<0.000 1
还原糖含量	提取方法	16 815	1	16 815	<0.000 1	
	交互作用	178 161	18	9 898	<0.000 1	
	残差	357.8	133	2.69		
	总多酚含量	食用菌种类	1 071 766	18	59 543	<0.000 1
	总多酚含量	提取方法	757 855	1	757 855	<0.000 1
交互作用		336 229	18	18 679	<0.000 1	
残差		28 596	190	150.5		
总黄酮含量		食用菌种类	16 501	18	916.7	<0.000 1
总黄酮含量		提取方法	343.1	1	343.1	<0.000 1
	交互作用	1 335	18	74.15	<0.000 1	
	残差	327.1	190	1.722		
	总蛋白含量	食用菌种类	1 466 308	18	81 462	<0.000 1
	总蛋白含量	提取方法	2 524 362	1	2 524 362	<0.000 1
交互作用		777 233	18	43 180	<0.000 1	
残差		82 464	76	1 085		

注: $p<0.000 1$ 表示影响极显著。

由表2可知,食用菌种类、不同提取方法以及两个因素的交互作用对多糖、还原糖、总多酚、总黄酮和总蛋白含量均有极显著影响($p<0.000 1$)。

2.2 抗氧化活性

抗氧化活性结果见表3。

表3 19种食用菌抗氧化活性测定结果

Table 3 Results of antioxidant activities of nineteen edible mushrooms

食用菌种类	DPPH·清除率/%		ABTS·清除率/%		·OH清除率/%		总还原力	
	水提取物	醇提取物	水提取物	醇提取物	水提取物	醇提取物	水提取物	醇提取物
糙皮侧耳	19.11	38.94	74.44	53.47	60.86	90.22	0.46	0.47
香菇	59.52	37.70	56.19	30.70	63.78	87.59	0.55	0.47
双孢蘑菇	67.57	63.77	72.74	57.68	85.07	90.22	0.55	0.78
猪肚菇	53.38	64.39	84.96	65.93	65.05	90.82	0.56	0.99
秀珍菇	40.28	46.36	85.74	61.07	84.23	92.11	0.54	0.56
鹿茸菇	59.61	62.75	89.94	74.93	58.34	90.57	0.55	0.88
蟹味菇	51.65	40.75	80.21	50.73	60.63	88.69	0.55	0.53
黑木耳	22.69	32.33	31.53	12.47	72.86	65.55	0.26	0.25
毛木耳	11.46	31.03	20.05	6.83	28.29	58.17	0.17	0.20
姬松茸	83.35	79.91	72.78	60.97	36.95	92.31	0.55	1.01
竹荪	58.69	61.12	69.23	56.15	73.67	83.82	0.62	1.35
银耳	14.37	26.05	27.03	14.35	83.99	82.90	0.21	0.18
金耳	26.96	38.59	16.74	11.27	53.40	90.02	0.41	0.38
灵芝	81.94	92.36	63.92	82.64	63.23	90.19	0.57	1.25
胶质磷伞	68.20	75.22	59.34	51.75	57.89	79.81	0.53	0.78
黑皮鸡枞	62.93	58.49	83.95	68.38	31.60	85.75	0.56	0.64
金针菇	22.42	35.47	85.06	68.36	50.57	86.66	0.47	0.48
猴头菇	30.84	41.84	71.08	51.26	61.41	80.34	0.46	0.55
蛹虫草	79.40	70.87	90.07	84.85	34.13	89.94	0.54	1.16

2.2.1 DPPH·清除率

由表3可知,不同食用菌水提取物对DPPH·的清除率为11.46%~83.35%,醇提取物对DPPH·的清除率为26.05%~92.36%。大部分食用菌醇提取物DPPH·清除能力强于其水提取物,且两者之间存在明显差异。灵芝、姬松茸和蛹虫草具有较强的DPPH·清除能力,均大于70%。其中灵芝水提取物DPPH·清除率为81.94%,醇提

物清除率更是达到 92.36%，明显高于其余食用菌提取物；此外，姬松茸和蛹虫草水提取物 DPPH·清除率亦较高，分别为 83.35% 和 79.40%。

2.2.2 ABTS⁺·清除率

由表 3 可知，不同食用菌水提取物对 ABTS⁺·的清除率为 16.74%~90.07%，醇提取物对 ABTS⁺·的清除率为 6.83%~84.85%。除灵芝外，其余食用菌水提取物 ABTS⁺·清除能力强于其醇提取物；且大部分食用菌水提取物与醇提取物 ABTS⁺·清除能力存在明显差异。蛹虫草、鹿茸菇、秀珍菇、金针菇、猪肚菇和黑皮鸡枞水提取物 ABTS⁺·清除率较高，分别为 90.07%、89.94%、85.74%、85.06%、84.96% 和 83.95%，明显高于其余食用菌水提取物。猪肚菇、鹿茸菇、灵芝、黑皮鸡枞、金针菇和蛹虫草醇提取物清除率均大于 65%。

2.2.3 ·OH 清除率

由表 3 可知，·OH 具有较强的氧化性，它几乎能与所有的生物分子发生反应，产生的氧化应激反应可以导致多种疾病和退化^[20]。不同食用菌水提取物对·OH 的清除率为 28.29%~85.07%，醇提取物对·OH 的清除率为 58.17%~92.31%。除黑木耳和银耳外，其余食用

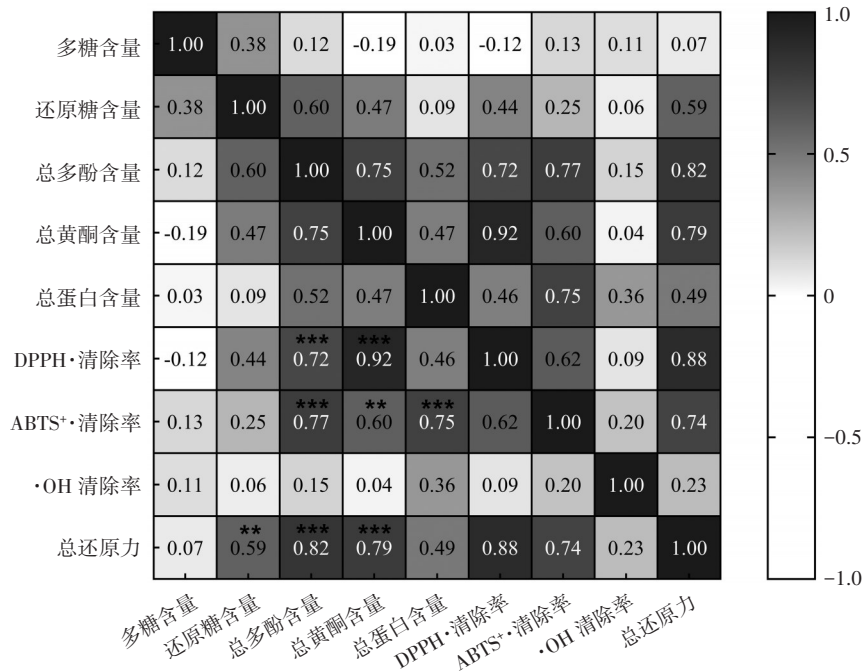
菌醇提取物·OH 清除能力强于其水提取物；除银耳外，其余食用菌水提取物与醇提取物·OH 清除能力存在明显差异。姬松茸、秀珍菇、猪肚菇、鹿茸菇、糙皮侧耳、双孢蘑菇、灵芝和金耳醇提取物清除率均大于 90%，其中姬松茸醇提取物清除率最高，达到 92.31%。对于水提取物，双孢蘑菇、秀珍菇、银耳具有较强的·OH 清除能力，清除率均大于 80%。综合来看，秀珍菇、双孢蘑菇和银耳提取物具有较强的·OH 清除能力。

2.2.4 总还原力

由表 3 可知，不同食用菌提取物具有不同程度的总还原力，水提取物的总还原力为 0.17~0.62，醇提取物的总还原力为 0.18~1.35。大部分食用菌醇提取物总还原力强于其水提取物，且两者之间存在明显差异。竹荪、灵芝和蛹虫草醇提取物总还原力较强，分别为 1.35、1.25 和 1.16，明显高于其余食用菌提取物。猪肚菇、竹荪、灵芝和黑皮鸡枞水提取物总还原力较强，均大于 0.55。综合来看，竹荪、灵芝和蛹虫草表现出较强的总还原力。

2.3 活性成分与抗氧化活性相关性分析

为考察食用菌活性成分含量与抗氧化能力之间的关联，进行了相关性分析，结果见图 6。



*表示影响显著, $p < 0.05$; **表示影响极显著, $p < 0.01$; ***表示影响高度显著, $p < 0.001$ 。

图 6 活性成分含量与抗氧化活性的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis between active component content and antioxidant activity

由图 6 可知，食用菌提取物中多糖含量与抗氧化性指标相关性不显著；还原糖含量与其总还原力呈极显著正相关 ($p < 0.01$)，与 DPPH·清除能力、ABTS⁺·清除能力和·OH 清除能力相关性不显著；总多酚和总黄酮含量与 DPPH·清除能力、ABTS⁺·清除能力和总还原力呈显著正相关 ($p < 0.01$, $p < 0.001$)；总蛋白含量与

ABTS⁺·清除能力呈高度显著正相关 ($p < 0.001$)，与其他抗氧化指标相关性不显著。综上所述，19 种食用菌提取物中的还原糖、总多酚、总黄酮和总蛋白含量与抗氧化活性具有相关性，其中总多酚和总黄酮含量与抗氧化活性相关性较强。食用菌不同活性成分协同作用后呈现出差异化的抗氧化能力。

3 讨论与结论

本研究测定了19种主栽食用菌水提取物与醇提取物中的多糖、还原糖、总多酚、总黄酮和总蛋白等活性成分含量,并通过DPPH·清除能力、ABTS⁺·清除能力、·OH清除能力和总还原力评价其抗氧化活性,在此基础上进行活性成分含量与抗氧化活性的相关性分析。

研究表明不同食用菌提取物中活性成分含量及抗氧化能力具有显著差异。其中,猪肚菇水提取物中多糖含量最高,为4331.65 μg/mL;蛹虫草水提取物中还原糖、总多酚和总黄酮含量最高,分别为243.98、556.88 μg/mL和68.38 μg/mL;灵芝醇提取物DPPH·清除能力最强,清除率达到92.36%;姬松茸醇提取物·OH清除能力最强,清除率达到92.31%。范俐等^[21]测定了不同食用菌粗黄酮含量,表明姬松茸粗黄酮含量>香菇粗黄酮含量>银耳粗黄酮含量;邓艺恒等^[22]研究表明秀珍菇水提取物与醇提取物的抗氧化能力均强于银耳和猴头菇,这些结果与本研究结果相似。我国食用菌资源丰富,但大多种类的药效成分尚待挖掘与研发。本研究显示不同食用菌种类活性成分含量不同,表现出不同的抗氧化能力。广泛开展多种食用菌活性成分和功能特性研究,将有利于充分挖掘其在功能食品研发中的应用前景。

同种食用菌的水提取物与醇提取物活性成分含量和抗氧化活性亦存在明显差异。蛹虫草水提取物ABTS⁺·清除能力为90.07%,而醇提取物为84.85%;竹荪醇提取物总还原力达到1.35,而水提取物为0.62。对于大部分食用菌其醇提取物对DPPH·清除能力、·OH清除能力以及总还原力强于其水提取物,例如灵芝、猪肚菇和鹿茸菇等。王宏雨^[23]研究发现26种食用菌水提液与醇提液中抗氧化能力均有差异;陈健敏等^[24]研究表明,金线莲醇提取物中总黄酮含量远高于水提取物,可能是由于黄酮类化合物难溶于水,所以一般采用有机溶剂提取总黄酮。这些结果表明不同活性成分适宜采用不同的溶剂进行提取,食用菌糖类化合物适宜水提,而黄酮类物质适宜采用乙醇、甲醇等有机溶剂提取。

活性成分含量与抗氧化活性相关性分析显示,食用菌提取物中活性成分含量与抗氧化活性具有不同程度的关联性,其中总多酚和总黄酮含量与DPPH·清除能力、ABTS⁺·清除能力和总还原力呈极显著正相关;总蛋白含量与ABTS⁺·清除能力呈极显著正相关。曾琳娜^[25]研究发现香菇酚类物质含量与其抗氧化能力明显相关;Guo等^[26]对多种食用菌的抗氧化性能和总酚含量进行系统评价,发现抗氧化能力与总酚含量呈正相关,这些结果与本研究分析结果一致。此外,纯化后的活性产物抗氧化能力明显增强^[18],后续研究中可以对提取的食用菌活性成分进行进一步纯化,提升其抗氧化能力。食用菌中活性成分是起到抗氧化作用的

重要物质,其抑制与清除自由基最为核心,但内在机制仍不清楚,这涉及多个基因、多条信号通路^[27]。

综上所述,本研究系统比较了19种食用菌水提取物与醇提取物中活性成分含量及其抗氧化活性。结果显示食用菌种类和提取方式对活性成分含量及抗氧化能力均有明显影响,总多酚和总黄酮含量与抗氧化活性相关性较强。研究结果将为食用菌功能性产品和药品开发提供参考。

参考文献:

- [1] LI C T, XU S. Edible mushroom industry in China: Current state and perspectives[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2022, 106(11): 3949-3955.
- [2] MUSZYŃSKA B, GRZYWACZ-KISIELEWSKA A, KAŁA K, et al. Anti-inflammatory properties of edible mushrooms: A review[J]. Food Chemistry, 2018, 243: 373-381.
- [3] DAI Y, WANG L, CHEN X Y, et al. *Lentinula edodes* sing polysaccharide: Extraction, characterization, bioactivities, and emulsifying applications[J]. Foods, 2023, 12(17): 3289.
- [4] WANG X Y, ZHANG D D, YIN J Y, et al. Recent developments in *Hericium erinaceus* polysaccharides: Extraction, purification, structural characteristics and biological activities[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(sup1): S96-S115.
- [5] FOGARASI M, SOCACIU M I, SĂLĂGEAN C D, et al. Comparison of different extraction solvents for characterization of antioxidant potential and polyphenolic composition in *Boletus edulis* and *Cantharellus cibarius* mushrooms from Romania[J]. Molecules, 2021, 26(24): 7508.
- [6] 陈琛, 李鑫鑫, 徐尤美, 等. 天麻多糖的分离纯化与抗氧化活性研究[J]. 中国临床药理学杂志, 2018, 4(18): 2203-2206.
CHEN Chen, LI Xinxin, XU Youmei, et al. Extraction, purification and antioxidant activity of polysaccharides from *Gastrodia elata* B1 [J]. The Chinese Journal of Clinical Pharmacology, 2018, 4(18): 2203-2206.
- [7] 牛晓静, 陈天朝, 鲁静, 等. 槐角中还原糖的含量测定[J]. 中医药信息, 2019, 36(6): 18-21.
NIU Xiaojing, CHEN Tianchao, LU Jing, et al. Content determination of reducing sugar in fructus sophorae[J]. Information on Traditional Chinese Medicine, 2019, 36(6): 18-21.
- [8] RUIZ-MEDINA B E, LERMA D, HWANG M, et al. Green barley mitigates cytotoxicity in human lymphocytes undergoing aggressive oxidative stress, via activation of both the Lyn/PI3K/Akt and MAPK/ERK pathways[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 6005.
- [9] BARROSO M F, NORONHA J P, DELERUE-MATOS C, et al. Flavored waters: Influence of ingredients on antioxidant capacity and terpenoid profile by HS-SPME/GC-MS[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(9): 5062-5072.
- [10] 韩明月, 李俐, 郝利民, 等. 5种食用菌水提取物生物活性的比较[J]. 食品科学, 2023, 44(3): 146-154.
HAN Mingyue, LI Li, HAO Limin, et al. Comparison of bioactivities of water extracts from five edible mushrooms[J]. Food Science, 2023, 44(3): 146-154.
- [11] CHOE J H, JANG A, LEE E S, et al. Oxidative and color stability of cooked ground pork containing lotus leaf (*Nelumbo nucifera*) and barley leaf (*Hordeum vulgare*) powder during refrigerated storage[J]. Meat Science, 2011, 87(1): 12-18.
- [12] LUAN X X, FENG M Q, SUN J. Effect of *Lactobacillus plantarum*

- on antioxidant activity in fermented sausage[J]. Food Research International, 2021, 144: 110351.
- [13] 刘宇琪, 郝利民, 鲁吉珂, 等. 灵芝子实体和孢子粉纯化多糖体外抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(16): 27-31.
LIU Yuqi, HAO Limin, LU Jike, et al. Antioxidant activities of *Ganoderma lucidum* fruit body and spore powder polysaccharide *in vitro*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(16): 27-31.
- [14] ZHANG T, XIANG J L, ZHENG G B, et al. Preliminary characterization and anti-hyperglycemic activity of a pectic polysaccharide from okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench)[J]. Journal of Functional Foods, 2018, 41: 19-24.
- [15] ZHANG J J, TAN W Q, ZHAO P Z, et al. Facile synthesis, characterization, antioxidant activity, and antibacterial activity of carboxymethyl inulin salt derivatives[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 199: 138-149.
- [16] 罗青, 翁文文, 杨玉珍, 等. 平菇、香菇、黑木耳三种食用菌中糖类的测定分析[J]. 郑州师范教育, 2017, 6(2): 34-36.
LUO Qing, WENG Wenwen, YANG Yuzhen, et al. Determination and analysis of carbohydrate in *Pleurotus ostreatus*, *Lentinula edodes* and *Auricularia auricula*[J]. Journal of Zhengzhou Normal Education, 2017, 6(2): 34-36.
- [17] 张洋洋, 张作法, 宋婷婷, 等. 瓦尼桑黄多酚类化合物纯化及抗氧化活性[J]. 菌物学报, 2023, 42(4): 973-983.
ZHANG Yangyang, ZHANG Zuofa, SONG Tingting, et al. Purification and antioxidant activities of polyphenolic compounds from *Sanguangporus vaninii*[J]. Mycosystema, 2023, 42(4): 973-983.
- [18] 郭磊, 加依达尔·努尔哈买提, 岳家梦, 等. 美味牛肝菌总黄酮大孔树脂纯化工艺及抗氧化活性研究[J]. 中国食品添加剂, 2020, 31(1): 85-91.
GUO Le, Gaydar NURHARMAITI, YUE Jiameng, et al. Study on purification process of total flavonoids from *Boletus edulis* with macroporous resin and its antioxidant activity[J]. China Food Additives, 2020, 31(1): 85-91.
- [19] 李娜, 吕爽, 董建国, 等. 常见食用菌营养成分及风味物质分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 441-448.
LI Na, LÜ Shuang, DONG Jianguo, et al. Analysis of nutritional components and volatile flavor compounds in common edible fungi[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(18): 441-448.
- [20] YIN J Y, NIE S P, ZHOU C, et al. Chemical characteristics and antioxidant activities of polysaccharide purified from the seeds of *Plantago asiatica* L[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 90(2): 210-217.
- [21] 范俐, 姜威彪, 许祯毅. 8种食用菌粗黄酮的萃取及其抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(1): 141-147.
FAN Li, JIANG Xianbiao, XU Zhenyi. Extraction and antioxidant activities of crude flavonoids from 8 edible fungi[J]. Food Research and Development, 2021, 42(1): 141-147.
- [22] 邓艺恒, 黄永铭, 冯亚栋, 等. 3种食用菌抗氧化抗炎的对比研究[J]. 食品工业, 2023, 44(8): 102-106.
DENG Yiheng, HUANG Yongming, FENG Yadong, et al. Comparative study on antioxidant and anti-inflammatory effects of three edible fungi[J]. The Food Industry, 2023, 44(8): 102-106.
- [23] 王宏雨. 食用菌抗氧化活性研究及竹荪抗氧化物质提取工艺优化[D]. 福州: 福建农林大学, 2010.
WANG Hongyu. Study on antioxidant activity of edible fungi and optimization of extraction technology of antioxidant substances from dictyophora indusiata[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2010.
- [24] 陈健敏, 刘思弯, 冉梦楠, 等. 金线莲醇提物和水提物生物活性研究[J]. 河南大学学报(医学版), 2021, 40(5): 322-328.
CHEN Jianmin, LIU Siwan, RAN Mengnan, et al. The biological activities of alcohol and water extracts of *Anoectochilus roxburghii*[J]. Journal of Henan University (Medical Science), 2021, 40(5): 322-328.
- [25] 曾琳娜. 香菇多糖降脂作用的评估及分子机制的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.
ZENG Linna. Evaluation and molecular mechanism of lipid-lowering effect of lentinan[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2016.
- [26] GUO Y J, DENG G F, XU X R, et al. Antioxidant capacities, phenolic compounds and polysaccharide contents of 49 edible macrofungi[J]. Food & Function, 2012, 3(11): 1195-1205.
- [27] 姜明, 么越, 范蓓, 等. 食用菌活性成分抗氧化机制的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(9): 257-265.
JIANG Ming, YAO Yue, FAN Bei, et al. Research progress on antioxidant mechanism of active components of edible mushrooms[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(9): 257-265.

加工编辑:张昱
收稿日期:2023-12-04