

基于主成分分析结合熵权 TOPSIS 法的 10 种食用菌多糖活性评价

姜荣华¹, 蒲铎文¹, 樊梓鸾^{1,2}, 刘荣^{1,2*}

(1. 东北林业大学林学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

(2. 黑龙江省森林食品资源利用重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要: 该文研究了 10 种常见的具有良好功能性的食用菌, 提取其中的主要活性成分多糖, 以体外抗氧化活性及降血脂功能为评价指标, 综合评价食用菌多糖的功能特性。采用水提醇沉法提取多糖, 对其体外抗氧化及降血脂活性共 7 项指标比较研究。采用主成分分析结合偏正交最小二乘判别分析 (Orthogonal Partial Least Squares Discriminant Analysis, OPLS-DA)、熵权法和逼近理想排序法 (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS) 建立功能评价模型, 对食用菌多糖的品质做出综合性评价并进行排序, 并通过聚类分析对样本分类。结果显示 10 种食用菌总糖含量范围为 48.61%~64.43%; 不同食用菌多糖发挥不同类型的活性功能; 主成分分析法提取了 2 个主成分, 累计贡献率达到了 86.05%, 各主成分的贡献率显示 O₂⁻清除率、OH 清除率和 DPPH 清除率是主要的影响因子; 熵权 TOPSIS 法分析得出 10 种食用菌多糖的相似接近度的大小为 0.194~0.882, 综合得分显示香菇多糖相似接近度最大, 为 0.882, 发挥的功能特性最优; 聚类分析将食用菌多糖依据功能性划分为 4 个类群。该研究通过构建功能评价体系, 筛选具有良好功能的食用菌多糖, 为其深入研究提供理论支撑, 为开发功能产品奠定理论依据。

关键词: 食用菌多糖; 抗氧化活性; 降血脂功能; 主成分分析法; 熵权法; TOPSIS 评价模型

文章编号: 1673-9078(2023)05-99-108

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.5.0710

Activity Evaluation of Polysaccharides from 10 Types of Edible Fungi Based using PCA and Entropy-weighted TOPSIS Method

XIAN Ronghua¹, PU Duowen¹, FAN Ziluan^{1,2}, LIU Rong^{1,2*}

(1.College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

(2.Heilongjiang Key Laboratory of Forest Food Resources Utilization, Harbin 150040, China)

Abstract: Ten common types of edible fungi with excellent functions were studied, and their major active polysaccharide was extracted. *In vitro* antioxidant activity and blood lipid-lowering function were used as evaluation indicators to comprehensively assess the functional properties of polysaccharides in edible fungus. Polysaccharides were extracted via aqueous extraction and alcohol precipitation, and their *in vitro* antioxidant and blood lipid-lowering activities were compared based on seven indicators. Principal component analysis (PCA) combined with orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) and entropy-weighted technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) method were applied to establish functional evaluation models. The quality of polysaccharides in edible fungi was comprehensively evaluated and sorted, and the samples were classified using cluster analysis. Total sugar content of the 10 edible fungi ranged from 48.61% to 64.43%. Different polysaccharides in edible fungi played diverse active functions. Two principal components were extracted by

引文格式:

姜荣华,蒲铎文,樊梓鸾,等.基于主成分分析结合熵权 TOPSIS 法的 10 种食用菌多糖活性评价[J].现代食品科技,2023,39(5):99-108.

XIAN Ronghua, PU Duowen, FAN Ziluan, et al. Activity evaluation of polysaccharides from 10 types of edible fungi based using PCA and entropy-weighted TOPSIS method [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(5): 99-108.

收稿日期: 2022-06-04

基金项目: 黑龙江省自然科学基金联合引导项目 (LH2020C035); 中央高校科学前沿与交叉学科创新基金项目(2572019BA09); 黑龙江省高等教育教学改革项目 (SJGY20200018)

作者简介: 姜荣华 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养学, E-mail: xianrhzz@163.com

通讯作者: 刘荣 (1971-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品营养学与功能性食品, E-mail: lrwxh123@163.com

PCA, with their cumulative contribution rate reaching 86.05%. The contribution rate of each principal component indicated that the scavenging rates of superoxide anion radicals (O_2^-), hydroxyl radicals (OH), DPPH· radicals were the key influencing factors. The entropy-weighted TOPSIS method showed that the similarity of polysaccharides in the ten types of edible fungi was 0.194-0.882. The comprehensive score showed that the similarity of *Lentinula* was the highest at 0.882, and its functional properties were the best. Cluster analysis revealed that the polysaccharides of the edible fungi could be divided into four taxa based on their functional characteristics. In conclusion, a functional evaluation system was constructed to screen the polysaccharides of edible fungi with good functions. This study provides theoretical support for future in-depth research and lays a theoretical foundation for the development of functional products.

Key words: polysaccharides in edible fungi; antioxidant activity; hypolipidemic function; principal component analysis; entropy-weighted method; TOPSIS evaluation model

食用菌因其脂肪含量低、营养丰富、药用价值高,被定义为“健康食品”^[1]。除食用美味,其衍生的生物活性化合物既是重要的膳食补充剂,也常被用作抗氧化剂,并参与疾病的预防和治疗^[2]。多糖作为食用菌的主要活性物质之一,具有抗氧化^[3]、降血脂^[4]、降血糖^[5]、抗肿瘤^[6]、免疫调节^[7]等多种功效。

目前关于食用菌多糖分离纯化、结构鉴定以及活性评价的报道较多^[8,9],而对于不同食用菌多糖的功能活性的比较研究相对较少,在生产开发相关功能产品时加大了选择的难度。大量研究结果证实食用菌多糖在抗氧化及降血脂方面的显著作用,食用菌多糖具有清除自由基,延缓衰老,预防心脑血管系统损伤的作用^[3,10,11],并且能促进胆固醇的代谢,是血脂的优良调节剂,以预防高脂血症^[12-14]。有研究发现肥胖和血脂代谢紊乱会导致体内氧化应激的水平增高,表明抗氧化和降血脂活性之间具有一定的关联性,可用于预防肥胖功效的评价^[15]。鉴于此,本实验通过测定抗氧化及降血脂活性来综合评价不同食用菌多糖的功能性。

对食用菌的质量评价采用单一或几种指标有失客观性,因此采用多指标综合数学分析的方法进行评价更为合理可行^[16]。主成分分析法可从多个评价指标中解析出主要因素,简化综合评价体系。熵权法是把多指标科学客观赋权,进而判断指标对综合评价的影响(即权重)的方法。TOPSIS法通过把多指标转化为综合指标,降低维度来评价样本^[17]。该法客观简单灵活,对原始数据的利用比较充分,可以排除主观因素的干扰,更为客观地综合筛选功能特性优良的样本。因此本文运用主成分分析法结合 OPLS-DA 分析、熵权法与 TOPSIS 法联合评价不同品系食用菌多糖抗氧化活性及降血脂功能,并运用聚类分析对食用菌进行分类,旨在对不同食用菌多糖进行区分,为其开发应用提供一定的依据。

1 材料和方法

1.1 材料与试剂

新鲜金针菇 (*Flammulina velutipes*)、平菇 (*Pleurotus ostreatus*)、香菇 (*Lentinula edodes*)、杏鲍菇 (*Pleurotus eryngii*)、松茸 (*Tricholoma matsutake*)、口蘑 (*Tricholoma mongolicum*)、白玉菇 (*White Hypsizygus marmoreus*)、蟹味菇 (*Hypsizygus marmoreus*)、秀珍菇 (*Pleurotus geesteranus*)、木耳 (*Auricularia auricula*), 购于大型超市; DPPH (1,1-二苯基苦基苯肼)、ABTS (2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑-6-磺酸)、牛磺胆酸钠、甘氨酸钠、胃蛋白酶 (1:30 000)、胰蛋白酶 (1:250), 上海源叶生物科技有限公司; 其他试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

721 可见分光光度计, 上海佑科仪器有限公司; 电热鼓恒温风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; ELx800NB 型酶标仪, 美国 Bio Tek 公司; RE-52 旋转蒸发器, 上海亚荣生化仪器厂; TGL-16G 台式离心机, 上海安亭科学仪器厂。

1.3 提取方法

1.3.1 原料前处理

将购买的食用菌剪去带杂质的子实体根部后, 置于 60 °C 烘箱烘干。置于粉碎机粉碎过 20 目(0.85 mm)筛, 石油醚脱脂干燥后备用。

1.3.2 多糖提取

采用水提醇沉法提取多糖, 将处理好的食用菌干粉各称取 10.0 g 置于 1 L 烧瓶中, 加入 500 mL 蒸馏水, 90 °C 下浸提 3 h, 过滤得滤液。旋转蒸发至原体积的 1/5, Sevage 法脱除蛋白, 重复多次至无明显白色沉淀, 加入 3 倍体积的无水乙醇静置一晚。沉淀溶于水, 透析 72 h 后冻干备用。

1.3.3 总糖含量测定

总糖含量的测定采用苯酚硫酸法^[18]。

1.4 抗氧化活性测定

1.4.1 O₂⁻清除能力的测定

参照黄俊丽^[19]的方法进行修改。采用邻苯三酚自氧化法,配制 0.05 mol/L Tris-HCl 缓冲液,各取 4 mL 置于 10 mL 试管中 25 °C 水浴反应 20 min,加入 1 mL 不同浓度样液和 0.4 mL 25 mmol/L 邻苯三酚溶液混匀,25 °C 水浴 5 min 后立即加入 1 mL 8 mmol/L HCl 终止反应。清除率计算公式为:测定样品 322 nm 处吸光度 (A_1),缓冲液为空白对照 (A_0),样品的本底吸光值 (A_2)。清除率计算公式为:

$$R = \frac{A_0 - A_1 + A_2}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

R ——清除率, %;

A_0 ——空白对照组吸光值;

A_1 ——样品组吸光值;

A_2 ——样品的本底吸光值。

1.4.2 还原力的测定

还原力测定参照向瑞琪等^[20]的方法并进行修改。吸取 2 mL 不同浓度样液,依次加入 2 mL 0.2 mol/L 的磷酸盐缓冲液 (pH 值 6.6) 和 2 mL 1% 的铁氰化钾后在 50 °C 水浴锅中反应 20 min。加入 2 mL 10% 的三氯化铁,3 000 r/min 离心 10 min。吸取 2 mL 上清液加入 1 mL 蒸馏水和 0.4 mL 0.1% (m/V) 的三氯化铁 10 min 后在 700 nm 处测定吸光度值 (A_1),蒸馏水为空白对照 (A_0)。

1.4.3 DPPH 清除能力的测定

参照 Wu 等^[21]的方法进行了修改。用无水乙醇配置 0.25 mg/mL DPPH 储备溶液,黑暗处保存。样液与 DPPH (0.25 mg/mL) 工作液 1:1 混合,避光 30 min,515 nm 处测定吸光度 (A_1),蒸馏水为空白对照 (A_0),样品的本底吸光值 (A_2),清除率计算公式同式 (1)。

1.4.4 OH 清除能力的测定

根据 Meng 等^[22]的方法进行修改,吸取 1 mL 不同浓度样液,加入 1 mL 6 mmol/L 的 FeSO₄ 溶液,混匀后再加入 1 mL 6 mmol/L 的 H₂O₂ 溶液,避光混匀后放置 10 min,再加入 1 mL 6 mmol/L 的水杨酸溶液,37 °C 水浴反应 30 min,在 510 nm 处检测样品吸光度值 (A_1),蒸馏水为空白对照 (A_0),样品的本底吸光值 (A_2),清除率计算公式同式 (1)。

1.4.5 ABTS⁺ 的清除能力测定

参照 Re^[23]的方法进行修改,ABTS (7 mmol/L) 与过硫酸钾 (5 mmol/L) 1:1 混合,避光 12 h 后为 ABTS 母液,使用时用 PBS 缓冲液稀释 10 倍。按 1:1 比例

分别吸取样液和 ABTS 溶液,避光 30 min,734 nm 处测定吸光值 (A_1),蒸馏水为空白对照 (A_0),样品的本底吸光值 (A_2),清除率计算公式同式 (1)。

1.5 体外降血脂测定

根据 Ma 等^[24]的方法进行修改测定。

1.5.1 胆酸盐标准曲线的制作

分别取 1 mL 不同浓度的甘氨酸胆酸钠 (0、0.075、0.15、0.3、0.45、0.6、0.75 mmol/L),1 mL 不同浓度的牛磺胆酸钠 (0、0.15、0.3、0.6、0.9、1.5 mmol/L),加入 3 mL $m=60\%$ 浓 H₂SO₄,于 70 °C 水浴锅中水浴 20 min 后冰浴 5 min,在 387 nm 处测定吸光度。

1.5.2 食用菌多糖结合胆酸盐能力测定

胆酸盐包括牛磺胆酸钠 (3 mmol/L) 和甘氨酸胆酸钠 (0.75 mmol/L)。取 3 mL 不同浓度多糖溶液,加入 1 mL 10 mg/mL 胃蛋白酶,3 mL 0.01 mol/L 的盐酸溶液中,37 °C 下恒温振荡 1 h。调节 pH 值至 6.3,加入 4 mL (10 mg/mL) 的胰蛋白酶溶液,37 °C 下恒温振荡 1 h。加入 4 mL 胆酸盐溶液,37 °C 下恒温振荡 1 h,混合物在 4 000 r/min 下离心 20 min,将上清液 (0.5 mL) 加入到 1.5 mL $m=60\%$ H₂SO₄ 在 70 °C 下水浴反应 20 min。对上清液中的胆酸盐进行分析,以缓冲液代替样品作为空白,在 387 nm 处记录吸光度。结合胆酸盐能力计算公式为:

$$B = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

B ——结合率, %;

C_0 ——空白组中胆酸盐含量, mmol/mL;

C_1 ——样品组中胆酸盐的剩余量, mmol/mL。

1.6 综合评价模型的建立

1.6.1 主成分分析

将标准化后的数据作为评价指标进行降维处理和 PCA 分析,在 PCA 的基础上利用 SIMCA 13.0 软件建立 OPLS-DA 模型。

1.6.2 熵权 TOPSIS 法

本试验中,采用熵权法结合 TOPSIS 法对不同品种食用菌的品质进行综合评价,具体步骤如下:

1) 建立原始评价矩阵:设有 m 个评价对象, n 个评价指标, x_{ij} 为第 j 个指标下第 i 个项目的值 ($m=10$; $n=7$),则形成的多目标决策矩阵为式 (3):

$$X = (x_{ij})_{m \times n} \quad (3)$$

2) 建立归一化决策矩阵:食用菌多糖的 7 个功能

活性的单位不同, 量程大小不一, 结合胆酸盐能力属于高优型指标, IC_{50} 值属于低优型指标。因此对指标的原始数值通过极差法进行同向化处理得 r_{ij} , 可避免数据分析的偏差。参照式 (4) 进行处理。

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)}; r_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (4)$$

3) 构造加权决策矩阵: 将归一化决策矩阵与与各指标的权重 w_j 相乘, 构造加权决策矩阵式 Z_{ij} , 计算如下:

$$Z_{ij} = (w_j \times r_{ij})_{m \times n} \quad (5)$$

式中 w_j 按式 (7) 计算。

4) 熵权法: 为避免人为主观因素的干扰, 本试验采用熵权法来确定各指标权重。其计算步骤具体如式 (6), 定义熵 e_j :

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \left(\sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \right) \quad (6)$$

式中:

$m=10$;

$$f_{ij} = \frac{1 + r_{ij}}{\sum_{j=1}^n (1 + r_{ij})}$$

定义熵权 w_j : 第 j 个评价指标的熵权定义为式 (7), 式中 $n=7$ 。

$$w_j = \frac{1 - e_j}{m - \sum_{j=1}^n e_j}; \sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (7)$$

5) 确定正负理想解:

$$A^+ = (\max(A_{ij})) = [A_1^+, A_2^+, \dots, A_m^+];$$

$$A^- = (\min(A_{ij})) = [A_1^-, A_2^-, \dots, A_n^-] \quad (8)$$

6) 确定各评价对象与理想解的距离和贴近度:

正理想解距离为 D_i^+ , 负理想解距离为 D_i^- , 得到综合的评价指数为 E_i , 根据 E_i 值的大小评定食用菌多糖的优劣^[25]。计算公式如下:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (A_{ij}^+ - A_{ij})^2}; D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (A_{ij}^- - A_{ij})^2} \quad (9)$$

$$E_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \quad (10)$$

1.7 数据分析

根据不同浓度下样品溶液对 DPPH·、ABTS⁺、OH·、O₂⁻ 的清除率大小, 以清除率为 50% 时 10 种食用菌多糖的浓度 (IC_{50}) 作为评价抗氧化能力的指标, 还原力以 OD 值为 0.5 时的多糖浓度进行评估。由于样品在最高浓度下胆酸盐结合能力未达到 50%, 因此选取多糖浓度为 1 mg/mL 时对胆酸盐的结合率评估降血脂能力, 采用 GraphPad Prism 8.0 进行拟合计算得出半数抑制率大小, 利用 SPSS 22.0 进行差异性分析, Excel 2019 软件进行数据处理, Origin 2018 软件作图。所有的试验均进行三次, 取平均值进行分析。

2 结果与分析

2.1 总糖含量测定

如表 1 所示, 各食用菌总糖含量有一定的差异, 不同种食用菌总糖含量在 48.61%~64.43% 之间, 其中平菇总糖含量最高, 秀珍菇总糖含量相对最低。秀珍菇为低糖高蛋白的真菌, 因此总糖含量最少, 可能是在去除蛋白的过程中, 多糖也有所流失, 导致了糖分减少、糖含量的降低。

表 1 10 种食用菌总糖含量的比较

Table 1 Comparison of total sugar content of 10 edible fungus

项目	口蘑	白玉菇	蟹味菇	杏鲍菇	金针菇	香菇	木耳	秀珍菇	平菇	松茸
总糖含量/%	62.47±4.68	60.35±5.98	54.8±4.30	57.4±4.51	55.74±3.34	50.95±4.28	51.12±3.77	48.61±2.88	64.43±5.32	49.02±2.79

注: 结果为平均值±标准差 ($n=3$)。

2.2 不同种食用菌多糖抗氧化及降血脂活性

分析

2.2.1 多糖抗氧化活性比较分析

O₂⁻ 作为机体内自由基链式反应的一种引发剂活性氧, 可触发人体内一系列自由基的产生^[26]。由图 1a 可知, 浓度为 5 mg/mL 时, 白玉菇多糖和杏鲍菇多糖对 O₂⁻ 的清除能力最强, 分别为 99.42%、99.15%, 而蟹味菇多糖清除率仅有 39.62%。这种现象可能是与

10 种食用菌多糖的不同三螺旋结构有关^[27]。与解春艳等^[28]的研究结果类似。

由图 1b 可知, 香菇多糖的还原力显著高于其他多糖 ($P<0.05$), 这与王帅等^[29]的结果类似。而蟹味菇多糖的还原力最低, 在质量浓度为 1 mg/mL 时还原力仅为 0.16。

DPPH 反应可通过电子转移或供氢而转换成稳定的反磁性分子, 使反应体系发生颜色变化, 广泛用于评价抗氧化活性^[30]。如图 1c 所示, 质量浓度为 0~0.5 mg/mL 时, 香菇多糖的清除 DPPH 能力最强, 质

量浓度为 0.5 mg/mL 时,清除率达到了 83.96%,这与向瑞琪等^[20]的结果一致。而质量浓度为 1 mg/mL 时,杏鲍菇多糖的清除 DPPH 能力最强,达到 97.56%。

在活性氧中, OH 最活泼,毒性最大,且反应迅速,对活细胞可造成严重的损伤^[31]。如图 1d 所示,口蘑多糖、金针菇多糖和香菇多糖的清除 OH 能力较强,而木耳多糖能力较弱。

ABTS 与过硫酸钾发生反应,产生稳定的蓝绿色阳离子自由基,在加入抗氧化剂后会使其褪色而使吸光度降低^[32]。由 1e 可以看出,各食用菌多糖均有很强的 ABTS⁺ 清除能力,在质量浓度为 1 mg/mL 时,10 种食用菌多糖的 ABTS⁺ 清除能力均达到了 80% 以上,白玉菇多糖始终保持较高的清除效果。

选用多种自由基系统评价样品的抗氧化能力,较为准确客观。有研究表明,多糖的单糖组成和分子量是对体外抗氧化活性影响较大的因素^[30],10 种食用菌多糖的抗氧化活性差异可能是由于种类或部分结构组成不同造成的。

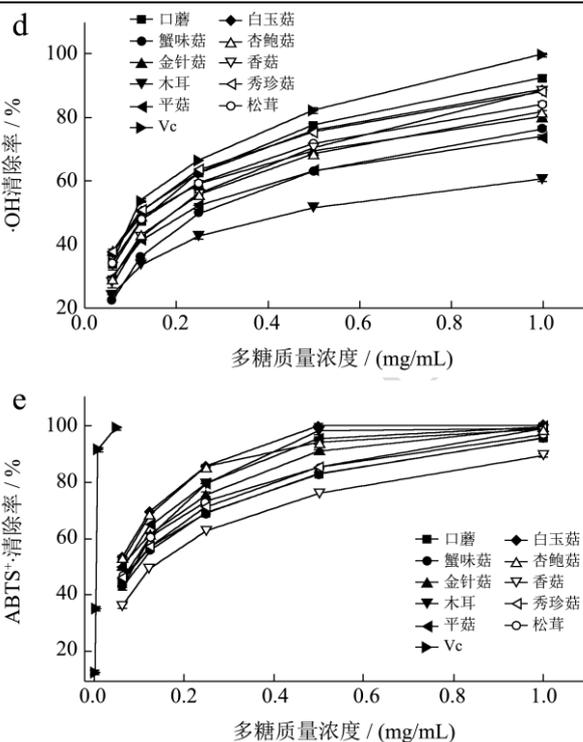
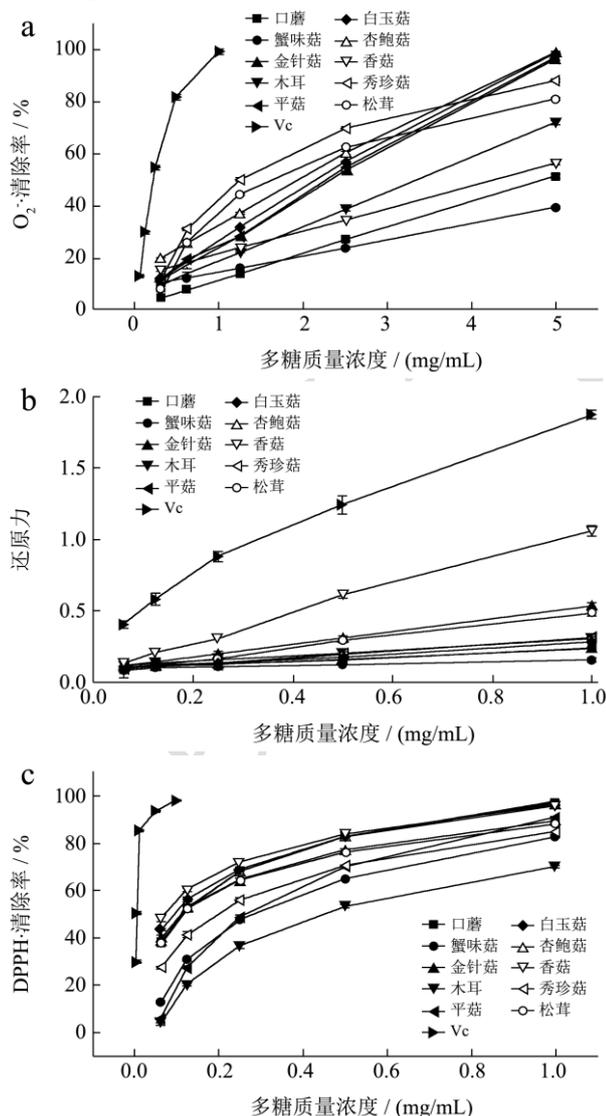


图1 抗氧化活性(a), O₂^{·-}清除能力, (b)还原力, (c)DPPH清除能力, (d) OH清除能力, (e)ABTS⁺清除能力

Fig.1 Antioxidant activities (a) O₂^{·-} free radical scavenging rate (b) reducing power (c) DPPH free radical scavenging rate (d) OH free radical scavenging rate (e) ABTS⁺ free radical scavenging rate

2.2.2 多糖体外降血脂能力比较分析

胆汁酸是胆固醇代谢的次级产物,主要以胆汁盐的结合形式存在,常被应用于生物活性成分降血脂能力的判定^[33]。

经实验和计算,得甘氨酸胆酸钠标准曲线为 $y=2.4994x+0.0843$ ($R \geq 0.9952$);牛磺胆酸钠标准曲线为 $y=1.7868x+0.1871$ ($R \geq 0.9916$),根据标准曲线计算胆酸盐结合率。

图2显示了不同浓度食用菌多糖结合胆酸盐的能力。香菇多糖和口蘑多糖结合甘氨酸胆酸钠的能力最强,木耳多糖的结合能力最弱。浓度为 0.5 mg/mL 时,香菇多糖和秀珍菇多糖结合牛磺胆酸钠的能力最强,分别为 20.44% 和 20.06%,二者无显著性差异($P > 0.05$)。质量浓度为 2 mg/mL 时,金针菇多糖显示了最强的结合能力(45.45%),而蟹味菇多糖的结合能力最弱(18.75%)。

研究表明,不同种食用菌多糖对不同类型的抗氧化及降血脂功能发挥不同的作用,综合显示香菇多糖和金针菇多糖的功能性相对较强,可能与其结构及单糖组成不同有关^[34]。食用菌多糖中大量存在的β-葡聚糖能够在体外消化过程中清除胆汁酸,可能是导致降

血脂作用的活性化合物^[35]。已有研究表明不同食用菌对肥胖小鼠有减肥和降血脂活性，杏鲍菇多糖有降低

胰腺脂质作用^[36]，不同种食用菌通过抑制 HMGCR 酶^[37]，参与机体脂质代谢的调节^[38]。

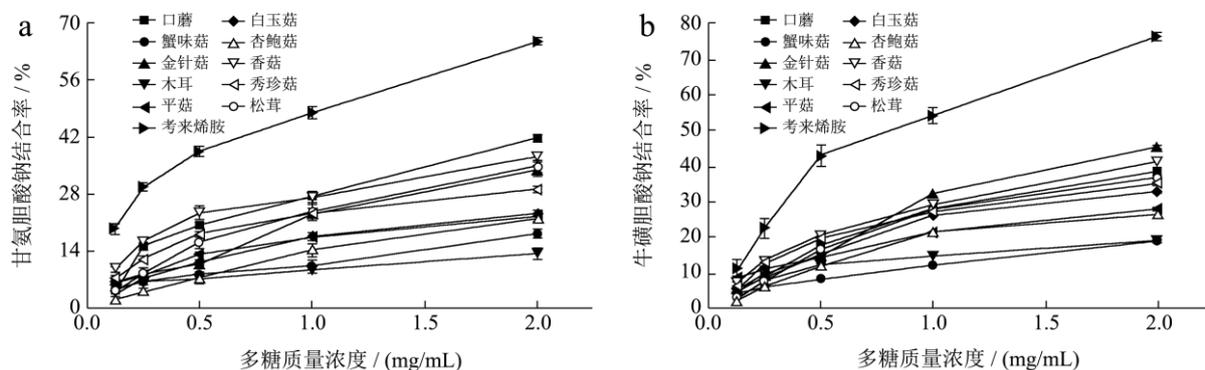


图2 (a) 食用菌多糖的甘氨酸胆酸钠结合率, (b) 食用菌多糖的牛磺胆酸钠结合率

Fig.2 (a) Comparison of sodium glycocholate binding ability, (b) Comparison of sodium taurocholate binding ability

表2 标准化决策矩阵

Table 2 Standardized decision matrix

名称	DPPH 清除率 <i>IC</i> ₅₀ (mg/mL)	O ₂ ⁻ 清除率 <i>IC</i> ₅₀ (mg/mL)	还原力 (1 mg/mL)	ABTS ⁺ 清除率 <i>IC</i> ₅₀ (mg/mL)	OH 清除率 <i>IC</i> ₅₀ (mg/mL)	甘氨酸胆酸钠结合率 (1 mg/mL)/%	牛磺胆酸钠结合率 (1 mg/mL)/%
口蘑多糖	0.11±0.01 ^d	5.16±0.05 ^b	2.21±0.19 ^c	0.09±0.02 ^{bcd}	0.14±0.02 ^{de}	27.36±2.43 ^a	28.02±1.95 ^b
白玉菇多糖	0.09±0.01 ^d	1.67±0.19 ^e	2.84±0.15 ^b	0.07±0.02 ^{cd}	0.14±0.03 ^{de}	17.73±0.85 ^c	26.42±1.28 ^b
蟹味菇多糖	0.27±0.01 ^b	11.69±1.39 ^a	5.68±0.16 ^a	0.13±0.03 ^a	0.26±0.08 ^b	10.55±0.58 ^e	12.21±0.78 ^d
杏鲍菇多糖	0.11±0.01 ^d	1.00±0.06 ⁱ	2.60±0.23 ^b	0.06±0.02 ^d	0.19±0.04 ^{cd}	14.30±1.29 ^d	21.65±1.81 ^c
金针菇多糖	0.11±0.01 ^d	1.34±0.16 ^g	0.88±0.11 ^e	0.08±0.02 ^{bcd}	0.12±0.01 ^e	23.28±1.62 ^b	32.37±1.70 ^a
香菇多糖	0.08±0.01 ^d	1.74±0.30 ^{ef}	0.43±0.12 ^f	0.07±0.01 ^{bcd}	0.13±0.01 ^{de}	27.25±2.38 ^a	29.20±2.05 ^b
木耳多糖	0.45±0.07 ^a	4.62±0.30 ^c	1.94±0.22 ^{cd}	0.09±0.02 ^{bcd}	0.45±0.10 ^a	9.67±0.63 ^e	14.77±1.07 ^d
秀珍菇多糖	0.19±0.06 ^c	2.95±0.22 ^d	2.03±0.14 ^{cd}	0.10±0.01 ^{bc}	0.18±0.01 ^{cd}	23.58±0.18 ^b	27.26±1.12 ^b
平菇多糖	0.26±0.20 ^b	1.23±0.026 ^h	1.80±0.02 ^d	0.10±0.03 ^b	0.22±0.01 ^{bc}	17.41±1.29 ^c	22.02±1.20 ^c
松茸多糖	0.11±0.01 ^d	1.59±0.11 ^f	1.01±0.02 ^e	0.07±0.03 ^{bcd}	0.15±0.01 ^{de}	23.73±1.84 ^b	27.95±2.00 ^b

注: 结果为平均值±标准差 (n=3); 同一列数值上标注不含有相同小写字母表示数据之间存在显著性差异 (P<0.05)。

表3 10种食用菌多糖抗氧化活性、降血脂功能相关性分析

Table 3 Correlation analysis of antioxidant activities and hypolipidemic functions of polysaccharides of 10 edible fungus

项目	DPPH 清除率	ABTS ⁺ 清除率	OH 清除率	还原力	牛磺胆酸钠结合率	甘氨酸胆酸钠结合率	O ₂ ⁻ 清除率
DPPH 清除率	1						
ABTS ⁺ 清除率	0.502	1					
OH 清除率	0.961**	0.310	1				
还原力	0.323	0.633*	0.289	1			
牛磺胆酸钠结合率	0.791**	0.533	0.810**	0.734**	1		
甘氨酸胆酸钠结合率	0.727**	0.285	0.771**	0.647*	0.899**	1	
O ₂ ⁻ 清除率	0.234	0.745**	0.182	0.711*	0.552*	0.274	1

注: *表示在 P<0.05 水平下显著相关; **表示在 P<0.01 水平下极显著相关。

2.3 归一化处理

表2显示了数据处理后的10种食用菌多糖的抗氧化活性值 (*IC*₅₀) 和降血脂能力值 (多糖质量浓度为 1 mg/mL 时的结合率)。

2.4 主成分分析结果

2.4.1 相关性分析

由表3可知,不同类型的抗氧化活性之间、两种胆酸盐表示的降血脂功能之间及抗氧化活性与降血脂

功能之间存在显著的相关性 ($P < 0.05$)。

2.4.2 主成分分析与正交偏最小二乘判别分析

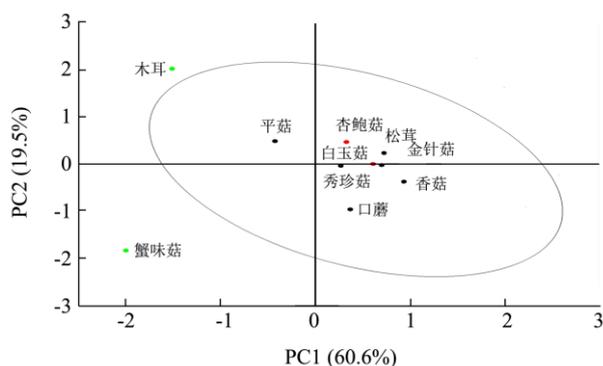


图3 主成分分析载荷图

Fig.3 Principal component load diagrams

主成分分析结果表明，提取前2个主成分的累积方差贡献率为86.05%，且特征值均大于1，表明该实验适用于主成分分析^[39]。第1主成分包含牛磺胆酸钠结合率、DPPH清除率、OH清除率、甘氨酸胆酸钠结合率、ABTS⁺清除率、还原力，均呈正相关；第2主成分在O₂⁻清除率上有较大载荷，呈正相关，说明所选7种活性指标可用于评价食用菌多糖的主要功能特征。不同变量的分布取决于载荷因子，离象限边界越远，对主成分贡献率越大^[40]，由图3载荷图可以看出，

蟹味菇多糖和木耳多糖对主成分的正向影响最小。

在主成分分析的基础上，建立的OPLS-DA模型中，累计解释能参数R²X和R²Y分别为0.953和0.333，模型的稳定性较好。依据模型对样品进行变量权重重要性排序(VIP)预测，得到7种评价指标的VIP值见表4。

表4 不同评价指标的VIP值

Table 4 VIP values of different evaluation indexes

评价指标	VIP值
O ₂ ⁻ 清除率 IC ₅₀ (mg/mL)	1.063 06
OH清除率 IC ₅₀ (mg/mL)	1.058 22
DPPH清除率 IC ₅₀ (mg/mL)	1.005 53
牛磺胆酸钠结合率 (1 mg/mL)	0.996 323
还原力 IC ₅₀ (mg/mL)	0.968 309
甘氨酸胆酸钠结合率 (1 mg/mL)	0.951 759
ABTS ⁺ 清除率 IC ₅₀ (mg/mL)	0.950 179

在0.95的置信区间内，VIP值的大小决定各因素对模型的贡献的大小，VIP值>1的指标对不同食用菌多糖的分类影响最大，1和0.5之间的重要性级别取决于数量的大小。表4结果表明，O₂⁻清除率、OH清除率和DPPH清除率VIP值均高于1，是主要的功能指标。

表5 权重系数计算结果

Table 5 Weight calculation results

评价指标	信息熵 e	信息效用 d	权重系数 w/%
还原力(mg/mL)	0.949 7	0.050 3	11.35
O ₂ ⁻ 清除率 IC ₅₀ (mg/mL)	0.952 1	0.047 9	10.80
OH清除率 IC ₅₀ (mg/mL)	0.951 8	0.048 2	10.86
DPPH清除率 IC ₅₀ (mg/mL)	0.944 6	0.055 4	12.49
ABTS ⁺ 清除率 IC ₅₀ (mg/mL)	0.944	0.056	12.63
牛磺胆酸钠结合率(1 mg/mL)	0.922 3	0.077 7	17.52
甘氨酸胆酸钠结合率(1 mg/mL)	0.892	0.108	24.35

表6 食用菌多糖评价排序

Table 6 Ranking of quality evaluation of mushroom polysaccharide

名称	正理想解距离 D _i ⁺	负理想解距离 D _i ⁻	相对接近度 E _i	排序结果
口蘑多糖	0.087	0.342	0.797	4
白玉菇多糖	0.152	0.286	0.653	6
蟹味菇多糖	0.362	0.087	0.194	10
杏鲍菇多糖	0.209	0.251	0.545	7
金针菇多糖	0.070	0.345	0.832	2
香菇多糖	0.049	0.370	0.882	1
木耳多糖	0.337	0.149	0.307	9
秀珍菇多糖	0.108	0.302	0.737	5
平菇多糖	0.193	0.222	0.534	8
松茸多糖	0.068	0.335	0.831	3

2.5 熵权 TOPSIS 分析

2.5.1 熵值法计算权重系数

权重表示在综合评价过程中各指标所占的重要程度，在对食用菌多糖的 5 种抗氧化及 2 种降血脂指标进行熵值的计算后，最终得出熵权比重。计算结果见表 5，各项指标权重 $W_j = \{0.1135, 0.1080, 0.1086, 0.1249, 0.1263, 0.1752, 0.2435\}$ ，其中抗氧化活性权重占比为 58.13%，降血脂活性的权重占比为 41.87%。

2.5.2 熵权 TOPSIS 法构建评价模型

根据加权决策矩阵得到最优最劣方案，再计算各食用菌多糖与最优方案和最劣方案的距离 D_i^+ 和 D_i^- ，同时计算与最优方案接近程度 (E_i) 进行排序， E_i 值越大表示评价结果越好，排名越高，结果见表，综合排序香菇多糖最优，蟹味菇多糖最劣。

2.6 聚类分析

聚类分析结果由图 4 可知，在欧式距离 1 处可将指标分成 3 类，第一类为 OH 清除率和 DPPH 清除率，为主要功能性指标，相关性最强；第二类为牛磺胆酸盐和甘氨酸胆酸盐结合率，第三类为还原力、ABTS⁺ 清除率和 O₂⁻ 清除率。聚类结果与相关性分析结果及主成分分析结果基本一致。依据功能指标将 10 种食用菌多糖分成 4 类，第一类为香菇、金针菇、松茸、口蘑多糖，第二类为秀珍菇和平菇多糖，第三类为白玉菇和杏鲍菇多糖，第四类为蟹味菇和木耳多糖，与熵权 TOPSIS 法的排序结果基本一致。

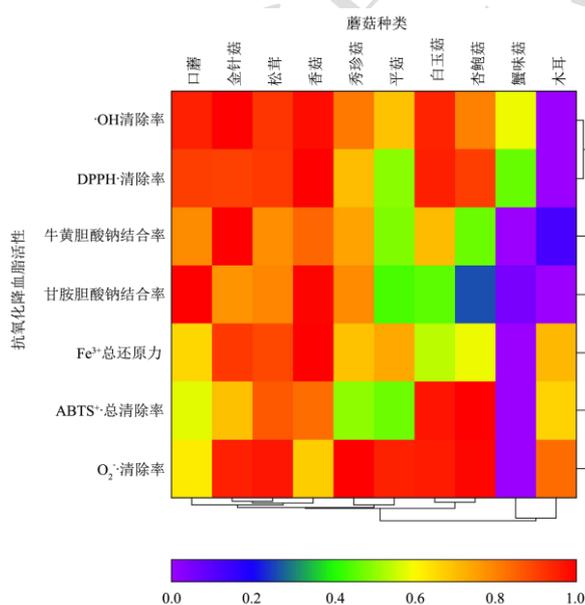


图 4 聚类分析谱系图

Fig.4 Dendrogram of HCA

3 结论

食用菌多糖作为其主要成分之一，在食品、医药、日化等领域具有重要的研究价值。本研究采用热水浸提法提取 10 种常见食用菌多糖，通过苯酚硫酸法测得的平菇总糖含量最高，为 64.43%，秀珍菇总糖含量最低，为 48.61%。对 10 种食用菌多糖进行抗氧化及降血脂活性的比较，采用主成分分析结合 OPLS-DA 模型、熵权 TOPSIS 法和聚类分析对其内在功能特性的联系展开研究。显示不同的食用菌多糖都具备一定的抗氧化及降血脂功效；结合所选 7 种活性指标，发现 O₂⁻ 清除率、OH 清除率和 DPPH 清除率 VIP 值均高于 1，是主要的功能指标；同时对食用菌多糖按功能特性进行排序，依次是香菇多糖、金针菇多糖、松茸多糖、口蘑多糖、秀珍菇多糖、白玉菇多糖、杏鲍菇多糖、平菇多糖、木耳多糖、蟹味菇多糖，可以为不同应用下的食用菌选择提供一定的理论基础；聚类分析得到 3 类功能指标、4 类食用菌多糖，其中第一类为香菇、金针菇、松茸、口蘑多糖，表明这四种多糖具有相似的活性功能，可能更适用于针对肥胖人群功能食品或保健品的开发，与熵权法 TOPSIS 法的综合排序结论一致。虽然本研究得到的结论显示某些其他品种的食用菌多糖的抗氧化活性及降血脂功能相对较弱，但可能会适用于针对其他功能性产品的开发。随着后续对食用菌多糖的深入研究，其质量评价指标必会更加丰富全面，对功能性的分析更加系统客观。

参考文献

- [1] Farenzena, Sonia, Albertengo, et al. Chemical composition and nutritional value of Argentine commercial edible mushrooms [J]. Journal fur Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, 2015, 10(2):155-164.
- [2] Zrnica-Ciric M, Dabetic N, Todorovic V, et al. Beta-glucan content and antioxidant activities of mushroom-derived food supplements [J]. Journal of the Serbian Chemical Society, 2020, 85(4): 439-451.
- [3] Huang Q L, Siu K C, Wang W Q, et al. Fractionation, characterization and antioxidant activity of exopolysaccharides from fermentation broth of a *Cordyceps sinensis* fungus [J]. Process Biochemistry, 2013, 48(2): 380-386.
- [4] 赵炳杰,郭岩彬.食用菌多糖的提取纯化及生物活性研究进展[J].中国生物工程杂志,2022,42(Z1):146-159.
- [5] Khursheed R, Singh S K, Wadhwa S, et al. Therapeutic potential of mushrooms in diabetes mellitus: Role of

- polysaccharides [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 164: 1194-1205.
- [6] Lu M K, Lin T Y, Chao C H, et al. Molecular mechanism of *Antrodia cinnamomea* sulfated polysaccharide on the suppression of lung cancer cell growth and migration via induction of transforming growth factor β receptor degradation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 95: 1144-1152.
- [7] Li J, Gu F F, Cai C, et al. Purification, structural characterization, and immunomodulatory activity of the polysaccharides from *Ganoderma lucidum* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 143: 806-813.
- [8] 冉靛,刘渊,周婵媛,等.青杠菌多糖的微波协助提取及抗氧化活性研究[J].食品科技,2021,46(10):184-188.
- [9] 赵晓琳.碱提滑子菇多糖的分离纯化与结构分析[D].长春:东北师范大学,2021.
- [10] Lin S, Lai T, Chen L, et al. Antioxidant and antiangiogenic properties of phenolic extract from *pleurotus tuber-regium* [J]. J Agric Food Chem, 2014, 62(39): 9488-9498.
- [11] Song X, Shen Q, Liu M, et al. Antioxidant and hepatoprotective effects of intracellular mycelium polysaccharides from *Pleurotus geesteranus* against alcoholic liver diseases [J]. Int J Biol Macromol, 2018, 114: 979-988.
- [12] 张廷婷,赵文颖,谢倍珍,等.黑木耳及其多糖对高脂饮食大鼠的降血脂和肠道菌群调节作用[J].中国食品学报,2021, 21(9):89-101.
- [13] Chen X, Zhong H, Zeng J, et al. The pharmacological effect of polysaccharides from *Lentinus edodes* on the oxidative status and expression of VCAM-1mRNA of thoracic aorta endothelial cell in high-fat-diet rats [J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 3: 445-450.
- [14] 赵圆圆.杏鲍菇子实体多糖的提取纯化、结构表征及降脂活性研究[D].西安:陕西科技大学,2020.
- [15] 赵红霞,董艳双,蔡友治,等.肥胖产妇血脂水平与DNA损伤及总抗氧化能力水平的相关性研究[J].医学研究生学报, 2015,28(2):157-160.
- [16] 张瑶,高慧,王新杰,等.熵权赋权法的灰色系统理论在当归饮片质量评价中的应用研究[J].中国中药杂志,2020,45 (21):5200.
- [17] Wang Y M, Ran W J. Comprehensive eutrophication assessment based on fuzzy matter element model and Monte Carlo-triangular fuzzy numbers approach [J]. International Journal of Environmental Research and Public health, 2019, 16(10): 1769.
- [18] Dubois M, Gilles K A, Hamilton J K, et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances [J]. Analytical Chemistry, 1956, 28(3): 350-356.
- [19] 黄俊丽,张愨,松茸、黑牛肝菌、双孢白蘑菇提取物体外抗氧化性试验研究[J].食品与生物技术学报,2011,30(3):342-347.
- [20] 向瑞琪,谢锋,谭红,等.三种食用菌多糖的基本结构与抗氧化活性研究[J].食品工业科技,2022,43(14):69-76.
- [21] Wu G, Johnson S K, Bornman J F, et al. Changes in whole grain polyphenols and antioxidant activity of six sorghum genotypes under different irrigation treatments [J]. Food Chem, 2017, 214: 199-207.
- [22] Meng Q, Li Y, Xiao T, et al. Antioxidant and antibacterial activities of polysaccharides isolated and purified from *Diaphragma juglandis* Fructus [J]. Int J Biol Macromol, 2017, 105(Pt 1): 431-437.
- [23] Re R. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay [J]. Free Radic Biol Med, 1999, 26.
- [24] Ma W, Shi Y, Yang G et al. Hypolipidaemic and antioxidant effects of various Chinese dark tea extracts obtained from the same raw material and their main chemical components [J]. Food Chem, 2022, 375: 131877.
- [25] 梁慧,蒋家晓,蒋俊俊,等.TOPSIS法和秩和比法综合评价2008-2017年广西钦州市妇幼卫生管理质量[J].内科,2019, 14(4):387-391.
- [26] Nagai T, Inoue R, Inoue H, et al. Scavenging capacities of pollen extracts from *Cistus ladaniferus* on autoxidation, superoxide radicals, hydroxyl radicals, and DPPH radicals [J], Nutrition Research, 2002, 22(4): 519-526.
- [27] 商佳琦,邹丹阳,滕翔宇,等.5种食用菌多糖的结构特征及抗氧化活性对比[J].食品工业科技.2020,41(15):77-83,89.
- [28] 解春艳,秦静,韩爽,等.4种常用食用菌子实体多糖抗氧化活性的比较[J].安徽农业科学,2014,42(35):12643-12645.
- [29] 王帅,赵冬雪,韩成凤,等.6种活性多糖的结构、性质及其抗氧化活性的比较研究[J].食品研究与开发,2021,42(16):7-15.
- [30] Ren L, Hemar Y, Perera C O, et al. Antibacterial and antioxidant activities of aqueous extracts of eight edible mushrooms [J]. Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre, 2014, 3(2): 41-51.
- [31] Husain S R, Cillard J, Cillard P. Hydroxyl radical scavenging activity of flavonoids [J]. Phytochemistry, 1987, 26(9): 2489-2491.
- [32] 胡治远,刘素纯,刘石泉.冠突散囊菌子囊孢子粗多糖抗氧化活性的比较分析[J].现代食品科技,2019,35(9):102-109.
- [33] Bellesi F A, Pilosof A M R. Potential implications of food

- proteins-bile salts interactions [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 118.
- [34] 张颖,曾艳,张丽姣,等.不同食用菌菌糠多糖的组分分析与抗氧化活性评价[J].食品科学,2015,36(5):18-23.
- [35] Palanisamy M, Aldars-García L, Gil-Ramírez A, et al. Pressurized water extraction of β -glucan enriched fractions with bile acids-binding capacities obtained from edible mushrooms [J]. Biotechnol Prog, 2014, 30(2): 391-400.
- [36] Chaturvedi V K, Agarwal S, Gupta K K, et al. Medicinal mushroom: boon for therapeutic applications [J]. 3 Biotech, 2018, 8(8): 334.
- [37] Gil-Ramírez A, Clavijo C, Palanisamy M, et al. Study on the 3-hydroxy-3-methyl-glutaryl CoA reductase inhibitory properties of *Agaricus bisporus* and extraction of bioactive fractions using pressurised solvent technologies [J]. Sci Food Agric, 2013, 93(11): 2789-2796.
- [38] Caz V, Gil-Ramírez A, Santamaría M, et al. Plasma cholesterol-lowering activity of lard functionalized with mushroom extracts is independent of Niemann-Pick C1-like 1 protein and ABC sterol transporter gene expression in hypercholesterolemic mice [J]. Agric Food Chem, 2016, 64(8): 1686-1694.
- [39] Khuluk R H, Yunita A, Rohaeti E, et al. An HPLC-DAD method to quantify flavonoids in *Sonchus arvensis* and able to classify the plant parts and their geographical area through principal component analysis [J]. Separations, 2021, 8(2).
- [40] 王建芳,高山,牟德华.基于主成分分析和聚类分析的不同品种燕麦品质评价[J].食品工业科技,2020,41(13):85-91.