

干巴菌不同溶剂提取物功能成分与生物活性

晋程妮, 边晶晶, 任梦梦, 徐建国, 闫帅帅*
(山西师范大学 食品科学学院, 山西 太原 030000)

摘要: 为进一步挖掘干巴菌的生物活性成分, 采用6种不同溶剂(水、乙醇、丙酮、乙酸乙酯、氯仿、石油醚)提取干巴菌, 比较不同溶剂提取物的总酚和麦角甾醇含量, 分析每种提取物所含的多酚组分, 并探究提取物的抗氧化性及其对 α -葡萄糖苷酶的抑制活性。结果表明: 6种提取物中乙醇提取物的总酚含量最高, 为 (14.95 ± 0.58) mg/g, 不同溶剂提取物所含的多酚组成及含量差异明显。乙酸乙酯和乙醇提取物中麦角甾醇含量高于其他溶剂提取物, 分别为 (1.33 ± 0.13) mg/g 和 (1.15 ± 0.15) mg/g。干巴菌乙醇提取物的抗氧化性较好, 其清除DPPH自由基和ABTS⁺自由基的能力最强, 铁还原能力最强。此外, 丙酮、乙醇和乙酸乙酯提取物均对 α -葡萄糖苷酶表现出明显的抑制能力。相关性分析发现干巴菌所含的酚类化合物、麦角甾醇等成分是其具有抗氧化性及 α -葡萄糖苷酶抑制活性的潜在物质。

关键词: 干巴菌; 多酚; 麦角甾醇; 抗氧化性; α -葡萄糖苷酶

Functional Components and Bioactivity of Extracts from Different Solvents of *Thelephora ganbajun*

JIN Chengni, BIAN Jingjing, REN Mengmeng, XU Jianguo, YAN Shuaishuai*

(College of Food Science, Shanxi Normal University, Taiyuan 030000, Shanxi, China)

Abstract: To further explore the bioactive ingredients of *Thelephora ganbajun*, six different solvents were used to extract *Thelephora ganbajun*, including water, ethanol, acetone, ethyl acetate, chloroform and petroleum ether. The effects of different solvents on the content of total phenols and ergosterol were investigated. At the same time, the polyphenol fractions, the antioxidant activity of the extracts and its inhibitory effect on the activity of α -glucosidase were analyzed. The result indicated that among the six extracts, the ethanol extract had the highest content of total phenols, which was (14.95 ± 0.58) mg/g. The polyphenol components and content among different solvent extracts obviously varied. The content of ergosterol in ethyl acetate and ethanol extracts, (1.33 ± 0.13) and (1.15 ± 0.15) mg/g, respectively, were higher than that in other solvent extracts. The ethanol extract had the best antioxidant activity with the strongest scavenging ability of DPPH and ABTS⁺ free radicals, as well as the strongest ferric ion reducing antioxidant power. In addition, acetone, ethanol and ethyl acetate extracts showed significant α -glucosidase inhibitory activity. According to correlation analysis, *Thelephora ganbajun* contained polyphenol components and ergosterol, potential substances for its antioxidant activity and α -glucosidase inhibitory activity.

Key words: *Thelephora ganbajun*; polyphenols; ergosterol; antioxidant activity; α -glucosidase

引文格式:

晋程妮, 边晶晶, 任梦梦, 等. 干巴菌不同溶剂提取物功能成分与生物活性[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(3): 38-44.

JIN Chengni, BIAN Jingjing, REN Mengmeng, et al. Functional Components and Bioactivity of Extracts from Different Solvents of *Thelephora ganbajun*[J]. Food Research and Development, 2025, 46(3): 38-44.

基金项目: 山西省自然科学基金青年项目(202203021222231, 202103021223247)

作者简介: 晋程妮(1994—), 女(汉), 副教授, 博士, 研究方向: 食品营养与健康。

*通信作者: 闫帅帅(1994—), 男(汉), 副教授, 博士, 研究方向: 食品营养与健康。

食用菌是一种健康食品,富含蛋白质、氨基酸、维生素、多糖和膳食纤维,是人体必需营养素的丰富来源。此外,还富含酚类化合物、甾醇、生物碱、萜类化合物、凝聚素等多种生物活性物质,对癌症、心脑血管疾病、传染病、高血压、高血脂和糖尿病具有预防作用^[1-3],日益受到消费者的青睐。在人类慢性疾病高发和饮食营养问题突出的情况下,食用菌的营养和药用价值研究受到国内外学者的关注,进一步研究功能性成分的提取技术以及开发食用菌的精深加工食品、保健品和药品迫在眉睫,人们期待食用菌能进一步促进人类健康福祉。

干巴菌(*Thelephora ganbajun*)又名绣球菌、对花菌、马牙菌等,是担子菌门(Basidiomycota)、伞菌纲(Agaricomycetes)、革菌目(Thelephorales)、革菌科(Thelephoraceae)、革菌属(*Thelephora*)野生食用菌^[4]。该菌主要产地在云南省,此外在四川省南部、贵州省西部、福建省三明地区等局部地区也有少量分布,至今无法人工栽培^[5]。干巴菌是一种具有浓郁鲜香味且营养价值极高的食用菌,含蛋白质、多种氨基酸、维生素、矿物质元素、多糖等大量营养物质,对人体的健康有益^[4]。据报道,在我国49种食用菌中,干巴菌具有较强的抗氧化能力,是一种潜在的天然抗氧化剂来源^[6]。优化干巴菌的提取工艺是挖掘其发挥抗氧化活性物质的重要手段,不仅有利于提高有效成分的提取效率,还能进一步指导干巴菌的精深加工。Xu等^[7]进一步优化干巴菌的提取工艺,发现超声辅助提取技术有助于从干巴菌乙醇水提取物中提取抗氧化剂,且干巴菌提取物对人癌细胞表现出抗增殖活性,这归因于其所含的酚类化合物,例如原儿茶酸、对羟基苯甲酸、芦丁、2-羟基肉桂酸和表儿茶素。已有研究证明,在干巴菌活性成分中,多糖含量较高,发现其具有免疫调节、抗氧化、抗炎、抗糖尿病、抗肿瘤等作用^[8-11]。赵红艳等^[8]采用热水法提取干巴菌多糖,在提取温度为70℃、提取时间为2.5h、料液比为1:15(g/mL)条件下,多糖提取率达到10.08%。陆文娟等^[12]研究发现干巴菌经超声细胞破碎处理后再热水浸提,可使多糖充分地溶出。干巴菌的功能活性成分及其功效正逐渐被深入研究,然而,尚需进一步挖掘有效的干巴菌活性物质提取方法。因此,本文以干巴菌为研究对象,采用6种不同极性溶剂对其进行提取,探索不同溶剂提取物中活性成分含量、抗氧化性及对α-葡萄糖苷酶抑制活性的差异,以期为干巴菌资源的精深加工和产品开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

干巴菌:市售,产于云南昆明;没食子酸(纯度≥98%)、福林酚试剂:上海源叶生物科技有限公司;1,1-

二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS]、2,4,6-三吡啶基三嗪(2,4,6-three pyridyl three triazine, TPTZ)、麦角甾醇、α-葡萄糖苷酶、对硝基苯基β-D-吡喃葡萄糖苷(4-nitrophenyl-β-D-glucopyranoside, PNPG):美国Sigma公司;乙醇、丙酮、乙酸乙酯、氯仿、石油醚(均为分析纯)、乙腈、甲醇(均为色谱纯):天津市科密欧化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

高效液相色谱仪(UltiMate™ 3000)、酶标仪(Multi-skan FC):美国Thermo Fisher公司;高速离心机(HC-3018):安徽中科中佳科学仪器有限公司;旋转蒸发器(RE-52AA):上海亚荣生化仪器厂;超声波清洗机(CQ-250A-DST):上海恒跃医疗器械有限公司;万能粉碎机(SF-130):上海超亿制药机械设备有限公司;鼓风干燥箱(DHG-9075A):上海一恒科学仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 干巴菌预处理

将干巴菌置于60℃鼓风干燥箱中干燥,粉碎机粉碎后过40目筛,得到的干巴菌粉在-20℃下保存、备用。

1.3.2 制备干巴菌提取物

准确称取10g干巴菌粉6份,按料液比1:10(g/mL)分别加入水、乙醇、丙酮、乙酸乙酯、氯仿和石油醚,超声波辅助(功率100W)处理2h,4000r/min离心10min,分别收集上清液和残渣。重复提取残渣2次,合并上清液后进行减压浓缩,甲醇溶解后定容至25mL,放于4℃备用。

1.3.3 总酚含量的测定

干巴菌提取物中总酚含量的测定采用福林酚比色法^[13]。干巴菌提取物中总酚含量按式(1)计算。

$$W = \frac{\rho \times V \times N}{m} \quad (1)$$

式中:W为总酚含量,mg/g;ρ为多酚质量浓度,mg/mL;V为待测液体积,mL;N为稀释倍数;m为干巴菌粉的质量,g。

1.3.4 多酚的组成成分及含量测定

参照葛鑫会等^[14]的方法并稍作修改,利用高效液相色谱(high performance liquid chromatography, HPLC)仪对干巴菌提取物中酚类化合物组成进行分析。色谱柱:Thermo Dionex Acclaim 120 C18柱(150mm×3mm, 3μm),流动相A:0.2%甲酸水,流动相B:乙腈/甲醇(4:1,体积比),梯度洗脱程序:0~2min,10%~20%B;2~7min,20%~30%B;7~9min,30%~60%B;9~14min,60%B;14~16min,60%~10%B;16~18min,10%B。流速1.0mL/min,柱温30℃,紫外检测波长280nm。干巴菌提取物过0.22μm有机滤膜,进样量10μL。

1.3.5 麦角甾醇含量的测定

采用 HPLC 法测定干巴菌提取物中麦角甾醇含量^[15]。将提取物过 0.22 μm 有机滤膜后上样检测。色谱柱为 Inertsil C18 柱 (250 mm×4.6 mm, 5 μm), 流动相为甲醇和水, 梯度洗脱程序: 0~10 min, 30% 甲醇~80% 甲醇; 10~30 min, 80% 甲醇~100% 甲醇。流速 1.0 mL/min, 柱温 30 °C, 进样量 20 μL, 检测波长 283 nm。干巴菌提取物中麦角甾醇含量按式(2)计算。

$$M = \frac{c \times V \times N}{m} \quad (2)$$

式中: M 为麦角甾醇含量, μg/g; c 为麦角甾醇质量浓度, μg/mL; V 为待测液体积, mL; N 为稀释倍数; m 为干巴菌粉的质量, g。

1.3.6 抗氧化性测定

1.3.6.1 DPPH 自由基清除能力测定

干巴菌提取物对 DPPH 自由基清除能力的测定参照 Yan 等^[13]的方法, 取 0.5 mL 样品溶液与 2.5 mL 的 60 μmol/L DPPH 溶液均匀混合, 暗室反应 30 min, 于波长 517 nm 处测吸光度。DPPH 自由基清除率按式(3)计算。

$$X = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100 \quad (3)$$

式中: X 为 DPPH 自由基清除能力, %; A_0 为甲醇与 DPPH 溶液混合液的吸光度; A_1 为样品与 DPPH 溶液混合液的吸光度。

1.3.6.2 ABTS⁺自由基清除能力测定

干巴菌提取物对 ABTS⁺自由基清除能力的测定参照颜征等^[16]的方法, 7 mmol/L ABTS 储备液与 2.45 mmol/L 过硫酸钾溶液按 1:1 (体积比) 混合制备 ABTS 溶液。取 0.1 mL 样品溶液与 3.8 mL ABTS 溶液均匀混合, 暗室反应 6 min, 于波长 734 nm 处测吸光度。ABTS⁺自由基清除率按式(4)计算。

$$Y = \frac{A_2 - A_3}{A_2} \times 100 \quad (4)$$

式中: Y 为 ABTS⁺自由基清除能力, %; A_2 为甲醇与 ABTS 溶液混合液的吸光度; A_3 为样品与 ABTS 溶液混合液的吸光度。

1.3.6.3 铁还原能力 (ferric ion reducing antioxidant power, FRAP) 测定

干巴菌提取物 FRAP 的测定参照张山佳等^[17]的方法并稍作修改, 0.3 mol/L 醋酸盐溶液、10 mmol/L TPTZ 溶液和 20 mmol/L FeCl₃ 溶液三者按 10:1:1 (体积比) 混合制备 FRAP 工作液。向 0.1 mL 提取物中加入 3.1 mL 蒸馏水和 1.8 mL FRAP 工作液, 在 37 °C 条件下孵育 30 min, 于波长 593 nm 处测吸光度。FRAP 表示为 μmol Fe²⁺/g 干重 (dry weight, DW)。FRAP 值越大表示抗氧化能力越强。

1.3.7 α-葡萄糖苷酶抑制活性的测定

干巴菌提取物对 α-葡萄糖苷酶抑制活性的测定参照 Yan 等^[13]的方法, 向 80 μL 样品溶液中加入 20 μL 的 0.2 U/mL α-葡萄糖苷酶溶液, 37 °C 下温育 5 min。随后, 加入 100 μL 的 4 mmol/L PNPG 溶液, 37 °C 下反应 30 min, 最后加入 100 μL 的 4 mmol/L Na₂CO₃ 终止反应, 于波长 405 nm 处测吸光度。α-葡萄糖苷酶抑制率按式(5)计算。

$$Z = \left(1 - \frac{A_s - A_b}{A_c - A_0}\right) \times 100 \quad (5)$$

式中: Z 为 α-葡萄糖苷酶抑制率, %; A_c 为磷酸盐缓冲液、α-葡萄糖苷酶溶液、PNPG 混合液的吸光度; A_0 为磷酸盐缓冲液与 PNPG 混合液的吸光度; A_s 为样品、α-葡萄糖苷酶溶液、PNPG 混合液的吸光度; A_b 为样品、磷酸盐缓冲液、PNPG 混合液的吸光度。

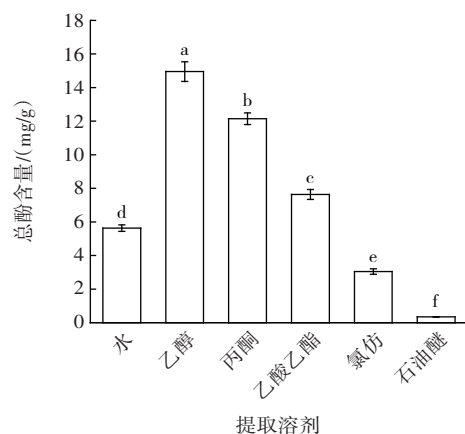
1.4 数据处理

试验均重复 3 次, 用平均值±标准差表示。采用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析, 以 Duncan 检验确定各处理组之间的显著性差异, $P < 0.05$ 时差异具有统计学意义, 使用 Origin 2018 软件进行图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 提取溶剂对总酚含量的影响

采用福林酚比色法对干巴菌提取物中多酚含量进行检测, 结果见图 1。



不同小写字母表示组间差异显著, $P < 0.05$ 。

图 1 不同提取溶剂对干巴菌提取物中总酚含量的影响

Fig.1 Effect of extraction solvents on the content of total phenols in extracts from *Thelephora ganbajun*

由图 1 可知, 不同溶剂对干巴菌提取物中总酚含量具有显著性影响, 各溶剂提取的干巴菌中总酚含量由高到低的顺序为乙醇>丙酮>乙酸乙酯>水>氯仿>石油醚。乙醇作为提取溶剂时, 干巴菌提取物中总酚含量最高, 为 (14.95±0.58) mg/g, 而石油醚作为提取溶剂时, 总酚含量最低。赵玉红等^[18]采用不同溶剂提取刺蔷薇叶总酚, 结果与本研究结果一致, 即乙醇提取物中

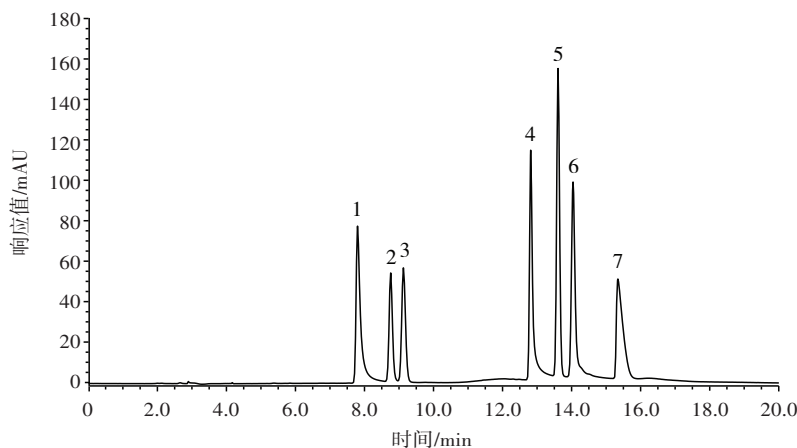
总酚含量最高。说明多酚类物质是一种极性化合物,在极性有机溶剂中有较高的溶解性^[19],但由于多酚组成较复杂,也使得酚类化合物在不同极性溶剂中溶解性存在较大差异。因此,在提取多酚时应选择合适的提取溶剂。

2.2 提取溶剂对多酚类物质组成的影响

酚酸和黄酮类物质作为药食用真菌中多酚的关键成分,具有重要的生物活性功能。参考相关研究对野

生食用菌酚类物质组成的分析^[14],选取7种多酚成分(绿原酸、表儿茶素、对羟基苯甲酸、槲皮素、肉桂酸、山奈酚和水杨酸)作为分析干巴菌多酚组成的研究对象。7种多酚类物质标准品的 HPLC 色谱图见图 2。

由图 2 可知,通过 HPLC 分析,得到了 7 种酚类化合物出峰的保留时间和峰面积,且峰型良好,出峰位置无干扰峰,这有助于进一步利用 HPLC 对干巴菌不同溶剂提取物中多酚类物质进行定量分析。



1. 绿原酸;2. 表儿茶素;3. 对羟基苯甲酸;4. 槲皮素;5. 肉桂酸;6. 山奈酚;7. 水杨酸。

图 2 7 种酚类化合物标准品的 HPLC 色谱图

Fig.2 HPLC of 7 polyphenol components standards

干巴菌不同溶剂提取物中多酚组成及 7 种多酚类物质的定量分析见表 1。

由表 1 可知,在选定的 7 种多酚类物质标样中,干巴菌不同溶剂提取物中多酚类物质的种类和含量存在

表 1 干巴菌不同溶剂提取物中多酚组成和含量

Table 1 Polyphenol components and content of extracts from different solvents of *Thelephora ganbajun*

提取溶剂	多酚类物质含量/($\mu\text{g/g}$)						
	绿原酸	表儿茶素	对羟基苯甲酸	槲皮素	肉桂酸	山奈酚	水杨酸
水	-	-	0.06 \pm 0.01 ^d	95.82 \pm 2.48 ^d	-	614.64 \pm 34.19 ^a	47.79 \pm 2.27 ^c
乙醇	60.50 \pm 2.64 ^a	554.53 \pm 22.17 ^a	97.25 \pm 3.74 ^a	105.12 \pm 2.68 ^d	-	68.99 \pm 1.41 ^e	-
丙酮	13.89 \pm 0.19 ^b	-	13.72 \pm 0.22 ^b	532.38 \pm 27.92 ^a	5.59 \pm 0.08 ^b	63.20 \pm 0.36 ^c	335.90 \pm 15.01 ^a
乙酸乙酯	14.88 \pm 0.26 ^b	-	14.39 \pm 0.25 ^b	548.32 \pm 30.15 ^a	9.84 \pm 0.21 ^a	110.55 \pm 3.15 ^d	42.31 \pm 3.42 ^c
氯仿	16.16 \pm 0.37 ^b	3.03 \pm 0.15 ^b	8.22 \pm 0.17 ^c	386.60 \pm 12.33 ^b	9.74 \pm 0.22 ^a	382.45 \pm 18.10 ^b	189.70 \pm 8.44 ^b
石油醚	14.02 \pm 0.23 ^b	-	14.78 \pm 0.30 ^b	236.08 \pm 9.71 ^c	2.54 \pm 0.07 ^c	217.19 \pm 6.72 ^c	313.51 \pm 12.98 ^a

注:-表示未检测到该物质;同列不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

差异。氯仿提取物中含有 7 种多酚类成分,丙酮、乙酸乙酯和石油醚提取物中均含有绿原酸、对羟基苯甲酸、槲皮素、肉桂酸、山奈酚和水杨酸 6 种多酚类物质,乙醇提取物中含有绿原酸、表儿茶素、对羟基苯甲酸、槲皮素和山奈酚 5 种多酚类物质,而水提取物中含有对羟基苯甲酸、槲皮素、山奈酚和水杨酸这 4 种多酚类物质。乙醇作为提取溶剂时,对绿原酸、表儿茶素和对羟基苯甲酸 3 种酚类物质的提取效果优于其他溶剂,而乙酸乙酯对槲皮素和肉桂酸的提取效果优于其他溶剂。山奈酚在水提取物中含量最高,水杨酸在丙酮提取物和石油醚提取物中的含量显著高于其他 4 种溶剂

提取物。

2.3 提取溶剂对麦角甾醇含量的影响

采用 HPLC 法对麦角甾醇标准品进行检测,结果见图 3。

由图 3 可知,麦角甾醇色谱峰的保留时间为 17.15 min,呈现单一对称的尖峰,说明该 HPLC 法能够检测提取物中的麦角甾醇含量。

干巴菌不同溶剂提取物中麦角甾醇含量测定结果见图 4。

由图 4 可知,不同溶剂对于干巴菌中麦角甾醇含量具有明显影响,乙酸乙酯为提取溶剂时麦角甾醇含量

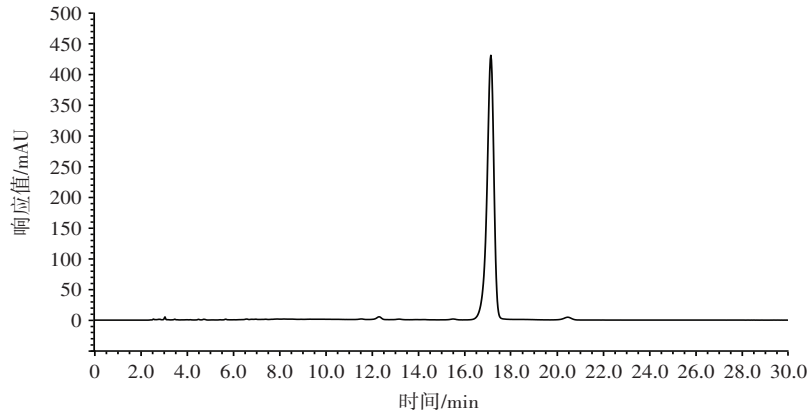
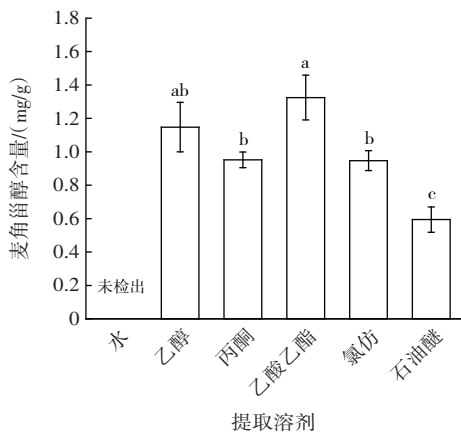


图3 麦角甾醇标准品的色谱图

Fig.3 HPLC of ergosterol standards



不同小写字母表示组间差异显著, $P<0.05$ 。

图4 不同提取溶剂对于干巴菌提取物中麦角甾醇含量的影响

Fig.4 Effect of extraction solvents on the content of ergosterol in extracts from *Thelephora ganbajun*

最高,为(1.33±0.13) mg/g,其次为乙醇提取物、丙酮提取物、氯仿提取物,石油醚提取物较低,水提取物中没有检出。这与麦角甾醇易溶于有机溶剂而不溶于水的特性相符。栗铭鸿等^[20]在研究鸡枞菌不同极性溶剂(蒸馏水、甲醇、无水乙醇、丙酮、乙酸乙酯、正己烷、正丁醇和石油醚)提取物中麦角甾醇含量时,发现甲醇提取物含量最高,为0.21 mg/g。俞明君等^[15]测定了8种食用菌中麦角甾醇含量,由高到低依次为香菇(‘伏牛山嫂’)、香菇(‘西峡9608’)、杏鲍菇、猴头菇、金针菇、银耳、平菇、黑木耳。本研究结果干巴菌乙酸乙酯提取物和乙醇提取物中麦角甾醇含量仅低于香菇(最高可达2.13 mg/g),但高于杏鲍菇、猴头菇、金针菇、银耳、平菇、黑木耳和鸡枞菌7种食用菌^[15,20],这为深入开发利用干巴菌中的麦角甾醇提供了理论依据。

2.4 提取溶剂对于干巴菌的抗氧化性和 α -葡萄糖苷酶抑制活性的影响

提取溶剂对于干巴菌的抗氧化性和 α -葡萄糖苷酶

抑制活性的影响见表2。

表2 干巴菌不同溶剂提取物的抗氧化性及其对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制作用

Table 2 Antioxidant activity and inhibitory effect on the activity of α -glucosidase of extracts from different solvents of *Thelephora ganbajun*

提取溶剂	DPPH 自由基 IC ₅₀ / (μg/mL)	ABTS ⁺ 自由基 IC ₅₀ / (μg/mL)	FRAP/(μmol Fe ²⁺ /g DW)	α -葡萄糖苷酶抑制活性 IC ₅₀ / (μg/mL)
水	44.96±1.80 ^a	92.94±1.23 ^a	29.83±1.42 ^c	128.88±2.65 ^a
乙醇	10.10±0.93 ^d	66.50±0.63 ^d	155.54±9.80 ^a	1.62±0.11 ^c
丙酮	15.79±0.40 ^c	74.40±1.03 ^c	124.71±5.64 ^b	1.14±0.08 ^c
乙酸乙酯	19.68±0.80 ^b	80.20±1.40 ^b	121.38±6.71 ^b	2.48±0.11 ^c
氯仿	14.12±1.39 ^c	79.11±0.82 ^b	29.14±0.99 ^c	21.48±1.80 ^b
石油醚	-	-	0.97±0.05 ^d	-

注:-表示未检测到;同列不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

通过 DPPH 自由基、ABTS⁺ 自由基清除能力和 FRAP 抗氧化能力 3 个指标来比较干巴菌不同溶剂提取物的抗氧化性。由表 2 可知,不同溶剂对于干巴菌 DPPH 自由基、ABTS⁺ 自由基清除率的影响差异较大。除石油醚外,干巴菌不同溶剂提取物对 DPPH 自由基的清除能力由高到低的顺序为乙醇>氯仿>丙酮>乙酸乙酯>水,对 ABTS⁺ 自由基的清除能力由高到低的顺序为乙醇>丙酮>氯仿>乙酸乙酯>水。其中,乙醇提取物对 DPPH 自由基和 ABTS⁺ 自由基的清除能力最强,乙酸乙酯和水提取物最弱。从表 1 可知,与其他提取物相比,乙醇提取物中表儿茶素的含量最高。Park 等^[21]研究了蓝桉叶含有多种与抗氧化作用有关的酚类物质,其中表儿茶素是其 50% 乙醇提取物表现出强抗氧化能力的特定酚类化合物,Xiang 等^[22]也证实表儿茶素是多齿山茶花 70% 甲醇提取物中含量最高的酚类化合物,并在抗氧化活性中起着重要作用,因此,猜测干巴菌乙醇提取物具有较高的抗氧化活性可能与表儿茶

素有关。此外,不同溶剂提取物对 DPPH 自由基和 ABTS⁺自由基的清除能力不同还有可能是受到提取物中的麦角甾醇等其他成分的影响。干巴菌 FRAP 受提取溶剂的影响,存在较大的差异。干巴菌不同溶剂提取物的 FRAP 由高到低的顺序为乙醇>丙酮>乙酸乙酯>水>氯仿>石油醚。这个顺序与总酚含量的顺序基本一致。综合以上结果可以看出,干巴菌乙醇提取物的抗氧化性最好,表现为 DPPH 自由基和 ABTS⁺自由基的清除能力最强,FRAP 值最高。

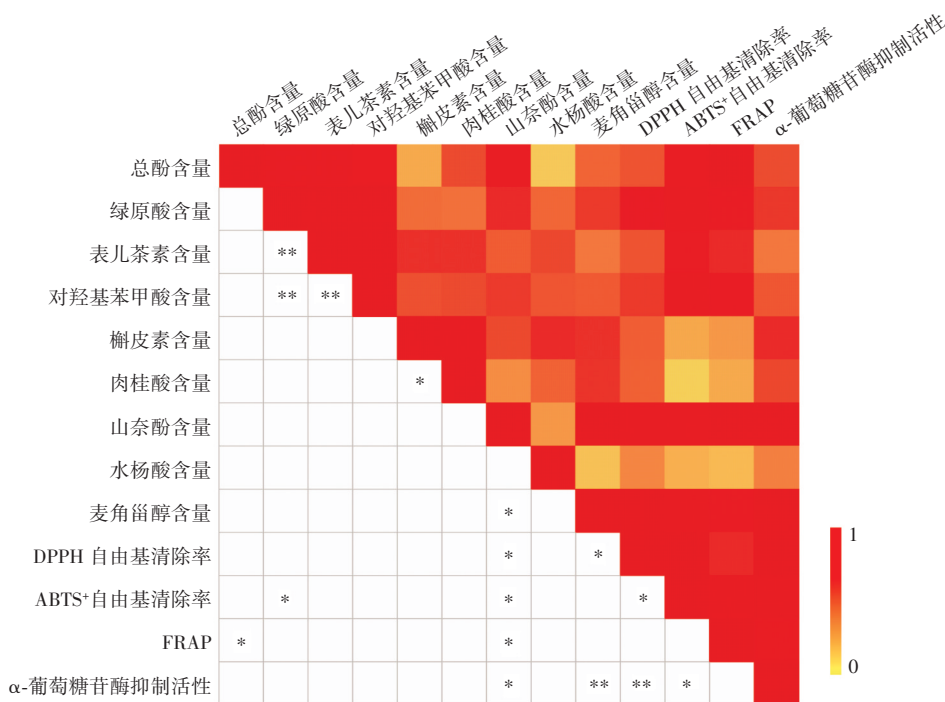
α -葡萄糖苷酶是催化多糖水解成单糖(如葡萄糖)的关键酶,抑制 α -葡萄糖苷酶的活性可以减缓小肠对葡萄糖的吸收,抑制餐后血糖升高,预防糖尿病的发生^[23-24]。由表 2 可知,乙醇、丙酮和乙酸乙酯提取物对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制能力最强,IC₅₀ 值分别为(1.62±0.11)、(1.14±0.08)、(2.48±0.11) $\mu\text{g/mL}$;其次是

氯仿提取物,水提取物的抑制能力较差,石油醚提取物对 α -葡萄糖苷酶的活性无抑制作用。Kaewnarin 等^[25]研究表明 4 种野生食用菌甲醇提取物均具有较强的 α -葡萄糖苷酶抑制活性,酚类化合物可能是其抑制活性的主要来源。Shamim 等^[26]研究表明食用菌(侧耳属、灵芝等)中的萜类化合物可防止单糖分子的形成并促进肝脏和肌肉中糖原的形成,具有较好的 α -葡萄糖苷酶抑制活性。本研究观察到的 α -葡萄糖苷酶抑制作用可能归因于干巴菌提取物中所含的酚类化合物和麦角甾醇等物质。

2.5 相关性分析

利用 SPSS 双变量相关性分析,通过 Pearson 相关系数计算得到干巴菌不同溶剂提取物的各项指标之间的相关性,结果见图 5。

由图 5 可知,干巴菌提取物中 DPPH 自由基清除



*表示显著相关($P < 0.05$);**表示极显著相关($P < 0.01$)。

图 5 干巴菌提取物各项指标的相关性分析

Fig.5 Correlation analysis of various indexes of extracts from *Thelephora ganbajun*

率与山奈酚、麦角甾醇含量及 ABTS⁺自由基清除率呈显著相关;FRAP 与总酚含量和山奈酚呈显著相关; α -葡萄糖苷酶抑制活性与山奈酚及 ABTS⁺自由基清除率呈显著相关,与麦角甾醇含量和 DPPH 自由基清除率呈极显著相关;山奈酚与麦角甾醇含量、抗氧化性、 α -葡萄糖苷酶抑制活性呈显著相关;绿原酸、表儿茶素及对羟基苯甲酸三者之间呈极显著相关。因此,干巴菌提取物中所含的酚类化合物、麦角甾醇等成分协同作用使得其具有抗氧化性及对 α -葡萄糖苷酶的抑制活性。

3 结论

通过探究 6 种不同溶剂对干巴菌中总酚、麦角甾醇和多酚类物质组成及含量的影响,得出乙醇提取物中总酚含量最高,乙酸乙酯和乙醇提取物中麦角甾醇含量高于其他溶剂提取物,不同溶剂对干巴菌多酚类物质的组成及含量影响差异显著。这可能与提取溶剂的种类、干巴菌的化学组成和物理特性有关。抗氧化研究结果表明,乙醇提取物具有较强的铁还原能力以及 DPPH 自由基和 ABTS⁺自由基清除能力。对 α -葡萄糖苷酶抑制效果中,乙醇、丙酮和乙酸乙酯提取物比

其他溶剂提取物抑制能力强。综上,干巴菌乙醇提取物表现出显著的体外抗氧化性和 α -葡萄糖苷酶抑制活性。相关性分析表明,酚类化合物、麦角甾醇是干巴菌提取物发挥抗氧化和 α -葡萄糖苷酶抑制能力的重要活性物质,未来可通过细胞或者动物模型深入系统的研究干巴菌发挥抗氧化性和潜在降血糖能力的具体活性成分及作用机制。

参考文献:

- [1] 翟晓旭,薛春梅,吴薇,等.食用菌的研究进展[J].农业与技术,2023,43(4):17-19.
ZHAI Xiaoxu, XUE Chunmei, WU Wei, et al. Research progress of edible fungi[J]. Agriculture and Technology, 2023, 43(4): 17-19.
- [2] RAUF A, JOSHI P B, AHMAD Z, et al. Edible mushrooms as potential functional foods in amelioration of hypertension[J]. Phytotherapy Research, 2023, 37(6): 2644-2660.
- [3] KUMAR K, MEHRA R, GUINÉ R P F, et al. Edible mushrooms: A comprehensive review on bioactive compounds with health benefits and processing aspects[J]. Foods, 2021, 10(12): 2996.
- [4] 朱晓梅,慕丽琴,施庭有.珍稀野生食用菌干巴菌的研究进展[J].食用菌,2023,45(1):1-4.
ZHU Xiaomei, MU Liqin, SHI Tingyou. Research progress on rare wild edible fungus *Thelephora ganbajun*[J]. Edible Fungi, 2023, 45(1): 1-4.
- [5] 严胜泽,罗情情,叶开温,等.野生干巴菌(*Thelephora ganbajun* M. Zang)在中国的新分布[J].亚热带植物科学,2021,50(4):313-317.
YAN Shengze, LUO Qingqing, YE Kaiwen, et al. New distribution of wild *Thelephora ganbajun* M. Zang in China[J]. Subtropical Plant Science, 2021, 50(4): 313-317.
- [6] 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.
- [7] XU D P, ZHENG J, ZHOU Y, et al. Extraction of natural antioxidants from the *Thelephora ganbajun* mushroom by an ultrasound-assisted extraction technique and evaluation of antiproliferative activity of the extract against human cancer cells[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2016, 17(10): 1664.
- [8] 赵红艳,张鸣关,史俊友.干巴菌多糖提取工艺优化及抗氧化活性的研究[J].化学与生物工程,2020,37(5):18-21.
ZHAO Hongyan, ZHANG Yaguan, SHI Junyou. Optimization in extraction process of polysaccharides from *Thelephora ganbajun* Zang and their antioxidant activity[J]. Chemistry & Bioengineering, 2020, 37(5): 18-21.
- [9] 徐蕊阳,陆文娟,陶明焯,等.干巴菌多糖对急性酒精损伤小鼠的抗氧化作用[J].食品工业科技,2017,38(15):314-318.
XU Songyang, LU Wenjuan, TAO Mingxuan, et al. Antioxidant effects of polysaccharides from *Thelephora ganbajun* in mice with acute alcoholic injury[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(15): 314-318.
- [10] GONG L L, MENG F J, HOU Y C, et al. Purification, characterization, and bioactivity of two new polysaccharide fractions from *Thelephora ganbajun* mushroom[J]. Journal of Food Biochemistry, 2020, 44(1): e13092.
- [11] ZHENG L, MA Y H, ZHANG Y J, et al. Distribution of zinc in mycelial cells and antioxidant and anti-inflammatory activities of mycelial zinc polysaccharides from *Thelephora ganbajun* TG-01[J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2020, 2020: 2308017.
- [12] 陆文娟,喻晨,王美菊,等.响应面法优化提取干巴菌多糖的工艺研究[J].南京师范大学学报(工程技术版),2015,15(3):84-92.
LU Wenjuan, YU Chen, WANG Meiju, et al. Optimization study on the extraction technology of polysaccharide from *T. ganbajun* Zang by response surface method[J]. Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology Edition), 2015, 15(3): 84-92.
- [13] YAN S S, SHAO H J, ZHOU Z H, et al. Non-extractable polyphenols of green tea and their antioxidant, anti- α -glucosidase capacity, and release during *in vitro* digestion[J]. Journal of Functional Foods, 2018, 42: 129-136.
- [14] 葛鑫会,孟继坤,张楠,等.五台山野生食用菌酚类物质组成及抗氧化活性分析[J].中国食用菌,2022,41(4):56-63.
GE Xinhui, MENG Jikun, ZHANG Nan, et al. Phenolic compositions and antioxidant activities of wild edible fungi from mount Wutai[J]. Edible Fungi of China, 2022, 41(4): 56-63.
- [15] 俞明君,聂远洋,杨伟,等.HPLC法测定食用菌中的麦角甾醇含量[J].河南科技学院学报(自然科学版),2019,47(5):18-21.
YU Mingjun, NIE Yuanyang, YANG Wei, et al. Determination of ergosterol contents in mushroom by HPLC[J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(5): 18-21.
- [16] 颜征,张海晖,李亚群,等.莲子壳多酚的抗氧化活性和稳定性[J].中国食品学报,2019,19(12):89-95.
YAN Zheng, ZHANG Haihui, LI Yaqun, et al. Antioxidant properties and stability of polyphenols in lotus seed hull[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(12): 89-95.
- [17] 张山佳,韩雪怡.沙葱总酚含量测定及抗氧化活性分析[J].中国调味品,2022,47(11):64-67.
ZHANG Shanjia, HAN Xueyi. Determination of total phenol content and analysis of antioxidant activity of *Allium mongolicum*[J]. China Condiment, 2022, 47(11): 64-67.
- [18] 赵玉红,师帅帅,张立钢.‘鲁赫’刺蔷薇叶不同溶剂提取物的活性成分及抗氧化性比较[J].现代食品科技,2019,35(5):159-166.
ZHAO Yuhong, SHI Shuaishuai, ZHANG Ligang. Bioactive compounds extracted by different solvents from *Rosa acicularis* ‘Luhe’ leaves and their antioxidant activity[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(5): 159-166.
- [19] 陈龙,李文峰,令博,等.金耳、银耳、木耳多酚提取及其抗氧化活性[J].食品科学,2011,32(20):52-56.
CHEN Long, LI Wenfeng, LING Bo, et al. Extraction and antioxidant activity of polyphenols from *Tremella aurantialba*, *Tremella fuciformis* and *Auricularia auricula*[J]. Food Science, 2011, 32(20): 52-56.
- [20] 栗铭鸿,李官浩,朴守焕,等.鸡枞菌不同溶剂提取物成分分析及抗氧化作用研究[J].食品与机械,2018,34(1):144-148.
LI Minghong, LI Guanhao, PIAO Shouhuan, et al. Research of composition and antioxidant activity of different solvent extracts from *Termitomyces albuminosus*[J]. Food & Machinery, 2018, 34(1): 144-148.
- [21] PARK J Y, KIM J Y, SON Y G, et al. Characterization of chemical composition and antioxidant activity of *Eucalyptus globulus* leaves under different extraction conditions[J]. Applied Sciences, 2023, 13(17): 9984.
- [22] XIANG Z Y, LIU L, XU Z, et al. Solvent effects on the phenolic compounds and antioxidant activity associated with *Camellia polyodonta* flower extracts[J]. ACS Omega, 2024, 9(25): 27192-27203.
- [23] ZHANG Y, CHEN Y, LIU X Y, et al. Preparation and identification of peptides with α -glucosidase inhibitory activity from shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) protein[J]. Foods, 2023, 12(13): 2534.
- [24] PAPOUTSIS K, ZHANG J Y, BOWYER M C, et al. Fruit, vegetables, and mushrooms for the preparation of extracts with α -amylase and α -glucosidase inhibition properties: A review[J]. Food Chemistry, 2021, 338: 128119.
- [25] KAEWNARIN K, SUWANNARACH N, KUMLA J, et al. Phenolic profile of various wild edible mushroom extracts from Thailand and their antioxidant properties, anti-tyrosinase and hyperglycaemic inhibitory activities[J]. Journal of Functional Foods, 2016, 27: 352-364.
- [26] SHAMIM M Z, MISHRA A K, KAUSAR T, et al. Exploring edible mushrooms for diabetes: Unveiling their role in prevention and treatment[J]. Molecules, 2023, 28(6): 2837.