

3 种干燥方式对猴头菇活性成分及 抗氧化活性的影响

李英迪¹, 夏其乐^{1*}, 曹艳¹, 杨开², 毛荣良³, 黄良水⁴

(1. 浙江省农业科学院 食品科学研究所, 农业农村部果品采后处理重点实验室, 浙江省果蔬保鲜与加工技术研究重点实验室, 杭州 310021; 2. 浙江工业大学, 杭州 310014; 3. 常山县豪锋农业发展有限公司, 常山 324207; 4. 常山县天乐食用菌研究所, 常山 324200)

摘要: **目的** 研究不同干燥方式对猴头菇品质的影响。**方法** 采用真空冷冻干燥、热风干燥、真空干燥 3 种不同干燥方式测定猴头菇干品活性成分含量及抗氧化活性, 通过 DPPH 清除能力、还原力、ABTS⁺清除能力 3 种抗氧化体系进行综合评价。**结果** 50 °C 真空干燥组猴头菇干制品总酚和三萜类活性成分含量最高, 分别为 17.56 mg/g 和 2.83 mg/g, 随加热温度升高而降低, 70 °C 真空干燥组的总酚和三萜类含量仅为 50 °C 真空干燥组的 53.5% 和 71.7%; 真空冷冻干燥和热风干燥组 2 种成分含量相差不大, 总酚和三萜含量最高的皆为 60 °C 热风干燥组, 分别为 7.28 mg/g 和 2.17 mg/g, 含量最低的分别是 70 °C 热风干燥和真空冷冻干燥, 总酚含量为 4.06 mg/g, 三萜含量为 1.77 mg/g。发现真空干燥组醇提物抗氧化能力好于另外 2 种干燥方式, 且抗氧化能力均随提取液浓度增加变大。**结论** 50 °C 真空干燥组猴头菇活性成分含量较高、抗氧化能力相对较强, 可更好的应用于干燥和后续加工产品品质提升。

关键词: 猴头菇; 干燥方式; 活性成分; 抗氧化活性

Effects of 3 drying methods on bioactive components and antioxidant activity of *Hericium erinaceus*

LI Ying-Di¹, XIA Qi-Le^{1*}, CAO Yan¹, YANG Kai², MAO Rong-Liang³, HUANG Liang-Shui⁴

(1. Key Laboratory of Post-Harvest Handling of Fruits, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Fruits and Vegetables Postharvest and Processing Technology Research of Zhejiang Province, Institute of Food Science, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 2. Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 3. Changshan Haofeng Agricultural Discovery Co., Ltd, Changshan 324207, China; 4. Changshan Tianle Edible Tungi Research Institute, Changshan 324200, China)

ABSTRACT: Objective To study the effect of different drying methods on the quality of *Hericium erinaceus*. **Methods** Three different drying methods including vacuum freeze drying, hot air drying, and vacuum drying were used to determine and analyze the active ingredients and antioxidant activity of *Hericium erinaceus*. Three antioxidant systems, DPPH scavenging capacity, reducing capacity and ABTS⁺ scavenging capacity, were evaluated.

基金项目: 浙江省重点研发项目(2019C02040)

Fund: Supported by the Key R&D Projects in Zhejiang Province (2019C02040)

*通讯作者: 夏其乐, 副研究员, 主要研究方向为农产品加工与功能活性研究。E-mail: cookxql@163.com

*Corresponding author: XIA Qi-Le, Associate Professor, Key Laboratory of Post-Harvest Handling of Fruits, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Fruits and Vegetables Postharvest and Processing Technology Research of Zhejiang Province, Institute of Food Science, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China. E-mail: cookxql@163.com

Results The totalphenol and triterpenoids of *Hericium erinaceus* in the vacuum drying group at 50 °C had the highest content of 17.56 mg/g and 2.83 mg/g, which decreased with increasing heating temperature. The content of total phenol and triterpenoids in the 70 °C vacuum drying group was only the 53.5% and 71.7% of 50 °C vacuum drying group. The content of the vacuum freeze-drying and hot air drying groups was similar, the highest content of total phenol and triterpenes was both in the hot air drying group at 60 °C, which was 7.28 mg/g and 2.17 mg/g, and the lowest contents was 70 °C hot air drying and vacuum freeze drying, the total phenol content was 4.06 mg/g, and the triterpene content was 1.77 mg/g. The alcohol extracts in the vacuum heating drying group had better antioxidant capacity than the other 2 drying methods, and the antioxidant capacity increased with the increase of the extract concentration. **Conclusion** The 50 °C vacuum drying group have higher active ingredient content and relatively strong antioxidant capacity, which can be better applied to drying and quality improvement.

KEY WORDS: *Hericium erinaceus*; drying methods; bioactive components; antioxidant activity

1 引言

猴头菇又名猴菇、猴头菌、刺猬菌, 隶属担子菌门, 猴头菌科, 具有很高的营养价值和药用价值^[1,2]。猴头菇富含蛋白质、脂肪、纤维素, 主要活性物质有多糖、萜类和酚类等, 具有抗肿瘤、抗衰老、保肝护胃、提高免疫力等功效^[3,4]。鲜猴头菇含水量大, 不易储存, 干制是其重要的保存方式。目前常用的干燥技术主要有热风干燥、真空干燥、真空冷冻干燥、微波干燥、压差膨化干燥等, 其中工业化应用的主要是热风干燥。热风干燥技术成熟, 具有成本低、产量大、操作简便等优点^[5], 但也会因温度高, 时间长, 易产生褐变等现象。真空干燥技术利用真空系统加速干燥, 效率较高, 品质损失较少^[6]。真空冷冻干燥技术由于干燥温度低能较好的保持物料原有的营养品质, 但生产能耗大、设备投资较高^[7]。

目前对于猴头菇多糖的提取纯化及其抗氧化性研究相对较多, 对其他活性成分萜类、多酚等的研究相对不足^[8,9], 猴头菇多糖为 7%左右, 猴头菇萜类和酚类合计为 4%左右。药食两用真菌所含萜类大多为倍半萜、二萜、三萜类, 其中三萜具有很多生理活性, 如抗菌、抗癌、抗肿瘤、抗氧化、提高免疫力等, 对人体健康有重要作用^[10,11], 其中 5~10 pg/mL 三萜人参皂苷可以抑制肝癌细胞增殖; 75、225、675 mg/kg 的三萜酸给药能改善小鼠免疫功能低下。多酚是存在于植物中的复杂酚类化合物, 是重要的天然活性成分, 酚类物质具有较强的抗氧化能力, 对过剩的自由基具有一定的清除功效, 是天然的抗氧化剂^[12,13]。研究显示, 生物体氧化作用产生的自由基与机体衰老, 诱发肿瘤及动脉粥样硬化等疾病密切相关^[14], 机体中累积的自由基过多可能会引起糖降解、DNA 断裂、蛋白质变性 & 细胞损伤^[10]。随着人体健康受到越来越多的关注, 以天然食物为原料开发营养健康食品成为新的研究热点, 猴头菇因具有特定的生物活性物质与抗氧化活性, 具备较好的开发应用前景。本研究以活性成分含量及体外抗氧化活性为评

价指标, 探究 3 种不同干燥方式对猴头菇品质的影响, 为猴头菇主要功能成分利用及功能产品的开发提供参考。

2 材料与方法

2.1 材料与试剂

猴头菇(猴头菇种猴头菇属), 采自常山森立家庭农场。

没食子酸标准品(99%)、齐墩果酸标准品($\geq 98\%$)、1,1-二苯基-2-苦基肼(1, 1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、2,2'-氨基-双(3-乙基苯并噻唑胶-6-磺酸)[2, 2'-azino-bis(3-ethylbmzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS]、铁氰化钾(上海源叶公司); 福林酚(纯度, 上海蓝季公司); 乙醇、香草醛、冰乙酸、三氯乙酸、三氯化铁、高氯酸(分析纯, 上海凌峰化学试剂有限公司)。

2.2 仪器与设备

UV-1800 紫外/可见分光光度仪(日本岛津公司); SCIENTZ-18N 冷冻干燥机(宁波新芝生物科技股份有限公司); DHG-9070A 电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司); R1002B 旋转蒸发器(上海申生科技有限公司); RE-52A 旋转蒸发器(上海亚荣生化仪器厂); LXJ-HB 飞鸽低速大容量离心机(上海安亭科学仪器厂); DZF-6050 真空干燥箱(上海精宏实验设备有限公司)。

2.3 原料干燥处理

挑选外形完好、无病虫害、大小色泽较一致的新鲜猴头菇, 切成 7~8 mm 厚的均匀薄片。取相同质量(1 kg 左右)预处理的新鲜猴头菇, 分别采用 7 种干燥方式干燥至含水量 13%左右。

热风干燥: 干燥温度 50、60、70 °C 下干燥至恒重, 打粉保存于-20 °C 冰箱备用。

真空干燥: 干燥温度 50、60、70 °C, 真空度 0.09 MPa 下干燥至恒重, 打粉保存于-20 °C 冰箱备用。

真空冷冻干燥: 新鲜猴头菇置于-80 °C冰箱冷冻过夜, 再在预冷到-40 °C真空度 0.025 MPa 下冷冻干燥 72 h, 打粉保存于-20 °C冰箱备用。

2.4 活性物质提取

实验室前期已对猴头菇醇提物提取条件进行工艺优化, 最佳提取条件: 60%乙醇, 料液比 1:15 (g/mL), 提取温度 55 °C, 超声提取 30 min。称取不同干燥方式的猴头菇干粉各 80 g, 60%乙醇按料液比 1:15 (g/mL)进行 55 °C超声(超声功率 500 W)辅助提取 30 min, 所得提取液 4000 r/min 离心 10 min, 收集上清液, 残渣再按上述条件提取 1 次, 合并 2 次上清液, 并将所得上清液旋蒸浓缩, 冷冻干燥得提取物粉末。测定时, 用 60%乙醇配制成 0.1~2.5 mg/mL 浓度的样品待测液。

2.5 猴头菇活性成分的测定方法

2.5.1 总酚含量的测定

总酚含量的测定以没食子酸为标准品, 采用 Folin-Ciocalteu 法进行测定^[15]。依次吸取 0.1 mg/mL 没食子酸标准品溶液 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0 mL 于 25 mL 比色管中, 加入 2.5 mL 福林酚显色剂, 混匀后加入 5 mL 5% Na₂CO₃ 溶液, 加水定容至 25 mL, 25 °C下避光反应 1 h, 于 750 nm 处测定吸光度。以没食子酸标准品浓度 $C(\text{mg/L})$ 为横坐标, 吸光值 A 为纵坐标, 绘制总酚含量标准曲线。

样品取 0.3 mL 提取液, 加 9 mL 蒸馏水混匀, 加入 2.5 mL 福林酚显色剂, 其余实验操作同标准品测定, 于 750 nm 处测定吸光值, 根据标曲方程计算样品浓度。

2.5.2 三萜含量的测定

参照王豪等^[16]方法, 三萜含量的测定以齐墩果酸为标准品, 依次吸取 0.2 mg/mL 齐墩果酸标准品溶液 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 mL 于 25 mL 比色管中, 氮吹仪吹干溶剂, 加入 0.5 mL 50 g/L 的香草醛-冰乙酸和 1.0 mL 高氯酸, 混合后 60 °C水浴 20 min, 冰水冷却 15 min 后加入 3.0 mL 冰乙酸, 室温反应 10 min, 最后于 547 nm 处测吸光值, 以齐墩果酸标准品质量 $M(\text{mg})$ 为横坐标, 吸光值 A 为纵坐标, 绘制三萜含量标准曲线。

样品取 150 μL 提取液, 吹干样品, 按上述操作测定样品浓度。

2.6 猴头菇醇提物抗氧化活性测定

2.6.1 DPPH·清除能力测定

参照杜丽娟等^[17]方法, 并据实验情况稍作修改。取浓度梯度为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 mg/mL 的样品溶液 0.8 mL, 加入 3.8 mL 浓度为 0.1 mmol/L 的 DPPH 溶液(无水乙醇配制), 摇匀后黑暗放置 30 min, 并于 517 nm 处测吸光值。计算 DPPH·清除率公式如下:

$$\text{DPPH}\cdot\text{清除率}(\%)=[1-(A_x-A_{x0})/A_0]\times 100\%$$

式中: A_x 为不同浓度样品溶液的吸光值; A_{x0} 为 0.8 mL 不同浓度样品溶液和 3.2 mL 无水乙醇的吸光值; A_0 为 0.8 mL 蒸馏水和 3.2 mL DPPH 溶液的吸光值。

2.6.2 还原力测定

参照林源等^[18]方法, 并据实验情况稍作修改。取浓度梯度为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 mg/mL 的样品溶液 2.0 mL, 加入 2.0 mL 浓度为 0.2 mol/L 磷酸盐缓冲液(pH 6.6)和 2.0 mL 1%铁氰化钾溶液混合均匀后于 50 °C水浴 20 min, 再加入 2.0 mL 10%三氯乙酸溶液后离心(3000 r/min, 5 min), 取 2.0 mL 上清液, 加入 2.0 mL 蒸馏水、0.4 mL 0.1% FeCl₃ 溶液混匀, 50 °C水浴 10 min 后在 700 nm 处测吸光值。蒸馏水代替样品溶液作为空白对照。

2.6.3 ABTS⁺清除能力测定

参照吴美媛等^[19]方法, 并据实验情况稍作修改。将 7 mmol/L ABTS⁺溶液与 2.45 mmol/L 过硫酸钾溶液等量混合反应, 室温避光放置 12~16 h 得到 ABTS⁺储备液。在 734 nm 波长处, 用磷酸盐缓冲液(10 mmol/L, pH 7.4)将 ABTS⁺储备液稀释至吸光值达到 0.70±0.02, 得到 ABTS⁺测定液。浓度梯度为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mg/mL 的样品溶液各取 1.0 mL 与 2.0 mL 上述 ABTS⁺测定液混合均匀, 室温避光反应 6 min 后于 734 nm 波长处测定吸光值。计算 ABTS⁺清除率公式如下:

$$\text{ABTS}^+\text{清除率}(\%)=[1-(A_i-A_j)/A_0]\times 100\%$$

式中: A_i 为不同浓度样品溶液的吸光值; A_j 为不同浓度样品溶液和磷酸盐缓冲液的吸光值; A_0 为蒸馏水和 ABTS⁺测定液的吸光值。

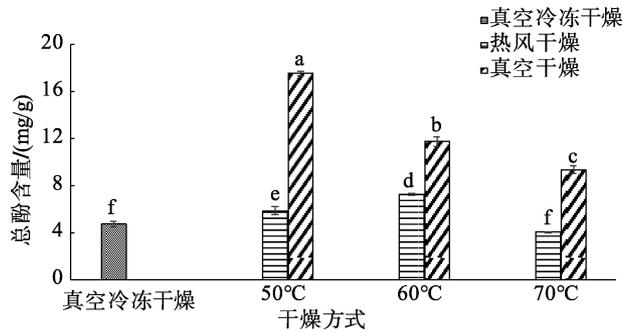
2.7 数据分析

平行实验 3 次, 结果以均值±标准差($means\pm sd$)表示, 数据采用 SAS 8.1 进行显著性分析, 使用 Microsoft Excel 绘图。

3 结果与分析

3.1 不同干燥方式对猴头菇总酚和三萜含量的影响

不同干燥方式对猴头菇总酚含量的影响如图 1 所示, 从图 1 可知猴头菇进行干燥后样品总酚含量在 4~18 mg/g 之间。其中 70 °C热风干燥组总酚含量最低, 为(4.06±0.03) mg/g; 50 °C真空干燥组总酚含量最高, 为(17.56±0.21) mg/g。热风干燥组总酚含量随温度升高先上升后下降, 真空干燥组总酚含量随温度升高而降低。真空干燥组总酚含量远高于热风干燥组和真空冷冻干燥组, 其中后 2 种干燥方式的猴头菇总酚含量相差不多, 这可能是由于真空干燥集中了真空冷冻干燥的真空优势和热风干燥的加热优势。卢可可等^[20]对香菇多酚不同热风干燥方式的研究结果表明, 在一定加热温度和时间范围内, 植物结合多酚会释放为游离多酚进而提高了总酚含量。



注: 字母标记不同, 表示差异显著, $P < 0.05$ 。下同。

图 1 不同干燥方式猴头菇总酚含量

Fig.1 Polyphenol contents of *Hericium erinaceus* in different drying methods

不同干燥方式对猴头菇三萜含量的影响如图 2 所示, 干燥后猴头菇三萜含量在 1.77~2.83 mg/g 之间。真空冷冻干燥组三萜含量最低, 为(1.77±0.036) mg/g; 50 °C真空干燥组三萜含量最高, 为(2.83±0.18) mg/g。热风干燥组三萜含量随温度升高先升高后降低, 真空干燥组三萜含量随温度升高而降低, 这可能是因为三萜结构随温度的升高受到破坏。不同干燥方式下三萜含量趋势与总酚基本一致, 真空干燥组含量普遍较高, 总的来说猴头菇中总酚和三萜含量顺序为真空干燥 > 热风干燥 > 冷冻干燥。总酚和三萜含量最高的皆为 60 °C热风干燥组, 分别为 7.28 mg/g 和 2.17 mg/g。

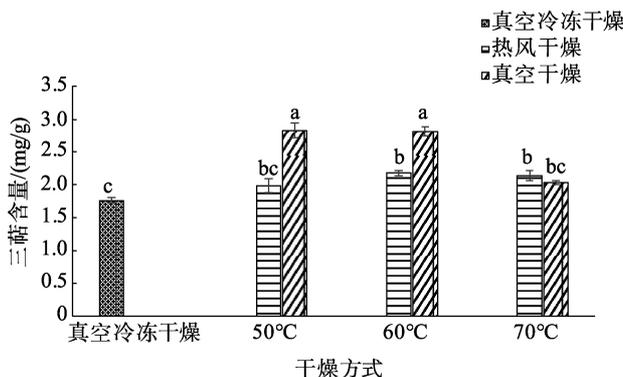


图 2 不同干燥方式猴头菇三萜含量

Fig.2 Triterpene contents of *Hericium erinaceus* in different drying methods

3.2 不同干燥方式对猴头菇醇提取物抗氧化能力的影响

3.2.1 DPPH·清除能力

不同干燥方式下的猴头菇醇提取物都表现出一定的 DPPH·自由基清除能力, 且在一定浓度范围内呈现出一定的量效关系。DPPH·是一种稳定的以氮为中心的自由基, 在 517 nm 处有强吸收峰, 当抗氧化剂存在时一部分稳定的自由基被清除, 使该波长处吸收减弱, 紫色消失, 从而广泛应用于抗氧化能力的评价中^[21,22]。如图 3 所示, 当提

取物浓度为 1.5 mg/mL 时, 真空冷冻干燥、热风干燥和真空干燥对 DPPH·自由基清除率无显著差异($P > 0.05$), 其中, 真空冷冻干燥、热风干燥(50、60、70 °C)和真空干燥(50、60、70 °C)对 DPPH·自由基清除率依次为(20.62±0.15)%、(18.62±1.54)%、(21.84±2.21)%、(13.10±0.51)%、(18.52±0.38)%、(19.65±1.54)%、(20.80±0.69)%。60 °C热风干燥的猴头菇醇提取物对 DPPH·自由基清除率相对较高, 50 °C真空干燥组仅比最高值降低了 3 个百分点, 最弱的是 70 °C热风干燥组, 样品对 DPPH·清除能力均随样品浓度的增加而增加。虽然不同干燥方式样品的 DPPH·清除能力变化趋势与其总酚和三萜含量变化趋势不同, 但不同干燥方式下样品对 DPPH·清除率相差不多, 这与王振帅等^[23]对不同干燥方法对朝鲜蓟多酚、抗氧化性影响中的研究结果一致。

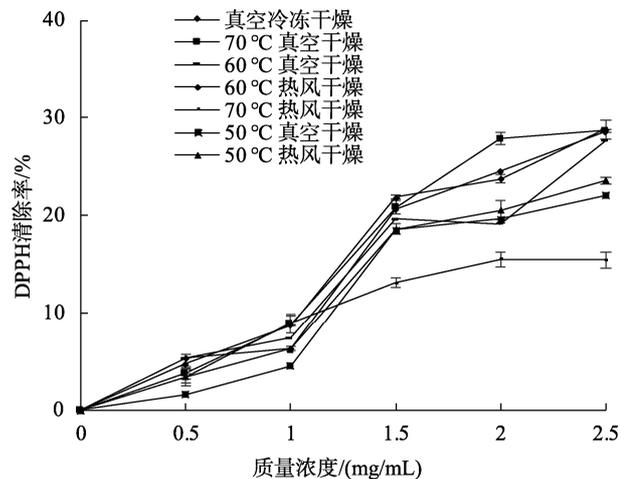


图 3 不同干燥方式猴头菇醇提取物对 DPPH·清除率

Fig.3 DPPH· scavenging rate of alcohol extract from *Hericium erinaceus* in different drying methods

3.2.2 还原能力

抗氧化性和还原性之间具有一定关系, 抗氧化剂通过还原作用清除自由基, 抗氧化力越强, 还原力越大, 显示为吸光值越大。由图 4 可知, 样品浓度为 0.5~2.5 mg/mL 时, 真空干燥组提取物还原能力随样品浓度的增加呈明显的量效关系, 测得 700 nm 处的吸光值由 0.346 增加到 1.677, 真空冷冻干燥和热风干燥组提取物还原能力随样品浓度的增加提高不明显, 测得 700 nm 处的吸光值由 0.130 增加到 0.604。魏芳等^[24]研究不同脱皮方式核桃青皮还原能力时发现, 手工脱皮、自然堆沤、乙烯熏蒸、乙烯利浸泡在 700 nm 处吸光值分别为 0.743、0.404、0.346、0.119, 说明猴头菇醇提取物具有良好的还原能力。真空干燥组还原力相较热风干燥组强, 真空冷冻干燥和热风干燥相差不多, 这与不同干燥方式样品总酚和三萜含量变化趋势相一致, 与史文景等^[25]报道金柑中总酚和黄酮含量越高其抗氧化性越好结论相吻合。

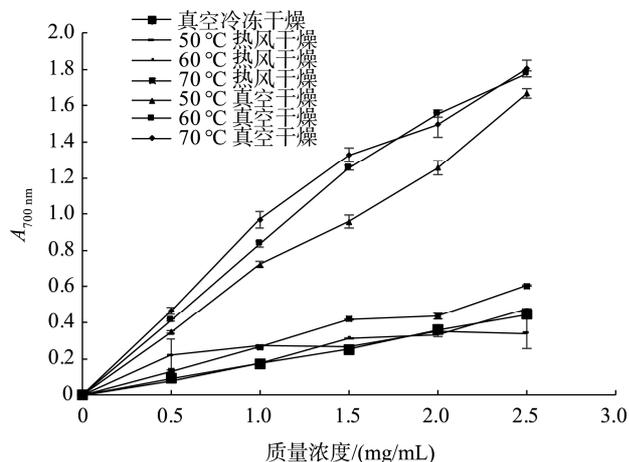
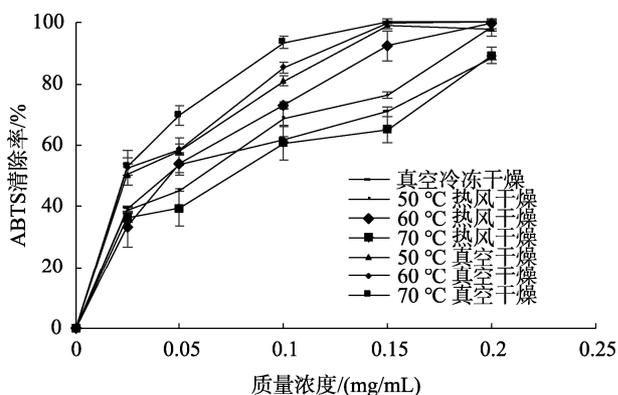


图 4 不同干燥方式猴头菇醇提取物还原能力

Fig.4 Reducing power of alcohol extract from *Hericium erinaceus* in different drying methods

3.2.3 ABTS⁺清除能力

ABTS 检测方法使用广泛, ABTS 经氧化后生成稳定的蓝绿色自由基 ABTS⁺, 抗氧化成分与其发生反应使其褪色, 并在最大吸收波长 734 nm 处测定出吸光值变化, 从而测定出抗氧化能力^[26]。由图 5 可知, 7 种干燥方式处理的猴头菇提取物对 ABTS⁺ 具有较好的清除能力, 清除效果较为明显。当样品浓度为 0.1 mg/mL 时, 冷冻干燥、50、60、70 °C 热风干燥和 50、60、70 °C 真空干燥猴头菇提取物对 ABTS⁺ 清除率依次为 (62.02±0.89)%、(68.80±2.83)%、(73.12±0.98)%、(60.67±2.66)%、(81.01±1.63)%、(85.37±1.95)%、(93.57±2.05)%、IC₅₀ 在 0.03~0.06 mg/mL 之间。其中 70 °C 真空干燥组对 ABTS⁺ 自由基清除率最好, 50 °C 真空干燥组与 70 °C 真空干燥组相差不多, 最差是 70 °C 热风干燥组。样品 ABTS⁺ 清除能力变化趋势与 DPPH·清除能力变化趋势整体相似, 清除率低于 90% 时, 所有样品的 ABTS⁺ 清除能力都具有良好的剂量关系。

图 5 不同干燥方式猴头菇醇提取物对 ABTS⁺ 清除率Fig.5 ABTS⁺ scavenging rate of alcohol extract from *Hericium erinaceus* in different drying methods

4 结论与讨论

不同干燥方式对猴头菇性状、品质及含水量均产生影响, 这与不同干燥特点有关。真空干燥使物料在真空状态下产生内外压差而达到干燥效果; 热风干燥使热量从外传到内, 水分慢慢蒸发而干燥; 真空冷冻干燥使水分在冷冻真空状态下由冰晶直接升华, 水分不被包裹达到干燥效果^[27]。本研究采用真空干燥、热风干燥和真空冷冻干燥, 从干燥后样品形态来看, 真空冷冻干燥使样品基本保持原有体积和性状, 而真空干燥和热风干燥不同温度下的干燥会使样品发生不同程度的皱缩, 质地变硬, 影响外观及口感; 从 3 种干燥方式下总酚和三萜含量来看, 真空干燥组远高于热风干燥组和真空冷冻干燥组, 而后 2 种干燥方式含量相差不多。Celik 等^[28]研究真空干燥和鼓风干燥方式下的樱桃月桂呈现出相似的总酚含量和抗氧化活性。Que 等^[29]采用冷冻干燥和热风干燥制备南瓜粉, 研究了不同干燥方法对南瓜粉抗氧化活性和理化性质的影响, 发现热风干燥的南瓜粉比冷冻干燥的具有更高的还原力, 自由基清除能力和金属螯合活性。Tan 等^[30]研究 3 种不同的干燥方法, 冷冻干燥、真空干燥和烤箱干燥对荔枝果实的酚含量和抗氧化活性的影响, 热干燥和冷冻干燥酚类成分之间存在显著的差异。可见, 不同的样品对干燥方式表现不同, 所以应采用合适的干燥方法以较好的保持成分活性和抗氧化活性。本研究中 50 °C 真空干燥组猴头菇干制品总酚和三萜类活性成分含量最高, 分别为 17.56 mg/g 和 2.83 mg/g, 随加热温度升高而降低。

本研究分别采用 DPPH 法、还原力法和 ABTS⁺法测定不同干燥方式下猴头菇的抗氧化能力。结果表明, DPPH·自由基清除率测定中, 当提取物浓度为 1.5 mg/mL 时, 60 °C 热风干燥组相对较高, 为 (21.84±2.21)%, 其次是 70 °C 真空干燥组, 为 (20.80±0.69)%, 最弱的是 70 °C 热风干燥组, 为 (13.10±0.51)%; 还原力测定中, 样品浓度为 0.5~2.5 mg/mL 时, 真空干燥组在 700 nm 处测得的吸光值由 0.346 增加到 1.677, 真空冷冻干燥组和热风干燥组测得 700 nm 处的吸光值由 0.130 增加到 0.604; 真空干燥组相较热风干燥组强, 真空冷冻干燥和热风干燥相差不多。ABTS⁺ 自由基清除率测定中, 当样品浓度为 0.1 mg/mL 时, 70 °C 真空干燥组最高, 为 (93.57±2.05)%, 其次是 60 °C 真空干燥组, 为 (85.37±1.95)%, 最差是 70 °C 热风干燥组, 为 (60.67±2.66)%。随着醇提取物浓度的增加, 对 DPPH·自由基清除力、还原力、ABTS 自由基清除力增强, 呈现剂量依赖性。测得的抗氧化能力存在差异, 推测可能是由于采用的抗氧化测定方法不同, 模型不同, 抗氧化原理不同。干燥方法对不同类型抗氧化成分的含量产生影响, 即表现在猴头菇不同干燥方法的抗氧化活性不一致上。Juliana 等^[31]和高帆等^[32]研究表明总酚含量与抗氧化活性之间呈正相

关,这与本研究对还原力测定结果一致。也有学者认为,抗氧化剂活性不仅与抗氧化剂的含量有关,而且与抗氧化剂的性质如化学结构和彼此之间的相互作用有关^[33]。Roleira 等^[34]指出某类成分含量高会有较强的抗氧化能力,但也需要考虑提取物各类化学成分,这与本研究对 DPPH·清除率和 ABTS⁺·清除能力研究发现一致。

参考文献

- [1] 李洋洋,韩迪,闫宝松,等.不同品系猴头菇子实体中总酚含量测定[J].食品研究与开发,2017,38(4):123-126.
Li YY, Han D, Yan BS, et al. Determination of total polyphenol content from different *Hericium erinaceus* strains [J]. Food Res Dev, 2017, 38(4): 123-126.
- [2] 吕国英,张作法,陈建飞,等.3种猴头菇不同成熟度子实体的抗氧化活性[J].浙江农业科学,2019,60(7):1208-1210.
Lv GY, Zhang ZF, Chen JF, et al. Antioxidant activity of fruit bodies from three *Hericium erinaceus* strains [J]. Zhejiang Agric Sci, 2019, 60(7): 1208-1210.
- [3] 周春晖,黄越,刘婷婷,等.猴头菇醇提物乙酸乙酯萃取相组分的分离与鉴定[J].食品工业科技,2019,40(21):32-37.
Zhou CH, Huang Y, Liu TT, et al. Isolation and identification of the components of the fractions in ethyl acetate phase from ethanol [J]. Food Ind Technol, 2019, 40(21): 32-37.
- [4] 张宗蕊,马昱,李爽,等.猴头菇的营养成分及保健制品开发研究进展[J].吉林医药学院学报,2019,40(4):297-300.
Zhang ZR, Ma Y, Li S, et al. Research progress on nutritional components and health products of *Hericium erinaceus* [J]. J Jilin Med Coll, 2019, 40(4): 297-300.
- [5] 于蒙杰,张学军,牟国良,等.我国热风干燥技术的应用研究进展[J].农业科技与装备,2013,230(8):14-16.
Yu MJ, Zhang XJ, Mou GL, et al. Research progress on the application of hot air drying technology in China [J]. Agric Technol Equip, 2013, 230(8): 14-16.
- [6] 徐小东,崔政伟.食品真空干燥装置及其进展[J].轻工机械,2000,(1):1-4.
Xu XD, Cui ZW. Food vacuum dryers and its improvement [J]. Light Ind Mach, 2000, (1): 1-4.
- [7] 孙曙光,张新明,商显德,等.真空冷冻干燥技术在金丝小枣冻干纯粉生产中的应用[J].山东食品发酵,2012,(1):38-40.
Su SG, Zhang XM, Shang XD, et al. Freeze drying technology in *Ziziphus jujuba* freeze-dried powder production application [J]. Shandong Food Ferment, 2012, (1): 38-40.
- [8] 黄越,周春晖,戴宏杰,等.猴头菇醇提物及其不同极性部位的体外抗氧化活性[J].食品工业科技,2017,38(21):16-20.
Huang Y, Zhou CH, Dai HJ, et al. *In vitro* antioxidant activity of ethanol extract from *Hericium erinaceus* and its different polar fractions [J]. Food Ind Technol, 2017, 38(21): 16-20.
- [9] 韩伟,豆欣欣.猴头菇多糖的提取纯化工艺及抗氧化活性研究[J].徐州工程学院学报(自然科学版),2016,31(3):22-28.
Han W, Dou XX. Study on the extraction and purification process and antioxidant activity of polysaccharides from *Hericium erinaceus* [J]. J Xuzhou Instit Technol (Nat Sci Ed), 2016, 31(3): 22-28.
- [10] 黄越.猴头菇抗氧化活性成分分离纯化及结构鉴定研究[D].广州:华南理工大学,2018.
Huang Y. Study on the isolation, purification and structure identification of antioxidant constituents in *Hericium erinaceus*. [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [11] 谭世强,谢敬宇,郭帅,等.三萜类物质的生理活性研究概况[J].中国农学通报,2012,28(36):23-27.
Tan SQ, Xie JY, Guo S, et al. Research advances in physiological activities of triterpenoids [J]. Chin Agric Sci Bull, 2012, 28(36): 23-27.
- [12] 陈晓英.蘑菇酚类物质的提取及其抗氧化活性的研究[D].福州:福建农林大学,2011.
Chen XY. Study on the extraction and antioxidation of poly phenol compounds of mushroom [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2011.
- [13] Huynh NDB, Yoshihiro O, Toshiaki O. Antioxidative activities of hydrophilic extracts prepared from the fruiting body and spent culture medium of *Flammulina velutipes* [J]. Biores Technol, 2010, 101(15): 6248-6255.
- [14] 唐功.活性氧·抗氧化酶及抗氧化剂之间关系的探讨[J].安徽农业科学,2010,38(33):18619-18621.
Tang G. The discussion on the relationship among reactive oxygen species, antioxidant enzyme and antioxidant [J]. Anhui Agric Sci, 2010, 38(33): 18619-18621.
- [15] Soong YY, Barlow PJ. Antioxidant activity and phenolic content of selected fruit seeds [J]. Food Chem, 2004, 88: 411-417.
- [16] 王豪,涂宗财,罗亚林,等.七种坚果仁中多酚、三萜含量及其抗氧化活性比较[J].食品与发酵工业,2019,45(6):219-224.
Wang H, Tu ZC, Luo YL, et al. Contents of polyphenols and triterpenoids in seven types of nuts and their antioxidant activities [J]. Food Ferment Ind, 2019, 45(6): 219-224.
- [17] 杜丽娟,苏秀芳,梁翠君.樱花叶总黄酮的超声波法提取工艺优化及其抗氧化能力的研究[J].食品工业科技,2020,41(11):221-225,233.
Du LJ, Su XF, Liang CJ. Study on the optimization of ultrasonic extraction technology and antioxidant capacity of total flavonoids from cerasus leaves [J]. Food Ind Technol, 2020, 41(11): 221-225, 233.
- [18] 林源,陈培,周明明,等.天然居群青钱柳叶主要生物活性物质及抗氧化活性研究[J/OL].南京林业大学学报(自然科学版):1-9[2020-01-31].
<http://mall.cnki.net/magazine/Article/NJLY202002003.htm>
Lin Y, Chen P, Zhou MM, et al. Key bioactive substances and their antioxidant activities in *Cyclocarya paliurus* leaves collected from natural populations[J/OL]. J Nanjing Fore Univ (Nat Sci Ed) :1-9[2020-01-31].
<http://mall.cnki.net/magazine/Article/NJLY202002003.htm>
- [19] 吴美媛,王喜周,周英,等.猴头菇不同活性部位体外抗氧化活性研究[J].食品研究与开发,2013,34(17):12-14.
Wu MY, Wang XZ, Zhou Y, et al. *In vitro* antioxidant activity of different extracts of *Hericium* [J]. Food Res Dev, 2013, 34(17): 12-14.
- [20] 卢可可,郭晓晖,李富华,等.不同热风干燥方式对香菇多酚组成及其抗氧化活性的影响[J].现代食品科技,2015,31(9):185-190,283.
Lu KK, Guo XH, Li FH, et al. Effects of various hot-air drying methods on the composition and antioxidant activity of polyphenols in mushrooms (*Lentinus edodes*) [J]. Mod Food Technol 2015, 31(9): 185-190, 283.
- [21] Xie Z, Huang J, Xu X, et al. Antioxidant activity of peptides isolated from alfalfa leaf protein hydrolysate [J]. Food Chem, 2008, 111(2): 370-376.

- [22] 高帆, 夏惠, 袁雪侦, 等. 外源褪黑素对盐胁迫下猕猴桃幼苗酚类物质含量和抗氧化能力的影响[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(7): 1144–1150.
Gao F, Xia H, Yuan XZ, *et al.* Effects of exogenous melatonin on phenolic substance content and antioxidant ability of kiwifruit seedlings under salt stress [J]. *J Zhejiang Agric*, 2017, 29(7): 1144–1150.
- [23] 王振帅, 盛怀宇, 陈善敏, 等. 不同干燥方法对朝鲜蓟多酚、抗氧化性及香气成分的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(23): 149–156.
Wang ZS, Sheng HY, Chen SM, *et al.* Effects of different drying methods on polyphenols, antioxidant activity and aroma composition of artichoke powder [J]. *Food Ferment Ind*, 2019, 45(23): 149–156.
- [24] 魏芳, 陈庆敏, 傅茂润, 等. 脱皮方式对核桃青皮成分和功能活性的影响[J]. 食品科技, 2018, 43(12): 259–265.
Wei F, Chen QM, Fu MR, *et al.* Effect of peeling methods on chemical compounds and functional activities of green walnut husk [J]. *Food Technol*, 2018, 43(12): 259–265.
- [25] 史文景, 游双红, 胡佳羽, 等. 金柑多酚提取与抗氧化活性研究[J/OL]. 农产品加工: 1-4[2020-02-28].
Shi WJ, You SH, Hu JY, *et al.* Research of kumquat polyphenols extraction and antioxidant activity [J/OL]. *Proef Agric Prod*: 1-4 [2020-02-28].
- [26] 彭芍丹, 李积华, 唐永富, 等. 菠萝蜜不同部位抗氧化性的研究[J]. 热带作物学报, 2013, 34(9): 1737–1741.
Peng SD, Li JH, Tang YF, *et al.* Antioxidant property of different parts from jackfruit [J]. *J Trop Crop*, 2013, 34(9): 1737–1741.
- [27] 邢亚阁, 蒋丽, 曹东, 等. 不同干燥方式对杏鲍菇营养成分的影响[J]. 食品工业, 2015, 36(4): 1–3.
Xing YG, Jiang L, Cao D, *et al.* Effect of different drying methods on nutrients of *Pleurotus eryngii* [J]. *Food Ind*, 2015, 36(4): 1–3.
- [28] Celik OF, Demirkol M, Durmus Y, *et al.* Effects of drying method on the phenolics content and antioxidant activities of cherry laurel (*Prunus laurocerasus* L.) [J]. *J Food Meas Character*, 2019, (2): 1–2.
- [29] Que F, Mao L, Fang X, *et al.* Comparison of hot air-drying and freeze-drying on the physicochemical properties and antioxidant activities of pumpkin (*Cucurbita moschata* Duch.) flours [J]. *Food Chem*, 2008, 43(7): 1195–1201.
- [30] Tan S, Tang J, Shi W, *et al.* Effects of three drying methods on polyphenol composition and antioxidant activities of *Litchi chinensis* Sonn [J]. *Food Sci Biotechnol*, 2019, 29(2): 1–2.
- [31] Juliana CN, Mabel GL, Vanessa NCB, *et al.* Effect of drying method on volatile compounds, phenolic profile and antioxidant capacity of guava powders [J]. *Food Chem*, 2016, 197: 881–890.
- [32] 高帆, 夏惠, 王秀, 等. 不同甜樱桃品种抗氧化物质及抗氧化活性分析[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(6): 926–932.
Gao F, Xia H, Wang X, *et al.* Antioxidant capacity analysis in different sweet cherry varieties [J]. *J Zhejiang Agric*, 2017, 29(6): 926–932.
- [33] Lee LS, Lee N, Kim YH, *et al.* Optimization of ultrasonic extraction of phenolic antioxidants from green tea using response surface methodology [J]. *Molecules*, 2013, 18(11): 13531–13545.
- [34] Roleira FMF, Tavares DS, Elisiário J, *et al.* Plant derived and dietary phenolic antioxidants: Anticancer properties [J]. *Food Chem*, 2015, 183: 235–258.

(责任编辑: 于梦娇)

作者简介



李英迪, 主要研究方向为农产品加工与综合利用。
E-mail: 742051711@qq.com



夏其乐, 副研究员, 主要研究方向为农产品加工与功能活性研究。
E-mail: cookxql@163.com