

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

卢可可¹, 郭晓晖¹, 李富华², 明建^{1,3}

(1. 西南大学食品科学学院, 重庆 400715) (2. 华南理工大学轻工与食品学院, 广东广州 510640)

(3. 西南大学国家食品科学与工程实验教学中心, 重庆 400715)

摘要: 研究了六种不同热风干燥方式对香菇多酚含量、组成及抗氧化活性的影响。采用福林-酚法和 HPLC 法对香菇多酚定量定性分析, 并用化学法评价其抗氧化活性。结果显示: 恒温干燥 (ID) 游离酚含量最高 (2.69 mg GAE/g DW), 结合酚含量最低 (0.19 mg GAE/g DW); 均匀间歇干燥 (UID) 游离酚含量最低, 结合酚含量相对较高。游离酚主要成分为没食子酸、绿原酸、咖啡酸、槲皮素, 结合酚主要成分为没食子酸、槲皮素。六种干燥方式多酚均具有一定的抗氧化能力, 其中 ID 组游离酚和结合酚的 DPPH 清除能力最强, IC₅₀ 值分别为 0.53 μg/mL、0.06 μg/mL; ID 组游离酚的 ABTS⁺ 清除能力最强, IC₅₀ 值为 3.32 μg/mL, 各干燥组间结合酚 ABTS⁺ 清除能力无显著差异; 不同干燥组间的还原力无显著差异。结论: 不同处理香菇多酚的含量、组成、抗氧化性有所差异, 恒温干燥 (ID) 是香菇干燥比较理想的方式。

关键词: 多酚; 香菇; 热风干燥; 抗氧化活性

文章编号: 1673-9078(2015)9-185-190

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.9.031

Effects of Various Hot-air Drying Methods on the Composition and Antioxidant Activity of Polyphenols in Mushrooms (*Lentinus edodes*)

LU Ke-ke¹, GUO Xiao-hui¹, LI Fu-hua², MING Jian^{1,3}

(1. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China) (2. College of Light Industrial and Food Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China) (3. National Food Science and Engineering Experimental Teaching Center, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: The effects of six hot-air drying methods on the content, composition, and antioxidant activity of polyphenols in mushrooms (*Lentinus edodes*) were studied. Phenols were analyzed qualitatively and quantitatively with the Folin-Ciocalteu method and HPLC, and their antioxidant activities were evaluated with chemical methods. The results showed that isothermal drying (ID) resulted in the highest free phenol content (2.69 mg GAE/g DW) and the lowest bound phenol content (0.19 mg GAE/g DW), whereas uniform intermittent drying resulted in the lowest free phenol content and relatively high bound phenol content. The free phenols mainly consisted of gallic acid, chlorogenic acid, caffeic acid, and quercetin, and the bound phenols mainly consisted of gallic acid and quercetin. Polyphenol content in mushrooms after drying with all methods had measurable levels of antioxidant activity. The ID group had the strongest DPPH· radical scavenging capacity, with IC₅₀ values for free and bound phenols as 0.53 μg/mL and 0.06 μg/mL, respectively. The ID group free phenols also had the strongest ABTS⁺· radical scavenging capacity, with an IC₅₀ value of 3.32 μg/mL. No differences in ABTS⁺· radical scavenging capacities by bound phenols were found among the groups. The reducing powers of the groups also showed no significant differences. In conclusion, the polyphenol content in mushrooms dried with various methods showed differences in content, composition, and antioxidant activity. Additionally, ID is a relatively ideal drying method for mushrooms.

Key words: polyphenols; *Lentinus edodes*; hot-air drying; HPLC; antioxidant activities

收稿日期: 2014-11-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31271825); 重庆市科技攻关计划项目 (CSTC2011AC1010)

作者简介: 卢可可 (1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品化学与营养学

通信作者: 明建 (1972-), 男, 博士, 教授, 研究方向为食品化学与营养学

活性氧 (reactive oxygen species, ROS) 是机体正常代谢的产物, 在体内处于动态平衡, 但当体内有过剩的 ROS 存在时就会使脂质、糖类、蛋白质、DNA 等构成细胞的物质发生氧化损伤, 从而引起动脉硬化、心脑血管等多种疾病^[1]。机体一般通过内源性抗氧化物 (Vc、VE、辅酶 Q 等) 和外源性抗氧化物 (多酚、类黄酮、花色苷等) 清除体内多余的 ROS, 以保持机体健康。许多研究证实植物多酚结构中存在的羟基基团可与体内自由基结合, 从而消灭自由基, 是很好的抗氧化剂, 特别是果蔬、食用菌多酚。

香菇 (*Lentinus edodes*) 也称香蕈, 属于口蘑科香菇属的一种腐生性真菌, 肉质鲜美, 富含多种营养成分^[2], 具有保健功能和药用价值。已有相关研究表明香菇多酚具有抗氧化、抗菌、抗肿瘤等活性^[3]。但由于鲜香菇含水量可达 80%~95%, 在常温下贮藏, 易腐烂变质, 影响其商品价值, 其干制品不但利于保藏, 而且增加了特殊的香味, 干香菇包装后其保质期可以延长至一年以上, 大大增加了其商业价值。

热风干燥是被广泛应用的干燥技术之一, 具有设备简单, 参数易控, 成本低等优点, 是目前香菇干燥常用的方法之一。干燥处理能明显延长香菇的货架期, 降低环境因素对香菇品质的影响, 提高香菇质量。研究发现改变热风干燥各阶段热风温度有利于提高热风干燥效率^[4]。Guo 等^[5]研究发现恒温干燥、均匀变温干燥、非均匀变温干燥、间歇干燥、非均匀间歇干燥及非均匀变温间歇干燥六种热风干燥方式, 对香菇基本营养成分影响不大, 适用于香菇干燥, 但并未研究这六种干燥方式对香菇多酚的影响, 因此本试验利用这六种热风干燥方式处理香菇, 研究不同干燥温度及间歇时间对香菇多酚含量、成分及其抗氧化活性的影响, 为选择香菇干燥方式提供更完善的理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料与试剂

香菇“808”, 购于重庆北碚农贸市场, 当日运回实验室处理。

分析纯丙酮、乙酸乙酯、没食子酸、福林酚试剂、铁氰化钾、三氯乙酸、氯化铁、过硫酸钾均为及色谱纯乙腈、甲醇均购自成都科龙化工试剂厂; 分析纯 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (DPPH)、抗坏血酸 (Vc)、表没食子儿茶素没食子酸酯 (EGCG)、2,2-联氨基-双-(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸) 二氨盐 (ABTS) 和多种多酚标准品 (纯度 $\geq 98\%$) 均购自美国 Sigma 公司。

1.2 仪器与设备

DHG-9140A 电热恒温鼓风干燥箱: 上海齐欣科学仪器有限公司; XHF-D 均质机: 宁波新芝生物科技股份有限公司; RE-52AA 旋转蒸发仪和 SHZ-III 循环水真空泵: 上海亚荣生化仪器厂; 1-15PK 离心机: Sigma 公司; DF8517 冰箱 ($-80\text{ }^{\circ}\text{C}$): 韩国 ilshin 公司; 722 分光光度计: 上海精科科学仪器厂; KQ-600VDV 数控超声波振荡器: 上海五相仪器仪表有限公司; 85-2A 磁力搅拌器: 金坛市科析仪器有限公司; SPD-M20A 高效液相色谱仪: 日本岛津公司。

1.3 方法

1.3.1 材料预处理

将购买的鲜香菇立即运输至实验室, 清理香菇表面尘土并按直径 (6 ± 0.5) cm 筛选香菇。干燥前将香菇柄沿香菇伞 1 cm 处切分处理。按照 GB/T 5009.3-2003 中的直接干燥法测定香菇水分含量为 (90 ± 0.15)% (干基重)。

1.3.2 六种不同热风干燥处理

参考本实验室已有研究方法^[5], 选取 500 g 预处理好的香菇, 均匀放置于干燥箱载物板中央。分别采用以下六种热风干燥方式进行处理:

(1) 恒温干燥 (Isothermal drying, ID): 初始温度为 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保持恒温至干燥终点。

(2) 均匀变温干燥 (Uniform raise drying, URD): 初始温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 每干燥 1 h, 温度提升 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 直至干燥终点。

(3) 非均匀变温干燥 (Non-uniform raise drying, NURD): 初始温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 前 5 h 每干燥 1 h 温度提升 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; 之后 7 h 内每干燥 1 h 温度提升 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$; 之后每干燥 1 h 温度提升 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 直至干燥终点。

(4) 均匀间歇干燥 (Uniform intermittent drying, UID): 初始温度为 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, 每干燥 50 min, 关闭电源间歇 10 min 后继续干燥, 保持温度周而复始直至干燥终点。间歇时间应计算在干燥的总耗时中, 下同。

(5) 非均匀间歇干燥 (Non-uniform intermittent drying, NUID): 初始温度为 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, 前 5 h 每干燥 55 min, 关闭电源间歇 5 min 后继续干燥; 之后 7 h 内每干燥 50 min, 关闭电源间歇 10 min 后继续干燥; 之后每干燥 45 min, 关闭电源间歇 15 min 后继续干燥直至干燥终点。

(6) 非均匀变温间歇干燥 (Combined drying, CD): 初始温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 前 5 h 每干燥 55 min, 关闭

电源间歇 5 min 后继续干燥,且下一时段干燥时温度提升 2.5 °C;之后 7 h 内每干燥 50 min,关闭电源间歇 10 min 后继续干燥,且下一时段干燥时温度提升 2 °C;之后每干燥 45 min,关闭电源间歇 15 min 后继续干燥,且下一时段干燥时温度提升 1 °C 直至干燥终点。

1.3.3 香菇多酚提取

1.3.3.1 游离酚的提取^[6]

将干燥后的香菇打粉,过 80 目筛。准确称取 2.5 g 香菇粉,加入 50 mL 预冻的 80% 丙酮,漩涡震荡 5 min 后使用均质机(12000 r/min)均质 3 min。抽滤,滤液转移至圆底烧瓶,重复提取一次并混合提取液,用旋转蒸发器在 45 °C 条件下浓缩至干。加入盐酸甲醇溶液($V_{\text{甲醇}}:V_{\text{盐酸}}=90:10$)定容至 25 mL,在 -80 °C 贮存备用。

1.3.3.2 结合酚的提取^[6]

将上述过滤残渣加入 20 mL 2 mol/L 的氢氧化钠溶液在氮气环境下消化 90 min,使用盐酸中和至中性,加正己烷除脂,弃去油脂层,加入 30 mL 乙酸乙酯震荡 10 min 后于 5578 r/min 离心 10 min,收集上清液。乙酸乙酯提取过程重复 5 次,混合上清液用旋转蒸发器于 45 °C 浓缩至干。用盐酸甲醇溶液($V_{\text{甲醇}}:V_{\text{盐酸}}=90:10$)定容至 25 mL,在 -80 °C 贮存备用。

1.3.4 香菇多酚测定

参考 Chu^[6]等方法,即福林-酚法,取 200 μL 提取液(可作适当稀释),再依次加入 800 μL 去离子水、200 μL 福林-酚试剂,振摇试管使溶液充分混合,避光保存 6 min,再加入 2 mL 7% Na_2CO_3 溶液和 1.6 mL 去离子水,在避光条件下放置 90 min 后于 760 nm 测定吸光值。以没食子酸为标准品,制作标准曲线,浓度范围为 0~400 $\mu\text{g/mL}$ 。结果以每克香菇样品中所含的没食子酸当量(mg gallic acid equivalent /g dry-weight basis, mg GAE/g DW)表示。

1.3.5 HPLC 测定香菇多酚组成成分

1.3.5.1 标准品及样品溶液的配制

标准溶液的配制:准确称取多酚标准品没食子酸、儿茶素、绿原酸、表儿茶素、咖啡酸、芦丁和槲皮苷各 10.0 mg,用色谱甲醇溶解并分别定容在 10 mL 棕色容量瓶中,配制成 1 mg/mL 的标准贮备液。标准贮备液置于 -18 °C 冰箱中保存,使用时稀释成所需要浓度。

样品的制备:取香菇多酚提取液 1 mL,用 4.5 μm 有机膜过滤,备用。

1.3.5.2 色谱条件

色谱柱: Thermo C_{18} 柱(250 mm \times 4.6 mm, 5 μm)。

流动相条件: A 为磷酸水溶液($V_{\text{乙腈}}:V_{\text{水}}:V_{\text{磷酸}}=2:97.8:0.2$); B 为色谱乙腈($V_{\text{乙腈}}:V_{\text{水}}:V_{\text{磷酸}}=97.8:2:0.2$)。梯度洗脱程序为 0~10 min, B 由 10% 增加到 50%; 10~20 min, B 为 50% 增加到 65%; 20~40 min, B 为 65% 增加到 80%; 40~50 min, B 为 80% 降至 10%; 50~55 min, B 为 10%。柱温 30 °C,进样量 10 μL ,流速 1.0 mL/mL,检测波长 282 nm。

1.3.6 DPPH 清除率测定

方法参考 Cheung^[7],根据实验内容进行修改,即取 1 mL 不同浓度的样液加入 5 mL 0.1 mmol/L 的 DPPH 溶液,黑暗中放置 50 min 后在 520 nm 处测定吸光值,以甲醇溶液做空白, Vc 和 EGCG 为对照, DPPH 清除率计算公式如下:

$$\text{DPPH}\cdot\text{清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_i}{A_j}\right) \times 100 \quad (1)$$

式中, A_i 为不同浓度提取液的吸光值, A_j 为甲醇空白试剂的吸光值。

1.3.7 还原力测定

方法参考 Ardestani^[8],并根据实验内容进行修改,即取 1 mL 不同浓度的样液加入 2.5 mL PBS(0.2 mol/L, pH 6.6) 溶液和 2.5 mL 铁氰化钾溶液(1%, m/V),混合物在 50 °C 下水浴 20 min,冷却后加入 2.5 mL 的 TCA 溶液(10%, m/V),混合物与 3000 g 条件下离心 10 min,取上清液 2.5 mL,再加入 2.5 mL 去离子水和 0.5 mL 氯化铁溶液(0.1%, m/V),在 700 nm 下测定吸光值,并以吸光值为纵坐标表示还原力,吸光值越大,还原力越大。以甲醇溶液做空白, Vc 和 EGCG 为对照。

1.3.8 ABTS⁺ 清除率测定

方法参考 Soong^[9],并根据实验内容进行修改,即将 5 mL 的 7 mmol/L ABTS⁺ 和 88 μL 的 140 mmol/L 过硫酸钾混合,在室温、避光的条件下静置过夜(12~16 h),形成 ABTS⁺ 储备液,使用前用 10 mmol/L pH 7.4 的磷酸盐缓冲液稀释成工作液,使其在室温下于条件 734 nm 波长处的吸光度为 0.70 \pm 0.02。测定时在加入 200 μL 的 ABTS⁺ 工作液,再加入 10 μL 不同浓度的样品,以 200 μL ABTS⁺ 工作液加 10 μL 溶剂为空白,混合 10 s,于 6 min 后读取 405 nm 波长处的吸光度 A,计算每种样品对 ABTS⁺ 的清除率。以甲醇溶液做试剂空白, Vc 和 EGCG 为对照, ABTS⁺ 自由基清除率计算公式如下。

$$\text{ABTS}^+\cdot\text{清除率} = \left(1 - \frac{A_i}{A_j}\right) \times 100 \quad (2)$$

式中, A_i 为不同浓度提取液的吸光值, A_j 为甲醇空白试剂的吸光值。

1.4 数据处理

数据采用 Origin8.0 统计分析, 实验重复 3 次, 结果用“平均值±标准差”表示, 并用 SPSS 软件进行统计处理, 采用 ANOVA 进行 Turkey 多重比较分析 (P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 香菇多酚含量

根据没食子酸标准曲线, 测得六种热风干燥处理香菇多酚含量见表 1。由表 1 可知, 香菇多酚主要以游离态存在, 不同干燥方式对香菇多酚含量有显著影响。干燥处理后游离酚含量为: ID>CD>NURD>URD>

UID>NUID, 结合酚为: UID>URD>NURD>CD>NUID>ID, 总酚为: ID>CD>URD>NURD>UID>NUID; 对比发现, ID 组游离酚含量最高, 为 2.69 mg GAE/g DW, 而结合酚含量相对较低, 仅为 0.19 mg GAE/g DW; URD 组游离酚含量较低而结合酚含量较高, 其原因可能是均匀升温导致后期温度偏高, 游离酚可能通过疏水键和多点氢键与蛋白质和糖类等发生缩合反应, 转变为结合酚; CD 组相对于其他各组游离酚与结合酚含量均处于中间水平, 表明适当的温度和间歇时间有助于干燥过程中香菇多酚存在形式的改变。干燥过程中温度和作用时间会影响酚类物质的释放, 且多酚氧化酶活性及多酚的热敏性等均会影响多酚含量。

表 1 不同热风干燥处理香菇多酚含量

Table 1 Polyphenol content in mushrooms after various hot-air drying treatments

干燥方式	ID	URD	NURD	UID	NUID	CD
游离酚/(mg GAE/g DW)	2.69±0.02 ^A	2.23±0.01 ^C	2.23±0.03 ^C	2.21±0.01 ^C	2.11±0.01 ^D	2.48±0.02 ^B
结合酚/(mg GAE/g DW)	0.19±0.01 ^c	0.31±0.01 ^a	0.26±0.02 ^b	0.33±0.01 ^a	0.25±0.03 ^b	0.26±0.01 ^b
总酚/(mg GAE/g DW)	2.88±0.01 ^w	2.55±0.01 ^y	2.50±0.03 ^y	2.54±0.01 ^y	2.36±0.02 ^z	2.74±0.03 ^x

注: ID: 恒温干燥; URD: 均匀变温干燥; NURD: 非均匀变温干燥; UID: 均匀间歇干燥; NUID: 非均匀间歇干燥; CD: 非均匀变温间歇干燥(下同)。A-D 不同字母代表游离酚差异显著(p<0.05); a-c 不同字母代表结合酚差异显著(p<0.05); w-z 不同字母代表结合酚差异显著(p<0.05)。

2.2 香菇多酚组分及含量

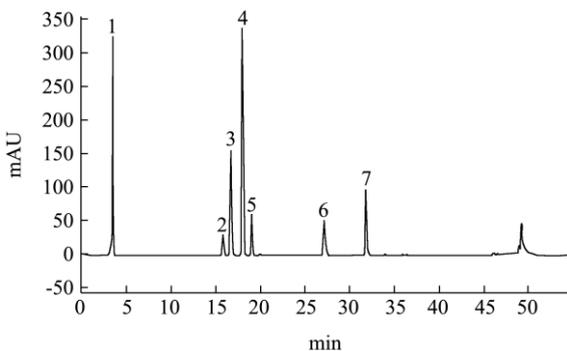


图 1 多酚标准品色谱图

Fig.1 Chromatograms of standard polyphenol mixtures

注: 1, 没食子酸; 2, 绿原酸; 3, 阿魏酸; 4, 儿茶素; 5, 咖啡酸; 6, 芦丁; 7, 槲皮素。

由紫外二极管矩阵检测器 200~400 nm 波长扫描可得各色谱峰的光谱图。由于各多酚类物质在 282 nm 左右均有较大吸收, 因此实验选择检测波长为 282 nm。图 1 是 7 种标准品的液相色谱图。

多酚类物质抗氧化活性是其各组成成分综合作用的结果, 不同组分对其活性的贡献并不相同^[10]。表 2 为不同热风干燥后香菇多酚的主要成分以及含量对

比。

由表 2 可知, 游离酚主要由没食子酸、绿原酸、咖啡酸三种酚酸和槲皮素组成, 而结合酚中主要以没食子酸和槲皮素为主, 说明香菇多酚组分主要为酚酸类, 黄酮类含量较少, 与 Nowacka 等^[11]研究食用菌多酚组成有类似结论。六种干燥方式处理香菇多酚物质组成较一致, 但有的组分含量差异明显, 如 ID 组没食子酸和绿原酸含量较高, 分别为 873.98 μg/g 和 904.88 μg/g, 而 NURD 组中这两种酚酸含量相对较低, CD 组游离酚和结合酚各组分组成均处于中等水平, 说明干燥过程中, 热风温度和间歇时间不仅对多酚含量有影响, 还会影响各组分间的转化。

2.3 香菇多酚的 DPPH 清除率

研究发现六种干燥方式下随着香菇多酚质量浓度的增加, 其 DPPH 清除能力增强, 六种香菇多酚的 DPPH 清除率与多酚质量浓度呈一定的正相关性。与 Vc 和 EGCG 相比, 香菇多酚具有更强的 DPPH 清除能力, 当游离酚浓度为 4.00 μg/mL 时, 清除率均达到 90% 以上, 而结合酚浓度为 0.80 μg/mL 时, 清除率达到 90% 以上, 说明结合酚虽然含量较低, 但其 DPPH 清除能力显著强于游离酚。六种干燥方式下香

菇游离酚和结合酚 DPPH 清除率 IC₅₀ 值如图 2 所示。

表 2 不同热风干燥处理香菇多酚成分和含量 (μg/g)

Table 2 Polyphenol composition and content of mushrooms after various hot-air drying treatments (μg/g)

多酚种类	干燥方式	没食子酸	绿原酸	咖啡酸	槲皮素
游离酚	ID	873.98±16.05 ^a	904.88±30.70 ^a	30.15±4.56 ^{ab}	503.26±22.77 ^a
	URD	838.91±20.58 ^{ab}	822.40±50.32 ^{bc}	21.61±1.25 ^d	458.23±16.56 ^b
	NURD	781.83±20.74 ^c	527.92±17.25 ^c	22.52±1.31 ^{cd}	467.23±16.04 ^b
	UID	845.22±16.59 ^{ab}	851.58±29.12 ^{ab}	23.97±0.47 ^{bcd}	474.57±22.02 ^a
	NUID	806.23±16.20 ^{ab}	826.15±21.68 ^{abc}	21.87±0.49 ^d	493.52±20.19 ^a
	CD	856.07±16.94 ^{ab}	871.02±10.32 ^{ab}	33.77±4.47 ^a	493.96±15.86 ^a
结合酚	ID	20.66±0.82 ^B	nd	nd	71.60±1.36 ^C
	URD	22.35±0.96 ^{AB}	nd	nd	79.39±1.28 ^{AB}
	NURD	21.68±1.13 ^{AB}	nd	nd	77.44±1.55 ^B
	UID	24.20±1.23 ^A	nd	nd	82.65±2.73 ^{AB}
	NUID	21.65±1.04 ^{AB}	nd	nd	80.03±1.23 ^{AB}
	CD	22.67±1.12 ^{AB}	nd	nd	80.39±2.46 ^{AB}

注: a~d 不同字母代表一列内游离酚差异显著(p<0.05); A-C 不同字母代表一列内结合酚差异显著(p<0.05); nd 表示未能检出。

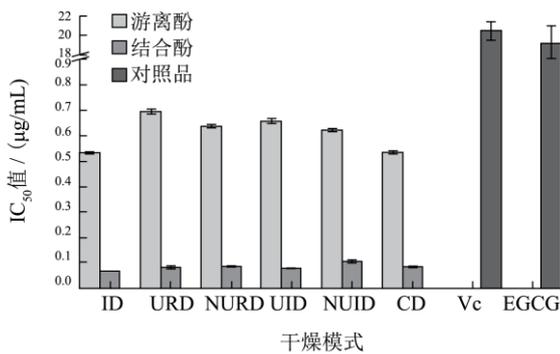


图 2 不同热风干燥处理香菇多酚 DPPH·自由基清除率 IC₅₀ 值
Fig.2 IC₅₀ of DPPH⁺·radical scavenging by polyphenols in mushrooms after various hot-air drying treatments

由图 2 可知, ID 组游离酚、结合酚的 IC₅₀ 值最低, 分别为 0.53 μg/mL、0.06 μg/mL; URD 组游离酚 IC₅₀ 值最高, 为 0.69 μg/mL, NURD 组结合酚 IC₅₀ 值最高, 为 0.11 μg/mL。说明不同热风干燥方式对香菇多酚 DPPH 清除能力有较大影响, 因为干燥过程中因温度, 间歇时间不同, 导致多酚的组成有所改变, 从而影响了多酚的抗氧化活性。温度上升过高, 则不利于香菇多酚抗氧化活性; 恒温干燥对香菇多酚 DPPH 清除力降低最小。

2.4 香菇多酚还原力

不同热风干燥处理香菇游离酚和结合酚还原力如图 3 所示。

由图 3 可知, 同等浓度下游离酚还原力强于结合酚, 且二者均弱于对照组 Vc 和 EGCG 的还原力; 随着多酚浓度提升, 还原力增强。不同热风干燥处理间,

香菇多酚(游离酚, 结合酚)还原力差异不显著。

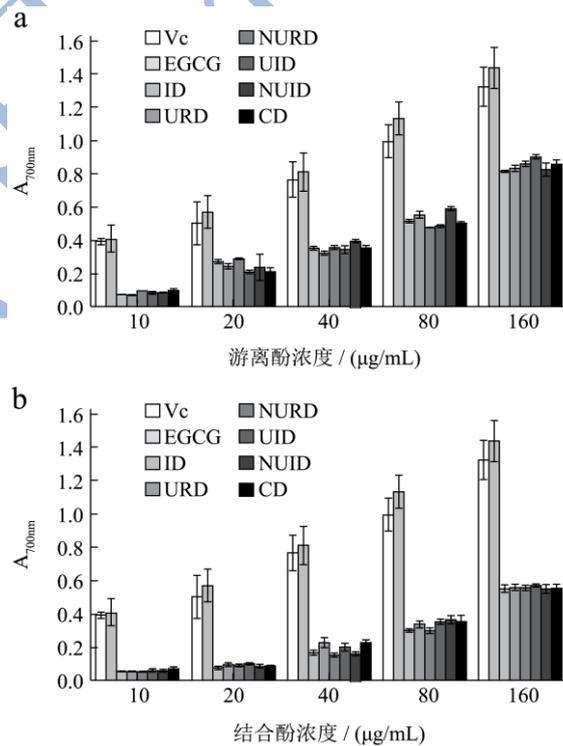


图 3 不同热风干燥方式下香菇多酚还原力测定
Fig.3 Reducing power of polyphenols in mushrooms after various hot-air drying treatments

2.5 香菇多酚 ABTS⁺ 清除率

研究发现六种干燥方式下随着香菇多酚质量浓度的增加, 其 ABTS⁺ 清除能力增强, 六种香菇多酚的 ABTS⁺ 清除率与多酚质量浓度呈一定的正相关性。虽然六种多酚样品 ABTS⁺ 清除能力弱于 Vc 和

EGCG, 但当浓度为 16.00 $\mu\text{g/mL}$ 时, 游离酚清除率均达到 90% 以上, 而结合酚清除率达到 80% 以上, 说明香菇多酚具有一定的 ABTS^+ 清除能力, 且游离酚强于结合酚。六种干燥方式下香菇游离和结合酚 ABTS^+ 清除率 IC_{50} 值如图 4 所示。

由图 4 可知, ID 组游离酚 IC_{50} 值最低, 为 3.32 $\mu\text{g/mL}$; NURD 组游离酚 IC_{50} 值最高, 为 3.48 $\mu\text{g/mL}$, 其余各组游离酚 IC_{50} 值差异不显著, 各组间结合酚 IC_{50} 值差异也不显著, 说明不同热风干燥处理对香菇多酚 ABTS^+ 清除能力影响不大, 相比较而言 ID 组具有较好的 ABTS^+ 清除能力, 而温度过高会对游离酚 ABTS^+ 清除能力有一定的损害。

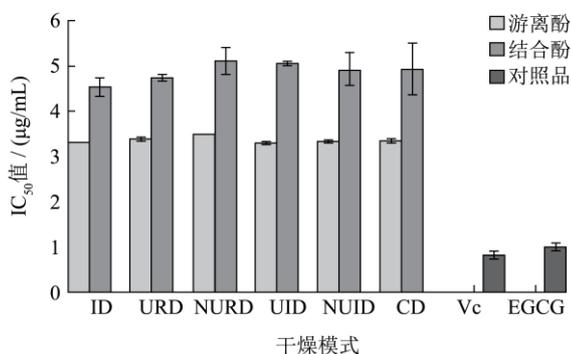


图 4 不同热风干燥处理香菇多酚 ABTS^+ 清除率 IC_{50} 值

Fig.4 IC_{50} of ABTS^+ radical scavenging by polyphenols in mushrooms after various hot-air drying treatments

不同干燥方式香菇多酚的抗氧化活性不同, 一方面可能是由于干燥过程有利于某些抗氧化组分的释放, 另一方面可能是因为有抗氧化活性组分的生成及降解。

3 结论

3.1 热风干燥方式不同, 香菇多酚含量和抗氧化能力也随之不同, 其中 ID 组游离酚含量最高为 2.69 mg GAE/g DW, 而结合酚含量相对较低, 仅为 0.19 mg GAE/g DW; UID 组游离酚含量较低 (2.21 mg GAE/g DW) 而结合酚含量较高 (0.33 mg GAE/g DW)。不同抗氧化能力测定结果表明香菇多酚具有一定的抗氧化能力, 虽结果不完全一致, 但 DPPH 清除力和 ABTS^+ 清除力结果均表明 ID 组具有较强的自由基清除能力。干燥温度过高对香菇多酚有破坏作用, 间歇时间延长则导致香菇游离酚和结合酚各组分发生变化, 从而影响其抗氧化能力。综合考虑多酚含量、抗氧化活性, 恒温干燥 (ID) 是比较理想的干燥方式。不同干燥方式香菇多酚组成成分较一致, 游离酚以没食子酸、绿原酸、咖啡酸和槲皮素为主, 而结合酚主要由没食子酸和槲皮素组成, 但各组分含量差异较显

著。多酚抗氧化活性与其组成关系密切, 因此有待进一步研究香菇多酚各组分对其抗氧化活性的贡献。

3.2 恒温干燥虽是对保护香菇多酚最理想的热风干燥, 但是其能耗较高^[5,12]; 常用于香菇干燥的还有微波干燥、真空冷冻干燥、真空热干燥、远红外干燥、超声辅助干燥等非热风干燥方式^[13-14], 但主要集中于干燥效率及干燥后香菇基本营养成分的研究, 对香菇多酚的研究鲜有报道, 因此在后续的研究中应综合考虑干燥时间、能耗、基本营养成分及多酚等活性成分, 选择更优的干燥方式, 使干制香菇具有较好的品质, 提升香菇的保健功能作用。

参考文献

- [1] Li H, Horke S, Förstermann U. Vascular oxidative stress, nitric oxide and atherosclerosis [J]. *Atherosclerosis*, 2014, 237(1): 208-219
- [2] Finimundy T C, Dillon A J P, Henriques J A P, et al. A review on general nutritional compounds and pharmacological properties of the *Lentinula edodes* mushroom [J]. *Food and Nutrition Sciences*, 2014, 5(12): 1095-1105
- [3] T C Finimundy, G Gambato, R Fontana, et al. Aqueous extracts of *Lentinula edodes* and *Pleurotus sajor-caju* exhibit high antioxidant capability and promising *in vitro* antitumor activity [J]. *Nutrition Research*, 2013, 33(1): 76-84
- [4] Rhim J, Lee J. Drying kinetics of whole and sliced shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2011, 20(2): 419-427
- [5] GUO Xiao-hui, XIA Chun-yan, TAN Yu-rong, et al. Mathematical modeling and effect of various hot-air drying on mushroom (*Lentinus edodes*) [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(1): 207-216
- [6] Chu Y F, Sun J, Wu X Z, et al. Antioxidant and antiproliferative activities of common vegetables [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(23): 6910-6916
- [7] Cheung L M, Cheung P C K, Ooi V E C. Antioxidant activity and total phenolics of edible mushroom extracts [J]. *Food Chemistry*, 2003, 81(2): 249-255
- [8] Ardestani A, Yazdanparast R. Antioxidant and free radical scavenging potential of *Achillea santolina* extracts [J]. *Food Chemistry*, 2007, 104(1): 21-29
- [9] Soong Y, Barlow P J. Antioxidant activity and phenolic content of selected fruit seeds [J]. *Food Chemistry*, 2004, 88(3): 411-417

- [10] Lee J E, Kim G S, Park S, et al. Determination of chokeberry (*Aronia melanocarpa*) polyphenol components using liquid chromatography-tandem mass spectrometry: Overall contribution to antioxidant activity [J]. *Food Chemistry*, 2014, 146(1): 1-5
- [11] Nowacka N, Nowak R, Drozd M, et al. Analysis of phenolic constituents, antiradical and antimicrobial activity of edible mushrooms growing wild in Poland [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 59(2): 689-694
- [12] Qi L L, Zhang M, Mujumdar A S, et al. Comparison of drying characteristics and quality of shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) using different drying methods [J]. *Drying Technology*, 2014, 32(15): 1751-1761
- [13] Kantrong H, Tansakul A, Mittal G S. Drying characteristics and quality of shiitake mushroom undergoing microwave-vacuum drying and microwave-vacuum combined with infrared drying [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2012, DOI 10.1007/s13197-012-0888-4
- [14] Wang H, Zhang M, Mujumdar A S. Comparison of three new drying methods for drying characteristics and quality of shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) [J]. *Drying Technology*, 2014, 32(15): 1791-1802

