

基于熵权-变异系数法对不同干燥方式下当归干燥特性及理化性质的评价

臧泽鹏, 黄晓鹏, 马国军, 张倩, 姜春慧, 万芳新*

甘肃农业大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730070

摘要: 目的 分析自然晾晒干燥 (natural drying, ND)、热风干燥 (hot air drying, HAD)、真空干燥 (vacuum drying, VD)、微波真空干燥 (microwave vacuum drying, MVD)、真空远红外干燥 (vacuum far infrared drying, VFIRD) 和超声-真空远红外干燥 (ultrasonic vacuum far-infrared drying, US-VFIRD) 6 种干燥方式对当归干制品干燥特性、理化品质及微观结构的影响, 探究当归的最佳干燥方式。方法 选取干燥时间、色差、复水比、收缩率等物理特性和绿原酸、阿魏酸、洋川芎内酯 H、洋川芎内酯 I、丁烯基苯酞、藁本内酯、多糖、总酚、总黄酮等化学成分含量作为评价指标, 使用熵权-变异系数法计算耦合权重系数和综合评分, 并利用加权逼近理想解排序法 (weighted approximation ideal solution ranking method, TOPSIS) 验证评价模型。结果 MVD 干燥时间最短 (110 min) 且干制品色差最低 ($\Delta E = 8.12 \pm 3.97$); US-VFIRD 能更好地保存样品中藁本内酯、绿原酸、阿魏酸等天然活性成分和多糖、总酚、总黄酮等基本营养成分的含量, 并对样品内部组织结构有明显的改善作用, 其干制品品质最佳 (熵权-变异系数综合评分为 77.94, TOPSIS 相对贴近度 Φ 为 0.838 3), 其次是 MVD。结论 采用 US-VFIRD 干燥方式明显优于其他 5 种干燥方式, 为超声波技术用于当归干燥提供理论支持。

关键词: 熵权-变异系数法; 加权逼近理想解排序法; 当归; 自然晾晒干燥; 热风干燥; 真空干燥; 微波真空干燥; 真空远红外干燥; 超声-真空远红外干燥; 绿原酸; 阿魏酸; 洋川芎内酯 H; 洋川芎内酯 I; 丁烯基苯酞; 藁本内酯; 多糖; 总酚; 总黄酮

中图分类号: R283.6

文献标志码: A

文章编号: 0253-2670(2022)23-7403-11

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2022.23.010

Evaluation of drying characteristics and physicochemical properties of *Angelicae Sinensis Radix* under different drying methods based on combination entropy weight and variable coefficient method

ZANG Ze-peng, HUANG Xiao-peng, MA Guo-jun, ZHANG Qian, JIANG Chun-hui, WAN Fang-xin

College of Mechanical and Electromechanical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Objective To study the effects of natural drying (ND), hot air drying (HAD), vacuum drying (VD), microwave vacuum drying (MVD), vacuum far infrared drying (VFIRD) and ultrasonic vacuum far-infrared drying (US-VFIRD) on the drying characteristics, physicochemical quality and microstructure of dried Danggui (*Angelica sinensis*) and explore the best drying process of samples. **Methods** The physical properties such as drying time, color difference, rehydration ratio, shrinkage rate and chemical components such as chlorogenic acid, ferulic acid, senkyunolide H, senkyunolide I, 3-butylideneephthalide, ligustilide, polysaccharide, total phenols and total flavonoids content were selected as evaluation indexes, coupling weights and comprehensive scores were calculated using the entropy weight-variable coefficient method, and the evaluation model was validated using the weighted approximation ideal solution ranking method (TOPSIS). **Results** MVD had the shortest drying time (110 min) and the lowest color difference in the dried products ($\Delta E = 8.12 \pm 3.97$); US-VFIRD could better preserve the active ingredients such as ligustilide, chlorogenic acid, ferulic acid and other nutrients in the samples and improve the internal tissue structure of the samples, and its dried products had the best quality (entropy weight- variable coefficient comprehensive score $A_w = 77.94$, TOPSIS relative closeness $\Phi = 0.838 3$), followed by MVD. **Conclusion** The test showed that the US-VFIRD drying method was significantly better than the other five drying methods, which provided theoretical support of ultrasonic technology applying in drying *A. sinensis*.

收稿日期: 2022-06-22

基金项目: 甘肃省重点研发计划 (17YF1NH051); 甘肃农业大学青年导师基金资助项目 (GSAU-QDFC-2020-14)

作者简介: 臧泽鹏, 男, 甘肃张掖人, 硕士研究生, 主要从事农产品加工技术与装备研究。E-mail: zangzp@st.gsau.edu.cn

*通信作者: 万芳新, 女, 甘肃华亭人, 教授, 主要从事农产品加工技术与装备研究。E-mail: wanfx@gsau.edu.cn

Key words: entropy weight and variable coefficient method; TOPSIS; *Angelica slices* (Oliv.) Diels; natural drying; hot air drying; vacuum drying; microwave vacuum drying; vacuum far infrared drying; ultrasonic vacuum far-infrared drying; chlorogenic acid; ferulic acid; senkyunolide H; senkyunolide I; 3-butylideneephthalide; ligustilide; polysaccharide; total phenols; total flavonoids

当归 *Angelicae Sinensis Radix* 为伞形科当归属植物当归 *Angelica sinensis* (Oliv.) Diels 的干燥根^[1], 甘肃东南部岷县为其道地产区, 其富含挥发油、有机酸、多糖、黄酮、维生素和苯酚类等化学成分, 具有较高的食用和药用价值^[2]。当归还具有潜在的抗肿瘤、保护软骨细胞、抗氧化和调经止痛等多种保健功效^[3], 新鲜当归含有大量天然活性物质, 具有挥发性、染菌性、高水分、易质变等特点, 采后若不及时脱水容易霉变腐败、滋生病菌^[4]。干燥作为一种固液分离技术, 是降低新鲜当归水分活度、保留营养物质和杀菌抑菌最常用的方法之一。

目前, 干燥方式众多, 包括传统干燥方式和现代干燥方式。晒干、阴干、熏干等传统的干燥方式存在干燥过程难控制、卫生条件难达标、产品品质难以保障等问题^[5]; 现代干燥方式又含有单一干燥和联合干燥。Wang 等^[6]研究不同干燥方式对当归理化性质的影响, 结果表明冷冻干燥后样品具有较高的热稳定性、独特的形态结构、均匀性和更高的外观品质。Zhang 等^[7]利用 HPLC 法探究了干燥方法对当归生物活性物质含量及抗氧化性的影响, 结果显示冷冻干燥后干制品抗氧化性更好。李武强等^[8]研究了不同干燥条件下当归切片的远红外干燥特性, 发现远红外干燥技术可以显著提高物料的干燥速率。以上结果表明, 合理的干燥工艺和条件, 可以抑制当归中微生物和病菌的活性, 最大限度地保留物料原有的感官品质和风味色泽, 对提高当归的食用价值和营养价值起至关重要的作用^[9]。近年来, 当归干燥重在研究单一干燥方式对其物理特性的影响, 鲜少有关不同干燥方式对当归干燥特性、品质特性及微观结构的综合评价。

熵权-变异系数法是通过计算耦合权重系数来评价各指标对整体的影响程度, 使评价结果更具协调性、兼容性和科学性^[10]。王玉霞等^[11]基于熵权-加权逼近理想解排序法 (weighted approximation ideal solution ranking method, TOPSIS) 模型对不同干燥方法下苦水玫瑰品质优劣作了综合评价; 刘盼盼等^[12]采用变异系数综合评分得出饱和蒸汽-热泵组合干燥是干制白萝卜的最佳工艺。但是这些研究评价指标较少, 均未从整体上分析不同干燥方式对

食品理化性质和功能特性的影响, 这不利于食品潜在价值的挖掘和产业化加工的发展。

本研究以“岷归 1 号”为试验材料, 分别采用自然晾晒干燥 (natural drying, ND)、热风干燥 (hot air drying, HAD)、真空干燥 (vacuum drying, VD) 单一干燥方式和微波真空干燥 (microwave vacuum drying, MVD)、真空远红外干燥 (vacuum far infrared drying, VFIRD)、超声-真空远红外干燥 (ultrasonic vacuum far-infrared drying, US-VFIRD) 联合干燥方式对样品进行干燥处理, 测定其复水比、收缩率等物理特性和绿原酸、阿魏酸、丁烯基苯酚、藁本内酯等化学成分含量, 并以此为评价指标, 利用熵权-变异系数法计算耦合权重系数和综合评分, 获得最佳的干燥方式, 再结合 TOPSIS 法和微观结构对其进行验证, 旨在为当归产业化加工方式的选择和应用提供理论参考。

1 仪器与材料

1.1 仪器

DHG-9053A 型热风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; DZF-6020 型真空干燥箱, 浙江力辰科技有限公司; HWZ-3B 型微波真空干燥箱, 天水盛华微波技术有限公司; WSH-60A 型真空远红外干燥箱, 天水盛华微波技术有限公司; THD-T1 型超声波设备, 深圳电科设备有限公司; Agilent 1100 型高效液相色谱仪, 美国安捷伦有限公司; CR-410 型色差仪, 日本柯尼卡美能达公司; JM-A3003 型电子天平, 余姚纪铭称重校验设备有限公司; TS-200 B 型恒温摇床, 上海锦玖仪器设备有限公司; TGL20M 型高速离心机, 湖南迈佳森仪器设备有限公司; T2600S 紫外分光光度计, 青岛精诚仪器有限公司。

1.2 材料

新鲜当归购自中国甘肃省定西市, 经甘肃农业大学黄晓鹏教授鉴定, 为伞形科当归属植物当归 *A. sinensis* (Oliv.) Diels 的干燥根, 品种为“岷归 1 号”。采用官方分析方法 (official analysis method, AOAC) 法^[13]测定了样品初始含水率为 $(71.21 \pm 0.50)\%$ 。

2 方法

2.1 干燥方法

选取长度均匀、形状完整的当归主根, 清洗干

净后切片(4 mm),称取(120.0±0.5) g,放入不同干燥设备(所有设备均预热 30 min);当物料湿基含水率下降至 10%时^[7],停止试验。为保证试验可靠性,所有试验进行 3 次重复,并取其平均值为试验值。具体干燥过程如下:ND:将当归切片均匀平铺放置于无阻挡阳光的地面上直接自然晾晒,夜晚将物料移入室内;HAD:干燥温度 50 °C,风速 1.5 m/s;VD:干燥温度 50 °C,真空度-0.070 MPa;MVD:干燥温度 50 °C,真空度-0.070 MPa;VFIRD:干燥温度 50 °C,真空度-0.070 MPa,辐射距离 200 mm;US-VFIRD:干燥温度 50 °C,真空度-0.070 MPa,辐射距离 200 mm,超声功率 60 W,超声频率 28 kHz;上述所有干燥设备整机功率均为 1.2 kW,试验至含水率低于 10%时停止,待测。

2.2 提取液的制备

2.2.1 供试品溶液的制备 取当归粉末(过三号筛)约 0.5 g。精密称定,置于 50 mL 具塞锥形瓶中,加入 80%甲醇溶液 25 mL,在 200 W、60 Hz 条件下超声 30 min,放冷后,再称定质量,用 80%甲醇补足减失的质量,摇匀,用 0.22 μm 微孔滤膜滤过,取续滤液,即得供试品溶液。

2.2.2 混合对照品溶液的制备 精密称取绿原酸、阿魏酸、洋川芎内酯 H、洋川芎内酯 I、丁烯基苯酞、藁本内酯对照品适量,分别置于 10 mL 量瓶中,用甲醇溶液定容,制成质量浓度为 167.00、66.80、26.72、10.69、4.28、1.71 μg/mL 的混合对照品溶液。

2.2.3 总酚、总黄酮、多糖、抗氧化性提取液的制备 将干燥后的当归,粉碎后过 5 号筛,精密称取 0.5 g,浸于盛有 20 mL 70%乙醇具塞锥形瓶中,先在 25 °C、黑暗、180 r/min 条件下旋转振荡 48 h,取出溶液后离心 15 min (4 °C、6000 r/min、离心半径 3.5 cm),取上清液,用 70%乙醇定容至 25 mL,于 4 °C 保存,用于多糖、总酚、总黄酮、抗氧化性的测定。

2.3 干燥特性(干基含水率)的测定

干基含水率根据公式(1)计算^[15]。

$$M_t = (W_t - W_d) / W_d \quad (1)$$

M_t 为任意 t 时刻当归干基含水率, W_t 为 t 时刻当归切片的质量, W_d 为当归切片干物质的质量

2.4 物理特性的测定

2.4.1 色泽 使用色差仪测量当归切片的色泽变化^[16]。

$$\Delta E = [(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2]^{1/2} \quad (2)$$

L^* 为明/暗度, a^* 为红/绿度, b^* 为黄/蓝度, L_0 、 a_0 、 b_0 为当归初始的明度值、红绿值、黄蓝值

2.4.2 复水比 称取干燥后当归切片 5 g,将其置于盛有 100 mL 蒸馏水的烧杯中,水浴 37 °C 下静置 60 min,然后将样品倒入过滤器中沥干,并用精确度为±0.1 mg 的电子天平称定质量,通过公式(3)计算物料的复水率^[17]。

$$RR = m / m_0 \times 100 \quad (3)$$

RR 为当归复水比, m 为复水后当归片的质量, m_0 为脱水产品质量

2.4.3 收缩率 为更好地分析干燥过程中材料的收缩特性,将干燥前后当归的体积比定义为收缩率(SR),用公式(4)计算^[18]。

$$SR = (V_0 - V) / V_0 \times 100 \quad (4)$$

V_0 、 V 为干燥前后当归切片的体积

2.5 有效成分的测定

2.5.1 HPLC 法测定当归中有机酸和苯酞类化合物 采用 HPLC 法^[19]测定当归中绿原酸、藁本内酯、阿魏酸、洋川芎内酯 I、洋川芎内酯 H、丁烯基苯酞 6 种主要成分含量。

色谱条件:色谱柱为 Agilent Eclipse XDB-C₁₈ 柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm);流动相为乙腈-1%乙酸水溶液,梯度洗脱:0~15 min, 12%乙腈;15~45 min, 12%~22%乙腈;45~50 min, 22%~40%乙腈;50~80 min, 60%~57%乙腈;80~85 min, 57%~37%乙腈;柱温 25 °C;体积流量 1.0 mL/min;检测波长 280 nm;进样量 10 μL。

2.5.2 当归营养成分的测定

(1)总酚:采用福林酚(Folin-Ciocalteu)试剂法^[20]测定。取 0.45 mL 提取液,依次加入 2.0 mL 10% Folin-Ciocalteu 溶液和 1.0 mL 7.5% Na₂CO₃ 溶液,混合振荡 5 min,置于温度为 37 °C 的水浴锅中避光反应 1 h,以不加提取液做空白对照,用分光光度计于 765 nm 处测定吸光度(A)值,总酚含量以没食子酸当量表示,每个试验重复 3 次。

(2)总黄酮:采用 NaNO₂-Al(NO₂)₃-NaOH 法^[20]测定。取 2.5 mL 提取液,加入 2.0 mL 蒸馏水和 0.3 mL 5% NaNO₂,振荡 5 min 后,加入 0.3 mL 10% AlCl₃,混合振荡 2 min,最后加入 2.0 mL 1 mol/L NaOH,使之充分反应,以不加提取液为空白对照,测定 510 nm 下的 A 值,总黄酮含量以儿茶素当量表示,每个试验重复 3 次。

(3)多糖:采用硫酸-苯酚法^[20]测定。取 5 μL 提

取液, 加入 1.0 mL 9% 苯酚溶液, 充分混匀后, 加入 3.0 mL 浓 H₂SO₄, 振荡 5 min, 室温反应 30 min, 测定 485 nm 下的 *A* 值, 以蔗糖为对照品标定, 每个试验重复 3 次。

(4) 抗氧化性: 用 DPPH 法^[21]测定。取适量的提取液, 将其加入 3.0 mL 0.1 mmol/L DPPH 甲醇溶液中, 室温、黑暗振荡 30 min, 随后在 515 nm 处测定 *A* 值, 以 500 μmol/L 90% 抗坏血酸 (ASA) 甲醇溶液为阳性对照。当归的 DPPH 自由基清除活性由公式 (5) 计算得出。

$$\text{抗氧化性} = (A_c - A_d) / A_c \quad (5)$$

A_c 为对照品的 *A* 值, *A_d* 为干燥样品液的 *A* 值

2.6 熵权法计算权重系数

2.6.1 无量纲处理 试验中所选天然活性成分、复水比等指标, 其数值越大越好, 均为正向指标。对于正向指标, 按公式 (6) 计算^[22]。

$$X_{ij} = (X_{ij} - m_j) / (M_j - m_j) \quad (6)$$

X_{ij} 为 *i* 次试验中 *j* 指标试验值, *m_j* 为该组试验值中的最小值, *M_j* 为该组试验值中的最大值

试验中所选干燥时间、色差等指标, 其值越小越好, 均为逆向指标。对于逆向指标, 按公式 (7) 计算。

$$X_{ij} = (M_j - X_{ij}) / (M_j - m_j) \quad (7)$$

2.6.2 消零及去负数处理 由于无量纲化处理后数据最小值为 0, 为使数据处理有意义, 需将数据平移进行消零处理, 按公式 (8) 计算。

$$X = X_{ij} + \alpha \quad (8)$$

α 为最接近试验值 *X_{ij}* 的最小值, 为保证数据准确性, 取 *α* = 0.001

2.6.3 标准化处理 由于当归中各有效活性成分及其他评价指标的含量差异性较大, 为使评价更精确, 对各因素进行标准化处理。

$$P_{ij} = X / \sum_{i=1}^n X \quad (9)$$

P_{ij} 为 *i* 次试验在 *j* 评价指标下的概率, *n* 为试验组数

2.6.4 熵值计算 所测指标熵值越小说明离散水平越高, 所占权重就越大, 对综合评价的影响越显著。熵值按公式 (10) 计算^[23]。

$$e_j = - \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} / \ln n \quad (10)$$

e_j 为第 *j* 项指标的熵值

2.6.5 差异系数 对第 *j* 项指标来说, 指标值的差异越大, 表明该指标所占权重越大, 对综合评价的

作用显著, 差异系数按公式 (11) 计算。

$$\alpha = 1 - e_j \quad (11)$$

α 为第 *j* 项指标的差异系数

2.6.6 评价指标权重系数 指标权重系数为评价当归微波真空干燥品质优劣的重要依据, 各指标权重系数按公式 (12) 计算。

$$w_{j1} = \alpha / \sum_{i=1}^m \alpha \quad (12)$$

w_{j1} 为第 *j* 项指标的权重系数, *m* 为试验指标个数

2.7 变异系数法计算权重系数

第 *i* 项指标的变异系数 *β* 为

$$\beta = \delta_i / x_i \quad (13)$$

δ_i 为第 *i* 项指标的标准差, *x_i* 为第 *i* 项指标的平均数

各评价指标的权重 *w_{j2}* 为

$$w_{j2} = \beta_i / \sum_{i=1}^m \beta_i \quad (14)$$

2.8 熵权-变异系数法耦合权重系数

根据拉格朗日乘子法^[10], 得到优化后的耦合权重系数。

$$w_j = (w_{j1} w_{j2})^{1/2} / \sum_{i=1}^m (w_{j1} w_{j2})^{1/2} \quad (15)$$

2.9 TOPSIS 法评价

将原始数据和耦合权重系数的乘积作为规范化矩阵, 根据 TOPSIS 法的计算步骤^[24-25], 得到不同干燥工艺与最优方案和最劣方案的距离 *Φ⁺* 和 *Φ⁻*, 最终得到评价方案与正理想解的贴合度 *Φ* 值, 根据 *Φ* 值评价不同干燥工艺的优劣。

2.10 微观结构观察

将 Wu 等^[26]的方法略作改动, 采用扫描电镜观察样品。首先将物料切成 5 mm × 5 mm 小薄片, 迅速浸入 2.5% 戊二醛溶液中固定 12 h, 然后用 pH 7.4 的 0.2 mol/L 磷酸缓冲液漂洗 3 次, 每次 15 min, 并依次用 50%、70%、80%、90%、100% 乙醇梯度脱洗, 每次 15 min。最后将渗透后的当归切片转移至叔丁醇中保存, 喷金处理后观察样品的微观结构。

3 结果和讨论

3.1 不同干燥方式对当归含水率的影响

由图 1 可知, 与传统的自然晾晒相比, 单一干燥和联合干燥均对缩短干燥时间和提高干燥速率有积极作用。VD、MVD、VFIRD、US-VFIRD 处理下, 样品达到安全含水率所花时间分别为 200、110、220、160 min, 与 HAD (260 min) 相比干燥时间分别缩短了 23.08%、57.69%、15.38%、38.46%。随着

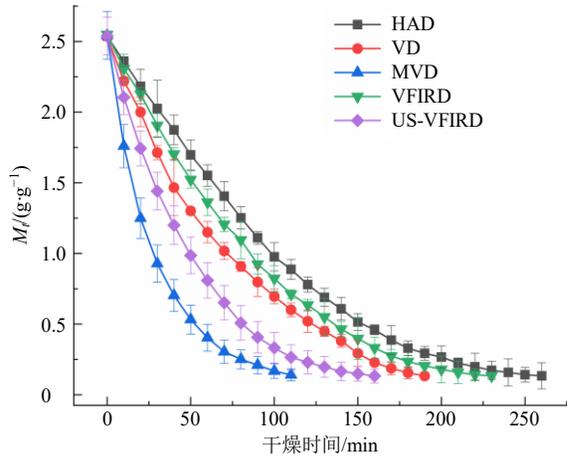


图1 不同干燥方式下当归的干燥曲线

Fig. 1 Drying curve of *Angelicae Sinensis Radix* under different drying methods

干燥方式的变化,干燥曲线由平缓逐渐变陡峭,这说明干燥速率逐渐变大,其中MVD明显陡于其余4种干燥方式,这可能是因为MVD可以增加物料与干燥介质之间的蒸汽压差,提高了水分子的内能和活性,使得结合水分子间作用力被削弱,内部化学键被破坏,细胞内部分结合水转化为流动性较好的自由水^[27],减少了物料内部扩散边界,增强传热传质效率,但是干燥速率过快容易导致物料皱缩较为严重,发生干缩和表面硬化现象,使得物料内部渗透性变低。此外,US-VFIRD利用超声波的机械、空化和热效应也大幅缩短了干燥时间,这是因为超声波引起分子间高频振动,使样品组织结构发生拉伸收缩现象,在挤压、剪切作用下减弱分子间内聚力,打破固有的扩散边界层,促进水分由内部向表面迁移,降低了固液之间的传热传质阻力^[28]。此外,

还发现脱水后期干燥较为缓慢且干燥曲线几乎重合,这是由于当归的干燥过程属于由内扩散控制的降速干燥,其内扩散阻力决定了传热传质速率和水分扩散速率,其次干燥后期剩余多为与蛋白质等保水成分紧密贴合的结合水,内扩散阻力及水分子结合力增大,较难除去,因此干燥后期干燥速率较低。综合脱水速率和表观结构来看,US-VFIRD最佳,MVD次之。

3.2 干燥方式对当归物理性质的影响

3.2.1 不同干燥方式对当归复水比和收缩率的影响
干燥通常会导致样品组织结构发生不可逆的损伤,复水比和收缩率可以作为衡量干燥过程中物料内部组织结构被破坏程度的重要指标,复水比越高、收缩率越低,表明内部组织完整性越好。由表1可知,不同干燥方式对当归复水性能的影响不同,复水30 min后MVD、VFIRD、US-VFIRD联合干燥的复水比分别为4.00、3.48、4.33,与单一的热风干燥相比分别提高了21.95%、6.10%、32.01%;VFIRD与US-VFIRD相比复水比略低,可能是因为VFIRD干燥速率较低,物料长时间处于高温环境中内部组织结构受损,出现微孔通道的破裂和坍塌;其次,干缩和表面硬化现象的加剧,可能会阻碍复水过程中水的渗透,而US-VFIRD因其机械效应和空化效应,在引起内部水分湍流的同时扩张了组织结构间的微孔通道,增强了自由水和不易流动水的运动,因此表现出更好的复水能力。此外,不同干燥方式对样品收缩率具有显著性影响($P < 0.05$),收缩率的大小顺序为HAD > ND > VD > MVD > VFIRD > US-VFIRD,这说明联合干燥对样品空气界面的对流换

表1 不同干燥方式对当归复水比、收缩率、色泽和干燥时间的影响

Table 1 Effects of different drying methods on rehydration ratio, shrinkage rate, color and drying time of *Angelicae Sinensis Radix*

| 干燥方式 | 复水比 | 收缩率/% | 色泽参数 | | | | 干燥时间/ min |
|----------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------|
| | | | L^* | a^* | b^* | ΔE | |
| 鲜样 | — | — | 80.98 ± 3.79 ^a | 0.40 ± 0.12 ^f | 14.51 ± 2.12 ^d | — | — |
| ND | 3.16 ± 0.18 ^d | 0.380 ± 0.011 ^b | 68.53 ± 4.91 ^d | 4.33 ± 0.81 ^a | 24.99 ± 3.08 ^a | 16.75 ± 5.85 ^b | 2400 |
| HAD | 3.28 ± 0.12 ^{cd} | 0.430 ± 0.016 ^a | 62.32 ± 5.62 ^e | 4.23 ± 0.77 ^a | 25.20 ± 1.79 ^a | 21.85 ± 5.95 ^a | 260 |
| VD | 3.97 ± 0.14 ^b | 0.340 ± 0.012 ^c | 72.21 ± 4.33 ^{bc} | 1.07 ± 0.13 ^e | 18.91 ± 2.14 ^c | 9.84 ± 4.83 ^d | 200 |
| MVD | 4.01 ± 0.21 ^b | 0.300 ± 0.012 ^{cd} | 74.11 ± 3.28 ^b | 2.80 ± 0.22 ^d | 18.10 ± 2.22 ^c | 8.12 ± 3.97 ^e | 110 |
| VFIRD | 3.48 ± 0.14 ^c | 0.240 ± 0.017 ^d | 70.78 ± 3.02 ^c | 3.12 ± 0.40 ^c | 20.49 ± 0.97 ^b | 12.13 ± 3.20 ^c | 220 |
| US-VFIRD | 4.33 ± 0.15 ^a | 0.210 ± 0.011 ^d | 73.06 ± 4.97 ^{bc} | 4.15 ± 0.31 ^{bc} | 20.71 ± 1.21 ^b | 10.74 ± 5.12 ^{cd} | 160 |

同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

different letters in same column indicate significant differences ($P < 0.05$)

热和内部热传导均有改善作用。其中 US-VFIRD 对收缩率和复水性能的影响最显著 ($P < 0.05$), 表明超声波的应用可以有效减少物料干缩硬化现象的发生, 对内部组织细胞结构的破坏力较小。

3.2.2 不同干燥方式对当归色泽的影响 色泽是评价当归品质优劣的重要指标之一^[29], 不同干燥方式对样品外观品质有显著影响 ($P < 0.05$)。由表 1 可知, 新鲜当归 L^* 、 a^* 、 b^* 分别为 80.98 ± 3.79 、 0.40 ± 0.12 、 14.51 ± 2.12 , 与新鲜样品相比, 干燥后所有干制品 L^* 均显著降低, a^* 和 b^* 显著升高, 说明干燥后样品色泽变暗, 这是由于当归中富含酚类、糖类、花青素、抗坏血酸等营养物质, 长时间暴露在高温潮湿的环境中, 易发生氧化反应和美拉德反应, 这与 Wu 等^[26]的研究结果类似。 ΔE 由高到低依次为 $MVD > VD > US-VFIRD > VFIRD > ND > HAD$, 基本与干燥时间长短一致, 这说明长时间的高温环境会加剧样品中酚类、糖苷类等物质发生降解, 从而降低色泽。MVD 的 ΔE (8.12 ± 3.97) 较低, 可能是由于电磁波会造成样品中氧化酶和过氧化酶发生钝化和失活, 进而减少酶促褐变反应的发生^[30]。此外, VD 比 US-VFIRD 的色差值小, 可能是因为 VD 可以在亚气压环境下减少热损伤和氧化损伤, 最大程度上保留了样品的色泽和营养成分, 其次, US-

VFIRD 干燥时超声波的机械效应可能会造成细胞壁的机械损伤, 使部分氧化酶从细胞基质中泄露出来, 发生羟醛缩合与聚合形成了褐色素, 因此色泽略有下降。综合来看, MVD 和 VD 更有利于当归干燥过程中色泽的保留。

3.3 干燥方式对当归化学成分的影响

3.3.1 不同干燥方式对当归有机酸类和苯酚类化合物的影响 本实验测定了不同干燥方式下当归样品中绿原酸、阿魏酸、藁本内酯、洋川芎内酯 H、洋川芎内酯 I、丁烯基苯酐 6 种当归主要活性成分的含量, 色谱图见图 2, 不同干燥方式下当归主根和须根中苯酚类和有机酸类化合物含量如表 2 所示。

HAD 的绿原酸、阿魏酸、洋川芎内酯 H、藁本内酯含量最低, 这是由于样品中有效活性物质多为热敏性成分, 遇高温和氧气条件易发生分解, 不利于活性物质的保留; 在 6 种干燥方式中, 联合干燥后干制品中有效活性成分含量明显高于单一干燥, 这是因为联合干燥可以大幅的缩短干燥时间, 提高干燥速率, 例如 US-VFIRD 后样品中绿原酸、藁本内酯等 6 种活性物质含量均显著高于其余干燥方式 ($P < 0.05$), 与 ND [$(2\ 797.48 \pm 21.41) \mu\text{g/g}$] 和 HAD [$(2\ 572.29 \pm 27.10) \mu\text{g/g}$] 相比, US-VFIRD 后藁本内酯 [$(4\ 692.48 \pm 23.66) \mu\text{g/g}$] 含量分别提高了

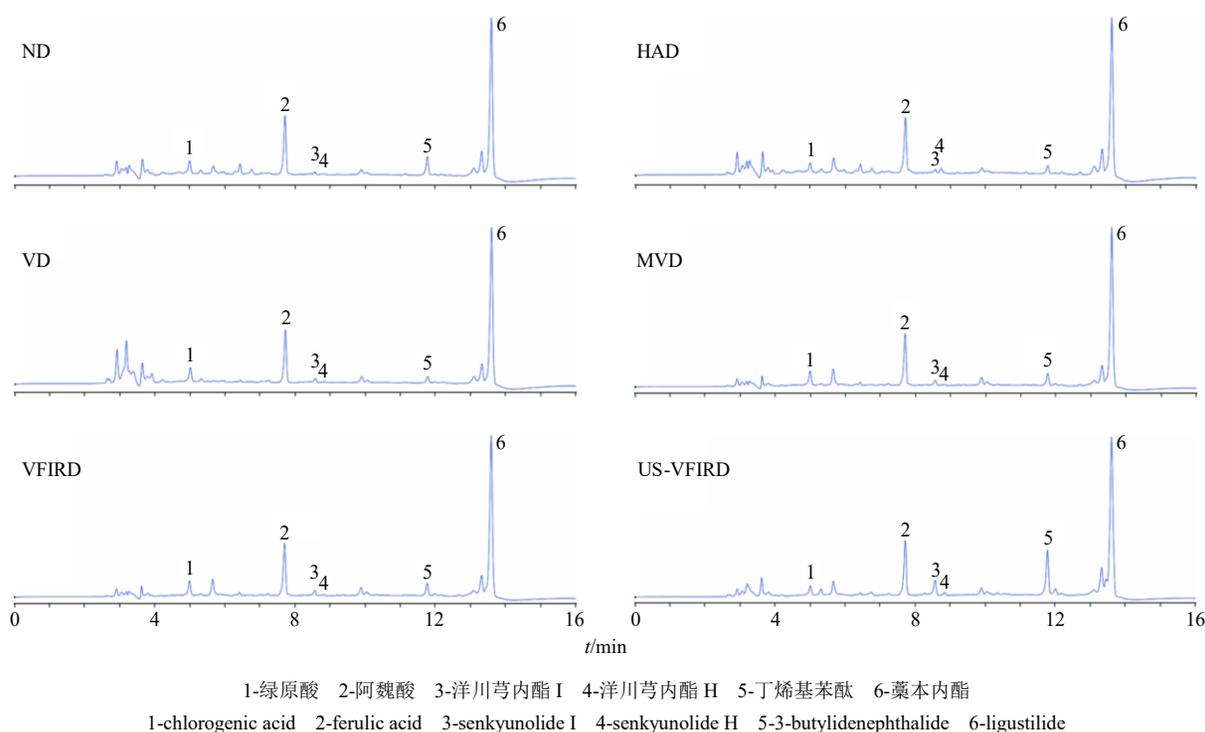


图 2 不同干燥方式当归 HPLC 比较

Fig. 2 HPLC comparison of *Angelicae Sinensis Radix* by different drying methods

表 2 不同干燥方式下当归主根和须根中有机酸类和苯酞类化合物含量

Table 2 Content of organic acids and phthalides compound in main roots and fibrous roots of *A. sinensis* under different drying methods

| 干燥方式 | 部位 | 有机酸类化合物/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) | | 苯酞类化合物/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) | | | |
|----------|----|---|-------------------------------|--|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| | | 绿原酸 | 阿魏酸 | 洋川芎内酯 H | 洋川芎内酯 I | 丁烯基苯酞 | 藁本内酯 |
| ND | 主根 | 628.86 ± 10.71 ^{de} | 1 511.71 ± 20.48 ^d | 96.33 ± 4.28 ^b | 413.11 ± 14.31 ^e | 487.03 ± 9.48 ^e | 2 797.48 ± 21.41 ^d |
| | 须根 | 133.47 ± 6.49 ^F | 470.10 ± 10.15 ^F | 39.66 ± 3.99 ^{BC} | 179.29 ± 10.11 ^D | 161.79 ± 9.48 ^E | 1 528.49 ± 16.81 ^D |
| HAD | 主根 | 422.02 ± 11.24 ^e | 1 309.10 ± 18.49 ^e | 89.35 ± 1.94 ^e | 704.17 ± 8.90 ^d | 503.74 ± 13.79 ^{de} | 2 572.29 ± 27.10 ^e |
| | 须根 | 120.09 ± 7.25 ^F | 528.34 ± 17.99 ^E | 36.99 ± 6.07 ^C | 160.89 ± 10.21 ^E | 167.50 ± 6.41 ^E | 1 389.67 ± 14.08 ^F |
| VD | 主根 | 639.97 ± 14.68 ^d | 1 840.17 ± 21.66 ^c | 97.95 ± 9.22 ^b | 754.34 ± 14.33 ^c | 542.70 ± 12.60 ^d | 3 702.02 ± 30.17 ^c |
| | 须根 | 152.83 ± 9.15 ^{CD} | 678.85 ± 10.34 ^D | 44.35 ± 5.48 ^B | 176.00 ± 10.00 ^D | 276.13 ± 7.92 ^C | 1 422.11 ± 12.04 ^E |
| MVD | 主根 | 677.60 ± 11.07 ^e | 1 912.87 ± 24.11 ^b | 134.26 ± 4.37 ^a | 811.43 ± 8.79 ^b | 790.61 ± 16.33 ^b | 4 079.12 ± 14.72 ^b |
| | 须根 | 164.65 ± 6.48 ^C | 924.91 ± 10.62 ^C | 45.46 ± 5.60 ^B | 333.65 ± 11.22 ^B | 238.96 ± 8.24 ^D | 2 345.17 ± 25.01 ^B |
| VFIRD | 主根 | 855.16 ± 15.14 ^b | 1 841.17 ± 20.16 ^c | 82.20 ± 3.13 ^{cd} | 816.54 ± 13.97 ^b | 685.09 ± 10.27 ^c | 3 941.39 ± 22.79 ^{bc} |
| | 须根 | 228.74 ± 5.48 ^B | 1 064.65 ± 9.48 ^B | 44.31 ± 3.08 ^B | 217.93 ± 9.78 ^C | 299.56 ± 6.70 ^B | 2 180.85 ± 16.85 ^C |
| US-VFIRD | 主根 | 950.96 ± 12.48 ^a | 2 208.97 ± 22.67 ^a | 97.95 ± 7.44 ^b | 1 011.11 ± 10.39 ^a | 1 431.82 ± 20.14 ^a | 4 692.48 ± 23.66 ^a |
| | 须根 | 251.85 ± 7.33 ^A | 1 309.10 ± 14.60 ^A | 68.02 ± 5.28 ^A | 413.11 ± 7.45 ^A | 320.16 ± 6.89 ^A | 2 572.29 ± 18.20 ^A |

同列不同小写字母表示主根含量差异显著 ($P < 0.05$), 同列不同大写字母表示须根含量差异显著 ($P < 0.05$)

different lowercase letters in the same column indicate significant differences in main root content ($P < 0.05$) and different capital letters in the same column indicate significant differences in fibrous root content ($P < 0.05$)

67.74%和 82.42%, 呈极显著 ($P < 0.01$), 这是因为超声波作为一种新型的非热物理干燥技术, 其独特的空化、机械以及热效应可以降低固-液体系中的传质阻力^[31], 结合具有脱水速度快、能量消耗低、加热均匀等优点的真空远红外技术, 在亚大气压下有效防止了天然活性化合物的热损伤和氧化损伤, 因此 US-VFIRD 后样品中活性物质含量较高。此外, ND 和 VD 处理后样品主根中绿原酸含量无显著差异 ($P > 0.05$), 但是须根中含量差异显著 ($P < 0.05$)。

3.3.2 不同干燥方式对当归营养成分的影响 多糖、总酚和总黄酮作为当归基本的营养成分, 其含量的变化对物料品质的整体评价有至关重要的影响。其中总酚和总黄酮属生物活性物质, 化学性质不稳定, 长时间高温条件会加速其降解。不同干燥方式下样品的营养成分含量如表 3 所示, 6 种干燥方式处理后当归主根和须根样品中多糖、总酚和总黄酮呈现不同的变化趋势。VD 后干制品中多糖、总酚和总黄酮含量最低, 分别为 (275.41 ± 12.03)、(1.696 4 ± 0.069 4)、(2.271 8 ± 0.102 2) mg/g, 这是由于酚类和黄酮类是热敏性成分, 长时间与湿热空气接触使得酚类、黄酮类化合物在氧化酶的催化作用下发生氧化降解, 其次氨基酸等物质与多糖类化合物发生美拉德反应和焦糖化反应的机率增大, 因

此 HAD 后样品中营养成分较低; US-VFIRD 后多糖和总黄酮含量最高, 分别为 (462.16 ± 13.08)、(2.988 2 ± 0.093 1) mg/g, 比 HAD 后提高了 67.81%和 31.53%, 说明 US-VFIRD 对多糖和总黄酮含量的提高具有促进作用, Wang 等^[32]也得到了相同的结论; MVD 后总酚含量 [(2.300 9 ± 0.123 3) mg/g] 最高, 这是因为 MVD 利用电磁波使得样品发生分子间高频振动, 从组织细胞中裂解共价结合的多酚化合物, 有利于结合态酚从细胞壁中溢出, 从而提高了酚类物质的含量。此外, 由表 3 可知样品主根和须根各营养成分含量差异显著 ($P < 0.05$), 主根中各成分含量约是须根的 1.5~2.0 倍。综合来看 US-VFIRD 和 MVD 后干制品风味和成分丧失较少, 有利于营养成分等活性化合物的保留。

3.3.3 不同干燥方式对当归抗氧化性的影响 DPPH 法常被用来测定天然分子自由基清除活性, 为进一步考察不同干燥方式的优劣性, 采用 DPPH 自由基清除法来测定当归体外抗氧化性, 表 3 可知不同干燥方式对样品抗氧化能力差异显著 ($P < 0.05$)且变化趋势与总酚和总黄酮含量变化相似, 说明总酚和总黄酮作为生物活性化合物, 其含量与抗氧化活性直接相关, 这与 Fu 等^[33]的观点基本一致。与 VD (45.20%) 相比, VFIRD (62.32%) 后干制品

表 3 不同干燥方式对当归主根和须根营养成分含量和抗氧化性的影响

Table 3 Effects of different drying methods on nutrient content and antioxidant properties of main roots and fibrous roots of *A. sinensis*

| 干燥方式 | 部位 | 多糖/(mg·g ⁻¹) | 总酚/(mg·g ⁻¹) | 总黄酮/(mg·g ⁻¹) | 抗氧化能力/% |
|----------|----|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| ND | 主根 | 329.38±10.29 ^d | 1.813 7±0.092 4 ^c | 2.478 1±0.071 8 ^c | 43.07±3.44 ^c |
| | 须根 | 180.29±7.28 ^C | 0.872 8±0.045 1 ^D | 1.469 7±0.085 9 ^C | 39.75±2.09 ^C |
| HAD | 主根 | 353.21±8.33 ^{bc} | 1.920 5±0.080 4 ^{bc} | 2.673 6±0.097 1 ^b | 51.94±2.19 ^{bc} |
| | 须根 | 177.36±6.75 ^C | 1.208 0±0.068 9 ^{BC} | 1.301 3±0.076 2 ^D | 41.82±3.20 ^C |
| VD | 主根 | 275.41±12.03 ^e | 1.696 4±0.069 4 ^d | 2.271 8±0.102 2 ^d | 45.20±2.97 ^c |
| | 须根 | 115.79±6.98 ^E | 0.944 3±0.059 8 ^D | 1.405 7±0.091 7 ^C | 35.54±2.01 ^D |
| MVD | 主根 | 341.30±11.28 ^c | 2.300 9±0.123 3 ^a | 2.456 2±0.081 5 ^c | 54.62±1.89 ^b |
| | 须根 | 159.08±10.01 ^D | 1.166 5±0.075 1 ^C | 1.808 7±0.054 8 ^B | 50.30±2.11 ^{AB} |
| VFIRD | 主根 | 445.16±14.01 ^{ab} | 2.125 8±0.110 2 ^{ab} | 2.878 9±0.123 3 ^{ab} | 62.32±2.51 ^{ab} |
| | 须根 | 203.44±11.44 ^B | 1.359 5±0.069 9 ^A | 1.475 3±0.090 9 ^C | 51.52±1.66 ^A |
| US-VFIRD | 主根 | 462.16±13.08 ^a | 2.049 9±0.070 1 ^b | 2.988 2±0.093 1 ^a | 66.31±2.88 ^a |
| | 须根 | 235.43±9.98 ^A | 1.212 4±0.081 0 ^{AB} | 2.030 7±0.101 0 ^A | 53.59±2.79 ^A |

同列不同小写字母表示主根含量差异显著 ($P < 0.05$), 同列不同大写字母表示须根含量差异显著 ($P < 0.05$)

different lowercase letters in the same column indicate significant differences in main root content ($P < 0.05$), and different capital letters in the same column indicate significant differences in fibrous root content ($P < 0.05$)

的抗氧化性提高了 37.88%; US-VFIRD 后样品体外抗氧化性 (66.31%) 最高, ND (43.07%) 最低, 这是由于超声波的应用可以高度保持酚类、黄酮类等生物活性的结果; 其次, 当归挥发油中藁本内酯、阿魏酸等苯醌类化学物质也具有一定的抗氧化性, 一定程度上增强了其抗氧化能力; VD 与 ND 处理后样品主根抗氧化性无显著差异 ($P > 0.05$), ND 与 HAD 处理后须根中也无显著差异 ($P > 0.05$), 这可能是因为抗氧化能力是由有效活性成分等抗氧化剂提供氢供体或自由基受体抑制氧化连锁反应, ND 和 HAD 处理后样品中有效活性物质相差不大且均因长时间高温干燥引起样品中糖苷类、酚类、黄酮类化合物的氧化降解, 故抗氧化能力相对较弱。按抗氧化能力评价干燥方式的优劣, 依次为 US-VFIRD > VFIR > MVD > HAD > VD > ND。

3.4 不同干燥方式对当归综合评分的影响

由上述分析可知, 不同干燥方式对样品不同品质的影响不同, 难以判断出干燥方式的优劣, 因此采用熵权-变异系数法耦合赋权的方式来确定各指标权重系数并计算其综合评分, 有效避免了单一客观权重分配不合理的缺点, 比以往的主观赋权法更加客观的反映各指标实际所占权重, 提高了赋权方法的兼容度。

选择干燥时间、收缩率、色差、复水比、抗氧

化性、多糖、总酚、总黄酮、绿原酸、阿魏酸、洋川芎内酯 H、洋川芎内酯 I、丁烯基苯酞、藁本内酯为评价指标, 根据熵权法和变异系数法得到各评价指标的权重系数 w_{j1} 和 w_{j2} 见表 4。

表 4 不同干燥方式下当归熵权-变异系数法各指标权重
Table 4 Index weight of *Angelicae Sinensis Radix* by entropy weight-variable coefficient method under different drying methods

| 指标名称 | 熵权法 | | 变异系数法 | | w_j | |
|---------|---------|----------|----------|---------|---------|---------|
| | e_i | α | w_{j1} | β | | |
| 干燥时间 | 0.898 2 | 0.101 8 | 0.039 6 | 1.477 5 | 0.354 1 | 0.133 9 |
| 收缩率 | 0.835 8 | 0.164 2 | 0.063 9 | 0.241 0 | 0.057 8 | 0.068 7 |
| 色差 | 0.873 4 | 0.126 6 | 0.049 3 | 0.353 9 | 0.084 8 | 0.073 1 |
| 复水比 | 0.788 6 | 0.211 4 | 0.082 3 | 0.114 4 | 0.027 4 | 0.053 7 |
| 抗氧化性 | 0.792 0 | 0.208 0 | 0.081 0 | 0.155 6 | 0.037 3 | 0.062 1 |
| 多糖 | 0.828 8 | 0.171 2 | 0.066 6 | 0.178 4 | 0.042 7 | 0.060 3 |
| 总黄酮 | 0.826 2 | 0.173 8 | 0.067 6 | 0.095 1 | 0.022 8 | 0.044 4 |
| 总酚 | 0.829 2 | 0.170 8 | 0.066 5 | 0.100 9 | 0.024 2 | 0.045 3 |
| 绿原酸 | 0.856 8 | 0.143 2 | 0.055 7 | 0.244 3 | 0.058 6 | 0.064 6 |
| 阿魏酸 | 0.849 8 | 0.150 2 | 0.058 5 | 0.163 4 | 0.039 2 | 0.054 1 |
| 洋川芎内酯 H | 0.765 2 | 0.234 8 | 0.091 4 | 0.165 1 | 0.039 6 | 0.068 0 |
| 洋川芎内酯 I | 0.881 1 | 0.118 9 | 0.046 3 | 0.237 9 | 0.057 0 | 0.058 1 |
| 丁烯基苯酞 | 0.588 6 | 0.411 4 | 0.160 1 | 0.442 3 | 0.106 0 | 0.147 3 |
| 藁本内酯 | 0.817 2 | 0.182 8 | 0.071 1 | 0.202 5 | 0.048 5 | 0.066 4 |

根据公式 (15) 计算得到耦合权重系数 w_j 为 0.133 9、0.068 7、0.073 1、0.053 7、0.062 1、0.060 3、0.044 4、0.045 3、0.064 6、0.054 1、0.068 0、0.058 1、0.147 3、0.066 4，由此可以看出干燥时间、色差、丁烯基苯酞、藜本内酯等权重较高，故对干燥方式评价有重要影响。

根据熵权-变异系数法计算得到不同指标的耦合权重系数 (表 4) 和不同干燥方式的综合评分 (表 5)。由表 5 可知，不同干燥方式处理后熵权-变异系数综合评分由高到低依次为 US-VFIRD > MVD > VD > VFIRD > HAD > ND。TOPSIS 排序法是以原始数据和耦合权重系数的乘积作为评价模型，计算不同干燥工艺与最优方案和最劣方案的距离 Φ^+ 和 Φ^- ，同时计算其与最优方案的贴合度 Φ ，并按 Φ 大小排序， Φ 值越大评价结果越好，排名越高。不同干燥方式处理后根据 TOPSIS 排序法得出：US-VFIRD > VFIRD > MVD > VD > HAD > ND，基本与熵权-变异系数综合评分一致。综合来看，US-VFIRD 联合干燥

表 5 不同干燥方式下当归熵权-变异系数综合评分和 TOPSIS 排序法结果

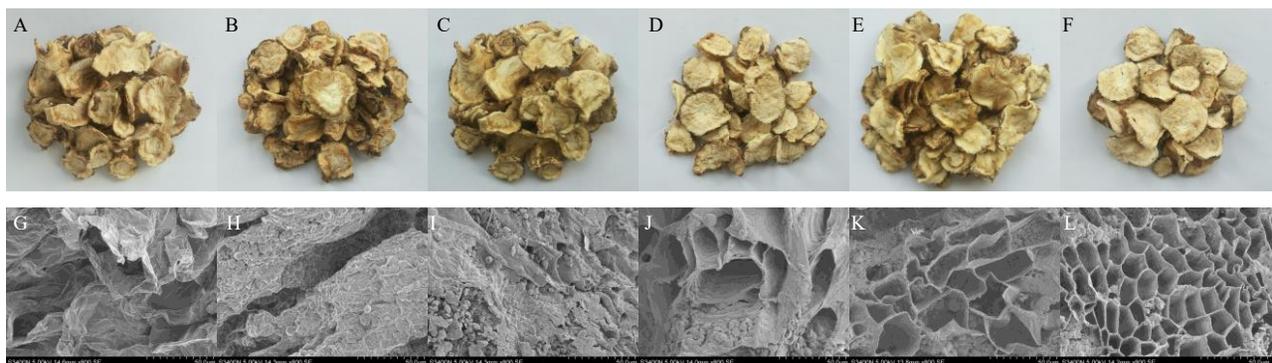
Table 5 Results of entropy weight-variable coefficient comprehensive score and TOPSIS ranking method for *Angelicae Sinensis Radix* under different drying methods

| 干燥方式 | 熵权-变异系数综合评分 | | TOPSIS | | | |
|----------|-------------|----|----------|----------|---------|----|
| | 综合评分 | 排名 | Φ^+ | Φ^- | Φ | 排名 |
| ND | 58.28 | 6 | 0.261 0 | 0.052 0 | 0.166 1 | 6 |
| HAD | 60.39 | 5 | 0.230 5 | 0.136 7 | 0.372 2 | 5 |
| VD | 65.49 | 3 | 0.194 6 | 0.165 6 | 0.459 7 | 4 |
| MVD | 68.76 | 2 | 0.129 5 | 0.207 1 | 0.615 2 | 2 |
| VFIRD | 65.34 | 4 | 0.148 9 | 0.197 3 | 0.569 8 | 3 |
| US-VFIRD | 77.94 | 1 | 0.053 0 | 0.274 6 | 0.838 3 | 1 |

后当归的品质最佳 (熵权-变异系数综合评分为 77.94, TOPSIS 相对贴适度 Φ 为 0.838 3), MVD 次之 (综合评分为 68.76), ND 处理后样品品质最差 (综合评分为 58.28)。此外, 还可看出联合干燥的综合评分高于单一干燥, 说明适宜的干燥方式组合有利于提升物料的品质和改善其风味。

3.5 不同干燥方式对当归微观结构的影响

物料的微观结构决定了宏观特性, 不同干燥方式下当归宏观组织结构和微观组织结构见图 3。由图可知, HAD 后样品微观结构较为致密, 蜂窝状结构变形严重, 细胞出现破碎和坍塌^[34], 结合干燥曲线 (图 1) 分析可知, ND 水分蒸发过程由外向内进行, 物料受到温、湿度梯度应力的影响, 内部结构较为致密, 变形收缩严重, 且干燥时间越长表面硬化现象发生的机率就越大, 从而造成样品坚硬和破裂; 长时间的高温干燥增加了水分扩散阻力, 不利于水分的蒸发溢出, 因此, HAD 干燥时间长、干燥速率低, Yao 等^[35]也得出了类似的结论; MVD 和 VFIRD 后样品内部出现蜂窝状孔隙结构, 但孔隙数目较少, 这可能是由于 MVD 和 VFIRD 时电磁波和红外辐射穿透性较强, 水分子内能增强并产生摩擦热, 蒸发溢出时形成细小的孔隙, 造成组织结构畸变; US-VFIRD 后样品微观组织结构疏松, 闭合或半闭合的微孔通道数目减少, 相邻细胞壁完整通透且有序排列, 并出现大量的蜂窝状孔隙结构, 孔隙收缩破碎程度较低, 这是因为超声波利用周期性膨胀-压缩脉动, 产生微射流和新的微孔通道, 打破固有的扩散边界层, 增强了水分子的活性, 促进水分由内部向表面迁移, 降低了固液之间的传热传质阻力, 因此, US-VFIRD 后样品脱水速率较快, 干燥时间缩短, 这也证明 US-VFIRD 是一种更具潜力的



A, G-ND B, H-HAD C, I-VD D, J-MVD E, K-VFIRD F, L-US-VFIRD

图 3 不同干燥方式下当归宏观 (A~F) 和微观 (G~L) 组织结构图

Fig. 3 Macroscopic (A—F) and microscopic (G—L) organization of *Angelicae Sinensis Radix* under different drying methods

新型干燥方式。此外，与单一干燥相比，联合干燥后样品内部均出现了蜂窝状孔隙结构且组织结构较为疏松，说明联合干燥在保证物料外观品质方面具有一定的优势。

4 结论

本实验通过对当归干燥时间、收缩率、色差、复水比、抗氧化性、多糖、总酚、总黄酮、绿原酸、阿魏酸、洋川芎内酯、藁本内酯等指标进行全面分析和比较，探究了 ND、HAD、VD 单一干燥和 MVD、VFIRD、US-VFIRD 联合干燥对当归理化性质和微观结构的影响。研究发现，熵权-变异系数法避免了单一客观权重分配不合理的缺点；其次，不同干燥方式对当归理化性质的影响差异显著 ($P < 0.05$)。MVD 干燥时间最短，US-VFIRD 次之，ND 干燥时间最长；US-VFIRD 后样品复水比 (4.33) 最高，收缩率 (0.21) 最低；从色泽来看，MVD 后样品的 L^* (74.11 ± 3.28) 最高， ΔE (8.12 ± 3.97) 最低，说明 MVD 后干制品亮度最高褐变最小，与新鲜当归最为接近，HAD 后 ΔE (21.85 ± 5.95) 最大，这是因为长时间的高温环境增大了样品发生氧化反应和美拉德反应的机率。

从有机酸类和苯酚类化合物含量分析，US-VFIRD 后样品中 6 种天然活性物质含量均显著高于其余干燥，与 HAD [$(2\ 572.29 \pm 27.10) \mu\text{g/g}$] 相比，US-VFIRD 后藁本内酯 [$(4\ 692.48 \pm 23.66) \mu\text{g/g}$] 含量分别提高了 82.42%；从基本营养成分分析，US-VFIRD 后多糖 [$(462.16 \pm 13.08) \text{mg/g}$]、总黄酮含量 [$(2.988\ 2 \pm 0.093\ 1) \text{mg/g}$] 和体外抗氧化性 (66.31%) 最高，MVD 后总酚含量 [$(2.300\ 9 \pm 0.123\ 3) \text{mg/g}$] 最高，说明联合干燥在营养成分等活性化合物的保留方面有显著优势；从微观结构分析，样品经不同干燥方式处理后内部组织结构均出现了不同程度的损伤，其中 HAD 对样品组织结构的损伤最严重，可清晰的看到微孔道破裂，孔隙基本闭合；US-VFIRD 后出现均匀规则的蜂窝状孔隙结构，说明超声波的应用，可以有效的抑制物料内部组织结构的收缩变形和断裂坍塌；此外，基于熵权-变异系数耦合得出综合评分由高到低依次为 US-VFIRD > MVD > VD > VFIR > HAD > ND，TOPSIS 排序法结论为 US-VFIRD > VFIR > MVD > VD > HAD > ND，两者结果基本一致。

综合来看，US-VFIRD 联合干燥后当归的品质最佳，且超声波作为一种新型的非热物理干燥技术，

其独特的机械、空化效应在提高干燥速率和食品品质方面有显著优势。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Nai J J, Zhang C, Shao H L, *et al.* Extraction, structure, pharmacological activities and drug carrier applications of *Angelica sinensis* polysaccharide [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 183: 2337-2353.
- [2] Bi S J, Fu R J, Li J J, *et al.* The bioactivities and potential clinical values of *Angelica sinensis* polysaccharides [J]. *Nat Prod Commun*, 2021, 16(3): 1-18.
- [3] Hou C Y, Yin M S, Lan P, *et al.* Recent progress in the research of *Angelica sinensis* (Oliv.) Diels polysaccharides: Extraction, purification, structure and bioactivities [J]. *Chem Biol Technol Agric*, 2021, doi: 10.1186/S40538-021-00214-X.
- [4] Zhao X H, Wei Y Y, Gong X, *et al.* Evaluation of umami taste components of mushroom (*Suillus granulatus*) of different grades prepared by different drying methods [J]. *Food Sci Hum Wellness*, 2020, 9(2): 192-198.
- [5] Shi X W, Yang Y, Li Z Y, *et al.* Moisture transfer and microstructure change of banana slices during contact ultrasound strengthened far-infrared radiation drying [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2020, 66: 102537.
- [6] Wang Y, Li X, Zhao P, *et al.* Physicochemical characterizations of polysaccharides from *Angelica Sinensis Radix* under different drying methods for various applications [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 121: 381-389.
- [7] Zhang C C, Liu D Q, Gao H Y. Kinetics, physicochemical properties, and antioxidant activities of *Angelica keiskei* processed under four drying conditions [J]. *LWT*, 2018, 98: 349-357.
- [8] 李武强, 万芳新, 罗燕, 等. 当归切片远红外干燥特性及动力学研究 [J]. *中草药*, 2019, 50(18): 4320-4328.
- [9] Kahraman O, Malvandi A, Vargas L, *et al.* Drying characteristics and quality attributes of apple slices dried by a non-thermal ultrasonic contact drying method [J]. *Ultrason Sonochem*, 2021, 73: 105510.
- [10] 陈红光, 李晓宁, 李晨洋. 基于变异系数熵权法的水资源系统恢复力评价: 以黑龙江省 2007—2016 年水资源情况为例 [J]. *生态经济*, 2021, 37(1): 179-184.
- [11] 王玉霞, 武晓玉, 夏鹏飞, 等. 基于熵权 TOPSIS 模型对经不同方法干燥的苦水玫瑰品质的综合评价 [J]. *中成药*, 2021, 43(5): 1241-1248.
- [12] 刘盼盼, 任广跃, 段续, 等. 饱和蒸汽-热泵组合干燥处理对白萝卜干燥特性及品质的影响 [J]. *中国食品学报*, 2022, 22(5): 157-168.

- [13] William H. *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists* [M]. 13th ed. Arlington: The Association of Official Analytical Chemists Inc., 1980: 349-350.
- [14] Liu Y H, Sun C Y, Lei Y Q, *et al.* Contact ultrasound strengthened far-infrared radiation drying on pear slices: Effects on drying characteristics, microstructure, and quality attributes [J]. *Dry Technol*, 2019, 37(6): 745-758.
- [15] Huang X P, Li W Q, Wang Y M, *et al.* Drying characteristics and quality of *Stevia rebaudiana* leaves by far-infrared radiation [J]. *LWT*, 2021, 140: 110638.
- [16] Chao E P, Tian J J, Fan L P, *et al.* Drying methods influence the physicochemical and functional properties of seed-used pumpkin [J]. *Food Chem*, 2022, 369: 130937.
- [17] Aksoy A, Karasu S, Akcicek A, *et al.* Effects of different drying methods on drying kinetics, microstructure, color, and the rehydration ratio of minced meat [J]. *Foods*, 2019, 8(6): E216.
- [18] Xu X, Zhang L, Feng Y B, *et al.* Ultrasound freeze-thawing style pretreatment to improve the efficiency of the vacuum freeze-drying of okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) and the quality characteristics of the dried product [J]. *Ultrason Sonochem*, 2021, 70: 105300.
- [19] Zhao Y T, Zhu H Z, Xu J X, *et al.* Microwave vacuum drying of lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) seeds: Effects of ultrasonic pretreatment on color, antioxidant activity, and rehydration capacity [J]. *LWT*, 2021, 149: 111603.
- [20] 葛莉, 姚园园, 康天兰, 等. 不同收获期贯叶连翘花中抗氧化能力、主要活性物质变化及挥发性组分分离鉴定 [J]. *草业学报*, 2017, 26(9): 66-74.
- [21] Nencini C, Menchiari A, Franchi G G, *et al.* *In vitro* antioxidant activity of aged extracts of some Italian *Allium* species [J]. *Plant Foods Hum Nutr*, 2011, 66(1): 11-16.
- [22] 姜春慧, 万芳新, 谢永清, 等. 基于 AHP-熵权法的甜叶菊叶片远红外干燥工艺优化 [J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2022, 50(6): 101-109.
- [23] 蒋文恬. 我国商贸流通灰色关联产业结构优化效应研究 [J]. *商业经济研究*, 2018(10): 172-175.
- [24] Jiang J R, Ren M, Wang J Q. Interval number multi-attribute decision-making method based on TOPSIS [J]. *Alex Eng J*, 2022, 61(7): 5059-5064.
- [25] Dolatabadi A M, Masoumi S, Lakzian E. Optimization variables of the injection of hot-steam into the non-equilibrium condensing flow using TOPSIS method [J]. *Int Commun Heat Mass Transf*, 2021, 129: 105674.
- [26] Wu B G, Guo X Y, Guo Y T, *et al.* Enhancing jackfruit infrared drying by combining ultrasound treatments: Effect on drying characteristics, quality properties and microstructure [J]. *Food Chem*, 2021, 358: 129845.
- [27] He X, Lin R, Cheng S S, *et al.* Effects of microwave vacuum drying on the moisture migration, microstructure, and rehydration of sea cucumber [J]. *J Food Sci*, 2021, 86(6): 2499-2512.
- [28] Jiang M M, Sun J, Obadi M, *et al.* Effects of ultrasonic vacuum drying on the drying kinetics, dynamic moisture distribution, and microstructure of honey drying process [J]. *Food Sci Technol Int*, 2021, 27(5): 426-440.
- [29] Qiu G, Jiang Y L, Deng Y. Drying characteristics, functional properties and *in vitro* digestion of purple potato slices dried by different methods [J]. *J Integr Agric*, 2019, 18(9): 2162-2172.
- [30] 代建武, 杨升霖, 王杰, 等. 微波真空干燥对香蕉片干燥特性及品质的影响 [J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S1): 493-500.
- [31] Tao Y, Li D D, Siong C W, *et al.* Comparison between airborne ultrasound and contact ultrasound to intensify air drying of blackberry: Heat and mass transfer simulation, energy consumption and quality evaluation [J]. *Ultrason Sonochem*, 2021, 72: 105410.
- [32] Wang J, Vanga S K, Raghavan V. High-intensity ultrasound processing of kiwifruit juice: Effects on the ascorbic acid, total phenolics, flavonoids and antioxidant capacity [J]. *LWT*, 2019, 107: 299-307.
- [33] Fu Z F, Han L F, Zhang P, *et al.* *Cistanche* polysaccharides enhance echinacoside absorption *in vivo* and affect the gut microbiota [J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 149: 732-740.
- [34] Feng L, Xu Y Y, Xiao Y D, *et al.* Effects of pre-drying treatments combined with explosion puffing drying on the physicochemical properties, antioxidant activities and flavor characteristics of apples [J]. *Food Chem*, 2021, 338: 128015.
- [35] Yao L Y, Fan L P, Duan Z H. Effect of different pretreatments followed by hot-air and far-infrared drying on the bioactive compounds, physicochemical property and microstructure of mango slices [J]. *Food Chem*, 2020, 305(C): 125477.

[责任编辑 郑礼胜]