DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250212002

引用格式: 耿君君, 谢永康, 孟建升, 等. 基于熵权逼近理想排序法评价干燥方式对黄芪品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(9): 230–239.

GENG JJ, XIE YK, MENG JS, *et al*. Evaluation of the effects of drying methods on the quality of *Astragalus membranaceus* based on technique for order preference by similarity to an ideal solution analysis [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(9): 230–239. (in Chinese with English abstract).

基于熵权逼近理想排序法评价干燥方式对黄芪品质的影响

耿君君[1], 谢永康[1*], 孟建升[2], 李 萍[1], 韩俊豪[1], 李 锟[3], 赵 妍[1], 杨 慧[1]

(1. 河南省农业科学院农产品加工研究中心, 郑州 450002; 2. 商丘市产品质量检验检测中心, 商丘 476000; 3. 黄河科技学院医学部, 郑州 450005)

摘 要: 目的 基于熵权逼近理想排序法评价干燥方式对黄芪品质的影响。**方法** 本研究采用热风干燥(hot air drying, HAD)、热泵干燥(heat pump drying, HPD)、碳纤维远红外联合热泵干燥技术(carbon fiber far-infrared combined heat pump drying, CFFCHPD)、中短波红外干燥(medium short wave infrared drying, MSWID)、真空脉动干燥(vacuum pulsed drying, VPD)、真空冷冻干燥(freeze drying, FD) 6 种方式对黄芪进行干燥试验, 比较黄芪的干燥时间、单位能耗、色泽、感官品质以及有效成分, 并采用熵权逼近理想排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)进行综合评价。**结果** 结果表明, CFFCHPD 干燥黄芪时间最短、能耗最低, 分别为(0.15±0.00) h 与(3.41±0.03) (kW・h)/kg, 且干燥后样品 L^*最高, 可对保持黄芪原有色泽有积极作用, 其他处理组黄芪则发生了不同程度的褐变。VPD 组感官评分最高, 但与其他处理组差异并不显著。CFFCHPD 可赋予黄芪更好的口感, 使其鲜味、甜味和丰富度处于较高水平。同时保留黄芪中的甲苷、多糖和毛蕊异黄酮葡萄糖苷等营养成分, 获得更优的品质。相关性分析表明黄芪 L^*与甲苷含量呈负相关, 与多糖含量呈正相关, a^*与黄芪甲苷含量正相关, 可通过色泽间接判断黄芪甲苷与多糖的含量。**结论** CFFCHPD 综合排序第一, 说明 CFFCHPD 是一种有前途的适用于黄芪干燥的联合干燥技术, 该研究结果为黄芪高效保质干燥提供一定数据支持。

关键词: 黄芪; 联合干燥; 甲苷; 相关性分析; 熵权逼近理想排序法评价

Evaluation of the effects of drying methods on the quality of *Astragalus membranaceus* based on technique for order preference by similarity to an ideal solution analysis

GENG Jun-Jun[1], XIE Yong-Kang[1*], MENG Jian-Sheng[2], LI Ping[1], HAN Jun-Hao[1], LI Kun[3], ZHAO Yan[1], YANG Hui[1]

收稿日期: 2025-02-12

基金项目: 河南省农业科学院基础性科研工作项目(2024XK12)

第一作者: 耿君君(1998—), 女, 硕士, 主要研究方向为食品工程。E-mail: gengjunjun98@163.com

***通信作者:** 谢永康(1992—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农业工程。E-mail: xykang@hnagri.org.cn

(1. *Agricultural Product Processing Research Center*, *Henan Academy of Agricultural Sciences*, *Zhengzhou* 450002, *China*; 2. *Shangqiu Product Quality Inspection and Testing Center*, *Shangqiu* 476000, *China*; 3. *Medical Department*, *Huanghe Science & Technology University*, *Zhengzhou* 450005, *China*)

ABSTRACT: Objective To evaluate of the effects of drying methods on the quality of Astragalus membranaceus based on technique for order preference by similarity to an ideal solution analysis. **Methods** In this study, 6 kinds of drying methods including hot air drying (HAD), heat pump drying (HPD), carbon fiber far infrared combined heat pump drying (CFFCHPD), medium short wave infrared drying (MSWID), vacuum pulsating drying (VPD), and vacuum freeze-drying (FD) were conducted to drying experiments. The effect of the drying time, unit energy consumption, color, sensory quality and effective components of *Astragalus membranaceus* were evaluated by technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS). **Results** The results showed that CFFCHPD had the shortest drying time and lowest energy consumption for *Astragalus membranaceus*, with (0.15±0.00) h and (3.41±0.03) (kW・h)/kg, respectively. The L^* of the dried sample was the highest, which could have a positive effect on maintaining the color of *Astragalus membranaceus*, while other treatments showed varying degrees of browning. The VPD had the highest sensory score, but there was not significant difference with other treatments. CFFCHPD had a better taste, making its freshness, sweetness and richness at a high level. At the same time, retaining the nutritional components such as astragalosides, polysaccharides and calycosin-7-glucoside in *Astragalus membranaceus* could achieve better quality. Correlation analysis showed that the L^* was negatively correlated with the content of astragalosides and positively correlated with the content of polysaccharides. The a^* was positively correlated with the content of astragalosides, and the content of astragalosides and polysaccharides could be indirectly judged by color. **Conclusion** The comprehensive ranking of CFFCHPD ranked first, indicating that CFFCHPD is a promising combined drying technology suitable for drying traditional Chinese medicinal materials. This research result provides certain data support for efficient and high-quality drying of *Astragalus membranaceus*.

KEY WORDS: *Astragalus membranaceus*; combined drying; astragalosides; correlation analysis; technique for order preference by similarity to an ideal solution evaluation

0 引　言

黄芪为豆科植物蒙古黄芪[*Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. var. mongholicus (Bge.) Hsiao]或膜荚黄芪[*Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge.]的干燥根，主要含有黄酮类、皂苷类、氨基酸、多糖及多种微量元素[1]。具有增强免疫系统功能、抗肿瘤、抗心肌缺血等功效，其中甲苷和毛蕊异黄酮葡萄糖苷具有抗炎、抗氧化、抗肿瘤等多种药理活性，在临床应用、保健食品、化妆品等方面都具有极大的应用价值[2]。新鲜黄芪含水量较高，且富含碳水化合物，长时间储存和运输过程中易出现霉变和腐烂现象，造成巨大经济损失[3]。为保持其药效成分和经济价值，防止黄芪品质劣变，需探索适当的加工技术[4]。

产地加工是黄芪生产过程中质量控制的关键一步，很大程度决定着黄芪的品质[5]。由于黄芪中含有的挥发油、多糖成分在高温干燥过程中易分解，因此选择合适的干燥方法对于黄芪药用价值的发挥有重要意义[4]。目前黄芪常见的干燥方式有自然晾晒和热风干燥(hot air drying, HAD)。自然晾晒周期长、干燥过程难控制，易受天气影响对产品产生二次污染，霉变风险大[4]。HAD 往往会导致产品风味、颜色和营养物质的降解，干燥过程中造成的细胞损伤会导致药效成分的大量损失[6]。张雪峰[7]对黄芪切片 HAD 动力学进行研究，获得了 HAD 的最优工艺参数，但未分析干燥后黄芪药效成分。黄芪干燥温度一般控制在 60 ℃以下，当干燥温度过高会引起黄芪表面因干燥过快出现结壳硬化现象，阻碍其内部水分扩散，同时高温会引起黄芪表面发生美拉德反应出现褐变现象，影响黄芪品质[8–9]。亦有研究表明，干燥温度过高会导致其有效成分损失，影响黄芪整体质量水平及临床效果[1,10]。相比于 HAD，热泵干燥(heat pump drying, HPD)能满足黄芪低温干燥的发展趋势，同时保持物料的色泽和营养品质，达到低碳、环保、高质干燥[4]。目前在食品领域已有较多研究，而在药食同源领域应用较少。红外辐射干燥由于温度和水分传递方向相同，具有效率高、传热快等优点，因此在干燥技术中占有一席之地。然而，黄芪的干燥速率、色泽和营养成分受远红外波长和曝光时间影响显著[9]。不同药材有特定的红外吸收带，允许特定波长通过的智能红外干燥技术更适用于黄芪干燥[4]。远红外-热泵干燥技术(carbon fiber far-infrared combined with heat pump drying, CFFCHPD)不但能较好地保持黄芪的品质和有效活性成分，

而且与单一干燥相比能耗更低、干燥速率更快、对环境几乎无污染[11]。联合干燥可弥补单一干燥方式的局限性，热泵通过低温除湿，可减少黄芪中挥发油、苷类等热敏性成分的损失，提高黄芪干燥后的活性成分含量，保持药效[12]；远红外可实现黄芪由内而外均匀加热，避免外部过热产生焦壳而阻止水分扩散的现象，解决了 HPD 后期物料内部水分难以扩散排除的问题，从而实现高效、节能、均匀干燥[13]。相较于其他联合干燥，太阳能联合热泵易受天气制约，干燥周期长[14]，CFFDHPD 可实现温湿度精准控制，稳定运行。热风联合微波干燥温度较高，易导致黄芪表面结壳，且不利于热敏性物质的保留[15]。因此，CFFCHPD 在黄芪干燥中具备较大发展潜力。真空冷冻干燥(freeze drying, FD)作为一种新型低温干燥方式，可以充分保留黄芪的有效成分，保持物料的色泽和形状，但也存在能源消耗大、成本高、干燥时间长等问题[16]。张卫鹏等[17]运用真空脉动干燥(vacuum pulsed drying, VPD)对茯苓丁进行干燥研究，结果表明VPD具有干燥时间短、品质好和破碎率低等优点，但该技术在黄芪干燥领域的研究甚少。近年来我国中草药产业发展迅速，对黄芪等中草药的干燥质量、干燥效率等方面也有了更为严苛的要求。

熵权法是一种纯粹客观的评价方法，是衡量决策中不同信息源分散程度的加权方法之一，主要根据各指标传递给决策者的信息量大小来确定权重[18]。作为一种客观综合的定权方法，可避免人为因素对各评价指标加权的干扰，使评价结果更加客观，已成为药食同源工艺优化的重要手段。熵权逼近理想排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)能将评价对象中多指标转化为综合指标，计算评价指标与参考对象之间的欧式距离，以达到质量评价的目的[19]。由于药食同源本身“整体性”与“系统性”的特点，若以单一指标进行工艺优化，不能保证黄芪的整体质量。近年来，中药质量评价逐渐向多指标评价、多维度方向发展，使结果更加合理、科学、全面、准确[20]。

本研究针对现有黄芪干燥技术单一、干燥品质不稳定等问题，采用了 HAD、HPD、CFFCHPD、中短波红外干燥(mediumshort wave infrared drying, MSWID)、VPD、FD 对黄芪进行干燥，对干燥后黄芪的干燥特性(干燥时间、单位能耗)和理化特性(复水比、色泽、风味、甲苷和毛蕊异黄酮葡萄糖苷等)进行检测，并进行感官和综合评价，以期获得最适合黄芪的干燥技术，为黄芪保质、高效干燥提供一定的数据支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜黄芪购于河南省郑州市金水区，随机选取长势均匀且无病虫害的黄芪作为试验样本，除去杂质，分级，洗净，切片[厚度(4±1) mm]，称重干燥。

乙腈、甲醇、4%浓氨水、葡萄糖、浓硫酸、苯酚(分析纯，国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

碳纤维远红外联合热泵干燥机、中短波红外干燥机、真空脉动干燥机(为本团队自主研发设计)；LGJ-25E 型冷冻干燥机(四环福瑞科仪科技发展北京有限公司)；CR-10PLUS 型台式色差仪(日本 KONICA MINOLTA 公司)；TMS-Pro 型质构仪(美国 FTC 公司)；DZKW-C 型恒温水浴锅、FX101-O 型电热鼓风干燥箱(上海树立仪器仪表有限公司)；SA402B 型电子舌(日本 INSENT 公司)；SHZ-D(III)循环水式多用真空泵(河南省予华仪器有限公司)；1260 Infinity III 型液相色谱仪(美国安捷伦科技有限公司)；Read Max1200 型光吸收型全波长酶标仪(上海闪谱生物科技有限公司)；MJ-PB80F02 型破壁机(美的集团股份有限公司)。

1.3 方 法

本研究中 FD 需提前于–60 ℃预冻 20 h，然后将提前预冻的黄芪切片放入冷冻干燥机中在 1 Pa 和–65 ℃下干燥 20 h。其他 5 种干燥方式均为 60 ℃下干燥，风速为 1 m/s，在设定温度下对设备预热，待设备达到设定温度后，将黄芪(100±1) g 放入设备中[初始湿基含水率为(63.32±1.65)%]，每隔 1 h 测定样品的质量变化，至黄芪湿基含水率低于 8%时结束试验，记录干燥时间和所用电量。其中 CFFDHPD 红外功率为 150 W，波长为 2.8~3.1 μm，红外加热板与样品间距离为 5 cm。MSIRD 处理样品时，干燥器中平行放置 5 个不同辐射功率的红外灯，包括 2 个中波(2~4 μm)和 3 个短波(0.75~2.00 μm)红外灯(250 W)。每组试验重复 3 次，取平均值，最后将干燥后的物料封装并贴标签做记录。

1.4 指标测定与方法

1.4.1 单位能耗

脱除单位质量的水所需的能耗(U)指黄芪干燥至终点所消耗的总能量与该干燥时间内去除水分总质量的比值。按式(1)计算。

$$U=\frac{Q}{m} \tag{1}$$

式中：U 为单位能耗，(kW·h)/kg；Q 为干燥过程中的总能耗，kW·h；m 为干燥结束时物料脱水的质量，kg。

1.4.2 复水比

准确称取(5.0±0.5) g 的干黄芪切片，于 45 ℃蒸馏水中浸泡 30 min，沥干称重，每组至少测定 3 次，取平均值。复水比按式(2)计算。

$$R_R=\frac{m_2}{m_1} \tag{2}$$

式中：R_R 为复水比，g:g；m_2 为复水后黄芪切片沥干表面水分的质量，g；m_1 为复水前黄芪切片的质量，g。

1.4.3　色　泽

将干燥后的黄芪粉碎，于 60 目筛过滤，经台式色差仪测定干燥后黄芪粉的 L^*(明亮度)、a^*(红绿值)与 b^*(黄蓝值)，每组样品测定 3 次，取其平均值。

1.4.4　感官评价

邀请 7 位身体健康，无感官方面缺陷的食品专业研究生组成感官评定小组，并进行综合感官评价专业培训，对干燥后的黄芪片色泽、气味、组织状态、杂质进行评定，4 个指标占比均为 25%。具体评价标准见表 1。

表 1　黄芪切片感官评价标准

Table 1　Sensory evaluation criteria for sliced *Astragalus membranaceus*

指标	21~25 分	11~20 分	10 分以下
色泽	样品呈淡黄色，无明显褐变	部分样品呈深黄色，有可见褐变	大部分样品出现明显褐变
气味	有黄芪淡淡的自然香味，入口甘甜，无其他异味	有黄芪淡淡的自然香味，有轻微苦味或焦糊味	无黄芪香味，入口较苦或有其他异味
组织状态	为类圆形切片，组织完整，无明显变形	为类圆形切片，部分样品有变形或碎片	样品出现不规则形状，变形严重
杂质	无明显可见杂质	部分样品有杂质	存在较多杂质

1.4.5　质　构

参考 LV 等[21]的方法，每组分别取 3 个大小、形状相对接近的黄芪片样品测定其硬度。采用直径 75 mm 圆形探头，触发力 30 N，测试速度 0.15 mm/s，距离 15 mm，压缩程度 50%。

1.4.6　电子舌测定

准确称取 30 g 样品于破壁机中，加入 150 mL 去离子水，打碎混匀 90 s，将混匀后的样品转移到离心管中，3000 r/min 离心 5 min，取上清液用于测试。各样品溶液和试剂溶液温度保持室温。味觉传感器和陶瓷参比电极共清洗 222 s，平衡 30 s，样品测量 30 s，回味测量 30 s。每个样品重复 3 次，每组样品测定 3 次。

1.4.7　化学品质

甲苷(每次精密称取 1 g 样品)和毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量(每次精密称取 2 g 样品)的测定参照《中国药典 2020 版》高效液相色谱法(通则 0512)；多糖含量的测定采用苯酚-硫酸法。每组样品测定 3 次，取平均值。

1.5　TOPSIS 分析

TOPSIS 可减少主观因素影响，以客观、全面的特点广泛应用于中药质量评价[22]。熵权法通过构建各个评价指标的判断矩阵得到各指标的熵，从而客观地给各指标赋予权重。TOPSIS 常用于解决多指标多方案的评价与排序，从而判断黄芪不同干燥方式的优劣[23]。参考鲁梦琪等[23]的方法，计算如式(3)~(7)所示。

$$X_{ij}=(X_{ij}-\min[X_{ij}, \ldots, X_{nj}])/(\max[X_{ij}, \ldots, X_{nj}]-\min[X_{ij}, \ldots, X_{nj}]) \quad (3)$$

$$P_{ij}=X_{ij}/\sum_{i=1}^{n} X_{ij}\ (i=1, \ldots, n;\ j=1, \ldots, m) \quad (4)$$

$$e_j=-k\sum_{i=1}^{n} P_{ij}\ln P_{ij}\ (j=1, \ldots, m;\ k=1/\ln n>0,\ e_j>0) \quad (5)$$

$$d_j=1-e_j\ (j=1, \ldots, m) \quad (6)$$

$$w_j=d_j/\sum_{i=1}^{m} d_j\ (j=1, \ldots, m) \quad (7)$$

式中：j 为决策对象，j=1, … , m；i 为决策指标，i=1, … , n；X_{ij} 为归一化处理后各数值；P_{ij} 为第 j 项指标下第 i 个样本值占该指标的比重所得到的权重；e_j 为第 j 项指标的熵值；d_j 为信息熵冗余度，计算信息熵差异；w_j 为各项指标的权重。

本研究分别计算干燥时间、单位能耗、感官评价、甲苷含量、毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量和多糖含量 6 项指标的权重，各指标计算结果如表 2 所示。

表 2　熵值法计算权重结果

Table 2　Weight results calculated by entropy method

评价指标	e_j	d_j	w_j/%
干燥时间	0.8981	0.1019	10.81
单位能耗	0.8968	0.1032	10.94
感官评价	0.8233	0.1767	18.74
甲苷含量	0.8380	0.1620	17.18
毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量	0.8307	0.1693	17.95
多糖含量	0.7701	0.2299	24.38

初始化矩阵的建立采用式(8)计算得到加权决策矩阵 Y_{ij}，根据式(9)得到最优方案(V^+)和最劣方案(V^-)，经式(10)分别得到正、负理想解距离(D_i^+, D_i^-)，最后根据式(11)得到最优解的欧式贴进度 C_i，并以此进行排序。

$$Y_{ij}=X_{ij}w_j \quad (8)$$

$$V^+=\max(Y_{1j}, Y_{2j}, \ldots, Y_{nj})$$
$$V^-=\min(Y_{1j}, Y_{2j}, \ldots, Y_{nj}) \quad (9)$$

$$D_i^-=\left[\sum_{i=1}^{j}(Y_{ij}-V^-)^2\right]^{1/2}$$
$$D_i^+=\left[\sum_{i=1}^{j}(Y_{ij}-V^+)^2\right]^{1/2} \quad (10)$$

$$C_i=D_i^-/(D_i^-+D_i^+) \quad (11)$$

1.6　数据处理

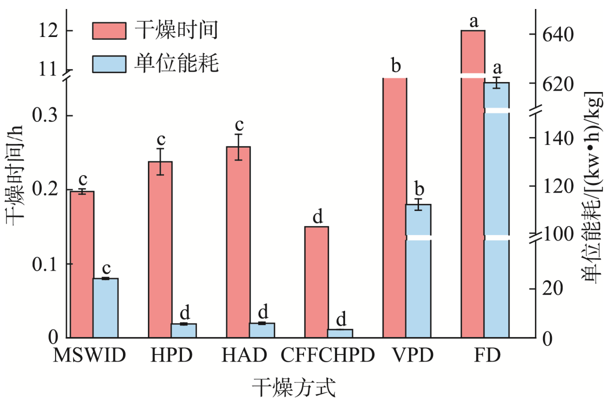
本研究使用 Excel 2021 整理数据，Origin 2022 软件绘图，使用 SPSS 21.0 进行单因素方差分析和组间 Duncan’s 多重比较，差异显著性水平设置为 0.05。每组进行 3 次平行试验，以平均值±标准偏差表示。

2　结果与分析

2.1　干燥时间和能耗

不同干燥技术下黄芪干燥时间与能耗如图 1 所示，在干燥温度 60 ℃条件下，不同的干燥方式对干燥时间和单

位能耗具有显著影响。黄芪干燥单位能耗随着干燥时间的增加而增加。FD 干燥时间最长，能耗最高分别为(12±0) h 与(620.16±2.27) (kw·h)/kg。因 FD 是在真空条件下加热使物料中的水分直接从固态升华成气态，从而除去水分，而真空度过高急剧增加能耗[24]。其次是 VPD，可能是因黄芪和电热板接触式传热，传热效率低，在干燥过程中，黄芪水分逐渐降低，黄芪收缩，与电热板的接触面积变小，使干燥时间变长。HAD 与 HPD 是以流动的热空气为干燥介质，使被干燥物料内部水分形成温度梯度导致水分蒸发[25]。随着干燥过程中黄芪水分不断流失，游离水占比减少，结合水占比增多，水分迁移路径变长，后期干燥速率减慢，因此这两种干燥时间与能耗差异不显著(P>0.05)。MSWID 干燥速率高于 HAD，主要是因为红外辐射穿透力较强，无需介质传递能量，热辐射能量直接穿透物料内部，可达到快速、高效干燥。CFFCHPD 干燥时间最短、能耗最低，相比于单一的干燥技术，热泵联合红外干燥可有效解决单一热泵干燥后期水分脱除缓慢的问题，二者优势互补，达到提高干燥速率和能源利用率的效果[26]。



注：图中组间不同小写字母表示具有显著性差异(P<0.05)，图 2 同。

图 1　黄芪干燥时间和干燥能耗

Fig.1　Drying time and energy consumption of *Astragalus membranaceus*

2.2　物理品质

2.2.1　复水比

不同干燥方式下黄芪复水比如图 2 所示。MSWID 处理黄芪复水比最大为 1.99 (g:g)，其次是 FD 组。黄芪复水性能取决于干燥过程其细胞结构的破坏程度，干燥过程中黄芪细胞不可逆转的错位和破坏易导致组织结构塌陷，使得黄芪收缩严重，复水性下降[27]。可见，复水比越高，说明干燥对样品的结构组织破坏程度越小。MSWID 因从内而外加热物料，温湿度传递方向相同，均匀加热避免了黄芪表面结壳，对物料内部破坏较小[28]，从而样品具有较高的复水比，这与 OSAE 等[29]的研究结果类似。FD 因黄芪物料水分结冰后升华，易形成多孔状结构，因此复水性强。而 HPD、CFFCHPD 和 VPD 处理组之间差异不显著。VPD 会由于干燥过程中真空和常压的压力交替对物料结构造成一定破坏，出现细胞壁渗透并诱导部分蛋白质变性的现象，造成样品细胞结构萎缩和变形，导致复水比降低[30–31]。HAD 在干燥过程中会因为表面水分蒸发过快而导致表面结壳，破坏黄芪的组织结构，导致 HAD 的复水性较差。可进一步探究黄芪干燥过程中结构变化对质构特性的影响。

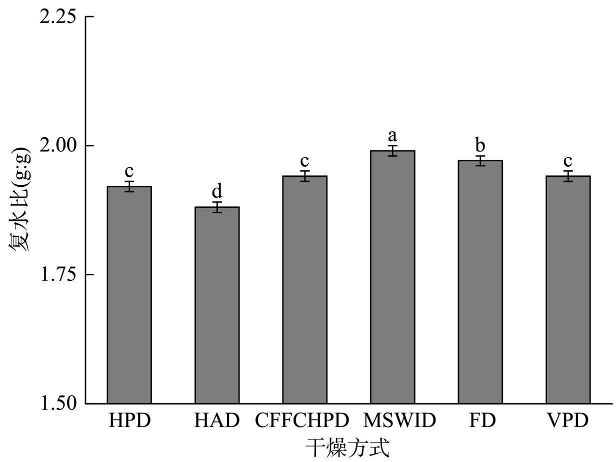


图 2　不同干燥方式黄芪复水比

Fig.2　Rehydration ratio of *Astragalus membranaceus* under different drying methods

2.2.2　色泽及感观品质

色泽是消费者选择产品最直观的指标之一，不同干燥方式下黄芪的色泽值如表 3 所示。不同干燥方式下黄芪的 L^*、a^*、b^*存在差异。酶促褐变和美拉德反应是使干燥产品色泽变化的主要原因，有氧环境易使热敏物质反应而产生氧化褐变。由表 3 可知，HAD 和 MSWID 具有较高的 b^*，说明干燥过程中出现褐变导致样品黄色加深。而 HAD 和 HPD 的 L^*较低，说明样品的亮度较低。相比之下，CFFCHPD 的亮度较高，可较好的保持样品色泽。可能是因为远红外干燥可使自由水更快析出，物料内外受热均匀，能有效避免因温度差过大造成的物料外观发生显著变化[32]。此外，相较于单一干燥方式，联合干燥可弥补 HPD 后期水分去除不及时的缺点，提高干燥效率，减少物料因干燥时间过长造成的外观品质劣变。大量研究表明，FD 过程中因真空环境阻碍了样品和氧气接触，可有效避免因酶促反应或有氧反应引起褐变现象，从而维持样品原有的色泽[33]，VPD 也因存在真空环境可有效阻止干燥过程中的色泽劣变，因此在本研究中 VPD 和 FD 的色泽参数差异不显著(P>0.05)。综上，CFFCHPD 处理能更好的保持黄芪的色泽，其次是 FD 和 VPD，HAD、HPD 和 MSWID 会造成一定程度的褐变。

黄芪在不同干燥方法下的感官评价如表 3 所示。VPD 处理的黄芪感官评价得分最高为 89.39 分，其次为 FD、HPD、CFFCHPD、HAD，MSWID 的感官评分最低为 87.75 分，但以上几种干燥方式处理的黄芪感官评价无显著性差异(P>0.05)。

表 3　不同干燥方法下黄芪的外观品质与感官品质

Table 3　Appearance and sensory quality of *Astragalus membranaceus* under different drying methods

名称	HAD	HPD	CFFCHPD	MSWID	FD	VPD
L^*	72.90±0.10^{d}	72.70±0.17^{d}	75.70±0.17^{a}	74.70±0.17^{b}	74.17±0.15^{c}	74.10±0.12^{c}
a^*	0.27±0.06^{bc}	0.37±0.06^{ab}	0.03±0.06^{d}	0.07±0.06^{d}	0.13±0.06^{cd}	0.17±0.16^{cd}
b^*	32.90±0.10^{a}	31.30±0.17^{b}	31.53±0.25^{b}	32.90±0.10^{a}	28.87±0.15^{c}	28.93±0.21^{c}
硬度/N	0.31±0.02^{e}	0.66±0.01^{ab}	0.53±0.01^{d}	0.70±0.02^{a}	0.61±0.02^{c}	0.62±0.01^{bc}
鲜味	13.21±0.06^{bc}	13.58±0.00^{a}	13.22±0.10^{bc}	13.28±0.00^{b}	13.08±0.03^{d}	13.16±0.05^{cd}
丰富度	11.50±1.26^{a}	12.09±2.09^{a}	11.50±0.32^{a}	11.00±0.92^{ab}	11.70±0.24^{a}	9.93±0.16^{bc}
咸味	2.26±0.10^{a}	2.29±0.02^{a}	2.22±0.09^{a}	1.40±0.00^{b}	0.52±0.05^{d}	1.00±0.07^{c}
甜味	8.97±0.14^{b}	8.57±0.10^{c}	8.96±0.16^{b}	8.90±0.00^{b}	8.10±0.05^{d}	9.41±0.03^{a}
苦味	7.42±0.17^{c}	7.41±0.13^{c}	7.36±0.16^{c}	7.78±0.00^{b}	7.74±0.03^{b}	8.20±0.02^{a}
感官评价/分	88.00±6.43^{a}	89.00±4.19^{a}	88.50±5.28^{a}	87.75±6.12^{a}	89.21±6.08^{a}	89.39±5.12^{a}

注：同行不同小写字母表示具有显著性差异(P<0.05)。

2.2.3　质　构

硬度表示样品断裂所需要的最大力，样品的硬度由干燥后样品内部组织结构所决定，可以直接反映黄芪片品质[34]。干燥加工会使样品的形变和内部张力增加，从而破坏和损伤其内部组织结构。不同干燥方式下黄芪的硬度如表 3 所示。由表 3 可得，MSWID 的黄芪硬度最高为 0.70 N，可能因为干燥速度较快，组织结构更加紧密，显著高于其他处理组(P<0.05)，FD、HPD、VPD，3 组之间差异较小。而 CFFCHPD 的黄芪内部组织损伤较弱，硬度相对较小，这可能是因为远红外凭借其较低的光子能量在干燥时只引起物料的热效应，不会引起化学变化，经 CFFCHPD 干燥后的黄芪收缩率低，硬度较小。HAD 的黄芪硬度最低，这可能是因为 HAD 主要通过外部加热，带走物料表面的水分，可能导致表面过度干燥，内部水分未能充分蒸发，导致硬度不均匀或降低，根据黄芪不同干燥方式后硬度的结果，表明 CFFCHPD 可赋予黄芪更好的口感。

2.3　化学品质

2.3.1　风　味

电子舌能够通过检测味觉特征[35]。电子舌系统由 5 个味觉传感器组成，能够检测酸味、苦味、涩味、鲜味和咸味物质。鲜味和甜味氨基酸均能改善食物的风味，缓和食物中苦涩味，不同干燥方式下黄芪的风味雷达图如图 3 所示，不同干燥方式的味觉传感器响应值差异不大。由表 3 可知，HPD 的鲜味最高，可能是因为黄芪在 HPD 的干燥过程中，能够保持黄芪内部的湿度平衡，减少因快速脱水而导致的风味物质的流失，一些呈鲜氨基酸保留较多。MSWID、CFFCHPD 与 HAD 之间鲜味无显著性差异(P>0.05)，FD 鲜味最低，可能因为冷冻干燥过程中，黄芪中的水分在低温下形成冰晶，黄芪结构遭到破坏，导致细胞内液流失，黄芪解冻后，流失的水分无法完全恢复，影响其鲜味。

HPD 的丰富度也高于其他组，其次为 FD、CFFCHPD、HAD，但 4 种处理之间的丰富度味觉传感器响应值并无显著性差异(P>0.05)，VPD 的丰富度最低，可能是因为 VPD 干燥时间较长，导致部分氨基酸发生分解。VPD 的甜味最高，可能是因为不同游离氨基酸的共同作用，以及氨基酸与核苷酸的协同增效作用[36]。其次为 HAD、CFFCHPD、MSWID，3 组之间差异不显著(P>0.05)。FD 甜味最低。对比不同干燥方式的滋味轮廓，HPD 处理的黄芪鲜味和丰富度最高，CFFCHPD 也能保持较强的鲜味、甜味和丰富度。

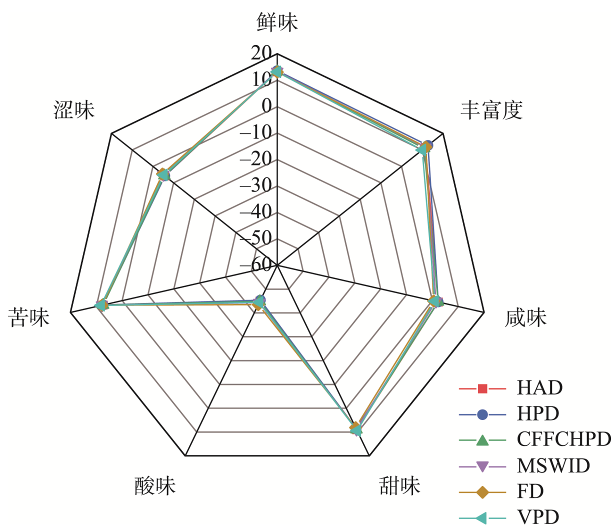


图 3　不同干燥方式下黄芪电子舌分析结果

Fig.3　Results of electron tongue analysis of *Astragalus membranaceus* under different drying methods

2.3.2　黄芪有效成分含量分析

不同干燥方式黄芪的有效成分测定结果见表 4。由表 4 可知，经 HPD 干燥后的黄芪，黄芪甲苷保留量最大。黄芪甲苷作为一种皂苷类化合物，具有热敏感性[37]，HPD 是充分利用湿空气通过蒸发器时释放的热量进行干燥，可在低

表 4　不同干燥方法下黄芪的营养品质(%)

Table 4　Nutritional quality of *Astragalus membranaceus* under different drying methods (%)

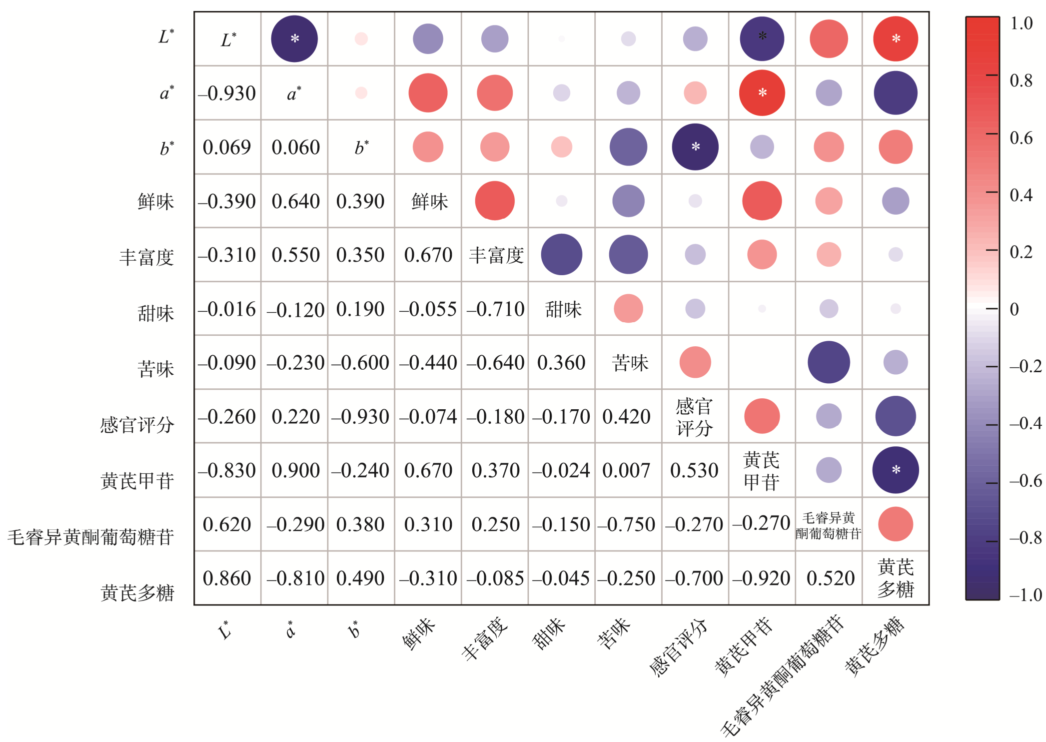
名称	甲苷	毛蕊异黄酮葡萄糖苷	多糖
HAD	1.15±0.03[ab]	0.05±0.00[cd]	11.10±0.54[b]
HPD	1.20±0.00[a]	0.07±0.00[b]	10.07±0.23[c]
CFFCHPD	1.19±0.02[a]	0.10±0.01[a]	12.37±0.09[a]
MSWID	1.05±0.03[d]	0.06±0.00[c]	12.55±0.42[a]
FD	1.08±0.01[cd]	0.05±0.00[d]	11.26±0.31[b]
VPD	1.13±0.02[bc]	0.03±0.00[e]	10.19±0.06[c]

注：同列不同小写字母表示具有显著性差异($P<0.05$)。

温下除湿，保证苷类物质的稳定性，因此经 HPD 干燥后的黄芪甲苷含量最高[38]。另外，CFFCHPD 采用远红外加热方式，可以激发红外线使黄芪内外同时干燥，减少黄芪其有效成分的流失，更好的保持黄芪甲苷的含量。MSWID 后的黄芪甲苷保留率低，可能是因为黄芪内部部分区域受热不均匀，局部高温下引发甲苷热分解或内部成分的相互转化，导致黄芪甲苷含量较低[39]。对于黄芪多糖，MSWID 与 CFFCHPD 含量较高，且两组无显著性差异，可能是因为红外辐射可实现快速升温，干燥速度较快，减少湿热环境下黄芪多糖与水分发生化学反应，更好保留黄芪多糖。VPD 处理的黄芪中多糖含量显著降低($P<0.05$)，这可能是因为在 VPD 过程中，真空常压交替进行，干燥时间较长，水分去除缓慢，导致多糖分子发生水解，影响其结构的稳定性，使多糖含量降低[40]。此外 VPD 处理黄芪长时间高温作用下使多糖的糖苷键断裂，转化为其他代谢底物被转化。同时，CFFCHPD 处理的黄芪中毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量最高为 0.10%，显著高于其他处理组。作为一种黄酮类化合物，毛蕊异黄酮葡萄糖苷极易受光、热、氧的作用被氧化分解[41]，CFFCHPD 既可在低氧条件下高效除湿，又因远红外的作用快速均匀加热，减少氧化发生。综上，CFFCHPD 能更好的保留黄芪中的有效成分，获得更优的品质。

2.3.3　黄芪感观品质和有效成分相关性分析

黄芪感观品质和有效成分相关性分析如图 4 所示，L^* 通常与黄芪的外观品质相关，能间接反映其干燥程度和内部成分的变化。然而，明亮度本身并不直接决定黄芪多糖和黄芪甲苷的含量，可能通过干燥过程中的温度、湿度和时间等因素，进而对这两种成分的含量产生影响。a^*和 b^* 的变化可能反应黄芪干燥过程中色素成分的变化，长时间干燥可能会引起黄芪内部成分发生降解或转化。由图 4 可知，L^*与黄芪甲苷和黄芪多糖的相关性系数分别为–0.83 和 0.86，说明黄芪的 L^*越高，黄芪甲苷含量越低，且黄芪多糖的含量越高。a^*与黄芪甲苷含量正相关，说明可以通过色差值结果间接判断黄芪甲苷与黄芪多糖的含量。除此之外，b^*与感官评分的相关性系数为–0.930，也可间接判断黄芪感官评分的高低。



注：*表示差异显著，$P<0.05$。

图 4　外观、味觉与营养品质含量间相关性系数矩阵

Fig.4　Correlation coefficient matrix between appearance, taste and nutritional quality content

2.4 TOPSIS 评价结果

黄芪经不同干燥方式处理后，经熵权赋分得到最终评价结果如表 5。由表 2 所列权重可知，干燥时间、单位能耗、感官评价、甲苷含量、毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量和多糖含量所占权重分别为 10.81%、10.94%、18.74%、17.18%、17.95%和 24.38%。根据排序结果可知, CFFCHPD 的评价最高，优于其他干燥技术。其中干燥特性表现优异，干燥时间最短，能耗最低，并保持黄芪甲苷、多糖和毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量处于较高水平。其次是 HPD 与 MSWID, FD 因干燥时间最长、能耗最高，排序结果最差。CFFCHPD 作为一种联合干燥技术，既可以解决单一红外干燥脱水缓慢，提高干燥效率降低能耗，还可以弥补单一热泵干燥黄芪时品质下降的缺点，提升黄芪的品质[42–43]。综上所述，CFFCHPD 在保留黄芪有效成分、提高干燥效率、降低能耗等方面均展现出了较明显优势。

表 5　黄芪经不同干燥方式的 TOPSIS 评价结果
Table 5　TOPSIS evaluation results of *Astragalus membranaceus* under different drying methods

处理组	D^+	D^-	C_i	排序
HAD	0.2555	0.2240	0.4671	4
HPD	0.2595	0.2895	0.5274	2
CFFCHPD	0.1039	0.3742	0.7828	1
MSWID	0.2742	0.2968	0.5199	3
FD	0.2748	0.2129	0.4366	6
VPD	0.3048	0.2491	0.4497	5

3 结论与讨论

本研究探究了 6 种不同干燥方式对黄芪干燥时间、能耗、感官特性、品质、风味及营养成分的影响。结果发现: 在 60 ℃的干燥温度下，CFFCHPD 处理的黄芪可有效缩短干燥时间，降低能耗。经 MSWID、FD、CFFCHPD 和 VPD 干燥后的黄芪均具有较好的复水性。CFFCHPD 处理后的 L^*最大，可最大程度地保持黄芪原有色泽，HAD、HPD 和 MSWID 处理的黄芪则发生了不同程度的褐变。不同干燥方式对黄芪的感官评价没有显著影响，经 VPD 干燥后的感官评分最高。质构结果表明, CFFCHPD 可赋予黄芪更好的口感，同时在风味上可保持黄芪鲜味、甜味和丰富度处于较高水平。通过测定干燥黄芪的有效成分发现，CFFCHPD 能更好的保留黄芪中的甲苷、多糖和毛蕊异黄酮葡萄糖苷的含量，获得更优的品质。相关性分析表明，黄芪 L^*与黄芪甲苷和黄芪多糖具有显著相关性，a^*与黄芪甲苷含量呈显著正相关，说明可以通过色差结果间接判断黄芪甲苷与黄芪多糖的含量，b^*与感官评分的相关性系数为–0.93，也可间接判断黄芪感官评分的高低，为黄芪的进一步研究提供了新思路。对干燥后的黄芪进行 TOPSIS 评价发现，CFFCHPD 是一种有前途的适用于黄芪干燥的联合干燥技术。黄芪是典型多孔介质结构，还需从孔隙结构、水分迁移方向及温湿度场在多孔介质中的变化规律等方面进行深度研究，为黄芪干燥技术与装备研究提供新方向。

参考文献

[1] BUZIAK D, GARLAND SM, NICHOLS DS, *et al*. *Astragalus membranaceus*: Impact of postharvest drying processes on yield and components of bioactive compounds [J]. Industrial Crops and Products, 2024, 209: 117918.

[2] TIAN H, AN L, WANG P, *et al*. Review of *Astragalus membranaceus* polysaccharides: Extraction process, structural features, bioactivities and applications [J]. Chinese Herbal Medicines, 2025, 17(1): 56–69.

[3] ZHANG Y, NAN M, XUE H. Isolating, identifying, and analyzing the biological characteristics of pathogens causing postharvest disease in fresh *Radix astragali* [J]. Horticulturae, 2023, 9(9): 1019.

[4] 朱文学，赵雅婷，吴建章，等. 根茎类中药材干燥技术与装备研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(1): 153–171.
ZHU WX, ZHAO YT, WU JZ, *et al*. Research progress on drying technology and equipment of rhizome traditional Chinese medicines [J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(1): 153–171.

[5] YANG K, HAN TH, LIU YJ, *et al*. Application progress of ultrasound in the production and processing of traditional Chinese herbal medicines [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 111: 107158.

[6] JIANG DL, LIU Y, LIN ZF, *et al*. Effects of combined infrared and hot-air drying on ginsenosides and drying characteristics of *Panax notoginseng* (*Araliaceae*) roots [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(1): 267–276.

[7] 张雪峰. 黄芪热风干燥机理及能效评价分析[D]. 重庆：西南大学, 2020.
ZHANG XF. *Astragalus* hot air drying mechanism and energyefficiency evaluation analysis [D]. Chongqing: Southwest University, 2020.

[8] 宫瑞泽，霍晓慧，张磊，等. 美拉德反应对中药品质的影响及调控研究进展[J]. 中草药, 2019, 50(1): 243–251.
GONG RZ, HUO XH, ZHANG L, *et al*. Advances in effects and regulation of Maillard reaction on quality of Chinese materia medica [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2019, 50(1): 243–251.

[9] DAVIDSON VJ, LI X, BROWN RB. Forced-air drying of ginseng root: Effects of air temperature on quality [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 63(4): 361–367.

[10] 韩红亮，周修腾, GARRAN TA，等. 黑人参的炮制方法、化学成分和药理作用的研究进展[J]. 中草药, 2022, 53(3): 912–920.
HAN HL, ZHOU XT, GARRAN TA, *et al*. Research progress on processing methods, chemical constituents and pharmacological action of black ginseng [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2022, 53(3): 912–920.

[11] SHAH AS, BHAT SV, MUZAFFAR K, *et al*. Processing technology, chemical composition, microbial quality and health benefits of dried fruits [J]. Current Research in Nutrition and Food Science, 2022, 10(1): 71–84.

[12] WEN YX, CHEN LY, LI BS, *et al*. Effect of infrared radiation-hot air (IR-HA) drying on kinetics and quality changes of star anise (*Illicium verum*) [J]. Drying Technology, 2021, 39(1): 90–103.

[13] 张应玲, 马朋, 易俊杰, 等. 远红外联合干燥技术在果蔬加工中的应用[J]. 农产品加工, 2020(18): 84–87.
ZHANG YL, MA P, YI JJ, *et al*. Application of far-infrared combined drying technology in fruit and vegetable processing [J]. Agricultural Products Processing, 2020(18): 84–87.

[14] THAM TC, NG MX, GAN SH, *et al*. Effect of ambient conditions on drying of herbs in solar greenhouse dryer with integrated heat pump [J]. Drying Technology, 2017, 35(14): 1721–1732.

[15] 吕豪, 吕黄珍, 王雷, 等. 微波-热风振动流化床干燥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 344–351, 248.
LV H, LV HZ, WANG L, *et al*. Design and experiment of microwave-hot-airflow vibrating dryer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 344–351, 248.

[16] SINGH P, PANDEY VK, SINGH R, *et al*. Spray-freeze-drying as emerging and substantial quality enhancement technique in food industry [J]. Food Science and Biotechnology, 2024, 33(2): 231–243.

[17] 张卫鹏, 陈浩然, 范晓志, 等. 茯苓丁真空脉动干燥特性及多目标优化[J]. 食品与机械, 2021, 37(9): 91–98, 144.
ZHANG WP, CHEN HR, FAN XZ, *et al*. Pulsed vacuum drying characteristics and multi-objective optimization of *Poria* cubes [J]. Food & Machinery, 2021, 37(9): 91–98, 144.

[18] QU W, LI J, SONG W, *et al*. Entropy-weight-method-based integrated models for short-term intersection traffic flow prediction [J]. Entropy, 2022, 24(7): 849.

[19] 贾银芝, 吴琦, 杨绪芳, 等. 基于灰色关联-TOPSIS法评价不同产地山楂质量[J]. 中草药, 2021, 52(23): 7317–7322.
JIA YZ, WU Q, YANG XF, *et al*. Quality evaluation of *Crataegi fructus* from different habitats based on grey correlation-TOPSIS method [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2021, 52(23): 7317–7322.

[20] 李天娇, 包永睿, 王帅, 等. 中药质量控制与评价创新方法研究进展及应用[J]. 中草药, 2022, 53(20): 6319–6327.
LI TJ, BAO YR, WANG S, *et al*. Research progress and application of innovative methods for quality control and evaluation of traditional Chinese medicine [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2022, 53(20): 6319–6327.

[21] LV L, LI X, ZANG E, *et al*. Specification and grade of *Saposhnikoviae radix* (*Saposhnikovia divaricata*) [J]. Chinese Herbal Medicines, 2022, 14(4): 543–553.

[22] 高伟城, 王小平, 肖晓琳, 等. 基于熵权TOPSIS法综合评价不同产地枇杷叶质量[J]. 中国药房, 2023, 34(1): 72–77.
GAO WC, WANG XP, XIAO XL, *et al*. Comprehensive evaluation of the quality of *Eriobotrya japonica* leaves from different producing areas based on entropy weight TOPSIS method [J]. China Pharmacy, 2023, 34(1): 72–77.

[23] 鲁梦琪, 张雪晶, 徐梦丹, 等. 不同干燥方式对北苍术趁鲜切制品中主要有效成分含量的影响[J]. 药物分析杂志, 2024, 44(5): 874–881.
LU MQ, ZHANG XY, XU MD, *et al*. Effect of different drying methods on the content of major active ingredients in fresh cutting products of *Atractylodes chinensis* [J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2024, 44(5): 874–881.

[24] UDDIN I, JAHAN E, SULTANA A, *et al*. Effect of different drying methods on nutritional composition, antioxidant activity and phytochemicals of *Enhydra fluctuans* [J]. Carpathian Journal of Food Science and Technology, 2024, 16(2). DOI: 10.3390/plants12223914

[25] TILIWA ES, BOATENG ID, ZHOU C, *et al*. Role of drying technologies on the drying kinetics, physical quality, aroma, and enzymatic activity of pineapple slices [J]. Sustainability, 2023, 15(22): 15906.

[26] 杨大恒, 付健, 李晓燕. 食品红外辅助冷冻干燥技术的研究进展[J]. 包装工程, 2021, 42(3): 100–106.
YANG DH, FU J, LI XY. Research progress of infrared assisted freeze-drying technology for food [J]. Packaging Engineering, 2021, 42(3): 100–106.

[27] CHANDRA A, KUMAR S, KUMAR S, *et al*. Ultrasound-assisted osmotic dehydration, followed by convective drying of papaya: Effect on physicochemical and functional quality parameters [J]. Systems Microbiology and Biomanufacturing, 2023, 3(4): 615–626.

[28] 林雅文, 刘佳晨, 牛慧玲, 等. 南美白对虾中短波红外干燥特性及模型拟合[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(9): 137–145.
LIN YW, LIU JC, NIU HL, *et al*. Medium-short-wave infrared drying characteristics and model fitting of *Penaeus vannamei* [J]. 2023, 14(9): 137–145.

[29] OSAE R, APALIYA MT, KWAW E, *et al*. Evaluation of various drying approaches on the physicochemical properties, rehydration kinetics, mathematical modeling and quality of tiger nut (*Cyperus esculentum*) [J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2023, 12: 100584.

[30] LIU ZL, XIE L, ZIELINSKA M, *et al*. Pulsed vacuum drying enhances drying of blueberry by altering micro-, ultrastructure and water status and distribution [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 142: 111013.

[31] 杨双喜, 马慧, 张海红, 等. 真空脉动干燥温度对黄花菜理化性质与微观结构的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(6): 264–277.
YANG SX, MA H, ZHANG HH, *et al*. The effect of vacuum pulsation drying temperature on the physicochemical properties and microstructure of daylily [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(6): 264–277.

[32] 周迅, 鲍官培, 余友群, 等. 空气源热泵干燥技术在粮食干燥中应用与展望[J]. 西昌学院学报(自然科学版), 2024, 38(3): 7–16, 34.
ZHOU X, BAO GP, YU YQ, *et al*. Application and prospect of air source heat pump drying technology in grain drying [J]. Journal of Xichang University (Natural Science Edition), 2024, 38(3): 7–16, 34.

[33] 马佳佳, 董明辉, 全鑫瑶, 等. 不同干燥方式对羊肚菌品质特性及复水

性能的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(20): 288–297.

MA JJ, DONG MH, QUAN XY, *et al*. Effects of different drying methods on the quality characteristics and rehydration performance of *Morchella esculenta* [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(20): 288–297.

[34] XIE Y, GENG J, HAN J, *et al*. Effect of drying technology on the physical, rehydration, flavor, and allicin content of single-clove garlic [J]. Industrial Crops and Products, 2024, 222: 120020.

[35] YAO W, WU H, CAI Y, *et al*. Comprehensive analysis of geographical impact on flavor profiles of braised chicken across Eastern, Central, and Western China using GC-IMS, E-Nose techniques and sensory evaluation [J]. Food Chemistry Advances, 2024, 5: 100808.

[36] 安朝丽门, 钱磊, 姜迎迎, 等. 不同干燥方式对滑子蘑滋味物质的影响[J]. 保鲜与加工, 2022, 22(10): 69–75.

AN CLM, QIAN L, JIANG YY, *et al*. Effects of different drying methods on the taste substances of *Pholiota microspora* [J]. Storage and Process, 2022, 22(10): 69–75.

[37] 赵灵改, 吕学泽, 刘毅, 等. 黄芪中皂苷类成分的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(12): 4937–4946.

ZHAO LG, LV XZ, LIU Y, *et al*. Research progress of saponins in *Astragalus membranaceus* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(12): 4937–4946.

[38] 张派伟, 张振迎, 武雨萌, 等. 热泵干燥技术的应用现状及展望[J]. 化学工程, 2024, 52(6): 40–46.

ZHANG PW, ZHANG ZY, WU YM, *et al*. Application and prospects of heat pump drying technology [J]. Chemical Engineering, 2024, 52(6): 40–46.

[39] 范国忠, 师希雄, 冯毓琴, 等. 温度对新鲜黄芪抗氧化能力及贮藏品质的影响[J/OL]. 甘肃农业大学学报, 1-13. [2025-03-21]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1055.S.20240428.1018.019.html

FAN GZ, SHI XX, FENG YQ, *et al*. Effect of temperature on antioxidant capacity and storage quality of fresh *Astragalus membranaceus* [J/OL]. Journal of Gansu Agricultural University, 1-13. [2025-03-21]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1055.S.20240428.1018.019.html

[40] 赵雅婷. 鲜湿切片黄芪热泵干燥特性及品质变化研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024.

ZHAO YT. Study on quality change and heat mass transfer characteristics of heat pump drying of fresh *Astragali Radix* slices [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2024.

[41] 苏优拉, 陈贵林. 黄芪中黄酮类成分的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(3): 849–857.

SU YL, CHEN GL. Research progress of flavonoids in *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(3): 849–857.

[42] 邱勋荣, 李玉姗, 万琴, 等. 真空冷冻干燥对中药材质量的影响与调控技术研究进展[J]. 中草药, 2024, 55(4): 1377–1388.

QIU XR, LI YS, WAN Q, *et al*. Research progress on effeet of vacuum freeze-drying on quality of Chinese herbal medicine and its regulation technology [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2024, 55(4): 1377–1388.

[43] 王乐意, 李长河, 刘明政, 等. 中药材干燥技术与装备研究现状[J]. 农业工程学报, 2024, 40(2): 1–28.

WANG LY, LI CH, LIU MZ, *et al*. Research status of drying technology and equipment for Chinese medicinal materials [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(2): 1–28.

(责任编辑: 蔡世佳 安香玉)