DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250815005
引用格式: 石丹荣, 董一航, 陈明珍, 等. 不同干燥方法对牛大力品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(2): 272–280.
SHI DR, DONG YH, CHEN MZ, *et al*. Effects of different drying methods on quality of *Millettia speciosa* Champ. [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(2): 272–280. (in Chinese with English abstract).

不同干燥方法对牛大力品质的影响

石丹荣[1], 董一航[2], 陈明珍[1], 黄 艳[1], 祁 静[1*], 胡德辉[3,4*]

[1. 广西中医药大学药学院, 南宁 530200; 2. 广西中医药大学瑞康临床医学院, 南宁 530200; 3. 广西中医药大学教学实验实训中心, 南宁 530200; 4. 中药学国家级实验教学示范中心(广西中医药大学), 南宁 530200]

摘 要: 目的 探究不同干燥方式对牛大力品质的影响。**方法** 以牛大力为原料, 经真空微波干燥(vacuum microwave drying, VMD)、真空干燥(vacuum drying, VD)以及热风干燥(hot air drying, HAD)处理后制成粉末, 观察其微观结构, 测定其色差、总黄酮、总酚、多糖、淀粉的含量, 以及清除 1,1-二苯基-2-苦基肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、2,2-联氮-双(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonate acid)diammonium salt, ABTS]阳离子自由基的能力。**结果** VMD 组的总黄酮(1.95±0.01) mg/g、总酚(18.14±0.18) mg/g、多糖(280.73±1.35) mg/g 含量均最高, 且 DPPH 自由基清除率(54.17±0.09)%、ABTS 阳离子自由基清除率(37.37±0.00)%均最优; VD 组次之, HAD 组最低, 三组间差异显著(P<0.05)。**结论** VMD 在保留牛大力总黄酮、总酚、多糖等成分及提升自由基清除能力上表现最优, 更适宜用于牛大力干燥。

关键词: 牛大力; 干燥方式; 功能性成分; 抗氧化活性

Effects of different drying methods on quality of *Millettia speciosa* Champ.

SHI Dan-Rong[1], DONG Yi-Hang[2], CHEN Ming-Zhen[1], HUANG Yan[1], QI Jing[1*], HU De-Hui[3,4*]

[1. *College of Pharmacy*, *Guangxi University of Chinese Medicine*, *Nanning* 530200, *China*; 2. *Ruikang Clinical Medical College*, *Guangxi University of Chinese Medicine*, *Nanning* 530200, *China*; 3. *Teaching Experiment and Training Center of Guangxi University of Chinese Medicine*, *Nanning* 530200, *China*; 4. *National Demonstration Center for Experimental Traditional Chinese Pharmacology* (*Guangxi University of Chinese Medicine*), *Nanning* 530200, *China*]

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of different drying methods on *Millettia speciosa* Champ. quality. **Methods** *Millettia speciosa* Champ. samples were processed into powder using vacuum microwave drying (VMD), vacuum drying (VD) and hot-air drying (HAD). Their microstructures were observed, and color difference,

收稿日期: 2025-08-15
基金项目: 广西自然科学基金项目(2022GXNSFBA035643); 广西中青年教师科研基础能力提升项目(2022KY0309); 广西中医药大学 2024 年大学生创新创业训练计划项目(X202410600017)
第一作者: 石丹荣(2003—), 女, 主要研究方向为食品质量与安全。E-mail: 3550961838@qq.com
***通信作者:** 祁静(1983—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品化学和食品营养学。E-mail: 769039627@qq.com
胡德辉(1988—), 男, 硕士, 实验师, 主要研究方向为功能食品研究与开发。E-mail: 895111301@qq.com

total flavonoids, total phenolics, polysaccharides and starch content were measured. Additionally, their ability to scavenge 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) and 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonate acid) diammonium salt (ABTS) positive ion free radicals was assessed. **Results** The VMD group exhibited the highest levels of total flavonoids (1.95±0.01) mg/g, total phenols (18.14±0.18) mg/g and polysaccharides (280.73±1.35) mg/g. The radical scavenging rate of DPPH (54.17±0.09)% and the positive ion radical scavenging rate of ABTS (37.37±0.00)% were both the best. VD yielded the second-highest values, while HAD produced the lowest, with significant differences among all 3 groups (P<0.05). **Conclusion** VMD optimally preserves *Millettia speciosa* Champ. components, including total flavonoids, total phenolics and polysaccharides, while enhancing radical scavenging capacity, making it the most suitable drying method.

KEY WORDS: *Millettia speciosa* Champ.; drying methods; functional components; antioxidant activity

0 引　言

美丽崖豆藤(*Millettia speciosa* Champ.)的根部别名"牛大力", 主产于广西、广东、福建、海南等省区, 又名猪脚笠、山藕等, 属药食同源植物[1], 是"四大南药"之一的华南原生药材。药理研究表明, 牛大力有提高免疫功能、抗疲劳等多种药理作用[2–3], 其含有的黄酮类、多酚类等抗氧化活性物质[4], 可中和自由基, 减少氧化应激损伤[5]。主要食用部分为秋季挖取的根部, 可用于煲汤、制药酒等[6], 且其根部成薯性与基因、环境等相关, 肉质化程度影响品质与药效[7]。新鲜药材含水量高、易霉变, 干燥是延长存储、保持药性的关键加工环节[8]。传统阴干、晒干等方法操作简便但周期长、受天气限制大、易导致药效流失[9–10]; 现代热风干燥、微波干燥等技术虽弥补了传统方法的缺陷, 但不同干燥方式的温度、压力等参数差异, 仍会显著影响植物中黄酮、多酚等活性成分的保留率, 以及抗氧化、酶抑制等药效相关指标, 最终导致药材品质与药用价值的差异[11], 如 ZHENG 等[12]发现经过真空冷冻干燥的大蒜片显示出最小的色差、更好的复水能力和理想的还原糖含量; QIAN 等[13]采用阴干、晒干和热风烘箱干燥 3 种不同方法处理覆盆子后发现, 阴干处理的覆盆子抗氧化能力最强, 鞣花酸含量提升最显著, 还具有坚果味、香蕉味等独特风味, 综合利用价值最高; MIAO 等[14]研究发现干燥方法对雪菊花茶的化学组成、抗氧化活性和抗 α-葡萄糖苷酶活性有显著影响。

目前, 牛大力干燥研究多集中于单一干燥方式的参数优化与干燥率分析, 针对多种干燥方法对其综合品质影响的系统性对比研究仍较为匮乏, 例如, 方良材等[15]仅探究了微波功率、切片厚度对牛大力微波干燥特性及动力学模型的影响, 未涉及干燥后活性成分保留、感官品质及与其他干燥方式的对比分析; 沈向阳等[16]虽优化了牛大力热风干燥参数, 却未分析参数对活性成分含量及产品储存稳定性的影响。本研究以膨大的牛大力根为对象, 分别采用真空微波干燥(vacuum microwave drying, VMD)、真空干燥(vacuum drying, VD)以及热风干燥(hot air drying, HAD)处理, 测定色差, 总黄酮、总酚等含量, 观察微观结构, 开展体外抗氧化实验, 旨在明确不同干燥工艺对牛大力品质的作用机制, 为其深加工利用提供理论支撑, 推动药食同源植物干燥工艺的精准化发展。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

牛大力: 2024 年 5 月 14 日采购于广西玉林市玉州区中药港市场, 品种为大叶牛大力; 经广西中医药大学姚绍嫦教授鉴定, 为豆科均为豆科崖豆藤属植物美丽崖豆藤的干燥根; 且所有样本外观、质地一致, 无霉变、虫蛀。

无水乙醇(分析纯, 成都市科隆化学品有限公司); 福林 酚(生物技术级)、没食子酸(纯度 99%)(上海麦克林生化科技股份有限公司); 1,1-二苯基-2-苦基肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)(纯度>97%, 梯希爱化成工业发展有限公司); 2,2'-联氮-双(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonate acid)diammonium salt, ABTS](纯度 98%, 山东科源生化有限公司); 芦丁(纯度≥97%, 上海源叶生物科技有限公司); DNS 显色液(飞净科技有限公司); 亚硝酸钠、九水合硝酸铝、无水碳酸钠、氢氧化钠、葡萄糖、2,6-二叔丁基对甲酚(butylated hydroxytoluene, BHT)(分析纯)、过硫酸钾(纯度 99.9%)(国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

TU-18100 型紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司); TDZ5-WS 型低速多管架自动平衡离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司); SQP 型电子天平(精度 0.0001 g, 赛多利斯科学仪器有限公司); YT1030 型超声波清洗机(深圳云奕科技股份有限公司); Quanta250 型电镜扫描仪(美国 FEI 公司); NR110 型色差仪(深圳市三恩驰科技有限公司); DSH-50-1 型电子水份测定仪[上海越平科学仪器(苏州制造)有限公司]; FSJ-A05N6 型粉碎机(小熊电器

股份有限公司); DZF-6030 型真空干燥箱(深圳爱特尔电子科技有限公司); DHG-9425A 型鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司); TYPE WBZ-10 型智能化静态微波真空干燥机(贵阳新奇微波工业有限责任公司); HH-8 型数显恒温水浴锅(上海力辰邦西仪器科技有限公司); UPC-II-20T 型优普系列超纯水器(四川优普超纯科技有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 不同干燥方式牛大力粉的制取

选择新鲜的牛大力充分清洗, 自然晾干表面水分后切成厚度 6.5 mm 左右的薄片, 均匀地单层放置于托盘中。分别使用 3 种不同的方法对切片分别进行干燥。

HAD: 在 50 ℃的电热鼓风干燥箱中连续干燥 9 h[17]。

VD: 在 50 ℃、压力为–0.085 MPa 的真空烘箱中连续干燥 26 h[18]。

VMD: 温度控制在 50 ℃, 压力为–0.085 MPa, 连续干燥 17 min[19]。

将干燥后的牛大力薄片分别放入粉碎机中, 每次打粉 10 s, 间隔 1 min 以避免过热。总共打粉 3 次, 粉碎后用 60 目筛过筛, 即可得到不同干燥方法的牛大力粉。

1.3.2 切片水分含量测定

取不同干燥方法处理过的牛大力切片约 2 g, 平铺于卤素水分测定仪样品舱, 测定水分含量[20]。

1.3.3 牛大力粉色差测定

取 3 种干燥方式所得的牛大力粉适量, 置于透明自封袋内, 以白板校准色差仪后, 测定并记录各样品的亮度(L^*)、红绿值(a^*)、黄蓝值(b^*) 3 项色差指标[21]。

1.3.4 牛大力粉微观结构观察

取 3 种不同干燥方式得到的牛大力粉样品粘贴于样盘的双面胶上, 喷金后分别在放大倍数为 800 倍和 1600 倍的条件下进行观察比较[22]。

1.3.5 牛大力粉总黄酮、总酚的提取及含量测定

(1)牛大力粉总黄酮、总酚的提取

参考 LIU 等[23]的方法稍作修改。精确称量 2.5 g 的牛大力粉置于具塞三角瓶中, 加入 50 mL 的 60%乙醇, 超声 30 min(温度和功率分别为 60 ℃、600 W)。超声结束后, 3000 r/min 的转速下离心 10 min, 收集上清液置于 100 mL 容量瓶。剩余沉淀加入 50 mL 的 60%乙醇重复超声提取一次, 合并 2 次上清液, 加入 60%乙醇定容至 100 mL, 摇匀备用。

(2)牛大力粉总黄酮含量的测定

配制质量浓度为 0.45 mg/mL 的芦丁标准溶液, 参考何春玫等[24]的方法测定总黄酮含量, 得到标准曲线(Y=12.333X–0.0415, r^2=0.9923)。取 1.3.5(1)的醇提液 10 mL 进行 3 次平行实验, 测定其吸光度。牛大力总黄酮含量按式(1)计算。

$$X=\frac{C_1\times N_1\times V_1}{m_1} \tag{1}$$

式中: X 为样品总黄酮的含量, mg/g; C_1 为样品总黄酮质量浓度, mg/mL; N_1 为稀释倍数; V_1 为样品醇提液体积, mL; m_1 为样品的质量, g。

(3)牛大力粉总酚含量的测定

配制 0.1 mg/mL 的没食子酸母液并稀释成质量浓度分别为 0.001、0.002、0.003、0.004、0.005 和 0.006 mg/mL 的溶液。后续参考王红等[25]的方法测定, 得到标准曲线(Y=1.3831X+0.0218, r^2=0.9923)。吸取 400 μL 1.3.5(1)处理后的醇提液, 平行测定各样品 3 次, 记录其吸光度。牛大力中总酚的含量按式(2)计算。

$$L=\frac{C_2\times N_2\times V_2}{m_2} \tag{2}$$

式中: L 为样品总酚的含量, mg/g; C_2 为样品总酚质量浓度, mg/mL; N_2 为稀释倍数; V_2 为牛大力醇提液体积, mL; m_2 为样品的质量, g。

1.3.6 牛大力粉多糖的提取和含量测定

多糖的提取参考苏芬丽等[26]的方法, 测定则参考王文霞等[27]的方法并稍作修改。用移液枪取 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 mL 葡萄糖溶液(质量浓度为 1 mg/mL)注入比色管。随后, 向各比色管内添加蒸馏水至 2.0 mL 与 2.0 mL DNS 试剂, 充分混合均匀后置于沸水浴中反应 5 min。反应完成后, 迅速取出并冷却。用蒸馏水定容至25 mL后, 于540 nm特征波长处测定系列溶液吸光度, 继而以葡萄糖浓度与吸光度为变量参数得到标准曲线(Y=0.058X+0.0013, r^2=0.9982)。取 0.2 mL 上述制备的水提液, 按标准曲线测定步骤进行操作, 平行测定各样品 3 次, 记录其吸光度。牛大力中多糖含量按式(3)计算。

$$T=\frac{C_3\times N_3\times V_3}{m_3} \tag{3}$$

式中: T 为样品中多糖的含量, mg/g; C_3 为样品中多糖的含量, mg/mL; V_3 为水提液体积, mL; N_3 为稀释倍数; m_3 为样品的质量, g。

1.3.7 牛大力粉淀粉的提取

参考廖夏云等[28]的方法稍作修改, 其中所用筛子为 100 目。

1.3.8 DPPH 自由基清除能力的测定

参考鲍雨婷等[29]的方法稍作修改。制备质量浓度为 25 μg/mL 的 DPPH 标准溶液, 取 1 mL 1.3.5(1)处理过的样品溶液和 8 mL DPPH 溶液, 充分摇匀, 在室温下避光 30 min, 在 517 nm 波长下测量 E_1 的吸光度值, 分别用无水乙醇分别代替 DPPH 溶液和样品溶液, 在 517 nm 波长下测量 E_2、E_0 的吸光度值; 以 BHT 作为阳性对照, DPPH 自由基的清除率(D)按式(4)计算。

$$D/\%=(1-\frac{E_1-E_2}{E_0})\times100\% \quad (4)$$

式中: E_1 为 1 mL 样品溶液+8 mL DPPH 溶液的吸光度; E_2 为 1 mL 样品溶液+8 mL 无水乙醇的吸光度; E_0 为 1 mL 无水乙醇+8 mL DPPH 溶液的吸光度。

1.3.9　ABTS 阳离子自由基清除能力的测定

参考王明茹等[30]的方法稍作修改。将 0.2 mL 浓度为 7.4 mmol/L ABTS 溶液和 0.2 mL 浓度为 2.6 mmol/L 过硫酸钾溶液混合, 配制 ABTS 母液。随后, 将该溶液于常温环境下避光保存 12~16 h, 完成保存后对其稀释, 经检测, 在 734 nm 波长处, 该稀释溶液的吸光度为 0.70±0.02。取 6 mL 已稀释的 ABTS 溶液, 与 75 μL 经步骤 1.3.5(1)处理的样品溶液充分混合, 在常温下静置 30 min, 于 734 nm 波长条件下处测量吸光度, 记 F_1。以蒸馏水分别代替 ABTS 溶液和样品溶液, 同样在在 734 nm 波长条件下测定其吸光度, 依次记为 F_2 和 F_3。并以 BHT 作为阳性对照, 按式(5)计算 ABTS 阳离子自由基的清除率(H)。

$$H/\%=(1-\frac{F_1-F_2}{F_3})\times100\% \quad (5)$$

式中: F_1 为 75 μL 样品溶液+6 mL ABTS 溶液的吸光度; F_2 为 75 μL 样品溶液+6 mL 蒸馏水的吸光度; F_3 为 75 μL 蒸馏水+6 mL ABTS 溶液的吸光度。

1.4　数据处理

每组实验重复 3 次, 所得结果表示为平均值±标准偏差, 并用 IBM SPSS Statistics 27.0.1 进行处理。

2　结果与分析

2.1　牛大力切片水分含量

实验所用的牛大力根茎如图 1 所示, 经测定, VD、VMD、HAD 3 种干燥方法得到的牛大力切片含水量分别为 (9.57±2.24)%、(10.57±0.78)%、(10.79±0.79)%, 经分析, 无显著差异(P>0.05)。



图 1　新鲜牛大力外形照片

Fig.1　Photograph of fresh *Millettia speciosa* Champ. shape

2.2　牛大力粉色差测定结果

不同干燥方式对牛大力粉色差的影响结果如表 1 所示。L^*表示亮度, 其中 HAD、VD 样品的 L^*为 91.47±0.05、91.38±0.29, 大于 VMD 样品的 88.19±0.26, 且具有显著差异(P<0.05), 表明 HAD 和 VD 的样品偏白; a^*表示红绿度, 其中 VMD 样品的 a^*较大, 为 5.48±0.12, 与其他两种样品具有显著差异(P<0.05), 表明样品偏红; b^*表示黄蓝度, 其中 VMD 样品的 b^*较大, 为 23.89±0.04, 与其他两种样品具有显著差异(P<0.05), 表明样品偏黄。在牛大力干燥过程中, HAD、VD 与 VMD 因热量传递机制、水分去除效率及对化学成分的影响不同对样品颜色产生显著差异。其中 HAD 通过对流传热实现水分缓慢蒸发, VD 借助低压环境降低水的沸点, 并以缺氧抑制氧化, 减少氧化色素的产生, 二者均能温和减少热敏性色素降解与非酶褐变[31–32]。而 VMD 因水分子在高频电磁场中振荡实现快速内部加热, 易引发局部过热, 加速美拉德反应及色素分子变化[33], 导致样品更易出现色泽加深的现象。

表 1　牛大力粉色差测定

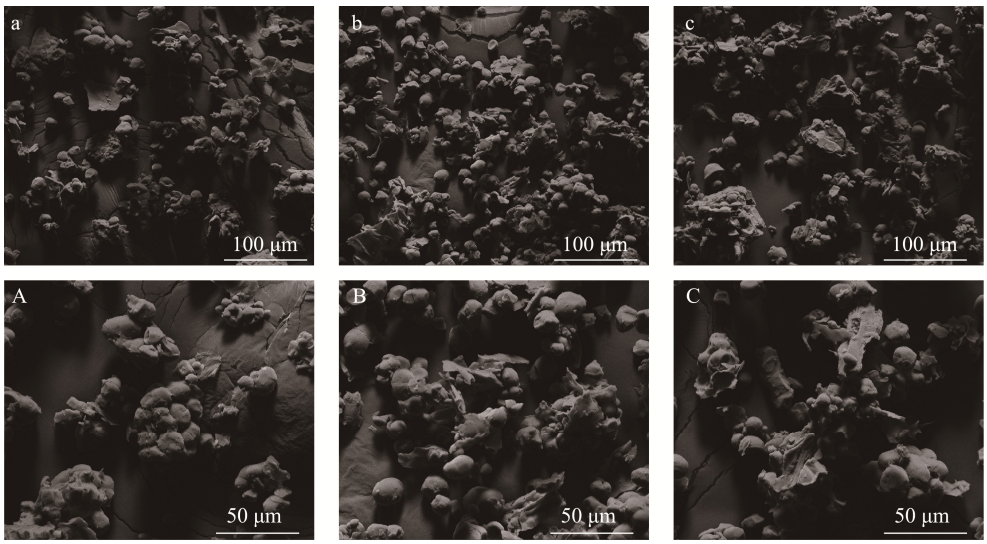
Table 1　Determination of color difference of *Millettia speciosa* Champs. powder

干燥方式	L^*	a^*	b^*
VMD	88.19±0.26^b	5.48±0.12^a	23.89±0.04^a
VD	91.38±0.29^a	4.20±0.01^b	21.95±0.19^b
HAD	91.47±0.05^a	4.21±0.03^b	22.12±0.09^b

注: 同列不同字母表示组间具有显著性差异(P<0.05)。

2.3　牛大力粉微观结构

3 种干燥方法对牛大力粉微观结构的影响如图 2 所示。HAD 的牛大力粉微观下呈内部间隙窄、颗粒排列密集的特征, 颗粒间粘连性强且易团聚, 分离困难。这是因为 HAD 通过热空气对流传热使水分蒸发, 过程中物料表面温度较高、内部水分向表面迁移并蒸发, 较高温度下水分快速蒸发使细胞结构收缩、塌陷, 且干燥时较高温度和热应力使细胞壁变形, 颗粒表面更粗糙或具黏性, 水分去除中可溶性物质迁移到表面形成硬壳, 进一步促进颗粒粘连团聚[34–36]。相比之下, VD 的牛大力展现出内部间隙更大、结构更疏散的微观形态, 各颗粒之间的分离度更高。在真空条件下水分以蒸汽形式从内部迅速逸出, 减少毛细管应力, 能较好保留原始孔隙结构、避免或减轻细胞壁塌陷, 且真空环境下物料失水时, 内外压力差有效减少颗粒间挤压粘连, 对物料质量参数有良好保持效果[37]。VMD 样品的微观结构内部间隙大于 HAD 且其结构特征更接近 VD 样品。这种差异可能与 VMD 的短时间、高频热效应有关, 快速脱水减少了物料持续收缩, 同时微波能量促使内部水分快速汽化[32], 使其更接近 VD 的疏散特征。



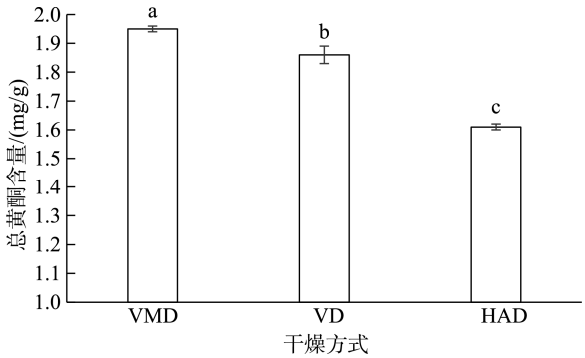
注: a: VMD, 放大 800 倍; A: VMD, 放大 1600 倍; b: VD, 放大 800 倍; B: VD, 放大 1600 倍; c: HAD, 放大 800 倍; C: HAD, 放大 1600 倍。

图 2 牛大力粉微观结构的观察

Fig.2 Observation of the microstructure of *Millettia speciosa* Champ. powder

2.4 总黄酮含量分析结果

不同干燥方式的牛大力粉总黄酮含量测定结果如图 3 所示。VMD 的样品总黄酮含量最高, 达到了(1.95±0.01) mg/g; 其次是 VD, 为(1.86±0.03) mg/g; HAD 的最低, 为(1.61±0.01) mg/g。从微观结构来看, VMD 的样品颗粒较为分散, 能与提取液充分接触, 因此提取率更高; 同时, 该干燥方式处理时间短, 且真空环境可减少氧气接触[38], 避免总黄酮因氧化降解损耗, 加之快速加热与真空环境能维持植物细胞结构完整性, 进一步减少活性成分流失, 进而最大程度保留有效成分[39], 让总黄酮含量显著提升。而 VD 虽同样处于低氧环境, 但处理时间明显长于 VMD, 对黄酮的保留效果稍弱; HAD 则因处于有氧环境, 且干燥过程中物料易团聚, 既减少了与提取液的接触面积, 又因长时间氧气接触加速黄酮氧化, 且黄酮类成分在有氧环境下本就易因氧化作用发生降解, 最终导致总黄酮含量最低[40]。



注: 不同字母表示组间具有显著性差异(P<0.05), 图 4~8 同。

图 3 牛大力粉总黄酮含量的测定

Fig.3 Determination of total flavonoid content in *Millettia speciosa* Champ.

2.5 总酚含量分析结果

不同干燥方式的牛大力粉总酚含量见图 4。其中 VMD 牛大力粉的总酚含量最高, 为(18.14±0.18) mg/g, 与 HAD 牛大力粉总酚(9.94±0.04) mg/g 和 VD 牛大力粉总酚(10.79±0.13) mg/g 含量差异显著(P<0.05)。多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)是影响酚类物质稳定性的核心酶类, 能催化酚类化合物氧化, 引发物料褐变并导致酚类物质结构破坏与降解, 造成活性成分流失, 而植物细胞结构完整是保护酚类的关键, 干燥时细胞破裂会使酚类释放, 与 PPO 接触加速氧化, 且干燥时间越长, 氧化风险越高[41]。VMD 凭借微波快速加热, 能短时间升温脱水、抑制 PPO 活性, 真空环境还可隔绝氧气、避免细胞壁破裂, 对酚类保护最优[42–43]; HAD 干燥时间长、高温暴露久, PPO 活性难抑制, 且高温破坏细胞结构, 导致酚类大量流失; VD 虽

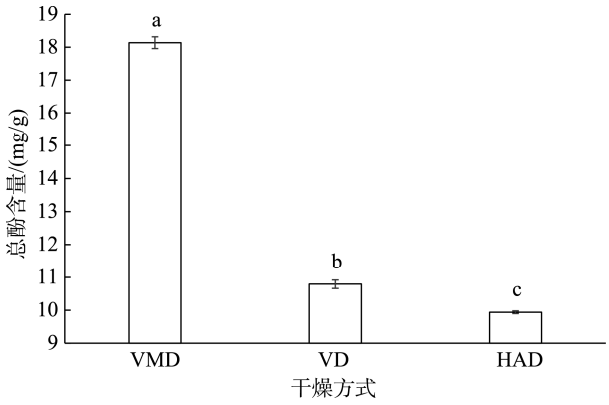


图 4 牛大力粉总酚含量的测定

Fig.4 Determination of total phenolic content of *Millettia speciosa* Champ.

能靠真空减少氧化, 但干燥速率慢, PPO仍有活性, 对细胞保护有限, 酚类保护效果介于两者之间。

2.6　多糖含量结果分析

如图 5 所示, VMD 处理的牛大力粉多糖含量最高, 达到了(280.73±1.35) mg/g, 与 VD (274.92±1.68) mg/g、HAD (267.66±0.87) mg/g 相比, 三者存在差异显著(P<0.05)。从作用机制看, HAD 为外加热, 热量从牛大力表面向内部传递, 表面水分先蒸发易形成致密硬壳, 阻碍热量传导与水分逸出, 导致物料需长时间高温干燥。持续高温会引发糖组分转化分解及美拉德反应[44], 故 HAD 组多糖含量最低。VD 可通过降压让牛大力内部形成疏散结构, 改善水分排出, 但真空环境传热效率低, 干燥速度慢, 牛大力仍需长时间受热, 累积加热效应造成部分多糖降解, 因此其多糖含量低于 VMD 组。VMD 凭借微波直接作用于内部水分, 实现内外同时受热; 且真空降低水分沸点, 使其低温快速汽化排出, 大幅缩短干燥时间, 减少多糖高温暴露, 显著降低降解风险[45], 最终最大程度保留多糖, 故 VMD 组多糖含量最高。

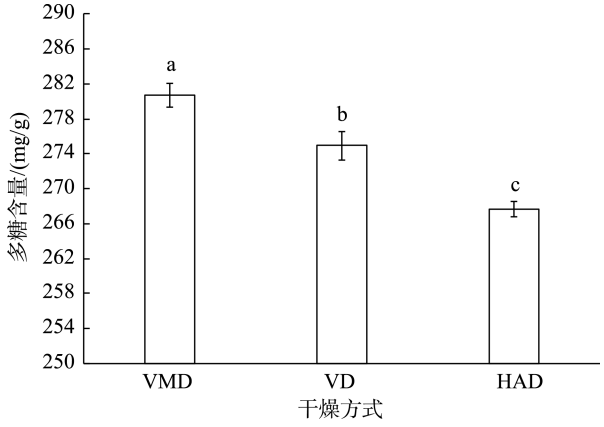


图 5　牛大力多糖的测定
Fig.5　Determination of polysaccharides in *Millettia speciosa* Champ.

2.7　淀粉含量结果分析

牛大力经 3 种干燥方式处理后, 其淀粉含量见图 6。VMD 的牛大力粉淀粉含量(429.17±5.65) mg/g 高于 VD 的牛大力(424.80±4.30) mg/g 和 HAD 的牛大力(426.70±1.37) mg/g, 经统计分析, 3 种干燥方式的淀粉含量无显著差异(P>0.05)。HAD、VD 以及 VMD 的温度均维持在 50 ℃左右, 在此温度区间内, 牛大力淀粉分子结构相对稳定, 不易在温和的干燥条件下发生显著降解[46–47]。尽管 3 种干燥方式的时长各不相同, 但综合作用效果相近。并且, VD 和 VMD 所涉及的压力条件, 并未对淀粉产生明显影响。从牛大力微观结构特性来看, 虽然不同干燥方式使牛大力微观结构存在间隙大小、排列疏密的差异, 但牛大力自身淀粉结构较为稳定[48], 其具备较强的抗外界干扰能力。不同干燥方式造成的微观结构变化未对淀粉结构产生足以引起含量显著变化的影响。此外, 本研究选用同一批次牛大力样本, 初始淀粉含量差异微小[49], 即便经过不同干燥方式处理, 这种差异依然难以显现。

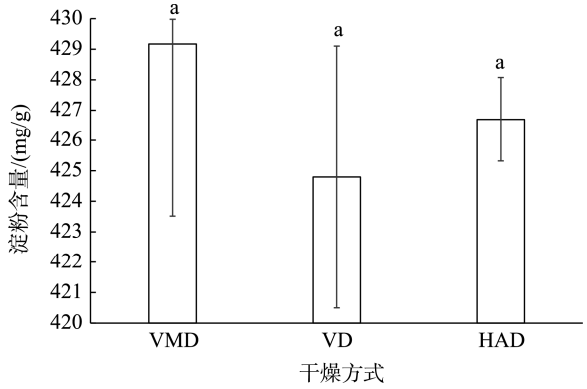


图 6　牛大力粉淀粉的测定
Fig.6　Determination of starch in *Millettia speciosa* Champ.

2.8　DPPH 自由基和 ABTS 阳离子自由基清除能力

牛大力对DPPH自由基和ABTS阳离子自由基的清除效果见图 7~8。不同干燥方法下样品的清除率表现为: VMD 组 DPPH 自由基清除率(54.17±0.09)%、ABTS 阳离子自由基清除率(37.37±0)%; VD 组 DPPH 自由基清除率(41.31±0.15)%、ABTS 阳离子自由基清除率(34.92±0.08)%; HAD 组 DPPH 自由基清除率(40.46±0.09)%、ABTS 阳离子自由基清除率(32.36±0)% 3 种干燥方法的牛大力样品 DPPH 自由基和 ABTS 阳离子自由基清除率存在显著差异(P<0.05)。这与上述 VMD 组牛大力总酚和总黄酮含量较高的结果一致[50], 且其结构更疏松、孔隙更 多, 促进了抗氧化物质的析出。

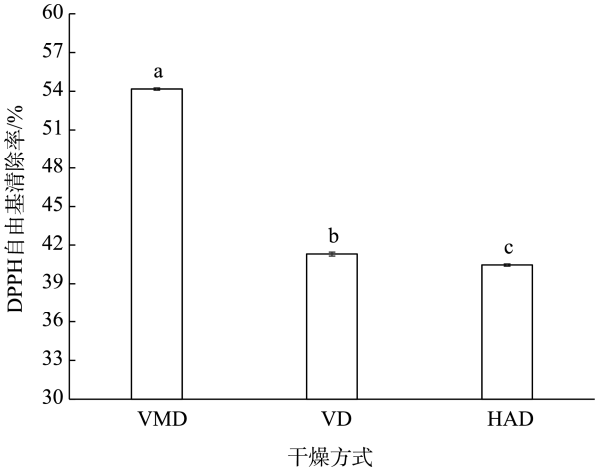


图 7　DPPH 自由基清除率
Fig.7　Scavenging rates of DPPH radicals

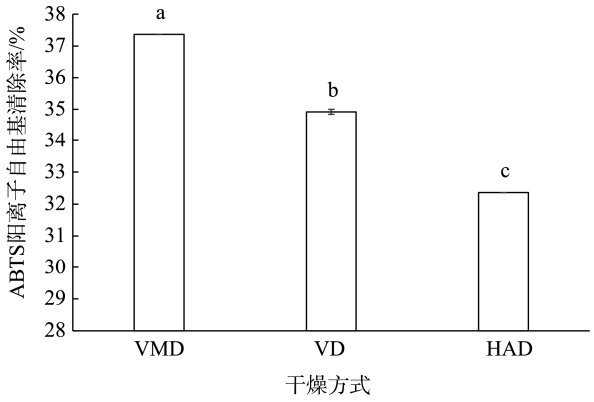


图 8 ABTS 阳离子自由基清除率
Fig.8 Scavenging rates of ABTS positive ion radical

2.9 总黄酮、总酚与抗氧化性的相关性分析

如表 2 所示, 总黄酮含量与 DPPH 自由基、ABTS 阳离子自由基均在 0.01 水平上显著相关, 相关系数分别为 0.937、0.953; 牛大力总酚含量与 DPPH 自由基、ABTS 阳离子自由基也均在 0.01 水平上显著相关, 相关系数分别为 0.953、0.931。由此可见, 牛大力对 DPPH 自由基、ABTS 阳离子自由基的清除能力与其总黄酮和总酚含量相关性极强, 对牛大力发挥抗氧化作用密切相关[51]。

表 2 总黄酮、总酚与抗氧化性之间的关系的相关性分析
Table 2 Correlation analysis of the relationship between total flavonoids, total phenols and antioxidant activity

相关因子	DPPH 自由基	ABTS 阳离子自由基
总黄酮含量	0.937**	0.953**
总酚含量	0.953**	0.931**

注: **表示具有极显著差异, P<0.01。

3 结 论

本研究通过测定色差、总黄酮、总酚、多糖、淀粉含量及抗氧化能力, 结合微观结构观察, 对比分析了 HAD、VD 与 VMD 对牛大力的干燥效果。结果显示, VMD 的牛大力样品色差值 L^*更小、a^*及 b^*更大且与其他两种方式差异显著(P<0.05), 表现为颜色偏暗; 同时其总黄酮、总酚、多糖含量及抗氧化活性最高, 其次是 VD, HAD 效果最差。不同干燥方式的牛大力颜色差异源于微波能量的“内加热”特性, 微波能快速穿透样品破坏细胞壁结构, 使细胞内色素更易暴露, 尽管真空环境可抑制色素氧化, 但微波快速升温可能加速部分色素热变色, 而 HAD 的“外加热”模式会让样品表面先形成硬壳, 反而减少了色素迁移与变化; 活性成分保留优势则依赖真空环境与微波加热的协同作用, 真空能降低体系氧气浓度, 直接抑制多酚氧化酶、过氧化物酶等氧化酶活性, 减少总黄酮、总酚的氧化降解, 同时减缓多糖糖苷键断裂与淀粉老化, 而微波内加热可在 17 min 内完成干燥, 大幅缩短高温暴露时间, 避免热敏成分热损耗, 这与“总黄酮、总酚含量与抗氧化能力显著相关”的结果也相互印证。综上所述, VMD 是牛大力活性成分提取的较优方式, 兼顾效率与成分保留, 在产业化推广上具备可行性, 但短期设备与能耗投入高, 不过长期可通过提升生产效率、产品附加值抵消这一成本, 规模化生产中经设备改造可突破产能限制并保障品质稳定。

参考文献

[1] 彭远航, 董晓全, 林大雪. 南药牛大力开发与利用研究进展[J]. 特产研究, 2024, 46(5): 112–123, 134.
PENG YH, DONG XQ, LIN DX. Research progress on development and utilization of *Millettia speciosa* Champ [J]. Special Wild Economic Animal and Plant Research, 2024, 46(5): 112–123, 134.

[2] LUO YF, ZHU MS, MA H, *et al*. The physicochemical properties and anti-fatigue efficacy of a polysaccharide-rich fraction derived from *Millettia speciosa* Champ [J]. Chemistry & Biodiversity. DOI: 10.1002/CBDV.202501744

[3] ZHANG J, ZHANG W, YU L, *et al*. Polysaccharides from *Millettia speciosa* Champ. ameliorates excessive exercise-induced fatigue by regulating gut microbiota [J]. Foodborne Pathogens and Disease, 2025. DOI:10.1089/fpd.2024.0128

[4] NASIRUDDIN, CHEN G, LI X, *et al*. Comparison of phytochemical constituents and pharmacological activities of various solvent extracts obtained from *Millettia speciosa* stem powder [J]. Biomed Research International, 2022, 2022: 2486979.

[5] 梁子昌, 陈明, 施雪敏, 等. 牛大力总黄酮提取工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(10): 101–106.
LIANG ZC, CHEN M, SHI XM, *et al*. Optimization of extracting process and antioxidant activity of total flavonoids from *Millettia speciosa* Champ [J]. Cereals & Oils, 2023, 36(10): 101–106.

[6] 陈晨, 刘平怀, 罗宁, 等. 牛大力食用研究概况[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(14): 168–172.
CHEN C, LIU PH, LUO N, *et al*. The overview on the research of radix *Millettiae speciosa* as food [J]. Food Research and Development, 2016, 37(14): 168–172.

[7] 顾学金, 王祝年, 羊青, 等. 牛大力块根膨大的调节机制研究进展[J]. 分子植物育种, 2024, 22(20): 6805–6812.
GU XJ, WANG ZN, YANG Q, *et al*. Research progress on the swelling mechanism of *Millettia speciosa* Champ. root [J]. Molecular Plant Breeding, 2024, 22(20): 6805–6812.

[8] ZHANG YM, LI XB, LI XJ, *et al*. Effects of different drying methods on the product quality and key non-volatile compounds of Morchella sextelata [J]. Food Science and Technology, 2025, 223: 117709.

[9] KUMAR C, SINGH M, ZALPOURI R, *et al*. An in-depth analysis of various technologies used for mushroom drying [J]. Food Engineering Reviews, 2023, 15(3): 491–524.

[10] 徐柳风, 王学成, 易兵, 等. 中药材保质增效干燥预处理技术的研究现状、问题及对策[J]. 中国医药工业杂志, 2024, 55(4): 463–474.

XU LF, WANG XC, YI B, *et al*. Research status, problems and countermeasures of drying pretreatment technology of traditional Chinese medicinal materials for quality assurance and efficiency enhancement [J]. Chinese Journal of Pharmaceuticals, 2024, 55(4): 463–474.

[11] 李玉姗, 邱勋荣, 齐娅汝, 等. 中药材干燥过程中的活性成分变化机制研究现状[J]. 中国中药杂志, 2024, 49(2): 315–324.
LI YS, QIU XR, QI YR, *et al*. Mechanisms of changes of active components in Chinese medicinal materials during drying: A review [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2024, 49(2): 315–324.

[12] ZHENG ZA, WANG SY, WANG H, *et al*. Comparative study on the influence of various drying techniques on drying characteristics and physicochemical quality of garlic slices [J]. Foods, 2023, 12(6): 1314.

[13] QIAN C, LI H, HOU Z, *et al*. Effects of different drying methods on *Rubus chingii* Hu fruit during processing [J]. Heliyon. DOI: 10.1016/J.HELIYON.2024.E24512

[14] MIAO J, LIU JJ, GAO XX, *et al*. Effects of different drying methods on chemical compositions, antioxidant activity and anti-*α*-glucosidase activity of *Coreopsis tinctoria* flower tea [J]. Heliyon. DOI: 10.1016/J.HELIYON.2022.E11784

[15] 方良材, 吴钊龙, 刘梦姣, 等. 牛大力微波干燥特性及其动力学模型分析[J]. 南方农业学报, 2021, 52(9): 2554–2561.
FANG LC, WU ZL, LIU MJ, *et al*. Microwave drying characteristics and kinetic model of *Millettia speciosa* Champ [J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(9): 2554–2561.

[16] 沈向阳, 谭子键, 陈嘉澍, 等. 牛大力热风干燥工艺参数优化[J]. 农机化研究, 2024, 46(5): 228–234.
SHEN XY, TAN ZJ, CHEN JP, *et al.* Optimization of hot airflow drying technological parameters for *Millettia speciosa* Champ [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(5): 228–234.

[17] 黄少军, 韦宏官, 马留辉, 等. 热风干燥温度对牛大力药材质量的影响[J]. 广西质量监督导报, 2021(6): 156–157.
HUANG SJ, WEI HG, MA LH, *et al*. Influence of hot air drying temperature on the quality of *Millettia speciosa* Champ medicinal herbs [J]. Guangxi Quality Supervision Guide Periodica, 2021(6): 156–157.

[18] 陈琪, 王瑞雪, 张可欣. VD 条件对黄芪花干燥速率、外观品质及有效成分的影响研究[J]. 生物化工, 2022, 8(6): 85–87.
CHEN Q, WANG RX, ZHANG KX. Effects of vacuum drying conditions on drying rate, appearance quality and active ingredients of astragalus flower [J]. Biological Chemical Engineering, 2022, 8(6): 85–87.

[19] 丛燏阳. 桑葚微波真空干燥特性及工艺优化研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2024.
CONG JY. Study on microwave vacuum drying characteristics and processoptimization of mulberry [D]. Alear: Tarim University, 2024.

[20] 王晨, 尼格尔热依·亚迪卡尔, 冯作山, 等. 响应面优化青熟期托克逊杏膨化脆片的制备工艺[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(8): 148–157.
WANG C, NIGEERRIYI YDKER, FENG ZS, *et al*. Optimization of the preparation process of *Toksun* apricot puffed crisps at green ripe stage by response surface method [J]. China Food Additives, 2024, 35(8): 148–157.

[21] 娄世豪, 孙小晶, 李丹丹, 等. 干燥方式对山楂总黄酮含量及抗氧化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(1): 121–129.
LOU SH, SUN XJ, LI DD, *et al*. Effect of drying method on total flavonoid content and antioxidant properties of *hawthorns* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(1): 121–129.

[22] HE Q, GUO ZX, CAO Y, *et al*. Selective separation of main flavonoids by combinational use of ionic liquid-loaded microcapsules from crude extract of tartary buckwheat [J]. Food Chemistry, 2021, 362: 130255.

[23] LIU J, GUO X, YANG T, *et al*. Study on the extraction and stability of total flavonoids from *Millettia speciosa* Champ [J]. Public Library of Science One, 2025. DOI: 10.1371/JOURNAL.PONE.0326570

[24] 何春玫, 石敏, 戈秋艳, 等. 响应面法优化牛大力总黄酮提取工艺研究[J]. 广西农学报, 2023, 38(3): 79–85.
HE CM, SHI M, GE QY, *et al*. Optimization of extraction process of flavonoids from *Millettia speciosa* Champ by response surface methodology [J]. Journal of Guangxi Agriculture, 2023, 38(3): 79–85.

[25] 王红, 吴启南, 蒋征, 等. 干燥方式对芡实功能性成分含量及抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(7): 19–25.
WANG H, WU QN, JIANG Z, *et al*. Effects of different drying methods on functional component contents and antioxidant activity of *Euryale Semen* [J]. Food Science, 2015, 36(7): 19–25.

[26] 苏芬丽, 杨泽锐, 黄松, 等. 牛大力多糖提取工艺的优化[J]. 海峡药学, 2019, 31(11): 38–41.
SU FL, YANG ZR, HUANG S, *et al*. Optimization of extraction technology of polysaccharide from *Millettia speciosa* Champ [J]. Strait Pharmaceutical Journal, 2019, 31(11): 38–41.

[27] 王文霞, 陈婷婷, 李震, 等. 知母多糖的提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 中华中医药学刊, 2023, 41(2): 127–131.
WANG WX, CHEN TT, LI Z, *et al*. Optimization of extraction process and antioxidant activity of polysaccharides from common *Anemarrhena rhizome* [J]. Chinese Archives of Tradiyional Chinese Medicine, 2023, 41(2): 127–131.

[28] 廖夏云, 卢羽玲, 王芊, 等. 荔枝核淀粉理化性质及体外消化特性研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(2): 67–72.
LIAO XY, LU YL, WANG Q, *et al*. Physicochemical properties and in vitro digestive characteristics of *Lychee kernel* starch [J]. Food Reserarch and Development, 2021, 42(2): 67–72.

[29] 鲍雨婷, 陈琪, 王灼琛. 低温油炸黄茶风味小麦脆片加工工艺优化及品质分析[J]. 中国食品学报, 2024, 24(11): 254–268.
BAO YT, CHEN Q, WANG ZS. Process optimization and quality analysis of low temperature fried yellow tea flavor wheat chips [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(11): 254–268.

[30] 王明茹, 周莎莎, 杨晓溪, 等. 肌原纤维蛋白-壳聚糖稳定的 Pickering 乳液负载白藜芦醇特性[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(20): 35–41.
WANG MR, ZHOU SS, YANG XX, *et al*. Characteristics of resveratrol loaded pickering emulsion stabilized by *Myofibrillar* protein-chitosan [J]. Food Research and Development, 2024, 45(20): 35–41.

[31] NAZARI D, NAGHDI-BADI H, MEHERAFARIN A, *et al*. Expression of the changes in essential oil components of Shirazi thyme (*Zataria multiflora* Boiss.) as affected by various drying methods [J]. Industrial Crops and Products, 2024, 220: 119222.

[32] GRASSION AN, KARLOVIĆ S, ŠOŠO L, *et al*. Influence of different drying processes on the chemical and texture profile of *cucurbita maxima* pulp [J]. Foods, 2024, 13(4): 520.

[33] AN J, WICAKSANA F, LIU P, *et al*. Optimizing infrared wavelengths in food drying: A comprehensive review of standalone and combined techniques [J]. Food Control, 2025, 169: 110991.

[34] ANDO Y, NEI D. Comparison of potato void structures dried by air-drying,

freeze-drying, and microwave-vacuum-drying, and the physical properties of powders after grinding [J]. Food and Bioprocess Technology, 2022, 16(2): 447–458.

[35] LV Y, LV W, LI G, *et al*. The research progress of physical regulation techniques in 3D food printing [J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 133: 231–243.

[36] 薛艾莲, 夏晓霞, 寇福兵, 等. 不同干燥方式联合熟化处理对板栗粉品质特性及微观结构的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(9): 62–70.
XUE AIL, XIA XX, KOU FB, *et al*. Effect of cooking combined with different drying methods on the quality characteristics and microstructure of Chinese chestnut powder [J]. Food Science, 2022, 43(9): 62–70.

[37] 赵国峥, 李娜, 盛晶博, 等. 以海藻酸钠为模板制备蜂窝状纳米 CeO_2 及其性能[J]. 中国稀土学报, 2018, 36(5): 558–563.
ZHAO GZ, LI N, SHENG JB, *et al*. Synthesis and performance of honeycomb nano cerium oxide derived from sodium alginate [J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2018, 36(5): 558–563.

[38] ZHANG F, WANG X, XIN L, *et al*. Moisture diffusion modelling and effect of microwave vacuum drying on drying kinetics and quality of Yam [J]. International Food Research Journal, 2023, 30(3): 626–639.

[39] JIAN Y, WANG N, HAN Z, *et al*. Effects of different drying methods on the quality of *Lycium barbarum*: Focus on the carotenoids and Polysaccharides [J]. Food Chemistry: X, 2025, 31: 103021.

[40] YANG J, MIAO M. Analysis of the influence of different drying methods on the active ingredients of fresh medicine [J]. Chinese Medicine and Natural Products, 2022, 2(1): 1–4.

[41] 陈旭, 周涛, 黄志芳, 等. 新鲜丹参中酚酸成分的含量测定及其多酚氧化酶对含量的影响研究[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(5): 1148–1154.
CHEN X, ZHOU T, HUANG ZF, *et al*. Content determination of phenolic acids in fresh salvia miltiorrhiza and effect of polyphenol oxidase on content [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2021, 46(5): 1148–1154.

[42] ZHU L, LI M, YANG W, *et al*. Effects of different drying methods on drying characteristics and quality of *Glycyrrhiza uralensis* (licorice) [J]. Foods, 2023, 12(8): 1652.

[43] DE-BRUIJN J, BÓRQUEZ R. Quality retention in strawberries dried by emerging dehydration methods [J]. Food Research International, 2014, 63: 42–48.

[44] LI Y, LI J, FAN L. Effects of combined drying methods on physicochemical and rheological properties of instant *Tremella fuciformis* soup [J]. Food Chemistry, 2022, 396: 133644

[45] CHAO E, LI J, FAN L. Influence of combined freeze-drying and far-infrared drying technologies on physicochemical properties of seed-used pumpkin [J]. Food Chemistry, 2023, 398: 133849.

[46] SHANG J, HU Z, WANG P, *et al*. Effect of operating conditions on structure and digestibility of spray-dried corn starch [J]. Food Research International, 2023, 174: 113511.

[47] 罗海露, 刘兴隆, 安丰坤, 等. 牛大力淀粉的理化性质和体外消化特性比较[J]. 食品科技, 2025, 50(2): 267–275.
LUO HL, LIU XL, AN FK, *et al*. Comparison of physicochemical properties and *in vitro* digestibility of *Millettia speciosa* Champ starch [J]. Food Science and Technology, 2025, 50(2): 267–275.

[48] 罗海露. 牛大力淀粉的结构和理化性质研究[D]. 南宁: 广西大学, 2024.
LUO HL. The structure and physicochemical properties of *Millettia speciosa* champ [D]. Nanning: Guangxi University, 2024.

[49] 蒙兰杨, 唐国强, 唐武, 等. 广西 7 个种源牛大力的营养及药用成分含量分析[J]. 南方林业科学, 2024, 52(6): 18–24.
MENG LY, TANG GQ, TANG W, *et al*. Analysis of nutrient and medicinal component content of seven provenances of *Nanhaia speciosa* in Guangxi [J]. South China Forestry Science, 2024, 52(6): 18–24.

[50] NZIMANDE NA, MIANDA SM, SEKE F, *et al*. Impact of different pre-treatments and drying methods on the physicochemical properties, bioactive compounds and antioxidant activity of different tomato (*Solanum lycopersicum*) cultivars [J]. Food Science and Technology, 2024, 207: 116641.

[51] REN Z, YU X, YAGOUB AEA, *et al*. Combinative effect of cutting orientation and drying techniques (hot air, vacuum, freeze and catalytic infrared drying) on the physicochemical properties of ginger (*Zingiber officinale Roscoe*) [J]. Food Science and Technology, 2021, 144: 111238.

(责任编辑: 韩晓红 于梦娇)