

不同干燥条件下食用土当归品质及美拉德反应产物的比较

林杨¹, 何礼涛¹, 信文娟², 许勤美³, 孙培龙^{1,4*}

(1. 浙江工业大学食品科学与工程学院, 浙江杭州 313299) (2. 浙江佐力药业股份有限公司, 浙江湖州 313200) (3. 小金县赞拉雪山农产品开发有限公司, 四川阿坝 624200) (4. 浙工大生态工业创新研究院, 浙江衢州 324400)

摘要: 为探讨不同干燥方式对食用土当归品质和美拉德反应产物的影响, 选择三种不同干燥方式(真空冷冻干燥, 真空干燥, 热风干燥)对新鲜食用土当归进行脱水处理, 测定了食用土当归物理性质、主要化学成分、多糖和氨基酸组成、美拉德反应产物、蛋白质氧化产物和体外抗氧化活性。结果表明, 真空冷冻干燥制备的食用土当归组织结构保持最好, 复水比最大, 色泽与鲜品最接近 ($\Delta E=6.39$), 蛋白质 (6.99 g/100 g)、总糖 (68.25 g/100 g)、还原糖 (7.13 g/100 g) 和总氨基酸含量 (197.90 mg/g) 高, 且 DPPH 自由基清除率 (83.12%)、ABTS⁺ 自由基清除率 (73.51%) 和总抗氧化能力 (7.49 mmol FeSO₄/g) 最强。真空干燥制备的食用土当归藁本内酯 (10.81 mg/g) 含量最高, 但色差较大 ($\Delta E=16.28$), 且含有高水平的美拉德反应产物。随着温度的升高, 热风干燥处理的食用土当归的阿魏酸和藁本内酯含量逐渐增加, 美拉德反应产物以及蛋白质氧化产物水平也随之升高。60 °C 热风干燥处理后的食用土当归含有较高的阿魏酸 (49.82 μ g/g)、藁本内酯 (7.24 mg/g) 和氨基酸含量 (193.82 mg/g), 且抗氧化能力仅次于真空冷冻干燥。综上, 真空干燥干燥时间长且品质较差; 真空冷冻干燥后的食用土当归品质最优, 但其应用成本较高; 60 °C 热风干燥具有成本低和耗时短的优势, 其干燥后产品品质较好, 是实际生产应用中干燥食用土当归优选方式。

关键词: 食用土当归; 理化性质; 美拉德反应; 多糖; 氨基酸

文章编号: 1673-9078(2025)08-166-178

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.8.0655

Comparison of Effect of Different Drying Methods on the Quality and Maillard Reaction Products of *Aralia cordata* Thunb

LIN Yang¹, HE Litao¹, XIN Wenjuan², XU Qinmei³, SUN Peilong^{1,4*}

(1.School of Food Science and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 313299, China) (2.Zhejiang Zuoli Pharmaceutical Co. Ltd., Huzhou 313200, China) (3.Xiaojin County Zara Snow Mountain Agricultural Products Development Co. Ltd., A'ba 624200, China) (4.Institute of Eco-industrial Innovation, Zhejiang University of Technology, Quzhou 324400, China)

引文格式:

林杨,何礼涛,信文娟,等.不同干燥条件下食用土当归品质及美拉德反应产物的比较[J].现代食品科技,2025,41(8): 166-178.

LIN Yang, HE Litao, XIN Wenjuan, et al. Comparison of effect of different drying methods on the quality and maillard reaction products of *Aralia cordata* Thunb [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(8): 166-178.

收稿日期: 2024-05-13

基金项目: 浙江省科技计划项目 (2023C04007)

作者简介: 林杨 (1992), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品功能与营养健康, E-mail: linyang@zjut.edu.cn

通讯作者: 孙培龙 (1964-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品化学与资源利用, E-mail: sun_pl@zjut.edu.cn

Abstract: Fresh *Aralia cordata* Thunb was dried by three different methods (vacuum freeze-drying, vacuum drying, and hot-air drying) and the effects of the different drying methods on the quality and Maillard reaction products were evaluated. The physical properties, main chemical components, polysaccharide and amino acid compositions, Maillard reaction products, protein oxidation products, and the antioxidant activity of *Aralia cordata* Thunb *in vitro* were determined. The optimal tissue structure; highest rehydration ratio, closest color to that of the fresh sample ($\Delta E=6.39$); highest protein content (6.99 g/100 g); total sugar (68.25 g/100 g), reducing sugar (7.13 g/100 g), and total amino acid content (197.90 mg/g); highest DPPH radical scavenging (83.12%), ABTS⁺ radical scavenging (73.51%), and total antioxidant capacity (7.49 mmol FeSO₄/g) were obtained by vacuum freeze-drying. The vacuum drying method yielded the highest content of ligustilide in *Aralia cordata* Thunb. (10.81 mg/g). However, this method also resulted in a significant color difference ($\Delta E=16.28$) and elevated levels of Maillard reaction products. The content of ferulic acid, ligustilide, Maillard reaction products, and protein oxidation products in *Aralia cordata* Thunb, subjected to hot-air drying, gradually increased with increasing temperature. *Aralia cordata* Thunb, subjected to hot-air drying at 60 °C, had a high content of ferulic acid (49.82 µg/g), ligustilide (7.24 mg/g), and amino acid (193.82 mg/g), and the anti-oxidation ability was second only to that of the vacuum freeze-dried sample. In conclusion, vacuum drying required an extended drying time and resulted in lower overall quality. Vacuum freeze-drying resulted in the best quality of *Aralia cordata* Thunb, but its application cost was higher. Among the methods, hot-air drying at 60 °C is the preferred method of drying *Aralia cordata* Thunb for practical production applications.

Key words: *Aralia cordata* Thunb; physical and chemical properties; Maillard reaction; polysaccharides; amino acids

食用土当归 (*Aralia cordata* Thunb.), 五加科繖木属多年生草本植物, 主要分布于中国四川、云南、西藏、湖北、广州等地^[1]。食用土当归的根及根茎作为九眼独活的主流品种入药, 用于治疗风湿痹痛、腰膝酸软、头痛目眩、水肿等症状^[2], 已有研究表明食用土当归具有消炎镇痛^[3]、抗哮喘^[4]、抗动脉粥样硬化^[5]、预防阿尔茨海默病^[6]、降低血脂^[7]等功效。食用土当归含有类黄酮、有机酸、皂苷、挥发油等多种化学成分^[8], 且含有多种氨基酸、维生素和微量元素, 具有极高的营养价值^[1]。食用土当归的地下部分可以入药, 其地上部分可以作为食用蔬菜, 是国内、国际市场最畅销的绿色蔬菜之一^[9]。

食用土当归含水量高达 90%, 其中大部分为游离水, 在加工运输中极易腐败变质^[10]。干燥处理是食用土当归采后的主要加工方式, 通过降低水分含量从而抑制微生物以及酶促反应, 减少腐烂。目前, 通常沿用阴干法、自然晾晒法、熏干法等传统加工方法, 或采用现代加工方法如真空干燥、热风干燥、真空冷冻干燥等对食用土当归进行干燥, 但传统加工方法效率低且受外界环境的影响较大, 干燥过程难控, 而现代加工方法由于干燥温度和热传递机制不同, 经加工后的产品感官品质和生物活性存在较大差异^[11]。真空冷冻干燥提供的低温真空环境, 能够抑制微生物、美拉德反应以及酶的活性, 维持产品品质和营养价值, 但因设备昂贵且加工成本高,

其应用受到限制^[12]。热风干燥、真空干燥等热加工方法具有设备简单、能耗低、效率高、成本低等特点, 是目前适宜大规模应用的干燥方法^[13]。不同的干燥方法对干燥产品品质有着重要影响, Zhang 等^[14]探究了不同干燥方式对当归抗氧化活性影响, 发现真空冷冻干燥后的当归抗氧化性最强。宋来辉等^[15]研究发现低温鼓风干燥人参饮片的总多糖和总黄酮含量高于真空冷冻干燥饮片。但是, 不同干燥方式对食用土当归品质的研究鲜见报道。

在干燥过程中, 食品会发生一系列的非酶促褐变反应, 如: 美拉德反应 (Maillard Reaction, MR)。美拉德反应又称羰氨反应, 是羰基化合物与氨基化合物之间的缩合反应^[16]。食品干燥过程中常见的美拉德反应产物 (Maillard Reaction Products, MRP) 为类黑精和 5-羟甲基糠醛 (5-Hydroxymethylfurfural, 5-HMF) 等。长时间摄入 MR 晚期糖基化终产物 (Advanced Glycosylation End Products, AGEs) 会增加糖尿病^[17]、动脉粥样硬化^[18]、肌肉衰减综合征^[19]、帕金森症和阿尔茨海默症^[20,21]等疾病的风险。探究干燥方式对美拉德反应产物组成及含量的影响对于维持当归品质具有重要意义, 但目前少有关于食用土当归干燥过程中美拉德反应的相关研究。

因此, 本研究以新鲜食用土当归为原料, 分别采用热风干燥、真空干燥、真空冷冻干燥进行干燥处理, 探究不同干燥方式对食用土当归的物理性质、

主要化学成分、多糖和氨基酸组成、美拉德反应产物、蛋白质氧化产物、体外抗氧化活性的影响,为当归干品加工方法的选择和应用提供技术支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

实验所用当归购自四川赞拉雪山健康科技有限公司,经鉴定为五加科植物食用土当归(*Aralia cordata* Thunb.)。

Bradford 蛋白浓度测定试剂盒,武汉博士德生物技术有限公司;3,5-二硝基水杨酸(DNS),杭州钠镁科技有限公司;阿魏酸标准品、藁本内酯标准品,上海麦克林生化科技有限公司;5-羟甲基糠醛,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;2,2-二苯基-1-吡啶肼(DPPH),上海麦克林生化科技有限公司;氨基酸混合标准品,坛墨质检科技股份有限公司;所有其他化学品均为分析级,无需进一步纯化。

1.2 仪器与设备

TA.XT Plus 质构仪,英国 Stable Micro Systems 公司;F7000 荧光分光光度计,日立(中国)有限公司;P7 双光束紫外可见分光光度计,上海美谱达仪器有限公司;WSC-S 测色色差计,上海仪电物理光学仪器有限公司;DHG 9245A 电热恒温鼓风箱,上海一恒科学仪器有限公司;SCIENTZ-12N 真空冷冻干燥机,宁波新芝生物科技股份有限公司;DZF-6030A 真空干燥机,上海一恒科学仪器有限公司;Hitach HT7700 EXALENS120kV 扫描电子显微镜,日立(中国)有限公司;MB23 水分分析仪,奥豪斯国际贸易(上海)有限公司;DFT-1004 100 g 手提式高速粉碎机,温岭市林大机械有限公司;安捷伦 1260 高效液相色谱仪,杭州全谱实验室设备有限公司。

1.3 方法

1.3.1 干燥处理

选取无烂根、发霉、虫蛀的新鲜食用土当归,用蒸馏水洗净泥沙,吸水纸擦干表面后室温放置至表面干燥,将其切成厚度为 3 mm 的薄片,各组取 300 g 切片食用土当归,经 3 种不同干燥处理将样品干燥至含水量为 8.00%。1) 热风干燥(Hot Air

Drying, HAD): 设定电热鼓风干燥箱风速为 1 m/s,分别在 50、60、70 °C 下连续干燥 12、10、8 h。2) 真空冷冻干燥(Vacuum Freeze Drying, VFD): 样品经超低温冰箱 -80 °C 冷冻 24 h 后,设定样品盘温度 -35 °C、冷阱温度 -60 °C、真空度 1 Pa,真空冷冻干燥 48 h。3) 真空干燥(Vacuum Drying, VD): 根据前期预实验结果选择 50 °C 作为当归真空干燥温度。将样品单层平铺于真空干燥机内,真空度 0.08 MPa,连续干燥 15 h。

将干燥后的样品通过高速粉碎机粉碎后过 50 目筛,密封,置于干燥器中室温保存,用于后续化学成分及美拉德反应产物的测定。

1.3.2 微观结构的测定

将样品均匀平铺于贴有导电胶的扫描电子显微镜样品座上,喷金处理,于加速电压 10.00 kV 下对样品进行扫描,放大 500 倍观察样品微观结构。

1.3.3 硬度、咀嚼性、脆性的测定

参考 Liu 等^[22]的方法,采用 TA.XT Plus 质构仪测定样品的质构。配备圆柱形探针 P/5 (直径 5 mm),初始速度 1 mm/s,测试速度 1 mm/s,触发力 5 g,缩回速度 5 mm/s,压缩程度为样品形变 40%。记录最大峰值力,重复十次。

1.3.4 复水比

参考 Inla 等^[23]的方法并稍加修改,对食用土当归切片的复水性能进行测定。将 0.5 g 左右样品放入盛有 60 °C 蒸馏水的烧杯内,60 °C 水浴,每隔 10 min 将样品冷却并用滤纸吸去表面水分,测定样品重量至衡重。复水比计算如公式(1)所示:

$$B = \frac{m}{m_0} \quad (1)$$

式中:

B——复水比(RR);

m——复水后质量,g;

m_0 ——样品复水前质量,g。

1.3.5 色泽

通过色差仪测定干燥前后样品的色泽变化,每个样品重复测定 10 次,取平均值。 ΔE 为色差值,表示干燥后样品的色泽(L^* 、 a^* 、 b^*)与鲜样色泽(L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^*)的差异,按式(2)进行计算。根据 Feumba 等^[24]的方法,按式(3)计算食用土当归褐变指数(Browning Index, BI):

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

$$D = \frac{\frac{a^* + 1.75 \times L^*}{5.645 \times L^* + a^* - 3.012 \times b^*} - 0.31}{0.17} \times 100 \quad (3)$$

式中：
 D ——褐变指数（BI）；
 ΔE ——色差值；
 L^* 、 a^* 、 b^* ——鲜食用土当归的明度、红绿度和黄蓝度；
 L^* 、 a^* 、 b^* ——干燥后食用土当归的明度、红绿度和黄蓝度。

1.3.6 理化成分分析

使用水分测定仪并参照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》^[25]测定水分质量分数；分别采用 DNS 试剂盒^[26]和 Bradford 考马斯亮蓝试剂盒测定还原糖含量和蛋白质含量；根据苯酚-硫酸法^[27]测定总糖含量；采用 GB 5009.4-2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》^[28]的方法测定灰分。以上每组样品的各项成分指标均重复测定 3 次取平均值。

1.3.7 阿魏酸和藁本内酯测定

精密称取当归粉末 0.2 g，加入 20 mL 70%（ φ ）的甲醇溶液，称定质量，加热回流 30 min 后放置冷却，称定质量，并用 70% 的甲醇补足减少的质量，0.45 μm 微孔滤膜过滤后备用。

色谱条件：色谱柱：Welch Ultimate AQ-C₁₈ 柱（4.6×250 mm，5 μm ）；流动相：A：0.1% 乙酸水；B：乙腈；流量：1 mL/min；进样量：10 μL ；柱温：30 $^{\circ}\text{C}$ ；波长：280 nm；洗脱梯度：0~10 min，10% B；10~16 min，24% B；16~32 min，70% B；32~40 min，80% B；40~43 min，10% B。检测器：紫外检测器。

1.3.8 粗多糖提取

参照姚艳婷等^[29]的方法并稍加修改，进行粗多糖的提取。取食用土当归粉末 100 g，加入无水乙醇（ $m/V=1:10$ ），室温下振荡 3 h 以除去脂肪和色素等杂质，抽滤并挥发除去残渣中的乙醇。随后加入蒸馏水（ $m/V=1:10$ ），85 $^{\circ}\text{C}$ 水浴提取 1 h，冷却后以 8 000 r/min 离心 10 min，收集清液，重复提取三次，合并提取液。采用 Sevag 法除去蛋白质后，以 8 000 r/min 离心 10 min，上清液于透析袋（截留分子量 3 500 Da）中透析 2 d，补充无水乙醇至溶液中乙醇含量为 80%，4 $^{\circ}\text{C}$ 醇沉 48 h，4 000 r/min 离心 10 min，所得沉淀经溶解后进行冷冻干燥，得到食用土当归粗多糖（ACPs，*Angelica cordata* Polysaccharides）。热风干燥、真空冷冻干燥和真空

干燥处理的食用土当归多糖分别命名为 ACPs-H、ACPs-F、ACPs-V。

采用 Bradford 试剂盒测定蛋白质含量；采用苯酚-硫酸法^[27]测定总糖含量；均重复测定 3 次取平均值。

1.3.9 粗多糖分子质量测定

制备质量浓度为 5 mg/mL 的葡萄糖标准品溶液和多糖样品溶液，12 000 r/min 离心 10 min，采用 0.22 μm 的水系微孔滤膜进行过滤。流动相：0.05 mol/L NaCl 溶液；色谱柱：BRT105-103-101 串联凝胶柱（8×300 mm）；流速：0.8 mL/min；柱温：40 $^{\circ}\text{C}$ ；进样量：25 μL ；检测器：示差检测器 RID-20A。

1.3.10 单糖组成分析

将质量浓度为 5 mg/mL 的多糖样品溶液置于水解管中，加入 2 mL 浓度为 3 mol/L 的三氟乙酸，120 $^{\circ}\text{C}$ 水解 3 h。水解后的多糖样品经氮气吹干后，加入 5 mL 水并涡旋混匀，吸取 50 μL 加入 950 μL 去离子水，12 000 r/min 离心 5 min 后，采用 0.22 μm 的水系微孔滤膜过滤，用于单糖组成分析。

色谱柱：Dionex CarbopacTM PA20（3×150 mm）；流动相：A：H₂O；B：15 mmol/L NaOH；C：15 mmol/L NaOH & 100 mmol/L NaAc；流量：0.3 mL/min；进样量：25 μL ；柱温：30 $^{\circ}\text{C}$ ；检测器：电化学检测器；洗脱程序见表 1。

表 1 梯度洗脱程序表

Table 1 Gradient elution procedure table

时间/min	流动相 A/%	流动相 B/%	流动相 C/%
0.00	98.80	1.20	0.00
18.00	98.80	1.20	0.00
20.00	50.00	50.00	0.00
30.00	50.00	50.00	0.00
30.10	0.00	0.00	100.00
46.00	0.00	0.00	100.00
46.10	0.00	100.00	0.00
50.00	0.00	100.00	0.00
50.10	98.80	1.20	0.00
80.00	98.80	1.20	0.00

1.3.11 氨基酸测定

参考 Tang 等^[30]的方法，准确称取样品 50 mg 至水解管中，加入 4 mL 分析纯盐酸（约 6 mol/L）（ $m/V=1:1$ ），氮吹 15 min 后封管，110 $^{\circ}\text{C}$ 水解 24 h，取出冷却并将样品定容至 100 mL。准确吸取 2 mL

样品, 置氮吹仪上脱酸后, 进行 60 °C 热风干燥, 用 0.02 mol/L HCl 将样品定容至 10 mL, 采用 0.22 μm 的水系微孔滤膜过滤, 上机测定。

色谱柱: 磺酸型阳离子交换树脂 (4.6 mm×60 mm); 检测波长 440 nm 和 570 nm; 洗脱液流量: 0.4 mL/min, 柱温: 70 °C; 茚三酮流量: 0.35 mL/min, 反应柱温: 135 °C; 采集时间: 55 min, 进样量: 20 μL。结果以峰面积计算, 采用外标法定量。

1.3.12 食用土当归美拉德反应产物的测定

1.3.12.1 反应产物的提取制备

制备料液比 1:5 (g:mL) 的样品甲醇溶液, 超声 (40 kHz) 60 min, 10 000 r/min 离心 15 min 后, 收集上清液, 重复提取两次, 用于后续美拉德反应产物的测定。

1.3.12.2 5-羟甲基糠醛测定

参考 GB/T 18932.18-2003 《蜂蜜中羟甲基糠醛含量的测定方法 液相色谱-紫外检测法》测定 5-羟甲基糠醛含量^[31]。

色谱柱: Agilent Eclipse CDB-C₁₈ 色谱柱 (4.6×150 mm, 5 μm)。流动相: A: 0.01% 甲酸水; B: 甲醇; 流量: 1 mL/min; 进样量: 10 μL; 柱温: 40 °C; 波长: 283 nm; 洗脱梯度: 0~1 min, 5% B; 1~4 min, 50% B; 4~6 min, 90% B; 6~7 min, 5% B。检测器: 紫外检测器。

1.3.12.3 晚期糖基化产物及蛋白质氧化产物测定

参考 Lan 等^[32]的方法, 使用荧光分光光度计分别在 355/405、330/415、365/480 和 325/434 nm 的激发/发射波长下测定样品中 AGEs、蛋白质氧化产物 (二酪氨酸、犬尿氨酸和 N-甲酰基犬尿氨酸) 的荧光强度, 分别记作食用土当归 AGEs 以及蛋白质氧化产物的水平。

1.3.12.4 类黑精测定

参考 Lotfy 等^[33]的方法, 使用紫外-可见分光光度计在 420 nm (MR 终产物的特定波长) 下测定吸光度。

1.3.13 食用土当归抗氧化能力的测定

1.3.13.1 食用土当归提取物制备

制备料液比 0.5:10 (g:mL) 的样品甲醇溶液, 超声 (40 kHz) 30 min, 抽滤得到样品母液, 用于后续抗氧化能力的测定。

1.3.13.2 DPPH 自由基清除能力

参照 Lin 等^[34]的方法测定 DPPH 自由基清除率, 稍加修改。100 μL 当归甲醇溶液与 2.9 mL DPPH 溶液混匀后, 避光反应 30 min, 517 nm 处测定吸光度。

使用公式 (4) 计算 DPPH 自由基清除率:

$$D = \left(1 - \frac{A - A_1}{A_0}\right) \times 100\% \quad (4)$$

式中:

D ——DPPH 自由基清除率, %;

A ——样品吸光度;

A_1 ——甲醇空白溶液吸光度;

A_0 ——DPPH+ 甲醇空白吸光度。

1.3.13.3 ABTS⁺自由基清除能力

参照孙兆岳等^[35]的方法测定样品的 ABTS⁺ 自由基清除能力, 稍加修改。50 μL 当归甲醇溶液加入 200 μL ABTS 工作液, 室温避光反应 6 min 后于 734 nm 测定吸光值。按式 (5) 计算 ABTS⁺ 自由基清除率:

$$B = \left(1 - \frac{A - A_1}{A_0}\right) \times 100\% \quad (5)$$

式中:

B ——ABTS⁺ 自由基清除率, %;

A ——样品吸光度;

A_1 ——甲醇空白溶液吸光度;

A_0 ——ABTS+ 甲醇空白吸光度。

1.3.13.4 总抗氧化能力 (FRAP法)

参照杨丽阳等^[36]的方法, 并稍加修改。5 μL 当归甲醇溶液和 180 μL FRAP 溶液混合, 37 °C 孵育 10 min, 于 593 nm 处测量吸光度。采用不同浓度 (0.05~0.5 mmol/L) 的 FeSO₄ 制备标准曲线。FRAP 值表示为 mmol FeSO₄/g。

1.4 数据分析

采用 SPSS 22.0 软件对实验数据进行分析, 使用单因素方差分析 (ANOVA) 获得每个数据的平均值之间的差异, $P < 0.05$ 表示差异显著。采用 Pearson 法进行相关性分析。使用 Origin Pro 9.2 创建数据图片。采用 Ward 最小方差和欧式距离法对不同干燥后的样品及各品质指标进行聚类分析。

2 结果与分析

2.1 干燥处理对食用土当归实物以及微观结构的影响

不同干燥方式对食用土当归实物以及微观结构的影响如图 1 所示。鲜样表观平整, VFD 处理后的样品表观与鲜样最接近, 无弯曲与收缩现象; 随着温度的升高, HAD 样品收缩现象加剧; VD 也表现出严重的收缩与弯曲。扫描电镜图显示鲜样的细胞规则排列, 孔洞均匀; VFD 处理后的样品出现蜂

窝状多孔结构，可能是由于预冻时细胞内的自由水被冻结成小冰晶，冰晶在真空环境下升华^[37]。VD、HAD 组食用土当归的微观结构呈现了不同程度的褶皱。随着温度的升高，HAD 样品表面散落的淀粉颗粒逐渐糊化，细胞收缩加剧^[38]。VD 样品表面出现了结构收缩坍塌，可能由于在真空环境下水分迅速汽化溢出导致^[39]。

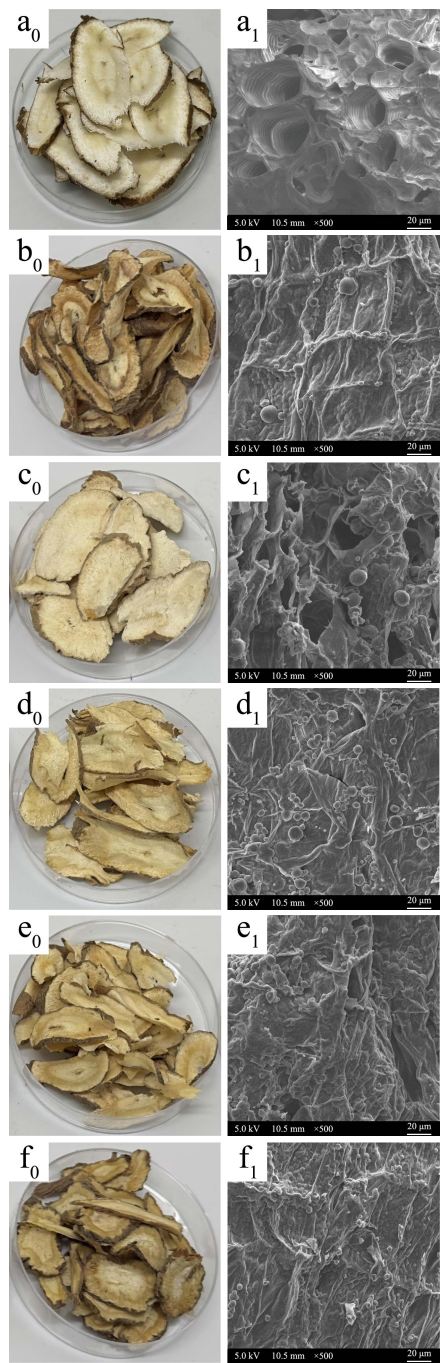


图 1 不同干燥方式制备的食用土当归片的实物以及 SEM 图
Fig.1 The samples of *Aralia cordata* Thunb tablet by different drying methods and scanning electron micrograph

注：a~f 分别为鲜样、VD、VFD、50HAD、60HAD、70HAD。下标 0 为实物图；下标 1 为放大 500 倍图。

2.2 干燥处理对食用土当归硬度、咀嚼度、脆性的影响

由图 2 可知，VFD 处理组样品的硬度、咀嚼度、脆性与其他处理组样品差异显著 ($P<0.05$)，VFD 样品硬度 (200.38 g) 和咀嚼度 (105.74 g/sec) 最小，脆性 (1.38 mm) 最大，结合微观结构，表明 VFD 处理产生的蜂窝状多孔结构降低了样品的硬度和咀嚼性，提高了样品脆性。随着 HAD 温度的升高，样品硬度和咀嚼性显著增加 ($P<0.05$)。HAD 过程中，样品表面的水分较快迅速汽化，内部水分迁移到表面的速度较慢，从而使样品表面迅速形成一层硬膜，且表面坍塌的细胞结构在水分蒸发过程中受到进一步挤压，显著增加了样品的硬度。此外，VD 样品的硬度较高，这可能由于真空干燥过程中水分迅速汽化，导致样品结构塌陷、收缩，从而提高了样品的硬度^[40]。

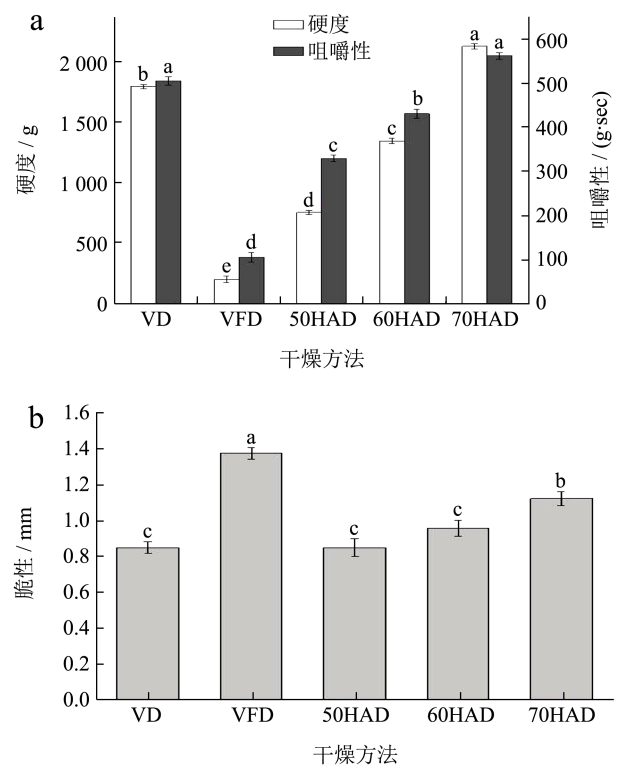


图 2 不同干燥方式对食用土当归硬度、咀嚼度 (a) 和脆性 (b) 的影响

Fig.2 Effects of different drying methods on hardness chewiness (a) and fragility (b) of *Aralia cordata* Thunb

注：图中不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

2.3 干燥处理对食用土当归复水比的影响

在干燥过程中，物料内部不可逆转的细胞错位或破坏，会导致细胞完整性缺失、毛细管收缩、组

织结构塌陷，从而降低干制品的复水效果^[41]。食用土当归的复水比如图 3 所示，VFD 复水比最高（3.55），VFD 处理产生的多孔蜂窝状结构增加了样品复水能力。70HAD 样品的复水比最低（2.60），这可能由于细胞收缩以及淀粉糊化并粘附在细胞表面进而阻碍了水分吸收^[42]。

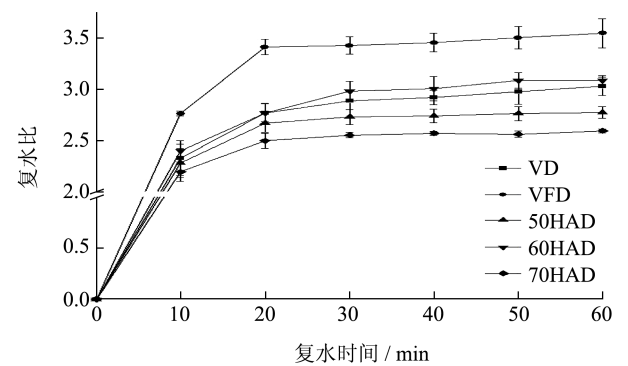


图 3 不同干燥方式对食用土当归复水性的影响
Fig.3 Effects of different drying methods on rehydration ratio of *Aralia cordata* Thunb

2.4 干燥处理对食用土当归主要色泽的影响

颜色是影响消费者接受度和干当归市场价值的关键指标。由表 2 可知，VFD 处理后的样品色差值最小（ $\Delta E=6.39$ ），表观色泽与鲜当归最接近，表明低温和真空的环境抑制了酶促和非酶促褐变反应发生^[38]。随着温度的升高，HAD 处理的样品 L^* 值显

著降低， a^* 、 b^* 、 ΔE 、BI 值显著增加（ $P<0.05$ ）。VD 处理的样品 BI 值为 30.98，仅次于 70HAD，表明 VD 长时间的干燥增加了样品褐变程度^[30]。

2.5 干燥处理对食用土当归主要成分的影响

如表 3 所示，不同干燥方式样品的灰分无显著差异（ $P>0.05$ ）。VFD 组样品总糖和还原糖的含量最高，分别为 68.25、7.13 g/200 g。随着温度升高，HAD 样品的总糖和还原糖含量降低，表明高温处理加速了糖类物质的降解^[43]。

VFD 处理的样品蛋白质含量显著高于其他样品（ $P<0.05$ ），为 6.99 g/100 g；随着温度的升高，HAD 处理的样品蛋白质含量逐渐降低，70HAD 处理的样品蛋白质含量最低，为 1.74 g/100 g，表明真空低温的环境有效的抑制了样品中蛋白质的变性和氧化分解。

不同干燥方法对食用土当归阿魏酸和藁本内酯的影响差异显著（ $P<0.05$ ）。相比 VFD 组，VD 组样品的阿魏酸含量显著降低（ $P<0.05$ ），表明 VD 长时间的热干燥导致阿魏酸分解^[44]。VD 组阿魏酸含量显著高于 50HAD（ $P<0.05$ ），表明真空环境能有效防止阿魏酸氧化。VD、VFD 组藁本内酯含量均高于 HAD 组（ $P<0.05$ ），分别为 10.81、9.27 mg/g，表明真空以及低温的环境能有效防止藁本内酯的挥发。

表 2 不同干燥方式对食用土当归色泽的影响

Table 2 Effects of different drying methods on color of *Aralia cordata* Thunb

干燥方法	L^*	a^*	b^*	ΔE	BI
VD	76.75 ± 0.38^c	2.34 ± 0.12^a	19.52 ± 0.15^b	16.28 ± 0.34^b	30.98 ± 0.36^b
VFD	83.82 ± 0.61^b	1.12 ± 0.19^c	12.62 ± 0.16^c	6.39 ± 0.38^c	16.94 ± 0.34^c
50HAD	80.48 ± 0.87^c	1.56 ± 0.13^b	18.62 ± 0.32^c	13.37 ± 1.29^d	27.17 ± 0.70^d
60HAD	79.20 ± 0.53^d	1.83 ± 0.13^b	19.32 ± 0.47^b	14.40 ± 0.48^c	29.07 ± 0.78^c
70HAD	76.08 ± 1.05^c	2.12 ± 0.20^a	20.31 ± 0.26^a	17.27 ± 0.73^a	32.45 ± 0.75^a

注：同列不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。下同。

表 3 不同干燥方式对食用土当归主要成分影响

Table 3 Effects of different drying methods on the main components and color of *Aralia cordata* Thunb

干燥方法	总糖/(g/100 g)	还原糖/(g/100 g)	蛋白质/(g/100 g)	灰分/(g/100 g)	阿魏酸/(μ g/g)	藁本内酯/(mg/g)
VD	42.71 ± 3.01^{bc}	1.88 ± 0.39^d	2.36 ± 0.00^{bc}	3.08 ± 0.00^a	27.32 ± 1.26^d	10.81 ± 0.78^a
VFD	68.25 ± 0.03^a	7.13 ± 0.52^a	6.99 ± 0.01^a	3.21 ± 0.00^a	37.51 ± 1.82^c	9.27 ± 0.56^b
50HAD	61.02 ± 1.83^a	5.45 ± 0.66^b	2.60 ± 0.00^b	3.11 ± 0.00^a	16.32 ± 0.70^c	5.49 ± 0.06^d
60HAD	49.71 ± 1.46^b	2.72 ± 0.25^c	2.14 ± 0.00^{bc}	3.01 ± 0.00^a	49.82 ± 0.61^a	7.24 ± 0.12^c
70HAD	38.51 ± 1.40^d	1.49 ± 0.09^d	1.74 ± 0.00^d	2.98 ± 0.00^a	42.05 ± 2.45^b	7.96 ± 0.11^c

表 4 不同干燥方式对食用土当归多糖理化性质以及组成的影响

Table 4 Effects of different drying methods on physicochemical properties and composition the polysaccharides of *Aralia cordata* Thunb

当归粗多糖	总糖/(g/100 g)	蛋白质/(g/100 g)	单糖组成及摩尔比 mol/%				分子量 <i>M_w</i> /(kDa)
			阿拉伯糖	半乳糖	葡萄糖	半乳糖醛酸	
ACPs-V	66.38 ± 0.43 ^d	0.97 ± 0.12 ^c	0.20	0.46	9.21	0.13	108.36
ACPs-F	67.01 ± 0.85 ^d	0.06 ± 0.03 ^d	0.33	0.62	8.65	0.41	16.16
ACPs-50H	71.47 ± 0.06 ^a	1.51 ± 0.13 ^a	0.29	0.58	8.78	0.34	80.85
ACPs-60H	69.96 ± 0.34 ^b	1.30 ± 0.04 ^b	0.23	0.47	9.11	0.19	116.00
ACPs-70H	68.65 ± 0.47 ^c	0.99 ± 0.03 ^c	0.24	0.52	9.05	0.20	104.55

表 5 不同干燥方式对食用土当归氨基酸含量与组成的影响

Table 5 Effects of different drying methods on amino acid content and composition of *Aralia cordata* Thunb

氨基酸	含量/(mg/g)				
	VD	VFD	50HAD	60HAD	70HAD
天冬氨酸 Asp	18.69 ± 0.08 ^d	21.14 ± 0.07 ^a	16.51 ± 0.31 ^c	19.27 ± 0.24 ^c	20.28 ± 0.08 ^b
苏氨酸 Thr*	9.23 ± 0.09 ^a	9.43 ± 0.20 ^a	7.29 ± 0.19 ^b	9.47 ± 0.19 ^a	9.17 ± 0.14 ^a
丝氨酸 Ser	9.84 ± 0.03 ^c	10.35 ± 0.21 ^{ab}	8.30 ± 0.14 ^d	10.53 ± 0.23 ^a	10.16 ± 0.16 ^b
谷氨酸 Glu	23.65 ± 0.04 ^d	26.69 ± 0.10 ^a	20.35 ± 0.20 ^c	24.64 ± 0.32 ^c	25.72 ± 0.26 ^b
甘氨酸 Gly	7.87 ± 0.04 ^a	7.76 ± 0.13 ^a	6.49 ± 0.13 ^d	7.50 ± 0.12 ^b	7.09 ± 0.08 ^c
丙氨酸 Ala	7.78 ± 0.06 ^a	6.63 ± 0.20 ^{bc}	5.67 ± 0.14 ^d	6.81 ± 0.02 ^b	6.54 ± 0.14 ^c
胱氨酸 Cys	8.72 ± 0.10 ^{ab}	8.45 ± 0.16 ^b	4.71 ± 0.10 ^d	8.79 ± 0.15 ^a	7.99 ± 0.17 ^c
缬氨酸 Val*	10.51 ± 0.05 ^c	10.73 ± 0.11 ^b	8.57 ± 0.15 ^c	10.94 ± 0.09 ^a	10.15 ± 0.15 ^d
蛋氨酸 Met*	4.63 ± 0.08 ^b	4.56 ± 0.05 ^b	3.45 ± 0.16 ^d	5.40 ± 0.13 ^a	4.31 ± 0.19 ^c
异亮氨酸 Ile*	6.06 ± 0.06 ^a	5.63 ± 0.10 ^b	4.57 ± 0.05 ^c	5.68 ± 0.20 ^b	5.56 ± 0.32 ^b
亮氨酸 Leu*	12.07 ± 0.06 ^c	13.34 ± 0.08 ^a	10.62 ± 0.10 ^{dc}	12.49 ± 0.19 ^b	12.32 ± 0.10 ^b
酪氨酸 Tyr	6.84 ± 0.04 ^b	7.30 ± 0.07 ^a	5.69 ± 0.11 ^c	7.19 ± 0.11 ^a	7.19 ± 0.07 ^a
苯丙氨酸 Phe*	15.06 ± 0.04 ^a	14.22 ± 0.10 ^c	11.34 ± 0.18 ^c	14.53 ± 0.13 ^b	13.94 ± 0.15 ^d
组氨酸 His	5.93 ± 0.11 ^b	5.81 ± 0.09 ^{bc}	5.38 ± 0.24 ^d	6.51 ± 0.36 ^a	5.43 ± 0.22 ^c
赖氨酸 Lys*	11.77 ± 0.14 ^b	12.67 ± 0.16 ^a	9.53 ± 0.08 ^d	12.47 ± 0.15 ^a	11.38 ± 0.31 ^c
精氨酸 Arg	14.27 ± 0.21 ^c	16.65 ± 0.21 ^b	17.37 ± 0.18 ^a	17.40 ± 0.17 ^a	17.43 ± 0.20 ^a
脯氨酸 Pro	17.57 ± 0.11 ^a	16.55 ± 0.07 ^b	11.21 ± 0.08 ^c	14.19 ± 0.20 ^d	14.97 ± 0.14 ^c
TAA	190.51 ± 0.35 ^c	197.90 ± 0.42 ^a	157.05 ± 1.66 ^d	193.82 ± 1.09 ^b	189.64 ± 2.49 ^c
EAA	69.34 ± 0.52 ^b	70.57 ± 0.79 ^{ab}	55.37 ± 0.9 ^d	70.98 ± 1.09 ^a	66.83 ± 1.35 ^c

注: * 表示必需氨基酸。

2.6 干燥处理对食用土当归多糖理化性质以及组成的影响

不同干燥方式对食用土当归多糖理化性质的影响见表 4。HAD 处理的样品粗多糖中总糖和蛋白质含量显著高于 VFD ($P<0.05$), 可能由于热处理促进了多糖和蛋白质相互作用形成多糖-蛋白质复合物, 从而增加了总糖和蛋白质含量^[45]。VFD 样品的半乳糖糖醛酸 (0.41 mol/L/%)、阿拉伯糖

(0.33 mol/L/%)、半乳糖 (0.62 mol/L/%) 的含量最高, 表明低温真空环境有利于单糖的保留。HAD、VD 样品的多糖分子量大于 VFD, 在热干燥过程中, 高温破坏了多糖的水合层, 使羟基暴露, 促进分子内和分子间的相互作用, 导致多糖聚集、分子量增加^[46]。相似地, Qin 等^[47]研究发现, 通过 HAD 和 VD 制备的秋葵多糖具有较高的分子量。

2.7 干燥处理对食用土当归氨基酸含量与组成的影响

氨基酸不仅是蛋白质的基本单位，也是味道和香气的前体物质。由表 5 可知，食用土当归富含 17 种氨基酸，含人体必需的 7 种氨基酸，其中谷氨酸、精氨酸、天冬氨酸和脯氨酸的含量丰富。VFD 样品的总氨基酸 (Total Amino Acid, TAA) 含量 (197.90 mg/g) 和必需氨基酸 (Essential Amino Acid, EAA) 含量 (70.57 mg/g) 最高，表明 VFD 处理能较好地保留样品的氨基酸含量。HAD 样品 EAA 趋势与 TAA 一致，VD 样品 EAA 含量与 VFD 样品无显著差异 ($P>0.05$)，且显著高于 50HAD，表明真空环境能有效防止 EAA 的损失。

2.8 干燥处理对食用土当归美拉德产物的影响

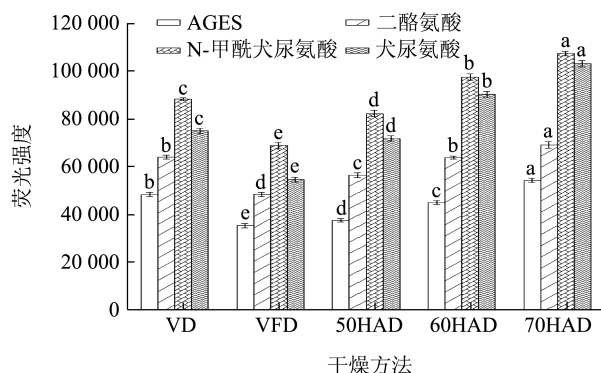


图 4 不同干燥方式对食用土当归 AGEs 以及蛋白质氧化产物的影响

Fig.4 Effects of different drying methods on advanced glycosylation end products and protein oxidation products of *Aralia cordata* Thunb

注：图中不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。图 5、图 6 同。

食用土当归常被作为传统的滋补品食用，控制当归干燥过程中 MRP 的产生至关重要。图 4 所示，HAD 样品显示出更高水平的 AGEs 和蛋白质氧化产物 (二酪氨酸、犬尿氨酸和 N-甲酰犬尿氨酸)。随着温度的升高，HAD 处理样品的美拉德产物 (5-HMF、AGEs)、蛋白质氧化产物 (二酪氨酸、犬尿氨酸和 N-甲酰基犬尿氨酸) 和类黑精的含量增加，表明高温促进了美拉德反应的产生。值得注意的是，尽管在低温下干燥，VFD 样品中的 AGEs 水平相对较高 (35 533.33)，Tang 等^[30]对不同干燥枸杞的研究也发现相似的结果，可能由于在冷冻的过程中冰晶破坏了细胞的完整性，导致促氧化因子

的释放，蛋白质发生氧化，生成活性碳基化产物，促进了 AGEs 的形成^[48]。类黑精的含量能够反应 MRP 的水平。如图 5 所示，本研究中，70HAD 样品 MRP 值最大 (0.78)，VD 处理样品次之 (0.68)，表明高温或长时间的干燥会带来高水平的 MRP。相比之下，VFD 样品的 MRP 水平较低，反应了其良好的品质。

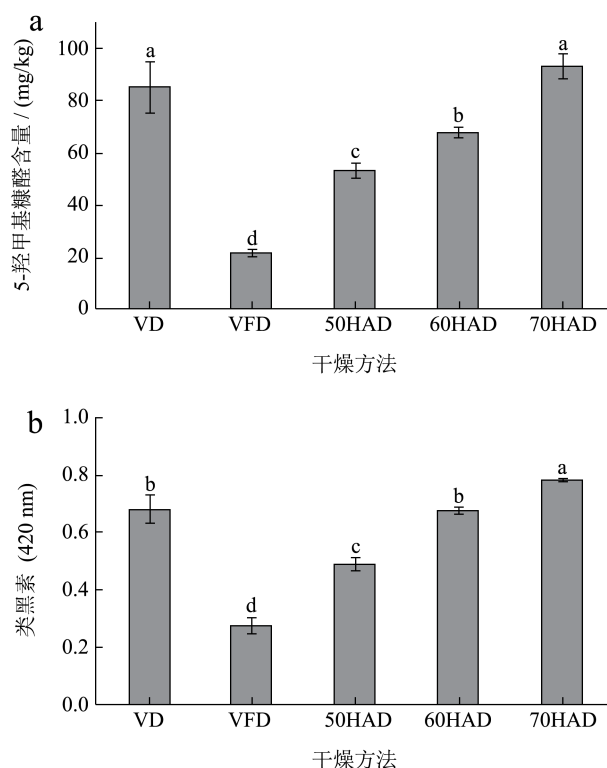


图 5 不同干燥方式对食用土当归 5-羟甲基糠醛含量 (a) 及类黑精 (b) 的影响

Fig.5 Effects of different drying methods on 5-hydroxymethylfurfural (a) and melanoidin (b) of *Aralia cordata* Thunb

2.9 干燥处理对食用土当归抗氧化能力的影响

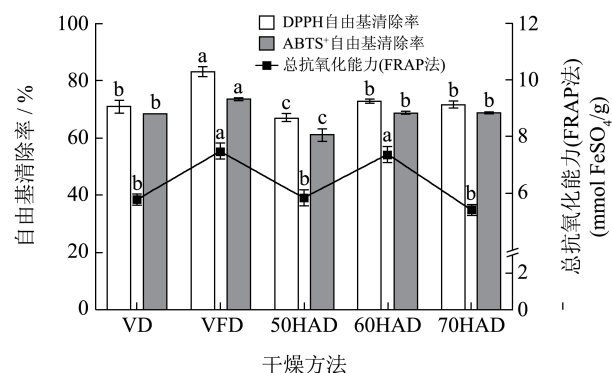


图 6 不同干燥方式对食用土当归抗氧化能力的影响

Fig.6 Effects of different drying methods on antioxidant capacity of *Aralia cordata* Thunb

图6表明了干燥方式对食用土当归抗氧化能力的影响。由图6可知, VFD处理下食用土当归提取物的DPPH、ABTS⁺自由基清除率显著高于其他处理($P<0.05$), 分别为83.12%和73.51%, 且FRAP最高(7.49 mmol FeSO₄/g), 表明VFD处理有利于当归样品抗氧化能力的保持。70HAD表现出高水平的抗氧化能力, 这可能是由于美拉德反应产生的类黑精具有较高的金属离子螯合活性和抗氧化能力^[49]。

2.10 主成分分析结果

基于质构、复水比、色泽、主要化学成分、多糖、氨基酸组成、美拉德反应产物和抗氧化活性的实验结果, 对3种不同干燥方式处理的当归样品进行主成分分析, 观察不同干燥方式下样品的分布。主成分分析的得分图如图7所示, 第一主成分(PC1)方差贡献率为45.83%, 第二主成分(PC2)方差贡献率为36.71%, 累积方差贡献率达82.53%。

如图7所示, 3种干燥方式的样品分别位于PCA得分图的4个象限。60HAD和VD样品位于第三象限, 有较好的聚集性, 说明这两种干燥方式下的食用土当归品质接近。VFD样品分布于第四象限, 50HAD样品位于第一象限, 两者距离最远, 表明VFD和50HAD差异明显。

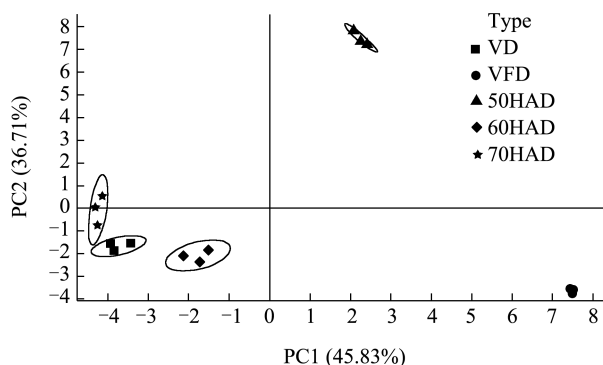


图7 PCA得分图

Fig.7 PCA score plot

2.11 聚类分析结果

聚类分析结果如图8所示, 3种不同干燥方式被分为4类: 第一类为VFD; 第二类为50HAD; 第三类为70HAD; 第四类为VD和60HAD。其中VFD与其他2种干燥方式差异最大, 这是由于冷冻真空干燥的低温环境与其他2种热干燥有较大的区别; 真空干燥与热风干燥相似, 其美拉德反应产物、硬度、咀嚼性较高, 还原糖、总糖含量和蛋白质较低,

主要差异在于组织结构不同。聚类分析结果与主成分分析结果相似, 同时也综合体现了3种干燥方式之间的差异性。

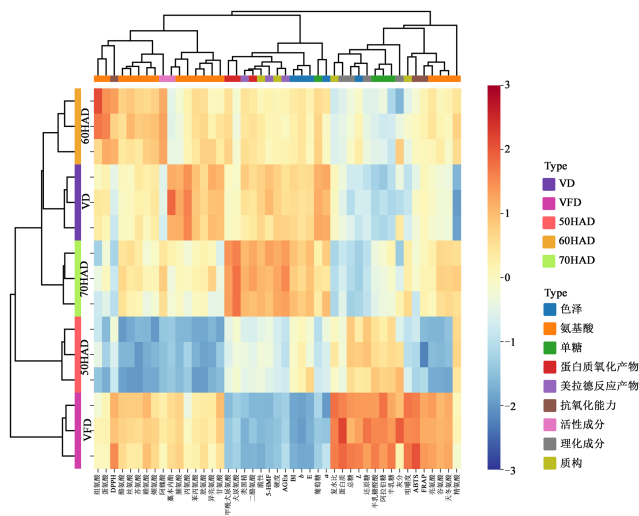


图8 聚类分析热图

Fig.8 Cluster analysis heatmap

2.12 相关性分析结果

采用皮尔森双尾检验, 对3种干燥方式处理下的干燥食用土当归样品的理化性质和抗氧化活性进行相关性分析。结果如图9所示, 部分化学组分及质地、复水比之间存在较强的相关性。总糖、还原糖、蛋白质、阿拉伯糖、半乳糖、半乳糖醛酸含量与硬度和咀嚼性呈极显著负相关($P<0.01$), 与复水比呈极显著正相关($P<0.01$)。葡萄糖含量与硬度和咀嚼性呈极显著正相关($P<0.01$), 与复水比呈极显著负相关($P<0.01$)。可能由于在干燥过程中, 食用土当归表面的淀粉糊化, 提升了表面的硬度和咀嚼性, 并阻碍了复水时水分的吸收^[42]。阿魏酸和藁本内酯含量与ABTS⁺自由基清除率呈极显著正相关($P<0.01$), 类黑精与DPPH自由基清除率、FRAP抗氧化能力呈显著负相关($P<0.05$)。可能由于类黑精是在MR晚期阶段形成, 其形成过程中消耗了抗氧化物质, 从而降低了抗氧化能力^[50]。

食用土当归在干燥后的色泽变化与总糖、还原糖、蛋白质、蛋白质氧化产物、美拉德反应产物、单糖含量有关。总糖、还原糖、阿拉伯糖、半乳糖、半乳糖醛酸含量与干燥后当归总色差、 a^* 、 b^* 、BI含量呈极显著负相关($P<0.01$), 葡萄糖、美拉德反应产物含量与总色差、 a^* 、 b^* 、BI含量呈极显著正相关($P<0.01$); 总糖、还原糖、阿拉伯糖、半乳糖、半乳糖醛酸含量与 L^* 值极显著正相关

($P < 0.01$), 葡萄糖、美拉德反应产物、蛋白质氧化产物含量与 L^* 值极显著负相关 ($P < 0.01$); 丙氨酸含量与 a^* 值显著正相关 ($P < 0.05$), 亮氨酸与 b^* 值显著负相关 ($P < 0.05$)。结果表明, 干燥产生的美拉德反应产物降低了干燥土当归的 L^* , 并提高了干燥土当归的总色差、 a^* 、 b^* 、BI 值。

总糖、还原糖、蛋白质与美拉德反应产物、蛋白质氧化产物含量极显著负相关 ($P < 0.01$), 葡萄糖和 N-甲酰基犬尿氨酸、晚期糖基化产物、5-HMF 和类黑精极显著正相关 ($P < 0.01$), 阿拉伯糖、半乳糖、半乳糖醛酸含量和 N-甲酰基犬尿氨酸、二酪氨酸、AGEs、5-HMF 和类黑精含量极显著负相关 ($P < 0.01$), 美拉德反应产物 (AGEs、5-HMF、类黑精) 和蛋白质氧化产物 (二酪氨酸、犬尿氨酸、N-甲酰基犬尿氨酸) 之间极显著正相关 ($P < 0.01$)。葡萄糖与胱氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、苯丙氨酸显著正相关 ($P < 0.05$), 与丙氨酸极显著正相关 ($P < 0.01$)。因此推测在干燥过程中, 葡萄糖与氨基酸参与了美拉德反应, 促进了美拉德反应产物和蛋白质氧化产物的产生。

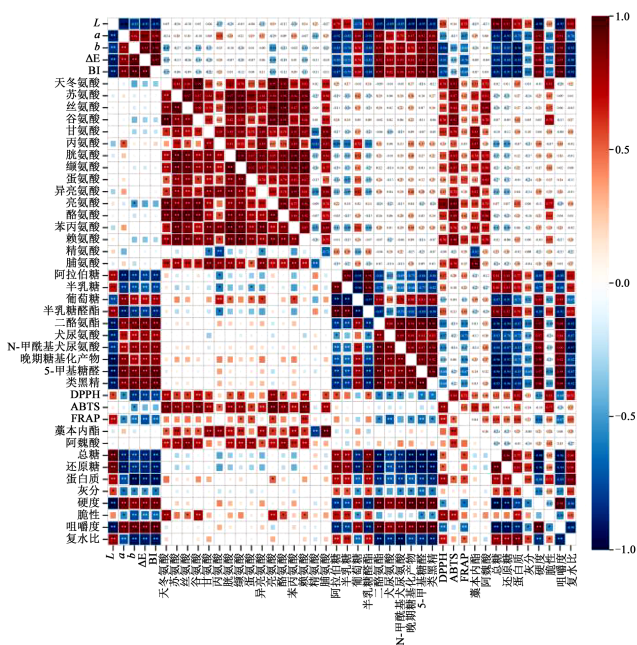


图 9 相关性分析

Fig.9 Correlation analysis

注: * 和 ** 表示分别表示相关性在 0.05 和 0.01 水平达到显著和极显著。

3 结论

通过热风干燥、真空干燥、真空冷冻干燥 3 种干燥技术处理食用土当归, 揭示了温度和真空度对

食用土当归品质和美拉德反应产物积累的影响。结果表明: 1) VFD 样品组织结构完整, 具有良好的复水比, 色泽与鲜样最接近; HAD、VD 样品结构塌陷; HAD 样品随着干燥温度升高, 色泽劣变加剧。2) 低温以及真空干燥有利于保持糖类物质、氨基酸、阿魏酸等营养物质; HAD 有利于酚酸类物质的溶出和提取。3) 样品的抗氧化能力与阿魏酸和鞣本内酯含量相关。4) 高温以及长时间的干燥促进了 5-HMF、类黑精、AGEs 以及蛋白质氧化产物 (二酪氨酸、犬尿氨酸和 N-甲酰基犬尿氨酸) 的产生。

综上, VFD 处理的综合品质较为突出, 是食用土当归较理想的干燥方式, 但 VFD 成本高、效率低、干燥时间长, 不适合大规模生产应用; VD 样品的干燥时间较长且美拉德反应产物水平较高, 品质较差; 同比之下, 60HAD 设备成本低、批次处理量大, 干燥时间较短且品质较好。因此, 60HAD 是实际生产应用中干燥食用土当归优选方式。此研究为食用土当归的干燥与加工提供了理论依据与技术支持。

参考文献

- [1] 包柏林. 中药九眼独活的研究 [J]. 药实践杂志, 1998, 1: 34-38.
- [2] 王忠壮, 苏中武, 李承祜, 等. 中药九眼独活的商品调查及生药鉴定 [J]. 中国中药杂志, 1994, 12: 707-709, 761.
- [3] 杨菁, 彭腾, 禹亚杰. 食用土当归总有机酸的抗炎镇痛作用 [J]. 中成药, 2016, 38(10): 2117-2121.
- [4] CHO J H, LEE J Y, SIM S S, et al. Inhibitory effects of diterpene acids from root of *Aralia cordata* on IgE-mediated asthma in guinea pigs [J]. Pulmonary Pharmacology & Therapeutics, 2010, 23(3): 190-199.
- [5] SUH S J, KWAK C H, CHUNG T W, et al. Pimaric acid from *Aralia cordata* has an inhibitory effect on TNF- α -induced MMP-9 production and HASMC migration via down-regulated NF- κ B and AP-1 [J]. Chemico-Biological Interactions, 2012, 199(2): 112-119.
- [6] OCK C S, BAN J Y, YOUNG K J, et al. *Aralia cordata* protects against amyloid β protein (25-35)-induced neurotoxicity in cultured neurons and has antidementia activities in mice [J]. Journal of Pharmacological Sciences, 2009, 111(1): 22-32.
- [7] KIM M O, LEE S H, SEO J H, et al. *Aralia cordata* inhibits triacylglycerol biosynthesis in HepG2 cells [J]. Journal of Medicinal Food, 2013, 16(12): 1108-1114.
- [8] 蒲兰香, 唐天君, 袁小红, 等. 不同产地九眼独活挥发油成分分析 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(17): 8946-8948.
- [9] 蒋紫艳, 阳桂平. 食用土当归地下虫害防治试验 [J]. 蔬菜, 2023, 7: 47-50.

- [10] 彭腾,董小萍,邓赞,等.栽培食用土当归根的化学成分研究[J].中药材,2005,11:31-33.
- [11] 陈琳琳,孙晶,祝秀梅,等.不同加工过程中当归化学成分变化的研究进展[J].食品研究与开发,2023,44(23):209-216.
- [12] LUO D, WU J, MA Z, et al. Production of high sensory quality Shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) by pulsed air-impingement jet drying (AID) technique [J]. Food Chemistry, 2021, 341: 128290.
- [13] 刘芹,胡素娟,崔筱,等.不同干燥温度对金针菇根挥发性特征和口感特性的影响[J].食品科学,2023,44(7):104-113.
- [14] ZHANG C, LIU D, GAO H. Kinetics, physicochemical properties, and antioxidant activities of *Angelica keiskei* processed under four drying conditions [J]. LWT, 2018, 98: 349-357.
- [15] 宋来辉,张睿,许天阳,等.不同干燥方法和干燥温度对人参饮片化学成分含量及抗氧化活性影响[J].时珍国医国药,2023,34(10): 2412-2418.
- [16] AJANDOUZ E H, DESSEAUX V, TAZI S, et al. Effects of temperature and pH on the kinetics of caramelisation, protein cross-linking and Maillard reactions in aqueous model systems [J]. Food Chemistry, 2008, 107(3): 1244-1252.
- [17] XIAO S S, SHI L, WANG P C, et al. Determination of N ϵ -(carboxymethyl)lysine in commercial dairy products in China with liquid chromatography tandem mass spectroscopy [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16(1): 714-721.
- [18] WU C H, YEH C T, SHIH P H, et al. Dietary phenolic acids attenuate multiple stages of protein glycation and high-glucose-stimulated proinflammatory IL-1 β activation by interfering with chromatin remodeling and transcription in monocytes [J]. Molecular Nutrition and Food Research, 2010, 54: S127-S140.
- [19] NOWOTNY K, SCHRÖTER D, SCHREINER M, et al. Dietary advanced glycation end products and their relevance for human health [J]. Ageing Research Reviews, 2018, 47: 55-66.
- [20] LI J X, ZHANG Y. Emerging drug targets for pain treatment [J]. European Journal of Pharmacology, 2012, 681(1): 1-5.
- [21] BATKULWAR K, GODBOLE R, BANARJEE R, et al. Advanced glycation end products modulate amyloidogenic APP processing and tau phosphorylation: a mechanistic link between glycation and the development of Alzheimer's disease [J]. ACS Chemical Neuroscience, 2018, 9(5): 988-1000.
- [22] LIU Q, BAU T, JIN R, et al. Comparison of different drying techniques for shiitake mushroom (*Lentinus edodes*): changes in volatile compounds, taste properties, and texture qualities [J]. LWT, 2022, 164: 113651.
- [23] INLA K, BUNCHAN S, KRITTACOM B, et al. Drying behavior, color change and rehydration of lingzhi mushroom (*Ganoderma lucidum*) under convection-assisted microwave drying [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 49: 103348.
- [24] FEUMBA D R, PANYOO A E, RANI P A, et al. Effect of microwave blanching on antioxidant activity, phenolic compounds and browning behaviour of some fruit peelings [J]. Food Chemistry, 2020, 302: 125308.
- [25] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.GB 5009.3-2016,食品安全国家标准 食品中水分的测定[S].北京:中国标准出版社.2016.
- [26] 廖玉琴,任中阳,石林凡,等.干制过程中鲍鱼肌肉理化性质和挥发性风味的变化[J].食品科学,2023,44(12):252-261.
- [27] ZHANG W H, WU J, WENG L, et al. An improved phenol-sulfuric acid method for the determination of carbohydrates in the presence of persulfate [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 227: 115332.
- [28] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.GB 5009.4-2016,食品安全国家标准 食品中灰分的测定[S].北京:中国标准出版社.2016.
- [29] 姚艳婷,杨小兵,陈旭洁,等.富硒蛹虫草多糖的结构表征及体外免疫调节活性[J].食品科学,2023,44(22):39-48.
- [30] TANG X, ZHANG Y, LI F, et al. Effects of traditional and advanced drying techniques on the physicochemical properties of *Lycium barbarum* L. polysaccharides and the formation of Maillard reaction products in its dried berries [J]. Food Chemistry, 2023, 409:135268.
- [31] GB/T 18932.18-2003,蜂蜜中羟甲基糠醛含量的测定方法 液相色谱-紫外检测法[S].
- [32] LAN M Y, LI H M, TAO G, et al. Effects of four bamboo derived flavonoids on advanced glycation end products formation *in vitro* [J]. Journal of Functional Foods, 2020, 71: 103976.
- [33] LOTFY S N, SAAD R, EL M K F, et al. Effects of pH on headspace volatiles and properties of Maillard reaction products derived from enzymatically hydrolyzed quinoa protein-xylose model system [J]. LWT, 2021, 145: 111328.
- [34] LIN Y, PANGLOLI P, MENG X, et al. Effect of heating on the digestibility of isolated hempseed (*Cannabis sativa* L.) protein and bioactivity of its pepsin-pancreatin digests [J]. Food Chemistry, 2020, 314: 126198.
- [35] 孙兆岳,崔文玉,程安玮.油用牡丹籽种皮多酚的提取及抗氧化和体外发酵特性[J].现代食品科技,2024,40(5): 162-170.
- [36] 杨丽阳,卢琪,杨德,等.不同预处理和干燥方式下养心菜粉色泽、功能成分和抗氧化性水平的比较[J].现代食品

- 科技,2024,40(4):245-256.
- [37] ZHU J, LIU Y, ZHU C, et al. Effects of different drying methods on the physical properties and sensory characteristics of apple chip snacks [J]. LWT, 2022, 154: 112829.
- [38] LI C, REN G, ZHANG L, et al. Effects of different drying methods on the drying characteristics and drying quality of *Cistanche deserticola* [J]. LWT, 2023, 184: 115000.
- [39] OZKAN K, KARADAG A, SAGDIC O. The effects of different drying methods on the *in vitro* bioaccessibility of phenolics, antioxidant capacity, minerals and morphology of black 'Isabel' grape [J]. LWT, 2022, 158: 113185.
- [40] HU D, LIU X, QIN Y, et al. The impact of different drying methods on the physical properties, bioactive components, antioxidant capacity, volatile components and industrial application of coffee peel [J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100807.
- [41] ZHANG X, ZHANG G, MIAO Y, et al. Effects of different drying methods on physico-chemical properties, bioactive and taste substances of *Cynomorium songaricum* [J]. LWT, 2023, 185: 115159.
- [42] AI Z, LIN Y, XIE Y, et al. Effect of high-humidity hot air impingement steaming on *Cistanche deserticola* slices: drying characteristics, weight loss, microstructure, color, and active components [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 824822.
- [43] 周禹含,毕金峰,陈芹芹,等.不同干燥方式对枣粉品质的影响[J].食品科学,2014,35(11):36-41.
- [44] SILPA V, ATHIRA V A, NANDULAL A M, et al. Influence of refrigerated adsorption dehumidified drying towards the retention of phenolic, flavonoid and antioxidant properties of small cardamom (*Elettaria cardamomum*): performance comparison with convection, solar and fluidized bed dryer [J]. Industrial Crops and Products, 2023, 200: 116839.
- [45] LIU W, LI F, WANG P, et al. Effects of drying methods on the physicochemical characteristics and bioactivities of polyphenolic-protein-polysaccharide conjugates from *Hovenia dulcis* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 148: 1211-1221.
- [46] AHMAD A, GULRAIZ Y, ILYAS S, et al. Polysaccharide based nano materials: Health implications [J]. Food Hydrocolloids for Health, 2022, 2: 100075.
- [47] YUAN Q, HE Y, XIANG P Y, et al. Influences of different drying methods on the structural characteristics and multiple bioactivities of polysaccharides from okra (*Abelmoschus esculentus*) [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 147: 1053-1063.
- [48] WU X, ZHANG Z, HE Z, et al. Effect of freeze-thaw cycles on the oxidation of protein and fat and its relationship with the formation of heterocyclic aromatic amines and advanced glycation end products in raw meat [J]. Molecules, 2021, 26(5):1264.
- [49] MESÍAS M, DELGADO A C. Melanoidins as a potential functional food ingredient [J]. Current Opinion in Food Science, 2017, 14: 37-42.
- [50] MANZOCCO L, CALLIGARIS S, MASTROCOLA D, et al. Review of non-enzymatic browning and antioxidant capacity in processed foods [J]. Trends in Food Science & Technology, 2000, 11(9): 340-346.