

## 不同干燥条件对枸杞热风干燥特性和品质的影响

王庆惠，罗燕，杨莉玲，刘佳，马文强，朱占江，王军，孟新涛

**Effects of Drying Conditions on Hot-air Drying Characteristics and Quality of Goji Berries**

WANG Qinghui, LUO Yan, YANG Liling, LIU Jia, MA Wenqiang, ZHU Zhanjiang, WANG Jun, and MENG Xintao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024050059>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 预处理方式及干燥温度对养心菜热风干燥特性与品质的影响

Effects of Physical Pretreatment Methods and Hot Air Temperatures on the Hot Air Drying Characteristics and Quality of Yangxincai (*Sedum aizoon* L.)

食品工业科技. 2021, 42(13): 210–215 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020100184>

#### 西梅热风干燥特性及品质的研究

Study on the Characteristics and Quality of Hot Air Drying of Prune

食品工业科技. 2023, 44(24): 103–110 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023030191>

#### 远红外辅助热风干燥对秋刀鱼片干燥特性及品质的影响

Effects of Far-infrared Assisted Hot Air Drying on the Drying Characteristics and Quality of Saury Fillets

食品工业科技. 2020, 41(21): 58–66 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020020141>

#### 微波-热风联合干燥茉莉花干燥特性及品质分析

Drying Characteristics and Quality Analysis of Jasmine with Combined Microwave and Hot Air Drying

食品工业科技. 2022, 43(11): 126–135 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021090267>

#### 八角热风干燥水分变化及品质分析

Moisture Transformation and Quality Analysis of Star anise During Hot Air Drying

食品工业科技. 2021, 42(14): 79–85 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020110075>

#### 真空冷冻与热风干燥对腐竹品质特性及微观结构的影响

Effects of Vacuum Freezing Drying and Hot-air Drying on the Quality Characteristics and Microstructure of Yuba Stick

食品工业科技. 2024, 45(16): 57–63 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023090070>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

王庆惠, 罗燕, 杨莉玲, 等. 不同干燥条件对枸杞热风干燥特性和品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(8): 202–210. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050059

WANG Qinghui, LUO Yan, YANG Liling, et al. Effects of Drying Conditions on Hot-air Drying Characteristics and Quality of Goji Berries[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(8): 202–210. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050059

· 工艺技术 ·

# 不同干燥条件对枸杞热风干燥特性和品质的影响

王庆惠<sup>1</sup>, 罗 燕<sup>2</sup>, 杨莉玲<sup>1</sup>, 刘 佳<sup>1</sup>, 马文强<sup>1</sup>, 朱占江<sup>1</sup>, 王 军<sup>3,\*</sup>, 孟新涛<sup>4,\*</sup>

(1.新疆维吾尔自治区农业科学院农业装备研究所,新疆乌鲁木齐 830091;

2.新疆农业大学机电工程学院,新疆乌鲁木齐 830052;

3.西北农林科技大学食品科学与工程学院,陕西杨凌 712100;

4.新疆维吾尔自治区农业科学院农产品加工研究所,新疆乌鲁木齐 830091)

**摘要:** 该研究以枸杞为研究对象,分析不同干燥温度(40、50、60 °C)、溶液浸泡(碳酸钠、亚硫酸钠、柠檬酸)以及阶段变温对枸杞的干燥特性、多糖、总酚、总黄酮、甜菜碱、类胡萝卜素、抗氧化能力和色泽的影响。结果表明:提高干燥温度、溶液浸泡预处理以及阶段变温干燥都能有效的缩短干燥时间。变温干燥枸杞中的多糖含量最高,溶液浸泡预处理后干燥的枸杞中总黄酮、甜菜碱、类胡萝卜素含量最高,采用亚硫酸钠溶液处理的DPPH自由基清除能力(76.11%)最高、总色差 $\Delta E$ (5.92)最小,采用变温干燥(40 °C, 10 h; 50 °C, 10 h; 60 °C, 10 h; 40 °C, 至结束)的总酚含量(10.24 mg GAE/g)最高。聚类分析结果表明,4类干燥方式之间存在差异,自然晾晒与其它干燥方式差异最大。相关性分析表明,枸杞的多糖、总酚、总黄酮、甜菜碱、类胡萝卜素含量之间存在相关性,除甜菜碱含量外,DPPH自由基清除能力与其它品质指标在统计学上无显著的相关性。采用溶液浸泡的方式可以保证枸杞品质的同时有效缩短干燥时间。该研究结果为枸杞干燥加工技术提升提供参考。

**关键词:** 热风干燥, 枸杞, 品质, 干燥特性, 处理条件, 聚类分析, 相关性分析

中图分类号: TS255.36

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2025)08-0202-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024050059

本文网刊:



## Effects of Drying Conditions on Hot-air Drying Characteristics and Quality of Goji Berries

WANG Qinghui<sup>1</sup>, LUO Yan<sup>2</sup>, YANG Liling<sup>1</sup>, LIU Jia<sup>1</sup>, MA Wenqiang<sup>1</sup>, ZHU Zhanjiang<sup>1</sup>,  
WANG Jun<sup>3,\*</sup>, MENG Xiantao<sup>4,\*</sup>

(1.Agricultural Equipment Institute, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China;

2.College of Mechanical and Electronic Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

3.College of Food Science and Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

4.Institute of Agricultural Products Processing, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China)

**Abstract:** This study investigated the quality of goji berries by analyzing the effects of three drying temperatures (40, 50, and 60 °C), immersion pretreatments in sodium carbonate, sodium sulfite, and citric acid solutions, and staged temperature variations on drying characteristics, polysaccharide, total phenolic, total flavonoid, betaine, carotenoid contents, 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) scavenging capacity and color. Results indicated that increasing the drying temperature,

收稿日期: 2024-05-09

基金项目: “天山英才”培养计划青年科技拔尖人才项目—青年科技创新人才培养项目(2022TSYCCX0069);“天山创新团队计划”项目(2023D14019);自治区重点研发计划项目子课题(2023B02009-2);自治区公益性科研院所基本科研业务费专项(KY2022013)。

作者简介: 王庆惠(1980-),女,博士,研究员,研究方向:农产品加工技术及装备,E-mail: 510945070@qq.com。

\*通信作者: 王军(1988-),男,博士,副教授,研究方向:果蔬贮藏与加工,E-mail: jun.wang@nwafu.edu.cn。

孟新涛(1985-),女,硕士,副研究员,研究方向:农产品贮运与加工,E-mail: mengxiantao\_929@126.com。

applying solution immersion pretreatments, or utilizing staged temperature variations shortened the drying time of goji berries. Specifically, goji berries dried using staged temperature variations exhibited the highest polysaccharide content, while those pretreated by immersion before drying showed higher levels of total flavonoids, betaine, and carotenoids. Additionally, goji berries pretreated with sodium sulfite solution demonstrated the highest DPPH scavenging capacity (76.11%) and the lowest total chromatic aberration ( $\Delta E=5.92$ ). In contrast, those dried using staged temperature variations (40 °C for 10 h, followed by 50 °C for 10 h, 60 °C for 10 h, and finally 40 °C until the completion of the drying process) revealed the highest total phenolic content (10.24 mg GAE/g). Cluster analysis indicated differences among the four drying methods, with natural sun drying displaying the greatest disparity compared with the other methods. Correlation analysis revealed correlations among polysaccharide, total phenolic, total flavonoid, and carotenoid contents. Except for betaine, the DPPH scavenging capacity showed an insignificant correlation with the other quality indices. Immersion pretreatment technology can produce high-quality dried goji berries while reducing drying time. These results provide a reference for improving the drying and processing technology of goji berries.

**Key words:** hot air drying; goji berries; quality; drying characteristics; treatment conditions; cluster analysis; correlation analysis

枸杞(goji berries)为茄科多年生落叶灌木,在我国西北及华北地区被广泛种植<sup>[1]</sup>。枸杞含有多糖、甜菜碱、维生素 C 和胡萝卜素等多种物质,具有改善肝脏功能、降低血压、调节人体免疫功能、保护视力和抗衰老等作用<sup>[2]</sup>,是药食同源的新时代水果之王,深受国内消费者青睐,在欧盟和北美也备受关注。枸杞成熟集中在夏秋两季,成熟后果实不仅皮薄,而且含糖量和含水率也较高,呼吸代谢强,在采摘及运输过程中极易受到损伤而出现腐败变质的现象。同时,大量鲜果集中上市给销售带来极大的困难。干燥是枸杞采后加工最广泛且保存最有效的方式<sup>[3]</sup>。传统自然晾晒的方式,虽然成本低且操作简单,但存在卫生条件差易受天气影响等问题,干燥后枸杞品质难以保证。随着枸杞产业的不断发展,改革产地干燥技术和工艺已成为解决枸杞产业发展的关键所在。

热风、微波、真空冷冻、远红外和真空脉动等方式用于枸杞干燥时有报道<sup>[4]</sup>。但由于热风干燥设备具有成本低,批次处理量大,操作维修方便等优点<sup>[5]</sup>,是目前枸杞产地加工最常见的干燥方式。吴励萍等<sup>[6]</sup>研究发现,干燥温度对枸杞中多糖、总酚、总黄酮、核苷类及氨基酸类组分含量影响较大,温度 40 °C 至枸杞子表皮皱缩后升温至 60 °C 是热风干燥的最佳温度。Batu 等<sup>[7]</sup>研究发现,干燥温度越高,所需的干燥时间越短,干燥后枸杞内的维生素 C 和 B6 及色泽均表现出最差的结果。吴中华等<sup>[8]</sup>采用变温干燥工艺对枸杞进行干燥,发现与单一温度相比,变温干燥后枸杞的多糖含量、颜色和复水率均优于单一温度。

本文以枸杞为研究对象,以市场上广泛使用的热风干燥技术为切入点,分别探讨不同温度、浸泡溶液以及阶段变温的方式对其干燥特性和品质指标的影响,确定较优的干燥方式,为其产业化应用提供技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

试验所用的枸杞品种为新杞 10 号 2023 年 7 月上旬采摘自新疆博尔塔拉蒙古自治州精河县托

里镇,挑选(外形尺寸、颜色及成熟度等基本一致、无破损)试验所需的枸杞后置于 4 °C 恒温恒湿箱保存备用,枸杞平均长轴直径(19.66±0.68)mm,短轴直径(11.61±0.32)mm,单粒重(1.18±0.45)g,初始湿基含水率(83.98±0.50)%(烘干法, 105 °C, 24 h)<sup>[9]</sup>;乙醇、苯酚、浓硫酸、碳酸钠、三氯化铝、氢氧化钠 分析纯,中国医药集团有限公司;芦丁、福林酚、没食子酸

上海源叶生物科技有限公司;正己烷、2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚 西格玛奥德里奇贸易有限公司。

热风干燥装置 新疆农业科学院农业机械化研究所自制;YP 型电子称 10 g, 上海精科仪器有限公司;V-5100 型分光光度计 上海元析仪器有限公司;DHG-9140A 型电热恒温鼓风干燥箱 上海一恒科技有限公司;TG 16G 高速离心机 湖南凯达科学仪器有限公司;YCW-160A 型台式恒温摇床 上海捷呈实验仪器有限公司;3nh 色差计 深圳市莱特仪器设备有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 枸杞干燥工艺 试验组:将枸杞单层均匀铺放在料盘上,每盘(600±1)g。分别采用恒温、溶液浸泡和变温热风干燥与自然晾晒的方式对枸杞进行干燥。参照文献 [3–4,10–11] 及预试验效果,制定不同干燥条件枸杞干燥试验。具体试验方案如表 1 所示。当枸杞湿基含水率降到 13% 时停止试验<sup>[1]</sup>。每组试验重复三次。

对照组:取(600±1)g 枸杞单层铺放在料盘内,置于室外阳光下,当枸杞湿基含水率降到 13% 时停止晾晒。

1.2.2 干燥特性分析 各组枸杞在干燥处理过程中每隔 2 h 取样称重,按式(1)计算枸杞的水分比(MR)<sup>[12]</sup>,记录枸杞 MR 随干燥时间的变化情况,并绘制干燥动力学曲线。

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad \text{式 (1)}$$

式中:  $M_0$ 、 $M_e$  和  $M_t$  分别表示枸杞的初始、干燥

表 1 试验方案  
Table 1 Experimental scheme

组号	干燥条件
1	40 ℃
2	50 ℃
3	60 ℃
4	先1%的碳酸钠溶液浸泡2 min, 再50 ℃干燥
5	先0.6%的亚硫酸钠溶液浸泡2 min, 再50 ℃干燥
6	先0.6%的柠檬酸溶液浸泡2 min, 再50 ℃干燥
7	40 ℃, 10 h; 50 ℃, 10 h; 60 ℃, 至结束
8	60 ℃, 10 h; 50 ℃, 10 h; 40 ℃, 至结束
9	40 ℃, 10 h; 50 ℃, 10 h; 60 ℃, 10 h; 40 ℃, 至结束
10	对照组(自然晾晒)

到平衡时以及干燥到 t 时刻枸杞的干基含水率, g/g。

1.2.3 提取液的制备 将干燥后的枸杞干加液氮研磨制粉, 准确称取 2.0 g 置入含 80 mL 70% 乙醇具塞三角瓶中, 室温避光 120 r/min 旋转振荡 4 d, 4 ℃、5000 r/min 离心 10 min, 移取上清液置于 4 ℃ 保存, 每个样品重复提取 3 次。

1.2.4 多糖含量测定 枸杞多糖多为可溶性糖, 多糖测定可采用硫酸苯酚法<sup>[13]</sup>, 略作修改。吸取稀释 10 倍的提取液 20 μL, 加入 1.0 mL 9.0% 的苯酚溶液, 摆匀, 加入 3.0 mL 浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 摆匀, 放置 30 min, 以不加样品溶液为对照, 在 485 nm 波长处测定吸光度, 重复 3 次, 绘制标准曲线, 按式(2)计算:

$$\text{多糖含量} = \frac{x_1 \times V_1 \times n_1}{m_1} \quad \text{式 (2)}$$

式中: x<sub>1</sub>, 多糖质量浓度, mg/mL; V<sub>1</sub>, 多糖提取液体积, mL; n<sub>1</sub>, 多糖稀释倍数; m<sub>1</sub>, 多糖样品重量, g。

1.2.5 总酚含量测定 总酚含量测定可采用福林酚试剂法<sup>[14]</sup>, 略作修改。在试管中依次放入 70 μL 提取液、2.0 mL 10% 福林酚和 1.0 mL 7.5% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, 振荡 5 min, 静置 1 h, 以不加样品溶液为对照, 在 760 nm 波长处测定吸光度值, 重复 3 次, 以没食子酸做标准曲线, 按式(3)计算:

$$\text{总酚含量} = \frac{x_2 \times V_2 \times n_2}{m_2} \quad \text{式 (3)}$$

式中: x<sub>2</sub>, 总酚质量浓度, mg/mL; V<sub>2</sub>, 总酚提取液体积, mL; n<sub>2</sub>, 总酚稀释倍数; m<sub>2</sub>, 总酚样品重量, g。

1.2.6 总黄酮含量测定 总黄酮测定参照邢晓凡等<sup>[15]</sup>方法, 略作修改。在试管中依次放入 1.0 mL 提取液、2.5 mL 70% 乙醇、0.2 mL 5% NaCO<sub>2</sub>、0.3 mL 10% AlCl<sub>3</sub> 溶液, 振荡后静置 5 min, 再加入 1.0 mL 1 mol/L NaOH, 以不加样品溶液为对照, 在 510 nm 波长处测定吸光度值, 重复 3 次, 以芦丁标准品做标样绘制标准曲线, 按式(4)计算:

$$\text{总黄酮含量} = \frac{x_3 \times V_3 \times n_3}{m_3} \quad \text{式 (4)}$$

式中: x<sub>3</sub>, 总黄酮质量浓度, mg/mL; V<sub>3</sub>, 总黄酮提

取液体积, mL; n<sub>3</sub>, 总黄酮稀释倍数; m<sub>3</sub>, 总黄酮样品重量, g。

1.2.7 甜菜碱含量测定 按照《中国药典》中甜菜碱的测定方法对枸杞进行前处理<sup>[1]</sup>, 再利用薄层色谱法对其含量进行测定。

1.2.8 类胡萝卜素含量测定 类胡萝卜素含量测定采用 HPLC-DAD 法<sup>[16]</sup>, 略作修改。取 0.5 g 枸杞粉加入 50 mL 提取液(含体积分数 50% 正己烷、25% 丙酮、25% 乙醇和 0.1% 2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚, 0.5 g NaCl), 4 ℃ 搅拌 20 min, 加入 15 mL 蒸馏水, 4 ℃ 搅拌 10 min, 避光静置 1 h, 收集有机相, 在 450 nm 波长处测定吸光度值, 重复 3 次, 以正己烷加 0.1% 2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚做对照, 绘制标准曲线, 按式(5)计算:

$$\text{类胡萝卜素含量} = \frac{x_4 \times V_4 \times n_4}{100 \times m_4} \quad \text{式 (5)}$$

式中: x<sub>4</sub>, 类胡萝卜素质量浓度, mg/mL; V<sub>4</sub>, 类胡萝卜素提取液体积, mL; n<sub>4</sub>, 类胡萝卜素稀释倍数; m<sub>4</sub>, 类胡萝卜素样品重量, g。

1.2.9 DPPH 自由基清除能力测定 DPPH 自由基清除能力的测定参照李玲玲等<sup>[17]</sup>方法, 略作修改。取 2.0 mL 枸杞甲醇提取液, 加入 3.0 mL 0.1 mmol/L DPPH 溶液, 振荡, 在水浴锅中避光保温 30 min, 重复 3 次, 按式(6)计算:

$$\text{DPPH自由基清除能力}(\%) = \left( 1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0} \right) \times 100 \quad \text{式 (6)}$$

式中: A<sub>1</sub>, 以乙醇为对照, 在 515 nm 波长处测定吸光度值; A<sub>2</sub>, 将上述样品组中的 DPPH 用甲醇溶液代替测定的吸光度; A<sub>0</sub>, 空白系为 2 mL 甲醇溶液加 3.0 mL DPPH 的吸光度。

1.2.10 色泽的测定 采用 CIELAB 表色系统测量枸杞的 L\*(明亮度)、a\*(红绿值) 和 b\*(黄蓝值)<sup>[18]</sup>。为保证试验测试的准确性, 每组随机抽取十个样品取平均值, 以总的色差值  $\Delta E$  表示被测样品与鲜样色泽之间的差异, 按式(7)计算:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad \text{式 (7)}$$

式中:  $\Delta E$  表示总色差值; L\*、a\* 和 b\* 分别表示枸杞干样的明亮度、红绿值和黄蓝值; L<sub>0</sub>、a<sub>0</sub> 和 b<sub>0</sub> 分别表示枸杞鲜样的明亮度、红绿值和黄蓝值。

### 1.3 数据处理

所有实验均重复 3 次。采用 SPSS 27 和 Origin 2021 软件进行数据处理、分析及图形绘制。实验结果采用平均值±标准差表示。采用邓肯分析对数据进行显著性分析, 当 P<0.05 时表示差异显著。采用系统聚类分析法进行聚类分析, Pearson 双尾检验法进行相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同干燥条件对枸杞干燥特性的影响

不同处理条件对枸杞干燥特性的影响如图 1 所示。可以看出, 水分比的下降趋势随着干燥的进行逐渐变缓, 最终趋于恒定。这是因为干燥初期, 枸杞内部水分含量较大, 内部热质传递以及水分扩散蒸发速度都较快, 随着干燥的进行, 枸杞内水分含量越来越接近其平衡水分, 水分扩散速度明显下降。从图 1A 可以看出, 在相同处理条件下, 温度越高所需的干燥时间越短, 干燥温度为 40、50 和 60 °C 所需的干燥时间分别为 62、44 和 30 h, 其中 60 °C 比 40 °C 的干燥时间缩短了 51.61%, 这是因为增加温度, 加速了枸杞内部水分子的迁移运动速度, 水分子脱离枸杞进入到干燥介质中的速度加快, 缩短了干燥进程。从图 1B 可以看出, 与未处理相比, 采用溶液浸泡的预处理方式能有效缩短干燥时间, 其中采用亚硫酸钠溶液浸泡后干燥时间为 34 h, 与未处理(44 h)相比, 干燥时间缩短了 22.73%, 这是因为亚硫酸钠呈碱性, 对

枸杞表层的长链脂肪酸烃类化合物有溶解作用, 使得枸杞表面蜡质层变薄、断裂, 形成水分迁移通道<sup>[10]</sup>。从图 1C 可以看出, 阶段变温干燥也能有效缩短干燥时间, 这是因为改变干燥温度其实就是改变枸杞内部的温度或水分与干燥介质间的温度或湿度的梯度差<sup>[19]</sup>, 从而达到提高枸杞干燥速率的目的。吴中华等<sup>[8]</sup>采用分段式变温热风干燥枸杞时发现, 利用渐进式升温工艺可以达到与恒定高温工艺相近的干燥时间, 本文的研究结果与之一致。

### 2.2 不同干燥条件对多糖的影响

枸杞多糖是一种天然大分子水溶性多糖, 具有多种生物活性。不同处理条件下枸杞多糖含量如图 2 所示。从图 2 可以看出, 不同干燥方式枸杞多糖含量存在明显差异。这是因为干燥过程会不同程度地破坏枸杞多糖内多种饱和及不饱和单糖残基、糖苷键以及大分子构象, 从而影响多糖生物活性并使其含量降低<sup>[20]</sup>。同时, 枸杞干燥过程中多糖含量的变化会受高温降解以及酶降解等因素的影响, 延长干燥

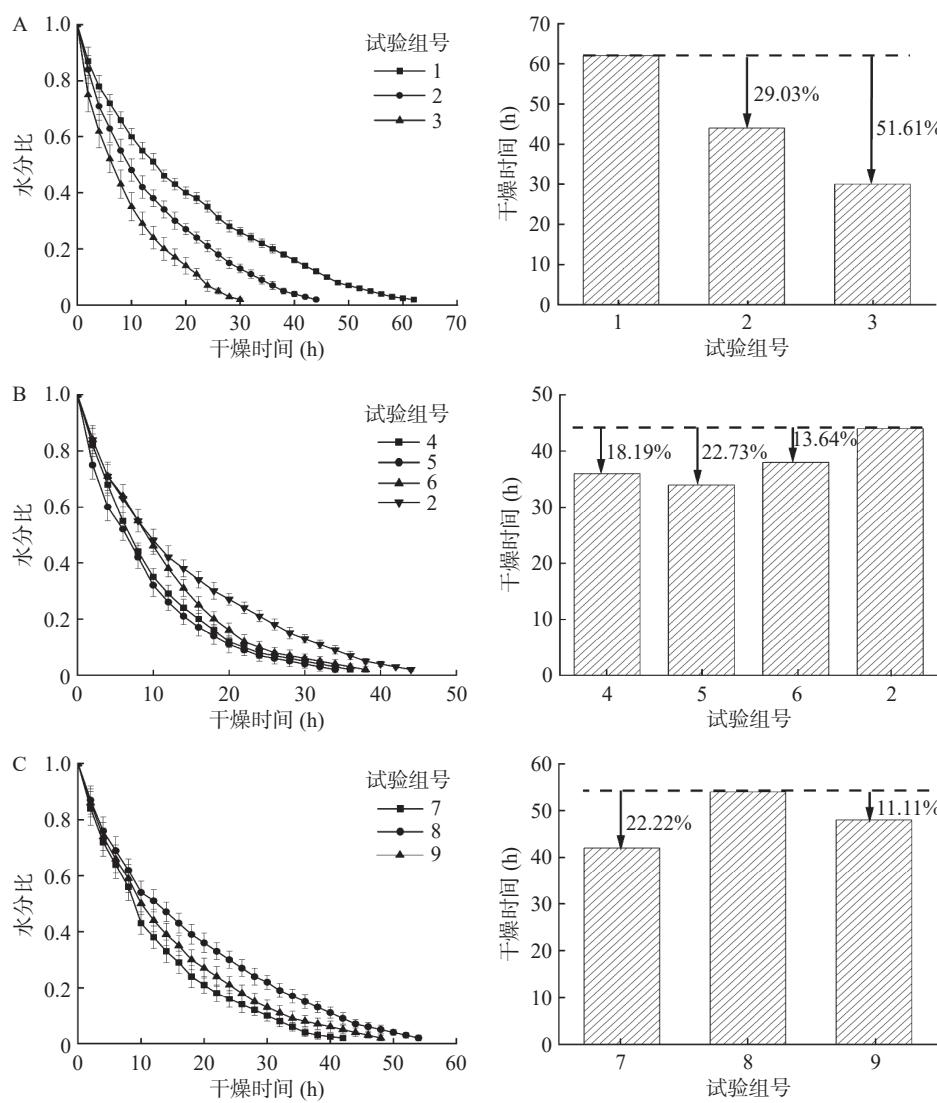


图 1 不同干燥条件对枸杞干燥特性和总时间的影响

Fig.1 Effects of different conditions on drying characteristics and total drying time of goji berries

注: A、B 和 C 分别表示不同干燥温度、溶液浸泡以及阶段变温干燥对枸杞干燥特性和总时间的影响。

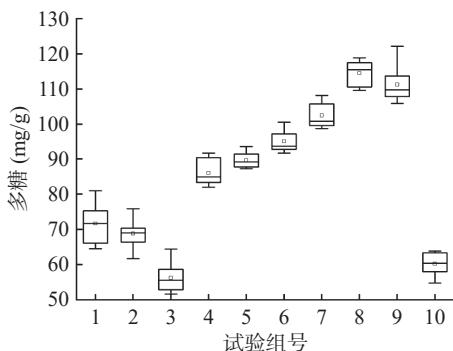


图2 不同干燥条件对枸杞多糖含量的影响

Fig.2 Effects of different drying conditions on polysaccharides content of goji berries

时间和提高干燥温度都会促进枸杞多糖发生生化反应,增加多糖的消耗。变温(试验组7、8和9)干燥后枸杞多糖含量明显高于其余各组,其中试验组8的变温干燥方式干燥后多糖最高,为114.50 mg/g,而恒温(试验组1、2和3)中试验组3干燥后多糖含量最低,仅为56.23 mg/g,这可能与持续较高的干燥温度(60 °C)导致的枸杞多糖降解及果实表皮损伤引起的多糖外渗损失相关。Wang等<sup>[21]</sup>研究发现,热处理可显著降低浆果物料总多糖含量,这主要与热诱导的多糖降解相关。

### 2.3 不同干燥条件对枸杞总酚含量的影响

枸杞中酚类化合物是一种重要的天然活性物质,具有良好的抗氧化能力,图3显示出不同处理条件对枸杞总酚含量的影响。可以看出,试验组的总酚含量均高于对照组,其中试验组9总酚含量为10.24 mg GAE/g,比对照组10的7.34 mg GAE/g提高了39.51%。这是因为酚类化合物具有较好的还原性,在干燥过程中容易被氧化,与对照组相比,其余组均缩短了干燥时间,多酚类物质降解的进程相对较短,因此保留率高。

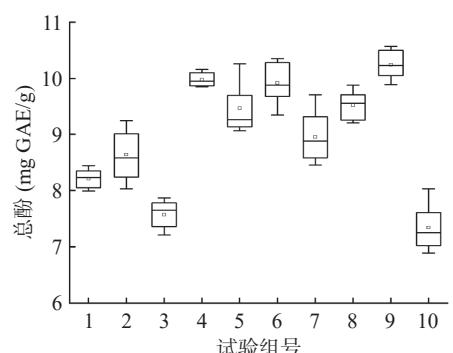


图3 不同干燥条件对枸杞总酚含量的影响

Fig.3 Effects of different drying conditions on total phenolic content of goji berries

### 2.4 不同干燥条件对总黄酮含量的影响

黄酮类化合物是枸杞重要的功能物质组成成分,也是枸杞品质评价的关键指标。不同处理条件对枸杞总黄酮含量的影响如图4所示。可以看出,与预处理和变温干燥组别相比,恒温干燥与自然晾晒枸

杞总黄酮含量相对较低,这主要与较长的干燥进程相关。热、光照和氧气均可引起黄酮类物质的降解,从而降低其含量<sup>[22]</sup>。采用溶液浸泡获得的总黄酮含量较高,这是因为预处理能对枸杞表皮发生化学作用,果皮形成孔隙,促使更多的黄酮类物质溶解在提取剂中,增加总黄酮含量<sup>[23]</sup>。

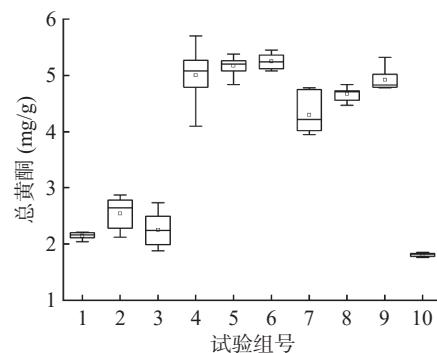


图4 不同干燥条件对枸杞总黄酮含量的影响

Fig.4 Effects of different drying conditions on total flavonoids content of goji berries

### 2.5 不同干燥条件对枸杞甜菜碱含量的影响

甜菜碱类物质是枸杞中一种重要的生物碱成分,在营养物质的代谢中起着十分重要的作用。不同处理条件对枸杞甜菜碱含量的影响如图5所示。可以看出,与恒温或变温干燥方式相比,采用溶液浸泡的方式能够最大程度的保留枸杞中甜菜碱含量,其中采用柠檬酸、亚硫酸钠和碳酸钠溶液浸泡后干燥的枸杞中甜菜碱含量要高于其余试验组,其含量分别为18.79、18.74以及18.09 mg/g。这是因为甜菜碱是一种类似于氨基酸的两性离子,不稳定且容易分解,预处理可以明显缩短干燥时间,减少甜菜碱的损失<sup>[24]</sup>,同时,浸泡溶液通过果皮渗入枸杞内部与细胞壁中的果胶作用,形成凝胶,导致薄壁细胞“棱角”逐渐消失,形状变得不规则,细胞间接触减少,随着枸杞细胞液泡中水分减少,剩余溶液浓度增加并通过细胞膜损伤部位迁移出来,也会增加甜菜碱物质含量<sup>[25]</sup>。

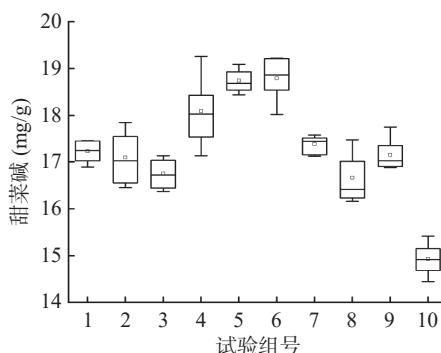


图5 不同干燥条件对枸杞甜菜碱含量的影响

Fig.5 Effects of different drying conditions on betaine content of goji berries

### 2.6 不同干燥条件对枸杞类胡萝卜素含量的影响

枸杞中含有丰富的类胡萝卜素,是枸杞具有药

食同源功效的重要影响因素。不同处理条件对枸杞类胡萝卜素含量的影响如图 6 所示。可以看出, 各组试验中类胡萝卜素含量的高低依次为: 溶液浸泡>变温>恒温>对照, 这是因为类胡萝卜素在极端条件下如酸、氧、强光及高温下易发生降解或异构化<sup>[23]</sup>。在 50 ℃ 干燥条件下, 经碳酸钠溶液和亚硫酸钠溶液处理后干燥的枸杞内类胡萝卜素含量(241.73 mg/100 g 及 238.82 mg/100 g)之间无显著性差异, 这是因为溶液浸泡时会破坏枸杞表面的蜡质层, 致使类胡萝卜素溶出, 不仅干燥后在托盘上有枸杞溶出的色素, 而且类胡萝卜素成分易于提取。此外, 对于稳定性较差的枸杞类胡萝卜素而言, 干燥时间比干燥温度影响更为显著<sup>[26]</sup>, 对照组所需干燥时间最长, 类胡萝卜素含量最低, 仅为 122.57 mg/100 g, 远远低于所有试验组, 而 60 ℃ 烘干的枸杞类胡萝卜素含量(192.44 mg/100 g)高于 50 ℃(179.08 mg/100 g)和 40 ℃(164.03 mg/100 g)烘干的枸杞类胡萝卜素含量。

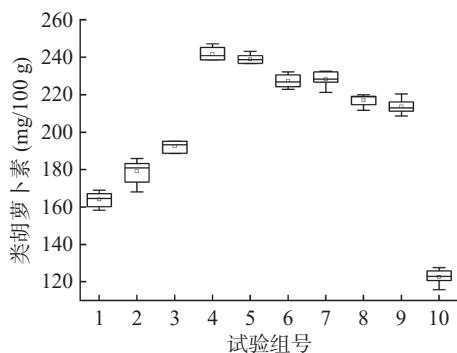


图 6 不同干燥条件对枸杞类胡萝卜素含量的影响  
Fig.6 Effects of different drying conditions on carotenoid contents of goji berries

## 2.7 不同干燥条件对枸杞抗氧化能力的影响

体外抗氧化能力是评价枸杞功能活性组分保留的重要指标之一<sup>[27]</sup>。枸杞中抗氧化组分包括多糖、氨基酸、黄酮类和抗坏血酸等。本文采用 DPPH 自由基清除能力判定枸杞的抗氧化能力差异。不同处理条件下枸杞抗氧化能力如图 7 所示。可以看出,

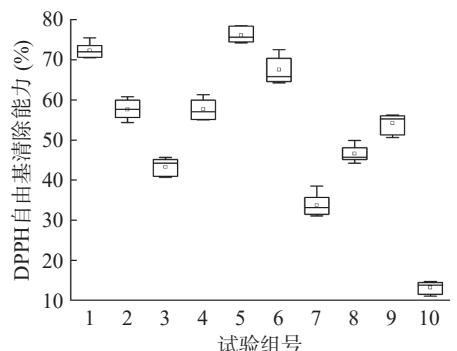


图 7 不同干燥条件对枸杞抗氧化能力的影响  
Fig.7 Effects of different drying conditions on antioxidant capacity of goji berries

随着干燥温度的增加 DPPH 自由基清除能力值逐渐减少, 不同预处理方式下的 DPPH 自由基清除能力值均高于变温干燥, 其中采用亚硫酸钠溶液处理的 DPPH 自由基清除能力值(76.11%)与恒温 40 ℃ 处理的 DPPH 自由基清除能力值接近(72.30%), 均大于其它各组。但这两组的多糖和总黄酮并不是最高的, 这并不否定枸杞的抗氧化能力与其生物活性成分含量存在着剂量-效应关系<sup>[28]</sup>。这可能是因为这两组在干燥枸杞的过程中存在着抗氧化能力较高的黄酮类和非多糖生物活性成分, 如通过美拉德反应产生具有抗氧化活性成分的呋喃、吡咯、类黑精和还原酮等<sup>[29]</sup>。

## 2.8 不同干燥条件对枸杞色泽的影响

色泽是判定枸杞品质的重要外观依据, 在一定程度上反映了枸杞的新鲜度、成熟度和品质的变化。总色差  $\Delta E$  值越小, 表示干制品与鲜样颜色变化越小, 干制品表观品质越好。不同处理条件对枸杞  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  和  $\Delta E$  的变化如图 8 所示。可以看出, 干燥温度和溶液浸泡对枸杞的颜色变化均有影响。采用 60 ℃ 干燥后的枸杞  $\Delta E$  值最大为 22.82, 而采用碳酸钠、亚硫酸钠和柠檬酸溶液浸泡后干燥的枸杞  $\Delta E$  值分别为 8.35、5.92 和 7.90。这是因为高温会导致枸杞内的酚类物质转化成醌类物质, 进一步氧化形成黑色素使枸杞颜色加深<sup>[30]</sup>, 同时, 随着干燥时间的延长, 增加了枸杞与外界氧气接触的时间, 加剧氧化褐变的发生, 这些化学反应宏观表现就是枸杞颜色变得暗淡, 不红亮。而经过溶液浸泡, 不仅能有效缩短干燥时间, 减少枸杞与氧气接触的时间, 还能与枸杞内有机过氧化物中的氧结合, 防止生成过氧化氢, 从而使过氧化酶失去氧化作用<sup>[25]</sup>, 减少色泽的变化。

## 2.9 聚类分析

通过系统聚类分析可以进一步揭示样品之间的差异和联系。样品之间的距离越大, 对应的相似度越低, 差异越大<sup>[31]</sup>。图 9 的聚类分析显示, 不同处理方式的所有枸杞样品被分为 3 个聚类: 第一类为试验组 1、2、5、6、4 和 3, 均为恒温干燥; 第二类为试验组 7、8 和 9, 均为变温干燥; 第三类为试验组 10, 为自然晾晒。其中第三类的试验组 10 处理样品距离与其它处理方式样品距离最远, 说明与其它处理方式差异最大。而第一类试验组 2、5、6 和 4 均采用 50 ℃ 恒温温度进行干燥, 样品之间的距离特别接近。第二类中试验组 8 和 9 的样品之间距离特别接近, 是因为后期都采用 40 ℃ 温度进行干燥, 说明温度是影响枸杞品质指标的重要因素。

## 2.10 相关性分析

采用 Pearson 双尾检验, 对 10 种不同干燥方式处理的枸杞各指标进行相关性分析。如图 10 所示, 其中总酚、总黄酮、甜菜碱含量与类胡萝卜素含量成

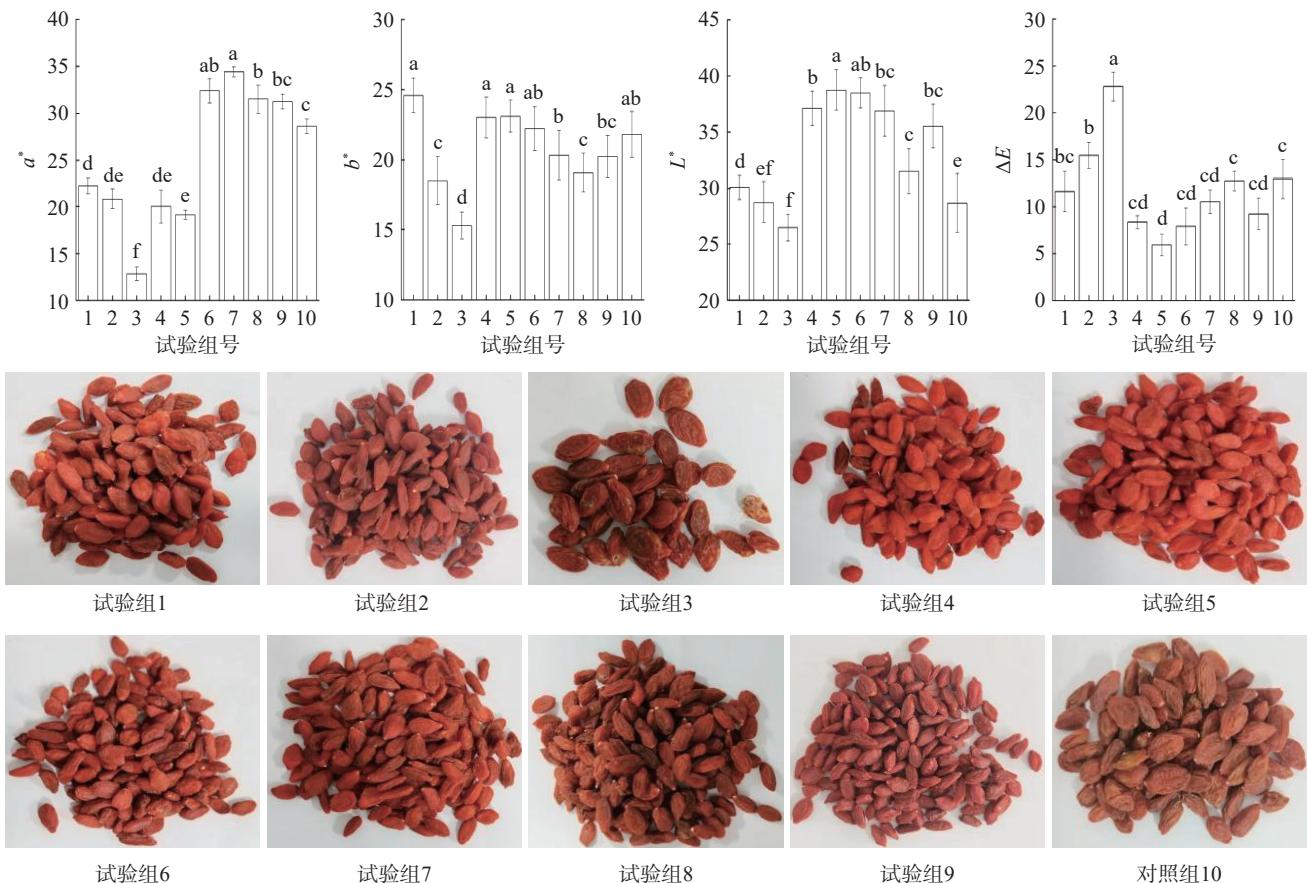


图 8 不同干燥条件对枸杞色泽特性的影响

Fig.8 Effects of different drying conditions on color characteristics of goji berries

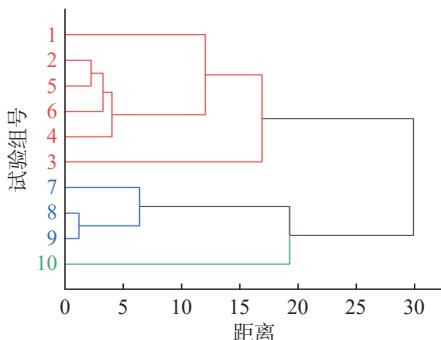
注:柱状图中不同字母表示有显著性差异( $P<0.05$ )。

图 9 不同干燥条件的聚类分析

Fig.9 Cluster analysis of different drying conditions

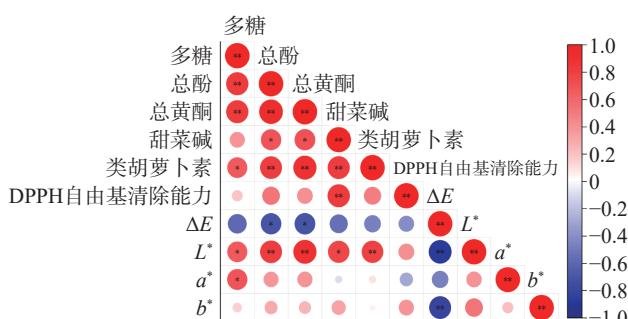


图 10 不同干燥条件下枸杞各指标相关系数热图

Fig.10 Heat map of correlation coefficient of various indicators on different drying conditions of goji berries

注: \* $P<0.05$ , 显著相关; \*\* $P<0.01$ , 极显著相关。

极显著正相关( $P<0.01$ ),多糖、总酚含量与总黄酮含量也成极显著正相关( $P<0.01$ )。枸杞在干燥后的色泽变化与品质指标含量有关。总酚、总黄酮和类胡萝卜素含量与  $L^*$  值极显著正相关( $P<0.01$ ),总酚、总黄酮含量与  $\Delta E$  值显著负相关( $P<0.05$ )。但是,除甜菜碱含量外,DPPH 自由基清除能力与其它品质指标含量在统计学上无显著的相关性( $P>0.05$ ),这可能是由于除这些含量外,干燥过程中的美拉德反应产物能提高抗氧化能力<sup>[32]</sup>。Imeh 等<sup>[33]</sup>研究不同品种的梨子和苹果时发现,除了多酚以外的其它因素(如  $\beta$ -胡萝卜素)也有可提高抗氧化活性。

### 3 结论

本实验研究了不同干燥温度、溶液浸泡、阶段变温的方式对枸杞干燥特性和品质指标的影响,结果表明,溶液浸泡能有效缩短干燥时间,干燥后枸杞中的总黄酮、甜菜碱、类胡萝卜素以及色泽均优于其余干燥方式,其中采用亚硫酸钠溶液处理的 DPPH 自由基清除能力达到 76.11%。本实验仅采用单一的热风干燥方式,后期将进一步探讨其它干燥方式对枸杞品质指标的研究,这对枸杞产品的开发利用具有极其重要的意义。

## 参考文献

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(四部)[S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015: 67. [Chinese Pharmacopoeia Commission. Chinese Pharmacopoeia (Four departments)[S]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2015: 67.]
- [2] SUN W L, SHAHRAJABIAN M H, QI C. Health benefits of wolfberry (*Gou Qi Zi, Fructus barbarum L.*) on the basis of ancient Chinese herbalism and Western modern medicine[J]. *Avicenna J Phytomed*, 2021, 11: 109–119.
- [3] 罗燕, 黄晓鹏, 李声元, 等. 预处理方式对枸杞子热风和远红外干燥下品质的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(6): 159–169. [LUO Y, HUANG X P, LI S Y, et al. Effect of pretreatment methods on the quality of *Lycium barbarum L.* under hot-air drying and far-infrared drying[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(6): 159–169.]
- [4] 王兆凯, 任广跃, 段续, 等. 预处理与干燥方式对枸杞干燥特性及品质影响的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(19): 367–375. [WANG Z K, REN G Y, DUAN X, et al. Research progress on influence of pretreatment and drying methods on drying characteristics and quality of goji[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(19): 367–375.]
- [5] 王庆惠. 核桃热风干燥装置的设计及试验[D]. 北京: 中国农业大学, 2015: 32–43. [WANG Q H. The design and experiment of hot-air drying equipment for walnut[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015: 32–43.]
- [6] 吴励萍, 卢有媛, 李海洋, 等. 不同干燥方法对枸杞子药材多类型功效成分的影响及其分析评价[J]. *中草药*, 2022, 53(7): 2125–2136. [WU L P, LU Y Y, LI H Y, et al. Analysis and evaluation of different drying methods for *Lycii fructus* based on multi-type functional components[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2022, 53(7): 2125–2136.]
- [7] BATU H, KADAKAL C. Drying characteristics and degradation kinetics in some parameters of goji berry (*Lycium barbarum L.*) fruit during hot air drying[J]. *Italian Journal of Food Science*, 2021, 33(1): 1949.
- [8] 吴中华, 李文丽, 赵丽娟, 等. 枸杞分段式变温热风干燥特性及干燥品质[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 287–293. [WU Z H, LI W L, ZHAO L J, et al. Drying characteristics and product quality of *Lycium barbarum* under stages-varying temperatures drying process[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(11): 287–293.]
- [9] AOAC. Official method of analysis. Association of official analytical chemists(No. 934.06)[S]. Arlington, 1990: 47.
- [10] 宋慧慧, 陈芹芹, 毕金峰, 等. 干燥方式及碱液处理对鲜枸杞干燥特性和品质的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(15): 197–206.
- [11] SONG H H, CHEN Q Q, BI J F, et al. Effects of different drying methods and alkali pretreatment on drying characteristics and quality of fresh goji berries (*Lycium barbarum*)[J]. *Food Science*, 2018, 39(15): 197–206.
- [12] 赵丹丹, 陈冬, 彭郁, 等. 枸杞热风干燥过程动力学模型及品质分析[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(3): 114–124. [ZHAO D D, CHEN D, PENG Y, et al. Kinetic model and quality analysis of hot air drying process of *Lycium barbarum*[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2018, 18(3): 114–124.]
- [13] DUBOIS M, GILLES K, HAMILTON J, et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances analytical chemistry (ACS publications)[J]. Springerplus, 1980, 89(5): 449–454.
- [14] BEATO V M, ORGAZ F, MANSILLA F, et al. Changes in phenolic compounds in garlic (*Allium sativum L.*) owing to the cultivar and location of growth[J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2011, 66(3): 218–223.
- [15] 邢晓凡, 刘浩楠, 姚飞, 等. 不同干燥方式对黄桃果干品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(24): 327–333. [XING X F, LIU H N, YAO F, et al. Effects of different drying methods on the quality of dried yellow peach slices[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(24): 327–333.]
- [16] KNOCKAERT G, LEMMENS L, BUGGENHOUT S V, et al. Changes in  $\beta$ -carotene bioaccessibility and concentration during processing of carrot puree[J]. *Food Chemistry*, 2012, 133(1): 60–67.
- [17] 李玲玲, 袁航, 叶子, 等. 促干剂对热风条件下西梅品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(11): 238–244. [LI L L, YUAN H, YE Z, et al. Effect of desiccant on the quality of *Prunus domestica L.* under hot air condition[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(11): 238–244.]
- [18] JIANG D L, WANG Q H, HUANG C, et al. Effect of various different pretreatment methods on infrared combined hot air impingement drying behavior and physicochemical properties of strawberry slice[J]. *Food Chemistry*, 2024, 132: 365–381.
- [19] 巨浩羽, 张卫鹏, 于贤龙, 等. 恒温下相对湿度对果蔬热风干燥特性和品质的影响及调控[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(2): 29–40. [JU H Y, ZHANG W P, YU X L, et al. Influence of relative humidity on drying characteristics and quality of fruits and vegetables during constant temperature hot air drying as well as controlling strategy[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(2): 29–40.]
- [20] 巨浩羽, 赵士豪, 赵海燕, 等. 阶段降湿对山药热风干燥特性和品质的影响[J]. *中草药*, 2021, 52(21): 6518–6527. [JU H Y, ZHAO S H, ZHAO H Y, et al. Influence of step-down relative humidity on drying characteristic and quality of hot air drying of *Dioscoreae rhizoma* slices[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2021, 52(21): 6518–6527.]
- [21] WANG J, MUJUMDAR A S, DENG L Z, et al. High-humidity hot air impingement blanching alters texture, cell-wall polysaccharides, water status and distribution of seedless grape[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 194: 9–17.
- [22] FENG S M, WU S J, XIE F, et al. Natural compounds lower uric acid levels and hyperuricemia: Molecular mechanisms and prospective[J]. *Food Science & Technology*, 2022, 123: 87–102.
- [23] SOONG Y Y, BARLOW P J. Antioxidant activity and phenolic content of selected fruit seeds[J]. *Food Chemistry*, 2004, 88(3): 411–417.
- [24] 胡颖, 徐鑫, 张春阳, 等. 不同品种来源枸杞子多糖及甜菜碱含量测定和比较分析[J]. *中国现代中药*, 2022, 24(12): 2383–2390. [HU Y, XU X, ZHANG C Y, et al. Content determination and comparative analysis of polysaccharide and betaine in *Lycium barbarum L.* from different varieties[J]. *Modern Chinese Medicine*, 2022, 24(12): 2383–2390.]
- [25] ZHANG A A, XIE L, WANG Q H, et al. Effect of the ripening stage on the pulsed vacuum drying behavior of goji berry (*Lycium barbarum L.*): Ultrastructure, drying characteristics, and browning mechanism[J]. *Food Chemistry*, 2024, 442: 138489.

- [26] 谭晨. 类胡萝卜素脂质体的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 27–39. [TAN C. Study on carotenoid - loaded liposomes [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014: 27–39.]
- [27] 万芳新, 李武强, 罗燕, 等. 超声预处理对枸杞远红外真空干燥特性及品质的影响[J]. *中草药*, 2020, 51(18): 4654–4663. [WAN F X, LI W Q, LUO Y, et al. Effects of ultrasonic pretreatment on far infrared vacuum drying properties and quality of *Lycium barbarum*[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2020, 51(18): 4654–4663.]
- [28] 高涛, 唐华丽, 罗振宇, 等. 川明参粗多糖初级结构解析及其体外抗氧化活性[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(8): 275–282. [GAO T, TANG H L, LUO Z Y, et al. Primary structure analysis and antioxidant activity *in vitro* of crude polysaccharide from *Chuanminshen violaceum*[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(8): 275–282.]
- [29] HAN J R, YAN J N, SUN S G, et al. Characteristic antioxidant activity and comprehensive flavor compound profile of scallop (*Chlamys farreri*) mantle hydrolysates-ribose Maillard reaction products[J]. *Food Chemistry*, 2018, 261: 337–347.
- [30] 沈跃, 陈恺, 曹娅, 等. 干制前处理对切分杏褐变内源酶及色泽的影响[J]. *中国食物与营养*, 2024, 30(4): 41–48. [SHEN Y, CHEN K, CAO Y, et al. Effects of pretreatment on browning endogenous enzymes and color of cut apricot[J]. *Food and Nutrition in China*, 2024, 30(4): 41–48.]
- [31] 左亚锋, 徐秀泉, 李巧月, 等. 不同干燥方法对合欢花药材化学成分及其抗氧化活性影响[J]. *天然产物研究与开发*, 2024, 36: 125–136. [ZUO Y F, XU X Q, LI Q Y, et al. Effects of different drying methods on the chemical composition and antioxidant activity of *Albiziae Flos*[J]. *Nat Prod Res Dev*, 2024, 36: 125–136.]
- [32] 周子丹, 彭文君, 倪家宝, 等. 不同干燥方式对油菜蜂花粉色泽、酚酸含量和抗氧化活性的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(17): 76–83. [ZHOU Z D, PENG W J, NI J B, et al. Effects of different drying methods on color, phenolic acids contents and antioxidant activity of rape bee pollen[J]. *Food Science*, 2021, 42(17): 76–83.]
- [33] IMEH U, KHOKHAR S. Distribution of conjugated and free phenols in fruits: Antioxidant activity and cultivar variations[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50: 6301–6306.