基于层次分析法的红枣切片热风真空及组合干燥试验与品质评价

牛静怡[1] 袁越锦[1,2*] 李颖[1] 徐英英[1,2] 左筱蓓[1]
(1. 陕西科技大学机电工程学院 西安 710021; 2. 陕西省农产资源干燥加工及综合利用工程技术研究中心 西安 710021)

Experiment and Quality Evaluation of Hot-Air Vacuum Combined Drying for Red Jujube Slices Based on Analytic Hierarchy Process

NIU Jingyi[1], YUAN Yuejin[1,2*], LI Ying[1], XU Yingying[1,2], ZUO Xiaobei[1]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an* 710021, *China*; 2. *Shaanxi Engineering Research Center of Drying and Comprehensive Utilization on Agricultural Resources, Xi'an* 710021, *China*)

Abstract Red jujubes are rich in vitamins and sugar and have high nutritional value, and drying is one of the main ways to process jujubes, extending the shelf life by reducing the moisture content of red jujubes. However, the traditional jujube drying method has problems such as poor quality and low efficiency, and it is difficult to comprehensively evaluate multiple quality indicators in the current analysis of jujube drying, so this paper used the special product of Shaanxi jujube as the test material to study the drying quality of red jujube slices under four drying methods: hot-air drying, vacuum drying, hot-air vacuum combined drying and vacuum freeze drying (reference group), and compared the drying characteristics of them. Drying time, rehydration ratio, color difference, Vc content and texture characteristics were used as evaluation indexes, and the analytic hierarchy process (AHP) was used to comprehensively score hot air drying, vacuum drying and hot air vacuum drying. The experimental results showed that the drying of red jujube slices was controlled by both external water evaporation and internal water diffusion. The effective moisture diffusion coefficient D_{eff} of hot air drying was the largest, followed by hot air vacuum combined drying, and the effective moisture diffusion coefficient of vacuum drying was the smallest. In terms of drying quality, vacuum freeze drying (reference group) has the best quality in terms of Vc content, color difference, and rehydration ratio, but its high drying time increases its energy consumption and drying cost. However, we used the AHP to rank the overall scoring of hot air drying, vacuum drying and hot air vacuum drying, and the highest overall scoring was hot air vacuum combination drying.

Keywords Red jujube, Analytic hierarchy process, Hot-air vacuum drying, Drying quality

摘要 红枣富含维生素和糖分, 营养价值高, 干燥是红枣加工的主要方式之一, 通过降低红枣的水分含量来延长货架期。但传统的红枣干燥方法存在品质差、效率低等问题, 同时目前关于红枣干燥的分析难以对多个品质指标进行综合评价, 为此, 文章以陕西特产狗头枣为试验材料, 研究了热风干燥、真空干燥、热风真空组合干燥、真空冷冻干燥(参照组)四种干燥方式下红枣切片的干燥品质, 比较了不同干燥方式下的干燥特性, 以干燥时间、复水比、色泽、Vc 含量、质构特性为评价指标, 采用层次分析法 (AHP) 对热风干燥、真空干燥、热风真空干燥进行了综合评价。试验结果表明: 红枣切片干燥由外部水分蒸发和内部水分扩散共同控制, 热风干燥有效水分扩散系数 D_{eff} 最大, 其次是热风真空组合干燥, 真空干燥的有效水分扩散系数最小; 在干燥品质方面, 虽然真空冷冻干燥(参照组)Vc 含量、色差、复水比等品质最佳, 但其过高的干燥耗时使其能耗增加, 干燥成本增加, 因此对于热风干燥、真空干燥、热风真空干燥采用层次分析法进行了综合评分排序, 最终综合评分最高的为热

收稿日期: 2024−03−25
基金项目: 国家自然科学基金项目（51876109）；陕西省教育厅青年创新团队科研计划项目（22JP012）
* **联系人:** E-mail: 156709547@qq.com

风真空组合干燥。

关键词　红枣　层次分析法　热风真空干燥　干燥品质

中图分类号: TS255.3　　**文献标识码**: A　　**doi**: 10.13922/j.cnki.cjvst.202403016

红枣营养丰富, 是一种药食同源的保健食品, 枣果中富含酚类、萜类、多糖等多种营养物质[1-2]; 可改善睡眠、养胃健脾、促进身体排毒[3]。红枣采摘后保质期短, 长时间放置容易产生霉变。中国的红枣产量位居世界第一, 但销量在国际市场并无明显优势[4], 据调查, 红枣采摘后因腐烂造成的损失高达 30 %。故而, 为了延长采摘后鲜枣的保质期并保留其品质, 常采取干制的方式对其进行处理[5]。不同干燥方式对品质和营养成分有着显著的影响。传统的干燥方法, 如自然晾晒和烘干, 存在干燥品质差和效率低等问题[6]。因此, 为了提高红枣切片的品质, 需采用更先进的干燥方法, 其中包括微波干燥[7]、冷冻干燥[8]、真空干燥[8] 以及联合干燥[9] 等干燥方式, 刘德成等[10] 采用三元二次通用旋转组合设计, 对冷冻-红外联合干燥工艺进行优化, 这一研究旨在寻找最佳的工艺参数组合, 以实现对红枣切片的高效干燥, 并提高其品质。这些组合设计方案多用于单个干燥方式中选取最佳工艺参数, 而对于干燥工艺如何选取也很重要, 贺怡等[11] 从红枣切片的香气、味道、质构特性方面对于各个干燥工艺进行了综合性评述。先前的研究多采用对比分析来选取最优干燥方式, 只能考虑单一的评价指标或少数几个指标, 难以全面考虑问题的多方面因素, 而干燥品质评价指标常常是多方面多层次的, 层次分析法 (AHP) 将复杂问题依据评价目标、目标指标等分解为有序的层次结构, 进而对每个层次的评价指标赋予权重系数。通过将这些权重系数与原始数据进行计算, 对不同方案进行综合评分, 从而提供一种更为系统和准确的评价方法[12-13]。目前已应用于中药[14]、鲜虾[15] 等领域。

因此, 本研究以狗头枣为研究对象, 针对热风干燥、真空干燥、热风真空组合干燥以及真空冷冻干燥(参照组)四种不同的干燥方式, 进行了对红枣切片的干燥特性的比较分析。采用层次分析法对除参照组之外的三种干燥方式进行了综合评分, 优选红枣切片的最优干燥方式, 以期提高枣片干燥品质, 为枣片的加工生产提供一定的理论和技术指导。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

试验材料: 红枣属类中的狗头枣 (初始含水率约为 70 %±1%), 陕西延安; 乙醇 (50% 体积分数); 2, 6-二氯靛酚 (0.05%); 1 % 草酸溶液; 2 % 草酸溶液; 抗坏血酸标准溶液 (0.1 mg/ml)。

1.2　仪器与设备

电热鼓风干燥箱; 冷冻干燥箱; 真空干燥箱; 电子天平; 分光测色仪; 质构仪。

1.3　试验方法

1.3.1　样品处理

物料干燥前处理: 挑选新鲜、大小均匀、个头完整无霉变的狗头枣, 在室温中放置 30 min 进行回温, 使用酒精清洁其表面, 选取无核区切成厚度为 5 mm 的薄片后进行不同干燥方式处理。每组干燥试验处理样品 50 g。

针对不同的干燥方式, 通过前期预试验获得各自较优工艺参数, 设定其试验方案如表 1 所示。在试验过程中, 每隔 30 min 取出样品, 测量其含水率, 至其小于 5% 时, 停止试验。冷冻干燥是公认品质较优的干燥技术, 因此被设定为参照组, 代表着红枣切片最优干燥品质。

表 1　红枣切片干燥试验方案

Tab. 1　Experimental protocol of the red jujube slices drying

干燥方式	工艺参数
真空冷冻干燥	真空度 60 Pa，预冻初始温度−26℃
热风干燥	热风温度 65℃
真空干燥	真空温度 65℃，真空度 0.03 MPa
热风真空组合干燥	热风温度 65℃，真空温度 65℃，真空度 0.03 MPa，转换点含水率 45%

1.3.2　含水率的测定

本研究中, 采用直接干燥法[16] 测定红枣切片的含水率, 具体步骤遵循 GB 5009.3—2016《食品中水分的测定》。将红枣切片于 105℃ 的烘箱中烘干至两次质量差不超过 0.01 g, 计算得到初始含水率。

1.3.3　干燥速率的测定

$$DR = \frac{M_{t1} - M_{t2}}{t_2 - t_1} \quad (1)$$

式中, DR为干燥速率, g/(g·h); M_{t1}、M_{t2}为t_1、t_2时刻红枣切片的干基含水率, %。

1.3.4 色泽的测定

色差采用分光测色仪测定。每次测量 5 个不同位置取平均值, 色差值的公式为:

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

式中, ΔE为色差值。L^*、a^*、b^*为干燥后红枣切片的亮度、红绿度、黄蓝度, L_0、a_0、b_0为试验前红枣切片的亮度、红绿度、黄蓝度。

1.3.5 复水比的测定

将红枣切片称量并记录, 之后放入 35℃ 的热水中每隔 10 min, 取出并记录质量, 重复以上操作直至枣片两次测量前后质量不超过±0.2 g 为止, 即为红枣切片复水后的质量[17]。

复水比的公式为:

$$R = \frac{G_0}{G_1} \quad (3)$$

式中, R为红枣切片的复水比; G_0为复水后称量的红枣切片质量, g; G_1为干燥后称量的红枣切片质量, g。

1.3.6 Vc 的测定

根据 GB/14754-2010 进行 Vc 的测定, 方法选取 2, 6-二氯酚靛酸钠滴定法[18]。

1.3.7 硬度测定

使用 TA.XTC 质构仪进行红枣切片干燥后样品的硬度测量, 选择 P/2N 型探头。每组样品测量 5 次, 最终结果取其平均值。

1.3.8 基于层次分析法的红枣切片品质综合评价模型的建立与综合评分计算

(1)挑选核心指标: 根据测定目标, 为确定红枣干燥的最佳干燥工艺, 选择出与红枣切片品质相关的评价指标, 包括干燥时间、复水比、色泽、Vc 含量和硬度。

(2)搭建评价模型结构: 根据各个评价指标间的相互关系, 搭建目标层、指标层和方案层。图 1 展示了红枣切片综合评价模型结构。

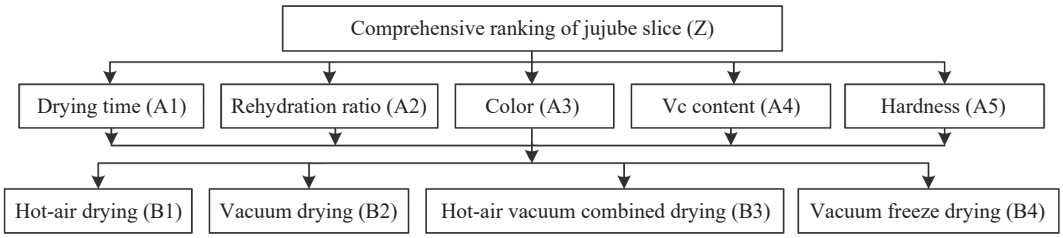

图1 红枣综合评价模型结构图

Fig. 1 Structure diagram of red jujube comprehensive evaluation model

(3)构建判断矩阵: 确定每个指标的权重系数, 构建判断矩阵, 以评估该指标在综合评价中的重要性。因此本研究采用了如表 2 所示的 1~9 比例标度法来构建判断矩阵 (见图 1) , 并计算了各指标的权重系数。

(4)检验判断矩阵一致性: 为确保使用层次分析法时所得到的权重或优先级排序具有合理性、稳定性及可行度, 根据下列公式分别计算一致性比率CR和一致性指标CI。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (5)$$

式中, RI为随机一致性标准值, 本研究中, 核心指标为 5 个, 查表得RI为 1.12; λ为判断矩阵特征值; n为判断矩阵阶数。

若CR< 0.1 时, 表示通过一致性检验, 判断矩阵具有合理性; 当CR≥0.1 时, 则表示判断矩阵缺乏一致性, 需对其重新构建并计算一致性, 直至通过一致性检验。

(5)红枣切片品质综合评分的计算: 为了得到各干燥条件下的综合评分 Zi, 采用归一化的指标数

表 2 标度 1-9 的含义

Tab. 2 Meaning of scales 1-9

标度	1	3	5	7	9	2、4、6、8	倒数
含义	同等重要	稍微重要	明显重要	强烈重要	极端重要	中间性	恰反性

据与其对应的权重系数做内积计算, 该过程可用如下公式计算:

$$Z_i = \sum_{i=1}^{5} \omega_i a_{ij} \quad (6)$$

式中, Z_i为综合得分; ω_i为各指标对应的权重系数; a_{ij}为各指标标准化后的数值。

1.4　数据分析方法与模型分析

1.4.1　数据分析方法

软件工具: 采用 Microsoft Office Excel 2019 软件进行表格绘制, 用 Origin 2024 软件进行数据处理及曲线图绘制。

分析方法: 在试验中, 使用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 对红枣切片的干燥方式进行综合评分。

1.4.2　Weibull 模型模拟

Weibull 分布函数表示为如下形式:

$$MR = \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \quad (7)$$

式中, MR为水分比; t为干燥时间, min; α为尺度参数, min; β为形状参数。

红枣切片在干燥过程中可近似地看成一个无限平板, 可用 Fick 第二定律揭示其内部的干燥规律, 其表达式如下:

$$MR = \frac{8}{\pi^2}\exp\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{L_0^2}t\right) \quad (8)$$

式中, D_{eff}为有效水分扩散系数, m^2/min; L_0为枣片厚度, m, 其值为 5×10^{-3} m; t为干燥时间, min。

对表达式两边同时取对数可得:

$$\ln MR = \ln\frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{L_0^2}t \quad (9)$$

由上式可知, MR的对数与时间t呈线性关系, 且其斜率与有效水分扩散系数相关, 水分扩散系数可由斜率计算得到。

2　结果与分析

2.1　不同干燥方式对红枣切片干燥特性的影响

如图 2 所示, 不同干燥方式下的红枣切片的干燥速率有显著差异, 热风干燥处理组样品达到干燥终点需 210 min, 热风真空组合干燥次之, 需 273 min, 真空干燥速度最慢, 需 378 min, 干燥耗时较热风干燥增加了 80 %, 较组合干燥增加了 38.46 %。热风真空组合干燥与热风干燥在含水率转换点之前干燥曲线基本一致, 转换点之后, 红枣切片进行真空干燥, 此时组合干燥速率明显低于纯热风干燥, 这是由于真空干燥的干燥速度小于热风干燥。

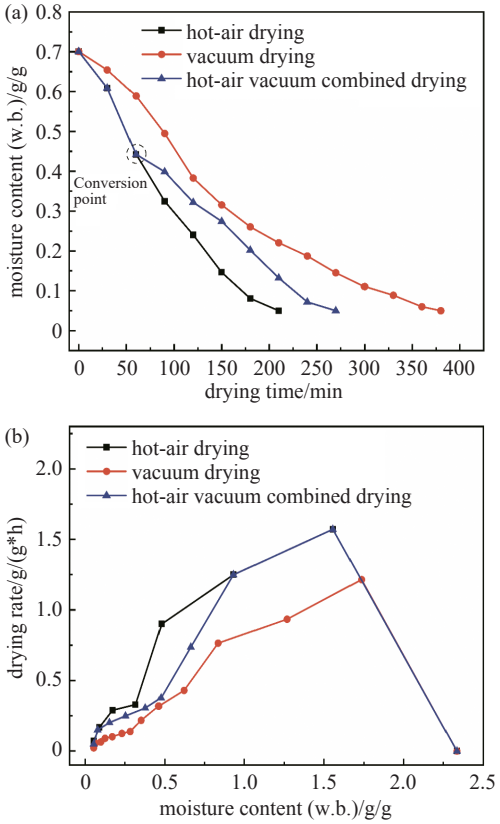

图2　红枣切片在不同干燥方式下的曲线。(a)干燥特性曲线, (b)干燥速率曲线

Fig. 2　The curves of red jujube slice under different drying methods. (a) Drying characteristic curves, (b) drying characteristic curves

从图 2 可以看出, 在红枣切片的干燥过程中, 随着时间推移, 三种干燥方式下的干燥速率逐渐降低, 特别是在干燥中后期。同时随着干燥过程的进行, 红枣切片的含水率逐渐降低, 这也导致了干燥速率的逐渐减缓。这一结果进一步突显了干燥过程中水分扩散的影响, 初始阶段的较高干燥速率主要是由于红枣切片表面的水分快速蒸发, 而干燥后期则是由于切片内部水分缓慢扩散至表面, 再经过缓慢的挥发至干燥介质中的一个过程。当红枣切片水分快降低到终点含水率时, 组合干燥的真空阶段并没有与单一真空干燥一样速率急剧下降, 这是由于组合干燥前期存在热风干燥阶段, 热风干燥改变了红枣切片的组织和表皮结构, 细胞孔径变大, 从而使内部水分在后期真空干燥时更容易蒸发[9]。

采用 Weibull 函数对红枣切片三种干燥方式下

的干燥过程进行拟合，图 3 所示为各个干燥方式的拟合曲线，表 3 为模型拟合结果，由表知，三种干燥方式的 Weibull 函数拟合精度都很高，决定系数 R^2 均大于 0.97。α值是衡量物料前期干燥速率的指标，代表干燥 63 % 水分所需耗时。结合表中α值数据可得，热风干燥脱去 63 % 水分所需时间最短，组合干燥次之，真空干燥的α值最大，干燥速率最慢，所需时间最长。形状参数β的大小很大程度上受到干燥方式、红枣种类和形状等因素的影响。在本研究中，采用了相同厚度的同种红枣切片，因此只考虑干燥方式的影响。当 0.3<β<1 时，物料干燥过程基本属于降速干燥，受内部水分迁移的控制；当β>1 时，物料干燥速率呈先上升后下降的趋势[19]。由表知β值大于 1，因此红枣切片干燥速率在前期呈现上升的趋势，而后逐渐下降。有效水分扩散系数 D_{eff} 表征单位时间内水分的扩散程度，热风干燥的有效水分扩散系数明显高于其他两种干燥方式，这表明热风干燥的水分扩散动量更大，干燥效率更高，而组合干燥的水分扩散动量则较小，真空干燥的水分扩散动量最小。

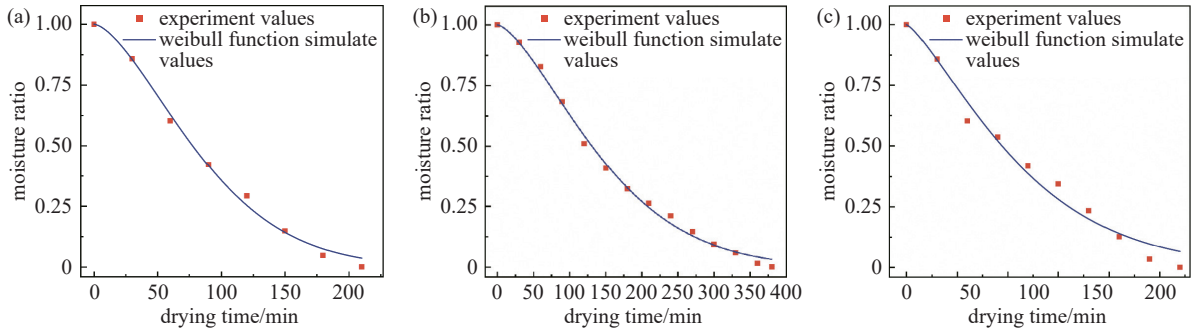

图3 不同方式干燥红枣切片的 Weibull 函数拟合曲线。(a)热风干燥，(b)真空干燥，(c)热风真空组合干燥

Fig. 3 Weibull function fitting curves of red jujube slice dried by different methods. (a) Hot-air drying, (b) vacuum drying, (c) hot-air vacuum combined drying

表 3 Weibull 模拟不同干燥方式的结果

Tab. 3 Weibull simulates the results of different drying methods

干燥方式	尺度参数 α/min	形状参数 β	决定系数 R^2	有效水分扩散系数 D_{eff}/(m^2/min)
热风干燥	98.0088	1.5686	0.9955	4.0326×10^{-8}
真空干燥	167.2952	1.5001	0.9965	6.8563×10^{-9}
热风真空组合干燥	124.9866	1.3011	0.9798	9.2598×10^{-9}

2.2 不同干燥方式对红枣切片干燥品质的影响

通过试验测定了不同干燥方式下红枣切片的干燥时间、复水比、色泽、Vc 含量、硬度等评价指标。图 4 为不同干燥方式所得的红枣切片，按照 1.3 所述方法测得红枣切片的品质评价指标见表 4。

干燥时间是反应干燥能耗的重要指标[20]，热风干燥的干燥时间最短，用时 3.5 h，而真空冷冻的干燥时间最长，长达 28 h，是热风干燥的 8 倍。

复水比是衡量干燥过程中微观结构损伤程度的重要指标[21]，较高的复水比即红枣切片内部结构保存较好，其重新吸收水分的能力也更强。真空冷冻干燥能够对红枣切片的组织结构起到最大的保护作用，复水比最大，其次是组合干燥。真空干燥与热风干燥复水比均较小，这是由于真空环境会破坏红枣切片内部组织的孔道网络结构，而热风干燥中红枣切片表面发生结壳且干燥过程中红枣切片内部细胞结构收缩塌陷，形成致密结构[22-23]，均不利于复水。

色泽是衡量食品加工过程中热损伤的重要指标[24]，物料在干燥前后色泽差异值越小，原色保留的越好时，真空冷冻干燥温度低，避免了因为热干燥引起的天然色素减少的问题，维持了红枣切片原有的色泽，而热风干燥由于温度过高抑制酶促褐变，物料表面水分蒸发过快，在还原糖、氨基酸等物质作用下，发生美拉德反应的同时又发生了焦糖化反应，从而使得红枣切片色差增大[25]。

图4　不同方式干燥的红枣切片。(a)热风干燥, (b)真空干燥, (c)热风真空组合干燥, (d)冷冻干燥

Fig. 4　Image of red jujube slices dried in different ways. (a) Hot-air drying, (b) vacuum drying, (c) hot-air vacuum combined drying, (d) vacuum freeze drying

表 4　不同方式干燥红枣切片对比

Tab. 4　Comparison of dried red jujube slices in different ways

干燥方式	干燥时间/h	复水比	色泽-色差/ΔE*	Vc 含量/ mg/100 g	硬度/N
热风干燥	3.5	2.64	17.63	552.35	879.14
真空干燥	6.3	2.51	9.88	850.26	788.81
热风真空组合干燥	4.5	2.84	12.59	785.12	720.09
真空冷冻干燥	28	3.12	0	910.25	426.11

Vc 保留率是衡量物料在干燥过程中营养物质损失程度的指标[26], 组合干燥结合了热风干燥时间短和真空干燥 Vc 保留率高的优势, Vc 含量仅次于真空冷冻干燥。

硬度是反应红枣切片品质的重要指标之一, 软组织结构的干燥最受消费者欢迎[27]。在试验条件下, 热风干燥的红枣切片硬度最高, 高于真空干燥约 11%, 高于组合干燥约 22%, 高于真空冷冻干燥约 106%, 真空冷冻干燥的物料结构组织疏松, 在运输过程中易碎, 不利于保存物料的完整性。

2.3　基于层次分析法的综合评价

采用层次分析法对红枣切片的 5 个评价指标进行分析, 从而建立其评价体系的数学模型, 旨在筛选出品质较好的红枣加工工艺。

2.3.1　判断矩阵及其一致性检验结果

在红枣切片的综合评价模型中, 指标层的评级指标对目标层的品质评价产生直接影响, 而方案层则对指标层的评级指标产生影响, 从而间接地影响了目标层的品质评价结果。通过采用 1~9 比例标度法构建判断矩阵 (见表 5) , 并对其一致性进行检验; 采用和积法计算判断矩阵的最大特征根λ, 并计算各个评价指标的权重值ω_i (见表 5) 。根据公式 (4) 计算得$CR < 0.1$, 表明判断矩阵通过一致性检验, 因此ω_i =(0.3376, 0.1031, 0.2210, 0.1995, 0.1288) 可以作为红枣脆片品质评价指标的权重系数。

2.3.2　红枣切片品质综合评分

真空冷冻干燥为参照组, 其过高的干燥耗时使其干燥能耗高, 成本较高, 去除真空冷冻干燥组后, 根据 1.3.8 节所述, 得到红枣脆片品质的综合评分, 如表 6 所示。其中热风真空组合干燥(参照组)综合评分最高, 为 0.22300 分, 其次是真空干燥(0.21872), 热风干燥(0.21227)最低。在三种干燥方式中, 热风真空组合干燥的综合评分最高, 因此选择该种干燥方式为红枣切片最优加工工艺。

3　结论

本文采用热风干燥、真空干燥、热风真空组合干燥、真空冷冻干燥(参照组)四种干燥方式分别干燥红枣切片, 对其干燥特性及品质进行对比, 考虑其干燥速率及品质, 选取干燥时间、复水比、色泽、Vc 含量和质构特性为评价指标, 采用层次分析法对红枣切片的干燥方式进行综合评分排序。

(1) 干燥特性方面, 由于β>1, 故表面和内部水分扩散同时来控制红枣切片的干燥过程; 有效水分扩散系数 D_{eff} 大小排序为: 热风干燥>热风真空组合干燥>真空干燥, 说明相比于真空干燥, 热风干燥可增加水分扩散动量, 提高干燥效率。

(2) 干燥品质方面, 尽管冷冻干燥(参照组)Vc 含量、色差、复水比等品质最佳, 但其过高的干燥耗时使其干燥能耗高, 成本较高, 因此对热风干燥、真空干燥、热风真空组合干燥采用层次分析法进行综

表 5 判断矩阵与一致性检验结果

Tab. 5 Judgment matrix and consistency test results

		判断矩阵					ω_i	λ	CI	CR
指标层		A1	A2	A3	A4	A5				
	A1	1	2	2	2	3	0.3376	5.3223	0.0806	0.07195
	A2	1/2	1	1/2	1/2	1/3	0.1031			
	A3	1/2	2	1	1	3	0.2210			
	A4	1/2	2	1	1	2	0.1995			
	A5	1/3	3	1/3	1/2	1	0.1288			
方案层			B1	B2	B3	B4				
	A1	B1	1	2	2	4	0.4299	4.1181	0.0394	0.0438
		B2	1/2	1	1/2	3	0.2087			
		B3	1/2	2	1	2	0.2618			
		B4	1/6	1/3	1/2	1	0.0997			
	A2	B1	1	2	1/2	1/4	0.1514	4.0613	0.0204	0.0227
		B2	1/2	1	1/2	1/4	0.1069			
		B3	2	2	1	1/2	0.2472			
		B4	4	4	2	1	0.4944			
			B1	B2	B3	B4				
	A3	B1	1	1/3	1/2	1/4	0.0774	4.0458	0.0153	0.0170
		B2	3	1	2	1/2	0.1820			
		B3	2	1/2	1	1/2	0.1442			
		B4	4	2	2	1	0.5963			
	A4	B1	1	1/3	1/2	1/5	0.0705	4.1488	0.0496	0.0551
		B2	3	1	2	1/2	0.1741			
		B3	2	1/2	1	1/3	0.1741			
		B4	5	3	3	1	0.5812			
	A5	B1	1	1/2	1/3	1/4	0.0882	4.0310	0.0103	0.0115
		B2	2	1	1/2	1/3	0.1575			
		B3	3	2	1	1/2	0.2718			
		B4	4	3	2	1	0.4824			

表 6 红枣切片品质综合评分

Tab. 6 Comprehensive score of red jujube slice quality

干燥方式	干燥时间	复水比	色泽	Vc 含量	硬度	综合评分
热风干燥	0.14514	0.01561	0.02149	0.01672	0.01332	0.21227
真空干燥	0.07046	0.01103	0.06335	0.05154	0.02235	0.21872
热风真空组合干燥	0.08839	0.02550	0.04057	0.03008	0.03845	0.22300

合评分排序,最终红枣脆片综合评分最高的工艺为热风真空组合干燥。

(3) 热风真空组合干燥结合了两种单一干燥方式的优点,该技术不仅可以显著地缩短干燥时间、节约能耗,并提高整体干燥效率及红枣切片的品质。

参 考 文 献

[1] Song Y, Wang J Z. Evaluation of sensory and physicochemical properties of grey jujube from different producing regions[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(7): 148−154, 293 (宋烨, 王建中. 不同产地灰枣感官及理化特性评价 [J]. 现代食品科技, 2021, 37(7): 148−154, 293 (in Chinese))

[2] Ozturk B, Bektas E, Aglar E, et al. Cracking and quality attributes of jujube fruits as affected by covering and preharvest Parka and GA_3 treatments[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 240(14): 65−71

[3] Hernández F, Noguera-Artiaga L, Burló F, et al. Physicochemical, nutritional, and volatile composition and sensory profile of Spanish jujube (Ziziphus jujuba Mill.)

fruits[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2016, 96(8): 2682−2691

[4] Zhang Y L, Fang H C, Dou B X, et al. Research progress of red jujube related products[J]. Storage and Process, 2021, 21(4): 146−150 (张云亮, 范洪臣, 窦博鑫, 等. 红枣相关产品的研究进展 [J]. 保鲜与加工, 2021, 21(4): 146−150 (in Chinese))

[5] Wu X F. Changes of phenols in jujube during drying and their relationship with browning[J]. Storage and Process, 2021, 12(3): 125−129, 135 (武兴菲. 红枣干制过程中酚类物质的变化及其与褐变的关系 [J]. 保鲜与加工, 2021, 12(3): 125−129, 135 (in Chinese))

[6] Xiang Y X, Yang T J, Xiang Y L. Study on extraction technology of red pigment from dog's head jujube peel[J]. Agricultural Science &Technology and Equipment, 2021: 39−41 (相玉秀, 杨铁金, 相玉琳. 狗头枣枣皮红色素的提取工艺研究 [J]. 农业科技与装备, 2021(4): 39−41 (in Chinese))

[7] Yu J J, Bi J F, Ding Y Y. Effect of drying treatment methods on the quality properties of red jujube[J]. Modern food science and technology, 2011, 27(6): 610−614, 672 (于静静, 毕金峰, 丁媛媛. 不同干燥方式对红枣品质特性的影响 [J]. 现代食品科技, 2011, 27(6): 610−614, 672 (in Chinese))

[8] Li R L, Yin D C, Wang X H, et al. Effects of drying methods on kinetics and volatile components of red jujube slices[J]. Fine Chemicals, 2023, 40(2): 297−304 (李瑞丽, 尹冬辰, 王新惠, 等. 干燥方式对红枣片动力学及挥发性成分的影响 [J]. 精细化工, 2023, 40(2): 297−304 (in Chinese))

[9] Niu Y B, Yao X D, Xiao H W, et al. Effects of radio frequency assisted hot air drying on the texture and microstructure of jujube slices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(2): 296−306 (牛玉宝, 姚雪东, 肖红伟, 等. 射频辅助热风干燥对红枣脆片质构特性和微观结构的影响 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 296−306 (in Chinese))

[10] Liu D C, Zheng X, Xiao H W, et al. Optimization of sequential freeze-infrared drying process of jujube slices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(17): 293−302 (刘德成, 郑霞, 肖红伟, 等. 红枣片冷冻-红外分段组合干燥工艺优化 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(17): 293−302 (in Chinese))

[11] He Y, Zhang M, Ma C, et al. Research progress on the influence of different drying methods on the flavor of jujube[J]. The Food Industry, 2021, 42(7): 208−211 (贺怡, 张明, 马超, 等. 不同干制方式对红枣风味影响的研究进展 [J]. 食品工业, 2021, 42(7): 208−211 (in Chinese))

[12] Zhang L Y, Zhang X Q, Wang H Y, et al. Based on the analytic hierarchy process and multi-index orthogonal experiments, the water extraction process of anti-chancre and stomach mixture was optimized[J]. Chinese Journal of Traditional Medical Science and Technology, 2024, 31(1): 41−45,133 (张乐怡, 张晓芹, 王慧玉, 等. 基于层次分析法及多指标正交试验优选消疳健胃合剂水提工艺 [J]. 中国中医药科技, 2024, 31(1): 41−45,133 (in Chinese))

[13] Liu X, Wang P, Bi J F, et al. Quality evaluation of late maturity apple chips based on analytic hierarchy process[J]. Food & Machinery, 2012, 28(5): 46−50 (刘璇, 王沛, 毕金峰, 等. 基于层次分析法的晚熟品种苹果脆片品质评价 [J]. 食品与机械, 2012, 28(5): 46−50 (in Chinese))

[14] Hu Z, Zhou H, Li Y, et al. Optimized purification process of polysaccharides from Carex meyeriana Kunth by macroporous resin, its characterization and immunomodulatory activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 132(12): 76−86

[15] Pei L N, Cheng M, Ge Y. Analysis of quality evaluation factors of Penaeus vannamei shrimp based on chromatography analysis[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(9): 334−337 (裴丽娜, 陈明, 葛艳. 基于层析分析法的凡纳滨对虾品质评价因素分析 [J]. 江苏农业科学, 2015, 43(9): 334−337 (in Chinese))

[16] National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. Determination of moisture in food: GB/T 5009.3-2016[S][M]. Bei Jing: Standards Press of China (中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品中水分的测定: GB/T 5009.3-2016[S][M]. 北京: 中国标准出版社, 2016 (in Chinese))

[17] Jia W T, Zhang R R, Li W J, et al. Optimization of hot air-microwave coupling drying process and study on drying characteristics and microstructure of Ziziphus jujuba Mill[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2023, 14(20): 269−278 (贾文婷, 张冉冉, 李文绮, 等. 红枣热风微波耦合干燥工艺优化及干燥特性和微观结构研究 [J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(20): 269−278 (in Chinese))

[18] Niu Y, Chen H F, Yuan Y J, et al. Effects of ethanol and CO_2 on the low temperature pressure explosion puffing drying quality of jujube slices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering Transactions of

the CSAE), 2022, 38(7): 300−307 (牛瑶, 陈海峰, 袁越锦, 等. 乙醇对红枣片 CO_2 低温压差膨化干燥品质的影响 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(7): 300−307 (in Chinese))

[19] Bantle M, Kolsaker K, A T M E. Modification of the weibull distribution for modeling atmospheric freeze-drying of Food[J]. Drying Technology, 2011, 10(29): 1161−1169

[20] Yuan Y J, Li S S, Xu Y Y, et al. The influence of different moisture heat treatments on the drying quality of soybean based on the coefficient of variation[J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology, 2023, 41(6): 55−61 (袁越锦, 李沈沈, 徐英英, 等. 基于变异系数法评价不同湿热处理对大豆干燥品质的影响 [J]. 陕西科技大学学报, 2023, 41(6): 55−61 (in Chinese))

[21] Qiao H Z, Gao Z J, Wang J, et al. Optimization of vacuum pulsed drying process of garlic[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(5): 256−263 (乔宏柱, 高振江, 王军, 等. 大蒜真空脉动干燥工艺参数优化 [J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 256−263 (in Chinese))

[22] Wang J, Dong J X, Wang D, et al. Optimization of process parameters on apricot drying by combination of hot-air and vacuum[J]. Farm Products Processing, 2019(1): 33−36 (王健, 董继先, 王栋. 杏子热风真空组合干燥工艺参数的优化 [J]. 农产品加工, 2019(1): 33−36 (in Chinese))

[23] Deng Y Y, Yang J, Wei Z C, et al. Effects of hot air-vacuum freeze combined with drying on physical properties and prebiotic activities of brittle dried longan[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(10): 2078−2090 (邓媛元, 杨婧, 魏振承, 等. 热风-真空冷冻联合干燥对脆性龙眼果干品质及益生活性的影响 [J]. 中国农业科学, 2020, 53(10): 2078−2090 (in Chinese))

[24] Dai J W, Fu Q Q, Huang H, et al. Drying characteristics and quality optimization of green prickly ashes during vacuum pulsed drying[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(8): 279−287 (代建武, 付琪其, 黄欢, 等. 青花椒真空脉动干燥特性及干燥品质工艺优化 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 279−287 (in Chinese))

[25] Zhang M, Ma C, Zhang B H, et al. Optimization of microwave hot-air combined drying process for gray jujube slices with low browning degree[J]. China Fruit & Vegetable, 2021, 41(6): 1−4 (张明, 马超, 张博华, 等. 低褐变度灰枣片微波热风联合干燥工艺优化研究 [J]. 中国果菜, 2021, 41(6): 1−4 (in Chinese))

[26] Yuan J Y, Hong C, Xu Y Y, et al. Optimization of carrot vacuum pulsating steam blanching process under combined drying method[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2022, 34(1): 163−172 (袁越锦, 洪晨, 徐英英, 等. 组合干燥方式下胡萝卜真空脉动蒸汽烫漂工艺优化 [J]. 浙江农业学报, 2022, 34(1): 163−172 (in Chinese))

[27] Liao Y X, Cheng W B, Zhang W D, et al. Optimization of the variable temperature drying process and quality evaluation of Junzao jujube[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(6): 237−246 (廖雅萱, 程少波, 张伟达, 等. 骏枣变温干燥工艺优化及品质评价 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(6): 237−246 (in Chinese))