

热风干燥工艺对红枣裂纹及品质的影响

胡林宾^{1,2,3} 李 林⁴ 王 龙^{1,2,3} 胡 灿^{1,2,3} 弋晓康^{1,2,3}

(1. 塔里木大学机械电气化工程学院, 新疆 阿拉尔 843300; 2. 自治区教育厅普通高等学校现代农业工程重点实验室, 新疆 阿拉尔 843300; 3. 新疆特色农林产物利用与装备兵团重点实验室, 新疆 阿拉尔 843300; 4. 新疆工业学院, 新疆 和田 848000)

摘要: [目的] 考察不同热风干燥条件下红枣裂纹产生情况及品质差异。[方法] 以新疆红枣为研究对象, 基于热风干燥技术, 分别设置 3 个干燥温度与干燥风速水平, 探究无裂纹和有裂纹红枣在不同干燥条件下的干燥特性及品质变化规律。[结果] 在热风干燥条件下, 提高干燥温度和干燥风速能加快干燥速率, 相对于无裂纹红枣, 有裂纹红枣因水分更易流失, 因此所需干燥时间更短。干燥温度与干燥风速的提高, 使得水分有效扩散系数提高。红枣鲜样的初始裂纹率在 35%~55%, 无裂纹红枣在 65 °C (固定干燥风速) 和 2.0 m/s (固定干燥温度) 干燥后新增裂纹率分别为 30%, 20%, 相同条件下有裂纹红枣干燥后无新裂纹。总糖含量、总酸含量、抗坏血酸含量、 L^* 值、 a^* 值、 b^* 值随干燥温度及干燥风速提高而整体降低, 还原糖含量与 ΔE 则相反。[结论] 干燥温度和干燥风速的提高会缩短红枣干燥时间, 对红枣裂纹产生影响, 但裂纹对红枣品质不会造成影响。

关键词: 红枣; 热风干燥; 干燥动力学; 裂纹; 理化品质

Effect of hot air drying process on the cracks and quality of jujubes

Hu Linbin^{1,2,3} Li Lin⁴ Wang Long^{1,2,3} Hu Can^{1,2,3} Yi Xiaokang^{1,2,3}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Tarim University, Alaer, Xinjiang 843300, China; 2. Modern Agricultural Engineering Key Laboratory at Universities of Education Department of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Alaer, Xinjiang 843300, China; 3. Xinjiang Production and Construction Corps (XPCC) Key Laboratory of Utilization and Equipment of Special Agricultural and Forestry Products in Southern Xinjiang, Alaer, Xinjiang 843300, China; 4. Xinjiang University of Technology, Hetian, Xinjiang 848000, China)

Abstract: [Objective] To investigate the crack occurrence in jujubes under different hot air drying conditions and the resulting quality differences. [Methods] Jujubes of Xinjiang are taken as the research objects. Based on hot air drying technology, three drying temperature and wind speed levels are set up to explore the drying characteristics and quality changes of crack-free and cracked jujubes under different drying conditions. [Results] Under hot-air drying conditions, the drying rate can be accelerated by increasing drying temperature and wind speed. Compared to crack-free jujubes, cracked ones are prone to moisture loss, thus requiring shorter drying times. Increases in temperature and wind speed enhance the effective moisture diffusion coefficient. The initial crack rate of fresh jujube samples is between 35% and 55%. The newly added crack rates of crack-free jujubes after drying at 65 °C (with a fixed air drying wind speed) and 2.0 m/s (with a fixed drying temperature) are 30% and 20%, respectively. Under the same conditions, no new cracks occur in the cracked jujubes after drying. As drying temperature and wind speed are increased, total sugar, total acid, and ascorbic acid content, as well as L^* , a^* , and b^* values decrease, while reducing sugar content and ΔE show the opposite trend. [Conclusion] Increased drying temperature and drying wind speed shorten the drying time of jujubes and influence crack occurrence, but the resulting cracks do not affect jujube quality.

基金项目: 兵团基础研究面上项目 (编号: 2024DA032); 师市科技攻关计划项目 (编号: 2024ZB04); 国家自然科学基金 (编号: 32160427)

通信作者: 弋晓康 (1976—), 男, 塔里木大学教授, 博士。E-mail: yxk@taru.edu.cn

收稿日期: 2025-05-29 **改回日期:** 2026-01-02

引用格式: 胡林宾, 李林, 王龙, 等. 热风干燥工艺对红枣裂纹及品质的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(7): 194-202.

Citation: Hu Linbin, Li Lin, Wang Long, et al. Effect of hot air drying process on the cracks and quality of jujubes[J]. Food & Machinery, 2026, 42(7): 194-202.

Keywords: jujube; hot air drying; drying kinetics; crack; physicochemical property

红枣是鼠李科枣属植物的果实,为药食同源的食品。枣果中富含酚类、萜类、多糖等多种营养物质^[1-3],具有抗氧化、调节血压血脂、抑菌、抗肝癌、缓解抑郁、缓解酒精致急性肝损伤等多种生物活性^[4-6]。鲜枣含有约80%的水分,导致贮运极为困难,在贮藏阶段每年损失率高达20%~30%^[7]。干燥是加工红枣的常用方法,干燥过程中工艺参数的调控会影响产品的最终品质。许利平等^[8]研究发现,红枣在热风干燥过程中,相对于干燥温度,干燥时间更能影响到红枣甜度指数。贾文婷等^[9]优化了红枣热风微波耦合干燥工艺,解决了传统热风干燥效率低、抗坏血酸损失严重等问题。对于红枣商品品质与消费者选择外观因素主要考虑红枣的色泽与裂纹,尤其是裂纹的存在会降低红枣的商品价值。徐超^[10]⁵³研究发现,裂纹的扩散与红枣收缩相关,裂纹扩散主要是干燥收缩不均导致的;裂纹部位的收缩更加快,产生的生物应力传导到未开裂位置,驱使其延伸,当红枣表皮硬化后扩散趋于稳定。

为探索适宜的红枣干燥技术与装备,科研人员开展了大量的研究工作。Fang等^[11]对整个枣与切片红枣进行了干燥特性研究,在1.20,1.67,2.50 W/g(干基)的微波功率水平下,对枣果的收缩率、密度、抗坏血酸含量、色泽和复水比进行了测定,研究发现整颗枣收缩行为和切片存在本质差异;在较高微波功率(2.50 W/g)下整颗枣抗坏血酸和产品密度增加,同时也会加剧褐变。Li等^[12]基于射频联合热风干燥技术,研究了板间距、射频施用时间和射频间隔时间对冬枣片品质的影响,结果表明,在板间距100 mm、射频施用时间3 min、射频间隔时间2 min的条件下,抗坏血酸质量分数达到258.35 mg/100 g。Wan等^[13]研究了冷等离子体和超声波两种预处理方法,以及真空冷冻干燥、热风干燥和微波—脉冲真空干燥等不同干燥工艺对冬枣片品质特性的影响,结果表明,冷等离子体预处理结合微波—脉冲真空干燥技术是提升冬枣片品质的有效方式。Liao等^[14]研究表明,变温干燥(VTD)保持了红枣原有的色泽,降低了红枣的硬度和咀嚼性,而且干燥时间比恒温干燥(CTD)缩短了13.2%。目前针对裂纹红枣与无裂纹红枣的相关研究已有报道,而质构和感官关键品质属性的对比研究尚且不足。

研究拟探究不同干燥温度(45,55,65℃)和干燥风速(1.0,1.5,2.0 m/s)对无裂纹红枣和裂纹红枣的干燥特性,以及干燥过程中红枣裂纹变化规律和理化品质,旨在为红枣干燥工艺优化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

新鲜红枣:采摘于新疆维吾尔自治区阿拉尔市十二团十四连枣园(东经81°10'29.132",北纬40°26'15.076");

氢氧化钠、酒石酸钾钠、硫酸铜、抗坏血酸、2,6-二氯酚、草酸、盐酸、葡萄糖、乙醇:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

电子天平:CP4102型,克斯仪器(常州)有限公司;

热风干燥箱:6THCD型,塔里木大学机械电气化工程学院和中国农业大学工学院研制;

电子数显卡尺:111N-101-40型,上海工具厂有限公司;

体视显微镜:B133-CB型,深圳市三镨泰达光学仪器有限公司;

便携式分光测色仪:DS-700D型,杭州彩谱科技有限公司;

质构分析仪:JSTA-05型,北京久世衡仪科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 干燥预处理 挑选表面无裂纹和有裂纹无机械损伤的鲜熟期红枣,初始湿基含水率为(65±2)%。挑选数量一致无裂纹与有裂纹枣均匀平铺在托盘上放入热风干燥机进行干燥。分别统计干燥前后红枣裂纹;每隔2 h称重1次,直至湿基含水率为25%时结束干燥。基于文献资料并结合前期预试验结果,将热风干燥温度设定为45,55,65℃^[15]²¹,干燥风速设置为1.0,1.5,2.0 m/s^[16]。具体试验方案见表1。

表1 干燥温度及干燥风速试验方案

Table 1 Test plan of drying temperature and wind speed

编号	干燥温度/℃	干燥风速/(m·s ⁻¹)
1	45	1.5
2	55	1.5
3	65	1.5
4	55	1.0
5	55	2.0

1.2.2 红枣干燥特性

(1) 水分比:参照钱婧雅等^[17]的方法。

(2) 干燥速率:参照刘德成等^[18]的方法。

1.2.3 水分有效扩散系数 参照王立霞等^[19]的方法结合式(1)求得水分有效扩散系数。

$$\ln(M_R) = \ln \frac{6}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{r_c^2}, \quad (1)$$

式中:

M_R ——水分比;

D_{eff} ——水分有效扩散系数, m^2/s ;

t ——干燥时间, s ;

r_c ——红枣的等量半径, mm 。

1.2.4 裂纹率测定 裂纹率测定分为初始裂纹率和干燥裂纹率。红枣表面裂纹为三维形式,但红枣裂纹扩散尺度较小,因此将新增裂纹部位近似看作平面,使用马克笔对裂纹尾端进行标记,定时取样使用体视显微镜观察裂纹尾端扩散长度。按式(2)计算裂纹率^[15]^[22]。

$$n = \frac{N_1}{N_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

n ——裂纹率, %;

N_0 ——取样的总数;

N_1 ——裂果数。

1.2.5 总糖质量分数测定 参照王超^[20]的方法并加以修改:用液氮对样品速冻,利用研磨机粉碎成细粉,将样本混合均匀,放入离心管中,加体积分数 80% 的乙醇溶液, 80°C 水浴 30 min,将溶液充分搅拌均匀,冷却至室温 (25°C 左右), $3\,500\text{ r/min}$ 离心 10 min,将上层清液转移至 150 mL 的容量瓶中,再向沉淀中加入提取液,重复两次,合并上清液并定容。将待测溶液放入比色管中,加蒽酮溶液,记录在 620 nm 处待测试剂和空白试剂的吸光度。每个样品进行 3 次平行测定。按式(3)计算总糖质量分数。

$$W = \frac{C \times V_t \times n}{m \times V_s \times 1\,000} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

W ——总糖质量分数, %;

C ——标曲求得的葡萄糖的质量, μg ;

V_t ——样品提取液总体积, mL ;

n ——稀释倍数;

m ——样品干重, g ;

V_s ——测定所取样品溶液体积, mL 。

1.2.6 还原糖质量分数测定 按 GB 5009.7—2016 中的直接滴定法执行,每个样品进行 3 次平行测定。

1.2.7 总酸质量分数测定 按 GB 12456—2021 中的酸碱指示剂滴定法执行,每个样品进行 3 次平行测定。

1.2.8 抗坏血酸质量分数测定 按 GB 5009.86—2016 中的 2,6-二氯酚滴定法执行,每个样品进行 3 次平行测定。

1.2.9 色泽测定 参照刘战霞等^[21]的方法,每个样品进行 3 次平行测定。

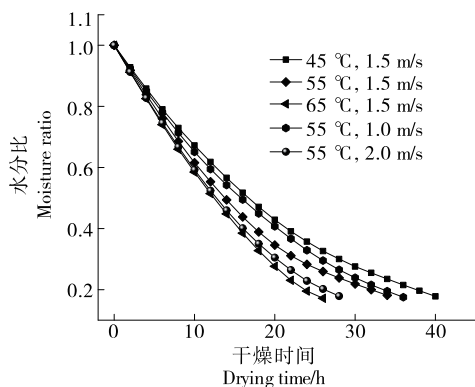
1.2.10 硬度测定 使用质构分析仪测定硬度,使用圆柱形探头进行试验,测量条件:下压速度 2 mm/s ,上升速度 3 mm/s ,按压时间 3 s,每个样品进行 3 次平行测定。

1.2.11 试验数据分析 利用 Excel 软件对数据处理,SPSS 软件对数据进行相关性分析,使用 Origin 2022 进行曲线绘制。

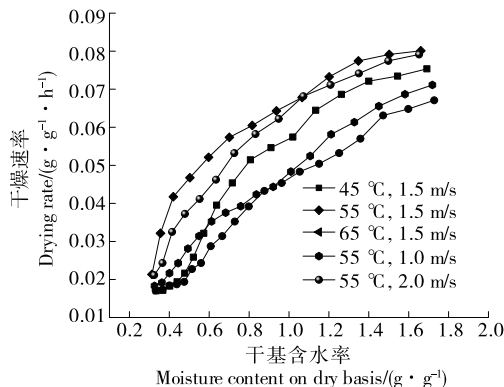
2 结果与分析

2.1 干燥参数对干燥特性的影响

2.1.1 水分比和干燥速率 图 1(a)为红枣表面无裂纹过程中水分比曲线图, 65°C 相对于 45°C 时间缩短了 35%, 2.0 m/s 干燥时间相对于 1.0 m/s 缩短了 22.22%。图 2(a)为有裂纹红枣干燥过程中水分比曲线图, 65°C 相对于 45°C 干燥时间缩短了 29.41%。 2.0 m/s 相对于 1.0 m/s 干燥耗时缩短了 18.75%。由图 1(a)、图 2(a)可知,提高干燥温度和干燥风速,干燥耗时越短、效率越高。水分比 (M_R)



(a) 水分比



(b) 干燥速率

图 1 干燥温度和干燥风速对无裂纹红枣干燥特性的影响

Figure 1 Effects of drying temperatures and wind speed on the drying characteristics of crack-free jujubes

曲线在干燥前期下降明显,后期下降趋势减缓,这一结论与王坤华等^[22]的研究结果一致。这种现象产生的原因是红枣干燥前期表面的水分快速蒸发,后期下降缓慢是因红枣内部水分向表面扩散的路径变长且阻力更大,进而导致内部水分迁移速度跟不上表皮水分蒸发速度。裂纹红枣的干燥时间整体短于无裂纹红枣,这是因为裂纹红枣果皮破裂加快了内部水分的扩散。因此,有裂纹会对干燥效率产生影响。

由图1(b)、图2(b)可知,在1.5 m/s干燥风速下,干燥温度越高干燥速率越大,随着干基含水率的减少干燥速率降低,两者整体呈降速干燥;在55℃干燥温度下,随着干燥风速的增加干燥速率增大,与王立霞等^[19]的研究结果相似。干燥速率与水分传递有很大关系,在干燥前期,红枣主要从表面快速扩散,后期内部水分扩散逐渐由内向外传递,红枣内部水分迁移缓慢,进而造成干燥速率降低。因此,提高干燥温度及干燥风速能够提升红枣的干燥效率。

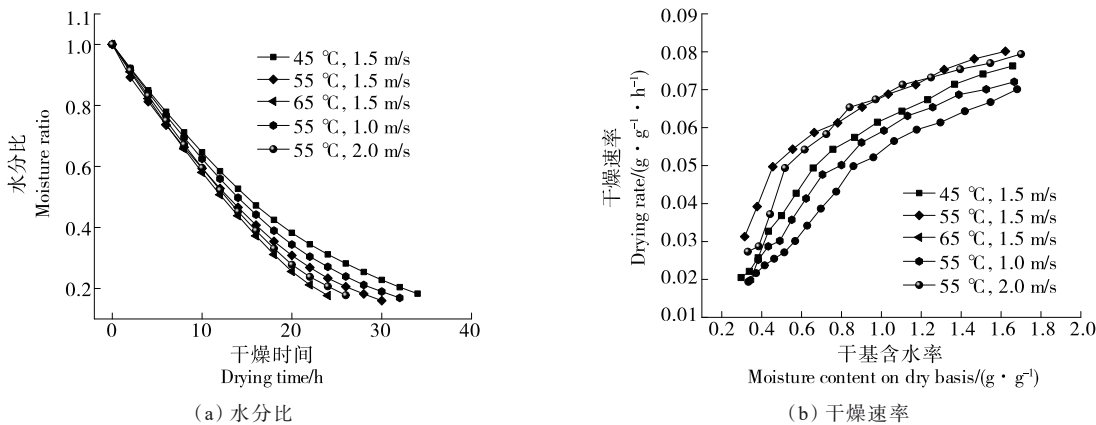


图2 干燥温度和干燥风速对有裂纹红枣干燥特性的影响
Figure 2 Effects of drying temperatures and wind speed on the drying characteristics of cracked jujubes

2.1.2 水分有效扩散系数 通过线性回归公式计算红枣干燥过程不同干燥温度和干燥风速的有效扩散系数,结果如表2所示,干燥温度和干燥风速越大,水分有效扩散系数越大。无裂纹红枣线性回归公式的决定系数(R^2)为0.990 6~0.999 6,有裂纹红枣线性回归公式的 R^2 为0.991 3~0.998 8,两者拟合程度均相对较高。无裂纹红枣水分有效扩散系数略低于有裂纹红枣。水分扩散系数越大,代表样品中水分的脱除效率越高^{[10]46}。随着干燥温度的升高, D_{eff} 值逐渐增加。

2.2 红枣裂纹变化
干燥前,统计样品的初始裂纹率,并根据红枣裂纹情况划分为有裂纹组和无裂纹组。如表3所示,试验样品初始裂纹率为35%~55%,平均裂纹长度为22.65~29.81 mm,平均裂纹宽度为1.23~2.45 mm。
无裂纹红枣在干燥过程中裂纹产生情况如表4所示。提高干燥温度或干燥风速均会导致裂纹风险的增加,以干燥风速1.5 m/s为基准,随着干燥温度的升高,红枣的裂纹率从10%增至30%;以干燥温度55℃为基准,红枣裂纹

表2 红枣干燥温度和干燥风速下水分有效扩散系数				
Table 2 Effective moisture diffusion coefficient under different drying temperatures and wind speed				
样品	干燥时间/h	线性回归公式	R^2	$D_{\text{eff}}/(\times 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
无裂纹红枣	40	$\ln M_R = -1.208 7 \times 10^{-5} t + 0.024 2$	0.999 6	6.000 8
	34	$\ln M_R = -1.438 6 \times 10^{-5} t + 0.014 9$	0.997 9	7.151 4
	26	$\ln M_R = -1.925 9 \times 10^{-5} t + 0.099 8$	0.990 6	9.573 8
	36	$\ln M_R = -1.356 5 \times 10^{-5} t + 0.145 3$	0.998 1	6.743 2
	28	$\ln M_R = -1.752 7 \times 10^{-5} t + 0.069 9$	0.996 6	8.712 8
有裂纹红枣	34	$\ln M_R = -1.405 8 \times 10^{-5} t + 0.046 6$	0.998 8	6.744 4
	30	$\ln M_R = -1.726 5 \times 10^{-5} t + 0.059 7$	0.996 7	8.283 0
	24	$\ln M_R = -2.012 6 \times 10^{-5} t + 0.110 6$	0.985 1	9.655 5
	32	$\ln M_R = -1.584 4 \times 10^{-5} t + 0.066 8$	0.997 6	7.601 2
	26	$\ln M_R = -1.891 6 \times 10^{-5} t + 0.100 52$	0.991 3	9.075 0

表 3 干燥前裂纹统计[†]

Table 3 Statistical analysis of cracks before drying		
裂纹率/%	平均裂纹长度/mm	平均裂纹宽度/mm
35	24.17	1.75
40	22.65	1.23
45	32.17	2.01
50	25.21	2.45
55	29.81	1.54

[†] 裂纹数据按照不同采摘日期的样品统计得出;平均裂纹长度与平均裂纹宽度均为对应组所有样品的平均值。

率从 15% 增至 20%。这是由于干燥温度和干燥风速的升高,红枣表面与内部果肉的水分迁移程度不同导致水分梯度较大,进而产生不均匀干燥应力,当干燥应力超过枣皮能承受的范围而造成裂纹。初始有裂纹的红枣在热风干燥过程中均未新增裂纹,对于初始有裂纹的红枣,裂纹为红枣内部水分迁移提供了通道,降低了干燥应力,因此不会有新裂纹的产生^{[10]31}。因此,干燥温度和干燥风速对红枣裂纹产生有影响。

2.3 理化品质分析

2.3.1 总糖质量分数 如图 3 所示,总糖质量分数随干燥温度及干燥风速的提升整体呈下降趋势,与 Elmas 等^[23]和 Yaşa^[24]的研究结果相似。由于干燥前红枣表皮和内部组织未被破坏理化指标相对较好,干燥后内部水分迁移会造成红枣自身的营养成分流失。对比干燥前,在 55℃ 无裂纹和有裂纹红枣总糖质量分数减少了 23.67%,21.62%。红枣在采摘后仍然能保持一段时间的呼吸作用,高温干燥时会提高其呼吸强度,使得红枣内部的糖分以更快的速度被消耗,因此干燥温度越高,干燥完成后总糖质量分数就越低^[23]。对于总糖质量分数,同一类型枣不同干燥

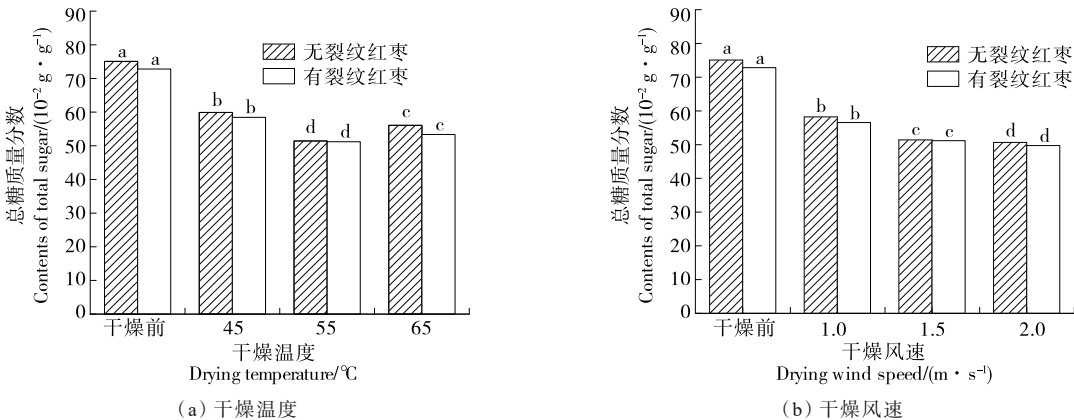
表 4 无裂纹枣干燥新增裂纹统计

Table 4 Statistical analysis of new cracks in crack-free jujubes after drying				
干燥条件	干燥红枣数量	新增裂果数量	新增裂纹率/%	新增裂纹条数
1	20	2	10	3
2	20	3	15	5
3	20	6	30	8
4	20	3	15	5
5	20	4	20	7

温度及干燥风速间具有显著性差异。

2.3.2 还原糖质量分数 如图 4 所示,随干燥温度及干燥风速的提升还原糖质量分数整体提高,当干燥温度为 55℃ 时还原糖质量分数最高。魏利清等^[25]采用热风干燥枣时也发现,干制温度越高,还原糖上升越快。红枣干燥过程中,在热风作用下大量的水分被蒸发,糖浓缩,还原糖的相对浓度增加,同时受温度影响,多糖会转化成还原糖,进一步增加了还原糖的浓度^[23]。因此,干燥温度与干燥风速的提升加快了红枣传热传质的过程,也加快了糖浓缩和多糖转换为还原糖速度。

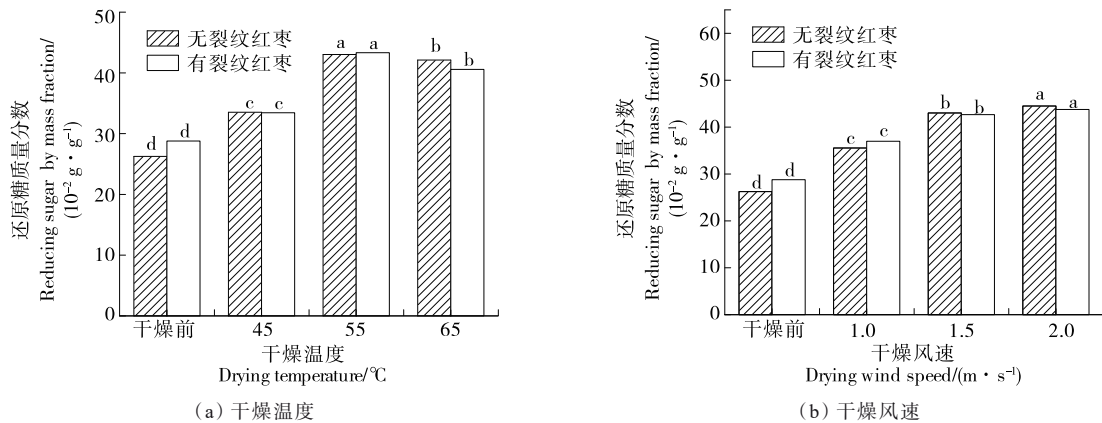
2.3.3 总酸质量分数 如图 5 所示,随干燥温度和干燥风速的增加总酸质量分数整体呈下降趋势。干燥温度为 65℃ 时的总酸质量分数高于 55℃ 时的,可能是因为干燥目标含水率相同,65℃ 所需的干燥时间更短,减少了酸类的流失和降解,与李林^{[15]43}得出的结论相似。魏事宇^[26]也发现,干燥风速的提高,会使冬枣片干基总酸含量越低。试验对比得出,同一类型枣不同干燥温度及干燥风速间的总酸质量分数具有显著性差异,总酸含量受到干燥温度及干燥风速的影响很大。



字母不同表示同型枣不同干燥参数组间差异显著($P<0.05$)

图 3 干燥参数对红枣总糖质量分数的影响

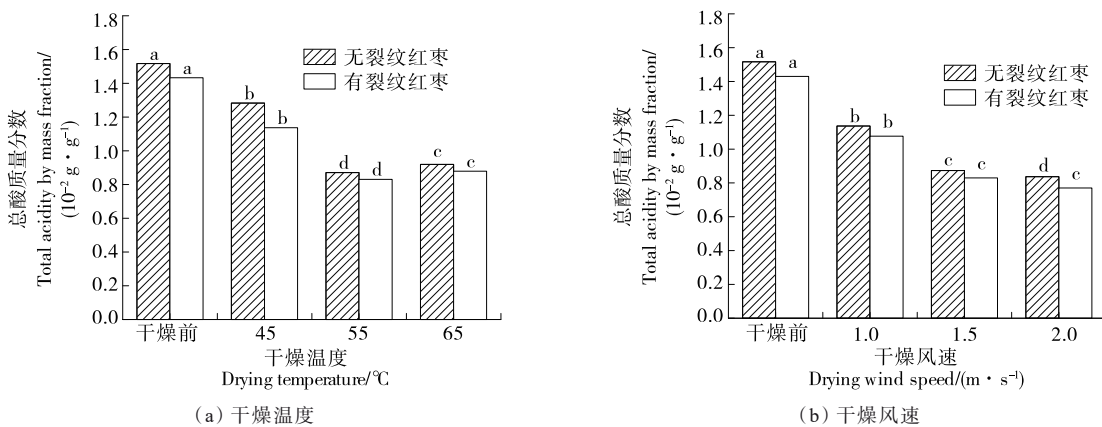
Figure 3 Effect of drying parameters on total sugar content in jujubes



字母不同表示同型枣不同干燥参数组间差异显著 ($P < 0.05$)

图4 干燥参数对红枣还原糖质量分数的影响

Figure 4 Effect of drying parameters on reducing sugar content in jujubes



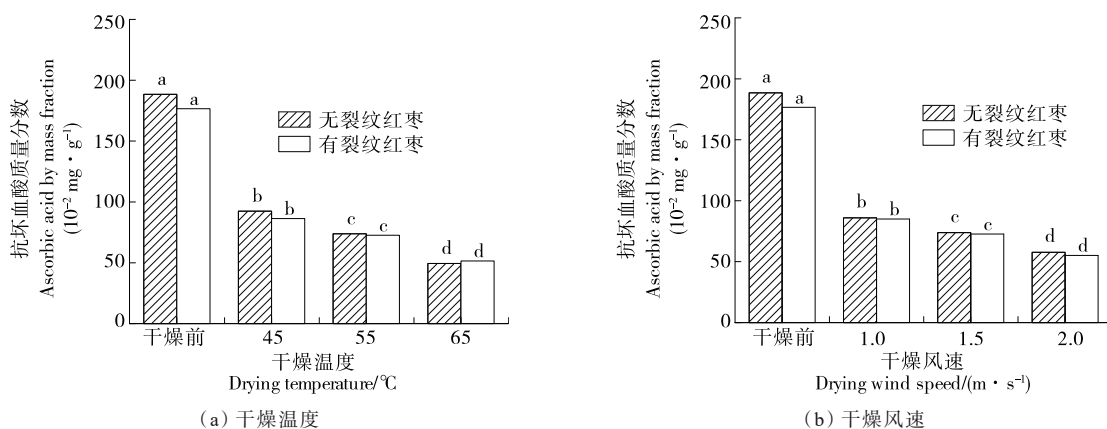
字母不同表示同型枣不同干燥参数组间差异显著 ($P < 0.05$)

图5 干燥参数对红枣总酸质量分数的影响

Figure 5 Effect of drying parameters on total acid content in jujubes

2.3.4 抗坏血酸质量分数 如图6所示,随干燥温度及干燥风速升高抗坏血酸质量分数降低,与刘宇星^[27]的研究

结论一致。抗坏血酸的损失可能是热不稳定性与光敏性引起的。同一类型的枣在不同干燥温度及干燥风速条件



字母不同表示同型枣不同干燥参数组间差异显著 ($P < 0.05$)

图6 干燥参数对红枣抗坏血酸质量分数的影响

Figure 6 Effect of drying parameters on the mass fraction of ascorbic acid in jujubes

下的抗坏血酸质量分数存在显著性差异,证实了干燥温度及干燥风速对抗坏血酸质量分数有影响。

2.3.5 色泽 如表 5 所示,无裂纹和有裂纹红枣的 L^* 、 a^* 、 b^* 值均随干燥温度及干燥风速的升高而减小; ΔE 随干燥

温度的升高而变大,与 Hadibi 等^[28]的研究结论一致。较高的干燥温度和干燥风速会加剧红枣的褐变,导致干燥后红枣枣皮变暗。其主要原因有两方面:① 红枣色素热降解;② 非酶褐变反应加剧。

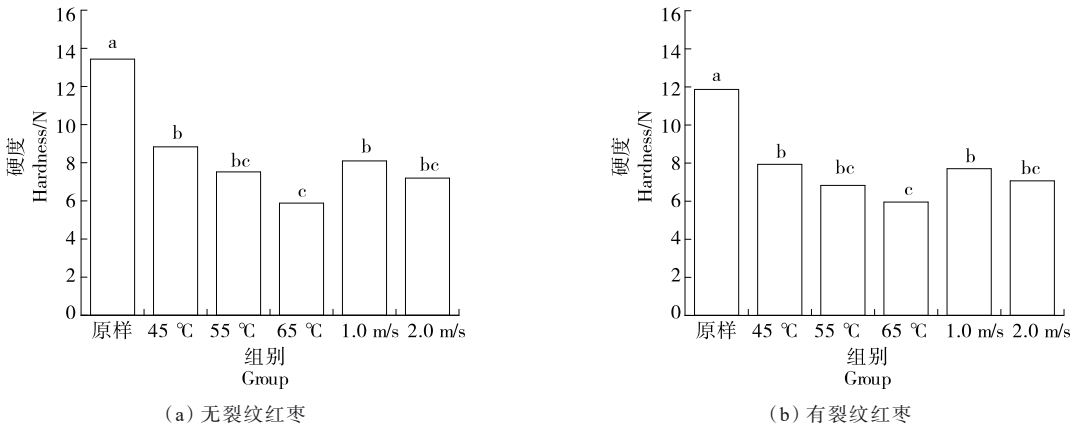
表 5 干燥参数对红枣色泽的影响[†]
Table 5 Effect of drying parameters on jujube color

组别	L^* 值		a^* 值		b^* 值		ΔE	
	无裂纹红枣	有裂纹红枣	无裂纹红枣	有裂纹红枣	无裂纹红枣	有裂纹红枣	无裂纹红枣	有裂纹红枣
鲜样	32.47±0.50 ^a	32.81±0.84 ^a	22.49±0.89 ^a	22.96±0.30 ^a	14.17±0.78 ^a	14.59±1.13 ^a		
45 °C	30.26±0.71 ^b	30.93±0.74 ^b	20.10±0.54 ^b	19.85±0.45 ^b	11.81±1.39 ^b	13.05±0.19 ^{ab}	4.14±0.22 ^{ab}	4.13±0.97 ^c
55 °C	28.06±0.57 ^c	28.28±0.56 ^d	18.25±0.65 ^{cd}	19.43±0.30 ^{bc}	10.93±0.52 ^{bc}	11.37±0.58 ^{bc}	6.34±0.33 ^a	7.17±0.15 ^a
65 °C	28.23±0.82 ^c	28.83±0.31 ^{cd}	17.69±0.38 ^d	18.89±0.34 ^c	10.15±0.36 ^c	10.86±1.99 ^c	6.84±0.77 ^a	7.41±0.72 ^a
1.0 m/s	29.93±0.44 ^b	29.95±0.68 ^{bc}	19.42±0.55 ^{bc}	19.63±0.22 ^b	10.67±0.22 ^{bc}	11.05±0.63 ^c	5.43±1.12 ^{ab}	5.70±0.40 ^b
2.0 m/s	27.94±0.56 ^c	28.97±0.35 ^{cd}	18.59±1.30 ^{cd}	18.91±0.29 ^c	10.59±0.31 ^{bc}	10.72±0.61 ^c	7.01±1.14 ^a	6.90±0.61 ^a

[†] 字母不同表示同列间差异显著($P<0.05$)。

2.3.6 质构特性 不同干燥参数下红枣质构特性如图 7 所示,随着干燥温度及干燥风速的升高,硬度呈下降趋势,与 Al-Awaadh 等^[29]和牛玉宝等^[30]的研究结论一致。这是因为干燥温度及干燥风速的提高强化了传热传质,

使得红枣水分的流失和水分向表皮迁移加快,导致细胞失水而发生红枣收缩,从而加剧了细胞的塌陷与组织破坏,造成硬度的下降。因此,干燥温度是影响硬度的主要因素。



字母不同表示同型枣不同干燥参数组间差异显著($P<0.05$)

图 7 干燥参数对红枣质构的影响

Figure 7 Effect of drying parameters on jujube texture

3 结论

该研究探讨了干燥参数(干燥温度、干燥风速)和裂纹状态对红枣干燥特性、品质的综合影响。结果表明,干燥温度与干燥风速的提升能够缩短干燥时间,并引起红枣色泽变暗、硬度下降。裂纹的存在破坏了红枣表皮与组织的结构完整性,干燥过程中裂纹为内部水分扩散和蒸汽向外界迁移提供了路径,从而降低了水分扩散阻力,提高了水分迁移速率。无裂纹红枣在不同干燥参数下均会有新的裂纹产生。为了保证干燥效率和提升红枣品

质,宜在干燥温度 55 °C、干燥风速 1.5 m/s 的条件下干燥红枣。为达成红枣干燥裂纹的精准调控,未来可从变温干燥工艺作为切入点,通过分析不同干燥温度阶段下裂纹与干燥时长、干燥温度之间的关系,建立有效的调控策略,为抑制裂纹提供理论依据与工艺指导。

参考文献

[1] 牛静怡,袁越锦,李颖,等.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[J].真空科学与技术学报,

- 2024, 44(10): 892-900.
- Niu J Y, Yuan Y J, Li Y, et al. Experiment and quality evaluation of hot-air vacuum combined drying for red jujube slices based on analytic hierarchy process[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2024, 44(10): 892-900.
- [2] 宋焯, 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.
- Song Y, Wang J Z. Evaluation of sensory and physico-chemical properties of grey jujube from different producing regions[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(7): 148-154, 293.
- [3] 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.
- Zhang Y L, Fan H C, Dou B X, et al. Research progress of red jujube-related products[J]. Storage and Process, 2021, 21(4): 146-150.
- [4] 朱沁, 何亮亮, 曹悦, 等. 红枣粉加工技术研究进展[J]. 食品工业, 2024, 45(10): 211-214.
- Zhu Q, He L L, Cao Y, et al. Research progress in processing technology of jujube[J]. The Food Industry, 2024, 45(10): 211-214.
- [5] 王富刚, 魏永义. 红枣汁降血脂营养功能性研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(17): 183-185.
- Wang F G, Wei Y Y. Study on the nutritional function of jujube juice for reducing blood fat[J]. Food Research and Development, 2017, 38(17): 183-185.
- [6] 徐怀德, 雷宏杰, 李梅, 等. 我国红枣产业发展现状[J]. 中国农村科技, 2022(4): 49-52.
- Xu H D, Lei H J, Li M, et al. Current development status of China's jujube industry[J]. China Rural Science & Technology, 2022(4): 49-52.
- [7] 朱丽春, 朱晨阳, 何波涛, 等. 基于响应曲面优化的红枣红外联合热风干燥研究[J]. 农机化研究, 2023, 45(8): 188-191.
- Zhu L C, Zhu C Y, He B T, et al. Study on of infrared combined hot-air drying of jujube based on response surface optimization [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45 (8): 188-191.
- [8] 许利平, 黄贵元, 张丽娜, 等. 高温热风干燥对新郑红枣糖含量的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(22): 79-85.
- Xu L P, Huang G Y, Zhang L N, et al. Effect of high-temperature air drying on sugar content of *Ziziphus jujuba* cv. Xinzhenhongzao[J]. Food Research and Development, 2022, 43(22): 79-85.
- [9] 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.
- Jia W T, Zhang R R, Li W Q, 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.
- [10] 徐超. 不同性状红枣挂树晾干过程中品质变化与热风干燥特性研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2024.
- Xu C. Analysis of quality change during Hang on trees drying and hot-air drying characteristics of jujube with different characters[D]. Alar: Tarim University, 2024.
- [11] Fang S Z, Wang Z F, Hu X S, et al. Shrinkage and quality characteristics of whole fruit of Chinese jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) in microwave drying[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2010, 45(12): 2 463-2 469.
- [12] Li Y, Yang C Y, Cao S T, et al. Optimization of drying parameters and texture properties of winter jujube slices by radio frequency combined with hot air[J]. Frontiers in Nutrition, 2025, 11: 1523078.
- [13] Wan Z D, Ji Z F, Zhao D D, et al. Study on the quality characteristics of jujube slices under different pretreatment and drying methods[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2025, 115: 107305.
- [14] Liao Y X, Liu Y X, Zhang W D, et al. Effects of variable-temperature drying on the qualities and sweet-substance profile of *Zizyphus jujuba* Mill. cv. Junzao[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101361.
- [15] 李林. 骏枣热风干燥中裂纹与品质变化规律研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2024.
- Li L. Study on the law of crack and quality change of Junzao jujube during hot air drying[D]. Alar: Tarim University, 2024.
- [16] 左晓婷, 郝庆, 靳娟, 等. 烘干温度和时间对灰枣品质的影响[J]. 北方园艺, 2024(7): 89-95.
- Zuo X T, Hao Q, Jin J, et al. Effects of drying temperature and time on quality characteristics of *Ziziphus jujuba* 'Huizao' [J]. Northern Horticulture, 2024(7): 89-95.
- [17] 钱婧雅, 张茜, 王军, 等. 三种干燥技术对红枣脆片干燥特性和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 259-265.
- Qian J Y, Zhang Q, Wang J, et al. Effects of three drying technologies on drying characteristics and quality attributes of jujube crisps[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(17): 259-265.
- [18] 刘德成, 郑霞, 肖红伟, 等. 红枣片冷冻—红外组合干燥特性[J]. 食品与机械, 2023, 39(3): 128-135.
- Liu D C, Zheng X, Xiao H W, et al. Characteristics of freeze-infrared combined drying of jujube slices[J]. Food & Machinery, 2023, 39(3): 128-135.
- [19] 王立霞, 兰昊, 郑倩雨, 等. 红枣气体射流冲击干燥特性及干燥模型[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(2): 131-140.
- Wang L X, Lan H, Zheng Q Y, et al. Drying characteristics and model of jujube in air jet impingement[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(2): 131-140.

- [20] 王超. 新疆引种红枣风味特征研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2021: 11.
- Wang C. Study on the flavor characteristics of introduced jujube from Xinjiang[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2021: 11.
- [21] 刘战霞, 代文婷, 吴洪斌, 等. 超声辅助去糖处理对热风干燥及压差闪蒸干燥红枣脆片品质的影响[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(5): 234-241.
- Liu Z X, Dai W T, Wu H B, et al. Effects of ultrasound-assisted desugaring on quality of red jujube crisps dried with hot air drying and instant controlled pressure drop[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(5): 234-241.
- [22] 王坤华, 李佳美, 彭飞, 等. 射频处理对红枣中短波红外干燥动力学及品质特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(7): 117-123.
- Wang K H, Li J M, Peng F, et al. Effects of radio frequency treatment on short and medium wavelength infrared drying kinetics and quality characteristics of red jujubes[J]. Food Science, 2020, 41(7): 117-123.
- [23] Elmas F, Varhan E, Koç M. Drying characteristics of jujube (*Zizyphus jujuba*) slices in a hot air dryer and physicochemical properties of jujube powder[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2019, 13(1): 70-86.
- [24] Yaşa F. Türkiye'de yetiştirilen hünnap meyvesinin bileşimi ve meyvenin kurutulması sırasında bileşiminde meydana gelen değişimler[D]. Denizli: Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016: 36.
- [25] 魏利清, 万红军, 许铭强, 等. 枣干制过程中可溶性糖含量变化的规律[J]. 食品与机械, 2011, 27(6): 67-70.
- Wei L Q, Wan H J, Xu M Q, et al. Study on regularities of soluble sugar change in process of drying Chinese jujube[J]. Food & Machinery, 2011, 27(6): 67-70.
- [26] 魏事宇. 冬枣片干燥过程品质变化及品质指标相关关系研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2019: 32.
- Wei S Y. The quality change and the relationship of quality index of winter jujube slices during drying process[D]. Shihezi: Shihezi University, 2019: 32.
- [27] 刘宇星. 烘制温度对骏枣品质特性及香气含量影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2022: 29.
- Liu Y X. Effects of drying temperature on quality and aroma characteristics of jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Jun Zao) [D]. Shihezi: Shihezi University, 2022: 29.
- [28] Hadibi T, Mennouche D, Boubekri A, et al. Experimental investigation, performance analysis, and optimization of hot air convective drying of date fruits via response surface methodology[J]. Renewable Energy, 2024, 226: 120404.
- [29] Al-Awaadh A M, Hassan B H, Ahmed K M A. Hot air drying characteristics of Sukkari date (*Phoenix dactylifera* L.) and effects of drying condition on fruit color and texture[J]. International Journal of Food Engineering, 2015, 11(3): 421-434.
- [30] 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.
- 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.