

气体射流冲击干燥对吊干杏干燥特性、色泽、营养品质及抗氧化性的影响

程 慧¹ 皓建锐¹ 李春玘¹ 卢春霞²

(1. 新疆生产建设兵团科技发展促进中心, 新疆 乌鲁木齐 830002;

2. 长江师范学院现代农业与生物工程学院, 重庆 408100)

摘要: [目的] 考察气体射流冲击干燥技术(干燥温度和风速)对新疆吊干杏干燥特性、色泽、营养品质以及抗氧化性的影响。[方法] 吊干杏经热烫处理后在不同温度(40, 45, 50, 55, 60 °C)和风速(6, 8, 10, 12, 14 m/s)下进行干燥, 测其干燥特性、色泽、可溶性糖、总酸、总酚含量以及抗氧化活性。[结果] 吊干杏的气体射流冲击干燥主要属于降速干燥, 干燥温度对吊干杏的干燥曲线和干燥速率曲线具有显著影响($P < 0.05$), 而风速对其影响不显著($P > 0.05$)。不同干燥条件对吊干杏的色泽、可溶性糖、抗坏血酸、总酸、总酚含量及抗氧化活性均有不同程度的影响, 其中, L^* 值、 b^* 值、可溶性糖、抗坏血酸、总酸、总酚含量及抗氧化能力随干燥温度的增加而显著降低($P < 0.05$), 但对多酚氧化酶和过氧化物酶活性影响不显著($P > 0.05$)。另外, 风速对吊干杏色泽、营养品质及抗氧化活性均无显著影响($P > 0.05$)。[结论] 综合考虑干燥效率和产品品质, 确定干燥温度 50 °C、风速 12 m/s 作为吊干杏气体射流冲击干燥的优化条件, 该条件下吊干杏干燥至终止含水率仅需要 16 h。该技术干燥周期短, 干制品品质好, 具有一定实用价值。

关键词: 吊干杏; 气体射流冲击干燥; 干燥特性; 色泽; 营养品质; 抗氧化活性

Effects of air-impingement jet drying on drying characteristics, color, nutritional quality and antioxidant capacity of *Prunus armeniaca* L. cv. Diaogan

CHENG Hui¹ GAO Jianrui¹ LI Chunqi¹ LU Chunxia²

(1. Xinjiang Production and Construction Corps Science and Technology Development Promotion Center, Wulumuqi, Xinjiang 830002, China; 2. School of Advanced Agriculture and Bioengineering, Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China)

Abstract: [Objective] Air-impingement jet drying technology is applied to explore the influence of drying temperature and air velocity on the drying characteristics, color, nutritional quality and antioxidant capacity of *Prunus armeniaca* L. cv. Diaogan. [Methods] *P. armeniaca* samples are blanched and then dried at different temperatures (40, 45, 50, 55, 60 °C) and air velocity (6, 8, 10, 12, 14 m/s), respectively. The drying characteristics, color, soluble sugar contents, total acid contents, total phenol contents and antioxidant activity were measured. [Results] The air-impingement jet drying of *P. armeniaca* primarily falls into a rate-falling drying process. The drying curve and drying rate curve are significantly ($P < 0.05$) affected by drying temperature but not significantly ($P > 0.05$) by air velocity. The contents of soluble sugar, ascorbic acid, total acid, total phenol, and antioxidant activity of *P. armeniaca* are differentially affected by drying conditions. L^* values, b^* values, soluble sugar content, ascorbic acid content, total acid content, total phenol content, and antioxidant activities decreased significantly with increasing drying temperature ($P < 0.05$). However, the activities of polyphenol oxidase and peroxidase are not

基金项目: 重庆市教委科学技术研究计划重点项目(编号: KJZD-K202201405)

通信作者: 卢春霞(1978—), 女, 长江师范学院教授, 博士。E-mail: shzlcx2002@163.com

收稿日期: 2025-03-29 改回日期: 2025-11-18

引用格式: 程慧, 皓建锐, 李春玘, 等. 气体射流冲击干燥对吊干杏干燥特性、色泽、营养品质及抗氧化性的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(5): 150-157.

Citation: CHENG Hui, GAO Jianrui, LI Chunqi, et al. Effects of air-impingement jet drying on drying characteristics, color, nutritional quality and antioxidant capacity of *Prunus armeniaca* L. cv. Diaogan[J]. Food & Machinery, 2026, 42(5): 150-157.

significantly affected ($P>0.05$). In addition, air velocity has no significant impact on the color, nutritional quality, and antioxidant activity ($P>0.05$). [Conclusion] Considering both the drying efficiency and product quality comprehensively, a drying temperature of 50 °C and an air velocity of 12 m/s are selected as the optimal conditions for the air-impingement jet drying of *P. armeniaca*. Under these conditions, the drying process to reach the final moisture content requires only 16 h. This technology features a short drying cycle and produces high-quality dried products, demonstrating certain practical values.

Keywords: *Prunus armeniaca* L. cv. Diaogan; air-impingement jet drying; drying characteristics; color; nutritional quality; antioxidant capacity

吊干杏(*Prunus armeniaca* L. cv. Diaogan)是新疆优良杏树品种,为蔷薇科杏属多年生落叶乔木^[1],主要种植在伊犁河谷,其果肉厚、风味甜,具有丰富的营养物质和独特的感官特征^[2]。由于新疆地域偏远,交通不便,而鲜杏收获期短且果实不耐贮藏,因此,干制成为吊干杏提质增效的主要技术之一。

目前,杏的干制方法主要包括自然干制^[3]、热风干燥^[4-5]和太阳能干燥^[6]等。传统的吊干杏干制多采取自然吊干或露天晾晒,但该类方法周期长、效率低、卫生条件差,且易受天气影响^[3]。而热风干燥技术耗能高,且对制品口感及抗氧化能力有不同程度的影响。太阳能干制技术虽效率高,但干燥设备费用高、投资回收期长。针对以上问题,李洁^[3]研制了大型可控自动吊干杏干燥系统,在低温干燥条件(温度33 °C、湿度30%)下干燥,虽提升了杏干品质,但干燥效率低下(需干燥203 h)。

气体射流冲击干燥技术是将气体在一定温度下高速冲击物料表面,从而使物料快速干燥的一种新技术。由于气流速度高、流程短,该技术具有更高的传热系数和干燥速率^[7],且干制产品品质好^[8]。因此,气体射流冲击干燥技术被应用于农产品加工领域^[9]。但该技术应用于杏子干制的研究报道甚少。肖红伟等^[10]对杏子的气体射流冲击干燥特征进行了详细研究,但未涉及其对杏干品质的影响。研究拟利用气体射流冲击干燥技术,在模拟低温(<60 °C)条件下,探讨干燥温度和风速对吊干杏干燥特性、色泽、营养品质及抗氧化活性的影响,旨在为吊干杏的深加工提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料及试剂

吊干杏:挑选九成熟、色泽接近、大小均匀和无机械损伤的吊干杏(试验前于冰箱内4 °C下贮藏备用),市售;

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、福林酚、邻苯二酚、3,5-二硝基水杨酸、苯酚、亚硫酸钠、亚铁氰化钾、乙酸锌、甲基红、氢氧化钠、磷酸二氢钾、磷酸三钠、苯酚、亚硫酸钠、聚乙烯吡咯烷酮:分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司;

抗坏血酸、异抗坏血酸标准品:纯度 $\geq 99\%$,坛墨质检标准物质中心;

没食子酸标准品:纯度95.7%,坛墨质检标准物质中心;

L-半胱氨酸:纯度98.5%,生工生物工程(上海)股份有限公司;

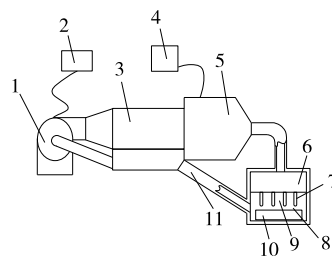
乙醇(95%)、磷酸(85%):分析纯,生工生物工程(上海)股份有限公司;

过氧化物酶检测试剂盒:生工生物工程(上海)股份有限公司;

十六烷基三甲基溴化铵、甲醇:色谱纯,德国默克(Merck)公司。

1.2 主要仪器

气体射流冲击干燥机(如图1所示):长江师范学院食品工艺实验室依据文献[7,11]制作;



1. 离心风机 2. 变频器 3. 余热回收装置 4. 温控仪 5. 加热单元 6. 气流分配室 7. 喷嘴(喷嘴间距85 mm,喷嘴内径15 mm) 8. 物料干燥箱 9. 温度传感器 10. 物料网盒 11. 余热回收通道

图1 气体射流冲击干燥机结构示意图

Figure 1 Structure of air-impingement jet dryer

分光色差仪:DS-420型,杭州彩谱科技有限公司;

液相色谱仪:2695型,配备2498紫外检测器和C₁₈柱色谱柱(5 μm, 3.9 mm×150 mm),美国沃特斯(Waters)公司;

紫外可见分光光度计:U-T3型,屹谱仪器制造(上海)有限公司;

酶标仪:Multiskan FC型,美国赛默飞世尔科技公司;

精密型电子天平:ML-3002T/02型,瑞士梅特勒-托利多公司;

热风干燥箱:ZFD-5040型,上海智成分析仪器制造有限公司;

水浴恒温振荡器:SHZ-82A 型,金坛市医疗仪器厂;
超声波清洗仪:KQ-500DB 型,昆山市超声仪器公司;
台式冷冻离心机:5424R 型,德国艾本德公司。

1.3 试验方法

1.3.1 热风干燥 参照文献[12],取出鲜杏,清洗,晾干表面水分,沿骑缝线切成两瓣,取出杏核,单层摆放在托盘上,干燥温度为 60℃,风速为 6 m/s,每隔 2 h 测定样品质量,直到杏中的水分含量降至 15% 停止试验。干燥前测得吊干杏初始含水率为(83.51±3.54)%。

1.3.2 气体射流冲击干燥 取出鲜杏,清洗,晾干表面水分,沿骑缝线切成两瓣,取出杏核,果肉于 90℃热水中漂烫 4 min^[13],以灭活过氧化物酶和多酚氧化酶,防止褐变。漂烫后,将杏果单层摆放在托盘上,在不同干燥条件下进行气体射流冲击干燥试验(表 1),前 14 h 每隔 2 h 取样,14 h 以后每隔 1 h 取样,测定其质量,直到杏干中的水分含量降至 15% 停止试验^[10,12]。试验结束后,测其色泽、可溶性糖、抗坏血酸、总酸、总酚含量,以及多酚抗氧化活性、多酚氧化酶活性和过氧化物酶活性。

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

组别	干燥温度/℃	风速/(m·s ⁻¹)
1	40	10
2	45	10
3	50	10
4	55	10
5	60	10
6	50	6
7	50	8
8	50	10
9	50	12
10	50	14

1.3.3 水分测定 按 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法执行。

1.3.4 水分比、干燥速率测定 参照文献[14]。

1.3.5 色泽测定 利用分光色差仪测定杏干色差,每试验组取 6 个杏干样品,每个样品取 3 个测量点,结果取其平均值。以仪器白板为标准,测量杏干的明亮度(L^*)、红绿值(a^*)和黄蓝值(b^*)。其中 L^* 和 b^* 值越大,杏色泽越好^[15]。

1.3.6 营养品质测定

(1) 可溶性糖:按 NY/T 2742—2015 执行。

(2) 总酸:按 GB 12456—2021 中的 pH 计电位滴定法执行。

(3) 抗坏血酸:按 GB 5009.86—2016 执行。

(4) 总酚含量:参照文献[16]。

1.3.7 抗氧化活性测定 参照文献[17]。

1.3.8 多酚氧化酶(PPO)活性测定 根据文献[17]修改如下:将样品切碎,称取 1.0 g 置于研钵中,依次加入 6.0 mL 预冷的 0.1 mol/L 磷酸缓冲液(pH 6.8)和 0.06 g 聚乙烯吡咯烷酮,在冰浴条件下研磨,匀浆液于 12 000 r/min、4℃下离心 15 min。取 0.1 mL 上清液于试管中,依次加入 2.0 mL 0.1 mol/L 邻苯二酚溶液和 1.6 mL 0.1 mol/L 磷酸缓冲液,室温下反应 10 min,在 420 nm 处测定其吸光度,以每分钟吸光值变化 0.01 为一个酶活力单位(U)。每个样品重复 3 次。

1.3.9 过氧化物酶(POD)活性测定 取少许样品,切碎,称取 1 g 于研钵中,加入 5 mL 0.1 mol/L 的磷酸缓冲液(pH 6.8),冰浴下匀浆,于 4 000 r/min、4℃下离心 15 min,上清液贮于 4℃下备用。过氧化物酶活性采用愈创木酚法进行测定,具体检测按照试剂盒说明进行,以每克组织在 1 mL 反应体系中每分钟 $A_{470\text{ nm}}$ 变化 0.01 定义为一个酶活力单位(U)。

1.4 数据处理

利用 Excel 2010 进行数据整理,采用单因素方差分析法分析数据,使用 Origin 软件进行绘图。所有试验平行重复 3 次,结果以其平均值±标准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 干燥条件对吊干杏干燥特性的影响

由图 2(a)可知,吊干杏水分比在干燥前期快速降低,而后期缓慢下降,而且随着干燥温度的升高,干燥时间缩短,在 40、45、50、55、60℃下吊干杏干燥到终止含水率所需的时间分别为 24、21、18、16、14 h。这是因为提高干燥温度能加快热量传递速度,促进物料中水分的迁移和蒸发^[12]。由图 2(b)可知,干燥速率随着干燥温度的增加而增加,前期和中期为降速干燥,后期为恒速干燥,其中 60℃时干燥速率最高,这与水分比干燥速率曲线变化规律一致。虽然在 60℃温度下干燥效率更高,但是高温可能更易导致干制品营养物质损失,所以在风速对吊干杏干燥特性的影响试验中干燥温度控制在 50℃。

由图 2(c)可知,吊干杏的干燥时间随着风速的升高而减少,50℃下风速为 6、8、10、12、14 m/s 时,吊干杏干燥到终止含水率所需的时间分别为 20、19、17、16、15 h。结合图 2(d)可知,不同风速下的干燥曲线或干燥速率曲线几乎相互重叠,表明风速对干燥时间的影响不明显,可能与试验中干燥风速的梯度较小有关。以上结果表明,气体射流冲击干燥温度对干燥时间的影响较风速的影响更为突出,表明干燥温度是决定干燥效率和干制品品质的关

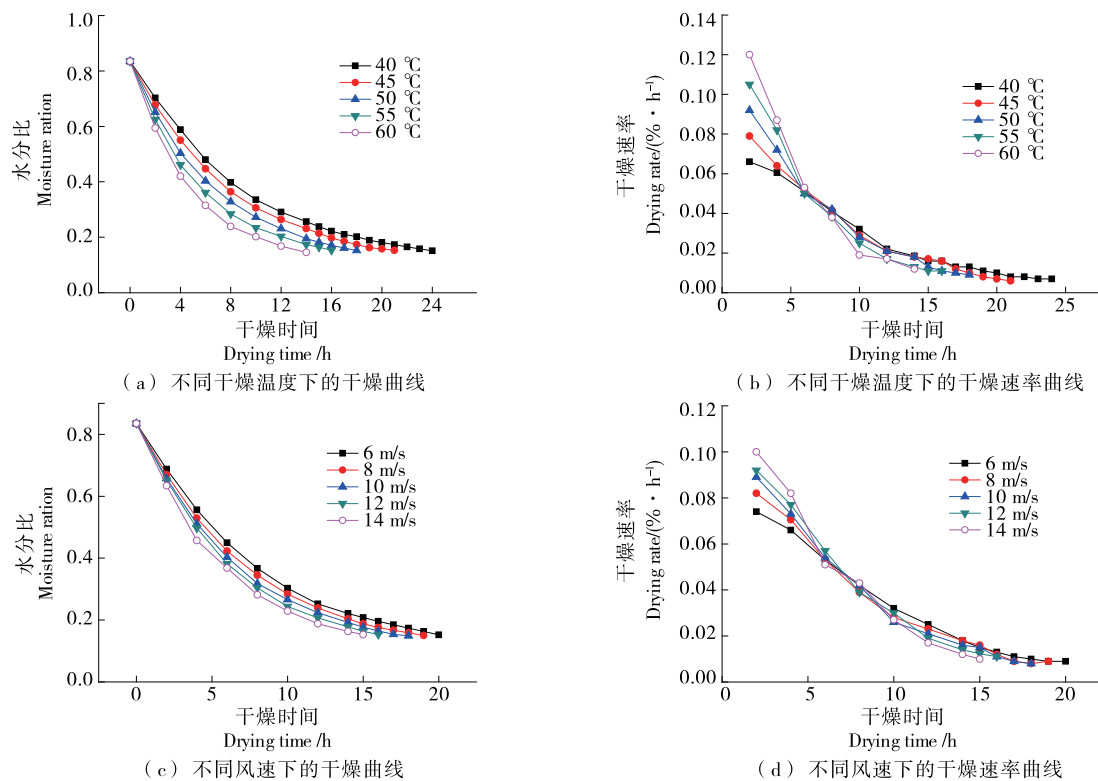


图2 干燥条件对吊干杏干燥特性的影响

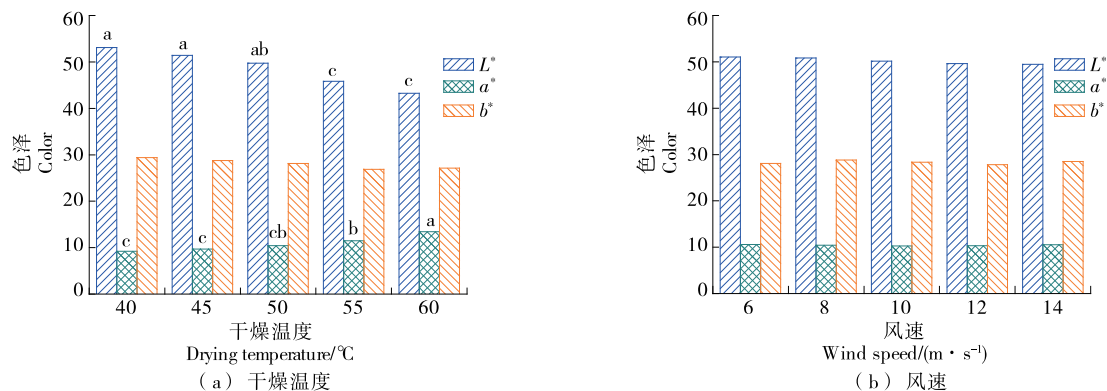
Figure 2 Effects of drying conditions on drying characteristics of *P. armeniaca*

键因素,以上结果与肖红伟等^[10]和Li等^[7]报道的变化规律基本一致。考虑到干燥效率,干燥风速控制在12 m/s或14 m/s较为合适。

2.2 干燥条件对吊干杏色泽的影响

在干燥过程中,杏干色泽的变化在一定程度反映了干燥条件与营养成分变化的规律性。由图3可知,在相同风速(10 m/s)下,干燥温度对杏干色泽具有一定影响,在气体射流冲击干燥处理中,随着温度的升高, L^* 值和 b^* 值

逐渐降低,40 °C干燥的样品 L^* 值为53.12,色泽最为明亮,显著高于55,60 °C干燥的($P < 0.05$),可能是因为随着干燥温度的升高,加剧了样品中糖类物质的分解,发生了Maillard反应^[12],使其 L^* 值降低。绿红值 a^* 由9.25升到13.46,但40,50,55 °C下干燥的样品的 a^* 值差异不显著($P > 0.05$);蓝黄值 b^* 由29.42变化到27.14,各组间差异不显著($P > 0.05$)。由此可见,风速为10 m/s时,40 °C干燥的杏干颜色和亮度最好,但与45,50 °C干燥的差异不显著



同一指标不同字母表示差异显著($P < 0.05$)

图3 干燥条件对吊干杏色泽的影响

Figure 3 Effects of drying conditions on color of *P. armeniaca*

($P>0.05$)。干燥温度为 50℃ 时,不同风速下的 L^* 、 a^* 和 b^* 值差异均不显著($P>0.05$),说明风速对杏干色泽没有明显影响。考虑到对杏干色泽的影响,干燥温度控制在 50℃、风速控制在 6~14 m/s 较为合适。

2.3 干燥条件对吊干杏营养品质的影响

杏干中富含有机酸和糖类,这是吊干杏风味的主要来源,也是评价杏干品质的指标之一。由图 4 可知,不同干燥条件对吊干杏总酸含量有显著影响,风速为 10 m/s 时,随干燥温度升高总酸含量下降。这可能是随着温度的升高有机酸挥发率增加,由于有机酸在总酸中占比不高^[18],所以总酸含量下降不显著($P>0.05$)。可溶性糖含量随着干燥温度的升高呈下降趋势,可能是因为随着干燥温度的升高,加剧了美拉德反应和焦糖化反应,进而导致糖类物质的分解。抗坏血酸是果蔬中常见的营养物质,具有清除自由基和抗氧化的作用^[19],因此,抗坏血酸含量是评价果蔬品质的重要依据之一。在干燥过程中,吊干杏抗坏血酸含量随着干燥温度的升高而降低,这是

因为在高温加热过程中抗坏血酸易发生氧化反应,进而导致抗坏血酸的损失。在山楂气体射流冲击干燥研究^[20]中也有相似发现。酚类化合物是果蔬的一种主要抗氧化成分,由图 4 可知,总酚含量随干燥温度的增加而降低,干燥温度超过 50℃ 后总酚含量显著下降($P<0.05$)。而干燥风速对总酸、可溶性糖、抗坏血酸和总酚含量均无显著影响($P>0.05$)。综合以上营养品质变化规律,吊干杏干燥温度控制在 50℃、风速控制在 6~14 m/s 较为合适。

2.4 干燥条件对吊干杏 DPPH 自由基清除率的影响

有研究^[17, 20-21]表明,不同干燥方式会导致山楂、紫薯、牛肝菌等果蔬中多酚类化合物降解,从而降低其抗氧化活性。由图 5 可知,随着干燥温度的升高,DPPH 自由基清除率显著高于 55、60℃ 干燥的($P<0.05$),而干燥风速对吊干杏 DPPH 自由基清除率无显著影响($P>0.05$),这与总酚的变化规律一致。故干燥温度控制在 50℃、风速控制在 6~14 m/s 较为合适。

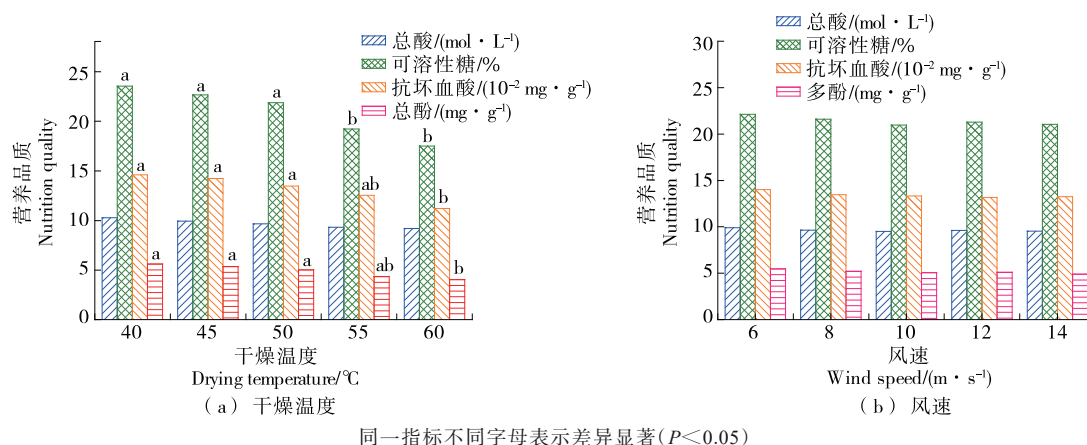


Figure 4 Effects of drying conditions on nutritional quality of *P. armeniaca*

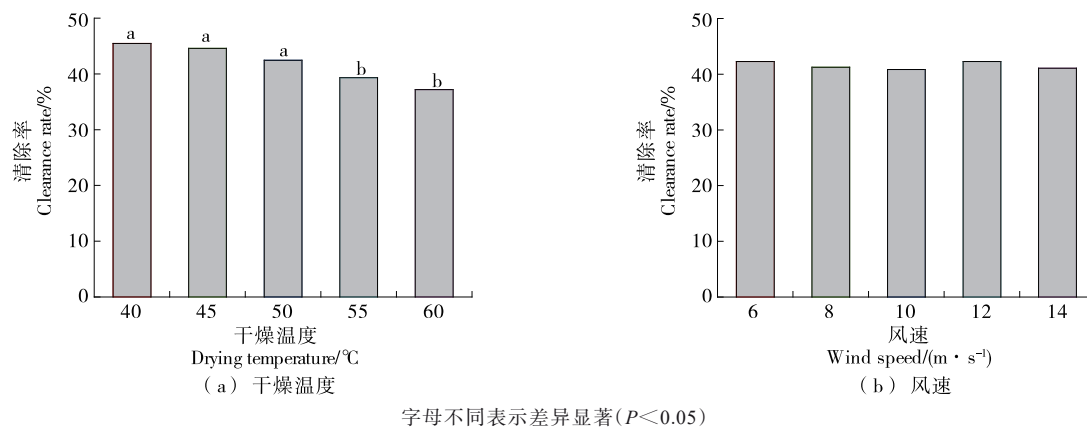


Figure 5 Effects of drying conditions on DPPH scavenging rate of *P. armeniaca*

2.5 干燥条件对吊干杏 PPO 活性的影响

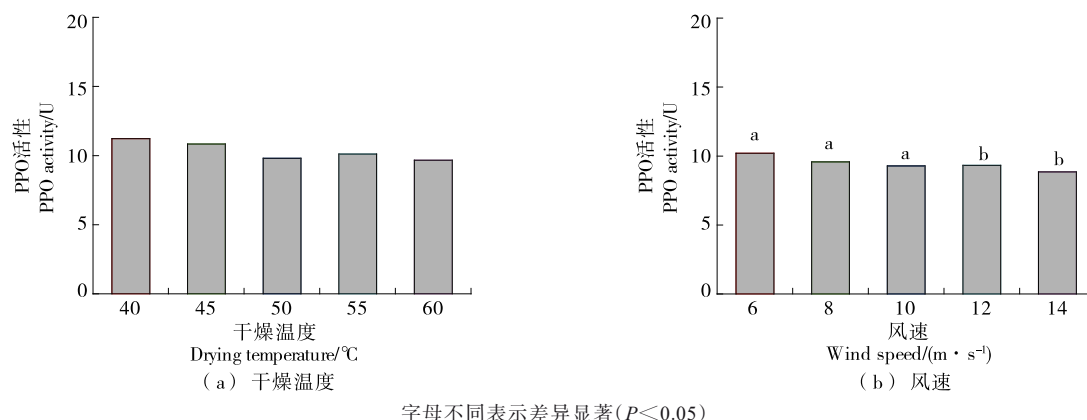
果蔬在干制过程中易出现褐变现象,而褐变可导致产品的色泽和商业价值的降低。通常认为 PPO 是引起褐变的关键酶,大量酚类化合物被 PPO 氧化成棕褐色邻醌类化合物^[22]。由图 6 可知,PPO 活力虽然随干燥温度和风速的增加而降低,但各组间差异不显著($P>0.05$)。有研究^[17]发现,在气体射流冲击干燥过程,当干燥温度超过 60 °C 时 PPO 活力显著下降。PPO 活力还受水分活度的影响,而干燥后的样品中因水分活度较低,酶的活力会受到抑制。

2.6 干燥条件对吊干杏 POD 活性的影响

POD 广泛存在于植物体内,是引起果蔬发生褐变的主要酶类之一,能氧化植物组织内的酚类物质产生黑色或褐色的物质。由图 7 可知,PPO 活力随干燥温度和风速的增加未发生显著变化($P>0.05$),与 PPO 活力变化规律相似,可能是因为干制前对样品进行了热烫处理,达到了灭酶效果。

2.7 干燥方式对吊干杏干燥特性和品质的影响

综合以上研究结果,虽然吊干杏在 40 °C 干燥后其营养成分损失较少,但干燥时间较长,而 50 °C 下的干燥品质较好且干燥时间适中。风速对色泽和各项品质指标基本无显著性影响。故将 90 °C 条件下热烫 4 min,干燥温度 50 °C,干燥风速 12 m/s 作为吊干杏气体射流冲击干燥的优化条件。在此优化条件下与传统热风干燥的吊干杏干燥特性和品质进行比较。由表 2 可知,气体射流冲击干燥使吊干杏干燥到终止含水率的时间仅需要 16 h,但传统热风干燥方式需要 32 h,气体射流冲击干燥的干燥效率远高于热风干燥。另外,在相同干燥温度(50 °C)下,气体射流冲击干燥制备的吊干杏色泽优于热风干燥,总酸、可溶性糖、抗坏血酸和总酚含量均显著高于热风干燥($P<0.05$)。这可能是因为热风干燥干燥速率较低,随着干燥时间的延长,吊干杏在氧气和水的作用下持续发生褐变,糖类物质的分解也随之增加。因此,干燥时间越长,褐变度越高,最终使其 L^* 值降低。相同干燥温度下,总酸含量随干燥时间的延长呈下降趋势,损失的主要是有



字母不同表示差异显著($P<0.05$)

图 6 干燥条件对吊干杏 PPO 活性的影响

Figure 6 Effects of drying conditions on PPO activity of *P. armeniaca*

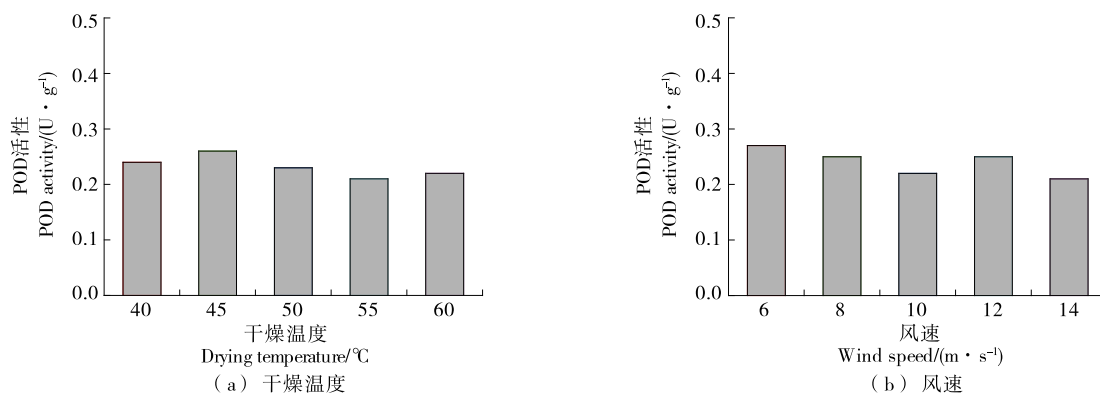


图 7 干燥条件对吊干杏 POD 活性的影响

Figure 7 Effects of drying conditions on POD activity of *P. armeniaca*

表 2 干燥方式对吊干杏干燥特性和品质的影响[†]

Table 2 Effects of drying conditions on drying characteristics and nutritional quality of *P. armeniaca*

干燥方式	耗时/ h	色泽			总酸/ (g·kg ⁻¹)	可溶性 糖/%	抗坏血酸/ (10 ⁻² mg·g ⁻¹)	总酚/ (mg·g ⁻¹)
		L [*]	a [*]	b [*]				
气体射流冲击干燥	16	49.62±2.73 ^a	10.33±0.41 ^b	27.81±1.11 ^a	9.62±0.51 ^a	21.28±0.89 ^a	13.18±0.58 ^a	5.11±0.25 ^a
热风干燥	32	45.18±2.25 ^b	11.91±0.57 ^a	24.42±1.34 ^b	7.05±0.38 ^b	17.65±0.77 ^b	11.04±0.52 ^b	4.21±0.25 ^b

[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

机酸^[18]。

3 结论

干燥温度对吊干杏的气体射流冲击干燥具有较大的影响,而风速的影响不明显。其中,干燥温度对干制品色泽、还原糖、抗坏血酸、总酸、总酚含量及抗氧化能力具有显著影响($P<0.05$),但对多酚氧化酶和过氧化物酶活性影响不显著($P>0.05$)。综合考虑干燥效率和产品品质,干燥前对吊干杏进行热烫预处理,干燥温度控制在 50℃,风速控制在 12 m/s 较为合理,该条件下干燥至终止含水率仅需要 16 h。后期将进一步研究干燥条件对吊干杏挥发性成分的影响。

参考文献

[1] 马友福,夏明辉,陈伊宇,等.不同产地‘树上干’杏抗寒性分析及土壤养分的相关性研究[J].北方园艺,2025(10): 48-55.
MA Y F, XIA M H, CHEN Y Y, et al. Analysis of cold resistance and correlation with soil nutrients in 'Shushanggan' apricot from different origins[J]. Northern Horticulture, 2025(10): 48-55.

[2] 郑涛,苏柯星,丛桂芝,等.树上干杏和梅杏果实品质分析与综合评价[J].食品与发酵工业,2021,47(9): 201-207.
ZHENG T, SU K X, CONG G Z, et al. Quality analysis and comprehensive evaluation of the 'Shushanggan' apricots and apricots[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(9): 201-207.

[3] 李洁.低温低湿条件下吊干杏自然干燥特性及工艺优化试验[D].阿拉尔:塔里木大学,2022: 20-21.
LI J. Experiment on natural drying characteristics and process optimization of air-dried apricot under low temperature and low humidity[D]. Alaer: Tarim University, 2022: 20-21.

[4] 李悦,陈恺,许铭强,等.基于GC-IMS研究预处理结合热风干燥对赛买提切分杏风味物质的影响[J].食品工业科技,2025,46(8): 281-292.
LI Y, CHEN K, XU M Q, et al. Effect of pretreatment combined with hot air drying on flavour substances in saimaiti cut apricots based on GC-IMS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(8): 281-292.

[5] 陈恺,承春平,王雪妃,等.预处理对赛买提杏片热风干燥特性和水分迁移的影响[J].中国食品学报,2024,24(8): 311-324.
CHEN K, CHENG C P, WANG X F, et al. Effects of

pretreatment on hot air drying characteristics and water migration of saimaiti apricot slices[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(8): 311-324.

[6] REJABOV S, USMONOV B, USMANOV K, et al. Experimental comparison of open sun and indirect convection solar drying methods for apricots in Uzbekistan[J]. Engineering Proceedings, 2024, 67(1): 26.

[7] LI W F, WANG M Y, XIAO X L, et al. Effects of air-impingement jet drying on drying kinetics, nutrient retention and rehydration characteristics of onion (*Allium cepa*) slices[J]. International Journal of Food Engineering, 2015, 11(3): 435-446.

[8] 孟建升,蒋俊春,郑志安,等.3种干燥方式对山药片干燥动力学和品质的影响[J].中草药,2019,50(11): 2 575-2 582.
MENG J S, JIANG J C, ZHENG Z A, et al. Effects of three drying technologies on drying kinetics and quality attributes of yam slices[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2019, 50 (11): 2 575-2 582.

[9] 时静,刘颖沙,王文光.气体射流冲击在农产品加工中的应用及展望[J].农产品加工,2020(12): 70-72.
SHI J, LIU Y S, WANG W G. Application and prospect of air-impingement jet technology in agricultural products processing [J]. Farm Products Processing, 2020(12): 70-72.

[10] 肖红伟,张世湘,白竣文,等.杏子的气体射流冲击干燥特性[J].农业工程学报,2010,26(7): 318-323.
XIAO H W, ZHANG S X, BAI J W, et al. Air impingement drying characteristics of apricot[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 318-323.

[11] 李文峰,肖旭霖,王玮.紫薯气体射流冲击干燥效率及干燥模型的建立[J].中国农业科学,2013,46(2): 356-366.
LI W F, XIAO X L, WANG W. Drying characteristics and model of purple sweet potato in air-impingement jet dryer[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(2): 356-366.

[12] 王庆惠,李忠新,闫圣坤,等.杏子热风干燥收缩特性和色泽变化研究[J].西南农业学报,2017,30(5): 1 189-1 193.
WANG Q H, LI Z X, YAN S K, et al. Hot-air drying shrinkage characteristics and color changing of apricot[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(5): 1 189-1 193.

[13] 汤尧,张文涛,高凯,等.人工干制树上干杏的防褐变研究[J].食品工业科技,2015,36(21): 269-274.

- TANG R, ZHANG W T, GAO K, et al. Study on the anti-browning technology of 'Shushanggan' apricot dried artificially [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(21): 269-274.
- [14] DENG L Z, PAN Z L, ZHANG Q, et al. Effects of ripening stage on physicochemical properties, drying kinetics, pectin polysaccharides contents and nanostructure of apricots[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 222: 114980.
- [15] 王庆惠, 李忠新, 闫圣坤, 等. 干燥工艺对杏干燥特性及色泽变化影响[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(1): 78-84.
- WANG Q H, LI Z X, YAN S K, et al. Effect of drying processing on drying characteristics and color changing of apricot[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(1): 78-84.
- [16] 李文峰, 张向阳, 王翠, 等. 茎瘤芥的气体射流冲击干燥动力学及多酚降解动力学特征 [J]. 食品科学, 2021, 42(5): 106-114.
- LI W F, ZHANG X Y, WANG C, et al. Drying kinetics and polyphenol degradation kinetic characteristics in the swollen succulent stem of tumorous stem mustard during air-impingement jet drying[J]. Food Science, 2021, 42(5): 106-114.
- [17] 李文峰, 肖旭霖. 气体射流冲击干燥对紫甘薯色泽及抗氧化性的影响[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(6): 27-32, 52.
- LI W F, JIN X L. Effects of air-impingement jet drying on color and antioxidant activity of purple sweet potato[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(6): 27-32, 52.
- [18] 陈雪. 不同干制条件对厚皮杏干制过程中品质的影响[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2018: 14-15.
- CHEN X. Effect of drying methods on the qualities changes of dried thick skin apricot during drying[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2018: 14-15.
- [19] JING L, WANG Y Y, WANG R, et al. Effects of controlled freezing-point storage on quality of fresh-cut broccoli[J]. Advance Journal of Food Science and Technology, 2016, 12(6): 317-325.
- [20] 李文峰, 金欢欢, 肖旭霖. 气体射流冲击干燥对山楂抗坏血酸、还原糖、总酸及总黄酮的影响[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(7): 147-153.
- LI W F, JIN H H, XIAO X L. Effects of air-impingement jet drying on ascorbic acid, reducing sugar, total acid and total flavonoids of hawthorn[J]. Food and Fermentation Industries, 2013, 39(7): 147-153.
- [21] 郑俏然, 周凤, 邢洁, 等. 干燥方式对牛肝菌干燥特性、品质及抗氧化能力的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(11): 45-49.
- ZHENG Q R, ZHOU F, XING J, et al. Effect of different drying methods on drying characteristics, quality and antioxidant capacity of *Boletus edulis*[J]. Food & Machinery, 2018, 34(11): 45-49.
- [22] VELTMAN R H, LARRIGAUDIÈRE C, WICHERS H J, et al. PPO activity and polyphenol content are not limiting factors during brown core development in pears (*Pyrus communis* L. cv. Conference) [J]. Journal of Plant Physiology, 1999, 154(5/6): 697-702.