

# 不同温度热风预干燥对热风-真空冷冻联合干燥龙眼果干品质的影响

杨婧<sup>1</sup>, 邓媛元<sup>2</sup>, 张雁<sup>2</sup>, 魏振承<sup>2</sup>, 刘光<sup>2</sup>, 唐小俊<sup>2</sup>, 王佳佳<sup>2</sup>, 廖娜<sup>2</sup>, 张名位<sup>2</sup>

(1. 华中农业大学食品科技学院, 湖北武汉 430070) (2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610)

**摘要:** 本研究分析了不同温度热风预干燥对热风-真空冷冻联合干燥龙眼果干品质的影响, 建立龙眼果干联合干燥工艺。通过测定 80 °C、100 °C、120 °C 热风预干燥过程中龙眼果肉的水分含量、褐变度、体积密度、总糖、多糖含量及单位能耗确定了不同温度下联合干燥过程中的最佳水分转换点。同时比较了热风干燥, 真空冷冻干燥及不同温度条件下热风-真空冷冻联合干燥等干燥方式下龙眼果干的硬度, 色泽变化及感官评价的差异。结果表明, 新鲜龙眼 100 °C 热风预干燥 3 h 为最佳的水分转换点, 此时龙眼的水分含量为 67.63%, 褐变度为 4.89 /g·DW, 体积密度为 1.10 g/mL, 总糖含量为 2.11 mg/g·DW, 多糖含量为 1.94 mg/g·DW, 单位能耗为 16.74 MJ/kg, 将热风预干燥龙眼果干真空冷冻干燥 50 h, 水分含量达到 7%, 此时热风-真空冷冻联合干燥的产品在硬度、色泽及感官评价上都优于热风干燥的产品, 更接近于真空冷冻干燥的产品。热风-真空冷冻联合干燥是一种有利于提高龙眼果干品质、高效节能的干燥方式, 为高品质龙眼果干的工业化应用提供理论指导。

**关键词:** 龙眼; 联合干燥; 热风; 真空冷冻; 品质

文章编号: 1673-9078(2019)05-175-183

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.5.025

## Effect of Hot Air Pre-drying under Different Temperatures on Longan Quality by the Combined Hot Air-vacuum Freezing Drying

YANG Jing<sup>1</sup>, DENG Yuan-yuan<sup>2</sup>, ZHANG Yan<sup>2</sup>, WEI Zhen-cheng<sup>2</sup>, LIU Guang<sup>2</sup>, TANG Xiao-jun<sup>2</sup>, WANG Jia-jia<sup>2</sup>, LIAO Na<sup>2</sup>, ZHANG Ming-wei<sup>2</sup>

(1. Department of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

(2. Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences; Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China)

**Abstract:** Effect of hot air pre-drying under different temperatures on longan quality was analyzed, and the combined drying process of longan was established. Three different temperatures of hot air drying 80 °C, 100 °C, 120 °C were investigated to analyze the moisture content, browning degree, bulk density, total sugar content, polysaccharides content and unit energy consumption of longan, and the optimum water conversion point under different temperatures in drying process was also determined. In addition, the hardness, color feature and sensory evaluation of longan were also analyze by three different drying methods (hot air drying, vacuum freeze drying and hot air-vacuum freeze drying). Results showed that the longan dried with hot air for 3 h at 100 °C had the best water conversion point. The moisture content was 67.6%, browning degree was 4.89/g·DW, volume density was 1.10 g/mL, total sugar content was 2.11 mg/g·DW, polysaccharides content was 1.94 mg/g·DW, and unit energy consumption was 16.74 MJ/kg. After pre-drying, longan was dried with vacuum freeze-drying for 50 h, and the moisture content of dried longan was about 7%. Furthermore, the hardness, color feature and sensory evaluation of the dried longan with hot air-vacuum freeze drying were better than those of the dried longan with hot air drying, and more similar to the sample with vacuum freeze

收稿日期: 2018-12-25

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC1601002); 广州市科技计划项目 (201803010079; 201803020014; 201704020039); 广东省科技计划项目 (2017B090907022); 广东省农业科技创新及推广项目 (2018LM2154); 农业技术试验示范 (农产品加工) 项目 (161821301064071003)

作者简介: 杨婧 (1993-), 女, 硕士, 研究方向: 粮油加工与功能食品

通讯作者: 张名位 (1966-), 男, 研究员, 研究方向: 粮油加工与功能食品

drying. Therefore, hot air-vacuum freeze drying method could effectively improve the quality of longan, and achieve energy saving for promoting the utilization of high quality longan in food industry.

**Key words:** longan; combined drying; hot air; vacuum freezing; quality

龙眼 (*Dimocarpus longan* Lour.) 是亚热带特色水果, 世界总产量高达 300 万吨, 而中国龙眼总产量为 170 万吨, 占全世界总产量的一半以上<sup>[1]</sup>。龙眼风味独特, 营养丰富, 同时具有抗氧化、抗衰老、免疫调节及调节肠道菌群等作用<sup>[2]</sup>。然而, 龙眼的采收期集中, 鲜果极易腐烂, 不耐贮藏。干制是龙眼最主要的加工方式<sup>[3]</sup>。干制可以去除龙眼中的水分, 降低酶活, 减少微生物的入侵从而延长保质期。干制龙眼(桂圆肉)被卫计委认定为药食同源原料<sup>[4]</sup>。因此, 龙眼的干制方式的研究具有重要的意义。

联合干燥技术是分阶段干燥的一种复合技术, 可以结合不同干燥方式的优势实现互补, 是目前干燥技术的研究热点之一<sup>[5,6]</sup>。联合干燥技术应用于龙眼上可以提高其品质并降低成本。J.Vrith 等<sup>[7]</sup>发现, 微波-热风联合干燥龙眼果肉相比直接热风干燥, 干燥时间减少 64.3%, 能耗降低 48.2%, 并且产品品质更佳。Adisak 等<sup>[8]</sup>利用热泵和热风分别联合远红外技术干燥龙眼, 发现联合干燥可以提高干燥速度, 缩短干燥时间, 同时使龙眼形成多孔结构, 减少皱缩率, 提高复水性。龙眼传统的干燥方式为热风干燥, 该干燥方式设备简单且能耗较低, 但较易破坏龙眼质构, 使其外观皱缩变形, 色泽褐变。真空冷冻干燥在低温低压的传热传质过程中进行脱水, 是目前生产高品质干制品的最佳干燥方式, 该干燥方式对龙眼的挥发性物质破坏程度较小, 保持了龙眼原有的外观形状, 质地较脆, 色泽变化较小, 但其干燥时间长, 设备复杂且能耗高<sup>[3]</sup>。因此, 热风干燥联合真空冷冻干燥可以在提高龙眼干燥效率的同时改善品质。此外, 前期的热风干燥降低龙眼水分及体积, 有利于实现“预干燥-贮藏-真空冷冻”的高品质龙眼干工业化干燥模式。真空冷冻干燥与其它干燥方式的联合干燥过程中, 物料的变形和变色是难点, 两种干燥方式的水分转换点是影响最终产品品质的关键因素, 该点的选取要以高品质和低能耗为前提<sup>[9,10]</sup>。因此, 降低皱缩率, 褐变度及能源消耗, 减少营养物质的流失, 获得较高的感官评价, 同时达到尽可能低的水分含量是本研究期望解决的主要问题。

本研究以新鲜龙眼果肉为原料, 比较不同温度 80 °C、100 °C、120 °C 热风预干燥对龙眼理化指标和单位能耗的影响, 明确预干燥的最佳水分转换点, 同时比较热风干燥, 真空冷冻干燥及不同温度条件下热

风-真空冷冻联合干燥等干燥方式下龙眼果干的硬度, 色泽变化及感官评价的差异, 建立热风-真空冷冻联合干燥工艺。为建立高品质低能耗的工业化龙眼果干生产工艺提出指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

龙眼: 购于广东省高州晟丰水果专业合作社, 品种名为‘储良’。

醋酸、丙酮、正庚烷、苯酚和硫酸均为分析纯试剂, 均购于天津市大茂化学试剂厂。

### 1.2 仪器与设备

电热恒温鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; FDU-2100 真空冷冻干燥机, 东京理化器械株式会社; TA-XLPLUS 质构仪, 英国 Stable Micro System 公司; 色度仪, 美国 HunterLab 公司; 九阳破壁料理机(小型)。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 工艺流程

热风-真空冷冻联合干燥 (heat air-vacuum freeze combined drying, HA-VFCD): 新鲜龙眼(初始水分含量为 82.5%) 去皮去核, 尽量使果肉保持完整, 流水冲洗表面的泥沙, 尘土等。挑选 5 kg 龙眼果肉双层平铺于托盘内, 分别在不同温度下 80 °C, 100 °C, 120 °C 进行热风预干燥。其中, 选取干燥温度 80 °C 是基于该温度较接近实际生产中的温度, 而选取干燥温度 100 °C, 120 °C 是基于高温短时处理可以增加处理量考虑。当水分含量降到一定的范围时, 停止干燥, 均湿后将其分装, 并于 -20 °C 的冰箱中进行预冻 12 h, 取 2.4 kg 的预干燥龙眼果干进行真空冷冻干燥(真空冷冻干燥机容量为 2.4 kg), 腔内压强 3~4 Pa, 低温 -80 °C, 连续干燥至水分含量为 7% 左右, 干燥时间为 50 h, 从而得到热风-真空冷冻联合干燥的龙眼。将制得的产品用避光封口袋分装, 封口机密封后放入干燥器皿中保存备用。

热风干燥 (heat air drying, HAD): 5 kg 新鲜龙眼果肉双层平铺于托盘内, 放入电热鼓风干燥箱干燥, 热风温度为 65 °C, 干燥时间为 20 h, 干燥后龙眼的水

分含量为 14.53%。

真空冷冻干燥 (vacuum freeze drying, VFD): 新鲜龙眼果肉放入 -20 °C 冰箱冷冻 12 h, 之后将冷冻的龙眼取 2.4 kg (真空冷冻干燥机容量为 2.4 kg) 移入真空冷冻干燥机, 腔内压强 3~4 Pa, 低温 -80 °C, 连续干燥 62 h, 此时龙眼的水分含量为 7.46%。

### 1.3.2 水分含量的测定

参考 GB 5009.3-2016 直接干燥法。

### 1.3.3 褐变度的测定

参考 Namtip 等人的方法稍作修改<sup>[11]</sup>。称取干重为 10 g 的龙眼肉, 加入 100 mL 体积分数为 2% 的醋酸溶液, 用打浆机打碎, 均质机混匀, 然后过滤保留滤液, 再将 100 mL 丙酮加入其中, 漩涡混匀后再次过滤, 将得到的滤液放在 420 nm 波长下检测其吸光值, 结果以吸光值/干重 (g·DW) 表示。

### 1.3.4 体积密度的测定

体积密度采用正庚烷的液体体积置换法测定, 将龙眼质量除以其体积来计算<sup>[12]</sup>。

### 1.3.5 总糖、多糖测定<sup>[13]</sup>

糖类的提取采用热水提法得到多糖冻干粉, 总糖测定采用苯酚-硫酸法, 称取一定量的龙眼多糖冻干粉制成多糖溶液, 吸取 1 mL 稀释好的样液于 25 mL 试管中, 加入 0.5 mL 6% 苯酚溶液, 再沿管壁缓慢加入 2.5 mL 浓硫酸, 漩涡摇匀, 室温静置 30 min。在分光光度计上比色, 于 490 nm 波长下测吸光度。同时以蒸馏水代替多糖溶液做空白。

还原糖测定采用 3,5-二硝基水杨酸法, 称取一定量的冻干粉制成多糖溶液, 吸取 1 mL 样液于 25 mL 试管中, 加入 DNS 溶液 0.75 mL, 漩涡混匀后在沸水浴中加热 5 min, 迅速用流水冷却, 再加入蒸馏水 10.75 mL, 漩涡混匀。在分光光度计上比色, 于 540 nm 波长下测定吸光度。同时以蒸馏水代替多糖溶液做空白。

多糖含量=总糖含量-还原糖含量

### 1.3.6 单位能耗的测定<sup>[8]</sup>

干燥过程的能源效率用单位能耗 (SEC) 表示, 计算公式如下:

$$\text{单位能耗} = \frac{\text{干燥过程中使用的总能源(kJ)}}{\text{龙眼水分损失的总质量(kg)}}$$

### 1.3.7 色泽的测定

采用色度仪测定。色泽以 L\*(明度/黑暗), a\*(红色/绿色)和 b\*(黄色/蓝色)值表示。ΔE 值为色差值, 表示样品的颜色综合差异, 多次测定取平均值。

### 1.3.8 硬度的测定

采用 TA-XTPLUS 型质构仪测定, 选择 P/50 探头。

参照吴娜等<sup>[14]</sup>方法, 测定参数为: 测前速度 1.00 mm/s, 测中速 1.00 mm/s, 测后速 5.00 mm/s, 下压距离 75%, 龙眼果干剪成 5 mm×30 mm 左右的长方形块状, 测量 10 次, 取均值。

### 1.3.9 感官评价

选取不同性别, 年龄, 地域的 10 人对干燥的龙眼果干从颜色、形状、质地和风味等方面进行评分<sup>[4]</sup>。

表 1 龙眼果干感官评定表

指标	标准	分值
颜色	颜色呈金黄色, 均匀有光泽	21~25
	颜色呈浅黄色, 略均匀有光泽	16~20
	颜色呈黑褐色, 无光泽	10~15
形状	果干饱满	21~25
	果干稍有皱缩	16~20
	果干干瘪, 粘结成团	10~15
质地	质地紧实	21~25
	质地略微紧实	16~20
	质地松软, 粘牙	10~15
风味	龙眼风味较重, 无焦味	21~25
	龙眼风味稍重, 微焦味	16~20
	龙眼风味丧失, 明显焦味	10~15

## 1.4 数据处理与分析

试验数据为 3 次重复试验的平均值, 以均值±标准误差 (Means±SD) 表示, 用 SPSS.17 软件进行差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同温度热风-真空冷冻联合干燥水分转

#### 换点的确定

#### 2.1.1 不同温度热风预干燥对龙眼水分含量的影响

不同温度 80 °C、100 °C、120 °C 热风预干燥过程中龙眼水分含量的变化情况见图 1。结果显示, 水分含量随着干燥时间的延长呈不断下降的趋势。水分含量干燥前期变化较小, 随着干燥时间的延长显著降低。此外, 干燥温度对水分含量的影响较大, 温度越低, 干燥速率越慢。干燥温度为 80 °C 时, 干燥时间最长, 干燥速率最慢。干燥温度为 120 °C 时, 干燥时间最短, 干燥速率最快。干燥温度为 100 °C 时, 干燥时间和速率居中。

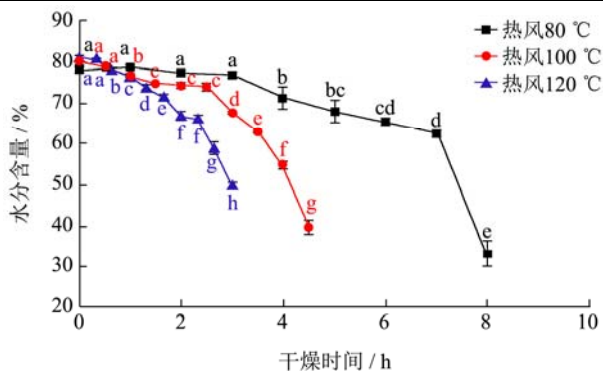


图1 不同温度热风预干燥对龙眼水分含量的影响

Fig.1 The influence of hot air pre-drying at different temperatures on moisture content of longan

注: 不同字母表示数值存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。下同。

### 2.1.2 不同温度热风预干燥对龙眼褐变度的影响

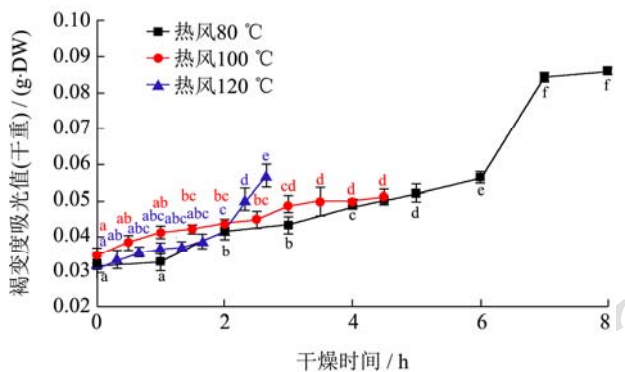


图2 不同温度热风预干燥对龙眼褐变度的影响

Fig.2 The influence of hot air pre-drying at different temperatures on the Browning degree of longan

不同温度 80 °C、100 °C、120 °C 热风预干燥过程中龙眼褐变度的变化情况见图 2。结果显示, 褐变度随着干燥时间的延长呈不断升高的趋势。干燥前期褐变度变化不显著, 三个温度下差异较小, 当 80 °C 干燥 6 h 后, 果干褐变度显著高于 100 °C、120 °C 干燥条件下的龙眼果干褐变度, 说明高温短时干燥在快速脱水的同时能够减少果干的褐变。当 80 °C 干燥 7 h、100 °C 干燥 3.5 h、120 °C 干燥 2.33 h 时褐变度显著提

表 2 不同温度热风预干燥参考水分转换点汇总表

Table 2 Summary of reference water conversion points for pre-drying at different hot air temperatures

项目	干燥温度/°C	干燥时间/h	水分含量/%	体积密度/(g/mL)	褐变度/(100 g·DW)
渗糖前	80	6	65.39±0.39 <sup>b</sup>	1.14±0.02 <sup>ab</sup>	5.64±0.14 <sup>c</sup>
	100	3	67.63±0.32 <sup>c</sup>	1.10±0.01 <sup>ab</sup>	4.89±0.23 <sup>b</sup>
	120	2	66.77±1.05 <sup>c</sup>	1.08±0.03 <sup>a</sup>	4.11±0.52 <sup>a</sup>
渗糖后	80	7	62.49±0.73 <sup>a</sup>	1.13±0.06 <sup>ab</sup>	8.44±0.14 <sup>d</sup>
	100	3.5	62.69±0.25 <sup>a</sup>	1.15±0.13 <sup>b</sup>	4.96±0.40 <sup>b</sup>
	120	2.3	66.16±0.76 <sup>b</sup>	1.10±0.03 <sup>ab</sup>	5.02±0.30 <sup>b</sup>

注: 同一列中不同字母表示数值存在显著差异 ( $p < 0.05$ )。下表同。

高, 此时龙眼出现不同程度的渗糖现象, 即龙眼果干组织破裂, 糖类随着水分向外迁移, 短时间内烘箱水分湿度增大, 又未能有效干燥, 导致龙眼果肉粘结成团, 表面失去光泽, 体积皱缩<sup>[4]</sup>。

### 2.1.3 不同温度热风预干燥对龙眼体积密度的影响

不同温度 80 °C、100 °C、120 °C 热风预干燥过程中龙眼体积密度的变化情况见图 3。结果显示, 体积密度随着干燥时间的延长都不断增大。干燥前期体积密度变化不显著, 三个温度下差异较小, 当 80 °C 干燥 7 h、100 °C 干燥 3.5 h、120 °C 干燥 2.33 h 时体积密度较渗糖前无显著性差异, 说明渗糖现象对龙眼体积密度的影响较小。

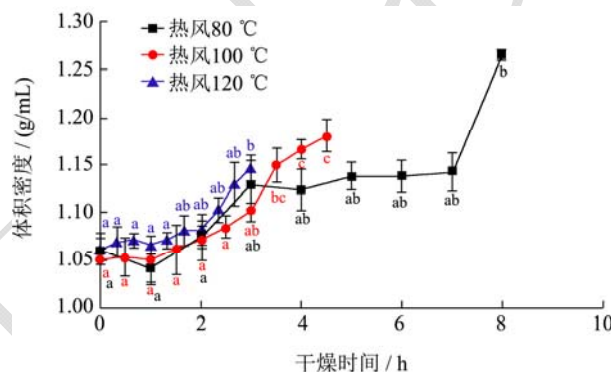


图3 不同温度热风预干燥对龙眼体积密度的影响

Fig.3 The influence of hot air pre-drying at different temperatures on the volume density of longan

### 2.1.4 不同温度热风预干燥参考水分转换点的选择

上述结果表明, 渗糖现象导致在干燥过程中龙眼的褐变度提高, 糖分流失。为获得褐变度与皱缩率较小, 同时具有较好的色泽, 外观饱满的龙眼果干, 因此选取渗糖前和渗糖后的时间点作为参考水分转换点。不同温度 80 °C、100 °C、120 °C 热风预干燥参考水分转换点汇总于表 2。结果表明, 渗糖前的水分含量显著高于渗糖后, 渗糖前后体积密度无显著性差异, 渗糖后的褐变度显著高于渗糖前。

表3 不同温度热风预干燥对龙眼总糖及多糖含量的影响

Table 3 The influence of hot air pre-drying at different temperatures on total sugar and polysaccharide content of longan

项目	干燥温度/℃	干燥时间/h	总糖含量/(mg/g·DW)	多糖含量/(mg/g·DW)
渗糖前	80	6	2.04±0.13 <sup>a</sup>	1.88±0.12 <sup>a</sup>
	100	3	2.11±0.20 <sup>a</sup>	1.94±0.20 <sup>a</sup>
	120	2	2.12±0.20 <sup>a</sup>	1.90±0.21 <sup>a</sup>
渗糖后	80	7	1.51±0.13 <sup>b</sup>	1.33±0.14 <sup>b</sup>
	100	3.5	1.52±0.01 <sup>b</sup>	1.39±0.01 <sup>b</sup>
	120	2.3	1.45±0.15 <sup>b</sup>	1.29±0.15 <sup>b</sup>

### 2.1.5 不同温度热风预干燥对龙眼总糖及多糖含量的影响

不同温度 80℃、100℃、120℃ 热风预干燥对龙眼总糖及多糖含量的影响见表 3。结果表明，温度对龙眼总糖及多糖含量无显著性影响，而渗糖前总糖、多糖含量都显著高于渗糖后。此外，渗糖前龙眼总糖含量随着干燥温度的升高略有升高，但无显著性差异。渗糖前龙眼多糖含量在干燥温度为 100℃ 时最高。因此，选取渗糖前时间点进行下一步的试验。

### 2.1.6 不同温度热风预干燥对龙眼单位能耗的影响

不同温度 80℃、100℃、120℃ 热风预干燥对龙眼单位能耗的影响见表 4，80℃、100℃ 热风预干燥时，渗糖前单位能耗都高于渗糖后；而 120℃ 时，渗糖前却低于渗糖后。其中 120℃ 干燥 2 h 时单位能耗最低 12.95 MJ/kg。

表4 不同温度热风预干燥对龙眼单位能耗的影响

Table 4 The influence of hot air pre-drying at different temperatures on unit energy consumption of longan

项目	干燥温度/℃	干燥时间/h	单位能耗/(MJ/kg)
渗糖前	80	6	20.42±0.02 <sup>a</sup>
	100	3	16.74±0.01 <sup>c</sup>
	120	2	12.95±0.03 <sup>f</sup>
渗糖后	80	7	17.55±0.11 <sup>b</sup>
	100	3.5	13.65±0.08 <sup>e</sup>
	120	2.3	14.82±0.06 <sup>d</sup>

### 2.1.7 不同温度热风-真空冷冻联合干燥水分转换点的确定

综合不同温度 80℃、100℃、120℃ 热风预干燥对龙眼水分含量，褐变度，体积密度，总糖，多糖含量及单位能耗等指标的影响，得到不同温度下的最佳水分转换点为：80℃ 干燥 6 h、100℃ 干燥 3 h 和 120℃ 干燥 2 h。后续与真空冷冻联合干燥至水分含量为 7% 左右。这些水分转换点下龙眼果干的品质较好，能耗较低，更适用于进一步的真空冷冻干燥。

## 2.2 不同温度热风预干燥对热风-真空冷冻联合干燥龙眼果干品质的影响

### 2.2.1 不同温度热风预干燥对热风-真空冷冻联合干燥龙眼果干硬度的影响

不同温度 80、100、120℃ 热风预干燥对热风-真空冷冻联合干燥龙眼果干硬度的影响见图 4。结果表明，热风干燥龙眼果干的硬度最高，真空冷冻干燥龙眼果干的硬度最低，热风-真空冷冻联合干燥龙眼果干的硬度介于两者之间且无显著性差异，三个温度下，80℃ 热风-真空冷冻联合干燥龙眼果干硬度最大，100、120℃ 下龙眼果干的硬度较小，但高于直接真空冷冻干燥，在一定程度上改善了其质地易碎的特点。

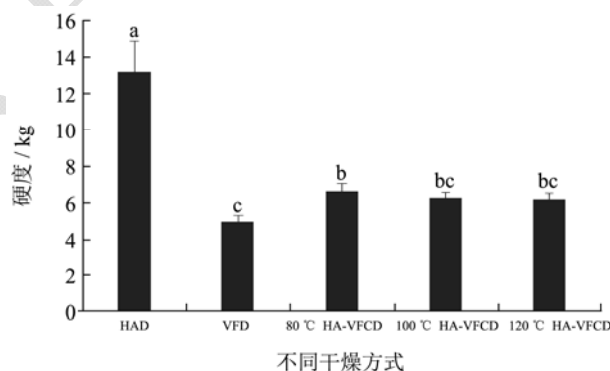


图4 不同温度热风预干燥对热风-真空冷冻联合干燥龙眼果干硬度的影响

Fig.4 The influence of pre-drying by hot air at different temperatures on dry hardness of longan fruit by hot-air-vacuum freezing combined drying

注：图中不同字母表示组间有显著差异 ( $p < 0.05$ )；HAD：热风干燥；VFD：真空冷冻干燥；80℃ HA-VFCD：80℃ 热风干燥 6 h 联合真空冷冻干燥；100℃ HA-VFCD：100℃ 热风干燥 3 h 联合真空冷冻干燥；120℃ HA-VFCD：120℃ 热风干燥 2 h 联合真空冷冻干燥。

### 2.2.2 不同温度热风预干燥对热风-真空冷冻联合干燥龙眼果干色度的影响



色泽是衡量干燥产品品质最直观的判断标准, 直接影响产品的被接受程度。不同温度 80 °C、100 °C、120 °C 热风预干燥对热风-真空冷冻联合干燥龙眼果干色度的影响见表 5。结果表明, 真空冷冻干燥龙眼果干的亮度最高, 热风干燥龙眼果干的亮度最低, 联合干燥龙眼果干的亮度介于两者之间。三个温度下, 100 °C、120 °C 热风-真空冷冻联合干燥龙眼果干的亮度高于 80 °C。真空冷冻干燥的龙眼果干的红值最低, 120 °C 热风-真空冷冻联合干燥与真空冷冻干燥龙眼果干的红值间无显著差异, 而热风干燥和 80 °C 热风-真空冷冻联合干燥显著提高了龙眼果干的红值。真空冷冻干燥龙眼果干的黄值最高, 热风干燥次之, 热风-真空冷冻联合干燥最低, 同时随温度升高依次降低。 $\Delta E$  分析了热风干燥与三个温度下热风-真空冷冻联合干燥等四种干燥方式与真空冷冻干燥龙眼果干整体色度的差异性,  $\Delta E$  越小表明与真空冷冻干燥龙眼果干色度之间的差异越小。结果表明, 热风干燥的 $\Delta E$  最大, 三个温度热风-真空冷冻联合干燥之间无显著性差异, 其中 100 °C 下联合干燥的 $\Delta E$  最低, 更接近于真空冷冻干燥。图 5 为不同温度热风-真空冷冻联合干燥的色泽

形态图, 印证了表 5 的结论。

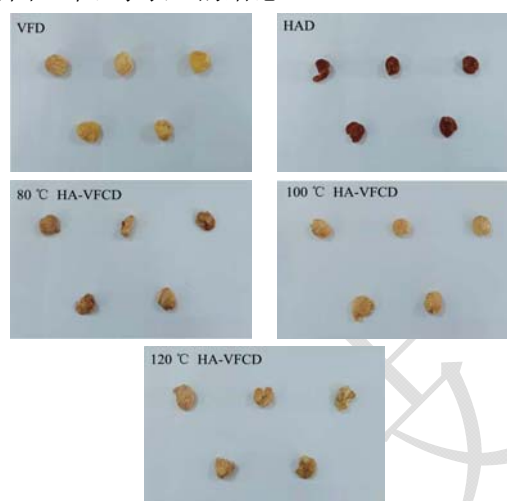


图 5 不同温度热风-真空冷冻联合干燥的色泽形态图

Fig.5 Color pattern of hot air-vacuum freezing combined drying at different temperatures

注: HAD: 热风干燥; VFD: 真空冷冻干燥; 80 °C HA-VFCD: 80 °C 热风干燥 6 h 联合真空冷冻干燥; 100 °C HA-VFCD: 100 °C 热风干燥 3 h 联合真空冷冻干燥; 120 °C HA-VFCD: 120 °C 热风干燥 2 h 联合真空冷冻干燥。

表 5 不同温度热风预干燥对热风-真空冷冻联合干燥龙眼果干色度的影响

Table 5 The influence of pre-drying by hot air at different temperatures on dry chroma of longan fruits by hot-air and vacuum freezing combined drying

项目	L*	a*	b*	$\Delta E$
VFD	54.45±2.26 <sup>a</sup>	1.94±0.50 <sup>b</sup>	19.84±0.53 <sup>a</sup>	-
HAD	46.58±0.59 <sup>d</sup>	3.46±0.48 <sup>c</sup>	16.05±1.14 <sup>b</sup>	9.29±0.17 <sup>a</sup>
80 °C HA-VFCD	48.41±0.42 <sup>c</sup>	3.88±0.04 <sup>c</sup>	14.24±0.25 <sup>c</sup>	8.46±0.45 <sup>b</sup>
100 °C HA-VFCD	51.61±0.22 <sup>b</sup>	1.35±0.05 <sup>a</sup>	11.25±0.09 <sup>d</sup>	8.12±0.07 <sup>b</sup>
120 °C HA-VFCD	50.91±0.06 <sup>b</sup>	1.98±0.06 <sup>b</sup>	12.19±0.13 <sup>e</sup>	8.43±0.10 <sup>b</sup>

表 6 不同温度热风预干燥对热风-真空冷冻联合干燥龙眼果干感官评价的影响

Table 6 Effect of predrying by hot air at different temperatures on sensory evaluation of longan fruits by hot air - vacuum freezing combined with drying

项目	颜色	形状	质地	风味	综合评分
VFD	22.9±1.20 <sup>a</sup>	22.5±1.43 <sup>a</sup>	16.2±3.61 <sup>a</sup>	21.5±2.84 <sup>a</sup>	83.10±5.08 <sup>a</sup>
HAD	14.9±2.18 <sup>d</sup>	16.4±4.22 <sup>bc</sup>	18±3.65 <sup>a</sup>	20.1±2.51 <sup>ab</sup>	69.40±8.98 <sup>bc</sup>
80 °C HA-VFCD	13.2±2.15 <sup>c</sup>	15.5±2.76 <sup>c</sup>	18.1±3.48 <sup>a</sup>	16.7±2.67 <sup>c</sup>	63.50±4.11 <sup>c</sup>
100 °C HA-VFCD	18.6±0.97 <sup>b</sup>	17.1±3.11 <sup>bc</sup>	17.1±3.98 <sup>a</sup>	18.6±4.48 <sup>abc</sup>	71.40±10.17 <sup>b</sup>
120 °C HA-VFCD	18.1±1.66 <sup>b</sup>	18.7±3.33 <sup>b</sup>	15.4±2.99 <sup>a</sup>	17.3±3.50 <sup>bc</sup>	69.50±6.70 <sup>bc</sup>

注: 同一列中不同字母表示数值存在显著差异 ( $p < 0.05$ ); HAD: 热风干燥; VFD: 真空冷冻干燥; 80 °C HA-VFCD: 80 °C 热风干燥 6 h 联合真空冷冻干燥; 100 °C HA-VFCD: 100 °C 热风干燥 3 h 联合真空冷冻干燥; 120 °C HA-VFCD: 120 °C 热风干燥 2 h 联合真空冷冻干燥。

### 2.2.3 不同温度热风预干燥对热风-真空冷冻联合干燥龙眼果干感官评价的影响

不同温度 80 °C、100 °C、120 °C 热风预干燥对热风-真空冷冻联合干燥龙眼果干感官评价的影响见

表 6。结果表明, 真空冷冻干燥龙眼果干的感官评价分值最高, 其风味保留较好, 质地疏松多孔呈海绵状, 复水性较好, 有粘牙现象。热风干燥龙眼果干呈黄褐色, 质地紧实, 形状皱缩, 有焦糖风味。热风-真空冷

冻联合干燥中, 100 °C下龙眼感官评价分值最高, 颜色呈浅黄色, 形状略有皱缩, 质地略紧实, 有新鲜龙眼风味。此条件下联合干燥结合了热风干燥和真空冷冻干燥各自的优点, 同时弥补了两种干燥方式的不足。

综上, 80 °C热风-真空冷冻联合干燥时间长, 褐变严重, 外形皱缩, 活性物质含量较低; 120 °C联合干燥时间最短, 活性物质损失较少, 但感官评价分值较低; 而100 °C联合干燥时间短, 质地良好, 营养品质较高且单位能耗较低。因此得到最佳热风-真空冷冻联合干燥龙眼果干加工工艺: 100 °C热风预干燥 3 h后联合真空冷冻干燥 50 h。

### 3 讨论

#### 3.1 不同温度热风预干燥对龙眼果干干预干燥工艺品质的影响

本研究结果表明, 不同温度 80 °C、100 °C、120 °C热风预干燥条件下, 随着干燥时间的延长, 龙眼果干的水分含量不断降低, 褐变度和体积密度不断升高。有研究表明, 龙眼在热风干燥的过程中, 在前期干燥速率缓慢, 随后干燥速率不断提高<sup>[15]</sup>, 与本研究结果相似, 而本研究中由于只分析干燥过程中的水分转换点(即渗糖前后), 因此并未干燥至水分含量最低趋于平缓的阶段。随着干燥时间的延长褐变度不断提高, 这可能是由于在高温下, 单糖脱水生成糠醛及其衍生物, 与胺类物质反应形成深褐色物质, 同时蔗糖在加热条件下生成蔗糖烯及其衍生物, 而后经过聚合和缩合反应生成深色难溶的焦糖素, 从而使褐变度越来越大<sup>[16]</sup>。有研究表明干燥前期的褐变主要是酶促褐变, 而干燥后期褐变反应种类较多<sup>[15]</sup>。黄榕辉等的<sup>[17]</sup>研究也表明随干燥时间的延长, 龙眼褐变度显著增加。此外, Yang 等也<sup>[18]</sup>发现红辣椒的褐变度随着干燥时间的延长而显著增加。据报道, 果肉体积的皱缩是干燥温度和干燥时间共同作用所导致, 长时间暴露在高温下, 果肉的皱缩率和体积密度随着水分含量逐渐降低而不断增加<sup>[19]</sup>。

本研究发现, 龙眼果干在干燥过程中会出现不同程度的渗糖现象, 其原因可能是龙眼的在干燥过程中先失去自由水, 随后干燥至一定的时间会破坏物料中的热敏感或热不稳定成分, 造成溶质迁移, 从而失去龙眼中的结合水, 而这些溶质的迁移伴随着糖类物质的流失, 导致龙眼果肉粘结成团, 表面失去光泽, 体积皱缩<sup>[4]</sup>。因此, 渗糖前龙眼总糖及多糖含量显著高于渗糖后。渗糖前总糖含量随着温度的升高略有上升,

且无显著性差异。可能的原因是干燥温度高但干燥时间短, 龙眼中多糖未完全降解为寡糖, 使得糖分足以保留<sup>[4]</sup>。多糖含量在渗糖前 100 °C时最高, 可能的原因是 100 °C干燥温度较 120 °C低, 而干燥时间较 80 °C短, 使得糖分流失没有 80 °C高, 而糖降解与非酶反应没有 120 °C强。

#### 3.2 不同温度热风预干燥对龙眼果干单位能耗的影响

本研究分析不同温度热风预干燥渗糖前后龙眼果干的单位能耗, 发现 80 °C、100 °C条件下单位能耗渗糖前较渗糖后高, 可能由于这些温度下渗糖前后的时间间隔和水分含量变化较大。而 120 °C条件下渗糖前却低于渗糖后, 可能是由于 120 °C时间间隔较短、水分含量变化较小、同时高温消耗能量较多。前人报道由于热风风机的运行, 环境温度和干燥温度之间温差的增加都会导致单位能耗的升高<sup>[20]</sup>。然而, 有时干燥时间对能耗的影响更甚于干燥温度<sup>[21]</sup>。

#### 3.3 不同温度热风预干燥对热风-真空冷冻联合干燥龙眼果干品质的影响

本研究分析了不同温度热风-真空冷冻联合干燥与真空冷冻干燥和热风干燥龙眼果干的硬度、色度与感官评价。结果表明, 不同干燥方式对龙眼果干的硬度影响较大, 其中热风干燥的硬度最高, 真空冷冻干燥的硬度最低, 联合干燥介于两者之间且无显著性差异。影响果干硬度的关键因素是水分迁移速率, 水分在干燥过程中被迅速去除, 造成组织纤维收缩, 而热风干燥由于长时间处于高温下, 表面的水分优先蒸发, 其内部水分的迁移速率低于表面水分的蒸发速率时导致龙眼果干形成硬壳<sup>[22,23]</sup>。真空冷冻干燥过程中水分在低温下结冰升华, 保持了果肉原有的外形, 形成的结构疏松, 孔隙较大, 硬度较小。而联合干燥的过程中, 热风预干燥降低了果肉水分, 但并未形成硬壳, 此时联合真空冷冻干燥得到龙眼果干的硬度更接近于真空冷冻干燥。李丰廷等<sup>[24]</sup>在比较了热风干燥、真空冷冻干燥、真空冷冻-热风联合干燥等三种干燥方式下桑葚干的硬度, 表明热风干燥桑葚干硬度最高, 真空冷冻干燥最低, 联合干燥介于两者之间, 与本研究结果一致。

不同干燥方式会造成产品发生不同程度褐变, 包括酶促褐变与美拉德反应、焦糖化反应和抗坏血酸氧化等非酶褐变。真空冷冻干燥龙眼果干的水分在低温

真空下升华,抑制了可能发生的褐变,最大程度的保护了龙眼的色泽。热风干燥由于干燥时间长、干燥温度高等因素导致龙眼果干发生酶促褐变及美拉德反应和焦糖化反应等非酶褐变,导致褐变加重。80℃条件下联合干燥,干燥时间长,导致褐变较重;而100℃、120℃条件下联合干燥,干燥时间短,褐变程度低。前人研究发现随着干燥时间和干燥温度的增加,龙眼果肉的L值减小,a、b值显著增加<sup>[25,26]</sup>。

感官评价结果表明,真空冷冻干燥龙眼果干的综合评分最高,其原因是因为真空冷冻干燥时龙眼在处于低温真空的条件下,细胞间的冰晶直接升华成气体,最大程度的保持了龙眼的形态和风味,同时低温下也避免了龙眼果肉组织细胞内酶的氧化。而热风干燥龙眼果干时,由于龙眼中富含糖类物质,极易发生酶促和非酶促褐变导致其颜色加深,影响了龙眼果干的整体接受度,干燥后的龙眼呈黑褐色,质地紧实,但形状皱缩龙眼风味稍有丧失。此外,100℃条件下联合干燥龙眼果干在三种联合干燥中的综合评分最高,其原因是由于100℃条件下联合干燥的龙眼果干同时结合了热风干燥和真空冷冻干燥的优点,弥补了这两种加工方式的不足,是一种良好的加工方式。

#### 4 结论

本研究以新鲜龙眼果肉为原料,优化了不同温度80℃、100℃、120℃热风-真空冷冻联合干燥的工艺,得出热风-真空冷冻联合干燥工艺的最佳水分转换点为:100℃热风干燥3h,此时的水分含量为67.63%,褐变度4.89/g·DW,体积密度为1.10g/mL,总糖含量为2.11mg/g·DW,多糖含量为1.94mg/g·DW,单位能耗为16.74MJ/kg。此外,分析评价了真空冷冻干燥、热风干燥与三种温度条件下热风-真空冷冻联合干燥等干燥方式对龙眼果干品质的影响。结果表明,真空冷冻干燥龙眼果干的品质最好,热风-真空冷冻联合干燥的产品在硬度、色泽及感官评价上都优于热风干燥,更接近于真空冷冻干燥。热风-真空冷冻联合干燥采用高温、短时间的热风预干燥,极大的保留了新鲜龙眼的色泽和外观,不仅提高了产品的品质,同时节约了干燥时间和能耗,提高了产品的干燥效率和附加值,是一种可工业化应用的龙眼干燥新方式。

#### 参考文献

[1] 陈水渐,姚兆奇,万忠,等.2015年广东龙眼产业发展形势与对策建议[J].广东农业科学,2016,43(4):25-28  
CHEN Shui-jian, YAO Zhao-qi, WAN Zhong, et al.

Development situation and countermeasures of Guangdong longan industry in 2015 [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2016, 43(4): 25-28

[2] 陈彦林, 遆慧慧, 张名位, 等. 龙眼果肉的健康效应及主要活性物质研究进展[J]. 广东农业科学, 2014, 41(12): 40-44  
CHEN Yan-lin, TI Hui-hui, ZHANG Ming-wei, et al. Research advances on health effects and active components of arillus longan pulp [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(12): 40-44

[3] 陈仪男. 龙眼真空冷冻干燥工艺优化[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 244-248  
CHEN Yi-nan. Optimization of vacuum freeze-drying technologies of longan fruits [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(9): 244-248

[4] 田玉庭, 陈洁, 李淑婷, 等. 不同干燥方法对龙眼果肉品质特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(8): 161-165  
TIAN Yu-ting, CHEN Jie, LI Shu-ting, et al. Effect of different drying methods on the quality of longan [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.), 2012, 40(8): 161-165

[5] Wojdyło A, Figiel A, Oszmiański J. Effect of drying methods with the application of vacuum microwaves on the bioactive compounds, color, and antioxidant activity of strawberry fruits [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(4): 1337-1343

[6] 陈君琛, 杨艺龙, 翁敏劫, 等. 即食杏鲍菇热风-真空联合干燥工艺优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 331-338  
CHEN Jun-chen, YANG Yi-long, WENG Min-jie, et al. Optimization of combined hot-air and vacuum drying technology for instant *Pleurotus eeryngii* [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(14): 331-338

[7] Varith J, Dijkanarukkul P, Achariyaviriya A, et al. Combined microwave-hot air drying of peeled longan [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81(2): 459-468

[8] Nathakaranakule A, Jaiboon P, Soponronnarit S. Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 99(4): 662-668

[9] 黄略略. 冻干-真空微波串联联合干燥苹果的保质和节能工艺及模型研究[D]. 无锡: 江南大学, 2011  
HUANG Lue-lue. Studies on quality, saving energy technology and model of tandem combined freeze drying-vacuum microwave dried apple [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011



- [10] 张莉会,刘杜娟,廖李,等.真空冷冻-热风联合干燥对草莓品质的影响[J].现代食品科技,2018,34(4):188-197  
ZHANG Li-hui, LIU Du-juan, LIAO Li, et al. Effects of vacuum freezing combined with hot air drying on the quality of strawberry [J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(4): 188-197
- [11] Namtip L, Sakamon D, Naphaporn. Drying kinetics and quality of potato chips undergoing different drying techniques [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77: 635-643
- [12] Apinyavisit K, Nathakaranakule A, Mittal G S, et al. Heat and mass transfer properties of longan shrinking from a spherical to an irregular shape during drying [J]. Biosystems Engineering, 2018, 169: 11-21
- [13] Kong F L, Zhang M W, Kuang R B, et al. Antioxidant activities of different fractions of polysaccharide purified from pulp tissue of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 81(3): 612-616
- [14] 吴娜,孙为正,任娇艳,等.广式腊肠加工过程中质构与色泽变化的研究[J].食品工业科技,2009,3:95-97  
WU Na, SUN Wei-zheng, REN Jiao-yan, et al. Study on the changes of texture and color of Cantonese sausage during processing [J]. Science and Technology of Food Industry, 2009, 3: 95-97
- [15] 王宸之,邓自高,李琳,等.热风和微波干燥对龙眼品质的影响[J].食品与生物技术学报,2018,37(4):429-436  
WANG Chen-zhi, DENG Zi-gao, LI Lin, et al. Changes in the quality of *Dimocarpus longan* during the hot-air drying and microwave drying processes [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2018, 37(4): 429-436
- [16] 蔡长河,郭际,曾庆孝.荔枝在干制过程中非酶褐变的研究[J].食品科学,2006,27(10):158-161  
CAI Chang-he, GUO Ji, ZENG Qing-xiao, et al. Research on non-enzymatic browning (NEB) reaction during the drying process of litchi fruit [J]. Food Science, 2006, 27(10): 158-161
- [17] 黄榕辉,吴光亮,黄春梅,等.龙眼干制过程中糖含量变化对果肉褐变度的影响[J].亚热带农业研究,2014,10(3):145-150  
HUANG Rong-hui, WU Guang-liang, HUANG Chun-mei, et al. Effect of sugar content on browning degree of longan aril in drying processing [J]. Subtropical Agriculture Research, 2014, 10(3): 145-150
- [18] Yang X H, Deng L Z, Mujumdar A S, et al. Evolution and modeling of colour changes of red pepper (*Capsicum annuum*, L.) during hot air drying [J]. Journal of Food Engineering, 2018, 231: 101-108
- [19] Jalal Dehghannya, Seyed-Hamed Hosseinlar, Maryam Khakbaz Heshmati, et al. Multi-stage continuous and intermittent microwave drying of quince fruit coupled with osmotic dehydration and low temperature hot air drying [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 45: 132-151
- [20] Yingqiang Wang, Min Zhang, Arun S Mujumdar, et al. Drying and quality characteristics of shredded squid in an infrared-assisted convective dryer [J]. Drying Technology, 2014, 32(15): 1828-1839
- [21] Daniel I Onwude, Norhashila Hashim, Khalina Abdan, et al. The effectiveness of combined infrared and hot-air drying strategies for sweet potato [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 241: 75-87
- [22] 邓媛元,汤琴,张瑞芬,等.不同干燥方式对苦瓜营养与品质特性的影响[J].中国农业科学,2017,50(2):362-371  
DENG Yuan-yuan, TANG Qin, ZHANG Rui-fen, et al. Effects of different drying methods on the nutritional and physical properties of *Momordica charantia* [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(2): 362-371
- [23] Mayor L, Sereno A M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review [J]. Journal of Food Engineering, 2004, 61(3): 373-386
- [24] 李丰廷,邹波,徐玉娟,等.真空冷冻与热风联合干燥对桑葚干品质的影响[J].广东农业科学,2017,44(11):129-137  
LI Feng-ting, ZOU Bo, XU Yu-juan, et al. Effect of freeze-hot air drying on the quality of dried mulberry. Guangdong Agricultural Sciences, 2017, 44(11): 129-137
- [25] 邓彩玲.龙眼热泵干燥特性研究及高水分龙眼干的研发[D].南昌:江西农业大学,2013  
DENG Cai-ling. Study on heat pump drying characteristics of longan and development of high-moisture dried longan [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2013
- [26] Chunthaworn S, Achariyaviriya S, Achariyaviriya A, et al. Color kinetics of longan flesh drying at high temperature [J]. Procedia Engineering, 2012, 32: 104-111