

# 不同干燥工艺对荔枝果干品质影响的比较研究

杨韦杰<sup>1,2</sup>, 肖更生<sup>1,\*</sup>, 徐玉娟<sup>1</sup>, 廖森泰<sup>1</sup>, 唐道邦<sup>1</sup>, 吴继军<sup>1</sup>, 温靖<sup>1</sup>, 林羨<sup>1</sup>

(1.广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 广东省农产品加工重点实验室, 广东 广州 510610;

2.江西农业大学生物科学与工程学院, 江西 南昌 330045)

**摘要:** 采用6种热泵干燥工艺和1种热风干燥工艺干燥荔枝, 分析不同工艺条件下荔枝果肉可滴定酸度、复水率、总糖、褐变度和总酚含量等理化指标和挥发性风味物质含量变化。结果表明: 热泵干燥各工艺条件加工的荔枝果干除总酚含量外, 可滴定酸度、复水率、总糖和褐变度等指标评价普遍优于热风干燥; 热泵干燥加工的荔枝果干挥发性风味物质中芳樟醇、香叶醇、香茅醇、柠檬烯等荔枝典型香气成分相对含量总和高于热风干燥。

**关键词:** 荔枝; 热泵干燥; 热风干燥; 品质; 气相色谱-质谱法(GC-MS)

## Effects of Different Drying Methods on Quality of Dried Litchi

YANG Wei-jie<sup>1,2</sup>, XIAO Geng-sheng<sup>1,\*</sup>, XU Yu-juan<sup>1</sup>, LIAO Sen-tai<sup>1</sup>, TANG Dao-bang<sup>1</sup>, WU Ji-jun<sup>1</sup>, WEN Jing<sup>1</sup>, LIN Xian<sup>1</sup>

(1. Guangdong Key Laboratory of Agricultural Product Processing, Sericulture and Farm Product Processing Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510610, China; 2. College of Bioscience and Bioengineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

**Abstract:** Dried litchi was prepared by heat pump drying (HPD) at six different combinations of temperature and time or hot air drying (HAD). Titratable acidity, rehydration ratio, total sugar, browning index, total phenols and volatile flavor compounds of dried litchi by the two methods were analyzed. The results showed that the chemical and physical indexes, except total phenol, of dried litchi processed by HPD was better than those of dried litchi processed by HAD. HPD-dried litchi also had higher levels of volatile flavor compounds, including linalool, geraniol, citronellol and limonene.

**Key words:** litchi; heat pump drying; hot air drying; quality; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS)

中图分类号: TS255.42; TS207.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2013)13-0095-06

doi:10.7506/spkx1002-6630-201313021

荔枝(*Litchi chinensis* Sonn.)是华南地区特色的大宗水果, 种植面积大, 经济效益高, 在国际和国内水果市场占有重要份额。荔枝极不耐贮藏, 加上成熟季节恰逢酷暑, 生产和销售环节存在诸多问题, 致使大量荔枝腐烂失去商品价值, 因此将其加工成荔枝干、糖水罐头和荔枝酒等传统产品, 有利于稳定市场果价, 实现果农、果商的增收<sup>[1]</sup>。

传统带壳荔枝干加工, 是荔枝加工的主要途径。荔枝干制加工主要为日晒法、火焙法和工厂化的热风干燥法(hot air drying, HAD)。上述方法干燥温度高(55~90℃), 干燥时间长(约4~5d), 加工生产的荔枝干制品质量参差不齐, 原有风味和营养成分破坏较大。

热泵干燥(heat pump drying, HPD)是通过特制干燥系统从低温热源吸取热量, 在较高温度下作为有用热能进行干燥的一种干燥方法<sup>[2]</sup>。它能够有效的利用环境热源,

高效节能, 提高干制品的品质<sup>[3-4]</sup>。目前广泛应用于木材工业、纺织、制药、食品和农产品加工等行业<sup>[5-6]</sup>。根据热泵干燥温度又可分为低温热泵干燥(30~40℃)和高温热泵干燥(50~60℃)。

本实验比较研究不同温度和风速条件下热泵干燥工艺和热风干燥工艺对荔枝干果肉品质的影响, 以期荔枝热泵干制深加工提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

荔枝品种“妃子笑”取自广东茂名某商业果园, 成熟度8~9成(果皮85%转红, 果柄部位仍带有青色)。采摘后冷藏于泡沫箱, 2h内运输至实验室, 严格挑选大小、形状、颜色均一的果实用于干燥实验。

收稿日期: 2012-03-15

基金项目: 广东省科技计划项目(2011A080803011; 2009A020101002); 国家农业部公益性行业科研专项(200903043-8-1)

作者简介: 杨韦杰(1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为食品生物技术。E-mail: wjyang2004@163.com

\*通信作者: 肖更生(1965—), 男, 研究员, 硕士, 研究方向为农产品深加工。E-mail: gshxiao@yahoo.com.cn

## 1.2 仪器与设备

UV1800紫外-可见分光光度计 日本岛津公司；DF-101S集热式恒温加热磁力搅拌器、SHZ-D(III)循环水式真空泵 巩义市予华仪器有限责任公司；MJ-25PM01B组织匀浆机 广东美的精品电器制造有限公司；TD6台式离心机 长沙湘智离心机仪器有限公司；HWS24电热恒温水浴锅 上海一恒科学仪器有限公司；N-1000旋转蒸发器 日本Eyela公司；HX-1050恒温循环器 北京德天佑科技发展有限公司；DHG-9240A电热恒温鼓风干燥箱 上海齐欣科学仪器有限公司；PB-10酸度计 德国Sartorius公司；GHRH-20热泵干燥系统 广东省农业机械研究所；6890N/5975B液相色谱-质谱联用仪(配有电喷雾离子源(ESI)及Xcalibur1.2数据处理系统) 美国Agilent公司；固相微萃取手动进样器、50/30 $\mu$ m DVB/CAR/PDMS(Gray/plain Hub)固相微萃取纤维头 美国Supelco公司。

## 1.3 方法

### 1.3.1 可滴定酸度测定

参照国标GB/T5009.187—2003《干果(桂圆、荔枝、葡萄干、柿饼)中总酸的测定》中的酸度计法，以0.050mol/L NaOH标准溶液进行滴定，以柠檬酸计。

### 1.3.2 总糖含量测定

精密称取0.25g干果果肉加入250mL三角瓶中，加100mL蒸馏水和20mL浓盐酸，装上冷凝回流装置，置于100℃水浴中水解3h，冷却至室温过滤，再加蒸馏水洗滤渣，合并滤液及洗液，定容至250mL，即为待测试样。采用苯酚硫酸法，以葡萄糖制作标准曲线，测定490nm波长处的吸光度，计算总糖含量<sup>[7]</sup>。

### 1.3.3 总酚含量测定

取10g荔枝干果肉，加入50mL 80%丙酮溶液，组织匀浆3min，室温浸提3次，每次1h。真空抽滤，合并浸提液，45℃旋蒸浓缩至有机相无残留，收集浓缩液并定容至50mL<sup>[8]</sup>。以没食子酸制作标准曲线，测定760nm波长处的吸光度，计算总酚含量<sup>[9]</sup>。

### 1.3.4 复水率测定

随机取5颗干果果肉( $m_1$ )放入40℃蒸馏水中充分吸水30min，复水后用滤纸反复吸附表面和四周水分，然后进行准确称质量( $m_2$ )，复水率计算公式如下<sup>[10]</sup>。

$$\text{复水率} = m_2/m_1$$

### 1.3.5 褐变度测定

称取2g干果果肉，加入5mL 95%乙醇，组织匀浆3min，静置提取1h，4000r/min离心20min，取上清液测定410nm波长处吸光度，根据吸光度大小直接确定褐变程度，以新鲜荔枝果肉做相同处理为对照<sup>[11]</sup>。

### 1.3.6 挥发性风味物质的检测

#### 1.3.6.1 固相微萃取样品的制备

取5g干果果肉于15mL顶空样品瓶，密封，50℃水浴，萃取平衡30min，萃取纤维头在GC进样口解析5min，采用GC-MS检测分析。

#### 1.3.6.2 色谱柱

Agilent HP-5MS毛细管柱(30.0m $\times$ 250 $\mu$ m，0.25 $\mu$ m)，载气为He，流速为1mL/min，进样口温度250℃，不分流进样。

#### 1.3.6.3 质谱条件

Agilent 5975MSD质谱，电子轰击离子源(EI)，离子源温度230℃，接口温度280℃，扫描质量范围10~450u。

#### 1.3.6.4 升温程序

起始温度40℃，保持3min；以5℃/min升至110℃，保持2min；以5℃/min升至130℃，保持2min；以10℃/min升至220℃，保持5min；以10℃/min升至230℃，保持5min；以12℃/min升至250℃，保持5min。

#### 1.3.6.5 挥发性风味物质分析方法

峰面积归一化法。采用Xcalibur1.2软件处理试验数据，计算机检索并与NIST05谱库匹配来确定未知化合物，当匹配度>80(最大值为100)时，予以确认鉴定结果。

## 1.4 干燥工艺

### 1.4.1 工艺流程

鲜果→挑选→剪枝→清洗→干燥→成品

### 1.4.2 热泵干燥工艺

为了探讨不同热泵干燥条件对荔枝干成品品质的影响，设计了6个干燥工艺条件(表1)。干燥前，机器预热30min，达到稳定温度后，称取(10.0 $\pm$ 0.2)kg鲜荔枝，按5.0kg/m<sup>3</sup>装载量放入果实。干燥过程中，每干燥12h，停止加热，让果品回软3h，然后重复加热与回软，直至含水量达到要求。回软时间不计入整体干燥时间内。

表1 热泵干燥工艺条件

实验号	1	2	3	4	5	6
温度/℃	55	55	60	60	65	65
风速/(m/s)	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0

### 1.4.3 热风干燥工艺

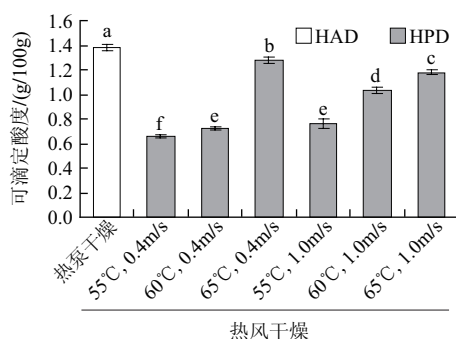
参照广东省地方标准DB44/T 366—2006《荔枝干和龙眼干加工(风干和烘干)包装技术规程》进行，以与热泵干燥相同装载量放入果实进行干燥。干燥过程分为5个阶段：第1阶段为前期干燥(初焙)，温度90℃，时间15h；第2阶段为回软期(缓苏)，回软1d；第3阶段为中期干燥(第1次复焙)，温度65℃，时间24h；第4阶段为第2次回软期，回软2d；第5阶段为后期干燥(第2次复焙)，温度55℃，时间15h。

### 1.5 统计分析

以上实验经完全随机取样, 并设3个平行, 每平行两次测定。结果以 $\bar{x} \pm s$ 的形式给出。所有数据经SPSS17.0单因素方差分析和最小显著性差异计算, 差异在 $P=0.05$ 水平上为显著。

## 2 结果与分析

### 2.1 热泵、热风干燥对成品荔枝干可滴定酸度的影响



字母不同表示差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

图1 热泵、热风干燥对荔枝干可滴定酸度的影响

Fig.1 Effect of HPD and HAD on titratable acidity of dried litchi

由图1可知, 热风、热泵干燥方式加工的荔枝干可滴定酸度均符合GB16325—2005《干果食品卫生标准》和NY/T 709—2003《荔枝干农业行业标准》。热风干燥干果可滴定酸度最高, 为 $(1.38 \pm 0.03)$ g/100g, 热泵干燥各条件下的荔枝干可滴定酸度均明显低于热风干燥, 其中热泵干燥55°C、风速0.4m/s干制的成品可滴定酸度最低。

### 2.2 热泵、热风干燥对成品荔枝干复水率的影响

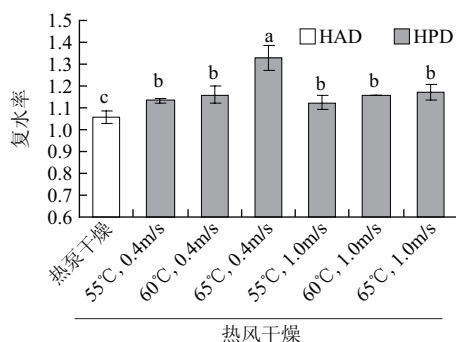


图2 热泵、热风干燥对荔枝干复水率的影响

Fig.2 Effect of HPD and HAD on rehydration ratio of dried litchi

由图2可知, 热泵干燥温度65°C、0.4m/s复水率最高, 为 $1.33 \pm 0.06$ , 明显优于其他干燥条件; 热泵干燥其他工艺下的荔枝干复水率差异不显著; 热风干燥复水率明显低于热泵干燥。由于植物物料是由细胞及细胞外空间组成的有机体, 干燥过程中不可逆转的细胞破坏, 导

致细胞的严重收缩和相关组织结构的塌陷降低了其亲水性能, 因而只具备有限的复水能力<sup>[12]</sup>。相比热泵干燥, 热风干燥过高的干燥温度可能对荔枝果肉细胞和组织结构的破坏程度较大, 因而复水率较低。

### 2.3 热泵、热风干燥对成品荔枝干总糖含量的影响

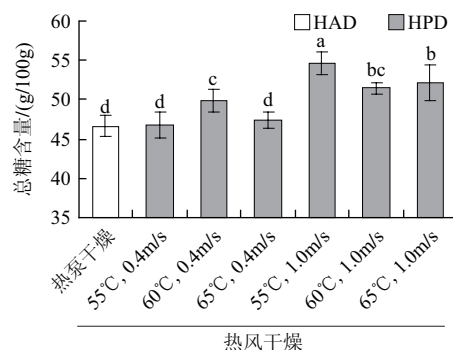


图3 热泵、热风干燥对荔枝干总糖含量的影响

Fig.3 Effect of HPD and HAD on total sugar in dried litchi

由图3可知, 热泵干燥温度55°C、1.0m/s的荔枝干总糖含量最高, 为 $(54.62 \pm 1.54)$ g/100g, 且热泵干燥风速1m/s的荔枝干总糖含量明显高于0.4m/s的, 热泵干燥各工艺条件下的荔枝干的总糖含量相对于热风干燥要高, 热泵干燥55°C、0.4m/s和65°C、0.4m/s条件下荔枝干成品总糖含量与热风干燥差异不显著。

### 2.4 热泵、热风干燥对成品荔枝干褐变度的影响

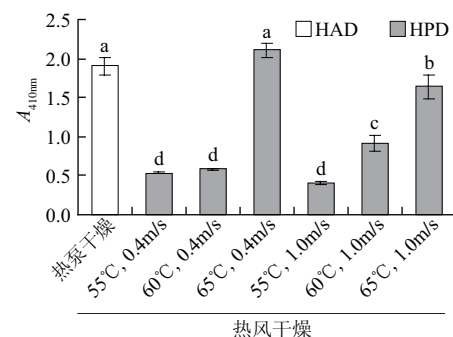


图4 热泵、热风干燥对荔枝干褐变度的影响

Fig.4 Effect of HPD and HAD on browning index of dried litchi

由图4可知, 热泵干燥温度65°C、0.4m/s时荔枝干果肉 $A_{410nm}$ 为 $2.10 \pm 0.10$ , 色泽最深, 略高于热风干燥, 但差异不显著。其次为热泵干燥65°C、1.0m/s, 然后为热泵干燥60°C、1.0m/s。热泵干燥其他条件荔枝干成品色泽最优, 果肉褐黄, 清亮。

### 2.5 热泵、热风干燥对成品荔枝干总酚含量的影响

由图5可知, 热泵干燥65°C、0.4m/s荔枝干总酚含量最高, 达 $(5.30 \pm 0.45)$ mg/g, 明显高于其他干燥条件。热泵干燥55°C、0.4m/s荔枝干总酚含量为 $(2.05 \pm 0.15)$ mg/g,

明显低于其他干燥条件,热泵干燥其他工艺条件所制得的荔枝干成品与热风干燥差异不显著。

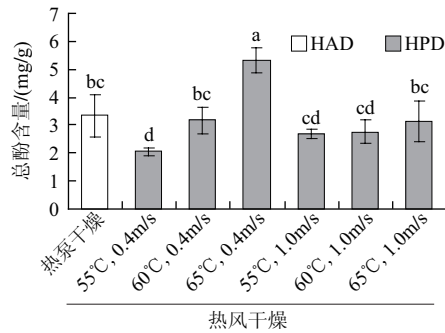


图5 热泵、热风干燥对荔枝干总酚含量的影响

Fig.5 Effect of HPD and HAD on total phenols in dried litchi

2.6 热泵、热风干燥对荔枝干挥发性风味物质影响的比较

2.6.1 热泵、热风干燥荔枝干典型挥发性风味物质分析

采用固相微萃取与气质联用法对不同干燥工艺制得的荔枝干果肉的挥发性风味物质进行分析所得质谱图,结合NIST05数据库经计算机检索,并按各峰的质谱裂片图与相关的一些文献资料<sup>[13-21]</sup>核对,从而确定了荔枝的香气成分,结果见表2。

表2 不同干燥工艺所得荔枝干挥发性风味物质相对含量

Table 2 Volatile flavor compounds identified in dried litchi processed by HPD and HAD										%	
序号	保留时间/min	化合物名称	分子式	热风干燥	热泵干燥						
					55°C, 0.4m/s	55°C, 1.0m/s	60°C, 0.4m/s	60°C, 1.0m/s	65°C, 0.4m/s	65°C, 1.0m/s	
1	1.563	乙醇	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	12.48	8.10	11.57	10.04	12.96	21.26	16.11	
2	1.733	二甲基硫醚	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S	2.22	1.13	—	1.24	—	2.42	—	
3	2.658	异戊醛	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	—	—	0.90	0.81	—	—	0.81	
4	2.746	2-甲基丁醛	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	2.33	—	1.89	1.13	—	1.36	—	
5	3.393	3-羟基-2-丁酮	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	2.45	9.86	7.04	—	7.27	0.96	4.78	
6	3.822	3-甲基-3-丁烯-1-醇	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	0.93	—	1.03	1.10	1.06	1.07	—	
7	3.944	异戊醇	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	2.16	3.40	1.25	—	2.69	—	4.20	
8	4.056	2-甲基-1-丁醇	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	—	—	1.48	—	—	—	—	
9	4.674	正戊醇	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	0.27	—	—	0.25	—	—	—	
10	4.849	3-甲基-2-丁烯-1-醇	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	0.92	1.48	0.88	1.07	1.61	1.97	1.12	
11	5.107	2,3-丁二醇	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	0.59	0.64	0.57	0.37	0.52	0.47	0.56	
12	5.380	(2R,3R)-(-)-2,3-丁二醇	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	0.58	0.68	0.55	0.30	0.68	0.47	0.58	
13	5.545	环戊烯	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	0.26	—	—	—	—	—	—	
14	6.480	糠醛	C <sub>5</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	4.59	0.85	0.55	2.16	1.50	3.33	5.43	
15	7.132	糠醇	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	0.30	—	—	—	—	—	—	
16	7.663	正己醇	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	—	0.32	—	0.81	—	0.54	0.36	
17	7.731	1,4-戊二烯	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	0.54	—	—	—	—	—	—	
18	8.744	2-丁氧基乙醇	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	0.70	—	—	—	1.07	0.98	—	
19	8.880	3-甲氧基丙醛	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	0.87	—	0.26	0.41	0.82	1.46	0.41	
20	8.973	丁内酯	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	0.71	—	—	—	—	—	—	
21	9.197	3,3-二甲基丙酸	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	—	0.37	—	—	—	—	—	
22	10.691	苯甲醛	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O	1.30	3.02	3.71	2.09	1.66	1.45	2.58	
23	11.334	1-辛烯-3-醇	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	—	0.99	0.60	—	1.00	—	—	
24	11.617	月桂烯	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	0.46	0.40	0.47	—	0.42	0.67	0.25	
25	11.743	2-甲基-6-庚烯-1-醇	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O	0.25	0.19	0.16	0.18	0.17	—	0.21	
26	11.938	正己酸乙酯	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub> O <sub>2</sub>	—	—	—	0.36	—	0.55	—	

续表2

序号	保留时间/min	化合物名称	分子式	热风干燥	热泵干燥						
					55°C, 0.4m/s	55°C, 1.0m/s	60°C, 0.4m/s	60°C, 1.0m/s	65°C, 0.4m/s	65°C, 1.0m/s	
27	11.982	2,3,5-三甲基吡嗪	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> N <sub>2</sub>	—	0.64	0.41	—	0.55	—	—	
28	12.761	间异丙基甲苯	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub>	0.09	0.04	0.09	0.12	0.09	0.20	—	
29	12.912	D-柠檬烯	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	0.61	0.42	0.57	0.72	0.67	0.81	0.28	
30	13.072	苯甲醇	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	0.59	1.26	1.53	0.99	1.25	1.13	1.36	
31	13.394	苯乙醛	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O	0.27	0.58	0.82	0.52	0.59	0.80	0.58	
32	13.983	2-乙酰基吡咯	C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> NO	0.16	—	—	—	—	0.28	0.27	
33	14.718	(+)-4-萜烯	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub>	0.56	—	0.83	0.42	0.81	0.83	0.36	
34	14.879	2,4-二甲基苯乙烯	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub>	0.24	—	0.21	0.28	0.27	0.24	0.12	
35	15.195	芳樟醇	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	0.61	0.62	0.49	0.54	0.66	0.38	0.49	
36	15.351	壬醛	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O	—	—	0.27	0.32	—	0.94	—	
37	15.604	苯乙醇	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	4.14	8.38	11.21	8.95	8.68	6.03	10.18	
38	16.008	玫瑰醚	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	0.37	0.80	0.27	0.28	0.32	0.45	0.35	
39	16.485	2,3-二氢-6-甲基-3,5-二羟基-四氢吡喃酮	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub>	0.60	—	—	0.16	0.25	0.71	0.48	
40	16.777	3,6-二氢-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙基)-二氢吡喃	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	0.28	0.23	0.28	0.22	0.34	0.24	0.29	
41	17.362	苯甲酸乙酯	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	—	—	0.23	—	0.20	—	0.29	
42	17.931	2-(4-甲基苯基)丙-2-醇	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O	0.56	0.52	0.49	0.59	0.94	0.31	0.50	
43	18.978	7-甲基-3-亚甲基-6-辛烯-1-醇	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	—	0.40	—	—	0.28	—	—	
44	19.265	橙花醇	C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O	—	—	—	0.43	1.39	0.61	0.62	
45	19.367	(R)-(+)-β-香茅醇	C <sub>10</sub> H <sub>18</sub> O	2.10	10.46	4.19	3.40	5.08	4.01	2.97	
46	19.927	苯乙酸乙酯	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	—	—	—	0.17	—	—	0.10	
47	20.219	香叶醇	C <sub>15</sub> H <sub>26</sub> O	0.71	3.13	2.04	2.07	2.54	1.11	1.94	
48	20.862	2-苯基巴豆醛	C <sub>10</sub> H <sub>10</sub> O	0.26	0.42	0.38	—	0.33	0.18	0.41	
49	22.887	3,7-二甲基-6-辛烯酸乙酯	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>2</sub>	—	—	0.12	—	0.13	—	0.11	
50	24.314	衣兰烯	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	0.17	0.12	0.14	0.22	—	0.11	0.10	
51	24.572	可巴烯	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	0.15	0.27	0.59	0.37	0.10	0.22	0.29	
52	25.039	2,6-二甲基-6-(4-甲基-3-戊烯基)-二氢[3.1.1]-2-庚烯	C <sub>13</sub> H <sub>24</sub>	0.56	—	—	—	—	—	—	
53	25.283	3,7-二甲基-2,6-辛二烯酸乙酯	C <sub>12</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	—	0.29	0.17	—	0.18	0.22	0.09	
54	26.154	石竹烯	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	0.82	1.28	2.78	1.94	1.32	1.44	0.93	
55	26.451	[S-(E,E)]-1-甲基-5-亚甲基-8-(1-甲基乙基)-1,6-环癸二烯	C <sub>13</sub> H <sub>24</sub>	0.21	0.14	0.17	0.23	0.13	0.18	0.14	
56	26.549	2,6-二甲基-6-(4-甲基-3-戊烯基)-二氢[3.1.1]-2-庚烯	C <sub>13</sub> H <sub>24</sub>	0.26	—	0.23	0.41	0.16	0.15	0.13	
57	27.099	(E)-β-金合欢烯	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	0.98	0.67	1.22	1.58	0.74	1.01	0.71	
58	27.849	1-(1,5-二甲基-4-己烯基)-4-甲基苯	C <sub>15</sub> H <sub>22</sub>	11.95	4.72	6.67	10.19	7.96	5.41	5.47	
59	28.165	[S-(R*,S*)]-5-(1,5-二甲基-4-乙基)-2-甲基-1,3-环己二烯	C <sub>13</sub> H <sub>24</sub>	11.33	3.07	6.22	7.36	4.22	5.81	5.88	
60	28.452	(S)-1-甲基-4-(5-甲基-1-亚甲基-4-乙基)-环己烯	C <sub>13</sub> H <sub>24</sub>	12.09	7.26	7.60	13.81	7.05	7.76	8.59	
61	28.632	(1S-顺式)-1,2,3,5,6,8a-六氢化-4,7-二甲基-1-(1-甲基乙基)-萘	C <sub>17</sub> H <sub>24</sub>	—	0.20	0.43	—	0.14	0.48	0.37	
62	28.749	[S-(R*,S*)]-3-(1,5-二甲基-4-乙基)-6-亚甲基-环己烯	C <sub>13</sub> H <sub>24</sub>	2.20	0.63	1.01	1.71	1.01	0.88	1.08	
63	29.431	γ-覆香烯	C <sub>15</sub> H <sub>24</sub>	—	—	0.06	0.11	0.09	0.08	0.07	
64	33.613	邻苯二甲酸二异丁酯	C <sub>16</sub> H <sub>22</sub> O <sub>4</sub>	0.05	0.05	—	—	—	0.04	0.05	
65	34.329	十六酸甲酯	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	—	—	0.07	—	0.07	0.08	—	
66	35.161	十六酸乙酯	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	0.06	0.14	0.18	0.13	0.19	0.17	0.20	

由表2可知,热风干燥荔枝干成品共检测出49种挥发性风味,所占比例较大的为乙醇(12.48%)、异戊醇(2.16%)、苯乙醇(4.14%)、(R)-(+)-β-香茅醇(2.10%)、二甲基硫醚(2.22%)、2-甲基丁醛(2.33%)、糠醛(4.59%)、苯甲醛(1.30%)、3-羟基-2-丁酮(2.45%)、1-(1,5-二甲基-4-己烯基)-4-甲基苯(11.95%)、[S-(R\*,S\*)]-5-(1,5-二甲基-4-乙基



基)-2-甲基-1,3-环己二烯(11.33%)、(S)-1-甲基-4-(5-甲基-1-亚甲基-4-乙烯基)-环己烯(12.09%)和[S-(R\*,S\*)]-3-(1,5-二甲基-4-乙烯基)-6-亚甲基-环己烯(2.20%)。热泵干燥荔枝干成品按不同工艺分别检测出41~49种挥发性风味物质,除上述风味物质外,含量较高的还有3-甲基-2-丁烯-1-醇、苯甲醇、香叶醇、石竹烯和(E)- $\beta$ -金合欢烯。

香叶醇具有典型柑橘香气;柠檬烯具有令人愉快的柠檬香气;芳樟醇具有花香香气,且阈值较低;香茅醇具有浓厚的甜香香气;橙花醇具有玫瑰香气<sup>[22]</sup>。据文献报道<sup>[22-24]</sup>,芳樟醇、香叶醇、香茅醇、柠檬烯等是荔枝的典型香气成分,对构成荔枝香气起着重要作用。热风干燥荔枝干果肉上述挥发性风味物质的含量占其总峰面积的4.01%;而热泵干燥各工艺条件下含量分别为5.68%~14.63%,高于热风干燥,且较低的热泵干燥温度有利于上述挥发性风味物质的保留。

## 2.6.2 不同干燥工艺条件下荔枝干挥发性物质数量和峰面积分析

热风干燥与热泵干燥不同工艺条件下(实验号1~6),分别检测出挥发性风味物质数量为49种、41种、49种、44种、48种、49种和47种,分别占总峰面积的87.88%、78.15%、84.92%、81.61%、82.17%、82.25%和83.21%。从挥发性风味物质数量上来看热风干燥要优于热泵干燥。由图6挥发性风味物质峰面积可知,除热泵干燥55℃、1.0m/s条件外,热泵干燥峰面积相比热风干燥高3.47%~35.34%。

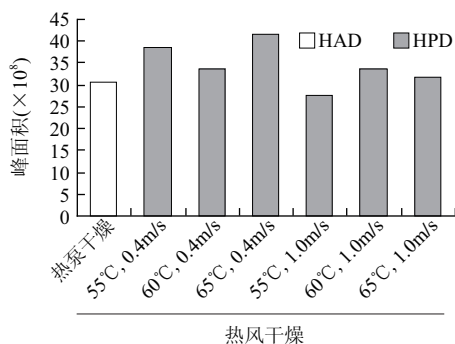


图6 不同干燥方式对荔枝干峰面积的影响

Fig.6 Effect of HPD and HAD on peak areas of volatile flavor compounds in dried litchi

## 2.6.3 不同干燥工艺条件下荔枝干挥发性风味物质相对含量分析

根据表2,对挥发性风味物质的相对含量进行统计归纳,如图7所示。总体来看,醇类和烯类物质相对含量较高,是构成荔枝干风味物质最重要的主体成分,其次是芳香烃类、醛类、酮类、醚类,而杂环类、酯类和酸类相对含量小,对荔枝干风味的贡献不大。与热风干燥相比,热泵干燥荔枝干挥发性风味物质中醇类物质相对含量较高,而烯类物质较低。对荔枝香气有重要贡献的香

叶醇、香茅醇等物质的含量,热泵干燥普遍高于热风干燥。*D*-柠檬烯、月桂烯等呈香烯类物质的含量热泵与热风干燥差异不大。不同干燥方式荔枝干挥发性风味物质中醛类物质总体变化不规律,但糠醛含量热风干燥要高于热泵干燥,且随热泵干燥温度的升高呈上升趋势。

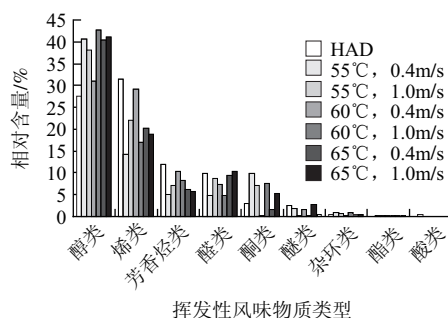


图7 不同干燥工艺对荔枝干挥发性风味物质相对含量的影响

Fig.7 Effect of HPD and HAD on relative contents of volatile flavor compounds in dried litchi

## 3 讨论

干燥过程中物料发生的物理和化学变化会直接影响终产品的品质。热泵干燥由于相对温和的干燥温度,在热敏性物料干燥领域中得到广泛应用,使得人们在低能耗和获得高品质产品间得到了平衡<sup>[25]</sup>。对实验结果进行分析,发现热泵干燥制得的荔枝干成品果肉可滴定酸度、复水率、总糖含量和褐变度等理化指标高于热风干燥,说明热泵干燥制得的荔枝干成品品质较优。

Maillard反应是食品加工过程中广泛存在的一种非酶褐变,是羰基类化合物(还原糖)和氨基化合物(氨基酸和蛋白质)经过3个阶段的复杂反应,最终生成棕色或黑色的类黑精<sup>[26]</sup>。分析荔枝干总糖含量与褐变度之间的关系,发现热风干燥制得的荔枝干果肉总糖含量较热泵干燥低,且果肉褐变程度大。因此我们推测,热风干燥的荔枝果肉,总糖中部分还原糖与含有游离氨基的化合物发生剧烈的Maillard反应,是其褐变程度较大,总糖含量较低的可能原因。

热风干燥制得的荔枝干果肉比热泵干燥检测到更多的糠醛物质。糠醛具有焦糊味,该物质在柑桔浓缩汁和120℃、30min处理后草莓浆中检测到<sup>[27]</sup>,与果汁风味的劣变有很大的相关性<sup>[28]</sup>。荔枝热泵干燥65℃条件和热风干燥制得的荔枝干果肉褐变度较大,相对应的糠醛含量也较高,经相关性分析后发现荔枝干果肉褐变程度于糠醛含量在 $P=0.01$ 水平上呈显著正相关。推测干燥温度越高,干燥过程中荔枝果肉Maillard反应越剧烈,生成的糠醛含量高,褐变程度大。

## 4 结 论

- 4.1 热泵干燥各工艺条件制得的荔枝干品质优于热风干燥。
- 4.2 热风干燥与热泵干燥不同工艺条件下, 分别检测出挥发性风味物质数量为49种、41种、49种、44种、48种、49种和47种, 其中醇类、烯类为荔枝干果肉挥发性风味物质重要的主体成分。
- 4.3 对挥发性风味物质中芳樟醇、香叶醇、香茅醇、柠檬烯等荔枝典型香气成分相对含量总和, 热泵干燥的荔枝干高于热风干燥。其中香叶醇、香茅醇等物质的含量, 热泵干燥普遍高于热风干燥。
- 4.4 不同干燥方式的荔枝干果肉糠醛含量, 热风干燥高于热泵干燥, 糠醛含量随热泵干燥温度的升高呈上升趋势, 且与果肉褐变程度呈显著正相关。

## 参考文献:

- [1] 肖维强, 蔡长河. 荔枝综合加工技术[J]. 中国南方果树, 2004, 33(5): 58-60.
- [2] 郑春明. 热泵在农副产品干燥中的应用[J]. 粮油加工与食品机械, 1997(2): 26-28.
- [3] NESLIHAN C, ARIF H. A review of heat-pump drying (HPD): Part 2. Applications and performance assessments[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50: 2187-2199.
- [4] FABIANO A N F, SUELI R, CHUNG L L, et al. Drying of exotic tropical fruits: a comprehensive review[J]. Food Bioprocess Technol, 2011, 4: 162-185.
- [5] SHI Qilong, XUE Changhu, ZHAO Ya, et al. Optimization of processing parameters of horse mackerel (*Trachurus japonicus*) dried in a heat pump dehumidifier using response surface methodology[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 87: 74-81.
- [6] 陈坤杰, 李娟玲, 张瑞合. 热泵干燥技术的应用现状与展望[J]. 农业机械学报, 2000, 31(3): 109-111.
- [7] 李丹. 苯酚-硫酸法测定食品总糖方法的应用和改进[J]. 中国卫生检验杂志, 2003, 13(4): 506.
- [8] SUN Jie, CHU Yifang, WU Xianzhong, et al. Antioxidant and antiproliferative activities of common fruits[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50: 7449-7454.
- [9] SINGLETON V L, ORTHOFER R, LAMUELA-RAVENTOS R M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent[J]. Methods in Enzymology, 1999, 299: 152-178.
- [10] 曾绍校, 梁静, 郑宝东, 等. 不同干燥工艺对莲子品质的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 227-231.
- [11] 张百刚. 红枣多酚氧化酶(PPO)特性及抑制其酶促褐变的研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2006.
- [12] 宋洪波, 毛志怀. 干燥方法对植物产品物理特性影响的研究进展[J]. 农业机械学报, 2005, 36(6): 117-121.
- [13] LI C, HAO J, ZHONG H, et al. Aroma components at various stages of litchi juice processing[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2009, 89(14): 2405-2414.
- [14] ONG P K, ACREE T E. Gas chromatography/olfactory analysis of lychee (*Litchi chinesis* Sonn.)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(6): 2282-2286.
- [15] ONG P K, ACREE T E. Similarities in the aroma chemistry of Gewürztraminer variety wines and lychee (*Litchi chinesis* Sonn.) fruit[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(2): 665-670.
- [16] 蔡长河, 陈玉旭, 曾庆孝, 等. 半干型荔枝干加工过程中香气物质的变化[J]. 食品科学, 2009, 30(24): 266-271.
- [17] 郝菊芳, 徐玉娟, 李春美, 等. 不同品种荔枝香气成分的 SPME/GC-MS分析[J]. 食品科学, 2007, 28(12): 404-408.
- [18] 蔡长河, 郭际, 曾庆孝. 荔枝及其干制后香气成分的研究[J]. 食品科学, 2007, 28(9): 455-461.
- [19] 郝菊芳. 荔枝汁加工中营养和典型香气成分的变化研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- [20] 徐禾礼. 荔枝汁香气成分的研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2009.
- [21] 徐禾礼, 余小林, 胡卓炎, 等. 七个荔枝品种果实香气成分的提取与分析研究[J]. 食品与机械, 2010(2): 23-26.
- [22] 马斯H, 贝耳兹R, 徐汝撰. 芳香物质研究手册[M]. 林祖铭, 译. 北京: 中国轻工业出版社, 1989.
- [23] PETER K C O, TERRY E A. Gas chromatography/olfactory analysis of lychee (*Litchi chinesis* Sonn.)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(6): 2282-2286.
- [24] CHYAN C C, KO P T, CHANG C H, et al. Free and glycosidically bound aroma compounds in lychee[J]. Food Chemistry, 2003, 80: 387-392.
- [25] FATOUH M, METWALLY M N, HELALI A B, et al. Herbs drying using a heat pump dryer[J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47: 2629-2643.
- [26] AJANDOUZ E H, DESSEAUX V, TAZI S, et al. Effects of temperature and pH on the kinetics of caramelisation, protein cross-linking and Maillard reactions in aqueous model systems[J]. Food Chemistry, 107(3): 1244-1252.
- [27] 陈计宙. 梨香气成分分析、变化及理化特征指标的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [28] 任述荣, 赵晋府. 果汁风味劣变因素的研究[J]. 食品与发酵工业, 2002, 28(5): 70-75.