

间歇式红外辅助热泵干燥对龙眼品质及挥发性成分的影响

朱经楠^{1,2}, 彭健², 谢子权², 余元善², 唐道邦², 辜青青^{1*}, 徐玉娟^{2*}

(¹江西农业大学农学院 南昌 330045

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 广州 510610)

摘要 采用不同干燥温度结合间歇式红外辅助热泵干燥龙眼,研究干燥条件对龙眼干燥特性、色泽、复水性、抗氧化活性以及挥发性成分的影响。结果表明:间歇式红外辅助热泵干燥能显著缩短干燥时间,提升干燥龙眼品质。与单一热泵干燥相比,间歇红外辅助干燥的时间可缩短 25%~28.6%,复水比增加 2.65%~8.21%;间歇红外辅助干燥龙眼总色差值较单一热泵干燥明显降低,色泽均匀性提升,FRAP 铁离子还原力显著提高 4.42%~17.95%;干燥使龙眼挥发性成分中醇类、醛类、酮类和酯类物质种类或含量增加,香叶基丙酮、正辛醇、癸酸乙酯等特有挥发性物质仅在间歇式红外辅助干燥龙眼中测得,表明间歇式红外辅助能有效丰富龙眼干的香气种类。结论:60℃热泵条件下每 5 min 辅助红外 2 min 是间歇式红外辅助热泵干燥的最优处理条件,有利于龙眼干的品质和挥发性物质的形成。

关键词 间歇式红外; 热泵干燥; 龙眼; 品质; 挥发性物质

文章编号 1009-7848(2024)01-0190-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.01.020

龙眼(*Dimocarpus longan* Lour.)俗称桂圆,是无患子科龙眼属常绿果树,盛产于我国广东、福建、广西、海南等热带亚热带地区。龙眼果实营养丰富,且富含多糖、多酚、类黄酮等天然生物活性物质,自古受人们喜爱,被视为珍贵补品^[1]。现代医学证实龙眼具有抗衰老和增强免疫力等功效,是益气补血的佳品^[2-3]。然而,龙眼成熟于高温、高湿的季节,采后鲜果呼吸代谢旺盛,易腐烂变质。干制加工作为龙眼加工最主要的方式,在降低其水分含量,延长货架期的同时,亦能改变龙眼的外观品质、化学组成和挥发性香气成分,从而影响整体产品品质^[4]。

目前,龙眼的干燥方式多种多样,不同干燥方式干燥过程的能耗、效率各有优劣,对产品品质的影响各异。热泵干燥为一种从低温热源吸收热量,

并将所吸收的热量在较高温度下作为有效热能加以利用的干燥方式,有节能环保、安全稳定的优点。而热泵干燥与热风干燥类似,均以热风作为导热介质,对物料进行由表及里的干燥,干燥过程存在耗时较长且部分物料干燥不均匀的问题^[5-6]。红外辐射可以缩短干燥时间,保持产品内温度均匀,提高能源效率,杀灭微生物,抑制酶促反应,从而提高产品品质^[7-8]。前期研究表明,红外辅助热泵干燥是一种能有效缩短果蔬物料干燥时间且改善产品品质的有效方法。Aktas 等^[9]比较单一热泵和红外辅助热泵干燥对胡萝卜干燥时间的影响,发现在 45℃和 55℃两个干燥温度下,红外辅助热泵干燥比单一热泵干燥时间减少 49%以上。Song 等^[10]对山药片的研究表明,红外辅助热泵干燥比单一热泵干燥耗时短,色泽优。在龙眼干燥方面,Nathakaranakule 等^[11]采用不同远红外功率(250, 350, 450 W)辅助热泵(55℃)干燥龙眼,发现其干燥速率、色泽、感官品质均优于单一热泵干燥,且在远红外辅助作用下,龙眼果肉更易形成多孔结构,孔隙率随远红外功率的增大而增加。相关研究多为红外热泵分段干燥或红外全程辅助热泵干燥对龙眼理化品质的影响,对红外间歇式辅助热泵干燥龙眼品质及香气影响的研究报道较少。本文以新鲜龙眼为研究对象,以单一热泵干燥为对照,

收稿日期: 2023-01-04

基金项目: 广东省省级科技计划项目(2018B020241003); 广东省农业科学院学科团队建设项目(202109TD); 科技创新战略专项资金(高水平农科院建设)(R2019YJ-YB3009, 2020QD-032, R2022PY-QF004); 茂名市科技计划项目(KJ052)

第一作者: 朱经楠,男,硕士生

通信作者: 辜青青 E-mail: qingqinggu2006@126.com
徐玉娟 E-mail: guoshuxuyujuan@163.com

采用自行改造的红外辅助热泵干燥设备, 研究不同干燥温度下, 间歇红外辅助干燥对龙眼的干燥特性、色泽、复水性、抗氧化活性以及挥发性成分的影响, 以为龙眼的高品质干制加工提供参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

“储良”龙眼购于广州市水果市场, 剪枝、除杂后清洗, 去壳、去核后备用, 果肉初始水分含量 (81.1±13)%。

Trolox 试剂, 福晨(天津)化学试剂有限公司; FRAP 法总抗氧化能力测定(T-AOC)检测试剂盒, 南京建成生物工程研究所; 环己酮(色谱纯), 天津市大茂化学试剂厂。其它试剂均为国产色谱纯或分析纯级。

1.2 仪器与设备

101-2A 数显电热鼓风干燥箱, 上海沪南科学仪器厂; CR22G III 高速冷冻离心机, 日本日立公司; Infinite M200PRO 酶标仪, 瑞士 TECAN 公司; Ultra Scan VIS 型全自动色差仪, 美国 Hunter Lab 公司; UV1800 型紫外可见分光光度计, 日本岛津公司; 热泵干燥机, 广东威尔信实业有限公司; GC-MS 7980A 气相色谱-质谱联用仪, 美国 Agilent 公司; Tc-08 热电偶数据记录仪, SMPW-T-M T 型热电偶, 美国 Omega-Engineering 公司。

1.3 方 法

1.3.1 龙眼干燥工艺 采用自行改造的热泵干燥机(图 1)进行干燥。该设备在干燥室顶部加装了 2 根红外灯管, 总功率 2 kW, 可通过操作界面控制红外灯管开关, 所产生的红外线可使物料快速升温, 推动内部水分向外扩散, 加速干燥过程。干燥过程设定热泵干燥的参数: 温度 60 ℃或 70 ℃, 湿度 20%, 风速 1.8 m/s; 红外灯管的开启设置为每 5 min 开 1 min 或 2 min, 记为 IR1/5、IR2/5。以单一热泵干燥(HP)作为对比, 则按不同红外辅助时间可将各处理组分为 6 组: HP60 ℃, HP60 ℃+IR1/5, HP60 ℃+IR2/5, HP70 ℃, HP70 ℃+IR1/5, HP70 ℃+IR2/5。样品干至水分含量低于 20%后停止干燥。

1.3.2 龙眼水分含量的测定 参考《食品水分的测定》(GB 5009.3-2016)^[12], 采用直接干燥法测定。

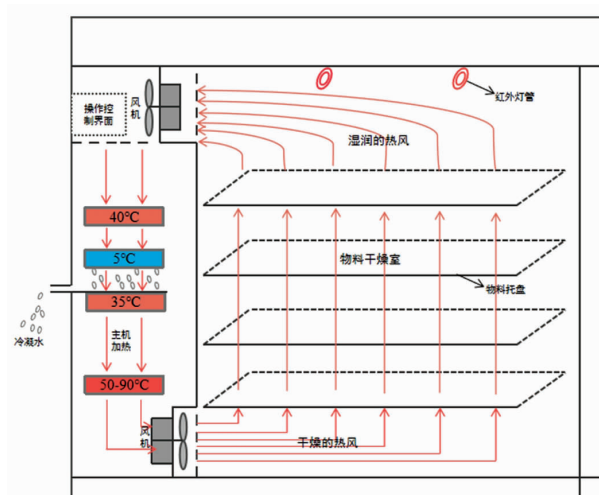


图 1 改造的热泵干燥机示意图

Fig.1 Schematic plot of the renovated heat pump dryer

1.3.3 干燥环境与龙眼内部温度的测定 温度的测定参考本课题组前期方法^[13], 略作修改, 龙眼干燥过程温度变化采用 T 型热电偶和热电偶数据记录仪测定。具体操作方法: 干燥前, 将热电偶丝的测量端插入龙眼的中心, 用于测量龙眼温度; 同时将另一热电偶丝的测量端放置在干燥箱内, 用于测量干燥箱内环境温度, 连接端连接热电偶数据记录仪, 每隔 1 min 采集一次数据并记录, 直至干燥结束。

1.3.4 色泽的测定 色泽采用自动色差计测定, 结果以 L 值、 a 值、 b 值、 ΔE 值表示。 L 值越大, 颜色越亮; a 值越大, 颜色越红; b 值越大, 颜色越黄; ΔE 值越小, 表明干燥样品色泽越接近鲜样。每组样品平行测定 5 次。总色差用 ΔE 表示, ΔE 按下式计算:

$$\Delta E = \sqrt{(L-L_0)^2 + (a-a_0)^2 + (b-b_0)^2} \quad (1)$$

式中, L 、 a 和 b ——样品干燥后的色泽值; L_0 、 a_0 和 b_0 ——鲜样的色泽; ΔE ——干燥样品与鲜样之间的色泽差异。

1.3.5 复水率的测定 随机取各组样品中 5 颗龙眼干 (m_1) 置于 40 ℃的蒸馏水中充分吸水, 每隔 5 min 取出, 用滤纸反复吸附龙眼表面水分, 然后准确称量 (m_2), 待前、后 2 次数据相差不大后结束。复水率= m_2/m_1 , 每组试验重复 3 次。

1.3.6 抗氧化活性的测定 将干燥龙眼用液氮冷冻后打粉, 准确称取 5 g 粉末置于 25 mL 离心管

中,加入 10 mL 80%甲醇溶液,用超声波提取 30 min (25 ℃) 后离心 (8 000 r/min, 10 min), 取上清液, 再重复上述操作 1 次, 合并上清液, 最后用 80%甲醇溶液定容至 25 mL。此溶液为龙眼多酚提取液, 随后采用 DPPH 法和 FRAP 法测定^[14-15]其抗氧化活性。各组平行测定 3 次, 样品结果以 Trolox 当量表示 ($\mu\text{mol/g}$ 干基)。

1.3.7 风味物质的测定 风味物质的测定参考 Yi 等^[16]的方法, 采用 GC-MS 法测定。手动进样法: 取 2 g 剪碎的龙眼干样品于 15 mL 顶空瓶中, 再加入 5 μL 0.2 mg/mL 的环己酮 (内标物), 在温度为 40 ℃ 的集热式恒温加热磁力搅拌器中水浴 20 min, 然后将老化后的萃取针插入萃取 30 min, 随后取出萃取针并插入 GC-MS 进样器中解吸 5 min, 测定不同干燥条件下龙眼干挥发性物质含量。

GC-MS 条件: 色谱柱: DB-5MS 色谱柱 (30 m \times 0.25 mm, 0.25 μm); 载气: He, 流速 1.0 mL/min, 不分流进样, 进样口温度 250 ℃。升温程序: 起始温度为 40 ℃, 保持 2 min, 以 4 ℃/min 升温到 160

℃, 保持 0 min, 再以 50 ℃/min 的速度升温到 280 ℃, 最后保持 2 min; 电子电离源: 离子源温度 230 ℃; 电子能量 70 eV; 溶剂延迟 3 min; 质量扫描范围 30~550 u。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 处理, 用 Origin 2017 软件绘制图形, 用 SPSS 19.0 软件统计分析显著水平 ($P < 0.05$)。用 Adobe Photoshop (21.0.1 版) 进行图片标准化处理。

2 结果与分析

2.1 不同干燥条件对龙眼温度及干燥特性的影响

不同处理条件下, 龙眼的温度变化与干燥特性如图 2 所示。由龙眼干燥过程温度变化曲线表明, 红外间歇辅助干燥的龙眼升温速度明显快于单一热泵干燥的样品, 达到设定温度的时间显著减少; 在间歇式红外作用下, 龙眼本身的温度与环境温度均存在波动性, 且红外辅助时间越长波动越明显; 在干燥后期由于红外辐射的作用环境温

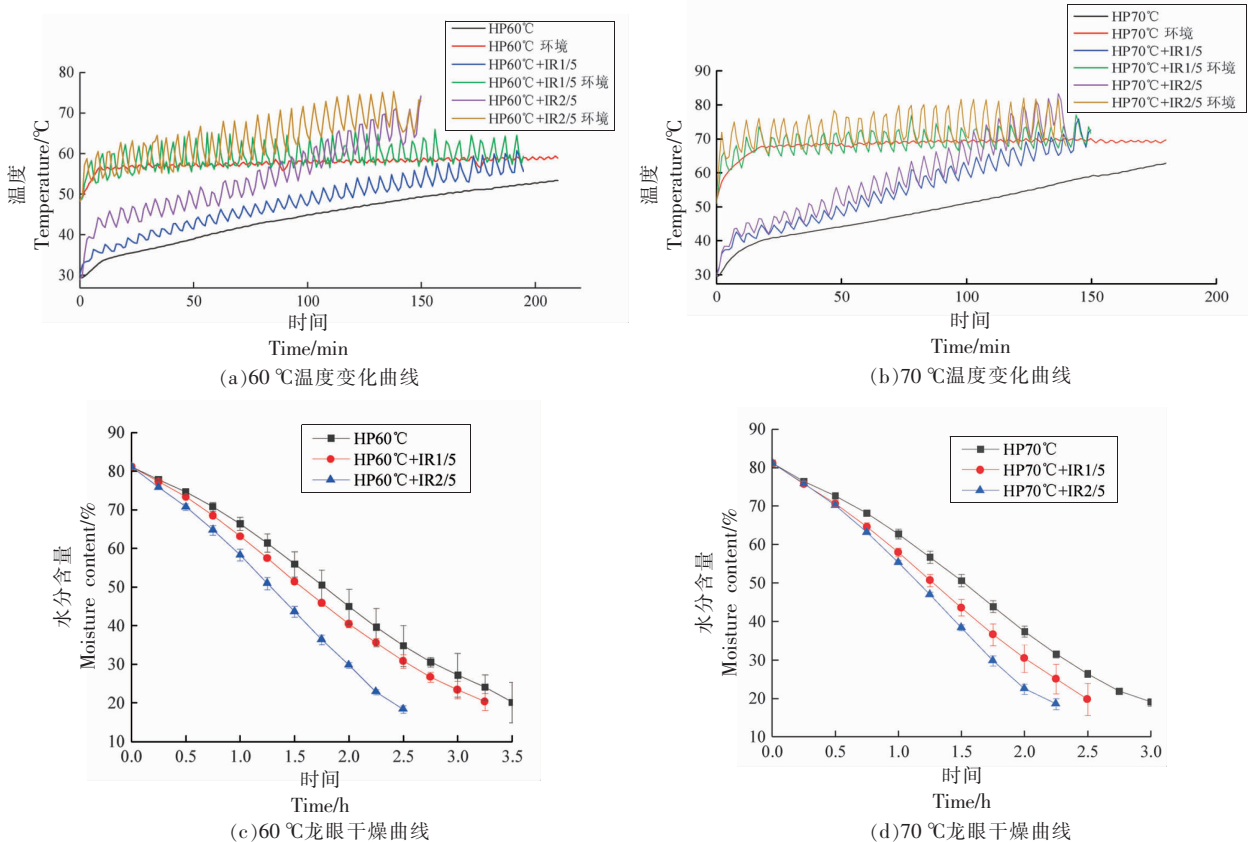


图 2 实时温度变化曲线与龙眼干燥曲线

Fig.2 Real time temperature change curve and longan drying curve

度略高于设定值,这在很大程度上加快了龙眼的干燥速率(图 2a 和 2b)。红外间歇辅助干燥时间的长短对龙眼干燥速率影响显著,红外间歇辅助时间越长,水分扩散速度越快,干燥时间越短,70℃单一热泵干燥龙眼耗时 3 h,当赋予 IR1/5 和 IR2/5 时,相应的干燥时间分别缩短至 2.5 h 和 2.25 h(图 2d),这是因为红外辐射能够穿透物料表层,且能量直接与物料内部的水分耦合,形成物料内、外湿度差,进而加快水分向外扩散迁移^[17-18]。

2.2 不同红外辅助热泵干燥条件对龙眼色泽的影响

不同红外辅助热泵干燥条件下龙眼的亮度(L 值)、红度(a 值)、黄度(b 值)和总色差(ΔE)如表 1 所示。从 L 值和 a 值来看,红外辅助与单一热泵干燥对龙眼亮度和红度值无显著性影响,然而从 b 值的角度看,红外辅助可以有效降低黄度值,使其

更接近新鲜龙眼的颜色,红外辅助热泵干燥所得龙眼的 ΔE 值均小于单一热泵干燥,表明红外辅助热泵干燥能有效地阻止龙眼色泽劣变,且随着干燥温度的升高, ΔE 值逐渐增大,这与林羨等^[19]、Artanaseaw 等^[20]的结果一致。这可能是由于高温促进了龙眼中过氧化物酶的酶促反应进程,导致褐变更加严重。图 3 为不同处理所得样品实物图和经过 Adobe Photoshop 标准化处理后的龙眼,由图 3 可知,干燥龙眼与新鲜龙眼样品存在明显的视觉色彩差异,且随着干燥温度的升高,差异明显。经标准化处理后可直观观察样品色泽均匀程度变化(图 3b),无论何种干燥温度,经间歇式红外辅助干燥后样品的褐变程度均明显降低,样品表面色泽更为均匀,进一步表明间歇式红外辅助干燥可以提高热泵干燥龙眼的均匀性。这可能是由于红外辅助热泵干燥的时间较短,而干燥时间长容

表 1 不同红外辅助热泵干燥条件下龙眼色泽

Table 1 Color of longan pulp dried with different infrared radiation assisted heat pump drying

指标	Fresh	HP60℃	HP60℃+IR1/5	HP60℃+IR2/5	HP70℃	HP70℃+IR1/5	HP70℃+IR2/5
L	48.11 ± 0.28 ^c	43.66 ± 0.55 ^b	43.37 ± 0.81 ^b	42.57 ± 1.09 ^{ab}	41.73 ± 1.07 ^a	41.37 ± 0.94 ^a	40.85 ± 1.53 ^a
a	-1.48 ± 0.17 ^a	2.14 ± 0.54 ^c	1.46 ± 0.28 ^b	1.51 ± 0.37 ^{bc}	1.67 ± 0.78 ^{bc}	1.64 ± 0.41 ^{bc}	1.46 ± 0.22 ^b
b	1.11 ± 0.29 ^a	18.33 ± 0.48 ^c	15.82 ± 0.99 ^b	14.90 ± 0.82 ^b	19.20 ± 1.03 ^c	17.05 ± 0.88 ^{bc}	18.67 ± 0.64 ^c
ΔE	-	18.16 ± 0.48 ^b	15.76 ± 0.68 ^a	14.85 ± 0.83 ^a	19.47 ± 0.88 ^c	17.61 ± 0.67 ^b	18.91 ± 0.85 ^{bc}

注:同行不同肩标小写字母表示差异显著($P < 0.05$),下同。

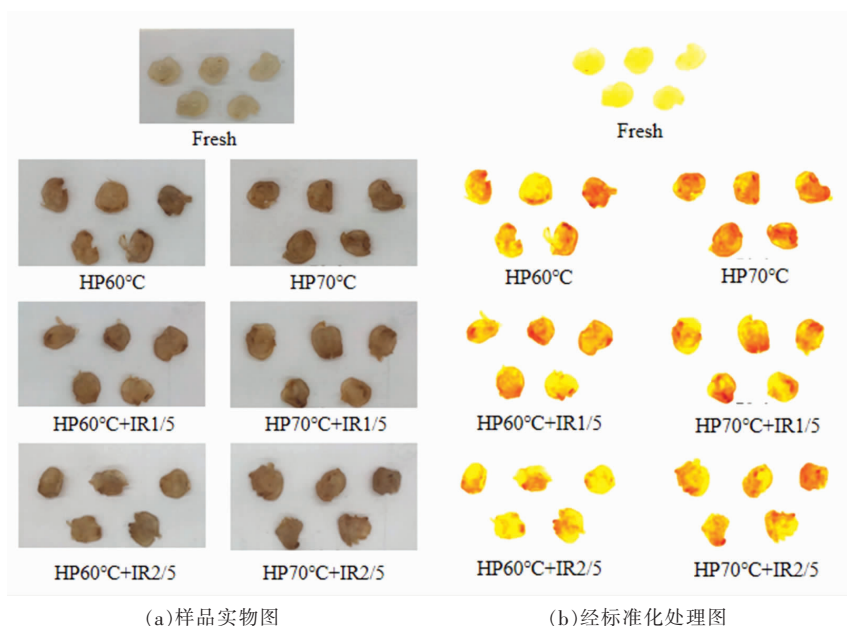


图 3 不同红外辅助热泵干燥样品图

Fig.3 Drying samples of different infrared assisted heat pumps

易增加发生各类化学反应的几率,且加剧反应强度^[21],所以红外辅助干燥龙眼色泽均匀性更好,这与郭玲玲等^[22]的结果类似。

2.3 不同红外辅助热泵干燥条件对龙眼复水特性的影响

复水比是衡量果蔬干制品品质的重要指标,也可从侧面反映样品干燥过程中细胞结构损伤程度^[23]。由图4可知,经间歇式红外辅助干燥,样品的复水速率和平衡复水比均高于同一温度条件下单一热泵干燥的样品,干燥温度为60℃和70℃

时,红外辅助干燥龙眼平衡复水比与单一热泵干燥相比分别提升了2.65%和8.21%。这可能是因为红外辐射热量能进入物料内部,内部水分快速扩散,随之形成更为疏松的多孔结构,孔隙率增大,有利于复水过程水分的传递,导致其复水速率和复水比相较单一热泵干燥有所提高^[11]。随干燥温度的升高,样品的平衡复水比减小,这与杨韦杰等^[24]的结果类似,这是因为高温对龙眼果肉组织结构破坏更加严重,不利于样品水分的保持。

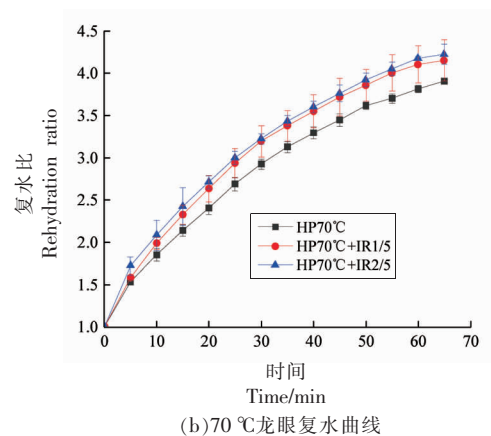
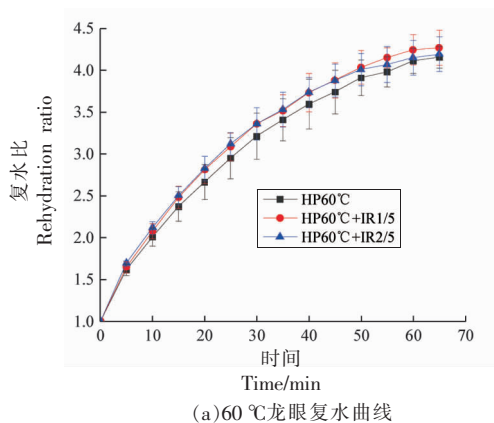
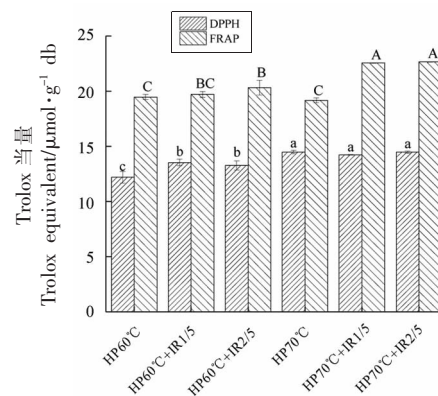


图4 不同红外辅助热泵干燥条件下龙眼的复水特性

Fig.4 Rehydration characteristics of longan under different infrared assisted heat pump drying conditions

2.4 不同红外辅助热泵干燥条件对龙眼抗氧化活性的影响

通过测定龙眼80%甲醇提取物的DPPH自由基清除力和FRAP铁离子还原力,对不同红外辅助热泵干燥条件下的龙眼抗氧化活性进行评价,结果如图5所示。总体而言,随着干燥温度的升高,龙眼DPPH自由基清除力和FRAP铁离子还原力都呈一定程度的上升趋势,且经间歇式红外辅助干燥的龙眼FRAP铁离子还原力较单一热泵干燥的样品均有所提高(4.42%~17.95%)。龙眼抗氧化活性与其含有的多酚类物质密切相关,在干燥过程中,干燥温度与时间均是影响多酚类物质的重要因素。HP70℃+IR2/5处理组样品测定的DPPH和FRAP抗氧化活性最高,Trolox当量分别为14.48 μmol/g(干基)和22.65 μmol/g(干基),这是因为一方面红外间歇辅助干燥的龙眼样品其干燥时间较单一热泵干燥显著减少,利于多酚物质



注:图中不同字母表示具有显著性差异($P < 0.05$)。

图5 不同红外辅助热泵干燥条件下龙眼的抗氧化活性

Fig.5 Antioxidant activity of longan under different infrared assisted heat pump drying conditions

的保留,另一方面,HP70℃+IR2/5组干燥过程中快速的升温可导致龙眼多酚氧化酶活力下降,从而抑制酶促褐变反应。Edidiong等^[25]在红外干燥红

心火龙果的研究中也获得了类似的结果。

2.5 不同红外辅助热泵干燥条件对龙眼挥发性成分的影响

由表 2 可知,对龙眼鲜果及不同红外辅助热泵干燥龙眼挥发性物质进行半定量分析,7 组不同样品中分离鉴定出挥发性物质 44 种,其中龙眼鲜样及不同温度下红外辅助干燥的龙眼挥发性物质种类存在显著差异。鲜样、HP60°C、HP60°C+IR1/5、HP60°C+IR2/5、HP70°C、HP70°C+IR1/5、HP70°C+IR2/5 等处理组中分别检测出 27、35、36、36、

30、35、35 种挥发性成分,共有成分 16 种,其中含量较高的 β -罗勒烯、别罗勒烯、反式- β -罗勒烯、对薄荷-1,3,8-三烯等、 β -罗勒烯及其同分异构体被认为是新鲜龙眼和龙眼干中主要的香气成分^[26],不同样品中 β -罗勒烯的含量为 586.52~1 431.91 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (干基),表明干燥后龙眼典型特征香气仍占主导。

将不同处理组所得挥发性物质按照化学结构分为 6 类,分别为烯烃类 14 种、醇类 7 种、酯类 7 种、醛类 4 种、酮类 2 种以及其它类 10

表 2 不同红外辅助热泵干燥条件下龙眼挥发性成分

种类	序号	名称	质量浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (干基)						
			新鲜样品	HP60°C	HP60°C+IR1/5	HP60°C+IR2/5	HP70°C	HP70°C+IR1/5	HP70°C+IR2/5
醇类	1	2-甲基-1-丁醇	-	15.52 ± 1.97	14.66 ± 1.09	16.45 ± 4.17	16.10 ± 1.75	16.86 ± 3.27	14.82 ± 1.11
	2	正己醇	-	6.50 ± 0.66	3.33 ± 0.73	-	-	2.94 ± 0.69	1.62 ± 0.14
	3	庚醇	-	13.45 ± 1.31	11.86 ± 1.88	12.69 ± 0.48	-	13.40 ± 0.86	11.33 ± 0.90
	4	4-乙基-三苯基甲醇	7.64 ± 0.97	5.37 ± 0.54	3.56 ± 0.73	4.33 ± 0.90	3.99 ± 0.40	3.19 ± 0.39	4.38 ± 1.01
	5	正辛醇	13.44 ± 1.71	-	-	-	-	4.90 ± 0.22	3.84 ± 0.21
烯烃	6	芳樟醇	8.77 ± 0.52	8.64 ± 1.19	10.50 ± 1.28	9.25 ± 2.26	5.73 ± 1.48	5.42 ± 0.40	5.62 ± 0.22
	7	壬醇	11.55 ± 1.65	20.92 ± 1.70	16.95 ± 2.14	16.16 ± 1.62	6.09 ± 0.55	18.01 ± 1.23	13.14 ± 1.16
	8	β -月桂烯	5.38 ± 0.57	-	3.84 ± 0.19	4.34 ± 0.43	4.69 ± 0.57	3.62 ± 0.35	4.13 ± 0.73
	9	对薄荷-1,3,8-三烯	19.19 ± 0.94	25.13 ± 1.20	15.52 ± 1.41	21.52 ± 3.53	21.24 ± 2.00	15.90 ± 0.77	18.08 ± 1.94
	10	2,7-二甲基-1,3,7-八碳三烯	-	2.09 ± 0.20	1.44 ± 0.05	2.65 ± 0.76	2.42 ± 0.42	1.54 ± 0.15	2.20 ± 0.61
	11	对伞花烃	9.32 ± 0.55	8.13 ± 0.36	6.56 ± 0.36	6.40 ± 0.58	6.16 ± 0.75	4.97 ± 0.17	5.14 ± 0.64
	12	右旋柠檬烯	-	9.09 ± 0.65	9.05 ± 0.80	12.64 ± 3.14	4.63 ± 0.22	4.28 ± 0.43	3.56 ± 0.40
	13	3,7,7-三甲基-1,3,5-环庚三烯	6.70 ± 0.45	10.43 ± 1.86	1.23 ± 0.26	-	-	5.50 ± 0.26	-
	14	反式- β -罗勒烯	51.72 ± 6.53	44.35 ± 3.81	32.07 ± 4.76	38.26 ± 5.03	48.73 ± 5.46	34.41 ± 3.52	42.54 ± 7.66
	15	β -罗勒烯	1 431.91 ± 258.15	1 003.85 ± 70.01	586.52 ± 119.80	779.42 ± 99.75	1 214.29 ± 103.15	781.73 ± 93.38	1 047.76 ± 211.69
烯	16	3-乙丙烯基-5,5-二甲基-环戊烯	26.72 ± 3.09	25.33 ± 1.98	18.59 ± 2.47	20.94 ± 4.46	25.15 ± 2.19	18.35 ± 1.51	21.79 ± 3.01
	17	异松油烯	16.38 ± 1.81	12.53 ± 0.94	8.33 ± 1.29	10.60 ± 2.14	11.00 ± 1.70	7.98 ± 0.69	9.62 ± 1.70
	18	E,E-2,6-二甲基-1,3,5,7-辛烯	8.82 ± 1.42	18.42 ± 0.22	6.98 ± 0.96	8.61 ± 2.56	10.87 ± 10.87	8.02 ± 0.29	10.61 ± 1.21

(续表 2)

种类	序号	名称	质量浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (干基)							
			新鲜样品	HP60 $^{\circ}\text{C}$	HP60 $^{\circ}\text{C}$ +IR1/5	HP60 $^{\circ}\text{C}$ +IR2/5	HP70 $^{\circ}\text{C}$	HP70 $^{\circ}\text{C}$ +IR1/5	HP70 $^{\circ}\text{C}$ +IR2/5	
	19	别罗勒烯	195.84 ± 86.17	189.45 ± 15.1	63.27 ± 9.03	148.97 ± 23.28	172.60 ± 22.12	125.58 ± 10.84	148.87 ± 21.64	
	20	α -反式-香柑油烯	0.76 ± 0.08	0.48 ± 0.05	-	-	0.38 ± 0.05	-	-	
	21	β -法尼烯	0.92 ± 0.06	1.34 ± 0.11	-	0.86 ± 0.11	0.97 ± 0.06	-	0.98 ± 0.09	
酯类	22	<i>E</i> -2-己酸甲酯	-	5.96 ± 0.41	3.27 ± 0.84	6.69 ± 2.71	6.39 ± 0.18	5.38 ± 0.60	5.46 ± 0.91	
	23	辛酸乙酯	2.33 ± 0.60	2.01 ± 0.11	-	1.15 ± 0.07	1.72 ± 0.31	1.37 ± 0.19	1.64 ± 0.10	
	24	壬酸甲酯	1.17 ± 0.31	-	-	0.33 ± 0.02	-	-	-	
	25	壬酸乙酯	-	0.80 ± 0.14	0.73 ± 0.14	0.69 ± 0.28	-	0.76 ± 0.11	-	
	26	反式-香叶酸甲酯	3.57 ± 0.94	6.08 ± 0.26	2.88 ± 0.46	5.82 ± 0.35	4.31 ± 0.46	4.63 ± 0.54	5.41 ± 0.11	
	27	癸酸乙酯	-	-	0.44 ± 0.05	1.84 ± 0.13	-	-	-	
	28	(<i>2E,4E</i>)-3,7-二甲基辛基-2,4,6-三烯酸甲酯	-	1.08 ± 0.12	-	3.84 ± 0.23	1.19 ± 0.53	0.91 ± 0.13	2.10 ± 0.08	
醛类	29	<i>E</i> -2-己烯醛	-	4.57 ± 0.31	1.64 ± 0.06	-	-	-	-	
	30	庚醛	-	1.35 ± 0.19	1.28 ± 0.20	1.49 ± 0.17	-	1.18 ± 0.01	1.19 ± 0.29	
	31	壬醛	6.32 ± 1.08	8.65 ± 1.47	9.97 ± 0.19	8.59 ± 0.39	3.18 ± 0.39	7.05 ± 0.43	9.30 ± 0.81	
酮类	32	癸醛	0.83 ± 0.11	4.15 ± 1.53	4.77 ± 0.79	2.97 ± 0.48	2.67 ± 0.29	2.38 ± 0.17	2.49 ± 0.18	
	33	6-甲基-庚烯酮	-	11.50 ± 1.12	8.29 ± 0.58	9.43 ± 1.39	4.18 ± 0.51	9.63 ± 0.69	8.89 ± 0.59	
	34	香叶基丙酮	-	-	1.47 ± 0.23	2.53 ± 1.27	-	2.58 ± 0.24	4.12 ± 0.41	
其它	35	2-甲基呋喃	-	51.63 ± 14.52	50.39 ± 3.36	35.71 ± 6.38	28.99 ± 1.21	29.54 ± 2.35	33.18 ± 5.90	
	36	乙萘酮	-	22.63 ± 2.46	31.11 ± 1.23	23.44 ± 17.46	25.44 ± 3.39	35.36 ± 0.98	38.32 ± 3.08	
	37	吡啶	-	4.60 ± 2.11	12.39 ± 2.27	-	-	-	3.62 ± 0.52	
	38	对二甲苯	13.86 ± 1.33	-	11.31 ± 1.37	10.19 ± 0.87	13.37 ± 1.76	10.25 ± 0.20	11.59 ± 1.10	
	39	1-甲基-3-(1-甲基乙基)苯	5.92 ± 0.34	-	-	5.56 ± 0.80	0.78 ± 0.17	-	-	
	40	1-甲基-4-(1-乙丙烯基)苯	22.77 ± 2.35	24.15 ± 0.57	19.67 ± 1.78	14.55 ± 1.72	19.57 ± 2.48	15.33 ± 0.90	16.66 ± 1.46	
	41	3-甲基-2-(2-甲基-2-丁烯基)-呋喃	5.60 ± 0.44	8.43 ± 0.76	4.59 ± 0.50	6.68 ± 1.11	6.08 ± 0.50	4.77 ± 0.46	5.51 ± 0.97	
	42	2-乙基-1,4-二甲基苯	0.99 ± 0.10	-	-	-	-	-	-	
	43	环癸烷	-	4.27 ± 0.79	2.85 ± 0.54	1.51 ± 0.13	-	-	2.31 ± 0.10	
	44	β , β -二甲基苯丙酸	1.45 ± 0.48	-	1.07 ± 0.14	-	-	2.16 ± 0.28	-	

注: -, 未测出。

种。烯烃类物质在各处理组中质量浓度占比最大, β -罗勒烯及其同分异构体占主要部分, 就含量而言, 单一热泵干燥比红外辅助干燥保留率高, 这可能是因为红外干燥温度具有上下波动性, 而 β -罗勒烯等物质本身不稳定, 使得其氧化分解更快。不同处理组共检测出 7 种醇类化合物, 其中 HP70°C+IR1/5、HP70°C+IR2/5 均能检测出这 7 种醇类化合物, 且正辛醇仅在这两组中被检测出, 其中 2-甲基-1-丁醇、正己醇、庚醇是干燥之后特有的醇类物质且含量较高, 醇类物质主要来源于脂肪氧化分解和羰基化合物还原^[27], 而高温条件易促使部分醇类物质酯化^[28], 后续关于醇类物质增多这一现象还需进一步探究。而干燥过程亦会发生美拉德和焦糖化等非酶促褐变反应, 导致干燥之后龙眼干的醛酮类物质含量上升^[29], 干燥后龙眼醛酮类比鲜样多 4 种。龙眼中酯类物质主要为 *E*-2-己酸甲酯、辛酸乙酯、反式-香叶酸甲酯, 酯类物质大多具有甜香和花香味, 干燥之后其含量和种类增多, 可为龙眼呈现更丰富的香气特性。

就 6 种不同干燥处理组龙眼而言, 共检测出挥发性成分 43 种, 且随着干燥温度的升高, 香气成分的种类与含量出现不同程度的减少, 这可能是由于高温导致了部分香气成分可能发生了热降解、转化反应, 从而造成其种类与含量减少, 这与 Wang 等^[30]的研究结果类似。经间歇式红外辅助处理的龙眼干的挥发性成分种类多于单独热泵干燥处理, 能产生单一热泵干燥所检测不到的成分, 如正辛醇、癸酸乙酯、香叶基丙酮等, 增加了干制龙眼挥发性成分组成, 丰富了龙眼的香气。

3 结论

间歇式红外辅助热泵干燥能有效提升龙眼的干燥速率, 减少干燥时间, 与单一热泵干燥相比, 间歇式红外辅助干燥龙眼具有更大的复水比、更小的总色差和更均匀的色泽分布, 在功能特性方面其 DPPH 自由基清除能力显著提升。GC-MS 分析不同干燥条件下龙眼挥发性物质显示, 龙眼经干燥之后能产生多种鲜样中检测不到的挥发性成分, 且随着温度的升高, 龙眼中挥发性成分种类及含量会逐渐减少; 经间歇式红外辅助热泵干燥能产生香叶基丙酮等特有挥发性物质, 丰富龙眼的

香气品质。综合品质及挥发性物质分析, 热泵温度 60 °C 条件下, 每 5 min 红外间歇辅助 2 min 进行龙眼干燥, 可获得理化品质佳、香气丰富的龙眼干制品。本研究为高品质龙眼干的制备及干燥装备设计提供了技术支撑和理论参考。

参 考 文 献

- [1] 齐文娥, 陈厚彬, 彭朵芬, 等. 中国龙眼产业发展现状、问题与对策建议[J]. 广东农业科学, 2016, 43(8): 169-174.
QI W E, CHEN H B, PENG D F, et al. Development status, problems and countermeasures of China's longan industry[J]. Guangdong Agricultural Science, 2016, 43(8): 169-174.
- [2] SCHEPETKIN I A, QUINN M T. Botanical polysaccharides: Macrophage immunomodulation and therapeutic potential[J]. International Immunopharmacology, 2006, 6(3): 317-333.
- [3] ZHANG R, KHAN S A, LIN Y, et al. Phenolic profiles and cellular antioxidant activity of longan pulp of 24 representative Chinese cultivars[J]. International Journal of Food Properties, 2018, 21(1): 746-759.
- [4] 彭健, 王蔚婕, 唐道邦, 等. 分段式远红外-热泵干燥对龙眼品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(19): 118-123.
PENG J, WANG W J, TANG D B, et al. Effects of segmented far-infrared-heat pump drying on the quality of longan[J]. Food Science, 2020, 41(19): 118-123.
- [5] YAO L, FAN L, DUAN Z. Effect of different pretreatments followed by hot-air and far-infrared drying on the bioactive compounds, physicochemical property and microstructure of mango slices[J]. Food Chemistry, 2020, 305: 125477.
- [6] WANG Q, LI S, HAN X, et al. Quality evaluation and drying kinetics of shitake mushrooms dried by hot air, infrared and intermittent microwave-assisted drying methods [J]. Lebensmittel Wissenschaft Und Technologie, 2019, 107: 236-242.
- [7] YUE Z A, GZ A, XL A, et al. Combined medium- and short-wave infrared and hot air impingement drying of sponge gourd (*Luffa cylindrical*) slices - ScienceDirect[J]. Journal of Food Engineer-

- ing, 2020, 284: 110043.
- [8] CHEN Q, SONG H, BI J, et al. Multi-objective optimization and quality evaluation of short- and medium-wave infrared radiation dried carrot slices[J]. International Journal of Food Engineering, 2019, 15(8): 20180234.
- [9] AKTAŞ M, KHANLARI A, AMINI A, et al. Performance analysis of heat pump and infrared-heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 132(15): 327-338.
- [10] SONG X, CHENG L. Study of iron yam (*Dioscorea opposita* Thunb. cv. Tiegun) dehydration using far-infrared radiation assisted heat pump drying[J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2015, 3(1): 20-25.
- [11] NATHAKARANAKULE A, JAIBOON P, SOPONRONNARIT S. Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(4): 662-668.
- [12] 国家卫生和计划生育委员会. 食品水分的测定: GB 5009.3-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-6.
- National Health and Family Planning Commission. Determination of food moisture: GB 5009.3-2016[S]. Beijing: China Standards Press, 2016: 1-6.
- [13] JIAN P, YI J, BI J, et al. Freezing as pretreatment in instant controlled pressure drop (DIC) texturing of dried carrot chips: Impact of freezing temperature [J]. LWT- Food Science and Technology, 2017, 89: 365-373.
- [14] TABART J, KEVERS C, EVERS D L, et al. Ascorbic acid, phenolic acid, flavonoid, and carotenoid profiles of selected extracts from *Ribes nigrum*[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2011, 59(9): 4763-4770.
- [15] WANG Y, LIU F, CA O X, et al. Comparison of high hydrostatic pressure and high temperature short time processing on quality of purple sweet potato nectar [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2012, 16: 326-334.
- [16] YI Z, GAO B, ZHANG M, et al. Headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry analysis of the volatile components of longan (*Dimocarpus longan* Lour.)[J]. European Food Research and Technology, 2009, 229(3): 457-465.
- [17] WU X F, ZHANG M, LI Z. Influence of infrared drying on the drying kinetics, bioactive compounds and flavor of *Cordyceps militaris* [J]. LWT- Food Science and Technology, 2019, 111: 790-798.
- [18] 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.
- LIU D C, ZHENG X, XIAO H W, et al. Optimization of freezing-infrared segmented combined drying process for red jujube slices[J]. Chinese Journal of Agricultural Engineering, 2021, 37(17): 293-302.
- [19] 林羨, 邓彩玲, 徐玉娟, 等. 不同高温热泵干燥条件对龙眼干品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(4): 30-34.
- LIN X, DENG C L, XU Y J, et al. Effects of different high temperature heat pump drying conditions on the quality of dried longan [J]. Food Science, 2014, 35(4): 30-34.
- [20] ARTNASEAW A, THEERAKULPISUT S, BENJAPIYAPORN C. Development of a vacuum heat pump dryer for drying chilli[J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(1): 130-138.
- [21] 朱凯阳, 任广跃, 段续, 等. 不同干燥方式下带壳鲜花生质构、营养成分及能耗的表征[J]. 中国食品学报, 2022, 22(4): 177-188.
- ZHU K Y, REN G Y, DUAN X, et al. Characterization of texture, nutrients and energy consumption of fresh flowers in shell under different drying methods[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(4): 177-188.
- [22] 郭玲玲, 周林燕, 毕金峰, 等. 香菇中短波红外干燥工艺优化[J]. 食品科学, 2016, 37(6): 44-51.
- GUO L L, ZHOU L Y, BI J F, et al. Optimization of medium and short wave infrared drying process for shiitake mushrooms[J]. Food Science, 2016, 37(6): 44-51.
- [23] XIAO H W, BAI J W, XIE L, et al. Thin-layer air impingement drying enhances drying rate of American ginseng (*Panax quinquefolium* L.) slices with quality attributes considered [J]. Food & Bioprocesses Processing, 2015, 94: 581-591.
- [24] 杨韦杰, 肖更生, 徐玉娟, 等. 不同干燥工艺对荔枝果干品质影响的比较研究[J]. 食品科学, 2013, 34(13): 95-100.
- YANG W J, XIAO G S, XU Y J, et al. Compar-

- tive study on the effect of different drying processes on the quality of dried litchi [J]. *Food Science*, 2013, 34(13): 95–100.
- [25] EDIDIIONG J B, CHENG J U, SUN D W. Improving drying kinetics, physicochemical properties and bioactive compounds of red dragon fruit (*Hylocereus* species) by novel infrared drying [J]. *Food Chemistry*, 2022, 375: 131886.
- [26] ZHANG Z, ZENG D, LI G. Study of the volatile profile characteristics of longan during storage by a combination sampling method coupled with GC/MS [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2008, 88(6): 1035–1042.
- [27] 马尧, 郝慧慧, 张海红, 等. GC-MS 结合电子鼻分析不同干燥方式对黄花菜粉挥发性物质的影响 [J]. *食品科学*, 2022, 43(6): 324–330.
- MA Y, HAO H H, ZHANG H H, et al. Analysis of the effects of different drying methods on volatile compounds in daylily powder by GC-MS combined with electronic nose [J]. *Food Science*, 2022, 43(6): 324–330.
- [28] 邓媛元, 张雁, 汤琴, 等. 干燥方式对苦瓜茶感官品质及挥发性物质的影响 [J]. *中国食品学报*, 2019, 19(2): 173–184.
- DENG Y Y, ZHANG Y, TANG Q, et al. Effects of drying methods on sensory quality and volatile substances of bitter melon tea [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(2): 173–184.
- [29] 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.
- DENG Y Y, YANG J, WEI Z C, et al. Effects of hot air-vacuum freezing combined drying on the quality and probiotic activity of dried brittle longan [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(10): 2078–2090.
- [30] WANG J, MUJUMDAR A S, WANG H, et al. Effect of drying method and cultivar on sensory attributes, textural profiles, and volatile characteristics of grape raisins [J]. *Drying Technology*, 2021, 39(4): 1–12.

Effect of Intermittent Infrared Assisted Heat Pump Drying on the Quality and Volatile Profiles of Longan

Zhu Jingnan^{1,2}, Peng Jian², Xie Ziquan², Yu Yuanshan², Tang Daobang², Gu Qingqing^{1*}, Xu Yujuan^{2*}

¹College of Agriculture, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045

²Institute of Sericulture and Agricultural Products Processing, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Food, Ministry of Agriculture and Rural Areas, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610

Abstract In this study the intermittent infrared assisted heat pump was used to longan drying, and the drying characteristics, color change, rehydration properties, antioxidant activity and volatile profiles of longan under different drying conditions were measured. The results indicated that intermittent infrared assisted heat pump drying could dramatically shorten drying time and improved the comprehensive quality of dried longan. Specifically, the intermittent infrared assisted heat pump drying time of longan was reduced 25%–28.6% and the rehydration rate was increased 2.65%–8.21% when compared with the single heat pump drying. Total color change of the intermittent infrared assisted heat pump dried longan was lower than the single heat pump dried longan coupled with more uniformity color distribution of dried longan pulp surface. Moreover, the higher ferric reducing antioxidant power, 4.42%–17.95%, was also observed in intermittent infrared assisted heat pump dried longan. The types or content of alcohols, aldehydes, ketones, and esters in longan were increased after drying, and (*E*)-6,10-dimethyl-5,9-undecadien-2-one, 1-octanol, and ethyl caprate were only detected in intermittent infrared assisted heat pump dried longan, which indicated that intermittent infrared assistant effectively enriched the volatile profiles of dried longan. In general, 60 °C heat pump drying coupled with 2 min every 5 min intermittent infrared was the best assisted drying scheme in all the selected methods, which is benefit to improve the qualities and volatile profiles formation of longan.

Keywords intermittent infrared; heat pump drying; longan; quality; volatile profiles