



肖更生,林可为,沈乔眉,等. 岭南特色水果干燥加工技术研究进展[J]. 轻工学报,2023,38(4):1-10.  
XIAO G S, LIN K W, SHEN Q M, et al. Research progress on drying processing technology of Lingnan characteristic fruits[J]. Journal of Light Industry, 2023, 38(4): 1-10.  
DOI: 10. 12187/2023. 04. 001

# 岭南特色水果干燥加工技术研究进展

肖更生,林可为,沈乔眉,刘东杰,马路凯,王锋

仲恺农业工程学院 轻工食品学院/农业农村部岭南特色食品绿色加工  
与智能制造重点实验室,广东 广州 510225

**摘要:**岭南特色水果采后较易腐败变质,而采用干燥加工技术将其制成干制品可有效延长货架期,降低运输成本,提高产品价值。对目前常用的岭南特色水果干燥加工技术(热风干燥、热泵干燥、微波干燥、喷雾干燥、冷冻干燥和联合干燥)及其优缺点,以及不同干燥加工技术对岭南特色水果干制品品质的影响进行综述,认为,干燥温度是影响水果干制品品质的关键因素,热风干燥操作简单,但高温会使水果干制品品质下降;热泵干燥对水果的感官品质影响较小,适用于热敏性水果的干燥;微波干燥效率较高,但过高的干燥功率易使水果干制品表面焦糊;喷雾干燥效率较高且处理量较大,制得的果粉品质较好;冷冻干燥能够最大限度地保持水果原有的风味和营养成分,但能源消耗大;联合干燥可结合单一干燥技术的优点,提高干燥效率,减少能源消耗,同时提升水果干制品品质,但最佳工艺参数需经大量实验加以确定。未来应结合高新干燥技术和设备,联合单一干燥技术的优点,针对水果的不同特性采用合适的干燥加工技术并优化联合干燥工艺,提高干燥效率和干制品品质稳定性,以期对岭南特色水果干燥加工技术的创新发展提供参考。

**关键词:**岭南特色水果;干燥加工技术;水果干制品;感官特性;营养成分;活性物质

**中图分类号:**TS255.3 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2023)04-0001-10

## 0 引言

我国岭南地区地处热带和亚热带,适宜的自然环境盛产荔枝、香蕉、木瓜、菠萝等岭南特色水果<sup>[1-5]</sup>,这些水果既富含维生素、矿物质、膳食纤维等营养成分,也含有类胡萝卜素、花青素、植物甾醇等生物活性物质,能为人体提供能量和营养,有助于预防和治疗高血压、高血脂、骨质疏松症等疾病,且

具有美容、保健等功效<sup>[6]</sup>。然而,岭南特色水果的水分和糖度较高,且岭南地区环境温度高、湿度大,水果极易发生腐败变质,这为岭南特色水果的贮藏和运输带来了极大挑战<sup>[7]</sup>。干燥加工技术是常用的水果加工方式之一,不仅可减小水果的体积,便于运输<sup>[8]</sup>,还能抑制微生物繁殖,降低采后生理性品质劣变<sup>[9]</sup>。此外,干燥加工技术能提高水果的附加值,满足消费者的多样化需求。目前,干燥加工技术

收稿日期:2023-04-14;修回日期:2023-06-21;出版日期:2023-08-15

基金项目:国家自然科学基金项目(31901734);“十四五”广东省农业科技创新十大主攻方向“揭榜挂帅”项目(2022SDZG04)

作者简介:肖更生(1965—),男,湖南省衡阳市人,乌克兰工程院外籍院士,仲恺农业工程学院研究员,主要研究方向为农产品加工与贮藏。E-mail: Gshxiao@aliyun.com

通信作者:王锋(1991—),男,河南省驻马店市人,仲恺农业工程学院副教授,博士,主要研究方向为食品加工。E-mail: wangfeng\_sp@163.com

已在岭南特色水果精深加工中得到广泛应用,本文拟对岭南特色水果的干燥加工技术进行梳理归纳,对比不同干燥加工技术对岭南特色水果干制品品质的影响,以期为岭南特色水果的贮藏和深加工提供理论支撑。

## 1 岭南特色水果干燥加工技术

目前,常用的岭南特色水果干燥加工技术主要有热风干燥、热泵干燥、微波干燥、喷雾干燥、冷冻干燥、联合干燥等<sup>[10]</sup>,不同的干燥加工技术各具特色,也有其适宜的应用范围。

### 1.1 热风干燥

热风干燥(干燥温度 50~105 ℃)也称烘箱干燥,是目前岭南特色水果最常用的干燥加工技术<sup>[11-12]</sup>。依据传热、传质原理,热风干燥通过热源提供热量,以热空气为干燥介质,利用风机将热风吹入干燥室内;在此过程中,水果表面水分受热并扩散到空气中,而内部水分向表面扩散,使得水果的水分含量持续减少,达到干燥的目的<sup>[13]</sup>。热风干燥因其成本低、操作简便、物料处理量大等优点,已广泛应用于黄皮、香蕉、荔枝等岭南特色水果的干燥加工<sup>[14-15]</sup>。杨婉如等<sup>[16]</sup>研究了热风干燥温度对黄皮品质的影响,发现最佳干燥温度为 60~70 ℃,干燥时间为 20~30 h。X. Cao 等<sup>[17]</sup>在荔枝热风干燥前使用超声波进行预处理,发现超声波预处理可有效提高热风干燥效率,改善荔枝干果的品质。王宸之等<sup>[18]</sup>研究表明,在热风干燥高温(75 ℃)阶段,龙眼果肉的褐变程度上升,多酚氧化酶活性下降。热风干燥是由外向内加热,这使水果中存在温度梯度,因此干燥温度是影响水果干制品品质的主要因素,若干燥温度过高,易引起水果褐变、营养成分损失等问题。热敏性高的水果需在低温下进行干燥,但低温热风干燥的干燥速率较低、耗时较长<sup>[14-15]</sup>。因此,热风干燥适用于热敏性较低、处理量大的岭南特色水果干燥加工,且在干燥过程中要特别注意干燥温度的控制。

### 1.2 热泵干燥

热泵干燥(干燥温度 40~70 ℃)通过消耗电能驱动热泵,借助热力循环实现物料干燥<sup>[19]</sup>。干燥过

程中,热泵系统能充分吸收水蒸气的汽化潜热,能量损失小<sup>[20-21]</sup>,与传统干燥方式相比,具有明显的节能减排优势<sup>[22-23]</sup>。邱松山等<sup>[24]</sup>对中温热泵干燥龙眼的工艺参数进行了优化,发现当干燥时间为 11.5 h、干燥温度为 65 ℃、干燥风速为 1.73 m<sup>3</sup>/s 时,龙眼肉干色泽明亮、品质最佳。C. Tunckal 等<sup>[25]</sup>研究了香蕉片在热泵干燥过程中的品质变化,并建立了香蕉干品质评价模型,发现随着干燥温度的升高,有效水分扩散率增加至 1.12×10<sup>-10</sup>~1.64×10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>/s,且 Midilli&Kucuk 模型适用于分析香蕉片的干燥过程。热泵干燥以空气作为热源,对环境友好;干燥温度和湿度调控范围较宽,干燥条件较温和,适合热敏性水果的干制,有利于保留水果中的营养成分;但在干燥中后期,降速干燥阶段的持续时间较长、干燥速率较低,易引起水果褐变,需通过优化干燥工艺、改良设备等方式提高其干燥效率。

### 1.3 微波干燥

微波干燥(微波功率 200~500 W)是一种复杂的非稳态过程<sup>[26]</sup>,微波功率、场分布等均会影响干燥物料的水分分布<sup>[27-28]</sup>。在干燥过程中,微波可促进热量和水分的同向传递,提高干燥速率,减少干燥时间<sup>[29-30]</sup>,因此微波干燥被广泛应用于食品工业、化学工业等领域<sup>[31]</sup>。王宸之等<sup>[18]</sup>对比了微波干燥和热风干燥对龙眼品质的影响,发现微波干燥的干燥效率显著高于热风干燥,微波干燥的龙眼脱水迅速,褐变程度低,品质更好。唐小闲等<sup>[32]</sup>对比了热风干燥、红外干燥和微波干燥对三华李片品质的影响,发现微波干燥能有效提高干燥速率,并保持三华李的色泽、质构和营养。由于微波干燥兼容性好,实际生产中常与其他干燥技术联合使用。微波功率是干燥过程中的重要参数,最佳微波功率既能有效缩短干燥时间,又能起到杀菌作用,而过高的微波功率和较长的干燥时间则会导致物料表面焦糊。Y. T. Tian 等<sup>[33]</sup>优化了微波真空干燥猕猴桃切片的最佳工艺参数,发现当微波功率密度为 7.7 W/g、样品厚度为 6.0 mm、真空度为 -90 kPa、干燥时间为 11.5 min 时,猕猴桃切片的品质最佳。岭南特色水果水分含量高,在干燥过程中对微波的吸收较多,若水果表面散热和水分蒸发不及时,会使水果内部温

度过高,进而导致水果干制品品质下降,而间歇性微波加热可较好改善这一问题,使水果内部温度分布更均匀,同时减少颜色恶化、提高复水性<sup>[34]</sup>。微波干燥时间较短,产品品质较好,但干燥不均匀现象时有发生。针对高水分含量的岭南特色水果,还需要优化干燥工艺,以加速水果表面散热和水分蒸发,提高产品的干燥均匀性。

#### 1.4 喷雾干燥

喷雾干燥(进风温度 110~180 ℃)是利用雾化器将料液雾化成直径微小的雾滴,并在干燥塔中与热空气接触进行热交换,使料液中的水分迅速蒸发,从而得到粉末状干燥产品的技术,该技术一般分为物料雾化、物料干燥和气固分离 3 个部分<sup>[35-37]</sup>。海金萍等<sup>[38]</sup>对荔枝的喷雾干燥工艺进行了优化,发现最佳工艺条件为进料质量分数 25%、进料流量 7 mL/min、进风温度 170 ℃、麦芽糊精用量 45 g/100 mL,此条件下荔枝粉的品质最优。Y. J. Liu 等<sup>[39]</sup>用响应面法优化了杨梅的喷雾干燥工艺,发现当入口温度为 150 ℃、麦芽糊精质量分数为 31%时,可生产出优质的杨梅粉。喷雾干燥产率高,干燥迅速,适合大规模工业化生产,且产出的果粉颗粒均匀,分散性和溶解性均较好。目前,针对喷雾干燥的研究主要侧重于优化工艺参数,包括进风温度、进料质量分数、进料流量、进料温度、助干剂种类、助干剂添加量、热空气流量等<sup>[40]</sup>,其中,进料质量分数是影响产品品质的主要因素,一般为 30%~60%;进料质量分数太低会造成易挥发物质大量散失,且较高的含水量会导致干燥不充分,而进料质量分数太高则会造成雾化困难<sup>[41]</sup>。喷雾干燥操作简单、效率高,但岭南特色水果含糖量高,在喷雾干燥过程中易出现粘壁问题,需通过优化清扫装置及助干剂组合配比进行改善。

#### 1.5 冷冻干燥

冷冻干燥(温度-80~-50 ℃)也称真空冷冻干燥<sup>[42]</sup>,是在真空、低温环境下进行干燥的技术,能有效避免水果中多酚、黄酮、维生素等热敏性物质被破坏,目前常用于高品质水果的加工<sup>[43-44]</sup>。冷冻干燥过程中,水分从固态直接升华为气态,能最大程度地保持水果的物理性状,制得高品质的干燥产品<sup>[45]</sup>。

F. J. Olivas-Aguirre 等<sup>[46]</sup>研究了芒果、木瓜和菠萝经冷冻干燥后的自由基清除能力和抗癌细胞增殖能力,发现 3 种干制水果中营养组分的生物活性均有一定程度的提高,其中芒果具有较高的自由基清除能力,冷冻干燥后的抗癌细胞增殖能力也更强。N. A. Salazar 等<sup>[47]</sup>优化了芒果冷冻干燥工艺,发现最佳干燥工艺为压强 66.66~86.65 kPa、温度-2~0 ℃、冷冻速率 0.4 ℃/min,与常规干燥技术相比,优化后的冷冻干燥工艺既保证了芒果干的品质,也减少了 30%的干燥时间。冷冻干燥是目前保持水果干制品品质最好的单一干燥技术,能够避免水果在干燥过程中细胞结构被破坏,最大程度地保留水果原有的营养成分,但冷冻干燥后的产品呈疏松多孔结构,吸湿性较强,干燥时间和能源消耗均较高,与其他干燥技术联合使用可减少产品的干燥时间和能耗,提升产品品质。如邓媛元等<sup>[48]</sup>利用冷冻干燥联合热风干燥对龙眼进行干燥,发现比单一冷冻干燥节约了 12.16%的干燥时间和 25.40%的单位能耗,提高了干燥效率。冷冻干燥的产品品质好,可最大限度保留营养成分,但其干燥时间较长且耗能较多,未来应致力于寻求更高效、更可持续的冷冻干燥联合技术,以减少能源消耗和环境污染。

#### 1.6 联合干燥

联合干燥是将两种或两种以上干燥加工技术联合使用的一种复合干燥加工技术<sup>[49]</sup>,其利用各干燥加工技术的优点分阶段进行干燥,克服了单一干燥加工技术的缺点,实现了优势互补,可大大提高干燥效率,缩短干燥时间,减少能源消耗,既有利于环保,也有利于产出高品质的干燥产品。张强等<sup>[50]</sup>研究了微波热风联合干燥芒果的工艺,并采用 Box-Behnken 设计建立了回归方程,发现转换点含水率是影响芒果果脯感官评价的主要因素,其次是微波功率和热风温度;在最优干燥工艺条件下制得的芒果果脯色泽鲜艳、香味浓郁、口感适中;在转换点含水率一定的条件下,随着微波功率的增大,感官评价分值先增加后降低,而热风温度越高则芒果果脯失水速率越快,导致芒果果脯变硬,进而影响其口感。K. Apinyavisit 等<sup>[51]</sup>研究了微波热风联合干燥、微波真空联合干燥和热风干燥对龙眼品质的影响,发现

与单一热风干燥相比,微波热风联合干燥的干燥时间显著缩短、能源消耗显著减少;微波真空联合干燥的龙眼具有最佳的色泽和形状,是最适合龙眼干燥的技术。邓媛元等<sup>[48]</sup>比较了热风冷冻联合干燥、真空冷冻干燥和热风干燥对龙眼果干理化性质和益生特性的影响,发现联合干燥技术能有效降低龙眼果干的水分含量、水分活度和皱缩率,提高龙眼果干复水比,保持龙眼果干较高的总糖、多糖和挥发性风味物质含量。B. L. Chen 等<sup>[52]</sup>研究了微波冷冻联合干燥菠萝片的工艺和能耗,发现微波功率密度和过渡期水分含量是影响干燥时间和产品品质的主要因素,采用旋转转盘和温度控制系统可实现均匀加热和质构改善;优化后的工艺条件为过渡期水分含量20%、微波功率密度6 W/g、干燥温度40℃、转盘转速8 r/min,该工艺条件下的菠萝片产品品质较好,且比传统冷冻干燥节省了34.5%的能源消耗和33.3%的干燥时间。

相较于单一干燥加工技术,联合干燥不仅能提高干燥效率、节约能源消耗,还能保证果干的品质。由于水果组织结构存在很大差异,目前联合干燥的主要难点是如何优化工艺参数以适应不同水果的特性。数学干燥模型多适用于简单干燥过程,若干燥过程中涉及过多变量则不适用<sup>[53]</sup>,而联合干燥过程较复杂,很难建立数学干燥模型来预测水分和温度的变化。因此,完善并建立合理的干燥动力学模型是联合干燥未来的发展方向之一。

## 2 不同干燥加工技术对岭南特色水果干制品品质的影响

岭南特色水果干制品富含营养成分,具有改善饮食品质、保护心肺、降血脂、抗氧化、抗炎、抗癌、抗糖尿病等健康益处,在一定程度上解决了新鲜水果贮藏保鲜较困难的问题,也为其进一步应用和深加工提供了原材料,能够很好地满足消费者的多样化需求<sup>[54]</sup>。干燥加工不仅可延长水果的货架期,还可改变水果的感官特性、营养成分、活性物质等,进而影响水果干制品的营养价值和品质,其中干燥加工条件是决定水果干制品品质的重要因素。根据不同水果的特性选择合适的干燥加工技术,可在提高干

燥效率、降低能源消耗的同时获得高品质的干果制品。

### 2.1 对感官特性的影响

水果的主要感官特性是指质地、香气、味道、颜色和形状<sup>[55]</sup>,这些感官特性直接影响消费者对水果干制品的喜好和选择。干燥加工过程会使水果细胞受到压力而发生结构变化,进而导致其干制品的外观发生收缩、变硬等变化。颜色是水果干制品的重要品质指标之一,但在干燥加工过程中,水果中的还原糖或多酚类物质会发生氧化反应,使得水果干制品的颜色变暗<sup>[56]</sup>。在干燥前对水果进行适当的预处理,可更好地保持水果的质地和颜色。J. Barragan-Iglesias 等<sup>[57]</sup>研究了Ca(OH)<sub>2</sub>溶液和渗透脱水预处理对对流干燥木瓜质地的影响,发现预处理可重构木瓜的细胞壁从而形成特殊的空间结构,促进了水分和可溶性固形物的转移,使得干燥木瓜的硬度和颜色稳定性增强,收缩和变形降低,干燥时间缩短,弹性和咀嚼性提高。S. Nagvanshi 等<sup>[58]</sup>研究发现,香蕉片在微波干燥过程中发生了明显褐变,表现为L\*降低和a\*增加,香蕉片颜色由黄白色变成黄褐色;NaHSO<sub>3</sub>预处理可减缓褐变的速度,但不能完全抑制,而褐变的原因可能是苯酚类化合物的氧化和色素的降解所致;微波功率和切片厚度对干燥时间和香蕉片颜色均有显著影响,高微波功率和低切片厚度均会导致干燥速率加快,但也会造成香蕉片的膨胀和烧焦。张振亚等<sup>[59]</sup>探讨了超声波预处理温度对热泵干燥过程中不同切片厚度菠萝片品质的影响,发现超声波预处理可使菠萝片内部形成较多微孔通道,减弱水分迁移阻力,加快水分散失速率,从而较好地维持菠萝片的色泽,增大其硬度、胶着性和咀嚼性。

水果的挥发性物质有助于形成其特有的香气,但会受到干燥温度的影响。一般而言,干燥温度是决定水果干制品感官特性的关键因素,相较于低温干燥加工,高温干燥加工更易造成挥发性物质的损失和感官特性的下降,且随着干燥时间的延长,下降趋势更加明显。干燥加工对水果香气的影响较为复杂,不仅与干燥温度有关,而且各挥发性物质的性质也会影响水果干制品最终的香气(见表1)。B. Saha

表 1 干燥加工技术对岭南特色水果香气化合物的影响

Table 1 The effects of drying processing technologies on the aroma compounds of Lingnan characteristic fruits

干燥加工技术	水果种类	香气化合物	影响情况	影响原因	文献
热风干燥	芒果	萜类	浓度显著降低	萜类化合物水溶性差,在空气中易挥发	[60]
		脂肪醇类	3-戊醇、2-戊醇、1-丁醇和 2-癸醇浓度显著降低;异戊醇、2-甲基丁醇、正己醇和(Z)-3-己烯-1-醇浓度增加	部分脂肪醇类化合物在干燥过程中蒸发损失;高温和酸性条件促进糖苷水解,使部分脂肪醇类化合物浓度增加	
		脂肪醛类	浓度增加	不饱和脂肪酸在高温条件下降解生成脂肪醛类化合物	
	枇杷	内酯类	浓度降低	高温可加快内酯类化合物分解	[61]
		醛类	浓度降低	醛类化合物易受温度影响	
		酮类	浓度增加	干燥过程中的化学反应导致酮类化合物生成	
番木瓜	烷烃类	浓度降低,但种类增多	烃类化合物发生氧化缩合、裂解反应,生成小分子的烷烃、醛、酮、醇等化合物	[62]	
	酯类和烃类 醛类和酮类	浓度随干燥温度升高而降低 浓度随干燥温度升高而增加	在高温下发生氧化反应 在高温下发生美拉德反应		
热泵干燥	香蕉	挥发性酯类和醛类	干燥初期浓度显著降低,趋于非零平衡浓度	该类香气化合物通过分子扩散作用从水果表面扩散出来	[63]
		挥发性醇类和酮类	随着干燥时间延长,浓度先增加后降低	加热导致该类香气化合物释放量增加	
	荔枝	芳香酚类和芳香醚类	浓度未发生显著变化	该类香气化合物分子质量较高,不易挥发	[64]
	酯类、酚类和脂肪族类	干燥后期浓度增加,且荔枝整果的浓度比果肉多	有果壳包裹,果肉中的该类香气化合物损失较少,或果皮中该类香气化合物在干制过程中迁移到果肉中		
		萜类	浓度降低	长时间加热导致该类香气化合物损失	

等<sup>[63]</sup>研究了低温(28 ℃、33 ℃和 38 ℃)热泵干燥对香蕉风味的影响,发现风味物质的保留程度受选择性扩散的影响,如酯类物质(乙酸异戊酯、2-乙酸乙酯和乙酸异丁酯)的保留程度与香蕉表面的快速干燥有关,因此较高的干燥温度有利于保留酯类物质;醇类物质(异戊醇和 1-己醇)较易挥发,其含量随干燥时间的延长而降低;芳香酚类和芳香醚类化合物(丁香油酚和沉香醚)因其分子质量较高,其含量在干燥过程中未发生显著变化。C. F. Song 等<sup>[65]</sup>研究发现,微波在荔枝内部转化为热能,可加速水分蒸发,因此微波冷冻联合干燥耗时较短,但在一定程度上会影响荔枝干制品的外观;在热风干燥过程中,高温和高氧气含量均会促进荔枝褐变,使荔枝干制品颜色加深、收缩率升高、外形发生塌陷,而冷冻干燥的荔枝干制品色泽较好,但干燥时间较长。

经干燥加工后,水果的感官特性会有不同程度的改变。在高温环境中,水果易发生氧化反应,导致其感官特性下降,在干燥前进行预处理,可改变水果

的特性,有效减轻水果干制品的劣变;另外,通过不同干燥加工技术的优势互补,也可提高水果干制品的感官特性。

## 2.2 对营养成分和活性物质的影响

岭南特色水果营养成分和活性物质的稳定性和保留情况均会受不同干燥加工技术及其加工条件的影响(见表 2)。A. W. Cheng 等<sup>[66]</sup>研究发现,相较于喷雾干燥,冷冻干燥对杨梅粉多酚的热应力更小;在相同贮藏时间下,冷冻干燥杨梅粉中总多酚、没食子酸、原儿茶酸、花青素-3-O-葡萄糖苷、总花青素等营养成分的保留率和稳定性更高;此外,2 种干燥加工技术制备的杨梅粉其褐变程度随着贮藏时间的延长而加剧,且贮藏温度越高,褐变程度越严重。E. Takounadi 等<sup>[70]</sup>研究了对流热风干燥中不同干燥温度和气流速率对香蕉片干燥速率、营养成分和感官品质的影响,发现干燥温度对干燥速率的影响大于气流速率,气流速率只在低温下对干燥速率有显著影响,其中温度 65 ℃、气流速率 24 dm<sup>3</sup>/s 条件

表2 不同干燥加工技术对岭南特色水果营养成分和活性物质的影响

Table 2 The effects of different drying processing technologies on the nutritional components and active substances of Lingnan characteristic fruits

水果种类	干燥加工技术	维生素 C	总多酚	总糖	总酸	总黄酮	文献
三华李	热风干燥	含量较低	含量较低	美拉德反应程度比微波干燥低,含量较高	含量较低,损失严重	—	[32]
	微波干燥	干燥时间短,含量最高	高温使细胞内酚类物质释放,并钝化多酚氧化酶,减少酚类化合物降解,含量较高	干燥过程局部过热,产生焦糖化和美拉德反应,含量最低	含量降低,但高于热风干燥和红外干燥	—	
	红外干燥	干燥时间长,样品与氧气充分接触,含量最低	干燥时间最长,酚类化合物被破坏,含量最低	干燥时间比热风干燥长,含量较低	长时间干燥使易挥发酸解离损失,含量最低	—	
杨梅	喷雾干燥	—	多酚类化合物因高温而损失,含量降低	—	—	—	[66]
	冷冻干燥	—	低温保持了多酚类化合物稳定性,含量显著高于喷雾干燥	—	—	—	
番石榴	热风干燥	—	含量显著升高	含量显著降低,但与冷冻干燥差异不显著	含量显著降低	含量显著降低	[67]
	冷冻干燥	—	真空、低温的干燥条件有利于酚类化合物保留,含量高于热风干燥	含量显著降低	含量较高	冰晶破坏细胞膜,导致细胞内容物流出,黄酮类化合物易被氧化,含量显著低于热风干燥	
火龙果	热风干燥	—	长时间加热使酚类化合物氧化降解,含量较低	—	—	黄酮类化合物长时间暴露于高温和氧气中,含量较低	[68]
	60℃真空干燥	—	—	—	—	—	
	折射窗干燥	—	干燥时间最短,含量最高	—	—	干燥条件温和,含量较高	
	冷冻干燥	—	低温有利于酚类化合物保留,含量较高	—	—	低温有利于黄酮类化合物保留,含量最高	
橄榄	热风干燥	—	含量较低	含量较高	含量较高	含量最高	[69]
	60℃真空干燥	—	较高的温度破坏了组织细胞结构,酚类化合物溶出,含量最高	含量最高	含量较低	含量较高	
	微波干燥	—	含量较低	含量较低	含量最高	含量较低	
	冷冻干燥	—	含量最低	含量较低	因长时间进行各类氧化反应而消耗较多,含量最低	含量较低	

注:—表示参考文献中未提及。

下的干燥最节能,且能抑制酶促褐变,提高感官品质;但脂肪、还原糖和维生素 C 的损失率较高,分别达到 79.55%、55.81%和 37.61%。

干燥加工有利于提高岭南特色水果的总多酚含量。邵雪花等<sup>[67]</sup>比较了热风干燥和冷冻干燥对番石榴果实品质的影响,发现与热风干燥相比,经冷冻干燥后的番石榴含有更多多酚类、酸类等营养成分。

这一方面是因为干燥加工破坏了多酚类化合物结构,使得与高分子化合物结合的多酚类化合物更易被提取出来;另一方面,真空环境在一定程度上隔绝了氧气,减少了多酚类化合物的氧化,同时冷冻干燥是在低温条件下进行的,因而其多酚类化合物的保留率更高。干燥加工还会导致岭南特色水果多糖结构及其生物活性的改变。K. J. An 等<sup>[71]</sup>探讨了空气

干燥、红外干燥、热泵干燥、冷冻干燥和冷冻热泵联合干燥对荔枝果肉多糖理化特性、抗氧化活性和降血糖活性的影响,发现冷冻干燥和冷冻热泵联合干燥荔枝果肉的多糖热聚集较少,且含有更多的中性糖、蛋白质和糖醛酸,具有更好的抗氧化活性和降血糖活性;相较于其他干燥加工技术,冷冻热泵联合干燥的能源消耗更少,有更大的市场潜力。相较于低温联合干燥技术,长时间的热干燥会对岭南特色水果中的多糖产生不利影响。韩苗苗等<sup>[72]</sup>研究了龙眼热风干燥过程中多糖的理化特性,发现在60℃条件下加热84h后,多糖与蛋白质的美拉德反应加剧,导致多糖与蛋白质相互作用增强,从而降低了龙眼多糖的功能活性。

岭南特色水果富含果胶,目前商品果胶主要来源于柑橘皮和苹果渣<sup>[73]</sup>,果胶品质取决于水果原料的特性和提取工艺,其中干燥加工是影响果胶品质的关键步骤<sup>[74]</sup>,而联合干燥加工技术可提高其品质。H. L. Dong等<sup>[75]</sup>对比了热风干燥和微波真空联合干燥对脐橙皮果胶品质的影响,发现微波真空联合干燥可使脐橙皮表面组织松散,提高果胶的提取率和纯度;在较低真空度下,果胶对重金属的吸附能力增强,在高真空度下,果胶酯化度提高。

根据水果特性选择合适的干燥加工技术和干燥工艺,对保留其营养成分和活性物质至关重要。单一干燥加工技术会使水果干制品的营养成分和活性物质损失较多,很难达到理想的干制效果,且影响产品的应用范围;多种干燥加工技术联合使用可极大提高干燥效率,减少水果干制品营养成分和活性物质的损失,有效保证其品质。

### 3 总结与展望

本文梳理了岭南特色水果的干燥加工技术研究进展,综述了不同干燥加工技术的特性及其对水果干制品感官特性、营养成分和活性物质的影响,指出,岭南特色水果的干燥加工技术主要有热风干燥、热泵干燥、微波干燥、喷雾干燥、冷冻干燥和联合干燥。干燥温度是影响水果干制品品质的关键因素,高温干燥会造成水果表面硬化、颜色褐变、香气化合物损失较多、营养成分降低等问题。热风干燥操作

简单,但干燥时间较长;热泵干燥高效节能、污染小;微波干燥时间短,但存在干燥不均匀的问题;喷雾干燥效率高,但产品易粘壁;冷冻干燥能够最大程度地保持水果干制品的品质特性,而联合干燥具有提升干燥效率、节约能源消耗、改善产品品质等优势,但也存在如何确定最佳干燥转换点等难题,建议采用低温干燥和联合干燥技术以有效提高水果干制品的品质。未来将聚焦高新技术创新及其设备研发与产业化应用,采用新型干燥加工技术及高效节能型设备,结合单一干燥技术的优点,探索适合不同岭南特色水果品种特性的联合干燥技术,优化联合干燥工艺,改进干燥过程中的传热和传质效率,改善设备热能回收系统,提高能源利用率和干燥效率,以期岭南特色水果的干燥加工及深加工技术的发展提供研究依据。

### 参考文献:

- [1] 徐晨,罗思玲,张琰,等.荔枝果实的营养成分、生物活性及其综合利用研究进展[J].果树学报,2021,38(11):1995-2005.
- [2] 马华明,方伟,王玉梅.高质量发展岭南特色果业产业对策探讨:以湛江香蕉、菠萝产业为例[J].农村经济与科技,2022,33(23):68-71.
- [3] 郑逸蓝,林映好,张倩玮,等.番木瓜加工副产物综合利用研究进展[J].食品安全质量检测学报,2021,12(13):5162-5169.
- [4] 平少华.芒果的前世与今生[J].中国果菜,2015,34(5):26-33.
- [5] 韩冬梅.“南方人参”龙眼[J].中国果菜,2014,34(7):6-15.
- [6] 庄姗姗,刘祎帆,张沁铭,等.柚子幼果精油的提取及其抗氧化活性研究[J].轻工学报,2022,37(2):51-58.
- [7] 徐玉娟,程丽娜,卜智斌,等.岭南特色水果保鲜与加工研究进展[J].广东农业科学,2020,47(12):1441-1457.
- [8] 覃焱婷,段振华,韦珍珍,等.柿子干燥技术的研究进展[J].食品科技,2020,45(12):53-58.
- [9] PETIKIRIGE J, KARIM A, MILLAR G. Effect of drying techniques on quality and sensory properties of tropical fruits[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2022, 57(11):6963-6979.
- [10] VERMA A, SINGH S V. Spray drying of fruit and vegetable juice: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 55(5):701-719.

- [11] THAMKAEW G, SJOHOLM I, GALINDO F G. A review of drying methods for improving the quality of dried herbs [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 61(11): 1763-1786.
- [12] RATSEEW J, MEESO N, SIRIAMORN PUN S. Changes in amino acids and bioactive compounds of pigmented rice as affected by far-infrared radiation and hot air drying [J]. *Food Chemistry*, 2020, 306: 125644.
- [13] 刘格含, 王鹏, 吴小华, 等. 农产品热风干燥传热传质数值模拟研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(22): 342-350, 357.
- [14] DUKARE A, SAMOTA M K, BIBWE B, et al. Using convective hot air drying to stabilize mango peel (Cv-Chausa): Evaluating effect on bioactive compounds, physicochemical attributes, mineral profile, recovery of fermentable sugar, and microbial safety [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2022, 16(5): 3897-3909.
- [15] MA Q C, BI J F, YI J Y, et al. Stability of phenolic compounds and drying characteristics of apple peel as affected by three drying treatments [J]. *Food Science and Human Wellness*, 2021, 10(2): 174-182.
- [16] 杨婉如, 彭健, 张晓敏, 等. 不同热风干燥温度下的黄皮干燥特性及品质研究[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(22): 214-220.
- [17] CAO X, ISLAM M N, ZHONG S, et al. Drying kinetics, antioxidants, and physicochemical properties of litchi fruits by ultrasound-assisted hot air-drying [J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2020, 44(1): 13073.
- [18] 王宸之, 邓自高, 李琳, 等. 热风 and 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.
- [19] 赵宗彬, 朱斌祥, 李金荣, 等. 空气源热泵干燥技术的研究现状与发展展望[J]. *流体机械*, 2015, 43(6): 76-81.
- [20] 黄毅成, 於海明, 缪磊, 等. 热泵干燥技术研究现状及发展趋势[J]. *农业工程*, 2020, 10(6): 61-65.
- [21] DONG X F, ZHAO H X, KONG F C, et al. Parameter optimization of multistage closed series heat pump drying system [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 216: 119124.
- [22] 杨丰, 青舒婷, 王晨笑, 等. 远红外辅助热泵干燥技术在食品加工中的应用研究进展[J]. *食品科技*, 2021, 46(5): 75-80.
- [23] 杨鲁伟, 魏娟, 陈嘉祥. 热泵干燥技术研究进展[J]. *制冷技术*, 2020, 40(4): 2-8, 27.
- [24] 邱松山, 陈桂, 姜翠翠, 等. 中温热泵干燥龙眼果肉工艺优化研究[J]. *中国南方果树*, 2016, 45(6): 25-31, 38.
- [25] TUNCKAL C, DOYMAZ İ. Performance analysis and mathematical modelling of banana slices in a heat pump drying system [J]. *Renewable Energy*, 2020, 150: 918-923.
- [26] 冯爱国, 李国霞, 李春艳. 食品干燥技术的研究进展[J]. *农业机械*, 2012(18): 90-93.
- [27] 王也, 吕为乔, 李树君, 等. 农产品微波干燥技术与装备的研究进展[J]. *包装与食品机械*, 2016, 34(3): 56-61.
- [28] CARVALHO G R, MONTEIRO R L, LAURINDO J B, et al. Microwave and microwave-vacuum drying as alternatives to convective drying in barley malt processing [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 73: 102770.
- [29] BHAGYA RAJ G V S, DASH K K. Heat transfer analysis of convective and microwave drying of dragon fruit [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2021, 44(9): e13775.
- [30] BHAT T A, HUSSAIN S Z, WANI S M, et al. The impact of different drying methods on antioxidant activity, polyphenols, vitamin C and rehydration characteristics of Kiwifruit [J]. *Food Bioscience*, 2022, 48: 101821.
- [31] ROKHBIN A, AZADBAKHT M. The shrinkage of orange slices during microwave drying and ohmic pretreatment [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(5): e15400.
- [32] 唐小闲, 陈海荣, 任爱清, 等. 不同干燥方法对三华李片干燥特性及营养成分的影响[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(24): 42-50.
- [33] TIAN Y T, WU S Z, ZHAO Y T, et al. Drying characteristics and processing parameters for microwave-vacuum drying of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) slices: Microwave-vacuum drying of kiwifruit slices [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2015, 39(6): 2620-2629.
- [34] RAJ G V S B, DASH K K. Effect of intermittent microwave convective drying on physicochemical properties of dragon fruit [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2022, 31(5): 549-560.
- [35] 李荣丽, 吴喆超, 肖安红, 等. 青金桔籽油微胶囊的喷雾干燥技术制备工艺优化 [J]. *中国油脂*, 2023, 48(3): 84-89.
- [36] 于方园, 张丁洁, 吴娜娜, 等. 草莓速溶粉喷雾干燥工艺的研究 [J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(10): 161-166.
- [37] 周铁桩, 王磊, 黄帅, 等. 喷雾干燥技术研究进展和展望 [J]. *辽宁化工*, 2019, 48(9): 907-910.
- [38] 海金萍, 吴豪迪, 徐国祥, 等. 荔枝粉的喷雾干燥工艺优化 [J]. *食品研究与开发*, 2015, 36(21): 105-108.
- [39] LIU Y J, CHEN F X, GUO H H. Optimization of bayberry juice spray drying process using response surface methodology [J]. *Food Science and Biotechnology*, 2017, 26(5): 1235-1244.
- [40] 范方宇, 杨宗玲, 李晗, 等. 喷雾干燥条件对果蔬粉加工特性影响研究进展 [J]. *食品研究与开发*, 2020, 41



- (9):169-176.
- [41] 程丽娜,唐道邦,徐玉娟,等.荔枝原浆喷雾干燥配方优化研究[J].广东农业科学,2013,40(3):71-74.
- [42] 乔晓玲,闫祝炜,张原飞,等.食品真空冷冻干燥技术研究进展[J].食品科学,2008(5):469-474.
- [43] LIU Y,ZHANG Z Y,HU L D. High efficient freeze-drying technology in food industry[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition,2022,62(12):3370-3388.
- [44] WAGHMARE R B,CHOUDHARY P,MOSES J A, et al. Trends in approaches to assist freeze-drying of food: A cohort study on innovations[J]. Food Reviews International,2022,38(S1):552-573.
- [45] 王新珂,杨锡洪,吴帆,等.果蔬冷冻干燥节能新技术研究进展[J].食品与机械,2020,36(6):226-232.
- [46] OLIVAS-AGUIRRE F J, GONZÁLEZ-AGUILAR G A, VELDERRAIN-RODRÍGUEZ G R, et al. Radical scavenging and anti-proliferative capacity of three freeze-dried tropical fruits[J]. International Journal of Food Science and Technology,2017,52(7):1699-1709.
- [47] SALAZAR N A, ALVAREZ C, ORREGO C E. Optimization of freezing parameters for freeze-drying mango (*Mangifera indica* L.) slices[J]. Drying Technology,2018,36(2):192-204.
- [48] 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.
- [49] 马云龙,张雯,任艳君,等.葡萄干燥的研究进展[J].食品科技,2022,47(8):27-35.
- [50] 张强,邓酥萍,张娜英,等.微波-热风联合干燥在芒果果脯加工中的应用[J].食品研究与开发,2020,41(14):104-109.
- [51] APINYAVISIT K, NATHAKARANAKULE A, SOPON-RONNARIT S, et al. A comparative study of combined microwave techniques for longan (*Dimocarpus longan* Lour.) drying with hot air or vacuum[J]. International Journal of Food Engineering,2017,13(7):20160263.
- [52] CHEN B L, LIN G S, AMANI M, et al. Microwave-assisted freeze drying of pineapple: Kinetic, product quality, and energy consumption[J]. Case Studies in Thermal Engineering,2023,41:102682.
- [53] 杨博,王未君,李文林.热泵-微波联合干燥技术研究进展[J].食品工业,2022,43(7):202-206.
- [54] CHANG S K, ALASALVAR C, SHAHIDI F. Review of dried fruits: Phytochemicals, antioxidant efficacies, and health benefits[J]. Journal of Functional Foods,2016,21:113-132.
- [55] PEREIRA C, MARTIN A, LOPEZ-CORRALES M, et al. Evaluation of the physicochemical and sensory characteristics of different fig cultivars for the fresh fruit market[J]. Foods,2020,9(5):619.
- [56] CHONG C H, LAW C L, FIGIEL A, et al. Colour, phenolic content and antioxidant capacity of some fruits dehydrated by a combination of different methods[J]. Food Chemistry,2013,141(4):3889-3896.
- [57] BARRAGAN-IGLESIAS J, RODRIGUEZ-RAMIREZ J, SABLANI S S, et al. Texture analysis of dried papaya (*Carica papaya* L., cv. Maradol) pretreated with calcium and osmotic dehydration[J]. Drying Technology,2019,37(7):906-919.
- [58] NAGVANSHI S, VENKATA S K, GOSWAMI T K. Study of color kinetics of banana (*Musa cavendish*) under microwave drying by application of image analysis[J]. Food Science and Technology International,2020,27(7):660-673.
- [59] 张振亚,韩球丛,金听祥,等.超声预处理对热泵干燥菠萝品质的影响[J].食品与发酵工业,2022,48(12):111-116.
- [60] BONNEAU A, BOULANGER R, LEBRUN M, et al. Aroma compounds in fresh and dried mango fruit (*Mangifera indica* L. cv. Kent): Impact of drying on volatile composition[J]. International Journal of Food Science & Technology,2016,51(3):789-800.
- [61] 张巧,顾欣哲,吴永进,等.枇杷果皮热风干燥前后功能性成分含量变化与挥发性成分分析[J].食品科学,2016,37(16):117-122.
- [62] 杨晓红,赵宏亮,丁陈,等.不同热风干燥温度对番木瓜粉品质与香气成分的影响[J].热带作物学报,2018,39(2):372-379.
- [63] SAHA B, BUCKNALL M P, ARCOT J, et al. Profile changes in banana flavour volatiles during low temperature drying[J]. Food Research International,2018,106:992-998.
- [64] 黄燕芬.荔枝整果和果肉热泵干燥特性及其风味成分的变化[D].广州:华南农业大学,2020.
- [65] SONG C F, CUI Z W, JIN G Y, et al. Effects of four different drying methods on the quality characteristics of peeled litchis (*Litchi chinensis* Sonn.) [J]. Drying Technology,2015,33(5):583-590.
- [66] CHENG A W, XIE H X, QI Y, et al. Effects of storage time and temperature on polyphenolic content and qualitative characteristics of freeze-dried and spray-dried bayberry powder[J]. LWT-Food Science and Technology,2017,78:235-240.
- [67] 邵雪花,赖多,肖维强,等.不同干燥方法对番石榴果实品质及抗氧化活性的影响[J].中国农学通报,2022,38(6):134-140.
- [68] DADHANEYYA H, KESAVAN R K, INBARAJ B S, et al. Impact of different drying methods on the phenolic composition, in vitro antioxidant activity, and quality attributes of dragon fruit slices and pulp[J]. Foods,2023,12(7):1387.
- [69] 林炎娟,周丹蓉,吴如健,等.不同干燥方式对橄榄果

- 粉品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(7): 90-97.
- [70] TAKOUGNADI E, BOROZE T E T, AZOUMA O Y. Effects of drying conditions on energy consumption and the nutritional and organoleptic quality of dried bananas [J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 268: 109747.
- [71] AN K J, WU J J, XIAO H W, et al. Effect of various drying methods on the physicochemical characterizations, antioxidant activities and hypoglycemic activities of lychee (*Litchi chinensis* Sonn.) pulp polysaccharides [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 220: 510-519.
- [72] 韩苗苗, 姚娟, 易阳, 等. 龙眼果肉干燥过程中多糖的理化特征与活性变化规律 [J]. *食品科学*, 2017, 38(21): 67-73.
- [73] CHOI I S, LEE Y G, KHANAL S K, et al. A low-energy, cost-effective approach to fruit and citrus peel waste processing for bioethanol production [J]. *Applied Energy*, 2015, 140: 65-74.
- [74] QIN Z, LIU H M, CHENG X C, et al. Effect of drying pretreatment methods on structure and properties of pectins extracted from Chinese quince fruit [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 137: 801-808.
- [75] DONG H L, DAI T T, LIANG L, et al. Physicochemical properties of pectin extracted from navel orange peel dried by vacuum microwave [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 151: 112100.

## Research progress on drying processing technology of Lingnan characteristic fruits

XIAO Gengsheng, LIN Kewei, SHEN Qiaomei, LIU Dongjie, MA Lukai, WANG Feng

*College of Light Industry and Food Technology/Key Laboratory of Green Processing and Intelligent Manufacturing of Lingnan Specialty Food, Ministry of Agriculture, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China*

**Abstract:** Lingnan characteristic fruits are prone to spoilage after harvesting, drying processing technology can be used to produce dried products that can effectively extend shelf life, reduce transportation costs, and enhance product value. A review of current drying technologies for Lingnan characteristic fruits (hot air drying, heat pump drying, microwave drying, spray drying, freeze drying and combined drying) was conducted to summarize their advantages and disadvantages as well as their effects on the quality of dried products. Drying temperature is a key factor affecting the quality of dried fruit products. Hot air drying is convenient to operate, but high temperature will reduce the quality of its products. Heat pump drying has less sensory loss of fruits, and is suitable for drying heat-sensitive fruits. Microwave drying has high drying efficiency, but the surface of dried fruit products will be burnt with excessive drying power. Spray drying has high efficiency and large processing capacity with good quality produced fruit powder. Freeze drying can maximize the flavor and nutritional content of fruits but consumes more energy, and combined drying can improve the efficiency and reduce energy consumption while improving the quality of fruit dried products by combining the advantages of single drying technology, however, the optimal process parameters need to be determined through a large number of experiments. In the future, we should combine advanced drying technology and equipments and utilize jointly the advantages of single drying technology to adopt appropriate drying processing technology and optimize the combined drying process for different characteristics of fruits, which has contributed to the improvement of drying efficiency and stability of dried product quality. This study aimed to provide references for the innovation-driven development of Lingnan characteristic fruit drying technology.

**Key words:** Lingnan characteristic fruit; drying process technology; dried fruit product; sensory property; nutritional component; active substance

(责任编辑:杨晓娟)