

陈晓玲, 管维良, 侯东园, 等. 水果纸干燥技术研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(22): 463–469. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120084

CHEN Xiaoling, GUAN Weiliang, HOU Dongyuan, et al. Research Progress of Fruit Paper Drying Technology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(22): 463–469. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120084

· 专题综述 ·

水果纸干燥技术研究进展

陈晓玲^{1,2,3}, 管维良^{2,3,4}, 侯东园^{2,3}, 蔡路昀^{2,3,4,*}, 张进杰^{1,*}

(1. 宁波大学食品与药学学院, 浙江宁波 315300;

2. 浙江大学宁波研究院, 浙江宁波 315000;

3. 浙大宁波理工学院生物与化学工程学院, 浙江宁波 315000;

4. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 浙江杭州 310058)

摘 要: 水果纸是新鲜水果经过打浆、熬煮和干燥后制成的脱水干果纸状薄片小吃。干燥是最古老的食品保存方法之一, 可去除水果中的水分, 延迟其贮藏期限供全年食用。最常见的干燥方式包括热风干燥、真空干燥、冷冻干燥及联合干燥技术。干燥过程的能源效率和水果纸的品质是水果干燥中需考虑的重要因素。本文归纳了可用于水果纸干燥的热风干燥、冷冻干燥、真空干燥、微波干燥、红外辐射干燥和折射窗干燥的研究现状以及水果纸的预处理方法和干燥工艺对其形态、质构、营养成分的影响, 旨在提高水果纸的干燥效率, 最大限度地保留水果的活性成分, 为今后食品行业中进一步研究水果纸的干燥加工提供参考。

关键词: 水果纸, 干燥技术, 营养物质, 品质

中图分类号: TS255.42

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)22-0463-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021120084

本文网刊:



Research Progress of Fruit Paper Drying Technology

CHEN Xiaoling^{1,2,3}, GUAN Weiliang^{2,3,4}, HOU Dongyuan^{2,3}, CAI Luyun^{2,3,4,*}, ZHANG Jinjie^{1,*}

(1. College of Food and Pharmaceutical Sciences, Ningbo University, Ningbo 315300, China;

2. Ningbo Research Institute, Zhejiang University, Ningbo 315000, China;

3. College of Biological and Chemical Engineering, Ningbo Tech University, Ningbo 315000, China;

4. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Fruit paper is a paper-shaped snack made from fresh fruit after pulping, boiling and drying. Drying, one of the oldest methods for food preservation, removes water from fruit and extends its shelf-life for year-round consumption. The most commonly used drying methods include hot air drying, vacuum drying, freeze drying, and their combinations. The energy efficiency of drying process and the quality of fruit paper are both important to be considered in fruit pulp drying. This article updates the research status of drying technologies applied in fruit paper production, including hot air drying, freeze drying, vacuum drying, microwave drying, infrared radiation drying, and refraction window drying. In addition, the influence of the pretreatments and drying process on fruit paper's shape, texture, and nutrients are also summarized. This work aims to improve the drying efficiency of fruit paper and retain the active ingredients of fruit to the maximum extent, and to provide reference for further research on drying processing of fruit paper in food industry.

Key words: fruit paper; drying technology; nutrient substance; quality

水果是居民必需营养物质的重要来源, 其含有
的维生素、多糖、膳食纤维等丰富的生物活性化合物

可为人们提供显著的健康益处^[1-2]。根据居民膳食指
南报道, 水果的每日推荐摄入量为 300~500 g^[3]。适

收稿日期: 2021-12-08

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFF0414425); 余姚市科技计划项目(2020NS01)。

作者简介: 陈晓玲(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: 1434911043@qq.com。

* 通信作者: 蔡路昀(1981-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: cailuyun@zju.edu.cn。

张进杰(1981-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 水产品加工, E-mail: jackace@163.com。

量的水果摄入量不仅可以降低心血管疾病各年龄段人群中的发病率和死亡风险,还可以降低肺癌和消化道疾病的发病风险^[4-5]。

然而,水果极易受环境或贮藏条件的影响发生品质恶化,保质期较短。这不仅使水果的营养价值显著下降,同时也造成了普遍的食物浪费。当前我国食物损耗和浪费问题普遍存在,从生产、运输、贮存、加工到消费都存在严重的浪费现象^[6]。渗透脱水、涂膜保鲜、气调保鲜、臭氧保鲜、低温保鲜等多种技术可以减少损失并延长水果的保质期^[7-9]。其中,干燥是实现这一目标的最古老且最常用的方法。干燥是一个同时涉及传热和传质的复杂过程,此过程中原料的水分持续蒸发,最终达到低水分活度^[1],抑制微生物生长、酶促活性从而达到延长食品保质期的目的。最常见的干燥技术包括自然风干、真空干燥、冷冻干燥及不同干燥技术的组合。然而,果泥在脱水过程中会发生一系列物理、化学反应如褐变、脂质氧化等,导致干燥产品的质量参数(色泽、风味、质构和营养物质)会发生变化,其变化程度与前处理方式和干燥处理方式密切相关^[10-11]。

水果纸或水果皮,是新鲜水果依次经过打浆、熬煮和干燥后制成的脱水干果纸状薄片小吃^[11-12]。由于干燥过程有效浓缩了其中的营养、能量和矿物质,水果纸是一种健康、营养、美味的甜点或零食^[13]。研究证明,水果纸保留了水果原料中丰富的糖类、蛋白质、有机酸、维生素、矿物质等营养成分,还含有多酚、黄酮类等生理活性物质,其在抗氧化、防治疾病和促进身体健康方面具有重要作用^[13-14]。有很多文章已经报道出水果纸的相关研究,包括猕猴桃^[15]、菠萝^[16]、石榴^[17]等水果。

因此,本综述归纳了水果纸生产过程常用的干燥的热风干燥(hot air drying)、冷冻干燥(freeze drying)、真空干燥(vacuum drying)、微波干燥(microwave drying)、红外辐射干燥(infrared drying)和折射窗干燥(refraction window drying)的研究现状,总结了水果纸的预处理方法和干燥工艺对其形态、质构、营养成分等的影响,并指出了未来水果纸干燥加工的研究方向和发展趋势,为今后食品行业中进一步研究和合理利用干燥加工提供参考。同时希望能促进水果纸产品的商业开发,并引起各个科学领域的研究人员对研究水果纸作为休闲食品的兴趣。

1 水果纸的形成

水果纸是一种有吸引力的、彩色的、有独特风味的产品。水果纸由多种果泥和浓缩果汁制成,首先对原料进行分选、洗涤、去皮、切块、打浆,并将果浆加热浓缩至果泥等预处理工序后,使用或不使用食品添加剂,采用合适的干燥技术使之成型^[18-20]。

1.1 预处理

新鲜水果加热浓缩、干燥前可进行预处理,以降低原材料的初始含水量或改变植物组织的结构,并减

少干燥时间和成本,减少微生物污染,保证产品的质量^[19,21]。最常用的预处理方法为热烫和渗透脱水^[18,22]。热烫通常用作微生物和多酚氧化酶迅速灭活的预处理方法,其主要目的是保护水果的初始颜色和提高水果纸的干燥速度。渗透脱水的原理是将水果浸入一定温度的高浓度溶液中,利用细胞膜的半透性进行脱水。整个渗透脱水过程没有高温,有效降低了加工产品的能耗,最大限度地保持了产品的风味和营养品质。如在亚硫酸盐和其他溶液中采用长时间低温(70 ℃, 20 min)或短时间高温(100 ℃, 3 min)对水果进行热烫和浸渍,通过控制温度、渗透时间、糖浆浓度、渗透液浓度等进行渗透脱水处理等^[17,22]。

1.2 原料搭配

水果纸的原料决定了产品的色泽、质构、口感等感官特性。恰当的水果搭配可以起到互补的作用。Nizamlioglu 等^[23]研究发现苹果-李子混合纸产品的普遍接受度、色泽、质构、口感和风味优于纯李子纸。Jethwani 等^[24]采用热风干燥制作了形态、质地较好的芒果奇亚籽、苹果奇亚籽和番石榴奇亚籽水果纸,其中芒果奇亚籽水果纸具有最佳的感官评定结果。水果纸的原料搭配对水果纸产品的生物活性物质(如黄酮)的含量也会产生积极或消极影响^[25]。Mphaphuli 等^[26]研究表明在芒果纸中添加李子,可提高芒果纸的营养物质含量。纯芒果纸的抗氧化活性和酚类含量都较低。增加芒果-李子纸中的李子含量可显著提升黄酮类化合物含量,改善抗氧化活性。同时芒果-李子纸也含有碳水化合物,纤维含量高,钠含量低,因此是一种潜在的功能性小吃。目前普遍的做法是使用纤维含量较高的水果(苹果和梨等)提高水果纸的坚韧度,同时搭配其他水果赋予水果纸独特的香气和营养成分。

1.3 食品添加剂

通常在水果混合之前或混合过程中添加合适的食品添加剂,如葡萄糖浆、果胶、柠檬酸、焦亚硫酸钾等,这些成分与果泥混合,制成比原始水果品质更好、储存时间更长的水果纸^[27-28]。

水果纸在干燥过程中维生素 C 等营养物质会发生氧化反应,这对它们的感官特性和营养价值产生负面影响。因此,添加抗氧化剂可以抑制产品的氧化和褐变^[29]。Demarchi 等^[30]在实验中添加亚硫酸钾为抗氧化剂,采用扩散模型对干燥过程进行研究并用一级模型描述了水果纸的抗氧化能力损失。随着空气温度的升高,两种配方(添加或不添加亚硫酸钾配方)的水果纸的抗氧化能力都降低了。加入亚硫酸钾的样品,除 70 ℃ 干燥的样品外,其抗氧化能力明显提高。此外,添加亚硫酸钾的样品的动力学常数较低,说明食品添加剂具有提高产品品质作用。Barman 等^[15]对添加不同浓度的亲水胶体(黄原胶、瓜尔胶和果胶)的水果纸进行感官评定后发现使用 0.5% 瓜尔胶、0.5% 果胶和 0.5% 黄原胶制作的水果纸产品的

感官评定结果最好。

水果纸中添加适量的防腐剂还可以延长水果纸的贮藏期,此外对其口感和质地也有一定的提升作用。Tylewicz 等^[25]的研究表明在猕猴桃纸中添加海藻多糖能在脱水过程中有效保留水果的脂质双层,对生物活性物质产生必要的保护作用,从而提升终产品的类黄酮含量。García-García 等^[31]研究了添加龙舌兰和菊粉对苹果纸的微观结构、热性能和感官特性的影响。对比之下,龙舌兰的添加能够显著改善苹果纸的质构,使产品表面更光滑且硬度值较低,同时还能提升甜味。Quintero 等^[29]表明添加焦亚硫酸钾的苹果纸在 20 ℃ 下储存 7 个月期间保持了苹果纸的质量特性,抑制了微生物的繁殖。

由于果肉中的低分子量化合物(如有机酸和糖)导致水果纸黏度高,使其容易粘在包装材料牙齿上等。因此,可以将高分子量化合物(如淀粉、麦芽糖糊精和果胶)添加到果浆中以尽量降低黏性或降低吸湿性。Valenzuela 等^[32-33]表明麦芽糖糊精降低了苹果纸的吸湿性。添加麦芽糖糊精的苹果纸在相对湿度下进行检测后发现粘附力和内聚力破坏程度显著降低。水果纸产品的分子量和水分含量的变化会在咀嚼和和吞咽时产生不同的质地和口感。果胶、明胶和海藻酸盐等亲水胶体通常用作水果纸的增稠剂,以改善果泥的流变特性和果皮质地。然而,添加这些化合物可能会降低干燥速率^[16]。Gujral 等^[16]发现添加剂蔗糖、果胶和麦芽糖糊精对产品的干燥速率、干燥速率常数和有效水分扩散率有显著影响。添加蔗糖、果胶和麦芽糖糊精后菠萝纸和芒果纸的干燥速率均降低。添加果胶对菠萝纸和芒果纸的水分扩散率有影响,菠萝皮和芒果皮干燥过程中有效水分扩散率分别为 $6.64\sim 12.93\times 10^{-7}$ 和 $1.65\sim 4.03\times 10^{-7}$ m²/sec。

2 干燥方式对水果纸品质的影响

食品干燥是通过将热量或其他能源应用于食品材料以去除水分来延长保质期和延缓食品腐烂的有效程序^[34]。如表 1,干燥方法的选择取决于水果种类、干燥产品的适宜性、经济性以及最终干燥产品质量的需要^[35]。不正确的干燥方法会对最终产品的质量造成不可逆转的损害,使产品失去商业价值。通过现代化的设备和精心设计的干燥方法,水果纸可以在一年中的任何时间进行干燥,以满足消费者的要求。水果纸的干燥是一个同时涉及传热和传质的过程^[36]。传热率是外部传热系数和材料热导率的函数,而传质速率通常取决于材料中水的传质系数和质量扩散率。大多数水果纸的干燥温度为 50~80 ℃,以水分含量降至 12%~20%(干重)为终点^[18]。

2.1 热风干燥

热风干燥是食品加工过程中常用的简单、经济的干燥技术,利用热风作为干燥介质,产生所需的温度梯度来干燥物料。通常需要高温和较长的干燥时间。其干燥时间取决于干燥过程中产品的厚度、空

气温度、相对湿度和风速^[11]。干燥温度是影响最终产品质量的关键因素。尽管高温条件会提升样品的干燥速率,但是也会降低最终产品的质量,例如造成必需氨基酸的损失、维生素降解以及产品色泽、质构和风味的劣变^[37]。此外,由于热空气导热率较低会造成产品表面硬化,干燥效率低,干燥时间长^[38]。

Nizamlioglu 等^[23]研究了对流干燥和日晒对苹果、李子以及苹果-李子混合果纸(50:50, w/w)的质量参数的影响。结果表明日晒(30±5 ℃)和热风干燥(65 ℃)对色泽和感官特性没有负面影响,所有产品都具有良好的色泽和风味,且热风干燥可有效提高总酚含量和抗氧化活性,从而显著改善产品的功能特性,推测是由于在高于 50 ℃ 下长时间干燥可能会破坏植物细胞壁并释放大量的酚类化合物。

热风干燥形成的水果纸会有较好的质地和滋味,但色泽不佳,营养成分损失较多。Roknul 等^[39]发现通过热风干燥加工成的桃纸组织结构紧密,表面光滑,且口感较好。同样, Basumatary 等^[40]和 Jethwani 等^[24]分别采用热风干燥制作了形态、质地较好的橄榄纸、芒果奇亚籽纸、苹果奇亚籽纸和番石榴奇亚籽水果纸。Eyiz 等^[41]发现高温热风干燥提高了山楂纸的总酚类含量,但维生素 C 含量较少,抗氧化活性较低,褐变反应较高,这是因为山楂中含有的大量还原糖会在干燥过程中发生美拉德反应,同时热处理引起了维生素 C 氧化降解。同样, Demarchi 等^[30]在最佳条件(中等气温)下采用热风干燥法制备苹果纸,发现其抗氧化活性的保留率仅为 16%。

2.2 真空干燥

真空干燥过程在低氧气浓度和低温条件下进行,能保持高干燥速率。因此,真空干燥常被用于干燥对热或氧气敏感的产品。与对流干燥相比,真空干燥更有利于保持样品的营养物质和生物活性。Eyiz 等^[41]在研究中发现由于真空干燥过程中的无氧条件抑制了褐变反应,真空干燥法生产的山楂纸的 L^* 值(58.34)明显高于对流干燥法(55.39)。Quintero 等^[42]通过热风、红外线和真空干燥技术对 60 和 70 ℃ 下生产的玫瑰果进行与营养相关的特征评价,发现 60 ℃ 条件下真空干燥可以得到抗氧化能力最强、酚类物质保留率最高的产品。Suna 等^[43]比较了微波、热风 and 真空干燥对桑葚的色泽(L^* 、 a^* 、 b^*)和质构的影响,结果发现真空干燥后的样品会有更满意的色泽和感官评定分数,这与真空干燥中的缺氧环境有关。Yilmaz 等^[44]对石榴纸热风干燥、真空干燥和日晒过程中的干燥动力学和产品的营养物质进行监测,研究证明真空干燥干燥更快,产品含有更高含量的酚类、花青素和维生素 C。

2.3 微波干燥

微波干燥技术是食品工业中越来越受欢迎的一大技术。微波是高频电磁波,对物质有穿透作用,引起水分子和离子粒子的搅动产热。微波干燥将高频

电磁能转化为热量,液体水分被集中蒸发并输送到食品材料表面,蒸汽在食品内部产生,然后通过内部压力梯度扩散。由于微波穿透力强,食物内外同时受热同步升温^[45]。与传统干燥相比,微波干燥具有许多优点,例如能减少干燥时间并能提高干燥产品的质量,有更高的复水率、脱水率,同时使食品呈现更好的多孔结构^[45]。但是,干燥环境过热通常会导致烧焦和产生异味,尤其是在微波干燥的最后阶段^[45]。

Juhaimi 等^[46]表明,微波干燥中微波功率 180 W 时比微波功率 540 W 的干燥成品的总酚含量和抗氧化活性低,这可能是因为当微波功率出现较大变化(180~540 W)时,较高的微波功率可以缩短加热时间,从而更好地提高营养物质的保留率。此现象表明与适当高微波功率下的微波干燥比低微波功率下的微波干燥更能够保持食物材料的营养成分。Suna 等^[43]也表明 180 W 功率下的样品色泽优于 90 W 功率下的样品。Özkan 等^[47]研究了热空气干燥、真空干燥和微波干燥对黑刺李干燥纸的干燥特性、有效水分扩散率、色泽、感官特性和总酚含量的消化稳定性和抗氧化能力的影响。研究结果表明微波干燥能有效减少干燥时间,同时保留原有的营养价值,抑制生物活性物质的降解。Suna 等^[43]研究了微波、热风 and 真空干燥对桑葚的干燥特性、有效水分扩散率、总酚含量、抗氧化能力、色泽(亮度值 L^* 、红绿值 a^* 、黄蓝值 b^*)和质构(硬度、弹性、咀嚼度和黏性)的影响。研究表明微波干燥比热风干燥和真空干燥方法更适用于桑葚干制品生产,因为微波干燥处理的样品具有最高的有效水分扩散率,含有更高的总酚含量和更强的抗氧化能力。然而,微波干燥后的微波干燥有损产品感官价值。Özkan 等^[47]、Suna 等^[43]在他们的研究中发现微波干燥的样品因为不均匀受热及多孔性状导致较低的感官评定分数。

2.4 冷冻干燥

冷冻干燥已被广泛应用于制备高品质的干制果蔬产品,其被认为是获得高品质干燥产品的最先进的干燥方法之一^[48]。冷冻干燥是以冷冻产品升华脱水为基础的,涉及三个主要过程:冷冻、一次干燥和二次干燥^[37]。冷冻干燥过程中低温、缺氧、缺乏液态水的环境条件使微生物生长和代谢过程停止,有利于保持产品最终质量^[37]。然而,冷冻干燥进程缓慢,耗时较长,产量相对低。此外,由于需要同时达到真空和低温条件,总体运行成本也较高^[37]。

冷冻干燥可以有效保留原料的营养成分,使产品具有高营养价值。在 Tylewicz 等^[25]的研究中,与在 70 ℃ 下风干获得的草莓水果纸相比,通过冷冻干燥(-40 ℃)获得的水果纸保留了更高的多酚、维生素 C 和类黄酮含量。Ratti^[37]通过分析热风干燥和冷冻干燥对草莓三种质量参数(复水化、色泽和体积)的影响,认为冷冻干燥与其他食品干燥方法相比,能更有效地保持产品品质。Chen 等^[49]也同样在对

蓝莓进行不同干燥方式(热风干燥、冷冻干燥和电流体动力干燥)的研究中发现真空干燥制作的蓝莓纸保留了大部分生物活性化合物并且具有最满意的色泽和外观。

2.5 红外辐射干燥

红外辐射加热是一种热物理处理技术,其波长范围为 0.78~1000 μm ^[50]。与热风干燥相比,这种物理处理技术有很多优点,如能够即时、均匀、快速地加热,能够较好地保留维生素、多酚等营养物质等。当红外线照射到要干燥的材料上时,它会转化为热量^[11]。在干燥过程中,热表面将辐射能传递到产品表面,而不加热周围的空气。由于其穿透力较弱、长时间暴露后会导致产品破裂和不必要的膨胀,可选择与其他热(微波、射频、红外)和非热(超高压和电场)技术一起使用,以进一步提高干燥产品的干燥性能和质量^[50]。

红外干燥的干燥速率高,能耗低,同时还能保证物料内部的温度分布均匀,从而生产出更优质的产品^[39]。Jaturonglumlert 等^[36]建议红外可应用于制作水果纸和薄层干燥工艺。尽管红外是一种更快的干燥手段,它能穿透物料并在内部产热,但其穿透能力有限,这使得红外线对较厚的产品效果较差。Jaturonglumlert 等^[36]对龙眼纸进行了测试,结果表明与热风干燥相比,红外干燥具有高传热系数,可将干燥效率提高 2~2.5 倍或更高,此外这种干燥方式还具有清洁的工作环境,节省操作空间等优势^[51]。

Roknul 等^[39]通过比较热风干燥、红外干燥、射频热风干燥和微波热风干燥四种干燥技术对干燥后的桃纸色泽、再水化、质构属性、气味和滋味等质量属性的影响,经色度计、电子鼻、电子舌测定发现红外辐射干燥后的产品表现出最佳的色泽(褐变最浅)、风味(保留了桃子的大部分特征风味)、滋味(糖酸比协调)。因此认为红外辐射干燥是可以生产出优质的水果纸产品并确保全年供应美味又营养的桃干制品的一种清洁、节能的干燥技术。

2.6 折射窗干燥

折射窗干燥是一种薄膜干燥系统,具有高传热和传质速率,可加快干燥速度^[52]。因此它是一种省时、成本效益高且产品质量有保证的技术。

使用折射窗干燥技术可以减少产品的营养损失,保持产品良好的感官特性。Tontul 等^[17]第一次使用折射窗干燥生产水果纸,就将该技术描述为生产高质量水果纸的最好的干燥方法。Tontul 等^[17]发现,与热风或微波热风干燥的石榴纸相比,折射窗干燥生产的石榴纸色泽和风味更具有吸引力、酶促褐变反应率较低和更高的生物活性化合物含量(维生素 C 和花青素)。

Rajoriya 等^[52]研究了温度(70、80 和 90 ℃)和果泥厚度(2 和 3 mm)对折射窗干燥香蕉果泥的干燥特性、传质速度和质量属性的影响。结果表明,与在

较低温度(70 和 80 ℃)下干燥两种厚度的果泥相比,在 90 ℃ 下干燥减少了干燥时间和能源消耗。此外,在 90 ℃ 干燥的样品中,总色泽的变化最小,总酚(10.3 mg GAE/g dm)和类黄酮含量(3.4 mg QE/g dm)保留效果也更好,抗氧化能力(58.8 mmol/L TE/g dm)更强。Shende 等^[53] 对不同比例的芒果泥和配料进行热风干燥和折射窗干燥,通过感官评定发现添加了焦亚硫酸氢钾的经折射窗干燥处理的芒果纸(含有 90% 芒果果肉和 10% 糖的样品)在所有芒果纸样品中排名第一,感官等级为“良好”。

2.7 联合干燥技术

热风干燥、冷冻干燥、真空干燥、微波干燥和折射窗干燥通常可以结合使用,发挥各自的技术优势,以提高干燥速度并提升产品质量。Roknul、Wojdyło 等^[39,48] 根据干燥动力学,发现微波热风干燥可以在最短的操作时间内完成桃纸的干燥。在这种组合中,热空气从产品表面去除游离状态的水,而微波能量从产品内部去除水分子。微波热风干燥相结合的系统不仅提高了干燥速率,而且还有效保持了干燥产品的质量。有研究表明,真空微波干燥,如果应用得当,可显著缩短生物材料的干燥时间,确保干燥产品的高质量^[48]。Wojdyło 等^[48] 通过 480 W 功率的真空-微波干燥获得了色泽、口感较好的酸樱桃纸,并且能较好

地保留槲皮素和山奈酚衍生物的含量。此外,微波真空干燥和微波红外联合干燥可以对细胞之间的内聚力造成更大的破坏,产生更多的多孔结构,干燥制品从而具有高再水化率^[45]。

3 展望

水果纸是一种合理方便的水果消费替代品,需要合适的加工工艺和储存条件才能保证水果纸的高品质。用于水果纸的干燥技术都有其优点和局限性。热风干燥简单且经济,是水果纸生产中最常用的技术之一。然而,这种高温长时间的干燥方式会降低水果纸的质量并导致不愉快的色泽。充分合理优化每种干燥方法,结合不同的干燥技术,是改善水果纸品质和消费情况的一个必要条件。干燥方法的恰当组合使用可以减少能源消耗和环境影响,生产高质量、受欢迎的水果纸。

与传统热风干燥相比,微波干燥的能耗更低,产品具有更好的感官特性。微波加热过程中,随着微波功率的增加,热风-微波加热可以有效降低最终含水量和回收率,但相应地增加了样品的收缩率、脱水率和复水率^[45]。虽然微波在食品加工中已得到广泛应用,但微波场的不均匀性是实现食品均匀加工的长期技术障碍,通常会导致食品出现热点或冷点。微波具有独特的高效加工特性,它与其他常规加工方法的结

表 1 不同干燥方式的优缺点
Table 1 Advantages and disadvantages of different drying methods

干燥方式	水果原料	干燥方式对水果纸性能的影响	与热风干燥相比的优势	缺点	参考文献
热风干燥	苹果	总酚含量和抗氧化能力低 亮度L*值更高	/	降低最终产品的质量,造成必需氨基酸的损失、维生素降解以及产品色泽、质构和风味的劣变;干燥效率低	Demarchi等 ^[30]
	桃				Roknul等 ^[39]
	山楂				Eyiz等 ^[41]
	黑刺李				Özkan等 ^[47]
真空干燥	山楂	抗氧化能力强、酚类物质保留率高 满意的色泽和感官评定分数 高含量的酚类、花青素和维生素C	保持高干燥速率,有利于保持样品的营养物质和生物活性	无美拉德反应产物,产品风味不佳	Eyiz等 ^[41]
	玫瑰果				Quintero等 ^[42]
	桑葚				Suna等 ^[43]
	石榴				Yılmaz等 ^[44]
微波干燥	黑刺李	最高的总酚含量和抗氧化能力	能减少干燥时间并能提高干燥产品的质量,有更高的复水率、脱水率,同时使食品呈现更好的多孔结构;有效减少干燥时间,同时保留原有的营养价值,抑制生物活性物质的降解	干燥环境过热通常会导致烧焦和产生异味;不均匀受热;较低的感官评定分数	Özkan等 ^[47]
	桑葚	微波干燥处理的样品具有最高的有效水分扩散率,含有更高的总酚含量和更强的抗氧化能力			Suna等 ^[43]
冷冻干燥	草莓	多酚、维生素C和类黄酮含量	有效保留原料的营养成分,使产品具有高营养价值	成本高	Tylewicz等 ^[25]
	蓝莓	色泽佳			Chen等 ^[49]
红外线干燥	龙眼	干燥速度快	高传热系数,可将干燥效率提高2~2.5倍或更高;清洁的工作环境;节省操作空间;有效保留原料的营养成分和风味	/	Jaturonglumlert ^[50]
	桃	褐变最浅;保留了桃子的大部分特征风味;糖酸比协调			Roknul ^[39]
	石榴	色泽和风味更具有吸引力;酶促褐变反应率较低和高的生物活性化合物含量(维生素C和花青素)			Tontul等 ^[17]
折射窗干燥	香蕉	总色泽的变化最小;总酚和类黄酮含量及抗氧化能力的保留效果好	高传热和传质速率,省时,减少产品的营养损失,保持产品良好的感官特性	/	Rajoriya等 ^[52]
	芒果	在所有芒果纸样品中排名第一,感官等级为“良好”			Shende等 ^[53]
微波热风干燥	桃		提高了干燥速率;有效保持了干燥产品的质量	/	Roknul ^[39] 、 Wojdyło等 ^[48]
真空微波干燥	酸樱桃	色泽、口感较好的酸樱桃纸;槲皮素和山奈酚衍生物的含量	干燥制品具有高再水化率	/	Concha等 ^[48]

合通常可以有效地克服常规技术的缺点,因此,未来的研究可以集中开发微波与其他干燥技术的组合技术,在提高加工效率的同时保持产品质量和安全。但是利用物理场能对组合干燥设备的技术水平和经济成本要求较高。企业和技术工程师需要在产品质量和更高的成本效率之间进行权衡,进而选择更好的生产方案。此外,选择正确的包装对于防止水果纸在储存和运输过程中的质地、色泽、风味和营养特性发生劣变至关重要。

水果纸作为休闲食品存在相当大的扩展和创新机会。水果纸富含膳食纤维、多酚、维生素等营养物质,应该进行更多的研究来确定植物活性物质的保留率和生物可利用率,如多酚、黄酮类化合物、植物雌激素及其抗氧化活性或其他生物活性。未来相关研究者可以控制水果纸在加工和储存过程中的目标生物活性物质(如多酚、多糖、蛋白质)之间的相互作用,控制水果纸配方和加工方法之间的有益协同作用有可能促进基于水果纸的休闲食品的实质性创新。

参考文献

- [1] SAGAR V R, SURESH KUMAR P. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: A review[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2010, 47(1): 15–26.
- [2] LOMBRANA J I, ZUAZO I, IKARA J. Moisture diffusivity behavior during freeze drying under microwave heating power application[J]. *Drying Technology*, 2001, 19(8): 1613–1627.
- [3] 杨月欣, 张环美. 《中国居民膳食指南(2016)》简介[J]. *营养学报*, 2016, 38(3): 209–217. [YANG Y X, ZHANG H M. Dietary Guidelines for Chinese Residents (2016)[J]. *Chinese Journal of Nutrition*, 2016, 38(3): 209–217.]
- [4] 谢虹. 社区居民膳食现状与糖尿病的关系研究[D]. 合肥: 安徽医科大学, 2020. [XIE H. Study on the relationship between dietary status and diabetes mellitus in community residents [D]. Hefei: Anhui Medical University, 2020.]
- [5] 杨慧霞. 膳食营养健康风险评估指标体系构建[D]. 天津: 天津科技大学, 2020. [YANG H X. Construction of dietary nutrition health risk assessment index system [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2020.]
- [6] 隋文杰, 贾洪玉, 敬佩, 等. 中国果品加工固体废弃物资源化利用现状与分类管理研究[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(S1): 172–180. [SUI W J, JIA H Y, JING P, et al. Research on resource utilization and classification management of solid waste from fruit processing in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(S1): 172–180.]
- [7] FAN Y, YANG J, DUAN A, et al. Pectin/sodium alginate/xanthan gum edible composite films as the fresh-cut package[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 181: 1003–1009.
- [8] 贾朝爽, 王志华, 高剑利, 等. 不同 O₂、CO₂ 体积分数气调贮藏对‘砀山酥’梨货架期生理病害和相关指标的影响[J]. *中国果树*, 2020(6): 16–22, 40, 142. [JIA C S, WANG Z H, GAO J L, et al. Effects of different oxygen and carbon dioxide concentration on shelf life of ‘Dangshansu’ pear physiological disease and related indexes after refrigeration. [J]. *Chinese Fruit Trees*, 2020(6): 16–22, 40, 142.]
- [9] 马玉婷, 王瑞环. 水果保鲜技术研究进展[J]. *山东化工*, 2020, 49(20): 48–49. [MA Y T, WANG R H. Research progress of fruit preservation technology[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2020, 49(20): 48–49.]
- [10] CHOU S K, CHUA K J. New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2001, 12(10): 359–369.
- [11] DA SILVA SIMÃO R, DE MORAES J O, CARCIOFI B A M, et al. Recent advances in the production of fruit leathers[J]. *Food Engineering Reviews*, 2019, 12(1): 68–82.
- [12] 倪震丹, 李剑. 一种苹果果纸及其制备方法: 中国, 109874963A [P]. 2019-06-14. [NI Z D, LI J. An apple paper and its preparation method: China, 109874963A[P]. 2019-06-14.]
- [13] 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.
- [14] HUANG X G, HSIEH F H. Physical properties, sensory attributes, and consumer preference of pear fruit leather[J]. *Journal of Food Science*, 2005, 70(3): E177–E186.
- [15] BARMAN M, DAS A B, BADWAIK L S. Effect of xanthan gum, guar gum, and pectin on physicochemical, color, textural, sensory, and drying characteristics of kiwi fruit leather[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(5): e15478.
- [16] GUJRAL H S, OBEROI D P S, SINGH R, et al. Moisture diffusivity during drying of pineapple and mango leather as affected by sucrose, pectin, and maltodextrin[J]. *International Journal of Food Properties*, 2013, 16(2): 359–368.
- [17] TONTUL I, TOPUZ A. Storage stability of bioactive compounds of pomegranate leather (pestil) produced by refractance window drying[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2019, 42(2): e12973.
- [18] DIAMANTE L M, BAI X, BUSCH J. Fruit leathers: Method of preparation and effect of different conditions on qualities[J]. *International Journal of Food Science*, 2014, 2014: 139890.
- [19] CONCHA-MEYER A A, DIGNOTI V, SAEZ B, et al. Effect of storage on the physico-chemical and antioxidant properties of strawberry and kiwi leathers[J]. *Journal of Food Science*, 2016, 81(3): C569–77.
- [20] 倪震丹, 李剑. 苹果渣在制备果蔬纸中的应用以及一种果蔬纸的制备方法: 中国, 109938239A [P]. 2019-06-28. [NI Z D, LI J. Application of apple residue in preparing fruit and vegetable paper and a preparation method of fruit and vegetable paper: China, 109938239A[P]. 2019-06-28.]
- [21] FIJALKOWSKA A, NOWACKA M, WIKTOR A, et al. Ultrasound as a pretreatment method to improve drying kinetics and sensory properties of dried apple[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2016, 39(3): 256–265.
- [22] AHMED I, QAZI I M, JAMAL S. Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 34: 29–43.
- [23] NIZAMLIOGLU N M, YASAR S, BULUT Y. Chemical versus infrared spectroscopic measurements of quality attributes of sun or oven dried fruit leathers from apple, plum and apple-plum mix-

- ture[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 153: 112420.
- [24] JETHWANI P, KOCHHAR A, JAVED M. Formulation and quality evaluation of antioxidant rich bars enriched with chia seed, whole mango, apple and guava[J]. *Current Research in Nutrition and Food Science Journal*, 2020, 8(3): 975–987.
- [25] TYLEWICZ U, NOWACKA M, RYBAK K, et al. Design of healthy snack based on kiwi fruit[J]. *Molecules*, 2020, 25(14): 3309.
- [26] MPHAPHULI T, MANHIVI V E, SLABBERT R, et al. Enrichment of mango fruit leathers with natal plum (*Carissa macrocarpa*) improves their phytochemical content and antioxidant properties[J]. *Foods*, 2020, 9(4): 431.
- [27] DAS A, BORA B N, CHUTIA H, et al. Processing of minerals and anthocyanins-rich mixed-fruit leather from banana (*Musa acuminata*) and sohiong (*Prunus nepalensis*)[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(9): e15718.
- [28] MARDHATILAH D, BANYURO PARTHA I B, HARTATI H. Influence of types of fatty materials and addition of sugar concentration on fruit leather quality from dragon fruit albedo (*Hylocereus polyrhizus*)[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 209: 012030.
- [29] QUINTERO RUIZ N A, DEMARCHI S M, MASSOLO J F, et al. Evaluation of quality during storage of apple leather[J]. *LWT*, 2012, 47(2): 485–492.
- [30] DEMARCHI S M, RUIZ N A Q, CONCELLON A, et al. Effect of temperature on hot-air drying rate and on retention of antioxidant capacity in apple leathers[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2013, 91(C4): 310–318.
- [31] GARCIA-GARCIA A B, OCHOA-MARTINEZ L A, LARACENICEROS T E, et al. Changes in the microstructural, textural, thermal and sensory properties of apple leathers containing added agavins and inulin[J]. *Food Chemistry*, 2019, 301: 124590.
- [32] VALENZUELA C, AGUILERA J M. Effects of different factors on stickiness of apple leathers[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 149: 51–60.
- [33] VALENZUELA C, AGUILERA J M. Effects of maltodextrin on hygroscopicity and crispness of apple leathers[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 144: 1–9.
- [34] DENG L Z, MUJUMDAR A S, ZHANG Q, et al. Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes—a comprehensive review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(9): 1408–1432.
- [35] SABLANI S S. Drying of fruits and vegetables: Retention of nutritional/functional quality[J]. *Drying Technology*, 2006, 24(2): 123–135.
- [36] JATURONGLUMLERT S, KIATSIRIROAT T. Heat and mass transfer in combined convective and far-infrared drying of fruit leather[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 100(2): 254–260.
- [37] RATTI C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: A review[J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, 49(4): 311–319.
- [38] LI K, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Recent developments in physical field-based drying techniques for fruits and vegetables[J]. *Drying Technology*, 2019, 37(15): 1954–1973.
- [39] ROKNUL AZAM S M, ZHANG M, LAW C L, et al. Effects of drying methods on quality attributes of peach (*Prunus persica*) leather[J]. *Drying Technology*, 2018, 37(3): 341–351.
- [40] BASUMATARY B, BHATTACHARYA S, DAS A B. Olive (*Elaeagnus latifolia*) pulp and leather: Characterization after thermal treatment and interrelations among quality attributes[J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 278: 109948.
- [41] EYIZ V, TONTUL I, TURKER S. Effect of variety, drying methods and drying temperature on physical and chemical properties of hawthorn leather[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2020, 14(6): 3263–3269.
- [42] QUINTERO RUIZ N A, DEMARCHI S M, GINER S A. Effect of hot air, vacuum and infrared drying methods on quality of rose hip (*Rosa rubiginosa*) leathers[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2014, 49(8): 1799–1804.
- [43] SUNA S, OZKAN-KARABACAK A. Investigation of drying kinetics and physicochemical properties of mulberry leather (pestil) dried with different methods[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 43(8): e14051.
- [44] YILMAZ F M, YÜKSEKKAYA S, VARDIN H, et al. The effects of drying conditions on moisture transfer and quality of pomegranate fruit leather (pestil)[J]. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2017, 16(1): 33–40.
- [45] GUO Q S, SUN D W, CHENG J H, et al. Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 67: 236–247.
- [46] AL JUHAIMI F, USLU N, BOZKURT D, et al. Effects of oven and microwave drying on phenolic contents and antioxidant activities in four apple cultivars[J]. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 2016, 8(1): 51–55.
- [47] ÖZKAN KARABACAK A. Effects of different drying methods on drying characteristics, colour and in-vitro bioaccessibility of phenolics and antioxidant capacity of blackthorn pestil (leather)[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2019, 55(10): 2739–2750.
- [48] WOJDYŁO A, FIGIEL A, LECH K, et al. Effect of convective and vacuum-microwave drying on the bioactive compounds, color, and antioxidant capacity of sour cherries[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 7(3): 829–841.
- [49] CHEN Y G, MARTYNENKO A. Combination of hydrothermodynamic (HTD) processing and different drying methods for natural blueberry leather[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 87: 470–477.
- [50] ZHOU C, OKONKWO C E, INYINBOR A A, et al. Ultrasound, infrared and its assisted technology, a promising tool in physical food processing: A review of recent developments[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021: 1–25.
- [51] SHENDE D, DATTA A K. Refractance window drying of fruits and vegetables: A review[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(4): 1449–1456.
- [52] RAJORIYA D, BHAVYA M L, HEBBAR H U. Impact of process parameters on drying behaviour, mass transfer and quality profile of refractance window dried banana puree[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 145: 111330.
- [53] SHENDE D, KOUR M, DATTA A K. Evaluation of sensory and physico-chemical properties of Langra variety mango leather[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2020, 14(6): 3227–3237.