

预干燥过程水分分布对热风-真空冷冻干燥桃脆片微观结构与质构的影响

于宛加^{1,2,3}, 金鑫³, 胡丽娜³, 鲜美林³, 刘萍^{1,2}, 毕金峰^{3,*}

(1.青岛农业大学食品科学与工程学院, 山东 青岛 266109; 2.青岛海军食品与营养创新研究院(青岛特种食品研究院), 山东 青岛 266109; 3.中国农业科学院农产品加工研究所, 农业农村部农产品加工重点实验室, 北京 100193)

摘要:为探究预干燥过程水分分布对热风-真空冷冻干燥桃片微观结构与质构品质的影响, 以提升桃脆片综合食用品质, 本研究对3个温度(40、60、80℃)热风预干燥过程中桃片的水分分布和升温过程中的温度进行监测, 3个温度下各选取干基水分含量分别为7、6 g/g和5 g/g作为水分转换点, 进行热风-真空冷冻干燥(联合干燥), 对桃脆片色泽、皱缩率、微观结构、孔隙分布、质构特性和吸湿性进行测定和分析。结果表明, 温度对干燥过程样品的水分分布有明显影响, 但3个温度下水分迁移的总体趋势一致。热风预干燥样品的水分含量越低, 联合干燥后样品的色泽越接近鲜样, 其中, 40℃、转换点水分含量5 g/g的样品色泽最接近鲜样。干燥时间较温度对皱缩率的影响更大, 干燥时间较温度对皱缩率的影响更大, 干燥至相同水分转换点, 40℃较60℃和80℃需要更长时间, 样品在预干燥阶段和联合干燥阶段均有明显收缩。真空冷冻干燥样品与联合干燥样品的孔隙结构有明显差异, 其中, 水分转换点为5 g/g时, 孔隙结构最不均匀; 联合干燥样品较冷冻干燥样品的平均硬度提高了52.11%, 样品预干燥水分含量越低, 联合干燥后的硬度越大, 通过热风预干燥处理可以有效调控桃脆片的硬度和脆度。与真空冷冻干燥样品相比, 联合干燥后样品吸湿率更低, 这与预干燥过程形成的结构差异有关。综上, 相比于单一的真空冷冻干燥, 热风-真空冷冻干燥更有利于改善桃脆片的质构品质和提升贮藏稳定性。

关键词:桃脆片; 联合干燥; 水分迁移; 微观结构; 质构特性

Effect of Water Distribution during Pre-drying on the Microstructure and Texture Properties of Peach Crisps Produced by Hot Air-Vacuum Freeze Drying

YU Wanjia^{1,2,3}, JIN Xin³, HU Lina³, XIAN Meilin³, LIU Ping^{1,2}, BI Jinfeng^{3,*}

(1. College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China;
2. Qingdao Institute of Naval Food and Nutrition Innovation (Qingdao Institute of Special Food), Qingdao 266109, China;
3. Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: In this study, experiments were conducted to investigate the effect of moisture distribution during pre-drying on the microstructure and textural quality of hot air-vacuum freeze dried peach slices. The moisture distribution during the hot air pre-drying process at different temperatures (40, 60 and 80 °C) and the product temperature during heating were monitored. Three levels of dry-basis moisture content (7, 6 and 5 g/g) were selected as moisture conversion points for each temperature. The color, shrinkage rate, microstructure, pore distribution, textural properties and hygroscopicity of peach crisps were measured. The results showed that drying temperature had a great impact on the moisture distribution during the pre-drying process, but the overall trends of moisture mobility were consistent among the different drying temperatures. The lower the moisture content of the pre-dried sample, the closer the color of the final dried sample to that of the fresh sample. The color of the sample dried at 40 °C with a moisture conversion point of 5 g/g was the closest to that of the fresh sample. Drying time had a greater effect on the shrinkage rate than temperature. It took longer to dry peach slices to the same

收稿日期: 2022-09-20

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-30-5-02)

第一作者简介: 于宛加(1995—)(ORCID: 0000-0001-6618-4971), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品加工与安全。

E-mail: 1254256500@qq.com

*通信作者简介: 毕金峰(1970—)(ORCID: 0000-0001-8664-8788), 男, 研究员, 博士, 研究方向为果蔬食品制造与营养健康理论及技术。E-mail: bijinfeng2010@163.com

moisture conversion point at 40 °C than 60 and 80 °C. The sample shrank distinctly during both pre-drying and combined drying. There was a significant difference in the pore structure between the freeze-dried and combined dried samples. The sample with a moisture conversion point of 5 g/g had the most heterogeneous pore structure. The average hardness value of the hot air-vacuum freeze dried sample increased by 52.11% compared with that of the freeze-dried sample. The lower the moisture content of the pre-dried sample, the higher the hardness value of the hot air-vacuum freeze dried sample. This study showed that hot air pre-drying can effectively control the crunchiness and hardness of peach crisps. The decrease in the hygroscopicity of the hot air-vacuum freeze dried sample compared with the vacuum freeze dried one may be related to the structure changes during the pre-drying process. In summary, hot air-vacuum freeze drying is conducive to improving the texture quality and storage stability of peach crisps than vacuum freeze drying.

Keywords: peach crisp; combined drying; water mobility; microstructure; texture properties

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220920-187

中图分类号: TS255.36

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2023)15-0069-11

引文格式:

于宛加, 金鑫, 胡丽娜, 等. 预干燥过程水分分布对热风-真空冷冻干燥桃脆片微观结构与质构的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(15): 69-79. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220920-187. <http://www.spkx.net.cn>

YU Wanjia, JIN Xin, HU Lina, et al. Effect of water distribution during pre-drying on the microstructure and texture properties of peach crisps produced by hot air-vacuum freeze drying[J]. Food Science, 2023, 44(15): 69-79. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220920-187. <http://www.spkx.net.cn>

桃脆片作为一种休闲食品, 近年来越来越受到消费者的喜爱。目前, 市场上桃脆片产品主要以真空冷冻干燥生产为主, 相比于其他干燥方式, 真空冷冻干燥可以较好地保留物料原有的色、香、味及形态^[1], 但其干燥时间较长、能耗高。由于真空冷冻干燥过程在真空条件下进行, 水分通过升华的形式除去, 因而形成了疏松的海绵状多孔网络结构, 导致样品与空气中的水分接触面积增大, 产品更易吸湿; 同时, 这种疏松多孔的结构使产品在质构方面呈现硬度低、脆度高的特点, 导致产品口感较差, 且在贮运和加工过程中易破碎^[2-3]。组合干燥(两种或多种干燥技术联合使用)是降低干燥成本和能源消耗以及提高产品品质的有效技术^[4], 其中, 热风干燥是最简单、经济的干燥方法, 经常作为组合干燥中的预干燥方法^[5]。质构特性是桃脆片产品的核心品质, 通过热风预干燥可以改变物料的组织结构和组成基质^[6], 进而改善桃脆片的食用品质。

Wang Haiou等^[4]研究热风预干燥过程桃片质构特性与细胞壁多糖及细胞形态的相关性, 发现在热风预干燥过程中细胞孔隙的黏度指数和分形维数均随着干燥温度的升高而增加, 细胞孔隙的缩小和细胞壁多糖的降解对桃片的质构特性有一定影响, 其研究结果对于果蔬干燥过程优化和质构品质提升有一定参考价值。杨婧等^[7]研究发现, 热风-真空冷冻干燥的龙眼干极大地保留了新鲜龙眼的色泽和外观, 品质接近真空冷冻干燥龙眼, 同时缩短干燥时间和降低了能耗, 提高了干燥效率和产品附加值。因此, 热风-真空冷冻干燥作为一种联合干燥方式, 对于提升产品品质和降低能耗均具有积极作用。

热风预干燥过程中, 水分的迁移分为细胞内的水分向细胞外迁移和细胞间隙的水分向物料表面迁移两种, 二者面临的阻力不同, 细胞内水分向外迁移会受到来自细胞膜和细胞壁的阻力, 细胞间隙水分向外迁移还会受到细胞间的阻力^[8]。Xu Congcong等^[9]研究表明, 热风干燥过程中胡萝卜的黏弹性变化与水分状态和细胞壁成分的变化密切相关。不同的热风预干燥温度和干燥时间会导致干燥物料的组织结构差异, 并影响水分在物料中的迁移速率, 进而影响干燥产品最终的质构品质^[10], 但热风预干燥过程水分迁移对桃片微观结构和质构的影响机理尚不明确。低场核磁共振(low field-nuclear magnetic resonance, LF-NMR)是一种可以快速无损分析食品干燥过程中水分分布及水分迁移的技术^[11], Kamal等^[12]利用LF-NMR和核磁共振成像相结合的技术对苹果片的水分状态和分布进行测定, 结果表明LF-NMR参数与水分含量、色泽和剪切力之间存在着良好的相关性, LF-NMR在评估干燥过程中水分动态分布与食品品质关系方面应用潜力巨大。李梁等^[13]利用LF-NMR技术分析热风干燥过程中猕猴桃切片的内部水分分布状态与变化规律, 并建立数学模型进行验证和预测, 可以实现对干燥过程含水率的快速、无损检测。为更好地理解热处理过程物料品质变化的机制, Deng Lizhen^[14]和Wang Jun^[15]等利用LF-NMR监测杏和葡萄在热处理过程中水分的分布和状态, 发现细胞超微结构损伤可能改变水分分布和状态。因此, 利用LF-NMR监测热风预干燥过程, 有助于实现对桃片品质的跟踪和预测^[16], 提高桃片品质及改善干燥工艺^[17]。

本实验采用热风-真空冷冻干燥对桃片进行联合干燥, 监测预干燥过程物料中的水分分布随干燥时间的变化, 同时测定干燥过程中桃片的温度、色泽和皱缩率, 分析水分迁移和其他品质特性间的关系, 观察联合干燥桃片微观结构, 对其质构特性和复水特性进行分析, 旨在阐明热风预干燥处理水分分布对热风-真空冷冻干燥桃脆片品质的影响。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

‘瑞光28号’黄桃采摘于北京市平谷桃产业基地, 初始湿基水分质量分数为(90.00±0.01)%。实验选用大小、外观、色泽和成熟度一致的果实。桃果实清洗去核后, 切成厚度约6 mm的桃片, 四等分切成扇形, 样品单个质量约为4 g。

1.2 仪器与设备

CPA-12 电子天平 德国Sartorius公司; DHG-9123A电热恒温鼓风箱 上海精宏实验仪器有限公司; LGJ-10 E真空冷冻干燥设备 北京四环科学仪器有限公司; TC-08热电偶数据记录仪 英国Pico公司; PQ001 LF-NMR分析仪 苏州纽迈分析仪器股份有限公司; Version 1.5.5.0电子眼色彩分析系统 美国Lens Eye-NET公司; D700数码相机 日本Nikon公司; S-570扫描电子显微镜(scanning electronic microscopy, SEM) 日本日立公司; Auto Pore IV 9500压汞仪 美国Micromeritics公司; TA.XT2i/50物性分析仪、DVS-Intrinsic水分动态吸附仪 英国Stable Micro System公司。

1.3 方法

1.3.1 热风预干燥

将桃片平铺于纱布上, 单次样品总质量约为200 g, 置于40、60、80 °C烘箱中进行热风预干燥, 干燥过程中将桃片取出称质量。3个温度下分别烘至水分含量分别为7、6、5 g/g m_d 时取出桃片, 停止干燥。将9组样品分装在自封袋中, 并置于4 °C冰箱中均湿12 h。

1.3.2 真空冷冻干燥

均湿后的桃片在-80 °C冰箱中预冻12 h, 进行真空冷冻干燥。参考陈腊梅等^[2]的方法设置真空冷冻干燥的工艺参数: 冷阱温度-49 °C、真空度约0.37 mbar。真空冷冻干燥直至水分质量分数(湿基)低于5%, 停止实验, 获得热风-真空冷冻干燥(联合干燥)桃脆片。40 °C预干燥至不同水分转换点(7、6、5 g/g m_d)的联合干燥桃脆片分别命名为40-7、40-6和40-5, 60 °C和80 °C热风预干燥处理的样品用同样的方法命名。以真空冷冻干燥桃脆片作为对照, 记为FD。

1.3.3 指标测定

1.3.3.1 干燥曲线绘制

在干燥前120 min, 每10 min取样一次, 之后

每30 min取样, 记录样品质量变化, 直至干燥至360 min。按式(1)计算取样点桃片水分比, 绘制干燥曲线。

$$\text{水分比} = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

式中: M_e 为平衡时干基水分含量/(g/g m_d); M_0 为初始干基水分含量/(g/g m_d); M_t 为 t 时刻的干基水分含量/(g/g m_d)。

1.3.3.2 物料升温过程测定

用电偶数据仪监测热风预干燥过程的温度变化, 将测温探头分别置于烘箱内、样品表面和插入样品内部, 设置数据采集频率为1 s/次。

1.3.3.3 干燥过程水分弛豫时间的测定

参考Li Xiao等^[18]的方法, 采用LF-NMR仪测定样品的自旋-自旋弛豫时间(T_2), 热风预干燥前120 min, 每10 min取样测定 T_2 , 之后在120~300 min内每30 min测定一次。采用CMPG序列, 90°脉冲时间4.80 μs, 180°脉冲时间8.40 μs, 采样点640 000, 回波数16 000, 等待时间6 500 ms, 累加次数16, 基于得到的原始数据的对数坐标绘制 T_2 分布曲线。

1.3.3.4 色泽的测定

参考徐焯等^[19]的方法并稍作修改, 采用电子眼色泽分析系统测定热风预干燥前后和联合干燥样品的亮度(L^*)、红度(a^*)、黄度(b^*)值, 并按式(2)计算总色差(ΔE)值。每次处理6个平行, 以鲜样作为对照, ΔE 值越小表明样品色泽越接近初始样品, 色泽品质越好。

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (2)$$

式中: ΔL^* 、 Δa^* 和 Δb^* 分别表示干燥后样品与鲜样 L^* 、 a^* 、 b^* 值的差值。

1.3.3.5 皱缩率的测定

参考Hou Haonan等^[20]的方法并略作修改, 将热风预干燥前后和联合干燥的样品置于固定高度下, 使用相机进行拍照, 并保存其图片文件, 每次处理6个平行。用ImageJ软件进行像素点分析, 按公式(3)计算收缩率。

$$\text{物料皱缩率}/\% = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100 \quad (3)$$

式中: A_0 表示干燥前物料的正投影面积/pixel; A_t 表示 t 时刻物料的正投影面积/pixel。

1.3.4 微观结构观察

参考Liu Chunju等^[21]的方法, 将真空冷冻干燥和联合干燥后的样品切成3~5 mm厚的薄片, 用碳导电胶将观察样本粘在样品托上, 采用离子溅射仪喷金, 再用SEM观察拍照。

1.3.5 孔隙分布的测定

参考Liu Chunju等^[21]的方法, 采用压汞法测定真空冷冻干燥和联合干燥样品的孔隙分布。由于汞液对固体

样品具有不可润湿性,只有在压力作用下汞液才能侵入孔隙结构,并且孔径越小,所需压力越大,通过汞液侵入量可知样品的孔体积,通过绘制孔体积随孔径大小变化的曲线,可得出样品的孔径分布^[23]。样品的孔径分布计算参考Washburn方程(式(4))。仪器测定的压力范围689.5~420 595 000 Pa,进汞和退汞接触角均为130°。

$$P = \frac{4\gamma \cos\theta}{d} \quad (4)$$

式中: P 为入侵压力/MPa; γ 为汞的表面张力(0.48 N/m); θ 为多孔材料与汞的接触角(130°); d 为孔径/nm。

1.3.6 桃脆片质构特性的测定

参考马有川等^[3]的方法并稍作修改,采用物性分析仪,压缩模式,选用A型探头,设置测试前速率2.00 mm/s,测中速率1.00 mm/s,测后速率10.00 mm/s,触发力10.0 g,触发距离28.00 mm。记录力-距离曲线,其中最大正峰处的力值表示样品的硬度,峰个数对应样品的脆度。每组测试10个平行。

1.3.7 桃脆片复水比的测定

参考Qiu Yang等^[23]的方法并稍作修改,测定样品的复水比。在室温(25 °C)下准确称取(1.000±0.100) g桃片,采用1:20 (m/m)比例进行复水,使桃片完全浸入蒸馏水中。每间隔15 min取出桃片,沥干表面水分后称质量,记录质量变化直至达到复水平衡。按式(5)计算复水比。

$$\text{复水比} = \frac{m_t}{m_g} \quad (5)$$

式中: m_t 为复水样品质量/g; m_g 为干燥样品质量/g。

1.3.8 桃脆片吸湿性的测定

准确称取(30.00±1.00) mg真空冷冻干燥和联合干燥后样品,使用配有Cahn微量天平的动态水分吸附仪测定,设置仪器参数为:温度25 °C、氮气流速200 sccm、相对湿度75%、持续时间6 h,测定样品在该环境下的质量变化。吸湿性表示为在该环境下样品的质量增加率。

1.4 数据处理与分析

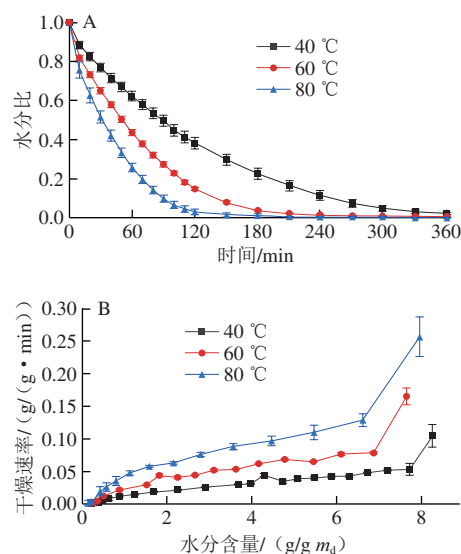
采用SPSS 26.0软件进行数据分析,ImageJ 1.8.0软件进行图片处理和像素点分析,Origin 2022b软件进行模型拟合、回归分析及绘图。

2 结果与分析

2.1 热风预干燥温度对桃片干燥特性的影响

如图1所示,干燥温度对桃片的水分比有明显影响,水分比随着干燥时间的延长而降低,在相同干燥时间下,温度越高水分比越低。从干燥速率与水分含量

变化曲线可以看出,干燥速率随温度升高呈由慢到快的趋势,80 °C干燥速率最快,60 °C次之,40 °C最慢,这归因于烘箱内部与样品之间存在温度和水分梯度差,温度差越大,对水分蒸发的推动作用越明显,当物料温度接近烘箱内温度时,干燥速率降低。Zhou Mo等^[24]研究热风干燥过程桃渣的干燥特性也得到了类似的结论。



A.水分比随干燥时间的变化; B.干燥速率随水分含量的变化。

图1 热风预干燥温度对桃片干燥曲线和干燥速率的影响

Fig. 1 Effect of hot air pre-drying temperature on drying curves and drying rates of peach slices

如图2所示,热风预干燥过程中桃片存在内外温度差,从而形成内外水分梯度差。干燥温度越高,桃片表面与桃片内部温差越大,传质阻力越小,因为高温可以加速水分子的热运动,桃片中的水分从内向外迁移的速率越快^[25]。相应地,干燥初期温差大,因此干燥速率也较高。当桃片内外温差减小时,表现为干燥速率降低;当桃片温度达到设定温度时,质量也趋于恒定。升温趋势的显著差异对桃干燥过程中的水分传递现象有显著影响,进而会影响桃干制品最终的品质。

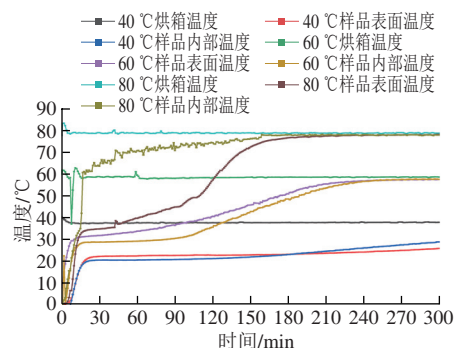
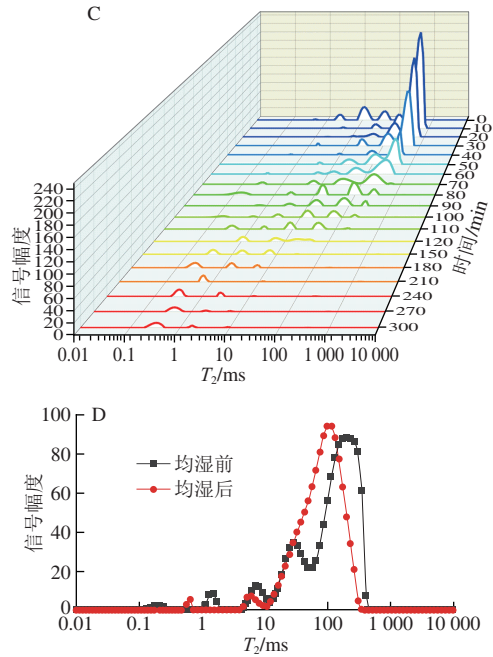


图2 不同热风预干燥温度下桃片的升温过程

Fig. 2 Temperature changes of peach slices during heating process at different pre-drying temperatures

2.2 热风预干燥处理过程中桃片水分分布和迁移规律

热风预干燥过程的水分分布和水分迁移对于桃片最终品质的形成具有关键作用,干燥是传热传质同时进行的过程,不仅伴随样品结构的变化,也会影响水分迁移过程^[26]。如图3A~C所示,桃片中水分状态可分为3种类型:结合水(与大分子物质如细胞壁多糖紧密结合的水)、不易流动水(截留在高度组织结构中的水)和自由水(存在于液泡中或细胞外空间中的水分),图中4个峰分别对应强结合水(T_{21} 0.1~1.0 ms)、弱结合水(T_{22} 1~10 ms)、不易流动水(T_{23} 10~100 ms)和自由水(T_{24} 100~1 000 ms)。以各峰的峰面积占比表示不同状态水分的相对含量, T_{23} 和 T_{24} 的峰面积占比最高,因此不易流动水和自由水是样品中主要的水分组成^[12]。由于3个温度下的水分迁移趋势一致,以60℃热风预干燥过程为例,如表1所示,初始阶段自由水相对含量最高,随着干燥的进行,细胞结构被破坏,液泡和细胞外空间的水分不断向外迁移^[27],自由水相对含量呈下降趋势,自由水是影响干燥过程的主要水分。不易流动水相对含量呈先增加后降低的趋势,这可能是因为干燥过程中,在内外温差和水分梯度的作用下,细胞液泡内水分向外迁移,造成不易流动水相对含量增加,随着干燥的继续,不易流动水也逐渐被脱离。整个干燥过程结合水相对含量整体上呈不断增加的趋势,这是因为在干燥初期,结合水与细胞中的大分子紧密结合,干燥后期样品的细胞结构破坏严重,水分与大分子结合的紧密度降低,结合水得到释放。



A~C.分别为40、60、80℃热风预干燥过程中的 T_2 曲线; D.80℃热风预干燥至湿基水分质量分数60%时均湿前、后的 T_2 曲线。

图3 热风预干燥过程和均湿过程中桃片的 T_2 曲线

Fig.3 T_2 curve of peach slices during hot air pre-drying and moisture equilibrium process

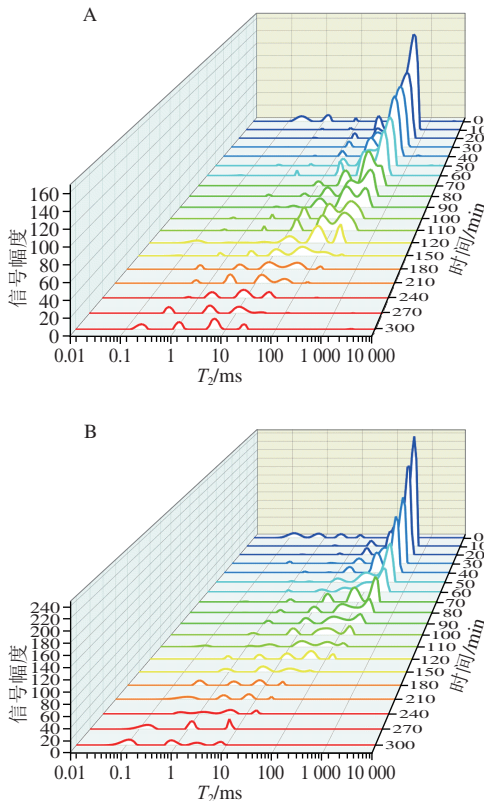
表1 60℃热风预干燥过程中的水分分布变化

Table 1 Changes in moisture distribution during pre-drying with hot air at 60℃

干燥时间/min	$(A_{21}+A_{22})/\%$	$A_{23}/\%$	$A_{24}/\%$
10	0.32±0.03	2.82±0.08	96.86±0.12
20	0.69±0.02	4.43±0.18	94.88±0.16
30	1.20±0.72	4.81±0.13	93.99±0.85
40	0.98±0.12	6.76±0.49	92.26±0.38
50	1.73±0.02	33.21±2.49	65.06±2.47
60	5.70±0.94	12.81±1.33	81.49±0.38
70	4.92±0.09	49.59±1.11	45.36±0.84
80	4.69±0.56	54.40±5.22	41.02±4.81
90	5.55±0.68	60.18±3.07	34.27±3.74
100	26.08±1.55	48.00±2.17	25.92±3.72
110	22.19±3.96	66.57±1.36	11.24±2.60
120	24.64±1.72	61.45±5.60	13.91±3.88
150	64.51±4.52	35.49±4.52	—
180	82.79±7.80	17.21±7.81	—
210	90.36±4.30	9.64±4.30	—
240	88.28±3.71	11.72±3.71	—
270	97.96±2.88	—	—
300	99.81±0.28	—	—

注:—未检测到。

在40、60℃和80℃热风预干燥温度下, T_2 分别在0~120、0~70 min和0~40 min阶段内峰面积显著降低,这与干燥速率的变化趋势一致,即干燥初期自由水被大量去除,干燥速率较高,后期较低的干燥速率与样品中剩余的水分状态有关^[28],剩余的结合水与细胞大分子



紧密结合,难以脱除。40、60℃和80℃预干燥样品在70~150、50~100 min和40~80 min时, T_{23} 和 T_{24} 峰面积有重叠,二者的总峰面积呈下降趋势,说明自由水和不易流动水同时迁移扩散。3个峰面积重叠时间段的差异说明干燥过程水分的迁移速率与温度密切相关,高温加剧了细胞膜的损伤程度,因此温度越高,水分迁移速率越快^[29]。Lu Keke等^[30]研究香菇在6种不同组合的热风干燥方式下的水分分布和迁移规律,观察到均匀的水分分布对香菇的感官质量具有积极影响,因此选择间歇升温热风干燥作为最佳方式。综上,利用LF-NMR监测干燥过程中水分状态变化,对于选择合适的干燥方式提高产品的稳定性具有重要的意义。

由于在热风预干燥过程中3种状态水分变化均较为剧烈,弛豫时间在不同干燥阶段有所重叠,说明水分在桃片内部的存在状态不稳定^[25]。均湿过程是桃片内水分自主迁移至平衡的过程。如图3D所示,与均湿前相比,均湿后桃片的 T_2 曲线各峰明显左移,水分流动性降低,不易流动水峰值降低,而自由水峰值和峰面积均有所增加,说明均湿过程中不易流动水向自由水迁移,样品内部水分实现了更均匀的空间分布。Li Xiao等^[31]研究发现,均湿后的苹果块再进行压差膨化干燥表现出更好的外观和质构特性。热风预干燥后进行均湿处理,在预冻过程中形成更加均匀的冰晶结构,有利于后续真空冷冻干燥产品品质的提升。

2.3 热风预干燥处理对桃片色泽的影响

干燥过程中的色泽变化受到酶促褐变和非酶促褐变等反应的影响^[32],色泽在果蔬食品加工中具有重要的指示作用,可以表征果蔬内部发生的各种生化反应程度^[33],颜色的变化与干燥食品的稳定性和可接受性息息相关^[34]。如表2所示,预干燥后桃片的 L^* 和 b^* 值总体呈下降趋势, a^* 值基本保持不变。 ΔE 值越小表明样品越接近鲜样的色泽,3个预干燥温度下,60℃热风预干燥时3个水分转换点处的桃脆片的 ΔE 最小,色泽保持最好。40℃

热风预干燥处理样品40-7和40-6色泽保持较好,但样品40-5色泽劣变严重,这可能是因为在较低的温度下,样品干燥至干基水分含量为5 g/g所需时间最长,干燥时间的增加会加剧酶促褐变的发生^[35]。80℃热风预干燥在3个水分转换点处样品的色泽与样品40-7和40-6接近,这可能是因为在高温干燥下美拉德反应导致的褐变化合物含量增加和桃中天然色素的降解^[36]。以上结果表明,无论是干燥时间的延长还是干燥温度的升高,均会导致色素生成并使褐变强度增加^[12]。

热风-真空冷冻干燥和真空冷冻干燥桃脆片与鲜样色泽相比, L^* 值基本保持不变, a^* 和 b^* 值呈明显下降趋势,表明真空冷冻干燥和联合干燥后样品亮度变化不大,但整体出现褪色现象,这可能是因为在真空冷冻干燥过程时间长,色素成分发生自动氧化降解、光降解和酶降解等^[33]。Lü Ying等^[37]在胡萝卜物理特性与呈色物质相关性的研究中也发现胡萝卜在真空冷冻干燥过程中出现了褪色现象,与本研究结果一致。联合干燥样品与真空冷冻干燥样品的 ΔE 值相比,FD与样品40-5存在显著差异,样品40-5更接近鲜样的色泽,这是因为样品40-5在预干燥阶段干燥时间长,酶促褐变生成褐色物质,而在真空冷冻干燥阶段色素降解导致颜色变浅。此外,FD与样品60-7也存在显著差异。FD与其他联合干燥样品的 ΔE 值总体差异不大。综上,为获得综合品质较好的桃脆片可以进行热风预干燥处理。

2.4 热风预干燥处理对桃片外观形态的影响

干燥产品的外观形态非常重要,因为其影响产品的品质和消费者接受度^[38]。皱缩率可反映干燥后桃片的外观形态变化。如图4所示,FD样品的皱缩率最低,热风预干燥样品在预干燥阶段水分含量越低,其皱缩率越高,这是因为随着干燥的进行,水分向外迁移,导致样品内部组织崩塌,宏观表现为样品皱缩形变,并且干燥时间越长,内部组织结构破坏越严重^[39]。不同干燥温度下,相同水分转换点处的样品在预干燥阶段收缩率差异

表2 热风预干燥和联合干燥对桃脆片色泽的影响
Table 2 Effect of hot air pre-drying and combined drying on the color of peach crisps

样品	预干燥前			预干燥后				联合干燥后			
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*	ΔE	L^*	a^*	b^*	ΔE
FD	64.85±0.81	20.04±0.85	55.19±1.25					64.56±0.75	12.66±1.72	35.29±1.91	21.35±1.93 ^{ad}
40-7	62.09±1.31	21.44±2.10	55.04±1.87	58.94±3.55	22.48±1.93	48.38±5.25	5.88±2.00 ^{bc}	61.33±2.55	14.07±1.20	32.23±2.53	24.04±0.86 ^b
40-6	62.42±1.11	19.87±2.24	53.75±1.44	59.02±1.08	22.05±1.26	50.28±2.96	4.88±2.67 ^{bc}	57.16±2.00	15.31±1.33	34.14±2.41	21.09±1.90 ^{ad}
40-5	59.24±1.42	19.84±1.42	49.77±2.58	48.51±1.99	23.67±0.64	32.68±4.19	19.9±1.63 ^a	57.16±2.52	19.23±2.14	34.19±3.63	15.92±1.52 ^c
60-7	64.73±0.82	18.43±1.00	55.61±1.19	65.09±0.76	16.95±0.68	53.11±1.91	2.91±0.92 ^e	61.05±1.19	11.63±0.66	28.66±1.11	28.06±0.61 ^a
60-6	59.28±0.95	20.46±0.74	50.70±1.14	56.58±1.37	19.87±1.43	49.21±2.45	2.88±0.50 ^e	58.17±1.29	12.48±1.28	29.66±1.88	22.56±1.91 ^{bc}
60-5	59.17±0.65	18.65±1.08	50.33±1.03	56.54±2.20	21.42±1.16	46.23±4.00	4.61±3.18 ^{bc}	57.74±2.60	14.38±1.42	30.47±1.54	20.56±1.27 ^{ad}
80-7	59.37±1.06	20.27±1.35	48.50±2.93	61.72±0.78	17.36±1.12	48.00±1.97	5.38±1.98 ^{bc}	58.86±0.70	11.94±0.42	27.92±0.80	22.38±2.42 ^{bcd}
80-6	59.03±1.02	20.99±0.54	46.73±1.81	54.23±3.29	21.64±1.36	39.84±4.86	7.15±2.98 ^b	54.60±3.40	15.12±1.08	28.19±1.53	20.16±1.99 ^{ad}
80-5	59.46±1.18	22.59±1.77	48.87±1.51	58.87±3.15	23.39±1.16	43.47±4.86	4.69±1.28 ^{bc}	60.38±2.81	16.09±0.61	30.04±2.52	20.08±1.07 ^d

注:同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

较小,经联合干燥后,60℃样品的平均收缩率最低,样品40-5、80-6和80-5的收缩率较高。这可能是由于样品40-5预干燥时间过长,水分迁移速率最慢,样品内部的孔隙结构破坏严重,而样品80-6和80-5主要是由于预干燥温度过高,桃片表面水分快速蒸发,而内部水分迁移扩散到表面的速率相对缓慢,形成了较大的水分梯度,桃片多孔结构遭到破坏,在真空冷冻干燥过程中由于冰晶升华桃片内部留下较大的空洞,表现为桃片的收缩塌陷。因此,为获得良好外观形态的桃脆片,应缩短预干燥时间,同时不宜选用过高的预干燥温度。

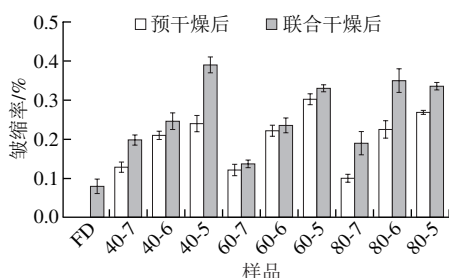
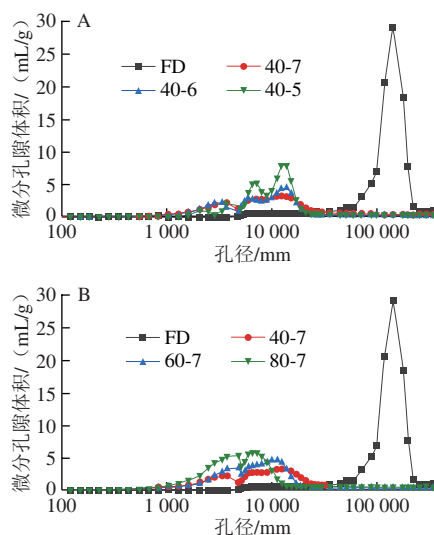


图4 热风预干燥和联合干燥对桃片皱缩率的影响

Fig. 4 Effect of hot air pre-drying and combined drying on shrinkage of peach slices

2.5 热风预干燥处理对联合干燥桃脆片孔隙分布和微观结构的影响

热风预干燥过程会使果蔬组织产生许多物理和化学变化,其中最主要的物理变化是收缩变形,而宏观的变化是由微观结构变化引起^[40]。如图5A所示,经过热风预干燥的样品孔隙结构与真空冷冻干燥样品存在明显差异,真空冷冻干燥样品的孔径在100 000~200 000 nm之间,且样品孔径分布较为均匀,对于联合干燥的样品,孔径在1 000~30 000 nm之间,且孔径大小分布不均。40℃热风预干燥温度下,桃片在不同水分转换点的孔隙结构不同,热风预干燥样品水分含量越低,孔隙结构的不均匀性越明显,这可能是由于干燥时间延长,自由水和不易流动水不断向外迁移,导致细胞壁和细胞膜破裂,进而导致大的空洞形成,部分细胞因毛细管压力引起皱缩闭孔^[41]。因此,热风预干燥时间越长,细胞孔隙结构越不均匀。同时,如图5B所示,样品在不同温度下热风预干燥至相同水分含量,也会导致不同的孔隙结构。热风预干燥温度越高,形成的孔隙结构越不均匀,这是因为高温会加快水分子的热运动,水分迁移速率加快,细胞破裂加剧。一方面,在干燥过程中可能导致多个相邻细胞融合^[40],出现多个细胞融合成一个的现象;另一方面,部分细胞在高温作用下发生收缩或闭孔,导致细胞结构收缩变小,这种两极化现象共同导致了孔隙结构的不均匀性。

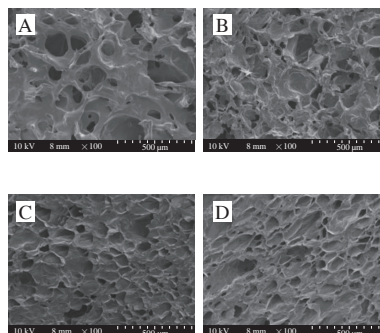


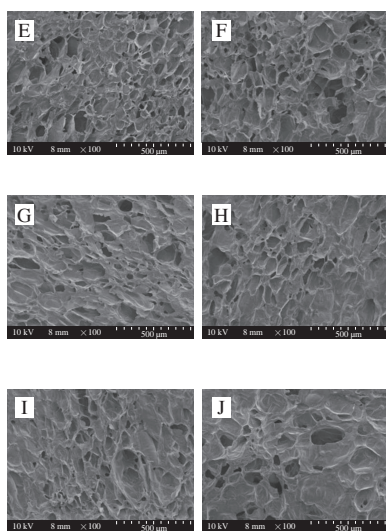
A. 40℃热风预干燥至不同水分含量联合真空冷冻干燥桃脆片的孔隙结构; B.不同热风预干燥温度干燥至相同水分含量联合真空冷冻干燥桃脆片的孔隙结构。

图5 真空冷冻干燥和联合干燥桃脆片的孔隙分布

Fig. 5 Porosity distribution of vacuum freeze-dried and combined drying peach crisps

压汞法为孔隙结构的表征提供了更多定量的信息,而SEM图像可直观地表征物料细胞结构的变化^[42]。如图6所示,真空冷冻干燥桃脆片呈现较完整的细胞结构,且细胞大小均一,而热风-真空冷冻干燥桃脆片呈现不同程度的细胞结构破裂,包括细胞的收缩和细胞壁的折叠,细胞的形状和大小均发生变化。这是因为真空冷冻干燥过程中,样品中的水以冰晶形式存在,在真空低温环境下直接升华,不产生毛细管张力,因此可以最大程度地保持细胞形态,避免了因水分散失造成细胞结构的变化^[43]。具体分析可知,热风预干燥温度越高,细胞结构完整性越差^[41],这是因为高温加快了水分子的迁移速率,自由水的迁移会导致毛细管张力大于细胞壁抗拉强度,造成细胞结构破裂。Abbasi等^[44]对洋葱热风干燥过程物理性质和微观结构变化的研究表明,结构变化的强度取决于干燥温度和干燥时间,较高的干燥温度和较长的时间均会对洋葱切片的微观结构造成较大的破坏,样品的收缩率和复水率也会增加,这与本研究结果一致。





A~J.分别为样品FD、40-7、40-6、40-5、60-7、60-6、60-5、80-7、80-6、80-5。

图6 热风-真空冷冻干燥桃脆片SEM图像

Fig. 6 Scanning electron microscopic images of hot air-vacuum freeze dried peach crisps

2.6 热风预干燥处理对联合干燥桃脆片质构特性的影响

食品的质构品质是食品基质与结构性质的感官体现,桃脆片的质构特性直接影响食用口感,是决定产品质量的关键感官属性^[45]。硬度和脆度是决定桃脆片产品品质的核心指标。如图7所示,热风预干燥会提高桃片的硬度,相比于真空冷冻干燥样品,联合干燥样品的平均硬度提高了52.11%,在相同干燥温度下,预干燥水分含量越低,硬度越大。热风预干燥对脆度的影响主要体现在预干燥样品水分含量越高,最终联合干燥的样品脆度越接近真空冷冻干燥样品,且预干燥水分含量越低,脆度越低。基于硬度和脆度发现,热风预干燥样品的水分含量对后期联合干燥的样品质构特性有很大影响,热风预干燥时间短、水分含量高的样品经联合干燥后更接近真空冷冻干燥样品的硬度和脆度。相比于热风预干燥后样品的水分含量差异,热风预干燥温度对最终质构品质的形成影响较小。桃片的质构特性与预干燥过程中微观结构变化相关,随着干燥的进行,细胞内的水分迁移到细胞外,细胞膜完整性被破坏,在内外温差驱动下水分不断向外迁移散失,在毛细管应力作用下细胞壁被破坏,出现细胞融合和收缩变形的现象^[4],进而影响其宏观质构特性。

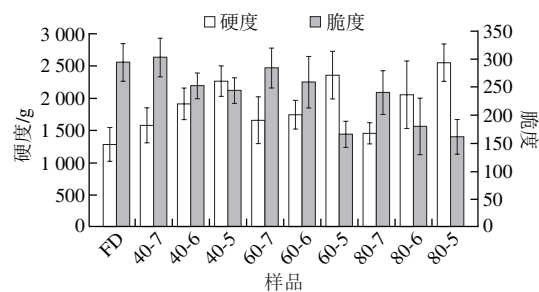


图7 热风-真空冷冻干燥桃脆片的硬度和脆度

Fig. 7 Hardness and crispness of peach crisps produced by hot air-vacuum freeze drying

与真空冷冻干燥样品相比,联合干燥样品硬度随预干燥样品水分含量的降低而增大,脆度随预干燥水分含量降低而降低。可能的原因有:一方面,随着热风预干燥的进行,桃片发生皱缩,形成了紧凑的结构,导致硬度增加和脆度降低;另一方面,热风预干燥过程中,细胞壁成分发生降解引起质构特性的改变^[21]。3个温度下,预干燥阶段水分含量越低,最终样品的硬度越大,这可能是由于随着干燥时间的延长,内部水分迁移速率低于表面水分的蒸发速率,桃片组织纤维随水分含量的降低而皱缩加剧,致使桃片表面形成硬壳^[46]。因此,热风预干燥联合真空冷冻干燥可以有效调控桃脆片的硬度和脆度。

2.7 不同热风预干燥温度和水分转换点对桃片复水特性的影响

复水比是评价干制品品质的重要指标,可以反映物料由干燥引起的组织结构变化和细胞破坏程度^[47]。如表3所示,联合干燥样品的复水比总体大于真空冷冻干燥样品,并呈现预干燥水分含量越低复水比越大的趋势。结合图8桃脆片复水过程示意图分析,可能的原因是,在复水过程中,水分最初通过毛细管吸力被吸收,起主导作用的是微观结构,即由孔隙大小决定^[48]。不同的干燥方式形成了不同的多孔结构,真空冷冻干燥样品形成了疏松的多孔网络结构且孔隙直径较大,热风预干燥样品的孔隙结构呈现不同程度的收缩且孔隙直径大小不一,形成了相对于真空冷冻干燥样品更致密的结构。这种孔隙结构差异导致真空冷冻干燥样品在复水初期的速率大于联合干燥样品,但样品的复水过程涉及外部水分与孔隙内空气的交换^[49],在内外气压差不足够大的情况下,外部的水分不足以将填充在孔隙中的空气排出。因此,留在组织内的空气阻碍了水分子进一步迁移到组织中,导致不完全的水-空气交换过程^[50],最终导致真空冷冻干燥样品与联合干燥样品的复水比差异。为更好地证明这一观点,Zhou Cunshan等^[50]对比真空辅助复水与常压复水,测定大蒜片最终含水率,结果表明,大气压力是

表3 预干燥温度和水分转换点对热风-真空冷冻桃脆片复水比的影响

Table 3 Effect of pre-drying temperature and water conversion point on rehydration ratio of hot air-vacuum freeze dried peach crisps

样品	FD	40-7	40-6	40-5	60-7	60-6	60-5	80-7	80-6	80-5
复水比	4.81±0.00 ^{cd}	5.36±0.01 ^{cd}	5.71±0.44 ^{ab}	6.36±0.29 ^a	4.62±0.08 ^{cd}	4.56±0.17 ^d	5.34±0.29 ^{bcd}	4.80±0.03 ^{cd}	5.36±0.35 ^{cd}	5.84±0.69 ^{ab}

导致大量气泡被滞留在样品内而导致最终复水样品水分含量低的原因; Vergeldt等^[49]在真空冷冻干燥胡萝卜复水后的组织中也观察到气泡, 也证明了这一观点。但另一方面, 复水过程中细胞壁从孔隙中吸水并膨胀, 这种膨胀通过收缩孔隙空间降低了毛细吸力^[48], 热风预干燥过程可能伴随细胞壁物质的降解^[21], 相对于真空冷冻干燥样品, 水分进入联合干燥样品阻力较小, 因此复水比总体大于真空冷冻干燥样品。

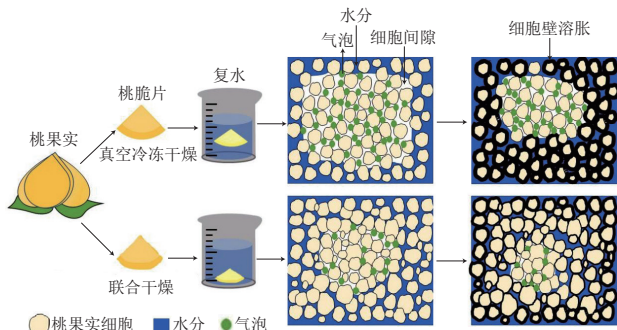


图8 桃脆片复水机理示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the rehydration mechanism of peach crisps

2.8 不同热风预干燥温度和水分转换点对桃片吸湿性的影响

吸湿性是衡量桃脆片贮藏稳定性的重要因素。如图9所示, 在相对湿度75%下, 桃脆片的吸湿率随时间的延长而增加, 并逐渐趋于平衡。真空冷冻干燥样品相比于联合干燥样品具有更强的吸湿性, 联合干燥样品在预干燥阶段水分含量越低, 吸湿性越弱, 表明联合干燥对桃片的吸湿性有一定抑制作用。桃片的吸湿本质是外界水分迁移到桃片内部, 当外部条件的温度和相对湿度固定时, 由此产生的吸湿性差异的主要因素是桃片内部固体基质和气相的多孔性^[51]。吸湿过程中的水分迁移速率受细胞大小分布、细胞间的连通性和细胞壁厚度影响^[52], 从孔隙结构和SEM图可以看出, 热风预干燥过程破坏了原有的细胞结构, 增加了细胞大小的不均匀性, 且细胞间连通性降低, 细胞壁厚度增加。因此, 相比于真空冷冻干燥桃片, 热风-真空冷冻干燥的桃脆片吸湿率更低。

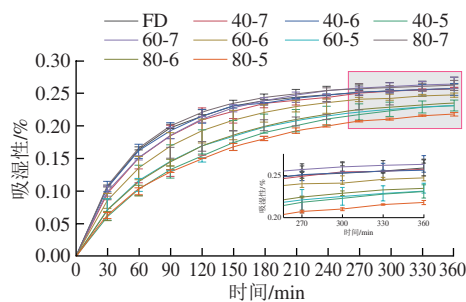


图9 热风-真空冷冻干燥桃脆片的吸湿性

Fig. 9 Hygroscopicity of peach crisps dried by hot air-vacuum freeze-drying

2.9 桃片复水特性与微观结构和质构特性的相关性

桃片的水分分布与其微观结构和质构特性密切相关, 热风预干燥过程中水分从桃片内部向外迁移, 导致桃片形成不同孔隙度(即微分孔隙体积)的微观结构, 孔隙度差异导致在预冻过程中形成的冰晶大小不同, 进而在真空冷冻干燥后产生不同的质构特性。采用主成分分析对不同热风预干燥条件下联合干燥样品的水分迁移、孔隙度、硬度、脆度、吸湿性和复水比进行综合分析, 以阐明不同预干燥过程对桃片品质特性的影响。PCA结果(图10)表明, PC1和PC2共同解释了总方差的83%, 说明PC1和PC2可以很好地解释桃片品质特性与预干燥处理之间的关系。PC1与桃片的孔隙度、脆度和吸湿性呈正相关, 与硬度和复水比呈负相关, PC2与复水比呈正相关。预干燥水分含量高的样品更接近真空冷冻干燥样品的孔隙度、脆度和吸湿性。预干燥水分含量低的样品硬度较大, 与PC2有更强的相关性。

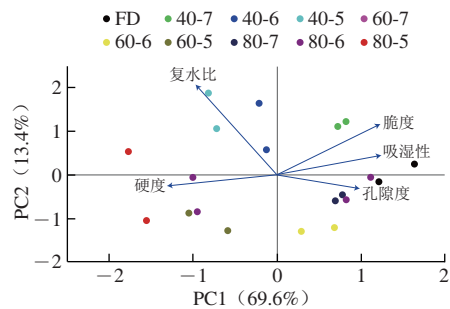


图10 桃脆片复水特性与微观结构和质构特性的PCA载荷图

Fig. 10 PCA loading plot of rehydration characteristics, microstructure and texture characteristics of peach crisps

3 结论

本研究探讨了不同热风预干燥温度和不同水分转换点对热风-真空冷冻干燥桃脆片微观结构和质构特性的影响, 发现热风预干燥过程不仅伴随样品结构的变化, 也会影响水分迁移过程。干燥温度影响水分迁移速率、水分的扩散以及内部组织结构变化, 导致样品在干燥过程形成了不同的质构特性, 表明热风预干燥是一种可以有效调控桃脆片硬度和脆度的方法。此外, 热风预干燥过程改变了桃果肉原有的细胞结构, 增加了细胞大小和细胞间孔隙的不均匀性, 且细胞间连通性降低, 细胞壁厚度增加, 相比于真空冷冻干燥桃脆片, 热风-真空冷冻干燥的桃脆片吸湿率更低, 有效提升了桃脆片贮藏稳定性。结合对样品的色泽、皱缩率、微观结构、质构特性和吸湿性等指标的综合分析, 热风预干燥温度60℃的联合干燥桃脆片品质较好, 后续可进一步分析该温度下预干燥样品的风味、口感和营养等指标。

参考文献:

- [1] 王静, 张卫卫, 石勇, 等. 真空冷冻干燥技术对食品品质的影响[J]. 农产品加工, 2018(1): 36-38; 42. DOI:10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2018.01.010.
- [2] 陈腊梅, 金鑫, 毕金峰, 等. 超声辅助糖液渗透处理对真空冷冻干燥桃脆片干制品品质及吸湿性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(17): 117-123. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210507-053.
- [3] 马有川, 毕金峰, 易建勇, 等. 预干燥方式和水分转换点对真空冷冻联合干燥苹果脆片品质的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(9): 110-120. DOI:10.16429/j.1009-7848.2021.09.012.
- [4] WANG Haiou, LIU Chunju, XUE Youlin, et al. Correlation of mechanical properties of peach slices with cell wall polysaccharides and cell morphology during hot air predrying[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 44(2): e14319. DOI:10.1111/jfpp.14319.
- [5] ANDO Y, MAEDA Y, MIZUTANI K, et al. Impact of blanching and freeze-thaw pretreatment on drying rate of carrot roots in relation to changes in cell membrane function and cell wall structure[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 71: 40-46. DOI:10.1016/j.lwt.2016.03.019.
- [6] LIU C, LIU J, LI D, et al. Cell wall components, cell morphology, and mechanical properties of peach slices submitted to drying[J]. Drying Technology, 2019, 38(13): 1776-1789. DOI:10.1080/07373937.2019.1662799.
- [7] 杨婧, 邓媛元, 张雁, 等. 不同温度热风预干燥对热风-真空冷冻联合干燥龙眼果干品质的影响[J]. 现代食品科技, 2019, 35(5): 175-83. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.5.025.
- [8] HALDER A, DHALL A, DATTA A K. Modeling transport in porous media with phase change: applications to food processing[J]. Journal of Heat Transfer, 2011, 133(3): 031010. DOI:10.1115/1.4002463.
- [9] XU Congcong, LI Yunfei. Correlation of viscoelastic behavior with water state and ultrastructure in hot air-dried carrots[J]. Food Control, 2015, 50: 23-30. DOI:10.1016/j.foodcont.2014.08.020.
- [10] JOARDDER M U, KUMAR C, KARIM M A. Food structure: Its formation and relationships with other properties[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(6): 1190-205. DOI:10.1080/10408398.2014.971354.
- [11] KAMAL T, CHENG S, KHAN I A, et al. Potential uses of LF-NMR and MRI in the study of water dynamics and quality measurement of fruits and vegetables[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(11): e14202. DOI:10.1111/jfpp.1420.
- [12] KAMAL T, SONG Y, TAN Z, et al. Effect of hot-air oven dehydration process on water dynamics and microstructure of apple (Fuji) cultivar slices assessed by LF-NMR and MRI[J]. Drying Technology, 2019, 37(15): 1974-1987. DOI:10.1080/07373937.2018.1547312.
- [13] 李梁, 程秀峰, 杨尚雄, 等. 基于低场核磁共振的热风干燥猕猴桃切片含水率预测模型[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 252-260. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2020.10.031.
- [14] DENG Lizhen, PAN Zhongli, MUJUMDAR A S, et al. High-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) enhances drying quality of apricots by inactivating the enzymes, reducing drying time and altering cellular structure[J]. Food Control, 2019, 96: 104-111. DOI:10.1016/j.foodcont.2018.09.008.
- [15] WANG Jun, MUJUMDAR A S, DENG Lizhen, et al. High-humidity hot air impingement blanching alters texture, cell-wall polysaccharides, water status and distribution of seedless grape[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 194: 9-17. DOI:10.1016/j.carbpol.2018.04.023.
- [16] 程沙沙, 唐英强, 章坦, 等. LF-NMR和MRI对干制虾仁复水过程水分状态及品质变化的研究[J]. 分析测试学报, 2017, 36(10): 1224-1229. DOI:10.3969/j.issn.1004-4957.2017.10.010.
- [17] 陈琳, 高彤, 方嘉沁, 等. 低场核磁共振在食品加工中的应用研究进展[J]. 食品工业, 2021, 42(2): 274-278.
- [18] LI Xiao, BI Jinfeng, JIN Xin, et al. Effect of pectin osmosis or degradation on the water migration and texture properties of apple cube dried by instant controlled pressure drop drying (DIC)[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 125: 109202. DOI:10.1016/j.lwt.2020.10202.
- [19] 徐烨, 李旋, 毕金峰, 等. 微波与超声处理对花青素-多酚固态与液体系色泽的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 139-148. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20191211-115.
- [20] HOU Haonan, CHEN Qinqin, BI Jinfeng, et al. Understanding appearance quality improvement of jujube slices during heat pump drying via water state and glass transition[J]. Journal of Food Engineering, 2020, 272: 109874. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2019.109874.
- [21] LIU Chunju, XUE Youlin, GUO Jia, et al. Citric acid and sucrose pretreatment improves the crispness of puffed peach chips by regulating cell structure and mechanical properties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 142: 111036. DOI:10.1016/j.lwt.2021.111036.
- [22] ADILETTA G, RUSSO P, CRESCITELLI A, et al. Combined pretreatment for enhancing quality of dried and rehydrated eggplant[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(11): 1912-1923. DOI:10.1007/s11947-016-1778-y.
- [23] QIU Yang, BI Jinfeng, JIN Xin, et al. An understanding of the changes in water holding capacity of rehydrated shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) from cell wall, cell membrane and protein[J]. Food Chemistry, 2021, 351: 129230. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.129230.
- [24] ZHOU Mo, LI Cong, BI Jinfeng, et al. Towards understanding the enhancement of moisture diffusion during intermediate-infrared drying of peach pomace based on the glass transition theory[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 54: 143-151. DOI:10.1016/j.ifset.2019.04.003.
- [25] 李潇. 苹果丁压差闪蒸联合干燥机理及质构形成影响机制研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020: 18-30.
- [26] SHI X, YANG Y, LI Z, et al. Moisture transfer and microstructure change of banana slices during contact ultrasound strengthened far-infrared radiation drying[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 66: 102537. DOI:10.1016/j.ifset.2020.102537.
- [27] LECA A, CLERJON S, BONNY J M, et al. Multiscale NMR analysis of the degradation of apple structure due to thermal treatment[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 294: 110413. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2020.110413.
- [28] 李琳琳, 陈俊亮, 段续, 等. 基于LF-NMR及不同干燥方法的哈密瓜片含水率预测模型[J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 304-312. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2021.2.035.
- [29] ANDO Y, HAGIWARA S, NABETANI H, et al. Effects of prefreezing on the drying characteristics, structural formation and mechanical properties of microwave-vacuum dried apple[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 244: 170-177. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2018.09.026.
- [30] LU Keke, GUO Xiaohui, LI Yao, et al. Characterization of moisture transformation and distribution in mushroom (*Lentinus edodes*) during hot-air drying[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(2): e12812. DOI:10.1111/jfpp.12812.

- [31] LI Xiao, BI Jinfeng, JIN Xin, et al. Effect of the moisture equilibrium process on the expansion behavior of instant controlled pressure drop (DIC) drying of dried apple cubes[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(4): 1635-1642. DOI:10.1002/jsfa.10175.
- [32] RICHTER-REIS F, IVAHASHI M M, GUENIAT ROSA A H. Effect of vacuum drying temperature on drying kinetics, effective moisture diffusivity and quality of peeled litchi (*Litchi chinensis* Sonn.)[J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40(2): e12419. DOI:10.1111/jfpe.12419.
- [33] 吕莹, 陈芹芹, 李旋, 等. 干燥对果蔬加工色泽影响的研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(13): 368-377. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220802-022.
- [34] YANG X H, DENG L Z, MUJUMDAR A S, et al. Evolution and modeling of colour changes of red pepper (*Capsicum annuum* L.) during hot air drying[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 231: 101-108. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2018.03.013.
- [35] 赵文亚, 张慤. 不同干燥方式对杏鲍菇品质的影响[J]. 北方园艺, 2015(23): 134-137. DOI:10.11937/bfy.201523038.
- [36] RHIM J W, HONG S I. Effect of water activity and temperature on the color change of red pepper (*Capsicum annuum* L.) powder[J]. Food Science and Biotechnology, 2011, 20(1): 215-222. DOI:10.1007/s10068-011-0029-2.
- [37] LÜ Ying, BI Jinfeng, CHEN Qin, et al. Discoloration investigations of freeze-dried carrot cylinders from physical structure and color-related chemical compositions[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(12): 5172-5181. DOI:10.1002/jsfa.11163.
- [38] MONTEIRO R L, LINK J V, TRIBUZI G, et al. Effect of multi-flash drying and microwave vacuum drying on the microstructure and texture of pumpkin slices[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 96: 612-619. DOI:10.1016/j.lwt.2018.06.023.
- [39] APRAJEETA J, GOPIRAJAH R, ANANDHARAMAKRISHNAN C. Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 144: 119-128. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2014.08.004.
- [40] 常剑, 杨德勇, 路倩倩, 等. 热风干燥对果蔬薄壁组织细胞结构的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 262-268. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2012.14.040.
- [41] VEGA-GALVEZ A, ZURA-BRAVO L, LEMUS-MONDACA R, et al. Influence of drying temperature on dietary fibre, rehydration properties, texture and microstructure of Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.)[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(4): 2304-2311. DOI:10.1007/s13197-013-1235-0.
- [42] RAHMAN M S, AL-ZAKWANI I, GUIZANI N. Pore formation in apple during air-drying as a function of temperature: porosity and pore-size distribution[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2005, 85(6): 979-989. DOI:10.1002/jsfa.2056.
- [43] 曹梦丹, 张雪霞, 任文庭, 等. 干燥方式对毛竹细胞壁孔隙结构的影响[J]. 林业工程学报, 2021, 6(6): 58-65. DOI:10.13360/j.issn.2096-1359.202103014.
- [44] ABBASI S, MOUSAVI S M, MOHEBBAT M. Investigation of changes in physical properties and microstructure and mathematical modeling of shrinkage of onion during hot air drying[J]. Iranian Food Science and Technology, 2011, 7: 92-98. DOI:10.22067/ifst.v7i1.9369.
- [45] PAULA A M, CONTI-SILVA A C. Texture profile and correlation between sensory and instrumental analyses on extruded snacks[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 121: 9-14. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2013.08.007.
- [46] RICHTER REIS F, MARQUES C, MORAES A C S D, et al. Trends in quality assessment and drying methods used for fruits and vegetables[J]. Food Control, 2022, 142: 109254. DOI:10.1016/j.foodcont.2022.109254.
- [47] 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. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2020.10.014.
- [48] VAN DER SMAN R G M, PAUDEL E, VODA A, et al. Hydration properties of vegetable foods explained by Flory-Rehner theory[J]. Food Research International, 2013, 54(1): 804-811. DOI:10.1016/j.foodres.2013.08.032.
- [49] VERGELDT F J, VAN DALEN G, DUIJSTER A J, et al. Rehydration kinetics of freeze-dried carrots[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2014, 24: 40-47. DOI:10.1016/j.ifset.2013.12.002.
- [50] ZHOU Cunshan, FENG Yabin, ZHANG Lei, et al. Rehydration characteristics of vacuum freeze- and hot air-dried garlic slices[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 143: 111158. DOI:10.1016/j.lwt.2021.111158.
- [51] YANG J, MARTIN A, RICHARDSON S, et al. Microstructure investigation and its effects on moisture sorption in fried potato chips[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 214: 117-128. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2017.06.034.
- [52] PRIMO-MARTÍN C, VAN DALEN G, MEINDERS M B J, et al. Bread crispness and morphology can be controlled by proving conditions[J]. Food Research International, 2010, 43(1): 207-217. DOI:10.1016/j.foodres.2009.09.030.