

项可心, 张博, 赵邯, 等. 水蜜桃片冻干-压差膨化干燥过程中水分与糖分迁移规律 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(12): 248–258. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024080054

XIANG Kexin, ZHANG Bo, ZHAO Han, et al. Migration Patterns of Moisture and Sugar in Honey Peach Slices during Vacuum Freeze-drying Combined with Puffing Drying[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(12): 248–258. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024080054

· 工艺技术 ·

水蜜桃片冻干-压差膨化干燥过程中 水分与糖分迁移规律

项可心^{1,2}, 张博^{1,2}, 赵邯¹, 刘春菊^{1,2,*}, 李大婧¹, 吴海虹¹, 牛丽影¹, 孙希云²

(1.江苏省农业科学院农产品加工研究所, 江苏南京 210014;

2.沈阳农业大学食品学院, 辽宁沈阳 110161)

摘要:为揭示水蜜桃干燥过程中不同形态水分与糖分的迁移规律, 将水蜜桃进行未浸渍真空冷冻干燥(CK+FD)、20%蔗糖浸渍后真空冷冻干燥(SUC+FD)、20%低聚木糖浸渍后真空冷冻干燥(XOS+FD)、未浸渍冻干-压差膨化干燥(CK+FP)、20%蔗糖浸渍冻干-压差膨化干燥(SUC+FP)、20%低聚木糖浸渍冻干-压差膨化干燥(XOS+FP), 对干燥过程中干燥特性、水分迁移与糖迁移情况进行分析。结果表明: 不同处理水蜜桃片干燥过程中自由水含量逐渐降低, 横向弛豫时间(T₂)曲线向左移动, 逐渐转变为不易流动水和结合水, 并且桃片的水分是从内向外迁移。与真空冷冻干燥(FD)相比, 冻干-压差膨化干燥(FP)可以显著缩短干燥时间, 提升干燥速率。在干燥过程中水分从外部开始散失, 随着干燥的进行不易流动水与结合水含量有所增加, FP干燥中的压差膨化阶段可以加快外部不易流动水含量的增加, 加速干燥进程。糖浸渍FP干燥压差膨化阶段外部糖含量会出现一个断崖式的下降, 中部糖含量基本处于逐渐下降趋势, 向外部迁移, 内部变化不大。本研究发现在干燥过程中水分和糖分都是从内部向外部迁移, 对外部影响最大, 对内部影响最小, 旨在为果蔬干燥效率提升及品质调控提供了理论支撑。

关键词:水蜜桃, 冻干-压差膨化干燥, 干燥特性, 水分迁移, 糖分迁移

中图分类号: TS255.42

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2025)12-0248-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024080054



本文网刊:

Migration Patterns of Moisture and Sugar in Honey Peach Slices during Vacuum Freeze-drying Combined with Puffing Drying

XIANG Kexin^{1,2}, ZHANG Bo^{1,2}, ZHAO Han¹, LIU Chunju^{1,2,*}, LI Dajing¹, WU Haihong¹,
NIU Liying¹, SUN Xiyun²

(1. Institute of Agricultural Products Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China;

2. School of Food, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract: To investigate the migration mechanisms of water in different states and sugars in peach slices during drying, samples were unpretreated or pretreated with either 20% sucrose or 20% oligosaccharide solution impregnation. Each group was then processed using vacuum freeze-drying (FD) or vacuum freeze-drying combined with puffing drying (FP). The drying kinetics, water migration patterns, and sugar transport dynamics were systematically analyzed throughout the process. Results demonstrated that the T₂ relaxation curve exhibited a leftward shift during drying, indicating progressive conversion of free water into immobilized and bound water in peach slices. Concurrently, intra-tissue moisture migrated outward, as evidenced by the decreasing free water content and evolving water state distribution. Compared to FD, FP

收稿日期: 2024-08-07

基金项目: 江苏省重点研发计划(现代农业)项目(BE2023316); 江苏省农业科技自主创新资金(CX(22)3176); 国家现代农业产业技术体系建设专项资金资助(CARS-30-5-03)。

作者简介: 项可心(2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬加工与品质调控, E-mail: xkx071@163.com。

* 通信作者: 刘春菊(1979-), 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 果蔬加工与品质调控, E-mail: cjliu0306@163.com。

significantly reduced drying duration while enhancing moisture removal efficiency. During FP treatment, initial moisture evaporation occurred preferentially from surface regions, while intracellular immobilized and bound water fractions progressively increased. During FP stage, accelerated accumulation of immobilized water in the peripheral tissue layers enhanced drying kinetics. In sugar-impregnated FP samples, a steep concentration gradient emerged: Sugar content exhibited a sharp decline in peripheral regions versus gradual depletion in medial zones, confirming unidirectional outward sugar migration. The sugar in the internal field of the peach slices presented with little migration change. In this study, migration from internal to external both happened to the water and sugar in the peach slices during the drying process, which was more prominent in the outer field of the peach slices and less prominent in the internal field. These findings can provide theoretical supports for the improvement of drying efficiency and quality control of the dried fruits and vegetables.

Key words: honey peach; vacuum freeze-drying combined with puffing drying; drying characteristics; moisture migration; sugar migration

水蜜桃(*Prunus persica* L.)为蔷薇科(Rosaceae)李属(*Prunus*)植物果实,迄今已有 4000 年的栽培历史^[1],它含有丰富的维生素 B1、B2、B3 等多种维生素及钾、磷、镁、铁等多种矿物质元素。然而,由于水蜜桃果实水分含量高、呼吸代谢作用旺盛,后熟迅速,容易在贮运过程中发生腐烂,使得理化品质与商品价值下降。干燥是一种常见的果蔬加工方式,能有效延长水果的保质期,防止果蔬在贮运过程中发生腐烂变质,将新鲜水蜜桃干制成水蜜桃脆片,是丰富桃产品种类,拓宽产业链,大幅提高桃产品的附加值的有效途径^[2]。

常用的干燥技术包括真空冷冻干燥、压差膨化干燥等,真空冷冻干燥能最大程度保持果蔬的色、香、味及营养成分,但真空冷冻干燥时间长,能耗高,产品硬脆性不佳,吸湿强^[3]。压差膨化干燥通过瞬间泄压给予物料一定膨化力,促使物料形成多孔结构,赋予物料一定硬脆度,但产品硬度大、产能低^[4]。而冻干-压差膨化联合干燥是将真空冷冻干燥与压差膨化干燥的优势进行融合,可实现加快干燥速率、提升产品品质。干燥主要是水分脱除的过程,以自由水、结合水与不易流动水 3 种状态水相互转换^[5],真空冷冻干燥可分为升华干燥阶段和解析干燥阶段,其中大部分的自由水会通过升华干燥阶段去除,该阶段直接影响干制品的内部结构与质地,解析干燥阶段主要去除结合水和不易流动水,该阶段耗时较长,但去除水分较少^[6],而采用压差膨化干燥替代解析干燥阶段能够显著缩短干燥时间。已有研究表明冻干-压差膨化联合干燥技术能够缩短干燥时间及能耗。例如,李越^[7]研究表明经真空冷冻预干燥后进行压差膨化干燥生产的果蔬脆片孔隙度增加,有易于水分的脱除;Kprüalan 等^[8]通过研究不同干燥方式对南瓜片物理、质构及抗氧化性能的影响,结果表明与单一冻干相比,冻干-膨化联合干燥能够在稍短的时间内完成干燥;于宛如等^[9]通过研究预干燥过程水分分布对热风-真空冷冻联合干燥桃片微观结构与品质的影响,得出联合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的结论。同时,生产中常用糖浸渍技术来调控果蔬干制品的质地和品质,在糖渍过程中,

食物中的水分子渗出到细胞外,外界的溶质迁移到食物中,通过细胞内外浓度差使渗透压升高,从高水分食品的细胞颗粒中去除水分子的过程^[10]。Cristina 等^[11]研究表明经真空浸渍后苹果片水分含量略有下降,这是由于真空浸渍期间糖溶液的加入会替换产品中一部分液体,从而导致天然液体的损失;王海鸥等^[12]采用低场核磁共振技术对比分析弛豫时间 T2 值与对应峰面积 A2 值,发现渗透脱水可以改变桃片内部水分状态和分布;张鹏飞^[13]研究表明水苏糖浸渍的冻干苹果片细胞组织结构规整蓬松,孔隙均匀,冻干苹果片具有较高的孔隙率、较低的变形率及较好咀嚼性和质构特性。综上所述,糖浸渍技术和联合干燥手段会改变水分迁移路径,对干燥过程以及最终产品的品质具有重要影响。因此,深入探讨糖浸渍与联合干燥对果蔬干燥过程中水分及糖分迁移的影响机制,显得尤为必要。这一研究不仅有助于优化干燥技术的应用,还能提升果蔬制品的质量,为相关领域提供科学依据和技术支持。

本文以霞晖 5 号水蜜桃为研究对象,对糖浸渍与未浸渍的水蜜桃片进行真空冷冻干燥、真空冷冻-压差膨化干燥,通过研究水蜜桃片在不同干燥过程中干燥速率、干燥曲线、水分变化、水分分布及糖分分布,探究水蜜桃片在干燥过程中干燥特性、水分与糖分迁移规律,为果蔬干燥过程中水分脱除及质地调控研究提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

水蜜桃(品种为霞晖 5 号) 江苏省农业科学院国家种植桃资源圃;蔗糖(食品级)、低聚木糖(食品级) 山东圣协生物科技有限公司;葡萄糖(AR)、苯酚(AR)、浓硫酸(AR)、无水乙醇(AR) 国药集团化学试剂有限公司。

BS224S 型电子分析天平 北京赛多利斯科学仪器公司产品;BLK-FD-0.5 型真空冷冻干燥机 江苏博莱客冷冻科技发展有限公司;QDPH-5 型电加热式气流膨化设备 天津市勤德新材料科技有限公司;BLK-FD-1 型真空冷冻/脉冲压差膨化干燥一体化设备 江苏博莱客冷冻科技发展有限公司;MesoMR23-

060H-I 型低场核磁仪 苏州纽迈分析仪器有限公司; SHB-III 型循环水式真空泵 郑州长城科工贸有限公司; HH-8 型数显恒温水浴锅 上海江星仪器有限公司; KH-500D 型数控超声波清洗器 昆山禾创超声仪器有限公司; TG16-WS 型台式高速离心机 上海湘仪离心机仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备 选取新鲜, 无机械损伤, 成熟度均匀一致的水蜜桃, 经清洗、去皮、去核后, 制成直径为 25 mm, 厚度为 5 mm 的桃片; 将桃片进行热烫 60 s 护色、放冷、冷冻于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱储存。

真空冷冻干燥(FD): 通过将解冻后的 500 g 水蜜桃片分别浸泡在浓度为 20% 的蔗糖溶液和 20% 低聚木糖溶液中, 料液比为 1:1, 即 1 g 水蜜桃片加入 1 mL 20% 的蔗糖溶液和 20% 低聚木糖溶液。然后将它们引入连接到真空泵的真空中, 施加 0.5 MPa 的压力 1 h 后, 恢复大气压, 将桃片取出沥干糖液, 经 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 预冻 24 h 后进行真空冷冻干燥, 分别标记为 20% 蔗糖浸渍后冻干 (SUC+FD) 和 20% 低聚木糖浸渍后冻干 (XOS+FD), 未浸渍冻干 (CK+FD)。

冻干-压差膨化干燥(FP): 解冻后水蜜桃片分别用浓度为 20% 的蔗糖溶液和低聚木糖溶液真空浸渍 1 h, 浸渍后水蜜桃片先经真空冷冻干燥, 干燥至水分含量为 60% 后, 样品放入 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱均湿 24 h, 均湿后进行压差膨化干燥, 其中膨化温度 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 真空干燥温度 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, 分别标记为 20% 蔗糖浸渍后冻干-压差膨化 (SUC+FD) 和 20% 低聚木糖浸渍后冻干-压差膨化 (XOS+FD), 未浸渍冻干-压差膨化 (CK+FP)。

上述 6 组处理分别在未干燥前、真空冷冻干燥至水分含量为 60%、45%、30%、<5% 时取样, 将样品以同心圆的形式分成三部分: 外部、中部、内部 (如图 1 所示), 分别测定不同部分水分分布与糖分布。

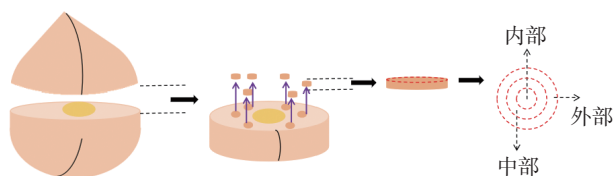


图 1 具体取样部位示意图

Fig.1 Schematic diagram of specific sampling position

1.2.2 干燥过程中温度变化 分别取不同浸渍处理的桃片, 称重, 在桃片中心插入温度探头, 放入真空冷冻/脉冲压差膨化干燥一体化设备中分别进行真空冷冻干燥与真空冷冻-压差膨化干燥, 从样品放入时开始, 每隔 10 min 记录一次温度变化, 直到干燥结束。

1.2.3 干燥特性 FD 干燥: 取不同浸渍处理桃片, 准确称重后, 放入真空冷冻干燥机中进行干燥, 分别干燥至 1、2、3、.....、10 h, 记录干燥前后质量, 并进行

后续计算。

FP 干燥: 取不同浸渍处理桃片, 准确称重后, 先进行真空冷冻干燥, 每隔 1 h 记录干燥前后样品质量, 直至水分含量降至 60% 时, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 均湿 24 h 后, 进行压差膨化干燥, 每隔 1 h 记录干燥前后样品质量。

参照文献 [14-17] 的方法对干燥特性指标进行测定。

干基含水率: 是指样品在干燥后所含有的水分质量与该样品的干重之比。

$$M(\%) = \frac{m-n}{n} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

湿基含水率: 是指样品在湿润状态下所含有的水分质量与该样品的湿重之比。

$$X(\%) = \frac{m-n}{m} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

式中: m 为样品湿重(g); n 为样品干重(g); M 为样品干基含水率(%), X 为样品湿基含水率(%)。

水分比(moisture ratio, MR): 物料在一定条件下的剩余含水率。与物料含水率比较, 平衡含水率 M_e 很小, 在 MR 计算中可忽略不计, 即 $M_e \approx 0$, 计算公式如下:

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad \text{式 (3)}$$

式中: M 为任意时刻的干基含水率(%); M_e 为样品平衡时干基含水率(%); M_0 为样品初始干基含水率(%)。

失水率(water loss, WL): 失水率是指含水量的减少量与初始含水量之比, 计算公式如下:

$$WL(\%) = \frac{M_0 X_{w0} - M_t X_{wt}}{M_0} \times 100 \quad \text{式 (4)}$$

式中: M_0 、 M_t 为样品初始时刻和 t 时刻的质量(g); X_{w0} 、 X_{wt} 分别为初始时刻和 t 时刻干基含水量(g/g)。

干燥速率(drying rate, DR): 干燥速率即单位时间内蒸发的水分量, 计算公式如下:

$$DR = \frac{M_{t0} - M_t}{\Delta t} \quad \text{式 (5)}$$

式中: DR 为 t 时刻样品干燥速率($\text{g}/100\text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$); M_{t0} 、 M_t 为 t_0 、 t 时刻样品干基含水率, %; t 为干燥时间, h。

1.2.4 水分分布的测定 采用低场核磁共振仪进行水分分布的测定, 方法参照郭嘉^[18] 和仇徐亮等^[19] 实验方法, 并稍作修改。

测试条件: 温度 $32.00 \pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$, 磁体-探头: MesoMR-I-60 mm, TW 5000 ms, 通过 Q-FID 序列确定样品测试等待的时间, 然后用 Q-CPMG 序列采集样品信号。将采集信号用反演软件进行 10000000 连续谱迭代分析拟合得到各组样品的波谱图和 T2 弛豫信息, 并通过 SPIN ECHO 序列对样品中心横截面的氢质子密度进行成像。主要测量参数为: 等

待时间 4000 ms, 采样次数为 16, 时间回波 0.2 ms, 回波数 3000, 扫描次数 4。

1.2.5 总糖的测定 总糖含量的测定采用苯酚-硫酸法测定不同部分的总糖含量(以干物质糖含量计), 参考 Yue 等^[20]的方法并稍作修改。

样品处理: 准确称取不同水分含量、不同部分的浸渍水蜜桃片 1.00 g 于离心管中, 加入 20.00 mL 蒸馏水, 于 45 ℃ 下超声水浴 60 min, 超声功率 850 W。超声结束后, 进行离心 20 min, 离心力为 9548×g, 上清液为样品提取液。重复提取 2 次后, 将所得上清液移入 50.00 mL 容量瓶中, 用蒸馏水定容, 得到待测液。

总糖(total sugar, TS)含量测定: 吸取 1 mL 样品待测液于试管中。加入 2 mL 蒸馏水, 6% 苯酚溶液 1.00 mL, 混匀后加浓硫酸 6.00 mL, 充分混合后室温放置冷却 30 min, 在 490 nm 处测吸光值。重复实验 3 次。

$$TS(\%) = \frac{c \times n \times V_1 \times 10^{-3}}{m \times V_2 \times (1 - \omega)} \times 100 \quad \text{式 (6)}$$

式中: TS 为样品中总糖含量(%); c 为从标准曲线上计算得出样品中的葡萄糖含量(mg); m 为样品质量(g); V_1 为样品定容体积(mL); V_2 为比色时所移取的样品测定液体积(mL); n 为稀释倍数; ω 为样品此时湿基含水率(g/100 g)。

1.3 数据处理

所有实验均重复三次平行, 试验结果以“平均值±标准差”表示。实验数据由 IBM SPSS Statistics 25 软件进行 Duncan's multiple range test 对结果进行显著性分析($P < 0.05$), 并用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 水蜜桃片干燥过程中温度变化曲线

不同干燥方式下水蜜桃片的温度变化曲线如图 2 所示, 由图 2 可以看出, 在 FD 干燥过程的第一阶段升华干燥阶段, CK+FD 与 SUC+FD 物料从 -35 ℃ 升温到 0 ℃ 耗时约 5 h, XOS+FD 耗时约 6.5 h, 这是由于升华干燥主要去除物料中自由水, 自由水含量越多, 升华干燥时间越长, XOS 具有黏度低, 抗冻性能强的性质, 冻结后物料中形成的冰晶孔隙较少, 阻碍了升华干燥过程中水蒸汽的逸出, 使升华干燥过程缓慢, 干燥时间延长^[21]。第二阶段为解析干燥阶段, 即样品从 0 ℃ 继续升温, 并逐渐趋于平衡, 三种不同处理方式的冻干桃片均在 10 h 到达干燥终点, 干燥终点含水率<5%。升华干燥阶段是冷冻干燥过程中的关键阶段, 此时约有 60%~70% 的水分通过升华方式被除去, 该阶段能够直接影响样品干燥质量如形状、内部结构等质地特性^[22]。而解析干燥过程仅能去除样品 25%~35% 的水分, 耗时占冷冻干燥过程的二分之一左右。

由图 2b 可知, FD 水蜜桃片水分含量达到 60%

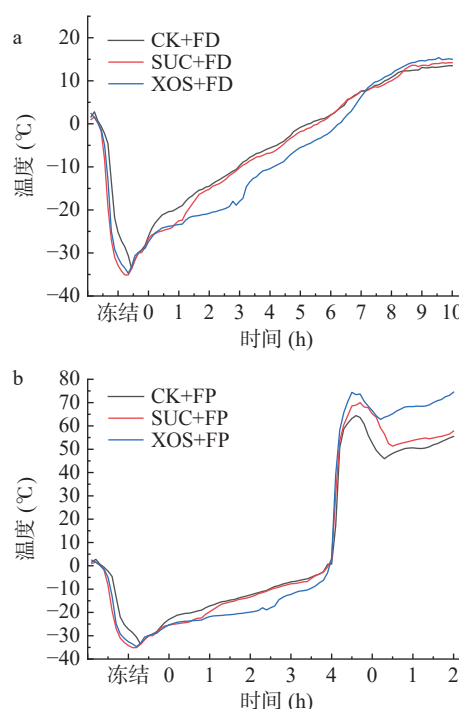


图 2 干燥过程中温度变化曲线

Fig.2 Variation of the temperature curves during drying process

需要 4 h, 4 ℃ 均湿 24 h 后压差膨化干燥需要 3 h, 压差膨化干燥能够有效缩短干燥时间, 使最终的干燥时间缩短了约 3 h。这是由于 FD 的升华干燥阶段在短时间内除去了部分水, 进一步采用压差膨化干燥代替真空冷冻干燥中解析干燥阶段, 解析温度提高, 能够增大热辐射及热传导的传热量, 物料的汽化速率加快, 干燥速率增加^[23], 同时通过瞬间泄压使得剩余水分快速汽化成水蒸气脱除, 因此脱除剩余水分需要的时间较短^[24]。在膨化过程中, 糖浸渍处理温度均高于未浸渍, XOS+FP 处理温度高于 SUC+FP 处理, 这是由于糖液浸渍处理使桃片中水分含量降低, 糖存在可增加物料热特性, 物料内部温度升高^[25]。

2.2 水蜜桃片干燥过程中干燥曲线分析

不同干燥方式下水蜜桃片在干燥过程中干基含水量、湿基含水量、水分比和失水率的变化如图 3 所示。从图 3a 和图 3c 可以看出, 糖浸渍可以降低水蜜桃片的初始含水率, 其中 SUC 浸渍后含水量最低。干燥前 4 h 时干基含水率和水分比降低速率较快, 并且经糖浸渍后降低速率较为均匀; 4 h 后进行压差膨化干燥, 所有 FP 处理的干基含水率和水分比要低于 FD 处理。图 3b 为不同处理水蜜桃片干燥过程中湿基含水率的变化, 从图中可以看出前 4 h 湿基含水率下降较为缓慢, 4 h 后由于进行压差膨化, 湿基含水率下降较为迅速。在干燥前, 经 SUC 浸渍后的初始水分含量低于 XOS 浸渍与未浸渍, 这是由于蔗糖分子量高于低聚木糖的分子量, 浸渍过程中由于渗透作用蔗糖分子进入水蜜桃片内, 将水分置换出来, 使得浸渍后含水率较低; 蔗糖能与水分子形成氢键, 使

水分子与蔗糖分子结合在一起,从而减少水分子的自由运动能力,使干燥过程中水分脱除较为缓慢^[26]。图 3d 为干燥过程中失水率的变化,失水率呈先升高后逐渐趋于平缓,在干燥前期干燥速率较快,主要脱除自由水,自由水的自由度较高容易去除,失水率快速上升;在干燥后期大部分自由水已全部被去除,结合水和不易流动水自由度较低,更不容易被去除,使失水率上升较缓并趋于稳定^[27]。

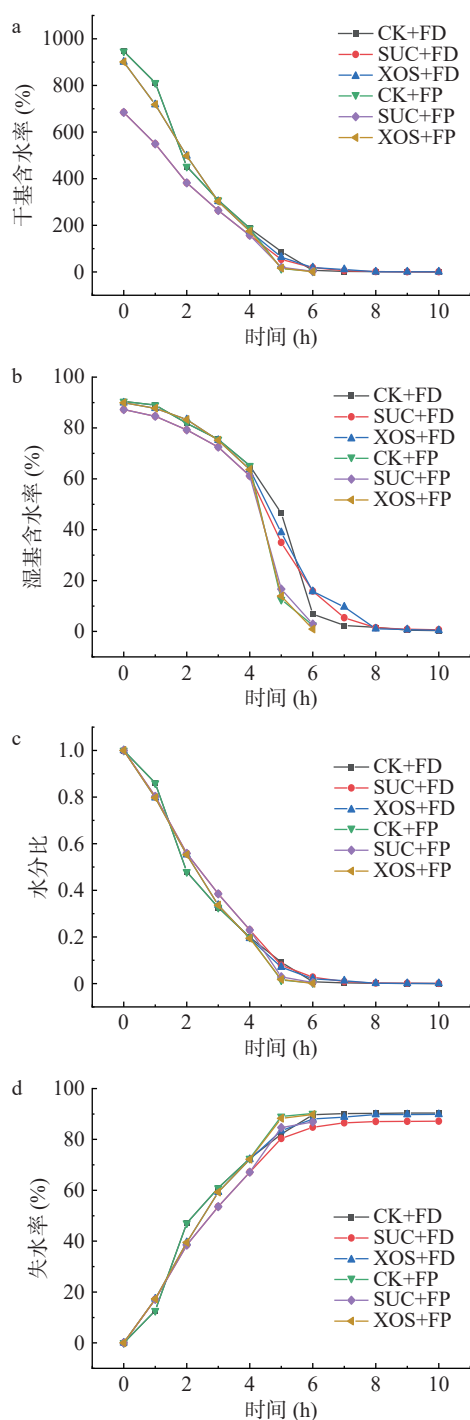


图 3 干燥过程中干燥曲线变化

Fig.3 Changes of drying curves during drying process

2.3 干燥速率和干燥时间分析

不同干燥方式下水蜜桃片的干燥速率和干燥时

间如图 4 所示,如图 4a 可知,随着干燥时间的延长,三个处理组干燥速率均呈现先上升后减小的趋势,在 FP 干燥过程中,由于第 4 h 后进行压差膨化,使得干燥速率在第 5 h 处又有所增加,然后再降低。真空冷冻中干燥速率呈先增加后降低的趋势,这是由于在含水量较高的升华阶段伴随着小部分冰晶融化,物料内部开放式孔道塌陷转化为封闭式孔道引起的^[28]。从图中可以看出,无论哪种干燥方式,经 SUC 浸渍后的干燥速率要低于 XOS 浸渍,这是因为在干燥过程中由于糖浸渍处理可以增加溶液的黏度从而降低了水的流动性,而低聚木糖的黏度比蔗糖低^[29],因此经低聚木糖浸渍后的水蜜桃片干燥速率要略高于蔗糖浸渍。由图 4b 可知,在 FD 过程中 CK 组干燥时间最短,SUC 浸渍干燥时间最长;与 FD 干燥时间相比,FP 干燥明显缩短了干燥时间,并且糖浸渍会增加干燥时间,且 SUC 浸渍后干燥时间最长。由于压差膨化过程中膨化温度较高,并且具有较高的孔隙度,水分扩散速率较高,蒸发速率较高^[30]。FD 干燥和 FP 干燥过程中,都是 SUC 浸渍组干燥时间大于 XOS 浸渍组,这是由于蔗糖分子在水中能够与水分子形成氢键,较高浓度的蔗糖溶液可以通过增加溶液的黏度和降低水的活动性,而低聚木糖在水中的溶解度较低,在溶液中形成了较大的分子团,其黏度比蔗糖低,水分扩散速率较高。

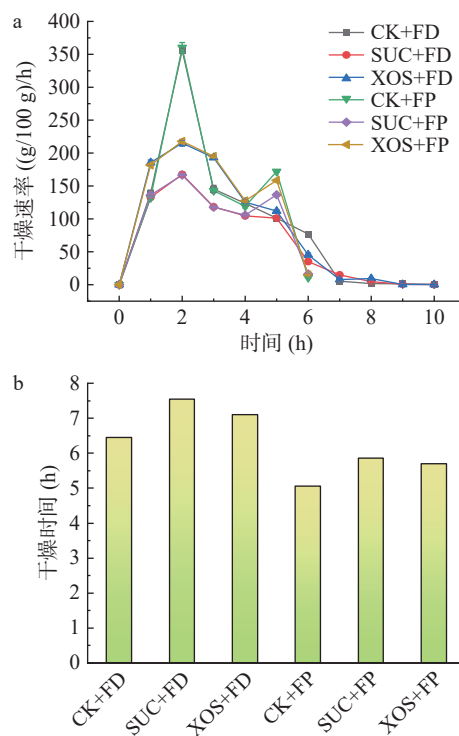


图 4 干燥过程中干燥速率与干燥时间变化
Fig.4 Changes of drying rate and drying time during drying process

2.4 水蜜桃片干燥过程中水分状态分布变化

低场核磁共振技术可以反应物料内部的水分分布情况,图 5 共检测出 3 个波峰,分别代表水蜜桃片

中 3 种不同状态的水分, A23、A22 和 A21 分别代表自由水、不易流动水和结合水的峰面积。峰面积的大小代表水蜜桃片中 3 种水分的含量(表 1)。由图 5 与表 1 可知, 在干燥过程中 3 种水分状态均发生改变。干燥前水蜜桃片中自由水含量均占绝大部分, 不易流动水与结合水相对含量较低, 随着干燥过程中水分减少, 总峰面积逐渐降低, 自由水含量降低, 这可能是由于自由水主要存在于液泡、原生质和细

胞间隙中, 距离质粒较远可以自由移动, 因此在干燥过程中最容易被脱除^[27], 同时渗透压作用导致细胞内水分重新分布, 使具有较高流动性的自由水从液泡中流入粘度较高的细胞质中, 从而转变为流动性较弱的结合水^[31]。

由图 5a~图 5c 和表 1 可知, 经糖渍后 FD 干燥水蜜桃片曲线逐渐左移, 逐渐以不易流动水和结合水为主。这是由于未浸渍样品细胞结构的结合力较弱

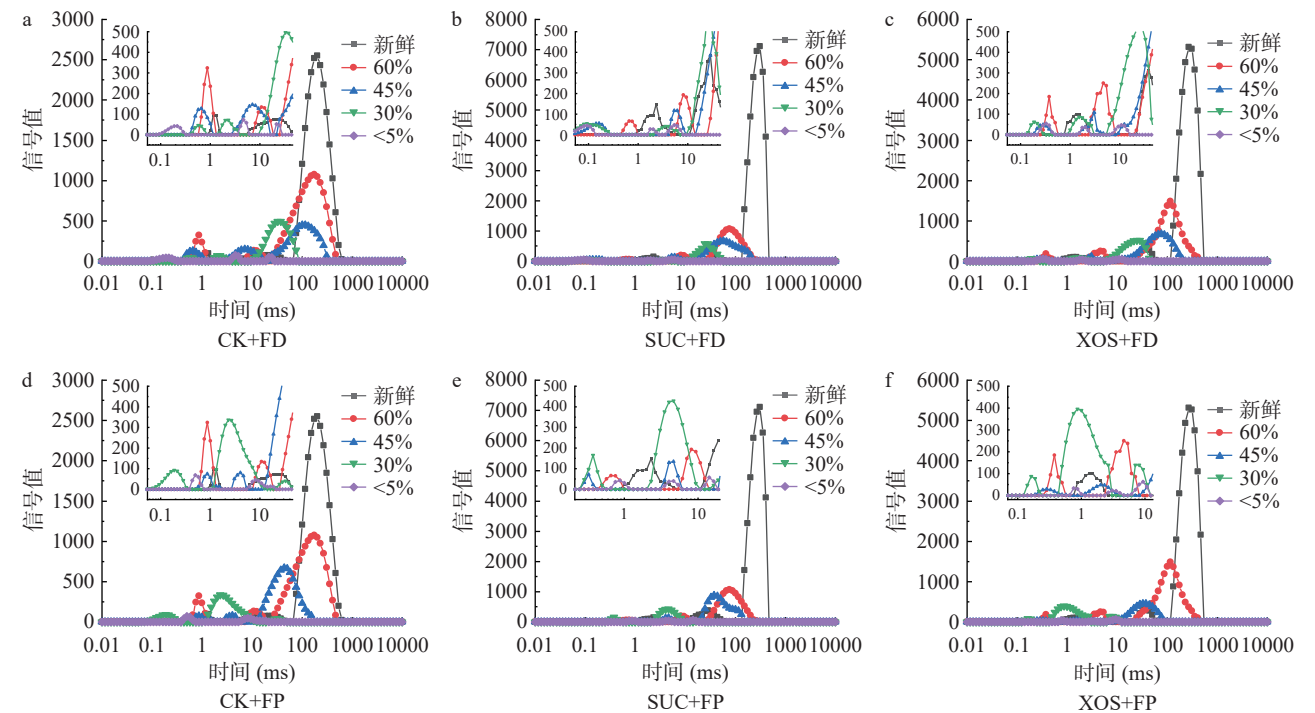


图 5 干燥过程中横向弛豫时间 T2 反演图谱

Fig.5 Inverse mapping of transverse relaxation time T2 during drying process

表 1 冻干和冻干-压差膨化干燥过程中水蜜桃片横向水分分布

Table 1 Transverse moisture distribution of peach slices during vacuum freeze-drying and vacuum freeze-drying combined with puffing drying processes

样品	水分含量	A21	A22	A23	总峰面积
CK+FD	新鲜	236.39±2.36 ^c	776.03±2.74 ^c	23219.42±51.64 ^c	24231.85±55.94 ^c
	60%	1130.87±1.86 ^a	681.30±8.29 ^c	13149.67±34.45 ^b	14961.84±29.91 ^b
	45%	677.92±3.98 ^a	1217.21±6.83 ^a	5363.07±52.83 ^c	7258.20±50.65 ^d
	30%	157.54±1.08 ^f	301.81±1.38 ^c	4531.46±33.75 ^b	4990.81±34.98 ^b
	<5%	223.60±1.36 ^b	175.92±3.73 ^b	99.82±2.43 ^d	499.34±5.46 ^a
SUC+FD	新鲜	735.53±3.35 ^a	2307.52±3.80 ^a	40302.70±12.03 ^a	43345.75±11.45 ^a
	60%	250.95±6.10 ^c	755.60±3.43 ^b	9778.23±17.57 ^c	10784.78±16.11 ^c
	45%	364.41±1.35 ^c	424.42±3.66 ^b	8050.98±9.57 ^a	8839.81±7.22 ^a
	30%	473.91±1.13 ^b	227.96±3.33 ^f	3677.96±8.33 ^c	4379.83±6.54 ^c
	<5%	258.99±5.94 ^a	64.74±1.19 ^e	168.34±0.73 ^b	492.07±5.78 ^a
XOS+FD	新鲜	579.83±4.74 ^b	1390.47±5.64 ^b	36449.20±46.74 ^b	38419.50±45.18 ^b
	60%	447.58±2.58 ^b	1280.17±4.92 ^a	13643.63±31.58 ^a	15371.37±35.84 ^a
	45%	214.54±4.62 ^d	334.48±4.88 ^d	7378.45±42.69 ^c	7927.48±39.29 ^b
	30%	219.59±3.39 ^c	490.36±9.23 ^d	4681.02±8.81 ^a	5390.97±2.31 ^a
	<5%	184.71±2.53 ^c	100.93±2.98 ^d	184.42±3.31 ^a	470.07±3.53 ^b
CK+FP	新鲜	235.12±1.83 ^c	774.07±5.70 ^c	23182.72±13.17 ^c	24191.92±20.06 ^c
	60%	1136.57±4.95 ^a	677.77±3.55 ^c	13187.40±9.35 ^b	15001.74±1.21 ^b
	45%	374.01±3.67 ^b	268.36±3.67 ^c	6825.39±53.36 ^d	7467.76±52.82 ^c
	30%	593.14±3.41 ^a	3072.87±7.09 ^b	154.07±1.31 ^e	3820.08±10.80 ^c
	<5%	190.56±1.98 ^c	197.65±4.49 ^a	26.87±1.12 ^c	415.08±2.58 ^c

续表 1

样品	水分含量	A21	A22	A23	总峰面积
SUC+FP	新鲜	737.30±5.89 ^a	2310.25±6.85 ^a	40300.02±22.71 ^a	43347.56±22.67 ^a
	60%	247.61±0.84 ^c	753.00±6.89 ^b	9798.06±12.22 ^c	10798.67±9.28 ^c
	45%	124.00±1.71 ^f	374.16±3.22 ^c	7505.06±8.39 ^b	8003.23±11.32 ^b
	30%	418.72±6.55 ^c	2790.91±6.71 ^c	117.33±3.27 ^f	3326.96±14.85 ^f
	<5%	122.49±2.04 ^d	114.68±3.36 ^c	116.08±1.99 ^c	353.25±3.18 ^d
XOS+FP	新鲜	578.68±4.44 ^b	1387.13±1.52 ^b	36424.66±47.22 ^b	38390.47±48.98 ^b
	60%	444.83±3.34 ^b	1291.36±6.62 ^a	13674.65±39.26 ^a	15410.84±44.89 ^a
	45%	140.18±2.52 ^e	264.45±3.16 ^e	4255.06±24.16 ^f	4659.68±24.83 ^e
	30%	230.04±3.06 ^d	3652.03±6.84 ^a	309.06±4.59 ^d	4191.13±33.37 ^d
	<5%	72.53±3.61 ^e	68.68±1.22 ^e	186.16±51.64 ^a	327.37±15.92 ^e

注: A23、A22和A21分别代表自由水、不易流动水和结合水的峰面积,同列不同小写字母表示相同水分含量不同组别间进行比较差异性显著, $P < 0.05$ 。

并且具有较高的迁移率,自由水可被轻易除去,而结合水和不易流动水与糖类中羟基集团结合紧密,难以除去^[32]。由图 5d~图 5f 和表 1 可知,水分含量低于 45% 时,FP 组桃片的水分状态主要以不易流动水为主,这可能是因为真空冷冻干燥过程中已除去大量的自由水。随着干燥过程中水分含量降低,曲线逐渐向左移动,不易流动水逐渐转变为结合水,且 XOS 浸渍后的桃片不易流动水含量高于 SUC 浸渍,这可能是因为 SUC 在水中的溶解度较高, XOS 溶解度较低,使得 SUC 在细胞壁中水的流动性略有增强^[33]。与 FD 过程相比,FP 干燥桃片自由水向不易流动水和结合水转化的更多,这是由于膨化压力可以压缩样品内部的气体,高压能够使水分子在分子间产生相互作用力,使其难以流动,更容易与其他物质结合,有助于自由水向不易流动水和结合水转变^[34]。

2.5 水蜜桃片干燥过程中水分迁移情况

不同干燥方式果蔬脆片的各部位水分迁移及变化如图 6 所示。由图 6 可知,随着干燥过程的进行自由水含量逐渐减少,大多数自由水从物料中脱除,部分自由水转化为不易流动水与结合水。CK+FD 干燥过程中,在水分含量为 60%、45% 时,与新鲜样品相比外部不易流动水与结合水含量逐渐升高,水分含量低于 30% 时,不易流动水与结合水含量降低;在干燥过程中,中部不易流动水几乎无明显变化,但结合水含量有所增加;干燥过程中水分含量为 60% 时内部结合水含量最高。SUC+FD 组在干燥过程中,外部不易流动水和结合水呈降低,升高再降低的趋势;中部和内部不易流动水变化情况与外部变化相同,内部结合水变化趋势与外部相同。XOS+FD 组干燥过程中,外部不易流动水先随水分含量降低而降

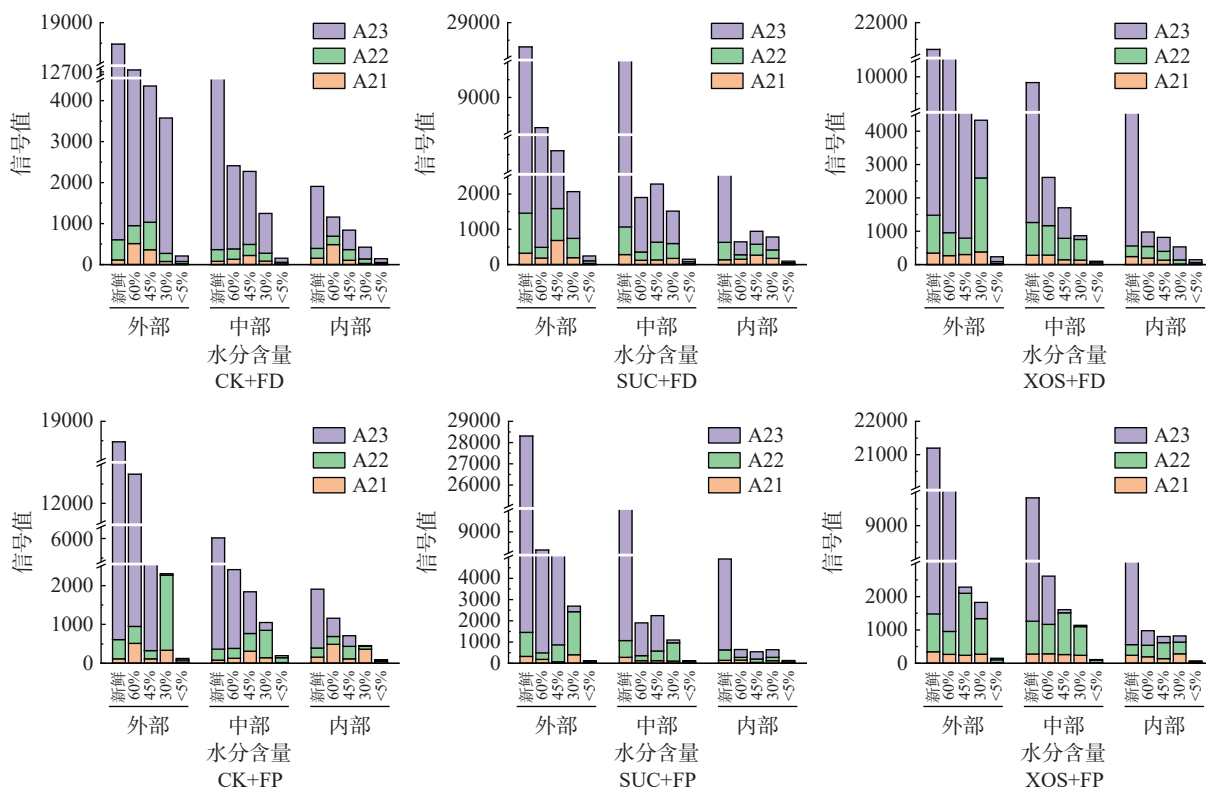


图 6 干燥过程中水蜜桃片不同部分水分含量变化

Fig.6 Changes in moisture content of different parts of peach slices during drying process

低,在水分含量为 30% 时,不易流动水含量增加,结合水含量在干燥过程中几乎无明显变化,在干燥结束时含量有所下降;中部与内部不易流动水与结合水含量呈下降趋势。在 CK+FP 干燥过程中,水分含量为 30% 时,外部、中部的不易流动水含量最高,内部的结合水含量最高。SUC+FP 组中水分变化与 SUC+FD 组相似,外部与中部不易流动水含量在水分含量为 30% 时最高。XOS+FP 组外部与中部不易流动水呈波动变化,结合水在干燥过程中变化不明显;内部不易流动水与结合水逐渐上升。

图 7 为不同干燥方式桃片质子密度加权图像,干燥过程中图像颜色的深浅代表含水量的高低,绿色

越多表示物料水分较多。通过加权成像图可直观获悉物料干燥不同阶段水分子的空间分布信息。从图 7 可以看出,干燥前桃片含水质量分数较大,水分分布均匀程度高。随着干燥的进行,各处理桃片水分由外向内不断推进,边缘部位最先失水,这说明物料内部水分脱除较困难^[35],这与图 6 的分析结果一致。FP 干燥中在水分含量低于 45% 时,水分分布面积要低于 FD,且内部与中部的红色区域比 FD 要多,这是由于在联合干燥时,温度的上升及瞬间泄压使外部与中部水分迅速脱除,并且在此过程中水分由自由水转化过来的不易流动水与结合水增加,此现象与图 6 中结果一致。

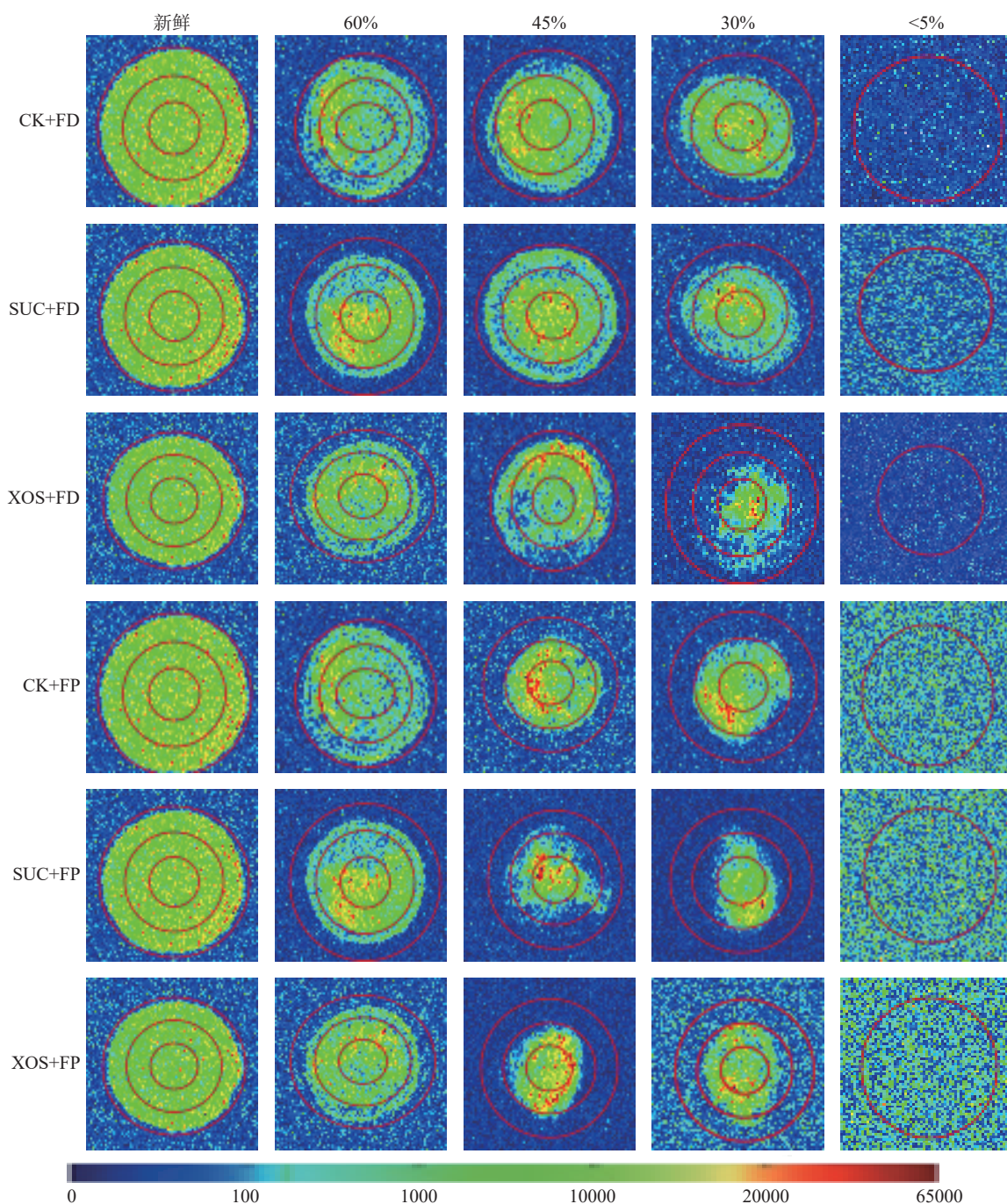


图 7 不同干燥方式桃片质子密度加权图像

Fig.7 Proton density weighted images of peach slices with different drying methods

2.6 水蜜桃片干燥过程中糖分布及迁移情况

不同干燥方法对水蜜桃片糖含量的影响如图 8 所示。从图 8 可以看出,与未浸渍处理相比,糖浸渍处理桃片的外部、中部、内部糖分均显著增加,这是由于糖溶液中的糖分浓度高于桃片,形成了渗透压差,糖在渗透压作用下渗透进入桃片的细胞内,导致桃片糖含量增加^[36]。在干燥过程中,随着水分含量的降低,总糖含量逐渐下降,在 FP 干燥中总糖含量下降较为明显,这可能是由于在膨化过程中温度的升高使部分糖发生美拉德反应,导致糖含量下降较快^[37];其中 SUC 浸渍后的桃片糖含量要高于 XOS 浸渍,这可能是由于 SUC 是由一分子葡萄糖的半缩醛羟基与一分子果糖的半缩醛羟基彼此缩合脱水而成,更容易发生热分解转化为还原糖, XOS 在高温时稳定性较强,膨化时不易发生分解^[38-39]。糖浸渍后桃片外部总糖含量要高于中部与内部,这是由于在桃片外部表面积较大,使得浸入糖较多。CK+FD 与 CK+FP 干燥过程中,外部与中部糖含量逐渐降低,内

部糖含量在水分含量在 60% 后随着水分含量继续降低,糖含量缓慢增加。糖浸渍后不同干燥方式糖含量变化较大, SUC+FD 与 SUC+FP 在干燥过程中外部糖含量呈先增加后降低的趋势,且 SUC+FP 在干燥至水分含量 45% 时,外糖含量急剧下降; SUC+FD 干燥过程中的中部糖含量呈先降低后升高, SUC+FP 中部糖含量呈先降低后升高再降低的趋势; SUC+FD 与 SUC+FP 内部糖含量先急剧降低后略有增加,这是由于糖分子不同程度的进入到桃片组织内部,与细胞壁组分、细胞基质等发生不同程度的结合^[40]。XOS+FD 与 XOS+FP 在干燥过程中内部糖含量有着先降低然后略有升高,并随着干燥的进行内部糖含量继续降低的趋势; XOS+FD 中部糖含量先降低而后略有增加,而外部糖含量随水分含量降低而逐渐下降,水分含量降低至 30% 后糖含量无差异; XOS+FP 干燥过程的中外部糖含量均有明显的下降趋势,而外部糖含量在干燥至水分含量为 45% 后开始增加,这可能是中部糖部分向外部迁移的结果。

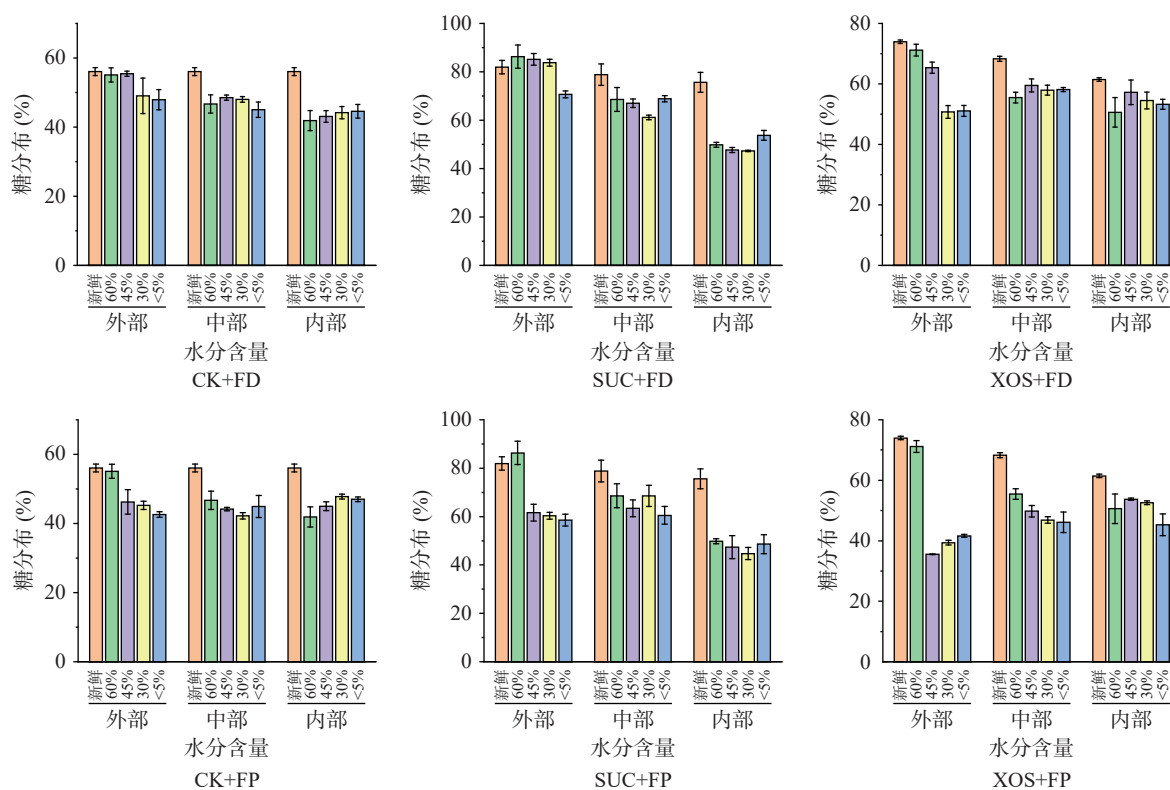


图 8 干燥过程中桃片不同部位糖分布图

Fig.8 Sugar distribution in different parts of peach slices during drying process

3 结论

通过研究浸渍与未浸渍水蜜桃在 FD 和 FP 干燥过程中的水分与糖分迁移规律,发现在 FD 和 FP 干燥过程中,干燥速率均先升高后缓慢下降,最终趋于平缓,且干燥速率 CK 组>XOS 浸渍组>SUC 浸渍组;与 FD 相比,FP 干燥能够显著缩短桃片的干燥时间,提高干燥速率,且 CK 组干燥时间较短, SUC 浸渍组干燥时间最长。随着干燥过程的进行,自由水

含量逐渐降低,逐渐转换成不易流动水和结合水;在 FP 干燥过程中外部不易流动水含量明显上升,糖渍后 FP 桃片水分含量显著低于 FD,且桃片的水分脱除过程是由外向内进行的;XOS 浸渍能使不易流动水与结合水含量更高,这种现象在中外部更加明显。CK 组在干燥过程中,外部与中部糖含量逐渐降低,内部糖含量在水分含量在 60% 后随着水分含量继续降低,糖含量缓慢增加;糖浸渍 FP 干燥压差膨化阶

段外部糖含量会出现一个断崖式的下降,中部糖含量基本处于逐渐下降趋势,内部变化不大。本研究结果发现 FP 干燥中的压差膨化阶段可以加快外部不易流动水含量的增加,加速干燥过程的进程,同时使得外部糖含量大幅下降,促使中部糖向外部迁移。该研究结果为果蔬干燥技术发展产品研发提供了技术支撑与理论依据。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] WANG X Q, ZHONG J H, HAN M, et al. Drying characteristics and moisture migration of ultrasound enhanced heat pump drying on carrot[J]. *Heat Mass Transfer*, 2023, 59(12): 2255–2266.
- [2] 宋娟, 张海燕, 袁晶, 等. 不同干燥方式下菠菜粉理化性质的比较[J]. *现代食品科技*, 2021(9): 207–215. [SONG J, ZHANG H Y, YUAN J, et al. Comparison of physical and chemical properties of spinach powder under different drying methods[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021(9): 207–215.]
- [3] 屈展, 张小燕, 张静林. 真空冷冻联合干燥技术在果蔬加工中的应用现状[J]. *食品安全导刊*, 2024(6): 166–169, 173. [QU Z, ZHANG X Y, ZHANG J L. Application of vacuum freeze combined drying technology in fruit and vegetable processing[J]. *Guide to Food Safety*, 2024(6): 166–169, 173.]
- [4] 王丹丹, 汪兰, 李江涛, 等. 鱼糜-淀粉脆片压差膨化加工工艺研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(16): 211–219. [WANG D D, WANG L, LI J T, et al. Study on pressure differential expansion process of surimi-starch chips[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(16): 211–219.]
- [5] CHI X, TANG S, SONG X X, et al. Visible dynamic changes in the mechanism of water evaporation surface formation during wood drying[J]. *Wood Science and Technology*, 2023, 57(5): 1061–1076.
- [6] PEI F, SHI Y, GAO X Y, et al. Changes in non-volatile taste components of button mushroom (*Agaricus bisporus*) during different stages of freeze drying and freeze drying combined with microwave vacuum drying[J]. *Food Chemistry*, 2014, 165: 547–554.
- [7] 李越. 冷冻-膨化干燥不同果蔬脆片质地特性影响因素研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023. [LI Y. Study on the influencing factors of texture characteristics of different fruit and vegetable chips by freeze-expansion drying[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023.]
- [8] KPRÜALAN Z, ALTAY Z, BODRUK A, et al. Effect of hybrid drying method on physical, textural and antioxidant properties of pumpkin chips[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021, 15(4): 2995–3004.
- [9] 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. [YU W J, JIN X, HU L N, et al. Effect of moisture distribution during pre-drying on the microstructure and texture of hot air-vacuum freeze-dried peach chips[J]. *Food Science*, 2023, 44(15): 69–79.]
- [10] PRAVITHA M, MANIKANTAN M R, KUMAR V A, et al. Optimization of process parameters for the production of jaggery infused osmo-dehydrated coconut chips[J]. *LWT*, 2021, 146: 111441.
- [11] CRISTINA B, NOELIA B, LUCÍA S. Potential of vacuum impregnation and osmotic dehydration techniques in producing jaggery-fortified apple snackst[J]. *Sustainable Food Technology*, 2024(7): 1041–1051.
- [12] 王海鸥, 王前菊, 闫秋菊, 等. 多元糖浸渍处理对真空冷冻干燥苹果片品质及微观孔隙结构的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(16): 43–48, 55. [WANG H O, WANG Q J, YAN Q J, et al. Effects of maceration with polysaccharides on the quality and microstructure of vacuum freeze-dried apple slices[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(16): 43–48, 55.]
- [13] 张鹏飞. 桃片渗透脱水及联合干燥技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016. [ZHANG P F. Study on osmotic dehydration and combined drying of peach slices[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.]
- [14] 韦丽娜, 李来好, 郝淑贤, 等. 渗透处理对冷冻干燥罗非鱼肉品质和肌原纤维蛋白的影响[J]. *南方水产科学*, 2023, 19(2): 133–141. [WEI L N, LI L H, HAO S X, et al. Effects of osmotic treatment on meat quality and myofibril protein of freeze-dried tilapia[J]. *South China Fisheries Science*, 2023, 19(2): 133–141.]
- [15] 杨慧, 吴洪斌, 金新文, 等. 预处理对变温压差膨化干燥红枣脆片品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(12): 36–43. [YANG H, WU H B, JIN X W, et al. Effect of pretreatment on the quality of expanded dried jujube crispy slices at variable temperature and pressure difference[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(12): 36–43.]
- [16] 李原, 毕金峰, 马有川, 等. 打孔和划痕预处理对蓝莓粒真空冷冻干燥特性及品质的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2023, 41(2): 175–186. [LI Y, BI J F, MA Y C, et al. Effects of pre-treatment of perforating and scratching on vacuum freeze-drying characteristics and quality of blueberry kernels[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2023, 41(2): 175–186.]
- [17] 马有川. 预处理对苹果脆片真空冷冻干燥特性和品质的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021. [MA Y C. Effect of pretreatment on vacuum freeze-drying characteristics and quality of apple crisps[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.]
- [18] 郭嘉. 微粒化大分子物质对冻干草莓质地形成的影响[D]. 镇江: 江苏大学, 2023. [GUO J. Effect of microparticle macromolecule on texture formation of freeze-dried strawberry[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023.]
- [19] 仇徐亮, 冯蕾, 聂梅梅, 等. 超声预处理对荠菜微波干燥品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(6): 155–167. [QIU X L, FENG L, NIE M M, et al. Effect of ultrasonic pretreatment on microwave drying quality of Shepherd's purse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(6): 155–167.]
- [20] YUE F F, ZHANG J R, XU J X, et al. Effects of monosaccharide composition on quantitative analysis of total sugar content by phenol-sulfuric acid method[J]. *Front Nature*, 2022, 9: 963318.
- [21] 赵月明. 微波真空与冷冻联合干燥蓝靛果脆片工艺研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022. [ZHAO Y M. Study on microwave-vacuum-freeze drying of *Lonicera edulis* crisps[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022.]
- [22] CHEN B L, JANG J H, AMANI M, et al. Numerical and experimental study on the heat and mass transfer of kiwifruit during vacuum freeze-drying process[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 73(15): 427–442.
- [23] 袁蕉蕉, 赵武奇, 于维平, 等. 真空冷冻干燥猕猴桃果粉的工艺优化[J]. *真空科学与技术学报*, 2021, 41(1): 69–74. [YUAN J

- J, ZHAO W Q, YU W P, et al. Optimization of vacuum freeze-drying technology of kiwi fruit powder[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2021, 41(1): 69–74.]
- [24] NADALI N, PAHLEVANLO A, SARABI-JAMAB M, et al. Effect of maltodextrin with different dextrose equivalents on the physicochemical properties of spray-dried barberry juice (*Berberis vulgaris* L.)[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022(7): 59.
- [25] 宋晓燕, 张婉竹, 刘宝林. 不同预处理对冷冻芒果果肉块冷冻速率和解冻后品质的影响[J]. 工业微生物, 2022, 52(5): 14–20. [SONG X Y, ZHANG W Z, LIU B L. Effect of different pretreatment on freezing rate and quality of frozen mango pulp[J]. Industrial Microbiology, 2022, 52(5): 14–20.]
- [26] 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. [CHEN L M, JIN X, BI J F, et al. Effects of ultrasonic-assisted osmotic treatment of sugar solution on the quality and hygroscopicity of vacuum freeze-dried peach chips[J]. Food Science, 2022, 43(17): 117–123.]
- [27] 张绪坤, 祝树森, 黄俭花, 等. 用低场核磁分析胡萝卜切片干燥过程的内部水分变化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 282–287. [ZHANG X K, ZHU S S, HUANG J H, et al. The internal moisture changes of carrot slices during drying were analyzed by low field nuclear magnetic resonance (NMR)[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(22): 282–287.]
- [28] DUAN L L, DUAN X, REN G Y. Evolution of pore structure during microwave freeze-drying of Chinese yam[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(6): 208–212.
- [29] 陈立夫, 裴斐, 张里明, 等. 超声辅助渗透处理对冷冻干燥双孢蘑菇冻干效率和品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(23): 8–13. [CHEN L F, PEI F, ZHANG L M, et al. Effects of ultrasound-assisted osmotic treatment on freeze-drying efficiency and quality of freeze-dried *Agaricus bisporus*[J]. Food Science, 2017, 38(23): 8–13.]
- [30] LÜ J, YI J Y, BI J F, et al. Effect of sucrose concentration of osmotic dehydration pretreatment on drying characteristics and texture of peach chips dried by infrared drying coupled with explosion puffing drying[J]. Drying Technology, 2017, 35(15): 1887–1896.
- [31] 陈童, 张慤, 陈晶晶. 超声波辅助渗透脱水处理及其对西兰花冻结品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2020, 39(4): 33–40. [CHEN T, ZHANG M, CHEN J J. Effect of ultrasonic-assisted osmotic dehydration on freezing quality of broccoli[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2020, 39(4): 33–40.]
- [32] LI X, BI J F, JIN X, et al. Study on the mechanism of volume expansion and texture formation of apple cube dried by instant controlled pressure drop drying (DIC)[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 293: 110379.
- [33] 黄亦文. 鲜切橙片低温干燥工艺及半干半湿产品研发[D]. 无锡: 江南大学, 2023. [HUANG Y W. Research and development on low-temperature drying technology and semi-dry and semi-wet products of fresh-cut orange slices[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.]
- [34] 刘宗博, 张钟元, 李大婧, 等. 双孢菇远红外干燥过程中内部水分的变化规律[J]. 食品科学, 2016, 37(9): 82–86. [LIU Z B, ZHANG Z Y, LI D J, et al. Changes of internal moisture during far infrared drying of *Agaricus bisporus*[J]. Food Science, 2016, 37(9): 82–86.]
- [35] 薛广, 李敏, 关志强, 等. 基于低场核磁共振的罗非鱼片微波真空干燥过程水分变化规律[J]. 广东海洋大学学报, 2020, 40(6): 123–129. [XUE G, LI M, GUAN Z Q, et al. Moisture variation of tilapia fillets during microwave vacuum drying based on low field NMR[J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2020, 40(6): 123–129.]
- [36] 王锐, 牛丽影, 胡丽丽, 等. 草莓液态与固态糖渍过程中的水分分布与迁移规律[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(18): 134–139. [WANG R, NIU L Y, HU L L, et al. Distribution and migration of water in strawberry during liquid and solid saccharification[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(18): 134–139.]
- [37] 袁越锦, 邹娜, 徐英英, 等. 热风真空组合干燥对黄芪品质的影响及工艺优化研究[J]. 真空科学与技术学报, 2023, 43(10): 879–889. [YUAN Y J, ZOU N, XU Y Y, et al. Effect of hot-air vacuum combined drying on quality of astragalus membranaceus and its technology optimization[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2023, 43(10): 879–889.]
- [38] YANG Q Q, SUN F B, MENG X Z, et al. An integrated biorefinery approach to obtain xylo-oligosaccharides from corncob using lactic acid-rich fermentation broth[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 397: 136513.
- [39] ZHANG F L, LAN W, ZHANG A P, et al. Green approach to produce xylo-oligosaccharides and glucose by mechanical-hydrothermal pretreatment[J]. Bioresource Technology, 2022, 344: 126298.
- [40] 郭梓煜, 胡佳琦, 杨菲菲, 等. 预冻及蔗糖浸渍方法对冻干苹果片品质的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(6): 185–191. [GUO Z Y, HU J Q, YANG F F, et al. Effects of pre-freezing and sucrose impregnation on the quality of freeze-dried apple slices[J]. Food and Machinery, 2024, 40(6): 185–191.]