

# 穿刺协同乙醇预处理对胡萝卜片热风干燥特性影响

索奎<sup>1</sup>, 杨震峰<sup>1</sup>, 冯亚斌<sup>1\*</sup>, 张 扬<sup>1</sup>, 周存山<sup>2</sup>, 施丽愉<sup>1</sup>, 陈 伟<sup>1</sup>

(1. 浙江万里学院生物与环境学院, 宁波 315100; 2. 江苏大学食品与生物工程学院, 镇江 212013)

**摘 要:**干燥效率低导致的能耗高、品质劣变是果蔬热风干燥加工面临的严峻挑战。为改善胡萝卜热风干燥特性, 该研究以横切和纵切方式获得的胡萝卜片为研究材料, 对其进行穿刺(perforation pretreatment, PT)、乙醇浸渍(alcohol pretreatment, AT)和穿刺协同乙醇浸渍预处理(perforation synergistic alcohol pretreatment, PAT)。研究发现: 同未预处理的胡萝卜片相比, PT、AT 和 PAT 预处理技术的应用均显著提高了胡萝卜有效水分扩散系数及热风干燥速率, 并将干燥时间缩短 10.61%~50.00%, 其中 PAT 样品干燥时间最短。相同预处理方式下, 纵切的胡萝卜片相比于横切表现出较高的有效水分扩散系数、较快的干燥速率及较短的干燥时间。进一步, 我们提出了 PAT 预处理具有较高干燥效率的“三重奏机制”: 预脱水降低干燥负荷、毛细管流促进水分传质、细胞通透性的增强降低水分传质阻力。在品质方面, PAT 预处理显著改善了纵切胡萝卜片的体积收缩、复水性、色泽、总类胡萝卜素和抗坏血酸含量、抗氧化活性及风味等品质特性。因此, 为高效获得品质相对较优的脱水胡萝卜, 可在其纵向切片后进行 PAT 预处理。该研究为改善胡萝卜热风干燥提供了一种简单有效的预处理技术, 同时也为其他果蔬提质、增效、节能干燥提供参考。

**关键词:**胡萝卜; 热风干燥; 干燥效率; 穿刺协同乙醇预处理; 品质

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305224

中图分类号: TS255.36

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-02-0124-10

索奎, 杨震峰, 冯亚斌, 等. 穿刺协同乙醇预处理对胡萝卜片热风干燥特性影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(2): 124-133. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305224 <http://www.tcsae.org>

SUO Kui, YANG Zhenfeng, FENG Yabin, et al. Effects of puncture combined with ethanol pretreatment on the hot air drying characteristics of carrot slices[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(2): 124-133. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305224 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

新鲜果蔬含水率较高, 为防止其腐烂变质、延长货架期以达到随取随用的目的, 干燥是最有效的深加工方法之一<sup>[1-2]</sup>。在众多干燥方法中, 热风干燥技术因其设备成本低、操作简便、普适性强等优点成为生产脱水果蔬的重要选择, 并且在工业化生产中占据主导地位<sup>[3-4]</sup>。然而, 相关研究表明: 热风干燥存在干燥时间长、效率低的突出问题, 进而产生较高的能耗、并诱发产品品质劣变, 而高能耗又与污染环境的碳排放密切相关<sup>[1,5-7]</sup>。据此, 如何缩短热风干燥时间、降低能耗、改善产品品质成为果蔬脱水加工业亟需解决的技术难题; 同时, 该问题的解决对助力国家双碳、绿色可持续的发展战略, 促进果蔬精深加工高质量发展具有重要意义<sup>[8-9]</sup>。

近年来, 干燥预处理技术因其低能耗、高效、非热的特点逐渐成为果蔬提质增效干燥领域研究的热点, 例如: 超声波、脉冲电场、冻融和渗透脱水等。WU 等<sup>[10]</sup>

发现: 菠萝蜜在红外干燥过程中(红外功率 900~1 500 W)辅以超声波(20 kHz, 80 W)可以促使组织产生大量的微孔道, 进而缩短 25%~35% 的干燥时间, 并提高干燥产品中维生素 C 和总酚含量。KIM 等<sup>[11]</sup>报道了脉冲电场(2.5 kV/cm)通过电穿孔效应破坏了胡萝卜的细胞结构, 提高组织内水分扩散效率, 从而缩短了胡萝卜 45% 的热风干燥(温度为 50 ℃)时间, 且产品复水能力相比未处理组提高了 27.58%。在大蒜干燥特性研究中, 冻融循环预处理过程中由于冰晶的生长, 促使大蒜形成多孔网络状结构, 可将真空冷冻干燥时间缩短 22%~33%<sup>[12]</sup>; 此外, 乙醇作为预脱水的渗透液, 浸渍预处理后也可将大蒜的红外干燥时间缩短 27%, 且预处理可以显著提高脱水蒜片的风味, 而相比于盐或糖渗透溶液, 乙醇浸渍预处理无化学残留<sup>[13]</sup>。

研究表明, 果蔬干燥特性的改进可以通过破坏细胞结构和形成微孔道来减少水分扩散阻力(如: 超声波、脉冲电场、冻融), 或者通过预脱水(渗透脱水)减少干燥负荷来实现。因此, 一个可能的有效方法是将微孔道的形成与渗透预脱水相互协同, 来改善果蔬的干燥效率及品质。此外, 在微孔道形成方面, 另一个新思路是通过人工穿刺直接形成微孔道, 简单替代第三效应: 由超声波设备、脉冲电场设备和制冷设备分别产生的声空化、电穿孔和冰晶生长来形成微孔道。据此, 针对热风干燥技术存在的效率低、能耗高、品质劣变等突出问题,

收稿日期: 2023-05-28 修订日期: 2023-09-03

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(No. LTGN23C200015); 宁波市公益类科技计划项目(No. 2022S142; No. 2022S152); 宁波市农业技术推广项目(No. 2023NT001)

作者简介: 索奎, 研究方向为农产品干燥技术。

Email: suokui2022@163.com

\*通信作者: 冯亚斌, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为食品物理加工技术与装备。Email: fengyabinyx@zjwu.edu.cn



该研究以胡萝卜为研究材料, 对其进行人工穿刺协同乙醇浸渍预处理, 以期改善热风干燥特性。

以横切和纵切两种切片方式获得的胡萝卜片为研究对象, 分别对其进行人工穿刺预处理、乙醇浸渍预处理、穿刺协同乙醇浸渍预处理, 探究切片方式与3种预处理技术对胡萝卜热风干燥动力学、复水比、色泽、外观形状、生物活性成分含量、抗氧化活性和风味等品质的影响, 以期提供一种简单有效的预处理技术来改善胡萝卜热风干燥特性, 并为今后工业化果蔬提质、增效、节能干燥或制粉加工提供一定的技术基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

新鲜胡萝卜购于宁波市钟公庙农贸市场, 无腐烂、无病虫害、大小一致。胡萝卜样品(干基含水率  $9.19 \pm 0.24$  g/g)使用取样器(直径 3.0 cm)从肉质根的正下方横切(transverse cutting, TC)和侧方纵切(longitudinal cutting, LC)分别提取圆柱体后, 切割获取 0.3 cm 厚的横向和纵向胡萝卜切片, 并用于预处理和热风干燥, 具体操作方法如图1所示。

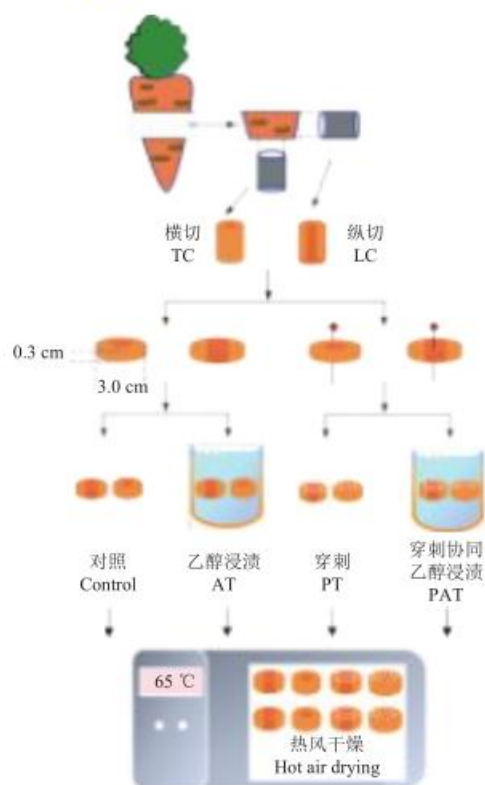


图1 胡萝卜切片、预处理与热风干燥示意图

Fig.1 Illustrative diagram of slicing, pretreatment and hot air drying of carrot

分析纯化学试剂: 无水乙醇、三氯乙酸(trichloroacetic acid, TCA)、磷酸、1,10-菲啰啉、三氯化铁、二硫苏糖醇(dithiothreitol, DTT)、磷酸氢二钠、氢氧化钠、抗坏血酸、氢氧化钾、石油醚(沸程为 60~90 °C)、二氯甲烷、甲醇、2,2-联苯基-1-苦基肼基(2,2-di-phenyl-1-picrylhydrazyl, DPPH)等购置于国药集团化

学试剂有限公司。

### 1.2 仪器与设备

DHG-9240A 电热鼓风干燥箱(控温范围 25~200 °C、控温精度  $\pm 0.1$  °C), 上海一恒科学仪器有限公司; CM-26 d 便携式分光测色仪(波长范围 360~740 nm、重复性 0.02 以内标准偏差), 杭州柯盛行仪器有限公司; P4 紫外/可见分光光度计(波长范围 190~1 100 nm、光谱带宽 2 nm、光谱范围 0~4 Abs), 上海美谱达仪器有限公司; AL204 电子天平(称量范围 0~210 g、可读性 0.000 1 g), 梅特勒-托力多仪器有限公司; HH-4 数显恒温水浴锅(控温范围 25~100 °C、控温精度  $\pm 0.5$  °C), 国华电器有限公司; KQ-500DB 数控超声波清洗器(超声频率 40 kHz、功率 500 W、容量 22.5 L), 昆山市超声仪器有限公司; JXFSTPRP-24 L 全自动样品快速研磨仪(容量 5~15 mL、均质速度 10~70 Hz/s、出料粒径 5  $\mu$ m), 上海净信实业发展有限公司; LC-DCY-24SYD 水浴氮吹浓缩仪(控温范围 25~100 °C、控温精度  $\pm 0.1$  °C、气体流量 0~15 L/min), 上海力辰邦西仪器科技有限公司; PEN3 电子鼻(传感器数目 10 个、进样流量 10~400 mL/min), 德国 AIRSENSE 公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 预处理

以横切和纵切获得的胡萝卜片为材料, 对其分别进行人工穿刺(PT)、乙醇浸渍(AT)、穿刺协同乙醇浸渍(PAT)预处理, 具体操作步骤如下(图1):

未处理或对照组(Control): 未经任何预处理的胡萝卜样品;

穿刺预处理(PT): 基于前期优化的条件, 使用直径为 0.5 mm 的微针在胡萝卜片上穿刺 80 个孔, 这些穿孔沿着胡萝卜片圆形表面均匀分布, 并相对于圆形表面垂直定向;

乙醇预处理(AT): 基于前期优化的条件, 将未穿刺处理的样品浸渍于 75% 乙醇中 30 min;

穿刺协同乙醇预处理(PAT): 样品穿刺处理后再乙醇浸渍, 操作同上(PT、AT)。

#### 1.3.2 热风干燥

将对照和预处理后的胡萝卜片置于热风干燥箱中进行干燥, 基于前期的优化条件, 干燥温度设定为 65 °C、风速为 2 m/s。干燥期间每隔 15 min 取样、称重, 直至样品干基含水率低至 0.1 g/g 为止, 所需时间即为样品的干燥总时间; 所得脱水胡萝卜产品保存于 4 °C 冰箱中用于后续理化品质分析。

样品干基含水率(moisture content,  $M_C$ )计算公式如下:

$$M_C = \frac{m_i - m}{m} \quad (1)$$

式中  $M_C$  为样品干基含水率, g/g;  $m_i$  为干燥至  $t$  时刻的样品重量, g;  $m$  为样品的干基重量, g。

#### 1.3.3 干燥动力学

根据热风干燥过程中胡萝卜样品含水率变化的结果, 以干燥时间为横坐标、干基含水率为纵坐标绘制干燥曲



线, 并采用分数转换模型 (公式 2) 进行计算<sup>[14]</sup>:

$$\frac{M_{Ci}}{M_{Co}} = \exp(-kt) \quad (2)$$

式中  $M_{Ci}$  为干燥时间  $t$  时样品的干基含水率, g/g;  $M_{Co}$  为干燥前样品的初始干基含水率, g/g;  $t$  为干燥时间, h;  $k$  为干燥速率常数,  $h^{-1}$ ; 下同。

干燥过程中样品的有效水分扩散系数 (effective moisture diffusion coefficient,  $D_{eff}$ ) 按以下公式计算<sup>[15]</sup>:

$$D_{eff} = \frac{H^2}{t\pi^2} \ln\left(\frac{8M_{Co}}{\pi^2 M_{Ci}}\right) \quad (3)$$

式中  $D_{eff}$  为有效水分扩散系数,  $m^2/s$ ;  $t$  为干燥时间, s;  $H$  为样品厚度, m。

#### 1.3.4 复水性

将脱水的胡萝卜样品浸泡于 25 °C 的蒸馏水中, 期间每隔 10 min 取出样品, 并用吸水纸擦干表面水分后称重、记录, 然后继续浸泡于水中复水, 直至样品重量恒定为止。脱水胡萝卜样品的复水性用复水比 (rehydration ratio,  $R_R$ ) 表示, 并按以下公式计算:

$$R_R = \frac{w_t - w_0}{w_0} \quad (4)$$

式中  $R_R$  为复水比;  $w_t$  为样品复水至  $t$  时的质量, g;  $w_0$  为样品复水前的质量, g。

#### 1.3.5 色泽

新鲜以及脱水样品的色泽参数值 ( $L$ 、 $a$ 、 $b$ ) 采用手持式色差仪进行测定。测量时随机选择样品表面测量点, 并平行测定 10 次。样品色泽用总色差 ( $\Delta E$ )、饱和度 ( $C^*$ ) 表示, 并按以下公式计算:

$$\Delta E = \sqrt{(L_0 - L)^2 + (a_0 - a)^2 + (b_0 - b)^2} \quad (5)$$

$$C^* = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (6)$$

式中  $\Delta E$  为总色差;  $C^*$  为饱和度;  $L$ 、 $a$ 、 $b$  分别为脱水样品的亮度、红绿度和黄蓝度值;  $L_0$ 、 $a_0$ 、 $b_0$  为新鲜样品色泽参数值。

#### 1.3.6 抗坏血酸

抗坏血酸含量的测定参照张琰等<sup>[16]</sup>的方法并稍作修改。取粉碎的胡萝卜样品 0.5 g (干基质量), 加入 20 mL 5% TCA 溶液, 超声提取 10 min (频率 40 kHz, 功率密度 60 W/L), 然后 4 °C 10 000 rpm 离心 15 min, 得上清液。取 1 mL 上清液与 0.5 mL 60 mM DTT-乙醇溶液混合, 调 pH 值至 7~8, 30 °C 反应 10 min, 分别加入 0.5 mL 20% TCA、1 mL 5% TCA、1 mL 无水乙醇、0.5 mL 0.4% 的磷酸-乙醇溶液、1 mL 0.5% 菲罗啉-乙醇溶液、0.5 mL 三氯化铁-乙醇溶液。混合液 30 °C 反应 60 min 后, 在 534 nm 处测量吸光值, 以 5% TCA 溶液为参比液。使用抗坏血酸标样 (0.01、0.02、0.03、0.04、0.05、0.06 mg/mL) 代替样品上清液完成上述试验操作, 以吸光值为横坐标、抗坏血酸浓度为纵坐标绘制标准曲线。胡萝卜样品的抗坏血酸含量 (ascorbic acid content,  $C_{AA}$ ) 按以下公式计算:

$$C_{AA} = \frac{A_{AC} \times V}{M} \times 100 \quad (7)$$

式中  $C_{AA}$  为抗坏血酸含量, mg/100 g;  $A_{AC}$  为通过标准曲线计算得到的样品抗坏血酸含量, mg/mL;  $V$  为样品提取液的总体积, mL;  $M$  为称取的样品质量, g。

#### 1.3.7 总类胡萝卜素

样品中总类胡萝卜素含量测定方法参照 XIAO 等<sup>[17]</sup>的方法并稍作修改。取粉碎的胡萝卜样品 0.5 g (干基质量), 加入 5 mL 预冷的无水乙醇 (含 1% 的抗坏血酸), 超声辅助提取 10 min (频率 40 kHz, 功率密度 60 W/L) 后, 置于 -20 °C 浸提 12 h。然后, 加入 300  $\mu$ L 80% 氢氧化钾溶液, 充分混匀后 95 °C 避光皂化 45 min。完成皂化后分别加入 5 mL 预冷的双蒸水、5 mL 石油醚, 漩涡混匀后 4 °C 10 000 rpm 离心 10 min 得上清提取液。提取过程重复 5 次左右, 直至混合液中类胡萝卜素衍生物被完全提取出来。将提取液在 35 °C 下氮吹至液体挥发完全, 加入 6 mL 二氯甲烷-甲醇混合液 (体积比 1:1) 溶解提取物。取 0.2 mL 重新溶解的样液和 2.8 mL 二氯甲烷-甲醇混合液充分混匀, 用紫外/可见分光光度计在 450 nm 处测量其吸光值, 二氯甲烷-甲醇混合液为参比液。样品中总类胡萝卜素含量 (carotenoid content,  $C_C$ ) 按以下公式计算:

$$C_C = \frac{A_{450} \times v \times f \times 10 \times 1000}{m} \times 2500^{-1} \times 0.1 \quad (8)$$

式中  $C_C$  为总类胡萝卜素含量, mg/100 g;  $A_{450}$  为类胡萝卜素提取液在 450 nm 处的吸光值;  $v$  为类胡萝卜素提取液体积, mL;  $f$  为类胡萝卜素提取液的稀释倍数;  $m$  为称取的样品质量, g; 2 500 为 1% 浓度的类胡萝卜素在最大吸收波长时的平均吸光值。

#### 1.3.8 抗氧化活性

胡萝卜样品的抗氧化活性通过其对 DPPH 自由基的清除能力来表示, 并参照 FENG 等<sup>[1]</sup>的方法。取粉碎的胡萝卜样品 1.0 g (干基质量), 加入 20 mL 80% 的甲醇, 超声辅助提取 10 min (频率 40 kHz, 功率密度 60 W/L), 然后 4 °C 10 000 rpm 离心 10 min, 得上清液 (50 mg/mL)。将上清液稀释至 0、20、25、30、35、40 和 45 mg/mL 用于 DPPH 自由基清除试验。取 3 mL 不同浓度的样品提取液, 加入 1 mL 0.1 mM DPPH 溶液, 室温暗反应 30 min 后, 于 517 nm 处测量吸光度值, 80% 甲醇溶液为空白。胡萝卜样品清除 DPPH 自由基的能力 (DPPH scavenging activity,  $A_{DPPH}$ ) 按公式 9 计算。IC<sub>50</sub> 值 (half inhibitory concentration) 是清除 50% 自由基所需的提取物浓度, 由清除能力曲线的线性回归分析得出, 本研究中胡萝卜样品的抗氧化活性由 DPPH 的 IC<sub>50</sub> 值来表示<sup>[1]</sup>。

$$A_{DPPH} = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100\% \quad (9)$$

式中  $A_{DPPH}$  为样品清除 DPPH 自由基的能力, %;  $A_0$  为“DPPH+甲醇”的吸光值;  $A$  为“DPPH+样品提取液”的吸光值。



### 1.3.9 风味

胡萝卜样品的气味(挥发性成分)通过电子鼻进行分析。将0.5 g(干基质量)胡萝卜样品研磨成粉后置于10 mL顶空瓶中, 35℃ 孵育5 min以促进挥发性成分的释放。电子鼻的气体流速为450 mL/min, 检测时间为180 s。选择电子鼻传感器信号的最大响应值进行分析, 并绘制风味雷达图。

### 1.3.10 数据处理与统计分析

除另行说明外, 所有试验至少平行测定三次。所得数据以“平均值±标准差”表示, 并采用SPSS Statistics 26软件(IBM SPSS Inc, 美国)中的单因素方差分析法(ANOVA)对不同处理之间的组间差异进行显著性分析, 所有统计检验显著性均在0.05范围内( $P<0.05$ ); 采用Pearson相关系数检验确定参数之间的相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同预处理和切片方式对胡萝卜片干燥动力学的影响

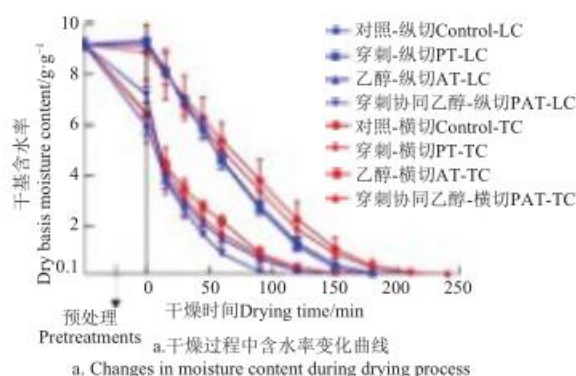
不同预处理和切片方式的胡萝卜片热风干燥曲线如图2a所示。在预处理过程中, 无论是纵切(LC)还是横切(TC)的胡萝卜片, 与对照组(Control)和穿刺预处理(PT)相比, 乙醇预处理(AT)和穿刺协同乙醇预处理(PAT)均降低了样品的含水率, 分别达23.33%~26.82%和27.41%~36.13%, 这主要与乙醇的脱水作用有关<sup>[18]</sup>。ROJAS等<sup>[19]</sup>也发现了经乙醇浸渍过的南瓜, 水分显著流失。其中, PAT预处理的胡萝卜片失水率最高, 这可能与人工穿刺形成的多孔结构有关, 其增加了水分传质的毛细管路, 进而促进了乙醇浸渍过程中水分的流失。这与郝启栋等<sup>[20]</sup>和SANTOS等<sup>[21]</sup>的研究结果一致, 即: 食品中微孔道的形成可以加速脱水过程中的水分流失。

如图2b和2c所示, 在热风干燥过程中, PT、AT和PAT预处理技术的应用均显著提高了胡萝卜片的有效水分扩散系数, 是对照组的1.07~1.69倍, 意味着PT、AT和PAT样品在干燥过程中组织内水分向外扩散的阻力较小, 进而表现出较快的干燥速率, 最终将干燥时间缩短了10.61%~50.00%, 提高了胡萝卜的热风干燥效率。考虑到所有胡萝卜样品均在相同条件下(栽料量、温度、风速等)进行干燥的, 因此PT、AT和PAT预处理技术也将具备降低10.61%~50.00%能耗的潜力。

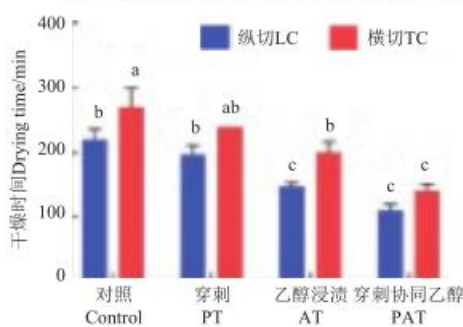
在相同切片方式下, PAT预处理的胡萝卜样品具有较高的有效水分扩散系数和干燥速率、以及最短的干燥时间, 其次是AT、PT预处理的样品, 这表明人工穿刺和乙醇浸渍的联合应用将两者优点实现了融合, 取得的协同效应将胡萝卜干燥时间缩短达50%。

在相同预处理方式下, 纵切的胡萝卜片相比于横切的样品, 表现出较高的有效水分扩散系数和干燥速率、以及最短的干燥时间; 这可能与胡萝卜片在干燥过程中的体积收缩程度有关, 横切相比于纵切的胡萝卜片在干燥过程中体积过度收缩, 导致组织内毛细管路被挤压、

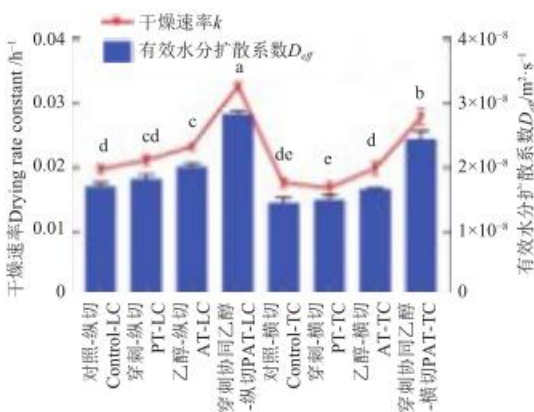
封闭, 阻碍水分扩散、降低了有效水分扩散系数(图2c), 最终导致横切的胡萝卜片干燥效率低于纵切的样品。同样, REN等<sup>[22]</sup>在研究姜催化式红外干燥特性时也发现纵切的样品具有比横切样品更快的干燥效率。



a. Changes in moisture content during drying process



b. Drying time of samples with different cutting orientation and pretreatments



c. Drying rate constant and effective moisture diffusion coefficient of samples with different cutting orientation and pretreatments

注: 图中的不同字母代表样品间具有显著性差异( $P<0.05$ ), 下同  
Note: Different letters indicated significant differences ( $P<0.05$ ) between sample means, the same below

图2 不同预处理及切片方式的胡萝卜片热风干燥动力学  
Fig.2 Drying characteristic of carrot slices with different pretreatments and cutting orientation

ROJAS等<sup>[19]</sup>和WANG等<sup>[23]</sup>发现乙醇作为一种有机溶剂, 浸渍处理南瓜和苹果后, 可溶解其细胞膜组分, 破坏细胞膜结构、增加细胞通透性、降低胞内水分迁移至外部的阻力, 从而提高南瓜和苹果的干燥效率。此外, 我们在前期报道中发现了: 超声波辅助乙醇浸渍处理通过声空化效应形成的微孔道与乙醇脱水作用的协同显著改善了大蒜催化式红外干燥特性, 相比单独的超声波或



乙醇浸渍处理,干燥效率最高,时间缩短达 27%<sup>[13]</sup>。据此,本研究提出了一个可能的“三重奏机制”来解释穿刺协同乙醇预处理改善胡萝卜热风干燥效率的原因(图 3),机制 1:在预处理过程中,乙醇的脱水作用脱去胡萝卜部分水分,从而降低后续热风干燥负荷;机制 2:人工穿刺形成的多孔结构促进了乙醇浸渍和热风干燥过程中的水分扩散;机制 3:乙醇浸渍处理提高了胡萝卜细胞通透性、降低了干燥过程中水分扩散阻力。因此,在这三重机制的协同作用下 PAT 预处理技术大幅提高了胡萝卜片的热风干燥效率。

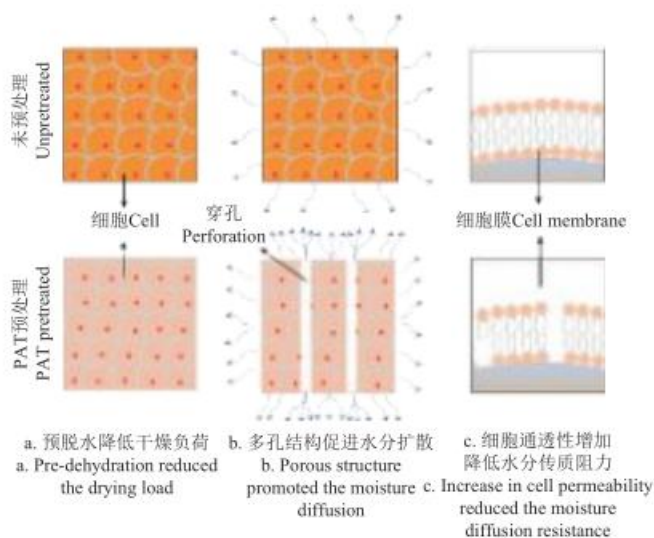


图 3 PAT 预处理改善胡萝卜片热风干燥效率的“三重奏”机制示意图

Fig.3 Illustrative diagram of trio mechanism for accelerating the hot air drying of carrot slices pretreated by PAT

综上,在胡萝卜热风干燥加工中,为获取较快的干燥效率及较低的干燥能耗,可在其纵向切片的基础上进行穿刺协同乙醇浸渍预处理。

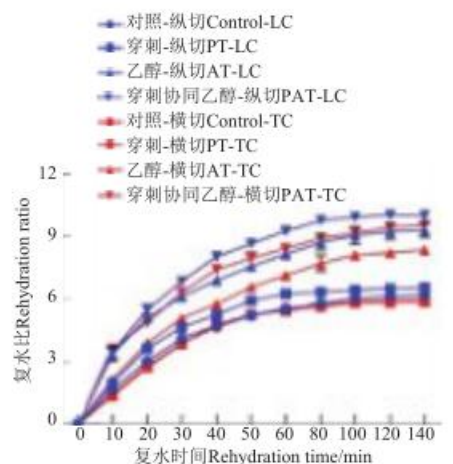
## 2.2 不同预处理和切片方式对热风干燥胡萝卜片理化品质的影响

### 2.2.1 复水性

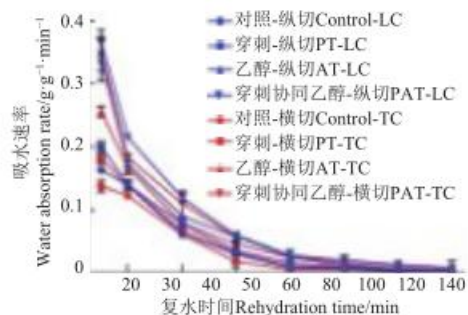
果蔬干燥加工的一个常规要求是脱水产品具有较高的复水比,即在复水过程中能够快速吸收较多的水分,以接近鲜食的口感,其是评价脱水果蔬品质的重要指标。在本研究中,预处理方式对热风干燥胡萝卜片复水比的影响如图 4 所示:无论何种切片和预处理方式,随着复水过程的进行,热风干燥胡萝卜片的复水比呈现先增加、后稳定的趋势(图 4a),这与文献报道的脱水果蔬复水特性曲线相一致<sup>[24-25]</sup>。

同对照组相比,PT、AT 和 PAT 预处理技术的应用均改善了胡萝卜样品的复水速率(图 4b)及平衡复水比(图 4c),这与胡萝卜样品在预处理过程中分别形成的多孔结构和增强的细胞通透性有关(如 2.1 节所述),这些因素加速了复水过程中样品对水分的吸收。同样,研究发现乙醇浸渍处理后的南瓜片和茄片经热风干燥后也表现出较快的复水速率及平衡复水比<sup>[19, 26]</sup>。XU 等<sup>[27]</sup>

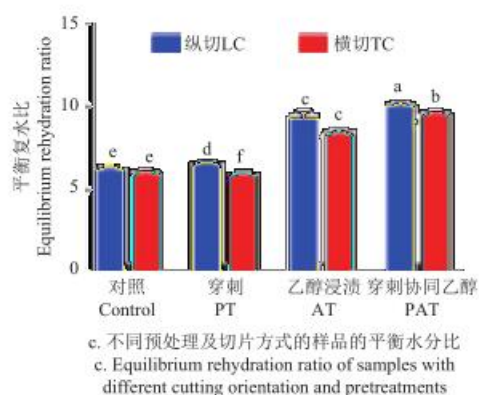
研究发现经超声波预处理的草莓可形成众多微孔道,在毛细效应下加速冻干草莓的复水过程,并提高 27.57% 的复水比。在本研究的 3 种预处理技术中, PAT 预处理的样品具有显著( $P<0.05$ )最快的复水速率和最大的平衡复水比值,其次为 AT、PT 和对照组,这与多孔结构和细胞通透性的协同效应有关。在相同预处理方式下,纵切胡萝卜片的复水速率及平衡复水比均高于横切的样品;同样 REN 等<sup>[22]</sup>也报道了同横切的姜片相比,经催化式红外干燥的纵切的姜片表现出较快的复水速率及复水比。



a. 复水比随复水时间的变化  
a. Changes in rehydration ratio with rehydration time



b. 吸水速率随复水时间的变化  
b. Changes in water absorption rate with rehydration time



c. 不同预处理及切片方式的样品的平衡水分比  
c. Equilibrium rehydration ratio of samples with different cutting orientation and pretreatments

图 4 不同预处理和切片方式干燥的胡萝卜片的复水性  
Fig.4 Rehydration characteristics of carrot slices with different pretreatments and cutting orientation

综合干燥动力学与复水性结果可知: PAT 预处理不仅能够促进胡萝卜干燥过程中组织内部水分向外部环境扩散,同时还能促进外部水分向脱水胡萝卜片内部组



织迁移，该结果进一步印证：PAT 预处理形成的多孔结构和增强的细胞通透性提高了胡萝卜组织水分传质，进而改善干燥及复水效率。

2.2.2 外观形状

预处理和切片方式对干燥胡萝卜片的外观形状影响如图 5 所示。从图中可以明显看出：预处理和切片方式显著影响了胡萝卜干燥后的外观形状。无论预处理与否，纵切的胡萝卜片外观收缩均显著小于横切的样品，并且 AT 和 PAT 预处理的样品外观收缩最小。结果表明：纵向切片和 AT、PAT 预处理可抑制胡萝卜片在热风干燥过程中体积收缩。

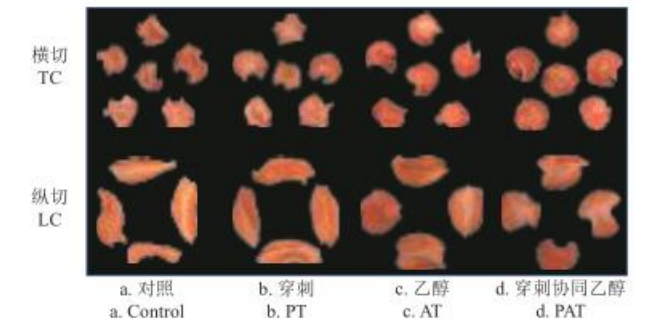


图 5 不同预处理和切片方式干燥的胡萝卜片的外观  
Fig.5 Photos of dried carrot slices with different pretreatments and cutting orientation

植物组织中存在大量的维管束，其坚硬的质地在外力作用下表现出较强的应力，从而维持组织的立体形

状<sup>[28]</sup>。胡萝卜在切片过程中，纵切时的切割方向同维管束平行，相比于垂直维管束切割的横切方式（维管束长度同切片厚度约 3 mm），纵切的胡萝卜片保留了较长的维管束（长度分布在 0~3 cm）；因此，在干燥过程中平行于维管束方向的组织由于维管束较强的应力，抑制组织向内收缩，而垂直于维管束方向的组织急剧向内收缩，使得纵切的胡萝卜片干燥后呈现出长条形，横切的胡萝卜片呈现出卷曲的圆形，该现象尤其显著的是未经任何预处理的样品（Control）。

无论何种切片方式，AT 和 PAT 预处理的样品外观收缩最小，这可能是乙醇具有固定化细胞的作用，使得 AT 和 PAT 预处理的样品表现出较强的应力来抑制干燥过程中形状的过度收缩。该现象同样被 FENG 等<sup>[13]</sup>、WANG 等<sup>[29]</sup>和任梓菲<sup>[30]</sup>发现：乙醇预处理的大蒜、大葱和姜在干燥过程中体积收缩率显著小于未预处理的样品。此外，相比于乙醇预处理，单独的穿刺预处理对胡萝卜干燥过程中形状收缩的影响不显著。

2.2.3 表面色泽

预处理和切片方式对干燥胡萝卜片的色泽参数、总色差值  $\Delta E$ 、饱和度值  $C^*$  的影响如表 1 所示。无论何种切片方式以及预处理与否，干燥后胡萝卜片的表面色泽均发生了变化，这可归因于一系列的综合因素：失水、酶促褐变/非酶褐变、氧化反应等<sup>[31]</sup>，类似的现象也出现在猕猴桃<sup>[32]</sup>和玫瑰<sup>[33]</sup>的干燥过程。

| 表 1 不同预处理的横切和纵切热风干燥胡萝卜片的色泽参数、 $\Delta E$ 和 $C^*$ 值                                                                                    |                          |                          |                          |                          |                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Table 1 The color parameters, $\Delta E$ and $C^*$ values of dried carrot slices with different cutting orientation and pretreatments |                          |                          |                          |                          |                          |
| 预处理<br>Pretreatments                                                                                                                  | 色泽参数 Color parameters    |                          |                          | 总色差 $\Delta E$           | 饱和度 $C^*$                |
|                                                                                                                                       | 亮度 $L^*$                 | 红绿值 $a^*$                | 黄蓝值 $b^*$                |                          |                          |
| 鲜样 Fresh                                                                                                                              | 61.62±1.31 <sup>a</sup>  | 35.16±0.96 <sup>ab</sup> | 45.91±1.46 <sup>a</sup>  | -                        | 57.83±1.62 <sup>a</sup>  |
| 对照-纵切 Control-LC                                                                                                                      | 62.60±2.06 <sup>a</sup>  | 23.30±2.40 <sup>c</sup>  | 25.09±3.31 <sup>cd</sup> | 24.08±3.93 <sup>ab</sup> | 34.26±3.86 <sup>d</sup>  |
| 穿刺-纵切 PT-LC                                                                                                                           | 62.13±3.48 <sup>a</sup>  | 24.87±3.49 <sup>c</sup>  | 25.77±3.79 <sup>cd</sup> | 22.90±4.92 <sup>ab</sup> | 35.83±5.05 <sup>cd</sup> |
| 乙醇-纵切 AT-LC                                                                                                                           | 53.90±2.84 <sup>bc</sup> | 28.78±2.54 <sup>bc</sup> | 30.24±5.82 <sup>c</sup>  | 18.97±5.71 <sup>b</sup>  | 41.82±5.72 <sup>c</sup>  |
| 穿刺协同乙醇-纵切 PAT-LC                                                                                                                      | 50.44±2.38 <sup>c</sup>  | 35.47±1.87 <sup>a</sup>  | 35.28±3.28 <sup>bc</sup> | 15.64±3.53 <sup>bc</sup> | 50.05±3.55 <sup>b</sup>  |
| 对照-横切 Control-TC                                                                                                                      | 55.08±3.36 <sup>bc</sup> | 23.10±3.18 <sup>c</sup>  | 24.35±3.88 <sup>cd</sup> | 25.86±4.33 <sup>a</sup>  | 33.57±4.96 <sup>d</sup>  |
| 穿刺-横切 PT-TC                                                                                                                           | 60.37±2.34 <sup>ab</sup> | 25.30±1.00 <sup>c</sup>  | 28.49±1.59 <sup>cd</sup> | 20.21±1.49 <sup>ab</sup> | 38.11±1.61 <sup>cd</sup> |
| 乙醇-横切 AT-TC                                                                                                                           | 57.16±4.01 <sup>b</sup>  | 28.59±4.06 <sup>bc</sup> | 28.90±3.89 <sup>cd</sup> | 19.28±5.04 <sup>b</sup>  | 40.67±5.48 <sup>cd</sup> |
| 穿刺协同乙醇-横切 PAT-TC                                                                                                                      | 58.70±4.10 <sup>ab</sup> | 28.79±3.63 <sup>bc</sup> | 28.30±2.83 <sup>cd</sup> | 19.57±3.28 <sup>b</sup>  | 40.37±4.54 <sup>cd</sup> |

注：每一列中的不同字母代表样品间具有显著性差异（ $P<0.05$ ）  
Note: within the column, different letters indicated significant differences ( $P<0.05$ ) between sample means

与未处理和 PT 预处理的样品相比，AT 和 PAT 预处理的样品总色差  $\Delta E$  小、饱和度  $C^*$  高；此外，AT 与 PAT 预处理的样品中，纵切的总色差  $\Delta E$  小、饱和度  $C^*$  高。这可以从干燥胡萝卜的实物图（图 5）看出：无论何种切片方式，AT 和 PAT 预处理的样品均呈现出诱人的鲜红色，即较高的饱和度。乙醇作为一种有机溶剂，在浸渍预处理过程中可使胡萝卜 POD 和 PPO 酶变性、钝化其活性，从而抑制干燥过程中酶促褐变反应；其次，AT 和 PAT 样品相对较短的干燥时间较大程度的保留了类胡萝卜素（图 6）、减缓氧化反应的程度，最终使得 AT 和 PAT 预处理的样品维持了较优的表面色泽。

2.2.4 生物活性成分

不同预处理和切片方式干燥的胡萝卜样品抗坏血酸

和总类胡萝卜素含量如图 6 所示。与新鲜样品相比，由于热风干燥过程中的水分流失以及相对高的温度（60℃），干燥后胡萝卜样品的抗坏血酸和总类胡萝卜素含量都有一定程度的损失。FENG 等<sup>[1]</sup>、XU 等<sup>[6]</sup>和 WU 等<sup>[10]</sup>也发现干燥加工降低了果蔬中生物活性成分含量的现象。

在相同切片方式下，PAT 预处理的样品含有较高的抗坏血酸和总类胡萝卜素含量，这可能与较短的干燥时间有关，降低了生物活性成分在高温中过度降解的风险；其次，由于 PAT 预处理破坏了组织及细胞结构，促进了生物活性成分在提取过程中的释放，从而表现出较高的检测含量<sup>[34]</sup>。SANTOS 等<sup>[21]</sup>和 MINA 等<sup>[35]</sup>也发现经乙醇预处理的胡萝卜干燥后保留了更多的类胡萝卜素；此外，相似的现象也发生在经乙醇预处理的姜<sup>[22]</sup>、葱<sup>[29]</sup>、



草莓<sup>[36]</sup>、甜瓜<sup>[37]</sup>和菠萝<sup>[38]</sup>的干燥过程中,脱水产品的生物活性成分得到显著保留。同样,胡萝卜样品的纵向切片方式在一定程度上也缩短了干燥时间,进一步致使纵向切片与 PAT 预处理取得了协同效应,使 PAT-LC 样品表现出相对较高的生物活性成分含量。

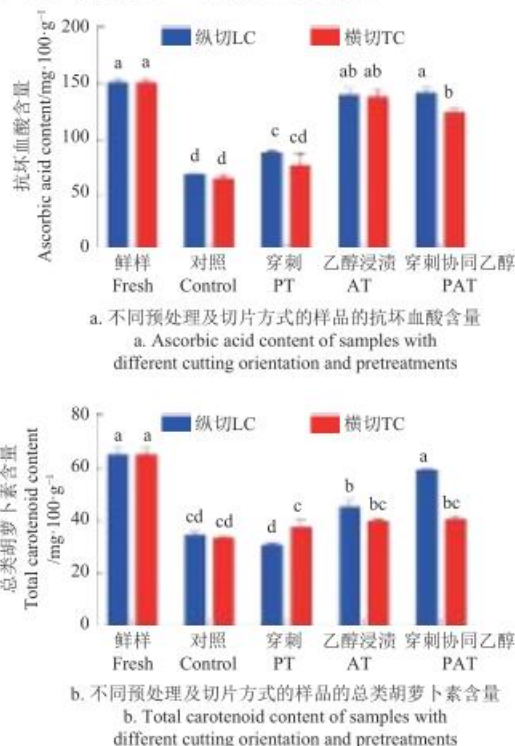


图6 不同预处理及切片方式的胡萝卜样品抗坏血酸和总类胡萝卜素含量

Fig.6 The ascorbic acid and total carotenoid content of carrot samples with different pretreatments and cutting orientation

## 2.2.5 抗氧化活性

胡萝卜样品的抗氧化能力如图7所示。无论何种切片及预处理方式,经热风干燥后,胡萝卜样品的抗氧化活性均显著降低 ( $P < 0.05$ ),干燥后卷心菜<sup>[6]</sup>、猕猴桃<sup>[32]</sup>、桃子<sup>[39]</sup>等的抗氧化活性也出现了类似的下降。抗坏血酸和类胡萝卜素被认为是赋予胡萝卜较强抗氧化活性的生物活性成分之一,因此,与新鲜样品相比,干燥胡萝卜较低的抗氧化活性可能与干燥过程中生物活性成分的降解损失有关,比如:干燥前后胡萝卜样品中抗坏血酸和总类胡萝卜素含量分别降低了6.16%~56.36%和8.75%~47.89%。

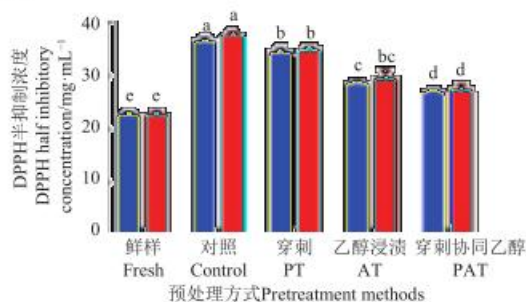


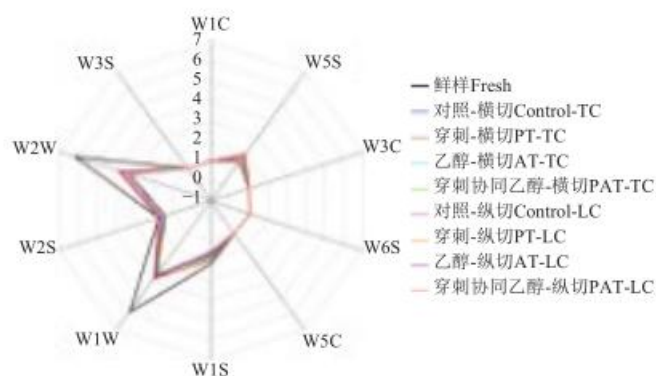
图7 不同预处理和切片方式的胡萝卜样品的抗氧化活性

Fig.7 The antioxidant activity of carrot samples with different pretreatments and cutting orientation

在所有干燥样品中, PAT 预处理的样品表现出显著较强的抗氧化活性,这可能与含有较高的生物活性成分含量(抗坏血酸和总类胡萝卜素)有关,这可通过相关性分析得到证实: DPPH  $IC_{50}$  值与胡萝卜样品(横切和纵切)的抗坏血酸含量(相关系数:  $r_{横切} = -0.956$ ,  $r_{纵切} = -0.945$ )和总类胡萝卜素含量(相关系数:  $r_{横切} = -0.963$ ,  $r_{纵切} = -0.862$ )呈显著负相关;即胡萝卜样品生物活性成分含量越高、DPPH  $IC_{50}$  值越低、样品抗氧化活性越强。

## 2.2.6 风味

不同预处理和切片方式干燥的胡萝卜样品和鲜样的风味特性(挥发性成分)采用电子鼻进行分析,并将电子鼻10个传感器响应值绘制成雷达图(响应值越大、相应挥发性成分含量越高),结果如图8所示。同新鲜样品相比,经干燥后胡萝卜样品的挥发性成分呈现出不同程度的损失,这与长时间的高温干燥导致挥发性成分散失与降解有关<sup>[1]</sup>。除新鲜样品外, AT 和 PAT 预处理样品的传感器响应值均大于 PT 和未处理的样品,表明 AT 和 PAT 预处理的样品具有相对较高的挥发性成分含量,从而表现出较为浓郁的风味,这可能与具有显著较短的干燥时间有关,避免挥发性成分在高温下过度的散失与降解。FENG 等<sup>[13]</sup>和 WANG 等<sup>[29]</sup>也报道了经乙醇预处理的大蒜和大葱具有较短的干燥时间及较高的挥发性成分含量。



注: W1C 为芳香类, W5S 为广域类, W3C 为芳香类, W6S 为氢类, W5C 为芳香脂族类, W1S 为甲烷类, W1W 为有机硫化物, W2S 为醇类, W2W 为氯化硫类, W3S 为甲烷脂族类。  
Note: W1C represents aromatic, W5S represents nitrogen oxides; W3C represents aromatic, ammonia; W6S represents hydrogen; W5C represents aromatic, aliph; W1S represents broad-methane; W1W represents sulphur-organic; W2S represents broad-alcohol; W2W represents sulph-chlor; W3S represents methane-aliph.

图8 胡萝卜样品风味电子鼻传感器响应雷达图

Fig.8 Radar graphs of the sensor response signals of the carrot samples

## 3 结论

为改善胡萝卜热风干燥特性,本研究以横切和纵切方式获得的胡萝卜片为研究材料,对其分别进行了穿刺(PT)、乙醇浸渍(AT)和穿刺协同乙醇浸渍预处理(PAT),研究结论如下:

1) 在干燥效率方面,相同切片方式下,与对照组相比(LC-220 min, TC-270 min), PT、AT 和 PAT 预处



理技术均显著提高了胡萝卜热风干燥效率、缩短了干燥时间(10.61%~50.00%), 其中PAT预处理技术(LC-110 min, TC-140 min)在单独的PT(LC-197 min, TC-240 min)和AT(LC-147 min, TC-200 min)预处理技术基础上取得了协同效应, 干燥效率最高、干燥时间最短; 在相同预处理方式下, 纵切的胡萝卜片相比于横切的样品, 表现出较高的有效水分扩散系数和干燥速率、以及最短的干燥时间;

2) PAT预处理具有较高干燥效率的“三重奏机制”: 预脱水降低干燥负荷、毛细管流促进水分传质效率、细胞通透性的增强降低水分传质阻力, 在这三重机制的协同作用下PAT预处理技术相比单独预处理技术(PT和AT)显著提高了胡萝卜片的热风干燥效率;

3) 在品质方面, PAT预处理显著改善了纵切胡萝卜片的体积收缩、复水性、色泽、抗坏血酸和总类胡萝卜素含量、抗氧化活性、风味等品质;

因此, 为在较短干燥时间内获得品质相对较优的脱水胡萝卜片, 可在其纵向切片后进行PAT预处理。本研究为改善胡萝卜热风干燥提供了一种简单有效的预处理技术, 同时也为其他果蔬提质、增效、节能干燥与制粉加工提供理论与技术参考。

#### [参 考 文 献]

- [1] FENG Y B, XU B G, YAGOUR A E A, et al. Role of drying techniques on physical, rehydration, flavor, bioactive compounds and antioxidant characteristics of garlic[J]. *Food Chemistry*, 2021, 343: 128404.
- [2] 巨浩羽, 邹燕子, 肖红伟, 等. 相对湿度对胡萝卜热风干燥过程中水分迁移和蒸发的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(1): 232-240.  
JU Haoyu, ZOU Yanzi, XIAO Hongwei, et al. Effects of relative humidity on water diffusion and evaporation during hot air drying of carrot[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(1): 232-240. (in Chinese with English abstract)
- [3] NURHASLINA C R, BACHO S A, MUSTAPA A N. Review on drying methods for herbal plants[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 63(S1): S122-S139.
- [4] 魏明, 张倩, 钱森和, 等. 不同预处理对铁皮石斛热风干燥特性及品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(8): 281-287.  
WEI Ming, ZHANG Qian, QIAN Senhe, et al. Effects of different pretreatment methods on the hot-air drying characteristics and quality of *Dendrobium officinale* stems[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(8): 281-287. (in Chinese with English abstract)
- [5] 苑丽婧, 何秀, 林蓉, 等. 超声预处理对猕猴桃水分状态及热风干燥特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(13): 263-272.  
YUAN Lijing, HE Xiu, LIN Rong, et al. Effects of ultrasound pretreatment on water state and hot-air drying characteristics of kiwifruit[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(13): 263-272. (in Chinese with English abstract)
- [6] XU Y Y, XIAO Y D, LAGNIKA C, et al. A comparative evaluation of nutritional properties, antioxidant capacity and physical characteristics of cabbage (*Brassica oleracea* var. *Capitata* var L. ) subjected to different drying methods[J]. *Food Chemistry*, 2020, 309(30): 124935.
- [7] MENON A, STOJCESKA V, TASSOU S A. A systematic review on the recent advances of the energy efficiency improvements in non-conventional food drying technologies[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 100: 67-76.
- [8] CHEN J L, ZHANG M, XU B G, et al. Artificial intelligence assisted technologies for controlling the drying of fruits and vegetables using physical fields: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 105: 251-260.
- [9] MOUSAKHANI-GANJEH A, AMIRI A, NASROLLAHZADEH F, et al. Electro-based technologies in food drying-A comprehensive review[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 145: 111315.
- [10] WU B G, GUO X Y, GUO Y T, et al. Enhancing jackfruit infrared drying by combining ultrasound treatments: Effect on drying characteristics, quality properties and microstructure[J]. *Food Chemistry*, 2021, 358: 129845.
- [11] KIM S Y, LEE B M, HONG S Y, et al. A pulsed electric field accelerates the mass transfer during the convective drying of carrots: drying and rehydration kinetics, texture, and carotenoid content[J]. *Foods*, 2023, 12(3): 589.
- [12] FENG Y B, TAN C P, ZHOU C S, et al. Effect of freeze-thaw cycles pretreatment on the vacuum freeze-drying process and physicochemical properties of the dried garlic slices[J]. *Food Chemistry*, 2020, 324: 126883.
- [13] FENG Y B, ZHOU C S, YAGOUR A E A, et al. Improvement of the catalytic infrared drying process and quality characteristics of the dried garlic slices by ultrasound-assisted alcohol pretreatment[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 116: 108577.
- [14] BAI T T, WAN Q, LIU X B, et al. Drying kinetics and attributes of *fructus aurantii* processed by hot air thin-layer drying at different temperatures[J]. *Heliyon*, 2023, 9(5): e15554.
- [15] TURGUT S S, KUCUKONER E, FEYISSA A H, et al. A novel drying system-simultaneous use of ohmic heating with convectional air drying: System design and detailed examination using CFD[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 72: 102727.
- [16] 张琰, 肖翔, 刘悦, 等. 不同基因型猕猴桃果实抗坏血酸代谢基因差异变化[J]. *分子植物育种*, 2023, 21(5): 1562-1569.  
ZHANG Yan, XIAO Xiang, LIU Yue, et al. Variation of ascorbic acid metabolism genes in different kiwifruit



- genotypes[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2023, 21(5): 1562-1569. (in Chinese with English abstract)
- [17] XIAO X, SHI L Y, DONG W Q, et al. Ethylene promotes carotenoid accumulation in peach pulp after harvest[J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 304: 111347.
- [18] MIANO A C, ROJAS M L, AUGUSTO P E D. Combining ultrasound, vacuum and/or ethanol as pretreatments to the convective drying of celery slices[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 79: 105779.
- [19] ROJAS M L, AUGUSTO P E D. Ethanol pre-treatment improves vegetable drying and rehydration: Kinetics, mechanisms and impact on viscoelastic properties[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 233: 17-27.
- [20] 郝启栋, 乔旭光, 郑振佳, 等. 超高压和超声波预处理对蒜片热风干燥过程及品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(3): 278-286.
- HAO Qidong, QIAO Xuguang, ZHENG Zhenjia, et al. Effects of ultrahigh pressure and ultrasound pretreatments on hot-air drying process and quality of garlic slices[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(3): 278-286. (in Chinese with English abstract)
- [21] SANTOS K C, GUEDES J S, ROJAS M L, et al. Enhancing carrot convective drying by combining ethanol and ultrasound as pre-treatments: Effect on product structure, quality, energy consumption, drying and rehydration kinetics[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 70: 105304.
- [22] REN M N, REN Z F, CHEN L, et al. Comparison of ultrasound and ethanol pretreatments before catalytic infrared drying on physicochemical properties, drying, and contamination of Chinese ginger (*Zingiber officinale* Roscoe)[J]. *Food Chemistry*, 2022, 386: 132759.
- [23] WANG J, CHEN Y X, WANG H, et al. Ethanol and blanching pretreatments change the moisture transfer and physicochemical properties of apple slices via microstructure and cell-wall polysaccharides nanostructure modification[J]. *Food Chemistry*, 2022, 381: 132274.
- [24] ZHOU C S, FENG Y B, ZHANG L, et al. Rehydration characteristics of vacuum freeze- and hot air-dried garlic slices[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 143: 111158.
- [25] QIU Y, BI J F, JIN X, et al. Investigation on the rehydration mechanism of freeze-dried and hot-air dried shiitake mushrooms from pores and cell wall fibrous material[J]. *Food Chemistry*, 2022, 383: 132360.
- [26] 赵海燕, 方小明, 王军, 等. 乙醇浸渍对切片茄子干燥特性和品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 233-40.
- ZHAO Haiyan, FANG Xiaoming, WANG Jun, et al. Effect of ethanol dipping pretreatment on drying characteristics and quality of eggplant slices[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(9): 233-40. (in Chinese with English abstract)
- [27] XU B G, CHEN J N, TILIWA E S, et al. Effect of multi-mode dual-frequency ultrasound pretreatment on the vacuum freeze-drying process and quality attributes of the strawberry slices[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 78: 105714.
- [28] SAAVEDRA J, GOMES B D O, AUGUSTO P E D, et al. Structure-process interaction in mass transfer processes: Application of ethanol and ultrasound in a vascular structure[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2023, 46(6): e14187.
- [29] WANG X L, FENG Y B, ZHOU C S, et al. Effect of vacuum and ethanol pretreatment on infrared-hot air drying of scallion (*Allium fistulosum*)[J]. *Food Chemistry*, 2019, 295: 432-440.
- [30] 任梓菲. 基于清洗、切割及预处理技术的生姜红外高质精准干燥挖掘研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- REN Zifei. Research on High-quality and Precise Infrared Drying of Ginger Based on Cleaning, Cutting and Pretreatment Technology[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [31] ZENG S Y, WANG B, ZHAO D L, et al. Microwave infrared vibrating bed drying of ginger: Drying qualities, microstructure and browning mechanism[J]. *Food Chemistry*, 2023, 424: 136340.
- [32] 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.
- [33] XU B G, FENG M, CHITRAKAR B, et al. Selection of drying techniques for Pingyin rose on the basis of physicochemical properties and volatile compounds retention[J]. *Food Chemistry*, 2022, 385: 132539.
- [34] 田怀香, 陈霜, 陈小燕, 等. 不同提取方式对萱草花中酚类物质及抗氧化活性的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(20): 303-312.
- TIAN Huaixiang, CHEN Shuang, CHEN Xiaoyan, et al. Effects of different extraction methods on phenolic compounds and antioxidant activity in Hemerocallis flower[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(20): 303-312. (in Chinese with English abstract)
- [35] MINA Z P, KASEKE T, FADIJI T, et al. Effect of gum arabic and ethanol pretreatments on drying kinetics and quality attributes of dried carrot slices[J]. *Heliyon*, 2022, 8: e12037.
- [36] SANTOS N C, ALMEIDA R L J, MONTEIRO S S, et al. Influence of ethanol and ultrasound on drying, bioactive compounds, and antioxidant activity of strawberries (*Fragaria x ananassa*)[J]. *Journal of the Indian Chemical Society*, 2022, 99(7): 100542.
- [37] DA CUNHA R M C, BRANDAO S C R, DE MEDEIROS R A B, et al. Effect of ethanol pretreatment on melon convective drying[J]. *Food Chemistry*, 2020, 333: 127502.



- [38] DE FREITAS L D C, BRANDAO S C R, DA SILVA J H F, et al. Effect of ethanol and ultrasound pretreatments on pineapple convective drying[J]. *Food Technology and Biotechnology*, 2021, 59(2): 209-215.
- [39] NI J B, ZIELINSKA M, WANG J, et al. Post-harvest ripening affects drying behavior, antioxidant capacity and flavor release of peach via alteration of cell wall polysaccharides content and nanostructures, water distribution and status[J]. *Food Research International*, 2023, 170: 113037.

## Effects of puncture combined with ethanol pretreatment on the hot air drying characteristics of carrot slices

SUO Kui<sup>1</sup>, YANG Zhenfeng<sup>1</sup>, FENG Yabin<sup>1✉</sup>, ZHANG Yang<sup>1</sup>, ZHOU Cunshan<sup>2</sup>, SHI Liyu<sup>1</sup>, CHEN Wei<sup>1</sup>

(1. College of Biological and Environmental Sciences, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315100, China; 2. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Hot air drying is required for the short duration, energy saving, and high quality of food products. In this study, an artificial perforation and alcohol (PAT) pretreatment was proposed to enhance the hot air drying of carrot slices. The carrot was first cut in the transverse and longitudinal sections. Various parameters were then evaluated, including the effective moisture diffusion coefficient, drying rate and time, color, volume shrinkage, rehydration potential, total content of carotenoids and ascorbic acid, antioxidant activity, and flavor. Control samples were selected without pretreatment or subjected to separate perforation (PT) and alcohol maceration (AT) pretreatments. The results demonstrated that the effective moisture diffusion coefficients of pretreated carrot slices ranged from 1.07 to 1.69 times higher in the AT, PT, and PAT pretreatments, compared with the unpretreated samples. The high drying rates enhanced the drying efficacy of carrot slices during hot air drying in the PT, AT, and PAT pretreatments. The drying duration was reduced by 10.61%~50.00%, compared with the unpretreated samples, when the moisture content fell to 0.1 (g water/g dry basis). There was a positive correlation between the drying duration and energy savings. The energy savings were reduced from 10.61% to 50.00% at the constant drying temperature, air velocity, and loading. Among them, the PAT pretreated samples exhibited the highest effective moisture diffusion coefficient and drying rate, with the shortest drying duration, followed by the AT, PT, and unpretreated samples. Additionally, a triple enhancement was proposed for the carrot slices drying in the PAT pretreatment: 1) The dehydration load was reduced at the initial dehydration stage in the pretreatment during hot air drying; 2) Capillary water flow was induced by the porous structure that created by artificial perforation; 3) Cell permeability increased to reduce the water flow resistance. Three factors improved the hot air drying of carrot slices. Importantly, the longitudinally-cut carrot slices shared a higher effective moisture diffusion coefficient and drying rate, but a shorter drying time in all pretreatments, compared with the transversely-cut slices. This was attributed to the severe volume shrinkage in the transverse cuts during drying, leading to the less microchannels and impeded moisture diffusion. In physicochemical quality, the hot air drying negatively impacted the quality of fresh carrots. However, the PT, AT, and PAT pretreatments improved the quality of dried carrot slices, in terms of color, volume shrinkage, rehydration, total content of carotenoids and ascorbic acid, antioxidant activity, and flavor. Specifically, PAT pretreatment significantly mitigated the volume shrinkage of longitudinally-cut carrot slices during drying, leading to the least color alteration, the highest saturation and rehydration capacity, as well as the highest content of volatile components. Furthermore, there was the strongest antioxidant activity, due to a relatively high concentration of total carotenoids and ascorbic acid. In conclusion, PAT pretreatment on longitudinal slicing can be an efficient strategy to produce dehydrated carrot slices with superior quality. This research offers practical and effective implications to enhance the hot air drying of fruits or vegetables at an industrial scale.

**Keywords:** carrot; hot air drying; drying efficiency; perforation and alcohol combination pretreatment; quality