

# 芒果片真空预处理联合超声辅助渗透脱水的传质动力学及品质分析

宋璐瑶<sup>1</sup>, 刘东红<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 浙江杭州 310058) (2. 宁波市农业科学研究院农产品加工研究所, 浙江宁波 315040) (3. 浙江大学馥莉食品研究院, 浙江杭州 310058)

**摘要:** 为解决芒果果脯生产过程中传质效率低、加工时间长的问题, 该文研究了脉冲真空预处理联合超声辅助渗透脱水对芒果传质动力学、质量特性和微观结构的影响。结果表明: 脉冲真空预处理联合超声辅助渗透脱水组的芒果失水率(54.43%)最高, 较常规渗透脱水、脉冲真空预处理渗透脱水、超声辅助渗透脱水组分别高45.85%、14.06%、29.38%, 增固率(12.81%)较常规渗透脱水、超声辅助渗透脱水、脉冲真空预处理渗透脱水组分别高90.03%、53.43%、32.06%。用Azulara模型拟合渗透脱水过程中失水率和增固率的变化, 高回归系数( $R^2 > 0.97$ )和低RMSE表明Azulara模型可以较好拟合芒果渗透脱水过程, 预测脉冲真空预处理联合超声辅助渗透脱水组的平衡脱水率、增固率最高, 分别为65.06%和23.35%。测定色泽和质构, 发现超声辅助渗透脱水组、脉冲真空预处理联合超声辅助渗透脱水组芒果硬度值显著低于常规渗透脱水组和脉冲真空预处理渗透脱水组( $p < 0.05$ ), 而芒果色泽得到了较好保护。通过扫描电镜的观察, 发现超声处理使芒果细胞壁塌陷与变形、细胞横截面积变小、微孔增多。此外, 真空对芒果硬度和微观结构的影响均较小。综上, 脉冲真空预处理联合超声辅助渗透脱水通过改变芒果细胞结构、增加传质微通道, 提高了渗透脱水的效率, 缩短加工时间, 可以较好保护芒果色泽, 但会导致硬度的下降。

**关键词:** 渗透脱水; 芒果; 真空预处理; 超声; 传质动力学

文章编号: 1673-9078(2021)11-231-238

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.11.0296

## Mass Transfer Kinetics and Quality Analysis of Mango under Vacuum Pretreated and Ultrasound Assisted Osmotic Dehydration

SONG Luyao<sup>1</sup>, LIU Donghong<sup>1,2,3\*</sup>

(1. School of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

(2. Institute of Agricultural Products Processing, Ningbo Academy of Agricultural Sciences, Ningbo 315040, China)

(3. Fuli Institute of Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** To improve mass transfer efficiency and reduce production duration, the effects of the pulsed vacuum pretreated and ultrasound assisted osmotic dehydration (VUOD) on the mass transfer kinetics, quality and microstructure of mangoes were investigated. In terms of mass transfer efficiency, the results showed that the water loss (54.43%) of the VUOD samples was the highest, which was 45.85%, 14.06%, 29.38% higher than that in the traditional osmotic dehydration (OD), ultrasound assisted osmotic dehydration (UOD) and pulsed vacuum pretreated osmotic dehydration (VOD) samples, respectively, and the solid gain (12.81%) of the VUOD samples was 90.03%, 53.43% and 32.06% higher than that in the OD, UOD and VOD groups, respectively. The high regression coefficient ( $R^2 > 0.9$ ) and low RMSE value represented the

引文格式:

宋璐瑶, 刘东红. 芒果片真空预处理联合超声辅助渗透脱水的传质动力学及品质分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(11): 231-238, +230

SONG Luyao, LIU Donghong. Mass transfer kinetics and quality analysis of mango under vacuum pretreated and ultrasound assisted osmotic dehydration [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(11): 231-238, +230

收稿日期: 2021-03-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0400301); 浙江省重点研发计划项目(2017C02015)

作者简介: 宋璐瑶(1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬干燥, E-mail: erzheerzhe@163.com

通讯作者: 刘东红(1968-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工装备与自动化, 食品无损检测和快速分析技术, 食品加工过程的信息化技术应用, E-mail:

dhl@zju.edu.cn

suitability of Azuara model for describing WL and SG of osmo dehydrated mangoes. The model predicted that the equilibrium value of WL and SG of VUOD were the highest, which were 65.06% and 23.35% respectively. The hardness of the mangoes in the UOD and VUOD groups were significantly lower than those in the OD and VOD groups ( $p<0.05$ ), while the color of mangoes was well protected. The results of scanning electron microscope (SEM) showed that ultrasound treatment caused a significant collapse in cell wall, the decrease in cross-sectional area and the formation of the microscopic pores. Meanwhile, vacuum pretreatment had little effect on the hardness, color and microstructure of mangoes. Overall, VUOD improved the efficiency of osmotic dehydration by changing the cell structure, increasing the mass transfer microchannels which can better protect the color of mangoes but result in a decrease in hardness.

**Key words:** osmotic dehydration; mango; vacuum pretreatment; ultrasound; mass transfer kinetics

芒果 (*Mangifera indica* Linn.) 学名杧果, 富含纤维、蛋白质、氨基酸、维生素以及多酚等生物活性成分<sup>[1,2]</sup>, 因其独特的口感、芳香而深受人们的喜爱, 被誉为“热带水果之王”。根据联合国粮食与农业组织<sup>[3]</sup>的统计数据, 2019 年我国芒果产量  $2.58 \times 10^6$  t, 占全球产量的 4.62%, 种植总面积  $1.96 \times 10^5$  hm<sup>2</sup>。芒果为呼吸跃变型水果, 其采后生理代谢旺盛, 成熟后容易发生果实软化、失重和腐烂等品质劣变<sup>[4]</sup>, 并且低温环境易使芒果遭受冷害<sup>[5]</sup>。因有效保鲜手段的缺失, 我国芒果鲜果的损耗率高达 25% 到 40%。为延长货架期并提高附加值, 芒果常被加工成芒果果脯(干)<sup>[6]</sup>。

渗透脱水是芒果果脯生产中必不可少的工艺, 是将果蔬浸泡于盐溶液、糖溶液或混合溶液中, 通过脱水以及溶质的渗入以获得独特风味、延长保藏期的加工方式<sup>[7]</sup>。在工厂生产中, 渗透脱水过程周期长、质量风险大、成本高, 因此亟需提高渗透脱水的传质效率。

超声技术被应用于果蔬的渗透脱水过程中, 以提高脱水、传质效率。超声波是一种超过人耳探测范围、频率在 20 kHz~10 MHz 之间的声波, 低频率(20~100 kHz)的超声波对传质具有显著促进作用。Allahdad 等<sup>[7]</sup>指出, 超声辅助渗透脱水通过增加细胞壁的破坏程度, 使石榴皮的脱水量提高 2.7 倍。Nowacka 等<sup>[8]</sup>证实超声预处理使猕猴桃产生微孔, 增加细胞平均横截面积, 使水分在细胞的不同结构中再分配。此外, 真空技术也因其高效、低能耗的优势而被应用。Jesus 等<sup>[9]</sup>研究表明, 脉冲真空提高了甜菜根、胡萝卜和茄子渗透脱水的脱水率, 较好地保持了果蔬中类胡萝卜素的含量。目前, 一些研究将真空与超声技术联合应用于果蔬的脱水, 以获得更高传质效率。Feng 等<sup>[10]</sup>应用真空预处理联合超声波辅助大蒜片渗透脱水, 发现该技术显著提高了大蒜片的传质速率 ( $p<0.05$ ), 且使大蒜获得了更好的质量特性。因此, 真空联合超声技术在果蔬的渗透脱水领域具有广阔应用前景。

本文以越南玉芒为原料, 探究了常规渗透脱水 (traditional osmotic dehydration, OD)、脉冲真空预处

理渗透脱水 (pulsed vacuum pretreated osmotic dehydration, VOD)、超声辅助渗透脱水 (ultrasound assisted osmotic dehydration, UOD) 以及脉冲真空预处理联合超声波辅助渗透脱水 (pulsed vacuum pretreated and ultrasound assisted osmotic dehydration, VUOD) 等四种渗透脱水方式对芒果渗透脱水的传质动力学、品质以及微观结构的影响, 预期为芒果干的工艺优化与新型食品加工技术的发展提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 试验原料

芒果, 品种为越南玉芒, 购于广西南宁, 挑选重量 ( $525 \pm 50$  g)、形状 ( $20 \pm 2$  cm 长,  $8 \pm 2$  cm 宽) 和颜色相似的芒果, 以减少芒果的个体差异, 常温储藏; 食品级蔗糖, 购于本地超市。

将芒果去皮、去核, 取平行于核的芒果果肉, 用食品级切片器切出 0.8 cm 厚度, 手动切成  $2.5 \text{ cm} \times 3.5 \text{ cm}$  的芒果片样品。经测定, 新鲜芒果片的初始水分含量为  $85.53\% \pm 0.54\%$ 。

#### 1.1.2 主要仪器设备

超声波水浴消毒机, 宁波新芝生物科技有限公司; 冷水循环控温装置、食品级切片器, SD-1138A, 广州艺成食品机械有限公司; ColorFlex EZ 色差仪, 美国 Hunterlab 公司; TA-XT2i 质构仪, 英国 Stable Micro System 有限公司; 真空干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; DHG-101-2Sb 热风干燥箱, 杭州蓝途仪器有限公司; SU-8010 扫描电镜, 日本 Hitachi 公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 渗透脱水

试验比较了四种不同的渗透脱水方式: 常规渗透脱水、脉冲真空预处理渗透脱水、超声辅助渗透脱水、脉冲真空预处理联合超声辅助渗透脱水。图 1 为 VUOD 组试验过程的示意图。

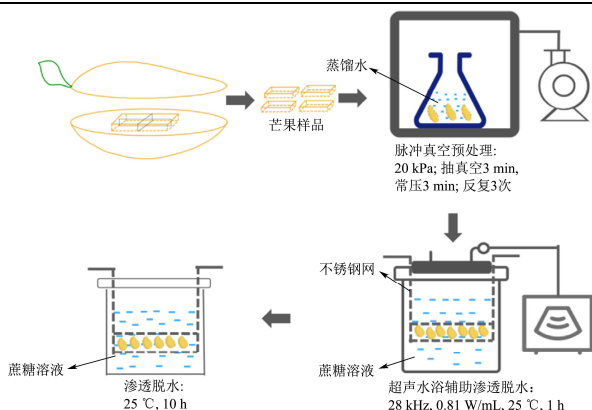


图1 脉冲真空预处理联合超声辅助芒果渗透脱水 (VOD) 的实验示意图

Fig.1 Schematic diagram for pulsed vacuum pretreated and ultrasound assisted osmotic dehydration of mango slices

脉冲真空预处理：将芒果片浸入蒸馏水中，置于真空烘箱中，于室温下进行脉冲真空预处理。脉冲真空的模式：抽真空（20 kPa）3 min，释放到常压 3 min，反复操作三次。从蒸馏水中取出芒果片，用吸水纸轻轻吸干（每片 6 次）以去除样品表面多余的水分。经过脉冲真空预处理的芒果片将用于 VOD、VUOD 组的渗透脱水。

OD、VOD：将芒果样品浸到盛有 50%蔗糖溶液的食品级塑料盒中，固定于塑料盒的中心位置。芒果样品/蔗糖溶液的比例为 1:20 (m/m)<sup>[11]</sup>，避免因溶液稀释导致的驱动力的降低。渗透脱水在 25 °C 下进行 11 h。

UOD、VUOD：将芒果样品浸入盛有 50%蔗糖溶液的超声水浴锅中，为防止芒果片漂浮，将其放在不锈钢网格中，并固定于超声水浴锅的中心位置。芒果样品/蔗糖溶液的比例为 1:20 (m/m)。在 25 °C 下超声 1 h，超声频率为 28 kHz，超声强度为 0.810 W/mL，使用冷水循环控温装置调控溶液温度，使温度波动保持在 1 °C 以下。超声结束后继续渗透脱水 10 h。

在渗透脱水 0.5、1、2、3、4、5、7、9、11 h 时，捞出芒果样品，用 150 mL 蒸馏水冲洗 10 s，并用吸水纸轻轻吸去芒果表面多余水分（每片吸水 6 次），放入称量瓶中进行各项指标的测定。

1.2.2 失水率和增固率

根据 Prinzevalli 等<sup>[12]</sup>的方法，在 105 °C 热风干燥箱中将样品烘干至恒重，测定水分和固形物含量。每组样品平行测定 4 次。利用公式 (1)、(2)，分别计算失水率 (WL) 和增固率 (SG)：

$$WL(\%) = \frac{(M_0 - m_0) - (M_t - m_t)}{M_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$SG(\%) = \frac{m_t - m_0}{M_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

$M_0$ 、 $M_t$ ——新鲜样品和经渗透脱水 t h 后的样品的质量，

g；

$m_0$ 、 $m_t$ ——新鲜样品和经渗透脱水处理样品的干物质质量，g。

1.2.3 传质动力学模型

通过使用合适的动力学模型拟合实验数据，可预测渗透脱水过程中芒果的失水率和增固率的平衡值。在文献中，主要使用经验模型描述渗透脱水中水分和溶质的迁移行为，其中应用最广泛的模型有 Peleg、Azuaa、Page 和 Weibull 模型等<sup>[13]</sup>。

Azuaa 等<sup>[14]</sup>提出了一种可预测渗透脱水过程中失水率和增固率的模型。模型方程中具有两个可调参数，并且该模型还可以估算传质系数和最终的传质平衡点，可使用 Azuaa 模型拟合远离平衡值的试验数据。Azuaa 模型的公式如下：

$$WL = \frac{s_1 \times t \times WL_\infty}{1 + s_1 \times t} \quad (3)$$

$$SG = \frac{s_2 \times t \times SG_\infty}{1 + s_2 \times t} \quad (4)$$

式中：

$s_1$ ——与水分的扩散速率有关的参数；

$s_2$ ——与溶质扩散速率有关的参数。

将 Azuaa 方程的线性化：

$$\frac{t}{WL} = \frac{1}{WL_\infty} \times t + \frac{1}{s_1 \times WL_\infty} \quad (5)$$

$$\frac{t}{SG} = \frac{1}{SG_\infty} \times t + \frac{1}{s_2 \times SG_\infty} \quad (6)$$

因此，式 (5)、(6) 表明 (t/WL) 或 (t/SG) 与 t 呈线性关系，通过得到动力学线性回归的斜率和截距，可以方便地估算平衡失水 (WL<sub>∞</sub>) 和固体增益 (SG<sub>∞</sub>)。

1.2.4 色泽

使用 Colorflex-EZ 色差仪测定芒果样品的色泽，每组样品平行测量 10 次。CIE 颜色空间由 L\* (明暗)，a\* (红色或黄色) 和 b\* (绿色或蓝色) 组成。最后，通过公式 (4) 计算总色差 (ΔE)。

$$\Delta E = \sqrt{(a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2 + (L^* - L_0^*)^2} \quad (7)$$

1.2.5 质构

使用 TA-XT2i 质构仪测定芒果样品的质构，使用圆柱形 P/5 探针 (直径 5 mm)，以 5 mm/s 的下降速度推入样品的中心位置，探头压样速度为 1 mm/s，压缩形变率为 50%，每次测量进行 15 次重复。

### 1.2.6 微观结构

从四组芒果样品中分别切取 2 mm×2 mm×3 mm 大小的切片,在 4℃ 下于 2.5%戊二醛溶液中固定 24 h。使用 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液 (pH 7.0) 冲洗 3×15 min,再用 1%锇酸溶液固定 1~2 h。用 0.1 mol/L 的磷酸盐缓冲液再次冲洗 3×15 min 后,分别用系列浓度梯度的乙醇 (30%、50%、70%、80%、90%、95%、100%) 逐步脱水处理。最后,干燥、涂金,在扫描电子显微镜下观察。

### 1.2.7 数据处理与分析

采用 Excel 软件整理实验数据,结果表示为平均值和标准差。使用 SPSS 22 软件进行显著性分析,使用 Matlab 进行 Azuara 模型的拟合,并使用 Graphpad Prim 9 作图。组间比较采用单因素方差分析 (ANOVA),当  $p<0.05$  时认为有显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同渗透脱水方式对芒果失水率与增固率的影响

#### 率的影响

将新鲜芒果样品放置于蔗糖溶液中时,芒果中的渗透压远比蔗糖溶液中渗透压的低。这种渗透压差成为了较大的驱动力,使芒果表层组织细胞快速与溶液进行物质交换,水分从芒果中扩散到蔗糖溶液中,蔗糖溶液中溶质 (蔗糖) 逆向扩散果蔬的内部<sup>[15]</sup>。

图 2、3 为渗透脱水过程中,芒果中失水率与增固率随渗透脱水时间的变化。由图可知,相较于渗透脱水 5 h~11 h 阶段,芒果的失水率和增固率在渗透脱水 0~5 h 阶段增加得更快,但在 5 h 之后逐渐趋于平缓。这一方面是因为水分失去和溶质渗入使芒果内渗透压增加,与外界溶液的渗透压差减小导致速率减小。另一方面可能是大量蔗糖溶质进入芒果内,由于内部阻力的作用,堆积于芒果样品的外层,并阻碍了后续的扩散。根据 Baldan 等<sup>[16]</sup>,溶质在食品表面会发生生物粘附现象,即分子与界面的生物粘附基质之间发生的物理和化学相互作用,从而产生吸引力。比较相同处理时间下芒果失水率与增固率,发现失水率比增固率高, Tylewicz 等<sup>[17]</sup>将这归因于膜的选择透性,水分子较蔗糖分子更易通过细胞膜。

与常规渗透脱水组比,真空处理导致了较高的失水率与增固率 ( $p<0.05$ )。渗透脱水 11 h, VOD 的失水率为 42.07%,比 OD 组高 12.73%;增固率为 12.81%,比 OD 组高 43.90%。在 Lin 等<sup>[18]</sup>的研究中,真空处理能使芒果渗透脱水 300 min 后失水率 (WL) 和增固率

(SG) 分别提高 20.59%和 31.26%。通过测定芒果的水分含量,发现真空处理后芒果内水分含量提高了 4.28%。根据 Ahmed 等<sup>[19]</sup>认为,是由于真空环境下芒果外界的蒸馏水被挤压进入芒果组织细胞内,填充了原先封闭在芒果内的气体区域,使传质面积增大,从而提高了传质速率。由于芒果是多孔隙的水果,因此真空处理对其传质效率的提高较为显著。

UOD 处理 11 h 后,芒果的失水率为 47.72%,增固率为 11.03%,较常规渗透脱水组有显著提高 ( $p<0.05$ ),可见超声对芒果的脱水、传质同样具有促进作用。在四种渗透脱水方式中, VUOD 表现出最高的失水率 (54.43%) 和增固率 (16.92%),比 OD 组分别高 45.85%、90.04%。由图 2 可知渗透脱水在 11 h 时仍未达到失水与增固的平衡,但根据工厂生产的需求 (可溶性固形物含量达到 38%), VUOD 组在 7 h 左右时,即可达到水分含量与糖含量的要求,因此 VUOD 可以显著减少加工时间。此外,延长渗透脱水时间,还可减少后续热风干燥的时间,降低对芒果品质的影响。

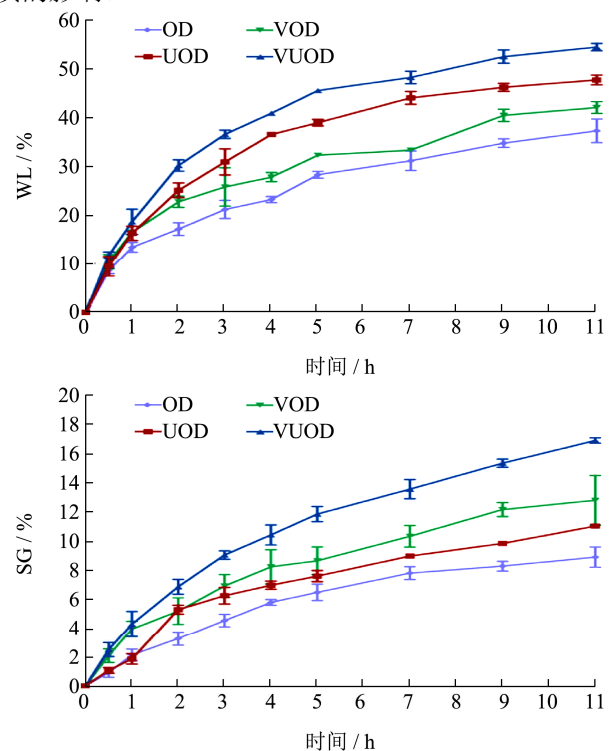


图 2 四种不同渗透脱水处理对芒果失水率、增固率的影响  
Fig.2 Effect of four different osmotic dehydration treatments on water loss and solid gain of mango slices

### 2.2 不同渗透脱水方式对传质动力学的影响

表 1、2 列出模型参数、统计参数以及线性方程的方程式。从表 1 中可以看到, Azuara 模型拟合失水率的统计参数中, VUOD 组的  $R^2$ 、RMSE、SSE 值分

别为 0.9963、0.2042、0.2918；VOD 组为 0.9991、0.1077、0.0812；UOD 组为 0.9915、0.0022、0；OD 组为 0.9735、0.7854、4.3190。而表 2 中，在 Azuara 模型在对增固率的拟合中，VUOD 组的  $R^2$ 、RMSE、SSE 值分别为 0.9915、0.0144、0.0015；VOD 组为 0.9840、0.0365、0.0093；UOD 组为 0.9739、0.0346、0.0084；OD 组为 0.9752、0.0398、0.0111。因此，较高的  $R^2$ 、RMSE、SSE 表明 Azuara 模型对芒果渗透脱水具有较好的拟合效果，可以用来描述四种渗透脱水方式的传质动力学。

在 Azuara 模型中， $s_1$ 、 $s_2$  是与水分、溶质扩散速率有关的参数，值越大，扩散速率越大。由表 1、2， $s_1$ 、 $s_2$  值由大到小依次为 VUOD、UOD、VOD、OD，这表明真空预处理和超声辅助对于芒果渗透脱水的水分、溶质扩散速率有所提高。

通过 Azuara 模型，可计算得到不同渗透脱水方式下芒果失水率平衡值 ( $WL_{\infty}$ ) 和增固率平衡值 ( $SG_{\infty}$ )。

图 3、4 是由公式 (5)、(6) 拟合得到的  $t/WL$  和  $t/SG$  与  $t$  的直线图。可根据斜率 ( $1/WL_{\infty}$  和  $1/SG_{\infty}$ ) 得到芒果渗透脱水过程中失水率的平衡值。从图 3、4 中可以看到，四条直线的斜率  $OD > VOD > UOD > VUOD$ ，可知 VUOD 具有最大的失水率、增固率平衡值。VUOD 组失水率的平衡值为 65.06%，比 OD 组 (45.70%) 高出 42.36%；增固率的平衡值为 23.35%，比 OD 组 (11.33%) 高出 106.09%。因此，真空和超声技术的应用可以提高芒果渗透脱水的平衡失水率与增固率，这可能是由于在超声波作用使芒果组织细胞破坏、形成微观通道，以及真空处理增加了芒果内部的传质面积所导致的。Sharma 等<sup>[20]</sup>发现 30 °C 下，真空预处理联合超声渗透脱水的印度黑莓样品中的失水率的平衡值为 64.1%，增固率的平衡值为 14.1%。而未处理组分别为 53.2%和 8.3%。Deng 等<sup>[21]</sup>研究报道，脉冲真空辅助渗透脱水组和超声辅助渗透脱水组的苹果失水率分别比搅拌组高 6.9%和 11.6%。

表 1 Azuara 模型对芒果渗透脱水过程中 WL 的拟合

Table 1 Parameters evaluated of Azuara model for WL in mango slices

样品编号	Azuara 模型参数		统计参数			方程
	$s_1$	$WL_{\infty}$	Adj. R-square	RMSE	SSE	
VUOD	0.0074	65.06	0.9963	0.2042	0.2918	$WL=0.48t/(1+0.0074t)$
UOD	0.0062	59.81	0.9991	0.1077	0.0812	$WL=0.37t/(1+0.0062t)$
VOD	0.0069	49.26	0.9915	0.0022	0.0000	$WL=0.34t/(1+0.0069t)$
OD	0.0056	45.70	0.9735	0.7854	4.3190	$WL=0.26t/(1+0.0056t)$

表 2 Azuara 模型对芒果渗透脱水过程中 SG 的拟合

Table 2 Parameters evaluated of Azuara model for SG in mango slices

样品编号	Azuara 模型参数		统计参数			方程
	$s_1$	$SG_{\infty}$	Adj. R-square	RMSE	SSE	
VUOD	0.0036	23.35	0.9915	0.0144	0.0015	$SG=0.084t/(1+0.0036t)$
UOD	0.0024	18.01	0.9840	0.0365	0.0093	$SG=0.043t/(1+0.0024t)$
VOD	0.0040	17.17	0.9739	0.0346	0.0084	$SG=0.069t/(1+0.0040t)$
OD	0.0044	11.33	0.9752	0.0398	0.0111	$SG=0.036t/(1+0.0025t)$

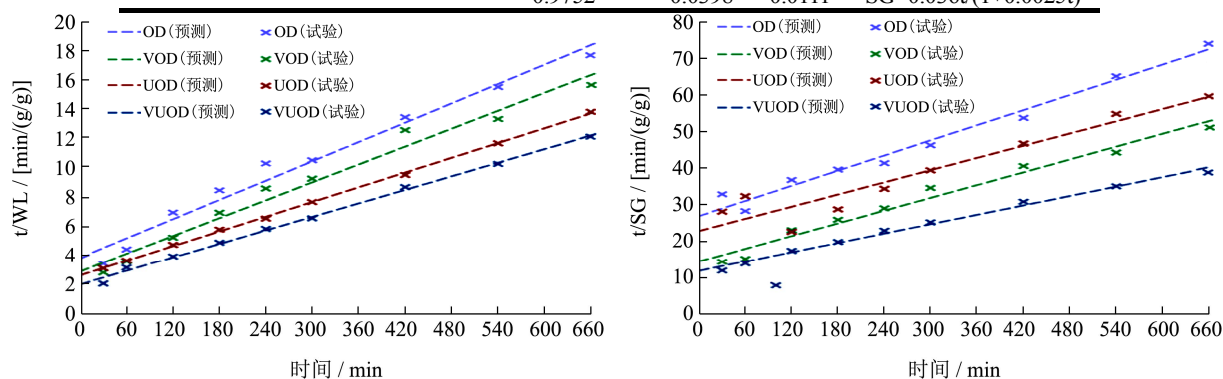


图 3 Azuara 模型对芒果渗透脱水中 WL 和 SG 拟合的线性图

Fig.3 Linear plots of the Azuara model to describe water loss and solid gain of mango slices during OD



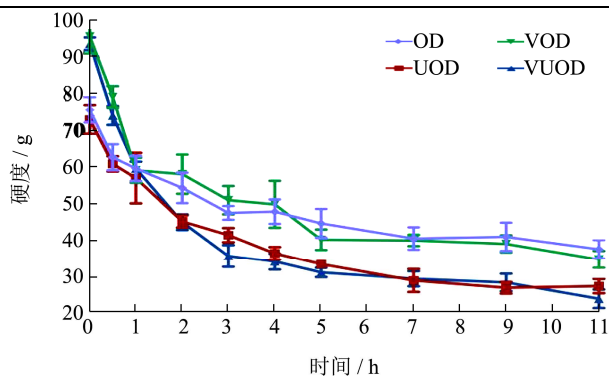


图4 四种渗透脱水方式对芒果硬度的影响

Fig.4 Effect of four different osmotic dehydration treatments on hardness of mango slices

### 2.3 不同渗透脱水方式对芒果色泽的影响

表3 四种渗透脱水方式对芒果色泽的影响

Table 3 Effect of four different osmotic dehydration treatments on color of mango slices

样品编号	L*	a*	b*	ΔE
新鲜芒果	65.82±1.13 <sup>a</sup>	9.84±0.25 <sup>a</sup>	63.83±1.31 <sup>a</sup>	-
OD	59.40±1.08 <sup>b</sup>	7.09±0.35 <sup>b</sup>	56.81±0.57 <sup>b</sup>	4.61±0.23 <sup>a</sup>
VOD	58.34±1.10 <sup>b</sup>	7.62±0.73 <sup>b</sup>	57.31±1.07 <sup>b</sup>	3.49±0.88 <sup>a</sup>
UOD	58.95±1.05 <sup>b</sup>	6.57±0.34 <sup>b</sup>	58.58±0.85 <sup>b</sup>	3.06±0.81 <sup>a</sup>
VUOD	60.23±0.63 <sup>b</sup>	6.83±0.84 <sup>b</sup>	56.84±1.93 <sup>b</sup>	3.68±0.46 <sup>a</sup>

注: 字母不同表示显著性差异  $p < 0.05$ 。

表3为新鲜的以及经过不同渗透脱水方式处理的芒果色泽。经过渗透脱水方式处理的芒果L\*、a\*、b\*值均显著低于新鲜芒果样品,因此可知渗透脱水处理后的芒果亮度降低,红色和黄色减少。L\*值的降低可能是由于渗透脱水期间芒果内部发生了酶促褐变导致的,此外大量失水导致的细胞质壁分离也会使芒果色泽变化<sup>[22]</sup>。而a\*降低可能是由于芒果中的色素(如类胡萝卜素)随着水分的迁移渗出到外界溶液中导致的<sup>[23]</sup>。此外,四种渗透脱水方式对L\*、a\*、b\*值的影响无明显差异( $p > 0.05$ )。

### 2.4 不同渗透脱水方式对芒果质构的影响

硬度是衡量芒果质构的重要指标之一。从图4可以看到,芒果经过渗透脱水方式处理硬度值均明显降低,且在渗透脱水1~5 h内硬度快速下降。渗透脱水过程中硬度的下降是由于芒果组织细胞大量脱水,细胞质收缩引起的,这与2.1中的结论一致,1~5 h内失水率快速升高。根据Moreno等<sup>[24,25]</sup>的研究,质构的变化还与物理化学变化有关,即脱水使细胞壁(果胶)发生降解(增溶),细胞膨胀压降低,离子从细胞壁转移到溶液中,从而导致细胞破裂、质壁分离和组织

结构变软。在茄子<sup>[26]</sup>、芒果<sup>[18]</sup>、青梅<sup>[27]</sup>和中也观察到了这种现象。此外,在渗透脱水7 h后,四组芒果的硬度均不再发生明显下降。但根据2.1,7~11 h时芒果仍在继续脱水,猜测是由于在较长时间的渗透脱水过程中,蔗糖分子大量迁移并囤积于芒果表层,使芒果的表层的硬度提高。在大蒜片<sup>[10]</sup>、印度黑莓<sup>[20]</sup>、芒果<sup>[28]</sup>等果蔬的渗透脱水过程中也观察到了这种现象。

同时从图中可以看到,VUOD和VOD组芒果的初始硬度值( $t=0$ )较高,这是由于芒果在蒸馏水中经真空处理后的水分含量增加了4.28%。因此,虽然VUOD组的芒果由于超声波作用和水分的流失,导致硬度值减少量最大,但硬度的平衡值与UOD组无明显差异。此外,经过超声处理的UOD和VUOD组,最终的硬度值均显著低于OD和VOD组( $p < 0.05$ ),可见超声波的海绵效应与空化效应对芒果细胞壁造成了一定程度的破坏。Pieczywek等<sup>[29]</sup>研究了超声处理对苹果微观结构的影响,发超声波促进苹果果胶的溶解,使细胞壁硬度显著下降,Lin等<sup>[18]</sup>在渗透脱水过程中观察到果胶的降解现象以及芒果硬度的下降。

### 2.5 不同渗透脱水方式对芒果微观结构的影响

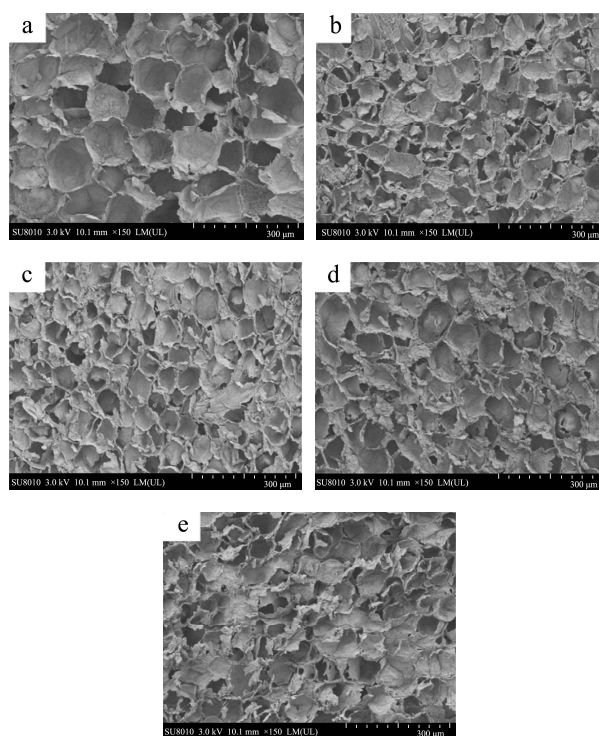


图5 芒果的SEM图像

Fig.5 SEM-photographs of mango slices

注: a: 新鲜; b: OD; c: VOD; d: UOD; e: VUOD。

SEM对芒果表面微观结构的表征如图5所示。从图4a中可以看到,新鲜芒果样品具有完整、规则的网状细胞结构,细胞呈现长而圆的形状。而经过OD处

理的芒果微观结构发生了明显变化(图4b), 规则网状结构消失, 细胞变形严重, 横截面积减小。这些变化与2.1对水分含量的测定结果一致, 在OD处理后失水率达37.32%。水分从芒果组织细胞流出到蔗糖溶液中, 导致细胞膜皱缩, 发生质壁分离<sup>[30]</sup>。

从图4c、4d和4e可看到真空预处理和超声处理对芒果微观结构的影响。对比OD的芒果(图4b)和VOD的芒果(图4c), 二者在微观结构上无明显差异。因此可见, 真空预处理在提高芒果渗透脱水的传质速率的同时, 对细胞结构的破坏较小。这与2.1中的猜测一致, 由于芒果是孔隙率较高的食品, 对其施加真空, 压力差的存在使外部蒸馏水扩散进入, 使封闭在食品中的气体与外界液体相互交换, 从而增大了芒果内部的传质面积<sup>[31,32]</sup>。

而对于经过UOD(图4d)和VUOD处理的芒果(图4e), SEM图像显示出了不同程度的细胞壁的塌陷与变形, 同时细胞横截面积较小, 表面的孔隙增多。在猕猴桃<sup>[33]</sup>、大蒜<sup>[10]</sup>、甘薯<sup>[34]</sup>、土豆<sup>[35]</sup>、石榴皮<sup>[7]</sup>、双孢蘑菇<sup>[36]</sup>等果蔬渗透脱水的研究中, 也有相似地发现。Garcia-Noguera等<sup>[37]</sup>将溶式超声应用于草莓的脱水, 观察到细小的针状细胞, 证实了由细胞的伸缩所形成的微通道的形成与外观。Allahdad等<sup>[7]</sup>指出, 超声水浴辅助渗透脱水通过增强细胞壁的破坏程度, 使石榴皮的脱水量提高了2.7倍。在超声场作用下, 芒果组织细胞内部产生空化气泡, 空化气泡形成、增长并发生不对称的溃陷产生微射流, 使食品内形成微小通道。孔隙的生成为芒果渗透脱水过程中水分、溶质的扩散提供了新通道, 从而提高水分、溶质的扩散速率与最终的失水率和增固率<sup>[8]</sup>。

### 3 结论

本文探究了OD、UOD、VOD以及VUOD等四种渗透脱水方式对芒果渗透脱水的传质动力学、品质以及微观结构的影响。结果表明, 在渗透处理过程中应用脉冲真空和超声技术对芒果的脱水、增固、硬度以及微观结构具有显著影响。VUOD可以显著提高芒果渗透脱水过程的传质效率, 使芒果的失水率较常规渗透脱水提高45.85%, 增固率较常规渗透脱水提高43.90%。Azura模型描述了芒果渗透脱水过程的传质动力学, 预测经OD、VOD、UOD、VUOD处理的芒果失水率平衡值分别为45.70%、49.26%、59.81%、65.06%; 增固率平衡值为11.33%、17.17%、18.01%、23.35%。脉冲真空通过驱除气泡、增大传质面积提高了传质效率, 且对芒果硬度和微观结构影响较小, 是一种温和的食品加工技术。超声通过破坏细胞壁结构、

增加微孔提高了传质速率, 但也引起了一定程度的硬度下降。综合考虑, 脉冲真空联合超声技术在果蔬脱水中具有应用前景广阔, 但在未来的研究中需进一步研究这种新兴技术的加工工艺, 以降低对果蔬品质的影响。

### 参考文献

- [1] Jahurul M H A, Zaidul I S M, Ghafoor K, et al. Mango (*Mangifera indica* L.) by-products and their valuable components: a review [J]. Food Chemistry, 2015, 183: 173-180
- [2] Tharanathan R N, Yashoda H M, Prabha T N. Mango (*Mangifera indica* L.), "the king of fruits" - an overview [J]. Food Reviews International, 2006, 22(2): 95-123
- [3] Food and Agriculture Organization of the United Nations [EB/OL]. (2021-02-22). <http://www.fao.org/home/en>
- [4] Rastegar S, Khankahdani H H, Rahimzadeh M. Effect of  $\gamma$ -aminobutyric acid on the antioxidant system and biochemical changes of mango fruit during storage [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2020, 14(2): 778-789
- [5] Pesis E, Aharoni D, Aharon Z, et al. Modified atmosphere and modified humidity packaging alleviates chilling injury symptoms in mango fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2000, 19(1): 93-101
- [6] 傅国华, 韩立越, 许能锐. 中国芒果产业链现状[J]. 热带农业科技, 2008, 31(4): 27-31  
FU Guohua, HAN Liyue, XU Nengrui. Situation of mango industrial chain in China [J]. Tropical Agriculture Science & Technology, 2008, 31(4): 27-31
- [7] Allahdad Z. Effect of sonication on osmotic dehydration and subsequent air-drying of pomegranate arils [J]. Journal of Food Engineering, 2019: 10
- [8] Nowacka M, Tylewicz U, Laghi L, et al. Effect of ultrasound treatment on the water state in kiwifruit during osmotic dehydration [J]. Food Chemistry, 2014, 144: 18-25
- [9] De Jesus Junqueira J R, Corrêa J L G, De Mdonça K S, et al. Pulsed vacuum osmotic dehydration of beetroot, carrot and eggplant slices: effect of vacuum pressure on the quality parameters [J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 11(10): 1863-1875
- [10] FENG Yabin, YU Xiaojie, Yagoub A E A, et al. Vacuum pretreatment coupled to ultrasound assisted osmotic dehydration as a novel method for garlic slices dehydration [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2019, 50: 363-372
- [11] FAN Kai, ZHANG Min, WANG Weiqin, et al. A novel method

- of osmotic-dehydrofreezing with ultrasound enhancement to improve water status and physicochemical properties of kiwifruit [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020, 113: 49-57
- [12] Prinzivalli C, Bambilla A, Maffi D, et al. Effect of osmosis time on structure, texture and pectic composition of strawberry tissue [J]. *European Food Research and Technology*, 2006, 224(1): 119-127
- [13] Assis F R, Morais R M S C, Morais A M M B. Mathematical modelling of osmotic dehydration kinetics of apple cubes: OD of apple cubes in different process conditions [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2017, 41(3): e12895
- [14] Azuara E, Cortés R, Garcia H S, et al. Kinetic model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's second law [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2007, 27(4): 409-418
- [15] Rastogi N K, Angersbach A, Knorr D. Evaluation of mass transfer mechanisms during osmotic treatment of plant materials [J]. *Journal of Food Science*, 2000, 65(6): 1016-1019
- [16] Baldan A. Adhesion phenomena in bonded joints [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2012, 38: 95-116
- [17] Tlewiec U, Tappi S, Mannozi C, et al. Effect of pulsed electric field (PEF) pre-treatment coupled with osmotic dehydration on physico-chemical characteristics of organic strawberries [J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 213: 2-9
- [18] LIN Xian, LUO Cai-lian, CHEN Yu-long. Effects of vacuum impregnation with sucrose solution on mango tissue: effects of VI on mango tissue [J]. *Journal of Food Science*, 2016, 81(6): E1412-E1418
- [19] Ahmed I, Qazi I M, Jamal S. Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 34: 29-43
- [20] Sharma M, Dash K K. Effect of ultrasonic vacuum pretreatment on mass transfer kinetics during osmotic dehydration of black jamun fruit [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 58: 104693
- [21] DENG Yun, ZHAO Yan-yun. Effects of pulsed-vacuum and ultrasound on the osmodehydration kinetics and microstructure of apples (Fuji) [J]. *Journal of Food Engineering*, 2008: 10
- [22] Falade K O, Igbeka J C, Ayanwuyi F A. Kinetics of mass transfer, and colour changes during osmotic dehydration of watermelon [J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 80(3): 979-985
- [23] Kaymak-Ertekin F, Sultanoğlu M. Modelling of mass transfer during osmotic dehydration of apples [J]. *Journal of Food Engineering*, 2000, 46(4): 243-250
- [24] Moreno J, Simpson R, Pizarro N, et al. Influence of ohmic heating/osmotic dehydration treatments on polyphenoloxidase inactivation, physical properties and microbial stability of apples (cv. Granny Smith) [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 20: 198-207
- [25] Moreno J, Simpson R, P N, et al. Effect of ohmic heating and vacuum impregnation on the quality and microbial stability of osmotically dehydrated strawberries (cv. Camarosa) [J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 110(2): 310-316
- [26] De Jesus Junqueira J R, Corrêa J L G, De Mdonça K S, et al. Pulsed vacuum osmotic dehydration of beetroot, carrot and eggplant slices: effect of vacuum pressure on the quality parameters [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, 11(10): 1863-1875
- [27] LUO Wei, Tappi S, WANG Chunfang, et al. Study and optimization of high hydrostatic pressure (HHP) to improve mass transfer and quality characteristics of candied green plums (*Prunus mume*) [J]. *Journal of Food Processing & Preservation*, 2018, 42(11): e13769.1-e13769.10
- [28] Tedjo W, Taiwo K A, Eshtiaghi M N, et al. Comparison of pretreatment methods on water and solid diffusion kinetics of osmotically dehydrated mangos [J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 53(2): 133-142
- [29] Pieczywek P M, Koziol A, Konopacka D, et al. Changes in cell wall stiffness and microstructure in ultrasonically treated apple [J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 197: 1-8
- [30] Barat J M, Albors A, Chiralt A, et al. Equilibration of apple tissue in osmotic dehydration: microstructure changes [J]. *Drying Technology*, 1999, 17(7-8): 1375-1386
- [31] Fito P, Chiralt A, Betoret N, et al. Vacuum impregnation and osmotic dehydration in matrix engineering [J]. *Journal of Food Engineering*, 2001, 49(2-3): 175-183
- [32] Fito P, Pastor R. Non-diffusional mechanisms occurring during vacuum osmotic dehydration [J]. *Journal of Food Engineering*, 1994, 21(4): 513-519
- [33] Prithani R, Dash K K. Mass transfer modelling in ultrasound assisted osmotic dehydration of kiwi fruit [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 64: 102407

(下转第230页)