

# 真空冷冻干燥过程中升华温度对梨瓜 细胞微观结构的影响

Effects of sublimation temperature on cell microstructure of  
pear melon during vacuum freeze drying

田津津 姚超阳 张志强 张哲 计宏伟 吴金宇

TIAN Jinjin YAO Chaoyang ZHANG Zhiqiang ZHANG Zhe JI Hongwei WU Jinyu

(天津商业大学天津市制冷技术重点实验室, 天津 300134)

(Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

**摘要:**目的:获得梨瓜细胞最佳的升华温度。方法:基于低温显微镜成像及真空冷冻干燥技术,通过优化方法选择预冻降温速率和真空压力分别为 25 °C/min 和 10 Pa, 然后以 10, 5, 0, -4, -7, -10 °C 的升华温度进行试验研究,分析脱水干燥过程中的细胞形态学参数(当量直径、面积、周长、体积)以及内压、孔隙率在冻干过程中的变化规律。结果:细胞不同维度的形态学参数随着升华温度的增高先减小再增大,在 0 °C 时干燥后细胞的变化率最小,当量直径、细胞横截面积和体积的变化率分别为 5.05%, 9.60%, 14.68%, 很好地保留了细胞的原始形态结构;同时,随着维度的增加,在同一升华温度下的变化量也增加。结论:结合研究所得的最佳预冻速率和真空度,梨瓜干燥升华最佳温度为 0 °C。

**关键词:**梨瓜;真空冷冻干燥;升华温度;细胞形态

**Abstract:** **Objective:** This study aimed to obtain optimal sublimation temperature of pear melon cells. **Methods:** The pre-freezing cooling rate and vacuum pressure were selected by optimization method to be 25 °C/min and 10 Pa, respectively, based on cryogenic microscope imaging and vacuum freeze-drying technology. Then, sublimation temperatures of 10, 5, 0, -4, -7 and -10 °C were used for experimental research. The morphological parameters (equivalent diameter, area, circumference, volume), internal pressure, and porosity of cells during the process of dehydration and drying were analyzed. **Results:** As the sublimation temperature rose, the morphological parameters of different dimensions of cells first decreased and

subsequently increased. The change rates of equivalent diameter, cross-sectional area, and volume of cells were 5.05%, 9.60%, and 14.68% after drying at 0 °C, which well preserved the original morphological structure of cells. At the same time, with the increase of dimension, the change amount at the same sublimation temperature also increases. **Conclusion:** Combined with the optimal pre-freezing rate and vacuum degree, the optimum temperature condition of pear melon drying sublimation is 0 °C.

**Keywords:** pear melon; vacuum freeze-drying; sublimation temperature; cell morphology

随着科技的发展和进步,冷冻干燥技术在保持蛋白质大分子空间结构和稳定性,以及提高活性成分吸收率方面表现突出<sup>[1]</sup>,成为了一种较为先进的干燥技术。经过冷冻干燥加工处理后,食品具有体积小、质量轻、保质期长、复水性能好<sup>[2]</sup>以及保持原有生化活性的特点,冻干食品的脱水率可高达 97%<sup>[3]</sup>,其较低的含水量有效地控制了细菌等微生物的繁殖,因此冷冻干燥技术被广泛用于食品加工行业<sup>[4]</sup>。但是由于冻干过程包含着传质传热和物料微观结构变化,其中微观结构的变化严重影响着食品的运输和营养价值<sup>[5]</sup>,合适的升华温度在促进冰晶融化和降低对细胞的损伤方面起着重要作用。

关于升华温度对果蔬细胞形态结构的影响,国内外许多研究人员做了大量研究。王元春等<sup>[6]</sup>以芒果作为试验材料进行了真空冷冻干燥试验,得出适合的升华温度更好地保留了细胞蛋白质和维生素 C 含量以及使芒果细胞有更好的复水性。Sapkota 等<sup>[7]</sup>探究了干燥方式对枣的影响,得出冷冻干燥下适当的升华温度能够减少细胞内部原花青素等营养物质流失及对细胞的损伤。Fissore 等<sup>[8]</sup>研究了装载小瓶的微型冷冻干燥机,试验以产品温

基金项目:国家自然科学基金(编号:12172254,11772225)

作者简介:田津津,女,天津商业大学高级实验师,硕士。

通信作者:张哲(1975—),男,天津商业大学教授,博士。

E-mail: zhang zhe @tjcu.edu.cn

收稿日期:2023-04-08 改回日期:2023-07-02

度和从初级干燥阶段开始 6 h 后的质量损失作为关键参数,研究得出合适的温度可以获得均匀的干燥条件。诸凯等<sup>[9]</sup>通过数字图像处理方法统计了细胞图像的灰度特征值,对脱水过程中细胞骨架的变化进行了定量分析,发现升华温度的变化会对细胞微观结构产生较大影响。经过单因素试验、响应面法及其正交试验,徐海龙等<sup>[10]</sup>成功探索出黑果腺肋花楸如采用过高的升华温度,会造成细胞内冰晶融化,使水分超标严重影响复水比。袁小峰等<sup>[11]</sup>利用正交试验,优化真空冷冻干燥工艺参数,研究得出升华干燥温度会对蜜柚细胞含水率、色差等带来影响。张艳红<sup>[12]</sup>在真空冷冻干燥红萝卜试验中得出,过高的升华温度会造成细胞体积形状受损,导致营养流失。王泽智<sup>[13]</sup>通过冻融循环预处理和冻干工艺,探究得出过高的升华温度会造成葱茎段细胞结构受损、组织收缩以及内外压的不平衡。罗洁莹等<sup>[14]</sup>在冷冻干燥蓝莓工艺研究中得出,过低和过高升华温度都会造成细胞塌陷和干缩现象。魏丽红等<sup>[15]</sup>在对软枣猕猴桃冷冻干燥研究中得出,合适的升华温度能够保持细胞饱满,且使细胞呈良好的蜂窝状结构。郭利琴<sup>[16]</sup>在蒜片冷冻干燥工艺研究中得出,升华温度过高会造成蒜片组织结构塌陷,最终使大蒜素流失。

梨瓜营养丰富,但采后贮藏时间短,不利于运输,此外用于果蔬微观结构,如细胞层面研究的果蔬较少,梨瓜满足细胞轮廓清晰的试验要求,可当作果蔬类的典型代表进行真空冷冻干燥微观研究。研究拟采用真空冷冻干燥显微冻干台,观察梨瓜细胞结构变化,并定性分析不同升华温度对组织细胞结构产生的影响,以获得梨瓜细胞冷冻干燥的最佳升华温度。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

试验材料为批发市场采购新鲜度较高、无病虫害且没有机械损伤的九成熟梨瓜(*Cucumis melo* L.),其中每 100 g 梨瓜中基本营养成分为水分( $91.99 \pm 1.99$ ) g、蛋白质( $0.72 \pm 0.07$ ) g、可溶性固形物( $9.5 \pm 0.4$ ) g,其中包含有( $5.19 \pm 0.17$ ) g 的糖类和少量的微量元素。将所有样品在冰箱冷藏,真空冷冻干燥试验前将样品从冰箱中取出,室温环境下静置 1 h,以达到热稳定,试验前对其进行清洗、切片。

试验设备为真空冷冻干燥显微镜分析仪:BX-53 型,日本奥林巴斯株式会社;该仪器主要由计算机、控制器、Linksys 操作软件、显微镜、CCD 相机、图像采集软件“TCapture”、FDSC196 型冷热冻干台(英国 Linkam Scientific Instruments 公司)、Duo3M 型高精度真空泵(德国 PFEIFFER 公司)、Leica VT1000 型切片机(德国 Leica Biosystems 公司)、液氮罐、液氮泵、冷热台台芯组成。其

基本原理:温度压力控制器与计算机相连,真空泵和冷热台与控制器相连,冷热台里封闭腔室的工况借助 Linksys 软件设置程序进行控制,显微镜观测冻干细胞动态过程,同时实时通过 CCD 相机传输至计算机,通过图像采集软件“TCapture”对动态图像进行拍摄,获取冻干全过程图像,最后使用 Image Pro-plus6.0 软件处理图像并评估出细胞内的冰晶导致的细胞变形程度。

### 1.2 试验方法

通过真空冷冻干燥显微镜技术,获得冻干过程的详细示意图,并利用图像处理技术,精准地确定梨瓜细胞形态特征参数。

1.2.1 真空冷冻干燥条件及显微镜观察 用 LeicaVT1000 切片机将梨瓜薄壁组织结构分割为 200  $\mu\text{m}$  的薄层,然后把梨瓜的薄层结构放到冻干台台芯。接着打开 Linkam 降温控制系统,设定过程控制程序,以 25  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  的降温速率进行冻结,设定真空压力为 10 Pa,分别在温度为-10,-7,-4,0,5,10  $^{\circ}\text{C}$  时进行升华,解析温度 55  $^{\circ}\text{C}$ ,并使用 CCD 相机连续记录其冻干过程变化情况,将降温开始的时间设为冻结时间的开始。最后,利用图像处理软件处理梨瓜组织显微照片,获得结构特征参数,量化分析细胞变化情况。

1.2.2 细胞形态学参数计算 通过使用 Image Pro-plus6.0 图像处理软件,对梨瓜细胞组织在真空冷冻干燥过程中拍摄的显微图像进行处理、测量、分析后,得出细胞的周长和面积,然后探索不同条件下细胞形态学参数的变化情况,从而更好地了解梨瓜细胞受到的影响。根据文献<sup>[17]</sup>,细胞形态学参数计算如下:

假设细胞均为圆形,则当量直径计算公式为:

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}, \quad (1)$$

式中:

A——细胞面积,  $\mu\text{m}^2$ ;

d——当量直径, m。

当量直径变化率计算公式:

$$\delta_d = \frac{\Delta d}{d} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

$\delta_d$ ——当量直径变化率, %;

$\Delta d$ ——当量直径变化量, m;

d——当量直径, m。

细胞周长变化率计算公式:

$$\delta_L = \frac{\Delta L}{L} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

$\delta_L$ ——细胞周长变化率, %;

$\Delta L$ ——细胞周长变化量, m;

$L$ ——细胞周长,  $m$ 。

细胞面积变化率计算公式:

$$\delta_s = \frac{\Delta S}{S} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

$\delta_s$ ——细胞面积变化率, %;

$\Delta S$ ——细胞面积变化量,  $m^2$ ;

$S$ ——细胞面积,  $m^2$ 。

假设细胞形状为球形, 各项载荷均匀分布, 则体积和内压的计算公式为:

$$V = \frac{L^3}{6\pi^2}, \quad (5)$$

$$\Delta P = \frac{hE\Delta L}{R(1-\gamma^2)2\pi r}, \quad (6)$$

式中:

$V$ ——细胞体积,  $m^3$ ;

$\Delta P$ ——细胞内压变化量,  $kPa$ ;

$L$ ——细胞周长,  $m$ ;

$h$ ——细胞壁厚度, 取  $1.26 \times 10^{-6} m$ ;

$E$ ——细胞壁性模量,  $2.67 \times 10^7 N/m^2$ ;

$\Delta L$ ——细胞周长的变化量,  $m$ ;

$\gamma$ ——细胞壁的 Poission 比, 取 0.33;

$R$ ——变形后果蔬细胞的半径,  $m$ 。

细胞体积变化率计算公式:

$$\delta_v = \frac{\Delta V}{V} \times 100\%, \quad (7)$$

式中:

$\delta_v$ ——细胞面积变化率, %;

$\Delta V$ ——细胞体积变化量,  $m^3$ ;

$V$ ——细胞体积,  $m^3$ 。

对于从空间上随机选一点, 线、面积和体积孔隙率一般是相同的, 文中孔隙率采用面积孔隙率, 其计算公式为:

$$\epsilon = \frac{A_1}{A_0} \times 100\%, \quad (8)$$

式中:

$\epsilon$ ——孔隙率, %;

$A_1$ ——孔隙面积,  $\mu m^2$ ;

$A_0$ ——孔隙与非孔隙部位总面积,  $\mu m^2$ 。

### 1.3 数据处理

使用 Image Pro-plus6.0 软件记录试验数据并导入到 origin2019 中生成折线图, 分析各组梨瓜细胞的特征参数的变化情况。

## 2 结果与分析

### 2.1 梨瓜细胞冻干过程形态演化分析

如图 1(a)~图 1(f)所示是真空冷冻干燥显微镜在放

大 100 倍时, 多个梨瓜细胞微观形貌结构变化图像。从梨瓜细胞整个过程来看, 其微观照片的亮度由亮变暗再变亮, 这是由于梨瓜细胞在冷冻干燥之前, 组织细胞内外充满了大量组织液, 光可以很容易地穿过组织细胞, 使其轮廓能够清晰地显示出来, 但随着温度降低, 整体轮廓变得模糊和暗淡, 这是由于细胞液逐渐结晶导致光的散射造成的<sup>[18]</sup>。在梨瓜细胞升华干燥时, 冰晶界面会慢慢退却, 细胞表面会变得粗糙, 随着升华干燥完成, 组织内开始出现多孔通道。解析干燥时, 组织细胞微观结构不再发生变化, 光只能通过固定通道, 干燥后的物料表面发生皱缩, 呈疏松多孔的龟甲状, 有部分光线通过, 冻干过程结束。

较高或较低的升华温度, 都会使细胞形态学参数发生较大改变。因为在升华阶段, 真空度和降温速率一定时, 较低的升华温度不能够及时提供应对冰晶升华所需的热量, 不利于冰晶的快速升华<sup>[19]</sup>, 使得第一干燥阶段冰晶升华不够完全, 剩余冰晶在解析干燥阶段的较高温度下融化, 导致细胞出现软化、收缩和塌陷等现象, 最终导致干制品出现表面硬化的情况。然而较高的升华温度会使干燥速率增加, 干燥后发生表面硬化的情况, 因为较高的温度会使干燥速率增加, 细胞表面冰晶快速升华, 而胞内冰晶升华较慢, 这样易致清晰干燥面硬化皱缩<sup>[20]</sup>, 给后续解析干燥过程造成负面影响。在升华阶段包含着热量传递和质量传递, 两者相互作用, 所以要探究升华温度在此阶段产生的重要影响。

### 2.2 一维形态学参数变化

如图 2、图 3 所示, 随着升华温度的升高, 干燥前后相比梨瓜细胞一维形态学参数变化率表现为先减小再增大的趋势, 当量直径和周长的最大变化量分别为 7.09% 和 8.60%, 最小变化量分别为 5.04% 和 5.10%。当以  $-10^\circ C$  的升华温度干燥时, 由于温度过低, 会使冻干过程中自由水形成的冰晶升华不完全, 存在剩余, 在后续解析干燥时, 自由水和结合水被同时除去, 会造成细胞收缩塌陷, 使当量直径和周长变化率变大。但随着升华温度的升高, 变化率在  $0^\circ C$  时达到最小, 此温度下直径和周长变化率分别为 5.05% 和 5.15%。温度过高, 会使梨瓜内部冰晶融化, 水分则以液态的形式蒸发, 会对细胞结构产生不利影响, 使得细胞皱缩, 这与易丽等<sup>[21]</sup>和高续春等<sup>[22]</sup>关于升华温度对细胞影响的观点一致。

### 2.3 二维形态学参数变化

如图 4 所示, 随着升华温度的升高, 干燥前后相比梨瓜细胞二维形态学参数变化率表现为先减小再增大的趋势, 与初始细胞状态相比, 细胞面积最大变化率达 13.70%, 变化率最小为 9.60%,  $0^\circ C$  时面积变化率是最小的。当以  $-10^\circ C$  的升华温度干燥时, 由于温度较低, 造成

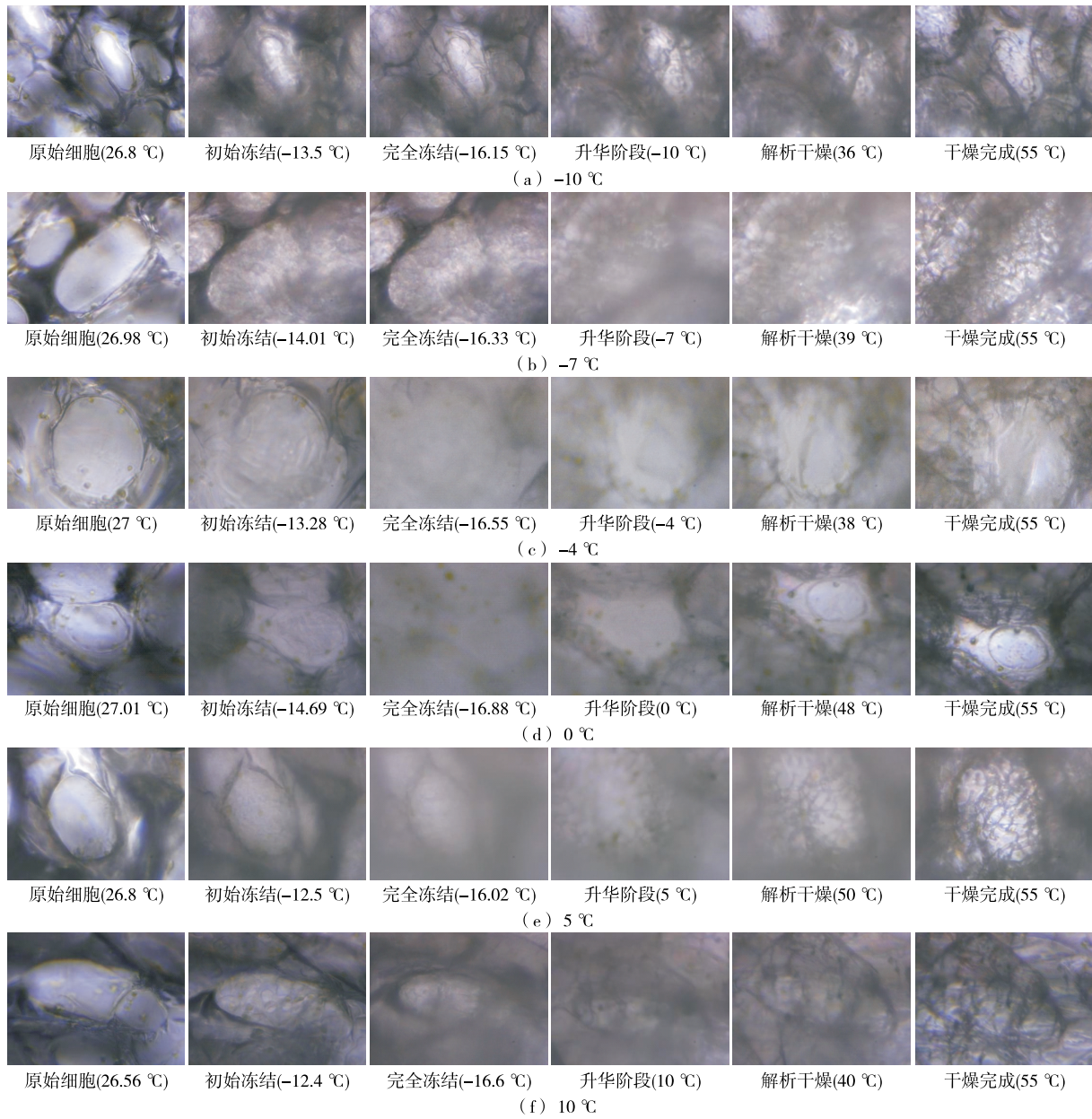


图 1 梨瓜组织冻干过程中细胞结构的变化

Figure 1 Changes in cellular structure of pear and melon tissues during freeze drying

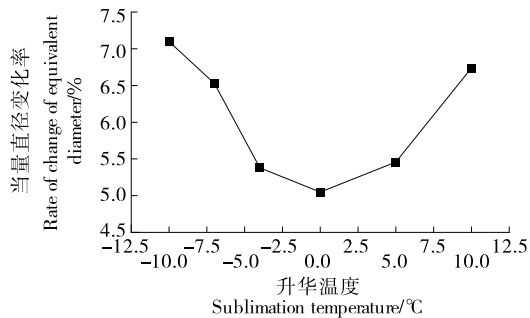


图 2 当量直径变化率随升华温度的变化

Figure 2 Change rate of equivalent diameter with sublimation temperature

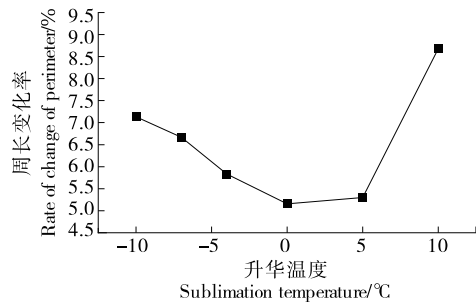


图 3 细胞周长变化率随升华温度的变化

Figure 3 Change rate of cell perimeter with sublimation temperature

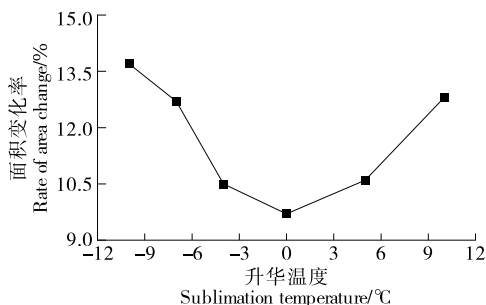


图 4 细胞面积变化率随升华温度的变化

Figure 4 Change rate of cell area with sublimation temperature

细胞塌陷,此时面积变化率较大,随着温度升高,面积变化率减小,在 0 °C 时面积皱缩减少是最小的,此温度下对细胞结构的破坏和分离程度的影响较低。温度继续升高时,会造成细胞干缩,使细胞面积变化率增大,不利于保留细胞二维的初始微观结构,这与郭帅帅<sup>[23]</sup>在胡萝卜冷冻干燥试验和模拟中,对升华干燥阶段内部传热传质的结论一致。

#### 2.4 三维形态学参数变化

如图 5 所示,随着升华温度的升高先以较小的梯度减小然后大梯度增长,在所选温度下,最大和最小体积变化量分别为 23.85% 和 14.68%,在 0 °C 下最小。较高的升华温度会使升华界面处的温度超过其共熔点温度,在内部冰晶升华过程中,破坏了细胞结构,造成外部表面干缩<sup>[20]</sup>;较低的升华温度,使细胞内固态冰难以升华,在解析干燥完成后造成细胞塌陷,这两种现象都会造成体积变化率增大。

#### 2.5 细胞内压变化

如图 6 所示,在一定的温度范围内,随着升华温度的升高,内压变化先减小再增大,并且细胞内压和细胞体积呈正相关,在 0 °C 的条件下升华时内压变化量最小为 89.6 kPa,在所选温度范围内最大变化为 357 kPa。较低和较高的升华温度都会使冻干后的细胞发生收缩,造成

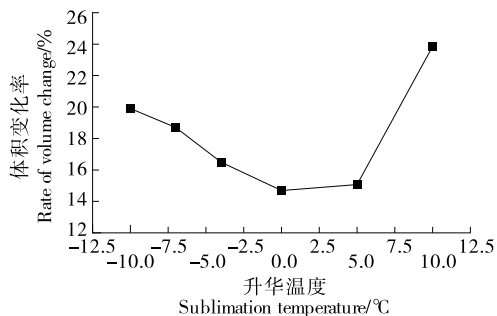


图 5 细胞体积变化率随升华温度的变化

Figure 5 Change rate of cell volume with sublimation temperature

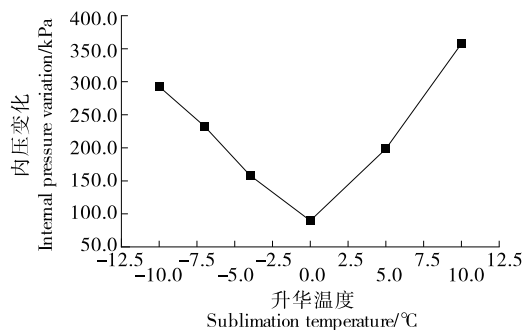


图 6 内压随升华温度的变化

Figure 6 Internal pressure changes with sublimation temperature

细胞内压变化量增大,使细胞体积缩小,所以细胞内压的变化会对细胞形状和结构产生直接影响<sup>[24]</sup>。

#### 2.6 孔隙率变化

如图 7 所示,随着升华温度的升高,孔隙率先增大后减小,在 -10, -7, -4, 0, 5, 10 °C 6 种升华温度下,干燥组织的孔隙率分别为 49.63%, 51.76%, 53.15%, 52.46%, 51.16%, 50.31%, 可以发现孔隙率的变化范围较小,孔隙率普遍较高。随着升华温度的升高,孔隙率也逐渐升高,在 -4 °C 达到最大,此时结构稳定性较高,升华温度对细胞结构破坏减小。随着温度继续升高,对细胞结构影响增大,孔隙率下降,但是从整体来看升华温度对孔隙率的影响较小<sup>[25]</sup>,为了加快升华速率,在不影响物料品质和细胞结构的同时可以在允许的范围内适当提高升华温度。

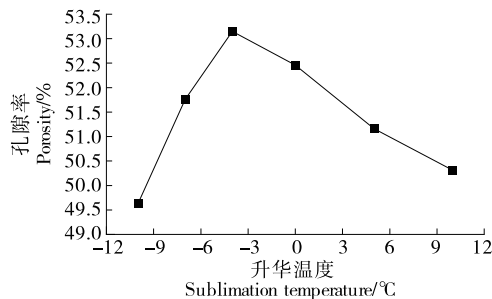


图 7 孔隙率随升华温度的变化

Figure 7 Porosity changes with sublimation temperature

### 3 结论

(1) 较高的升华温度或较低的升华温度,都会使细胞形态学参数发生较大改变,在允许的范围内适当提高升华温度可以加快升华速率,使冻干效果更好。

(2) 细胞不同维度的形态学参数随升华温度的升高先减小再增大。随着维度的增加,在同一升华温度下的变化量也增加。

(3) 在最佳预冻降温速率 25 °C/min 和真空压力 10 Pa 时,0 °C 的温度条件可以认为是最佳冻干条件,当

量直径、细胞横截面积和体积的变化率分别为 5.05%, 9.60%, 14.68%, 此时细胞结构稳定性最高, 所得产品品质最佳。

(4) 文中研究的是升华温度对梨瓜细胞微观结构的影响, 可能会受到优化方法选择的降温速率和真空度数值的影响, 后续可以将宏观与微观层面的冻干研究同步进行, 设计正交试验, 对工艺参数组合进一步优化, 获得整个冻干周期的最佳工艺组合。

### 参考文献

- [1] 李兢思, 李俊欣, 付佳佳. 冷冻干燥技术及其在食品加工行业的应用[J]. 食品安全导刊, 2022(34): 151-158.  
LI J S, LI J X, FU J J. Freeze drying technology and its application in food processing industry [J]. Food Safety Guide, 2022 ( 34 ): 151-158.
- [2] KROKIDA M K, KARATHANOS V T, MAROULIS Z B. Effect of freeze-drying conditions on shrinkage and porosity of dehydrated agricultural products[J]. Journal of Food Engineering, 1998, 35(4): 53-56.
- [3] 毕金峰, 冯舒涵, 金鑫, 等. 真空冷冻干燥技术与产业的发展及趋势[J]. 核农学报, 2022, 36(2): 414-421.  
BI J F, FENG S H, JIN X, et al. Development and trend of vacuum freeze drying technology and industry [J]. Journal of Nuclear Agricultural Science, 2022, 36(2): 414-421.
- [4] WAGHMARE R, KUMAR M, YADAV R, et al. Application of ultrasonication as pre-treatment for freeze drying: An innovation approach for the retention of nutraceutical quality in food[J]. Food Chemistry, 2023, 404: 79-86.
- [5] 蔡路昀, 台瑞瑞, 曹爱玲, 等. 冷冻因素对水产品品质的影响及冷冻保鲜的研究进展[J]. 食品工业科技, 2018, 39(20): 308-319.  
CAI L Y, TAI R R, CAO A L, et al. Effect of freezing factors on the quality of aquatic products and the research progress in freezing preservation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39 (20): 308-319.
- [6] 王元春, 谢晓航, 黄忠闯, 等. 芒果冷冻干燥过程中营养成分变化的研究[J]. 食品工业, 2011, 32(12): 65-68.  
WANG Y C, XIE X H, HUANG Z C, et al. Study on the change of nutrient composition of mango during freeze drying [J]. Food Industry, 2011, 32(12): 65-68.
- [7] SAPKOTA G, DELGADO E, VANLEEUEWEN D, et al. Preservation of phenols, antioxidant activity, and cyclic adenosine monophosphate in jujube (*Ziziphus jujuba* mill.) fruits with different drying methods[J]. Plants, 2023, 12(9): 98-104.
- [8] FISSORE D, GALLO G, RUGGIERO A E, et al. On the use of a micro freeze-dryer for the investigation of the primary drying stage of a freeze-drying process[J]. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2019, 141: 121-129.
- [9] 诸凯, 董杨, 王雅博, 等. 脱水过程对细胞骨架的影响[J]. 制冷学报, 2020, 41(4): 159-166.
- [10] ZHU K, DONG Y, WANG Y B, et al. Effect of dehydration on cytoskeleton[J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(4): 159-166.
- [10] 徐海龙, 于莹, 赵明波. 响应面法优化黑果腺肋花楸真空冷冻干燥工艺[J]. 现代农业科技, 2022(22): 189-193.  
XU H L, YU Y, ZHAO M B. Optimization of vacuum freeze-drying process of sorbus melanocarpa by response surface method [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2022 ( 22 ): 189-193.
- [11] 袁小峰, 阮征, 张飞, 等. 正交试验优化蜜柚真空冷冻干燥工艺[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(18): 100-105.  
YUAN X F, RUAN Z, ZHANG F, et al. Optimization of vacuum freeze drying process of honey pomelo by orthogonal experiment [J]. Food Research and Development, 2022, 43(18): 100-105.
- [12] 张艳红. 胡萝卜真空冷冻干燥试验[J]. 农业工程, 2019, 9(11): 52-55.  
ZHANG Y H. Experiment on vacuum freeze drying of carrot[J]. Agricultural Engineering, 2019, 9(11): 52-55.
- [13] 王泽智. 基于干燥特性及品质控制的葱茎段预处理联合真空冷冻干燥研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022: 9.  
WANG Z Z. Study on pretreatment of onion stem segment combined with vacuum freeze-drying based on drying characteristics and quality control [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022: 9.
- [14] 罗洁莹, 汤梅, 柳建良, 等. 蓝莓真空冷冻干燥工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(3): 91-95.  
LUO J Y, TANG M, LIU J L, et al. Optimization of vacuum freeze-drying process for blueberry[J]. Food Research and Development, 2018, 39(3): 91-95.
- [15] 魏丽红, 翟秋喜. 软枣猕猴桃真空冷冻干燥条件的筛选[J]. 辽宁农业职业技术学院学报, 2019, 21(5): 7-9.  
WEI L H, ZHAI Q X. Screening of vacuum freeze-drying conditions for actinidia jujube[J]. Journal of Liaoning Agricultural Vocational and Technical College, 2019, 21(5): 7-9.
- [16] 郭利琴. 蒜片真空冷冻干燥工艺及其贮藏包装的研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2020: 23.  
GUO L Q. Research on vacuum freeze drying technology and storage packaging of garlic slices[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2020: 23.
- [17] 徐焱. 贮运过程中果蔬细胞组织损伤机理微观实验研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2019: 28.  
XU Y. Microscopic experimental study on damage mechanism of fruit and vegetable cell tissue during storage and transportation[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2019: 28.
- [18] 柯程虎, 张辉, 保秀娟. 团聚形核壳结构冰晶粒子的激光散射特性[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(8): 70-76.  
KE C H, ZHANG H, BAO X J. Laser emission characteristics of agglomerated core-shell ice crystal particles[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(8): 70-76.

(下转第 44 页)

- Journal of Aquatic Food Product Technology, 2023, 32 (3): 304-320.
- [14] LI H J, HU Y F, ZHAO X H, et al. Effects of different ultrasound powers on the structure and stability of protein from sea cucumber gonad[J]. LWT-Food Science & Technology, 2021, 137: 110403.
- [15] 田然, 冯俊然, 隋晓楠, 等. 高强度超声处理对大豆 7S 和 11S 球蛋白结构和理化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(5): 87-97.  
TIAN R, FENG J R, SUI X N, et al. Effect of high intensity ultrasound on the conformational and physicochemical properties of soy 7S and 11S globulin[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(5): 87-97.
- [16] KANG D C, ZOU Y H, CHENG Y P, et al. Effects of power ultrasound on oxidation and structure of beef proteins during curing processing[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 33: 47-53.
- [17] TANG C H, WANG X Y, YANG X Q, et al. Formation of soluble aggregates from insoluble commercial soy protein isolate by means of ultrasonic treatment and their gelling properties[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 92(4): 432-437.
- [18] O'SULLIVAN J, MURRAY B, FLYNN C, et al. The effect of ultrasound treatment on the structural, physical and emulsifying properties of animal and vegetable proteins [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 53: 141-154.
- [19] ZHOU C S, HU J L, YU X J, et al. Heat and/or ultrasound pretreatments motivated enzymolysis of corn gluten meal: Hydrolysis kinetics and protein structure[J]. LWT-Food Science & Technology, 2017, 77: 488-496.
- [20] WANG Z B, LIN X M, LI P P, et al. Effects of low intensity ultrasound on cellulase pretreatment[J]. Bioresource Technology, 2012, 117: 222-227.
- [21] 秦倩倩. 超声波预处理对草鱼皮胶原蛋白特性和酶解产物活性的影响[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2019: 45.
- QIN Q Q. Effects of ultrasound pretreatment on properties of collagen from grass carp skin and activities of its hydrolysates[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2019: 45.
- [22] BRUNO S F, KUDRE T G, BHASKAR N. Effects of different pretreatments and proteases on recovery, umami taste compound contents and antioxidant potentials of *Labeo rohita* head protein hydrolysates[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56: 1 966-1 977.
- [23] LAN X H, LIU P, XIA S Q, et al. Temperature effect on the non-volatile compounds of Maillard reaction products derived from xylose-soybean peptide system: Further insights into thermal degradation and cross-linking[J]. Food Chemistry, 2010, 120(4): 967-972.
- [24] LI X P, LIU Y W, WANG Y Y, et al. Combined ultrasound and heat pretreatment improve the enzymatic hydrolysis of clam (*Aloididae aloid*) and the flavor of hydrolysates[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 67: 102596.
- [25] ZHAO C J, SCHIEBER A, GÄ NALE M G. Formation of taste-active amino acids, amino acid derivatives and peptides in food fermentations-A review[J]. Food Research International, 2019, 89: 39-47.
- [26] ZHANG Z Y, ELFALLEH W, HE S D, et al. Heating and cysteine effect on physicochemical and flavor properties of soybean peptide Maillard reaction products[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120: 2 137-2 146.
- [27] ZHENG Z L, ZHANG M, FAN H, et al. Effect of microwave combined with ultrasonic pretreatment on flavor and antioxidant activity of hydrolysates based on enzymatic hydrolysis of bovine bone[J]. Food Bioscience, 2021, 44: 101399.
- 
- (上接第 17 页)
- [19] 张彤. 火龙果真空冷冻干燥热质传递理论与实验研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022: 4.  
ZHANG T. Theoretical and experimental study on heat and mass transfer in vacuum freeze drying of pitaya fruit [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022: 4.
- [20] 张爱琳. 香蕉预冻过程传热性能及真空冷冻干燥工艺优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2020: 44.  
ZHANG A L. Study on heat transfer performance and vacuum freeze-drying process optimization of bananas during pre-freezing [D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2020: 44.
- [21] 易丽, 杨薇, 王晨, 等. 番木瓜片真空冷冻干燥工艺研究[J]. 农产品加工, 2016(17): 19-22.  
YI L, YANG W, WANG C, et al. Study on vacuum freeze-drying technology of papaya slices [J]. Processing of Agricultural Products, 2016(17): 19-22.
- [22] 高续春, 代宏哲, 樊君, 等. 红枣冻干升华工艺优化研究[J]. 当代化工, 2009, 38(4): 335-339.  
GAO X C, DAI H Z, FAN J, et al. Optimization of freeze-drying and sublimation process for red jujube[J]. Contemporary Chemical Industry, 2009, 38(4): 335-339.
- [23] 郭帅帅. 冷冻干燥中传热传质过程的实验和数值模拟研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2021: 46.  
GUO S S. Experimental and numerical simulation of heat and mass transfer in freeze-drying [D]. Qingdao: Qingdao University, 2021: 46.
- [24] 王雅博, 诸凯, 代宝民, 等. 冷却速率对洋葱内表皮细胞结构的影响[J]. 制冷学报, 2018, 39(6): 129-134.  
WANG Y B, ZHU K, DAI B M, et al. Effect of cooling rate on cell structure of inner epidermis of onion[J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(6): 129-134.
- [25] 赵延强. 具有初始孔隙多孔物料冷冻干燥的实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015: 27.  
ZHAO Y Q. Experimental study on freeze drying of porous materials with initial porosity from aqueous solution[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015: 27.