

玉米种子真空冷冻干燥微观实验研究及模型分析

张哲*, 张智弘, 张靖含, 计宏伟, 田津津, 李昌宁, 刘训杰
(天津商业大学 天津市制冷技术重点实验室, 天津 300134)

摘要: **目的** 探究真空冷冻干燥技术对玉米种子的影响。**方法** 基于光学显微镜成像及真空冷冻干燥技术探究各冻干条件(冻结终温、升华干燥温度、解析干燥温度)对玉米种子细胞微观结构的影响。对比分析细胞形态学参数(当量直径、周长、面积、圆度)和含水率的变化规律,建立真空冷冻干燥条件与细胞形态学参数变化率之间关联的数学拟合模型。**结果** 细胞形态学参数变化率和含水率与冻结终温呈负相关趋势,随升华干燥和解析干燥温度的升高呈现先减少后增大的趋势,且升华干燥温度对玉米种子形态学参数变化率影响最大。在冻结终温为 -25°C 、升华干燥温度为 5°C 、解析干燥温度为 40°C 下,含水率(12.81%)最低。在细胞的当量直径(9.2%)、周长(8.4%)、面积(17.68%)的变化率最小且圆度(1.78%)小于4%时,干燥效果最好。采用二次多项式模型,决定系数 R^2 均接近于1, F_{SSE} 和 F_{RMSE} 均接近0。**结论** 该数学模型能较好地描述各真空冷冻干燥条件对玉米种子细胞形态学参数的影响,可在一定范围内对玉米种子真空冷冻干燥后的品质进行控制。

关键词: 真空冷冻干燥, 玉米种子, 微观结构, 含水率

中图分类号: TS255 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)03-0072-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.03.009

Experimental Study and Model Analysis of Vacuum Freeze-drying of Corn Seed

ZHANG Zhe*, ZHANG Zhihong, ZHANG Jinghan, JI Hongwei, TIAN Jinjin,
LI Changning, LIU Xunjie

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

ABSTRACT: The work aims to study the effects of vacuum freeze-drying on corn seeds. The effects of vacuum freeze-drying conditions (freezing end temperature, sublimation drying temperature and parse drying temperature) on the microstructure of corn seed cells were investigated based on the optical microscope imaging and vacuum freeze-drying techniques. The variation pattern of cell morphological parameters (equivalent diameter, perimeter, area and roundness) and moisture content were compared and analyzed. A mathematical fitting model was established for the correlation between the change rate of cell morphology parameters and vacuum freeze-drying conditions. The change rate of cell morphological parameters and moisture content were negatively correlated with the freezing end temperature. With the increase of sublimation drying and parse drying temperature, the change rate of cell morphological parameters and moisture content tended to decrease and then increase. The sublimation drying temperature had the greatest impact on the change rate of morphological parameters of corn seeds. The moisture content is the lowest (12.81%) at the final freezing temperature of -25°C , sublimation drying temperature of 5°C and parse temperature of 40°C . The cells have the smallest rate of change in equivalent diameter (9.2%), perimeter (8.4%), area (17.68%) and the roundness (1.78%) is less than 4%, indicating the best drying results. By the quadratic polynomial model, the coefficient of determination R^2 is closed to 1

收稿日期: 2023-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(12172254, 11772225); 天津市研究生科研创新项目(2022SKY327)

*通信作者

and F_{SSE} and F_{RMSE} are closed to 0. This mathematical model can effectively describe the effects of various vacuum freeze-drying conditions on the morphological parameters of corn seed cells and control the quality of corn seed after vacuum freeze-drying within a certain range

KEY WORDS: vacuum freeze-drying; corn seed; microstructure; moisture content

玉米目前是世界上最重要的种植作物之一,我国玉米的种植面积大、产量多、需求高^[1-2]。玉米种子含水率过高,使其呼吸作用加强引起霉菌大量繁殖导致霉变。国家规定玉米种子的含水率的安全范围应在 13% 左右,但玉米种子由于籽粒大,表皮结构紧密等因素导致很难干燥^[3]。常见干燥玉米种子的方法包括热风干燥、热泵干燥、微波干燥等^[4],但是它们由于干燥温度过高等问题使产品品质不能满足需求^[5]。真空冷冻干燥相较于其他干燥方法能很好地保留物料原有的成分^[6-8],产出的干制品质量较高。

目前针对谷物种子真空冷冻干燥的宏观研究较多,微观研究较少。杨颖等^[9]采用冻干的方式对小麦种子进行干燥处理。结果表明,小麦种子在真空冷冻干燥条件处理下的平均活率高,且发现冰晶升华温度与干燥室压力密切相关。张子涵^[10]利用 3D 显微镜观察冻干前后的蚕豆细胞变化,发现其突起高度变化较大,证明了蚕豆在冻干处理下的失水效果良好。Jiang 等^[11]对新鲜毛豆种子进行真空冷冻干燥研究,采用近红外反射 (NIR) 技术对样品检测,得出冻干后的毛豆种子蛋白质和油含量保存较好并具有高稳定性。Aborus 等^[12]对小麦品种子在冻干条件下的品质进行了测定,发现冻干后的小麦种子的抗氧化能力和还原能力具有显著性。张芳等^[13]对冻干处理下的蚕豆种子技术进行了优化,利用 Central Composite Design 方法对实验数据进行了分析,建立了相关的二次回归模型,发现蚕豆在真空干燥温度为 85 °C、脱水时间为 120 min 下的品质最好,且决定系数均大于 0.95,拟合结果较好。诸凯等^[14]建立了低温真空下蚕豆种子的数学模型,发现脱水过程中细胞直径变化率与含水率具有很好的相关性,且决定系数大于 0.96,拟合结果较好。经上述研究可知,关于谷物种子真空冷冻干燥的相关模型建立的研究较少,且模型精度有待优化。

由于玉米种子微观结构的变化与宏观的传热传质同时发生,可通过细胞形态学参数变化率(当量直径、周长、面积、圆度)来反映玉米种子宏观结构的变化。本文从微观角度出发,探究不同真空冷冻干燥条件对玉米种子细胞形态学参数变化率和含水率的影响,并针对真空冷冻干燥条件和细胞形态学参数变化率建立相关的数学模型进行分析,通过预测玉米种子真空冷冻干燥细胞形态学参数变化率,可在一定范围内对干燥后玉米种子品质的进行调控。为真空冷冻干燥技术处理玉米种子提供理论依据。

1 实验

1.1 材料与仪器

主要材料和仪器:玉米种子(无损伤病害,颗粒饱满),山东德州德利农 988; LGJ-20F 真空冷冻干燥机,北京松源华真科技发展有限公司; OLYMPUS BX-53, 光学冷冻干燥显微镜,日本奥林巴斯株式会社; Leica VT1000 型切片机,德国 Leica Biosystems; FD 610 水分测试仪,日本 KETT; DSC-Q1000 型,美国 TA 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 工艺流程

采用 Leica VT1000 型切片机将玉米种子切成为 5 mm×5 mm×3 mm 的薄片,采用水分测试仪测量玉米种子的初始含水率。在光学冷冻干燥显微镜下放大 100 倍进行细胞微观图像的记录。之后将玉米种子切片放入培养皿中送入真空冷冻干燥机中。依据各冻干条件(冻结终温、升华干燥温度、解析干燥温度)进行单因素实验,最后对干燥后的玉米种子切片先进行细胞微观图像的记录,再测含水率。

1.2.2 含水率的测定

将所制得干燥前后的玉米种子切片研制成粉末,采用 FD 610 水分测试仪测定含水率。选择合适的 carrot powder 模式,按要求加入适量的玉米种子粉末,运行至终点后读取数值^[15]。

1.2.3 共晶点和共融点的测定

用镊子将玉米种子切片平整放于坩埚内,然后使用压片机进行压片,最后放入差式扫描热量仪中设置冻结和升温速率,进行共晶点(降温过程胞内水分开始凝结冰晶的点)和共融点(升温过程中冰晶开始融化的点)的温度测定。保持同等条件下测试 3 次并取平均值。得出共晶点的温度为 $(-17.68 \pm 4.1) ^\circ\text{C}$ 、共融点的温度为 $(3 \pm 1.28) ^\circ\text{C}$ ^[16]。

1.2.4 细胞形态学参数变化率的测定

采用 OLYMPUS BX-53 光学冷冻干燥显微镜放大 100 倍对玉米种子切片干燥前后中心区域 300 个细胞形态学参数(当量直径、周长、面积)进行观察和记录,将所得到的图像先用 Adobe Photoshop 进行描边处理,再将其变成灰度图像,通过调节对比度、降噪等方式使细胞轮廓更加清晰,导入 image-proplus 6.0 中对干燥前后细胞形态学参数进行测量和计算。

由式 (1) 计算细胞的圆度, 并对所得到的细胞形态学参数用频数分布曲线表示。取频数分布最高区间内数值的平均值作为细胞形态学参数的初终值。细胞形态学参数变化率如式 (2) 所示^[17]。

$$R = \frac{4\pi A}{L^2} \quad (1)$$

$$S = \frac{X_0 - X_1}{X_0} \quad (2)$$

式中: L 为细胞周长, μm ; A 为细胞面积, μm^2 ; R 为细胞圆度; S 为细胞形态学参数变化率 (当量直径、周长、面积、圆度), %; X_0 为细胞干燥前细胞各形态学参数的初值; X_1 为干燥后细胞各形态学参数的终值。

1.2.5 真空冷冻干燥条件实验参数的选取

冻结终温应比共晶点低 5~10 °C、升华干燥温度应该在共融点温度附近^[18]。为了保护玉米种子的活性, 解析干燥温度不应超过 45 °C。因此本研究以预冻方式为速冻, 冻结终温为 -25 °C, 冻结 1 h, 真空度为 10 Pa, 升温速率设置为 0.5 °C/min, 升华干燥温度为 5 °C 持续 6 h, 解析干燥温度为 40 °C 停留 3 h 对玉米种子切片进行冻干处理 (如图 1 所示), 并将其作为对照组。分别在冻结终温 (-35、-32.5、-30、-27.5、-25 °C)、升华干燥温度 (1、3、5、7、9 °C) 和解析干燥温度 (35、37.5、40、42.5、45 °C) 下对玉米种子切片进行单因素实验, 探究各真空冷冻干燥条件对玉米种子的细胞形态学参数和含水率的变化规律。

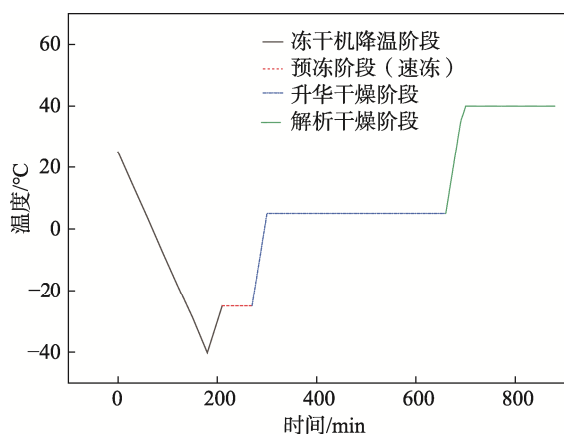


图 1 真空冷冻干燥工艺
Fig.1 Vacuum freeze-drying process

1.2.6 干燥模型的评价指标

决定系数 R^2 表示预测值和实验值相关程度, R^2 越接近于 1 表明所拟合后的方程式精准度越高。误差平方和 (F_{SSE}) 和均方误差的根 (F_{RMSE}) 如式 (4)、(5) 所示, 越接近于 0, 表明模型拟合越好^[19]。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y - y_0)(y - y_1)}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (y - y_0)^2][\sum_{i=1}^N (y - y_1)^2]}} \quad (4)$$

$$F_{\text{SSE}} = \sum_{i=1}^N (y_0 - y_1)^2 \quad (5)$$

$$F_{\text{RMSE}} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_0 - y_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中: y 为细胞的结构参数; y_0 为细胞结构参数的预测值; y_1 为细胞结构参数的实测值; N 为实验总次数。

1.3 数据处理

上述实验测定除特殊说明外均重复 3 次并取平均值, 实验结果以平均值±标准差表示。对不同冻干条件下玉米种子切片干燥后的含水率, 采用 spss26 采用单因素方差分析 (ANOVA) 进行 Duncan 多重检验, $P < 0.05$ 表示差异显著。用 origin2020 对所得数据进行频数分布处理并作图。用 Matlab2020 计算细胞圆度、细胞形态学参数变化率, 以建立干燥拟合模型及验证。

2 结果与分析

2.1 冻结终温对玉米种子切片的影响

冻结会使细胞内部产生结晶, 冰晶过多或过大会对细胞造成不同程度的机械损伤^[20], 冻结终温的选取对玉米种子干燥后的品质至关重要。由于冻结终温温度一般比共晶点低 5~10 °C, 在其他冻干条件不变的情况下, 分别在 -35、-32.5、-30、-27.5、-25 °C 的冻结终温下对玉米种子细胞干燥前后的形态学参数分布频数进行了统计, 如图 2 所示。实验中玉米种子切片的初始湿基质量含水率为 (37.6±0.2) %。不同冻结终温下所对应的玉米种子切片含水率经 spss 统计分析后如表 1 所示。

表 1 不同冻结终温下玉米种子切片的含水率
Tab.1 Moisture content of corn seed slices at different freezing end temperature

冻结终温/°C	含水率/%
-35	13.71±2.47 ^a
-32.5	13.56±2.89 ^b
-30	13.3±3.15 ^c
-27.5	13.05±2.63 ^d
-25	12.81±2.15 ^e

注: 字母相同表示在 Duncan 多重比较检验法中, $P > 0.05$, 差异无统计学意义, 下同。

由图 2 可知, 随着冻结终温的降低, 玉米种子细胞形态学参数变化率逐渐增大, 细胞当量直径的变化率为 9.20%~12.31%, 细胞周长和面积变化率分别为 8.40%~11.31% 和 17.12%~23.56%, 细胞圆度干燥前后变化不大 (1.78%~3.12%)。由表 1 可知, 改变冻结终

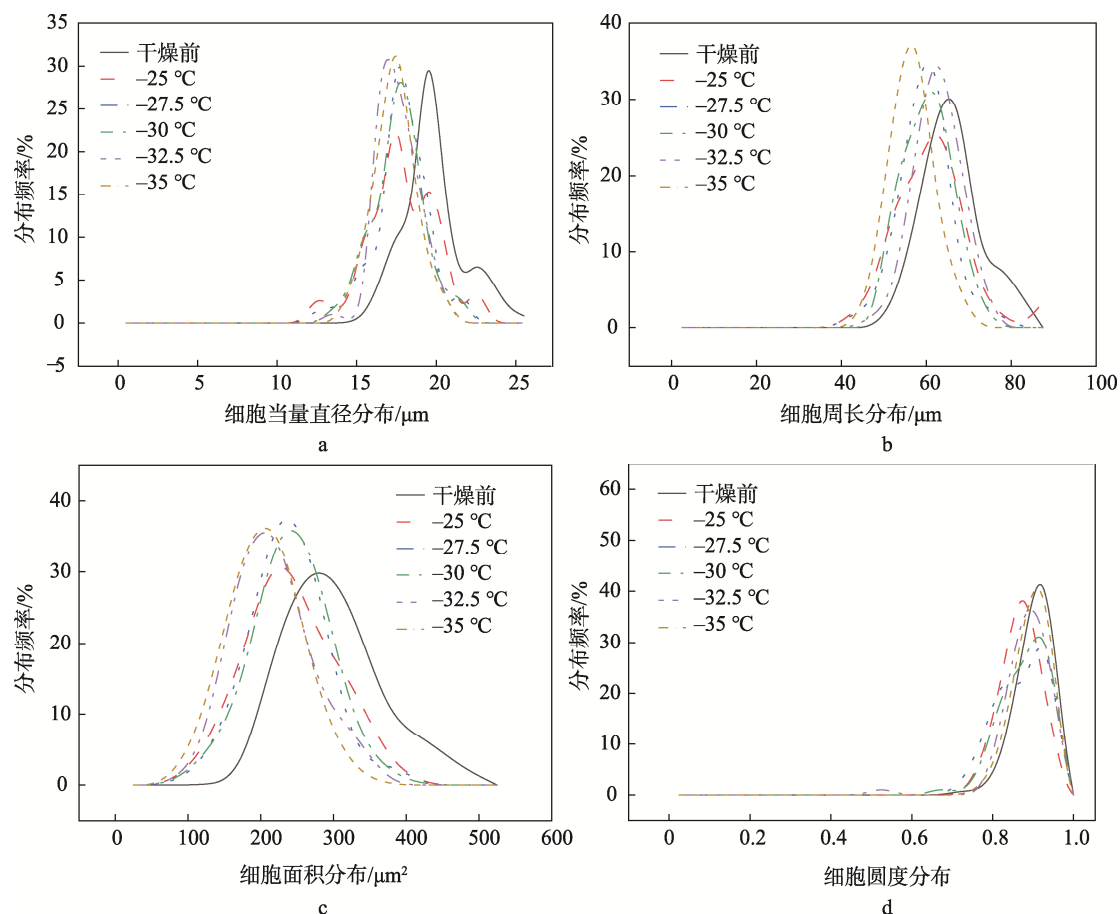


图 2 不同冻结终温下细胞形态学参数分布
Fig.2 Distribution of morphological parameters of cells at different freezing end temperature

温所得干燥后玉米种子切片含水率的差异有统计学意义 ($P < 0.05$), 且细胞形态学参数变化率与含水率会随冻结终温的降低而增大。在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时细胞形态学参数变化率最小, 且含水率最低。这主要是由胞内冰晶引发的溶质损失所导致的, 冻结时间恒定时, 冻结温度的降低会使降温速率略微提高, 导致过冷度的增大, 细胞内的水分相变时间短产生了大量细小的冰晶, 因此对细胞壁造成了略微的机械损伤, 导致胞内溶质的流失引起细胞形态学参数的变化^[21], 同时细胞组织间的自由水含量增大。由细胞圆度的变化率小于 4% 可知, 细胞形状依然接近圆形^[16], 此时细胞受到的机械损伤较少。说明玉米种子细胞在该冻结终温范围内的状态较为稳定。

2.2 升华干燥温度对玉米种子切片的影响

升华干燥主要是利用冰在压强低于 610.62 Pa 时, 对冰加热水会直接变成气态排放出去, 这一过程可以去除约 90% 的自由水和少量结合水。因此升华干燥温度在真空冷冻干燥过程中极为重要。在冻结终温为 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和解析温度为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 分别在 1、3、5、7、9 的升华干燥温度下对玉米种子细胞干燥前后的形态

学分布频数进行了统计, 见图 3。实验中不同升华干燥温度下的样品含水率如表 2 所示。

由图 3 可知, 随着升华干燥温度的升高, 玉米种子细胞的当量直径、周长、面积变化率和含水率呈先减少后增大的趋势。细胞直径变化率为 11.20%~26.46%, 细胞周长和面积变化率分别为 8.40%~26.92% 和 17.12%~46.64%, 细胞圆度变化率干燥前后变化不大, 为 0.74%~3.12%。由表 2 可知, 升华干燥温度对干燥后玉米种子切片含水率的影响差异显著 ($P < 0.05$), 且含水率会随升华干燥温度的升高呈现先减少后增大的趋势。在其他冻干条件不变时, 当升华干燥温度小于共融点时, 升华干燥温度的升高让冰能更快地以水蒸气的方式去除内部的自由水, 细胞形态学参数变化率和含水率随升华干燥温度的升高而减少。当升华干燥温度大于共融点时, 冰会逐渐先融化成水再以水蒸气的形式析出, 这一过程导致升华干燥所需要的升华潜热增大, 使得水分不能尽快去除, 导致干燥后的含水率增多^[22], 引起细胞发生大量的坍塌和软化。因此含水率和细胞形态学参数变化率随升华干燥温度的升高而增大。在升华干燥温度为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 细胞形态学参数变化率较小, 圆度变化低于 4%, 含水率最低, 干燥效果最好。

表2 不同升华干燥温度下玉米种子切片的含水率
Tab.2 Moisture content of corn seed slices at different sublimation drying temperature

升华干燥温度/°C	含水率/%
1	16.81±3.08 ^a
3	14.53±2.72 ^b
5	12.81±2.15 ^c
7	14.92±2.38 ^d
9	18.61±2.75 ^e

2.3 解析温度对玉米种子切片的影响

解析干燥过程是在低真空的条件下对已经结束升华干燥的玉米种子切片进行升温加热,主要使玉米种子内部的结合水以水蒸气的形式去除。在冻结终温为-25℃、升华干燥温度为5℃下,对玉米种子细胞分别在解析温度35、37.5、40、42.5、45℃下干燥前后的形态学分布频数进行了统计,见图4。实验中不同解析干燥温度的样品含水率经spss统计分析后如表3所示。

由图4可知,随着解析干燥温度的升高,干燥

后的玉米种子细胞的当量直径、周长、面积变化率呈先减少后增大的趋势。细胞当量直径的变化率为9.20%~19.88%,细胞周长的变化率为8.40%~18.61%,细胞面积的变化率为17.12%~32.9%。随着解析干燥温度的升高,细胞圆度变化率(1.26%~5.3%)逐渐增大。由表3可知,解析干燥温度对干燥后玉米种子切片含水率有显著差别($P<0.05$)。在一定范围内,解析干燥温度的升高会导致干燥后含水率和细胞形态学参数变化率呈现先减少后增大的趋势。这可能是由于结合水解析自由水的速率不同引起的。在解析干燥温度时间一定时,当结合水解析自由水的速率较慢时,自由水含量较少,自由水蒸发获得的汽化潜热逐渐增大,含水率会逐渐减少。因此细胞内外的渗透压减少,此时细胞的当量直径、周长、面积变化率会减少。而随温度升高结合水的解析速率较大时,结合水大量解析为自由水,导致自由水蒸发需要的汽化潜热略大于所获得的,因此细胞内部含水率和形态学参数变化率会略微增大^[23]。结合水的逐渐析出会使得细胞坍塌和软化有所增加,细胞圆度在45℃时大于4%,细胞形态此时接近于正五边形。说明解析温度过高会使得玉米种子细胞形变较大,状态不稳定。因此在解析干燥温度为40℃时,

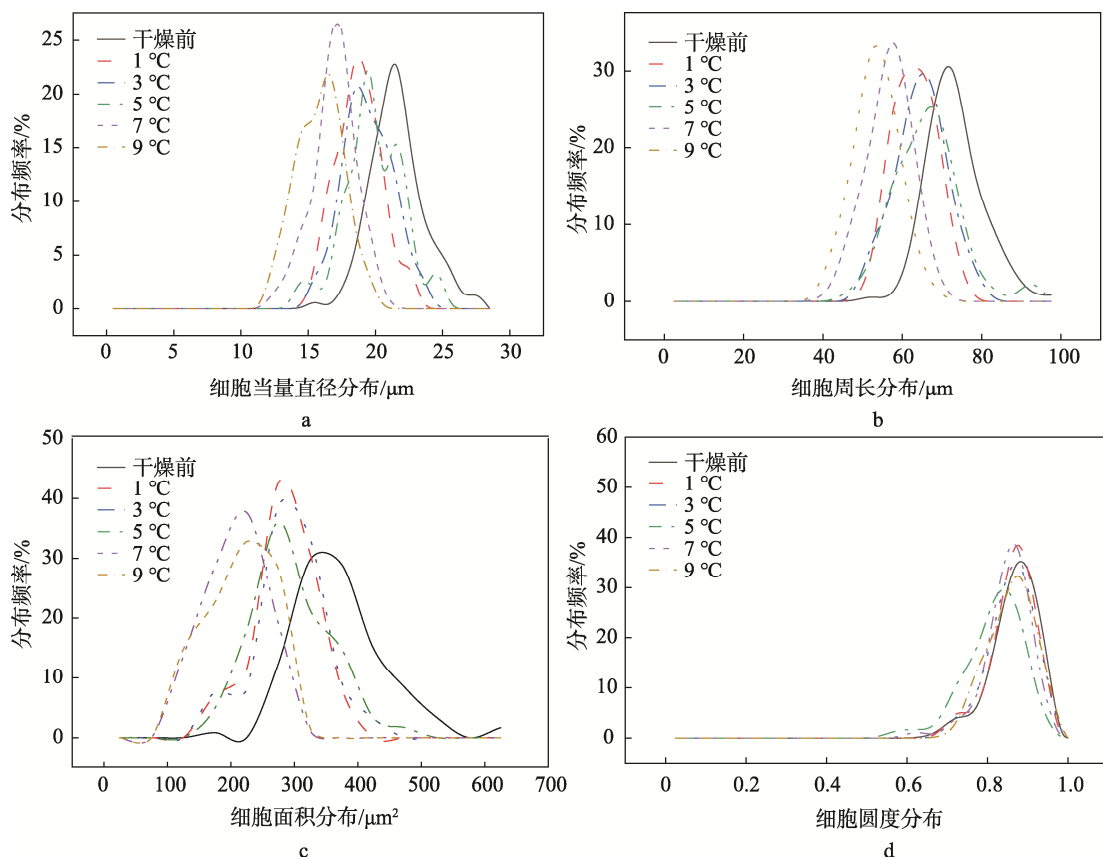


图3 不同升华干燥温度下细胞形态学参数分布
Fig.3 Distribution of morphological parameters of cells at different sublimation drying temperature

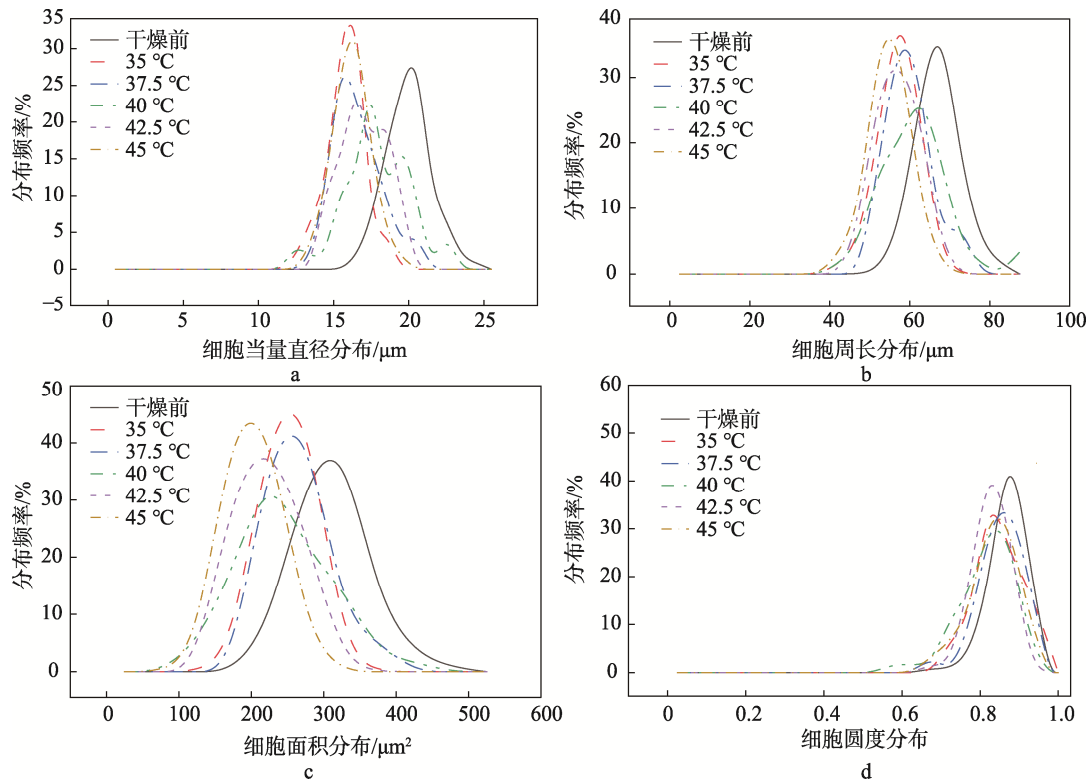


图 4 不同解析干燥温度下细胞形态学参数分布
Fig.4 Distribution of morphological parameters of cells at different parse drying temperature

表 3 不同解析干燥温度下玉米种子切片的含水率 Tab.3 Moisture content of corn seed slices at different parse drying temperature	
解析干燥温度/℃	含水率/%
35	18.81±0.13 ^a
37.5	15.91±0.08 ^b
40	12.81±0.04 ^c
42.5	14.72±0.05 ^d
45	17.61±0.16 ^e

细胞的当量直径、周长、面积变化率最小, 含水率最低, 干燥后的效果最好。

综合实验结果可得, 在冻结终温为-25 °C(1 h)、升华干燥温度为 5 °C(6 h)、解析温度为 40 °C(3 h)时, 玉米种子的含水率(12.81%)最低, 细胞的当量直径(9.20%)、周长(8.40%)、面积(17.68%)变化率最小。圆度(1.78%)小于 4%时, 细胞状态较为稳定, 干燥效果最好。玉米种子干燥前后不同区域的微观图像如图 5 所示。

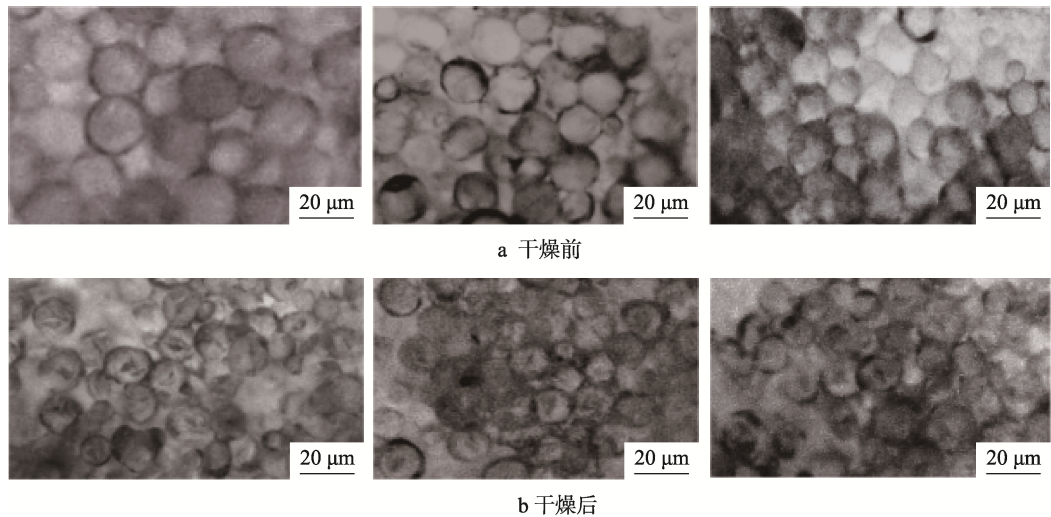


图 5 玉米种子细胞不同区域干燥前后对比 (放大倍数为 100 倍)
Fig.5 Comparison of corn seed cells before and after drying in different areas (100x magnification)

3 模型的建立与评价

为了揭示真空冷冻干燥过程中不同冻干条件与玉米种子细胞结构变化的关系,本文基于Matlab建立不同冻干条件对细胞的当量直径、周长,面积的相关数学模型,并进行评价分析。从上述的分析中可以发现,各参数因素和细胞变化率服从非线性关系,为了使方程简化,采用二次多项式模型表示:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (6)$$

式中: y 为细胞结构的变化率; x 为不同的影响因素; a 、 b 、 c 为系数。拟合结果如图6所示,求解

各模型结果如表4所示。

由表4可知, Y 与 x 的决定系数 R^2 在 0.9 以上, F_{SSE} 和 F_{RSME} 均接近 0, 说明该数学模型的拟合结果较好^[24]。 a 表示冻干条件对玉米种子形态学变化的相关度, 且相关度从大到小排序为升华干燥温度、解析干燥温度、冻结终温。这表明升华干燥温度相较于冻结终温和解析干燥温度对玉米种子细胞微观结构变化的影响最大, 冻结终温影响幅度最小, 这说明真空冷冻干燥过程中, 升华干燥阶段去除的自由水的过程至关重要^[23]。且从 R^2 来看, 升华干燥温度 (0.957 7) 和解析干燥温度 (0.963 2) 对细胞周长的变化拟合效果最好, 冻结终温对细胞当量直径的变化拟合精度较高 (0.999 6)^[13-14]。

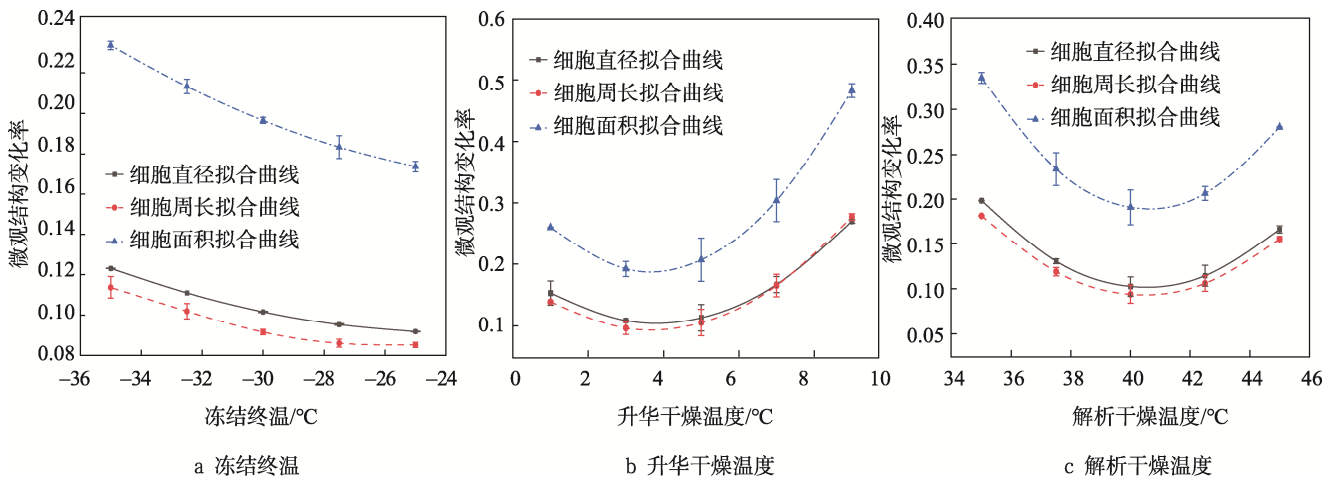


图6 不同真空冷冻干燥条件对细胞形态学参数变化率的拟合曲线
Fig.6 Fitting curves of the rate of change of cell morphological parameters under different vacuum freeze-drying conditions

表4 干燥模型的结构与评价
Tab.4 Structure and evaluation of drying model

冻干条件	结构参数	a	b	c	R^2	F_{SSE}	F_{RSME}
冻结终温	当量直径/ μm	0.000 228 6	0.010 59	0.2139	0.999 6	2.286E-07	0.000 338 1
	周长/ μm	0.000 386 2	0.019 97	0.343	0.966 6	2.507E-05	0.003 54
	面积/ μm^2	0.000 283 7	0.011 04	0.2725	0.975 4	5.737E-05	0.005 356
升华干燥温度	当量直径/ μm	0.006 052	-0.046 14	0.1926	0.949 6	0.000 873 7	0.020 9
	周长/ μm	0.006 334	-0.046 32	0.1785	0.957 7	0.000 907 6	0.021 3
	面积/ μm^2	0.010 11	-0.073 63	0.321	0.953 2	0.002 614	0.036 15
解析干燥温度	当量直径/ μm	0.003 184	-0.257 9	5.326	0.958 4	0.000 269	0.011 6
	周长/ μm	0.002 974	-0.240 5	4.956	0.963 2	0.000 200 9	0.010 02
	面积/ μm^2	0.004 671	-0.379 1	7.883	0.944 2	0.000 816 2	0.020 2

4 结语

本文对玉米种子在真空冷冻干燥条件下的细胞形态学参数和含水率的变化进行研究,发现在冻结终温为 -25°C (1 h)、升华干燥温度为 5°C (6 h)、解析干燥温度为 40°C (3 h)时,玉米种子的细胞形态学参数变化最低,含水率最小。在一定范围内,冻结终温的降低会导致细胞形态学参数变化率和含水率的增大。升华干燥温度和解析干燥温度的升高会使玉米种子细胞的形态学变化率和含水率先减少后增大的变化趋势。玉米种子的细胞圆度变化在4%附近,干燥后细胞状态较为稳定,从微观角度印证了冻干技术处理下玉米种子的品质较好。各真空冷冻干燥条件与细胞形态学参数变化率的二次多项式拟合模型的决定系数均在0.9以上。表明该模型可预测玉米种子真空冷冻干燥过程中细胞形态学参数率,有助于控制干燥后玉米种子的品质,以及为后续玉米种子真空冷冻干燥数学模型的建立提供依据。

参考文献:

- [1] 佚名. 2022/23 年度粮食产量预计[J]. 养猪, 2022(3): 6.
- [2] 周大朋, 穆月英. 我国玉米产业发展现状及对策[J]. 河南农业, 2022(22): 53-54.
- [3] 葛玉姣. 玉米种子干燥过程中皮层阻力影响的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [4] 丁俊雄, 吴小华, 王鹏, 等. 干燥技术在果蔬中的应用综述[J]. 制冷与空调, 2019, 19(8): 23-27.
- [5] CIURZYŃSKA A, LENART A. Freeze-Drying Today Applications and Properties of Freeze-Dried Food Products[J]. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 2011, 61(3): 165-171.
- [6] WANG H, LIU J S, MIN W H, et al. Changes of Moisture Distribution and Migration in Fresh Ear Corn During Storage[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(11): 2644-2651.
- [7] MUSIELAK G, MIERZWA D, KROEHNKE J. Food Drying Enhancement by Ultrasound a Review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 56: 126-141.
- [8] SUN Q, ZHANG M, MUJUMDAR A S. Recent Developments of Artificial Intelligence in Drying of Fresh Food: A Review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(14): 2258-2275.
- [9] 杨颖, 李夔宁, 童明伟. 小麦种子的真空冷冻干燥处理[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2002, 25(8): 61-64.
- [10] 张子涵. 蚕豆在冷冻及干燥过程的传热传质分析[D]. 天津: 天津商业大学, 2019.
- [11] JIANG G L, TOWNSEND W, SISMOUR E, et al. A Study of Application and Comparison of Thermal Drying and Freeze Drying of Fresh Edamame Seeds in the Analysis of Seed Composition[J]. Agronomy, 2022, 12(9): 1993-1994.
- [12] ABORUS N E, ŠAPONJAC V T, ČANADANOVIĆ-BRUNET J, et al. Sprouted and Freeze-Dried Wheat and Oat Seeds - Phytochemical Profile and in Vitro Biological Activities[J]. Chemistry & Biodiversity, 2018, 15(8): 1800119.
- [13] 张芳, 张永茂, 张海燕, 等. 蚕豆冷冻-真空干燥工艺的优化[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(12): 135-139.
- [14] 诸凯, 李言洁, 王雅博, 等. 蚕豆种子脱水过程中细胞层面各相态水分流动及形变特征[J]. 制冷学报, 2020, 41(4): 144-150.
- [15] 张哲, 刘卫宾, 严雷, 等. 基于 BP 神经网络模型对果蔬热物性的预测[J]. 食品科技, 2020, 45(11): 28-35.

- BP Neural Network Model[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(11): 28-35.
- [16] 常剑, 杨德勇, 路倩倩, 等. 热风干燥对果蔬薄壁组织细胞结构的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 262-268.
- CHANG J, YANG D Y, LU Q Q, et al. Effect of Hot-Air Drying on Cell Structure of Fruit and Vegetable Parenchyma[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(14): 262-268.
- [17] 张哲, 吴巧燕, 陈佳楠, 等. 降温速率对苹果细胞结构的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(8): 152-157.
- ZHANG Z, WU Q Y, CHEN J N, et al. Microscopic Experimental Study on the Influence of Different Cooling Rates on the Structure of Apple Cells[J]. Food & Machinery, 2022, 38(8): 152-157.
- [18] 陈佳楠. 菠萝切片真空冷冻干燥工艺研究及优化[D]. 天津: 天津商业大学, 2022.
- CHEN J N. Research and Optimization of Vacuum Freeze-Drying Process of Pineapple Slices[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2022.
- [19] 张付杰, 陶欢, 易俊洁, 等. 辣椒微波热风耦合干燥模型及品质研究[J]. 包装与食品机械, 2022, 40(6): 45-53.
- ZHANG F J, TAO H, YI J J, et al. Study on Microwave Hot Air Coupled Drying Model and Quality of Pepper[J]. Packaging and Food Machinery, 2022, 40(6): 45-53.
- [20] LEWICKI P P, PAWLAK G. Effect of Drying on Micro-Structure of Plant Tissue[J]. Drying Technology, 2003, 21(4): 657-683.
- [21] ALABI K P, ZHU Z W, SUN D W, et al. Transport Phenomena and Their Effect on Micro-Structure of Frozen Fruits and Vegetables[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 101: 63-72.
- [22] KOBAYASHI R, SUZUKI T. Effect of Super-Cooling Accompanying the Freezing Process on Ice Crystals and the Quality of Frozen Strawberry Tissue[J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 99: 94-100.
- [23] 马青. 冻干保存中相变传热过程的数值仿真研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- MA Q. Numerical Simulation of Phase Change Heat Transfer Process in Freeze-Drying Storage[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [24] 杨佳琪. 果蔬干燥过程微观组织结构变化的实验研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2020.
- YANG J Q. Experimental Study on Microstructure Changes of Fruits and Vegetables during Drying[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2020.