doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.13.033

基于 X 射线图像特征的核桃挤压破壳高露仁检测装置设计与试验

李丽霞[1,2]　陈祥浩[1]　陈申奥[1]　万水龙[1]　曾庆宇[1]　刘涛溢[1]　王俊伟[1]

（1.昆明理工大学现代农业工程学院，昆明 650500；2.云南省智能农业工程技术与装备国际联合实验室，昆明 650500）

摘要：核桃破壳过程中高露仁的精准检测对优化破壳工艺具有重要意义，传统方法依赖人工检测，效率低且准确性不稳定。本文聚焦核仁结构变化，提出一种基于 X 射线图像的高露仁检测方法。搭建了集成力学加载控制和 X 射线成像的可旋转试验平台，通过设定加载速度与变形量阈值控制破壳，并利用旋转装置实现双视角成像；采用图像处理与 YOLO v8n－seg－DN 模型对核仁结构进行识别与分割，并提取最大核仁区域面积占比（P_{max}）与相对核仁块数指数（RI_{kbc}）两项图像特征；对图像特征与高露仁率进行相关性分析；采用岭回归方法建立图像特征与高露仁率之间的相关关系；通过三因素五水平中心复合设计试验，分析加载速度（10～50 mm/min）、挤压变形量（5～9 mm）、核桃等效直径对高露仁率的影响。结果表明：试验平台稳定可控，速度与变形量平均误差控制在 5% 以内；P_{max} 与高露仁率呈显著正相关（相关系数为 0.931），RI_{kbc} 与高露仁率呈显著负相关（相关系数为 －0.926），P_{max} 和 RI_{kbc} 之间存在显著共线性（方差膨胀因子为 13.067）；模型验证集 R^2 为 0.92、$RMSE_p$ 为 8.89%、RPD 为 3.46，表现出较高的精度；加载速度、挤压变形量和核桃等效直径对高露仁率具有显著负向影响，且模型值与实测值的变化趋势总体一致，表明建立的模型能够有效替代传统的检测方法；在加载速度为 10～30 mm/min、挤压变形量为 5～6 mm、核桃等效直径为 33～35 mm 时，高露仁率基本保持在 70% 以上，为核桃低损伤破壳工艺优化提供了一种新的技术路径。

关键词：核桃破壳；X 射线成像；图像特征；共线性；岭回归模型；高露仁率

中图分类号：S233.5　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)13-0386-10　　**OSID**：

Design and Experiment of Walnut Compression Shell-breaking High-grade Kernels Detection Device Based on X-ray Image Features

Li Lixia[1,2]　Chen Xianghao[1]　Chen Shen'ao[1]　Wan Shuilong[1]　Zeng Qingyu[1]　Liu Taoyi[1]　Wang Junwei[1]

(1. *Faculty of Modern Agricultural Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*
2. *Yunnan International Joint Laboratory of Intelligent Agricultural Engineering Technology and Equipment*, *Kunming* 650500, *China*)

Abstract: The precise detection of high-grade kernels during walnut shell-breaking is significant for optimizing the shelling process. Traditional methods rely on manual inspection, which is inefficient and has unstable accuracy. Focusing on internal structural changes, an X-ray imaging-based method for detecting high-grade kernels was proposed. A rotating experimental platform integrating mechanical loading control and X-ray imaging was established. The shelling process was controlled by adjusting the loading speed and deformation threshold, and dual-view imaging was enabled via a rotating device. Then image processing and the YOLO v8n－seg－DN model were applied to detect and segment the kernels, and two image features were extracted from the segmented regions: the maximum kernel area proportion (P_{max}) and the relative kernel block count index (RI_{kbc}). Correlation analysis was performed between the image features and the proportion of high-grade kernels. Ridge regression was employed to predict the proportion of high-grade kernels from the extracted image features. A three-factor five-level central composite design experiment was conducted to evaluate the effects of loading speed (10～50 mm/min), extrusion deformation (5～9 mm), and walnut equivalent diameter on high-grade kernel proportion. The results showed that the experimental platform was stable and controllable, with the average errors of loading speed and deformation within 5%. P_{max} was significantly positively correlated with high-grade

收稿日期：2026－01－05　修回日期：2026－02－02

基金项目：云南省基础研究专项面上项目（202401AT070383）

作者简介：李丽霞（1983—），女，副教授，博士，主要从事农产品加工与检测技术研究，E-mail：lilixia2012@kust.edu.cn

kernel proportion (the correlation coefficient was 0.931), RI_{kbc} was significantly negatively correlated (the correlation coefficient was −0.926), and there was significant collinearity between P_{max} and RI_{kbc} (the VIF was 13.067). The model validation set yielded R^2 of 0.92, $RMSE_p$ of 8.89%, and RPD of 3.46, indicating high accuracy. Loading speed, extrusion deformation, and walnut equivalent diameter all had significant negative effects on high-grade kernel proportion, and the predicted values closely matched the measured values, demonstrating that the developed model can effectively substitute traditional detection methods. When the loading speed was 10 ~ 30 mm/min, the extrusion deformation was 5 ~ 6 mm, and the walnut equivalent diameter was 33 ~ 35 mm, the proportion of high-grade kernel remains above 70%, providing a technical approach for optimizing walnut low-damage shelling processes.

Key words: walnut shell-breaking; X-ray imaging; image features; collinearity; ridge regression model; high-grade kernel proportion

0　引言

核桃作为我国重要的经济林果，采后加工环节中“破壳取仁”的效果直接关系到产品品质与经济价值，其本质要求是在高效破壳条件下最大限度保持核仁完整性[1]。其中，高露仁指破壳后结构保持较完整的核仁，根据核仁完整性等级划分[2]，高露仁包括整仁和半仁，其质量占总核仁质量的百分比即为高露仁率，是评价破壳工艺参数合理性与破壳装置性能的重要指标[3]。然而，高露仁的传统测定方法通常依赖人工分级和称量[4]，过程繁琐、效率低下，且在分选过程中可能会引入二次损伤。此外，该方法受操作人员经验影响较大，易导致测定结果的稳定性和一致性较差。

为提高核仁完整性，国内外学者围绕核桃的物理和力学特性等关键影响因素进行了深入研究。研究表明，核桃尺寸显著影响壳体的承载能力，且与挤压变形量及破壳能量呈显著正相关，进而影响破壳率与核仁完整性[5-6]；核桃壳不同部位的刚度和壳厚影响其破壳时的临界力，壳厚越大，失稳的临界压力越大[7-8]；干核桃与鲜核桃在破壳力、含水率和核桃仁力学特性上存在显著差异，含水率偏高与偏低均不利于核仁完整性保持[9-10]；加载方向对核桃的破壳力学响应及核仁损伤具有显著影响，沿横径方向加载更易破壳，且对核桃仁损伤更小[5,11-12]；加载速度增加会导致核桃破损力升高，提高破壳率，但过高的加载速度会降低整仁率[13]；此外，核仁损伤与压缩量之间存在非线性权衡关系：核仁损伤随压缩量增加而加剧，但存在一个既能保证破壳效果，又能控制核仁损伤的压缩量区间[14]。尽管上述研究不断深入，但研究多集中于破壳力学规律或核桃外观破碎，而高露仁的测定仍主要依赖壳仁分离后的人工分级和称量，一定程度上制约了破壳工艺条件的改进及装备参数的优化。

X 射线成像技术在农产品品质评价中的应用日益广泛，为核桃内部检测提供了新的技术支撑[15]。该技术能够将核桃内部各组织的密度差异以灰度图像的形式展现，且已在农产品内部结构的表征与定量分析中展现出独特优势[16-17]。例如，分析 X 射线图像中的核桃边界轮廓与核仁区域面积比，可实现核仁干瘪程度的检测与分级[18]；基于 X 射线图像阈值分割，分析干桂圆果肉区域的形状和灰度特征，可准确预测果肉质量[19]；类似地，对柚子 X 射线图像进行阈值分割，提取二维区域面积比与灰度值对数和的图像指标，亦可建立其与柚子体积可食率的关系[20]。尽管 X 射线成像在农产品内部结构分析中潜力巨大，但在核桃破壳领域仍面临诸多挑战。具体而言，如何有效利用 X 射线获取核仁完整性信息并将其用于破壳工艺优化，是当前亟待解决的关键问题。

综上所述，本文以云南深纹核桃为研究对象，融合挤压力学加载与 X 射线成像技术搭建试验平台，用以获取破壳过程中力学数据与核仁结构图像；通过图像处理技术实现核仁区域分割，提出最大核仁区域面积占比(P_{max})与相对核仁块数指数(RI_{kbc})图像特征指标，表征核仁结构完整性；随后，引入机器学习回归框架对图像特征与高露仁率的相关关系进行建模。在此基础上，以挤压变形量、加载速度和核桃等效直径为关键试验因素，开展三因素五水平中心复合设计试验，评估模型在多参数组合条件下的适用性，分析不同试验条件下高露仁率的变化规律。

1　核桃样本与物理特性分析

采用云南深纹核桃作为试验样本，随机选取 20 枚核桃进行烘干处理，测定其平均含水率(干基)为 3.96%。为确保所选样本能够代表总体的外形特征，从同批次中随机抽取 400 枚核桃，进行外形尺寸分析。核桃的三径尺寸包括横径 D、棱径 W 和纵径 L，如图 1 所示。所有三径尺寸均使用高精度游标卡尺测量，以保证数据准确性与一致性；等效直径

D_p计算式为[21]

$$D_p = \sqrt[3]{LWD} \tag{1}$$

各尺寸参数的统计特征如图 2 所示，横径均值为 37.6 mm，方差为 4.13 mm^2，表明横径在样品间分布集中；棱径的分布与横径相似；纵径的数值区间为 33.76～45.91 mm，变异系数为 5.30%；等效直径方差为 2.76 mm^2，变异系数约 4.63%，其离散程度与三径相近。等效直径由三径计算得到，能够减少形状差异和测量误差，作为后续研究中的代表性参数。

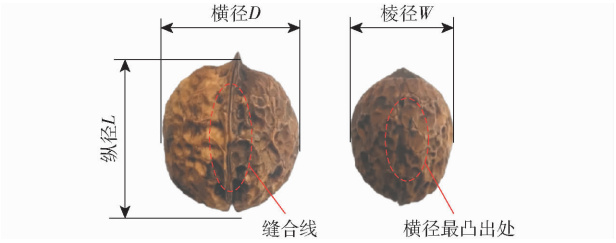


图 1 核桃尺寸特征

Fig. 1 Size characteristics of walnuts

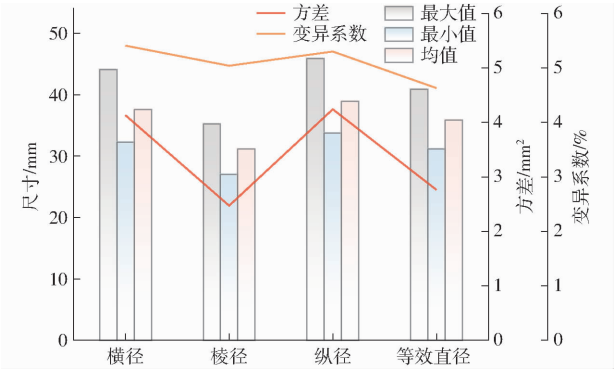


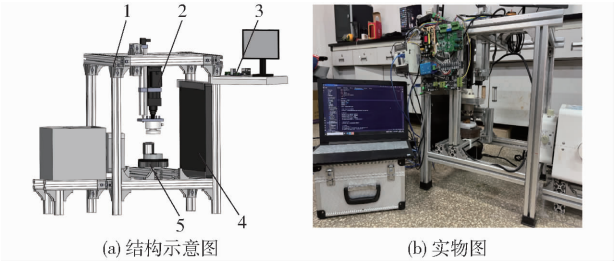
图 2 尺寸参数统计

Fig. 2 Statistical analysis of size parameters

2 试验装置设计

2.1 整体设计

试验装置集核桃挤压破壳、X 射线成像与图像处理于一体，在封闭铅箱内运行，如图 3 所示，主要由机架、挤压传感装置、样品固定与旋转装置、X 射线成像系统和控制系统组成。



(a) 结构示意图 (b) 实物图

图 3 试验系统

Fig. 3 Experimental system

1. 机架 2. 挤压传感装置 3. 控制系统 4. X 射线成像系统 5. 样品固定与旋转装置

2.2 工作原理

以步进电动缸提供可控挤压加载，通过力、位移传感器结合 PLC 实现加载过程中变形量的采集与阈值闭环控制，加载结束后，系统通过 X 射线结合转盘旋转，实现双视角成像；上位机在同一试验循环内完成顺序逻辑控制指令下发和数据读取与处理。试验时，样品固定在转盘中部，步进电机在脉冲驱动下经减速与滚珠丝杠将旋转运动转换为直线位移，加载速度由脉冲频率确定。力、位移传感信号经采集模块数字化写入 PLC 寄存器，上位机通过 Modbus 协议读取并换算挤压力、位移与变形量，当变形量达到设定阈值时下发指令控制电动缸复位。复位后，上位机触发微焦点 X 射线源与平板探测器完成成像，图像经 DICOM 协议传输至上位机；转盘通过步进电机与齿轮啮合实现精确旋转 180°，再次触发 X 射线成像系统获取图像。完成双视角成像后，上位机对图像进行预处理，并采用分割模型完成核仁结构分割与指标计算。

2.3 挤压传感装置设计

挤压传感装置如图 4 所示，由内部集成齿轮减速装置与滚珠丝杠的步进电动缸驱动（减速比 1∶4，导程 5 mm，最大推力 3 000 N），同时配备力传感器（最大承载力 5 000 N，精度 0.03%）和位移传感器（最大伸长量 200 mm，线性精度 0.05%）采集压缩过程中的力和行程变化。

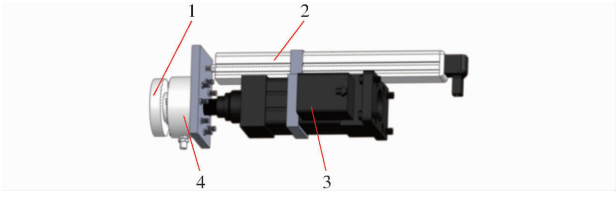


图 4 挤压传感装置

Fig. 4 Compression sensing device

1. 上挤压板 2. 位移传感器 3. 力传感器 4. 步进电动缸

(1) 挤压加载速度

在挤压加载过程中，步进电动缸的线性输出速度由脉冲驱动信号决定。电动缸内置步进电机在接收控制器输出的脉冲序列后，以固定步距角旋转，经齿轮减速装置传递至滚珠丝杠，实现旋转运动向直线运动的转换。电动缸线速度 v_d 计算式为

$$v_d = \frac{f_d L_d}{N_d R_d} \tag{2}$$

式中 f_d——电动缸步进脉冲频率，Hz

L_d——丝杠导程，mm/r

N_d——电机每转步数，步/r

R_d——电动缸齿轮减速比

在线性参数 L_d、N_d、R_d 给定的条件下，线速度 v_d

与脉冲频率 f_d 呈确定的线性对应关系。因此，加载速度的设定具有确定性与可重复性。

(2)模拟信号转换与变形量

力与位移数据的实时采集依赖于两类传感器的协同工作。力信号经转换模块转换为 0 ~ 10 V 电压信号，位移信号则直接以同一量程的电压形式输出。两路信号均进入模拟量采集模块，并存储在 PLC 寄存器中。真实的力与位移物理量需通过量程系数与控制位进行标定换算，计算公式分别为

$$x = \frac{20x_d}{10^h} \tag{3}$$

$$F = \frac{5 \times 9.795\,4F_f}{10^h} \tag{4}$$

式中　x——位移，mm

F——挤压力，N

x_d——寄存器中位移的原始数据

F_f——寄存器中力的原始数据

h——高位十进制控制位

此外，为更准确地反映加载过程中试样的实际挤压变形量，引入变形量 s 参数，将挤压过程中挤压力 F 最后一次为 0 的时刻记为 t_0，此刻 $F=0$，$s=0$，并从该时刻起累积的位移值即为变形量 s。其计算公式为

$$s(t) = \begin{cases} 0 & (t \leqslant t_0) \\ x(t) - x(t_0) & (t > t_0) \end{cases} \tag{5}$$

2.4　样品固定与旋转装置设计

样品固定与旋转装置如图 5 所示，其采用外齿回转支撑转盘(模数 2 mm，齿数 70)，通过外啮合小齿轮(模数 2 mm，齿数 12)及联轴器与步进电机相连，且转盘中部设有带通孔槽的 EPE 泡沫，用于稳定核桃样品并防止核桃外壳脱落后产生堆积干扰成像。在旋转控制中，转盘的角位移与角速度由步进电机驱动参数决定。步进电机在接收控制器输出的脉冲序列后，以固定步距角旋转，经小齿轮与外齿回转支撑转盘啮合传递，实现 0° ~ 360°的精确旋转。考虑到转盘齿数 Z_1、小齿轮齿数 Z_2、电机每转步数 N_Z、电机轴角位移 θ_d 及传动比 R_Z 等结构参数，转盘角位移 θ_Z 与角速度 ω_Z 计算式为

$$\theta_Z = \frac{Z_2}{Z_1}\theta_d \tag{6}$$

$$\omega_Z = \frac{2\pi f_Z Z_2}{N_Z R_Z Z_1} \tag{7}$$

式中　f_Z——脉冲频率，Hz

考虑双视角成像过程中两次曝光所需的缓冲时间，转盘旋转角速度设为 6(°)/s，通过反求脉冲数实现等角步进模式的分度定位，并通过设定脉冲频率实现恒速旋转控制。

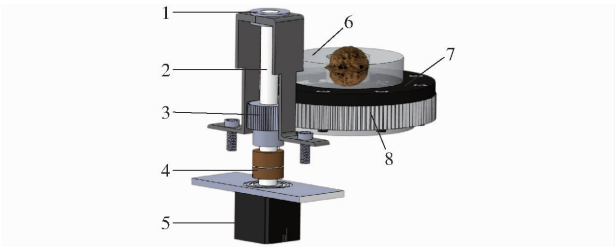


图 5　样品固定与旋转装置结构示意图

Fig. 5　Sample fixation and rotation device

1. 轴承　2. 轴　3. 小齿轮　4. 联轴器　5. 步进电机　6. EPE 泡沫　7. 下挤压板　8. 外齿回转支撑转盘

2.5　X 射线成像系统

X 射线成像系统由便携式 5 kW 微焦点 X 射线源与平板探测器组成，如图 6 所示。X 射线源的曝光电压范围为 40 ~ 125 kV，焦点直径 0.6 mm，最大管电流 100 mA，经过预试验，确定曝光时间 25 ms，曝光电压 44 kV，管电流 80 mA；平板探测器为 NK3543W 型数字平板探测器，成像视野为 350 mm × 430 mm，像素阵列为 2 560 × 3 072，像素间距 139 μm，配备 16 位 AD 转换，空间分辨率 3.6 lp/mm，可实现核桃样品内部结构的高分辨率成像。其成像机理基于 X 射线穿透不同材料时的能量衰减特性。当 X 射线穿透核桃时，由于组织密度分布不均，不同区域对 X 射线的吸收程度存在差异，从而在探测器端形成灰度对比，实现核仁结构可视化。

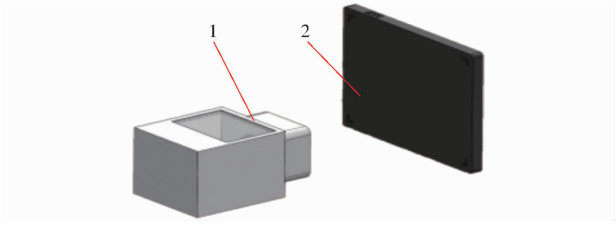


图 6　X 射线成像系统

Fig. 6　X-ray imaging system

1. 微焦点 X 射线源　2. 平板探测器

2.6　系统控制与通讯

为实现系统的逻辑控制与数据采集，设计了以 PLC 控制和上位机协调为核心的控制与通讯架构。如图 7 所示，控制系统包含计算机、PLC、步进电机驱动器、模拟信号采集与转换等模块单元，其中 PLC 负责加载机构与旋转平台的运动控制逻辑与状态量输出；步进电机驱动器接收 PLC 输出的脉冲/方向信号，实现对步进电动缸及转盘步进电机的精确驱动；信号转换与模拟信号采集模块完成力与位移数据转换并将采样结果写入 PLC 寄存器。上位机为独立计算机，运行 Python 程序，通过 RS485 与 PLC 建立通信链路并采用 Modbus 协议进行指令交互与

寄存器数据读取,同时通过 DICOM 协议与 X 射线成像系统进行数据交互,实现成像数据的传输。

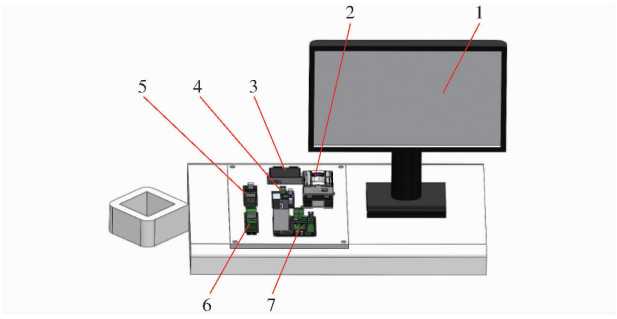


图 7 控制系统

Fig. 7 Control system

1. 计算机 2. PLC 3. 步进电机驱动器 4. 模拟信号转换模块
5. RS485 转 USB 模块 6. 模拟信号采集模块 7. 24V 开关电源

2.7 装置加载控制精度测试与分析

为了评估装置在不同试验条件下的加载精度,选取 3 枚等效直径为 35 ~ 36 mm 的核桃开展挤压试验。加载速度分别设为 10、30、50 mm/min,挤压变形量阈值统一为 7 mm。如图 8 所示,力-变形量曲线整体连续,过程平稳;变形初期载荷随变形近似线性上升,达到峰值后曲线骤降,表明壳体发生宏观破裂。在控制精度方面,不同速度下的实测速度误差约 3%,变形量误差更小。当变形量接近设定阈值时,系统可及时响应并停止加载,说明基于变形量的闭环控制可靠。

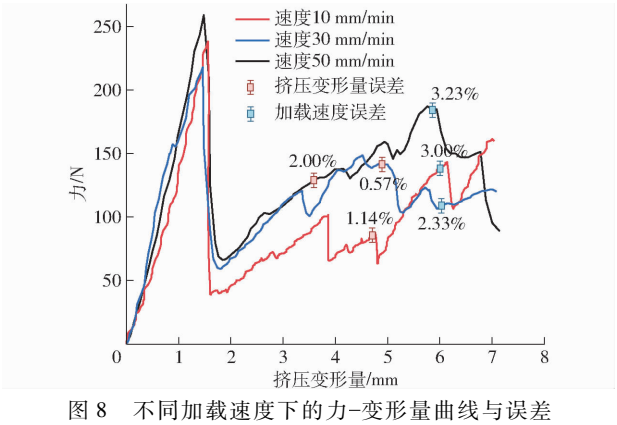


图 8 不同加载速度下的力-变形量曲线与误差

Fig. 8 Force-deformation curves and errors at different loading speeds

3 核仁图像特征提取与高露仁率模型建立

3.1 X 射线成像与数据预处理

采用 X 射线对挤压破壳的核桃样品进行成像,成像时使核桃缝合线与 X 射线束方向垂直,以获得更清晰的核仁结构[22]。为确定适合核桃的 X 射线成像条件,以灰度熵作为图像质量评价指标对成像参数进行优化,对采集后的 DICOM 图像进行窗位/窗宽调整与固定区域裁剪(ROI:422 像素 × 588 像素),并转换为 PNG 格式。鉴于核桃灰度主要集中于中低灰度区,呈现类似软组织的低对比成像特征,参考医学软组织窗位/窗宽设定经验[23],选取 4 组效果最佳的窗位/窗宽组合进行对比(见图 9)。最终确定成像参数为:曝光电压 44 kV、管电流 80 mA、曝光时间 25 ms;综合图 9 的视觉效果与图像亮度、对比度和信噪比[24],窗位/窗宽为 120/200 时在亮度、对比度与噪声抑制之间更优,组织边界清晰且细节信息较完整。

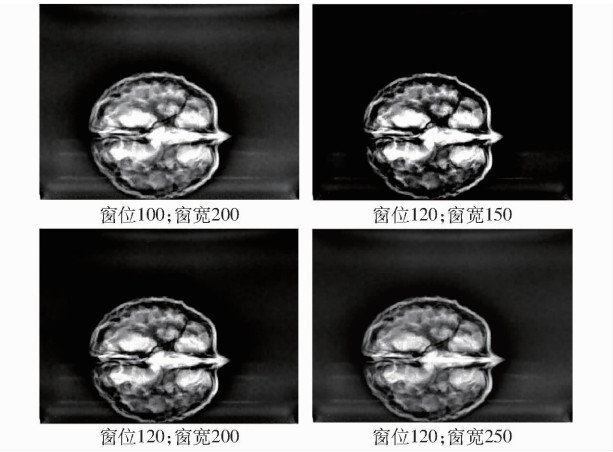


图 9 不同窗位/窗宽下 X 射线图像对比

Fig. 9 Comparison of X-ray images under different window level/window width

3.2 核仁图像特征提取与量化

为表征破壳前后核仁结构的变化特征,对预处理后的图像进行分析,具体如图 10 所示。通过图像分割技术生成掩膜实现核仁各碎块分离,提取计算核仁碎块数量、面积及其占比等几何特征[25],对高露仁率进行定量分析及预测。

破壳后核仁常分裂为多个不规则碎块,其形态复杂且碎块间存在部分粘连,在这种复杂情况下准确分割出核仁面临挑战。传统阈值法受限于图像灰度特征,无法区分外壳与核仁,而语义分割方法虽能识别核仁类别,却难以精准界定存在粘连的核仁碎块边界,导致欠分割。为此,本文采用改进的 YOLO v8n - seg - DN 模型进行图像分割,该模型在 YOLO v8n - seg 的基础上引入了 DLKA(Deformable large kernel attention)注意力机制[26]和 DCNv2(Deformable convnets v2)可变形卷积[27]。其中,DLKA 通过引入大感受野的可变形卷积核,使得模型能够更好地聚焦于图像中的核仁区域;而 DCNv2 则通过可变形卷积操作,动态调整卷积核的采样位置和权重,增强模型对不同形态核仁识别的适应性。改进后的模型实现了 91.0% 的 Mask mAP@0.5,相比原始模型提升了 2.2 个百分点。

从结构机理角度来看,当核仁在破壳过程中保

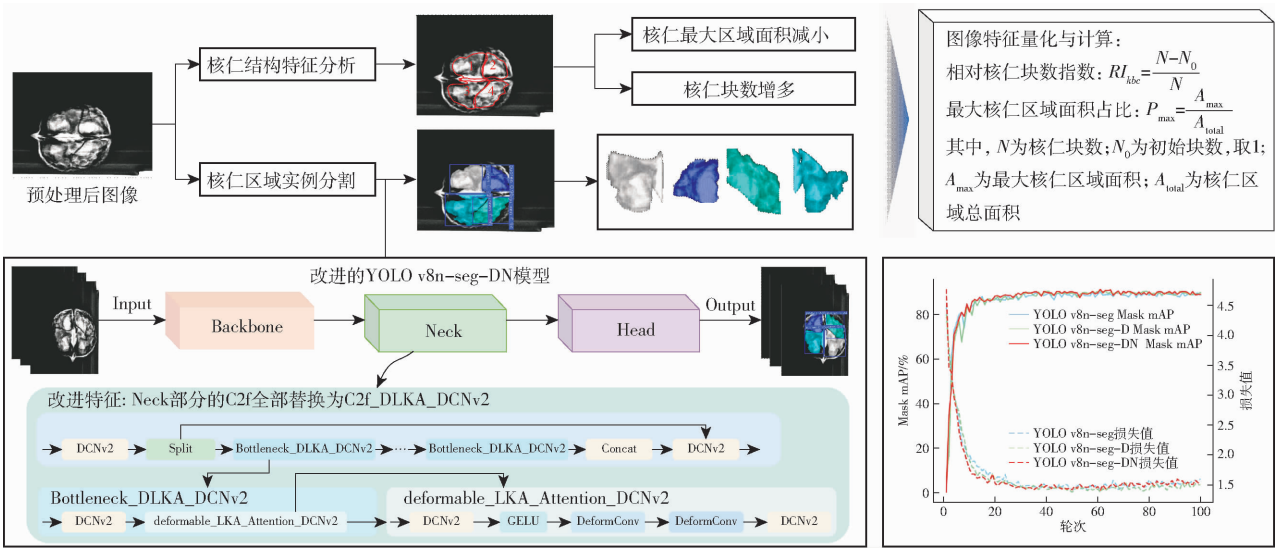


图 10　核仁结构分割提取与特征量化

Fig. 10　Segmentation, extraction and feature quantification of kernel structure

持完整时，切面图像中呈现较大且连通的核仁区域，分裂块较少；而当核仁结构遭到破坏时，较为完整的核仁发生断裂，切面图像中最大连通核仁区域减小，分裂块增多。基于分割获得的核仁掩膜，通过像素计算构建了两项图像特征：最大核仁区域面积占比 P_{max} 和相对核仁块数指数 RI_{kbc}。具体来说，P_{max} 衡量图像中核仁最大块区域在整体核仁中的占比，值越大表示结构完整性越好；而 RI_{kbc} 则反映核仁的破碎程度，值越大表示分裂块越多、结构越不完整。进一步地，分别在 0° 与 180° 视角下计算切面图像指标，并取其平均值作为每个核桃样品的切面图像指标。

3.3　核仁高露仁率计算

参照行业标准中关于核桃仁等级划分要求[2]，对各样品破壳后的核仁进行分选、称量与统计，以获得实测高露仁率（见图 11）。分选时以标准等级为依据，并结合 X 射线图像对核仁结构完整性进行辅助判别，将整仁和半仁统一归类为高露仁，分别记录样品核仁总质量 M_{total} 与高露仁质量 M_G，并计算高露仁率 P_G，其表达式为

$$P_G=\frac{M_G}{M_{total}} \tag{8}$$



图 11　核仁等级划分

Fig. 11　Grading of walnut kernels

3.4　基于图像特征的核仁高露仁率模型建立

3.4.1　样本与建模方法

为保证模型的稳定性和代表性，按照核桃的等效直径划分为若干区间，依据其分布特性从各区间分层抽取样本，共计 150 颗。参考预试验结果，将每个尺寸区间内选取的样品均匀分配至 5 ~ 9 mm（步长 1）的挤压变形量水平下，如表 1 所示。挤压加载速度设定为 1.5 mm/min。对每个样本的特征（RI_{kbc}、P_{max} 和 P_G）进行测量后，利用 Origin 软件进行数据 Pearson 相关性分析，并使用最小二乘法检查各特征之间的线性关系。随后，样本按比例 8∶2 随机划分为训练集和验证集，在 Pycharm 中采用岭回归对核仁高露仁率进行建模。模型性能通过决定系数（R^2）、均方根误差（RMSE）和相对分析误差（RPD）进行评价。

表 1　等效直径区间样本分布

Tab. 1　Equivalent diameter range sample distribution

等效直径区间/mm	样本总量/个	各水平样本数/个
(32,33]	5	1
(33,34]	20	4
(34,35]	30	6
(35,36]	35	7
(36,37]	30	6
(37,38]	15	3
(38,39]	10	2
(39,40]	5	1

3.4.2　核仁图像特征统计与共线性分析

对 150 颗核桃样品的核仁图像特征分析显示（见表 2），P_{max} 的均值为 0.82、标准差为 0.20，与 P_G 相关系数为 0.931，说明多数样本仍保留较大的最大核仁区域，且 P_{max} 与核仁完整性密切相关。RI_{kbc} 的均值为 0.23、标准差为 0.24，与 P_G 相关系数为 −0.926，表明 RI_{kbc} 的增大与核仁分裂程度的增加相关，进而导致 P_G 下降。因此，P_{max} 和 RI_{kbc} 都能作为有效的特征与高露仁率建立相关关系。

普通最小二乘回归分析进一步验证了 P_{max} 对 P_C 的正向影响，回归系数为 0.803，$P<0.001$。RI_{kbc} 对 P_C 有负向影响，回归系数为 −0.491，$P<0.001$。P_{max} 与 RI_{kbc} 的方差膨胀因子均为 13.067，高于阈值（10），且二者强相关，表明二者之间存在显著的共线性问题。因此，采用岭回归方法，通过引入惩罚项来减轻共线性的影响，从而提高回归模型的稳定性和准确性。

表 2 核仁特征统计与普通最小二乘法回归

Tab. 2 Walnut kernel feature statistics and regression by ordinary least squares method

变量	均值	标准差	与 P_C 相关系数	回归系数	标准误差	标准系数	t 统计量	P	容差	方差膨胀因子	P_{max} 与 RI_{kbc} 相关系数
常量	–	–	–	0.162	0.154	–	1.057	0.292	–	–	–
P_{max}	0.82	0.20	0.931	0.803	0.154	0.539	5.209	<0.001	0.077	13.067	−0.961
RI_{kbc}	0.23	0.24	−0.926	−0.491	0.125	−0.408	−3.941	<0.001	0.077	13.067	

注：“–”表示无数据。

3.4.3 岭回归模型结果与分析

图 12 显示了基于图像特征 P_{max} 和 RI_{kbc} 作为输入，采用岭回归模型（$\alpha=0.1$，10 折交叉验证）对核仁高露仁率进行建模的结果。模型验证集决定系数 R^2 为 0.92，$RMSE_p$ 为 8.89%，RPD 为 3.46，拟合效果良好。总体而言，岭回归模型在整体拟合方面表现出较高的准确性，特别是在数据分布较为集中的区域。P_{max} 和 RI_{kbc} 能够有效地反映核仁完整性的变化，其中 P_{max} 对模型预测的贡献更为突出。当 P_C 较高时，模型能够较为准确地拟合数据。但在 P_C 接近极端值 0 附近时偏差有所增大，这一现象可能与数据中存在的极端值有关，其在局部范围内对拟合精度产生一定影响。尽管如此，模型在整体范围内仍保持较高的精度与可靠性。

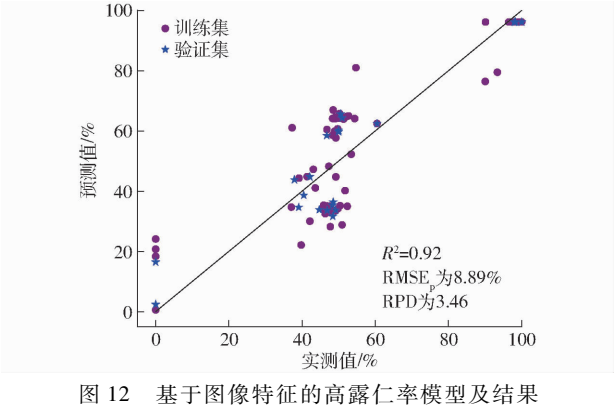


图 12 基于图像特征的高露仁率模型及结果

Fig. 12 High-grade kernel proportion model based on image features and its results

4 高露仁率模型验证及影响因素分析

4.1 中心复合设计试验方案

为进一步检验岭回归模型在不同试验条件下的适用性，并分析各因素对高露仁率的影响，设计了三因素五水平的中心复合设计试验，因素编码如表 3 所示，共设置 15 组试验组合，各组合重复 3 次并取高露仁率实测均值（Y_1）、高露仁率预测均值（Y_2）作为响应，采用 Design-Expert 软件进行分析。

表 3 CCD 试验因素编码

Tab. 3 CCD test factors coding

编码	因素		
	加载速度 x_1/（mm·min^{-1}）	挤压变形量 x_2/mm	核桃等效直径 x_3/mm
−1.682	10	5.0	(32,33)
−1	18	5.8	(33.4,34.4)
0	30	7.0	(35,36)
1	42	8.2	(36.6,37.6)
1.682	50	9.0	(38,39)

4.2 模型精度验证及因素影响规律

通过三因素五水平中心复合设计试验，对比了不同试验条件下高露仁率的实测均值（Y_1）与模型预测均值（Y_2），结果如表 4 所示，表中 X_1、X_2、X_3 为因素编码值。整体来看，随着加载速度、挤压变形量

表 4 不同试验条件下的高露仁率结果

Tab. 4 High-grade kernel proportion results under different experimental conditions

组号	因素			Y_1/%	Y_2/%
	X_1	X_2	X_3		
1	−1.682	0	0	60.479	65.014
2	−1	−1	−1	74.781	81.554
3	−1	1	−1	49.259	54.592
4	−1	−1	1	60.362	71.522
5	−1	1	1	46.732	49.940
6	0	0	−1.682	58.757	60.718
7	0	−1.682	0	74.103	77.450
8	0	0	0	58.600	61.936
9	0	1.682	0	45.558	41.163
10	0	0	1.682	50.000	56.936
11	1	−1	−1	66.776	75.297
12	1	1	−1	53.416	52.651
13	1	−1	1	47.602	56.015
14	1	1	1	45.432	52.117
15	1.682	0	0	51.433	56.274

和核桃等效直径的增大，Y_2 能够较好地跟随 Y_1 的变化趋势，这表明岭回归模型能够准确、稳定地反映不同试验条件下各因素对高露仁率的影响规律。然而，Y_2 普遍高于 Y_1，整体平均绝对误差为 5.347%，最大偏差为 11.16%，模型呈现明显高估。该偏差可能与试验组内样本量有限及数据本身变异性有关，但不影响模型在整体数据上的变化趋势，说明 Y_2 在破壳工艺参数优化和趋势判别中具有较高可靠性。因此，Y_2 可替代传统高露仁率测定方法，在破壳阶段通过计算机快速评估高露仁率，减少人工干预，且无需高成本试验数据即可分析出最优试验条件，为破壳工艺改进提供支持。

表 5 结果表明，从主效应来看，加载速度、挤压变形量和核桃等效直径呈负向影响，即三者增加，Y_1 和 Y_2 均趋于下降趋势。其中，变形量的负向影响尤为显著，表明较大的变形量会导致 Y_1 和 Y_2 急剧下降。同时，交互作用显示，X_1X_2 与 X_2X_3 对 Y_1 和 Y_2 均具有显著正向影响，这表明在特定参数组合下，因素间存在协同效应，能够部分抵消主效应的负向趋势，反映出“先升后降”的非单调变化特征。

表 5　核仁高露仁率方差分析

Tab.5　ANOVA for high-grade kernel proportion

方差来源	Y_1					Y_2				
	平方和	自由度	均方	F	P	平方和	自由度	均方	F	P
模型	1 244.72	6	207.45	18.30	0.000 3	1 703.53	6	283.92	25.04	<0.000 1
X_1	80.26	1	80.26	7.08	0.028 8	96.11	1	96.11	8.48	0.019 5
X_2	771.38	1	771.38	68.05	<0.000 1	1 355.77	1	1 355.77	119.56	<0.000 1
X_3	243.70	1	243.70	21.50	0.001 7	115.08	1	115.08	10.15	0.012 9
X_1X_2	69.75	1	69.75	6.15	0.038 1	60.50	1	60.50	5.34	0.049 7
X_1X_3	13.04	1	13.04	1.15	0.314 8	3.29	1	3.29	0.290 3	0.604 7
X_2X_3	66.60	1	66.60	5.87	0.041 6	72.77	1	72.77	6.42	0.035 1
残差	90.69	8	11.34			90.71	8	11.34		
拟合方程	$Y_1=56.22-2.41X_1-7.48X_2-4.49X_3+2.90X_1X_2-1.41X_1X_3+3.19X_2X_3$					$Y_2=60.88-2.64X_1-9.91X_2-3.08X_3+2.7X_1X_2-0.71X_1X_3+3.33X_2X_3$				

通过对各因素影响的分析，结合拟合方程计算了不同因素水平组合下的试验结果。在仅考虑高露仁率的情况下，当加载速度为 10～30 mm/min，变形量为 5～6 mm，核桃等效直径为 33～35 mm 时，Y_2 在 70% 以上，且在多个试验条件下超过 80%。该因素组合下 Y_1 也普遍高于 70%，且变化趋势与 Y_2 一致，表明该模型可为实际生产中实现较高的高露仁率工艺目标提供技术支撑。然而，高露仁率并非唯一的评价指标，核桃的破壳率同样是影响破壳工艺效果的关键因素。因此，未来的研究不仅要巩固前述的高露仁率优化条件，还应综合考虑破壳率，进一步优化工艺参数，从而提高整体生产效益。

5　结论

（1）设计并搭建了集挤压力学加载与 X 射线成像于一体的可旋转试验平台，实现了核桃破壳过程中的力学控制和核仁结构图像的获取与分割。装置在挤压变形量阈值设定为 7 mm，加载速度为 10、30、50 mm/min 的条件下运行稳定，误差在 5% 以内；在成像方面，X 射线成像系统在曝光电压 44 kV、管电流 80 mA、曝光时间 25 ms 的条件下完成核仁成像；同时，考虑双视角成像过程中两次曝光所需的缓冲时间，转盘旋转角速度设为 6(°)/s。在图像处理方面，调整窗位/窗宽为 120/200，并结合改进的 YOLO v8n－seg－DN 模型，实现了核仁结构的准确识别与分割。

（2）基于图像中核仁结构形态变化，提出了最大核仁区域面积占比（P_{max}）与相对核仁块数指数（RI_{kbc}）两项指标，用于量化破壳前后核仁“最大区域缩小、碎裂块数增加”的结构变化；相关性分析显示，P_{max} 与高露仁率呈强正相关（相关系数为 0.931），RI_{kbc} 与高露仁率呈强负相关（相关系数为 －0.926），两者可作为表征核仁完整性与受损程度的有效特征。

（3）针对特征间显著共线性（方差膨胀因子为 13.067），通过岭回归方法建立了基于图像特征的高露仁率相关关系模型，模型验证集 R^2 为 0.92、$RMSE_p$ 为 8.89%、RPD 为 3.46，显示出较高精度。

（4）三因素五水平的中心复合设计试验表明，加载速度、挤压变形量与核桃等效直径对高露仁率具有显著的负向影响；模型预测值与实测值的趋势高度一致，整体平均绝对误差为 5.347%。在加载速度为 10～30 mm/min、变形量为 5～6 mm、核桃等效直径为 33～35 mm 的条件下，模型预测的高露仁率均超过 70%，且在相同的条件下，实测值也普遍高于 70%，表明模型能够准确反映不同试验条件下高露仁率的响应规律。

参 考 文 献

[1] 王大臣，王迎胜，周宏平. 核桃破壳取仁技术研究进展[J/OL]. 食品与发酵工业，2025－11－24. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11－1802/ts.044671.
Wang Dachen, Wang Yingsheng, Zhou Hongping. Research advances in walnut shell-breaking and kernel extraction technologies [J/OL]. Food and Fermentation Industries, 2025－11－24. https://doi.org/10.13995/j.cnki.11－1802/ts.044671. (in Chinese)

[2] 刘娇，李浩，杨卿，等. 云南省核桃坚果及核桃仁产品质量分级探讨[J]. 南方农业，2024，18(1)：107－112.
Liu Jiao, Li Hao, Yang Qing, et al. Discussion on the quality classification of walnut nuts and walnut kernel products in Yunnan Province[J]. South China Agriculture, 2024, 18(1): 107－112. (in Chinese)

[3] 郑霞，张恩铭，坎杂，等. 适宜核桃壳划口位置改善其破壳特性提高整仁率[J]. 农业工程学报，2018，34(19)：300－308.
Zheng Xia, Zhang Enming, Kan Za, et al. Improving cracking characteristics and kernel percentage of walnut by optimal position of cutting on shell[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(19): 300－308. (in Chinese)

[4] Zhang H, Liu H, Zeng Y, et al. Design and performance evaluation of a multi-point extrusion walnut cracking device[J]. Agriculture, 2022, 12(9): 1494.

[5] 石明村，刘明政，李长河，等. 凸轮摇杆双向挤压核桃破壳装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(1)：140－150.
Shi Mingcun, Liu Mingzheng, Li Changhe, et al. Design and experiment of cam rocker bidirectional extrusion walnut shell breaking device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 140－150. (in Chinese)

[6] 李鑫瀛. 核桃物理特性与力学特性的测定与分析[J]. 食品安全导刊，2024(36)：71－74.
Li Xinying. Determination and analysis of physical and mechanical properties of walnuts[J]. China Food Safety Magazine, 2024(36): 71－74. (in Chinese)

[7] 刘明政，李长河，张彦彬，等. 柔性带差速挤压核桃脱壳性能试验[J]. 农业机械学报，2016，47(9)：99－107.
Liu Mingzheng, Li Changhe, Zhang Yanbin, et al. Performance test of walnut shelling using flexible-belt and differential velocity extrusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 99－107. (in Chinese)

[8] 刘明政，李长河，张彦彬，等. 柔性带剪切挤压核桃破壳机理分析与性能试验[J]. 农业机械学报，2016，47(7)：266－273.
Liu Mingzheng, Li Changhe, Zhang Yanbin, et al. Shell crushing mechanism analysis and performance test of flexible-belt shearing extrusion for walnut[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 266－273. (in Chinese)

[9] 刘奎，郭文川，朱占江. 新丰核桃的多因素压缩试验[J]. 食品与机械，2020，36(3)：124－128.
Liu Kui, Guo Wenchuan, Zhu Zhanjiang. Study on various factors compression test of Xinfeng walnut[J]. Food & Machinery, 2020, 36(3): 124－128. (in Chinese)

[10] 李康，李长河，刘明政，等. 多工位定向挤压鲜核桃破壳装置设计与试验[J]. 石河子大学学报(自然科学版)，2023，41(3)：265－273.
Li Kang, Li Changhe, Liu Mingzheng, et al. Design and experiment of multi-station directional extrusion shell breaking device for fresh walnut[J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2023, 41(3): 265－273. (in Chinese)

[11] 赵康奇，周宏平，许林云，等. 基于轮廓拟合的核桃仿形破壳装置设计与参数优化[J/OL]. 林业工程学报，2025－11－20. https://doi.org/10.13360/j.issn.2096－1359.202505017.
Zhao Kangqi, Zhou Hongping, Xu Linyun, et al. Design and optimization of a contour-fitted walnut profiling sheller[J/OL]. Journal of Forestry Engineering, 2025－11－20. https://doi.org/10.13360/j.issn.2096－1359.202505017. (in Chinese)

[12] 马秋成，陈强，卢安舸，等. 核桃定向破壳装置设计及试验[J]. 江西农业大学学报，2022，44(2)：473－485.
Ma Qiucheng, Chen Qiang, Lu Ange, et al. Design and test of walnut directional shell breaking device[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(2): 473－485. (in Chinese)

[13] 高警，郑甲红，闫茹，等. 对影响核桃破壳力大小因素的探究[J]. 农机化研究，2014，36(9)：186－189.
Gao Jing, Zheng Jiahong, Yan Ru, et al. Study on influencing factors of walnut's shelled force[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2014, 36(9):186－189. (in Chinese)

[14] 张永成，盖广鑫，宗望远，等. 基于 FDEM 的核桃挤压-剪切载荷下破碎机理与减损方法[J]. 农业机械学报，2025，56(3)：291－300.
Zhang Yongcheng, Gai Guangxin, Zong Wangyuan, et al. Crushing mechanism of walnut under extrusion-shear load based on FDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(3):291－300. (in Chinese)

[15] Dong C, Tan A W W, Liu T, et al. Transformer-based smart inspection for agricultural products via X-ray images[C]// International Conference on Optical and Photonic Engineering (icOPEN 2023). Bellingham: WA. SPIE, 2024: 322－327.

[16] 陈树人，徐李，尹建军，等. 基于 Micro－CT 图像处理的稻谷内部损伤定量表征与三维重构[J]. 农业工程学报，

2017, 33(17): 144 – 151.
Chen Shuren, Xu Li, Yin Jianjun, et al. Quantitative characterization of grain internal damage and 3D reconstruction based on Micro – CT image processing[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17): 144 – 151. (in Chinese)

[17] Matsui T, Sugimori H, Koseki S, et al. Automated detection of internal fruit rot in Hass avocado via deep learning-based semantic segmentation of X-ray images[J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 203: 112390.

[18] Zhang H, Ning X, Pu H, et al. A novel approach for the non-destructive detection of shriveling degrees in walnuts using improved YOLO v5n based on X-ray images[J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 214: 113007.

[19] 叶创, 蔡健荣, 袁雷明, 等. 基于 X 射线图像的干桂圆果肉质量预测[J]. 食品科技, 2016, 41(1): 264 – 268.
Ye Chuang, Cai Jianrong, Yuan Leiming, et al. Prediction of dry longan flesh weight based on X-ray imaging[J]. Food Science and Technology, 2016, 41(1): 264 – 268. (in Chinese)

[20] Zhang Y, Lin Y, Tian H, et al. Non-destructive evaluation of the edible rate for pomelo using X-ray imaging method[J]. Food Control, 2023, 144: 109358.

[21] 李龙, 曾勇, 满晓兰, 等. 冲击条件下核桃损伤断裂特性尺寸效应研究[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(10): 108 – 114.
Li Long, Zeng Yong, Man Xiaolan, et al. Study on size effect of damage fracture characteristics of walnut under impact condition[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(10): 108 – 114. (in Chinese)

[22] 蒲厚旭, 张慧. 基于卷积神经网络干瘪核桃 X 射线图像判别[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(9): 184 – 189.
Pu Houxu, Zhang Hui. Discrimination of shriveled walnut X-ray image based on convolution neural network[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(9): 184 – 189. (in Chinese)

[23] 余行, 何奕松, 傅玉川. 不同固定窗宽/窗位调节在医学图像自动分割中的应用研究[J]. 中国医疗设备, 2022, 37(3): 75 – 78,96.
Yu Hang, He Yisong, Fu Yuchuan. Research on the application of different fixed window width and window level adjustment in automatic segmentation of medical images[J]. China Medical Devices, 2022, 37(3): 75 – 78,96. (in Chinese)

[24] Viana M, Fontenele R, Nogueira-Reis F, et al. DICOM file format has better radiographic image quality than other file formats: an objective study[J]. Brazilian Dental Journal, 2023, 34: 150 – 157.

[25] Huang Z, Hou Y, Cao M, et al. Mechanisms of machine vision feature recognition and quality prediction models in intelligent production line for broiler carcasses[J]. Intelligent and Sustainable Manufacturing, 2025, 2(2): 10016.

[26] Azad R, Niggemeier L, Huettemann M, et al. Beyond self-attention: deformable large kernel attention for medical image segmentation[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision, 2024: 1287 – 1297.

[27] Zhu X, Hu H, Lin S, et al. Deformable convnets v2: more deformable, better eesults[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2019: 9308 – 9316.