

# 采用 X 射线三维重构技术检测厚皮柑橘的体积可食率

蔡健荣, 梁小祥, 许 骞, 夏中岩, 孙 力, 马立鑫

(江苏大学食品与生物工程学院, 镇江 212013)

**摘 要:** 针对传统无损检测技术无法定量分析厚皮柑橘体积可食率的问题, 为此开发了一套线阵 X 射线图像采集和三维重构装置, 包括果实旋转升降、数据采集、辐射防护及运动控制, 实现厚皮柑橘果实的体积可食率检测。以“不知火”柑橘为检测对象, 利用 X 射线投影图的信息熵为评价依据, 根据果实大小对检测参数进行优化, 得到 X 射线源的管电压为 67 kV, 管电流为 0.92 mA, 线阵探测器的积分时间为 1 ms。以旋转角度 2.0°为间隔, 在圆周方向采集 180 幅 X 射线投影图并生成正弦图, 通过滤波反向投影 (filtered back projection, FBP) 算法将正弦图重构为切面图, 再利用图像滤波、图像增强、阈值分割对切面图进行图像分割处理, 分割出背景区域、果皮区域、果肉区域和空腔区域, 然后基于区域面积比定义切面图像可食率。同时, 测量了柑橘基本物理参数, 计算了切面图像可食率, 并建立了与柑橘体积可食率之间的相关关系。结果表明, 切面图像可食率与体积可食率相关性最高, 相关系数为 0.93。最后, 选择切面图像可食率作为数学模型的输入特征, 利用线性回归模型对厚皮柑橘体积可食率进行定量分析, 其预测集决定系数 (coefficient of determination of prediction,  $R_p^2$ )、预测集均方根误差 (root mean square error of prediction, RMSEP)、相对分析误差 (residual predictive deviation, RPD) 分别为 0.86、4.81% 和 2.71。综上, 利用 X 射线三维重构技术对厚皮柑橘体积可食率进行无损检测可行, 可为其他农产品内部品质无损检测提供参考。

**关键词:** 无损检测; X 射线成像; 三维重构; 切面图像; 柑橘; 体积可食率

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202309084

中图分类号: TG115.28+1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-01-0293-08

蔡健荣, 梁小祥, 许骞, 等. 采用 X 射线三维重构技术检测厚皮柑橘的体积可食率[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 293-300. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202309084 <http://www.tcsae.org>

CAI Jianrong, LIANG Xiaoxiang, XU Qian, et al. Detecting volumetric edible rate of thick-skinned citrus using X-ray three-dimensional reconstruction[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(1): 293-300. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202309084 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

柑橘是全球产量最大的水果, 中国的柑橘种植面积与产量均位居世界第一<sup>[1]</sup>。柑橘果实富含类黄酮类<sup>[2]</sup>、酚酸<sup>[3]</sup>、类胡萝卜素<sup>[4]</sup>等多种营养成分, 具有清除体内自由基、抗癌等功效<sup>[5-6]</sup>。中国种植的柑橘中, 宽皮柑橘和柚产量较高, 其中宽皮柑橘约占总产量的 2/3<sup>[7]</sup>。宽皮柑橘中“春见”、“不知火”等品种果皮较厚、耐储性好, 但因中心柱空心区域面积及果皮和果肉间隙面积均较大, 且常伴有内部组织局部缺水现象, 仅从外观很难判断其果肉含量。果实可食率是表达果实品质的重要指标, 可分为体积可食率和质量可食率。体积可食率是柑橘果肉体积与整果体积之比, 质量可食率是柑橘果肉质量与整果质量之比<sup>[8]</sup>。

目前, 快速无损检测技术在农产品品质检测中得到了广泛的应用<sup>[9]</sup>, 如近红外光谱技术<sup>[10-12]</sup>、高光谱成像技术<sup>[13-15]</sup>、声学分析法<sup>[16-18]</sup>、机器视觉技术<sup>[19-21]</sup>等, 但上述技术中, 主要是针对果实表面的缺陷检测以及针对

糖酸度的内部品质检测, 无法穿透果实整体获得内部组织形态的分布, 因此无法检测柑橘可食率。X 射线是波长在 0.01~10 nm 的电磁波<sup>[22]</sup>, 具有强穿透性, 高能光子与电子相互作用并对 X 射线所经路径中的原子产生电离效应, 这种相互作用导致光子通量差异<sup>[23]</sup>, X 射线探测器利用此特性将光子通量差异通过光电转换的方式以灰度值表现, 将待测物体内部密度差异可视化表达。

X 射线应用主要分为数字 X 射线影像系统 (digital radiography, DR) 和计算机断层扫描成像技术 (computerized tomography, CT), 两者在农产品检测领域具有独特优势, 受到广泛关注。MAGWAZA 等<sup>[24]</sup>利用 X-ray CT 技术结合图像分析检测石榴果实可食用部分和非可食用部分; ARENDSE 等<sup>[25]</sup>利用 X-ray CT 技术对病变石榴内部的蛾幼虫、黑心病组织进行质量和体积预测, 质量预测偏差小于 6 g, 体积预测偏差小于 4 mL; LOOVERBOSCH 等<sup>[26]</sup>提出一种将 CT 技术与机器学习相结合检测梨内部病变程度, 其所建模型准确率为 90.20%~95.10%; 国内章程辉等<sup>[27]</sup>利用 DR 技术结合直方图矩特征和支持向量机回归方法预测红毛丹可溶性固形物含量, 相关系数最高可达 87.20%; 孙旭东等<sup>[28]</sup>利用 X 射线二维图像每个灰度值的负指数与厚度成正比的关系预测苹果体积, 预测相关系数为 0.92; 黄滔滔等<sup>[29]</sup>利用 CT 技术对苹果果肉进行提取, 成功建立了苹果果肉区 CT 均值与苹果整

收稿日期: 2023-09-11 修订日期: 2023-12-04

基金项目: 国家现代农业产业技术体系项目 (CARS-26)

作者简介: 蔡健荣, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为食品、农产品质量快速无损检测。E-mail: jrcai@ujs.edu.cn

体的糖度、可滴定酸度、含水质量分数之间的线性关系模型,其 $R^2$ 值分别为 0.85、0.82、0.91; 本研究小组的叶创等<sup>[30]</sup>利用 DR 技术,采用基于区域形状和区域灰度特征的 2 种方法预测干桂圆果肉的可食率,其预测集的相关系数分别为 0.750 5 和 0.794 5; 许骞等<sup>[31]</sup>利用自制 DR 检测装置对清江椪柑的浮皮和枯水进行检测,总体识别率分别为 96.2% 和 86.9%。以上研究结果表明,DR 技术和 CT 技术在农产品内部定量预测方面具有可行性,但利用 X 射线三维重构技术定量分析厚皮柑橘的研究目前未见报道。

DR 技术是低成本的检测技术,但其将果实三维信息压缩成二维平面,果实内部密度差异的信息被压缩,不能充分表达柑橘内部复杂的组织结构; CT 技术可以通过重建多层切面的形式表达果实内部复杂的三维组织结构,有更高的检测精度,但其价格昂贵,目前国内外学者均采用商业 CT 进行试验与数据分析,并不适合在农产品检测领域广泛应用。

鉴于 X 射线技术能够可视化表达和预测柚子可食率及果肉含量<sup>[32]</sup>,本文采用 DR 检测技术结合旋转及提升机构,低密度采集果实 CT 基础数据,并对线阵 X 射线的切面影像进行三维图像重构,实现厚皮柑橘的体积可食率的可视化表达。通过重建样品间隔 120° 的 3 张纵轴切面,基于区域面积比计算各切面图像可食率,并选取相关特征参数运用机器学习算法进行回归,定量分析柑橘体积可食率与相关特征之间的关系。因“不知火”柑橘具有外形不规则,果皮较厚,果肉与果皮间隙大,中心柱空心化等特征,以此为试验对象,研究探索 DR 技术结合 CT 重构算法,以期实现柑橘体积可食率高精度检测,为低成本 CT 检测技术应用探索新路径。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验对象: 2023 年 4 月采摘的“不知火”柑橘(四川,眉山),共 102 个样本,果实完好、无擦伤、果皮与果肉之间均存在轻微浮动,放置在 27℃,相对湿度 60% 的室内环境,保存 24 h 后进行 X 射线投影图采集,然后测量每个样本的基本物理参数。

试验器材: 自制线阵 X 射线三维重构装置; 电子数显游标卡尺(JINGSIDA, 中国),测量精度为 0.01 mm; 电子天平(舜宇恒平仪器,中国),测量精度为 0.01 g; 烧杯(蜀牛,中国),测量精度为 100 mL; 量筒(蜀牛,中国),测量精度为 1.0 mL。

### 1.2 技术原理及试验装置

#### 1.2.1 试验技术原理

如图 1a 所示,底部为 X 射线发射源,顶部为 X 射线探测器,由于样品各组织的密度存在差异,当 X 射线穿过不同密度组织时衰减程度不同,探测器检测到的射线强度也不同,这些信号经过光电转换和模数转换后,得到不同方向上的 X 射线衰减程度累计值 $g(\theta, \rho)$ ,并采

用 X 射线投影图像进行表征。假设样品上每一点对 X 射线的衰减程度为 $f(x, y)$ ,CT 重构技术就是利用不同方向上的 X 射线衰减程度累计值 $g(\theta, \rho)$ 计算样品每一个点的 X 射线衰减程度 $f(x, y)$ 。

$$x \cos \theta + y \sin \theta = \rho \quad (1)$$

$$g(\theta, \rho) = \iint f(x, y) \delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy \quad (2)$$

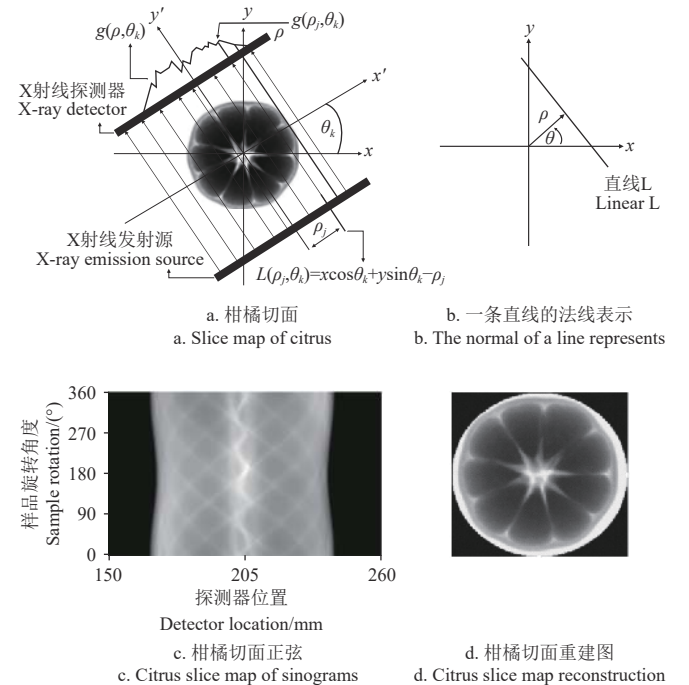
式中,式(1)为图 1b 中直线 L 的法线表示形式, $\theta$ 为直线 L 的法线与 x 轴夹角,(°), $\rho$ 为原点到直线 L 的距离,mm; 式(2)为 Radon 变换公式,可将 X 射线投影图像转换为正弦图,如图 1c 所示,其中 $\delta$ 为冲激函数, $g(\theta, \rho)$ 为不同方向上的 X 射线衰减程度累计值。

对 $\rho$ 求傅里叶变换,如下:

$$\begin{aligned} F[g(\theta, \rho)] &= \int \left[ \iint f(x, y) \delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy \right] e^{-j\omega\rho} d\rho \\ &= \int \left[ \iint f(x, y) \delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy \right] \\ &\quad e^{-j\omega(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) + j\omega(x \cos \theta + y \sin \theta)} d\rho \\ &= \widehat{\delta}(\omega) \iint f(x, y) e^{-j\omega(x \cos \theta + y \sin \theta)} dx dy \\ &= \widehat{f}(\omega \cos \theta, \omega \sin \theta) \widehat{\delta}(\omega) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\widehat{f}(\omega \cos \theta, \omega \sin \theta) = F[g(\theta, \rho)] \quad (4)$$

式中 $\omega$ 是频率变量, $\delta$ 函数的傅里叶变换为常数 1, $F[g(\theta, \rho)]$ 为 $\rho$ 的傅里叶变换。



注: 图 1a 中 $\theta_k$ 为样品旋转角; $\rho_j$ 为探测器位置; $g(\rho_j, \theta_k)$ 为 $\theta_k$ 、 $\rho_j$ 的投影; $g(\rho, \theta_k)$ 是角度为 $\theta_k$ 的完整投影; $L(\rho_j, \theta_k)$ 是角度为 $\theta_k$ 、探测器位置为 $\rho_j$ 的直线表达式。

Note: In figure 1a,  $\theta_k$  is the sample rotation angle,  $\rho_j$  is the detector fixation position,  $g(\rho_j, \theta_k)$  is the projection of  $\theta_k$ 、 $\rho_j$ ,  $g(\rho, \theta_k)$  is the complete projection with angle  $\theta_k$ ,  $L(\rho_j, \theta_k)$  is the linear expression for the angle  $\theta_k$  and detector position  $\rho_j$ .

图 1 试验技术原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the technical principle

最后, 对 $\theta$ 方向的 X 射线投影数据进行傅里叶变换, 得到的数据填充到 $\theta$ 方向所在直线 L 上, 再进行傅里叶反变换便可得到样品上每一点对 X 射线的衰减程度  $f(x,y)$ , 图 1 d 是由图 1 a 的 X 射线投影数据, 利用上述计算式得出的柑橘切面重建图。

### 1.2.2 试验装置组成

为实现上述技术原理, 自主研发了基于 X 射线二维成像三维重构的试验装置, 包括样品的旋转升降、数据采集、辐射防护和运动控制, 如图 2 所示<sup>[33]</sup>。旋转升降装置包括旋转机构、升降机构和样品载物台, 通过样品旋转可采集不同角度的 X 射线投影数据, 通过升降机构选择样品不同高度切面。数据采集装置主要由线阵 X 射线发射源、X 射线准直器和 X 射线探测器构成, 实现样品 X 射线投影图的数据采集, 其中 X 射线光源型号为 IXS100SE 150P149 (VJ Technologies 公司), 管电压输出为 25~100 kV, 射线束为 80°扇形面, 焦点尺寸为 0.8 mm, X 射线探测器为 X-Scan C5 (芬兰 DT 公司), 晶体材料为 GOS, 像素间距为 0.4 mm, 像素高度为 0.6 mm, 像素宽度为 0.32 mm, 最大积分时间为 128 ms, A/D 转换分辨率为 14 位。辐射防护装置采用 2 mm 厚铅板密封封装。运动控制系统由计算机和可编程逻辑控制器组成。

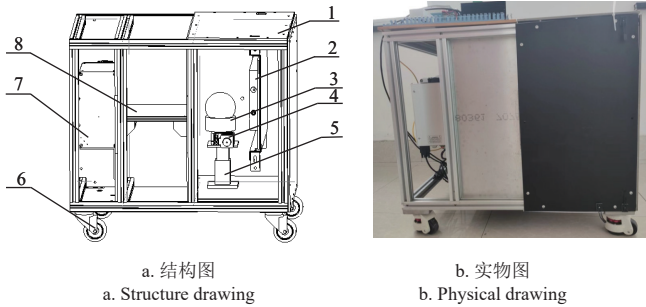


图 2 线阵 X 射线三维重构装置结构图与实物图  
Fig.2 Structural and physical drawings of the line array X-ray three-dimensional reconstruction device

### 1.2.3 成像校正与参数选取

影响 X 射线投影图像质量的主要因素为 X 射线发射源的非一致性和 X 射线探测器的不均匀性<sup>[34]</sup>。试验用 X 射线光源管电压的变化率小于 0.1%, 可以有效减小 X 射线发射源的非一致性; X 射线探测器在初始状态下存在噪音背景, 导致像素灰度值分布不均匀, 如图 3a、3c 所示。采用暗场校正和亮场图像补偿方式进行解决, 经校正后的像素灰度值分布如图 3b、3d 所示。

管电压越高, 发射的 X 射线波长越短, 穿透能力越强; 管电流越大, X 射线光子数量越多, 采集得到图像的对比度越好。根据试验柑橘果实的大小和密度, 设计了基于图像信息熵  $F(y)$  的参数选择方案, 对管电压、管电流参数选取进行试验<sup>[35]</sup>, 以获得信噪比高、对比度强的原始图像, 计算式如下:

$$F(y) = - \sum \left( \frac{H_i}{Y} \right) \ln \left( \frac{H_i}{Y} \right) \quad (5)$$

式中  $H_i$  为直方图中某灰度值的像素,  $Y$  为总像素数。

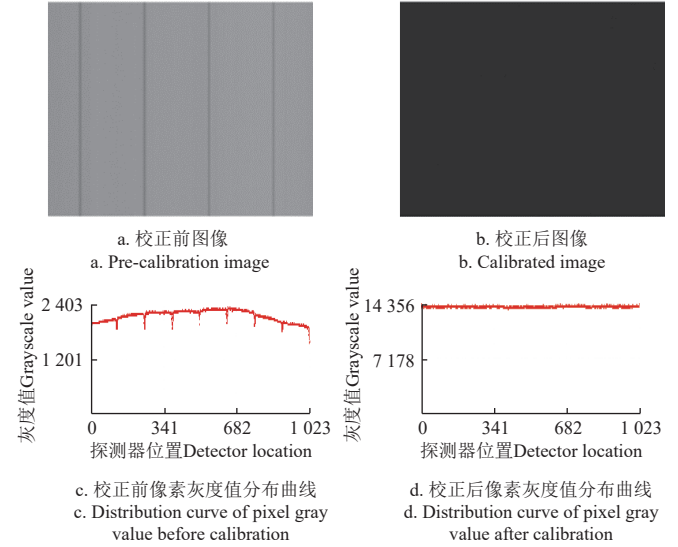


图 3 图像校正前后对比图

Fig.3 Comparison of before and after image correction

图像信息熵大小可以表征图像像素点灰度值的离散程度, 信息熵越大, X 射线投影图像质量越高, 图像越清晰。将线阵 X 射线发射源的管电流设定为 0.92 mA, X 射线探测器的积分时间设定为 1 ms, 分别采集 63、64、65、66、67、68、69、70 和 71kV 的柑橘 X 射线投影图像并计算信息熵, 根据计算结果最终选择 67 kV 作为最佳工作电压; 后将管电压设定为 67 kV, 积分时间设定为 1 ms, 分别采集 0.87、0.88、0.89、0.90、0.91、0.92、0.93、0.93、0.94 和 0.95 mA 的柑橘 X 射线投影图像并计算信息熵, 根据计算结果选择 0.92 mA 作为最佳工作电流, 如图 4 所示。

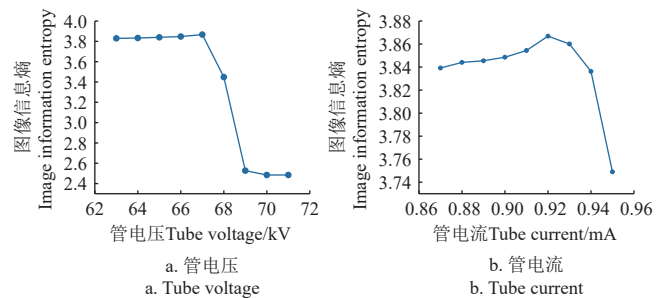


图 4 不同管电压、管电流参数条件下的图像信息熵

Fig.4 Entropy of image information under different tube voltage and tube current parameters

装置经校正后的工作参数: 管电压为 67 kV、管电流为 0.92 mA、积分时间为 1 ms。

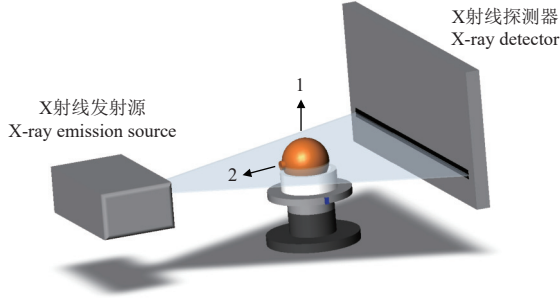
### 1.3 图像采集及切面图像可食率

#### 1.3.1 X 射线投影图采集

采集柑橘样品 X 射线投影图时, 将果梗与花萼形成的果实中轴与 X 射线的扇面平行, 如图 5 所示。首先, 载物台每旋转一个固定角度  $n$  拍摄一次 X 射线投影图, 样品旋转一周完成一个切面的采样; 然后, 以中轴为旋



转中心将样品旋转固定角度  $m$ , 完成下一个切面的采样, 直至样品旋转一周。 $n$ 、 $m$  取值越小, 样品切面图像表达的果实内部细节越丰富, 检测精度也越高, 但图像采集所需的时间越长。经对比试验, 最终选择载物台旋转角度间隔为  $n=2^\circ$ , 以保证采样后的柑橘切面图像细节丰富, 满足果皮果肉图像分割的需求, 并能有效表达组织内部分布; 选择果实中轴旋转角度间隔为  $m=120^\circ$ , 即只采集  $0^\circ$ 、 $120^\circ$  和  $240^\circ$  柑橘 3 个切面的图像, 经统计学处理后, 其切面图像可食率与实际值有较高的相关性, 同时低密度采样提高了图像数据的采集效率。



1. 载物台旋转中心 2. 果实中轴旋转中心  
1. Carrier rotation center 2. Center of rotation of fruit mesocarp

图 5 柑橘样品 X 射线投影图采集示意图

Fig.5 Schematic diagram of X-ray projection acquisition of citrus samples

### 1.3.2 切面图像可食率计算

调用 OpenCV (2.4.13) 软件库, 分别将  $0^\circ$ 、 $120^\circ$  和  $240^\circ$  三个角度下的一系列 X 射线投影图转换为正弦图, 如图 6a 所示; 调用 MATLAB 2019a 软件中 Toolbox 工具箱的 FBP 算法将正弦图生成对应的切面图, 如图 6b 所示; 因切面图的果实区域和背景灰度值差异明显, 利

用固定阈值分割便可提取果实区域, 如图 6c 所示; 然后采用式 (6)~(8) 所示的灰度值线性拉伸变换方法, 进行图像增强, 以提高图像对比度, 如图 6d 所示。

$$g' = g \cdot \beta + \gamma \quad (6)$$

$$\beta = \frac{255}{G_{\max} - G_{\min}} \quad (7)$$

$$\gamma = -\beta \cdot G_{\min} \quad (8)$$

式中  $g'$  为灰度值线性变换后的灰度值,  $g$  为当前的灰度值,  $\beta$  为变换系数,  $\gamma$  为偏移值,  $G_{\max}$  为图像的最大灰度值,  $G_{\min}$  为图像的最小灰度值。

最后利用最大类间方差法, 将增强后的图像分为 3 个互不连通的区域, 分别为果肉区域、果皮区域和空腔区域, 如图 6e 所示。基于区域面积比分别计算同一样品 3 个不同旋转角度下的切面图像可食率, 取平均值作为柑橘样品的最终切面图像可食率, 计算式如下:

$$R_{S1} = \frac{N_{F1}}{N_{F1} + N_{P1} + N_{C1}} \quad (9)$$

$$R_{S2} = \frac{N_{F2}}{N_{F2} + N_{P2} + N_{C2}} \quad (10)$$

$$R_{S3} = \frac{N_{F3}}{N_{F3} + N_{P3} + N_{C3}} \quad (11)$$

$$R_S = \frac{R_{S1} + R_{S2} + R_{S3}}{3} \quad (12)$$

式中  $R_S$  为柑橘样品切面图像可食率,  $R_{S1}$ 、 $R_{S2}$  和  $R_{S3}$  分别为旋转角度为  $0^\circ$ 、 $120^\circ$  和  $240^\circ$  的切面图像可食率,  $N_F$  为果肉区域像素个数,  $N_P$  为果皮区域像素个数,  $N_C$  为空腔区域像素个数, 各部分区域如图 6e 所示。

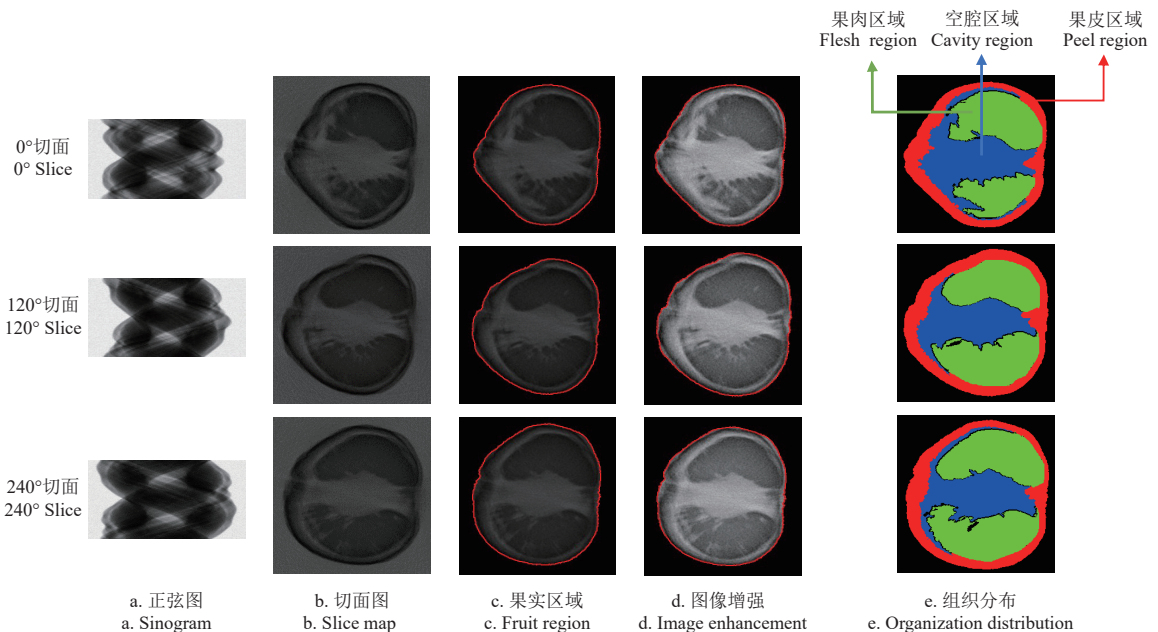


图 6 柑橘果肉、果皮、空腔组织分割

Fig.6 Citrus flesh, peel and cavity organization segmentation

### 1.4 柑橘基本物理参数测量和体积可食率计算

为了计算柑橘体积可食率, 测量了果实横径、纵径、

质量、体积、密度及果形指数等基本物理参数。

采用电子数显游标卡尺测量柑橘横径及纵径, 将柑

橘果梗向上垂直放置于桌面，游标卡尺在水平方向夹住柑橘赤道面，读取最大值作为柑橘横径；将游标卡尺平行放置柑橘果梗与花萼形成的果实中轴线上，读取最大值作为柑橘纵径。

柑橘果形指数定义为柑橘纵径与横径之比，计算式如下：

$$S = \frac{L_v}{L_T} \tag{13}$$

式中  $S$  代表柑橘果形指数； $L_v$  代表柑橘纵径，mm； $L_T$  代表柑橘横径，mm。

采用电子天平测量柑橘果实质量；采用排水法测量柑橘果实体积，将柑橘果实缓慢浸没于盛满水的烧杯中，利用量筒收集排出的水，待果实完全浸没于水中，读取量筒中水的高度值换算后作为柑橘果实体积；柑橘果肉体积测量时，剥除果皮将果肉浸没于盛满水的烧杯中，排除空腔体积对果肉体积的影响。

柑橘果实密度定义为柑橘果实质量与体积之比，计算式如下：

$$\rho_A = \frac{M_A}{V_A} \tag{14}$$

式中  $\rho_A$  代表果实密度， $\text{g}/\text{cm}^3$ ； $M_A$  代表果实质量，g； $V_A$  代表果实体积， $\text{cm}^3$ 。

柑橘体积可食率以果肉体积与果实体积之比进行定义，计算式如下：

$$V_A = V_F + V_P + V_C \tag{15}$$

$$R_v = \frac{V_F}{V_A} \tag{16}$$

式中  $R_v$  代表体积可食率； $V_F$  代表果肉体积， $\text{cm}^3$ ； $V_P$  代表果皮体积， $\text{cm}^3$ ； $V_C$  代表柑橘内部空腔体积， $\text{cm}^3$ ；

1.5 柑橘体积可食率模型建立

采用线性回归算法对柑橘体积可食率进行建模，为

保证模型的稳定性和准确性，按照 7:3 的比例将样本数据随机分为训练集和预测集。采用决定系数（coefficient of determination,  $R^2$ ）、均方根误差（root mean square error, RMSE）和相对分析误差（residual predictive deviation, RPD）作为模型评价指标。其中  $R^2$  值越接近 1，说明模型的拟合效果越好，RMSE 值越接近 0，说明模型预测值和实际值之间的差异越小，RPD 值越大，说明模型相对于简单基准模型的改善效果越好，预测能力越强，其计算式分别如下：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \tag{17}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 1}} \tag{18}$$

$$\text{RPD} = \frac{\text{SD}_p}{\text{RMSE}_p} \tag{19}$$

式中  $y_i$  代表第  $i$  个样本体积可食率实测值； $\hat{y}_i$  代表第  $i$  个样本体积可食率预测值； $\bar{y}$  代表训练集或预测集所有样本体积可食率的平均值； $n$  为训练集或预测集的样本总数； $\text{SD}_p$  为预测集样本体积可食率的标准偏差； $\text{RMSE}_p$  为预测集样本体积可食率均方根误差。

1.6 数据处理

采用 Excel 2021 对数据进行前期整理和基本计算，采用 Origin 进行 Pearson 相关性分析，采用 Matlab 2019a 进行柑橘体积可食率建模及评价指标分析。

2 结果和分析

2.1 柑橘体积可食率的统计特征及相关系数

柑橘体积可食率包含了 7 个统计特征：果实横径、纵径、质量、体积、密度、果形指数和及切面图像可食率，并采用 Pearson 系数计算所有样本统计特征和体积可食率之间的相关性，如表 1 所示：

表 1 柑橘样本集统计特征及与体积可食率之间的相关性

Table 1 Statistical characterization of citrus sample sets and correlations with volumetric edible rate

参数 Parameters	果实横径 Transversal diameter of fruit $r/\text{mm}$	果实纵径 Vertical diameter of fruit $/\text{mm}$	果实质量 Fruit mass/g	果实体积 Fruit volume/ $\text{cm}^3$	果形指数 Shape index	果实密度 Density of fruit $/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	切面图像 可食率 Slice map edible rate	体积可食率 Volumetric edible rate
范围 Range	68.26~97.18	47.02~93.46	114.85~291.63	145.00~434.80	0.88~1.54	0.51~0.92	0.33~0.53	0.33~0.72
平均值 Mean	78.68	69.95	190.54	256.16	1.14	0.75	0.44	0.55
标准差 Standard deviation	5.66	9.55	42.46	55.59	0.13	0.08	0.04	0.07
相关系数 Correlation coefficient	-0.24	0.003 6	0.12	-0.34	-0.12	0.78	0.93	1.00

由于“不知火”形状并不规则，果实横径、纵径及果形指数与体积可食率的相关性较低，可见柑橘基本几何参数不能作为预测柑橘体积可食率的特征参数；而切面图像可食率源于 X 射线 CT 切面图中的果肉区域与果实区域面积比，且切面图能较好地分辨柑橘内部的果皮、果肉及空腔组织，因此切面图像可食率与柑橘体积可食

率相关性最高达 0.93。柑橘基本物理参数中，果实密度与体积可食率的相关性最高为 0.78，表明柑橘体积可食率与果实密度也存在一定正相关性；

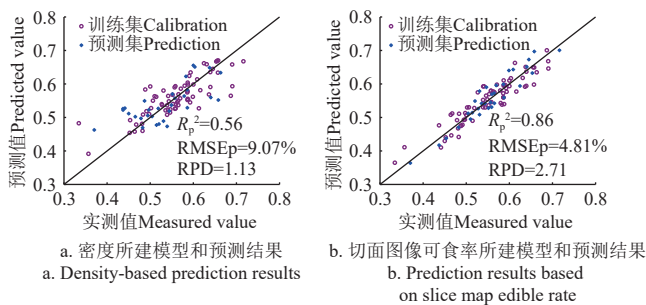
果实体积与柑橘体积可食率的相关系数为-0.34，说明两者关系为负相关，随着“不知火”果实体积的增加，果实空腔体积及果皮与果肉之间的间隙体积占比逐渐增

大, 而果肉体积占比逐渐减少, 说明从果实体积的大小判断柑橘可食率缺乏科学依据。

试验表明, 基于 X 射线三维重构技术获得的切面图像可食率和果实密度与柑橘体积可食率有很高的相关性, 因此, 后续仅选择果实密度、切面图像可食率作为模型输入特征进行建模分析柑橘体积可食率。

## 2.2 基于线性回归模型定量分析柑橘体积可食率

图 7 显示了不同输入特征的线性回归模型对柑橘体积可食率的预测结果, 结果表明, 当采用果实密度作为模型输入特征时, 预测精度较差, 决定系数  $R_p^2$  小于 0.6 而  $RMSEP_p$  均大于 9.0%,  $RPD$  小于 1.2, 说明模型拟合效果差、数据较离散, 其原因是“不知火”柑橘个体间形状差异大, 果皮与果肉间有空隙, 尤其是受生长环境和采摘时间的影响中心柱的空腔差异较大, 果实密度的计算值与实际值相关性差, 降低了建模精度。当采用切面图像可食率作为模型输入特征时, 算法精度高,  $R_p^2$  值大于 0.85,  $RPD$  大于 2.5, 说明模型经过训练能较好地归纳出变量间的相关性, 其原因是切面图像可食率特征, 明确表征了柑橘果皮、果肉和空腔组织区域及分布, 但  $R_p^2$  小于 0.9 说明利用切面图像可食率进行预测也存在不足, 其原因是 X 射线发射源焦点尺寸较大, X 射线探测器分辨率低, 切面图未能高精度重建柑橘组织结构分布。



注:  $R_p^2$  为预测集决定系数;  $RMSEP_p$  为预测集均方根误差;  $RPD$  为相对分析误差。

Note:  $R_p^2$  is the coefficient of determination of prediction;  $RMSEP_p$  is the root mean square error of prediction;  $RPD$  is the residual predictive deviation.

图 7 密度和切面图像可食率所建模型和预测结果

Fig.7 Modeling and prediction results based on density and slice map edible rates

从图 7 中也可观察到, 采用果实密度作为模型的输入特征时, 随着柑橘体积可食率的增加, 其预测值也逐渐增加, 但预测值与实际值偏差大, 说明预测效果差, 相关性低; 采用切面图像可食率作为模型的输入特征时, 预测值与实际值偏差小, 且相关性强; 柑橘体积可食率为 0.45~0.60 时, 线性回归模型的预测能力强, 预测精度高, 但当体积可食率大于 0.60 或小于 0.45 时, 预测集数据波动大, 可能的原因是 X 射线发射源的管电压与管电流参数与柑橘内部组织分布不匹配, 未能采集清晰的 X 射线投影图, 从而导致切面重建效果差。

## 3 结 论

1) 针对厚皮柑橘中心柱空心区域大, 果皮与果肉空腔间隙大, 仅从外观很难判断其果肉含量的难点, 本研究自制了一套线阵 X 射线三维重构无损检测装置, 包括

果实旋转升降、数据采集、辐射防护和运动控制; 根据试验柑橘果实的大小和密度, 确定经校正后的装置工作参数为: 管电压为 67 kV、管电流为 0.92 mA、积分时间为 1 ms;

2) 以“不知火”柑橘为研究对象, 引入切面图像可食率的概念, 采用线性回归模型对柑橘的体积可食率进行定量分析。结果表明, 柑橘密度和切面图像可食率与柑橘体积可食率有较强的相关性, 其中切面图像可食率的相关性最高, 相关系数达 0.93; 选择切面图像可食率作为线性回归模型的输入特征, 其预测集决定系数、均方根误差、相对分析误差分别为 0.86、4.81% 和 2.71, 说明使用此方法对厚皮柑橘体积可食率进行定量分析是可行的;

3) 本试验装置为探索性装置, 采用的 X 射线发射源焦点尺寸较大、X 射线探测器分辨率较低, 为了保证检测效率只采用间隔 120° 的 3 张柑橘重建切面计算切面图像可食率, 预测精度受到一定影响。后续研究可提高设备的采集精度或者增加切面重建数量来进一步提高预测精度。同时, 探索低成本 CT 检测技术在其它农产品无损检测中的应用。

## 【参 考 文 献】

- [1] 陈朗, 刘文欢, 刘思雨, 等. 柑橘营养施肥推荐专家系统的建立与验证[J]. 农业工程学报, 2023, 39(1): 146-154. CHEN Lang, LIU Wenhuan, LIU Siyu, et al. Establishing and verifying the nutrient expert system for citrus fertilization recommendation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(1): 146-154. (in Chinese with English abstract)
- [2] ZIBAE E, KAMALIAN S, TAJVAR M, et al. Citrus species: A Review of traditional uses, phytochemistry and pharmacology[J]. Current Pharmaceutical Design, 2020, 26(1): 44-97.
- [3] BUYUKKURT O K, GUCLU G, KELEBEK H, et al. Characterization of phenolic compounds in sweet lime (*Citrus limetta*) peel and freshly squeezed juices by LC-DAD-ESI-MS/MS and their antioxidant activity[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2019, 13(4): 3242-3249.
- [4] LADO J, ALÓS E, MANZI M, et al. Light regulation of carotenoid biosynthesis in the peel of mandarin and sweet orange fruits[J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 1288.
- [5] AL-SAMAN M A, ABDELLA A, MAZROU K E, et al. Antimicrobial and antioxidant activities of different extracts of the peel of kumquat (*Citrus japonica Thunb*)[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2019, 13(4): 3221-3229.
- [6] GAO K, HENNING S M, NIU Y, et al. The citrus flavonoid naringenin stimulates DNA repair in prostate cancer cells[J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2006, 17(2): 89-95.
- [7] 余乔明, 李果果, 许让伟, 等. 广西宽皮柑橘“蓝皮”果产生的生理原因初探[J]. 园艺学报, 2020, 47(6): 1172-1182. YU Qiaoming, LI Guoguo, XU Rangwei, et al. Physiological mechanisms for the phenomenon of “blue albedo” fruits of citrus reticulata in Guangxi[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2020, 47(6): 1172-1182. (in Chinese with English abstract)



- [8] 中华全国供销合作总社济南果品研究院. 鲜柑橘: GB/T 12947-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [9] 吉家颖. 无损检测技术在农产品品质检验中的应用[J]. 食品安全导刊, 2023(15): 166-168, 179.  
JI Jiaying. Application of non-destructive testing technology in quality inspection of agricultural products[J]. Food Science and Technology, 2023(15): 166-168, 179. (in Chinese with English abstract)
- [10] ARENDSE E, FAWOLE O A, MAGWAZA L S, et al. Non-destructive prediction of internal and external quality attributes of fruit with thick rind: A Review[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 217: 11-23.
- [11] MEDEIROS M L, CRUZ-TIRADO J P, LIMA A F. Assessment oil composition and species discrimination of Brassicas seeds based on hyperspectral imaging and portable near infrared (NIR) spectroscopy tools and chemometrics[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2022, 107: 104403.
- [12] BARBIN D, ELMASRY G, SUN D W, et al. Near-infrared hyperspectral imaging for grading and classification of pork[J]. *Meat Science*, 2012, 90(1): 259-268.
- [13] SHAO Y Y, SHI Y K, XUAN G T, et al. Hyperspectral imaging for non-destructive detection of honey adulteration[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2022, 118: 103340.
- [14] KAMRUZZAMAN M, MAKINO Y, OSHITA S. Rapid and non-destructive detection of chicken adulteration in minced beef using visible near-infrared hyperspectral imaging and machine learning[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 170: 8-15.
- [15] BAIANO A, TERRACONE C, PERI G, et al. Application of hyperspectral imaging for prediction of physico-chemical and sensory characteristics of table grapes[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 87: 142-151.
- [16] 刘洋, 罗印斌, 马先红, 等. 基于声学技术在农产品品质评价中的应用研究现状[J]. 食品工业, 2018, 39(10): 255-259.  
LIU Yang, LUO Yinbin, MA Xianhong, et al. Application of acoustic technology in quality evaluation of agricultural products[J]. *The Food Industry*, 2018, 39(10): 255-259. (in Chinese with English abstract)
- [17] 白志杰. 基于声学特性水果硬度检测系统与应用方法的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.  
BAI Zhijie. Study on the Detection System and Application Method of Fruit Firmness Based on Acoustic Characteristics[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [18] 陈翀. 猕猴桃内部品质的声学振动无损检测方法研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020.  
CHEN Chong. Study on Acoustic Vibration Nondestructive Testing Method for Internal Quality of Kiwifruit[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [19] PUERTO D, GILA D, GARCÍA J, et al. Sorting olive batches for the milling process using image processing[J]. *Sensors*, 2015, 15(7): 15738-15754.
- [20] 王风云, 封文杰, 郑纪业, 等. 基于机器视觉的双孢蘑菇在线自动分级系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 256-263.  
WANG Fengyun, FENG Wenjie, ZHENG Jiye, et al. Design and experiment of automatic sorting and grading system based on machine vision for white agaricus bisporus[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(7): 256-263. (in Chinese with English abstract)
- [21] 邹伟. 机器视觉在柑橘分级技术上的研究进展[J]. 农业装备技术, 2023, 49(3): 4-6.
- [22] STEVIE F A, DONLEY C L. Introduction to X-ray photoelectron spectroscopy[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2020, 38(6): 063204.
- [23] 张潮, 孙钦秀, 孔保华. X 射线断层扫描技术在食品检测中的应用[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(6): 189-193.  
ZHANG Chao, SUN Qinxiu, KONG Baohua. A Review of the application of X-ray computed microtomography in food detection[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(6): 189-193. (in Chinese with English abstract)
- [24] MAGWAZA L S, OPARA U L. Investigating non-destructive quantification and characterization of pomegranate fruit internal structure using X-ray computed tomography[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 95: 1-6.
- [25] ARENDSE E, FAWOLE O A, MAGWAZA L S, et al. Non-destructive characterization and volume estimation of pomegranate fruit external and internal morphological fractions using X-ray computed tomography[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 186: 42-49.
- [26] LOOVERBOSCH T, BHUIYAN M H, VERBOVEN P, et al. Nondestructive internal quality inspection of pear fruit by X-ray CT using machine learning[J]. *Food Control*, 2020, 113: 107170.
- [27] 章程辉, 王群. X 射线图像技术对红毛丹内部品质的检测[J]. 热带作物学报, 2005, 26(1): 103-108.  
ZHANG Chenghui, WANG Qun. Detection of internal quality of rambutan fruit by using X-ray imaging[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2005, 26(1): 103-108. (in Chinese with English abstract)
- [28] 孙旭东, 王加华, 皮付伟, 等. 基于 X 射线图像的苹果体积在线快速测算[J]. 光学学报, 2007(11): 2096-2100.  
SUN Xudong, WANG Jiahua, PI Fuwei, et al. A fast online method to measure and calculate the apples cubage based on X-ray image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007(11): 2096-2100. (in Chinese with English abstract)
- [29] 黄滔滔, 孙腾, 张京平. 基于 CT 图像的苹果内部品质无损检测[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2013, 39(01): 92-97.  
HUANG Taotao, SUN Teng, ZHANG Jingping. Non-destructive detection of internal quality of apple based on CT image[J]. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)*, 2013, 39(01): 92-97. (in Chinese with English abstract)
- [30] 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 with English abstract)
- [31] 许骞, 蔡健荣, 杜灿, 等. 基于软 X 射线成像技术的柑橘内部浮皮和枯水检测[J]. 智慧农业(中英文), 2021, 3(4):

- 53-65.
- XU Qian, CAI Jianrong, DU Can, et al. Detection of peel puffing and granulation in citrus based on soft X-ray imaging technology[J]. *Smart Agriculture*, 2021, 3(4): 53-65. (in Chinese with English abstract)
- [32] 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.
- [33] 蔡健荣, 梁小祥, 许赛, 等. 一种基于三维影像重构技术的柑橘桔水浮皮检测装置及方法: 202310436953.1[P]. 2023-04-21.
- [34] 屈国普, 凌球, 郭兰英, 等. X射线线阵列探测器数字图像的均匀性原因分析[J]. *核电子学与探测技术*, 2003(5): 414-416.
- QU Guopu, LING Qiu, GUO Lanying, et al. Analysis of the cause for the nonuniformity of X-ray detector line array of digital image[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2003(5): 414-416. (in Chinese with English abstract)
- [35] 巫军, 王黎明, 史振华, 等. X射线成像系统数字图像质量评价方法研究[J]. *传感器世界*, 2010, 16(4): 6-9.
- WU Jun, WANG Liming, SHI Zhenhua, et al. Digital image quality evaluation method of X-ray imaging system[J]. *Sensor World*, 2010, 16(4): 6-9. (in Chinese with English abstract)

## Detecting volumetric edible rate of thick-skinned citrus using X-ray three-dimensional reconstruction

CAI Jianrong, LIANG Xiaoxiang, XU Qian, XIA Zhongyan, SUN Li, MA Lixin

(School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Citrus rich in nutrients is one of the most favorite fruits in recent years. But the thick-skinned citrus is often accompanied by the fruit hollow, skin thick floating, leading to the low actual volumetric edible rate. Furthermore, traditional nondestructive testing cannot accurately and rapidly detect the volumetric edible rate. In this study, the line array X-ray image acquisition and three-dimensional reconstruction were developed to detect the volumetric edible rate of thick-skinned citrus fruits, including the fruit rotation and lifting, data acquisition, radiation protection and motion control. The fruit rotating device consisted of a rotating table and a gear motor; the fruit lifting device consisted of a lifting platform and a stepping motor. The data acquisition device included an X-ray emission source, a line array X-ray detector, and upper computer software. The radiation protection device was a lead plate with a thickness of 2mm, which was used to prevent the radiation generated by X-rays from leaking to the external environment. The motion control part consisted of a programmable logic controller and upper computer software. Taking the Ugli fruit as the detection object, the information entropy of the X-ray projection map was evaluated to optimize the detection parameters. The optimal tube voltage and current of X-ray source were obtained to be 67 kV and 0.92 mA, respectively. The integration time of the line array detector was 1 ms. Dark-field correction and bright-field compensation were used to remove the uneven pixel distribution and the noisy background in the initial state of the X-ray detector before the experiment. A series of 180 X-ray projections were collected in the circumferential direction at intervals of 2.0° rotation. The samples were rotated by 120° with the mid-axis of the fruit as the center of rotation. A series of citrus X-ray projection maps were captured at three angles of 0°, 120° and 240°, respectively. The X-ray projection maps were converted to sinograms using the Radon transform. After that, the sinograms under the three angles were reconstructed as the slice maps using the FBP (Filtered Back Projection). Image segmentation was carried out on the slice maps using image filtering, enhancement, and thresholding segmentation, in order to form the background, pericarp, pulp, and cavity region. Moreover, the regional area ratio was defined using the ratio of citrus pulp region to fruit region, whereas, the slice map edible rate was defined using the regional area ratio. The physical parameters were measured, such as transversal diameter, vertical diameter, mass, volume, density and fruit shape index of citrus fruits. The true volumetric edible rate of citrus was calculated using the specific gravity of citrus pulp to the volume of the whole fruit. There was the better correlation between the physical parameters and volumetric edible rate of citrus. The results showed that there was the higher correlation between fruit density and slice map edible rate and citrus volumetric edible rate, with the highest correlation 0.93 for slice map edible rate. Finally, the slice map edible rate was selected as the input feature of the model. The linear regression model was used to quantify the volumetric edible rate of thick-skinned citrus, with the values of  $R_p^2$  (Coefficient of Determination of Prediction), RMSEP (Root Mean Square Error of Prediction), and RPD (Residual Predictive Deviation) of 0.86, 4.81%, and 2.71, respectively. In conclusion, it is feasible to quantitatively analyze the volumetric edible rate of thick-skinned citrus using X-ray three-dimensional reconstruction. The developed approach can also be applied in the nondestructive testing of the quality of agricultural products. Therefore, the nondestructive testing techniques can be expected to evaluate the internal tissue lesions and external quality of agricultural products.

**Keywords:** non-destructive testing; X-ray imaging; three-dimensional reconstruction; slice map; citrus; volumetric edible rate