

菠萝 X 射线 3D 显微 CT 重建与可视化研究

白永亮¹, 张延杰¹, 富阳², 刘霁莎¹, 胡志高¹, 何颖雯¹, 马骊欣², 刘海林²

1. 中山市食品学会, 广东 中山 528400

2. 中山职业技术学院, 广东 中山 528400

DOI:10.61369/SDR.2025030021

摘 要 : 本研究聚焦中国地理标志产品神湾菠萝, 探索工业 X 射线显微计算机断层扫描 (显微 CT) 技术在其内部微结构三维重建与可视化中的应用潜力。研究系统阐述了显微 CT 技术在农产品内部缺陷识别、组织结构解析及品质评价中的独特优势, 结合菠萝果实特有的复合组织构造, 提出了基于显微 CT 的三维成像与分析方法框架。该技术路线为深入理解神湾菠萝采后生理变化、优化贮藏加工工艺、提升品质控制精度提供了新的无损观测维度, 展现了工业 CT 技术在特色农产品精细化研究中的前景。

关 键 词 : 菠萝; X 射线; 显微 CT; 重建; 可视化

Research on 3D Micro-CT Reconstruction and Visualization of Pineapple X-ray

Bai Yongliang¹, Zhang Yanjie¹, Fu Yang², Liu Aisha¹, Hu Zhigao¹, He Yingwen¹, Ma Lixin², Liu Hailin²

1. Zhongshan Food Science Society, Zhongshan, Guangdong 528400

2. Zhongshan Polytechnic, Zhongshan, Guangdong 528400

Abstract : This study focuses on the Chinese geographical indication product, Shenwan Pineapple, and explores the application potential of industrial X-ray micro-computed tomography (micro-CT) technology in the three-dimensional reconstruction and visualization of its internal microstructure. This study systematically expounds the unique advantages of micro-CT technology in the identification of internal defects, tissue structure analysis and quality evaluation of agricultural products. Combined with the unique composite tissue structure of pineapple fruits, a framework of three-dimensional imaging and analysis methods based on micro-CT is proposed. This technical route provides a new non-destructive observation dimension for a deeper understanding of the post-harvest physiological changes of Shenwan pineapples, optimizing storage and processing techniques, and improving the accuracy of quality control, demonstrating the prospects of industrial CT technology in the refined research of characteristic agricultural products.

Keywords : pineapple; "X-ray"; microscopic CT; reconstruction; visualization

引言

农产品品质安全与加工适宜性高度依赖于其内部不可见的结构特征。传统检测方法多具破坏性, 难以实现产品内部状态的全面评估与动态追踪。菠萝等热带水果, 其内部糖心 (水浸状病变)、褐变、孔隙分布、维管束结构等关键品质指标, 对食用口感、贮藏性能及加工品质具有决定性影响。因此, 发展无损、高分辨的内部结构可视化技术, 对提升菠萝产业的科研水平与产品价值很重要。

工业 CT 技术, 特别是显微 CT, 利用不同物质对 X 射线吸收系数的差异, 通过多角度投影数据重建物体内部结构的三维图像, 实现了从“剖开观察”到“透视解析”的革命性跨越。该技术在材料科学、生物医学、考古等领域已广泛应用, 其在食品农产品领域的深入应用尚待拓展, 尤其在具有复杂内部构造的果实类产品如菠萝上的系统性研究相对较少。现有菠萝内部品质评估方法 (如密度测定、声学检测、近红外光谱等) 虽各有优势, 但在精确描绘三维空间结构、定位微小缺陷方面存在短板。显微 CT

技术凭借其非破坏性、高分辨率及三维量化分析能力, 有望成为填补这一空白的有力工具。

工业 CT 技术通过射线穿透物体并采集多角度投影数据, 经计算机重建生成物体内部结构的三维图像^[1]。该技术已成功应用于多孔介质结构分析, 菠萝孔隙与黄土空隙结构研究中利用 CT 识别结构缺陷的原理相似^[2], 也类似冻干人参的孔隙率测量^[3]、黑土孔隙网络的三维构建^[3]以及非饱和砂土水分特征研究^[4]。这些研究表明, 基于密度差异的 CT 成像能有效区分材料内部不同组分, 为

基金信息: 中山市科技局公益项目《神湾菠萝 x 射线 3D 显微 CT 重建与可视化研究》, 编号 2022SYF07; 佛山市教育局《面向集群产业共性技术的先进检测技术研究与应用示范》, 编号 2021DZX06。

菠萝果肉组织、病变区域的识别提供了技术依据。CT 技术可三维重建果肉孔隙网络及纤维束空间分布^[3,6]，其分析逻辑与黑土孔隙定量化研究^[3]、菊粉面包微观结构表征^[7]一致。通过建立结构参数与感官品质的关联模型，可为育种筛选提供量化依据。工业 CT 支持同一样本多次扫描，实现结构动态变化可视化^[5,8]，该方法在冻融循环下土壤结构演变监测中已有成功应用^[3]。现有工业 CT 设备主要针对工业零件设计，腔体尺寸和射线参数对高水分农产品适配性不足。需开发专用样品固定夹具，并优化扫描参数（如 70–90kV 电压、100 μ m 级分辨率）^[5,9]，这与植物根系 CT 扫描中面临的样品制备挑战相似^[10,11]。建立菠萝典型结构的 CT 图谱库及灰度区间^[12]，可降低判读门槛。该需求与沥青混合料 CT 分析中建立结构–性能关联模型的要求一致^[13]。高精度 CT 单次检测成本较高，当前更适用于育种材料评价、保鲜工艺开发等高价值场景^[14]。快速扫描方案是推广关键，类似植物考古中显微 CT 技术的分级应用策略^[15]。将 CT 定位与微型近红外光谱技术结合，可实现“结构+成分”双模态分析^[16]。此方法在根系–土壤相互作用研究中已有探索，通过 CT 与力学测试结合量化根土复合体抗剪强度^[17]。基于深度学习的 CT 图像自动识别技术可提升糖心区域量化效率^[18]。在林木根系研究中，改进的 FCM 聚类算法已有效提升 CT 序列图像分割精度^[19]。工业 CT 为神湾菠萝内部品质研究提供了新的技术视角。借鉴土壤学^[2–4]、食品科学^[7,16]等领域的技术经验，有望推动该技术从科研工具转化为产业升级的有效支撑。

一、工业显微 CT 技术原理及其在农产品领域的适用性

X 射线显微 CT 的核心原理在于物质对 X 射线的衰减遵循比尔–朗伯定律。当一束 X 射线穿透样品时，不同密度和原子序数的组织对射线的吸收程度各异。探测器记录下穿透样品后衰减的 X 射线强度信息（即投影数据）。通过围绕样品旋转扫描获取数百乃至上千个不同角度的二维投影图像，利用专门的数学重建算法（如滤波反投影算法 FBP 或迭代重建算法），即可精确计算出样品内部各点的 X 射线衰减系数分布图。这一分布图直接反映了样品内部物质的三维密度信息。

显微 CT 区别于常规工业 CT 的关键在于其极高的空间分辨率（通常可达微米甚至亚微米级别）。这依赖于精密的微焦点 X 射线源、高灵敏度平板探测器以及精确的样品定位与运动控制系统。高分辨率使得观察如菠萝果肉中的细胞间隙、微小维管束、早期病变区域等微观结构成为可能。此外，显微 CT 扫描过程无需对样品进行任何物理切割或复杂预处理（通常仅需适当固定），最大程度保持了样品的原始状态，这对于研究活体或易损伤的农产品意义重大。

在农产品食品领域，显微 CT 的价值已初步显现。例如，在小麦籽粒内部虫蛀检测、苹果水心病诊断、面包孔隙结构分析、冷冻食品冰晶分布观察等方面均取得了积极进展。这些应用证实了该技术在解析农产品复杂、非均质内部结构，尤其是那些与品

质、安全密切相关的微观特征方面，具有独特且不可替代的优势。这为其应用于神湾菠萝这类结构复杂的热带水果研究奠定了坚实的技术基础。

二、菠萝显微 CT 三维重建与可视化方法设计

针对菠萝的结构特点和科研目标，本研究提出以下显微 CT 三维成像与分析的核心方法框架：

（一）样品制备与参数优化：

选取代表性神湾菠萝果实（不同成熟度、不同果园来源等），进行必要的外观清洁。样品尺寸需适配显微 CT 设备的扫描腔体，过大的样品可进行局部取样（如包含果芯的圆柱状果块），但需记录取样位置。

（二）关键扫描参数需系统优化：

（1）X 射线管电压 (kV) 与电流 (μ A)：决定射线能量与穿透能力。需在保证足够信噪比和穿透菠萝组织的前提下，尽量选择较低剂量，避免损伤样品。通常需要试验确定最佳组合。

（2）空间分辨率：根据目标特征尺寸（如微小孔隙、纤维束）设定。高分辨率（如 10–20 微米体素）利于微观结构，但扫描时间长、数据量大；需平衡分辨率与效率。

（3）曝光时间与投影数：影响单幅投影图像质量及最终重建精度。需在图像清晰度与总扫描时间/辐射剂量间取得平衡。

（4）滤波片：根据需求选用适当滤波片（如铜箔、铝箔）过滤低能射线，提高图像对比度，减少硬化伪影。

（5）数据采集：将样品稳固安装在旋转台上。设置优化好的扫描参数（电压、电流、分辨率、曝光时间、投影数等），启动自动扫描程序，获取样品 360 度范围内的一系列二维投影图像。

（6）三维重建：将采集到的二维投影数据导入专业 CT 重建软件（如 CTPro3D, NRecon 等）。选择合适的重建算法（如 FBP）和关键参数（如 Beam Hardening Correction 硬化校正、Ring Artifact Reduction 环状伪影抑制）。重建过程将生成代表样品内部三维密度分布的图像堆栈（一系列连续的二维断层切片）。

（三）可视化与定量分析：

（1）三维可视化：使用三维可视化软件（如 VGStudio MAX, Avizo, Dragonfly 等）导入重建后的体数据。利用体绘制技术生成菠萝内部结构的整体三维透视图，直观展示果肉、纤维束、孔隙、潜在病变区域（糖心、褐变）的空间形态及相互关系。可进行虚拟切割，从任意角度和平面观察内部细节。

（2）关键结构分割与提取：应用图像处理技术（阈值分割、区域生长、形态学操作、机器学习辅助分割等）区分不同组织（如果肉、纤维束、孔隙、病变区）。这是后续定量分析的基础，其准确性很重要。

（四）三维定量分析：

（1）糖心/褐变区域：计算其体积、表面积、空间位置（如距果皮距离、与果芯关系）、形状因子等。

（2）孔隙结构：分析孔隙率（总体积占比）、孔隙数量分布、孔隙大小分布、孔隙形状、孔隙连通性、各向异性等。

(3) 纤维束(维管束)网络: 提取纤维骨架, 分析纤维长度、直径分布、分支数量、空间取向、体积密度等。

(4) 密度分析: 计算不同区域(如果肉、果芯)的平均灰度值(间接反映密度), 绘制密度分布图, 分析密度均匀性。

(五) 数据关联与应用探索: 将显微 CT 获取的内部结构参数(如孔隙率、纤维密度、糖心体积、密度分布)与菠萝的感官评价指标(多汁性、嫩度、纤维感)、理化指标(糖度、酸度、硬度)或贮藏加工表现进行关联分析, 探索结构参数作为菠萝内部品质无损评价指标的潜力。

通过精确捕捉和量化糖心、褐变、纤维、孔隙等关键微观结构特征及其空间分布, 该技术有望在理解采后生理、建立科学分级体系、指导加工工艺、辅助育种栽培等多个维度推动神湾菠萝产业的提质增效与价值提升。

三、菠萝显微 CT 挑战

我们认识到该技术在实际应用面临的挑战:

(1) 成本与效率: 高精度显微 CT 设备购置和维护成本高昂, 高分辨率扫描耗时较长(数小时/样品), 数据处理(重建、分割、分析)也需要较强的计算资源和专业软件技能。这限制了其在大规模、高通量检测场景(如果园现场分级)的即时应用。

(2) 图像解释与标准建立: 如何准确地将 CT 图像中的灰度差异、几何形态与具体的生理状态(如糖心早期、轻微褐变)或品质属性(如嫩度阈值)对应起来, 需要扎实的农学、食品科学知识 with CT 图像分析经验相结合。建立广泛认可的、基于 CT 参数的菠萝内部品质评价标准仍需大量的基础研究和数据积累。

(3) 样品与参数优化: 菠萝个体差异大, 大小、形状、内部成分(水分、糖分)变化会影响 X 射线吸收, 为扫描参数设置和图像标准化带来挑战。针对不同研究目标(如看整体结构 vs 看微小孔隙), 需要精细优化扫描方案。

(4) 与其他技术的融合: 显微 CT 擅长结构成像, 但在成分分析(如糖度、酸度、特定代谢物)方面能力有限。未来研究需探索将其与近红外光谱(NIRS)、拉曼光谱、高光谱成像等技术融合, 构建更加全面的菠萝品质无损检测体系。

本研究提供传统方法无法获取的、关于菠萝内部世界的三维量化信息, 为理解品质形成、优化生产链条提供科学依据。随着技术的进步(如更快扫描速度、更智能的分析算法)和成本的降低, 其在产业中的应用潜力将逐步释放。

四、神湾菠萝内部结构特性与显微 CT 观测价值

神湾菠萝以其香甜多汁、风味浓郁著称, 其独特的内部结构是品质形成的基础。菠萝果实由众多小果聚合而成, 内部结构高度复杂:

(1) 多层次组织: 从外到内主要包括坚韧的外皮(苞片、萼片)、多汁的果肉(由子房和花萼基部发育而来)以及贯穿其中的纤维束(维管束系统)。

(2) 关键品质指标关联结构:

(3) 糖心(水浸状区域): 常表现为局部果肉密度降低、水分异常聚集, 与特定部位细胞破裂或物质代谢异常有关。

(4) 褐变: 内部褐变常发生于果芯或维管束周围, 与酚类物质氧化及酶活性相关, 影响外观和口感。

(5) 孔隙度与纤维分布: 果肉中孔隙(细胞间隙)的大小、分布及连通性直接影响质构(如多汁感、嫩度); 纤维束(维管束)的数量、粗细及走向则与口感粗糙度、咀嚼性密切相关。

(6) 成熟度与糖度分布: 成熟过程中物质转化导致内部密度发生细微变化。

传统方法难以无损、立体地量化这些内部特征及其空间分布规律。例如, 糖心的发生位置和范围具有随机性, 破坏性取样难以全面评估整果状况; 内部褐变的起始点隐蔽, 外观难以察觉; 纤维的立体网络结构通过切片难以完整重构。显微 CT 的三维成像能力为直观展现神湾菠萝内部复杂的解剖结构、精确定位和量化糖心区域、可视化褐变病灶的空间形态、三维重建纤维网络、分析孔隙的三维分布特性提供了前所未有的。这种无损的“内部透视”对于理解神湾菠萝品质形成的结构基础、识别影响品质的关键内部因子、建立基于内部结构的客观评价标准具有核心价值。

五、显微 CT 在菠萝科研的潜力

基于上述三维重建与可视化能力, 显微 CT 技术有望在神湾菠萝研究的多个关键环节发挥重要作用:

(1) 采后生理与贮藏品质劣变机理研究: 无损、动态地监测菠萝在贮藏过程中内部结构的变化很重要。通过定期对同一批样本(或代表性样本)进行显微 CT 扫描, 可定量追踪糖心区域的产生与发展过程、褐变病灶的扩散路径、果肉孔隙结构的变化(如塌陷或增大)、纤维束的增韧等现象。这种无损的动态观测将揭示水分迁移、细胞结构解体、酶促褐变等生理过程在三维空间的表现形式, 为阐明神湾菠萝采后劣变(如软化、风味丧失、褐变)的具体机理提供直接的微观结构证据, 从而为开发针对性的保鲜调控技术(如气调参数优化、保鲜剂筛选)提供理论依据。

(2) 内部品质无损评价与分级标准优化: 传统的菠萝分级主要依赖外观、重量、糖度(破坏性抽样)。显微 CT 提供的丰富内部结构信息(如糖心有无及大小、内部褐变程度、纤维分布均匀性、核心紧实度、整体密度均匀性)可作为开发高附加值内部品质分级标准的客观依据。探索建立关键 CT 结构参数(如特定阈值下的低密度区体积、平均密度标准差、纤维束密度)与消费者最关注的感官属性(如口感嫩度、多汁性、是否有粗纤维感、有无异味源)之间的可靠关联模型, 是未来实现基于内部品质的精准、无损在线分级的科学基础。

(3) 加工适应性研究与工艺优化: 菠萝的加工特性(如出汁率、果肉得率、质地保持)深受其内部结构影响。利用显微 CT 分析不同品种、产地、成熟度或采后处理的神湾菠萝在孔隙结构、纤维网络、果肉紧实度等方面的三维特征差异, 可以科学预测其适用于鲜切、制罐、榨汁、干燥等不同加工途径的潜力。例

如，高连通孔隙率的菠萝更易渗透糖液，适合制作糖渍产品；纤维束细小且分布均匀的菠萝则更适合鲜切或榨汁。进一步地，该技术可用于无损评价加工处理（如酶解、热烫、冷冻）对菠萝微观结构的改变（如果肉细胞破损程度、孔隙形态变化、纤维软化效果），为优化加工工艺参数（如酶解时间温度、热烫强度）提供直观的结构反馈。

（4）栽培与育种辅助评价：不同栽培措施（如灌溉模式、施肥方案、生长调节剂使用）或不同菠萝品系 / 育种材料，其最终形成的果实内部结构存在显著差异。显微 CT 技术提供了一种在三维层面无损评估这些差异的高效手段。育种家可以筛选具有理想内部结构特征（如低糖心发生率、细小均匀的纤维、适宜的孔隙度）的优良单株或品系，加速育种进程。农学家则可研究农艺操作如何影响果实内部结构建成，从而指导优化栽培技术，生产出内部结构更符合市场需求（如更少纤维）的菠萝。

六、结论

我们研究了工业 X 射线显微 CT 技术在菠萝内部结构三维重建与可视化，显微 CT 能够穿透菠萝坚硬的外皮，以微米级分辨率清晰呈现其内部复杂的果肉组织、纤维束网络、孔隙分布以及糖心、褐变等关键品质关联特征的三维空间形态，并提供量化的结构参数。这为深入理解神湾菠萝的采后生理变化规律、揭示内部品质形成与劣变的结构基础、探索基于内部结构的无损评价新方法、优化加工适应性以及辅助栽培育种研究，开辟了全新的技术视角。

随着技术的持续发展和多模态检测融合的推进，显微 CT 有望在菠萝乃至更广泛的特色农产品精细化研究、品质保障与价值挖掘中发挥越来越重要的作用。本研究提出的方法框架为后续开展具体的实验验证和应用探索奠定了基础，推动菠萝研究从“表面”深入“内里”，为产业的可持续发展注入科技动力。

参考文献

- [1] 戴晶玮, 周国燕. 工业 CT 测量冻干人参孔隙率的试验研究 [J]. 食品研究与开发, 2015, 36(15): 12-15.
- [2] 李鑫. 基于 CT 的黄土微观空隙结构及优先流特性研究 [D]. 长安大学, 2020.
- [3] 刘博. 冻融条件下黑土孔隙结构三维构建与定量化研究 [D]. 沈阳农业大学, 2019.
- [4] 赵甜. 基于 CT 扫描的非饱和砂土水分特征研究 [D]. 中国地质大学 (北京), 2018.
- [5] 徐秀苹, 等. 磷酸盐和干燥处理提高植物样品显微 CT 成像对比度的方法 [J]. 电子显微学报, 2021, 40(4): 407-413.
- [6] 刘玲玲, 等. 利用 X 射线 CT 技术研究根系三维构型的进展 [J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(2): 380-392.
- [7] 高海霞. X 射线 CT 技术无损评价菊粉面包品质及在货架期的特征变化 [D]. 武汉轻工大学, 2024.
- [8] 杨圣涛, 等. 基于 CT 扫描的草炭土孔隙结构分析及渗流模拟 [J]. 工程地质学报, 2021, 29(5): 1569-1578.
- [9] 苏益, 等. Micro-CT 技术及其在植物学研究中的应用 [J]. 实验科学与技术, 2022, 20(4): 1-6.
- [10] 张亭. 植物根土复合体的结构表征及其保水固土效应研究 [D]. 成都理工大学, 2023.
- [11] 杨钊, 黄婧. 基于 CT 扫描植物根-土复合体直剪试验研究 [J]. 山西建筑, 2024, 50(9): 84-87.
- [12] 布海玲. 新疆地区基于路面性能的沥青混合料设计方法优化分析 [D]. 新疆农业大学, 2015.
- [13] 李毅红, 等. 植物根系 X 射线 CT 图像序列分割方法研究 [J]. 中国体视学与图像分析, 2017, 22(3): 302-309.
- [14] 安婷, 等. 显微 CT 技术助力植物考古与农业起源演化研究 [J]. 科学通报, 2024, 69(9): 1230-1240.
- [15] 于世瑾. 植物器官 CT 影像体分割算法的研究与实现 [D]. 西北农林科技大学, 2018.
- [16] 李克新, 等. 林木幼苗根系 CT 序列图像分割 [J]. 森林工程, 2014, 30(1): 77-80.
- [17] 马哲. 含根系细观界面黄土渗透与力学特性研究 [D]. 长安大学, 2023.
- [18] 黄效. 膨胀土中草本根系的生长特征及其对裂隙发育的影响 [D]. 广西大学, 2020.