

刘庆庭, 胡平, 郑明轩, 等. 作物组织结构与力学性能研究 [J]. 华南农业大学学报, 2024, 45(3): 446-456.
LIU Qingting, HU Ping, ZHENG Mingxuan, et al. Research on crop tissue structure and mechanical properties [J]. Journal of South China Agricultural University, 2024, 45(3): 446-456.

作物组织结构与力学性能研究

刘庆庭, 胡平, 郑明轩, 林志超, 李志昂, 李桃

(华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642)

摘要: 传统的宏观力学性能试验方法无法解析作物的力学性能与形态结构、微观结构和化合物成分存在的内在联系。显微图像获取与处理技术和有限元分析的深度发展使多尺度方法成为了作物力学研究的新途径。作物组织结构与力学性能研究是作物多尺度力学的重要部分。本文从作物组织的形态结构及几何模型构建方法、力学模型构建与求解方法和力学性能试验方法等3个方面对作物组织多尺度结构力学的研究现状进行了综述, 分析了现有的组织几何模型与力学模型构建方法和力学性能试验方法等方面存在的局限性, 并对多尺度结构力学研究进行了展望。

关键词: 作物; 组织结构; 几何模型; 力学模型; 多尺度

中图分类号: S511; S502

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2024)03-0446-11

Research on crop tissue structure and mechanical properties

LIU Qingting, HU Ping, ZHENG Mingxuan, LIN Zhichao, LI Zhiang, LI Tao

(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Crop mechanical properties are intrinsically related to its morphological structure, microstructure and compound composition, and traditional macroscopic mechanical test methods cannot resolve the relationship. The development of microscopic image acquisition and processing technology and finite element simulation has led to a new approach to study on crop mechanics at multiple scales. The study of the structure and mechanical properties of crop tissue is an important part of crop mechanics at multiple scales. This paper reviewed the current status and development of research on the multi-scale structural mechanics of crop tissue from three aspects: Morphological structure and geometric model construction methods, mechanical models and its solution method, and mechanical performance experiment methods of crop tissue, and pointed out their current shortcomings from those three aspects. The prospects for conducting multi-scale structural mechanics research were also presented.

Key words: Crop; Tissue structure; Geometric model; Mechanical model; Multi-scale

作物的根、茎、叶、花、果实等器官和植株的力学性能, 被广泛应用于作物抗倒伏、土壤-作物-机器互作力学、果实品质监测和仿生材料设计等研究领域^[1-4]。作物的力学性能大多是在器官尺度下通过

测试获得的。刘庆庭等^[5]在研究收割机与甘蔗茎秆的互作规律时提出需要根据茎秆的解剖结构构建材料与力学模型。Liu等^[6]以横观各项同性材料为甘蔗茎秆的蔗皮与蔗芯材料模型, 建立本构方程和

收稿日期: 2023-03-02 网络首发时间: 2023-11-10 08:23:09

首发网址: <https://link.cnki.net/urlid/44.1110.S.20231108.1740.002>

作者简介: 刘庆庭, 教授, 博士, 主要从事甘蔗生产机械化研究和作物力学研究, E-mail: qingting@scau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (32271995)

力学指标体系, 分析机具切割时甘蔗的破坏机理。Von Forell 等^[7]在研究作物抗倒伏性能时, 提出茎秆的力学性能取决于茎秆的形态结构、微观结构和化合物含量。

作物是天然的多尺度结构, 细胞是作物结构的基本单位, 组织是由一种或多种细胞集合而成的结构单位, 器官是由多种组织构成的具有一定功能的作物结构。这种多尺度结构为多尺度方法应用于作物力学研究提供了基础, 多尺度方法正成为作物力学研究的前沿和热点。例如, 将作物的茎划分为整秆尺度(茎秆)、宏观尺度(组织)、微观尺度(细胞)、超微尺度(细胞壁)和生物化学尺度(细胞壁化合物组分)等多个层次, 从宏观到微观解析其力学性能^[8-11]。但是, 目前多尺度作物力学领域的研究还较少, 尚未形成系统的理论与方法。

作物器官的力学性能取决于构成器官的各组织在器官内的分布方式和组织本身力学性能^[12-13]。组织的力学性能取决于构成组织的各细胞在组织内的分布方式及其力学性能。细胞力学性能取决于细胞的形态结构、化合物成分^[14]和含水率^[15]等。组织是“细胞-组织-器官-植株”多尺度结构的核心环节。组织力学是多尺度方法从细胞到器官解析作物力学性能的关键环节, 是联结细胞力学与器官力学的重要桥梁。

梳理作物组织的形态结构、细胞在组织内的排列方式、组织的几何与力学模型和力学性能试验方法等, 对开展作物组织力学研究具有重要的实践价值和科学意义。

1 作物组织形态结构与几何模型

对作物器官力学性能影响较大的组织有薄壁组织、机械组织(包括厚角组织、植物纤维和石细胞组织等)和输导(维管)组织(分为木质部和韧皮部)等。不同作物组织的功能和力学性能不同^[16-19]。即使是同类组织, 细胞形态结构尺寸、排列方式和疏密度不同, 组织的力学性能也不同。例如, 木射线细胞在树木横截面内沿径向排列的现象, 可以解释木材径向力学性能远高于切向力学性能、纵向排列的束状纤维细胞使组织的纵向力学性能远高于径向和力学性能^[20]。

表征组织的形态结构, 需要构建合适的几何模型^[21]。组织形态结构取决于构成组织的细胞的形态结构和排列方式^[22]。构建组织几何模型, 需要构建组织内细胞的几何模型, 方法有2种: 一是将细胞简化为统一尺寸的几何单元, 重复叠加这些单元构

成组织的几何模型; 二是利用图像处理技术对组织的显微图像进行处理, 将组织内每个细胞的几何尺寸参数化, 构建较为精确的组织几何模型。

1.1 均匀化细胞尺寸构建的组织几何模型

在模拟作物组织形态结构时, 将同类型细胞简化为简单、统一的几何图形单元, 如圆环状、方形或者六角形等。结合组织显微图像中细胞的数量和排列方式, 将几何单元阵列构建成组织的几何模型^[23]。

Pitt^[17]在研究薄壁组织力学性能时, 将组织中的薄壁细胞简化为统一尺寸的正六边形, 将这些正六边形堆叠在一起, 首次构建了薄壁组织的二维几何模型。该几何模型对组织的还原精度较低, 且忽略了细胞在三维尺度上的形态。Voronoi^[24]发现苹果表皮薄壁组织是由形似球形多面体的薄壁细胞堆积而成, 为了还原薄壁细胞的三维形态, 基于离散单元法, 采用三维无网格粒子模拟薄壁细胞, 构建由13个薄壁细胞构成的薄壁组织的三维几何模型。该几何模型模拟了细胞在三维尺度上的形态, 解释了更多的细胞细节, 但忽略了组织内部细胞间的形态差异, 无法在细胞尺度上体现组织结构的复杂性。

1.2 参数化细胞图形构建的组织几何模型

组织内各细胞的几何尺寸往往不同, 简化的几何模型大多关注形态结构变化的规律而忽略了个体间的差异。图像处理技术可以对作物组织内细胞的几何图像进行参数化, 进而构建作物组织的几何模型。

1.2.1 以Voronoi图表达的组织模型 Voronoi剖分法是俄罗斯数学家Voronoi提出的一种空间随机剖分方法^[25]。对作物组织的SEM显微图像进行分析, 确定组织内细胞和空隙的质心, 然后利用得到的质心坐标生成的Voronoi图表示组织的几何模型。Voronoi图中的多边形拟合的是组织内的细胞。Faisal等^[26]利用Voronoi图建立了大黄叶柄厚角组织和薄壁组织的几何模型; Ilincanu等^[27]利用Voronoi图建立了苹果营养组织的几何模型。

这种Voronoi模型存在固有缺陷, 即在边界处存在半无限边, 使得模型不适用于有限元分析。为此, Faisal等^[28]提出了一种有限边中心Voronoi剖分技术(FECVT), 并依此构建了枸杞叶柄厚角组织的二维几何模型(图1a)。该方法解决了半无限边的问题, 所构建的几何模型适用于有限元分析。但是, 当组织中相邻细胞形态差异较大时, 该方法会出现相邻细胞间的吞噬效应, 导致相邻大细胞的面积减小和小细胞的面积增大, 影响组织微观结构的重建精度。为了解决这一问题, 汪宁陵^[8]提出了一

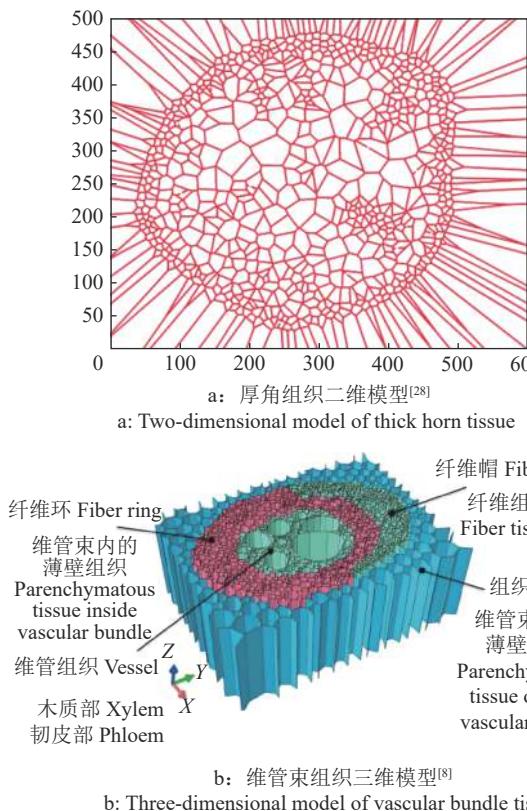


图 1 厚角组织和维管束组织模型

Fig. 1 Models of thick horn tissue and vascular bundle tissue

种基于面积权重的 Voronoi 剖分法, 重建维管束组织的二维几何模型, 并且结合 Abaqus 软件对二维模型进行轴向拉伸, 构建了组织的三维模型 (图 1b)。与 FECVT 相比, 该方法相邻细胞间的吞噬效应大为减少, 构建的二维几何模型的重建精度有了较大的提升。Liu 等^[29]采用虚拟分割算法, 并使用距离权重因子代替面积权重, 构建了一种基于距离权重的 Voronoi 剖分法 (ODWT), 实现了对维管束组织的几何重建, 图形特征的对比显示, ODWT 重建的几何模型的精确度较高, 是基于 Voronoi 剖分实现组织重建的最新算法。

虽然 Voronoi 剖分技术对组织结构的还原精度不断提升, 但依然存在 2 个局限: 重构的二维模型中, 细胞单元格填充满整个空间, 没有细胞间隙, 并且都具有尖锐的角形; 该方法只适合呈凸形的细胞, 不适合凹形细胞^[23]。

1.2.2 以细胞骨架法拟合细胞构建的组织模型

细胞骨架法用矢量跟踪细胞壁轮廓生成的多边形拟合细胞, 由此构建组织的几何模型^[30]。基于细胞骨架法构建的胡萝卜薄壁组织的二维几何模型在一定程度上具有创建凹形细胞的能力, 但忽略了细胞壁的曲率, 且创建凹形细胞的能力也受到细胞壁

矫直效果的限制。Huang 等^[31]基于细胞骨架法实现了对水稻茎秆维管束组织的几何模型构建 (图 2), 模拟精度较高。

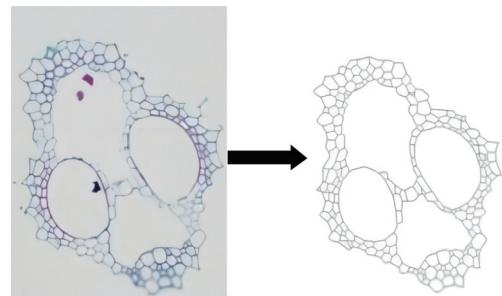
图 2 基于细胞骨架法构建的水稻茎秆维管束组织几何模型^[31]

Fig. 2 Geometric model of vascular bundle tissue of rice stem based on cytoskeleton method

1.2.3 以椭圆拟合细胞构建的组织模型 椭圆分割算法通过对组织显微图像进行数据处理, 获取每个细胞的边界数据, 并采用椭圆直接最小二乘拟合的方法求出最佳拟合椭圆, 完成对组织中细胞的建模^[32]。经过统计分析, 该方法生成的组织几何模型可以与真实微观结构在空间上等价。采用椭圆分割法对马铃薯块茎和胡萝卜薄壁组织的共聚焦扫描激光显微图像进行几何重构^[33], 生成薄壁组织几何模型 (图 3), 还原精度较高, 并且在一定程度上保留了细胞间隙。但是, 该方法在还原凹形形态结构时, 表现出局限性。

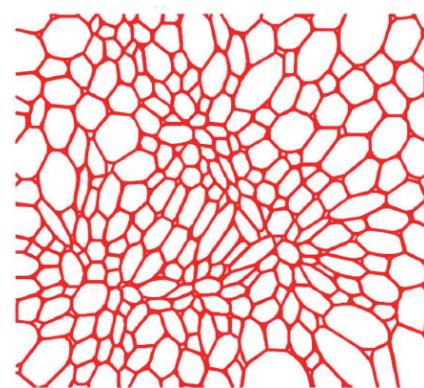
图 3 以椭圆拟合细胞构建的胡萝卜薄壁组织模型^[33]

Fig. 3 Carrot parenchyma model constructed by ellipse fitting cells

2 组织的力学模型

组织内的细胞通过胞间层粘结在一起, 其黏合力的大小影响组织的机械性能和强度。薄壁组织细胞的胞间层主要成分为果胶, 木质化程度较高的厚壁细胞的胞间层主要为木质素。果胶无定形的特性使得它可以传递剪切力, 且能支持少量的拉伸应

力^[34]。胞间层的存在使组织表现出一定的流变特性,当胞间层承受的剪切应力超过其强度时,细胞就会脱离而不一定破裂。这使得组织在外载荷作用下的应力应变关系变得复杂。

按照几何模型的处理方式,组织力学模型可以分为有限元数值求解模型和解析力学模型2类^[35]。有限元数值求解模型是采用有限元法将组织内细胞假设为均匀材料,对组织的几何模型进行离散,解析其力学性能。解析力学模型通过对作物组织内细胞结构和力学性能进行理想化假设,使模型具有理想化的几何结构(如柱状或球状)和材料特征(如各向同性或横观各向异性),从而得到较为简洁的数学描述。

2.1 组织的有限元数值求解模型

组织的有限元数值求解模型构建方法主要有有限元法和离散元法。最早的组织有限元模型可以追溯到1998年,Wu等^[36]在显微成像观测获取苹果薄壁组织几何数据的基础上,建立了简化三维的有限元模型,该模型较为简单,未考虑组织结构、细胞壁材料性能、细胞膨压等因素的影响,仅在其构建的薄壁细胞上进行了简单的排列。尽管研究从大变形、细胞壁渗透性和非线性本构关系等角度对单细胞模型进行了较大程度的改良^[37-38],但是仍然缺乏具有真实空间异质性的组织模型。

Ho等^[39]提出了一种基于水果光显微图像的具有虚拟组织几何特征的气体交换二维微尺度模型。在进一步的研究中使用的模型包含基于同步辐射X射线断层扫描获得数据的组织的实际三维微观结构^[40]。Palombini等^[41]在对竹子进行微观尺度的力学性能分析时,利用高分辨率X射线显微断层成像(μCT)技术叠加竹子图像,生成三维模型(图4a),并进行组织相对密度和细胞形态分析,构建了基于μCT的薄壁和纤维组织离散模型并进行了非线性有限元分析。

Qing等^[42]在对作物厚壁组织建模的过程中引入复合材料理论,将细胞壁视为单向纤维增强复合材料,且将细胞壁分解为多层结构,充分考虑了细胞壁力学性能的各向异性,在此基础上建立了厚壁组织的有限元模型(图4b)。模型求解结果一定程度上与试验数据吻合,能反应细胞壁层结构、力学性能与组织力学性能之间的关系。但建立的组织力学模型在结构上做出了一定的均匀化假设,仅能分析小尺寸、小变形下的组织应力应变关系,无法反映组织层面受力的失效形式。该模型的特点在于将细胞壁视为由多层单向增强复合材料构成的层合

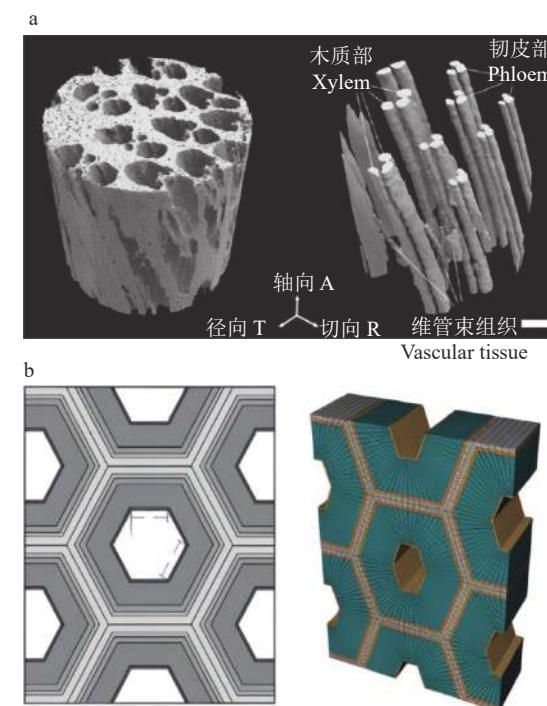


图4 组织的三维模型^[41](a)和力学模型^[42](b)

Fig. 4 Three-dimensional model (a) and mechanical model (b) of tissue

板结构,由此构建的组织力学模型可以将微观尺度下组织的力学性能与微观尺度下细胞壁的壁层结构、化合物构成及化合物力学性能联系起来。

相对于有限元法,离散元法在涉及大变形、极端的含水率变化及多相问题的处理上存在明显的优势,更适用于对薄壁组织的建模^[43]。Loodts等^[44]用离散元方法构建了洋葱表皮组织的二维模型,组织中的细胞由一组呈矩形的节点描述。Van Liedekerke等^[45-47]提出了一种用无网格颗粒方法模拟细胞和组织响应外部应力的离散元模型,将细胞分为固相和液相,固相为细胞壁,颗粒成对相互作用连接在一起组成防止流体穿透的细胞壁;液相为细胞内部的原生质体,通过平滑粒子流体动力学(SPH)建模,且细胞壁的渗透率可通过SPH配方中的本构关系进行设置。该模型具备了分析组织受外部机械载荷作用下大变形的能力,甚至可以模拟压缩过程中极端变形下的细胞壁破裂和流体逃逸。在此基础上,Karunasena等^[48]构建了新的组织无网格粒子模型,考虑了细胞和组织的多相互作用机理,并研究了组织在干燥过程中会发生的细胞壁皱缩和组织边界变形等现象,且模型对组织细节的还原也有了提升。更多关于组织离散元模型的构建方法可以参考文献[43]。

2.2 组织的解析力学模型

2.2.1 薄壁组织的解析力学模型 主要由薄壁细

胞内液泡的简化、线弹性模型、非线弹性模型、黏弹性模型、非线性流变模型和应力应变的唯象模型来描述。在大多数薄壁组织解析模型中, 将细胞内部的细胞质定义为不可压缩的流体, 通过对细胞内表面施加载荷来模拟细胞内压。这种模型也称为“湿”模型, 对细胞内部存在大液泡的薄壁组织较为合适。Pitt 等^[49]提出了一种“干”模型, 将细胞内部的细胞液假设为具有流体性质的实体单元, 具有低弹性模量和零初始压缩。以上模型在讨论细胞内压时均默认不存在细胞内液的渗透性。为了研究渗透胁迫下果实软化过程的物理机制, Liu 等^[50]构建了一个跨尺度的苹果组织解析模型, 将细胞视为薄壁球壳, 结合渗透平衡、物质守恒、细胞壁本构方程和力学平衡, 得到了细胞在渗透压力作用下的膨压和变形。同时, 结合球形复合单元模型和自洽法, 计算了组织的等效杨氏模量和泊松比。

作物组织的解析力学模型最早由 Nilsson 团队构建。Nilsson 等^[51]基于 Frey-wyssling 提出的细胞壁的弹性模量是植物组织弹性力学性能主要来源的观点, 将土豆薄壁细胞简化为内部充满不可压缩液体的球体, 并假设细胞壁为均匀、各向同性和线弹性材料, 建立了薄壁组织力学模型, 利用应变理论, 对薄壁组织进行小变形的力学性能分析, 得到了薄壁组织的弹性模量与细胞内压的线性关系。

Pitt 等^[52]将细胞构建为正六边形, 使用 6 个等刚度弹簧代表细胞壁, 顶点使用理想铰链连接, 建立了营养组织细胞结构的解析模型(图 5)和由该模型构建的二维组织模型。这一模型很好地描述了苹果营养组织在压缩过程中的失效行为, 并初步具有了几何大变形的分析能力和较好的计算实用性。

Gao 等^[53]建立了由理想化薄壁细胞构成的苹果薄壁组织力学模型(图 6), 研究细胞间结合对薄壁组织应力应变行为的影响。在薄壁组织模型中, 每个细胞都是加压的, 并在施加载荷的方向上与相邻细胞在平面接触区域结合。细胞壁是一层有限变形的机械膜, 包裹着不可压缩的液体(细胞质)。在以上假设下, 提出了一个描述苹果薄壁组织的非线性弹性本构方程。结果表明, 细胞间结合对整个组织的宏观特性影响明显, 较大的细胞间接触面积增加了组织刚度, 放大了初始膨胀压对组织刚度的影响。

Zhu 等^[54]以统一尺寸的六棱柱体为细胞模型, 多个六棱柱体堆叠在一起构成蔬菜薄壁组织三维模型, 如图 7 所示。该模型中, 假设细胞壁是不透水的复合材料, 由相对无定形的基质和镶嵌在基质

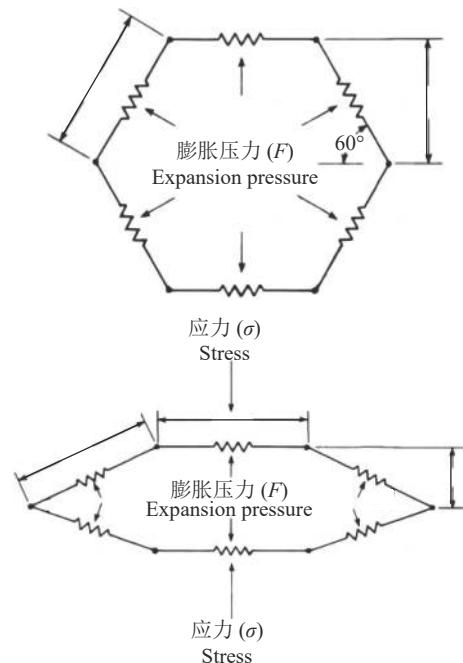


图 5 Pitt 的细胞结构模型^[52]

Fig. 5 Cell structure model of Pitt

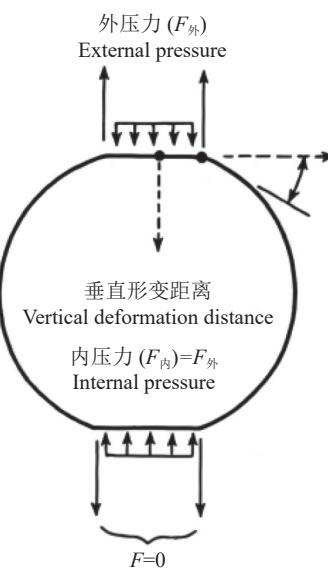


图 6 Gao 等^[53]建立的薄壁细胞理想模型

Fig. 6 Ideal model of parenchyma cells established by Gao et al

中的高度结构化的微纤丝网格组成。此模型得到了组织压缩应变与细胞内压、细胞壁应力-应变的非线性解。

Murase 等^[55-56]在 Nilsson 的基础上, 用广义的 Maxwell 模型(图 8)描述轴向载荷下西红柿表皮在水势控制环境下的黏弹性行为, 该模型描述了薄壁细胞膨压与薄壁组织杨氏模量的线性关系。

上述这些模型存在的不足之处有: 模型内各个细胞的膨压是统一的, 与组织非均匀受力的事实不

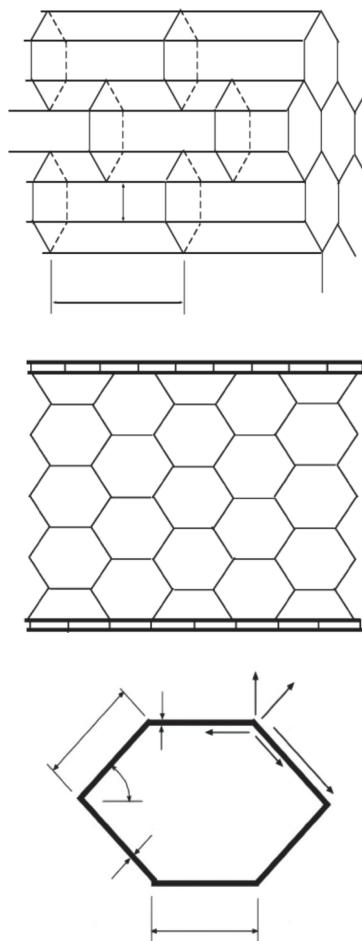
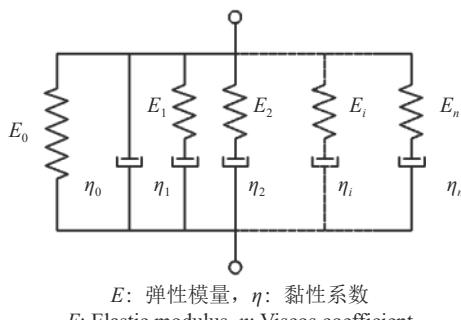


图7 三维薄壁柱状组织模型^[54]

Fig. 7 Three-dimensional thin-walled columnar tissue model



E: 弹性模量, η : 黏性系数
E: Elastic modulus, η : Viscous coefficient

图8 薄壁组织的广义 Maxwell 模型^[55]

Fig. 8 Generalized Maxwell model of parenchyma

符; 细胞间采用了共用细胞壁的假设, 未考虑细胞间的连接问题。

针对甜菜根、芹菜根和马铃薯块茎中的薄壁组织, 研究构建了一个以弹性细胞壁和内部存在不可压缩流体的细胞的简化非线性流变组织模型, 模型反映了组织形变和细胞壁的弹性、细胞壁厚度与细胞直径的比值、流动阻力系数、组织孔隙率的关系^[57-58], 但对其与细胞形状尺寸和组织形态结构的相关性还需要进一步的研究证实。

Böl 等^[59]构建了马铃薯薄壁组织非弹性应力-应变的唯象模型, 综合了塑性理论、体积生长理论和伪超弹性理论, 其中, 伪超弹性理论提出了一个记忆变量的概念, 可以追踪完整的应变历史, 由此得到的本构模型提供了局部应力、局部弹性应变和局部非弹性应变的关系。

Song 等^[60]构建了云杉湿木组织的均匀化模型。假设对湿木组织施加机械载荷可以改变组织的微观结构, 根据受力状态分为初始构型和最终构型, 并通过引入状态变量来表达受机械载荷下2种构型微观结构的变化程度, 在任何中间加载状态下, 组织的宏观力学响应是由初始和最终构型微观结构共同作用的结果。该模型的优点是只需要少量的材料参数, 且可以从宏观试验数据中进行标定, 但该模型无法反映组织内部低尺度的力学与结构参数对宏观力学性能的影响。

2.2.2 厚壁组织的解析力学模型 包括多层次同心圆柱体纤维模型和填充了弹性材料的拉长六角形胞元构成的二维蜂窝模型。Davies 等^[61]构建了亚麻纤维细胞的解析模型, 描述了由厚壁同心圆筒组成的结构中应力应变的关系。Yamamoto 等^[62]采用具有CML层、S1层和S2层的多层次圆柱体作为木质纤维素(木材)纤维的模型, 并对孤立木纤维的弹性性能进行了数学表述, 不仅考虑了结构因素, 如微纤丝角和各层厚度, 还考虑了环境条件, 如含水率; 利用新导出的公式, 模拟了含水量和微纤丝角对木纤维纵向杨氏模量和泊松比的影响。

Ongaro 等^[63]将龙骨组织结构模拟为填充了弹性材料的拉长六角形胞元构成的二维蜂窝系统。将该系统视为Winkler地基的Euler-Bernoulli梁序列, 通过引入经典有限元法的形状函数来推导其位移。Born规则的假设, 结合基于能量的方法, 提供了连续体形式的本构模型。该模型预测的生物系统有效刚度与已发表的数据很接近, 并给出了内压与填料刚度的显示关系。将该模型推广到组织层次构型中, 可以得到组织弹性模量的闭式表达式。

综上所述, 在构建组织的相关解析模型中, 有关细胞壁和细胞力学的研究水平要领先于组织模型。这是因为组织处于细胞更高一层的尺度, 实现组织完整的解析模型的难度远大于细胞壁和细胞的相应模型, 因此大多数的组织模型都对低尺度的某些因素进行了理想化或均一化的假设, 以简化组织的解析模型。在组织解析模型中, 细胞壁之间的连接与细胞渗透性的互作机理、多尺度结构的力学机理等方面的研究相对缺乏。

2.3 多尺度方法在组织力学性能研究中的应用
作物组织具有天然的多尺度结构,在对作物组织进行力学建模时,将作物组织力学模型按照生物尺度进行拆分,在各自尺度分开建模,最后进行模型的组装是作物组织多尺度建模的核心思想。

Ghysels 等^[64]首次将多尺度方法应用于植物组织,提出了一种模拟植物组织大弹性变形的微观-宏观模型建立方法,微观尺度上,使用质点-弹簧模型描述单个植物细胞的几何结构和力学性质;在宏观尺度上建立组织的有限元模型,模型的材料属性通过对组织中的代表性体积单元构建微观模型并计算得出。该模型首次对组织不同尺度的模型分开建模,为多尺度方法在植物组织力学研究上的应用打开了新的思路。

Qing 等^[42]在对软木进行力学建模时,将软木按照生物结构拆分为由细胞壁微纤丝到年轮的 4 个尺度层次,构建了相应的三维力学解析计算模型。首先在超微尺度上将细胞壁按照微观结构分为次生壁 S1、S2、S3 和初生壁 P 层,基于复合材料理论,将每一层壁视作单向纤维增强复合材料,其中,半纤维素和木质素视作基体,纤维素微纤丝视为增强相,建立单独的细胞壁壁层复合模型,考虑增强相的排列方向以模拟纤维素微纤丝的排布;在微观尺度上,根据细胞壁的微观结构,将其视为由若干细胞壁层叠加构成的复合体,基于层合板模型构建完整的细胞壁模型,将软木组织的细胞模拟为正六边形构建细胞模型;最后在细观尺度上,在细胞与细胞之间引入中间层,将细胞模型进行规律排列,叠加为组织模型,完成多尺度软木组织的力学模型构建。此模型不仅考虑了生物材料三维正交各向异性的力学特性,还同时考虑了两相界面处变形的相容性与相界处牵引力的平衡性。

在对王棕叶片维管束组织的建模研究中,同样采用了多尺度的方法^[65]。将维管组织按照生物尺度拆分为细胞壁、细胞和组织模型,且在建立组织力学模型(图 1b)的过程中引入基于 Delaunay 三角化的面积权重重建算法,最大程度模拟维管组织复杂的二维结构特征,通过有限元对组织力学模型进行求解,获取模型在 3 种载荷下的应力应变关系。

多尺度方法应用于作物组织力学模型,可以在不同尺度根据研究对象的特点和研究重心来选取合适的建模方法。在微观层面,例如微观尺度下的细胞壁,在研究厚壁组织细胞时,可以采用复合材料铺层的方法模拟细胞壁的壁层结构;在研究营养组织中的薄壁细胞时又可以将其表示为内含液体

的薄壁结构。在宏观层面,以组织内细胞的分布结构为研究重心时,可以结合图像处理和结构重建算法来构建与真实组织相近的组织模型;以组织在受力状态下的变形与水分损失为研究重心时,可以采用连续介质方法构建水分运输与力学的耦合模型^[66]。

3 组织形态结构与力学性能试验方法

3.1 作物组织形态结构试验方法

研究作物组织力学特性和建立力学模型时,需要观察作物组织的微观结构,经常使用的方法有石蜡切片法、冰冻切片法和扫描电镜等。

3.1.1 石蜡切片法 通过石蜡切片法获得的组织切片,组织结构保存良好、组织细胞形态清晰,且样本可以长期保存,在光学显微镜下可获取 20~1000 倍的显微图像。常规的石蜡切片法并不完全适用于不同作物的组织结构。刘穆^[67]在对作物茎秆解剖结构的研究中采用了常规的石蜡切片法,切片厚度约 40 μm ,因厚度较大难以获取较为清晰的作物组织微观结构。李素坤等^[68]以玉米茎秆为试验材料,对石蜡切片的一系列步骤进行改良,摸索出适用于玉米成熟期茎秆的石蜡切片法,获得了厚度为 10 μm 、染色清晰、组织结构完整的组织横切切片。梁艳等^[69]在传统石蜡切片方法的基础上,对脱水、染色等环节进行改良,有效解决了使用传统方法制作带有愈伤组织的红松种子切片时出现的愈伤组织破碎、细胞结构不清晰等问题,得到了具有完整愈伤组织、结构清晰的高质量切片。

3.1.2 冷冻切片法 作为临时切片方法的一种,冰冻切片通过将组织材料在低温环境中冻结到一定硬度后进行切片,相对于石蜡切片法,制片周期短,是一种简单、高效、易操作的制片方法。冰冻切片法多用于动物和人体组织的研究,在植物组织的制片过程中,若材料未经固定,有时会出现切片效果差、结构不完整等问题^[70]。宁代峰等^[71]采用直接包埋与适当回温相结合的方法得到了组织结构较为完整的切片,且无需使用冷冻保护剂。李建霞等^[72]采用直接包埋的方法,通过调控冷冻切片的冷箱温度、冷台温度和冷冻时间,比较了 15 种冷冻切片条件,获得了大叶黄杨、旱柳、南蛇藤、油松 4 种植物组织结构完整的切片。

3.1.3 扫描电镜法 扫描电镜通过细聚焦的电子束扫描组织样本表面,并将反馈回来的信号放大、转化为图像,获取具有三维微观特征的组织结构图像^[73]。扫描电镜获取的组织微观图像具有视野广、景象深、立体感强和分辨率高的特点。陆彦等^[74]

使用扫描电镜观察高水分、富含淀粉的植物组织,得到的图像组织细胞结构完整、细胞壁结构清晰。汪宁陵^[8]在对棕榈维管组织的力学研究中,使用扫描电镜获取了维管组织的扫描图片,结合图像处理技术,实现了棕榈维管组织的结构模型重建。

3.2 作物组织力学性能试验方法

由于在作物生长过程中承担的功能不同,作物组织形态结构复杂多样,获取作物组织在不同载荷形式下的应力应变关系对作物组织力学性能研究显得尤为重要。作物组织的主要力学性能参数有弹性、塑性、蠕变和流变等性能参数、强度参数等。常用的试验方法主要有拉伸和压缩试验。

3.2.1 拉伸试验 由大量厚壁纤维细胞构成的纤维组织如维管束鞘,是作物轴向抗拉强度的主要来源,单纤维拉伸试验通过对制取的纤维组织施加轴向载荷,结合高精度的力学传感器可获得纤维组织的应力应变关系。

汪宁陵^[8]在研究棕榈茎秆维管束的拉伸力学性能时,对不同含水率的维管束进行单纤维拉伸试验,获取了维管束的应力应变关系,发现维管束的拉伸强度与维管束组织含水率存在一定的线性关系,组织的含水率越高,其抗拉强度越低。Huang等^[31]沿玉米茎秆径向和轴向的不同位置分别制取维管束组织并对其进行拉伸试验,获取了玉米茎秆皮部(10.80 GPa 和 92.65 MPa)与芯部(4.44 GPa 和 32.35 MPa)维管束组织的平均拉伸模量和拉伸强度,发现玉米茎秆的维管束组织刚度沿径向和轴向呈梯度分布,这种分布可以增加茎秆基部的刚度。

3.2.2 压缩试验 Gibson^[19]提出了一种三轴压缩试验方法用于测量苹果组织的轴向抗压强度和轴向挠度,试验将制备的圆柱形苹果组织样本放入一个由“T”形铝制水管制作而成的压力容器中,通过对顶端施加不同的静水压力模拟轴向负载,样品底部放置一个传感器,用于测量通过苹果果肉组织传递的力。李艳聪等^[75]将苹果果肉组织制成方块,利用万能力学试验机获得苹果果肉组织的压缩应力应变曲线,计算发现其弹性模量基本保持在 57 MPa。这种直接的压缩试验方法仅限于硬度较大的作物组织,如苹果果肉、土豆果肉等。对于像葡萄果肉组织这种水分含量大、变形大的柔性体,鲜见相关研究。

4 小结与展望

4.1 小结

构建组织几何模型的方法有 2 种:一是将细胞

简化为统一尺寸的几何单元,重复叠加这些单元构成组织的几何模型;二是利用图像处理技术对组织的显微图像进行处理,将组织内每个细胞的几何尺寸参数化,构建较为精确的组织几何模型。按照几何模型的处理方式,组织力学模型可以分为有限元数值求解模型和解析力学模型 2 类。解析力学模型体现了组织内细胞形态结构和排列情况。多尺度方法应用于组织力学性能研究时,将作物组织力学模型按照生物尺度进行拆分,在各自尺度上分开建模,最后进行模型的组装。

4.2 展望

多尺度方法已逐步成为作物组织力学研究的重要方法,目前的研究还存在以下不足之处:

1) 几何模型重构算法的重建能力不足。组织多尺度建模方法在微观尺度下的主要研究内容为对组织内部细胞真实分布的二维及三维拓扑结构的精准还原。当前的几何模型重建算法对细胞形态结构均匀的组织的拓扑结构具有一定的还原度,但对内部细胞形态结构复杂、个体间差异较大的组织,重构精度有待提高。同时,目前的重建算法只能对组织二维的拓扑结构进行还原,无法实现对组织三维结构的真实重建,因此只适用于在第三维方向上对均匀分布的组织进行模型构建,如维管束组织。实现组织三维拓扑结构的真实还原,既依赖于重建算法在三维层次上的拓展,也需要组织微观结构观测手段与技术在三维方向的进一步完善。

2) 力学模型的局限性。无论是有限元数值求解模型还是解析力学模型都是数值模型,大多基于工程材料力学与复合材料力学,较为适用于模拟厚壁组织这类含水率较低、细胞壁较厚、内腔较小的组织。对薄壁组织这类含水率较高、细胞壁较薄的组织进行模拟时均表现出局限性,无法反映组织内部的流变性。少部分针对薄壁细胞构建的球形膜细胞模型一定程度上可以分析内部膨胀压变化对细胞流变的影响,但依然是对细胞壁进行了各项同性材料的假设,且当模型上升到组织尺度时,在模拟较大尺寸的非均匀变形场问题时会出现计算量大、误差大的问题。

3) 力学性能试验手段单一化。针对组织的力学性能试验手段过于单一,作物组织形态结构具有较大的多样性,同一种力学试验手段无法在所有的组织上适用,例如维管束组织呈束状结构,直径较小,其径向与切向的剪切性能受夹具功能的限制,难以测量。而对薄壁组织的拉伸力学性能进行测量时会存在部分薄壁细胞受膨胀压影响而破裂的情况,使

得测量数值波动大、误差大,且薄壁组织在拉伸过程中的含水率难以控制,细胞膨胀压与流变性能对试验结果存在很大干扰。

作物组织力学建模涉及作物学、多尺度结构理论、复合材料力学、计算机数值求解和有限元分析技术等不同学科领域,属于交叉学科。作物组织的力学模型及求解方法的准确性与精度,与各学科的先进水平有直接关系,需要各学科科学家协同攻关。开展作物组织多尺度结构力学研究,有利于形成规范的研究方法和建立作物组织力学模型数据库,在农业领域有重要的潜在应用价值,对农业装备设计、农产品加工、质量控制以及作物育种和生物仿生材料设计等具有重要的意义。

参考文献:

- [1] BAKER C J, STERLING M, BERRY P. A generalised model of crop lodging[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2014, 363: 1-12.
- [2] 黄玲,杨文平,梅沛沛,等.砂质脱潮土区不同冬小麦品种(系)抗倒伏特性研究[J].*灌溉排水学报*,2021,40(3):31-39.
- [3] 尹伊君.宽皮柑橘压缩损伤特性与机械损伤评估研究[D].武汉:华中农业大学,2018.
- [4] 周霞,李东嵘,蒋静,等.紫花苜蓿根系拉拔试验研究[J].*人民长江*,2019,50(7):185-188.
- [5] 刘庆庭,区颖刚,卿上乐,等.光刃刀片切割甘蔗茎秆时根茬破坏力学分析[J].*农业机械学报*,2007,38(9):51-54.
- [6] LIU Q T, OU Y G, WANG W Z, et al. The mechanical properties and constitutive equations of sugarcane stalk[C]//ASABE Annual International Meeting. Minneapolis, Minnesota: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007.
- [7] VON FORELL G, ROBERTSON D, LEE S Y, et al. Preventing lodging in bioenergy crops: A biomechanical analysis of maize stalks suggests a new approach[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66(14): 4367-4371.
- [8] 汪宁陵.王棕组织多尺度结构力学建模方法及仿王棕结构设计研究[D].广州:华南理工大学,2016.
- [9] 张凌.一种植物组织二维重建算法及仿王棕叶柄的蜂窝梁设计[D].广州:华南理工大学,2019.
- [10] 张亮.谷子茎秆与纤维拉伸力学特性测试研究[D].太谷:山西农业大学,2019.
- [11] 李红波,薛晋霞,王炳轩,等.谷子茎秆叶鞘叶片及其结合部位的拉伸力学性能[J].*农业工程学报*,2020,36(18):11-17.
- [12] 刘亮亮,田杰,杨皓翔,等.拟南芥花萼尖端褶皱现象的测量和分析[J].*实验力学*,2020,35(6):970-977.
- [13] BRUCE D M. Mathematical modelling of the cellular mechanics of plants[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 2003, 358(1437): 1437-1444.
- [14] ASTLEY R, HARRINGTON J, STOL K. Mechanical modelling of wood microstructure, an engineering approach[J]. *Ipenz Transactions*, 1997, 24(1): 21-29.
- [15] RÜGGEBERG M, SPECK T, PARIS O, et al. Stiffness gradients in vascular bundles of the palm *Washingtonia robusta*[J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2008, 275(1648): 2221-2229.
- [16] WATANABE U. Shrinking and elastic properties of coniferous wood in relation to cellular structure[D]. Kyoto: Kyoto University, 1998.
- [17] PITT R E. Models for the rheology and statistical strength of uniformly stressed vegetative tissue[J]. *Transactions of the ASAE*, 1982, 25(6): 1776-1784.
- [18] MILES J A, REHKUGLER G E. A failure criterion for apple flesh[J]. *Transactions of the ASAE*, 1973, 16(6): 1148-1153.
- [19] GIBSON L J. The hierarchical structure and mechanics of plant materials[J]. *Journal of the Royal Society, Interface*, 2012, 9(76): 2749-2766.
- [20] GHOSH S, LEE K, MOORTHY S. Two scale analysis of heterogeneous elastic-plastic materials with asymptotic homogenization and Voronoi cell finite element model[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1996, 132(1/2): 63-116.
- [21] SILVA M J, HAYES W C, GIBSON L J. The effects of non-periodic microstructure on the elastic properties of two-dimensional cellular solids[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1995, 37(11): 1161-1177.
- [22] GOLOVIN Y I, GUSEV A A, MATVEEV S M. From nano-to macromechanical properties of wood via the hierarchy of its structural units and size effects (A Review)[J]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2022, 86(10): 1207-1218.
- [23] LIVANI M A, SUIKER A S J, CRIVELLARO A, et al. A 3D multi-scale hygro-mechanical model of oak wood[J]. *Wood Science and Technology*, 2023, 57(6): 1215-1256.
- [24] VORONOI G. Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie deformed squad ratiques[J]. *Journal Für Die Reine Und Angewandte Mathematik (Cell Journal)*, 1908, 1908(134): 198-287.
- [25] ROUDOT A, DUPRAT F, PIETRI E. Simulation of a penetrometric test on apples using voronoi-delaunay tessellation[J]. *Food Structure*, 1990, 9(3): 215-222.
- [26] FAISAL T R, HRISTOV N, WESTERN T L, et al. Computational study of the elastic properties of *Rheum rhabarbarum* tissues via surrogate models of tissue geometry[J]. *Journal of Structural Biology*, 2014, 185(3): 285-294.
- [27] ILINCANUL A, OLIVEIRA F A R. Strategy for controlling thermal processes in case of random fluctuations of the heating-medium temperature[J]. *Process Optimisation and Minimal Processing of Foods*, 1996, 3: 106-110.

- [28] FAISAL T R, HRISTOV N, REY A D, et al. Experimental determination of *Philodendron melinonii* and *Arabidopsis thaliana* tissue microstructure and geometric modeling via finite-edge centroidal Voronoi tessellation [J]. *Physical Review E*, 2012, 86(3): 031921. doi: 10.1103/physreve.86.031921.
- [29] LIU W Y, ZHANG L, HUANG J L, et al. Reconstruction of plant microstructure using distance weighted tessellation algorithm optimized by virtual segmentation[J]. *Journal of Structural Biology*, 2019, 208(2): 115-126.
- [30] PIECZYWEK P M, ZDUNEK A, UMEDA M. Study on parameterisation of plant tissue microstructure by confocal microscopy for finite elements modelling[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, 78(1): 98-105.
- [31] HUANG J L, LIU W Y, ZHOU F, et al. Mechanical properties of maize fibre bundles and their contribution to lodging resistance[J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 151: 298-307.
- [32] MEBATSION H K, VERBOVEN P, HO Q T, et al. Microscale modelling of fruit tissue using Voronoi tessellations[C]//13th World Congress of Food Science & Technology. Les Ulis, France: EDP Sciences, 2006: 673-685.
- [33] MEBATSION H K, VERBOVEN P, VERLINDEN B E, et al. Modeling fruit microstructure using an ellipse tessellation algorithm[C]//13th World Congress of Food Science & Technology. Nantes, France: EDP Sciences, 2006: 673-685.
- [34] KERTESZ Z I. The pectic substances[M]. New York: Interscience Publishers, 1951.
- [35] 付志一, 焦群英. 植物细胞力学模型研究进展[J]. *力学进展*, 2005, 35(3): 404-410.
- [36] WU N Q, PITTS M J. Development and validation of a finite element model of an apple fruit cell[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 1999, 16(1): 1-8.
- [37] DINTWA E, VAN ZEEBROECK M, RAMON H, et al. Finite element analysis of the dynamic collision of apple fruit[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2008, 49(2): 260-276.
- [38] DINTWA E, JANCSÓK P, MEBATSION H K, et al. A finite element model for mechanical deformation of single tomato suspension cells[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 103(3): 265-272.
- [39] HO Q T, VERBOVEN P, VERLINDEN B E, et al. A model for gas transport in pear fruit at multiple scales[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(8): 2071-2081.
- [40] HO Q T, VERBOVEN P, VERLINDEN B E, et al. A three-dimensional multiscale model for gas exchange in fruit[J]. *Plant Physiology*, 2011, 155(3): 1158-1168.
- [41] PALOMBINI F L, KINDLEIN W, DE OLIVEIRA B F, et al. Bionics and design: 3D microstructural characterization and numerical analysis of bamboo based on X-ray microtomography[J]. *Materials Characterization*, 2016, 120: 357-368.
- [42] QING H, MISHNAEVSKY L. 3D multiscale micromechanical model of wood: From annual rings to microfibrils[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2010, 47(9): 1253-1267.
- [43] RATHNAYAKA MUDIYANSELAGE C M R, KARUNASENA H C P, GU Y T, et al. Novel trends in numerical modelling of plant food tissues and their morphological changes during drying: A review[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 194: 24-39.
- [44] LOODTS J, TIJSKENS E, WEI C F, et al. Micromechanics: Simulating the elastic behavior of onion epidermis tissue[J]. *Journal of Texture Studies*, 2006, 37(1): 16-34.
- [45] VAN LIEDEKERKE P, GHYSELS P, TIJSKENS E, et al. A particle-based model to simulate the micromechanics of single-plant parenchyma cells and aggregates[J]. *Physical Biology*, 2010, 7(2): 026006. doi: 10.1088/1478-3975/7/2/026006.
- [46] VAN LIEDEKERKE P, TIJSKENS E, RAMON H, et al. Particle-based model to simulate the micromechanics of biological cells[J]. *Physical Review E*, 2010, 81(6): 061906. doi: 10.1103/physreve.81.061906.
- [47] VAN LIEDEKERKE P, GHYSELS P, TIJSKENS E, et al. Mechanisms of soft cellular tissue bruising: A particle based simulation approach[J]. *Soft Matter*, 2011, 7(7): 3580-3591. doi: 10.1039/C0SM01261K.
- [48] KARUNASENA H C P, BROWN R J, GU Y T, et al. Application of meshfree methods to numerically simulate microscale deformations of different plant food materials during drying[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 146: 209-226.
- [49] PITT R E, DAVIS D C. Finite element analysis of fluid-filled cell response to external loading[J]. *Transactions of the ASAE*, 1984, 27(6): 1976-1983.
- [50] LIU S B, YANG H Q, BIAN Z T, et al. Regulation on mechanical properties of spherically cellular fruits under osmotic stress[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2019, 127: 182-190.
- [51] NILSSON S B, HERTZ C H, FALK S. On the relation between turgor pressure and tissue rigidity: II: Theoretical calculations on model systems[J]. *Physiologia Plantarum*, 1958, 11(4): 818-837.
- [52] PITT R E, CHEN H L. Time-dependent aspects of the strength and rheology of vegetative tissue[J]. *Transactions of the ASAE*, 1983, 26(4): 1275-1280.
- [53] GAO Q, PITT R E. A mechanics model of the compression of cells with finite initial contact area[J]. *Biorheology*, 1990, 27(2): 225-240.
- [54] ZHU H X, MELROSE J R. A mechanics model for the compression of plant and vegetative tissues[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2003, 221(1): 89-101.
- [55] MURASE H, MERVA G E. Static elastic modulus of tomato epidermis as affected by water potential[J]. *Transactions of the ASAE*, 1977, 20(3): 594-597.
- [56] MURASE H, MERVA G E, SEGERLIND L J. Variation

- of young's modulus of potato as a function of water potential[J]. *Transactions of the ASABE*, 1980, 23(3): 794-796.
- [57] MYHAN R, MARKOWSKI M, JACHIMCZYK E. A non-linear rheological model of plant tissues[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 190: 1-10.
- [58] MYHAN R, MARKOWSKI M. The compression specificity of plant tissue[J]. *Journal of Texture Studies*, 2020, 51(4): 593-600.
- [59] BÖL M, SEYDEWITZ R, LEICHSENRING K, et al. A phenomenological model for the inelastic stress-strain response of a potato tuber[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2020, 137: 103870. doi: 10.1016/j.jmps.2020.103870.
- [60] SONG R Y, MULIANA A. Modeling mechanical behaviors of plant stems undergoing microstructural changes[J]. *Mechanics of Materials*, 2019, 139: 103175. doi: 10.1016/j.mechmat.2019.103175.
- [61] DAVIES G C, BRUCE D M. A stress analysis model for composite coaxial cylinders[J]. *Journal of Materials Science*, 1997, 32(20): 5425-5437.
- [62] YAMAMOTO H, KOJIMA Y. Properties of cell wall constituents in relation to longitudinal elasticity of wood[J]. *Wood Science and Technology*, 2002, 36(1): 55-74.
- [63] ONGARO F, BARBIERI E, PUGNO N M. Mechanics of mutable hierarchical composite cellular materials[J]. *Mechanics of Materials*, 2018, 124: 80-99.
- [64] GHYSELS P, SAMAÉY G, TIJSKENS B, et al. Multi-scale simulation of plant tissue deformation using a model for individual cell mechanics[J]. *Physical Biology*, 2009, 6(1): 016009. doi: 10.1088/1478-3975/6/1/016009.
- [65] WANG N L, LIU W Y, HUANG J L, et al. The structure-mechanical relationship of palm vascular tissue[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2014, 36: 1-11.
- [66] AREGAWI W A, ABERA M K, FANTA S W, et al. Prediction of water loss and viscoelastic deformation of apple tissue using a multiscale model[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2014, 26(46): 464111. doi: 10.1088/0953-8984/26/46/464111.
- [67] 刘穆. 种子植物形态解剖学导论[M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2008.
- [68] 李素坤, 张秋芝, 郝玉兰, 等. 玉米成熟期茎秆石蜡切片方法的研究[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(8): 3935-3937.
- [69] 梁艳, 刘德强, 潘朋, 等. 带有愈伤组织的红松种子石蜡切片制作方法改良[J]. *分子植物育种*, 2022, 20(13): 4455-4461.
- [70] 陆叶, 席梦利, 郑佳, 等. 杨树和杉木茎段组织的冰冻切片技术研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2009, 33(6): 44-48.
- [71] 宁代锋, 尹增芳, 张菁, 等. 一种简单快速植物组织冰冻切片方法[J]. *热带亚热带植物学报*, 2008, 1(4): 386-389.
- [72] 李建霞, 张出兰, 夏晓飞, 等. 植物冰冻切片条件的优化及其与石蜡切片在组织化学应用中的比较[J]. *植物学报*, 2013, 48(6): 643-650.
- [73] 金嘉陵. 扫描电镜分析的基本原理[J]. *上海钢研*, 1978(1): 29-45.
- [74] 陆彦, 祁琰, 张晓敏, 等. 高水分、富含淀粉植物组织的扫描电镜制备技术优化[J]. *植物科学学报*, 2018, 36(1): 119-126.
- [75] 李艳聪, 杜晓勇, 王金海, 等. 苹果损伤力学特性[J]. *农业工程*, 2018, 8(6): 77-80.

【责任编辑 霍 欢】