

作物多尺度力学初探

刘庆庭, 林志超, 胡平, 郑明轩, 李志昂, 李桃

(华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘要:作物力学性能广泛应用于作物抗倒伏性、机器-作物-土壤互作系统和作物栽培等领域的研究, 为培育抗倒伏品种、提高机器作业质量和改进栽培措施提供理论支持。作物的力学性能与其形态结构、解剖学特征、化合物组分等有密切关系。该研究在梳理作物力学性能研究的基础上, 将作物多尺度力学概括为以作物为研究对象, 分别以细胞壁层、细胞壁、细胞、组织和器官为基本元件, 依次建立细胞壁、细胞、组织、器官和植株的几何结构与力学模型, 并解析其力学性能的科学。进一步对细胞壁结构力学、细胞结构力学、组织结构力学、器官结构力学和植株结构力学的研究内容进行了归纳总结。该研究明确提出作物多尺度力学的概念、系统归纳其研究内容和方法, 有利于促进作物多尺度力学理论的形成、数据库的建立和分析软件的开发。

关键词:作物; 多尺度力学; 细胞; 组织; 植株

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202206195

中图分类号: S-03; Q947.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-11-0295-10

刘庆庭, 林志超, 胡平, 等. 作物多尺度力学初探[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 295-304. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202206195 <http://www.tcsae.org>

LIU Qingting, LIN Zhichao, HU Ping, et al. Preliminary study on crop multi-scale mechanics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(11): 295-304. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202206195 <http://www.tcsae.org>

0 引言

宏观层次上, 作物根、茎、叶和果实等器官的力学性能^[1-4]以及作物-机器之间相互作用^[5-7], 得到了广泛的试验与理论研究。这些研究在参考木材和复合材料等力学性能试验方法的基础上, 确定了适合作物材料本身特点的试件形状、尺寸、夹紧方法和加载方法^[8-9]。在材料力学试验机或自制的装置上, 测试了各器官(或其材料)在拉伸、压缩和剪切等载荷下的强度和弹性模量等力学性能参数^[1-3, 9]。

作物各器官的力学性能与其形态结构^[10]、解剖学特征(各组织的构成与分布等)^[11]、化合物组分(木质素、纤维素、半纤维素和果胶等的分布与占比)^[12-13]有密切关系。例如, 纤维鞘是维管束的主要的加强元件, 纤维细胞壁的多层结构形成的纤维刚度变化有助于减小给定载荷下的应力集中^[14-15]、提高茎秆对风载下振动的阻尼性能进而衰减振动^[16-17]。

根据作物各器官的形态结构和各向异性建立的材料模型与力学模型, 用于分析其在各种载荷下的力学表现。例如, 正交各向异性用于建立茎秆横向屈曲模型, 分析弯曲过程中的椭圆化现象^[18-19], 适用于水稻和小麦这类直立、中空、薄壁、细长茎秆的作物。以复合材料作为茎秆的材料模型, 利用茎秆的纤维体积分数等参数^[20],

建立茎秆的本构方程^[21], 可分析茎秆在加载时应力分布的不均匀性和破坏机理^[22]。

作物是天然的多尺度结构。多尺度方法为作物力学性能研究提供了新的途径, 正成为作物力学研究的前沿和热点。如, 建立各尺度下细胞、组织和器官等的力学模型, 用于分析植物微观结构与力学性能之间的关系, 为仿生材料设计提供结构方案^[23-25]。

基于以上分析, 本文梳理多尺度方法在植物力学性能领域的研究, 并尝试提出作物多尺度力学的概念、归纳总结研究内容和方法, 以促进形成系统的作物多尺度力学理论。

1 作物多尺度力学的概念

1.1 依据

从材料构成角度来看, 细胞壁、细胞、组织、器官分别是构成细胞、组织、器官和植株的基本元件。其力学性能取决于各自基本元件的数量、分布、组合方式以及基本元件自身的性能。所以, 多尺度方法应用于作物力学性能研究, 可以归纳为“作物多尺度力学”范畴。

1.2 意义

明确提出“作物多尺度力学”概念, 系统归纳其研究内容和方法, 有利于促进作物力学由目前以试验研究为主的应用技术, 向探索作物微观结构与其力学行为之间内在联系的科学理论发展; 有利于形成规范的研究方法和构建规范的数据库, 进而可以开发作物多尺度力学分析软件, 丰富作物学和农业工程学科理论。

1.3 作物多尺度力学的概念

基于以上讨论, 给出作物多尺度力学的概念: 是以

收稿日期: 2022-06-21 修订日期: 2023-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(32271995)

作者简介: 刘庆庭, 博士, 教授, 国家糖料产业技术体系岗位科学家。研究方向为甘蔗生产机械化和作物力学。Email: qingting@scau.edu.cn

作物为研究对象, 分别以细胞壁、细胞、组织和器官为基本元件, 依次建立细胞、组织、器官和植株的几何模型与力学模型, 并解析其力学性能的科学。

2 作物多尺度力学的主要研究内容

2.1 作物细胞壁结构力学

2.1.1 概念与主要研究内容

由大到小的细胞壁多尺度结构依次是细胞壁、细胞壁层、微纤丝角 (MFA, microfibril angle) 和化合物。细胞壁的力学性能取决于各细胞壁层的力学性能, 各壁层的力学性能又取决于微纤维丝角和各化合物组分的力学性能。

细胞壁结构力学是以细胞壁为研究对象, 以初生壁 (P) 和次生壁的外层 (S1)、中层 (S2)、内层 (S3) 为基本元件, 建立细胞壁的几何结构和力学模型, 并求解其力学性能的科学。

主要研究内容为: 细胞壁的微观结构和化合物成分; 细胞壁层的结构与力学模型; 细胞壁的结构与力学模型; 力学模型的求解方法; 力学性能试验方法。

2.1.2 微观结构与试验方法

细胞壁的微观结构包括细胞壁的分层结构、各层纤维分子的取向以及细胞壁上纹孔的超微结构等^[26]。

细胞壁的子层厚度和细胞腔径宽可通过透射电镜 (TEM, transmission electron microscope) 和扫描电镜 (SEM, scanning electron microscope) 等显微技术观察作物的超薄切片获得^[27-28]。细胞壁各层微纤丝角可以通过 SEM^[28-29]、偏振光显微镜 (PLM, polarized light technique)^[30]、原子力显微镜 (AFM, atomic force microscope)^[31-32]、直接碳复型技术^[27]、X 射线衍射法^[33-35]与拉曼光谱法^[36]等技术测量。

2.1.3 细胞壁的化合物成分及试验方法

初生壁的主要化合物成分是纤维素、半纤维素和果胶^[37-39]。次生壁的主要化合物成分除了纤维素、半纤维素和木质素等外^[40-41], 还有木栓质、角质和蜡质等填充物。这些化合物在细胞壁各层中的体积分数对细胞壁各层的力学性能有影响^[42]。

TEM、SEM、荧光显微镜 (FM, fluorescence microscope) 以及共聚焦拉曼显微镜 (CRM, confocal raman microscope) 等方法可分析细胞壁不同层内纤维素、半纤维素、木质素和果胶等化合物的分布情况^[43-44]。

X 射线衍射仪、拉曼光谱技术和压痕法可测量纤维素、半纤维素和木质素的弹性模量^[45-48]。

2.1.4 细胞壁层的结构与力学模型及求解方法

从复合材料角度, 细胞壁层可视为纤维增强复合材料。结合细胞壁层的 MFA (图 1b 中 θ), 可建立细胞壁层的结构模型。初生壁和次生壁的结构模型如图 1 所示^[47, 49-51]。

结合细胞壁层结构模型, 利用 Halpin-Tsai 方程可构建各壁层的弹性力学模型, 研究微纤丝角、壁层厚度、化合物组分体积分数及其力学性能等与细胞壁层弹性模量、剪切模量和泊松比之间的关系^[52-53]。计算机数值计算和

有限元分析方法用于求解细胞壁层的力学模型^[48, 53-54]。THUAULT 等应用该方法求解得到亚麻纤维 S2 层的厚度和微纤丝角对纤维杨氏模量的敏感度为 0.64, S2 层的厚度以及 S2 层的微纤维丝角度是影响其力学性能的主要因素^[48]。

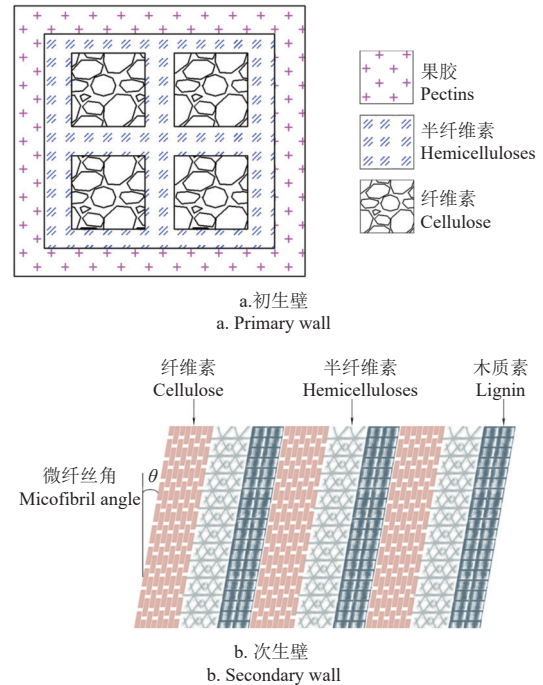


图 1 细胞壁的结构模型

Fig.1 Model of cell wall structure

2.1.5 细胞壁的结构与力学模型及求解方法

薄壁细胞的细胞壁只有初生壁。厚壁细胞的细胞壁结构模包含了初生壁和次生壁。图 2 是由 P、S1、S2 和 S3 组成的层合板结构模型^[47-49, 55]。初生壁的微纤丝没有特定取向, S1、S2 和 S3 的微纤丝角各不相同^[47-49, 55]。

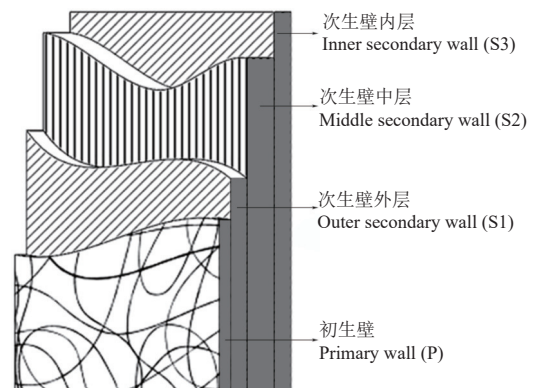


图 2 细胞壁的层合板结构模型

Fig.2 Laminated plate structure model of cell wall

经典层合板理论和各壁层的边界条件, 用于构建细胞壁弹性力学模型, 可用有限元数值法求解该模型^[47-49, 55-56]。LENNART 利用 Abaqus 建立了木材细胞壁的层合板模型, 分析比较了单层和多层细胞壁模型在压缩和剪切载荷下对细胞壁变形的影响, 得出细胞壁多层结构是影响其力学性能的主要因素^[56]。

2.1.6 细胞壁力学性能试验方法

作物细胞壁的力学性能试验方法主要有纳米压痕技术和原子力显微技术。

纳米压痕技术在细胞壁表面进行加卸载力学测试, 计算材料的弹性模量、硬度、屈服强度、蠕变等力学性能^[57]。YU 等使用原位成像纳米压痕技术测试获得了毛竹纤维细胞壁的纵向与横向弹性模量分别为 16.01 和 5.91 GPa, 纵向与横向硬度分别为 359.99 和 391 MPa; 毛竹薄壁细胞壁的纵向模量和纵向硬度分别为 5.8 GPa 和 230 MPa^[58]。

原子力显微技术可同时获得样品的形貌和定量纳米力学性质^[59-61]。ARNOULD 利用原子力显微镜的接触共振模式研究木材细胞壁各层的黏弹性特性, S2 层的接触模量变化从 8 到 13 GPa, 而 S1 和 CML 层约为 6 GPa^[60]。

2.2 作物细胞结构力学

2.2.1 概念与主要研究内容

由大到小的作物细胞多尺度结构依次是细胞、细胞壁(和液泡)、细胞壁层、MFA 和化合物。细胞的力学性能取决于细胞壁(和液泡)的力学性能和细胞的形态结构。

作物细胞结构力学是以细胞为研究对象, 以细胞壁(和液泡)为基本元件, 建立细胞的几何结构和力学模型, 并求解其力学性能的科学。

主要研究内容为: 细胞的形态结构; 以细胞壁(和液泡)为基本元件的细胞几何结构模型、力学模型及其求解方法; 细胞力学性能试验方法等。

2.2.2 细胞的形态结构与几何模型

不同类型的细胞, 其形态结构各异。例如, 薄壁细胞形状一般为直径近乎相等的多面体, 细胞内有大液泡^[61]。厚角细胞为长棱柱形, 截面呈多角形^[62]。纤维是二端尖细、成梭状的细长细胞^[63]。

细胞的几何结构模型应尽量与细胞的形态结构一致。如, 薄壁细胞可采用充满液体的多面体或球体^[39]; 纤维细胞采用与其形态结构一致的梭形体^[63]。

作物解剖学显微镜技术结合图像分析技术可以获取细胞朝向、细胞腔大小和细胞壁厚度等形态结构参数, 用于建立细胞的几何模型^[47-49, 55]。

2.2.3 力学模型与求解方法

作物细胞力学模型经历了从二维到三维的过程。细胞二维力学模型将细胞壁设置为黏弹性的各向同性材料^[54, 64-66]; ZHU 等建立了单个植物细胞的数学模型, 分析了在均匀载荷下, 组织压缩应变和细胞壁的应力、细胞的黏弹性和细胞膨胀压之间的线性关系^[64]。

薄壁细胞可以采用多面体或球体作为其几何结构模型, 细胞内的液体定义为不可压缩的液体^[64]; 厚壁细胞可以使用内腔中空的多棱柱体、梭形体等拟合其三维模型^[48-49, 55, 67-68], 可用数值计算和有限元分析方法对模型进行求解。WU 等利用显微图像技术测量了苹果果肉组织细胞, 建立了苹果薄壁组织细胞几何模型, 对细胞壁

进行单元划分, 细胞内腔施以均匀压力模拟膨胀压, 建立三维有限元模型。Ansys 有限元软件求解模型力学性能, 并与试验数据对比, 仿真结果与体积弹性模量试验测量结果以及几何解析模型的求解结果基本一致^[69]。

QING 等建立了细胞三维形变和应变计算模型, 该模型考虑细胞在多个尺度水平上的结构(细胞结构、细胞壁的多层性质、细胞壁层的复合结构)对细胞弹性性能的影响^[54]。

2.2.4 细胞力学试验方法

微穿透测试技术可以用来分辨单个细胞壁的拉伸与破裂, 测试细胞平均直径、细胞壁厚度和结构刚度等信息^[70]。HILLER 利用微穿透技术测试了马铃薯薄壁细胞, 获得细胞腔平均直径、细胞壁断裂能量和细胞壁模量分别为 236 μm 、 $1.834 \times 10^4 \text{ J/m}^2$ 、7 700~16 500 MPa^[70]。

压力探针技术可用来测作物细胞的膨压^[71-72]。THOMAS 测得葡萄浆果中细胞膨胀压从转色前的 0.25 MPa 下降到转色后的 0.02 MPa^[71]。

微压痕技术可测试细胞的杨氏模量和拉伸强度^[11]。GIBSON 利用微压痕技术测得棕榈茎薄壁细胞和维管束纤维的杨氏模量分别为 0.3 MPa 和 30 GPa, 抗压强度分别为 0.3 和 300 MPa^[11]。

2.3 作物组织结构力学

2.3.1 概念与主要研究内容

由大到小的作物组织多尺度结构依次是组织、细胞、细胞壁(和液泡)、细胞壁层、MFA 和化合物。组织的力学性能取决于组织内细胞的排列方式、细胞的力学性能和细胞间的作用力。

作物组织结构力学是以组织为研究对象, 以细胞为基本元件, 建立组织的几何结构和力学模型, 并求解其力学性能的科学。

主要研究内容为: 组织的形态结构; 组织的几何结构模型、力学模型及其求解方法; 组织力学性能试验方法。

2.3.2 作物组织的形态结构

对作物力学性能影响较大的有薄壁组织、机械组织(包括厚角组织、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^[11]。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, 其力学性能也不同^[73]。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的力学性能^[74-75]。

2.3.3 组织的几何结构模型

组织的形态结构取决于组织内各类细胞的形态、数量和排列分布^[76]。通过切片和显微镜技术可获取组织的显微图像, 图像处理技术可得到组织中各类细胞的相关数据^[76]。按照重构细胞几何模型的方法不同, 可以将构建组织几何结构模型的方法分为两类: 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^[77]; 二是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。细胞几何尺寸参数化的

方法主要有以下几种:

1) Voronoi 图

对组织的 SEM 显微图像进行分析, 确定了组织内细胞和空隙的质心, 然后利用得到的质心坐标生成 Voronoi 图, 以 Voronoi 图表示组织的几何模型^[78-80]。Voronoi 图在油菜、苹果和棕榈等的维管束组织几何模型重构得以应用^[75, 79-80]。Voronoi 图法可以应用于所有作物组织的显微图像分析。但是该方法在边界处产生半无限边, 不适用于组织的细胞面积变化梯度较大和凹多边形场合。FAISAL 对 Voronoi 法进行了优化, 提出了有限边形 Voronoi 镶嵌法, 用此方法可减少相邻细胞间的吞噬效应, 准确捕捉拟南芥和鹅毛芥组织的非周期性的微观结构^[78]。

2) 骨架法拟合细胞

骨架法是用矢量跟踪组织内细胞壁轮廓, 生成多边形拟合细胞, 由此构建组织的几何模型^[76]。该方法能够实现维管束凹多边形的重建精度。HUANG 等利用骨架法重构了玉米茎秆维管束, 分析了 S2 层厚度和 MFA 对玉米维管束拉伸模量的影响^[42]。

马铃薯和胡萝卜等的薄壁细胞大多呈多边形^[76], 比较适合上述两种方法。

3) 椭圆拟合细胞

椭圆分割算法是通过组织显微图像进行数据处理, 获取每个细胞的边界数据, 并采用椭圆最小二乘法求出最佳拟合椭圆作为细胞的几何模型, 由此构建组织的几何模型^[81-82]。统计分析表明, 该方法构建的几何模型与组织的真实微观结构在空间上等价, 组织重建精度也较高, 但只能创建凸形状, 相邻细胞之间会产生小的间隙, 并使细胞的形状变得圆润^[81]。

苹果、梨等果实的薄壁组织细胞大多接近椭圆形^[76], 比较适合该方法。

4) 高分辨率 X 射线显微断层成像 (μ CT, computed tomography)

μ CT 技术对作物组织内部结构进行无损成像, 直接生成各细胞三维几何模型, 由此构建组织的几何结构模型^[83]。该方法生成的组织结构细节过于复杂, 导致模型求解计算量大幅增加^[83-85]。

2.3.4 组织的力学模型与求解方法

采用同一尺寸的细胞几何单元构建组织模型时, 可将细胞的力学参数直接赋给细胞单元, 建立组织的力学模型^[64-68]。

采用细胞几何尺寸参数化的方法构建组织模型时, 组织内每个细胞形态结构尺寸各异。将细胞壁、胞间层力学性能赋予给组织内的细胞模型, 可建立组织的力学模型。

1) 有限元或离散元模型

建立组织内各细胞的有限元或离散元模型。确定其载荷和边界条件后, 利用有限元或离散元分析软件求解组织的力学性能^[69, 75-77]。

2) 解析力学模型

①线弹性模型

薄壁细胞简化为内部充满不可压缩液体的球体, 假设细胞壁为均匀、各向同性和线弹性材料, 可建立薄壁组织力学模型。利用应变理论, 对薄壁组织进行小变形的力学性能分析, 可得到了薄壁组织的弹性模量与细胞内压的线性关系^[64]。

纤维细胞采用具有胞间层 (ML, middle lamella)、P、S1、S2 和 S3 层的多层棱柱体模型, 在确定的载荷和边界条件下, 可建立纤维组织的解析模型。纤维的弹性性能采用数学函数表述, 采用数值计算方法求解组织力学性能^[54]。

联合薄壁组织和纤维的解析力学模型, 可建立由这两种组织组成的复合组织 (如维管束) 力学模型^[54, 65]。

②非线性弹性模型

在由理想化薄壁细胞构成的薄壁组织几何模型中, 假设每个细胞在施加载荷的方向上与相邻细胞在平面接触区域上结合, 可建立薄壁组织的非线性弹性本构方程。求解结果表明, 薄壁组织的力学特性与细胞壁的力学性能、细胞膨胀压以及细胞间结合方向有关^[86]。

③非线性流变模型

考虑薄壁细胞内液体流动阻力系数和薄壁组织孔隙率等因素, 可构建薄壁组织非线性流变模型。该模型可用于分析形态较复杂的植物组织 (如, 甜菜根、芹菜根和马铃薯块茎) 的压缩特性^[65-66]。

④二维蜂窝模型

软叶鳞菊 (Ice Plant) 的吸湿龙骨组织结构可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 地基上的 Euler-Bernoulli 梁序列, 引入有限元法的形状函数推导其位移, 基于能量法建立连续体的本构模型。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表达式^[87]。

2.3.5 组织力学性能试验方法

作物组织的力学性能参数有弹性、塑性、蠕变和流变性和强度参数等。常用的测试方法有拉伸、压缩和剪切等试验^[88]。微拉伸试验可以测量纤维的杨氏模量、断裂强度和应变^[17]。光学显微镜和扫描电子显微镜可以测量单根纤维的直径, 观察纤维拉伸破坏模式^[89]。如, 维管束拉伸试验时, 在维管束两端滴上直径约 60 μ m 的 AB 胶滴, 放入 60 $^{\circ}$ C 烘箱内烘 24 h 以上使胶滴固化, 然后放置在常温下冷却 24 h。试验测得谷子茎秆不同部位维管束的抗拉强度与弹性模量不同, 其变化趋势为从基部到梢部强度与模量值逐渐减小^[90]。

2.4 作物器官结构力学

2.4.1 概念与主要研究内容

由大到小的作物器官多尺度结构依次是器官、组织、细胞、细胞壁 (和液泡)、细胞壁层、MFA 和化合物。器官的力学性能取决于各类组织的数量、空间分布与排列方式。

作物器官结构力学是以器官为研究对象, 以组织为基本元件, 建立器官的几何结构和力学模型, 并求解其力学性能的科学。

主要研究内容为: 器官中组织的分布与排列; 器官几何结构模型、力学模型和求解方法; 器官力学性能试验方法等。

2.4.2 作物器官的形态结构

作物器官的形态结构包括外部形态结构和内部微观结构两个方面。通过显微镜观察器官切片, 可获取器官内植物组织的分布图像^[91]。 μ CT 技术可对器官内部结构进行无损成像^[92]。

不同作物、不同器官的形态结构差异较大。按形态结构对同类器官(如, 茎)进行分类, 有利于总结器官形态结构的一些普遍规律。如, 水稻、小麦和亚麻类型茎秆横截面内维管束较规则地排成两轮^[10,93-94]; 甘蔗、玉米类型茎秆横截面内维管束随机分散在薄壁组织中, 越靠近外侧越多, 越向中央愈少^[94-95]。

2.4.3 器官的几何结构模型

根据器官的外部形态结构和内部微观结构特点, 可建立其几何结构模型。如, 根据作物茎的外部形态结构, 假定茎为横观各向同性, 建立薄壁管茎秆模型^[19]和由皮与芯组成、有节部的圆柱体模型^[96-98]。

图像分析技术可重构器官内各组织的几何模型^[91], μ CT 技术可以直接生成器官内各组织的三维模型^[92]。外部形态结构和内部微观结构相结合, 可构建器官的几何结构模型。如, HORBENS 等根据苹果梗截面微观结构特点, 建立了基于表皮厚角组织、皮层薄壁组织、石细胞组织、纤维组织和髓部薄壁组织等 5 层组织排列的果梗模型^[99]。

2.4.4 器官的力学模型与求解方法

将组织的力学性能参数赋予给器官几何结构模型中相应的组织, 在给定载荷和约束条件下, 建立器官的力学模型^[98-99], 可通过有限元分析法求解其力学性能。如, HORBENS 等赋予苹果梗截面内 5 层组织相应的力学性能参数, 采用自适应漫射域方法 (AMDIs) 对苹果梗进行了弯曲、拉伸和扭转载荷下的虚拟试验^[99]。

代表性体积元 (RVE, representative volume element) 方法建立作物器官的力学模型。以维管束和其周围的基体为 RVE, 构建器官有限元模型^[96, 100]。如, CUI 等利用 RVE 法构建竹茎秆有限元模型, 分析维管束分布对竹茎秆力学性能的影响, 与维管束均匀分布的茎秆结构相比, 维管束非均匀分布的茎秆抗弯刚度提高 20%^[96]。

2.4.5 器官力学性能试验方法

作物器官力学性能主要有弹性、黏弹性、流变性和塑性和硬度、强度等参数^[99]。

水果类果实的力学参数常用质构仪测量。例如 SUSANRS 等利用 TA-XT2i 物性测定仪测试 13 种葡萄在均匀载荷下的时间-位移曲线, 分析葡萄的质地特性^[101]。

材料力学试验机用于作物茎在拉伸、剪切和弯曲各载荷下的强度、模量等力学参数的测量^[95, 98]。试验时, 需要根据测试对象的具体情况, 设计合适的夹具^[95, 98]。茎秆在风载下振动的高速摄影分析, 可得到的茎秆的刚度矩阵, 用于分析验证茎秆振动有限元模型^[100]。

2.5 植株结构力学

2.5.1 概念与主要研究内容

由大到小的作物植株多尺度结构依次是植株、器官、组织、细胞、细胞壁(和液泡)、细胞壁层、MFA 和化合物。植株的力学性能取决于各类器官的数量、空间分布与排列方式。

作物植株结构力学是以植株为研究对象, 以器官为基本元件, 建立植株的几何结构和力学模型, 并求解其力学性能的科学。

主要研究内容为: 植株的形态结构; 对植株力学性能贡献较大的各类器官的空间分布与排列方式; 植株的几何结构模型、力学模型及其求解方法; 植株力学性能试验方法。

2.5.2 植株的形态结构

植株是包括根、茎、叶等器官的成长的植物体。植株的三维形态结构直接表征了其品种遗传特征-环境-栽培措施的互作关系^[102-103]。育种计划常常将基因组学与表型组学相结合来实现作物关键性状的遗传结构提取, 以此选育出优良性状的作物^[104]。

2.5.3 植株的几何结构模型

植株几何结构模型包含了各器官几何模型和各器官在植株上的空间位置、姿态等信息。各器官的几何模型可以根据研究目的进行简化^[105-107]。例如, 根系的几何模型可以简化为圆柱体, 果实的几何模型可以简化为椭球体^[105], 花朵可以分别绘制花瓣和萼片, 然后组合成花朵^[106]; 叶片可以根据叶子形状, 将叶片建模时简化为面, 然后设定厚度^[107]。

2.5.4 植株力学模型与求解方法

为植株几何结构模型中的各器官赋予力学性能参数, 设定各器官之间的连接、约束方式和边界条件, 可建立器官的力学模型。采用有限元法分析其在特定载荷下应力应变特性^[108]。例如, 建立水稻茎秆-穗几何模型, 在水稻模型周围建立矩形流场域, 模拟水稻植株在风载的动态力学性能及其弯扭耦合变形在抗风中的作用, 得到水稻在不同风速的动力响应图^[13]。

2.5.5 植株力学性能试验方法

不同作物、不同生长期的植株形态结构差异较大。快速、准确地实现作物植株形态结构表型参数的提取和三维建模一直是具有挑战性的研究课题。对作物植株按其形态结构进行分类, 有利于植株形态结构模型重构技术的发展。

将植物的形态结构特征和计算机图形学方法结合, 可以实现作物形态结构在三维空间的高分辨率重现^[109]。获取植株三维形态结构信息的方法有激光扫描技术^[110]、结构光技术^[111]、地面激光雷达立式^[112]、双目立体视觉技术^[113]和三维植物点云分割技术^[114]等。

作物植株田间力学性能测试大多应用于作物抗倒伏性研究。测试将作物茎部向前推压至茎与地面呈 45°时的力和茎的抗断裂力, 用于评价抗倒伏性能^[115]。

有研究尝试非接触法测试植株的力学性能。例如,

基于作物茎本身对振动波的传递特性和其与声波纵向波长的特点,声学原理可被用于测试灌木的动态弹性模量^[116]。

3 结 论

1) 本文在梳理作物细胞、组织、器官和植株力学性能研究文献的基础上,提出了作物多尺度力学的概念,并总结了其研究内容和方法。

2) 作物多尺度力学的主要研究内容可以划分为细胞壁结构力学、细胞结构力学、组织结构力学、器官结构力学和植株结构力学等几个层次的研究。

3) 明确提出作物多尺度力学的概念,开展作物多尺度力学研究,有利于形成系统、规范的研究方法,建立规范的数据库,进而可以开发作物多尺度力学分析软件,丰富作物学和农业工程学科理论。

【参 考 文 献】

- [1] 肖海, 张千恒, 夏振尧, 等. 拉拔作用下护坡植物香根草根系的力学性能[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 91-97. XIAO Hai, ZHANG Qianheng, XIA Zhenyao, et al. Mechanical properties of roots of *Vetiveria zizanioides* as protection slope plants under tensile and pullout conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(11): 91-97. (in Chinese with English abstract)
- [2] 赵春花, 韩正晟, 师尚礼, 等. 新育牧草茎秆收获期力学特性与显微结构[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 179-183. ZHAO Chunhua, HAN Zhengsheng, SHI Shangli, et al. Mechanical properties and microstructure of new species forage stems in harvesting period[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(7): 179-183. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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. LI Hongbo, XUE Jinxia, WANG Bingxuan, et al. Tensile properties of foxtail millet leaf sheath, leaf and leaf collar[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(18): 11-17. (in Chinese with English abstract)
- [4] 闫德, 汪建晓, 罗陆锋, 等. 断梗激励下葡萄果粒的振动脱落特性与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 31-40. YAN De, WANG Jianxiao, LUO Lufeng, et al. Vibration shedding characteristics of the grapes under the excitation of broken stems and experimental research[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(22): 31-40. (in Chinese with English abstract)
- [5] 沈公威, 王公仆, 胡良龙, 等. 甘薯茎尖收获机研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 46-55. SHEN Gongwei, WANG Gongpu, HU Lianglong, et al. Development of harvesting mechanism for stem tips of sweet potatoes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(19): 46-55. (in Chinese with English abstract)
- [6] 郑书河, 林长山, 叶大鹏, 等. 巨菌草种茎辊式排种器结构优化及排种动力学仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 36-43. ZHENG Shuhe, LIN Changshan, YE Dapeng, et al. Structural optimization of grooved-roller seed metering device for Pennisetum and simulation and experiment of seed metering dynamics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(21): 36-43. (in Chinese with English abstract)
- [7] 辛尚龙, 赵武云, 石林榕, 等. 立辊式玉米收获割台夹持输送装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(9): 34-43. XIN Shanglong, ZHAO Wuyun, SHI Linrong, et al. Design and experiments of the clamping and conveying device for the vertical roller type corn harvesting header[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(9): 34-43. (in Chinese with English abstract)
- [8] 高国华, 谢海峰, 王天宝. 设施蔬菜收获机拉拔力学性能 EDEM 仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 24-31. GAO Guohua, XIE Haifeng, WANG Tianbao. EDEM simulation and experiment of pullout force of protected vegetable harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(23): 24-31. (in Chinese with English abstract)
- [9] 丁为民, 邓丽君, 李毅念, 等. 不同成熟度芡实的力学性能试验分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 241-247. DING Weimin, DENG Lijun, LI Yinian, et al. Experiment and analysis on mechanical properties of gorgon nuts (*euryle ferox*) at different maturities[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(19): 241-247. (in Chinese with English abstract)
- [10] ALAIN B, MARIANNE G, ANAËLE L, et al. Influence of the morphology characters of the stem on the lodging resistance of marylin flax[J]. Industrial Crops and Products, 2015, 66(1): 27-37.
- [11] GIBSON L. The hierarchical structure and mechanics of plant material[J]. Journal of Royal Society, 2012, 76(9): 2749-2766.
- [12] WANG N, LIU W, PENG Y. Gradual transition zone between cell wall layers and its influence on wood elastic modulus[J]. Journal of Materials Science, 2013, 48(14): 5071-5084.
- [13] 黄家乐. 仿水稻茎秆结构的弯扭耦合薄壁梁设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2018. HUANG Jiale. Biomimetic Design of Bend-twist Coupling Thin-walled Beams Based on the Structure of Rice Stem[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [14] RÜGGERBERG 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.
- [15] HUANG J, LIU W, ZHOU F, et al. Mechanical properties of maize fibre bundles and their contribution to lodging resistance[J]. Biosystems Engineering, 2016, 151: 298-307.
- [16] RÜGGERBERG M, BURGERT I, SPECK T. Structural and mechanical design of tissue interfaces in the giant reed[J]. Journal of the Royal Society, 2010, 7(44): 499-506.
- [17] FAISAL T, KHALIL A, HRISTOZOV N, et al. The impact of tissue morphology, cross-section and turgor pressure on the mechanical properties of the leaf petiole in plants[J]. Journal

- of Bionic Engineering, 2010, 7(4): 11-23.
- [18] WEGST U, ASHBY M. The structural efficiency of orthotropic stalks, stems and tubes[J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42(21): 9005-9014.
- [19] PIÑERA-CHAVEZ F, BERRY P, FOULKES M, et al. Avoiding lodging in irrigated spring wheat. II. genetic variation of stem and root structural properties[J]. *Field Crops Research*, 2016, 196(1): 64-74.
- [20] GANGWAR T, HEUSCHELE D, ANNOR G, et al. Multiscale characterization and micromechanical modeling of crop stem materials[J]. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 2020, 20(1): 1-23.
- [21] LIU Q, OU Y, WANG W, et al. The mechanical properties and constitutive equations of sugarcane stalk[C]. //ASABE Annual International Meeting, US: Minneapolis, 2007.
- [22] HULL D, CLYNE T. An Introduction to Composite Materials. Cambridge Solid State Science Series[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996.
- [23] LI B, HONG J, LIU Z. Stiffness design of machine tool structures by a biologically inspired topology optimization method[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 84(1): 33-44.
- [24] 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.
WANG Ningling. Multi-scale Modeling of Royal Palm Tissue and The Bionic Applications Based on Its Tissue Structure[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [25] LIU H, LI B, ZHANG L, et al. Optimizing heat-absorption efficiency of phase change materials by mimicking leaf vein morphology[J]. *Applied Energy*, 2020, 269(C): 1-20.
- [26] 田根林. 竹纤维力学性能的主要影响因素研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.
TIAN Genlin. The Main Influence Factors of Bamboo Fiber Mechanical Properties[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [27] 刘波. 毛竹发育过程中细胞壁形成的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2008.
LIU Bo. Formation of Cell Wall in Developmental Culms of *Phyllostachys Pubescens*[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [28] 陈红. 竹纤维细胞壁结构特征研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
CHEN Hong. Study on the Structural Characteristics of Bamboo Cell Wall[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [29] WANG C, WANG N, LIU S, et al. Investigation of microfibril angle of flax fibers using X-Ray diffraction and scanning electron microscopy[J]. *Journal Of Natural Fibers*, 2020, 17(7): 1001-1010.
- [30] KITA Y, AWANO T, YOSHINAGA A, et al. Intra-annual fluctuation in morphology and microfibril angle of tracheids revealed by novel microscopy-based imaging[J]. *PloS One*, 2022, 17(11): 616-620.
- [31] NIIMURA H, YOKOYAMA T, KIMURA S, et al. AFM observation of ultrathin microfibrils in fruit tissues[J]. *Cellulose*, 2010, 17(1): 13-18.
- [32] ZHANG T, MAHGSOUDY L, TITTMANN B, et al. Visualization of the nanoscale pattern of recently-deposited cellulose microfibrils and matrix materials in never-dried primary walls of the onion epidermis[J]. *Cellulose*, 2014, 21(2): 853-862.
- [33] WANG C, WANG N, LIU S, et al. The combined effects of initial microfibrillar angle and moisture contents on the tensile mechanical properties and angle alteration of wood foils during tension[J]. *Holzforschung*, 2017, 71(6): 491-497.
- [34] 刘苍伟, 苏明垒, 王思群, 等. 不同生长期毛竹材细胞壁力学性能与微纤丝角[J]. *林业科学*, 2018, 54(1): 174-180.
LIU Cangwei, SU Minglei, WANG Siqun, et al. Cell wall mechanical properties and microfibril angle of *phyllostachys edulis* in different growth period[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54(1): 174-180. (in Chinese with English abstract)
- [35] REKHA B, NAGARAJAGANESH B. X-ray diffraction: An efficient method to determine microfibrillar angle of dry and matured cellulosic fibers[J]. *Journal of Natural Fibers*, 2022, 19(10): 3689-3696.
- [36] GIERLINGER N, LUSS S, KÖNIG C, et al. Cellulose microfibril orientation of picea abies and its variability at the micron-level determined by Raman imaging[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(2): 587-595.
- [37] LIESE W. The anatomy of bamboo culms[R]. Technical Report INBAR, Beijing, China, 1998.
- [38] EVERT R F. Esau's Plant Anatomy: Meristems, Cells, and Tissues of the Plant Body: Their Structure, Function, and Development, Third Edition[M]. Wiley-Interscience, US: New Jersey, 2006.
- [39] 冯龙, 孙存举, 毕文思, 等. 毛竹薄壁细胞组分分布及取向显微成像研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(9): 2957-2961.
FENG Long, SUN Cunju, BI Wensi, et al. The distribution and orientation of cell wall components of moso bamboo parenchyma[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(9): 2957-2961. (in Chinese with English abstract)
- [40] WANG Y, HUANG J, LI Y, et al. Ammonium oxalate-extractable uronic acids positively affect biomass enzymatic digestibility by reducing lignocellulose crystallinity in *Miscanthus*[J]. *Bioresour Technology*, 2015, 196: 391-398.
- [41] WANG Y, FAN C, HU H, et al. Genetic modification of plant cell walls to enhance biomass yield and biofuel production in bioenergy crops[J]. *Biotechnol Advances*, 2016, 34(5): 997-1017.
- [42] HUANG J, LIU W, ZHOU F, et al. Stiffness variability analysis of maize fiber bundles via multiscale simulation[J]. *Journal of Materials Science*, 2017, 52(13): 7917-7928.
- [43] WANG Y, WANG G, CHENG H, et al. Structures of bamboo fiber for textiles[J]. *Textile Research Journal*, 2010, 80(4): 334-343.
- [44] BRAYBROOK S, JONSSON H. Shifting foundations: the mechanical cell wall and development[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2016, 29: 115-120.
- [45] COUSINS W. Young's modulus of hemicellulose as related to moisture content[J]. *Wood Science and Technology*, 1978, 12(3): 161-167.
- [46] COUSINS W. Elastic modulus of lignin as related to moisture content[J]. *Wood Science and Technology*, 1976, 10(1): 9-17.
- [47] NEAGU R, GAMSTEDT E. Modelling of effects of ultrastructural morphology on the hygroelastic properties of wood fibres[J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42(24): 10254-10274.
- [48] THUAULT A, BAZIN J, EVE S, et al. Numerical study of the influence of structural and mechanical parameters on the tensile mechanical behaviour of flax fibres[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2014, 44(1): 22-39.
- [49] Thomas J, Cristian N, Stig L, et al. Modelling of the hygroelastic behaviour of normal and compression wood tracheids[J]. *Journal of Structural Biology*, 2014, 185(1): 89-

- 98.
- [50] CHARLET K, JERNOT J, EVE S, et al. Multi-scale morphological characterisation of flax: From the stem to the fibrils[J]. *Carbohydr Polymers*, 2010, 82(1): 54-61.
- [51] CHRISTOPHE L, MICHIEL H, JACO V, et al. Reciprocal interactions between cadmium-induced cell wall responses and oxidative stress in plants[J]. *Frontiers Plant Science*, 2017, 8: 1867-1886.
- [52] NILSSON T, GUSTAFSSON P. Influence of dislocations and plasticity on the tensile behaviour of flax and hemp fibres[J]. *Compositers Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, 38(7): 1722-1728.
- [53] QING H, MISHNAEVSKY L. 3D hierarchical computational model of wood as a cellular material with fibril reinforced, heterogeneous multiple layers[J]. *Mech Mater*, 2009, 41(9): 1034-1049.
- [54] QING H, MISHNAEVSKY L. A 3D multilevel model of damage and strength of wood: Analysis of microstructural effects[J]. *Mechanics of Materials*, 2011, 43(9): 487-495.
- [55] ALEXIS B, RICHARD N. Structure, morphology and mechanical properties of rhectophyllum camerunense(RC) plant fiber. Part II: Computational homogenization of the anisotropic elastic properties[J]. *Computational Materials Science*, 2011, 50(4): 1550-1558.
- [56] LENNART S. Finite element modelling of wood cell deformation transverse to the fibre axis[J]. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2008, 23(2): 240-246.
- [57] ASGARI M, BRULÉ V, WESTERN T, et al. Nano-indentation reveals a potential role for gradients of cell wall stiffness in directional movement of the resurrection plant *selaginella lepidophylla*[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 506-516.
- [58] YU Y, FEI B, ZHANG B, et al. Cell-wall mechanical properties of bamboo investigated by in-situimaging nanoindentation[J]. *Wood and Fiber Science*, 2007, 39(4): 527-535.
- [59] 马斌, 王作斌. 原子力显微镜在细胞力学特性研究中的进展[J]. *加工、测量与设备*, 2014, 51(9): 593-597.
MA Bin, WANG Zuobin. Progress of the atomic force microscope in the study of mechanical properties of cells[J]. *Processing, Measurement and Equipment*, 2014, 51(9): 593-597. (in Chinese with English abstract)
- [60] ARNOULD O, ARINERO R. Towards a better understanding of wood cell wall characterisation with contact resonance atomic force microscopy[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 74: 69-76.
- [61] RIGATO A, RICO F, EGHIAIAN F, et al. Atomic force microscopy mechanical mapping of micropatterned cells shows adhesion geometry-dependent mechanical response on local and global scales[J]. *ACS Nano*, 2015, 9(6): 5846-5856.
- [62] LEROUX O. Collenchyma: A versatile mechanical tissue with dynamic cell walls[J]. *Annals of Botany*, 2012, 110(6): 1083-1098.
- [63] 刘胜祥. 植物资源学 [M]. 武汉: 武汉出版社, 1992.
- [64] ZHU H, MELROSE R. A mechanics model for the compression of plant and vegetative tissues[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2003, 221(1): 89-101.
- [65] MYHAN R, MARKOWSKI M, JACHIMCZYK E. A non-linear rheological model of plant tissues[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 190(C): 1-10.
- [66] MYHAN R, MARKOWSKI M. The compression specificity of plant tissue[J]. *Journal of Texture Studies*, 2020, 51(4): 593-600.
- [67] PITT R, DAVIS D. Finite element analysis of fluid-filled cell response to external loading[J]. *Transactions of the ASAE*, 1984, 27(6): 1973-1983.
- [68] BERGANDER A, SALMÉN L. Cell wall properties and their effects on the mechanical properties of fibers[J]. *Journal of Materials Science*, 2002, 37(1): 151-156.
- [69] WU N, PITTS J. Development and validation of a finite element model of an apple fruit cell[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 1999, 16(1): 1-8.
- [70] HILLER L, BRUCE D, JERONIMIDIS G. A micro-penetration technique for mechanical testing of plant cell walls[J]. *Journal of Texture Studies*, 1996, 27(5): 559-587.
- [71] THOMAS T, MATTHEWS M, SHACKEL K. Direct in-situ measurement of cell turgor in grape (*Vitis vinifera* L.) berries during development and in response to plant water deficits[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2006, 29(5): 993-1001.
- [72] 刘小芳, 张岁岐, 杨晓青. 压力探针技术原理及其在植物水分关系研究中的应用[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(4): 172-179.
LIU Xiaofang, ZHANG Suiqi, YANG Xiaoqing. The pressure probe technique: principles and application in research of plant water relations[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(4): 172-179. (in Chinese with English abstract)
- [73] BURGERT B. The influence of rays on the transverse elastic anisotropy in green wood of deciduous trees[J]. *Transverse Elasticity of Deciduous Trees*, 2001, 55(5): 449-454.
- [74] 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): 63-116.
- [75] ALEXIS B, RICHARD N. Structure, morphology and mechanical properties of rhectophyllum camerunense(RC) plant fiber. Part I: Computational homogenization of the anisotropic elastic properties[J]. *Computational Materials Science*, 2011, 50(4): 1442-1449.
- [76] PIECZYWEK P, 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.
- [77] 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): 1-13.
- [78] FAISAL T, HRISTOZOV N, REY A, 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, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2012, 86(3): 1-10.
- [79] FAISAL T, HRISTOZOV N, WESTERN T, 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.
- [80] WANG N, LIU W, HUANG J, et al. The structure-mechanical relationship of palm vascular tissue[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2014, 36: 1-11.
- [81] MEBATSION H. Modeling fruit microstructure using an ellipse tessellation algorithm[J]. *Iufost*, 2006: 673-685.
- [82] MEBATSION H, VERBOVEN P, JANCOSOK P, et al.

- Modeling 3D fruit microstructure using a novel ellipse tessellation algorithm[J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2008, 29(3): 137-150.
- [83] PALOMBINI F, JR W. Bionics and design: 3D microstructural characterization and numerical analysis of bamboo based on X-ray microtomography[J]. *Materials Characterization*, 2016, 120: 357-368.
- [84] MATHENY J. Understanding the Transition from Positive to Negative Poisson's Ratio Behavior in Cellular Materials and the Potential for Auxeticity in Trabecular Bone[D]. State of Ohio: The University of Toledo, 2011.
- [85] URAL A, ZIOUPOS P, BUCHANAN D, et al. The effect of strain rate on fracture toughness of human cortical bone: a finite element study[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2011, 4(7): 1021-1032.
- [86] GAO Q, PITT R. Mechanics of parenchyma tissue based on cell orientation and microstructure[J]. *Transactions of the ASAE*, 1991, 34(1): 232-238.
- [87] ONGARO F, BARBIERI E, PUGNO N. Mechanics of mutable hierarchical composite cellular materials[J]. *Mechanics of Materials*, 2018, 124(1): 80-99.
- [88] 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.
LI Yancong, DU Xiaoyong, WANG Jinhai, et al. Mechanical properties of apple picking damage[J]. *Agricultural Engineering*, 2018, 8(6): 77-80. (in Chinese with English abstract)
- [89] RONALD-ASEER J, SANKARANARAYANASAMY K, JAYABALAN P. Morphological, physical and thermal properties of chemically treated banana fibers[J]. *Journal of Natural Fibers*, 2013, 13(1): 197-206.
- [90] 张亮. 谷子茎秆与纤维拉伸力学特性测试研究 [D]. 太原: 山西农业大学, 2019.
ZHANG Liang. Study on Tensile Mechanical Properties of Millet Stems and Fibers[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [91] LEGLAND D, EL-HAGE F, MÉCHIN V, et al. Histological quantification of maize stem sections from farga-stained images[J]. *Plant Methods*, 2017, 13(1): 84-95.
- [92] WU W, Re X. 3D microstructure reconstruction of bamboo fiber and parenchyma cell[J]. *Journal of Natural Fibers*, 2019, 18(8): 1-9.
- [93] DUAN C, WANG B, WANG P, et al. Relationship between the minute structure and the lodging resistance of rice stems[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2004, 35(3): 155-158.
- [94] ODUNTAN Y, STUBBS C, ROBERTSON D. High throughput phenotyping of cross-sectional morphology to assess stalk lodging resistance[J]. *Plant Methods*, 2022, 18(1): 1-26.
- [95] 刘庆庭, 区颖刚, 卿上乐, 等. 农作物茎秆的力学特性研究进展[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(7): 172-176.
LIU Qingting, OU Yinggang, QING Shangle, et al. Study progress on mechanics properties of crop stalks[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(7): 172-176. (in Chinese with English abstract)
- [96] CUI J, QIN Z, MASIC A, et al. Multiscale structural insights of load bearing bamboo: A computational modeling approach[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2020, 107: 1-9.
- [97] 周敬辉, 李尚平, 莫翰宁, 等. 甘蔗根部蔗芯工程弹性常数的试验研究[J]. *中国农机化学报*, 2017, 38(1): 15-21.
ZHOU Jinghui, LI Shangping, MO Hanning, et al. Experimental study on engineering elasticity constants for the sugarcane core of sugarcane root[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2017, 38(1): 15-21. (in Chinese with English abstract)
- [98] 沈成, 李显旺, 田昆鹏, 等. 苕麻茎秆力学模型的试验分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(20): 26-33.
SHEN Cheng, LI Xianwang, TIAN Kunpeng, et al. Experimental analysis on mechanical model of ramie stalk[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(20): 26-33. (in Chinese with English abstract)
- [99] HORBENS M, BRANKE D, GRTNER R, et al. Multi-scale simulation of plant stem reinforcement by brachysclereids: a case study in apple fruit peduncles[J]. *Journal of Structural Biology*, 2015, 192(1): 116-126.
- [100] ZAJACZKOWSKA U, UCHARSKI S, NOWAK Z, et al. Morphometric and mechanical characteristics of equisetum hyemale stem enhance its vibration[J]. *Planta*, 2017, 245(4): 835-848.
- [101] SUSANRS R, LUCAR R, VINCENZOG G, et al. Phenolic ripeness assessment of grape skin by texture analysis[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2008, 21(8): 644-649.
- [102] 蔡东娜. 重瓣花卉植物的三维重建与动态模拟研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
CAI Dongna. Research on Three-dimensional Reconstruction and Dynamic Simulation of Double Flower Plants[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [103] 郑晨曦. 基于三维数字化技术和网格变形的小麦植株建模方法研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
ZHENG Chenxi. Modelling Method of Wheat Plant Based on 3D Digitization and Mesh Deformation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [104] FURBANK R. Phenomics-technologies to relieve the phenotyping bottleneck[J]. *Trends in Plant Science*, 2011, 16(12): 635-644.
- [105] 胡包钢, 赵星, 严红平, 等. 植物生长建模与可视化回顾与展望[J]. *自动化学报*, 2001, 24(6): 815-835.
HU Baogang, ZHAO Xing, YAN Hongping, et al. Plant growth modeling and visualization-review and perspective[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, 24(6): 815-835. (in Chinese with English abstract)
- [106] 欧中斌. 油菜生长可视化仿真关键技术研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007.
OU Zhongbing. Studies on the Key Technology of Rapeseed (*Brassica napus*) Visual Growth[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [107] 杨望, 梁磊, 杨坚. 风作用甘蔗的动力学仿真模型[J]. *农机化研究*, 2019, 41(9): 9-14.
YANG Wang, LIANG Lei, YANG Jian. Dynamic simulation model of sugarcane affected by wind[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2019, 41(9): 9-14. (in Chinese with English abstract)
- [108] 张烨, 李长友, 方壮东, 等. 基于有限元法的玉米力学特性分析[J]. *计算机仿真*, 2018, 35(8): 194-197.
ZHANG Ye, LI Changyou, FANG Zhuangdong, et al. Analysis of mechanical characteristic of maize based on the FEM[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 35(8): 194-197. (in Chinese with English abstract)

- [109] YIN K, HUANG H, LONG P, et al. Full 3D plant reconstruction via intrusive acquisition[J]. *Computer Graphics Forum*, 2016, 35(1): 272-284.
- [110] SHENGA P, BOMARK P, BROMAN O, et al. 3D phase-shift laser scanning of log shape[J]. *Bioresources*, 2014, 9(4): 7593-7605.
- [111] 方慧, 胡令潮, 何任涛, 等. 植物三维信息采集方法研究[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(3): 142-147.
FANG Hui, HU Lingchao, HE Rentao, et al. Research on plant three-dimensional information acquisition method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(3): 142-147. (in Chinese with English abstract)
- [112] DANNY B, RICHARD A, JOAN E, et al. Predicting wood fiber attributes using local-scale metrics from terrestrial lidar data: A case study of newfoundland conifer species[J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, 347(1): 116-129.
- [113] 赵元棣, 温维亮, 郭新宇, 等. 基于参数化的玉米叶片三维模型主脉提取[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(4): 183-187.
- ZHAO Yuandi, WEN Weiliang, GUO Xinyu, et al. Midvein extraction for 3D corn leaf model based on parameterization[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(4): 183-187. (in Chinese with English abstract)
- [114] DUAN T, CHAPMAN S, HOLLAND E, et al. Dynamic quantification of canopy structure to characterize early plant vigour in wheat genotypes[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2016, 67(15): 4523-4534.
- [115] LI X, LI Y, LIANG Q, et al. Evaluation of lodging resistance in sugarcane (*saccharum* spp. hybrid) germplasm resources[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, 17(3): 6107-6116.
- [116] 徐峰. 阔叶材原木质量应力波精准检测方法研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2020.
XU Feng. Research on Accurate Detection Methods of Hardwood Log Quality Through Stress Wave Technology[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2020. (in Chinese with English abstract)

Preliminary study on crop multi-scale mechanics

LIU Qingting, LIN Zhichao, HU Ping, ZHENG Mingxuan, LI Zhi'ang, LI Tao

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

Abstract: Crop mechanical properties are widely used in the studies of crop lodging resistance, machine-crop-soil interaction system and crop cultivation. Theoretical support can greatly contribute to the lodging resistance varieties for the quality of machine operation and cultivation. The mechanical properties of crops are also closely related to their morphological structure, anatomical characteristics, and chemical compounds. This review was focused mainly on the mechanical properties associated with the volume fraction of the main compound components (including cellulose, hemicelluloses, lignin, and pectin) in each cell wall layer, the thickness, and the microfibrillar angle. The structure models were also established for the cell wall layer. The elastic mechanics model of each cell wall layer was then constructed using the Halpin-Tsai equation. The elastic model of the cell wall was built using the classical laminate theory and the boundary conditions of each wall layer. The finite element method (FEM) was used to solve those mechanical models. The mechanical properties of the cell and cell wall were characterized by the transmission electron microscope (TEM), scanning electron microscope (SEM), and atomic force microscope (AFM), and confocal raman microscope (CRM). A systematic investigation was made to clarify the influences of cell morphology, structure, size, arrangement, and density on the mechanical properties of tissues. The cell geometry model reconstruction of tissues was performed on the Voronoi diagram, skeleton, ellipse fitting, and high-resolution X-ray microtomography. The mechanical models of tissue were represented by the linear elastic, nonlinear rheological and two-dimensional honeycomb system mechanical model using the finite or discrete element method (FEM or DEM). The mechanical properties of tissue were verified by the micro-scale tension, compression and shear tests. Previous research was found to determine the influence of tissue distribution and arrangement on the mechanical properties of organs. Furthermore, the geometric structure model was also built, according to the characteristics of external morphology and internal microstructure of the organ. The mechanical model of organs was constructed to assign the mechanical property parameters of tissues, and then for the setting load and constraint conditions. FEM was then used to solve the mechanical models. Much effort also focused on the influences of the number, spatial distribution, and arrangement of various organs on the mechanical properties of plants. The plant geometric structure model included the geometric model of each organ, the spatial position, and the posture of each organ on the plant. The mechanical model of the plant was built to assign the mechanical property parameters to each organ in the plant geometric structure model, and then set the connection, constraint mode, and boundary conditions on each organ. The FEM was also used to analyze the mechanical properties of the plant under a specific load. As such, the concept of crop multi-scale mechanics was summarized during this time. Namely, the mechanical properties of crops were analyzed to take the cell wall layer, cell wall, cell, tissue, and organ as the basic components, thus building the geometric structure and mechanical models of the cell wall, cell, tissue, organ, and plant, together with the research contents of their structure mechanics. The concept of crop multi-scale mechanics was proposed to systematically summarize the research contents. The findings were also helpful to the formation of crop multi-scale mechanics theory, the establishment of database and the development of analysis software.

Keywords: crop; multi-scale mechanics; cell; organs; plants