

# 基于双向流固耦合模型的大豆叶片变形响应机理

胡 军<sup>1,2\*</sup> 杨薇卉<sup>1</sup> 刘昶希<sup>1,2</sup> 石 航<sup>1</sup> 孙 昊<sup>1</sup>

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319; 2. 农业农村部大豆机械化生产重点实验室, 黑龙江 大庆 163319)

**摘要:** 为揭示风幕作用下始花期大豆枝叶的动态变形机理, 测定大豆枝叶力学参数, 构建大豆枝叶变形双向流固耦合模型并通过高速摄像试验对其进行验证; 在此基础上, 以气流速度、气流角度及叶片初始倾角为因素进行正交试验, 建立叶片变形回归预测模型。结果显示: 始花期大豆分枝的弹性模量(169.8 MPa)显著高于叶片的弹性模量(43.2 MPa), 风载下分枝相对静止, 叶片呈主叶脉弯曲特征; 双向流固耦合模型仿真与实测最大相对误差为9.36%, 表明模型有效; 回归分析显示对叶尖变形量和叶面形心变形量影响的各因素显著性由大到小依次为气流速度、气流角度和初始倾角; 回归模型拟合良好, 其对叶尖变形量与叶面形心变形量的预测值与仿真值吻合度较高, 平均绝对百分比误差分别为10.50%和9.49%。该研究为风幕式喷雾机的作业参数优化及大田作物高效施药提供了重要理论支撑。

**关键词:** 始花期; 大豆; 风幕式喷雾机; 叶片变形; 双向流固耦合模型; 计算流体力学

## Numerical simulation of soybean leaf deformation based on bidirectional fluid structure coupling model

Hu Jun<sup>1,2\*</sup> Yang Weihui<sup>1</sup> Liu Changxi<sup>1,2</sup> Shi Hang<sup>1</sup> Sun Hao<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, Heilongjiang Province, China;

2. Key Laboratory of Soybean Mechanized Production, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,

Daqing 163319, Heilongjiang Province, China)

**Abstract:** To reveal the dynamic deformation mechanism of soybean branches and leaves under the influence of an air curtain, this study determined the mechanical parameters of soybean tissues and established a bidirectional fluid-structure interaction (FSI) model. The model was validated using high-speed photography experiments. Subsequently, orthogonal experiments were conducted, considering air-flow velocity, airflow angle, and initial leaf inclination as key factors, to establish a regression prediction model for leaf deformation. The results indicate that the elastic modulus of soybean branches (169.8 MPa) is significantly higher than that of the leaves (43.2 MPa) during the initial flowering stage. Under wind loading, the branches remained relatively stationary while the leaves exhibited characteristic bending along the primary veins. The maximum relative error between the bidirectional FSI simulation and experimental measurements was 9.36%, confirming the model's validity. Regression analysis demonstrated that the factors influencing leaf tip and leaf centroid displacement, in descending order of significance, are airflow velocity, airflow angle, and initial inclination. The regression models exhibited a high degree of fit, with mean absolute percentage errors of 10.50% for leaf tip displacement and

基金项目: 黑龙江省重点研发计划重大项目(2023ZX01A06), 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2023E106), 黑龙江省“双一流”学科协同创新成果项目(LJGXCG2023-045), 中国高校产学研创新基金资助课题(2023RY059), 黑龙江八一农垦大学引进人才科研启动基金项目(XYB202504)

\* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: gcxykj@126.com

收稿日期: 2025-09-23

9.49% for leaf centroid displacement when predicted values were compared with simulated data. This research lays a critical theoretical basis for optimizing the operating parameters of air-curtain sprayers and enhancing the pesticide application efficiency for field crops.

**Key words:** initial flowering stage; soybean; air-assisted boom sprayer; leaf deformation; bidirectional fluid-structure interaction model; computational fluid dynamics

大豆作为我国主要的农产品,对保障粮食安全与稳定农业经济具有战略意义。为提高大豆产量,增加收益,农民不断增加化肥施用量,这进一步加剧了环境污染问题(何勇等,2018;李敏等,2024;杨园园等,2024)。此外,传统喷雾施药穿透性差且雾滴飘移率较高,这导致农药施用过程中的低效问题突出。大豆生长至中后期,冠层郁闭度高,施药时药液穿透性差和飘移污染尤其严重,而风幕式喷雾技术在解决药液穿透性差和雾滴飘移高方面有较大潜力(曾爱军,2005)。风幕式喷雾机通过调控辅助气流(如速度、角度)优化雾滴输送路径,辅助气流可减少侧风干扰,加速液滴穿透冠层,并通过动态调整叶片在气流方向上的投影面积来改善雾滴沉积均匀性(茹煜,2009;何雄奎,2022;Wei et al.,2023)。因此,揭示风幕气流与大豆枝叶的动态互作规律对于精准优化风幕喷雾参数、提升农药利用率与降低环境污染具有重要意义。

国内外关于气流、雾滴与叶片相互作用的研究较多。例如,国外学者Hong et al.(2018)开发了一种稳态计算流体动力学(computational fluid dynamics,CFD)模型,该模型可以预测苹果园中空气辅助喷雾器的雾滴位移特性、雾滴在树冠内部的沉积规律以及脱靶飘移行为,该模型模拟的冠层内喷雾浓度与脱靶损失及实测值高度吻合;针对气流辅助喷雾中因忽略气流-雾滴-三维冠层耦合效应而导致沉积预测精度低的问题,Endalew et al.(2009;2010a,b)提出了一种CFD集成方法,该方法通过分析风场、雾滴流与三维冠层间的相互作用构建了用于预测枝叶雾滴分布的随机沉积模型,并证实了其在优化喷雾器设计与参数校准、提升喷施效率方面的有效性;Duga et al.(2015a,b,c)利用三维CFD方法模拟了果园冠层靶标、风送气流、空气和雾滴群的交互过程;以上研究均是将植株的三维几何结构纳入了CFD模型中。国内学者Qiu et al.(2022)建立并验证了多相流CFD仿真模型,利用该模型模拟了不同喷雾雾滴粒径、冲击速度、叶片倾角和旋转角速度下雾滴在叶片上的沉积行为。Yan et al.(2022)分析了辅助气流下葡萄叶片的变形规律,明确在植物的不同生长

阶段气流参数不能固定不变,需要调整,从而为优化喷雾器气流系统提供了理论依据。Liu et al.(2024)将双向流固耦合模型与离散相粒子追踪方法结合用于研究辅助气流喷雾中气流、雾滴与番茄叶片的动态作用,揭示了叶片变形对雾滴沉积的影响规律,从而为喷雾参数的优化提供了依据。大田作物冠层结构连续性强、植株柔性动态变化显著,其气流-雾滴-叶片相互作用机制更复杂,因此,关于大豆、水稻等大田作物密植冠层的相关研究较少,多聚焦于雾滴沉积规律、传统喷雾飘移或针对特定风场(如无人机)。例如,Nuyttens et al.(2010)通过喷雾质量、风洞测量以及田间飘移试验研究喷雾施药技术、液滴特性、缓冲区、气象条件、喷雾液特性、边界结构和作物特性对田间作物喷雾器飘移的间接或直接影响。Hu et al.(2023)采用有限元方法模拟近地风场(自然风和无人机下洗气流中)水稻的运动响应,建立了水稻风致响应模型,利用该模型预测其位移和临界风速,并探讨风致响应与产量的关系。张亚辉(2021)构建了多旋翼无人机下洗流场与大豆冠层-雾滴气液两相流耦合模型,利用该模型揭示了无人机风场参数对雾滴冠层穿透性及沉积均匀性的影响规律,为低空施药装备参数优化提供理论依据。刘兴华等(2021)构建了双向流固耦合模型,利用该模型分析辅助气流作用下棉花叶片的变形机理,确定气流速度、弹性模量和叶片倾角对其的影响依次减弱,基于此构建了叶片变形的数学模型,并量化了不同参数组合下叶片迎风面积的变化规律,为优化气流辅助喷雾作业参数提供了理论依据。但关于大豆、水稻等密植大田作物的风幕气流-叶片动态变形-雾滴沉积多因素耦合机制未见报道。

为量化风幕气流扰动下大豆叶片的动态变形规律,基于双向流固耦合理论建立始花期大豆风幕作用下枝叶变形双向流固耦合模型,并利用高速摄像试验验证模型的有效性;在此基础上,选取气流速度、气流角度、叶片初始倾角三因素进行正交试验,量化风幕气流扰动下大豆叶片的动态变形规律,以为风幕式喷雾机的参数优化与装备升级提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试植物:始花期黑农51大豆植株由黑龙江八一农垦大学国家杂粮工程技术研究中心提供,于植株上层随机选择健康的30片叶片以及长度、粗细相等的30个分枝,逐一编号后迅速装入自封袋内,立即带回实验室。

仪器:CMT2050微机控制电子万能材料试验机,协强仪器制造(上海)有限公司;SCMOS高速摄像机,德国PCO公司;TWIN AIR风幕试验台、自走式ALPHA Evo 4100 TWIN 28 m双风风幕喷杆喷药机,丹麦哈滴公司。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 大豆枝叶的物理与力学参数测定

为准确构建大豆枝叶的三维几何模型,使用游标卡尺与直尺分别测量30片大豆叶片的长度、宽度、厚度以及30个分枝的长度与直径,利用游标角度尺测定分枝与叶片的夹角,各指标均独立测量3次并取算术平均值,同时根据测量数据计算单叶面积,从而为后续双向流固耦合模型的几何重构提供精确的边界条件。为满足CFD流固耦合数值计算的输入要求,需进一步确定材料的弹性模量、密度及泊松比等关键物理参数;为提高计算效率,本研究将大豆分枝和叶片简化视为各向同性弹性材料。根据马飞龙和李立州(2014)研究结果,大豆分枝和叶片的泊松比分别取0.34和0.32。本研究采用常规称重法测量密度。选取新鲜的大豆分枝15个和叶片15片,使用精度为0.001 g的电子分析天平测定其在空气中的质量;随后采用排水置换法测定样品体积;依据质量与体积之比计算各样品密度并取平均值,将其作为双向流固耦合模型中材料密度的输入参数。选择15个大豆分枝样品,每个分枝截取长度为50 mm试样;选择15片大豆叶片样品,沿叶片主脉方向在叶片基部截取长50 mm、宽20 mm的试样;将分枝或叶片试样置于CMT2050型电子万能材料试验机支架上,压头垂直向下移动,采集样品的变形量和载荷增量,每个样品分别进行多次三点弯曲试验(谢伟等,2023),取平均值作为试验结果。根据载荷-位移曲线获得样品弹性变形阶段的载荷变化量与位移变化量比值( $\Delta F/\Delta\delta$ ),利用公式分别计算分枝和叶片的弹性模量 $E_p$ 和 $E_l$ , $E_p = \frac{L^3}{48I_1} \left( \frac{\Delta F}{\Delta\delta} \right)$ , $I_1 = \frac{\pi D^4}{64}$ ,

$E_l = \frac{L^3}{48I_2} \left( \frac{\Delta F}{\Delta\delta} \right) (1 - \nu^2)$ , $I_2 = \frac{bh^3}{12}$ ,式中, $\Delta F$ 为载荷增量, $\Delta\delta$ 为中心挠度增量, $L$ 为水平支架跨距, $I_1$ 为惯性矩, $D$ 为分枝直径, $\nu$ 为泊松比, $b$ 为叶片宽度, $h$ 为叶片厚度。分别统计叶片和分枝的弹性模量,剔除异常数据样本。

#### 1.2.2 大豆枝叶三维图形建模

基于1.2.1采集的大豆分枝和叶片数据,在SolidWorks 2022软件中构建大豆枝叶三维模型,建模过程中形态参数保持恒定,以排除个体差异对气流响应的干扰。为模拟风幕喷雾机作业时的气流场环境,在SolidWorks 2022软件中构建长500 mm、宽500 mm、高600 mm的长方体流体域,计算域上表面为气流入口,气流流动方向为Z轴负方向,其他5个表面均为压力出口,大豆叶片形心距流体域上平面500 mm(图1)。

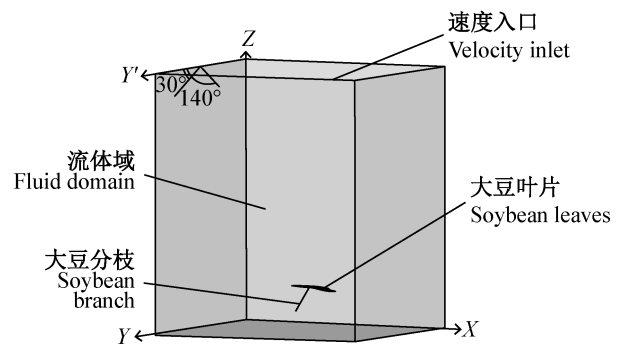


图1 风幕气流作用下大豆枝叶的三维模型及气流角度方向定义

Fig. 1 Three-dimensional model of soybean branches and leaves under action of air curtain airflow and definition of airflow angle and direction

#### 1.2.3 大豆枝叶变形双向流固耦合模型的建立

网格划分:在ANSYS 2022R1软件中进行网格划分和耦合求解。在瞬态结构模块中,将分枝与叶片之间的接触网格设为0.5 mm;采用扫掠法生成大豆叶片实体壳单元,单元尺寸为1 mm;采用自适应网格法应用ANSYS 2022R1软件中网络划分模块将空气流体域生成四面体网格。当叶片网格数为42 800、流体域网格数为680 158时,此时模型网格最大偏度低于0.6,平均正交度高于0.8,将此作为后续仿真的基准网格。

物理场模拟设置:在固体域中,大豆分枝与叶片均视为各向同性弹性材料,大豆分枝的前端被设定为固定支撑,而大豆叶片表面的其余部分则设为耦合界;在固体域求解过程中,求解器控制开启Large

Deflection功能,该功能能精准模拟大豆叶片在气流等外力作用下发生的显著变形,并输出最大变形量。流体域采用Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型及标准壁面函数,空气密度  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ,动力黏度  $1.789 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。在实际气流辅助喷雾过程中,气流速度角度、大小可调,气流角度定义为  $Y-Z$  平面内气流速度方向与  $Y'$  轴正方向夹角(图1);通过定义入口气流  $Y$  轴和  $Z$  轴速度分量来产生不同速度大小和角度的风幕气流,出口压力设为0,从而模拟现实环境中大豆周围的气压。

双向耦合求解策略:选择分离算法和顺序求解。Fluent求解器计算叶片表面的气动载荷并将其映射至固体场界面;瞬态结构分析模块接收载荷并计算位移响应;将固体场的位移反馈至流体域,利用动态网格技术模拟风载荷作用下大豆叶片的动态变形过程。在系统耦合模块中,将耦合时间步长设置为  $0.001 \text{ s}$ ,最小迭代步长设置为系统的耦合模块,重复上述规则,直到计算结果1,最大迭代步长设置为5,仿真计算时间设置为  $0.2 \text{ s}$ 。计算完成后,在瞬态结构模块中获得分枝末端、叶面形心和叶尖处的最大变形(在叶片上相同位置的空间位移),在CFD-POST后处理模块中获得最大变形时的变形量。

#### 1.2.4 大豆枝叶变形双向流固耦合模型的验证试验

试验参数的确定:风幕气流携带雾滴到达冠层表面的末速度对沉积效果至关重要。速度过高易导致飘移,过低则穿透性不足,故末速度不应低于  $2 \text{ m/s}$  (戴奋奋,2008)。采用双风风幕喷杆喷药机进行田间作业时,始花期大豆冠层距风幕出风口的实际高度为  $400\sim 600 \text{ mm}$ ,本试验取值为  $500 \text{ mm}$ 。在此高度下,测得风幕气流到达叶片的末速度范围为  $2\sim 4 \text{ m/s}$ 。喷雾机的风幕角度调节范围为  $30^\circ\sim 140^\circ$  (李信,2017),因此将气流角度范围设为  $30^\circ\sim 140^\circ$ ,这有助于确定叶片最大变形角度。根据大豆叶片倾角分布概率密度函数,始花期大豆叶片主要呈近水平生长,叶片倾角多集中在  $0^\circ\sim 20^\circ$  范围内,当叶片倾角超过  $20^\circ$  时多为机械损伤或竞争光照所致的异常姿态,对实际作业中雾滴穿透性的影响较小。

大豆枝叶变形双向流固耦合模型的有效性验证:基于上述确定的参数范围,于2025年3月在黑龙江八一农垦大学植保实验室内利用TWIN AIR风幕试验台开展了验证试验。该试验台可通过变频控制系统与角度调节刻度盘实现风速及气流角度的精确调节。试验时,将5片面积接近统计平均值的始花

期大豆枝叶固定于出风口正下方  $500 \text{ mm}$  处,并使用黑色标记笔在叶片的分枝端、叶表面中心及叶尖处进行物理标记,作为位移监测的特征点。利用高速摄像系统在垂直于叶片运动平面的方向实时记录其动态变形过程(图2)。测量过程中每片叶子均录制3段视频,运用图像处理技术提取关键帧,通过追踪标记点的运动轨迹来定量测量分枝端、叶形中心及叶尖的动态位移量。以各标记点的最大变形位移平均值作为评价指标,将其与模型的节点位移数据进行对比,从而定量验证双向流固耦合模型的有效性。验证试验共设置了3组参数组合,第1组参数组合:气流速度  $2.0 \text{ m/s}$ 、气流角度  $30^\circ$ 、叶片初始倾角  $0^\circ$ ;第2组参数组合:气流速度  $3.0 \text{ m/s}$ 、气流角度  $60^\circ$ 、叶片初始倾角  $10^\circ$ ;第3组参数组合:气流速度  $4.0 \text{ m/s}$ 、气流角度  $90^\circ$ 、叶片初始倾角  $20^\circ$ 。

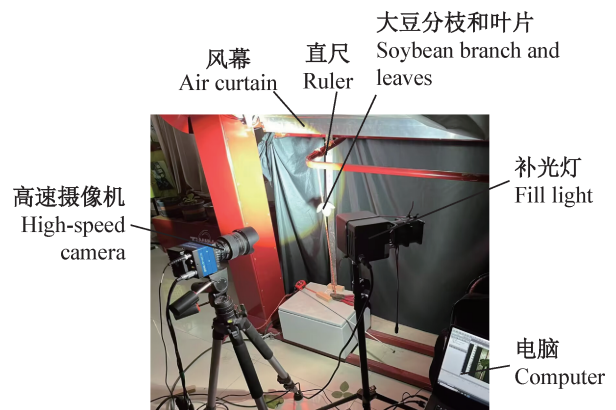


图2 大豆枝叶变形双向流固耦合模型的验证试验图

Fig. 2 Validation test diagram of bidirectional fluid-structure interaction model for soybean branch and leaf deformation

#### 1.2.5 大豆叶片弯曲变形回归模型的构建

在验证试验中发现,在风载荷下大豆分枝的变形远小于叶片,因此,当风幕气流通过大豆时,叶片变形引起的叶片空间位置的相对变化将是影响下层叶片沉积好坏的主要原因。所以本研究只构建大豆叶片弯曲变形回归模型。选取气流速度、气流角度、叶片初始倾角作为试验因素,利用Design Expert软件设计三因素三水平正交试验,其中气流速度  $v$  的3个水平分别为  $2, 3$  和  $4 \text{ m/s}$ ,气流角度  $\alpha$  的3个水平分别为  $30^\circ, 85^\circ$  和  $140^\circ$ ,叶片初始倾角  $\beta$  的3个水平分别为  $0^\circ, 10^\circ$  和  $20^\circ$ ,分别以叶面形心变形量和叶尖变形量为指标对试验结果进行评价。本研究共进行17组试验,其中12组为正交试验,其他5组为衡量误差试验。

### 1.2.6 响应面分析交互因素对变形量的影响

采用 Design Expert 软件分析交互因素对叶尖变形量与叶面形心变形量的影响, 因为交互因素对二者的影响趋势基本一致, 所以本研究只对交互因素对叶尖变形量的影响进行响应面分析。

### 1.2.7 变形量回归模型的验证

为全面验证所构建叶尖变形量回归模型与叶面形心变形量回归模型的准确性与可靠性, 本研究采取双重验证策略。首先利用 CFD 仿真数据检验回归方程的拟合精度, 随后通过高速摄像实测数据校验其对真实变形的预测能力。采用平均绝对百分比误差 (mean absolute percentage error, MAPE) (Rehman et al., 2022) 对所建回归模型进行可靠性分析。MAPE =  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i - F_i}{A_i} \right| \times 100\%$ , 式中,  $n$  为模拟试验总数, 取值为 17;  $t$  为模拟试验的序列号;  $A_i$  为叶尖变形量与叶面形心变形量的试验模拟值;  $F_i$  为叶尖变形量与叶面形心变形量的回归模型预测值。

## 2 结果与分析

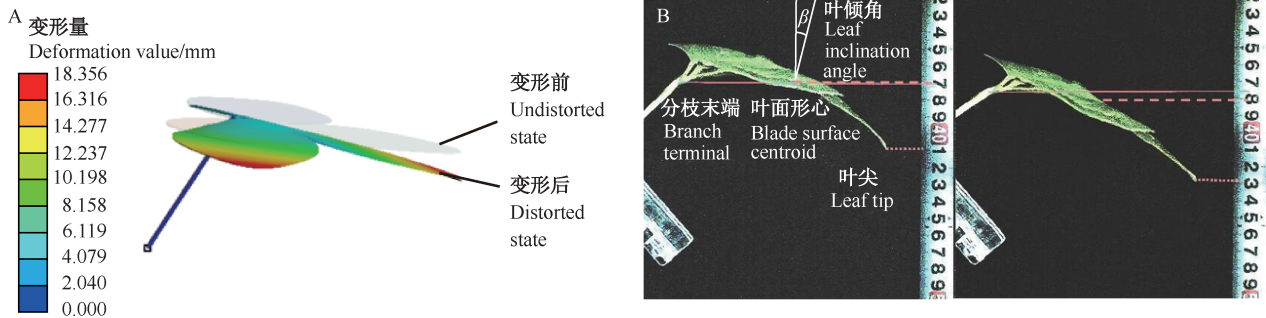
### 2.1 大豆枝叶的物理与力学参数

基于大豆枝叶物理与力学参数的测定结果, 确定了双向流固耦合模型的几何参数。在叶片模型

中, 长设为 57 mm, 宽设为 41 mm, 厚设为 0.2 mm, 单叶面积为 1 834 mm<sup>2</sup>; 在分枝模型中, 长设为 50 mm, 直径设为 2.0 mm, 且分枝与主茎秆夹角设定为 30°。力学特性测试表明, 始花期黑农 51 大豆表现为显著的柔性特征, 其中分枝样本的平均弹性模量为 169.8 MPa, 95% 置信区间为 163.4~170.7 MPa, 密度为 1 025 kg/m<sup>3</sup>; 相比之下, 叶片刚度显著较低, 其平均弹性模量仅为 43.2 MPa, 95% 置信区间为 40.6~46.2 MPa, 密度为 625 kg/m<sup>3</sup>。

### 2.2 大豆枝叶变形双向流固耦合模型的验证结果

大豆叶片双向流固耦合模型分别输入气流速度、气流角度和叶片初始倾角参数(表 1), 分别获取这 3 组参数组合下大豆叶尖、叶面形心和分枝末端的变形数据(图 3-A); 同时利用高速摄像捕捉上述 3 组组合参数下大豆叶尖、叶面形心和分枝末端的变形数据(图 3-B)。3 组参数组合下相对误差最大值为 9.36%(表 1); 同时在大豆叶片双向流固耦合模型仿真过程中, 大豆分枝末端变形较小且主叶脉的弯曲变形与实际结果吻合, 表明所建立的大豆枝叶变形双向流固耦合模型能有效仿真风幕气流作用下大豆叶片的变形过程, 可为叶面形心变形量和叶尖变形量的回归模型构建提供支持。



A: 基于大豆枝叶变形双向流固耦合模型的大豆叶尖、叶面形心和分枝末端变形的仿真值; B: 基于高速摄像捕捉的大豆叶尖、叶面形心和分枝末端变形的试验值(左侧为叶片的初始静止状态, 右侧为气流作用后的变形稳态)。A: Simulated deformation values of soybean leaf tips, blade surface centroid, and branch terminals based on the two-way fluid-structure interaction model of soybean branch and leaf deformation; B: experimental values of deformation at soybean leaf tips, blade surface centroids, and branch ends captured by high-speed photography (left: initial static state of leaves; right: steady-state deformation after airflow interaction).

图 3 大豆枝叶变形双向流固耦合模型的验证

Fig. 3 Validation of a two-way fluid-structure interaction model for soybean branch and leaf deformation

### 2.3 叶面形心变形量和叶尖变形量的回归模型

#### 2.3.1 回归模型建立与显著性检验

$v$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\alpha\beta$ 、 $v^2$  和  $\beta^2$  对叶面形心变形量的影响显著 ( $P < 0.05$ ), 而  $v\alpha$ 、 $v\beta$  和  $\alpha^2$  对叶面形心变形量的影响不显著。经多元拟合回归分析得到叶面形心变形量回归模型为  $DC = 6.572 - 20.712v + 1.194\alpha -$

$1.055\beta + 0.053v\alpha + 0.195v\beta - 0.002\alpha\beta + 3.543v^2 - 0.007\alpha^2 + 0.017\beta^2$ , 该回归模型显著性高 ( $P < 0.001$ ), 且失拟项不显著, 表明回归模型能反映叶面形心的变形量规律(表 2)。根据回归方程系数可知气流速度、气流角度和叶片初始倾角 3 因素对叶面形心变形量的影响依次减小。

表1 不同参数组合下大豆叶尖、叶面形心和分枝末端变形的试验值、仿真值及误差

Table 1 Experimental, simulated values, and errors of deformation at soybean leaf tips, blade surface centroid, and branch terminals under different parameter combinations

参数组合 Parameter combination			试验值 Test value			仿真值 Simulation value			误差极值 Error extremum/%
气流速度 Airflow velocity/(m/s)	气流角度 Airflow angle/(°)	叶片初始倾斜角 Initial blade inclination/(°)	叶尖 Leaf tip/mm	叶面形心 Blade surface centroid/mm	分枝末端 Branch end/mm	叶尖 Leaf tip/ mm	叶面形心 Blade surface centroid/mm	分枝末端 Branch end/mm	
2.0	30	0	20.3	10.8	3.6	18.4	10.1	3.5	9.36
3.0	60	10	56.2	29.3	6.6	54.2	28.1	6.8	4.10
4.0	90	20	93.5	45.8	13.4	92.6	46.9	12.9	3.37

$v$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $v\alpha$ 、 $v^2$ 、 $\alpha^2$ 对叶尖变形量的影响显著( $P < 0.05$ ),而 $\alpha\beta$ 、 $v\beta$ 和 $\beta^2$ 对叶尖变形量的影响不显著。经多元拟合回归分析,得到叶尖变形量回归模型为 $DT = 9.448 - 39.115v + 2.324\alpha - 1.321\beta + 0.101v\alpha + 0.118v\beta - 0.003\alpha\beta + 7.000v^2 - 0.014\alpha^2 + 0.030\beta^2$ ,该回归模型的显著性高( $P < 0.001$ ),且失拟项不显著,表明回归模型能反映叶尖变形量(表2)。根据回归方程的系数可知气流速度、气流角度和叶片初始倾角3因素对叶尖变形量的影响依次减小。

表2 叶面形心和叶尖变形量的方差分析

Table 2 Analysis of variance of deformation of blade surface centroid and leaf tip

试验指标 Test index	叶面形心变形量 Blade surface centroid deformation		叶尖变形量 Leaf tip deformation	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
	模型 Model	73.12	<0.001	118.81
$v$	28.60	0.001	131.67	<0.001
$\alpha$	9.68	0.017	64.76	<0.001
$\beta$	6.32	0.040	32.98	0.001
$v\alpha$	2.86	0.135	12.70	0.009
$v\beta$	0.51	0.498	0.57	0.475
$\alpha\beta$	9.93	0.016	1.09	0.332
$v^2$	396.29	<0.001	21.26	0.003
$\alpha^2$	2.33	0.171	815.45	<0.001
$\beta^2$	73.12	<0.001	3.71	0.095
失拟项 Lack of fit	4.41	0.093	2.04	0.251

$v$ :气流速度; $\alpha$ :气流角度; $\beta$ :叶片初始倾角;显著( $P < 0.05$ ),极显著( $P < 0.01$ )。  $v$ : Airflow velocity;  $\alpha$ : airflow angle;  $\beta$ : initial blade inclination; significant ( $P < 0.05$ ), highly significant ( $P < 0.01$ ).

### 2.3.2 响应面分析交互因素对叶尖变形量的影响

当叶片初始倾角一定,叶尖变形量随着气流速度的增加而增加,随着气流角度增加呈先增大后减

小的趋势,当气流速度为3.0~4.0 m/s,气流角度为80°~96°时,叶尖变形量较大,为40~90 mm(图4-A);当气流角度一定,叶尖变形量随气流速度的增加而增加,随着叶片初始倾角的增加而降低,当气流速度为3.5~4.0 m/s、叶片初始倾角为0°~10°时,叶尖变形量较大,为60~95 mm(图4-B);当气流速度一定,叶尖变形量随着叶片初始倾角的增加呈缓慢减小的趋势,随着气流角度的增加呈现先增大后减小的趋势,当叶片倾角为0°~10°、气流角度为75°~95°时,叶尖变形量较大,为60~85 mm(图4-C)。

### 2.3.3 变形量回归模型的验证

叶尖变形量的预测值与仿真模拟值的MAPE为10.50%,决定系数 $R^2$ 为0.985(图5-A),叶面形心变形量的预测值与仿真模拟值的MAPE为9.49%,决定系数 $R^2$ 为0.970(图5-B),表明回归方程准确性较高。

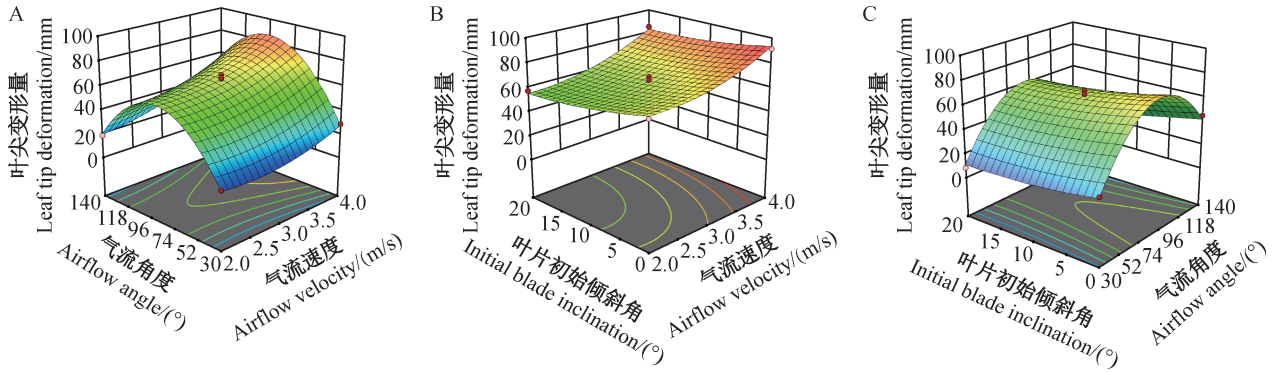
叶面形心变形量的回归预测值与实测值之间的相对误差最大,为11.1%,但仍在允许精度范围内(表3)。误差产生的主要原因:一是回归模型本身存在固有的拟合残差;二是仿真建模时将叶片视为理想化的均质材料,忽略了真实大豆叶片在几何形态与力学性能上客观存在的个体差异。尽管存在上述偏差,该回归方程仍能较准确地表征风载荷作用下真实叶片的动态变形行为,满足工程预测需求。

## 3 讨论

本研究构建了大豆枝叶变形双向流固耦合模型,该模型的仿真值与高速摄像实测值的最大相对误差为9.36%,表明该方法在处理大田密植作物柔性体变形问题的准确性较高,与刘兴华等(2021)在棉花叶片变形模拟中得出的结论基本一致,表明双向流固耦合技术能有效捕捉低刚度生物材料在流场中的非线性大变形行为。在变形机理方面,本研究发现大豆分枝的弹性模量(169.8 MPa)显著高于叶片(43.2 MPa),这导致在风幕气流作用下分枝表现

出近似刚体的微小位移,而叶片则表现出以主叶脉弯曲为主的显著柔性变形,与 Yan et al.(2022)关于葡萄叶片变形特性的研究相符,即叶柄/分枝的刚度决定了叶片的空间位置,而叶面的柔度决定了受风

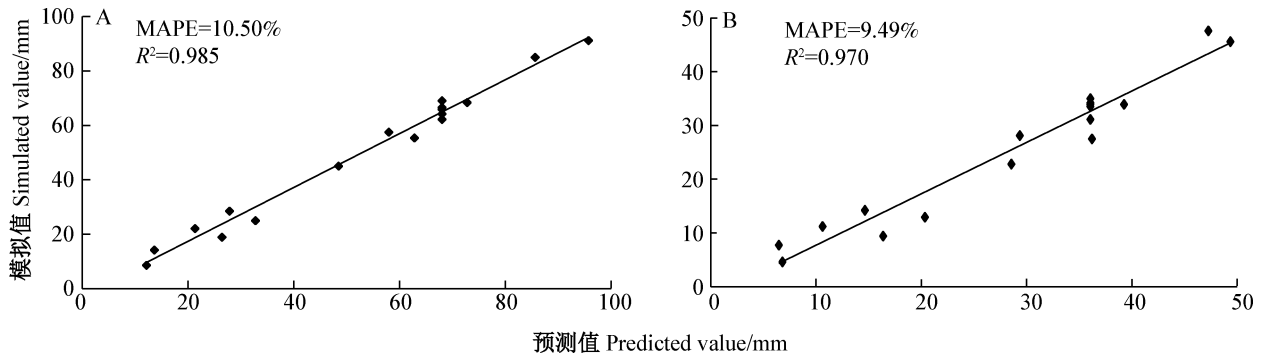
后的形态重构;进一步证实了风幕式喷雾提升雾滴穿透性的核心机制是通过气流迫使上层柔性叶片发生退让式弯曲,从而瞬间扩大冠层空隙率,而非依赖整株植株的倾倒。



A: 气流速度与气流角度的交互作用; B: 气流速度与叶片初始倾角的交互作用; C: 气流角度与叶片初始倾角的交互作用。  
 A: Interaction between airflow velocity and airflow angle; B: interaction between airflow velocity and initial blade inclination angle; C: interaction between airflow angle and initial blade inclination angle.

图4 交互因素对叶尖变形量影响的响应面分析

Fig. 4 Response surface analysis on effects of interaction factors on leaf tip deformation



MAPE: 平均绝对百分比误差。MAPE: Mean absolute percentage error.

图5 叶尖变形量(A)和叶面形心变形量(B)预测值与模拟值的线性拟合结果

Fig. 5 Linear fitting results between predicted and simulated values of leaf tip deformation (A) and blade surface centroid deformation (B)

表3 计算流体动力学模拟中的试验参数

Table 3 Experimental parameters in computational fluid dynamics simulation

序号 Serial number	叶尖 Leaf tip/mm		叶尖误差极值 Error extremum of leaf tip/%	叶面形心 Blade surface centroid/mm		叶面形心误差极值 Error extremum for blade surface centroid/%
	模型 Model	试验 Test		模型 Model	试验 Test	
1	22.4	20.3	10.3	12.0	10.8	11.1
2	53.9	56.2	4.1	27.2	29.3	7.1
3	97.0	93.5	3.7	47.9	45.8	4.6

本研究的正交试验结果表明,影响叶片变形量的因素显著性顺序由大到小依次为气流速度、气流角度和叶片初始倾角。首先,气流速度对叶片变形量表现出最强的正效应,这是因为根据伯努利原理,流体动压与速度的平方成正比,速度的提升直接转

化为作用于叶面的气动载荷,这与张亚辉(2021)在无人机下洗气流研究中的结论一致。其次,气流角度对叶片变形的影响呈现先增加后减小的趋势,且在近似垂直于叶面(约90°)时叶片变形量最大。从空气动力学角度分析,这是因为当气流方向与叶面

法线平行时,叶片的迎风投影面积最大,从而获得了最大的阻力系数;反之,当气流角度过小(掠过叶面)时,气流主要产生表面摩擦阻力,而非压差阻力,导致变形能力减弱。因此在实际作业中应根据大豆冠层的平均生长姿态动态调整风幕角度,从而确保持续获得最大的垂直分力。

本研究通过响应面分析发现,叶片初始倾角越小,即越接近水平,其在相同风载下叶片变形量越大。这与 Endalew et al. (2010a) 在果园喷雾模拟中提到的冠层结构对气流阻滞作用的观点互为印证。结合大豆农艺性状,始花期大豆叶片多呈近水平展开( $0^{\circ}\sim 20^{\circ}$ ),处于气流受力的敏感区间,这意味着在始花期进行风幕喷雾作业时有天然的形态优势——较小的风速即可诱导显著的叶片变形,从而打开雾滴沉积通道。相比之下,若在作物萎蔫或叶片自然下垂的生长后期,由于初始倾角增大,可能需要更高的气流速度才能达到同等的扰动效果。这一发现为基于作物生长阶段的施药参数精准调控提供了重要的理论依据,即作业参数不应一成不变,而应随作物冠层形态的演变进行适应性调整。

尽管本研究量化了风幕气流与大豆叶片的交互规律,但仍存在一定局限性。一方面,模型中将叶片与分枝简化为各向同性弹性材料,忽略了植物活体组织的黏弹性、各向异性以及叶脉拓扑结构对局部应力分布的影响,这可能是导致10%左右预测误差的来源之一。另一方面,本研究主要聚焦于流固二相作用,尚未引入雾滴相,未考虑大量雾滴冲击对叶片变形的反作用力。未来研究可引入三维激光扫描技术构建高保真叶片模型,并结合离散相模型开展气-液-叶三场耦合模拟,进一步探究叶片变形后的雾滴微观沉积行为。

## 参 考 文 献 (References)

- Dai FF. 2008. Selection and calculation of the blowing rate of air-assisted sprayers. *Plant Protection*, 34(6): 124-127 (in Chinese) [戴奋奋. 2008. 风送喷雾机风量的选择与计算. *植物保护*, 34(6): 124-127]
- Duga AT, Dekeyser D, Ruysen K, Bylemans D, Nuyttens D, Nicolai BM, Verboven P. 2015b. Numerical analysis of the effects of wind and sprayer type on spray distribution in different orchard training systems. *Boundary-Layer Meteorology*, 157(3): 517-535
- Duga AT, Ruysen K, Dekeyser D, Nuyttens D, Bylemans D, Nicolai BM, Verboven P. 2015a. CFD based analysis of the effect of wind in orchard spraying. *Chemical Engineering Transactions*, 44: 289-294
- Duga AT, Ruysen K, Dekeyser D, Nuyttens D, Bylemans D, Nicolai BM, Verboven P. 2015c. Spray deposition profiles in pome fruit trees: effects of sprayer design, training system and tree canopy characteristics. *Crop Protection*, 67: 200-213
- Endalew AM, Debaer C, Rutten N, Vercammen J, Delele MA, Ramon H, Nicolai BM, Verboven P. 2010a. A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying, Part I: model development and effect of wind speed and direction on sprayer airflow. *Computers and Electronics in Agriculture*, 71(2): 128-136
- Endalew AM, Debaer C, Rutten N, Vercammen J, Delele MA, Ramon H, Nicolai BM, Verboven P. 2010b. Modelling pesticide flow and deposition from air-assisted orchard spraying in orchards: a new integrated CFD approach. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(10): 1383-1392
- Endalew AM, Hertog M, Delele MA, Baetens K, Persoons T, Baelmans M, Ramon H, Nicolai BM, Verboven P. 2009. CFD modelling and wind tunnel validation of airflow through plant canopies using 3D canopy architecture. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30(2): 356-368
- He XK. 2022. Research and development of efficient plant protection equipment and precision spraying technology in China: a review. *Journal of Plant Protection*, 49(1): 389-397 (in Chinese) [何雄奎. 2022. 高效植保机械与精准施药技术进展. *植物保护学报*, 49(1): 389-397]
- He Y, Xiao SP, Fang H, Dong T, Tang Y, Nie PC, Wu JJ, Luo SM. 2018. Development situation and spraying decision of spray nozzle for plant protection UAV. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 34(13): 113-124 (in Chinese) [何勇, 肖舒裴, 方慧, 董涛, 唐宇, 聂鹏程, 吴剑坚, 骆少明. 2018. 植保无人机施药喷嘴的发展现状及其施药决策. *农业工程学报*, 34(13): 113-124]
- Hong SW, Zhao LY, Zhu HP. 2018. CFD simulation of pesticide spray from air-assisted sprayers in an apple orchard: tree deposition and off-target losses. *Atmospheric Environment*, 175: 109-119
- Hu XD, Li HF, Wu H, Long B, Liu ZJ, Wei X, Li JY. 2023. Modeling the kinematic response of rice under near-ground wind fields using the finite element method. *Agronomy*, 13(4): 1178
- Li M, Yan CG, Ma S, Tan HC, Kang YY, Xu LM. 2024. Development status and countermeasures of grape plant protection mechanization technology in China. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 45(1): 76-82 (in Chinese) [李敏, 闫成功, 马帅, 谭好超, 康云友, 徐丽明. 2024. 我国葡萄植保机械化技术发展现状与对策. *中国农机化学报*, 45(1): 76-82]
- Li X. 2017. Calculation of spray flow field in air-assist boom spraying and spray parameter optimization. Master thesis. Zhenjiang: Jiangsu University (in Chinese) [李信. 2017. 风幕式喷杆喷雾流场计算及喷雾参数优化研究. 硕士学位论文. 镇江: 江苏大学]
- Liu XH, Yuan J, Li Y, Suo JZ, Liu XM. 2021. Deformation modelling of cotton leaf under assisted airflow using bidirectional fluid-structure coupling method. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 37(5): 68-76 (in Chinese) [刘兴华, 苑进, 李扬, 索金政, 刘雪美. 2021. 采用双向流固耦合方法构建辅助气流作用下棉花叶片变形模型. *农业工程学报*, 37(5): 68-76]

- Liu Z, Chen J, Guo JL, Qiu BJ. 2024. Numerical simulation and validation of droplet deposition on tomato leaf surface under air-assisted spraying. *Agronomy*, 14(8): 1661
- Ma LF, Li LZ. 2014. The topology optimization simulation study on the process of natural selection of leaf veins. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 31(1): 132-136, 12 (in Chinese) [马龙飞, 李立州. 2014. 植物叶脉自然选择过程的拓扑优化模拟研究. *应用力学学报*, 31(1): 132-136, 12]
- Nuyttens D, De Schampheleire M, Baetens K, Brusselman E, Dekeyser D, Verboven P. 2010. Drift from field crop sprayers using an integrated approach: results of a five-year study. *Transactions of the ASABE*, 54(2): 403-408
- Qiu W, Guo HB, Zheng H, Cao YB, Lv XL, Fang J, Zhai CY, Yu HF. 2022. CFD modelling to analyze the droplets deposition behavior on vibrating rice leaves. *Computers and Electronics in Agriculture*, 201: 107330
- Rehman A, Zhu JJ, Segovia J, Anderson PR. 2022. Assessment of deep learning and classical statistical methods on forecasting hourly natural gas demand at multiple sites in Spain. *Energy*, 244: 122562
- Ru Y. 2009. Research on aerial pesticide electrostatic spraying system and its application. PhD thesis. Nanjing: Nanjing Forestry University (in Chinese) [茹煜. 2009. 农药航空静电喷雾系统及其应用研究. 博士学位论文. 南京: 南京林业大学]
- Wei ZM, Li R, Xue XY, Sun YT, Zhang SC, Li QL, Chang C, Zhang ZH, Sun YJ, Dou QQ. 2023. Research status, methods and prospects of air-assisted spray technology. *Agronomy*, 13(5): 1407
- Xie W, Meng DX, Jiang P, Peng L, Ouyang C. 2023. Experimental study on biomechanical characteristics of rape shoot stems, twigs and leaves in clamping harvesting. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 45(6): 1504-1516 (in Chinese) [谢伟, 孟德鑫, 蒋蕪, 彭磊, 欧阳琛. 2023. 面向夹持采收的油菜茎、枝、叶生物力学特性试验. *江西农业大学学报*, 45(6): 1504-1516]
- Yan CG, Niu C, Ma S, Tan HC, Xu LM. 2022. CFD models as a tool to analyze the deformation behavior of grape leaves under an air-assisted sprayer. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198: 107112
- Yang YY, Li KN, Shi WS, Chen CJ, Ye WW, Wang YC. 2024. Present situation, existing problems, and prospects of soybean pesticide product registration in China. *Journal of Plant Protection*, 51(6): 1268-1278 (in Chinese) [杨园园, 李凯楠, 石伟山, 陈长军, 叶文武, 王源超. 2024. 我国大豆农药产品登记现状及存在问题与展望. *植物保护学报*, 51(6): 1268-1278]
- Zeng AJ. 2005. Research on technique to reduce spray droplets drift. PhD thesis. Beijing: China Agricultural University (in Chinese) [曾爱军. 2005. 减少农药雾滴飘移的技术研究. 博士学位论文. 北京: 中国农业大学]
- Zhang YH. 2021. Effect of downwash airflow in hover and soybean canopy on droplet motion law for multi-rotor unmanned plant protection machine. Master thesis. Zhengzhou: Henan Agricultural University (in Chinese) [张亚辉. 2021. 多旋翼植保无人机悬停下洗气流及大豆冠层对雾滴运动规律影响研究. 硕士学位论文. 郑州: 河南农业大学]

(责任编辑:张俊芳)