doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.033

基于气固耦合的脉冲集束式番茄授粉方法研究

吴嘉鑫 张学敏 徐 静 曾斌亮 李志远 王雅娟
（中国农业大学工学院，北京 100083）

摘要：温室空间密闭，需要辅助授粉才能保证番茄的坐果率与产量。物理辅助授粉方法绿色健康，坐果率高，是主要发展的授粉手段。针对现有物理辅助授粉方法存在的易造成茎秆损伤、作用范围大、振动效果差等问题，提出了一种脉冲集束式番茄授粉方法，并搭建相应授粉装置。通过CFD仿真得到单、双出口数下喷嘴流场的速度分布，以射程、流体喷射角为评价指标，确定选取出口个数为2、单孔直径为1 mm的喷嘴方案。通过观察番茄花的开花期形态，并分析其在脉冲气流作用下的摆动规律，基于气-固两相流数学模型，建立CFD-DEM耦合仿真模型模拟番茄花授粉过程。以气吹角度、气吹频率、气吹距离为试验因素，以有效粘附量为评价指标进行三因素三水平正交仿真试验。仿真结果表明，各因素对花粉有效粘附量的影响由大至小依次为气吹距离、气吹频率和气吹角度，当气吹距离为182 mm、气吹频率为24 Hz、气吹角度为76°时，花粉有效粘附量最大。同时，对仿真结果进行分析，得到在脉冲集束方法作用下番茄花的授粉过程。使用最优参数组合在温室中进行试验，仿真与试验结果相比，柱头花粉覆盖率最大误差为5.54%、平均误差为1.93%。授粉结束42 d后统计番茄果实情况，得到采用脉冲集束式授粉方法的番茄坐果率为82.81%，单果质量为229.60 g，畸果率为8.27%，效果优于其他辅助授粉方法。结果表明，所建立的耦合仿真模型准确可靠，为脉冲集束授粉方法在智能装备中的应用提供了理论依据。同时验证采用此授粉方法可以提高番茄的坐果率与产量，满足温室番茄授粉的农艺要求。

关键词：温室番茄；授粉方法；气固耦合；试验验证
中图分类号：TP391 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-1298(2024)S1-0306-11

Pulse Cluster Tomato Pollination Method Based on Gas-Solid Coupling

WU Jiaxin ZHANG Xuemin XU Jing ZENG Binliang LI Zhiyuan WANG Yajuan
(*College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The greenhouse space is closed, and auxiliary pollination is needed to ensure the fruit setting rate and yield of tomatoes. Physical assisted pollination methods are green and healthy, with high fruit setting rate, and are the main pollination methods developed. Aiming at the problems of the existing physical assisted pollination methods, such as easy stem damage, large range of action and poor vibration effect, a pulse cluster pollination method was proposed and the corresponding pollination device was built. Through CFD simulation, the velocity distribution of nozzle flow field with single and double outlet number was obtained. With the range and fluid injection angle as evaluation indexes, the nozzle scheme with two outlet number and 1 mm diameter of single hole was determined. Based on the gas-solid two-phase flow model, a CFD-DEM coupled simulation model was established to simulate the pollination process of tomato by observing the flowering morphology of tomato flower and analyzing its oscillation rule under the action of pulsed air flow. The orthogonal simulation of three factors and three levels was carried out with air blowing angle, air blowing frequency and air blowing distance as test factors and effective adhesion as evaluation index. The simulation results showed that the effect of various factors on the effective adhesion of pollen was in the order of blowing distance, blowing frequency and blowing angle. When the blowing distance was 182 mm, the blowing frequency was 24 Hz and the blowing angle was 76°, the effective adhesion of pollen was the highest. At the same time, the simulation results were analyzed, and the pollination process of tomato flower under the action of pulse cluster method was obtained. The optimal parameter combination was used to test in a greenhouse. Compared with the test results, the maximum error of

收稿日期：2024-08-20 修回日期：2024-09-25
基金项目：国家自然科学基金项目(32372010)和新长城科技小院助力计划项目
作者简介：吴嘉鑫(1999—)，女，硕士生，主要从事车辆与智能农机装备研究，E-mail: wjxjx959@163.com
通信作者：张学敏(1975—)，男，副教授，博士生导师，主要从事车辆节能环保与新能源技术研究，E-mail: xueminzh@ cau.edu.cn

stigma pollen coverage was 5.54% and the average error was 1.93%. Six weeks after pollination, the results of tomato fruit statistics showed that the fruit setting rate, single fruit weight and abnormal fruit rate were 82.81%, 229.60 g and 8.27%, which were better than that of other auxiliary pollination methods. The results showed that the coupling simulation model established was accurate and reliable, and it can provide a theoretical basis for the application of pulse cluster pollination method in intelligent devices. At the same time, it was verified that the pollination method can improve the fruit setting rate and yield of tomato, and meet the agronomic requirements of tomato pollination in greenhouse.

Key words: greenhouse tomatoes; pollination methods; gas-solid coupling; experimental validation

0　引言

番茄，又称西红柿，是茄科茄属的一年生草本植物。含有多种维生素，营养价值高，具有抗癌、抗炎、抗氧化能力[1]。我国的番茄种植主要分为露天种植和温室种植两种方式[2]。在温室中种植番茄，可以减少因气候条件变化导致的产量波动，实现全年稳定生产，因此逐渐成为番茄种植的主要方式。但温室番茄种植空间密闭，需要辅助授粉来保证坐果率与产量[3-5]。

目前，番茄的辅助授粉方法主要包括生物、化学和物理手段[6]。生物手段指在温室中放置熊蜂箱，通过熊蜂访花促进番茄授粉，此方法虽然可提高产量和品质，但存在活跃度不定、管理困难、蜂箱成本高及蜂类数量锐减等问题[7-9]。化学手段是通过喷施化学激素，刺激子房发育形成果实。虽然成本低、操作简单，但可能导致畸形果、空心果和食品安全等问题[10-13]。物理手段包括风机直吹、授粉器振动和脉冲气吹3种方法。这些方法通过振荡番茄花，使花粉释放并粘附到柱头上完成授粉，具有绿色健康、坐果率高等优势，适合应用与推广。但电动授粉器使用不当可能对番茄花朵和茎秆造成损伤[14]，风机直吹方法由于叶片遮挡和气流振动效果较弱等问题，导致花粉释放效果不佳[15]。相比之下，脉冲气流具有间歇性，可以增强番茄花的振荡效果，提高授粉率。且其为非接触式授粉，不会对番茄植株造成损伤，是更为理想的物理授粉方式。

鉴于脉冲气吹方法在提升授粉效果方面的优势，研发出了一些相关的授粉装置[16-17]。振动是释放花粉的主要方法，单目标授粉可以集中气流能量，减少枝条的晃动干扰，从而增强花的振动效果，释放更多花粉。

番茄花朵结构封闭，花粉颗粒在脉冲气流作用下的释放、运动、碰撞和粘附过程发生于花药内部，难以直接观测。且花粉颗粒基数大、受力复杂，难以直接计算，因此广泛采用仿真模拟方法来分析授粉过程[18-20]。

本文在现有研究基础上提出一种脉冲集束式番茄授粉方法，并搭建相应装置。通过CFD仿真确定喷嘴出口方案。利用CFD-DEM耦合仿真对番茄授粉过程进行数值模拟。以气吹角度、气吹频率、气吹距离为试验因素，以有效粘附量为评价指标，通过分析仿真结果优化气源参数组合。最后对本文所提出的授粉方法和仿真模型进行试验验证，以期为脉冲集束式授粉方法的应用提供支撑。

1　总体结构与工作过程

1.1　整体结构与喷嘴设计

搭建的脉冲集束式番茄授粉装置总体结构如图1所示，主要组成部分有气泵、储气罐、电池、空气开关、时间继电器模块、信号发生器、MOS管模块、高频电磁阀和喷嘴。

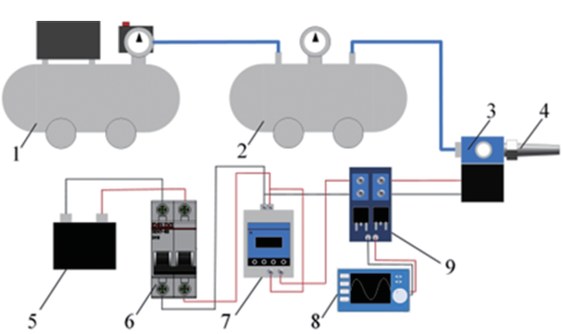


图1　脉冲集束式番茄授粉装置

Fig. 1　Pulse cluster tomato pollination device

1. 气泵　2. 储气罐　3. 高频电磁阀　4. 喷嘴　5. 电池　6. 空气开关　7. 时间继电器模块　8. 信号发生器　9. MOS管模块

在脉冲气流发生装置中，喷嘴是关键部件，不同的喷嘴类型会影响射流效果[21]。设计合适的喷嘴可以集中射流能量，产生更好的作用效果[22]。圆锥形喷嘴可以减少流体的能量损失，具有良好的射流性能[23]。圆形喷嘴出口的风速大，耗气量小，可使能量有效集中[24]。因此喷嘴设计采用圆形出口和圆锥形外轮廓。喷嘴内部流道采用圆锥段与圆柱段的组合[25]。气体从喷嘴左端流入，经过圆锥段收缩加速后进入圆柱段，圆柱段能够消除收缩过程中产生的一些微小湍流和涡流，使射流的方向更加稳定。喷嘴结构设计如图2所示。喷嘴需要承受由脉冲载荷产生的应力和应变，因此选用强度较高的不锈钢材质，并采用3D打印方法制作。考虑到3D打印不锈钢材料的加工精度，设计喷嘴出口直径时不应小于1 mm。考虑到番茄花的尺寸小，因此设计喷嘴时需要进一步提升其集束性。通过前期仿真可知，改变出口直径

对喷嘴集束性提高较小，因此考虑增加出口数量[26]，分析其对作用范围和距离的影响，确定适用于番茄授粉的喷嘴方案。

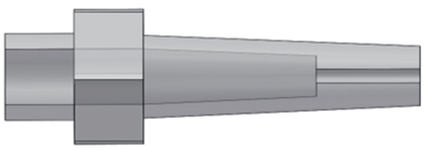
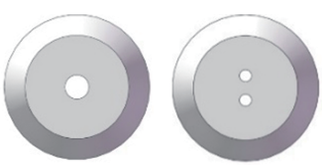


图2 脉冲气流喷嘴

Fig. 2 Pulsed jet nozzle

1.2 喷嘴方案确立

在保持出口总直径一致的条件下，将出口数设计为1和2，具体分布如图3所示。设计单孔直径分别为2 mm和1 mm，对应型号命名为1K和2K。



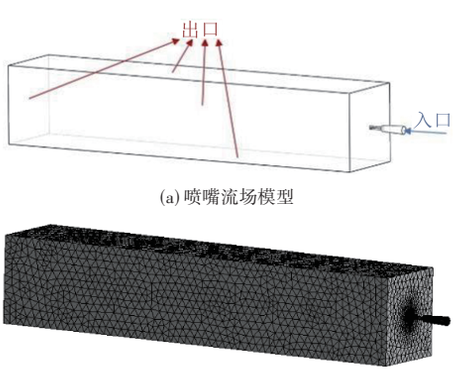
(a) 1K (b) 2K

图3 出口方案

Fig. 3 Export program

选用的气泵容积流量为2 m^3/h，通过直径8 mm的气管流出时，风速可达11 m/s。为保证气泵在授粉期间供应稳定气流，调小阀口开度，使气流出口风速保持在较为稳定状态，通过风速仪测量其出口风速约为7 m/s。

为考察单个脉冲气流的形成过程，将求解域长度设为400 mm。通过Workbench mesh定义流场的边界条件，并对流场区域进行网格划分。流场模型及网格划分如图4所示。



(a) 喷嘴流场模型

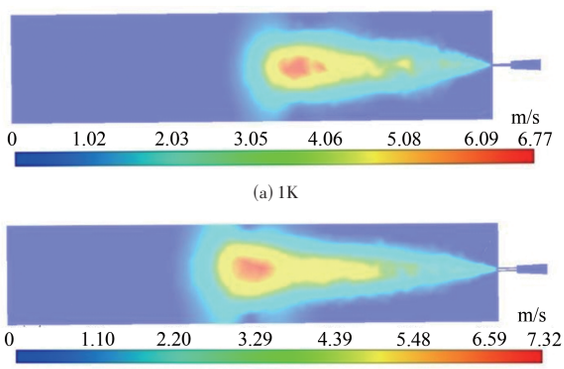
(b) 流场网格划分

图4 喷嘴流场模型及网格划分

Fig. 4 Nozzle flow field model and mesh division

将网格文件导入Fluent，通过用户自定义函数(UDF)编写速度入口条件，使气流以持续时长0.04 s、速度7 m/s的脉冲形式进入喷嘴。设置瞬态求解，时间步长为0.000 2 s，仿真时长为0.06 s，以模拟脉冲气流的形成过程。

对仿真结果进行后处理，得到的喷嘴外流场速度云图如图5所示。为了便于装置授粉操作和评估喷嘴的集束性，选取射程和流体喷射角作为评价指标，具体参数如表1所示。



(a) 1K

(b) 2K

图5 各喷嘴速度云图

Fig. 5 Velocity cloud images of different types of nozzle

表1 喷嘴外流场参数

Tab. 1 Nozzle outflow field parameters

喷嘴类型	射程/mm	流体喷射角/(°)
1K	212	22.08
2K	261	18.92

由表1可知，2K型喷嘴与1K型相比，流体喷射角更小，集束性更好，射程更远，因此选用2K型喷嘴。

1.3 工作过程

脉冲集束式番茄授粉装置的工作过程如下：TYW-1A型空气压缩机输出正压气流，存储于气罐内，为授粉作业提供稳定气源。气流流经TM-08型电磁阀，通过高低电平信号控制流道的通断，产生脉冲气流。脉冲气流流经喷嘴作用到番茄花上，使番茄花产生周期性摆动。这种摆动使花粉颗粒从花药中释放并掉落，最终粘附到柱头上完成授粉。电磁阀接收到的高低电平信号是由信号发生器(FY2300-06M型)控制MOS管模块通断形成的。信号发生器通过输出峰值为10 V、频率可调的正弦电压来控制MOS管模块的通断。时间继电器模块用于控制单花授粉作业时间。12 V电池连接空气开关给回路供电。

2 基于气固耦合的数学模型建立

气固两相流模型可用于分析和模拟固体颗粒在气相中的运动及其相互作用[27]。番茄花粉在脉冲气流作用下释放并粘附到柱头的过程符合气固两相流模型。通过耦合仿真方法模拟脉冲集束式番茄授粉过程首先需要建立气相与固相数学模型。根据颗粒浓度和大小，气固两相流可以分为稀相流动和密相流动[28]。花粉颗粒在模型中的体积分数小于1%，其运动主要受到气相的影响，气相行为主导整体流动特性，颗粒对气相的反馈作用较小，所以该授粉模型属于稀相流动。常用的气固两相流主要包括欧拉-拉格朗日模型和欧拉-欧拉模

型。欧拉-拉格朗日模型采用欧拉法描述流体相，拉格朗日法描述颗粒相，能够精确追踪颗粒轨迹和碰撞行为[29]，适用于稀相模型，因此选择此模型用于仿真分析。

在建立脉冲集束式番茄授粉模型时遵循以下假设：空气状态稳定，环境中无温差和压差；花粉颗粒的物理特性稳定，不受气流场影响；授粉过程不考虑番茄花的变形；花粉颗粒对流场无影响。

2.1　气相数学模型

气相模型基于流体力学原理，通过求解控制流体运动的方程来分析流动规律[30]。脉冲气流作用在番茄花周围形成复杂的湍流场，湍流场属于连续相，采用欧拉法描述，其主要方程包括质量守恒方程（连续性方程）和动量守恒方程（N-S方程）。

2.2　固相数学模型

通过拉格朗日方法跟踪计算域内的花粉颗粒时考虑的所受作用力包括重力、浮力、压力梯度力、曳力、粘附力和摩擦力等。颗粒轨迹由运动方程和转动方程控制。运动方程描述了颗粒所受的体力（由于其所处的物理环境而受到的作用力）及总外力对颗粒加速度和速度变化的影响。转动方程描述了颗粒在外力矩作用下的转动行为[31]。花粉颗粒的运动方程和转动方程分别为

$$m_i\frac{\mathrm{d}v_i}{\mathrm{d}t}=m_ig+F_{ip}+\sum F_{ij} \tag{1}$$

$$I_i\frac{\mathrm{d}\omega_i}{\mathrm{d}t}=\sum_{j=1}^{n_i}(M_{tij}+M_{rij}) \tag{2}$$

式中　m_i——颗粒i质量，kg

v_i——颗粒i速度，m/s

F_{ip}——流体作用于颗粒的力，N

F_{ij}——颗粒i和颗粒j间的作用力，N

I_i——颗粒i转动惯量，kg·m^2

ω_i——颗粒i角速度，rad /s

n_i——与颗粒i接触数

M_{tij}——切向力产生的力矩，N·m

M_{rij}——滚动摩擦产生的滚动力矩，N·m

3　基于气固耦合的授粉过程仿真

3.1　物理模型建立

固相仿真模型包括番茄花与花粉颗粒模型，为使仿真结果准确，需要根据番茄花与花粉的特点进行物理建模。番茄花属于完全花，由花托、萼片、花瓣、雄蕊和雌蕊组成。在番茄花中，花托、萼片和花瓣共同构成了花的外围部分，雄蕊和雌蕊位于花的中心。雄蕊包括花药和花粉囊，负责产生花粉；雌蕊包括子房、花柱和柱头，负责接受花粉。这种结构使番茄花更易于自花授粉[32]，其具体结构如图6所示。不同品种间番茄花结构差异较小，因此可以选用一种广泛种植的番茄品种进行研究，以减轻工作量。本文选取的研究对象是晶粉番茄，是一种在江苏省推广种植的无限生长型番茄，具有抗病虫害、生长稳定和果实大小均匀等特点[33]。



图6　番茄花结构

Fig. 6　Tomato flower structure

番茄花期分为花蕾期、开花期和谢花期。处于开花期的番茄花朝下开放。当花瓣张开至180°时，花粉囊纵向开裂至花药轮廓收缩处，处于此时期的番茄花授粉效果最好。花粉囊围绕雌蕊一周，存储大量花粉颗粒。基于电子显微镜观察和三维扫描技术，测量开花期番茄花的尺寸参数，并进行三维建模。扫描模型如图7a所示，番茄花三维简化模型如图7b所示。



(a) 三维扫描模型　　(b) 三维简化模型

图7　番茄花三维模型

Fig. 7　Tomato flower 3D models

在简化模型中，花药长10 mm，最大处直径为4.5 mm。设计12个与花药轮廓一致的曲面作为花粉囊围绕花柱一周，花粉囊最大宽度为0.5 mm。花柱长8.6 mm，柱头直径为0.66 mm，柱头与花药之间的间隙为0.1 mm。花粉颗粒模型采用经过运动特性验证的七球椭圆颗粒模型[34]。以花粉囊作为颗粒工厂随机产生花粉，颗粒总数为4 800。花粉颗粒属于不可压缩的粘性颗粒，所以接触模型选取Hertz-Mindlin with JKR模型[35]。番茄花的物理特性如表2所示，花粉与各部分间的接触系数如表3所示。

表2　番茄花物理特性

Tab. 2　Physical characteristics of tomato flower

结构	杨氏模量/Pa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})
花粉颗粒	4.82×10^4	0.5	1 260
花药	5.51×10^4	0.5	1 063
花柱	1.01×10^5	0.5	1 099
柱头	2.31×10^5	0.5	1 099

3.2　网格划分

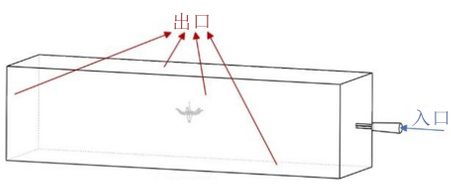
为减小计算量，将流体域长度设计为300 mm。通过Solidworks布尔运算抽取气嘴与番茄花之间的流体

表3 材料间接触系数

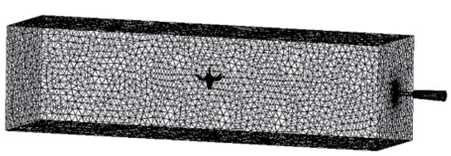
Tab. 3 Contact coefficient between materials

项目	恢复系数	表面能/(J·m^{-2})	静摩擦因数
花粉-花粉	0.14	5.35×10^{-4}	0.3
花粉-花药	0.04	4.36×10^{-4}	0.3
花粉-花柱	0.04	3.59×10^{-4}	0.3
花粉-柱头	0.07	9.39×10^{-4}	0.3

域,建立气相仿真模型。图8a为气流作用方向与番茄花中心轴线垂直时的流体模型与对应的边界条件。因为仿真过程涉及到动网格,所以选择适应性好的四面体网格对求解域进行划分。番茄花尺寸小且结构复杂,因此加密其周围网格来提高求解精度,网格模型如图8b所示。网格总数为405 540,平均单元质量为0.84,满足动网格质量要求。



(a) 气相网格模型



(b) 气相网格划分

图8 授粉气相仿真模型与网格划分

Fig. 8 Pollination gas phase simulation model and grid division

3.3 脉冲气流作用下番茄花运动规律

脉冲集束式番茄授粉方法通过间歇气流引起番茄花振动,使花粉从雄蕊释放并转移到雌蕊上,实现授粉。脉冲气流与番茄花摆动之间的关系主要受到气流的频率、强度、方向和番茄花物理特性的影响。通过调节脉冲气流参数,可以优化花朵的摆动形式和幅度,从而提高花粉释放量和授粉成功率。通过分析不同气源参数下番茄花的运动轨迹,确定其运动频率、幅度和相位,为后续气固两相流耦合仿真研究提供数据支撑。由于番茄花在脉冲气流作用下的运动速度较快,因此需要利用高速摄影机结合图像处理,捕捉番茄花的运动轨迹,从而获取番茄花的运动参数。

3.3.1 运动规律试验系统

在温室大棚内搭建如图9所示的试验环境,用于观测番茄花的运动特性。试验使用Phachorm高速摄影机配备变焦镜头,获取番茄花的运动视频。选取处于开花期的番茄花,将高速摄影机摆放在与气吹方向正交的位置,以获得最佳观测角度下的视频文件[36]。为了准确记录番茄花的运动轨迹,将视频的保存帧率设定为2 000帧/s。因为图像的采集帧率高,所以需要高亮度的补光灯摆至番茄花附近来调整视频亮度。分辨率设置为480像素×480像素,在保证图像质量的前提下提高数据保存速度。视频录制时间设定为3 s,其中包含1 s提前录制时间。



图9 运动规律试验系统

Fig. 9 Motion test system

3.3.2 运动规律试验方案

为保证花粉的释放量,脉冲气流作为振动能量的载体,应使番茄花在作用过程中产生足够的加速度,以确保其具备足够的振幅和频率。通过分析,确定选取气吹角度、气吹频率、气吹距离作为试验因素。气吹距离是指喷嘴出口与番茄花轴线之间的距离,气吹角度是指喷嘴出口与番茄花轴线之间的夹角,气吹频率是指脉冲气流的作用频率。在正式试验前,需要进行单因素试验,以确定各因素的最佳水平。

通过高速摄影录像观察番茄花在不同参数下的运动响应。当气吹角度小于60°时,花轴方向的作用力增大,番茄花的振幅较小,无法实现有效授粉。随着气吹角度的增大,番茄花绕花梗摆动,摆幅显著增加。因此,气吹角度设定在60°~90°之间。番茄种植在垄上,当气吹距离小于15 cm时,不便于进行授粉操作。而当气吹距离超过25 cm时,番茄花周围的风速较小,花朵摆动不足,无法实现有效授粉,所以气吹距离选择15~25 cm。根据前期试验发现,番茄花在20~30 Hz区间加速度最大[30]。由于番茄花的花梗特性和花朵质量不同且难以统一,无法确定其固有频率,因此本研究不考虑番茄花固有频率带来的影响[37]。选择三因素三水平进行二次旋转正交组合试验,试验如表4所示。

表4 试验因素编码

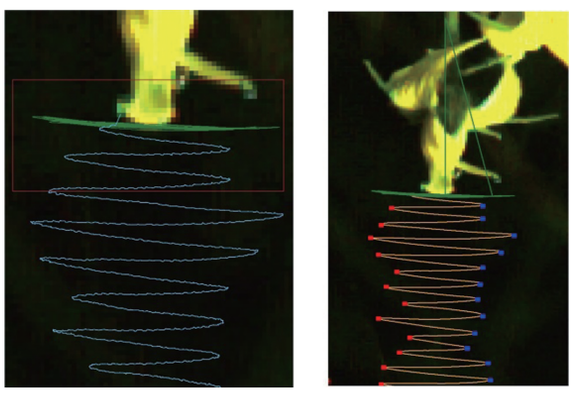
Tab. 4 Testing factors and codes

编码	因素		
	气吹角度/(°)	气吹频率/Hz	气吹距离/mm
-1	60	20	150
0	75	25	200
1	90	30	250

3.3.3 图像处理与轨迹分析

采用表4所示的试验方案进行正交组合试验,录制17组高速摄影视频,采用图像处理方法分析各组气源参数组合下番茄花的运动轨迹。通过运动轨迹,计算出番茄花的运动参数,用于仿真模拟番茄花的授粉过程。

在试验前测得花药的最大直径为4.5 mm。通过计算图像中花药最大直径处的像素数，确定每个像素代表的实际距离为0.34 mm。选取花药底部作为感兴趣区域（ROI），以减少图像中其他信息的干扰。将高速摄影视频导出为单帧图像，提取每帧图像中ROI内的花药区域。计算该区域的中心点坐标，以该坐标为基准绘制矩形，作为下一帧图像的ROI区域。将各帧图像的花药底部中心点坐标连成曲线，获得番茄花在观测平面上的运动轨迹，在图10a中以绿线表示。



(a) 摆动轨迹处理　　(b) 摆动参数计算

图10　运动轨迹识别

Fig. 10　Motion path recognition

番茄花的运动轨迹重叠为一条圆弧线，不便于分析，因此将每个轨迹点的纵坐标进行等距拉长，拉长后的轨迹曲线如图10a中蓝线所示。由于识别误差，轨迹曲线出现上下波动的小锯齿，为了消除锯齿并保留轨迹细节，对坐标进行滤波掩膜处理，得到的平滑轨迹如图10b中的橙线所示。根据轨迹可知番茄花在脉冲气流的作用下做往复摆动运动。在高速摄影的观察下，花药在气吹作用下没有发生变形。为简化仿真模型，将其视为正弦摆动。识别橙色轨迹的左右端点坐标，计算番茄花在各组气吹参数下的平均摆角、相位角和频率，用于仿真计算。识别到的左右端点坐标和平均摆角如图10b所示。使用相同的算法对其余组图像进行批量处理，获得各组的摆动轨迹参数。考虑到建模复杂性和试验精度，对轨迹参数进行了取整处理，并忽略距离超过150 mm的番茄花初始相位。对于150 mm范围内的初始相位，通过计算各组初始相位的平均值来确定。摆动参数如表5所示。

3.4　耦合仿真模型建立

番茄花授粉模型需要在Fluent软件中进行气相仿真，EDEM软件中进行固相仿真，再通过耦合接口连接两软件进行数据传递，来模拟番茄花的授粉过程。在脉冲气流作用下番茄花周围气场复杂，所以选择k-ε湍流模型进行瞬态计算。番茄花在流体域中摆动，因此启用动网格模型对番茄花在空气中的摆动进行模拟，动网格模型采用局部重构和弹性光顺相结合的网格更新方法。番茄花的运动形式为正弦摆动，通过表5所示的轨迹参数编写UDF进行实时控制，并在EDEM中设置相同运动参数。通过UDF定义脉冲速度入口。根据实际授粉操作，将仿真时长设定为0.5 s。为保证Fluent与EDEM联合仿真数据传递的准确性，数据保存间隔与二者仿真时间步长需呈整数倍。因此EDEM采用的时间步长为1×10^{-7} s，数据保存间隔为0.001 s。Fluent的仿真时间步长为1×10^{-4} s，设置每20个时间步长保存数据一次，共计算5 000个时间步长。

表5　运动轨迹参数

Tab. 5　Motion trajectory parameters

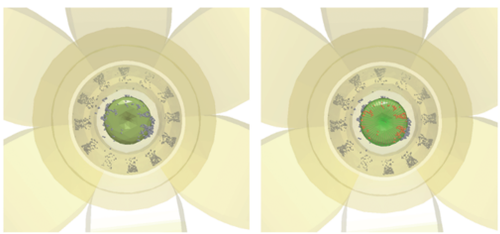
序号	因素			摆动参数		
	气吹角度/(°)	气吹频率/Hz	气吹距离/mm	摆角θ/(°)	相位φ/(°)	频率f/Hz
1	60	20	200	15	0	20
2	90	20	200	19	0	20
3	60	30	200	14	0	30
4	90	30	200	16	0	30
5	60	25	150	23	13	25
6	90	25	150	26	13	25
7	60	25	250	12	0	25
8	90	25	250	14	0	25
9	75	20	150	20	13	20
10	75	30	150	19	13	30
11	75	20	250	10	0	20
12	75	30	250	12	0	30
13	75	25	200	20	0	25
14	75	25	200	22	0	25
15	75	25	200	24	0	25
16	75	25	200	23	0	25
17	75	25	200	23	0	25

3.5　仿真结果与分析

3.5.1　仿真结果

采用与表4相同的试验方案进行仿真，共进行17组模拟试验。为评估脉冲集束方法的授粉效果，以柱头的有效粘附量为评价指标。有效粘附量通过EDEM的后处理模块进行统计。在Setup Selections模块添加Geometry Bin传感器，实时监测柱头区域花粉颗粒的个数。设置传感器尺寸为直径0.6 mm、高0.15 mm的圆柱体，其几何位置跟随番茄花摆动而变化。许多花粉被柱头边缘粘附，但这些花粉并不能有效授粉，需要排除统计，因此设计传感器尺寸略小于番茄花柱头。花粉颗粒的检测情况如图11所示，其中花粉颗粒显示为灰色，如图11a所示，位于检测区域内的花粉颗粒显示为橙色，如图11b所示。

根据上述统计方法，各因子水平组合下的有效粘附量统计结果如表6所示，表中X_1、X_2、X_3表示气吹角度、气吹频率、气吹距离编码值。由文献[18]可知，当柱头粘附30粒以上花粉时可以保证可靠授粉，所以以上参数组合均可使番茄授粉成功。但不同的花粉数量会影响番茄果实的质量，通常授粉效果越好的番茄果实在成熟后更大更重，因此需要进一步探究气源参数的最佳组合。



(a) 花粉颗粒 (b) 有效粘附颗粒

图11 花粉颗粒检测

Fig. 11 Pollen particle detection

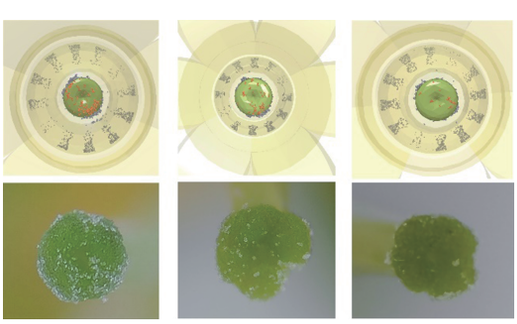
表6 试验方案及结果

Tab. 6 Experimental scheme and results

序号	因素			有效粘附量/个
	X_1	X_2	X_3	
1	−1	−1	0	81
2	1	−1	0	129
3	−1	1	0	96
4	1	1	0	36
5	−1	0	−1	124
6	1	0	−1	137
7	−1	0	1	78
8	1	0	1	40
9	0	−1	−1	135
10	0	1	−1	84
11	0	−1	1	59
12	0	1	1	36
13	0	0	0	152
14	0	0	0	160
15	0	0	0	157
16	0	0	0	153
17	0	0	0	146

3.5.2 仿真结果验证

为验证耦合仿真结果的准确性，在温室中进行授粉模型验证试验。采用搭建的脉冲集束式番茄授粉装置，选取仿真方案中的第14、3和4组参数进行试验，分别对应高、中、低3个有效授粉量水平。试验结束后摘取花朵，使用电子显微镜观测其柱头授粉情况。由于实际授粉量难以直接测得，因此根据文献[34]方法，通过图像处理求得柱头的花粉覆盖率，各组的试验与仿真结果如图12所示。计算得到的柱头花粉覆盖率数据如表7所示。



(a) 第14组 (b) 第3组 (c) 第4组

图12 各组柱头授粉情况

Fig. 12 Stigma pollination in each group

表7 验证试验结果

Tab. 7 Verification test results %

序号	仿真值	试验值	误差
14	23.11	20.37	2.74
3	9.73	8.91	0.82
4	3.64	3.16	0.48

验证试验结果表明，各组误差在3%以内，试验结果与仿真结果基本一致。由于仿真试验所构建的温室环境相对理想，与真实流场环境存在差异。同时，在授粉作业过程中，花粉颗粒的物理特性也会受到气流的影响，所以试验与仿真结果之间存在误差，但各组试验误差均在允许范围。因此验证试验结果表明耦合仿真结果可信，可用于后续分析。

3.5.3 仿真结果分析

对仿真结果进行方差分析，结果如表8所示。通过分析可知，回归模型中各P值均小于0.05，花粉有效粘附的回归模型达到显著水平，模型与试验变量之间存在显著的函数关系。模型失拟差P>0.05，失拟项不显著证明拟合效果较好。其中，脉冲气流的频率和距离对有效粘附量具有极显著影响(P<0.01)，气吹角度对有效粘附量具有显著影响(P<0.05)。通过F检验可知，影响有效授粉量的主次顺序依次为气吹距离、气吹频率和气吹角度。模型修正后的决定系数R^2为0.960 9。以各影响因素为自变量，建立的有效授粉量为响应函数的回归方程为

$$Y = 153.60 - 4.63X_1 - 19X_2 - 33.38X_3 - 27X_1X_2 - 12.75X_1X_3 + 7X_2X_3 - 25.93X_1^2 - 42.18X_2^2 - 32.92X_3^2 \quad (3)$$

表8 方差分析

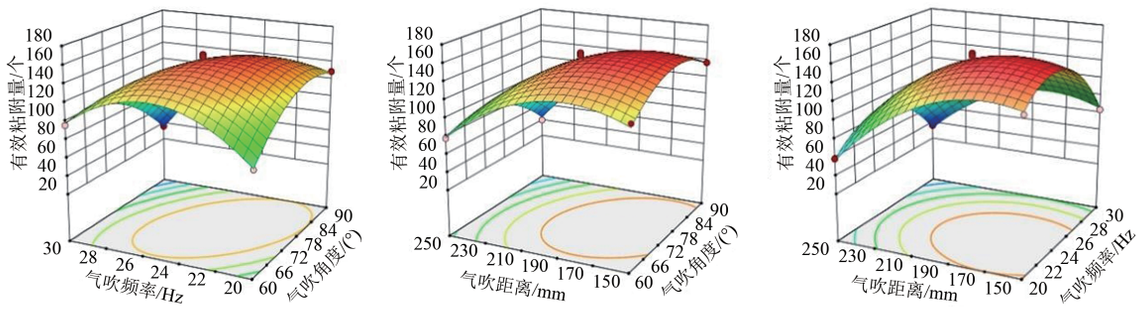
Tab. 8 Analysis of variance

方差来源	平方和	均方和	F	P
模型	32 273.49	3 585.94	138.340 0	<0.000 1
X_1	171.13	171.13	6.600 0	0.037 0
X_2	2 888.00	2 888.00	111.410 0	<0.000 1
X_3	8 911.13	8 911.13	343.770 0	<0.000 1
X_1X_2	2 916.00	2 916.00	112.490 0	<0.000 1
X_1X_3	650.25	650.25	25.090 0	0.001 6
X_2X_3	196.00	196.00	7.560 0	0.028 5
X_1^2	2 829.92	2 829.92	109.170 0	<0.000 1
X_2^2	7 489.39	7 489.39	288.930 0	<0.000 1
X_3^2	4 564.44	4 564.44	176.090 0	<0.000 1
残差	181.45	25.92		
失拟	68.25	22.75	0.803 9	0.553 4
误差	113.20	28.30		
总和	32 454.94			

3.5.4 响应曲面分析

根据回归方程，利用Origin软件绘制气吹距离、气吹角度、气吹频率之间的交互作用对有效粘附量的响应曲面，如图13所示。3个响应面曲线均呈开口向下的趋势，即随着因子水平的增加，有效授粉量呈先增加后减

少趋势。通过分析响应曲面，得出当气吹距离为170~200 mm，气吹频率为22~27 Hz，气吹角度为70°~80°时，花粉有效粘附量较高。为了获得气流参数的最佳组合，结合各因素的边界条件对上述回归模型进行求解。

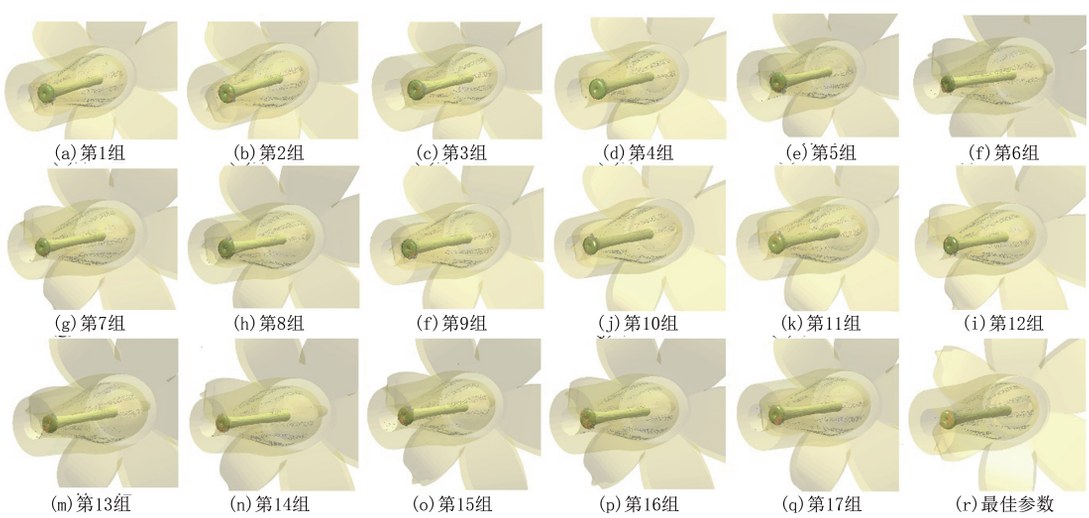


(a) X_3=0　　(b)X_2=0　　(c)X_1=0

图 13　试验因素间交互作用的响应面

Fig. 13　Response surface of interaction between test factors

当气吹距离为181.67 mm、气吹角度为75.51°、气吹频率为24.12 Hz时获得最高粘附量，其值为164个花粉颗粒。依据作业精度，将最优气源参数圆整为气吹距离182 mm、气吹角度76°、气吹频率24 Hz。采用圆整后参数进行仿真试验，得到有效粘附量为162，接近最大理论授粉量。图14为17组试验参数和最佳参数仿真得到的的花粉颗粒分布。可以直观地看出，在不同气流参数组合的作用下，柱头花粉颗粒数存在显著差异，但大部分花粉颗粒仍粘附在花粉囊上。



(a) 第1组　(b) 第2组　(c) 第3组　(d) 第4组　(e) 第5组　(f) 第6组

(g) 第7组　(h) 第8组　(f) 第9组　(j) 第10组　(k) 第11组　(i) 第12组

(m) 第13组　(n) 第14组　(o) 第15组　(p) 第16组　(q) 第17组　(r) 最佳参数

图 14　花粉颗粒分布

Fig. 14　Pollen particle distribution

3.6　授粉过程分析

脉冲气流作用下番茄花授粉过程发生在花药内部，授粉过程难以直接观测。因此可以通过分析气固耦合仿真结果，得到番茄花授粉过程。图15为脉冲气流下番茄花周围风速矢量图和花粉颗粒运动轨迹图。脉冲气流对番茄花施加间歇性压力，使花药产生周期性摆动。摆动过程中花粉颗粒受到惯性力、离心力等多种力的作用，当合力超过花粉颗粒与花药之间的附着力时，花粉颗粒会从花药表面脱落[38]。花粉在重力作用下开始下落，并具有脱落时的初速度。在花药持续摆动的过程中，花粉颗粒脱落后会与之发生碰撞。每次碰撞，花粉颗粒会受到反作用力，使其运动方向和速度发生改变。在与花药碰撞的过程中会有部分颗粒粘附在柱头上成功授粉。此外，还有部分成功授粉的花粉颗粒是通过碰撞运动到柱头与花药之间的区域，并受到涡流的作用。在气流曳力的作用下，部分颗粒随涡流运动，与柱头接触。当花粉颗粒接触柱头时，主要受到柱头表面的黏附力和空气流动的剪切力的影响。在柱头附近，空气流速小，所形成的剪切力不足以克服粘附力，因此花粉颗粒能够稳定附着在柱头上。

4　试验验证

4.1　试验环境与试验方法

为验证脉冲集束式番茄授粉方法在温室环境中的适用性及实际授粉效果，在江苏省盐城市的温室中开展了脉冲集束式番茄授粉方法的验证与对比试验。试验温室长24 m、宽7 m，以晶粉番茄为试验对象，共种植4垄，垄宽70 cm，沟宽80 cm，温室坐南朝北，白天可充分

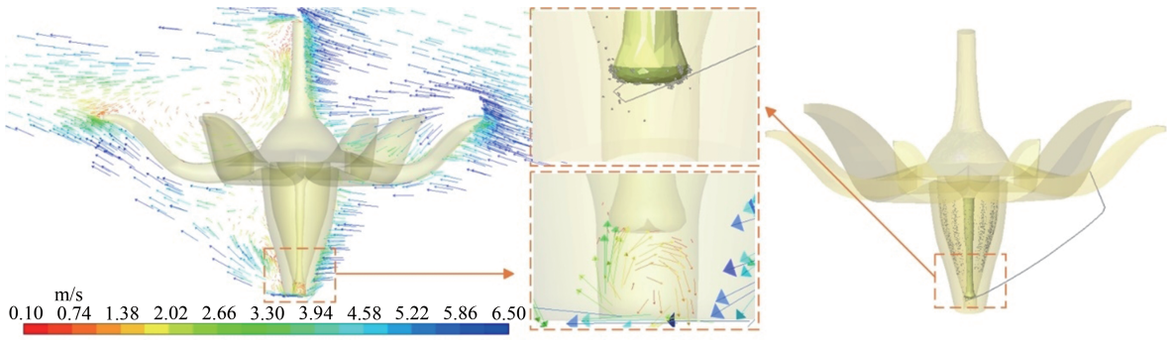


图15 风速矢量图与颗粒轨迹图

Fig. 15 Wind velocity vector diagram and particle trajectory diagram

接受阳光照射,温室种植情况如图16a所示。根据授粉农艺,番茄花在首次授粉时,应处于“三开两裂”的状态,如图16b所示。试验时间为2024年4—7月,气候和温度适宜番茄生长。为减小生长状态对番茄果实品质的影响,统一选取番茄的第4层花序进行试验。



(a) 温室环境 (b) 首次授粉状态

图16 试验条件

Fig. 16 Experimental condition

在每隔一天的09:00—11:00进行授粉试验,授粉持续7 d。四垄番茄依次采用化学喷花、风机直吹、授粉器振动和脉冲集束4种方法进行授粉,授粉方法如图17所示。在首次授粉结束后,随机摘取脉冲集束组不同植株上的10朵花,使用电子显微镜拍摄其柱头授粉情况,用于验证最优气源参数的仿真结果。4次授粉结束后统计番茄花的开放数量。授粉结束后第42天,在各垄随机选取25株番茄进行坐果率、畸果率和单果质量的统计,用于评价番茄的授粉效果。



(a) 化学喷花 (b) 风机直吹

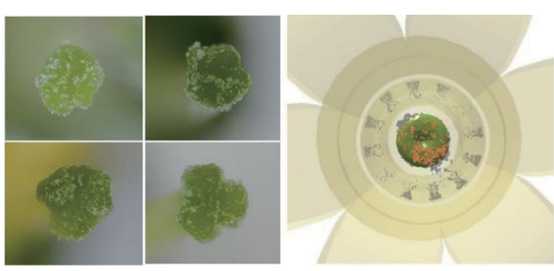
(c) 授粉器振动 (d) 脉冲集束

图17 授粉方法

Fig. 17 Pollination methods

4.2 最优参数验证结果

在气吹距离182 mm、气吹角度76°、气吹频率24 Hz条件下进行试验,拍摄的部分柱头授粉图像如图18a所示,仿真得到的柱头授粉情况如图18b所示。



(a) 试验结果 (b) 仿真结果

图18 最优参数柱头授粉情况

Fig. 18 Optimal parameter stigma pollination

在试验与仿真图像中,花粉颗粒的分布特点相似。柱头边缘粘附了大量花粉颗粒,其余花粉呈单粒或团聚状随机分布在柱头表面。根据文献[34]方法统计得到柱头花粉覆盖率情况。仿真得到的花粉覆盖率为24.77%。试验得到的柱头花粉覆盖率平均值为22.84%。试验与仿真之间最大误差为5.54%、平均误差为1.93%,可以验证仿真结果具有合理性。

4.3 试验结果对比

为对比脉冲集束方法的授粉效果,在各组中随机选取25株番茄进行统计,统计结果如表9所示。试验结果表明采用脉冲集束方法授粉后番茄的坐果率为82.81%,单果质量为229.60 g,畸果率为8.27%,优于其他3种方法授粉后得到的果实品质,可以满足温室番茄的授粉需求。化学喷花方法通过激素刺激子房发育形成果实,而不是通过正常的受精过程,且喷花的作用对象是花序,会因遮挡导致药液喷洒不匀,因此其作果效果没有物理方法稳定。物理方法中集束脉冲方法具有较高坐果率的原因在于,与风机直吹方法相比其能使花药产生更有效的振动,使花粉脱落;与授粉器振动相比,脉冲气流可以在柱头下方形成涡流将花粉引回柱头,并使其稳定粘附。

5 结论

(1)为解决现有温室脉冲气流授粉存在的作用范围

表9　结果情况统计

Tab. 9　Outcome statistics

参数	直吹组	喷花组	振动组	脉冲组
花朵总数/个	131	134	130	128
坐果总数/个	97	93	98	106
坐果率/%	74.05	69.40	75.38	82.81
单果质量/g	204.73	195.76	217.50	229.60
畸果率/%	10.32	17.91	11.25	8.27

大、振动效果差等问题，提出了一种脉冲集束式番茄授粉方法，并搭建相应授粉装置。通过流体仿真分析，确定脉冲吹嘴的出口个数为2，单孔直径为1 mm。此方法为温室番茄的辅助授粉提供了一种新的有效方案。

（2）通过分析番茄花开花期形态、气流场分布、番茄花在脉冲气流下摆动规律，建立气固两相流耦合的仿真模型。以气吹距离、气吹角度、气吹频率为试验因素，以有效粘附量为评价指标进行三因素三水平正交仿真试验，得到气源参数最佳组合为气吹距离181.67 mm、气吹角度75.51°、气吹频率24.12 Hz。

（3）通过分析气固耦合仿真结果可得，花粉颗粒在花药摆动的过程中脱落，部分花粉颗粒能够在涡流的作用下稳定附着在柱头上，从而保证授粉的成功率。

（4）将最优组合圆整为气吹距离182 mm、气吹角度76°、气吹频率24 Hz，在温室进行验证与对比试验。验证试验结果表明，仿真与试验图像中花粉在柱头上分布的特点一致，柱头花粉覆盖率最大误差为5.54%，平均误差为1.93%，验证了仿真模拟的可行性。对比试验结果表明，脉冲集束授粉方法的坐果率为82.81%，单果质量229.60 g，畸果率8.27%。与风机直吹、化学喷花和授粉器振动相比坐果率分别提升8.76、13.41、7.43个百分点，单果质量分别增加24.87、33.84、12.1g，畸果率分别降低2.05、9.64、2.98个百分点，说明脉冲集束方法可以满足温室番茄的授粉需求。

参　考　文　献

[1] 赵文举，马锋，曹伟，等.水肥耦合对基质栽培番茄产量及品质的影响[J].农业工程学报，2022，38(2)：95－101.
ZHAO Wenju，MA Feng，CAO Wei，et al. Effects of water and fertilizer coupling on yield and quality of tomato cultivated in substrate [J]. Transactions of the CSAE，2022，38(02)：95－101.（in Chinese）

[2] 乔礼.浅谈番茄现代农业绿色设施种植[J].河南农业，2024(11)：40－42.
QIAO Li. Discussion on modern agricultural green facilities planting of tomato[J]. Agriculture of Henan，2024(11)：40－42.（in Chinese）

[3] 曹丽丽，戴宇婷.三种授粉方式在春季设施番茄上的应用评价[J].南方农业，2022，16(11)：24－26.
CAO Lili，DAI Yuting. Application evaluation of three pollination methods in spring plant tomato[J]. Southern Agriculture，2022，16(11)：24－26.（in Chinese）

[4] 尤春，陈大军，吴文丽.不同授粉方式对设施番茄产量、品质及效益的影响[J].长江蔬菜，2020(24)：56－58.
YOU Chun，CHEN Dajun，WU Wenli. Effects of different pollination methods on yield，quality and benefit of plant tomato[J]. Yangtze River Vegetables，2020(24)：56－58.（in Chinese）

[5] DINGLEY A，ANWAR S，KRISTIANSEN P，et al. Precision pollination strategies for advancing horticultural tomato crop production[J]. Agronomy，2022，12(2)：518.

[6] 孙艳军，徐刚，高文瑞，等.不同授粉方式对日光温室番茄产量、品质及效益的影响[J].中国蔬菜，2017(6)：38－41.
SUN Yanjun，XU Gang，GAO Wenrui，et al. Effects of different pollination methods on yield，quality and benefit of tomato in solar greenhouse[J]. Chinese Vegetables，2017(6)：38－41.（in Chinese）

[7] 黄训兵，李辉，陈浩，等.熊蜂授粉对北方冬季温室不同品种番茄品质的影响[J].北方园艺，2022(4)：56－61.
HUANG Xunbing，LI Hui，CHEN Hao，et al. Effect of bumblebee pollination on the quality of tomato varieties in northern greenhouse in winter[J]. Northern Horticulture，2022(4)：56－61.（in Chinese）

[8] SALVARREY SE，SANTOS N，ARBULO G，et al. Characteristics of the tomato fruit（*Solanum lycopersicum*）using native bumblebees（*Bombus atratus*）as pollinators in greenhouse[J]. Agrociencia，2020，24：101－111.

[9] KNIGHT K，How buzzing helps bees to pollinate plants[J]. Journal of Experimental Biology，2019(4)：33－42.

[10] 周进，吴杨焕，张爱萍.不同授粉方法对设施番茄果实生长发育的影响[J].北方园艺，2017(10)：47－53.
ZHOU Jin，WU Yanghuan，ZHANG Aiping. Effects of different pollination methods on fruit growth and development of plant tomato[J]. Northern Horticulture，2017(10)：47－53.（in Chinese）

[11] 程浩淼，季书，葛恒军，等.生态沟渠对农田面源污染的消减机理及其影响因子分析[J].农业工程学报，2022，38(21)：42－52.
CHENG Haomiao，JI Shu，GE Hengjun，et al. Reduction mechanism and influencing factors of non-point source pollution in farmland by ecological ditches[J]. Transactions of the CSAE，2022，38(21)：42－52.（in Chinese）

[12] 赵来成，张建华，朱建飞，等.农药使用对食品安全的影响及防范措施[J].农业与技术，2020，40(24)：56－58.
ZHAO Laicheng，ZHANG Jianhua，ZHU Jianfei，et al. Effects of pesticide use on food safety and preventive measures[J]. Agriculture and Technology，2020，40(24)：56－58.（in Chinese）

[13] 卢阳，李娜，贾漫丽.我国绿色农业可持续发展研究[J].中国果菜，2022，42(4)：80－84.
LU Yang，LI Na，JIA Manli. Research on sustainable development of green agriculture in China[J]. Chinese Journal of Fruit and Vegetable Science，202，42(4)：80－84.（in Chinese）

[14] BROUSSARD M A，COATES M，MARTINSEN P. Artificial pollination technologies：a review[J]. Agronomy，2023，13(5)：1351.

[15] HANNA H Y. Air blowers are less effective pollinators of greenhouse tomatoes than electric vibrators but cost less to operate[J]. HortTechnology, 2004,14(1):104 - 107.

[16] MAHADIK A S, KUSHWAHA H L, KUMAR A, et al. Pulsating air pollinator for greenhouse cultivation[J]. Journal of Scientific and Industrial Research, 2021,80(6): 477 - 485.

[17] 赵春江,文朝武,林森,等.基于级联卷积神经网络的番茄花期识别检测方法[J].农业工程学报,2020,36(24):143 - 152.
ZHAO Chunjiang, WEN Chaowu, LIN Sen, et al. Tomato blossom recognition and detection method based on cascade convolutional neural network[J]. Transactions of the CSAE, 2019,36(24):143 - 152. (in Chinese)

[18] 石强.基于无人机下洗流场的温室番茄风致振动授粉机理和方法研究[D].镇江:江苏大学,2021.
SHI Qiang. Study on wind-induced vibration pollination mechanism and method of greenhouse tomato based on UAV-based downwash flow field[D].Zhenjiang: Jiangsu University,2021. (in Chinese)

[19] SHI Q, WANG B, MAO H, et al. Calibration and measurement of micrometre-scale pollen particles for discrete element method parameters based on the Johnson-Kendal-Roberts model[J]. Biosystems Engineering, 2024, 237: 83 - 91.

[20] HII M J W, ABRAHAMSON J, JORDAN P J. CFD simulation of flow around a single kiwifruit flower[C]//V International Symposium on Kiwifruit 610, 2002: 479 - 487.

[21] 韩启龙,马洋.喷嘴结构对高压水射流影响及结构参数优化设计[J].国防科技大学学报,2016,38(3):68 - 74.
HAN Qilong, MA Yang. Effect of nozzle structure on high-pressure water jet and optimization design of structural parameters[J]. Journal of National University of Defense Technology,2016,38(3):68 - 74. (in Chinese)

[22] 蔡玉波,刘勇,魏建平,等.冰粒空气射流喷射器结构关键参数[J].中国表面工程, 2024,37(4):1 - 13.
CAI Yubo, LIU Yong, WEI Jianping, et al. Key structural parameters of ice air jet ejector[J]. China Surface Engineering, 2024,37(4): 1 - 13. (in Chinese)

[23] 李智博,姚绍明,王立权,等.收缩段截面形状对喷嘴性能影响的模拟分析[J].哈尔滨工程大学学报,2023,44(6):1011 - 1018.
LI Zhibo, YAO Shaoming, WANG Liquan, et al. Simulation analysis of effect of section shape of contraction section on nozzle Performance[J]. Journal of Harbin Engineering University,2023,44(6):1011 - 1018. (in Chinese)

[24] 赵保准.单喷嘴高温气体射流除冰影响因素分析与喷嘴优化[D].大连:大连海事大学,2023.
ZHAO Baozhun. Analysis of influencing factors and optimization of single jet high temperature gas jet deicing[D]. Dalian: Dalian Maritime University,2023. (in Chinese)

[25] 杨怀银.圆锥形多孔喷嘴的低压射流特性研究[D].成都:西南交通大学,2016.
YANG Huaiyin. Study on low pressure jet characteristics of conical porous nozzle[D].Chengdu: Southwest Jiaotong University,2016. (in Chinese)

[26] 肖世超,沈敏,何为,等.阵列多孔式辅助喷嘴和异型筘组合流场特性[J].科学技术与工程,2022,22(10):4063 - 4068.
XIAO Shichao, SHEN Min, HE Wei, et al. Flow field characteristics of arrayed porous assistant nozzle and non-standard heddle combination[J]. Science and Technology Engineering, 2022,22(10):4063-4068. (in Chinese)

[27] 翁晓星,陈长卿,王刚,等.基于CFD-DEM的机采鲜叶管道集叶过程数值模拟研究[J].农业机械学报,2022,53(11):424-432.
WENG Xiaoxing, CHEN Changqing, WANG Gang, et al. Numerical simulation of leaf gathering process of fresh leaf collecting pipeline based on CFD-DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(11):424 - 432. (in Chinese)

[28] 王龙宝,杨翰瑜,王庆杰,等.小麦气流辅助直线投种装置设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(6):111 - 120.
WANG Longbao, YANG Hanyu, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of air-assisted linear seeding device for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(6):111 - 120. (in Chinese)

[29] 刘浩,马瑞,孙雪峰,等.CFD-DEM方法研究下降管结构对颗粒流动的影响[J].农业工程学报,2024,40(13):205 - 213.
LIU Hao, MA Rui, SUN Xuefeng, et al. Study on effect of downcomer structure on particle flow using CFD-DEM method[J]. Transactions of the CSAE, 2024,40(13):205 - 213. (in Chinese)

[30] 刘思瑶.基于振动诱导与气流引导耦合的番茄授粉技术与智能化装备研究[D].北京:中国农业大学,2023.
LIU Siyao. Research on tomato pollination technology and intelligent equipment based on vibration induction and airflow guidance coupling[D]. Beijing: China Agricultural University,2023. (in Chinese)

[31] 蔡国庆,刁显锋,杨芮,等.基于CFD-DEM的流-固耦合数值建模方法研究进展[J].哈尔滨工业大学学报,2024,56(1):17 - 32.
CAI Guoqing, DIAO Xianfeng, YANG Rui, et al. Research progress of fluid-solid coupling numerical modeling method based on CFD-DEM[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024,56(1):17 - 32. (in Chinese)

[32] HERMANN C T, BRUNO A D, MATHIEU A T A, et al., Tomato (*Solanum lycopersicum*) pollinators and their effect on fruit set and quality[J]. Journal of Horticultural Science & Biotechnology, 2021, 96(1):1 - 13.

[33] 赵丽萍,赵统敏,王银磊,等.番茄新品种——晶粉1号的特征特性及早春栽培技术[J].上海蔬菜,2021(4):30 - 31.

[34] LIU S, ZHANG X, WANG X, et al. Vibration inducing and airflow guiding coupled tomato pollination method research based on gas-solid two-phase flow model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 216: 108472.

[35] XIN F, TIANHUA L, LI jun, et al. Investigation on JKR surface energy of high-humidity maize grains[J]. Powder Technology,2021, 382: 406 - 419.

[36] ITO S, RAJABI H, GORB S N. A ballistic pollen dispersal strategy hidden in stylar oscillation[J]. bioRxiv, 2020: 2020.01. 27.920710.

[37] NAHIR D, GANMOR S, RYLSKI I, et al. Pollination of tomato flowers by a pulsating air jet[J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(3): 894 - 896.

[38] LIU S, WANG X, CHEN X, et al. Simulation and experiment of tomato pollen particles release and motion characteristics based on optical flow target tracking method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107 - 116.