



喷雾参数对猕猴桃精量对靶授粉雾滴沉积量的影响

孟鹏豪^{1a,1b},童俊华^{1a,1b},周海丽^{1a,1b},李 振^{1a},叶宏宝²,欧俊朗^{1a}

(1. 浙江理工大学, a. 机械工程学院; b. 浙江省种植装备技术研究重点实验室, 杭州 310018;

2. 浙江省农业科学院农业装备研究所, 杭州 310021)

摘 要: 为了提高猕猴桃在不同倾斜角度下的花粉液沉积量, 达到节约花粉液和提高授粉效率的目的, 提出了一种基于角度调控的精量对靶授粉方式, 并分析了气压、液压、喷雾距离和倾斜角度对雾滴沉积量的影响。首先搭建了精量对靶授粉试验装置; 其次针对不同花朵重叠的情况, 设计了精量对靶的角度调控方案、控制参数试验方案以及沉积量、雾滴粒径大小测试方法, 确定了无倾斜角度下的授粉控制参数; 再次分析了倾斜角度对雾滴沉积区域面积、理论授粉时间、雾滴逃逸率以及授粉补偿时间的影响, 确定了最终授粉时间; 最后通过验证性试验对精量对靶授粉方式进行雾滴沉积量和授粉成功率的分析。试验结果表明: 当授粉液压为 0.070 MPa、授粉气压为 0.150 MPa、授粉距离为 40 cm、授粉基础时间为 3.50 s 时, 雾滴沉积量可满足无倾斜角度的充分授粉要求; 随着花朵、喷嘴倾斜角度的增大, 雾滴逃逸率和授粉补偿时间随之增大, 最大雾滴逃逸率为 27%; 精量对靶授粉方式在不同倾斜角度下花蕊区平均雾滴沉积量稳定在 43.0~46.5 mg, 平均单朵花所需最终授粉时间 3.67 s, 授粉成功率达到 96.7%。基于角度调控的精量对靶授粉方式在节约花粉液、提高授粉效率以及提高充分授粉率上具有显著优势, 可为高效自动化精量授粉提供支持。

关键词: 猕猴桃; 倾斜角度; 雾滴沉积量; 雾滴逃逸率; 精量对靶授粉

中图分类号: S224.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2023)03-0263-09

引文格式: 孟鹏豪, 童俊华, 周海丽, 等. 喷雾参数对猕猴桃精量对靶授粉雾滴沉积量的影响[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2023, 49(2): 263-271.

Reference Format: MENG Penghao, TONG Junhua, ZHOU Haili, et al. Effects of spray parameters on the deposition of target pollination droplets by kiwifruit precision[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2023, 49(2): 263-271.

Effects of spray parameters on the deposition of target pollination droplets by kiwifruit precision

MENG Penghao^{1a,1b}, TONG Junhua^{1a,1b}, ZHOU Haili^{1a,1b}, LI Zhen^{1a}, YE Hongbao², OU Junlang^{1a}

(1a. School of Mechanical Engineering; 1b. Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology of Zhejiang Province, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. Institute of Agricultural Equipment, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

Abstract: In order to improve the deposition of pollen liquid of kiwifruit under different inclination angles, and achieve the purpose of saving pollen liquid and improving pollination efficiency, a precision-to-target pollination method based on angle regulation was proposed, and the effects of air pressure, hydraulic pressure, spray distance and inclination angle on droplet deposition were analyzed. Firstly, we set up a precision target pollination test device. Secondly, in view of the overlap of different flowers, we designed the precision target angle control scheme, parameter test scheme, deposition amount and droplet size test method, and determined the pollination control parameters without tilt angle. Thirdly, we analyzed the effects of tilt angle on droplet deposition area, theoretical pollination time, droplet escape rate

收稿日期: 2022-10-11 网络出版日期: 2023-01-17

基金项目: 浙江省“领雁”研发攻关计划(2022C02055); 浙江理工大学科研启动基金(19022456-Y)

作者简介: 孟鹏豪(1997—), 男, 河南漯河人, 硕士研究生, 主要从事农业机器人方面的研究。

通信作者: 李 振, E-mail: lizhen3251193@163.com

and pollination compensation time again, and determined the final pollination time. Finally, we analyzed the droplet deposition and pollination success rate of precision target pollination by confirmatory test. The experimental results show that the droplet deposition could meet the requirements of full pollination without tilt angle when the pollination hydraulic pressure was 0.070 MPa, the pollination pressure was 0.150 MPa, the pollination distance was 40 cm, and the pollination base time was 3.50 s. With the increase of tilt angle of flower and nozzle, the droplet escape rate and pollination compensation time increased, and the maximum droplet escape rate was 27%. The average droplet deposition in the stamen area of the precision target pollination method at different tilt angles was stable between 43.0 and 46.5 mg. The average final pollination time required for a single flower was 3.67 s, and the pollination success rate reached 96.7%. The precision target pollination method based on angle regulation has outstanding advantages in saving pollen liquid, and improving pollination efficiency and full pollination rate, which can provide support for efficient automatic precision pollination.

Key words: kiwifruit; tilt angles; amount of droplet deposition; droplet escape rate; precision target pollination

0 引言

猕猴桃为雌雄异株果树,授粉方式为异花授粉。在自然条件下昆虫传粉极易受到天气因素的影响;人工辅助授粉可提高授粉沉积量,对提高猕猴桃坐果率和优果率效果显著,可实现单果重约 150 g 和果实大小均匀的目标^[1-3]。液体喷雾授粉具有授粉速度快、便于控制雾化效果和施药量、减少雾滴飘移、节约花粉等优点,弥补了自然授粉和干粉式授粉的不足,有助于提高花粉利用率^[4-6]。喷雾授粉的角度不同,对应的雾滴沉积区域面积也不同;合适的控制参数能够提高雾化效果,从而提高花粉液附着率和雾滴沉积量,是节约花粉液和提高授粉效率的关键。

对靶喷雾技术可通过确定作物的位置进行精准喷雾,大大提高了药液的利用率,降低了药液成本和对环境的污染^[7]。张慧春等^[8]和张瑞瑞等^[9]针对苦苣和棉花对靶喷雾授粉,研究了喷雾高度、雾滴粒径等对农药沉积量的影响;代祥等^[10]研究了电磁阀控对靶喷雾系统动态条件下系统压力等参数控制下的喷雾流量特性,利用反向传播神经网络对试验数据进行拟合和测试,实验结果显示线性区间平均误差仅 0.20,最低误差 0.15;贾卫东等^[11]研究了对靶喷雾机喷雾参数对雾滴沉积分布的影响,结果表明选择合适的株距、降低对靶响应延迟时间是提高雾滴覆盖率的有效途径;常瑞等^[12]构建了双流式喷雾试验平台,分析了一定控制参数下雾滴粒径的变化与靶向雾滴沉积量的影响,发现适宜授粉雾化气压为 0.125~0.150 MPa;石复习等^[13]分析了气压、液流

量等和喷雾距离对授粉沉积量的影响,确定了双流体喷嘴的对靶喷施控制参数。上述研究对对靶喷施过程中的相关控制参数进行了研究,但没有考虑对靶过程中花朵和喷嘴的倾斜角度对雾滴沉积区域面积和控制参数的影响。花朵、喷嘴倾斜角度变大,雾滴沉积区域面积变小,雾滴逃逸率变大,满足充分授粉时的最终授粉时间将会随之变长。

本研究提出了一种基于角度调控的精度对靶授粉方式,并分析气压、液压、喷雾距离和倾斜角度对雾滴沉积量的影响。首先搭建精度对靶授粉试验装置;然后针对不同花朵重叠的情况,设计授粉角度调控方案、控制参数试验方案及参数测试方法,确定无倾斜角度下的授粉控制参数;在此基础上分析倾斜角度对雾滴沉积区域面积、理论授粉时间、雾滴逃逸率以及授粉补偿时间的影响,通过理论计算及试验确定最终授粉时间、验证精度对靶授粉方式在提高雾滴沉积量和授粉成功率方面的合理性,从而为机器视觉识别出花朵精准位置和角度信息的情况下实现精度对靶喷施技术提供支持。

1 试验材料与方法

1.1 理论授粉量及精度对靶授粉试验装置

本研究选择浙江省杭州市余杭区大型猕猴桃种植园红心猕猴桃果树为试验对象,猕猴桃花朵及果园照片如图 1 所示。该猕猴桃品种的花冠直径 7~9 cm,花蕊区直径 2~3 cm,花朵朝向不一,距离地面 150~170 cm。若授粉时采用质量分数为 0.1% 的花粉液,当花粉液沉积量大于 42.9 mg 时,可认为其充分授粉^[14]。

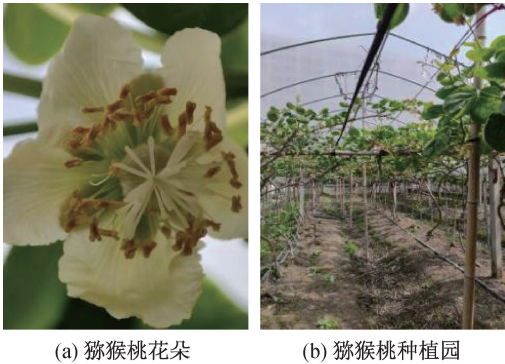


图 1 猕猴桃花朵及种植园照片

双流体喷嘴雾化效果好、雾滴粒径分布稳定、喷雾穿透性强,故本研究选用孔径为 1 mm 的压力式锥形双流式喷嘴,该喷嘴雾锥角 15.0°,喷雾距离 0~2.5 m。本研究中的双流体精量对靶喷雾试验装置由液路、气路 and 控制系统组成,试验装置示意图如图 2 所示。气路为喷雾提供稳定的、可定时控制

的气压,由空气压缩机、油水分离过滤器、气压表、气动电磁阀组成;液路为喷雾提供持续稳定、可控流量的花粉液,由隔膜泵、节流阀、液压表、水电磁阀组成。气液两相分别通过电磁阀控制,本试验选用三菱 FX5U 系列 PLC 控制电磁阀通断,实现对气液两相的精准控制。电磁阀响应时间在 50 ms 以下,响应速度快,可准确调节喷雾时间,达到精量对靶授粉、节约资源的目的。本试验模拟花朵位姿和授粉时的真实状态,搭设 160 cm 高授粉架,授粉架上安装有亚克力板,亚克力板上安装用于模拟花朵倾斜位姿的倾斜角度模拟支架,将雾滴采集卡固定在倾斜角度模拟支架上作为模拟花蕊区。由于本试验模拟了喷嘴授粉时的倾斜角度,故将双流体喷嘴安装在固定可调节角度的装置上进行试验,双流体喷嘴朝上对模拟花蕊区中心,在后续的授粉实际应用中将采用多关节机械臂进行倾斜角度的调整。

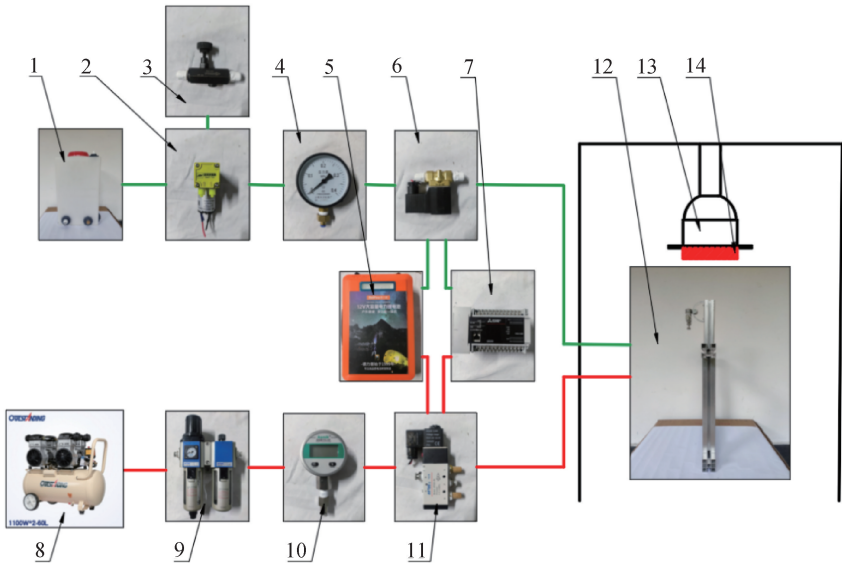


图 2 双流体精量对靶喷雾试验装置示意图

根据文献[15]的试验结果,设定气压调节范围为 0~0.300 MPa,液压范围 0~0.080 MPa。其余装置根据上述参数值进行选型。双流体对靶喷雾沉积试验部件的主要参数如表 1 所示。

1.2 精量对靶角度调控方案

在猕猴桃果园调研中发现,盛花期猕猴桃花朵分布情况复杂,可分为重叠和倾斜两种情况,重叠情况为 2 朵重叠、3 朵重叠、4 朵及以上重叠,如图 3 所示。

对重叠花朵授粉时,只有对每个花朵的花蕊中心进行授粉,使雾滴沉积区域覆盖整个重叠花朵的

花蕊区域,才能确保重叠花朵充分授粉。不同花朵重叠情况下授粉点的选择及倾斜角度方式均不同,授粉点示意图如图 4 所示。

喷嘴授粉分为 4 个步骤,如图 5 所示。a) 获取授粉点坐标信息及喷嘴、花朵倾斜角度信息;b) 将喷嘴移动至授粉点下;c) 喷嘴倾斜一定角度,对准各个花蕊中心点,根据不同的喷嘴倾斜角度和花朵倾斜角度,喷雾一定时间;d) 将喷嘴移到下一个授粉点下,重复上述步骤。其中,本研究采用 YOLOv5 进行图像识别,然后通过拟合倾斜时花朵和花蕊的位置关系曲线获得花朵的坐标及倾斜角度信息。

表 1 双流体对靶喷雾沉积试验部件的主要参数

试验仪器	参数	参数值
空气压缩机	额定压力/MPa	0.800
	压力范围/MPa	0~0.400
天川流体压力表	分度值/MPa	0.010
	流量/L	1
JBL-BP1000 隔膜泵	电压/V	12
	压力范围/MPa	0~1.000
米科数显气压表	分度值/MPa	0.001
	喷嘴孔径/mm	1
双流体喷嘴	喷雾锥角/(°)	15.0
	容量/L	25
药箱	响应时间/ms	50
	电压/V	24
亚德客 4V310-08 气动电磁阀	响应时间/ms	50
	电压/V	24
亚德客 2W030-08 流体电磁阀	调压范围/MPa	0~1.000
亚德客油水分离过滤器 GFC300-08		

1.3 精量对靶授粉控制参数试验方案

根据所选隔膜泵的流量和液压表的分度值,进

行预试验,确定液压范围 0.030~0.080 MPa,气压范围为 0.100~0.200 MPa,喷雾距离 20~60 cm,授粉角度为 0.0°,喷雾时间为 3.00 s,具体试验方案如表 2 所示。

1.4 参数测试方法

试验选择与花粉液密度相差不大的水为试验液体,选用与花蕊直径大小相近的雾滴采集卡收集雾滴沉积液。采用分度值为 0.1 mg 的电子天平对喷雾前后的雾滴采集卡进行称量,称量过程中用干净的镊子对雾滴采集卡进行夹取和放置,通过计算雾滴采集卡喷雾前后的重量之差,得到模拟花蕊区的雾滴沉积量 M 。加入显色试剂的花粉液在水敏纸上沉积后,经过一定时间的静置,可显示出雾滴沉积区域和雾滴粒径大小,采用水敏纸对雾滴粒径大小和雾滴覆盖程度进行定性分析。每组参数重复测量 3 次沉积量,测量结果取平均值。温度、湿度和风速影响着雾滴的沉积量,本试验选在无风室内环境进行,试验现场温度为 34℃,空气相对湿度为 41%。

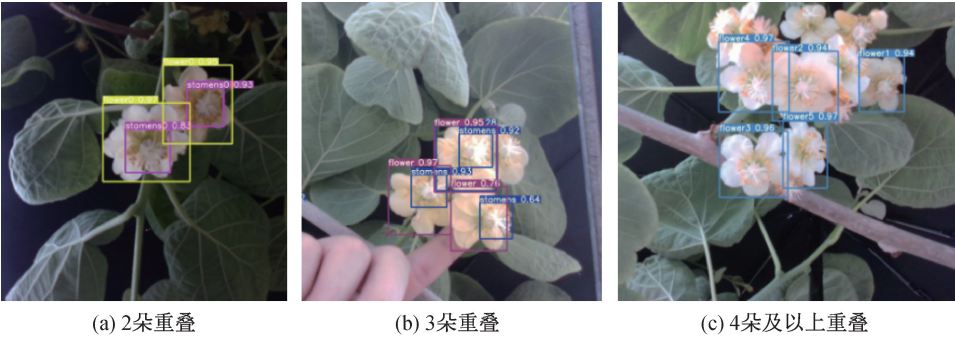


图 3 花朵重叠情况示例

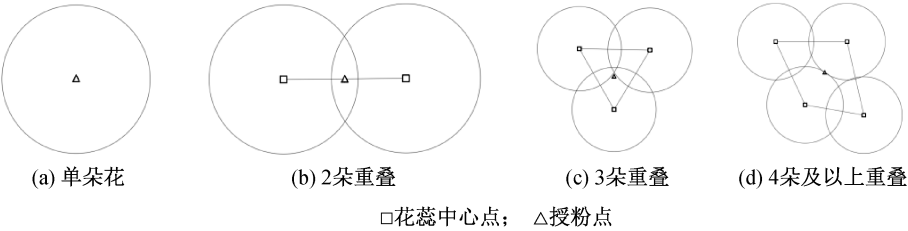


图 4 不同花朵重叠情况下授粉点示意图

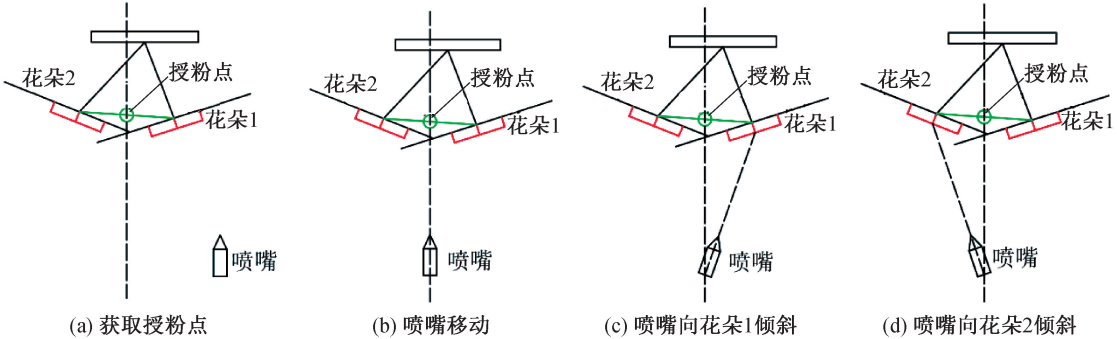


图 5 喷嘴授粉步骤示意图

表 2 试验方案

喷雾距离/cm	喷雾液压/MPa	喷雾气压/MPa
20	0.030	0.100
30	0.040	0.125
40	0.050	0.150
50	0.060	0.175
60	0.070	0.200
	0.080	

2 精量对靶授粉控制参数试验与分析

2.1 无倾斜角度下控制参数确定

喷雾距离、喷雾气压、喷雾液压、喷雾时间决定

着花粉液雾化效果以及花蕊区雾滴沉积量的大小，是喷雾授粉过程中的关键控制参数。在表 2 的试验参数下进行正交试验，分析模拟花蕊区的雾滴沉积量大小，对不同参数下的沉积量、雾滴覆盖程度、雾滴粒径大小等结果进行对比，根据双流体喷嘴的沉积特性，确定精量对靶授粉最佳控制参数，试验结果如图 6—图 8 所示。

由上述试验结果可知：在 40 cm 的授粉距离下，气压对雾滴沉积量的影响较小，雾滴沉积量在不同气压下能够保持稳定；在 0.150 MPa 的气压下，液压较小时雾滴沉积量最大，随着液压升高，保持持续

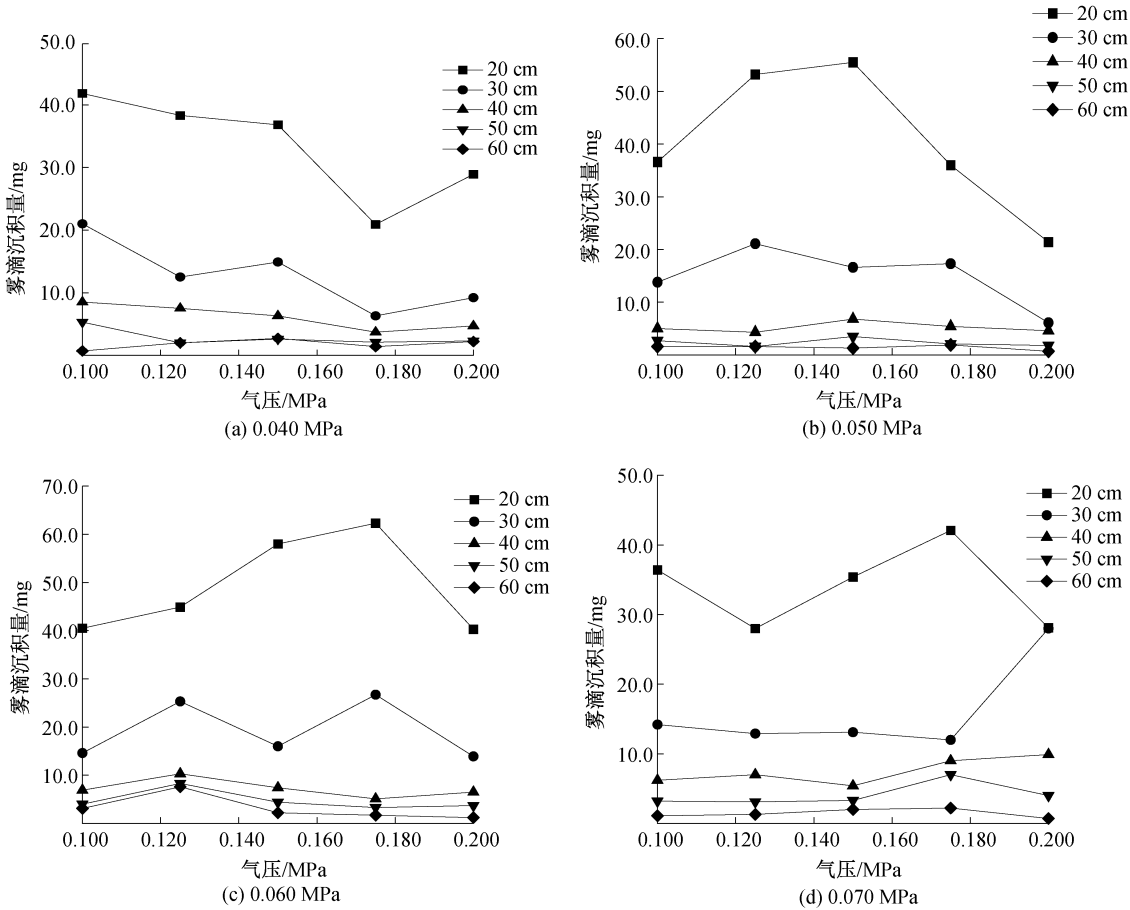


图 6 不同液压下各种距离的雾滴沉积量随气压变化的曲线

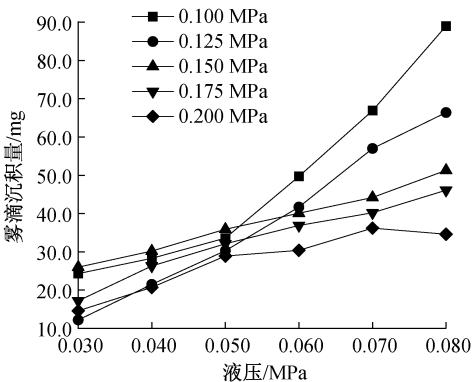


图 7 不同气压下雾滴沉积量随液压变化的曲线

稳定上升；当液压为 0.070 MPa 时，雾滴粒径较小且均匀性较好，雾滴沉积量分布均匀。因此选择授粉距离 40 cm、授粉气压 0.150 MPa、授粉液压 0.070 MPa 作为精量对靶授粉作业的最佳参数。

在一定授粉距离、气压和液压的情况下，授粉时间决定雾滴沉积量的大小。在授粉过程中，由于药液在电磁阀响应后从初速度到达稳定流速需要一定时间，因此喷雾授粉存在滞后性。通过测量不同时间下的雾滴沉积量，确定授粉基础时间，具体测量数据如图 9 所示。

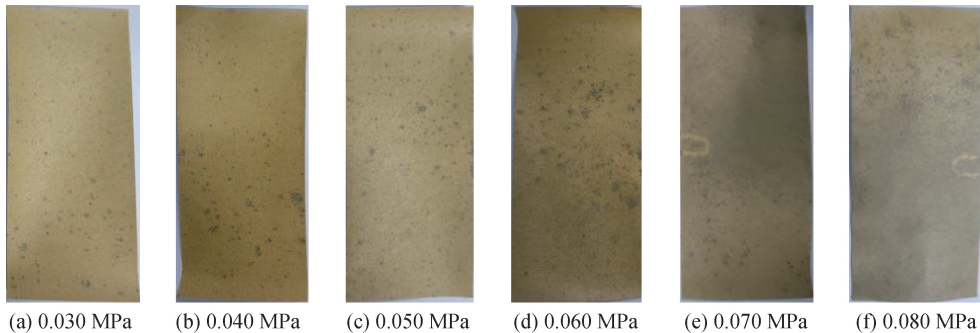


图 8 不同液压下雾滴覆盖程度及粒径大小示例照片

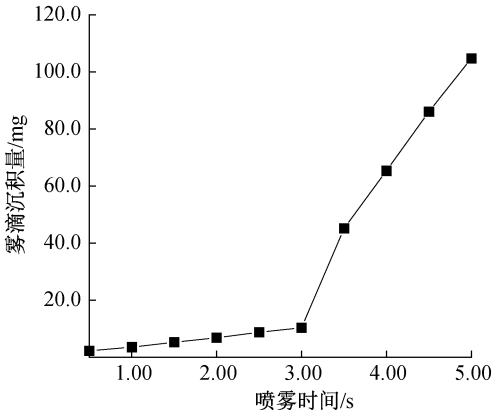


图 9 雾滴沉积量与喷雾时间之间的关系曲线

从图 9 可以看出:当授粉时间小于 3.00 s 时,雾滴沉积量较小,此阶段下液体流速未达到稳定,受滞后时间影响;授粉时间大于 3.00 s 时,雾滴沉积量与时间呈正比例关系,每秒约增加 20.0 mg;当授粉时间为 3.50 s 时,多次试验的雾滴沉积量均大于 42.9 mg,因此,确定授粉基础时间 T 为 3.50 s。

根据上述试验,本研究确定了无倾斜角度下的 4 个授粉控制参数:授粉距离 40 cm,授粉气压 0.150 MPa,授粉液压 0.070 MPa,授粉基础时间 3.50 s。

2.2 倾斜角度与雾滴沉积区域面积、理论授粉时间的关系

倾斜角度包含了喷嘴倾斜角度和花朵自身倾斜角度,影响着雾滴沉积区域面积和授粉时间。花朵无倾斜时,视花蕊区为圆形,模拟花蕊区面积 S 的计算公式为:

$$S = \pi a^2 \quad (1)$$

其中: a 为花朵无倾斜时的直径,cm。

花朵、喷嘴倾斜角度及对应雾滴沉积区域面积如图 10 所示。当花蕊朝 X 、 Y 方向倾斜时且喷嘴在授粉点位置时:

$$\begin{cases} c = a \times \cos(\alpha_1 + \beta_1), \\ d = a \times \cos(\alpha_2 + \beta_2) \end{cases} \quad (2)$$

其中: c 、 d 分别为花朵倾斜后 X 方向和 Y 方向的大

径和小径,cm; α_1 、 β_1 分别为花蕊和喷嘴各自在 X 方向倾斜的角度, ($^\circ$); α_2 、 β_2 分别为花蕊和喷嘴各自在 Y 方向倾斜的角度, ($^\circ$)。此时雾滴沉积区域面积 S_1 和雾滴沉积区域面积比例 k 的计算公式为:

$$\begin{cases} S_1 = \pi cd, \\ k = \frac{cd}{a^2} \end{cases} \quad (3)$$

因此理论授粉时间 t_1 的计算公式为:

$$t_1 = T \times \frac{a^2}{cd} \quad (4)$$

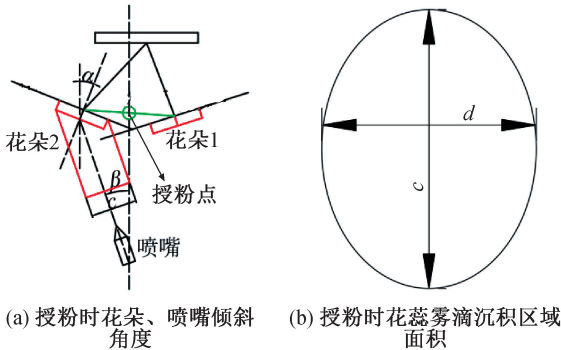


图 10 授粉时花朵、喷嘴倾斜角度及对应雾滴沉积区域面积示意图

2.3 倾斜角度对雾滴逃逸率的影响

赵东等^[16]研究了气液两相流的 3 种吸附液滴及其逃逸形式,发现当花朵与喷嘴之间存在倾斜角度时,由于滚动起动逃逸、悬浮起动逃逸、碰撞起动逃逸 3 种形式的雾滴逃逸,导致真实雾滴沉积量与垂直状态下的雾滴沉积量出现较大差异,这个差异被称为雾滴逃逸率。以倾斜角度模拟支架模拟花朵倾斜、喷嘴不倾斜以及花朵倾斜、喷嘴倾斜两种情况,选择 5 个角度,每组情况测量 3 次,最后取单张雾滴采集卡雾滴沉积量平均值 M_1 。在理论授粉时间下,测得不同角度范围下的真实雾滴沉积量并计算出最大雾滴逃逸率,雾滴逃逸率 E 的计算公式为:

$$E = \frac{42.9 - M_1}{42.9} \quad (5)$$

由调研可知,花朵在 X 、 Y 方向倾斜最大角度皆不超过 30.0° ,喷嘴在 X 、 Y 方向的最大倾斜角度按照 2 朵、3 朵、4 朵重叠时形成的多边形和线段为例,最大倾斜角度为 6.5° ,在此情况下,进行花朵单独倾斜以及花朵、喷嘴同向倾斜试验。首先设置不同倾斜角度的花朵,计算出其理论授粉时间,具体试验参数设计如表 3、表 4 所示,试验结果如图 11 所示。由试验结果可知,当花朵及喷嘴同时倾斜最大角度时,由于喷嘴与花蕊之间倾斜角过大,雾滴在后续高流速喷雾的推动下不能较好的附着在花蕊上,此时雾滴逃逸率最大,达到 27%。

表 3 花朵不同倾斜角度下的理论授粉时间		
花朵编号	花朵倾斜角度/ $(^{\circ})$	理论授粉时间/s
1	5.0	3.51
2	10.0	3.52
3	15.0	3.54
4	20.0	3.57
5	25.0	3.62
6	30.0	3.68

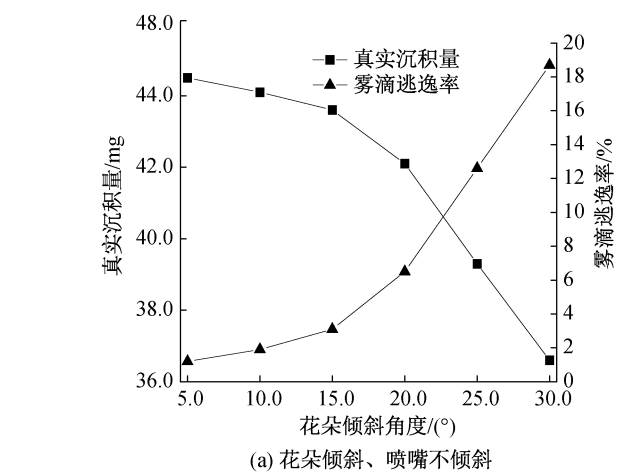


表 4 花朵及喷嘴不同倾斜角度下的理论授粉时间			
花朵编号	花朵倾斜角度 $X_1/(^{\circ})$	喷嘴倾斜角度 $X_2/(^{\circ})$	理论授粉 时间/s
1	12.0	6.0	3.56
2	16.0	5.0	3.58
3	21.0	6.0	3.64
4	25.0	4.0	3.66
5	30.0	5.0	3.75
6	30.0	6.5	3.78

2.4 倾斜角度与授粉补偿时间的关系

由于喷雾授粉过程中存在雾滴逃逸,因此需要对理论授粉时间进行补偿。试验发现,当倾斜角度 $<15.0^{\circ}$ 时,雾滴沉积量 >42.9 mg,满足授粉需求;当倾斜角 $>15.0^{\circ}$ 时,随着雾滴逃逸率的增大,雾滴沉积量逐渐不能满足充分授粉要求。因此分别对 $15.0^{\circ}\sim20.0^{\circ}$ 、 $20.0^{\circ}\sim25.0^{\circ}$ 、 $25.0^{\circ}\sim30.0^{\circ}$ 、 $30.0^{\circ}\sim36.5^{\circ}$ 这 4 种情况下的倾斜角度进行最大授粉补偿时间计算,确保在相应倾斜角下花蕊区能够得到充分授粉。分别对每个角度范围内的最大补偿时间进

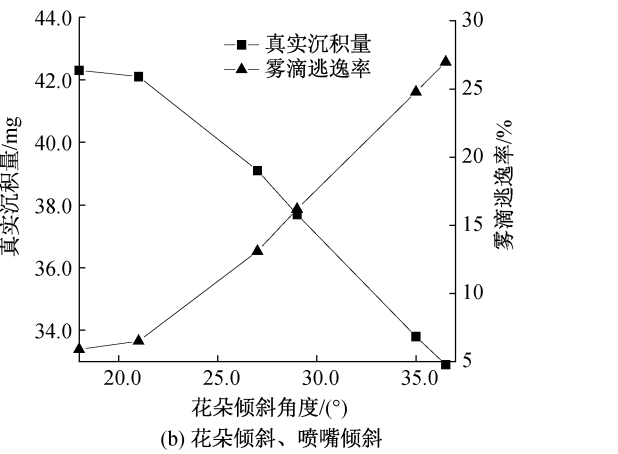


图 11 不同倾斜角度下雾滴沉积量与雾滴逃逸率结果曲线

行计算,授粉补偿时间 t_2 的计算公式为:

$$t_2 = \frac{45 \times [1 - \cos\alpha_3 \times \cos\beta_3 \times (1 - d)]}{40 \times \cos\alpha_3 \times \cos\beta_3 \times (1 - d)} \quad (6)$$

其中: α_3 和 β_3 分别为花朵、喷嘴在 X 方向和 Y 方向总倾斜角度, $(^{\circ})$; d 为 α_3 和 β_3 中取最大角度时的雾滴逃逸率。

根据计算可得,分别对 $15.0^{\circ}\sim20.0^{\circ}$ 、 $20.0^{\circ}\sim25.0^{\circ}$ 、 $25.0^{\circ}\sim30.0^{\circ}$ 、 $30.0^{\circ}\sim36.5^{\circ}$ 补偿授粉时间 0.09、0.20、0.35、0.65 s,以确保每朵花在极限状态下授粉量在 ± 2 mg 的误差内满足授粉需求。因此,最终授粉时间 t 的计算公式为:

$$t = T + t_1 + t_2 \quad (7)$$

2.5 精量对靶授粉验证性试验

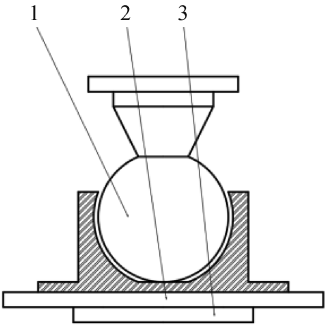
为进一步研究花朵在不同倾斜角度下的精量对

靶充分授粉成功率,本试验搭设授粉架,通过倾斜角度模拟支架模拟花朵倾斜情况,如图 12 所示,用直径 9 cm 大小的亚克力板模拟花朵区,用直径大小为 3 cm 的雾滴采集卡模拟花蕊区。分别通过倾斜角度模拟支架模拟 2、3、4 朵花重叠时的情况,如图 13 所示。

根据花朵和喷嘴的倾斜角度,计算出最终授粉时间,测量雾滴沉积量,每种重叠情况设置 3 组数据,雾滴沉积量 >42.9 mg 时即认为授粉成功,授粉成功率 Z 的计算公式为:

$$Z = \frac{h}{H} \quad (8)$$

其中: h 为充分授粉的花朵数目; H 为授粉花朵总数目。



1. 倾斜角度模拟支架;2. 亚克力板;3. 雾滴采集卡

图 12 模拟花朵示意图

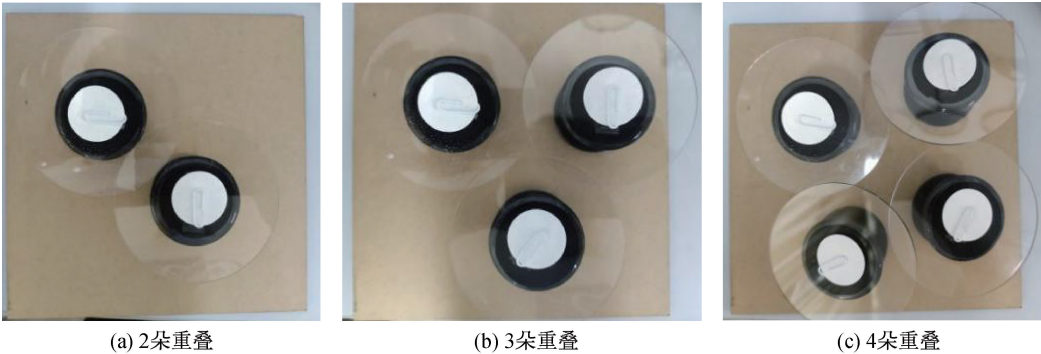


图 13 模拟花朵重叠实物图

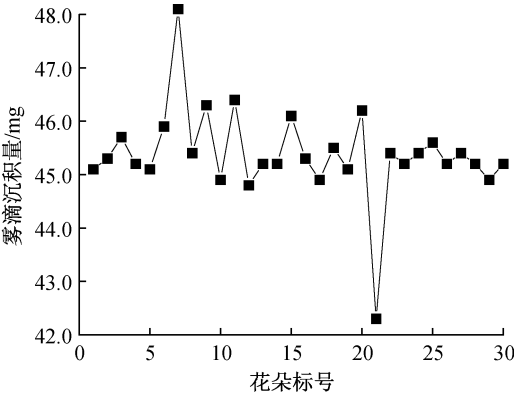


图 14 多种重叠情况下花朵平均雾滴沉积量曲线

之内。对比普通竖直喷雾授粉,精量对靶授粉方式通过对花朵倾斜角度的寻找以及对多朵花重叠情况下制定相应授粉策略,精确的找到了花朵的角度,对花朵进行充分授粉,充分授粉花朵数目为 29 朵,授粉成功率达到 96.7%,平均每朵模拟花朵所需最终授粉时间 3.67 s,消耗花粉液约 3 mL,30 朵模拟花朵消耗花粉液 90 mL,约消耗花粉 0.09 g。

将精量对靶授粉和电动喷雾器、手动喷雾器和人工点粉三种授粉方式^[13]进行比较。具体数据如表 5 所示。表 5 中的试验数据表明,在花粉消耗量上,精量对靶方式授粉 30 朵模拟花朵所需花粉 0.09 g,比手工点授的花粉消耗量略低,比电动喷雾和手动喷雾节约授粉量 70%和 55%;在授粉效率

对单朵花、2 朵重叠、3 朵重叠、4 朵重叠这 4 种情况分别进行模拟试验,每组试验重复进行 3 次,选用共 30 朵模拟花朵进行试验,对试验结果进行统计,试验结果如图 14 所示。

由本试验 4 种重叠情况的雾滴沉积量平均值可知,模拟花蕊区实际雾滴沉积量基本与理论计算量保持一致,由于授粉补偿时间均是在对应范围角度内以最大雾滴逃逸率计算得出,因此真实雾滴沉积量稳定在 45.0 mg 左右,有 2 朵花雾滴沉积量出现突变,考虑到测量误差以及高温等原因,在合理范围

表 5 不同授粉方式花粉量消耗对比

授粉方式	30 朵花花粉消耗量/g
精量对靶	0.09
手工点授	0.10
电动喷雾器	0.30
手动喷雾器	0.20

上,实现精确化的精量对靶授粉需要通过机械装置对授粉角度进行一定时间的调整,从而会导致整个授粉过程时间变长,虽然电动喷雾器和手动喷雾器速度快,但这两种方式喷雾角度分散,雾滴沉积量不固定,难以达到充分授粉的效果,授粉成功率远低于本研究。本研究中的精量对靶授粉方式,在节约花粉液、提高授粉效率以及提高充分授粉率上优势突出,可为高效自动化精量授粉提供技术支持。

3 结 论

本研究提出了一种基于角度调控的精量对靶授粉方式,分析了气压、液压、喷雾距离和倾斜角度对花蕊区雾滴沉积量的影响,设计了授粉角度调控方案、控制参数试验方案及参数测试方法,在得出无倾斜角度下授粉控制参数的基础上,分析了倾斜角度对雾滴沉积区域面积、理论授粉时间、雾滴逃逸率以及授粉补偿时间的影响,在理论计算的前提下,对不同情况下的模拟花朵进行喷雾试验,得出的主要结

论如下:

a)在授粉距离 40 cm、授粉气压 0.150 MPa、授粉液压 0.070 MPa、授粉基础时间 3.50 s 这 4 个基本授粉参数下,精量对靶授粉可满足竖直向下无倾斜花朵的充分授粉要求。

b)随着倾斜角度的增加,雾滴逃逸率不断增大,最大达 27%。倾斜角度小于 15.0°时满足充分授粉要求;倾斜角度大于 15.0°时,由于雾滴逃逸率过大,对 15.0°~20.0°、20.0°~25.0°、25.0°~30.0°、30.0°~36.5°分别补偿授粉时间 0.09、0.20、0.35 s 和 0.65 s,可满足充分授粉需求。

c)模拟花朵重叠和倾斜情况并进行精量对靶授粉验证性试验,结果表明,模拟花蕊区平均雾滴沉积量稳定在 43.0~46.5 mg,单朵花平均授粉时间 3.67 s,消耗花粉液 3 mL,授粉成功率达 96.7%,比电动喷雾和手动喷雾节约花粉量 70%和 55%。

参考文献:

[1] 贾爱平,王飞,姚春潮,等. 猕猴桃种间及种内杂交亲和性研究[J]. 西北植物学报, 2010, 30(9): 1809-1814.

[2] Chechetka S A, Yu Y, Tange M, et al. Materially engineered artificial pollinators[J]. Chem, 2017, 2(2): 224-239.

[3] 管良明. 日本的猕猴桃人工授粉技术[J]. 落叶果树, 2002, 34(5): 60.

[4] 白雪. 猕猴桃高效液体授粉技术研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018: 3-6.

[5] 刘丽,张洋,方金豹. 不同机械授粉方式对猕猴桃坐果率和果实品质的影响[J]. 河南农业科学, 2017, 46(7): 97-100.

[6] 陈建业,李占红,宁玉霞. 猕猴桃花粉悬浊液省力化制备及其生物效应[J]. 果树学报, 2014, 31(6): 1105-1109.

[7] 赵学观,郑申玉,易克传,等. 考虑喷雾高度的大田蔬菜对靶喷雾系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 1-11.

[8] 张慧春,郑加强,周宏平,等. 农药喷施过程中雾滴沉积分布与脱靶飘移研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 114-122.

[9] 张瑞瑞,张真,徐刚,等. 喷雾助剂类型及浓度对喷头雾化效果影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 36-43.

[10] 代祥,肖静,徐幼林,等. 动态下电磁阀控对靶喷雾流量特性及控制方法[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(2): 476-483.

[11] 贾卫东,刘欢,薛新宇,等. 对靶喷雾机喷雾参数对雾滴沉积分布的影响试验[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(12): 53-56.

[12] 常瑞,曲旭鹏,石复习. 基于雾化粒径调控的猕猴桃花粉粒靶向沉积量研究[J/OL]. 西北农林科技大学学报(自然科学版). (2022-10-11)[2022-11-24]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?doi=10.13207/j.cnki.jnwafu.2023.01.015>.

[13] 石复习,蒋宗谨,马驰,等. 双流体喷嘴靶向授粉沉积量控制参数研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 115-124.

[14] 石宝宝,石复习,陈军,等. 双流体喷嘴雾化控制特性研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(1): 174-179.

[15] 郭昊明. 喷雾式猕猴桃授粉末端执行器的研制[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016: 45-48.

[16] 赵东,蔡冬梅. 三种吸附液滴逃逸形式及其气流临界速度[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2002, 16(2): 189-190.

(责任编辑:康 锋)