

双流体喷嘴靶向授粉沉积量控制参数研究

石复习¹ 蒋宗谨¹ 马 驰¹ 朱 悦¹ 刘占德²

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学园艺学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 猕猴桃喷雾授粉作业时,花蕊区花粉液沉积量是保证猕猴桃产量和品质的关键。构建了双流式喷雾授粉试验装置,分别采用沉积量测试和图像灰度分析的方法,分析了气压、液流量和喷雾距离对授粉沉积质量和径向分布特征的影响,确定了双流体喷嘴授粉的对靶喷施控制参数,并通过棚架式猕猴桃田间授粉试验,验证了采用沉积量下限参数作业时,双流式授粉方式对坐果率、单果质量和畸形率的改善效果。试验研究表明:在盛花期(单花花冠完全展开时)采用质量分数为0.1%的花粉液,单朵猕猴桃雌花花蕊区最少沉积42.9 mg花粉液,才可保证猕猴桃充分授粉;双流体喷嘴采用气压0.20 MPa、花粉液流量0.125 L/min、喷雾脉冲时长0.1 s、喷雾距离35 cm等作业参数时,可提高花粉液在花朵柱头区的有效沉积,改善对靶授粉作业品质。田间试验表明:采用双流体喷嘴喷雾授粉的坐果率达86.7%,平均果实质量达91.5 g,优于电动喷雾器和手动喷雾器授粉方式。

关键词: 猕猴桃; 双流体喷嘴; 对靶授粉; 雾滴沉积; 参数优化

中图分类号: S224.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)12-0115-10

Controlled Parameters of Targeted Pollination Deposition by Air – Liquid Nozzle

SHI Fuxi¹ JIANG Zongjin¹ MA Chi¹ ZHU Yue¹ LIU Zhande²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: During the kiwifruit flower pollination, depositing sufficient pollen on the kiwifruit flower stigma is the key to ensure the yield and quality of kiwifruit. To improve kiwifruit pollination quality and reduce assumption of expensive pollen, kiwifruit flower pollination based on air – liquid nozzle spraying was studied. By means of an air – liquid pollination device, using the methods of droplets sedimentation weighing and image gray-scale analysis, the effects of spray pressure, pollen suspension flow rate and spraying distance on the spray quality and distribution characteristics of pollination suspension were investigated to get optimum control parameters of spraying air pressure, pollen suspension flow rate and distance between nozzle and kiwifruit flower. Moreover, these control parameters were validated through kiwifruit flower pollination experiment on the scaffolding kiwifruit orchard. The test result showed that the air – liquid spray pollination method under these spray parameters can effectively improve the kiwifruit setting rate, the single kiwifruit weight and reduce kiwifruit deformity rate. The experiments showed that when applying the pollen liquid with mass fraction of 0.1% at petal fully opening stage, a single kiwifruit flower needed at least 42.9 mg effective deposition of pollen liquid in the stigma area to pollinate all stigmas. Under the air pressure of 0.20 MPa, the pollen liquid flow of 0.125 L/min, the spray pulse duration of 0.1 s and the spray distance of 35 cm, the air – liquid spraying pollination can notably improve the effective deposition of pollen liquid on the stigma and the quality of the pollination. Pollination test on kiwifruit orchard showed that the kiwifruit setting rate and average kiwifruit weight as a pollination result of the air – liquid spraying pollination was 86.7% and 91.5 g respectively, which was 13.4 percent points and 8.0 g higher than that of the electric sprayer, respectively.

Key words: kiwifruit; air – liquid nozzle; targeted pollination; droplet deposition; parameter optimization

收稿日期: 2019-06-17 修回日期: 2019-10-01
基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2018NY-119)
作者简介: 石复习(1976—),男,副教授,主要从事果园智能装备研究,E-mail: shifuxi2012@126.com
通信作者: 刘占德(1965—),男,教授,主要从事果树种质资源与育种研究,E-mail: dezhanliu@vip.sina.com

0 引言

猕猴桃为雌雄异株藤本植物,人工辅助授粉是提高猕猴桃产量的重要措施^[1]。传统手工授粉方法存在花粉消耗大、授粉均匀性差、劳动强度高和效率低等问题,且难以满足规模化生产需求^[2-4]。压力式液体喷雾授粉可提高作业效率,但因雾化质量差、花粉液的柱头沉积量不足、授粉不充分,而影响猕猴桃的产量和品质。

双流体喷嘴可使液相在混合腔内受到气流剪切、机械碰撞和孔口膨胀等强烈的相互作用,以较低的喷射水压和气压获得良好的雾化效果,并保持稳定的雾化粒径分布和喷雾穿透性^[5-6],有助于花粉液的定向喷授和定量沉积。相较于压力式喷授方式,双流式授粉技术液流可独立控制,具有导向性强、雾化分布稳定、雾滴粒径均匀性好等特点,可有效降低花粉消耗量^[7]。

新西兰 Kiwi Pollen 公司的外混式双流体喷雾授粉机^[8],作业面积可达 1.5 hm²/h,但由于该机采用连续喷雾的作用方式授粉,导致花粉利用率低。相比外混式喷嘴,内混式双流式喷头具有雾锥角小、雾滴定向沉积可控性强的优点^[9],可有效提高柱头花粉液沉积率。蒋仲安等^[10]的试验研究表明,内混式双流体喷嘴在水压一定时,气压增加会使水流量减小,进而使雾化粒径减小。王宇等^[11]研究烟草加料过程中双流体喷嘴雾化粒径的分布特性,发现随着气液比增加,雾滴粒径减小,粒径均匀性指数变大,因此可通过调节双流式喷雾的气体压力改善雾化粒径分布。李雪等^[6]研究发现,常温下双流体烟雾系统,雾滴沉积量在作物冠层间变异系数小、雾滴均匀性好,对喷雾距离敏感度低,能更好地满足猕猴桃花朵生长高度对喷雾距离的要求。

双流式喷雾系统雾化对象为液体,气体有辅助雾化和液滴输送的双重作用,可在较低的气压和液流条件下维持稳定的雾化粒径,降低雾化能耗^[12-15]。授粉作业过程中调整喷射液流,不影响雾化效果和气流输送效果,可有效节约花粉液。因此,采用具有近距离、微量、低气流量作业特征的双流体喷嘴进行猕猴桃授粉,是湿式喷雾授粉系统的最佳选择。

猕猴桃寻花对靶授粉是提高花粉利用率和作业效果的先进技术手段,本研究从单花的最低授粉量确定入手,将花蕊区花粉液沉积量及其分布规律作为提高作业质量优化的依据,通过研究液流量、喷射气压和喷雾距离对花粉液沉积效果的影响,确定双流体喷嘴对靶授粉的喷施控制参数,并通过棚架式

猕猴桃果园授粉试验,验证该参数组合的有效性,为双流式雾化技术在猕猴桃对靶授粉作业中的应用提供技术支持。

1 试验材料与方法

1.1 理论授粉量计算

本研究针对西北农林科技大学眉县猕猴桃试验站海沃德猕猴桃树,其花冠直径为 5~7 cm,花蕊区直径 2~3 cm,朝下开花,花朵距离地面 160~190 cm,开花冠层厚度约 30 cm。在盛花期,即单花花冠完全展开时,雌花柱头充分暴露在空气中,雾滴不受花瓣遮挡易沉积于花蕊区,此时喷雾授粉成功率最高。

猕猴桃果实大小与花蕊区的花粉沉积量成正相关,增加柱头上的花粉液沉积,能提高猕猴桃果实产量^[16]。通常认为每 3~5 粒花粉粒可确保发育 1 粒种子^[17],猕猴桃果实种子数大于 800~1 000 粒可认为授粉充分^[4],因此,本研究采用花蕊获得花粉粒数量评价授粉效果,如表 1 所示,质量分数为 0.1% 的花粉液,其花粉粒浓度为 2.78×10⁵粒/mL^[18]。

表 1 充分授粉条件的花粉粒数需求研究成果

Tab.1 Result of pollen grain amount requirement for sufficient pollination

文献序号	发表时间	充分授粉花粉粒需求/(粒·朵 ⁻¹)	花粉液质量分数/%
[19]	2018 年	≥3 000	0.1
[20]	2016 年	≥10 000	0.1
[21]	2004 年	≥12 000	0.1
[22]	1988 年	≥6 000	0.1

由表 1 可知,单朵花充分授粉需花粉 3 000~12 000 粒,取上限 12 000 粒,经计算可得,在盛花期采用质量分数为 0.1% 的花粉液,单朵猕猴桃花柱头最少需沉积 42.9 mg 花粉液,可确保充分授粉。

1.2 雾滴沉积量测试装置

采用圆锥形双流体喷嘴(D1/4-SUC13-SS 和 D1/4-SUC1A-SS 型,东莞市长原喷雾技术有限公司)进行雾滴谱宽度^[23]预测试,测试条件为气压 0.2 MPa、液流量 0.125 L/min、喷嘴孔径 1 mm,经测试 D1/4-SUC1A-SS 型和 D1/4-SUC13-SS 型喷嘴的雾滴谱宽度平均值分别为 1.9 和 1.4,表明 D1/4-SUC13-SS 型喷嘴雾滴谱宽度较小,雾滴粒径均匀性更高^[24]。故本研究选用 D1/4-SUC13-SS 型喷嘴,其结构如图 1 所示。

如图 2 所示,双流体喷嘴沉积试验装置主要由气路、液路和控制部分等组成。气路包括空气压缩机、压力调节阀、气压表和安全阀,能准确控制喷嘴的气压。液路由隔膜泵、节流阀、流量计构成,能实

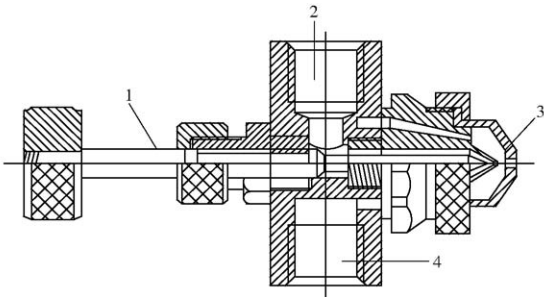


图 1 D1/4-SUC13-SS 型双流体喷嘴结构简图

Fig.1 Structure diagram of D1/4-SUC13-SS air-liquid nozzle

1. 流量调节阀针 2. 进口口 3. 空气帽 4. 进气口

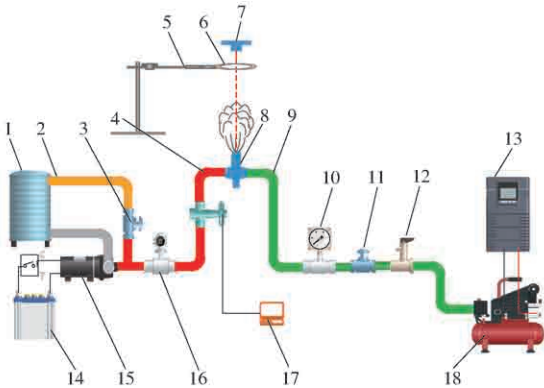


图 2 双流体喷嘴沉积试验装置示意图

Fig.2 Scheme of air-liquid spraying deposition test device

1. 药箱 2. 回流管 3. 节流阀 4. 液管 5. 试管夹 6. 采集卡
7. 激光定位器 8. 双流体喷嘴 9. 气管 10. 气压表 11. 调压
阀 12. 安全阀 13. 220 V 交流电源 14. 蓄电池 15. 隔膜泵
16. 流量计 17. Arduino UNO 单片机 18. 空气压缩机

现喷嘴流量的有效调节与控制,液路的电磁阀有较高的响应速度,可准确控制喷雾脉冲。

通过 Arduino UNO 单片机精确控制电磁阀脉冲时长,控制液路通断,实现对液流的有效控制。试管夹将雾滴采集卡固定于采样点,激光定位器安装于双流体喷嘴正上方 100 cm 处,以精确对中采样点位置。雾滴沉积量试验现场如图 3 所示。

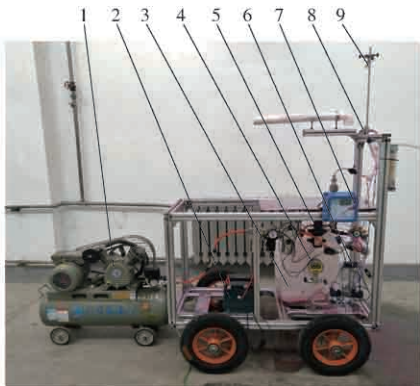


图 3 双流体喷雾沉积试验现场

Fig.3 Scene of air-liquid pollination spraying test device

1. 空气压缩机 2. 蓄电池 3. 药箱 4. 气压表 5 隔膜泵
6. Arduino UNO 单片机 7. 液体流量计 8. 双流体喷嘴 9. 雾滴
采集卡

根据前期试验研究的结果^[9],气压调节范围为 0~0.4 MPa,液路流量调节范围为 0~0.35 L/min,相应的传感器和检测装置据此选型。测试装置的主要部件性能参数如表 2 所示。

表 2 双流式喷雾控制系统主要参数

Tab.2 Main parameters of spray control system

试验仪器	参数	数值
V-0.6/8 型空气压	额定压力/MPa	0.8
缩机	容积流量/(L·min ⁻¹)	128
OPEC-LZAR1 型金	流量范围/(L·min ⁻¹)	0.1~1.0
属管浮子流量计	测量精度/%	±1.5
ZC-530 型隔膜泵	流量/(L·min ⁻¹)	1.5
	电压/V	12(DC)
智能数字化压力表	压力范围/MPa	0~1
	测量精度/%	±0.4
SUC13 型双流体雾化	喷嘴孔径/mm	1
喷嘴	喷雾锥角/(°)	16
kamoer 电磁阀	电压/V	24(DC)
	响应时间/ms	25

1.3 测试方法

1.3.1 雾滴沉积量测试方法

为有效地采集雾滴在花蕊区的雾滴沉积数据,试验以清水为介质,用直径为 3 cm 的 Sinovege 型雾滴采集卡(先正达生物科技有限公司)替代花朵的花蕊区,收集雾滴沉积液,采用精度为 1 mg 的电子天平(AL204 型,梅特勒仪器有限公司)称量采集卡上的沉积液质量,喷雾前后采集卡质量差值为花蕊区雾滴沉积量 m ,每组参数重复测量 3 次沉积量,取平均值。

1.3.2 单花柱头极限附着量测试方法

于 2018 年 5 月 10 日在西北农林科技大学眉县猕猴桃试验站摘取 80 朵花冠直径为 5~7 cm 的猕猴桃雌花,并保存于 4℃ 冷藏柜。试验前 30 min 将雌蕊与花托分离,把雌蕊固定于喷嘴正上方,保持柱头朝下。以清水为雾化介质,对雌蕊持续喷雾 2 min,分别用电子天平测量喷雾前后雌蕊质量,其质量差为单花雌蕊的液滴极限附着量 $m_{\max}$ 。试验现场温度 21℃、风速 1.6 m/s、空气湿度 49%。

1.3.3 喷雾场雾滴粒径测量方法

用 DP-02 型激光粒度仪(欧美克仪器公司)测量雾滴体积中值直径(D_{v50})。以清水为喷雾介质,测量气压 0.15~0.30 MPa 条件下,雾滴沉积位置的雾滴粒径分布,测量点选取如图 4 所示。每个测点持续喷雾 30 s,分别测量 0~5 s 和 25~30 s 时段的雾滴粒径,对比分析喷雾初始期和雾化稳定期的雾滴粒径差异。每个测点重复 3 次试验,取平均值。

根据文献[23],雾滴谱宽度 S 计算公式为

$$S = (D_{v90} - D_{v10}) / D_{v50} \tag{1}$$

式中 D_{v90} ——90% 累积体积直径
 D_{v10} ——10% 累积体积直径
 D_{v50} ——50% 累积体积直径

雾滴谱宽度衡量喷雾系统所雾化雾滴的均匀性,雾滴谱宽度越小,表明喷雾系统雾化雾滴的均匀性越好^[24]。

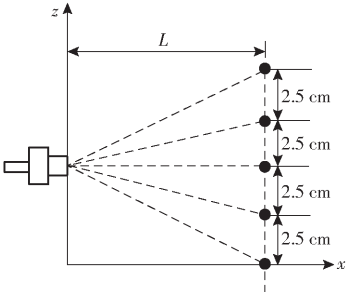


图 4 雾滴粒径测试点布置图

Fig. 4 Schematic of measurement points arrangement

雾滴粒径测量系统如图 5 所示,测量激光沿 y 方向垂直穿过雾场,喷嘴轴线距激光接收端面 30 cm。测试距离 L 取田间授粉作业的最佳喷雾距离,该距离由 2.1 节分析得出。试验时室内温度为 26℃、湿度 60%。

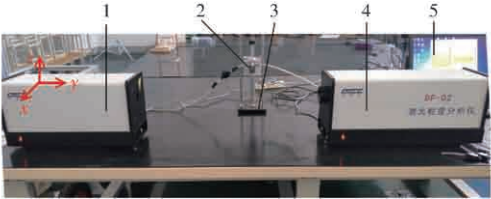


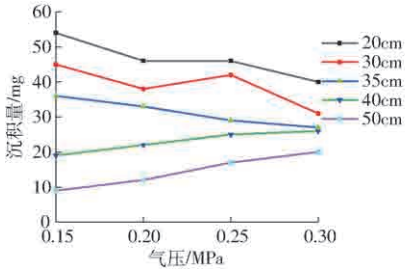
图 5 雾滴粒径测量系统

Fig. 5 Measurement system of droplet diameter

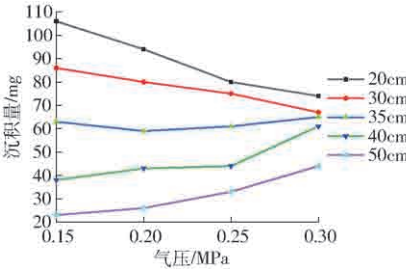
1. 激光发射端 2. 双流体喷嘴 3. 喷嘴支架 4. 激光接收端
5. 数据显示器

1.3.4 雾滴覆盖率测定方法

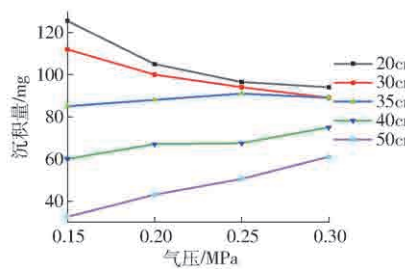
使用六六山下植保科技公司 3 cm × 11 cm 水敏纸采集雾滴分布信息,采样后将水敏纸晾干,用扫描仪(柯尼卡美能达 C226 型,分辨率为 600 像素 × 600 像素)采集水敏纸雾滴印痕图像,在水敏纸图像上从左至右依次截取 3 cm × 1 cm 的矩形区域,通过 ImageJ 软件面积测量功能分析矩形区域内的雾滴覆



(a) 液流量为0.10 L/min



(b) 液流量为0.15 L/min



(c) 液流量为0.20 L/min

图 6 不同液流量和喷雾距离的雾滴沉积量变化曲线

Fig. 6 Changing curves of droplet deposition at different liquid flow rates and spray distances

盖率 a ^[25]。

1.4 雾化控制参数试验方案

棚架式猕猴桃园花朵层厚差约 30 cm,故喷嘴至花的距离设定为 20 ~ 50 cm。郭昊明^[26]采用压力式喷嘴,最佳授粉液流量为 0.05 L/min,石宝宝等^[9]获得猕猴桃园双流体喷嘴最佳液流量 0.182 L/min、气压 0.25 MPa,根据以上研究和预试验,本试验确定液流量 0.10 ~ 0.20 L/min,气压 0 ~ 0.30 MPa。参见目前自走式果园喷雾机^[27]的最低行驶速度 0.5 m/s,根据花朵的直径 5 cm,确定单朵雌花对靶授粉时长为 0.1 s,故设定喷雾脉冲时长为 0.1 s。因此,确定总体的测试方案如表 3 所示。

表 3 测试试验方案

Tab. 3 Scheme for testing experiment

水平	试验因素		
	喷雾距离/cm	液流量/(L·min ⁻¹)	喷雾气压/MPa
1	20	0.10	0
2	30	0.125	0.05
3	35	0.15	0.10
4	40	0.175	0.15
5	50	0.20	0.20
6			0.25
7			0.30

2 试验结果与分析

雾滴在花蕊区域的沉积量是判定双流式雾化授粉作业效果的核心指标。通过分析喷雾距离、气压、液流量,以及花蕊区域雾化粒径分布、雾滴密度径向分布,探讨试验采用的双流体喷嘴的区域沉积特性,并通过试验确定最佳花粉液沉积量的雾化控制参数。

2.1 喷雾距离对花粉液沉积的影响

喷雾距离决定雾化充分程度、雾锥内雾滴的粒径分布和中心区域雾滴数量分布,因此其成为影响花蕊区花粉液沉积量的重要控制参数。依据表 3,雾滴沉积量随气压的变化趋势曲线如图 6 所示。

在不同喷雾距离和液流量条件下,沉积量随气压增加而逐渐收窄,表明随着气压增加,双流体喷嘴

出口的环状液膜厚度减小,雾化效果提升,雾滴沉积量趋于稳定,因此喷雾距离 20 ~ 50 cm 范围内,较高的气压对沉积量的影响弱化。

其次,3 种液流量条件下,喷雾距离小于 35 cm 时雾滴沉积量随气压增大而减小,喷雾距离大于 35 cm 时雾滴沉积量随气压增大而增加,而在 35 cm 处沉积量在流量、气压变化时均保持基本稳定。

以上数据表明,喷雾距离 35 cm 处,气压 0.15 ~ 0.30 MPa 时,液流量 0.10、0.15、0.20 L/min 时雾滴沉积量为(31 ± 5) mg、(65 ± 5) mg、(90 ± 5) mg,且基本保持稳定,此时花蕊区的喷雾沉积量主要受液流量的影响,雾滴沉积量对气压变化不敏感,可通过液流量调节的方式,准确控制雾滴沉积量。因此,从喷粉量控制准确性和花朵授粉量稳定性角度出发,选喷雾距离 35 cm 为授粉作业的最佳喷雾距离。

2.2 气压对雾滴极限附着量的影响

试验测量喷雾距离 35 cm 处的单花柱头区的液滴极限附着量。如图 7 所示,在不同流量下雾滴极限沉积量变化趋势相同,流量变化对极限沉积量影响较小。随着气压增大,柱头上的雾滴极限附着量先增大后减小,在 0.05 MPa 气压时达到最大值 100.5 mg,在气压为 0.30 MPa、液流量 0.10 L/min 时,最小极限附着量约为 77.0 mg。

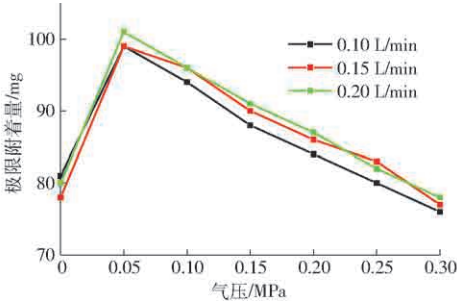


图 7 气压与雾滴极限附着量关系曲线
Fig. 7 Variation curves of pollen droplet deposition with air pressure

试验发现,无气压时,雾锥角为零,喷雾液为柱状,直射到柱头上,液流动能大,与柱头碰撞后发生飞溅,液体的柱头附着性能降低^[28-29],当气压为 0.05 MPa 时,液柱雾化为液滴,液体附着能力增强。随着雾锥角增加,花粉液极限附着量降低,原因是花蕊区内雾滴密度下降,柱头上可粘附的雾滴下降。此外,雌蕊表面的空气流速增加,气流对雌蕊的作用力增强,柱头摇摆的频率增加,导致雾滴极限附着量降低。因此,设定极限附着量小于 77.0 mg,在 0 ~ 0.30 MPa 气压下,不会出现喷施过量而导致的雾滴滴落。

2.3 液流量对雾滴沉积量的影响

结合 2.2 节试验结果,在喷雾距离 35 cm、喷雾脉冲时长 0.1 s 和气压 0.15 ~ 0.30 MPa 工况下,液流量对雾滴沉积量影响如图 8 所示。

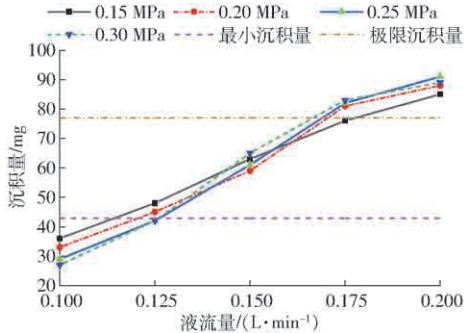


图 8 液流量与雾滴沉积量关系曲线
Fig. 8 Variation curves of pollen droplet deposition with liquid flow rate

由图 8 可知,雾滴在采集卡上的沉积量对气压变化不敏感,但随液流量增大而增加。在流量 0.125 L/min、气压 0.15 ~ 0.30 MPa 内,所对应的雾滴沉积量均大于 42.9 mg,能满足充分授粉的最低要求。当液流量大于 0.175 L/min 时,曲线斜率明显减小,沉积量增长率降低,此时雾滴沉积量大于柱头极限附着量,开始出现雾滴滴落,花粉利用率降低。因此,选定 0.125 L/min 为花粉液最佳控制流量,可在确保授粉质量的同时,使花粉利用率最高。

2.4 气压对雾化粒径径向分布的影响

图 9 为在喷雾距离 35 cm、液流量 0.125 L/min

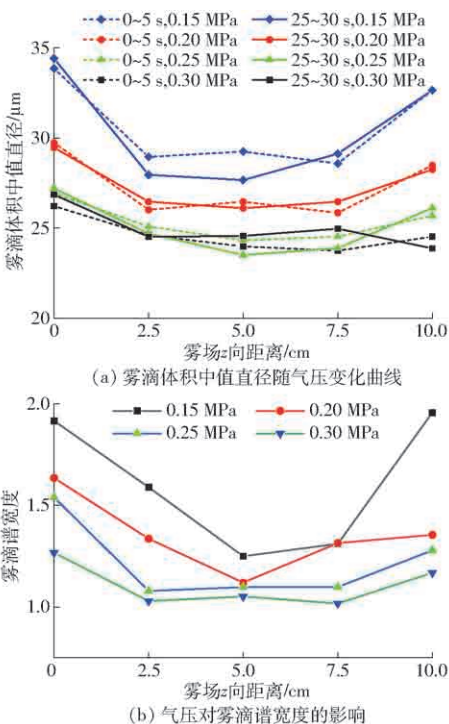


图 9 气压对雾滴体积中值直径和雾滴谱宽度的影响
Fig. 9 Influence of air pressure on VMD and droplet size spectrum

的工况下,花蕊区雾场雾滴粒径和雾滴谱宽度随气压变化的分布规律。

由图 9a 可知,随着气压增大,雾滴粒径呈减小趋势。总体上,0~5 s 和 25~30 s 雾滴粒径的变化趋势基本相同。其次,在花朵径向(同图 4 中 z 轴方向)上雾滴的 D_{v50} 分布呈中心小周边大,沿喷嘴轴线位置雾滴粒径最小。此外,气压大于 0.15 MPa 时,50% 的雾滴粒径均小于 $35\text{ }\mu\text{m}$ ^[30],表明在喷雾距离 35 cm、气压大于 0.15 MPa 时,本研究所用喷嘴的雾滴已充分雾化。

如图 9b 所示,在喷雾距离 35 cm、0~5 s 喷雾时段、气压 0.15~0.30 MPa 时,雾场中心的雾滴谱宽度为 1.0~2.0;随着气压增高,雾滴谱宽度减小,雾滴的雾化均匀性提高。同一气压下,雾滴谱宽度基本呈对称分布,雾场中心的雾滴谱宽度最小,雾化粒径更均匀。根据标准 MH/T 1002—2016^[23],低容量喷雾(每公顷喷液量大于 5 L 但小于 30 L 的喷洒作业)的雾滴谱宽度小于 2 即可满雾滴谱宽度指标要求。

表 4 0~5 s 和 25~30 s 时段的雾滴粒径差绝对值

Tab.4 Absolute value of droplet diameter difference at 0~5 s and 25~30 s spray stage													μm
z/cm	气压 0.15 MPa			气压 0.2 MPa			气压 0.25 MPa			气压 0.3 MPa			
	ΔD_{v10}	ΔD_{v50}	ΔD_{v90}	ΔD_{v10}	ΔD_{v50}	ΔD_{v90}	ΔD_{v10}	ΔD_{v50}	ΔD_{v90}	ΔD_{v10}	ΔD_{v50}	ΔD_{v90}	
-5.0	3.32	0.56	4.03	0.27	0.27	2.37	4.38	0.27	0.38	0	0.63	0	
-2.5	0.89	1.00	7.76	0.10	0.45	0.59	1.13	0.39	0.92	0.83	0.09	0.28	
0	0.17	1.58	0.31	0.92	0.36	0.69	0.41	0.82	0.77	0.45	0.58	0.69	
2.5	0.29	0.54	0.62	0.46	0.62	0.57	0.14	0.64	0.35	0.11	1.22	0.90	
5.0	0.33	0	1.60	0.64	0.23	0.13	0.08	0.43	2.74	0.39	0.65	0.06	

2.5 气压对雾滴径向分布规律的影响

设喷雾距离 35 cm、液流量 0.125 L/min 和气压 0.15~0.30 MPa。通过将水敏纸采集的雾滴覆盖情况与雾滴沉积的径向分布对应的方法,间接分析花蕊区的雾滴沉积效果,结果如图 10 和图 11 所示。

液滴在水敏纸上的雾滴附着分布情况如图 10 所示。以花朵中心为轴线将水敏纸划分为花蕊区和花瓣区。在 0.15 MPa 气压时,雾锥角较小,雾滴过度集中于花蕊区,造成雾滴滴落,不利于授粉;在 0.20 MPa 气压时,雾化粒径大小适中、靶向性较好,使雾滴沉积在花蕊区,成为有效的授粉沉积液;在 0.30 MPa 气压时,雾锥角增大,雾滴分布在整张水敏纸上分布更为均匀,但花蕊区的雾滴沉积量减少,导致花粉利用率降低。这一现象是因为随着气压增加,气液质量比增加,气液两相流中气体的体积空隙率增大,加强了气相对液相的挤压作用,喷嘴出口处的膨胀能增加,使得雾滴沿径向外侧发散^[33]。

图 11 为不同喷射气压下雾滴覆盖率沿花朵径

表 4 中 ΔD_{v10} 、 ΔD_{v50} 、 ΔD_{v90} 分别表示 0~5 s 和 25~30 s 时段雾滴 D_{v10} 、 D_{v50} 、 D_{v90} 之差的绝对值,在气压 0.15~0.3 MPa 范围内 0~5 s 和 25~30 s 喷雾时段雾滴的 D_{v50} 之差的绝对值最大为 $1.58\text{ }\mu\text{m}$ 、最小为 0,表明 0~5 s 和 25~30 s 喷雾时段的雾化粒径差异较小,本试验所用喷嘴在喷雾初始阶段雾化粒径稳定,可保证雾滴在花蕊区的稳定沉积,提高授粉量控制的准确性。

此外,海沃德猕猴桃花粉粒呈椭球形^[31],其长轴和短轴平均尺寸分别为 25.7 、 $12.7\text{ }\mu\text{m}$ 。气压为 0.20 MPa 时,在 z 轴(图 4)2.5~7.5 cm 区域的雾滴 D_{v50} 约为 $26\text{ }\mu\text{m}$,雾滴大小与花粉粒相近,液滴可有效包裹花粉粒,提高花粉粒与柱头的黏附性,而且在一定范围内雾滴粒径越小,花粉粒“击中”柱头的概率越大,授粉成功率越高^[32]。当气压大于 0.20 MPa 时,雾滴粒径小于花粉粒,花粉液过度雾化会导致花粉机械损伤,故确定本研究的最佳气压为 0.20 MPa。

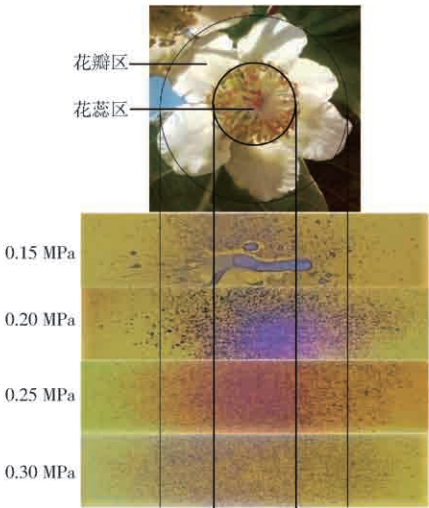


图 10 不同气压下液滴在水敏纸上的沉积状态

Fig.10 Evaluation of spray deposition status in coated paper

向分布的图形统计结果。雾滴覆盖率为 1 cm 图像宽度内雾滴沉积面积与该区域图片面积之比。0.20 MPa 气压时,花蕊区的雾滴覆盖率最高,中心点达 69.5%;气压 0.20~0.30 MPa 时,花蕊区雾滴

覆盖率随气压增加而减小,花瓣区雾滴覆盖率变化不大。

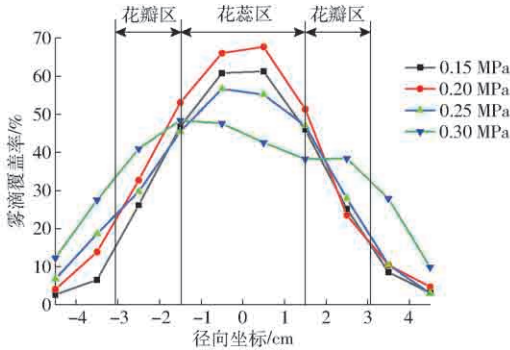


图 11 雾滴的径向分布规律

Fig. 11 Curves of droplets rational distribution under different air pressure

如图 12 所示,花蕊区覆盖面积和花瓣区覆盖面积分别为本区域所有沉积点的面积和,0.20 MPa 喷射气压时,花蕊区的雾滴覆盖面积和覆盖率达到极大值 7.14 cm²和 69.5%,为授粉雾滴的最佳沉积状态,花粉液利用率最高。

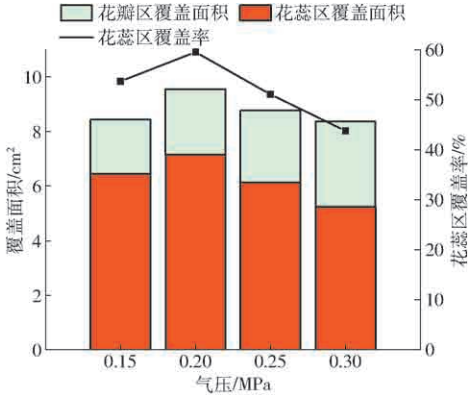


图 12 气压与花蕊区覆盖率及覆盖面积关系

Fig. 12 Relationship between air pressure and droplets coverage on stamen area

综合上述试验,确定双流式喷雾授粉作业参数为:最佳气压为 0.20 MPa,最佳液流量为 0.125 L/min,最佳喷雾距离为 35 cm,喷雾脉冲时长 0.1 s。因此,采用本研究所用的双流体喷嘴,在最佳喷雾参数条件下,进行猕猴桃授粉试验,用以验证最佳参数对猕猴桃授粉的改善效果。

3 最佳喷雾参数授粉效果试验

3.1 试验地点和材料

试验于 2018 年 5 月 12 日在西北农林科技大学眉县猕猴桃试验站进行,以 8 株树龄为 8 a、树体长势一致的棚架式海沃德猕猴桃为试验对象,猕猴桃树的行距 400 cm,株距 300 cm,花朵高度在 160 ~ 190 cm 之间。作业时气候条件:气温 20℃、西风风速 2.1 m/s、湿度 43%。

试验用花粉为宝鸡福罗瑞斯园艺有限公司的 lovepande 牌花粉(10 g 装,花粉活性 70%),冷藏保存温度 -18℃。花粉液配制:先将 250 g 蔗糖、0.5 g 硼酸加入量筒中,加纯净水,定容至 500 mL 后,放入微波炉加热 3 min,待蔗糖融化后,加入 9 500 mL 纯净水稀释,搅拌均匀配制成 10 L 悬浮液,冷却至常温后待用。使用前 10 min,加入 10 g 纯花粉,搅拌至花粉全部溶于悬浮液,配制成质量分数为 0.1% 的花粉液。

3.2 授粉试验方法

3.2.1 授粉作业方法

设置手工点授、电动喷雾器授粉、手动喷雾器授粉和双流式授粉共 4 种授粉方式,每种授粉方式取 2 棵树为授粉样本,用秒表分别记录 4 种授粉方法的授粉时长,试验现场如图 13 所示。



图 13 猕猴桃园授粉试验

Fig. 13 Kiwifruit orchard pollination experiment

双流体喷嘴授粉,花粉液流量 0.125 L/min、气压 0.20 MPa、喷雾距离 35 cm、喷雾脉冲时长 0.1 s。

3WBD - 16L 型电动喷雾器授粉,液流量为 1.5 L/min、喷雾压强 0.30 MPa,人工背负电动喷雾器对猕猴桃花朵授粉,喷头与花的距离为 35 cm。

手工点授,猕猴桃花粉与红色的石松子粉按 1:5 的比例,混合均匀后装入 LP-3 型针管接触式授粉器(针管直径 3 cm)内,对雌花逐朵沾授。

手动喷雾器授粉,采用 deepbang - 5L 型手压式喷雾器授粉,喷雾前手工打气 15 次,喷射压力为 0.30 MPa,花粉液流量 0.8 L/min,调节喷嘴雾化帽至花粉液雾化效果最佳的状态,喷雾器距离花朵 35 cm。压力低于 0.20 MPa,重新打气 15 次。

3.2.2 坐果率、果实质量和畸形率统计

授粉作业前,每棵树选取 30 个直径为 20 cm 的标记区,每个标记区内用标签纸标记 1 朵花,取样标记方法如下:如图 14a 所示,在纵向平面内,花朵高度在 160 ~ 190 cm 之间,采样区沿垂直于地面的方向分为 3 个 10 cm 高的采样层,每个采样层分布 10

个采样点。

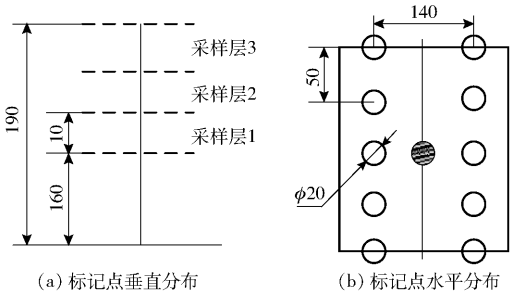


图 14 授粉试验采样点布置

Fig. 14 Scheme of sample point distribution

如图 14b 所示,在水平平面内,以树干构成的直线为分界线,在左、右两侧 70 cm 处,每隔 50 cm 设一个采样点。每种授粉方式以 2 棵树为一个处理,每个处理设置 3 个重复。数据统计方法采用文献[26]所述方法计算。

授粉作业 20 d 后,按取样标记分别统计 4 种授粉方式的坐果数,坐果率 f 为坐果数与标记数之比。在果实成熟期,每个采样层各摘 5 个标记果,用电子天平称量单果质量 m_g ,按授粉方式取单果质量平均值;然后用游标卡尺分别测量果纵径、横径和侧径,每个尺寸重复测量 3 次,并取平均值,按文献[26]所述方法计算猕猴桃果实的畸形率 r 。

3.3 授粉试验结果分析

将 4 种授粉方法的作业数据和试验统计结果进行统计,如表 5 所示,喷雾授粉消耗的花粉量由喷雾消耗的花粉液体积和花粉质量分数计算出,手工点授消耗的花粉量由消耗的花粉混合物和配制比例计算出。双流式喷嘴的坐果率分别比手动喷雾器和电动喷雾器高 6.7 个百分点和 13.4 个百分点;单果质量上,双流式授粉比手式喷雾器和电动喷雾器高 12.6 g 和 8.0 g。手工点授的坐果率比双流式授粉高 5.0 个百分点,平均单果质量高 11.1 g。

表 5 田间授粉效果对比试验结果

Tab.5 Comparison of pollination experiment result in kiwifruit orchard

授粉方法	60 朵花花粉	授粉 60 朵	坐果率/	畸形率/	单果
	消耗量/g	花耗时/min	%	%	质量/g
双流式喷雾	0.15	2.0	86.7	20.5	91.5
手工点授	0.20	5.0	91.7	21.1	102.6
电动喷雾器	0.60	0.5	73.3	19.5	83.5
手动喷雾器	0.40	1.5	80.0	18.5	78.9

授粉试验数据表明,双流式喷雾授粉的坐果率、果实畸形率和单果质量均优于电动喷雾和手动喷雾器作业,在气压 0.20 MPa、流量 0.125 L/min 和对靶

喷授的工况下,由双流式喷嘴喷出的雾滴主要沉积于花蕊区,提高了柱头上的花粉液附着量,同时因双流式雾化雾滴粒径小,花蕊区单位空间内的雾滴密度大,雾滴在空中悬浮的时间较长,提高了花粉在多个柱头上粘附的概率,从而获得了更好的授粉效果。

相比手工点授,双流式喷雾的授粉效果较差,但其花粉利用率最高。因喷雾授粉花粉浸泡在水中,导致部分花粉吸水膨胀破裂,花粉活性下降,而手工点授时花粉浓度高,单花授粉量大,易充分授粉,但消耗的花粉也稍高^[34]。

作业效率和成本方面,双流式喷雾对于 60 朵花授粉所需时间比手工点授少 3 min,作业效率提高了 60%,同时双流式喷雾授粉花粉消耗量减少了 25%。双流式喷雾授粉 60 朵花的花粉消耗量比电动喷雾器少 0.45 g,节约 60% 的花粉,但电动喷雾器和手动喷雾器的喷雾流量大、喷射范围广,其工作效率均高于双流式对靶授粉,综合考虑花粉消耗量和人力成本,双流式授粉的成本比电动喷雾器低约 14%。

综上所述,手动喷雾器和电动喷雾器授粉方法雾化质量差、受控性差,花粉液在花蕊区沉积少,花粉消耗最高,花粉利用率低。双流式对靶授粉技术,在授粉质量、花粉消耗和作业速度等方面具有综合优势。

4 结论

(1) 在盛花期,采用质量分数为 0.1% 的花粉液,雌花柱头区至少需要 42.9 mg 花粉液沉积,才能保证猕猴桃充分授粉。

(2) 揭示了猕猴桃花朵采用双流式靶向喷射时,花蕊区授粉沉积量的径向分布特征,试验选定的双流式喷嘴采用 0.20 MPa 气压时,猕猴桃花蕊区雾滴覆盖率最大,为 69.5%。

(3) 确定了双流式喷嘴对猕猴桃授粉的作业控制参数为:气压 0.20 MPa、喷雾脉冲时长 0.1 s、花粉液流量 0.125 L/min、喷雾距离 35 cm,此时花蕊区的靶向沉积量能满足充分授粉的最低要求。

(4) 采用以上控制参数进行田间授粉,双流式授粉的坐果率为 86.7%,比手动喷雾器授粉提高 6.7 个百分点,比电动喷雾器提高 13.4 个百分点,比手工点授低 5.0 个百分点;双流式授粉的平均单果质量为 91.5 g,比手动喷雾器授粉提高 12.6 g,比电动喷雾器提高 8.0 g,比手工点授小 11.1 g。

参 考 文 献

- [1] CHECHETKA S A, YU Y, TANGE M. Materially engineered artificial pollinators[J]. Chem, 2017, 2(2): 224 – 239.
- [2] 丁素明, 薛新宇, 蔡晨. 手持式风送授粉机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13): 20 – 27.
DING Suming, XUE Xinyu, CAI Chen. Design and experiment on handheld air-assisted pollination device[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(13): 20 – 27. (in Chinese)
- [3] 丁素明, 薛新宇, 方金豹. 手持式风送授粉机工作参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 68 – 76.
DING Suming, XUE Xinyu, FANG Jinbao. Parameter optimization and experiment of air-assisted pollination device [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8): 68 – 76. (in Chinese)
- [4] HII M J W. Modelling of air flow and pollen collection by a single kiwifruit flower under wind and an air jet[C] // Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, 2003.
- [5] 朱余乐, 吴玉新, 冯乐乐, 等. 双流体雾化喷嘴的液膜模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(11): 1228 – 1332.
ZHU Yule, WU Yuxin, FENG Lele, et al. Liquid film model for the flow in a twin-fluid atomization nozzle [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2017, 57(11): 1228 – 1232. (in Chinese)
- [6] 李雪, 吕晓兰, 张美娜, 等. 设施固定管道式二相流常温烟雾系统雾滴沉积试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 199 – 204.
LI Xue, LÜ Xiaolan, ZHANG Meina, et al. Droplet distribution and deposition of fixed pipes cold fogging system in greenhouse [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 199 – 204. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s026&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.026. (in Chinese)
- [7] 李跟宝, 张亚运, 王瑶, 等. 湿雾抑尘内混式空气雾化喷嘴的选型[J]. 环境工程学报, 2017, 11(2): 1306 – 1311.
LI Genbao, ZHANG Yayun, WANG Yao, et al. Experiment research on selection of internal mixing air blast atomizer used for wet-mist dust depression [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(2): 1306 – 1311. (in Chinese)
- [8] MURAKAMI H, YAMAGUCHI K. Study of pollination method, disbudding and dilution of pollen on artificial pollination for purpose of reducing pollen consumption in ‘Rainbow Red’ Kiwifruit (*Actinidia chinensis*) [J]. Horticultural Research, 2017, 16(3): 333 – 338.
- [9] 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.
SHI Baobao, SHI Fuxi, CHEN Jun, et al. Study on atomization control characteristics of twin-fluid nozzle [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(1): 174 – 179. (in Chinese)
- [10] 蒋仲安, 王明, 陈举师. 气水喷嘴雾化特征与降尘效果分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(2): 151 – 157.
JIANG Zhongan, WANG Ming, CHEN Jushi. Atomization characteristics and dust suppression mechanism of a gas-water nozzle [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(2): 151 – 157. (in Chinese)
- [11] 王宇, 李晓, 张明建, 等. 烟草加料过程中双流体喷嘴雾化粒径的分布特性[J]. 烟草科技, 2018, 53(1): 78 – 86.
WANG Yu, LI Xiao, ZHANG Mingjian, et al. Distribution characteristics of particle size of tobacco casing atomized by two-fluid nozzle[J]. Tobacco Science & Technology, 2018, 53(1): 78 – 86. (in Chinese)
- [12] 陈波, 高殿荣, 杨超, 等. 基于 PDPA 的双流体撞击式喷嘴雾化特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 362 – 369.
CHEN Bo, GAO Dianrong, YANG Chao, et al. Atomizing characteristics of twin-fluid impact nozzle based on PDPA[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 362 – 369. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170448&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.048. (in Chinese)
- [13] GARCÍA J A, LOZANO A, ALCONCHEL J. Atomization of glycerin with a twin-fluid swirl nozzle[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2017, 92: 150 – 160.
- [14] GAO C, QI L, WU Y, et al. Design and testing of a self-propelled air-blowing greenhouse sprayer[C] // 2017 ASABE Annual International Meeting, 2017.
- [15] 王贞涛, 岑旗钢, 罗惕乾, 等. 双流体喷嘴雾化特性实验[J]. 化工学报, 2010, 38(2): 26 – 30.
WANG Zhentao, CEN Qigang, LUO Tiqian, et al. Experiment for atomization characteristics of twin-fluid nozzle[J]. Chemical Engineering, 2010, 38(2): 26 – 30. (in Chinese)
- [16] GIANNI T, VANIA M. Pollination in plants[M]. London: IntechOpen, 2018: 58 – 60.
- [17] CHAUTA-MELLIZOA A, CAMPBELL S A, BONILLAA M A, et al. Effects of natural and artificial pollination on fruit and offspring quality[J]. Basic and Applied Ecology, 2012, 13(6): 524 – 532.
- [18] 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 – 1110.
CHEN Jianye, LI Zhanhong, NING Yuxia. Preparation method and biological effects of pollen suspension liquid for spraying pollination of *Actinidia chinensis*[J]. Journal of Fruit Science, 2014, 31(6): 1105 – 1110. (in Chinese)
- [19] POZO ROMWERO M I, VENDEVILLE J, KAY C, et al. Entomovectoring technology in kiwifruit pollination[J]. Acta

- Horticulturae, 2018, 12(1): 381–390.
- [20] TACCONI G, MICHELOTTI V, CACIOPPO O, et al. Kiwifruit pollination; the interaction between pollen quality, pollination systems and flowering stage[J]. Journal of Berry Research, 2016, 6(4): 417–426.
- [21] HII M J. Kiwifruit flower pollination[D]. Christchurch:University of Canterbury, 2004: 21–50.
- [22] CRAIG J L, STEWART A M, POMEROY N, et al. A review of kiwifruit pollination: where to next[J]. New Zealand Journal of Experimental Agriculture, 1988, 16(4): 385–399.
- [23] 中国民用航空局. 中华人民共和国民用航空行业标准: 第1部分 农业航空作业质量技术指标: MH/T1002—2016[S]. 北京:中国标准出版社, 2016.
- [24] 兰玉彬, 张海艳, 文晟, 等. 静电喷嘴雾化特性与沉积效果试验分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 130–139. LAN Yubin, ZHANG Haiyan, WEN Sheng, et al. Analysis and experiment on atomization characteristics and spray deposition of electrostatic nozzle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 130–139. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180415&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.015. (in Chinese)
- [25] 蒋焕煜, 周鸣川, 李华融, 等. PWM 变量喷雾系统动态雾滴分布均匀性实验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 73–77. JIANG Huanyu, ZHOU Mingchuan, LI Huarong, et al. Experiment on dynamic droplet distribution uniformity for PWM variable spray system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 73–77. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150310&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.010. (in Chinese)
- [26] 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. GUO Haoming. Research and design of the spray end effector of kiwifruit pollination [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016: 45–48. (in Chinese)
- [27] 许林云, 张昊天, 张海锋, 等. 果园喷雾机自动对靶喷雾控制系统研制与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 1–9. XU Linyun, ZHANG Haotian, ZHANG Haifeng, et al. Development and experiment of automatic target spray control system used in orchard sprayer[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(22): 1–9. (in Chinese)
- [28] MUSIU E M, QI L, WU Y. Spray deposition and distribution on the targets and losses to the ground as affected by application volume rate, airflow rate and target position[J]. Crop Protection, 2019, 116: 170–180.
- [29] 代超, 纪献兵, 周冬冬, 等. 液滴碰撞不同湿润性表面的行为特征[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(1): 36–42. DAI Chao, JI Xianbing, ZHOU Dongdong, et al. Behavioral characteristics of droplet collision to different wettability surfaces [J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2018, 52(1): 36–42. (in Chinese)
- [30] ANSI/ASABE S572.1—2009: Spray nozzle classification by droplet spectra[S]. 2009.
- [31] 姜正旺, 王圣梅, 张忠慧, 等. 猕猴桃属花粉形态及其系统学意义[J]. 植物分类学报, 2004, 42(3): 245–260. JIANG Zhengwang, WANG Shengmei, ZHANG Zhonghui, et al. Pollen morphology of actinidia and its system aticsignificance [J]. Acta Phytotaxonomica Sinica, 2004, 42(3): 245–260. (in Chinese)
- [32] 廖娟, 臧英, 周志艳, 等. 作物航空喷施作业质量评价及参数优选方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊): 38–46. LIAO Juan, ZANG Ying, ZHOU Zhiyan, et al. Evaluation method and optimization of operating parameters in crop aerial spraying technology[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp.): 38–46. (in Chinese)
- [33] GONZALEZ M V, COQUE M, HERRERO M. Pollinator selection in kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) [J]. Journal Horticultural Science, 1994, 69(4): 697–702.
- [34] RUSSO L, PARK M G, BLITZER E J, et al. Lower handling behavior and abundance determine therelative contribution of pollinators to seed set in apple orchards[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2017, 246: 102–108.