

水平棚架式梨树多旋翼无人机液体授粉试验

徐陶^{1,2} 李雪^{1,2} 祁雁楠^{1,3} 曾锦^{1,3} 吕晓兰^{1,2}

(1. 江苏省农业科学院农业设施与装备研究所, 南京 210014; 2. 农业农村部园艺作物农业装备重点实验室, 南京 210014;
3. 农业农村部南方果园(桃梨)全程机械化科研基地, 南京 210014)

摘要: 针对我国梨树授粉用工量大、作业效率低等问题, 基于液体授粉技术, 以水平棚架式栽培的梨树为研究对象, 开展多旋翼无人机液体授粉试验, 探究多旋翼无人机单位面积液体喷施量、飞行高度及授粉方式等对雾滴沉积分布及授粉效果的影响。试验结果表明多旋翼无人机液体喷雾授粉作业性能稳定, 雾滴沉积分布组内变异系数不超过 20%; 雾滴覆盖率及雾滴覆盖密度均与喷施量呈正相关, 当液体喷施量为 6 mL/m² 时, 飞行高度的变化对雾滴沉积分布影响显著, 飞行高度为 4 m 时, 雾滴覆盖率及覆盖密度分别为 7.06%、84.77 个/cm², 花朵坐果率为 49.70%, 花序坐果率为 85.83%, 较自然授粉分别提高 91% 及 43%。当花粉液体喷施量为 4.5、6 mL/m² 时, 无人机液体授粉与自然授粉花序坐果率差异显著, 且无人机液体授粉与背负式喷雾器授粉花序坐果率无显著差异, 花序坐果率可达 80% 以上。研究结果表明, 无人机液体授粉作业时雾滴覆盖率及覆盖密度越高, 对提升花朵坐果率、花序坐果率作用越显著, 当无人机飞行高度为 4 m、花粉液体喷施量为 4.5 mL/m² 时为较优的无人机液体授粉参数组合。

关键词: 梨树; 无人机; 液体授粉; 雾滴沉积; 坐果率

中图分类号: S252 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S2-0136-06

Experiment on Liquid Pollination of Pear Tree with Horizontal Scaffolding Based on Multi-rotor UAV

XU Tao^{1,2} LI Xue^{1,2} QI Yannan^{1,3} ZENG Jin^{1,3} LÜ Xiaolan^{1,2}

(1. Institute of Agricultural Facilities and Equipment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China
2. Key Laboratory of Modern Horticultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China
3. Southern Orchard (Peach and Pear) Full Mechanized Scientific Research Base, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: The pollination of pear trees in China requires a large amount of labor and low efficiency. Based on the liquid pollination technology, the liquid pollination experiment of multi-rotor UAV was carried out with horizontal scaffolded pear trees as the research object. The effects of liquid spraying amount per unit area, flight height and pollination mode on droplet deposition distribution and pollination effect of multi-rotor UAV were investigated. The experimental results showed that the performance of liquid spray pollination operation of multi-rotor UAV was stable, and the variation coefficient in groups of droplet deposition distribution was less than 20%. Droplet coverage and droplet coverage density were positively correlated with the spraying amount. When the liquid spraying amount was 6 mL/m², the change of flight height had a significant effect on the droplet deposition distribution. When the flight altitude was 4 m, the coverage and coverage density of droplets were 7.06% and 84.77 droplets/cm², respectively. The fruit setting rate of liquid pollinated flowers and inflorescence were 49.70% and 85.83%, respectively, which were 91% and 43% higher than that of natural pollination. When the amount of liquid pollination was 4.5 mL/m² and 6 mL/m², the fruit setting rate of the UAV liquid pollination was significantly different from that of the natural pollination inflorescence. Meanwhile, there was no significant difference between the UAV liquid pollination and the backpack sprayer pollination

收稿日期: 2023-05-20 修回日期: 2023-09-01

基金项目: 国家梨产业技术体系专项资金项目(CARS-28)和江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(22)2025)

作者简介: 徐陶(1991—), 女, 助理研究员, 主要从事果园智能农机装备研究, E-mail: xutao@jaas.ac.cn

通信作者: 吕晓兰(1980—), 女, 研究员, 主要从事果园智能农机装备研究, E-mail: lxlanny@126.com

inflorescence fruit setting rate, which could reach more than 80%. The above results showed that the higher the coverage and density of droplets were, the higher the fruit setting rate of flowers and inflorescences was. The optimal combination of UAV liquid pollination parameters was obtained when the UAV flying height was 4 m and the pollen liquid spraying amount was 4.5 mL/m². The research result can provide theoretical guidance and data support for the optimization of liquid pollination operation parameters of multi-rotor UAV.

Key words: pear tree; unmanned aerial vehicle; liquid pollination; droplet deposition; fruiting rate

0 引言

梨树种植过程中授粉是非常重要的环节^[1],由于梨树花期时间短、自然授粉坐果率低,为提高产量、保证果品品质,梨树授粉主要以人工辅助授粉为主,目前常见的辅助授粉方式包括手工点授粉、机械喷粉和液体授粉等^[2]。传统的人工点授粉耗时耗工、效率低下,采用机械喷粉方式则容易将花粉粒挤压在一起,难以均匀地附着在花朵柱头上^[3]。液体授粉作为新型授粉技术,能增加柱头的水分和养分,延长柱头授粉受精时间^[4-5],具有授粉速度快、节省人工的特点。牛自勉等^[6]认为液体授粉不同程度提高了果实品质,梨液体授粉潜力巨大,市场广泛。液体授粉常见方式为背负式电动喷雾器授粉及无人机液体授粉,相比于背负式喷雾器授粉,无人机液体授粉技术采用能将花粉液体形成微米级雾化颗粒的新技术,螺旋桨下压风场可显著减少花粉液体的漂移,可以实现花粉的自动传递^[7],增加授粉的成功率^[8],同时降低人工成本,提高授粉效率^[9]有助于提高林果生产的机械化和高效化,是中大型果园基地理想的授粉方式。

无人机液体授粉技术在亚洲东南部国家应用较为普遍^[10],已应用到猕猴桃、梨、苹果、桃、枣椰树^[11]等果树授粉。目前,我国无人机授粉技术起步较晚,在杂交水稻授粉方面应用较为常见,如汪沛等^[12]对无人机授粉作业进行了试验及参数优化,测量了油动力无人直升机用于水稻制种辅助授粉时的田间风场和不同方位的风速,为杂交水稻采用无人机授粉提供了科学依据;李继宇等^[13-14]对单旋翼和多旋翼电动无人直升机用于杂交水稻制种授粉时的作业参数进行了优选。

在梨树无人机液体授粉方面,王士林等^[15]为探究无人机梨树液体喷雾授粉效果,对不同喷雾参数下的多旋翼植保无人机液体喷雾授粉质量进行分析与探讨,研究结果表明单位面积喷雾量越高,其授粉效果越好,且无人机液体授粉溶液用量显著低于背负式喷雾器,作业效率显著提升。羊坚^[16]对库尔勒香梨的六旋翼无人机花粉液剂量、花粉稀释比例进行参数优化,结果表明花粉液即配即用,花粉剂量

3 L/min、花粉稀释比例为 1:500 时花序坐果率、花朵坐果率分别为 88.57% 和 30.79%。王雨晴等^[17-18]通过比较分析四旋翼无人机(极飞 XP2020)不同授粉参数下雾滴覆盖率、雾滴密度和雾滴沉积量情况,筛选出适用于库尔勒香梨纺锤形和疏散分层形两种树形的无人机授粉最佳参数组合,距离树顶 1 m,喷雾量 2 L/(667 m²),喷雾喷嘴粒径 120 μm,飞行路径在树冠上方,坐果率为 63.27%。

上述研究表明无人机作业参数是影响授粉效果的重要因素,多旋翼无人机由于其质量轻、操作灵活、飞行稳定等优势^[19-21],已成为我国植保无人机市场上的主流机型。本文基于多旋翼无人机梨树液体授粉技术,以雾滴覆盖率、坐果率为指标,背负式电动喷雾器授粉及自然授粉为对照试验,研究花粉液体喷施量、飞行高度、授粉方式等对梨树液体授粉效果的影响,构建雾滴沉积分布数学模型,探明多旋翼无人机作业参数对雾滴分布及坐果率的影响规律,以期多旋翼植保无人机高效喷雾授粉研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 花粉喷雾液配置

花粉喷雾液成分主要包括花粉营养剂(由南京沃德丰农业科技有限公司提供,主要包括黄原胶、硝酸钙、硼酸,白色粉末状,无味)、纯净水^[22]、白砂糖,梨树花粉品种为雪花梨。使用前按照 1 包花粉营养剂(30 g/包)配置 10 L 花粉营养液为例,向 10 L 的容器内先加入 7 L 纯净水,将花粉营养剂边搅拌边倒入容器内,然后向容器内加入 1 kg 白砂糖,充分搅拌均匀,溶解 1~2 h 后定容至 10 L,花粉营养液配置完成;准备 500 mL 空矿泉水瓶 1 个,向其倒入配置好的营养液约 300 mL,称取花粉 20 g,将花粉倒入装有营养液的矿泉水瓶并快速振荡使花粉溶解,然后全部倒回 10 L 容器内,搅拌均匀,花粉喷雾液配置完成。花粉喷雾液即配即用。

1.2 多旋翼无人机参数

试验用多旋翼无人机由深圳市大疆创新科技有限公司生产(大疆 MG-1S),如图 1 所示。该机型

为电动八旋翼无人机,自动避障系统安全距离 2.5 m,满载载荷 10 L,最大作业飞行速度 7 m/s,作业幅宽 4~6 m,配置 4 个 XR11001VS 型扇形喷头,雾滴粒径 130~250 μm,单喷头最大喷雾量 0.45 L/min,主要性能参数见表 1。



图 1 大疆 MG-1S 型多旋翼无人机
Fig.1 DJI MG-1S multi-rotor UAV

表 1 大疆 MG-1S 型多旋翼植保无人机主要性能参数
Tab.1 Main performance parameters of DJI MG-1S multi-rotor UAV

参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 460×1 460×578
电池容量/(mA·h)	12 000
整机质量/kg	13. 8
药箱容量/L	10
最大作业飞行速度/(m·s ⁻¹)	7
喷洒幅宽/m	4~6
旋翼数量	8
最大喷雾量/(L·min ⁻¹)	1. 8
雾化粒径/μm	130~250
喷头数量	4

1.3 试验方案

1.3.1 试验条件

试验基地选在江苏省句容市丰之源果品专业合作社,梨园主体为水平棚架式栽培模式,保留 3 个主枝,株行距为 4 m×4 m,树干高约 1.2 m,主枝高约 1.7 m,冠幅 4 m。试验于 3 月下旬进行,正值梨树盛花期,开花率约 70%。

试验前将 SP3000 型三维风速仪固定在果园上风口方向空旷位置,每隔 10 min 测量并记录距离地面 4 m 处风速值,平均最大风速不高于 2 m/s。试验时间为 10:00—16:00,环境温度 15~21℃,环境相对湿度 62%。

1.3.2 试验设计

已有研究表明,不同类型植保无人机机身构造不一,对作业高度、作业速度等参数要求不同^[23],为探究八旋翼无人机授粉作业参数对雾滴沉积分布及坐果的影响,对大疆 MG-1S 型无人机作业参数液体喷施量(mL/m²)、花粉质量浓度(g/L)、飞行高度(m)进行试验分析。为减少环境风对试验结果的影响,无人机飞行时其飞行方向均统一为自南向北。同时为比较授粉方式对授粉效果的影响,设置对照

组 CK1、CK2。对照组 CK1 为背负式电动喷雾器授粉,花粉液体喷施量及花粉质量浓度参照文献[24];对照组 CK2 为自然授粉,授粉媒介为蜂虫。具体试验参数设置如表 2 所示。

表 2 授粉试验主要参数设置
Tab.2 Parameter setting of pollination test

处理编号	喷施量/ (mL·m ⁻²)	花粉质量浓度/ (g·L ⁻¹)	飞行高度/ m
A	3	2	5
B	3	2	4
C	4.5	2	5
D	4.5	2	4
E	6	2	5
F	6	2	4
CK1	15	1	
CK2			

试验前对不同处理编号区域进行标记,编号 A~F 授粉区域样本面积均为 1 334 m²,背负式电动喷雾器授粉区域样本面积为 667 m²,自然授粉区域样本面积为 667 m²,本试验授粉面积共计 9 338 m²。各处理区域内随机挑选 3 棵树为观测对象命名并标记,图 2 为无人机液体授粉作业现场。



图 2 大疆 MG-1S 型无人机液体授粉作业现场
Fig.2 Field of MG-1S UAV liquid pollination in DJI

1.4 数据采集与处理

1.4.1 数据采集与检测

将水敏纸(先正达,26 mm×76 mm)按图 3 所示对标记的观测样本树依次进行布样。待无人机授粉作业飞行结束后取样并标记,使用 EPSON 扫描仪将

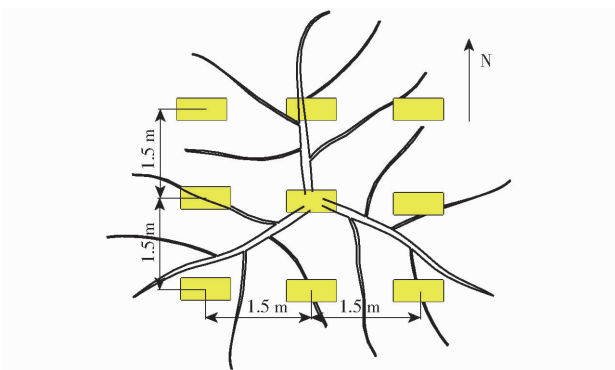


图 3 水敏纸布样图

Fig.3 Layout of water-sensitive paper in canopy

回收的水敏纸扫描为 JPEG 格式 (600 dpi),并用图像处理软件 DepositScan 对雾滴覆盖率、雾滴覆盖密度进行检测。为减小株间误差,取同一观测样本树 9 个采样点平均值。

为了表征各试验组无人机作业稳定性,采用变异系数^[25]作为评价指标,数值越小说明无人机工作性能越稳定^[26-27]。

1.4.2 坐果率统计

无人机授粉试验前随机选取观测树各 50 个花序,并对所选取花序进行挂牌统计其花朵数。授粉试验结束 2~3 周后统计花序坐果率 W_1 及花朵坐果率 W_2 。

2 结果与分析

2.1 不同处理对雾滴沉积分布的影响

无人机喷雾作业时,并非所有从喷雾器释放的雾滴都能沉积在靶标上,在下洗气流影响下雾滴穿透冠层到达靶标,但仍有大量雾滴飘失或偏离了目标^[27],因此植保无人机喷雾作业时单位面积雾滴沉积数量越多,雾滴覆盖率越高,则液体授粉效果越好。对各试验组的雾滴覆盖率 Y_1 、雾滴覆盖密度 Y_2 进行统计,结果见表 3。可以看出,不同处理下雾滴覆盖率及雾滴覆盖密度的组内变异系数不超过 21%,说明基于多旋翼无人机液体喷雾授粉作业性

表 3 不同处理下雾滴沉积分布
Tab.3 Droplets deposition distribution under different treatments

处理 编号	雾滴覆盖率 Y_1					雾滴覆盖密度 Y_2				
	样本 1/%	样本 2/%	样本 3/%	平均值/%	组间变异 系数/%	样本 1/ (个·cm ⁻²)	样本 2/ (个·cm ⁻²)	样本 3/ (个·cm ⁻²)	平均值/ (个·cm ⁻²)	组间变异 系数/%
A	1.01	0.60	0.87	(0.83 ± 0.17) ^e	20	14.03	18.50	19.13	(17.22 ± 2.27) ^e	13
B	1.31	0.88	0.83	(1.01 ± 0.21) ^e	21	24.82	18.76	18.00	(20.52 ± 3.05) ^e	15
C	1.28	1.20	1.77	(1.42 ± 0.25) ^{de}	18	27.56	34.51	35.96	(27.34 ± 3.67) ^{de}	11
D	3.69	3.36	4.22	(3.76 ± 0.13) ^{cd}	9	51.99	47.11	32.88	(43.99 ± 8.11) ^{cd}	18
E	4.86	3.64	4.79	(4.76 ± 0.56) ^e	13	51.32	44.96	60.82	(52.70 ± 6.52) ^e	12
F	5.13	8.64	7.42	(7.06 ± 0.14) ^b	21	64.57	98.38	91.36	(84.77 ± 14.57) ^b	17
CK1	15.13	14.34	10.50	(15.13 ± 2.02) ^a	13	130.42	112.74	134.03	(125.73 ± 9.30) ^a	7

注:同列字母不同表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

能较稳定;不同飞行高度下,雾滴覆盖率及雾滴覆盖密度均与喷施量呈正相关;处理 A 及处理 B 雾滴覆盖率及覆盖密度均无显著差异,处理 C 及处理 D 无显著差异,但处理 E 及处理 F 存在显著差异,说明当喷施量较低时,改变飞行高度对雾滴沉积分布影响不大;当喷施量增大到 6 mL/m²时,飞行高度的变化对雾滴沉积的影响显著,飞行高度从 5 m(处理 E)降至 4 m(处理 F)时,雾滴覆盖率及覆盖密度分别提高至 7.06%、84.77 个/cm²。

相比无人机液体授粉方式,背负式电动喷雾授粉(对照组 CK1)雾滴沉积分布更均匀,雾滴覆盖率及雾滴覆盖密度的组内变异系数分别为 13% 和 7%,且雾滴覆盖率及雾滴覆盖密度分别为 15.13% 和 125.73 个/cm²,较无人机作业提高 53.3% 和 32.6%。由于背负式喷雾器作业时其喷雾量为 15 mL/m²,其单位面积喷施量显著高于无人机作业喷施量,且手持式喷杆喷头距离冠层 20~30 cm,有效降低了雾滴飘失;同时无人机飞行作业时,受多旋翼下洗气流及环境风影响导致部分雾滴出现漂移,导致无人机喷雾作业时雾滴覆盖率及雾滴覆盖密度均低于背负式电动喷雾器授粉方式。

2.2 不同处理对坐果率的影响

对不同处理下花朵坐果率 W_1 及花序坐果率 W_2 进行统计,结果见表 4。自然授粉(对照组 CK2)坐果情况受外界环境影响较大,本试验授粉期间,温度适宜、天气晴朗,未出现降温、大风、连续阴雨天气,利于自然授粉,自然授粉的花朵坐果率可达 26.00%,花序坐果率可达 60.00%。当无人机飞行高度为 4 m、花粉液体喷施量为 4.5 mL/m²时,雾滴覆盖率及覆盖密度分别为 3.76%、43.99 个/cm²,花朵坐果率为 39.58%,花序坐果率为 80.00%,较自然授粉分别提高 52% 及 33%;当无人机花粉液体喷施量为 6 mL/m²时,雾滴覆盖率及覆盖密度分别为 7.06%、84.77 个/cm²,花朵坐果率为 49.70%,花序坐果率为 85.83%,较自然授粉分别提高 91% 及 43%;说明提高单位面积花粉液体喷施量,对提高雾滴覆盖率及覆盖密度以及提升花朵坐果率、花序坐果率有显著作用。

另外,除处理 B 外,无人机液体授粉对提高自然授粉花朵坐果率均有显著作用。造成此现象的原因,一方面是由于外界因素(温度适宜、晴天等)使该年度自然授粉坐果率高于同期水平,导致处理 B

表 4 不同处理下坐果情况统计

Tab.4 Fruit setting statistics under different treatments

处理 编号	花朵坐果统计			花序坐果统计			%
	花朵坐果率 W_1	组内变异系数	较自然授粉提高率	花序坐果率 W_2	组内变异系数	较自然授粉提高率	
A	(31.10 ± 1.38) ^{de}	4	20	(68.33 ± 4.25) ^b	6	14	
B	(33.63 ± 2.31) ^{cd}	7	29	(69.17 ± 1.18) ^b	2	15	
C	(36.16 ± 1.93) ^{cd}	5	39	(82.50 ± 4.08) ^a	5	38	
D	(39.58 ± 1.68) ^c	4	52	(80.00 ± 2.04) ^a	4	33	
E	(48.36 ± 5.23) ^b	11	86	(83.33 ± 3.12) ^a	4	39	
F	(49.70 ± 2.76) ^b	6	91	(85.83 ± 2.36) ^a	3	43	
CK1	(66.07 ± 2.28) ^a	3	154	(89.17 ± 1.18) ^a	1	49	
CK2	(26.00 ± 3.93) ^e	15		(60.00 ± 5.40) ^b	9		

无人机液体授粉坐果率较自然授粉不明显;另一方面由于自然授粉多依靠蜂虫、自然风等增加花粉流动性,实现异花授粉,但由于 B 处理液体喷施量偏低,且飞行高度较高,雾滴飘失严重,导致雾滴覆盖率及覆盖密度均低于其他处理,造成靶标花粉量偏低;再者,花粉喷雾液中含有大量糖分,增大了液体粘度,液体喷施到花朵后一定程度抑制了花粉流动,最终导致 B 处理花朵坐果率仅 31.31%,较自然授粉提高 12%,与自然授粉花朵坐果率的 26.00% 无显著差异。

同时,处理 A 和处理 B 的花朵坐果率无显著差异,处理 C 和处理 D、处理 E 和处理 F 间同样无显著性差异,说明无人机液体授粉作业高度对花朵坐果率影响不显著,但处理 B、处理 C、处理 E 三者均存在显著性差异,说明无人机液体喷施量是影响花朵坐果率的关键因素,单位面积花粉液体喷施量越大,雾滴覆盖率及覆盖密度越高,花朵坐果率越高;处理 A、处理 B 及自然授粉 CK2 的花序坐果率无显著差异;无人机液体授粉处理 C ~ F 的花序坐果率无显著差异,且与背负式喷雾器授粉 CK1 的花序坐果率差异不显著,花序坐果率可达 80% 以上。为保证坐果率,同时降低后期疏果强度,综合分析得出无人机飞行高度 4 m、花粉液体喷施量 4.5 mL/m² 为较优的无人机授粉参数组合。

3 结论

(1)多旋翼无人机液体喷雾授粉作业性能稳定,雾滴沉积分布组内变异系数不超过 20%;雾滴覆盖率及雾滴覆盖密度均与喷施量呈正相关。当无人机飞行高度为 4 m、花粉液体喷施量为 4.5 mL/m² 时,雾滴覆盖率及覆盖密度为 3.76%、43.99 个/cm,花朵坐果率为 39.58%,花序坐果率为 80.00%,较自然授粉分别提高 52% 及 33%;液体喷施量为 6 mL/m² 时,飞行高度的变化对雾滴沉积分布影响显著。飞行高度为 4 m 时,雾滴覆盖率及覆盖密度分别为 7.06%、84.77 个/cm²,花序坐果率为 85.83%,较自然授粉分别提高 91% 及 43%。

(2)无人机液体喷施量是影响花朵坐果率的关键因素,在试验范围内单位面积花粉液体喷施量越大,雾滴覆盖率及覆盖密度越高,花朵坐果率越高。

(3)当花粉液体喷施量为 3 mL/m² 时,无人机液体授粉与自然授粉的花序坐果率无显著差异;当花粉液体喷施量为 4.5、6 mL/m² 时,无人机液体授粉及背负式喷雾器授粉均与自然授粉花序坐果率差异显著,但无人机液体授粉与背负式喷雾器授粉花序坐果率无显著差异,花序坐果率可达 80% 以上。当无人机飞行高度为 4 m、花粉液体喷施量为 4.5 mL/m² 时为较优的无人机液体授粉参数组合。

参 考 文 献

[1] MURIEL Q, TRACY M, LAURA M, et al. Introduction of new tools to improve pollination in European pear orchards [J]. Scientia Horticulturae, 2016, 21: 5 - 12.

[2] 王斌,葛丰,王春强.不同授粉条件对“南果梨”坐果率的影响[J].北方果树,2011,34(2):12 - 13.

[3] SAKAMOTO D, HAYAMA H, ITO A, et al. Spray pollination as a labor-saving pollination system in Japanese pear (*Pyrus pyrifolia* (Burm.f.) Nakai): development of the suspension medium[J]. Scientia Horticulturae, 2009, 119: 280 - 285.

[4] 代江瑞,王斐然,史秀丽,等.果树授粉研究进展[J].中国蜂业,2023,74(3):58 - 61.

DAI Jiangrui, WANG Feiran, SHI Xiuli, et al. Research progress on pollination fruit tree[J]. Apiculture of China, 2023, 74 (3): 58 - 61. (in Chinese)

[5] 齐开杰,陶书田,吴巨友,等.梨树省力化液体授粉技术[J].中国南方果树,2017,46(3):168 - 169.

[6] 牛自勉,阎和建.梨树液体授粉稳定剂与营养剂的综合效应[J].中国农学通报,2008,24(10):377 - 380.

NIU Zimian, YAN Hejian. Effect of liquid pollination stabilizers and nutrition agents on fruit setting and fruit quality of pear in

- Shanxi[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008,24(10):377–380. (in Chinese)
- [7] ABUTALIPOV R N, BOLOV Y V, SENOV H M. Flowering plants pollination robotic system for greenhouses by means of nano copter (drone aircraft) [C]//IEEE 2016 Conference on Quality Management, Transport, and Information Security, Information Technologies (IT and MQ and IS), 2016.
- [8] REHNA V J, MOHAMMAD N I. Impact of autonomous drone pollination in date palms[J]. International Journal of Innovative Research and Scientific Studies,2022, 5(4): 297–305.
- [9] AKHAVAN F, KAMGAR S, NEMATOLLAHI M A, et al. Design, development, and performance evaluation of a ducted fan date palm (*Phoenix dactylifera* L.) pollinator [J]. Scientia Hort, 2021, 277:109808.
- [10] HE X, BONDS J, HERBST A L, et al. Recent development of unmanned aerial vehicle for plant protection in East Asia [J]. Int. J. Agric. Biol. Eng., 2017, 10: 18–30.
- [11] ALYAFEI M A S, AL D A, ALMOOSA M, et al. Innovative and effective spray method for artificial pollination of date palm using drone [J]. HortScience, 2022,57(10):1298–1305.
- [12] 汪沛,胡炼,周志艳,等. 无人油动力直升机用于水稻制种辅助授粉的田间风场测量[J]. 农业工程学报,2013,29(3): 54–61.
WANG Pei, HU Lian, ZHOU Zhiyan, et al. Wind field measurement for supplementary pollination in hybrid rice breeding using unmanned gasoline engine single-rotor helicopter[J]. Transactions of the CSAE, 2013,29(3):54–61. (in Chinese)
- [13] 李继宇,周志艳,胡炼,等. 单旋翼电动无人直升机辅助授粉作业参数优选[J]. 农业工程学报,2014,30(10):10–17.
LI Jiyu, ZHOU Zhiyan, HU Lian, et al. Optimization of operation parameters for supplementary pollination in hybrid rice breeding using uniaxial single-rotor electric unmanned helicopter[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 10–17. (in Chinese)
- [14] 李继宇,周志艳,胡炼,等. 圆形多轴多旋翼电动无人机辅助授粉作业参数优选[J]. 农业工程学报,2014,30(11):1–9.
LI Jiyu, ZHOU Zhiyan, HU Lian, et al. Optimization of operation parameters for supplementary pollination in hybrid rice breeding using round multi-axis multi-rotor electric unmanned helicopter[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(11): 1–9. (in Chinese)
- [15] 王士林,雷晓晖,唐玉新,等. 基于多旋翼无人机的梨树喷雾授粉技术[J]. 江苏农业科学,2020,48(23):210–214.
- [16] 羊坚. 库尔勒香梨授粉花粉保存、梨火疫病菌检测及无人机授粉花粉液参数组合优选[D]. 阿拉尔:塔里木大学,2021.
YANG Jian. Study on preservation of pollinated pollen, detection of pear fire blight and parameters combination of UAV pollination fluid of Korla fragrant pear[D]. Alar: Tarim University,2021. (in Chinese)
- [17] 王雨晴.“库尔勒香梨”XP 2020 无人机授粉参数优选与应用[D]. 石河子:石河子大学,2022.
WANG Yuqing. Preferred parameters and application of XP 2020 UAV pollination for “Kuerle Xiangli”[D]. Shihezi: Shihezi University, 2022. (in Chinese)
- [18] WANG Y, BAI R, LU X, et al. Pollination parameter optimization and field verification of UAV-based pollination of ‘Kuerle Xiangli’ [J]. Agronomy 2022, 12:2561.
- [19] 张豪,祁力钧,吴亚垒,等. 基于 Porous 模型的多旋翼植保无人机下洗气流分布研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 112–122.
ZHANG Hao, QI Lijun, WU Yalei, et al. Spatio-temporal distribution of down-wash airflow for multi-rotor plant protection UAV based on Porous model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 112–122. (in Chinese)
- [20] 李民赞,李欣泽,杨玮,等. 无人机喷雾质量检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(增刊):36–42.
LI Minzan, LI Xinze, YANG Wei, et al. Design and experiment of UAV spray quality detection system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(Supp.):36–42. (in Chinese)
- [21] 丁素明,薛新宇,董祥,等. 喷雾参数对雾滴沉积性能影响研究[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊2): 308–315.
DING Suming, XUE Xinyu, DONG Xiang, et al. Effects of spraying parameters on droplet deposition performance [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp.2): 308–315. (in Chinese)
- [22] 王鹏,曹鹏,齐开杰,等. 水质对梨树液体授粉的花粉萌发率的影响[J]. 中国南方果树,2018,47(2):145–147.
- [23] 张瑞瑞,李龙龙,文瑶,等. 植保无人机喷施雾滴沉积特性的荧光示踪分析[J]. 农业工程学报,2020,36(6):47–55.
ZHANG Ruirui, LI Longlong, WEN Yao, et al. Fluorescence tracer method for analysis of droplet deposition pattern characteristics of the sprays applied via unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(6): 47–55. (in Chinese)
- [24] 南京农业大学. 一种节本增效的梨树液体授粉方法:CN102318549B[P]. 2012–01–18.
- [25] 邱白晶,沙俊炎,汤伯敏,等. 密闭空间雾滴沉积状态参数的显微图像解析[J]. 农业机械学报,2008,39(2):55–58.
QIU Baijing, SHA Junyan, TANG Bomín, et al. Analysis of droplets deposition parameters based on micrograph in airtight space[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(2):55–58. (in Chinese)
- [26] 宋淑然,洪添胜,王卫星,等. 水稻田农药喷雾分布与雾滴沉积量的试验分析[J]. 农业机械学报,2004,35(6):90–93.
SONG Shuran, HONG Tiansheng, WANG Weixing, et al. Testing analysis on deposit and distribution of pesticide spraying in rice fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004,35(6):90–93. (in Chinese)
- [27] 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.