

单旋翼油动无人机与圆形果园风送喷雾机作业性能对比试验研究

边永亮 李建平* 薛春林 李昕昊 王鹏飞

(河北农业大学 机电工程学院,河北 保定 071000)

摘要 为验证单旋翼油动无人机在丘陵山地果园的喷雾效果,将单旋翼油动无人机与圆形果园风送喷雾机在矮砧密植苹果园进行喷雾性能对比试验,结果表明:单旋翼油动无人机喷雾作业的果树上中下层雾滴沉积覆盖率分别为0.66%~21.98%、1.20%~16.17%、0.38%~3.96%,雾滴平均体积中值直径大小顺序依次为上层>中层>下层;圆形果园风送喷雾机喷雾作业的果树上中下层雾滴沉积覆盖率分别为5.68%~24.94%、2.64%~34.61%、3.15%~21.78%,雾滴平均体积中值直径大小顺序依次为下层>中层>上层;单旋翼油动无人机喷洒的雾滴在果树中上层的沉积效果显著,圆形果园风送喷雾机则为中下层效果显著。排除机具故障等不确定因素影响,无人机作业的工作效能与节水省药性能优于喷雾机;在果园生产抢农时和病虫害应急处理中,无人机表现出较好的实用性能。

关键词 单旋翼油动无人机; 风送果园喷雾机; 雾滴沉积覆盖率; 雾滴分布均匀性

中图分类号 S252.3 **文章编号** 1007-4333(2020)12-0134-08 **文献标志码** A

A comparative study on the performance of single-rotor oil-propelled UAV and circular air-fed orchard sprayer

BIAN Yongliang, LI Jianping*, XUE Chunlin, LI Xinhao, WANG Pengfei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China)

Abstract In order to verify the spray effect of the single-rotor oil-powered UAV in the hilly mountain orchard, the spray performance comparison tests of the single-rotor oil-powered UAV and the round orchard wind-driven sprayer on the low-root densely planted apple orchard were conducted. The results showed that: For single-rotor, the coverage of fog droplet deposition on the upper and lower layers of fruit trees for oil-driven UAV spray operations were 0.66% - 21.98%, 1.20% - 16.17% and 0.38% - 3.96%, respectively. The average order of the average diameter of the droplet size was the upper layer>Middle layer>Lower layer; The coverages of the droplet deposition on the upper and lower layers of the fruit trees in the round orchard wind sprayer were respectively 5.68% - 24.94%, 2.64% - 34.61% and 3.15% - 21.78%. The average diameter of the average volume of the droplets in descending order was lower layer>middle layer>upper layer; The droplets sprayed by the single-rotor oil-powered UAV displayed a significant deposition effect on the upper and middle layers of fruit trees, and the round orchard wind-driven sprayer was the middle and lower layer. In conclusion, eliminating the influence of uncertain factors such as machine malfunctions, the working efficiency and water-saving and medicine-saving performance of the UAV is better than that of the sprayer; and the UAV shows good practical performance in the orchard production and farming and emergency treatment of diseases and insect pests.

Keywords single-rotor oil-powered UAV; air-driven orchard sprayer; droplet deposition density; droplet deposition coverage

收稿日期: 2020-02-26

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0201100);河北省农业科技成果转化资金专项(19827201D);河北省现代农业产业技术体系水果创新团队(HBCT2018100205);现代农业产业技术体系建设专项资金资助(CARS-27)

第一作者: 边永亮, 硕士研究生, E-mail: 1348159229@qq.com

通讯作者: 李建平, 副教授, 主要从事现代农业装备及自动化研究, E-mail: ljpd327@126.com

果园病虫害防治施药作业的工作量约占果树管理总工作量的 30% 左右,是最费工时又非常重要的作业项目,施药作业质量效果直接影响果品质量及产量^[1-2]。施药作业质量主要取决于植保机具的喷雾性能。目前,我国果园中的植保机具主要为风送喷雾机^[3],但其施药作业参数不能根据果树冠层结构自动调节,造成沉积在单位叶片面积上的药液不均匀,导致局部过量施药和局部防效不理想并存现象^[4-5]。同时,风送喷雾机的地形适应性较差,难以适应在丘陵山地果园的植保作业。植保无人机是一种新型的植保机具,因其安全性高、地形适用性强等优点得到广泛应用^[6]。植保无人机应用于果园病虫害防治,可实现高效轻简化施药作业,达到节水节药、节本增效的目的,使果品质量更高、更加绿色安全。

目前植保无人机已应用在玉米^[7]、水稻^[8-9]、小麦^[10]等作物的植保作业中^[11]。电动单旋翼植保无人机雾滴覆盖率上部和下部的平均值分别为 1.17% 和 0.99%,农药有效利用率为 42.3%,具有较好的喷雾性能,能满足水稻、小麦等作物的病虫害防治^[12-13],但其载药量不足,续航能力差。N-3 型无人直升机在玉米生长后期雾沉积效果表明,作业高度和作业喷幅会影响雾滴在植株上的沉积量和分布均匀性,横向喷幅为 7 m 时,多喷幅雾滴沉积百分比的极差为 26.3%,变异系数为 25%^[7]。张盼等^[14-15]研究发现小型四旋翼无人机喷雾的雾滴在柑橘树冠上层的沉积效果较好,距离冠层顶部 1 m 高度飞行喷洒的雾滴覆盖率、沉积密度等各项参数较为理想,然而,在树冠垂直方向上施药雾滴沉积分布均匀性相对较差,旋翼风场难以将雾滴送到中下层。综上,植保无人机的载药量、续航能力是衡量植保无人机适用性的重要指标,雾滴沉积覆盖率和雾滴沉积分布均匀性是衡量植保无人机喷雾性能的主要指标。单旋翼油动无人机动力强劲,载药量大,续航时间长,且旋翼下压风场强劲,有助于雾滴沉积到果树上。由于植保无人机在果园施药作业还没有相应标准,故本研究拟采用田间对比试验的方法,对比分析单旋翼油动无人机和圆形果园风送喷雾机在果树冠层的喷雾效果,进而明确单旋翼油动无人机与圆形果园风送喷雾机在果园病虫害防治作业的应用范围,旨在为果农和农业社会化服务组织的植保机具选择提供参考。

1 材料与方 法

1.1 材料及设备

1.1.1 试验材料

采用重庆六六山下植保科技有限公司生产的水敏纸检测雾滴;型号为 EPSON PERFECTION 1670 激光扫描仪扫描处理水敏纸;精创 RC-4 湿度测试仪测量环境湿度;希玛 AS856S 风速测试仪测量风速等。

1.1.2 试验机型及搭载设备

试验用植保无人机为 Z-3 N 型单旋翼油动无人机(简称无人机),由广西农博士农业服务有限公司提供,采用差分 GPS 全球导航系统记录无人机飞行高度、飞行速度和运行轨迹。差分定位精度为 ± 0.2 m,航线控制精度 ± 0.2 m,并搭载有高精度的声呐感知系统,采用先进的离心式喷头,雾化效果较好^[16]。试验用喷雾机为 FXS7B-340 圆形果园风送喷雾机(简称喷雾机)。机具型号参数见表 1。

1.2 试验过程及方法

1.2.1 试验环境

供试果园位于河北省保定市曲阳县下河乡刘家马村矮砧密植苹果园($38^{\circ}68' N, 114^{\circ}71' E$)。以 5 年生富士苹果为试验对象,果园株距 1.0~1.2 m、行距 4.0 m,树高 3.5~4.0 m,纺锤形树冠,矮砧密植,南北走向,果园采用水肥一体化灌溉;环境温度 15℃,环境湿度 45%,环境风速 1~2 级。试验时间为 2019 年 10 月 22 日 14:00—17:30,此时苹果树正值全叶期。

1.2.2 采样布置

1) 靶标果树选取。在果园同一行间的左右两树行分别选取 3 棵树形规整、枝繁叶茂的靶标果树,一左一右依次选取且间隔取样,防止果树距离太近相互干扰。在试验树行中按照“留白距离”的方法^[17]选择放置水敏纸的果树。6 棵靶标树编号为 T1~T6,分别距地头 4.0、5.2、6.4、7.6、8.7、10.1 m。沿果树高度方向分 3 层放置水敏纸,在果树冠上部、中部(2/3 株高)和下部(1/3 株高)分别张贴 4 张水敏纸进行标记,果树树层划分示意图 1。每张取样卡的尺寸为 70 mm×50 mm,与果树叶片的尺寸几乎相同。施药后将着雾滴的水敏纸收集在密封袋中。

表1 无人机与喷雾机技术参数

Table 1 Technical parameters of UAV and sprayer

主要参数 Main parameter	无人机 UAV	喷雾机 Sprayer	主要参数 Main parameters	无人机 UAV	喷雾机 Sprayer
最大任务载荷/kg Maximum mission load	30	—	有效喷洒幅宽/m Effective spray width	6	5
最大载药量/L Maximum charge	30	340	喷药流量/(L/min) Spray flow	0~3	78
有效作业续航时间/min Effective endurance	30~60	60~120	作业高度/m Working height	5~10	5
抗风等级/级 Wind resistant grade	6~7	6~8	风机形式 Fan form		轴流式 Axial flow
作业速度/(m/s) Working speed	0~10	0~5	风机尺寸/mm Fan size	—	φ800
作业温度/℃ Working temperature	-15~65	-15~65	喷头数量 Number of nozzles	4	12

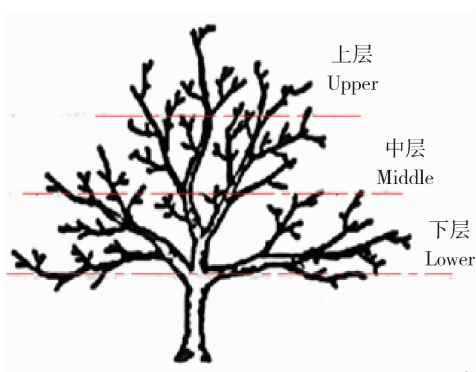


图1 果树树层划分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the division of the fruit tree layer

2)水敏纸使用与处理。将水敏纸分别固定在果树同一叶片的叶面、叶背,利用双面胶将叶片粘贴在叶片上。同时在张贴位置处用彩色标记条标记。喷洒结束后,应立即将水敏纸收集并粘贴在收集硬纸板上;将硬纸板做干燥处理,存放在干燥环境中。使用激光扫描仪依次对硬纸板上的水敏纸进行扫描,为保证沉积雾滴的清晰显像,扫描图像分辨率设定为600 dpi,背景为A4白纸,灰度扫描成PNG格式。

1.2.3 试验过程

准备工作就绪后,进行无人机和喷雾机的喷雾作业试验,作业场景见图2。用秒表记录机具作业时间,用皮尺测量作业距离。



图2 无人机(a)和喷雾机(b)果园内作业场景

Fig. 2 UAV (a) and sprayer (b) scenes in the orchard

1) 无人机。无人机作业速度为 2 m/s, 作业高度为距地面 7 m, 喷幅为 4 m, 喷量为 67.5 L/hm², 试验时无无人机的航线经过试验果树行间的正上方; 在果树行间上空飞行, 将药液喷洒到果树上。

2) 喷雾机。喷雾机作业速度为 2.96 m/s, 喷雾压力为 1.0 MPa, 喷孔直径 1.5 mm, 风机转速 540 r/min, 风机出口风量 16 200 m³/h。

1.2.4 数据处理

通过 Image-master 软件进行雾滴信息采集。将扫描好的文件(图 3(a))导入到软件, 经区域选取、提取分析区域、调节区域前进背景的像素, 设置参数 sigma、weight 均为 5, 经“阈值调节”将前景背景剥离, 再经“去除前景”、“降噪处理”等步骤之后(图 3(b)), 软件将自行分析出雾滴直径参数、总雾滴数、雾滴雾滴沉积覆盖率。采用 Excel 软件进行

数据汇总分析和图表绘制。

雾滴大小以体积中值直径表示, 计算式为:

$$VMD = \frac{D_{max}}{F} \quad (1)$$

式中: VMD 为体积中值直径, μm ; D_{max} 为最大雾滴直径, μm ; F 为折合系数, $F=2.2$ 。雾滴分布均匀度以雾滴覆盖率的变异系数表示, 变异系数和标准差分别采用式(2)和式(3)计算:

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\% \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (3)$$

式中: CV 为变异系数, %; S 为标准差; \bar{X} 为雾滴平均覆盖密度, 滴/cm²。

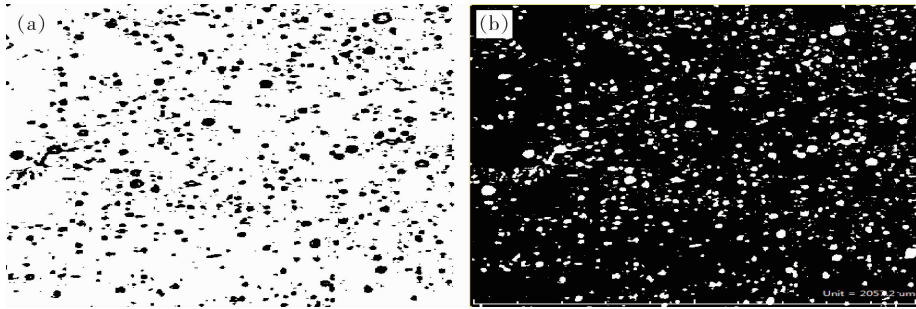


图 3 水敏纸扫描图(a)和“Imagepy-master”处理的雾滴图(b)

Fig. 3 Water sensitive paper scan (a) and “Imagepy-master” processed fog drop (b)

2 试验结果分析

2.1 纯喷药小时生产率

同一地区果园的物候期相近, 病虫害防治时间相对集中, 对植保机具的作业效率要求较高。纯喷药小时生产率 W_{si} 用以衡量机具作业效率^[18-19], 采用式(4)计算:

$$W_{si} = \frac{U}{T_{si}} \quad (4)$$

式中: W_{si} 为纯喷药小时生产率, hm²/h, 下标 $i=1, 2$ 分别表示无人机和喷雾机; U 为班次作业面积, hm²; T_{si} 为纯喷药时间, h; 生产率之比 η 采用式(5)计算:

$$\eta = \frac{W_{s1}}{W_{s2}} \quad (5)$$

无人机与喷雾机的工作参数见表 2。利用式(4)、(5)计算可知, 无人机的纯工作小时生产率约是喷雾机的 2 倍。

表 2 无人机和喷雾机的工作参数

Table 2 Working parameters of UAV and sprayers

机具 Implement	喷头数量 Number of nozzles	单喷头流量/(L/min) Single nozzle flow	喷幅/m Spray amplitude	运行速度/(km/h) Running speed	施药量/(L/hm ²) Dosage of pesticide	喷药时间/s Working time
无人机 UAV	4	0.60	6	7.20	62.6	10.21
喷雾机 Sprayer	12	0.92	5	2.96	846.2	16.52

2.2 节水性能

无人机和喷雾机开始作业时记录喷洒时间,根据装液量、喷洒时间、作业飞行速度和采用的喷幅宽度来计算喷洒量。喷洒量采用式(6)计算:

$$q = \frac{Q}{TvD} \times 10^4 \quad (6)$$

式中: q 为喷洒量, L/hm^2 ; Q 为装液量, L ; T 为喷洒时间, s ; v 为飞行速度, m/s ; D 为喷幅宽度, m 。利用式(6)计算得出喷雾机每 hm^2 用水量约是无人机的14倍。

2.3 雾滴沉积覆盖率

植保机具作业时,目标物上雾滴所覆盖的面积

与目标物总面积的比值称为覆盖率,是评价喷雾作业质量的重要指标^[20-21]。无人机与喷雾机作业后各冠层平均雾滴沉积覆盖率见表3。

从测得的数据可以看出,无人机喷洒作业后的上层叶面覆盖率为1.72%~21.98%,均值9.10%;叶背覆盖率0.66%~1.95%,均值1.34%。中层叶面覆盖率6.19%~16.17%,均值10.79%;中层叶背覆盖率1.20%~7.56%,均值3.46%。下层叶面覆盖率0.85%~3.96%,均值2.47%;叶背覆盖率0.38%~1.98%,均值1.58%。中层和上层的覆盖率较高,下层的沉积覆盖率也达到施药标准要求,可见单旋翼无人机的纵向雾滴穿透性较好。

表3 无人机与喷雾机作业后各冠层平均雾滴沉积覆盖率

Table 3 Average droplet deposition coverage of each canopy after UAV and sprayer operation %

机具 Implement	取样位置 Sampling position	靶标树编号 The numbers of target trees						平均值 Average
		T1	T2	T3	T4	T5	T6	
无人机 UAV	UZ	8.22	14.27	3.57	1.72	4.81	21.98	9.10
	UF	1.31	1.48	0.66	0.78	1.85	1.95	1.34
	MZ	16.17	12.29	9.23	6.19	8.69	12.17	10.79
	MF	3.70	7.56	2.02	3.89	2.39	1.20	3.46
	LZ	3.96	0.85	2.72	2.98	2.81	1.49	2.47
喷雾机 Sprayer	LF	1.98	3.46	0.83	1.94	0.89	0.38	1.58
	UZ	14.83	10.14	21.64	9.93	17.32	24.94	16.47
	UF	5.96	4.28	9.06	14.05	11.75	5.68	8.46
	MZ	2.64	23.34	20.57	15.53	12.00	34.61	18.12
	MF	12.93	14.36	13.66	10.51	18.13	18.75	14.72
	LZ	7.10	22.19	18.51	23.96	12.26	28.40	18.74
	LF	4.44	3.15	9.10	11.61	10.29	21.78	10.06

注:“UZ”代表上层叶面,“UF”代表上层叶背,“MZ”代表中层叶面,“MF”代表中层叶背,“LZ”代表下层叶面,“LF”代表下层叶背,表4同。T1~T6为6棵靶标树编号,分别距地头4.0、5.2、6.4、7.6、8.7、10.1 m。

Note: “UZ” represents the upper leaf surface, “UF” represents the upper leaf surface, “MZ” represents the middle leaf surface, “MF” represents the middle leaf back, “LZ” represents the lower leaf surface, and “LF” represents the lower leaf surface, Table 4 is the same. T1—T6 are the numbers of 6 target trees, which are respectively 4.0, 5.2, 6.4, 7.6, 8.7 and 10.1 m from the ground.

喷雾机喷洒作业后上层叶面覆盖率为9.93%~24.94%,均值16.47%;叶背覆盖率5.68%~14.05%,均值8.46%。中层叶面覆盖率2.64%~34.61%,均值10.79%;中层叶背覆盖率10.51%~18.75%,均值14.72%。下层叶面覆盖率7.10%~28.40%,均值18.74%;叶背覆盖率3.15%~

21.78%,均值10.06%。上层、中层和下层的覆盖率接近,雾滴覆盖情况较好。无人机喷洒作业中上层效果显著,喷雾机为中下层效果显著。无人机与喷雾机中层叶背的着药效果均属最佳。

2.4 雾滴分布均匀性

利用式(1)、(2)、(3)计算无人机与喷雾机作

业后果树冠层雾滴体积中值直径及雾滴变异系数,结果见表 4。无人机的上中下层叶面平均体积中值直径值分别为 121.7、107.8、45.3 μm ,变异系数均值分别为 32.71%、23.67%、33.51%。无人机喷洒在叶面上的雾滴直径从上、中、下层逐渐减小,中层的雾滴分布最为均匀,其次为上层和下层。无人机的上中下层叶背平均体积中值直径值分别为 74.4、84.5、35.2 μm ,变异系数均值分别为 12.03%、20.02%、16.93%。无人机喷洒的叶背雾滴直径中层的最大,其次为上层和下层,上层叶背的雾滴分布最为均匀,其次为

下层和上层。

喷雾机的上中下层叶面平均体积中值直径值分别为 177.6、183.1、192.3 μm ,变异系数均值分别为 36.77%、26.26%、24.72%。喷雾机喷洒在叶面上的雾滴直径从下、中、上层逐渐减小,下层的雾滴分布最为均匀,其次为中层和上层。喷雾机的上中下层叶背平均体积中值直径值分别为 118.5、152.8、156.6 μm ,变异系数均值分别为 49.40%、37.78%、33.93%。喷雾机喷洒的叶背雾滴直径下层的最大,其次为中层和上层,下层叶背的雾滴分布最为均匀,其次为中层和上层。

表 4 无人机与喷雾机喷洒在果树各层雾滴分布均匀性指标

Table 4 Uniformity index of mist droplets sprayed by UAV and sprayer on various layers of fruit trees

取样位置 Sampling position	体积中值直径/ μm VMD		变异系数/% CV	
	无人机 UAV	喷雾机 Sprayer	无人机 UAV	喷雾机 Sprayer
	UZ	121.7	177.6	32.71
UF	74.4	118.5	12.03	49.40
MZ	107.8	183.1	23.67	26.26
MF	84.5	152.8	20.02	37.78
LZ	45.3	192.3	33.51	24.72
LF	35.2	156.6	16.93	33.93

3 结 论

本研究基于果园植保机具田间对比试验方法,对 Z-3 N 型单旋翼油动无人机和 FXS7B-340 圆形果园风送喷雾机进行了田间喷雾测试,对比分析了纯喷药小时生产率、节水性能、雾滴沉积覆盖率、雾滴分布均匀性等性能指标,主要结论如下:

1) 单旋翼油动无人机喷雾作业的果树上中下层雾滴沉积覆盖率分别为 0.66%~21.98%、1.20%~16.17%、0.38%~3.96%,雾滴平均体积中值直径大小顺序依次为上层>中层>下层。圆形果园风送喷雾机喷雾作业的果树上中下层雾滴沉积覆盖率分别为 5.68%~24.94%、2.64%~34.61%、3.15%~21.78%,雾滴平均体积中值直径大小顺序依次为下层>中层>上层。

2) 单旋翼油动无人机喷洒的果树中上层雾滴

沉积覆盖效果显著,圆形果园风送喷雾机为中下层效果显著,无人机与喷雾机中层叶背的着药效果均属最佳。无人机喷洒在中层叶面上的雾滴分布均匀度最佳,其次为上层和下层;上层叶背的雾滴分布均匀度最佳,其次为下层和上层。喷雾机喷洒在下层叶面的雾滴分布均匀度最佳,其次为中层和上层;下层叶背的雾滴分布均匀度最佳,其次为中层和上层。

3) 排除机具故障等不确定因素影响,单旋翼油动无人机作业的工作效能与节水省药性能总体优于圆形果园风送喷雾机。单旋翼油动无人机在果园抢农时和病虫害应急处理上表现出较好的实用性能。

参考文献 References

- [1] 李龙龙,何雄奎,宋坚利,刘杨,王志翀,李进耀,贾晓铭,刘志雄. 果园仿形变量喷雾与常规风送喷雾性能对比试验[J].

- 农业工程学报, 2017, 33(16): 56-63
- Li L L, He X K, Song J L, Liu Y, Wang Z C, Li J Y, Jia X M, Liu Z X. Comparative experiment on profile variable rate spray and conventional air assisted spray in orchards [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(16): 56-63 (in Chinese)
- [2] 丁素明, 傅锡敏, 薛新宇, 周良富, 吕晓兰. 低矮果园自走式风送喷雾机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 18-25
- Ding S M, Fu X M, Xue X Y, Zhou L F, Lü X L. Design and experiment of self-propelled air-assisted sprayer in orchard with dwarf culture [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(15): 18-25 (in Chinese)
- [3] 贾晓曼, 张勇, 门兴元, 李丽莉, 翟浩. 果园风送式喷雾机在矮砧苹果园的应用与喷施效果评价[J]. 山东农业科学, 2019, 51(7): 87-91
- Jia X M, Zhang Y, Men X Y, Li L L, Zhai H. Evaluation on application and spraying effect of air-assisted sprayer in dwarfing rootstock apple orchard [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2019, 51(7): 87-91 (in Chinese)
- [4] 周良富, 薛新宇, 周立新, 张玲, 丁素明, 常春, 张学进, 陈晨. 果园变量喷雾技术研究现状与前景分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 80-92
- Zhou L F, Xue X Y, Zhou L X, Zhang L, Ding S M, Chang C, Zhang X J, Chen C. Research situation and progress analysis on orchard variable rate spraying technology [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(23): 80-92 (in Chinese)
- [5] 熊波, 李传友, 滕飞, 刘京蕊, 张莉, 李震, 赵谦, 熊海龙. 几种常用风送式果园喷雾机作业参数比较[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(12): 85-93
- Xiong B, Li C Y, Teng F, Liu J R, Zhang L, Li Z, Zhao Q, Xiong H L. Comparison of the working parameter of a few common air blast orchard sprayers [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2019, 21(12): 85-93 (in Chinese)
- [6] 张杰, 杨豫新, 谢建华. 精准施药技术与装备发展现状[J]. 新疆农机化, 2019(5): 8-12
- Zhang J, Yang Y X, Xie J H. Development status of technology and equipment for precise pesticide application [J]. *Xinjiang Agricultural Mechanization*, 2019(5): 8-12 (in Chinese)
- [7] 秦维彩, 薛新宇, 周立新, 张宋超, 孙竹, 孔伟, 王宝坤. 无人直升机喷雾参数对玉米冠层雾滴沉积分布的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 50-56
- Qin W C, Xue X Y, Zhou L X, Zhang S C, Sun Z, Kong W, Wang B K. Effects of spraying parameters of unmanned aerial vehicle on droplets deposition distribution of maize canopies [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(5): 50-56 (in Chinese)
- [8] 张京, 何雄奎, 宋坚利, 曾爱军, 刘亚佳, 李学锋. 无人驾驶直升机航空喷雾参数对雾滴沉积的影响[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 94-96
- Zhang J, He X K, Song J L, Zeng A J, Liu Y J, Li X F. Influence of spraying parameters of unmanned aircraft on droplets deposition [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(12): 94-96 (in Chinese)
- [9] 何勇, 吴剑坚, 方慧, 郑启帅, 肖舒裴, 岑海燕. 植保无人机雾滴沉积效果研究综述[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2018, 44(4): 392-398, 515
- He Y, Wu J J, Fang H, Zheng Q S, Xiao S P, Cen H Y. Research on deposition effect of droplets based on plant protection unmanned aerial vehicle: A review [J]. *Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences*, 2018, 44(4): 392-398, 515 (in Chinese)
- [10] Huang Y B, Thomson S J, Hoffmann W C, Lan Y B, Fritz B K. Development and prospect of unmanned aerial vehicle technologies for agricultural production management [J]. *Int J Agric & Biol Eng*, 2013, 6(3): 1-10
- [11] 何雄奎. 我国植保无人机的研究与发展应用浅析[J]. 农药科学与管理, 2018, 39(9): 10-17
- He X K. Brief analysis on the research development and application of plant protection UAV in China [J]. *Pesticide Science and Administration*, 2018, 39(9): 10-17 (in Chinese)
- [12] 袁会珠, 薛新宇, 闫晓静, 秦维彩, 孔肖, 周洋洋, 王明, 高赛超. 植保无人飞机低空低容量喷雾技术应用与展望[J]. 植物保护, 2018, 44(5): 152-158, 180
- Yuan H Z, Xue X Y, Yan X J, Qin W C, Kong X, Zhou Y Y, Wang M, Gao S C. Applications and prospects in the unmanned aerial system for low-altitude and low-volume spray in crop protection [J]. *Plant Protection*, 2018, 44(5): 152-158, 180 (in Chinese)
- [13] 姜昆, 王永龙, 樊嘉荣, 张梦龙. 多旋翼无人机飞行载荷对雾滴沉积规律的影响[J]. 农机化研究, 2020, 42(5): 25-32
- Jiang K, Wang Z H, Fan J R, Zhang M L. Droplet deposition rules of multi rotor UAV flight loads impact [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2020, 42(5): 25-32 (in Chinese)
- [14] 张盼, 吕强, 易时来, 刘颖, 何绍兰, 谢让金, 郑永强, 潘海