

小麦不同生育期单旋翼植保无人机 施药作业参数优化

孙涛¹ 张宋超¹ 薛新宇^{1*} 顾伟¹ 焦雨轩¹ 孙向东²

(1. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014; 2. 无锡汉和航空技术有限公司, 江苏 无锡 214125)

摘要: 为确定小麦不同生育期与不同病虫害的单旋翼植保无人机施药作业参数,以CE20型电动单旋翼植保无人机为对象,分别在返青期、齐穗期与盛花期对作业速度、作业高度和喷施流量进行优选试验。经对比分析作业喷幅、雾滴覆盖率变异系数与雾滴穿透率,筛选B5(作业速度4 m/s、作业高度2 m、喷施流量2 L/min)与B9(作业速度3 m/s、作业高度1.5 m、喷施流量2 L/min)为较优作业参数组合。在小麦返青期,当作业参数组合为B5时,有效喷幅为5.75 m,雾滴覆盖率变异系数为26.2%,综合作业效率最高,达36.8 hm²/d。在小麦齐穗期,B5与B9作业参数组合的雾滴穿透率分别为46.7%和60.1%,综合作业效率分别为36.8 hm²/d和26.02 hm²/d;施药前,当小麦蚜虫数量小于800头/百株时,B5和B9作业参数组合施药后7 d防治效果均为92.37%以上,当小麦蚜虫数量大于800头/百株时,B9作业参数组合的防治效果高于B5作业参数组合;施药前,当小麦白粉病病情指数小于5.00时,B5和B9作业参数组合施药后14 d防治效果均为81.86%以上,当小麦白粉病病情指数大于5.00时,B9作业参数组合的防治效果高于B5作业参数组合。在小麦盛花期,B5与B9作业参数组合的雾滴穿透率分别为43.8%和55.1%;施药前,当小麦白粉病病情指数小于5.00时,B5和B9作业参数组合防治效果均为86.65%以上,当小麦白粉病病情指数大于5.00时,B9作业参数组合的防治效果高于B5作业参数组合;B5和B9作业参数组合施药后20 d对小麦赤霉病的防治效果差异不大。在小麦齐穗期与盛花期施药参数选择时需结合田间实际病虫害发生情况,当病虫害等级较低时,选择作业效率更高的B5作为较优的作业参数组合,当病虫害等级较高时,选择雾滴穿透性更高的B9作为较优的参数。

关键词: 单旋翼; 植保无人机; 小麦; 生育期; 作业参数; 优化

Optimization of operation parameters for single-rotor plant protection unmanned aerial vehicle (UAV) at different growth stages of wheat

Sun Tao¹ Zhang Songchao¹ Xue Xinyu^{1*} Gu Wei¹ Jiao Yuxuan¹ Sun Xiangdong²

(1. Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, Jiangsu Province, China; 2. Wuxi Hanhe Aviation Technology Co., Ltd, Wuxi 214125, Jiangsu Province, China)

Abstract: In order to optimize the operating parameters of single-rotor plant protection UAV at different growth stages of wheat for control of diseases and pests, CE20 electric single-rotor plant protection UAV was used as the research object, the combinations of commonly used operating parameters (operating speed, operating altitude and spraying flow) were tested and optimized at the regreening stage, the full heading stage and the flowering stage of winter wheat. Through comparing the spraying width, the coefficient of variation of droplet coverage and the droplet penetration rate, B5 (operating speed 4 m/s,

基金项目: 中国农业科学院基本科研业务费专项(S202009-03), 国家重点研发计划(2017YFD0701000, 2016YFD0200700)

* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: 735178312@qq.com

收稿日期: 2021-02-20

operating altitude 2 m, spraying flow 2 L/min) and B9 (operating speed 3 m/s, operating altitude 1.5 m, spraying flow 2 L/min) were selected as the preferable combinations of operating parameters. At the re-greening stage of winter wheat, the spraying width was 5.75 m, the coefficient of variation of droplet coverage was 26.2%, and the daily comprehensive operating efficiency was the highest, up to 36.8 hm²/d when the combination of operation parameter was B5. At the full heading stage, the droplet penetration rates were 46.7% and 60.1%, the daily comprehensive operating efficiency were 36.8 hm²/d, 26.02 hm²/d when the combinations of operation parameter were B5 and B9, respectively. At the full heading stage, when the number of aphids before spraying pesticide was less than 800 per 100 plants, the control efficacy evaluated after seven days were both higher than 92.37% using B5 and B9, when the number of aphids was more than 800 per 100 plants, the average control efficacy after seven days was higher using B9 than that using B5. When the disease index of powdery mildew before spraying pesticide was less than 5.00, the control effect of B5 and B9 after 14 d were both higher than 81.86%. When the disease index was higher than 5.00, the average control efficacy was higher using than that using B5. At the flowering stage, the droplet penetration rates of B5 and B9 were 43.8% and 55.1%, respectively. When the disease index of powdery mildew before spraying pesticide was less than 5.00, the control efficacy was higher than 86.65% using either B5 or B9, and when the disease index was higher than 5.00, the average control efficacy using B9 was higher than that using B5. The control efficacy for wheat scab evaluated 20 d post-application showed little difference between using B5 and using B9. Therefore, the selection of pesticide application parameters at full heading and flowering stage should take the level of pests and diseases into consideration. When the occurrence level of pests and diseases was low, the B5 parameter combination with higher operation efficiency should be selected, and the B9 parameter combination with higher droplet penetration should be selected when the occurrence level of pests and diseases was high.

Key words: single-rotor; plant protecting UAV; wheat; growth stages; operating parameters; optimization

随着我国农业现代化进程的加快以及农村土地流转趋势的日益明显,小麦种植规模不断扩大,机械化生产模式得到大规模普及,播种、施肥及收获都实现了较高度度的机械化。与之形成鲜明对比,施药仍是以背负式喷雾机/器的粗放施药技术为主,作业效率低,农药使用量大,防治效果不稳定,已成为限制我国农业全程机械化发展的主要因素之一,同时化肥农药的过量施用严重污染我国农田生态环境,进而引发耕地质量下降、生物多样性下降等一系列问题(张凯等,2019)。近几年植保无人机施药技术研究逐步开展,并已取得了阶段性成果。与传统的背负式喷雾机/器相比,植保无人机具有作业效率高、劳动力投入少、省水节药明显、适应性广等特点(薛新宇等,2008;张东彦等,2014;兰玉彬等,2019),发展态势迅猛。

伴随着植保无人机使用的逐渐普及,与之配套的施药技术也显得越来越重要。在小麦不同生育期,植株特性与病虫害发生种类有较大差异(许向利等,2012;刘娜,2018;高建坤,2021),在施药过程中,

如果忽视这一特性,片面地追求作业效率,不仅对病虫害的防治效果差,而且还会因农药飘移而对环境造成污染(Huang et al., 2017; Zhang et al., 2017; Qin et al., 2018),这给植保无人机产业发展带来巨大的负面影响。如何合理搭配作业参数,保障作业质量,已成为植保无人机研究热点之一。在作业参数与雾滴沉积关系研究方面,秦维彩等(2014;2016)分别研究了单旋翼与多旋翼植保无人机作业高度、速度、喷头流量等作业参数对雾滴沉积分布的影响;邱白晶等(2013)采用二因素三水平试验方法探究了单旋翼植保无人机喷雾沉积密度、均匀性与作业高度、速度及两因素间的交互作用关系;陈盛德等(2016)研究了电动单旋翼植保无人机不同喷雾作业参数对水稻冠层雾滴沉积分布的影响;杜文等(2017)研究了多旋翼植保无人机不同作业参数下水稻雾滴沉积分布均匀性与雾滴穿透率的变化规律;以上结果均表明作业速度和作业高度显著影响雾滴沉积分布。在作业参数与病虫害防治效果研究方面,韩冲冲等(2019)研究了多旋翼植保无人机飞行高度对雾滴在

水稻群体内沉积分布的影响以及雾滴大小对水稻稻瘟病与纹枯病防治效果的影响;张龙等(2018)研究了不同作业参数组合下单旋翼植保无人机雾滴沉积分布规律及对小麦蚜虫 *Macrosiphum avenae* 的防治效果;赵冰梅等(2018)研究了多旋翼植保无人机不同作业参数下玉米冠层各部分的雾滴沉积密度及对叶蝉 *Zygnema salina* 的防治效果;以上结果表明植保无人机作业参数影响雾滴在作物冠层的沉积分布,进而影响对病虫害的防治效果。已有研究多集中于作物某个生育期的病虫害防治,但是作物生育期不同,其株高、叶面积指数、病虫害及其发生特点也存在较大差异,目前针对不同生育期及病虫害防治要求的植保无人机作业参数优化的研究较少。

为探寻适合小麦不同生育期及病虫害发生特点的植保无人机作业参数,在前人研究成果的基础上,本研究结合小麦不同生育期的生长特性及实际病虫害发生情况,以作业效率与作业质量为考核目标,进行 CE20 型电动单旋翼植保无人机作业参数的优化,并测定优化作业参数下对病虫害的防治效果,以期对植保无人机的应用及小麦病虫害的防治提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

药剂:20 g/L 噻呋酰胺(thiafufamide)悬浮剂,江苏省盐城市利民农化有限公司;25% 高氯辛硫磷(phoxim)乳油,福建绿安生物农药有限公司;60% 吡蚜酮(pymetrozine)+20% 烯啶虫胺(nitenpyram)水分散粒剂,北京燕化永乐农药有限公司;48% 氰烯菌酯(phenamacril)·戊唑醇(tebuconazole)悬浮剂,江苏省农药研究所股份有限公司;航空喷洒专用助

剂,江苏克胜集团股份有限公司。

仪器:CE20 型电动单旋翼植保无人机,外型尺寸长 2 650 mm、宽 590 mm、高 760 mm,主旋翼长度 2 390 mm,最大载药量 20 L,2 个扇形雾喷头 Teejet 110025,喷洒流量可调,飞行高度 1~3 m,飞行速度 0~8 m,无锡汉和航空技术有限公司;LAI-2200C 型植物冠层分析仪,美国 Li-COR 公司;FYF-1 型手持风速风向仪,上海风云气象仪器有限公司;数字温湿度计,华谊电子科技有限公司;9000F MARKII 型扫描仪,佳能(中国)有限公司。

1.2 方法

1.2.1 植保无人机施药试验及其作业参数设计

于 2019 年 3—4 月在江苏省泗洪农业示范区进行试验,小麦种植品种为迁麦 33,播种时间为 2018 年 10 月下旬,播种方式为机条播,行距为 15 cm,种植密度约为 300 株/m²,结合当地小麦统防统治要求,分别于小麦返青期(3月 11—13 日)、齐穗期(4月 12—14 日)和盛花期(4月 28—30 日)利用单旋翼植保无人机进行施药。不同生育期小麦株高、冠层叶面积指数差异较大,在每次试验前分别对试验区内小麦株高与冠层叶面积指数进行测定,分别在飞机航线方向与航线垂直方向上选择 10 个点,测量每个点的小麦株高与叶面积指数,取其算术平均数。试验时用手持风速风向仪测定风速,用数字温湿度计测定相对湿度和温度。结合单旋翼植保无人机常规作业参数,作业速度设 3、4 和 5 m/s 三个水平,作业高度为距小麦冠层面的距离,设 1.5、2.0 和 2.5 m 三个水平,喷施流量通过调整压力来实现,喷头压力设 0.2 MPa 和 0.3 MPa 两个水平,其对应喷施流量分别为 1.6 L/min 和 2 L/min(表 1)。

表 1 植保无人机作业参数

Table 1 Operating parameters of plant protection UAV

处理编号 Treatment no.	速度 Speed/(m/s)	高度 Altitude/m	流量 Flow/(L/min)	处理编号 Treatment no.	速度 Speed/(m/s)	高度 Altitude/m	流量 Flow/(L/min)
A1	5	2.5	1.6	B1	5	2.5	2
A2	5	2.0	1.6	B2	5	2.0	2
A3	5	1.5	1.6	B3	5	1.5	2
A4	4	2.5	1.6	B4	4	2.5	2
A5	4	2.0	1.6	B5	4	2.0	2
A6	4	1.5	1.6	B6	4	1.5	2
A7	3	2.5	1.6	B7	3	2.5	2
A8	3	2.0	1.6	B8	3	2.0	2
A9	3	1.5	1.6	B9	3	1.5	2

1.2.2 作业喷幅、雾滴覆盖率及其变异系数测试

于小麦返青期(3月 11 日)进行作业喷幅、雾滴覆盖率及其变异系数测试。在大田内沿植保无人机

预设航线的垂直方向布置采样行,为确保飞机经过采样点时作业速度、作业高度以及喷头喷洒稳定,第 1 行采样点距离飞机起飞位置 30 m。每行的中心采

样点位于航线上,左右对称各布置10个采样点,每行共设置21个采样点,总宽度为7 m,大于CE20植保无人机有效喷幅的企业明示值6 m,共平行布置3行,行间距为10 m。每个采样点上插1根高1 m的采样杆,将纸卡通过万向夹夹在采样杆上,每个采样杆夹1张纸卡,调整纸卡的位置使其与小麦叶片冠层高度一致。纸卡上雾滴所覆盖的面积与纸卡总面积的比值为雾滴覆盖率。采用全因素组合试验,对A1~B9共计18组作业参数组合(表1)进行测试,对收集的纸卡进行扫描,扫描后图像通过DropletScan软件进行分析,得到植保无人机不同作业参数下不同采样点的雾滴覆盖密度与覆盖率。依据植保无人机质量评价技术规范NY/T3212—2018,从采样区两端逐个检查测点,两端首个单位面积雾滴数不小于15个/cm²的采样点作为作业喷幅的边界,取3行采样点边界间距离的平均数作为作业喷幅。用作业喷幅内采样点雾滴覆盖率的变异系数来衡量作业喷幅内的雾滴覆盖均匀性,变异系数=同一行作业喷幅内采样卡雾滴覆盖率标准差/雾滴覆盖率平均数,包含2个端点的数据,取3行采样卡测得数据的平均数。

1.2.3 作业喷幅内雾滴穿透率的确定

于小麦齐穗期(4月12日)和盛花期(4月28日)测定植保无人机作业喷幅内雾滴穿透率,采用对角线九点式定点法布置采样点,共设置4条航线,在第2与第3条航线上布置2次(图1),每个采样点上插1根高1 m的采样杆,将水敏纸通过万向夹夹在采样杆上,分为上、下2层,分别距小麦植株冠层和地面15 cm,每层1张水敏纸。每次试验完成后,待水敏纸上的雾滴充分干燥后,按照采样点顺序收集,并放入对应的密封袋中,带回实验室进行数据处理。植保无人机作业喷幅内下层采样卡雾滴覆盖率平均数与上层采样卡雾滴覆盖率平均数的比值即为雾滴穿透率,比值越大则表示雾滴穿透性越好。

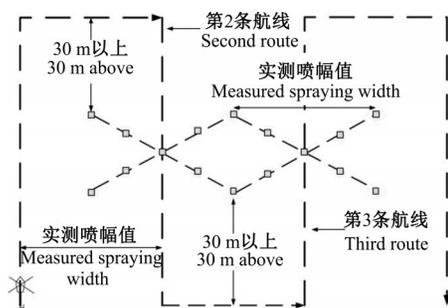


图1 雾滴穿透率采样点布置图

Fig. 1 Schematic layout of sampling points for measuring droplet penetration rate

1.2.4 小麦病虫害防治效果试验

试验地点同1.2.1,试验共设9个田块,每个田块长50 m,宽18 m,田块之间设置隔离带。在小麦返青期(3月13日),采用1.2.2筛选出的最优作业参数组合,对田块1~8进行施药,同时施用20 g/L噻呋酰胺悬浮剂和25%高氯辛硫磷乳油,施用量分别为300 mL/hm²和900 mL/hm²,田块9为空白对照。

待小麦齐穗期(4月14日),采用单旋翼植保无人机分别使用1.2.3优化后筛选出的2个较优作业参数组合对田块施药,田块1~4和田块5~8分别使用1组参数组合,均同时施用60%吡蚜酮+20%烯啶虫胺水分散粒剂和48%氰烯菌酯·戊唑醇悬浮剂,施用量分别为80 g/hm²和450 g/hm²,田块9为空白对照;施用60%吡蚜酮+20%烯啶虫胺水分散粒剂前以及施药后1、3和7 d,分别采用对角线五点取样法取样,每个点调查20株小麦上小麦蚜活虫数量,计算虫口减退率及防治效果;施用48%氰烯菌酯·戊唑醇悬浮剂前以及施药后7 d和14 d,分别采用对角线五点取样法取样,每个点调查20株小麦叶片的病斑面积和病叶数量,按照叶片病斑面积进行病叶等级划分,计算病情指数和防治效果,每个小区重复取样3次。病叶等级划分方法:0级,无病;1级,病斑面积占整个叶面积的5%以下;3级,病斑面积占整个叶面积的6%~15%;5级,病斑面积占整个叶面积的16%~25%;7级,病斑面积占整个叶面积的26%~50%;9级,病斑面积占整个叶面积的50%以上。虫口减退率=(施药前蚜虫活虫数-施药后蚜虫活虫数)/施药前蚜虫活虫数×100%,蚜虫防治效果=(处理区虫口减退率-对照区虫口减退率)/(1-对照区虫口减退率)×100%;白粉病病情指数=Σ(各级病叶数×病情等级数值)/(调查总叶片数×9)×100,白粉病防治效果=(空白对照区病情指数-处理区病情指数)/空白对照区病情指数×100%。

待小麦盛花期(4月30日)采用单旋翼植保无人机分别在2个较优作业参数组合下对田块施药,参数使用与田块设置与齐穗期一致,田块1~4和田块5~8分别使用1组参数组合,同时均施用60%吡蚜酮+20%烯啶虫胺水分散粒剂和48%氰烯菌酯·戊唑醇悬浮剂,施用量分别为80 g/hm²和450 g/hm²,施药后14 d调查白粉病的发病情况,药后20 d调查赤霉病的发病情况。白粉病调查方法及防治效果计算同小麦齐穗期。赤霉病采用对角线五点取样法取样,每点调查20株小麦的病穗数,每个小区重复取样3次,记录每株感病穗的面积及病穗数,按照感病穗面积

对赤霉病病穗进行等级划分,计算防治效果。赤霉病病穗等级划分方法:0级,全穗无病;1级,感病穗面积占全穗面积的24%及以下;2级,感病穗面积占全穗面积的25%~49%;3级,感病穗面积占全穗面积的50%~74%;4级,感病穗面积占全穗面积的75%以上。赤霉病病情指数= $\sum(\text{各级病穗数} \times \text{病情等级数值}) / (\text{调查总穗数} \times 4) \times 100\%$,赤霉病防治效果=(空白对照区病情指数-处理区病情指数)/空白对照区病情指数 $\times 100\%$ 。

1.2.5 植保无人机施药作业参数优化的评价指标

在小麦返青期,小麦株高较小,叶面积指数较低,相较于小麦生长后期,雾滴更容易穿透至各层叶片上,此时以作业效率以及有效喷幅内雾滴覆盖率均匀性为作业参数组合的评价指标,纯飞行喷洒作业效率=作业速度 \times 作业喷幅,单位面积施药量=喷施流量/喷洒作业效率。

在齐穗期与盛花期作业参数选择时,以返青期参数优化试验结果为基础,进一步开展雾滴穿透性试验,以雾滴穿透率作为作业参数组合的评价标准,雾滴穿透率=上层采样卡雾滴覆盖率/下层采样卡雾滴覆盖率 $\times 100\%$,同时结合田间实际病虫害发生情况及各参数组合下对病虫害的防治效果来确定最佳

作业参数组合。

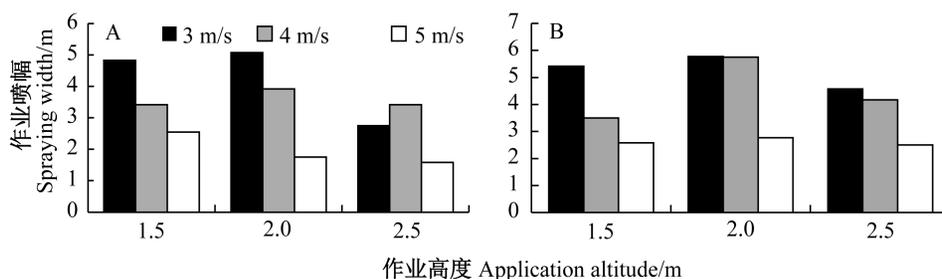
2 结果与分析

2.1 3个小麦生育期植保无人机施药试验环境条件

小麦返青期时,风速为0.8~1.9 m/s,平均气温为12℃,平均相对湿度为65%,小麦株高为15.5 cm,叶面积指数为1.65;小麦齐穗期时,风速为0.6~1.5 m/s,平均气温为22℃,平均相对湿度为45%,小麦株高为51.4 cm,叶面积指数为4.25;小麦盛花期时,作业条件风速为1.2~1.6 m/s,平均气温为28℃,平均相对湿度为52%,株高为70.3 cm,叶面积指数为5.47,3个生育期的环境条件均满足植保无人机作业条件。

2.2 不同施药作业参数下植保无人机作业喷幅

在不同作业参数下,植保无人机作业喷幅差异较大(图2)。在同一喷施流量与作业高度下,作业速度为5 m/s时的作业喷幅明显小于作业速度为4 m/s和3 m/s时的作业喷幅;在同一作业速度与高度下,喷施流量为2 L/min时的作业喷幅均大于喷施流量为1.6 L/min时的作业喷幅;作业高度为2 m时的作业喷幅大于作业高度为2.5 m和1.5 m时的作业喷幅。



A~B: 喷施流量为1.6 L/min和2.0 L/min。A~B: Spraying flow at 1.6 L/min and 2.0 L/min.

图2 单旋翼植保无人机9种作业参数组合下的作业喷幅

Fig. 2 Spraying width of single-rotor plant protection UAV under nine combinations of operating parameters

2.3 不同作业参数下植保无人机雾滴覆盖均匀性

当作业速度为5 m/s时,由于其作业喷幅较小,喷幅内的有效采样点少,因此在计算雾滴覆盖率变异系数时,其值相较于其他参数组合显著降低。当作业速度为3 m/s和4 m/s时,喷施流量下,随着作业高度的升高,作业喷幅内雾滴覆盖率变异系数呈增大趋势,雾滴覆盖率均匀性变差;在同一作业高度下,随着喷施流量的变大,作业喷幅内雾滴覆盖率变异系数逐渐降低,雾滴覆盖均匀性变好(图3)。

2.4 基于喷幅和雾滴覆盖均匀性的作业参数优化

施药作业参数组合A1、A2和A3的作业喷幅实测值较小,作业喷幅内的采样点少,覆盖率变异系数

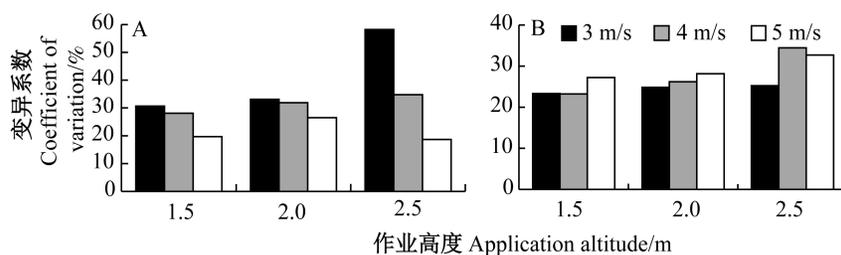
相对于其他组显著降低,故不予以分析。当植保无人机作业参数组合为A8、A9、B5、B8和B9时,作业喷幅均大于4.8 m,作业喷幅内覆盖率变异系数均小于35.0%,明显优于其他作业参数组合。在这5个作业参数组合下,植保无人机的作业效率分别为914.4、869.4、1 380.0、1 040.4和975.6 m²/min,施药量分别为17.5、18.4、15.5、19.2和20.5 L/hm²(表2)。

2.5 小麦返青期施药作业参数优化

作业参数组合为B5时,作业效率以及有效喷幅内雾滴覆盖率均匀性均最好。此时植保无人机的施药液量为15.5 L/hm²,作业喷幅为5.75 m,喷幅内雾滴覆盖率变异系数为26.2%,雾滴覆盖率均匀性较

好,在此作业参数组合下,1架载药量为20 L的CE20型电动单旋翼植保无人机可以持续喷洒10 min。在实际作业过程中,由于田块大小及航线设置,飞机在拐弯折返时需要进行减速与加速,单架平均飞行

时间约12 min,作业面积约为13 800 m²,架次之间起飞、降落、加药、更换电池等平均时间6 min,1 h可施药面积约为46 000 m²,按照作业时间8 h/d计算,其实际作业效率为36.8 hm²/d。



A~B: 喷施流量为1.6 L/min和2.0 L/min。A~B: Spraying flow at 1.6 L/min and 2.0 L/min.

图3 单旋翼植保无人机9种作业参数组合下喷幅内雾滴覆盖率变异系数

Fig. 3 Coefficient of variation of droplet coverage within the spraying width of the single-rotor plant UAV under nine combinations of operating parameters

表2 在较优作业参数组合下单旋翼植保无人机作业效率、施药量、雾滴覆盖率和雾滴穿透率

Table 2 Operating efficiency, pesticide volume, droplet coverage and penetration of the single-rotor plant UAV under the preferable combinations of operating parameters

编号 No.	作业速度 Operating speed/ (m/s)	作业高度 Operating altitude/m	喷施流量 Spraying flow/ (L/min)	作业效率 Operation efficiency/ (m ² /min)	施药量 Pesticide volume/ (L/hm ²)	齐穗期 Full heading stage			盛花期 Full-bloom stage		
						上层雾滴 覆盖率 Upper droplet coverage/ %	下层雾滴 覆盖率 Lower droplet coverage/ %	雾滴 穿透率 Droplet penetra- tion/%	上层雾滴 覆盖率 Upper droplet coverage/ %	下层雾滴 覆盖率 Lower droplet coverage/ %	雾滴 穿透率 Droplet penetra- tion/%
A8	3	2.0	1.6	914.4	17.5	2.11	0.69	32.8	-	-	-
A9	3	1.5	1.6	869.4	18.4	2.08	0.81	38.9	-	-	-
B5	4	2.0	2.0	1 380.0	15.5	2.27	1.06	46.7	1.93	0.85	43.8
B8	3	2.0	2.0	1 040.4	19.2	2.33	1.13	48.6	-	-	-
B9	3	1.5	2.0	975.6	20.5	2.68	1.61	60.1	2.28	1.26	55.1

2.6 小麦齐穗期施药作业参数优化

2.6.1 基于雾滴覆盖率的施药作业参数优化

在相同喷施流量下,上层雾滴覆盖率随着飞行速度与飞行高度的降低逐渐增大,作业速度为3 m/s的上层雾滴覆盖率高于作业速度为4 m/s的上层雾滴覆盖率,作业高度为1.5 m的上层雾滴覆盖率高于作业高度为2.0 m的上层雾滴覆盖率;下层雾滴覆盖率随着飞行高度的降低逐渐增加,作业高度为1.5 m的下层雾滴覆盖率高于作业高度为2.0 m的上层雾滴覆盖率;在相同飞行速度和飞行高度下,随着喷施流量的增加,上下层雾滴覆盖率均增加(表2)。

2.6.2 基于雾滴穿透率的施药作业参数优化

随着飞行速度、飞行高度的降低及喷施流量增大,雾滴穿透率呈增加的趋势(表2)。当作业参数组合为B5时,植保无人机的作业效率最高,为1 380.0 m²/min,雾滴穿透率为46.7%,当作业参数组

合为B9时,植保无人机雾滴穿透性最高,为60.1%,作业效率为975.6 m²/min(表2)。

2.6.3 基于齐穗期病虫害防治效果的作业参数优化

当施药前小麦蚜虫数量小于800头/百株时,作业参数B5与B9药后7 d对小麦蚜虫的防治效果分别为92.37%~92.71%和93.91%~94.82%;当施药前小麦蚜虫数量超过800头/百株时,作业参数B5与B9药后7 d对小麦蚜虫的防治效果分别为86.16%~88.62%和94.38%~95.68%,B9作业参数下,上、下层雾滴覆盖率和雾滴穿透率均高于B5作业参数,其防治效果明显高于B5参数组合(表3)。

当施药前小麦白粉病病情指数小于5.00时,作业参数组合B5和B9药后14 d对小麦白粉病的防治效果介于81.86%~84.43%;当施药前小麦白粉病病情指数大于5.00时,作业参数组合B5与B9药后14 d对小麦白粉病的防治效果分别为59.01%~65.57%和

67.08%~75.15%,作业参数组合B9的防治效果明显高于作业参数组合B5(表3)。

在小麦齐穗期病虫害防治时,当田间病虫害发生程度较低时,作业参数优化组合B5与B9均可以达到较好的防治效果,此时以作业效率为主要考核目标,故选择B5为最优作业参数组合,其施药液量

为15.5 L/hm²,综合实际作业效率为36.8 hm²/d。当田间小麦病虫害发生程度较重时,为了防治病情进一步恶化,以雾滴穿透率为主要考核目标,故选择B9为最优作业参数组合,其施药液量为20.5 L/hm²,综合实际作业效率为26.02 hm²/d。

表3 在较优作业参数组合下电动单旋翼植保无人机对小麦蚜和白粉病的防治效果

Table 3 Control efficacy of wheat aphid and powdery mildew using the electric single-rotor plant UAV under the preferable combinations of operating parameters

参数组合作业速度 Parameter combination	作业高度 Operating speed/ (m/s)	喷施流量 Spraying flow/ (L/min)	田块 Field	小麦蚜 Wheat aphid					小麦白粉病 Wheat powdery mildew			
				药前虫数 Number of wheat aphid before pesticide application/(heads/100 plants)	防治效果 Control effect/%			药前病情指数 Disease index before pesticide application	防治效果 Control effect/%			
					药后1 d One day after pesticide application	药后3 d Three days after pesticide application	药后7 d Seven days after pesticide application		药后7 d Seven days after pesticide application	药后14 d Fourteen days after pesticide application		
B5	4	2.0	2	1	614	82.66	86.64	92.71	3.07	73.07	82.16	
				2	635	82.08	88.04	92.37	3.71	73.84	81.86	
				3	875	71.40	79.97	86.16	7.78	40.55	59.01	
				4	935	76.93	82.73	88.62	6.48	50.39	65.57	
B9	3	1.5	2	5	542	82.37	87.74	93.91	3.45	76.41	84.43	
				6	866	84.03	89.53	95.68	2.41	75.71	84.35	
				7	524	84.54	89.46	94.82	7.83	46.92	67.08	
				8	823	80.65	87.94	94.38	5.74	58.35	75.15	
CK			9	587	-	-	-	8.93	-	-		

2.7 小麦盛花期施药作业参数优化

2.7.1 基于雾滴穿透率和覆盖率的作业参数优化

小麦盛花期时,小麦株高与叶面积指数较齐穗期增加,而上、下层雾滴覆盖率及雾滴穿透较小麦齐穗期降低,因此,采用小麦齐穗期优化后的作业参数组合B5和B9,当作业参数组合为B5与B9时,雾滴穿透率分别为43.8%和55.1%(表2)。

2.7.2 基于盛花期病虫害防治效果的作业参数优化

在小麦白粉病防治上,防治效果与雾滴的穿透率的规律与小麦齐穗期基本一致。当施药前病情指数小于5.00时,B5与B9这2种作业参数组合的防治效果分别为86.65%~87.47%和86.99%~87.81%;当病情指数大于5.00时,有较好雾滴穿透性的B9作业参数的防治效果为78.05%~84.55%,高于B5作业参数组合的防治效果(73.62%~75.83%,表4)。在小麦赤霉病防治上,B5与B9作业参数组合的防治效果差异不大,防治效果分别为81.78%~88.22%和81.20%~84.55%。综合以上分析,在小麦盛花期选择与齐穗期相同的作业参数,当田间病虫害等级较低时,选择作业效率高的B5参数组合;田间病虫害

等级较高时,选择雾滴穿透性较好的B9参数组合。

3 讨论

本研究结果显示,在不同作业参数组合下,植保无人机的作业喷幅与作业喷幅内雾滴覆盖率的变异系数存在较大差异,进而影响作业效率与作业质量。随着植保无人飞机作业速度的增加,雾滴迎风风速增加,同时单位面积上雾滴的沉积量减少,作业喷幅随之缩小;随着喷施流量的增加,单位面积上雾滴的沉积量增加,作业喷幅增加;作业高度过低不利于喷雾面的完全展开,作业高度过高则增加了雾滴蒸发比例与飘移概率,作业高度过高或者过低均会导致作业喷幅的缩小。与于丽娟等(2020)研究结果存在一些差异,但是随着作业高度的增加作业喷幅呈现先变大后缩小的趋势一致,其在实验室内进行试验且植保无人飞机为固定状态,这是造成与本研究结果差异的主要原因。本研究结果显示,作业喷幅内覆盖率变异系数随着作业高度的增加呈增大的趋势,因为随着飞行高度的增加,雾滴的运动时间增加,同时受到旋翼风场及田间风场的影响增加,从而

导致雾滴分布均匀性变差,与陈盛德等(2016)得出的趋势一致,但部分结果有差异,差异主要原因是试

验参数不同。因此在植保无人机实际作业时,采用常规作业参数组合,从而提高作业质量。

表4 在较优作业参数组合下电动单旋翼植保无人机对小麦白粉病和小麦赤霉病的防治效果

Table 4 Control effects of wheat powdery mildew and scab of the electric single-rotor plant UAV under the preferable combinations of operating parameters

参数组合 Parameter combina- tion	作业速度 Operating speed/ (m/s)	作业高度 Operating altitude/m	喷施流量 Spraying flow/ (L/min)	田块 Field	小麦白粉病 Wheat powdery mildew		小麦赤霉病 Wheat scab	
					施药前病情指数 Disease index before pesticide application	防治效果 Control effect/%	施药前病情指数 Disease index before pesticide application	防治效果 Control effect/%
					B5	4	2.0	2
				2	4.81	86.65	2.58	81.78
				3	10.87	73.62	2.40	88.22
				4	9.13	75.83	2.92	85.00
B9	3	1.5	2	5	4.13	86.99	2.67	84.42
				6	4.15	87.81	2.83	83.39
				7	8.73	78.05	1.83	84.55
				8	6.59	84.45	2.33	81.20
CK				9	26.52	-	8.32	-

在植保无人机作业参数与病虫害防治效果研究方面,蒙艳华等(2017)研究了单旋翼油动植保无人机在小麦田间雾滴沉积分布以及对小麦蚜虫的防治效果,结果表明当虫口基数较大时优先采用低作业速度、低作业高度、大喷施流量的施药方式,提高防治效果,当虫口基数不大时,则以预防为主,优先考虑作业效率;张海艳等(2019)通过研究提出雾滴沉积量随着喷施流量的增加及作业高度的降低而增加,沉积分布均匀性则随着作业高度的增加而变差,提高雾滴覆盖率与均匀性可以提高病虫害防治效果,与本研究结果的趋势一致。随着飞行速度的降低与喷施流量的加大,单位面积上的雾滴沉积量增加,植株上下层的雾滴覆盖率均增加,同时随着飞行高度的降低,植保无人机风场对小麦植株的扰动更大,可以使小麦冠层内部更好地暴露,进而提高植株下层的雾滴覆盖率。施药参数的选择不仅取决于雾滴沉积效果、作业效率,同样需要结合田间作物植株特性与病虫害的发生情况,综合考虑以确定植保无人机实际作业参数。小麦返青期时植株高度与叶面积指数较低,雾滴穿透难度小,优先考虑作业效率与雾滴覆盖均匀性;小麦齐穗期与盛花期,植株高度与叶面积指数均大大增加,同样也增加了雾滴穿透的难度,同时这2个生育期多发的病虫害多自植株基部发病,提高雾滴穿透率有利于提高防治效果,当田间基部病虫害发病情况较低时,优先选择作业效率较高的作业参数,当基部病虫害发病情况较重时,则在保证作业效率前提下选择雾滴穿透效果较好的作

业参数。

目前植保无人机作业参数与病虫害防治效果之间的研究多集中于不同作业参数下的研究,关于病虫害不同发生等级下的防治效果研究较少,不同生育期小麦的植株特性与病虫害发生情况差异较大,在植保无人机实际作业过程中,单一作业参数存在较大的局限性,必须根据实际情况来进行作业参数调整,使作业效率与作业质量之间达到平衡。本研究仅针对单旋翼植保无人机开展试验,关于多旋翼植保无人机以及不同田间风速条件对雾滴沉积与病虫害防治效果的影响还需要进一步研究。

参 考 文 献 (References)

- Chen SD, Lan YB, Li JY, Zhou ZY, Jin J, Liu AM. 2016. Effect of spray parameters of small unmanned helicopter on distribution regularity of droplet deposition in hybrid rice canopy. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 32(17): 40-46 (in Chinese) [陈盛德, 兰玉彬, 李继宇, 周志艳, 金济, 刘爱民. 2016. 小型无人直升机喷雾参数对杂交水稻冠层雾滴沉积分布的影响. *农业工程学报*, 32(17): 40-46]
- Du W, Cao YL, Xu TY, Cong L, Hong X, Tang R. 2017. Effect and assessment of UAV spraying parameters at japonica rice canopies. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 39(4): 182-186 (in Chinese) [杜文, 曹英丽, 许童羽, 丛林, 洪雪, 唐瑞. 2017. 无人机喷雾参数对粳稻冠层沉积量的影响及评估. *农机化研究*, 39(4): 182-186]
- Gao JK. 2021. Occurrence and control of wheat diseases, insect pests and weeds. *Modern Agricultural Science and Technology*, (7): 103-106 (in Chinese) [高建坤. 2021. 小麦病虫害的发生及防

- 治. 现代农业科技, (7): 103-106]
- Han CC, Li F, Li BT, Shi XG, Xiong ZH. 2019. A study on deposition distribution of droplets by UAV spraying rice population and its efficacy. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 41(1): 58-67 (in Chinese) [韩冲冲, 李飞, 李保同, 石绪根, 熊忠华. 2019. 无人机喷施雾滴在水稻群体内的沉积分布及防效研究. *江西农业大学学报*, 41(1): 58-67]
- Huang Y, Ouellet-Plamondon CM, Thomson SJ, Reddy KN. 2017. Characterizing downwind drift deposition of aerially applied glyphosate using RbCl as tracer. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(3): 31-36
- Lan YB, Chen SD, Deng JZ, Zhou ZY, Ouyang F. 2019. Development situation and problem analysis of plant protection unmanned aerial vehicle in China. *Journal of South China Agricultural University*, 40(5): 217-225 (in Chinese) [兰玉彬, 陈盛德, 邓继忠, 周志艳, 欧阳帆. 2019. 中国植保无人机发展形势及问题分析. *华南农业大学学报*, 40(5): 217-225]
- Liu N. 2018. Occurrence regularity and control technology of main wheat diseases. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, (6): 302-304 (in Chinese) [刘娜. 2018. 小麦主要病害的发生规律与防治技术. *农业科技通讯*, (6): 302-304]
- Meng YH, Lan YB, Li JY, Liu LL, Guo YW, Wang ZG, Zhou GQ. 2017. Optimization of operation parameters of single-rotor gas-powered UAV for controlling wheat aphid. *China Plant Protection*, 37(12): 66-71 (in Chinese) [蒙艳华, 兰玉彬, 李继宇, 刘琳琳, 郭永旺, 王志国, 周国强. 2017. 单旋翼油动植保无人机防治小麦蚜虫参数优选. *中国植保导刊*, 37(12): 66-71]
- Qin WC, Xue XY, Zhang SC, Gu W, Chen C. 2016. Optimization and test of spraying parameters for P20 multi-rotor electric unmanned aerial vehicle based on response surface method. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 37(5): 548-555 (in Chinese) [秦维彩, 薛新宇, 张宋超, 顾伟, 陈晨. 2016. 基于响应面法的P20型多旋翼无人机施药参数优化与试验. *江苏大学学报(自然科学版)*, 37(5): 548-555]
- Qin WC, Xue XY, Zhang SM, Gu W, Wang BK. 2018. Droplet deposition and efficiency of fungicides sprayed with small UAV against wheat powdery mildew. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(2): 27-32
- Qin WC, Xue XY, Zhou LX, Zhang SC, Sun Z, Kong W, Wang BK. 2014. Effects of spraying parameters of unmanned aerial vehicle on droplets deposition distribution of maize canopies. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 30(5): 50-56 (in Chinese) [秦维彩, 薛新宇, 周立新, 张宋超, 孙竹, 孔伟, 王宝坤. 2014. 无人直升机喷雾参数对玉米冠层雾滴沉积分布的影响. *农业工程学报*, 30(5): 50-56]
- Qiu BJ, Wang LW, Cai DL, Wu JH, Ding GR, Guan XP. 2013. Effects of flight altitude and speed of unmanned helicopter on spray deposition uniform. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29(24): 25-32 (in Chinese) [邱白晶, 王立伟, 蔡东林, 吴建浩, 丁国荣, 管贤平. 2013. 无人直升机飞行高度与速度对喷雾沉积分布的影响. *农业工程学报*, 29(24): 25-32]
- Xu XL, Li YH, Li YP, Wu JX, Lu JJ. 2012. Relationship between the population density of ground pests and degree of damage. *Journal of Plant Protection*, 39(5): 385-389 (in Chinese) [许向利, 李艳红, 李怡萍, 仵均祥, 陆俊娇. 2012. 小麦不同生育期地下害虫为害程度与其虫口密度的关系. *植物保护学报*, 39(5): 385-389]
- Xue XY, Liang J, Fu XM. 2008. Prospect of aviation plant protection in China. *Chinese Agricultural Mechanization*, 29(5): 72-74 (in Chinese) [薛新宇, 梁建, 傅锡敏. 2008. 我国航空植保技术的发展前景. *中国农机化*, 29(5): 72-74]
- Yu LJ, Zhang W, Zhang B, Zhang WW, Zhang P, Qi LQ. 2020. Experimental study on effective spray amplitude of single rotor UAV. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 32(6): 95-102 (in Chinese) [于丽娟, 张伟, 张博, 张伟巍, 张平, 亓立强. 2020. 单旋翼无人机有效喷幅试验研究. *黑龙江八一农垦大学学报*, 32(6): 95-102]
- Zhang DY, Lan YB, Chen LP, Wang X, Liang D. 2014. Current status and future trends of agricultural aerial spraying technology in China. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 45(10): 53-59 (in Chinese) [张东彦, 兰玉彬, 陈立平, 王秀, 梁栋. 2014. 中国农业航空施药技术研究进展与展望. *农业机械学报*, 45(10): 53-59]
- Zhang HY, Lan YB, Wen S, Yin XC, Liang B, Tian WK. 2019. Operational effects of unmanned helicopters for pesticide spraying in rice field. *Journal of South China Agricultural University*, 40(1): 116-124 (in Chinese) [张海艳, 兰玉彬, 文晟, 尹选春, 梁冰, 田维逵. 2019. 植保无人机水稻田间农药喷施的作业效果. *华南农业大学学报*, 40(1): 116-124]
- Zhang K, Feng TZ, Xiong C, Zhang Z. 2019. Top design and progress in research and development of synthesis technique for reduction and synergy of chemical fertilizers and pesticides in China. *Journal of Plant Protection*, 46(5): 943-953 (in Chinese) [张凯, 冯推紫, 熊超, 张昭. 2019. 我国化学肥料和农药减施增效综合技术研发顶层布局与实施进展. *植物保护学报*, 46(5): 943-953]
- Zhang L, Chen SM, Ma JL, Li GZ, Wang ZG. 2018. Study on droplet distribution of multi rotor unmanned aerial vehicle (UAV) in wheat field and its control effect against wheat aphid. *Pesticide Science and Administration*, 39(2): 46-52 (in Chinese) [张龙, 陈树茂, 马金龙, 李广泽, 王志国. 2018. 多旋翼植保无人机在小麦田的雾滴分布及对小麦蚜虫的防治效果初探. *农药科学与管理*, 39(2): 46-52]
- Zhang SC, Xue XY, Sun Z, Zhou LX, Jin YK. 2017. Downwash distribution of single-rotor unmanned agricultural helicopter on hovering state. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(5): 14-24
- Zhao BM, Ding LL, Zhang Q, Dong HQ. 2018. Control effects of low volume spraying using unmanned aerial vehicle (UAV) against *Zygina salina* Mit. *Plant Protection*, 44(1): 186-189 (in Chinese) [赵冰梅, 丁丽丽, 张强, 董红强. 2018. 电动多旋翼植保无人机低容量喷雾防治玉米三点斑叶蝉的应用研究. *植物保护*, 44(1): 186-189]

(责任编辑:张俊芳)