

多旋翼无人机辅助籼粳杂交稻制种授粉研究^{*}

翁晓星¹, 徐锦大¹, 赵晋¹, 黄贇¹, 边晓东¹, 王建军²

(1. 浙江省农业机械研究院, 浙江金华, 321017; 2. 浙江省农业科学院, 杭州市, 310021)

摘要:水稻是浙江省最主要的粮食作物,而籼粳杂交稻品种已成为浙江省的主要水稻种植品种类型。但籼粳杂交稻制种是一种劳力密集型技术,其中水稻授粉阶段主要依靠人工采用绳索、竹竿或木杆振动父本和自然风力辅助授粉。随着近年来中国农用无人机的发展与研究,为杂交水稻制种辅助授粉机械化提供了可能。以四旋翼无人机为例,通过田间授粉试验、花粉密度观测、结实率测算,考察农用无人机和人工拉绳的授粉效果。结果显示,无人机辅助授粉与人工拉绳相比效果相当,即花粉统计为 95 个/视野左右,平均结实率为 27% 左右。但无人机辅助授粉效率是人工的 10 倍以上,节约 50% 的人力成本,同时克服种植地形环境等困难,有助于机械化水平的提升。

关键词:籼粳杂交稻;无人机;辅助授粉

中图分类号:S223.2 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553(2022)09-0024-06

翁晓星, 徐锦大, 赵晋, 黄贇, 边晓东, 王建军. 多旋翼无人机辅助籼粳杂交水稻制种授粉研究[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(9): 24-29

Weng Xiaoxing, Xu Jinda, Zhao Jin, Huang Yun, Bian Xiaodong, Wang Jianjun. Study on seed production and pollination of Indica-japonica hybrid rice assisted by multi-rotor UAV [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(9): 24-29

Study on seed production and pollination of Indica-japonica hybrid rice assisted by multi-rotor UAV

Weng Xiaoxing¹, Xu Jinda¹, Zhao Jin¹, Huang Yun¹, Bian Xiaodong¹, Wang Jianjun²

(1. Zhejiang Academy of Agricultural Machinery, Jinhua, 321017, China;

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

Abstract: Rice is the most important grain crop in Zhejiang province, and Indica-japonica hybrid rice has become the main rice variety type in Zhejiang Province. However, seed production of Indica-japonica hybrid rice is a labor-intensive technology, in which the pollination stage of rice mainly relies on the artificial use of rope, bamboo or wooden poles to vibrate the male parent and natural wind assisted pollination. With the development and research of agricultural UAV in China in recent years, it is possible for the mechanization of auxiliary pollination for hybrid rice seed production. Taking the quadrotor UAV as an example, this paper investigated the pollination effect of the agricultural UAV and the artificial rope through the field pollination experiment, the observation of pollen density and the calculation of seed setting rate. The results showed that the effect of drone assisted pollination was comparable to that of artificial pull rope, i. e., the pollen count was about 95 IOD and the average seed setting rate was about 27%. However, the efficiency of UAV assisted pollination is more than 10 times that of manual pollination, saving 50% of labor cost, and overcoming difficulties such as planting terrain and environment, which contributes to the improvement of mechanization level.

Keywords: Indica-japonica hybrid rice; unmanned aerial vehicle; auxiliary pollination

0 引言

目前,水稻是浙江省种植面积最广,最主要的粮食

作物。2017 年全省种植面积 828.83 km²,占粮食作物总面积的 64.7%;稻谷总产占全省粮食作物总产的 80%左右。有别于常规稻,杂交稻(Hybrid rice)品种

收稿日期:2021年8月28日 修回日期:2021年9月16日

^{*} 基金项目:浙江省重点研发计划项目(2019C02007)

第一作者:翁晓星,女,1986年生,浙江金华人,硕士,高级工程师;研究方向为农业机械。E-mail: 390920801@qq.com

通讯作者:徐锦大,男,1965年生,浙江金华人,高级工程师;研究方向为农业机械。E-mail: why0578@163.com

约 153.33 km²,其约占稻品种总面积的 55%。在杂交稻品种中,籼粳杂交稻(*Indica-japonia hybrid rice*)品种面积约 366.66 km²,占杂交稻种植面积的 80%,占水稻总面积的 45%,可见,籼粳杂交稻品种已成为我省的主要水稻种植品种类型。

随着国内土地流转率的进一步提升,农业规模化生产成为一种趋势,同时浙江省开展粮食生产功能区“非粮化”整治的情况下,迫切需要规模化、机械化。提高大田作物生产全程机械化水平是保障国家粮食安全、增强中国农业综合生产能力、增加农业收入和推进农业现代化的重要措施之一^[1-2]。浙江省的水稻机械化率在 80%以上,但在籼粳杂交稻在制种环节还存在较大技术障碍,其主要难点之一就是授粉。在授粉环节,以前常用的两种方法为拉绳辅助授粉和竹竿辅助赶粉(单竿振动、单竿推压、双竿推压)。虽然竹竿辅助授粉效果较好,但拉绳授粉在效率上比竹竿赶粉高,目前普遍采用拉绳授粉。以上两种方式均需人工完成。因此现今杂交水稻制种依旧依靠大量的人工,是一项费工费时、劳动强度大、成本高的产业。随着农村经济的进一步发展,制种过程中雇工难、劳动成本高的问题日益显现^[3]。其制种的机械化对促进杂交水稻生产的发展、提高水稻质量和产量起着先导作用,因此亟需实现籼粳杂交水稻制种机械化作业^[4-5]。

1 农用无人机研究现状

无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)是一种无人驾驶的远程控制的飞行器,利用无线电遥控装置和自备的程序控制装置完成各种指定任务。无人机按照应用领域分为农业无人机、灾难救援无人机、电力巡查无人机等。通过农用无人机作业,能够有效应对农业发展中各类地形限制,比如山区、丘陵和坡地等,同时不会受到农作物自身高度等要素的影响,能够有效解决部分偏远地区大型农业机械无法作业等问题。

1.1 国外研究情况

在农业航空领域,由于地理环境特点,小型无人机航空植保在亚洲地区发展迅速。日本是最早将无人驾驶直升机施药技术运用于农业生产的国家,也是当今世界上该技术发展最成熟的国家之一。与其他发达国家相比,日本农业经营规模相对较小,常规的大型地面施药技术装备无法满足实际要求。在无机可用的状况下,日本引入航空无人直升机^[6]。日本在农业航空领域经历了有人直升机空中农药、化肥喷施和飞机播种到无人直升机空中作业的快速发展阶段,以雅马哈发动机有限责任公司研发并投入使用的植保无人直升机最为著名^[7]。2015年以来,日本企业开始从单旋翼无

人机的基础上陆续推出四旋翼、六旋翼、八旋翼等多旋翼植保无人机^[6]。

1.2 国内研究情况

中国在农林应用上的飞机主要是以固定翼和直升飞机为主,农用无人机的研究和应用是在近几年才开始的^[8]。我国植保无人机的应用推广起步于 2012 年。无人机植保技术^[9],与传统的人工施药和地面机械施药方法相比,响应快,具有作业效率高、成本低、农药利用率高的特点^[10-13]。旋翼植保无人机在水田、高秆作物间进行植保、农作物信息采集以及预防治理爆发性病虫害等方面已经表现出突出的优势,近年来已经逐步在水稻、小麦、玉米、棉花等大田作物上展开应用,但与农业航空发达国家相比差距较大。据不完全统计,目前全国植保无人机装机量达到 2.5 万架。

但农用无人机的应用与研究主要集中在植保环节,杂交水稻制种辅助授粉机械化方面的研究比较少。由于无人机具有飞行自由,可全方位穿梭自如的特点,可实现水稻的辅助授粉。2012—2015 年由袁隆平农业高科技股份有限公司牵头开展单旋翼农用无人机辅助授粉技术研究。配套父母本大行比种植方式的农用无人机辅助授粉制种产量达到了 3 t/hm²,与父母本小行比种植方式人工辅助授粉制种的产量相当^[14]。

小型农用无人机的优势在于:便于飞行路线部署,特别是适用于在小地块、复杂地形等人工或地面作业机具难以作业的情况。而多旋翼无人机与单旋翼无人直升机相比,其结构有很大差异^[15-17],多个旋翼一般采用圆形对称结构布局,飞行中所产生的气流是多个旋翼共同作用的结果^[18]。对于多旋翼无人机,旋翼的数量越多,平衡作用效果越好,飞行稳定性也越好;震动小;成本低;结构简单,易维护;自动化程度高,容易操控,对操控员要求较低;场地适应能力强,轻便灵活。由于以上多方面的显著优势,预计未来几年,我国植保无人机仍将以多旋翼植保无人机为主。本文试验选用多旋翼农用无人植保机(以四旋翼为例),与拉绳授粉方式进行辅助杂交水稻制种授粉效果对比试验。

2 试验设计

2.1 试验对象与场地选择

本文选用四旋翼植保无人机为例,该机型号为 3WD4-10,质量为 12.3 kg,旋翼直径 736.6 mm,有效载药量 10 L,最大起飞重量 26 kg,连续作业时间为 6 min。

2020 年在浙江省海宁试验田进行试验。对于杂交水稻制种,父母本一般能采用 1:(8~10)或 2:(10~12)的小行比相间种植,父母本间距 25 cm。

2.2 考查内容与方法

杂交水稻制种完全依赖父母本异花授粉来实现产量,而母本异交结实率的高低,取决于父本花粉散落到母本的情况。通过农用无人机和人工拉绳辅助授粉进行对比试验。在父母本行比为1:8的试验区内,选取父母本生长正常、花期相遇较好状况的区段作为观测区,用于授粉后花粉密度观测和母本结实率考查。本试验选用的四旋翼植保无人机,该型号可通过地面遥控,实现低高度作业,漂移少,可空中悬停。图1为面积相等的两个观测区(农用无人机辅助授粉区和人工拉绳区)。



(a) 无人机辅助授粉



(b) 人工拉绳授粉

图1 现场授粉试验

Fig. 1 Field pollination test

由前期研究表明旋翼无人机授粉作业参数中的飞行速度主要影响风场宽度,当飞行速度增大时产生垂直风场变小。旋翼的转速越大,风场宽度越大,散粉的效率也越高,更能达到授粉的效果。但实际飞行时速度不可能无限增大,其不仅受到无人机自身设计性能的限制,例如承载重量等,且受到大环境风向风速的影响。结合试验的场地、当时的风向风速等因素,将无人机的飞行速度设置为4 m/s。而当旋翼与杂交水稻距离超过一定距离时,旋翼气场变得复杂,距离过近容易伤到水稻,为了保持无人机的稳定低空飞行,确保花粉像粉尘一样卷起,保证授粉效果。将此试验飞行高度设置为2 m。

除了考虑水稻生长状况外,试验田的选择还需考

虑田块的面积。相关文献研究表明,由于田块宽度对花粉扩散率影响不大,主要受到田块长度的影响,田块长度越大,越多的杂交稻花粉扩散到下风方。但并不是无限长,当达到一定峰值后就逐渐下降。因此应选择合适长度的试验田,在本次试验的稻田长度为300 m,宽为60 m。

2.2.1 田间花粉密度观测

在行间距为25 cm的籼粳杂交稻田中,母本区内距离父本50 cm设置第一个观测点,之后每隔50 cm设置一个观测点,纵向等间距取三行,母本共计9个观测点,同时也在父本纵向设置等间距3个观测点(图2),从左至右将观测点标记“东”“中”和“西”。每个观测点立一个样本采集桩,父本盛花期观测2次。无人机飞行授粉和拉绳辅助授粉前在每个桩顶端用双面胶粘1块涂有凡士林的载玻片(Pollen trap,捕捉花粉载体)。无人机授粉或拉绳辅助授粉后将相应的回载玻片取回,利用2%碘-碘化钾溶液染色,在100倍显微镜下观察授粉分布情况,并计数正常染色花粉粒数,以及计算每个观测点的平均正常染色花粉粒数。

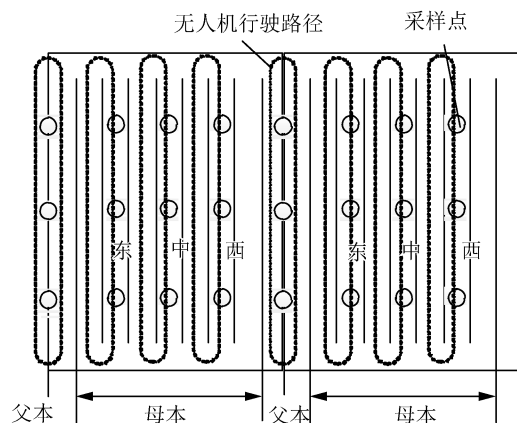


图2 试验田采样点设置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sampling point setting in test field

2.2.2 母本异交结实率考查

母本成熟收割前2天,在试验田的母本厢内每个花粉密度测定点点选取异交结实率好的母本穗,考查异交结实潜力;同时也在每个观测点连续取3穴,考查母本群体异交结实率,并调查单位面积母本有效穗数。

2.2.3 测产

母本收割前1天,在父母本每个行比试验区内取3点作为3次重复,每点实收面积为1 m×厢宽的母本,脱粒干燥并风选,并按照母本占地比例,测算制种产量。

3 田间试验

3.1 田间花粉密度观测

授粉期为8月底至9月初,天气较好,自然风速在

1~2 级。一天中花粉源强是不断变化,趋势呈现单峰型。相关文献研究表明,上午 7:00~9:30 水稻开花量较小,此时花粉源强不足总量的 10%;随着光照增强,花粉量突增;10:30~12:00 是花粉源强最大的时间段,占整日总量的 30%~56%;达到最大值之后,父本的花粉源强开始随时间逐渐下降,12:30 后开花过程基本结束,花粉源强只占总量 0~2%。因此在试验田父本盛花期前 2 天,采样时间选在花粉源最强时段,即中午 10:30~12:30,无人机辅助授粉每天需进行 2~3 次,每次授粉时间控制在 30~40 min 内。

本研究花粉收集是利用自然重力沉降法,即采用涂有凡士林的载玻片捕捉水稻花粉,用花粉沉降量表示花粉浓度,此为沉降载玻片单位面积内的花粉数量。如图 3 所示,可清晰地看到与底色不同的圆形物质,此为试验观测的被染色花粉。通过分类识别与统计,记录下各区域内捕获的花粉数。由于在采样过程中存在压板手势等原因,载玻片呈现出了水渍,但总体不影响花粉粒数的统计。



图 3 100 倍显微镜下载玻片的花粉呈现

Fig. 3 Pollen present on the slide downloaded by 100x microscope

从采样点花粉统计看,无人机授粉和人工拉绳授粉作用下花粉数平均数差不多。同时试验发现,在父本观测点收集的花粉均值在 196,而参照图 2 所示,采用人工拉绳授粉时越靠近父本花粉数越多(东侧的观测点是离父本最近的 50 cm 母本授粉观测点),即在父本区花粉数处于高峰,随后花粉量迅速下降。根据“有效源强”的相关理论,父本水稻颖壳张开后,里面的花丝迅速伸长,花药裂开,花粉便从花药中释放出来;在水稻近地层中,大气层结只影响风和湍流的大小,并不影响风的轮廓形式,花粉主要受风的影响,随着风向进行扩散,花粉沉降量会呈现如图 4 所示的单峰型。此趋势也与本试验数据结果近似。

如表 1 所示,人工授粉主要集中在靠近父本的观测点东部,中部和西部明显减少,仅为东部数量的一

半;无人机辅助授粉时花粉东部和中部花粉数相当,西部较少为平均值以下。可见较人工拉绳,无人机辅助授粉的情况下该规律相对不明显,花粉分布更均匀,扩散的面积更大。如图 5 所示,不同采样区花粉的分布影响呈非对称性,无人机飞行过程中风力作用较大,而籼粳杂交水稻种植株距不大,使得花粉克服与花药的附着力,受到旋翼风脱离花药,随着气流扩散到更远的区域。

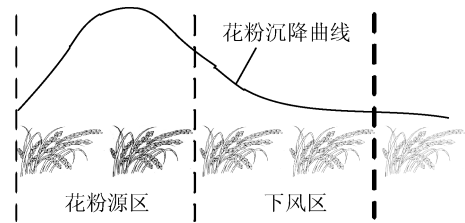


图 4 杂交水稻花粉沉降示意图

Fig. 4 Schematic diagram of pollen deposition in hybrid rice

表 1 在两种辅助授粉方式下采样点花粉统计

Tab. 1 Pollen counts were performed at sampling sites under two assisted pollination methods

授粉方式	花粉统计/(个·视野 ⁻¹)			
	东	中	西	平均值
人工授粉	152	63	68	94
无人机授粉	110	113	63	95

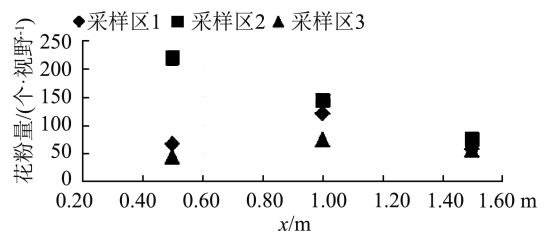


图 5 农用无人机辅助授粉不同采样区花粉数分布

Fig. 5 Distribution of pollen counts in different sampling areas assisted by agricultural UAV pollination

3.2 母本异交结实率考查

母本成熟收割前,在母本厢内每个花粉密度测定点点选取 20 个异交结实率好的母本穗,考查异交结实潜力;同时,在每个观测点连续取 3 穴,考查母本群体异交结实率,并调查单位面积母本有效穗数。

表 2 显示在两种辅助授粉方式下各观测点的结实率有差异,但总体上农用无人机授粉的结实率与人工拉绳辅助授粉相当,结实率分别为 27.01% 与 27.79%。将表 1 与表 2 进行比较,结实率分布与花粉密度分布存在一定差异。虽在结实率数值上也出现从东部、中部、西部依次减少的现象,但相较花粉分布,并没有呈现明显的“有效源强”特点,结实率与离父本距离和风向的相关性不高。

表2 在两种辅助授粉方式下结实率统计
Tab. 2 Statistics of seed setting rate under two auxiliary pollination methods

授粉方式	结实率/%		平均数/%	
无人机授粉	37.20	23.57	22.18	
	19.40	31.52	39.30	27.01
	25.47	22.99	21.45	
人工授粉	22.70	27.70	25.94	
	34.17	25.59	20.60	27.79
	41.53	32.88	18.99	

3.3 效率对比

在用工时长上,需1人地面遥控完成无人机辅助授粉,飞行速度保持在4 m/s,每天中午10:30~12:30进行2~3次,每次授粉时间控制在30~40 min内,可完成至少2 hm²以上的水稻的授粉作业。人工进行拉绳授粉,则需要2个人配合拉绳,沿田块不停走动。同样在一天中花粉源最强时段的2个小时内进行辅助授粉,可完成0.67 hm²左右的水稻授粉作业。经过测算,如表3所示,无人机辅助授粉效率是人工的10倍以上,成本上也可减少一半。

表3 在两种辅助授粉方式下工作情况分析
Tab. 3 Analysis of working conditions under two kinds of assisted pollination

授粉方式	用工人数	工作效率 /(km ² ·h ⁻¹)	成本 /(km ² ·h ⁻¹)
无人机授粉	1	3.33	5.3
人工授粉	2	0.26	3.35

通过田间试验发现:(1)在采样点花粉统计上,无人机辅助授粉和人工拉绳相比数量上差异不大,均在95个/视野左右。在花粉分布上两者有差别,无人机辅助授粉有效地削弱了“有效源强”的作用,其花粉分布相较人工拉绳更均匀,扩散的面积更大。(2)在母本异交结实率考查上,无人机授粉与人工拉绳辅助授粉虽然在各观测点的结实率有差异,但平均结实率相当,均为27%以上。(3)在产量测算上,两块试验田均在7.135 kg/hm²左右,差异也不显著。(4)在作业效率上,无人机辅助授粉效率是人工的10倍以上。在用工人数、用时与成本上,无人机比人工辅助授粉更有优势。

4 结论

由于籼粳杂交稻表现出超强的高产潜力水平和优良的植株形态,抗逆性强,因而是未来杂交水稻发展的主要方向。但籼粳杂交稻的制种是一项费工费时、劳动强度大、成本高的产业,提高机械化水平是产业振兴

的唯一出路。而实现机械化制种主要难点之一就是授粉。人工授粉是杂交水稻制种中最辛苦的环节。

依靠无人机辅助授粉能减轻对大气环境的影响,通过田间花粉密度观测、母本结实率考察等授粉效果试验表明无人机辅助授粉与人工拉绳相比,无论在花粉密度(95个/视野左右)、母本异交结实率(27%以上)、最终的产量(7.135 kg/hm²左右)上数值差异不大,授粉效果相当,但前者节约50%的人力成本,辅助授粉效率是人工的10倍以上,同时克服种植地形环境等困难。利用现有多旋翼农用植保空载无人机实现杂交水稻制种辅助授粉,无需任何改制,续航时间比载重农药时提高30 min,且授粉效率也提高15%以上。

随着小型无人机在农业上的迅猛发展,通过无人机作业,能够有效应对农业发展中各类地形限制,比如山区、丘陵和坡地等,不会受到农作物自身高度及各类地形要素的影响,能够有效解决部分偏远地区不便于人工拉绳授粉等问题,同时可以代替在高温下作业的人工授粉,劳动强度大幅降低,促进籼粳杂交水稻制种授粉机械化水平的提升。

参 考 文 献

- [1] 汤楚宙,王慧敏,李明,等. 杂交水稻制种机械授粉研究现状及发展对策[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 1-7.
Tang Chuzhou, Wang Huimin, Li Ming, et al. Study status and developmental strategies of mechanical pollination for hybrid rice breeding [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(4): 1-7.
- [2] 李小阳,孙松林. 南方水稻生产机械化发展影响因子新体系的研究[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(1): 103-106.
Li Xiaoyang, Sun Songlin. Study on the new system of factors influencing the development of mechanization of rice production in South China [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(1): 103-106.
- [3] 牟楠. 水稻全程机械化生产技术及装备研究[J]. 农业科技与装备, 2014(3): 34-35.
Mou Nan. Research on the technology and equipment for completely mechanized rice production [J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2014(3): 34-35.
- [4] 唐文帮,张桂莲,邓化冰. 杂交水稻机械化制种的技术探索与实践[J]. 中国水稻科学, 2020, 34(2): 95-103.
Tang Wenbang, Zhang Guilian, Deng Huabing. Technology exploration and practice of hybrid rice mechanized seed production [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2020, 34(2): 95-103.
- [5] 陈惠哲,毛一剑,朱德峰,等. 杂交水稻机械化制种技术初步研究[J]. 杂交水稻, 2012, 27(5): 34-36.
Chen Huizhe, Mao Yijian, Zhu Defeng, et al. A

- preliminary study on mechanized seed production technology of hybrid rice [J]. *Hybrid Rice*, 2012, 27(5): 34-36.
- [6] 阮晓亮, 石建尧, 陆永法, 等. 浙江省籼粳杂交晚稻品种发展与展望[J]. *中国稻米*, 2016, 22(4): 8-12.
Ruan Xiaoliang, Shi Jianyao, Lu Yongfa, et al. Development and prospect of indica-japonica hybrid late rice cultivar in Zhejiang Province [J]. *Rice abstracts*, 2016, 22(4): 8-12.
- [7] 何雄奎, Jane Bonds, Andreas Herbst, 等. 亚洲农用植保无人机发展与应用[J]. *中国农业文摘·农业工程*, 2017(6): 5-12.
He Xiongkui, Jane Bonds, Andreas Herbst, et al. Recent development of unmanned aerial vehicle for plant protection in East Asia [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, 10(3): 18-30.
- [8] 储为文. 我国植保机械化发展短板与提升对策分析[J]. *中国农机化学报*, 2021, 42(1): 46-51.
Chu Weiwen. Analysis of developing short board and lifting countermeasure of plant protection mechanization in China [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2021, 42(1): 46-51.
- [9] 田志伟, 薛新宇, 李林, 等. 植保无人机施药技术研究现状与展望[J]. *中国农机化学报*, 2019, 40(1): 37-45.
Tian Zhiwei, Xue Xinyu, Li Lin, et al. Research status and prospects of spraying technology of plant-protection unmanned aerial vehicle [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2019, 40(1): 37-45.
- [10] 陈盛德, 兰玉彬, 李继宇, 等. 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[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(17): 40-46.
Chen Shengde, Lan Yubin, Li Jiyu, et al. Effect of spray parameters of small unmanned helicopter on distribution regularity of droplet deposition in hybrid rice canopy [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(17): 40-46.
- [11] Qin Weicai, Qiu Baijing, Xue Xinyu, et al. Droplet deposition and control effect of insecticides sprayed with an unmanned aerial vehicle against plant hoppers [J]. *Crop Protection*, 2016, 85: 79-88.
- [12] Xue Xinyu, Lan Yubin, Sun Zhu, et al. Development an unmanned aerial vehicle based automatic aerial spraying system [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 128: 58-66.
- [13] 冯焕萍. 农用植保无人机作业市场分析[J]. *中国农机化学报*, 2018, 39(8): 54-57.
Feng Huanping. Analysis of UAV agricultural plant protection operation market [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2018, 39(8): 54-57.
- [14] 刘爱民, 张海清, 廖翠猛, 等. 单旋翼农用无人机辅助杂交水稻制种授粉效果研究[J]. *杂交水稻*, 2016, 31(6): 19-23.
Liu Aiming, Zhang Haiqing, Liao Cuimeng, et al. Effects of supplementary pollination by single-rotor agricultural unmanned aerial vehicle in hybrid rice seed production [J]. *Hybrid Rice*, 2016, 31(6): 19-23.
- [15] 肖会涛, 薛新宇, 崔龙飞, 等. 单旋翼植保无人机喷杆悬架机构设计与分析[J]. *中国农机化学报*, 2019, 40(10): 51-57.
Xiao Huitao, Xue Xinyu, Cui Longfei, et al. Design and analysis of suspension mechanism of single rotor plant protection drone [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2019, 40(10): 51-57.
- [16] 刘羽峰, 宁媛. 六轴旋翼碟形飞行器控制系统设计[J]. *现代机械*, 2010, 19(5): 56-58.
Liu Yufeng, Ning Yuan. Design of flight control system for a six-axis rotor saucer shaped rotorcraft [J]. *Modern Machinery*, 2010, 19(5): 56-58.
- [17] 杨成顺, 杨忠, 张强. 一种新型多旋翼飞行器的建模与反演控制[J]. *济南大学学报: 自然科学版*, 2013, 27(1): 52-58.
Yang Chengshun, Yang Zhong, Zhang Qiang. Modeling and backstepping control for a novel multi-rotor aircraft [J]. *Journal of University of Jinan: Science and Technology*, 2013, 27(1): 52-58.
- [18] 潘俊, 杨成顺, 周宾. 一种新型多旋翼飞行器的建模与反演控制[J]. *佳木斯大学学报: 自然科学版*, 2012, 30(4): 540-544.
Pan Jun, Yang Chengshun, Zhou Bin. Modeling and backstepping control for a novel multi-rotor aircraft [J]. *Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition*, 2012, 30(4): 540-544.