

尹选春, 兰玉彬, 文晟, 等. 日本农业航空技术发展及对我国的启示[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(2): 1-8.

日本农业航空技术发展及对我国的启示

尹选春¹, 兰玉彬¹, 文晟^{1,2}, 邓继忠¹, 张建瓴¹, 张建桃³

(1 国际农业航空施药技术联合实验室/农业航空应用技术国际联合实验室/广东省农业航空应用工程技术研究中心/
华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642; 2 华南农业大学 工程基础教学与训练中心, 广东 广州 510642;
3 华南农业大学 数学与信息学院, 广东 广州 510642)

摘要: 日本根据其地形、地貌特征、从事农业劳动的情况选择了从有人直升机到无人直升机航空施药为主的发展模式, 研制了几款不同发展时期的植保无人机机型 (R50、RMAX、RMAX II G、FAZER) 应用于水稻植保作业, 日本学者对农业航空遥感技术、精准导航控制技术、无人机控制技术进行了大量研究, 在施药实践中形成了较为实用的无人机植保管理体制, 确保了日本农业航空的健康、有序发展。本文旨在介绍日本农业航空现状、应用领域、精准施药技术及管理方法, 以期为我国农业航空应用技术的发展提供借鉴。

关键词: 日本; 农业航空; 植保; 精准农业; 精准导航控制; 无人机

中图分类号: S25

文献标识码: A

文章编号: 1001-411X(2018)02-0001-08

The development of Japan agricultural aviation technology and its enlightenment for China

YIN Xuanchun¹, LAN Yubin¹, WEN Sheng^{1,2}, DENG Jizhong¹, ZHANG Jianling¹, ZHANG Jiantao³

(1 International Laboratory of Agricultural Aviation Pesticide Spraying Technology/International Laboratory of Agricultural Aviation Applied Technology/Engineering Research Center for Agricultural Aviation Application of Guangdong Province/
College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 Engineering Foundation
Teaching and Training Center, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3 College of
Mathematics and Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: According to the characteristics of topography, landforms and the situation of engagement in agricultural work in Japan, the aerial spraying method has been developed from using manned helicopter to mainly using unmanned helicopter. Several types of unmanned helicopter for agricultural plant protection, such as R50, RMAX, RAMX II G and FAZER, have been generated at different periods for application in rice plant protection. Japanese scholars did extensive research on aerial remote sensing technology, precision navigation technology and unmanned helicopter control technology. A practical management system of unmanned aerial vehicle(UAV) for plant protection has been developed insuring healthy and organized development of agricultural aviation in Japan. This paper is aimed to provide introduction about the state of agricultural aviation and its application area, precise spraying technology and management methods in Japan, and offer guidance for developing agricultural aviation technology in China.

Key words: Japan; agricultural aviation; plant protection; precision agriculture; precision navigation control; UAV

收稿日期: 2017-06-13 优先出版日期: 2018-01-17

优先出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20180117.1613.036.html>

作者简介: 尹选春 (1979—), 男, 讲师, 博士, E-mail: xc_yin@scau.edu.cn; 通信作者: 兰玉彬 (1961—), 男, 教授, 博士, E-mail: ylan@scau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (61773171); 国家重点研发计划 (2016YFD0200700); 广东省科技计划项目 (2017B010117010); 广东省自然科学基金博士启动项目 (2017A030310383)

农业病虫害是影响我国粮食安全和农产品供给的重要制约因素,2001—2004年,我国粮食产量年平均增长率高达3%,施药强度也随之增加,根据测算耕地面积年增长约为6%,农药的单位面积使用量也处于较高水平^[1]。我国农业植保现状可以概括为以下两方面:智能化程度不高、农药利用率低、环境污染等;工业化和城镇化的快速发展,导致从事农业生产的青壮年人数减少,无防治人员可用。据统计,我国每年使用130万t农药制剂,单位面积农药使用量是世界平均水平的2.5倍,受污染的耕地面积达0.1亿hm²,约占可耕种面积的1/10,大部分污染源于农药化肥的不合理施用。因此,亟待发展高效、省力的植保作业模式^[2]。2014年中央一号文件提出“要促进生态友好型农业发展”,而且特别指出要“加强农用航空建设”。2015年农业部制定了《到2020年农药使用量零增长行动方案》,提出要大力推进农药减量控害,积极探索产出高效、产品安全、资源节约、环境友好的现代农业发展之路,到2020年力争实现农药使用总量零增长。要实现这一目标,现阶段迫切需要研究和大力推广农业智能化精准施药装备和技术。当前,在全国科研院所和企业大力推动下,航空植保专业化防治组织逐渐形成,从业人员不断增多,农业航空植保应用技术与推广应用已进入快速发展期。

世界上农业航空较为发达和典型的国家是美国和日本,美国是农业航空应用技术最成熟的国家之一^[3]。日本农业航空发展可以追溯到1958年,其快速发展的原因有以下两点:年轻一代不愿意从事繁重且劳累的农业种植工作,导致从事农业生产劳动人口的减少;农业机械化和自动化技术的快速发展。我国南方地区地形、地貌及农作物种植模式与日本极为相似,本文拟介绍日本的农业航空现状、应用领域、精准施药技术及管理方法,以期为我国农业航空应用技术的发展提供借鉴。

1 日本农业航空发展概况

日本农业航空发展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,尤其是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。

1.1 日本农业航空发展历史及现状

20世纪50年代至70年代,日本进入经济高速增长时期,农村过剩人口被工商业迅速地吸收,逐步出现了农村人口的老龄化现象。为确保粮食生产安全同时提高作业效率,1958年开始日本将有人直

升机投入到稻田的害虫和稻瘟病防治,利用有人直升机进行农药喷施的面积为100hm²,到1993年达到210万hm²,有人直升机喷施几乎遍及整个日本^[4]。但是,有人直升机农药喷施飞行高度在8~13m,飞行速度达到60~80km·h⁻¹,农药喷施出现大量飘移而引起环境污染问题,还伴随着坠机、作业操作安全事故等突出问题^[4]。1983年日本农林水产省做出了农业航空植保作业有人直升机和无人直升机共同参与的决策,同年农林水产省下属的社团法人组织农林水产航空协会委托雅马哈发动机公司从事农用无人植保作业器械的研究,1987年研制出世界上第1台工业用无人直升机R50,并且于次年开始销售;经过10年的作业实践和改进,1997年研发出了具有飞行姿态控制系统且性能大幅提升的RMAX新机型;2003年推出具有GPS导航特性,在飞行稳定性控制方面有较大改进的RMAX IIG型无人直升植保机;预计2017年投入市场的FAZERR G2型无人直升机能够达到载质量40kg,飞行高度2800m,续航距离90km。

日本植保无人直升机保有量呈现出逐年增长的趋势,从1990年的106台,到1993年的307台,年均增长67台,无人直升机植保作业面积也相应的从25hm²涨到123hm²;1994—2005年,这11年间,植保无人直升机年均增长量为179台,无人直升机植保作业面积也相应的从17.2万hm²涨到28.2万hm²;2006—2011年这5年间,年均增长约40台,2011年植保无人直升机保有量为2378台,2011年无人直升机植保作业面积已达到35.3万hm²,截止2015年日本植保无人直升机保有量为2668台。

2013年日本雅马哈发动机有限责任公司对现有病虫害防治手段做了作业效率及病虫害防治情况(图1^[5])的详细调查^[5]:1)以1hm²(100m×100m)作业面积为例,背负式喷雾器作业需要时间

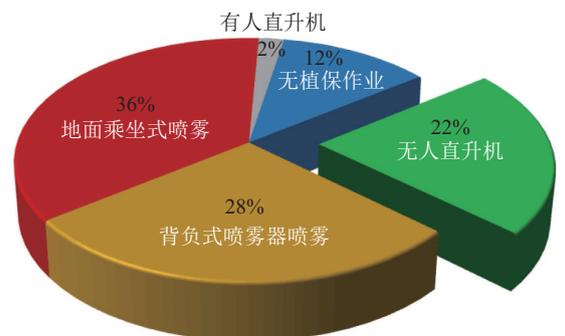


图1 水稻病虫害防治器械覆盖率(2013年)
Fig. 1 Coverage rates of different tools for prevention and control of rice plant disease and pests in 2013

为 160 min, 乘坐式拖拉机喷雾作业时间为 60 min^[5], 无人直升机作业时间为 10 min。2) 从图 1 可以看出, 日本水稻病虫害防治以无人直升机占有较高比例 (22%), 而有人直升机仅占防治面积的 2%。3) 从图 2^[5]可以看出, 1995—2014 年, 有人直升机水稻防治面积所占比例逐年降低, 无人直升机防治面积所

占比例逐年升高, 在 2003 年首次有人直升机对水稻病虫害的防治面积少于无人直升机, 之后无人直升机植保作业率一直高于有人直升机植保作业率, 无人直升机逐渐替代有人直升机成为水稻病虫害防治的主要手段。

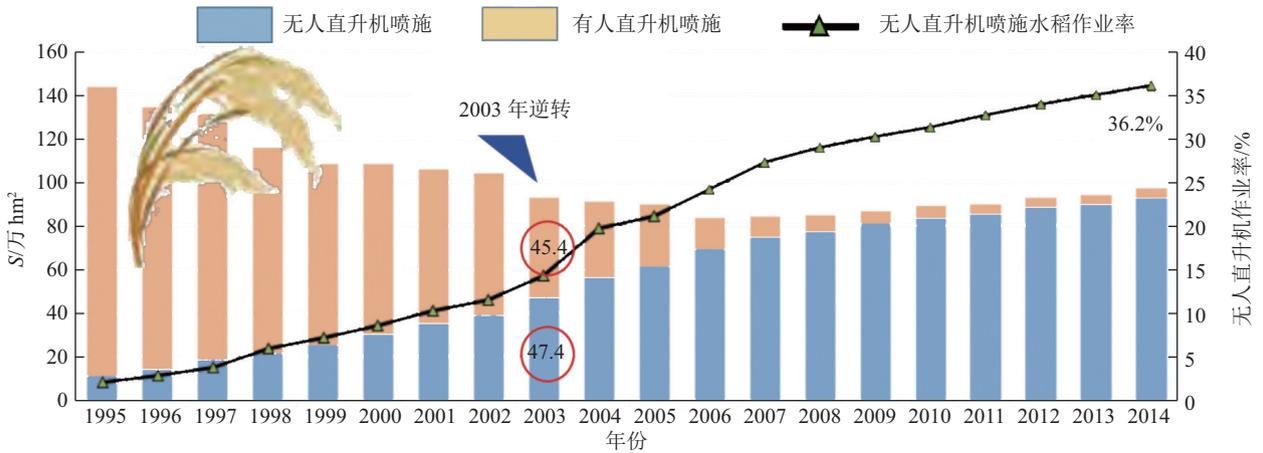


图 2 日本有人直升机和无人直升机水稻病虫害防治对比图 (1995—2014 年)

Fig. 2 Comparison of areas under prevention and control of rice plant diseases and pests by utilizing manned helicopter and unmanned helicopter (1995–2014)

从日本近 30 年的植保无人机发展历程可以看出, 在农业航空植保方面经历了从无到有, 从有人直升机到无人直升机的快速发展阶段, 其中, 雅马哈发动机公司在植保无人机方面的研究和发展为日本农业航空的发展做出了重要贡献。在无人机施药实践过程中, 日本农林水产航空协会对有人直升机和无人直升机在施药高度、喷幅、飞行速度等方面做出了经验总结 (图 3)^[4]。

2 日本农业航空施药关键技术

农业航空服务的主要任务是航空施药、施肥、农情信息获取。农业航空施药技术的目标是实现精准施药, 实现高效的农作物病虫害防治。实现精准施药的必要条件是农作物病虫害信息监测, 其关键技术包括: 农业航空遥感技术、精准导航控制和变量施药技术。图 4 描述了农业航空精准施药的实现过程, 需要根据地理信息系统 (Geographic information system, GIS)、机载遥感测量系统 (Remote sensing system, RSS) 获取作物的病虫害信息, 生成作物精准施药处方图 (Crop prescription map, CPM), 无人机在农作物病虫害发生地点的上

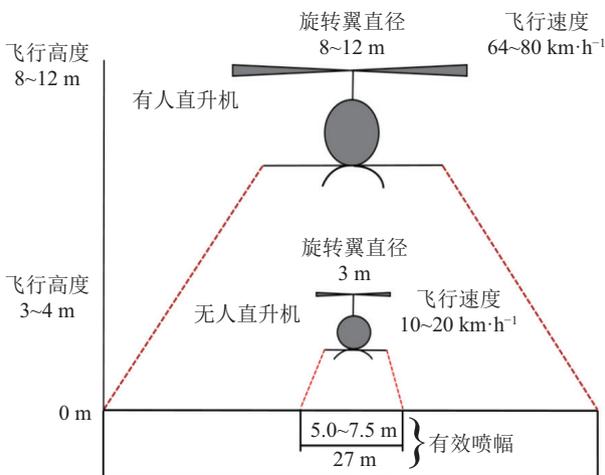


图 3 有人直升机和无人直升机航空施药技术指南

Fig. 3 Technical manual of aerial spraying by manned helicopter and unmanned helicopter

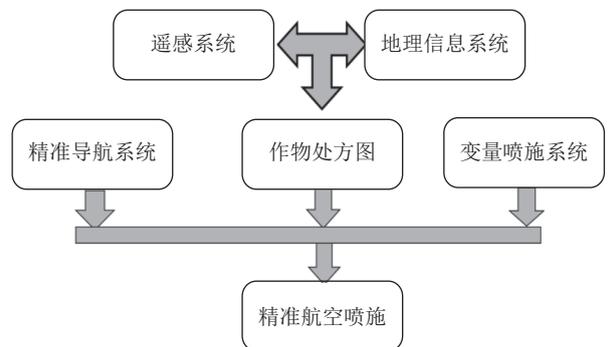


图 4 精准航空喷施技术概念图

Fig. 4 Concept of precision aviation spraying technology

方进行农药喷施,需要精准导航系统(Precision navigation system, PNS),要实现精准低量喷施达到保护环境、减少农药残留的目的,还需要配有变量喷施系统(Variable-rate spraying system, VSS)。

2.1 农业航空遥感技术

遥感是用一种非接触式调查设备获取物体本身、区域或者物体所呈现的现象信息,再通过对所获取信息进行分析、提取的一门科学艺术,根据获取遥感信息的手段可以分为卫星遥感、航空遥感和地面机载遥感^[6]。卫星遥感知面积大、感知时间间隔相对固定、空间分辨率高;航空遥感及地面机载遥感系统感知面积小、感知时间间隔灵活、空间分辨率高。在农作物生长及病虫害信息获取的应用方面,这些遥感信息获取方法都具有各自的局限性,因此,农业航空遥感信息技术是未来农业航空的研究热点之一。

作为对1986年欧洲航天局利用ERS-1(European remote sensing satellite 1)获取遥感信息应用于科学研究(1991年7月17日ERS-1遥感卫星成功发射)的回应,1992—1993年期间,日本秋田县立大学大学部(Akita prefectural college of agriculture-APCA),在日本国家航天管理局(National space development agency of Japan, NASADA)帮助下,进行了第1次从水稻移栽到收获季节的监测试验,旨在研究微波后向散射特性与水稻生产态势的关系^[7]。近年来,日本对航空遥感技术在水稻及其他农作物生产信息获取的应用方面进行了大量研究,监测水稻生产期(水稻穗分花期)氮元素含量,可为追施氮肥提供重要决策依据,Kurosu等^[8]利用航空高光谱相机监测不同天气条件下利用数学模型预测水稻在穗分化期从土壤中吸入氮元素的含量。Chanseok等^[9]借助航空高光谱相机获取水稻农情信息,提出了一种综合Lasso(Least absolute shrinkage and selection operator)回归模型算法和AIC(Akaike's information criterion)原则的新方法估算水稻长势、产量以及蛋白质含量。在2007—2008年,Odagawa等^[10]利用有人直升机(セナスC028)搭载CASI-3(Itres Research Co., Ltd.)从可见光到红外光波长范围传感器,在平川市对抽穗后20 d到成熟期间的水稻进行监测,指出可以利用670 nm的水稻叶面反射率预测水稻成熟期,确定水稻高品质的收割时间。2014年5月中旬至9月中旬,对埼玉县坂户市水田水稻种植区进行了1周1次的水稻生长监测,试验监测利用小型无人机(UAV)搭载相机(GoPro3)拍摄水稻长势图像,然后利用SfM软件(PhotoScan)

进行处理,得到水稻长势等农情信息^[11-13]。相比卫星遥感监测,获取信息的成本较低,且不受时间限制,此种方法有广泛的应用前景。

除此之外,航空遥感技术在日本的其他应用领域也得到了广泛的应用。在林业种植中,利用无人直升机机载激光雷达(Lidar)对林区树木密度、高度、直径以及材质特性进行监控和管理^[14-16]。在火山爆发探测^[17]及小型UAV自然灾害调查领域也有探索性应用研究^[18]。

2.2 农业航空精准导航控制技术

精准农业航空施药是利用及时准确的信息获取技术和现代信息处理技术实现农药减施、高效、省力的一项综合技术,包括利用全球定位系统(GPS)、GIS、遥感技术、精准导航技术以及变量喷施控制技术等。机载遥感系统搭载遥感装置(摄像机、高光谱相机、多光谱相机、热成像仪等)利用作物表面的反射或光合作用水分蒸发原理监测作物病虫害农情。利用空间统计学等知识将遥感识别到的农作物病虫害农情,生成需要施药的处方图。利用GPS确定航空植保飞机与需要喷施地点的位置关系。搭载自主飞行控制器的作业飞机做出航线轨迹规划,计算出作业模式,开启变量喷施系统装置进行精确、定点、超低量的高效喷施。

农业航空精准导航控制技术是实现精准、定点喷施的先决条件之一。有研究利用RTK-GPS和惯性导航系统技术实现了农业航空精准导航控制^[19-21]。辻井利昭等^[22]提出了无人直升机搭载伪卫星装置用于导航控制,并且验证了在导航精度和可靠性等方面比GPS有所提高。Iwahori等^[23]开发了无人直升机搭载的三维GIS地图系统用于精准航空调查。雅马哈发动机公司开发了RMAX型工业用无人直升机(超过2500台),可利用精准喷粉防治水稻病虫害,并且利用搭载了自动导航控制系统的RMA XG1型无人直升机用于火山爆发观测以及灾害救助等^[23],即将投入使用的FAZER机型在载质量和续航时间上较常规的RMA机型有较大改善,再配上精准导航控制系统,将进一步推动精准农业航空施药技术。

精准航空施药需要研究无人机自动避障、空中悬停、喷施中无人机姿态控制以及飞机降落控制等技术。已有对雅马哈发动机公司RMA X型航空施药无人直升机自动控制系统的深入研究^[24-25]。由于农业航空精准施药无人机飞行高度为3~4 m^[4],属于低空飞行,为确保安全,精准施药需要开发无人机自动避障控制系统。Suzuki等^[26]提出将非线性模型控制算法应用于小型无人机自动避障控制及导

航应用。Nakanishi 等^[27]提出利用环境自适应控制算法控制无人机空中飞行的姿态,抵御外界环境干扰。Nonaka 等^[28]综合考虑外界干扰、地面控制站、无人机动力学模型,利用滑模控制算法削弱外界干扰、减小模型误差,实现了平稳起飞、降落及空中悬停的稳定控制。

精准农业航空施药综合了遥感、精准导航控制、无人机控制以及变量喷施等技术。在遥感农情监测、精准导航及无人机控制等方面日本学者都进行了深入研究。而变量喷施技术^[28-29]以及有人驾驶直升机农药喷施防飘移^[30-32]等方面美国学者进行了大量研究。

3 日本农业航空管理

农业航空植保技术的健康发展,除了加大力度研究无人机施药关键技术以外,还需要加强农业航空植保无人机的管理工作。日本农业机械政府管理体系大体上分为农业水产省和地方农政局2级。植保无人机的中央级管理归属于农业水产省消费安全局,在地方归属于消费安全部管理。植保无人机作业管理相关政策制定由农业水产省消费安全局发布,2017年发布的无人机植保农药配施利用技术指导准则^[33](28消安第1118号、地农第1046号),为确保航空植保无人机作业的安全做了如下规定:

1) 植保无人机必须以航空法(昭和27年法律)第231号第2条第22项中的规定为准,空中散布是指利用无人机进行农药、化肥的喷施以及播种,实施主体指的是各级植保作业行政机构、联防联控团体、飞防作业人员及农户。作业者必须具备无人机植保作业的基础知识和操作技能,并且要获得农林水产航空协会认可。

2) 航空植保作业必须遵守国土交通省航空局和农林水产省消费安全局联合颁布的规则^[33],如国空法第734号、国空机第1007号、27消安第4546号。

3) 列出了航空植保无人机机型、飞行参数、农药喷施方法、操作人员技能要求等;详尽地列出了实施主体必须遵循的规则以及事故发生时的对策;规定了航空植保作业实施计划书和实施作业效果报告书的填写方法和提出流程(图5)^[33]。

对植保无人飞机作业进行管理的“无人飞机植保农药喷施利用技术指导准则(28消安第1118号)”发布于2016年5月31日,其中对“宗旨、无人飞机相关术语定义、与农药喷施相关的机构和协会、空中施药的实施细则、根据航空法的规定申请

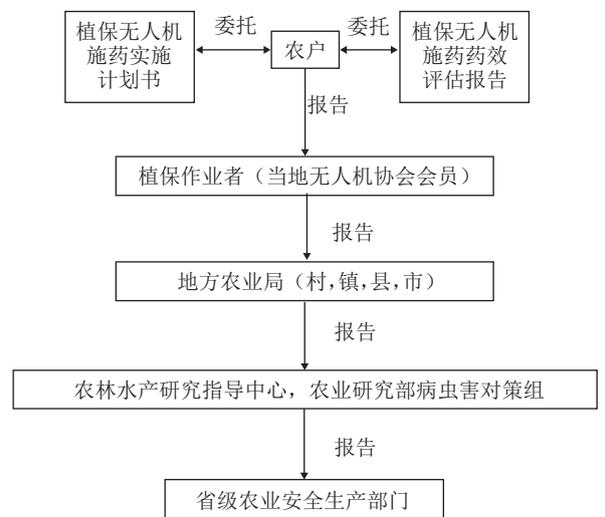


图5 航空植保施药作业计划书和实施效果评估提交流程图
Fig. 5 Flow chart of aerial aviation spraying plan for plant protection and evaluation of spraying effect

实施作业、事故发生时的对策、操作者资格、药液喷施后的药效、空中施药药效统计表以及相关信息的收集整理”等做出了细致明确的规定,并在技术准则中制定了一系列相关的规范、作业以及效果评估规程,具体包括:

1) 无人飞机植保施药作业计划书确定了植保无人飞机施药主体(农户和施药单位)、无人飞机操作者情况(姓名和技能证书编号)、施药机型、施药地点、农作物名称、病虫害名称及特征、施药面积、施药量、作业飞机数量及每亩施药量等具体细节;

2) 无人飞机植保作业空中施药事故发生报告书,该报告书要求详细记录施药过程发生的事故具体情况、事故应对措施、事故原因分析以及再发生事故对策;

3) 无人飞机航空施药作业实施效果评估报告包括计划书提及的信息及实施时间,该实施效果报告书由农户和作业者共同确认并提交地方农政局。

日本的无人飞机植保空中施药业务也受“国土交通省航空局”管理,因此农林航空植保空中施药飞行许可相关的政策文件是由日本国土交通省航空局长和农林水产省消费安全局长联合发文。无人飞机农业航空植保空中施药飞行许可法令文件“国空航第734号、国空械第1007号、27消安第4546号”等是由日本国土交通省航空局长和农林水产省消费安全局长联合发文。该法令明确了申请的手续和申请记载事项,申请内容包括申请者姓名、无人机概况、飞行路线及目的、飞行高度、飞行施药效果评估报告、作业领域的通告以及事故报告书等(图6)^[33]。

事故报告人单位:					
事故报告人姓名:					
事故报告人联系地址:					
事故报告人联系电话:					
事故报告时间:					
报告基本情况表					
1	事故发生时间	() 年 () 月 () 日 () 时 () 分 无人机植保作业时间: () 时 () 分			
2	发生地点	要求精确到 (县, 区, 村, 组)			
3	无人飞机操作人员	姓名:	技能认定证书编号:		
4	使用无人飞机机型	机型:	机型登记号:		
5	作业时天气情况	天气:	气温:	风向: 风速:	
6	作业内容	1. 农药 2. 肥料 3. 种子 4. 测量与调查 5. 其他 ()			
		作物:	病虫害等:		
7	药剂	药剂名称:			
		稀释倍数:	无人飞机载药量:		
8	植保施药主体	农户			
		无人飞机施药单位			
9	作业人员统计	无人飞机操作人员		名	
		植保作业时安全管理人员		名	
		其他人员		名	
10	事故概要	人身事故	名	机体事故	
		药害事故		其他	
11	灾害情况	情况确认		有无	其他详细描述
	人身伤害	无	确认中	有	
	家畜伤害	无	确认中	有	
	农作物药害	无	确认中	有	
	药剂随意倾倒	无	确认中	有	
	无人飞机机体损伤	无	确认中	有	
	周边设施损伤	无	确认中	有	
其他损伤	无	确认中	有		
12	事故处理情况记录				
13	其他相关部门协助处理情况记录				
14	事故发生原因分析				
15	事故再发生对策				

图 6 植保无人飞机施药作业实施事故报告书范例

Fig. 6 An accident report of pesticide spraying by UAV for plant protection

除了政府对农业航空植保作业进行管理外, 还专门成立了由航空无人机植保相关企业人员组成的社团组织——农林水产航空协会, 该协会成立于 1962 年, 其目的是利用农业航空确保农林水产业的健康稳定发展, 提高生产率, 确保国民的粮食安全,

并且保护自然生态环境, 其主要工作内容为: 开展与农业航空相关的技术研究, 农业航空安全的教育及农业航空无人机的质量监管与鉴定工作, 航空植保作业过程的监管与调查, 以及协会拟定的其他农业航空的相关工作。纵观日本农业航空 30 年发展

历史,在农林水产省和以企业为主的团体组织——农林水产航空协会的大力推动下,农业航空得以健康、快速的发展,与此同时,作为企业的雅马哈发动机有限责任公司和大批专家学者在农业航空植保装备制造以及无人机控制技术方面也做出了应有的贡献。

4 日本农业航空发展管理启示

日本的农业生产经营模式是建立在日本传统的农户家庭经营基础上的,且农户分散居住在农村,农业航空的发展经历了由有人驾驶直升飞机到植保无人机的模式。我国许多地区的地形地貌特征、农村农业生产和种植模式、农村生活居住特征都与日本极为相似,因此在农业航空和植保无人机产业发展和应用方面,可以借鉴日本农业航空植保的发展经验和成熟的管理经验,主要从以下几个方面入手:

1) 政府应加大植保无人机关键技术的研发财政支持力度。早在1983年日本农林水产省就支持日本雅马哈发动机公司研究开发植保无人机,经过30多年的发展,目前在小型植保无人机领域技术已经比较成熟,但禁止对外进行技术出售与转让。我国目前正处于植保无人机发展的起步阶段,科研院所和小型植保无人机企业应当投入大量的财力和精力,围绕小型植保无人机装备和应用关键技术进行研究,突破技术瓶颈。

2) 建立政府监管和行业协会协同管理的推动模式。在小型植保无人机的管理方面,日本政府实行部级管理,以农林水产省为主,国土交通省为辅,国土交通局主要协同农林水产省管理,地方管理以地方农政局为主。由于植保无人机的作业管理较为复杂,为此日本早在1962年2月16日成立了“农林水产航空协会”,负责小型植保无人机植保作业实施的协同管理。利用“农林水产航空协会”管理农用航空植保作业,制定农业航空植保作业技术标准,质量检测标准由协会牵头,植保无人飞机生产企业以及高校、科研院所共同参与制定。协会加强了在植保无人机操作人员培训和农药使用方法方面的管理,强化了农业航空植保应用领域的宣传。因此,在我国小型植保无人机发展过程中,应当赋予联盟和协会更多的管理责任、权利和义务,形成以植保无人飞机生产企业为主、政府监管和推动为辅,联盟、协会协同管理的发展局面。

3) 大力开展农业航空植保专用药剂研发。由于植保无人机施药与传统背负式施药器械不同,植保

无人机施药量属于低量、超低量,但是药剂浓度高,因此需要研发农业航空专用药剂。在日本,政府根据农业航空植保专用药剂制定的标准对植保无人机用药进行监督和管理。我国目前正处于农业航空发展的初级阶段,既要完善农业航空植保专用药剂的标准制定,又要加大对农业航空植保专用药剂的研发投入。

4) 积极推进我国农业航空植保相关标准的制定。行业标准的制定对于行业的发展有引导和推动作用。在标准制定过程中,我们可以借鉴日本在农业航空植保方面的一些管理制度、政策法规和相关标准的具体条文,结合我国的实际情况制定农业航空植保特殊阶段的符合我国国情的农业航空植保标准,以推动新科技在我国农业航空及植保无人机产业的应用和发展。

参考文献:

- [1] 王佳新,李媛,王秀东,等. 中国农药使用现状及展望[J]. 农业展望, 2017, 2: 56-60.
- [2] 周志艳,臧英,罗锡文,等. 中国农业航空植保产业技术创新发展战略[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 1-10.
- [3] ENDERLE B. Commercial applications of UAVs in Japanese agriculture[C]//Proceedings of the AIAA 1st technical conference and workshop on unmanned aerospace vehicles. Portsmouth, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics. AIAA-2002-3400, 2002.
- [4] 芳賀俊郎. 航空(有人ヘリ)防除及び無人ヘリ防除の歩みと今後の展望[J]. 日本農薬学会誌, 2013, 38(2): 224-228.
- [5] 石岡修. 産業用無人ヘリコプターの活用事例[R]. ヤマハモーターパワープロダクツ株式会社, 2013.
- [6] LILLESAND T, KIEFER R W, CHIPMAN J. Remote sensing and image interpretation[M]. 6th ed. New York: John Wiley & Sons, 2014.
- [7] NOGUCHI N, JOHN G O. Remote sensing technology for precision agriculture[J]. Environ Control in Bio, 2003, 41(2): 107-120.
- [8] KUROSU T, FUJITA M, CHIBA K. Monitoring of rice crop growth from space using the ERS-1 C-band SAR[J]. IEEE T Geosci Remote, 1995, 33(4): 1092-1096.
- [9] CHANSEOK R, MASAHICO S, MIKIO U. Model for predicting the nitrogen content of rice at panicle initiation stage using data from airborne hyperspectral remote sensing[J]. Biosyst Eng, 2009, 104(4): 465-475.
- [10] ODAGAWA S, KOSUGI Y, SAITO G, et al. Development of an estimation method for the rice growth status, yield and protein content using airborne hyperspectral data[J]. J Japan Soc Photogram Remot Sen, 2012, 51(5): 270-284.
- [11] SAKAIYA E, INOUE Y. Operational use of remote sensing for harvest management of rice[J]. J Remote Sens

- Soc Japan, 2013, 33(3): 185-199.
- [12] TANAKA K, KONDOH A. The acquisition of rice growth monitoring by small UAV[C]//Proceedings of the General Meeting of the Association of Japanese Geographers Annual Meeting of the Association of Japanese Geographers, Spring 2015. The Association of Japanese Geographers, 2015: 100228.
- [13] 濱侃, 早崎有香, 望月篤, 等. 小型 UAV と SfM-MVS を使用した近接画像からの水稻生育モニタリング[J]. 水文・水資源学会誌, 2016, 29(1): 44-54.
- [14] UTO K, SEKI H, SAITO G, et al. Characterization of rice paddies by a UAV-mounted miniature hyperspectral sensor system[J]. IEEE J-STARS, 2013, 6(2): 851-860.
- [15] 大政謙次, 秋山幸秀, 石神靖弘, 等. ヘリコプター搭載の高空間分解能 Scanning Lidar システムによる樹冠高の3次元リモートセンシング[J]. 日本リモートセンシング学会誌, 2000, 20(4): 394-406.
- [16] OSHIO H, ASAWA T, HOYANO A, et al. Accuracy of the information on the external crown form of individual trees extracted by airborne LiDAR in urban spaces[J]. J Remote Soc Japan, 2013, 33(5): 350-359.
- [17] 細井文樹, 大政謙次. 3次元リモートセンシングによる森林構造の計測と解析 (<特集> 植生のリモートセンシング)[J]. 日本生態学会誌, 2014, 64(3): 223-231.
- [18] 秋山幸秀. Air-borne LiDAR による火山調査の応用事例[J]. 先端測量技術, 2006: 92-102.
- [19] 渡辺豊. 平成26年広島市豪雨災害での小型無人ヘリ被災地状況計測[J]. 写真測量とリモートセンシング, 2015, 54(2): 72-73.
- [20] SUGIURA R, FUKAGAWA T, NOGUCHI N, et al. Field information system using an agricultural helicopter towards precision farming[C]//Proceedings of 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Kobe, Japan: IEEE, 2003: 1073-1078. doi: 10.1109/AIM.2003.1225491.
- [21] SUGIURA R, NOGUCHI N, ISHII K. Remote-sensing technology for vegetation monitoring using an unmanned helicopter[J]. Biosyst Eng, 2005, 90(4): 369-379.
- [22] 辻井利昭, 張替正敏, 小神野和貴, 等. 航空機搭載型疑似衛星によるGPS補完試験について[J]. J-STAGE, 2007, 55(641): 266-272.
- [23] IWAHORI T, SUGIURA R, ISHII K, et al. Development of 3-D GIS map generation system using an unmanned helicopter[C]//2005 ASAE Annual Meeting. St Joseph, Michigan: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2005: 1. doi:13031/2013.18826.
- [24] SATO A, NAKNISHI H. Observation and measurement in disaster areas using industrial use unmanned helicopters[C]//2014 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. Hokkaido, Japan: IEEE, 2014: 1-5. doi:10.1109/SSRR.2014.7017671.
- [25] SATO A. Autonomous control system of an unmanned helicopter[J]. J Japan Soc Agr Mach, 2004, 66(2): 17-20.
- [26] SUZUKI S, ISHII T, AIDA Y, et al. Collision-free guidance control of small unmanned helicopter using nonlinear model predictive control[J]. SICE JCMSI, 2014, 7(6): 347-355.
- [27] NAKANISHI H, KANATA S, SAWARAGI T, et al. Environment adaptive heading control for an autonomous unmanned helicopter[J]. Trans SICE, 2011, 46(1): 8-15.
- [28] NONAKA K, SUGIZAKI H. Integral sliding mode altitude control for a small model helicopter with ground effect compensation[C]//Proceedings of the 2011 American Control Conference. San Francisco, USA: IEEE, 2011: 202-207. doi:10.1109/ACC.2011.5991016.
- [29] XUE X, LAN Y, SUN Z, et al. Develop an unmanned aerial vehicle based automatic aerial spraying system[J]. Comput Electron Agr, 2016, 128: 58-66.
- [30] CHEN Y, ZHU H, OZKAN H E. Development of a variable-rate sprayer with laser scanning sensor to synchronize spray outputs to tree structures[J]. Trans ASABE, 2012, 55(3): 773-781.
- [31] LAN Y, HOFFMANN W C, FRITZ B K, et al. Spray drift mitigation with spray mix adjuvants[J]. Appl Eng Agric, 2008, 24(1): 5-10.
- [32] HEWITT A J. Spray drift: Impact of requirements to protect the environment[J]. Crop Prot, 2000, 19(8): 623-627.
- [33] 空中散布等における無人航空機利用技術指導指針[S]//平成28年5月31日付け28消安第1118号. 日本农业水产省消费安全局, 2016.

【责任编辑 霍欢】