

# 中国农业航空施药技术研究进展与展望\*

张东彦<sup>1,2</sup> 兰玉彬<sup>3</sup> 陈立平<sup>1,3</sup> 王秀<sup>1</sup> 梁栋<sup>2</sup>

(1.北京农业信息技术研究中心,北京 100097; 2.安徽大学电子信息工程学院,合肥 230601;

3.中美农业航空联合技术中心学院站,德克萨斯 77845)

**摘要:** 农业航空施药是实现国家生态安全和粮食安全的有效保障。对中国农业航空施药技术的研究现状进行了梳理和总结,分别从农用航空机型、航空施药关键技术、航空施药配套装备与技术等方面进行了阐述;通过与发达国家航空施药现状的比较分析,展望了中国农业航空施药的发展前景,以为国内科研机构、企业的科学研究与发展提供参考。

**关键词:** 航空施药 无人机 GPS导航 雾滴

**中图分类号:** S252 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)10-0053-07

## 引言

目前,我国受农药污染的耕地面积高达1 300~1 600万 $\text{hm}^2$ <sup>[1]</sup>。精准施药技术是降低农药残留的有效手段<sup>[2]</sup>。车载式大田精准施药技术有效控制了农药喷施量,降低了农药残留,但对于水稻和玉米等作物,车载式施药装备难以作业,其病虫害防治依然是困扰我国农业生产的巨大难题。农用飞机航空施药,具有作业飞行速度快、喷洒作业效率高、应对突发灾害能力强等优点<sup>[3]</sup>,克服了农业机械或人工无法进地作业的难题,其发展前景受到农业植保领域的高度重视。农业部南京农业机械化研究所龚艳等指出,随着社会的发展,先进技术的引入,航空施药在中国现代农业中将具有巨大的发展潜力<sup>[3]</sup>。薛新宇等对比了中国植保机械和航空植保与国外先进国家的现状,提出了一些中国航空植保发展的建议<sup>[4]</sup>。但是,由于受农业管理体制、法规政策和航空管理等问题影响以及农业发展基础的制约,航空施药技术在中国发展一直比较缓慢。

近年来,随着我国粮食安全、生态安全、绿色植保等领域的发展需求,国家对农业航空发展予以大力扶持。科技部和农业部在“十二五”科研规划中都将农业航空应用作为重要支持方向。国家863计划立项“微型无人机遥感信息获取与作物养分管

理技术”项目<sup>[5]</sup>,农业部行业科研专项立项“主要粮食作物航空植保”项目<sup>[6]</sup>;同年,科技部将“全国农业航空产业技术创新战略联盟”列入产业技术创新联盟试点计划<sup>[7]</sup>;2014年中央一号文件《关于全面深化改革加快推进农业现代化的若干意见》中第二条“强化农业支持保护制度”中提出“加强农用航空建设”。

在上述国家政策、项目支持以及相关研究单位推动下,我国农业航空施药技术得到了快速发展,在农用航空机型、航空施药关键技术、航空施药配套装备与技术等方面取得了一系列成果。但是,与发达国家的农业航空应用相比,我国在航空施药基础理论、低空喷洒沉降规律、航空静电喷雾技术、航空变量施药技术等方面,还存在不足<sup>[8]</sup>。本文拟从航空机型、航空施药关键技术、航空施药配套装备与技术三方面对中国农业航空施药的研究进展和现状进行梳理和总结,以为国内科研机构、企业的科学研究提供参考。

## 1 中国航空施药机型发展

当前,中国因农业生产布局和管理方式的原因,农用航空施药机型以大型固定翼飞机为主,用于中国东北三省、新疆、内蒙古等大面积的农垦地区;以旋翼无人机为辅,用于中国南方丘陵、地形复杂的山地地区。

收稿日期:2014-02-27 修回日期:2014-05-19

\* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA101901)、国家自然科学基金资助项目(41301471)、博士后国际交流计划资助项目(20130043)和北京博士后基金资助项目(2014ZZ73)

作者简介:张东彦,博士后,安徽大学讲师,主要从事农业航空遥感及其应用研究,E-mail: zhangdy@nercita.org.cn

通讯作者:陈立平,研究员,主要从事精准农业与农用航空应用研究,E-mail: chenlp@nercita.org.cn

## 1.1 大型农用飞机的发展现状

据中国民用航空局年报统计和互联网资料,中国目前有30余家农用航空公司<sup>[9]</sup>,大型农用飞机400余架。其中世界先进机型近100架,包括M-18型20架,AT-402B型6架,Thrush 510G型40架,贝尔407型直升机2架,罗宾逊R66型直升机4架,新洲60型和Y12F型各1架,小鹰500型6架;其他机型300余架,有Y-5型177架,Y-11型18架,N-5型16架,海燕650型14架,GA-200型6架,PL-12型1架。

由上述数据看,近几年中国农业航空发展迅猛,航空作业的主力机型逐渐与世界接轨。如世界先进机型M-18型、AT-402B型、Thrush510G型等逐渐成为国内通用航空公司的主力机型,且仍以几何倍数增长,反映了中国农业现代化生产和粮食、生态安全对农业航空的迫切需求<sup>[10]</sup>。但是,关于大型农用飞机航空施药技术研究方面报道较少,如国外报道较多的雾滴飘移伤害、作业时间选择等<sup>[11-12]</sup>。在未来若干年,随着农用航空飞机数量的增长、作业面积的增加,上述问题将引起国内相关研究院所以及生产一线科技工作者的重视。

## 1.2 农用无人机的发展状况

相比大型农用飞机,中国的农业无人机尚属起步阶段。主要表现为:①机型五花八门。有固定翼、单旋翼、多旋翼等类型<sup>[7]</sup>。②用途多样化。其中用于环境遥感监测、突发性震灾损失评估、城市变化航测、水质检测等方面较多,且以轻型固定翼飞机为主<sup>[8]</sup>。旋翼无人机用于航空施药、作物授粉等方面,其性能仍在测试观察阶段<sup>[13]</sup>。③专业生产企业较少。农用无人机的生产和加工大都从航模生产加工企业发展而来,具备一定的自主研发能力,但技术保障有待提高。目前,进入微小型农用无人机领域的企业约10余家,常见机型10余种,有总参60所的Z-5型、Z-3型,沈阳自动化所Servoheli-120型,潍坊天翔的V-750型,无锡汉和的CD-10型,中航工业自控所的AR-100/AF811型,北方天途的RH-2型、EH-3型;博航联合的BH330-200型;珠海羽人的YR-H-15型;珠海银通的YT-A5型,山东卫士的多旋翼机<sup>[8]</sup>。实际上,真正能用于农业航空施药的只有3~5家。

无人机因其作业高度低,飘移少,对环境污染小,可空中悬停,防治病虫害效果好,运行成本低、灵活性高等优点,在农业生产中有较大的应用前景<sup>[14]</sup>。但是,实际生产应用中,仍面临各种挑战,且上述机型仍处于研发测试阶段,真正大面积推广还有待进一步提高。

## 2 中国航空施药技术研究进展

农业航空施药是农业航空服务的重要项目。在世界发达国家,尤其是美国、日本等国的航空施药作业规范齐全,施药配套部件完善,可适合不同作业要求<sup>[15]</sup>。中国航空施药技术虽然在近年来取得重要进展,但仍与发达国家存在较大差距,主要表现在:①农用飞机配套的施药设备性能和施药核心技术研究不完善;施药设备性能差;喷出的雾滴谱宽;对靶性差。②航化施药喷头排列间距大、飞行速度快、雾滴沉积受外界影响因素多,药液沉积位置和沉积量难以控制。

### 2.1 航空施药关键技术

虽然中国航空施药技术研究处于起步阶段,但国内的相关科研单位、大学、企业针对大型农用飞机、不同型号无人机的航空施药技术进行了全方位的探索研究。

#### 2.1.1 大型农用飞机的施药关键技术

目前,国外研究机构大多侧重于对大型农用飞机的航空雾滴飘移、雾滴沉积规律等方面进行研究,其配套的航空施药设备先进<sup>[16]</sup>。国内直接引进国外先进飞机机型与配套设备,但缺乏对各类机型的实际施药参数进行测试。特别是国外施药飞行高度一般在3~5m<sup>[17]</sup>;而国内因受防风林、电力电信布线以及作业安全的影响,作业高度一般在4~20m<sup>[18]</sup>。针对该实际应用差异,北京农业智能装备技术研究中心联合北大荒通用航空公司对M-18B型、510G型飞机的有效喷幅宽度,雾滴均一性进行了测试,首次提供了施药效果测试报告。同时,于2013年7月在黑龙江农垦集团下辖的前进农场,开展了M-18B型飞机雾滴飘移、雾滴沉积分布规律研究<sup>[19]</sup>。

此外,黄向东等对固定翼飞机与超轻型直升飞机在森林病虫害防治应用中的性能、喷洒效果、作业效率、使用费用、安全性等方面进行了比较。发现在山区森林病虫害防治中,超轻型直升飞机比固定翼飞机更能有效地提高防治效果<sup>[20]</sup>。茹煜等针对固定翼Y-5B型农用飞机设计了航空静电喷雾系统,该系统具有使雾滴雾化均匀、荷电充分的特点。该团队还对与Y-5B型农用飞机配套航空静电喷雾系统进行了有效喷幅、雾滴沉积、雾滴飘移和灭虫等试验研究<sup>[21]</sup>。上述已开展的探索研究大大促进了中国大型农用飞机航空施药技术的快速提升与优化。

为了推动中国农业航空施药技术的快速发展,2013年9月,国家农业信息化工程技术研究中心联

合北大荒通用航空公司、中国农业大学、华南农业大学与美国农业部南方平原农业研究中心的农业航空应用技术等单位成立了中美农业航空联合技术中心,这是中国农业航空应用发展的里程碑<sup>[6]</sup>。

### 2.1.2 无人机的施药关键技术

现阶段,无人机因其成本低、性能优越、无需专门起降场地等优点,在中国的发展呈井喷趋势。尤其是近年,无人机航空喷洒系统、低空低量喷洒、远程控制施药等技术在中国均取得突破性进展。茹煜等以德国 VARIO 公司的多用途无人机为平台,设计了远程控制低量喷雾系统。通过地面远程遥控控制喷雾系统施药,对影响离心雾化喷雾效果的主要因素进行了理论研究和性能试验,获得了雾化盘直径为 80 mm 的离心雾化喷头的最佳作业参数<sup>[22]</sup>。范庆妮设计了两套应用于小型无人直升机的农药雾化系统——离心雾化系统和液力雾化系统,用于研究小型无人机的低空低量喷洒技术<sup>[23]</sup>。张京等利用 WPH642 型无人机搭载红外热像仪,在飞行高度 2 m、飞行速度 1.5 m/s 的作业参数下,研究了无人驾驶直升机航空喷雾参数对药液雾滴沉积效果的影响<sup>[24]</sup>。

在农业病虫害防治中,无人机的作业高度、气流场对雾滴均匀性、雾滴沉积和飘失有较大影响。薛新宇等为了阐明 N-3 型无人直升机(N-3 UAV)对稻飞虱和稻纵卷叶螟的防治效果及其应用前景,进行了飞机不同作业高度和不同喷洒浓度的田间药效试验。研究发现 UAV 3 m 作业高度优于 5 m 和 7 m 的杀虫效果;在同一飞行作业高度,施药量与防治效果呈正比;从节约农药与药效的角度看,作业高度 3~5 m 时防治效果最好;7 m 作业高度下旋气流对雾滴的作用减弱,侧风对雾滴的作用相对增强,导致雾滴飘失增多,防治效果相对较差<sup>[25]</sup>。高圆圆等为确定小型无人机的工作参数及探索适用于无人机施药的药剂剂型,应用 Af-811 型无人机喷施了不同剂型的毒死蜱防治玉米螟。试验表明,飞行速度为 5 m/s,试验设定的 3 个飞行高度中,以离植株顶部高度为 2.5 m 时的防治效果最好。飞行过高影响防治效果,过低影响作业效率<sup>[26]</sup>。高圆圆等还在小麦吸浆虫的防治中应用了小型无人机进行低空喷洒,试验使用了不同雾化方式的喷头喷洒不同药剂、不同剂型以及添加不同助剂的药剂,在对雾滴沉积分布状况及防治效果进行分析后发现,2 种雾化方式相比,离心式雾化喷头的雾滴沉积密度优于液力式雾化喷头<sup>[27]</sup>。

## 2.2 航空施药配套装备与技术

航空精准施药能有效提高作物病虫害的防治效果,降低对环境的污染。其实施前提是开发并使用

先进的施药配套装置。国外主要关注 GPS 自动导航仪、施药自动控制系统以及航空施药作业模型的开发<sup>[28]</sup>。

### 2.2.1 GPS 导航设备与系统

国外发达国家的农用航空飞机都配备精密的 GPS 导航设备与系统,便于操作人员根据 GPS 仪制定施药作业航线图,确定飞机施药飞行线,以避免重喷和漏喷<sup>[15]</sup>。目前,中国只有部分学者开展了农用航空飞机配套 GPS 仪进行喷药辅助导航技术的探索研究。陈鹰对无人机空中姿态变化引起的单点无法精确定位问题进行了研究<sup>[29]</sup>。刘艳等研究开发了基于组件式 GIS 的机载航图辅助导航系统<sup>[30]</sup>。卢之慧等就无人机作业的航线规划和边界算法提出了一些改进措施,在一定程度上增强了导航系统的性能,提高了飞机作业的效率<sup>[31]</sup>。蔡艳辉等基于我国的超轻型飞机平台,设计了机载低空数码航摄 GPS 导航和定点曝光控制系统<sup>[32]</sup>。

这些研究主要集中在无人机平台,且离航空施药精准导航的应用仍有较大差距。为了加快我国农用航空导航领域的快速发展,北京市农林科学院立项“轻型农用飞机喷雾沉积规律及处方施药控制方法研究”项目,以加拿大 AG-NAV 公司的图像导航和精准导航系统为基础,在大型农用飞机和无人机上开展了针对性研究,以期开发适用于中国实际农业生产、操控强的导航系统<sup>[6]</sup>。

### 2.2.2 航空喷嘴的试验与改进

目前,世界发达国家农用航空飞机作业主要使用液力雾化喷嘴和旋转离心式雾化喷嘴<sup>[33]</sup>。目的是实现雾滴可控、流量大且不易堵塞、喷头数少且低量喷雾,提高航空作业效果的同时,最大化降低环境污染。中国大型农用施药飞机直接从国外采购,大都采用旋转离心式雾化喷头。对于这种喷头的作业效果如何,是否需要针对实际生产对其升级开发,有待开展系列试验验证。北京农业智能装备技术研究中心在 2013 年 9 月,首次对旋转离心式雾化喷头航空作业时的放置方向,进行施药效果评估<sup>[19]</sup>。

无人机要实现低空、低量、均匀喷施、高功效的喷洒要求,必须对其雾化部件进行优化与选择<sup>[34]</sup>。国内许多学者就无人机专用雾化喷头进行了设计和测试。范庆妮设计了适合天鹰 3 号小型无人直升机低空低量喷洒的液力喷头,确定了其最佳匹配参数<sup>[23]</sup>;周立新等开展了航空施药电动离心喷头的试验研究,分析了雾化盘电机电压和喷头流量 2 个主要因素对电动离心喷头喷洒性能的影响<sup>[35]</sup>。茹煜等对兼容液力雾化和离心雾化优点的旋转液力雾化喷头进行了性能试验测试<sup>[21]</sup>。此外,还对航空静电

喷雾装置采用的双喷嘴静电喷头进行了结构设计,从理论上分析了双喷嘴环状电极诱导的空间电场对雾滴粒径及荷电效果的影响。建立了泵-喷头-粒径分析-荷质比测量系统,完成了双喷嘴静电喷头喷雾特性的试验分析<sup>[36]</sup>。周宏平等对应用于轻型飞机上的单喷嘴航空静电喷头,从静电电极、喷头材料、喷头加工工艺、高压导线与电极的连接方式、旋拧接头、溢流阀体等几个方面进行了改进设计,完成雾化荷电机理及性能的分析与试验,并搭载于轻型蜜蜂飞机上与原有静电喷头及传统的扇形喷头进行了松毛虫防治对比试验研究<sup>[37]</sup>。

综上,我国科研人员已展开航空喷嘴的结构、性能及应用效果的测试研究,并取得了一定进展。但是,因航空喷嘴性能直接影响航空喷雾效果,我国现开发的喷嘴多存在雾滴谱宽、漂移量大、雾化效果不可控等不足,下一步需从喷嘴结构上加大力度。如重点借鉴发达国家使用的静电超低容量施药技术的应用经验,开发适用于大型农用飞机和不同型号农用无人机的专用可控雾化喷嘴,以提高药液的利用率。

### 2.2.3 先进传感器的开发与应用

当前,雾滴飘移监测、雾滴沉积量评估、雾滴图像处理系统等传感器的开发与使用,是航空施药领域的研究热点,这些研究都有助于提高航空施药技术的应用效果。查阅已报道文献,中国科研人员就上述传感器和技术已开展跟踪与探索。赵春江等开发了航空施药中药雾分布与飘移趋势遥测系统<sup>[38]</sup>。利用近红外成像仪在一定距离获取航空施药的雾滴云团图像,分析其红外成像光谱特征,对药雾云团进行识别,进而反演药雾云团的浓度图像,实现药雾飘移趋势预测。北京市农林科学院依托“轻型农用飞

机喷雾沉积规律及处方施药控制方法研究”的立项,建设了中、低速风洞,重点研究了轻型农用飞机的风场动力源特性<sup>[6]</sup>。农业部南京农业机械化研究所针对无人机旋翼风场测试、航空飘移预测模型等内容开展了系列测试试验<sup>[39]</sup>。张瑞瑞等开发了一种航空施药雾滴沉积特性分析系统,系统包括雾滴获取介质、感染区识别编码模块以及沉积特性分析模块。使用雾滴获取介质捕获航空施药喷洒的雾滴;使用感染区识别编码模块,对雾滴获取介质中的标记试剂进行识别,确定该标记试剂在该雾滴获取介质中的分布信息;使用沉积特性分析模块,与该感染区识别编码模块连接,分析分布信息的航空施药雾滴沉降特性<sup>[40]</sup>。华南农业大学研制成功风场无线传感器网络测量系统,为航空喷施等作业参数的优化选择提供了依据<sup>[41]</sup>。陈立平等开发了一套航空施药雾滴分布指标的检测装置及系统,通过对水敏试纸的扫描图像进行处理,获得雾滴分布指标,降低雾滴分布指标的测量误差,用于提高雾滴沉积测量效率<sup>[42]</sup>。

上述航空施药先进技术的跟踪研究,缩小了中国与发达国家的技术差距。但是,落实到航空作业效果,仍有大量关键问题有待解决,这需要国内科技工作者开展针对性试验,开发出实用、适用于实际生产的航空施药评估监测装置与系统,以提高我国的农用航空应用能力,真正服务于中国的粮食生产与生态安全。

## 3 前景展望

### 3.1 航空施药飞机的发展前景

表1是世界主要国家与中国在航空施药飞机的数量、机型、作业面积的对照。

表1 中国与其他国家航空施药飞机应用对照

Tab.1 Application contrast of aviation spraying aircraft between other countries and China

国家	数量	类型	作业面积比例/%	备注
美国	4 000	AT-402, 510G	40	农用飞机,无人机
俄罗斯	11 000	M-18	35	农用飞机
巴西	1 050	AT-402, 510G	20	农用飞机
中国	500	Y-5, Y12, M-18, 510G RH-2, EH-3, YR-H-15	1.8	农用飞机 无人机
日本	2 346	Yamaha Rmax	30	无人机
韩国	500	Roll-balanced helicopter	20	无人机

分析表1可知,中国无论是在固定翼飞机、旋翼无人机的数量、作业面积等方面都和国外主要国家有较大差距<sup>[7]</sup>。同时,也说明农用施药飞机、无人机在中国有巨大的发展和应用前景。在未来若干年,我们应借鉴美国、俄罗斯、日本、韩国及巴西等应

用较为成熟的国家在农用施药机型上的配置经验,立足于国内的农业实际生产需求。大型农用飞机生产服务可参考欧美标准,无人机可参考日韩标准,在国家专项科研资金支持下,在“全国农业航空技术应用协会和联盟”的引导下,引进与消化国外先进

成熟技术,开发设计具有自主知识产权的农用施药飞机(以开放程度较高、资金投入少的无人机为主),进而建立完善的农用航空施药飞机作业行业标准。

### 3.2 航空施药技术的发展前景

表 2 是发达国家与中国航空施药技术的研究对照。

表 2 中国与发达国家航空施药技术对照

Tab.2 Contrast of aviation spraying technology between developed countries and China

技术内容	美国	日本	中国	备注
性能标准	成熟	成熟	发展中	
飞控系统	成熟	成熟	准备中	
作业参数	成熟	成熟	发展中	
风场模拟	成熟	成熟	发展中	新技术
喷嘴模型	成熟	成熟	准备中	新技术
飘移预测	成熟	成熟	发展中	新技术
静电喷雾	成熟	成熟	发展中	新技术
变量喷雾	发展	发展	准备中	新技术
遥感技术	成熟	成熟	发展中	
无线传感网	发展	发展	发展中	新技术

由表 2 得出,针对世界航空施药的最新技术,如中低速风洞风场模拟、航空飘移预测模型构建、静电喷雾技术、处方图变量喷雾、无线传感监测雾滴沉积等方面<sup>[28]</sup>,国内的北京农业智能装备技术研究中心、南京农业机械化研究所、华南农业大学、中国农业大学都有相关研究团队开展了跟踪研究。但是,由于研究所需的大型农用飞机、无人机及配套设备较少,缺乏国家专项资金的支持,导致开展的理论研究未有质变的突破,已有成果到实际应用仍有较大差距。

随着绿色植保、精准农业、食品安全等热点领域的发展需求,国家对农业航空施药领域予以了重点扶持。2013 年,科技部、农业部等相关部门已对该领域实施专项立项支持<sup>[6-8]</sup>。我国的科研机构 and 科技工作者应抓住这一战略发展期,紧贴生产实际需求,根据国情和实际应用,重点实施:①建立并使用专业风洞风场研究基地,进一步深化航空施药理论研究。②根据国家地域特点和种植区划分,开展针对性的施药技术探索,形成大型农用飞机、无人直升机、多旋翼无人机等多机型作业的生产服务体系。③突破雾滴飘移预测、静电喷雾、变量施药等前沿技

术,形成实用可行的技术体系。

### 3.3 航空施药设备的发展前景

表 3 是发达国家与中国航空施药关键设备对照。

表 3 中国与发达国家航空施药设备对照

Tab.3 Contrast of aviation spraying instruments between developed countries and China

施药设备	美国	日本	中国
导航系统	成熟	成熟	农用飞机,成熟;无人机,缺乏
喷嘴	成熟	成熟	农用飞机,成熟;无人机,缺乏
药箱	成熟	成熟	农用飞机,成熟;无人机,缺乏
隔膜泵	成熟	成熟	农用飞机,成熟;无人机,缺乏
飞控平台	种类多	种类多	多类型同步发展

表 3 显示,中国大型农用飞机航空施药设备与国外差距较小,因其相关设备直接从国外配套采购;无人机喷药设备差距较大,但也呈现关键设备采购与研发并举的快速发展局面<sup>[9]</sup>。

航空施药设备性能直接关系到航空作业的效率和服务于农业生产的有效性。目前,国内大型农用飞机分属各地区通用航空公司运营,国家相关机构统筹管理,由于未能和施药研究的高校、科研院所密切结合,导致相关喷药设备的维护成本高、性能优化速度慢,始终无法最大化其应用效果。其次,无人机因涉及到制造成本、导航系统、喷嘴等方面,需要研发单位针对性地开展系列研究,进而设计开发、测试验证、推广普及,才能发挥相关设备的应用效果。因此,中国需借鉴发达国家航空施药设备的开发与应用经验,与科研机构密切联系,共同测试相关设备在实际生产上的应用效果,开发适用于不同地区、不同应用目标的航空喷药关键部件。

## 4 结束语

在未来的 5~10 年,随着国家逐渐加强对农用航空发展政策的制定与深入宣传;全国农业航空产业技术创新战略联盟和协会等相关专业机构的引导与支持;支撑其发展各种专业技术人员的快速培养;航空施药配套设备专门企业的培育与发展,中国必定在航空精准喷雾基础理论研究和相关设备研发方面取得突破,这将有力推动航空精准施药技术的快速发展和应用普及,真正实现高效、环保、安全的农业植保要求。

## 参 考 文 献

- 李丽,李恒,何雄奎,等. 红外靶标自动探测器的研制及试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12):159-163.  
Li Li, Li Heng, He Xiongkui, et al. Development and experiment of automatic detection device for infrared target[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(12):159-163. (in Chinese)

- 2 傅泽田, 祁力钧, 王俊红. 精准施药技术研究进展与对策[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1):189-192.  
Fu Zetian, Qi Lijun, Wang Junhong. Developmental tendency and strategies of precision pesticide application techniques[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1):189-192. (in Chinese)
- 3 龚艳, 傅锡敏. 现代农业中的航空施药技术[J]. 农业装备技术, 2008, 34(6):26-29.
- 4 薛新宇, 梁建, 傅锡敏. 我国航空植保技术的发展前景[J]. 中国农机化, 2008(5):72-74.
- 5 冯江. 基于无人机的农业遥感信息获取技术[C]//全国农业航空技术研讨会, 2013.
- 6 赵春江. 农业航空遥感与精准施药[C]//2013年全国农业航空技术研讨会, 2013.
- 7 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.  
Zhou Zhiyan, Zang Ying, Luo Xiwen, et al. Technology innovation development strategy on agricultural aviation industry for plant protection in China[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(24):1-10. (in Chinese)
- 8 罗锡文. 对加快发展我国农业航空技术的思考[C]//2013年全国农业航空技术研讨会, 2013.
- 9 中国民用航空局发展计划司. 从统计看民航 2011[M]. 北京: 中国民航出版社, 2011.
- 10 郭庆才. 北大荒通用航空现状与发展[C]//2013年全国农业航空技术研讨会, 2013.
- 11 Bradley K F, Hoffmann W C, Bagley W E, et al. Field scale evaluation of spray drift reduction technologies from ground and aerial application systems[J]. Journal of ASTM International, 2011, 8(5):1-11.
- 12 Huang Y, Ding W, Thomson S J, et al. Assessing crop injury caused by aerially applied glyphosate drift using spray sampling[J]. Transactions of the ASABE, 2012, 55(3):725-731.
- 13 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)
- 14 Bae Y, Koo Y M. Flight attitudes and spray patterns of a roll-balanced agricultural unmanned helicopter[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2013, 29(5):675-682.
- 15 薛新宇, 兰玉彬. 美国农业航空技术现状和发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5):194-201.  
Xue Xinyu, Lan Yubin. Agricultural aviation applications in USA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5):194-201. (in Chinese)
- 16 ASAE Standards S386.2 Calibration and distribution pattern testing of agricultural aerial application equipment[S]. ASABE, 2009.
- 17 Bradley K F, Hoffmann W C, Wolf R E, et al. Wind tunnel and field evaluation of drift from aerial spray applications with multiple spray formulations[C]//STP 1558 Pesticide Formulations and Delivery Systems: Innovating Legacy Products for New Uses West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012:1-18.
- 18 MHT 1040—2011 Determining application rates and distribution patterns from aerial application equipment[S].
- 19 Zhang Dongyan, Lan Yubin, Chen Liping, et al. Measurement and analysis of aviation spraying key parameters for M-18B Dromader and Thrush 510G aircraft[C]//2014 ASABE and CSBE/SCGAB Annual International Meeting, 2014.
- 20 黄向东, 方志蓉. 超轻型直升飞机与固定翼飞机在森林病虫害防治应用中的比较研究[J]. 长沙电力学院学报: 自然科学版, 1999(8):279-281.  
Huang Xiangdong, Fang Zhirong. Study on comparing helicopter with plane application in forest pest and disease control[J]. Journal of Changsha University of Electric Power: Natural Science, 1999(8):279-281. (in Chinese)
- 21 茹煜, 周宏平, 贾志成, 等. 航空静电喷雾系统的设计及应用[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2011, 35(1):91-94.  
Ru Yu, Zhou Hongping, Jia Zhicheng, et al. Design and application of electrostatic spraying system[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2011, 35(1):91-94. (in Chinese)
- 22 茹煜, 贾志成, 范庆妮, 等. 无人直升机远程控制喷雾系统[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6):47-52.  
Ru Yu, Jia Zhicheng, Fan Qingni, et al. Remote control spraying system based on unmanned helicopter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6):47-52. (in Chinese)
- 23 范庆妮. 小型无人直升机农药雾化系统的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.  
Fan Qingni. The research on the pesticide spray system using for the mini unmanned helicopter[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2011. (in Chinese)
- 24 张京, 何雄奎, 宋坚利, 等. 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 Jing, He Xiongkui, Song Jianli, et al. 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)
- 25 薛新宇, 秦维彩, 孙竹, 等. N-3 型无人直升机施药方式对稻飞虱和稻纵卷叶螟防治效果的影响[J]. 植物保护学报, 2013, 40(3):273-278.  
Xue Xinyu, Qin Weicai, Sun Zhu, et al. Effects of N-3 UAV spraying methods on the efficiency of insecticides against planthoppers and *Cnaphalocrocis medinalis*[J]. Acta Phytophylacica Sinica, 2013, 40(3):273-278. (in Chinese)
- 26 高圆圆, 张玉涛, 赵西城, 等. 小型无人机低空喷洒在玉米田的雾滴沉积分布及对玉米螟的防治效果初探[J]. 植物保护, 2013, 39(2):152-157.
- 27 高圆圆, 张玉涛, 张宁, 等. 小型无人机低空喷洒在小麦田的雾滴沉积分布及对小麦吸浆虫的防治效果初探[J]. 作物杂志, 2013(2):139-142.

- Gao Yuanyuan, Zhang Yutao, Zhang Ning, et al. Primary studies on spray droplets distribution and control effects of aerial spraying using unmanned aerial vehicle(UAV) against wheat midge[J]. *Crops*, 2013(2):139 – 142. (in Chinese)
- 28 Lan Y, Thomson S J, Huang Y, et al. Current status and future directions of precision aerial application for site-specific crop management in the USA[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 74(1):34 – 38.
- 29 陈鹰, 于晶涛. INSAR 复数影像配准方法研究[J]. *计算机工程与应用*, 2005, 41(8):13 – 15.  
Chen Ying, Yu Jingtao. A research on registration procedure for INSAR complex image [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2005, 41(8):13 – 15. (in Chinese)
- 30 刘艳, 顾春艳. 基于组件式 GIS 的机载航图辅助导航系统[J]. *测绘与空间地理信息*, 2009, 32(6):87 – 90.  
Liu Yan, Gu Chunyan. The airborne aeronautical chart assisting navigation system based on component GIS[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2009, 32(6):87 – 90. (in Chinese)
- 31 卢之慧, 沈明霞, 姬长英. 嵌入式 GPS 技术的农用飞机作业航线及边界规划研究[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(8):3819 – 3820.  
Lu Zhihui, Shen Mingxia, Ji Changying. Channel planning and border algorithm in agricultural aircraft operating based on embedded and GPS technology[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(8):3819 – 3820. (in Chinese)
- 32 蔡艳辉, 程鹏飞, 李英成, 等. 超轻型飞机 GPS 导航与摄影控制[J]. *测绘科学*, 2010, 35(2):27 – 29.  
Cai Yanhui, Cheng Pengfei, Li Yingcheng, et al. GPS navigation and digital photogrammetric camera control using super-light aircraft[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2010, 35(2):27 – 29. (in Chinese)
- 33 Hoffmann W C. Operation and setup of aerial application equipment[C]//2013 年全国农业航空技术研讨会, 2013.
- 34 Huang Y, Hoffmann W C, Lan Y, et al. Development of a spray system for an unmanned aerial vehicle platform[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2009, 25(6):803 – 809.
- 35 周立新, 薛新宇, 孙竹, 等. 航空喷雾用电动离心喷头试验研究[J]. *中国农机化*, 2011(1):107 – 111.  
Zhou Lixin, Xue Xinyu, Sun Zhu, et al. Experimental study on electrical-driven centrifugal nozzle of aerial spray[J]. *Chinese Agricultural Mechanization*, 2011(1):107 – 111. (in Chinese)
- 36 茹煜, 郑加强, 周宏平, 等. 航空双喷嘴静电喷头的设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(5):58 – 61.  
Ru Yu, Zheng Jiaqiang, Zhou Hongping, et al. Design and experiment of double-nozzle of aerial electrostatic sprayer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(5):58 – 61. (in Chinese)
- 37 周宏平, 茹煜, 舒朝然, 等. 航空静电喷雾装置的改进及效果试验[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(12):7 – 12.  
Zhou Hongping, Ru Yu, Shu Chaoran, et al. Improvement and experiment of aerial electrostatic spray device[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(12):7 – 12. (in Chinese)
- 38 赵春江, 郑文刚, 董大明, 等. 航空施药中药雾分布与飘移趋势遥测系统及方法: 中国, 201110209409.0[P]. 2011-07-25.
- 39 薛新宇. 农用无人机标准现状与思考[C]//2013 年全国农业航空技术研讨会, 2013.
- 40 张瑞瑞, 徐刚, 陈立平, 等. 航空施药雾滴沉积特性分析系统: 中国, 201310533540.1[P]. 2013-10-31.
- 41 胡炼, 周志艳, 罗锡文, 等. 无人直升机机场无线传感器网络测量系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(5):221 – 226.  
Hu Lian, Zhou Zhiyan, Luo Xiwen, et al. Development and experiment of a wireless wind speed sensor network measurement system for unmanned helicopter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(5):221 – 226. (in Chinese)
- 42 陈立平, 徐刚, 张瑞瑞. 一种航空施药雾滴分布指标的检测方法及系统: 中国, 201310425564.5[P]. 2013-09-17.

## Current Status and Future Trends of Agricultural Aerial Spraying Technology in China

Zhang Dongyan<sup>1,2</sup> Lan Yubin<sup>3</sup> Chen Liping<sup>1,3</sup> Wang Xiu<sup>1</sup> Liang Dong<sup>2</sup>

(1. *Beijing Research Center of Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China*

2. *College of Electronic and Information Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China*

3. *Sino-US Agricultural Aviation Cooperative Technology Center, Beijing, China and College Station, Texas 77845, USA*)

**Abstract:** Agricultural aerial spraying is an effective guarantee to achieve food security and ecological security in China. In this article, the research status of agricultural aerial spraying technology in China was reviewed and summarized. Three aspects such as models of agricultural airplane, key technologies of aerial spraying and supporting equipments in aerial spraying were elaborated, and then the prospect of China's agricultural aerial spraying was expected through comparing the current situation of aerial spraying with developed countries. It will provide progress reference for scientific research and development of domestic research institutions and enterprises.

**Key words:** Aviation spray UAV GPS navigation Droplet