

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.034

美国农业航空技术现状和发展趋势分析*

薛新宇¹ 兰玉彬²

(1. 农业部南京农业机械化研究所, 南京 210014; 2. 美国农业部南方平原研究中心, 德克萨斯 77845)

摘要: 美国是目前农业航空装备技术最先进、应用最广泛的国家,农业航空服务组织体系完善,航空施药作业规范,施药部件系列齐全。一些精准农业技术手段如 GPS 自动导航、施药自动控制系统、各种作业模型已步入实用阶段,作业精准、高效,对环境的污染低。随着精准农业的发展,航空遥感技术、空间统计学、变量施药控制等技术也用于美国农田产量监测,植物的水分、营养状况、病虫害监测。提出了为改善目前技术存在的不足,提高数据准确性和生产效率,需解决的主要技术问题和研究热点,包括:图像实时处理技术、多传感器数据融合技术、航空变量喷洒技术。

关键词: 精准农业 航空施药 遥感 漂移 自动导航

中图分类号: S252 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)05-0194-08

Agricultural Aviation Applications in USA

Xue Xinyu¹ Lan Yubin²

(1. *Nanjing Research Institute for Agriculture Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China*

2. *Southern Plains Agricultural Research Center, Department of Agriculture, Texas 77845, USA*)

Abstract: The United States has the most advanced equipment and applications in agricultural aviation. It also has a complete service system in agricultural aviation. This article introduced the current status of aerial applications including service, equipment, and aerial application techniques. It had a complete system including various components for aerial applications which could fit into the different applications. It had practical application of different advanced technologies such as GPS autonomous guidance, variable rate technology, and application models. This article also summarized the techniques in remote sensing, spatial statistic, and variable rate controls, and how these technologies had been used in yield estimation and monitoring for crop water and nutrient stresses, and also pest damages. This article also showed the current status of USA precision aerial application and also provided some thought of the future direction in precision aerial applications including real-time imaging processing, variable rate technologies, and multisensory data fusion.

Key words: Precision agriculture Aerial application Remote sensing Drift model GPS

引言

美国农业航空的发展已有 100 多年历史,从 1906 年,俄亥俄州使用飞机喷洒化学药剂消除牧草害虫开始,航空技术在美国农业生产中不断得到推

广应用。美国农业航空作业项目主要包括:播种、施肥、除草、灭虫等。农用飞机空中作业效率高;突击能力强,利于消灭暴发性病虫害;不受作物长势的限制,利于作物后期作业。与地面机械田间作业相比,使用农用飞机作业还有降低作业成本、不会损坏农

收稿日期: 2012-07-05 修回日期: 2012-11-04
* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2008AA10902)、公益性行业(农业)科研专项资助项目(201203025)和江苏省科技合作计划资助项目(BZ2009056)
作者简介: 薛新宇,研究员,主要从事植保与环境工程技术研究,E-mail: 2012xuexinyu@gmail.com
通讯作者: 兰玉彬,教授,博士生导师,主要从事精准农业航空及航空应用与遥感技术研究,E-mail: yubin.lan@ars.usda.gov

作物的优势,因此很受美国农场主的欢迎。随着精准农业技术的发展,一些不同类型的精准农业技术包括全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)、遥感系统(RS)、作物生产专家管理系统和新类型的装备及部件,也逐步应用于农业航空。这些精准农业技术的应用,进一步提升美国农业航空技术水平。相对于美国农业航空研究而言,我国在农业航空研究和应用方面还很滞后。但是,农业航空作为农业生产的一个重要组成部分和反映农业现代化水平的重要标志之一,已引起了政府部门和国内有关方面专家和学者的高度重视,在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》中,对现代农业航空及相关关键技术提出了规划。随着我国农业科技的大力投入、政策倾斜及低空管制的开放,农业航空将得到迅速发展。本文介绍美国农业航空服务现状、应用现状以及精准农业技术在农业航空中的应用,以期对我国农业航空发展有所借鉴。

1 美国农业航空服务现状

美国是世界上农业航空技术最先进,应用最广泛的国家,农用飞机有20多个品种,根据机型划分,可分为固定翼飞机和直升飞机两大类;根据载荷不同,可分为大型和中小型两类,大型旋风式农用飞机载重1.5 t,中小型为0.5~1 t。农用飞机价格通常在100~140万美元之间。美国现有农业航空公司2000多家,在用农用飞机约4000架,注册农用飞机驾驶员3000多名,年处理耕地面积近3400万hm²,占美国年处理耕地面积的40%。森林植保作业100%采用航空作业方式。

美国农业航空服务一个重要的特点就是有强大的农业航空组织体系,包括国家农业航空协会和近40个州级农业航空协会。国家农业航空协会有来自于46个州的1700个会员,会员主要包括企业主和飞行员。协会一方面为会员提供品牌保护、继续教育、安全计划、农林业与公共服务业方面的联系与信息服务,另一方面还积极开展提高航空应用效率与安全性方面的研究与教育计划。由于共同的利益与目标,美国国家农业航空协会还与政府机构,包括美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)、美国环境保护署(U. S. Environmental Protection Agency, EPA)、美国农业部(United States Department of Agriculture, USDA)、重要的科研机构如美国农业部南方平原研究中心(United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service-Southern Plains Agricultural Research Center, USDA-ARS)以及材料与化学工业

行业保持紧密联系与合作。另外,协会还通过组织航空年会,为会员在新产品、新技术以及教育方面提供重要的交流机会,特别是新技术趋势发布会吸引了众多企业与农场主,他们都能够能够在发布会上寻求到更经济的技术用于农业生产。

2 农业航空施药技术

农业航空施药作业是农业航空服务最主要的作业项目。在美国,航空施药作业规范齐全,施药部件系列完善,能适合不同作业要求。随着精准农业技术手段如GPS自动导航、施药自动控制系统、各种作业模型的逐步应用,施药作业变得更加精准、高效,对环境的污染也在不断降低。

2.1 GPS导航施药技术

美国的农用飞机都配备精密仪器和设备,如GPS是很普遍的装备,部分农用飞机还配备流程控制、实时气象测试系统和精确喷洒设备。飞机上的GPS系统,由驾驶舱仪表板上的移动地图显示装置、指示灯条以及键盘组成。在施药作业之前,施药规划人员通过手持GPS测量确定施药作业区域的边界点,当这些边界点加载到施药飞机的GPS接收器上,就形成一个施药区域地图。GPS根据区域地图规划出施药作业的航路图,并准确地使飞机沿着规定路线施药,有效避免重喷和漏喷。当药箱中的药液不够时,GPS会记录结束喷药的关闭点,待药液重新加载完成后,飞机会从关闭点开始继续施药。大多数GPS系统在驾驶舱内都有一个显示屏,可以实时显示喷药地块、路线和飞机在已规划航路中的位置,便于飞行员进行监控及修正。GPS获取的作业信息,如飞机飞行轨迹、喷雾系统开与关、飞行速度等,也可以输入到GIS系统中,用来分析施药作业情况。这些信息也被作为一种合法的记录,用于由于施药可能产生的纠纷处理中^[1]。

2.2 航空喷嘴

美国航空施药喷嘴根据雾化方式主要分两种:液力雾化喷嘴和旋转离心雾化喷嘴(图1)。航空用液力喷嘴的设计类似于地面施药装备的喷嘴,但是有较大的区别:一是由于飞机飞行的速度比较快,因此航空施药液力喷嘴的流量非常大;二是由于航空喷嘴工作时会遇到高速空气流,因此航空施药液力喷嘴工作时会受到很大的空气剪切力;三是航空喷嘴的安装角度与地面喷嘴不同,高速空气流会直接影响雾滴谱。典型的航空施药液力喷嘴是CP喷嘴系列,多头CP喷嘴可以提供多种孔径,飞行员通过旋转喷嘴座来改变喷量,通过快速调节喷杆实现喷嘴角度向前或向下改变。另外一种航空施药喷嘴是

旋转式离心雾化喷嘴(Micron 公司制造),驱动方式有电动驱动和风力驱动两种形式。这种喷嘴主要有 3 个特点:①雾滴可控,可以通过调节旋转速度,有效地控制雾滴直径。②大流道结构不会产生堵塞现象,所以非常适合应用于可溶性粉剂和悬浮剂的喷洒作业。③主要用于低量施药,因此用此类喷嘴进行航空施药,通常只需要 6~8 个喷嘴。

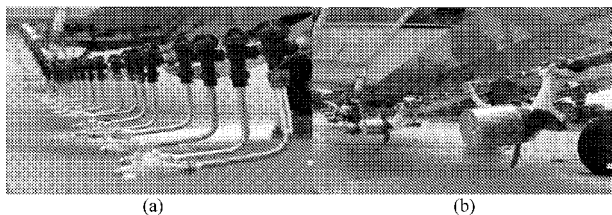


图 1 航空施药喷头

Fig. 1 Aerial spraying nozzles

(a) CP 喷嘴 (b) 旋转式离心雾化喷嘴

2.3 航空喷嘴模型

美国农业部航空应用技术研究中心研究出一种航空喷嘴喷洒模型,通过喷嘴的电脑模型,可以清晰了解喷嘴产生的雾滴情况,以便选择并设计合适的作业参数。喷嘴模型可以通过喷嘴型式、喷雾压力、气流速度和喷雾药液来预测将会产生的雾滴谱。目前,航空喷嘴模型不仅给使用者提供作业依据,还作为 EPA、州监管部门及相关人员等评估喷雾作业雾滴谱范围是否符合农药使用标签规定的依据。喷嘴空中雾滴谱数据研究,最早从 1954 年开始, Akesson、Bouse、Hewitt、Picot 等开展了在各种条件下、不同喷嘴雾滴谱的相关研究,但是这些研究数据获取方式不统一。直到 1990 年,应 EPA 的要求,由 38 家美国农业化工公司资助的农药飘移研究小组(Spray drift task force, SDTF)收集、研究了大约 2 000 个产品的相关数据来评估飘移。1999 年,美国农业工程师学会(American Society of Agricultural Engineers, ASAE, 2005 年更名为 American Society of Agricultural and Biological Engineers, ASABE)技术委员会又通过“合作标准项目”(Cooperative Standard Program),制订了农用喷雾雾滴谱分类标准,即 ASAE S572(ASAE S572.1-2009)。按照标准程序,SDTF 获得一系列喷嘴雾化数据, Hermansky、Hewitt 分别建立模型来描绘了这些喷嘴^[1-2]。

建立喷嘴模型,引起了美国国家航空协会(U.S. National Aeronautics Association, NAA)的兴趣,它要求建立一些最常用喷嘴模型。随后, NAA 和 USDA 对市场上所使用的喷嘴进行了调查,将固定翼飞机所使用的市场占有率超过 5% 以及一些具有独特设计或雾化特性的喷嘴列入了名单,这些喷嘴包括现在市场占有率超过 60% 的 CP 可调喷嘴、

水射流喷嘴(Lund、TVB 等)。目前,美国 DSDA-ARS 的 DropKirk 模型已成为美国航空施药作业条件选择的重要依据^[3]。

2.4 航空飘移预测模型

美国十分重视农药喷洒作业中雾滴飘移引起的环境污染问题,对于航空施药的安全区域,已有明确的法律条文规定。目前,飘移模型已成为决策是否允许航空施药和处理相关纠纷的重要手段。

20 世纪 70 年代末到 80 年代初,美国林业局开始用计算机模型来分析和预测航空施药中雾滴飘移、沉积情况。最早的模型是 FSCBG 模型(Forest service Cramer Barry grim),该模型研究天气因素、蒸发情况和冠层穿透对沉积分布的影响,预测雾滴分布、沉积,用于制定施洒作业方案和对环境的风险评估。在 Teske 等研究人员努力下, FSCBG 模型发展成为著名的 AGDISP(Agricultural dispersion)模型。用户可以输入喷嘴、药液、飞机类型、天气因素等,通过对内部数据库调用,预测可能产生的飘移。该模型将飞机尾流、翼尖涡流、直升机旋翼下旋气流和机身周边空气扰动纳入到对雾滴的影响因素,把航空施药的喷洒雾滴作为离散对象进行分析,以平均直径和体积分数为衡量参数,再将数据经过拉格朗日方程处理,得到雾滴的运动轨迹,以此来预测雾滴的运动和地面沉积模式,可以说该模型的建立为其他模型奠定了基础。

在 AGDISP 模型的基础上, STDF 做了一系列田间试验,为建立计算机飘移模型数据库奠定了坚实的基础。STDF 与 EPA 合作,在 2002 年正式注册了 AGDRIFT(Agricultural drift)模型,用于官方监管农业航空喷雾施药相关事宜。

近几年, AGDISP 模型还不断地被完善。Teske 和 Thistle 等针对 AGDISP 模型预测范围小的缺陷,对该模型进行了进一步改进,运用静态高斯模型法(Steady state Gaussian model)、高斯云团模型(Gaussian pull model)和物理角度分析飞机尾流、大气湍流相互作用、N-S 方程求解 3 种方法,将该模型有效准确预测范围扩至 20 km;澳大利亚 Hewitt 等将地理信息系统引入到航空飘移模型中,通过对实时风速的测定来优化喷施策略,以减少在非靶标区域的农药飘移损失^[4];新西兰 Praat 等开展了从喷雾器(机)和作物冠层特性角度出发,进行一系列飘移研究;德国 Kaul 等也基于一些具体作物进行了相关的沉积、飘移研究,取得了一定的进展^[5]。美国 Hoffmann、Fritz 和 Lan 通过一系列喷嘴在低速风洞中测得的尺寸和流量建立了 WTDISP(Wind tunnel dispersion)模型,然后用同样的喷嘴做实际试

验,得到了很好的对比结果^[6~7]。

2.5 航空静电喷雾技术

静电喷雾技术可以增加雾滴在靶标上的沉积,减少非靶标区的飘移,在温室、果园等地面喷洒作业中已有成功应用。1966年,Carlton等开展航空静电喷雾技术研究^[8],1999年Carlton获得航空静电喷雾系统专利^[9],此专利被美国SES公司(Spectrum electrostatic sprayers, Inc.)购买并形成商业化产品。与地面静电喷雾系统不同的是,每个航空静电喷嘴为相距30 mm相连的2个喷嘴组成(图2)。航空静电喷雾系统的静电发生器,分别产生正或负电压,在实际应用时,安装在飞机的机翼两侧的航空静电喷嘴,分别与静电发生器的正或负压输出端连接,使两机翼负载的正、负电压达到平衡,机身或喷雾支架上总静电场近似于零。静电喷雾系统的雾滴感应充电电压为8~10 kV,喷嘴工作压力为0.5 MPa,雾滴VMD约为150 μm ,施药量为9~18 L/hm²。近年来,美国学者对航空静电喷雾系统的作业效果做了一些评估试验,2001年Kirk、Hoffmann、Carlton研究了系统在棉花上的田间应用效果^[10],2003年Kirk研究了系统抗飘移性能^[11],试验结果表明,航空静电喷雾系统可有效减少施药液量和提高药液沉积量,但是没有提高病虫害防治效果和减少下风处的喷雾飘移。由于美国农药标签规定施药量大于静电施药量,航空静电喷雾系统价格与应用效果等方面的问题,限制了该技术的广泛应用。

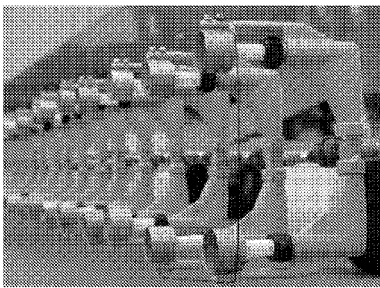


图2 航空静电喷头

Fig. 2 Aerial electrostatic nozzles

2.6 航空变量施药技术

航空变量施药技术,是将不同空间单元的数据与多源数据(土壤性质、病虫害害、气候等)进行叠加分析为依据,根据不同地块的不同要求,有针对性的进行作业。航空遥感与地理信息系统相结合,利用软件转换为处方图,提供给飞机导航系统制造商。变量控制系统下载这种处方图,利用处方图来控制施药量。

航空精准施药系统有2个主要部件:GPS系统和变量施药控制系统。Hemisphere GPS公司2010年产品Air IntelliStar采用了一种新的技术——

Crescent接收器,这种新的接收器的频率为20 Hz,使飞行员操作盘接收的信号1 s能够更新20次。与普通的5 Hz或10 Hz相比,20 Hz的频率能够提供更精确的信号,因为频率越高,系统就能够更准确、更准时地作出相应的变量控制。还有许多其他的公司提供类似的技术装备,AG-NAV公司有一种型号为AG-NAV2的导航设备,它可以提供给飞行员田地宽度、方向导航以及其他作业信息。Adapco公司生产的Wingman GX具有较大的使用范围,可以提供基本的飞行指导、飞行记录、喷洒流量控制等功能,是一个先进的空中喷洒管理系统,Wingman GX系统能够实时通过气象传感器系统接收和处理气象信息,准确的气象信息分析减少了喷洒过程中农药在非靶标作物上的飘移量,最大程度地优化喷洒质量。

由于航空变量喷洒系统的应用时间不长,所以关于农药投放和变量系统反应精确度的信息很少。2005年,Smith和Thomson选择了一个经纬度已知的区域评估了Satloc Airstar M3导航系统的GPS的位置及机械系统反应滞后问题^[12]。2009年,Thomson等测试了流量变量控制系统的定位精度,并且通过给出一些变量指令,观察它反应的快速性和准确性,相应地改进了控制系统^[13]。

3 精准农业航空技术的研究现状

精准农业技术是利用各种技术和信息工具来实现农作物生产率的最大化。这种新的技术可以使航空施药更加精确、更有效率。近几年来,包括全球定位系统、地理信息系统、土壤地图、产量监测、养分管理地图、航拍、变量控制器和新类型的喷嘴如宽频调制变量喷嘴等精准农业技术,进一步促进了航空应用技术的发展。机载遥感系统可以产生精确的空间图像用来分析农田植物的水分、营养状况,病虫害的状况;空间统计学可以更好地分析空间图像,通过图像处理将遥感数据转换成处方图,从而实现航空变量施药作业。因此,遥感、空间统计学、变量施药控制技术对于航空精准变量施药作业系统都是至关重要的^[14]。

3.1 遥感技术

近几年,随着一系列探测地球资源卫星的发射,卫星遥感技术已成为用于特定地点监测和管理作物生长状况的重要和有效的工具。一些商业卫星公司通过遥感技术提供不同的空间、光谱特性和分辨率的卫星影像,再利用这些动态变化的卫星影像来监测作物长势,并对作物产量进行预测。卫星遥感技术虽然在成像幅度和成像摆角等方面有显著优势,

但是也有很多不足,例如确定这些系统的光谱波段、飞行位置以及高度和采集时间是很困难的。随着地理信息系统(GIS)、全球卫星定位系统(GPS)、图像处理技术和数码摄录技术的发展,开发高效的航空遥感系统来克服卫星遥感系统的不足,成为一种新趋势。

航空遥感系统的主要特点是机动灵活、作业选择性强、时效性好、准确度高。遥感装置包括:数码相机、CCD(电耦合器件)照相机、摄像机、高光谱照相机、多光谱照相机、热成像照相机。高光谱成像和多光谱成像的区别在于光谱波段的数量。多光谱一般包含几个光谱波段数据,光谱往往并不是连续的。高光谱包含了几十个到数百个波段数据,并且是一套连续的光谱波段。在过去的10年里,航空高光谱遥感技术在农业中的应用一直稳步增长。Goel、Yang、Dobermann等开展了利用高光谱技术进行高粱、棉花的产量评估报告工作^[15~21]。Huang、Pinter、Yang等研究表明,与高光谱图像的系统相比,因为降低了数据密度,多光谱系统便宜得多,适合获取作物、土壤、杂草或地面覆盖信息,是服务于农业生产和农药喷洒既经济又实用的技术手段^[22~26]。通常,

在实际的航空遥感应用中,要基于经济和技术可行性来选择不同类型的光谱成像系统。

3.2 遥感飞机

航空遥感系统的飞机主要以小型农用飞机和无人驾驶直升飞机为主。图3所示为USDA-ARS大面积病虫害管理研究中心航空应用技术团队用于航空遥感系统的飞机。其中图3a为空中拖拉机公司生产的402-B型农用飞机,装载一个整合的气象系统,实时地测量和记录风速、风向、温度、湿度以及压力。图3b为Cessna公司生产的206型农用飞机,主要用于航空遥感系统,机载系统包括:数码相机、多光谱相机、TerraHawk遥感系统(图4)。图3c为Rotomotion公司生产的SR20型和SR200型无人驾驶直升飞机,其中SR20使用电池供电飞行时间约为25 min,可以承载2.25 kg的载荷;SR200使用汽油燃料提供动力飞行时间可达到1 h,可以承载约22.5 kg的载荷。两种机型都可以通过软件实时控制飞行路线,或者按照预先设定好的路线飞行。图3d为AgHusky农用飞机,同样是Cessna公司生产的产品,装载了一个GPS导航系统和变量控制系统,主要用于变量航空喷洒技术的研究。

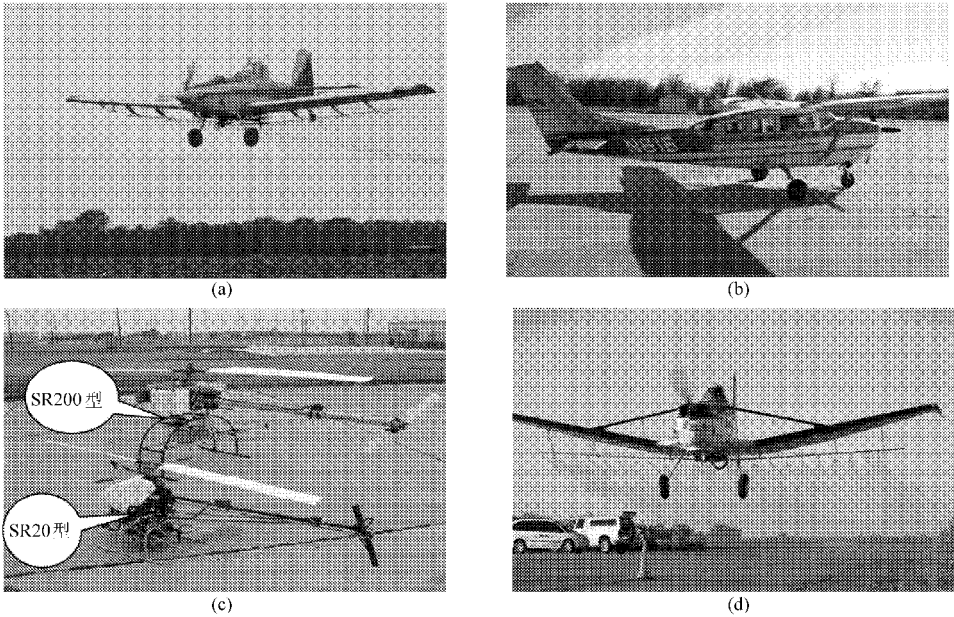


图3 航空遥感系统飞行器

Fig.3 Airborne remote sensing system

(a) 空中拖拉机公司402-B型农用飞机 (b) Cessna公司206型农用飞机
(c) Rotomotion公司SR20型和SR200型无人驾驶直升飞机 (d) AgHusky农用飞机

3.3 航空遥感相机

随着电子技术的发展,应用于航空遥感系统的传感器种类也非常繁多。USDA-ARS-APMRU-AAT现在所应用的两款相机分别是价格相对较低的农用多光谱数字相机和价格较高的MS4100型高分辨多光谱数字相机。

美国Tetracam公司的ADC农用数字相机包括320万像素、2048×1536分辨率的CMOS传感器和500万像素、2560×1536分辨率的CMOS传感器,可感光绿色、红色和近红外波段光谱,感光波段几乎可与地球资源探测卫星Thematic Mapper2(520~600 nm)、Thematic Mapper3(630~690 nm)和

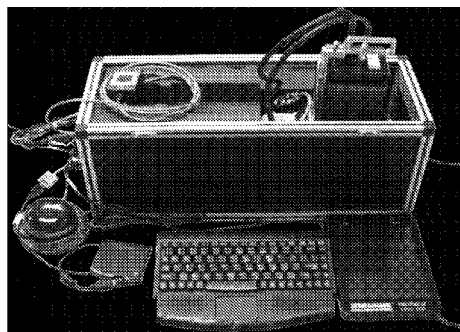


图4 TerraHawk 遥感系统

Fig. 4 TerraHawk remote sensing system

Thematic Mapper4(760 ~ 900 nm)相媲美。光谱信息提供的数据,用于分析植物 NDVI (Normalized difference vegetation index)、土壤调节植被指数 SAVI (Soil adjusted vegetation index)、叶面积指数 LAI (Leaf area index),标准的 GPS 系统是通过一个外部接收装置将坐标信息加入到图像中。该公司的农用数字相机质量为 640 g,使用 8 节 AA 碱性电池,320 万像素款装配了 8.5 mm 的镜头,在 1 340 m 高空的地面分辨率为 0.5 m。2009 年该相机的市场售价约为 5 000 美元。专用软件 Pixelwrench2,用于管理和处理成像的图片,另外需要安装软件 SensorLink,用于获取 GPS 航线信息并在指定点触发相机拍照。

Geospatial System 公司的 MS4100 型相机是 3 芯片彩色/近红外数字相机,每个传感器有 60° 视角,1 920 × 1 080 像素阵列,有 2 种工作模式:用于高质量彩色图片的 RGB 模式和多光谱拍摄的红外模式。该相机可获取从 400 nm 到 1 000 nm 间 4 个波段的图像:近红外波段(767 ~ 833 nm)、红光波段(640 ~ 680 nm)、绿光波段(520 ~ 560 nm)和蓝色波段(437 ~ 483 nm),根据需要分别可得到单色和组合颜色的平面图像。相机与图像采集卡 NIIMAQ PCI - 1424/1428 集成,通过专用软件 DTCControl 直接获取图片,目前市场上售价约为 25 000 美元。

由于飞行员不可能同时驾驶飞机和操作相机拍照,所以航拍必须实现自动化。TerraHawk 相机控制系统(Terra Verde Technologies, Inc.)与 MS4100 型相机集成,控制 DragonFly 软件根据 GPS 信息适时触发快门,控制平衡架,使相机保持稳定。通过应用研究,Huang 和 Lan 等认为 Tetracam 公司的相机更适合于贴近地面的低速运动平台,如 UAV,而 MS4100 型拍摄系统搭载在 Cessna 206 之类的飞行器上效果很好^[27~29]。

多光谱设备可获得可见光和近红外波段的反射光谱图像,但所有的遥感测量数据都会受到地面不定性因素的影响,如植物生长结构、冠层特性、作物

生长方向和密度以及背景土壤特性,所以仅仅分析遥感数据有时并不能得到所需要的全部信息,将遥感图像、地面实测和空间分析相互结合,才能对田块的空间复杂性有更全面的了解^[30~32]。

3.4 空间统计学

空间统计学首次提出和形成于 20 世纪 50 年代。近些年来,随着地理信息系统 GIS 技术的发展,空间统计学已经引起越来越多的重视,已被广泛用于空间数据的建模与分析,并且用于自然科学如地球物理学、生物学、流行病学和农业。大量研究成果表明,空间统计学具有在农业管理中应用的优越性和好处。Stein 等通过给玉米提供不同剂量的氮肥,然后利用空间统计学建立不同的模型来监测玉米的产量^[33]。通过此研究,他们强调了空间分析在降低生产风险、制定可变资源配置上的优越性。Bongiovanni 等发现,把空间回归分析应用于产量管理,可以用来调节玉米和大豆氮肥的变量施肥策略^[34~35]。Lambert 等指出利用空间经济学、空间地质统计学、空间趋势分析氮肥的使用量比普通的最小二乘法、相邻分析法能够提供更精确、更强有力的数据保证^[36]。Yao 等利用土壤样本数据、航空高光谱成像系统和空间统计学成功地制作了一幅土壤营养图^[37]。Misaghi 等使用空中图像、土壤参数、作物参数制作了预测草莓产量的模型^[38]。Bajwa 等建立了不同的空间模型测试各种各样变化的归一化植被指数 (Green normalized difference vegetation index, GNDVI),数据来源于遥感技术可见光和近红外地区的成像,以应对氮含量和叶柄硝态氮含量的营养预测^[39]。Huang 等发现遥感图像可以用来预测空间模型和地面的土壤特性和作物冠层覆盖率等^[40]。总的来说,遥感图像数据和空间统计方法,可以提供有价值的、完整的信息管理。这些信息可用于制作配方、产量等应用地图,支持变量精准农业技术。

4 研究趋势

目前,美国等发达国家在农业航空技术方面的研究热点,主要有以下 3 个方面。

4.1 图像实时处理系统

图像的实时处理可以弥合遥感和航空变量喷洒的差距。数据的采集和处理是精细航空喷洒的重要组成部分之一,无论是空中图像采集、地面传感器及仪器的监测、人们的观察,或实验室样品的检测,其数据分析必须正确,这样才便于更好地了解因果关系。为了准确地绘制航空变量喷洒的地图,收集实时的多光谱图像是一个挑战。研究的最终目标是建立一个界面友好的图像处理软件系统,旨在快速分析

空中图像的数据,以便于在数据采集后可立即进行变量喷洒。

4.2 多传感器数据融合技术

多传感器数据融合技术可以把不同位置的多光谱数据、多分辨率数据、环境数据、生物数据加以综合,消除传感器间可能存在的冗余和矛盾的数据互补,降低其不确定性,形成对系统的相对完整一致的感知描述,从而提高遥感系统决策、规划、反映的快速性和正确性,降低决策风险。

4.3 变量喷洒系统

目前,现有的商业变量喷洒控制设备成本高并且操作困难,因此在应用方面受到限制。所以需要开发一种经济的、应用软件界面友好的整合系统,可

以实时处理空间分布信息并指导在有效面积上的喷洒作业。此外,喷嘴的设计应达到释放最佳雾滴大小的目的,并提供最大的应用效果,尤其是喷嘴的大小应根据适当的压力界限而设计,同时可以调节喷嘴的最佳压力范围。精确的航空喷洒作业系统使得农药的利用更加合理和有效,从而满足农民的要求,达到节能环保的目的。

5 结束语

随着精准农业技术的应用,农业航空发展空间更为广阔。病虫害管理和农药使用更合理,对环境影响更小。学习并借鉴先进国家的技术和经验,对推动我国农业航空的发展具有积极作用。

参 考 文 献

- 1 Bill Kilroy. Aerial application equipment guide 2003[M]. Washington, D. C. : USDA Forest Service, 2003:59 ~ 62,143 ~ 147.
- 2 ASABES572.1—2009. Spray nozzle classification by drop-let spectra[S]. ASABE, 2009.
- 3 Kirk I W. Measurement and prediction of atomization parameters from fixed-wing aircraft spray nozzles[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 693 ~ 703.
- 4 Hewitt A J, Maber J, Praat J P. Drift management using modeling and GIS systems[C]//Proceedings of the World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources, 2002:290 ~ 296.
- 5 Teske M E, Thistle H W. Aerial application model extension into the far field [C]//ASAE Annual Meeting, 2003, Paper No. 034019.
- 6 Fritz B K, Hoffmann W C, Lan Y. Evaluation of the EPA drift reduction technology (DRT) low-speed wind tunnel protocol [J]. Journal of ASTM International, 2009,6(4):183 ~ 191.
- 7 Hoffmann W C, Fritz B K, Lan Y. Evaluation of a proposed drift reduction technology high-speed wind tunnel testing protocol [J]. Journal of ASTM International, 2009,6(4):212 ~ 223.
- 8 Carlton J B, Isler D A. Development of a device to charge aerial spray electrostatically[J]. Agricultural Aviation, 1966,8(2):44 ~ 51.
- 9 Carlton J B. Technique to reduce chemical usage and concomitant drift from aerial sprays: U. S. [P]. 1999-08-15.
- 10 Kirk I W, Hoffmann W C, Carlton J B. Aerial electrostatic spray system performance[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(5):1 089 ~ 1 092.
- 11 Kirk I W. Electrostatic coalescence for aerial spray drift mitigation[C]//Beltwide Cotton Conferences, Nashville, 2003, TN - January 6-10.
- 12 Smith L A, Thomson S J. GPS position latency determination and ground speed calibration for the Satloc Airstar M3[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2005, 21(5):769 ~ 776.
- 13 Thomson S J, Smith L A, Hanks J E. Evaluation of application accuracy and performance of a hydraulically operated variable-rate aerial application system[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(3):715 ~ 722.
- 14 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 U. S. A. [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 74(1): 34 ~ 38.
- 15 Goel P K, Prasher S O, Landry J A, et al. Estimation of crop biophysical parameters through airborne and hyperspectral remote sensing [J]. Transactions of the ASAE, 2003,46(4):1 235 ~ 1 246.
- 16 Jang G S, Sudduth K A, Hong S Y, et al. Relating image-derived vegetation indices to crop yield[C]//Proceedings of the 20th Biennial Workshop on Aerial Photography, Videography, and High-Resolution Digital Imagery for Resource Assessment, 2005.
- 17 Uno Y, Prasher S O, Lacroix R, et al. Artificial neural networks to predict corn yield from compact airborne spectro-graphic image data[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 47(2): 149 ~ 161.
- 18 Yang C, Everitt J H, Bradford J M, et al. Airborne hyperspectral imagery and yield monitor data for mapping cotton yield variability[J]. Precision Agriculture, 2004,5(5): 445 ~ 461.
- 19 Yang C, Everitt J H, Bradford J M, et al. Comparison of airborne multispectral and hyperspectral imagery for estimating grain sorghum yield[J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(2):641 ~ 649.
- 20 Zarco-Tejada P J, Ustin S L, Whiting M L. Temporal and spatial relationships between yield variability in cotton and high-spatial hyperspectral remote sensing imagery[J]. Agronomy Journal, 2005, 97(3):641 ~ 653.
- 21 Dobermann A, Ping J L. Geostatistical integration of yield monitor data and remote sensing improves yield maps[J]. Agronomy Journal, 2004, 96(1):285 ~ 297.

- 22 GopalaPillai S, Tian L. In-field variability detection and spatial yield modeling for corn using digital aerial imaging[J]. Transactions of the ASAE, 1999, 42(6):1 911 ~ 1 920.
- 23 Huang Y, Lan Y, Hoffmann W C, et al. Multisensor data fusion for high quality data analysis and processing in measurement and instrumentation[J]. Journal of Bionic Engineering, 2007, 4(1): 53 ~ 62.
- 24 Pinter P J, Hatfield J L, Schepers J S, et al. Remote sensing for crop management[J]. Photogram Eng. Remote Sens., 2003, 69(6):647 ~ 664.
- 25 Yang C, Anderson G L. Airborne videography to identify spatial plant growth variability for grain sorghum[J]. Precision Agriculture, 1999, 1(1): 67 ~ 79.
- 26 Yang C, Everitt J H. Relationships between yield monitor data and airborne multispectral digital imagery for grain sorghum[J]. Precision Agriculture, 2002, 3(4):373 ~ 388.
- 27 Huang Y, Lan Y, Hoffmann W C. Use of airborne multispectral imagery in pest management systems[J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2008, 10:IT-07-010.
- 28 Huang Y, Thomson S J, Lan Y, et al. Multispectral imaging system for airborne remote sensing to support site-specific agricultural management [C]//Proceedings of the 3rd Asian Conference on Precision Agriculture (ACPA), Beijing, China, 2009: 14 ~ 17.
- 29 Lan Y, Huang Y, Martin D E, et al. Development of an airborne remote sensing system for crop pest management: system integration and verification[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2009, 25(4):607 ~ 615.
- 30 Moran M S, Inoue Y, Barnes E M. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management [J]. Remote Sensing of Enviroment, 1997, 61(3):319 ~ 346.
- 31 Lan Y, Zhang H, Lacey R, et al. Development of an integrated sensor and instrumentation system for measuring crop conditions [J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2009, 11(1): 1 ~ 16.
- 32 Senay G B, Ward A D, Lyon J G, et al. Manipulation of high spatial resolution aircraft remote sensing data for use in site-specific farming[J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(2):489 ~ 495.
- 33 Stein A, Brouwer J, Bouma J. Methods for comparing spatial variability patterns of millet yield and soil data[J]. SSSAJ, 1997, 61(4):861 ~ 870.
- 34 Bongiovanni R G, Lowenberg-DeBoer J M. Nitrogen management in corn using site-specific crop response estimates from a spatial regression model[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture, St. Paul, MN, 2000:16 ~ 19.
- 35 Bongiovanni R G, Lowenberg-DeBoer J M. Economic of nitrogen response variability over space and time: results from the 1999 - 2001 field trials in Argentina[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Precision Agriculture, ASA, Madison, WI., 2002:14 ~ 17.
- 36 Lambert D M, Lowenberg-DeBoer J M. Spatial regression models for yield monitor data: a case study from Argentina[C]//American Agricultural Economics Association Annual Meeting, Montreal, Canada, 2003:27 ~ 30.
- 37 Yao H, Tian L, Wang G, et al. Soil nutrient mapping using aerial hypersepctral imaging and soil sampling data-a geostatistical approach[J]. ASAE Annual Meeting, 2003, Paper No.031046.
- 38 Misaghi F, Dayyanidardashti S, Mohammadi K, et al. Application of artificial neural network and geostatistical methods in analyzing strawberry yield data[J]. ASAE Annual Meeting, 2004, Paper No.041147.
- 39 Bajwa S G, Mozaffari M. Effect of N availability on vegetative index of cotton canopy: a spatial regression approach[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(5):1 883 ~ 1 892.
- 40 Huang Y, Lan Y, Ge Y, et al. Spatial modeling and variability analysis for modeling and prediction of soil and crop canopy coverage using multispectral imagery from an airborne remote sensing system[J]. Transactions of the ASABE, 2010, 53(4): 1 321 ~ 1 329.