

民用无人机作业气象标准制订及气象保障体系构建浅析

姚镇海¹ 江春¹ 姚叶青¹ 丁浩² 诸葛杰³ 马邵翔⁴

(1 安徽省公共气象服务中心, 合肥 230031; 2 中国民用航空华东地区空中交通管理局安徽分局, 合肥 230051; 3 佐格微系统(杭州)有限公司, 杭州 310000; 4 安徽科尔泰智能科技有限公司, 合肥 230000)

摘要: 我国民用无人机作业在影视、农林、勘测、安防等诸多领域得到了广泛应用, 作业高度多在低空空域, 属于通用航空(通航)领域的应用分支。气象服务作为飞行最重要的基础保障之一, 日益成为制约我国通航产业发展的瓶颈。该领域尚缺少系统性、针对性的气象指标和保障措施。本文从无人机作业领域、气象影响因素、无人机作业气象标准制订方面提出了“多部门联合”共建无人机作业气象标准的思路。并以无人机作业气象系列标准中的植保作业为例, 给出了作业期间天气实况、预报信息登记表, 为气象服务提供数据记录蓝本。其次, 就当前无人机作业气象保障存在的短板, 从气象指标体系构建、多元数据融合产品研发、通信机制的建立完善等方面提出了展望, 旨在为完善无人机作业气象保障体系提供思路和建议, 并为拓展通航气象服务新领域、创新发展奠定理论基础。

关键词: 无人机作业, 气象标准, 多部门联合, 气象保障体系

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.02.010

Analysis on Meteorological Standards Setting of Civil UAV Operation and Construction of Meteorological Support System

Yao Zhenhai¹, Jiang Chun¹, Yao Yeqing¹, Ding Hao², Zhuge Jie³, Ma Shaoxiang⁴

(1 Anhui Public Meteorological Service Center, Hefei 230031 2 Anhui Branch of East China Air Traffic Administration of Civil Aviation of China, Hefei 230051 3 Hangzhou ZOGLAB Microsystem Co., Ltd., Hangzhou 310000 4 Anhui Kertai Intelligent Technology Co. Ltd., Hefei 230000)

Abstract: In China, Civil UAV operation has been used in a variety of fields, such as film and television, agriculture and forestry, survey and security. The operation altitude of UAV operation is mostly in low altitude airspace, which belongs to the application branch of general aviation (GA) field. As one of the most important basic guarantees of UAV operation, meteorological services have increasingly become a bottleneck restricting the development of China's GA industry. Currently there is a lack of systematic and targeted meteorological indicators and support measures. Based on UAV application fields, meteorological influencing factors and the formulation of UAV operation meteorological standards, this paper puts forward the idea of “multi-sectoral cooperation” to build the UAV operation meteorological index system. The plant protection operation is taken as an example, and both the weather information record and the weather forecast record for UAV plant protection operation are provided references for the development of meteorological services. Then, the future outlook of meteorological support for UAV operation, which is still insufficient, is proposed from the aspects of meteorological index system construction, multiple data fusion, and the establishment and improvement of communication mechanism. It is hoped that the research results can not only offer some advice and suggestions for the establishment of meteorological support system for UAV operation but also lay the theoretical foundation for expanding new fields and innovative development of GA meteorological services.

Keywords: UAV operation, meteorological standards, multi-sectoral cooperation, meteorological support system

0 引言

无人机作业属于通用航空领域的应用分支, 在影

视、农林、勘测、安防等诸多领域得到了广泛应用^[1]。伴随飞控、电池、云台载荷等模块技术的不断成熟, 以大疆创新、3D Robotics、亿航、零度智控等为代表的无人机企业不断推陈出新, 拓展了无人机行业应用普及面^[2-4]。2019年4月, 人力资源社会保障部、市场监督管理总局和统计局发布了若干新兴职业, 其中无人

收稿日期: 2021年11月19日; 修回日期: 2022年2月25日
第一作者: 姚镇海(1989—), Email: 18256589121@163.com
通信作者: 姚叶青(1970—), Email: zmhht@163.com

机驾驶员以新职业的身份登上历史舞台，成为一项实用的专业技能。2020年中国航空器拥有者及驾驶员协会（AOPA-China Aircraft Owners and Pilots Association of China）民用无人机驾驶员报告指出：截至2020年12月31日，民用无人机驾驶员证照总数达88944本，且呈现逐年增加趋势^[5]，无人机应用培训市场的发展正如火如荼进行中（图1）。虽然我国在低空空域的开放政策、设施建设、保障体系等方面相对西方国家落后，但伴随政策调整、基础设施建设和应用领域需求的不断增加，我国通航领域的发展将焕发无限潜力^[6]。



图1 安徽省合肥市大圩镇无人机驾驶员训练
Fig. 1 UAV pilot training in Dawei town, Hefei, Anhui Province

我国民用无人机飞行高度多在1000 m低空空域内，环境复杂多变。易受到雷暴、风切变、能见度、温度和湿度等气象因子的影响^[7-9]。研究与经验表明：无人机作业受风的影响较大，5级以上的风力会影响操纵稳定性；高、低温天气作业均对电池不利；降水、高湿环境造成电子元器件腐蚀等^[10-11]。因为气象因素，造成作业失效、摔机、炸机、索赔等损失事件不胜枚举。钟若楣等^[12]于2018年首次提出“无人机低空公共航路”，即在有人驾驶航空器最低飞行高度以上，预先规划具有一定宽度专供无人机飞行的公共空中通道。国内一些学者如钟若楣等^[13]、赵磊等^[14]对无人机航路气象条件进行了初步研究，着眼于气温、风、降水的环境资料模拟分析，得到无人机航路上温度、湿度和风速的分布情况和时间变化规律，并对该区域中飞行安全提供了若干建议。

我国低空飞行安全气象保障和服务体系亟待完善。监测数据、作业气象指标欠缺，信息传输、告警机制不完善等是制约低空飞行气象服务和保障的主要因素^[15]。大势之下，气象部门机遇和挑战并存。本文针对应用较广泛的无人机作业领域，提出联合共建无

人机作业气象指标体系的思路，并对无人机作业气象保障工作提出了展望。

1 共建无人机作业气象标准

1.1 围绕通航发展背景，明确无人机作业目标领域

我国通用航空应用领域涉及农业、林业、国土、气象、生态等多部门，覆盖了低空到高空空域范围。民用无人机作业多处和低空空域（1000 m以下）内，涉及影视、监测、农业播撒等众多应用领域。航拍、航测、植保、巡检、安防为应用较为广泛的目标领域。无人机物流技术也在不断发展壮大。

1.2 面向从业人员，开展气象影响因素调研

2020年初，采取网络问卷调查形式，对全国范围包含无人机驾驶员、无人机教员在内的群体进行抽样调查。随机面向2577名调查者，最终得到有效问卷反馈2321份（缺失和无效问卷分别占184和72份），问卷有效率超过90%。其中，“无人机作业中出现飞行事故的原因？”这一问题的反馈结果（表1）表明：不熟悉周边环境（27%）、冒险操作（21%）、气象因素（18%）和不清楚理论知识，缺乏系统培训（13%），这几类因素总计占比79%。可见，气象因素（18%）是影响低空无人机飞行安全的重要因素之一。

表1 无人机作业事故原因统计表
Table 1 Statistics of UAV operation accident causations

事故原因	人数	占有比例/%
不熟悉周边环境	627	27
冒险操作	487	21
气象因素	418	18
不清楚理论知识，缺乏系统培训	302	13
设备质量异常	232	10
反无人机管制	46	2
其他	209	9
总计	2321	100

影响无人机作业的气象因素众多，但通过采纳一些教员的建议，并结合无人机驾驶员们的经验，罗列出影响无人机作业的气象因子。就“结合您实际工作，哪些气象因素对无人机作业产生影响（多选）？”这一问题的统计结果绘制饼图（图2）。可以发现，影响作业的气象首要因素是风（29.3%），其次分别是降水（21.7%）、气温（19.2%）、能见度（14.3%）和相对湿度（10.4%），云和其他因素分别占3.7%和1.4%。

1.3 依据调研结果和经验分析制订无人机作业气象标准

以民用无人机作业气象指标体系的构建工作为抓手，秉持“互通有无，博采众长”的合作精神，建立气象部门、空中交管部门、无人机执照培训企业、无

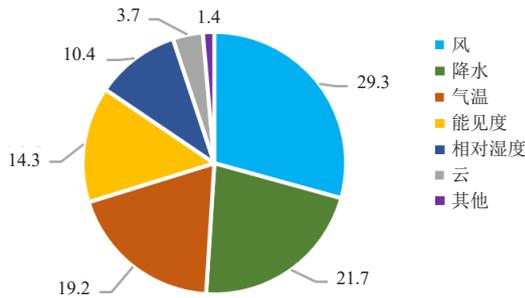


图2 无人机作业气象影响要素比例统计图 (单位: %)
Fig. 2 Statistical chart of meteorological impact factors for UAV operation (unit: %)

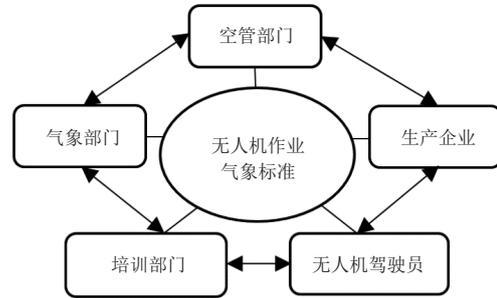


图3 无人机作业气象标准制订工作组
Fig. 3 Working group for meteorological standards settings of UAV operation

人机应用技术培训等“多部门联合”的常态化、高效沟通机制。以“气象+无人机应用”的服务思路，参考相关著作、标准、文献和专家建议^[16-21]，细化各类气象影响要素适宜作业的区间和最低气象条件，研究并起草无人机各应用领域的标准规范。在项目调研、讨论、文件起草和总结凝练等过程中，实现无人机飞行、行业应用等知识和经验的汇集，加深专家组对航空气象服务工作的理解。为后续创新工作的开展组建专业团队(图3)，搭建好良好的合作平台。

2021年10月，以中国气象服务协会提出并归口，安徽省公共气象服务中心、中国民用航空局华东空中交通管理局安徽分局、清华大学合肥公共安全研究院等无人机应用培训机构，联合起草并发布标准《民用无人机作业气象条件等级 植保》(T/CMSA 0021-

2021)。该项标准确立了影响无人机植保作业的气象条件等级，并就作业保障的气象监测(表2)、预报(表3)提供了标准化信息登记方案，详细的气象要素划分可参考气象标准^[22]。此项工作的开展，不仅可为无人机作业提供系统性、针对性的法理依据，使之更加规范、有效。同时也为气象标准规范在其他应用领域的推广^[23-25]，及相关研究工作奠定了基础。

2 无人机作业气象保障工程

2.1 气象数据应用能力存在不足

就无人机作业气象保障而言，当前气象数据存在如下短板。

1) 我国部分地区气象站点密度欠充足。民用无人机作业(如植保、航拍等)半径可达千米级或亚千米级别。此范围内国家站或区域气象站密度欠充足，

表2 无人机植保作业天气预报信息记录表
Table 2 Weather forecast record of UAV plant protection operation

无人机植保作业天气预报信息记录表											
填表日期: yyyy-mm-dd 作业地点: 作物名称: 无人机型号/动力来源: 植保药剂名称:											填表人()
时段 hh1: hh2	天气 现象	风力等级		气温等级		能见度等级		相对湿度等级		气象条件 等级	备注 (首要影响气 象要素)
		风速(<i>Ws</i>)/ (m/s)	影响等级 (L1)	气温(<i>T</i>) /℃	影响等级 (L2)	能见度(<i>V</i>) /m	影响等级 (L3)	相对湿度 (<i>RH</i>)/%	影响等级 (L4)		

填写说明:

- “填表日期”中，“yyyy-mm-dd”代表：“年-月-日”。“hh1:hh2”代表：“时次1：时次2”。“作业地点”以无人机驾驶员所在的地名，经纬度数值填报，如“**乡 经度，纬度”。“作物名称”填写植保作物名称。“无人机型号/动力来源”填写植保机型号/锂电(或燃油)。“植保药剂名称”填写飞防药剂全名。“填表人”为本次作业的负责人姓名。
- “天气现象”填写现场可能出现的天气。例如：晴，多云，阴，雨，雪。
- 不同气象要素对植保作业的影响等级，分为1级(适宜)、2级(较适宜)、3级(一般)、4级(较不宜)和5级(不适宜)。
- “备注”一栏填写“雨”或“雪”(若有发生)，或影响等级最大的1个或多个(若最大值相同)气象要素名称，若无影响作业安全的天气现象，且各影响等级值均为1，可填写“无”。
- 以气象部门公布的精细化预报数据填写各类要素。宜参考近地面1 km×1 km(或更高)空间分辨率数据，和较高时间分辨率的预报数据(宜首选分钟级数据)。当影响等级不能成为作业唯一依据的情况下，应结合现场环境综合研判，谨慎作业。

表3 无人机植保作业天气实况信息记录表
Table 3 Weather information record of UAV plant protection operation

无人机植保作业天气实况信息记录表											
填表日期: yyyy-mm-dd 作业地点: 作物名称: 无人机型号/动力来源: 植保药剂名称:											填表人()
时间 hh: mm	天气 现象	风力等级		气温等级		能见度等级		相对湿度等级		气象条件 等级	备注 (首要影响气 象要素)
		风速 (<i>W</i> s) / (m/s)	影响等级 (<i>L</i> 1)	气温 (<i>T</i>) / ℃	影响等级 (<i>L</i> 2)	能见度 (<i>V</i>) /m	影响等级 (<i>L</i> 3)	相对湿度 (<i>RH</i>) /%	影响等级 (<i>L</i> 4)		
填写说明: 1) “填表日期”中,“yyyy-mm-dd”代表:“年-月-日”。“hh: mm”代表:“时:分”,且在进行每个飞行架次前填写。“作业地点”以无人机驾驶员所在的地图名+经纬度数值填报,如“**乡 经度, 纬度”。“作物名称”填写植保对象名称,如“水稻”“小麦”。“无人机型号/动力来源”填写植保机型号/锂电(或燃油)。“植保药剂名称”填写飞防药剂全名。“填表人”为本次作业的负责人姓名。 2) “天气现象”一栏依据现场环境填写。例如:晴,多云,阴,雨,雪。 3) 不同气象要素对植保作业的影响等级,分为1级(适宜)、2级(较适宜)、3级(一般)、4级(较不宜)和5级(不适宜)。 4) “备注”一栏填写“雨”或“雪”(若有发生),或影响等级最大的1个或多个(若最大值相同)气象要素名称,若无影响作业安全的天气现象,且各影响等级均为1,可填写“无”。 5) 以气象部门公布的精细化实况数据或现场气象监测数据填写各类要素。前者宜参考近地面1 km×1 km(或更高)空间分辨率数据,和较高时间分辨率的实况数据(宜首选分钟级数据)。山区、丘陵等复杂地形下作业,宜参考符合国家标准移动式气象站分钟级观测数据,若缺少现场气象观测数据,则以气象部门公布的精细化实况数据填写。当影响等级不能成为作业唯一依据的情况下,应结合现场环境综合研判,谨慎作业。											

尤其是我国中西部地区,气象站点密度更低。这就需通过移动设备、天气App等途径获取作业所在地天气实况。

2) 遥感数据存在局限性。气象卫星遥感适用于大范围、长时间的连续观测。如当前的FY-4A可实现时间分辨率为5 min连续观测^[26]。但受其空间分辨率影响,难以精确监测无人机作业区的天气变化。多普勒气象雷达资料2 h以后外推资料误差增加,且存在监测盲区;激光雷达虽易于部署,但监测区域限于剖面,且监测要素受限^[27]。

3) 格点再分析资料尚未充分利用。例如:国家气象信息中心下发的“CLDAS(陆面数值同化系统)大气驱动场产品V2.0”1 km×1 km逐分钟精细化数值格网产品在无人机作业保障的适用性尚未得到论证,需在各领域作业保障中确立最优应用方案。

4) 民用无人机作业气象指标体系尚未建立完善。民用无人机作业涉及领域众多,各类作业采用的平台构型、航线规划等参数存在差异,作业过程受气象要素种类和强度的影响亦会发生变化。通过设立近似统一的气象阈值来判断航线或空域适航性好坏将难以适合多领域无人机作业对气象保障的需求。

2.2 无人机作业保障平台有待进一步发展

在无人机作业中,系统保障平台起到监视、通信、执行作业等作用,为地面端和空中端的纽带^[28-30]。行业服务类无人机系统的地面端集成了遥控(remote

control, RC)与地面站(ground station, GS)的协同控制模块,为特定作业开发相关航线规划、载荷算法等功能。当下市面中无人机系统可集成于手机、Pad或桌面端,如大疆公司的DJI N3飞控模块、GS Pro软件,ArduPilot开源系统下的mission planer地面站软件等。优云智翔公司推出了上报飞行数据、空域划拔、云存储等功能为一体的“优云”小黄盒,可满足无人机群体飞行数据管理功能。总体而言,无人机系统保障平台虽种类多样,但依然存在不足,具体如下。

1) 保障平台算法、算力不足。无人机系统保障平台的地面端承担了数据传输、显示、航线规划、载荷作业等多项功能需求。当前我国无人机系统以一机一控(一台无人机,一套控制端)为主,长时间作业中传输中断、运算停滞等状况时有发生。面对海量气象数据的融入,系统软硬件配置水平需进一步提升。

2) 系统续航能力有待提高。受锂电制造技术限制,无人机飞行终端续航时间的突破存在瓶颈。对大范围、长时间作业(尤其是气象监测领域)无人机系统来说,需进一步提高时空续航水平,并发展无人机数据集群技术,提高机群协同作业效率。

3) 地、空、天协同通信水平有待发展。受地区发展能力、空域管制等因素制约,我国民用无人机地、空、天的地基站点、无人机端、用户间通信机制尚未很好建立。在此基础上,还需对作业区域内空域管制、航线冲突、气象预警等重要信息实现高效融合。

与此配套的相关法律、标准规范体系有待逐步建立并更新。

2.3 无人机作业气象保障体系构建

目前中国民航局提出的民用无人航空器运行管理系统(UAV operation management system, UOM)、低空公路航路网等云端管理设施建设,将为无人机唯一性标识和安全运行提供技术支撑。为实现“碳达峰”“碳中和”目标,绿色低碳的航空作业体系逐步建立。中国民用航空局2022年2月印发了《“十四五”航空物流发展专项规划》^[31],作为首次编制的物流发展专项规划,这将为构建优质高效、自主可控的作业体系提供精准指引。相关气象服务保障工作也将陆续展开,这将极大提高我国物流运送的安全性。综上,对无人机作业气象保障体系的构建做出如下展望。

1) 分类细化无人机作业类别,构建气象指标体系。依据无人机重量(表4)^[32]、平台构型、作业类别等特点,以无人机作业为服务对象,分类制订气象指数产品。

表4 无人机重量分类等级
Table 4 UAV weight classification

分类等级	空机重量/kg	起飞全重/kg
I	$0 < W \leq 0.25$	$0 < W \leq 1.5$
II	$0.25 < W \leq 4$	$1.5 < W \leq 7$
III	$4 < W \leq 15$	$7 < W \leq 25$
IV	$15 < W \leq 116$	$25 < W \leq 150$
V	植保类无人机	
XI	$116 < W \leq 5700$	$150 < W \leq 5700$
XII	$W > 5700$	

具体措施如下:对影响无人机作业的气象要素划分影响等级。采取经验法、统计法或专家打分法等方法给出各气象因子影响权重,得到无人机作业气象指数(图4)。用户可采用定义作业类型、机型、确定作业时间等参数,获取所需时间空间范围内个性化气象指标参考依据。在大量作业案例中得到反馈信息,适时修订参数,使之不断完善。

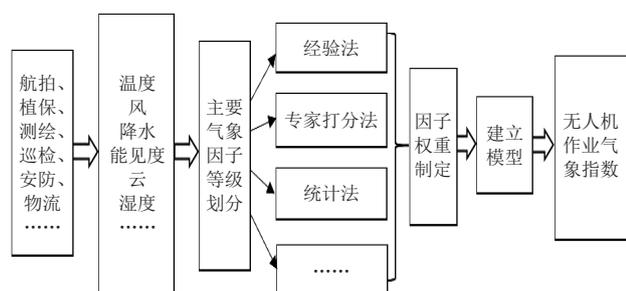


图4 无人机作业气象指数的建立流程
Fig. 4 Generation of meteorological index for UAV operation

2) 研发多元气象数据融合产品。融合高密度地面观测、卫星数据、北斗卫星实时定位结果,综合考虑起降点、航路网等作业区域地理地形等因素影响。运用多元资料融合产品,预测未来作业逐小时、分钟内气象要素变化。如2022年冬奥会中的气象精细化预报系统实现了分钟级、百米尺度分辨率的气象服务产品^[33]。该产品的应用或将为无人机飞行提供技术指引。

3) 定制可视化短临气象告警功能。立足无人机不同作业领域,制订告警要素和指标区间。构建无人机低空公共航路规划仿真验证系统,实现基于AR电子沙盘飞行仿真验证,融合气象告警数据,实现风险评估等功能,将其耦合至UOM中。用户可通过定制方式获取预警信息,实现可视化气象告警服务需求。

4) 建立并完善地、空、天通信机制。开发并部署移动观测设备(观测车、船、气象无人机等)系统,实现全作业周期数据中继技术。建立低空无人机、地基点、用户之间的通信机制。完善空域管制、航线冲突、气象预警等重要信息融合,贯穿全作业周期^[34]。建立低空无人机用户之间的气象信息通信机制,发展从传统ADS-B通信机制到基于5G的地、空端通信、无人机数据集群技术,实现无人机数传图传一体化新格局(图5)。完善无人机系统算力与算法,提高系统续航水平。

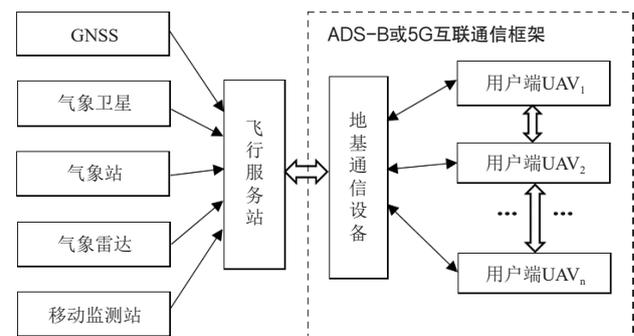


图5 无人机作业气象保障体系
Fig. 5 Meteorological support system for UAV operation

5) 加强高影响天气知识培训,完善应急处置措施^[35]。编写无人机作业高影响天气情况处置标准,要求无人机驾驶员遵循SOP(Standard Operating Procedure)准则^[36],通过常态化培训体系,增强无人机驾驶员对天气变化的敏感性,冷静地应对各类情况。当气象环境不满足上述一项或多项条件时,根据现场状况制定相应措施,提升作业效率,减少事故发生可能性。使得无人机飞行培训内容更具针对性、规范化。

3 结论

无人机技术的发展日新月异,与各领域应用的融合不断加深。立足监测精密、预报精准、服务精细的业务需求,秉持“互通有无,博采众长”的合作精神,基于“多部门联合”的协作模式,以无人机作业气象指标的制订作为通用航空气象服务业务的切入点。从中研发多元数据融合产品,建立并完善地、空、天通信机制及无人机作业用户气象信息个性化定制等需求。搭建“经验+试验+改进”的气象服务模式,实现“气象+无人机应用”的深度融合。这也将进一步促使我国低空空域无人机作业保障体系更加规范、高效地发展。

参考文献

- [1] 孙毅. 无人机驾驶员航空知识手册. 北京: 中国民航出版社, 2014.
- [2] 张天鹏, 周志强, 黄金鑫, 等. 我国农业无人机航空植保技术现状与发展趋势分析. 南方农机, 2021, 52(1): 42-45.
- [3] He X, Bonds J, Herbst A, et al. Recent development of unmanned aerial vehicle for plant protection in east Asia. *International Journal of Agricultural and Bioengineering*, 2017, 10(3): 18-30.
- [4] 程志义. 植保无人机行业年度发展报告. 深圳: 慧飞无人机应用技术培训中心, 2019.
- [5] 中国民用航空局飞行标准司. 中国民航驾驶员发展年度报告(2020年版). 北京: 中国民用航空局飞行标准司, 2020.
- [6] 安徽省发展和改革委员会. 安徽省民航业发展战略规划(2019—2035年). 安徽: 安徽省发展和改革委员会, 2019.
- [7] 陈婷, 杨泓, 李亚玲. 气象要素对多旋翼无人机飞行的影响. *中国设备工程*, 2018, (1): 170-171.
- [8] 中国气象局. GB/T 35227-2017 地面气象观测规范: 风向和风力. 北京: 中国气象局, 2017.
- [9] 中国气象局. GB/T 33673-2017 水平能见度等级. 北京: 中国气象局, 2017.
- [10] 易哲菁. 中短程无人机飞行气象要素影响及应急措施研究. *中国新技术新产品*, 2016, 9(2): 141-142.
- [11] 李玉华, 褚希, 杨秋彦, 等. 山东省首届无人机大赛气象条件及服务技巧分析. *陕西气象*, 2020, (4): 53-57.
- [12] 钟若媚, 廖小罕, 徐晨晨, 等. 京津冀地区无人机低空航路气象环境模拟研究. *气象科技进展*, 2021, 11(4): 147-155.
- [13] 钟若媚, 文小航, 徐晨晨. 基于高分辨率模式的京津冀地区无人机航路风向风速模拟分析. *地理科学进展*, 2021, 40(9): 1528-1539.
- [14] 赵磊, 谢丰, 徐晨晨, 等. 京津冀地区无人机航路气象因子高分辨率模拟分析. *地理科学进展*, 2021, 40(10): 1691-1703.
- [15] 张华, 李晶. 浅析低空飞行安全气象保障技术. *科技风*, 2020, (15): 8.
- [16] 赵中营. 无人机植保技术. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [17] 林正平, 洪峰, 刘鹤, 等. 浅析影响植保无人机作业效果的主要因素. *中国植保导刊*, 2019, 39(4): 70-72.
- [18] 陈盛德, 展义龙, 兰玉彬, 等. 侧向风对航空植保无人机平面扇形喷头雾滴飘移的影响. *华南农业大学学报*, 2021, 42(4): 89-98.
- [19] 王昌陵, 曾爱军, 何雄奎, 等. 风洞条件下植保无人机喷雾单元雾滴飘移特性试验. *农业工程技术*, 2020, 40(33): 85.
- [20] 中国民用航空局. MH/T 1069-2018 无人驾驶航空器系统作业飞行技术规范. 北京: 中国民用航空局, 2018.
- [21] 内蒙古自治区市场监督管理局. DB15/T 2081-2021 农用植保无人机作业技术规范. 内蒙古: 内蒙古自治区市场监督管理局, 2021.
- [22] 中国气象服务协会. T/CMSA 0021-2021 无人机作业气象条件等级 植保. 北京: 中国气象服务协会, 2021.
- [23] 逯曦, 任晓航, 张华明, 等. 无人机航拍技术在雷电防护中的应用. *气象科技*, 2015, 43(6): 1176-1180.
- [24] 王芝义. 应用无人机森林防火的优势分析与操作规范. *绿色科技*, 2019, (11): 167-168.
- [25] 樊丰新, 孙建军. 基于旋翼无人机的快速倾斜摄影测量作业研究. *地理空间信息*, 2021, 19(7): 24-26.
- [26] 崔林丽, 陈昭, 于兴兴, 等. 风云四号卫星东南沿海热带气旋强度深度学习估算. *遥感学报*, 2020, 24(7): 842-851.
- [27] 华志强, 黎倩, 黄轩, 等. 激光测风雷达在航空保障中的典型应用分析. *激光技术*, 2020, 44(5): 600-604.
- [28] 黄冠. 低空风切变的形成过程以及影响飞行安全的因素. *科技展望*, 2015, 25(15): 150-151.
- [29] Liu C G, Liu Y, Wu H, et al. A safe flight approach of the UAV in the electrical line inspection. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2015, 16(5): 503-515.
- [30] 吴红军, 行鸿彦, 张金玉. 低空飞行安全气象保障技术. *电子测量技术*, 2018, 41(9): 10-15.
- [31] 中国民用航空局. “十四五”航空物流发展专项规划. 北京: 中国民用航空局, 2022.
- [32] 中国民用航空局飞行标准司. AC-61-FS-2018-20R2 民用无人机驾驶员管理规定. 北京: 中国民用航空局飞行标准司, 2018.
- [33] 何亮. 护航冬奥会 气象科技实现两个“首次创新”. *科技日报*, 2021-11-26(02).
- [34] 卢娜, 张亮. 通用航空概论. 北京: 中国民航出版社, 2017.
- [35] Gyongyosi A Z, Kurunczi R, Kardos P, et al. Unmanned aerial observation of the planetary boundary layer for model evaluation and weather prediction purposes in support of UAV operation. *Optimization Letters*, 2013, 4(2): 173-183.
- [36] 中国民用航空局飞行标准司. AC-121-FS-2018-22R1 机组标准操作程序. 北京: 中国民用航空局飞行标准司, 2018.