DOI 10.15302/J-SSCAE-2024.10.022

台风飞机观测工程设计思考

翟薇[1]，钱传海[1*]，吴昊[1]，赵培涛[2]，付硕[1]，王月冬[3]，李泽椿[3]

（1. 中国气象局气象发展与规划院，北京 100081；2. 中国气象局气象探测中心，北京 100081；
3. 国家气象中心，北京 100081）

摘要：台风是夏秋季我国东南沿海最主要的致灾天气系统，将飞机作为移动观测平台对台风开展直接空中观测，能获取非常关键的台风环境场及其内核结构信息，有助于提升台风预报预警准确率及防灾减灾成效。本文基于国内外台风飞机观测实践，从飞机选型、保障基地建设、机载探测设备、飞行路线设计、观测数据通信、观测资料应用评估等方面提出了台风飞机观测工程设计的着眼点，并从建立国家级台风飞机观测专业指挥中心、推动有人飞机和无人机相结合的台风飞机观测业务、开展多平台协同的台风飞机观测试验、加大对台风飞机观测工程项目的稳定支持及牵头开展台风飞机观测领域国际大科学计划等角度为建立台风飞机观测工程提出了发展建议。

关键词：台风；飞机观测；飞机选型；机载仪器；飞行路线；数据传输；资料应用及评估

中图分类号：P4　　**文献标识码：**A

Engineering Design for Aircraft-Based Observations of Typhoons

Zhai Wei[1], Qian Chuanhai[1*], Wu Hao[1], Zhao Peitao[2], Fu Shuo[1], Wang Yuedong[3], Li Zechun[3]

(1. Institute for Development and Programme Design, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;
2. Meteorological Observation Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;
3. National Meteorological Centre, Beijing 100081, China)

Abstract: Typhoon is the most important disaster-causing weather system in the southeast coastal area of China during summer and autumn. Using aircraft as a mobile observation platform for direct observation of typhoons can obtain critical information about typhoons' environmental fields and their core structures, thus improving the accuracy of typhoon forecasts and warnings, as well as the effectiveness of disaster prevention and mitigation. Based on the typhoon observation practices using aircraft in China and abroad, this study proposes key considerations regarding the engineering design for aircraft-based observations of typhoons, encompassing aircraft selection, construction of support bases, airborne detection equipment, flight route planning, observation data transmission, and data application and evaluation. Furthermore, the following suggestions are proposed for establishing typhoon observation operations using aircraft in China: (1) building a professional typhoon observation command center, (2) promoting typhoon observation operations that combine manned aircraft with unmanned aerial vehicles, (3) conducting typhoon observation experiments with multi-platform coordination, (4) increasing stable support for aircraft-based typhoon observation projects, and (5) initiating an international major scientific program in the field of aircraft-based observations of typhoons.

Keywords: typhoon; aircraft-based observation; aircraft model selection; airborne instruments; flight route; data transmission; data application and evaluation

收稿日期：2024-10-12；**修回日期：**2024-12-10

通讯作者：*钱传海，中国气象局气象发展与规划院正高级工程师，研究方向为台风监测预报预警；E-mail: chqian@cma.gov.cn

资助项目：国家重点研发计划项目(2022YFC3004200)；中国工程院咨询项目“智慧交通气象保障工程发展战略研究”(2023-XY-22)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

一、前言

气象工作关系生命安全、生产发展、生活富裕、生态良好，要做到监测精密、预报精准、服务精细，发挥气象防灾减灾第一道防线作用。台风是夏秋季节我国东南沿海最主要的灾害性天气，平均每年约有 7 次台风登陆我国[1~3]。台风携带的狂风、暴雨及风暴潮等引发许多灾害或次生灾害，是我国最主要的致灾源之一。随着观测技术进步、数据处理和计算能力提升及数值天气预报模式的不断改进，我国在台风监测、预报、预警等方面取得长足发展和进步，特别是台风路径预报误差，相比 20 年前有显著降低[4~6]。但台风强度、结构及精细风雨预报等并未取得同等显著进展，其中最重要的原因之一即是缺少对台风的直接观测[7,8]。

国际上很早就探讨并将飞机作为观测平台，对台风周围环境及内核区开展直接观测[9~12]。美国是世界上最早开展台风（美国称为飓风）飞机观测的国家，至今已有 70 多年的历史，是当今世界开展台风飞机观测技术最成熟的国家。时至今日，美国还在持续不断地改进其机载观测能力和观测策略[13]。我国台湾地区自 2003 年开始实施了“追风计划”，飞机从高空抵近台风释放下投探空仪获取其周围环境观测资料，取得了重要的业务和科研价值，不仅提高了对台风热力和动力过程的认知，也有效改进了数值模式的台风路径预报效果[14]。中国香港地区自 2011 年开始在南海北部开展台风飞机观测试验，2016 年对飞机改装后具备了机载下投探空观测能力，并将观测资料以准实时的方式上传到全球通信系统（GTS），供业务和科研人员使用[15,16]。

中国气象局气象探测中心曾于 2008 年针对我国近海台风“海鸥”和“森拉克”开展过小型无人飞机观测试验，并获取了较为完整的机载观测资料[7,17]。2009 年，中国气象科学研究院基于国家重点基础研究发展计划和行业专项对当年登陆台风“莫拉克”和“天鹅”的环境场首次实施了有人驾驶飞机下投探空观测，观测资料经数据同化后，48 h 台风路径预报误差减小 18%[18]。2015 年，中国气象局联合中国航天科工集团探讨了利用火箭弹、有人驾驶飞机及岸基车载全球定位系统（GPS）探空等多平台开展台风协同观测试验的可能性[19]。但由于多方面原因，上述观测试验并没有持续下去并转化为业务能力。2020 年，中国气象局制定并实施了“海燕计划”，尝试在我国南海应用多型号无人飞机开展台风环境场下投探空及其他机载仪器观测试验，为未来更科学地开展台风飞机观测业务积累经验[20]。

用飞机对台风开展直接观测的难度很大，是一项复杂的系统工程。本文首先阐述我国开展台风飞机观测的必要性，然后结合国内外台风飞机观测实践，从飞机选型、保障基地建设、机载探测设备、飞行路线设计、观测数据通信、观测资料应用评估等角度，系统分析台风飞机观测工程设计的着眼点，为高质量开展台风观测业务提供参考。

二、开展台风飞机观测的必要性

（一）现有台风观测方式

目前我国已基本建成台风立体观测网。当台风位于远海时，气象卫星以其覆盖范围广的优势成为台风观测的最主要手段。当台风移入近海时，沿岸或岛屿部署的各型号天气雷达可以发挥其时间和空间分辨率上的优势，从而成为近海台风观测的主要方式。一旦台风靠近沿海或登陆时，沿岸及海岛、船舶、石油平台等自动气象站及海洋浮标观测资料成为台风监测分析的重要依据。由于上述岸基、岛礁及浮标、雷达等观测站的站址固定不动，只有当台风移入其站址附近或观测范围时才能发挥作用，而台风的生成和异常变化均发生在海上，现有的岸基、岛礁及雷达等观测往往鞭长莫及。虽然气象卫星具有覆盖范围广的优势，可以监控台风从生成到消失的整个过程，但多数并不具备直接定量观测能力，且卫星还存在分辨率不足、反演结果有偏差或观测频率不能满足需求等问题。

（二）开展台风飞机观测的必要性

飞机观测是岸基观测和卫星观测等的延伸与补充，是开展台风直接观测最有效的手段之一。机载测风仪、气压计、湿度计、温度计等能在飞行路线上对台风及其环境进行直接观测，机载雷达能对台风进行切片式扫描，获取台风的精细结构特征。另外，借助机载下投探空仪，能获取台风垂直结构信息。这些现场观测资料能帮助预报员更准确地分析台风的当前位置和最大风速信息，特别是当台风较弱时，基于飞机观测的台风中心位置能对基于卫星

遥感的台风中心定位进行有效的偏差订正。同时，飞机观测资料也能更好地帮助预报员确定7级、10级及12级台风风圈半径等关键特征参数，助力数值预报模式更准确地刻画台风初始场信息，从而提高台风路径、强度和风雨预报等精准度。从科学研究角度而言，飞机观测所获取的珍贵资料能对开展台风生成、台风结构演变、近海台风快速增强、海气相互作用机制研究及改进仪器性能等提供第一手资料。

迄今，我国大陆地区尚未开展飞机直接观测台风业务，这与我国防灾减灾需求和大国地位不相称，也是我国台风监测预警能力的薄弱环节。随着我国观测技术的进步，特别是飞机制造及无人机技术的发展，目前已经具备开展这项工作的能力。同时，我国在飞机人工影响作业方面积累了丰富经验，为开展我国台风飞机观测业务创造了条件。

三、台风飞机观测工程设计思考

（一）飞机选型

用飞机对台风进行直接观测是一项极具挑战性的任务，对飞机性能要求很高，机型选择非常重要。台风尺度大、影响范围广、风力强劲且不均匀，其外围螺旋云带及眼墙区对流活跃，会导致飞机产生剧烈颠簸，且强烈风雨会导致驾驶员视野受阻。开展台风飞机观测应兼顾安全保障和观测需求，要考虑飞行稳定性、有效载荷、飞行高度及续航能力等。目前台风飞机观测的机型分为有人飞机和无人飞机，其中有人飞机大致分为螺旋桨飞机和喷气式飞机，无人飞机分为中大型无人飞机和小型无人飞机。

在有人飞机执行台风观测方面：从美国70多年的飞机观测实践来看，螺旋桨飞机和喷气式飞机由于其各自的优劣势在执行台风观测任务时各有侧重。大型螺旋桨飞机具有低速特性，飞行过程中更易保持稳定，对台风强烈的气流和颠簸更具抵抗力，同时也有助于保持观测设备的稳定性，因此螺旋桨飞机适用于在台风中低层环境及穿越台风中心进行观测。喷气式飞机通常能够达到较高的飞行高度，这有助于观测台风中上层大气的情况，同时，喷气式飞机有较大的有效载荷，能携带更多的观测设备和仪器，开展更全方位的观测。我国台湾和香港地区开展台风飞机观测机型均为有人驾驶喷气式飞机，且均可开展下投探空观测。

在无人机执行台风观测方面：因有人驾驶飞机探测台风成本高、风险大，一些国家和地区不断探索对无人机进行改装以适应台风观测。2012年美国对大型无人飞机“全球鹰”进行改造，使其成为更适用于飓风下投探空的长航时高空气象无人机[7,21]。目前美国已建立有人飞机与无人机协同配合的飓风观测模式。澳大利亚研制了小型无人飞机“气象侦察兵”，并用于澳大利亚、美国、日本等气象部门开展热带气旋观测[7]。

我国对航空安全和空域申请的管控非常严格，再加上利用飞机观测台风本身风险很大，因此，利用有人飞机开展台风观测所面临的困难和挑战比其他国家和地区大得多。近年来，无人机技术的发展和应用，给我国利用无人飞机进行台风观测创造了良机。2020年8月2日，中国气象局在“海燕计划”中首次利用大型高空无人飞机“翼龙-10”开展台风观测试验。“翼龙-10”最大飞行高度为12 000 m、最大航程为4000 km，最大巡航时间为8 h，若从海南岛基地起飞，基本可对南海台风实现全覆盖观测。若需对台湾岛以东或菲律宾以东洋面的台风开展飞机观测，考虑到飞机往返及观测作业耗时，将会对飞机最大续航时间及有效载荷等核心指标提出更高要求。为切实提升我国台风飞机的观测能力，应构建谱系化的无人飞机和有人飞机相结合的观测体系，按观测需求及飞机性能实施高–中–低空相互协同的台风飞机观测。“翼龙-10”或性能更高的无人飞机可以在中–高空实施观测作业，更小型的无人飞机（含一次性无人飞机）可在低空恶劣环境实施边界层观测，而有人飞机在中–低空实施台风本体及穿心观测。如果对“第一岛链”以外的西北太平洋台风实施飞机观测，有人飞机最长航时应不低于8 h，最大航程需达到5000 km以上[21]。

（二）保障基地选址及建设

短时间内我国内地利用有人飞机开展台风观测存在较大困难，而利用无人机开展台风观测已有一定基础，所以，应聚焦无人机保障基地选址、设计及建设，以支持无人机实施台风观测任务时的放飞回收、停靠存放、维护维修及物资补给等。小型无人机起飞降落操作相对简单，甚至有些小型无人机本身就是一次性消费品，对保障基地的要求不高。

而对于大型无人机，由于飞行平台体量较大，需要相对固定且具有一定规格的起降机场、必要的地面保障设施和地勤工作人员，因此需在沿海地区建设无人机专用保障基地，或者租用沿海地区现有机场并进行适应性改建。

无人机保障基地一般包括无人机机库、无人机控制站和气象载荷仓库。其中，无人机控制站用于与无人机进行视距 / 卫星通信、导航定位、平台 / 载荷实时监控、任务规划及数据接收处理。气象载荷仓库用于无人机在执行气象观测任务前，为各机载载荷进行地面测试及系统联调、观测消耗品等提供固定场所。

对于新建无人机保障基地，应按照相关要求在建设前期开展社会稳定风险评估和环境影响评价，通过问卷调查、现场调研、公众参与等方式识别并评价可能产生的社会稳定和环境风险，提出风险管控和应对措施，并在建设和运行期严格落实，规避或者降低可能产生的各类风险。

目前，中国气象局在“海燕计划”实施期间于海南博鳌初步建设了无人飞机保障基地，为未来其他保障基地选址及建设提供了参考。我国自南向北的海域均有台风活动，应结合地域防台风需求和飞机性能等指标，兼顾近海及远海台风观测需求，在华南和华东沿海地区合理规划无人机保障基地，分期、分批逐步建设，为开展台风飞机观测业务提供重要支撑。

（三）机载观测仪器配置

机载观测仪器服务于观测任务和需求，同时受限于飞机载荷能力。常规机载观测仪器通常用于观测飞行层的大气温度、露点温度、气压、水汽、风速（含水平风速和垂直风速）等。除上述大气要素外，飞机往往还能搭载各型雷达，对台风环境及内核区域开展各种切片式扫描，用以探测台风对流活动产生的回波强度、湍流特征、降雨强度及洋面风等，以便业务和科研人员能更好理解台风外围及内核区的结构及演变规律。云微物理探测仪或毫米波测云雷达可以探测台风背景下云中各种水成物（如水滴、冰晶、雪花等）的粒径大小及其数量等云微物理特征。

飞机观测的重要任务之一便是开展下投探空观测，利用飞机移动快的优势，在台风环境场及内核区上空投放探空仪。探空仪在下落过程中能获取大气的风、温、压、湿等垂直分布状况，有助于更准确地描述台风的立体结构和构造数值模式初始场，从而提高台风分析精度和预报准确率。美国国家大气研究中心（NCAR）研究机载下投探空仪有很长历史，1996 年带有定位功能的 GPS 下投探空仪量产，广泛应用于飓风飞机观测，以获取高质量的、垂直方向上高分辨率的气象要素，从而提高飓风路径和强度预报。中国台湾和香港地区的机载下投探空仪都购置于美国 NCAR。

我国的下投探空仪发展历史经历了多个阶段，虽然和国外存在一定的差距，但近年来也在不断发展。2020 年我国用自主研发的下投探空仪在南海开展了下投探空试验，成功获取了台风“森拉克”外围风、温、压、湿等垂直大气要素，并用于台风监测分析和数值预报模式[20]。未来，我国应继续加强下投探空仪的升级改造，打造“自主可控、性能先进”的下投探空设备，为开展我国机载垂直观测业务奠定坚实基础。

相比于地基观测，飞机观测是在高空、高速、低温、低压等状态下开展的大气各要素观测或水的不同相态观测，因此应对各观测仪器进行环境适应性、灵敏度、精度等校准，以确保能准确反映大气的风、温、压、湿等真实状态。以温度测量为例，台风眼墙附近对流发展旺盛，云顶最低温度一般为 −80 ℃甚至可达−100 ℃，因而如果从对流层的高层实施下投探空观测，对机载测温仪和下投探空测温仪的量程和精准度有特殊要求[21]。

除大气要素外，台风背景下洋流、海浪及不同深度海温等海洋水文环境要素也是业务和科研关注的重点。可以利用飞机快速灵活的优势，在台风内核及周围以空投方式部署海洋探测仪，如深海温度测量仪（AXBTs）、导电性 – 海温 – 深度传感器（AXCTDs）、洋流剖面仪（AXCPs）等，以获取海洋温、流、盐等垂直结构参数及海气通量等，从而有助于提升海气相互作用认知及海气耦合模式性能。另外，随着观测和材料技术的不断进步，作为机动观测平台，在改装设计时应合理预留载荷空间，以便未来可搭载并测试新型仪器，以及实现其应用。

（四）飞行路线及目标观测设计

1. 飞行路线设计

台风飞机观测是围绕业务和科研需求开展的移

动观测，飞机作业方案设计服从于观测任务、飞机性能及安全保障。台风处于生命史不同阶段，观测任务或需求是不一样的，应针对台风不同阶段所面临的业务和科学问题有针对性设计飞机作业方案，包括起降机场、飞行路线、作业时长等。在设计飞行路线时，应事先向航空管制部门申请飞行作业空域，熟悉并遵守相关航空管制规定，包括飞行高度、速度、航线等方面的限制。当然，所有观测时段还应兼顾台风业务预报和数值模式运行时间窗口，以便观测资料能为实时业务提供参考，发挥观测资料的最大效益。

热带扰动阶段：热带扰动是台风生成前的“胚胎”，该阶段的主要科学问题是分析和研判热带扰动发展为台风的可能性。此时应聚焦扰动环境场的观测，特别是扰动下游方向（即扰动未来移动方向）的大气动力和热力过程对台风生成的影响，如垂直风切变、中低层水汽等。可以利用机载雷达在适当高度对扰动环境场进行扫描探测，并同步进行垂直下投探空观测。

台风早期阶段：这一阶段的台风强度较弱，台风眼区不清晰，有时难以确定台风中心位置，造成较大定位误差。同时，该阶段台风云系往往呈现非对称结构，面临着云系结构调整和强度变化。台风早期阶段的科学问题主要是弱台风精准定位、涡旋结构重组及强度演变、台风增强效率等。因此，针对台风早期阶段，应尽可能派遣飞机穿越台风中心，获取台风中低层风场信息，协助提升台风中心定位精度及最大风速半径等特征参数。另外，应聚焦台风最大风速区和强降雨区，开展多频次观测采样，包括机载雷达和下投探空，从而捕捉台风强度变化信息，提升对台风强度的变化机理认知和预报准确率。

台风成熟阶段：这一阶段是台风生命史中的强度鼎盛时期，面临的主要科学问题包括台风灾害性大风分布、台风内核双眼墙形成及台风眼置换物理机制、台风外围螺旋雨带变化、台风强度日变化特征等。因此，对于成熟期的台风，在飞行安全许可的前提下，观测重点应聚焦于台风本体，可采取穿越台风中心和环绕台风中心相结合的飞行路线进行观测，用于分析台风灾害大风分布状况、确定台风不同方位的大风半径、优化洋面风场模型，提升对成熟台风内核区物理过程及对环境场（包括大气环境场、海洋下垫面等）的响应过程等认知。

台风结束阶段：台风移入近海或登陆时，强度会逐渐减弱，同时带来强降水、灾害性大风（特别是阵风）及外围龙卷等灾害性天气，也有少数台风临近登陆时受下垫面暖海水或特殊海岸地形走势的影响会突然增强。另一方面，台风登陆或近海北上时也有可能转变为温带气旋，造成更为复杂的降水和强风天气。现有的数值模式和客观方法对这些天气或过程的预报能力有限，往往会有较大的预报误差。此时，观测重点应聚焦于台风大风和强降雨区域，这些数据既用于评估台风影响和破坏力，同时也用于验证数值预报的准确性，为预报员进行人工订正提供重要支撑。由于近海及沿岸海域布设有岛屿、石油平台和浮标等自动气象站及不同型号雷达等，为开展多平台协同观测提供了良机，既可以相互观测“补盲”，同时在观测重叠区域可以进行仪器仪表校验，以及飞行层高度风速插值到洋面风等算法模型的验证和优化。

2. 目标观测设计

开展台风飞机观测的技术和资金“门槛”较高，用飞机“追台风”需要强大的经济支撑，以机载下投式探空仪来说，其属于一次性消耗品，每枚为4000~6000元，通常一次飞行观测需投放10~30枚。为提高观测效率、降低观测成本，国际上开展了目标观测或敏感区观测研究及应用[22,23]。

台风预报误差主要来源于初始场误差（观测误差或观测缺失）和模式误差（物理过程及参数化方案等的不完备性），而且不同区域和不同要素的观测误差对模式预报结果的影响也不尽相同，影响较大的区域和要素即为敏感区和敏感要素[8]。在敏感区域或针对敏感气象要素开展观测，其效率要高得多。为提高台风飞机观测效率，应建立基于伴随敏感性或奇异向量等方法的台风目标观测敏感区和敏感要素的识别系统及流程，根据台风生命史不同阶段或距海岸线远近，实时识别敏感区范围和敏感气象要素，从而设计飞行路线，引导飞机飞抵敏感区开展相关观测，获得的观测资料经数据传输系统提供给数值模式资料同化系统，为改进数值模式初值场及提升数值模式预报性能提供第一手资料。

（五）飞机观测数据传输设计

卫星和移动通信技术的发展，为飞机观测数据

的实时传输和应用奠定了坚实基础。美国国家海洋和大气管理局（NOAA）与中国台湾地区针对热带气旋实施下投探空观测后，经机载设备接收、处理，由卫星通信系统将观测资料传送至业务预报一线和数值模式中心，用于热带气旋监测分析和数值预报模式的资料同化，从而为业务预报提供更好的支撑。

经过近两年的南海台风无人机观测试验，中国气象局气象探测中心初步建立了台风飞机观测数据传输链路。飞机观测数据通过卫星通信或视距链路传输至无人机地面指挥站并同步至飞机观测作业指挥平台服务端（互联网服务器），通过互联网将机动观测业务数据传输至云服务器进行存储。国家气象信息中心协同开通云服务器访问端口，供下游用户访问下载并应用。

为加强飞机观测数据传输的及时性和完整性，可结合通信系统带宽限制、数据应用紧迫性及数据体量等设计数据传输优先等级。比如，数值模式系统对机载下投探空资料同化有明确的时间窗口要求，这部分资料应优先经质控后通过卫星通信传输至地面指挥站，再经加密模组通过互联网上传至探测中心隔离区（DMZ）服务器，由探测中心集约化平台推送至国家级气象大数据云平台“天擎”系统，最终由“天擎”系统实现国家级和省级气象部门及其他相关用户单位的资料分发。云雷达、微波辐射计等遥感观测资料先存储于飞机平台，处理生成基本观测产品，通过卫星通信传送至地面指挥站，用于实时监控服务，而原始数据及精细化观测产品则采取后处理方式获取。在数据政策允许的情况下，“天擎”系统将飞机观测数据传输至中国气象局国际通信系统进行国际数据交换。

（六）飞机观测资料应用及效果评估设计

台风飞机观测重在资料评估和应用。已有相关研究开展了飞机观测资料的效用评估。Sippel 等[24]在 NCEP GFS 全球模式中同化了飓风近中心附近下投探空资料，2~5 天的飓风路径预报准确率提升约 15%，区域模式对洋面 10 m 最大风的预报改进率为 10%~15%[25]。我国台湾地区“追风计划”所实施的飞机观测能有效改进数值模式的台风路径预报效果[26]，并能提高对台风热力和动力过程的认知。“翼龙-10”作为移动观测平台参加了 2020 年南海台风观测试验，飞机观测资料经数值天气预报模式同化后，改进了台风初始场分析精度，使台风降水预报评分提高了约 3%[20]。

为加强飞机观测资料的实时评估和应用，在业务应用端应加强飞机观测资料展示和相关产品开发，如 T-lnP 产品、不同高度（等压面层）风速风向及相对湿度等与其他观测资料的融合显示。在数值模式端应建立机载雷达及下投探空资料同化和评估模块，实时同化并评估飞机观测资料对台风涡旋初始化及模式初值的改进效果，并对台风路径、强度、结构及风雨等整体预报性能进行评估和对比分析，为一线业务提供定量科技支撑。另外，对一些新型载荷在业务化应用之前亦应开展评估和校验分析，使新型载荷尽快发挥效益。

四、开展台风飞机观测工程的保障建议

飞机观测在热带气旋预报业务和理论研究中发挥了重要作用。作为一个移动观测平台，在常规观测资料稀缺的海洋上空开展飞机观测，有助于进一步了解台风内核导致结构和强度变化的物理过程及环境场作用等。同时，飞机观测资料对校正和持续发展卫星观测技术也有重要意义。台风飞机观测在国际上有成熟的经验可以借鉴，但各国 / 地区所采用的飞机型号不同，机载仪器不同，空域管制和申请难度不同，因此，需精心设计适合我国国情的台风飞机观测业务，确保飞机“飞得出去、探测得到、资料用得好”。

（一）建立国家级台风飞机观测专业指挥中心

台风飞机观测是一项系统性工程，涉及飞机制造及改装、观测仪器研制及标校、保障基地建设、飞行空域申请、卫星导航系统集成及数据通信、资料质控及应用评估等，仅凭气象部门一己之力难以全面兼顾，特别是飞行作业空域申请难度相当大。从过去几年气象部门开展的南海台风无人机观测试验来看，获批的飞行空域仅限于海南岛东南部近海 300~600 km 的海域，这种预先设定有限空域的方式让台风飞机观测变成了“守株待兔”，不能真正发挥飞机观测的机动性和灵活性。飞机观测资料不仅服务于防灾减灾和社会经济发展，也为海洋权益维护和军事演练及护航等活动提供支撑，需要联合多

部门，特别是负责我国空域审批的部门，成立国家级台风飞机观测专业指挥中心，负责统筹协调飞机观测相关事宜，为开展我国高质量的台风飞机观测业务提供支撑和保障。

（二）推动有人飞机和无人飞机相结合的台风飞机观测业务

近几年，国内外实践已证明无人飞机探测台风大有可为。有人驾驶飞机由于其飞行稳定性、飞行动力及搭载能力强等优势，在国际上仍是开展台风飞机观测的最主要手段。在持续提升我国无人飞机台风观测能力的基础上，推动我国有人飞机台风观测业务的发展。我国利用有人飞机开展人工影响天气作业已有60多年的历史，积累了丰富的复杂天气条件下实施飞机增雨作业经验，若对“空中国王”“新舟60”等人工影响天气作业飞机进行适当改装并加载合适的仪器设备，可用于开展近海台风观测。另外，亦可与其他部门合作，选择合适机型予以改装，不断拓展飞机观测能力。应加强我国无人飞机和有人驾驶飞机相结合的台风观测科学论证与设计，构建谱系化的有人飞机和无人机相结合的观测体系，有序推动我国有人飞机和无人机相结合的台风飞机观测试验和业务，为筑牢台风防灾减灾第一道防线做出贡献。

（三）开展多平台协同的台风飞机观测试验及业务

作为移动观测平台，机载仪器较好弥补了海上观测站点的不足。但台风尺度大，生命史长，而飞机受航程、高程及风险控制等因素限制，不能作为常规手段长时间驻留空中进行观测。因此，应设计并发展多平台协同的台风观测能力，除常规卫星观测外，可发挥平流层飞艇、小卫星等新型观测设备的优势，特别当台风移到近海时，可结合海上无人艇、近海浮标、石油平台、岸基梯度观测塔及车载追风观测等，建立动静结合（固定站点和移动观测）、分工明确、优势互补的海–岸–空–天四位一体台风观测网。另外，目前的台风观测试验多聚焦于大气圈层，而海洋是台风的发源地，应同步设计并开展海洋圈层观测试验，以提升海气界面物质和能量交换等认知及海气耦合模式性能，从而更全面刻画台风结构和变化及其与下垫面的相互作用，为数值模式提供更真实的初值场、物理过程及参数化表达，从而提升台风预报预警准确率和防灾减灾成效。

（四）加大对台风飞机观测工程项目的稳定支持

台风飞机观测投入较大，其产生的效益也非常显著。有研究指出，对于登陆台风而言，若24 h台风路径预报误差每减小1 km可减少因灾直接经济损失约0.97亿元，若强度预报每减小1 m/s可减少因灾直接经济损失约3.8亿元[27]。因此，开展台风飞机观测是一件利国利民的好事。应加强对台风飞机观测能力建设经费的稳定支持，设立台风飞机观测工程项目专项资金，以提升我国台风飞机观测综合能力，助力台风业务、科研及预报预警准确率的提升，同时培养我国台风飞机观测领域科技人才，进一步提升我国在台风观测业务和科研领域的国际话语权。

（五）牵头开展台风飞机观测领域国际大科学计划

除飞机平台性能及飞行空域管控等因素外，地缘政治问题也是目前制约我国开展台风飞机观测业务的原因之一。我国南海、东海等周边地缘政治复杂，虽然飞机观测台风属于科学研究范畴，但在某些情况下，可能会被解读为某种政治或军事意图，从而引发不必要的误解或关注。因此，一方面，我们要加大台风飞机观测平台及机载设备等的研制和应用；另一方面，应主动采取开放态度，加强与世界气象组织、联合国亚洲及太平洋经济社会委员会等联合国机构及亚太台风委员会成员的沟通与合作，牵头开展台风飞机观测领域的国际大科学计划，面向包括南海、东海在内的西北太平洋及“一带一路”沿线海域更广大范围开展台风观测科学试验，使周边国家和地区成为大科学计划的参与者和成果受益者。在提升我国台风科技国际影响力的同时，也为提升参与各方台风防灾减灾能力、推动构建人类命运共同体贡献智慧和力量。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: October 12, 2024; **Revised date:** December 10, 2024

Corresponding author: Qian Chuanhai is a professor-level senior engineer from Institute for Development and Programme Design, China Meteorological Administration. His major research fields include typhoon monitoring, forecast and warning. E-mail: chqian@cma.gov.cn

Funding project: National Key R&D Program of China (2022YFC3004200); Chinese Academy of Engineering project “Research on the Development Strategy of Intelligent Transportation Meteorological Support Projects” (2023-XY-22)

参考文献

[1] 向纯怡, 许映龙, 高拴柱, 等. 2021年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析 [J]. 气象, 2022, 48(9): 1195–1208.
Xiang C Y, Xu Y L, Gao S Z, et al. Analysis of the characteristics and forecast difficulties of typhoon over the western North Pacific in 2021 [J]. Meteorological Monthly, 2022, 48(9): 1195–1208.

[2] 钱奇峰, 董林, 许映龙, 等. 2022年西北太平洋和南海台风活动特征和预报难点分析 [J]. 气象, 2023, 49(10): 1254–1266.
Qian Q F, Dong L, Xu Y L, et al. Analysis on the characteristics and forecast difficulties of the typhoons over the northwest Pacific and the South China Sea in 2022 [J]. Meteorological Monthly, 2023, 49(10): 1254–1266.

[3] 钱传海, 端义宏, 麻素红, 等. 我国台风业务现状及其关键技术 [J]. 气象科技进展, 2012, 2(5): 36–43.
Qian C H, Duan Y H, Ma S H, et al. The current status and future development of China operational typhoon forecasting and its key technologies [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2012, 2(5): 36–43.

[4] Chen G M, Zhang X P, Yang M Q, et al. Performance of tropical cyclone forecasts in the western North Pacific in 2017 [J]. Tropical Cyclone Research and Review, 2021, 10(1): 1–15.

[5] 王晴, 许映龙, 董林, 等. 2012—2021年中央气象台台风3~5 d路径预报误差分析 [J]. 海洋预报, 2022, 39(6): 25–33.
Wang Q, Xu Y L, Dong L, et al. Analysis of typhoon track forecast errors for 3-5 days by Central Meteorological Observatory from 2012 to 2021 [J]. Marine Forecasts, 2022, 39(6): 25–33.

[6] Yu H, Chen G M, Zhou C, et al. Are we reaching the limit of tropical cyclone track predictability in the western North Pacific? [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2022, 103(2): 410–428.

[7] 雷小途. 无人飞机在台风探测中的应用进展 [J]. 地球科学进展, 2015, 30(2): 276–283.
Lei X T. Progress of unmanned aerial vehicles and their application to detection of tropical cyclone [J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(2): 276–283.

[8] 赵兵科, 汤杰, 雷小途, 等. 近海台风立体协同观测科学试验进展 [J]. 地球科学进展, 2022, 37(8): 771–785.
Zhao B K, Tang J, Lei X T, et al. Progress on the experiment of a multi-platform collaborative field campaign on offshore typhoon [J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(8): 771–785.

[9] Gray W M, Neumann C, Tsui T L. Assessment of the role of aircraft reconnaissance on tropical cyclone analysis and forecasting [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1991, 72(12): 1867–1883.

[10] Martin J D, Gray W M. Tropical cyclone observation and forecasting with and without aircraft reconnaissance [J]. Weather and Forecasting, 1993, 8(4): 519–532.

[11] Aberson S D, Black M L, Black R A, et al. Thirty years of tropical cyclone research with the noaa p-3 aircraft [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2006, 87(8): 1039–1056.

[12] Zhang F Q, Weng Y H, Gamache J F, et al. Performance of convection-permitting hurricane initialization and prediction during 2008—2010 with ensemble data assimilation of inner-core airborne Doppler radar observations [J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(15): L15810.

[13] Qian C H, Li Y, Xu Y L, et al. Tropical cyclone monitoring and analysis techniques: A review [J]. Journal of Meteorological Research, 2024, 38(2): 351–367.

[14] Wu C C, Lin P H, Aberson S, et al. Dropwindsonde observations for typhoon surveillance near the Taiwan region (DOTSTAR): An overview [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2005, 86: 787–790.

[15] Tang J, Zhang J A, Chan P, et al. A direct aircraft observation of helical rolls in the tropical cyclone boundary layer [J]. Scientific Reports, 2021, 11: 18771.

[16] Qin X H, Duan W S, Chan P W, et al. Effects of dropsonde data in field campaigns on forecasts of tropical cyclones over the western North Pacific in 2020 and the role of CNOP sensitivity [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2023, 40(5): 791–803.

[17] 李杨, 马舒庆, 王国荣, 等. 利用无人机探测台风海鸥的气象要素特征 [J]. 应用气象学报, 2009, 20(5): 579–585.
Li Y, Ma S Q, Wang G R, et al. Characteristics of meteorological elements during typhoon kalmaegi observed by unmanned aerial vehicle [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2009, 20(5): 579–585.

[18] 张诚忠, 万齐林, 丁伟钰, 等. 下投探空资料在台风莫拉克路径预报的应用试验 [J]. 气象学报, 2012, 70(1): 30–38.
Zhang C Z, Wan Q L, Ding W Y, et al. An experiment in application of the dropsonde data to forecasting the track of Typhoon Morakot [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 70(1): 30–38.

[19] 雷小途, 雷明, 赵兵科, 等. 火箭弹下投探测台风气象参数新技术及初步试验 [J]. 科学通报, 2017, 62(32): 3789–3796.
Lei X T, Lei M, Zhao B K, et al. New technology and experiment of rocket dropsondes for typhoon observation [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(32): 3789–3796.

[20] Zhang X F, Li L X, Yang R K, et al. Comprehensive marine observing experiment based on high-altitude large unmanned aerial vehicle (South China Sea experiment 2020 of the “petrel project”) [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(4): 531–537.

[21] 钱传海, 李泽椿, 张福青, 等. 国际热带气旋飞机观测综述 [J]. 气象科技进展, 2012, 2(6): 6–16.
Qian C H, Li Z C, Zhang F Q, et al. Review on international aircraft reconnaissance of tropical cyclones [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2012, 2(6): 6–16.

[22] Majumdar S J, Aberson S D, Bishop C H, et al. A comparison of adaptive observing guidance for Atlantic tropical cyclones [J]. Monthly Weather Review, 2006, 134(9): 2354–2372.

[23] Wu C C, Chen J H, Majumdar S J, et al. Intercomparison of targeted observation guidance for tropical cyclones in the northwestern Pacific [J]. Monthly Weather Review, 2009, 137(8): 2471–2492.

[24] Sippel J A, Wu X R, Ditchek S D, et al. Impacts of assimilating additional reconnaissance data on operational GFS tropical cy-

clone forecasts [J]. Weather and Forecasting, 2022, 37(9): 1615–1639.

[25] Zawislak J, Rogers R F, Aberson S D, et al. Accomplishments of NOAA's airborne hurricane field program and a broader future approach to forecast improvement [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2022, 103(2): 311–338.

[26] Chou K H, Wu C C, Lin P H, et al. The impact of dropwindsonde observations on typhoon track forecasts in DOTSTAR and T-PARC [J]. Monthly Weather Review, 2011, 139(6): 1728–1743.

[27] 吴影, 陈佩燕, 雷小途. 登陆热带气旋路径和强度预报的效益评估初步研究 [J]. 热带气象学报, 2017, 33(5): 675–682.
Wu Y, Chen P Y, Lei X T. A preliminary study on the benefit assessment of track and intensity forecast of landfall tropical cyclones [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2017, 33(5): 675–682.