

国内外台风飞行科学试验进展及展望

汤杰^{1, 2} 赵兵科¹ 雷小途³

(1 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030; 2 亚太台风研究中心, 上海 201306; 3 上海市气象局, 上海 200030)

摘要: 近年来, 热带气旋(台风)科研业务取得了长足进步, 但是海上台风资料的缺乏影响了台风学科突破其瓶颈, 制约着学科的进一步发展。因而, 利用多种类型飞行器对台风进行观测已经成为当务之急。回顾过去几十年国内外利用不同类型飞行器(有人机、无人机和火箭等)对台风展开的观测, 并对今后发展做出了一定的展望。

关键词: 台风, 飞机观测, 无人机, 资料采集

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.05.007

Progress and Prospect of Typhoon Flight Science Experiments

Tang Jie^{1, 2}, Zhao Bingke¹, Lei Xiaotu³

(1 Shanghai Typhoon Research Institute, Shanghai 200030 2 Asia-Pacific Typhoon Collaborative Research Center, Shanghai 201306 3 Shanghai Meteorological Service, Shanghai 200030)

Abstract: In recent years, great progress has been made in the scientific research and operational work of tropical cyclone (typhoon). However, the insufficient offshore typhoon data hinders the typhoon discipline from breaking through its bottleneck and restricts its further development. . Therefore, it has become a top priority to use various types of aircraft to observe typhoon. After looking back on the use of different types of aircraft at home and abroad in the past few decades (manned aircraft, UAV and rocket, etc.) for typhoon detection, the paper looks into the future development of typhoon flight science experiments.

Keywords: typhoon, aircraft observation, UAV, data collection

0 当前台风研究业务瓶颈与台风科学试验必要性

热带气旋(本文统称台风)是在热带洋面上发展起来的强对流涡旋性天气系统, 它产生的大风、暴雨和风暴潮等气象灾害每年都给全世界大洋沿岸居民带来巨大的生命和财产损失。因此台风的路径和强度以及风雨的预测和机理研究是气象防灾减灾业务和科研中的一个重要领域。近几十年来, 随着非常规资料的广泛使用, 高分辨率数值模式的改进以及对台风发生发展的机制深入理解, 台风路径预报水平已经逐步提高, 而与之形成鲜明对比的是, 台风强度和结构预报水平却进步相对缓慢^[1]。对于台风强度和结构预报进步缓慢一个主要原因是热带气旋主要在远洋洋面上发展并迅速移动, 人们往往缺乏对于台风内部结构进行持续有效观测的手段。因此近年来, 国内外开展多个针对热带气旋大型外场观测试验, 如美

国多年来连续开展的TCM-90和Typhoon-90试验^[2], RAINEX (Hurricane Rainband and Intensity Change Experiment)^[3], 以及近年来以美国飓风研究中心(Hurricane Research Division, HRD)为核心针对飓风强度观测试验HIFX (Hurricane Intensity Forecasting Experiment) 试验^[4-5]。THORPEX计划也针对西北太平洋台风开展了两季T-PARC (THORPEX-Pacific Asian Regional Campaign) 试验即TCS-08和TCS-10计划^[6]。我国台湾地区从2003年开始执行针对经过台湾岛附近区域的台风观测Dotstar (Dropwindsonde Observations for Typhoon Surveillance near the Taiwan Region) 计划。

美国等长年的飓风(大西洋的热带气旋)探测实践表明, 飞机下投探空是获取台风内部精细结构特征的有效手段, 其中基于无人机平台的台风下投探空技术则已渐成发展趋势。近年来, 美国通过实施“飓风预报提高计划(HFIP)”, 针对飓风强度预报, 开展规模化的飓风内部垂直精细结构的飞机下投探空观测, 并使用包括“全球鹰”在内的高空无人机加强了对飓风高层“出流层”结构等的直接观测, 极大提高了其对飓风结构影响强度变化过程的事实及机理认识, “出流层”结构的直接观测还促进了其数值模式(HWRF)飓风高层次抽吸及级环流等相关物理过程处理方案的

收稿日期: 2020年9月15日; 修回日期: 2021年3月19日

第一作者: 汤杰, Email: tangj@typhoon.org.cn

资助信息: WMO国际合作项目“近海台风强度变化科学试验”(EXOTICCA); 上海市科学技术委员会项目(19dz1200101)。

完善、确保了模式中飓风涡旋结构的真实准确，使其飓风强度的预报能力取得突破性进展，5年内降低误差约20%，当前72 h的预报误差与5年前的24 h预报相当^[7]。

Aberson等^[8]对2008—2011年的飓风飞机观测数据（包括航行高度上的温压湿风数据、步进频率微波辐射计（SFMR）数据、下投式探空仪数据以及机载多普勒雷达数据等）采用集合卡曼滤波的方法将其同化到HWRP模式中，通过比较飞机观测同化资料对24~60 h的路径和响度有20%~40%幅度的提高。

1 国内外台风飞行试验开展的情况

基于台风试验观测的必要性，国内外开展多个主要基于飞行器平台的大型综合性外场观测试验，如美国多年来连续开展的TCM-90和Typhoon-90试验^[2]，RAINEX（Hurricane Rainband and Intensity Change Experiment）^[3]，以及近年来以美国飓风研究中心（Hurricane Research Division, HRD）为核心针对飓风强度观测试验HIEX（Hurricane Intensity Forecasting Experiment）试验^[4-5]。THORPEX计划也针对西北太平洋台风开展了两季T-PARC（THORPEX-Pacific Asian Regional Campaign）试验即TCS-08和TCS-10计划^[6]。我国台湾地区从2003年开始执行针对经过台湾岛附近区域的台风观测DOTSTAR（Dropwindsonde Observations for Typhoon Surveillance near the Taiwan Region）计划。我国香港则利用海事搜救飞机自2012年进行有人飞机环绕台风的边界层观测试验，并从2016年开始在台风下探空等方式探测。日本也于2017年开始针对飓风Lane进行了飞行探测试验，并后续逐年开展。

进入21世纪后，我国连续多年开展台风科学试验（China Landfalling Typhoon Experiment, CLATEX）^[9]并且后续在“台风973”计划资助下开展了“影响登陆热带气旋强度的边界层主要物理过程特征观测试验”（TLAPFEX）^[10-11]以及在世界气象组织和亚太台风委员会指导下国际示范项目“近海台风强度变化科学试验”（EXOTICCA）。上海台风研究所自2007年也分别开展了诸如远程火箭探空，无人机探测等多元手段，我国中国气象科学研究院、探测中心、广州热带海洋气象研究所、南京大学等多家国内单位也持续多年在广东、海南等地针对登陆台风进行多单位协同观测试验。

下面根据飞行平台对相关试验进行介绍：

1.1 基于大型有人机和火箭的台风探测试验：

美国早在“二战”结束后的1950年代，即开展了

有人驾驶飞机穿越台风中心并在飞行中投放配有全球卫星定位装置的探空仪的观测试验，飞行路线上的资料，特别是针对台风中心附近实施的下投探空资料，成为台风“定位”（确定台风中心位置）和“定强”（确定台风的强度）的重要依据。1976—1977年，美国国家海洋与大气管理局（NOAA）成功地利用WP23D型飞机进行了2个架次的飓风下投探测试验，此后飞机便作为其探测飓（台）风的理想平台，投入业务探测应用至今。随着“冷战”的结束和经费等原因，美国于1987年停止了在西北太平洋地区的台风飞行观测。但是，西太平洋沿岸各国和地区针对台风预报科学问题的观测试验的努力并未停止。如：1990年代初，成功地实施了旨在提高台风路径预报的国际台风观测计划（SPECTRUM），下投探空、浮标、观测船和风廓线雷达及沿海众多地面和高空探测等资料的获取及其应用，明显增进了台风移动物理机制的认识和预报能力。SPECTRUM的成功，示范并推动了国际台风界的台风观测试验。下面举例分别介绍近年来开展的一些著名台风相关科学试验：

1.1.1 CBLAST (Coupled Boundary Layer Air-Sea Transfer)

利用风雨廓线仪观测表面风和边界层风，在飞机上释放GPS下投式探空仪观测海表温度和表面风，云成像仪和粒子多普勒仪观测海洋飞沫，扫描雷达高度计观测表面波，机载湍流仪观测动量和感热通量。CBLAST试验的主要目的是通过对大西洋热带气旋的观测，提高对海气相互作用物理过程的认识，了解强风条件下海气交换过程机制，改进热带气旋路径和强度预报数值模式物理参数化^[12-14]。

通过对热带气旋边界层通量的直接观测初步发现高风速条件下拖曳系数减小^[15-16]；热带气旋增强所需的焓通量不仅限于来自湍流通量^[17]；边界层中存在特征波长约为900 m的滚涡结构，它们对海气动量交换的调整有着显著作用^[17]。这些观测结果，已被应用于物理机制的研究和理论模型及数值模式参数化方案的评估^[18]，并发展了高分辨率大气—浪—海洋耦合模式，检验证明模式结果能够明显地提高热带气旋强度和结构预报，尤其能够较好反映海气相互作用对气旋强度预报的影响^[14]。

1.1.2 DOTSTAR (Dropwindsonde Observations for Typhoon Surveillance near the Taiwan Region)

由台湾科学家组织实施的“DOTSTAR试验”开始于2003年（图1），试验海区为西北太平洋（主要是经过台湾岛以东洋面），使用Astra SPX喷气机投放了下投式探空仪对台风进行温度、湿度、气压和风速的

垂直观测，至2010年试验共观测了39个台风，投放了846个下投式探空仪。观测进一步促进了对台风动力学研究，尤其是环境场对台风路径突变机理的影响以及台风边界层物理过程的理解^[19]。试验中观测资料实时传输到台湾气象局、NCEP、FNMOC和JMA，并同化进台湾气象局数值模式，NCEP的GFS和GFDL模式，FNMOC的NOGAPS、COAMPS和GFND模式，UET和JMA数值模式，发现同化DOTSTAR观测资料后NCEP的GFS模式、NOGAPS模式、JMA的GSM模式和WRF模式对台风的路径预报都表现出正效果^[20]。

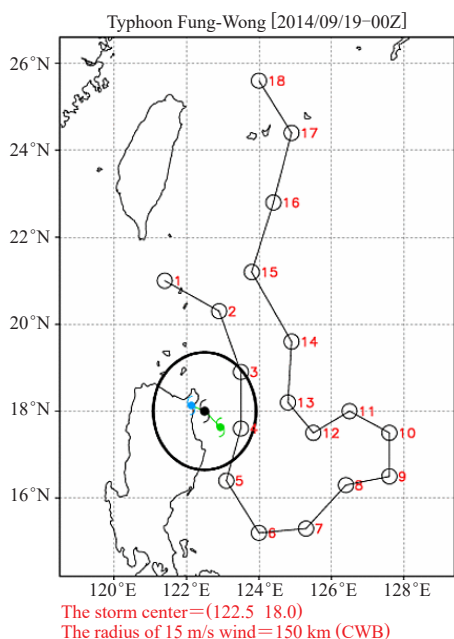


图1 DOTSTAR对2014年台风凤凰的观测

(黑色中心标记: 2014-09-19 00: 00 UTC的台风中心位置; 绿色中心标记: 第一枚Dropsonde落入海表时的台风中心位置; 蓝色中心标记: 最后一枚Dropsonde落入海表时的台风中心位置)
Fig. 1 Observation of typhoon Fenghuang in 2014 by DOTSTAR (black center mark: typhoon center position at 00:00 UTC on 19 September 2014; green center mark: typhoon center position when the first dropsonde falls into the sea surface; blue center mark: typhoon center position when the last dropsonde falls into the sea surface)

1.1.3 IFEX (Intensity Forecasting Experiment)

IFEX 观测试验利用P-3、G-IV飞机以及无人机，主要通过投式探空仪、机载多普勒雷达和SFMR (Stepped-Frequency Microwave Radiometer) 收集各种环境下大西洋飓风生命期各阶段的观测资料，提供改进的飓风强度、结构和环境场实时观测，并推进对影响飓风生命期各阶段强度变化的物理过程的理解^[4]。以2005年为例，该试验共在大西洋海域执行了93次飞行任务，观测了14个飓风，释放了约2500个下投式探

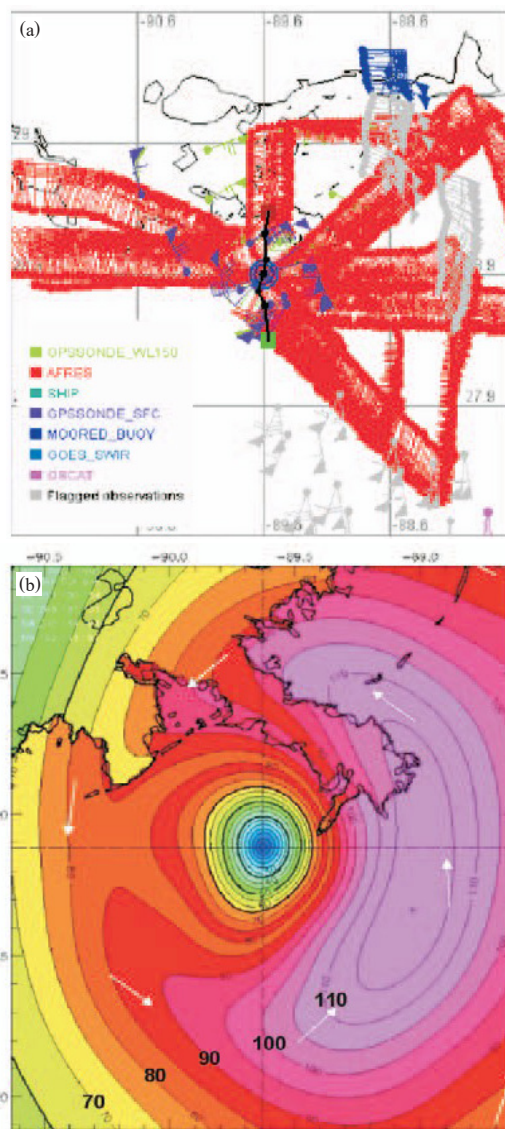


图2 IFEX试验中对2005年飓风Katrina的多平台风场观测 (a) 和地面风分析 (b)

Fig. 2 Multi-platform wind field observation (a) and surface wind analysis (b) of Hurricane Katrina in 2005 in IFEX test

空仪 (图2)。

1.1.4 EXOTICCA (Experiment on Typhoon Intensity Change in Coastal Area)

2014年，ESCAP/WMO台风委员会委托中国气象局上海台风研究所和香港天文台，联合牵头组织实施旨在提高西北太平洋近海台风强度变化预报能力的科学试验 (EXOTICCA)，该试验在南海北部布设了浮标阵、使用了搜救飞机 (Surveillance flight)、研制使用了火箭弹下投探空系统，并结合气象梯度观测塔等，对2014—2016年间的10个目标台风 (1409号“威马逊”、1415号“海鸥”、1416号“凤凰”、1509号“灿

鸿”、1513号“苏迪罗”、1522号“彩虹”、1601号“尼伯特”、1614号“莫兰蒂”、1617号“鲑鱼”和1621号“莎莉嘉”)实施了外场协同观测试验,揭示了西太平洋近岸丘陵和海岛特殊地形条件下的台风近地层的风随高度变化的垂直廓线及不同时距平均风速间的转化关系,明显不同于基于大西洋沿岸的平原地区。试验还针对1522号台风“彩虹”实施了全球首例火箭弹下投探空作业(图3),发现:在台风浓密的核心云雨区,目前广为使用的其于卫星反演的CIMSS AMV风场资料可能偏小约30%。

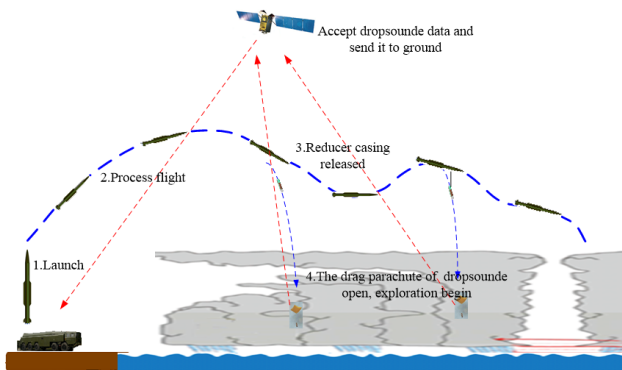


图3 2015年10月3日23:00“彩虹”台风云团及火箭下投探空和“追风”车GPS探空10 km附近高度处的位置示意图
Fig. 3 Location diagram of Rainbow typhoon group, rocket drop sounding and GPS sounding of "wind pursuit" vehicle at an altitude of 10 km at 23:00 on 3 October 2015

1.2 基于无人机的飞行探测试验

近年来,包括我国在内的亚太地区在利用飞机探测台风方面有所加快。继我国台湾成功实施DOSTAR试验后,我国大陆的科学家也曾于2009年“莫拉克”和“天鹅”台风期间首次进行了有人飞机探测台风的科学试验,飞机探测资料仍然对台风路径和强度的数值预报非常有用^[21]。但出于安全管制、飞行经验、飞机性能等多方面原因,相关有人机飞行探测台风未能持续下去。我国香港则利用海事搜救飞机自2012年进行有人飞机环绕台风的直接观测试验,其改装中的可下投探空仪的(有人)飞机并于2016年投入试用。韩国、日本和越南等国也纷纷制定雄心勃勃的飞机探测台风的试验计划,其中日本和韩国计划于2017—2018年间进行(有人)飞机探测台风的试验。

面对飞机探测台风的高风险,有人飞机探测台风风险大,操作难度大,对飞机性能和飞行员经验要求高,大多数国家或地区很难大规模开展台风的有人飞机探测。相对而言,无人飞机(Unmanned Aerial Vehicles, UAV)具有安全性好、效费比高等众多有人驾驶飞机所不具有的巨大优势。用无人机替代有人飞

机执行高风险作业任务,已是当今国际航空领域的一个重要发展方向。而随着无人机巡航高度、航程、载重量以及可操控性的进一步提高,利用无人机进行台风探测也逐渐成为可能和趋势^[22]。自本世纪开始,美国等国家已经利用多种类型的无人机开展了气象探测的尝试。

1.2.1 低空无人机对台风探测

澳大利亚较早研发气象无人机,代表机型是“Aerosonde(航空探测器,或称气象侦察兵)”及其改进型“MK-II”和“MK-III”(图4)。该序列无人机由澳大利亚Aerosonde公司自1991年开始研发,1997年“Aerosonde”投入使用,1999年和2001年先后推出改进型“MK-II”和“MK-III”。这一系列无人机由于方便可用已被澳大利亚气象局、美国NOAA、日本气象厅、韩国气象厅、我国台湾气象部门等多个国家的科研部门和国际组织使用。

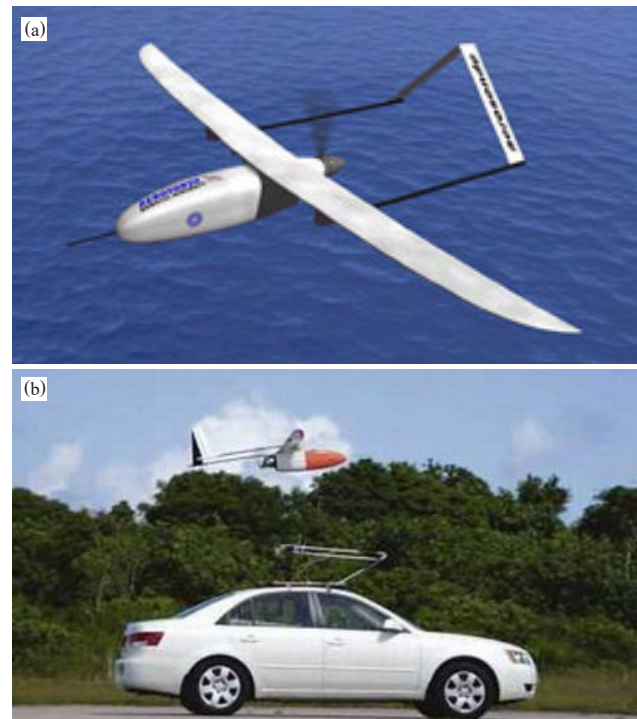


图4 澳大利亚“MK-III”型无人机
Fig. 4 Australian's "MK-III" UAV

美国在2001年实施的“对流与水汽科学试验(The Convection and Moisture Experiment, CAMEX-4)”中,使用这款无人机获取了近水面(约为300 m)的温度、湿度和风速等气象资料。同年,我国台湾科学家也利用相同型号的无人机,成功地飞入了“海燕(0121号)”台风的环流,距台风中心最近仅为150 km,测得了气压、最大风速和温度等气象要素。日本气象厅于2001年,以冲绳为基地,使用螺旋桨式单发动机飞

机(全长为2 m, 续航能力约为3000 km), 对“桃芝(0108号)”台风实施了无人机的探测试验, 获取了台风中的风向、风速、湿度和温度等大量的观测数据。

随后, 美国于2005年在“IFEX”试验中, 用“MK-III”无人机成功地飞入了飓风“奥菲莉亚(Ophelia)”, 获取了飓风近水面(约为300 m)的风、温、压、湿等观测资料, 在2007年进行的飓风“诺埃

尔(Noel)”超低空飞行探测试验中, 无人机的飞行高度仅为82 m, 并持续飞行了约为17.5 h。显然, 在这个高度实施有人驾驶飞机的飞行探测风险极大。

中国气象局大气探测中心于2008年组织国内首个无人机探测台风比较试验, 来自国内的多家无人机研发机构和生产厂商参加在整个试验中共完成了3次7 h 的连续飞行测试、4 h大雨条件下飞行测试(图5), 完

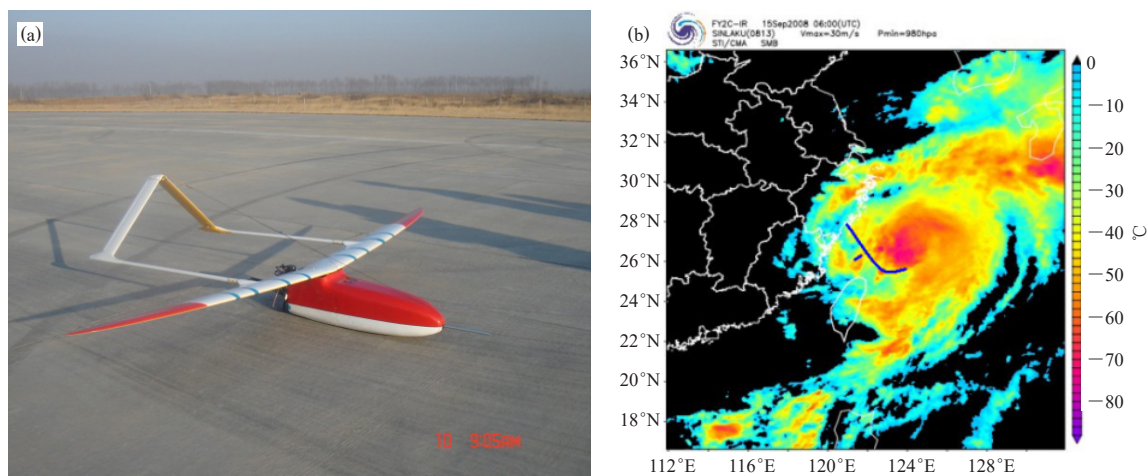


图5 中国“晨鸟”无人机(a)及其在台风探测的飞行轨迹(b)
Fig. 5 China's “Morning Bird” UAV (a) and its flight trajectory in typhoon detection (b)

成了对“海鸥”和“森拉克”台风的探测试验并获取了完整的温湿压、风速、风向资料^[23]。

2015年上海台风研究所也曾经利用小型无人机对台风“灿鸿”进行探测, 飞机进入台风内部40多分钟后, 探测到最大风速超过40 m/s, 但是此后失联。

2017年和2018年上海台风研究所再度联合南京航空航天大学在台风“泰利”和台风“安比”期间分别进行了飞行测试, 取得了一些有益数据(图6)。

1.2.2 以HS3为代表的高空无人机探测台风试验

台风环流内相关气象要素的垂直分布廓线, 对于台风结构的正确描述极为重要, 这也正是有人驾驶飞机穿越台风并进行下投探空的意义和价值之所在。早在1993年, Langford等就探讨了用高空无人机下投探空仪开展飓风观测的可能性。随着军用无人机技术的发展, 如今“长航时无人侦察机”的飞行升限已达18~20 km及以上、续航可达24 h以上, 并具备作为空中运载工具、携带和自动投放下投探空仪的能力。

2009年开始, 美国NASA和NOAA合作利用两架长航时高空无人侦察机“Global Hawk(全球鹰)”(图7a), 探索进行飓风探测方面的研究。先后开展了“飓风生成和快速增强过程(The Genesis and Rapid Intensification Processes, GRIP)科学试验”^[24]并在2012年开始与另外一架WB-57有人机(图7b)联合开展

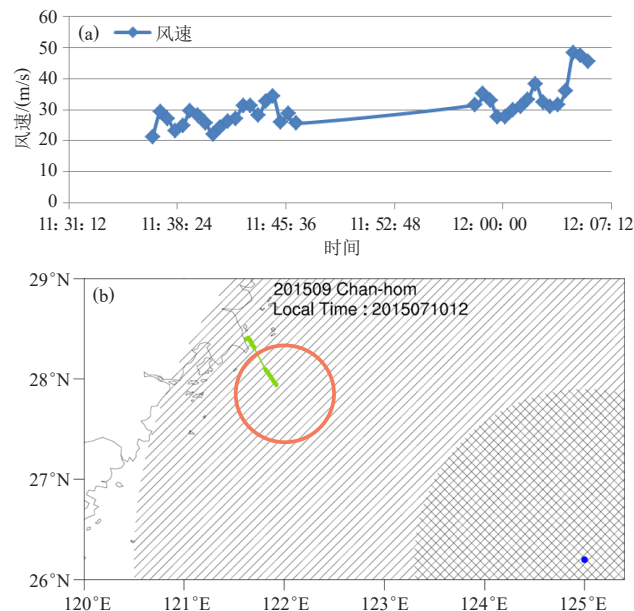


图6 上海台风研究所无人机探测“灿鸿”探测风速(a)及其在台风探测的飞行轨迹(b)

Fig. 6 Wind speed detected by “Canhong” UAV of Shanghai Typhoon Research Institute (a) and its flight track in typhoon detection (b)

“飓风与强风暴哨兵计划”(Hurricane and Severe Storm Sentinel, HS3)^[25], 先后对多个飓风进行了飞行探测(图8)。例如侦测到了飓风“Karl”在30 h内强度



图7 参加“超强风暴哨兵 (HS3)”的全球鹰 (GH) 无人机 (a) 和WB-57飞机 (b)
Fig. 7 Global Hawk UAV (a) and WB-57 aircraft (b) participating in “Super Storm Sentinel (HS3)”

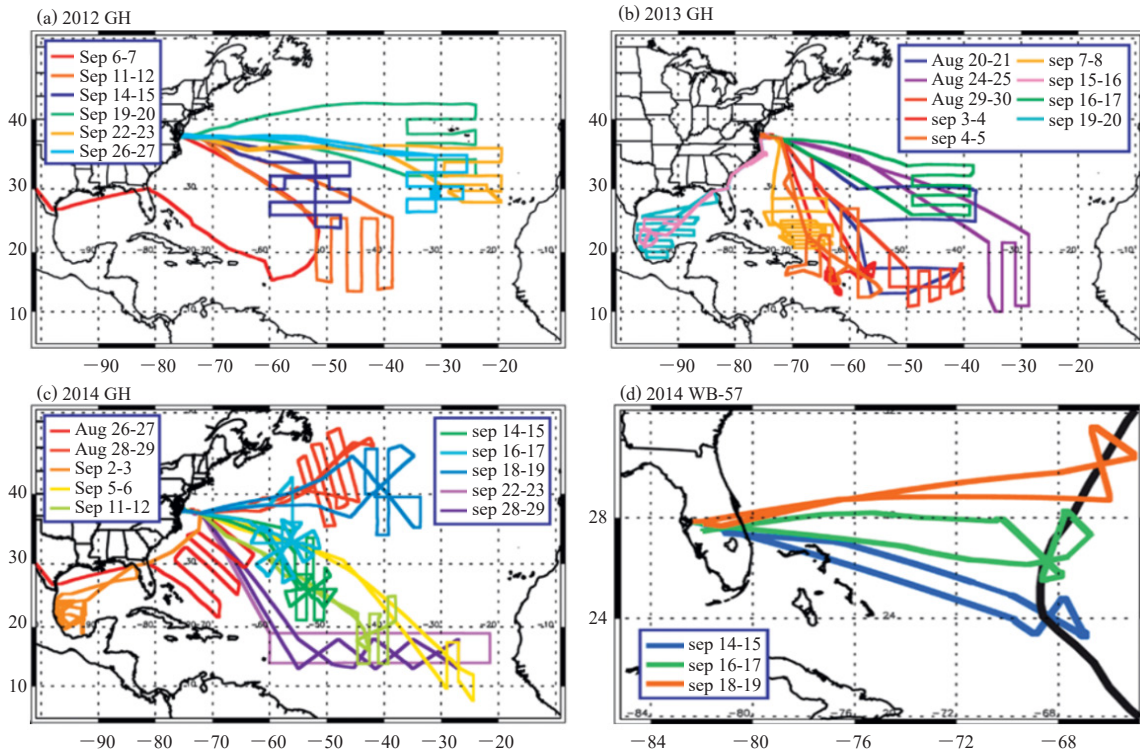


图8 美国HS3试验中, 2012—2014年历年全球鹰 (GH) 探测飓风飞行路径图以及2014年WB-57飞机探测飓风Gonzalo路径图
Fig. 8 Graphic summary of the HS3 Atlantic tropical cyclone and SAL flights, GH flight tracks for the 2012–2014 and the 2014 WB-57 flight tracks over Hurricane Gonzalo

23~56 m/s的快速增强等过程, 所获取的大量的飓风结构及其环境场资料, 已用于对飓风形成和增强机理等的研究。

Komaromi^[26]发现基于全球鹰的下投式探空能够有效的改进飓风流出层的动力和热力结构科学认识, 特别是第一次发现在飓风最大流出层上方还有一个大约为2~4 m/s、厚度约为20~50 hPa的高层流入层, 并认为这与平流层在台风眼区的非绝热干下沉有关。Christophersen等^[27]认为同化全球鹰下投式探空比没有相关资料同化的预报在路径和强度均有不同程度的提高。这些证明针对台风的高空下投式探空能够有效改

变模式预报能力。一系列的最新研究已经证明无人机探测台风具有重大的科学意义和可靠的应用前景以及高度的可行性^[26-27], 并且已经获得国际台风研究和业务人员的高度评价^[25]。2020年8月中国气象局探测中心、海南省气象局联合成都飞机制造公司利用翼龙-10高空无人机对台风“森拉克”外围进行了探测并成功收集到30多枚探空。同年10月, 中国气象局上海台风研究所联合四川腾盾科技公司利用TD328重型无人机等多类型无人机在台风“浪卡”登陆前24 h实施多机多次无人机探测试验, 收集采集了大量观测数据。

随着无人机技术的迅猛发展, 成本还将进一步降

低，有效荷载和续航能力等性能还将进一步提高，更多的台风特种观测仪器将被搭载并充分使用。对美国现役的用于探测台风的有人驾驶飞机和无人机的主要性能进行比较，不难发现无人机在长航时（或航程）和低空飞行方面具有明显优势（图9），基于高空下投探空和近水面飞行的无人机探测体系和协同观测已是大势所趋。

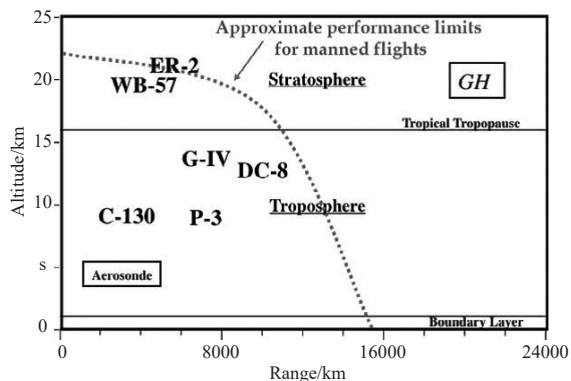


图9 美国现役探测台风的有人机 (ER-2, WB-57, G-IV, DC-8, C-130, P-3) 和无人机 (GH, Aerosonde) 的飞行高度及其航程示意

Fig. 9 Schematic diagram of flight altitude and range of manned aircraft (ER-2, WB-57, G-IV, DC-8, C-130, P-3) and unmanned aircraft (GH, Aerosonde) in active service of typhoon detection in the United States

2 台风外场试验相关展望和未来

从2009年开始，美国气象部门通过实施“飓风预报提高计划 (HFIP)”，针对飓风强度预报，开展规模化的飓风内部垂直精细结构的飞机下投探空观测，并使用包括“全球鹰”在内的高空无人机加强了对飓风高层“出流层”结构等的直接观测，极大提高了其对飓风结构影响强度变化过程的事实及机理认识，“出流层”结构的直接观测还促进了其数值模式 (HWRF) 飓风高层次抽吸及级环流等相关物理过程处理方案的完善、确保了模式中飓风涡旋结构的真实准确，使其飓风强度的预报能力取得突破性进展 (图10)，5年内降低误差约20%，当前72 h的预报误差与5年前的24 h预报相当^[7]。

飞机观测资料的使用是改进台风模式预报能力的有效手段。Aberson等^[8]对2008—2011年的飓风飞机观测数据 (包括航行高度上的温压湿风数据、步进频率微波辐射计 (SFMR) 数据、下投式探空仪数据以及机载多普勒雷达数据等) 采用集合卡尔曼滤波的方法将其同化到HWRF模式中，通过比较同化后和未经同化的模式预报结果来量化飞机观测数据对飓风路径及强度模式预报结果的影响。得到结论如下：1) 对于路径

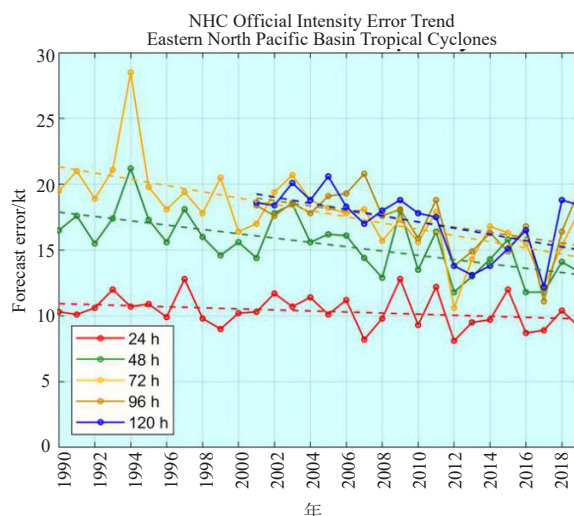


图10 美国 (NHC) 对大西洋飓风强度的业务预报平均年误差分布

Fig. 10 Annual mean error distribution of operational forecast for Atlantic hurricane intensity (NHC)

预报，飞机观测同化资料对24~60 h的预报有近20%的提高；对前24 h的预报，仅加入机载多普勒雷达的同化资料使预报改善10%；2) 对于强度预报，加入飞机观测同化资料后，使模式预报水平平均改善23%，对前24小时的预报，加入机载多普勒雷达数据使预报改善11%。Gall等^[28]对2008—2010年的所有飓风观测资料进行分析，指出对飓风内核的飞机观测数据进行同化，可以使强度预报的36 h预报提高18%，72 h预报提高42%，平均提高20%~40%；同时，AOML利用不包括雷达数据的其余飞机观测资料 and 所有飞机观测资料进行观测系统模拟试验 (OSSEs)，结果表明，二者较不利用任何飞机观测资料的运行结果都有显著的提高，此外对于飞机观测数据，加入雷达数据后，较未加入雷达数据有额外的10%的改善。

世界气象组织 (WMO) 于2015年组织召开的第8次国际热带气旋研讨会 (IWTC-8) 的评估表明，飞机下投探空及相应观测资料的同化，仍是探测台风内部结构及突破台风模式预报瓶颈的最有效手段。最近，美国环境预报中心 (NCEP) 对飞机下投探空资料在提高台风模式预报能力的贡献进行了较系统的测试和评估，结果表明，全球模式在同化飞机下投探空资料后，其60 h内的台风路径预报误差减小了10%~15% (图11)。

随着我国经济社会发展，台风给我国造成的灾害损失日益严重，尤其沿海地区人口密集、下垫面复杂，承灾害能力相对脆弱，台风容易对这些区域造成复合型的灾害。为此，《国家中长期科学和技术发展规划纲要 (2006—2020年)》将台风作为影响国家公共安全

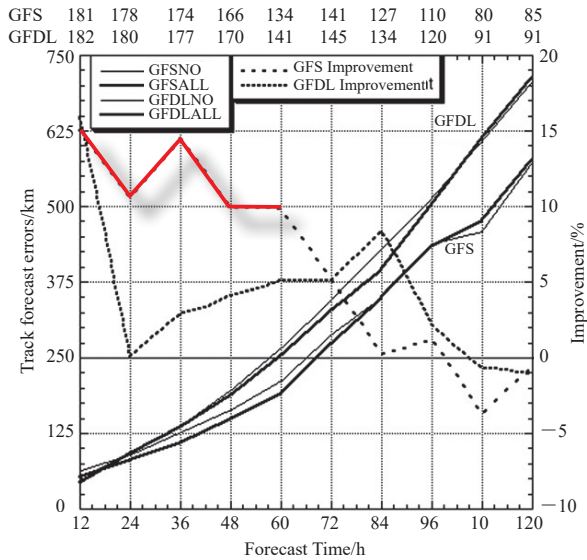


图11 1997—2006年间飞机下投探空资料对NCEP全球模式(GFS)和区域模式(GFDL)台风路径预报的改进(GFSNO和GFDLNO—未同化飞机资料的GFS和GFDL, GFSALL和GFDLALL—同化飞机资料的GFS和GFDL)

Fig. 11 Improvement of NCEP global model (GFS) and regional model (GFDL) typhoon path prediction by aircraft dropping radiosonde data from 1997 to 2006 (GFSNO and GFDLNO—GFS and GFDL of un-assimilated aircraft data, GFSALL and GFSALL—GFS and GFDL of assimilated aircraft data)

全的重大自然灾害之一，将台风监测、预警和应急处置关键技术及科学研究列入重大自然灾害监测和防御优先主题，因此针对台风内核结构的精确观测越来越具有紧迫性和必要性。

另外一方面由于海上观测站稀少，现阶段基于卫星遥感的大气要素反演，受台风浓密云雨区的严重“干扰”，其精度尚不能满足路径和强度变化研究及预报对台风内部结构精细化程度的要求。美国对飓风探测的实践已经表明，基于飞行器的对台风直接观测是当前获取台风结构高精度观测资料的最有效手段。加强台风的观测研究，被视为提高台风路径突变和强度变化机理认识从而提高预报能力的关键和突破口，受到国际台风界的高度关注(IWTC-8, 2015年韩国济州)。

综上所述，研发能搭载包括下投探空等的高空无人机、针对边界层内部的中低层无人机并构成多平台的台风综合探测体系，将可以获取台风内部气象要素(完整的)垂直廓线等精细结构特征信息，从而揭示海上台风内部(特别是近地层和出流层)精细热力动力结构特征，为包括台风涡旋结构初始化和物理过程参数化方案在内的台风数值模式改进及台风科学研究和预报能力的提高奠定基础，具有重大的科学意义和可

靠的应用前景^[29-31]。

需要指出的是，相对于美国飓风飞行科学试验广泛开展，近年来包括我国台风飞行探测试验长期徘徊不前。笔者基于多年台风科学试验经验，认为其主要原因如下：

1) 空域管理体制复杂：由于种种原因，我国沿海空域远比美国沿海空域管理复杂，以南海为例，台风生成发展关键区域的空域(南海中北部以及菲律宾以东、巴士海峡和巴林塘海峡等地上空)是在菲律宾、中国香港和中国台湾控制之下。对于需要开展真正有实际科研业务价值的台风飞行试验所需要的申请手续较为艰难而复杂。

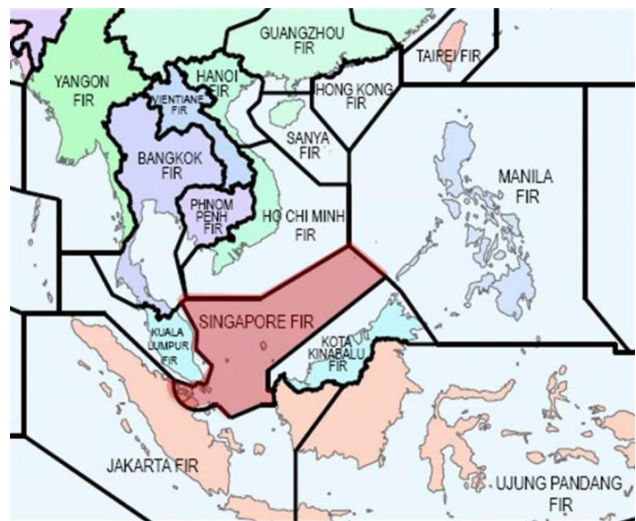


图12 南海区域飞行情报区分布
Fig. 12 Distribution of flight information regions in South China Sea

2) 飞行器性能不足：台风作为一个强致灾性天气系统，其特点是尺度大(水平尺度可以超过2000 km)、对流强(上升运动速度可达10 m/s, 雷达回波强度经常大范围超过50 dBz)、高度高(最大超过15 km)。参照美国多年飞行探测实践经验，需要非常经验丰富的飞行员和性能非常好的飞机。未经合适改装和科学指导下，常规有人机非常难以在搭载多类系统气象观测载荷情形下进入台风内核区域进行科学有效的气象探测。另外一方面，由于发动机等原因的限制，我国类似于美国全球鹰无人机的能从平流层高度进行长时间巡航的航空飞行器尚未成熟和民用化。

3) 台风内部结构复杂多变，且其内部遍布风切变、雷击、强降水等诸多不利于飞行器安全飞行的天气因素。因此合理安全的开展台风科学试验，需要同时兼具丰富的台风动力学知识和丰富的飞行操作实践经验的队伍来负责设计合理可行的飞行试验技术路线

和观测方案。虽然近年来通过“浪卡”“森拉克”等台风试验的开展,我国相关部门已经有一些经验,但是还需要进一步锻炼队伍,积累经验。特别是如何在有限飞机性能条件下,采集到真正科学有效的数据,最终达到提升台风理论和预报水平的目的,需要进一步深入探索和持续支持。

4) 另外由于飞行经验,管理机制以及安全设备等原因,有人飞机对以对流强、范围大为特点的台风探测具有较大的实施难度。但从美国、日本以及我国台湾和香港地区多年台风探测经验来看,能搭载多类型大型设备并且能灵活机动执行任务的大型有人飞机很可能才是最终解决台风资料探测困境的最终选择。这需要建设一支能紧密合作的兼备非常丰富的飞行经验和非常丰富的台风结构知识的飞行试验队伍紧密合作,科学稳妥地开展试验。

总而言之,研究认为当前西北太平洋台风结构和强度的主要研究和预报瓶颈并不在于理论和预报本身,而在于缺乏系统全面的以不同空基、地基、海基和天基平台协同体系,特别是缺乏利用各类飞机开展台风飞行科学观测试验。未来在更广泛开展台风飞行科学试验支持下,通过多部门联合,合理确定科学可行的台风试验方案,可以期望未来我国在台风内核精细结构及云微物理特征、海气相互作用机制以及环境引导流等多方面取得进展,并将使得台风预报水平走向新的台阶。

参考文献

- [1] 端义宏,方娟,程正泉,等.热带气旋研究和业务预报进展——第九届世界气象组织热带气旋国际研讨会(IWTC-9)综述.气象学报,2020,78(3):537-550.
- [2] Elsberry R L. International experiments to study tropical cyclones in the Western North Pacific. Bulletin of the American Meteorological Society, 1990, 71(9): 1305-1316.
- [3] Chen S S. Overview of RAINEX modeling of 2005 hurricanes. 27th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Monterey, CA. American Meteorological Society A, 2006.
- [4] Rogers R, Uhlhorn E, Surgi N, et al. The Intensity Forecasting Experiment: a NOAA multiyear field program for improving tropical cyclone intensity forecasts. Bulletin of the American Meteorological Society, 2006, 87(11): 1523-1538.
- [5] Rogers R, Aberson S, Aksoy A, et al. NOAA's Hurricane Intensity Forecasting Experiment: a progress report. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(6): 859-882.
- [6] Elsberry R L, Harr P A. Tropical Cyclone Structure (TCS08) field experiment science basis, observational platforms, and strategy. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 44(3): 209-231.
- [7] Marks F D, et al. Hurricane Forecast Improvement Project (HFIP): addressing the weather research and forecasting innovation act of 2017. 33rd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, 16 April 2018. AMS, 2018.
- [8] Aberson S D, Black M L, Black R A, et al. Thirty years of tropical cyclone research with the NOAA P-3 aircraft. Bulletin of the American Meteorological Society, 2006, 87(8): 1039-1056.
- [9] 陈联寿. 国内外登陆热带气旋研究的进展. 第十三届全国热带气旋科学讨论会, 2004.
- [10] 廖菲, 邓华, 赵中阔, 等. 热带气旋科学观测试验及研究进展概况. 热带气象学报, 2013, 29(4): 687-697.
- [11] 赵兵科, 邵德民, 鲁小琴, 等. 多通道地基微波辐射计在0713号“韦帕”台风登陆前后探测性能及特征分析. 地球科学进展, 2009, 24(9): 1001-1008.
- [12] Black P G, D'Asaro E A, Drennan W M, et al. Air-sea exchange in hurricanes - Synthesis of observations from the coupled boundary layer air-sea transfer experiment. Bulletin of the American Meteorological Society, 2007, 88(3): 357-374.
- [13] Edson J, Crawford T, Crescenti J, et al. The coupled boundary layers and air-sea transfer experiment in low winds. Bulletin of the American Meteorological Society, 2007, 88(3): 341-356.
- [14] Chen S S, Price J F, Zhao W, et al. The CBLAST-hurricane program and the next-generation fully coupled atmosphere-wave-ocean. Models for hurricane research and prediction. Bulletin of the American Meteorological Society, 2007, 88(3): 311-317.
- [15] French J R, Drennan W M, Zhang J A, et al. Turbulent fluxes in the hurricane boundary layer. Part I: Momentum flux. Journal of the Atmospheric Sciences, 2007, 64(4): 1089-1102.
- [16] Drennan W M, Zhang J A, French J R, et al. Turbulent fluxes in the hurricane boundary layer. Part II: Latent heat flux. Journal of the Atmospheric Sciences, 2007, 64(4): 1103-1115.
- [17] Zhang J A, Katsaros K B, Black P G, et al. Effects of roll vortices on turbulent fluxes in the hurricane boundary layer. Boundary-Layer Meteorology, 2008, 128(2): 173-189.
- [18] Zhang J A, Marks F D, Montgomery M T, et al. An estimation of turbulent characteristics in the low-level region of intense hurricanes Allen (1980) and Hugo (1989). Monthly Weather Review, 2010, 139(5): 1447-1462.
- [19] Wu C C, Lin P H, Aberson S, et al. Dropwindsonde observations for typhoon Surveillance near the Taiwan Region (DOTSTAR) -an overview. Bulletin of the American Meteorological Society, 2005, 86(6): 787-790.
- [20] Wu C C, Chou K H, Lin P H, et al. Impact of dropwindsonde data on typhoon track forecasts in DOTSTAR. Weather and Forecasting, 2007, 22(6): 1157-1176.
- [21] 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. 气象学报, 2012, 70(1): 30-38.
- [22] 雷小途. 无人飞机在台风探测中的应用进展. 地球科学进展, 2015, 30(2): 276-283.
- [23] 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. 应用气象学报, 2009, 20(5): 579-585.
- [24] Braun S A, Kakar R, Zipser E, et al. NASA's Genesis and Rapid Intensification Processes (GRIP) field experiment. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(3): 345-363.
- [25] Braun S A, Newman P A, Heysfield G M. NASA's hurricane and Severe Storm Sentinel (HS3) investigation. Bulletin of the American Meteorological Society, 2016, 97(11): 2085-2102.
- [26] Komaromi W A, Doyle J D. Tropical cyclone outflow and warm core structure as revealed by HS3 dropsonde data. Monthly Weather Review, 2016, 145(4): 1339-1359.
- [27] Christophersen H, Aksoy A, Dunion J, et al. The impact of NASA global Hawk unmanned aircraft dropwindsonde observations on tropical cyclone track, intensity, and structure: case studies. Monthly Weather Review, 2017, 145(5): 1817-1830.
- [28] Gall R, Toepfer F, Aberson S, et al. 2009 HFIP R & D Activities Summary: Accomplishments, Lessons Learned, and Challenges. Boulder: NOAA, 2010.
- [29] 雷小途, 张雪芬, 段晚锁, 等. 近海台风立体协同观测科学试验. 地球科学进展, 2019, 34(7): 671-678.
- [30] 马舒庆, 官福顺, 马瑞升, 等. 气象飞机探测体系. 中国无人机会论文集, 2006: 456-460.
- [31] 钱传海, 李泽椿, 张福青, 等. 国际热带气旋飞机观测综述. 气象科技进展, 2012, 2(6): 6-16.