

雷小途,张雪芬,段晚锁,等.近海台风立体协同观测科学试验[J].地球科学进展,2019,34(7):671-678.DOI:10.11867/j.issn.1001-8166.2019.07.0671.[Lei Xiaotu, Zhang Xuefen, Duan Wansuo, et al. Experiment on coordinated observation of offshore typhoon in China[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(7):671-678. DOI:10.11867/j.issn.1001-8166.2019.07.0671.]

## 近海台风立体协同观测科学试验\*

雷小途<sup>1,2</sup>,张雪芬<sup>3</sup>,段晚锁<sup>4</sup>,李 泓<sup>1</sup>,高志球<sup>5</sup>,钱传海<sup>6</sup>,赵兵科<sup>1</sup>,汤 杰<sup>1</sup>  
(1.中国气象局上海台风研究所,上海 200030;2.上海市气象局,上海 200030;3.中国气象局气象探测中心,北京 100081;4.中国科学院大气物理研究所,北京 100029;5.南京信息工程大学,江苏 南京 210044;6.中国气象局国家气象中心,北京 100081)

**摘 要:**缺乏足够的台风精细结构的直接观测资料,是当前制约我国台风学科发展和预报能力进一步提升的主要瓶颈。简要介绍了2019年初启动的国家重点研发计划项目“近海台风立体协同观测科学试验”的基本情况,首先围绕国家防台减灾需求说明项目的重要性和必要性,然后从物理机制和预报关键技术研制及改进出发,说明外场协同观测是当前台风学科发展的难点和前沿,接着从台风直接观测平台和设备、外场观测试验及台风模式物理过程参数化改进等方面阐述相关国内外研究进展,最后给出了项目的关键科学技术问题和主要研究内容。

**关 键 词:**台风;外场观测;协同观测;科学试验

**中图分类号:** P444 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8166(2019)07-0671-08

### 1 引 言

西北太平洋是全球台风(热带气旋的俗称,下同)活动最频繁、受台风影响最严重的区域。我国地处西北太平洋西岸、海岸线漫长,年均有7~9个台风登陆我国(大陆),其中不乏0608号“桑美”、1409号“威马逊”、1614号“莫兰蒂”和1822号“山竹”等造成巨灾的强台风和超强台风,年均造成约0.4%的GDP直接经济损失和约600人的伤亡,是全球台风灾害最严重的国家之一<sup>[1,2]</sup>。防台减灾是包括我国在内的世界主要沿海各国政府的重要工作之一,世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)除在总部设立专门的台风协调处(Tropical Cyclone Programm, TCP)外,还在全球共设立6个区域性的台风专业国际合作机构,包括1968年亚太经社会(Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, ESCAP)与WMO联合成立的亚太

台风委员会,我国是亚太台风委员会的发起国<sup>[3]</sup>。

提高台风的预报精度具有显著的防台减灾效益。研究表明,我国近海台风24 h路径预报误差每减小1 km可减少台风的直接经济损失约1亿元(人民币,下同)、我国近海台风强度24 h预报误差每减小1 m/s可减少约4亿元的直接经济损失<sup>[4]</sup>。近年来,随着对台风移动机制研究及认识的提高和气象卫星、雷达及高性能计算等技术的进步,台风路径的预报误差显著减小,中国气象局中央气象台(官方)的当前24 h预报误差已从15年前的约150 km减小至约70 km<sup>[5]</sup>。但是,对于一些特殊(如突变)路径的台风预报仍存在较大的不确定性,大误差(如24 h预报达200 km及以上、72 h预报达1 000 km及以上)的路径预报,在实际业务中仍时有发生<sup>[6]</sup>。此外,路径预报的不确定性会对台风强度及登陆台风风雨预报的准确性产生明显影响。

收稿日期:2019-05-06;修回日期:2019-06-10.

\* 基金项目:国家重点研发计划项目“近海台风立体协同观测科学试验”(编号:2018 YFC1506400)资助。

作者简介:雷小途(1968-),男,江西奉新人,研究员,主要从事台风观测及机理研究. E-mail:leixt@typhoon.org.cn

台风的移动路径和强度变化等活动主要受控于大尺度环境场、下垫面和台风自身结构及其复杂的相互作用,数值预报模式是刻画上述复杂相互作用的最有效的核心技术之一。研究表明,台风路径和强度等的数值预报误差主要来源于数值模式的初始场和模式物理过程参数化的误差,研制适合台风的模式物理过程参数化方案并为模式提供更为准确的初始场是提高台风数值模式预报水平的必由之路<sup>[7,8]</sup>。

伴随台风的狂风暴雨使获取台风结构及其变化特征的直接观测资料仍十分困难,特别是对于海上的台风,主要依赖于卫星遥感观测,但其精度因台风稠密云雨对遥感信号的衰减而大幅降低。因此,直接观测仍是当今国际公认的获取台风结构特征的最佳途径。然而,我国至今尚未建立针对海上台风的直接观测体系,缺乏海上台风内核三维结构(特别是台风高空流出层、低空及海气边界层、云—水—冰相转化等微物理过程特征量)的直接观测资料,已成为我国提高对台风精细结构特征变化及其对台风路径和强度等的影响、云微物理过程及其对台风强度和降水影响的物理机制等关键科学问题认识的主要瓶颈,也制约了适用于我国近海台风数值模式中大气边界层及云微物理过程参数化方案的研发和改进。足够数量和精度的台风直接观测资料,是刻画台风边界层及云微物理过程的前提和基础,也是改善模式初始场的质量及模式预报精度的重要保障。加强目标台风的外场直接观测并据此研制和改进台风数值模式边界层及云微物理过程参数化方案,是当前进一步提高我国台风预报能力的最有效手段。

国家重点研发计划项目“近海台风立体协同观测科学试验(编号:2018YFC1506400)”拟利用近年来我国自主研发的无人机和平流层飞艇等新型观测平台,构建地海空天协同的近海台风探测系统,引入目标观测技术实施近海台风多平台协同的外场观测试验,获取6~8个近海台风的三维精细结构特征(含流出层、海气边界层和云微物理过程)的直接观测资料,并据此发展和改进适合我国近海台风数值模式的边界层及云微物理过程参数化方案,旨在进一步提高我国台风模式的预报性能。

## 2 国内外发展趋势

### 2.1 观测平台及观测试验

美国早在1943年便开创了飞机穿越台风的观

测试验,随后开展了台风的飞机下投探空观测,并建立了“国家飓风中心(National Hurricane Center, NHC)和飓风研究中心(Hurricane Research Division, HRD)提出业务和科研目标、军方执行飞行任务”的业务体系,先后使用了WB-50, WB-47, DC-6, WP-3D(P-3), WC-130J, G-IV和ER-2等型号的飞机,获得的风、温、压、湿廓线等探测资料,对于台风内部中尺度结构特征的认识、台风的业务定位和定强及路径和强度预报能力的提高等均发挥了重要作用,如Burpee等<sup>[9]</sup>的评估工作表明,机载下投探空获得的对流层中低层资料将美国“全球预报模式GFS”和“地球物理流体动力学实验室(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, GFDL)”等数值模式的12~60 h飓风路径的预报误差减少了16%~30%;Chou等<sup>[10]</sup>则发现,机载下投探空资料使得60%的台风个例1~5天的路径预报误差平均减小10%~20%。然而,随着“冷战”结束及经费等原因,美国自1987年停止了对西北太平洋区域的台风“飞机探测”作业,但仍在大西洋及东北太平洋海域开展“耦合边界层海气传输飓风试验(Coupled Boundary layer Air-Sea Transfer-Hurricane, CBLAST-Hurricane)”等一系列与台风有关的研究计划<sup>[11]</sup>。

ESCAP/WMO台风委员会曾在1982—1983年组织实施“台风业务试验(Typhoo Operational Experiment, TOPEX)”,亚太地区的中国(大陆)、中国香港、日本、马来西亚、菲律宾、韩国、泰国和越南参加了该试验。此后,在1990年ESCAP/WMO台风委员会的“台风转向和异常运动的特别试验(Special Experiment Concerning Typhoon Recurvature and Unusual Motion, SPECTRUM)”期间,日本联合美国在西北太平洋实施了台风的飞机观测,中国台湾地区自2003年实施了为期10年的“侵台台风之飞机侦察及投落送观测实验(Dropwindsonde Observation for Typhoon Surveillance near the TAIwan Region, DOTSTAR)”,所获资料被同化到数值模式后均能较明显地改进台风路径的预报能力。然而, SPECTRUM针对的是台风路径且仅获取了8个台风的观测资料, DOTSTAR仅对中国台湾附近(以东)的台风且飞机只在台风核心区域的外围飞,未能获取台风内部,特别是台风眼和云墙区域的观测资料,因此对台风精细结构的刻画及台风强度预报的贡献仍较为有限。

在西北太平洋区域, WMO于2008年组织实施了“台风形成和强度及结构变化(TCS-08)”和“高影

响天气预报(T-PARC)”科学试验,于2010年实施“海洋对台风的响应(TCS-10/ITOP)”科学试验,均取得成功,特别是机载下投探空资料对提高台风模式的预报能力的作用进一步得到验证。此外, DOTSTAR 试验还发现,不同下投观测点资料的贡献不尽相同,即存在显著的观测敏感区和敏感要素,且该敏感区随时间而变(有时变化还较快),而飞机观测通常因来不及响应而无法开展基于敏感性的目标观测。Langland<sup>[12]</sup>发现,改善敏感区内的分析场能够显著改进模式预报能力。目标观测使 NCEP-GFS 和 JMA-GSM 2 个全球模式 72 h 内的台风路径预报误差平均减小 14% 和 19%<sup>[13]</sup>。

我国(大陆)的台风外场观测试验,始于1982年参与的国际“台风业务试验(TOPEX)”,并在参加 SPECTRUM 期间实施了“台风现场科学业务试验(Campaign of Typhoon Experiment, CATEX)”,除卫星和雷达外,仅有常规的地面气象和探空观测投入试验。2002年,采用“拖车”将装有三维风温仪的测风杆安装到预先位置(广东阳江)对0214号台风“黄峰”进行了我国(大陆)“守株待兔”式的移动观测。2007年前后,中国气象局上海台风研究所和广州热带海洋气象研究所先后组装了装有风廓线和微波辐射计等设备的移动观测车,并对登陆华东和华南的台风进行“追风”观测至今,为“登陆台风异常变化机理研究”等国家重点基础研究发展计划(“973”计划)和台风领域的公益性行业(气象)专项等的研究提供了大量的第一手直接观测资料,但仍局限于登陆及陆上台风。2009年,我国进行了首次飞机下投探测台风的试验,但仅抵达了台风0908号“莫拉克”和0907号“天鹅”台风间的边缘地带。2014年,中国气象局上海台风研究所依托相关“973”计划项目及公益性行业专项,并联合香港天文台(Hong Kong Observatory, HKO)组织实施 ESCAP/WMO 台风委员会的国际合作项目“亚太近海及登陆台风强度变化科学试验(Experiment on Typhoon Intensity Change in Coastal Area, EXOTICCA)”,除常规的卫星、雷达和地面及探空观测外,还使用了风廓线、微波辐射计、雨滴谱、梯度塔、浮标阵、移动观测车和有人飞机等观测设备,研发的基于火箭/导弹的下投探空系统也首次应用于台风观测并获成功,为开展基于敏感性的目标观测奠定了基础,但由于经费等原因试验次数仍十分有限<sup>[14]</sup>。

随着无人机等的日趋成熟,各国竞相发展基于无人机平台的台风观测技术。继美国和澳大利亚

等西方国家于20世纪90年代试验使用小型“气象无人机(Aerosonde)”后,美国首次使用长航时高空无人侦察机“全球鹰(Global Hawk)”对2010年的5个飓风进行了飞行探测试验并获得成功,开辟了台风高层流出层直接观测的新纪元。我国(大陆和台湾)也于2008年和2014年进行过无人机的台风探测试验,但使用的是低空无人机仅能在台风低层和外围作业,且续航时间和航程均有限<sup>[15]</sup>。

近年来,美国、加拿大、日本、韩国、英国、德国和以色列等国正在积极开展平流层飞艇和太阳能滑浪无人艇的相关研究,其中美国西南研究所的飞艇已在2005—2010年完成了3次18 km高度的短时(<5 h)飞行测试,谷歌的飞艇最长飞行时间已经超过半年,太阳能滑浪无人艇在海上作业时也曾遭遇2012年的飓风“以撒”。然而,美国和以色列等国飞艇主要以军事情报的监视和侦察为目的,德国和日本等的飞艇主要以民用通信为目的,且截至目前,还没有气象(台风)探测的实用艇。我国也于2017年进行了平流层飞艇(“天恒一号”)和太阳能半潜浮滑浪无人艇的靶试和海试,并获成功。

## 2.2 台风数值预报模式及关键技术

数值预报的概念最早由Bjerknes在1904年提出,1922年Richardson进行了首次尝试但未获成功,直至1950年Charney发表了其利用二战后(1946年)问世的电子计算机对500 hPa北美的环流形势成功地做出了24 h预报。随后,世界各国竞相发展数值天气预报技术,包括区域模式和全球模式,也包括台风等特殊天气系统的专业模式。台风数值预报模式的发展始于20世纪60年代,当时的模式大多采用正压涡度方程模式和准地转平衡模式,并将台风视为“点涡”,其移动路径则主要受无辐散层(500 hPa)环境气流的引导<sup>[16]</sup>。20世纪70~80年代开始建立基于简单原始方程的台风数值预报模式,模式垂直分层大多只有3~5层,部分模式也不考虑湿过程,模式台风采用轴对称的“兰金涡旋(Rankine vortex)”结构,其移动主要受多层环境引导气流的引导。20世纪90年代起研制的台风数值预报模式大多采用复杂的原始方程模式,如美国基于中尺度数值天气预报模式(MM4, MM5 和 WRF 等)发展起来的飓风模式(Hurricane-WRF, HWRF)。这一时期的台风数值预报模式,其模式台风多采用具有非对称结构的三维立体涡旋,其移动也不再仅受环境气流引导,而是环境场、台风涡旋自身结构及下垫面三者复杂相互作用的结果,模式

预报的性能在很大程度上取决于初始台风涡旋结构的刻画及积云及边界层等模式物理过程的描述和参数化方案。

我国台风数值预报的发展与国外大致同步,中国气象局上海台风研究所、广东热带海洋气象研究所和国家气象中心(中央气象台)等机构分别建立了针对东海、南海和西北太平洋区域台风的数值预报模式系统,国家气象中心还在欧洲中心谱模式的基础上先后建立了全球台风模式(T213/T639-TCM)系统。2006年前后,依托我国自主研发的GRAPES模式,先后建立了区域和全球的GRAPES-TCM/TYM模式系统<sup>[17]</sup>。

此外,为提高数值模式对台风强度的预报性能,美国国家海洋与大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)于2010年启动了“飓风预报能力提升计划(Hurricane Forecast Improvement Program, HFIP)”,旨在通过获取台风边界层和高层流出层的观测资料、发展海—气耦合的台风模式及其资料同化系统,将台风预报的时效延长至7天、路径和强度预报性能提高50%。美国众多高校和科研院所参加了HFIP计划,已取得显著进展,并提前1年实现计划的5年目标<sup>[18]</sup>。中国气象局上海台风研究所依托所主持的“973”计划项目“台风登陆前后异常变化及机理研究(编号:2009CB421500)”,自2009年在GRAPES\_TCM的基础上发展建立了海—气耦合的台风模式(GRAPES\_TCM+ECOM),批量对比试验表明耦合模式是提高台风预报能力的有效手段之一<sup>[19]</sup>;为更好地刻画台风条件下的海气相互作用及其对台风(强度)预报的影响,依托与自然资源部第二海洋研究所(原国家海洋局第二海洋研究所)等单位联合实施的“973”计划项目“上层海洋对台风的响应和调制机理研究(编号:2013CB430300)”,自2013年研发了海—气—浪耦合的台风预报系统(GRAPES\_TCM + ECOM + WW3),表现出良好的台风(强度)预报性能,已投入业务试用。

数值预报的数学本质是求解初值问题,其精度主要取决于初值的准确性和模式物理过程的完备性。初始化是基于实测资料并通过大气动力和热力约束形成模式初始场的过程,台风模式的初始化还包括台风初始位置、强度和结构特征等的构造,早期多根据少量观测资料和经验构造台风Bogus涡旋,并先后经历理想的Rankine涡旋、Bogus涡旋与资料同化相结合(Bogus Data Assimilation,

BDA)、基于卫星资料及边界层和模式动热力约束相结合的涡旋初始化技术等发展阶段<sup>[20-24]</sup>。限于观测及计算条件,早期台风数值模式的分辨率大都比较粗(水平格距约100 km量级),许多中小尺度的物理过程均需进行参数化处理(用网格尺度的模式物理变量通过统计关系进行近似表达,统计关系中的参数多依据有限的观测资料拟合确定)。由于积云对流过程对台风发生发展的重要性,其参数化方案的设计和改进是早期台风模式物理过程参数化工作的主要内容<sup>[25,26]</sup>。随着模式分辨率的不断提高(目前大多数机构的台风业务模式已达10 km量级),模式已能对积云对流过程进行显式描述和计算,关于云的参数化工作更多集中在台风暖云生消的微物理过程。此外,随着近年来关于海洋飞沫及强风条件下的粗糙度(拖曳系统)等边界层物理过程对台风活动影响的重要性逐渐被认识,其参数化问题也渐成台风模式物理过程参数化工作的前沿<sup>[27-29]</sup>。

### 3 拟解决的关键科学技术问题及主要研究内容

#### 3.1 关键科学技术问题

对台风下部边界层、上部流出层以及云微物理精细结构认识的不足,制约了台风模式涡旋初始化及边界层和云微物理过程参数化等关键技术的研制和改进,因此制约了台风预报能力的进一步提升。

针对这一现状,项目拟解决的关键科学问题是:台风上部流出层、下部边界层以及云微物理精细结构是如何演变的?这些精细结构的演变如何影响台风活动?台风预报最为敏感的结构要素和敏感区有哪些?

为有效获取敏感区和敏感要素的外场直接观测资料,探明上述科学问题并将所获外场直接观测资料示范应用于台风模式的改进,拟解决的关键技术是:如何利用卫星、高低空无人飞行器、雷达及地面观测等多平台,进行台风结构协同观测,并在狂风暴雨极端条件下获取高质量观测数据,特别是高空无人机和平流层飞艇等新型观测平台及其载荷在台风探测中的适应性改进及确定优先观测的目标区域和要素;如何控制外场直接观测资料的质量,并利用业务及科学试验数据,揭示台风海—气相互作用等边界层动热力过程和云微物理精细结构演变规律,据此改进台风数值模式的边界层及云

微物理过程参数化方案,提升预报能力。

### 3.2 主要研究内容

为实现预期目标,项目重点进行多平台载荷适应性改进和协同观测试验、依托协同观测试验资料的台风边界层和云微物理过程研究及模式参数化方案改进,并据此改进台风业务模式的性能。具体包括 6 个方面的研究内容,并设置相应的研究课题(图 1):

(1)新型观测平台的台风探测载荷适应性改进。针对台风特殊观测环境,开展包括平流层飞艇、高低空无人机、海上半潜浮无人艇、波浪滑翔器等多种新型观测平台在台风探测中的载荷适应性改进和探测模式优化调试研究,参与多平台协同的台风目标观测试验,联合新型观测设备研发机构发展探测新资料的质控及交叉检验算法,并据此评估和控制新型观测设备的台风探测资料质量。

(2)台风目标观测研究。引入目标观测理念,采用条件非线性最优扰动(Conditional Nonlinear Optimal Perturbation, CNOP)和集合预报等相结合的办法,开展基于台风预报的目标观测研究,探讨确定台风预报的目标(敏感)观测要素和观测区域,参与多平台协同的台风目标观测试验,并利用所获资料对目标观测敏感区域和敏感要素在提高台风预报技巧中的有效性进行检验和评估。

(3)多平台协同的台风目标观测试验。依托现有气象业务观测网和台风外场观测试验基地,集成新型观测平台,构建我国近海台风地海空天一

体化的多平台协同观测系统,研究设计协同观测综合方案和作业系统,组织实施目标台风的协同观测,收集目标台风外场观测资料及试验区域周边雷达和气象站等业务观测站网的常规及加密(台风登陆前后)观测资料,控制并交叉检验外场观测资料的质量,建立目标台风外场观测资料库及共享平台。

(4)云和降水观测资料的分析和应用研究。发展多平台协同的云和降水观测资料的分析同化系统,形成协同观测期内目标台风精细结构数据集。利用目标台风的云和降水观测资料,研究我国近海台风的微物理特征及其与动力过程的耦合作用,对台风数值模式云微物理过程关键参数进行评估和改进。

(5)台风边界层物理过程及参数化方案研究。利用目标台风的协同观测资料,分析台风条件下的海—气通量传输机制、台风边界层内超梯度强风及其对下垫面应力和湿对流等与台风路径和强度密切相关的物理过程的影响机理,研发适合强风条件下的海面空气动力粗糙度算法(即空气动力粗糙度与风速和波参数的关系),发展适用于台风模式的海面通量等边界层参数化新方案。

(6)台风业务模式及示范应用。利用改进的边界层及云微物理过程参数化方案,结合科学试验获取的观测资料,进行典型台风个例数值模拟和批量业务化试验,搭建业务化应用平台并进行示范和推广。

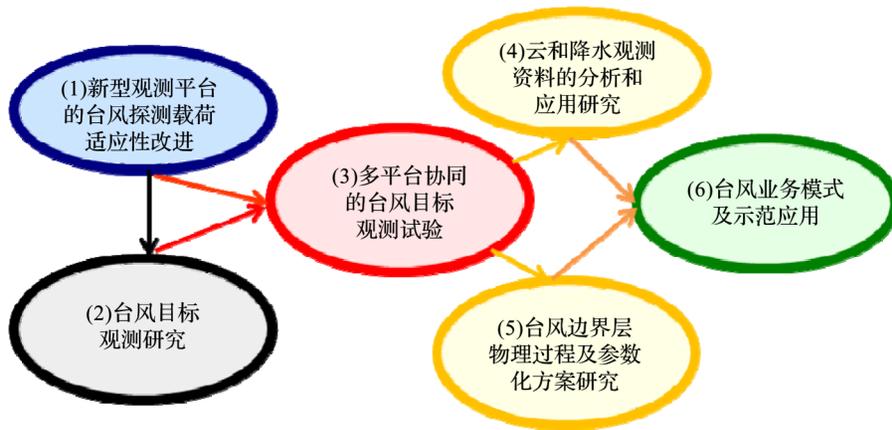


图 1 台风多平台协同观测科学试验及其示范应用研究任务示意图

Fig 1 The schematic diagram of typhoon multi-platform collaborative campaign and demonstration research task

### 3.3 项目各课题间的内在关联

项目的核心内容是实施我国近海台风地—海—空—天多平台协同的外场观测科学试验,并利用

外场观测资料改进我国台风模式的边界层和云微物理过程参数化方案,据此提高我国台风模式的预报性能,整个项目围绕第三课题为核心展开。

为保障这一外场观测科学试验的实施,首先要构建具备在台风条件下进行探测的地—海—空一天多观测平台,其次要具备使用多平台对目标台风进行针对性的协同探测能力。这2项任务分别由第一和第二课题完成。第一课题的重点是对近年来我国自主研究的平流层飞艇、无人机和海上半潜浮无人艇等新型观测平台,进行台风特殊条件下的探测模式的调式和载荷的适应性改进。第二课题重点发展目标台风的观测敏感区域和敏感要素的识别技术。第三课题在第一课题的基础上完成我国近海台风地海空天多平台观测系统的构建,在第一和第二课题的基础上,完成多平台协同的目标观测方案设计,并结合第四和第五课题研究对观测资料的需求及实际外场观测条件,实施近海目标台风的外场协同观测,获取目标台风流出层、边界层及云微物理参量等精细结构观测资料,并与第一课题联合进行外场观测资料的质量控制。

台风模式边界层和云微物理过程参数化方案的改进及其对台风路径、强度和降水的预报效果是本项目实施外场观测科学试验的重要目的,为此,项目将充分利用第三课题组织实施并获取的目标台风外场观测资料,进行适合我国近海台风的模式边界层和云微物理过程参数化方案改进,并在我国台风业务模式中进行示范应用。参数化方案的改进分别由第四和第五课题完成,示范应用由第六课题完成。第四课题的重点是对目标台风的云和降水观测资料进行分析,据此对台风数值模式的云微物理过程关键参数进行评估和改进。第五课题重点分析目标台风的海—气相互作用等边界层特征,据此发展适合我国近海台风的模式边界层参数化方案。第六课题重点是将第四和第五课题发展的云微物理过程及边界层参数化方案,通过对目标台风的典型个例模拟及批量预报试验检验其效果,检验效果将反馈给各课题,以评估和优化目标台风的多平台协同观测技术。

## 4 结 语

我国的台风直接观测能力长期以来远不及美国和日本等发达国家,特别是海上台风的直接观测,至今对台风高空流出层、低空边界层(海—气相互作用)及台风内核区的水汽相变等云微物理过程参量的直接观测仍几乎空白,成为制约我国台风科学发展、业务能力和国际影响力等进一步提高的主要瓶颈。随着我国制造业的迅猛发展,高空长航时

无人机的性能已基本达到台风高层流出层观测的要求(飞机已具备穿越或飞至台风顶以上的能力,因此可确保飞机的安全),能在平流层长时间滞留的飞艇(在台风顶以上,可确保安全)、能在海上半潜及随波浪滑翔的无人探测器等的研发均进入测试阶段(初步的海试表明可抗15 m以上巨浪的恶劣海况影响),并依据2015年火箭弹(导弹)下投探测系统的成功试验,下投至台风内核狂风暴雨中的气象探测设备均能正常工作且保持较好的探测质量。加之,2007年起投入准业务使用的移动观测车、布设在沿海和台风外场观测基地的梯度观测塔、风廓线仪、雨滴谱及卫星、雷达等常规观测网,为我国构建国际一流的地—海—空一体化的台风协同探测平台创造了有利条件,这也正是国家重点研发计划项目“近海台风立体协同观测科学试验”的实施基础。

项目将构建我国近海台风外场观测系统,实施并获取目标台风的外场直接观测资料,并据此开展边界层过程对台风路径和强度、云微物理过程对台风强度和降水等的影响机理研究,进而发展和改进台风模式边界层和云微物理过程参数化方案,应用于业务台风数值模式,提高台风路径和强度预报精度5%、台风降水预报精度3%~5%,有望在基于火箭弹(导弹)下投探空和平流层无人飞艇探测技术、基于敏感性的台风目标观测技术等方面领先国际,并切实推进我国台风外场观测业务和边界层及云微物理过程参数化等台风数值预报模式关键技术的进一步发展,增强我国台风领域的国际话语权和参与国际台风事务治理的能力。

通过项目的研究,还将建立“科研业务预报需求牵引、敏感性目标观测区域和要素的实时识别、多观测平台遴选组合和协同外场观测、数值模式实时资料同化及预报和改进”的台风外场观测科学试验作业流程,这将推动我国台风外场观测业务的建立并填补我国台风外场观测业务的空白。

此外,随着美国“亚太再平衡”战略的实施和我国国家利益向海洋纵深拓展,美国军事力量和我国海空军在西太平洋重叠区域越来越大,使得台风移动路径和影响区的气象情报收集以及海洋台风防灾减灾的需求显得越来越重要、越来越急迫。美国近20年来一直在致力于利用机载气象设备的研发和试验,我国还处于空白状态,加强海洋战略的需求决定了我国必须独立自主地研发系列机载气象观测设备,有灾时服务于海洋灾害性天气探测;战

略需要时,可贡献于我国海空军的军事行动。

### 参考文献(References):

- [1] Lei Xiaotu, Chen Peiyan, Yang Yuhua, *et al.* Characters and objective assessment of disasters caused by typhoons in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(5): 875-883. [雷小途, 陈佩燕, 杨玉华, 等. 中国台风灾情特征及其灾害客观评估方法[J]. 气象学报, 2009, 67(5): 875-883.]
- [2] Lei X T, Zhou X. Summary of retired typhoons in the Western North Pacific ocean [J]. *Tropical Cyclone Research and Review*, 2010, 1(1): 23-32.
- [3] Liu J P, Yu J X. The chronicle of events of the ESCAP/WMO Typhoon Committee from 1968 to 2017 [J]. *Tropical Cyclone Research and Review*, 2018, 7(1): 65-76.
- [4] Wu Ying, Chen Peiyan, Lei Xiaotu. 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. [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.]
- [5] Wang Qian, Qian Chuanhai, Zhang Ling. The characteristics and impact of typhoon activities over western North Pacific and the South China Sea [J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2018, 38(2): 1-11. [王婧, 钱传海, 张玲. 2017年西北太平洋和南海台风活动概述[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(2): 1-11.]
- [6] Chen G M, Zhang X P, Chen P Y, *et al.* Performance of tropical cyclone forecast in Western North Pacific in 2016 [J]. *Tropical Cyclone Research and Review*, 2017, 6(1/2): 13-25.
- [7] Reynolds C A, Peng M S, Chen J H. Recurring tropical cyclones: Singular vector sensitivity and downstream impacts [J]. *Monthly Weather Review*, 2009, 137(4): 1 320-1 337.
- [8] Emanuel K, Zhang F Q. On the predictability and error sources of tropical cyclone intensity forecasts [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73(9): 3 739-3 747.
- [9] Burpee R W, Franklin J L, Lord S J, *et al.* The impact of omega dropwindsondes on operational hurricane track forecast models [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(5): 925-934.
- [10] 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): 1 728-1 743.
- [11] Qian Chuanhai, Li Zechun, Zhang Fuqing, *et al.* Review on international aircraft reconnaissance of tropical cyclones [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2012, 2(6): 6-16. [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.]
- [12] Langland R H. Observation impact during the North Atlantic TRex-2003 [J]. *Monthly Weather Review*, 2005, 133(8): 2 297-2 309.
- [13] Wu C C, Chou K H, Lin P H, *et al.* The impact of dropwindsonde data on typhoon track forecasts in DOTSTAR [J]. *Weather and Forecasting*, 2007, 22(6): 1 157-1 176.
- [14] Lei Xiaotu, Lei Ming, Zhao Bingke, *et al.* New technology and experiment of rocket dropsondes for typhoon observation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(32): 3 789-3 796. [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): 3 789-3 796.]
- [15] Lei Xiaotu. Progress of unmanned aerial vehicles and their application to detection of tropical cyclone [J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(2): 276-283. [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.]
- [16] Chen Lianshou, Ding Yihui. Introduction to Typhoon over the Western Pacific Ocean [M]. Beijing: Science Press, 1979. [陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979.]
- [17] Ma Leiming. Research progress on China typhoon numerical prediction models and associated major techniques [J]. *Progress in Geophysics*, 2014, 29(3): 1 013-1 022. [马雷鸣. 国内台风数值预报模式及其关键技术研究进展[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(3): 1 013-1 022.]
- [18] Rogers R, Aberson S, Aksoy A, *et al.* NOAA's hurricane intensity forecasting experiment: A progress report [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(6): 859-882.
- [19] Duan Yihong. Monitoring and forecasting of finescale structure and impact assessment of landfalling typhoons [J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(8): 847-854. [端义宏. 登陆台风精细结构的观测、预报与影响评估[J]. 地球科学进展, 2015, 30(8): 847-854.]
- [20] Zou X, Xiao Q. Studies on the initialization and simulation of a mature hurricane using a variational bogus data assimilation scheme [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2000, 57: 836-860.
- [21] Liang X D, Wang B, Chan J C L, *et al.* Tropical cyclone forecasting with model-constrained 3D-Var I: Description [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007, 133(622): 147.
- [22] Zhang J A, Rogers R F, Nolan D S, *et al.* On the characteristic height scales of the hurricane boundary layer [J]. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(2): 522-535.
- [23] Davolio S, Buzzi A. A nudging scheme for the assimilation of precipitation data into a mesoscale model [J]. *Weather and Forecasting*, 2004, 19(2): 855-871.
- [24] Orlandi E, Fierli F, Davolio S, *et al.* A nudging scheme to assimilate satellite brightness temperature in a meteorological model: Impact on representation of African mesoscale convective systems [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2010, 136(2): 462-474.
- [25] Kain J S, Fritsch J M. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme: The representation of cumulus convection in numerical models [J]. *Meteorological Monographs*, 1993, 46: 165-170.
- [26] Yu X, Lee T Y. Role of convective parameterization in simulations of a convection band at grey-zone resolutions [J]. *Tellus*,

- 2010,62(5):617-632.
- [27] Moon I J, Ginis I, Hara T. Effect of surface waves on air-sea momentum exchange. Part II: Behavior of drag coefficient under tropical cyclones [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2004,61:2 334-2 348.
- [28] Moon I J, Ginis I, Hara T, *et al.* Physics-based parameteriza-
- tion of air-sea momentum flux at high wind speeds and its impact on hurricane intensity predictions [J]. *Monthly Weather Review*, 2007, 135:2 869-2 878.
- [29] Ma L M. Research progress on China typhoon numerical prediction models and associated major techniques [J]. *Progress in Geophysics*, 2014,29(3):1 013-1 022.

## Experiment on Coordinated Observation of Offshore Typhoon in China\*

Lei Xiaotu<sup>1,2</sup>, Zhang Xuefen<sup>3</sup>, Duan Wansuo<sup>4</sup>, Li Hong<sup>1</sup>, Gao Zhiqiu<sup>5</sup>,  
Qian Chuanhai<sup>6</sup>, Zhao Bingke<sup>1</sup>, Tang Jie<sup>1</sup>

(1. Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China; 2. Shanghai Meteorological Service, Shanghai 200030, China; 3. Meteorological Observation Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 4. The Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 5. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 6. National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The lack of sufficient direct observation data of typhoon fine structure is the main bottleneck that restricts the further development of typhoon discipline and forecasting. This paper briefly introduced the basic information of the National Key R&D Program of China, entitled "Experiment on Coordinated Observation of Offshore Typhoon in China", which started in early 2019. Firstly, the importance and necessity of the program around the national needs on typhoon-related disaster reduction and prevention were explained. Then, the coordinated observation difficulties and frontiers in the current typhoon discipline situation from the development and improvement of the physical mechanism and key forecasting technologies were shown. The overview of the direct observation instrument and platform, the field campaign and the parameterization techniques related to physical process in typhoon numerical modeling was provided. Finally, the key scientific and technical issues and main research contents of the program were given.

**Key words:** Typhoon; Field campaign; Coordinated observation; Experiment.

\* **Foundation item:** Project supported by the National Key Research and Development Program of China "Experiment on coordinated observation of offshore typhoon in China" (No.2018YFC1506400).

\* **First author:** Lei Xiaotu (1968-), male, Fengxin County, Jiangxi Province, Professor. Research areas include typhoon observation and mechanism. **E-mail:** leixt@typhoon.org.cn