

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. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2022.053. [ZHAO Bingke, TANG Jie, LEI Xiaotu, 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. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2022.053.]

近海台风立体协同观测科学试验进展*

赵兵科¹, 汤杰¹, 雷小途^{2*}, 张雪芬³, 段晚锁⁴, 李泓¹,
高志球⁵, 钱传海⁶, 鲍旭炜¹, 骆婧瑶¹, 张帅¹

(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. 国家气象中心, 北京 100081)

摘要:国家重点研发计划项目“近海台风立体协同观测科学试验”(2018 YFC1506400)针对防台减灾国家需要和缺乏台风直接探测资料这一制约我国台风学科发展和业务预报能力提升的关键瓶颈而立项, 经过3年(2018年12月至2021年12月)的研究, 全面完成了项目的目标任务。采用目标观测指导外场观测—基于观测资料的诊断和理论分析—数值模拟及观测资料验证—观测研究成果业务应用的技术路线, 首次对近年来我国自主研发的新设备高空无人机及平流层飞艇等开展了台风探测适应性改造, 完成近海台风“地—海—空—天”多基平台立体协同观测方案设计, 组织实施了16个近海目标台风的多基平台协同的外场观测试验, 基于多源直接观测资料的分析对台风模式物理过程参数化方案进行了改进, 并应用于国家级的台风业务模式, 效果显著, 实现台风业务模式的路径和强度预报精度提高5%、降水预报精度提高3%~5%的预期目标。构建的台风多平台观测体系及协同观测方案, 将为我国近海台风直接观测的业务建设奠定基础, 并有望实现由目前的“跟跑”向“并跑”和部分“领跑”迈进。

关键词:台风; 多平台协同的外场观测试验; 台风业务模式

中图分类号: P444 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8166(2022)08-0771-15

1 引言

我国年均登陆台风7~9个, 是全球台风灾害最严重的国家之一。提高台风预报的精度, 特别是近海台风的数值模式预报精度, 是当前减轻台风灾害的重要途径之一, 有着显著的社会和经济效益。据统计, 对于我国登陆台风, 24小时路径预报每减小1 km的误差可减少直接经济损失约1亿元, 24小时强度预报误差每减小1 m/s可减少直接经济损失约4亿元^[1]。

基于卫星等的遥感观测, 对于具有狂风暴雨和厚实云层等特征的台风探测而言, 精度十分有限。因此, 利用飞机下投式探空和携带气象要素传感器等直接观测, 提高对台风活动特征及其变化机理的认识, 并在此基础上进一步改进台风模式物理过程参数化方案, 是国际上进一步改进台风数值预报能力的主流技术途径。目前我国仍未建立海上台风的直接观测业务体系, 缺乏用于台风机理研究的直接观测资料, 特别是“空基”和“海基”观测平台几乎

收稿日期: 2022-06-29; 修回日期: 2022-07-23.

* 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: 2018YFC1506400)资助。

作者简介: 赵兵科(1963-), 男, 陕西眉县人, 研究员, 主要从事台风外场观测研究. E-mail: zhaobk@typhoon.org.cn

* 通信作者: 雷小途(1968-), 男, 江西奉新人, 研究员, 主要从事台风观测及预报关键技术研究. E-mail: leixt@typhoon.org.cn

是空白,导致台风海—气边界层及云微物理过程的观测研究、参量特征和模式参数化方案研究举步维艰。这些成为制约我国台风学科发展和台风数值预报进一步改进的主要瓶颈。

2018年12月立项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(2018 YFC1506400)”,其核心内容是:实施我国近海台风“地—海—空—天”多基平台协同的外场观测科学试验,利用外场观测资料改进台风模式的边界层和云微物理过程参数化方案,应用于我国台风业务模式^[2]。

经过3年的研究,项目完成了平流层飞艇及多款(高空、中空、低空)无人机等我国近年来自主研发平台及下投探空等多种载荷的台风探测适应性改装,并据此依托现有气象业务观测网和台风外场观测试验基地构建了我国近海台风立体观测的多基平台协同体系;首次在台风外场观测研究中引入目标观测理念,针对目标台风的模式预报,研究对预报敏感的要害和区域的识别技术,并据此设计了基于敏感区识别的台风多平台协同目标观测方案,指导组织实施了16个目标台风的外场观测(含7个目标台风的多基平台协同观测)试验并成功获取了第一手观测资料,建立了试验台风资料库对外开展共享,其中超过保密期的数据通过中国气象局热带气旋资料中心(<https://tcdata.typhoon.org.cn/>)向公众开放,保密期内的数据通过内网向项目组成员或其他内部人员分级分权限开放,其他特殊情况可联络项目组数据负责人通过离线联系方式进行获取(提供电子邮件传输和硬盘拷贝等);利用外场观测资料对台风数值模式的边界层和云微物理过程参数化方案进行了改进,并应用于国家气象中心的台风业务模式(CMA_TYM),对2019—2021年的台风批量试验和典型个例比对分析结果表明:模式24~120 h台风路径和强度预报精度的提高幅度可达5.16%和16.0%,各级台风降水的TS(Threat Score)评分也有明显提高,其中大雨提高3.1%~3.8%、暴雨提高6.2%~15.4%、大暴雨提高3.2%~24.4%。此外,还搭建了项目成果业务应用的示范平台,并将项目相关产品直接嵌入国家气象中心的实时业务平台,为实时业务提供了重要参考。

2 多基平台的台风观测适应性改装

对近海和登陆台风进行全方位的立体观测,首先需要构建“地—海—空—天”一体化的立体观测

平台及载荷体系。当前,我国风云气象卫星(FY-4)具备对特定区域进行加密观测并提供时间分辨率为15 min的大气风温压湿廓线,是较理想的台风“天基”观测平台;“地基”观测平台除依托当前东南沿海地区较为稠密的常规业务气象观测站和雷达等设备外,还包括中国气象局上海台风研究所等装备的“追风观测车”,该车搭载了自动气象站、边界层廓线仪、激光雨滴谱和GPS(Global Positioning System)探空系统;相对而言,我国“海基”观测平台仅有浮标和海上石油平台可用,且数量有限;“空基”观测平台几乎空白。

鉴于此,遴选近年来我国自主研发的平流层飞艇、高一中—低空多款无人机以及火箭弹等作为“空基”观测平台,遴选海上半潜浮无人艇和波浪滑翔器等作为“海基”观测平台,完成了新型观测平台的台风观测适应性改造,实现边界层观测新增海上半潜浮无人艇、波浪滑翔器和中—低空无人机,高空观测新增高空无人机和平流层飞艇,廓线观测新增下投探空、机/艇载云雷达和微波辐射计等新平台及载荷的预期目标。

在此基础上,项目构建了我国近海台风立体观测的多基平台观测体系(图1)。其中:

(1)平流层飞艇:由北京航空航天大学研制,其设计飞行高度为18~20 km、驻留飞行12 h、载荷功率200 W、载荷重量60 kg。为了搭载更多的探测设备并增加驻留平流层的飞行时间,项目对飞艇的载荷舱(吊舱)环境控制系统和飞行控制系统进行了改造,主要包括:优化艇载接收天线(扩大接收范围)及全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)掩星大气探测载荷舱(掩星接收设备布设在舱内而天线挂在舱外)、下投式北斗-GPS探空仪采用国产“春分一号”定位模块、采用数据通过卫星通信传输及太阳能供电等,还设计了一路28 V电源接口和专门的挂载架以方便载荷的搭载等,改装后的飞艇能搭载下投探空系统、平流层环境温度探测系统和GNSS掩星探测系统3类载荷^[3]。

(2)高空无人机:选用的是中国航空工业集团有限公司成都飞机设计研究所自主研发的“翼龙-10”高空无人机,其设计最大起飞重量超3 200 kg(任务载荷400 kg)、巡航高度12 km、航时8 h以上。项目主要对其进行了装载下投探空系统、毫米波测云雷达、太赫兹冰云探测仪和掩星/海反探测系统等改装。其中,下投探空系统(可满载30枚探空仪)为项



图 1 台风外场观测多基平台

Fig. 1 Multi-base platform for typhoon field observation

虚线框内的平台和设备由该项目实施添置

The platforms and equipments within the dotted line frame were added during the implementation of the project

目自主研发,将探空仪装在外挂的吊舱内(吊舱的安装架及整流罩等均采用利于透波的材料制成),通过点对点的无线通信方式激活并下投探空仪,天线置于吊舱下部以提高无线通信的可靠性及数据接收距离,电源开关采用与火箭探空同型号的成熟拨码开关以保证供电稳定^[4]。此外,在评估台风中紊流和向下垂直风速对无人机攻角和侧滑角等姿态参数影响、机载下投探空仪投放过程安全性和有效性等基础上对无人机机电、航电、结构、飞行管理及地面指控站等进行了台风观测的适应性改装。

(3)中空无人机:选用了2款中空无人机进行改装,其中四川滕盾科技有限公司研制的无人机(TW328),设计有效载荷1 000 kg、可在7 km以上的巡航高度飞行6 h以上、采用跑道机降;北京爱尔达(联合中国航天科技集团公司第九研究院)研制的无人机(FH92),设计有效载荷70 kg、可在8 km以下高度巡航6 h、采用车载带跑起飞和滑板滑翔降落。项目分别完成对TW328载荷(激光测风雷达和光电高清摄像机等)的搭载改装、对FH92机翼及载荷[下投探空仪、KPR(Airborne Ka-band Precipitation Cloud Radar)云雷达、GVR(G-band Water Vapor Radiometer)微波辐射计和高清摄像机等]的搭载改装,包括装载20枚下投探空仪系统设计、8个信道接收机设置及机载KPR云雷达和微波辐射计等载荷与无人机结构和软硬件接口的联调等。

(4)低空无人机:选用南京航空航天大学研制的鸿雁无人机(HY30A),设计有效载荷15 kg、可在3 km以下高度巡航4~6 h(达到考核要求的1~5 km巡航6 h的目标)。考虑到无人机相对较小、航时航速有限等特点,项目对无人机的起降方式进行了改造,即:将起飞方式从原车载带跑改为发射架弹射,保证了无人机可在海岸边起降作业(无需跑道或在1~2 km长的高速路起飞)。此外,还改装了深圳华讯方舟公司研制的弹簧刀式无人机(RF90)和杭州佐格公司的悬翼无人机,其中RF90能搭载风温压湿等基本气象要素传感器飞行约40 min;悬翼无人机则可用于台风外围近地层(1 km以下)基本气象要素的探测,可旋停于特定高度进行连续探测,航时约30 min。

(5)有人飞机及火箭弹/导弹:遴选2款火箭弹进行下投探空改造并作为“空基”的有益补充,包括:与中国航天科工集团常规弹头研究所联合研制的制导火箭弹(TFTC-400)和江西新余国科科技股份有限公司研制的人影火箭弹,前者可用于12 km以上的台风高空多枚下投探空观测(2015年已进行过台风实测验证),后者则可对水平距离50 km以内的指定区域进行下投探空观测(最大下投高度可达12 km)。此外,对南海台风的观测试验,还协调了香港天文台的有人飞机开展协同观测。

(6)半潜浮无人艇及波浪滑翔器:选用中国科

学院大气物理研究所研制的半潜浮无人艇“Marine Weather Observer (MWO-3)”和自然资源部第二海洋研究所装备的“波浪滑翔器 (Wave Glider, WG)”作为“海基”观测平台。其中, MWO-3 的水上部分搭载自动气象站、水下部分搭载海水温度和盐度探测器, 设计抗风 9 级、以 4 节航速连续航行 30 d 以上 (并能锚定在特定海域进行连续观测)^[5]; WG 则主要搭载自动气象站、海表温度仪和波浪仪。

3 基于观测敏感性的台风多平台协同观测方案及外场协同观测试验

3.1 台风目标观测敏感区的识别技术

台风数值模式的预报误差主要来源于初值误差和模式 (物理过程参数化) 误差的影响, 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不尽相同, 影响较大的区域和要素即为敏感区和敏感要素。将条件非线性最优扰动 (Conditional Nonlinear Optimal Perturbation, CNOP) 方法^[6]应用于数值模式 (如 Weather Research and Forecasting model, WRF) 以及谱投影梯度 (Spectral Projected Gradient 2, SPG2) 算法, 考虑初始扰动的非线性发展对台风路径和强度的影响, 进而建立了应对初始误差 (不确定性) 影响的“CNOP-目标台风观测敏感区和敏感要素识别技术”。进一步以台风强度模拟为着眼点, 将非线性强迫奇异向量 (Nonlinear Forcing Singular Vector, NFSV) 方法应用于数值模式 (如 WRF), 以考虑数值模式 (物理过程处理) 误差的影响, 进而建立了应对模式误差 (物理过程处理的不完备性) 影响的“NFSV-目标台风观测敏感区和敏感要素识别技术”。

在此基础上, 建立基于初始误差 (不确定性) 和

模式误差 (不完备性) 影响的台风目标观测敏感区和敏感要素的识别系统及流程 (图 2)。以初始误差 [图 2(a)] 为例, WRF 模式的预处理模块 (WRF Preprocessing System, WPS) 将再分析资料处理为模式区域的初边值; 通过向前积分, 得到控制预报 [$M(X_0)$]。与之对应, 在上述初值 (X_0) 上叠加 1 组初始扰动的初猜值 (δx_0), 再次向前积分, 得到叠加扰动后的预报 [$M(X_0 + \delta x_0)$]。根据选取的范数, 2 次预报的差别 (预报误差) 计算得到目标函数 [$J(\delta x_0)$]。目标函数对初始扰动的梯度可通过 WRF 模式的伴随模式计算得到, 其反映了预报误差对初始扰动的敏感性。上述求解梯度的过程将经过 SPG2 算法优化迭代, 直至获得梯度下降最快的方向 (预报误差对初始扰动更敏感)。基于下降最快的梯度方向, 判断上述计算过程是否满足提前预设的收敛条件。如果不收敛, 将根据上述梯度更新初始扰动 (δx_0), 并再次进入预报、计算目标函数和迭代求解梯度等循环过程, 直至收敛。经过上述优化、最终满足收敛条件的初始扰动 (δx_0^*) 即为条件非线性最优扰动 CNOP。求解模式误差的流程 [图 2(b)] 与初始误差相似, 区别在于扰动的初猜值 (f) 叠加在模式的倾向方程上。经过优化、最终满足收敛条件的模式倾向扰动 (f^*) 则为非线性强迫奇异向量 NFSV。

3.2 目标观测的有效性验证

利用 CNOP-和 NFSV-方法, 识别出对目标台风数值预报具有敏感影响 (含初值不确定性和模式不完备性的影响) 的观测区域及气象要素, 据此实施外场目标观测, 并进行敏感区及敏感要素目标观测资料的同化比对试验, 结果验证了目标观测及敏感性识别技术的有效性。如: 使用 CNOP-目标台风观测敏感区识别技术, 实时计算 2020 年的 4 个目标台

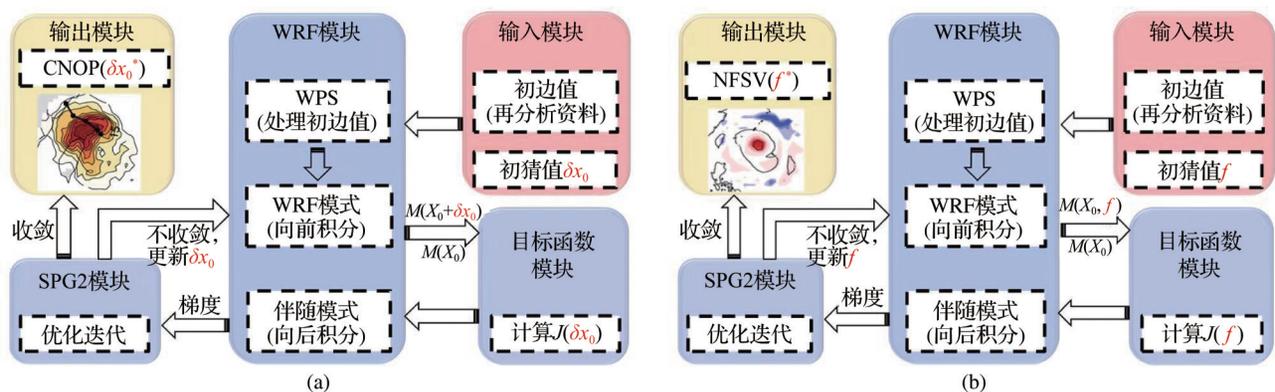


图 2 基于初始误差 (a) 和模式误差 (b) 影响的台风目标观测敏感区识别系统及流程示意图

Fig. 2 Flow chart of sensitive area identification system for typhoon target observation based on the influence of initial error (a) and model error (b)

风(海高斯、浪卡、沙德尔和艾莎尼)的观测敏感区,并据此与香港天文台联合实施并获取了相应区域的(有人)飞机下投探空目标观测资料,开展的模式同化比对结果表明:同化敏感区的下投探空资料后模式的台风路径、中心最低气压(P_{\min})、近中心最大风速(V_{\max})等的预报误差(相较于不同化)平均减小1.7%、13.6%和10.7%,显示了目标观测区下投探空观测的有效性,特别是对强度预报效果显著^[7]。

再如:将NFSV-目标台风观测敏感性识别技术,应用于目标台风的海表温度(Sea Surface Temperature, SST)观测敏感区识别,并验证该敏感区SST对目标台风强度数值预报的有效性。由SST对台风强度预报影响的NFSV-SST强迫扰动(基于WRF模式的12个历史台风个例模拟)分布可见:台风强度预报(特别是台风趋近峰值强度前)的SST敏感区主要在台风移动路径前方,且该敏感区域对台风个例的依赖性不显著。所以,台风强度预报关于外强迫SST的目标观测区域为台风趋近峰值强度前途经的海面。该结果可为无人艇外场观测试验提供理论指导^[8]。

分别对上述SST敏感区内/外、敏感区内台风不同发展阶段,进行了2组目标观测效果的模拟试验。结果表明:相对于非敏感区,敏感区内的SST观测对台风强度模拟的改善更大;相对于其他发展阶段,在台风(快速)增强且将达到成熟(最强)阶段进行SST的观测对台风强度模拟的改善更大。因此,在台风快速增强且将达到成熟的阶段在NFSV方法识别的敏感区内对海温进行加密观测,有望较大幅度地提高台风强度预报技巧。

此外,还验证了CNOP-在识别FY-4加密观测及对台风路径数值预报的有效性、NFSV-在识别台风内核及边界层气象要素对台风强度数值预报的有效性。并通过观测敏感区和敏感要素的识别,揭示出:台风强度预报的最敏感气象要素为位温,目标观测敏感区为台风内核区的大气中低层区域,边界层内台风大风区的气象要素(特别是水汽扰动)对台风快速增强过程的预报非常敏感^[9]。

不仅如此,该项目还提出了一种基于粒子滤波同化方法和Predictive Power指数且能够有效识别预报敏感要素和目标观测敏感区的新方法。该方法的优势是可以直接利用已有的集合预报资料来识别预报的敏感性,将该方法应用于台风路径预报,表明引导气流在台风路径中期预报中具有更重要的作用,而风场是需要优先进行目标观测的敏感

要素,台风外围区域是优先进行目标观测的区域,但具体方位则具有明显的个例依赖性^[10-11]。

3.3 基于目标观测敏感区的近海台风多平台协同观测试验方案

依托该项目构建的我国近海台风“地—海—空—天”一体化的立体协同观测平台及载荷体系,针对我国近海及登陆台风活动特征、台风目标观测的科学研究及防台减灾实时业务需求,结合项目关于目标台风的观测敏感区及敏感要素的识别,并充分考虑海域/空域等外场观测环境条件,开展了多平台的协同观测策略研究,完成了“近海台风多平台协同的立体目标观测方案/流程(推荐)”的设计和编制(图3)。

该推荐方案立足于海南(万宁等地)和浙闽交界(即浙南—闽北)区域,分别对南海和东海近海台风实施“地—海—空—天”多平台协同目标观测,重点观测时段为台风登陆(或影响)前24 h至登陆(或影响结束)后6 h之间。

按照该方案:台汛前,需要对可用的观测平台和设备进行检修维护以确保其良好性能,并组建好相应的观测团队;台汛期,根据实时台风的活动特征及其防台减灾业务需求和科学研究价值,会商并遴选确定拟实施外场观测的目标台风,启动外场观测程序并识别出目标观测的敏感区和敏感要素,据此选配适用的观测平台和设备,结合观测场地环境(如海域—空域申请)等条件,确定针对性的外场观测方案并组织实施,图3给出了完整方案/流程的示意图及对2016号台风“浪卡”实施多平台协同观测的“会商—启动—抵达—作业—小结”的时间节点;台汛后,对全年外场观测的总结及观测资料整编等。

3.4 目标台风外场协同观测

项目实施期间(2018年12月至2021年12月),对16个近海目标台风(路径如图4所示)实施了外场协同观测,包括针对7个目标台风(1907号“韦帕”、2003号“森拉克”、2007号“海高斯”、2014号“灿鸿”、2016号“浪卡”、2106号“烟花”和2113号“康森”)的多基平台协同观测以及针对9个目标台风(1905号“丹娜丝”、1909号“利奇马”、1911号“白鹿”、1913号“玲玲”、1918号“米娜”、1919号“海贝思”、2002号“鹦鹉”、2012号“白海豚”和2114号“灿都”)的单基平台观测。

3.4.1 “地—海—空—天”多基平台立体协同观测试验

2020年10月12~14日,利用“地基”的移动追风

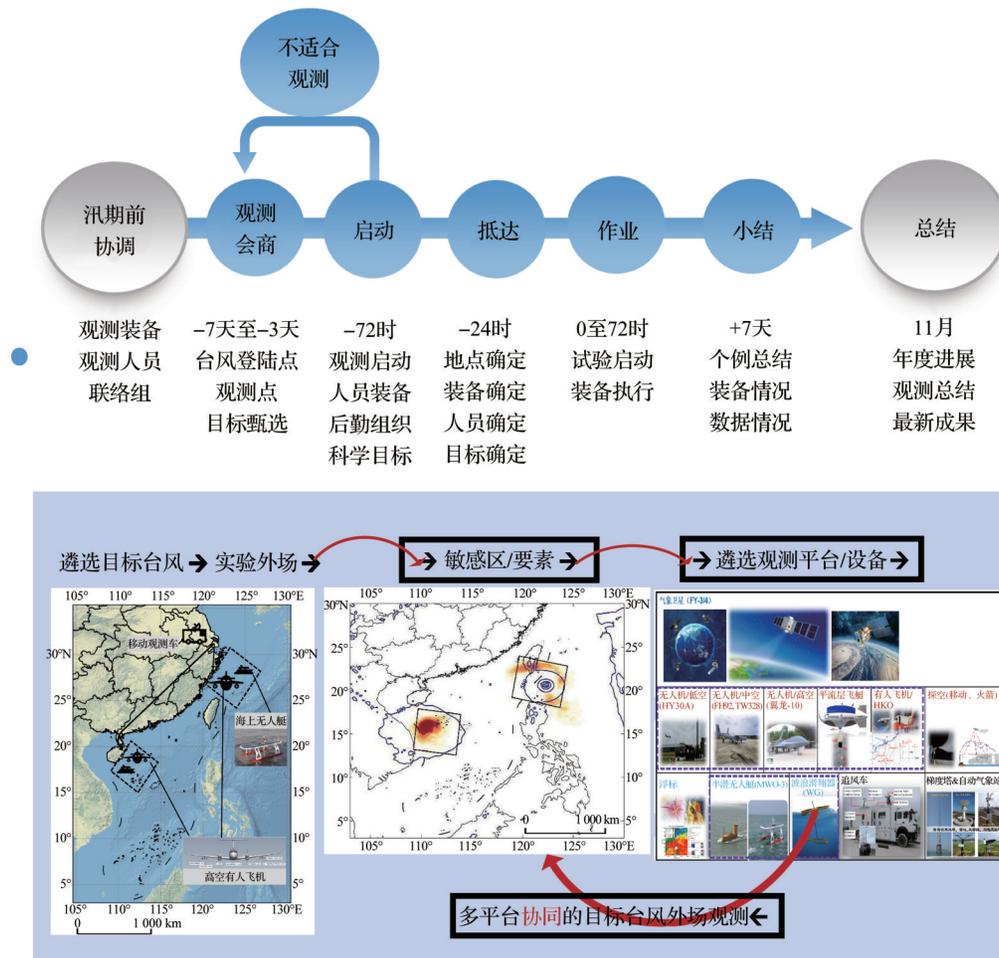


图3 近海台风多平台协同的立体目标观测推荐方案/流程(示意图)
Fig. 3 Recommended scheme/process of stereoscopic target observation of multi-platform collaboration for offshore typhoons (schematic diagram)

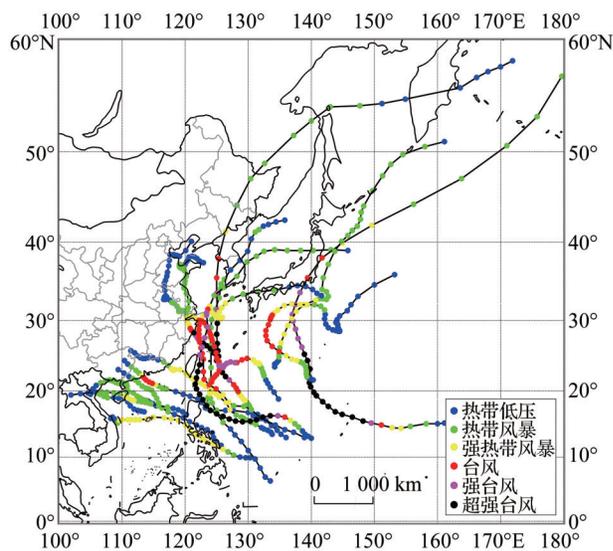


图4 2019—2021年实施的外场观测试验的
16个目标台风路径图

Fig. 4 Typhoon track map of 16 targets by the project's field observation experiments between 2019 and 2021

观测车,“海基”的海上半潜无人艇(MWO-3)和波浪滑翔器,“空基”的2款中空无人机(TW328和FH92)、3款低空无人机(HY30A、RF90和悬翼机)、火箭弹(江西新余国科科技有限公司研制)和“天基”的FY-4卫星等平台,对2016号台风“浪卡”实施了“地—海—空—天”多基平台的协同立体观测,并取得成功,图5是几款无人机的探测路径和台风移动路径。针对同一个台风,利用包括卫星、多款(有人和无人)飞机、火箭弹、海上半潜无人艇、波浪滑翔器和追风车等多观测平台进行“地—海—空—天”一体化的协同立体观测,这在我国尚属首次。试验的区域和时间、多平台及观测设备布点和运行路线等的确定,均结合了台风目标观测敏感区及敏感要素的识别结果(每隔6 h更新),是台风观测与预报模式需求协同互动的一次成功尝试。此外,试验期间,还首次成功开展了台风环流内的二次探空观测(探空仪下落时自带降落伞),并联合联合国亚洲及太平洋经济社会委员会

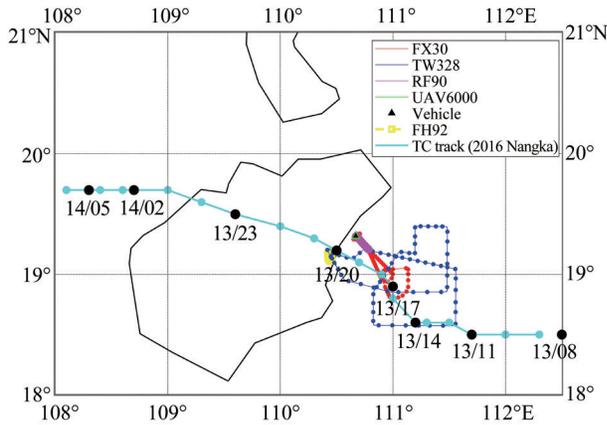


图 5 2016 号台风“浪卡”多平台协同观测无人机探测路线及台风路径

Fig. 5 The Unmanned Aerial Vehicle (UAV) detection routes for multi-platform coordinated observation and typhoon track of No. 2016 typhoon Nangka

(United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, UNESCAP)/世界气象组织 (World Meteorological Organization, WMO) 台风委员会的国际合作项目“亚太近海台风强度变化科学试验 (EXOTICCA-II)”协调香港天文台的有人飞机在毗邻区域开展了协同飞行观测和下投探空观测。

3.4.2 “海—空—天”多基平台协同观测试验

2020 年 8 月 2 日,项目利用高空无人机(改装的“翼龙-10”)[图 6(a)]、海上半潜无人艇 (MWO-3) [图 6(b)]、波浪滑翔器和卫星 (FY-4) 等“海—空—天”多平台,对 2003 号台风“森拉克”实施了协同观测试验^[12]。其中,无人机搭载了毫米波雷达等观测设备,并进行了我国首次高空无人机下投探空作业 (自 10 km 左右的高空成功下投探空仪 30 枚);无人艇和波浪滑翔器则成功获取了台风核心区域的

海—气边界层观测资料,其中海上半潜浮无人艇为我国首次进入台风核心区域。

3.4.3 “双基”平台协同观测试验

该项目组织实施了针对 2106 号台风“烟花”的“地—海”协同观测、针对 1907 号台风“韦帕”的“海—空”协同观测、针对 2014 号台风“灿鸿”的“海—天”协同观测、针对双台风“康森”(2113 号)和“灿都”(2114 号)的“空—天”协同观测。

(1)“烟花”的“地—海”协同观测:2021 年 7 月 23~26 日,利用“地基”观测平台(移动观测车、华东沿海的 3 个台风外场观测基地以及气象业务观测站网)和“海基”的波浪滑翔器,在浙江舟山沿海组织实施了登陆台风“烟花”(2106 号)的目标协同观测,使用的项目设备主要有 GPS 探空、边界层风廓线、激光雨滴谱、波浪滑翔器和车载自动气象站等。试验共获得和收集了车载雨滴谱和风廓线、GPS 探空(包括臭氧探空)以及台风观测基地的风廓线、涡动通量、微波辐射计、激光测风雷达、拉曼雷达、强风仪和波浪滑翔器等观测资料。

(2)“韦帕”的“海—空”协同观测:2019 年 7 月 31 日,联合 UNESCAP/WMO 台风委员会的国际合作项目 (EXOTICCA-II),与香港天文台协同,针对 1907 号台风“韦帕”实施了“海—空”联合观测试验,香港天文台的有人飞机进行了飞越台风的飞行观测及下投探空,该项目使用波浪滑翔器对台风过境前后(6 月 15 日至 8 月 30 日)的海表气象要素及波浪进行了较长时间的连续观测。

(3)“灿鸿”的“海—天”协同观测:2020 年 10 月 1~15 日,利用“海基”的波浪滑翔器和“天基”的 FY-4 卫星,对项目基于条件非线性最优扰动识别出的 2014 号台风“灿鸿”的目标观测敏感区,实施了 FY-4 卫星的加密观测,并对波浪及海表气象要素进行了



图 6 参与“森拉克”台风观测的高空无人机(a)和半潜无人艇 MWO-3(b)

Fig. 6 High-altitude UAV (a) and semi-submersible unmanned boat MWO-3 (b) used in the observation of typhoon Sinlaku

长时间的连续观测。

(4) 双台风“空一天”协同观测:2021年9月11~13日,对双台风“康森”(2113号)和“灿都”(2114号)实施了FY-4A卫星和飞机的协同观测。其中,香港天文台的有人飞机搭载了下投探空系统。针对香港天文台1天2次的可观测时段,提前24h计算了不同观测时段台风“康森”的目标观测敏感区,并连续3天进行实时更新,为飞机有的放矢的飞行观测提供了科学支撑。图7为依据CNOP-方法计算的双台风目标观测敏感区。同样“空一天”协同观测试验也针对2007号台风“海高斯”实施过。

3.4.4 单基平台目标观测

该项目除了利用CNOP-和NFSV-等识别出台风目标观测敏感区外,还利用单“基”观测平台(配合沿岸的台风外场观测基地及气象业务观测站网)进行了多个目标台风的观测,包括:2019年8月8~11日在浙江舟山沿岸,利用“地基”观测平台(追风观测车)对1909号超强台风“利奇马”实施了外场观测试验,使用了GPS探空、边界层风廓线仪、近地层激光测风雷达、激光雨滴谱和车载自动气象站等非常规观测设备。在8月9日10:00到10日22:00共约36h内共完成了12次GPS气球探空观测,并首次获取了台风环流内的臭氧垂直探空廓线。

利用波浪滑翔器于2019—2020年在南海“随波

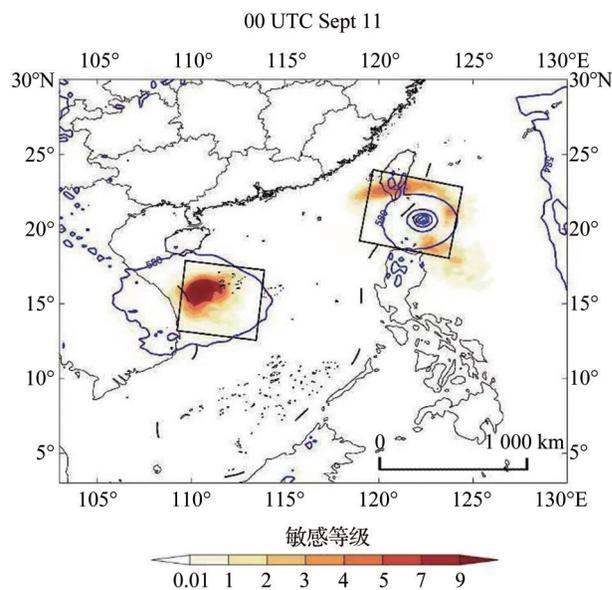


图7 台风“康森”和“灿都”的目标观测敏感区
(台风中心附近的黑色框内)

Fig. 7 Target observation sensitive areas for typhoons
Conson and Chanthu (inside the black frame
near the typhoon center)

逐流”期间,捕获7个台风:1905号“丹娜丝”(2019年6月15日至8月30日)、1911号“白鹿”(2019年8月21~25日)、1913号“玲玲”(2019年8月26日至9月6日)、1918号“米娜”(2019年9月28~30日)、1919号“海贝思”(2019年10月10~13日)、2002号“鹦鹉”(2020年6月11~15日)和2012号“白海豚”(2020年9月20~30日)^[13]。

此外,利用CNOP-方法识别出的台风目标观测敏感区,在FY-4卫星对2009号台风“美莎克”的加密观测和香港天文台对2122号台风“雷伊”的飞机下投探测中都得到了成功应用。

3.5 多基平台协同观测资料的多尺度联合同化

质量控制是观测资料应用的重要环节,为此发展了飞机下投探空等项目外场新型观测资料的质量控制方法,并针对台风狂风暴雨等的可能影响,改进了激光雨滴谱和双偏振雷达参数等数据质量的控制方法,效果显著。其中:基于水平风对雨滴粒子直径和下落末速度动态修正的雨滴谱数据质量控制方法,较好地克服了台风条件下水平大风使下落的雨滴粒子发生倾斜和漂移,从而引起雨滴直径和下落末速度的测量误差,并导致对降水率的低估等问题,实现14 m/s及以上风速下雨滴谱仪5 min降水率偏差平均由-22%降为约-11.8%;基于雨滴谱与双偏振参数统计关系的双偏振雷达衰减变分订正和比差分相位估算方法,实现利用双偏振雷达水平反射率(Z_H)、差分反射率(Z_{DR})和差分传播相移(Φ_{DP})观测,同时进行衰减订正、雨滴谱反演和定量降雨的估测,结果显示:估测的小时累计降水与雨量站观测的相关系数高达0.95,也表明对双偏振参数的衰减订正和云微物理参数的反演均具有较高的精度,从而为研究台风降水微物理结构和特征提供基础^[14]。

在此基础上,研制和改进了下投探空、雷达反射率及径向风等的直接同化技术,并结合台风本身的多尺度特性及多平台资料代表尺度的差异,发展了基于空间滤波的多尺度观测资料同化技术,实现对多平台所获取的不同尺度观测资料的有效同化,并具备评估不同观测资料(同化)对台风数值预报贡献的功能^[16]。其中,基于GSI-EnKF(Gridpoint Statistical Interpolation system-Ensemble Kalman Filter)系统建立的针对双参微物理参数化方案(Thompson)的反射率观测算子,实现雷达反射率因子的直接同化,个例(1909号台风“利奇马”)比对试验结果表明能有效改善模式对台风动热力及微物理结构的描述、降低台风内核雨带模式预报偏强的

误差、改进台风强度预报精度(正效果可维持 8 h 以上)。图 8 为多基平台观测资料对 1909 号台风“利奇马”预报的贡献。可见:无论是项目外场观测(浙江舟山探空和风廓线资料)还是雷达资料都对台风强度预报有改善作用;相比单平台资料,台风外场观测的探空、风廓线及雷达反射率和径向风等多平台资料的联合同化效果最佳。

据此,对 1907 号“韦帕”、1909 号“利奇马”、2003 号“森拉克”、2016 号“浪卡”、2106 号“烟花”和 2114 号“灿都”6 个典型台风的多平台外场观测资料进行了联合同化,生成了目标台风精细结构的同化分析数据集(空间分辨率 3 km、时间间隔 1 h),为项目模式关键技术的研发及验证提供了资料保障。

4 台风模式边界层参数化方案改进

基于台风条件下的飞机下投探测风廓线(共 3 322 条)及浮标等观测数据,分析了海上台风边界层湍流动量交换系数随风速的变化特征^[17],表明:在风速较小时,湍流动量交换系数随风速的增大而增大;当风速达到 22~23 m/s 时,湍流动量交换系数

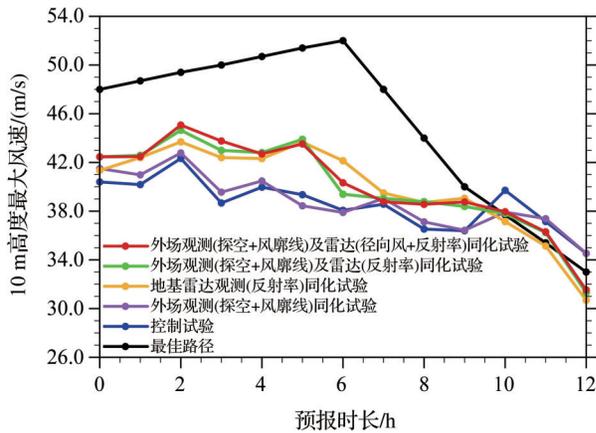


图 8 不同平台资料及联合同化对 1909 号“利奇马”台风的强度预报对比

Fig. 8 Comparison of intensity forecasts of different platforms and joint assimilation for No. 1909 typhoon Lekima

起报时间:2019年8月9号12:00;蓝色为控制实验(不同化),紫色为外场观测(探空+风廓线)资料同化,黄色为地基雷达(反射率)资料同化,绿色为外场观测(探空+风廓线)及雷达(反射率)资料同化,红色为外场观测(探空+风廓线)及雷达(反射率+径向风)资料同化
Starting time: 12:00 on August 9, 2019; Blue-control test (no assimilation), purple-field observation (sounding + wind profile) data assimilation, yellow-ground-based radar (reflectivity) data assimilation, green-field observation (sounding + wind profile) and radar (reflectivity) data assimilation, red-field observation (sounding + wind profile) and radar (reflectivity + radial wind) data assimilation

达到最大值,随后随着风速的增大,湍流动量交换系数有所减小。

以往研究^[18]指出:在台风条件下,湍流动量通量交换系数随风速呈现抛物线关系。但是,进一步分析发现^[19]:随着距台风中心距离(R)的不同,这种抛物线关系会发生变化,特别是在 R 与最大风速半径(Radius of Maximum Wind, RMW)的比值 $R/RMW < 0.95$ 时,湍流动量通量交换系数随风速的变化趋势并不明显(图 9)。

近海台风复杂(海—岛—岸—陆)下垫面条件下的台风边界层拖曳系数等物理参量特征不同于开阔洋面。事实上,基于台风影响期间的近海梯度塔观测数据,项目分析了下垫面曳力系数和粗糙度随风速的变化关系,结果表明(图 10):曳力系数和动力粗糙度随着风速的增大而增大,但在 24 m/s 附近达到峰值,随后随风速的增大而减小^[20]。在此基础上,拟合得到曳力系数(C_{DN})及动力粗糙度(z_0)和 10 m 风速(U_{10N})及摩擦速度(u_*)的如下关系^[25]:

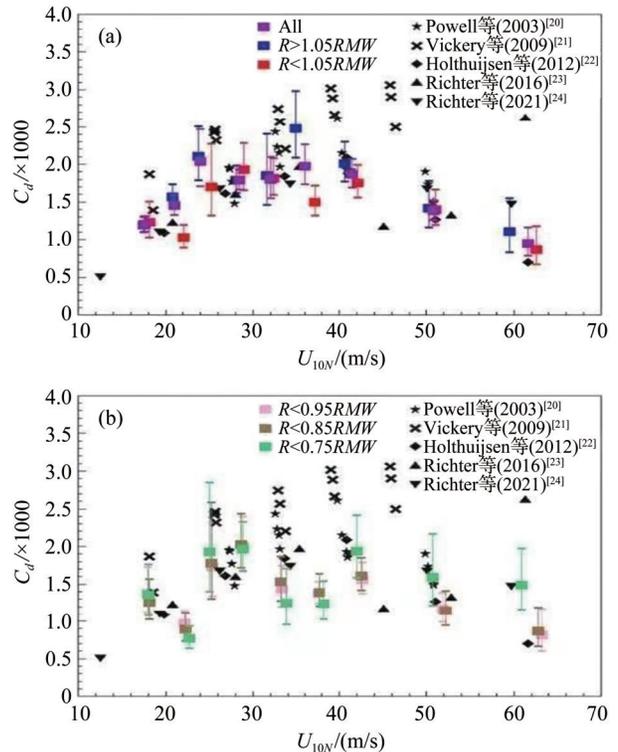


图 9 不同 R/RMW 范围下湍流动量通量交换系数 (C_d) 与 10 m 风速 (U_{10N}) 的关系

Fig. 9 Relationship between the flux exchange coefficient (C_d) of turbulence flow under different R/RMW ranges and the 10 m wind (U_{10N})

颜色方块为本研究结果,其他黑色符号为前人研究结果
Color square—the results of this study, other black symbols are the results of previous studies

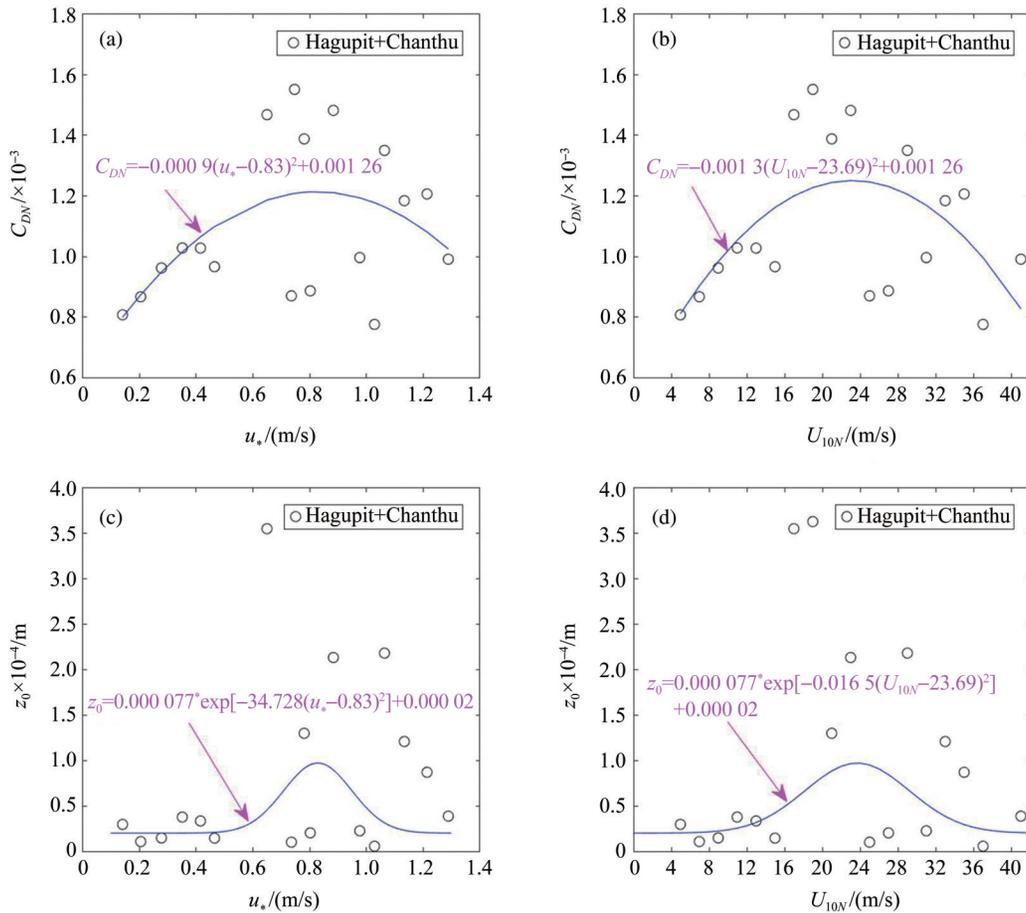


图 10 曳力系数 (C_{DN}) 和动力粗糙度 (z_0) 与摩擦速度 (u_*) 及 10 m 风速 (U_{10N}) 之间的关系
 Fig. 10 Relationship between drag coefficient (C_{DN}) and dynamic roughness (z_0) vs. friction velocity (u_*) and wind speed of 10 m (U_{10N})

$$C_{DN} = 0.009(u_* - 0.83)^2 + 0.00127 \quad (1)$$

$$C_{DN} = 0.0013(U_{10N} - 23.69)^2 + 0.00127 \quad (2)$$

$$z_0 = 0.000777 \exp[-34.728(u_* - 0.83)^2] + 0.00002 \quad (3)$$

$$z_0 = 0.000777 \exp[-0.0165(U_{10N} - 23.69)^2] + 0.00002 \quad (4)$$

基于这些观测数据,拟合得到了适合于近海台风的表面层动量通量交换系数参数化新方程[公式(5)]。在新方程中,动量通量交换系数(C_d)与风速(U)总体呈抛物线关系。

$$C_d = \begin{cases} 0.0113/U^{1.785} & U \leq 4.5 \text{ m/s} \\ 3.5 \times 10^{-5} U + 0.6 \times 10^{-3} & 4.5 \text{ m/s} < U \leq 10.5 \text{ m/s} \\ -4.4 \times 10^{-6} (U - 23)^2 + 1.7 \times 10^{-3} & 10.5 \text{ m/s} < U \leq 33.5 \text{ m/s} \\ 1.20 \times 10^{-3} & U \geq 33.5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (5)$$

依据观测数据对近海台风条件下的表面层湍流动量与热量通量交换系数的模式(WRF)参数化方案进行比较分析,结果表明^[26]:WRF模式中3种海表面层交换系数的参数化方案均较观测有明显

偏离,而采用新方程的修正参数化方案,则更接近实际观测值。可见,新方程在模式中的使用有助于提高台风状况下表面层通量计算的可靠性。

5 台风降水的微物理特征及参数化方案改进

为加深对台风降水过程中云微物理特征及其变化的理解,项目通过典型台风(1323号“菲特”)个例分析发现^[27]:台风外雨带对流性降雨和锋面(海陆锋)对流性降雨的雨滴谱特征和雷达反射率—降雨率($Z-R$)关系均不尽相同,其中台风外雨带对流性降雨在所有雨滴直径档上的浓度都比锋面(海陆锋)对流性降雨高,雨滴谱宽也更大,从而导致台风外雨带对流性降雨的降雨率更大。基于 Z_H 、 Z_{DR} 和 Φ_{DP} 等观测资料的分析表明:台风(内核、内雨带和外雨带)降水总体上是由自转化和碰并等暖雨过程主导,但外雨带区域相对于内核和内雨带具有更强的冰相过程和更弱的自转化过程、融化后的雨滴具有更大的尺

寸并对应了更加显著的破碎过程。以1909号超强台风“利奇马”为例,进一步分析台风降水中的云微物理与动力过程的关系,结果显示^[28]:在台风双眼墙发展阶段,外眼墙的上风切区域具有显著的强降水和强对流,且上风切右侧区域相比左侧的强降水频率和平均降水强度均稍大,以及明显更大的霰粒子频率,说明2个区域的微物理过程具有显著差异;台风登陆前双眼墙各象限微物理过程有所差异,在上风切右侧,暖雨增长和冰相增长是强降水增长的共同机制,而在上风切左侧,冰相增长较弱,暖雨增长是该区域强降水增长的主要机制。

利用数值模式(WRF),模拟并分析了云微物理过程参数化方案(Morrison)对目标台风(1909号“利奇马”)降水过程的雨滴等微物理参数的模拟性能,结果显示^[29]:Morrison方案有使模式对台风雨滴模拟过大的现象。为此,通过调整Morrison方案在暖雨碰并、破碎等过程的参数和相关阈值,设置了多组模拟试验,并对比了双偏振雷达观测和各试验模拟的双偏振雷达和微物理特征变量分布结果。

由双偏振雷达变量 Z_H 和 Z_{DR} 的水平分布可见:Morrison方案模拟的雷达反射率因子 Z_H 与实际观测结果较为接近,但代表雨滴平均直径的差分反射率 Z_{DR} 在眼墙和外围雨带区域均较观测明显偏高。通过调整雨滴破碎和碰并的粒径参数所进行的试验模拟的 Z_{DR} 数值明显降低,尤其在眼墙和外围雨带的对流区域,与双偏振雷达观测总体相似,对应的 Z_H 数值也更接近实际观测,但在层云区的粒子平均直径仍然偏大。

在此基础上,增加弱降水区域的粒子谱参数阈值设置试验,结果表明:该试验方案能够进一步改进弱降水区域的 Z_{DR} 数值(即层云区的雨滴微物理特性)。此外,进一步对比了模式模拟和双偏振雷达观测的 $Z-Z_{DR}$ 关系以及液态水含量廓线,均发现该试验比原方案在微物理模拟方面具有更高的精度。

6 边界层和云微物理参数化改进方案在台风业务模式中的应用

将项目研发(改进)的边界层和微物理过程参数化方案,接入了国家气象中心的业务台风模式(CMA_TYM,原名为GRAPES_TYM),并对2019—2021年11个重要台风(1909号、2004号、2008号、2009号、2010号、2019号、2106号、2107号、2109号、2114号和2118号)的路径进行了批量(123个样本)模拟试验(图11)。对上述11个台风批量试验的路径和强度预报性能进行统计分析,结果如下所述。

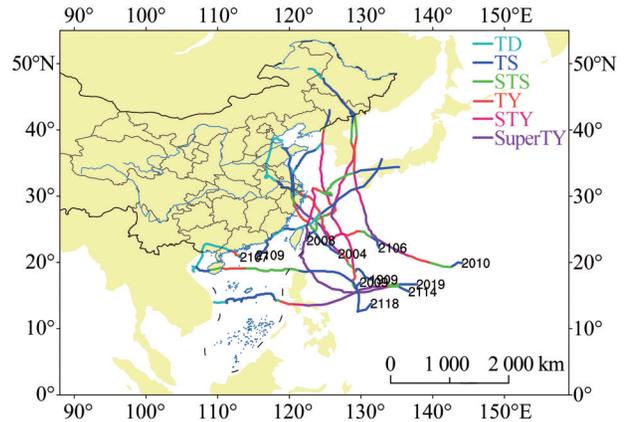


图11 改进的边界层和云微物理过程参数化方案接入业务模式(CMA_TYM)后对2019—2021年11个重要台风的批量试验模拟的台风路径

Fig. 11 The typhoon track simulated by the batch test of 11 important typhoons from 2019 to 2021 after the improved boundary layer and cloud microphysical process parameterization schemes were applied to the operational model (CMA_TYM)

6.1 路径预报

图12为11个台风123个模拟样本的路径平均预报误差和相对于原业务模式的预报技巧,可见:改进边界层拖曳系数(Drag Coefficient, CD)和云微物理(microphysics, MICRO)过程参数化方案后,业务模式24 h后的路径预报精度均有提高,其中96 h的路径预报平均误差减小了5.16%。

6.2 强度预报

图13给出的是11个典型台风批量(123个样本)模拟试验的台风强度预报平均误差和相对于原业务模式预报技巧,可见改进CD和MICRO过程参数化方案后,业务模式24~120 h的台风强度预报均有改进。其中,48 h、72 h、96 h和120 h的强度预报平均误差分别减小了7.02%、8.77%、16.0%和8.7%,尤以MICRO参数化改进方案在模式预报后期(72~96 h)的作用更为显著。

6.3 降水预报

选取2020年影响东北的3个台风(2008号“巴威”、2009号“美莎克”和2010号“海神”,影响时间段为2020年8月22日至9月6日)和2021年影响华东的2106号台风“烟花”(影响时段为2021年7月25—29日)进行了典型个例降水过程的模拟回报,并针对不同量级的过程降水量(>0.1 mm、>10 mm、>25 mm、>50 mm、>100 mm)进行了预报TS评分。

结果表明:改进边界层和微物理过程参数化方

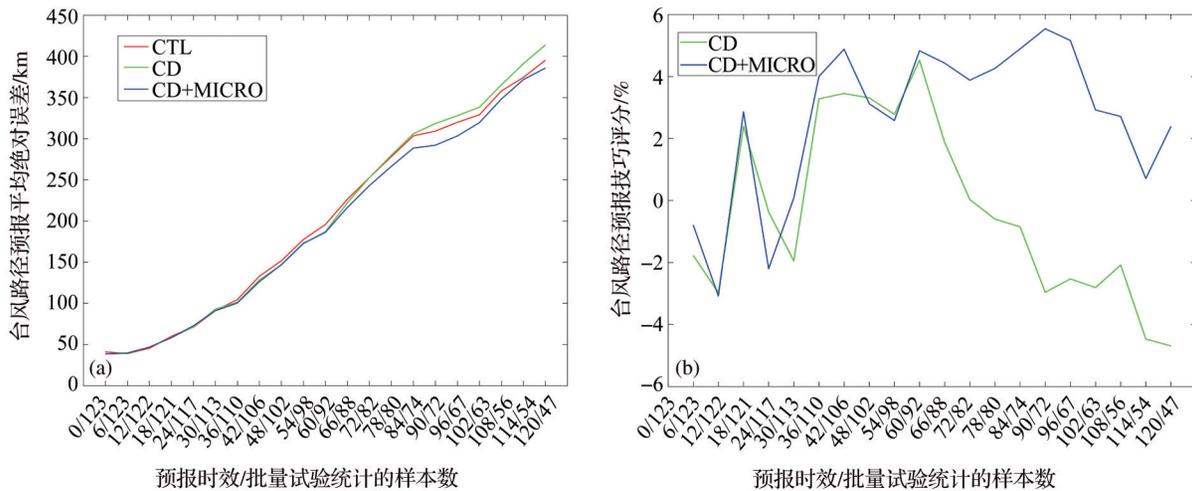


图 12 批量试验的台风路径预报平均误差 (a) 和预报技巧 (b)

Fig. 12 Average forecast error (a) and forecast skill (b) of typhoon track acquired by the batch tests

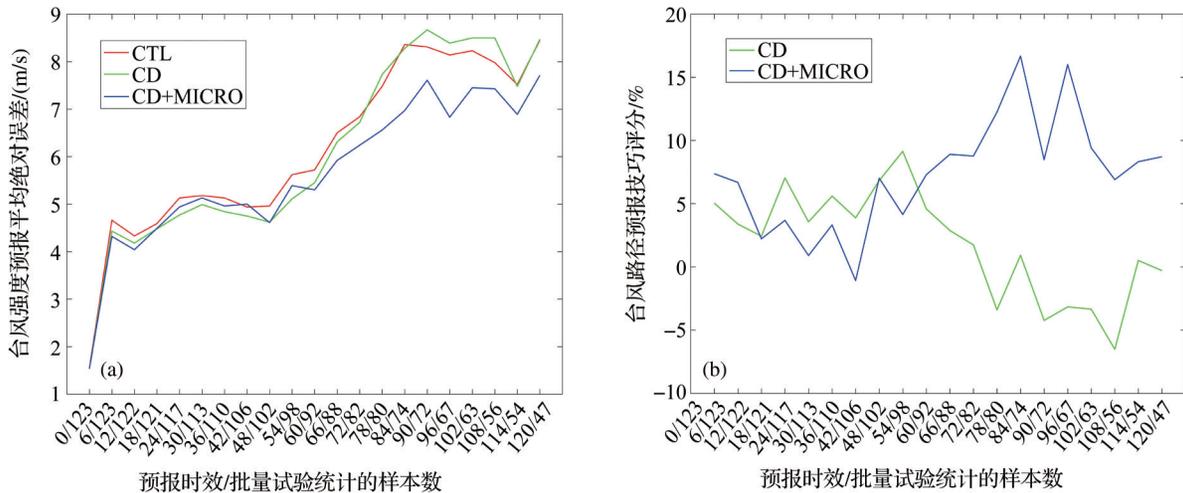


图 13 批量试验的台风强度预报平均误差 (a) 和预报技巧 (b)

Fig. 13 Average forecast error (a) and forecast skill (b) of typhoon intensity acquired by the batch tests

案后,模式 24~120 h 超过 0.1 mm 的各量级降水预报 TS 评分均有不同程度的提升。其中:对影响东北的 3 个台风的 24 h 和 48 h 大暴雨预报 TS 评分提升幅度分别达到 24.37% 和 8.42%,对 96 h 的暴雨预报 TS 评分提升幅度分别达到 15.4% [图 14(a)];对台风“烟花”的 24 h 大雨和大暴雨预报的 TS 评分改进幅度分别达到 3.10% 和 4.68%,48 h 的大雨和大暴雨 TS 降水预报评分改进幅度分别为 3.79% 和 3.23%,72 h 的中雨和大暴雨 TS 降水预报评分改进幅度分别达到 3.69% 和 7.10%,96 h 的暴雨 TS 降水预报评分改进幅度达到 6.19% [图 14(b)]。

6.4 业务应用示范平台

利用 html、css 和 javascript 等语言,开发了项目成果的业务应用示范平台(内网页面),集成了基于

项目模式预报的 3 类(台风预报产品、台风诊断分析产品和检验评估报告)14 种产品。其中:预报产品主要包括台风路径、强度、大风和降水预报,诊断产品主要包含台风形势场和台风诊断分析等。在调阅每一种产品时,均有年份、台风编号、起报时间、预报时效和高层 5 个次级选项,用户可以根据自己的需要依次选择每一个选项,确定选择后,网页会在最短的时间定位目标产品,提高了分析和预报的效率。

同时,为了与实际业务系统对接,项目对国家气象中心的台风业务预报平台进行了改进,实现项目开发的 3 类 14 种产品在台风业务平台的直接调用。

此外,在搭建业务示范平台中,开展了基于气

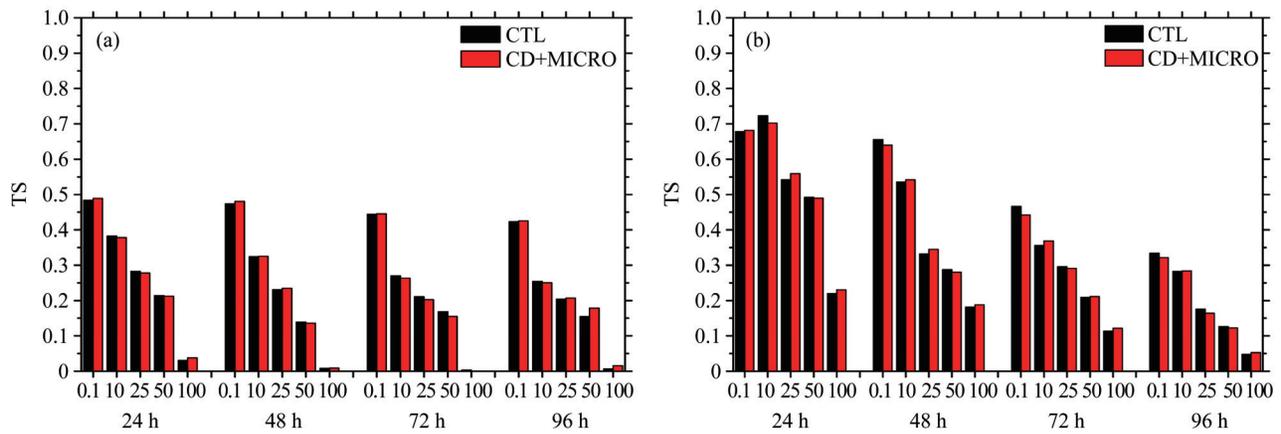


图 14 业务模式(CMA_TYM)对台风降水预报的 TS 评分

Fig. 14 TS score of typhoon precipitation forecasts in the operational model (CMA_TYM)

(a) 2020 年; (b) 2021 年; CTL: 原模式; CD+MICRO: 改进边界层和微物理过程后的新模式

(a) 2020; (b) 2021; CTL: original model; CD+MICRO: new model after the improvement of boundary layer and microphysical process

候持续性的台风风圈半径预报方法的研究,并研发了基于数值模式的风圈半径预报技术,为台风大风预报提供技术支撑;还构造了高空出流指数和大气视热源两个台风快速增强指数,改善了目前国内外可用于高空出流定量分析的研究成果不多的窘境。

7 结论和展望

国家重点研发计划项目“近海台风立体协同观测科学试验(2018YFC1506400)”进行了台风观测设备改装—外场协同观测—模式物理过程参数化方案改进—业务模式应用等较完整的研究,实现了业务模式台风路径和强度预报提高 5% 和降水 TS 评分提高 3%~5% 的预期目标。其中:对平流层飞艇、无人飞机及海上无人艇等改装,弥补了我国台风“空基”和“海基”观测平台严重不足的窘境;引入目标观测理念,实现台风外场观测区域、要素和观测平台的有的放矢;使用高一中—低空无人机和海上无人艇在内的“地—海—空—天”多基平台协同的台风外场观测,在我国尚属首次,设计的协同观测方案为我国近海台风立体观测业务的建立奠定了基础;研发的台风边界层和微物理过程参数化方案已应用于我国台风业务模式,效果良好。

然而,由于项目执行周期短和新冠疫情等原因,改装的高一中空无人飞机、平流层飞艇和海上无人艇等新型平台在实时台风观测中的应用仍不很充分,各种探测设备的协同性有待进一步改进;基于敏感性识别的目标观测区域和要素对外场观测的指导作用,在实时观测中仍面临海域/空域申请和观测装备保障等条件的制约;以及边界层和微物

理过程参数化方案改进后的台风业务模式性能的客观评估等,均有待更多的外场观测和实时台风预报进行验证和不断改进完善,并最终有望建立我国多平台协同的近海台风目标观测业务,实现目标观测与业务模式互动的台风监测预报新业态。

致谢: 本文综述的部分成果是十余个单位 60 多位科研工作者 3 年共同努力的结果,特此表示致谢! 还要特别感谢在成文过程中中国科学院大气物理研究所秦晓昊博士、中国气象局台风与海洋气象预报中心吕心艳正高工和中国气象局地球系统数值预报中心岳健工程师等给予的大力支持。

参考文献(References):

- [1] 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.]
- [2] 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. [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.]
- [3] CHEN T, ZHU M, ZHENG Z W. Adaptive path following control of a stratospheric airship with full-state constraint and actuator saturation [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 95: 105457.
- [4] GUO R, ZHANG X F, MA S Q, et al. Design and preliminary experiment of HALE UAV podded dropsonde system [C]// 2019 International Conference on Meteorology Observations

- (ICMO). Chengdu, China: IEEE, 2019: 1-4.
- [5] CHEN H B, LI J, HE W Y, *et al.* IAP's solar-powered unmanned surface vehicle actively passes through the center of typhoon Sinlaku (2020) [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(4): 538-545.
- [6] MU Mu, WANG Hongli, ZHOU Feifan. A preliminary application of conditional nonlinear optimal perturbation to adaptive observation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 31(6): 1 102-1 112. [穆穆, 王洪利, 周非凡. 条件非线性最优扰动方法在适应性观测研究中的初步应用[J]. *大气科学*, 2007, 31(6): 1 102-1 112.]
- [7] QIN X H, DUAN W S, XU H. Sensitivity to tendency perturbations of tropical cyclone short-range intensity forecasts generated by WRF [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2020, 37(3): 291-306.
- [8] YAO Jiawei, DUAN Wansuo. Target observation of sea surface temperature for tropical cyclone intensity simulation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2022, 46(1): 83-97. [姚佳伟, 段晚锁. 台风强度模拟的海温目标观测研究[J]. *大气科学*, 2022, 46(1): 83-97.]
- [9] QIN X H, DUAN W S. Forecast uncertainty of rapid intensification of typhoon Dujuan (201521) induced by uncertainty in the boundary layer [J]. *Atmosphere*, 2020, 11(11): 1263.
- [10] WANG Ye, DUAN Wansuo. Influences of initial perturbation amplitudes and ensemble sizes on the ensemble forecasts made by CNOPs method [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2019, 43(4): 915-929. [汪叶, 段晚锁. 初始扰动振幅和集合样本数对 CNOPs 集合预报的影响[J]. *大气科学*, 2019, 43(4): 915-929.]
- [11] HUO Z H, DUAN W S, ZHOU F F. Ensemble forecasts of tropical cyclone track with orthogonal conditional nonlinear optimal perturbations [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, 36(2): 231-247.
- [12] 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.
- [13] TIAN D, ZHANG H, ZHANG W Y, *et al.* Wave glider observations of surface waves during three tropical cyclones in the South China Sea [J]. *Water*, 2020, 12(5): 1331.
- [14] LIN L M, BAO X W, ZHANG S, *et al.* Correction to raindrop size distributions measured by PARSIVEL disdrometers in strong winds [J]. *Atmospheric Research*, 2021, 260: 105728.
- [15] HUANG H, ZHAO K, CHEN H N, *et al.* Improving time-efficiency of variational specific differential phase estimation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(7): 5 642-5 664.
- [16] SHEN F F, MIN J Z, LI H, *et al.* Applications of radar data assimilation with hydrometeor control variables within the WRF-DA on the prediction of landfalling hurricane IKE (2008) [J]. *Atmosphere*, 2021, 12(7): 853.
- [17] GAO Z Q, ZHOU S H, ZHANG J B, *et al.* Parameterization of sea surface drag coefficient for all wind regimes using 11 aircraft eddy-covariance measurement databases [J]. *Atmosphere*, 2021, 12(11): 1485.
- [18] GAO Z Q, PENG W W, GAO C Y, *et al.* Parabolic dependence of the drag coefficient on wind speed from aircraft eddy-covariance measurements over the tropical eastern Pacific [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 1805.
- [19] YE L, LI Y B, GAO Z Q. Surface layer drag coefficient at different radius ranges in tropical cyclones [J]. *Atmosphere*, 2022, 13(2): 280.
- [20] POWELL M D, VICKERY P J, REINHOLD T A. Reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones [J]. *Nature*, 2003, 422: 279-283.
- [21] VICKERY P J, WADHERA D, POWELL M D, *et al.* A hurricane boundary layer and wind field model for use in engineering applications [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48: 381-405.
- [22] HOLTHUIJSEN L H, POWELL M D, PIETRZAK J D. Wind and waves in extreme hurricanes [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117: 1-15.
- [23] RICHTER D H, BOHAC R, STERN D P. An assessment of the flux profile method for determining air-sea momentum and enthalpy fluxes from dropsonde data in Tropical Cyclones [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73(7): 2 665-2 682.
- [24] RICHTER D H, WAINWRIGHT C, STERN D P, *et al.* Potential low bias in high-wind drag coefficient inferred from dropsonde data in hurricanes [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2021, 78(7): 2 339-2 352.
- [25] ZHANG Xiaohua, BI Xueyan, GAO Zhiqiu, *et al.* Parameterizations of drag coefficient and aerodynamic roughness length using the turbulence data collected during typhoons Hagupit and Chanthu [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2021, 40(2): 1-6.
- [26] ZENG Zhihua, FU Tianhua, XU Ming, *et al.* Evaluation of impacts of CWRF boundary layer parameterization on the simulation of tropical cyclones over offshore areas of East Asia [J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2020, 40(3): 17-26. [曾智华, 辅天华, 徐明, 等. CWRF 边界层参数化对东亚近海热带气旋模拟的影响评估[J]. *海洋气象学报*, 2020, 40(3): 17-26.]
- [27] BAO X W, WU L G, TANG B, *et al.* Variable raindrop size distributions in different rainbands associated with typhoon Fitow (2013) [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(22): 12 262-12 281.
- [28] DAI H N, ZHAO K, LI Q Q, *et al.* Quasi-periodic intensification of convective asymmetries in the outer eyewall of typhoon Lekima (2019) [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(5): e2020GL091633.
- [29] WU D, ZHANG F Q, CHEN X M, *et al.* Evaluation of microphysics schemes in tropical cyclones using polarimetric radar observations: convective precipitation in an outer rainband [J]. *Monthly Weather Review*, 2021: 1 055-1 068. DOI: 10.1175/MWR-D-19-0378.1.

Progress on the Experiment of a Multi-platform Collaborative Field Campaign on Offshore Typhoon*

ZHAO Bingke¹, TANG Jie¹, LEI Xiaotu^{2*}, ZHANG Xuefen³,
DUAN Wansuo⁴, LI Hong¹, GAO Zhiqiu⁵, QIAN Chuanhai⁶,
BAO Xuwei¹, LUO Jingyao¹, ZHANG Shuai¹

(1. Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China; 2. Shanghai Meteorological Service, Shanghai 200030, China; 3. Meteorological Observation Center, 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 Centre, Beijing 100081, China)

Abstract: The China National Key Research and Development Program of China “The experiment of a multi-platform collaborative field campaign on offshore typhoon (2018YFC1506400)” was established to meet the needs of the country for typhoon prevention and disaster reduction. Additionally, the project aims to solve the lack of direct typhoon observation data, which restricts the development of typhoon science and the improvement of operational forecasting ability in China. Since the establishment of the project in December 2018, field observation-diagnosis and theoretical analysis based on observational data-numerical simulation and data verification have been used to adapt and transform new typhoon detection equipment independently developed by China in recent years. This included high-altitude unmanned aerial vehicles and stratospheric airships and the complete design of the “land-ocean-air-sky” three-dimensional collaborative observation scheme for offshore typhoons. Furthermore, multi-platform collaborative field observation experiments were implemented for 16 offshore target typhoons and the parameterization scheme of the physical process of the typhoon model based on the analysis of multi-source direct observation data was modified and applied to the national-level typhoon operational numerical prediction model. This significantly improved the performance and forecast accuracy of the track and intensity of the typhoon operational numerical prediction model and precipitation forecast by 5% and 3%~5%, respectively. Here, the progress of the program is summarized and associated scientific issues are discussed. The typhoon multi-platform observation system and collaborative observation scheme constructed by the project will lay the foundation for the construction of operational direct typhoon observation in offshore areas of China and is expected to realize the progress from the current “follow-up” to “parallel” and partial “lead.”

Key words: Typhoon; Multi-platform collaborative field campaign; Typhoon operational numerical forecast model.

* **Foundation item:** Project supported by the National Key Research and Development Program of China “The experiment of multi-platform collaborative field campaign on offshore typhoon” (Grant No. 2018 YFC1506400).

First author: ZHAO Bingke (1963-), male, Mei County, Shaanxi Province, Professor. Research areas include typhoon observation and research. **E-mail:** zhaobk@typhoon.org.cn

* **Corresponding author:** LEI Xiaotu (1968-), male, Fengxin County, Jiangxi Province, Professor. Research areas include typhoon observation and research of key technology for typhoon forecast. **E-mail:** leixt@typhoon.org.cn