

火箭弹下投探测台风气象参数新技术及初步试验

雷小途^{1*}, 雷明², 赵兵科¹, 王江², 汤杰¹, 高辉文², 曾智华¹, 李国兰², 罗建平³, 吴敏², 余晖¹, 叶雷², 方平治¹, 杨道安², 张帅¹, 邹勇波², 周鄂炯², 林立旻¹, 陈平², 钟业诚³, 石保平³, 何海龙³, 李运生², 杨晓晖³, 赵涛², 鲍旭炜¹, 刘卓², 陈国民¹, 鄢华明², 吴丹¹, 黄飞², 王建军², 罗珊², 伊蕾²

1. 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030;

2. 中国航天科工集团第四研究院, 武汉 430040;

3. 海南省气象局, 海口 571000

* 联系人, E-mail: leixt@mail.typhoon.gov.cn; leixt@typhoon.org.cn

2017-05-11 收稿, 2017-08-25 修回, 2017-08-28 接受, 2017-10-26 网络版发表

公益性行业(气象)专项(GYHY201406010)、国家重大基础研究计划(2013CB430305)和 ESCAP/WMO 台风委员会“亚太近海台风强度变化观测科学试验(EXOTICCA)”项目资助

摘要 与飞机探测台风的技术路线不同, 中国气象局上海台风研究所联合中国航天科工集团第四研究院, 历时3年完成了一种基于火箭弹的台风下投探测新技术的设计和研制. 2015年10月3日23时00分(北京时), 首枚台风探测试验火箭弹在海南省万宁市试射成功, 6 min内即将携带的多枚下投式探空仪“精准”送入200 km之外的强台风“彩虹”内核区域. 与车载GPS探空等资料的初步比对分析表明, 实时传回的火箭弹下投探测资料质量可靠. 试验的成功, 为快速而精准地获取台风内部(不同区域、同时刻)精细结构特征提供了有效的直接观测手段, 也为实现基于预报的台风目标敏感性观测提供了新途径.

关键词 台风, 结构与强度, 火箭弹, 下投探空, 外场观测科学试验

近年来, 台风(太平洋的热带气旋的通俗统称, 下同)的路径预报取得显著进展^[1,2], 当前24 h路径业务预报的误差已至约70 km, 48 h的误差约与15年前24 h的相当, 但是在环境场发生调整, 特别是当弱环境中台风结构发生非对称性变化时, 常引发路径预报的很大误差, 实际中24 h预报误差超过300 km的情况也并不鲜见^[3,4]. 此外, 台风强度预报几十年来进展缓慢, 其原因被认为与缺乏对台风内部精细结构及其影响强度变化机制的了解有关. 研究表明, 台风结构直接观测(特别是预报敏感区的目标观测)资料的同化可减少数值模式对台风强度预报误差的10%~20%及以上^[5~7]. 事实上, 台风内部精细结构直

接观测资料的匮乏, 已成为当今制约台风定位定强精度、台风结构变化及其对路径和强度影响的机理认识、台风数值模式(路径和强度变化)预报能力等进一步提高的主要瓶颈.

自20世纪50年代, 美国进行飓风(对大西洋的热带气旋的通俗统称, 下同)的飞机(有人驾驶)探测试验以来, 飞机几乎是(海上)飓/台风结构直接观测的唯一手段^[8,9]. 然而, 完成一次探测飞行, 将耗时2 h及以上, 下投的探空仪所测得的资料并非气象意义上的同时刻资料, 而且敏感区随时间的“快速”变化会使飞机下投资料的作用大打折扣. 加之, 探测飞机主要在5 km及以下的高度飞行, 而台风的垂直高度

引用格式: 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. 科学通报, 2017, 62: 3789~3796

Lei X T, Lei M, Zhao B K, et al. New technology and experiment of rocket dropsondes for typhoon observation (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 3789~3796, doi: 10.1360/N972017-00160

可伸展至10 km及以上,即飞机下投探测并无法获得台风完整的垂直结构,特别是对于台风发生发展至关重要的高层流出结构.传统飞机下投式探测手段在时间和空间上的探测缺陷,已经成为进一步提高台风预报水平的限制.基于这种考虑,国际上近年开始也逐步利用高空高速军用侦察机改装并利用更加多元的探测手段高效安全地获取完整台风垂直结构数据^[10-12].此外,有人飞机在探测台风过程中,不可避免地存在“机毁人亡”等的巨大风险,例如针对1989年飓风Hugo的飞行探测中就出现发动机被风浪损坏的极度危险的局面^[13].

本文介绍了一种基于火箭弹平台的台风下投探测新技术,即利用火箭弹(制导导弹)作为运载工具,在火箭弹飞越台风的过程中,将搭载的多个探空仪“同时(6 min以内)”下投至台风内部不同区域进行气象要素探测,并将探测资料实时传回接收站.2015年10月3日23时(北京时),对南海近海强台风“彩虹”,实施了首枚火箭弹探测台风的科学试验,并成功获取质量可靠的台风内部的风速、温度、气压、湿度等垂直廓线资料.

1 火箭弹下投探测系统

为快速、精准地获取(海上)台风内部结构的直接观测资料,特别是台风内核不同区域同时刻的风速、温度、气压、湿度等基本气象要素的垂直廓线分布,中国气象局上海台风研究所(以下简称“台风所”)联合中国航天科工集团第四研究院(以下简称“航天四院”),自2012年,历经3年,设计并成功研制了基于中国航天科工集团自制的制导火箭弹(SY400)平台的台风下投探测系统(TFTC-400).即:将装有气象探空仪的多枚减速箱换装至火箭弹平台的有效载荷舱内,并沿舱周均匀分布(图1),利用车载平台发射改装后的火箭弹,在火箭弹飞越台风的过程中依据控制指令分序多点“抛撒(释放)”减速箱,被释放出舱后的减速箱依靠其尾翼稳定并快速减速,引信在减速箱出舱的同时开始延时,达到预定的延时后即将探空仪推出减速箱(并利用“子母弹”技术,每个减速箱可“推/弹射”出多个探空仪),探空仪最大减速加速度不大于 $300g(g=9.8\text{ m/s}^2)$ 、减速持续时间不大于5 s,探空仪在随减速伞下降过程中进行风速、温度、气压、湿度的探测,其下落速度范围为6~20 m/s,测得的数据由绑定在探空仪上的卫星通信模块通过北斗卫星定位

和短报文等功能实时传输至地面接收站.下投探空仪采用北斗定位,水平位置精度达10 m,垂直位置精度达15 m.

火箭弹从发射到落地(坠海)整个飞行过程共持续约6 min,大致经历:火箭弹垂直发射、程序控制(火箭弹)飞行、减速箱释放、探空仪推/弹出后开伞并在下落过程中进行气象探测、探测数据的卫星实时中继并发送至地面接收站等阶段(图2).推/弹出的下投探空仪在台风中下落的全程(自开始探测的12 km左右高度至坠海)约20 min.

特别地,台风探测火箭弹的飞行采用“GNSS+光纤惯导”进行全程惯性精确制导控制,可实时获取火箭弹的位置、飞行速度等信息,并据此结合探测需求将多个探空仪“分序抛撒”投放到台风内部的不同探测点,从而实现对预报敏感区台风内部结构的“精确(位置)”探测.与常规的“火炸药抛撒”、“离心式抛撒”、“气囊抛撒”及“活塞抛撒”等抛撒技术相比,“分序抛撒”方案综合考虑火箭弹飞行环境、结构空间、抛撒速度、抛撒过载等因素,以燃气为动力源进行活塞式抛撒(释放),活塞实现释放的执行机构与维形壳片双重功能,推动探空仪安全释放后限位并锁定,从而确保火箭弹在释放探空仪后能够继续维持整体气动外形与结构强度,保证后续飞行过程的稳定控制.

为确保火箭高速飞行下释放的探空仪不受损及抛撒的探空仪在降落伞携带下保持合理的下降速度,借鉴成熟的子弹箱技术,设计了一个中间装置“减速箱”,即:将探空仪包裹在减速箱内,以实现探空仪从火箭弹上释放后的一级减速及该过程中的气动热防护,待“减速箱”减速至预定的安全速度和高度后再释放探空仪,并同步打开探空仪上的减速伞.

为实现探空仪与减速箱的安全分离及探空仪低速稳定探测的要求,减速伞的伞绳和伞衣均采用高强度材料并设计成方锥形,以确保减速伞不被撕裂且能在大风攻角的情况下保持气动性能稳定和减小减速伞在下降过程中的自转现象.减速箱和减速伞的设计过程中,减速、气动热防护及稳定下降效果等均进行了风洞试验、静态释放试验、动态释放试验和力学环境试验等一系列地面试验(图略),并验证了其功能可行性和环境适应性.

此外,多点分序抛撒(投放)和单点多个探空仪的推/弹射技术,可实现在同一时间范围内(前后相差不超过6 min)对台风不同区域的风速、温度、气压和湿

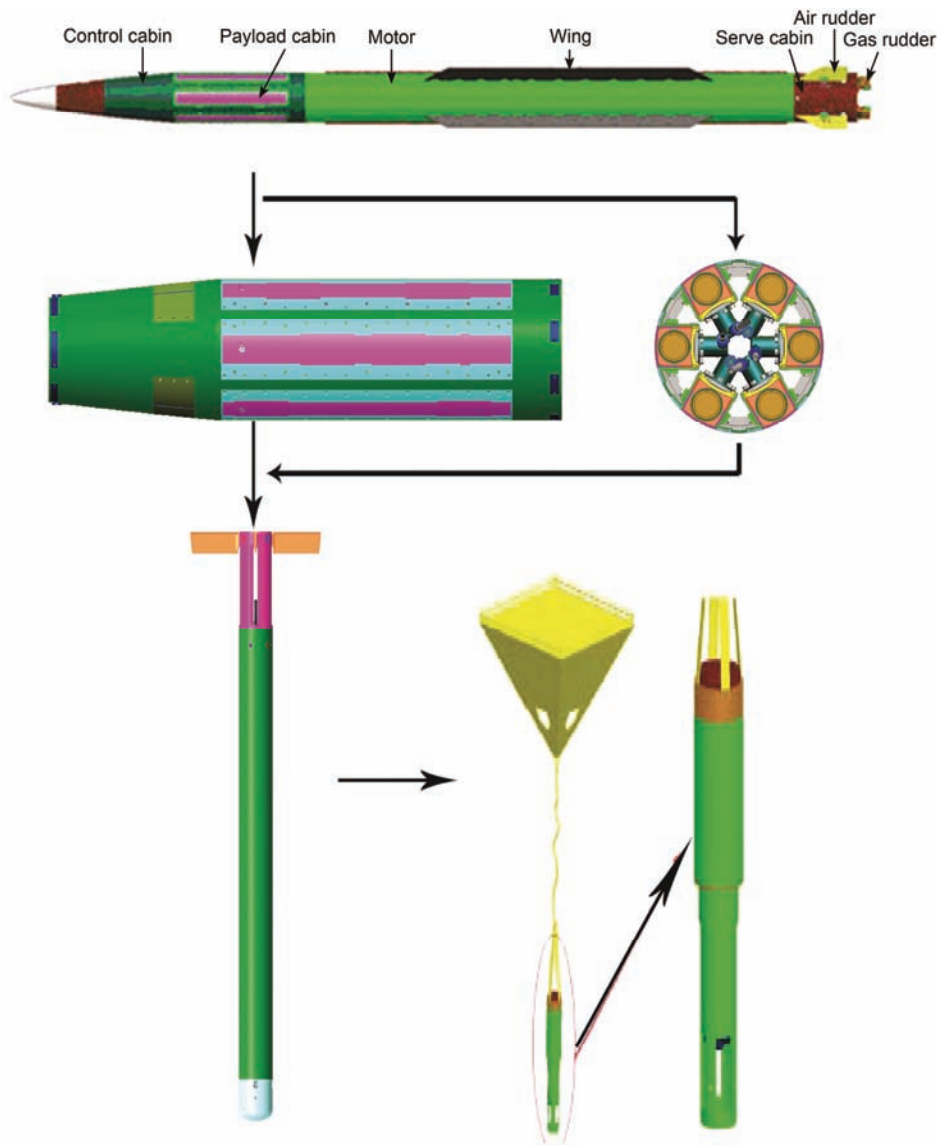


图1 TFTC-400 台风探测火箭弹及载荷舱内探空仪填装示意图

Figure 1 Scheme of TFTC-400 Rocket

度进行同步直接探测。

为了与中国气象局的日常探空业务对接，TFTC-400系统使用的探空仪为中国气象局业务列装的气象探空仪(G020303-JB-04)，由天津华云天仪特种气象探测技术有限公司提供，可获取风速、温度、气压、湿度、高度等气象要素。地面接收站由地面接收机、天线、地基GPS、基测箱及终端计算机等组成。其中，天线在(终端)计算机的控制下实现对探测信号的自动跟踪；接收机将接收的探空仪信号解调成数字信息后，发送至终端计算机；由探空仪GPS和地基GPS共同完成差分定位，定位数据直接发送至终端计算

机处理；终端计算机完成探测数据的实时接收、处理和初步校验，并具有一定的纠错及系统故障监测和报警功能。地面接收站可远离火箭发射及观测现场(但应在北斗卫星通讯覆盖区)。

2 试验过程

为了更好地检验火箭弹下投探测资料的质量，充分利用近岸雷达和梯度塔、海岛站和浮标、“追风”车载设备及台风影响期间的陆上气象加密观测等资料，设计了对近岸300 km以内的台风进行探测试验的方案，即：当台风中心距离试验地点200 km左右

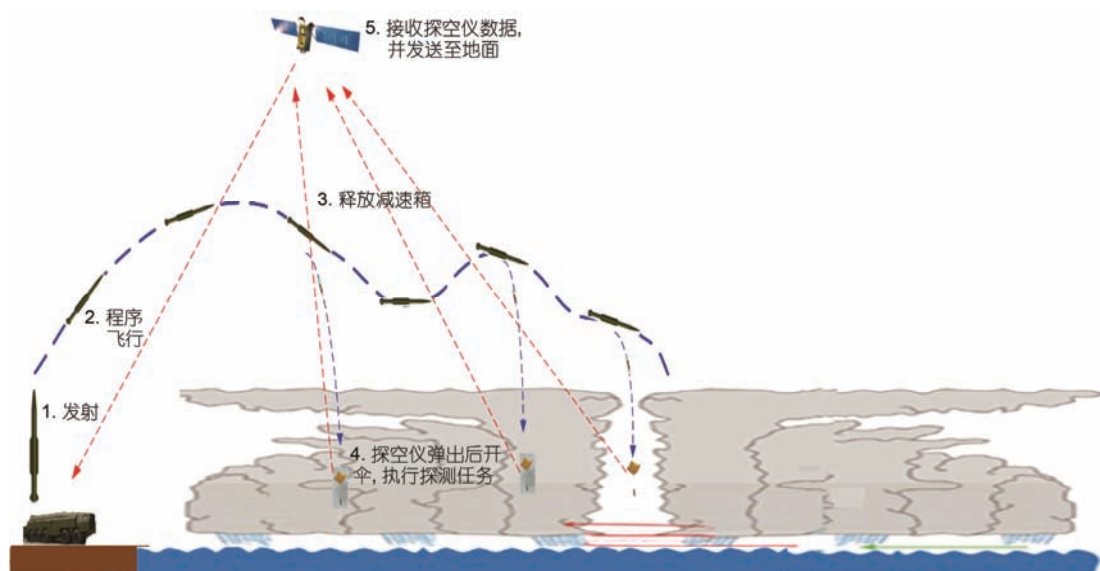


图2 TFTC-400 台风探测火箭弹探测飞行示意图

Figure 2 Scheme of dropsonde deployment based on rocket platform

时发射探测火箭弹, 火箭弹距发射点160~190 km、高度16~20 km时第1次释放探空仪, 并向左右两侧各释放2枚探空仪; 火箭弹距发射点200~220 km、高度12~15 km时第2次释放探空仪, 并向左右两侧各释放1枚下投探空仪; 火箭弹残骸约在距发射点210~250 km处坠入大海。

2015年10月2日02时(北京时, 下同), 位于菲律宾附近的热带低压加强为1522号热带风暴“彩虹(Mujigae)”, 并将进入位于海南岛近海的作业区(图

3(a)), 可能的作业时间窗口为10月3~4日。按照预案, 台风所、航天四院及海南省气象局相关试验人员30余人先后于10月2日下午赶到海南省万宁市, 当晚确定了试验场地(日月湾)及作业方案, 并初步确定3日17:00至4日8:00(预计登陆或擦过文昌)为试验窗口。3日8:30, 根据台风活动的变化, 将试验作业时间窗口缩小至3日20:00至4日5:00; 3日11:00, 进一步缩小为3日20:00至4日2:00; 3日17:00, 最终将作业时间设定为3日23:00。

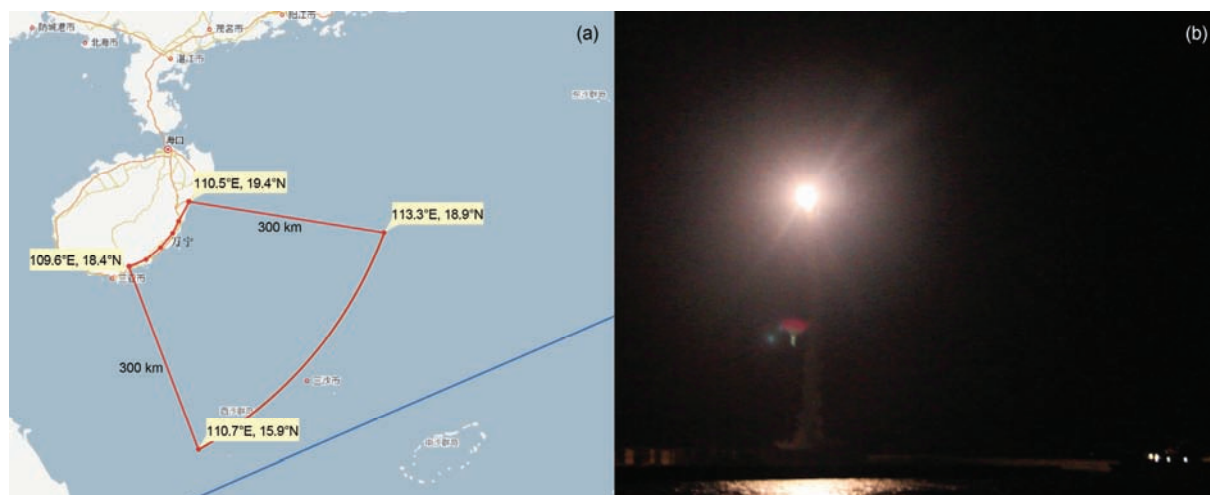


图3 海南岛近海的作业区(a)和台风探空火箭弹点火发射瞬间(b)(2015年10月3日23:00)

Figure 3 The area of experiment (a) and the rocket launch (b) (23:00 on October 3, 2015)

3日14:00, 台风所的“追风”车进场后, 所有的车载观测设备即投入了不间断的探测, 并在23:00前后进行了GPS(上投)加密探空. 海南省气象局的海口和三亚市气象局也分别在23:00增加了一个常规气球探空加密观测.

3日23:00, 火箭弹成功发射升空(图3(b)). 23:02设于海南省万宁市气象局的地面接收站成功接收到第一个下投探空数据, 至23:21接收到最后一个下投探空数据, 期间下投探空仪共飞行探测了19 min. 图4还给出了火箭弹下投探空仪的落点和“追风”车载GPS探空仪在10 km附近高度处的位置示意图.

3 试验结果检验

在本次试验火箭弹下投的4个探空仪下落的19 min过程中, 共获取了风速、温度、气压、湿度的秒级的垂直廓线观测数据4500余组. 其中, (水平)风的观测资料中仅有约1%(400个)出现缺失(或明显有异常), 甚至明显低于美国在非台风条件下的飞机下投探空仪的平均缺失率(2%~5%)^[14], 而有效的风观测数据的误差仅为0.5 m/s(95%信度), 与现有国际先进水平相当^[14]. 考虑到文献[14]提到的观测数据缺失率和精度均是在观测条件好得多的冬季非台风条件下获取的, 而本文采用的火箭弹探空数据在强台风条件(伴随狂风和暴雨)中, 观测质量整体上仍然与之相当甚至有所超过. 这表明, 本文介绍的基于火箭弹

的下投测风数据非常平稳, 观测精度也非常高.

对比“追风”车载GPS探空的风廓线(图5), 可见台风低层的流入和高层流出及相应的低高空急流特征明显, 且两者探测的风速相近, 火箭弹探测因距台风中心更近并已位于云墙附近而略大, 并且最大风速层次更低, 初步可判定火箭弹下投探测所获得的风廓线资料合理可靠(更多更详细的校验及与卫星、雷达、香港天文台等其余观测资料的对比分析参考1)).

4 结论与讨论

中国气象局上海台风研究所和中国航天科工集团四院, 联合设计和研发的火箭弹下投探测台风的新技术, 并于2015年10月3日23:00对1522号台风“彩虹”实施了首次探测试验, 获得成功. 初步分析表明, 所获资料质量可靠. 此次试验的成功, 标志着“快速”、“精准”、“同时”获取(海上)台风多处结构特征的探测技术的重大突破.

与飞机(有人)穿越台风的下投探空相比, 火箭弹下投探空具有飞行时间短(抛撒出的下投探空仪相差不超过6 min, 属气象意义的“同时”)、可同时获取台风不同位置的垂直结构廓线和无“机毁人亡”风险等优势, 受到科学家及联合国亚洲及太平洋经济社会委员会(ESCAP)/世界气象组织(WMO)台风委员会等国际社会的广泛关注. 依托台风所和香港天文台联合组织实施“近海台风强度变化科学试验(EXOTICCA)”

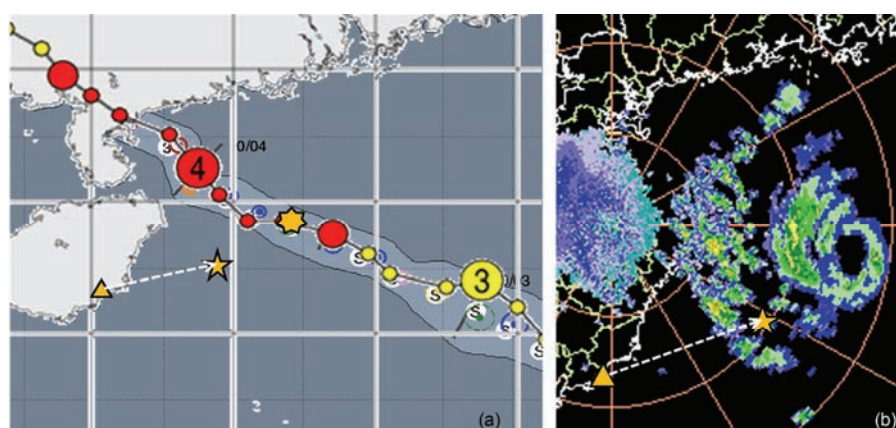


图4 2015年10月3日23:00“彩虹”台风路径(a)、雷达回波(b)及火箭弹下投探空(☆)和“追风”车GPS探空(△)10 km附近高度处的位置示意图
Figure 4 The trajectory of Typhoon Mujigae (a), rocket and radar image (b) and the relative position of rocket-dropsonde (star) and the radiosonde (triangle)

1) Lei X T, Lei M, Zhao B K, et al. Preliminary evaluation of the first rocket-deployed dropsonde observations in a tropical cyclone: A project EXOTICCA case study in STY Mujigae (2015).

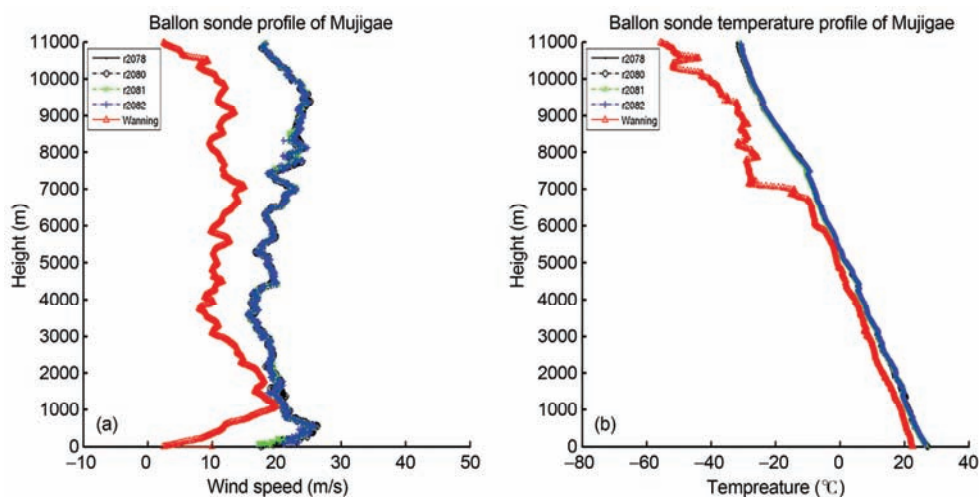


图 5 火箭弹下投探空及“追风”车载GPS探空的风速(a)、温度(b)廓线比较(黑色点线、黑色圈线、绿色和蓝色分别为 4 枚火箭弹探空仪, 红线为位于海南万宁的追风车探空)

Figure 5 The wind (a) and temperature profile (b) of rocket-dropsonde and radiosonde (rocket-dropsonde: black dotted, black loop, green and blue; radiosonde: red)

国际合作项目, 将在南海适时实施飞机、火箭弹及车载GPS台风探空等的协同探测, 包括火箭弹多点抛撒下投探测台风的试验(本次试验只释放了第一个减速箱内的4个下投探空仪), 以获取台风内部精细结

构的分布特征, 并尝试开展基于预报的台风敏感性快速响应观测试验. 全新的火箭弹下投探测台风技术的潜在价值, 预期将随时间及使用成本的降低等, 进一步显现.

致谢 中国气象局和中国航天科工集团公司对该项新技术的研制给予了大力支持, 中国气象局陈联寿院士为该项技术的设计和试验提供了全程的科学咨询和技术指导, 海军南海舰队航空管理处和中国民航海南空管分局对本次试验给予空域支持和保障, 特此致谢.

参考文献

- 1 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 (in Chinese). *Adv Meteorol Sci Tech*, 2012, 5: 36–43 [钱传海, 端义宏, 麻素红, 等. 我国台风业务现状及其关键技术. *气象科技进展*, 2012, 5: 36–43]
- 2 Duan Y H, Chen L S, Xu Y L, et al. The status and suggestions of the improvement in the typhoon observation forecasting and warning systems in China (in Chinese). *China Eng Sci*, 2012, 9: 4–9 [端义宏, 陈联寿, 许映龙, 等. 我国台风监测预报预警体系的现状及建议. *中国工程科学*, 2012, 9: 4–9]
- 3 Xu Y L, Zhang L, Gao S Z. The advances and discussions on China operational typhoon forecasting (in Chinese). *Meteorol Monthly*, 2010, 36: 43–49 [许映龙, 张玲, 高拴柱. 我国台风预报业务的现状及思考. *气象*, 2010, 36: 43–49]
- 4 Xu Y L, Han G R, Ma S H, et al. The analysis and discussion on operational forecast errors of super typhoon Muifa (1109) (in Chinese). *Meteorol Monthly*, 2011, 37: 1196–1205 [许映龙, 韩桂荣, 麻素红, 等. 1109 号超强台风“梅花”预报误差分析及思考. *气象*, 2011, 37: 1196–1205]
- 5 Wang J H, Young K, Hock T, et al. A long-term, high-quality, high-vertical-resolution GPS dropsonde dataset for hurricane and other studies. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2014, 96: 961–973
- 6 Abernethy S D, Franklin J L. Impact on hurricane track and intensity forecasts of GPS dropwindsonde observations from the first-season flights of the NOAA Gulfstream-IV jet aircraft. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1999, 80: 421–427
- 7 Wu C C, Lin P H, Abernethy S, et al. Dropwindsonde observations for typhoon surveillance near the Taiwan region (DOTSTAR): An overview. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2005, 86: 787–790

- 8 Rogers R, Aberson S, Black M, et al. The intensity forecasting experiment: A NOAA multiyear field program for improving tropical cyclone intensity forecasts. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2006, 87: 1523–1537
- 9 Rogers R, Aberson S, Aksoy A, et al. NOAA's hurricane intensity forecasting experiment: A progress report. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2013, 94: 859–882
- 10 Braun S A, Newman P A, Heymsfield G M, et al. NASA's hurricane and severe storm sentinel (HS3) investigation. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2016, 97: 2085–2102
- 11 Guimond S R, Heymsfield G M, Reasor P D, et al. The rapid intensification of Hurricane Karl (2010): New remote sensing observations of convective bursts from the Global Hawk platform. *J Atmos Sci*, 2016, 73: 3617–3639
- 12 Creasey R L, Elsberry R L. Tropical cyclone center positions from sequences of HDSS sondes deployed along high-altitude overpasses. *Weather Forecast*, 2017, 32: 317–325
- 13 Marks F D, Black P G, Montgomery M T, et al. Structure of the eye and eyewall of Hurricane Hugo (1989). *Monthly Weather Rev*, 2008, 136: 1237–1259
- 14 Hock T F, Franklin J L. The NCAR GPS dropwindsonde. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1999, 80: 407–420

Summary for “火箭弹下投探测台风气象参数新技术及初步试验”

New technology and experiment of rocket dropsondes for typhoon observation

LEI XiaoTu^{1*}, LEI Ming², ZHAO BinKe¹, WANG Jiang², TANG Jie¹, GAO HuiWen², ZENG ZhiHua¹, LI GuoLan², LUO JianPing³, WU Min², YU Hui¹, YE Lei², FANG PingZhi¹, YANG DaoAn², ZHANG Shuai¹, ZOU YongBo², ZHOU EJiong², LIN LiMin¹, CHEN Ping², ZHONG YeCheng³, SHI BaoPing³, HE HaiLong³, LI YunSheng², YANG XiaoHui³, ZHAO Tao², BAO XuWei¹, LIU Zhuo², CHEN GuoMin¹, WU HuaMing², WU Dan¹, HUANG Fei², WANG JianJun², LUO Shan² & YI Lei²

¹ Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China;

² Fourth Institute of China Aerospace Science Industry Corporation, Wuhan 430040, China;

³ Hainan Meteorological Bureau, Haikou 571000, China

* Corresponding author, E-mail: leixt@mail.typhoon.gov.cn; leixt@typhoon.org.cn

This study presents a new technique for typhoon observations that is based on dropsondes launched by long-distance rockets instead of research aircraft. This technology was developed by Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration in collaboration with China Aerospace Science and Industry Corporation in the past three years. On October 3, 2015, this meteorological rocket was successfully launched for the first time into an offshore strong typhoon (Mujigae, 2015) located east of Hainan Island. Four dropsondes were subsequently deployed within 6 min by the rocket when it flew into the inner core of Mujigae from the launching city, Wanning in Hainan Province that was located 200 km away from the storm. Real-time data from the dropsondes were sent back to the observation station on the ground. The detailed profiles of wind, temperature and humidity were obtained, showing high quality according to comparisons with the near collocated GPS radio-sondes data. These dropsonde profiles captured some fine-scale wind structure in the Typhoon Mujigae with may be related to large eddies. This field experiment described in this study implied a potential use of this new dropsondes-deployment technique for future TC research and operation. The success of the field campaign with rocket-carrying dropsondes could provide an effective and direct observation technique for rapid and accurate access to the fine-scale structure of typhoon interior (different areas, but at the same time), and provide a new way to achieve the typhoon targeting sensitivity analysis related to forecasting. Showing the advantages of long-range, high-quality and high-precision, this new technique, when deployed from high altitudes could improve TC model initial condition and provide accurate estimates of storm intensity of offshore typhoons, resulting in improved operational TC track and intensity predictions, as proved by previous studies that used aircraft-deployed dropsondes. Under the support of the Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (ESCAP) and World Meteorology Organization (WMO) Typhoon Committee, STI together with HKO organized the Experiment of Typhoon Intensity Change in Coastal Area (EXOTICCA) as an international cooperation project. This project carried out field experiments using rocket-platform sounding detection technology and other new typhoon field detection utilities. In the coming few years, EXOTICCA will also implement observations using man aircraft, unman aircraft, long-distance rockets and GPS sounding in South China Sea. It is believed that the new rocket deployment technology presented in this study when used in future field experiment will improve the track and intensity forecasts of typhoons.

typhoon, structure and intensity, rocket, dropsondes, field campaign

doi: 10.1360/N972017-00160