

无人艇组网观测台风的设想

陈洪滨^{1,2}, 何文英^{1,2}, 姜祝辉³, 陶法⁴, 马舒庆⁴, 李军¹, 潘继东¹

1 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

3 北京应用气象研究所, 北京 100029

4 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

摘要

登陆和近海台风伴随的暴雨、大风和风暴潮等经常造成重大人员伤亡和财产损失, 目前对台风的快速增强、路径突变和生成机制这三大难点科学问题的认识还存在不足, 主要原因之一是台风全生命期内部及环境多要素原位 (*in situ*) 高时空分辨率观测资料的缺乏。

为了解决海上台风观测资料匮乏问题, 中国科学院大气所无人艇团队自主研发了两款长航时半潜式无人艇, 并开展了多次海上试验。为了全面系统地获取台风演变过程中气象和海洋多要素场变化的信息, 本文提出无人艇组网观测台风的设想。

采用自动部署的太阳能无人艇和带探空设备的油电无人艇, 在热带气旋频发和西太台风经过的南海海域构建一个无人艇组网观测系统, 开展长期的台风观测试验。通过机动性强的太阳能无人艇获取海面气象水文多要素观测数据, 使用油电艇载火箭探空技术获取台风内部大气边界层的廓线资料, 组网观测能够实时获取海上热带气旋内部及其环境场的原位观测资料。对收集的同期卫星观测产品和再分析资料等进行验证对比分析, 形成一套多个南海热带气旋的综合观测资料集, 为数值预报模式资料同化和效果检验提供第一手资料, 提高模式对台风路径、强度以及暴雨和大风的预报能力。

关键词: 台风, 无人艇, 海上原位数据, 组网观测

1. 引言

我国受登陆和近海台风影响巨大, 台风强风和暴雨不仅严重影响人们的生活和生产活动, 有时还造成重大人员和财产损失。据统计, 在过去百年的主要自然灾害中, 台风/飓风造成的比例最高 (陈颖和史培军, 2013)。影响我国的台风年均约 8 个, 居世界首位 (许小峰等, 2009; 陈联寿等, 2012)。陈文方等 (2017) 和吴影等 (2017) 统计了我国 2006~2015 年台风年均损失, 其直接经济损失达

收稿日期: 2025-06-09; 网络预出版日期:

作者简介: 陈洪滨 (1960-) 男, 博士, 主要从事大气探测和大气遥感研究

通讯作者: 何文英, email: hwy@mail.iap.ac.cn

资助项目: 国家自然科学基金 (41627808)、国家重点研发计划 (2018YFC1506401)

600 多亿元人民币、死亡人数超过 400 人、受伤人数近万人。2024 年，影响我国的台风频数和强度都很高，“摩羯”是有气象记录以来秋季登陆我国的最强台风，有三个台风深入内地的路径和时间长，暴雨和大风在多地造成了严重灾害。

作为高影响天气之一，台（飓）风一直是气象和大气科学的主要研究对象，国内外有关学者对其进行了长达百年时间的观测、分析和数值模拟等研究。海上台风生成条件、结构及演变规律，已有相当多的认识（丁一汇，2005；郑国光等译，2008；陈联寿等，2012；Emanuel and Center, 2018）。静止气象卫星能够监测和跟踪全球全部热带气旋（TCs: Tropical Cyclones）（注：台风是热带气旋的一个类别，当风力达12级时TCs称为台风或飓风；以下可能两者混用）。但是，我们对热带气旋的快速增强、路径突变的预报水平还很低，对其伴随的大风与暴雨预报的不确定性很大，台风转向时72小时路径预报误差超过1000km时有发生。产生预报误差的主要原因仍是数值模式和有关热带气旋物理过程的不完善以及初始场中的误差，很多时候是海上观测资料的严重缺乏（许映龙等，2010；端义宏等，2012；Rogers et al., 2013；雷小途，2020；张璟等，2022）。

目前，我们对台风的快速增强、路径突变和生成机制的科学认识还很不全面，预报精度和时效远不能满足每年防台减灾的需求。为了改变这一状况，需要在增强TCs科学认识、改进台风数值模式和提高综合观测能力三个方面持续地开展工作，其中提高观测能力又是前两个方面得以实质性进展的基础（钱传海等，2012；李泽椿等，2014；任福民和向纯怡，2017；Emanuel and Center, 2018；周磊等，2019）。

2. 国内外台风观测的研究现状及发展

针对飓风/台风的前沿和难点科学问题，美国国家科学基金委（NSF）、国家航空和航天局（NASA）及国家海洋和大气管理局（NOAA）等部委持续支持了一系列外场观测试验。其中，美国学者使用了中高空有人和无人飞机平台和多种主被动遥感器为主的观测设备，并不断使用新的探测技术，对飓风全生命期进行立体、多要素综合探测或目标观测，如2010年7-9月在西北太平洋海域开展的“台风与海洋相互作用计划（Interactions of Tropical Cyclones and the Ocean, ITOP）”试验（D'Asaro et al., 2014），获取的资料（加上卫星遥感和其他辅助资料）对飓风物理过程研究与参数化和数值模式改进等研究帮助极大（Aberson, 2003；Franklin et al., 2003；Wu et al., 2007；Chou et al., 2011；Christophersen et al.,

2017)。但是，除了部分飞行有下投探空大气廓线探测，这些试验中都缺少热带气旋环境和内核的原位 (in situ) 观测。国内外不同型号的剖面浮标 (Argo) 可在台风条件下提供温盐资料，已应用于热带气旋生成和经过时海洋混合层变化及海气相互作用等研究 (曹敏杰等, 2017)。

多年来，我国有关学者也很重视台风观测研究，并开展了数次专项外场试验。2002年7月至8月实施了“中国登陆台风外场科学试验项目”，外场观测基地设在广东阳江海陵岛，试验中首次启用了多种地基遥感设备等，对台风“黄蜂”进行了追踪观测，获取了登陆台风内部和环境场的精细资料，并取得一些研究结果 (张光智等, 2004)。2008年，中国气象局组织开展了微型无人机台风探测试验，7月18日对台风“海鸥”进行了近4 h 的飞行探测，获得了温度、气压、相对湿度、风向、风速及海拔高度等基本气象要素数据 (李杨等, 2009)。2009年8月7日和9日，中国气象科学研究院利用机载下投式探空仪对台风“天鹅”和“莫拉克”进行了两次观测试验，张诚忠等 (2012) 利用7日11个下投探空及常规探空资料，分析了下投探空资料的可用性和南海上空台风外围的大气特征。2009年，中国气象局上海台风研究所牵头实施了国家重点基础研究发展计划“台风登陆前后异常变化及机理研究”项目，通过对登陆台风外场加强观测试验、资料融合、数值试验和理论分析等，增加了台风登陆前后异常变化机理的认识。

2003年开始，我国台湾地区多单位合作使用Altra 喷气有人驾驶飞机对接近台湾地区的台风进行监测，主要开展下投探空 (平均6小时航程投20个)。资料应用显示，加入飞机下投探空观测后台风12~72h 路径预报误差平均减少26.5%；飞机和其他资料的综合分析还揭示了台风外围和雨带结构的一些细微特征 (Wu et al., 2007; Chou et al., 2011); Chen et al. (2013) 利用台湾2004~2009年20个台风的下投探空资料，先由CNOP和FSV 方法识别出敏感区，然后同化进入中尺度模式MM5，研究不同地点的下投探空资料对路径预报的影响。自2013年，台湾的近岛台风监测下投观测由研究阶段转入气象局的常规业务 (DOTSTAR—<http://typhoon.as.ntu.edu.tw/Activity.htm>)；近几年，台湾与香港气象业务部门合作，联合实施近海台风的飞机下投探空。

自2004年，中科院南海海洋研究所经过10来年的努力，建立起一个覆盖南海的中尺度水文和气象观测网络 (Yang et al., 2015)，获取了一批南海海上原位探测资料。自2014年，海南省气象部门在南海增设气象浮标站和岛礁中尺度自

动观测站，对于收集海上台风气象资料、提高台风预报能力具有重要作用。2014年，中国气象局上海台风研究所和香港天文台联合牵头，启动了“近海台风强度变化科学试验(EXOTICCA)”项目，在我国南海开展了多观测手段的外场协同观测试验，并进行台风结构演变及强度预报等相关研究。

海洋第二研究所陈大可团队在南海布设的“十字形”浮标/潜标阵列，在数个台风经过时获得了海面气象、波浪和 underwater 温盐深流等资料(周磊等，2019)。Zhang et al. (2016) 利用阵列观测资料和模式研究了2014年台风Kalmaegi (“海鸥”) 经过时上层海洋对台风的响应，一个主要结果是在次表层热力响应中上涌与混合起同样重要的作用。周磊等(2019)指出，我国在台风过程海气协同观测方面已经开展了有益的尝试，但海上长期可靠的监测系统依然缺失；海上台风现场(原位)观测资料的缺乏阻碍了台风多尺度响应和反馈机制的深入研究，海洋与台风的相互作用过程还不能完好地模拟，台风数值预报需要的精细而可靠的海洋初始场难以构建，这限制了台风研究和预报水平的提高。

2018年5月1日至9月30日，中国气象局广州热带海洋气象研究所基于博鳌海洋气象野外科学试验基地，开展了华南季风/台风强降水协同观测试验。该科学试验针对华南季风/台风强降水预报难题，在关键区域采用多种手段进行加密观测，为华南强降水机理研究和精细数值预报模式研发提供重要的科学数据。2018年，中国科学院近海观测研究网络暨我国首套具有智能剖面观测能力的三锚式浮标综合观测平台顺利完成布放，并第一时间参与“安比”台风观测试验。

近几年国内研发了几款波浪滑翔器，虽然其机动性不高(平均速度小于0.5 m/s)，但由于其优异的随浪性和续航能力，也已应用于台风观测试验(孙秀军等，2019)。我国研究人员还利用“海燕”水下滑翔机追踪了2017年的台风“天鸽”和“帕卡”，是我国首次利用滑翔机获得台风条件下的原位海洋环境参数。

2014年，美国国家海洋和大气局(NOAA)制定了改进飓风预报十年计划(HFIP)，目标是使路径和强度预报精度5年内提高25%，十年内提高50%，实现目标的第一要求就是增强飓风的观测(Gall et al., 2014)。一个重要发展趋势就是使用大型无人机平台，搭载Doppler降水雷达和下投探空仪等设备，对热带气旋进行全生命期的综合观测。

2014和2018年，中国气象局分别制定了海洋气象发展规划，其中包含了海洋气象综合观测能力的建设。一些新的探测平台和载荷正在研发和试验，例如：长

航时平流层飞艇及探测载荷（包括下投探空），长航时高空无人机及探测载荷（包括云雷达和微波辐射计等）。2020年，中国气象局大气探测中心和上海台风所分别组织了两次南海台风综合观测试验，即“海燕计划2020”和“2020年多平台协同台风观测试验”（Zhang et al., 2021）；在两次试验中，大气物理研究所无人艇团队研发的太阳能无人艇MWO-I（Marine Weather Observer-I）观测台风的能力得到了比较充分的展示（Chen et al., 2021；He et al., 2024）。

当前，除了使用卫星、飞机、飞艇等平台自上而下的探测TCs，还需要岸基、岛基和海上的原位观测，而现有的海上浮标和岛屿站提供资料的能力不足。这是因为TCs生成源地大多在远海且不固定，其移动路径多变，分布稀疏的常规岛屿站和浮标站提供的TCs观测数据极其有限。虽然静止气象卫星能够提供台风全过程的云图，但台风内部尤其是海面大气边界层的3维气象要素的定量遥感水平还很低。海上台风位置的不确定及其产生的大风大浪，使台风内部的原位探测具有极高的难度和挑战性（Eckman et al., 2007）。可以说，目前海上热带气旋内外部动力和热动力三维结构的详细直接观测资料还是非常缺乏，尤其是缺乏海上台风不同部位大气边界层的同步探测资料；台风强风浪条件下的海-气交换参量的测量十分困难，需要发展先进的探测技术和装备。

随着卫星导航、无人自动驾驶、卫星通讯和传感器等技术的发展，可以使用长航时无人艇平台及组网观测技术，在TCs内外部开展长期的观测试验。搭载在无人艇平台上的海洋水文与气象观测设备，具有自动部署、长航时、人员安全等优点（陈洪滨等，2019；Chen et al., 2021）。美国Liquid Robotics公司于2007年研制出一款长航时自主航行的波浪滑翔器（wave glider），2013年始正式启用，可以连续一年以上以走航或驻点方式在海上实时收集和传输海洋气象水文观测数据，经历过多个飓风和恶劣的海况。2014年4月，NOAA与Liquid Robotics公司签署了多项旨在提高海洋天气预报和海洋环境监测能力的合作协议。无人艇观测数据与NOAA的数据分析和模式开发相结合，已提高了NOAA飓风预报、CO₂观测和北极海洋环境的监测能力。美国Saildrone公司研制成功了一款自动驾驶双体帆船SD1，利用风帆自主航行；在2013年底，SD1在太平洋海上航行超过100天，航程达5000多英里，经受了多种恶劣海况。该公司计划SD未来的一个用途是取代海洋中的锚系浮标（<http://saildrone.com/>）。

从上述研究现状和发展趋势调研可见：（1）气旋生成和演变的长期综合观测

试验研究不足，缺乏海上台风内部的原位观测数据；（2）台风观测试验研究已运用多种平台和技术手段，包括卫星、飞机、船基和陆基平台及各种先进传感器；（3）无人驾驶平台将逐渐成为海上台风探测的主力，包括美国的全球鹰 GH、Aerosonde、Saildrone 和我国的“海燕号”无人机及 MWO 无人艇等。

自2014年开始至今，大气物理研究所无人艇团队自主研制了两款半潜式海洋气象观测专用无人艇，进行了十多次海上观测试验。尤其，太阳能半潜式无人艇（MWO-I）具有长航时自动航行和自动探测能力，机动性好，能够在恶劣海洋环境下生存（Chen et al., 2021）。无人艇上装备的多种传感器，航行中可以获得海面基本气象要素（还包括海表水温和盐度等要素）的连续资料。北斗通讯数据链路自动实时传输探测数据至地面指挥控制中心，获取重点海域海洋气象水文观测实测数据，支撑海上台风、热带风暴、大雾等灾害天气监测、海洋气象与水文环境研究预报及卫星产品验证。与国内外同类设备相比，大气物理研究所无人艇的综合技术水平达到国际先进水平（表1）。

表 1 与国内外同类科研仪器设备的对比

Table 1 Comparison with Similar Scientific Research Instruments at Home and Abroad

主要功能和技术参数	本项目	他人	说明
卫星导航、自动驾驶	有	有	本项目采用北斗导航和通讯
航时大于 20 天	达到	极少	大多无人艇航时<1 天
平均航速大于 3 节	达到	有	波浪滑翔器<1 节
半潜式	有	极少	抗风浪能力强
加载自动气象站	有	少	多装载在有人船舶、海岛和锚定浮标上
海温海盐剖面测量	有	无	多在有人船舶搭载
波浪测量	有	少数	多装载在有人船舶

（注：国内外相关技术或产品主要有美国 Saildrone 公司的自动驾驶双体帆船（SD1）、美国 Liquid Robotics 公司的波浪滑翔器（Wave Glider）、沈阳航天新光集团有限公司的无人驾驶船、中国航天科工（新光）集团研制的海上气象探测船、上海大学的“精海”无人艇、青岛海舟科技有限公司的波浪滑翔器。）

基于气象水文探测无人艇具有长航时、远程海面气象要素连续观测与低对流

层探空的优势，我们提出组网观测台风的计划，形成主要针对海上台风立体监测的自动化海洋气象原位观测系统。通过开展海上连续的组网观测试验，并对观测数据进行质量控制，开展资料融合、分析和同化效果评估等研究，以期增加台风内部大气边界层物理过程的科学认识并验证和改进数值模式预报能力。

3 组网观测设计

3.1 观测目标

在我国南海某一海域部署5~13艘半潜式气象水文探测无人艇，形成一个海上台风多区位多要素原位（in situ）中尺度观测网，联合大型无人机，开展数期海上组网观测试验，获取台风多区位海面气象和水面及水下温盐深资料，其中在1~2个观测点位实施海面到2000米高度的大气边界层探空；为台风和热带风暴等天气的分析和模式模拟研究提供原位（in situ）观测数据，综合数据分析与资料同化模拟研究，增加台风物理过程及原位观测资料同化效果的科学认识。

3.2 观测任务

针对以上研究目标，计划未来5年的主要研究内容和任务有：

（1）在南海重点海域部署多艇探测系统，形成一个海上台风多区位多要素原位观测网；开展5期每期1~3个月的海上探测试验，充分检验半潜式无人驾驶艇的各项海洋气象水文探测能力，尤其是高海况条件下的生存与探测能力；

（2）获取一批原位探测数据（包括海面气温、湿度、气压、风速及风向，海水温度SST及盐度、浪高与流速，海洋大气边界层探空廓线等），开发相应的资料质量控制算法；通过数据异常值剔除、分析处理与统计评估，给出数据可信度（精度范围）和获取率等信息，为台风数值模式、海气相互作用、大气波导建模等研究提供第一手资料。

3.3 实施方案

拟采用大气物理研究所无人艇团队自主研发的两款半潜式无人艇气象水文探测系统，在我国南海部署5~13艘无人艇形成一个区域中尺度观测网络，在2026~2030年开展5期每期1~3个月的海上观测试验，获取10个以上海上台风内部及其环境的多种原位观测数据；通过资料质量控制、融合分析和资料同化数值试验，增加台风内核大气边界层和海-气交换物理过程及原位资料同化效果的科学认识。

(1) 海上观测设备-无人艇

大气物理所无人艇团队自主研发了两款半潜式无人艇探测平台：以全太阳能为动力的无人艇航行平台（命名为MWO-I，简称太阳能艇）和以柴油发电机为动力的大载荷无人艇平台（命名为MWO-II，简称油电艇）。两款无人艇实物图如图1所示，主要组成结构如图2所示。

图1 无人艇海洋气象探测系统实物照片，左：太阳能艇MWO-I；右：油电艇MWO-II。（油电艇艇身在水线以下，自动气象站位于前上部，气象探空火箭筒位于中部，进排气管和探空接收机等位于后舱，两组水温 and 电导率传感器位于水线以下20cm和40cm。）

Figure 1 The photos of the unmanned surface vehicle (USV) marine meteorological detection system, named Marine Weather Observer (MWO). Left: solar-powered MWO-I; Right: diesel-electric MWO-II. (The hull of the diesel-electric USV is below the waterline. The automatic weather station is located at the front upper part, the meteorological sounding rocket tube is in the middle, the intake and exhaust pipes and sounding receivers are located in the rear compartment, and two sets of water temperature and conductivity sensors are located 20 cm and 40 cm below the waterline.)

图2 无人艇海洋气象探测系统组成

Figure 2 Composition of the Unmanned Surface Vehicle Marine Meteorological Detection System

表2列出两款半潜式气象无人艇的主要技术和性能指标。太阳能艇航时更长，而油电艇载荷量大，可以加载大中型传感器或探测通讯设备。

表2 两款无人艇探测系统的主要技术指标

Table 2 Main Technical parameters of both MWOs

技术指标	太阳能艇 MWO-I	油电艇 MWO-II
工作模式	航行模式、定位模式、漂流模式	航行模式、定位模式、漂流模式
重量	~120 kg	~8000 kg
尺寸	4.6m×2.0m×1.2m	8.6m×1.0m×2.0m
航速	2~4 节	5~7 节
航时	360 天	45 天
定位精度	10 m	10 m
载荷	20 kg	800 kg

通信	北斗/铱星/天通卫星	北斗/铱星/天通卫星
数据接口	USB 和 RS232	USB 和 RS232
供电	太阳能/24V	柴油发电机
功率	400W	7 kW
适应海况	9 级	9 级
通信频次	1~60min (可调)	1~60min (可调)
载荷	自动气象站、多要素数据采集及传输装置、浪高仪、温盐深仪 (CTD, 深度可达 300m)	自动气象站、多要素数据采集及传输装置、浪高仪、温盐深仪 (CTD, 深度可达 300m)、自动探空系统

两款无人艇都采用半潜式，虽然增加了一些阻力、降低了航速，但其优点是具有自扶正能力（似不倒翁），稳定性高，不仅有利于海面气象探测，而且抗恶劣海况能力强。自2017年起，这两款无人艇气象水文探测系统分别在福建、广东、海南、河北附近海域及青海湖进行了数十次海上和湖上试验，通过北斗通信控制和监测无人艇、以走航、定点和漂流模式观测并将观测数据和监测信息实时传输。数次海上试验充分验证了海洋气象水文探测无人艇MWO已经具备长航时（近一个月）、长航程（超过1100 km）、协同组网、远海观测（距离出发港口203 km）、抗恶劣海况（穿过台风“森拉克”中心，8级海况）的能力，相关技术以及数据结果已经公开发表（Chen et al., 2019,2021； He et al.,2024）。

(2) 试验区域

拟选择在海南岛以东-菲律宾以西的南海东北部（见图3）。根据历史数据统计，在此海域南海热带气旋或台风生成的频率较高。此外，在西太平洋生成后向偏西方向运动，经过此海域然后袭击海南岛及登陆广东和广西省的热带气旋和台风频数也很高。

图3 无人艇组网探测台风示意图

Figure 3 Diagram of unmanned surface vehicle networking for typhoon monitoring

(3) 组网设计

多艇组网空间分布有多种考虑，主要涉及观测数据的空间代表性（空间分辨率）、观测目标的尺度和观测最大覆盖范围等。因主要探测目标是海上热带气旋（台风），每艇间的间隔暂设为25~50km。针对热带气旋探测并利用无人艇机动性的优点，目前设计的分布形状主要有以下几种：长方形、十字性、五边（圆）

形和（多）三角型（图4）。

长方形是一种常规布局，易于生成与数值模式匹配的格点数据。十字形（参考陈大可团队部署的南海浮标/潜标阵列）在台风路径方向或南北/东西方向部署3~7个，以期在某个方向获得台风不同位置（含环境）同时的高时间分辨率数据。五边形或圆型在多个方向有同样的观测范围，有利于研究有对称结构的台风。多三角型在某个方向有更长距离的空间覆盖；5艇十字型是第一期试验时要采用的组网分布。

图4 无人艇观测组网布局示意：矩形、十字、五边和三角形

Figure 4 Layout schematic of the observation network of unmanned surface vehicles: rectangle, cross, pentagon, and triangle

无人艇海洋气象探测系统在到达预设地点后，为了保持“定点”观测，需要根据海流和风浪的情况，对其位置进行必要的调整。可以采用两个技术方案：一是根据测定的海流，自动调整无人艇的航速和航向，使其维持在设定点上工作；二是当无人艇海洋气象探测系统到达预设地点后，改为环形或方形转圈式航行模式，一直以较小的半径（小于300m）围绕预设点连续工作。第二种海上定点观测技术方案，不需要连续测量海流和调整航速与航向；由于海流的速度一般较小，转圈航行速度可以低于1节，所以能耗消费低，在技术更容易实现，这需要海上试验来检验与完善此观测方案。

还要试验一种运动组网探测方式，即数个探测艇以一定的距离间隔（如~50km），都沿着同一预设航迹（如圆形或椭圆形）航行探测。此组网方式可以获得高空间分辨率的资料，不仅有利于研究台风多种气象水文要素在不同部位的差异，还有利于研究海洋中尺度涡以及台风与海洋的相互作用。为了验证气象和海洋卫星遥感产品，此运动观测网可以部署在（极轨）卫星观测区域，与卫星开展时间上匹配的长期观测。

此外，为了使此组网观测数据更好地同化应用于数值模式研究（如：WRF-台风中尺度数值模式），还可以根据模式模拟效果研究的需要，在敏感性海域部署，进行目标性观测试验。

总之，无人艇航迹预设和实时更改功能允许我们进行多艇机动组网观测试验。

（4）组网观测试验

2026~2030年期间，每个夏半年开展一期海上台风组网观测试验；上半年前期准备试验方案，陆上测试MWO探测系统；下半年秋冬季总结试验经验、进行数据分析，针对出现的问题制定新的观测试验方案和改进探测技术。

按照循序渐进的原则，5期海上观测试验计划如下：

第1期（2025-2026）：采用5艇组网（5个MWO-I），为期2个月。主要目的是进一步检验MWO-I在高海况条件下的生存与探测能力，初步评估组网观测的能力。

第2~3期（2027~2028）：使用7艇组网（6个MWO-I和1个MWO-II），每期2~3个月（每年的7~9月），每期在柴电艇MWO-II上装载发射40枚探空火箭或气球探空；获取多个台风或热带气旋内部和环境的大气和海洋探测资料，开展资料综合分析与同化效果研究。

第4~5期（2029~2030）：采用9~13艇组网观测试验（7~10个MWO-I，2~3个MWO-II），每期2~3个月，在柴电艇MWO-II上施放80~120只气球或火箭探空；获取更多的海上原位观测资料，及时释放资料与有关研究团队共享，开展资料同化应用效果评估研究。

每期试验具体时段选择时，还将密切结合卫星观测信息，关注国内有关海上台风或南海立体观测计划，积极参与海上协同试验，如陈大可团队智能敏捷海上观测试验，孙秀军团队波浪滑翔器阵列观测试验，中国气象局多部门实施的基于大型无人机的“海燕计划”试验、其他漂流浮标和水下滑翔机观测试验，等等。多单位多观测设备的协同观测，将扩大台风资料获取时间、空间和要素的覆盖度，更多更好的资料共享将提升其利用率和价值，进而提高台风科学研究乃至预报水平。

（5）构建台风综合观测资料集

针对无人艇组网观测的原位数据，开展综合观测数据集的预处理和质量评估。单艇多传感器（自动气象站、火箭或气球探空以及海温、海盐和海浪、海流）数据远程实时传输已经实现（延迟小于2分钟），资料预处理已有基础。在此基础上，研发多艇组网综合观测资料的实时传输、预处理和分析方法与技术，实现实时的资料质量控制。

收集同期气象和海洋卫星（我国FY和HY系列卫星、日本葵花卫星等）、再

分析资料、海面浮标观测等资料，实现多源数据的相互验证与融合（例如：多源海温SST 和海面风速等），形成一套含有10个以上南海热带气旋/台风的综合观测资料集。为数值预备模式资料同化和预报效果检验提供第一手资料，以期改进模式对台风路径和强度的预报能力。

4. 无人艇组网观测的特色

(1) 台风内外部连续原位探测。

在台风经过前后和经过时，无人艇能提供海面气象和水文的原位观测数据及大气边界层探空资料，为卫星产品验证和边界层参数化模型验证等研究提供新的第一手数据；海上台风内部多种原位探测资料的获取，将弥补卫星、飞机和浮标等平台探测的不足；

(2) 台风不同部位的组网同步探测研究。

由于本计划采用组网观测系统（覆盖面积可以大于 $300\times 300\text{ km}^2$ ），能够同时获得台风经过区域多个部位的探测资料；无人艇有一定的机动性（每天约100km），将在台风中心、眼墙、外围雨带和环境特定区域同步获得资料，有助于定位定强、路径及强度变化和海气交换物理过程等的分析研究；

(3) 形成一种海上台风探测研究的新技术。

无人艇海洋气象水文探测平台将是未来海洋气象综合监测系统的重要组成部分；通过本计划的试验研究，有望为未来业务组网应用提供经验和示范。

5 总结与展望

登陆和近海的台风往往带来降水和清凉天气，但其伴随的暴雨、大风和风暴潮等又经常造成重大人员伤亡和财产损失。所以，防止和减轻台风灾害是国家的重大需求，台风也一直是大气和气象科学中的重要研究对象。对台风多年的观测、分析和数值模拟研究，使得我们对台风生成的基本环境条件、内部结构和演变规律等有了相当深入的认识。尤其，近30年来台风新观测技术和台风（飓风）数值预报模式都得到了很大发展，卫星、飞机（下投探空）和岸基雷达资料的同化应用使得台风路径预报误差在近20年内显著减少，24h的预报误差减少约50%。但是，当前台风快速增强、路径突变和生成机制仍然是台风研究中的三大难点科学问题，我们仍然缺少台风全生命期内部及环境多要素的实地（in situ）高时空分

辨率观测资料。

基于大气物理研究所无人艇团队自主研发成功的两款半潜式气象无人艇,发挥其机动部署和长航时探测的优点,在我国南海热带气旋多发和西太台风经过区域部署5~13艘无人艇形成一个组网观测系统,在夏半年开展5期(每期约30~90天)观测试验,实时获取远海热带气旋环境和内部海面的气象与水文实地观测资料,使用定时或远程控制释放的艇载火箭或气球探空技术,获取台风内部大气边界层的廓线资料。对收集的同期卫星观测产品和再分析资料等进行验证对比分析,形成一套南海热带气旋的综合观测资料集。

通过多源资料综合分析和模式同化等研究,验证和改进台风卫星定位定强算法,验证台风天气时相关卫星产品(例如:海面温度SST和风场等)的精度;比较与改进不同资料同化方案,进而有助于回答或厘清一些具体的科学问题,例如:外围海洋气象环境因子的时空变化有多大及其对台风路径和强度的影响,台风内部大气边界层的结构特征,海洋中尺度涡对台风演变的影响,远海台风快速增强和路径转折的主要影响因子和机制,等等。

致谢:本研究得到了国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目(41627808)和国家重点研发计划(2018YFC1506401)资助;作者要特别感谢所有大气物理研究所无人艇团队成员和有关合作单位人员在无人艇海上观测试验方面所做的巨大努力。

参考文献

- Aberson, S D. 2003. Targeted observations to improve operational tropical cyclone track forecast guidance (J). *Mon. Wea. Rev.*, 131: 1613-1628.
- Braun, S A, Newman, P A, Heymsfield, G M. 2016. NASA's hurricane and severe storm sentinel (HS3) investigation (J). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 98: 2085-2102.
- 曹敏杰, 刘增宏, 王振峰, 许建平. 2017. 台风海域实时海洋监测及其应用研究综述 [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 4: 47-52. Cao, M J, Liu, Z H, Wang, Z F, and Xu, J P. 2017. Review of Real-time Ocean Monitoring and Its Application in Typhoon Areas [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 4: 47-52.
- Chen, B Y, Mu, M, Qin, X H. 2013. The impact of assimilating dropwindsonde data deployed at different sites on typhoon track forecasts [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 141: 2669-2682.
- 陈颢, 史培军. 2013. 自然灾害(修订版)[M]. 北京: 北京师范大学出版社. Chen H and Shi P J. 2013. *Natural Disasters (Revised Edition)*[M]. Beijing Normal University Press, Beijing.
- Chen, H B, Li, J, Xuan, Y J, et al. 2019. First Rocketsonde Launched from an Unmanned Semi-submersible Vehicle [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 36(4): 339-345.
- 陈洪滨, 李军, 马舒庆等. 2019. 海洋气象观测技术综述与展望 [J]. *科技导报*, 37 (6): 1-7. Chen H B, Li J, Ma S Q, et al. 2019. An overview on the marine meteorological observation technologies[J]. *Science & Technology Review*, 37(6): 1-7.

- Chen, H B, and Coauthors. 2021. IAP's solar - powered unmanned surface vehicle actively passes through the center of Typhoon (2020) [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 38(4), 538-545, <https://doi.org/10.1007/s00376-021-1006-1>.
- 陈联寿, 端义宏, 宋丽莉, 等. 2012. 台风预报及其灾害 (M). 北京: 气象出版社. Chen L S, Duan Y H, Song L L, et al. 2012. *Typhoon Forecasting and Its Disasters (M)*. Beijing: China Meteorological Press.
- 陈文方, 端义宏, 陆逸, 等. 2017. 热带气旋灾害风险评估现状综述 [J]. *灾害学*, 32 (4): 146-152. Chen W F, Duan Y H, Lu Y, et al. 2017. A Review of the Current Situation of Disaster Risk Assessment of Tropical Cyclones [J]. *Journal of Catastrophology*, 32(4): 146-152.
- Christophersen, H, Aksoy, A, Dunion, J, et al. 2017. The impact of NASA Global Hawk unmanned aircraft dropwindsonde observations on tropical cyclone track, intensity, and structure: Case studies [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 145: 1817-1830. doi:10.1175/mwr - d - 16 - 0332.1.
- Chou, K H, Wu, C C, Lin, P H, et al. 2011. The impact of dropwindsonde observations on typhoon track forecasts in DOTSTAR and T - PARC [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 139: 1728-1743.
- 丁一汇编著, 2005: 高等天气学[M]. 气象出版社, 北京. Ding Y H (Eds.). 2005. *Advanced Synoptic Meteorology[M]*. Beijing: China Meteorological Press.
- D'Asaro, E A, and Coauthors. 2014. Impact of typhoons on the ocean in the Pacific[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, 1405-1418, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00104.1>. Doyle, J D, et al. 2017. A view of tropical cyclones from above: The tropical cyclone intensity experiment (J). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 98: 2113-2134. doi:10.1175/bams - d - 16 - 0055.1.
- 端义宏, 陈联寿, 许映龙, 等. 2012. 我国台风监测预报预警体系的现状及建议[J]. *中国工程科学*, 9: 4-9. Duan, Y H, Chen, L S, Xu, Y L, et al. 2012. The Current Situation and Suggestions of the Typhoon Monitoring, Forecasting and Early Warning System in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 9: 4-9.
- Eckman, R. M., et al. 2007. A pressure - sphere anemometer for measuring turbulence and fluxes in hurricanes[J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 24(6): 994-1007.
- Elsberry, R. L., and Harr, P. A. 2008. Tropical cyclone structure (TCS08) field experiment: Science basis, observational platforms, and strategy [J]. *Asia - Pac. J. Atmos. Sci.*, 44: 1-23.
- Emanuel, K, and Center, L. 2018. 100 Years of Progress in Tropical Cyclone Research[M]. *Meteor. Monogr.* doi:10.1175/AMSMONOGRAPHS - D - 18 - 0016.1.
- Franklin, J. L., Black, M. L., and Valde, K. 2003. GPS dropwindsonde profiles in hurricanes and their operational implications[J]. *Weather and Forecasting*, 18: 32-44.
- Gall, R., Toepfer, F., Marks, F., and Rappaport, E. 2014. NOAA Hurricane Forecast Improvement Project Years Five to Ten Strategic Plan HFIP Technical Report, HFIP2014 - 1.1a [R].
- He, W, Chen, H, Yu, H, et al. 2024. Evaluation of in situ observations on Marine Weather Observer during Typhoon Sinlaku [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 17: 135-144.
- 李杨, 马舒庆, 王国荣, 等. 2009. 无人机探测“海鸥”台风中心附近的资料初步分析 [J]. *地球科学进展*, 24 (6): 675-679. Li Y, Ma S Q, Wang G R, et al. 2009. Preliminary Analysis of Typhoon "Kalmaegi" Observed by using Unmanned Aerial Vehicle [J]. *Advances in Earth Science*, 24(6): 675-679.
- 李泽椿, 毕宝贵, 金荣花, 等. 2014. 近 10 年中国现代天气预报的发展与应用[J]. *气象学报*, 72 (6): 1069 - 1078. Li Z C, Bi B G, Jin R H, et al. 2014. The Development and Application of the Modern Weather Forecast in China for the recent 10 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 72(6): 1069-1078.
- 钱传海, 端义宏, 麻素红等. 2012. 我国台风业务现状及其关键技术[J]. *气象科技进展*, 5: 36-43. Qian, C H, Duan, Y H, Ma, S H, et al. 2012. The Current Situation of Typhoon Operations and Its Key Technologies in China [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 5: 36-43.
- 任福民, 向纯怡. 2017. 登陆热带气旋降水预报研究回顾与展望[J]. *海洋气象学报*, 37 (4): 8-18. Ren, F M, and Xiang, C Y. 2017. Review and Prospect of Precipitation Forecast Research for Landfalling Tropical Cyclones [J]. *Journal of Marine Meteorology*, 37(4): 8-18.
- Rogers, R, Abernson, S, Aksoy, A, et al. 2013. NOAA's hurricane intensity forecasting experiment: A progress report (J). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 94: 859-882.

- 孙秀军, 王雷, 桑宏强. 2019. “黑珍珠”波浪滑翔器南海台风观测应用[J]. 水下无人系统学报, 5: 562-569. Sun, X J, Wang, L, and Sang, H Q. 2019. Application of "Black Pearl" Wave Glider in Typhoon Observation in the South China Sea [J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 5: 562-569.
- Wu, C C, Chou, K H, Lin, P H, et al. 2007. The impact of dropwindsonde data on typhoon track forecasts in DOTSTAR [J]. Weather and Forecasting, 22: 1157-1176.
- 吴影, 陈佩燕, 雷小途. 2017. 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, 33 (5): 675-682. Wu, Y, Chen, P Y, and Lei, X T. 2017. Preliminary Study on the Benefit Evaluation of the Track and Intensity Forecasts of Landfalling Tropical Cyclones [J]. Journal of Tropical Meteorology, 33(5): 675-682.
- 许小峰等编. 2009. 海洋气象灾害 [M]. 北京: 气象出版社. Xu, X F, et al. (Eds.). 2009. Marine Meteorological Disasters [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 许映龙, 张玲, 高拴柱. 2010. 我国台风预报业务的现状及思考. 气象, 36: 43-49. Xu, Y L, Zhang, L, and Gao, S Z. 2010. The Current Situation and Reflection of Typhoon Forecasting Operations in China [J]. Meteorological Monthly, 36: 43-49.
- Yang, L, Wang, D X, Huang, J, et al. 2015. Toward a mesoscale hydrological and marine meteorological observation network in the South China Sea [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., DOI: 10.1175/BAMS-D-14-00159.1.
- 张诚忠, 万齐林, 丁伟钰等. 2012. 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, 70 (1): 30-38. Zhang, C Z, Wan, Q L, Ding, W Y, et al. 2012. Application Experiment of Dropsonde Data in the Track Forecast of Typhoon Morakot [J]. Acta Meteorologica Sinica, 70(1): 30-38.
- 张光智, 徐祥德, 王继志等. 2004. “中国登陆台风外场科学试验”风廓线仪探测资料在四维同化中的初步应用研究 [J]. 应用气象学报, S1 期: P101-109. Zhang, G Z, Xu, X D, Wang, J Z, et al. 2004. Preliminary Application of Wind Profiler Data from the "Field Scientific Experiment of Landfalling Typhoons in China" in Four-dimensional Data Assimilation [J]. Journal of Applied Meteorological Science, S1: P101-109.
- Zhang, H, Chen, D, Zhou, L, et al. 2016. Upper ocean response to typhoon Kalmaegi (2014) [J]. J. Geophys. Res. Oceans, 121: 6520-6535.
- 张璟, 李泓, 段晚锁, 张峰. 2022. 台风集合预报研究进展 [J]. 大气科学学报, 5: 713-727. Zhang, J, Li, H, Duan, W S, and Zhang, F. 2022. Research Progress on Typhoon Ensemble Forecasting [J]. Transactions of Nanjing University of Information Science & Technology (Journal of Atmospheric Sciences and Meteorology), 5: 713-727.
- Zhang, X F, and Coauthors. 2021. Comprehensive marine observing experiment based on high-altitude large Unmanned Aerial vehicle (South China Sea Experiment 2020 of the “Petrel Project”) [J]. Adv. Atmos. Sci., 38(4): 531-537.
- 郑国光, 陈洪滨, 卞建春等 [译]. 2008. 进入 21 世纪的大气科学 [M]. 北京: 气象出版社. Zheng, G G, Chen, H B, Bian, J C, et al. (Translators). 2008. Atmospheric Sciences in the 21st Century [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 周磊, 陈大可, 雷小途等. 2019. 海洋与台风相互作用研究进展 [J]. 科学通报, 64 (1): 60-72. Zhou, L, Chen, D K, Lei, X T, et al. 2019. Research Progress on the Interaction between the Ocean and Typhoons [J]. Chinese Science Bulletin, 64(1): 60-72.

Networked USVs for Typhoon Observation: A Conceptual Framework

Chen Hongbin^{1,2}, He Wenying^{1,2}, Jiang Zhuhui³, Tao Fa⁴, Ma Shuqing⁴, Li Jun¹, Pan Jidong¹

1 Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029

4 Meteorological Observation Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract

Landfalling and offshore typhoons often cause significant casualties and property damage through associated hazards such as torrential rainfall, strong winds, and storm surges. Current

understanding of three key scientific challenges, including rapid intensification, sudden track changes, and formation mechanisms, remains inadequate. One of the main reasons is the lack of high spatiotemporal resolution in situ observational data covering both internal typhoon dynamics and environmental factors throughout their complete lifecycle.

To address the scarcity of marine typhoon observation data, the unmanned surface vehicle (USV) team from the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences has independently developed two long-endurance semi-submersible unmanned surface vehicles and conducted multiple sea trials. This paper proposes a novel concept of networked unmanned vehicle observation systems to comprehensively obtain meteorological and oceanic multi-element field information during typhoon evolution processes.

Using automatically deployed solar powered USV and oil-electric powered USV with sounding equipment, a network observation system of USV is constructed in the South China Sea area where tropical cyclones occur frequently and typhoons pass through the Western Pacific, to conduct long-term typhoon observation experiments.

The highly maneuverable solar-powered USVs will acquire multi-element observations data of sea surface meteorology and hydrology, and the oil-electric powered USV equipped with rocket-based sounding technology will obtain profile data of the atmospheric boundary layer within typhoons. The UAV networked observation system will enable real-time in situ observation data collection from both the internal structure of marine tropical cyclones and their ambient environmental fields.

Concurrent satellite observation products and reanalysis data will undergo validation and comparative analysis with the collected data, forming a comprehensive observational dataset for multiple South China Sea tropical cyclones. This dataset will provide first-hand data for data assimilation in numerical prediction models and model performance evaluation, ultimately improving the models' capabilities in typhoon track forecasting, intensity estimation, and predictions of torrential rainfall and gale-force winds.

Keyword: Typhoon, Unmanned Surface Vehicle (USV), Marine in situ data, Networked observation

大

科

风

刊

大

学