

· 专题:双清论坛“全球海洋治理与合作的关键科学问题” ·

热带气旋海上观测技术的进展及展望^{*}

张 翰^{1, 2**} 陈大可^{1, 2, 3} 田 娣¹ 汤 杰^{4, 5} 王岩峰⁶

1. 自然资源部 第二海洋研究所, 杭州 310012
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519082
3. 上海交通大学 海洋学院, 上海 201100
4. 中国气象局 上海台风研究所, 上海 200030
5. 亚太台风研究中心, 上海 201306
6. 自然资源部 第一海洋研究所, 青岛 266061

[摘 要] 热带气旋期间海上现场观测数据严重缺乏,是该领域科学认识和海气环境预测预报能力提高的瓶颈问题。本文简要叙述了热带气旋期间海上锚定、机动、“抛弃式”和遥感观测方式的特点和发展现状,指出结合不同观测方式的海上立体协同组网观测是未来的发展方向,其中机动观测方式有很大的发展和应用空间。除设备和仪器技术的改进外,热带气旋预报、目标观测和最优观测设计、组网通讯和实时组网调节等方面的技术需要进一步发展。平台和数据方面,针对热带气旋观测的平台建设、设备完善、多源数据融合、数据的高效利用和共享等均值得深入规划。以往的观测呈现时间和空间不连续的情况,有必要在热带气旋频发海域开展长期的业务化观测等。

[关键词] 热带气旋;海上观测;仪器设备;技术发展;海气相互作用;组网协同观测

热带气旋是发生和发展于海洋上的气旋性天气尺度系统,根据《热带气旋等级》国家标准(GB/T 19201-2006),底层中心附近最大平均风速大于等于 12 级(32.7 m/s)的热带气旋被称为台风。我国是世界上受热带气旋影响最为严重的国家之一。过去几十年来,热带气旋路径预报的准确率不断提高,而强度预报准确率的提高相对较缓,这和热带气旋期间海上观测数据长期缺乏不无关系^[1, 2]。研究显示,加入热带气旋期间的海上现场观测数据能提高其强度和路径的预报准确率^[1, 3, 4]。

目前,热带气旋期间海上观测数据严重缺乏,已成为制约预警预测和防灾减灾能力的瓶颈问题^[5, 6]。首先,热带气旋本身的观测仍然不足,这限制了对其结构、强度和路径等变化机制和预报能力的改进。其次,热带气旋期间海气界面呈现海和



张翰 博士,自然资源部第二海洋研究所研究员。主要从事海洋和热带气旋相互作用研究,包括热带气旋期间的海上现场观测、数值模拟、统计分析、人工智能等方面研究。迄今发表学术论文 70 余篇,参与多项国家重点研发计划项目,主持国家自然科学基金面上项目、青年科学基金项目等。获 AOGS Kamide Lecture Award,海洋科学技术奖特等奖(排名 3/15),浙江省省部属企事业单位“名师高徒”称号,任中国海洋学会人工智能海洋学专业委员会委员。

之间的飞沫状态,但由于海气界面的观测数据和观测能力不足,其中海气边界层的物理性质、边界层垂向结构、飞沫微尺度过程、二氧化碳等气体通量、海盐气溶胶、动量和热量通量的时空分布和变化等均不十分明朗。再次,海洋和热带气旋的相互作用的高时空分辨率观测仍较缺乏,限制了诸如热带气旋

收稿日期:2024-06-29;修回日期:2024-12-09

^{*} 本文根据国家自然科学基金委员会第 366 期“双清论坛”讨论的内容整理。

^{**} 通信作者, Email: zhanghan@sio.org.cn

本文受到国家自然科学基金项目(42227901, 42176015)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(JG2309)、浙江省重点研发计划项目(2024C03257)的资助。

期间海洋中尺度和亚中尺度的变化及其反馈过程的认识。此外,目前热带气旋前后上层海洋变化过程的观测较多,对于海洋内部、深海乃至海底的观测不足,导致对于热带气旋影响海洋内部、深海乃至海底的过程和机制认识不足。最后,热带气旋引起的海洋物理要素变化的观测较多,对于生物地球化学要素的观测仍然偏少。从海气协同的角度看,目前缺乏热带气旋内部、海气界面和海洋内部同步的观测,制约了热带气旋期间海气耦合研究、模拟和预测预报的进步。从时空分布上看,观测常呈现时间和空间不连续的情况,导致热带气旋对海洋低频过程的影响及其反馈作用仍不十分清晰。

总之,针对热带气旋开展海上观测对提高海气相互作用和海洋环境变化的认识、提升热带气旋预报预警准确率和增强防灾减灾的能力有重要的意义^[5],本文拟总结和回顾已有的热带气旋期间的海上观测手段及其优劣,分析热带气旋观测的未来发展趋势,探讨热带气旋期间立体协同观测的可能性及其重点和难点,总结提炼了热带气旋期间海上现场观测的科学问题和关键技术(表1),拟为提高热带气旋期间的海上观测能力提供意见和建议。

1 热带气旋期间海上现场观测的主要方式

热带气旋期间海上现场观测的主要方式如图1所示,可分为锚定观测、机动观测、“抛弃式”观测、遥感观测。接下来将对不同的观测方式进行介绍。

1.1 锚定观测

热带气旋期间海洋和大气过程复杂多变,基于欧拉观点的空间固定但时间连续的锚定观测是热带

气旋期间海上观测的重要组成部分,主要包括各类锚定浮标、潜标、海上固定站和海底定点观测等。锚定浮标、潜标和固定站可搭载仪器类型丰富,可观测要素种类多,包括海表气象要素、海气通量,以及海洋的物理和生物地球化学要素等^[6],是目前热带气旋期间海上现场观测数据的重要来源。值得指出的是,除专门布放的锚系外,固定站还包括海岛及石油平台等搭载的自动气象站和潮位观测等。近年来,学者们发现海底地震仪^[7]、海底光缆^[8]等定点观测中亦能捕获热带气旋引起的声学和水文信号等,有望成为热带气旋期间海上观测数据的另一重要来源。

由于单个锚定站位只能获取单一水平位置上的海洋和大气信息,因而开展多个锚定观测站位的组网观测便显得尤为重要。例如国家重点基础研究发展计划项目“上层海洋对台风的响应和调制机理研

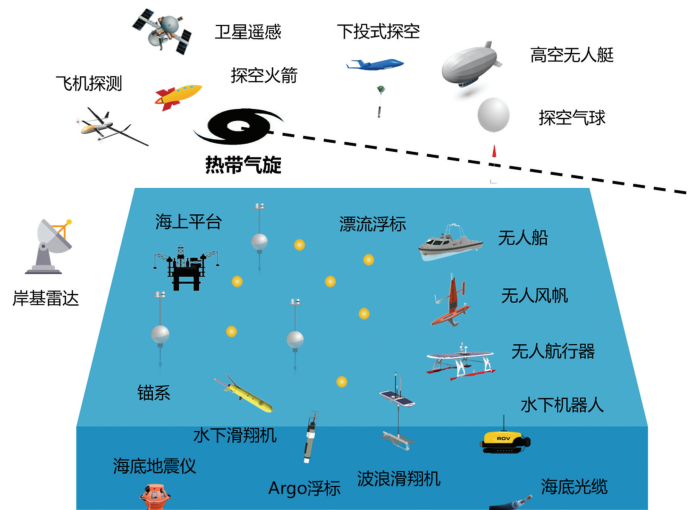


图1 热带气旋期间海上观测示意图

表1 热带气旋期间海上现场观测的科学问题和关键技术

科学问题	意义	重点	关键技术
热带气旋结构及其变化	热带气旋演变机制	热带气旋内部、高空出流层、海气界面	热带气旋内部高风速和海况情况下高质量数据的获取
海气界面性质和通量交换	海气边界层、海气通量交换、海气耦合机制	飞沫层性质、海气通量观测、边界层微结构	飞沫气溶胶、湍流微结构、气液交换的针对性观测
上层海洋响应和反馈	高影响天气事件的海气相互作用	上层海洋变化、海洋对热带气旋响应的脉络	高时空分辨率的上层海洋和热带气旋的协同观测
海洋内部和海底过程	热带气旋对海洋的三维影响及其对深海和海底的作用	海洋中下层、海底过程	热带气旋期间观测设备在海洋内部的定位和微信号的解析
海洋的低频变化与热带气旋的关系	海气长时间的变化、热带气旋对海洋低频过程的影响及其反馈作用	固定地点长时间的观测	站位规划、数据传输和存储、长时间观测和维护

究”开展的南海北部锚系观测阵列^[9, 10]捕捉到了多个热带气旋期间的海气数据,已广泛被业界应用于科研和业务实践中。另一方面,有必要开展长期(多年的)定点连续观测。在同一站位的观测时间较长时,其学术研究和业务应用价值呈一定的指数级增长,然而由于维护成本高和经费资助不连续等问题,此类锚定长期观测仍然十分稀少。总体而言,尽管目前锚系观测技术已发展相对成熟,但针对热带气旋布设和开展的锚定观测站位和观测阵列,无论是数量还是观测时间长度上,都仍然很难满足科研和业务需求,有必要进一步规划和统筹。

1.2 机动观测

由于锚定观测成本较高且无法根据需要(如热带气旋路径变化等)实时调整位置,因而近些年来业界广泛开发机动观测手段。

热带气旋期间恶劣的海况使得传统的有人船观测难以进行,因而新型无人设备应运而生,包括水下滑翔机(Underwater Glider)、波浪滑翔器(Wave Glider)、无人航行器(Unmanned Surface Vehicle, USV)和无人船(Unmanned Ship)等^[6]。目前,水下滑翔机技术发展比较成熟,已成为全球海洋观测系统的重要组成部分,多个国家和地区亦已在西北太平洋、大西洋及其边缘海等地开展热带气旋前后包括浅水海岸过程、海洋中上层温盐变化、沉积物再悬浮、湍流通量变化在内的海洋观测^[11]。热带气旋个例观测结果显示,水下滑翔机能获取高时间分辨率的温盐信息,对提高热带气旋前后层结和剖面结构变化的认识有重要的意义^[12, 13]。波浪滑翔器则广泛应用于热带气旋期间的海气界面过程观测,包括海表面温、风、浪、流等^[14, 15],已用于研究热带气旋内核区的海气相互作用^[14]、验证热带气旋海表风场模型的有效性^[15]等。成功用于热带气旋观测的无人航行器包括美国开发的无人风帆(Saildrone)^[1, 16]以及我国开发的太阳能海上无人航行器(Solar-Powered USV)等^[17]。近年国内外无人船技术蓬勃发展,为开展热带气旋期间海上无人观测提供了新的平台。目前国内计划开展基于无人智能母船的,包括小型无人船在内的多种无人设备布放(于热带气旋来临前)和回收(于热带气旋过后)的观测技术^[18]。

除无人海上设备外,飞机观测是获取热带气旋内部资料的重要手段^[4, 19]。自 20 世纪以来,美国于

太平洋和大西洋附近开展了长期的有人飞机观测,推动了热带气旋本身结构和变化机理的研究。然而,有人飞机探测成本高,也伴随着较高的人员伤亡风险,因而近年来无人飞机的发展成为热带气旋观测的另一大趋势。例如,包括“全球鹰”在内的高空无人机加强了对飓风高层“出流层”结构等的直接观测^[20],提高了对飓风结构影响强度变化的认识。我国亦已成功采用多种型号的大中小型无人机开展了针对台风的探测试验,收集了大量的观测数据^[19]。除无人机外,高空无人艇也已逐渐应用至热带气旋的观测中来^[21]。

1.3 “抛弃式”观测

锚定和机动设备会于观测结束后回收,而另一类设备在布放后不回收,称之为“抛弃式”观测,此类观测方式是热带气旋期间海上观测很好的补充。Argo 剖面浮标目前已广泛分布于海洋之中,已具备一定的数据规模和时空覆盖率,被广泛应用于包括海洋和热带气旋相互作用在内的研究和业务化预测预报中^[22]。传统的 Argo 浮标主要以温盐剖面观测为主,在热带气旋期间可进行高频加密观测^[22]。近年来,搭载了一系列物理、生物与化学多传感器的生物地球化学剖面浮标(BGC-Argo 浮标)还能获取海洋的叶绿素、有色可溶性有机物、溶解氧、硝酸盐、颗粒物等有关要素^[6, 22],对于提高热带气旋期间的生物地球化学过程的认识有潜在意义。除 Argo 浮标外,海面漂流浮标(Drifter)、自动剖面浮标(Profiling Floats)、拉格朗日浮标(Lagrangian Floats)等^[23]均可以通过飞机空投或者提前在热带气旋前部布放等方式组成一条线或一个阵列,开展热带气旋期间海气界面通量和上层海洋温盐要素等的连续观测。近期研究显示海面漂流浮标的轨迹和海气界面观测可用于推算热带气旋期间的海气热通量和海表风场^[24]等。由于海面漂流浮标已形成一定的数据规模和时空覆盖率,故其应用价值值得进一步期待。

飞机投放下投式探空仪(Dropsonde)可获取一次性的大气垂向剖面资料^[3, 16],而机载“抛弃式”温深计(Airborne expendable Bathy Thermograph, AXBT)、温盐深仪(Airborne expendable Conductivity Temperature Depth, AXCTD)和流速仪(Airborne expendable Current Profiler, AXCP)等可获取一次性的海洋垂向剖面资料^[25]。美国国家海洋和大气管

理局开展了长期的下投式探空仪试验,我国的香港天文台则在南海北部进行了多年的下投式探空仪的试验。此外,我国还创新性地采用火箭弹放下投式探空仪,同样能够获取台风不同位置的垂向结构廓线,且避免了飞机投放的风险^[26]。除下投式探空外,探空气球亦是较为经济的“抛弃式”探空手段,可于海上平台或飞行器上开展布放观测。

1.4 遥感观测

在资源有限的情况下锚定、机动和“抛弃式”观测方式覆盖的范围有限,而遥感观测能获取大范围的大气和海面信息,因而是热带气旋观测中不可或缺的手段。目前遥感观测主要包括星基的卫星观测和岸基的雷达观测,主要用于热带气旋位置、强度、结构^[27]以及海气界面过程的分析 and 预测等。卫星遥感观测包括海表高度计、合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)、散射计、降雨雷达、微波成像仪、光谱仪、辐射计、激光雷达、云和气溶胶雷达等,观测的要素包括热带气旋风场、气温和海表水温、海表盐度、降雨、海表高度、云量、海表面波等。卫星资料已广泛应用于业务和科研实际,包括热带气旋期间数值模拟、数据同化、数据集制作和机器学习^[28]等。在近岸地区,卫星遥感往往存在观测准确率降低或缺测的现象,而锚定、机动和“抛弃式”观测也相对不足,因而沿岸或岛屿上的岸基遥感观测是很好的补充。岸基遥感观测包括多普勒雷达、地波雷达、偏振雷达、风廓线雷达、探空雷达等,为近海特别是登陆前热带气旋期间的海气状况监测提供宝贵的数据。

由于狂风、暴雨和云的遮盖等,热带气旋刚经过时遥感观测往往有缺测或者偏差的现象。随着卫星

技术的提高,小卫星组网观测能够提供热带气旋核心附近的大气和海洋状况,而采用低频微波遥感组网能穿透厚云和降水,获取热带气旋眼墙内部的数据^[6]。除星载和岸基外,飞机、无人机、高空无人艇^[21]或者无人船载遥感观测是补充热带气旋期间遥感观测不足的一种可能的发展方向。

1.5 小结

综合来看,不同观测方式各有自身的发展状况和特点。首先,锚定观测技术已较为成熟,可获取海面到海底较长时间的数据,并已广泛应用于海上常规观测。不过锚定观测空间位置固定,其对热带气旋的观测有“守株待兔”的情形,常伴随一定的运气成分。其次,机动观测技术仍在发展中,其观测时长相对较短,潜力尚未被充分开发。机动观测能主动根据对象调节观测位置和频次等,适合针对热带气旋这类现象的加密观测。再次,“抛弃式”观测方式种类较多,布放后的设备有“随波逐流”的特点,具有一定的不可控性。不过“抛弃式”观测成本相对较低,部分设备已有一定的覆盖率、利用率和成熟度,适合作为其他观测方式的补充。最后,遥感观测空间覆盖范围大,目前也已被广泛应用于科研和业务实际,且其技术亦在不断改进,主要在于搭载平台的多样化、时空分辨率的提高和观测要素的增多等。然而,遥感观测仅能获取大气和海表的状况,对于海洋内部的要素获取能力不足,同时在热带气旋这种高影响的天气时间期间,遥感观测常常出现缺测现象。上述不同类型海洋观测方式的所需设备、特点及未来趋势总结见表2。

由于不同的观测方式各有其长处和短处,比较理想的是开展综合协同观测。比如,在遥感观测覆盖

表2 针对热带气旋的海上观测类型、特点及未来趋势

观测方式	锚定	机动	“抛弃式”	遥感
主要设备	浮标、潜标、固定站、地震仪、海底光缆	水下滑翔机、波浪滑翔器、无人船、无人飞行器、水下机器人、有人飞机、无人机、高空无人艇等	Argo浮标、表面漂流浮标、下投式探空仪、探空气球、探空火箭、其他“抛弃式”海上设备	高度计、合成孔径雷达、散射计、降雨雷达、微波成像仪、光谱仪、辐射计、激光雷达、云和气溶胶雷达等
特点	定点长时间观测,“守株待兔”,技术成熟,须定期维护	机动性高,可根据热带气旋变化调整观测位置,技术仍需完善	设备成本低,不必考虑回收,可广泛布放或作为组网观测的补充	观测范围大,采样间隔较大,热带气旋会影响其观测准确率
未来趋势	结合遥感、锚定、机动和“抛弃式”观测方式的针对热带气旋的海上立体协同观测,低成本、高效率、高分辨率地获取水文和气象数据			

的范围内,以锚定观测站位为基础、布放机动和“抛弃式”设备,并根据热带气旋发生和发展情况调节机动设备。总之,结合遥感、锚定、机动和“抛弃式”观测方式的针对热带气旋的海上立体协同观测,低成本、高效率、高分辨率得获取水文和气象数据是未来的一个趋势。

2 综合协同观测的技术问题和体系建设

2.1 热带气旋海上立体协同观测进展

如上所述,由于不同的观测方式各有优劣,因此有必要结合锚定、机动、“抛弃式”和遥感等手段开展针对热带气旋的立体协同观测。2014 年左右,国际太平洋台风影响海洋观测试验 (Impact of Typhoons on the Ocean in the Pacific, ITOP) 开展了结合卫星遥感、飞机观测、锚系、船测、自动浮标和漂流浮标的针对台风的组网观测^[29]。近期,美国国家海洋和大气管理局拟结合无人机、水下滑翔机、无人风帆、下投式探空仪、自动浮标、漂流浮标等开展针对飓风的无人机组网观测^[16]。基于国家自然科学基金重大仪器项目“智能敏捷立体观测仪”,国内亦拟开展以智能母船为基础,结合无人机、探空仪、小型无人船、无人浮标、无人潜器、探空火箭的针对台风的海上无人组网观测^[18],目前已针对 2023 年台风小犬开展小规模无人组网观测^[14]。总之,依赖无人机动设备的海上立体协同观测技术有望获取低成本、高效率、高分辨率的组网观测数据,为热带气旋期间海气相互作用、海洋动力环境变化科学认知突破和防灾减灾等提供支持。

2.2 热带气旋海上协同观测的技术问题

目前,针对热带气旋的海上观测正从以往守株待兔式的观测逐步转向主动式的组网观测^[16, 18],因而很多技术性的问题应运而生。首先,虽然目前热带气旋的路径预报误差在 5 天内较小,但在 7~14 天的延伸期预报时间内仍然较大^[28],因此无论是提前于海中布放设备还是布放后实时调整组网的位置,都依赖热带气旋路径预报准确率的进一步改善。其次,需要考虑设备的“实际观测”能力。例如,海面的设备需要考验其抗风浪的能力,提前布放的设备需要考虑其续航能力,能否工作到热带气旋来临,机动设备则需要考验其机动性。目前的机动设备在水平方向上的运动能力有限,从热带气旋发生到影响

观测海域过程中机动组网的调整能力仍然有限。再次,热带气旋的观测敏感区和最优观测设计^[2, 3]、海上设备组网通讯、多种海上设备根据热带气旋预报路径实时调节组网的算法^[30]等仍有很大的发展空间。最后,遥感观测方面,改进遥感观测设备和反演算法,提高热带气旋期间观测的覆盖率、准确率和有效率,如何做到与海上的锚系、机动和“抛弃式”设备的协同观测和交叉验证等问题值得进一步深入研究。

2.3 热带气旋海上观测体系的综合建设

随着热带气旋的海上观测蓬勃发展,有必要从整体的层面对其进行系统性的建设。首先,观测存在重复建设和不系统的问题,因而需要科学有效规划和设计并合理调配资源并实施,使得观测的要素类型和时空范围充分覆盖。比如可以参考地面气象站,在热带气旋较常发生和经过的海域规划相对固定的常规观测点,开展长期观测,这会对认识海洋低频变化和热带气旋的关系、推动该领域的研究乃至海上预测预报能力的提高有深远的影响。其次,目前观测设备和平台已有一定的发展,但设备组件的国产化率仍需提高,特别是针对热带气旋这种高风速和高海况情形下的观测探头种类和观测准确率仍需提高。再次,随着热带气旋期间海上观测方式逐渐呈现多样化趋势,如何协同获取、存储和传输多源异构的观测数据,制订数据质量控制方案和数据汇编格式,并制作便于科学研究和业务实际的数据集会是未来值得关注的问题。需要指出的是,目前热带气旋期间的海上观测数据仍以事后获得为主,能够实时传输并输入预测预报模式模拟和数据同化的观测资料仍然有限。最后,目前热带气旋期间数据的利用率仍然较低,其效能并未很好地开发,因而如何制订在保障各方权益情况下切实有效的数据共享和使用机制,是值得深入思考的问题。

3 总结和展望

热带气旋于海上产生和发展,显著影响海洋和大气环境,常常造成沿海地区居民的生命和财产损失。由于热带气旋期间海上现场观测难度较大,使得热带气旋本身、海气界面和海洋内部的观测均严重缺乏,不仅制约了对热带气旋演变和海气相互作用认识的提高,也制约了热带气旋前后预警预测能

力的改善。

针对热带气旋的海上现场观测可以分为锚系、机动、“抛弃式”和遥感观测等手段。其中锚系观测主要包括锚定浮标、潜标、海上固定站和海底定点观测等,其可搭载仪器的类型丰富、可观测要素种类多,能对指定位置开展长时间的观测,已被广泛应用于获取热带气旋海气界面、海洋内部和海底的数据。机动观测主要包括空中、海面和水下的有人和无人设备,近年来以无人机动观测设备为主要趋势。机动观测灵活性相对高些,能在一定程度上补充锚定观测“守株待兔”方式的不足,具有一定的主动性,适合针对热带气旋这类现象的加密观测。“抛弃式”观测在布放之后不回收,主要包括各类抛弃式的浮标、探空设备和海上设备等,其设备种类和能观测的要素也较多,部分抛弃式设备已被广泛应用并有一定的数据规模。相对来说,“抛弃式”观测成本较低、适合作为其他观测方式的补充。遥感观测主要包括各类陆基和天基的主动和被动雷达和其他遥感设备,遥感观测能获得大范围的大气和海面信息,其覆盖范围广且已被广泛应用于业务和科研实际。虽然遥感观测仅能获取大气和海表的信息,较难感知海洋内部的情形,且在热带气旋期间存在准确率和缺测的问题,但仍不妨碍遥感观测作为热带气旋期间观测数据的主要来源之一。

总体而言,锚系观测技术已成熟,无人观测技术正蓬勃发展,“抛弃式”观测技术有发展空间,遥感观测技术仍在持续进步。这些观测方式已较广泛应用于热带气旋期间的海上现场观测。图2所示为海上协同组网观测的主要组成及现状展望。特别地,静止轨道卫星和小卫星组网观测有一定的发展前景,无人平台如无人船、无人飞行器、平流层飞艇等为热带气旋观测提供了新的思路等。由于不同的观测手段布放、回收、维护和获取数据的方式和成本不同,有必要结合这些观测手段开展针对热带气旋的海上立体协同观测。未来热带气旋期间的观测会更强调大气内部、海气界面、海洋内部和海底的同步观测数据的获取。未来,热带气旋期间的海上现场观测将从“守株待兔式”观测逐渐转向有一定自主性的主动组网观测。因此,热带气旋特别是路径的预报能力、目标观测敏感区的确定和最优观测设计、海上设备组网通讯技术的发展、多种海上设备实时组网调节等方面仍有很大的提高空间。从体系建设上来看,

有必要在热带气旋频繁发生和经过的地区规划长期的观测,做好观测平台和设备的研发和完善,构建热带气旋前后多源观测数据的接收、质量控制和共享利用的流程体系等。

总之,随着观测技术的发展,海上观测设备的层出不穷、观测手段日新月异,相应的设施建设也逐渐完善,有望突破诸如热带气旋这种极端天气和高海况之情形下现场观测的诸多瓶颈问题,提供更多种类和来源的观测数据。希望在可见的未来,通过科学、技术和管理等各方的努力逐步改善热带气旋期间海上观测和数据不足的情况,推动海洋和热带气旋相互作用乃至海气相互作用领域技术、研究和业务能力的提升和学科发展等,亦为提高防灾减灾能力和公众服务能力做出贡献。

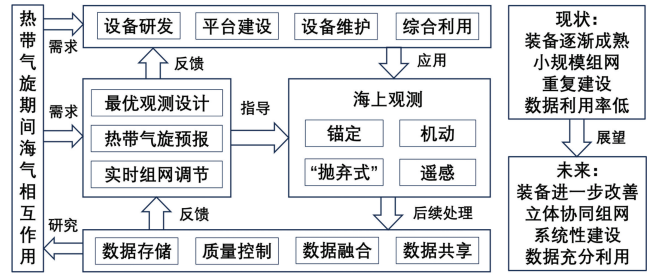


图2 热带气旋期间海上协同组网观测及其现状和展望

参 考 文 献

[1] Miles T, Zhang DX, Foltz GR, et al. Uncrewed ocean gliders and saildrones support hurricane forecasting and research. *Oceanography*, 2021, 34(3): 78—81.

[2] Domingues R, Kuwano-Yoshida A, Chardon-Maldonado P, et al. Ocean observations in support of studies and forecasts of tropical and extratropical cyclones. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 446.

[3] Qin XH, Duan WS, Chan PW, et al. Effects of dropsonde data in field campaigns on forecasts of tropical cyclones over the western North Pacific in 2020 and the role of CNOP sensitivity. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2023, 40(5): 791—803.

[4] Zawislak J, Rogers RF, Aberson SD, et al. Accomplishments of NOAA's airborne hurricane field program and a broader future approach to forecast improvement. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2022, 103(2): E311—E338.

- [5] Zhang H, He HL, Zhang WZ, et al. Upper ocean response to tropical cyclones: A review. *Geoscience Letters*, 2021, 8(1): 1.
- [6] 王岩峰, 王冠琳, 林劲松, 等. 热带气旋海上观测进展. *海洋科学进展*, 2023, 41(1): 1—23.
- [7] Lin JM, Fang SK, Xu W, et al. Multi-instrument observations of microseisms generated by typhoon Kalmaegi (2014) over the Northwestern Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 594: 117746.
- [8] Lin J, Fang S, He R, et al. Monitoring ocean currents during the passage of Typhoon Muifa using optical-fiber distributed acoustic sensing. *Nature Communications*, 2024; *Naturecommunicationsvol.* 15, 11111. 6Feb. 2024.
- [9] 周磊, 陈大可, 雷小途, 等. 海洋与台风相互作用研究进展. *科学通报*, 2019, 64(1): 60—72.
- [10] Zhang H, Chen D, Liu T, et al. MASCS 1.0: Synchronous atmospheric and oceanic data from across-shaped moored array in the northern South China Sea during 2014—2015. *Earth System Science Data*, 2024, In Press.
- [11] 杨绍琼, 成丹, 陈光耀, 等. 面向典型海洋现象观测的水下滑翔机应用综述. *热带海洋学报*, 2022, 41(3): 54—74.
- [12] 孙雨桐, 成丹, 杨绍琼, 等. 水下滑翔机观测台风“天鸽”过境的海洋响应研究. *数字海洋与水下攻防*, 2023, 6(2): 198—208.
- [13] Zhang YF, Zhang H, Tang XD, et al. Oceanic response to tropical cyclone in the northern South China Sea observed by underwater gliders during 2018 and 2020. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2024, 213: 104387.
- [14] Zhang H, Tian D, Sun YT, et al. Unmanned vehicles probed inner-core air-sea conditions during Super Typhoon Koinu (2023). *Science Bulletin*, 2024; In Press.
- [15] Tian D, Zhang H, Wang S, et al. Sea surface wind structure in the outer region of tropical cyclones observed by wave gliders. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2023, 128(3): e2022JD037235.
- [16] Zhang CD, Foltz GR, Chiodi AM, et al. Hurricane observations by uncrewed systems. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2023, 104(10): E1893—E1917.
- [17] Chen HB, Li J, He WY, et al. IAP's Solar-Powered Unmanned Surface Vehicle Actively Passes through the Center of typhoon Sinlaku (2020). *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(4): 538—545.
- [18] Dong C, Chen DK, Wang DX, et al. Intelligent swift ocean observing system. *Ocean-Land-Atmosphere Research*, 2023, 2: 0022.
- [19] 汤杰, 赵兵科, 雷小途. 国内外台风飞行科学试验进展及展望. *气象科技进展*, 2022, 12(5): 47—55.
- [20] Guimond SR, Heymsfield GM, Reasor PD, et al. The rapid intensification of hurricane karl (2010): New remote sensing observations of convective bursts from the global hawk platform. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73(9): 3617—3639.
- [21] 王向荣, 黄嘉怡, 谢晋东, 等. 面向艇载气象雷达的稀疏相控阵优化设计. *信号处理*, 2024, 40(9): 1569—1586.
- [22] Riser SC, Freeland HJ, Roemmich D, et al. Fifteen years of ocean observations with the global Argo array. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 145—153.
- [23] D'Asaro EA, Sanford TB, Niiler PP, et al. Cold wake of Hurricane Frances. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(15): L15609.
- [24] Wang GH, Wu LW, Mei W, et al. Ocean currents show global intensification of weak tropical cyclones. *Nature*, 2022, 611: 496—500.
- [25] Meyers PC, Shay LK, Brewster JK, et al. Observed ocean thermal response to Hurricanes Gustav and Ike. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(1): 162—179.
- [26] 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(32): 3789—3796.
- [27] 胡天慧, 余晖, 鲁小琴. 基于卫星遥感的热带气旋定强技术综述. *热带气象学报*, 2022, 38(2): 311—320.
- [28] Wang Z, Zhao J, Huang H, et al. A review on the application of machine learning methods in tropical cyclone forecasting. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 902596.
- [29] D'Asaro EA, Black PG, Centurioni LR, et al. Impact of typhoons on the ocean in the Pacific. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(9): 1405—1418.
- [30] Sun YT, Cheng D, Yang SQ, et al. Optimal design of a glider array for the observation of tropical cyclones. *Progress in Oceanography*, 2023, 217: 103103.

The Progress and Prospect of the Maritime Observation Technology during Tropical Cyclones

Han Zhang^{1, 2*} Dake Chen^{1, 2, 3} Di Tian¹ Jie Tang^{4, 5} Yanfeng Wang⁶

1. *Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012*

2. *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082*

3. *School of Oceanography, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030*

4. *Shanghai Typhoon Research Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200030*

5. *Asia-Pacific Typhoon Collaborative Research Center, Shanghai 201306*

6. *First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061*

Abstract The severe insufficient maritime in-situ observation during tropical cyclones is a bottleneck problem that restricts scientific understanding and the improvement of air-sea environment prediction and forecasting capabilities in this field. This article briefly describes the characteristics and current development status of moored, mobile, disposable and remote sensing observation means during tropical cyclones. It points out that combining different observation means for maritime three-dimensional collaborative network observation is the future development direction, among which the mobile observation method has great potential for future development and application. In addition to improvements in equipment and instrument, further development is needed in technologies such as tropical cyclone forecast, target observation and optimal design, network communications and real-time adjustments of observation instruments. In terms of platform and data, the platform construction, equipment improvement, multi-source data fusion, and efficient use and sharing of data for tropical cyclone observations are all worthy of in-depth planning. Previous observations during tropical cyclones have shown temporal and spatial discontinuities, making it necessary to conduct long-term operational observations in areas where tropical cyclones frequently occur.

Keywords tropical cyclone; maritime observation; instruments and equipment; technological development; air-sea interaction; collaborative network observation

(责任编辑 陈鹤 张强)

* Corresponding Author, Email: zhanghan@sio.org.cn