

台风海域实时海洋监测及其应用研究综述

曹敏杰^{1,2} 刘增宏^{1,2} 王振峰³ 许建平^{1,2}

(1 国家海洋局卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 杭州 310012; 2 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012;
3 上海海洋气象台, 上海 201300)

摘要: 简要阐述了台风海域实时海洋监测及其对台风预测预报的重要意义, 以及利用卫星跟踪的自动剖面浮标实时监测海洋环境要素的必要性和迫切性; 同时也回顾了国内外学者利用少量来自海上的自动剖面浮标观测资料, 在天气/气候领域的基础研究中所取得的初步成果, 呈现了自动剖面浮标在台风海域组网实施实时海洋监测及其有望提高对台风强度和路径, 乃至生成源地预测预报水平的广阔前景。

关键词: 自动剖面浮标, 实时海洋监测, 海洋环境, 台风, 预测预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.04.005

A Review of Real-Time Ocean Monitoring in Typhoon Region and Research Applications

Cao Minjie^{1,2}, Liu Zenghong^{1,2}, Wang Zhenfeng³, Xu Jianping^{1,2*}

(1 State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012

2 Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012

3 Shanghai Marine Meteorological Center, Shanghai 201300)

Abstract: In this paper, real-time ocean monitoring in typhoon genesis region and its importance for typhoon forecasting, as well as the necessity and urgency of monitoring marine environmental elements in real-time with satellite-tracked autonomous profiling floats are reviewed. Meanwhile, preliminary results in basic research on atmosphere/climate using observations from a few profiling floats are also reviewed. These efforts have effectively demonstrated the broad prospects of autonomous profiling float in real-time ocean monitoring, it improves the prediction and forecasting of typhoon intensity, moving track, and even its genesis location.

Keywords: autonomous profiling float, real-time ocean monitoring, marine environment, typhoon, prediction and forecast

0 引言

我国毗邻西北太平洋, 该海域是全球热带气旋(台风)发生最为集中的区域。据世界气象组织统计, 每年大概有占一半以上的热带气旋发生在北太平洋海域, 这其中约有80%会发展成台风^[1]。

热带气旋是影响我国的主要灾害性天气之一, 通常伴随巨浪、暴雨、狂风和风暴潮, 造成洪涝, 冲毁水库, 引发山体滑坡和泥石流, 对经过地区人民的生命、财产和生产活动造成巨大威胁, 对海上作业、海洋渔业和海水养殖业等造成重大安全隐患和经济

损失。如2015年, 我国沿海共发生台风风暴潮过程6次, 直接经济损失72.18亿元, 死亡7人。随着沿海经济带经济的迅速发展和全球气候变暖, 台风灾害有愈演愈烈之势, 已成为我国海洋经济可持续发展的一个制约因素^[2-3]。

国际Argo计划是人类历史上建成的首个全球海洋立体观测系统, 从2000年启动以来, 在美国、日本、法国、英国、德国、澳大利亚和中国等30多个国家和团体的共同努力下, 已经在全世界大洋中建成了由近4000个Argo剖面浮标组成的实时海洋观测网, 用来监测上层海洋内的海水温度、盐度和海流, 以帮助人类应对全球气候变化, 提高防灾减灾能力, 以及准确预测诸如发生在太平洋的台风等极端天气和海洋事件^[4]。

由此可见, 台风对我国所造成的灾害和损失巨大, 有必要加大对相关基础研究的投入, 深化对台风生成与发展机理的认识, 提高对台风的实时监测和预报能力, 减少台风和风暴潮等气象和海洋灾害对我国

收稿日期: 2016年11月6日; 修回日期: 2017年5月8日
第一作者: 曹敏杰(1987—), Email: caominjie@sio.org.cn
通信作者: 许建平(1956—), Email: sioxjp@139.com
资助信息: 科技基础性工作专项(2012FY112300); 国家自然科学基金项目(41606003); 卫星海洋环境动力学国家重点实验室自主项目(SOEDZZ1514)

沿海社会经济和人民生命财产带来的重大损失，无疑是国家防灾减灾的重大需要。

1 海洋与台风相互作用过程研究进展与问题

台风路径和台风强度预报是台风预报中的两个关键因子。过去几十年，随着卫星遥感技术、数值模拟和数据同化技术的发展，台风路径预报水平有了显著提高，但有关台风强度的预报水平发展仍相对缓慢，其原因在于台风强度变化不但与大气复杂的涡旋动力学、热力学过程紧密联系，而且与海气相互作用密切相关^[5-7]。海洋内部不同动力过程对台风的响应将调制海面状态，从而影响海气界面交换，进而影响台风结构和强度变化。在台风影响下，海洋的中尺度环流会显著加强局地的动力和热力过程，通过将大量的机械能输入到海洋内部使得局地的海洋混合加强，从而改变温盐度结构；由埃克曼（Ekman）抽吸、夹卷和湍流混合引起的次表层冷水上翻，使海表温度降低，通过海气界面交换将抑制台风的增强。因此，加强对台风条件下上层海洋的认识，将有助于人们了解由台风引起的海洋夹卷、湍流混合及近惯性内波等不同尺度过程的机制。

无论对于海洋科学还是大气科学，海洋与台风的相互作用过程都是当前的研究热点和难点，也将是今后相当一段时间内的科学前沿问题。近年来，国际海洋与大气科学界进行了一系列大规模的热带气旋研究计划。例如，美国科学家在北大西洋进行了“耦合边界层海气交换”（CBLAST）试验，目的是认识热带气旋与海洋的相互作用并改善预报模式，同时与台湾科学家合作，在台湾以东实施了“太平洋台风对海洋影响”（ITOP）计划^[8-9]。目前，我国对台风的监测主要针对台风的登陆过程，海上观测极为罕见。台风登陆后，主要利用沿海地区自动气象站、高空探测、沿海多普勒雷达以及特种观测设备（GPS/MET水汽监测和边界层气象梯度探测）对台风进行监测。近年来，我国开展的有关台风的观测或科研项目主要有：2001年实施的中国登陆台风试验（CLATEX）^[10]；2009年启动的国家重点基础研究发展规划（973计划）项目“台风登陆前后异常变化及机理研究^[11]”；2013年启动实施了一个973计划项目“上层海洋对台风的响应和调制机理研究”^[12]。这些研究计划或项目的一个重要特点是利用综合立体观测手段，试图了解上层海洋对热带气旋的响应机制和调制作用，并探讨利用海洋观测资料提高预报能力的可能性^[12]。

长期以来制约台风研究和影响台风预报精度的根本原因，除了台风过程中气象资料的缺乏，还在于缺

乏台风生成源地或路径附近海域长时间序列的实时海洋（次表层）观测资料，以及台风天气和恶劣海况下观测海洋环境要素的有效手段和方法，从而阻碍了人们对海洋与台风相互作用过程的深入了解和准确模拟，更无法获得台风预报所需要的、可靠的海洋初始场。

众所周知，台风路径附近上层海洋在台风过境后产生较为复杂的流场，导致台风路径两侧以及台风最大风速半径内外存在不同的响应过程，而且台风前海洋的初始状态不同也能导致不同的响应过程，因此，如果在台风路径附近能获取实时的、大面积范围内（300 km）的上层海洋观测资料，对研究上层海洋对台风的响应和调制机理，进而提高台风预报精度能起到重要作用。所以，有必要通过国家业务主管部门的支持，利用业已研制成功的、适合在恶劣环境下观测的新颖海洋仪器设备，以便能大范围、长时间、高分辨率和实时地获取台风天气条件下的上层海洋环境资料，为发展和完善海洋与台风相互作用的理论方法、耦合数值模式等相关基础研究提供充分的数据源，从而为提高我国对台风的研究及其预报水平奠定基础。

2 发展Argo海洋观测网，成功实施台风海域实时海洋监测

过去，适合台风条件下海洋观测的手段主要有使用飞机投放的抛弃式温度测量仪（AXBT）和抛弃式海流剖面观测仪（AXCP）^[13]。但这种通过飞机投放的观测设备，一方面投放成本非常大，另一方面其观测寿命比较短，无法获取长时间序列的资料。一些锚碇浮标的观测资料也被用于偶然经过的台风对海洋影响的研究，虽然这种浮标可携带多种海洋或气象传感器，但其成本和维护费用都相当大，且容易受到人为因素的破坏以及恶劣天气的影响，难以构建用来专门观测台风的阵列或观测网^[13]。常规的船只走航或定点海洋观测，也只能在台风发生前或过境后实施，尤其是台风发生前的海洋调查，不是离台风生成日期或源地、路径太远，就是离台风太近，形成的大风大浪导致调查船无法实施观测，而且也十分危险。近年来，卫星遥感技术的发展似乎给恶劣天气下的海洋观测带来了曙光，其反演资料被广泛应用于热带气旋对海洋上层影响的研究^[14-15]。但卫星遥感只能观测海洋表面的温、盐度等海洋环境要素，而无法获取人们更关心的上层海洋（如1000 m水深以上）的环境要素资料。

于是，人们把眼光投向了21世纪初开始在全球海洋中构建的实时海洋观测网（核心Argo）。国际Argo计划自2000年启动以来，已经于2007年10月在

全球无冰覆盖的大洋上建成了一个由3000多个Argo剖面浮标组成的观测网，每个浮标能每隔10天自动观测1条0~2000 m水深内的温、盐度剖面，并通过卫星将观测资料经地面接收站和数据处理中心及互联网传递给用户^[16-17]。虽然，Argo观测网中浮标的分布密度（约300 km）、剖面观测周期（约10天），以及剖面测量过程和采样间隔等还不能完全满足海洋和大气科学家的要求，但也为人们带来了观测台风作用下的海洋是如何变化的希望和新思路^[18-19]。早期的Argo浮标，大部分使用Argos卫星进行单向通信，即无法在台风到达前或经过时能随时改变浮标的观测周期等技术参数实施对海洋的加密观测，以更多地获取台风路径附近海域上层海洋环境要素，而且数据传输速率较慢（<1 bytes/s），无法满足高分辨率观测数据的传输要求。于是，人们开始尝试使用具有双向通信、高速率传输（180~300 bytes/s）功能的铱卫星（IRIDIUM）通信系统。目前，在全球海洋中约40%的Argo浮标采用铱卫星传输数据，而我国也已经在西北太平洋海域布放了51个该型浮标，目前仍有约9个浮标在海上正常工作，在2012—2015年台风季节期间通过铱卫星双向通信功能，获取了一批加密Argo剖面资料，并已应用到上层海洋对台风响应过程（图1）的研究中。所以，Argo剖面浮标将会是今后较长一段时间内有能力监测台风海域实时海洋环境的重要手段。

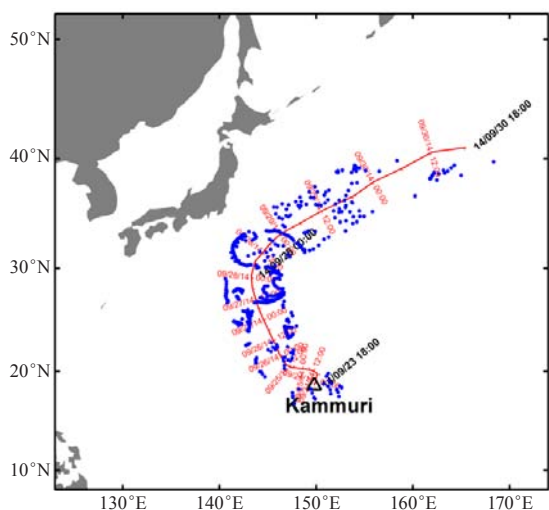


图1 2014年Kammuri台风路径附近Argo浮标剖面位置
Fig. 1 Positions of Argo floats near the track of Typhoon Kammuri in 2014

表1列出了上述各种观测仪器设备或观测系统的特点和优劣势对比。可以看到，使用卫星双向通信功能的剖面浮标构建海洋观测阵，对台风作用下的海洋进行大范围、长期、连续、实时监测，将是一种最理想、最有效的观测手段。

表1 台风天气条件下不同海洋观测方式比较
Table 1 Comparison of various ocean observing methods in situ under typhoon conditions

观测设备	观测要素	优点	缺点
AXBT、AXCP	温度、盐度、海流	价格便宜	投放成本大、使用寿命短，8级以上大风天气无法投放
锚碇浮标	温度、盐度、海流、风速、湿度和气温等	观测要素多	成本及维护费用大，易受人为破坏及恶劣天气的影响
船载CTD、ADCP仪	温度、盐度、海流	观测深度可超过2000 m，采样间隔密集	8级以上大风天气无法观测
卫星遥感	海表温、盐度、风场、降水、水汽等	覆盖面广，可全天候观测	仅观测海表面
常规Argo剖面浮标	温、盐度（可加溶解氧、叶绿素等传感器）	成本低、观测深度达2000 m，易于组成观测阵	使用国外卫星导航系统，定位、通信受制于人，且只能单向通信，数据传输速度较慢，剖面垂向分辨率不高
铱卫星Argo剖面浮标	温、盐度（可加溶解氧、叶绿素等传感器）	成本低、观测深度可达2000 m，可双向通信，剖面垂向分辨率高，易于组成观测阵	使用国外卫星导航系统，定位、通信受制于人

在国外，除了美国早期开发的APEX型剖面浮标和法国研制的ARVOR型剖面浮标可以专门用于台风海域的实时海洋环境监测外，美国伍兹霍尔海洋研究所还成功开发出了一种专门用于台风观测的微型空投浮标（ALAMO），可以在台风来临之前利用飞机快速、准确地布放在台风海域，以便获取更大范围内、更多的现场观测资料。

在国内，台风海域的实时海洋监测也越来越受到人们的广泛重视，除了相关的973计划项目和基础性工作专项等已在西北太平洋台风海域陆续布放了一批常规（利用ARGOS单向通信）Argo剖面浮标外，还布放了数十个可以双向通信（利用IRIDIUM卫星系统）的剖面浮标。需要指出的是，2015年9月，由中船重工七一〇研究所自主研发的HM2000型剖面浮标，采用了我国的北斗卫星系统（BEIDOU）定位和传输观测资料，并具备与铱卫星相同的双向通信功能，同样可用于台风海域的实时海洋监测。第一批（6个）HM2000型剖面浮标已经由中国科学院海洋研究所率先布放在西北太平洋西边界流海域（吕宋岛以东），并得到了国际Argo信息中心（AIC）的认可。部分资料经过中国Argo实时资料中心严格质量控制后，已经通过全球通信系统（GTS）和互联网（WWW、FTP），与世界气象组织（WMO）和国际Argo计划成员国共享。这标志着HM2000型剖面浮标已经走出国门，正式成为Argo剖面浮标大家庭中的一员，打破了长期以来Argo海洋观测网由欧美浮标一统天下的局面，从而实现了我国海洋观测仪器设备用于

国际大型海上合作调查计划“零”的突破。同时期筹建的“北斗剖面浮标数据服务中心（中国杭州）”，也已成为继ARGOS卫星地面接收中心（法国图卢兹）和IRIDIUM卫星地面接收中心（美国马里兰）后，第三个有能力为全球Argo实时海洋观测网提供剖面浮标观测数据传输的服务中心。

3 自动剖面浮标观测资料在天气/气候学研究领域中的应用

3.1 热带气旋（台风）研究

早在2010年11月，我国就开始使用铱卫星Argo剖面浮标，在西北太平洋海域开展了台风季节Argo剖面浮标加密观测试验，获取了台风路径附近海域0~500 m、间隔2~3天的大量加密剖面资料，这些新颖的第一手现场观测资料为研究上层海洋对台风的响应提供了丰富的数据来源^[4]。

国内外众多学者利用西北太平洋海域的Argo资

料，开展了台风过境海洋上层响应过程的相关研究工作^[13, 20-28]。刘增宏等^[13]通过对西北太平洋Argo浮标观测资料分析发现，由台风影响的混合层盐度变化在台风路径两侧分布对称；许东峰等^[20]在研究了西北太平洋暖池区夏季Argo浮标观测资料后得到，台风经过暖池区时，往往会导致海面盐度的下降，其主要原因为热带气旋带来的淡水输入；Liu等^[25]通过铱卫星Argo浮标加密观测资料分析显示，2012年Bolaven台风路径左右两侧海洋表层和次表层呈现不同的温盐度变化过程（图2）；Pei等^[28]通过Argo观测资料结合卫星和模式的研究发现，海洋上混合层深度在台风作用下会增加，并向大气释放潜热；Lin等^[21, 22, 26]通过分析台风过境海域Argo现场观测资料，研究了海洋热含量对于热带气旋强度及其对风暴潮影响的预测，并建立了新的热带气旋预报因子。此外，McPhaden等^[29]利用Argo和RAMA（印度洋的热带锚系观测网）资料来研究2008年Nargis热带气旋的形成过程。

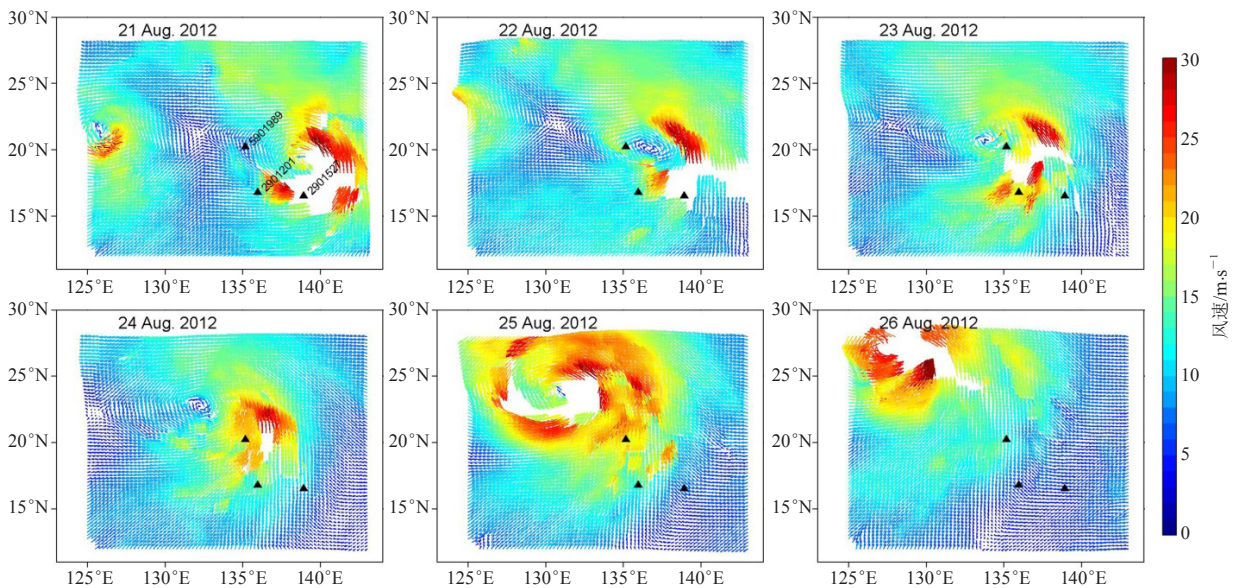


图2 2012年8月21—26日台风Bolaven期间的逐日风矢量分布^[25]

（彩色阴影为风矢量；黑色三角形为采取铱卫星双向通信的Argo剖面浮标）

Fig. 2 Daily wind vector distributions of Typhoon Bolaven during August 21—26, 2012(wind speeds are shaded by colors; the three selected Iridium profiling floats are marked with black triangles^[25])

3.2 海洋对热带气旋响应和反馈研究

上层海洋对热带气旋（TC）的响应和反馈是一种极端天气条件下的中尺度海气相互作用，对于其相互作用机制和过程的了解有助于更好地理解TC的产生、发展以及强度、路径变化等原因，进而为TC预报、预警提供依据。尽管短暂的天气现象并不是Argo的观测重点，但是Argo浮标通过全天候的观测，能帮助人们

更好地了解TC生成海域的海洋内部状态以及发展过程中附近海域的海气热交换、淡水通量变化等过程。

Argo浮标由于不受恶劣环境的影响，适用于上层海洋响应和反馈研究，特别是TC经过的海洋存在着强烈的海气相互作用，往往发生强烈的混合、夹卷等过程。在台风经过之前、经过时和经过之后，海洋的响应是不同的，台风经过时主要是垂向的湍流混合，而

台风过后则主要是近惯性流引起的埃克曼涌升和惯性抽吸^[30]。Price通过模式结果研究发现,台风导致的海表降温主要是由于上升流或深层海水混合,而不是海表失热^[31]。Cheng等^[27]基于Argo资料研究了全球尺度范围内海洋热状态对TC的响应,研究表明:在热带风暴经过的3天内,海洋向大气提供能量以维持热带风暴,其年平均总值约为 9.1 W/m^2 ,其中 3.2 W/m^2 来自于热带风暴,剩余的 5.9 W/m^2 来自台风,且在台风经过后(平均4~20天),海洋获得能量,而热带风暴经过后,海洋则损失能量,揭示了超强TC和强TC对于海洋热状态影响的不同。Park等分析台风经过前后混合层温度(Mixed Layer Temperature, MLT)和混合层厚度(MLD)变化后发现,北太平洋混合层温度平均下降 1°C ,混合层厚度平均加深 56 m ^[32]。比较台风经过前后海洋近表层和次表层热含量变化表明:强TC下,垂向混合导致次表层的升温 and 近表层的冷却量级相当;在弱TC下,近表层(海水深度1 m以上)的冷却显著,但次表层(表层以下,以跃层为界,厚度一般为 $200\sim 300 \text{ m}$)升温不明显,这说明在弱TC里海气热交换和垂向对流作用更显著^[30]。Park等研究发现,近表层热含量恢复时间(大于30天)要远远长于海表温度的恢复时间(仅需10天)^[33]。许东峰等指出台风经过时海表盐度(Sea Surface Salinity, SSS)的变化取决于降雨、蒸发增加、混合层内混合增强和跃层涌升等4个效应间的竞争结果,而Argo剖面观测显示在西北太平洋暖池区的绝大部分台风往往引起SSS的下降^[20]。台风强度变化除了与海表温度有关,还与海洋的垂向温盐结构特征有关。台风在经过有障碍层海域时,稳定的海洋层结减弱了垂向的混合冷却,热量从海洋传向大气导致台风强度增强,同时盐度结构也可以作为海洋状态的指示来预报台风强度变化^[34]。

4 面临的挑战与展望

Argo的核心目标是观测与气候变化密切相关的海洋信息,包括海洋温度与热容量、盐度和淡水容量、相对于总海平面的海面比容高度,以及大尺度环流等的区域性和全球变化。Argo资料的成功应用大大加深了对台风活动的认识。利用Argo剖面浮标,我们有能力对台风海域海洋环境进行实时监测,从而可以大范围、长时间、高分辨率和实时地获取台风天气条件下的上层海洋环境资料。这些数据源对发展和完善海洋与台风相互作用的理论方法、耦合数值模式等相关基础研究具有重要意义。

然而,作为今后较长一段时间内有能力监测台风海域实时海洋环境的重要手段,Argo计划目前正

面临着重大挑战。一是今后10年以温盐观测为主的常规观测网的维持问题,预计每年仍需投放 $800\sim 900$ 个浮标。像Argo计划这样的全球海洋观测系统至少需要持续数十年才能体现其潜在的价值,这也正是气候变化研究所必需的。Argo观测网若不能持续稳定,业务化海洋服务、气候服务、季节和年代际预测预报等都无法持续。二是扩展Argo观测网的覆盖区域,将由目前的“核心Argo”向“全球Argo”扩张,包括高纬度海域、边缘海和西边界海域,布放浮标的数量也将从目前的3000多个增加到近4000个,这是Argo计划未来10年的发展目标。按照国际Argo信息中心(AIC)的估算,在由“核心Argo”向“全球Argo”扩张的过程中,除了需要新增加约1000个浮标外,每年还需要补充布放约1000个浮标,才能维持由4000个浮标组成的全球Argo实时海洋观测网。然而目前由30多个Argo成员国每年布放的浮标数量只有800个左右。美国承诺为维持该观测网提供约1/2的浮标,其他参与国也都在为维持该观测网的长期运行而积极争取政府的支持。

中国Argo计划虽然是在国务院正式批复“我国可加入Argo全球海洋观测计划”以后,由科技部基础研究司、国际合作司和国家海洋局科技司等部门共同管理实施的一项国家计划,但没有如其他国家设置专项那样分配相应的资金,而是由科技部和国家海洋局负责实施的已有研究专项或计划(如“国家重点基础研究发展规划前期研究专项”“国际科技合作重点项目计划”“海洋公益性行业科研专项”和“科技基础性工作专项”等)中调剂部分经费给予一次性资助,缺乏固定的支持渠道和经费保障。目前,我国Argo大洋观测网的维护和浮标补充布放主要依赖科研项目的支持,缺少长期稳定的经费支撑,导致每年布放的浮标数量十分不稳定,甚至有些年份(如2005和2007年)无标可放,与一个海洋大国的地位尚有距离。我国参与全球Argo实时海洋观测网建设,不仅仅是在尽一个国际Argo计划成员国的义务,也是在全球自然灾害频发的今天肩负起一个海洋大国的责任,而更为重要的是,对此有着十分迫切的国家需求。事实上,许多Argo成员国(如美国、法国、德国、英国、日本和韩国等国家)的浮标布放计划,都得到了来自国家海洋气象部门的经费支持。为此,中国Argo计划应该得到国家海洋和气象主管部门的高度重视和大力支持。

值得指出的是,全球Argo实时海洋观测网的建设目标主要是为了获取大洋表层到中层(约 2000 m),甚至到深层(约 6000 m)范围内的温、盐度剖面资料,以便帮助科学家了解大尺度实时海洋的变化,提

高天气和海洋预报的精度，有效防御全球日益严重的天气和海洋灾害（如飓风、台风、龙卷、冰雹、洪水和干旱，以及风暴潮、赤潮等）给人类造成的威胁。然而，Argo资料在我国相关领域（特别是天气、气候研究）的应用却还未能引起足够的重视。当然，海洋观测网的时间序列与气象观测网相比还不够长、缺少海表温度（SST）资料（目前大部分剖面浮标还只能观测离海面3~5 m以深的温度资料），以及不能业务化提供高质量、格点化浮标资料等问题，也是制约气象学家大规模应用Argo资料开展相关研究的障碍。但从我们了解的情况来看，要突破障碍和解决上述问题不在于技术或方法的缺乏，而主要受到体制和机制的约束，特别是要统一和提高对全球Argo实时海洋观测网长期建设必要性的认识。

为此，气象部门应充分利用我国成功开发北斗剖面浮标的契机，在邻近我国的西太平洋（台风）海域构建起我国的实时海洋监测系统。通过北斗卫星或铱卫星及时调整浮标观测参数，以获取更多的加密观测资料，以及快速检索台风路径附近海域的Argo资料并自动生成相关数据产品，为国内气象服务部门准实时提供台风海域的相关海洋环境数据和信息服务。同时，该监测系统中的北斗剖面浮标或其他采用铱星通信的剖面浮标，其常规（每隔10天获取的一个深水剖面）观测资料，以及已经漂移离开台风影响海域的浮标观测资料，可以作为中国Argo计划的一部分，与WMO和国际Argo计划成员国共享，不仅可以提高我国对深海大洋长期、连续、高时空分辨率和高精度观测的能力，而且还可以提升我国在国际Argo成员国中的地位和作用。

参考文献

- [1] Peduzzi P, Chatenoux B, Dao H, et al. Global trends in tropical cyclone risk. *Nature Climate Change*, 2012, 2(4): 289-294.
- [2] 陈光华, 黄荣辉. 西北太平洋热带气旋和台风活动若干气候问题的研究. *地球科学进展*, 2006, 21(6): 610-616.
- [3] 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. *气象学报*, 2009, 67(5): 875-883.
- [4] 刘增宏, 吴晓芬, 许建平, 等. 中国Argo海洋观测十五年. *地球科学进展*, 2016, 31(5): 445-460.
- [5] D'Asaro E A, Black P G, Centurioni L R, et al. Impact of typhoons on the ocean in the Pacific. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(9): 1405-1418.
- [6] Emanuel K A. Thermodynamic control of hurricane intensity. *Nature*, 1999, 401(6754): 665-669.
- [7] 陈联寿, 孟智勇. 我国热带气旋研究十年进展. *大气科学*, 2001, 25(3): 420-432.
- [8] Chen S S, Price J F, Zhao W, et al. The CBLAST-hurricane program and the next-generation fully coupled atmosphere wave ocean models for hurricane research and prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, 88(3): 311-317.
- [9] D'Asaro E, Black P, Centurioni L, et al. Typhoon-ocean interaction in the western north Pacific: Part 1. *Oceanography*, 2011, 24(4): 24-31.
- [10] Chen L S, Zhou M Y, Xu X D. A tropical cyclone landfall research program (CLATEX) in China: 26th Conference on Hurricane and Tropical Meteorology, Miami, May 3-7, 2004. Amer Meteor Soc, 2004.
- [11] 端义宏, 陈联寿, 梁建茵, 等. 台风登陆前后异常变化的研究进展. *气象学报*, 2014, 72(5): 969-986.
- [12] 陈大可, 雷小途, 王伟, 等. 上层海洋对台风的响应和调制机理. *地球科学进展*, 2013, (10): 1077-1086.
- [13] 刘增宏, 许建平, 朱伯康, 等. 利用 Argo 资料研究 2001—2004 年期间西北太平洋海洋上层对热带气旋的响应. *热带海洋学报*, 2006, 25(1): 1-8.
- [14] 胡潭高, 张登荣, 王洁, 等. 基于遥感卫星资料的台风监测技术研究进展. *遥感技术与应用*, 2013, 28(6): 994-999.
- [15] 刘广平. 海洋上层对热带气旋响应的研究. 厦门: 厦门大学, 2009.
- [16] Riser S C, Freeland H J, Roemmich D, et al. Fifteen years of ocean observations with the global Argo array. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2): 145-153.
- [17] 许建平, 刘增宏, 孙朝辉, 等. 全球Argo实时海洋观测网全面建成. *海洋技术学报*, 2008, (1): 68-70.
- [18] 陈大可, 许建平, 马继瑞, 等. 全球实时海洋观测网(Argo)与上层海洋结构、变异及预测研究. *地球科学进展*, 2008, 23(1): 1-7.
- [19] Liu Z, Xu J, Sun C, et al. An upper ocean response to Typhoon Bolaven analyzed with Argo profiling floats. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(11): 90-101.
- [20] 许东峰, 刘增宏, 徐晓华, 等. 西北太平洋暖池区台风对海表盐度的影响. *海洋学报*, 2005, 27(6): 9-15.
- [21] Lin I, Goni G J, Knaff J A, et al. Ocean heat content for tropical cyclone intensity forecasting and its impact on storm surge. *Natural Hazards*, 2013, 66(3): 1481-1500.
- [22] Lin I I, Black P, Price J F, et al. An ocean coupling potential intensity index for tropical cyclones. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(9): 1878-1882.
- [23] Sun L, Li Y X, Yang Y J, et al. Effects of super typhoons on cyclonic ocean eddies in the western North Pacific: a satellite database evaluation between 2000 and 2008. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(9): 5585-5598.
- [24] Wang X, Wang C, Han G, et al. Effects of tropical cyclones on large-scale circulation and ocean heat transport in the South China Sea. *Climate Dynamics*, 2014, 43(12): 3351-3366.
- [25] Liu Z, Xu J, Sun C, et al. An upper ocean response to Typhoon Bolaven analyzed with Argo profiling floats. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(11): 90-101.
- [26] Lin I I, Pun I F, Lien C C. "Category-6" supertyphoon Haiyan in global warming hiatus: contribution from subsurface ocean warming. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(23): 8547-8553.
- [27] Cheng L, Zhu J, Srivier R L. Global representation of tropical cyclone-induced short-term ocean thermal changes using Argo data. *Ocean Science*, 2015, 11(5): 719.
- [28] Pei Y, Zhang R, Chen D. Upper ocean response to tropical cyclone wind forcing: A case study of typhoon Rammasun (2008). *Science China: Earth Sciences*, 2015, 58(9): 1623-1632.
- [29] McPhaden M J, Foltz G R, Lee T, et al. Ocean-atmosphere interactions during cyclone nargis. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 2009, 90(7): 53-54.
- [30] 安玉柱, 张初, 陈奕德, 等. Argo资料处理及其在海洋热动力学研究中的应用与进展. *Argo科学研讨会论文集*. 北京: 海军出版社, 2014.
- [31] Price J F. Upper ocean response to a hurricane. *Journal of Physical Oceanography*, 1981, 11(2): 153-175.
- [32] Park J, Park K, Kim K, et al. Statistical analysis of upper ocean temperature response to typhoons from ARGO floats and satellite data. *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, 2005, 13(7): 2564-2567.
- [33] Park J J, Kwon Y O, Price J F. Argo array observation of ocean heat content changes induced by tropical cyclones in the north Pacific. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(C12): 210-222.
- [34] Balaguru K, Chang P, Saravanan R, et al. Ocean barrier layers' effect on tropical cyclone intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(36): 14343-14347.