海洋与台风相互作用研究进展

周磊^{1,2}, 陈大可^{2*}, 雷小途³, 王伟⁴, 王桂华⁵, 韩桂军⁶

1. 上海交通大学海洋研究院, 上海 200030;

2. 国家海洋局第二海洋研究所, 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 杭州 310012;

3. 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030;

4. 中国海洋大学, 物理海洋教育部重点实验室, 青岛 266003;

5. 复旦大学大气科学研究院, 上海 200438;

6. 国家海洋信息中心, 国家海洋局海洋环境信息保障技术重点实验室, 天津 300171

* 联系人, E-mail: dchen@sio.org.cn

2018-07-05 收稿, 2018-10-30 修回, 2018-10-31 接受, 2018-12-10 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2013CB430300)和全球变化与海气相互作用专项(GASI-IPOVAI-04)资助

摘要 台风灾害是全球最主要的气象灾害之一。到目前为止, 人们已经从大气科学的角度对台风进行了长期系统并且卓有成效的研究。但人们对台风过程中海洋的剧烈变化及其对台风的反馈仍然缺乏足够的认识, 这也成为限制台风研究和预报水平的一个瓶颈问题。因此, 海洋与台风在各种时空尺度上的相互作用机理及其对台风预报和短期气候趋势预测的贡献是当前国际海洋与大气科学研究的重大前沿课题。本文基于国家重点基础研究发展计划, 总结了海洋与台风相互作用的最新研究成果, 重点梳理了海洋中尺度过程对台风的影响与反馈、海洋与台风的低频相互作用及其对短期气候变化趋势的影响、台风过程中的海洋多源资料同化及利用海气耦合模式进行台风预报等若干方面的研究进展。最后, 提出了今后在海洋与台风相互作用研究中需要关注和重点解决的若干关键科学问题。

关键词 台风, 中尺度涡, 海洋次表层变化, 多源数据同化, 海气耦合预报

1 海洋与台风相互作用的简要研究历史

西北太平洋每年有二十几个台风, 是全球台风活动最频繁的区域。地处太平洋西岸、拥有漫长海岸线的中国是全球遭受台风袭击最频繁的国家, 平均每年达到9.3个, 每年造成的直接经济损失逾千亿元, 人员伤亡达数千人。因此, 对台风过程的全面了解和深入研究, 特别是对台风监测预警能力的提高, 是我国防台减灾工作的必然要求。

在过去几十年中, 从大气科学的角度, 台风发生发展的机制、数值模拟和预报等各个方面的研究都取得了长足的进步^[1~3]。然而, 作为强烈的大气过程,

台风对过境区域的海洋有剧烈的扰动, 众多台风的累积效应也会对海洋的温盐结构和大洋环流及全球海洋热输送产生显著的影响。这些影响都会反作用于台风, 不仅影响特定台风的强度和路径, 也会调制全球台风的低频变化特征。但到目前为止, 台风过程中现场观测资料的匮乏使得海洋对台风多尺度响应和反馈机制的研究不够深入, 人们无法很好地模拟海洋与台风的相互作用过程, 难以获得台风预报所需要的可靠的海洋初始场, 这些都极大地限制了台风研究水平和预报能力的进一步提高。

事实上, 海洋对台风的局地响应有较长的研究历史^[4~6]。海洋对台风的局地响应大致可以分为“强

引用格式: 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: 60–72

Zhou L, Chen D K, Lei X T, et al. Progress and perspective on interactions between ocean and typhoon (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 60–72, doi: 10.1360/N972018-00668

迫阶段”和“松弛阶段”^[7,8]。从有限的观测资料中,人们总结出在台风条件下,海表温度快速下降^[9~11],近惯性振荡的能量明显增强。在北半球,由于台风路径右侧局地风的旋转方向与近惯性流速的旋转方向一致,旋转速度相当,二者产生共振效应,因此海洋对台风的响应有明显的左右非对称性^[12]。人们依据经典的艾克曼理论,得到了固定台风驱动的理想均质海洋三维环流的解析解^[13],对观测到的海洋对台风的局地响应给予了初步的理论解释。此外,人们利用海洋模式和海气耦合模式也可以重现海洋表层大尺度温度场与动力场对台风局地响应的基本特征^[14~16]。但除了大尺度环境场,海洋中还存在众多空间尺度在百千米量级的中尺度涡旋^[17]。台风诱发的三维环流会对海洋上层的涡旋和锋面等中尺度过程产生显著影响,例如台风作用在冷涡上会导致涡的强度增加、面积和范围扩大^[18,19]。尽管台风和海洋中尺度过程的空间尺度不同(台风的空间尺度通常为千千米,比海洋中尺度过程大一个数量级),但台风可以激发海洋中的气旋性涡旋,并由此对局地海洋的上层温盐结构和环流系统产生持续影响^[20]。此外,台风对海洋的影响也不仅仅局限在海表。台风会通过近惯性振荡、艾克曼抽吸、海洋混合等机制影响到海洋次表层。特别地,在台风使得海表温度降低的同时,强烈的海洋混合也把上混合层的暖水搅拌到混合层以下,使海洋次表层升温。当台风过境后,海表温度恢复得较快,而次表层的暖异常却被保留下来,这就形成台风的所谓“热泵”效应^[21]。与此同时,作为气旋的台风还会通过艾克曼抽吸引起海洋温跃层的强烈抬升,从而对上层海洋起到“冷抽吸”的作用。现有的研究对台风“热泵”效应关注较多,但对同时发生的“冷抽吸”作用研究得很少。这在台风对海洋次表层的研究中是一个需要完善的内容。

除了局地响应,海洋与台风之间也有重要的大尺度和低频的相互作用。每个台风都对海洋输入了大量的机械能,增强了局地海洋混合^[22],也造成了海气界面能量通量和物质通量的剧烈变化^[23]。已有研究表明,众多台风的累计作用对维持海洋上层稳定的温盐结构^[24],对海洋向极热输送都起着重要的作用^[25]。但我们至今对这些海洋低频响应的机理尚不清楚。另一方面,海洋是台风生成和发展的重要环境,海洋的低频变化,无论是自然变率导致的低频变化还是人类活动引起的海洋变化,都会对台风的发

生频率、强度、路径、持续时间等在年际和年代际甚至更长的时间尺度上造成显著的影响^[26,27]。现有的海洋对台风低频调制的研究主要集中在对海表温度变化的分析上,但事实上,台风的热量来源取决于整个海洋上层的热容量。除了海表温度,海洋上层的热量变化及温盐结构变化都会对台风的低频变化产生影响。例如,人们发现基于不同的气候状态,海洋次表层垂向温度梯度的增强可以对全球变暖背景下台风的增强起到抑制或加强的作用^[28,29]。由于现在的气候模式尚不能直接模拟台风,海洋与台风低频相互作用的研究受到两个根本的限制,一是如何可靠地预测对台风有影响的大尺度海洋过程和变量,二是如何准确模拟这些过程和变量与台风参数之间的关系。依据不同气候模式的研究结果不尽相同^[30],而且现实中不同海盆之间也存在显著的差异,因此大尺度海洋环境对台风的调制作用无疑是海洋与台风相互作用研究的前沿课题。

从实际应用的角度,提高台风的监测预报能力是台风研究的根本目标。由于海洋与台风相互作用的多尺度特性,针对台风过程的海洋数据同化也应该是多尺度的。由于台风条件下海况极其恶劣,卫星遥感数据成为可供同化的重要数据来源^[31]。但遥感只能提供海表信息,目前人们通常利用投影映射法和多种动力约束将表层信息映射到海洋次表层并进行同化^[32,33]。然而,现有的同化方法仍缺乏普适性,如何建立考虑更多动力约束并且更加适合台风条件下的海表数据同化方法是未来海气耦合资料同化研究的一个重要内容。对于台风的实际业务预报,无论国际还是国内现在仍然主要依赖数值天气模式。经过长期的探索和改进,主要预报模式对大气过程(如大气边界层物理特性、云物理过程、大气湍动能计算、积云对流参数化方案等)的模拟和预报能力有了长足的进步。但由于对海洋反馈作用的认识不足,目前的台风数值(天气)预报模式仍然存在显著误差,特别是对台风强度和风雨分布预报的误差较大^[34]。美国率先开发了海气耦合飓风(大西洋称飓风,即太平洋的台风)预报模式。经过多年业务化运行,改进的海气耦合模式与传统大气模式相比无论对飓风的强度还是路径的预报都有所改善^[35]。我国的台风海气耦合模式研发起步相对较晚,目前仍不能完全满足实际业务预报的需要。我国现有3个业务化的台风(大气)模式,分别是国家气象中心的全球热带气旋模式

(T639-TCM)、上海台风研究所的热带气旋模式 (GRAPES-TCM) 和广州热带海洋气象研究所的数值预报系统 (TRAMS), 目前仅用于制作台风路径预报。这些业务模式中海洋表面的温度都是固定不变的, 海面粗糙度等也仅依赖于风速大小, 基本没有考虑海洋与大气相互作用的物理过程, 因此我国的业务化台风预报在考虑海洋反馈作用方面还有极大的提升空间^[1,36]。

综上所述, 海洋与台风的相互作用既具有明显的科学意义, 也具有实用的实用价值。在各个时空尺度上, 人们关于海洋对台风响应与调制的机理认识都明显不足, 目前海气耦合模式对台风过程的模拟、同化、预报能力仍非常有限, 这些都成为进一步提高台风预报能力的瓶颈问题。

2 海洋与台风相互作用的近期研究进展

针对上述重大科学挑战, 我国在近几年通过组织国家重大基础研究计划及重大行业专题项目, 对海洋与台风相互作用进行了较系统的研究^[37~39]。本部分以我国近期海洋领域的国家重点基础研究发展计划为依托, 重点梳理了国内近年来在海洋与台风

相互作用研究领域的主要进展, 并辅以近期的国际重要科研成果^[40]。

2.1 针对海上台风的外场观测

海洋与台风相互作用研究的最主要瓶颈问题是直接观测资料的欠缺。近年来, 国际上陆续开展了多项海上台风观测试验。例如美国从2002~2004年进行的边界层海气耦合交换试验 (CBLAST^[41,42]) 和2010年由多国参与的太平洋台风对海洋影响计划 (ITOP^[43]) 都把认识热带气旋条件下海气相互作用规律作为主要科学目标。但我国由于受到经费和技术等多种因素限制, 观测对象还是集中在大气要素和海气边界层要素, 对海洋要素的观测非常稀少, 而且无论从观测手段的先进性还是获取资料的丰富程度都无法与国际先进的外场科学试验相比。面对这一现状, 针对我国近海台风活动特征及下垫面海况条件等, 我国科学家精心设计和实施了海上台风观测系统。主要观测内容包括3次南海浮标/潜标观测阵, 西太平洋区域5台铱卫星Argo剖面浮标以及南海北部7台水下滑翔机组网协作观测等。图1是观测的主要站位和Argo浮标的投放位置示意图。

图1 历年观测站位及影响到观测阵列的台风。其中红、蓝、黄、绿色分别代表2014~2015, 2016, 2017~2018年浮标/潜标观测以及2015年投放的铱星Argo观测, 其中实心点为锚定浮标/潜标站点位置或铱星Argo初始投放的位置, 实线为影响到当年观测阵列的台风。白色空心点为对应热带气旋消散的位置。2017~2018年资料尚未回收, 故未画出影响到观测站点的台风。

Figure 1 The observations dedicated for ocean-typhoon interactions in past 4 years and the trajectories of typhoon which have impacts on the mooring/buoy arrays. The moorings/buoys deployed in 2014~2015, 2016, 2017~2018 are represented with red, blue, yellow circles, respectively. The locations where Iridium Argos were released in 2015 are denoted with green circles. Solid lines show the trajectories of typhoon which have impacts on corresponding moorings/buoys. The unfilled circles indicate where the typhoon disappear. Note that the moorings/buoys deployed in 2017~2018 have not been retrieved yet. Thus, the related typhoon trajectories are not shown

由于台风条件下的恶劣海况,海洋浮标/潜标观测是台风期间相对比较可靠的观测手段。同时,浮标/潜标又可以得到较高时间和垂向分辨率的观测资料,是台风整个生命周期中海洋监测的有效手段。从2014年6月3日~2014年8月10日的第一次外场观测阵由5套浮标和4套潜标组成,2015年3月底~4月初期间回收完毕^[44]。2016年7~8月间的第二次针对台风的浮标/潜标观测阵由3套浮标和2套潜标组成,于2016年10月底回收。2017年的第三次外场观测阵由3套潜标组成,同时进行了为期两天(2017年6月23, 24日)的定点观测以及为期两天(2017年6月25, 26日)的断面观测。第三次布放的潜标计划于2018年6月回收。3次针对台风的外场观测成功获取了多个台风条件下海洋与大气的直接观测数据,其中比较完整的有2014年的台风“威马逊(Rammasun)”、台风“海鸥(Kalmaegi)”,2016年台风“莎莉嘉(Sarika)”等。除了浮标/潜标阵的定点观测外,西太平洋台风高发区的5台铱卫星Argo剖面浮标提供了海洋上层温盐结构的观测(图1)。在台风季节,利用铱卫星双向通讯功能向Argo浮标发送加密观测指令,使其观测周期由10天缩短为3天,从而获取了2015年“巨爵(Koppu)”和“烟花(In-fa)”等台风路径附近0~2000 m的观测资料。

此外,我国研究人员还试验了几种针对台风过程的具有创新意义的外场观测。例如利用专门用于台风观测的“海燕”水下滑翔机主动追踪了2017年的台风“天鸽(Hato)”和“帕卡(Pakhar)”。7台“海燕”水下滑翔机组网协作配合,在台风临近时,滑翔机距离台风中心仅约10千米。在观测过程中,通过对台风轨迹的实时预判,积极部署,“海燕”自动优化并调整航路,航行至台风区,开展高频次的剖面观测,获得台风条件下的海洋温盐、流速等参数信息。这是我国首次利用滑翔机获得台风条件下的现场海洋环境参数,为台风与海洋的相互作用研究提供了一种新的技术手段。针对台风过程中的大气垂向剖面,国内最近设计和研发了火箭弹下投探测台风的新技术,即利用火箭/导弹作为运载工具飞越台风,并多点下投气象探空仪^[45]。该火箭系统由控制系统、发动机、弹体结构和遥测系统等构成,采用车载垂直发射方案。火箭系统成功解决了高效减速、探测仪防震和云层对卫星传输信号的衰减等一系列技术难点。在飞越台风区域时,火箭搭载的多个探空仪下投至台风内部进行探测,并将探空仪测得的数据通过全球卫星定位系统

(GPS)和北斗卫星实时传输至地面。与美国等国家开展的飞机台风观测相比,火箭弹台风下投探测的主要优势体现在两点。首先,火箭的飞行高度更高,可达到台风环流的顶部15 km以上高空(可根据探测需要选用射程更高和更远的火箭弹),其下投探空资料对台风垂直结构描述更加完整。其次,火箭飞行速度更快,完成一次探测飞行只需6 min,所测得的资料为气象意义上台风同一时刻的状态,而飞机探测通常耗时2 h以上。2015年10月3日,我国对台风“彩虹(Mujigae)”成功实施了全球首次火箭弹下投探测试验。通过在台风不同区域投放多个下投式探空,获得了大量台风内部风、温、压、湿等气象要素的直接观测资料,对比“追风”车载GPS探空的风廓线资料,该观测方法得到的台风低层流入和高层流出及相应的低高空急流特征更加明显。对台风内部精细结构的直接观测资料分析,加深了对台风结构变化及其对路径和强度影响的机理认识。火箭探测等新型观测资料已被应用于台风的定强与结构分析中,修正了全球主要台风业务中心关于目标台风的定强结果。火箭弹下投探测台风新技术与海洋浮标/潜标阵及水下滑翔机等海洋观测手段相结合,使得台风期间海气协同观测成为可能。我国已经开始尝试这种海气立体台风观测。在技术成熟后,海气同步的台风观测数据将为台风与海洋相互作用研究提供独有的第一手资料,也必将极大地促进台风机理研究,提高台风的预报预测水平。

2.2 海洋中尺度涡与台风的相互作用

中尺度涡是海洋中最重要的运动形式,在海洋表层,超过90%的动能以涡的形式存在^[46],因此以中尺度涡为代表的海洋中尺度过程与台风的相互作用是海洋对台风局地响应与反馈的重要研究内容。利用2000~2008年间西北太平洋的15个超强台风,人们讨论了台风与海洋气旋性涡旋之间的关系,结果表明台风前期海洋中的气旋式涡旋对大范围海表温度冷却的位置和强度有显著的影响,影响其相互关系的因素主要有3个,即最大风速、台风移动速度、台风强迫时间^[47]。基于理论分析并利用全球Argo浮标和卫星高度计对所有中尺度涡旋的结构进行三维合成,人们发现在特定坐标系下中尺度涡具有全球统一的水平和垂直三维结构,且三维结构具有非常简单明了的解析表达^[48,49]。台风对已经在台风路径上

存在的海洋冷涡主要有两个作用：一是使冷涡的振幅和半径增大，二是使冷涡的水平形状经历一个从椭圆化到圆形化的过程^[50]。冷涡增强机制主要归因于台风所产生的地转上涌，而椭圆化过程取决于台风所产生的地转上涌的水平形状。台风过境后，除了原来冷涡所具有的正位涡，温跃层附近注入了大量额外的正位涡，这些额外的位涡通过调整变成了冷涡的一部分，导致冷涡半径增大。尽管上述结论是从个例研究中总结得到的，但其对冷涡受扰之后的动力学研究提供了新的视角。除了对台风的响应，海洋中尺度涡也是台风生命周期中的重要环境要素，对台风的强度和路径都会产生重要的反馈^[51,52]。通过研究西北太平洋1993~2005年间的5级台风，人们发现两个影响台风强化的海洋特征，其一是在海洋上混合层较浅的西北太平洋南部及黑潮区，台风加强的必要条件是混合层加深以弥补台风自身带来的海洋冷却效应；其二是在海洋环流的中心区域较深的上混合层有益于台风的加强^[53]。结合观测和海气耦合模式，人们发现海洋冷涡促进由于热带气旋导致的海表降温，而暖涡则抑制这种降温效应^[54]。此外，人们利用WRF(Weather Research and Forecasting)模式试验了台风强度对海洋暖涡的敏感性，实验表明，台风中心进入涡旋区域后约3 h后强度开始发生变化，暖(冷)涡促使台风强度相对控制实验增强(减弱)，增强(减弱)的幅度与涡旋的强度及混合层深度有关，其次与台风移动速度和环境相对湿度有关^[55]。由于对台风次级环流影响不同，涡旋对台风的反馈也与涡旋与台风的相对位置息息相关。暖涡在2倍最大风速半径以内时模拟的台风强度显著增强。随着暖涡偏离台风中心，台风强度的增强效应也减弱。当暖涡在2倍最大风速半径以外时，暖涡反而导致台风强度减弱。

除了对温度的影响，台风也会导致海水盐度的明显变化^[56]。利用西北太平洋Argo剖面浮标盐度资料的分析表明海水盐度对台风的响应具有非对称性，台风过后其路径右侧的海表面盐度显著上升，左侧则在 R_{50} (风速为50节的半径)内上升、 R_{50} 外区域普遍下降。台风携带的大量降水会使海表盐度明显降低，从而在海洋上层形成障碍层，影响上层海洋的热收支。盐度引起的海洋障碍层对台风强度的影响目前仍存在很大的争议，部分研究表明障碍层有利于台风加强，然而另一部分研究则表明海洋障碍层对台风的加强几乎没有影响。最新的研究结果表明，海洋

障碍层对台风强度的影响应该分为如下几种不同情况：(1) 当台风较弱或者移动较快、没有击破混合层底时，障碍层的存在不利于台风的加强；(2) 当台风较强或者移动较慢、击破混合层进入到障碍层时，障碍层水体的卷夹有利于台风的加强；(3) 当台风足够强以至于可以击破障碍层底，进入到跃层时，障碍层的存在同样利于台风的加强。由于障碍层对台风的影响涉及海气热通量和水汽通量，也要求有较高垂直分辨率的温盐等海洋要素的观测，因此具体过程及机制仍然有待进一步的深入研究^[57]。

2.3 海洋对台风的低频响应与调制

海洋与台风的大尺度耦合机制是理解海洋能量平衡、预测台风变化趋势的基础。近期国内的相关研究成果主要集中在台风的“热泵”和“冷抽吸”作用、台风对大洋环流的影响、台风与ENSO的相互作用及海洋对台风生成和可预测性影响等方面的研究上。

对于海洋与台风的低频相互作用，台风如何影响海洋次表层是核心问题。长期以来，“热泵”机制是人们对这一问题的理论假设^[21]，但观测和理论分析都表明“冷抽吸”是另一种不可忽视的机制(图2)。所谓“热泵”作用是指台风能增强海洋上层混合，加深混合层，从而将热量输入次表层，而“冷抽吸”作用是指台风在其中心附近引起艾克曼抽吸，冷却海洋次表层，从而削弱“热泵”在次表层的增暖，并改变台风对海洋的能量输入及其全球影响。浮标/潜标观测数据表明^[44]，2014年的台风“海鸥”过境后各站位混合层呈冷异常，其中路径右侧以次表层暖异常为主，左侧则以冷异常为主。模式结果大致能重现观测到的现

图2 “热泵”(a)与“冷抽吸”(b)机制的示意图。实线代表台风前海洋温度剖面，虚线代表台风后海洋温度剖面

Figure 2 Sketch for “heat pump” and “cold suction”. The temperature profiles before and after a typhoon are represented with solid lines and dashed lines, respectively

象. 分解模式中影响上层海洋温度结构的各项表明, 混合冷却表层、增暖次表层, 而上升流则从下方周期性冷却次表层以下的海洋. 因而在台风“海鸥”期间混合增暖(“热泵”作用)和上升流冷却(“冷抽吸”作用)对次表层同样重要. 传统观点认为台风“热泵”效应引起的次表层暖异常将随海洋环流传播, 在赤道东太平洋上升流区域回到表面, 造成海表升温. 但在模式中加入实际的台风风场, 人们发现由台风造成的强艾克曼抽吸会把更深层的冷水抽到次表层, 从而造成海洋次表层与表层一起降温, 而不是升温. 模式中, 变冷的效果几乎在整个热带太平洋上层都存在, 因而海洋对台风的低频响应表现出与传统认识截然相反的状况. 由台风导致的海水变冷会进一步反馈给大气, 从而对台风的低频变化产生重要的调制作用^[58].

台风从表象上来说虽然具有短时局地的特征, 但依旧能在长时间大尺度海洋过程中留下“深刻”的痕迹. 从观测数据出发, 人们研究了台风对北太平洋浅层翻转环流的影响过程和机理^[59]. 采用拉格朗日质点追踪方法, 人们发现西北太平洋地区的模态水潜沉后, 会保留其原有的温、盐特性并向赤道方向运动, 经过6~7年的时间到达台湾以东的台风频发海区. 在该海区通过混合被强台风“拔”回到海洋表层, 然后随着大尺度环流(黑潮)回到副热带源区, 形成北太平洋浅层翻转环流的一个分支. 然而, 由于每年台风发生的位置、大小等都存在很大的差异, 由台风作用形成的浅层翻转环流的上升分支的主体位置每年会随着台风位置的不同而改变. 与台风相关的翻转环流分支的强度与台风的潜在破坏力指数(PDI)直接相关, 即取决于西北太平洋的台风过程, 而与西北太平洋地区总的潜沉率、源区的海气通量(热通量、淡水通量、风应力)等并没有直接的关系. 对台风的低频统计特性的研究依赖于基于理论和经验建立的台风指数. 但上述海洋与台风的低频相互作用在已有的台风生成指数中没有得到充分的考虑. 利用所有相关的海气要素及逐步回归的统计方法, 人们提出一个新的台风潜在生成指数(GPI)^[60], 将上混合层平均温度和海洋26℃等温线深度加入了GPI中. 新指数可以定量地体现海洋内部变化对台风生成个数低频变率的调制, 从而为研究台风与海洋低频相互作用提供新颖而有效的工具. 利用台风潜在生成指数, 已有研究突破了预报场和气候态场为高斯分布的假定, 采用了混合高斯分布估计模式的预报场和气候态场,

分析了台风GPI和PDI的潜在可预报性. 研究表明GPI的潜在可预报性在赤道附近的中太平洋区域较高, 在西北太平洋潜在可预报性较低. PDI的潜在可预报性在西南太平洋较高, 其他区域都较低. 因此, 可以预计模式预报台风频数在中太平洋效果最好, 而预报台风强度则在西南太平洋最好.

热带海气耦合系统的多尺度相互作用是当前海洋与大气科学的前沿课题, 而最强的天气事件台风和最强的短期气候事件ENSO之间的相互作用自然备受关注^[61,62]. 通常, 在El Niño年份, 热带气旋的强度和存活时间强于和长于La Niña年份^[63]. 具体地, 人们分析了不同类型ENSO事件对西北太平洋5个不同区域内台风生成个数、生命周期和强度的影响. 结果表明, 在东太平洋暖事件期间, 东南区域的台风个数增加而西北和东北区域的台风个数减少; 在东太平洋冷事件期间, 东北和西北区域的台风个数明显增加. 而对中太平洋型ENSO事件, 主要变化体现在东南区域, 台风个数在中太平洋暖(冷)事件期间增加(减少). 台风生命周期在东太平洋暖事件期间显著变长, 而在中太平洋冷事件期间缩短. 台风强度在东太平洋暖事件(中太平洋冷事件)期间更强(弱), 而在东太平洋冷事件和中太平洋暖事件期间没有明显变化. 另一方面, 人们发现台风可以通过西风爆发影响ENSO. 西风爆发是发生在热带西太平洋的高频西风异常现象, 它对ENSO事件的发生、发展及时空演变有重要影响. 研究表明, 约72%的西风爆发事件与热带气旋密切相关. 当热带气旋强度很大, 或离赤道很近时, 赤道风场会表现为西风爆发. 西风爆发与热带气旋的这一紧密关系还能解释西风爆发的多种属性, 包括季节性(冬季多、春季少)、区域性(太平洋最多、大西洋最少)、低频调制(西风爆发随厄尔尼诺发展东移). 热带太平洋海表温度的年际变化可以被划分为三种暖类型和一种冷类型, 其中一种暖类型和冷类型一起构成对称的厄尔尼诺/拉尼娜基本ENSO循环. 由于西风爆发事件的单向特性, 拉尼娜基本不受其影响, 但它会通过海洋动力过程驱动另外两种暖类型(暖池型和极端型), 从而导致厄尔尼诺的多样性^[64]. 深入了解台风-西风爆发-厄尔尼诺的关系, 不仅有助于我们了解ENSO多样性的成因, 而且有可能通过台风的季节性预报提高ENSO预测水平.

海洋对台风的低频响应与调制不仅仅体现在以ENSO为主的年际尺度上, 也体现在季节内尺度

上^[65,66](如MJO)和年代际尺度上^[67,68](如PDO和AMO等). 此外, 海洋与台风的低频相互作用也涉及海盆之间的相互影响, 例如大西洋海温可以影响东太平洋台风^[69], 印度洋海温(如印度洋偶极子)可以通过大气桥和海洋中的印尼贯穿流影响西太平洋台风^[70,71]等. 在更长的时间尺度上, 随着全球气候变化, 台风活动也有相应的变化. 海洋与台风都是全球气候变化的有机组成部分, 并且相互之间可以产生复杂的相互影响^[72,73]. 由于篇幅限制, 上述海洋与台风的低频相互作用在本文中不详细综述.

2.4 针对台风的多源数据同化和海气浪耦合预报技术

数据同化是有效地利用多源海洋资料不可缺少的技术, 是观测数据用于构建台风数值预报初始场的必由之路. 针对台风过程的数据同化在技术方法上与通常的海洋与大气数据同化没有本质的区别. 同化常规的数据, 例如探空资料 and 各类遥感资料, 能有效提高模式对台风路径的预报技巧^[74,75]. 但由于台风过程中风速非常大, 海况特别恶劣, 海气交互过程特别剧烈, 因此海气耦合同化方法显得尤为重要, 而且一些特殊物理过程(例如波致混合^[76]、海洋飞沫、海气界面通量等)的最优参数估计也显得尤为重要. 海气耦合数据同化是目前国际上地球耦合系统研究的前沿领域之一, 人们在该方向上已经开展了众多的尝试^[42,77,78]. 基于一个简化的海气耦合概念模式和集合调整卡尔曼滤波方法, 人们建立了集合卡尔曼滤波耦合数据同化模型^[79], 实验结果表明只有当集合样本量非常大时, 耦合误差协方差的质量才会很高, 从而改进同化精度并提高预报技巧; 否则, 引入耦合误差协方差反而会使得状态估计的质量变差. 台风过程中的参数估计也是目前数据同化领域的前沿研究方向之一. 人们已经开展了集合调整卡尔曼滤波与四维变分耦合参数估计同化方法研究, 并对这两个方法进行了比较. 在数据同化的同时对模式中的经验参数进行估计, 其目的是在降低模式偏差的同时进一步提高分析场的质量, 尤其是提高预报能力. 在台风过程中, 风大浪急, 波浪及其破碎对台风过程中的海气相互作用起着举足轻重的作用. 利用四维变分参数估计同化方法可以对波致混合参数进行最优估计^[80], 同化试验的结果表明, 海表温度相比于控制试验的结果有了很大的提高, 得到的值

与观测十分接近, 混合层深度也比控制试验更加准确. 因此, 波致混合参数的变分估计确实能够有效减小模式的偏差, 提高海洋模式对海洋上层混合的模拟效果. 在台风的高风速下, 海洋飞沫是影响海气界面通量的重要过程. 人们对现有海气界面通量参数化方案进行改进, 并基于改进的海气界面通量参数化方案, 研究了台风期间海洋飞沫对海气界面通量和上层海洋的影响, 并利用集合卡尔曼滤波同化方法, 对含飞沫效应的海气界面通量参数化方案中的敏感参数进行最优估计^[81]. 计算结果表明, 考虑海洋飞沫影响的总潜热通量的最大增加值为 137.2 W/m^2 , 占界面潜热通量的15.7%. 此外, 海洋飞沫能加强海洋与大气之间的动量交换. 当海表风速大于 30 m/s 时, 海洋飞沫动量通量与界面动量通量具有相当的量级, 飞沫滴在海气界面形成极限饱和和悬浮层, 进而影响空气动力学, 使拖曳系数减小, 总的动量通量的增长率随之减小.

基于海气耦合同化技术研究和台风过程中重要参数最优估计的研究, 采用两步法构建台风条件下海洋多源数据同化系统. 第一步是对卫星海表观测反演的海洋中尺度信号进行同化, 对模式状态场进行相应的尺度订正; 第二步是利用含有日变化信息的海洋现场观测对第一步模式状态场的余量进行订正. 为了构建台风条件下的海洋多源数据再分析数据集, 还需要建立用来驱动海洋模式的台风风场数据集. 将卫星观测的融合风场作为背景场, 结合理论分析, 采用多重网格三维变分同化方法, 人们构建了能够体现台风强度和结构的风场, 其时间分辨率为 6 h , 空间分辨率 $1/4^\circ$. 然后, 基于POMgcs海洋数值模式(引入了含飞沫效应的海气界面通量参数化方案, 并采用了飞沫参数和波致混合参数的最优估计值), 在构建的台风风场驱动下, 利用数值模式和海洋多源数据同化系统, 通过同化卫星遥感和海洋现场观测数据, 人们研制了2001~2012年台风条件下的西北太平洋海洋同化再分析数据集(CORA). CORA再分析基本能够重现观测到的台风条件下的上层海洋状况^[82,83], 为西太平洋区域台风过程的模拟与预报研究提供了较为可靠的数据集.

发展和完善适用于台风及其海洋环境的预报系统并改进其预报效果是海洋与台风相互作用研究的根本目标之一. 与国际先进的天气与气候业务中心一样^[84], 目前我国已经建立了海气浪耦合台风预报

应用示范平台,并开始业务化预报试验.该预报系统由GRAPES-TCM中尺度台风模式、ECOM海洋环流模式、WAVEWATCH III(WW3)海浪模式构成,基于OASIS耦合器实现台风、海洋环流、海浪模式三者间的信息交换,构成新的区域中尺度台风海气浪耦合模式系统.耦合系统引入海浪模式后,更加合理地考虑了波浪引起的海面粗糙度和波浪破碎、海洋飞沫等物理因子和过程.研究者还利用目标台风观测数据,对模式大气边界层内海气动量交换^[85]、海面水汽输送、海浪飞沫的感热与潜热输送等物理过程的适用算法、模式边界层高度参数化方案等进行了改进和完善.这些研究有效提高了新的区域台风海浪耦合模式系统对台风路径和强度的模拟和预报能力,新的模式系统覆盖范围为西北太平洋、水平分辨率为27 km、垂直方向共36层、模式层顶高度为20 hPa.经过1年多的运行,系统表现稳定,具备台风业务预报的指导能力.为改进预报模式的初始场,业务部门重点研究了同化雷达等非常规资料对东南沿海台风预报的影响,分析了同化南海“彩虹(Mujigae)”台风火箭下投探测资料对台风数值模拟的改进效果,开发了基于混合资料同化的多源资料台风集合预报技术,可以同化常规气象观测资料和卫星、雷达等非常规观测资料,并能提供台风路径和强度的集合预报产品,有效提高了模式台风初始场的质量及对台风强度的预报效果.从而将台风强度的预报从传统的单一预报拓展到概率分布预报,为防台减灾提供更丰富的预报信息.利用最新研究成果,业务部门构建了海气浪耦合台风预报应用示范平台,对2016~2017年的台风进行了实时准业务集合预报测试.集合预报模式包括20个集合成员和一个控制预报,在每日北京08时和20时起报两次,同化多种常规和非常规资料,实时提供台风预报产品,内容包括台风路径确定性预报、台风路径集合预报、台风强度确定性预报、台风强度集合同化预报以及相关的海洋环境预报产品(含西北太平洋风浪预报和西北太平洋海表温度和温度距平预报等),并通过业务网站服务于实时的台风业务预报.该应用示范平台既集中体现了基础研究的最新研究成果,又是一个面向业务应用的台风预报支撑服务窗口.

3 重大科学问题与挑战

海洋与台风的相互作用是既有显著科学意义,又有重要实用价值的重大科学问题.最近几年,我国在

国家重大科研项目的支持下,从海气相互作用的角度出发,综合利用现场观测、理论分析、数据同化、模式预报等研究手段,系统研究了海洋上层对台风的响应与调制机理,在针对台风的海洋与大气观测系统、海洋中尺度过程与台风的相互作用、海洋对台风的低频响应与调制、台风影响上层海洋的物理机制及参数化、台风过程中的海洋多源数据同化与参数估计、台风和海洋环境的海气浪耦合预报技术和应用等方面取得了一系列创新成果.这些研究成果将进一步提高我国的台风业务预报水平提供坚实的理论基础和技术支撑,为防台减灾的国家重大需求作出实质性贡献.

但同时也必须认识到,我国在海洋与台风相互作用研究领域还非常欠缺,与国际先进水平还有较大的差距,与国家的防台减灾的需求相比还有明显的不足.在总结现有研究成果的基础上,我们认为在海洋与台风相互作用领域存在的重大科学问题和面临的主要挑战主要体现在以下几点:

(1) 现场观测仍然非常缺乏.如本文所述,我国已经在台风过程海洋监测方面做出了重要的实践,并取得了宝贵的现场观测资料.特别是在海气协同观测方面,我国已经开展了有益的尝试.在技术和保障条件更加成熟后,海气协同的台风观测将为深化台风研究提供必需的资料.此外,由于台风期间的恶劣海况,针对台风过程的长期监测系统依然缺失.西太平洋区域和南海北部是全球台风最高发的区域,也几乎是给我国造成重大灾害的台风的必经之路.因此在该区域建设和维护长期的观测网(例如以十字型浮标/潜标系统为基本构架的观测阵列)是加强对台风过程中海洋和大气监测的有效手段.

(2) 上层海洋的多尺度环流系统对台风的响应机制亟待深化.上层海洋的环流系统十分复杂,在西北太平洋台风盛行海区包括由信风驱动的北太平洋副热带环流和热带环流,由浮力通量驱动的北太平洋浅层翻转环流,由季风驱动的南海上层环流,以及叠加在这些大尺度环流之上的中小尺度环流和涡旋.台风不仅可以在天气尺度上影响甚至驱动中小尺度海洋环流和涡旋,也能通过改变上层海洋的热盐结构来影响气候态的大尺度海洋环流.因此,上层海洋的多尺度环流系统对台风的响应包括各类动力过程、热力过程以及它们之间的非线性相互作用,这些都是海洋与台风相互作用研究面临的重大挑战.揭示台风输入到海洋的近惯性能量的传播、转移与耗散机制,

了解台风过境时海洋涡旋、内波等中尺度过程的响应特征和激发机制,确定台风的“热泵”和“冷抽吸”作用对海洋层结的不同影响,是解决这些问题的核心。

(3) 上层海洋的动力和热力结构对台风强度的调制作用的定量化研究. 上层海洋的动力和热力结构在相当程度上决定了台风过境时海气界面上感热和潜热通量的大小,而台风的维持和发展,特别是台风强度的变化,依赖于这些通量提供的能量和水汽. 因此,上层海洋的动力和热力结构对台风强度能起到重要的调制作用. 虽然台风的结构、路径和强度密切相关,但由于台风强度直接受海洋提供的能量影响,而且是目前台风预报的薄弱环节,所以我们应该特别关注海洋对台风强度的调制作用. 如果海洋环

境不变化,这种调制作用便可从气候态的上层海洋结构方便地估算出来. 但问题是上层海洋的动力和热力结构在各种时空尺度上不断发生改变. 了解天气尺度上海洋中尺度过程对台风的反馈机制,揭示气候变化背景下上层海洋环流和热含量的低频变异,应该是解决此问题的关键所在。

总之,基于已有的研究基础和经验,我们建议在今后的海洋与台风相互作用研究中,坚持采用“现场观测→机制研究→数据同化→模式发展→应用示范”的技术路线,在深刻揭示动力机制的基础上提高台风强度和海洋环境的预报能力,评估台风低频变异的可预测性,使我国在海洋与台风相互作用研究领域跻身世界前列。

致谢 感谢审稿人对本文提出系统的意见与建议。

参考文献

- Chen L S, Meng Z Y. An overview on tropical cyclone research progress in China during the past ten years (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2001, 25: 420–432 [陈联寿, 孟智勇. 我国热带气旋研究十年进展. *大气科学*, 2001, 25: 420–432]
- Chen L S, Ding Y H. Introduction to Typhoon Over the Western Pacific Ocean (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979 [陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论. 北京: 科学出版社, 1979]
- Wang Y, Wu C C. Current understanding of tropical cyclone structure and intensity changes—A review. *Meteorol Atmos Phys*, 2004, 87: 257–278
- Price J F. Upper ocean response to a hurricane. *J Phys Oceanogr*, 1981, 11: 153–175
- Greatbatch R J. On the response of the ocean to a moving storm: The nonlinear dynamics. *J Phys Oceanogr*, 1983, 13: 357–367
- Large W G, Pond S. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *J Phys Oceanogr*, 1981, 11: 324–336
- Chang Y C, Tseng R S, Centurioni L R. Typhoon-induced strong surface flows in the Taiwan Strait and Pacific. *J Oceanogr*, 2010, 66: 175–182
- Sanford T B, Price J F, Garton J B. Upper-ocean response to hurricane Frances (2004) observed by profiling Em-Apex floats. *J Phys Oceanogr*, 2011, 41: 1041–1056
- Potter H, Drennan W M, Graber H C. Upper ocean cooling and air-sea fluxes under typhoons: A case study. *J Geophys Res: Oceans*, 2017, doi: 10.1002/2017jc012954
- Chiang T L, Wu C R, Oey L Y. Typhoon Kai-tak: An ocean's perfect storm. *J Phys Oceanogr*, 2011, 41: 221–233
- Lin I I, Liu W T, Wu C C, et al. Satellite observations of modulation of surface winds by typhoon-induced upper ocean cooling. *Geophys Res Lett*, 2003, 30, doi: 10.1029/2002GL015674
- Emmanuel V M, Matthieu L, Gurvan M, et al. Processes setting the characteristics of sea surface cooling induced by tropical cyclones. *J Geophys Res: Oceans*, 2012, 117: C02020
- Lu Z M, Huang R X. The three-dimensional steady circulation in a homogenous ocean induced by a stationary hurricane. *J Phys Oceanogr*, 2010, 40: 1441–1457
- Bender M A, Ginis I, Kurihara Y. Numerical simulations of tropical cyclone-ocean interaction with a high-resolution coupled model. *J Geophys Res: Atmos*, 1993, 98: 23245–23263
- Jacob S D, Shay L K. The role of oceanic mesoscale features on the tropical cyclone-induced mixed layer response: A case study. *J Phys Oceanogr*, 2003, 33: 649–676
- Huang L W, Wu G X, Yu R C. The effects of mesoscale air-sea interaction on heavy rain in two typhoon processes (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2005, 63: 14 [黄立文, 吴国雄, 宇如聪. 中尺度海-气相互作用对台风暴雨过程的影响. *气象学报*, 2005, 63: 14]
- Cheng X H, Qi Y Q. Distribution and propagation of mesoscale eddies in the global oceans learnt from altimetric data (in Chinese). *Adv*

- Marine Sci, 2008, 26: 447–453 [程旭华, 齐义泉. 基于卫星高度计观测的全球中尺度涡的分布和传播特征. 海洋科学进展, 2008, 26: 447–453]
- 18 Shang S L, Li L, Sun F Q, et al. Changes of temperature and bio-optical properties in the South China Sea in response to typhoon Lingling, 2001. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L10602
  - 19 Yang Y J, Fu Y F, Sun L, et al. Responses of the upper ocean to typhoon Tingting observed from multiplatform satellites and Argo float (in Chinese). *J Univ Sci Technol China*, 2010, 40: 1–7 [杨元建, 傅云飞, 孙亮, 等. 基于多卫星和 Argo 浮标观测海洋上层对台风婷婷的响应. 中国科学技术大学学报, 2010, 40: 1–7]
  - 20 Hu J Y, Kawamura H. Detection of cyclonic eddy generated by looping tropical cyclone in the northern South China Sea: A case study. *Acta Oceanol Sin*, 2004, 232: 213–224
  - 21 Emanuel K A. An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady-state maintenance. *J Atmos Sci*, 1986, 43: 585–605
  - 22 Liu L L, Wang W, Huang R X. The mechanical energy input to the ocean induced by tropical cyclones. *J Phys Oceanogr*, 2008, 38: 1253–1266
  - 23 Sriver R L, Huber M. Observational evidence for an ocean heat pump induced by tropical cyclones. *Nature*, 2007, 447: 577–580
  - 24 Manucharyan G E, Brierley C M, Fedorov A V. Climate impacts of intermittent upper ocean mixing induced by tropical cyclones. *J Geophys Res: Oceans*, 2011, 116: C11038
  - 25 Emanuel K. Contribution of tropical cyclones to meridional heat transport by the oceans. *J Geophys Res: Atmos*, 2001, 106: 14771–14781
  - 26 Kubota H, Chan J C L. Interdecadal variability of tropical cyclone landfall in the Philippines from 1902 to 2005. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L12802
  - 27 Chen G H, Huang R H. Dynamical effects of low frequency oscillation on tropical cyclogenesis over the western North Pacific and the physical mechanisms (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2009, 33: 205–214 [陈光华, 黄荣辉. 西北太平洋低频振荡对热带气旋生成的动力作用及其物理机制. 大气科学, 2009, 33: 205–214]
  - 28 Huang P, Lin I I, Chou C, et al. Change in ocean subsurface environment to suppress tropical cyclone intensification under global warming. *Nat Commun*, 2015, 6: 7188
  - 29 Jin F F, Boucharel J, Lin I I. Eastern Pacific tropical cyclones intensified by El Niño delivery of subsurface ocean heat. *Nature*, 2014, 516: 82–85
  - 30 Knutson T R, McBride J L, Chan J, et al. Tropical cyclones and climate change. *Nat Geosci*, 2010, 3: 157–163
  - 31 Shao W, Li X, Hwang P, et al. Bridging the gap between cyclone wind and wave by C-band sar measurements. *J Geophys Res: Oceans*, 2017, 122: 6714–6724
  - 32 Tang Y M, Kleeman R, Moore A M. SST assimilation experiments in a tropical Pacific Ocean model. *J Phys Oceanogr*, 2004, 34: 623–642
  - 33 Zhu J, Yan C X. Nonlinear balance constraints in 3DVAR data assimilation. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2006, 49: 331–336
  - 34 McFarquhar G M, Zhang H N, Heymsfield G, et al. Factors affecting the evolution of hurricane Erin (2001) and the distributions of hydrometeors: Role of microphysical processes. *J Atmos Sci*, 2006, 63: 127–150
  - 35 Bender M A, Ginis I, Tuleya R, et al. The operational GFDL coupled hurricane-ocean prediction system and a summary of its performance. *Mon Weather Rev*, 2007, 135: 3965–3989
  - 36 Chen L S. The evolution on research and operational forecasting techniques of tropical cyclones (in Chinese). *J Appl Meteorol Sci*, 2006, 17: 672–681 [陈联寿. 热带气旋研究和业务预报技术的发展. 应用气象学报, 2006, 17: 672–681]
  - 37 Chen D K, Lei X T, Wang W, et al. Upper ocean response and feedback mechanisms to typhoon (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2013, 28: 1077–1086 [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, 28: 1077–1086]
  - 38 Duan Y H, Chen L S, Liang J Y, et al. Research progress in the unusual variations of typhoons before and after landfalling (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2014, 72: 969–986 [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: 969–986]
  - 39 Duan Y H. Monitoring and forecasting of finescale structure and impact assessment of landfalling typhoons (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2015, 30: 847–854 [端义宏. 登陆台风精细结构的观测, 预报与影响评估. 地球科学进展, 2015, 30: 847–854]
  - 40 Zhou L, Chen D, Karnauskas K B, et al. Introduction to special section on oceanic responses and feedbacks to tropical cyclones. *J Geophys Res: Oceans*, 2018, 123: 742–745
  - 41 Black P G, D’Asaro E A, Drennan W M, et al. Air-sea exchange in hurricanes—Synthesis of observations from the coupled boundary layer air-sea transfer experiment. *Bull Am Meteorol Soc*, 2007, 88: 357–374
  - 42 Chen S S, Zhao W, Donelan M A, et al. Directional wind-wave coupling in fully coupled atmosphere-wave-ocean models: Results from CBLAST-hurricane. *J Atmos Sci*, 2013, 70: 3198–3215
  - 43 Wu C C, Tu W T, Pun I F, et al. Tropical cyclone-ocean interaction in typhoon Megi (2010)—A synergy study based on ITOP observations and atmosphere-ocean coupled model simulations. *J Geophys Res: Atmos*, 2016, 121: 153–167
  - 44 Zhang H, Chen D, Zhou L, et al. Upper ocean response to typhoon Kalmaegi (2014). *J Geophys Res: Oceans*, 2016, 121: 6520–6535

- 45 Lei X T. New technology and experiment of rocket dropsondes for typhoon observation (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2017, 62: 3789–3796 [雷小途. 火箭弹下投探测台风新技术及初步试验. *科学通报*, 2017, 62: 3789–3796]
- 46 Ferrari R, Wunsch C. Ocean circulation kinetic energy: Reservoirs, sources, and sinks. *Annu Rev Fluid Mech*, 2009, 41: 253–282
- 47 Sun L, Li Y, Yang Y, et al. Effects of super typhoons on cyclonic ocean eddies in the western North Pacific: A satellite data-based evaluation between 2000 and 2008. *J Geophys Res: Oceans*, 2014, 119: 5585–5598
- 48 Sun W, Dong C, Wang R, et al. Vertical structure anomalies of oceanic eddies in the Kuroshio extension region. *J Geophys Res: Oceans*, 2017, 122: 1476–1496
- 49 Zhang Z, Wang W, Qiu B. Oceanic mass transport by mesoscale eddies. *Science*, 2014, 345: 322–324
- 50 Lu Z, Wang G, Shang X. Response of a preexisting cyclonic ocean eddy to a typhoon. *J Phys Oceanogr*, 2016, 46: 2403–2410
- 51 Lin I I, Wu C C, Emanuel K A, et al. The interaction of supertyphoon Maemi (2003) with a warm ocean eddy. *Mon Weather Rev*, 2005, 133: 2635–2649
- 52 Bender M A, Ginis I. Real-case simulations of hurricane-ocean interaction using a high-resolution coupled model: Effects on hurricane intensity. *Mon Weather Rev*, 2000, 128: 917–946
- 53 Lin I I, Wu C C, Pun I F, et al. Upper-ocean thermal structure and the western North Pacific category 5 typhoons. Part I: Ocean features and the category 5 typhoons' intensification. *Mon Weather Rev*, 2008, 136: 3288–3306
- 54 Ma Z, Fei J, Liu L, et al. An investigation of the influences of mesoscale ocean eddies on tropical cyclone intensities. *Mon Weather Rev*, 2017, 145: 1181–1201
- 55 Wu C C, Lee C Y, Lin I I. The effect of the ocean eddy on tropical cyclone intensity. *J Atmos Sci*, 2007, 64: 3562–3578
- 56 Liu S S, Sun L, Wu Q, et al. The responses of cyclonic and anticyclonic eddies to typhoon forcing: The vertical temperature-salinity structure changes associated with the horizontal convergence/divergence. *J Geophys Res: Oceans*, 2017, 122: 4974–4989
- 57 Yan Y, Li L, Wang C. The effects of oceanic barrier layer on the upper ocean response to tropical cyclones. *J Geophys Res: Oceans*, 2017, 122: 4829–4844
- 58 Zhang R H, Pei Y, Chen D. Remote effects of tropical cyclone wind forcing over the western Pacific on the eastern equatorial ocean. *Adv Atmos Sci*, 2013, 30: 1507–1525
- 59 Zhang Z, Zhang Y, Wang W. Three-compartment structure of subsurface-intensified mesoscale eddies in the ocean. *J Geophys Res: Oceans*, 2017, 122: 1653–1664
- 60 Zhang M, Zhou L, Chen D, et al. A genesis potential index for western north Pacific tropical cyclones by using oceanic parameters. *J Geophys Res: Oceans*, 2016, 121: 7176–7191
- 61 Chen D, Lian T, Fu C, et al. Strong influence of westerly wind bursts on El Niño diversity. *Nat Geosci*, 2015, 8: 339–345
- 62 Huang H C, Boucharel J, Lin I I, et al. Air-sea fluxes for hurricane patricia (2015): Comparison with supertyphoon Haiyan (2013) and under different ENSO conditions. *J Geophys Res: Oceans*, 2017, 122: 6076–6089
- 63 Camargo S J, Sobel A H. Western North Pacific tropical cyclone intensity and ENSO. *J Clim*, 2005, 18: 2996–3006
- 64 Lian T, Chen D, Tang Y, et al. Effects of westerly wind bursts on El Niño: A new perspective. *Geophys Res Lett*, 2014, 41: 3522–3527
- 65 Yang L, Du Y, Wang D, et al. Impact of intraseasonal oscillation on the tropical cyclone track in the South China Sea. *Clim Dyn*, 2015, 44: 1505–1519
- 66 Weng C H, Hsu H H. Intraseasonal oscillation enhancing C5 typhoon occurrence over the tropical western north Pacific. *Geophys Res Lett*, 2017, 44: 3339–3345
- 67 Wang X, Liu H. PDO modulation of ENSO effect on tropical cyclone rapid intensification in the western north Pacific. *Clim Dyn*, 2016, 46: 15–28
- 68 Yang L, Chen S, Wang C, et al. Potential impact of the Pacific decadal oscillation and sea surface temperature in the tropical Indian Ocean-western Pacific on the variability of typhoon landfall on the China coast. *Clim Dyn*, 2017, doi: 10.1007/s00382-017-4037-7
- 69 Wang C, Lee S K. Co-variability of tropical cyclones in the north Atlantic and the eastern north Pacific. *Geophys Res Lett*, 2009, 36, doi: 10.1029/2009GL041469
- 70 Pradhan P K, Preethi B, Ashok K, et al. Modoki, Indian Ocean dipole, and western north Pacific typhoons: Possible implications for extreme events. *J Geophys Res: Atmos*, 2011, 116, doi: 10.1029/2011JD015666
- 71 Zhan R, Wang Y, Lei X. Contributions of ENSO and east Indian Ocean SSTA to the interannual variability of northwest Pacific tropical cyclone frequency. *J Clim*, 2011, 24: 509–521
- 72 Wang X, Wang D, Zhou W. Decadal variability of twentieth-century El Niño and La Niña occurrence from observations and IPCC AR4 coupled models. *Geophys Res Lett*, 2009, 36, doi: 10.1029/2009GL037929
- 73 Wang X, Zhou W, Li C, et al. Effects of the east Asian summer monsoon on tropical cyclone genesis over the South China Sea on an interdecadal time scale. *Adv Atmos Sci*, 2012, 29: 249–262

- 74 Weissmann M, Harnisch F, Wu C C, et al. The influence of assimilating dropsonde data on typhoon track and midlatitude forecasts. *Mon Weather Rev*, 2011, 139: 908–920
- 75 Craig S S, Liu Z, Chen Y, et al. Impact of assimilating microwave radiances with a limited-area ensemble data assimilation system on forecasts of typhoon Morakot. *Weather Forecast*, 2012, 27: 424–437
- 76 Li Y, Peng S, Wang J, et al. Impacts of nonbreaking wave-stirring-induced mixing on the upper ocean thermal structure and typhoon intensity in the South China Sea. *J Geophys Res: Oceans*, 2014, 119: 5052–5070
- 77 Wada A, Kunii M. The role of ocean-atmosphere interaction in typhoon Sinlaku (2008) using a regional coupled data assimilation system. *J Geophys Res: Oceans*, 2017, 122: 3675–3695
- 78 Chen S, Cummings J A, Schmidt J M, et al. Targeted ocean sampling guidance for tropical cyclones. *J Geophys Res: Oceans*, 2017, 122: 3505–3518
- 79 Zhang X, Zhang S, Liu Z, et al. Parameter optimization in an intermediate coupled climate model with biased physics. *J Clim*, 2015, 28: 1227–1247
- 80 Zhang X, Han G, Li D, et al. Variational estimation of wave-affected parameters in a two-equation turbulence model. *J Atmos Oceanic Technol*, 2015, 32: 528–546
- 81 Zhang L, Zhang X, Chu P C, et al. Impact of sea spray on the yellow and east China seas thermal structure during the passage of typhoon Rammasun (2002). *J Geophys Res: Oceans*, 2017, doi: 10.1002/2016jc012592
- 82 Han G, Li W, Zhang X, et al. A new version of regional ocean reanalysis for coastal waters of china and adjacent seas. *Adv Atmos Sci*, 2013, 30: 974–982
- 83 Zhang M, Zhou L, Fu H, et al. Assessment of intraseasonal variabilities in China ocean reanalysis (cora). *Acta Oceanol Sin*, 2016, 35: 90–101
- 84 Mogensen K S, Magnusson L, Bidlot J R. Tropical cyclone sensitivity to ocean coupling in the ECMWF coupled model. *J Geophys Res: Oceans*, 2017, 122: 4392–4412
- 85 Duan Z, Yao X, Li Y, et al. Investigation of turbulent momentum flux in the typhoon boundary layer. *J Geophys Res: Oceans*, 2017, 122: 2259–2268

Summary for “海洋与台风相互作用研究进展”

Progress and perspective on interactions between ocean and typhoon

Lei Zhou^{1,2}, Dake Chen^{2*}, Xiaotu Lei³, Wei Wang⁴, Guihua Wang⁵ & Guijun Han⁶¹ Institute of Oceanography, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;² State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China;³ Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China;⁴ Physical Oceanography Laboratory, Qingdao Collaborative Innovation Center of Marine Science and Technology, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;⁵ Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438, China;⁶ Key Laboratory of Marine Environmental Information Technology, State Oceanic Administration, National Marine Data and Information Service, State Oceanic Administration, Tianjing 300171, China

* Corresponding author, E-mail: dchen@sio.org.cn

Typhoon is one of the most destructive natural disasters on the earth. A lot of fruitful research has been conducted, especially from the perspective of atmospheric sciences. During a typhoon, the ocean also undergoes dramatic variabilities, which can have significant feedbacks to the atmosphere and typhoon. Generally, the sea surface temperatures (SST) decrease and inertial oscillations are greatly enhanced. The fingerprints of typhoon on the ocean are not constrained to the local sea surface, but can be extended to the ocean interior and remote areas, which play an important role in the climate change on a much longer and larger spatiotemporal scales. In addition, the mesoscale eddy accounts for a large amount of kinetic energy in the ocean. Much progress has been achieved on the responses and feedbacks of ocean eddy to typhoon, but it remains a large uncertainty for the ocean-typhoon interaction. Particularly, the three-dimensional structure of ocean eddy during typhoon is unclear due to the lack of observations. Overall, so far, there have been no comprehensive understandings of the ocean-typhoon interactions, which are believed to be a bottleneck for improving the typhoon prediction. Therefore, the mechanisms of ocean-typhoon interactions at various spatiotemporal scales, as well as their contributions to the short-term and long-term typhoon forecast, have become a hot and challenging topic for both the oceanic and the atmospheric sciences.

In this paper, recent progress in the ocean-typhoon interactions is reviewed, based on several collaborative projects in China. The foci are on the local responses and feedbacks between mesoscale variabilities in the upper ocean and typhoon, the ocean-typhoon interactions at low frequency and the impacts on global climate, data assimilation during typhoon, and typhoon forecast in the ocean-atmosphere coupled framework. The major challenge to the ocean-typhoon interactions resides in the lack of persistent and reliable observations, especially the synchronized observations in both the ocean and the atmosphere. Some valuable experiments have been conducted recently and are summarized in this study. For example, mooring/buoy arrays are carefully designed and deployed in the northern South China Sea consecutively from 2014 up to now. The monitoring for a long period accumulates very useful *in-situ* data for the study on the ocean-typhoon interactions. In addition, several novel techniques are also proposed and tested recently, such as the one using rocket-deployed dropsondes to obtain vertical profiles in the atmosphere within a typhoon, and the Iridium Argo the sampling frequency of which can be remotely and manually increased when a typhoon is coming. On the mechanisms of ocean-typhoon interaction, a hypothesis of “cold suction” in the ocean is proposed and examined, which is another avenue for the typhoon’s impacts on the subsurface in the ocean, except for the traditional concept of “heat pump”. Evidence for “cold suction” is found in *in-situ* observations. The new concept makes the theory for ocean-typhoon interactions more comprehensive. For the practical application, the improvement of typhoon prediction is the golden goal. A lot of efforts have been put into the data assimilation, which synthesizes data from different resources, such as the remote sensing data of the sea surface properties and the Argo data for the ocean interior. Improved data assimilation methods are proposed to facilitate the extreme conditions during typhoon. Until now, most operational typhoon forecast still rely on the atmosphere-only model. Nevertheless, the atmosphere-ocean-wave coupled systems have been established and evaluated. Some improvement has been shown for the operational typhoon forecast.

Finally, some key scientific problems and technical challenges are raised in this paper, which are expected to shed light on the future studies on the ocean-typhoon interaction.

typhoon, mesoscale eddy, subsurface variability, data assimilation, ocean-atmosphere coupled forecast

doi: 10.1360/N972018-00668