

台风-涡旋相互作用研究进展

王桂华¹, 卢著敏², 孙佳^{3,4,5,6}

(1. 复旦大学 大气与海洋科学系, 上海 200433;

2. 中国科学院南海海洋研究所 热带海洋环境国家重点实验室, 广东 广州 510301;

3. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

4. 自然资源部 海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东 青岛 266061;

5. 山东省海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东 青岛 266061;

6. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: 台风轨迹和强度的预报一直备受关注, 也是大气和海洋学家最为关注的科学问题之一。近些年, 随着观测技术和计算机模拟的快速发展, 发现海洋中尺度过程和台风有紧密的联系。本文针对该主题进行简要回顾和总结, 主要侧重 2 个方面: ① 台风如何影响海洋中尺度过程? 强调了地转过程的重要性和高度计观测对台风影响涡旋的低估; ② 海洋中尺度过程如何影响台风? 强调了冷暖涡的不同以及位置不同对台风强度的影响。在此基础上, 探讨台风-涡旋相互作用研究中尚未解决的问题: 涡旋对台风的三维响应、多涡对台风的综合效应、时间尺度匹配和海气通量等。

关键词: 台风; 海洋涡旋; 地转调整; 相互作用

中图分类号: P444

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2022)04-0755-08

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20220919001

引用格式: 王桂华, 卢著敏, 孙佳. 台风-涡旋相互作用研究进展[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(4): 755-762. WANG G H, LU Z M, SUN J. Advances in interactions between typhoons and ocean eddies[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(4): 755-762.

台风-海洋相互作用是典型的强海气相互作用。全球每年平均有 95.4 个台风生成, 西北太平洋、东太平洋、北大西洋、印度洋和南半球台风个数分别为 26.2、18.8、15.2、5.3 和 29.9 个^[1]。过去几十年全球范围内台风生成频次变化不大^[2-5], 但强台风(4~5 级, 萨菲尔-辛普森飓风等级)的比例在增加^[5]。平均来看, 强台风(3~5 级)的发生概率每十年增加 6%^[6]。另外, 随着纬度增加引导气流的风速加快, 全球台风移速增加^[7]。现在也有不少研究表明近几十年台风移动速度在显著变慢^[8-10]。台风发生的频率、强弱和移动速度与海洋紧密相关。

台风-海洋相互作用是十分复杂的。海洋大尺度混合层、热容量、海表温度与台风各种过程紧密相关, 反过来, 台风也可以通过改变混合强度、热通量和降水通量影响热盐环流和上层海洋过程^[11]。也有研究表明, 台风过程中的中小尺度现象是十分重要的^[12], 台风也可以产生强的惯性振荡、混合等海洋小尺度过程^[13]。随着高分辨率卫星高度计和海表温度产品的开发, 科学家发现, 世界大洋中广泛地分布着时间尺度从数周到数月、空间尺度从几十千米到数百千米的海洋中尺度涡旋^[14], 占据着世界大洋上层主要的动能。根据海洋涡旋的旋转方向, 我们亦将逆时针(顺时针)旋转的涡旋称为气旋涡(反气旋涡), 通常对应为冷涡(暖涡)。受行星 β 效应影响, 大部分涡旋会缓慢向西移动, 移动速度从赤道附近的 15 cm/s 向极地逐渐递减,

收稿日期: 2022-09-19

资助项目: 国家重点基础研究发展计划项目——两洋一海气象灾害自主可控监测预报技术研究(2019YFC1510100); 国家自然科学基金项目——台风致地转响应的高度计观察(42276018); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——海表温度影响台风强度变化速率的量化规律研究(2020Q05)

作者简介: 王桂华(1973—), 男, 教授, 博士, 主要从事物理海洋方面研究. E-mail: wanggh@fudan.edu.cn

(王 燕 编辑)

到 60°N 时, 速度约为 4 cm/s ^[15-17]。平均意义上, 涡旋半径大小也从低纬向高纬递减, 从 10°N 的 150 km 到 60°N 的 50 km , 影响深度从低纬向高纬递增^[18-19]。涡旋因具有强的非线性且能形成闭合的等位涡线, 可以携带水体一同移动^[20-21], 对海洋温度、盐度、海流和海气相互作用等方面产生重要影响^[22-24]。

台风-海洋相互作用在最近几十年取得了重要进展。在大尺度环流方面, 台风对热盐环流和风生环流的影响不可忽视^[25-26], 在小尺度方面, 近惯性振荡、内波和混合等海气界面过程有很多回顾性工作^[27-28]。本文主要侧重总结台风和海洋涡旋相互作用相关进展, 讨论侧重两方面内容: ①台风如何影响海洋涡旋; ②海洋涡旋对台风的影响。在此基础上, 深入分析它们之间的相互作用过程及目前研究存在的不足。

1 台风影响海洋涡旋研究进展

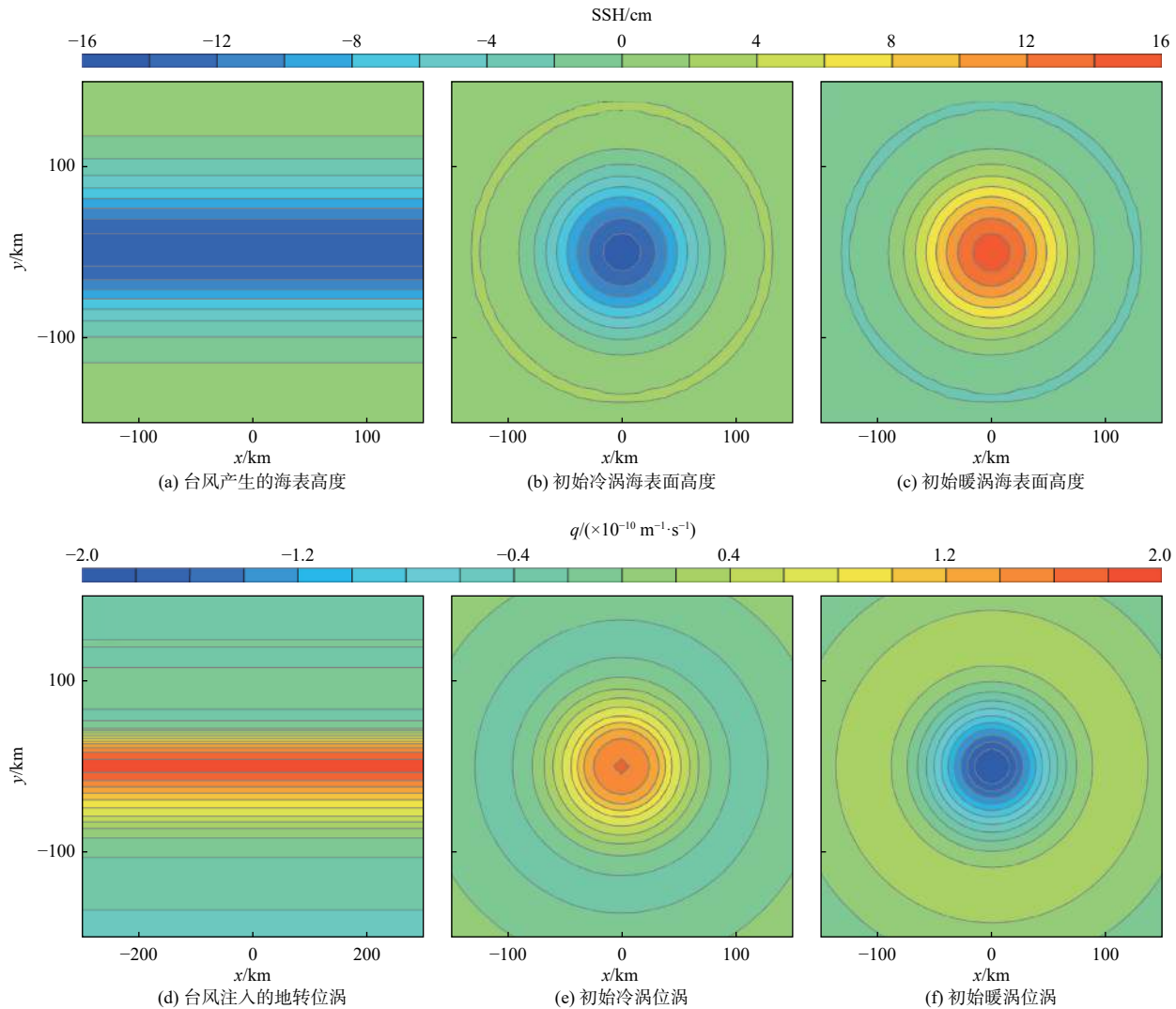
台风可以产生涡旋这个事实已经被海洋学家所关注^[29-30]。现有研究表明, 可能导致涡旋产生的情况有 3 种: ①极慢速台风能够产生冷涡。一般情况下, 慢速台风路径蜿蜒, 类似于静止台风, 理论上可以产生气旋性冷涡^[31]。②通过风、强降水或冷却等过程诱导一个弱涡^[32]。③台风和表面涡共同作用产生一个内部涡旋 (intrathermocline eddy)^[33]。

由于大洋中遍布海洋涡旋, 台风引起的中尺度涡变化更是一个值得注意的普遍现象^[26,34-35], 有研究表明, 台风对中尺度涡的累积影响可以改变大尺度环流和气候^[26]。台风生命周期较短, 一般不超过 10 d (平均 3 d , 一般年份最长 $12\sim 14\text{ d}$, 极端年份最长 19 d), 但中尺度涡生命期较长, 一般为几十天, 除此之外, 台风移动速度较快, 通过中尺度涡一般只需 12 h , 需要一个动力机制解释短时间尺度的台风如何影响长时间尺度的中尺度涡。通过高度计融合资料可以看到台风引起中尺度涡变化^[26,34,36], 但大多基于特征描述, 并没有提供合理的动力解释。事实上, 海洋对台风的响应, 除了广为人知的近惯性响应, 还存在另外一种响应, 即地转响应^[37-38]。早期的一些研究认为台风注入的近惯性能量远大于地转能量^[38-39], 导致台风引起的地转响应长期未得到应有的重视。

近年来, 台风引起的地转响应研究取得了一定进展。Lu 等^[40]利用高度计资料观测发现冷涡对台风的响应特征: 冷涡受台风影响后先发生椭圆变形并逐步恢复为圆形, 且强度增强, 该特征也可以通过数值模拟再现。诊断模式结果表明, 台风注入的位涡决定随后的冷涡演变。由于近惯性内波不携带位涡^[41], 而近惯性响应在海洋对台风的响应中占主导地位, 因此通常认为台风不能在海洋温跃层产生位涡^[38,42]。Lu 等^[43]提出台风主要通过地转响应产生位涡输入: ①台风经过涡旋时, 其路径两侧最大风圈内存在显著的正风应力旋度, 相应的风驱混合层流场辐散产生垂向上升流, 上升流导致混合层以下的等密度层厚度被压缩, 因而产生正位涡异常。根据 Zhang 等^[26]研究, 正位涡异常注入是台风影响海盆尺度环流的关键。②在同样的台风强迫下, 地转响应沿台风路径方向处处一致, 相应的正位涡异常和上升流的跨路径向尺度分别为 50 km 和 100 km , 和中尺度涡的尺度不完全一致。更为关键的是, 台风注入位涡的分布和中尺度涡也完全不一致, 前者为平行于台风路径的平行线而后者为封闭圆形 (图 1), 这导致中尺度涡受台风扰动之后必然发生准地转调整。

长期以来, 融合高度计资料被广泛用于研究台风引起的中尺度涡变化^[26,34,36,44-45]。由于海洋对台风的响应仅包含地转响应和近惯性响应两个物理过程, 而台风所产生的近惯性内波在较短时间内离开源地^[46-48], 根据高度计的采样频率, 融合高度计资料中观察到涡的特征主要是由地转响应所导致的^[34,40,49]。应该指出的是, 利用融合高度计资料研究台风引起的涡变化, 可能显著低估了台风的影响^[49]。导致低估的原因主要是: ①这类研究通常定量比较台风过境时间前后涡半径和振幅的变化, 选择提取台风特征的时间通常短于准地转调整时间, 这些参数并没达到稳定态, 因此导致动力上的不确定性。②融合高度计资料基于沿轨高度计数据插值而来, 卫星轨道非常稀疏, 采样率较低; 而台风的地转响应约在 0.5 d 内产生, 其引起的涡变化基

本是陡变的, 稀疏数据插值观察陡变必然人为平滑。由于人为平滑窗口较大, 约在台风前后 15 d, 可以预见, 通过这种人工插值提取的参数会显著低估台风对中尺度涡的影响。



注: 该图引自 Lu 等^[43]; x 和 y 分别为沿着和垂直台风路径的距离, SSH 为海表面高度(图 a~图 c), q 为地转位涡(图 d~图 f)。

图 1 台风注入扰动(a、d)与预存中尺度气旋涡(b、e)和反气旋涡(c、f)的分布特征

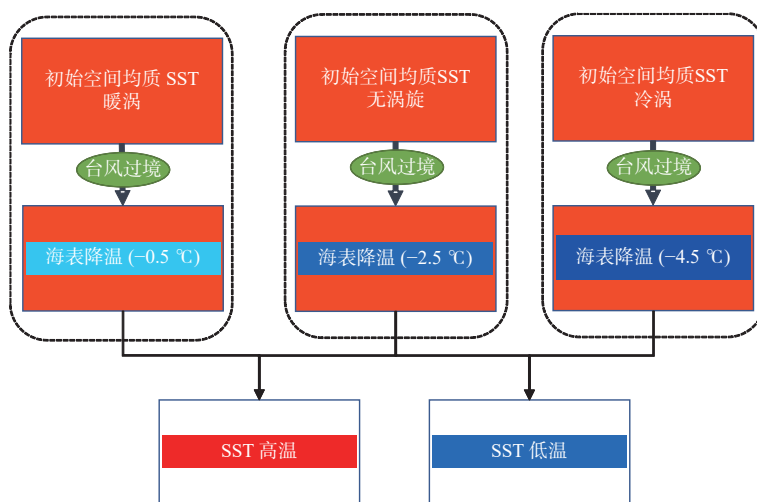
Fig. 1 Spatial features of disturbance from typhoon (a, d) and preexisting mesoscale cyclonic eddy (b, e) and anticyclonic eddy (c, f)

2 涡旋对台风的影响研究进展

台风倾向于向暖海温处移动, 但相对于大尺度环流和 β 效应等, 涡旋的冷暖结构对台风路径的影响相对较小。因此, 此文主要讨论涡旋对台风强度的影响。海洋是台风的热源, 台风以热通量形式从海洋获取热量, 经次级环流转化为自旋动能, 引起强度变化^[50-51]。台风通过强风夹卷混合导致上层海洋失热、混合层加深、温跃层冷水上涌, 引发台风中心附近海表温度降低^[11,52], 抑制台风的进一步发展, 即海洋对台风的负反馈效应。

涡旋的存在^[14,53] 改变台风过程中的海表温度变化幅度和空间分布形态, 影响海洋所能提供给台风的热量总量。由于暖涡和冷涡热力结构存在显著的不同, 它们对台风的影响也是有区别的^[54-55]。一般认为暖涡

上层的深厚暖水抑制了台风引发的海表降温幅度和降温范围,使台风期间海表温度维持在相对高温状态,因而台风途经暖涡时可以从海表获得更多的能量输入,继而维持或促进台风增强^[56-58]。如:2003年的超强台风“Maemi”^[59]、2008年的超强台风“Nagris”^[60]和2014年的超强台风“Rammassun”等^[61-62],均是因受到上层暖水的影响持续快速增强为超强台风的。因此,虽然目前对台风快速增强的预报有困难,但在考虑暖涡的情况下,台风强度的模拟结果可以得到极大的改善,这对台风强度的预报工作有重要的意义。相比之下,冷涡携带的冷水极大地强化了台风引起的海表降温效应,显著减少了台风通过海气通量从海表获得的热通量,抑制了台风的进一步发展^[57,63]。如:2005年的台风“Hai-Tang”在台湾以东引发的超过 -6°C 的大范围降温就与冷涡的存在密切相关^[64],这样剧烈的海表降温对台风强度有重要的调制作用。这些研究表明,虽然暖涡和冷涡与海表温度之间的关系复杂^[65],但在台风过程中的作用确实是有显著差异的(图2)。



注:图中数值为降温示意。

图2 暖涡、冷涡及无涡旋时海表温度对台风过程的响应示意图

Fig. 2 Sketch map of sea surface temperature response to typhoon with warm, cold and no eddy

涡旋-台风相互作用研究目前大多只考虑了涡旋位于台风移动路径上的情况^[56,59]。台风是一个热机,其能量获取和转化过程与台风次级环流系统密不可分。台风不同位置处的涡旋引发外区海表温度异常,通过局地海气相互作用影响台风入流风场,引起台风结构变化,进而改变台风的热量获取率和动能转化率,最终导致台风强度变化(图3)。Sun等^[58]的理想模式研究结果表明,当同一暖涡在台风内、外区时,台风次级环流系统变异以及海洋供给台风的能量总量差异反相变化。这两方面的原因共同导致这2个位置的暖涡对台风强度的影响是相反的:当暖涡在台风中心时,促进台风强度的增强,而当暖涡不在台风路径上时,则会抑制台风的增强。同时,当涡旋位于台风轨迹外侧时,涡旋的响应结果较其位于台风中心时要弱,加剧了外围暖涡对台风发展的抑制作用^[57-58]。这一结论与Sun等^[36]关于台风内外区高海表温度异常的反相响应结果是一致的,并且在实际台风过程中也得到了验证。同样地,台风内外区的冷涡对台风强度也有重要影响,内区冷涡直接降低了台

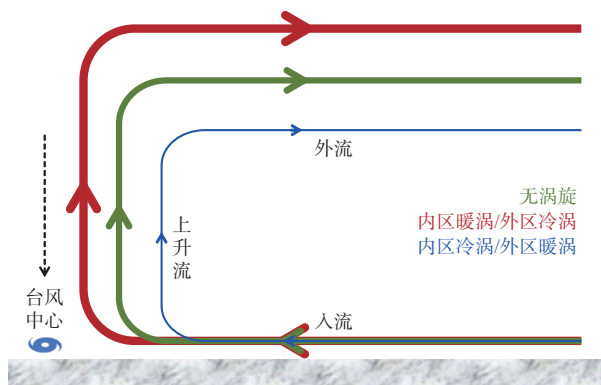


图3 涡旋对台风次级环流及其强度影响的示意图

Fig. 3 Sketch map of tropical cyclone subcirculation and intensity induced by mesoscale eddies

风中心附近海表温度, 降低了表面热通量输运, 抑制了台风的发展; 外区冷涡虽然降低了局地海表温度, 但增强了指向台风中心的风压梯度, 促进次级环流增强, 在一定程度上有利于台风增强。

3 结论与讨论

本文主要探讨了 2 个主要问题: 一是台风过程如何影响涡旋, 强调了地转过程的重要性。需要指出的是, 台风注入的位涡一般只局限于 100~200 m 厚的温跃层, 明显比中尺度涡位涡垂向分布薄, 可推断台风对中尺度涡影响必然是三维的。这种三维结构变化在 Lu 等^[40]的模拟结果和 Gordon 等^[33]的水文观测有所体现, 但三维结构变化的特征及机理研究仍还处于初步阶段。二是涡旋如何影响台风强度, 强调了冷暖涡结构的不同以及所处位置不同的重要性。由于台风尺度和涡旋尺度差别很大, 台风的范围一般可达 500~1 000 km, 而涡旋的尺度一般为 30~300 km, 因此, 1 个台风下面的涡旋数目远远大于 2 个。这些涡旋对台风的综合效应目前仍然是未知的。

无论台风影响涡旋, 还是涡旋影响台风, 这两类单向作用是十分重要的, 同时也对相互作用研究提出了挑战: ①台风沿着轨迹可加强, 甚至产生气旋性涡旋, 理论上反过来可以抑制涡旋的增长。但台风影响气旋性涡旋是一个较慢的过程, 改变的涡旋多长时间能反过来影响台风强度是值得思考的。②台风和涡旋相互作用与海气通量密切相关。我们对海洋中尺度的海气通量有些初步认识^[23,66], 但依然是肤浅的。同时, 台风条件下的海气通量由于观测难度大, 也有很大的不确定性^[67-68]。因此, 台风-海洋涡旋相互作用时海气通量如何变化是值得深入研究的。

参考文献 (References):

- [1] LI H, SRIVER R L. Tropical cyclone activity in the high-resolution community earth system model and the impact of ocean coupling[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2018, 10(1): 165-186.
- [2] SOLOW A R, MOORE L J. Testing for trend in north Atlantic hurricane activity, 1900-98[J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(21): 3111-3114.
- [3] ELSNER J B, NIU X F, JAGGER T H. Detecting shifts in hurricane rates using a markov chain monte carlo approach[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(13): 2652-2666.
- [4] PIELKE R A. Are there trends in hurricane destruction?[J]. *Nature*, 2005, 438(7071): E11.
- [5] WEBSTER P J, HOLLAND G J, CURRY J A, et al. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment[J]. *Science*, 2005, 309(5742): 1844-1846.
- [6] KOSSIN J P, KNAPP K R, OLANDER T L, et al. Global increase in major tropical cyclone exceedance probability over the past four decades[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(22): 11975-11980.
- [7] MOON I J, KIM S H, CHAN J C L. Climate change and tropical cyclone trend[J]. *Nature*, 2019, 570(7759): E3-E5.
- [8] KOSSIN J P. Climate change and tropical cyclone trend - uncertainties in tropical-cyclone translation speed reply[J]. *Nature*, 2019, 570(7759): E16-E22.
- [9] KOSSIN J P. A global slowdown of tropical-cyclone translation speed[J]. *Nature*, 2018, 558(7708): 104-107.
- [10] GUTMANN E D, RASMUSSEN R M, LIU C H, et al. Changes in hurricanes from a 13-yr convection-permitting pseudo-global warming simulation[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(9): 3643-3657.
- [11] 陈大可, 雷小途, 王伟, 等. 上层海洋对台风的响应和调制机理[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(10): 1077-1086. CHEN D K, LEI X T, WANG W, et al. Upper ocean response and feedback mechanisms to typhoon[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2013, 28(10): 1077-1086.
- [12] WU L G, LIU Q Y, LI Y B. Tornado-scale vortices in the tropical cyclone boundary layer: numerical simulation with the WRF-LES framework[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(4): 2477-2487.
- [13] HISAKI Y, NARUKE T. Horizontal variability of near-inertial oscillations associated with the passage of a typhoon[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, 108(C12): 3382-1-3382-20.
- [14] CHELTON D B, SCHLAX M G, SAMELSON R M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies[J]. *Progress in Oceanography*, 2011, 91(2): 167-216.
- [15] NOF D. On the beta-induced movement of isolated baroclinic eddies[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1981, 11(12): 1662-1672.

- [16] 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[J]. 海洋科学进展, 2008, 26(4): 477-453. XUHUA C, YIQUAN Q I. Distribution and propagation of mesoscale eddies in the global oceans learnt from altimetric data[J]. Advances in Marine Science, 2008, 26(4): 447-453.
- [17] FU L-L. Pattern and velocity of propagation of the global ocean eddy variability[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114: C11017-1-C11017-14.
- [18] CHELTON D B, GAUBE P, SCHLAX M G, et al. The influence of nonlinear mesoscale eddies on near-surface oceanic chlorophyll[J]. *Science*, 2011, 334(6054): 328-332.
- [19] LIU Z Y, LIAO G H, HU X K, et al. Aspect ratio of eddies inferred from Argo floats and satellite altimeter data in the ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(1): e2019JC015555-1-e2019JC015555-19.
- [20] EARLY J J, SAMELSON R M, CHELTON D B. The evolution and propagation of quasigeostrophic ocean eddies[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2011, 41(8): 1535-1555.
- [21] ZHANG Z G, WANG W, QIU B. Oceanic mass transport by mesoscale eddies[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 322-324.
- [22] SEO H. Distinct influence of air-sea interactions mediated by mesoscale sea surface temperature and surface current in the Arabian Sea[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(20): 8061-8080.
- [23] MA X H, JING Z, CHANG P, et al. Western boundary currents regulated by interaction between ocean eddies and the atmosphere[J]. *Nature*, 2016, 535(7613): 533-537.
- [24] MCGILLICUDDY D J JR. Mechanisms of physical-biological-biogeochemical interaction at the oceanic mesoscale[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2016, 8(125): 1-45.
- [25] DONE J, HU A X, FARMER E C, et al. The thermohaline circulation and tropical cyclones in past, present, and future climates[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(7): 1015-1017.
- [26] ZHANG Y, ZHANG Z G, CHEN D K, et al. Strengthening of the Kuroshio current by intensifying tropical cyclones[J]. *Science*, 2020, 368(6494): 988-993.
- [27] PERRIE W A. Atmosphere-ocean interactions. volume 2[M]. UK: WIT Press, 2006.
- [28] PERRIE W A. Atmosphere-ocean interactions. volume 1[M]. UK: WIT Press, 2002.
- [29] LI J G, YANG Y J, WANG G H, et al. Enhanced oceanic environmental responses and feedbacks to super typhoon Nida (2009) during the sudden-turning stage[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13: 2648-1-2648-23.
- [30] HU J Y, KAWAMURA H. Detection of cyclonic eddy generated by looping tropical cyclone in the northern South China Sea: a case study[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 23(2): 213-224.
- [31] LU Z M, HUANG R X. The three-dimensional steady circulation in a homogenous ocean induced by a stationary hurricane[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2010, 40(7): 1441-1457.
- [32] CHEN Y Q, TANG D L. Eddy-feature phytoplankton bloom induced by a tropical cyclone in the South China Sea[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(23): 7444-7457.
- [33] GORDON A L, SHROYER E, MURTY V S N. An intrathermocline eddy and a tropical cyclone in the bay of Bengal[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 46218-1-46218-8.
- [34] MA Z H, ZHANG Z L, FEI J F, et al. Imprints of tropical cyclones on structural characteristics of mesoscale oceanic eddies over the western North Pacific[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(10): e2021GL092601-1-e2021GL092601-8.
- [35] YU F J, YANG Q Q, CHEN G, et al. The response of cyclonic eddies to typhoons based on satellite remote sensing data for 2001-2014 from the South China Sea[J]. *Oceanologia*, 2019, 61(2): 265-275.
- [36] 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 data-based evaluation between 2000 and 2008[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(9): 5585-5598.
- [37] GEISLER J E. Linear theory of the response of a two layer ocean to a moving hurricane[J]. *Geophysical Fluid Dynamics*, 1970, 1(1/2): 249-272.
- [38] PRICE J F. Internal wave wake of a moving storm. 1. scales, energy budget and observations[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1983, 13(6): 949-965.
- [39] NILSSON J. Energy flux from traveling hurricanes to the oceanic internal wave-field[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1995, 25(4): 558-573.
- [40] LU Z M, WANG G H, SHANG X D. Response of a preexisting cyclonic ocean eddy to a typhoon[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2016, 46(8): 2403-2410.
- [41] PEDLOSKY J. Waves in the ocean and atmosphere: introduction to wave dynamics[M]. Germany: Springer Science & Business Media, 2003.

- [42] GILL A E. On the behavior of internal waves in the wakes of storms[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1984, 14(7): 1129-1151.
- [43] LU Z M, WANG G H, SHANG X D. Strength and spatial structure of the perturbation induced by a tropical cyclone to the underlying eddies[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125: e2020JC016097-1-e2020JC016097-19.
- [44] SHANG X D, ZHU H B, CHEN G Y, et al. Research on cold core eddy change and phytoplankton bloom induced by typhoons: case studies in the South China Sea[J]. *Advances in Meteorology*, 2015, 2015: 340432-1-340432-19.
- [45] WALKER N D, LEBEN R R, PILLEY C T, et al. Slow translation speed causes rapid collapse of northeast Pacific hurricane Kenneth over cold core eddy[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(21): 7595-7601.
- [46] JAIMES B, SHAY L K. Near-inertial wave wake of hurricanes Katrina and Rita over mesoscale oceanic eddies[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2010, 40(6): 1320-1337.
- [47] MOROZOV E G, VELARDE M G. Inertial oscillations as deep ocean response to hurricanes[J]. *Journal of Oceanography*, 2008, 64(4): 495-509.
- [48] SHAY L K, ELSBERRY R L. Near-inertial ocean current response to hurricane Frederic[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1987, 17(8): 1249-1269.
- [49] LU Z M, WANG G H, SHANG X D, et al. Uncertainties in altimetry observations of eddy changes induced by tropical cyclones[J/OL]. *Journal of Physical Oceanography*, 2022 [2022-09-19]. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-22-0115.1>.
- [50] EMANUEL K A. An air sea interaction theory for tropical cyclones. 1. steady-state maintenance[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1986, 43(6): 585-604.
- [51] EMANUEL K. A similarity hypothesis for air-sea exchange at extreme wind speeds[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2003, 60(11): 1420-1428.
- [52] LU Z M, WANG G H, SHANG X D. Inner-core sea surface cooling induced by a tropical cyclone[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2021, 51(11): 3385-3400.
- [53] LUMPKIN R. Global characteristics of coherent vortices from surface drifter trajectories[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(2): 1306-1321.
- [54] SUN W J, DONG C M, WANG R Y, et al. Vertical structure anomalies of oceanic eddies in the Kuroshio extension region[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(2): 1476-1496.
- [55] ZHANG Z G, ZHANG Y, WANG W, et al. Universal structure of mesoscale eddies in the ocean[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(14): 3677-3681.
- [56] MA Z H, FEI J F, HUANG X G, et al. Modulating effects of mesoscale oceanic eddies on sea surface temperature response to tropical cyclones over the western North Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(1): 367-379.
- [57] MA Z H, FEI J F, LIU L, et al. An investigation of the influences of mesoscale ocean eddies on tropical cyclone intensities[J]. *Monthly Weather Review*, 2017, 145(4): 1181-1201.
- [58] SUN J, WANG G H, XIONG X J, et al. Impact of warm mesoscale eddy on tropical cyclone intensity[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 39(8): 1-13.
- [59] LIN II, WU C C, EMANUEL K A, et al. The interaction of supertyphoon Maemi (2003) with a warm ocean eddy[J]. *Monthly weather review*, 2005, 133(9): 2635-2649.
- [60] LIN II, CHEN C H, PUN I F, et al. Warm ocean anomaly, air sea fluxes, and the rapid intensification of tropical cyclone Nargis (2008)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L03817-1-L03817-5.
- [61] SUN J, ZUO J C, LING Z, et al. Role of ocean upper layer warm water in the rapid intensification of tropical cyclones: a case study of typhoon Rammasun (1409)[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(3): 63-68.
- [62] 杨薇, 蔡亲波, 李勋, 等. 海洋暖涡对“威马逊”(2014)影响的观测和模拟研究[J]. *自然灾害学报*, 2019, 28(1): 165-174. YANG W, CAI Q B, LI X, et al. Observational and numerical study of impacts of ocean warm eddy on Rammasun (2014)[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2019, 28(1): 165-174.
- [63] WALKER N D, LEBEN R R, BALASUBRAMANIAN S. Hurricane-forced upwelling and chlorophyll a enhancement within cold-core cyclones in the gulf of Mexico[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L18610-1-L18610-5.
- [64] ZHENG Z W, HO C R, KUO N J. Importance of pre-existing oceanic conditions to upper ocean response induced by super typhoon Hai-Tang[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L20603-1-L20603-5.
- [65] LÜ M K, WANG F, LI Y L, et al. Structure of sea surface temperature anomaly induced by mesoscale eddies in the North Pacific Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2022, 127: e2021JC017581-1- e2021JC017581-20.
- [66] LIN Y J, WANG G H. The effects of eddy size on the sea surface heat flux[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48: e2021GL095687-1-e2021GL095687-10.

- [67] SONG X Z, NING C L, DUAN Y L, et al. Observed extreme air-sea heat flux variations during three tropical cyclones in the tropical southeastern Indian Ocean[J]. *Journal of Climate*, 2021, 34(9): 3683-3706.
- [68] WU L W, WANG G H. Surface net heat flux estimated from drifter observations[J]. *Environmental Research Letters*, 2022, 17: 094009-1-094009-10.

Advances in Interactions Between Typhoons and Ocean Eddies

WANG Gui-hua¹, LU Zhu-min², SUN Jia^{3,4,5,6}

(1. *Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Fudan University, Shanghai 200433, China;*

2. *South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences & State Key Laboratory of Tropical Oceanography, Guangzhou 510301, China;*

3. *First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;*

4. *Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, MNR, Qingdao 266061, China;*

5. *Shandong Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, Qingdao 266061, China;*

6. *Laboratory of Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory of Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)*

Abstract: Prediction of typhoon track and intensity receives much concern, and is a major scientific issue for atmospheric and oceanic sciences. With the development of observation and simulation, the close linkages between typhoons and ocean eddies have been studied in recent years. This study reviews this topic and emphasizes two issues: firstly, how typhoon affects ocean eddies. We highlight the dynamic role of geostrophic processes, and mention that recent altimetry datasets underestimate the typhoon effects on mesoscale eddies. Secondly, how ocean eddies affect typhoon. We stress the role of different type and position of eddies on typhoon intensity. This study also discusses some unsolvable problems on the interactions between typhoons and ocean eddies.

Key words: typhoon; mesoscale eddy; geostrophic adjustment; interaction

Received: September 19, 2022