

王珍,黄泓,赵军,等,2023.热带气旋近海加强机制的研究进展[J].气象,49(5):525-541. Wang Z, Huang H, Zhao J, et al, 2023. Research progress on the intensifying mechanism of coastal tropical cyclones[J]. Meteor Mon, 49(5): 525-541 (in Chinese).

热带气旋近海加强机制的研究进展^{*}

王 珍 黄 泓 赵 军 王学忠

国防科技大学气象海洋学院,长沙 410073

提 要:近年来,热带气旋(tropical cyclone, TC)强度的预报技巧有所提高,但是在近海加强 TC 多发的年份,强度预报值较实况偏弱。围绕 TC 近海加强影响因素,从环境条件和动力机制对相关研究进行回顾,详细分析了环境大气、海洋强迫机制、内核结构变化以及螺旋云带水相变化等因子对 TC 近海加强的作用。这些因子共同作用于 TC 近海加强过程,对预报具有指示意义。通过总结研究成果的异同点,建立了 TC 近海加强影响因子模型,以期更好地为 TC 近海加强过程的业务预报提供理论参考。

关键词:近海热带气旋,加强过程,环境条件,动力机制,影响因子模型

中图分类号: P456, P433

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.082201

Research Progress on the Intensifying Mechanism of Coastal Tropical Cyclones

WANG Zhen HUANG Hong ZHAO Jun WANG Xuezhong

College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073

Abstract: In recent years, the forecasting of tropical cyclone (TC) intensity has been improved. However, the intensity forecasting value is weaker in the years when TCs are frequently intensified over offshore waters. Focused on the factors affecting the intensified coastal TCs, this paper reviews the related research from two perspectives: environmental conditions and dynamic mechanism. Then a detailed analysis of the effects of environmental atmospheric, ocean forcing mechanisms, structural changes in the inner core and water phase change in spiral bands on the intensifying process of coastal TCs is performed. Such factors are good indicators for the forecasting of coastal TCs, and they act together in the TC intensifying process. Through comparing and summarizing relevant research results, a schematic model of impact factors is established in order to provide valuable reference for operational forecasting of the intensifying process of TCs over offshore waters.

Key words: coastal tropical cyclone, intensifying process, environmental condition, dynamic mechanism, schematic model of impact factor

^{*} 国家自然科学基金项目(42075053,41975128)共同资助

2022 年 2 月 18 日收稿; 2022 年 9 月 14 日收修定稿

第一作者:王珍,主要从事台风动力学及数值模拟研究. E-mail: wangzhen19971229@163.com

通讯作者:赵军,主要从事数值模式研发及数据同化研究. E-mail: zhaojun@nudt.edu.cn

引 言

由于所处的地理位置以及绵长的海岸线,中国是世界上受热带气旋(tropical cyclone, TC)影响最大的国家之一。1990 年以来,平均每年 TC 登陆造成的经济损失高达 100 亿元以上(王昂生,2007)。移近沿海的 TC 在登陆前,强度通常是降低的(阎俊岳,1996),然而有一小部分 TC 却在近海突然加强(郑峰等,2016)。余晖和端义宏(2002)以及郑峰等(2016)先后利用 35 年和 65 年的资料统计分别得到中国近海突然增强 TC 占近海 TC 总数的 17% 和 10.19%。近海突增 TC 存在明显的时空分布特征,主要发生在 4—10 月,以 8 月和 9 月最多(郑峰等,2016;陆波和钱维宏,2012);多数出现在南海,黄海偶有发生,但不会出现在 30°N 以北的中高纬地区和 0°~5°N 的低纬地区(于玉斌和姚秀萍,2006;郑峰等,2016)。尽管 TC 近海加强是小概率事件,但易因防御不足导致重大经济损失和人员伤亡,例如“桑美”(0608)和“莫兰蒂”(1614)。

远海 TC 结构和强度的演变主要是海洋和大气相互作用的结果;但是当 TC 趋于陆地时,将逐渐受到海岸地形、近海洋流、浅海区大陆架和沿海环流系统等的影响,会使 TC 的结构和强度发生变化(陈联寿等,2004;涂石飞等,2019)。近年来,对 TC 强度的预报水平虽然有所提高,但预报精度提高缓慢(DeMaria et al, 2014; Emanuel and Zhang, 2016; Tallapragada et al, 2016),强度预报误差逐年波动(Emanuel, 2018),特别是对近海加强 TC 的预报仍然存在很多问题(占瑞芬等,2010;周冠博等,2022)。高拴柱等(2018)、董林等(2019)、吕心艳等(2021)、王海平等(2021)、周冠博等(2022)和向纯怡等(2022)分别对 2016—2021 年中央气象台 TC 强度预报误差进行统计后发现,预报难点集中体现在近海快速加强 TC 的强度预报,其明显偏弱、误差较大。

近海 TC 加强的原理以及发生条件与在开阔洋面加强的 TC 大致相同,但是由于所处纬度以及地理环境的约束,近海加强 TC 也有其特殊性。为此,国内外学者开展了大量研究,但对 TC 近海加强的充分必要条件仍然存在很大的争议。因此,影响 TC 近海强度变化的内部和外部物理过程仍是现在的研究热点,亦是业务预报的难点。当前许多研究

表明,影响 TC 在近海强度变化的主要因子有:环境大气控制、海洋强迫作用、内核变化影响以及螺旋云带水相变化等(Kaplan and DeMaria, 2003; Rozoff et al, 2015; Didlake et al, 2018; 徐道生等, 2020)。

本文将主要围绕影响 TC 近海加强的因素,从环境条件和动力机制两方面对相关研究进行回顾。考虑到 TC 近海加强是多要素协同影响的结果且其中一些因子具有前兆性,本文在分析当前研究成果异同点的基础上,将进一步综合各种影响因子建立 TC 近海加强影响因子模型。

1 TC 近海加强的影响因子

海洋结构和大气环流的变化对近海发展的 TC 尤为重要(Landsea et al, 1998)。影响近海 TC 强度变化的因子具有多时间和空间尺度特征,涵盖大气环流形势的变化、海洋环境的维持和 TC 内部结构的变化等(Rogers et al, 2012)。这些影响因素在 TC 生命史中的不同阶段可能单独或者共同作用,其相对重要性是不确定的(端义宏, 2015)。

1.1 主要影响因子

TC 近海加强发生在有利的环境大气和海洋强迫条件下(郑峰等, 2016; 陈联寿等, 2012)。影响 TC 近海结构和强度变化的环境大气条件主要有:更强的高层东风、季风涌与 TC 涡旋的相互作用、中尺度系统和冷空气的卷入以及急流和对流层上层槽的相互作用等(Kaplan and DeMaria, 2003; Rozoff et al, 2015)。有利于 TC 近海加强的海洋强迫因子主要有较暖的海面温度(sea surface temperature, SST)、较高的海洋热容量(oceanic heat content, OHC)、稳定的垂直结构以及海洋飞沫(DeMaria and Kaplan, 1994; 陈联寿等, 2012; Lin et al, 2003)等。

1.1.1 大气环流

副热带高压(以下简称副高)作为东亚夏季风系统的重要成员之一,其进退与 TC 路径和强度变化的关系极为密切(陆波和钱维宏, 2012; 黄露等, 2012)。胡春梅等(2005)、郑艳等(2014)以及郑峰等(2016)先后通过大尺度诊断分析得出 TC 登陆时明显增强的副高为 TC 的突然增强提供了有利的中低层辐合形势,且均发现登陆前突然增强的 TC 主要位于副高的南侧或者西南侧(图 1)。副高加强还会

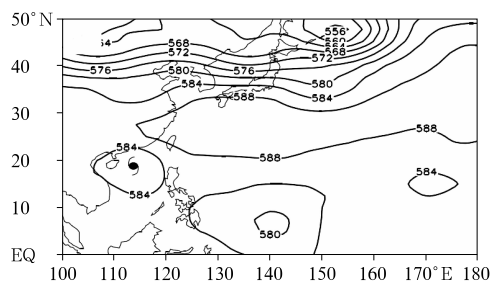


图1 副高与近海加强 TC 的相对位置(引自胡春梅等,2005)

Fig.1 The relative position of the subtropical high and intensified coastal TC (Hu et al, 2005)

加剧近海 TC 非对称结构的发展(陈燕等,2020),及加大近海 TC 与副高之间的气压梯度(叶宾宾等,2011),利于 TC 强度加强。此外,副高西伸北抬会加强水汽的输送,为 TC 近海急剧发展提供了湿热条件(刘赛赛等,2017;刘凯等,2017;冯萧,2018)。但是于玉斌等(2008)研究发现,TC 近海强度变化与副高的强度变化呈反相变化关系,在“桑美”(0608)近海急剧增强过程中,副高的面积和强度越来越小。

许多观测和理论研究将 TC 近海强度变化与对流层上部槽、脊的强度和位置联系到一起。以“威马逊”(1409)为例,稳定少动的高空槽维持了长时间的高层辐散抽吸作用,为其近海持续加强提供了有利的环境条件(郑艳等,2014)。高空槽对 TC 强度的具体影响取决于槽自身的尺度、与 TC 的相对位置及 TC 本身的强度等(Leroux et al, 2016; Fischer et al, 2017; Dai et al, 2017; Komaromi and Doyle, 2018)。当槽的尺度与 TC 尺度相当时,有利于 TC 的增强(Bosart and Lackmann, 1995)。李英等(2006)研究对流层上部槽脊的强度和位置对 TC 强度变化影响时发现,高空槽分裂出来的与 TC 尺度相当的正位涡扰动和 TC 的叠加、槽区的涡度下传、槽前高压对低层上升运动的激发等都会改变 TC 的结构并使其强度发生变化。研究表明,TC 的加强往往出现在陡槽区(Fischer et al, 2017)或中纬度西风带到副热带低压槽之间的区域(Ventham and Wang, 2007)。

一般而言,强的高空外流有利于 TC 发生近海加强过程(胡春梅等,2005;李霞等,2014),与之相伴的往往有较强的低空入流。与近海高层辐散气流加强相联系的 TC 占近海加强 TC 总数的 65% 以上,

且这种加强形势的出现主要与对流层上层经常存在的反气旋中心或 100 hPa 南亚高压东进有关(陈乾金,1996)。研究表明,TC 高层外流、低层入流与对流层环境气流之间的相互作用可以影响 TC 强度变化(Wu and Liu, 1998; 余晖等,2002),上层强辐散场的叠加和中低层的强辐合入流会加强 TC 环流的垂直上升运动,共同为 TC 环流的加强提供有利的动力条件(林毅等,2005)。“威马逊”(1409)高空南北两侧偏西风急流和偏东风急流构成反气旋式辐散流场,而南支急流与低空的西南急流存在很强的耦合,低层强辐合和高空强辐散加剧了“威马逊”(1409)近海的发展(郑艳等,2014;陈燕等,2020)。郑峰等(2016)对 1949—2013 年中国近海突然增强 TC 统计分析发现 TC 北侧外围维持的高空急流加剧了 TC 高空外流导致 TC 强度突增。通过对比登陆前迅速增强和迅速减弱的 TC 的大尺度环流背景特征,于润玲等(2013)发现快速增强 TC 的低空入流和高空外流均明显强于迅速减弱的 TC,再次印证了高空外流与 TC 近海强度突变之间存在紧密联系。此外,Peng et al(1999)还发现环境气流的方向也会对 TC 强度产生影响,西风气流比东风气流更能使 TC 强度增加。

冷空气可引起气压梯度及环境流场的变化,这对 TC 发展的作用是双重的(陈联寿和丁一汇,1979)。强冷空气流入 TC 破坏暖心结构会使其减弱和消亡或变性为温带气旋;当弱冷空气影响 TC 外围环流时,则有利于 TC 的强度增强(陈联寿和丁一汇,1979;钮学新等,2005;何洁琳等,2009)。梯度风理论表明冷空气侵入 TC 外围会引起温度梯度的增长,进而促进 TC 的发展(韩瑛和伍荣生,2008)。闫敬华等(2005)和阎俊岳等(1997)均认为适当低层弱冷空气入侵是 TC 近海增强的关键因素;而中高层冷空气对 TC 近海加强的贡献主要表现在冷低压系统外围的冷空气从西北侧进入 TC 中层,TC 低层有暖湿空气,使得位势不稳定能量增加,对流进一步发展(王远超,2006;李江南等,2008;于玉斌,2012)。于玉斌等(2015)指出,“桑美”(0608)近海突然增强过程与干冷空气活动密切相关,干冷空气入侵暖湿 TC 环流系统时形成的“上干下湿”的层结分布以及干冷空气穿越等熵面的下沉运动,均有利于近海 TC 的发展加强。梁建茵等(2003)针对“黄蜂”(0214)分析时也得到相同的结论。当暖的外流和冷槽靠近,温度梯度的增大使高空急流增强,如果 TC

中心恰好位于该急流入口区的右侧,在高空外流增强的同时,与该急流有关的次级环流还将有利于上升运动的发展,从而有利于 TC 增强(Hanley et al, 2001)。

中尺度系统与 TC 的相互作用也是 TC 近海加强的主要原因。首先,高空冷涡与 TC 环流的上下叠置会减弱 TC 环境风垂直切变,增强 TC 高空出流辐散强度,造成 TC 外围强对流不稳定层结,进而加强 TC 对流活动,利于 TC 发生近海加强(余晖等,2002;林毅等,2011)。李江南等(2008)利用数值模拟方法分析“黄蜂”(0214)近海加强机制时发现,中纬度中上层冷低压系统与 TC 之间的相互作用是 TC 近海加强的主要因素,一方面,冷低压外围冷空气侵入 TC 中层,配合低层的暖湿空气,增加了位势不稳定能量;另一方面,冷低压中心的下沉气流对应于次级环流的下沉支,冷低压南移填塞,使得 TC 在近海得以加强。其次,沿海地区发展起来的正涡度云团或中尺度小涡卷入近海的 TC 也会使其强度增强。这种合并过程不仅为 TC 输入了正涡量,还为其近海加强提供了水汽和潜热(陈联寿等,2004)。Chen and Luo(2004)进一步通过数值试验发现了这种正涡度云团或中尺度小涡卷入后 TC 增强的程度与 TC 自身的强度或者涡量有关,高涡量带 TC 与云团或中尺度小涡合并后的加强较低涡量带 TC 更为显著。陈光华和裘国庆(2005)通过数值模拟发现在近海加强阶段“黄蜂”(0214)的内核区内,中小尺度涡旋系统呈现轴对称化的趋势并通过非线性作用将能量传入内区。此外,双 TC 相互作用也会通过能量转化等方式影响 TC 的强度演变(徐洪雄等,2013;董林等,2020),其具体影响效果与 TC 所处的发展阶段及其自身的强度有关(张晓慧等,2019)。

1.1.2 海洋热力强迫

TC 通常被视为一个理想的卡诺热机,它从边界层与海表面间的热量差异中获得能量并在对流层顶流出层失去能量(Emanuel,1986)。一方面,SST 的高低影响海洋输入 TC 的潜热、感热和水汽通量(郑峰等,2017)。SST 越高,越有利于低层高温高湿大气环境的形成,促使局地对流活跃,有利于 TC 的生成和发展(薛根元等,2007)。Mei et al (2015)在确定控制 TC 生命期峰值强度的主要气候因子时发现,低纬西北太平洋的异常强烈的增暖有利于 TC 增强速率的增加,并会导致极高的平均 TC 强度。通过对“百合”(0116)(林毅等,2005)、“莫兰蒂”

(1010)(高拴柱等,2012)、“韦森特”(1208)(李霞等,2014)、“威马逊”(1409)(郑艳等,2014;高安宁等,2016)、“彩虹”(1522)(刘赛赛等,2017)、“天鸽”(1713)(覃丽等,2019)及“黑格比”(2004)(胡潇杰等,2021;龚俊强,2022)等近海加强 TC 个例的分析,再次证实异常偏暖的 SST 为 TC 近海显著加强提供了有利的湿热条件。Chan et al(2001)、Kaplan and DeMaria(2003)研究认为 27°C 是 TC 强度得以加强的阈值。赵大军等(2011)通过数值模拟同样证实了 TC 增强的临界 SST 约为 27°C ,当 SST 在 $27\sim 30^{\circ}\text{C}$ 时,TC 增强最快,当 SST 超过 30°C 时其增强率减慢。但陆波和钱维宏(2012)、朱晓金和陈联寿(2012)认为 TC 的加强过程发生在 $\text{SST}\geq 28^{\circ}\text{C}$ 的海域。此外,在给定环境中 TC 能达到的最大强度由 SST 决定(DeMaria and Kaplan,1994;Thanh et al,2020)(图 2),且相较于与大气处于平衡状态的大尺度 SST 场而言,TC 强度对其眼区的 SST 具有更高的敏感度(Schade,2000)。随后 Emanuel(1986)提出了 TC 最大潜在强度(maximum potential intensity, MPI)的概念,并从纯热力学角度和考虑海洋耦合效应出发对 MPI 公式进行了更多扩展(Holland,1997;Lin et al,2013;Gao et al,2016)。Whitney and Hobgood(1997)和 Kotal et al(2009)分别研究了北太平洋东部和印度洋 TC 最大强度和 SST 的关系,得到 SST 与 TC 最大强度成线性正比。而 Thanh et al(2020)在使用 1982—2016 年的 SST 数据集和 TC 强度记录探讨南海地区 TC 最大强度与 SST 之间的经验关系时发现,由于南海海域 SST 变化区间较小导致 TC 强度增长速度慢于前期研究中发现的线性或指数函数形式。

另一方面,通过对大西洋 TC 统计分析,DeMaria and Kaplan(1994)发现仅有 20% 的 TC 能够达到 MPI 值的 80% 以上,而大多数 TC 只能达到 55%。TC 通过海气界面向下传输的动量会改变近海浅水上层热力结构(Liu et al,2011),引起 SST 下降,进而对其强度产生负反馈过程(Mahapatra et al,2007;Seroka et al,2017)。TC 发生频次偏多的年份,TC 对海水的抽吸冷却加强,近海增强的 TC 数量会相应地减少(谭雅丽等,2021)。但是,蕴藏着丰富的 OHC 的海洋暖涡可以降低 TC 抽吸带来的降温效应,削弱海气之间的负反馈机制,使得 TC 强度得以加强(Shay et al,2000;Lin et al,2008;Goni et al,2009)。当 TC 经过西太平洋(Wang and

Zhou, 2008; 郑艳等, 2014)、西北太平洋南部(Wada and Usui, 2007)、西南太平洋(Chandra and Kumar, 2021)及北大西洋(Shay et al, 2000)暖涡时, 它们强度往往会加强(Jaimes et al, 2016; Ma et al, 2017)。基于该思想, Emanuel(1995)在 TC 模式中尝试加入海洋中尺度暖涡信息, 大幅改善了 TC 强度模拟效果。因此, OHC 是近海 TC 发展的另一关键因素(Lin et al, 2008), 其与 TC 近海加强的关系甚至比 SST 更紧密(Wada and Usui, 2007; 陈联寿等, 2012)。通过比较三个路径相似的 TC 个例, 冯萧(2018)发现 OHC 越高, TC 近海增强越显著。

近年来, 许多研究以全新的角度分析了海洋对 TC 强度变化的影响。例如, 海洋垂直结构对 TC 近海强度变化的影响不容忽视(Chan et al, 2001)。近海岸羽状淡水会增强海洋的层结稳定度, 利于 TC 加强(Newinger and Toumi, 2015; Yan et al, 2017)。Lin et al(2003)得出了同样的结论, 他还认为海洋飞沫对 TC 强度也存在重要的影响。海洋飞沫能够改变边界层内温度和湿度场的热焓量从而影响 TC 强度。海洋飞沫作用可以促使海气界面的潜热交换增加 50%, 10 m 最大风速值增加 30%, 从而进一步增强 TC 强度(刘磊等, 2010; 张连新等, 2014)。

1.2 多因子协同影响

近海 TC 强度的变化往往是动力场、热力场和

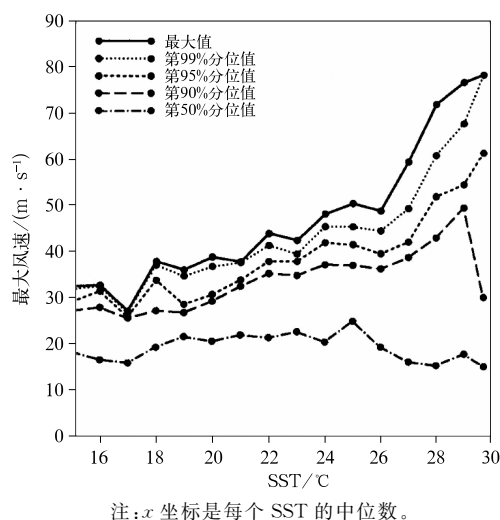


图2 1°C 海温组的最大风暴强度和第 99%、95%、90% 和 50% 分位值强度随 SST 的变化(引自 DeMaria and Kaplan, 1994)

Fig. 2 The maximum storm strength and the 99th, 95th, 90th and 50th percentiles in each 1°C SST group varying with SST (DeMaria and Kaplan, 1994)

湿度场协同影响的结果(韩慎友等, 2020; 胡娅敏等, 2017)。由于 TC 生成的时间、位置、环境和自身结构的差异, 其相对贡献具有差异性。研究表明, TC 随中心附近垂直风切变平均值的减小、相对涡度垂直切变的增大而增强, 并且若低层伴随着大量水汽净流入, 更易使 TC 发生近海加强过程(方宇凌等, 2018)。林良勋等(2006)对 1949—2004 年在华南近海急剧加强的 TC 进行综合分析发现, TC 近海急剧加强主要发生在东高西低、北高南低和弱背景环流中。该背景条件下, 西南季风、越赤道气流、东风波、弱冷空气和西南槽是诱发 TC 强度急剧增强的主要系统。黄荣成和雷小途(2010)对比了近海突然加强和减弱 TC 的环境场发现, 南亚高压的强度、水汽输送和上升运动连续性的共同作用使 TC 强度发生变化。钱燕珍等(2014)利用数值模式方法模拟强台风海葵(1211)近海急剧加强的过程, 发现低层水汽输入以及高(辐散)低(辐合)空流场配置有利于该过程的发展。汪彪等(2018)发现“天鸽”(1713)和“帕卡”(1714)在发展过程中, 满足充沛水汽通道和弱垂直风切变等条件, 呈现出近海加强的特点。李霞等(2014)同样指出, 高空强辐散、弱垂直风切变、中低层强的西南气流输送是“韦森特”(1208)近海显著加强的重要原因。除了弱垂直风切变条件外, 由南亚高压、西太平洋副高、低空急流和西风槽等系统的相互作用导致的低层辐合与高层辐散以及异常偏暖的近海 SST 是 TC 近海加强的重要原因(韩慎友等, 2020; 薛根元等, 2007)。刘蕾等(2015)对“威马逊”(1409)近海急剧加强的诊断分析中也有类似结果。胡潇杰等(2021)及龚俊强(2022)在研究“黑格比”(2004)近海加强的成因中同样发现近海加强与较高的 SST、有利的高低空流场配置、低层的正涡度平流输入以及西南、东南方向的水汽输入等条件密切相关。在副高、低空急流、西风槽和南亚高压等系统的影响下, “威马逊”(1409)近海发展中低层辐合与高层辐散、弱的环境风垂直切变和适宜的海面温度、深厚的暖涡为其强度增强提供了有利的动力与热力条件(郑艳等, 2014)。除此之外, 高安宁等(2016)还发现“威马逊”(1409)与季风急流的相互作用促使 TC 中心附近潜热持续增大, 暖心结构更趋于完整, 进一步促进其近海加强。曾小团等(2018)在对“芭玛”(0917)模拟研究中发现 TC 近海突然加强过程中其内核中心温度距平增大且不断对称化, 再加上从外围被卷入到 TC 低层的弱冷空气对暖湿气流的

抬升作用,造成水汽凝结释放潜热并且在该过程中同时存在环流重组(内圈趋近对称化将外围云团释放的能量和正涡度卷入 TC 内部),综合作用的结果使得 TC 近海发生强度突然增强过程。刘赛赛等(2017)研究发现,同时存在南亚高压转型、西太平洋副高加强西伸、低层冷空气入侵和环境风切变减弱这样的环流和动力条件,以及高 SST 和海洋暖涡,同时伴有环流变化引起的潜热加热增大从而导致双中心位涡柱的形成和暖心的增加这样的内部结构变化,造成“彩虹”(1522)近海急剧加强。

2 动力机制

以往研究 TC 发生近海加强的影响机制大多从大尺度环境场方面入手,而 TC 自身结构及其变化对强度的影响因观测资料的不足而进展缓慢。为弥补这部分研究的空白,陈乾金(1996)收集了 1949—1990 年近海飞机探测资料,分析得出近海 TC 强度突变与其自身结构及结构变化关系密切,近海增强过程往往伴随 TC 眼直径及最大风速圈的收缩。随着数值模式和计算机水平的发展,在 TC 发生近海强度突变过程中,其内部的变化特征能够再现,为分析影响强度变化的动力机制提供了有利的条件。观测和模拟研究表明 TC 的加强过程与内核区的降水和深对流活动有关(Rogers, 2010; Jiang, 2012; Munsell et al, 2021)。Rogers(2010)进一步指出内核区的对流性降水面积的增加会促发 TC 的加强,而非层云降水面积的影响。

2.1 垂直风切变影响 TC 近海加强的机制

环境风垂直切变的强度,即 200 hPa 和 850 hPa 水平风速差值的区域平均,在动力学上代表高低层通风效应的强弱(王新等,2018),是影响 TC 发展的主要因子(Gray, 1968; Zhang and Tao, 2013)。McBride and Zehr(1981)、Zehr(2003)研究表明,强的环境风垂直切变会抑制 TC 的形成和加强;弱的环境风垂直切变是 TC 发生发展的关键条件之一(陈联寿和丁一汇,1979;李霞等,2014)。在垂直切变较弱的情况下,对流层上下层空气相对运动很小,可使积云单体群释放的凝结潜热集中在一个相当小的区域内,加热同一气柱使中上层增温,从而有利于暖心结构建立,中心气压下降和低层气旋性环流加强(陈联

寿和丁一汇,1979;翁之梅等,2020)。例如,弱的环境垂直风切变使“彩虹”(1522)的暖心结构在其近海急剧增强的过程中迅速加强,维持了完整的自身结构(刘凯等,2017)。另外,王新等(2018)利用 FY-2 卫星数据对近海突然增强的“天鸽”(1713)和“韦森特”(1208)的内部动力演变机制解析时同样指出,减弱的风垂直切变将深对流增强阶段所释放的能量更多地保留在 TC 中高层,促发了 TC 的近海增强过程。此外,弱的水平风垂直切变还有利于垂直耦合(Tuleya and Kurihara, 1981)。然而有研究表明,相较于零垂直风切变(McBride and Zehr, 1981),低层适中的风切变会使 TC 环流中出现较强的上升气流,导致对流结构更对称(Rogers et al, 2016; Leighton et al, 2018),有利于 TC 的形成和发展(Tuleya and Kurihara, 1981; Corbosiero and Molinari, 2002)。还有学者认为虽然垂直切变会使 TC 增强的速率减弱,但是并不影响 TC 达到其最大可能强度(Holland and Wang, 1999)。发展完好、体积较大、强度较强的 TC 能抵抗相对较大的风速垂直切变(DeMaria, 1996; Wong and Chan, 2004)。针对“彩虹”(1522)(刘凯等,2017)、“韦森特”(1208)(李霞等,2014)、“威马逊”(1409)(郑艳等,2014)等近海加强 TC 个例,分析发现利于增强的垂直切变范围各不相同。更合理的解释是,风速垂直切变应该存在一个阈值,低于该阈值会相应地促进 TC 的形成和发展;反之亦然(Zhao et al, 2006; 徐明等, 2009; 于玉斌等, 2008)。不同的海域,触发 TC 强度变化的风切变阈值不同(王喜和余锦华, 2011; Zehr, 2003)且风切变对 TC 增强的作用存在滞后。以西北太平洋为例,当风垂直切变在 $-2.5 \sim 2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 更利于 TC 增强,且与 24 h 后 TC 强度的相关性更高(Wang et al, 2015);当大于 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时则会产生抑制,这种抑制作用存在 6~60 h 的滞后(白莉娜和王元, 2013)。大多数研究分析环境风垂直切变影响时仅针对单个或少数 TC 个例。考虑当前业务预报中还没有环境垂直风切变对 TC 近海增强的定量化判据,吕心艳(2015)统计分析了 2001—2012 年 135°E 以西全部发生近海突然增强过程的 TC 后发现,利于 TC 增强的环境风垂直切变一般在 $-8 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。此外,吕心艳(2015)还进一步发现中上层环境风垂直切变对近海增强过程影响更显著以及

偏东风环境风切变更有利于 TC 的增强。

当前研究认为垂直风切变对 TC 强度影响的物理机制主要有:(1)基于非绝热产生的“次级环流效应”:Tuleya and Kurihara(1981)认为流入与流出层的非对称机制改变了对流层加热的垂直结构分布从而导致 TC 强度变弱;(2)“斜压与稳定性”机制:De-Maria(1996)认为中层的加热以及气旋内部位涡倾斜增强的稳定度抑制了中高层的对流活动,而垂直风切变会直接导致位涡倾斜迫使中层为维持静力平衡而促使中高层温度升高,这个结果进一步使得垂直结构更加稳定,TC 强度减弱;(3)Rossby 波理论:Montgomery and Kallenbach(1997)研究证实,加强湿对流活动会使 Rossby 波向外传播从而使得 TC 强度增强。基于以上原理,余锦华(2003)也应用涡旋 Rossby 波理论研究垂直风切变环境中的干涡旋垂直结构倾斜过程,发现涡旋 Rossby 波阻尼机制也会对 TC 强度变化产生一定的影响;(4)“通风效应”:端义宏等(2005)认为垂直风切变会产生“通风效应”使得上层的潜热释放导致 TC 能量减少从而减弱其强度。

2.2 水相变化影响 TC 近海加强的机制

大量研究集中于云微物理过程对 TC 强度变化的影响上(Tao et al, 2011; Miller et al, 2015; Li et al, 2015; Paull et al, 2018),凝结潜热释放及其与随后发生的降水之间密不可分的联系常常被作为诊断 TC 强度及其演变的物理基础(储海等, 2017; Nolan et al, 2019)。非常规观测系统和高分辨率数值模式,尤其是云解析模式的发展,为细致了解 TC 中水相变化对 TC 降水分布、结构和强度变化的影响提供了条件(庞琦烨等, 2019)。螺旋雨带通常是在广阔的层积云背景下,由有组织的对流单体构成(Ryan et al, 1992)。其水物质以多种相态同时存在且各相态之间通过凝结、蒸发、冻结、融化等过程不断转化。转化过程中释放的凝结潜热一定程度上可引起 TC 内部的热力-动力场调整,继而引发强度的变化(张铭等, 2010; Didlake et al, 2018; Wang and Xu, 2010; Xu and Wang, 2010a; 2010b),是除海温以外 TC 中最主要的非绝热能量来源(陈联寿等, 2004; Rosenfeld et al, 2012)。Ooyama (1969) 和 Emanuel(1986)还提出组织化的深厚积云对流释放

的凝结潜热对 TC 强度的影响较单独的积云影响更为显著。近些年影响近海 TC 强度变化的具体机制,尤其是前期的水成物属性演变特征及其相关的云微物理过程受到了极大的关注(Chen et al, 2018; Alvey et al, 2020)。与水相转换相关的两个主要非绝热冷却源是雨水蒸发以及云冰、雪、霰、雹等的融化(Li et al, 2015)。由于难以直接准确测量 TC 中的蒸发以及与之相关的非绝热冷却,数值模拟方法得到了充分地应用。Willoughby et al(1984) 和 Lord et al(1984)的研究均表明是降水蒸发冷却驱动的下陷气流有利于眼墙外对流环的产生,从而减缓了 TC 的加强。根据云分辨的轴对称模式的结果,Frissius and Hasselbeck(2009)同样证实蒸发冷却会减缓 TC 的发展并降低最终强度。Wang (2002)认为虽然不同的云微物理方案模拟的 TC 的最终强度差异不大,但是当关闭暖云微物理方案中的雨水蒸发效应以及含有霰粒子的冰相云微物理方案中的霰融化效应这两个热量消耗过程时,会使模拟的 TC 强度过强,究其原因是外围雨带无法生成。Zhu and Zhang(2006)和 Tao et al(2011)也得到相似结论。Sawada and Iwasaki(2010a; 2010b)利用理想 TC 的云分辨模拟来研究蒸发冷却对 TC 发展的影响时,发现蒸发冷却形成的对流下沉气流可以降低眼墙附近的对流有效位能,进而抑制 TC 的加强。

此外,还有研究从 TC 局部出发,发现凝结潜热加热 TC 的位置不同会对其强度产生不同的影响。外螺旋雨带中与对流活动相关的强下沉运动可能通过热力学过程导致气旋性位涡异常的传输,从而使 TC 强度减弱(Powell, 1990a; 1990b; May and Holland, 1999)。从静力调整角度考虑,外围雨带潜热释放加热 TC 外围气柱导致内核至外围环流的水平气压梯度降低从而减弱 TC 的强度(Wang, 2009);而 TC 快速涡丝化区域发生的非绝热冷却可以抑制 TC 强度增强(Li et al, 2014);在眼墙外侧的部分冰相粒子及下层雨滴融化和蒸发会产生冷却效应进而产生下沉运动,增强低层的径向入流辐合,从而加速 TC 环流,使 TC 强度增强(Paull et al, 2018)。

针对 TC 强度变化的特殊形式,即快速加强过程,近年来一些研究致力于寻找其与云微物理过程之间的关系。云微粒子相态变化释放的潜热会加强

中、高层上升运动以及出流场,导致低层补偿入流在眼区聚集并进一步下沉,进而有利于高层暖心结构的增强以及海平面气压的降低,从而引起 TC 的快速加强。Miller et al(2015)以“威尔玛”(2005)为研究对象,关闭其高层由凝华引起的潜热释放效应,发现其增强率及最终强度均变弱。另有研究则以该过程对降水的对称性影响入手,指出 TC 下风切一侧的云微粒子向上平流至上风切一侧后会通过蒸发和升华方式加湿上风切一侧的中高层大气,从而减弱非对称性降水,产生快速加强过程(Alvey et al, 2020)。现有研究表明,通过改变云微物理方案本身或者调整由云微物理方案计算所得的加热或者冷却率可以改变 TC 强度(Wang, 2009),与暖云微物理方案相比,选择冰相云微物理方案更容易复现 TC 的快速加强过程(Lord et al, 1984; Wang, 2002b)。如果不考虑雨水的蒸发、雪和霰的融化,TC 将会更快加强,而且强度的增加更显著(Zhu and Zhang, 2006; Pattnaik and Krishnamurti, 2007; Sawada and Iwasaki, 2007)。但是,Yamasaki(1983)的理论研究结果与上述结论恰好相反。

3 TC 近海加强过程的前兆性

当前,大量研究表明 TC 近海加强具有一定的前兆性。首先,TC 内部结构变化,如暖心、中心位涡、眼区和螺旋雨带结构等,往往预示 TC 近海强度变化。阎俊岳等(1997)统计分析了 1991—1994 年发生近海加强过程的 TC 卫星云图,发现眼壁区深对流的加强及对流层上层眼区急剧增暖是 TC 近海迅速加强的前兆。Zhang and Chen(2012)的高分辨率数值模拟研究同样表明,内核对流爆发会造成平流层空气下沉,使得高空暖心迅速发展,从而引起“威尔玛”(2005)近海突然加强。官晓军(2011)在对“达维”(0518)模拟研究过程中发现,在 TC 近海快速加强的过程中还伴随着眼区缩小、眼墙结构趋于轴对称、内部螺旋雨带强于外部的结构变化。此外,环流变化引起的潜热变化也会导致 TC 中心位涡和暖心的结构变化,进而造成 TC 的强度变化(刘赛赛等, 2017; 王立诚等, 2020)。在“莫兰蒂”(1614)近海急剧加强的前 12 h, TC 结构具有对流层高层辐散增强、内部正相对涡度增加以及暖心进一步维持和

发展的前兆特征(王立诚等, 2020)。除此之外,在对个例“桑美”(2006)和“威马逊”(1409)近海急剧加强的特征及机理分析时发现,850 hPa 角动量和动能区域平均值以及对流层低层(1000 hPa 和 850 hPa)台风中心高度(于玉斌等, 2008)、对流层中低层涡度(刘蕾等, 2015)及其平均总温度散度净辐合值(袁小超和谭季青, 2011)对 TC 近海加强预测同样具有指示意义。

其次,多位学者发现风垂直切变是 TC 近海加强的重要前兆因子。较低的环境风垂直切变使得积云对流所产生的凝结潜热集中在一个有限范围内的气柱内,有利于 TC 暖心结构及高空辐散形式的维持和发展(颜玲等, 2017)。风垂直切变与滞后 6~18 h 的 TC 强度有一定的相关性,尤其是 6 h(徐明等, 2009)。“桑美”(0608)强度急剧增强对风垂直切变变化的响应时间大约为 18 h,即在其强度增强前 18 h,风垂直切变在逐渐增大过程中突然减弱(于玉斌等, 2008)。刘蕾等(2015)在对超强台风威马逊(1409)近海急剧加强特征诊断分析的过程中发现,近海加强对环境风垂直切变的响应时间为 12 h,即环境风垂直切变开始减弱后约 12 h,近海 TC 开始加强。

此外,TC 发展还与 20~25 d 的大气低频振荡有密切关系(Hartmann et al, 1992),在西北太平洋地区,大气准双周振荡主要通过低频气旋和反气旋的分布变化特征影响南海季风槽、副高的强度和位置,继而影响 TC 的生成位置、路径与强度(赵小平等, 2014)。魏晓雯等(2017)探讨了 TC 强度变化与低频水汽输送的关系指出“威马逊”近海加强还与 10~30 d 的低频水汽输送有关。

4 总结与展望

由于影响 TC 强度变化的内部和外部物理过程尚不清楚和完善,TC 近海加强问题一直是业务预报的重点和难点。本文主要围绕 TC 近海加强影响因素,从环境条件和动力机制两方面着手对相关研究进行回顾,结果显示影响 TC 近海加强的因素具有多时间和空间尺度特征,涵盖了大尺度环境背景场和内部精细化结构动力机制等,如大气环境因子、海洋强迫机制、内核结构变化以及螺旋云带水相变化等。前人工作的主要发现如下:

(1)副高进退与 TC 近海强度变化关系密切,其西伸北抬能够为近海加强过程提供有利的中低层辐合形势,加剧近海 TC 非对称结构的发展,加大与近海 TC 之间的气压梯度,加强水汽的输送。并且,近海加强的 TC 常位于低空辐合和高空辐散较强的副高南侧或西南侧;高空槽与 TC 的相互作用非常复杂,其对近海 TC 强度的具体影响取决于自身尺度、与 TC 相对位置及 TC 本身强度等;强的高空外流和低空入流通过加强 TC 环流的垂直上升运动来为 TC 近海加强提供动力条件;侵入 TC 外围的弱冷空气可引起气压和温度梯度及环境流场的变化,有利于促发近海加强过程;中尺度系统(冷低压、正涡度云团或中尺度小涡、TC 等)与 TC 的相互作用会改变 TC 的流场和能量场进而影响其近海强度变化。

(2)SST 高低影响到海洋输入 TC 的潜热、感热和水汽通量,异常偏暖的 SST 为 TC 近海显著加强提供了有利的湿热条件。TC 能达到的最大强度由 SST 决定且相较于大尺度 SST 场而言,TC 强度对其眼区的 SST 具有更高的敏感度;蕴藏着丰富 OHC 的海洋暖涡使 TC 所在海面海水上的翻的降温作用不大,削弱了海气间的负反馈机制,使得 TC 强度得以加强;近海岸羽状淡水强的层结稳定度利于 TC 加强;海洋飞沫能够改变边界层内温度和湿度场的热焓量从而影响 TC 强度。

(3)弱的垂直风切变有利于暖心结构建立,中心气压下降、低层气旋性环流和垂直耦合加强,是 TC 近海发生发展的关键条件之一;水相变化释放的凝结潜热一定程度上可引起 TC 内部的热力-动力场

调整,继而引发其强度的变化且组织化的深厚积云较单独的积云影响更为显著。

(4)当前研究对有利于 TC 加强的垂直风切变以及海温的阈值并非完全统一。TC 近海增强是多种动力学、热力学过程以及外强迫相互作用的结果,前人研究是对历史个例统计的结果,得出的结论和 TC 自身结构以及发生季节等均有关系。

这些因素协同影响 TC 的近海加强过程,其相对重要性尚不确定。此外,背景场和内部结构中的某些影响因子对 TC 近海加强具有一定的前兆性。例如,内部结构、20~25 d 以及准双周大气低频振荡、风垂直切变、10~30 d 低频水汽输送、850 hPa 角动量、动能区域平均值、对流层中低层涡度及其平均总温度散度净辐合值对 TC 近海加强预测均具有指示意义。对 TC 近海加强进行预测时,可选用以上因子。本文总结了当前研究成果的共同点和争议点(表 1),综合影响因子可以建立一个 TC 近海加强的影响因子模型(图 3),以便为预报 TC 近海加强过程提供理论参考。

但是,生成的时间、位置、环境及自身结构等方面的差异使 TC 呈现出特异性。因此,在以上因子协同影响 TC 近海加强的过程时,其相对重要性随 TC 个例不同而不同,具有个例依赖性。在未来的研究中,有必要对更多近海加强的 TC 个例进行分析,以便更为全面细致地了解影响 TC 近海强度变化的内部和外部物理过程,以期 TC 近海加强预测提供理论依据。

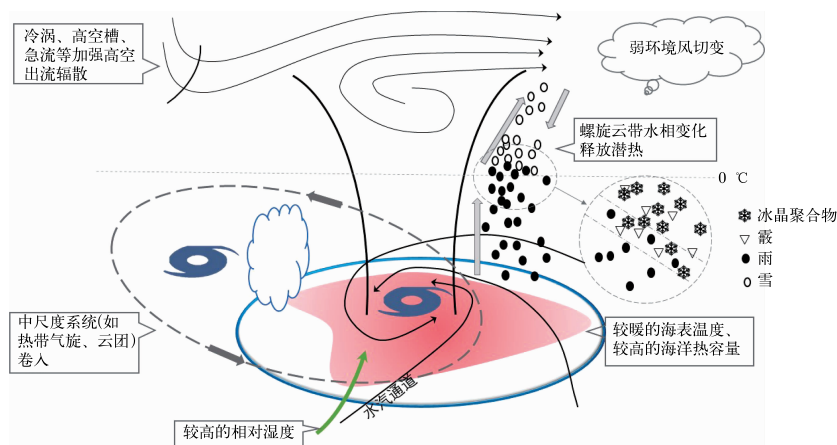


图 3 TC 近海加强影响因子模型

Fig. 3 The schematic model of impact factors affecting the intensified coastal TCs

表 1 TC 近海加强影响因子研究中的分歧

Table 1 Disagreement on factors affecting the intensified coastal TCs

分歧对象	分歧点	观点	学者
环境风 垂直切变	零垂直切变对 TC 强度影响	环境风垂直切变会抑制 TC 形成和加强	McBride and Zehr(1981)、Zehr(2003)
		低层适中的风切变比无风切变的环境更有利于 TC 形成和发展	Tuleya and Kurihara(1981)、Corbosiero and Molinari(2002)
		垂直风切变会使 TC 增强的速率减慢但不影响 TC 达到最大可能强度	Holland and Wang(1999)
	相应促进 TC 形成和加强的具体 风垂直切变阈值	$7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	Zhao et al(2006)
		$4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	于玉斌等(2008)
		$9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	徐明等(2009)
		$10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (西北太平洋), $9\sim 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (北大西洋), $12\sim 13\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (北印度洋)	王喜和余锦华(2011)、Zehr(2003)
		$8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	白莉娜和王元(2013)
海面温度	相应促进 TC 形成和加强的具 体海表温度阈值	26℃	Rotunno and Emanuel(1987)
		27℃	Chan et al (2001)、Kaplan and DeMaria (2003)、赵大军等(2011)
		28℃	朱晓金和陈联寿(2012)

参考文献

白莉娜,王元,2013. 环境风速垂直切变对西北太平洋热带气旋强度变化的影响[J]. 热带气象学报, 29(6):955-962. Bai L N, Wang Y, 2013. Effect of vertical wind shear on tropical cyclone intensity change[J]. J Trop Meteor, 29(6):955-962(in Chinese).

陈光华,裴国庆,2005. 对南海热带气旋近海加强机理个例模拟研究[J]. 气象学报, 63(3):359-364. Chen G H, Qiu G Q, 2005. A case simulation study on offshore intensification mechanism of tropical cyclone in South China Sea[J]. Acta Meteor Sin, 63(3):359-364(in Chinese).

陈联寿,丁一汇,1979. 西太平洋台风概论[M]. 北京:科学出版社. Chen L S, Ding Y H, 1979. Introduction to the Western Pacific Typhoon[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).

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 Forecast and Its Disasters[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).

陈联寿,罗哲贤,李英,2004. 登陆热带气旋研究的进展[J]. 气象学报, 62(5):541-549. Chen L S, Luo Z X, Li Y, 2004. Research advances on tropical cyclone landfall process[J]. Acta Meteor Sin, 62(5):541-549(in Chinese).

陈乾金,1996. 我国近海台风突然加强和眼结构变化及其与环流背景关系的统计研究[J]. 海洋学报, 18(3):121-127. Chen Q J, 1996. Statistical study on sudden intensification of offshore typhoons in my country, changes in eye structure and their relationship with circulation background[J]. Acta Oceanol Sin, 18(3):121-127(in Chinese).

陈燕,吴俞,王天巍,2020. 1409 号超强台风“威马逊”近海加强成因分析[J]. 热带农业科学, 40(1):120-126. Chen Y, Wu Y, Wang T W, 2020. Analysis of the intensification causes of Super Typhoon “Rammasun”(1409) in the coastal waters[J]. Chin J Trop Agric, 40(1):120-126(in Chinese).

储海,杨引明,刘梦娟,2017. 一次双台风影响下暴雨过程的中尺度涡旋模拟分析[J]. 气象, 43(11):1309-1325. Chu H, Yang Y M, Liu M J, 2017. Simulation of mesoscale vortex during a heavy rainfall process affected by typhoons[J]. Meteor Mon, 43(11):1309-1325(in Chinese).

董林,高拴柱,许映龙,等,2019. 2017 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象, 45(9):1322-1334. Dong L, Gao S Z, Xu Y L, et al, 2019. Analysis of characteristics and forecast difficulties of TCs on Western North Pacific in 2017[J]. Meteor Mon, 45(9):1322-1334(in Chinese).

董林,许映龙,吕心艳,等,2020. 台风纳沙和海棠的预报着眼点分析[J]. 气象, 46(1):29-36. Dong L, Xu Y L, Lyu X Y, et al, 2020. Analysis of forecast focuses of binary typhoons Nesat and Haitang[J]. Meteor Mon, 46(1):29-36(in Chinese).

端义宏,2015. 登陆台风精细结构的观测、预报与影响评估[J]. 地球科学进展, 30(8):847-854. Duan Y H, 2015. Monitoring and forecasting of finescale structure and impact assessment of land-falling typhoons[J]. Adv Earth Sci, 30(8):847-854(in Chinese).

端义宏,余晖,伍荣生,2005. 热带气旋强度变化研究进展[J]. 气象学报, 63(5):636-645. Duan Y H, Yu H, Wu R S, 2005. Review of the research in the intensity change of tropical cyclone[J]. Acta Meteor Sin, 63(5):636-645(in Chinese).

方宇凌,吴健君,洪晓媛,等,2018. 1604 号台风“妮妲”近海加强垂直结构的诊断分析[J]. 广东气象, 40(1):14-18. Fang Y L, Wu J J, Hong X Y, et al, 2018. Diagnostic analysis of vertical structure of Typhoon Nida (1604) intensifying in offshore waters[J]. Guangdong Meteor, 40(1):14-18(in Chinese).

冯萧,2018. 比较分析台风“杜苏芮”(2017)近海加强的主要原因[C]//2018 年全国重大天气过程总结和预报技术经验交流会. 南昌:中国气象学会. Feng X, 2018. Comparative analysis of the main reasons for the intensification of Typhoon “Du Surui”(2017) offshore[C]//2018 National Major Weather Process Summary and Forecast Technology Experience Exchange

- Meeting. Nanchang: Chinese Meteorological Society (in Chinese).
- 高安宁,李菁,陈见,等,2016.台风“威马逊”近海加强及引发广西异常暴雨分析[J].气象科技,44(4):653-658,668. Gao A N, Li J, Chen J, et al, 2016. “Rammasun” intensification in near sea and induced abnormal rainstorm in Guangxi[J]. Meteor Sci Technol, 44(4): 653-658, 668(in Chinese).
- 高拴柱,董林,许映龙,等,2018.2016年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J].气象,44(2):284-293. Gao S Z, Dong L, Xu Y L, et al, 2018. Analysis of the characteristics and forecast difficulties of typhoons in Western North Pacific in 2016[J]. Meteor Mon, 44(2): 284-293(in Chinese).
- 高拴柱,吕心艳,王海平,等,2012.热带气旋莫兰蒂(1010)强度的观测研究和增强条件的诊断分析[J].气象,38(7):834-840. Gao S Z, Lü X Y, Wang H P, et al, 2012. An observational and diagnostic analysis on the intensity and intensity changes of Typhoon Meranti(1010)[J]. Meteor Mon, 38(7): 834-840(in Chinese).
- 龚俊强,2022.台风“黑格比”(2004)近海急剧增强特征及成因分析[J].浙江气象,43(1):17-23. Gong J Q, 2022. The characteristics and causes of Typhoon “Hagupit” (2004) intensified offshore sharply[J]. J Zhejiang Meteor, 43(1): 17-23(in Chinese).
- 官晓军,2011.0518号台风“达维”近海迅速加强的数值模拟研究[D].杭州:浙江大学. Guan X J, 2011. A numerical simulation study of the rapid intensification of Typhoon “Damrey” (0518) over the offshore[D]. Hangzhou: Zhejiang University (in Chinese).
- 韩慎友,陈伟斌,陈见,2020.超强台风“天鸽”(1713)近海急剧加强特征及诊断分析[J].气象研究与应用,41(1):70-74. Han S Y, Chen W B, Chen J, 2020. Characteristics and diagnostic analysis on rapid intensification of Super Typhoon “Hato” (1713) over the offshore area[J]. J Meteor Res Appl, 41(1): 70-74(in Chinese).
- 韩瑛,伍荣生,2008.冷空气入侵对热带气旋发生发展的影响[J].地球物理学报,51(5):1321-1332. Han Y, Wu R S, 2008. The effect of cold air intrusion on the development of tropical cyclone[J]. Chin J Geophys, 51(5): 1321-1332(in Chinese).
- 何洁琳,管兆勇,万齐林,等,2009.冬季登陆我国的0428和7427号台风过程的冷空气作用和水汽特征[J].热带气象学报,25(5):541-550. He J L, Guan Z Y, Wan Q L, et al, 2009. The role of cold air and characteristics of water vapor in both 0428 and 7427 typhoons that made landfall on China in wintertime[J]. J Trop Meteor, 25(5): 541-550(in Chinese).
- 胡春梅,端义宏,余晖,等,2005.华南地区热带气旋登陆前强度突变的大尺度环境诊断分析[J].热带气象学报,21(4):377-382. Hu C M, Duan Y H, Yu H, et al, 2005. The diagnostic analysis of the rapid change in tropical cyclones intensity before landfall in South China[J]. J Trop Meteor, 21(4): 377-382(in Chinese).
- 胡潇杰,俞宏耀,於敏佳,2021.台风“黑格比”近海加强成因及对比分析[J].现代农业科技, (9): 187-190, 193. Hu X J, Yu H Y, Yu M J, 2021. The causes and comparative analysis of Typhoon Hagupit strengthening offshore[J]. Mod Agric Sci Technol, (9): 187-190, 193(in Chinese).
- 胡娅敏,王永光,王娟怀,等,2017.登陆华南台风强度的前兆信号分析及预测[J].气象,43(10):1278-1286. Hu Y M, Wang Y G, Wang J H, et al, 2017. Precursor signal analysis and prediction for the landfall typhoon intensity over South China[J]. Meteor Mon, 43(10): 1278-1286(in Chinese).
- 黄露,何金海,卢楚翰,2012.关于西太平洋副热带高压研究的回顾与展望[J].干旱气象,30(2):255-260. Huang L, He J H, Lu C H, 2012. Review and outlook of researches about Western Pacific subtropical high[J]. J Arid Meteor, 30(2): 255-260 (in Chinese).
- 黄荣成,雷小途,2010.环境场对近海热带气旋突然增强与突然减弱影响的对比分析[J].热带气象学报,26(2):129-137. Huang R C, Lei X T, 2010. Comparative analysis of the influence of environment field on rapid intensifying and weakening of tropical cyclones over offshore waters of China[J]. J Trop Meteor, 26(2): 129-137(in Chinese).
- 李江南,吴国强,王刚,等,2008.南海台风Vongfong(2002)登陆前后内核结构和近海加强原因的数值模拟研究[J].热带气象学报,24(5):441-448. Li J N, Wu G Q, Wang G, et al, 2008. Numerical study of the inner-core structures and the mechanism for inshore strengthening during the landfalling of Typhoon Vongfong (2002) in the South China Sea[J]. J Trop Meteor, 24(5): 441-448(in Chinese).
- 李霞,何如意,段朝霞,等,2014.台风“韦森特”路径突变和近海加强的成因分析[J].热带气象学报,30(3):533-541. Li X, He R Y, Duan Z X, et al, 2014. Analysis on the unusual track and intensification of Typhoon “Vicente”[J]. J Trop Meteor, 30(3): 533-541(in Chinese).
- 李英,陈联寿,雷小途,2006.高空槽对9711号台风变性加强影响的数值研究[M].气象学报,64(5):552-563. Li Y, Chen L S, Lei X T, 2006. Numerical study on impacts of upper-level westerly trough on the extratropical transition process of Typhoon Winnie (1997)[M]. Acta Meteor Sin, 64(5): 552-563(in Chinese).
- 梁建茵,陈子通,万齐林,等,2003.热带气旋“黄蜂”登陆过程诊断分析[J].热带气象学报,19(S1):45-55. Liang J Y, Chen Z T, Wan Q L, et al, 2003. Diagnostic analysis of the landfall process Tropical Cyclone Vongfong[J]. J Trop Meteor, 19(S1): 45-55 (in Chinese).
- 林良勋,梁巧倩,黄忠,2006.华南近海急剧加强热带气旋及其环流综合分析[J].气象,32(2):14-18. Lin L X, Liang Q Q, Huang Z, 2006. Analysis of circulation pattern of rapidly intensified offshore tropical cyclones of South China[J]. Meteor Mon, 32(2): 14-18(in Chinese).
- 林毅,刘爱鸣,刘铭,2005.“百合”台风近海加强成因分析[J].台湾海峡,24(1):22-26. Lin Y, Liu A M, Liu M, 2005. Causes analysis of Typhoon Lily’s strengthening on near waters[J]. J Oceanogr Taiwan Strait, 24(1): 22-26(in Chinese).
- 林毅,刘铭,刘爱鸣,等,2011.“莫兰蒂”台风近海加强快速北上成因分析[C]//中国气象学会.第28届中国气象学会年会:S12热带

- 气旋. 厦门: 中国气象学会: 1-8. Lin Y, Liu M, Liu A M, et al, 2011. Analysis of the cause of the rapid northward movement of Typhoon "Moranti" offshore [C]// Chinese Meteorological Society. The 28th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society-S12 Tropical Cyclone. Xiamen: Chinese Meteorological Society: 1-8 (in Chinese).
- 刘凯, 宋晓姜, 王彰贵, 等, 2017. 1522 号强台风“彩虹”近海急剧增强特征及机理分析[J]. 海洋预报, 34(4): 32-41. Liu K, Song X J, Wang Z G, et al, 2017. The features and mechanism analysis on rapid intensity change of No. 1522 Typhoon "Mujigae" over the offshore of China [J]. Mar Forecasts, 34(4): 32-41 (in Chinese).
- 刘蕾, 陈茂钦, 李煜, 等, 2015. 超强台风“威马逊”近海急剧加强特征及诊断分析[J]. 气象科技, 43(6): 1149-1156. Liu L, Chen M Q, Li Y, et al, 2015. Features and diagnostic analysis of rapid intensity change of Super Typhoon Rammasun over China offshore waters [J]. Meteor Sci Technol, 43(6): 1149-1156 (in Chinese).
- 刘磊, 郑静, 陆志武, 等, 2010. 海洋飞沫参数化方案在台风数值模拟中的应用[J]. 热带海洋学报, 29(3): 17-27. Liu L, Zheng J, Lu Z W, et al, 2010. Sea spray parameterization used in typhoon simulations [J]. J Trop Oceanogr, 29(3): 17-27 (in Chinese).
- 刘赛赛, 张立凤, 张晓慧, 2017. 台风“彩虹”(1522)近海急剧加强的特征分析[J]. 气象科学, 37(4): 487-496. Liu S S, Zhang L F, Zhang X H, 2017. Characteristics analysis on rapid intensification of Typhoon Mujigae (1522) over the offshore area of China [J]. Sci Meteor Sin, 37(4): 487-496 (in Chinese).
- 陆波, 钱维宏, 2012. 华南近海台风突然增强的初秋季节锁相[J]. 地球物理学报, 55(5): 1523-1531. Lu B, Qian W H, 2012. Seasonal lock of rapidly intensifying typhoons over the South China offshore in early fall [J]. Chin J Geophys, 55(5): 1523-1531 (in Chinese).
- 吕心艳, 2015. 环境风垂直切变在近海台风快速增强过程中的统计特征[C]//2015 年全国重大天气过程总结和预报技术经验交流会. 北京: 中国气象局: 275-279. Lü X Y, 2015. Statistical characteristics of vertical shear of ambient wind during the rapid enhancement of offshore typhoons [C] // 2015 National Major Weather Process Summary and Forecast Technology Experience Exchange Conference. Beijing: China Meteorological Administration: 275-279 (in Chinese).
- 吕心艳, 许映龙, 董林, 等, 2021. 2018 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象, 47(3): 359-372. Lyu X Y, Xu Y L, Dong L, et al, 2021. Analysis of characteristics and forecast difficulties of TCs over Northwestern Pacific in 2018 [J]. Meteor Mon, 47(3): 359-372 (in Chinese).
- 钮学新, 杜惠良, 刘建勇, 2005. 0216 号台风降水及其影响降水机制的数值模拟试验[J]. 气象学报, 63(1): 57-68. Niu X X, Du H L, Liu J Y, 2005. The numerical simulation of rainfall and precipitation mechanism associated with Typhoons Sinlaku (0216) [J]. Acta Meteor Sin, 63(1): 57-68 (in Chinese).
- 庞琦烨, 平凡, 沈新勇, 等, 2019. 不同微物理方案对台风“彩虹”(2015)降水影响的比较研究[J]. 大气科学, 43(1): 202-220. Pang Q Y, Ping F, Shen X Y, et al, 2019. A comparative study of effects of different microphysics schemes on precipitation simulation for Typhoon Mujigae (2015) [J]. Chin J Atmos Sci, 43(1): 202-220 (in Chinese).
- 钱燕珍, 张胜军, 黄奕武, 等, 2014. 强台风“海葵”(1211)近海急剧增强的数值研究[J]. 热带气象学报, 30(6): 1069-1079. Qian Y Z, Zhang S J, Huang Y W, et al, 2014. The numerical simulation study on rapid intensification of Typhoon Haikui (1211) over the offshore area of China [J]. J Trop Meteor, 30(6): 1069-1079 (in Chinese).
- 覃丽, 吴启树, 曾小团, 等, 2019. 对流非对称台风“天鸽”(1713)近海急剧增强成因分析[J]. 暴雨灾害, 38(3): 212-220. Qin L, Wu Q S, Zeng X T, et al, 2019. Analysis on cause of rapid intensification of asymmetrical Typhoon Hato (1713) over the offshore of China [J]. Torr Rain Dis, 38(3): 212-220 (in Chinese).
- 谭雅丽, 钟瑜珊, 潘剑波, 2021. 探讨近海台风突然增强与大气热源的关系[J]. 农业技术与装备, (7): 130-131, 133. Tan Y L, Zhong Y S, Pan J B, 2021. Explore the relationship between the sudden intensification of offshore typhoons and atmospheric heat sources [J]. Agric Technol Equip, (7): 130-131, 133 (in Chinese).
- 涂石飞, 徐峰, 常舒捷, 等, 2019. 西北太平洋热带气旋活动对夏秋型 ENSO 事件的响应[J]. 气象, 45(7): 920-930. Tu S F, Xu F, Chang S J, et al, 2019. Response of tropical cyclone in the Northwest Pacific for summer and autumn ENSO events [J]. Meteor Mon, 45(7): 920-930 (in Chinese).
- 王昂生, 2007. 中国可持续发展总纲 第 18 卷 中国减灾与可持续发展 [M]. 北京: 科学出版社. Wang A S, 2007. The General Outline of China's Sustainable Development Volume 18 China's Disaster Reduction and Sustainable Development [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- 汪彪, 刘玉国, 陈琛, 等, 2018. 1714 号台风“帕卡”近海加强之特征与成因分析[J]. 气候变化研究快报, 7(5): 391-396. Wang B, Liu Y G, Chen C, et al, 2018. Characteristics of rapid offshore intensification of Typhoon Pakhar (1714) and analysis of the causation [J]. Climate Change Res Lett, 7(5): 391-396 (in Chinese).
- 王海平, 董林, 许映龙, 等, 2021. 2019 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象, 47(8): 1009-1020. Wang H P, Dong L, Xu Y L, et al, 2021. Analysis on the characteristics of typhoon activity and forecasting difficulties in Western North Pacific in 2019 [J]. Meteor Mon, 47(8): 1009-1020 (in Chinese).
- 王立诚, 张强, 顾西辉, 等, 2020. 超强台风“莫兰蒂”强度急剧变化过程的结构特征及其机制[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 56(1): 96-101. Wang L C, Zhang Q, Gu X H, et al, 2020. Characteristics and mechanism of super Typhoon "Moranti" [J]. J Beijing Normal Univ (Nat Sci), 56(1): 96-101 (in Chinese).
- 王喜, 余锦华, 2011. 不同海域影响热带气旋强度变化的环境动力因素对比[J]. 热带气象学报, 27(3): 387-395. Wang X, Yu J H, 2011. A comparative analysis of environmental dynamical control of change of tropical cyclones intensity in different oceans [J]. J Trop Meteor, 27(3): 387-395 (in Chinese).
- 王新, 郭强, 文锐, 2018. 基于 FY-2 卫星云垂直运动解析近海突然增

- 强台风内动力演变机制[J]. 红外与毫米波学报, 37(6): 790-798. Wang X, Guo Q, Wen R, 2018. Inner dynamic mechanism analysis for tropical cyclone rapid intensification based on FY-2 cloud motion[J]. J Infrared Millim Waves, 37(6): 790-798 (in Chinese).
- 王远超, 2006. 0214 号热带气旋强度突变的研究[J]. 海洋预报, 23(1): 44-47. Wang Y C, 2006. Study on the rapid change of Typhoon 0214 (Vongfong) intensity[J]. Mar Forecasts, 23(1): 44-47 (in Chinese).
- 魏晓雯, 吴坤梯, 陈明, 等, 2017. 超强台风“威马逊”近海加强与低频水汽输送的关系及前期信号[J]. 热带气象学报, 33(2): 267-272. Wei X W, Wu K D, Chen M, et al, 2017. The relationship between the offshore intensification of Super Typhoon Rammason and low-frequency vapor transportation and its precedent signal[J]. J Trop Meteor, 33(2): 267-272 (in Chinese).
- 翁之梅, 贾海荣, 高丽, 等, 2020. 台风“利奇马”登陆前后雨带强度与结构变化特征分析[J]. 气象科学, 40(3): 325-332. Weng Z M, Ben H R, Gao L, et al, 2020. Analysis on the variation characteristics of rainbelt intensity and structure of Typhoon “Lekima” before and after its landing[J]. J Meteor Sci, 40(3): 325-332 (in Chinese).
- 向纯怡, 许映龙, 高拴柱, 等, 2022. 2021 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象, 48(9): 1193-1206. Xiang C Y, Xu Y L, Gao S Z, et al, 2022. Analysis of the characteristics and forecast difficulties of typhoon over the Western North Pacific in 2021[J]. Meteor Mon, 48(9): 1193-1206 (in Chinese).
- 徐道生, 陈子通, 张艳霞, 等, 2020. 南海台风模式 TRAMS 3.0 的技术更新和评估结果[J]. 气象, 46(11): 1474-1484. Xu D S, Chen Z T, Zhang Y X, et al, 2020. Updates in TRAMS 3.0 model version and its verification on typhoon forecast[J]. Meteor Mon, 46(11): 1474-1484 (in Chinese).
- 徐洪雄, 徐祥德, 陈斌, 等, 2013. 双台风生消过程涡旋能量、水汽输送相互影响的三维物理图像[J]. 气象学报, 71(5): 825-838. Xu H X, Xu X D, Chen B, et al, 2013. The structure change and energy moisture transport physical image in the development and decay processes of binary typhoon vortices[J]. Acta Meteor Sin, 71(5): 825-838 (in Chinese).
- 徐明, 余锦华, 赖安伟, 等, 2009. 环境风垂直切变与登陆台风强度变化关系的统计分析[J]. 暴雨灾害, 28(4): 339-344. Xu M, Yu J H, Lai A W, et al, 2009. A statistical analysis on the relations between effect of wind vertical shear and landing typhoons intensity[J]. Torr Rain Dis, 28(4): 339-344 (in Chinese).
- 薛根元, 张建海, 陈红梅, 等, 2007. 超强台风 Saomai(0608)加强成因分析及海温影响的数值试验研究[J]. 第四纪研究, 27(3): 311-321. Xue G Y, Zhang J H, Chen H M, et al, 2007. Analysis on causes of strengthening of Super Strong Typhoon Saomai (0608) and numerical experiments of the impact of SST on its intensity[J]. Quat Sci, 27(3): 311-321 (in Chinese).
- 闫敬华, 徐建平, 丁伟钰, 等, 2005. 地形对登陆热带气旋“黄蜂”(2002)强度影响的模拟研究[J]. 大气科学, 29(2): 205-212. Yan J H, Xu J P, Ding W Y, et al, 2005. A modeling study of the impact of terrain on the intensity of landfalling Tropical Cyclone Vongfong (0214)[J]. Chin J Atmos Sci, 29(2): 205-212 (in Chinese).
- 阎俊岳, 1996. 近海热带气旋迅速加强的气候特征[J]. 应用气象学报, 7(1): 28-35. Yan J Y, 1996. Climatological characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones over the offshore of China [J]. Quart J Appl Meteor, 7(1): 28-35 (in Chinese).
- 阎俊岳, 张秀芝, 李江龙, 1997. 135°E 以西西北太平洋热带气旋迅速加强的气候特征[J]. 热带气象学报, 13(4): 297-305. Yan J Y, Zhang X Z, Li J L, 1997. Climate characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the Northwest Pacific Ocean west of 135°E[J]. J Trop Meteor, 13(4): 297-305 (in Chinese).
- 颜玲, 周玉淑, 刘宣飞, 2017. 1410 号台风 Matmo 登陆前后的动热力结构演变和水汽输送特征分析[J]. 大气科学, 41(2): 289-301. Yan L, Zhou Y S, Liu X F, 2017. Dynamic and thermodynamic structure analysis of Typhoon Matmo (1410) and associated moisture characteristics before and after its landfall[J]. Chin J Atmos Sci, 41(2): 289-301 (in Chinese).
- 叶宾宾, 林中鹏, 童华君, 2011. 台风“莫兰蒂”近海加强的成因分析[J]. 广东气象, 33(5): 17-20. Ye B B, Lin Z P, Tong H J, 2011. Analysis on the causes of offshore strengthening of Typhoon “Moranti”[J]. Guangdong Meteor, 33(5): 17-20 (in Chinese).
- 余晖, 端义宏, 2002. 西北太平洋热带气旋强度变化的统计特征[J]. 气象学报, 60(6): 680-687. Yu H, Duan Y H, 2002. A statistical analysis on intensity change of tropical cyclone over Northwestern Pacific[J]. Acta Meteor Sin, 60(6): 680-687 (in Chinese).
- 余晖, 费亮, 端义宏, 2002. 8807 和 0008 登陆前的大尺度环境特征与强度变化[J]. 气象学报, 60(增刊): 78-87. Yu H, Fei L, Duan Y H, 2002. Large-scale environmental characteristics and intensity changes before 8807 and 0008 landing[J]. Acta Meteor Sin, 60(S): 78-87 (in Chinese).
- 余锦华, 2003. 地形对涡旋 Rossby 波传播和台风强度变化影响的研究[D]. 南京: 南京气象学院. Yu J H, 2003. Research in effects of terrain on the propagation of vortex Rossby waves and typhoon intensity change[D]. Nanjing: Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese).
- 于润玲, 余晖, 端义宏, 2013. 登陆华南热带气旋强度变化与大尺度环流的关系[J]. 大气科学学报, 36(5): 619-625. Yu R L, Yu H, Duan Y H, 2013. Relationship between intensity change of tropical cyclone landing in South China and large-scale circulation [J]. Trans Atmos Sci, 36(5): 619-625 (in Chinese).
- 于玉斌, 2012. 冷空气影响热带气旋发生发展的研究进展[J]. 海洋学报, 34(3): 173-178. Yu Y B, 2012. Research advances of cold air impacts on the tropical cyclone genesis and development[J]. Acta Oceanol Sin, 34(3): 173-178 (in Chinese).
- 于玉斌, 陈联寿, 杨昌贤, 2008. 超强台风“桑美”(2006)近海急剧增强特征及机理分析[J]. 大气科学, 32(2): 405-416. Yu Y B, Chen L S, Yang C X, 2008. The features and mechanism analysis on rapid intensity change of Super Typhoon Saomai (2006) over the offshore of China[J]. Chin J Atmos Sci, 32(2): 405-416 (in Chinese).

- 于玉斌,姚秀萍,2006.西北太平洋热带气旋强度变化的统计特征[J].热带气象学报,22(6):521-526. Yu Y B, Yao X P, 2006. A statistical analysis on intensity change of tropical cyclone over the Western North Pacific[J]. J Trop Meteor, 22(6):521-526(in Chinese).
- 于玉斌,赵大军,陈联寿,2015.干冷空气活动对超强台风“桑美”(2006)近海突然增强影响的数值模拟研究[J].热带气象学报,31(1):21-31. Yu Y B, Zhao D J, Chen L S, 2015. Effect of dry cold air activity on the offshore rapid intensification of Super Typhoon Saomai (2006): a numerical simulation research[J]. J Trop Meteor, 31(1):21-31(in Chinese).
- 袁小超,谭季青,2011.“达维”台风强度突变的诊断分析[J].科技通报,27(4):489-494,502. Yuan X C, Tan J Q, 2011. The diagnostic analysis of intensity sudden change of Typhoon Damrey[J]. Bull Sci Technol, 27(4):489-494,502(in Chinese).
- 曾小团,黄海洪,罗建英,等,2018.台风“芭玛”(2009)近海突然加强的模拟研究[J].气象研究与应用,39(3):1-6. Zeng X T, Huang H H, Luo J Y, et al, 2018. Simulation studies on the sudden offshore strengthening of Typhoon “Parma” (2009)[J]. J Meteor Res Appl, 39(3):1-6(in Chinese).
- 占瑞芬,汤杰,余晖,2010.2009年西北太平洋热带气旋定位和业务预报精度评定[J].气象,36(10):114-121. Zhan R F, Tang J, Yu H, 2010. Precision of the tropical cyclone positioning and forecasts over the Western North Pacific in 2009[J]. Meteor Mon, 36(10):114-121(in Chinese).
- 张连新,韩桂军,李威,等,2014.台风期间海洋飞沫对海气湍通量的影响研究[J].海洋学报,36(11):46-56. Zhang L X, Han G J, Li W, et al, 2014. The effects of sea spray on the air-sea turbulent fluxes during the typhoon passage[J]. Acta Oceanol Sin, 36(11):46-56(in Chinese).
- 张铭,黄泓,张立凤,2010.大气波谱分析及其不稳定性(第三卷)-热带气旋中的扰动[M].北京:气象出版社. Zhang M, Huang H, Zhang L F, 2010. Atmospheric Spectral Analysis and Its Instability (Volume 3) - Disturbances in Tropical Cyclones[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 张晓慧,张立凤,周海申,等,2019.双台风相互作用及其影响[J].应用气象学报,30(4):456-466. Zhang X H, Zhang L F, Zhou H S, et al, 2019. Interaction and influence of binary typhoons[J]. J Appl Meteor Sci, 30(4):456-466(in Chinese).
- 赵大军,于玉斌,李莹,2011.“0814”号强台风发展维持的环境场分析[J].气象科学,31(5):591-597. Zhao D J, Yu Y B, Li Y, 2011. A diagnostic analysis of the intensity change of Strong Typhoon Hagupit[J]. J Meteor Sci, 31(5):591-597(in Chinese).
- 赵小平,沈新勇,朱晶晶,等,2014.2009年豫南一次强暴雨过程的位涡方程诊断分析[J].气象,40(1):38-47. Zhao X P, Shen X Y, Zhu J J, et al, 2014. Diagnostic analysis on potential vorticity budget of one severe torrential rain process in southern Henan in 2009[J]. Meteor Mon, 40(1):38-47(in Chinese).
- 郑峰,曾智华,雷小途,等,2016.中国近海突然增强台风统计分析[J].高原气象,35(1):198-210. Zheng F, Zeng Z H, Lei X T, et al, 2016. A statistical study of rapid intensification of typhoons over coastal water of China[J]. Plateau Meteor, 35(1):198-210(in Chinese).
- 郑峰,曾智华,雷小途,等,2017.一次近海突然增强台风的个例数值模拟[J].浙江气象,38(1):6-13,20. Zheng F, Zeng Z H, Lei X T, et al, 2017. Numerical simulation of a case of a sudden intensification of typhoon offshore[J]. J Zhejiang Meteor, 38(1):6-13,20(in Chinese).
- 郑艳,蔡亲波,程守长,等,2014.超强台风“威马逊”(1409)强度和降水特征及其近海急剧加强原因[J].暴雨灾害,33(4):333-341. Zheng Y, Cai Q B, Cheng S C, et al, 2014. Characteristics on intensity and precipitation of Super Typhoon Rammasun (1409) and reason why it rapidly intensified offshore[J]. Torr Rain Dis, 33(4):333-341(in Chinese).
- 周冠博,柳龙生,董林,等,2022.2020年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J].气象,48(4):504-515. Zhou G B, Liu L S, Dong L, et al, 2022. The analysis of characteristics and forecast difficulties of TCs in Western North Pacific in 2020[J]. Meteor Mon, 48(4):504-515(in Chinese).
- 朱晓金,陈联寿,2012.2003—2005年西北太平洋台风眼生成特征分析[J].热带气象学报,28(5):646-652. Zhu X J, Chen L S, 2012. Large-scale characteristics of tropical cyclones eyes formation in the Northwest Pacific from 2003—2005[J]. J Trop Meteor, 28(5):646-652(in Chinese).
- Alvey G R III, Zipser E, Zawislak J, 2020. How does Hurricane Edouard (2014) evolve toward symmetry before rapid intensification? A high-resolution ensemble study[J]. J Atmos Sci, 77(4):1329-1351.
- Bosart L F, Lackmann G M, 1995. Postlandfall tropical cyclone re-intensification in a weakly baroclinic environment: a case study of Hurricane David (September 1979)[J]. Mon Wea Rev, 123(11):3268-3291.
- Chan J C L, Duan Y H, Shay L K, 2001. Tropical cyclone intensity change from a simple ocean-atmosphere coupled model[J]. J Atmos Sci, 58(2):154-172.
- Chandra A, Kumar S, 2021. Sea surface temperature and ocean heat content during tropical cyclones Pam (2015) and Winston (2016) in the Southwest Pacific Region[J]. Mon Wea Rev, 149(4):1173-1187.
- Chen L S, Luo Z X, 2004. Interaction of typhoon and mesoscale vortex[J]. Adv Atmos Sci, 21(4):515-528.
- Chen X M, Xue M, Fang J, 2018. Rapid intensification of Typhoon Mujigae (2015) under different sea surface temperatures: structural changes leading to rapid intensification[J]. J Atmos Sci, 75(12):4313-4335.
- Corbosiero K L, Molinari J, 2002. The effects of vertical wind shear on the distribution of convection in tropical cyclones[J]. Mon Wea Rev, 130(8):2110-2123.
- Dai Y, Majumdar S J, Nolan D S, 2017. Secondary eyewall formation in tropical cyclones by outflow-jet interaction[J]. J Atmos Sci, 74(6):1941-1958.
- DeMaria M, 1996. The effect of vertical shear on tropical cyclone

- intensity change[J]. *J Atmos Sci*, 53(14):2076-2088.
- DeMaria M, Kaplan J, 1994. Sea surface temperature and the maximum intensity of Atlantic tropical cyclones[J]. *J Climate*, 7(9):1324-1334.
- DeMaria M, Sampson C R, Knaff J A, et al, 2014. Is tropical cyclone intensity guidance improving? [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 95(3):387-398.
- Didlake A C, Reasor P D, Rogers R F, et al, 2018. Dynamics of the transition from spiral rainbands to a secondary eyewall in Hurricane Earl (2010)[J]. *J Atmos Sci*, 75(9):2909-2929.
- Emanuel K, Zhang F Q, 2016. On the predictability and error sources of tropical cyclone intensity forecasts[J]. *J Atmos Sci*, 73(9):3739-3747.
- Emanuel K A, 1986. An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: steady-state maintenance[J]. *J Atmos Sci*, 43(6):585-605.
- Emanuel K A, 1995. Sensitivity of tropical cyclones to surface exchange coefficients and a revised steady-state model incorporating eye dynamics[J]. *J Atmos Sci*, 52(22):3969-3976.
- Emanuel K A, 2018. 100 years of progress in tropical cyclone research[M] // *Meteorological Monographs*. American Meteorological Society:15. 1-15. 68.
- Fischer M S, Tang B H, Corbosiero K L, 2017. Assessing the influence of upper-tropospheric troughs on tropical cyclone intensification rates after genesis[J]. *Mon Wea Rev*, 145(4):1295-1313.
- Frisius T, Hasselbeck T, 2009. The effect of latent cooling processes in tropical cyclone simulations[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 135(644):1732-1749.
- Gao S, Zhang W, Liu J, et al, 2016. Improvements in typhoon intensity change classification by incorporating an ocean coupling potential intensity index into decision trees[J]. *Wea Forecasting*, 31(1):95-106.
- Goni G, Demaria M, Knaff J, et al, 2009. Applications of satellite-derived ocean measurements to tropical cyclone intensity forecasting[J]. *Oceanography*, 22(3):190-197.
- Gray W M, 1968. Global view of the origin of tropical disturbances and storms[J]. *Mon Wea Rev*, 96(10):669-700.
- Hanley D, Molinari J, Keyser D, 2001. A composite study of the interactions between tropical cyclones and upper-tropospheric troughs[J]. *Mon Wea Rev*, 129(10):2570-2584.
- Hartmann D L, Michelsen M L, Klein S A, 1992. Seasonal variations of tropical intraseasonal oscillations: a 20-25-day oscillation in the Western Pacific[J]. *J Atmos Sci*, 49(14):1277-1289.
- Holland G, Wang Y, 1999. What limits tropical cyclone intensity? [C] // *Preprint, 23rd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*. Dallas: American Meteorological Society:955-958.
- Holland G J, 1997. The maximum potential intensity of tropical cyclones[J]. *J Atmos Sci*, 54(21):2519-2541.
- Jaimes B, Shay L K, Brewster J K, 2016. Observed air-sea interactions in Tropical Cyclone Isaac over loop current mesoscale eddy features[J]. *Dyn Atmos Oceans*, 76:306-324.
- Jiang H Y, 2012. The relationship between tropical cyclone intensity change and the strength of inner-core convection[J]. *Mon Wea Rev*, 140(4):1164-1176.
- Kaplan J, DeMaria M, 2003. Large-scale characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the North Atlantic Basin[J]. *Wea Forecasting*, 18(6):1093-1108.
- Komaromi W A, Doyle J D, 2018. On the dynamics of tropical cyclone and trough interactions[J]. *J Atmos Sci*, 75(8):2687-2709.
- Kotal S D, Kundu P K, Roy Bhowmik S K, 2009. An analysis of sea surface temperature and maximum potential intensity of tropical cyclones over the Bay of Bengal between 1981 and 2000[J]. *Meteor Appl*, 16(2):169-177.
- Landsea C W, Bell G D, Gray W M, et al, 1998. The extremely active 1995 Atlantic hurricane season: environmental conditions and verification of seasonal forecasts[J]. *Mon Wea Rev*, 126(5):1174-1193.
- Leighton H, Gopalakrishnan S, Zhang J A, et al, 2018. Azimuthal distribution of deep convection, environmental factors, and tropical cyclone rapid intensification: a perspective from HWRF ensemble forecasts of Hurricane Edouard (2014)[J]. *J Atmos Sci*, 75(1):275-295.
- Leroux M D, Plu M, Roux F, 2016. On the sensitivity of tropical cyclone intensification under upper-level trough forcing[J]. *Mon Wea Rev*, 144(3):1179-1202.
- Li Q Q, Wang Y Q, Duan Y H, 2014. Effects of diabatic heating and cooling in the rapid filamentation zone on structure and intensity of a simulated tropical cyclone[J]. *J Atmos Sci*, 71(9):3144-3163.
- Li Q Q, Wang Y Q, Duan Y H, 2015. Impacts of evaporation of rainwater on tropical cyclone structure and intensity-a revisit[J]. *J Atmos Sci*, 72(4):1323-1345.
- Lin I I, Black P, Price J F, et al, 2013. An ocean coupling potential intensity index for tropical cyclones[J]. *Geophys Res Lett*, 40(9):1878-1882.
- Lin I I, Liu W T, Wu C C, et al, 2003. Satellite observations of modulation of surface winds by typhoon-induced upper ocean cooling [J]. *Geophys Res Lett*, 30(3):1131.
- Lin I I, Wu C C, Pun I F, et al, 2008. Upper-ocean thermal structure and the Western North Pacific category 5 typhoons. Part I: Ocean features and the category 5 typhoons' intensification[J]. *Mon Wea Rev*, 136(9):3288-3306.
- Liu B, Liu H Q, Xie L, et al, 2011. A coupled atmosphere-wave-ocean modeling system: simulation of the intensity of an idealized tropical cyclone[J]. *Mon Wea Rev*, 139(1):132-152.
- Lord S J, Willoughby H E, Piotrowicz J M, 1984. Role of a parameterized ice-phase microphysics in an axisymmetric, nonhydrostatic tropical cyclone model[J]. *J Atmos Sci*, 41(19):2836-2848.
- Ma Z H, Fei J F, Liu L, et al, 2017. An investigation of the influences of mesoscale ocean eddies on tropical cyclone intensities[J]. *Mon Wea Rev*, 145(4):1181-1201.
- Mahapatra D K, Rao A D, Babu S V, et al, 2007. Influence of coast

- line on upper ocean's response to the tropical cyclone[J]. *Geophys Res Lett*, 34(17): L17603.
- May P T, Holland G J, 1999. The role of potential vorticity generation in tropical cyclone rainbands[J]. *J Atmos Sci*, 56(9): 1224-1228.
- McBride J L, Zehr R, 1981. Observational analysis of tropical cyclone formation. Part II: comparison of non-developing versus developing systems[J]. *J Atmos Sci*, 38(6): 1132-1151.
- Mei W, Xie S P, Primeau F, et al, 2015. Northwestern Pacific typhoon intensity controlled by changes in ocean temperatures[J]. *Sci Adv*, 1(4): e1500014.
- Miller W, Chen H, Zhang D L, 2015. On the rapid intensification of Hurricane Wilma (2005). Part III: effects of latent heat of fusion [J]. *J Atmos Sci*, 72(10): 3829-3849.
- Montgomery M T, Kallenbach R J, 1997. A theory for vortex rossby-waves and its application to spiral bands and intensity changes in hurricanes[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 123(538): 435-465.
- Munsell E B, Braun S A, Zhang F Q, 2021. GOES-16 observations of rapidly intensifying tropical cyclones: hurricanes Harvey (2017), Maria (2017), and Michael (2018)[J]. *Mon Wea Rev*, 149(6): 1695-1714.
- Newinger C, Toumi R, 2015. Potential impact of the colored Amazon and Orinoco plume on tropical cyclone intensity[J]. *J Geophys Res: Oceans*, 120(2): 1296-1317.
- Nolan D S, Miyamoto Y, Wu S N, et al, 2019. On the correlation between total condensate and moist heating in tropical cyclones and applications for diagnosing intensity[J]. *Mon Wea Rev*, 147(10): 3759-3784.
- Ooyama K, 1969. Numerical simulation of the life cycle of tropical cyclones[J]. *J Atmos Sci*, 26(1): 3-40.
- Pattnaik S, Krishnamurti T N, 2007. Impact of cloud microphysical processes on hurricane intensity. Part 1: control run[J]. *Meteor Atmos Phys*, 97(1/2/3/4): 117-126.
- Paull G, Menelaou K, Yau M K, 2018. Sensitivity of tropical cyclone intensification to axisymmetric heat sources: the role of low-level heating and cooling from different microphysical processes[J]. *J Atmos Sci*, 75(12): 4229-4246.
- Peng M S, Jeng B F, Williams R T, 1999. A numerical study on tropical cyclone intensification. Part I: beta effect and mean flow effect[J]. *J Atmos Sci*, 56(10): 1404-1423.
- Powell M D, 1990a. Boundary layer structure and dynamics in outer hurricane rainbands. Part I. Mesoscale rainfall and kinematic structure[J]. *Mon Wea Rev*, 118(4): 891-917.
- Powell M D, 1990b. Boundary layer structure and dynamics in outer hurricane rainbands. Part II. Downdraft modification and mixed layer recovery[J]. *Mon Wea Rev*, 118(4): 918-938.
- Rogers R, 2010. Convective-scale structure and evolution during a high-resolution simulation of tropical cyclone rapid intensification[J]. *J Atmos Sci*, 67(1): 44-70.
- Rogers R, Lorsolo S, Reasor P, et al, 2012. Multiscale analysis of tropical cyclone kinematic structure from airborne Doppler radar composites[J]. *Mon Wea Rev*, 140(1): 77-99.
- Rogers R F, Zhang J A, Zawislak J, et al, 2016. Observations of the structure and evolution of Hurricane Edouard (2014) during intensity change. Part II: kinematic structure and the distribution of deep convection[J]. *Mon Wea Rev*, 144(9): 3355-3376.
- Rosenfeld D, Woodley W L, Khain A, et al, 2012. Aerosol effects on microstructure and intensity of tropical cyclones[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 93(7): 987-1001.
- Rotunno R, Emanuel K A, 1987. An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part II: evolutionary study using a nonhydrostatic axisymmetric numerical model[J]. *J Atmos Sci*, 44(3): 542-561.
- Rozoff C M, Velden C S, Kaplan J, et al, 2015. Improvements in the probabilistic prediction of tropical cyclone rapid intensification with passive microwave observations[J]. *Wea Forecasting*, 30(4): 1016-1038.
- Ryan B F, Barnes G M, Zipser E J, 1992. A wide rainband in a developing tropical cyclone[J]. *Mon Wea Rev*, 120(3): 431-447.
- Sawada M, Iwasaki T, 2007. Impacts of ice phase processes on tropical cyclone development[J]. *J Meteor Soc Japan*, 85(4): 479-494.
- Sawada M, Iwasaki T, 2010a. Impacts of evaporation from raindrops on tropical cyclones. Part I: evolution and axisymmetric structure[J]. *J Atmos Sci*, 67(1): 71-83.
- Sawada M, Iwasaki T, 2010b. Impacts of evaporation from raindrops on tropical cyclones. Part II: features of rainbands and asymmetric structure[J]. *J Atmos Sci*, 67(1): 84-96.
- Schade L R, 2000. Tropical cyclone intensity and sea surface temperature[J]. *J Atmos Sci*, 57(18): 3122-3130.
- Seroka G, Miles T, Xu Y, et al, 2017. Rapid shelf-wide cooling response of a stratified coastal ocean to hurricanes[J]. *J Geophys Res: Oceans*, 122(6): 4845-4867.
- Shay L K, Goni G J, Black P G, 2000. Effects of a warm oceanic feature on Hurricane Opal[J]. *Mon Wea Rev*, 128(5): 1366-1383.
- Tallapragada V, Kieu C, Trahan S, et al, 2016. Forecasting tropical cyclones in the western North Pacific Basin using the NCEP operational HWRf model: model upgrades and evaluation of real-time performance in 2013[J]. *Wea Forecasting*, 31(3): 877-894.
- Tao W K, Shi J J, Chen S S, et al, 2011. The impact of microphysical schemes on hurricane intensity and track[J]. *Asia-Pacific J Atmos Sci*, 47(1): 1-16.
- Thanh N T, Cuong H D, Hien N X, et al, 2020. Relationship between sea surface temperature and the maximum intensity of tropical cyclones affecting Vietnam's coastline[J]. *Int J Climatol*, 40(5): 2527-2538.
- Tuleya R E, Kurihara Y, 1981. A numerical study on the effects of environmental flow on tropical storm genesis[J]. *Mon Wea Rev*, 109(12): 2487-2506.
- Ventham J D, Wang B, 2007. Large-scale flow patterns and their influence on the intensification rates of western North Pacific tropical storms[J]. *Mon Wea Rev*, 135(3): 1110-1127.

- Wada A, Usui N, 2007. Importance of tropical cyclone heat potential for tropical cyclone intensity and intensification in the western North Pacific[J]. *J Oceanogr*, 63(3): 427-447.
- Wang B, Zhou X, 2008. Climate variation and prediction of rapid intensification in tropical cyclones in the western North Pacific [J]. *Meteor Atmos Phys*, 99(1-2): 1-16.
- Wang Y Q, 2002a. Vortex Rossby waves in a numerically simulated tropical cyclone. Part I: overall structure, potential vorticity, and kinetic energy budgets[J]. *J Atmos Sci*, 59(7): 1213-1238.
- Wang Y Q, 2002b. An explicit simulation of tropical cyclones with a triply nested movable mesh primitive equation model: TCM3. Part II. model refinements and sensitivity to cloud microphysics parameterization[J]. *Mon Wea Rev*, 130(12): 3022-3036.
- Wang Y Q, 2009. How do outer spiral rainbands affect tropical cyclone structure and intensity? [J]. *J Atmos Sci*, 66(5): 1250-1273.
- Wang Y Q, Rao Y J, Tan Z M, et al, 2015. A statistical analysis of the effects of vertical wind shear on tropical cyclone intensity change over the western North Pacific[J]. *Mon Wea Rev*, 143(9): 3434-3453.
- Wang Y Q, Xu J, 2010. Energy production, frictional dissipation, and maximum intensity of a numerically simulated tropical cyclone [J]. *J Atmos Sci*, 67(1): 97-116.
- Whitney L D, Hobgood J S, 1997. The relationship between sea surface temperatures and maximum intensities of tropical cyclones in the eastern North Pacific Ocean[J]. *J Climate*, 10(11): 2921-2930.
- Willoughby H E, Jin H L, Lord S J, et al, 1984. Hurricane structure and evolution as simulated by an axisymmetric, nonhydrostatic numerical model[J]. *J Atmos Sci*, 41(7): 1169-1186.
- Wong M L M, Chan J C L, 2004. Tropical cyclone intensity in vertical wind shear[J]. *J Atmos Sci*, 61(15): 1859-1876.
- Wu G X, Liu H Z, 1998. Vertical vorticity development owing to down-sliding at slantwise isentropic surface [J]. *Dyn Atmos Oceans*, 27(1/2/3/4): 715-743.
- Xu J, Wang Y Q, 2010a. Sensitivity of the simulated tropical cyclone inner-core size to the initial vortex size[J]. *Mon Wea Rev*, 138(11): 4135-4157.
- Xu J, Wang Y Q, 2010b. Sensitivity of tropical cyclone inner-core size and intensity to the radial distribution of surface entropy flux [J]. *J Atmos Sci*, 67(6): 1831-1852.
- Yamasaki M, 1983. A further study of the tropical cyclone without parameterizing the effects of cumulus convection[J]. *Pap Meteor Geophys*, 34(4): 221-260.
- Yan Y F, Li L, Wang C Z, 2017. The effects of oceanic barrier layer on the upper ocean response to tropical cyclones[J]. *J Geophys Res: Oceans*, 122(6): 4829-4844.
- Zehr R M, 2003. Environmental vertical wind shear with Hurricane Bertha (1996)[J]. *Wea Forecasting*, 18(2): 345-356.
- Zhang D L, Chen H, 2012. Importance of the upper-level warm core in the rapid intensification of a tropical cyclone[J]. *Geophys Res Lett*, 39(2): L02806.
- Zhang F Q, Tao D D, 2013. Effects of vertical wind shear on the predictability of tropical cyclones[J]. *J Atmos Sci*, 70(3): 975-983.
- Zhao B, Duan Y H, Yu H, et al, 2006. A statistical analysis on the effect of vertical wind shear on tropical cyclone development[J]. *Acta Meteor Sin*, 20(3): 383-388.
- Zhu T, Zhang D L, 2006. Numerical simulation of hurricane Bonnie (1998). Part II: sensitivity to varying cloud microphysical processes[J]. *J Atmos Sci*, 63(1): 109-126.

(本文责编:何晓欢)