

于玉斌,彭思越,赵大军,2024. 干冷空气活动对热带气旋强度变化影响的研究进展与展望[J]. 气象,50(2):133-143. Yu Y B, Peng S Y, Zhao D J, 2024. Research progresses and prospects of dry cold air activity impacts on the intensity change of tropical cyclones[J]. Meteor Mon, 50(2):133-143(in Chinese).

干冷空气活动对热带气旋强度变化影响 的研究进展与展望^{*}

于玉斌^{1,4} 彭思越^{1,2,3} 赵大军^{2,4}

1 中国气象局气象干部培训学院,北京 100081

2 中国气象局上海台风研究所,上海 200030

3 成都信息工程大学,成都 610225

4 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

提 要: 热带气旋的强度变化一直是热带气旋研究中的重要内容之一,干冷空气活动与热带气旋强度变化之间有密切的关系,如快速增强和快速减弱过程。文章对国内外干冷空气影响热带气旋强度变化的研究成果进行了回顾和总结,主要包括干冷空气的强度、侵入位置,以及高空冷性天气系统对热带气旋强度变化的影响三个方面,并对未来的研究进行展望,以期干冷空气影响热带气旋强度的研究提供参考。

关键词: 热带气旋,干冷空气,强度变化,研究进展

中图分类号: P447

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.070201

Research Progresses and Prospects of Dry Cold Air Activity Impacts on the Intensity Change of Tropical Cyclones

YU Yubin^{1,4} PENG Siyue^{1,2,3} ZHAO Dajun^{2,4}

1 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

2 Shanghai Typhoon Institute, CMA, Shanghai 200030

3 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

4 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: The community of tropical cyclone (TC) researches has identified intensity change of TC as a high priority study subject. The activity of dry cold air, such as the rapid intensification and rapid weakening, is closely related to the intensity change of TC. Domestic and international research results of TC intensity change interpreted from the perspective of dry cold air activity are reviewed in the following three aspects: the intensity of dry cold air and intrusion location as well as the effect of upper tropospheric cold weather system on TC intensity change. Also, an outlook for future research is also given here to promote the study of the effect of dry cold air on the intensity change of TC.

Key words: tropical cyclone (TC), dry cold air, intensity change, research progress

^{*} 国家自然科学基金项目(42375014、42175008)和中国气象局上海台风研究所台风基金项目(TFJJ202006、TFJJ202201)共同资助

2023 年 1 月 9 日收稿; 2023 年 7 月 2 日收修定稿

第一作者: 于玉斌,主要从事热带气旋动力学及热力学机理研究. E-mail: yuyb@cma.gov.cn

引言

我国是受热带气旋(tropical cyclone, TC)影响最严重的国家之一(雷小途, 2021), TC 往往会伴随着大风、暴雨等一系列灾害。在过去的几十年间, 随着飞机、雷达、卫星等多源探测资料的丰富和数值模式预报性能的持续提升, 对 TC 移动路径的预报已经取得了较好的进展, 但对于 TC 强度的预报一直没有取得显著的进步(李泽椿等, 2020; Huang et al, 2021; 周冠博等, 2022), 尤其是对 TC 强度的突然增强或突然减弱的预报往往存在较大的偏差, 这是由于 TC 强度变化往往受到多尺度过程的影响所导致(Colomb et al, 2019)。因此, 对 TC 强度的预报仍属于当前国际上业务和研究工作中的一个难点(Avila, 1998; Elsberry et al, 2007)。

冷空气是指会使所经地点气温下降的空气团, 冷空气的频繁发生往往会对受影响地区造成严重的经济财产的损失。为了方便对冷空气的研究和监测, 我国关于冷空气的有关标准中, 采用受冷空气影响的某个地区在一定时间内日最低气温下降幅度和日最低气温值这两个量作为衡量指标, 将冷空气分为弱冷空气、较强冷空气、强冷空气和寒潮共四个等级(GB/T 20484—2017)。若监测区域超过 20% 的观测站出现中等及中等以上强度的冷空气且持续时间超过 48 小时, 则判定为一次冷空气过程(QX/T 393—2017)。不同强度的冷空气侵入会对 TC 强度的变化产生不同的影响。此外, 干燥的空气也被证实会对 TC 的强度变化产生影响(Bhalachandran et al, 2019; Zhang et al, 2016), 其进入到 TC 的内核会通过蒸发迫使气流下沉或是通过减少中高层上升气流来抑制 TC 强度的增强; 而有的情况下, 干空气会阻碍次眼墙的形成, 从而有利于 TC 增强(Rogers et al, 2016)。因此, 许多学者对于干冷空气影响 TC 强度变化的方面展开了研究。天气尺度研究中常用相对湿度大于 60% 的区域(李媛等, 2014)或北风的强弱来表征干冷空气的活动情况(姚秀萍和于玉斌, 2005), 此外, 水汽云图上的暗区也可以表征干冷空气的活动及其强弱的变化(于玉斌等, 2015)。研究表明, 干冷空气侵入 TC 的方式大致分为两类: 一类是由对流层高层向低层侵入, 另一类是在对流层低层由北向南侵入。干冷空气的侵入会对 TC 的外部环境场和内部结构产生影响, 加强潜在不稳定, 从而

导致 TC 的强度发生变化, 有时还会伴随着降水幅度的增大(梁建茵等, 2003; 于玉斌等, 2015)。

国际上通常采用 TC 中心最低气压减少 $42 \text{ hPa} \cdot \text{d}^{-1}$ 或 TC 中心最大风速增大 $15.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 作为突然增强的判定标准(Kaplan and DeMaria, 2003; Holliday and Thompson, 1979)。陈联寿和丁一汇(1979)指出 TC 的强度变化存在“缓慢变化”和“迅速变化”两类, 在后续的研究中, 研究学者根据平均值和标准差的数学内涵将 TC 的生命史分为五种发展类型: 突然增强、缓慢增强、强度稳定、缓慢减弱和突然减弱(阎俊岳等, 1995; 于玉斌和姚秀萍, 2006)。其中, 突然增强和突然减弱属于小概率事件(Kaplan et al, 2010), 对短时天气预报和 TC 模拟等方面都构成了巨大的挑战(Elsberry et al, 2007; Cangialosi et al, 2020; DeMaria et al, 2021)。在过去的研究中多利用 TC 中心最低气压的变化值对 TC 的发展阶段进行划分(Holliday and Thompson, 1979), 随着卫星云图等工具的使用, 对 TC 最大风速的确定能力大幅度增强, 并且研究表明, TC 所造成的损失有相当大部分取决于其最大风速。因此, 对 TC 的发展阶段的阈值划分逐渐改为采用最大风速的变化值进行定义。除了采用统计学的阈值之外, 还有研究使用聚类分析的方法, 在考虑涡旋物理特性情况下对传统的阈值进行了修订(Li et al, 2022)。目前对于强度突变的阈值还没有确切的标准, 不同的研究对于突变判据的选择不同(表 1), 导致研究结果也存在差异, 因此, 强度突变的阈值选择仍然是 TC 强度研究中的重点(Kaplan et al, 2010)。

影响 TC 强度变化的因子大致分为三类: TC 的环境场、内部结构、下垫面(Chen, 2012)。2014 年第八届世界气象组织热带气旋国际研讨会指出, 继续研究外部环境场对 TC 强度变化的影响是有必要的(Leroux, 2014)。在 TC 趋于登陆或是北上的运动过程中, 大气环境场会对 TC 强度变化产生显著的影响, 当 TC 与中高纬度的冷空气发生相互作用时, 往往会导致其强度、结构、路径等发生改变(于玉斌, 2012)。例如 2014 年超强台风威马逊, 在近海区域出现持续性快速增强, 造成特强大风和特大暴雨, 导致大量的人员伤亡和财产损失。研究表明, “威马逊”的强度突变与干冷空气的活动之间存在密切的关系(李华实等, 2016), 而 2019 年超强台风利奇马却在干冷空气侵入后趋于变性消亡(沈阳等, 2020)。因此, 了解干冷空气对 TC 强度变化的影响机制, 对

表 1 不同研究对 TC 强度突变的阈值选择
Table 1 Threshold selection of TC intensity changes in different researches

突变类型	不同研究	判据
快速增强	Ito(1963)	1 小时变压 ≥ 2 hPa
	Brand(1973)	24 小时风速变化 $\geq 25.72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
	Holliday and Thompson(1979)	24 小时变压 ≥ 42 hPa
	中国气象局(1996)	12 小时风速变化 $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
	Kaplan and DeMaria(2003)	24 小时风速变化 $\geq 15.43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
快速减弱	于玉斌和姚秀萍(2006)	6 小时变压 ≥ 7.78 hPa
	Brand(1973)	24 小时风速变化 $\leq -10.29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
	中国气象局(1996)	12 小时风速变化 $\leq -10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
	于玉斌和姚秀萍(2006)	6 小时变压 ≥ 8.30 hPa
	Wood and Ritchie(2015)	24 小时风速变化 $\leq -15.43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
	Ma et al(2019)	24 小时风速变化 $\leq -20.58 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

提高 TC 强度预报的准确度,减少因预报误差而造成的防御不足或防御过当等方面,都具有重大的研究意义和实用价值。

本文对于冷空气影响热带气旋强度变化的国内外研究进行回顾,重点关注大气环境场中干冷空气强度、侵入位置以及冷性天气系统对 TC 强度变化的影响,并在文末对于冷空气影响 TC 强度变化的未来研究方向进行展望,以期能够为后续研究提供参考依据。

1 干冷空气活动对 TC 强度变化的影响

国内,李宪之(1956)最早注意到了冷空气对 TC 的发展有促进作用。之后,王允宽等(1988)、杨成彬等(1994)、王远超(2006a)等一系列研究中也证实了干冷空气的活动与 TC 的强度变化之间存在一定的关联,其中包括干冷空气的侵入方位、侵入高度和强度对 TC 强度变化的影响。

1.1 干冷空气的不同侵入方位对 TC 强度变化的影响

研究表明,同样强度的干冷空气从不同的方位侵袭北半球,在南海和菲律宾以东的洋面上触发的 TC 强度会存在差异(徐亚梅和伍荣生,2003)。对于处于扰动阶段的 TC,如果外围存在温度梯度,则有利于 TC 的发展,但如果内部存在温度梯度,则对 TC 的发展存在不利的影响(刘辉和董克勤,1987)。徐祥德(1986)通过数值试验改变大气环境温度场,发现外围环境降温明显加快了 TC 的增强,相反,如

果干冷空气侵入到 TC 的内部,TC 的强度就会受到抑制。何洁琳等(2009)指出,发展中的 TC 与干冷空气相向而行,气压梯度增强,使得 TC 强度增强;但当强冷空气入侵到 TC 中心时,则会使 TC 减弱消亡。此外,还有研究发现干冷空气从 TC 的西北象限侵入,与 TC 外围环流相结合,对 TC 强度和降水的加强都起到了有利的作用(王洪勋等,2009)。

观测事实也表明,干冷空气扩散到 TC 的外围,对 TC 强度的增强存在激发作用(韩璞和伍荣生,2008),其原因与 TC 外围气旋性涡旋加强和干冷空气造成的暖湿空气抬升、潜热释放加强都存在关系(束家鑫和陈联寿,1981)。

1.2 干冷空气的不同侵入高度对 TC 强度变化的影响

干冷空气侵入 TC 的高度在以往的研究中也被证实对 TC 强度的变化存在影响,狄利华等(2008)对 2005 年台风 Matsa 的强度变化过程进行数值模拟研究发现,冷空气从对流层低层侵入 TC 后,垂直方向上,高层干冷空气倾斜向下补充,斜压能量释放,使得减弱的“Matsa”出现再次增强。魏应植等(2008)利用多普勒雷达资料研究发现,冷空气侵入位置位于 4 km 以下的中低层时,会造成强迫抬升,加剧不稳定能量的释放,从而导致 TC 强度迅速减弱。干冷空气侵入是造成 TC 的近海强度突变的关键因素之一(闫敬华等,2005)。学者们在对 2002 年台风黄蜂的近海加强进行研究时发现,干冷空气侵入 TC 的中层,与低层西南季风带来的暖湿空气相结合,会影响 TC 内部的热力结构,造成层结的位势不稳定,使得 TC 强度加强(李江南等,2008;梁建茵

等,2003)。若干冷空气由高层向低层侵入 TC,会形成“上干下湿”的层结分布,从而有利于 TC 强度的加强(于玉斌等,2015)。但如果高层的干冷空气强度过大,向下贯通整层,就会导致低层的暖心结构遭到破坏,垂直稳定度加强,从而使得 TC 强度减弱(吴雪和端义宏,2013)。

不同高度的干冷空气侵入 TC,会对 TC 的结构和稳定度产生不同的影响,从而导致 TC 强度发生不同的变化。侧重低层弱冷空气对 TC 强度变化的影响在理论上形成了“低层弱冷空气有利于 TC 加强”的观点(于玉斌,2012);侧重中高层干冷空气影响 TC 强度变化的研究相对较少,还没有形成完整的理论体系,有待进一步探寻。

1.3 干冷空气的不同强度对 TC 强度变化的影响

干冷空气对 TC 强度变化的存在双重作用(陈联寿和丁一汇,1979),由于 TC 属于暖心结构,如果干冷空气的强度太强,会对 TC 暖心结构造成破坏,从而导致 TC 强度的减弱甚至是消亡;但如果干冷空气的强度较弱,则会对 TC 强度的增强起到“激发”作用(舒锋敏和罗森波,2010;姚增权和魏鼎文,1985)。李崇银(1983)从动力学的角度,分析了三种不同强度的干冷空气对 TC 强度的影响,研究结果表明,强的干冷空气会对 TC 的第二类条件不稳定(conditional instability of the second kind, CISK)机制造成破坏,不利于 TC 的发展,但适中强度的干冷空气却可以使得 TC 外围风速的气旋性切变加大,从而加强 Ekman 抽吸,使得 CISK 加强,有利于 TC 强度的增强。陆佳麟和郭品文(2012)对干冷空气强度进行敏感性试验,发现当侵入的冷空气强度太弱时,冷热空气相互作用积累并释放的斜压能量较少,如果没有新能量供应,TC 就会在深入内陆后逐渐消散;当侵入的干冷空气强度过强时,会造成 TC 暖心结构的破坏,从而导致 TC 填塞消散。观测事实也表明(王远超,2006b;梁建茵等,2003;王珍等,2023),弱干冷空气侵入 TC 会使得风场和温度场出现有利的配置,增加大气的斜压性和垂直不稳定,使得高空辐散和低空辐合同加强,大气上升运动加强,从而促使 TC 的强度增强。但当干冷空气强度太强时,TC 往往会填塞消亡。

因此,干冷空气强度的临界值对预测 TC 的强

度变化十分重要,但是目前对于这一临界值还有待进一步寻找(陈联寿,2006)。同时,对于干冷空气活动影响 TC 强度变化的研究更需要一个能够包含侵入强度、高度和方位等因素的综合表征物理量。

2 不同冷性天气系统对 TC 强度变化的影响

2.1 冷性天气系统与 TC 相互作用的定量表征

高层气流对 TC 的强度变化存在影响(Qian et al, 2011; Yu and Kwon, 2005),这一影响因素被定义为:大气上层环境和 TC 之间的相互作用。这种相互作用所引起的强度变化在 TC 发展的各个阶段都可以被发现(Qian et al, 2016)。高空冷性天气系统,例如高空槽和高空冷涡等,往往会带来干冷空气,对 TC 的强度、路径和结构产生较大的影响。因此,对高空系统与 TC 之间是否存在相互作用的判定是研究天气系统是否对 TC 强度变化产生影响的基础。早期的判定多是基于天气图上 TC 最低气压中心与天气系统之间的相对距离进行的,主观性较强。在后续的研究中,学者们在原先的基础上对于两者之间相互作用的判定提出了新的判据和判定方法,大大增加了判据的客观性。

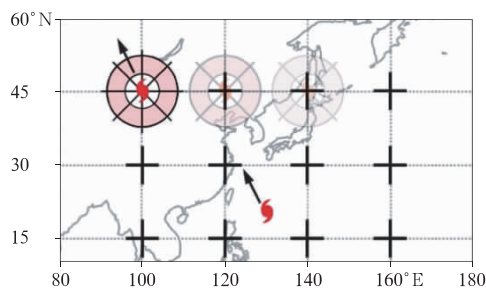
200 hPa 散度、350 K 位势涡度和 200 hPa 角动量涡旋通量辐合(eddy flux convergence of angular momentum, EFC)都可以作为 TC 与高空系统之间是否存在相互作用的指标(Leroux et al, 2016)。EFC 的定义为径向和切向风与方位角平均值的偏差(DeMaria et al, 1993)。其大小和持续时间在许多研究中被应用于诊断和衡量环境场与 TC 之间的非线性相互作用(Hanley et al, 2001; Qiu et al, 2020),有学者认为 EFC 引起结构的变化会加强次级环流,使得 TC 强度发生变化(Titley and Elsberry, 2000)。DeMaria et al(1993)通过计算 EFC 的大小变化,将 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 作为 TC 与大气环境场发生明显相互作用的阈值。Qian et al(2016)考虑了动力学因素的影响,在 EFC 的基础上重新调整了高层环流作用的强度,构建了一个上层强迫指数(upper-level forcing index, ULFI),以便后续的研究中可以对高空槽影响 TC 的强度变化的方面进行

定量的分析,图1给出了ULFI的水平构建示意图。但也有研究对EFC是否能作为一个良好的TC强度预测指标提出质疑,认为高空系统引起的EFC变化对TC强度的影响较小,并不足以抵消强垂直风切变和低海温的消极作用(Peirano et al, 2016),并且指出EFC的变化也可能是由于其他方式导致的(Fischer et al, 2019; Wang et al, 2023)。还有许多学者利用位涡理论对TC和冷性高空系统之间的相互作用进行判定(Li et al, 2012; Patla et al, 2009),位涡在绝热无摩擦的条件下处于守恒状态,等熵面上出现位涡异常往往是由于天气系统将高纬度的位涡输送而来所导致的(Bosart et al, 2000; Hamaguchi and Takayabu, 2021)。因此,等熵面上的位涡异常可以较好地反映天气系统的演变情况。尽管目前的研究对于高空系统与TC相互作用的判定提供了许多方法,但是依旧没有形成统一的理论或概念模型,TC个例之间的差异可能会使得判定结果存在误差,因此对于冷性高空系统和TC相互作用的判据的研究还需要进一步深入。

2.2 高空槽

高空槽是大气环境场中重要的强迫系统,国内外的许多研究都发现,高空槽对TC强度的变化存在一定的影响(DeMaria et al, 1993; Qiu et al, 2020; Sadler, 1976; Shieh et al, 2013)。

高空槽与TC强度之间的关系并不是单一的、直接的,因此关于两者之间关系的理论解释也不止一种(端义宏等, 2005)。“角动量输送理论”(Bosart et al, 2000)认为高空槽对TC的增强作用是由于外



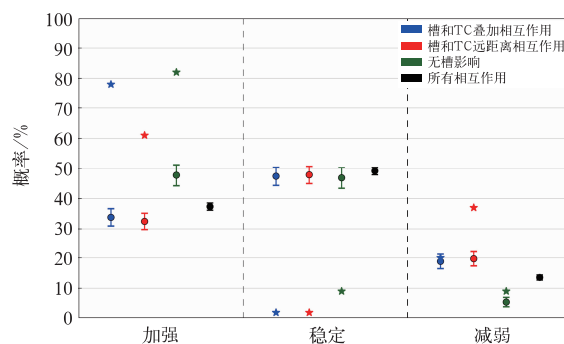
注:粉色阴影:ULFI,在两个特定半径之间取径向平均;
黑线:经纬度网格点;红色符号:TC;箭头:TC的平移矢量。

图1 ULFI的水平示意图(Qian et al, 2016)*

Fig. 1 Horizontal diagram of ULFI (Qian et al, 2016)*

流层结构非对称导致涡动角动量通量辐合所导致的。Shi et al(1997)和 Hanley et al(2001)认为当冷槽与TC暖的外流两者接近的时候,会导致温度梯度增大,使得高空急流增强。如果TC的中心位于急流入口区域的右侧,在高空外流增强的同时与该急流相关的次级环流还将加强上升运动,从而有利于TC强度的增强。DeMaria et al(1993)指出,虽然高空槽与TC两者之间的相互作用能使得部分TC个例出现快速增强的过程,但总体上对TC强度的变化是不利的。Hanley et al(2001)统计了高空槽与TC相互作用的个例后发现,78%的叠加个例和61%的远距离相互作用个例都存在强度加强的现象,他们指出对流层上层小尺度的位势涡度接近TC中心有利于TC强度的增强。Peirano et al(2016)对上述两者的结论的差异进行研究后认为,高空槽和TC的相互作用对TC强度变化的有利作用大于其不利作用,但有利作用并不如Hanley et al(2001)提出的数据那么可观(图2),他们认为这种差异可能是由于对相互作用的判据选择和TC个例筛选标准的不同而造成的。

高空槽与TC之间的相互作用对槽的强度和深度有较大的敏感性(Kimball and Evans, 2002; Galarnau et al, 2015),当有深槽移近TC时,TC的强度会发生增强,但是两者之间存在一定的相对距离(DeMaria et al, 1993; Gray, 1968; Paterson et al, 2005)。当不同强度的高空槽与TC发生相互作用



注:圆圈表示观测到的频率,条形表示用蒙特卡罗随机再抽样测试计算的第95个置信区间,星形表示Hanley et al(2001)中相应类别的值。

图2 TC与槽的配置在发生相互作用后的24小时内TC强度变化的频率分布(Peirano et al, 2016)

Fig. 2 Frequency distribution of TC intensity change in 24 hours after the interaction of TC with the trough (Peirano et al, 2016)

时,高空辐散的强度会发生改变,从而会对低层的辐合以及 TC 中心的上升运动产生影响,进而影响 TC 的强度(Bosart et al, 2000)。陈联寿和丁一汇(1979)指出高空槽后的弱冷平流从中低层侵入 TC 外围会使得 TC 强度增强,但槽后的冷平流强度过大时,就会造成 TC 填塞消亡。李英等(2006)对 1997 年号台风 Winnie 的初始场槽的强度进行敏感性试验时发现,较深的槽所携带的较强冷平流和正涡度平流会产生较大的高空辐散,有利于 TC 强度的加强。因此,关于高空槽的强度对 TC 强度变化的影响还需要进一步更深入的研究。

2018 年第九届世界气象组织热带气旋国际研讨会指出,槽与 TC 的相互作用类似于两个深系统相互作用(Komaromi and Doyle, 2018), TC 强度变化往往与两者相对位置和 TC 自身的强度有关。研究发现, TC 的快速增强与热带对流层上部槽的平均位置有着密切的关系(Holliday and Thompson, 1979),只要少量地改变两个系统之间的相对位置,就会对随后的相互作用产生极大的影响(Klein et al, 2002)。Leroux et al(2016)通过改变 TC 的强度和相对方位,对 2007 年热带气旋 Dora 与高空槽相互作用的过程进行了敏感性试验,发现当 TC 位于高空槽西北方向 12° 且向 TC 接近 1° 的情况下强度增强明显,而在东侧 $3^\circ \sim 4^\circ$ 或是东北侧则出现 TC 强度减弱的现象。Komaromi and Doyle(2018)在理想化模拟的基础上发现,当 TC 中心位置在纬向方向上处于 0.2~0.3 倍槽的波长内,经向方向上处于 0.8~1.2 倍槽的振幅内时, TC 和槽的相互作用有利于 TC 强度的增强。Liao et al(2020)将高空槽对增强 TC 和减弱 TC 之间的不同影响进行了对比发现,相较于增强 TC 而言,干冷空气仅位于减弱 TC 的西北部,并没有进一步侵入。此外,高空槽还会对 TC 运动的轨迹产生影响(Yu and Kwon, 2005; Kim and Jung, 2009),当 TC 轨迹发生偏移时,就会伴随着热力条件的差异,进而会对 TC 强度的变化产生间接的影响(Wang et al, 2023)。

高空槽的配置和规模对于低层扰动和高空槽对 TC 强度的影响都存在至关重要的作用(Bosart et al, 2000)。2022 年第十届世界气象组织热带气旋国际研讨会指出,目前关于高空槽影响 TC 强度变化的物理机制仍然没有确切的说法,对有利于 TC 发展的“好槽”和不利于 TC 发展的“坏槽”的特征研究,对 TC 强度变化的研究和预报工作都具有重大

的意义和价值。

2.3 高空冷涡

高空冷涡是存在于热带和亚热带的对流层上层的一个具有冷心结构的闭合气旋性环流。大致可以分为两类:第一类是中纬度西风中的切断冷涡(Kaplan, 1953),第二类则是西北太平洋或是大西洋的中部槽的底部产生的涡旋(Colton, 1973; Yin-Mao et al, 2012)。Wei et al(2016)对西北太平洋 2000—2012 年间的 TC 进行统计分析发现,与高空冷涡共存的 TC 占全部 TC 的 73%,第二类高空冷涡占全部高空冷涡样本的 83%,这些共存样本中 21% 的样本与 TC 之间存在相互作用。

许多研究和观测事实都表明,西北太平洋或大西洋的中部槽底部产生的高空冷涡对 TC 强度变化存在着重要的影响(刘景秀, 1978; Fei et al, 1983; 向纯怡等, 2022; 石晨等, 2023),有相当数量的快速增强的 TC 都曾经历过一段由于 TC 与高空冷涡相互作用而产生的角动量高空涡流辐合的增强期(DeMaria et al, 1993; Yan et al, 2021),高空冷涡在 TC 发展阶段的早期通过增强上层外流,使得 TC 强度增强(Wei et al, 2016; 蔡芎宁等, 2022)。Sadler(1978)对高空冷涡对 TC 增强的两个有利作用进行了总结:减少冷涡南侧的垂直风切变,以及由于冷涡南侧和东侧存在发散的外流使得对流层上层的质量辐散增加,从而有利于 TC 强度的增强。许健民和王友恒(1979)指出冷涡的存在能为 TC 的增强提供有利的环流条件,冷涡的外部云带里提供了有利于扰动存在的上升运动,冷涡的中心提供了扰动存在所必需的补偿的下沉运动,两者相互补偿使得扰动得以维持和发展。李崇银(1986)从动力学的角度对高空冷涡对 TC 强度的变化进行了研究,结果表明,高空冷涡会激发对流层上部的上升运动,对扰动的不稳定发展有促进作用,从而有利于 TC 强度的增强。此外,许多研究还表明高空冷涡会对 TC 的快速增强过程产生影响。Li et al(2012)研究表明 2010 年台风 Meranti 近海快速增强,与 TC 附近的冷涡为 TC 提供了正涡度,存在着密切的关系。冷涡与低层的暖湿气团相结合,增加了大气中的垂直不稳定性,有利于 TC 环流中的对流发展,并且通过潜热释放,使得 TC 暖中心得到加强。

尽管很多研究显示,高空冷涡的存在有利于 TC 强度的增强,但也有研究认为,高空冷涡对 TC 强度

变化的影响相对较小(Wei et al, 2016; Persing et al, 2002)。还有研究指出当高空冷涡与 TC 之间的相对距离较近时,强的垂直切变会成为负面影响的主导因素,从而导致 TC 的强度被迅速削弱(唐章敏, 1982; Yan et al, 2021; Chen and Wu, 2023)。

3 结论和展望

本文回顾了干冷空气影响 TC 强度变化的研究进展,包括干冷空气的侵入位置、强度以及冷性天气系统对 TC 强度变化的影响。尽管目前在干冷空气影响 TC 强度变化方面已经取得了一定进展,但大多数研究还是集中在对 TC 个例的研究和分析上,仍然没有形成完整的理论体系或概念模型,也很难对 TC 的强度变化进行定量的估测。这一方面是受缺乏精细化的探测数据和高分辨率的数值模拟的限制,另一方面是目前对于干冷空气影响 TC 强度变化的机制认识还不够全面。TC 的强度与其内部的结构存在着密切的关系,干冷空气的侵入会对 TC 的结构产生明显的影响,进而影响 TC 强度的变化(程正泉等, 2012; 于玉斌, 2012; Ma et al, 2013)。

第十届世界气象组织热带气旋国际研讨会指出对于 TC 强度变化的研究仍然是一个极具研究价值的领域。目前对于干冷空气的活动影响 TC 强度变化的方向仍然存在一些不清晰的科学问题,因此本文从以下三个方面对该方向的未来研究进行展望:

(1) 加强对干冷空气影响 TC 强度变化物理本质的理论认识,可将研究重点聚焦在干冷空气对 TC 的内部精细化结构的改变,以及这种改变是否是造成 TC 强度变化的本质上,为进一步研究引起 TC 强度变化前后的动力学和热力学过程与周围环境的相互作用等方面打好理论基础。

(2) 目前关于干冷空气影响 TC 强度变化的大多数研究还是集中在定性的研究上,在未来的研究中应该注重定量关系的探寻,例如:冷空气对 TC 强度变化的“临界值”,不同高度的干冷空气对 TC 强度变化影响的差异,干冷空气影响 TC 强度变化的速率快慢以及高层强迫系统对 TC 强度变化的影响程度等方面。

(3) 在冷性天气系统与 TC 强度变化的研究中,对冷性天气系统与 TC 相互作用的持续时间和程度的判定方式需进行更深入的研究。此外,高空槽的几何形状、高空冷涡的强度以及冷性天气系统与 TC

的相对位置对 TC 强度变化的直接影响和间接影响等方面也是冷性天气系统与 TC 强度相互作用的重要研究领域。与此同时,干冷空气对 TC 强度变化的影响是否与 TC 自身的尺度、强弱以及垂直结构存在关系等,也需要进行深入的探索。

参考文献

- 蔡芎宁,陈涛,湛芸,等,2022. 对流层高层冷涡对“21·7”河南持续性极端暴雨影响分析[J]. 气象,48(5):545-555. Cai X N, Chen T, Chen Y, et al, 2022. Dynamic impact of upper tropospheric cold low on persistent extreme rainstorm of Henan during 17-22 July 2021[J]. Meteor Mon, 48(5):545-555(in Chinese).
- 陈联寿, 2006. 热带气旋研究和业务预报技术的发展[J]. 应用气象学报, 17(6):672-681. Chen L S, 2006. The evolution on research and operational forecasting techniques of tropical cyclones[J]. J Appl Meteor Sci, 17(6):672-681(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:137-140, 405-410, 423-428. Chen L S, Ding Y H, 1979. An Introduction to the Western Pacific Typhoons[M]. Beijing: Science Press:137-140, 405-410, 423-428(in Chinese).
- 程正泉,陈联寿,李英, 2012. 登陆热带气旋海马(0421)变性加强的诊断研究[J]. 气象学报, 70(4):628-641. Cheng Z Q, Chen L S, Li Y, 2012. Diagnosis of the extra-tropical transition of landfalling Tropical Cyclone Haima(2004)[J]. J Meteor Sin, 70(4):628-641(in Chinese).
- 狄利华,姚学祥,解以扬,等, 2008. 冷空气入侵对 0509 号台风“麦莎”变性的作用[J]. 南京气象学院学报, 31(1):18-25. Di L H, Yao X X, Xie Y Y, et al, 2008. Impacts of cold air intrusion on extra-tropical transition of Typhoon Matsa[J]. J Nanjing Inst Meteor, 31(1):18-25(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).
- 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).
- 雷小途, 2021. 中国台风联防与科研协作及其对中国台风学科发展的作用综述[J]. 气象学报, 79(3):531-540. Lei X T, 2021. Overview of typhoon prevention and cooperative research and their contribution to typhoon study in China[J]. Acta Meteor Sin, 79(3):531-540(in Chinese).
- 李崇银, 1983. 环境流场对台风发生发展的影响[J]. 气象学报, 41

- (3):275-284. Li C Y, 1983. The effect of ambient flow on generation and development of typhoon[J]. *Acta Meteor Sin*, 41(3): 275-284(in Chinese).
- 李崇银, 1986. TUTT 对台风形成作用的动力学研究[J]. *气象科学研究院院刊*, 1(2): 158-164. Li C Y, 1986. A dynamic study on the role of TUTT in the generation of typhoon[J]. *J Acad Meteor Sci*, 1(2): 158-164(in Chinese).
- 李华实, 廖胜石, 李露芳, 等, 2016. 1409 超强台风“威马逊”近海急剧加强特征及成因分析[J]. *气象研究与应用*, 37(1): 47-51. Li H S, Liao S S, Li L F, et al, 2016. Characteristics and cause analysis of Super Typhoon(No. 1409) “Rammasun” rapid strengthening in offshore area[J]. *Meteor Res Appl*, 37(1): 47-51(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).
- 李宪之, 1956. 台风生成的综合学说[J]. *气象学报*, 27(2): 86-100. Li X Z, 1956. A comprehensive theory of typhoon generation[J]. *Acta Meteor Sin*, 27(2): 86-100(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[J]. *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)[J]. *Acta Meteor Sin*, 64(5): 552-563(in Chinese).
- 李媛, 赵宇, 李婷, 等, 2014. 一次台风远距离暴雨中的干侵入分析[J]. *气象科学*, 34(5): 536-542. Li Y, Zhao Y, Li T, et al, 2014. Analysis on dry intrusion of a remote typhoon rain[J]. *J Meteor Sci*, 34(5): 536-542(in Chinese).
- 李泽椿, 张玲, 钱奇峰, 等, 2020. 中央气象台台风预报业务的发展及思考[J]. *大气科学学报*, 43(1): 10-19. Li Z C, Zhang L, Qian Q F, et al, 2020. The development and consideration of typhoon forecast operation of National Meteorological Center[J]. *Trans Atmos Sci*, 43(1): 10-19(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).
- 刘辉, 董克勤, 1987. 环境温度场对台风等扰动发展和移动的影响[J]. *气象学报*, 45(2): 188-194. Liu H, Dong K Q, 1987. Effects of the environment temperature gradient on the development and movement of tropical disturbance[J]. *Acta Meteor Sin*, 45(2): 188-194(in Chinese).
- 刘景秀, 1978. 冷涡与台风[J]. *气象*, 4(8): 6-7. Liu J X, 1978. Cold vortex and typhoon[J]. *Meteor Mon*, 4(8): 6-7(in Chinese).
- 陆佳麟, 郭品文, 2012. 入侵冷空气强度对台风变性过程的影响[J]. *气象科学*, 32(4): 355-364. Lu J L, Guo P W, 2012. Impacts of the intrusion intensity of cold air on extratropical transition of Typhoon Krosa[J]. *J Meteor Sci*, 32(4): 355-364(in Chinese).
- 石晨, 翟盘茂, 廉毅, 2023. 高空切断冷涡研究进展[J]. *气象*, 49(5): 513-524. Shi C, Zhai P M, Lian Y, 2023. Advances in research of upper level cut-off cold vortex[J]. *Meteor Mon*, 49(5): 513-524(in Chinese).
- 舒锋敏, 罗森波, 2010. 台风“海高斯”过程及登陆减弱后再次加强的影响因素分析[J]. *热带气象学报*, 26(3): 317-324. Shu F M, Luo S B, 2010. The process analysis of “Higos” and the influencing factors of reinforcing again after landing to weaken[J]. *J Trop Meteor*, 26(3): 317-324(in Chinese).
- 束家鑫, 陈联寿, 1981. 中国台风研究和业务预报的评述[C]//上海国际台风学术讨论会译文集. 上海台风研究所. Shu J X, Chen L S, 1981. A review of typhoon research and operational forecasting in China[C]//Shanghai International Typhoon Symposium, Translated Proceedings, Shanghai Typhoon Research Institute(in Chinese).
- 沈阳, 吴海英, 孙燕, 等, 2020. 热带气旋“利奇马”(1909)暖心演变分析及变性过程探讨[J]. *气象科学*, 40(1): 53-64. Shen Y, Wu H Y, Sun Y, et al, 2020. Analysis on warm core variation and extratropical transition of Tropical Cyclone “Lekima”(1909)[J]. *J Meteor Sci*, 40(1): 53-64(in Chinese).
- 唐章敏, 1982. 西风带高空冷涡叠加使台风减弱的物理过程分析[J]. *气象科技*, (3): 51-55. Tang M Z, 1982. Analysis on physical process of typhoon decaying under its superposing with an upper cold vortex over the westerly zone[J]. *Meteor Sci Technol*, (3): 51-55(in Chinese).
- 王洪勋, 诸晓明, 张建海, 2009. 冷空气侵入对台风“罗莎”暴雨增幅的作用[J]. *广东气象*, 31(1): 48-50. Wang H X, Zhu X M, Zhang J H, 2009. The role of cold air intrusion on the rainfall increase of Typhoon Rosa[J]. *Guangdong Meteor*, 31(1): 48-50(in Chinese).
- 王远超, 2006a. 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, 2006a. Study on the rapid change of Typhoon 0214(Vongfong) intensity[J]. *Ocean Forecasting*, 23(1): 44-47(in Chinese).
- 王远超, 2006b. 0518 号台风达维(Damrey)强度突然增强的诊断分析[J]. *广西气象*, 27(S1): 58-59. Wang Y C, 2006b. Diagnostic analysis of the sudden increase in intensity of Typhoon 0518(Damrey)[J]. *J Guangxi Meteor*, 27(S1): 58-59(in Chinese).
- 王允宽, 刘俊清, 黄中华, 1988. 台风形成中冷空气作用的模拟实验[J]. *大气科学*, 12(4): 374-381. Wang Y K, Liu J Q, Huang Z H, 1988. An experimental simulation about the influences of cool air on the formation of typhoon[J]. *Sci Atmos Sin*, 12(4): 374-381(in Chinese).
- 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).
- 魏应植, 吴陈锋, 林长城, 等, 2008. 冷空气侵入台风“珍珠”的多普勒雷达回波特征[J]. *热带气象学报*, 24(6): 599-608. Wei Y Z, Wu C F, Lin C C, et al, 2008. Doppler radar echo characteristics for

- cold air intruding into Typhoon Chanchu[J]. *J Trop Meteor*, 24(6):599-608(in Chinese).
- 吴雪,端义宏,2013. 超强台风梅花(1109)强度异常减弱成因分析[J]. *气象*, 39(8):965-974. Wu X, Duan Y H, 2013. Analysis on the intensity change in an abnormal weakening of Super Typhoon Muifa[J]. *Meteor Mon*, 39(8):965-974(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):1195-1208. 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):1195-1208(in Chinese).
- 许健民,王友恒,1979. 夏季西北太平洋热带对流层上部冷涡的分析[J]. *气象学报*, 37(3):22-31. Xu J M, Wang Y H, 1979. Some synoptic aspects of cold vortexes of tropical upper troposphere over Northwest Pacific in summer[J]. *Acta Meteor Sin*, 37(3):22-31(in Chinese).
- 徐祥德,1986. 环境动力、热力因素对台风发生、发展影响的数值试验[J]. *大气科学*, 10(3):286-290. Xu X D, 1986. Ambient dynamic and thermodynamic effects on genesis and development of typhoon[J]. *Sci Atmos Sci*, 10(3):286-290(in Chinese).
- 徐亚梅,伍荣生,2003. 南半球冷空气入侵与热带气旋的形成[J]. *气象学报*, 61(5):540-547. Xu Y M, Wu R S, 2003. The effects of cold surges from Southern Hemisphere on tropical cyclone formation[J]. *Acta Meteor Sin*, 61(5):540-547(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).
- 閻俊岳,张秀芝,陈乾金,等,1995. 热带气旋迅速加强标准的研究[J]. *气象*, 21(5):9-13. Yan J Y, Zhang X Z, Chen Q J, et al, 1995. The standard of rapidly intensified tropical cyclones[J]. *Meteor Mon*, 21(5):9-13(in Chinese).
- 杨成彬,郑祖光,王雨,1994. 用非线性模型研究环境温度场和涡度场对台风发生、发展的影响[J]. *大气科学*, 18(S1):810-819. Yang C B, Zheng Z G, Wang Y, 1994. The studies of impact of environment and vorticity on formation and development of typhoon[J]. *Sci Atmos Sin*, 18(S1):810-819(in Chinese).
- 姚秀萍,于玉斌,2005. 2003年梅雨期干冷空气的活动及其对梅雨降水的作用[J]. *大气科学*, 29(6):973-985. Yao X P, Yu Y B, 2005. Activity of dry cold air and its impacts on Meiyu rain during 2003 Meiyu period[J]. *Chin J Atmos Sci*, 29(6):973-985(in Chinese).
- 姚增权,魏鼎文,1985. 冷空气对台风影响的流体动力学模拟实验研究[J]. *气象学报*, 43(1):53-62. Yao Z Q, Wei D W, 1985. The actions of the cool air on the tropical cyclone: an experimental study[J]. *Acta Meteor Sin*, 43(1):53-62(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,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).
- 中国气象局,1996. “八·五”攻关办:85-906-05 课题专辑[C]. 北京:气象出版社. China Meteorological Administration, 1996. “Eighth Five-Year Plan” Tackling Office:85-906-05 Project Album[C]. Beijing:China Meteorological Press(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).
- Avila L A, 1998. Forecasting tropical cyclone intensity changes: an operational challenge[C]//Special Sessions on Tropical Cyclone Intensity Change. Phoenix, 1-3.
- Bhalachandran S, Haddad Z S, Hristova-Veleva S M, et al, 2019. The relative importance of factors influencing tropical cyclone rapid intensity changes[J]. *Geophys Res Lett*, 46(4):2282-2292.
- Bosart L F, Bracken W E, Molinari J, et al, 2000. Environmental influences on the rapid intensification of Hurricane Opal(1995) over the Gulf of Mexico[J]. *Mon Wea Rev*, 128(2):322-352.
- Brand S, 1973. Rapid intensification and low-latitude weakening of tropical cyclones of the western North Pacific Ocean[J]. *J Appl Meteor*, 12(1):94-103.
- Cangialosi J P, Blake E, DeMaria M, et al, 2020. Recent progress in tropical cyclone intensity forecasting at the National Hurricane Center[J]. *Wea Forecasting*, 35(5):1913-1922.
- Chen L S, 2012. Research progress on the structure and intensity change for the landfalling tropical cyclones[J]. *J Trop Meteor*, 18(2):113-118.
- Chen Y A, Wu C C, 2023. Environmental forcing of upper-tropospheric cold low on tropical cyclone intensity and structural change[J]. *J Atmos Sci*, 80(4):1123-1144.
- Colomb A, Kriat T, Leroux M D, 2019. On the rapid weakening of very intense Tropical Cyclone Hellen(2014)[J]. *Mon Wea Rev*, 147(8):2717-2737.
- Colton D E, 1973. Barotropic scale interactions in the tropical upper troposphere during the northern summer[J]. *J Atmos Sci*, 30(7):1287-1302.
- DeMaria M, Franklin J L, Onderlinde M J, et al, 2021. Operational forecasting of tropical cyclone rapid intensification at the National Hurricane Center[J]. *Atmosphere*, 12(6):683.

- DeMaria M, Kaplan J, Baik J J, 1993. Upper-level eddy angular momentum fluxes and tropical cyclone intensity change[J]. *J Atmos Sci*, 50(8):1133-1147.
- Elsberry R L, Lambert T D B, Boothe M A, 2007. Accuracy of Atlantic and eastern North Pacific tropical cyclone intensity forecast guidance[J]. *Wea Forecasting*, 22(4):747-762.
- Fei L, Xie Z Y, Qiu J R, 1983. Influence of cold vortex over subtropical high level on typhoon tracks[J]. *Acta Oceanol Sin*, 2(1):22-33.
- Fischer M S, Tang B H, Corbosiero K L, 2019. A climatological analysis of tropical cyclone rapid intensification in environments of upper-tropospheric troughs[J]. *Mon Wea Rev*, 147(10):3693-3719.
- Galarneau T J, McTaggart-Cowan R, Bosart L F, et al, 2015. Development of North Atlantic tropical disturbances near upper-level potential vorticity streamers[J]. *J Atmos Sci*, 72(2):572-597.
- Gray W M, 1968. Global view of the origin of tropical disturbances and storms[J]. *Mon Wea Rev*, 96(10):669-700.
- Hamaguchi Y, Takayabu Y N, 2021. An initiation process of tropical depression-type disturbances under the influence of upper-level troughs[J]. *J Atmos Sci*, 78(12):4001-4019.
- 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.
- Holliday C R, Thompson A H, 1979. Climatological characteristics of rapidly intensifying typhoons[J]. *Mon Wea Rev*, 107(8):1022-1034.
- Huang X G, Peng X D, Fei J F, et al, 2021. Evaluation and error analysis of official tropical cyclone intensity forecasts during 2005—2018 for the western North Pacific[J]. *J Meteor Soc Japan*, 99(1):139-163.
- Ito H, 1963. Aspects of typhoon development—As viewed from observational data in the lower troposphere[C]//Tokyo Tech Report, No. 21, Meteor. Agency. Tokyo:106-116.
- 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.
- Kaplan J, DeMaria M, Knaff J A, 2010. A revised tropical cyclone rapid intensification index for the Atlantic and eastern North Pacific Basins[J]. *Wea Forecasting*, 25(1):220-241.
- Kaplan L D, 1953. The impulsive generation of certain changes in the tropospheric circulation[J]. *J Atmos Sci*, 10(4):306-307.
- Kim H M, Jung B J, 2009. Singular vector structure and evolution of a recurring tropical cyclone[J]. *Mon Wea Rev*, 137(2):505-524.
- Kimball S K, Evans J L, 2002. Idealized numerical simulations of hurricane-trough interaction[J]. *Mon Wea Rev*, 130(9):2210-2227.
- Klein P M, Harr P A, Elsberry R L, 2002. Extratropical transition of western North Pacific tropical cyclones: midlatitude and tropical cyclone contributions to reintensification[J]. *Mon Wea Rev*, 130(9):2240-2259.
- Komaromi W A, Doyle J D, 2018. On the dynamics of tropical cyclone and trough interactions[J]. *J Atmos Sci*, 75(8):2687-2709.
- Leroux M D, 2014. Topic 2. 5 Intensity change: external influences [C]//Proceedings of the 8th International Workshop on Tropical Cyclones. Jeju Island; WMO:2. 5. 0-2. 5. 8.
- 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 Y, Guo L X, Xu Y L, et al, 2012. Impacts of upper-level cold vortex on the rapid change of intensity and motion of Typhoon Meranti (2010)[J]. *J Trop Meteor*, 18(2):207-219.
- Li Y, Tang Y M, Toumi R, et al, 2022. Revisiting the definition of rapid intensification of tropical cyclones by clustering the initial intensity and inner-core size[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 127(20):e2022JD036870.
- Liao Y, Wang Y Q, Zhou J L, et al, 2020. A comparative study on the effect of upstream trough on intensity changes of two types of tropical cyclones during extratropical transition[J]. *Asia-Pacific J Atmos Sci*, 56(1):131-146.
- Ma Z H, Fei J F, Huang X G, 2019. A definition of rapid weakening for tropical cyclones over the western North Pacific[J]. *Geophys Res Lett*, 46(20):11471-11478.
- Ma Z H, Fei J F, Liu L, et al, 2013. Effects of the cold core eddy on tropical cyclone intensity and structure under idealized air-sea interaction conditions[J]. *Mon Wea Rev*, 141(4):1285-1303.
- Paterson L A, Hanstrum B N, Davidson N E, et al, 2005. Influence of environmental vertical wind shear on the intensity of hurricane-strength tropical cyclones in the Australian region[J]. *Mon Wea Rev*, 133(12):3644-3660.
- Patla J E, Stevens D, Barnes G M, 2009. A conceptual model for the influence of TUTT cells on tropical cyclone motion in the Northwest Pacific Ocean[J]. *Wea Forecasting*, 24(5):1215-1235.
- Peirano C M, Corbosiero K L, Tang B H, 2016. Revisiting trough interactions and tropical cyclone intensity change[J]. *Geophys Res Lett*, 43(10):5509-5515.
- Persing J, Montgomery M T, Tuleya R E, 2002. Environmental interactions in the GFDL hurricane model for Hurricane Opal[J]. *Mon Wea Rev*, 130(2):298-317.
- Qian Y K, Liang C X, Liang Q Q, et al, 2011. On the forced tangentially-averaged radial-vertical circulation within vortices. Part II: the transformation of Tropical Storm Haima(2004)[J]. *Adv Atmos Sci*, 28(5):1143-1158.
- Qian Y K, Liang C X, Peng S Q, et al, 2016. A horizontal index for the influence of upper-level environmental flow on tropical cyclone intensity[J]. *Wea Forecasting*, 31(1):237-253.
- Qiu W Y, Wu L G, Ren F M, 2020. Monsoonal influences on offshore rapid intensification of landfalling typhoons in a sheared environment over the South China Sea[J]. *Wea Forecasting*, 35(2):623-634.
- 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.
- Sadler J C, 1976. A role of the tropical upper tropospheric trough in early season typhoon development[J]. *Mon Wea Rev*, 104(10):1266-1278.
- Sadler J C, 1978. Mid-season typhoon development and intensity changes and the tropical upper tropospheric trough[J]. *Mon Wea Rev*, 106(8):1137-1152.
- Shi J J, Chang S, Raman S, 1997. Interaction between Hurricane Florence(1988) and an upper-tropospheric westerly trough[J]. *J Atmos Sci*, 54(9):1231-1247.
- Shieh O H, Fiorino M, Kucas M E, et al, 2013. Extreme rapid intensification of Typhoon Vicente(2012) in the South China Sea[J]. *Wea Forecasting*, 28(6):1578-1587.
- Titley D W, Elsberry R L, 2000. Large intensity changes in tropical cyclones: a case study of Supertyphoon Flo during TCM-90[J]. *Mon Wea Rev*, 128(10):3556-3573.
- Wang H, Yu Y B, Xu H X, et al, 2023. A numerical study on the effects of a midlatitude upper-level trough on the track and intensity of Typhoon Bavi(2020)[J]. *Front Earth Sci*, 10:1056882.
- Wei N, Li Y, Zhang D L, et al, 2016. A statistical analysis of the relationship between upper-tropospheric cold low and tropical cyclone track and intensity change over the western North Pacific[J]. *Mon Wea Rev*, 144(5):1805-1822.
- Wood K M, Ritchie E A, 2015. A definition for rapid weakening of North Atlantic and eastern North Pacific tropical cyclones[J]. *Geophys Res Lett*, 42(22):10091-10097.
- Yan Z Y, Ge X Y, Wang Z, et al, 2021. Understanding the impacts of upper-tropospheric cold low on Typhoon Jongdari(2018) using piecewise potential vorticity inversion[J]. *Mon Wea Rev*, 149(5):1499-1515.
- Yin-Mao Wang M, Tai-Jen Chen G, Wang C C, et al, 2012. A case study of the cutoff process and latent heating effect in an upper-level cold-core low during the Mei-Yu season in East Asia[J]. *Mon Wea Rev*, 140(6):1725-1747.
- Yu H, Kwon H J, 2005. Effect of TC-trough interaction on the intensity change of two typhoons[J]. *Wea Forecasting*, 20(2):199-211.
- Zhang G, Wang Z, Dunkerton T J, et al, 2016. Extratropical impacts on Atlantic tropical cyclone activity[J]. *J Atmos Sci*, 73(3):1401-1418.

(本文责编:戴洋)