

黄燕燕,蒙伟光,冯业荣,等,2023. 华南登陆台风降水不对称性及持续性问题[J]. 气象,49(4):385-399. Huang Y Y, Meng W G, Feng Y R, et al, 2023. Problems in asymmetry and sustainability of landfalling typhoon precipitation over South China[J]. Meteor Mon, 49(4):385-399(in Chinese).

## 华南登陆台风降水不对称性及持续性问题<sup>\*</sup>

黄燕燕<sup>1</sup> 蒙伟光<sup>1</sup> 冯业荣<sup>1</sup> 张诚忠<sup>1</sup> 陈德辉<sup>1,2</sup> 郑 彬<sup>1</sup>

1 中国气象局广州热带海洋气象研究所/广东省区域数值天气预报重点实验室, 广州 510080

2 国家气象中心, 北京 100081

**提 要:** 针对登陆华南台风降水及模式预报存在的突出问题,就当前关于登陆台风降水分布的不对称性及台风登陆后期持续性暴雨发生机理的研究状况进行回顾和分析,提出了需要深入研究的相关科学问题及模式预报技术改进的应对措施,为促进登陆华南台风暴雨预报工作和效果的不断改进提供参考。分析指出环境风场垂直切变、低层气团边界(如冷池边界)、干冷空气侵入、中尺度对流系统以及地形等是造成登陆华南台风降水不对称分布的重要影响因素。台风登陆后期华南发生的持续性暴雨往往与季风活动增强相关,活跃的西南季风为强降水中尺度对流系统(MCSs)发展提供有利条件,MCSs通过潜热加热反馈于大尺度环流,可使台风涡旋环流和西南季风得以维持并致使 MCSs 反复发生发展、暴雨持续。开展相关科学问题的深入研究,有针对性地考察评估目前模式的预报性能并提出有效改进方案,是进一步提高模式预报效果的重要途径。

**关键词:** 登陆华南台风,降水不对称性,持续性暴雨,形成机理,模式预报

中图分类号: P457

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.050501

## Problems in Asymmetry and Sustainability of Landfalling Typhoon Precipitation over South China

HUANG Yanyan<sup>1</sup> MENG Weiguang<sup>1</sup> FENG Yerong<sup>1</sup> ZHANG Chengzhong<sup>1</sup>  
CHEN Dehui<sup>1,2</sup> ZHENG Bin<sup>1</sup>

1 Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology/Guangdong Provincial Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, CMA, Guangzhou 510080

2 National Meteorological Centre, Beijing 100081

**Abstract:** In view of the prominent problems in the precipitation and model forecasts of the landfalling typhoons in South China, this paper reviews and analyzes the current researches on the asymmetry of the precipitation distribution of the landfalling typhoons and the mechanism of the persistent torrential rains in the later period of typhoons. Relevant scientific issues that need in-depth study and measures of improving numerical predictions are put forward, in order to provide references for the improvement of the forecast of heavy rainfall associated with tropical cyclone (TC) landfall in South China. The analysis reveals that the vertical shear of the ambient field, the boundary of the low-level air mass (such as the boundary of the cold pool), the intrusion of dry and cold air, mesoscale convective systems (MCSs) and the local topography are important factors causing the asymmetric distribution of precipitation of the landfalling typhoons in South China. The occurrence of persistent torrential rains in South China during the late period of landfalling

<sup>\*</sup> 广东省基础与应用基础研究基金项目(2022A1515011870、2021A1515011399)、国家自然科学基金项目(41705089、U1811464)和广东省水利科技创新项目(2022-01)共同资助

2022 年 1 月 10 日收稿; 2022 年 5 月 12 日收修定稿

第一作者: 黄燕燕, 主要从事数值预报、台风、暴雨等研究. E-mail: yyhuang@gd121.cn

通讯作者: 蒙伟光, 主要从事暴雨、强降水对流系统等高影响天气机理研究和数值模拟. E-mail: wgmeng@gd121.cn

typhoons is often related to the increase in summer monsoon activity. The active southwest monsoon tends to provide favorable conditions for the development of MCSs in torrential rains. Then, MCSs feed back to the large-scale circulation through latent heat heating, contributing to the maintenance of TC vortex circulation and the southwest monsoon, and cause iterative development of MCSs, resulting in persistent torrential rains. To further improve the forecast of models, it is essential to investigate and evaluate the performance of the current models, carry out in-depth research on the related scientific issues, and then propose effective improvement plans.

**Key words:** landfalling typhoon in South China, precipitation asymmetry, persistent torrential rain, formation mechanism, model forecast

## 引 言

登陆台风及其残余所带来的暴雨常为受影响地区造成极大经济和生命财产损失,如何准确地预报出台风暴雨发生的区域及发生强度对减轻台风登陆所带来的灾害尤为关键。过去二三十年,得益于数值天气预报发展,台风路径预报已经有了很大改进(McAdie and Lawrence, 2000; Elsberry, 2005)。然而,对台风强度、结构预报的改进则进展缓慢,特别是登陆台风降水尤其是暴雨的准确预报仍然是目前业务预报工作中具有挑战性的问题(Wang and Wu, 2004; Lonfat et al, 2004; Houze, 2010; Villarini et al, 2011)。

登陆台风降水是多尺度系统相互作用的结果。大尺度系统制约和孕育小尺度系统的发生和发展,小尺度系统产生以后发展壮大,反过来又对大尺度系统起反馈作用,使暴雨能继续维持或加强。关于登陆我国台风的降水,Chen et al(2010)曾针对降水具体形成区域不同,把与登陆台风相关的降水分为几种类型。类型 A: 台风内核区降水;类型 B: 台风外围雨带降水,又可分为 B1 和 B2 两种类型, B1 为台风北侧倒 V 型槽内形成的降水, B2 为发生于台风东南、西南侧与低层切变相关的降水;类型 C: 由中小尺度系统(如龙卷)造成的降水,此类降水通常发生在登陆台风的东北象限;类型 D: 不稳定降水,此类降水常发生在高层有冷空气与低层暖湿空气发生重叠的台风内核的南部地区;类型 E: 台风外围雨带中由飑线所带来的降水,通常发生在台风移向的前方并可能伴有龙卷的活动;类型 F: 发生于与台风有一定距离位置上的所谓“远距离”降水,例如发生于西风带槽前的降水,或者远离台风环流而由局地地形引起的辐合区中发生的降水。由此可见,登陆

台风降水问题极其复杂,不同区域降水由于具体的环境条件不同其形成机理可能不尽相同。因此在了解共同特征的基础上,针对不同登陆台风过程所表现出的降水特征,提出具体科学问题并开展相关的深入研究,对于深入理解登陆台风降水的形成机理、改进模式预报的技术很有必要。

就登陆台风暴雨的形成原因,Chen et al(2010)十多年前在对登陆台风降水及预报问题进行评述时曾总结指出,丰富的水汽输送、台风的“变性”(ET)过程、台风与季风(涌)的相互作用、台风环流中尺度对流系统(MCSs)的活动以及陆面过程、地形效应、边界层能量转换过程等,这些影响因素和物理机制与台风暴雨的发生都有密切关系。其综述报告对这些因素的具体影响过程以及研究取得的工作成果进行了总结,并就包括模式预报等相关问题的研究和发展方向提出了应对措施。在肯定所取得成效的同时也指出,登陆台风的定量降水预报技术所取得的进步离实际防灾减灾工作要求仍有不小距离,进一步加强登陆台风降水观测和预报技术改进工作仍有迫切的实际需求。

本文针对登陆华南台风降水预报存在的突出问题,对当前关于登陆台风降水分布不对称性及台风登陆后期持续暴雨发生机理的研究进行回顾和分析,提出需要深入研究的相关科学问题及模式预报技术改进的应对措施,为促进登陆华南台风降水预报工作和效果的不断改进提供参考。

## 1 国内外研究进展

### 1.1 台风登陆期间降水的不对称分布

台风降水是多尺度系统相互作用的结果,其中中小尺度对流系统活动对降水有关键的贡献。然而

由于这些中小尺度系统空间尺度小、时间变化快,目前仍难于进行预报,缺乏对于台风降水过程中这些内在中小尺度系统及其与环境场之间的多尺度复杂相互作用的认识是问题的关键。此外,由于台风接近陆地时,受到沿海和内陆地形及陆面过程等边界层状态的影响,使台风登陆期间的降水预报问题变得更为复杂,诸如沿海锋生、地形抬升、地形阻滞等过程都可引起登陆台风的降水结构发生改变,导致降水分布表现出明显的不对称性(Schwarz, 1970; Bosart and Dean, 1991; Atallah and Bosart, 2003; Colle, 2003)。

迄今为止,许多工作针对登陆台风降水不对称分布问题包括观测特征及物理机制等方面都开展了广泛研究。早期根据雨量站观测资料的分析发现,北半球沿海的降水多分布于登陆台风移动路径的右侧(Koteswaram and Gaspar, 1956; Miller, 1964)。这一特征在后来的一些观测分析研究和数值模拟试验结果中也都有发现,根据 Dunn and Miller(1960)的观点,登陆台风降水的这种不对称分布是由于台风右侧海陆之间地面摩擦存在梯度而引起的摩擦辐合造成。然而,随着观测资料的增多,不少分析结果也发现,另一些登陆台风的降水则是偏向于移动路径的左侧,活跃的对流和最大降水发生在台风移动路径的左侧。例如,基于移动雷达观测, Parrish et al(1982)就曾发现 1979 年飓风 Frederic(1979)的最大总雨量发生在其移动方向的左侧。Blackwell(2000)针对 1997 年飓风 Danny 的研究也发现了雨量分布的这种不对称结构。Corbosiero and Molinari(2002)基于美国国家闪电定位监测网资料的分析还发现,闪电发生的最大频率在台风移近陆地时也是多发生在台风左侧,位于环境场风垂直切变的下风方向。部分工作研究台风移动路径和降水不对称之间的关系(张胜军等, 2005; 余贞寿等, 2009),发现相似路径台风个例的降水分布未必相似,有时有很大差异(余贞寿等, 2009; 孙建华等, 2006; 颜玲等, 2019)。如此看来,登陆台风降水分布的决定因素不仅仅是摩擦辐合和移动路径,其他的影响因子如台风强度、大尺度环境场条件、局地地形影响等必须予以考虑。近十多年来,不少工作从环境场风垂直切变、台风与西风带斜压系统之间相互作用、与季风之间相互作用等角度对登陆台风降水分布进行了更为深入和广泛的研究。

作为影响台风降水分布最重要的因素之一,环

境场风垂直切变(VWS)受到特别关注(Matyas, 2010)。现有的研究结果指出,环境场 VWS 与垂直运动和台风降水的不对称分布密切相关,很多情况下可导致强的降水主要集中在环境场 VWS 的下风方向,并且顺着台风环流作气旋式偏转倾向于出现在 VWS 下风方的左侧,由此还提出了台风降水分布所谓的“downshear-left”现象(Rogers et al, 2003)。为深入认识这一问题并为了避免其他影响因素对于 VWS 和降水分布存在关系所产生的混淆,Chen et al(2006)基于 TRMM 卫星降雨估计资料,重点针对远离陆地的台风降水结构与 VWS 的关系进行了分析,证实“downshear-left”现象确实存在,并且指出 VWS 和台风移动是控制台风降水不对称分布的两个最重要的影响因素,当切变方向和移动方向一致时,具有最大不对称性;当 850 ~ 200 hPa VWS 超过  $7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时, VWS 是降水不对称的主要决定因子(尤其台风内核区),中等到强切变环境中,降水不对称主要为“downshear-left”;当 VWS 较弱(低于  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )时,台风移动贡献较大,降水不对称主要分布在移向前方(尤其外围), 100 km 半径内降水不对称仍主要为“downshear-left”。一般来说,降水的不对称分布会随着 VWS 强度增大而表现得更为明显,而随着台风强度增强,降水的不对称结构表现减弱。

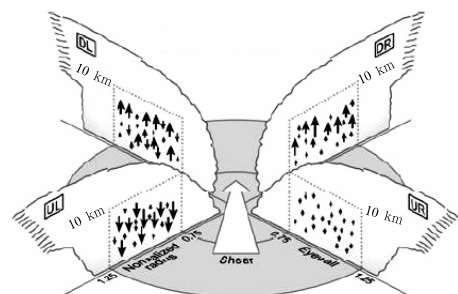
实际上,台风降水不对称分布的“downshear-left”现象并不仅局限于海洋上,在登陆台风降水中也存在,以上提及的一些针对实例的研究发现并非偶然。Yu et al(2015)基于 TRMM 卫星降雨估算资料针对登陆中国台风降水的统计分析发现,登陆中国的台风不仅在登陆期间而且在登陆后,其降水的分布都在很大程度上受到了大尺度环境场 VWS 的控制。统计分析结果发现,随着台风登陆点从华南变化到华东地区,登陆台风最大降水的位置有呈气旋式偏转的特征,最大降水位置这种气旋性偏转与 850 ~ 200 hPa VWS 方向的气旋性旋转密切相关。

我国作为受登陆台风影响最为频繁的国家之一,东南沿海和华南沿海台风暴雨占比明显高于内地(任福民等, 2011)。华南沿岸是最常受到登陆台风影响的地区之一,这里的登陆台风降水不对称分布问题一直也受到关注(Chan et al, 2004; Liu et al, 2007; Yu et al, 2015; 钮学新等, 2005; 冀春晓等, 2007; 岳彩军, 2009; 蔡菁等, 2017)。除上文提

及的 Yu et al(2015)的工作外,不少工作也发现这一地区登陆台风降水存在偏向于 VWS 下风方分布的不对称结构特征(Chan et al,2004;蔡菁等,2017;周海波等,2017)。基于卫星和雷达观测资料,Chan et al(2004)针对 1999 年登陆华南沿南 4 个台风的分析发现,台风强的对流开始时一般先出现在其移向的前方,而后偏移向于台风的左侧象限。Liu et al(2007)针对 1999—2005 年登陆华南 18 个台风的分析发现,其中的 10 个台风登陆时降水主要在其西侧发生增强,4 个台风登陆时强的对流主要出现在东侧,其余的 4 个台风降水则没有表现出明显的不对称性。Gao et al(2009)和 Yu et al(2010)针对 2006 年热带风暴 Billis 降水的分析也发现,风暴登陆华南后发生的降水也有偏向于 VWS 下风方的现象。

理论研究工作强调 VWS 对台风降水不对称分布的影响与台风涡旋本身对 VWS 作出响应而发生的倾斜有很大关系。Reasor et al(2013)应用 75 次针对飓风的机载雷达观测资料进行的合成分析发现,飓风涡旋确实有偏向于 VWS 方向发生倾斜的现象。其合成分析结果指出飓风内核区中的对流主要起始发展于 VWS 下风方右侧,但最大上升运动却是出现在紧邻 VWS 下风方的左侧,而且在整个 VWS 下风方左侧象限中低层的雷达回波最强、回波也最为深厚。相反在 VWS 上风方的左侧主要盛行下沉气流,尽管有大量的降水物质平流进入这一区域,但回波发展却受到很大抑制。Hence and Houze(2011)应用 TRMM 卫星降雨雷达资料进行的分析结果也发现了类似的特征,但同时也指出,降水分布与 VWS 的这种关系在内核雨带中表现更为突出,对外围雨带的影响不明显。DeHart et al(2014)较好地归纳了许多关于 VWS 可导致台风降水不对称分布的研究结果,并给出概念图:上升气流起始发展于 VWS 下风方的右侧,并在 VWS 下风方的左侧达到最强;VWS 上风方的左侧多盛行下沉气流,右侧垂直运动一般都比较弱(图 1)。垂直运动的这种分布与水物质平流相互配合,其结果导致台风最强的降水出现在 VWS 下风方的左侧,而在 VWS 上风方右侧降水最弱。

另外一个可对台风降水分布产生重要影响的因子是低层存在的气团边界,尤其是在环境场 VWS 较弱的情况下,气团边界的影响表现更明显。一般情况下,台风环境中低层存在的气团边界最主要的

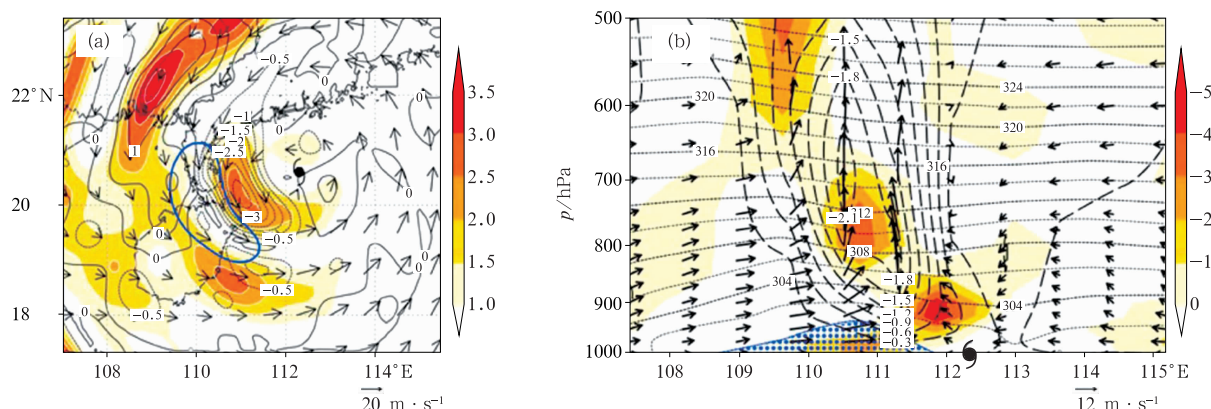


注:环境场 VWS 指向图的上方。

图 1 台风内核区中 VWS 可导致台风降水不对称分布的概念图(DeHart et al,2014)

Fig.1 Conceptual diagram of the asymmetric distribution of tropical cyclone (TC) precipitation caused by VWS in TC core zone (Quoted from DeHart et al, 2014)

表现是“冷池”界面,与降水在地面形成的对流“冷池”相联系。在中纬度地区,对流系统发展过程中经常可以观测到由水凝物蒸发驱动而在地面形成“冷池”的现象,由于“冷池”边界向外流出的气流对前沿新对流单体发展具有触发作用,“冷池”形成可对对流系统的持续发展产生重要影响。在台风内核环流中,由于缺乏有利于“冷池”形成的环境条件,一般情况很难观测到“冷池”的存在,但在台风外围雨带毗邻于有干空气入侵的环境中,“冷池”常可被观测到(Skwira et al,2005;Knupp et al,2006;Eastin et al,2012)。尽管具体的影响机制还不十分清楚,一般认为外围雨带中“冷池”的形成对台风内核对流活动的分布以及风暴本身的强度都可产生影响(Houze et al,2007),从而也影响登陆台风降水的分布。Meng and Wang(2016a)针对 2013 年低纬度地区登陆华南西部沿海的“尤特”的研究发现,其降水分布所表现出的不对称特征与“冷池”的形成有很大关系。登陆前“尤特”位于东北—西南向的环境场 VWS 中,降水明显偏向于 VWS 下风方分布于台风的西南象限,由于台风西北侧受来自于内陆干空气侵入的影响,为降水云下沉空气中水凝物的蒸发冷却提供了有利条件,台风西侧象限近地面有明显的“冷池”形成(图 2a)。利用锋生函数的诊断分析发现,在“冷池”与台风相邻的边界上,存在明显的锋生过程。基于准平衡  $Q$  矢量(张兴旺,1999)的诊断证实,通过“地转强迫”作用,锋生过程引起对流在“冷池”与台风相邻边界上强烈发展(图 2b),这是导致台风尤特登陆时降水主要集中在西侧象限的一个重要原因。



注:图 2a 中蓝色粗线和图 2b 中低层的蓝色点绘区表示“冷池”的位置,台风中心位置以台风符号表示。

图 2 基于 2013 年 8 月 14 日 00 时 ERA-Interim 再分析资料(a)台风尤特登陆前 6 h 的 925 hPa 的锋生函数分量(等值线,单位: $0.5 \times 10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )分布、位温梯度(填色,单位: $10^{-2} \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$ )、925 hPa 风矢,(b)经台风中心和 700 hPa 上升运动中心准平衡强迫(填色,单位: $10^{-15} \text{ K} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、位温(短虚线,单位:K)、垂直运动速度

( $\omega$ , 长等值虚线,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ )、风矢( $\omega$  放大 10 倍)的垂直剖面(Meng and Wang, 2016a)

Fig. 2 (a) Distribution of the frontogenesis functions at 925 hPa 6 hours before Typhoon Utor landfalling (contour, unit:  $0.5 \times 10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ), potential temperature gradients (colored, unit:  $10^{-2} \text{ K} \cdot \text{km}^{-1}$ ), and wind vectors at 925 hPa,

(b) vertical cross-sections of the quasi-balanced forcing (colored, unit:  $10^{-15} \text{ K} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), potential temperature (short dashed line, unit: K), vertical velocity ( $\omega$ , long dashed line, unit:  $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ), and the wind vectors ( $\omega$  multiplied by a factor of 10) along line across the 700 hPa maximum  $\omega$  through the TC center based on the ERA-Interim reanalysis data at 00 UTC 14 August 2013 (Quoted from Meng and Wang, 2016a)

地形抬升作用也是影响登陆台风降水的重要因子。地形越高、地形尺度越大,对台风暴雨的增幅作用越显著(陈联寿和孟智勇, 2001)。山地地形起伏也会增强地面对大气的拖曳效应使台风环流滞留,造成局地暴雨持续(Chen and Luo, 2004; 王凯等, 2021)。华南地形复杂、濒临南海,其地形和海陆分布与华南台风暴雨关系密切。太姥山、武夷山、南岭等山脉使南方暖湿气流强迫抬升,在迎风坡造成台风暴雨增幅(李江南等, 2004; 陈训来等, 2005)。此外,受山脉地理位置的影响山脉之间(如苍山和戴云山)形成“喇叭口”,气流受山脉阻挡后由于峡谷和地形抬升作用使辐合增强、台风降水增加(李江南等, 2005; 骆荣宗, 1997)。关于地形等下垫面环境因素对台风暴雨影响,可参看 Chen et al(2010)、李江南等(2003)、陈联寿等(2004)、程正泉等(2005)的研究。

登陆台风的“变性”(ET)过程与台风和西风带斜压系统之间的相互作用,不仅对台风强度维持和重新发展有重要影响,也引起了台风降水分布的改

变。关于台风 ET 问题的研究, Jones et al(2003)曾进行过全面的评述。台风 ET 一般发生在中纬度地区,华南地处较低纬度,与 ET 过程相关登陆台风问题的研究少有报道,因而与中纬度地区不同,登陆华南台风暴雨一般与 ET 过程关系不大。

中纬度冷空气到达华南后可对登陆台风降水不对称分布产生重要影响,往往通过影响台风的热力和动力结构导致台风暴雨(陈淑琴等, 2018; 董美莹等, 2009)。一定强度的冷空气的侵入可使台风热力结构变为不对称、斜压性增强(陈联寿和丁一汇, 1979; 张雪蓉等, 2021); 加强暖湿空气的辐合, 触发局地中小尺度对流、垂直运动更旺盛, 产生极端降水天气(陈鹏等, 2017), 造成台风降水不对称。过强或过弱的冷空气则均不利于台风暴雨出现(韩瑛和伍荣生, 2008)。

## 1.2 登陆台风降水的持续性

大多数台风由于携带强风和暴雨, 主要在登陆期间带来严重损害, 但另外的一些台风即使在其深

入内陆后仍可带来大范围的暴雨以至洪涝泛滥,导致更加严重生命财产损失。尤其是登陆后在某种条件下发生的残涡复苏所导致的台风环流长时间维持,其带来的影响更为严峻和致命。然而,由于台风残涡复苏往往发生在特殊环境条件下,与多尺度系统复杂的相互作用相联系,对其进行准确预报仍十分困难(Chen et al, 2010)。

我国著名的河南省“75·8”特大洪水,就是由于登陆台风妮娜深入内陆后其残涡复苏所导致(陈联寿和丁一汇, 1979; 陶诗言, 1980)。对华南造成类似影响的事件为 2006 年热带风暴碧利斯和 2013 年台风尤特。“碧利斯”登陆后在华南北部造成的持续性暴雨和所带来的洪水、泥石流等灾害导致了 843 人死亡和严重的经济财产损失(Gao et al, 2009)。“尤特”登陆后在华南地区移动缓慢,维持时间长达 4 d, 导致暴雨持续发生并引发严重洪涝灾害。在广东省东南部沿海的惠东县境内,“尤特”登陆后期记录到的 24 h 降雨量达到 924.3 mm, 打破了广东省日降雨量的历史最高纪录。这些台风登陆后与其他系统相互作用导致其环流在某一地区停滞少动,是造成此类持续性暴雨的重要条件(陈淑琴等, 2018)。

水汽输送是此类台风持续暴雨发生最重要的影响因素(杨舒楠等, 2021)。程正泉等(2009)曾比较分析了登陆后是否为我国带来强暴雨的两组台风的水汽输送情况,结果发现可带来强持续暴雨的登陆台风,其东南部往往都配置有强的水汽输送带,而弱降水的台风则没有这样的水汽输送带活动。李英等(2005)的数值试验研究证实,当这样的水汽输送带被人为切断时,模拟的降水将大为减少。

东亚季风活动由于携带有丰富的水汽和不稳定能量,其对台风降水的影响问题目前为止也得到了广泛研究(Chien and Kuo, 2011; Lee et al, 2012; Chen et al, 2014; 董美莹等, 2009; 叶成志和李昀英, 2011; 卢珊等, 2012)。Dong et al(2010)针对台风登陆中国大陆后,由于残涡复活而引起降水增强现象进行的研究发现,此类台风和降水增强过程的发生可分为两种类型,与台风登陆后的移动路径关系密切。登陆后向西和朝西南转向的台风,降水的增强多与季风增强导致季风涌云团活动频繁并与台风环流相互影响造成,而向北移动的台风降雨增强则主要是台风环流与其北侧西风槽的相互作用而引起。实际上华南地区发生的台风登陆后期降水增强现象

多属第一种类型,例如热带风暴碧利斯登陆后期引发的暴雨增强过程就是一个典型的例子。“碧利斯”在浙江沿海登陆后主要沿西南偏西路径移动并滞留于广西境内,在季风涌和风暴的相互作用下造成了持续暴雨的形成。台风尤特也属于此类,“尤特”在广东西部沿海登陆后开始时向北移动进入广西境内,然后移速减慢并发生偏转向西南方向移动,而由于季风活动增强以及镶嵌于其中的 MCSs 的频繁活动造成台风登陆后期持续暴雨发生。了解季风活动的变化及 MCSs 的活动对于此类持续暴雨形成的预报非常重要。

东亚夏季风活动的变化与低频振荡如准双周振荡(QBWO)、准 30~60 d 振荡(MJO)密切联系,这些现象都属于所谓的大气季节内振荡(ISO)。以往研究发现,与 ISO 相关的季风涡旋和台风环流的位置关系,对台风路径突变有重要影响(Harr and Elsberry, 1991; 1995; Chen and Huang, 2009; Ko and Hsu, 2006; 2009; Wu et al, 2011; Liang et al, 2011)。实际上,季风的这种低频振荡也会影响到季风涌的活动,从而也可引起台风降水的变化。Wu et al(2011)针对台风莫拉克登陆台湾引起南部地区发生破纪录降水过程的研究发现,台风涡旋与 QBWO 和 MJO 两种不同时间尺度低频振荡相对应气旋式环流位置的重合可引起台风东南侧西南季风增强,导致台风向西移动速度减慢,造成台风在台湾东部登陆后移向西北进入台湾海峡并作长时间停滞。同时指出,除引起台风移动路径发生改变外,低频振荡引起西南季风涌的增强对暴雨的形成也产生了重要影响,主雨带长时间停滞于台湾南部是多尺度系统相互作用的一种结果。Ge et al(2010)对“莫拉克”暴雨的研究也表明,季风涌的增强确实和季风低频振荡涡旋与台风位置的重合关系密切。他们还强调了暴雨导致的潜热加热对季风涌增强的影响,增强的季风涌为暴雨发生带来了更多的水汽,而潜热加热又进一步增强了西南季风的强度。

尽管不少工作都强调了季风涌和台风环流相互作用对于台风暴雨尤其是后期持续暴雨形成的重要影响,但针对给暴雨过程直接带来降水的季风云团或 MCSs 的研究工作仍比较少见。由于 MCSs 是镶嵌于季风中的主要降水对流系统,对其进行更加有针对性的研究很有必要。过去的工作,更多的是关



注那些由台风环流与冷空气侵入、地形抬升等因素相互作用所引发的 MCSs。根据观测及统计结果,此类 MCSs 多数形成发展于台风移向的前方,低层辐合、强的潜在不稳定以及高层辐散等是这些对流系统形成发展的有利条件(Chen et al, 2010; 张艳霞等, 2015)。而实际上,对于那些登陆后深入内陆并持续带来强降水的台风过程, MCSs 的形成发展并不仅限于由冷空气激发,尤其是那些活动于台风东南象限中与西南季风相关的 MCSs 更是如此。西南季风气流云带中往往可观测到对流云团的发展,这些深对流系统在适合的条件下往往可组织发展成尺度更大的 MCSs 或达到中尺度对流复合体(Maddox, 1980; 1983)标准从而带来更加丰富的降水。通过潜热加热的反馈作用,这些组织化发展的对流系统可对大尺度环境场形成反馈作用,进而对台风涡旋及季风环流的维持发展也将产生重要影响。

Meng and Wang(2016b)针对台风尤特登陆后期持续暴雨形成原因的分析结果进一步说明这一问题。“尤特”登陆后其环流的长时间维持与季风低频振荡气旋性涡旋的活动关系密切,只是相对于 MJO 气旋性涡旋来说,这一时期的 QBWO 涡旋发展更为明显并且尺度与台风涡旋相当、位置基本与台风环流重合,因此其对西南季风活动增强的作用更大。

在这样一个大背景中,西南季风活动增强导致台风环流东南侧对流云团活动频繁,其中不乏 MCSs 的活动。在带来强降水的同时,这些 MCSs 引起的潜热加热对大尺度环流也产生明显的反馈作用。图 3 为 Meng and Wang(2016b)分别由 ECMWF 的 ERA-Interim 资料计算得到的 24 h 平均视热源垂直积分  $\langle Q1 \rangle$  (Yanai et al, 1973) 的水平分布以及通过分段位涡反演得到的与加热作用相关的扰动高度场和风场。可以看到在台风环流东南一侧,由于 MCSs 频繁活动的贡献  $\langle Q1 \rangle$  存在一高值区,反演得出的扰动高度场和风场的分布表明,由加热引起的高度下降与台风环流对应良好,引起风速扰动最大出现在台风涡旋南—东南一侧,最大扰动风速达到  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,可达到背景风场的 1/3 左右,反映出 MCSs 对台风大尺度环流可形成正的反馈作用。

需要指出的是,不管是台风残涡复苏、台风环流与季风涌相互作用,或是台风环流中组织化发展的 MCSs 与大尺度环境场相互作用导致的持续性降水,都存在系统在某地停滞少动这一共同特点。可见,台风登陆后与其他系统相互作用导致降水系统在某一地区的停滞维持,是持续性降水发生的重要条件。

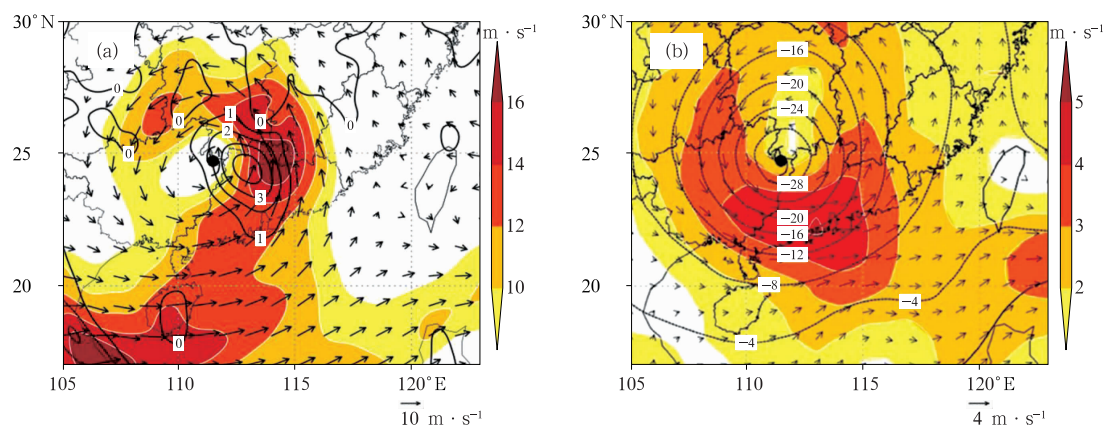


图3 基于 ERA-Interim 再分析资料的 2013 年(a)8月 15 日 12 时至 16 日 12 时 24 h 平均视热源垂直积分  $\langle Q1 \rangle$  的水平分布(等值线,单位:  $10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ )和 850 hPa 平均风场(风矢及填色区), (b)8月 16 日 00 UTC 850 hPa 上与潜热释放相关扰动位涡反演出的非线性平衡位势高度场(等值线,单位: gpm)和风场(风矢及填色区)(Meng and Wang, 2016b)

Fig. 3 (a) Horizontal distributions of the 24 h mean vertically integrated apparent heat source  $\langle Q1 \rangle$  (contour, unit:  $10^3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) and horizontal winds at 850 hPa (vector and colored) averaged from 12 UTC 15 to 12 UTC 16 August, (b) the nonlinear balanced geopotential height (contour, unit: gpm) and horizontal wind (vector and colored) at 850 hPa inverted from the middle to lower tropospheric perturbation potential vorticity related to latent heat release at 00 UTC 16 August 2013 based on the ERA-Interim reanalysis data (Quoted from Meng and Wang, 2016b)

此外,台风外围环流与高低空急流、西风槽、冷空气等西风带系统相互作用还可引起远距离持续性暴雨(陈联寿,2007;Cote,2007),如 2021 年台风烟花在河南引起的持续性强降水。台风远距离暴雨的主要产生机制是台风向暴雨区输送水汽,副热带高压加强低空急流水汽输送,地形动力强迫加强垂直运动和水汽堆积(丛春华,2011;陈淑琴等,2021;史文茹等,2021)。我国中东部地区的 27 个省份均有台风远距离暴雨事件发生,其高发区为环渤海地区和川陕交界处(丛春华,2011)。

## 2 关键科学问题和模式预报技术改进的思考

以上针对与华南登陆台风降水相关的两个突出问题即降水的不对称性和持续性问题,对当前的研究状况进行了简单的回顾。尽管不少工作都涉及到了问题的关键,但从中也可以看到,仍有许多问题需要进行更加深入和有针对性的研究。例如,尽管认识到环境场 VWS、气团边界以及地形抬升等因素,以及季风背景中 MCSs 及其与台风环流的相互作用等过程,都可导致登陆台风降水出现明显不对称或可造成降水持续发展,但其具体表现出的特征、影响过程如何,关键的物理机制是什么?这些都是改进目前台风定量降水及模式预报技术的基础问题,从天气气候特征角度对这些问题进行更加全面的分析,针对具体的科学问题从诊断分析角度开展更加广泛深入的机理分析,仍然非常必要。

### 2.1 相关的科学问题

就华南登陆台风降水不对称分布问题来说,目前只是了解到环境场 VWS 可能是重要的,但这种影响与台风的移动有什么具体的联系?其物理机制是怎样的?与其他的影响因素有什么样的关系?哪些因素起更主要作用?目前并不清楚。进一步了解以下问题可能是关键的。

(1)华南登陆台风降水的分布特征、环境场影响过程和机制。华南地区登陆台风降水分布有何特征?台风登陆前路径和登陆区域不同时降水的分布特征有何变化,与大尺度大气环流背景有什么关系?华南地区近海台风由于 VWS 引起的不对称结构多大程度上影响了台风登陆时降水的不对称分布,其影响过程和机制是怎样的?什么环境条件有利于台

风外围环流中“冷池”的形成,其影响台风内核对流活动分布和台风登陆时降水不对称分布的具体机制是什么?

(2)沿海地形影响。沿海地形及其抬升作用对华南登陆台风降水增强有何影响?相对于环境场 VWS、冷池界面,沿海地形及其抬升作用在登陆台风降水不对称分布中的相对重要性如何?

(3)数值模式对影响过程和机制的表现能力。数值模式对环境场 VWS、冷空气强度、冷池形成的描述能力如何?对三者影响华南登陆台风降水过程的表现能力如何?模式对华南沿海地形及其影响下近岸海陆气耦合过程中边界层变化的描述能力如何?

而就台风登陆后期降水的持续性问题,有必要针对以下问题加强研究。

(1)大尺度环流特征及影响。引起华南地区台风登陆后期降水持续发生的大尺度环流条件有什么特征?西风带长波槽、短波槽与台风环流相互作用以及西南季风与台风环流相互作用对华南登陆台风结构变化、环流维持有什么样的影响?其相对重要性如何?造成台风登陆后期降水持续发展的大尺度环流背景多大程度上受到了季风低频振荡等长周期大气活动的调节?不同低频振荡周期导致的季风活动变化对这一过程的影响有什么不同?

(2)中尺度系统活动特征、发展条件与机制。季风中对流云团或 MCSs 的活动有什么特征?降水结构有什么特征?有利于这些 MCSs 对流云起始发展的动力、热力环境条件如何,动力学机制是什么?MCSs 与大尺度环境场相互作用对登陆台风环流的维持发展有什么作用,其物理机制如何?数值模式对这些 MCSs 发展变化的预报能力如何?

要充分理解这些存在的问题,可以采用目前可获取的各种常规和非常规的观测资料、再分析资料等,应用包括统计分析、资料诊断分析、数值模拟等手段针对相关问题开展研究。华南地区稠密的自动站降水观测资料、地面雷达观测资料以及 TRMM PR 卫星雷达估计降水资料、卫星云图 TBB 资料等等均可用于分析登陆台风降水分布、对流云活动及降水结构演变特征,NCEP 或 ECMWF 等再分析资料可用于分析大尺度环流的演变特征,也是重要的开展相关诊断分析研究的基础资料。

要深入地理解不同过程的影响机制,采用数值模式模拟试验方法开展相关问题的研究也是非常重



要的手段。从模式角度探讨目前模式预报技术对于登陆台风降水及分布特征的预报能力,是进一步发展相关模式预报技术和完善有关物理过程描述的基础性工作。

## 2.2 模式预报技术改进策略的思考

数值天气预报已成为当前天气预报业务的重要基础和发展主流方向。在过去三十年间,许多气象工作者从资料同化(包括卫星和雷达资料同化、四维变分同化、初始增量更新等)(Zou et al, 2015; 闵锦忠等, 2007; 陈耀登等, 2018; Wang et al, 2018; 徐道生等, 2019), 模式动力框架、积云对流参数化方案(马雷鸣和鲍旭炜, 2017)、边界层参数化方案(张旭等, 2017)和云微物理参数化方案(沈新勇等, 2015)等方面进行技术改进, 为数值模式发展开展了大量工作, 数值天气预报的准确率明显提高, 大范围暴雨环流形势以及天气背景的预报能力有了很大改进, 然而台风降水(尤其不对称降水和持续性降水)预报仍很具有挑战性(王新敏和栗晗, 2020; 罗玲等, 2019; 徐燚等, 2019; 史文茹等, 2021)。登陆台风暴雨分布、强度及其变化是目前业务预报中的难点, 路径预报的偏差往往导致降水落区的偏差(王新敏和栗晗, 2020; 赵飞等, 2021), 即使在路径预报较为准确的情况下, 不管是模式客观预报还是预报员主观预报, 仍然难以从时间、强度、位置上正确预报出登陆台风暴雨尤其是局地增强的暴雨(余贞寿等, 2009)。数值模式对登陆台风暴雨尤其非对称降水的业务预报水平不高(Caumont et al, 2021; 吕林宜等, 2019), 全球模式存在漏报明显的现象, 高分辨率区域模式相对于全球模式在落区和强度预报上具有明显优势(漆梁波和徐珺, 2018; 赵飞等, 2021), 但也存在落区和降水强度偏差(何光碧等, 2014; 赵飞等, 2021), 大暴雨空报和漏报现象并存(赵飞等, 2021; 何光碧等, 2014), 不同过程模式性能表现出较大波动(王新敏和栗晗, 2020)。Yu et al (2020) 针对 25 个台风 133 个业务预报结果的评估显示, 当登陆台风 24 h 累计降水量达 100 mm 时, 当前台风数值模式 24 h 降水预报的 ETS 评分约为 0.2; 当降水量提高至 250 mm 以上时, 24 h 降水预报的 ETS 评分都不及 0.1 (甚至接近 0)。48 h/72 h 时效的预报水平更低。对小于 50 mm 降水来说, 约 50% 以上的台风降水预报误差是来源于降水分布形态; 对大于 250 mm 特大暴雨来说, 最大误差来源(约 30%~40%)为降水中

心的偏差。

模式对台风暴雨预报能力不足的原因主要是受目前模式技术水平和认识水平的限制。由于台风与其他多尺度系统相互作用过程非常复杂, 目前无论是模式初始场或是模式物理过程都还不能很好描述其结构及演变。缺乏针对登陆台风结构的目标观测, 卫星、雷达等多源资料同化技术还不能准确分析出台风精细结构, 台风结构在模式初始场中的表达能力不足; 模式现有动力框架或耦合技术等精度不高, 尽管对天气形势有一定预报能力, 但也存在系统预报偏差(如副热带高压强度、冷空气强度、急流位置等偏差), 这些都可对台风降水预报产生重要影响; 现有物理过程不能准确描述对流发展过程(如对流触发、云水物质演变及与环境场反馈作用等)和地形作用过程。此外, 对台风结构特征和降水不对称分布之间的联系认识不足, 对产生持续性降水和降水不对称的机理尚不清楚, 在数值模式中缺乏相应的机制表述。

要做好登陆台风的降水预报工作, 首先必须要考虑登陆前(~48 h)关于台风移动路径、强度变化、结构特征等的可能影响。其次对于登陆时降水的问题, 需要综合考虑沿海地形、海陆分布的影响, 上游冷空气、干空气侵入的影响等。而对于登陆后期降水的持续性问题则需要关注台风残涡的重生, 西风带低槽活动, 西南季风活动变化等环境因素的影响。从这一思路出发, 就华南登陆台风来说以下的一些问题值得重点关注:

### (1) 台风登陆前(~48 h)的模式预报问题

台风临近登陆前由于更加靠近陆地, 所受影响因素变得更加复杂, 海洋、大气以及陆面的共同影响均可造成台风移动路径、强度及结构更易于发生异常变化, 致使对其登陆所可能带来的影响更难于把握。就模式预报角度来说, 要改进台风路径及强度预报, 牵涉到许多技术上的问题, 如台风内核动力学、对流层高层环流、海表环流异常影响等等。根据当前存在突出具体问题和能力, 可重点开展以下几方面的工作。

①开展登陆前台风结构观测。可结合卫星、雷达、下投探空、微波辐射计等开展登陆前台风结构观测, 获取较为细致的台风结构信息, 尤其内核不对称结构和对流分布信息, 为开展登陆台风降水不对称机制研究提供数据基础, 同时在模式初值方面也具有应用价值。

②加强观测资料应用水平。发展卫星、雷达资料同化技术,加强多源观测资料应用水平,提高模式初始场对台风不对称结构的精细表达能力。

③分类评估模式形势预报效果,优化模式动力框架和同化方法。台风移动受台风涡旋本身与周边大尺度环境系统如西风槽、副热带高压、西南季风、中纬度冷空气等相互关系和作用影响,分析评估模式对不同大尺度天气系统的预报效果可更有效地找出关键问题所在。在现有技术水平下改进动力框架,针对关键问题,改进动力和物理耦合技术,结合目前可同化应用观测资料的具体情况,对不同观测资料同化应用的效果进行评估,并通过同化方法的优化,改进模式的形势预报效果。

④发展适用于华南地区的陆(海)面过程和台风边界层方案。台风强度变化受其与海、陆界面之间的水分、热量及能量交换过程影响,发展适用于华南地区的陆(海)面过程和台风边界层方案,将可增强模式对台风与陆(海)面水汽、热量及能量交换的描述能力,有效地促进模式对台风结构、路径及强度预报效果的提高。

#### (2)改进模式云微物理过程

地面“冷池”的形成对登陆台风降水分布的影响问题前面已有所论述。“冷池”的形成、结构及其演变受多种因素影响,涉及多种尺度过程的相互作用,即使在目前的观测平台,“冷池”也很难被观测到,需要采用数值模拟试验方法对不同环境条件下“冷池”的形成发展过程加以研究。由于“冷池”很大程度上由水凝物的蒸发驱动而形成,考察模式云微物理过程对这一现象的模拟能力,对改进模式云微物理方案将有益处。只有更加深入地了解台风中降水对于环境场产生的不同反馈效应,才能提高模式对于风暴登陆过程中结构和强度变化的预报能力。

#### (3)地形影响问题

地形及陆面过程对登陆台风强度、结构及降水演变和分布都有重要影响,这种影响是两方面的。地形抬升在适合条件下可对降水增强产生明显作用,往往受到了更多的关注。实际上,陆面粗糙度及摩擦的增强在台风登陆过程中会消耗其能量,这是台风登陆渐趋消亡的重要原因。问题的复杂性需要从具体环境条件进行更加综合的分析,例如就登陆我国东部地区的台风而言,由于位于台风北侧近岸一带处在迎风环境条件中,地形抬升作用更易于造成降水增多,而相对来说台风南侧处于背风环境中,

降水增强发生的概率往往较少。与之不同,华南南部海岸线基本呈东西走向,相对于台风环流来说,风暴中心东部为迎风一侧,而西部为背风一侧。东侧(迎风一侧)由于沿岸地形加之受到西南季风气流叠加的影响,往往出现更多的降水。但实际上在台风西侧不时也有降水增强的现象发生,如前面提到的台风尤特登陆时降水的不对称性,多大程度上是受登陆前环境风垂直切变所带来一系列结果的影响,还是也受到了地形的影响?需要加强针对这样一些具体个例的敏感性模拟研究,以加深对台风降水不对称结构形成的机理的理解,考察模式对与地形作用相关物理过程的描述能力,尤其华南沿海地形影响下近岸海陆气耦合过程中边界层变化的描述能力,促进诸如模式地形参数化方案及其与边界层方案耦合的进一步完善。

(4)与季风活动相联系的 MCSs 及其与大尺度环流相互作用的模式预报问题

MCSs 不仅直接带来了强降水,其导致潜热释放对大尺度环流的反馈作用对季风及台风涡旋环流的维持也有重要作用。因此模式对于这些对流系统的预报尤为关键。尽管问题难度很大,其本身也是涉及到模式降水的预报问题,但从模式预报角度出发,评估模式对此类对流系统的预报效果及其对大尺度环流的反馈作用,找出相关问题,才有可能进一步加以解决。季风中的这些对流系统,也是华南暖区暴雨的重要影响系统,与华南前汛期由冷空气参与而触发的对流系统不同,它们的降水结构特征可能存在差异。从区分对流/层云降水及其对大尺度环流反馈不同的角度出发,对比分析模式对于有无冷空气参与影响的两类不同对流降水系统的预报效果,查找模式预报能力不足问题,值得尝试。

### 3 结论与讨论

台风降水的不对称性及持续暴雨发生是华南登陆台风暴雨预报存在的两个突出问题,文章回顾分析了关于这两个问题的研究状况,提出了需要深入研究的相关科学问题和模式预报技术改进的应对措施,为促进华南登陆台风暴雨预报效果改进工作提供参考。

分析指出环境场风垂直切变、低层气团边界(如“冷池”边界)、干冷空气侵入以及局地地形等是造成华南登陆台风降水出现不对称分布的重要影响因

素。台风登陆后期华南持续暴雨的发生往往与季风活动增强相关,活跃的西南季风为强降水系统如对流云团、MCSs的发展提供有利条件,而通过潜热加热反馈作用,这些中尺度对流系统的频繁活动可有助于大尺度环流如台风涡旋本身、西南季风气流的维持,进而又可为MCSs的反复发生提供条件。台风登陆后期华南持续暴雨的发生往往与这种正反馈相互作用机制密切相关。

针对目前台风暴雨预报存在的这些问题认识的不足,提出了需要加强研究的科学问题,并就数值模式预报技术改进的应对措施进行了思考。强调从天气气候特征角度出发,针对相关问题进行更加全面的诊断及机理分析仍非常必要。为促进模式对于华南登陆台风降水预报效果的提高,需要进一步提高模式对于台风登陆前移动路径、强度及结构变化的预报能力,完善模式对于有关地形影响、云微物理过程、对流潜热反馈作用的描述能力。

## 参考文献

- 蔡菁,吴立广,赖巧珍,等,2017. 台风“苏拉”登陆福建后降水的非对称成因分析[J]. 大气科学学报,40(6):814-822. Cai J, Wu L G, Lai Q Z, et al, 2017. Analysis of the precipitation asymmetries of Typhoon Saola after its landfall on Fujian Province[J]. Trans Atmos Sci, 40(6):814-822(in Chinese).
- 陈联寿,2007. 登陆热带气旋暴雨的研究和预报[C]//第十四届全国热带气旋科学讨论会论文集. 上海:中国气象学会:3-7. Chen L S, 2007. Study and forecast of rainstorm associated with land-falling tropical cyclones [C] // 14th National Symposium on Tropical Cyclone Science. Shanghai: Chinese Meteorological Society: 3-7 (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 of Tropical Cyclones over the Western Pacific [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).
- 陈联寿,孟智勇,2001. 我国热带气旋研究十年进展[J]. 大气科学,25(3):420-431. Chen L S, Meng Z Y, 2001. An overview on tropical cyclone research progress in China during the past ten years [J]. Chin J Atmos Sci, 25(3):420-431(in Chinese).
- 陈鹏,庞珏,张虹,等,2017. 台风与冷空气对重庆“9. 17”大暴雨的影响分析[J]. 暴雨灾害,36(3):227-234. Chen P, Pang Y, Zhang H, et al, 2017. Analysis of the “9. 17” heavy rainfall in Chongqing under the influence of the typhoon and cold air[J]. Torr Rain Dis, 36(3):227-234(in Chinese).
- 陈淑琴,李英,范悦敏,等,2021. 台风山竹(2018)远距离暴雨的成因分析[J]. 大气科学,45(3):573-587. Chen S Q, Li Y, Fan Y M, et al, 2021. Analysis of long-distance heavy rainfall caused by Typhoon Mangosteen (2018)[J]. Chin J Atmos Sci, 45(3):573-587(in Chinese).
- 陈淑琴,徐赓,曹宗元,等,2018. 冷空气和热带低压共同作用下的一次暴雨预报失败原因分析[J]. 气象,44(1):142-150. Chen S Q, Xu Y, Cao Z Y, et al, 2018. Results of a failure forecast about a rainstorm caused by cold air and tropical low pressure[J]. Meteor Mon, 44(1):142-150(in Chinese).
- 陈训来,吴池胜,何夏江,等,2005. 台风 Utor 登陆广东过程的数值研究[J]. 中山大学学报(自然科学版),44(2):102-106. Chen X L, Wu C S, He X J, et al, 2005. A numerical study of the landfall of Typhoon Utor[J]. Acta Sci Nat Univ Sunyatseni, 44(2):102-106(in Chinese).
- 陈耀登,陈海琴,孙娟珍,等,2018. 雷达观测对应模式变量非线性特征及对四维变分同化的影响[J]. 热带气象学报,34(6):721-732. Chen Y D, Chen H Q, Sun J Z, et al, 2018. Nonlinear characteristics of model variables corresponding to radar observations and its effects on 4D-Var assimilation[J]. J Trop Meteor, 34(6):721-732(in Chinese).
- 程正泉,陈联寿,李英,2009. 登陆台风降水的大尺度环流诊断分析[J]. 气象学报,67(5):840-850. Cheng Z Q, Chen L S, Li Y, 2009. Diagnostic analysis of large-scale circulation features associated with strong and weak landfalling typhoon precipitation events[J]. Acta Meteor Sin, 67(5):840-850(in Chinese).
- 程正泉,陈联寿,徐祥德,等,2005. 近 10 年中国台风暴雨研究进展[J]. 气象,31(12):3-9. Cheng Z Q, Chen L S, Xu X D, et al, 2005. Research progress on typhoon heavy rainfall in China for last ten years[J]. Meteor Mon, 31(12):3-9(in Chinese).
- 丛春华,2011. 热带气旋远距离暴雨的研究[D]. 北京:中国气象科学研究院. Cong C H, 2011. On the study of the mechanism of tropical cyclone remote precipitation[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese).
- 董美莹,陈联寿,郑沛群,等,2009. 登陆热带气旋暴雨突然增幅和特大暴雨之研究进展[J]. 热带气象学报,25(4):495-502. Dong M Y, Chen L S, Zheng P Q, et al, 2009. Research progress on abrupt intensification of heavy rainfall and super heavy rainfall associated with landfalling tropical cyclones[J]. J Trop Meteor, 25(4):495-502(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).
- 何光碧,张利红,屠妮妮,2014. 区域中尺度模式对西南地区一次强降水过程的预报分析[J]. 高原山地气象研究,34(2):1-7. He G B, Zhang L H, Tu N N, 2014. Analyses on a heavy rainfall process prediction of regional numerical models[J]. Plateau Mountain Meteor Res, 34(2):1-7(in Chinese).
- 冀春晓,薛根元,赵放,等,2007. 台风 Ranim 登陆期间地形对其降水和结构影响的数值模拟试验[J]. 大气科学,31(2):233-244.

- Ji C X, Xue G Y, Zhao F, et al, 2007. The numerical simulation of orographic effect on the rain and structure of Typhoon Ranim during landfall[J]. *Chin J Atmos Sci*, 31(2): 233-244 (in Chinese).
- 李江南, 蒙伟光, 闫敬华, 等, 2005. 热带风暴 Fitow(0114)暴雨的中尺度特征及成因分析[J]. *热带气象学报*, 21(1): 24-32. Li J N, Meng W G, Yan J H, et al, 2005. Mesoscale characteristics and causes of Tropical Storm Fitow (0114) heavy rain[J]. *J Trop Meteor*, 21(1): 24-32 (in Chinese).
- 李江南, 王安宇, 侯尔滨, 等, 2004. 台风 Fitow 降雨的数值预报试验[J]. *热带海洋学报*, 23(1): 16-24. Li J N, Wang A Y, Hou E B, et al, 2004. A numerical prediction experiment of track and heavy rainfall round about Typhoon Fitow[J]. *J Trop Oceanogr*, 23(1): 16-24 (in Chinese).
- 李江南, 王安宇, 杨兆礼, 等, 2003. 台风暴雨的研究进展[J]. *热带气象学报*, 19(S1): 152-159. Li J N, Wang A Y, Yang Z L, et al, 2003. Advancement in the study of typhoon rainstorm[J]. *J Trop Meteor*, 19(S1): 152-159 (in Chinese).
- 李英, 陈联寿, 徐祥德, 2005. 水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值试验[J]. *大气科学*, 29(1): 91-98. Li Y, Chen L S, Xu X D, 2005. Numerical experiments of the impact of moisture transportation on sustaining of the landfalling tropical cyclone and precipitation[J]. *Chin J Atmos Sci*, 29(1): 91-98 (in Chinese).
- 卢珊, 王黎娟, 管兆勇, 等, 2012. 低纬季风涌影响登陆台风榴莲(0103)和碧利斯(0604)暴雨增幅的比较[J]. *大气科学学报*, 35(2): 175-185. Lu S, Wang L J, Guan Z Y, et al, 2012. Comparison of impacts of low-latitude monsoon surge on the enhanced rainstorm from landing typhoons Durian and Bilis[J]. *Trans Atmos Sci*, 35(2): 175-185 (in Chinese).
- 罗玲, 娄小芬, 傅良, 等, 2019. ECMWF 极端降水预报指数在华东台风暴雨中的应用研究[J]. *气象*, 45(10): 1382-1391. Luo L, Lou X F, Fu L, et al, 2019. Application of precipitation extreme forecast index from ECMWF in typhoon rainstorm in East China[J]. *Meteor Mon*, 45(10): 1382-1391 (in Chinese).
- 骆荣宗, 1997. 9012 号台风中尺度螺旋雨带与暴雨的观测分析[J]. *热带气象学报*, 13(2): 173-179. Luo R Z, 1997. The analysis and observation of the mesoscale rotational rain belt and the storm of Typhoon 9012 (Yancy)[J]. *J Trop Meteor*, 13(2): 173-179 (in Chinese).
- 吕林宜, 王新敏, 栗晗, 2019. 华东区域模式对河南“7·19”特大暴雨的数值检验与分析[J]. *气象与环境科学*, 42(1): 101-109. Lü L Y, Wang X M, Li H, 2019. Verification and analysis of SMS-WARMS forecast for “7·19” extraordinary rainstorm in Henan Province[J]. *Meteor Environ Sci*, 42(1): 101-109 (in Chinese).
- 马雷鸣, 鲍旭炜, 2017. 数值天气预报模式物理过程参数化方案的研究进展[J]. *地球科学进展*, 32(7): 679-687. Ma L M, Bao X W, 2017. Research progress on physical parameterization schemes in numerical weather prediction models[J]. *Adv Earth Sci*, 32(7): 679-687 (in Chinese).
- 闵锦忠, 彭霞云, 赖安伟, 等, 2007. 反演同化和直接同化多普勒雷达径向风的对比试验[J]. *南京气象学院学报*, 30(6): 745-754. Min J Z, Peng X Y, Lai A W, et al, 2007. Contrast experiments of Doppler radar radial velocity using retrieval and direct assimilation[J]. *J Nanjing Inst Meteor*, 30(6): 745-754 (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).
- 漆梁波, 徐珺, 2018. 豫北“7·9”特大暴雨的短期预报分析和反思[J]. *气象*, 44(1): 1-14. Qi L B, Xu J, 2018. Rethink on short-range forecast of the 9 July severe rainstorm in northern Henan[J]. *Meteor Mon*, 44(1): 1-14 (in Chinese).
- 任福民, 吴国雄, 王小玲, 等, 2011. 近 60 年影响中国之热带气旋[M]. 北京: 气象出版社. Ren F M, Wu G X, Wang X L, et al, 2011. Tropical Cyclones Affecting China over the Last 60 Years [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 沈新勇, 梅海霞, 王卫国, 等, 2015. 双参数微物理方案的冰相过程模拟及冰核数浓度的影响试验[J]. *大气科学*, 39(1): 83-99. Shen X Y, Mei H X, Wang W G, et al, 2015. Numerical simulation of ice-phase processes using a double-moment microphysical scheme and a sensitivity test of ice nuclei concentration[J]. *Chin J Atmos Sci*, 39(1): 83-99 (in Chinese).
- 史文茹, 李昕, 曾明剑, 等, 2021. “7·20”郑州特大暴雨的多模式对比及高分辨率区域模式预报分析[J]. *大气科学学报*, 44(5): 688-702. Shi W R, Li X, Zeng M J, et al, 2021. Multi-model comparison and high-resolution regional model forecast analysis for the “7·20” Zhengzhou severe heavy rain[J]. *Trans Atmos Sci*, 44(5): 688-702 (in Chinese).
- 孙建华, 齐琳琳, 赵思雄, 2006. “9608”号台风登陆北上引发北方特大暴雨的中尺度对流系统研究[J]. *气象学报*, 64(1): 57-71. Sun J H, Qi L L, Zhao S X, 2006. A study on mesoscale convective systems of the severe heavy rainfall in North China by “9608” Typhoon[J]. *Acta Meteor Sin*, 64(1): 57-71 (in Chinese).
- 陶诗言, 1980. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社. Tao S Y, 1980. Heavy Rainfall in China [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- 王凯, 齐铎, 高丽, 等, 2021. 浙东地形对台风利奇马极端降水的影响分析[J]. *气象科学*, 41(2): 162-171. Wang K, Qi D, Gao L, et al, 2021. Analysis of the effects of the topography of eastern Zhejiang on the extreme precipitation of Typhoon “Lekima”[J]. *Sci Meteor Sin*, 41(2): 162-171 (in Chinese).
- 王新敏, 栗晗, 2020. 多数值模式对台风暴雨过程预报的空间检验评估[J]. *气象*, 46(6): 753-764. Wang X M, Li H, 2020. Spatial verification evaluation of typhoon rainstorm by multiple numerical models[J]. *Meteor Mon*, 46(6): 753-764 (in Chinese).
- 徐道生, 张邦林, 曾庆存, 等, 2019. 一种基于分析增量更新技术的台风初始化方案[J]. *气象学报*, 77(6): 1053-1061. Xu D S, Zhang B L, Zeng Q C, et al, 2019. A typhoon initialization scheme based on incremental analysis updates technology [J]. *Acta Meteor Sin*, 77(6): 1053-1061 (in Chinese).
- 徐焱, 钱浩, 罗玲, 等, 2019. 基于 ECMWF 模式预报的台风降水地形

- 订正方法[J]. 气象学报, 77(4): 674-685. Xu Y, Qian H, Luo L, et al, 2019. A study of terrain correction method on typhoon precipitation based on ECMWF forecasts[J]. Acta Meteor Sin, 77(4): 674-685(in Chinese).
- 颜玲, 周玉淑, 王咏青, 2019. 相似路径台风 Soudelor(1513)与 Matmo(1410)登陆前后的降水分布特征及成因的对比分析[J]. 大气科学, 43(2): 297-310. Yan L, Zhou Y S, Wang Y Q, 2019. Analysis on different characteristics and causes of precipitation distribution during the landing of Typhoon "Soudelor" (1513) and Typhoon "Matmo" (1410) with similar tracks[J]. Chin J Atmos Sci, 43(2): 297-310(in Chinese).
- 杨舒楠, 路屹雄, 张芳华, 等, 2021. 热带风暴艾云尼持续性强降雨成因分析[J]. 气象, 47(1): 106-116. Yang S N, Lu Y X, Zhang F H, et al, 2021. Analysis on causes of persistent heavy rainfall brought by Tropical Storm Ewiniar[J]. Meteor Mon, 47(1): 106-116(in Chinese).
- 叶成志, 李昀英, 2011. 热带气旋“碧利斯”与南海季风相互作用的强水汽特征数值研究[J]. 气象学报, 69(3): 496-507. Ye C Z, Li Y Y, 2011. A numerical study of the characteristics of strong moisture transport as a result of the interaction of tropical storm Bilis with the South China Sea monsoon[J]. Acta Meteor Sin, 69(3): 496-507(in Chinese).
- 余贞寿, 陈敏, 叶子祥, 等, 2009. 相似路径热带气旋“海棠”(0505)和“碧利斯”(0604)暴雨对比分析[J]. 热带气象学报, 25(1): 37-47. Yu Z S, Chen M, Ye Z X, et al, 2009. Analysis of rainstorm associated with similar track tropical cyclones "Haitang" (0505) and "Bilis" (0604)[J]. J Trop Meteor, 25(1): 37-47(in Chinese).
- 岳彩军, 2009. “海棠”台风降水非对称分布特征成因的定量分析[J]. 大气科学, 33(1): 51-70. Yue C J, 2009. A quantitative study of asymmetric characteristic genesis of precipitation associated with Typhoon Haitang[J]. Chin J Atmos Sci, 33(1): 51-70(in Chinese).
- 张胜军, 陈联寿, 徐祥德, 2005. Helen 台风(9505)异常路径的诊断分析与数值模拟[J]. 大气科学, 29(6): 937-946. Zhang S J, Chen L S, Xu X D, 2005. The diagnoses and numerical simulation on the unusual track of Helen (9505)[J]. Chin J Atmos Sci, 29(6): 937-946(in Chinese).
- 张兴旺, 1999. 修改的  $Q$  矢量表达式及其应用[J]. 热带气象学报, 15(2): 162-167. Zhang X W, 1999. The expression of the modified  $Q$  vector and its application[J]. J Trop Meteor, 15(2): 162-167(in Chinese).
- 张旭, 黄伟, 陈葆德, 2017. 高分辨率数值预报模式的尺度自适应物理过程参数化研究[J]. 气象科技进展, 7(6): 105-110. Zhang X, Huang W, Chen B D, 2017. A study of the scale-aware physical parameterizations in high-resolution numerical weather prediction models[J]. Adv Meteor Sci Technol, 7(6): 105-110(in Chinese).
- 张雪蓉, 王丽芳, 王博妮, 等, 2021. 干冷空气对江苏热带低压倒槽大暴雨影响的数值试验[J]. 气象, 47(7): 791-804. Zhang X R, Wang L F, Wang B N, et al, 2021. Numerical study on the effect of cold dry air on a rainstorm caused by tropical depression inverted trough in Jiangsu Province[J]. Meteor Mon, 47(7): 791-804(in Chinese).
- 张艳霞, 蒙伟光, 戴光丰, 等, 2015. 台风“凡亚比”登陆过程中暴雨 MCSs 演变及形成机理[J]. 热带气象学报, 31(4): 433-443. Zhang Y X, Meng W G, Dai G F, et al, 2015. The evolution and formation mechanism of rainstorms MCSs during Typhoon Fnanpi landing[J]. J Trop Meteor, 31(4): 433-443(in Chinese).
- 赵飞, 包文雯, 张雪波, 等, 2021. 台风“浪卡”(2016)暴雨成因及数值预报模式偏差分析[J]. 气象研究与应用, 42(3): 83-87. Zhao F, Bao W W, Zhang X B, et al, 2021. Typhoon Nangka (2016) rainstorm causes and deviation analysis of numerical forecast model[J]. J Meteor Res Appl, 42(3): 83-87(in Chinese).
- 周海波, 白爱娟, 蔡亲波, 2017. 对强台风“纳沙”(1117)登陆海南岛前后降水非对称性的分析[J]. 热带气象学报, 33(3): 386-398. Zhou H B, Bai A J, Cai Q B, 2017. Analysis on asymmetric precipitation of the strong Typhoon Nesat (1117) before and after landing on Hainan Island[J]. J Trop Meteor, 33(3): 386-398(in Chinese).
- Atallah E H, Bosart L F, 2003. The extratropical transition and precipitation distribution of Hurricane Floyd (1999)[J]. Mon Wea Rev, 131(6): 1063-1081.
- Blackwell K G, 2000. The evolution of Hurricane Danny (1997) at landfall: Doppler-observed eyewall replacement, vortex contraction/intensification, and low-level wind maxima[J]. Mon Wea Rev, 128(12): 4002-4016.
- Bosart L F, Dean D B, 1991. The Agnes rainstorm of June 1972: surface feature evolution culminating in inland storm redevelopment[J]. Wea Forecasting, 6(4): 515-537.
- Caumont O, Mandement M, Bouttier F, et al, 2021. The heavy precipitation event of 14-15 October 2018 in the Aude catchment: a meteorological study based on operational numerical weather prediction systems and standard and personal observations[J]. Nat Hazards Earth Syst Sci, 21(3): 1135-1157.
- Chan J C L, Liu K S, Ching S E, et al, 2004. Asymmetric distribution of convection associated with tropical cyclones making landfall along the South China coast[J]. Mon Wea Rev, 132(10): 2410-2420.
- Chen B F, Lee C S, Elsberry R L, 2014. On tropical cyclone size and intensity changes associated with two types of long-lasting rainbands in monsoonal environments[J]. Geophys Res Lett, 41(7): 2575-2581.
- Chen G H, Huang R H, 2009. Interannual variations in mixed Rossby-gravity waves and their impacts on tropical cyclogenesis over the western North Pacific[J]. J Climate, 22(3): 535-549.
- Chen L S, Li Y, Cheng Z Q, 2010. An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones[J]. Adv Atmos Sci, 27(5): 967-976.
- Chen L S, Luo Z X, 2004. A study of the effect of topography on the merging of vortices[J]. Adv Atmos Sci, 21(1): 13-22.
- Chen S S, Knaff J A, Marks F D Jr, 2006. Effects of vertical wind



- shear and storm motion on tropical cyclone rainfall asymmetries deduced from TRMM[J]. *Mon Wea Rev*, 134(11):3190-3208.
- Chien F C, Kuo H C, 2011. On the extreme rainfall of Typhoon Morakot (2009)[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 116(D5):D05104.
- Colle B A, 2003. Numerical simulations of the extratropical transition of Floyd (1999): structural evolution and responsible mechanisms for the heavy rainfall over the Northeast United States [J]. *Mon Wea Rev*, 131(12):2905-2926.
- 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.
- Cote M R, 2007. Predecessor rain events in advance of tropical cyclones[D]. New York: Albany State University.
- DeHart J C, Houze R A Jr, Rogers R F, 2014. Quadrant distribution of tropical cyclone inner-core kinematics in relation to environmental shear[J]. *J Atmos Sci*, 71(7):2713-2732.
- Dong M Y, Chen L S, Li Y, et al, 2010. Rainfall reinforcement associated with landfalling tropical cyclones[J]. *J Atmos Sci*, 67(11):3541-3558.
- Dunn G E, Miller B I, 1960. *Atlantic Hurricanes*[M]. Baton Rouge: Louisiana State University Press.
- Eastin M D, Gardner T L, Link M C, et al, 2012. Surface cold pools in the outer rainbands of Tropical Storm Hanna (2008) near landfall[J]. *Mon Wea Rev*, 140(2):471-491.
- Elsberry R L, 2005. Achievement of USWRP hurricane landfall research goal[J]. *Bull Am Meteor Soc*, 86(5):643-646.
- Gao S Z, Meng Z Y, Zhang F Q, et al, 2009. Observational analysis of heavy rainfall mechanisms associated with Severe Tropical Storm Bilis (2006) after its landfall[J]. *Mon Wea Rev*, 137(6):1881-1897.
- Ge X Y, Li T, Zhang S J, et al, 2010. What causes the extremely heavy rainfall in Taiwan during Typhoon Morakot (2009)? [J]. *Atmos Sci Lett*, 11(1):46-50.
- Harr P A, Elsberry R L, 1991. Tropical cyclone track characteristics as a function of large-scale circulation anomalies[J]. *Mon Wea Rev*, 119(6):1448-1468.
- Harr P A, Elsberry R L, 1995. Large-scale circulation variability over the tropical western North Pacific. Part I: spatial patterns and tropical cyclone characteristics[J]. *Mon Wea Rev*, 123(5):1225-1246.
- Hence D A, Houze R A Jr, 2011. Vertical structure of hurricane eye-walls as seen by the TRMM precipitation radar[J]. *J Atmos Sci*, 68(8):1637-1652.
- Houze R A Jr, 2010. Clouds in tropical cyclones[J]. *Mon Wea Rev*, 138(2):293-344.
- Houze R A Jr, Chen S S, Smull B F, et al, 2007. Hurricane intensity and eyewall replacement[J]. *Science*, 315(5816):1235-1239.
- Jones S C, Harr P A, Abraham J, et al, 2003. The extratropical transition of tropical cyclones: forecast challenges, current understanding, and future directions[J]. *Wea Forecasting*, 18(6):1052-1092.
- Knupp K R, Walters J, Biggerstaff M, 2006. Doppler profiler and radar observations of boundary layer variability during the landfall of Tropical Storm Gabrielle[J]. *J Atmos Sci*, 63(1):234-251.
- Ko K C, Hsu H H, 2006. Sub-monthly circulation features associated with tropical cyclone tracks over the East Asian monsoon area during July—August season[J]. *J Meteor Soc Japan*, 84(5):871-889.
- Ko K C, Hsu H H, 2009. ISO Modulation on the submonthly wave pattern and recurving tropical cyclones in the tropical western North Pacific[J]. *J Climate*, 22(3):582-599.
- Koteswaram P, Gaspar S, 1956. The surface structure of tropical cyclones in the Indian Area[J]. *Indian J Meteor Geophys*, 7(4):339-352.
- Lee C S, Chen B F, Elsberry R L, 2012. Long-lasting convective systems in the outer region of tropical cyclones in the western North Pacific[J]. *Geophys Res Lett*, 39(21):L21812.
- Liang J, Wu L G, Ge X Y, et al, 2011. Monsoonal influence on typhoon Morakot (2009). Part II: numerical study[J]. *J Atmos Sci*, 68(10):2222-2235.
- Liu K S, Chan J C L, Cheng W C, et al, 2007. Distribution of convection associated with tropical cyclones making landfall along the South China coast[J]. *Meteor Atmos Phys*, 97(1-4):57-68.
- Lonfat M, Marks F D Jr, Chen S S, 2004. Precipitation distribution in tropical cyclones using the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) microwave imager: a global perspective[J]. *Mon Wea Rev*, 132(7):1645-1660.
- Maddox R A, 1980. Mesoscale convective complexes[J]. *Bull Am Meteor Soc*, 61(11):1374-1400.
- Maddox R A, 1983. Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude, mesoscale convective complexes[J]. *Mon Wea Rev*, 111(7):1475-1493.
- Matyas C J, 2010. Associations between the size of hurricane rain fields at landfall and their surrounding environments[J]. *Meteor Atmos Phys*, 106(3/4):135-148.
- McAdie C J, Lawrence M B, 2000. Improvements in tropical cyclone track forecasting in the Atlantic Basin, 1970-98 [J]. *Bull Am Meteor Soc*, 81(5):989-998.
- Meng W G, Wang Y Q, 2016a. A diagnostic study on heavy rainfall induced by Typhoon Utor (2013) in South China: 1. Rainfall asymmetry at landfall[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 121(21):12781-12802.
- Meng W G, Wang Y Q, 2016b. A diagnostic study on heavy rainfall induced by landfalling Typhoon Utor (2013) in South China: 2. Postlandfall rainfall[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 121(21):12803-12819.
- Miller B I, 1964. A study of the filling of Hurricane Donna (1960) over land[J]. *Mon Wea Rev*, 92(9):389-406.
- Parrish J R, Burpee R W, Marks F D Jr, et al, 1982. Rainfall patterns observed by digitized radar during the landfall of Hurricane Frederic (1979)[J]. *Mon Wea Rev*, 110(12):1933-1944.
- Reasor P D, Rogers R, Lorsolo S, 2013. Environmental flow impacts

- on tropical cyclone structure diagnosed from airborne Doppler radar composites[J]. *Mon Wea Rev*, 141(9):2949-2969.
- Rogers R, Chen S S, Tenerelli J, et al, 2003. A numerical study of the impact of vertical shear on the distribution of rainfall in Hurricane Bonnie (1998)[J]. *Mon Wea Rev*, 131, 1577-1599.
- Schwarz F K, 1970. The unprecedented rains in Virginia associated with the remnants of Hurricane Camille[J]. *Mon Wea Rev*, 98(11):851-859.
- Skwira G D, Schroeder J L, Peterson R E, 2005. Surface observations of landfalling hurricane rainbands[J]. *Mon Wea Rev*, 133(2):454-465.
- Villarini G, Smith J A, Baek M L, et al, 2011. Characterization of rainfall distribution and flooding associated With U. S. landfalling tropical cyclones; analyses of hurricanes Frances, Ivan, and Jeanne (2004)[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 116(D23):D23116.
- Wang P, Li J, Lu B, et al, 2018. Impact of moisture information from advanced himawari imager measurements on heavy precipitation forecasts in a regional NWP model[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 123(11):6022-6038.
- Wang Y, Wu C C, 2004. Current understanding of tropical cyclone structure and intensity changes — a review[J]. *Meteor Atmos Phys*, 87(4):257-278.
- Wu L G, Liang J, Wu C C, 2011. Monsoonal influence on typhoon Morakot (2009). Part I: observational analysis[J]. *J Atmos Sci*, 68(10):2208-2221.
- Yanai M, Esbensen S, Chu J H, 1973. Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moisture budgets[J]. *J Atmos Sci*, 30(4):611-627.
- Yu J H, Tan Z M, Wang Y Q, 2010. Effects of vertical wind shear on intensity and rainfall asymmetries of strong Tropical Storm Bilis (2006)[J]. *Adv Atmos Sci*, 27(3):552-561.
- Yu Z F, Chen Y J, Ebert B, et al, 2020. Benchmark rainfall verification of landfall tropical cyclone forecasts by operational ACCESS-TC over China[J]. *Meteor Appl*, 27(1):e1842.
- Yu Z F, Wang Y Q, Xu H M, 2015. Observed rainfall asymmetry in tropical cyclones making landfall over China[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 54(1):117-136.
- Zou X, Qin Z K, Zheng Y, 2015. Improved tropical storm forecasts with GOES-13/15 imager radiance assimilation and asymmetric vortex initialization in HWRF[J]. *Mon Wea Rev*, 143(7):2485-2505.

(本文责编:戴洋)