

杨舒楠,路屹雄,张芳华,等,2021. 热带风暴艾云尼持续性强降水成因分析[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).

热带风暴艾云尼持续性强降水成因分析*

杨舒楠^{1,3} 路屹雄² 张芳华¹ 陶亦为¹

1 国家气象中心,北京 100081

2 国家气候中心,北京 100081

3 中国气象局-河海大学水文气象研究联合实验室,北京 100081

提 要:以热带风暴艾云尼(1804)为研究对象,利用常规、非常规观测以及 NCEP 分析资料等探讨了“弱”台风的持续性强降水成因。大尺度环流背景导致“艾云尼”引导气流很弱,台风移速缓慢,长时间维持在我国近海。南海季风爆发初期的异常强西南季风和台风马力斯(1805)的偏东急流将水汽、动量持续向台风环流输送。净水汽收支诊断显示:台风影响前期,水汽主要来自南边界;后期,东边界水汽流入增加,维持了台风环流的持续性水汽输入,造成广东沿海水汽通量辐合及高湿、高能环境条件的持续。广东沿海长时间维持较强东南向岸风,在海岸线及沿海地形作用下低层辐合持续,叠加高空辐散,为强降水的持续产生和中尺度对流系统的触发提供了有利动力条件,对流层低层东南风风速增强与降水量陡增吻合较好。台风中尺度对流系统活跃,伴随 5 个阶段的中尺度对流雨带的发生、发展。沿海地区对流不断新生、中尺度螺旋雨带发展、台风本体降水和外围中尺度对流雨带的叠加以及两条暖湿输送带中海上对流的移入等,共同造成广东沿海中尺度对流系统的持续存在和持续性强降水的产生。

关键词:台风暴雨,持续性强降水,水汽收支,中尺度对流系统

中图分类号: P458, P447

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.01.010

Analysis on Causes of Persistent Heavy Rainfall Brought by Tropical Storm Ewiniar

YANG Shunan^{1,3} LU Yixiong² ZHANG Fanghua¹ TAO Yiwei¹

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 National Climate Centre, Beijing 100081

3 CMA-HHU Joint Laboratory for Hydrometeorological Studies, Beijing 100081

Abstract: Ewiniar (1804), a tropical storm with weak tropical cyclone (TC) intensity but strong and long lasting precipitation, is taken as the research object in this study. By using the conventional and unconventional observations, and NCEP analysis data, the causes of persistent heavy rainfall of the “weak” TC are analyzed. Ewiniar moved very slowly due to the very weak steering flow caused by the large scale circulation background. As a result, its TC circulation maintained for a long time over the offshore waters in South China. Water vapor and momentum were transported to the TC circulation continuously by both the abnormal strong southwest jet induced by the onset of the South China monsoon and the easterly jet caused by Maliksi (1805). Diagnosis of net water vapor budget shows that in the early stage, water vapor inflow mainly came from Ewiniar’s southern boundary, and then water inflow in the eastern boundary increased

* 国家重点研发计划(2017YFC1502502, 2017YFC1502501)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306011)、气象预报业务关键技术发展专项[YBGJXM(2020)3A-03]和国家自然科学基金项目(41405051)共同资助

2019 年 4 月 19 日收稿; 2020 年 10 月 29 日收修定稿

第一作者:杨舒楠,主要从事灾害性天气预测及研究. E-mail: shunanyoung@163.com

rapidly, which played an important role in maintaining the continuous water input in the whole TC circulation. As a result, the water flux convergence and high humidity and high energy environment along the coastal areas of Guangdong maintained. Strong southeast onshore wind existed for a long spell along the coastal areas of Guangdong. Impacted by the costal line and topography, sustained convergence can be found in lower-level along coastal areas, which could provide favorable dynamic conditions for the continuous generation of heavy rainfall and triggering of mesoscale convective system. And the enhancement of the southeast wind speed in lower troposphere was in good agreement with the sharp increase in precipitation. There were active mesoscale convective systems along the coastal areas, accompanying the occurrence and development of five-stage mesoscale convective rain belts. The continuous generation of new convections in the coastal areas, the development of mesoscale spiral rain band, the superposition of TC inner core precipitation and convections in the outer rain belt, as well as the migration of convection over sea from the two warm wet conveyor belts all contributed to the persistence of the mesoscale convective system in the coastal area of Guangdong Province, resulting in the generation of persistent heavy rainfall there.

Key words: TC rainstorm, persistent heavy rainfall, water vapor budget, mesoscale convective system

引言

中国东邻西北太平洋,是世界上受台风影响最严重的国家之一,平均每年约有7~8个台风在我国登陆。台风对中国最重要的影响是登陆台风引发的暴雨和洪涝灾害,我国历史上几大破纪录的暴雨灾害均与台风有关(Chen et al, 2010)。长期以来台风暴雨研究都是台风研究的重要方面之一(谢惠敏等, 2016; Wang et al, 2017; 许映龙等, 2015)。但相比于路径预报,台风暴雨预报仍存在较多难点,是台风预报的薄弱环节之一(徐燚等, 2019; 钮学新等, 2005)。

台风强度是影响台风降水强度的因素之一(钮学新等, 2010),但影响台风降水的因素较多,其与雨量强度之间的关系较为复杂。受不同环流影响,有时很强的台风登陆后减弱很快,风雨影响并不大;而较弱的台风,在有利环境条件下也能持续不消,造成持续性强降水(罗玲等, 2013; 尹洁等, 2008)。台风登陆后的暴雨强度和持续时间受诸多因素影响,源源不断的水汽输送、中低纬环流相互作用、中尺度系统影响及地形作用等均是造成台风登陆后维持不衰和暴雨持续的重要因素(陈联寿和丁一汇, 1979; 杨舒楠等, 2018; 岳彩军等, 2019)。

水汽是登陆台风陆上维持的一个重要条件,也是台风暴雨增幅的主要原因之一(Li and Chen, 2007)。与台风环流相关联的水汽场特征差异将造成完全迥异的降水强度及分布特征。对于登陆我国

的台风,南海西南季风是重要的水汽输送通道(陈超等, 2015),其对登陆台风陆上强度的维持有重要影响(李英等, 2005),从而决定台风暴雨的空间、时间分布及降水强度(卢山等, 2008; 朱红芳等, 2019)。叶成志和李昀英(2011)对强热带风暴碧利斯(0604)的研究指出,“碧利斯”登陆后低压环流的长时间维持及其与南海季风的相互作用,是造成湖南东南部罕见致洪暴雨的重要成因。

台风中经常出现的局地性强烈天气往往由中小尺度对流系统所引起(陈联寿和丁一汇, 1979),螺旋雨带则是这些中尺度对流系统的主要源地之一(程正泉等, 2005)。中尺度雨带是台风降水的最主要特征之一,是台风非对称结构的重要体现,同时又与台风暴雨灾害紧密关联(闫非等, 2012; 王勇等, 2010; 朱佩君等, 2005)。台风中的中尺度雨带结构特征变化对于台风降水有直接关系(周海光, 2010; 王勇和丁治英, 2008),中尺度对流系统中的物理量特征分布可以较好地示踪台风暴雨的落区和强度演变(王勇等, 2010)。

2018年第4号台风艾云尼影响我国期间强度为热带风暴或热带低压,强度相对较弱。但其登陆前后,在华南及江南部分地区,尤其是广东沿海,造成了罕见的连续性暴雨,强降水持续时间长达5 d以上,部分站点累积雨量突破历史极值,给当地人民的生产生活和财产安全造成很大影响。本文将针对此次“弱”台风的持续性强降水成因进行探讨,从而为此类台风暴雨的预报及防灾减灾工作提供一定参考依据。

1 资料与方法

本文选用常规地面观测, 1 h 降水量(包括国家站和自动站)、中央气象台台风路径资料、卫星云图以及雷达资料等, 对“艾云尼”的降水实况、中尺度对流系统特征等进行分析。选用 NCEP 的 6 h 间隔, $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 分辨率的全球分析资料(FNL)等, 对环流形势、动热力条件等进行诊断分析。

为分析环流形势的异常特征, 利用 NCEP-NCAR 1988—2017 年(共计 30 年)的 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 再分析资料对环流场的标准化异常(SD)进行计算(杨舒楠和端义宏, 2020)。

$$SD = (F - M) / \sigma$$

式中: F 为某一气象场或物理量的值; M 为该变量 30 年的气候平均, 为去除小波动对统计结果的影响, 在计算气候平均时, 对每一天的变量都进行了 21 d 的滑动平均(前后各 10 d); σ 为变量场气候标准差。标准化异常表征变量场偏离气候态的程度, 一般情况下, $|SD| \geq 3\sigma$ 表示存在较明显异常。

为研究台风暖湿气流来源及空气块物理属性, 选用 HYSPLIT 迹线模式(Stein et al, 2015; Rolph, 2017)对空气质点进行轨迹分析。该模式由美国国家海洋与大气管理局空气资源实验室和澳大利亚墨尔本气象研究中心联合开发, 用于计算空气质点运动轨迹。本文选用 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的 NCEP 全球数据同化系统(GDAS)分析数据计算质点后向运动轨迹, 以探寻台风环流中暖湿气流的源地及移动路径。

2 台风暴雨过程简介

“艾云尼”生成于南海中部洋面, 随后向偏北方向缓慢移动(图 1a), 6 月 6 日早晨至夜间在海南东北部和雷州半岛海岸线附近回旋打转, 随后向东北方向移动, 6—7 日先后在广东徐闻、海南海口和广东阳江三次登陆。“艾云尼”移速约为 $10 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 远小于台风平均移速($20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$), 具有移速缓慢、路径复杂和多次登陆等特点。

受其影响, 6 月 5 日 08 时至 10 日 08 时, 海南岛、广东、湘赣南部、浙江西部等地出现大范围暴雨、大暴雨(图 1a), 其中, 广东沿海、海南岛北部出现特大暴雨, 局地过程累计降水量超 400 mm(图 1b), 最大达 835 mm。“艾云尼”降水持续时间长, 尤其广东沿海

降水持续达 5 d。以广东海丰为例(位置见图 1a), 其 $\geq 10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ($20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) 的小时雨强持续了 28 h (12 h), 其中有 3 h 的小时雨强超 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。台风外围螺旋雨带发展强盛, 对流单体降水效率较高, 最大小时雨量达 124 mm(图略)。受“长时间”和“高效率”降水影响, 广东沿海多站点降水量突破历史极值。

“艾云尼”强度相对较弱(热带风暴或热带低压), 最大风速仅 8 级左右。但却给广东沿海带来了持续性强降水。本文针对此次弱台风影响下的持续性强降水成因进行探讨, 以总结此类台风暴雨的环流特征及动、热力条件特点, 拓展台风暴雨预报思路。

3 台风缓慢移动

“艾云尼”影响过程中, 台风移速缓慢, 台风环流在近海长期维持, 是造成台风持续性强降水的重要环流背景条件。

台风移动既受内部因子作用, 又受环境条件影响(朱乾根等, 2007)。其中台风内力与台风环流大小和强度有关, “艾云尼”环流范围较小(最大风速半径和 7 级风圈分别约为 80 和 100 km), 强度较弱, 因此内力非常小。当台风强度较弱, 内力较小时, 台风一般沿大型环境流场的引导气流移动(朱乾根等, 2007; 毕鑫鑫等, 2018; Wu and Wang, 2000)。为详细分析引导气流对“艾云尼”移动的影响, 本文参照 Wu et al(2011)的定义, 选用台风中心 440 km 半径(四个纬距)范围, 850~300 hPa 的质量权重整层平均风场定义为台风的深层引导气流。

计算的台风引导气流与台风的实际移动速度非常接近(图 2), 表明台风的缓慢移动与特殊的大尺度环流造成的弱引导气流有密切关系。“艾云尼”影响我国期间, 青藏高原上空的大陆高压较气候态明显偏强, 而位于菲律宾以北洋面上的副热带高压也较气候态略偏强(图略), 台风位于副热带高压和大陆高压之间的过渡带, 环境流场等高线较稀疏, 气压梯度力较小(图 3a), 导致引导气流较弱(图 2)。且随着副热带高压东退, 6 日 02 时之后台风环流处于鞍型场中(图 3a), 进一步使得引导气流大小出现陡降(图 2)。这种鞍型场的大尺度环流特征一直从 6 日 02 时持续到 7 日 08 时, 这一时段整层平均引导

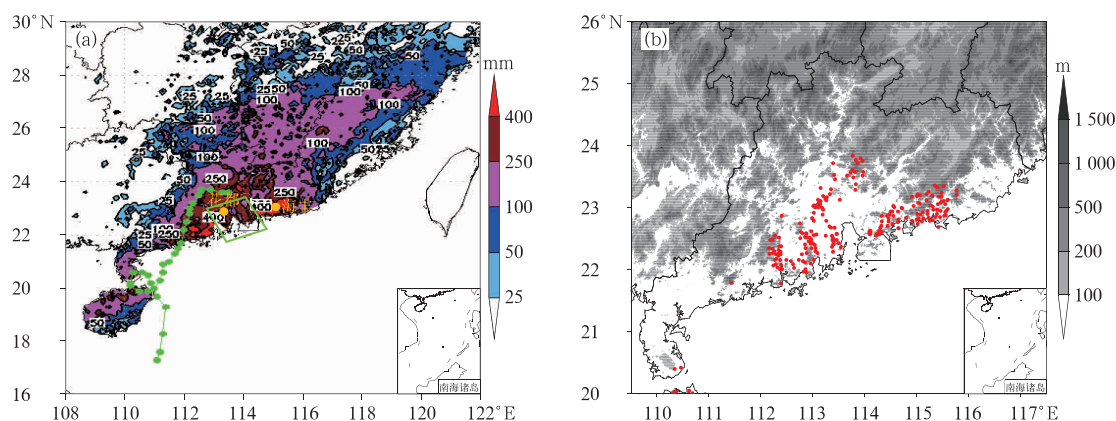


图1 2018年台风艾云尼降水观测实况

(a) 6月5日08时至10日08时过程累计降水量(填色, 绿色圆点为台风路径, 方框为图11珠江三角洲降水计算范围),

(b) 过程累计降水量 ≥ 400 mm站点分布(红点, 包含国家站和自动站)及广东地形(阴影)

Fig. 1 Observed precipitation of TC Ewiniar in 2018

(a) accumulated precipitation (colored) from 08:00 BT 5 to 08:00 BT 10 June

(green dots: TC track, green frame: precipitation statistical area of Pearl River Delta Region in Fig. 11),

(b) distribution of stations with accumulated precipitation ≥ 400 mm (red dots)

and the terrain of Guangdong (shaded)

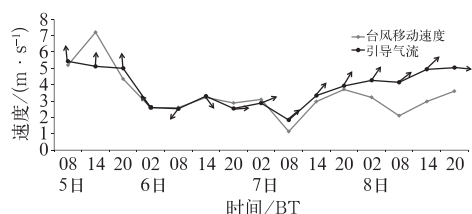


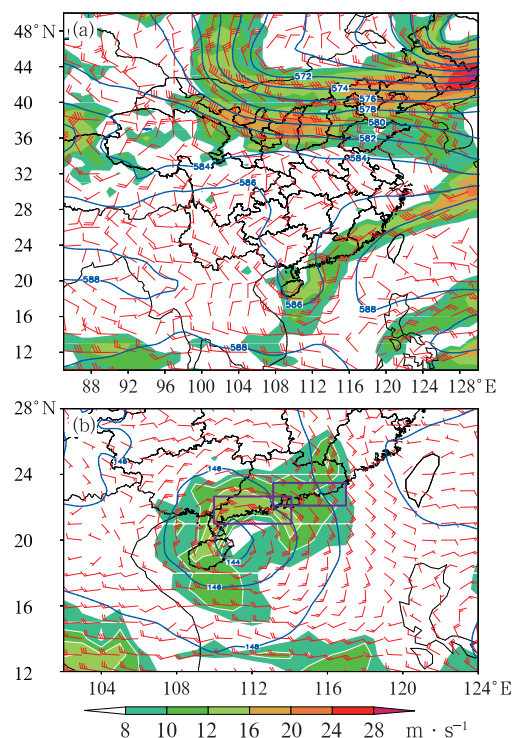
图2 2018年6月5—8日台风艾云尼引导气流大小(黑线)和方向(箭头), 以及台风移动速度(灰线)

Fig. 2 Time series of the magnitude (black line) and direction (arrow) of steering flow, and the translation speed (gray line) of TC Ewiniar during 5–8 June 2018

气流仅为 $2 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。此外, 从引导气流的方向看, 在这一阶段中, 大尺度环境流场的引导气流方向存在较大变化, 呈现出逆时针旋转, 因此在此种弱的大尺度环境引导气流下, 台风移动缓慢, 并发生打转。

4 持续的水汽输送过程

活跃的季风及持续的水汽输入会引起台风环流的长时间维持, 并导致持续性暴雨(王黎娟等, 2011; Gao et al, 2009)。“艾云尼”影响期间处于南海季风爆发初期, 南海夏季风纬向风强度指数达 $7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 较气候平均值 ($2.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 显著偏高。 $5^\circ \sim 15^\circ \text{N}$

图3 2018年6月6日20时(a)500 hPa, (b)850 hPa位势高度场(蓝色实线, 单位: dagpm)、风场(风向杆)及风速(填色, $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)Fig. 3 (a) 500 hPa and (b) 850 hPa geopotential height (blue solid line, unit: dagpm), wind (wind barb) and wind speed (colored, $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) of Ewiniar at 20:00 BT 6 June 2018 (Two purple frames indicate the areas of western and eastern coasts of Guangdong, respectively)

的西风带上,低层纬向风较强,标准化距平达 $2\sigma \sim 4\sigma$ (图 3b, 图 4)。此外,“艾云尼”影响后期,与台风马力斯(1805)的偏东气流打通,导致 $-3\sigma \sim -2\sigma$ 的东风异常(图 4)。上述两支明显强于气候态的气流将能量和水汽源源不断向台风输送。台风环流(南北方向 12 个纬度、东西方向 13 个经度)水汽收支计算显示(图 5),南海西南季风是台风降水的重要水汽通道,受其影响,台风南边界一直存在较强的水汽净流入,尤其 800 hPa 以下。虽然南边界对流层中层的水汽输送在 7 日 08 时后有所减小,但东边界水汽通道的打通迅速弥补了南边界的水汽,使得台风环流的总水汽流入得以长时间维持。

在西南季风环境和双台风环流影响下,台风南侧到东侧存在一条明显的水汽输送带。广东西部沿海($21^\circ \sim 22.5^\circ \text{N}$ 、 $110^\circ \sim 114^\circ \text{E}$)和东部沿海($22^\circ \sim 23.5^\circ \text{N}$ 、 $113^\circ \sim 117^\circ \text{E}$)的平均水汽条件演变显示

(图 6):强水汽输送给广东沿海 800 hPa 以下的整

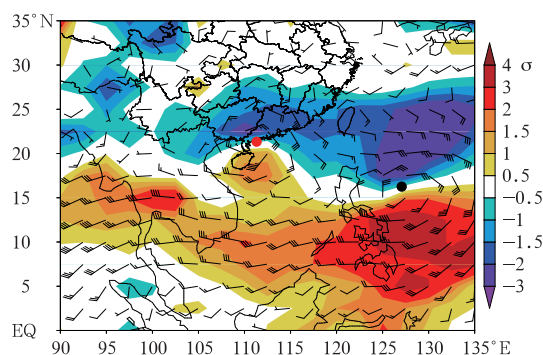


图 4 2018 年 6 月 7 日 08 时 850 hPa 风场及纬向风速标准化异常(填色)

(红色和黑色点分别为“艾云尼”和“马力斯”位置)

Fig. 4 The 850 hPa wind and standardized anomaly (colored) at 08:00 BT 7 June 2018

(Red and black dots indicate the locations of TC Ewiniar and TC Maliksi, respectively)

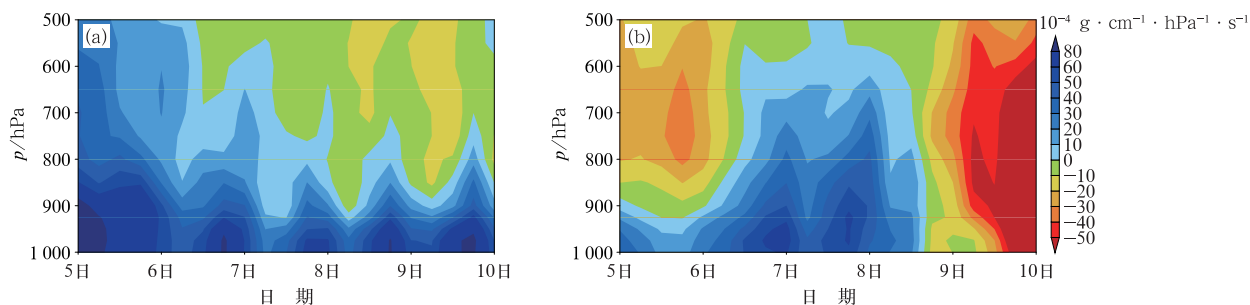


图 5 2018 年 6 月 5 日 08 时至 10 日 08 时台风环流(a)南,(b)东边界净水汽收支

Fig. 5 Net water vapor budget of TC circulation at (a) southern boundary and (b) eastern boundary from 08:00 BT 5 to 08:00 BT 10 June 2018

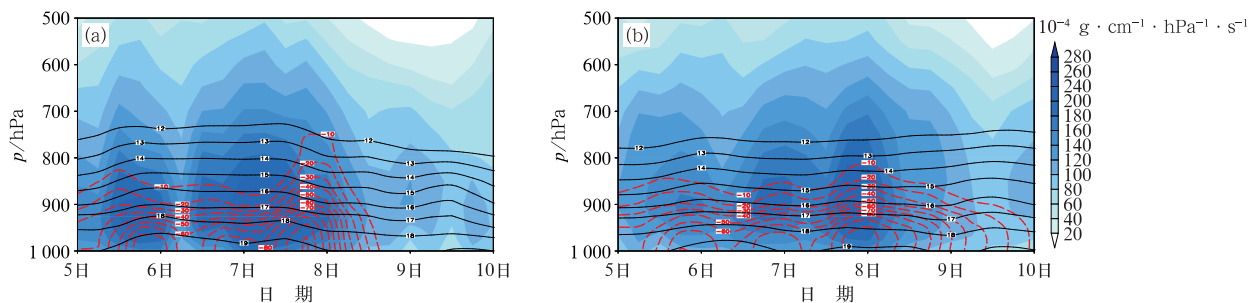


图 6 2018 年 6 月 5 日 08 时至 10 日 08 时,广东(a)西部沿海和(b)东部沿海的区域平均水汽通量(填色)、水汽通量辐合(红色虚线,单位: $10^{-9} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)及比湿(等值线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的垂直时间剖面

Fig. 6 Vertical-time cross-section of regional average of water vapor flux (colored), water vapor flux convergence (red dashed line, unit: $10^{-9} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), and specific humidity (contour, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) among (a) western coast and (b) eastern coast of Guangdong from 08:00 BT 5 to 08:00 BT 10 June 2018

个对流层低层均带来连续 4~5 d 的持续水汽通量辐合。水汽的不断输入造成该地区 850 hPa 比湿长时间维持在 $14 \sim 15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 6), 大气整层可降水量超 70 mm, 为强降水的产生提供有利的水汽条件。

此外, 受强水汽和能量输入影响, 台风的南侧和东侧具有高温、高湿、高能环境条件。台风暖湿空气质点后向运动轨迹(图 7)显示, 高温、高湿气块主要来自中国南海和菲律宾以东洋面, 其在移动过程中, 温度逐渐上升, 相对湿度始终维持在 $70\% \sim 90\%$ 。暖湿气块的不断汇入, 导致高温、高湿环境条件得以维持或增强, 能量不断聚集, 广东沿海的对流有效位能值始终维持在 $1200 \sim 2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 假相当位温持续超过 $348 \sim 352 \text{ K}$ (图略)。

5 下垫面导致的辐合抬升机制

从动力条件看, 受台风环流影响广东沿海对流层低层长期维持着一支与海岸线接近垂直的超过 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东南急流, 该东南急流对强降水的产生

十分重要。花都站风廓线显示(图 8a), 该站对流层中低层为东南或偏南风, 风随高度顺转, 有暖平流, 有利于上升运动发展。6 月 8 日 13:30—15:40, 花都 1.2~3.5 km 风速显著增强, 最大风速达 $22 \sim 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (蓝色方框); 同时, 边界层大风速区向近地面延伸, 近地面风速由 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 迅速增至 $12 \sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (黑色方框)。花都地处山前, 边界层东南风风速增大使地形抬升作用增强, 因此 14—15 时降水出现陡增(图 8b)。15:40 后, 随着东南风风速的减小, 花都的降水量也迅速减弱, 东南风风速演变与降水量变化之间具有很好的对应关系。

为定量分析持续性强降水的动力条件, 图 9 给出了广东西部沿海和东部沿海的平均散度时间演变。对于广东西部沿海, 6 月 5 日至 7 日夜, 800 hPa 以下始终维持着非常强的辐合(图 9a)。7 日 20 时, 台风在阳江登陆, 西部沿海低层辐合迅速增强, 且在垂直方向上延伸至 700 hPa (图 9a), 暴雨的动力条件增强显著。广东西部沿海, 先后受台风外围东南气流向岸风辐合及台风本体辐合影响, 动力条件持续时间较长。

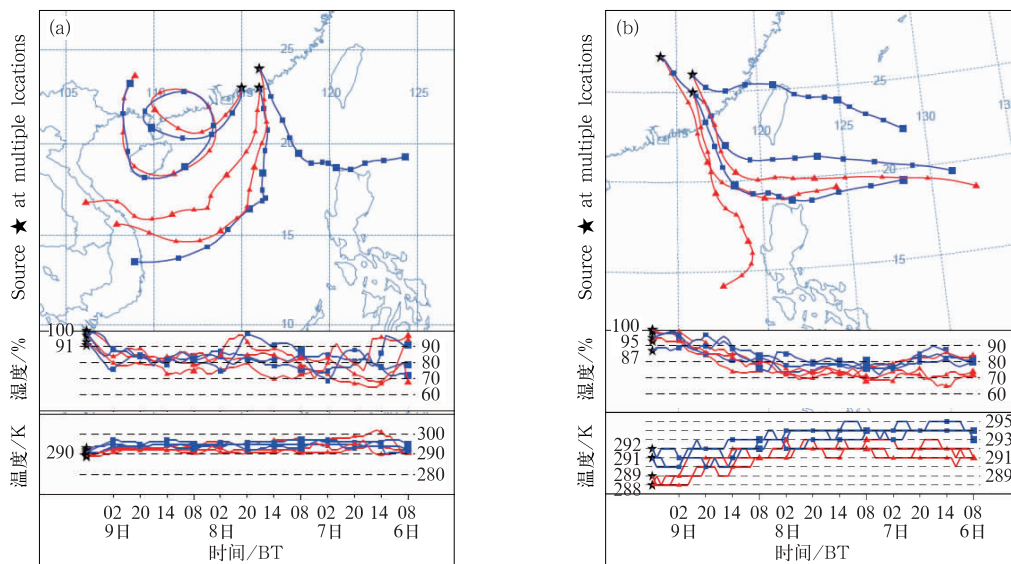


图 7 利用 HYSPLIT 迹线模式计算的台风艾云尼环流 1.5 km 高度(蓝线)和 5 km 高度(红线)空气质点后向传播轨迹(上)及 2018 年 6 月 6 日 08 时至 9 日 02 时空气质点的相对湿度(中)和温度(下)演变

(a) 空气质点位置: $23^{\circ}\text{N}, 115^{\circ}\text{E}$; $23^{\circ}\text{N}, 116^{\circ}\text{E}$; $24^{\circ}\text{N}, 116^{\circ}\text{E}$,

(b) 空气质点位置: $25^{\circ}\text{N}, 116^{\circ}\text{E}$; $26^{\circ}\text{N}, 116^{\circ}\text{E}$; $27^{\circ}\text{N}, 114^{\circ}\text{E}$

Fig. 7 Backward horizontal trajectory (up), the evolution of relative humidity (middle) and air temperature (down) during the movement of air particles over

(a) $23^{\circ}\text{N}, 115^{\circ}\text{E}$; $23^{\circ}\text{N}, 116^{\circ}\text{E}$; $24^{\circ}\text{N}, 116^{\circ}\text{E}$ and (b) $25^{\circ}\text{N}, 116^{\circ}\text{E}$;

$26^{\circ}\text{N}, 116^{\circ}\text{E}$; $27^{\circ}\text{N}, 114^{\circ}\text{E}$ at the height of 1.5 km (blue line) and 5 km (red line)

calculated by HYSPLIT model from 08:00 BT 6 to 02:00 BT 9 June 2018

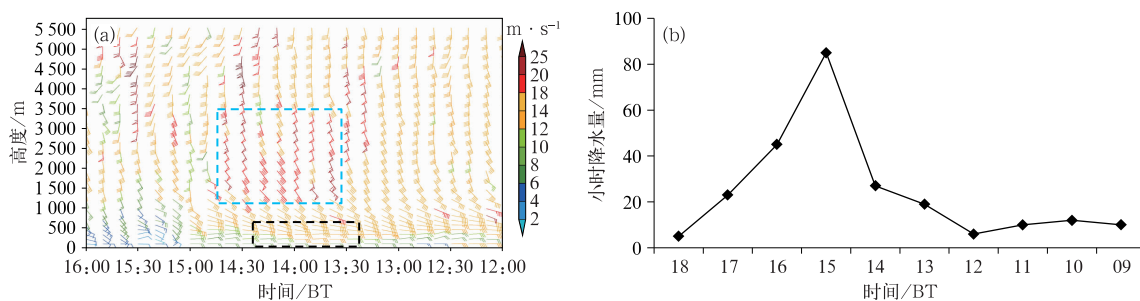


图 8 广东花都站 2018 年 6 月 8 日 (a)12—16 时雷达风廓线风羽图(颜色为风速大小)及 (b)09—18 时小时降水量演变(单位:mm)

Fig. 8 (a) Wind profile of radar wind profiler (colored) from 12:00 BT to 16:00 BT, and (b) hourly precipitation (unit: mm) at Huadu Station of Guangdong Province from 09:00 BT to 18:00 BT 8 June 2018

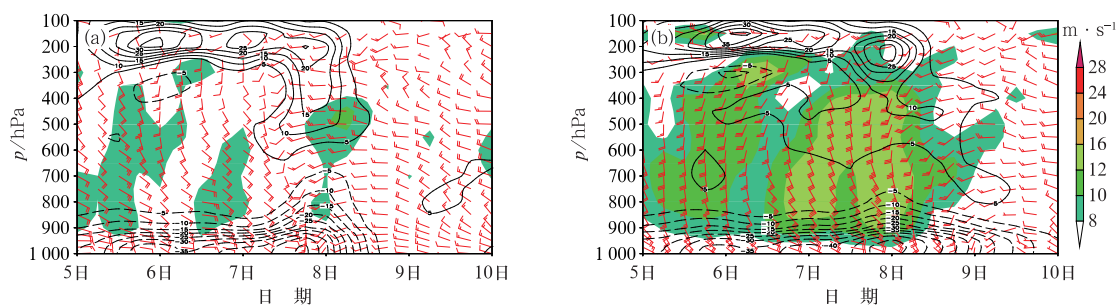


图 9 2018 年 6 月 5 日 08 时至 10 日 08 时广东(a)西部沿海和(b)东部沿海的区域平均风场(风羽)、风速(填色, $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)和散度场(等值线, 单位: 10^{-6} s^{-1})的垂直时间剖面

Fig. 9 Vertical-time cross-section of regional average wind (wind barb), wind speed (colored, $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), and divergence (contour, unit: 10^{-6} s^{-1}) in (a) western coast and (b) eastern coast of Guangdong from 08:00 BT 5 to 08:00 BT 10 June 2018

对于广东东部沿海,其始终处于台风环流右侧,东南向岸风在沿海地形作用下造成的强低层辐合维持时间更长(图 9b)。6 日 20 时之前,台风中心距离较远,东南风较弱($6 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。随着台风的靠近,风速逐渐增大至 $14 \sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且大风速区的垂直延展范围不断扩大。在持续东南向岸风及沿海海岸线和地形的作用下,广东东部沿海的低层辐合维持时间长达 5 d,为强降水提供了持续的动力条件。

6 持续的中尺度对流过程

受高湿、高能环境条件影响,加上东南向岸风辐合及海岸线和地形的动力触发,广东沿海中尺度对流系统十分活跃,伴随持续的中尺度对流的发生、发展(图 10)。就珠江三角洲(图 1a 绿色方框,以下简称珠三角)而言,受 5 个阶段的中尺度对流雨带发

展、演变的影响,其区域站点平均小时雨强呈现出明显的波动演变特征,并具有 5 个降水量峰值(图 11)。下面将重点针对这 5 个阶段的中尺度对流过程演变进行讨论。

第一阶段(6 月 5 日 10—17 时):台风中心位于海南岛东南方向距广东沿海约 400 km 处,此时外围环流已在广东西部沿海引起一条沿海岸线的强对流带(图略),最大回波强度为 $55 \sim 60 \text{ dBz}$ 。但该对流的强回波范围较小,影响较局地,小时雨强较弱(图 11),且雨带迅速西北抬,影响时间短。

第二阶段(6 日 00—22 时):在持续向岸风影响下,对流明显加强(图 10a~10c)。6 日 10 时,广东沿海对流由三部分组成(图 10a):雷州半岛附近的弱台风本体对流;珠三角附近由东南向岸风引起的强回波($55 \sim 60 \text{ dBz}$,影响时间较长、范围较广);以及汕头到揭阳附近快速移动的强回波(仅在 6 日 08—10 时对局地造成了强降水)。中尺度对流系统

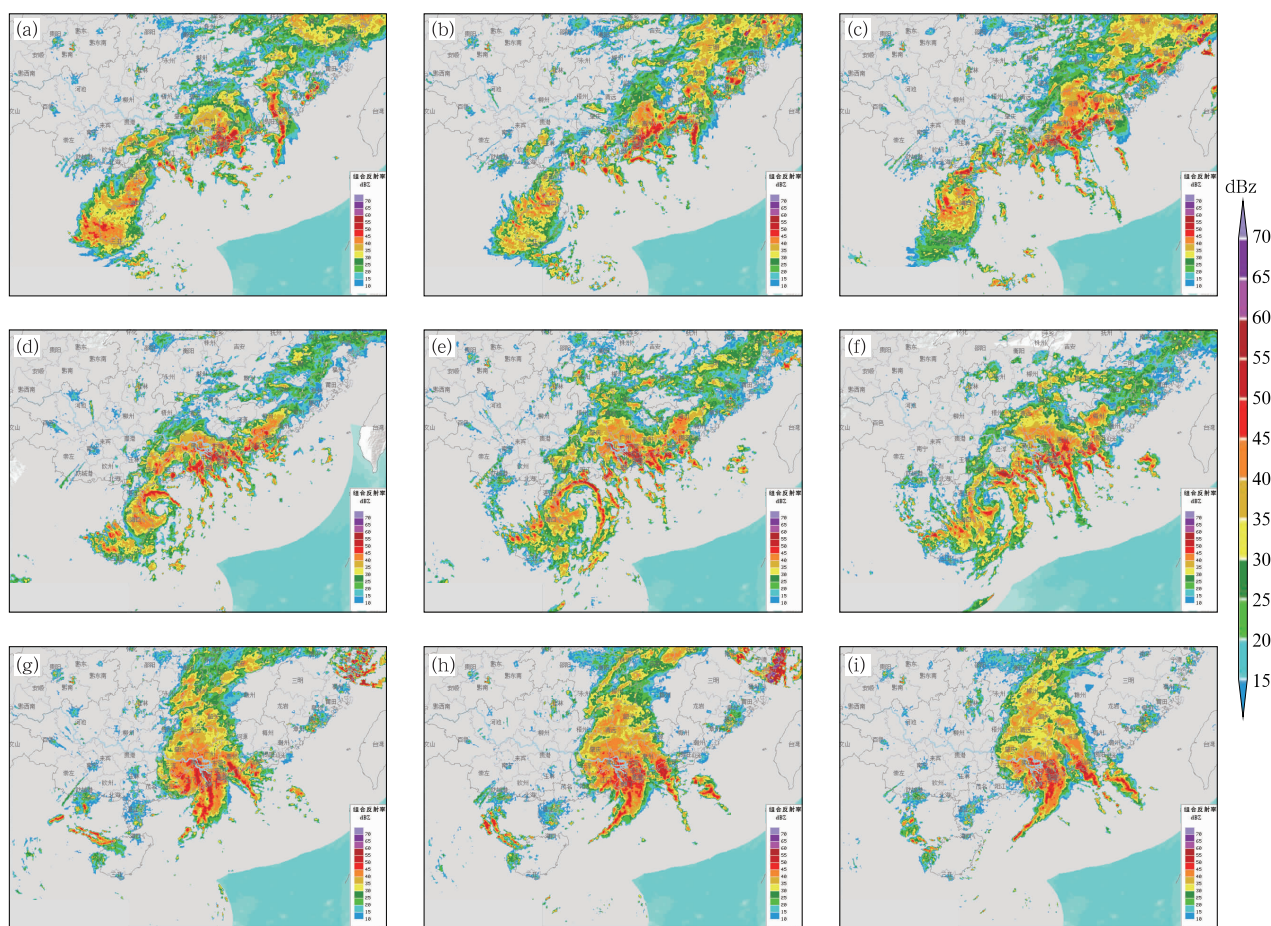


图 10 2018 年 6 月 6 日(a)10 时、(b)12 时、(c)14 时,7 日(d)03 时、(e)05 时、
(f)07 时,8 日(g)04 时、(h)06 时和(i)08 时华南沿海地区雷达拼图

Fig. 10 Composition of radar echo images in coastal areas of South China

at (a) 10:00 BT 6, (b) 12:00 BT 6, (c) 14:00 BT 6, (d) 03:00 BT 7, (e) 05:00 BT 7, (f) 07:00 BT 7,
(g) 04:00 BT 8, (h) 06:00 BT 8, and (i) 08:00 BT 8 June 2018

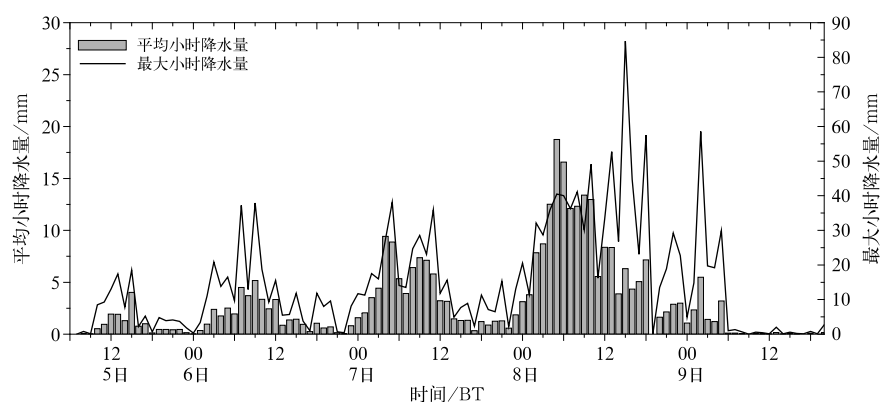


图 11 2018 年 6 月 5—9 日珠三角地区 17 个国家站
平均小时降水量和最大小时降水量演变

Fig. 11 Average 1 h accumulated precipitation and maximum 1 h
accumulated precipitation from 17 national observational
stations in Pearl River Delta Region during 5—9 June 2018

产生后,一方面随大尺度流场向东北方向平移,另一方面珠三角不断有新对流产生。新对流的触发叠加上游对流的移入,导致广东沿海对流的长时间维持(图 10a~10c)。

第三阶段(7 日 00—22 时):随着台风向广东沿海靠近及偏东风水汽通道的建立,广东沿海风速、水汽和能量均迅速增加,中尺度对流的组织化特征明显增强,出现多条较细的东南—西北向强回波带(图 10d~10f),珠三角最大小时降水量达 38.1 mm。此时,对流系统产生后,逐渐发展形成多条中尺度螺旋雨带(图 10d~10f)。中尺度螺旋雨带的发展使对流产生后不会被迅速平移出高湿、高能区,加上台风中心移动缓慢,对流得以长时间维持,降水强度及持续时间均明显提高。

第四阶段(8 日 00—20 时):台风第三次登陆,将大量水汽和能量携带至广东沿海,降水迅速增强,珠三角平均和最大小时降水量分别达 18.8 和 84.7 mm(图 11),为最强降水时段。对流发展旺盛、组织化程度进一步增强,中尺度螺旋雨带特征更明显,雨带强度、空间尺度及维持时间均显著提高(图 10g~10i)。雷达回波表现为两条宽广的中尺度螺旋雨带,分别对应西南季风和东南风(由偏东气流近海转向形成)两条暖湿输送带。对流在海上产生后,沿两支入流发展,在沿海地区的有利环境条件下增强,从而引起长达 20 h 的强降水。此外,冷空气入侵使湘赣南部及广东地区的不稳定条件增强,850 与 500 hPa 温差达 $28\sim 32^{\circ}\text{C}$,进一步导致降水增幅。

第五阶段(8 日 20 时至 9 日 06 时):受冷空气和地面摩擦影响,台风环流逐渐被破坏,降水显著减弱,但台风南侧的西南暖湿气流中仍有中尺度对流系统被触发,但随着环境条件的转差,对流持续时间较短,且影响范围较小,虽然单站小时雨强仍很强,但强降水非常局地(图 11)。

综上所述,高湿、高能环境条件下,沿海地区受不同阶段的对流系统接连影响,对流被不断激发、叠加。中尺度螺旋雨带发展,台风本体和外围云带对流接力以及海上对流的移入等因素共同导致广东沿海中尺度对流雨带的长时间维持,从而造成持续性强降水。尤其 7—8 日,中尺度螺旋雨带特征明显,螺旋雨带形成后,对流沿台风切向向下游移动,引起了强烈的对流性降水和明显的“列车效应”。

7 结论与讨论

台风艾云尼强度较弱,但却造成十分严重的暴雨灾害,广东沿海强降水持续长达 5 d,多站降水量突破历史极值。本文利用常规、非常规观测及分析数据等对“弱”台风艾云尼的持续性强降水成因进行探讨,主要结论如下:

(1)“艾云尼”影响期间,台风处于两高之间的过渡带,大尺度环流背景受鞍型场控制,环境流场等高线稀疏,引导气流非常弱($2\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),且引导气流的方向多变,导致台风移动缓慢,并出现打转。台风环流在近海的长时间维持是持续强降水的重要环流背景条件。

(2)异常强西南季风带来的台风南边界水汽输送,以及双台风背景下,台风马力斯偏东急流提供的东边界水汽补充,共同导致台风环流水汽输入的持续。受其影响,台风水汽条件十分充沛,高温、高湿空气不断被卷入台风环流,造成广东沿海连续出现 4~5 d 的强水汽通量辐合,同时沿海地区高湿、高能环境条件得以维持。

(3)台风外围持续的东南向岸风及海岸线和沿海地形作用下,广东沿海长时间维持着较强的低层风场辐合,叠加高空辐散,有利于强降水的产生及中尺度对流系统的触发。对流层低层东南风风速的增大及大风速区向近地面层的延伸与降水的增强吻合较好。

(4)中尺度对流系统活跃,存在 5 个阶段的中尺度雨带的发展、演变。中尺度雨带中对流不断新生,随后沿切向发展,导致“列车效应”的产生。台风本体降水和外围对流雨带的叠加、中尺度螺旋雨带的发展以及两条暖湿输送带中海上对流的移入等因素共同造成广东沿海地区中尺度对流系统的持续。

(5)本文通过对艾云尼持续性强降水成因的综合分析揭示了弱引导气流造成台风缓慢移动、西南季风和双台风影响下强水汽输送的维持、向岸风造成的沿海辐合抬升以及中尺度对流系统等对持续性强降水产生的作用,但对地形作用的定量性诊断、强降水的微物理特征、中尺度螺旋雨带发展演变机理等的科学问题仍需要进一步的研究和更深入的探讨。

参考文献

毕鑫鑫,陈光华,周伟灿,2018. 超强台风“天鹅”(2015)路径突变过程

- 机理研究[J]. 大气科学, 42(1): 227-238. Bi X X, Chen G H, Zhou W C, 2018. A mechanism study on the sudden track change of Super Typhoon Goni (2015)[J]. Chin J Atmos Sci, 42(1): 227-238(in Chinese).
- 陈超, 卢山, 任志杰, 等, 2015. 强西南季风背景下 1311 号台风“尤特”的暴雨特征分析[J]. 广东气象, 37(2): 13-17. Chen C, Lu S, Ren Z J, et al, 2015. Characteristics of Utor-associated rainstorm under strong southwest monsoon background[J]. Guangdong Meteor, 37(2): 13-17(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: 43-120. Chen L S, Ding Y H, 1979. An Introduction to Typhoons in the West Pacific Ocean[M]. Beijing: Science Press: 43-120(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).
- 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).
- 卢山, 吴乃庚, 薛登智, 2008. 南海季风槽影响下热带气旋暴雨增幅的研究[J]. 气象, 34(6): 53-59. Lu S, Wu N G, Xue D Z, 2008. Research on the enhancement of tropical cyclone rainstorm influenced by monsoon trough of South China Sea[J]. Meteor Mon, 34(6): 53-59(in Chinese).
- 罗玲, 娄小芬, 胡亮, 等, 2013. 0604 号强热带风暴“碧利斯”结构特征及其暴雨成因分析[J]. 气象科学, 33(2): 208-214. Luo L, Lou X F, Hu L, et al, 2013. Study on the characteristics of STS “Bilis” structure and its heavy rainfall in China[J]. J Meteor Sci, 33(2): 208-214(in Chinese).
- 钮学新, 董加斌, 杜惠良, 2005. 华东地区台风降水及影响降水因素的气候分析[J]. 应用气象学报, 16(3): 402-407. Niu X X, Dong J B, Du H L, 2005. Climatic analysis on typhoon rainfall of East China and affecting factors of the precipitation[J]. J Appl Meteor Sci, 16(3): 402-407(in Chinese).
- 钮学新, 杜惠良, 滕代高, 等, 2010. 影响登陆台风降水量的主要因素分析[J]. 暴雨灾害, 29(1): 76-80. Niu X X, Du H L, Teng D G, et al, 2010. Main factors affecting the rainfall caused by landing typhoons[J]. Torr Rain Dis, 29(1): 76-80(in Chinese).
- 王黎娟, 高辉, 刘伟辉, 2011. 西南季风与登陆台风耦合的暴雨增幅诊断及其数值模拟[J]. 大气科学学报, 34(6): 662-671. Wang L J, Gao H, Liu W H, 2011. Diagnosis and numerical simulation of increased torrential rainfall associated with a landfalling typhoon coupled with southwest monsoon[J]. Trans Atmos Sci, 34(6): 662-671(in Chinese).
- 王勇, 丁治英, 2008. 台风“海棠”的螺旋雨带结构及特征[J]. 南京气象学院学报, 31(3): 352-362. Wang Y, Ding Z Y, 2008. Structural and characteristic analyses of spiral rain bands around the landing of Typhoon Haitang[J]. J Nanjing Inst Meteor, 31(3): 352-362(in Chinese).
- 王勇, 丁治英, 李勋, 等, 2010. 台风“海棠”(2005)登陆前后非对称螺旋雨带特征分析[J]. 热带气象学报, 26(5): 544-554. Wang Y, Ding Z Y, Li X, et al, 2010. Dynamic analysis of asymmetric spiral rain bands around the landing of Typhoon Haitang (2005)[J]. J Trop Meteor, 26(5): 544-554(in Chinese).
- 谢惠敏, 任福民, 李国平, 等, 2016. 超强台风丹娜丝对 1323 号强台风菲特极端降水的作用[J]. 气象, 42(2): 156-165. Xie H M, Ren F M, Li G P, et al, 2016. Role of Supper Typhoon Danas in the extreme precipitation caused by severe Typhoon Fitow[J]. Meteor Mon, 42(2): 156-165(in Chinese).
- 徐斌, 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).
- 许映龙, 吕心艳, 张玲, 等, 2015. 1323 号强台风菲特特点及预报难点分析[J]. 气象, 41(10): 1222-1231. Xu Y L, Lyu X Y, Zhang L, et al, 2015. Analysis on the characteristics and forecasting difficulty of Severe Typhoon Fitow (No. 1323)[J]. Meteor Mon, 41(10): 1222-1231(in Chinese).
- 闫非, 李艳伟, 周毓荃, 等, 2012. 受“碧利斯”影响的一次中尺度对流系统模拟研究[J]. 大气科学学报, 35(6): 737-745. Yan F, Li Y W, Zhou Y Q, et al, 2012. Numerical simulation on mesoscale convective systems associated with severe Tropical Storm “Bilis”[J]. Trans Atmos Sci, 35(6): 737-745(in Chinese).
- 杨舒楠, 陈涛, 刘建勇, 2018. 两次台风暴雨冷空气影响对比分析[J]. 气象科技, 46(2): 324-335. Yang S N, Chen T, Liu J Y, 2018. Comparative analysis of TC rainstorms induced by cold air intrusion of two TC cases[J]. Meteor Sci Technol, 46(2): 324-335(in Chinese).
- 杨舒楠, 端义宏, 2020. 台风温比亚(1818)降水及环境场极端性分析[J]. 应用气象学报, 31(3): 290-302. Yang S N, Duan Y H, 2020. Extremity analysis on the precipitation and environmental field of Typhoon Rumbia in 2018[J]. J Appl Meteor Sci, 31(3): 290-302(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).
- 尹洁, 王欢, 陈建萍, 2008. 强热带风暴碧利斯造成华南持续大暴雨成因分析[J]. 气象科技, 36(1): 63-68. Yin J, Wang H, Chen J P, 2008. Diagnostic analysis of sustained torrential rainfall in southern China caused by severe Tropical Storm Bilis[J]. Meteor Sci Technol, 36(1): 63-68(in Chinese).
- 岳彩军, 唐玉琪, 顾问, 等, 2019. 城市阻碍效应对局地台风降水的影响[J]. 气象, 45(11): 1611-1620. Yue C J, Tang Y Q, Gu W, et al, 2019. Study of urban barrier effect on local typhoon precipitation[J]. Meteor Mon, 45(11): 1611-1620(in Chinese).

- 周海光, 2010. 罗莎(0716)台风外围螺旋雨带中尺度结构的双多普勒雷达试验研究[J]. 气象, 36(3): 54-61. Zhou H G, 2010. Structure of Typhoon Krosa (0716) outer rainband observed by dual-Doppler radars[J]. Meteor Mon, 36(3): 54-61(in Chinese).
- 朱红芳, 杨祖祥, 王东勇, 等, 2019. 进入内陆的两个台风降水特征对比分析[J]. 气象学报, 77(2): 268-281. Zhu H F, Yang Z X, Wang D Y, et al, 2019. Comparative analysis of the rainstorms caused by two typhoons in inland China[J]. Acta Meteor Sin, 77(2): 268-281(in Chinese).
- 朱佩君, 郑永光, 王洪庆, 等, 2005. 台风螺旋雨带的数值模拟研究[J]. 科学通报, 50(5): 486-494. Zhu P J, Zheng Y G, Wang H Q, et al, 2005. Numerical simulation of typhoon spiral rain band [J]. Chin Sci Bull, 50(5): 486-494(in Chinese).
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等, 2007. 天气学原理和方法: 第 4 版[M]. 北京: 气象出版社: 523-530. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 2007. Synoptic Meteorology Principle and Method[M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press: 523-530(in Chinese).
- 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.
- 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.
- Li Y, Chen L S, 2007. Numerical study on impact of the boundary layer fluxes over wetland on sustention and rainfall of landfalling tropical cyclones[J]. Acta Meteor Sin, 21(1): 34-46.
- Rolph G D, 2017. Real-time Environmental Applications and Display System (READY) Website[R]. College Park: NOAA Air Resources Laboratory.
- Stein A F, Draxler R R, Rolph G D, et al, 2015. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system[J]. Bull Amer Meteor Soc, 96(12): 2059-2077.
- Wang B Y, Wei M, Hua W, et al, 2017. Characteristics and possible formation mechanisms of severe storms in the outer rainbands of Typhoon Mujiga (1522)[J]. J Meteor Res, 31(3): 612-624.
- 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.
- Wu L G, Wang B, 2000. A potential vorticity tendency diagnostic approach for tropical cyclone motion[J]. Mon Wea Rev, 128(6): 1899-1911.