

梁军,张胜军,贾旭轩,等,2024. 登陆北上台风结构变化及其引发的辽东半岛强降水分析[J]. 气象,50(11):1306-1316. Liang J, Zhang S J, Jia X X, et al, 2024. Analysis on structure changes of landfall northbound typhoons and the heavy precipitation in Liaodong Peninsula induced by them[J]. Meteor Mon, 50(11):1306-1316(in Chinese).

## 登陆北上台风结构变化及其引发的 辽东半岛强降水分析\*

梁 军<sup>1</sup> 张胜军<sup>2</sup> 贾旭轩<sup>1,2</sup> 冯呈呈<sup>1</sup> 李婷婷<sup>1</sup> 李思绪<sup>1</sup>

1 大连市气象台,大连 116001

2 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:** 登陆北上进入渤海的热带气旋多能引发辽东半岛强降水。利用《热带气旋年鉴》、云顶亮温和 ERA-Interim 全球再分析资料,对北上过程中引发辽东半岛强降水的 7 个台风进行动态合成和诊断分析。结果表明:台风登陆北上过程中靠近中纬度高空槽,变性为半冷半暖结构,非对称结构明显;环境风垂直切变明显增大,台风垂直结构发生明显倾斜,其北侧中尺度对流活动发展旺盛,强降水主要分布在顺垂直切变方向的左侧。台风北上过程中与偏南风低空急流相连接,强度衰减缓慢,对流活动持续维持并有所加强。台风北上靠近槽前偏西风高空急流入口区,对流层高层辐散增强,有利于台风低压环流的维持及强降水的产生。槽后冷空气自台风西北侧对流层中高层倾斜下沉,向东南楔入低层,触发台风的东北侧、东南侧对流不稳定能量释放,深厚的上升运动发展。辽东半岛处于台风北侧强对流区,降水强度大、持续时间长。

**关键词:** 北上热带气旋,变性,强降水,辽东半岛

**中图分类号:** P447, P445

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.101201

### Analysis on Structure Changes of Landfall Northbound Typhoons and the Heavy Precipitation in Liaodong Peninsula Induced by Them

LIANG Jun<sup>1</sup> ZHANG Shengjun<sup>2</sup> JIA Xuxuan<sup>1,2</sup> FENG Chengcheng<sup>1</sup> LI Tingting<sup>1</sup> LI Sixu<sup>1</sup>

1 Dalian Meteorological Observatory, Dalian 116001

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

**Abstract:** The landfall tropical cyclones can often bring heavy precipitation to Liaodong Peninsula when they move northward into the Bohai Sea. Using CMA *Tropical Cyclone Yearbook*, cloud top brightness temperature and ERA-Interim reanalysis data, we conduct dynamic synthesis and diagnostic analysis of seven typhoons that caused heavy precipitation over the Liaodong Peninsula during their northward moving. The major conclusions are as follows. The typhoons experienced extratropical transition when approaching westerly troughs and had hybrid structures with remarkable baroclinic instability. Meanwhile, the vertical wind shear was enhanced, the vertical structure of the typhoon vortex slanted with height, and mesoscale convection developed on their north sides. The locations of heavy precipitation mainly occurred in the left side along with the direction of vertical wind shears. The standing link of typhoon with a deep southwestern or southeastern jet was favorable for the development of sustained convective activities in the typhoon rain belts, and the typhoons decayed slowly due to abundant moisture supply. Basically, strong-rainfall

\* 国家重点研发计划(2023YFC3008501)、环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM202108、QYXM202208、QYXM202402、QYXM202403)和中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题(2024LASW-B14)共同资助

2024 年 5 月 9 日收稿; 2024 年 10 月 23 日收修定稿

第一作者: 梁军, 主要从事短期天气预报及应用技术研究. E-mail: qinldj@163.com

typhoons moved northward near the entrance area of the westerly jet stream in front of the trough, characterized by strong divergence in the upper layers. The coupling dynamical structure of positive divergence zone and the positive vorticity at lower levels formed, which was favorable for genesis of heavy precipitation and long-time subsistence of typhoon circulation. The cold air in the middle and upper troposphere invaded into typhoons' northwest sides and the frontal zone slanted towards northwest with height, increasing the convective instability in the low-level front zone. The coupling dynamic structure of positive vorticity region and the divergence center further uplifted the air on their northeast sides and southeast sides. Liaodong Peninsula was in the north side of the typhoons, possessing strong low-level convergence, vertical wind shear, and deep and persistent vertical motion, thus the precipitation intensity was high and the duration was long over the Liaodong Peninsula.

**Key words:** northward-moving tropical cyclone, extratropical transition, heavy precipitation, Liaodong Peninsula

## 引 言

辽东半岛大范围强降水多发生于北上台风与中纬度系统相互作用的变性过程中, 约占变性台风总数的一半(梁军和陈联寿, 2005; 钟颖旻等, 2009; 孙莎莎等, 2017)。此类台风与西风槽相互作用若获得斜压能量可变性加强, 激发中尺度对流系统(MCS), 从而增加降水强度(Kofron et al, 2010; 梁军等, 2019; 杨晓亮等, 2023; 符娇兰等, 2023; 于玉斌等, 2024)。与此同时, 若有低空急流或多台风提供持续的水汽输送, 则有利于台风强度的维持、对流云降水效率的提高和极端强降水的产生(Sun and Zhang, 2017; 杨舒楠和端义宏, 2020; 何立富等, 2020; 王科等, 2021; 杨浩等, 2022; 饶晨泓等, 2022; 汪小康等, 2022; 张芳华等, 2023)。由于变性台风的结构变化, 其雨带呈明显的非对称结构(Jones et al, 2003; Atallah et al, 2007; Anwender et al, 2008; 梁军等, 2015; 高拴柱, 2020; 向纯怡等, 2020), 引发的强降水分布与冷暖锋的位置和强度、能量及高空冷空气下传的区域密切相关(梁军等, 2008; 吴丹等, 2021)。台风在不同变性阶段的结构特征不尽相同(Klein et al, 2002; Deng and Ritchie, 2018), 直接影响其强度和强降水的分布。在此过程中, 台风与副热带、西风带或另一热带系统相互作用时, 影响台风路径、强度和降水的环境因素更为复杂, 相关的预报技术一直是业务中的难点。

2011—2023年, 北上影响辽东半岛的台风多达15个, 仅2018年就有3个登陆北上(吕心艳等, 2021)。辽东半岛历史罕见大暴雨多由北上进入渤海

的变性台风引发, 特别是2018年“温比亚”影响期间, 半岛南部的大连地区平均降水量达190.7 mm, 突破了全区日平均降水量历史极值, 98%的区域出现大暴雨。在多尺度、多系统、多台风的复杂过程中, MCS(包括中尺度涡旋、中尺度辐合线和干线等)变得非常活跃, 甚至沿同一条中尺度辐合线不断有对流云团生成(杨舒楠和端义宏, 2020; 高拴柱, 2020; 薛煜等, 2021), 造成影响地区的降水强度变大、强降水时间变长, 台风暴雨发生发展的中尺度环境和触发机制更为复杂。常用业务预报模式对变性台风降水的极端性、对流云降雨效率及强降水落区的预报较实况有较大偏差, 这常常会导致降水强度和落区预报失败, 给台风灾害防御带来困难和挑战。研究登陆北上变性台风的结构变化及其降水强度和分布的关键影响因子, 对提高此类台风暴雨预报的精度有实际意义。本文针对登陆北上进入渤海引发辽东半岛强降水的变性台风多个例, 利用动态合成分析方法, 研究其强降水期间的大尺度环流特征、台风暴雨的中尺度结构变化特征及强降水落区的关键影响因子, 以期今后北上变性台风强降水业务预报提供参考。

## 1 资料及台风个例选取和研究方法

所用资料为常规观测资料、大连地区逐1 h自动气象站雨量资料; FY-2D卫星的黑体亮温(TBB)产品( $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , 主要用于分析“0509”“1818”“1909”“2106”号台风)、日本气象厅3 h一次的TBB资料( $1^\circ \times 1^\circ$ , 主要用于分析“8108”“8509”“9711”号台风); 欧洲中期数值预报中心 ERA-Interim 再分

析资料( $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ); 台风的中心位置、强度等数据取自中国气象局《热带气旋年鉴》和台风最佳路径数据集。

台风样本选取原则兼顾登陆季节及进入渤海时的强度, 即登陆季节相近, 进入渤海时强度相差不大, 辽东半岛降水期间强度维持多超过 24 h, 台风中心海平面气压偏差为  $0 \sim 2$  hPa。所选登陆北上进入渤海引发辽东半岛强降水的台风样本包括“8108”“8509”“9711”“0509”“1818”“1909”“2106”号(图 1), 图中台风路径起始点为  $25^{\circ}\text{N}$  以北的位置。登陆地多在温州北部到长江口一带, 登陆后多向偏北方向移动, 且均有变性过程。7 个台风个例基本为东北转向路径, 多在进入渤海前  $18 \sim 24$  h 引发辽东半岛的降水, 降水期间辽东半岛位于台风东北或东北偏北方向。7 个台风引发的强降水均呈现西南—东北向带状分布, 过程降水量多在  $100 \sim 200$  mm, “2106”号台风影响期间由于其路径偏西, 辽东半岛东部降水量偏小; 最大小时降水强度多在  $20 \sim 40$   $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , 但“1818”号台风影响期间出现超过  $50$   $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$  的极端短时强降水, 这与“1819”号台风和西太平洋副热带高压(以下简称副高)之间持续向北充沛的水汽输送密切相关(梁军等, 2020)。以辽东半岛降水开始前 30 h 为基准, 对以上 7 个台

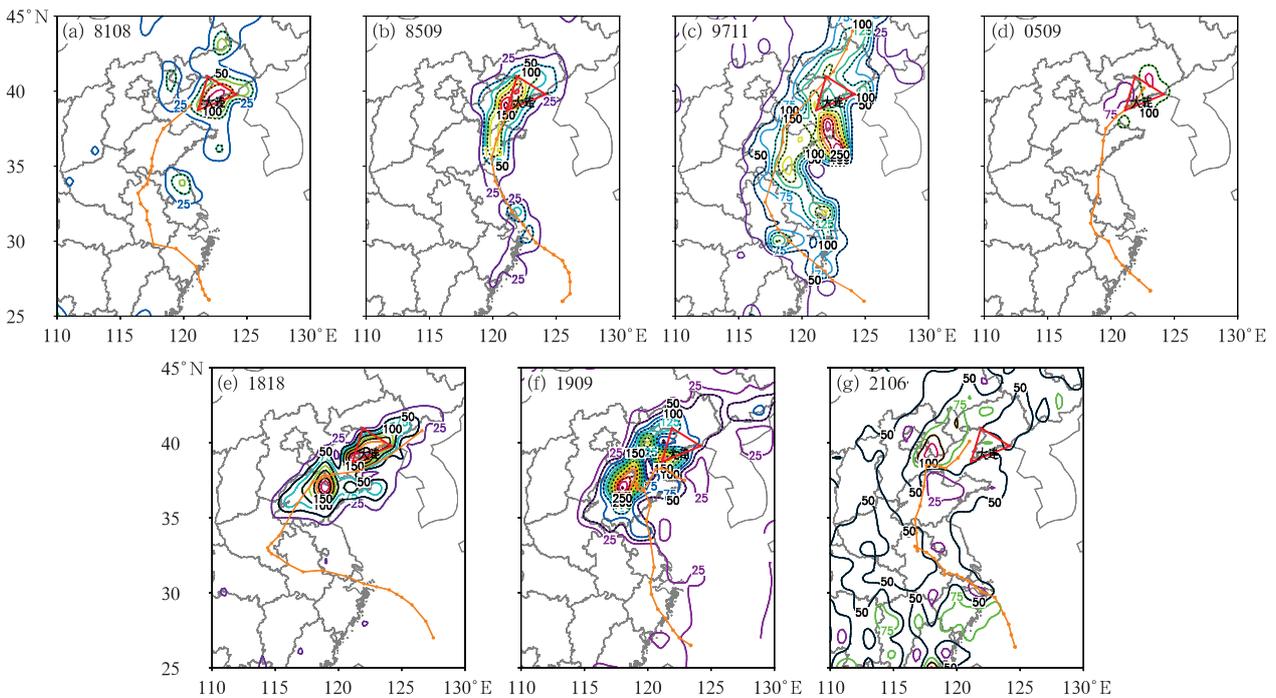
风样本暴雨前(后)时刻的物理量进行动态合成。即采用伴随台风的移动坐标系, 以台风移动过程中各时刻中心所在位置作为移动坐标原点进行样本合成。该方法中台风总是位于研究区域中心, 既能保持台风结构的相对完整, 又能使台风在大尺度环流形势下的相对位置基本保持不变, 从而减少了样本平均时物理量的相互抵消。为分析中尺度对流系统对北上变性台风降水的影响, 采用 Shuman-Shapiro 九点滤波算子平滑常规物理量场和 TBB 数据提取中尺度物理量场。

## 2 大尺度环流背景

### 2.1 环流形势

分析辽东半岛降水前后 24 h 动态合成的 500 hPa 环流特征(图 2a~2c)发现, 台风中心的东南侧为副高, 东北象限为位于东北地区的大陆高压, 副高与其北部的大陆高压形成的经向高压带稳定维持, 有利于台风北上; 西北象限有西风槽靠近, 且西风带冷空气逆时针卷入台风西南部, 均伴有变性过程, 环流结构由准对称逐渐演变为非对称结构。

对合成的 850 hPa 水平风和水汽通量场(图 2d~2f)



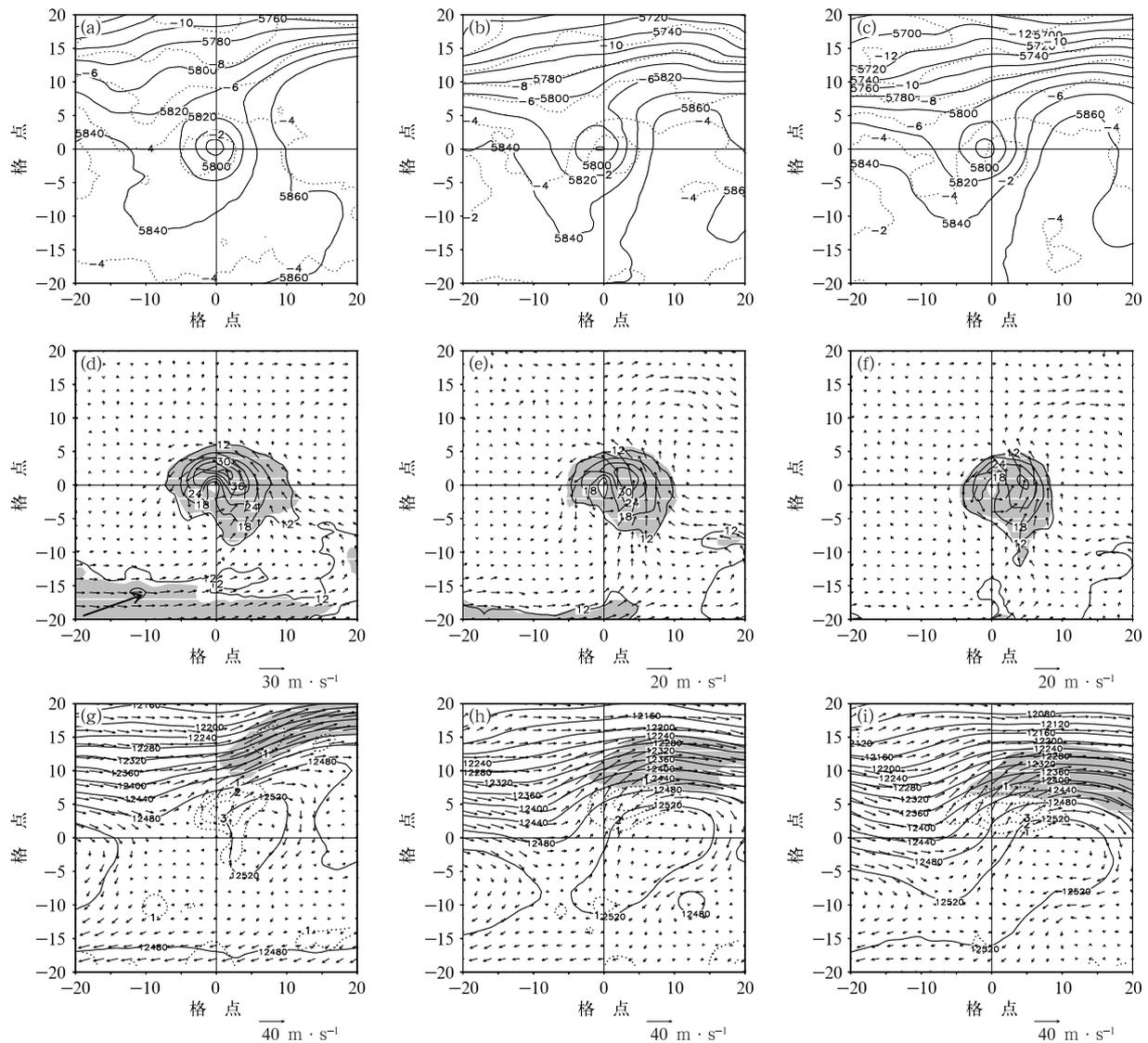
注: 台风位置间隔 6 h, 三角形代表辽东半岛地区。

图 1 台风样本路径(点线)和累计降水量(等值线, 单位: mm)

Fig. 1 Tracks (dotted line) of sampled typhoons and the accumulated precipitation (contour, unit: mm)

进行分析,发现降水前 24 h 的低空风速大值中心有两个,分别位于西南(图 2d 中西南方向箭头南侧)、东南象限,降水后风速大值中心主要在东南象限。低空急流带上的水汽通量大值区表明低空急流是台风强度维持和强降水持续的主要水汽输送带,水汽

主要来源于南海至孟加拉湾及副高西侧的东部海域。北上台风持续获得水汽和能量补充有利于其强度的维持和大范围强降水的产生,降水发生后 24 h,水汽输送减弱。进一步分析合成的四个边界水汽通量平均值的垂直变化(图 3)可以看出,850 hPa 以下



注:台风中心位于坐标原点,向北、向东为正,向南、向西为负;格距为 1 个经/纬度;图 d 中长箭头表示风速大值中心。

图 2 辽东半岛(a,d,g)降水开始前 24 h,(b,e,h)降水开始时,(c,f,i)6 h 降水量 > 30 mm 时合成的 (a~c)500 hPa 高度场(实线,单位:gpm)和温度场(虚线,单位:℃),(d~f)850 hPa 水平风(风矢)和风速(阴影,≥8 m · s<sup>-1</sup>)及水汽通量场(实线,≥12 g · cm<sup>-1</sup> · hPa<sup>-1</sup> · s<sup>-1</sup>), (g~i)200 hPa 高度场(实线,单位:gpm)、水平风(风矢)和风速(阴影,≥30 m · s<sup>-1</sup>)及散度场(虚线,≥1 × 10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>)  
 Fig. 2 Composite (a~c) 500 hPa geopotential height field (solid line, unit: gpm) and temperature field (dashed line, unit: ℃), (d~f) 850 hPa horizontal wind (wind vector), wind speed (shaded, ≥8 m · s<sup>-1</sup>) and moisture flux (solid line, ≥12 g · cm<sup>-1</sup> · hPa<sup>-1</sup> · s<sup>-1</sup>) and (g~i) 200 hPa geopotential height field (solid line, unit: gpm), horizontal wind (wind vector), wind speed (shaded, ≥30 m · s<sup>-1</sup>) and divergence field (dashed line, ≥1 × 10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>) of (a, d, g) 24 h before precipitation, (b, e, h) onset of precipitation and (c, f, i) 6 h accumulated precipitation over 30 mm in Liaodong Peninsula

的东边界、南边界和 850 hPa 以上的西边界、南边界有明显的水汽流入,尤其是 925 hPa 以下的东、南边界始终有较强的水汽流入,表明水汽主要来源于南边界和东边界。降水开始后,1000~300 hPa 的东边界和北边界的水汽通量为负值,表明这两个边界有水汽流出。

对合成的 200 hPa 水平风和散度场(图 2g~2i)进行分析,发现辽东半岛台风降水发生前,在对流层中高层西风槽前存在一支西南风高空急流(HLJ)。台风东北象限始终维持着一支中心风速大于  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的西南急流,随着中纬度高空槽靠近,高空出流逐渐加强,HLJ 急流轴入口区南侧的辐散中心值由

$2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  增至  $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  以上,高层辐散抽吸作用的持续有利于对流层低层台风低压环流和强降水的维持。

### 2.2 环境风垂直切变

在北上渤海变性台风影响辽东半岛期间,台风螺旋雨带的 MCS 和强降水区呈现明显的非对称性分布,这与环境风垂直切变密切相关。研究表明,在北半球,当影响台风的水平风垂直切变大于  $7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,台风雨带的 MCS 及其强降水区主要出现在顺切变方向及其左侧(Chen et al,2006)。

图 4 是台风区域(以台风中心为中心的 10 个经/

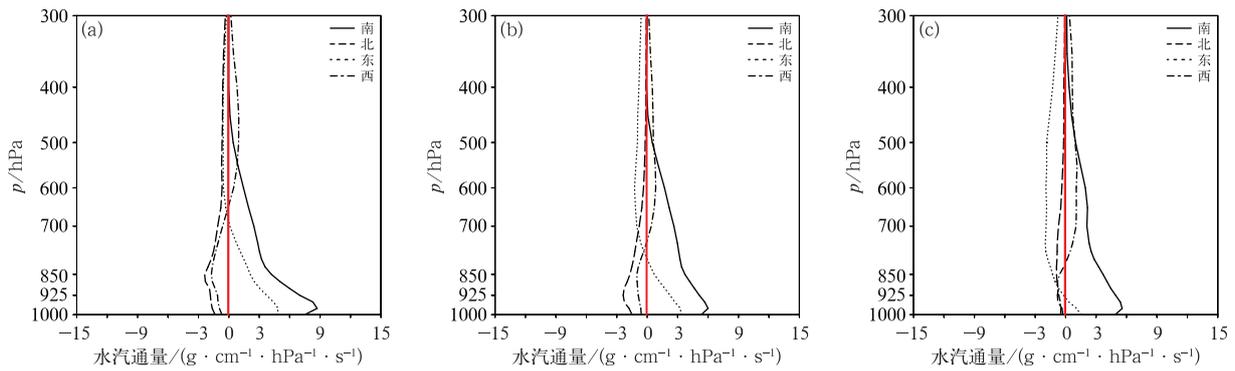
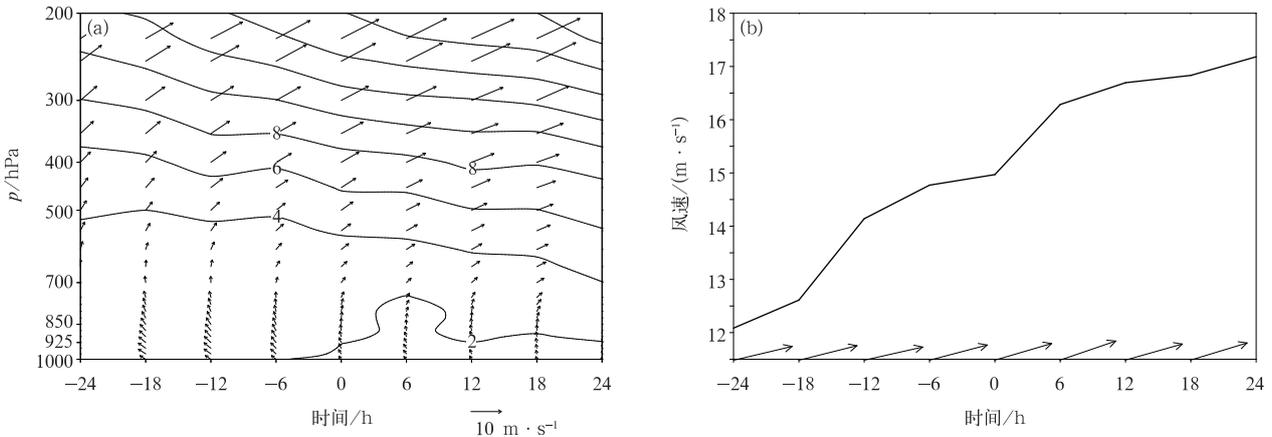


图 3 辽东半岛(a)降水开始前 24 h,(b)降水开始时,(c)6 h 降水量 > 30 mm 合成的四个边界水汽通量平均值的垂直变化曲线

Fig. 3 Vertical profiles of composite the moisture fluxes across four boundaries of (a) 24 h before precipitation, (b) onset of precipitation and (c) 6 h accumulated precipitation over 30 mm in Liaodong Peninsula



注:横坐标中 0 代表降水开始时刻,正、负数值分别表示降水开始后和开始前,下同;  
图 b 中箭头代表垂直风切变方向,折线代表其大小。

图 4 台风区域平均(a)水平风(风矢)和风速(等值线,单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )高度-时间演变,  
(b)850~200 hPa 平均垂直风切变时间演变

Fig. 4 (a) Height-time variation of horizontal wind field (wind vector) and wind speed (contour, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and (b) time series of vertical wind shear from 850 hPa to 200 hPa averaged over the typhoon areas

纬度范围)平均水平风和风速的垂直分布(图 4a)及平均 850~200 hPa 环境垂直风切变(图 4b)的时间演变。可以看出,辽东半岛强降水开始前,700 hPa 以下盛行东南风,低层东南风风速随高度减小,500 hPa 以上转为西南风;降水开始时(0 h),台风逐渐移近对流层高层偏南风大值区,环境风垂直切变增至  $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,风向为西南偏西风(图 4b)。此时,对流层低层台风环流中心向西南方向拉伸为椭圆形,逐渐呈现西北冷、东南暖的非对称结构。台风区域的对流云团沿垂直切变的方向主要出现在台风北部。此间辽东半岛位于台风北部,处于顺切变方向的左侧,位于强对流发展区。可见,北上台风变性过程中环境风垂直切变的增强,对其降水的非对称分布起决定性作用。

### 2.3 温湿场

分析合成的温度距平纬向垂直剖面(图 5)可以看出,台风降水前后,台风中心上空 500 hPa 以上均为暖中心,700 hPa 以下均有冷空气侵入,气温下降  $1\sim 3\text{ }^\circ\text{C}$ 。低层的冷空气随西北气流自北向南、自西向东侵入,台风中心附近的暖中心与其北侧、西侧的冷中心形成半暖半冷的结构,围绕台风中心形成半环形,台风中心西侧和东北侧出现假相当位温等值线密集带,具有中尺度冷(图 6 中西侧箭头)、暖(图 6 中东侧箭头)锋特征,变性台风降水增强。同

时,由合成的温度距平经向垂直剖面(图略)可以发现,台风中心南侧温度正距平贯穿对流层,暖心高度在  $600\sim 250 \text{ hPa}$ ,其北侧有冷中心相对应,也呈现显著的非对称结构。

上述分析表明,登陆北上进入渤海的台风影响辽东半岛期间,卷入的冷空气加强,环境风垂直切变明显偏强,台风的涡旋结构非对称结构明显。由于台风与水汽输送通道持续相连,台风衰减缓慢。

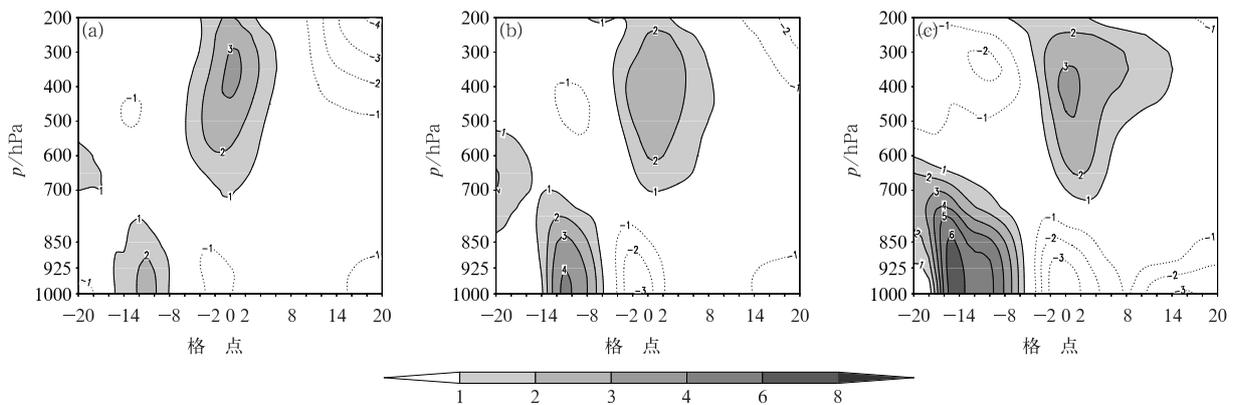
## 3 辽东半岛暴雨的中尺度特征及成因

### 3.1 云系特征

辽东半岛强降水期间,围绕台风眼区的螺旋云带 TBB 低于  $-32\text{ }^\circ\text{C}$ ,暴雨开始前(图 7a),螺旋云带在经向上已被拉长近南北向,云体呈现明显的非对称结构,台风中心附近的东北象限对流最强。之后的变性过程中(图 7b,7c),螺旋云带中尺度对流云团在其东北象限台风外围发展,显示了变性台风非对称的结构变化特征。

### 3.2 中尺度扰动特征

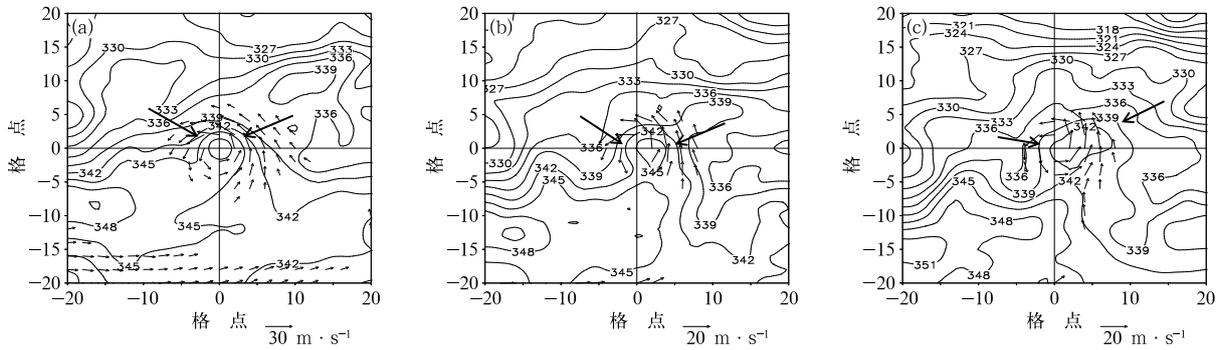
冷暖空气相互作用激发对流发展,有利于北上台风强度的维持和强降水的产生。台风影响辽东半岛期间垂直运动扰动场(图 8)的分布特征也表明,



注:横坐标中 0 代表台风中心,向东为正,向西为负。

图 5 辽东半岛(a)降水开始前 24 h,(b)降水开始时,(c)6 h 降水量  $> 30 \text{ mm}$  时过台风中心合成的温度距平(等值线和阴影,单位:  $^\circ\text{C}$ )的纬向垂直剖面

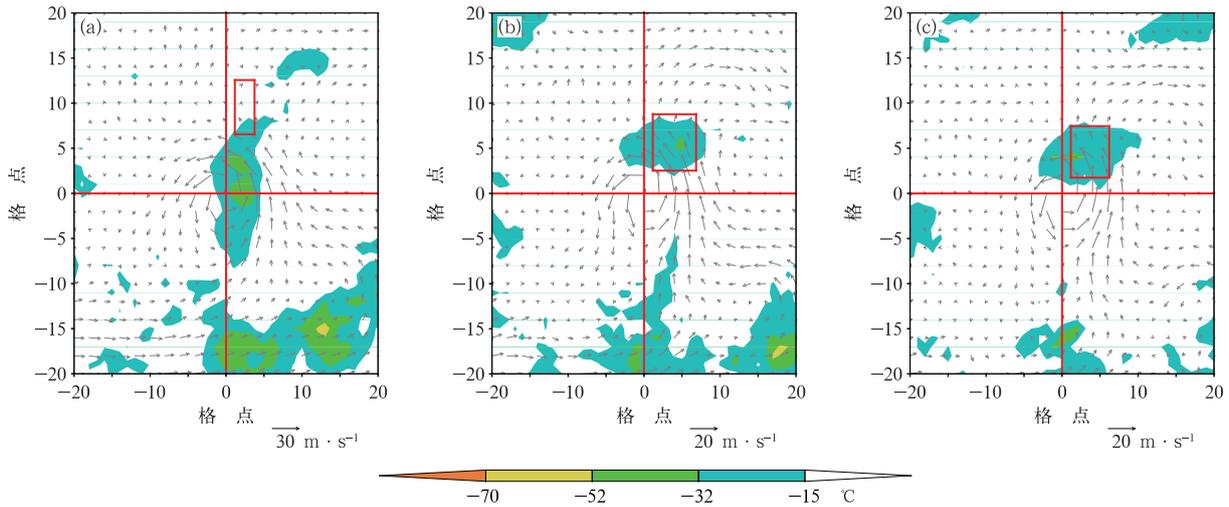
Fig. 5 Zonal vertical cross-sections of composite temperature anomaly (contour and shaded, unit:  $^\circ\text{C}$ ) through typhoon center of (a) 24 h before precipitation, (b) onset of precipitation and (c) 6 h accumulated precipitation over 30 mm in Liaodong Peninsula



注:黑色粗箭头代表锋面。

图 6 辽东半岛(a)降水开始前 24 h,(b)降水开始时,(c)6 h 降水量 > 30 mm 时合成的 850 hPa 风场(风矢,风速  $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )和假相当位温(等值线,单位:K)

Fig. 6 Composite 850 hPa wind field (wind vector,  $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and pseudo-equivalent potential temperature (contour, unit: K) of (a) 24 h before precipitation, (b) onset of precipitation and (c) 6 h accumulated precipitation over 30 mm in Liaodong Peninsula



注:红色方框区域代表辽东半岛暴雨区。

图 7 辽东半岛(a)降水开始前 24 h,(b)降水开始时,(c)6 h 降水量 > 30 mm 时合成的 TBB(填色,  $\leq -15^\circ\text{C}$ )和 850 hPa 风场(风矢)

Fig. 7 Composite TBB (colored,  $\leq -15^\circ\text{C}$ ) and 850 hPa wind field (wind vector) of (a) 24 h before precipitation, (b) onset of precipitation and (c) 6 h accumulated precipitation over 30 mm in Liaodong Peninsula

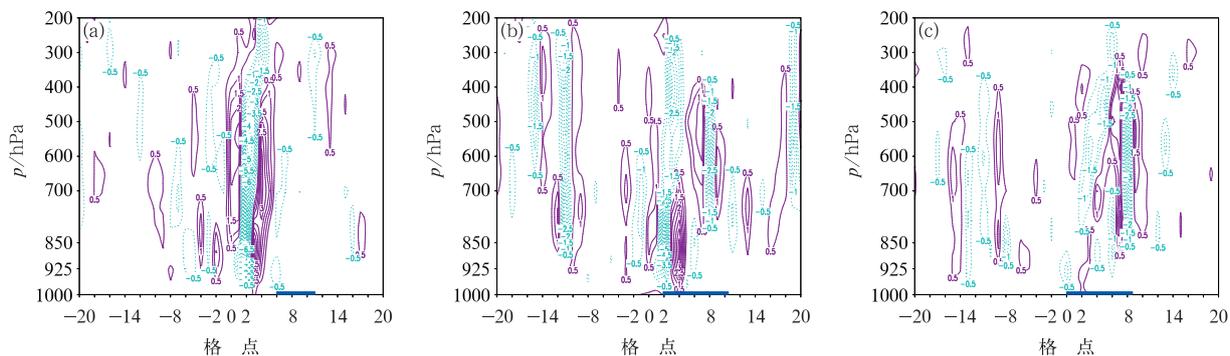
围绕台风中心下沉和上升运动是相间排列的,具有明显的波动结构,向上伸展至 200 hPa。降水前 24 h 波动结构主要分布在台风中心南侧;降水开始时围绕台风中心南北基本对称;随着北方扰动增强,北侧波动增强,辽东半岛强降水开始。降水期间,南方扰动虽有减弱,但波列仍维持,有利于对流运动,台风强度维持,辽东半岛降水持续时间超过 18 h。

由此可见,北上台风具有明显的中尺度波动特

征。台风波列向中心北侧发展,振幅强、范围广,有利于减缓台风强度衰减,使得辽东半岛强降水维持时间长。

### 3.3 暴雨区的降水条件

辽东半岛降水期间,暴雨区位于台风东北侧。图 9 是台风影响期间辽东半岛 ( $38^\circ \sim 40^\circ\text{N}, 121^\circ \sim 123^\circ\text{E}$ ) 区域平均的气象要素垂直分布随时间的演



注:蓝色粗线段代表暴雨区,下同;横坐标中 0 代表台风中心,向北为正,向南为负,下同。

图 8 辽东半岛(a)降水开始前 24 h,(b)降水开始时,(c)6 h 降水量>30 mm 时过台风中心合成的扰动垂直速度(单位: $10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ )的经向垂直剖面

Fig. 8 Meridional vertical cross-sections of composite disturbance vertical velocity (unit:  $10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ) through typhoon center of (a) 24 h before precipitation, (b) onset of precipitation and (c) 6 h accumulated precipitation over 30 mm in Liaodong Peninsula

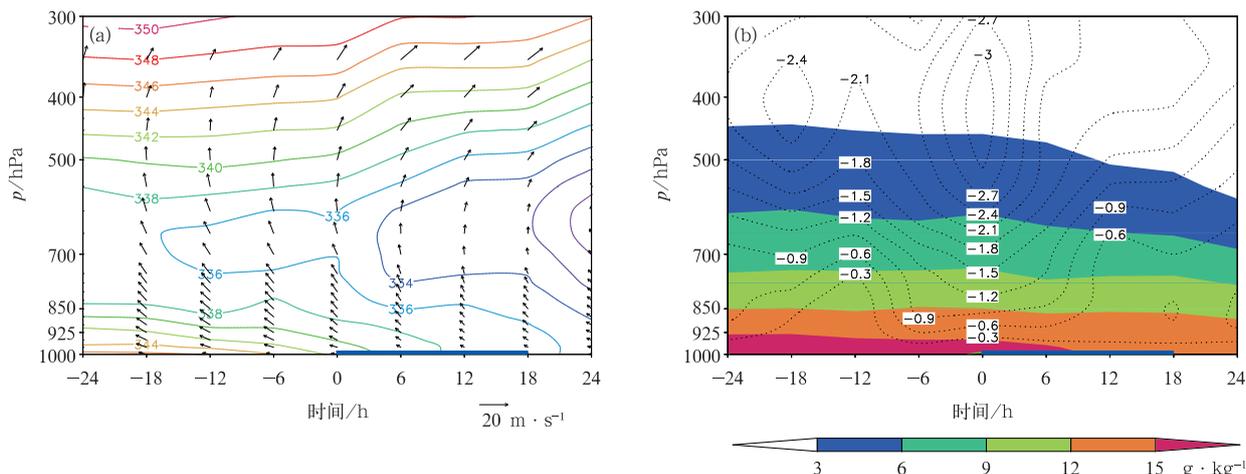


图 9 辽东半岛上空 ( $38^{\circ} \sim 40^{\circ} \text{N}, 121^{\circ} \sim 123^{\circ} \text{E}$ ) 合成的平均(a)相当位温(等值线,单位:K)和水平风(风矢),(b)比湿(填色)和垂直速度(等值线,单位: $10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ )的高度-时间演变

Fig. 9 Height-time variations of (a) equivalent potential temperature (contour, unit: K) and horizontal wind (wind vector), (b) specific humidity (colored) and vertical velocity (contour, unit:  $10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ) averaged over Liaodong Peninsula ( $38^{\circ} \sim 40^{\circ} \text{N}, 121^{\circ} \sim 123^{\circ} \text{E}$ )

变。从相当位温和水平风场(图 9a)的演变可以看出,500 hPa 以上和 850 hPa 以下为相当位温大值区,700~500 hPa 出现降温,两者分别在降水开始前前后比较明显。这是由于降水期间辽东半岛高层始终处于东北地区大陆暖高压内,持续向东北伸展的暖温度脊阻挡了自北向东南扩散的冷空气,边界层的相当位温仍维持较大值。随着台风北上逐渐靠近温度槽底,对流层中高层西风带干冷空气与低层台风东侧的暖湿气流上下叠置,大气垂直对流不稳定性加大,有利于辽东半岛降水发生。同时,台风北移

靠近高空槽,其对流层低层的水平辐合明显加大,冷暖气流的交汇以及强风垂直切变加剧了辽东半岛的上升运动(图 9b),积聚的不稳定能量得以释放,引发强降水。

### 3.4 锋生对暴雨的触发

上述分析表明,辽东半岛台风降水期间低层伴有明显的中尺度锋生现象,位于台风北侧锋区内,过台风中心做相当位温和垂直流场的经向剖面,其中垂直风矢量由经向风  $v$  与  $100w$  合成(图 10)。降水

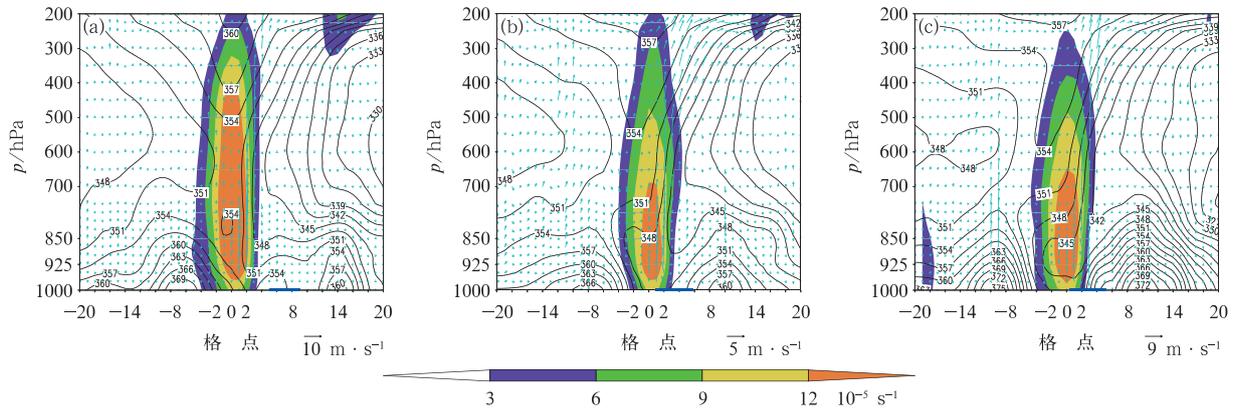


图 10 辽东半岛(a)降水开始前 24 h,(b)降水开始时,(c)6 h 降水量 $>30$  mm 时合成的过台风中心相当位温(等值线,单位:K)、涡度(填色)和  $v-100w$  环流(箭矢)的经向垂直剖面  
Fig. 10 Meridional cross-sections of composite equivalent potential temperature (contour, unit: K), vorticity (colored) and  $v-100w$  circulation (arrow) through the typhoon center of (a) 24 h before precipitation, (b) onset of precipitation and (c) 6 h accumulated precipitation over 30 mm in Liaodong Peninsula

前 24 h(图 10a),台风中心北侧 700 hPa 以下已有冷空气,台风中心南侧为相当位温大值区和等值线密集区,辽东半岛(图 10a 中 6~10 个格点区域)低层相当位温等值线稀疏。降水开始时(图 10b),台风中心上空 700 hPa 以上的暖空气与其北侧中低层的冷空气所形成的高空锋区逐渐加强,强锋区和正涡度区自低层到高层出现向北、向西的倾斜(图略),台风中心附近的上升运动明显加强。与此同时,随着 700 hPa 以下冷空气的加强,台风北侧辽东半岛(图 10b 中 2~7 个格点区域)低层相当位温等值线逐渐密集,该区域对流发展旺盛。降水加强时(图 10c),700 hPa 以下暖湿输送明显加强,500 hPa 高空槽靠近台风低压,高空暖舌继续下伸,台风中心与辽东半岛(图 10c 中 1~6 个格点区域)间的高、低空锋区加强,正涡度大值中心继续向上伸展至 600 hPa,同时涡度柱向西北倾斜,不断获得正涡度输送;此时,辽东半岛 850 hPa 以下有明显的次级环流,将对流层中低层的冷空气卷入强辐合中心,有利于半岛地区的对流持续。降水期间,辽东半岛上空对流层低层远离冷空气中心,强降水发生在暖锋锋生区。

由此可见,台风西北侧的冷空气自对流层中高层向下楔形侵入,辽东半岛低层锋区随高度向西北倾斜,对流不稳定增大,强的辐合抬升在台风的东北侧、东南侧发展,辽东半岛位于台风北侧的中尺度对流区,强降水发生在暖锋锋生过程中,降水强度大、

持续时间长。

## 4 结 论

本文对登陆北上进入渤海引发辽东半岛强降水的变性台风的结构特征进行了动态合成分析,得到以下结论:

(1)台风登陆北移靠近西风带高空槽,高空向东北方向的流出气流增强,且与偏南风低空急流连通,获得较多的水汽能量和斜压位能,强度衰减缓慢。

(2)台风变性为半冷半暖斜压结构,具有明显的中尺度波动特征,有利于其北侧中尺度对流活动发展;在较强的环境风垂直切变作用下,台风强降水沿垂直切变下风方左侧主要出现在台风东北象限。

(3)辽东半岛位于台风东北象限,台风影响下低层的水平辐合较强,水平风垂直切变增大,深厚的上升运动维持;同时,冷空气自台风西北侧对流层中高层倾斜下沉,与低层暖湿气流叠加,加大对流不稳定度,触发辽东半岛强降水。

## 参考文献

- 符娇兰,权婉晴,麦子,等,2023.“23·7”华北特大暴雨过程雨强精细化特征及动力和热力条件初探[J].气象,49(12):1435-1450. Fu J L, Quan W Q, Mai Z, et al, 2023. Preliminary study on the refined characteristics of rainfall intensity and dynamic and thermodynamic conditions in the July 2023 severe torrential rain in

- North China[J]. Meteor Mon, 49(12):1435-1450(in Chinese).
- 高拴柱, 2020. 2018 年台风温比亚的强对流螺旋雨带观测特征分析[J]. 气象, 46(6):792-800. Gao S Z, 2020. Characteristics analysis on the severe convective spiral rainband of Typhoon Rumbia (2018)[J]. Meteor Mon, 46(6):792-800(in Chinese).
- 何立富, 陈双, 郭云谦, 2020. 台风利奇马(1909)极端强降雨观测特征及成因[J]. 应用气象学报, 31(5):513-526. He L F, Chen S, Guo Y Q, 2020. Observation characteristics and synoptic mechanisms of Typhoon Lekima extreme rainfall in 2019[J]. J Appl Meteor Sci, 31(5):513-526(in Chinese).
- 梁军, 陈联寿, 2005. 影响辽东半岛热带气旋运动、强度和影响的特征[J]. 热带气象学报, 21(4):410-419. Liang J, Chen L S, 2005. Motion and intensity and impact characteristics of tropical cyclone affecting the Liaodong Peninsula[J]. J Trop Meteor, 21(4):410-419(in Chinese).
- 梁军, 陈联寿, 张胜军, 等, 2008. 冷空气影响辽东半岛热带气旋降水的数值试验[J]. 大气科学, 32(5):1107-1118. Liang J, Chen L S, Zhang S J, et al, 2008. Numerical study of impact of cold air on rainfall of tropical cyclone over Liaodong Peninsula[J]. Chin J Atmos Sci, 32(5):1107-1118(in Chinese).
- 梁军, 冯呈呈, 张胜军, 等, 2020. 台风“温比亚”(1818)影响辽东半岛的预报分析[J]. 干旱气象, 38(2):280-289. Liang J, Feng C C, Zhang S J, et al, 2020. Analysis on operational forecast of Typhoon Rumiba (1818) affecting Liaodong Peninsula[J]. J Arid Meteor, 38(2):280-289(in Chinese).
- 梁军, 李英, 张胜军, 等, 2015. 影响辽东半岛两个台风 Meari 和 Muifa 暴雨环流特征的对比分析[J]. 大气科学, 39(6):1215-1224. Liang J, Li Y, Zhang S J, et al, 2015. Comparison of synoptic circulations of heavy rain associated with typhoons Meari and Muifa over Liaodong Peninsula[J]. Chin J Atmos Sci, 39(6):1215-1224(in Chinese).
- 梁军, 张胜军, 冯呈呈, 等, 2019. 台风 Polly(9216)和 Matmo(1410)对辽东半岛降水影响的对比分析[J]. 气象, 45(6):766-776. Liang J, Zhang S J, Feng C C, et al, 2019. Comparison of synoptic circulations of heavy rain associated with typhoons Polly and Matmo over Liaodong Peninsula[J]. Meteor Mon, 45(6):766-776(in Chinese).
- 吕心艳, 许映龙, 董林, 等, 2021. 2018 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象, 47(3):359-372. Lyu X Y, Xu Y L, Dong L, et al, 2021. Analysis of characteristics and forecast difficulties of TCs over Northwestern Pacific in 2018[J]. Meteor Mon, 47(3):359-372(in Chinese).
- 饶晨泓, 毕鑫鑫, 陈光华, 等, 2022. 近海台风对“21·7”河南极端暴雨过程水汽通量和动、热力条件影响的模拟[J]. 大气科学, 46(6):1577-1594. Rao C H, Bi X X, Chen G H, et al, 2022. A numerical simulation on the impacts of the offshore typhoons on water vapor flux, dynamic and thermal conditions of the extreme rainstorm event in Henan Province in July 2021[J]. Chin J Atmos Sci, 46(6):1577-1594(in Chinese).
- 孙莎莎, 丛春华, 魏萌, 等, 2017. 1949—2014 年影响山东的变性台风特征分析[J]. 气象科技, 45(1):157-163. Sun S S, Cong C H, Wei M, et al, 2017. Characteristics of extratropical transitional typhoons from 1949 to 2014 affecting Shandong Province[J]. Meteor Sci Technol, 45(1):157-163(in Chinese).
- 王科, 陈光华, 吕欣宇, 等, 2021. 1521 号台风“杜鹃”生成阶段中尺度对流系统和降水演变特征[J]. 大气科学, 45(1):73-87. Wang K, Chen G H, Lyu X Y, et al, 2021. Evolution characteristics of mesoscale convective system during the formation of Tropical Cyclone Dujuan (1521)[J]. Chin J Atmos Sci, 45(1):73-87(in Chinese).
- 汪小康, 崔春光, 王婧羽, 等, 2022. “21·7”河南特大暴雨水汽和急流特征诊断分析[J]. 气象, 48(5):533-544. Wang X K, Cui C G, Wang J Y, et al, 2022. Diagnostic analysis on water vapor and jet characteristics of the July 2021 severe torrential rain in Henan Province[J]. Meteor Mon, 48(5):533-544(in Chinese).
- 吴丹, 黄泓, 王春明, 等, 2021. 高空槽脊对台风“天兔”(0705)变性过程中非对称降水的影响[J]. 大气科学, 45(2):355-368. Wu D, Huang H, Wang C M, et al, 2021. Influence of upper-level trough and ridge on the asymmetric precipitation during extratropical transition of Typhoon Usagi[J]. Chin J Atmos Sci, 45(2):355-368(in Chinese).
- 向纯怡, 赵海坤, 刘青元, 等, 2020. 1909 号台风“利奇马”登陆后强降水分布特征[J]. 气象科学, 40(3):294-302. Xiang C Y, Zhao H K, Liu Q Y, et al, 2020. The distribution of torrential rain after landfalling of Typhoon “Lekima” (1909)[J]. J Meteor Sci, 40(3):294-302(in Chinese).
- 薛焯, 李靓靓, 朱业, 等, 2021. 1323 号台风“菲特”螺旋云带中“列车效应”特征及形成分析[J]. 大气科学, 45(2):379-392. Xue Y, Li L L, Zhu Y, et al, 2021. Analysis of characteristics and formation of “Train Effect” in the spiral cloud belts of Typhoon “Fitow” (No. 1323)[J]. Chin J Atmos Sci, 45(2):379-392(in Chinese).
- 杨浩, 周文, 汪小康, 等, 2022. “21·7”河南特大暴雨降水特征及极端性分析[J]. 气象, 48(5):571-579. Yang H, Zhou W, Wang X K, et al, 2022. Analysis on extremity and characteristics of the “21·7” severe torrential rain in Henan Province[J]. Meteor Mon, 48(5):571-579(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).
- 杨晓亮, 金晓青, 孙云, 等, 2023. “23·7”河北太行山东麓罕见特大暴雨特征及成因[J]. 气象, 49(12):1451-1467. Yang X L, Jin X Q, Sun Y, et al, 2023. Evolution characteristics and formation of the July 2023 severe torrential rain on the eastern foothills of Taihang Mountains in Hebei Province[J]. Meteor Mon, 49(12):1451-1467(in Chinese).
- 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).
- 张芳华, 杨舒楠, 胡艺, 等, 2023. “23·7”华北特大暴雨过程的水汽特征[J]. 气象, 49(12):1421-1434. Zhang F H, Yang S N, Hu Y, et al, 2023. Water vapor characteristics of the July 2023 severe torrential rain in North China[J]. Meteor Mon, 49(12):1421-1434(in Chinese).
- 钟颖旻, 徐明, 王元, 2009. 西北太平洋变性台风时空分布特征[J]. 气象学报, 67(5):697-707. Zhong Y M, Xu M, Wang Y, 2009. Spatio-temporal distributive characteristics of extratropically transitioning tropical cyclones over the Northwest Pacific[J]. Acta Meteor Sin, 67(5):697-707(in Chinese).
- Atallah E, Bosart L F, Aiyyer A R, 2007. Precipitation distribution associated with landfalling tropical cyclones over the eastern United States [J]. Mon Wea Rev, 135(6):2185-2206.
- Anwender D, Harr P A, Jones S C, 2008. Predictability associated with the downstream impacts of the extratropical transition of tropical cyclones; case studies [J]. Mon Wea Rev, 136(9):3226-3247.
- 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.
- Deng D F, Ritchie E A, 2018. Rainfall characteristics of recurring tropical cyclones over the western North Pacific [J]. J Climate, 31(2):575-592.
- 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.
- 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.
- Kofron D E, Ritchie E A, Tyo J S, 2010. Determination of a consistent time for the extratropical transition of tropical cyclones. Part I: examination of existing methods for finding “ET Time” [J]. Mon Wea Rev, 138(12):4328-4343.
- Sun J, Zhang F Q, 2017. Daily extreme precipitation and trends over China[J]. Sci China Earth Sci, 60(12):2190-2203.

(本文责编:张芳)