

两次西风槽影响下北上台风导致的强降水对比分析

陈宏, 卢焕珍*, 孙密娜, 韩婷婷

(天津市气象台, 天津 300074)

摘要: 利用台风最佳路径数据、逐时自动站资料、美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR) $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料、FY-4A卫星的云顶亮温和常规观测资料,对比分析了2106号台风“烟花”和1810号台风“安比”在北上过程中受到西风带高空槽影响导致天津地区强降水落区产生差异的原因。结果表明:两次台风在北上过程中,均受到高空槽和冷空气的影响,但是由于台风结构不同,西风槽和北上台风结合后引发的暴雨位置和强度有所区别。台风“安比”维持正压结构,降水持续时间短、降水强度大,大暴雨主要集中在天津西部;而台风“烟花”存在斜压性,降水持续时间长、效率低,大暴雨主要位于天津东部。在台风“安比”期间,副热带高压东撤,槽后冷空气渗透与偏东南暖湿低空急流交汇共同导致大气层结向不稳定状态发展,中尺度云团发展,正涡度强度明显增大,高层高位涡气流到达对流层低层,位涡下传引起低层位涡增大,强降水与对流层低层螺旋度中心、锋区以及偏东水汽输送关系密切;而台风“烟花”与西风槽合并后中尺度云团不明显,暴雨区西侧和北侧的 θ_{se} 密集带发生倾斜,斜压性增强,强降水站点主要位于锋生函数和假相当位温的梯度区,偏南水汽输送为持续降水提供水汽来源,降水的雨强较小,以稳定性降水为主。

关键词: 台风; 西风槽; 位涡; 水汽输送

中图分类号: P444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)04-0083-14

0 引言

台风造成的降水不仅强度大,还经常会导致严重的洪涝灾害和财产损失。台风暴雨的分布特征是预报业务中的难点和重点,因此一直受到众多专家学者的关注^[1-5]。台风暴雨强度不仅与台风自身结构、强度、移动路径有关,而且与环境场中的天气系统、水汽输送甚至下垫面有密切的关系^[6]。台风通过与其他天气系统相互作用获得能量,有时会导致其结构发生变化甚至变性,从而导致暴雨增强^[7-8]。台风暴雨需要源源不断的水汽供应,因此对流层低层的水汽变化对台风降水强度有很大的影响,适宜的水汽条件不仅利于台风环流的维持,还会加强雨带中的对流活动,从而导致台风暴雨加强^[9]。

在台风登陆北上的过程中,由于较高纬度上不同的大气环境场以及下垫面变化等影响,台风结构会发生显著变化,这种结构变化将对暴雨落区产生影响。在台风北上的过程中,如果有冷空气侵入台风,两者相互作用后会在某一地区造成明显的降水^[10-11]。这是由于台风倒槽中冷暖空气相遇会使台风外围的对流强度、垂直涡度和上升运动增强,从而增加台风外围的降水^[12],且冷空气侵入后,台风从中纬度斜压锋区中获取斜压能量使其变性加强^[13-14],从而增加强辐合抬升作用^[15];同时,冷空气有时会触发中尺度对流系统的生成和发展^[16-18],台风外围云系中发展的中尺度雨团往往是台风产生暴雨的主要影响系统^[19]。因此,北上台风暴雨由于往往受副热带高压(简称副高)、西风带冷槽等多个

收稿日期: 2022-03-14。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41575049);天津市自然科学基金项目(16JQNJC07500);天津市气象局局项目(202209ybxm01);2021年中国气象局创新发展专项。

作者简介: 陈宏(1988-),女,工程师,硕士,主要从事中短期天气预报和智能网格预报技术研究。E-mail: chen hongfengye@163.com

*通信作者: 卢焕珍(1965-),女,正研级高级工程师,硕士,主要从事灾害天气研究。E-mail: 1310098477@qq.com

系统影响,一直是预报业务中的难点。

1810号台风“安比”经山东进入河北后移入天津,影响天津的时间较短但降水强度较大,台风在移动过程中造成京津交界地区出现大暴雨落区;而2106号台风“烟花”虽然未经过天津,但由于受到外围云系的影响,降水持续时间较长,导致天津东部地区出现大暴雨。本文将利用中国气象局最佳路径数据、逐时自动站资料、美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR) $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料、风云四号A星(FY-4A)的云顶亮温(Black Body Temperature, TBB)和常规观测资料,重点分析两次台风北上进入天津过程中导致暴雨落区存在差异的原因,以期为以后的北上台风降水预报提供有益的参考依据。

1 过程概况

1.1 台风概况

2018年7月18日20时(北京时,下同),台风“安比”在西北太平洋洋面上生成;7月22日12时30分,台风“安比”以强热带风暴强度在上海市崇明岛沿海登陆,登陆时中心附近最大风力为10级(风速为28 m/s),中心最低气压为982 hPa;随后不久,台风“安比”登陆江苏南通启东,台风强度减弱为热带风暴级别,在副高的引导下以热带风暴的强度一路向北,先后穿过山东和河北,并于24日07时左右移入天津;台风“安比”中心从天津穿过,在影响天津期间台风强度始终保持热带风暴级别,其中心气压为992 hPa,风速为18 m/s;台风继续北上经过辽宁后,7月24日23时左右于内蒙减弱为热带低压后消失。

2021年7月18日02时,中央气象台将热带低压“烟花”升格为热带风暴,7月25日12时30分台风“烟花”在浙江省舟山市普陀区沿海登陆,登陆时中心附近最大风力为13级(风速为38 m/s),中心最低气压为965 hPa;台风经过浙江—江苏—安徽进入山东,7月28日08时开始对天津地区产生影响;台风“烟花”中心虽未从天津地区直接穿过,但台风外围云系给天津带来了较强的降水,影响天津期间的台

风级别为热带低压,台风中心气压为985~992 hPa,风速为15 m/s;台风于30日早晨移入渤海,逐渐变性为温带气旋。

图1a为两个台风登陆后在陆地上的移动路径。台风“安比”在天津经历6 h强度不变(见图1b),导致天津西部出现强降水;而台风“烟花”则是经过山东时强度不变(见图1b),随后在渤海湾维持较长时间,台风虽然一直维持在热带低压级别,但台风中心风速没有变化,中心气压略有增加,受其外围云系的持续影响,天津地区出现强降水。

1.2 雨情实况

受北上台风“安比”的影响,天津西部出现明显降水。图2a为2018年7月23日08时—24日14时和2021年7月28日08时—30日08时的累积降水量空间分布。由图可以看出,台风“安比”在北上过程中造成的天津降水落区位于台风西侧,台风在天津持续6 h,区域站最大累积降水为256.5 mm,国家站为213.6 mm;受北上台风“烟花”的影响,天津东部地区出现强降水,受台风外围云系影响,区域站最大累计降水为204.2 mm,国家站为173.6 mm。两次降水过程中累计降水达到100 mm以上的国家站均为8个(占天津市国家站的62%)。

为了进一步分析两次台风过程的降水时间变化特征,分别各选择两个累积降水量最大的站点的降水时间变化来进一步分析。台风“安比”导致的强降水代表站点为天津城市气候监测站(以下简称市区国家站)和蓟州梁庄站。从2018年7月23日08时—25日08时降水的时间演变图可知(见图2b),台风“安比”导致的降水主要持续时间为15 h。随时间推移,天津地区逐小时雨强共出现两次峰值,分别出现在24日03—07时和24日10—12时,对应的市区国家站和蓟州梁庄站的最大小时雨强分别为34.9 mm/h和30.4 mm/h,且两个站的短时强降水分别维持了5 h和3 h,降水过程表现出持续时间短、雨强大的特点。台风“烟花”导致的强降水站点为天津市区容和里站和蓟州安棋盘站。根据2021年7月28日08时—30日20时降水的时间演变图可知(见图2b),这次降水持续近40 h,其中容和里站出现3个降水峰值,蓟州安棋盘站出现两个降水峰值,雨强在30 mm以下,整个降水过程中未出现短时强

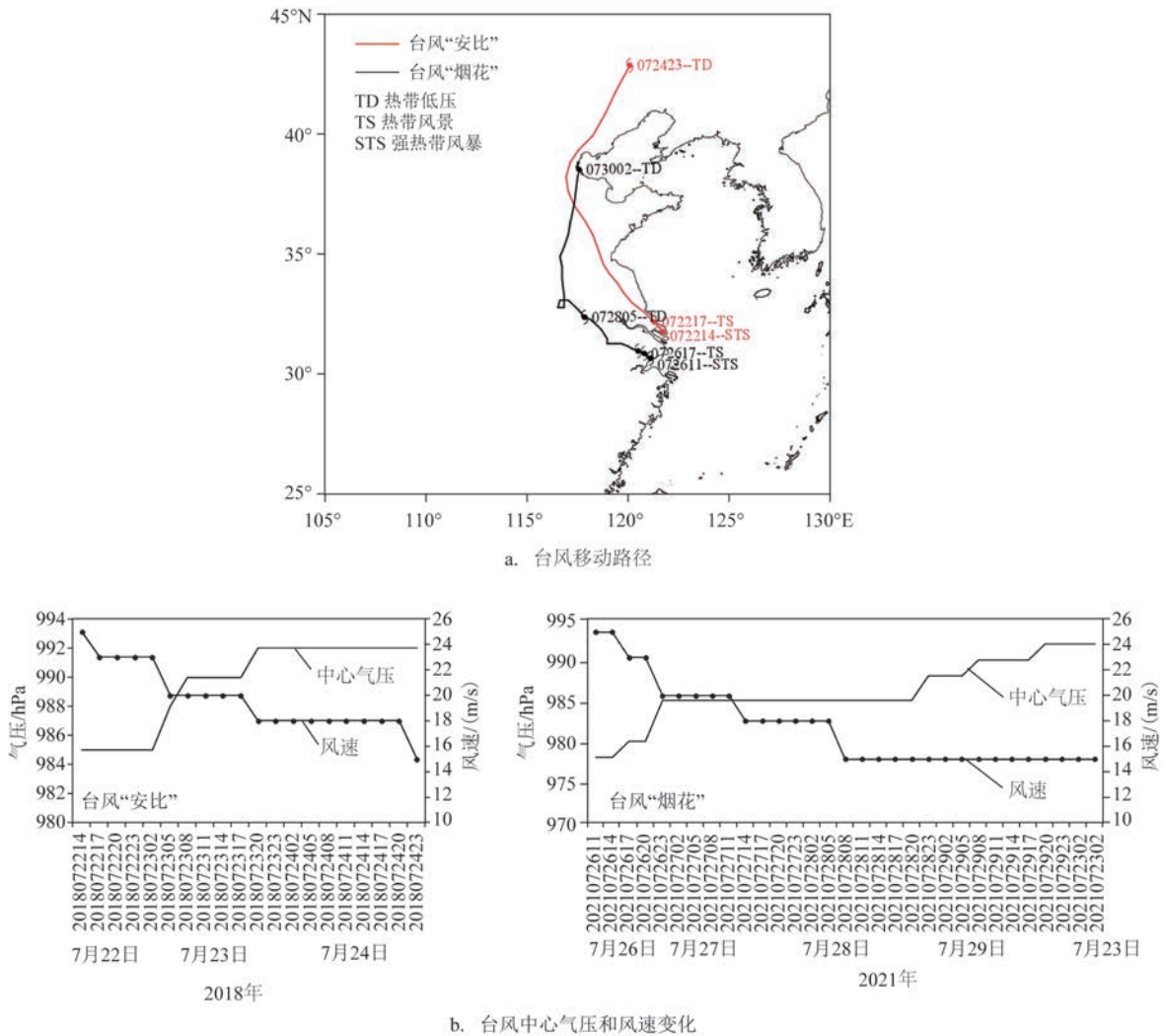


图1 两个台风登陆后的移动路径与中心气压和风速随时间的变化

Fig.1 The movement paths of the two typhoon centers after landfall and the timeseries of the central pressure and wind speed

降水,降水过程表现出持续时间长、雨强弱的特点。

2 环流背景

台风“安比”自江苏启东登陆后一直保持热带风暴的台风级别继续北上。2018年7月24日02时(见图3a),台风位于500 hPa副高的西侧,副高呈南北块状分布,大陆高压和副高之间存在一个东北—西南走向的高空槽,台风在副高西侧的东南急流的引导下向西北方向移动,影响京津地区。台风东北侧有东南低空急流存在,急流中心强度为26 m/s,其左前方风速辐合有利于上升运动加剧。随着高空槽东移和台风系统北上,7月24日08时500 hPa高

空槽逐渐进入华北西部(见图3b),与此同时副高东撤,利于槽后冷空气逐渐渗透下来,并逐渐影响华北地区。在整个过程中,台风东侧的东南低空急流范围有所扩大,伴随的强降水带主要发生在低空急流的左前方,低空急流不仅可以为暴雨区提供充足的水汽供应,也会导致大气层结向不稳定状态发展,进而利于对流性降水的发生。

台风“烟花”在安徽东北部北移过程中降为热带低压的级别后北上,2021年7月29日08时副高位置偏南偏东(见图3c),台风主要受到500 hPa高空槽的影响,台风倒槽伸至天津南部地区,其中心位于高空槽内部,且台风的西北部仍然存在高空槽,其中高空槽经向度与台风“安比”相比较弱,因此台风

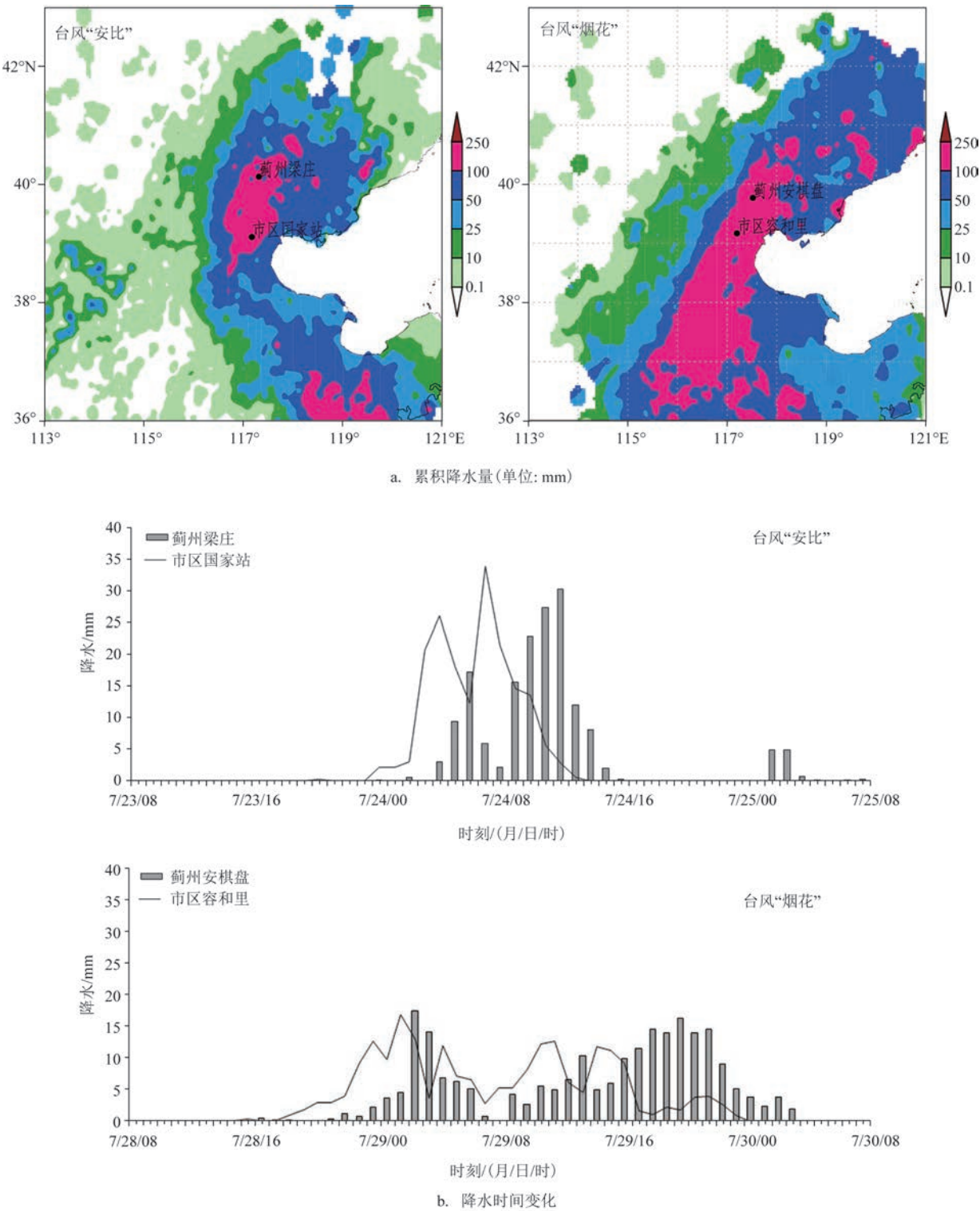


图2 台风期间的累积降水量空间分布和强降水代表站的降水时间变化

Fig.2 Spatial distribution of cumulative rainfall and time series of heavy precipitation at representative stations for the two typhoons

向东移动过程中携带的冷空气较弱。进一步分析，台风“烟花”东北侧的低空急流大于 24 m/s，与台风“安比”相比强度略弱。7 月 29 日 14 时(见图 3d)，

台风与西风槽合并后演变为高空槽，影响天津的主要是台风西北侧的东北气流，大暴雨也主要集中在该地区。因此，两次北上台风均受到西风

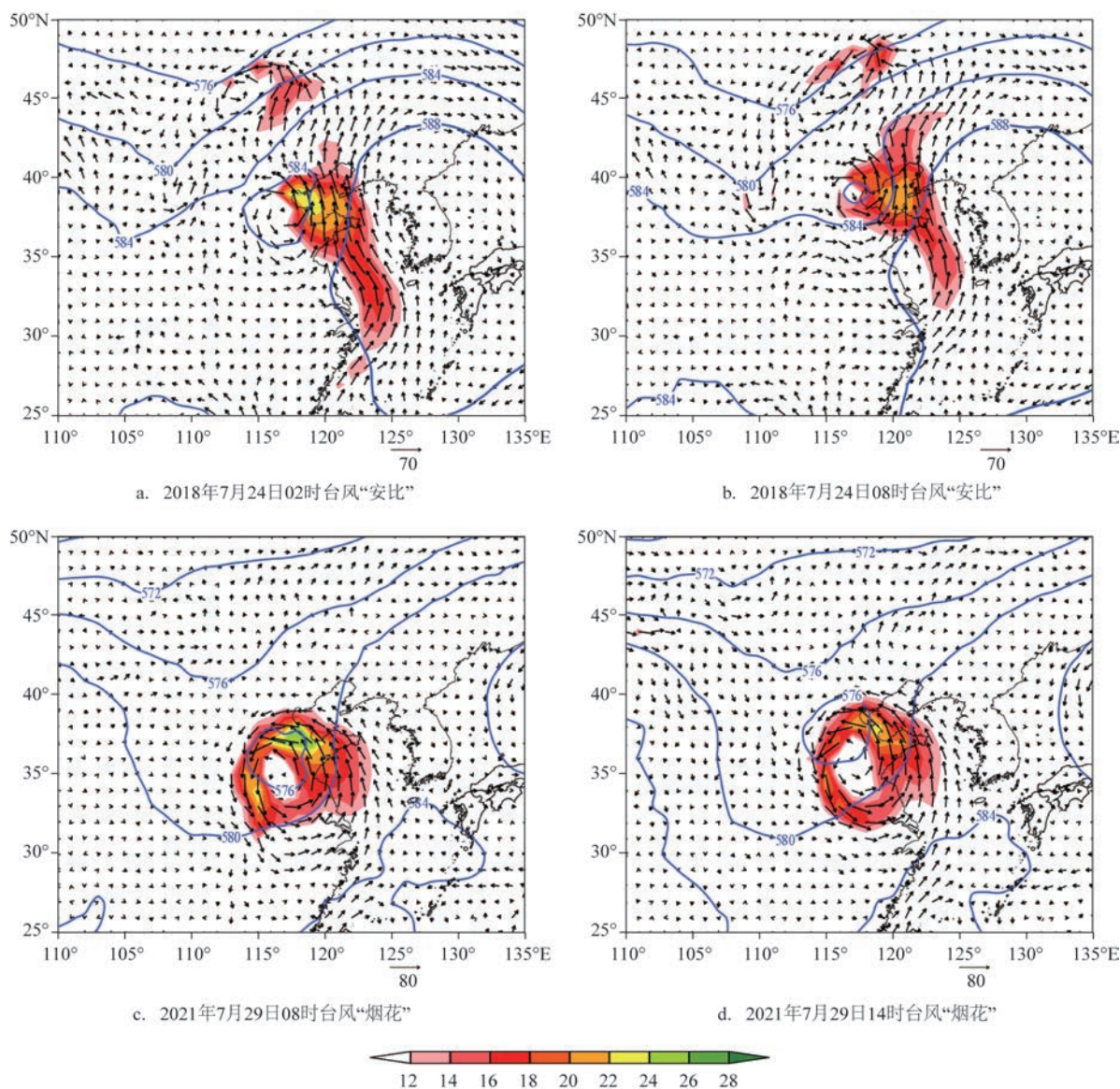


图3 台风“安比”和台风“烟花”期间500 hPa高度场(蓝色等值线,单位: dagpm)、850 hPa风场(矢量,单位: m/s)和850 hPa急流(填色,单位: m/s)

Fig.3 Geopotential height of 500 hPa (blue contour, unit: dagpm), wind (vector, unit: m/s) and jet stream of 850 hPa (shaded area, unit: m/s) during Typhoon "Ampil" and Typhoon "In-Fa"

槽的影响,且均有低空急流存在,但是高空槽的经向度和影响天津地区的低空急流的风向有所不同。

3 台风结构及强降水成因对比分析

3.1 台风云系分布特点

云图的演变可以直观地反映台风登陆期间降

水非对称分布特征的形成原因^[20]。研究表明,台风螺旋云带上降水不均匀性有明显的中尺度天气特点,尤其是台风云系上中尺度对流云团的形成、发展和维持有利于台风暴雨的产生。进一步分析TBB可以判断台风对流发展的旺盛程度,尤其对降水有重要的指示意义。图4为2018年7月24日07:15—09:15和2021年7月29日05:53—07:38的FY-4A的TBB分布和最近时刻的台风中心位置,通

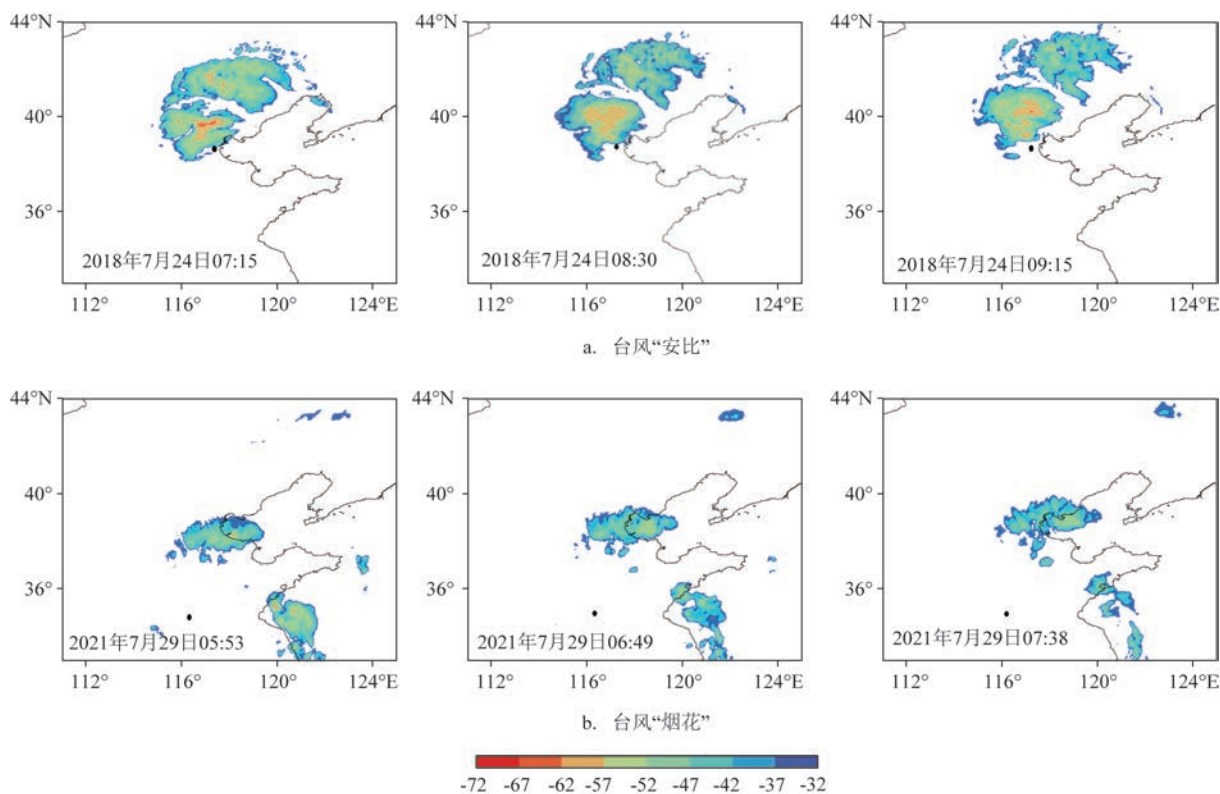


图4 台风“安比”和台风“烟花”的FY-4A的云顶亮温(填色,单位:°C)和台风中心位置(黑色标记)

Fig.4 Cloud top brightness temperature (shaded area, unit: °C) and typhoon center position (black mark) of Typhoon "Ampil" and Typhoon "In-Fa" from FY-4A

通过分析逐小时TBB的演变可以得到中尺度对流系统的发生、发展特点。从卫星云图上看,2018年7月24日07:15(见图4a),台风“安比”北上后,螺旋云带的结构不明显,天津中西部—北部地区出现带状的中尺度云团,云团主要位于台风的西北侧,且随着 $TBB \leq -52$ °C的中尺度云系团的稳定维持,天津中西部强降水位置分布与亮温梯度分布关系明显,此时天津中西部出现小时雨强超过20 mm/h的雨团,并持续5 h,可见暴雨与中尺度云团的发展对应关系密切。图4b为2021年7月29日的台风“烟花”云系,其外围云系的对称性和组织性较差,且TBB较高,不利于对流的发生, $TBB \leq -32$ °C的云团主要位于天津南部和东部,因此天津地区的雨强较小,以稳定性降水为主。

3.2 台风的结构特征

台风“安比”进入天津后一直向北移动,2018年7月24日08时台风中心移动到天津大港地区(见图

5a),台风东西两侧的假相当位温梯度均为10 K,西侧的梯度大值区更靠近台风中心。进一步从850 hPa的涡度水平分布来看,台风呈现出较为对称的结构,台风中心基本位于正涡度中心位置,但是北侧的垂直上升运动明显强于台风南侧,因此强降水主要发生在垂直上升明显的地区。

台风“烟花”在北抬的过程中,西北侧冷空气侵入导致东西向假相当位温梯度明显(见图5b),在台风中心的西北侧形成了一条近似西北—东南走向的能量锋区,锋区西侧为来自西北方向的干冷空气,相当位温中心为336 K,锋区东侧有较强的暖湿空气向锋区输送水汽和能量,假相当位温中心值达356 K,两侧假相当位温中心相差18 K。进一步分析,850 hPa的涡度和垂直上升速度相对台风环流而言也相应地呈现出非对称分布,涡度大值区和强上升运动区主要分布在台风中心的西北侧,与能量锋区一致,此时的强降水也主要出现在这一区域。

螺旋度大小可以反映旋转与沿旋转轴方向运动

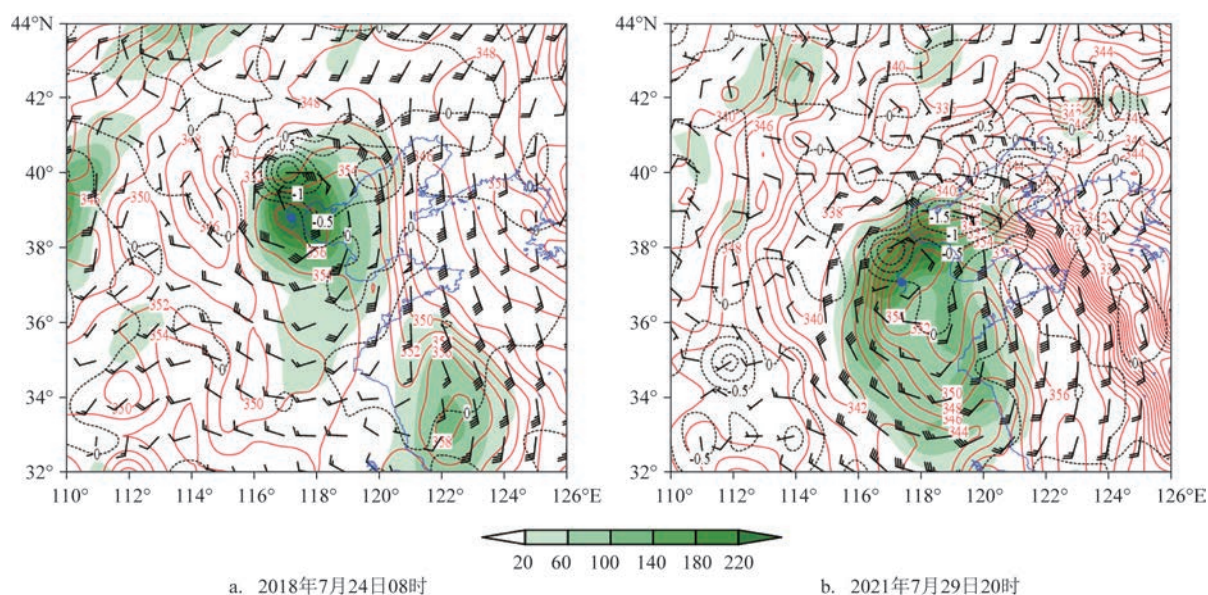


图5 850 hPa的正涡度(填色,单位: $10^{-5}/s$)、垂直上升运动(黑色虚线,单位: Pa/s)和假相当位温(红线,单位: K)

Fig.5 Positive vorticity (shaded area, unit: $10^{-5}/s$), vertical ascending motion (dashed black line, unit: Pa/s) and false equivalent potential temperature (red line, unit: K) at 850 hPa

的强弱程度,其中垂直螺旋度为垂直速度和垂直涡度的乘积,可以综合描述垂直上升运动和垂直涡度。低层的正垂直螺旋度与台风移动方向和强度变化关系较为密切,能够反映系统的维持和发展^[21-22],因此进一步通过分析螺旋度来分析台风低层涡旋的强度和分布。2018年7月24日08时700 hPa和850 hPa的螺旋度中心几乎重合(图略),均位于天津和北京的交界处,可见对流层低层的气旋性环流垂直分布较为一致,因此台风结构是正压的。而2021年7月29日20时700 hPa和850 hPa的螺旋度中心分布不一致(图略),其中700 hPa的螺旋度中心位于京津交界,850 hPa的螺旋度中心位于天津东部的渤海西岸,台风垂直结构存在斜压性,结合台风“烟花”期间天津地区的强降水落区来看(图略),强降水区位于700 hPa和850 hPa螺旋度梯度的重合区。

3.3 冷空气的作用

通过以上分析可知,两次台风降水过程均受到西风槽的影响,下面进一步研究西风槽冷空气与台风降水之间的关系。首先研究冷空气入侵后台风涡旋强度的变化。图6a为2018年7月23日20时沿台风中心位置的温度平流、正涡度和风场的纬向-高度剖面图。从图中可以看出,台风“安比”的西侧

为西北风,导致116°E附近的对流层中层冷平流明显,冷平流中心位于700 hPa,台风东侧为偏南风携带的明显暖平流,对流层低层的暖平流发展加强,700 hPa处冷暖平流交汇明显,在偏南风 and 偏北风的冷暖交汇区,台风西侧的水平风垂直切变增强,气旋性涡度显著增强,7月24日08时正涡度明显增大(见图6c),正涡度垂直分布较为一致,其中心最大值加强至 $24 \times 10^{-5} m/s$ 以上。台风“烟花”期间(见图6b),对流层中层和低层的冷平流中心分别位于115°E的600 hPa和120°E的900 hPa附近,随着冷空气从台风西侧入侵,2021年7月29日20时低层的正涡度增加且中心下移(见图6d),正涡度中心由800 hPa下降到900 hPa,中心最大值增加至 $20 \times 10^{-5} m/s$ 左右,但北上台风“烟花”的涡旋强度仍弱于台风“安比”。

由于位涡与大气涡度(旋转性)和大气位势(厚度或高度)有关,因此位涡在天气诊断分析和预报中常被用于干侵入的分析,并揭示冷空气和位涡与气旋发展的关系^[17]。位涡的计算公式为^[23]:

$$(PV)_p = -g(fk + \nabla_p \times V_{\text{变}}) \cdot \nabla_p \theta \quad (1)$$

式中: PV 为位涡, g 为重力加速度, f 为地转参数, k 为垂直方向矢量, ∇_p 表示等压面梯度, V 为速度, $\nabla_p \theta$ 为

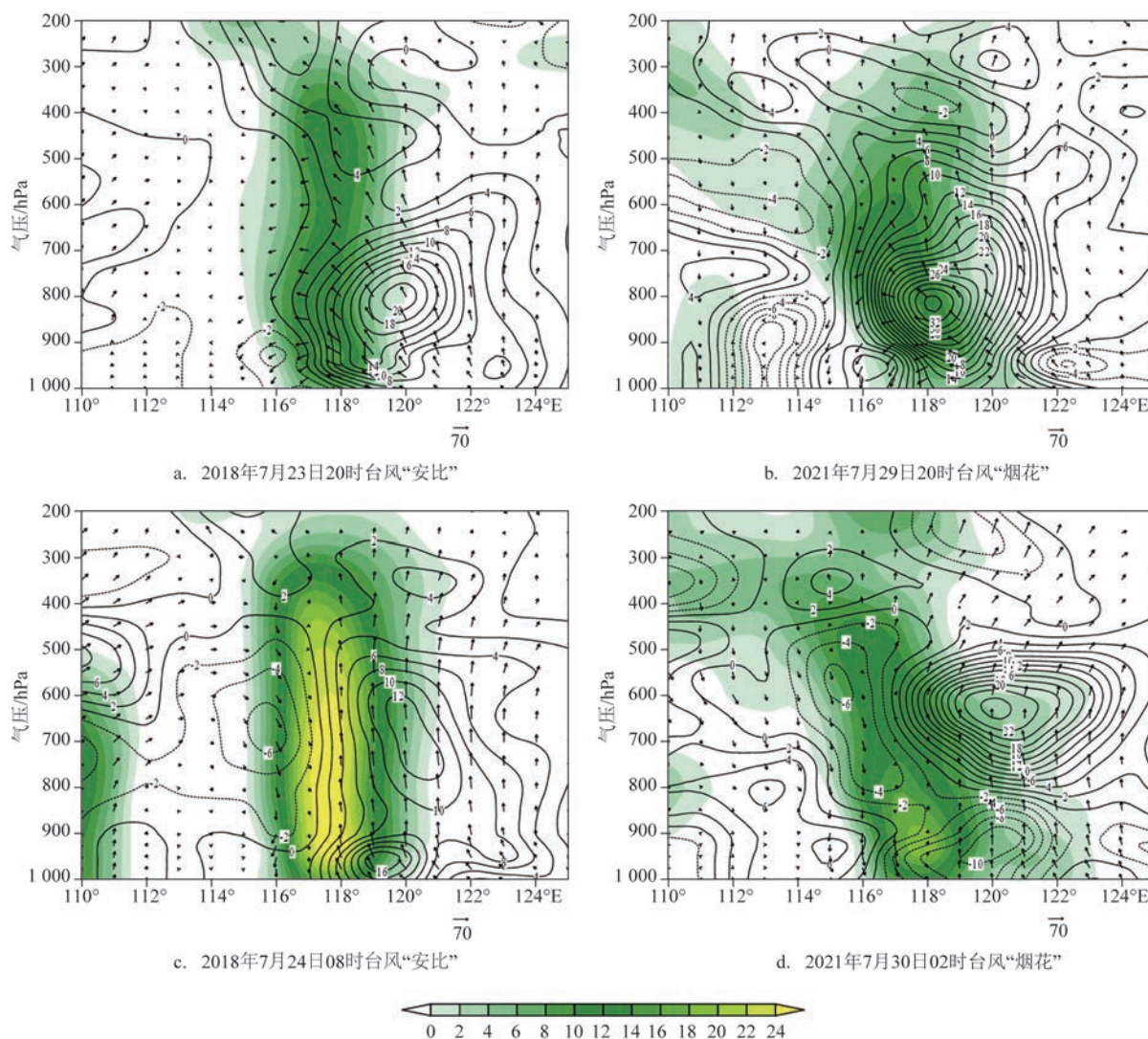


图6 台风“安比”和台风“烟花”期间沿台风中心温度平流(等值线,单位: 10^{-5} K/s)、正涡度(填色,单位: 10^{-5} /s)与风场(矢量,单位:m/s)剖面

Fig.6 Temperature advection (isolines, unit: 10^{-5} K/s), positive vorticity (shaded area, unit: 10^{-5} /s) and wind field along the typhoon center during Typhoon "Ampil" and Typhoon "In-Fa"

等压面的位温梯度。

通过沿台风中心的位涡垂直分布可以分析气旋中心强度的变化。由2018年7月23日20时纬向位涡和经向位涡垂直剖面图可以看出(图略),在400 hPa附近存在位涡的高值区。7月24日08时整层位涡加强至 $2.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/(\text{kg} \cdot \text{s})$ (见图7a),高位涡逐渐下传至500 hPa附近。根据位涡守恒原理^[24],来自高层稳定环境的高位涡气流到达低层不稳定环境后,其涡度增大会促进气旋的发生和发展,因此对流层中低层600 hPa和800 hPa的位涡中心强度增强至 $1.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/(\text{kg} \cdot \text{s})$ 和 $2.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/$

$(\text{kg} \cdot \text{s})$ (见图7c)。结合假相当位温的垂直分布来看(见图7c),700 hPa以下 θ_{se} 随气压降低有所减小, $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} > 0$,因此大气在低层是对流不稳定的,利于造成强对流天气发生,因此位涡下传为台风“安比”的涡旋增强及对流降水提供了有利的动力条件。2021年7月29日20时台风“烟花”位涡为倾斜的垂直分布(见图7b),且高位涡中心为 $2.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/(\text{kg} \cdot \text{s})$,强度小于台风“安比”,7月30日02时位涡倾斜向上传播(见图7d),低层600 hPa和900 hPa的位涡增加明显。从假相当位温垂直分布来看,与台

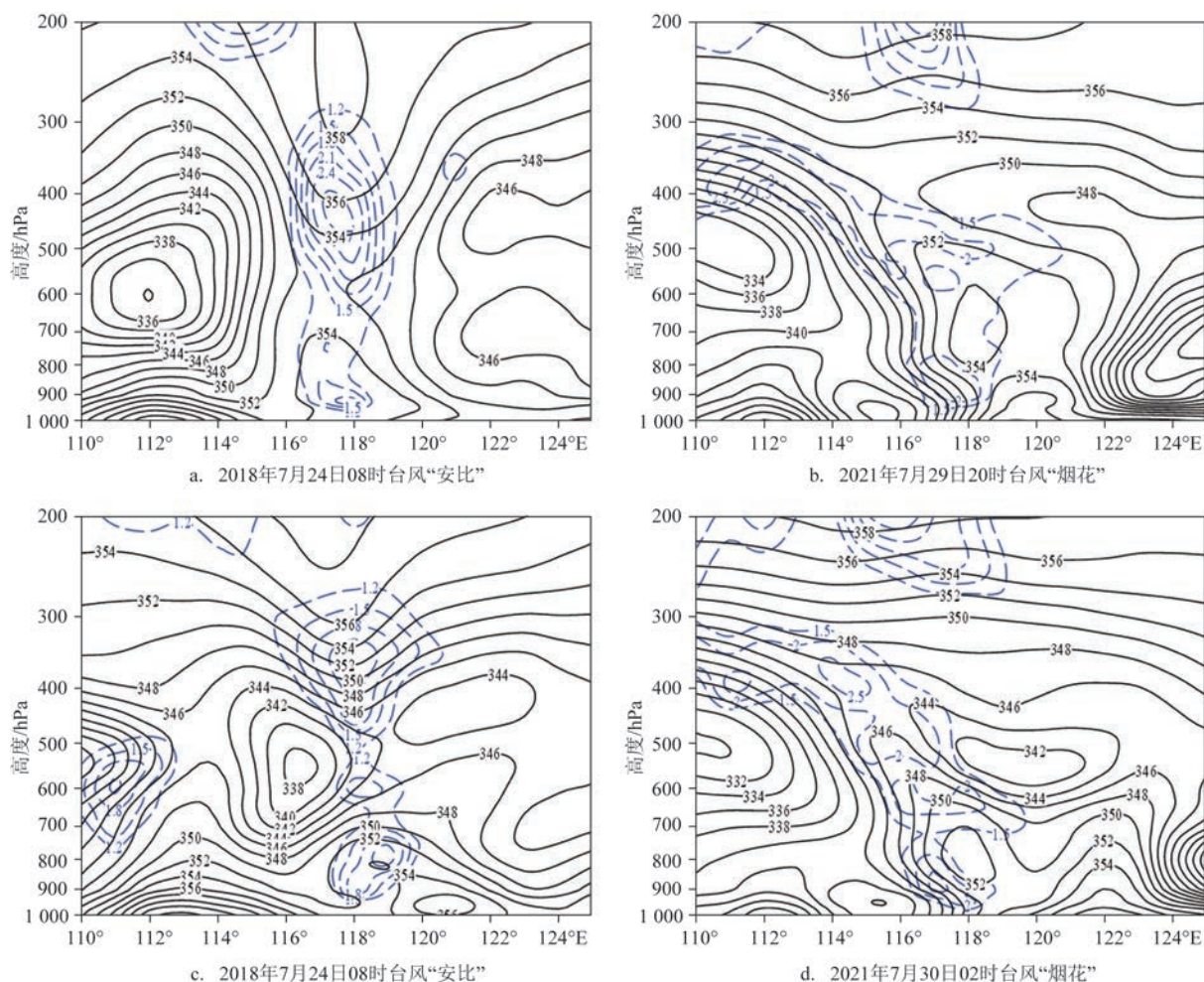


图7 台风“安比”和台风“烟花”期间假相当位温(黑色等值线,单位:K)与位涡(蓝色虚线,单位: $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/(\text{kg} \cdot \text{s})$)剖面
Fig.7 Vertical section of pseudo-equivalent potential temperature (black contour, unit: K) and potential vortex (blue dotted line, unit: $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/(\text{kg} \cdot \text{s})$) during Typhoon "Ampil" and Typhoon "In-Fa"

风“安比”不同,台风“烟花”暴雨区西侧和北侧的 θ_{se} 线密集带在 116°E 和 37°N 附近发生倾斜,存在一定斜压结构。

3.4 冷空气引起的锋生作用

冷空气入侵台风环流后的 θ_{se} 密集带说明存在锋生过程。为了对比两次台风期间冷空气对锋生和对流不稳定过程的作用,进一步分析2018年7月23日02时—25日08时市区国家站(见图8a, 39.0°N , 117.2°E)和2021年7月28日20时—31日02时天津市容和里站(见图8b, 39.17°N , 117.2°E)的锋生函数时间变化。锋生函数表达式为^[25]:

$$F = \frac{d}{dt} |\theta_{se}| = F1 + F2 + F3 + F4 \quad (2)$$

式中: $F1$ 、 $F2$ 、 $F3$ 、 $F4$ 分别为非绝热加热项、水平辐散项、水平变性项和与垂直运动有关的倾斜项。在台风“安比”影响天津期间,2018年7月24日08时的强降水区整层存在明显的锋生函数,垂直分布表明锋生的影响是整层的,且在700 hPa和900 hPa附近分别有锋生的强中心,强度均为 $13 \times 10^{-10} \text{ K}/(\text{m} \cdot \text{s})$,锋生强中心与天津地区强降水时段一致;7月24日14时后,锋生函数减弱,降水逐渐减弱,可见锋区的增强有利于大暴雨的发生和发展,且在900 hPa以下有明显的辐合。在台风“烟花”影响天津期间,2021年7月29日20时仅在近地面—800 hPa附近有明显的锋生,其强度略弱于台风“安比”,从垂直方向上看锋生影响是非正压的,其中30日02时的锋

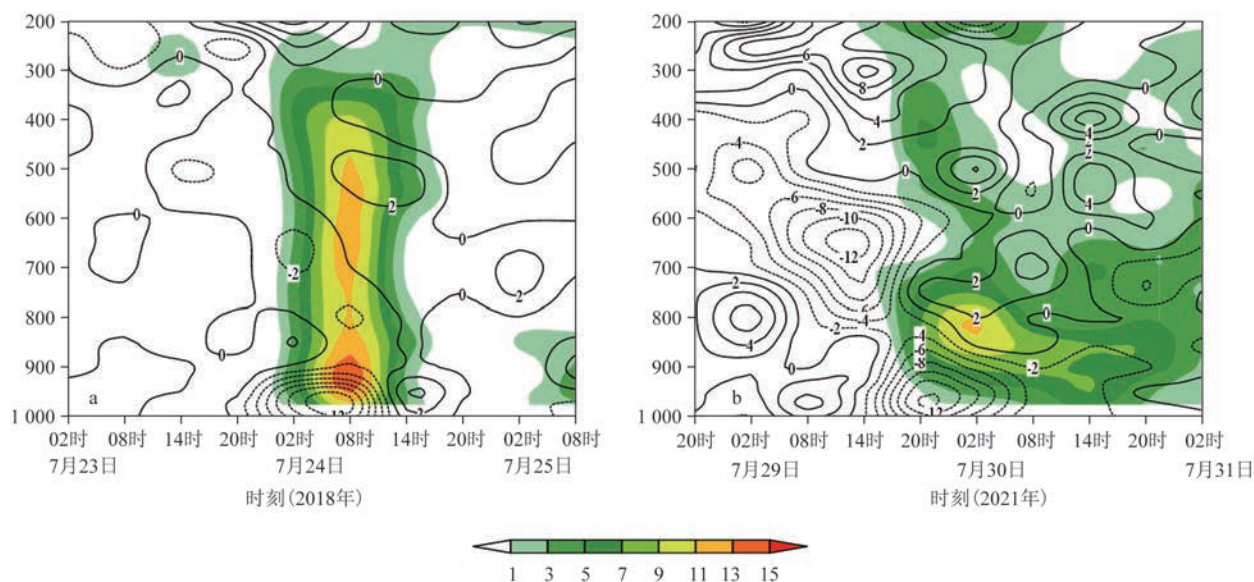


图8 台风“安比”(a)和台风“烟花”(b)期间强降水区锋生函数(填色,单位: $10^{-10} \text{ K}/(\text{m}\cdot\text{s})$)和散度(等值线,单位: 10^{-5} m/s)的时间变化

Fig.8 Time variation of frontogenesis function (shaded area, unit: $10^{-10} \text{ K}/(\text{m}\cdot\text{s})$) and divergence (unit: 10^{-5} m/s) in the heavy rainfall area during Typhoon "Ampil" (a) and Typhoon "In-Fa" (b)

生中心位于800 hPa,强度为 $11 \times 10^{-10} \text{ K}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 且锋生维持(见图9a),出现150 mm的降水站点主要位于850 hPa锋生和锋消的交汇区,台风“烟花”导致

的强降水站点主要位于锋生函数和假相当位温的梯度区(见图9b),且与台风结构的斜压性关系密切。

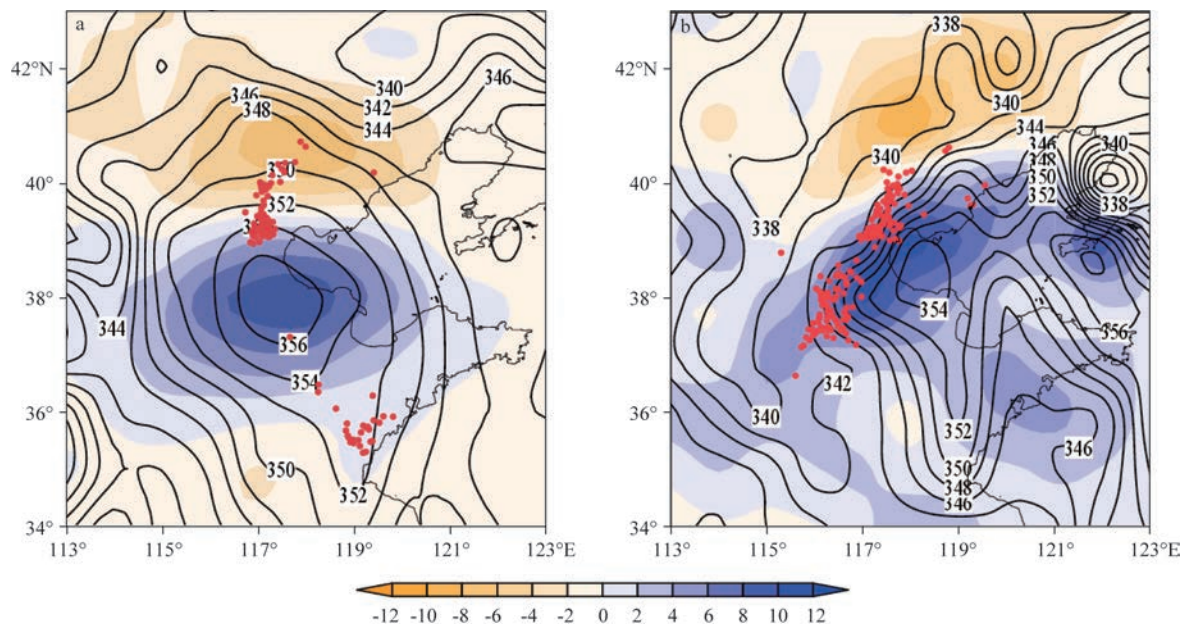


图9 台风“安比”(a)和台风“烟花”期间(b)累积降水>150 mm的站点分布(红点)、850 hPa的锋生函数(填色,单位: $10^{-10} \text{ K}/(\text{m}\cdot\text{s})$)和假相当位温(单位:K)

Fig.9 Distribution of stations with accumulated precipitation greater than 150 mm (red dots), frontogenesis function at 850 hPa (shaded area, unit: $10^{-10} \text{ K}/(\text{m}\cdot\text{s})$) and pseudo-equivalent potential temperature (unit: K) during Typhoon "Ampil" (a) and Typhoon "In-Fa" (b)

3.5 水汽输送条件

暴雨不仅与动力和热力因子有关,充足的水汽供应也是暴雨发生的必要条件,其中水汽通量及其散度辐合可表征外地水汽对雨区内水汽的补充^[26]。从低层 925 hPa 水汽通量、水汽通量散度和风矢量分布可以看出,2018 年 7 月 24 日 08 时(见图 10a),台风在进入天津北上过程中东侧一直存在偏南风低空急流,一方面为暴雨区提供了源源不断的水汽,另一方面将海上的热量向台风经过地区输送,使台风的强度得以维持,其东侧的低空急流始终维持,经过渤海后水汽得以补充,在向北推进过程中水汽通量高值区强度变化不大,台风的西北部有一明显的带状水汽辐合带,不对称分布更加明显,水汽辐合中心位于京津交界附近,中心强度为 $-120 \times 10^{-8} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})$,暴雨位置与水汽通量的密集带和水汽辐合大值区对应。而 2021 年 7 月 29 日 20 时(见图 10b),台风“烟花”北侧的东南气流经渤海向天津东部地区不断输送水汽,最强的水汽辐合中心位于渤海西岸的天津东部沿海地区,其辐合强度略弱于台风“安比”,水汽通量较台风“安比”低约 $4 \times$

$10^{-8} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})$ 。

进一步分析水汽通道对水汽集中的贡献程度,选取了 $116.5^{\circ} \sim 118.2^{\circ} \text{E}$ 、 $38.5^{\circ} \sim 40.3^{\circ} \text{N}$ 范围内 4 条边界来分析两次台风过程中天津地区水汽的收支情况。从 4 个边界的净收支上看(见图 11a),在台风“安比”导致的强降水开始前,东边界主要为天津水汽的净流入方,西边界主要为水汽的净流出方,而南边界以弱的净流入为主,北边界为弱的净流出。因此偏东水汽输送为最重要的水汽来源,对天津强降水的水汽集中有正贡献。总体来看,2018 年 7 月 24 日 20 时前总的水汽收支为正值,水汽源源不断向降水区集中,20 时后总收支变为负值,即当水汽由净收入转为净支出后,强降水逐渐趋于停止,降水量迅速减少。从台风“烟花”的水汽收支情况来看(见图 11b),在强降水发生前,南边界主要为天津水汽的净流入方,北边界主要为水汽的净流出方,而东边界以弱的净流入为主,西边界为弱的净流出,偏南水汽输送为最重要的水汽来源。但与台风“安比”不同的是,在台风“烟花”导致的强降水开始后,降水区的总收入始终是增加的,可以持续为降水区提供水汽,为其较长时间的降水提供有利条件。

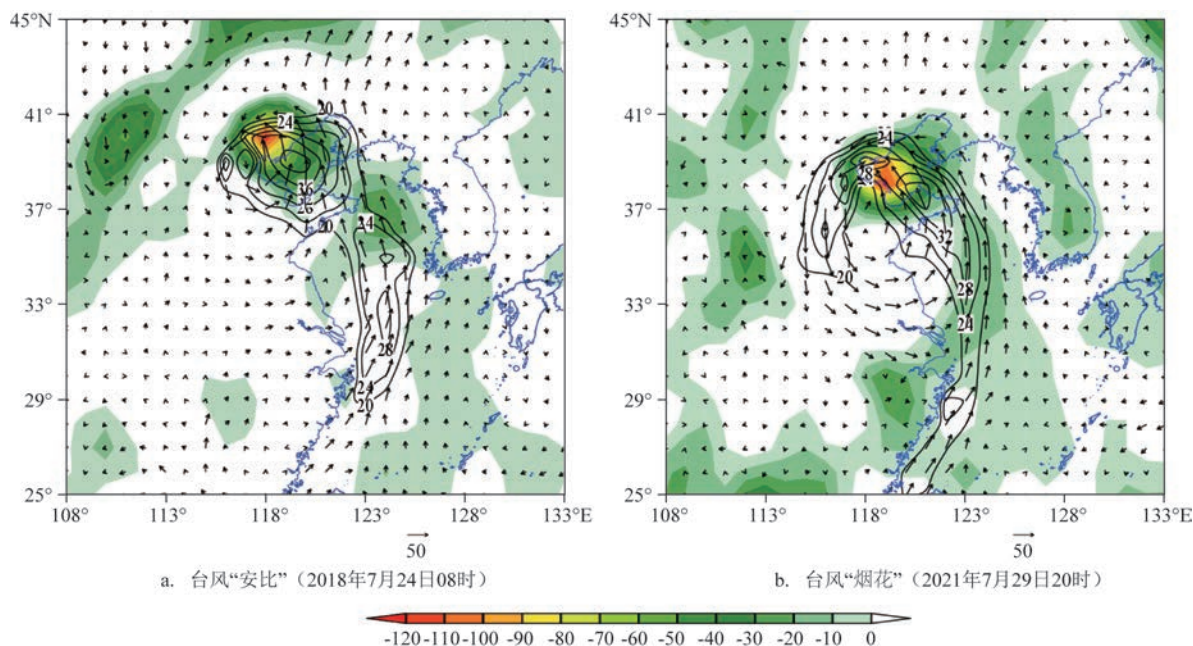


图 10 台风“安比”和台风“烟花”期间 925 hPa 水汽通量(等值线,单位: $\text{g}/(\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm})$)、水汽通量散度(填色,单位: $10^{-8} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})$)和风矢量(单位: m/s)分布

Fig.10 Water vapor flux (contour, unit: $\text{g}/(\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm})$), water vapor flux divergence (shaded area, unit: $10^{-8} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})$) and wind vector (unit: m/s) during Typhoon "Ampil" and Typhoon "In-Fa"

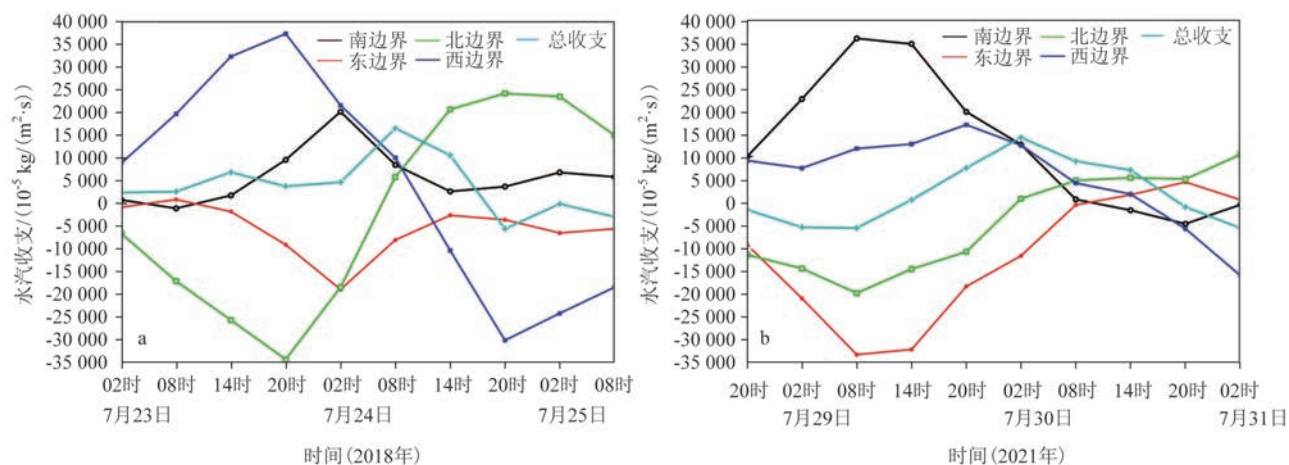


图11 台风“安比”(a)和台风“烟花”(b)期间天津地区1 000~300 hPa整层的水汽收支时间序列

Fig.10 Time series of vertically integrated water vapor budget between 1 000 hPa and 300 hPa in Tianjin during the periods of Typhoon "Ampil" (a) and Typhoon "In-Fa" (b)

4 结论

本文使用中国气象局最佳路径数据、卫星云图、自动站资料、NCEP/NCAR再分析资料和常规观测资料,分析了2106号台风“烟花”和1810号台风“安比”北上过程中受到西风带高空槽的影响导致天津地区强降水落区存在差异的原因。结论如下:

①台风“安比”和台风“烟花”在北上过程中强度保持不变,均给天津地区带来明显降水,但是大暴雨落区位置以及降水的强度和持续性却存在显著差异,其中台风“安比”的降水强度大,大暴雨主要集中在天津西部,而台风“烟花”降水持续时间长,降水效率低,大暴雨主要位于天津东部。

②两次台风降水分布差异与台风结构、位置和环境气流密切相关。在台风“安比”影响期间,正压结构维持,副高东撤导致槽后有冷空气渗透并与偏东南暖湿低空急流交汇,中尺度云团发展,利于对流性降水的发生。台风“烟花”则与西风槽合并后演变为高空槽,由于冷平流较弱,中尺度云团不明显,雨强较小,以稳定性降水为主。

③台风“安比”西侧冷暖交汇,风切变增大,正涡度增强,高层高位涡气流到达对流层低层,位涡下传导致900 hPa新的位涡中心被激发,且对流层低层螺旋度中心几乎重合,锋区垂直且有一定增强,共同为台风“安比”期间的涡旋增强及大暴雨的发生和发展提供了有利的动力条件。台风“烟花”

暴雨区西侧和北侧的 θ_{se} 密集带发生倾斜,斜压性明显,强降水落区恰好位于700 hPa和850 hPa螺旋度梯度的重合区,强降水站点主要位于锋生函数和假相当位温的梯度区。

④水汽分析发现,台风“安比”正面袭击天津,对流层低层东南急流经渤海后水汽得以补充,在台风西北部形成明显的带状水汽辐合带,东边界主要为天津水汽的净流入方,偏东水汽输送为最重要的水汽来源,对天津强降水的水汽集中有正贡献,水汽和冷暖空气均交汇于京津交界并诱发短时强降水。台风“烟花”经山东折向渤海,台风北侧的东南气流经渤海向天津东部地区不断输送水汽,最强的水汽辐合中心位于天津东部沿海地区,南边界主要为天津水汽的净流入方,偏南水汽输送为持续降水提供水汽来源。

参考文献:

- [1] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 281-283.
CHEN L S, DING Y H. Introduction to western Pacific typhoon [M]. Beijing: Science Press, 1979: 281-283.
- [2] BROWNING K A. The dry intrusion perspective of extra-tropical cyclone development[J]. Meteorological Applications, 1997, 4(4): 317-324.
- [3] 雷小途, 陈联寿. 热带气旋的登陆及其与中纬度环流系统相互作用的研究[J]. 气象学报, 2001, 59(5): 602-615.
LEI X T, CHEN L S. Tropical cyclone landfalling and its

- interaction with mid-latitude circulation systems[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, 59(5): 602-615.
- [4] 程正泉, 陈联寿, 徐祥德, 等. 近10年中国台风暴雨研究进展[J]. *气象*, 2005, 31(12): 3-9.
- CHENG Z Q, CHEN L S, XU X D, et al. Research progress on typhoon heavy rainfall in China for last ten years[J]. *Meteorological Monthly*, 2005, 31(12): 3-9.
- [5] 端义宏, 陈联寿, 梁建茵, 等. 台风登陆前后异常变化的研究进展[J]. *气象学报*, 2014, 72(5): 969-986.
- DUAN Y H, CHEN L S, LIANG J Y, et al. Research progress in the unusual variations of typhoons before and after landfalling[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(5): 969-986.
- [6] 岳彩军. “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*, 2009, 33(1): 51-70.
- YUE C J. A quantitative study of asymmetric characteristic genesis of precipitation associated with Typhoon Haitang[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, 33(1): 51-70.
- [7] 朱佩君, 郑永光, 陶祖钰. 发生在中国大陆的台风变性加强过程分析[J]. *热带气象学报*, 2003, 19(2): 157-162.
- ZHU P J, ZHENG Y G, TAO Z Y. Analysis of the extratropical transition of tropical cyclone over mainland of China[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2003, 19(2): 157-162.
- [8] 孙建华, 齐琳琳, 赵思雄. “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*, 2006, 64(1): 57-71.
- SUN J H, QI L L, ZHAO S X. A study on mesoscale convective systems of the severe heavy rainfall in north China by “9608” typhoon[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, 64(1): 57-71.
- [9] 周玲丽, 翟国庆, 王东海, 等. 0713号“韦帕”台风暴雨的中尺度数值研究和非对称性结构分析[J]. *大气科学*, 2011, 35(6): 1046-1056.
- ZHOU L L, ZHAI G Q, WANG D H, et al. Mesoscale numerical study of the rainstorm and asymmetric structure of 0713 Typhoon Wipha[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2011, 35(6): 1046-1056.
- [10] 赵宇, 崔晓鹏, 高守亭. 引发华北特大暴雨过程的中尺度对流系统结构特征研究[J]. *大气科学*, 2011, 35(5): 945-962.
- ZHAO Y, CUI X P, GAO S T. A study of structure of mesoscale systems producing a heavy rainfall event in North China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2011, 35(5): 945-962.
- [11] 赵宇, 李静, 杨成芳. 与台风“海鸥”相关暴雨过程的水汽和干侵入研究[J]. *高原气象*, 2016, 35(2): 444-459.
- ZHAO Y, LI J, YANG C F. Study on water vapor and dry intrusion in a heavy rainfall event associated with Typhoon Haiou [J]. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(2): 444-459.
- [12] ATALLAH E, BOSART L F, AIYYER A R. Precipitation distribution associated with landfalling tropical cyclones over the eastern United States[J]. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(6): 2185-2206.
- [13] 任丽, 王承伟, 张桂华, 等. 台风布拉万(1215)深入内陆所致的大暴雨成因分析[J]. *气象*, 2013, 39(12): 1561-1569.
- REN L, WANG C W, ZHANG G H, et al. Analysis of severe rainstorm caused by Typhoon Bolaven (1215) invading interior territory[J]. *Meteorological Monthly*, 2013, 39(12): 1561-1569.
- [14] 孙力, 董伟, 药明, 等. 1215号“布拉万”台风暴雨及降水非对称性分布的成因分析[J]. *气象学报*, 2015, 73(1): 36-49.
- SUN L, DONG W, YAO M, et al. A diagnostic analysis of the causes of the torrential rain and precipitation asymmetric distribution of Typhoon Bolaven (1215) [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2015, 73(1): 36-49.
- [15] 刘晓波, 邹兰军, 夏立. 台风罗莎引发上海暴雨大风的特点及成因[J]. *气象*, 2008, 34(12): 72-78.
- LIU X B, ZOU L J, XIA L. Analysis on the characteristics and reason of heavy rain and strong wind in Shanghai caused by Typhoon Krosa[J]. *Meteorological Monthly*, 2008, 34(12): 72-78.
- [16] 王承伟, 齐铎, 徐玥, 等. 冷空气入侵台风“灿鸿”引发的东北暴雨分析[J]. *高原气象*, 2017, 36(5): 1257-1266.
- WANG C W, QI D, XU Y, et al. Analysis of rainstorm induced by interaction between Typhoon Chan-hom (2015) and Cold air in Northeast China[J]. *Plateau Meteorology*, 2017, 36(5): 1257-1266.
- [17] 陈宏, 杨晓君, 尉英华, 等. 干冷空气入侵台风“海棠”残余低压引发的华北地区大暴雨分析[J]. *暴雨灾害*, 2020, 39(3): 241-249.
- CHEN H, YANG X J, WEI Y H, et al. Analysis of the heavy rain in North China for dry cold air intruding into typhoon “Begonia” depression[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2020, 39(3): 241-249.
- [18] 盛芳, 杨旺文, 吴松涛. 相似路径超强台风“尼伯特”(1601)和“莫兰蒂”(1614)对金华降水影响对比分析[J]. *海洋预报*, 2017, 34(6): 73-82.
- SHENG F, YANG W W, WU S T. Analysis of contrastive precipitation caused by super typhoon “Nepartak” (1601) and “Meranti” (1614) in similar path for Jing Hua[J]. *Marine Forecasts*, 2017, 34(6): 73-82.
- [19] 陈宏, 杨晓君, 易笑园, 等. 北上台风“安比”后期两个阶段暴雨落区分布的差异性分析[J]. *高原气象*, 2021, 40(5): 1087-1100.
- CHEN H, YANG X J, YI X Y, et al. Analysis of difference in distribution of rainstorms in the later two stages of northward-moving Typhoon Ampil[J]. *Plateau Meteorology*, 2021, 40(5): 1087-1100.
- [20] 梁军, 李英, 张胜军, 等. 辽东半岛热带气旋暴雨的中尺度结构及复杂地形的影响[J]. *高原气象*, 2014, 33(4): 1154-1163.
- LIANG J, LI Y, ZHANG S J, et al. Mesoscale structure of torrential rain tropical cyclone over Liaodong Peninsula and the effect of complicated topography[J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(4): 1154-1163.
- [21] 岳彩军. Q矢量、螺旋度、位涡及位涡反演在台风暴雨研究中的应用进展[J]. *暴雨灾害*, 2014, 33(3): 193-201.
- YUE C J. Progress in application study of Q vector, helicity, potential vorticity and its inversion to torrential rainfall associated with typhoon[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2014, 33(3): 193-201.

- [22] 曹宗元, 陈淑琴, 刘飞, 等. 相似路径台风“天鹅”(1515)和“珊珊”(0613)降水差异分析[J]. 海洋预报, 2018, 35(3): 48-56.
CAO Z Y, CHEN S Q, LIU F, et al. Analysis on precipitation difference between the similar track typhoon "GONI" (1515) and "Shanshan" (0613)[J]. Marine Forecasts, 2018, 35(3): 48-56.
- [23] 寿绍文, 励申申, 姚秀萍. 中尺度气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
SHOU S W, LI S S, YAO X P. Mesoscale Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003.
- [24] 李志楠, 郑新江, 赵亚民, 等. 9608 号台风低压外围暴雨中尺度云团的发生发展[J]. 热带气象学报, 2000, 16(4): 316-326.
LI Z N, ZHENG X J, ZHAO Y M, et al. The mesoscale torrential rain cloud cluster from the low pressure periphery area of the Typhoon No. 9608[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2000, 16(4): 316-326.
- [25] NINOMIYA K. Characteristics of Baiu Front as a predominant subtropical front in the summer northern hemisphere[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 1984, 62(6): 880-894.
- [26] 陶祖钰. 基础理论与预报实践[J]. 气象, 2011, 37(2): 129-135.
TAO Z Y. Basic theories and forecast practices[J]. Meteorological Monthly, 2011, 37(2): 129-135.

Comparative analysis of heavy precipitation caused by two northward-moving typhoon under the influence of westerly troughs

CHEN Hong, LU Huanzhen*, SUN Mina, HAN Tingting

(Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074, China)

Abstract: Based on typhoon best track data, hourly automatic weather station data, National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) $1^\circ \times 1^\circ$ reanalysis data, cloud top brightness temperature data from FY-4A satellite and conventional observation data, a comparative analysis of heavy precipitation in Tianjin during Typhoon "In-Fa" (2106) and Typhoon "Ampil" (1810) is conducted in this study, specifically both these two northward-moving typhoons were affected by high-altitude trough in the westerly belt. The results show that the two typhoons were both affected by high-altitude troughs and cold air during their northward movement. However, due to the different typhoon structure, location and intensity of the rainstorm are different after the two typhoons encounter the westerly trough. Typhoon "Ampil" maintained a barotropic structure, thus the associated precipitation had a short duration and high intensity, and the heavy rainstorm mainly located in the western Tianjin. However, Typhoon "In-Fa" had a baroclinic property, and the associated precipitation had a long duration and low intensity, and the heavy rainstorm mainly located in the eastern Tianjin. During the northward movement of Typhoon "Ampil", the subtropical high moved eastward, which was conducive to convergence of the cold air behind the trough and the warm-humid low-level jet from the southeast, leading to the development of atmospheric stratification instability and mesoscale cloud clusters. The high-level high potential vortex air flow reached the lower troposphere, and the downward propagation of the potential vortex caused the increases of the low-level potential vortex. Heavy rainfall is closely related to the helicity center, frontal zone and easterly water vapor transport in the lower troposphere. Typhoon "In-Fa" merged with the westerly trough and evolved into a high-altitude trough, but the mesoscale cloud clusters were not obvious, and the dense belts of θ_{se} on the west and north sides of the heavy rain area inclined. Heavy rainfall mainly located in the gradient area of frontogenesis function and pseudo-equivalent potential temperature. The southerly water vapor transport provided the source for continuous precipitation. The associated precipitation was characterized by low intensity and high stability.

Key words: typhoon; westerly trough; potential vortex; water vapor transport