

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.03.004

# 台风“美莎克”致洪暴雨精细化特征及成因分析

沈晓琳<sup>1,2</sup>, 胡 艺<sup>1</sup>, 张恒德<sup>1,2</sup>, 张芳华<sup>1</sup>, 陈 涛<sup>1</sup>, 陈博宇<sup>1</sup>, 官 宇<sup>1</sup>

(1. 国家气象中心, 北京 100081; 2. 中国气象局-河海大学水文气象研究联合实验室, 北京 100081)

**摘要:** 为分析 2020 年台风“美莎克”致洪暴雨成因, 利用自动气象站观测、风廓线雷达、NCEP 再分析等资料, 对暴雨的精细化特征进行诊断分析, 并与 2012 年台风“布拉万”进行简要对比。结果表明: 台风“美莎克”带来的降水具有风雨影响范围大、降水持续时间长、降水呈非对称性等特点; “美莎克”在东北地区造成的强降水与它和西风带系统结合关系密切, 北上台风进入我国东北地区后呈非对称性结构发展, 台风西侧干冷空气的卷入和锋生区导致了其降水的持续和非对称性分布; “布拉万”与“美莎克”的大尺度环流均表现为“西低东高”的形势, 但是“美莎克”环流的异常程度、系统随高度向西倾斜的程度及锋区强度均强于“布拉万”, 因此降水也表现为持续时间更长、范围更大的特征。

**关键词:** 致洪暴雨; 北上台风; 台风“美莎克”; 非对称性; 冷空气; 锋生

**中图分类号:** P458.1+21.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1980(2022)03-0023-08

## Analysis on refined characteristics and causes of flooding rainstorm caused by typhoon MAYSAC

SHEN Xiaolin<sup>1,2</sup>, HU Yi<sup>1</sup>, ZHANG Hengde<sup>1,2</sup>, ZHANG Fanghua<sup>1</sup>, CHEN Tao<sup>1</sup>, CHEN Boyu<sup>1</sup>, GONG Yu<sup>1</sup>

(1. National Meteorological Centre, Beijing 100081, China;

2. CMA-HHU Joint Laboratory for Hydrometeorological Studies, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Based on the observation of automatic weather station, the wind profile radar and the NCEP reanalysis data, this paper analyzes the fine characteristics and causes of the torrential rain caused by typhoon MAYSAC in 2020, and makes a brief comparison with typhoon Bolaven in 2012. The results show that: the precipitation brought by typhoon MAYSAC has the characteristics of the large influence range of wind and rain, the long duration of precipitation and the asymmetric precipitation; The heavy precipitation caused by MAYSAC in northeast China was closely related to the combination of MAYSAC and westerly system. The asymmetric structure developed after the northward typhoon entered northeast China, and the involvement of dry/cold air and frontogenesis area on the west side of MAYSAC led to the continuous and asymmetric distribution of precipitation; The large-scale circulation of Bolaven and Meshak showed a situation of "low in the west and high in the east", but the anomaly degree of the circulation of MAYSAC, the degree of the system tilting to the west with the height and the strength of the frontal zone were stronger than that of Bolaven, so the precipitation also showed a longer duration and a larger range.

**Key words:** flooding rainstorm; northward typhoon; typhoon MAYSAC; asymmetry; cold air; frontogenesis

我国是世界上登陆台风最多、受灾最严重的国家之一, 平均每年有七八个台风登陆<sup>[1]</sup>, 台风带来的大风及其登陆后带来的暴雨是致灾的主要原因, 经常会引起城市内涝、山体滑坡等灾害, 给人民的生命财产安全带来重大损失<sup>[2-5]</sup>。众多学者在台风暴雨形成的机理方面取得了重要进展, 研究发现水汽、上升运动、位势不稳定等影响台风降水的物理因子的产生、维持和强弱与台风周围的环境流场、自身动力和热力结构等均有联系<sup>[1]</sup>; 台风强度和眼壁区暴雨强度的突然增强是由内核对流爆发导致的<sup>[6]</sup>; 中小尺度切变线和小尺度涡旋

**基金项目:** 国家重点研发计划(2017YFC1502004, 2017YFC150210); 中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z033); 中国气象局预报预测核心业务发展专项子项目(YBGJXM(2020)3A-03)

**作者简介:** 沈晓琳(1986—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事短期天气预报研究。E-mail: shenxiaolin\_1986@126.com

**通信作者:** 张恒德(1977—), 男, 研究员级高工, 博士, 主要从事灾害性天气机理和预报技术研究。E-mail: zhanghengde1977@163.com

**引用本文:** 沈晓琳, 胡艺, 张恒德, 等. 台风“美莎克”致洪暴雨精细化特征及成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 23-30.

SHEN Xiaolin, HU Yi, ZHANG Hengde, et al. Analysis on refined characteristics and causes of flooding rainstorm caused by typhoon MAYSAC[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(3): 23-30.

会导致台风环流内局地降水增强,台风内核上空云微物理过程对降水增强也容易被忽视<sup>[7]</sup>;季风涌与台风的相互作用给予台风大量水汽和能量,使得其登陆强度维持或残涡复苏,并使台风暴雨增强<sup>[8]</sup>。

北上台风对我国东北地区东南部的影响较多,而对东北地区中北部的影响相对较少<sup>[9]</sup>。影响东北的台风暴雨多与西风带系统密切相关,冷空气的入侵可能会导致台风变性,使系统重新发展,导致暴雨落区扩大<sup>[10-11]</sup>;伴随与中纬度环流相互作用,台风结构也有所调整,从正压演变成斜压,结构呈现出非对称性特征<sup>[12-14]</sup>。针对近年北上影响我国东北地区的台风,我国学者也做了相关分析,王承伟等<sup>[15]</sup>对冷空气入侵台风“灿鸿”引发的东北暴雨进行分析发现,冷空气从低层进入变性台风北部,使台风登陆后强度减弱较慢,北部有所加强,在其北部出现较大范围的暴雨、大暴雨。孙力等<sup>[16]</sup>对2012年第15号台风“布拉万”给我国东北地区带来的暴雨过程进行了分析,结果表明,中纬度西风槽带来的干冷空气,使得降水和环流结构表现为明显的不对称性。刘硕等<sup>[17]</sup>对台风“狮子山”并入温带气旋在东北地区引发的强降水进行分析,结果表明,“狮子山”与温带气旋结合,结构发生较大变化,从对称的热带涡旋云系发展为非对称斜压云系,最终发展为成熟温带气旋,增强了动力、水汽和能量输送,因此在东北地区引发较强降水。

2020年8月26日至9月8日半个月的时间内,东北地区连续受8号台风“巴威”、9号台风“美莎克”和10号台风“海神”3个台风影响,为有气象记录以来首次,比常年全年影响东北地区台风个数(平均1.2个)偏多1.8个。台风的“三连击”给东北地区带来较大的风雨影响,并造成大面积的农作物倒伏和经济损失。其中,“美莎克”在高纬地区与冷空气结合,随后变性为温带气旋,在我国东北地区的持续时间最长、影响范围最广。受“美莎克”带来的强风雨影响,东北三省多地学校停课、景点关闭、航班调整,与前期“巴威”影响叠加,黑龙江南部、吉林中部部分地区发生城乡积涝和作物倒伏,多个乡镇出现房屋倒塌或损毁。此次降水强对流特征虽不明显,但降水持续时间长,雨区分布不均匀,导致东北三省、内蒙古东部等多地城市内低洼路段出现积水和道路坍塌,低洼路段平房区出现内涝,对城市交通和人民生活影响较大。本文利用自动气象站观测、风廓线雷达、NCEP分析等资料,对2020年台风“美莎克”降水的特征及非对称性分布成因进行分析,并与2012年台风“布拉万”的降水及环流形势进行对比,以期为提高对北上台风暴雨的认识和预报能力提供参考。

# 1 降水极端性及精细化特征分析

## 1.1 降水极端性特征

2020年第9号台风“美莎克”于9月3日北上影响我国东北地区,路径见图1,受其影响,2日20时至5日8时,辽宁北部、吉林、黑龙江西部和南部、内蒙古东北部等地累计降水量50~100 mm,其中吉林东部、黑龙江西南部局地累计降水量超过100 mm,最大降水量(152.8 mm(自动站))出现在黑龙江西南部。同时,强降水表现出非常明显的非对称性特征,累计降水量大值区主要出现在台风中心的左侧。“美莎克”影响东北期间,吉林省、黑龙江省有49个国家级观测站的日降雨量突破当地9月历史极值(图1),其中有2个站突破建站以来历史极值。从松花江流域面雨量实况图(图2)可见,2日20时至5日8时,松花江大部分流域、嫩

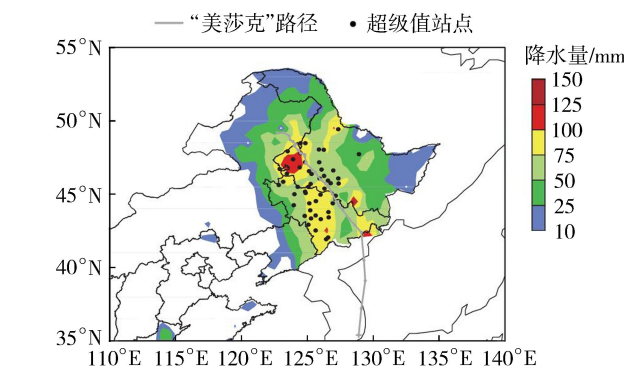


图1 2020年9月2日20时至5日8时  
累计降水量

Fig.1 Accumulated precipitation from  
2000 CST Sept 2 to 0800 CST Sept 5, 2020

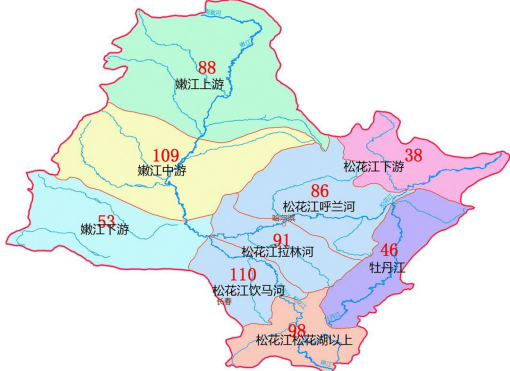


图2 2020年9月2日20时至5日8时松花江  
流域面雨量实况(单位:mm)

Fig.2 Areal precipitation of Songhua River Basin (units: mm)  
from 2000 CST Sept 2 to 0800 CST Sept 5, 2020

江面雨量在 50 ~ 110 mm,其中嫩江中游、松花江饮马河面雨量超过 100 mm,黑龙江、吉林两省内多条中小河流超警戒水位,部分河流超保证水位。五道沟水文站于 3 日傍晚水位超警戒水位,并于 5 日中午出现洪峰流量,约为 273 m<sup>3</sup>/s,八里哨水位于 3 日凌晨先后超警戒水位和保证水位,并于 3 日夜间出现洪峰流量(图 3)。

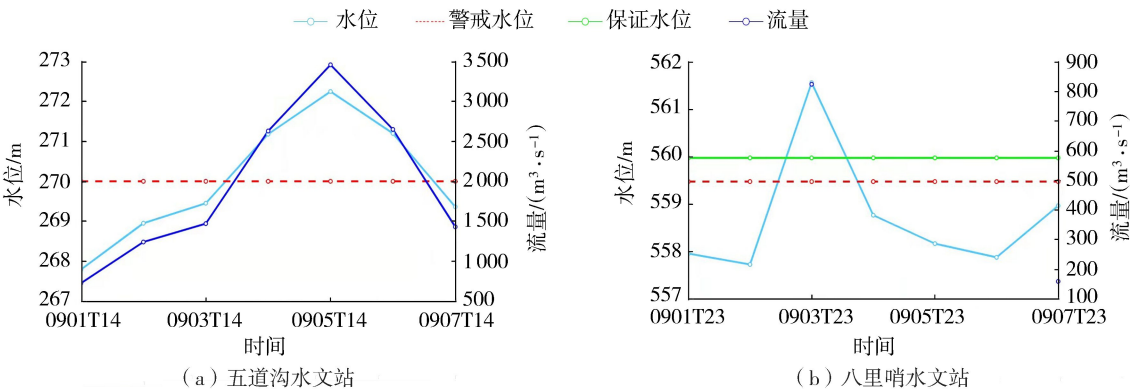


图 3 五道沟和八里哨水文站水情变化

Fig. 3 Hydrological regime change map of Wudaogou and Balishao hydrological stations

1.2 降水精细化特征

由图 4(a)发现,黑龙江西部、吉林大部、辽宁南部和东部出现的最大小时降水量区间主要集中在 15 ~ 30 mm,仅在黑龙江南部、吉林中部和东部的个别站点最大小时降水量超过 30 mm。同时牡丹江站雷达反射率剖面图表现为回波顶高度在 8 km 左右,但回波强度不强(图略)。由图 4(b)可知,辽宁北部、吉林大部、黑龙江西部和南部的大部分站点累计降水时间长达 30 ~ 40 h,个别站点累计降水时间超过 40 h。由图 4(c)可以发现,强降水的持续时间长,从 2 日夜间开始,至 4 日白天降水陆续结束。综上,本次台风暴雨过程以持续时间较长的稳定性降水为主,降水主要集中在 3 日,尤其在 3 日下午至夜间降水强度最强。

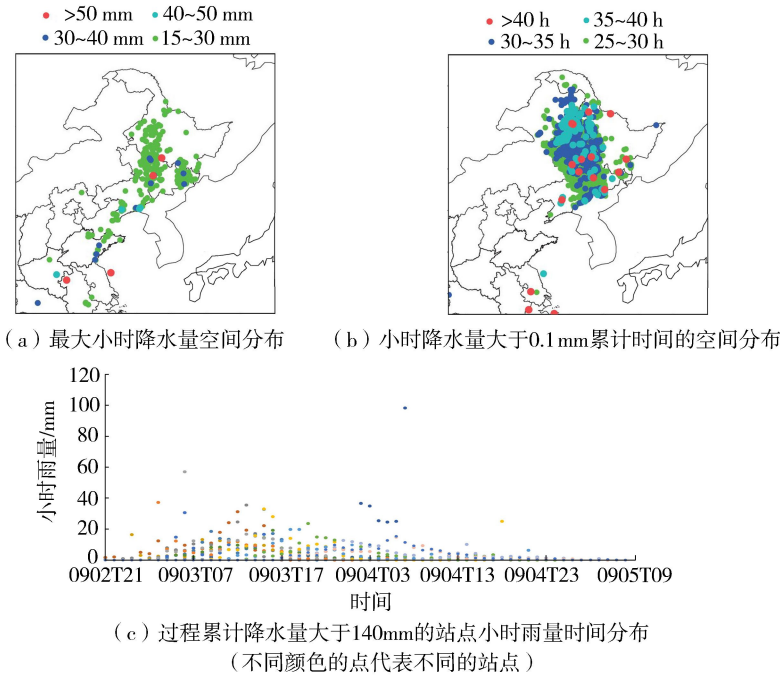


图 4 2020 年 9 月 2 日 20 时至 5 日 8 时降水的时空分布

Fig. 4 Temporal and spatial distribution of precipitation from 2000 CST Sept 2 to 0800 CST Sept 5, 2020

结合降水的时空分布特征,对逐小时形势场和降水演变进行分析(图 5),2 日夜间至 3 日上午,台风穿过朝鲜半岛后继续北上,向我国吉林省东部靠近,台风倒槽已经开始影响吉林东部,此阶段 500 hPa 形势场表现为台风整体环流密实,但结构开始出现不对称,其东西两侧的高度场梯度和风速均出现不对称,同时华北东北部至东北地区南部上空存在一个闭合的低压中心,台风和西风带系统各自独立,此阶段在吉林东部出

现对流性降水,从逐小时环流场演变可知,在台风登陆我国前(3日12时前后),前期在500 hPa形势场上存在的各自独立的2个低值中心合并为一个低值中心,表明此时台风与西风带系统在高空表现出相结合的趋势。3日下午开始,随着台风主体进入我国,与西风带系统逐渐结合,台风结构不对称性进一步增强,台风中心北侧和西侧辐合区降水较强,主要影响吉林中东部和黑龙江东南部。台风与西风带系统结合后,在吉林中西部、黑龙江南部和西部等地先后出现较强降水,此时的降水以锋面降水为主,降水的强度较前期强,范围大。综合上述降水精细化特征,本文将台风“美莎克”降水过程分成2个阶段,一个是与西风带系统结合前,另一个是与西风带系统结合的过程。在3日下午至夜间“美莎克”与西风带系统相互作用期间,降水强度最强,非对称性特征最显著。

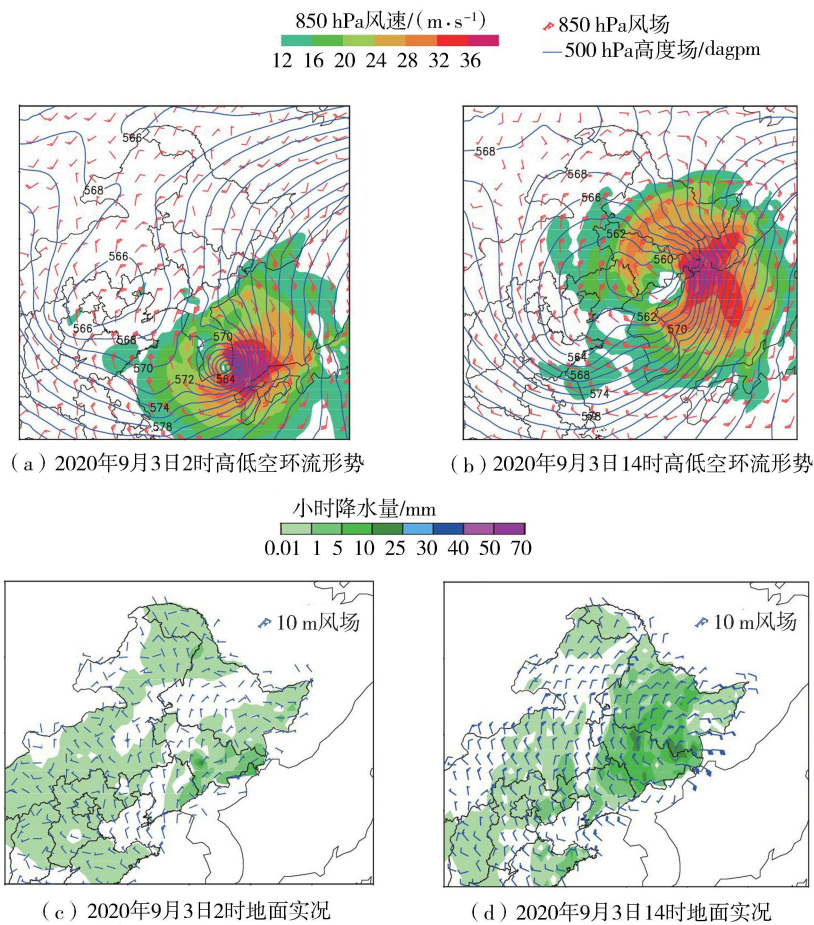


图5 再分析资料的高低环流形势和地面实况

Fig.5 Circulation fields and ground map of reanalysis data

## 2 致洪暴雨成因分析

### 2.1 降水持续性成因分析

分析8月28日至9月2日平均500 hPa环流形势场可知,台风登陆我国之前东部阻塞高压稳定且强度异常偏强,本次过程主要的大尺度环流背景为中高纬上空“西低东高”的环流形势,北上台风“美莎克”位于西风槽和东部阻塞高压之间,东部阻塞高压稳定存在,位置较常年同期偏北,位于我国东部地区的东亚大槽异常偏强,并且位置稳定。这种异常稳定的“西低东高”的环流形势场有利于台风北上影响我国东北地区,使其北上路径更加稳定,台风移动缓慢,在我国东北地区影响时间长,有利于出现持续性降水。

从主要降水区区域平均综合廓线(图6)可以发现,2日夜間至4日上午,该区域从近地面到200 hPa层相对湿度均维持在80%以上,有2个中心,一个出现在3日凌晨到下午,位于500~200 hPa层,另一个出现3日夜間至4日8时,位于700~800 hPa层;垂直运动则表现为整层的上升运动,中心值出现在400~600 hPa层。以上有利于降水的动力和水汽条件,持续时间长达约20 h,非常有利于该区域累计降水量的增大。

2.2 降水非对称性成因分析

对“美莎克”降水分布特征的分析可知, 累计降水量大值区主要出现在台风中心的左侧。通过分析“美莎克”影响我国期间降水与低层风场的位置发现,降水主要出现在台风倒槽西侧。

分析 850 hPa 风场变化可知,前期低层风速的辐合区位于台风倒槽的东侧,在台风与西风带系统结合后,台风倒槽西侧为风速和风向的辐合区。200 hPa 环流(图 7)图上前期有 2 个辐散中心,分别位于辽宁南部和朝鲜半岛,而伴随着西风带系统和台风的结合,高层也逐渐合并为一个辐散中心,位于内蒙古东北部上空。这种低层辐合、高层辐散有利于降水的加强和持续,并且高层的辐散区比低层辐合区位置偏西。

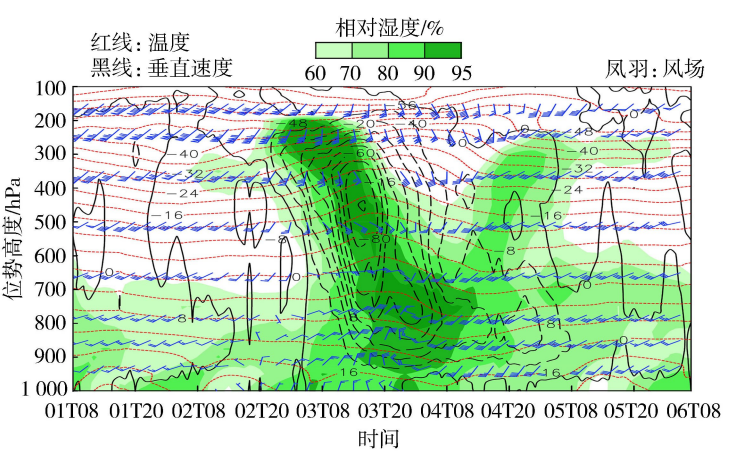


图 6 9 月 1—5 日主要降水区域平均综合廓线

Fig. 6 Average comprehensive profile of major precipitation areas from Sept. 1 to Sept. 5

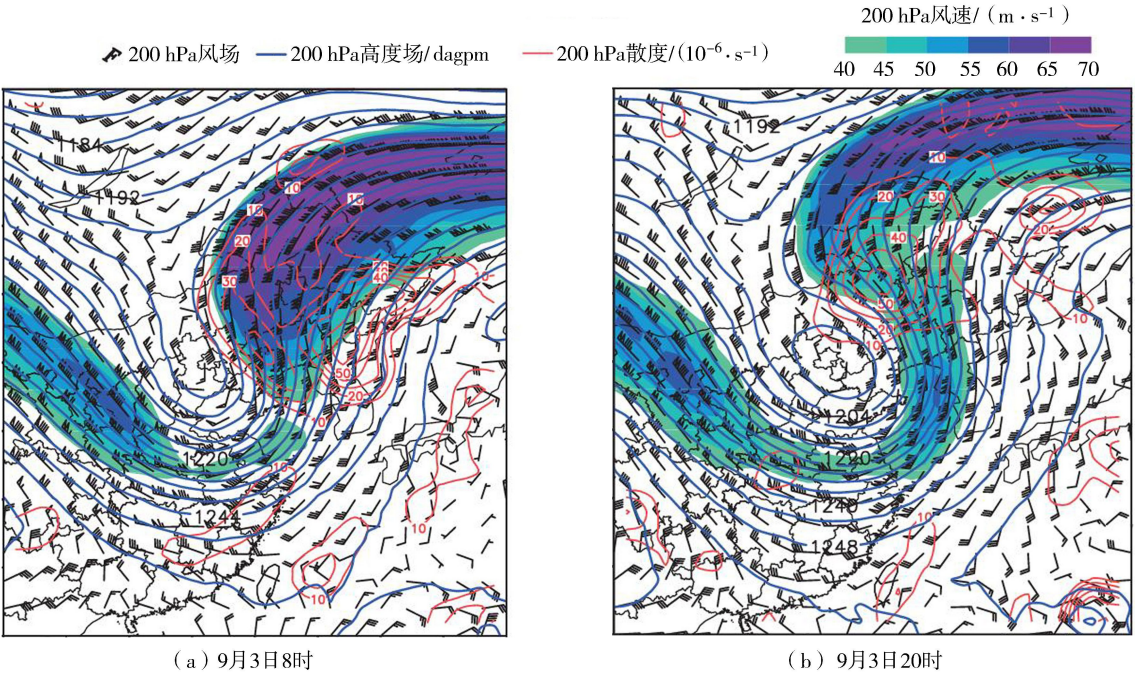


图 7 高空形势场分析

Fig. 7 High altitude situation field analysis

进一步从动力和热力方面进行诊断分析,由图 8 可见,在西风带系统和“美莎克”相互作用前,过台风中心(图中红色三角)的相对涡度表现为高低层垂直的分布特征,台风维持暖心结构,暖中心在 400 hPa 附近,暖平流中心和温度距平正值中心基本重合,高空辐散,低层辐合,抽吸作用暖中心对应上升运动。“美莎克”进入我国并与西风带系统相互作用后,相对涡度大值区开始随高度逐渐向西倾斜,台风涡旋环流在垂直方向上发生倾斜,上升运动也向西倾斜,此时台风的暖心结构虽然没有被破坏,但是低层伴随着冷平流输送,已经出现明显的温度梯度。

追踪水汽云图和  $1.5\times10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{K}/(\text{s}\cdot\text{kg})$  等位涡面的变化(图 9 中等值线),可以更清晰地揭示干冷空气的卷入过程。在西风带系统与台风相互作用前,气旋西部就可以看到明显的位涡入侵,等位涡面中心位于辽宁上空,中心强度 450 hPa,随后等位涡面逐渐向东偏北方向扩展;随着西风带系统与台风相互作用,其等位涡面气压明显降低,4 日 2 时等位涡面中心位于吉林西部、黑龙江西南部,中心气压 600 hPa 以上,达到最

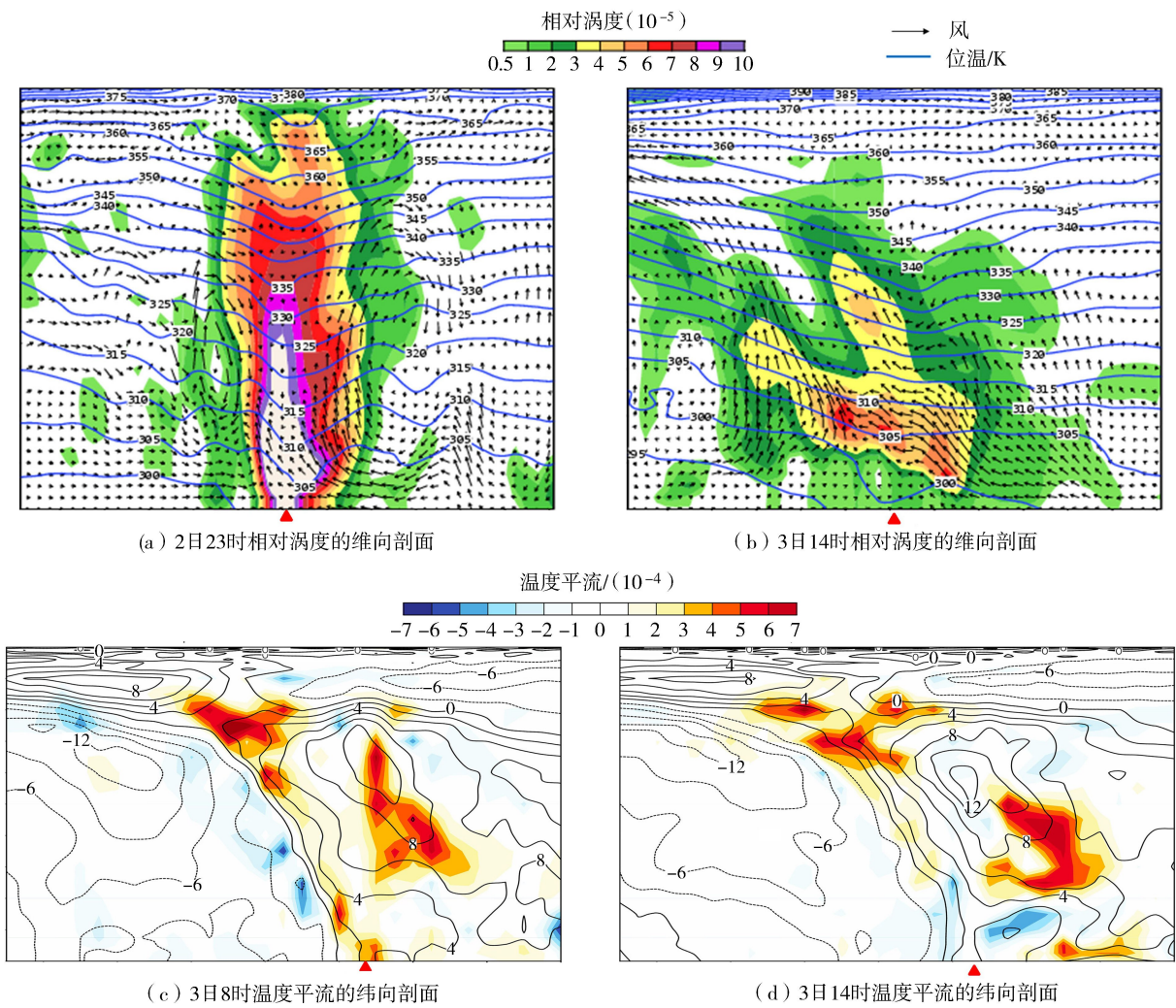


图 8 过台风中心的纬向剖面

Fig. 8 Zonal profile through the typhoon center

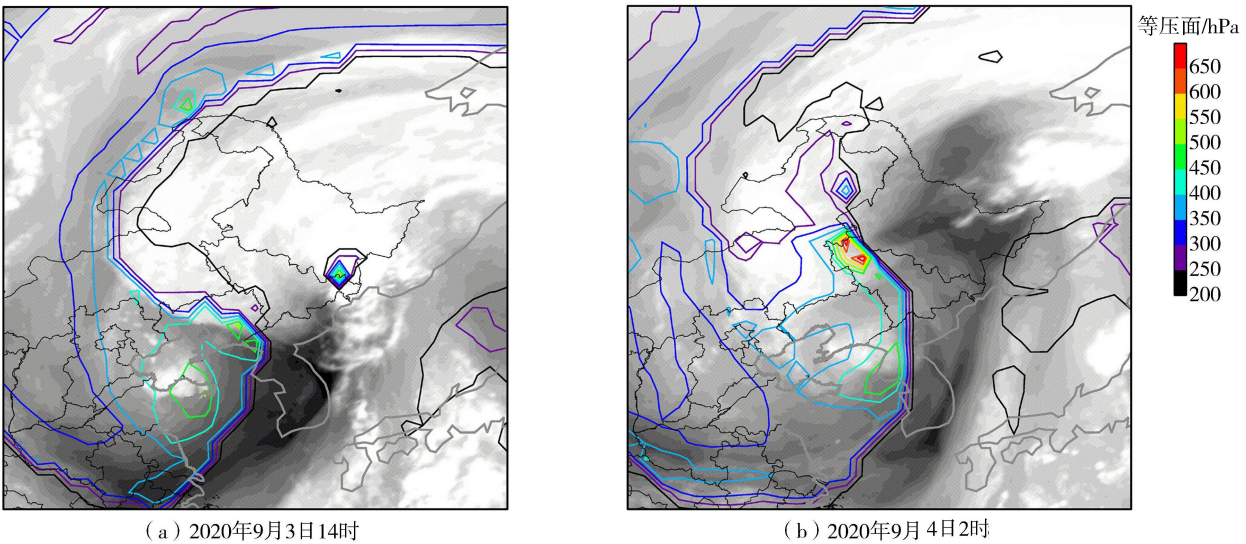


图 9 FY-2 水汽通道和 1.5pvu 等位涡面

Fig. 9 FY-2 water-vapor channel and 1.5pvu equipotential vortex surface

强。此外,从FY-2水汽通道图(图9中阴影)可见,在西风带系统与台风相互作用前,位涡明显的区域均对应于水汽通道的暗区,说明此区域内空气比较干燥,而随着西风带系统与台风相互作用,位涡明显的区域水

汽条件较好,其东侧水汽条件转差。同时分析锋生函数发现,台风倒槽西侧对应为锋生函数的大值区,表明在干冷空气卷入的过程中,在西侧有明显的锋生过程,而东侧则丧失了水汽的补充,并且锋生区与降水落区的位置匹配更好。以上分析表明,西侧干冷空气的卷入有利于在台风倒槽西部出现锋生过程,配合西侧水汽条件转好,有利于降水出现,使“美莎克”降水表现出明显的非对称性特征。此外,在冷空气与台风相互作用过程中,台风变性为温带气旋也是导致其降水空间分布发生变化的重要原因,有关台风变性的科学问题,将在以后的研究中进一步分析。

3 与 2012 年“布拉万”简要对比分析

2012 年台风“布拉万”北上,也给东北地区带来重大影响。“美莎克”和“布拉万”带来的风雨影响范围均比较大,且强降水中心都出现在台风中心的左侧。但“布拉万”以强热带风暴级进入我国境内,随后减弱为热带风暴,其强度维持不足 10 h,“美莎克”以热带风暴级进入我国,其强度维持 17 h,在我国境内强度维持时间较“布拉万”长,“美莎克”与西风带系统相互作用更明显。对 2 个台风影响我国东北期间小时降水量大于 10 mm 降水站数时间序列进行统计分析(图 10),发现“美莎克”降水持续 30~40 h,“布拉万”持续 15~20 h;在降水最强时期,“美莎克”影响的降水区域有 1800 站以上小时降水量大于 10 mm,而“布拉万”影响的降水区域则有 1000 站以上小时降水量大于 10 mm,总体表现出“美莎克”的降水持续时间更长、范围更大的特征。

对比分析 2 个台风的大尺度环流形势场可知,两次台风过程中高纬上空“西低东高”的基本环流型一致,均是在西风槽和东部阻塞高压中间,是北上的台风,但是“布拉万”的东部阻高和西风槽的异常程度不及“美莎克”;两次台风过程低层均有偏东风急流,且强度均为 4 个标准差异常,但范围上“美莎克”更强。分析高低层的系统配置可知,2 个台风靠近我国时,地面低值中心在高空低值中心的东侧,系统随高度均表现出向西倾斜的特征,但是“美莎克”随高度向西倾斜更明显。受西路冷空气影响,“美莎克”的锋区较“布拉万”更强。因此,在相似的环流背景下,2 个台风均在东北地区带来比较强的降水,且降水均具有非对称性,而动力条件的差异,导致了“美莎克”产生的降水更强。

4 结 语

2020 年台风“美莎克”与西风带系统相结合,在我国境内的时间长达 27 h,其风雨影响的时间长达 45 h 左右,具有风雨影响范围大、广的特征,部分站点雨量超极值;以持续性、稳定性降雨为主,黑龙江、吉林持续降水时间超过 30 h;降水具有非对称性特征,强降水落区主要位于台风中心的左侧。

如“美莎克”影响东北地区的概念模型所示(图 11),异常稳定的“西低东高”的环流形势场有利于台风北上影响我国东北地区,使其北上路径也更加稳定,台风移动缓慢,在我国东北地区影响时间长,有利于出现持续性降水。北上台风进入我国后呈非对称性结构发展,系统随高度向西倾斜,在台风的西侧动力条件较好,有利于降水在台风的西侧产生。同时,“美莎克”与西风带系统结合,台风强度维持时间较长,倒槽西侧锋生区,有利于降水的维持和降水落区的非对称性分布。

“美莎克”和“布拉万”在东北地区造成的强降水均与它们和西风带系统结合关系密切,但是“美莎克”环流的异常程度、系统随高度向西倾斜的程度及锋区强度均强于“布拉万”,因此降水也表现为持续时间更长、范围更大的特征。

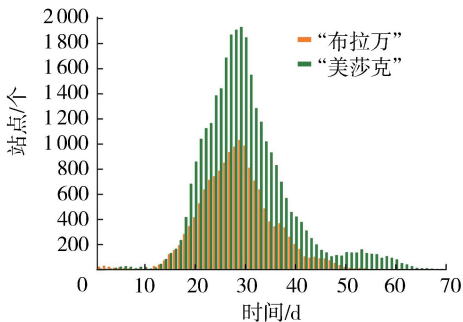


图 10 小时降水量大于 10 mm 降水站  
点数时间序列

Fig. 10 Time series of number of precipitation  
stations with hourly rainfall over 10 mm

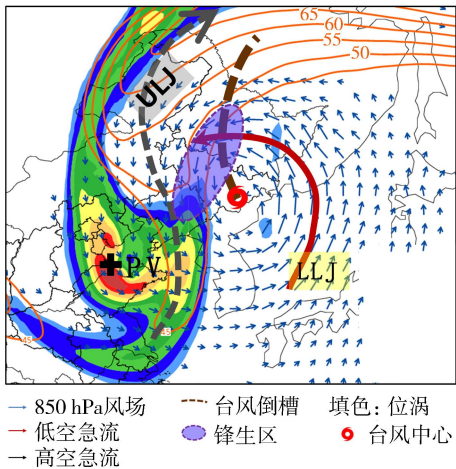


图 11 “美莎克”影响东北地区概念模型

Fig. 11 Conceptual model of Maysak  
influences on the Northeast region

## 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.
- [2] 孙佳,左军成,黄琳,等. 东海沿岸台风及风暴潮灾害特征及成因[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(5):461-465. (SUN Jia,ZUO Juncheng,HUANG Lin,et al. Characteristics and causes of typhoon and storm surge along coast of East China Sea [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2013,41(5):461-465. (in Chinese))
- [3] 杨波,林祥,刘青明,等. “桑美”超强台风风暴潮增水特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2013,41(4):348-353. (YANG Bo,LIN Xiang,LIU Qingming,et al. Feature analysis of super storm surge due to Typhoon Saomai[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2013,41(4):348-353. (in Chinese))
- [4] 潘存鸿,郑君,吴修广,等. 杭州湾年最高潮位时空变化及其抬升原因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):394-400. (PAN Cunhong,ZHENG Jun,WU Xiuguang,et al. Research progress of ocean waves forecasting method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(5):394-400. (in Chinese))
- [5] 赵静,胡庆芳,王腊春,等. 基于 MSWEP 数据的太湖流域降水特性分析[J]. 水资源保护,2020,36(2):27-33. (ZHAO Jing,HU Qingfang,WANG Lachun,et al. Analysis of precipitation characteristics in Taihu Lake Basin based on MSWEP[J]. Water Resources Protection,2020,36(2):27-33. (in Chinese))
- [6] CHEN Hua,ZHANG Dalin. On the rapid intensification of Hurricane Wilma (2005). Part II: Convective bursts and the upper-level warm core[J]. Journal of the Atmospheric Sciences,2013,70(1):146-162.
- [7] REN Chenping,CUI Xiaopeng. The cloud-microphysical cause of torrential rainfall amplification associated with Bilis (0604) [J]. Science China Earth Sciences,2014,57(9):2100-2111.
- [8] DONG Meiyang,CHEN Lianshou,LI Ying,et al. Rainfall reinforcement associated with landfalling tropical cyclones[J]. Journal of the Atmospheric Sciences,2010,67(11):3541-3558.
- [9] 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 Li,WANG Chengwei,ZHANG Guihua,et al. Analysis of severe rainstorm caused by Typhoon Bolaven(1215) invading interior territory[J]. Meteor Mon,2013,39(12):1561-1569. (in Chinese))
- [10] 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 Zhengquan,CHEN Lianshou,XU Xiangde,et al. Research progress on typhoon heavy rainfall in China for last ten years[J]. Meteor Mon,2005,31(12):3-9. (in Chinese))
- [11] 陈联寿,孟智勇,丛春华. 台风暴雨落区研究综述[J]. 海洋气象学报,2017,37(4):1-7. (CHEN Lianshou,MENG Zhiyong,CONG Chunhua. An overview on the research of typhoon rainfall distribution[J]. Journal of Marine Meteorology,2017,37(4):1-7. (in Chinese))
- [12] HARR P A,ELSBERRY E L. Extratropical transition of tropical cyclones over the western North Pacific. Part I: evolution of structural characteristics during the transition process[J]. Monthly Weather Review,2000,128:2613-2633.
- [13] KLEIN P M,HARR P A,ELSBERRY R L. Extratropical transition of western North Pacific tropical cyclones: an overview and conceptual model of the transformation stage[J]. Weather and Forecasting,2000,15:373-395.
- [14] KLEIN P M,HARR P A,ELSBERRY R L. Extratropical transition of western North Pacific tropical cyclones: midlatitude contributions to intensification[J]. Monthly Weather Review,2002,130(9):2240-2259.
- [15] 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 Chengwei,QI Duo,XU Yue,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. (in Chinese))
- [16] 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 Li,DONG Wei,YAO Ming,et al. A diagnostic analysis of the causes of the torrential rain and precipitation asymmetric distribution of Typhoon Bolaven(2012) [J]. Acta Meteorologica Sinica,2015,73(1):36-49. (in Chinese))
- [17] 刘硕,李得勤,赛瀚,等. 台风“狮子山”并入温带气旋过程及引发东北强降水的分析[J]. 高原气象,2019,38(4):804-816. (LIU Shuo,LI Deqin,SAI Han,et al. The physical mechanism and strong precipitation in Northeast China analysis during Typhoon “Lionrock” merging into extratropical cyclone process[J]. Plateau Meteorology,2019,38(4):804-816. (in Chinese))

(收稿日期:2021-09-28 编辑:刘晓艳)