

吉林一次极端降水发生发展动热力过程的数值模拟分析*

迟静^{1,2}, 周玉淑^{2,3,4}, 冉令坤^{2,3}, 周括^{2,3}, 沈新勇^{1,5}

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 云降水物理与强风暴院重点实验室, 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002

5 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519082

摘要 利用 ERA-Interim 再分析资料、常规气象观测资料、CMORPH 融合降水资料以及 WRF 高分辨率数值模拟结果, 对 2017 年 7 月 13 日-14 日吉林地区的极端降水天气过程的环流背景和触发机制进行了分析。结果表明: (1) 东北冷涡环流控制下, 副高北抬与中纬度锋区形成了有利的大尺度环流背景。降水发生在冷涡底部与副高之间的平直纬向环流中, 东北冷涡南部的低槽、低空切变线、高低空急流是影响此次降水的重要天气系统; (2) 在高层辐散低层辐合的有利动力条件下, 极端的水汽输送与吉林地区西低东高地形的阻挡和强迫抬升是极端降水产生的重要原因; (3) 中高层有干冷空气入侵, 伴随高空动量下传至低空, 加强了低空急流发展, 低空急流发展至地面附近产生超低空急流后, 加强了上升运动。南北经向动量输送交汇加强了低层风辐合切变, 切变线上对流发展与永吉附近小地形的抬升作用, 诱导永吉县产生极端降水。

关键词 东北冷涡; 极端降水; 高低空急流; 动量

文章编号

Doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

Numerical Simulation Analysis on the Generation and Evolution of the Dynamic and Thermodynamic Processes of an Extreme Rainfall in Jilin Province

Jing Chi^{1,2}, Yushu Zhou^{2,3,4}, Lingkun Ran^{2,3}, Zhou Kuo^{2,3}, Shen Xinyong^{1,5}

¹ Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry Education/ Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

收稿日期 2020-07-17; 网络预出版日期

作者简介 迟静, 女, 1995年出生, 硕士研究生, 主要从事暴雨诊断及机理分析研究。E-mail: chijing29@126.com

通讯作者 沈新勇, E-mail: shenxy@nuist.edu.cn

资助项目 吉林省科技发展计划项目(20190201035SF), 国家自然科学基金资助项目(41975137, 41875056, 41975054), 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所专项资金项目(IDM2019007), 新疆维吾尔自治区2019年高层次柔性人才项目。

Funded by Science and Technology Project of Jilin Province(Grant 20190201035SF), National Natural Science Foundation of China (Grant 41975137, 41875056, 41975054), Special Fund Project of Urumqi Institute of Desert Meteorology (Grant IDM2019007), Xinjiang Uygur Autonomous Region 2019 High-level Flexible Talent Project.

² Key Laboratory of Cloud–Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

⁴ Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China

⁵ Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China

Abstract The analysis of circulation background and trigger mechanism of an extreme precipitation weather process in Jilin area on July 13-14, 2017 was conducted by using the ERA-Interim reanalysis data, conventional meteorological observation data, CMORPH fusion precipitation data and high-resolution numerical simulation results of WRF. The results are as follows. (1) The northward movement of the subtropical high and the cold vortex over Northeast China and mid-latitude front zone are the large-scale circulation background of precipitation. Precipitation occurs in the straight zonal circulation between the bottom of the cold vortex and the subtropical high. Clod trough, low-level shear line, upper-level jet stream and low-level jet stream are important weather systems affecting precipitation. (2) Under the background of high-level divergence and low-level convergence, extreme water vapor transport and the blocking and forced uplift of the low west and east high terrain in Jilin area are one of the factors that cause extreme precipitation. (3) Dry and cold air intruded into the middle and upper levels, and the high-level momentum transmitted to the low altitude, which strengthened the low-level jet and generating an ultra-low-level jet near surface, resulting in the enhancement of the vertical ascent movement. The intersection of north-south meridional momentum transport strengthens low-level wind convergence shear, and the development of convection on the shear line and the uplift of nearby small terrain led to extreme precipitation in Yongji County.

Keywords: Cold vortex over Northeast China, Extreme precipitation, high-level and low-level jet, momentum

1 引言

夏季暴雨是影响我国东北地区的重要灾害性天气之一（陶诗言，1980）。近年来，东北地区频繁发生暴雨、大暴雨等极端性天气，并引发严重的洪涝和地质灾害，如 1998 年松嫩流域特大洪水以及 2005 年黑龙江沙兰镇突发性短时强降水等，给人民群众的生命财产安全造成严重威胁，引发众多学者对东北暴雨展开科学研究。郑秀雅等（1992），邹立尧和丁一汇（2010）等对东北暴雨进行了气候学的统计分析和归纳，得到东北暴雨的时空分布特征。也有学者对典型的东北暴雨个例进行分析，如 1998 年引发松嫩流域洪涝灾害的大暴雨天气过程等（孙力等，2000，2002；刘景涛等，2000；陈立亭等，2000）。而东北冷涡是影响我国东北地区重要的天气系统，东北地区夏季暴雨常常受其影响。东北冷涡暴雨一般具有局地性、突发性强等特点，不仅给当地造成低温冻害、连续降水洪涝、突发性强对流天气，还会使我国其他地区产生灾害性强的中尺度对流系统，是北方地区降水监测预报的一大难点（王东海等，2007；张立祥和李泽椿，2009）。

东北冷涡环流背景可以为中尺度对流提供有利的动力以及热力条件进而导致强对流等灾害性天气（钟水新等，2013；蔡雪薇等，2019），其中暴雨是其造成的灾害性天气中最为常见的一类。围绕东北冷涡暴雨，众多学者已经对其大中尺度环流背景、物理量场诊断分析以及降水机制等方面进行了研究。冷涡常在其外围与其他天气系统作用产生暴雨，如低压槽、切变线、台风和副热带高压等（李爽等，2016），东北冷涡的活动与东亚阻塞高压、西太平洋副热带高压配合形成了有利于持续性强降水产生的大尺度环流背景（孙力等，2002），如2014年山西省一次区域性暴雨就是发生在西太平洋副高东退、东北冷涡东移并与北上的台风“浣熊”相互作用的环流背景之下（王思懿，2014）。研究指出高、低空急流上下的耦合作用常是东北冷涡暴雨发生的重要原因，高层辐散和低层辐合的垂直环流结构为其提供了有利的动力条件，并且，高空急流出、入口区与低空急流的相对位置对强降水的落区有重要影响（陶诗言，1980；钟水新等，2013；王宁等，2014；袁美英等，2014）。低空急流在冷涡天气中也有着十分重要的作用。低空急流既是暴雨区的水汽输送带，又能为冷涡暴雨建立和维持不稳定层结（张云等，2008；张立祥和李泽春，2009）。此外，东北冷涡暴雨中，对流性降水最为常见，东北冷涡中高空温度比较低，低涡后部一般有冷平流，当低层有暖湿平流输送时，冷暖平流垂直叠加产生层结不稳定，导致冰雹、雷暴等天气以及持续性的局地强降水（郑秀雅等，1992）。另外，在东北冷涡过程中，不均匀地形常使得中尺度系统发生发展并产生和加强中尺度扰动，中尺度地形影响 β 中尺度天气系统的维持发展以及强降水的落区和强度（张玲和李泽椿，2003）。虽然关于东北暴雨有很多研究开展，但由于其受西风带、副热带及热带环流系统共同影响，尤其是东北冷涡环流下，暴雨具有突发性较强、强度大、持续性强等特点，因此对其预报预警仍是东北地区天气预报面临的重点与难点。

2017年7月中下旬，吉林省连续出现2次强降水过程，分别为7月13日-14日，19日-20日。这两次降水过程天气背景极为相似，均为东北冷涡活动与西太副高配合，且两次过程降水强度大，多地最大小时降水量和日降水量突破当地历史极值，其暴雨影响区域高度重叠，特大暴雨中心均出现在吉林省永吉县和吉林市区。两次降水强度大、特大暴雨区高度重叠、时间间隔短的特点在当地气象史上极为罕见。其中，7月13日-14日的强降水过程还受副热带高压后部切变影响，

造成吉林省 19 人死亡、18 人失踪，全省直接经济损失 212.3 亿元。本文以此次过程为例，探讨暴雨发生的环流背景和影响机制，利用高分辨率数值模拟资料分析影响强降水发生发展因素，以加深对东北冷涡影响东北地区极端强降水发生过程的理解。

2 资料、降水实况

2.1 资料

本文用于天气形势和降水分析所用的资料为：欧洲中期天气预报中心（ECWMF）提供的 ERA-Interim 全球再分析资料，一日 4 次，时间间隔 6h，空间分辨率为 $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ ；中国气象局提供的国家级地面观测站降水资料和探空资料，以及国家气象信息中心基于全国自动站观测降水量和 CMORPH 卫星反演降水资料，采用 PDF 和 OI 两步融合方法生成的中国区域 1h、 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 分辨率的 CMORPH 融合降水量数据（沈艳等，2013）。

2.2 降水实况

此次强降雨主要集中在 13 日 09:00-14:00 UTC（协调世界时，下同）。其中吉林、永吉出现暴雨和大暴雨。永吉全县日平均降水量 171.5mm，永吉县春登站降水总量达到 291.6mm，最大 1 小时降雨强度达 $107.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ，日降雨量和 1h 降水量均突破历史极值，永吉县年平均降水量 677.4mm，本次暴雨仅一天就达到了往年总降水量的三分之一。从 24 h 降水分布（图 1）可见，除了永吉出现极端降水，吉林多地降水量也达特大暴雨（6 个观测站点）和大暴雨（66 个观测站点）标准，还有 58 个站点达到暴雨量级，具有影响范围广，持续时间长，过程雨量大，小时雨强强等特点。

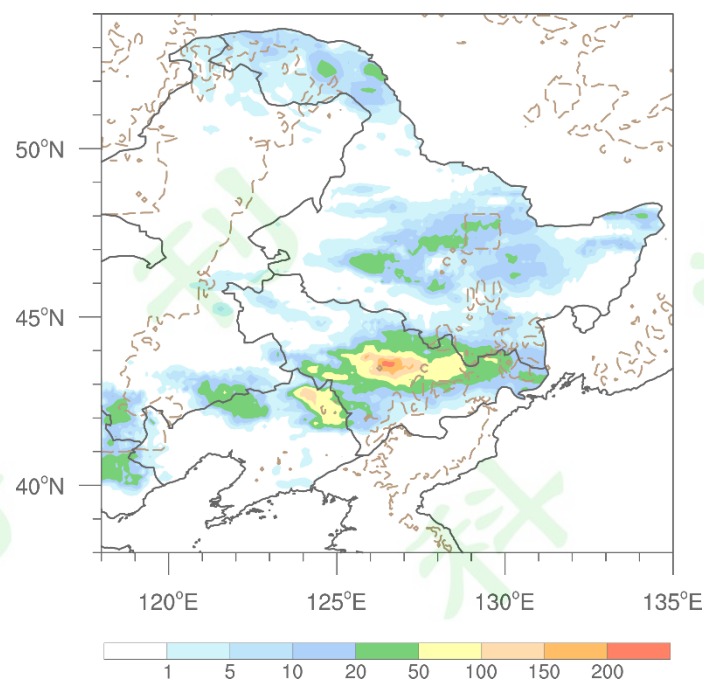


图 1 2017 年 7 月 13 日 00:00 UTC-14 日 00:00 UTC 24h 累积降水量（单位：mm），虚线为 700m 地形

Fig. 1 24-h accumulative precipitation from 00: 00 UTC 13 to 00: 00 UTC 14 July 2017 (units:mm).The dashed line is fot elevation=700m

3 天气形势、影响极端降水的环境因素分析

3.1 天气形势

利用 ERA-Interim 的 $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ 再分析资料对此次降水过程的大尺度背景场进析表明，7 月 12-13 日，500 hPa 环流场中，西太平洋副热带高压呈带状分布，主体位置偏北，5840 gpm 线位于 40°N 附近。欧亚地区中高纬度环流形势为两槽一脊型，温压场斜压性较大，东北地区北部有冷涡稳定维持，涡后有冷空气持续南下影响东北地区。

13 日 06:00 UTC（图 2a），东北地区北部 50°N - 60°N 低涡中心气压为 5600 gpm，吉林省上空受低涡底部和副热带高压之间平直的偏西纬向环流控制，低涡后部有冷舌向南向东发展，使冷空气扩散南下，在内蒙古东部地区有一支高空急流建立并在东移过程中逐渐加强。到 13 日 12:00 UTC，5840 gpm 线南落，低涡南压至黑龙江与内蒙古交界处，冷涡南部低槽由黑龙江北部向南延伸至辽宁西部，槽后的冷空气随西北气流向吉林上空持续输送。200 hPa 高空急流东移加强，

急流中心风速达 42 m s^{-1} 以上，此时吉林地区处于高空急流入口区右侧，表现为明显的高层辐散气流。

850 hPa 天气图上的形势场与 500 hPa 配合较好，低压中心同样位于东北地区北部，13 日 06:00 UTC（图 2c），吉林北部到辽宁西部有一条东北-西南向的切变线，切变线以东，辽宁中部上空有一条明显的西南急流带。到 13 日 12:00 UTC（图 2d），切变线增强，并由吉林北部发展延伸至渤海北部，低空西南急流加强北抬深入到吉林东北部地区，最大风速达到 18 m s^{-1} 。吉林中部地区对应高空急流入口区右侧、低空急流的左侧，形成了高空辐散低空辐合的环流形势。随着中高层冷空气的侵入下沉和低空西南急流将暖湿空气源源不断输送至吉林地区，形成下层暖湿中高层冷干的不稳定层结，为降水提供了有利的动力和水汽条件。

综上所述，在副高偏北、中纬度锋区明显的环流背景下，受 500 hPa 东北冷涡底部槽、850 hPa 切变线、高低空急流的共同影响导致了对流性强降水，而冷暖空气在吉林中部交汇，导致冷暖空气切变线长时间维持在吉林上空，是导致此次极端暴雨的重要天气形势。

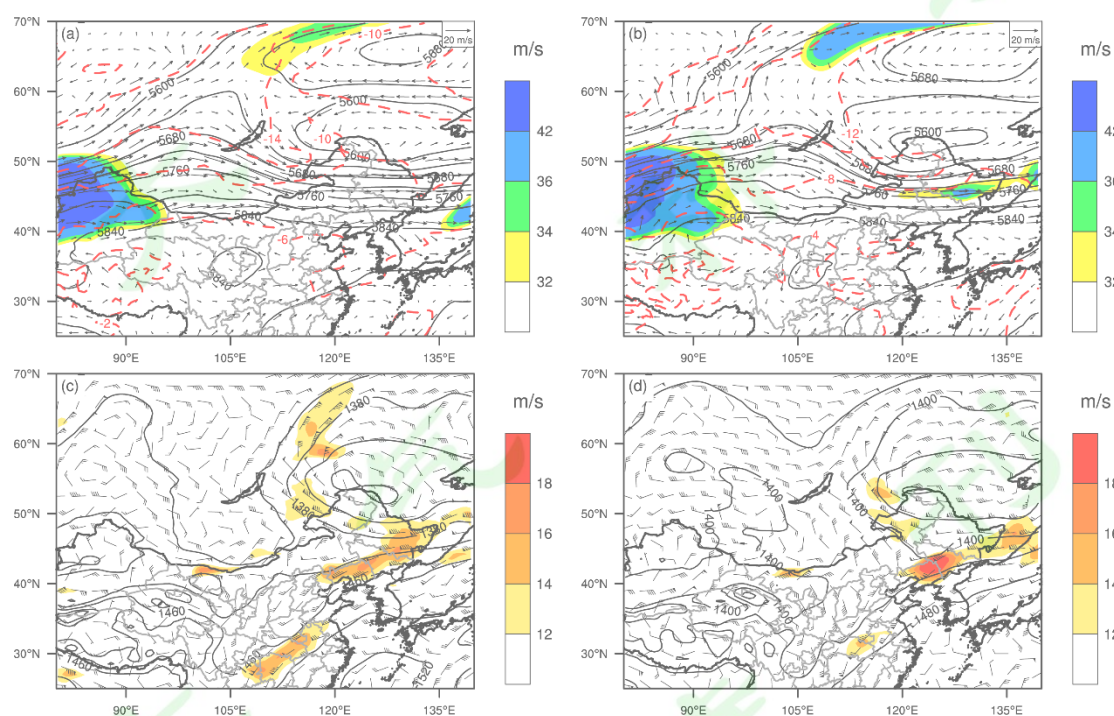


图 2 2017 年 7 月 13 日 500 hPa 位势高度（黑实线，单位：gpm）、温度（红色虚线，单位： $^{\circ}\text{C}$ ）、风场（矢量箭头，单位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）和 200 hPa 高空急流（阴影）分布：（a）06:00 UTC；（b）12:00 UTC 和 850hPa 位势高度（黑实线，单位：gpm）、风场（单位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）和低空急流（阴影）分布（c）06:00 UTC；（d）12:00 UTC

Fig. 2 The distribution of geopotential height (black line, unit: gpm), temperature (red dashed lines, unit: $^{\circ}\text{C}$), wind vectors (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 500 hPa and high-level jet (shaded) at 200 hPa at (a) 06: 00 UTC; (b) 12: 00 UTC; the distribution of geopotential height (black line, unit: gpm), wind vectors (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and low-level jet (shaded) at 850 hPa at (c) 06: 00 UTC; (d) 12: 00 UTC 13 July 2017

3.2 水汽输送和辐合特征分析

3.2.1 水汽输送

充足的水汽输送和辐合是持续性暴雨形成的必要条件。分析本次暴雨期间的水汽通量场发现，7月13日06:00 UTC，低层929 hPa（图3a）的水汽从孟加拉湾经南海沿西南气流经由山东半岛-黄渤海一带向东北地区输送。与925 hPa对比，700 hPa（图3b）水汽输送强度较弱，除了孟加拉湾西南暖湿水汽通道外，还有一条从萨彦岭沿西北路径向吉林省输送冷湿气流的水汽通道，这两支水汽在吉林省中部汇合。而由大气整层水汽通量积分（图3c）所示，西南路径的水汽通量值明显大于西北路径，西南急流输送的水汽是此次降水过程的主要水汽来源。而来自西南的暖湿空气与来自西北的冷湿空气在吉林上空交汇，使吉林地区持续处于冷暖水汽辐合区，为暴雨的发生提供了有利的水汽条件。

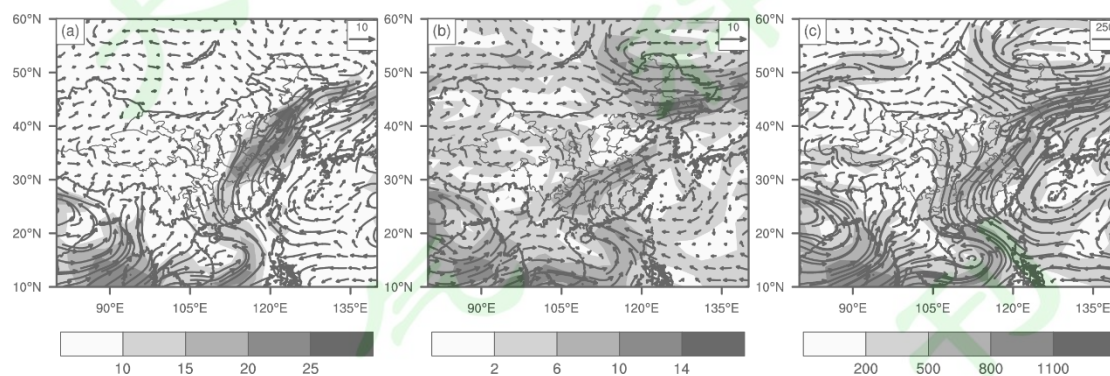


图3 2017年7月13日06:00 UTC (a) 925 hPa水汽通量; (b) 700 hPa水汽通量 (单位:

$\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$); (c) 大气整层水汽通量 (单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 3 Water vapor fluxes at (a) 925hPa; (b) 700 hPa (unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$); (c) the whole layer (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 06: 00 UTC 13 July 2017

水汽通量是表征水汽输送强度和方向的重要物理参量，但其不能表征水汽的

源汇，因此还需要分析水汽通量散度，以及降水水汽来源和辐合区。分析此次降水过程 850 hPa 水汽通量散度与比湿分布发现，降水前期 13 日 00:00 UTC（图 4a），850 hPa 比湿大值区位于吉林省与辽宁省的交界处，但还有一条明显的湿度舌（比湿大于 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）东伸至吉林省北部，且吉林省中部与辽宁交界处也处于水汽通量的弱辐合区。13 日 12:00 UTC（图 4b），比湿大值区东移，吉林省中部比湿增加到 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上，同时该地区水汽通量辐合增加，与降水强度变化相符。结合降水量分布情况（图 1）对比可见，水汽辐合与比湿大值的叠加区与暴雨落区有着较好的对应关系和时间相关性。水汽输送通道的形成和对流层中低层水汽在该地区的持续大量的积聚为暴雨过程提供了充足的水汽条件。从比湿与水汽通量散度沿 43.5°N 的纬向垂直剖面图中可以看出，13 日 00:00 UTC（图 4c），比湿大于 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 区域主要集中在 850 hPa 及以下层， 126°E 西侧有湿舌向高空延伸，而中层比湿等值线向低层下凹，说明有低层暖湿空气加强抬升并与其上层干冷空气作用。850 hPa 以下有水汽辐合，高层水汽辐散，而 126°E 东侧则与之相反，850 hPa 以上出现水汽辐合中心。至 12:00 UTC（图 4d）， 126°E 西侧 850 hPa 低层水汽辐合增强，且辐合区域向东斜升， 125°E 附近辐合区抬升至 700 hPa，吉林地区西低东高的山地地形对由西而来的水汽有明显的山前堆积辐合作用和抬升作用，有利于对流触发。

由此可见，持续充足的水汽输送为此次暴雨过程提供了有利的环境条件，低层暖湿空气在吉林中部辐合上升与中层干冷空气发生作用触发降水，而长白山地形对水汽的阻挡抬升作用使得降水持续集中并在该地区辐合。

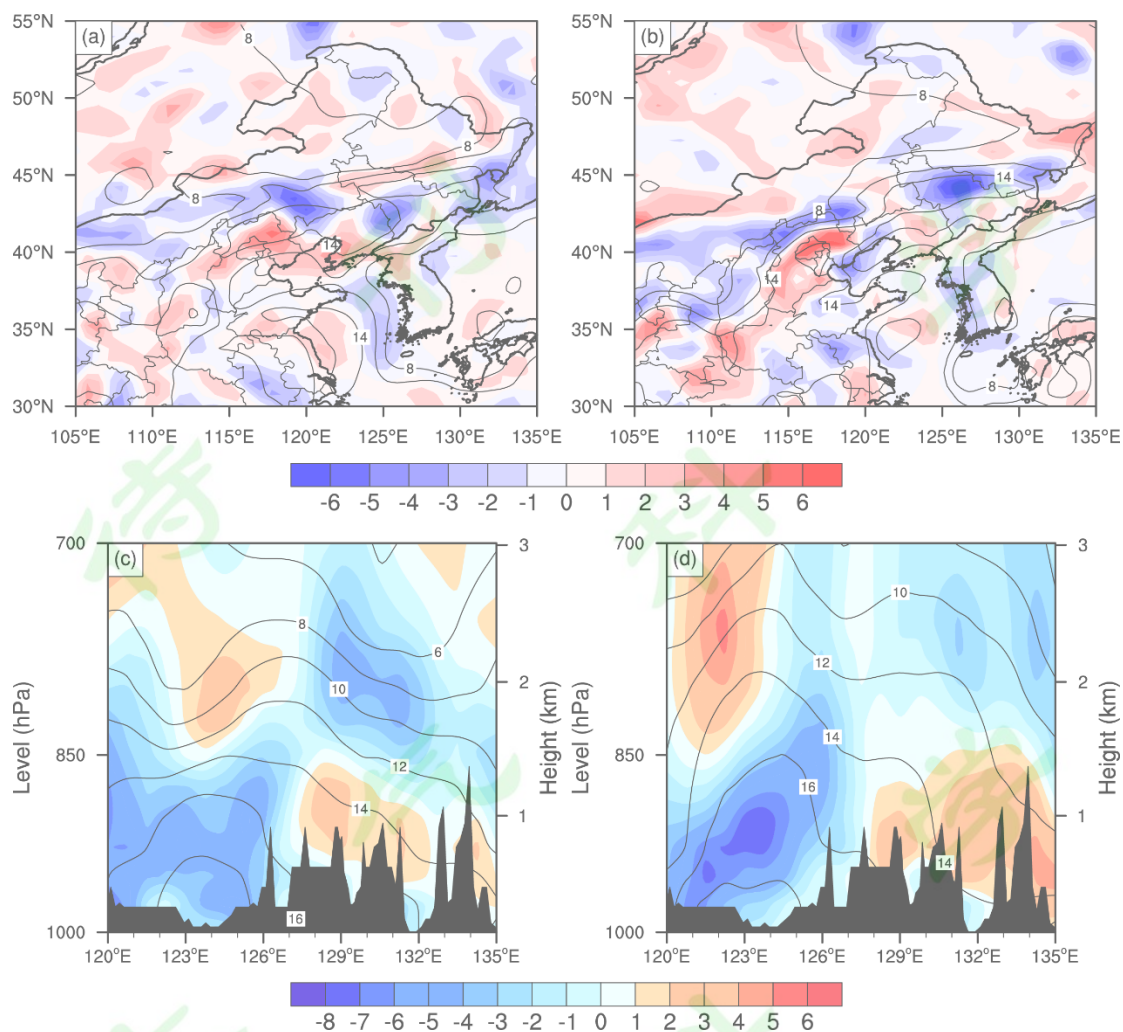


图 4 2017 年 7 月 13 日 850 hPa 比湿（等值线，单位： $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）和水汽通量散度（阴影，单位： $10^{-7} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ）分布图：（a）00:00 UTC；（b）12:00 UTC；比湿（等值线，单位： $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）、水汽通量散度（阴影，单位： $10^{-7} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ）沿 43.5°N 的纬向—垂直剖面图（黑色阴影为地形，下同）：（c）00:00 UTC；（d）12:00 UTC

Fig. 4 The distribution of 850 hPa specific humidity (line, units: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and vapor flux divergence (shaded, units: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$) at (a) 00: 00 UTC; (b) 12: 00 UTC; zonal-vertical cross sections of specific humidity (line, units: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and vapor flux divergences (shaded, units: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$) along 43.5°N at (c) 00: 00 UTC; (d) 12: 00 UTC, the black shading denotes terrain, similarly hereinafter

3. 2. 2 水汽输送及辐合的极端性特点

整层大气可降水量是分析降水的一个重要参量，与降水范围有密切关系（杨红梅和葛润生，1998；刘晶等，2019）。其定义是指单位面积内垂直气柱中所含有的水汽总量，并假设其全部凝结后积聚的液态水深度，可以反映该地区大气的水汽含量（李霞和张光兴，2003）。此次降水过程中，吉林地区大气可降水量（图 5a）分布表明，在降水开始前，吉林省中部多数站点大气可降水量均超过 50 mm，且高值区与降水中心吻合较好。由图 5b 可见，13 日 06:00 UTC 吉林市大气可降水量为 53.5mm，为 7 月以来最高值。

选取吉林（54172）站近 5 年以来日降水量 ≥ 50 mm 的 8 次暴雨个例作为统计对象，利用 ERA-Interim 再分析资料计算表征水汽条件的物理量：大气整层可降水量、水汽通量散度及其平均值（图 6）可见，本次降水过程与历史暴雨过程的样本对比，大气整层可降水量和水汽通量散度均远超 8 次暴雨样本的平均值，其中大气整层可降水量为次大，而水汽通量散度为极大值，证明了极端的水汽输送和辐合，是此次极端降水事件发生的前提条件。

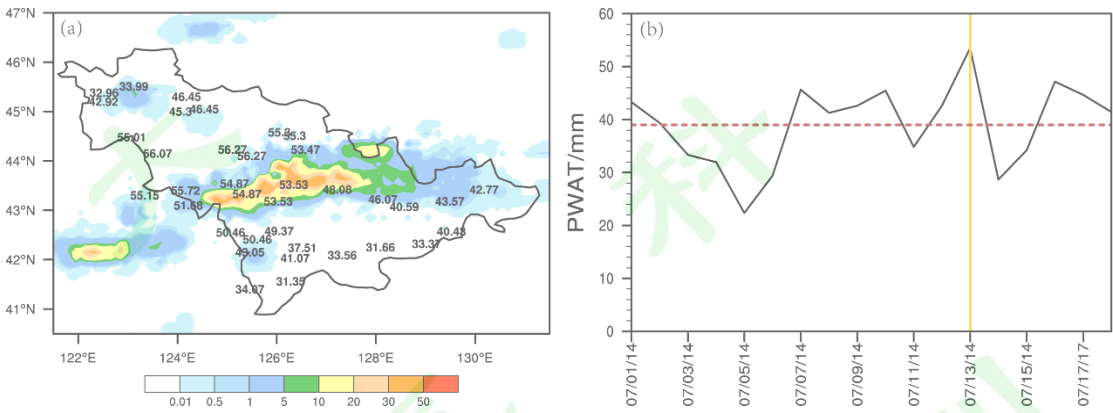


图 5 (a) 2017 年 7 月 13 日 06:00 UTC 吉林省整层大气可降水量（数字，单位：mm）及小时降水量（阴影，单位 mm）；(b) 吉林站 7 月 1-17 日整层大气可降水量时间演变（单位：mm；虚线为平均值）

Fig. 5 (a) Precipitable water vapor (number, unit: mm) and 1 h accumulated precipitation (shaded, units mm) in Jilin province at 06: 00 UTC 13 July 2017; (b) Time series of precipitable water (unit: mm. The dashed line is the average) from 1 to 7 July of Jilin station

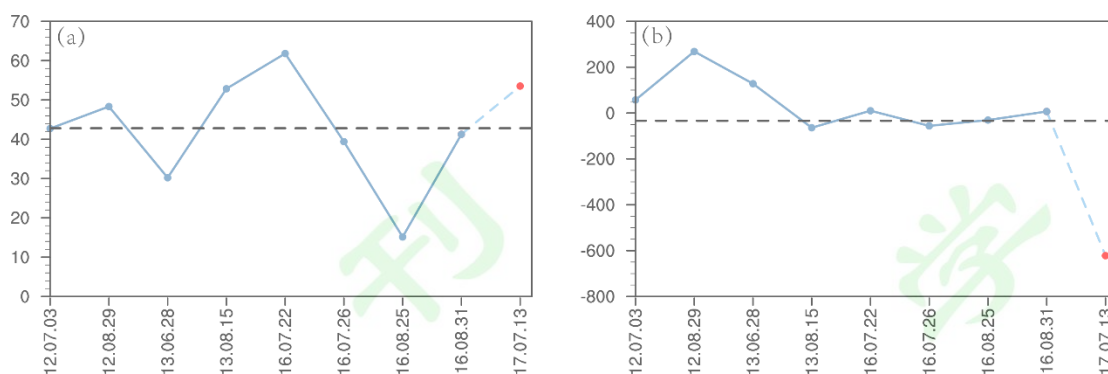


图 6 吉林站（54172）2012 年以来 8 次日降水量 $\geq 50\text{mm}$ 的暴雨过程中，（a）整层可降水量（单位 mm）；（b）水汽通量散度（单位： $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ）及其平均值（虚线）的对比图

Fig. 6 Comparison diagram between (a) precipitable water (unit: mm) ; (b) vapor flux divergences (unit: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$) and its average (dashed line) in the eight rainstorms with daily precipitation $\geq 50\text{mm}$ since 2012 in Jilin station

3.3 动力条件分析

强大的动力抬升作用是暴雨发生发展的重要条件。图 7 给出了 7 月 13 日各时刻沿降水中心 43.5°N 的垂直速度和涡度散度的纬向垂直剖面图，可以看到 13 日 06:00 UTC（图 7a、d）， 121°E - 126°E 范围内，在 850 hPa 以下有辐合中心，500 hPa 中高层附近有弱的辐散，对应 500 hPa 以下有局地上升运动。12:00 UTC（图 7b、e）低层辐合加强范围向东扩展，在 126°E - 129°E 之间，由于山地作用，辐合区域向高空倾斜抬升至 300 hPa，200 hPa 由于高空急流的建立转为强辐散中心，这种高层辐散低层辐合的抽吸作用使垂直上升运动迅速增强，进而导致降水发生发展。18:00 UTC 后（图 7c、f），低层辐合高层辐散减弱，垂直上升速度相应减小，降水随之减弱。从涡度场分布看，冷涡低槽对应的正涡度带加强并向东倾斜发展，12:00 UTC，500 hPa 以下为倾斜的正涡度带，正涡度中心位于 122°E 附近低层，对应高空低槽东移和低空切变线的形成。因此，从垂直速度和散度涡度场中可见，在吉林上空抽吸作用与散度涡度的倾斜发展加强了垂直上升运动，为此次强降水的发生发展提供了良好的动力条件。

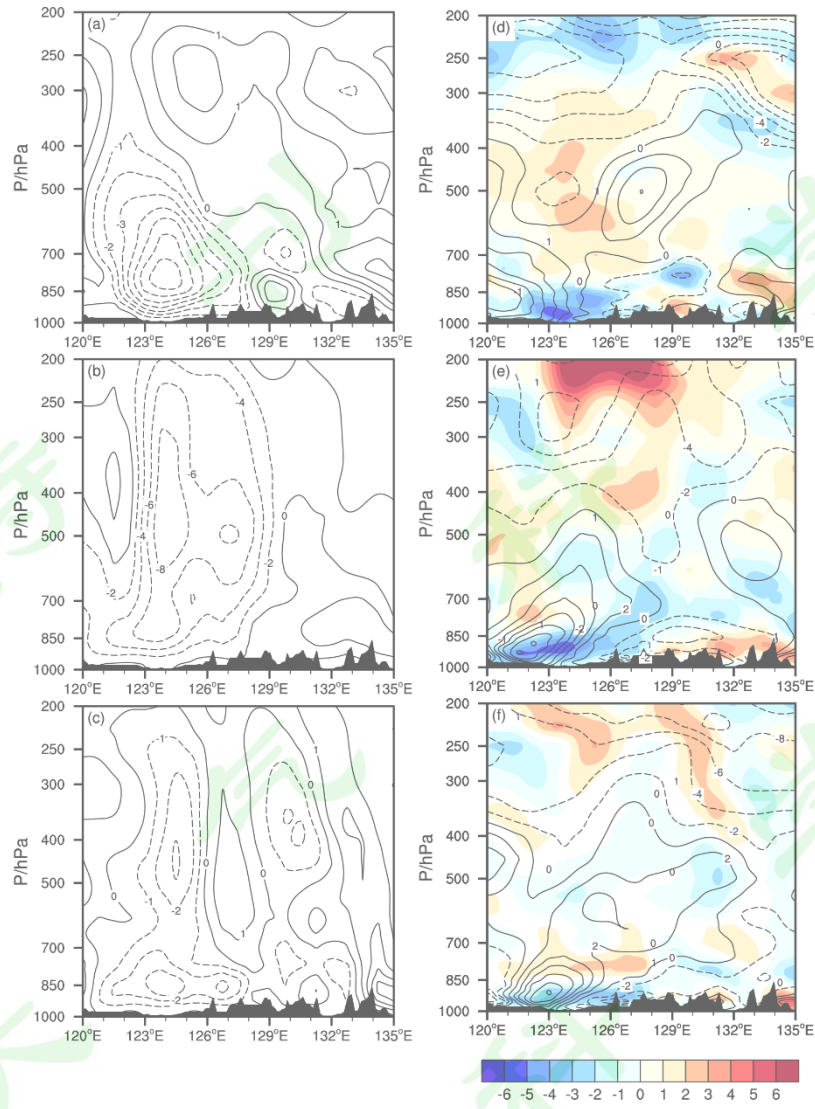


图 7 2017 年 7 月 13 日各时刻垂直速度(单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)沿 43.5°N 垂直剖面: (a) 06:00 UTC; (b) 12:00 UTC; (c) 18:00 UTC; 散度(阴影, 单位: 10^{-5} s^{-1})、涡度(等值线, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 沿 43.5°N 垂直剖面: (d) 06:00 UTC; (e) 12:00 UTC; (f) 18:00 UTC

Fig. 7 The vertical cross sections of w in $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ along 43.5°N at (a) 06: 00 UTC, (b) 12:00 UTC, (c) 18:00 UTC 13 July 2017. The vertical cross sections of divergence (shaded, unit: 10^{-5} s^{-1}) and vorticity (contours, unit: 10^{-5} s^{-1}) along 43.5°N at (d) 06:00 UTC , (e) 12:00 UTC , (f) 18:00 UTC

13 July 2017

4 中尺度数值模式(WRF)试验设计及验证

本文重点研究长白山地区附近东北冷涡与地形对暴雨的作用, 鉴于现有观测资料时空分辨率低, 为进一步对强降水过程机理进行更细致的分析, 故利用中尺

度数值模拟模式 WRF（4.0 版本）对此次暴雨过程开展高分辨率数值模拟。

4.1 WRF 数值模拟实验设计

模式初始场和边界条件采用分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ ，时间间隔为 6h 的 NCEP/NCAR 提供的 FNL 全球再分析资料，模拟区域选取见图 8，水平分辨率为 3km，格点数为 701×711 ，垂直分辨率为 51 层。模式模拟的起始时间为 2017 年 7 月 12 日 00:00 UTC，积分步长 18s，共积分 72h，逐 0.5h 输出模拟结果。模式的具体参数化如表 1 所列，数值模拟区域及地形高度分布如图 8 所示。

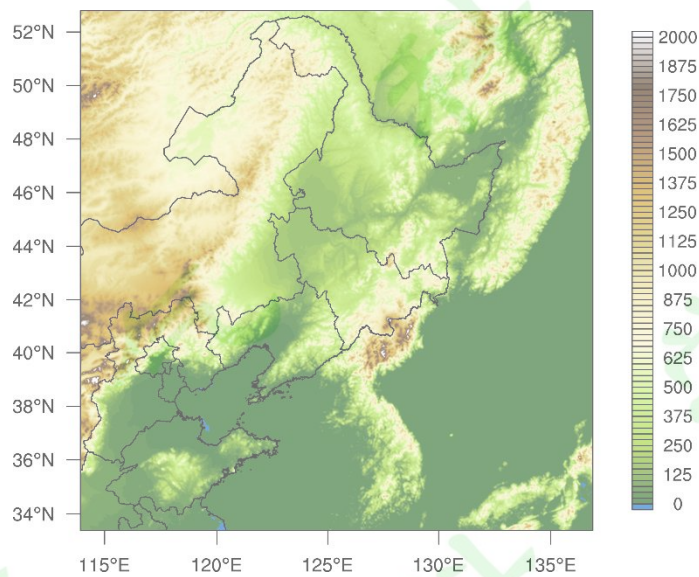


图 8 模式模拟区域（阴影表示地形高度，单位：m）

Fig. 8 Model domains. The shading denotes the terrain (units: m)

表 1 主要参数列表

Tabel 1 Model configuration for simulation

参数化方案	
边界层方案	YSU
长波辐射方案	RRTMG
短波辐射方案	RRTMG
近地面层方案	Revised MM5
陆面过程方案	Noah
云微物理方案	New Thompson

4.2 WRF 模拟结果验证

从 13 日 07:00-13:00 UTC 的 WRF 模拟（图 9a）与 CMORPH 降水资料（图 9b）的 6 小时累积降水量分布中可以看出，与实况相比，虽然模拟的雨带略微偏东偏南，暴雨落区略微偏大，但模拟的强降水中心与实况基本一致，主要位于吉林市东南侧，对暴雨落区、雨量大小的模拟都较好。为进一步验证模式模拟结果可靠性，选取降水最强时刻 2017 年 7 月 13 日 12:00 UTC 的 WRF 模拟的逐小时累积降水分布（图 9c）与实况（图 9d）进行对比。对于主要研究的吉林市地区而言，与 6 小时累积降水对比情况相近，也是模拟的降水区域范围稍偏大，但模拟的暴雨中心位置与实况较为一致，模拟的暴雨量级也与实况一致。总的来说，虽然模式在吉林省北部有虚假的雨带，但是对于发生极端降水区域的暴雨中心和雨带而言，模式对本次强降水研究地区的降水落区和强度的模拟结果较为理想，基本再现了此次永吉县的极端降水过程。

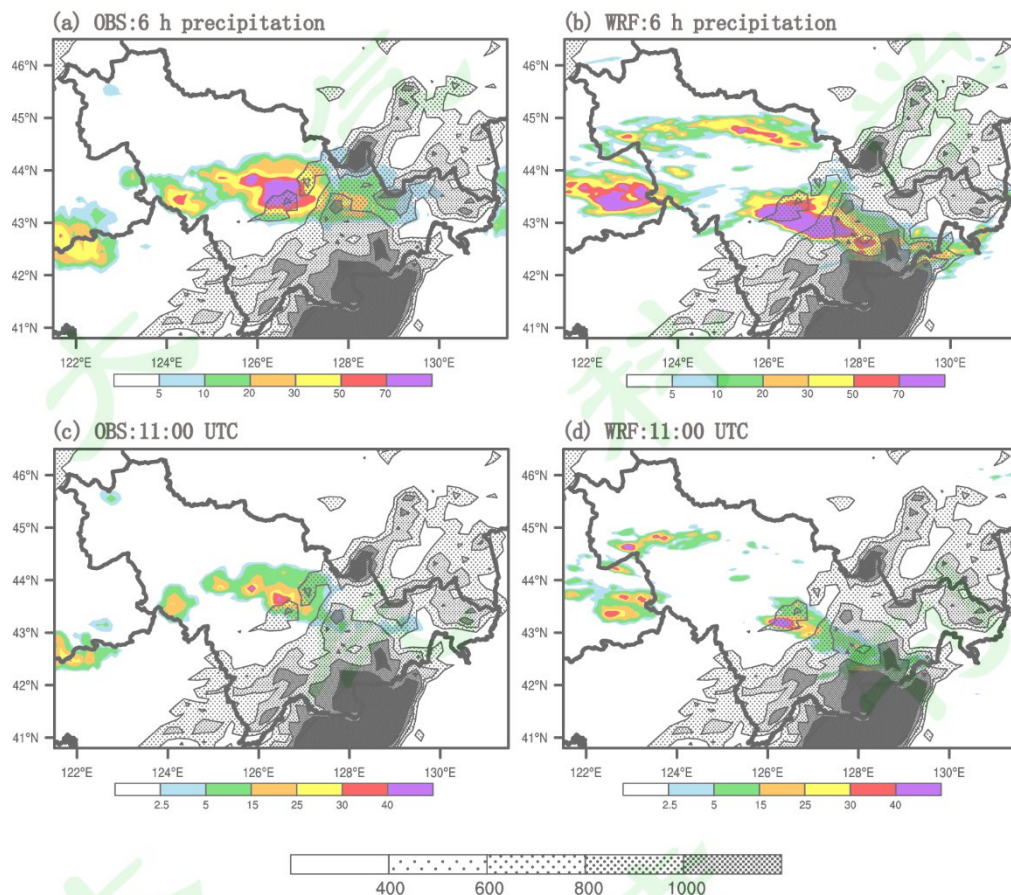


图 9 (a) CMORPH 资料实况与 (b) WRF 模拟的 2017 年 7 月 13 日 07:00 UTC-2017 年 7 月 13 日 12:00 UTC 6 小时累积降水量分布（彩色阴影，单位：mm）；2017 年 7 月 13 日 12:00 UTC (c) CMORPH 资料实况与 (d) WRF 模拟的 1h 累积降水量分布（彩色阴影，单位：mm）。图中灰阶阴影区域表示地形（单位：m）

Fig.9 07: 00 UTC 13 July 2017 - 12: 00 UTC 13 July 2017 (a) Observed from CMPRPH data, (b) simulated 6 h accumulated precipitation (shaded, units: mm) ; (c) Observed from CMORPH data, (d) simulated 1 h accumulated precipitation (colored shade, units: mm). The monochrome shaded area indicate terrain (units: m)

长春探空站（54161 站，43.54°N，125.13°E）位于此次强降水研究区域内，因此，将 WRF 模拟的长春站探空资料（图 10a）与长春观测站的探空资料进行对比（图 10b），可以看出，虽然模式模拟的对流层高层偏干，但模拟结果准确地反映出长春站 700-500 hPa 存在干层，850 hPa 对流层低层以及 500-250 hPa 对流层中高层接近饱和的层结特征；从风向上看，模拟结果准确表现出 850 hPa 以下低层长春上空风向随高度顺时针旋转，为暖平流；上空 700 hPa 风向逆转，冷平流侵入，激发对流不稳定能量释放产生降水。以上说明模式较好地反映了此次强降水研究区域的层结及风场情况。

综合上述对比分析可见，无论是降水量还是层结和风场的模拟，WRF 模式对此次暴雨的模拟与时实况基本相符，因此数值模拟实验结果是基本可信的，可以利用高分辨率模拟资料对本次暴雨过程的机理进行深入分析。

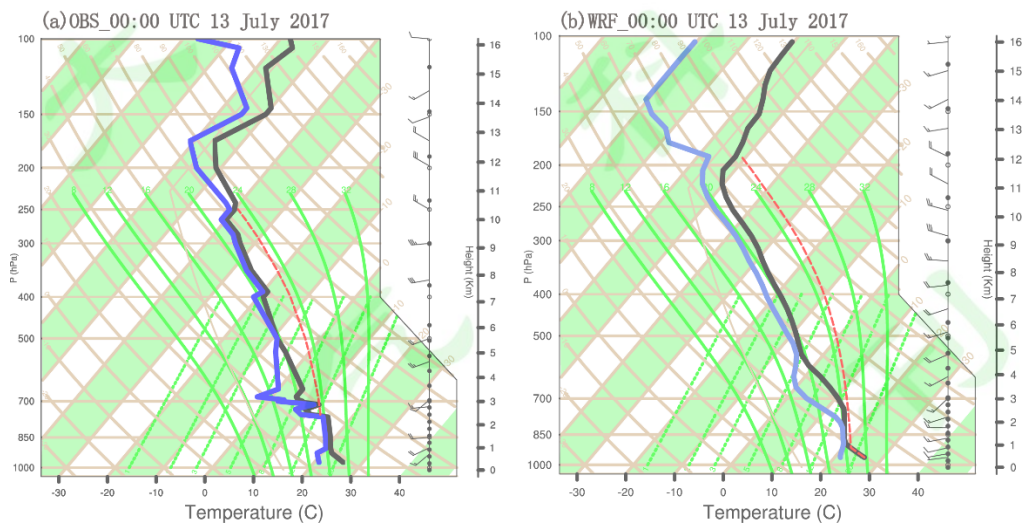


图 10 2017 年 7 月 13 日 00:00 UTC 长春站（a）实况与（b）模拟探空，其中黑色实线表示环境温度，蓝色实线表示环境露点温度

Fig. 10 (c) Observed and (d) simulated sounding at 00: 00 UTC 13 July 2017 from Jilin station, where red solid line indicates ambient temperature curve, solid blue line indicates environmental dew point temperature curve.

5 低层辐合线、高低空急流演变与动量输送作用分析

5.1 切变线和高低空急流演变特征

图 11 为 7 月 12 日 22:00 UTC 和 13 日 11:00 UTC 模拟的风场和雷达回波，可以看出，700 hPa 风场上存在平直西风带与西南风形成的东西走向水平风切变，对应产生了低层辐合线，在对流系统发展初期，00:00 UTC 模拟的强回波位于吉林、辽宁与内蒙古三省交界处；13 日 00:00 UTC，随着冷涡槽后西北风南下，辐合线转为西北-东南走向，对流发展移动至吉林省中部（图略）；11:00 UTC 雷达回波由团状发展成带状，吉林中南部为大于 40 dBz 的强回波区，为强烈发展的对流云区，槽后西北气流与西南急流交汇造成的强烈的气流辐合和切变，为对流发展和移动提供了极为有利的中尺度环境条件。

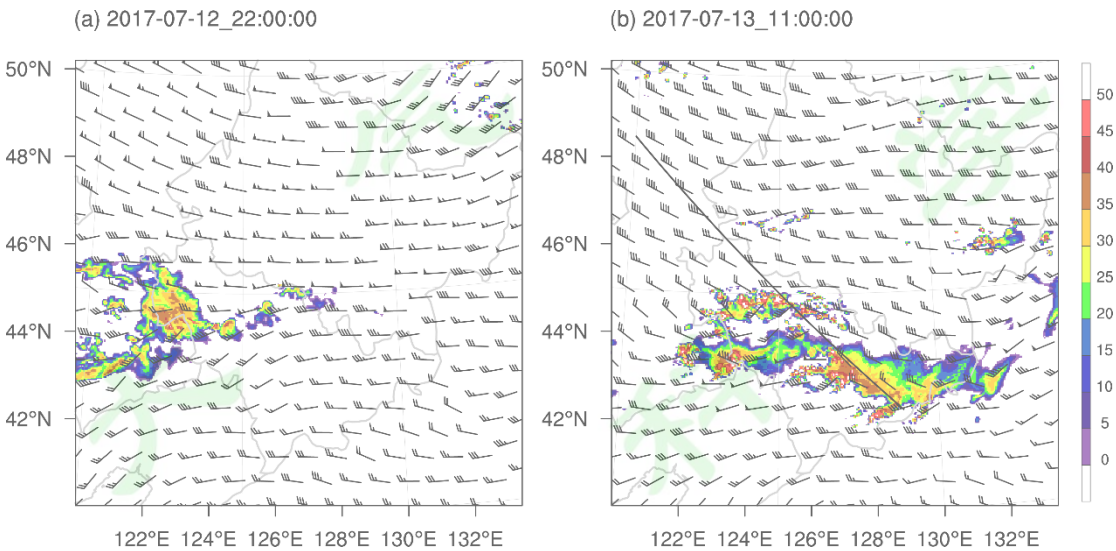


图 11 2017 年 7 月 12 日-13 日模拟的雷达组合反射率（彩色阴影，单位：dBz）和 700 hPa 风场（风向标，单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）：（a）12 日 22:00 UTC；（b）13 日 11:00 UTC

Fig.11 Simulated radar reflectivity (colored shade, units: dBz) and wind bars (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 700 hPa at (a) 22: 00 UTC 12 July 2017; (b) 11: 00 UTC 13 July 2017

研究表明，高空急流的位置与强度对周边地区的天气和气候变化起影响作用（耿全震，1996；吴伟杰，2006）。Chen（1982）指出高低空急流的耦合不仅能加强垂直次级环流和对流强度，还能通过潜热释放进而使低空急流加强，为强降水的发生发展提供有利条件。孙继松（2005）研究表明在中尺度降水过程中急流的产生与加强能促进急流轴前的动力辐合过程。在本次降水过程中，上游 6-10 km

有高空急流稳定存在（图 12），从 2017 年 7 月 13 日 01:00 UTC 开始（图略），高空急流前端 8 km 以下高度存在强烈的下沉气流，吉林市上空 2 km 处出现低空急流，此时有弱降水产生；之后，6 km 高空 30 m s^{-1} 急流中心有动量迅速下传，05:00 -09:00 UTC（图 7b, c）吉林市上空低空急流不断加强， 15 m s^{-1} 急流中心高度下传到 1 km 左右，产生超低空急流，在山前迎风坡产生风辐合，吉林市低空动量局地积聚。11:00 UTC（图 7d）低层西北气流与西南气流交汇辐合，同时在长白山地形的抬升作用下，产生了强烈的上升运动，引发强降水。在降水发生前，对流层低层有明显的暖平流，还有较强的水汽辐合，不同高度的三支急流互相配合，使暖湿空气深厚且持续向暴雨区输送，辐合线上风速的增强对于暴雨中尺度系统的触发具有重要意义。

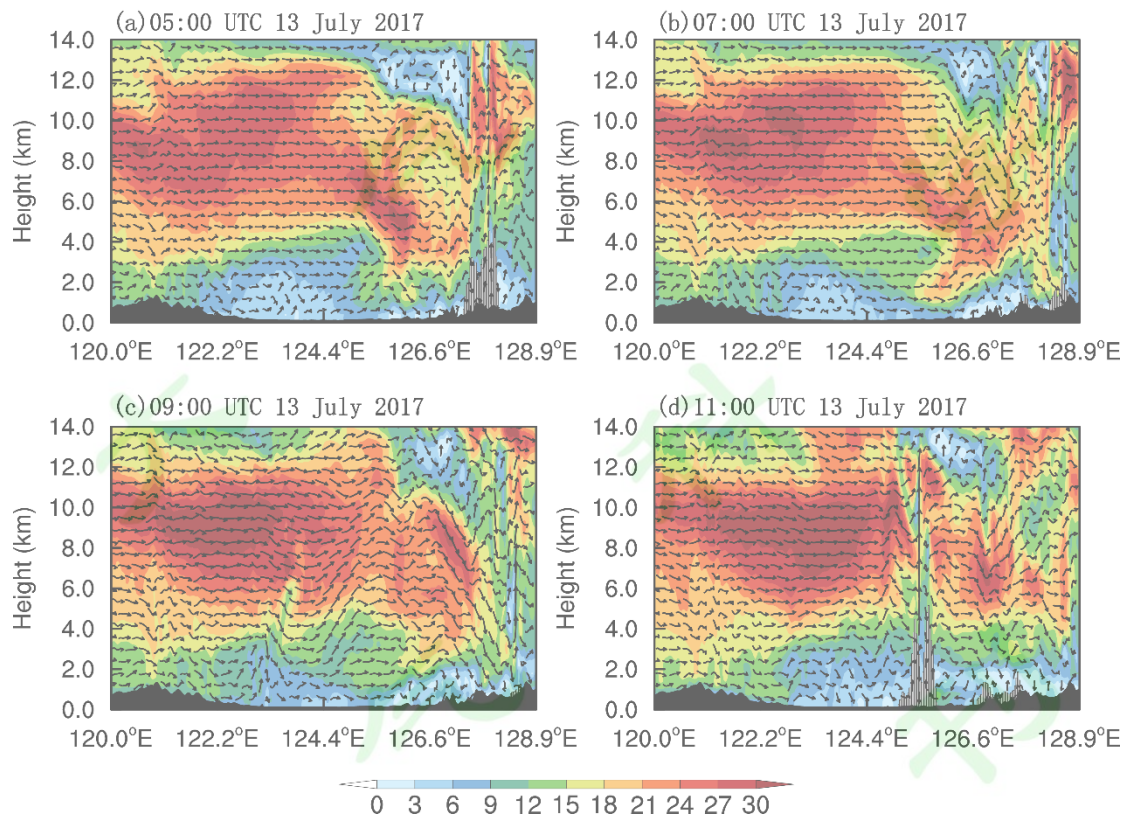


图 12 模拟的风速（阴影，单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）和风矢量（箭头，单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）沿图 11b 中黑色实线的垂直分布：（a）2017 年 7 月 13 日 05:00 UTC；（b）2017 年 7 月 13 日 07:00 UTC；（c）2017 年 7 月 13 日 09:00 UTC；（d）2017 年 7 月 13 日 11:00 UTC（灰色柱状图表示 1h 累积降水）

Fig.12 Vertical cross sections along the black solid line (shown in the Fig.11b) of simulated wind velocity (shaded, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and wind vectors (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at (a) 05: 00 UTC 13 July 2017;

(b) 07: 00 UTC 13 July 2017; (c) 09: 00 UTC 13 July 2017; (d) 11: 00 UTC 13 July 2017. The gray bar denotes 1-h accumulated precipitation.

5.2 动量收支分析

急流的强度变化体现为动量的输送（钟中等，2010），张琳娜等（2018）推导出适用于中尺度对流系统的动量方程，并指出强降水等强烈天气过程大多存在着一定的动量输送，动量下传与地形作用导致的动量局地变化有利于地面风增强。下面利用该动量方程进一步分析动量下传对低层风辐合的影响，方程如下：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) = -\nabla \cdot (\vec{v} \rho u) + f \rho v - \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) = -\nabla \cdot (\vec{v} \rho v) - f \rho u - \frac{\partial p}{\partial y}, \quad (2)$$

其中， $\vec{v} = (u, v, w)$ ， u 、 v 、和 w 分别为 x 、 y 和 z 方向的速度， f 为科氏参数， p 为气压， ρ 为密度， $\nabla = \partial/\partial x \vec{i} + \partial/\partial y \vec{j} + \partial/\partial z \vec{k}$ 为三维空间梯度算子， ρu 和 ρv 分别为纬向（或 x 方向）和经向（或 y 方向）的动量。由于此次对流过程以经向为主，低层风场受偏南风与偏北风辐合作用，所以主要利用方程（2）分析此次对流过程的经向动量（ ρv ）的变化以及经向动量的输送特征。

图 13 是方程(2)右端的经向动量通量散度项（ $-\nabla \cdot (v \rho v)$ ）、科氏力项（ $-f \rho u$ ）和气压经向梯度项（ $-\partial p / \partial y$ ）沿 126.3°E 的垂直分布。在 11:00 UTC 降水强盛，降水量主要出现在 43.2°N 周围。方程中的三个强迫项也主要分布在降水区域上空 10km 高度以下，其中动量通量散度项在经向动量局地变化中起主导作用，这与该区域较大的经向风速变化有关。在 43.2°N 北侧降水区域，动量通量散度项在近地面层表现为正值，说明降水区域近地面层存在地面风辐合。2 km-6 km 高空则存在负高值区，这主要是由急流中心风速在此高度造成下传和低槽加深使经向风速增大辐合。高层的正值中心由散度项和气压经向梯度项共同作用，这可能与高空急流出口的风速辐合以及冷涡环流有关。北部降水区在 2 km 以下近地面有散度项的正高值区，可能由山区地形抬升辐合作用导致。综上所述，6 km 以

下在经向动量的局地变化中动量通量的散度项占主导作用,说明经向动量下传对低层风辐合切变变化有重要作用。

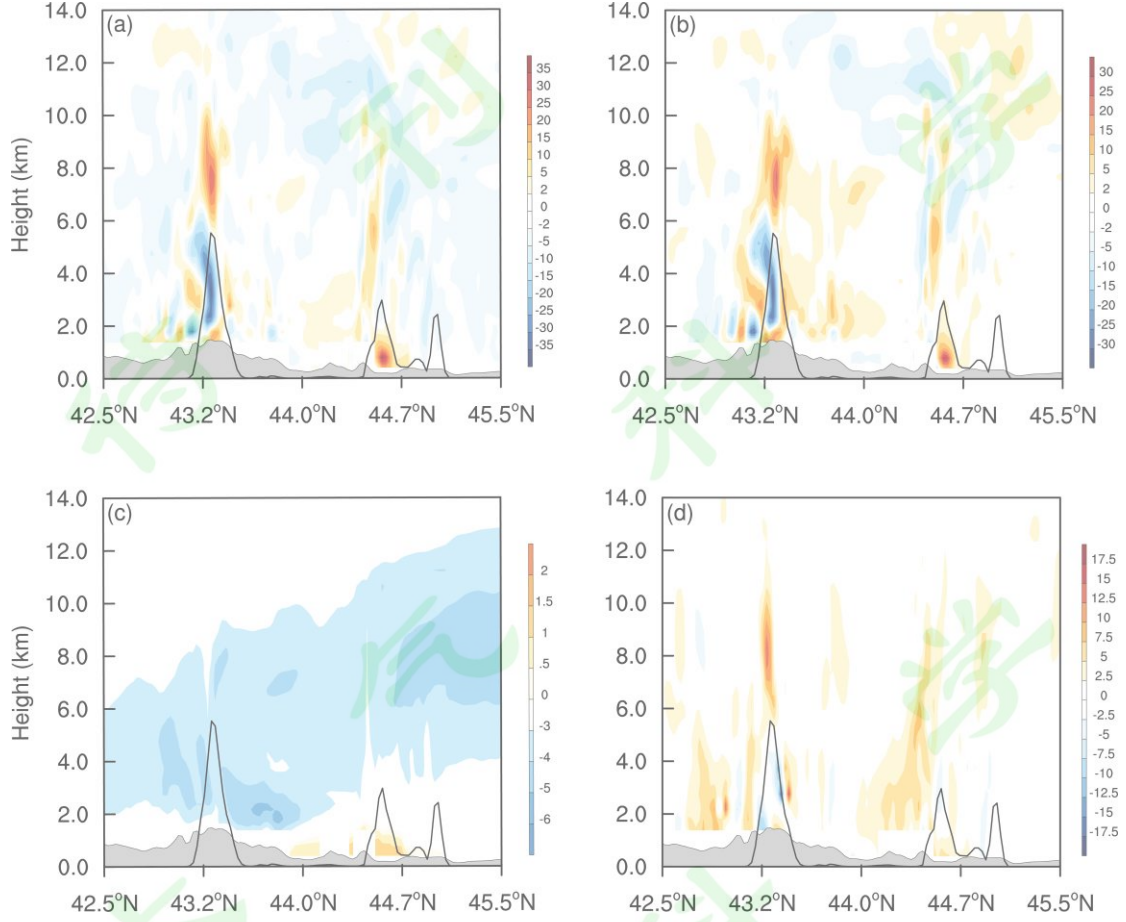


图 13 2017 年 7 月 13 日 11:00 UTC (a) 经向动量的局地变化项 (单位: $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$); (b) 经向动量通量散度项 (单位: $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$); (c) 科氏力项 (单位: $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$); (d) 气压经向梯度 (单位: $10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^{-1}$) 沿 126.3°E 的经向-垂直分布。灰色阴影区为地形 黑色实线表示模拟的 1h 累积降水量 (单位: mm), 下同

Fig.13 Meridional-vertical sections of (a) the local changes in meridional momentum (units: $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$), (b) the divergence of meridional momentum flux (units: $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$), (c) the Coriolis force term (units: $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$), and (d) the meridional gradient of pressure (units: $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$) along 126.3°E at 11: 00 UTC 13 July 2017. The gray shading denotes terrain and the black line denotes the simulated 1-h precipitation (units: mm) , similarly hereinafter

经向垂直剖面图 (图 14) 显示了经向动量在降水过程中的演变。07:00 UTC

(图 14a) 中层为北风动量高值区，位于降水区域北部。近地面层降水区域南侧为南风动量高值区，北侧是北风动量高值区，两者正好在 43.2°N 附近的降水中心交汇。09:00-11:00 UTC (图 14b、c)，在 3-6 km 有较强的由北向南的经向动量通量($v\rho v, w\rho v$)，向下倾斜输送北风动量，使近地面北风动量增强，导致近地面北风增大，南北风动量在低空的交汇增强了低空切变线上的风速和风向辐合，南风动量向高空的输送使高空急流增强，加强了高层抽吸作用，在低空切变线辐合加强的共同作用下，将低空来自西南的暖湿气流抬升至更高高度触发强降水。

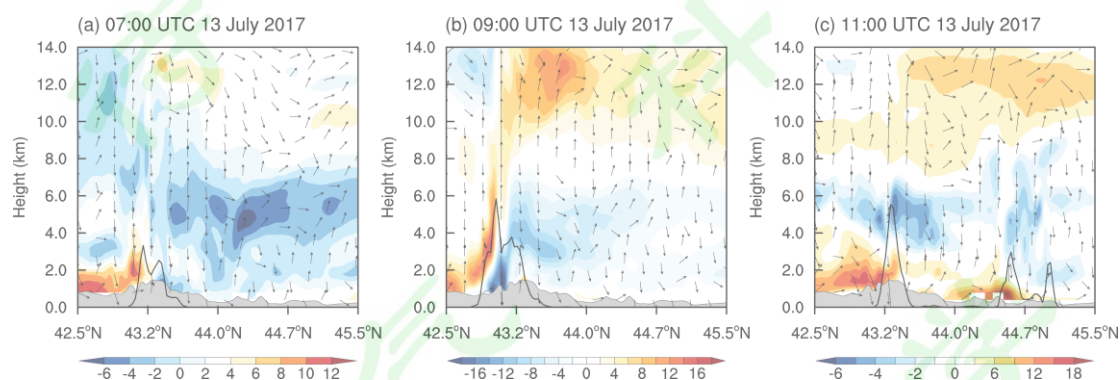


图 14 2017 年 7 月 13 日经向动量 (阴影, 单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 和经向动量通量 (箭头, 单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 沿 126.3°E 的经向-垂直分布: (a) 07:00 UTC; (b) 09:00 UTC; (c) 11:00 UTC

Fig.14 Meridional-vertical sections of meridional momentum (shaded, units: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) and its fluxes (arrows, units: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) at (a) 07:00 UTC 13 July 2017; (b) 09:00 UTC 13 July 2017; (c) 11:00 UTC 13 July 2017

6 结论与讨论

本文基于 ERA-Interim 再分析资料、东北地区的多种观测资料和 WRF 高分辨率模拟资料,对 2017 年 7 月 13 日吉林极端降水事件环流背景、水汽输送条件、动热力结构、动量输送等特点进行分析,得到以下结论:

(1) 此次降水过程影响范围广、持续时间长、雨量大、强度强。500 hPa 中高纬呈“两槽一脊”的环流形势,以及副高北抬、东北冷涡、中纬度锋区形成是此次降水发生的有利天气背景,东北冷涡南侧低槽、低空切变线、高低空急流是引发极端降水的重要天气系统。

(2) 降水水汽来源有两条, 一条为副高外围西南气流输送的孟加拉湾、南海水汽, 另一条是东北冷涡槽后带来的西北路径的水汽。吉林地区西低东高的地形对山前西南气流有阻挡和强迫抬升作用。本次降水的整层可降水量为近 5 年第二强, 水汽通量散度为近 5 年暴雨过程的极值, 水汽条件极为有利。吉林上空低层辐合高层辐散, 涡度倾斜发展的垂直结构使得上升运动加强, 为极端降水的发生提供动力条件。

(3) 吉林上空中层有干冷空气侵入, 低层低空急流的暖湿水汽输送导致吉林地区条件不稳定层结形成和加强。降水前, 高空动量下传加强了低空急流发展, 超低空急流的产生与高低空急流相互作用, 使上升运动持续加强。高空低槽导致北风动量下传, 与低层强的南风动量交汇, 南北经向动量的交汇加强了低层风辐合切变, 配合上升运动, 最终影响了极端降水的强度与落区。

本文虽然对此次吉林省特大暴雨进行了诊断分析和模拟实验, 也得到了一些结论, 但还未对降水过程中的中尺度对流系统的演变及其对降水发展的作用进行分析, 以及长白山地形对降水作用的影响分析还要继续加强, 后续工作中将进一步进行针对性研究。

参考文献 (References)

- 蔡雪薇, 谌芸, 沈新勇, 等. 2019. 冷涡背景下不同类型强对流天气的成因对比分析[J]. 气象, 45(5): 621-631. Cai X W, Chen Y, Shen X Y, et al, 2019. Cause Analysis of Different Types of Severe Convective Weather under Cold Vortex Background [J]. Meteor Mon (in Chinese), 45(5): 621-631.
- 陈立亭, 孙永罡, 白人海. 2000. 松花江、嫩江流域 1998 年夏季暴雨过程天气分析[J]. 气象, 26(10): 19-23. Chen Liting, Sun Yonggang, Bai Renhai. 2000. Analysis of summer rainstorm process in Songhua River and Nenjiang river basins in 1998 [J]. Meteor Mon (in Chinese), 26(10): 19-23
- Chen Q. 1982. The instability of the gravity-inertia wave and its relation to low-level jet and heavy rainfall [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 60: 1041-1057.
- 耿全震, 黄荣辉. 1996. 辐散风和瞬变的涡度通量的异常对定常波年际异常的强迫作用 [J]. 气象学报, 54 (2): 132-141. Geng Quanzhen, Huang Yonghui. 1996. The Forcing of Anomalous Divergent Wind and Transient Vorticity Fluxes to the Anomaly of Stationary Waves [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 54 (2): 132-141.
- 李爽, 丁治英, 戴萍, 等. 2016. 东北冷涡的最新研究进展[J]. 干旱气象, 34(1): 13-19. Li Shuang, Ding Zhiying, Dai Ping, et al. 2016. Recent Advances In Research on Northeast China Cold Vortex [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 34(1): 13-19.

- 李霞, 张广兴. 2003. 天山可降水量和降水转化率的研究[J]. 中国沙漠, 23(5): 33-37.
Li Xia, Zhang Guangxing. 2003. Research on the Precipitable Quantity and Conversion Rate of Precipitation in Tianshan Mountains [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 23(5): 33-37.
- 刘晶, 周雅蔓, 杨莲梅, 等. 2019. 2016 年伊犁河谷大气可降水量变化特征及其与降水的关系[J]. 干旱气象, 37(4): 565-576. Liu Jing, Zhou Yaman, Yang Lianmei, et al. 2019. Temporal Variation Characteristics of Precipitable Water Vapor Based on GPS Data and Its Relation with Precipitation at Yili River Valley in 2016 [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 37(4): 565-576.
- 刘景涛, 孟亚里, 康玲, 等. 2000. 1998 年汛期嫩江松花江流域大暴雨成因分析[J]. 气象 26(2): 20-24. Liu Jingtao, Meng Yali, Kang Ling, et al. 2000. Analysis of the Causes of Heavy Rain in the Nenjiang-Songhua River Basins during the Flood Season in 1998 [J]. Meteor Mon (in Chinese), 26(2): 20-24.
- 沈艳, 潘昶, 宇婧婧, 等. 2013. 中国区域小时降水量融合产品的质量评估[J]. 大气科学学报, 36(1): 37-46. Shen Yan, Pan Yang, Yu Jingjing, et al. 2013. Quality Assessment of Hourly Merged Precipitation Product over China [J]. Trans Atmos Sci (in Chinese), 36(1): 37-46.
- 孙继松. 2005. 北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究[J]. 大气科学, 29 (3): 445-452. Sun Jisong. 2005. A Study of the Basic Features and Mechanism of Boundary Layer Jet in Beijing Area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (3): 445-452.
- 孙力, 安刚, 沈柏竹. 2000. “98.8.9.” 嫩江流域东北冷涡暴雨过程的中尺度滤波分析[J]. 暴雨. 灾害, 000(1): 99-110. Sun Li, An Gang, Shen Bozhu. 2000. Mesoscale Filtering Analysis of the Northeast Cold Vortex Rainstorm Process in Nenjiang River Basin [J]. Torrential Rain. Disaster (in Chinese), 000(1): 99-110.
- 孙力, 安刚, 高枏亭, 等. 2002. 1998 年夏季嫩江和松花江流域东北冷涡暴雨的成因分析 [J]. 应用气象学报, 13 (2): 156-162. Sun li, An Gang, Gao Zongting, et al. 2002. A Composite Diagnostic Study of Heavy Rain Caused By The Northeast Cold Vortex Over Songhua River-Nenjiang River Basin in Summer of 1998 [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 13 (2): 156-162.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1-10. Tao Shiyan. 1980. Heavy Rainstorm in China [M]. Beijing: Science Press (in Chinese), 1-10.
- 王东海, 钟水新, 刘英, 等. 2007. 东北暴雨的研究[J]. 地球科学进展, 22(6): 549-560. Wang Donghai, Zhong Shuixin, Liu Ying, et al. 2007. Advances in the Study of Rainstorm in Northeast China [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 22(6): 549-560.
- 王思懋. 2014. 台风近海活动对 2014 年 7 月 8 日到 9 日山西省区域暴雨的影响分析[C]. 中国气象学会. 第 31 届中国气象学会年会 S2 灾害天气监测、分析与预报. 北京: 2628-2633. Wang Simin. 2014. Analysis of the Impact of Typhoon Offshore Activities on Regional Rainstorms in Shanxi Province from July 8th to 9th, 2014 [C]. Chinese Meteorological Society (in Chinese). The 31st Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society S2 Severe Weather Monitoring, Analysis and Forecast. Beijing: 2628-2633.

- 杨红梅, 葛润生. 1998. 用单站探空资料分析对流层气柱水汽总量[J]. 气象, 24(9): 8-11.
- Yang Hongmei, Ge Runsheng. 1998. Analysing Troposphere Air Moisture Content with Single Radiosonde Station Data [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 24(9): 8-11.
- 袁美英, 关月, 胡好莉, 等. 2014. 2011 年“7·31”东北冷涡外围中尺度涡旋暴雨分析[J]. 自然灾害学报, 23(2): 182-189.
- Yuan Meiyong, Guan Yue, Hu Haoli, et al. 2014. Analysis of Meso-scale Vortex Rainstorm at Periphery of Northeast Cold Vortex in July 31, 2011 [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 23(2): 182-189.
- 张立祥, 李泽椿. 2009. 东北冷涡研究概述[J]. 气候与环境研究, 14(2): 218-228.
- Zhang Lixiang, Li Zechun. 2009. A Summary of Research on Cold Vortex over Northeast China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14(2): 218-228.
- 张琳娜, 冉令坤, 李娜, 等. 2018. 雷暴大风过程中对流层中低层动量通量和动能通量输送特征研究[J]. 大气科学, 42(1): 178-191.
- Zhang Linna, Ran Lingkun, Li Na, et al. 2018. Analysis of Momentum Flux and Kinetic Energy Flux Transport in The Middle and Lower Troposphere During a Thunderstorm Event [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(1): 178-191.
- 张玲, 李泽椿. 2003. 1998 年 8 月嫩江流域一次大暴雨的成因分析[J]. 气象, 29(8): 7-12.
- Zhang Ling, Li Zechun. 2003. The Reason of a Heavy Rain Event in Nenjiang Valley in August, 1998 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 29(8): 7-12.
- 张云, 雷恒池, 钱贞成. 2008. 一次东北冷涡衰退阶段暴雨成因分析[J]. 大气科学, 32(3): 481-498.
- Zhang Yun, Lei Hengchi, Qian Zhencheng. 2008. Analyses of Formation Mechanisms of a Rainstorm during the Declining Phase of a Northeast Cold Vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32(3): 481-498.
- 郑秀雅, 张廷治, 白人海. 1992. 东北暴雨 [M]. 北京: 气象出版社, 19-43.
- Zheng Xiuya, Zhang Tingzhi, Bai Renhai. 1992. Rainstorm in Northeast China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 19-43pp.
- 钟水新, 王东海, 张人禾, 等. 2013. 一次冷涡发展阶段大暴雨过程的中尺度对流系统研究[J]. 高原气象, 32(2): 435-445.
- Zhong Shuixin, Wang Donghai, Zhang Renhe, et al. 2013. Study of Mesoscale Convective System in Heavy Rainstorm Process at a Cold Vortex Development Stage [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32(2): 435-445.
- 邹立尧, 丁一汇. 2010. 1961-2005 年东北暴雨气候特征分析[J]. 高原气象, 29(5): 1314-1321.
- Zhou Liyao, Ding Yihui. 2010. Characteristics of Rainstorm in Northeast China in 1961-2005 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29(5): 1314-1321.
- 王宁, 徐祥德, 徐洪雄, 等. 2014. 一次东北冷涡暴雨的水汽输送特征和位涡分析[J]. 地理科学, 34(2): 211-219.
- Wang Ning, Xu Xiangde, Xu Hongxiong, et al. 2014. Water Vapor Transport Features and Potential Vorticity Analysis of Northeast Cold Vortex Rainstorm [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 34(2): 211-219.
- 钟中, 元慧慧, 李杰, 等. 2010. 一次高空急流增强过程中的中尺度扰动和动量输送特征[J]. 气象科学, 30(5): 639-645.
- Zhong Zhong, Yuan Huihui, Li Jie, et al. 2010. Characteristics of The Meso-scale Perturbations and Momentum Transportation Associated with an Intensification Process of Upper-level Jet [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 30(5): 639-645.