暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

内蒙古东北部“21.7”罕见极端暴雨特征及成因分析

王颖 王洪丽 孔凡超 杨雪峰 高绍鑫

Analysis of the characteristics and causes of the July 2021 rare extreme rainstorm in northeastern Inner Mongolia

WANG Ying，WANG Hongli，KONG Fanchao，YANG Xuefeng，GAO Shaoxin

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2023-096

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

内蒙古夏季极端降水持续性分析与时空分布特征

Analysis on duration and temporal and spatical distribution characteristics of hourly extreme rainfall in summer in Inner Mongolia

暴雨灾害. 2019, 38(2): 161-168 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2019.02.008

“18.8”粤东暴雨中心极端强降水“列车效应”分析

The analysis of train effect features of a record-breaking severe rainfall in eastern region of Guangdong in August 2018

暴雨灾害. 2019, 38(4): 329-337 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2019.04.005

ECMWF集合预报在一次台风远距离极端降水分析中的应用

Application of ECMWF ensemble prediction system on an extreme heavy rainfall cause by a remote tropical cyclone

暴雨灾害. 2021, 40(6): 626-636 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.06.007

引发内蒙古汛期暴雨洪涝灾害的降水事件雨强特征分析

Analysis of rainfall intensity characteristics of precipitation events causing rainstorm and flood disaster in flood season in Inner Mongolia

暴雨灾害. 2023, 42(3): 346-352 https://doi.org/10.12406/byzh.2021-224

四川盆地东北部三次持续性暴雨过程水汽输送特征分析

Analysis of water vapor transport characteristics of the three persistent rainstorm processes in northeastern Sichuan basin

暴雨灾害. 2020, 39(3): 234-240 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.03.003

基于多源资料的四川盆地西部一次持续性极端暴雨过程分析

Analysis of a sustained extreme rainstorm event in western Sichuan Basin by using multi-source data

暴雨灾害. 2024, 43(1): 13-22 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-221

关注微信公众号，获得更多资讯信息

王颖,王洪丽,孔凡超,等.2025.内蒙古东北部“21.7”罕见极端暴雨特征及成因分析[J].暴雨灾害,44(2):177−185. WANG Ying, WANG Hongli, KONG Fanchao, et al. 2025. Analysis of the characteristics and causes of the July 2021 rare extreme rainstorm in northeastern Inner Mongolia [J]. Torrential Rain and Disasters,44(2):177−185 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−096

内蒙古东北部“21.7”罕见极端暴雨特征及成因分析

王颖[1],王洪丽[1],孔凡超[2],杨雪峰[1],高绍鑫[1]
(1. 内蒙古呼伦贝尔市气象局,呼伦贝尔 021008;2. 河北省气象台,石家庄 050021)

摘　要: 2021 年 7 月 18 日内蒙古东北部出现了一次罕见的极端暴雨 (以下简称“21.7”极端暴雨) 过程,最大日降雨量达 279.7 mm,刷新呼伦贝尔市有气象记录以来的极值,造成严重灾害。基于自动气象站观测资料、多普勒天气雷达资料、FY−4A 卫星资料和欧洲中期天气预报中心 ERA5 再分析资料,对该暴雨过程的特征及极端性成因进行诊断分析,并与“19.8”极端暴雨过程进行对比分析。结果表明:(1) “21.7”极端暴雨发生在低槽东移、副热带高压呈块状北伸与中西伯利亚高原高压脊异常偏强形成东阻形势、西太平洋洋面台风“烟花”(2106 号) 活动的背景下,具有影响范围广、降雨时段集中、强度极端、致灾性强的特点。(2) 低空西南急流北上,一是形成较强的差动假相当位温平流,使得层结向对流不稳定发展,二是与近地层东风形成强垂直风切变,促进对流云团组织化,在低层切变线以南、地面中尺度辐合线以北不断触发 M_βCS 云团并沿引导气流生消发展,触发局地极端降雨。(3) 短时强降水出现在中尺度对流云团冷云区云顶亮温 (TBB)≤218 K 移出方位梯度大值区边缘,雷达特征显示的强单体位于卫星云图上对流云团上风方向,可作为应用卫星、雷达产品监测和预报极端降雨的着眼点。(4) 与“19.8”极端暴雨过程对比分析发现,两次暴雨的水汽、能量和天气系统持续时间的不同造成了极端程度差异,“21.7”极端暴雨表现在有两条水汽输送带经渤海加强北上在内蒙古东北部汇集,且下游有经向度大的东阻形势使得天气系统移动缓慢。

关键词: 极端暴雨;假相当位温平流;对流云团;列车效应;远距离水汽通道
中图法分类号: P458.1+21.1　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023−096

Analysis of the characteristics and causes of the July 2021 rare extreme rainstorm in northeastern Inner Mongolia

WANG Ying[1], WANG Hongli[1], KONG Fanchao[2], YANG Xuefeng[1], GAO Shaoxin[1]
(1. *Inner Mongolia Hulunbuir Meteorological Bureau*, *Hulunbuir* 021008; 2. *Hebei Meteorological Observatory*, *Shijiazhuang* 050021)

Abstract: On July 18, 2021, a rare extreme rainstorm (referred to as “21.7” extreme rainstorm) event occurred in the northeast of Inner Mongolia. The maximum daily rainfall reached 279.7 mm, breaking the historical record in Hulunbuir City and causing serious disasters. Based on automatic weather station observation data, Doppler weather radar data, FY−4A satellite data and ERA5 reanalysis data (0.25°×0.25°) of ECMWF, the characteristics of the rainstorm event and the causes of its extremes were diagnosed and analyzed and were compared with the "19.8" extreme rainstorm event. The results are as follows. (1) The "21.7" extreme rainstorm event occurred under the influence of a low eastward trough, the east-blocking situation of the subtropical high stretching northward and the high pressure ridge over the Middle Siberian Plateau, and the activity of Typhoon In-Fa (No.2106) over the western Pacific Ocean. It has the characteristics of wide influence, concentrated rainfall periods, extreme intensity and strong disaster. (2) The northward movement of the low-level southwest jet stream forms a strong differential pseudo-equivalent potential temperature advection, which leads to the unstable development of convective stratification. It also forms strong vertical wind shear with the near-ground easterly wind, promoting the organization of convective cloud clusters. The continuously triggered M_βCS cloud clusters on the southern side of the low-level shear line and the northern side of the surface mesoscale convergence line, and their development along the guiding airflow, are the main reasons for the formation of the local extreme rainstorm. (3) Short term extreme rainstorm occur in the cold cloud region of mesoscale convective cloud clusters, where the TBB is less than 218 K and moves out of the edge of the azimuth gradient. The radar characteristics show that the strong convective cell is located on the upwind side of the convective cloud cluster identified from the satellite cloud image, suggesting a

收稿日期:2023−05−01;**定稿日期**:2023−09−05
资助项目:内蒙古自治区气象局科技创新项目 (nmqxkjcx202304);内蒙古自治区气象局引导性创新基金项目 (nmqxydcx202204)
第一作者:王颖,主要从事天气预报及方法研究。E-mail: wygohappy@163.com
通信作者:王洪丽,主要从事天气预报及服务方法研究。E-mail: 316454501@qq.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

focus for monitoring and predicting extreme rainfall s using satellite and radar products. (4) Compared with the "19.8" extreme rainstorm event, the differences of water vapor, energy and duration of weather systems result in differences in extreme levels. During the "21.7" extreme event, two water vapor conveyor belts strengthen northward through the Bohai Sea and converge in the northeast of Inner Mongolia, and the weather system moves slowly due to the situation of downstream large longitude east blocking.

Key words: extreme rainfall; pseudo-equivalent potential temperature advection; convective cloud; train effect; remote water vapor channel

引　言

极端降雨是我国夏季最严重的气象灾害之一，不仅会造成农作物被淹、道路桥涵损毁、河道漫溢、水库垮坝，还可能引发河流洪水、山洪、内涝等次生灾害，给人民生产生活造成极大影响，如 2021 年 7 月 17—22 日河南极端降雨导致郑州市出现严重的城市内涝灾害，并致使河南多个水库和河流出现超警戒水位 (段汀等, 2022)。在全球变暖的背景下，极端降雨发生的频率和强度呈增加趋势 (艾克代·沙拉木等, 2024)，人类将面临更高的气象灾害风险。因此，加强极端天气发生发展过程的监测，探究其机理成因，对于防范极端降雨引发的灾害具有科学应用价值 (翟盘茂和刘静, 2012)。

在极端降雨动力和热力成因方面，高守亭等 (2018) 指出华北东北暴雨过程局部湿度集中特点较为明显，中高层干冷空气侵入引起的不稳定和动量下传及高空中尺度急流增强引发的高层局地辐散增强对暴雨发生有重要作用。周璇等 (2020) 指出华北极端暴雨过程中经向型环流对流活动强，造成日降雨量超过 50 mm 的最大频率远高于纬向型环流，原因在于存在弱的层结不稳定异常。雷蕾等 (2017) 指出华北 2016 年“7·20”特大暴雨与低涡系统强烈发展有直接关系，低涡的演变不仅与高低空耦合有关，强降雨造成的潜热反馈也起到重要作用。马梁臣等 (2017) 通过对比东北地区四个暴雨个例指出两支主要的水汽输送通道，一支是南海或西太平洋的海上水汽输送，另一支是西北气流的水汽输送。而水汽输送的强度、影响范围和持续性在极端降雨中起关键作用，水汽通量散度出现辐合且加强才能造成降雨的累加 (丁一汇等, 2020)。内蒙古东北部位于中国北部边疆，因海洋暖湿气流难以深入，暴雨具有历时短、局部性强、多对流性暴雨的特征 (顾润源等, 2012)。李瑞青等 (2023) 指出内蒙古夏季极端暴雨在 2016 年后显著增多，并且东部地区降水区的动力因子强于西部地区，常煜等 (2023)通过研究内蒙古 108 例引发暴雨洪涝灾害的降雨发现，降雨高发区正位于内蒙古大兴安岭东部地区，次高发区位于阴山山脉以南。内蒙古强降雨集中在 7 月中旬到 8 月上旬，持续时间在 1~5 h，其东部强降雨有夜发性 (常煜, 2015)，且强降雨是冷锋云系或涡旋云系中不断生消的中尺度对流系统 (MCS) 直接造成的，而短时强降水出现在云顶亮温 (TBB)梯度密集区 MCS 移出区域靠近干冷空气侵入一侧常煜等 (2016, 2018)。

上述研究多是基于国家级气象观测站 (以下简称国家站) 日降雨观测数据得到的观测事实和机理性的认识，且针对内蒙古东北部和东北地区极端降雨个例的对比研究极少。2021 年 7 月 18 日内蒙古东北部发生一次大范围极端暴雨，局地出现罕见特大暴雨，导致多个城镇出现严重内涝，境内永安水库决口、新发水库垮坝，农作物受灾严重，单次灾害造成经济损失高达 9 亿元。此次大范围罕见的极端暴雨的特征和机理尚不清晰，与历史极端暴雨相似个例对比，其特征和成因如何？因此，本文充分利用多源资料探讨此次极端暴雨的特征和成因，以期为挖掘北方边疆暴雨特征及防灾减灾提供科学参考。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文所用资料包括：(1) 内蒙古自治区气象数据中心提供的呼伦贝尔市 365 个气象站（包括国家站、区域站，下同）常规气象观测资料；(2) 国家卫星气象中心提供的 FY-4A 气象卫星观测的 TBB 资料 (空间分辨率 4 000 m，精度为 1 K)；(3) 国家气象信息中心提供的齐齐哈尔雷达站 (123°56'4" E, 47°22'2" N) 每 6 min 一次体扫资料；(4) 欧洲中期天气预报中心提供的第五代全球大气再分析资料 ERA5 (https://cds.climate.copernicus.eu)，空间分辨率 0.25°×0.25°，时间分辨率 1 h，包括位势高度、气温、风向风速、相对湿度、散度、垂直速度等气象要素。

1.2 研究方法

参考王颖等 (2023) 研究中极端降雨阈值标准，利用逐小时降雨量资料，采用第 99.9 百分位数计算得到呼伦贝尔市各站的极端短时强降雨判别阈值。

分析中尺度对流云团演变特征时，采用 Ai 等 (2016) 分析研究中国中东部地区 MCS 活动特征时的阈值定义，即将云顶亮温 238 K 和 218 K 分别作为对流云盖 (CS) 和对流核心区 (CC) 的阈值，且将降雨强度达到 10 mm· h^{-1} 作为 MCS 形成的判定阈值。

2 暴雨特征

2021 年 7 月 17 日 20:00—18 日 20:00 (北京时, 下同), 呼伦贝尔市出现区域性暴雨过程 (图 1a), 其影响范围广、降雨时段集中、强度极端。全市 365 个气象站有 93 站达暴雨以上量级, 其中 43 站大暴雨、2 站特大暴雨, 最大日降雨量达 279.7 mm, 出现在莫力达瓦达斡尔族自治旗 (以下简称莫旗) 宝山镇, 创呼伦贝尔市有气象记录以来日降雨量极值, 莫旗国家站日降雨量为 153.4 mm, 突破该站历史极值 (2009 年 8 月 20 日 118.8 mm)。120 站次出现短时强降水, 西瓦尔图镇农场和宝山镇小时降雨量分别为 64.8 mm (极端降雨阈值 38 mm)、52.8 mm (极端降雨阈值 40 mm)。最大小时雨强在 20 mm·h^{-1} 以上的实况图 (图 1b) 与日降雨量实况图 (图 1a) 对比表明, 短时强降水对暴雨起到主要贡献。本次暴雨过程 7 月 17 日 18:00 开始, 自西南向东北发展, 18 日凌晨至上午降雨最为集中 (图 1c)。

3 环流背景

2021 年 7 月 16 日, 南亚高压控制亚洲大陆西部, 东北地区南部-西太平洋洋面有低压活动, 贝加尔湖北部高压脊和南部低槽同位相促使鄂霍次克海地区西风加强, 18 日 04:00 (图 2a) 200 hPa 影响区北部上空西风超过 40 m·s^{-1}, 高空急流入口区右侧减压促进纬向环流与南侧东北低涡结合形成低槽, 而槽后流场也反向促进呼伦贝尔市东南部形成强辐散区, 随后南亚高压西撤, 一方面促进 200 hPa 辐散流场加强并达到 2×10^{-4} s^{-1}, 另一方面, 500 hPa 控制亚洲大陆大范围地区的副热带高压 (以下简称副高) 沿华北南部断裂并呈东西两块分布, 贝加尔湖低槽东移发展, 形成华北暴雨典型的“两高对峙”环流形势。该过程较为特殊的是, 低槽经向度大, 促进槽前暖湿气流向北输送和下游高压脊的强烈发展, 与东部异常偏北的副高 (588 dagpm 线北界达到 45°N 附近) 打通形成稳定的东阻形势 (图 2b)。东部沿海地区受低值区控制, “烟花”达到热带风暴级, 影响呼伦贝尔市地区的“北脊+南涡+东阻”形势形成。

朱乾根等 (1992) 指出行星尺度系统本身不直接产生降水, 而是制约影响天气尺度系统在某一固定地带活动产生持续性的降水。17 日 23:00—18 日 08:00, 影响系统具有中低层垂直、高层略后倾的垂直结构, 850 hPa 低空急流形成, 并在呼伦贝尔市东南部形成暖式切变线 (图 2c、d), 暴雨区位于低空西南急流出口区左前侧, 700 hPa 暖式切变线在此维持超过 9 h, 暴雨产生在切变线南侧的暖湿气流区内。综上所述, 本次过程受低槽、低空急流和低层切变线等天气尺度系统的共同影响。18 日 04:00 环境动力场表现为较强的低层辐合与高层辐散结构, 此后降雨明显增强。

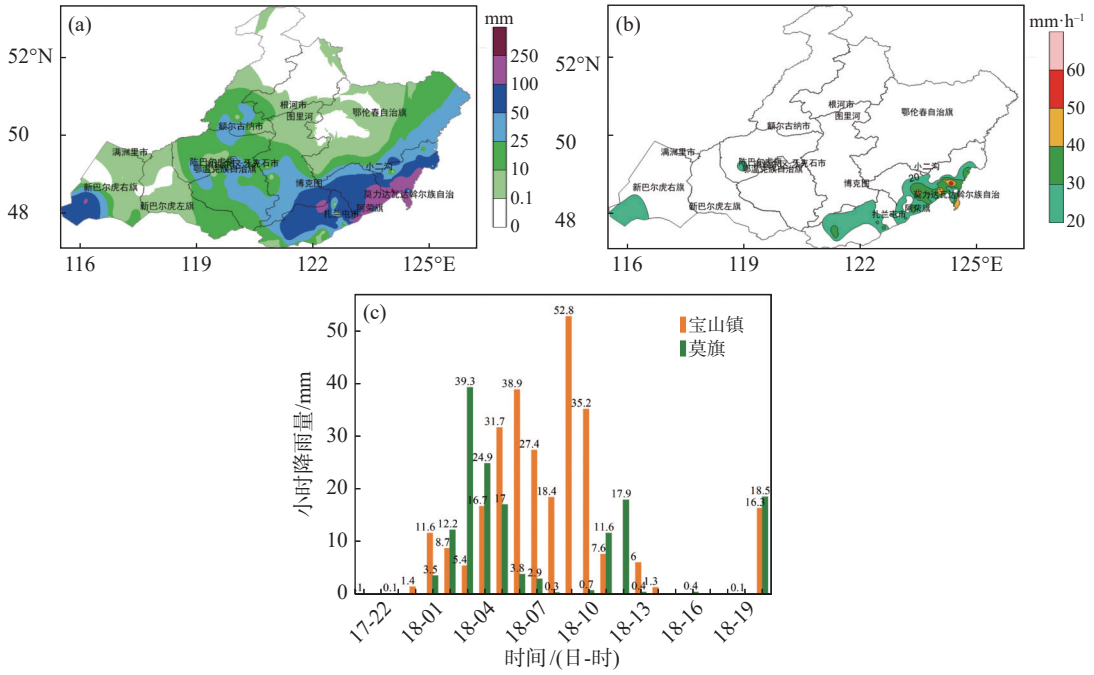


图 1 2021 年 7 月 17 日 20:00—18 日 20:00 呼伦贝尔市 24 h 累积降雨量 (a)、最大雨强≥20 mm·h^{-1} (b) 的空间分布以及代表站逐小时降雨量演变 (c)

Fig. 1 Spatial distribution of (a) 24 h cumulative rainfall and (b) maximum rain intensity over 20 mm·h^{-1}, and (c) hourly rainfall at represent stations in Hulunbuir from 20:00 BT on July 17 to 20:00 BT on July 18, 2021

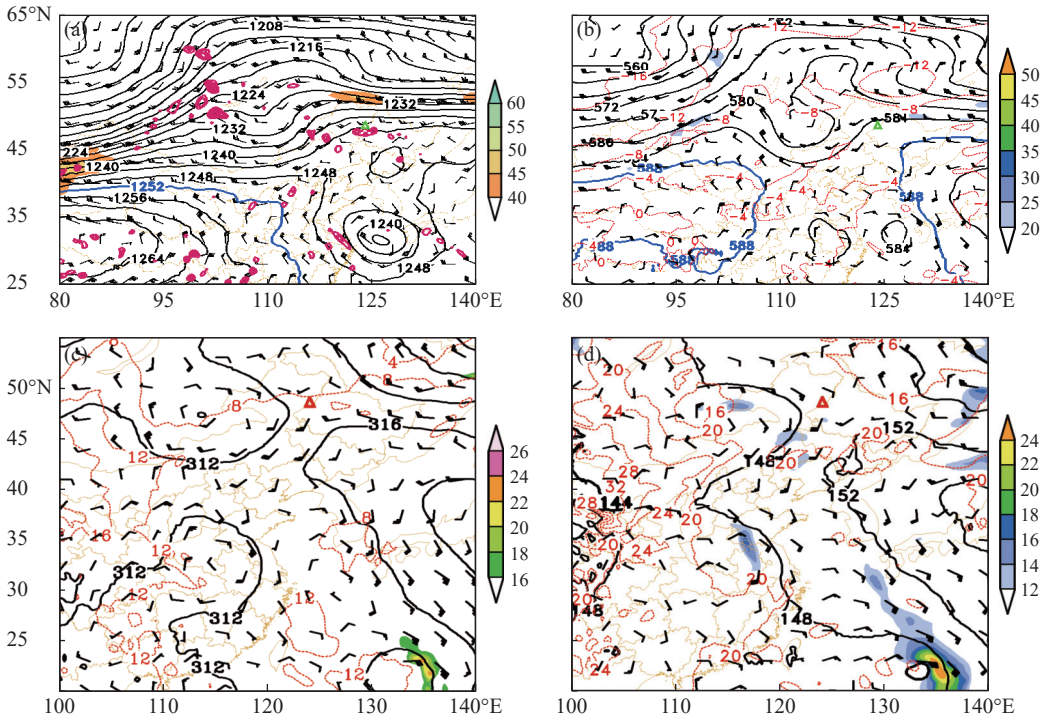


图 2 2021 年 7 月 18 日 04:00 200 hPa 位势高度场 (黑色等值线, 单位: dagpm)、散度场 (玫红色等值线, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 和风场 (填色和风向杆, 单位: $m·s^{-1}$) (a) 以及 500 hPa (b)、700 hPa (c)、850 hPa (d) 位势高度场 (黑色等值线, 单位: dagpm)、温度场 (红色虚线, 单位: ℃) 和风场 (填色和风向杆, 单位: $m·s^{-1}$)

Fig. 2 The (a) 200 hPa geopotential height field (black contour line, unit: dagpm), divergence field (rose red contour line, unit: 10^{-5} s^{-1}) and wind field (shaded and wind barb, unit: $m·s^{-1}$), and geopotential height field (black contour line, unit: dagpm), temperature field (red dashed line, unit: ℃) and wind field (shaded and wind barb, unit: $m·s^{-1}$) at (b) 500 hPa, (c) 700 hPa, (d) 850 hPa at 04:00 BT July 18, 2021

4 极端暴雨成因

4.1 偏南气流为极端暴雨提供了充沛的水汽

随着 500 hPa 贝加尔湖低槽东移加深和副高断裂, 低层低涡东移发展, 低涡前部偏南气流持续加强, 建立水汽输送带。18 日 04:00 (图 3a) 可见 40°N 以南维持两支水汽输送带, 一支来源于南海, 经我国东部沿海地区向北输送; 另一支为源于台风“烟花”外围水汽, 沿西北太平洋北上经由日本海南部、黄海, 向北与第一支水汽通道汇聚, 经渤海后在华北东部得到加强。04:00 850 hPa 呼伦贝尔市东南部水汽通量超过 15 $g·s^{-1}·cm^{-1}·hPa^{-1}$, 07:00 加强到 20 $g·s^{-1}·cm^{-1}·hPa^{-1}$, 并形成水汽辐合 $(-10\sim-4)\times10^{-7}$ $g·s^{-1}·cm^{-2}·hPa^{-1}$(图略) 且持续 9 h 以上, 暴雨区水汽通量维持在 10~20 $g·s^{-1}·cm^{-1}·hPa^{-1}$。925 hPa 南风急流强盛 (图 3b), 急流头部在影响区形成强辐合, 13:00 急流北上, 影响区降雨停止。综上, 低层持续较强的水汽输送和水汽辐合为极端降雨提供了必要条件。

4.2 差动平流为极端暴雨创造了必要的动力抬升

热力强迫项是垂直运动的重要组成部分 (Hoskins et al., 1978), 一方面其与温度平流有关, 另一方面上下层的假相当位温平流差异 (以下简称差动平流) 对加强垂直运动起到不可忽视的作用 (刘还珠等, 2007)。分析发现, 17 日 10:00 在 (123°E, 45°N) 处 700 hPa 和 500 hPa 间发展出大于 8×10^{-5} $K·s^{-1}$ 的差动平流中心, 在偏南气流引导下向东北偏北方向移动, 22:00 500 hPa 偏南风加强, 中心快速北进, 中心附近上升速度 $(-5\sim0)\times10^{-1}$ $Pa·s^{-1}$, 18 日 01:00 中心附近上升速度增强到 $(-15\sim-10)\times10^{-1}$ $Pa·s^{-1}$, 18 日 04:00 (图 4a) 中心强度 10×10^{-5} $K·s^{-1}$, 上升速度大值区位于中心附近北侧的影响区附近, 10:00 上升速度增强到 $(-20\sim-15)\times10^{-1}$ $Pa·s^{-1}$, 随后中心低于 4×10^{-5} $K·s^{-1}$, 降雨减弱。降雨开始前, 内蒙古东北部上空 850 hPa 和 700 hPa 间差动平流超过 16×10^{-5} $K·s^{-1}$, 低层强于上层, 中心附近速度 $(-5\sim5)\times10^{-1}$ $Pa·s^{-1}$, 不稳定能量积聚, 18 日 01:00 中心附近南侧的上升速度显著增强到 $(-20\sim-15)\times10^{-1}$ $Pa·s^{-1}$, 18 日 04:00 (图 4b) 中心强度 8×10^{-5} $K·s^{-1}$ 低于上层, 上升速度有所减弱。分析宝山镇的假相当位温 (θ_{se}) 垂直分布随时间演变 (图 4c) 发现, 在大尺度背景下, 中低层位势不稳定的增强与雨强增大有着密切关系。中层为 θ_{se} 低值区, 17 日 20:00—18 日 05:00, 低层暖湿中心向上扩展, $\partial\theta_{se}/\partial P>0$, 宝山镇雨强逐小时递增, 05:00 超过 340 K 的暖湿中心向上扩展到 700 hPa, 600—850 hPa θ_{se} 梯度达到最大, 06:00 雨强出现第一个峰值 38.9 $mm·h^{-1}$。08:00 θ_{se} 低值区向下发展, 09:00 雨强出现第二个峰

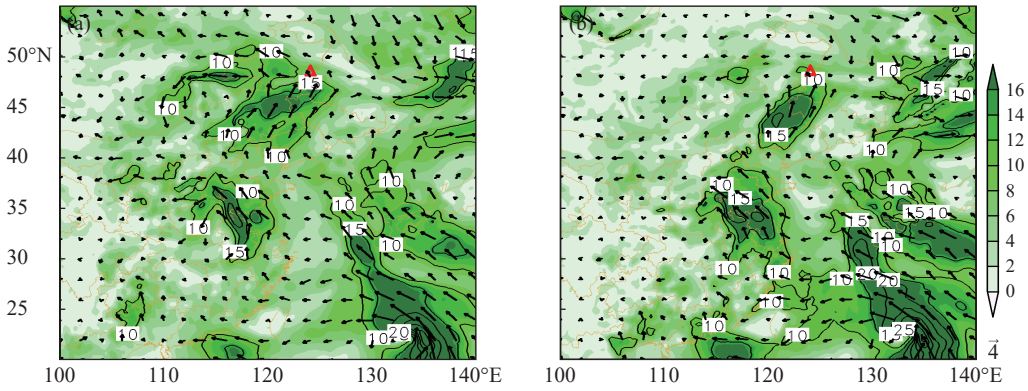


图 3 2021 年 7 月 18 日 04:00 850 hPa (a)、925 hPa (b) 水汽通量场 (填色, 单位: $g\cdot s^{-1}\cdot cm^{-1}\cdot hPa^{-1}$) 和风场 (箭矢, 单位: $m\cdot s^{-1}$) (黑色等值线代表水汽通量≥10 $g\cdot s^{-1}\cdot cm^{-1}\cdot hPa^{-1}$; 红色三角形代表宝山镇位置, 下同)

Fig. 3 Water vapor flux field (shaded, unit: $g\cdot s^{-1}\cdot cm^{-1}\cdot hPa^{-1}$) and wind field (arrow, unit: $m\cdot s^{-1}$) at (a) 850 hPa and (b) 925 hPa at 04:00 BT on July 18, 2021 (Black contour is water vapor flux more than 10 $g\cdot s^{-1}\cdot cm^{-1}\cdot hPa^{-1}$. Arrow represents the wind (vector, unit: $m\cdot s^{-1}$). The red triangle represents the location of Baoshan, hereafter)

值 52.8 $mm\cdot h^{-1}$。可见, 降雨前低层显著的差动平流配合弱的上升运动加剧了层结向对流不稳定发展, 不稳定能量释放, 上升速度增强, 暴雨得到加强。

4.3 造成极端暴雨的中尺度对流系统演变

4.3.1 中尺度对流云团演变特征

结合高、低层天气系统, 利用 FY−4A TBB 资料和同时次地面 2 min 平均风、小时降雨资料对中尺度对流云团演变进行跟踪分析发现, 西南暖湿气流在近地层偏东气流下获得抬升, 具有强的垂直风切变, 中尺度对流云团形成于地面辐合线以北的东风气流里, 以及西南急流头部辐合区偏暖气团一侧, 符合暖锋结构特征。17 日 22:00 (图 5a), 上述地区有一近圆形的 $M_{\alpha}CS$ (A) 活动, 地面为 4 $m\cdot s^{-1}$ 以下东风, 无辐合, 此时 CS 边界刚刚影响到宝山镇和莫旗一带, 随

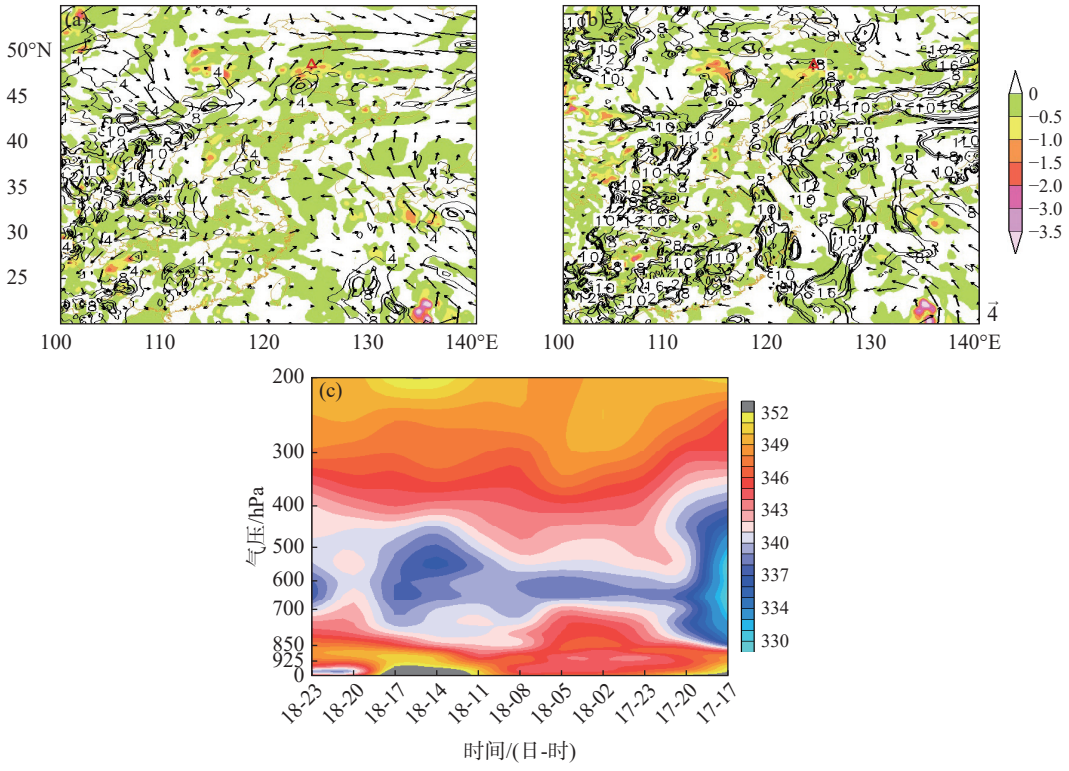


图 4 2021 年 7 月 18 日 04:00 700 hPa 减 500 hPa (a)、850 hPa 减 700 hPa (b) 差动平流 (黑色等值线, 单位: $10^{-5}\ K\cdot s^{-1}$)、被减层风场 (箭矢, 单位: $m\cdot s^{-1}$) 和垂直速度 (填色, 单位: $Pa\cdot s^{-1}$) 以及 2021 年 7 月 17 日 17:00—18 日 23:00 宝山镇 θ_{se} (单位: K) 时间-高度剖面 (c)

Fig. 4 Differential advection of pseudo-equivalent potential temperature (contour, unit: $10^{-5}\ K\cdot s^{-1}$) between (a) 700 hPa and 500 hPa, (b) between 850 hPa and 700 hPa, and wind field (arrow, unit: $m\cdot s^{-1}$) and vertical velocity (shaded, unit :$Pa\cdot s^{-1}$) at reduced layer at 04:00 BT on July 18, 2021, (c) time-height profile of θ_{se} (unit: K) at Baoshan from 17:00 BT on July 17 to 23:00 BT on July 18, 2021

后出现微量降雨。低层西南急流向北推进，图 5b 可见 18 日 00:00 A 云团减弱，强中心分裂两个 $M_\beta CS$ (A_1 和 A_2)，地面持续的东风与南来暖湿气流形成辐合，对流云团 (B) 获得持续发展，迅速增强，冷云盖面积增大，地面降雨随之加强，18 日 02:00 (图 5c)，对流核心区 (CC) 清晰可见，表明对流发展旺盛，莫旗位于 A_1 云团 CC 冷云区低空急流上风方向边缘，此时 MCS 的 TBB 高梯度区与地面辐合线有较好对应关系，该站小时降雨量首次突破 10 mm。随后低层西南气流增强，地面风加强，图 6a 可见影响区位于低压顶前部，影响区以北存在弱高压，04:00 A_1、A_2 与 B 合并 (图 5d)，并快速向东北方向移动，先再度获得发展，随后减弱 (图 5e)，此时段是莫旗的主降雨时段。18 日 08:00，地面气旋缓慢向北推进，近地层南风加强 (图 5f)，影响区内地面风达 4 $m\cdot s^{-1}$ 以上，地面辐合线清晰可见，该地形成一个 β 中尺度对流云团 (C)，存在 CC，宝山镇位于 TBB 高梯度区，同时上游新生一对流云团 (D)，在西南风引导气流下并入云团 C，08:00—10:00 (图 5g)，位于冷云区移出方位的宝山镇监测到雨强 52.8 $mm\cdot h^{-1}$ 和 35.2 $mm\cdot h^{-1}$。辐合线附近的莫旗出现的是微量降雨，11:00—12:00 莫旗位于冷云区移出方位时 (图 5h)，降雨量增大，连续两个小时雨强稳定在 10 $mm\cdot h^{-1}$ 以上。图 6b 可见 13:00 近地层风场持续增强，地面气旋发展并缓慢北上，辐合区移出影响区，14:00—19:00 降雨间歇，暖输送带上不断有对流云团的新生、发展，16:00 新生的 $M_\beta CS$ 自西南向东北移动，19:00 形成 CC，同时近地层北部回流冷空气南下，对流云团 CC 北边界 TBB 高梯度区再次影响上述地区 (图略)，降雨再度发展，此后降雨减弱结束。由此可见，低空西南急流与近地层东风形成强的垂直风切变，促进云团组织化结构形成，本次极端降雨过程是由多个中尺度对流云团连续影响造成的。

4.3.2 雷达回波特征

多普勒天气雷达资料具有较高的时空分辨率，齐齐哈尔雷达站探测到了此次极端降雨的回波特征。18 日 01:20 (图 7a)，层积混合云状回波在低层西

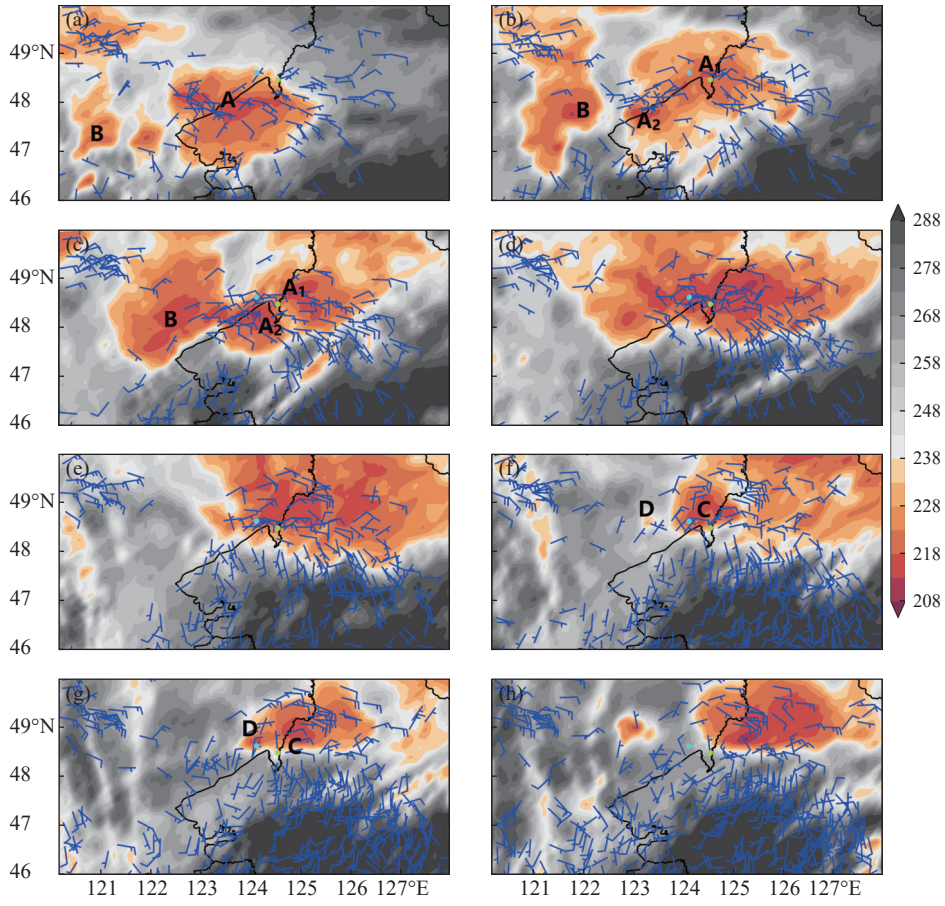


图 5 2021 年 7 月 17 日 22:00 (a)、18 日 00:00 (b)、02:00 (c)、04:00 (d)、06:00 (e)、08:00 (f)、10:00 (g)、12:00 (h) FY−4A 卫星云顶亮温 TBB (单位：K) 和风场 (风向杆) (绿点、黄点分别代表宝山镇和莫旗位置；A、B、C、D 分别代表中尺度对流云团)

Fig. 5 FY−4A TBB (unit: K) and wind field (wind bar) at (a) 22:00 BT on July 17, and (b) 00:00 BT, (c) 02:00 BT, (d) 04:00 BT, (e) 06:00 BT, (f) 08:00 BT, (g) 10:00 BT, and (h) 12:00 BT on July 18, 2021 (The green and yellow dots represent the locations of Baoshan and Moqi, respectively. A, B, C, and D represent mesoscale convective cloud clusters, respectively)

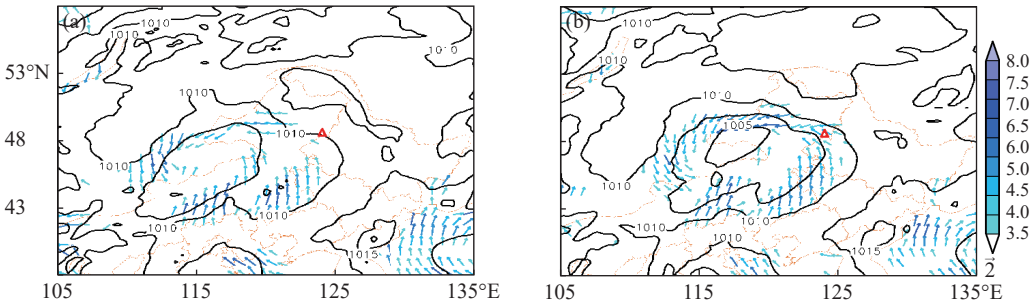


图 6 2021 年 7 月 18 日 04:00 (a)、13:00 (b) 地面气压场 (黑色等值线, 单位: hPa) 和超过 3.5 m·s^{-1} 的风场 (箭矢)

Fig. 6 Pressure field (black contour line, unit: hPa) and wind vector (arrow) exceeding 3.5 m·s^{-1} at (a) 04:00 BT and (b) 13:00 BT on July 18, 2021

南气流引导下向东北方向移动影响莫旗, 图中所示 A_1 和 A_2 对应上文图 5c 中两个 M_βCS 对流云团, 可见该对流云团是由多单体风暴组成, 强对流单体位于对流云团上风方向, 1.5°仰角径向速度图 (图 7b) 可见存在速度模糊 (图中最大速度可显示至 13 m·s^{-1}), 判断存在 16 m·s^{-1} 西南偏南风低空急流, 急流前端存在径向速度辐合, 促进 A_1 和 A_2 上风方向对流单体进一步东移、发展, 莫旗 01:00—03:00 分别监测到 12.2 mm·h^{-1} 和 39.3 mm·h^{-1} 的降雨。

剖析宝山镇出现 52.8 mm·h^{-1} 极端降雨的原因发现, 08:00—09:00 在西南偏西气流 (图 7e) 输送带上, 多个大于 45 dBz 低质心结构的对流单体依次排列形成“列车效应”持续经过影响区 (图 7d、f), 促进降雨效率。影响宝山镇的对流风暴强于莫旗 (图 7c), 从图 7f 可见, >45 dBz 的反射率因子高度达到 5 km 附近, 对流风暴发展更为旺盛, 降雨效率高。

5　与“19.8”极端暴雨过程的对比分析

“19.8”极端暴雨过程主要降雨时段为 2019 年 8 月 6 日 20:00—7 日 20:00, 12 站达大暴雨量级, 最大日降雨量为 154.4 mm (阿荣旗松塔沟), 其中阿荣旗国家站最大日降雨量 123.7 mm, 刷新该站历史极

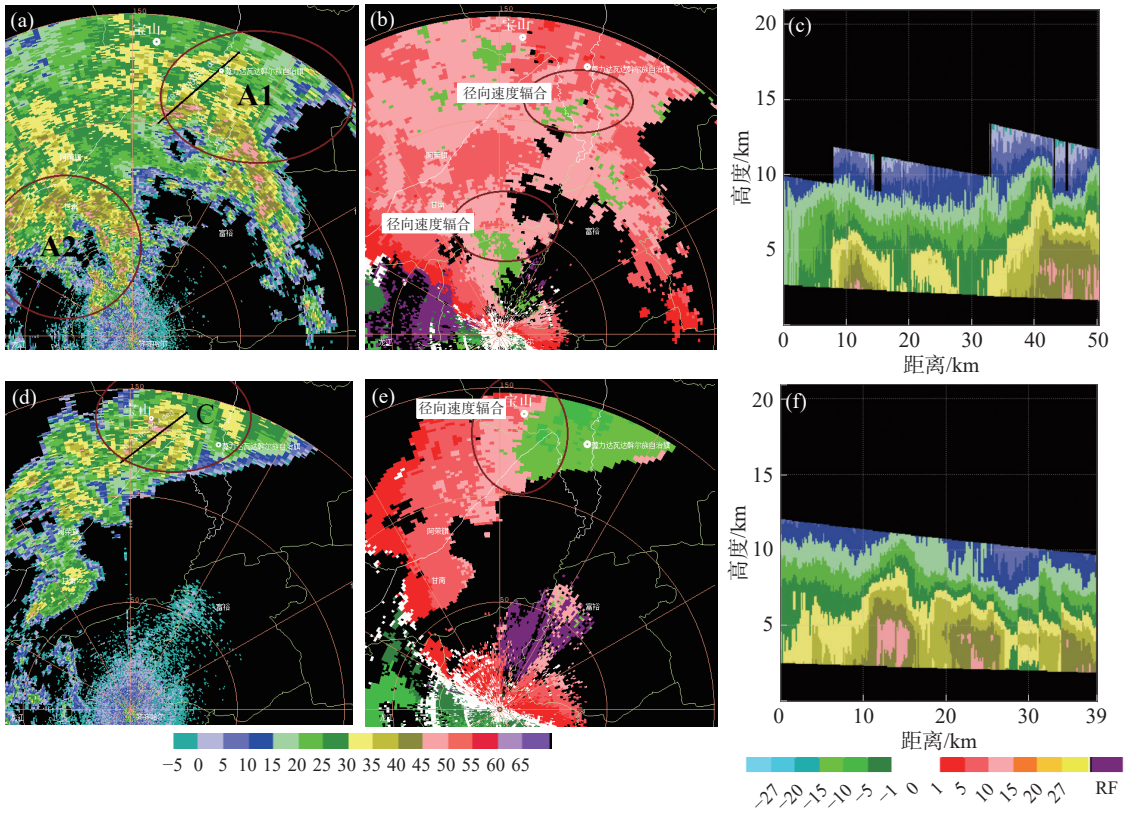


图 7 2021 年 7 月 18 日 01:20 (a、b) 和 08:28 (d、e) 齐齐哈尔雷达 1.5°仰角反射率因子 (a、d, 单位: dBz)、1.5°仰角径向速度 (b、e, 单位: m·s^{-1})、莫旗附近沿图 7a 黑线和宝山镇附近沿图 7d 黑线的反射率因子 (单位: dBz) 垂直剖面 (c、f)

Fig. 7 The (a, d) 1.5° reflectivity factor (unit: dBz), (b, e) 1.5° radial velocities (unit: m·s^{-1}) at (a, b) 01:20 BT and (d, e) 08:28 BT on July 18, 2021, and vertical reflectivity (unit: dBz) along the black line (c) near Moqi in Fig.7a and (f) near Baoshan in Fig.7b

值, 最大雨强 30.5 mm·h^{-1} (阿荣旗红毛沟村), 大暴雨集中在图 8 黄色框区域内。“21.7”极端暴雨过程的大暴雨集中在图 8 红色框区域内。两个过程降雨区有重合, 均有国家站日降雨量刷新历史记录, 且强降雨均集中在 03:00—13:00。但“21.7”极端暴雨过程从大暴雨落区、降雨持续时间、日降雨量、小时降雨强度、短时强降水持续时间上均强于“19.8”极端暴雨过程。两个过程环流形势、影响系统和物理量特征存在差异, 特别是中低层动力结构和水汽条件存在明显不同。“21.7”极端暴雨过程发生在南亚高压西退(东脊点在 112°E)、副高位置异常偏北 (588 dagpm 线北界在 45°N)、台风活动于台湾岛以东洋面的环流背景下, 影响系统为 500 hPa 低槽、700 hPa 暖式切变线、850 hPa 暖式切变线和超过 14 m·s^{-1} 的西南急流、地面气旋, 低空西南急流强盛, 远距离水汽通道建立, 具有高能高湿 (内蒙古索伦探空站 CAPE 达 1 287.7 J·kg^{-1}, K 指数达“19.8”极端暴雨过程环流背景是南亚高压东伸 (东脊点在 123°E)、副高北挺 (588 dagpm 线北界在 41°N)、两台风分别活动于台湾岛以东洋面和日本海, 影响系统为 500 hPa 高空冷涡、700 hPa 暖式切变线、850 hPa 暖式切变线和地面低压, 影响区上空 500 hPa 存在切变线, 但低层能量条件差 (内蒙古索伦探空站 CAPE 为 0 J·kg^{-1}, K 指数 37.1 ℃)。

综上, “21.7”极端暴雨过程极端性强, 远距离水汽通道向北输送到影响区, 强盛低空西南急流形成风速辐合, 特别是下游形成经向度大的东阻形势使得天气系统移动缓慢, 造成大范围强降雨。

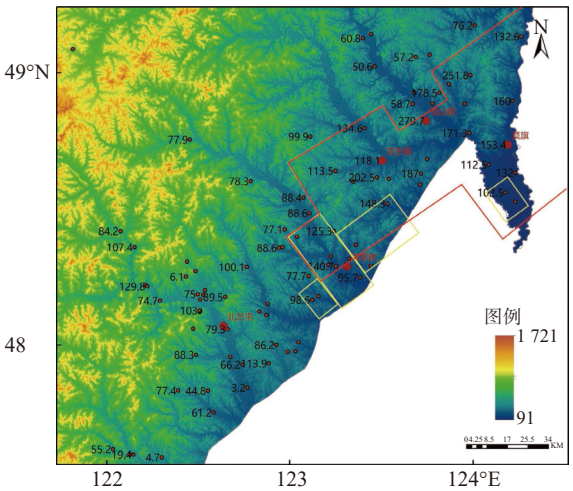


图 8 呼伦贝尔市东南部 30 m 分辨率地形 (填色) 以及 “21.7” 和 “19.8” 极端暴雨过程日最大降雨量 (数值,单位: mm) 叠加图 (红色框和黄色框分别为 “21.7” 和 “19.8” 极端暴雨过程中降雨量≥100 mm 的区域)

Fig. 8 Terrain in the southeast of Hulunbuir with spatial resolution of 30 m (shaded) and the maximum daily rainfall during "21.7" and "19.8" extreme rainstorm events (value, unit: mm) (Red box and yellow box are the areas with more than 100 mm during the two rainfall events of July 2021 and August 2019, respectively)

6 结论与讨论

利用常规气象观测资料、多普勒天气雷达资料、FY-4A 气象卫星资料和欧洲中期天气预报中心 ERA5 再分析资料, 从环流背景、水汽条件、热力条件、中尺度系统特征及发展机制等方面, 对内蒙古东北部“21.7”极端暴雨的特征和成因进行分析, 并与“19.8”极端暴雨进行对比, 得出以下主要结论:

(1) “21.7”极端暴雨存在日降雨量创历史极值、降雨时段集中和致灾性强等显著特点, 属于极端短时强降雨。极端暴雨出现在“两高对峙”、东部副高异常偏北的大尺度环流形势下。异常偏北的副高一方面促进高能高湿气流向北输送, 另一方面与北部高压脊打通形成东阻, 为低槽、低涡、低空急流及暖式切变线长时间稳定少动及暴雨的产生提供了极有利的背景场。

(2) 源于南海和台风“烟花”外围的远距离水汽通道的建立, 形成持续的水汽输送和水汽辐合, 为本次极端降雨创造了有利水汽条件。暖湿气流北上, 假相当位温平流强于高层, 加剧对流不稳定层结发展, 对宝山镇特大暴雨的形成起到不可忽视的作用。

(3) 高空强辐散与低层切变辐合形成耦合且持续 9 h, 形成持续较强的大尺度上升运动, 且低层西南急流与近地层东风形成强的垂直风切变, 可能是形成准静止中尺度对流云团的原因。

(4) 暖锋降雨形成于低层切变线以南、地面辐合线以北的暖区内。暖云区数个新生、发展的 M_βCS 云团持续影响是造成此次极端降雨的主要成因。强的对流风暴多位于中尺度对流云团的上风方向。冷云区 TBB≤218 K 的对流核心区 (CC) 移出方位梯度大值区边缘多发短时强降水。

(5) 内蒙古东北部“21.7”极端暴雨过程与“19.8”极端暴雨过程对比发现, 高空冷涡和低槽影响均可能导致极端强降雨, 但水汽、能量、系统持续的不同时间构成了极端程度的差异。

在预报业务中, 预报员能够对大尺度环流形势和主要影响系统有一定把握, 但对暴雨以上的强降雨落区预报存在偏差, 特别是对极端降雨预估不足, 究其原因是对形成极端降雨的中尺度系统发生发展机理、对流云团演变及各因子的综合作用认识不足。本文发现本次内蒙古东北部罕见特大暴雨天气学成因为异常偏北的副高形成东阻形势, 暖湿气流

远距离向北输送形成辐合、高能高湿条件下多个中尺度对流云团新生、发展, 但内蒙古罕见极端暴雨过程中山体沟壑等复杂地形在 MCS 组织发展过程中的作用以及对降雨的贡献, 有待进一步研究探讨。

参考文献 (References):

艾克代·沙拉木,何清,阿力木·阿巴斯,等.2024.新疆克州暖季小时极端降水时空分布特征[J].沙漠与绿洲气象,18(2):20−26. Akida S, He Q, Alim A, et al. 2024. Spatial and temporal distribution characteristics of hourly extreme rainfall in warm season in Kezhou of Xinjiang [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(2):20−26 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.02.003

常煜.2015.内蒙古 5—9 月小时强降水时空变化特征[J].中国沙漠,35(3):735−743. Chang Y. 2015. Spatial-temporal variations of hourly strong precipitation from May to September in Inner Mongolia of China [J]. Journal of Desert Research,35(3):735−743 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−694X.2014.00066

常煜,李秀娟,陈超,等.2016.内蒙古一次暴雨过程中尺度特征及成因分析[J].高原气象,35(2):432−443. Chang Y, Li X J, Chen C, et al. 2016. Mesoscale characteristics of a rainstorm process in Inner Mongolia and its cause analysis [J]. Plateau Meteorology,35(2):432−443 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2014. 00155

常煜,马素艳,仲夏.2018.内蒙古夏季典型短时强降水中尺度特征[J].应用气象学报,29(2):232−244. Chang Y, Ma S Y, Zhong X. 2018. Mesoscale characteristics of typical summer short-time strong rainfall events in Inner Mongolia [J]. Journal of Applied Meteorological Science,29(2):232−244 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20180209

常煜,冀刚,高绍鑫,等.2023.引发内蒙古汛期暴雨洪涝灾害的降水雨强特征分析[J].暴雨灾害,42(3):346−352. Chang Y, Ji G, Gao S X, et al. 2023. Analysis of rainfall intensity characteristics of precipitation events causing rainstorm and flood disaster in flood season in Inner Mongolia [J]. Torrential Rain and Disasters,42(3):346−352 (in Chinese). doi:10.12406/ byzh.2021−224

丁一汇,柳艳菊,宋亚芳.2020.东亚夏季风水汽输送带及其对中国大暴雨与洪涝灾害的影响[J].水科学进展,31(5):629−643. Ding Y H, Liu Y J, Song Y F. 2020. East Asian summer monsoon moisture transport belt and its impact on heavy rainfalls and floods in China [J]. Advances in Water Science,31(5):629−643 (in Chinese). doi:10.14042/j.cnki.32.1309.2020.05.001

段汀,陈权亮,廖雨静.2022. “21.7”郑州极端暴雨的形成过程及致灾机理分析[J].气象科学,42(2):152−161. Duan T, Chen Q L, Liao Y J. 2022. Analysis of “21.7” extreme rainstorm formation process and disaster mechanism in Zhengzhou [J]. Journal of the Meteorological Sciences,42(2):152−161 (in Chinese). doi:10.12306/2022jms.0002

顾润源,孙永刚,韩经纬,等.2012.内蒙古自治区天气预报手册[M]. 北京:气象出版社:159. Gu R Y, Sun Y G, Han J W, et al. 2012. Inner Mongolia Autonomous Region weather forecast manual [M]. Beijing:Meteorological Press:159 (in Chinese)

高守亭,周玉淑,冉令坤.2018.我国暴雨形成机理及预报方法研究进展[J].大气科学,42(4):833−846. Gao S T, Zhou Y S, Ran L K. 2018. A review on the formation mechanisms and forecast methods for torrential rain in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,42(4):833−846 (in Chinese) doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1802.17277

刘还珠,王维国,邵明轩,等.2007.西太平洋副高影响下北京区域性暴雨的个例分析[J].大气科学,31(4):727−734. Liu H Z, Wang W G, Shao M X, et al. 2007. A case study of the influence of the western pacific subtropical high on the torrential rainfall in Beijing area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,31(4):727−734 (in Chinese)

雷蕾,孙继松,何娜,等.2017. “7.20”华北特大暴雨过程中低涡发展演变机制研究[J].气象学报,75(5):685−699. Lei L, Sun J S, He N, et al. 2017. A study on the mechanism for the vortex system evolution and development during the torrential rain in North China on 20 July 2016 [J]. Acta Meteor Sinica,75(5):685−699 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2017.054

李瑞青,黄晓璐,宋桂英,等.2023.内蒙古东西部典型地区夏季极端暴雨特征对比分析[J].高原气象,42(5):1218−1231. Li R Q, Huang X L, Song L Y, et al. 2023. Comparative analysis of summer extreme rainstorm characteristics between Western and Eastern Inner Mongolia [J]. Plateau Meteorology,42(5):1218−1231 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534. 2022. 00097

马梁臣,孙力,王宁.2017.东北地区典型暴雨个例的水汽输送特征分析[J].高原气象,36(4):960−970. Ma L C, Sun L, Wang N. 2017. Analysis of water vapor transport characteristics of typical rainstorm cases in Northeast China [J]. Plateau Meteorology,36(4):960−970 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2016.00078

王颖,王洪丽,姜凤友,等. 2023. DB 1507/T 90−2023 极端短时强降雨判别指标[S]. 呼伦贝尔市市场监督管理局. Wang Y,Wang H L,Jiang F Y,et al. 2023. DB 1507/T 90−2023 Discriminant indices of short-duration heavy rain extremes [S]. Hulunbuir Market Supervision and Administration Bureau (in Chinese)

翟盘茂,刘静.2012.气候变暖背景下的极端天气气候与防灾减灾[J].中国工程科学,14(9):55−63,84. Zhai P M, Liu J. 2012. Extreme weather/climate s and disaster prion and mitigation under global warming backgound [J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering,14(9):55−63,84 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1009−1742.2012.09.007

朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 1992. 天气学原理和方法[M]北京:气象出版社:385,364−399. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al. 1992. Principles and methods of synoptic meteorology [M]. Beijing:China Meteorological Press:385, 364−399 (in Chinese)

周璇,孙继松,张琳娜,等.2020.华北地区持续性极端暴雨过程的分类特征[J].气象学报,78(5):761−777. Zhou X, Sun J S, Zhang L N, et al. 2020. Classification characteristics of continuous extreme rainfall s in North China [J]. Acta Meteorologica Sinica,78(5):761−777 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2020.052

Ai Y, Li W, Meng Z, et al. 2016. Life cycle characteristics of MCSs in middle East China tracked by geostationary satellite and precipitation estimates [J]. Monthly Weather Review,144(7):2517−2530. doi:10.1175/MWR−D−15−0197.1

Hoskins B J, Draghici I, Davies H C. 1978. A new look at the ω equation [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,104:31−38

(责任编辑　唐永兰)