

苏爱芳,席乐,吕晓娜,等,2022. 豫北“21·7”极端暴雨过程特征及成因分析[J]. 气象,48(5):556-570. Su A F, Xi L, Lyu X N, et al, 2022. Analysis on characteristics and causes of the July 2021 extreme rainstorm in northern Henan[J]. Meteor Mon, 48(5):556-570(in Chinese).

豫北“21·7”极端暴雨过程特征及成因分析*

苏爱芳^{1,2} 席 乐^{1,2} 吕晓娜^{1,2} 崔丽曼^{1,2} 张 宁^{1,2}

1 中国气象局(河南)农业气象保障与应用技术重点实验室,郑州 450003

2 河南省气象台,郑州 450003

提 要: 利用探空、地面自动站、多普勒雷达等观测资料及 ERA5 再分析产品,对 2021 年 7 月 17—22 日豫北地区的极端暴雨过程进行分析。结果表明,极端暴雨过程具有强降水持续时间长、降水强度极端及地形影响明显等特征。极端暴雨过程发生于稳定的大尺度天气形势下,在日本海高压西伸及台风烟花(2106 号)、查帕卡(2107 号)西北行背景下,黄淮低涡外围加强北上的东南急流/偏南急流为强降水的发生提供了异常充足的水汽、能量条件,对流层中低层暖湿平流强迫、叠加地形影响的强动力辐合抬升作用及低空弱冷空气扩散南下是形成强降水的重要条件,而大气“强-弱-强-弱”的对流不稳定层结特征转化说明强降水过程中存在着两种互补的物理机制。不同阶段极端短时强降水(小时降水量 ≥ 50 mm)对流系统的形态结构和发展演变特征不同,但从雷达回波的垂直分布来看,系统均具有“低质心”特征,质心强度 ≥ 55 dBz 且 ≥ 50 dBz 强回波垂直伸展至 5~8 km、持续时间 1 h 以上。强降水对流系统在太行山前 30 km 左右范围内的后向发展特征明显,一方面与地面西行偏东风/东北风在太行山绕流作用下形成的地形辐合线不断南伸有关,另一方面也与强降水冷池效应促使山前偏北风进一步发展南下有关。

关键词: 极端暴雨,极端短时强降水,对流系统,低空急流,地形,冷池,豫北

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.032501

Analysis on Characteristics and Causes of the July 2021 Extreme Rainstorm in Northern Henan

SU Aifang^{1,2} XI Le^{1,2} LYU Xiaona^{1,2} CUI Liman^{1,2} ZHANG Ning^{1,2}

1 Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, CMA, Zhengzhou 450003

2 Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003

Abstract: This paper analyzes the extreme rainstorm that occurred in Henan Province in 17–22 July 2021 based on the observations from radiosonde, automatic weather stations, Doppler weather radars, and the ECMWF ERA5 reanalysis data. The results show that this process had the characteristics of persistence, extreme rainstorm intensity and obvious topographic precipitation. The extreme rainstorm happened under the stable large-scale synoptic situation. When the high pressure in the Sea of Japan extended westward, and typhoons In-fa and Cempaka moved northwestward, the southwesterly/westerly airflow which strengthened northward in the periphery of the Huanghuai vortex provided abundant water vapor and energy for the occurrence of the extreme rainstorm. The warm-wet advection forcing in the mid-low troposphere, strong convergence and uplift under terrain influence as well as weak north low-level cold air were the important conditions of the extreme rainstorm, and the transformation of the “strong-weak-strong-

* 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题项目(2021LASW-A09)、河南省 2020 年度国家超级计算郑州中心创新生态系统建设科技专项(201400210800)、河南省科技攻关项目(212102310416)和风云卫星应用先行计划(FY-APP-2021.0109)共同资助

2021 年 12 月 23 日收稿; 2022 年 3 月 7 日收修定稿

第一作者:苏爱芳,主要从事强对流预报技术研究. E-mail:610061618@qq.com

weak” convective unstable characteristics indicated that there were two complementary physical mechanisms during the extreme heavy precipitation. The morphological structure and evolution characteristics were different in various stages of extreme heavy precipitation convection system (hourly precipitation ≥ 50 mm). In vertical direction, convective systems (CSs) of the short-time heavy precipitation showed the characteristics of low-mass center (stronger than 55 dBz), stretching thickness of the echoes greater than 50 dBz over 5 km, duration over 90–120 minutes. Short-time heavy precipitation CSs developed backward clearly within about 30 km in front of Taihang Mountains. Continuous southward extension of the topographic convergence line formed by the westerly easterly/northeasterly wind around Taihang Mountains was one aspect, and on the other hand further development of the northerly wind before the mountain due to the cold pool effect of heavy precipitation works too.

Key words: extreme rainstorm, extreme short-time heavy precipitation, convective system, low-level jet, terrain, cold pool, northern Henan

引言

豫北地区地处华北南部、太行山东麓,指河南位于黄河以北的区域,包括安阳、鹤壁、濮阳、新乡、焦作和济源示范区6个地级市(示范区)(图1),历史上曾遭遇过“63·8”“96·8”等严重的暴雨洪涝灾害(陶诗言,1980;张文龙和崔晓鹏,2012)。2021年7月下旬,继20日郑州极端暴雨灾害事件后,豫北20日下午至22日连续出现大范围强降水,与17日开始持续出现的对流性强降水叠加,导致了严重的山洪、泥石流灾害,中小河流、水库承担了极高风险,共产主义渠和卫河新乡、鹤壁段多处发生决口,大范围粮田被淹没,交通、通信、水电设施等大范围损毁,人员伤亡严重,经济损失数以百亿(简称豫北“21·7”极端暴雨过程)。

华北暴雨(豫北暴雨属华北暴雨研究范畴)一直是我国气象学者关注的重点,相关研究涵盖了大尺度环流形势及中低纬度系统相互作用、水汽输送、高低空急流、暴雨中尺度系统、复杂地形等(张文龙和崔晓鹏,2012;赵思雄等,2018)。丁一汇等(1980)归纳了华北暴雨天气形势:(1)在东高西低或两高压对峙的环流形势下,当长波槽位于 $100^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ 时,对华北暴雨最有利;当北面形成高压坝时,北上台风深入内陆受阻或切断低涡稳定少动也会造成暴雨。(2)低涡、暖切变线和低槽冷锋是造成华北暴雨的主要天气尺度系统。(3)华北强烈的暴雨大部分出现在两个或两个以上天气系统的相互作用或相互叠加的情况下,暖切变线与低涡相叠加;低槽冷锋与低涡叠加;(南北或东西方向)低槽合并和加强;高空冷涡

与台风或西南涡结合。(4)大部分暴雨发生时有低空急流出现。(5)华北地形对暴雨的出现有一定作用。

近年来,东风气流与暴雨的关系、太行山地形对暴雨的影响以及极端暴雨发生发展的中尺度过程成为华北暴雨研究的焦点问题(陶祖钰和成秋影,1981;徐国强等,1999;孙继松和杨波,2008;孙继松等,2012;孙建华等,2005;2013;廖菲等,2009;张文龙和崔晓鹏,2012;谌芸等,2012;孙军等,2012;俞小鼎,2012;2013;陈明轩等,2013;Zhong et al,2015;吴庆梅等,2015;闫冠华等,2015;符娇兰等,2017;王丛梅等,2017;栗晗等,2018;章翠红等,2018;Fu et al,2020)。孙继松和杨波(2008)的研究表明,在太行山东侧为低空东风气流的背景下,当垂直于山体的气流随高度减小时,地形的作用表现为迎风坡上水平辐合造成气旋式涡度增加,对迎风坡降水产生明显增幅作用,由城市热岛形成的水平温度梯度可能在靠近城区的山前迎风坡强迫产生相对独立的中尺度风垂直切变,由此产生的低空风的垂直切变是维系中尺度对流降水发生、发展的重要条件,强降水形成吹向迎风坡的风与降水强度之间的正反馈现象,对中尺度暴雨的形成起重要作用。俞小鼎(2012)指出北京及其周边地区 $1\ 000\sim 2\ 000\ \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的湿对流有效位能(CAPE)、深厚的湿层、强的低空急流、高的地面露点温度(T_d)和异常大的可降水量(PW)等环境条件有利于北京“7·21”大暴雨的出现,极端降水中尺度对流系统起源于类似热带气旋形态的中尺度涡旋的发展,低空急流在太行山东坡被强迫抬升导致新单体不断在强降水区西南侧生成,向西南方向的后向传播和速度更快向东北向

平流导致对流单体反复经过同一区域,形成“列车效应”,以及逐渐增加的深层垂直风切变导致很多小型超级单体形成,其内部的旋转与环境垂直风切变的相互作用导致更强的上升气流、更大雨强和更长的对流单体生命史,都有利于极端降水的形成。陈明轩等(2013)的研究表明,在“7·21”极端暴雨过程中,低层动力场和地形强迫对中尺度对流系统(MCS)的触发、增强和维持起关键作用,随着急流加强,强降雨区域呈现与地形走向接近的“西南—东北”向带状分布,单体移动具有明显的“列车效应”,而整体则向东偏南缓慢传播,在传播前沿(山前)形成强的出流风场,低层 2 km 以下均为深厚的辐合上升区且进一步加强,有利于长时间“列车效应”的维持和发展;出流风场与平原地区近地面偏南风交汇,使得在距传播前沿约 50 km 的、已经存在的一个接近“西西南—东东北”走向的出流边界明显增强,在 MCS 传播前沿存在较为明显的 0~3 km 风的强垂直切变,风垂直切变与 MCS 之间存在明显的正反馈效应。

综合来看,极端暴雨的天气形势及其中小尺度过程复杂,每个过程都值得深入开展研究。豫北“21·7”极端暴雨过程的持续时间和降水强度都超过北京“7·21”和“16·7”过程,产生如此极端降水的系统是怎样发展起来的?其天气背景、中尺度特征及成因是什么?都是非常具有研究价值的问题。本文拟采用常规探空、地面自动站、多普勒雷达等观测资料以及 ERA5 再分析资料,探究豫北“21·7”极端暴雨过程的特征和成因,旨在为北方极端暴雨预报预警提供参考依据。

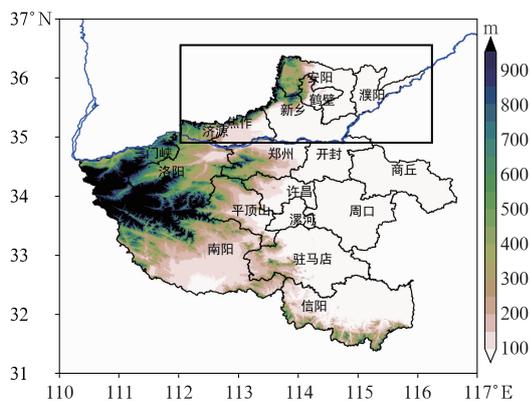


图 1 河南省行政区划及地形(填色)
(框内为豫北地区,填色区为太行山区,蓝线为黄河河道线)
Fig. 1 Administrative division of northern Henan
(box: the northern Henan, colored area: Taihang Mountains, blue line: Yellow River Channel)

1 降水极端性特征分析

文中所用降水资料源于中国气象局 CIMISS 数据库,小时降水量是指小时整点降水数据。

2021 年 7 月 17 日 08 时至 23 日 08 时(北京时,下同),豫北大部累计降水量超 250 mm,太行山区及其东侧累计降水量超 600 mm,尤其安阳、鹤壁、新乡、焦作等地的沿山地带局地超 800 mm,超过当地国家气象观测站年平均降水量(546~649 mm),其中鹤壁科创中心站累计降水量达 1122.6 mm(图 2a),接近鹤壁市年降水量极值(1393 mm)、年平均降水量(593 mm)的 2 倍;安阳、汤阴、鹤壁、淇县、卫辉、焦作、博爱、温县等国家级气象站的日降水量(20 日 20 时至 21 日 20 时)突破建站以来的历史极值。

逐日降水分析表明,17 日 08 时至 18 日 08 时豫北地区降水主要由南太行山区分散性对流降水导致的局地暴雨(图略),18—21 日降水加强(图 2b~2e):18 日 08 时至 19 日 08 时暴雨、大暴雨分布在北部和太行山区及沿山地带,辉县万仙山站降水量为 169 mm;19 日 08 时至 20 日 08 时暴雨、大暴雨分布在南部和太行山区及沿山地带,焦作温县关白庄站降水量最大为 200.5 mm;20 日 08 时至 21 日 08 时降水普遍达大暴雨量级,新乡南部出现特大暴雨,原阳县大宾站 24 h 降水量达 334 mm;21 日 08 时至 22 日 08 时为豫北最强降水时段,太行山区及沿山地带 24 h 降水量超 600 mm,鹤壁市科创中心站达 777.5 mm,远超其附近国家级气象站淇县站的日降水量极值(353 mm)。22 日 08 时至 23 日 08 时沿山地区为分散性暴雨、大暴雨(图 2f),过程趋于结束。

我国中东部地区小时降水量 ≥ 20 mm 定义为短时强降水、小时降水量 ≥ 50 mm 为极端短时强降水(俞小鼎,2013;郑永光等,2017)。图 3a 显示,18—22 日豫北多站次出现极端短时强降水:18 日 14—20 时极端短时强降水出现在安阳、濮阳两地,20 日 08 时至 21 日 08 时极端短时强降水出现在新乡市南部和东部平原地带,21 日 08 时至 22 日 08 时,极端短时强降水范围最大、强度最强,降水强度超过 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,主要分布在太行山前 30 km 左右范围内。极端短时强降水集中出现在 18 日 18—19 时、20 日 13—22 时、21 日 01—02 时、21 日 16—22 时和 22 日 03—06 时。其中,21 日下午到夜里,

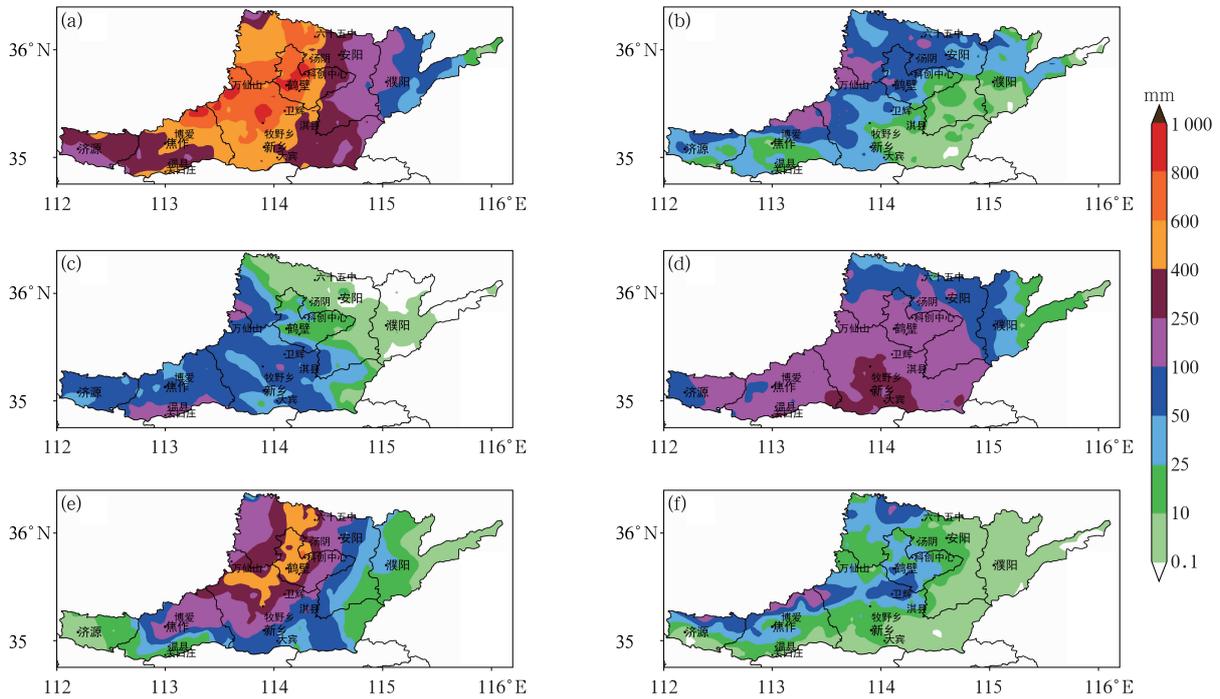


图 2 2021 年 7 月(a)豫北“21·7”过程累计降水量和(b)19 日、(c)20 日、(d)21 日、(e)22 日、(f)23 日降水量
 Fig. 2 (a) Accumulated rainfall in northern Henan during the process and (b–f) 24 h accumulated rainfall on (b) 19 July, (c) 20 July, (d) 21 July, (e) 22 July, (f) 23 July 2021

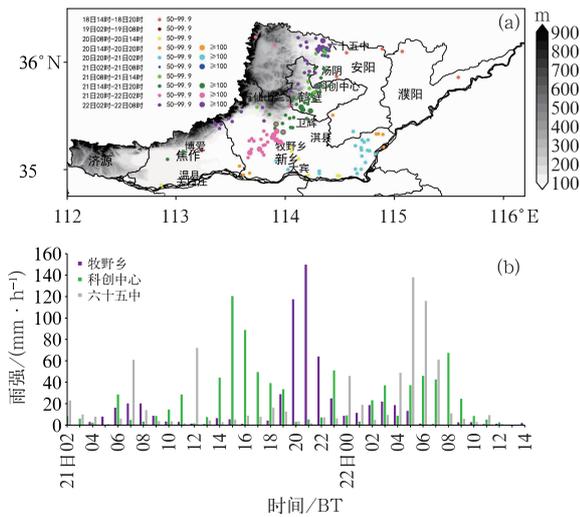


图 3 2021 年 7 月(a)18 日 14 时至 22 日 08 时豫北极端短时强降水空间分布(阴影,地形高度)和 (b)20 日 02 时至 22 日 14 时新乡牧野乡、鹤壁科创中心和安阳六十五中逐小时降水强度

Fig. 3 (a) Distribution of extreme short-time heavy precipitation every 6 h from 14:00 BT 18 to 08:00 BT 22 July (shaded, terrain height), (b) series of hourly rainfall intensity from 02:00 BT 20 to 14:00 BT 22 at Muxiyang Station of Xinxiang, Kechuangzhongxin Station of Hebi and Liushiwuzhong Station of Anyang in July 2021

极端短时强降水范围最大、强度最强。21 日下午的极端短时强降水集中出现在鹤壁西部山前, 21 日前半夜的极端短时强降水出现在新乡西部, 21 日后半夜(22 日凌晨)的短时强降水集中出现在安阳西部的山前地区, 即极端短时强降水落区具有沿山分布特征, 且表现为先自北向南移动、再向北移动的特征。选取累计降水量较大的鹤壁科创中心(1122.6 mm)、新乡牧野乡站(935.2 mm)、安阳六十五中站(889.7 mm)的小时降水进行分析, 发现鹤壁科创中心站、新乡牧野乡站、安阳六十五中站分别于 21 日 15 时、20 时、21 时和 22 日 05 时、06 时出现超过 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的极强降雨, 牧野乡站 21 日 20—21 时雨强最大, 达 $149.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 鹤壁科创中心站的雨强略弱于牧野乡站, 但先后出现 4 次 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上、1 次 $100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的强降水, 15 时最大雨强为 $120.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 安阳六十五中的雨强峰值出现时间最晚, 在 22 日 04—05 时, 为 $138 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

综合来看, 极端暴雨过程具有强降水持续时间长, 极端性强、地形作用明显等特征, 太行山沿山地区出现过程累计降水量超过当地国家气象站历史年平均降水量、日降水量突破建站以来历史极值的极端降水。过程前期极端短时强降水较分散, 20 日下

午至22日凌晨范围明显增大,强降水首先出现在新乡中东部平原,然后是鹤壁西部,其次是新乡西部,最后是安阳西部,表现出自东南向西北移动,然后在沿山地带自北向南扩展,最后又自南向北移动的趋势,最强降水时段为21日下午至夜里,山前降水雨强超 $100\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

2 极端暴雨的动力场结构和环境特征

利用高空和地面观测资料及ERA5再分析资料(时间分辨率为1h,空间分辨率为 $0.25^\circ\times 0.25^\circ$)分析豫北极端暴雨的天气形势和生成条件。

2.1 动力场的中尺度特征及对流触发

郑州“7·20”极端暴雨形成于南亚高压增强东伸、台风烟花、查帕卡西行、黄淮低涡发展及低空东南急流增强北上的过程中(苏爱芳等,2021;冉令坤等,2021;张霞等,2021;汪小康等,2022;杨浩等,2022),对比分析发现,东南急流不断向西北方向发展加强、扩散南下弱冷空气及其与太行山相互作用是豫北17—18日暴雨的主要成因,豫北19—20日的大暴雨形成、发展于郑州“7·20”特大暴雨相同背景下,而21日特大暴雨是20日强降水落区北移的结果,其形成、发展的天气形势具有以下特点:(1)21日08时(图4a₁,4b₁,4c₁),200hPa南亚高压脊继续向东北方向发展,河套槽南伸,槽上河套东部有低涡发展,低涡槽前西南/偏西风大风速轴(最大风速达 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)北移,强辐散区位于豫北东部,沿山地带为弱辐合区(图略);500hPa黄淮低涡北移至河套东部低涡对应位置,东西向切变线也北抬至冀豫交界处,豫北受切变线南侧偏南气流影响,但沿山地带为辐散区;850hPa豫北地区受两支气流影响:一支为源于日本海高压和“烟花”之间的东南气流,另一支源自“查帕卡”外围的偏南气流,两支气流在河南境内沿黄河一带加强为急流(风速 $\geq 12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)并在豫北太行山东侧汇合,与太行山地形相互作用形成强辐合,科创中心站附近中高层强辐散与低层强辐合区耦合发展形成中尺度次级环流,为豫北强降水对流系统的形成发展提供了有利条件(图4a₁,4b₁,4c₁)。(2)21日20时,200hPa河套槽前高压脊上大风速轴向西南方向伸展,安阳西部处于大风轴后发展的辐散区内(图略),对应500hPa沿山地带为强辐散区,850hPa急流向南摆动,急流出口位

于新乡西部,强降水中心由安阳、鹤壁西部南移到新乡西部,牧野乡站附近的散度和风矢量垂直剖面显示,此时由环境动力场形成的低层辐合、中高层辐散减弱(图4a₂,4b₂,4c₂),而此时降水强降却更强,可能与局地对流能量高及对流尺度的动力场结构变化有关。随后,高低空急流减弱逐渐北抬到河北境内,豫北强降水落区北移、过程结束。在整个过程中,豫北上空500hPa和850hPa等压线、等温线稀疏,说明无明显由温度变化引发的锋生作用,不同时段降水强度和落区有所差别主要是由不同时段低空辐合、中高层辐散的动力耦合作用强度差异及位置差别所导致。

此外,21日08时科创中心站和21日20时牧野乡站上空辐合区均位于700hPa以下,正垂直涡度大值区及垂直上升运动区从边界层伸展至400hPa附近,辐合、辐散中心强度分别为 $-5\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 、 $7.2\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$,高层为弱的辐合、辐散结构,且垂直散度场呈现出“+”“-”“+”“-”的耦合特征、低空动力辐合上升运动区的宽度不足100km是 β 中尺度对流系统形成发展的有利结构,尤其在1000~400hPa存在假相当位温 θ_{sc} 随高度减小的对流不稳定层结条件下(图4c₁,4c₂),对流系统更容易发展。需要关注的是,21日08时辐散层低、垂直上升运动仅伸展至400hPa附近,可能由于低空急流水平尺度小、急流与地形相互作用产生的水平辐合尺度也小造成的。张霞等(2021)曾对“21·7”河南极端强降水过程低空动力因子的平均异常度进行了分析,指出850hPa辐合平均偏离气候态超过 3σ ,但若聚焦于豫北强降水中心附近,发现21日08时沿山区域的850hPa正涡度和925hPa负散度的异常度更突出,分别为 13σ 和 15σ (图4a₃,4b₃),尤其20—23时,925hPa垂直上升速度异常度达 7σ (图略)。

根据上文的分析,强而持续的低空辐合抬升是形成极端暴雨关键动力因子。从科创中心站附近风场的垂直演变(图5a)来看,18日17时前后925hPa出现 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 超低空急流,安阳、濮阳等地出现极端短时强降水,20日14时后,整层风速较前期明显增大,伴随着中层东南气流转为偏南急流,豫北地区南部出现强降水;21日08时至22日08时,850~925hPa附近的东南急流强盛,中层偏南气流持续发展,风随高度顺时针旋转,暖平流强迫是21日豫北地区极强降水形成和发展的重要机制。21日08

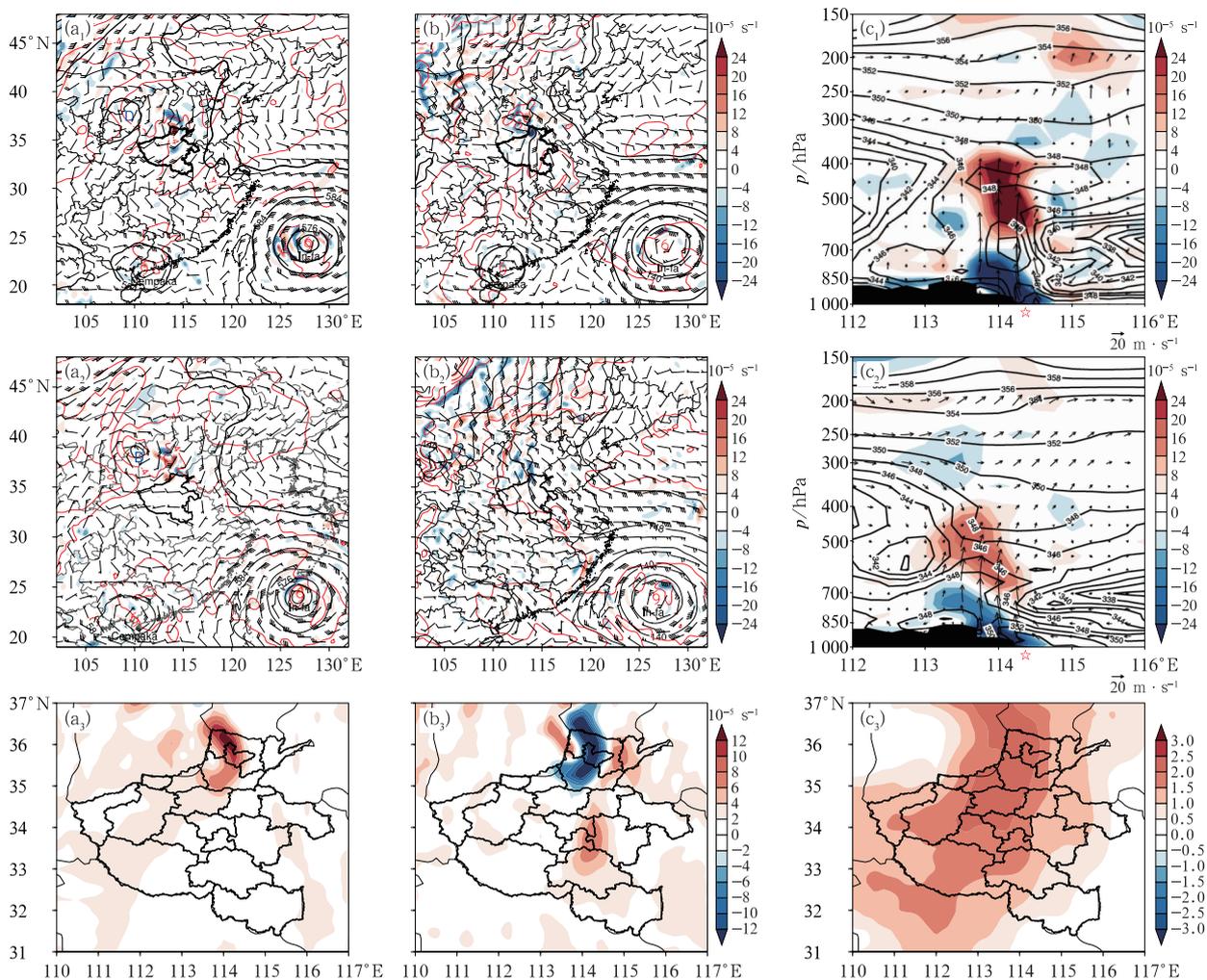


图 4 2021 年 7 月 21 日 (a₁, b₁, c₁) 08 时和 (a₂, b₂, c₂) 20 时 (a₁, a₂) 500 hPa、(b₁, b₂) 850 hPa 的天气形势 (黑线: 等高线, dagpm; 红线: 等温线, 单位: °C)、散度场 (填色) 及风场 (风羽) (☉: 台风位置), (c₁, c₂) 科创中心站附近散度 (填色)、假相当位温 θ_{se} (等值线, 单位: K) 和风矢的纬向-垂直分布 (红色五角星代表站点位置), (a₃, b₃, c₃) 21 日 08 时 (a₃) 850 hPa 涡度 (填色)、(b₃) 925 hPa 散度 (填色) 及 (c₃) PW 异常度 (填色)

Fig. 4 Synoptic charts at (a₁, a₂) 500 hPa and (b₁, b₂) 850 hPa at (a₁, b₁, c₁) 08:00 BT and (a₂, b₂, c₂) 20:00 BT 21 July (black line: geopotential height, unit: dagpm; red dashed line: isotherm, unit: °C), divergence (colored) and wind field (barb) (☉: position of typhoon); (c₁, c₂) vertical zonal distributions of divergence (colored), θ_{se} (contour, unit: K) and wind vector (arrow) along Kechuangzhongxin Station (red star: the position of station); (a₃, b₃, c₃) multiples of the standard deviation of physical quantity relative to climate state divergence: (a₃) vorticity (colored) at 850 hPa, (b₃) divergence (colored) at 925 hPa and (c₃) PW anomaly degree (colored) at 08:00 BT 21 July 2021

时低空温度平流水平分析(图 5b)显示,黄淮地区东南/偏南急流前部为强盛的暖平流带(中心值达 $70.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$),而此时 500 hPa 与 925 hPa 的差动涡度平流最大达 $26 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$ (图略),相对于微小的差动涡度平流的强迫作用,东南急流带来的宽约 60 km 的中尺度暖平流强迫在极端暴雨过

程中的作用明显,这也是 925 hPa 强辐合区较窄的原因之一。另外,21 日 14 时(图 5a)近地层东北气流灌入使豫北沿山附近形成向南的弱冷平流,冷暖平流交汇导致降水加强,尽管此时暖平流和差动涡度平流中心值分别减弱至 $44 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $11.7 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$,但由强降水带来的潜热释放通量最大

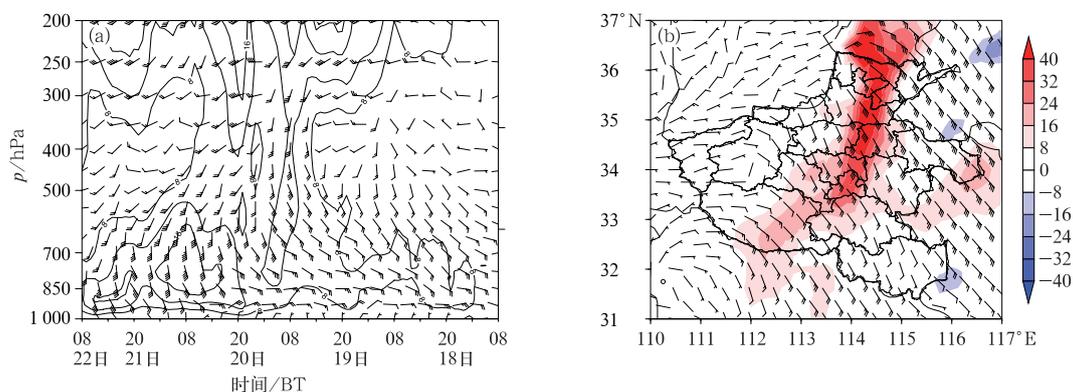


图 5 2021 年 7 月 (a)18 日 08 时至 22 日 08 时科创中心站附近的风垂直变化(黑线, $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速线)和 (b)21 日 08 时的 925 hPa 温度平流(填色, 单位: $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) 及风场(风羽)

Fig. 5 (a) Vertical variation of wind field and isotach (black line, $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) at Kechuangzhongxin Station from 08:00 BT 18 to 08:00 BT 22 July, (b) temperature advection (colored, unit: $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) and wind field (barb) at 925 hPa at 08:00 BT 21 July 2021

值从 $2 \times 10^5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 增至 $12 \times 10^5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略), 促使上升运动加强, 综合作用下降水强度进一步加强、降水效率加大。

2.2 热力环境条件特征

根据图 4c₃, 21 日 08 时河南大部水汽异常偏高, 豫北地区 PW 的气候标准差 $> 2\sigma$, 选用郑州、邢台两个探空站的探空数据计算分析极端强降水发生时的 PW 和静力稳定度特征, 发现 17 日 08 时至 20 日 08 时郑州站上空整层可降水量由 51 mm 增加至 67 mm (苏爱芳等, 2021), 20 日 14 时至 21 日 14 时整体在 62 mm 以上, 21 日 20 时升至 67 mm, 超过了北京 2012 年“7·21”和 2016 年“7·20”的 PW (田付友等, 2021), 尽管邢台站的水汽条件略差, 但大部分时次的 PW 在 52~57 mm, 尤其 21 日 20 时升至 63 mm, 说明从河南中部到河北南部的 PW 都很高, 可满足 21 日豫北强降水的需求。根据图 6 计算环境能量条件, 发现 20 日 14 时受降水影响郑州 CAPE 减小至 $91.5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、LI 为 0°C , 环境近于中性, 中性层结的饱和湿环境有利于垂直运动和 β 中尺度对流系统发展 (许焕斌和丁正平, 1997), 21 日白天郑州有出现少云天气, 高层水汽蒸发使 14 时和 20 时的 CAPE 增大至 $3070 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $3124 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, LI 分别减小至 -6.0°C 和 -6.3°C , 说明大气异常不稳定, 高的 CAPE 可为 21 日午后豫北沿山地带强降水的发生提供支持; 邢台站上空的对流不稳定条件较郑州稍弱, 但 20 日 20 时极强降水发生

前 CAPE 也高达 $2461 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、LI 为 -4.2°C , 尽管 21 日 14 时和 20 时降水发生后变为中性层结, 但也说明 21 日午后豫北强降水的发展可能存在着两种机制且为互补关系, 其一是极高的湿对流潜势环境条件下发展起来的, 另一种为在中性层结中由旺盛的垂直运动发展引发的。此外, 19 日 20 时至 22 日 08 时郑州站的 K 指数在 $38.4 \sim 39.1^{\circ}\text{C}$, 且 1000 hPa 附近假相当位温 $\theta_{sc} \geq 80^{\circ}\text{C}$ (353 K), 尤其 21 日 20 时超过 90°C ; 邢台站的 K 指数也在 34°C 以上, 21 日 20 时为 37.4°C 。需要说明的是, 整个过程中两站的对流抑制能量 CIN 几乎为 0, 加上两站的抬升凝结高度 LCL 接近地面, 使得地表水汽很易被抬升、成云致雨, 考虑到两站 20—22 日 0°C 层均在 5 km 左右, 暖云层深厚 (暖云层厚度在 4.7~5.1 km), 有利于高效率降水的发生。22 日 08 时, 郑州站的对流潜势条件仍较好, 但低空急流及动力抬升辐合区减弱、北抬到河北境内, 豫北强降水过程趋于结束。

总之, 日本海高压西伸、台风烟花、查帕卡西北行、低空急流发展北抬及异常充沛的能量和水汽条件是豫北极端暴雨的天气背景, 低空东南/偏南风急流发展形成强的暖平流强迫是引发强降水的重要机制, 太行山地形及边界层扩散南下的弱冷空气对强降水也起抬升触发作用, 沿山地带动力场的水平尺度和垂直结构具有明显的 β 中尺度特征, 偏低的 LCL、深厚的暖云层使得强降水的发生更为有利。

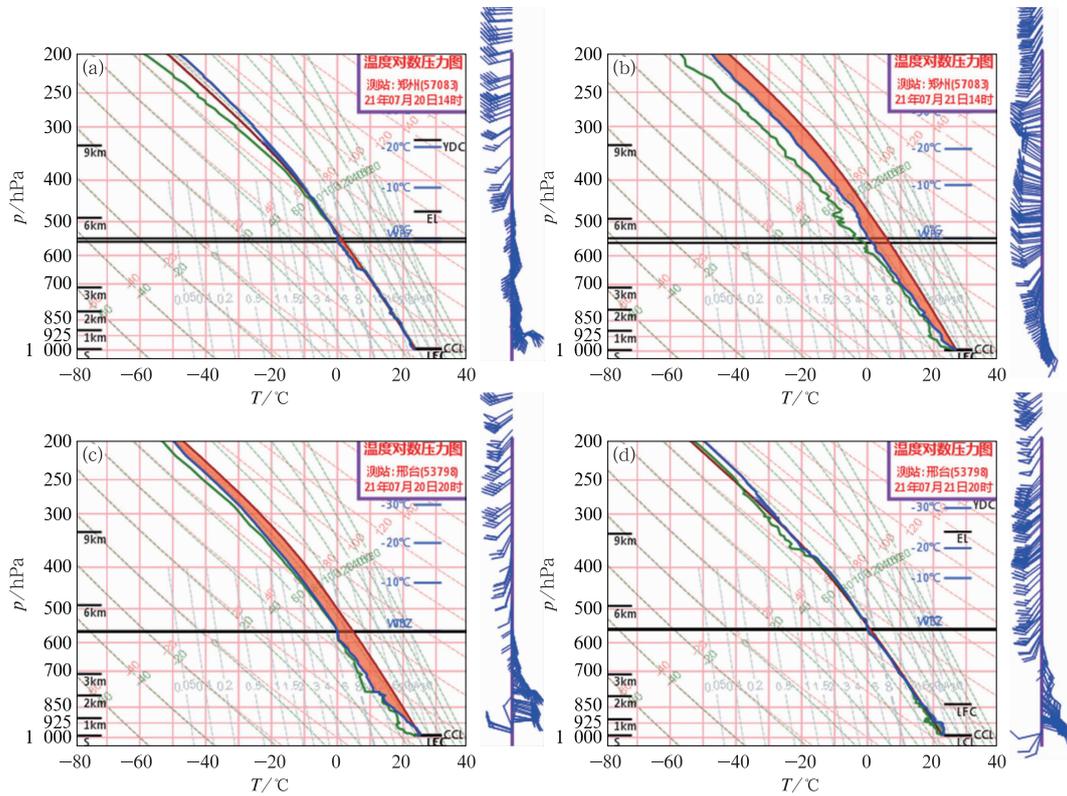


图 6 2021 年 7 月(a)20 日 14 时和(b)21 日 14 时郑州探空曲线,(c)20 日 20 时和(d)21 日 20 时邢台站探空曲线
(绿线、蓝线、红线分别表示露点温度、温度层结和状态曲线)

Fig. 6 Observational soundings of Zhengzhou at (a) 14:00 BT 20 and (b) 14:00 BT 21, Xingtai at (c) 20:00 BT 20 and (d) 20:00 BT 21 July 2021
(Green, blue, red lines indicate dew point temperature, stratification and state curves, respectively)

3 极端短时强降水对流系统的发展演变

用河南省境内雷达(雷达站位于濮阳、郑州、洛阳、商丘、平顶山)反射率拼图资料和郑州、濮阳雷达监测产品及地面加密自动站资料,对豫北极端强降水对流系统的结构、发展演变特征及极端短时强降水的触发机制进行分析。

3.1 强降水对流系统的形成发展和形态特征

豫北极端短时强降水主要出现在 20 日 13—22 时、21 日 01—02 时、21 日 16—22 时和 22 日 03—06 时,各时段强降水中尺度对流系统的形态结构和发展演变特征各有不同。

20 日 13—23 时发生的极端短时强降水主要由低涡云系外围的螺旋状 MCS 引发。20 日 08 时,郑州西部受低涡外围急流影响,螺旋式带状中尺度对

流系统(MCS)不断发展并向东北方向频散(类似于台风外围螺旋式 MCS),12:30 低涡北部东风急流内带状 MCS 发展旺盛(图 7a),13 时在原阳县北部、MCS 西端形成中心强度超过 55 dBz 的 MCS,原阳县路寨站出现雨强为 $76.6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的短时强降水。13 时后低涡云系北移,受其外围螺旋式带状 MCS 影响,15—16 时安阳滑县、新乡原阳、长垣境内,21—23 时新乡原阳县、封丘县境内间断出现分散性极端短时强降水,其中 16 时长垣县余家站降水强度最强,为 $84.7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

21 日 01—02 时极端短时强降水由南北向条状 MCS 引发。条状对流系统是 23 时前后由低涡云系外围发展的对流云组合形成的,20 日 23 时至 21 日 00 时,随着低涡切变线的北移,豫东地区低空东南急流转为偏南急流,急流轴左侧对流云发展旺盛,21 日 00 时前后在开封、许昌东部形成南北向排列的 MCS(图 7b),21 日 00—02 时随着低空急流北抬、MCS 向北收缩, $\geq 50 \text{ dBz}$ 的强降水回波不断经过新

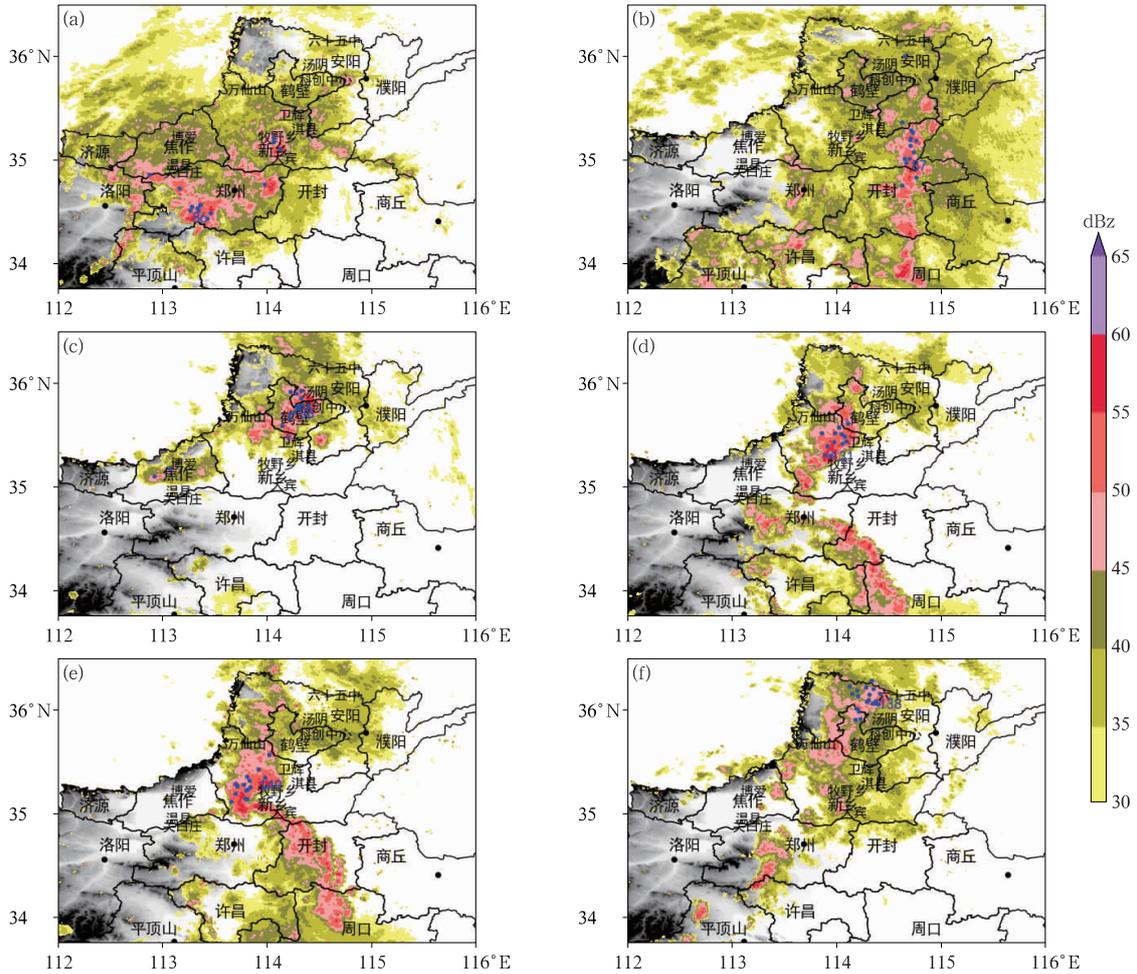


图 7 2021 年 7 月(a)20 日 12:30 和(b)21 日 00:00,(c)15:30,(d)19:30,(e)20:30,(f)22 日 04:00 的雷达组合反射率(填色)和 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的极端短时强降水(蓝点)

Fig. 7 Distribution of radar composite reflectivity (colored) and extreme short-time heavy precipitation ($\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, blue dot) at (a) 12:30 BT 20, (b) 00:00 BT 21, (c) 15:30 BT 21, (d) 19:30 BT 21, (e) 20:30 BT 21, (f) 04:00 BT 22 July 2021

乡地区东部,最强回波达 55 dBz ,在“列车效应”作用下新乡市东部封丘和长垣两县东部连续出现极端短时强降水,封丘县尹岗最强达 $88 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

21 日 16—22 时和 22 日 03—06 时,极端短时强降水由沿山发展的 MCS 造成的。21 日 13 时前后,鹤壁境内再次有对流云团形成并发展北移,14 时在鹤壁西部至安阳中部又形成一长度约 60 km 的结构紧凑的条状 MCS,其中心强度 $\geq 50 \text{ dBz}$,15:30 强度超过 60 dBz (图 7c),受其影响科创中心站出现 $120.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 强降水。15—20 时,低空偏南急流北进,沿山 MCS 向北平移,但表现出明显的后向发展特征(Bluestein and Jain, 1985),15 时 MCS 后向发展至新乡西部,牧野乡站附近的对流云

发展旺盛,中心强度 $\geq 60 \text{ dBz}$,MCS 稳定少动给该地区造成极端强降水。需要关注的是,21 日下午豫南地区有一弧状 MCS 发展北移,19:30 移至郑州至周口一带(图 7d),20—22 时其西北端与牧野乡站附近的 MCS 合并加强,21 时牧野乡站降水强度达 $149.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 7e);随后,沿山地区的 MCS 收缩北移,弧状 MCS 北移至安阳地区减弱。22 日 00 时沿山减弱向北收缩至鹤壁、安阳西部的 MCS 上再次有强度 $\geq 50 \text{ dBz}$ 对流云团发展并维持 $2 \sim 3 \text{ h}$,六十五中站 05 时、06 时小时降水强度分别达 $138.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $116.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

鹤壁科创中心站的过程累计降水量最大(1122.6 mm),最强降水出现在 21 日 15 时,雨强达

120.5 mm · h⁻¹; 新乡牧野乡站的小时雨强最强, 21 日 18 时达 149.9 mm · h⁻¹, 过程累计降水量为 935.2 mm。从雷达回波时间-高度演变(图 8)来看, 两站的雷达回波和小时降水具有相似的演变特征, 持续受到强度 ≥ 40 dBz 的强对流回波影响, 强降水系统整体表现为低质心结构。比较而言, 科创中心站受强度超 50 dBz 的回波影响频次较多, 有 11 次, 对应出现 11 次短时强降水, 且对流发展较为旺盛, 回波顶高在 9~12 km, 而新乡牧野乡站有 7 个时次受到 50 dBz 强回波影响, 对应 7 次短时强降水。在两站小时降水峰值出现时, 系统表现出相似的旺盛发展的对流云结构特征(强回波中心 ≥ 55 dBz), 但牧野乡站 50 dBz 以上强度的回波高度更高, 持续时间更长, 两站出现 ≥ 100 mm · h⁻¹ 强度降水时, ≥ 50 dBz 的强回波持续时间约 80、100 min, 且短时出现了 ≥ 55 dBz 的强中心。可见, 更加旺盛和持续的对流系统有利于降水强度的增强, 50 dBz 强降水回波的形成、持续 60 min 以上, 且伸展到 5 km 高度或许可作为小时雨强 ≥ 100 mm · h⁻¹ 的判识指标。

3.2 沿山极端强降水对流系统的成因分析

21 日下午到夜里, 极端短时强降水在沿太行山地区发展。14—17 时, 地形辐合线及其附近的长约 60 km、中心强度 ≥ 40 dBz 的条状 MCS 稳定维持在山前, 此时山前存在由东风气流在西进过程中与北方沿山南下的西北风或偏北风交汇形成的地面辐合线, 14 时濮阳雷达径向风(图 0.5° 仰角)监测显示, 在安阳、鹤壁西部沿山地带 0.8 km 左右的高度上仍可监测到边界层辐合线, 而该区域西侧山体最高

海拔高度最高在 0.5~0.8 km, 可见边界层辐合区有一定的厚度, 一方面是与地形作用形成的辐合有关, 另一方面也可能是由北方扩散南下弱冷空气或降水所致, 总体来看由地面伸展至 0.8 km 附近的边界层辐合线有利于对流系统的触发, 14 时极端短时强降水首先发生在安阳、鹤壁西部, 然后北扩, 受日变化影响, 随后 22°C 等温线西移南压、山前偏北风南侵, 导致对流系统后向传播发展特征明显, 17 时极端强降水系统南移至新乡西部, 这一阶段 15 时极端短时强降水范围最大, 17 时落区最偏南, 此时引导气流为偏南风, 系统表现为北传减弱的移动态势(图 9a₁, 9b₁)。17—18 时, MCS 后向发展到新乡西部, 牧野乡站附近出现强度 ≥ 60 dBz 强回波并维持(图略), 造成该区域持续强降水, 其中 18—19 时和 19—20 时局地雨强分别达 130.1 mm · h⁻¹ 和 131.1 mm · h⁻¹; 与此同时, 郑州至周口地区有一弧状对流系统形成并发展北移, 其西北端与新乡西部的对流系统合并(见图 9a₂, 9a₃), 速度场中, 20 时郑州附近为一致的偏南风, 同时新乡东北部辐合与图 9a₂ 近地面辐合位置接近, 偏北风继续加强南压, 与偏南风在新乡附近辐合加强(图 9b₂, 9b₃), 对即对流层低层南北两系统的碰并, 在碰并区附近形成强烈的中尺度辐合抬升运动, 配合局地强降水产生地面冷池(冷堆)的中尺度强迫抬升效应, 辐合高度伸展至 2 km 以上, 导致对流系统强烈发展, 从而产生极端短时强降水(牧野站 20—21 时小时雨量达 149.9 mm, 图 9b₃)。随后弧状对流系统北移至安阳地区并减弱为层云。22 日 00 时后新乡西部沿山地带仍有对流系统发展北移, 凌晨受山前发展的带

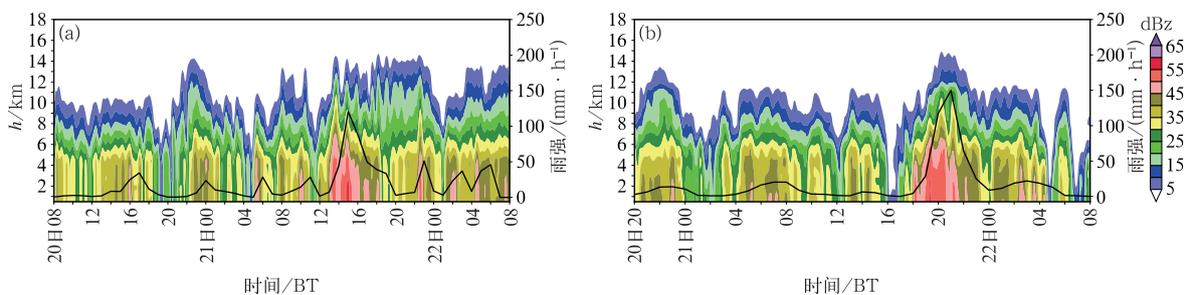


图 8 2021 年 7 月(a)20 日 08 时至 22 日 08 时鹤壁科创中心站, (b)20 日 20 时至 22 日 08 时新乡牧野乡站雷达拼图反射率因子(填色)和小时降水量(黑线)的时间演变

Fig. 8 The vertical profile of radar reflectivity factor (colored) and time series of hourly rainfall intensity (black line) at (a) Kechuangzhongxin Station from 08:00 BT 20 to 08:00 BT 22 July and (b) Muyexiang Station from 20:00 BT 20 to 08:00 BT 22 July 2021

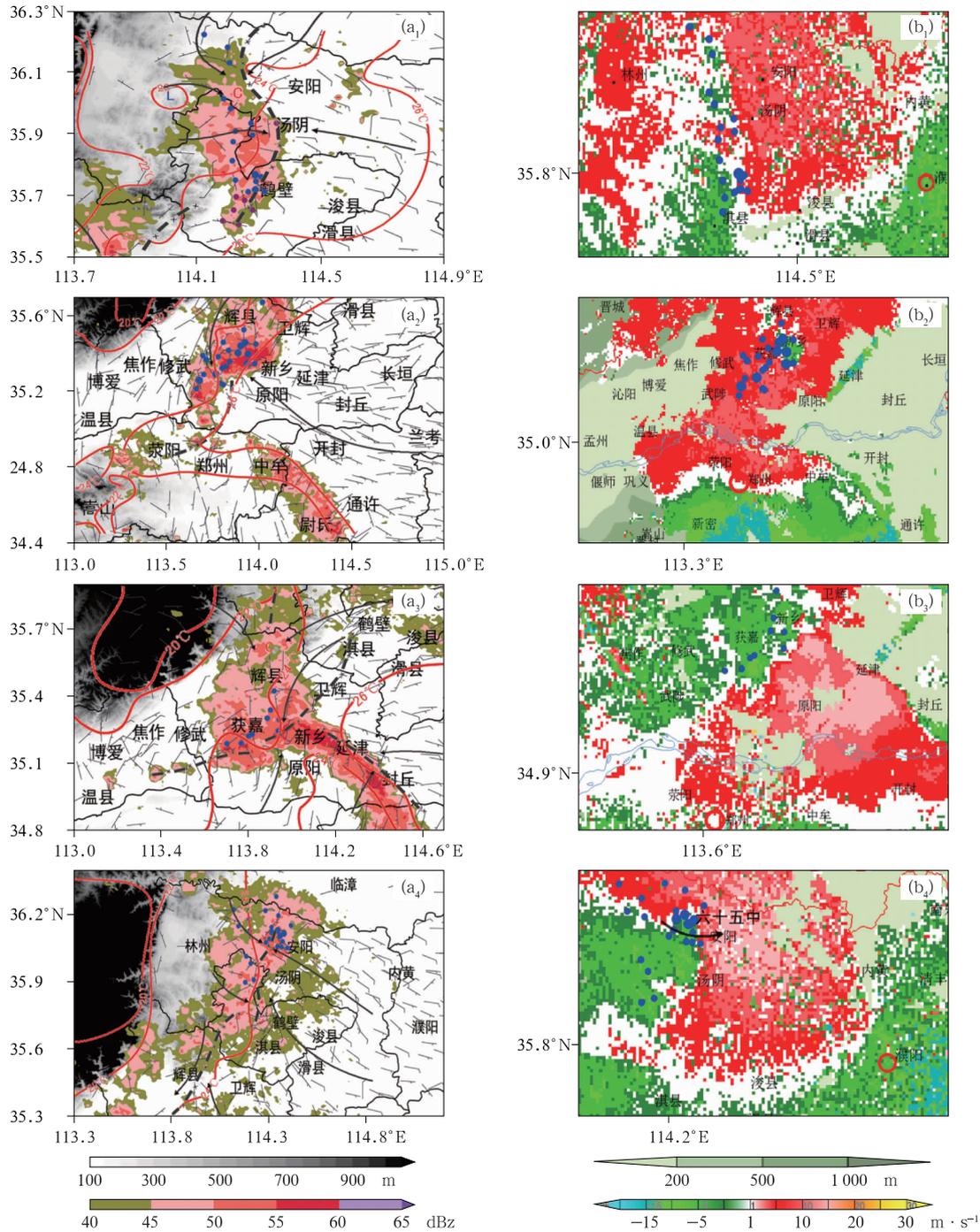


图 9 2021 年 7 月 21—22 日极端暴雨过程中典型时刻(a)雷达组合反射率因子、(b)雷达径向速度及地形与同时次地面自动站要素、未来 1 h 雨量综合图

(a₁, b₁) 21 日 14:00, (a₂, b₂) 20:00, (a₃, b₃) 21:00, (a₄, b₄) 22 日 04:30

(图 9b₁, 9b₄: 濮阳雷达 0.5° 仰角, 图 9b₂, 9b₃: 郑州雷达 1.5° 和 0.5° 仰角; 图 9a₁ 中 ● 为 16 时未来 1 h 雨量, 图 9a₄, 9b₄ 为 22 日 04 时未来 1 h 雨量, 其他为该时次; ●: 50 mm ≤ 1 h 雨量 < 100 mm, ●: 1 h 雨量 ≥ 100 mm, —: 等温线, —x—x: 地面辐合线, —>: 近地面流线, ○: 雷达站位置)

Fig. 9 (a) The radar composite reflectivity factor and (b) the radial velocity at a typical time during the extreme rainstorm terrain and simultaneous ground automatic station elements, future 1 h rainfall

(a₁, b₁) 14:00 BT 21, (a₂, b₂) 20:00 BT 21, (a₃, b₃) 21:00 BT 21, (a₄, b₄) 04:30 BT 22 July 2021

(Figs. 9b₁ and 9b₄ are the 0.5° elevation angle of Puyang Radar, Figs. 9b₂ and 9b₃ are 1.5° and 0.5° elevation angles of Zhengzhou Radar, respectively; in Fig. 9a₁ ● is the future 1 h rainfall at 16:00 BT, Figs. 9a₄, 9b₄ are the next 1 h rainfall at 04:00 BT 22, others for indicated time; ●: 50 mm ≤ R_{1h} < 100 mm, ●: R_{1h} ≥ 100 mm,

—: the isotherm, —x—x: convergence line, —>: surface streamline, ○: radar station)

状 MCS 影响,鹤壁、安阳再次出现强降水,地面局地气旋式环流的发展导致降水增强(04—05 时六十五中站小时雨量达 138 mm,图 9a₁,9b₁)。

综合来看,豫北太行山地形的绕流作用使得近地面东风气流在太行山东侧形成新的局地气旋式环流,在与边界层系统相互作用过程中激发新对流及对流系统的后向发展,使得极端强降水落区主要位于太行山前 30~50 km 范围内,这与王丛梅等(2017)研究结论一致。另外值得注意的是,在高温高湿的环境及有利的大尺度辐合抬升背景下,豫北中尺度地形对地面流场的阻挡扰流激发的中尺度气旋式环流、冷池效应及对流系统合并过程是形成 100 mm·h⁻¹以上的极端短时强降水的重要因子,需要重点关注。

4 与华北“16·7”极端暴雨过程的对比

“16·7”与“21·7”极端暴雨过程的对比(表 1)表明,“16·7”过程的主要降水时间在 2016 年 7 月 19 日 00 时至 21 日 08 时,极端暴雨范围大,强降水集中在太行山东麓,局地过程降水达 400~600 mm,河北井陘(379.7 mm)等国家级气象站的日降雨量突破历史极值,从过程累计降水量和影响范围来看,过程强于“96·8”过程、次于“63·8”过程,过程中太行山迎风坡处的降水强度约为西部高原和东部平原的 3~4 倍(徐国强等,1999;符娇兰等,2017;赵思雄等,

2018),豫北的强降水集中时间在 19 日 07 时到 21 日 08 时,安阳西部沿山地带超 400 mm,林州市东马鞍山 24 h 降水量最大达 703 mm(超过安阳地区年平均降雨量 582 mm)、过程累计降水量为 727 mm,安阳马家村站降水最强,雨强为 137.8 mm·h⁻¹(栗晗等,2018);而“21·7”极端暴雨过程的强降水主要在河南境内,且其持续时间、累计降水量、24 h 降水量及小时降水强度明显超过“16·7”过程,两次过程的地形降水特征都很明显,“21·7”过程沿山地带鹤壁科创中心站的降水强度为其东部平原地区的 5 倍左右,其地形降水增幅作用略高于“16·7”过程。从天气形势、影响系统及环境物理量来看,两次过程形成于不同的大尺度天气形势下,尤其低涡的深厚程度及中空动力场结构存在明显不同,“16·7”过程海上无台风活动、低涡深厚、地面有明显气旋发展,中空东南和西南急流为主要影响系统,黄淮低涡生成于黄淮西部,然后沿太行山自南向北移动,CAPE 值略小,而“21·7”过程中海面上有台风活动,低空偏东/东南急流为主要影响系统,地面无明显气旋发展,黄淮低涡形成于豫东并先向西南方向移动、填塞,然后在豫西再次形成并缓慢北移,其附近对流不稳定能量较高,且具有更低的 LCL 及更加深厚的暖云层厚度;两次过程的相似点,低空动力场均异常偏强、水汽条件相当,太行山地形作用明显,由强降水引发的“冷堆”效应对极端短时强降水有促进作用(符娇兰等,2017;栗晗等,2018;赵思雄等,2018;张雅乐和俞小鼎,2021;苏爱芳等,2021)。

表 1 华北“16·7”极端暴雨过程与“21·7”河南暴雨过程的对比

Table 1 Comparative analysis of the July 2016 and the July 2021 extreme torrential rains

暴雨过程	特大暴雨特征	天气形势、影响系统	物理量特征及极端性
“16·7”	河南、河北、北京西部沿山地带,安阳林州市东马鞍山过程降水量最大、为 732 mm;最大小时降水量河北赞皇县站 139.7 mm,河南安阳 137.8 mm	南亚高压东伸(东脊点在 105°E)、西太平洋副高西伸北抬,近海无台风活动;高空槽发展东移,500 hPa 槽前有 $\geq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 西南急流发展;深厚黄淮低涡及地面气旋沿太行山东北移,低空西南/东南急流东移、发展北抬,地面强降水冷池及中尺度锋生起对流触发作用,迎风坡降水为平原地区的 3~4 倍	影响系统均较气候平均场异常偏强,850 hPa 涡度、散度标准差分别为 2.7σ 、 3.6σ ;PW 为 60~70 mm,标准差为 3~4 σ ,郑州、邢台探空站最大 CAPE 分别为 $1531 \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1362 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$
“21·7”	河南北中部,鹤壁科创中心站过程降水量最大,为 1122.6 mm,最大小时降水量郑州国家站 201.9 mm、新乡牧野乡站 149.9 mm	南亚高压东北伸(东脊点在 107°E),日本海高压西伸,台风烟花、查帕卡西行;500 hPa 无明显低槽、急流发展,中低层黄淮低涡在豫东附近发展-南移-西行-填塞-再发展-北移,低空偏东/东南风急流先西进后北抬,地面强降水冷池及中尺度锋生起对流触发作用,地形迎风坡降水为平原地区的 4~5 倍	南亚高压、海上副高位置异常偏北,低空急流异常偏强,850 hPa 散度标准差超过 2σ ;PW 为 60~70 mm,与“16·7”过程相当;郑州和邢台探空站最大 CAPE 分别为 2070 、 $2461 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$

总之,两次过程虽发生于不同的形势背景下,但

其能量、动力和水汽条件都存在气候异常性特征。

“21·7”过程的不稳定和湿对流潜势条件略高于“16·7”过程,低空急流强度与“16·7”过程基本相当,虽本次过程中 850 hPa 涡度异常值高达 13σ ,但这可能是采用不同背景数据导致,也可能是出于更强的中尺度反馈机制,如果该机制成立,则可以推测“21·7”过程中由高的湿对流潜势所引发的降水要明显多于“16·7”过程,这是今后在极端暴雨预报预警中需要关注的问题。

5 结论与讨论

本文利用探空、地面自动气象站、S 波段多普勒雷达等观测资料及 ERA5 再分析产品,对“21·7”豫北极端暴雨的降水特征、极端降水成因等进行了分析研究,得到如下主要结论:

(1) 豫北“21·7”特大暴雨过程具有持续时间长、小时降水量大、极端性强及地形影响明显等特征,极端强降水主要分布在太行山沿山 30 km 范围内。

(2) 极端暴雨过程发生于相对稳定的大尺度天气形势下,在日本海高压西伸及台风烟花、查帕卡西北行背景下,黄淮低涡外围加强北上的东南急流/偏南急流为强降水的发生提供了异常充足的水汽、能量条件,对流层中低层暖湿平流强迫、叠加地形影响的强动力辐合抬升作用及低空弱冷空气扩散南下是强降水发生的重要机制。

(3) 在低空急流的作用下,特大暴雨过程发生时豫北具有较有利于对流性强降水形成的环境条件,具体表现为高 CAPE、异常偏高的 PW、明显偏低的 LCL、深厚的暖云层以及强烈发展的低空急流;低空急流与太行山特殊地形的相互作用有利于对流系统触发和再生,从而有利于强降水对流系统的组织和维持。极端短时强降水发生期间近地层处于高温高湿的环境,有利于 CAPE 的发展。

(4) 强盛的低空急流不仅起对流触发作用,而且对 MCS 上对流云的传播起引导作用。雷达分析表明,不同阶段极端短时强降水(小时降水量 ≥ 50 mm)对流系统的形态结构和发展演变特征不同,但从雷达回波的垂直分布来看,系统均具有“低质心”特征,质心强度 ≥ 55 dBz,且 ≥ 50 dBz 强回波垂直伸展至 5 km 以上、持续时间 1 h 以上。强降水对流系

统在太行山前 30 km 左右范围内的后向发展特征明显,一方面与地面西行偏东风/东北风在太行山绕流作用下形成的地形辐合线不断南伸有关,另一方面也与强降水冷池效应促使山前偏北风进一步发展南下有关。

(5) 豫北“21·7”过程与“16·7”过程相比,两次过程发生于不同的形势背景下,但其能量、动力和水汽条件都存在气候异常性特征,“16·7”过程的低涡系统更加深厚,形成后自南向北移动,发展北上的中低空西南和东南急流共同为极端暴雨的发生提供有力的水汽、能量输送及抬升触发作用,而“21·7”过程的低涡主要位于低层,低空东南/偏东急流是影响系统,且湿对流潜势条件略高于“16·7”过程。

参考文献

- 陈明轩,王迎春,肖现,等,2013. 北京“7·21”暴雨雨团的发生和传播机理[J]. 气象学报,71(4):569-592. Chen M X, Wang Y C, Xiao X, et al, 2013. Initiation and propagation mechanism for the Beijing extreme heavy rainstorm clusters on 21 July 2012[J]. Acta Meteor Sin, 71(4):569-592(in Chinese).
- 谌芸,孙军,徐珺,等,2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考[J]. 气象,38(10):1255-1266. Chen Y, Sun J, Xu J, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part I: observation and thinking[J]. Meteor Mon, 38(10):1255-1266(in Chinese).
- 丁一汇,李吉顺,孙淑清,等,1980. 影响华北夏季暴雨的几类天气尺度系统分析[C]//中国科学院大气物理研究所集刊(第 9 号),暴雨及强对流天气的研究. 北京:科学出版社:1-13. Ding Y H, Li J S, Sun S Q, et al, 1980. Analysis of several synoptic scale systems affecting summer rainstorms in North China[C]//Journal of Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences(No. 9), Research on Rainstorm and Severe Convection. Beijing: Science Press: 1-13(in Chinese).
- 符娇兰,马学款,陈涛,等,2017. “16·7”华北极端强降水特征及天气学成因分析[J]. 气象,43(5):528-539. Fu J L, Ma X K, Chen T, et al, 2017. Characteristics and synoptic mechanism of the July 2016 extreme precipitation event in North China[J]. Meteor Mon, 43(5):528-539(in Chinese).
- 栗哈,王新敏,张霞,等,2018. 河南“7·19”豫北罕见特大暴雨降水特征及极端性分析[J]. 气象,44(9):1136-1147. Li H, Wang X M, Zhang X, et al, 2018. Analysis on extremity and characteristics of the 19 July 2016 severe torrential rain in the North of Henan Province[J]. Meteor Mon, 44(9):1136-1147(in Chinese).
- 廖菲,胡娅敏,洪延超,2009. 地形动力作用对华北暴雨和云系影响的数值研究[J]. 高原气象,28(1):115-126. Liao F, Hu Y M, Hong Y C, 2009. Numerical study for the influences of orographic

- dynamic on cloud and precipitation in North China[J]. Plateau Meteor, 28(1):115-126(in Chinese).
- 冉令坤,李舒文,周玉淑,等,2021. 2021年河南“7·20”极端暴雨动力、热力和水汽特征观测分析[J]. 大气科学, 45(6):1366-1383. Ran L K, Li S W, Zhou Y S, et al, 2021. Observational analysis of the dynamic, thermal, and water vapor characteristics of the “7·20” extreme rainstorm event in Henan Province, 2021[J]. Chin J Atmos Sci, 45(6):1366-1383(in Chinese).
- 苏爱芳,吕晓娜,崔丽曼,等,2021. 郑州“7·20”极端暴雨天气的基本观测分析[J]. 暴雨灾害, 40(5):445-454. Su A F, Lü X N, Cui L M, et al, 2021. The basic observational analysis of “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou[J]. Torr Rain Dis, 40(5):445-454(in Chinese).
- 孙继松,何娜,王国荣,等,2012. “7·21”北京大暴雨系统的结构演变特征及成因初探[J]. 暴雨灾害, 31(3):218-225. Sun J S, He N, Wang G R, et al, 2012. Preliminary analysis on synoptic configuration evolution and mechanism of a torrential rain occurring in Beijing on 21 July 2012[J]. Torr Rain Dis, 31(3):218-225(in Chinese).
- 孙继松,杨波,2008. 地形与城市环流共同作用下的 β 中尺度暴雨[J]. 大气科学, 32(6):1352-1364. Sun J S, Yang B, 2008. Meso- β scale torrential rain affected by topography and the urban circulation[J]. Chin J Atmos Sci, 32(6):1352-1364(in Chinese).
- 孙建华,张小玲,卫捷,等,2005. 20世纪90年代华北大暴雨过程特征的分析研究[J]. 气候与环境研究, 10(3):492-506. Sun J H, Zhang X L, Wei J, et al, 2005. A study on severe heavy rainfall in North China during the 1990s[J]. Climatic Environ Res, 10(3):492-506(in Chinese).
- 孙建华,赵思雄,傅慎明,等,2013. 2012年7月21日北京特大暴雨的多尺度特征[J]. 大气科学, 37(3):705-718. Sun J H, Zhao S X, Fu S M, et al, 2013. Multi-scale characteristics of record heavy rainfall over Beijing Area on July 21, 2012[J]. Chin J Atmos Sci, 37(3):705-718(in Chinese).
- 孙军,谌芸,杨舒楠,等,2012. 北京721特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考[J]. 气象, 38(10):1267-1277. Sun J, Chen Y, Yang S N, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part II: preliminary causation analysis and thinking [J]. Meteor Mon, 38(10):1267-1277(in Chinese).
- 陶诗言,1980. 中国之暴雨[M]. 北京:科学出版社:225. Tao S Y, 1980. Rainstorms in China[M]. Beijing: Science Press: 225 (in Chinese).
- 陶祖钰,成秋影,1981. 行星边界层流场和暴雨预报[G]//北方天气文集(1). 北京:北京大学出版社:33-45. Tao Z Y, Cheng Q Y, 1981. Planetary boundary layer flow field and rainstorm prediction[G]// Northern Weather Anthology (1). Beijing: Peking University Press:33-45(in Chinese).
- 田付友,杨舒楠,郑永光,等,2021. 北京地区两次极端特大暴雨过程中短时强降水环境条件对比分析[J]. 暴雨灾害, 40(1):27-36. Tian F Y, Yang S N, Zheng Y G, et al, 2021. Comparison of short-duration heavy rainfall environmental conditions during two extreme torrential rainfall events over Beijing Area[J]. Torr Rain Dis, 40(1):27-36(in Chinese).
- 王丛梅,俞小鼎,李芷霞,等,2017. 太行山地形影响下的极端短时强降水分析[J]. 气象, 43(4):425-433. Wang C M, Yu X D, Li Z X, et al, 2017. Investigation of extreme flash-rain events on the impact of Taihang Mountain[J]. Meteor Mon, 43(4):425-433 (in Chinese).
- 汪小东,崔春光,王婧羽,等,2022. “21·7”河南特大暴雨水汽和急流特征诊断分析[J]. 气象, 48(5):533-544. Wang X K, Cui C G, Wang J Y, et al, 2022. Diagnostic analysis on water vapor and jet characteristics of the July 2021 severe torrential rain in Henan Province[J]. Meteor Mon, 48(5):533-544(in Chinese).
- 吴庆梅,刘卓,王国荣,等,2015. 一次华北暴雨过程中边界层东风活动及作用[J]. 应用气象学报, 26(2):160-172. Wu Q M, Liu Z, Wang G R, et al, 2015. The influence of boundary layer east wind on a North China rainstorm[J]. J Appl Meteor Sci, 26(2):160-172(in Chinese).
- 徐国强,胡欣,苏华,1999. 太行山地形对“96·8”暴雨影响的数值试验研究[J]. 气象, 25(7):3-7. Xu G Q, Hu X, Su H, 1999. Simulation study of Taihang Mountain terrain effects on heavy rain in August 1996[J]. Meteor Mon, 25(7):3-7(in Chinese).
- 许焕斌,丁正平,1997. 湿中性垂直运动条件和中- β 系统的形成[J]. 气象学报, 55(5):602-610. Xu H B, Ding Z P, 1997. The neutral condition of moist vertical motion and the formation of meso- β system[J]. Acta Meteor Sin, 55(5):602-610(in Chinese).
- 闫冠华,李巧萍,李瑞义,2015. 太行山地形对华北暴雨影响的数值模拟试验[J]. 南京信息工程大学学报:自然科学版, 7(4):351-358. Yan G H, Li Q P, Li R Y, 2015. Numerical simulation for terrain effects of Taihang Mountain on heavy rainfall over North China[J]. J Nanjing Univ Inf Sci Technol: Nat Sci Ed, 7(4):351-358(in Chinese).
- 杨浩,周文,汪小东,等,2022. “21·7”河南特大暴雨降水特征及极端性分析[J]. 气象, 48(5):571-579. Yang H, Zhou W, Wang X K, et al, 2022. Analysis on extremity and characteristics of the “21·7” severe torrential rain in Henan Province[J]. Meteor Mon, 48(5):571-579(in Chinese).
- 俞小鼎,2012. 2012年7月21日北京特大暴雨成因分析[J]. 气象, 38(11):1313-1329. Yu X D, 2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012[J]. Meteor Mon, 38(11):1313-1329(in Chinese).
- 俞小鼎,2013. 短时强降水临近预报的思路与方法[J]. 暴雨灾害, 32(3):202-209. Yu X D, 2013. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain[J]. Torr Rain Dis, 32(3):202-209(in Chinese).
- 章翠红,夏茹娣,王咏青,2018. 地形、冷池流出和暖湿空气相互作用造成北京一次局地强降水的观测分析[J]. 大气科学学报, 41(2):207-219. Zhang C H, Xia R D, Wang Y Q, 2018. Observational analysis of a local heavy rainfall in Beijing caused by ter-

- rain, cold pool outflow and warm moist air interactions[J]. *Trans Atmos Sci*, 41(2):207-219(in Chinese).
- 张文龙, 崔晓鹏, 2012. 近 50a 华北暴雨研究主要进展[J]. *暴雨灾害*, 31(4):384-391. Zhang W L, Cui X P, 2012. Main progress of torrential rain researches in North China during the past 50 years[J]. *Torr Rain Dis*, 31(4):384-391(in Chinese).
- 张霞, 杨慧, 王新敏, 等, 2021. “21·7”河南极端强降水特征及环流异常性分析[J]. *大气科学学报*, 44(5):672-687. Zhang X, Yang H, Wang X M, et al, 2021. Analysis on characteristic and abnormality of atmospheric circulations of the July 2021 extreme precipitation in Henan[J]. *Trans Atmos Sci*, 44(5):672-687(in Chinese).
- 赵思雄, 孙建华, 鲁蓉, 等, 2018. “7·20”华北和北京大暴雨过程的分析[J]. *气象*, 44(3):351-360. Zhao S X, Sun J H, Lu R, et al, 2018. Analysis of the 20 July 2016 unusual heavy rainfall in North China and Beijing[J]. *Meteor Mon*, 44(3):351-360(in Chinese).
- 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎, 2017. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. *气象*, 43(6):641-652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D, 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting[J]. *Meteor Mon*, 43(6):641-652(in Chinese).
- Bluestein H B, Jain M H, 1985. Formation of mesoscale lines of precipitation; severe squall lines in Oklahoma during the spring[J]. *J Atmos Sci*, 42(16):1711-1732.
- Fu J L, Zhang F Q, Hewson T D, 2020. Object-oriented composite analysis of warm-sector rainfall in North China[J]. *Mon Wea Rev*, 148(7):2719-2735.
- Zhong L Z, Mu R, Zhang D L, et al, 2015. An observational analysis of warm-sector rainfall characteristics associated with the 21 July 2012 Beijing extreme rainfall event[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 120(8):3274-3291.

(本文责编:俞卫平)