

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.

河南“7·19”豫北罕见特大暴雨降水特征 及极端性分析^{*}

栗 哈^{1,2} 王新敏^{1,2} 张 霞² 吕林宜² 徐文明²

1 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室,郑州 450003

2 河南省气象台,郑州 450003

提 要: 2016年7月18—20日受低涡气旋影响,河南省出现了一次全省大范围的强降水过程(“7·19”),其中豫北部分地区出现特大暴雨,最大过程雨量达732 mm。本文基于自动气象站降水、地面风场观测资料、雷达组合反射率资料、常规气象探空资料和 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ ECMWF再分析资料,对“7·19”过程的降水特征、大尺度环流特征和中尺度系统进行了分析,同时也对比分析了“7·19”过程和1980—2016年以来发生在豫北太行山东麓的71个强降水过程(所选区域至少有一个站点的日降水量大于100 mm)的物理量场特征。结果表明:太行山地形和低涡气旋背景下有利的大尺度环流为“7·19”特大暴雨提供了充沛的水汽和辐合抬升条件;中尺度地形辐合线的生成、发展和维持、多个地面中尺度气旋移动造成的列车效应是导致局地特大暴雨的主要原因,对比不同强降水过程的物理量场显示“7·19”的动力因子具有明显的极端性特征。

关键词: 特大暴雨,低涡,气旋,太行山,地形辐合线,极端性

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.09.002

Analysis on Extremity and Characteristics of the 19 July 2016 Severe Torrential Rain in the North of Henan Province

LI Han^{1,2} WANG Xinmin^{1,2} ZHANG Xia² LÜ Linyi² XU Wenming²

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

2 Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003

Abstract: An extremely severe rainfall event occurred in Henan in 18–20 July 2016 (the “7·19” rainstorm) under the influence of vortex and cyclone. The precipitation was mainly concentrated in northern Henan, and the maximum accumulated rainfall was 732 mm observed at Dongmaan Station in Anyang. This paper analyzes the fundamental features of precipitation, large-scale circulation and mesoscale system of the “7·19” rainstorm based on the hourly rainfall and surface wind data of automatic weather stations, the composite reflectivity data of SA radar, the conventional sounding data and ECMWF (European Centre of Medium-Range Weather Forecasts) reanalysis data. At the same time, this paper also analyzes the physical quantity properties of 71 extreme rain events, which are defined as precipitation $\geq 100 \text{ mm} \cdot (24 \text{ h})^{-1}$ at any representative weather station within selected areas. These severe rainfall events took place in the east of Taihang Mountain in northern Henan. The results show that the topography of Taihang Mountain and favorable large-scale circulation under the background of vortex and cyclone provided abundant water vapor and better convergent lifting conditions for the “7·19” rainstorm. The train

^{*} 河南省气象局重点项目(Z201601)及河南省科技攻关项目(182102310757 和 172102310463)共同资助

2018年1月10日收稿; 2018年5月23日收修定稿

第一作者:栗哈,主要从事天气分析及预报工作. Email:hanli_1005@163.com

通信作者:王新敏,主要从事天气预报技术和暴雨机理研究. Email:995378392@qq.com

effect produced by the generation, development and maintenance of mesoscale terrain convergence lines and the movement of multiple surface cyclones are the main cause for the “7·19” severe torrential rain in northern Henan. Compared to the physical characteristics of various extreme rain events, the dynamic factors of “7·19” have obvious features of extremity.

Key words: severe torrential rain, vortex, cyclone, Taihang Mountain, terrain convergence line, extremity

引 言

华北暴雨具有很明显的区域特征,丁一汇等(1980)研究了华北暴雨的天气形势指出,低涡、暖切变线和低槽冷锋是造成华北暴雨的3种主要天气系统,而这些系统的相互叠加配合则是暴雨发生发展的主要原因。周鸣盛(1993)针对1954—1983年发生在我国北方的50次区域大暴雨的天气尺度环流特征进行了分析指出可将副热带高压作为暴雨过程的主导系统,结合直接诱发暴雨发生的低槽和低层形势对暴雨环流过程进行分类。孙建华等(2005)对1990—1999年造成华北夏季特大暴雨过程的天气形势进行了研究并将其分为台风与低槽、低涡与西风槽等5种类型。

极端暴雨过程不仅对社会和人民构成巨大威胁,也给降水预报带来了很大的难度。谌芸等(2012)、孙军等(2012)对2012年7月21日发生在北京的一次特大暴雨过程(“7·21”)进行了分析指出,“7·21”的极端性发生在高层辐散、中低层低涡切变和地面辐合线等系统耦合的背景下,水汽含量及相关物理量的异常偏强可作为判断极端降水的重要因子,同时也指出此次过程突发性强、影响系统不易分辨,造成模式和预报员对此次降水的预报能力都偏弱。杨博雷等(2016)针对“7·21”过程中低涡系统的演变的湿位涡特征展开了分析并指出在不考虑稳定度影响时,低层的非绝热过程引起的湿位涡制造与低涡发展有着很好的正相关。孙继松等(2015)对2006—2013年发生在北京地区的10次极端暴雨事件进行了对比分析,结果表明低空偏东气流的地形强迫作用是影响暴雨中心分布的原因之一。

地形对暴雨的强度和落区也有着不可忽视的作用。丁一汇等(1978)研究了1975年8月上旬发生在河南省的一次持续性强暴雨指出此次过程的暴雨落区主要发生在与东风气流正交的山脉迎风面,而降水的最大中心则出现在三面环山的喇叭口地形处。王宁等(2014)基于WRF模式对“7·21”过程

进行了数值模拟并开展了地形敏感性试验,结果表明局部地形的改变能够影响暴雨中心的分布和强度。闫冠华等(2015)利用区域气候模式RegCM3对华北地区1996年夏季降水进行了试验并模拟了太行山脉地形高度变化对降水的影响,结果指出对于不同形态的暴雨过程,地形的影响也不尽相同。王宇虹等(2015)利用GRAPES_Meso模式对2012年7月21—22日发生在北京地区附近的一次暴雨过程进行了地形及水汽敏感性模拟分析,结果表明水汽条件较小的变化,也会导致水汽输送的明显差异,从而造成降水量显著的改变。王丛梅等(2017)针对2015年8月2日和2011年8月9日两种不同天气系统背景下发生在太行山东麓的短时强降水过程开展了研究,结果表明太行山地形通过增强辐合上升运动、增大垂直风切变使雷暴下山加强。

2016年7月18—20日,河南省出现了一次全省大范围的强降水过程(简称“7·19”),其中豫北安阳地区出现罕见特大暴雨。据河南省民政厅救灾处提供的信息:全省多处河水暴涨、山洪暴发、城市内涝,部分乡镇电力、交通、通讯中断,玉米、花生、蔬菜等农作物大面积严重积水,灾害造成167万人受灾,其中因灾死亡17人、失踪9人。针对此次过程的研究也已经有所开展,符娇兰等(2017)分析了华北地区的降水特点和天气学成因并指出此次过程表现出明显的阶段特征,第一阶段为高空槽前偏东风导致的地形强降水,第二阶段为黄淮气旋北侧螺旋雨带造成的强降水。雷蕾等(2017)对于此次过程中低涡发展的演变机制进行了研究,结果表明强降水与低涡发展的正反馈过程是这次华北暴雨得以长时间维持的重要机制之一。赵思雄等(2018)分析了此次过程中有利于暴雨发生的诸多因素指出,高低空系统的耦合以及明显的中低纬度系统的相互作用是造成此次过程大尺度强迫持续时间长、累计降水量较大的主要原因。王毅等(2018)也从中期预报的角度分析了集合预报对此次过程的预报效果,指出欧洲集合预报在7月16日前后对降雨区及强度的预报出现了明显转折,原因是大尺度影响天气系统的预报

发生了转折性变化。

对于“7·19”过程,各家数值预报模式以及结合预报员经验的主观预报对于此次降水极端性的估计都存在严重的不足,本文意在通过探讨“7·19”过程中极端天气的成因为特殊天气系统和特殊地形的背景下极端暴雨预报提供预报思路和方法。

1 降水特征

1.1 降水概况

2016 年 7 月 18—20 日,受低涡气旋的共同影响,河南大部分地区出现暴雨,其中安阳市出现罕见特大暴雨,全省过程平均降水量为 76 mm,过程降雨量最大值出现在安阳林州市东马鞍 732 mm,超过了林州市常年的平均降水量(649 mm),另外安阳县的东水和上庄也分别出现 500 mm 以上的降水(图 1a)。此次降水过程的范围也较广,河南省全省范围内 2604 个雨量观测站中达到暴雨量级以上的测站有 1653 站,其中暴雨 1047 站、大暴雨 550 站、特大暴雨 56 站。最大小时雨强的区域分布显示安阳西部部分地区和郑州局部地区小时雨强 $> 100 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,安阳县马家村和横岭村分别达 137.8 和 109.8 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 1b)。

对比“7·19”和历史上河南省的几次著名强降水过程(表 1),从过程的累计降水量的最大值来看,“7·19”仅次于著名的“75·8”(1975 年 8 月 4—8 日),与其他三次强降水过程的差距并不大。但由于“7·19”的主要发生时段仅为两天,其日最大降水量远超 1963、1982 和 1996 年的三次强降水过程,仅略逊于“75·8”。

1.2 局部地形的影响

已有不少学者针对地形对暴雨的增幅作用开展了研究(雷蕾等,2017;Ntwali et al,2016;刘冀彦

等,2013;Flesch and Reuter,2012)。图 2a 给出了此次过程累计降水量 $> 250 \text{ mm}$ 的站点及海拔高度分布,从中可以看出大部分累计降水量超过 250 mm 的站点分布在豫北太行山东麓邻近地区,也有个别站点分布在西南部伏牛山山区,极个别站点分布在平原。其中 $> 500 \text{ mm}$ 的强降水中心(东马鞍、东水、上庄等)也均位于安阳地区西部,且站点海拔均大于 300 m。对比林州市同一纬度地区的地形和降水分布可以看出,林州附近靠近太行山东侧的累计降水量远超过地势较低的东部平原地区,而林州西部高山地区的降水量也远小于太行山的迎风坡一侧(图 2b)。从林州地区所处地形也可以看出(图 3 中 53889 站所示),除林州西部太行山脉的影响以外,林州的南部和北部地区也分别分布着 500~1000 m 海拔的山脉,构成向东开口的喇叭口地形特征,由此造成的喇叭口效应和地形强迫绕流作用导致豫北地区在偏东气流的影响下易受地面中尺度辐合线的影响,从而导致在相同环境条件下,林州地区地形对降水有着明显的增幅作用。

1.3 集中降水时段

此外,该过程的主要降水时段也较为集中。从图 4a 可以看出,此次过程中累计降水量较大的豫西南和豫北地区的强降水主要发生在 19 日 08—20 时,结合图 4c~4e 的站点小时降水序列来看,在 19 日 20 时安阳东马鞍山、东水站和南阳双龙站的降水已基本趋于结束,其中东马鞍山在强降水时段的小时雨量连续 10 个时次达 40 mm 以上,最大超过 90 mm,东水站除 19 日 14 时雨强稍弱以外,其他时次也连续出现 30 mm 以上的小时雨强,最大小时雨强达 70 mm,南阳双龙站的降水雨强相对较弱,最大小时雨强在 50 mm 左右,但主要降水时段也集中在 7 h 内。从 19 日 20 时至 20 日 08 时的累计降水量(图 4b)和信阳鸡公山站的小时降水序列来看(图 4f),此次过程中豫东及豫东南的降水相对于豫

表 1 “7·19”与河南历史上几次强降水过程对比

Table 1 Comparison between the 19 July heavy rain and several other extreme rain events in Henan

时间/年.月.日	累计降水量最大值/mm	日最大降水量/mm(月.日)	全省平均降水量/mm
2016.7.18—20	732	703(7.19)	80
1963.8.2—8	699	253(8.3)	199
1975.8.4—8	1631	755(8.7)	163
1982.7.28—8.5	666	265(8.1)	169
1996.7.28—8.6	438	249(8.3)	135

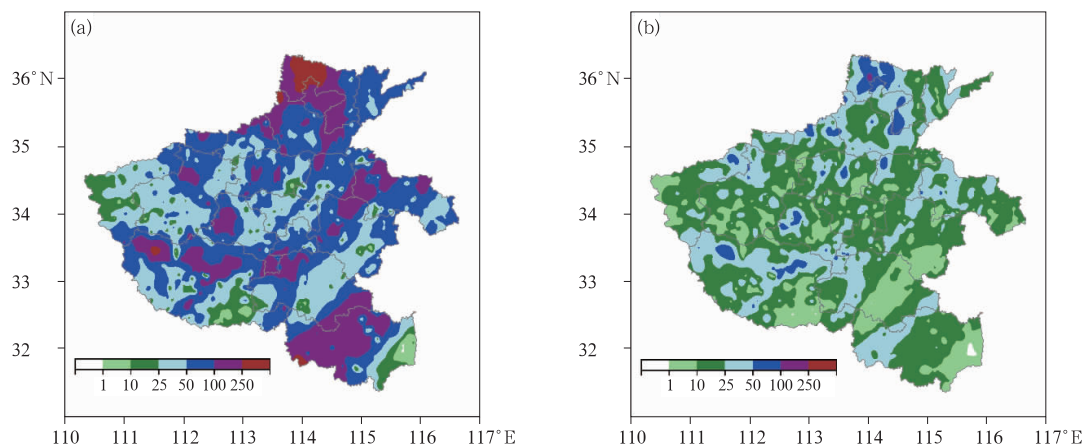


图1 2016年7月18日20时至20日20时(a)过程累计降水量(单位: mm),
(b)过程最大小时雨强(单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)

Fig. 1 Accumulated rainfall (a, unit: mm) and maximum hourly rain intensity (b, unit: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)
from 20:00 BT 18 to 20:00 BT 20 July 2016

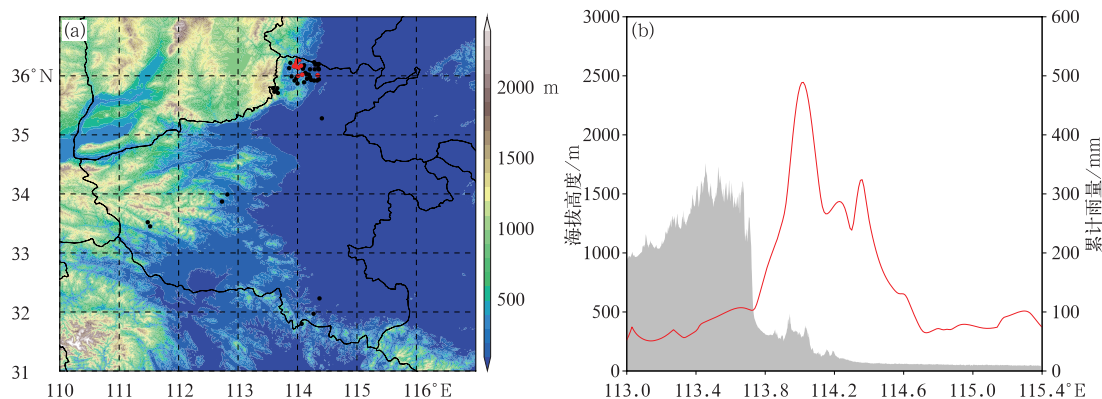


图2 (a)过程累计雨量 >250 mm(黑色)及 >400 mm(红色)的站点分布,
(b)沿林州 36.07°N 海拔高度(阴影)及过程累计雨量(红线)剖面

Fig. 2 (a) Distribution of stations with rainfall more than 250 mm (black),
(b) cross-section of accumulated rainfall (red line) at 36.07°N along Linzhou

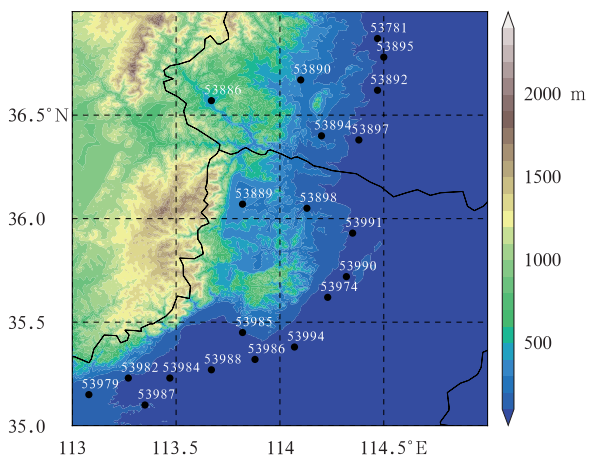


图3 所选区域及站点

Fig. 3 Selected region and stations

北地区发生较晚,且降水强度也相对较弱,其中鸡公山站的最大小时降雨量在 40 mm 左右,大部分时段则 <30 mm。从以上观测站点的数据可以看出,此次过程的降水效率较高,短时间内的降水造成受灾地区灾情严重,且豫北地区的强降水与东部、东南部的降水也展现出不同的特征。

2 低涡背景下大尺度环流特征

本文利用实况探空资料及 ECMWF 再分析资料的 200 和 700 hPa 风场数据分析了影响此次过程的高空急流和低涡的发展情况(图 5)。从 700 hPa 流场来看(图 5 流线),18 日 20 时位于河套地区

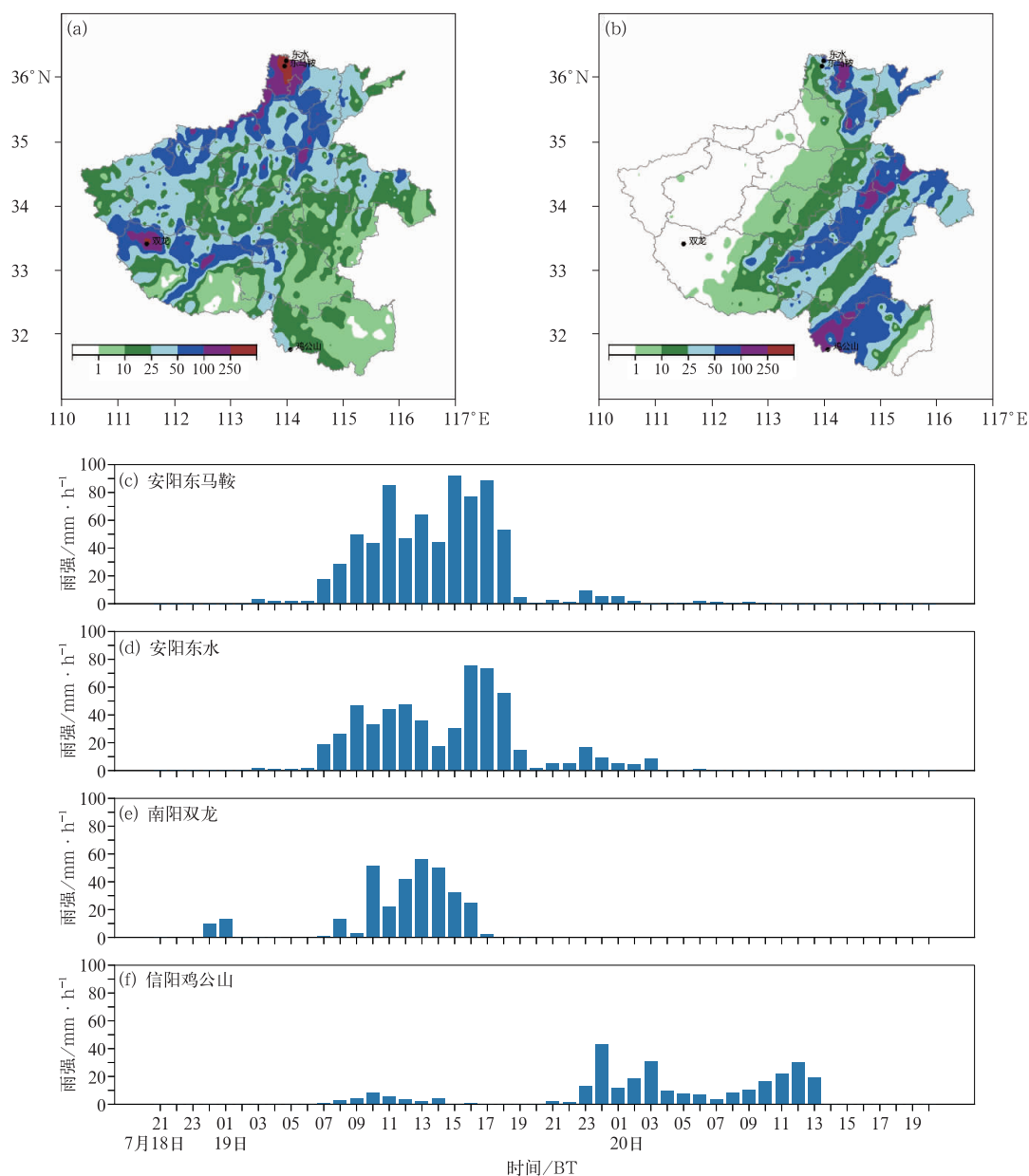


图4 2016年7月19日(a)08—20时,(b)20时至20日08时累计降水量(单位:mm);
(c)安阳东马鞍,(d)安阳东水,(e)南阳双龙,(f)信阳鸡公山小时降水量序列

Fig. 4 Accumulated rainfall (a) from 08:00 BT to 20:00 BT 19 July,
(b) from 20:00 BT 19 to 08:00 BT 20 July 2016 (unit: mm), and time series of hourly
rainfall at (c) Dongmaoan Station in Anyang, (d) Dongshui Station in Anyang,
(e) Shuanglong Station in Nanyang, (f) Jigong Mountain Station in Xinyang

(河套低涡)及四川地区东部(西南涡)分别有低涡逐渐形成,此时河南省位于两低涡东侧的偏南气流里,从风速来看此时偏南气流的风速相对较弱(约 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),随后,两个低涡分别沿西北—东南和西南—东北路径向河南省方向移动,至19日14时河套低涡已位于河南省西部地区上空,其东北侧风场流速加强至 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,该东南急流与豫北地

区太行山东麓山脉走向近乎垂直,其配合地形的抬升和辐合作用为豫北强降水过程提供了较好的动力条件,同时向东北方向移动的西南涡也已位于湖北省西部地区上空,其前侧的西南急流增强至约 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,这也为“7·19”过程中水汽通道的建立提供了有利条件,两低涡的相互配合是造成豫北地区19日白天主要降水时段发生的原因之一。至

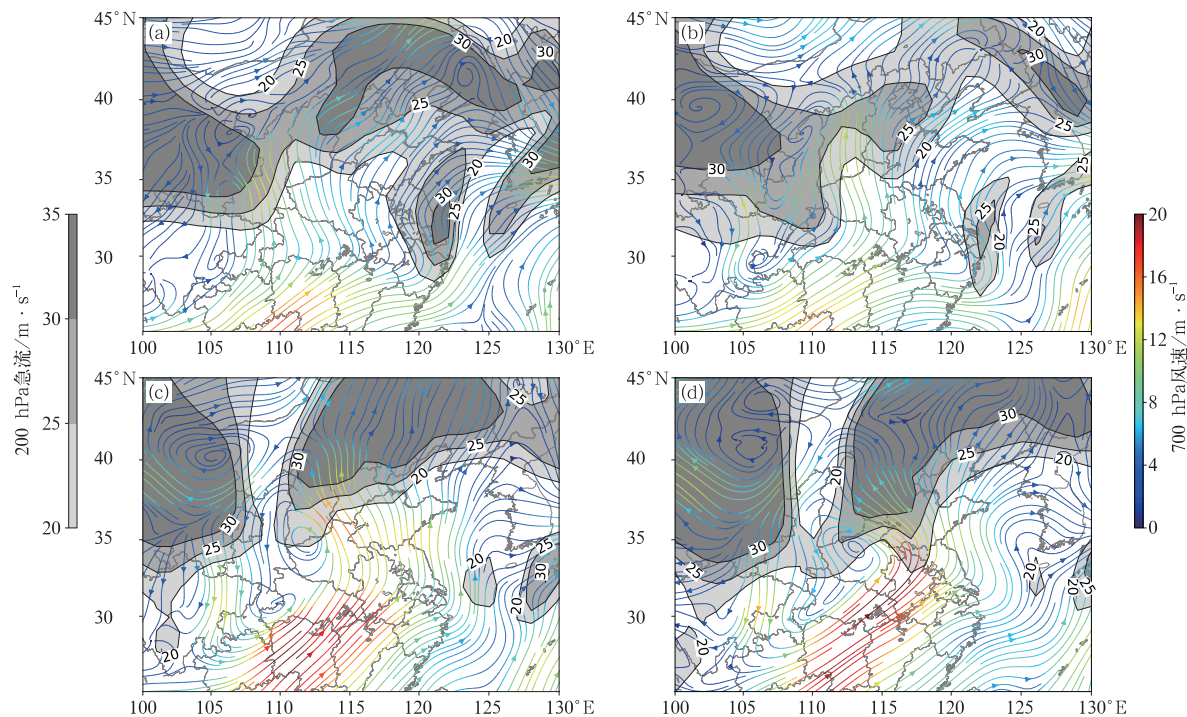


图 5 2016 年 7 月(a)18 日 20 时,(b)19 日 02 时,(c)19 日 14 时,(d)19 日 20 时 700 hPa 流场(彩色流线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)及 200 hPa 急流区(阴影,急流风速 $>20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 5 Jet streme (colored streamlines, unit; $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 700 hPa and wind speed at 200 hPa at (a) 20:00 BT 18, (b) 02:00 BT 19, (c) 14:00 BT 19, and (d) 20:00 BT 19 July 2016 (Shaded area indicates the 200 hPa wind speed larger than $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

19 日 20 时,两个低涡逐渐合并位于河南省中部地区。

同时,从 200 hPa 急流的发展情况来看(图 5 阴影区),在河套及以西地区高空一直存在一支较强的西北急流,随着高空槽的逐渐加深,在河南省的北侧(高空槽前)有一支高空西南急流逐渐建立并加强,而河南省的北部地区刚好位于该急流轴入口区的右侧即对应高空槽前辐散区。同时,在高空槽底部即两支急流过渡区存在一个弱风速区,因此从沿急流轴的风速梯度来看,该区域也同时出现了风速的辐散。

因此,从高低空风场的演变来看,高空急流及风速梯度的逐渐建立导致高空辐散加强和低空低涡逐渐东移合并增强两者相耦合,该动力机制配合豫北地区的地形作用为强降水区提供了有利的动力抬升条件,同时低层急流的发展也为该区域对流不稳定的建立提供了充足的暖湿空气(表 2)。

3 中尺度系统分析

较大的雨强和强降水长时间的维持是造成此次

表 2 高低层影响系统

Table 2 Main systems at each level

层次/hPa	影响系统
200	低槽、高空分流区
500	低槽、低涡、偏北急流(图略)
700	河套低涡、西南涡、切变、西南急流、东南急流
850 和 925	低涡、切变、西南急流、东南急流、偏东急流(图略)

豫北特大暴雨的主要原因,而这些都与中尺度对流系统的发展、移动和维持有关。本节基于郑州、三门峡、濮阳、商丘、驻马店、南阳六部新一代多普勒天气雷达观测结果组成覆盖河南省区域的组合反射率数据,及地面自动气象站观测风场和海平面气压场,对“7·19”过程中的中尺度影响系统进行分析。

从海平面气压场上来看(图 6a~6d 蓝色线条),四川盆地至黄淮之间有暖性地面倒槽存在,地面中尺度气旋逐渐形成并向东北方向移动,在 19 日 17 时(图 6c),地面中尺度气旋移动至河南省西南部地区,中心气压低于 995 hPa,并于 20 时移至豫北地区。

从雷达组合反射率和地面风场来看,从 19 日凌晨开始,豫北地区由偏北风逐渐转为偏东风,同时配

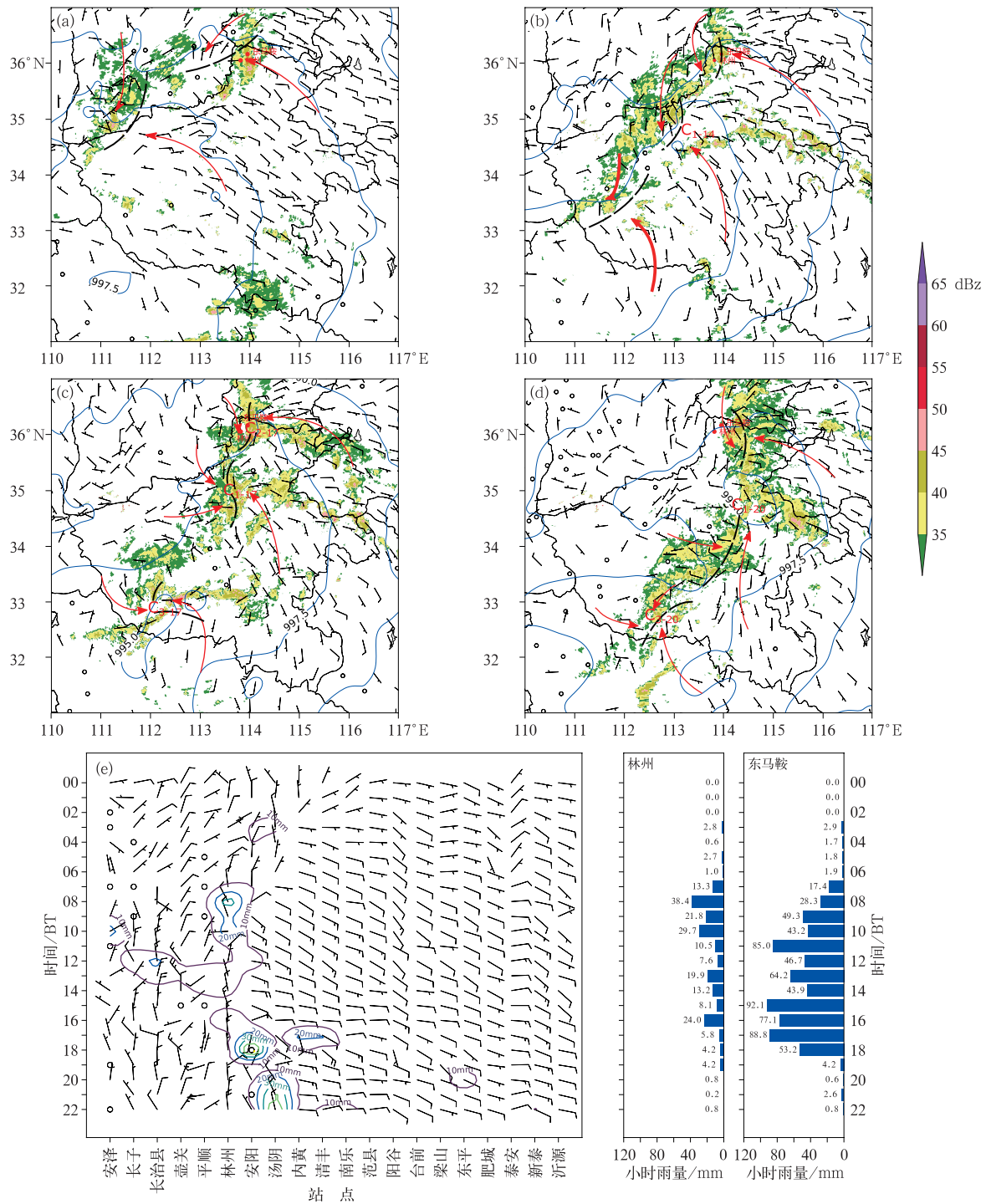


图6 2016年7月19日(a)10时,(b)14时,(c)17时,(d)20时组合反射率(填色)

叠加地面观测风场和海平面气压场(单位:hPa)

(红色箭头和黑色虚线分别代表风向和辐合线,红色字母C为地面中尺度气旋中心),

(e)沿林州 36.07°N 纬向附近各站地面风和小时降水(单位:mm,等值线>10 mm)剖面图
及林州和东马鞍单站小时雨量柱状图

Fig. 6 Composite reflectivity (colored) overlaid to surface wind field and sea level pressure (unit: hPa) at (a) 10:00 BT, (b) 14:00 BT, (c) 17:00 BT, and (d) 20:00 BT 19 July 2016, (e) the zonal and hourly cross-section of rainfall and surface wind at 36.07°N and hourly rainfall series at Linzhou Station and Dongmaan Station

合太行山地形的阻挡作用,于19日02时有地形辐合线逐渐形成,初始阶段辐合风速相对较弱,约 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。07时辐合线有所加强,风速加大到 $4\sim 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 并一直维持,同时10时的组合反射率也显示在该地区已有强回波区(组合反射率中心大于 45 dBz)的形成(图6a)。从14时地面风场来看,在沿黄地区(图6b中C1所示)逐渐有地面中尺度气旋形成,豫西南地区有偏北风与东南风形成地面辐合线,豫北地区辐合线继续维持,且地面风速也继续加强至 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从组合反射率上也可以看出在河南省的西北部和西南部分别有中尺度对流系统发展(图6b)。从17时的组合反射率来看,在河南省的北部、沿黄一带及西南部地区均有明显的中尺度回波带形成,对应地面风场均有明显的中尺度气旋辐合中心(图6c中C1、C2、C3所示),其中河南省西南部南阳地区的气旋中心气压低于 995 hPa 。至20时豫北地区地面辐合线继续维持并略微东移,沿黄地区的C1中尺度气旋中心气压加强至 995 hPa 以下,C3中尺度气旋也逐渐东移影响南阳东部地区。

图6e给出了沿林州地区(36.07°N)纬向方向各站点的地面风和林州、东马鞍山小时雨量的时间分布,从中可以看出,在19日07—16时,林州地区由偏北风转为偏东风和偏北风的辐合且风力也逐渐增强(偏东风和偏北风分别在09和14时达 8 和 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),而在此期间林州的小时雨强最大值达 38.4 mm (08时),在09、10、13、16时也分别达到或接近 20 mm 。在16时以后,随着地面中尺度气旋逐渐向东北方向移动,豫北地区的地面辐合线也逐渐东移至安阳、汤阴等地,两地分别在18和22时均出现超过 40 mm 的小时降水。此外,从与林州相近略偏东的东马鞍山小时雨量来看,其小时雨强较大(超过 $30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$)的时次也均配合较强的地面辐合。

结合分钟级降水资料和加密站风场资料来看(图略),豫北地区在19日07:00—18:30均为地面辐合线影响时段,累计降水量达 674.7 mm ,14:10地面中尺度气旋东北移,并与地面辐合线结合,其中12:25—18:30为地面辐合线和地面中尺度气旋共同影响时段,累计降水量达 402.5 mm ,在此之后地面辐合线逐渐东移。综上所述,“7·19”豫北地区的特大暴雨的发生与地面辐合线的发展和长时间维持及地面中尺度气旋的移动有关。

4 极端性分析

上文已经对比了“7·19”和历史上发生在河南省的几次强降水过程(表1),从日降水量来看,此次降水过程仅次于著名的“75·8”特大暴雨,下面利用ECMWF再分析资料对“7·19”过程的物理量场特征进行分析,同时,为了表征降水过程中物理量场的极端性,本文也选取1981—2010年作为历史气候态,计算了“7·19”过程中各时次相应物理量相对于气候态标准差的倍数(图7、图8)。

4.1 “7·19”物理场特征

从19日08时的水汽条件来看, 850 hPa 的水汽通量散度在河南省北部地区仍为正值,在河南省中部有弱的水汽辐合区。从整层可降水量来看,河南省大部分地区可达 $50\sim 70\text{ mm}$,平均较气候态标准差偏强 $4\sim 5$ 倍,说明该区域整层的水汽较充沛。由图5、图6可知,19日08时左右,河套低涡与西南涡在河南省西部开始合并,河南省北部主要受低涡北侧偏东气流的影响,由地形强迫产生地面辐合并伴有中尺度对流系统的发展。从 850 hPa 涡度可以看出(图7c)此时河南省中部一带较气候态标准差偏强 2.7 倍,并在其西北侧和西南侧分别存在涡度大值区,从 700 hPa 的垂直速度来看(图7d),异常偏强值出现在河南省北部与山西省交界地区,最强接近 $-2\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$,较气候态标准差偏大强 9 倍左右,可见太行山东麓对低涡北侧偏东气流的强迫抬升作用明显,为豫北地区强降水的初始阶段提供了有利的抬升条件。

随着低涡系统的逐渐合并北移,19日20时 850 hPa 的水汽通量散度在河南省北部与山西省的交界处形成一个负中心区(图略),中心值较气候态偏强 3.6 倍,说明低层水汽在此区域出现了较明显的辐合。 850 hPa 涡度在河南省东北部存在一个大值区达 $15\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$,相对气候态具有显著的正异常,配合19日20时的 700 hPa 流场来看(图5b),此区域位于低涡东北侧,由此造成河南省东部、东北部及河北省南部地区的 700 hPa 垂直速度明显加大。

雷蕾等(2017)对此次过程中低涡的移动发展研究指出,高空槽异常加深与低空暖平流的正反馈作用诱发了河南省西北部的新生气旋并使其向东北方向移动。从“7·19”过程最有利 850 hPa 涡度场的

分布情况来看(图 8c), 涡度大值区也呈东北西南向分布, 与低涡的移动路径一致。过程最大垂直速度场也有着相似的分布情况(图 8d), 但相对于涡度大值区的分布略偏北, 即此次过程中最大垂直速度的区域主要位于低涡外围, 特别是低涡北侧的偏东气流中。从过程最有利水汽条件来看, 在河南省西北部向北至河北省中部沿太行山地区, 存在 850 hPa 水汽通量散度的负值区(图 8a), 说明在此区域内受低涡北上和地形阻挡的共同作用出现了较有利的低层水汽辐合, 同时也配合较大的整层可降水量

(图 8b)。综上所述, 低涡北侧的偏东气流与河南省北部地区的地形作用相互配合, 造成此区域强的垂直上升运动, 低涡前侧的西南和东南急流也为该区域提供了有利的水汽通道, 以上这些因素的综合作用最终导致此次豫北地区特大暴雨的发生。

4.2 历史强降水过程物理场特征对比

为了客观地对比“7·19”豫北特大暴雨与历史上发生在同区域的降水过程之间的特征差异, 本文基于1980—2016年的国家自动站历史观测雨量资

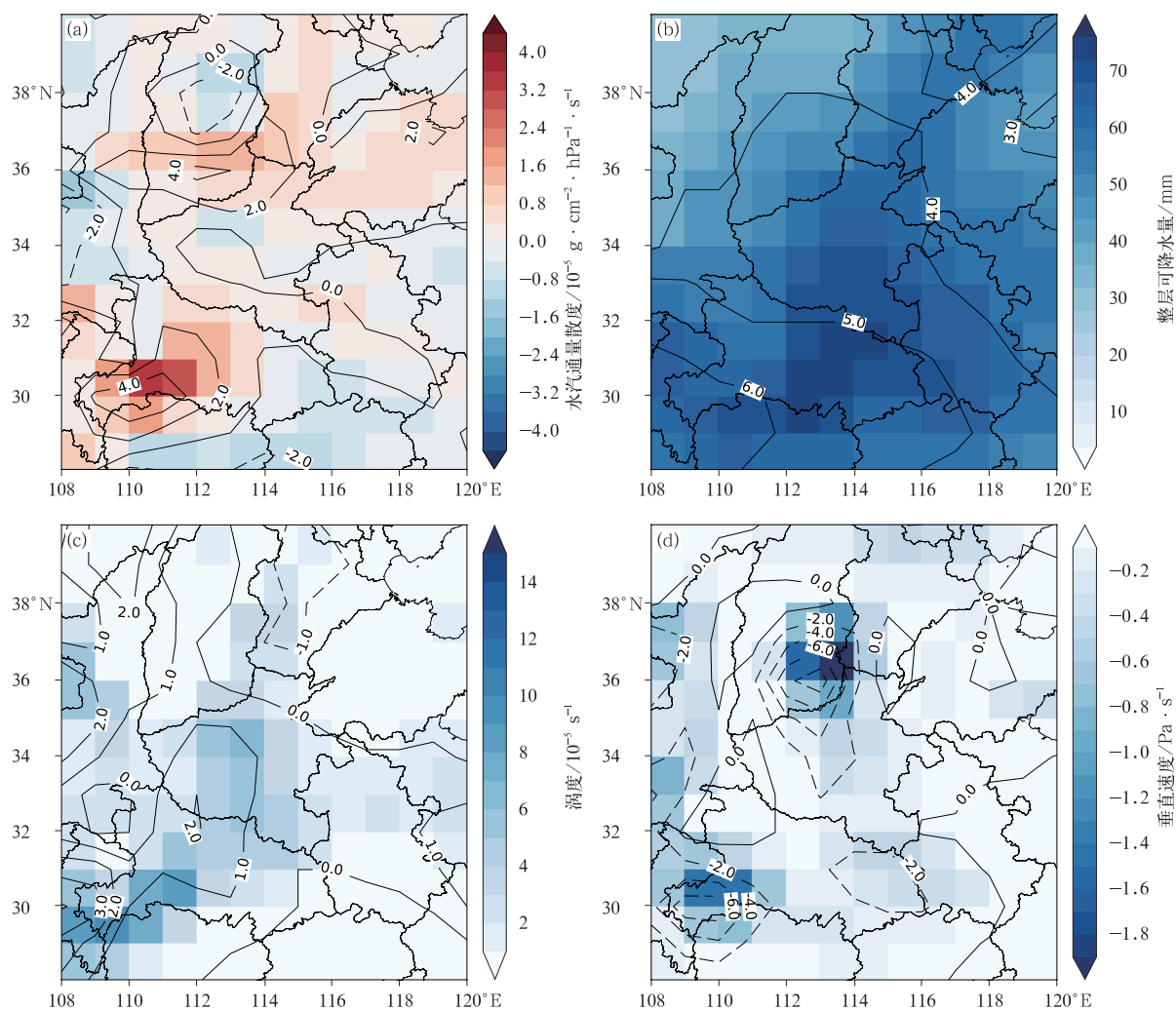


图7 2016年7月19日08时(a)850 hPa水汽通量散度,(b)整层可降水量,
(c)850 hPa涡度,(d)700 hPa垂直速度

(填色为物理量值,等值线为物理量相对于历史气候态标准差的倍数)

Fig. 7 (a) Water vapor flux divergence at 850 hPa, (b) whole-layer precipitable water, (c) vorticity at 850 hPa, and (d) vertical velocity at 700 hPa at 08:00 BT 19 July 2016

(Shaded areas are various physical values, contour is multiples of the standard deviation of physical quantity relative to climate state)

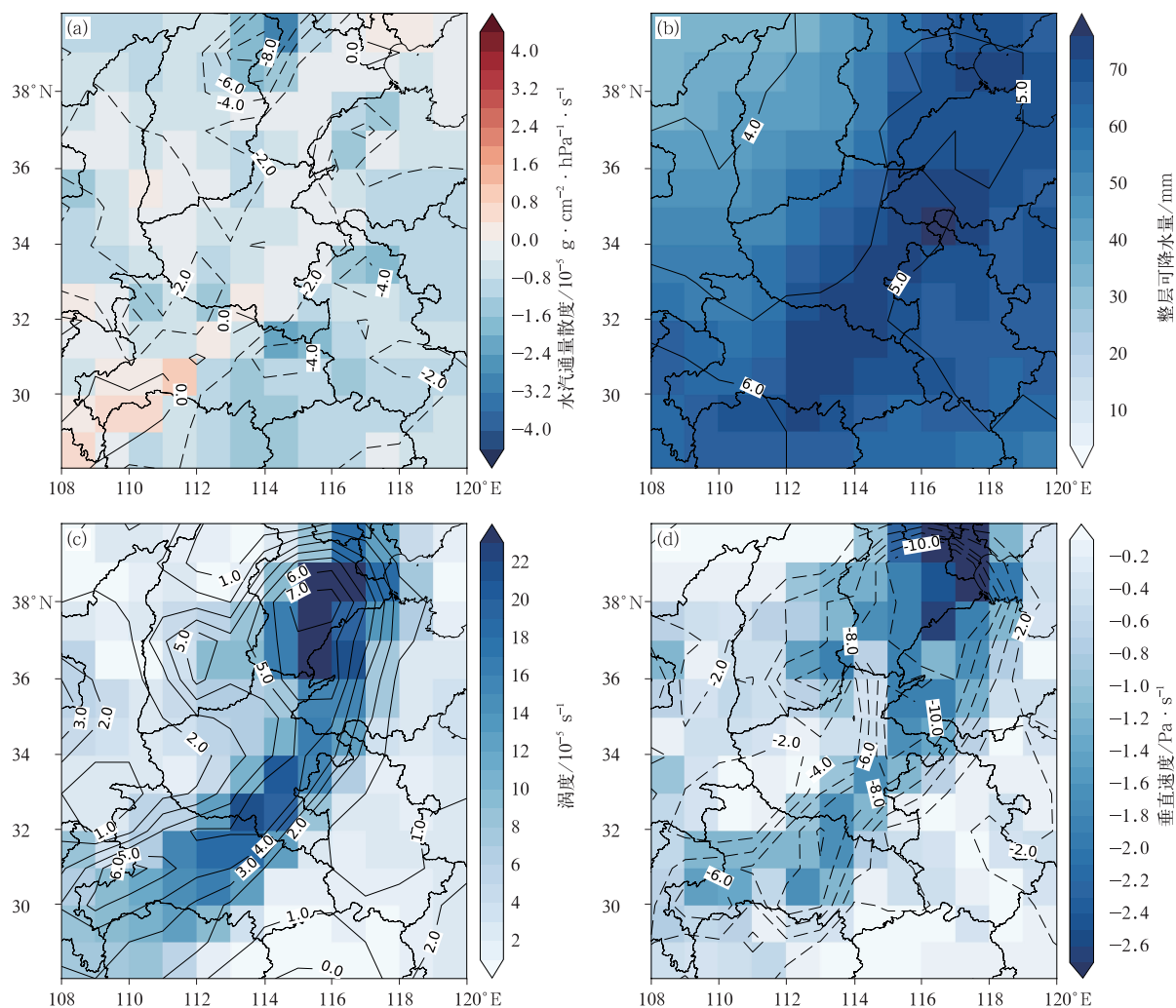


图8 同图7,但为2016年7月18日08时至20日08时过程最有利物理量
(每个格点值为该时段内最有利于降水的物理量场)

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for best physical quantity from 08:00 BT 18
to 08:00 BT 20 July 2016

(Every gridpoint value is the physical quantity of most conducive precipitation in this period of time)

料和ECMWF再分析数据集,选取了 $35^{\circ}\sim 37^{\circ}\text{N}$ 、 $113^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$ 范围内位于太行山东麓的20个国家自动站及 $35^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$ 、 $113^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$ 范围内再分析物理量场(图3),对比分析了该区域降水量与各物理量之间的关系。其中,自动站降水数据采用中国地面基本气象要素日值数据集(包含1980年以来有记录的国家自动站观测雨量数据),本文所选取的强降水过程定义如下:所选站点中至少有一个站点的日降水量(当日20时的24 h累计降水量,下同)大于100 mm。考虑到影响降水的天气系统具有移动性,本文将6 h间隔的ECMWF再分析资料采用日极值的方法(取当日02、08、12、18时四个时刻的最有利值,如垂直速度选最小值、整层可降水量则选最

大值)处理为日资料,然后对比区域内所选择站点的平均日降水量和区域内格点的平均物理量场(图9)。

从区域站的观测雨量上来看,“7·19”过程中单站19日20时的最大24 h累计雨量达702 mm(东马鞍山站),从国家自动站的观测情况来看,过程最大则为安阳市林州站的208 mm。根据国家自动站观测日降水量所挑选出的1980—2016年强降水过程的区域平均结果显示,“7·19”的平均日降水量约为125 mm排在第三位,排在第一位和第二位的分别是1994年7月12日和1996年8月4日的两次强降水过程,其中前者的单站最大日降水量达440 mm。从前文的分析可知,影响“7·19”的最主

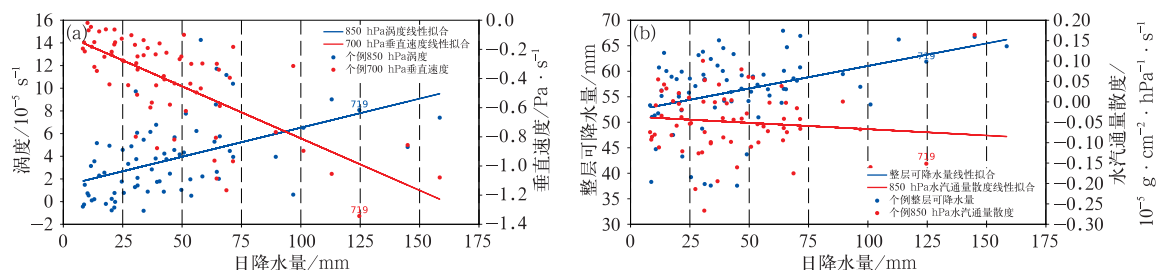


图9 1980—2016年所选区域的71次降水过程(至少一个站点

日降水量 $>100 \text{ mm}$)日降水量与物理量对比

(a)850 hPa 涡度、700 hPa 垂直速度,(b)整层可降水量、850 hPa 水汽通量散度

Fig. 9 Comparison between daily rainfall and physical quantity using 71 extreme

rain events in the selected region during 1980—2016

(a) vorticity at 850 hPa and vertical velocity at 700 hPa, (b) whole-layer

precipitable water and water vapor flux divergence at 850 hPa

要原因是合并北上的低涡与局地地形抬升共同作用,从850 hPa的涡度场来看(图9a蓝色),虽然拟合结果显示累计降水量与其呈正相关,但“7·19”过程的区域平均850 hPa涡度也仅为 $8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,结合图5b、图7c也可以看出,在降水初期,低涡仍处于合并阶段并位于河南省西南侧,涡度大值中心距离强降水中心仍有一定距离,而其前侧的偏东气流受到太行山东麓的抬升作用是造成垂直速度异常偏强的主要原因。与历史降水过程的对比结果也可以看出(图9a红色),“7·19”过程的区域平均垂直速度超过 $-1.3 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 为所有强降水过程最大值,这也从一定程度上反映了“7·19”过程异常偏强的动力条件。从区域平均的整层可降水量和850 hPa水汽通量散度来看(图9b),“7·19”的量值虽然超过了大多数过程的平均水平,但并没有表现出极端偏强的特征。从“7·19”过程的物理量分布和相较于气候态的异常也可以看出(图7a,7b;图8a,8b),整层可降水量相较于气候态标准差偏强约4倍左右,而850 hPa水汽通量散度则表现出较明显的局地性,仅在部分地区表现出水汽的辐合,因此从水汽条件来看,极端降水过程的特征并不明显。

5 结论与讨论

本文首先分析了2016年7月18—20日发生在河南省北部地区的一次特大暴雨的降水特征,并讨论了局地地形的影响及高空急流与低涡的耦合、低空双低涡合并和地面辐合线发展与降水增强之间的关系。此后分析了“7·19”过程的物理量场特征及

其与相较于气候态的异常情况,同时也与1980—2016年发生在豫北地区的强降水过程进行了对比,得到如下结论:

(1) “7·19”过程降水时间集中,主要降水时段为19日08—20时,且降水强度较大,小时雨强达137.8 mm,6 h降雨量达316 mm,日降水量达703 mm。强降水的局地性较强,与地形关系密切,在豫北太行山东麓迎风坡处累计降水量明显大于东部平原地区。

(2) 从大尺度的环流特征来看,河南省北部地区位于200 hPa高空急流轴右侧,同时也存在明显的风速辐散,配合低层有河套低涡和西南涡东移合并加强,此高低空的系统配置加强了低层正涡度的发展,因此也导致了低层西南急流和东南急流的显著加强。

(3) 从中尺度特征的分析结果来看,地面辐合线的发展和维持是导致局地特大暴雨的主要原因,其中豫北地区自19日10—20时持续有地面辐合配合强回波发展,同时在河南省中部、西部地区也有不同程度的地面辐合配合强回波向东北方向移动,多个地面中尺度气旋移动造成的列车效应也是导致此次豫北特大暴雨的原因之一。

(4) 分析“7·19”过程的物理场分布特征可以看出,在强降水主要发生区域低层的垂直速度相较于气候态明显偏强。对比1980—2016年的多个强降水过程显示,对于豫北太行山东麓附近区域,“7·19”平均700 hPa垂直速度要明显大于1980年以来的其他强降水过程。

通过对“7·19”豫北极端暴雨过程的降水特征、

产生机理的分析可以发现,高低空系统的耦合、地形的增幅作用、地面辐合线的产生和维持是此次强降水过程产生的重要原因。此外,针对极端降水发生发展时各物理因子的分析也发现,以上机制的共同作用也造成了豫北地区局地垂直速度的极端异常。此外,如何通过对极端降水发生发展时的物理因子特征进行分析从而提高对极端降水事件的预报能力也需要进一步的认识。

参考文献

- 湛芸,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.
- 丁一汇,蔡则怡,李吉顺,1978.1975年8月上旬河南特大暴雨的研究[J].大气科学,2(4):276-289.
- 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.
- 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.
- 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.
- 刘冀彦,毛龙江,牛涛,等,2013.地形对2011年9月华西致灾暴雨强迫作用的数值模拟研究[J].气象,39(8):975-987.
- 孙继松,雷蕾,于波,等,2015.近10年北京地区极端暴雨事件的基本特征[J].气象学报,73(4):609-623.
- 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.
- 孙军,湛芸,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.
- 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.
- 王宁,张立凤,彭军,等,2014.局部地形对北京“7·21”特大暴雨影响的数值研究[J].暴雨灾害,33(1):10-18.
- 王毅,马杰,代刊,2018.“7·20”华北强暴雨集合预报的中期预报转折和不确定性分析[J].气象,44(1):53-64.
- 王宇虹,徐国强,贾丽红,等,2015.太行山对北京“7·21”特大暴雨的影响及水汽敏感性分析的数值研究[J].气象,41(4):389-400.
- 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.
- 杨博雷,闵锦忠,王仕奇,等,2016.北京7·21暴雨低涡演变的湿位涡分析[J].气象科学,36(6):721-731.
- 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.
- 周鸣盛,1993.我国北方50次区域性特大暴雨的环流分析[J].气象,19(7):14-18.
- Flesch T K, Reuter G W, 2012. WRF model simulation of two Alberta flooding events and the impact of topography[J]. J Hydrometeorol, 13(2):695-708.
- Ntwali D, Ogwang B A, Ongoma V, 2016. The impacts of topography on spatial and temporal rainfall distribution over Rwanda based on WRF model[J]. Atmos Climate Sci, 6(2):64080.