

杨晓亮,金晓青,孙云,等,2023.“23·7”河北太行山东麓罕见特大暴雨特征及成因[J].气象,49(12):1451-1467. Yang X L, Jin X Q, Sun Y, et al, 2023. Evolution characteristics and formation of the July 2023 severe torrential rain on the eastern foothills of Taihang Mountains in Hebei Province[J]. Meteor Mon, 49(12):1451-1467(in Chinese).

“23·7”河北太行山东麓罕见特大暴雨 特征及成因^{*}

杨晓亮^{1,2,3} 金晓青³ 孙 云³ 陈碧莹³ 梁 天³
杨 敏⁴ 闫雪瑾³ 李江波³

1 中国气象局雄安大气边界层重点开放实验室,河北雄安 071800

2 河北省气象与生态环境重点实验室,石家庄 050021

3 河北省气象台,石家庄 050021

4 河北省气象行政技术服务中心,石家庄 050021

提 要: 受台风杜苏芮北上减弱的低压影响,2023年7月29日至8月1日,京津冀地区遭受了历史罕见的特大暴雨,海河发生流域性特大洪水并造成人员伤亡和经济损失。利用高空观测、地面自动站、S波段多普勒天气雷达、风廓线雷达、ERA5再分析资料等,对此次天气过程进行了初步分析。结果表明:特大暴雨过程具有累计降水量大、持续时间长、地形作用明显等特征。台风杜苏芮、卡努提供了极为有利的水汽条件,华北北部形成的高压坝阻挡了台风环流北上,华北地区先后经历了阵性降水、台风倒槽降水和倒槽减弱阶段对流性降水三个阶段,降水落区的叠加效应是形成罕见特大暴雨的主要原因。台风倒槽阶段850 hPa切变线受太行山阻挡移动缓慢,降水持续时间长,初期大气处于近中性状态,雨强整体平稳,30日午后对流开始加强,河北中部降水区冷池出流的偏北风与偏东风形成地面辐合线,使得河北东南部高能区中触发的对流单体发展加强为MCS,移入保定后形成“列车效应”;太行山冷池出流的偏北风与地面东南风形成辐合线触发不稳定能量释放,是30日夜间河北西南部降水维持的原因。31日早晨超过 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东南风急流再次建立,造成北京南部超过 $110 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的强降水。

关键词: 太行山东麓,“23·7”特大暴雨,北上台风,地形作用

中图分类号: P458 **文献标志码:** A **DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.102301

Evolution Characteristics and Formation of the July 2023 Severe Torrential Rain on the Eastern Foothills of Taihang Mountains in Hebei Province

YANG Xiaoliang^{1,2,3} JIN Xiaoqing³ SUN Yun³ CHEN Biying³
LIANG Tian³ YANG Min⁴ YAN Xuejin³ LI Jiangbo³

1 CMA Xiong'an Atmospheric Boundary Layer Key Laboratory, Hebei, Xiong'an 071800

2 Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province, Shijiazhuang 050021

3 Hebei Meteorological Observatory, Shijiazhuang 050021

4 Hebei Meteorological Administrative and Technical Service Center, Shijiazhuang 050021

Abstract: Influenced by the weakening low pressure of Typhoon Doksuri, the Beijing-Tianjin-Hebei Region suffered the unprecedented extremely severe torrential rain from 29 July to 1 August 2023, with catastrophic

* 中国气象局雄安大气边界层立体监测和精细化模拟青年创新团队、河北省重点研发计划项目(21375404D)、河北省灾害性天气机理研究创新团队和气象业务核心能力提升工程-暴雨强对流野外观测项目共同资助

2023年9月3日收稿; 2023年10月25日收修定稿

第一作者:杨晓亮,主要从事灾害性天气预报技术与方法研究. E-mail:hbsqxt087@sina.com

floods in the Haihe River Basin causing serious casualties and economic losses. A preliminary analysis of this rarely seen severe precipitation event is conducted in this article based on conventional observations, S-band Doppler weather radar data, wind profile radar data, and ERA5 reanalysis data. The results show that this extremely severe torrential rain process was characterized by enormous accumulated rainfall, and long duration, affected significantly by terrain. Typhoons Dokuri and Khanun provided extremely favorable water vapor conditions, but the high pressure barrier formed in northern part of North China blocked the northward typhoons. The North China Region experienced three stages: intermittent rainfall, typhoon inverted-trough precipitation and convective precipitation during the weakening stage of the inverted-trough, and the superposition of precipitation areas in three stages was the main cause for the formation of the extremely severe torrential rain. During the stage of weakening inverted-trough, the shear line at 850 hPa moved slowly due to the obstruction of the Taihang Mountains, causing the long duration of precipitation. The atmosphere was in a near neutral state with stable rainfall intensity in the early stages. From the afternoon of 30 July, convective precipitation began to strengthen. The convergence line formed by the northerly wind which was generated by the outflow of the cold pool in the central rainfall area of Hebei Province and the surface southeast wind triggered the release of unstable energy and also strengthened the development of triggered convective cells into mesoscale convective system (MCS) in the high-energy area of southeastern Hebei. This MCS moved into Baoding, resulting in the “train effect”. The convergence line between the surface north wind generated by the cold pool of Taihang Mountains and the southeast wind triggered the release of unstable energy, which was the reason for the maintenance of severe precipitation in southwestern Hebei over the night of 30 July. On the morning of 31 July, a southeast low-level jet over $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ was established again, leading to the extremely severe torrential rain exceeding $110 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ in the southern part of Beijing.

Key words: eastern foothills of Taihang Mountains, July 2023 severe torrential rain, northward typhoon, topographical effect

引言

每年7—8月,随着夏季风向北推进,华北进入雨季,持续性大暴雨导致的洪水是华北夏季的主要灾害之一,例如1963年8月海河流域大洪水(简称“63·8”)、1996年8月河北大暴雨(简称“96·8”)、2012年7月北京大暴雨(简称“12·7”)、2016年7月华北特大暴雨(简称“16·7”)和2021年7月19—21日河南极端暴雨(简称“21·7”)等,都给社会经济和人民生命财产造成了重大损失。不少研究均表明(俞小鼎,2012;孙军等,2012;谌芸等,2012;孙建华等,2013;陈明轩等,2013),“12·7”大暴雨是在有利的大尺度环流背景下由多个长生命史、稳定少动的中尺度对流系统造成,分为暖区降水和锋面降水两个阶段。“16·7”华北特大暴雨的研究表明,高低空系统耦合背景下快速发展的深厚气旋是影响强降水发生发展的重要系统(赵思雄等,2018),降水期间各物理量明显偏离气候平均态(栗晗等,2018),

地形对降水增幅作用显著(符娇兰等,2017;Xia and Zhang,2019),潜热反馈过程也起到非常重要的作用(雷蕾等,2017)。徐珺等(2022)、Xu et al(2022)利用客观分型方法对比了华北地区极端降水日与少雨日的环流型,解读了河南“21·7”破纪录降水事件的极端性。此外气象学者从“21·7”特大暴雨的降水特征、极端性、水汽输送、中尺度低空急流、地形作用等不同角度开展了广泛研究(苏爱芳等,2022;杨浩等,2022;汪小康等,2022;冉令坤等,2021;孔期等,2022;齐道日娜等,2023;Luo and Du,2023)。华北地区的强降水既受西风带系统影响,又有热带系统参与(孙建华等,2006;赵思雄和孙建华,2019;杨晓亮等,2021a;2022),台风远距离水汽输送或台风北上是华北地区产生大暴雨或持续性大暴雨的重要条件(陶诗言,1980;丁一汇,2019)。河南“75·8”特大暴雨就是台风登陆后北上至河南伏牛山脉与桐柏山脉之间的大弧形地带“停滞少动”,在其他天气尺度系统参与下造成的(“75·8”暴雨会战组,1977a;1977b)。丁一汇(2015)指出河南“75·8”特

大暴雨既有热带和中纬度天气系统的相互作用,又有高、低空系统的相互作用,还有不同尺度天气系统相互作用。孙建华等(2006)认为“96·8”河北特大暴雨是比较少见的登陆台风北上受高压阻挡停滞类型。杨晓亮等(2021b)研究环渤海地区的北上台风过程发现,当西太平洋副热带高压控制整个河北或形成北部高压坝时,大暴雨主要位于河北南部太行山前。

受台风杜苏芮减弱环流北上影响,2023年7月29日08时至8月2日08时(北京时,下同),华北遭受了历史罕见的特大暴雨(简称“23·7”)(符娇兰等,2023;张芳华等,2023)。受持续强降水影响,海河发生流域性特大洪水,永定河及其支流清水河、拒马河支流大石河等8条河流发生有实测记录以来最大洪水,据不完全统计(截至2023年8月10日),持续强降水造成河北110个县(市、区)388.86万人受灾,直接经济损失达958.11亿元,因灾死亡29人,16人失联。有必要回顾总结这次过程的降水特征及天气成因,为华北极端特大暴雨预报提供参考依据。

1 所用资料

本文使用的资料包括:(1)欧洲中期数值预报中心第五代全球大气再分析资料(ERA5, $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 、1 h 间隔),用于环流背景和诊断分析;(2)2023年7月28—31日北京和邢台探空站资料,用于大气垂直廓线分析;(3)河北气象信息中心提供的经质量控制的京津冀区域逐小时自动气象站资料(共4037个站),包括气温、风向、风速和小时降水量,用于地面要素和雨强分析;(4)2023年7月29日至8月1日京津冀雷达拼图产品及石家庄SA雷达单站数据,用于雷达特征及剖面分析;(5)河北气象信息中心提供的邯郸成安和北京风廓线雷达资料,用于分析水平风场的时间演变。站点分布如图1所示。

2 降水特征

2.1 降水极端性分析

2023年7月29日至8月1日,河北和北京共有14个国家级气象观测站(以下简称国家站)日降水量突破历史极值,26个国家站3 d累计降水量突破历史极值。河北79个国家站过程累计降水量超

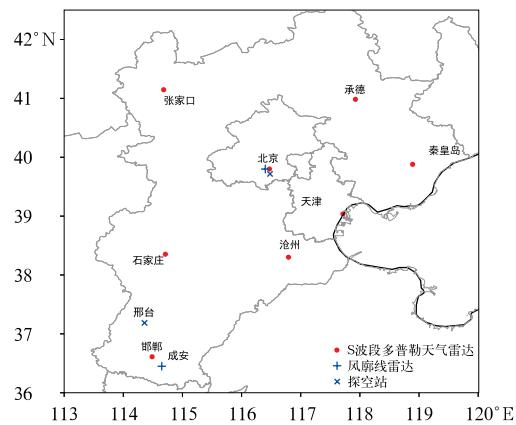


图 1 京津冀站点分布

Fig. 1 Distribution of stations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region

过本站7月降水量常年值,16个站超过本站夏季降水量常年值。与历史上4次著名的大暴雨过程相比(图2),本次过程河北平均降水量要低于“63·8”,但高于“96·8”“12·7”“16·7”;过程累计降水量极值为1003.4 mm(7月29日08时至8月2日08时,邢台梁家庄站),仅次于“63·8”过程的2051.0 mm。“63·8”降水极值邢台内丘獐么站降水持续7 d,本次过程邢台临城梁家庄站降水持续时间不足3 d。

2.2 降水空间分布及演变特征

从过程累计降水量来看,北京西南部和河北中南部的太行山前普遍在250~800 mm(图3a),250 mm以上的降水面积超过6.5万 km²,超过400 mm的站点沿太行山呈南北带状分布,主要集中在两个区域,一处位于河北中部的保定中北部、北京西南部等地,另一处位于河北西南部的石家庄西部、邢台西部、邯郸西北部等地的太行山东麓。过程最大累计降水量为1003.4 mm(邢台梁家庄站),其2 d的累计降水量接近河北年平均降水总量(505.6 mm)的2倍。从逐日演变来看,强降水自南向北发展。7月29日河北中南部偏西地区普遍出现暴雨(图3b),

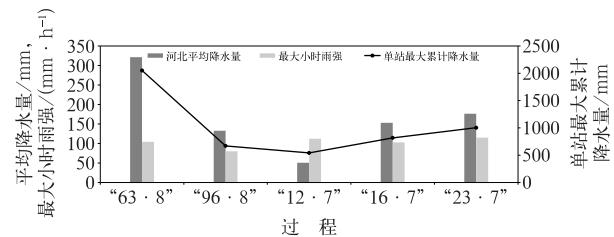


图 2 5 次大暴雨过程降水情况对比

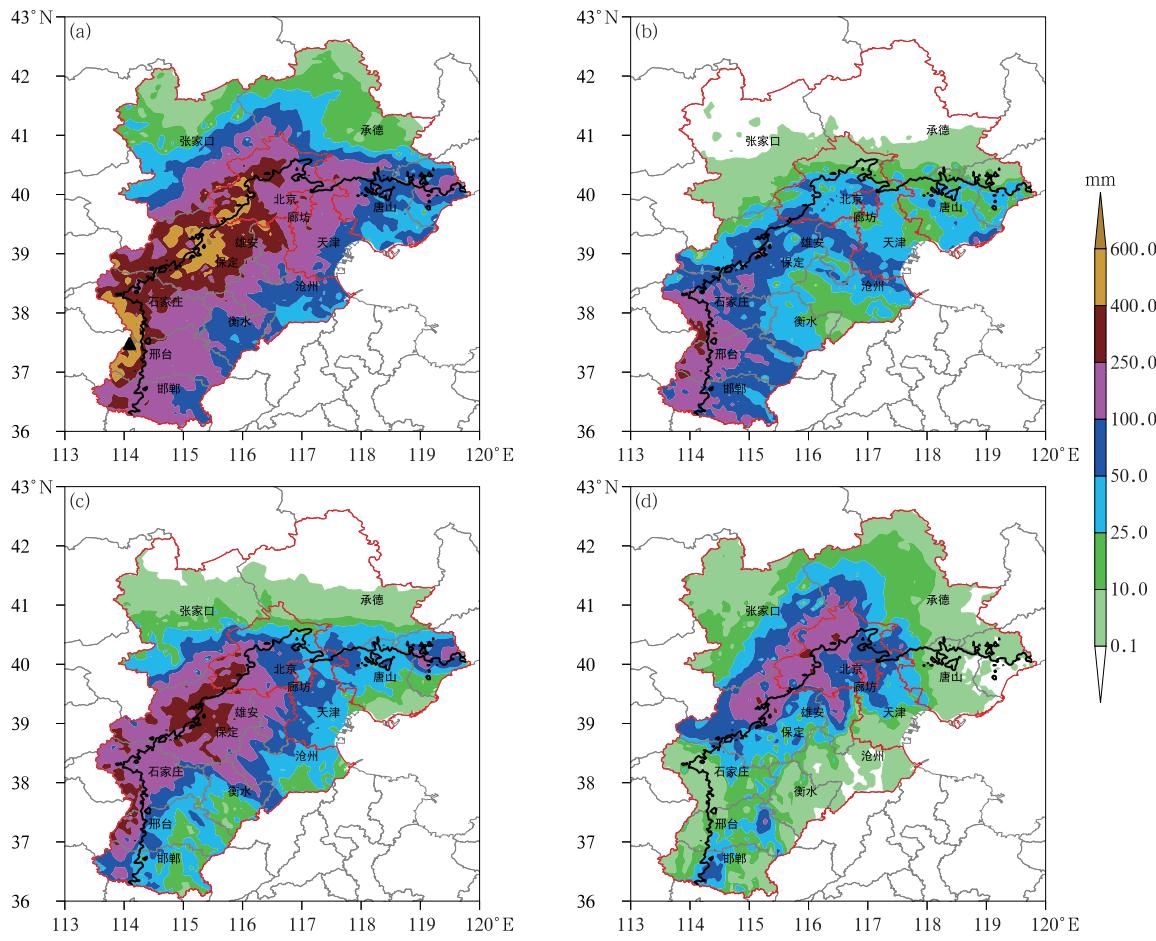
Fig. 2 Comparison of precipitation in five severe torrential rain processes

河北西南部太行山山前出现大暴雨到特大暴雨,邢台梁家庄站 24 h 降水量最大达 511.1 mm;30 日强降水向北发展(图 3c),大暴雨覆盖的范围最广,河北中部的保定、北京西南部出现大范围大暴雨到特大暴雨,保定辽道背站 24 h 降水量最大为 497.7 mm,河北西南部太行山山前连续 2 d 出现大暴雨到特大暴雨,邢台梁家庄站 24 h 降水量为 483.5 mm;31 日,降水区进一步北移,大暴雨主要集中在北京西部、南部及周边区域(图 3d),北京昌平王家园水库站 24 h 降水量最大为 394.8 mm,河北南部降水明显减弱;8 月 1 日京津冀地区转为分散性暴雨,过程趋于结束。

2.3 降水时长及雨强

本次过程两个强降水区域的降水时长普遍超过

40 h(图 4a),相比而言河北中部地区的降水持续时间更长。其中保定中部、北京南部、承德西南部超过了 60 h,保定易县富岗站最长达 84 h,远超过了“16·7”过程的 48 h(符娇兰等,2017)。从降水强度来看,各地最大小时降水量普遍在 20~50 mm(图 4b),北京南部、河北中部和西南部的部分站点超过 50 mm。日常业务中将小时降水量 ≥ 20 mm 定义为短时强降水,本次过程短时强降水时长超过 5 h 的站点仍主要位于河北中部和西南部两个区域(图 4a 中等值线),其中邢台梁家庄站最长达 24 h。两个区域对比来看,河北西南部总降水时间比河北中部短,小时雨强也不极端,雨势整体较为平稳,其出现单站极值的主要原因是短时强降水维持时间长。河北中部保定附近的最大小时雨强较河北西南部强,且降水持续时间普遍超过了河北西南部,持续



注:黑色实线为 200 m 地形等高线,图 a 中▲为降水量极值中心邢台梁家庄站。

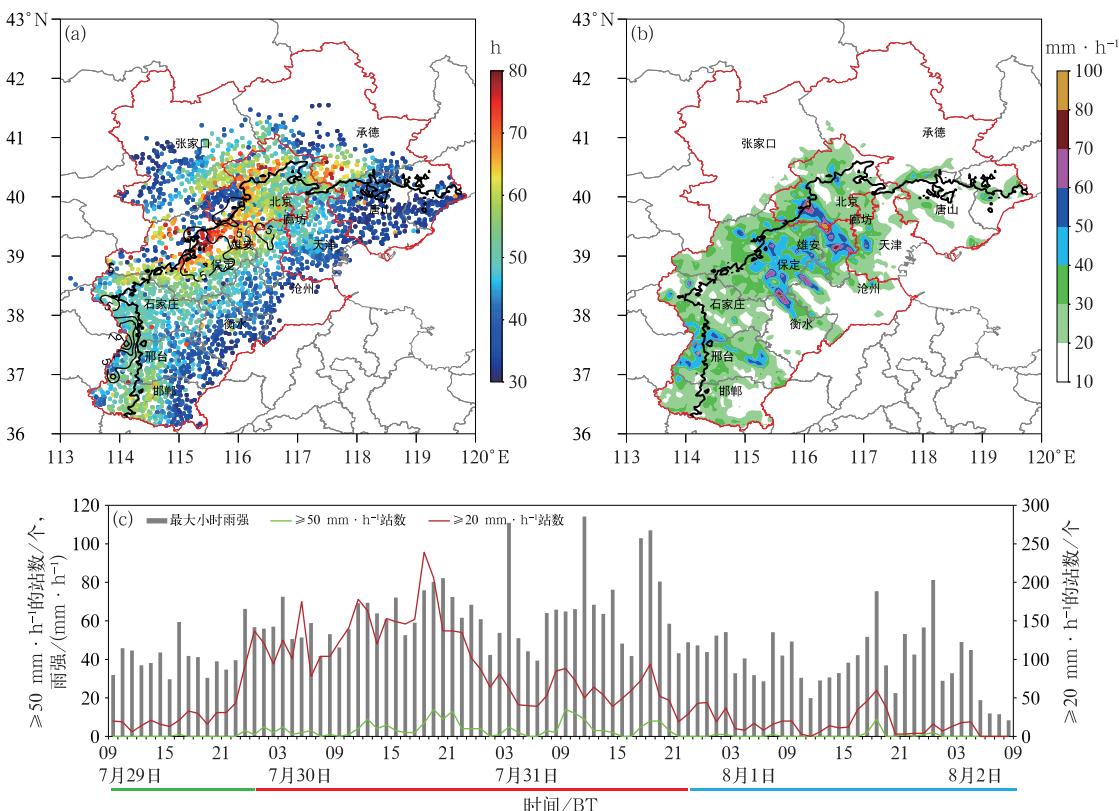
图 3 京津冀地区 2023 年(a)7 月 29 日 08 时至 8 月 2 日 08 时过程累计降水量,
(b)7 月 30 日 08 时、(c)7 月 31 日 08 时、(d)8 月 1 日 08 时过去 24 h 累计降水量分布
Fig. 3 (a) Accumulated precipitation from 08: 00 BT 29 July to 08: 00 BT 2 August, and
(b—d) 24 h accumulated precipitation at (b) 08: 00 BT 30 July, (c) 08: 00 BT 31 July,
(d) 08: 00 BT 1 August 2023 in the Beijing-Tianjin-Hebei Region

性特征明显,因此河北中部大量站点的累计降水量超过了 400 mm。

2.4 降水的阶段性特征

此次特大暴雨过程持续时间长,表现出明显的阶段性特征。图 4c 为京津冀地区最大小时雨强、小时降水量超过 20 mm 和 50 mm 站数的时间演变图,图中可以反映出降水不同阶段的强度和范围特征。7月 29 日 23 时之前京津冀地区最大小时雨强不超过 $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,超过 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的站数较少,超过 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的只有 1 个。天气系统分析发现,29 日台风倒槽主要位于河南和山东境内,此时为倒槽西北侧阵性降水;30—31 日台风倒槽直接影响河北,降水的强度和范围明显扩大,30 日凌晨最大小时雨强开始加大到 $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上,

超过 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的站数大部分时间超过 100 个,30 日 18 时最多达到了 239 个,19 时有 14 个超过 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,此时短时强降水范围最广。31 日凌晨后,超过 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的站数下降到 100 个以下,但 31 日 03 时、11 时、17 时和 18 时最大小时雨强分别达到了 $110.9, 114.2, 102.9, 107.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,分别为邢台内丘獐么站、北京门头沟定都阁站、北京大兴榆垡站和北京大兴马家屯站,超过 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的站数在 31 日 09 时和 18 时分别出现峰值,短时强降水范围虽然有所减小,但雨强更极端。31 日夜间到 8 月 1 日台风倒槽减弱,西太平洋副热带高压(以下简称副高)逐渐加强控制京津冀地区,超过 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的站数大部分时间在 50 个以下,最大小时雨强波动较大,最大超过 $80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,此阶段为倒槽减弱后的对流性降水。

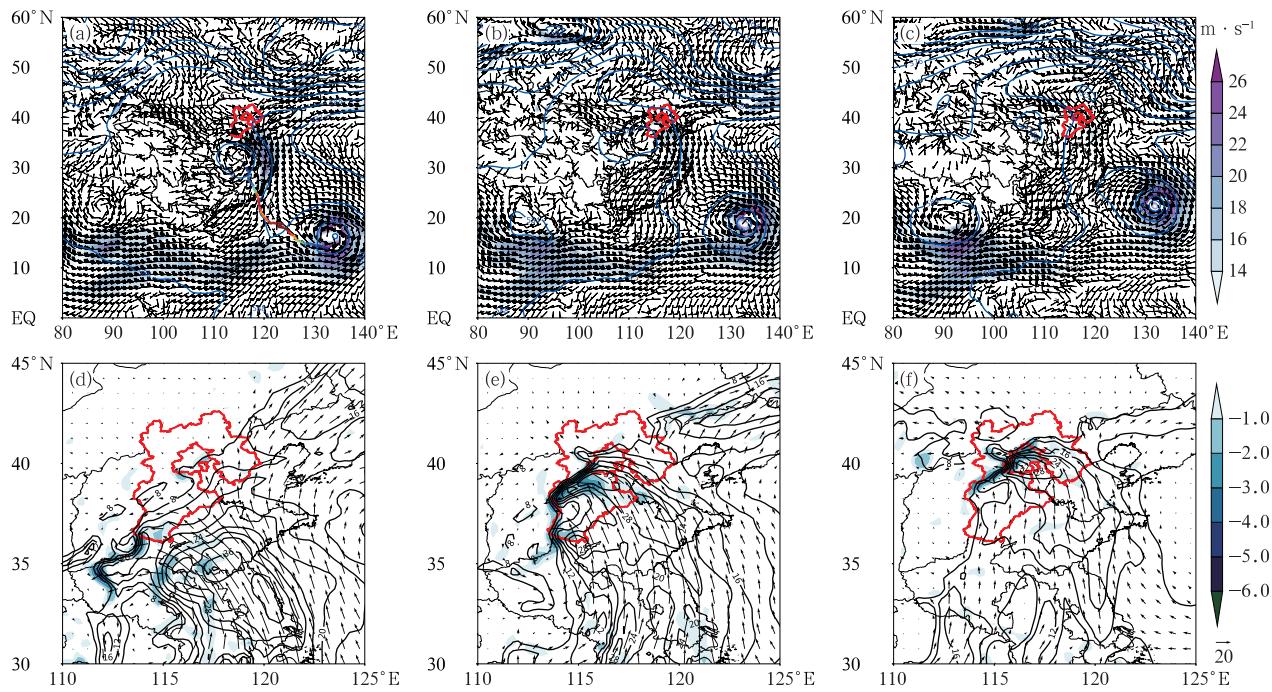


综上,本次特大暴雨河北平均降水量和单站极值均超过“96·8”“16·7”“12·7”极端暴雨过程,仅次于“63·8”。400 mm 以上的降水区覆盖了河北中部和西南部两个区域,降水中心集中在太行山前。强降水自南向北发展,两个区域的降水时长普遍超过 40 h,河北中部的降水维持时间和最大时雨强均强于河北西南部,但河北西南部太行山山前短时强降水的时长超过了河北中部。强降水具有明显的阶段性特征:7月 29 日为台风倒槽西北侧的阵性降水,具有间歇性、雨强不大的特点;30—31 日为台风倒槽直接影响产生的持续性强降水,雨势加大,持续时间较长,其中 30 日短时强降水范围最广,31 日单站雨强最极端;31 日夜间到 8 月 1 日为倒槽减弱后的对流性降水,持续时间短、局地性强、雨强变化大。降水特点不同,成因亦不同,以下对三个阶段的降水成因进行详细分析。

3 台风倒槽西北侧的阵性降水

7月 29 日 14 时 500 hPa 天气图上(图 5a),欧

亚中高纬冷空气活动较弱,副高呈块状且位置偏北偏西,西侧脊线北跳至 36°N 以北,588 dagpm 线西伸至 120°E 以西。台风杜苏芮 28 日在福建沿海登陆后沿副高西侧偏南气流一路北上(图 5a),其减弱的低涡环流经江西、安徽进入河南,低涡与东侧副高之间的气压梯度加大,在 850 hPa 形成一支风速超过 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的天气尺度低空急流,将暖湿空气不断向北方输送,低空急流左侧在河南东部到山东西北部一带形成倒槽切变,低层存在风向和风速的水平辐合。对应较强的低空急流,925 hPa 水汽通量中心值达 $36 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,前沿存在多条水汽通量散度的辐合中心(图 5d),呈东北—西南向带状分布。对应雷达拼图上有东北—西南向的螺旋雨带回波(图略),螺旋雨带上的中尺度对流系统在水汽通量散度辐合中心附近生成后,不断发展并向西北方向频散,之后进入河北。降水回波为层积混合云,层状云中镶嵌尺度较小的对流单体,最强可达 50 dBz 以上,多条带状回波自东南向西北依次扫过河北南部地区,地面降水呈现间歇性、不连续的特征,雨强普遍在 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下。分析河北南部



注:图 a 中彩色线条为台风杜苏芮移动路径。

图 5 2023 年 7 月 29—31 日(a~c)500 hPa 位势高度(等值线,单位:dagpm)、850 hPa 水平风(风向杆)和低空急流(填色),(d~f)925 hPa 水汽通量(等值线和箭矢,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和水汽通量散度(填色,单位: $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a,d)29 日 14 时,(b,e)30 日 08 时,(c,f)31 日 08 时

Fig. 5 (a~c) 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm), 850 hPa horizontal wind (barb) and low-level jet (colored), (d~f) 925 hPa water vapor flux (contour and vector, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and water vapor flux divergence (colored, unit: $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at (a, d) 14:00 BT 29, (b, e) 08:00 BT 30, and (c, f) 08:00 BT 31 July 2023

邢台的探空曲线发现(图 6a),29 日 08 时地面到 200 hPa 为深厚的饱和层,抬升凝结高度(LCL)和自由对流高度(LFC)贴近地面,对流有效位能(CAPE, $190 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)和 0~6 km 垂直风切变($9.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)均较弱。可见,此阶段的环境大气处于近乎湿绝热状态,有弱的不稳定能量、深厚的湿层、低的 LCL 和 LFC,均有利于降水出现。

综上,层积混合云降水回波在 925 hPa 水汽通量散度的辐合中心和 850 hPa 切变线附近形成后,

沿着 500 hPa 东南气流向河北中南部平流和传播,由于整体处于倒槽西北侧的东北风中,加之 0~6 km 垂直风切变较弱,回波的组织性较差,地面雨强普遍不强,因此该阶段的降水主要表现为阶段性、间歇性的阵性降水。

4 台风倒槽产生的降水

位于河北东南部的邯郸成安风廓线雷达显示

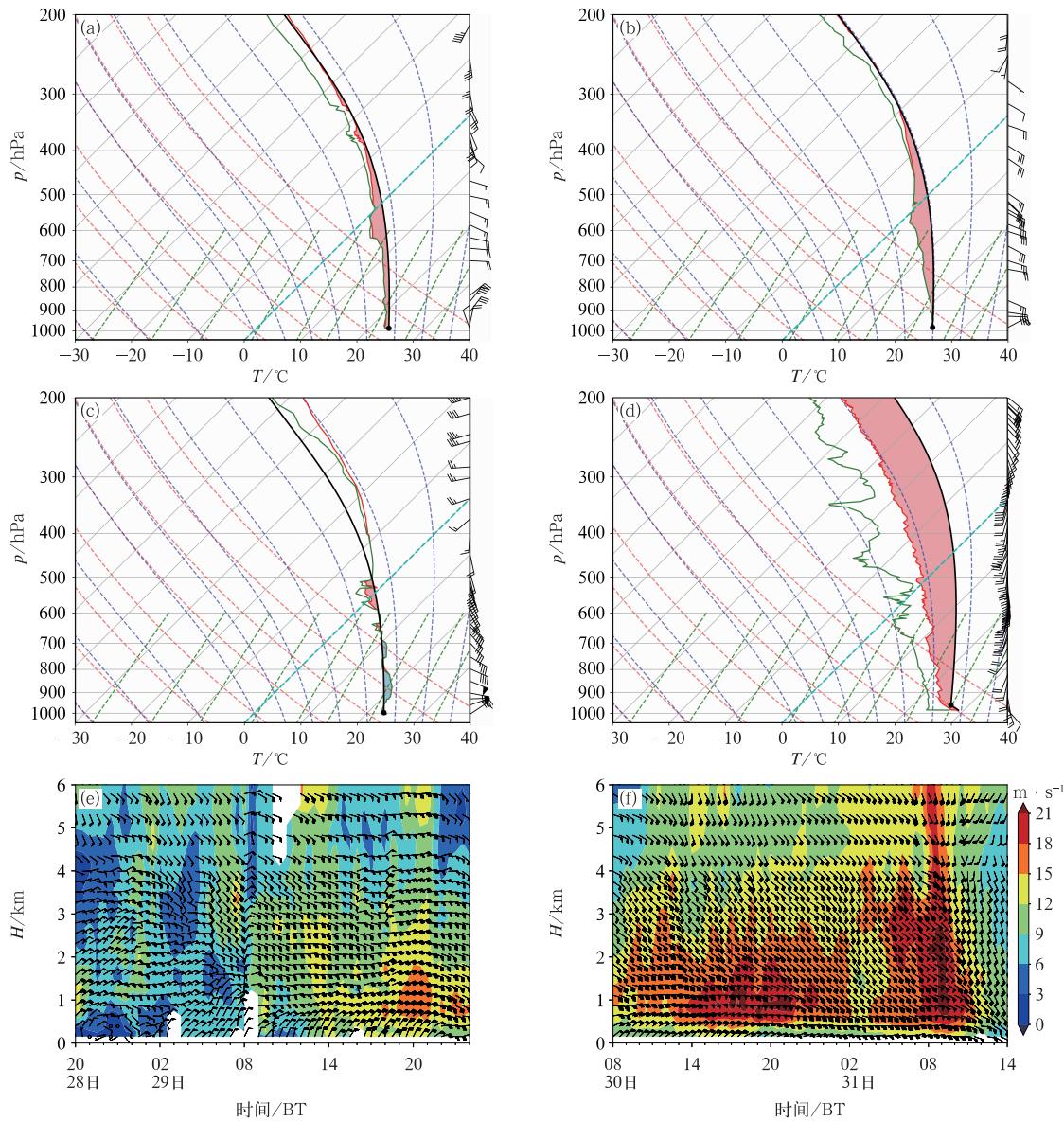


图 6 2023 年 7 月(a)29 日 08 时邢台、(b)30 日 02 时邢台、(c)30 日 20 时北京、(d)31 日 14 时邢台的探空曲线,(e)28 日 20 时至 30 日 00 时邯郸成安、(f)30 日 08 时至 31 日 14 时北京风廓线雷达的水平风(风向杆)和风速(填色)分布

Fig. 6 The sounding curves of (a, b, d) Xingtai at (a) 08:00 BT 29, (b) 02:00 BT 30, (d) 14:00 BT 31 July and (c) Beijing at 20:00 BT 30 July 2023; (e, f) the horizontal wind (barb) and wind speed (colored) of wind profile radar products at (e) Cheng'an of Handan from 20:00 BT 28 to 00:00 BT 30 July and (f) Beijing from 08:00 BT 30 to 14:00 BT 31 July 2023

(图 6e,位置见图 1),29 日 14 时后 2 km 以下的风速逐渐加大,20 时前后 500~1500 m 风速最大达 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,22 时风向由东北风转为东到东南风,说明台风减弱后的低涡北侧的倒槽切变开始进入河北。30 日 08 时(图 5b),500 hPa 副高与河套东移的大陆高压脊相连,在河北北部形成准东西向的高压坝,台风残涡中心位于河南,850 hPa 倒槽切变位于河北中南部,切变线东侧风速超过 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东南风低空急流维持。河北中南部位于 925 hPa 水汽通量大值区前沿,超过 $32 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的中心位于河北中部。河北中部和西南部太行山山前是水汽通量大值区的前沿、水汽通量散度的强辐合区(图 5e)。31 日 08 时(图 5c),华北北部高压坝发展强盛,台风残涡受其阻挡移动缓慢,环流中心进入河套以西,850 hPa 倒槽减弱,在北京附近形成东西向的暖式切变线,切变线北侧东南风低空急流位

于北京北部,水平尺度减小。925 hPa 超过 $32 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽通量中心移至北京附近,其大值区前沿位于北京西部到河北中部的太行山山前一带,同时为强的水汽通量散度辐合中心(图 5f)。30 日 02—20 时被台风倒槽东侧的东南气流控制之后,河北大部分地区的环境条件变化不大,邢台和北京探空曲线上(图 6b,6c),环境大气维持深厚的湿层、低的 LCL 和 LFC、弱的 0~6 km 垂直风切变($10.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $9.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)和弱 CAPE($350 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $19 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$),仍然接近湿绝热状态。

4.1 河北西南部特大暴雨对流系统的演变

河北西南部降水 29 日夜间开始加强,31 日凌晨趋于结束。利用京津冀雷达反射率因子拼图、地面自动站、ERA5 资料,对造成特大暴雨的对流系统结构、发展演变特征进行分析。29 日 20 时(图 7b),

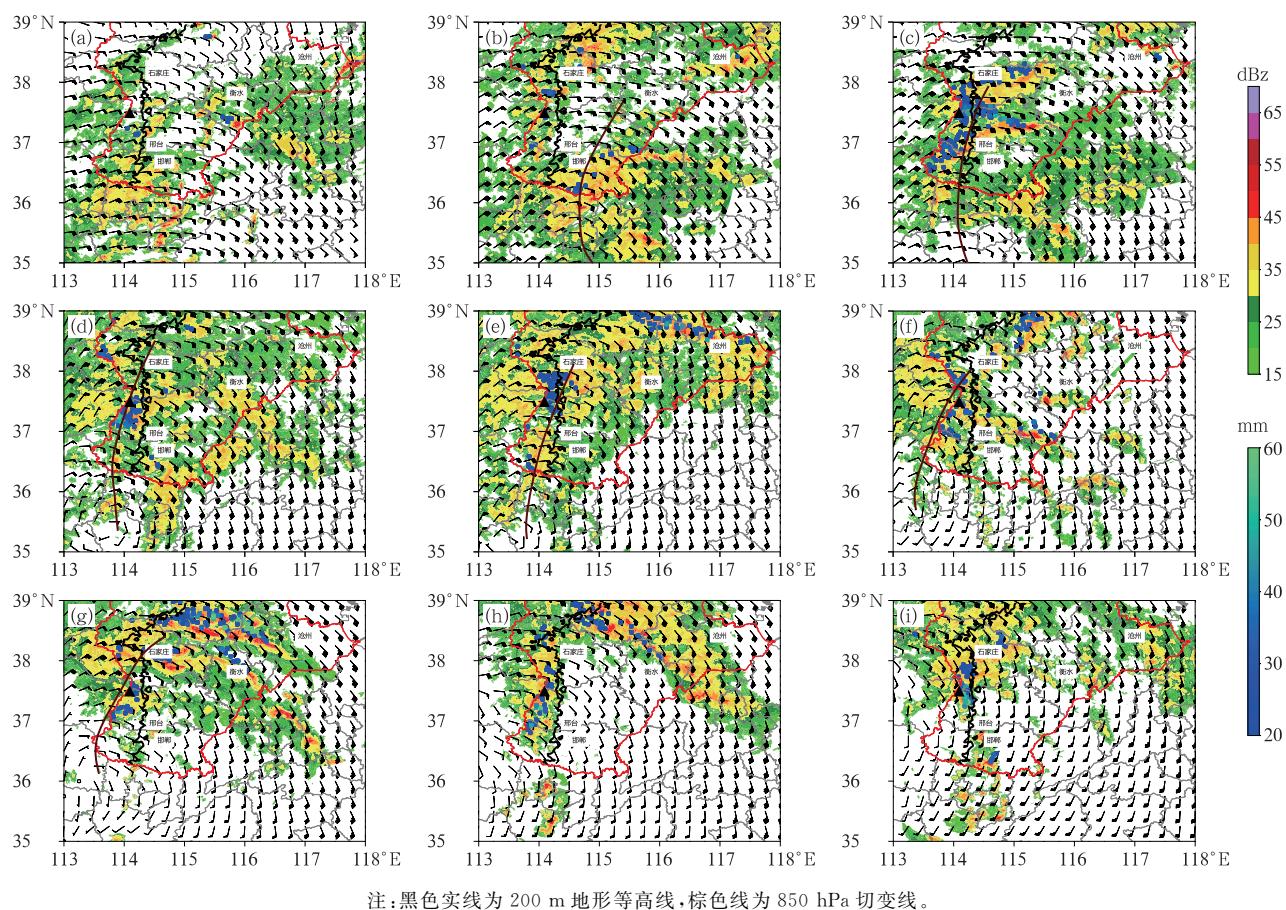


图 7 2023 年 7 月 29 日(a)14 时、(b)20 时、(c)23 时,30 日(d)05 时、(e)08 时、(f)14 时、(g)18 时、(h)22 时和(i)31 日 02 时河北南部雷达反射率因子拼图(填色),
850 hPa 水平风场(风向杆)与之后 1 h 的短时强降水(彩色圆点)

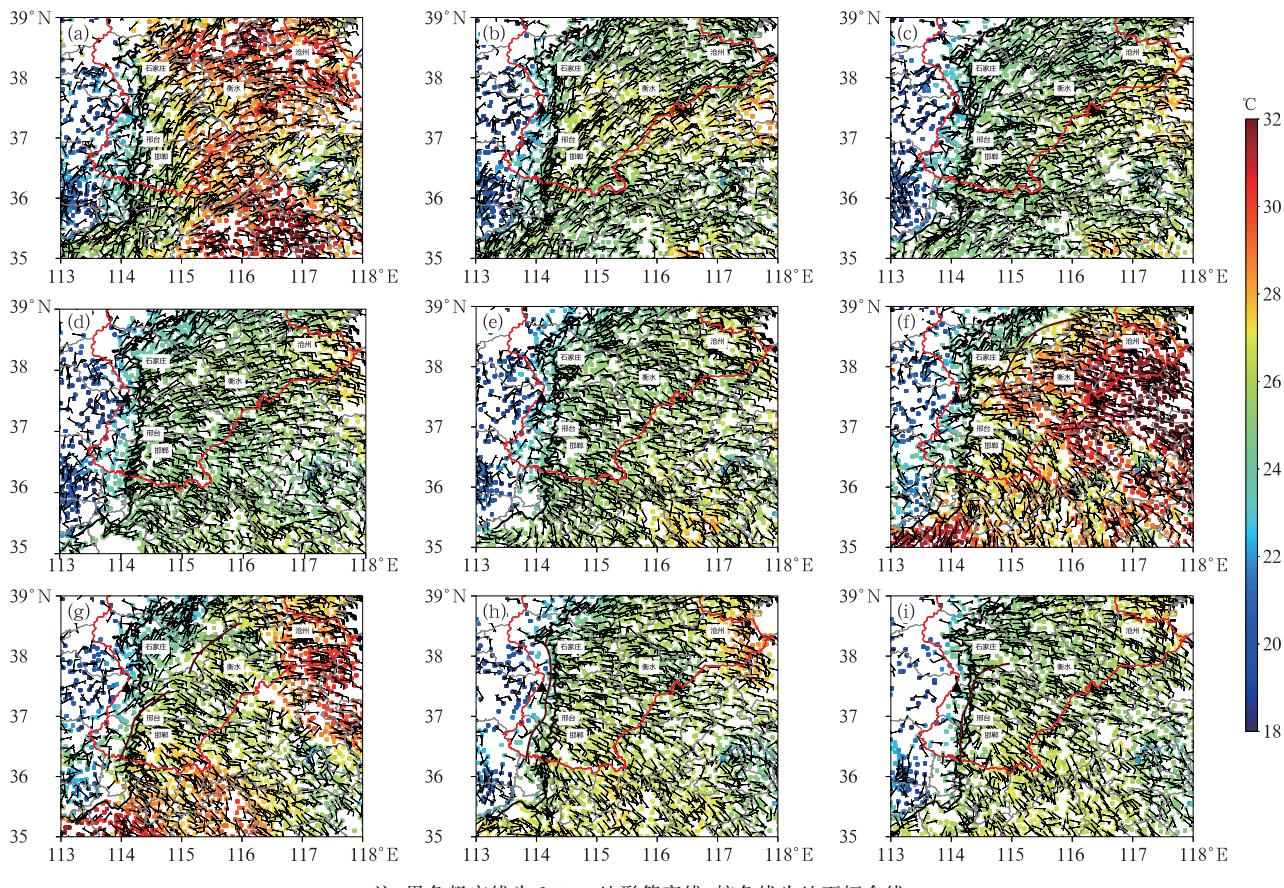
Fig. 7 Radar reflectivity (colored), 850 hPa horizontal wind (barb) and 1 h short-time severe precipitation thereafter (colored dot) in southern Hebei at (a) 14:00 BT 29, (b) 20:00 BT 29, (c) 23:00 BT 29 July, (d) 05:00 BT 30, (e) 08:00 BT 30, (f) 14:00 BT 30, (g) 18:00 BT 30, (h) 22:00 BT 30 and (i) 02:00 BT 31 July 2023

随着 850 hPa 东南风与东北风的切变线移入, 河北东南部开始出现大片分布均匀且密实的层积混合云回波, 强度在 30~50 dBz, 地面开始出现成片的短时强降水。23 时降水回波伴随着切变线移至河北西南部(图 7c), 之后 1 h 的短时强降水强度和范围均达到最大, 最强超过 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 主要位于河北西南部山前 200 m 地形线以西。30 日 01—08 时(图 7d, 7e), 850 hPa 切变线在河北南部的太行山附近稳定少动, 其东侧东南风急流中不断有层状云回波生成并西移至太行山前, 短时强降水主要出现在河北西南部, 中心位置南北略有摆动。09 时之后, 大范围降水回波北上至河北中部, 河北西南部山前的层状云降水回波维持, 地面仍出现短时强降水, 但范围和强度减小, 河北东南部降水出现短暂间歇。14 时(图 7f), 由于 850 hPa 切变线仍位于河北西南部, 太行山附近降水仍然维持, 同时河北东南部的东南风急流脉动中有分散的 β 中尺度对流单体新生, 中心强度超过 50 dBz, 逐渐发展成多个东西向的中

尺度对流系统(MCS), 地面最大雨强超过 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。18 时分散的 MCS 逐渐合并成两条准东西向的线状 MCS 并向北移动(图 7g), 22 时逐渐与河北中部的降水回波合并(图 7h), 给河北中部带来超过 $70 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的强降水。分析 850 hPa 风场发现, 18 时河北西南部切变线已开始减弱, 东南风风速亦减小, 虽然地面仍出现短时强降水, 但回波的组织性变差。22 时 850 hPa 切变线移出(图 7h), 但河北西南部沿山的降水回波再次组织发展, 地面形成超过 $60 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的南北向强降水带, 31 日 02 时 850 hPa 由东南风转为偏南风(图 7i), 回波北上给邯郸西北部、邢台西部、石家庄西部带来强降水, 之后此区域的降水逐渐结束。

4.2 河北西南部对流系统演变的原因

受倒槽西北侧的回波影响, 河北西南部到山西高原降水开始较早, 29 日 14 时河北西南部太行山以西已形成大范围 $20\text{--}22^\circ\text{C}$ 的冷池(图 8a), 而东侧



注: 黑色粗实线为 200 m 地形等高线, 棕色线为地面辐合线。

图 8 2023 年 7 月 29 日(a)14 时、(b)20 时、(c)23 时, 30 日(d)05 时、(e)08 时、(f)14 时、(g)18 时、(h)22 时和(i)31 日 02 时地面自动站 2 m 气温(彩色圆点)和 10 m 风场(风向杆)

Fig. 8 The 2 m temperature (colored dot) and 10 m wind (barb) from ground automatic stations at (a) 14:00 BT 29, (b) 20:00 BT 29, (c) 23:00 BT 29, (d) 05:00 BT 30, (e) 08:00 BT 30, (f) 14:00 BT 30, (g) 18:00 BT 30, (h) 22:00 BT 30 and (i) 02:00 BT 31 July 2023

平原地区 2 m 气温在 27~30℃, 在太行山东侧形成南北向的水平温度梯度带。29 日夜间随着降水区自东向西发展(图 8b~8e), 河北南部平原地面 2 m 气温下降到 25℃ 左右, 山区维持在 22℃ 上下, 水平温度梯度减小, 但始终存在 3℃ 左右的温差。分析地面风场发现, 30 日 08 时之前, 河北南部为一致的东北风, 太行山前冷池附近的辐合并不明显。30 日 14 时(图 8f), 由于河北东南部降水出现间歇, 平原地区 2 m 气温迅速回升至 29~30℃, 与河北西南部山前降水区的水平温度梯度加大, 同时河北东南部地面露点温度也升至 27~28℃, 环境大气处于高温高湿状态, 为对流发展加强提供了有利条件。随着强降水区移动到河北中部, 保定附近形成大范围冷池, 地面风场也发生了明显变化, 风向转为北风, 而东部沧州、衡水等地维持一致的偏东风, 在保定东南部到石家庄东部形成地面辐合线(图 8f), 河北东南部新生的对流单体北上遇地面辐合线发展加强, 形成东西带状的 MCS。18 时上述地面辐合线维持, 同时河北南部平原的风向由偏东风逐渐转为东南风(图 8g), 与西侧太行山冷池出流造成的偏北风形成辐合线并稳定少动。对比分析发现 22 时河北西南部 CAPE 维持在 $400 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 上下(详见 4.4 节), 地面辐合线触发不稳定能量释放, 使原本减弱的降水回波再次组织加强形成南北向强降水带(图 7h)。31 日 02 时(图 8i), 河北南部平原维持东到东南风, 与西侧冷池之间的地面辐合线维持, 仍有分散对流生成, 08 时随着 850 hPa 到地面东南风逐渐转为偏南风, 河北西南部太行山前强降水趋于结束。

可见, 河北西南部降水前期地面为一致的偏北风。30 日 14 时河北中部强降水区冷池出流的偏北风与东侧偏东风形成地面辐合线, 河北东南部高温高湿环境中触发的对流在地面辐合线附近发展加强。随着 30 日 18 时河北南部平原地面转为东南风, 其与西侧太行山冷池出流的偏北风形成地面辐合线, 触发不稳定能量释放, 是 30 日夜间 850 hPa 切变线移出、东南风急流减弱后河北南部降水再次加强的原因。

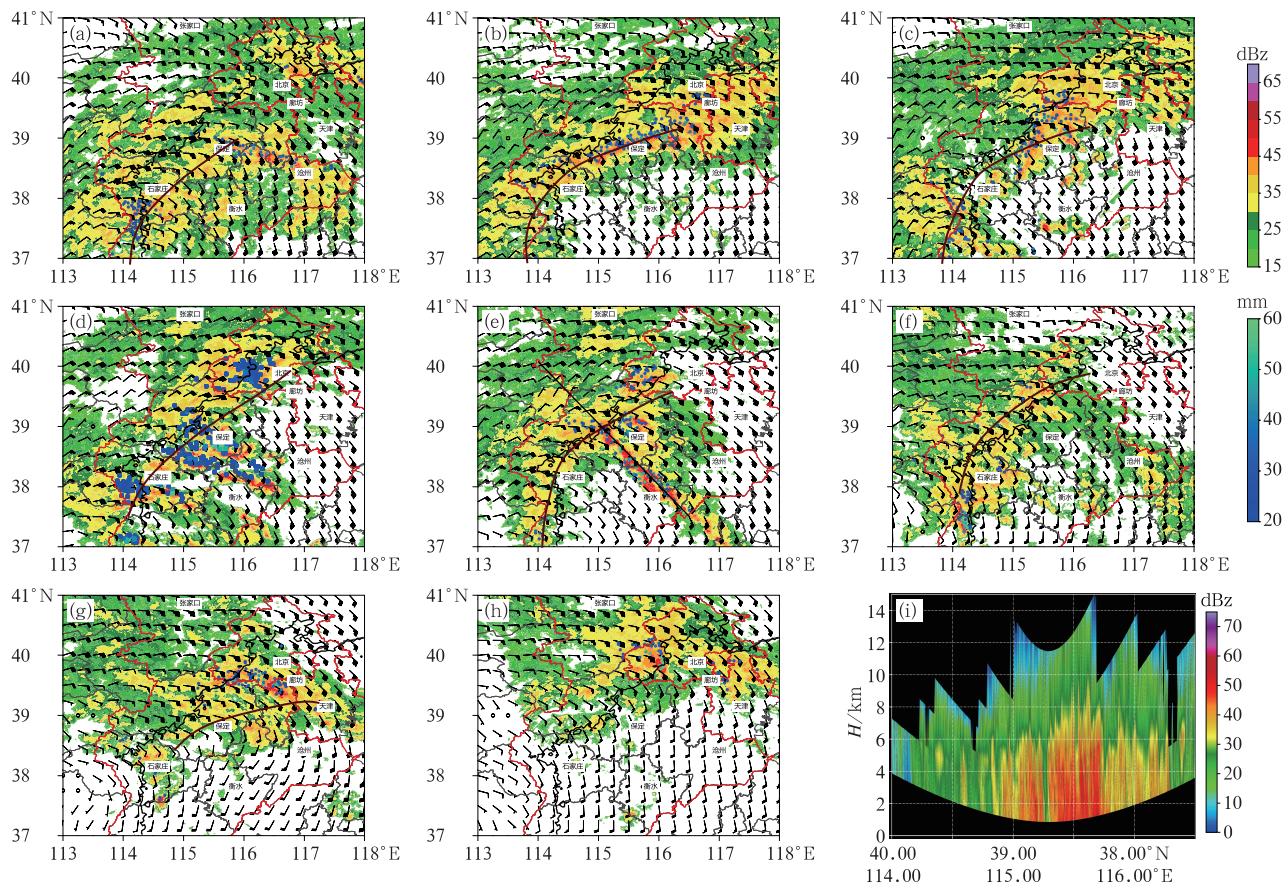
4.3 河北中部特大暴雨对流系统的演变

河北中部降水于 30 日凌晨开始加强。30 日 08 时(图 9a), 密实的层积混合云回波开始进入河北中部, 850 hPa 东南风与东北风形成的切变线位于保定中部到石家庄中部一带, 其东侧在沧州到保定北

部有超过 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东南风低空急流, 急流附近最大雷达反射率因子超过 50 dBz, 地面形成一条短时强降水带。11 时降水回波呈东北—西南走向(图 9b), 强回波位于 850 hPa 东南风急流前沿的切变线附近, 地面最大雨强超过 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。14 时 850 hPa 切变线移动缓慢(图 9c), 超过 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东南风急流进入北京南部, 最强回波位于偏东风与东南风切变处, 保定东部地面雨强超过 $70 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。17 时切变线附近强降水回波稳定少动(图 9d), 其东南方沧州、衡水附近的带状 MCS 开始移入, 逐渐与切变线附近回波相连, 地面超过 $70 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的强降水主要由准东西向 MCS 造成。20 时, 保定南部到衡水一线的 MCS 发展达最强, 回波超过 50 dBz(图 9e), 从垂直剖面可见(图 9i), 多个强对流单体排列紧凑, 为典型的低质心结构, 强回波集中出现在 6 km 附近、 0°C 层以下, 以暖云降水为主, 地面最大小时雨强达 $70 \sim 80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 且回波长轴方向与移动方向一致, 在保定南部平原附近形成明显的“列车效应”。入夜后切变线在保定西部太行山前维持(图 9f), 东南风急流强度略有减弱, MCS 强度减弱, 地面降水的强度和范围减小, 主要位于保定西部山区。31 日 07 时随着河北南部 850 hPa 东南风转为西南偏南风(图 9g), 保定至天津附近形成东西向暖式切变线, 其北侧东南风急流中的回波在廊坊附近突然发展加强, 地面降水迅速加大, 31 日 08 时后移入北京(图 9h), 给北京西南部带来强降水, 11 时最大雨强达到 $114.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

4.4 河北中部对流系统演变的原因

30 日 08—11 时, 河北中部地面为一致的东北风(图略), 风向与西部太行山走向基本一致。14 时, 河北中部冷池出流产生的偏北风与其东侧的偏东风形成地面辐合线, 辐合线以东由于午后气温和露点温度升高, 积累了充足的不稳定能量, CAPE 值在沧州附近出现接近 $2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的中心(图 10a), 在 850 hPa 东南急流脉动作用下不断有对流单体触发、发展形成 MCS(图 9c)。20 时 CAPE 大值区向西扩展至河北中部(图 10b), $800 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的中心位于保定西南部, 地面仍以东北偏东风为主, 保定至衡水有弱的风场辐合线, MCS 在高能区、辐合线附近合并发展加强, 后向传播形成“列车效应”(图 9e)。22 时(图 10c), 河北东南部 CAPE 值减小, MCS 强度开始减弱。31 日 02 时(图 10d), 北京南部、保定



注：黑色实线为 200 m 地形等高线，棕色线为 850 hPa 切变线。

图 9 2023 年 7 月 30 日(a)08 时、(b)11 时、(c)14 时、(d)17 时、(e)20 时,31 日(f)02 时、(g)07 时和(h)10 时雷达反射率因子拼图(填色),850 hPa 水平风场(风向杆)与之后 1 h 的短时强降水(彩色圆点),(i)石家庄雷达反射率因子沿图 9e 中黑线的剖面

Fig. 9 Radar reflectivity (colored), 850 hPa horizontal wind (barb) and 1 h short-time severe precipitation thereafter (colored dot) at (a) 08:00 BT 30, (b) 11:00 BT 30, (c) 14:00 BT 30, (d) 17:00 BT 30, (e) 20:00 BT 30 and (f) 02:00 BT 31, (g) 07:00 BT 31, (h) 10:00 BT 31 July 2023, (i) the cross-section of radar reflectivity along the black solid line in Fig. 9e at Shijiazhuang

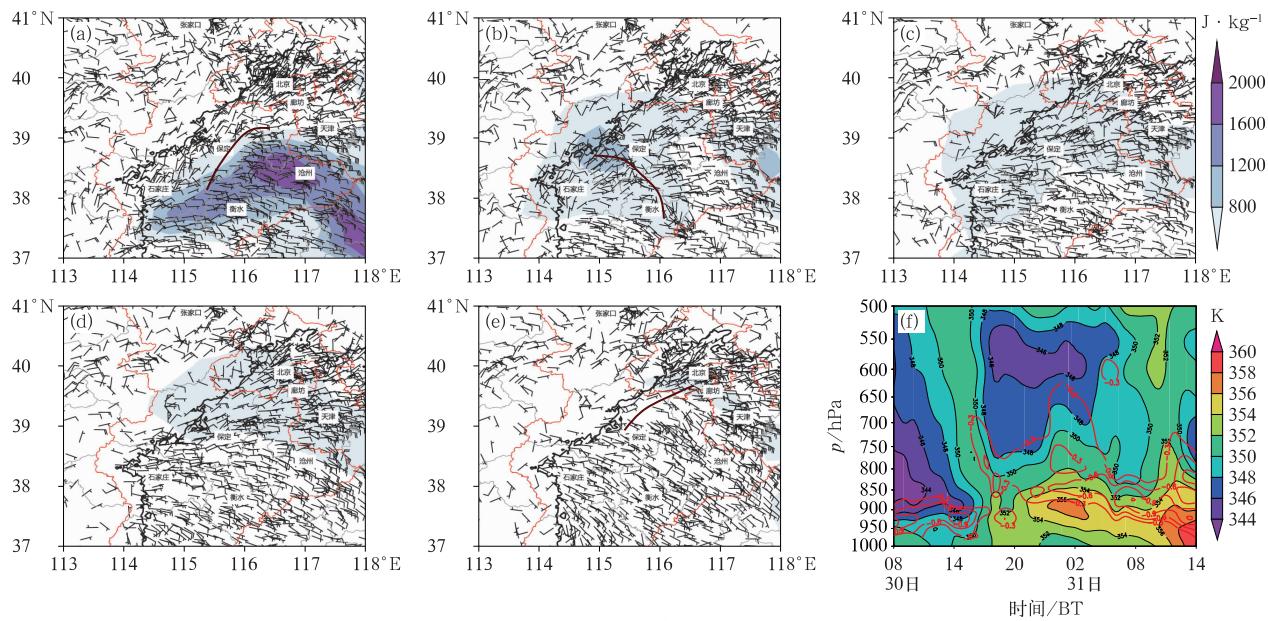
北部、廊坊附近存在 $400 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 CAPE, 地面仍为东北风, 而保定以南的风向开始转为东南偏东风, 此时降水区还主要位于河北中部太行山前。31 日 07 时(图 10e), 超过 $400 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 CAPE 仅在北京、廊坊附近存在, 廊坊以南地面为一致的东南风, 与北侧的东北风形成辐合线, 降水回波在地面辐合线附近发展加强。从风廓线资料可见(图 6f), 北京上空分别在 30 日 15—22 时和 31 日 08—10 时出现风速超过 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的低空急流, 前者为台风倒槽向北发展过程中伴随的低空急流, 高度在 2 km 以下, 急流核以偏东风为主。与 30 日不同, 31 日 08 时前后加强的低空急流发展得很高, 接近 4 km 高度, 超过 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的急流核从 0.5 km 向上伸展到

4 km 附近, 风向为东南风。对比天气形势, 此时台风残涡减弱, 副高开始西伸, 588 dagpm 线刚好位于北京附近上空, 850 hPa 上北京以南的东南风已转为西南偏南风。

为考察天气形势变化带来的气团及层结稳定度的演变, 计算了北京附近上空假相当位温以及湿位涡的湿正压项:

$$\xi_{\text{MPV1}} = -g(\zeta_p + f)\left(\frac{\partial \theta_e}{\partial p}\right)$$

式中: ξ_{MPV1} 表示惯性稳定度和对流稳定度, 北半球大气一般是惯性稳定的即 $(\zeta_p + f) > 0$, $\xi_{\text{MPV1}} < 0$ [$(\partial \theta_e / \partial p) > 0$] 时为对流性不稳定, 因此 ξ_{MPV1} 可以反映对流稳定度的变化。



注:黑色粗实线为 200 m 地形等高线,棕色线为地面辐合线。

图 10 2023 年 7 月 30 日(a)14 时、(b)20 时、(c)22 时,31 日(d)02 时、(e)07 时
地面自动站 10 m 风场(风向杆)和 CAPE(填色),(f)30 日 08 时至 31 日 14 时北京附近
上空假相当位温(填色和黑色等值线)、 ξ_{MPVI} (红色等值线,单位:PVU)的演变

Fig. 10 The 10 m wind (barb) from ground automatic station, CAPE (colored) at (a) 14:00 BT 30, (b) 20:00 BT 30, (c) 22:00 BT 30 July and (d) 02:00 BT 31, (e) 07:00 BT 31 July 2023, (f) the time-altitude evolution of θ_{se} (colored and black contour) and ξ_{MPVI} (red contour, unit: PVU) from 08:00 BT 30 to 14:00 BT 31 July 2023

从假相当位温的时间演变来看(图 10f),30 日 20 时之前,北京附近上空 900~500 hPa 假相当位温等值线接近垂直,即垂直梯度很小,大气处于近中性状态,只是在 900 hPa 以下存在假相当位温的垂直梯度,对应 $\xi_{MPVI} < 0$,说明近地面存在对流不稳定。31 日 02 时,随着低空偏南风向北推进,850 hPa 假相当位温增大到 356 K,气团更加暖湿,假相当位温等值线以水平分布为主,垂直方向梯度增大,从 900~600 hPa 都出现了 $\xi_{MPVI} < 0$ 区域,说明对流不稳定层在抬高增厚。可见,随着副高西伸,低层东南风转为偏南气流,北京附近气团相比于台风倒槽影响时更加高湿高能,大气对流不稳定层次增加,4 km 以下东南风急流加大,地面形成东北风与东南风的辐合线,使得 07 时后廊坊附近降水回波发展加强,之后向西北方向发展,给北京西南部带来极端强降水。

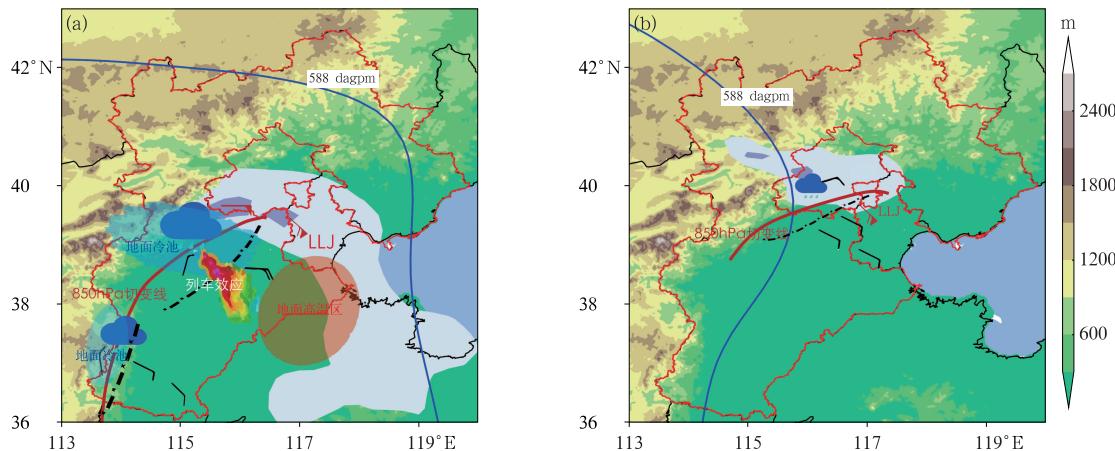
可见,850 hPa 切变线在河北中部山前稳定少动带来持续性降水。河北东南部能量高值区中生成的对流单体在地面辐合线附近发展加强,移入保定平原地区后形成“列车效应”,因此河北中部 400 mm 以上的强降水并不全出现在山区。31 日早晨副高 588 dagpm 线西伸至北京附近上空,850 hPa 转为西

南偏南风,气团变得更加高湿高能,对流不稳定层增厚,20 m·s⁻¹ 的东南风急流再次建立,发展到 4 km 高度,使得降水回波在廊坊附近发展加强,31 日白天造成北京西南部的极端强降水。

30—31 日特大暴雨的概念图见图 11。

4.5 地形在强降水中的作用

太行山平均海拔为 1000~1500 m,在河北中部呈东北—西南走向(图 12a),在河北南部呈南北走向。地形对华北暴雨的增幅作用已有不少研究(孙建华等,2006;符娇兰等,2017;栗晗等,2018;Xia and Zhang, 2019;苏爱芳等,2022)。从本次过程累计降水量超过 400 mm 的站点分布来看(图 12a),除了保定中部部分站点出现在平原地区外,大部分站点分布在太行山东麓附近地区。尤其是河北西南部强降水站点与地形等高线高度吻合,累计降水量在 400 mm 以上站点的海拔高度中位数接近 500 m(图 12b),而河北中部站点的海拔高度离散度较大,说明此处超过 400 mm 的站点分布既有平原,又有海拔较高的山区。以下重点对河北西南部降水极值中心附近地形作用进行分析。



注：LLJ 及填色区为低空急流，红色、黑色风向杆分别为 850 hPa、地面 10 m 风，黑色点断线为地面辐合线，彩色为雷达回波。

图 11 “23·7”台风倒槽阶段河北特大暴雨的概念模型

(a) 30 日, (b) 31 日

Fig. 11 The conceptual model of the July 2023 severe torrential rain during the stage of typhoon trough in Hebei Province for the precipitation on (a) 30 and (b) 31 July 2023

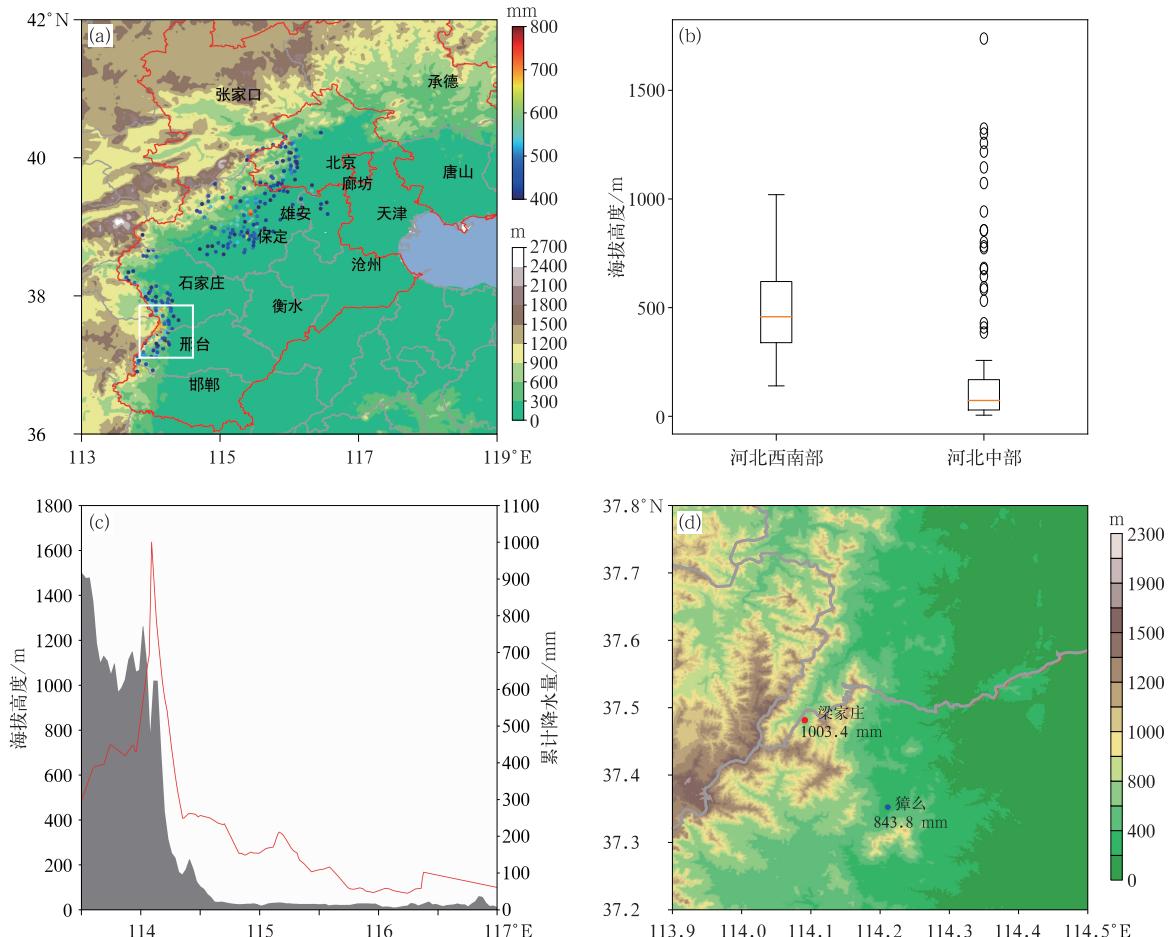


图 12 (a,b)“23·7”过程累计降水量在 400 mm 以上的站点(a)分布(彩色圆点)和地形(填色)、(b)海拔高度箱线图,(c)邢台梁家庄站所在纬度过程累计降水量(红线)与海拔高度(阴影)的纬向变化,(d)图 12a 中方框放大后的精细化地形(填色)

Fig. 12 (a) Distribution of the stations with accumulated rainfall over 400 mm (dot) and topography (colored), (b) box plot of elevation for stations with accumulated rainfall over 400 mm, (c) zonal variation of accumulated rainfall (red line) and terrain height (shaded) at the latitude of Liangjiazhuang Station in Xingtai, (d) enlarged refined terrain (colored) in the box of Fig. 12a from 29 July to 1 August 2023

对比梁家庄站所在纬度的过程累计降水量和地形的纬向分布(图 12c)可见,太行山东麓的累计降水量明显高于东部平原地区,降水量超过 400 mm 的区域主要位于海拔 600 m 以上的山区。降水过程极值中心附近的精细地形分析发现(图 12d),邢台梁家庄站位于向东北开口的山谷内,海拔高度自东北向西南升高。29—30 日地面为持续的东北风,气流在狭长的山谷内被辐合抬升,对比周边 3 km 范围内邻近自动站逐小时降水(图略),梁家庄站各时次的降水量都要高于周边站,地形效应明显。邢台獐么站东西两侧也为海拔 900 m 左右的山脉,北侧海拔相对较低,东北风容易被山谷两侧山脉强迫辐合,地面累计降水量也达到了 843.8 mm。可见,河北南部太行山山脉有许多向东、向北开口的喇叭口微尺度地形,本次过程在持续的偏东和东北风气流影响下,地形对降水的增幅作用明显。

5 倒槽减弱后的对流性降水

31 日 20 时,华北地区 500 hPa 受 588 dagpm 线控制(图略),河北南部 850 hPa 已经转为偏南风,北

京到河北西北部仍维持东南风。925 hPa 东南风远距离将台风卡努外围的水汽源源不断地输送到华北平原,河北大部地面露点温度仍然维持在 26℃ 以上。随着 31 日午后河北中南部云量减少,环境条件发生了明显变化,地面 2 m 气温快速升至 30℃ 以上,地面处于高温高湿状态;14 时邢台探空曲线上(图 6d),整层相对湿度下降、环境温度直减率加大,不稳定能量迅速增加,CAPE 达 $3300 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,同时 LCL 和 LFC 仍然很低,地面附近的弱辐合抬升即可触发不稳定能量释放促使对流强烈发展。雷达拼图显示 31 日夜间和 8 月 1 日中午(图 13a,13b),在河北中南部地面辐合线附近分别有近乎南北向的线状强对流回波形成,回波强度超过 50 dBz,垂直剖面图可以看出为典型的多单体风暴(图 13c,13d),单体发展高度普遍达 12 km 以上,45 dBz 以上的强回波主要位于 0℃ 层附近及以下,以暖云降水为主,环境湿度大有利于提高降水效率,回波生成后沿着偏南气流北上继续给河北中部山前及平原带来对流性降水。

可见,倒槽减弱后河北 500 hPa 上空逐渐转为副高 588 dagpm 线控制,环境大气调整为高温、高湿、高能状态,地面辐合线触发带状对流强烈发展,

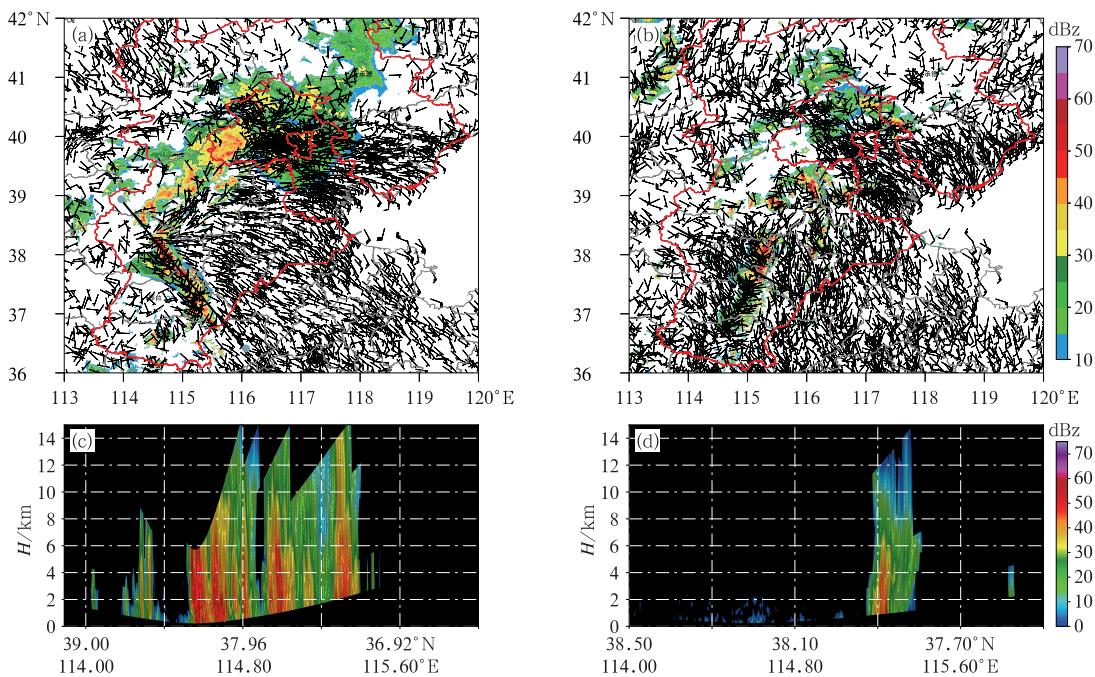


图 13 2023 年(a)7 月 31 日 22 时和(b)8 月 1 日 14 时京津冀地区雷达反射率因子拼图(填色)及地面 10 m 风场(风向杆),石家庄站雷达反射率因子(c)沿图 13a 和(d)沿图 13b 中黑色实线的剖面

Fig. 13 (a, b) Radar reflectivity (colored) and 10 m wind field (barb) in the Beijing-Tianjin-Hebei Region at (a) 22: 00 BT 31 July and (b) 14: 00 BT 1 August 2023, (c, d) vertical cross-sections of radar reflectivity along the black line in (c) Fig. 13a and (d) Fig. 13b at Shijiazhuang

回波沿偏南气流北上,地面雨带虽窄,但与台风倒槽影响阶段河北中部的雨区基本重叠,进一步加大了累计降水量。

6 结论与讨论

利用探空、地面自动站、S 波段多普勒天气雷达、风廓线雷达等观测和 ERA5 再分析资料,对“23·7”河北太行山东麓特大暴雨的降水特征、三个阶段的降水成因进行了初步分析,得到以下结论。

(1)本次过程具有累计降水量大、覆盖范围广、持续时间长、与地形关系密切等特征。过程平均和单站极值降水量仅次于“63·8”,极端性特征明显。累计降水量超过 400 mm 的站点集中出现在河北中部、河北西南部山前两个区域,降水时间超过 40 h,河北中部的降水时长和最大小时雨强均高于河北西南部。河北西南部雨势相对平稳,但短时强降水时长超过河北中部。降水还表现出阶段性特征,30 日短时强降水范围最广,31 日单站雨强最极端。

(2)罕见特大暴雨过程发生在相对稳定的大尺度经向环流背景下,块状副高位置偏北偏西,有利于台风杜苏芮减弱低压一路北上,副高外围加强的东南风低空急流为大暴雨发生提供了充足的水汽,850 hPa 倒槽切变在太行山前稳定少动提供了持久的辐合抬升条件。31 日之前降水区的环境特征是深厚的湿层、低的 LCL 和 LFC、弱的 0~6 km 垂直风切变,对流发展的不稳定能量条件相对较弱,只是 30 日下午在河北东南部 CAPE 得到了增长;31 日副高逐渐控制华北地区后,环境温度直减率加大,大气不稳定能量迅速增加。

(3)强降水分为倒槽西北侧的阵性降水、台风倒槽降水和倒槽减弱后的对流性降水三个阶段。倒槽西北侧的阵性降水在 925 hPa 水汽通量大值区前沿辐合区生成,表现为一条条螺旋带状回波向河北传播,降水间歇性波动特征明显。台风倒槽降水阶段(概念图见图 11),强的东南风低空急流和水汽通量大值区进入河北,雨强明显加大。850 hPa 切变线在太行山前稳定少动,30 日 14 时河北中部强降水区冷池出流的偏北风与东侧偏东风形成地面辐合线,有利于河北东南部高能区触发的对流系统发展加强为 MCS,MCS 移入保定平原地区后形成“列车效应”,增大了河北中部平原的降水量。地面东南风与太行山冷池出流的偏北风构成的地面辐合线触发

不稳定能量释放,是 30 日夜间河北西南部降水加强的原因。31 日早晨副高西伸,850 hPa 转为西南偏南风,对流不稳定层增厚,20 m·s⁻¹ 的东南风急流再次建立,造成北京西南部的极端强降水。倒槽减弱后河北主要受副高 588 dagpm 线控制,台风卡努远距离输送水汽使河北中南部处于高温、高湿、高能状态,31 日夜间和 8 月 1 日白天先后在河北中南部地面辐合线附近触发两条对流回波并北上,雨区重叠效应,进一步加大了累计降水量。

(4)台风倒槽直接影响阶段 850 hPa 切变线受太行山地形阻挡移动缓慢,使得太行山山前长时间维持偏东风,降水回波稳定少动是太行山山前累计降水量大的重要原因。河北西南部强降水主要发生在平均海拔 600 m 左右的山区,过程极值梁家庄站位于向东北开口的狭长山谷内,地面东北风的长时间维持加强了水汽在山脉间的强迫辐合,其各小时降水量均高于周边站点。

本文基于基本观测事实,从天气学的角度对本次罕见特大暴雨过程的成因进行了初步分析,有更多问题需要深入开展研究,如:太行山地形在回波组织、维持及降水增幅等方面的作用有多大?31 日上午副高西伸加强后,北京低空急流再次加强是否与降水潜热反馈有关?还需要采用数值模拟、敏感性试验等手段进一步给出定量的研究结果。

参考文献

- “75·8”暴雨会战组,1977a. 河南“75·8”特大暴雨成因的初步分析
(一)[J]. 气象,3(7):3-5. Special Research Team for the “75·8” heavy rainstorm, 1977a. Preliminary analysis of causes of the “75·8” heavy rainstorm. Part I [J]. Meteor Mon, 3(7):3-5(in Chinese).
- “75·8”暴雨会战组,1977b. 河南“75·8”特大暴雨成因的初步分析
(二)[J]. 气象,3(7):6-8. Special Research Team for the “75·8” heavy rainstorm, 1977b. Preliminary analysis of causes of the “75·8” heavy rainstorm. Part II [J]. Meteor Mon, 3(7):6-8(in Chinese).
- 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,2015. 论河南“75·8”特大暴雨的研究:回顾与评述[J]. 气象学报,73(3):411-424. Ding Y H,2015. On the study of the unprecedented heavy rainfall in Henan Province during 4—8 August 1975: review and assessment[J]. Acta Meteor Sin, 73 (3):411-424(in Chinese).
- 丁一汇,2019. 中国暴雨理论的发展历程与重要进展[J]. 暴雨灾害,38(5):395-406. Ding Y H,2019. The major advances and development process of the theory of heavy rainfalls in China[J]. Torr Rain Dis,38(5):395-406(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).
- 符娇兰,权婉晴,麦子,等,2023.“23·7”华北特大暴雨过程雨强精细化特征及动力和热力条件初探[J]. 气象,49(12):1435-1450. Fu J L,Quan W Q,Mai Z,et al,2023. Preliminary study on the refined characteristics of rainfall intensity and dynamic and thermodynamic conditions in the July 2023 severe torrential rain in North China[J]. Meteor Mon,49(12):1435-1450(in Chinese).
- 孔期,符娇兰,谌芸,等,2022. 河南“21·7”特大暴雨过程中尺度低空急流和低涡的演变特征及成因分析[J]. 气象,48(12):1512-1524. Kong Q,Fu J L,Chen Y,et al,2022. Evolution characteristics and formation analysis of mesoscale low-level jet and vortex in Henan Province during the July 2021 severe torrential rain [J]. Meteor Mon,48(12):1512-1524(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 event in North China on 20 July 2016[J]. Acta Meteor Sin,75(5):685-699(in Chinese).
- 栗晗,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).
- 齐道日娜,王秀明,俞小鼎,等,2023. 河南“21·7”极端暴雨过程天气尺度系统发展维持机制分析[J]. 气象学报,81(1):1-18. Dorina C,Wang X M,Yu X D,et al,2023. Analysis of the mechanisms for development and maintenance of synoptic-scale weather systems during the 19—21 July extreme heavy rainfall in Henan, China[J]. Acta Meteor Sin,81(1):1-18(in Chinese).
- 冉令坤,李舒文,周玉淑,等,2021. 2021 年河南“7·20”极端暴雨动、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,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).
- 孙建华,齐琳琳,赵思雄,2006.“9608”号台风登陆北上引发北方特大暴雨的中尺度对流系统研究[J]. 气象学报,64(1):57-71. Sun J H,Qi L L,Zhao S X,2006. A study on mesoscale convective systems of the severe heavy rainfall in North China by “9608” typhoon[J]. Acta Meteor Sin,64(1):57-71(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. Heavy Rainfalls in China[M]. Beijing: Science Press; 225 (in Chinese).
- 汪小康,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).
- 徐珺,李如梦,张庆红,等,2022. 从大尺度环流解读河南“21·7”特大暴雨事件的极端性[J]. 中国科学: 地球科学,52(10):1873-1886. Xu J,Li R M,Zhang Q H,et al,2022. Extreme large-scale atmospheric circulation associated with the “21·7” Henan flood [J]. Sci China Earth Sci,52(10):1873-1886(in Chinese).
- 杨浩,周文,汪小康,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).
- 杨晓亮,杨敏,段宇辉,等,2021a. 京津冀一次暖区大暴雨的成因分析[J]. 暴雨灾害,40(5):455-465. Yang X L,Yang M,Duan Y H,et al,2021a. Analysis on causes of a warm-sector torrential rain event in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Torr Rain Dis,40 (5):455-465(in Chinese).
- 杨晓亮,杨敏,隆璘雪,等,2021b. 影响环渤海地区的北上台风特征及其各类典型大暴雨过程分析[J]. 海洋预报,38(4):99-106. Yang X L,Yang M,Long L X,et al,2021b. The characteristics of northward-moving typhoons affecting the Bohai rim Region

- and the analysis of various types of related heavy rainfall processes [J]. Marine Forecasts, 38(4): 99-106 (in Chinese).
- 杨晓亮,王秀明,杨敏,等,2022.副热带高压控制下河北局地强降水触发与维持机制分析[J].气象,48(6):677-690. Yang X L, Wang X M, Yang M, et al, 2022. The trigger and maintenance mechanism of local flash heavy rain under the control of subtropical high in Hebei[J]. Meteor Mon, 48(6):677-690(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).
- 赵思雄,孙建华,2019.我国暴雨机理与预报研究进展及其相关问题思考[J].暴雨灾害,38(5):422-430. Zhao S X, Sun J H, 2019. Progress in mechanism study and forecast for heavy rain in China in recent 70 years[J]. Torr Rain Dis, 38(5): 422-430 (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).
- 张芳华,杨舒楠,胡艺,等,2023.“23·7”华北特大暴雨过程的水汽特征[J].气象,49(12):1421-1434. Zhang F H, Yang S N, Hu Y, et al, 2023. Water vapor characteristics of the July 2023 severe torrential rain in North China[J]. Meteor Mon, 49 (12): 1421-1434(in Chinese).
- Luo Y H, Du Y, 2023. The roles of low-level jets in “21·7” Henan extremely persistent heavy rainfall event[J]. Adv Atmos Sci, 40 (3):350-373.
- Xia R D, Zhang D L, 2019. An observational analysis of three extreme rainfall episodes of 19–20 July 2016 along the Taihang Mountains in North China[J]. Mon Wea Rev, 147 (11): 4199-4220.
- Xu J, Li R M, Zhang Q H, et al, 2022. Extreme large-scale atmospheric circulation associated with the “21·7” Henan flood[J]. Sci China Earth Sci, 65(10):1847-1860.

(本文责编:张芳)