

徐姝,易笑园,熊明明,等,2024. 华北局地大暴雨过程中多个 β 中尺度对流系统发生发展对比分析[J]. 气象,50(2):181-194.
Xu S, Yi X Y, Xiong M M, et al, 2024. Comparative analysis of occurrence and development of multiple β -meso scale convective systems during a localized severe torrential rain event in North China[J]. Meteor Mon, 50(2):181-194(in Chinese).

华北局地大暴雨过程中多个 β 中尺度对流系统 发生发展对比分析*

徐 姝^{1,2} 易笑园¹ 熊明明³ 孙密娜¹ 林晓萌¹

1 天津市气象台,天津 300074

2 中国气象局水文气象重点开放实验室,南京 210024

3 天津市气候中心,天津 300074

提 要: 利用常规地面高空观测、多普勒雷达、风廓线、VDRAS(Variational Doppler Radar Analysis System)和 NCEP 再分析资料,对 2018 年 8 月 5—6 日副热带高压(以下简称副高)控制下华北一次局地大暴雨过程中多个 β 中尺度对流系统触发和发展机制进行了分析。结果表明:这次大暴雨发生在副高控制下,处于高温、高湿气团中,大气层结极不稳定。暴雨由多个相继发展的中尺度对流系统造成,分别是太行山迎风坡上西南—东北向、华北平原地区保定一带南北向、保定至霸州附近西南—东北向和以雄安新区为中心东西向原地生消的准静止 MCS-I、MCS-II、MCS-III 和 MCS-IV,均属于 β 中尺度。在相似的环境中,不同中尺度对流系统触发机制有较大差异,太行山迎风坡上的 MCS-I 是由近地层偏东暖湿气流在迎风坡与山风形成的辐合抬升触发;由辐射差异和前期强降水形成的局地冷池受 MCS-I 影响再次加强后,其出流与环境风形成的两条地面辐合线分别触发了 MCS-II 和 MCS-III,并组织对流沿辐合线呈带状发展;而超低空偏东风增强叠加冷池出流在地形抬升作用下促使沿山暖湿气团进一步抬升,使得原本消亡的 MCS-I 再次重建。MCS-IV 发展最旺盛、持续时间最长,是大暴雨中心的直接制造者,一方面 MCS-II 与 MCS-III、MCS-I 与 MCS-IV 的两次合并过程,是 MCS-IV 增强、持久的重要原因;另一方面边界层偏东风急流为 MCS-IV 的发展提供了水汽和不稳定能量等有利条件,同时推动其左前方中尺度涡旋的发展,导致 MCS-IV 所在地的气旋性涡度大大增加,加强了以急流轴为中心的垂直次级环流发展,造成 MCS-IV 的发展维持,形成华北平原地区以雄安新区为中心的东西向大暴雨带。

关键词: 准静止中尺度对流系统,对流单体合并,冷池,地面辐合线,中尺度边界层急流,中尺度涡旋

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.092801

Comparative Analysis of Occurrence and Development of Multiple β -Meso Scale Convective Systems During a Localized Severe Torrential Rain Event in North China

XU Shu^{1,2} YI Xiaoyuan¹ XIONG Mingming³ SUN Mina¹ LIN Xiaomeng¹

1 Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074

2 China Meteorological Administration Hydro-Meteorology Key Laboratory, Nanjing 210024

3 Tianjin Climate Center, Tianjin 300074

Abstract: Based on the conventional surface and upper-air observations, Doppler radar products, wind-profiling

* 国家自然科学基金项目(41575049、41475050)、天津市气象局重点项目(202304zdxm03)和中国气象局水文气象重点开放实验室开放研究课题资助项目(23SWQXM002)共同资助

2022 年 10 月 19 日收稿; 2023 年 9 月 18 日收修定稿

第一作者:徐姝,主要从事天气预报和暴雨等强对流天气中尺度机制研究. E-mail: xushu210@163.com

通讯作者:易笑园,主要从事预报和中尺度灾害天气研究. E-mail: yixy123@sina.com

radar data, VDRAS and NCEP reanalysis data, the triggering and development mechanisms of multiple β -meso scale convective systems under the influence of subtropical high in North China from 5 to 6 August 2018 are analyzed. The results show that this severe torrential rain occurred under the control of subtropical high, in a high temperature and high humidity air mass, with extremely unstable atmospheric stratification. The torrential rain was caused by multiple successive developing mesoscale convective systems, namely MCS-I, MCS-II, MCS-III and MCS-IV, which were quasi-stationary β -meso scale systems on the windward slope of Taihang Mountains in southwest-northeast direction, in Baoding Area of North China Plain in north-south direction, near Baoding to Bazhou in the southwest-northeast direction and centered on Xiong'an New Area in east-west direction, respectively. In a similar environment, different mesoscale convective systems had significant differences in triggering mechanisms. MCS-I on the windward slope of Taihang Mountains was triggered by near-surface easterly warm and humid airflow converging and lifting on the windward slope with mountain wind. After being influenced by MCS-I, the local cold pool formed by radiation difference and earlier-stage severe precipitation was strengthened again. Its outflow formed two surface convergence lines with environmental wind, which triggered MCS-II and MCS-III and organized convection along convergence line into band-like development. The enhanced easterly wind at ultra-low altitude superimposed the outflow of the cold pool, promoting further uplift of the warm and humid air mass along the mountain under the effect of terrain uplift, triggering MCS-I reconstruction. MCS-IV developed most vigorously and lasted longest, and was the direct maker of the severe torrential rain center. On one hand, the two merger processes of MCS-II and MCS-III, MCS-I and MCS-IV were important reasons for the strengthening and persistence of MCS-IV. On the other hand, the boundary layer easterly jet provided favorable conditions such as water vapor and unstable energy for MCS-IV's development, and also promoted the development of mesoscale vortex in its left front side, resulting in a significant increase of cyclonic vorticity in MCS-IV's location, enhancing the vertical secondary circulation development centered on jet axis, causing MCS-IV's continuous maintenance, and forming an east-west severe torrential rain belt centered at Xiong'an New Area in North China Plain.

Key words: quasi-stationary mesoscale convective system, convection cell merge, cold pool, surface convergence line, mesoscale boundary layer jet, mesoscale vortex

引言

华北是中国三个暴雨集中分布区之一,近年来,以降水强度强、持续时间长为主要特征的极端降水事件在华北地区多次发生,造成了严重的生命财产损失和巨大的社会影响。为了探究华北暴雨的成因,气象工作者从多个角度进行了深入研究,包括大尺度环流形势(周璇等,2020)、中低纬度系统相互作用(赵思雄等,2018)、水汽输送特征(王婧羽等,2014;布和朝鲁等,2022)、高低空急流的作用(李青春等,2022)、天气尺度和中尺度系统(杨波等,2016)以及复杂地形(程晓龙等,2021;赵衍斌等,2023;符娇兰等,2017;盛春岩等,2012)在华北暴雨中的作用。

众多研究结果表明,暴雨事件多是在有利的大尺度环流背景下,由发展旺盛的中尺度对流系统引发(王晓芳和崔春光,2011),而中尺度对流系统的触发和发展维持机制一直是中尺度气象界研究的重点和难点,也是提高局地强对流天气演变的科学认知和短时临近预报水平的关键所在。张文龙等(2013)对北京地区两次暴雨天气过程进行对比分析,研究发现若浅薄的偏东风与中高空辐散场有较好的配合,则其动力作用能够对触发中尺度对流系统(MCS)起到直接作用;若在对流层低层的潮湿层中存在深厚的偏东风,则有利于 MCS 的发展和维持;陈明轩等(2013)利用雷达资料、四维变分同化技术和三维数值云模式,为北京“7·21”特大暴雨中尺度对流系统的结构特征和传播机理的分析提供了佐证,探讨了地形强迫及低层动力场对 MCS 的触发

和维持作用;孔凡超等(2016)分析冀中特大暴雨的中尺度系统特征时指出暴雨是在地面中尺度涡旋的影响下,由暖区中的 β 中尺度对流云团在初生和发展阶段造成的。湛芸等(2018)通过分析2013年7月华北一次暖区大暴雨研究,指出高温高湿环境下地面辐合线、冷池及中尺度涡旋的相互作用对对流系统的触发及组织化发展至关重要;雷蕾等(2020)在分析北京2018年7月副热带高压(以下简称副高)边缘的一次特大暴雨时发现,低空急流出口区出现的气旋性风场或切变有利于触发和加强对流。已有的研究多是针对相同天气背景下的一个中尺度系统展开,如果在相同的天气系统背景下,多个MCS相继触发,其机制是否相同,为什么其中有些中尺度对流系统持续发展,而另一些中尺度对流系统则维持时间相对较短?针对以上问题相关研究较少,认识也很有限,导致局地暴雨精细化预报水平不高,因此这些问题值得进一步研究。

2018年8月5日,在副高控制下,多个 β 中尺度对流系统相继影响华北中部,形成三条短历时暴雨带,最大6h累计雨量为202mm,其中雄安新区容城的最大小时雨强达到 $118\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。这次暴雨局地性、突发性强,强降水造成城区内涝严重,电力通信中断。一般预报经验认为,相比副高边缘,副高控制下强降水发生概率低,加之数值天气预报模式对这种弱强迫背景下局地降水预报也表现出明显的局限性,导致短期预报的雨强偏弱,出现大暴雨漏报。本文利用多种观测资料分析了此次强降水产生

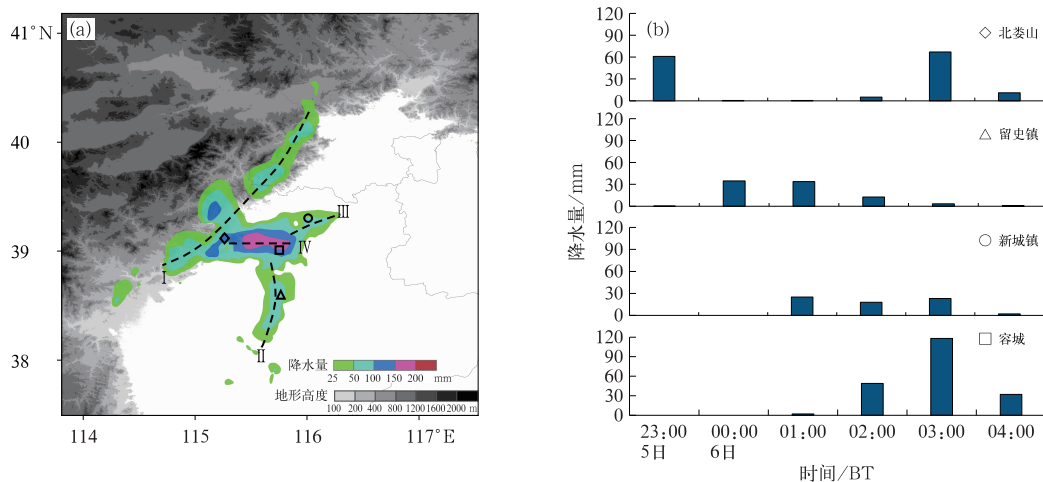
的中尺度环境条件,基于雷达产品给出多个中尺度对流系统演变过程,重点对比其触发及发展机制,并给出此次副高控制下华北暖区大暴雨形成的概念模型。

1 资料和方法

文中使用多源观测资料做综合分析。资料包括:(1)加密自动站资料,用于分析雨强、降水分布、冷池和地面辐合线;(2)北京观象台SA多普勒天气雷达资料,用于分析对流系统演变及中尺度结构;(3)一天四次的NCEP $0.25^\circ\times 0.25^\circ$ 的FNL再分析资料,用于大尺度环流及物理量诊断;(4)天津西青L波段风廓线雷达资料,用于分析边界层偏东风变化;(5)多普勒雷达四维变分分析系统(VDRAS)热动力反演资料由北京城市气象研究院提供,系统同化京津冀区域六部多普勒天气雷达,并融合区域自动站逐5min观测和中尺度数值模式结果(陈明轩等,2016),用于分析中尺度环流动力、热力特征;(6)华北地区地形资料,用于分析地形对降水的影响。

2 强降水实况

2018年8月5—6日,河北中部出现了一次强降水天气过程,最强降雨出现在5日23:00至6日05:00(北京时,下同),表现为四条降雨带(图1a),雨带I位于北京西南部和保定西部的太行山地区,



注: I、II、III、IV所示为四条雨带,◇、△、○、□为代表站位置。

图1 2018年8月5日23:00至6日05:00(a)6h累计雨量(填色)和地形高度(阴影),
(b)四个代表站的逐小时降水量变化

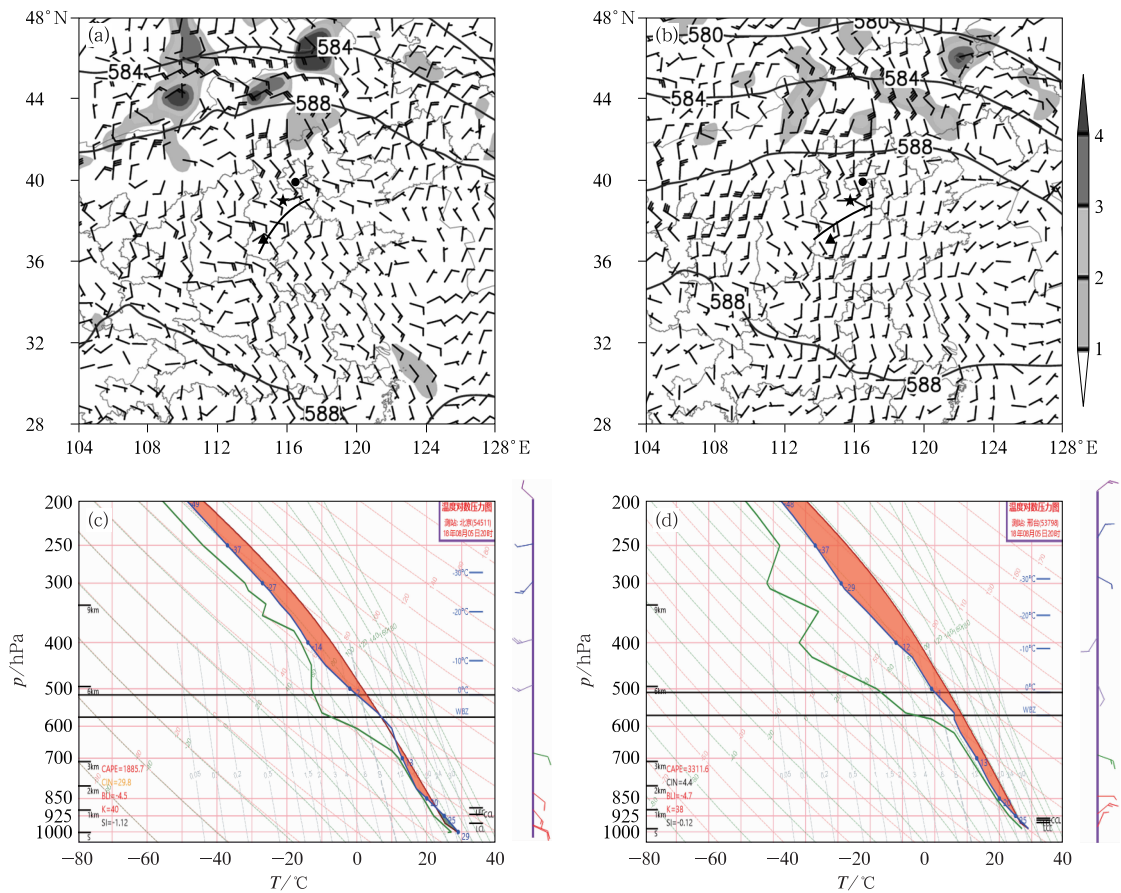
Fig. 1 (a) The 6 h accumulated precipitation (colored) and terrain height (shaded),
(b) hourly rainfall at four representative stations from 23:00 BT 5 to 05:00 BT 6 August 2018

另外三条分布在地形相对平缓的平原地区,分别是保定南部的南北向雨带Ⅱ,保定至霸州附近的西南—东北向雨带Ⅲ和以雄安新区为中心的东北向雨带Ⅳ。上述地区 6 h 累计雨量最大为 202 mm,出现在雄安新区的容城。选取不同雨带上的四个代表站,逐小时雨量变化显示(图 1b),雨带Ⅰ上的北娄山站出现了两次峰值,分别是 5 日 23:00 和 6 日 03:00,最大雨强达 $67 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$;雨带Ⅱ上留史镇站和雨带Ⅲ上新城镇站降水峰值出现在北娄山站第一次峰值后,最大雨强分别达 $35 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $25 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$;大暴雨带Ⅳ上雄安新区容城站的峰值出现最晚(6 日 03:00),且与雨带Ⅰ的第二次峰值同时,但强度最大,达到 $118 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,雨带Ⅳ是本文重点研究的降水区。此次降水分布不均、局地性强、

雨强大,具有明显的中尺度对流性降水特征,造成容城严重内涝、供电设施断电。

3 环流形势和环境条件

5 日 20:00(图 2a),500 hPa 中高纬经向型环流显著,副高主体控制长江以北大部分地区,内蒙古以北 104°E 有一浅槽,6 日 02:00(图 2b),浅槽东移至 108°E ,槽前正涡度平流位于内蒙古中部,副高北侧 588 dagpm 线南落至河北北部,河北中南部地区仍受副高控制,河北地区 925~500 hPa 均为暖平流(图略),无明显冷空气侵入特征。5 日 20:00 和 6 日 02:00,850 hPa 上由偏南风 and 偏东风形成的暖切变线在河北南部稳定少动。地面图上,东北和河套地



注:●、▲、★分别表示北京、邢台、大暴雨中心,“—”为 850 hPa 切变线所在位置。

图 2 2018 年 8 月(a)5 日 20:00,(b)6 日 02:00 的 500 hPa 高度场(黑色等值线,单位: dagpm)、涡度平流(阴影,单位: 10^{-9} s^{-2})、850 hPa 风场(风羽);(c,d)5 日 20:00(c)北京,(d)邢台 T - $\ln p$ 图

Fig. 2 (a, b) Geopotential height (black contour, unit: dagpm), vorticity advection (shaded, unit: 10^{-9} s^{-2}) at 500 hPa, wind field (barb) at 850 hPa at (a) 20:00 BT 5, (b) 02:00 BT 6 August and (c, d) T - $\ln p$ diagrams of (c) Beijing and (d) Xingtai at 20:00 BT 5 August 2018

区分别存在一个高、低压中心,华北地区处于低压倒槽前部,受东南风影响,京津冀中东部平原露点温度高达 $26\sim 28^{\circ}\text{C}$,且当日最高气温达 $35\sim 37^{\circ}\text{C}$,为显著的高温、高湿环境。

利用北京(图 2c)和邢台(图 2d)探空资料估计大暴雨区上空大气层结状况。5 日 20 时探空表明北京对流有效位能(CAPE)达到 $1886\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,对流抑制位能(CIN)只有 $30\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,抬升凝结高度在 975 hPa 附近,自由对流高度在 900 hPa 附近;邢台的 CAPE 达到 $3311\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,CIN 只有 $4\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,抬升凝结高度则接近 950 hPa,自由对流高度接近 935 hPa。较低的抬升凝结高度和自由对流高度使得不需要很强的抬升即可触发对流,700 hPa 以下的温度露点差均小于 2°C ,华北中东部的整层可降水量在强降水发生前和过程中均在 60 mm 以上,是形成强降水的有利能量、水汽条件。

4 中尺度对流系统演变特征与相互作用

4.1 中尺度对流系统的演变

为叙述简便,以下分别将造成太行山迎风坡附近、华北平原地区保定一带南北向、保定至霸州附近西南—东北向和以雄安新区为中心的东向西强降水的对流风暴系统分别称为 MCS-I(其中北京西部山区的对流用 I'表示)、MCS-II、MCS-III、MCS-IV。

从雷达组合反射率演变(图 3)可以看到,MCS-I 贯穿整个降水过程,生命史长达 7 h。MCS-I 演变大体上可以分为四个阶段:分散对流阶段、成熟阶段、减弱消亡阶段和重建阶段。太行山迎风坡的强降水主要发生在 MCS-I 成熟和重建阶段。5 日 22:00 分散对流阶段(图 3a),太行山山前迎风坡一侧开始出现与地形分布平行的多个新生对流单体,23:12 对流达到成熟阶段(图 3b),这些分散单体合并组织成东北—西南向带状对流系统 MCS-I,位于河北中部至北京西部山区,且 MCS-I 南端回波带强度明显增强,受其影响,河北中部山区出现短时强降水,小时雨强 $40\sim 80\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。6 日 00:18, MCS-I 南端回波进入减弱消亡阶段(图 3c),逐渐减弱消散,其北端北京西部山区的对流 I'回波不断增强,强回波中心达到 55 dBz,小时雨强达到 $73\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。01:06—04:06, MCS-I 南端回波又

重新建立(图 3d, 3f),持续影响河北中部沿山地区 3 h,最大累计雨量达 126 mm,最大雨强达 $87\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,期间北端回波减弱消亡。MCS-I 在长达 7 h 的生命史里,经历了分散对流阶段、成熟阶段、减弱消亡阶段和重建阶段,且稳定维持在太行山山前。

MCS-II 是在大气层结状态极不稳定的平原地区被触发、组织、发展起来。5 日 23:12,在保定西部的太行山山前对流系统发展加强过程中,其东部平原地区开始出现分散性新生回波,在山前对流系统减弱过程中,这些分散回波逐渐发展、合并,到 6 日 00:18,形成南北向的 MCS-II,其水平尺度达 120 km,结构密实,强中心增大到 45 dBz,对应的降水强度也随之增大,雨带 II 上的留史镇站出现最大雨强($35\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$)。MCS-II 在垂直剖面上呈现多单体特征,随后的 3 h MCS-II 逐渐减弱(图 3d~3f),且以准静止状态在保定南部维持,形成了华北平原地区的南北向雨带 II。

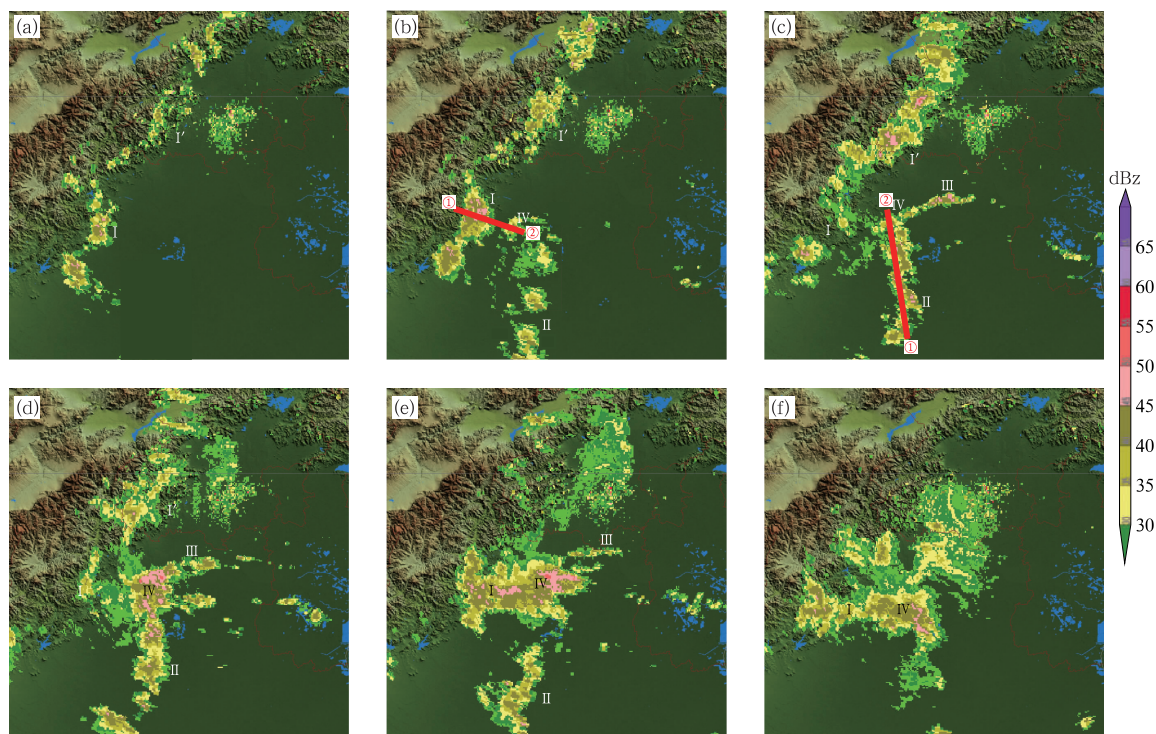
MCS-III 同样是在平原地区被触发、组织、发展起来。6 日 00:18,北京西南部太行山前的对流系统 I'加强过程中,其东部偏南的平原地区触发一条几乎与之平行的西南—东北向的 MCS-III,对流发展迅速,导致新城镇连续 3 h 雨强超 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。01:06, MCS-II 与 MCS-III 相交后,其交点处对流 IV 迅速发展,最大回波强度达 55 dBz。02:00, MCS-IV 与沿山重生的 MCS-I 合并,形成东西向 MCS-IV,出现本次降水中的最大雨强($118\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$)。至 04:06, MCS-IV 在雄安新区维持了 3 h,形成本次过程的极端强降水中心。

从上面的分析可以看到,在副高的控制下,造成太行山迎风坡附近、华北平原地区保定一带南北向、保定至霸州附近西南—东北向和以雄安新区为中心的东西向强降水的对流风暴系统均处于准静止状态,在其触发地发展成熟直至减弱消散,造成强降水在同一地点长时间维持,形成对应的四条雨带。

4.2 中尺度对流系统相互作用

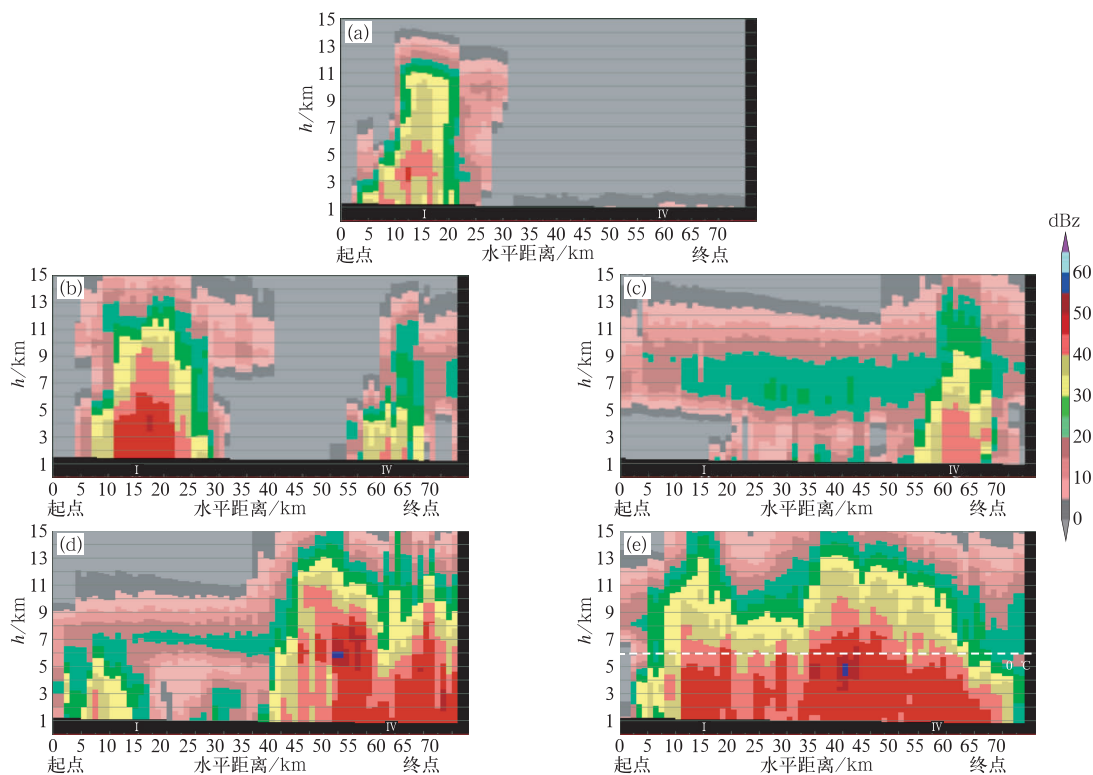
图 4a~4e 为图 3a~3e 对应时刻沿着图 3b 中①—②剖面得到的 RHI 图,从图 4 可以对比出 MCS-I 和 MCS-IV 生成与发展在时间上存在先后顺序,它们之间是如何相互作用的呢?

5 日 22:00, MCS-I 正在发展加强中,回波核心 45 dBz 位于 4 km 处,此时,IV 点处还未出现回波,23:12, MCS-I 达到成熟阶段(图 4b),大于 45 dBz



注:红色线表示剖面,①、②分别表示剖线的起点和终点;I'为北京西部山区的对流系统。

图 3 2018 年 8 月(a)5 日 22:00,(b)5 日 23:12,(c)6 日 00:18,(d)6 日 01:06,(e)6 日 02:00,(f)6 日 04:06 雷达组合反射率演变
Fig. 3 Composite reflectivity at (a) 22:00 BT 5, (b) 23:12 BT 5, (c) 00:18 BT 6, (d) 01:06 BT 6, (e) 02:00 BT 6, (f) 04:06 BT 6 August 2018



注:白色虚线表示 0℃层所在高度。

图 4 2018 年 8 月(a)5 日 22:00,(b)5 日 23:12,(c)6 日 00:18,(d)6 日 01:06,(e)6 日 02:00 沿图 3b 中①—②实线的反射率垂直剖面
Fig. 4 Vertical cross-section of the reflectivity along the line ①—② in Fig. 3b at (a) 22:00 BT 5, (b) 23:12 BT 5, (c) 00:18 BT 6, (d) 01:06 BT 6, (e) 02:00 BT 6 August 2018

的对流云回波发展到 6 km, 中心强度达到 50 dBz 以上, MCS-I 形成的冷池出流触发了 MCS-II, IV 点处回波逐渐生成(图 4c), 随后的 1 h, IV 点处回波进一步发展, 而 MCS-I 逐渐减弱消散(图 4c)。6 日 01:06, MCS-IV 迅速发展, 大于 45 dBz 的对流云回波发展到 9 km, 中心强度达到 55 dBz, 超低空偏东风叠加其形成的冷池出流与地形的相互作用触发了 MCS-I, 使得原本消散的 MCS-I 又重新发展起来。02:00(图 4e), MCS-IV 与重建的 MCS-I 合并, 最大反射率为 55 dBz, 反射率 45 dBz 以上的强回波均集中在 0°C 层以下, 由于抬升凝结高度在 700 m 左右, 暖云层厚度达 4800 m, 暖云主导型对流非常有利于高降水效率的产生(俞小鼎, 2012), 加之合并后的回波带长时间位于河北中部, 导致局地强降水持续, 形成一条东西向的大暴雨带。

为了研究 MCS-II 与 MCS-III 的相互作用, 沿着图 3c 中①—②剖面做剖面, 从图 5a 和 5b 对比看出, 交点处的 MCS-IV 在不到 1 h 的时间里迅速发展成熟, 中心强度达到 55 dBz, 具有发展快、强度大的特点。对应图 3c 和 3d 可以发现, 由于 MCS-II 与

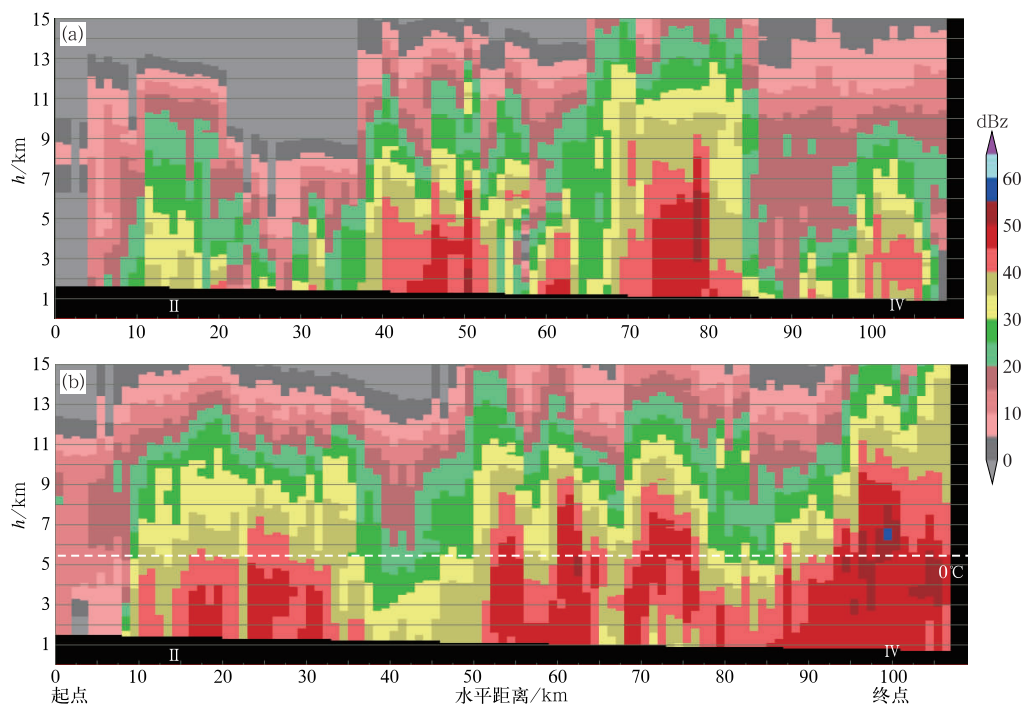
MCS-III 两条带状回波相交, 导致交点处 MCS-IV 迅速发展, 进入成熟阶段。

上述分析表明, 在副高的控制下, MCS-I 触发了 MCS-II 和 MCS-III, MCS-II 与 MCS-III 交点处的 MCS-IV 发展成熟后反过来又触发 MCS-I 重建; 对流单体合并是促使对流系统成长、增强、持久的重要因素(易笑园等, 2017)。本次大暴雨过程, MCS-II 与 MCS-III, MCS-IV 与 MCS-I 的合并是对流增强、持久的重要原因。

5 对流触发机制分析

5.1 地形抬升触发对流 MCS-I

5 日 22:00, 华北地区位于低压倒槽前, 其中东部平原地区处于高温、高湿的环境条件下, 偏东风一直沿伸至太行山东麓, 太行山迎风坡附近由于地形效应, 夜间吹山风即西北风(王丽荣等, 2013), 山前 200 m 高度附近, 东南风与山风形成的辐合抬升释放不稳定能量, 触发了 MCS-I 南段的对流单体



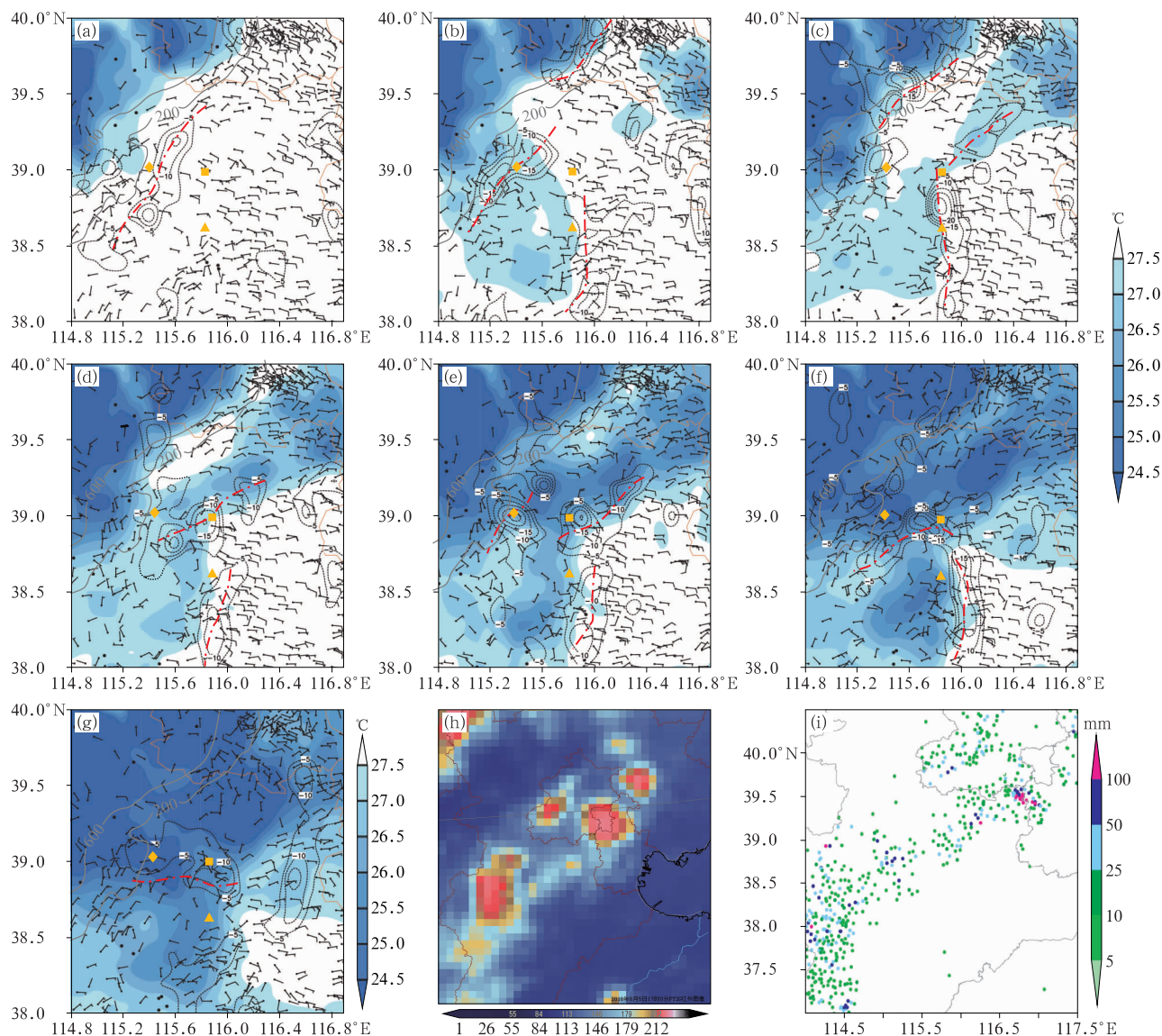
注: 白色虚线表示 0°C 层所在高度。

图 5 2018 年 8 月 6 日(a)00:18, (b)01:06 沿图 3c 中①—②实线的反射率垂直剖面

Fig. 5 Vertical cross-section of the reflectivity along the line ①—② in Fig. 3c
at (a) 00:18 BT and (b) 01:06 BT 6 August 2018

(图 6a),入夜后,山风增强,最大风速达到 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,此时沿山的辐合加强,辐合中心值达 $-2.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,MCS-I 南段发展到成熟阶段,最大雨强为 $80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,与此同时,偏东风在北京西部山区的辐合抬升触发了 MCS-I 北段的对流 I'(图 6b)。

由前面探空资料对比可知,北京的环境场条件较南部邢台略差,导致强迫抬升的高度比 MCS-I 南段略高,偏东风抬升至 600 m 高度附近才触发了 MCS-I 北段的对流 I'。副高控制型暴雨一般与午后至傍晚的局地热对流发展有关(李强等,2019),而



注:◆、▲、■分别表示北娄山、史留镇、容城所在位置。

图 6 2018 年 8 月(a~g)5—6 日地面自动气象站风场(风羽)、温度(填色)、散度(虚线,单位: 10^{-5} s^{-1}),地面辐合线(红色点划线),200、600 m 地形高度等值线(粗灰色线);

(h)5 日 18:00 红外卫星云图;(i)5 日 13:00—19:00 累计雨量

(a)5 日 22:00,(b)5 日 23:00,(c)6 日 00:00,(d)6 日 01:00,(e)6 日 02:00,(f)6 日 03:00,(g)6 日 04:00

Fig. 6 Distribution of (a~g) wind field (barb), temperature (colored), divergence (dashed line, unit: 10^{-5} s^{-1}) observed by automatic weather stations, surface convergence line (red dotted line), and 200 m and 600 m terrain height (thick gray line) from 5 to 6 August; (h) infrared satellite image at 18:00 BT 5;

(i) accumulated precipitation from 13:00 BT to 19:00 BT 5 August 2018

(a) 22:00 BT 5, (b) 23:00 BT 5, (c) 00:00 BT 6, (d) 01:00 BT 6, (e) 02:00 BT 6, (f) 03:00 BT 6, (g) 04:00 BT 6

MCS-I 在夜间被触发,主要是由近地层偏东暖湿气流在迎风坡强迫抬升后,与山风共同触发对流不稳定能量的释放。

5.2 地面辐合线触发 MCS-II 和 MCS-III

从逐时红外卫星云图可以看出,5日12:00开始,太行山沿山及北京南部有对流云生成,维持至18:00(图6h),对流云导致该区域出现局地强降水(图6i),直至19:00完全消散。受辐射差异及强降水影响,太行山沿山及北京以南地区较东部地区偏低 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$,冷出流前沿已经接近留史镇及容城站点(图略)。23:00(图6b),MCS-I 中的雨滴蒸发冷却后导致近地面冷池加强,其前沿偏北风出流进一步东扩,与环境场偏东暖湿入流相遇,在保定南部形成南北向的地面辐合线,在高温、高湿和对流不稳定的环境层结下,地面辐合线有利于对流触发及加强发展,位于平原地区的地面辐合线与散度场上的中尺度辐合区对应,辐合中心值达 $-2.5\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$,辐合线上触发了多个新生对流单体并组织发展成 MCS-II。6日00:00(图6c),受 MCS-I 北端的北京西部沿山冷池出流影响,北京以南地区温度进一步下降,风也由东风转为了东北风,与环境东南风在雄安新区附近形成一条西南—东北向的地面辐合线,该地面辐合线触发了 MCS-III,随后该条地面辐合线的西端与保定南部辐合线的北端在雄安新区的

容城上空相遇,辐合明显。在两条边界层辐合线的相交处,如果大气垂直层结有利于对流发展,则几乎肯定会有风暴在那里生成;如果边界层辐合线相交处本来就有风暴,则该风暴会迅速发展(刁秀广等,2009),两条边界层辐合线的相交,促使 MCS-IV 迅速成长(图5b)。01:00以后(图6d~6g),两条回波带上的强降水形成局地冷空气堆,温度进一步下降,冷池出流与环境东南风对峙有助于地面中尺度辐合稳定维持,且组织对流沿着辐合线继续呈带状发展。

5.3 超低空偏东风结合冷池出流与地形的相互作用再次触发 MCS-I

在 MCS-IV 与 MCS-I 相互作用过程中,沿山原本消亡的 MCS-I 是如何重建的呢?从雷达剖面(图4d)和对应时刻的流场(图7a)中可以看到,北娄山回波附近有偏东风沿山爬升,且扰动温度为负值,结合图8a,6日01:00以后超低空偏东风出现脉动,虽未达到急流标准,但明显增强,从 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增大到 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,且该偏东风具有冷湿特性(图8b),由于 MCS-IV 的发展,在平原地区近地面形成冷池,中心温度为 24°C ,冷池偏东出流向西推进,从图6e中也可以看到,回波西侧的地面偏东风由 $1\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增大到 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,此时北娄山处的温度为 27°C ,露点温度为 26°C ,超低空偏东风增强叠加冷池出流促使北娄山沿山一带相对暖湿的气团抬升, 115.2°E

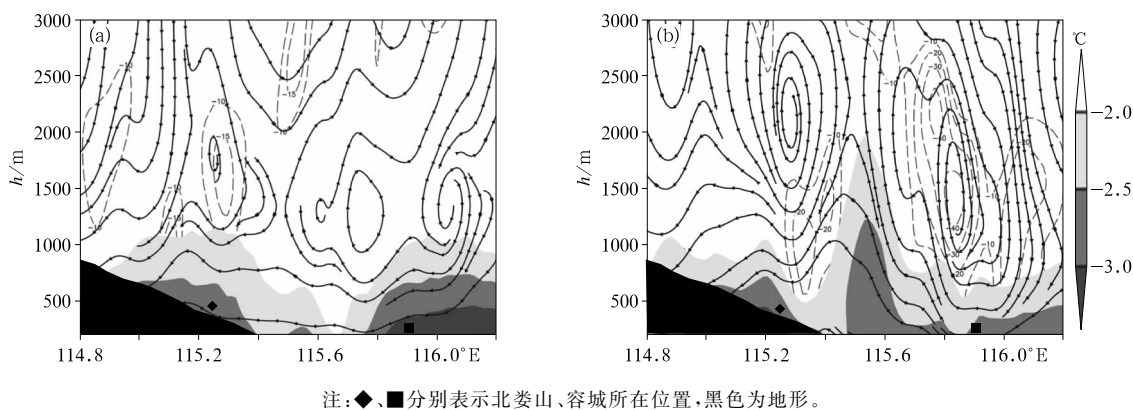


图7 2018年8月6日(a)01:06,(b)02:00沿图3b中①—②实线的VDRAS $v-w$ (w 放大50倍)

合成风场(流线,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、散度(虚线,单位: 10^{-5} s^{-1})、扰动温度(阴影)的垂直剖面

Fig.7 Verticle cross-section of $v-w$ (w amplified 50 times) composite wind field

(streamline, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), divergence (dashed line, unit: 10^{-5} s^{-1})

and temperature disturbance (shaded) of VDRAS along the solid line ①—②

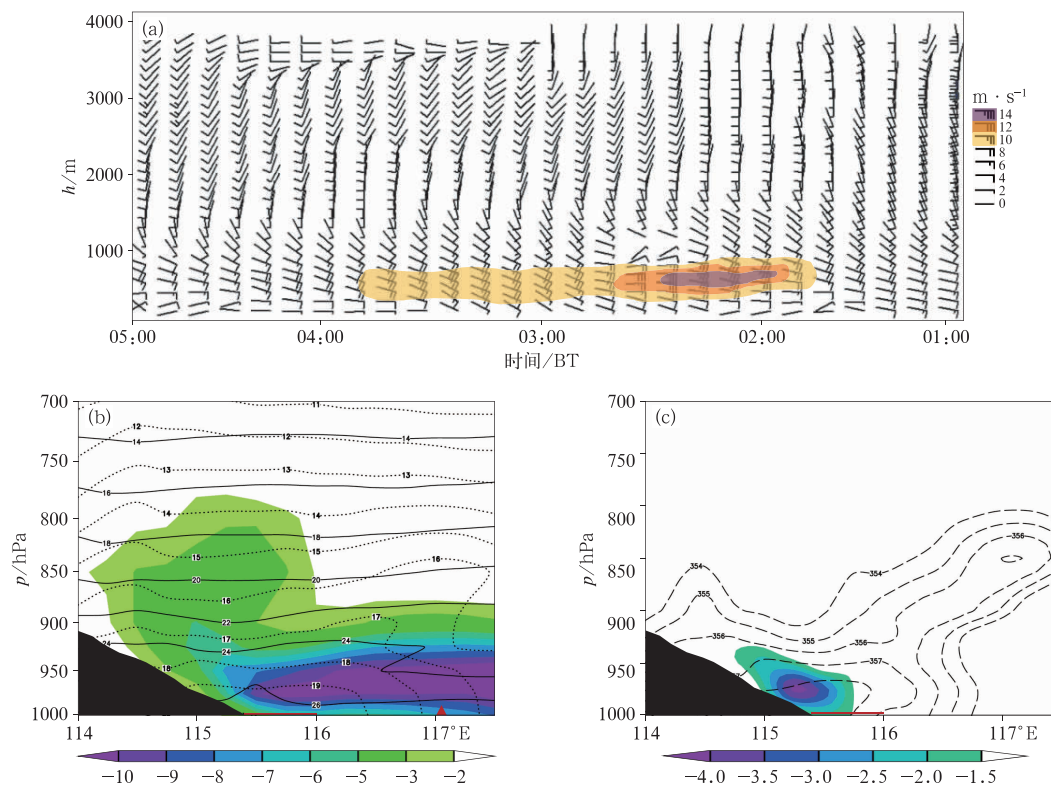
in Fig. 3b at (a) 01:06 BT and (b) 02:00 BT 6 August 2018

附近有一支明显的上升气流,在 2 km 高度达最强,相对辐合中心值达到 $-1.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,与杨晓亮等(2022)研究结论一致。由前面环境场的分析得知,本次过程的抬升凝结高度和自由对流高度都较低,不需要很强的抬升即可触发对流,超低空偏东风增强叠加冷池出流后在地形抬升作用下使得沿山 MCS-I 再次触发;6 日 00:00, MCS-IV 与 MCS-I 回波合并,辐合上升运动进一步加强,辐合中心值为 $-4.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (图 7b), 45 dBz 以上回波面积扩大,强回波中心发展到 5.5 km (图 4d),造成沿山地区雨强 $80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、雄安新区雨强 $118.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的强降水,即 MCS-I 的第二次峰值和 MCS-IV 的峰值。

6 MCS-IV 的发展机制

从前面的分析可见, MCS-I 与 MCS-IV 合并后,东西向的 MCS-IV 中心强度保持在 45 dBz 维持了 3 h,最强发展到 55 dBz 以上,而在同一时间段中,南北向的 MCS-II 南端结构逐渐松散,多为小于 35 dBz 的层状云区。在相似环流背景下, MCS-IV 为何可以持续发展更长的时间?

位于 MCS-IV 上游的天津风廓线雷达显示 (图 8a), 6 日 01:00 以后,边界层大气经历了从偏东风风速脉动,到低空急流建立并长时间存在的过程。使用 NCEP 的 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ FNL 资料,分析风廓



注: —代表 MCS-IV 所在位置, ▲代表风廓线雷达位置, 黑色代表地形。

图 8 2018 年 8 月 6 日 (a) 01:00—05:00 天津西青站风廓线雷达风场观测 (风羽和填色),

(b, c) 02:00 沿 MCS-IV (39.01°N) 的 (b) 温度 (实线, 单位: $^\circ\text{C}$)、比湿

(点线, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和纬向风速 (填色, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (c) 假相当位温 θ_{se}

(虚线, 单位: K) 和水汽通量散度 (填色, 单位: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 的垂直剖面

Fig. 8 (a) Wind profile (barb and colored) at Xiqing Station of Tianjin from 01:00 BT to 05:00 BT 6 August;

(b, c) vertical cross-section along MCS-IV (39.01°N) of (b) temperature (solid line, unit: $^\circ\text{C}$),

specific humidity (dotted line, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and zonal wind speed (colored, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),

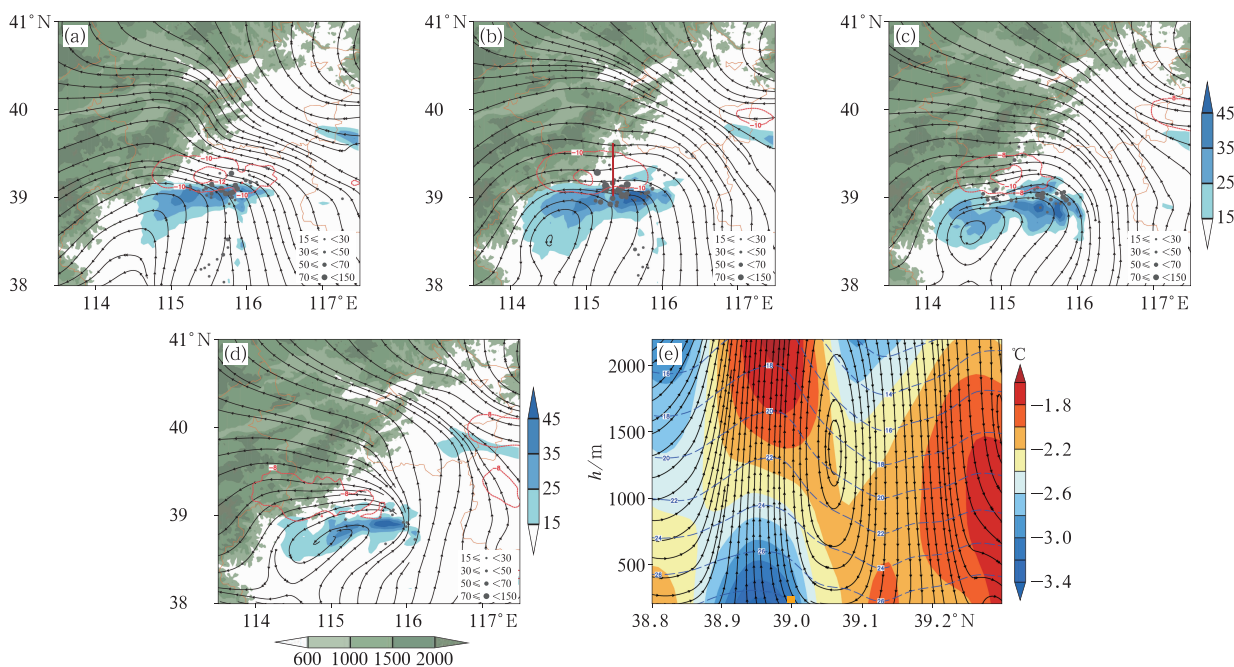
(c) θ_{se} field (dashed line, unit: K), vapor flux divergence

(colored, unit: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) at 02:00 BT 6 August 2018

线雷达所在纬度的纬向风速、温度和比湿垂直剖面(图 8b),从图中看到,这支东风急流核位于 950 hPa 左右,与风廓线一致,从海上一直推进至太行山前强降水区域,偏东风具有冷湿特性,一方面引起水汽的输送和辐合,山前的水汽通量散度中心值达到 $-4.0 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,这种对流层低层到近地面的水汽强辐合对极端暴雨的出现有重要贡献;另一方面形成 θ_{se} 等值线密集带(图 8c),水平梯度加大,增强大气不稳定性。MCS-IV 位于这支边界层偏东风急流内,偏东风急流为 MCS-IV 的发展提供了水汽和不稳定能量等有利条件。

基于 VDRAS 资料分析进一步分析这支边界层偏东风急流逐小时演变特征,从图 9a~9d 中看到,当边界层偏东急流建立后逐渐增强时,在其左前方

形成 β 中尺度涡旋,随着大风核的减弱消失, β 中尺度低涡也减弱、消失,且强涡度值和降水、边界层急流的位置吻合较好。这个中尺度涡旋与边界层急流之间有什么关系?从图 8a 风场演变看,从 6 日 01:00—03:00,随着时间的推移,偏东风从 $4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 逐渐增大至 $10 \sim 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,边界层偏东风急流的增强导致切变涡度的增强,使得其南侧的气旋式涡度增加,由此造成该地区局地气旋式切变或风场出现,即本文中形成的中尺度涡旋(图 9),其涡度的大值区正好与东西向的 MCS-IV 重合。涡旋的动力驱动作用促使 MCS 区域辐合上升,同时以气旋性环流方式向其输送涡旋以东地区的暖湿空气。由此可见,边界层急流的加强,推动了其左前方中尺度涡旋的发展,在两者的共同作用下,MCS-IV 在急流核



注:—表示剖面,■代表大暴雨中心位置,绿色填色为地形高度。

图 9 2018 年 8 月 6 日(a)01:00,(b)02:00,(c)03:00 和(d)04:00 VDRAS 600 m 高度风场(流线)、涡度(蓝色填色,单位: 10^{-5} s^{-1})和纬向风速 $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (红色实线),其后 1 h 降水(圆点,单位: mm)分布;
(e)02:00 沿图 9b 中实线的 $v-w$ (w 放大 50 倍)合成风场(流线)、
扰动温度(填色)、比湿(蓝色虚线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的垂直剖面

Fig. 9 Distribution of wind (streamline), vorticity (blue colored, unit: 10^{-5} s^{-1}) and zonal wind speed $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (red solid line) at 600 m height from VDRAS at (a) 01:00 BT, (b) 02:00 BT, (c) 03:00 BT and (d) 04:00 BT 6 August and the subsequent precipitation after one hour (dot, unit: mm); (e) vertical cross-section of $v-w$ (w amplified 50 times, streamline) composite wind field, temperature disturbance (colored) and specific humidity (blue dashed line, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) of VDRAS along the solid line in Fig. 9b at 02:00 BT 6 August 2018

南侧强气旋性环流的正涡度强迫下迅速加强,导致其发展和局地强降水的发生。

同时暴雨中的凝结加热以及积云对流垂直混合也对急流有正反馈作用,对流发展释放更多的凝结潜热造成降水区上空迅速增温,降水区边界层则变得更冷,形成对流层中层和边界层符号相反的水平温度梯度(图 9e),这种热力强迫作用使边界层风场进一步加速(杨舒楠等,2017),可以说这种积云对流与边界层急流(和中尺度涡旋)的相互作用是导致 MCS-IV 持续的主要因素。04:00 以后,随着低空急流的减弱,中尺度涡旋减弱。在有利的环境背景下,边界层急流、中尺度低涡与暴雨相互制约、相互依存。边界层急流促使暴雨发生和中尺度低涡生成,而暴雨的出现有利于潜热释放、中尺度低涡和急流的维持,垂直上升运动是急流和涡的纽带,也是涡动力驱动的结果。

7 结论与讨论

综合使用多种资料分析了发生在副高影响下一次局地大暴雨的形成原因,包括中尺度环境条件,中尺度对流系统抬升触发及维持发展机制,给出此次大暴雨的概念模型(图 10)。结果表明:

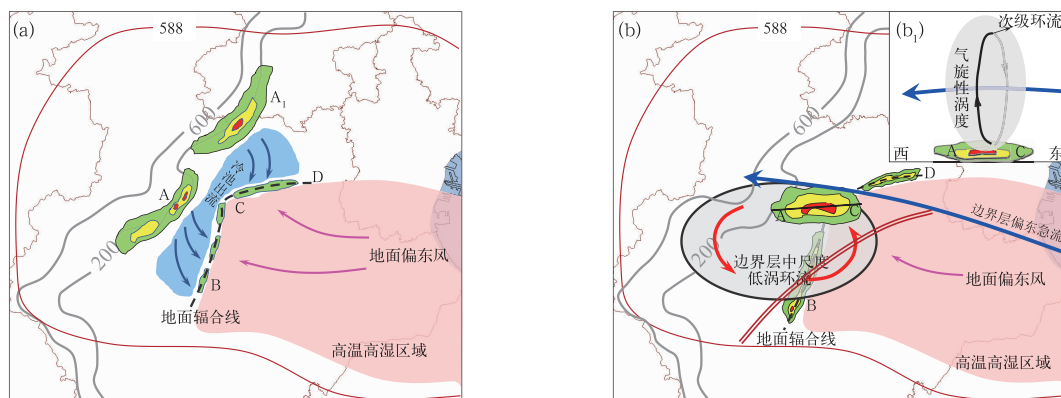
(1)此次局地强降水发生在副高控制下,环境大气层结极不稳定,边界层高温、高湿,CAPE 大于 $1886 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,且 CIN 小于 $30 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,抬升凝结高度和自由对流高度低,有利于对流触发和发生。

(2)四条雨带分别是由太行山迎风坡上西南—东北向、华北平原地区保定一带南北向、保定至霸州附近西南—东北向和以雄安新区为中心东西向的原地生消的准静止中尺度对流系统 MCS-I、MCS-II、MCS-III 和 MCS-IV 造成的。中尺度对流系统间的相互作用促发强降水,MCS-II 与 MCS-III, MCS-I 与 MCS-IV 的两次合并,是 MCS-IV 增强、持久的重要原因。

(3)近地层偏东暖湿气流与山风形成的辐合抬升释放不稳定能量,触发了 MCS-I;午后至傍晚,太行山沿山及北京以南地区受辐射差异及强降水影响,形成局地冷池,而 MCS-I 中降水蒸发冷却导致地面冷池进一步加强,其南北两端的出流与环境风形成了南北向、西南—东北向的两条地面辐合线分别触发了 MCS-II 和 MCS-III,并组织对流沿辐合线呈带状发展(图 10a);超低空偏东风增强叠加冷池出流后在地形抬升作用下使得北娄山处暖湿气团进一步抬升,再次触发 MCS-I 重建。

(4)偏东风急流为 MCS-IV 的发展提供了水汽和不稳定能量等有利条件,同时推动了其左前方中尺度涡旋的发展(图 10b),MCS-IV 在急流核南侧强气旋性环流的正涡度强迫下迅速加强,导致其发展和局地强降水的发生。而暴雨的潜热释放,又进一步加强了急流轴为中心的垂直次级环流发展(图 10b₁),形成有利于强降水产生及维持的正反馈机制。

已有的研究强调暴雨中地形的强迫作用不容忽



注:MCS 雷达反射率结构用彩色表示,红色实线为 588 dagpm 线,灰色阴影为气旋性涡度的大值区,红色双实线为 850 hPa 切变线,粗灰色线为 200、600 m 地形高度等值线。

图 10 华北 2018 年“8·5”副高控制下大暴雨概念模型

(a)触发机制,(b)维持机制,(b₁)沿 MCS-IV 东西向的剖面

Fig. 10 Schematic diagram of the warm-sector torrential rain under the influence of subtropical high in North China from 5 to 6 August 2018

(a) triggering mechanism, (b) maintaining mechanism, (b₁) east-west section along MCS-IV

视,本次大暴雨中地形的动力抬升和辐合作用对初始对流的启动起到了关键作用,MCS-I与太行山地形有很好的对应关系,回波带位于海拔200~600 m处,这与偏东风在迎风坡上辐合与强迫抬升关系密切,而这个中尺度对流系统的发展直接影响到平原地区回波带的触发与加强。对比图9b~9d中,中尺度低涡与其所在地区的喇叭口地形有很好的对应关系。有研究指出,由于喇叭口地形或峡谷地形的阻滞、绕流作用,以及地形侧边界的摩擦作用,边界层内常有局地性中小尺度涡旋发生发展,将其命名为地形性涡旋,这种地形性涡旋的水平尺度多为十多至数十千米,铅直厚度约为300~600 m,生命史短、厚度薄(马革兰和罗哲贤,2006)。其生消、发展扰动与降水均有密切关系,尤其是当与天气尺度系统叠加时会使降水明显增幅。所以中尺度低涡的形成除了与急流有关外,是否与太行山的地形有联系,更细致的研究有待于利用数值模拟来深入,将另文讨论。

参考文献

- 布和朝鲁,诸葛安然,谢作威,等,2022. 2021年“7·20”河南暴雨水汽输送特征及其关键天气尺度系统[J]. 大气科学,46(3):725-744. Bueh C, Zhuge A R, Xie Z W, et al, 2022. Water vapor transportation features and key synoptic-scale systems of the “7·20” rainstorm in Henan Province in 2021[J]. Chin J Atmos Sci, 46(3):725-744(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).
- 陈明轩,肖现,高峰,等,2016. 基于雷达四维变分分析系统的强对流高分辨率模拟个例分析和批量检验[J]. 气象学报,74(3):421-441. Chen M X, Xiao X, Gao F, et al, 2016. A case study and batch verification on high resolution numerical simulations of severe convective events using an analysis system based on rapid-refresh 4-D variational radar data assimilation[J]. Acta Meteor Sin, 74(3):421-441(in Chinese).
- 湛芸,吕伟琦,于超,等,2018. 北方一次暖区大暴雨降水预报失败案例剖析[J]. 气象,44(1):15-25. Chen Y, Lv W Q, Yu C, et al, 2018. Analysis of a forecast failure case of warm sector torrential rainfall in North China[J]. Meteor Mon, 44(1):15-25(in Chinese).
- 程晓龙,李跃清,衡志伟,2021. 川贵渝复杂地形下横槽诱发双涡贵州暴雨过程的数值模拟[J]. 气象学报,79(4):626-645. Cheng X L, Li Y Q, Heng Z W, 2021. Numerical simulation of a torrential rain process in Guizhou triggered by two vortices originating from a transverse trough over the Sichuan-Guizhou-Chongqing complex terrain[J]. Acta Meteor Sin, 79(4):626-645(in Chinese).
- 刁秀广,车军辉,李静,等,2009. 边界层辐合线在局地强风暴临近预警中的应用[J]. 气象,35(2):29-33. Diao X G, Che J H, Li J, et al, 2009. Application of boundary convergence line in nowcasting warning of severe convective storm[J]. Meteor Mon, 35(2):29-33(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).
- 孔凡超,赵庆海,李江波,2016. 2013年7月冀中特大暴雨的中尺度系统特征和环境条件分析[J]. 气象,42(5):578-588. Kong F C, Zhao Q H, Li J B, 2016. Diagnostic analysis of mesoscale system and environmental conditions during Hebei severe rainstorm[J]. Meteor Mon, 42(5):578-588(in Chinese).
- 雷蕾,邢楠,周璇,等,2020. 2018年北京“7·16”暖区特大暴雨特征及形成机制研究[J]. 气象学报,78(1):1-17. Lei L, Xing N, Zhou X, et al, 2020. A study on the warm-sector torrential rainfall during 15-16 July 2018 in Beijing Area[J]. Acta Meteor Sin, 78(1):1-17(in Chinese).
- 李强,王秀明,张亚萍,等,2019. 一次副高影响下的局地强风暴触发及维持机制探析[J]. 气象,45(2):203-215. Li Q, Wang X M, Zhang Y P, et al, 2019. Analysis and explanation on triggering and maintaining mechanism of a localized severe storm under the influence of subtropical high[J]. Meteor Mon, 45(2):203-215(in Chinese).
- 李青春,程丛兰,全继萍,等,2022. 夏季两次不同强度暴雨过程的低空急流特征及其作用对比分析[J]. 气象,48(11):1384-1401. Li Q C, Cheng C L, Quan J P, et al, 2022. Comparison of characteristics and effects about low-level jet in two rainstorm processes with different intensities in summer[J]. Meteor Mon, 48(11):1384-1401(in Chinese).
- 马革兰,罗哲贤,2006. 地形对涡旋自组织影响的初步研究[J]. 南京气象学院学报,29(6):769-774. Ma G L, Luo Z X, 2006. Preliminary study on the influence of topography on vortex self-organization[J]. J Nanjing Inst Meteor, 29(6):769-774(in Chinese).
- 盛春岩,高守亭,史玉光,2012. 地形对门头沟一次大暴雨动力作用的数值研究[J]. 气象学报,70(1):65-77. Sheng C Y, Gao S T, Shi Y G, 2012. Numerical simulation of the dynamic effect of the orography on a Mentougou severe torrential rain event[J]. Acta Meteor Sin, 70(1):65-77(in Chinese).
- 王丽荣,刘黎平,王立荣,等,2013. 太行山东麓地面辐合线特征分析[J]. 气象,39(11):1445-1451. Wang L R, Liu L P, Wang L R, et al, 2013. Analysis of surface convergence line features in the eastern side of Taihang Mountain[J]. Meteor Mon, 39(11):1445-1451(in Chinese).
- 王婧羽,崔春光,王晓芳,等,2014. 2012年7月21日北京特大暴雨过程的水汽输送特征[J]. 气象,40(2):133-145. Wang J Y, Cui C G, Wang X F, et al, 2014. Analysis on water vapor transport

- and budget of the severe torrential rain over Beijing Region on 21 July 2012[J]. Meteor Mon, 40(2):133-145(in Chinese).
- 王晓芳, 崔春光, 2011. 暴雨中尺度对流系统研究的若干进展[J]. 暴雨灾害, 30(2):97-106. Wang X F, Cui C G, 2011. A number of advances of the research on heavy rain mesoscale convective systems[J]. Torr Rain Dis, 30(2):97-106(in Chinese).
- 杨波, 孙继松, 毛旭, 等, 2016. 北京地区短时强降水过程的多尺度环流特征[J]. 气象学报, 74(6):919-934. Yang B, Sun J S, Mao X, et al, 2016. Multi-scale characteristics of atmospheric circulation related to short-time strong rainfall events in Beijing[J]. Acta Meteor Sin, 74(6):919-934(in Chinese).
- 杨舒楠, 路屹雄, 于超, 2017. 一次梅雨锋暴雨的中尺度对流系统及低层风场影响分析[J]. 气象, 43(1):21-33. Yang S N, Lu Y X, Yu C, 2017. Analysis on mesoscale convective system and impact of low-level wind in a Meiyu heavy rainfall event[J]. Meteor Mon, 43(1):21-33(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).
- 易笑园, 孙晓磊, 张义军, 等, 2017. 雷暴单体合并进行中雷达回波参数演变及闪电活动的特征分析[J]. 气象学报, 75(6):981-995. Yi X Y, Sun X L, Zhang Y J, et al, 2017. Evolution of radar parameters and lightning activity during thunderstorm cells merging[J]. Acta Meteor Sin, 75(6):981-995(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).
- 张文龙, 崔晓鹏, 王迎春, 等, 2013. 对流层低层偏东风对北京局地暴雨的作用[J]. 大气科学, 37(4):829-840. Zhang W L, Cui X P, Wang Y C, et al, 2013. Roles of low-level easterly winds in the local torrential rains of Beijing[J]. Chin J Atmos Sci, 37(4):829-840(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).
- 赵衍斌, 李强, 周盈颖, 等, 2023. 重庆西部平行岭谷地形作用下的一次局地暴雨天气过程的分析[J]. 气象, 49(6):657-670. Zhao Y B, Li Q, Zhou Y Y, et al, 2023. Analysis of a local rainstorm process in western Chongqing under the effect of parallel ridge-valley topography[J]. Meteor Mon, 49(6):657-670(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 events in North China[J]. Acta Meteor Sin, 78(5):761-777(in Chinese).

(本文责编:俞卫平 王蕾)