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

陕西一次突发性大暴雨的中尺度特征及触发机制

李明娟 郭大梅 张蔚然 刘慧 赵强 郭莉 高星星

Mesoscale characteristics and triggering mechanism of a sudden heavy rainstorm in Shaanxi

LI Mingjuan，GUO Damei，ZHANG Weiran，LIU Hui，ZHAO Qiang，GUO Li，GAO Xingxing

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2023-224

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

一次华南准静止线状对流系统触发维持机制研究

A study on triggering and maintenance mechanism of a linear quasi-stationary convection system in South China

暴雨灾害. 2022, 41(1): 33-41 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.004

中尺度天气系统适应性观测研究进展及其在大城市短临预报中的应用构想

Progress in targeted observation for meso-scale convective system and some thoughts on its applications to convection nowcasting in large cities

暴雨灾害. 2023, 42(6): 613-627 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-035

豫东北一次春季大暴雨的环境条件与中尺度特征分析

Analysis of environmental condition and mesoscale characteristics for a heavy rainstorm event in Spring in northeast Henan

暴雨灾害. 2022, 41(1): 76-85 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.009

对流尺度集合预报中模式地形扰动对其预报技巧的影响研究

Study on the influence of model topography perturbation on prediction skill in a convection-allowing scale ensemble prediction system

暴雨灾害. 2019, 38(6): 649-657 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2019.06.010

2008—2017年四川省突发性山地暴雨事件的演变特征

Evolution characteristics of sudden mountain rainstorm events in Sichuan Province from 2008 to 2017

暴雨灾害. 2023, 42(6): 670-678 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-041

超低空急流形成的爬、绕流对长白山地区一次突发性暴雨的影响

Impact of flow over and flow around caused by super low-level jet on a sudden rainstorm over the Changbai Mountains

暴雨灾害. 2023, 42(3): 273-282 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-035

关注微信公众号，获得更多资讯信息

李明娟,郭大梅,张蔚然,等.2025.陕西一次突发性大暴雨的中尺度特征及触发机制[J].暴雨灾害,44(1):19−30. LI Mingjuan, GUO Damei, ZHANG Weiran, et al. 2025. Mesoscale characteristics and triggering mechanism of a sudden heavy rainstorm in Shaanxi [J]. Torrential Rain and Disasters,44(1):19−30 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−224

陕西一次突发性大暴雨的中尺度特征及触发机制

李明娟[1], 郭大梅[2], 张蔚然[2], 刘慧[2], 赵强[2], 郭莉[3], 高星星[2]

(1. 陕西省气候中心, 西安 710014; 2. 陕西省气象台, 西安 710014; 3. 陕西省商洛市气象局, 商洛 726000)

摘　要: 2020 年 8 月 5—6 日陕西中东部的平原和秦岭山区洛南县两处局地突发大暴雨, 造成 6 人死亡、10 人失踪, 全球模式和中尺度模式对此次过程的强度和落区均存在预报偏差。为加深对此类天气过程的认识, 利用常规地面、高空观测资料、ERA5 再分析资料和多普勒天气雷达资料, 对此次大暴雨过程的环流背景、环境条件和中尺度对流系统 (MCS) 演变特征及成因进行分析。结果表明: (1) 大暴雨发生于弱天气尺度强迫条件下, 暴雨区 500 hPa 为西太平洋副热带高压控制, 中低层无明显天气尺度系统主导, 地面上无冷锋; 陕西中东部 700 hPa 未出现强水汽输送带, 但边界层存在较强的水汽输送带, 暴雨区本地水汽含量非常充沛, 大气整层可降水量 50~70 mm, 大气可降水量偏离气候平均 1.5~2 σ, 同时对流有效位能为 3 000~4 800 J·kg^{-1}, 0—6 km 深层垂直风切变较弱, 环境场条件有利于突发性大暴雨的发生。(2) 平原和秦岭山区洛南两处落区的大暴雨物理过程有所不同。平原的雷暴由平原地区地面辐合线、平原南侧骊山分别触发, 骊山触发的雷暴向平原地区传播与平原地区雷暴合并增强, 形成 β 中尺度对流系统 ($M_\beta CS$)。$M_\beta CS$ 沿高空西南风向东北方向移动, 给平原地区带来局地大暴雨。强雷暴主要在 β 中尺度对流系统的东北侧生成和维持, $M_\beta CS$ 强雷暴中维持约 1 h 的低层 γ 中尺度气旋性涡旋直接造成了平原地区 103.7 mm·h^{-1} 极端短时强降水; 冷池驱动、低层垂直风切变相对于雷暴出流边界方向的有利配置是平原地区雷暴加强和维持的原因。(3) 秦岭山区洛南附近的雷暴由地形抬升边界层东南风触发, 下午至夜间边界层稳定维持的东南风是雷暴触发的关键因子, 雷暴单体后向传播在西南平流作用下形成“列车效应”经过洛南北部, 造成大暴雨天气。

关键词: 暴雨; 中尺度对流系统; γ 中尺度气旋性涡旋; 触发机制; 地形

中图法分类号: P458.1$^+$21.1　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023−224

Mesoscale characteristics and triggering mechanism of a sudden heavy rainstorm in Shaanxi

LI Mingjuan[1], GUO Damei[2], ZHANG Weiran[2], LIU Hui[2], ZHAO Qiang[2], GUO Li[3], GAO Xingxing[2]

(1. *Climate Center of Shaanxi Province*, *Xi'an* 710014; 2. *Shaanxi Meteorological Observatory*, *Xi 'an* 710014; 3. *Shangluo Meteorological Bureau of Shaanxi Province*, *Shangluo* 726000)

Abstract: A local sudden heavy rainstorm occured on 5-6 August 2020 in the plain area of the central and mid-eastern Shaanxi and the montainous area Luonan of Qinling Montains, causing 6 people death and 10 missing cases. Both global numerical model and Meso-scale numerical models had biases in predicting the location and intensity of this event. To deepen our understanding of such weather processes, based on conventional surface and upper-air observation data, ERA5 reanalysis data, and Doppler weather radar data, we analyze the circulation background, environmental conditions characteristics of the meso-scale convective systems (MCS) and triggering mechanisms of this heavy rainstorm process. The results are as follows. (1) The heavy rainstorm occurred under a weak synoptic-scale forcing, influenced by a sub-tropical high at 500 hPa, with no obvious synoptic scale weather system dominating at mid-lower levels, and no cold fronts on the ground. There was no strong water vapor transport at 700 hPa in the central and eastern Shaanxi, but there was a strong water vapor transport at the boundary layer, and the local water vapor content was abundant in the rainstorm area. The total atmospheric precipitable water reached 50~70 mm which deviated 1.5~2 σ from the climate average, while the convective available potential energy

收稿日期: 2023−10−20; **定稿日期:** 2024−05−16

资助项目: 中国气象局创新发展专项项目 (CXFZ2023J031); 陕西省自然科学基础研究计划项目 (2023-JC-YB-283, 2024JC-YBMS-217, 2024JC-YBQN-0326); 2024 年中国气象局复盘总结专项 (FPZJ2024-131)

第一作者: 李明娟, 主要从事天气预报和暴雨机理研究。E-mail: 122584008@qq.com

通信作者: 郭大梅, 主要从事天气预报和暴雨机理研究。E-mail: 271801757@qq.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

(CAPE) over 3 000~4 800 J·kg^{-1} and the vertical wind shear between 0 and 6 km was weak, which provided favorable environmental conditions for the occurrence of the sudden heavy rainstorm. (2) The physical processes of the heavy rainstorms in the plain area and the montainous area Luonan of Qinling Montains were different. The thunderstorm in the plain was triggered respectively by the convergence line on the ground and Lishan mountain in the south of plain. The thunderstorm triggered by Lishan Montain propagated towards the plain, merging with the thunderstorm in the plain, and furthermore enhanced to be a meso-β-scale (M_βCS) convective system, which moved northeastwards along southwesterly on upper-level, led to a local sundden rainstorm in the plain. The strong thunderstorms were mainly generated and maintained at the northeast side of the M_βCS convective system, in which a M_βCS vortex maintaining nearly 1 h at lower layer directly induced an extreme severe precipitation of 103.7 mm·h^{-1} in a short time in the plain. The favorable configuration of cold pool driving and direction of low-level vertical wind shear relative to the thunderstorm outflow boundary is the reason for the strengthening and maintenance of thunderstorms in the plain. (3) The thunderstorms adjacent to Luonan of Qinling Montains were triggered by the southeasterly wind at the topographic uplift boundary layer, and key factor was the southeasterly wind on the boundary layer maintaining stable from afternoon to night. The thunderstorm cells propagating backwards formed a train effect under the influence of southwestward advection passing over the north of Luonan, thus caused heavy rainstorm.

Key words: heavy rainstorm; meso-scale convective systems; meso-γ-scale vortex; triggering mechanism; topography

引　言

暴雨是影响陕西的主要天气灾害之一，对于受到西风槽、低层切变线、低空急流、低涡和冷锋等明显天气系统影响的暴雨天气过程，数值模式有较强的预报能力 (刘勇等, 2014; 郭大梅等, 2022; 赵强等, 2022)。此外，陕西时而也会出现突发性暴雨，杜继稳等 (2007) 将陕西突发性暴雨定义为环流特征不明显且需要满足三个条件：(1) 中心降水雨强≥30 mm·6 h^{-1}，且≥50 mm·(12 h)$^{-1}$；(2) 出现暴雨站数≥3 站且连片 (基于国家气象观测站)；(3) 暴雨发生前 12 h，在 (95°—110°E, 27.5°—42.5°N) 范围内，500 hPa 无明显低值系统。李国平等 (2021) 将包括陕西在内的西南山地突发性暴雨事件定义为：发生在西南山地 (海拔高度介于 500 ~ 3 000 m)、降水区域直径小于 200 km、1 h 累计雨量≥20 mm 且 3 h 累计雨量≥50 mm 的强降水。以上突发性暴雨的定义均突出暴雨的局地性强和雨强大的特点。突发性暴雨对流性强、雨强大，短时间内容易引起山洪暴发、城市内涝等灾害，甚至可能造成重大人员伤亡和经济损失。因此加强对突发性暴雨的研究并加深对暴雨机理认识，提高对其预报能力对保护人民生命财产安全、做好防灾减灾工作有着重要意义。

目前针对突发性暴雨的机理研究主要围绕其环境场条件和中尺度对流系统的发展演变等方面开展，已取得了一些成果。突发性暴雨发生前，水汽充足及较强的对流有效位能 (CAPE)、探空图上 CAPE 呈“狭长型” (Davis, 2001)；大气有着充沛的水汽和不稳定层结条件，对流层低层存在弱的水汽输送 (安礼政等, 2021)；山区热力驱动的上坡气流为昼夜深层湿对流提供了有利条件，尤其是在弱天气尺度强迫下 (Imamovic et al., 2019)。孙继松等 (2006) 针对一次局地突发性暴雨进行了研究，指出强雷暴群激发重力波触发对流是孤立局地暴雨的启动机制，城市与郊区下垫面物理属性造成的热力差异有利于对流单体的组织。Wang 等 (2014)、徐珺等 (2018)、杨晓亮等 (2022) 指出突发性暴雨的触发与地面中尺度边界、冷池出流、地形抬升、辐合线有关。雷暴触发后中尺度对流系统的传播和移动路径对暴雨有重要影响，雷暴单体后向传播，中尺度对流系统呈“准静止状态” (Wu and Luo, 2016; 徐珺等, 2018) 是造成局地突发性暴雨的一个重要原因。另外，杨晓亮等 (2022) 采用了计算大气整层可降水量异常度的方法对一次突发性暴雨水汽条件进行了研究，得到突发性暴雨发生在大气可降水量偏离气候平均达 4 σ 以上、水汽条件异常充沛的环境条件下；刘成瀚等 (2023) 计算了爬流对长白山山地突发性暴雨的影响，指出山地和平原过度区的地形高度差强迫气流产生爬流运动，爬流运动对降水的范围和强度至关重要。

以上研究提高了气象工作者对突发性暴雨的认识，但是没有明显天气尺度强迫背景下局地突发性暴雨的发生机制非常复杂，仍需进一步探讨。近年来对陕西突发性暴雨仅有少量研究，李明娟等 (2023) 分析了陕西地区一次局地突发性大暴雨，指出地形和地面弱冷空气的共同作用触发对流，平原地区的局地大暴雨是雷暴单体后向传播造成。陕西西太平洋副热带高压 (以下简称为副高) 控制下突发性暴雨也时有发生，这类暴雨在环境场条件上是否有特别之处，是否和沈晓玲等 (2024) 分析的副高控制下突发性暴雨类似，也存在超低空急流；暴雨的触发机制、雷暴单体传播方向及雷暴如何维持较长的时间，

是否也存在雷暴单体后向传播, 均需要进一步研究。2020 年 8 月 5—6 日副高控制下陕西中东部的平原和秦岭山区洛南县两处局地突发大暴雨, 造成平原地区西安 1 人溺亡, 秦岭山区东段洛南县 5 人死亡、10 人失踪。各家模式对此次暴雨过程的落区或量级均有漏报。此次大暴雨致灾性强, 预报难度大, 预报员对此类天气成因尚不清楚。因此本文利用高空常规观测资料、地面气象站资料、ERA5 再分析资料和多普勒天气雷达资料对此次天气过程的环流背景、环境场条件和中尺度对流系统 (MCS) 发生发展演变特征及成因进行研究, 以期为此类暴雨预报提供科学参考。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文所用的数据主要包括: (1) 2020 年 8 月 5 日 08 时—6 日 08 时 (北京时, 下同) 中国气象局气象信息综合处理系统提供的陕西省泾河站和河南省卢氏站每日 08 时和 20 时的高空常规观测数据, 以及陕西省部分地区、山西部分地区、河南西部区域 2 000 个国家和区域自动气象站 (以下分别简称为国家和区域站) 逐小时降水量、温度、气压及 2 min 平均风场数据, 用于分析高低空环流形势的配置、地面冷池和辐合线; (2) 距离西安北屯站约 40 km 的泾河站探空及距离秦岭山区洛南最近的卢氏站探空数据, 用于分析环境参数特征; (3) 1981—2010 年 8 月 5 日 08 时—6 日 08 时共 30 a 和 2020 年 8 月 5 日 08 时—6 日 08 时欧洲中期天气预报中心第五代 (ERA5) 大气再分析数据 (Hersbach et al., 2018), 时空分辨率分别为 1 h 和 0.25°×0.25°, 垂直方向为 1 000—200 hPa 共 23 层, 包括相对湿度、风场和比湿数据, 用于分析此次过程水汽、中底层风场配置及地形爬流产生的上升速度及水汽标准化异常度; (4) 2020 年 8 月 5 日 08 时—6 日 08 时西安泾河 C 波段雷达数据, 包括雷达基本反射率因子和径向速度, 时间分辨率为 6 min, 包括 0.5°、1.5°、2.4°、3.4°、4.3°和 6.0°共 6 个仰角, 用于分析中尺度系统发展演变特征; (5) 2020 年 5 日 18 时—6 日 06 时非气象站观测秦岭山区局地最大累积降水量 (282.5 mm), 来自中国气象局气象灾害管理系统中的灾情直报资料。

1.2 研究方法

参照杜继稳等 (2007) 和李国平等 (2021) 的标准, 本文将突发性暴雨定义为: 发生在弱天气背景或弱天气尺度系统强迫下, 1 h 累计雨量≥20 mm 且 3 h 累计雨量≥50 mm 的强降水, 暴雨局地性强, 没有成片出现, 且单个成片暴雨区的暴雨站数小于 5 站国家气象观测站。

1.2.1 大气整层可降水量的异常度

为研究大气整层可降水量 (PWV) 偏离气候平均值的程度, 诊断 PWV 的异常度, 采用 Grumm and Hart (2001) 标准化异常度计算方法, 利用 1981—2010 年 8 月 5 日 08 时—06 日 08 时的 ERA5 再分析资料计算气候平均和气候标准差, 具体计算方法如下

$$N=(X-\mu)\cdot\sigma^{-1} \tag{1}$$

其中, N 为标准化异常度, X 为气象要素值, μ 为气候平均差, σ 为气候标准差。

1.2.2 地形爬流产生的上升速度

为研究地形对低层风的强迫作用, 使用 ERA5 再分析低层风数据, 将低层风速度矢量 ($\vec{V}$, 单位: m·s^{-1}) 分解为爬流矢量 ($\vec{V}_{\rm p}$, 单位: m·s^{-1}) 和绕流矢量 ($\vec{V}_{\rm r}$, 单位: m·s^{-1}) (金妍等, 2020; 刘成瀚等, 2023), 其中 $\vec{V}_{\rm P}$ 和 $\vec{V}_{\rm r}$ 互相正交, 且满足以下方程

$$\vec{V}=\vec{V}_{\rm r}+\vec{V}_{\rm P} \tag{2}$$

由地形强迫导致的底层风垂直运动速度 ($W_{\rm S}$) 计算公式如下

$$W_{\rm S}=\vec{V}_{\rm p}\cdot\nabla Z_{\rm S} \tag{3}$$

其中, $\nabla Z_{\rm S}$ 为地形高度梯度, $\nabla Z_{\rm S}=\dfrac{\partial Z_{\rm S}}{\partial x}\vec{i}+\dfrac{\partial Z_{\rm S}}{\partial y}\vec{j}$, x 为经度方向距离, y 为纬度方向距离, $\dfrac{\partial Z_{\rm S}}{\partial x}$ 为地形高度经向梯度, $\dfrac{\partial Z_{\rm S}}{\partial y}$ 为地形高度纬向梯度, i 为经度方向, j 为纬度方向。

2 降水实况

2020 年 8 月 5—6 日陕西中东部局地发生突发性暴雨, 5 日 18 时—6 日 06 时 56 个国家和区域站出现暴雨 (12 h 累积降水量≥30 mm) (图 1a), 12 个国家站和区域站出现大暴雨 (70 mm≤12 h 累积降水量≤139.9 mm), 共出现平原和秦岭山区东段两处落区。其中平原地区暴雨、大暴雨开始于 5 日 20 时, 至 6 日 03 时结束, 期间共 44 个国家和区域站出现短时强降水 (雨强≥20 mm·h^{-1}), 5 日 21 时平原雨带西南侧西安北屯站 (图 1a 中 B 处) 出现 103.7 mm·h^{-1} 的雨强, 为此次平原地区暴雨过程的最大小时雨强 (图 1b), 6 日 01 时平原雨带东北侧渭南合阳站 (图 1a 中 H 处) 出现 44.7 mm·h^{-1} 的雨强。平原偏西和偏东地

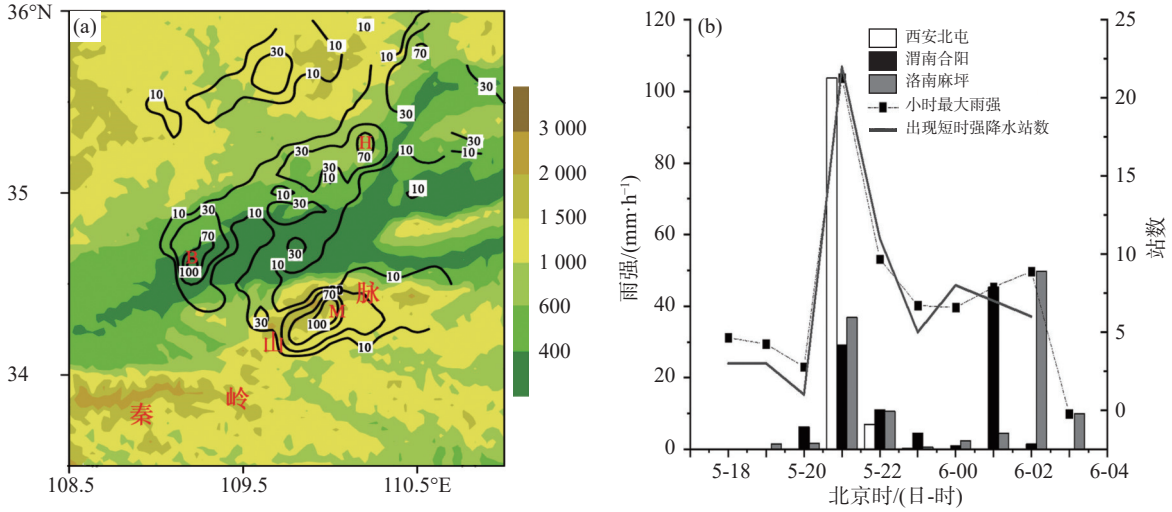


图 1 2020 年 8 月 5 日 18 时—6 日 06 时陕西中东部 12 h 累积降水量 10 mm (等值线) 以上的降水区域和地形 (填色, 单位: m) 空间分布 (a), 5 日 18 时—6 日 03 时陕西中东部 44 个国家和区域站逐小时最大雨强、出现短时强降水站数及北屯站、合阳站和麻坪站逐小时雨强随时间变化 (b) (图 1a 中 B、H 和 M 分别代表北屯站、合阳站和麻坪站, 下同)

Fig. 1 The spatial distribution of (a) 12-h precipitation larger than 10 mm (contour) in mid-eastern Shaanxi from 18:00 BT on 5 August to 06:00 BT on 6 August 2020 and topography (color-filled, unit: m), and the change of (b) maximum hourly rain intensity of 44 national and regional stations, numbers of short term heavy precipitation stations and hourly rain intensity of Beitun, Heyang and Maping stations from 18:00 BT on 5 August to 06:00 BT on 6 August 2020 in mid-eastern Shaanxi (The B, H, M in Fig. 1a represent the Beitun station, Heyang station and Maping station, respectively, hereafter)

区单个气象观测站的短时强降水历时分别约 1 h 和 2 h (图 1b)。平原降水呈西南—东北带状分布, 在带状雨带的两端分别有 B 和 H 两个降水中心, 12 h 累积最大降水量出现在 B 处, 为 111 mm。

秦岭山区东段大暴雨开始于 5 日 18 时, 6 日 03 时结束, 期间共 12 个国家和区域站出现短时强降水。单站短时强降水共历时约 2 h, 6 日 02 时洛南麻坪站 (图 1a 中 M 处) 雨强为 49.7 mm·h^{-1}, 为秦岭山区东段的最大小时雨强 (图 1b)。秦岭山区东段降水落区为局地椭圆状, 5 日 18 时—6 日 06 时 12 h 累积最大降水量位于 M 处, 为 117.6 mm, 非气象观测站观测到秦岭山区东段的洛南地区最大降水量为 282.5 mm。综上, 此次降水具有局地性强、历时短、雨强大等明显的中小尺度对流特征, B、H 和 M 处分别为此次降水的三个大暴雨中心。

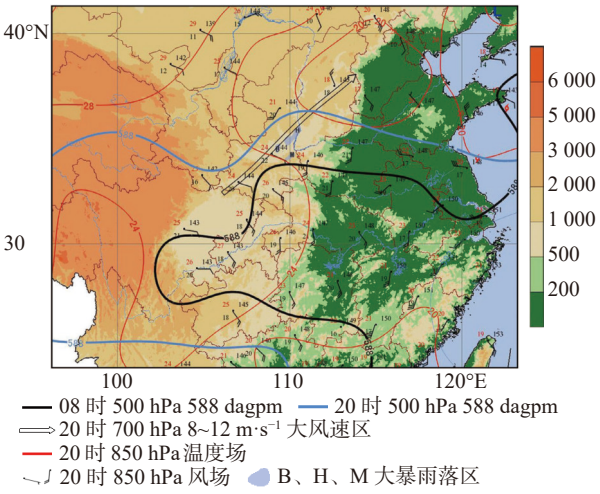


图 2 2020 年 8 月 5 日高低空环流形势和地形 (填色, 单位: m) 分布

Fig. 2 The distribution of high and low altitude circulation and topographic (color-filled, unit: m) on 5 August 2020

3 环流形势与环境条件

3.1 环流形势

此次过程是在 500 hPa 副高西伸北抬, 副高控制下发生的。5 日 08 时 500 hPa 陕北有一西风槽, 江苏地区及其东部海上有一低压, 副高 592 dagpm 线位于海上, 588 dagpm 线西脊点位于 (102°E, 28.5°N) 附近 (图 2), 588 dagpm 线北部位于成都-达州-西安-阜阳-南京-上海地区, 甘肃东南部有一偏北风和偏南风的切变。5 日 20 时, 江苏附近地区低压与西风带短波槽相结合北移至山东半岛附近, 中国东南沿海部分地区被 592 dagpm 线控制, 588 dagpm 线北抬至合作-武都-延安-山西中南部-山东南部地区, 西脊点西伸至 (91.6°E, 28.5°N)。甘肃东南部切变线减弱, 大暴雨区被 588 dagpm 线完全控制。5 日 20 时 700 hPa、850 hPa 陕西中东部无明显的天气尺度系统, 850 hPa 河北-山西有 20 ℃ 冷中心, 暴雨区位于弱的温度锋区中, 地面上无冷锋。虽然 5 日 20 时平原地区大暴雨临近时 850 hPa 弱的温度锋区有利于暴雨的抬升

触发, 但短期预报时效内, 大暴雨可预报性低。综上, 本次过程临近时, 500 hPa 为副高控制, 中低层无天气尺度系统影响, 地面无冷锋, 大暴雨是在弱天气尺度强迫副高控制下发生的。

3.2 环境条件

3.2.1 水汽输送特征

本次局地暴雨、大暴雨与有明显天气尺度系统强迫的陕西区域性暴雨水汽输送特征明显不同。区域性暴雨临近时, 700 hPa 有大范围较强偏南气流为暴雨区输送水汽 (郭大梅等, 2022), 而本次大暴雨临近时, 700 hPa 10~12 m·s^{-1} 较强西南风及强水汽通量 12~14 g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1} 主要位于陕西西南部 (图 3a), 陕西中东部西南风仅为 6 m·s^{-1}, 水汽通量为 8~10 g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}。陕西西南部强水汽输送区降水量小于 3 mm, 而陕西中东部较弱的水汽输送区却出现强降水天气。

5 日 20 时, 边界层 (1 km 以下) 875 hPa 风场和水汽通量的分布 (图 3b) 上, 自南海-两广-湖南-湖北-河南南部有大范围较强的偏南风转为东南风或偏东风, 向陕西中东部暴雨区输送水汽, 陕西中东部偏东风达 4~6 m·s^{-1}, 水汽通量为 6~10 g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}。陕西西南部风速明显小于中东部且无明显水汽输送, 陕西中东部边界层较强的偏东风和水汽通量为此次暴雨的发生提供有利的水汽输送条件。

5 日 20 时, 副高控制下, 陕西平原地区 PWV 可达 65~70 mm, 秦岭山区东段的洛南地区为 50~55 mm (图 3c), 平原地区水汽标准化异常度为 30 a 平均值的 2 倍以上, 秦岭山区洛南附近为 1.5 倍, 与平均气候态的水汽含量相比明显偏大。可见, 此次过程陕西中东部大气有着充沛的水汽含量。

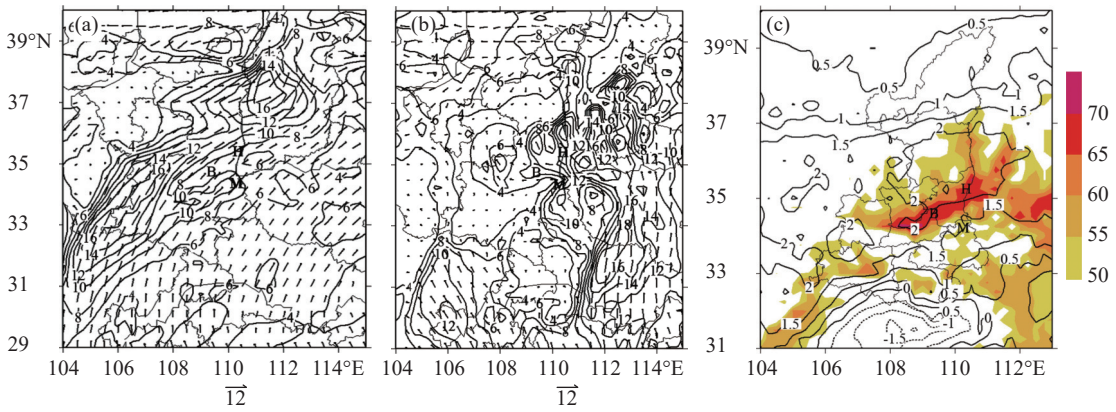


图 3 2020 年 8 月 5 日 20 时 700 hPa (a) 和 875 hPa (b) 水汽通量 (等值线, 单位: g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}) 和风场 (箭头, 单位: m·s^{-1}), 整层可降水量 (PWV) (填色, 单位: mm) 和水汽的标准化异常度 (等值线, 单位: α) 分布 (c)

Fig. 3 The distribution of water vapor flux (contour, unit: g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}) and wind field (arrow, unit: m·s^{-1}) at (a) 700 hPa and (b) 875 hPa at 20:00 BT on 5 August 2020, (c) total atmospheric precipitable water and effective water vapor (color-filled, unit: mm) and standardized anomaly of water vapor (contour, unit: α) at 20:00 BT on 5 August 2020

3.2.2 环境参数特征

由 5 日 20 时平原地区泾河站和邻近秦岭山区东段卢氏站探空 (图 4) 可知, 泾河站 850—200 hPa、卢氏站自地面至 200 hPa 有着深厚的湿度层, 泾河站 PWV 高达 70 mm, 卢氏站 PWV 为 55 mm。PWV 为 70 mm 是我国东部短时强降水大气极端的水汽条件 (Tian et al., 2015), 可见泾河站大气有着极端的水汽条件。地面露点泾河站和卢氏站分别为 25.6 ℃、27.2 ℃, 高的地面露点使得抬升凝结高度较低 (泾河为 889 m, 卢氏为 199.5 m)。对流有效位能 (CAPE) 泾河站为 3 108 J·kg^{-1}, 卢氏站为 4 857 J·kg^{-1}, 均表现为强的对流有效位能。对流抑制能量 (CIN) 泾河站和卢氏站分别为 35.8 J·kg^{-1} 和 0 J·kg^{-1}, 均较低。两站的暖云湿层厚度大, 0 ℃ 层高度均在 5.7 km 以上。0—6 km 为弱垂直风切变, 泾河站为 9 m·s^{-1}, 卢氏站为 11.9 m·s^{-1}。综上, 此次大暴雨临近时, 深厚的大气湿度层、高的地面露点、平原地区极端高的 PWV 和秦岭山区东段较高的 PWV、强的 CAPE 为大暴雨的发生提供了充沛的水汽和能量条件; 低的 CIN 和抬升凝结高度有利于对流的触发; 深厚的暖云湿层和 0—6 km 弱的垂直风切变使得雨滴下落过程中减少蒸发, 提高了降水效率 (俞小鼎, 2013), 雷暴在弱的垂直风切变下移动较为缓慢, 有利于大暴雨的发生。

4 中尺度对流系统 (MCS) 的触发与维持机制

4.1 MCS 的触发

受西风槽和低层切变线影响, 8 月 5 日 17—19 时陕北南部、关中北部出现对流云系造成局地短

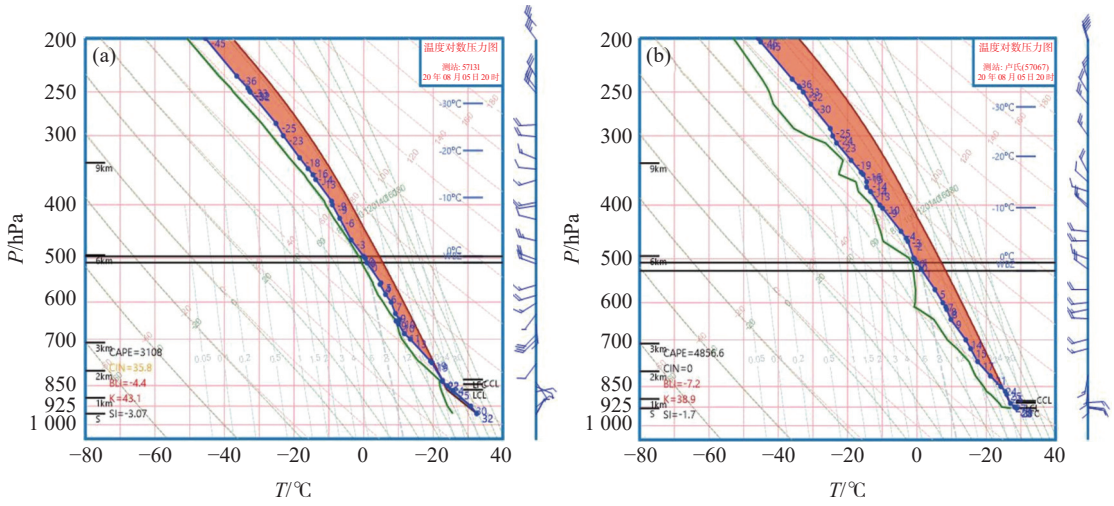


图 4 2020 年 8 月 5 日 20 时泾河站 (a)、卢氏站 (b) *T*-ln*p* 图

Fig. 4 The *T*-ln*p* of (a) Jinghe station and (b) Lushi station at 20:00 BT on 5 August 2020

时强降水天气, 对流云在东移的过程中减弱, 经西安东北部时地面并未出现降水、降温天气, 经山西地区有弱降水天气出现。5 日 17 时山西-河北因前期降水形成地面冷高压, 陕南东部暖湿气流活跃, 有倒槽向东北方向伸展, 陕西中东部位于弱的气压梯度中(图略)。

分析 5 日 19 时地面的位温、风场 (图 5a) 发现, 陕西中东部平原 A 区 (图 5a 中长方形所示) 为暖区, 位温为 308~312 K。A 区北侧、东北侧 (图 5a 中圆圈) 因降水分别形成位温低于 306 K 的弱冷空气。受地面弱冷空气影响, A 区北侧为偏北风, 东北侧为东北风, 19 时 18 分偏北风和东北风在关中中东部平原形成地面辐合线 (图 5b 白色实线)。地面至 867 hPa 边界层东北风在秦岭北侧、秦岭支脉骊山东北侧分别触发 γ 中尺度雷暴 (图 5b 红色圆圈 1 和 2), 秦岭支脉骊山东北侧 γ 中尺度雷暴迅速向平原地面辐合区传播, 19 时 42 分在西安东北部形成约 22 km 的带状回波, 地面辐合线附近触发多个 γ 中尺度雷暴, 形成 120 km 的带状回波 (图 5c), 秦岭北侧仍有两处 γ 中尺度雷暴 (图 5c 红色圆圈 3 和 4)。5 日 19 时 18 分—19 时 42 分雷达图上可见秦岭山区东段迎风坡麻坪地区 (图 5b、5c M 处) 出现的多个 γ 中尺度雷暴。

4.2 MCS 的加强与维持

5 日 19 时 50 分—20 时 00 分, 平原地区两条带

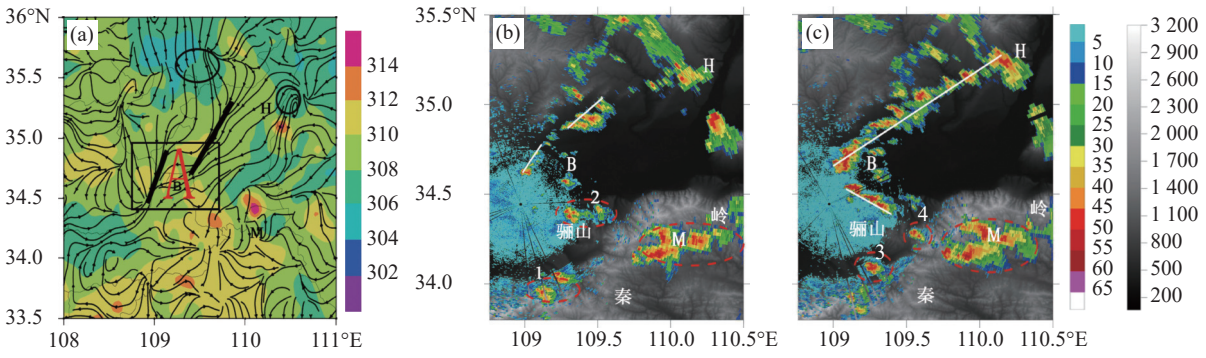


图 5 2020 年 8 月 5 日 19 时陕西中东部地面位温 (填色, 单位: K) 和地面风场 (箭头流线) (a), 19 时 18 分 (b) 和 19 时 42 分 (c) 泾河雷达 1.5°仰角基本反射率因子 (填色, 单位: dBz) 和地形 (灰色阴影, 单位: m) 分布 (图 a 中长方形 A 所示为暖区, 黑色圆圈为弱冷空气区, 黑线为辐合线; 图 b、c 中 1—4 红色圆圈代表秦岭北侧地形触发的雷暴, 图 b 白线为地面辐合线所在位置; 图 c 白线为带状回波所在位置)

Fig. 5 The distribution of (a) surface potential temperature (color-filled, unit: K) and surface wind field (streamline) in mid-eastern Shaanxi at 19:00 BT, basic reflectivity factor of the Jinghe radar (color-filled, unit: dBz) at elevation 1.5 and terrian (grey shaded area, unit: m) at (b) 19:18 BT and (c) 19:42 BT on 5 August 2020 (The black line denotes convergence line, rectangle A denotes warm area, black circles denote the weak cold air area in Fig. 5a. The red circles 1-4 were thunderstorms triggered by the terrain on the north sided of the Qinling Mountains in Fig. 5b and 5c. The white line denotes convergence line at the surface in Fig. 5b. The white line denotes banded echo in Fig. 5c)

状回波西部累积降水量超过 10 mm。由 5 日 20 时地面位温、风场和 1 h 变温 (图 6a) 可见, 关中平原北屯附近 (图 6a 中 B 处) 2 个局地强降水地区的地面气温 1 h 下降 5~6 ℃, 位温降至 304 K 以下, 形成两个 γ 中尺度局地冷池, 冷池出流形成新的地面辐合区。20 时 06 分雷达图上可见新的地面辐合线触发雷暴后两条带状回波西部雷暴合并加强, 形成 β 中尺度对流系统 ($M_{\beta}CS$) a (图 6b 中红色方框), 雷暴出流边界触发新的对流单体, a 进一步加强且范围增大 (图 6c); 20 时 42 分后, a 的出流边界呈环状

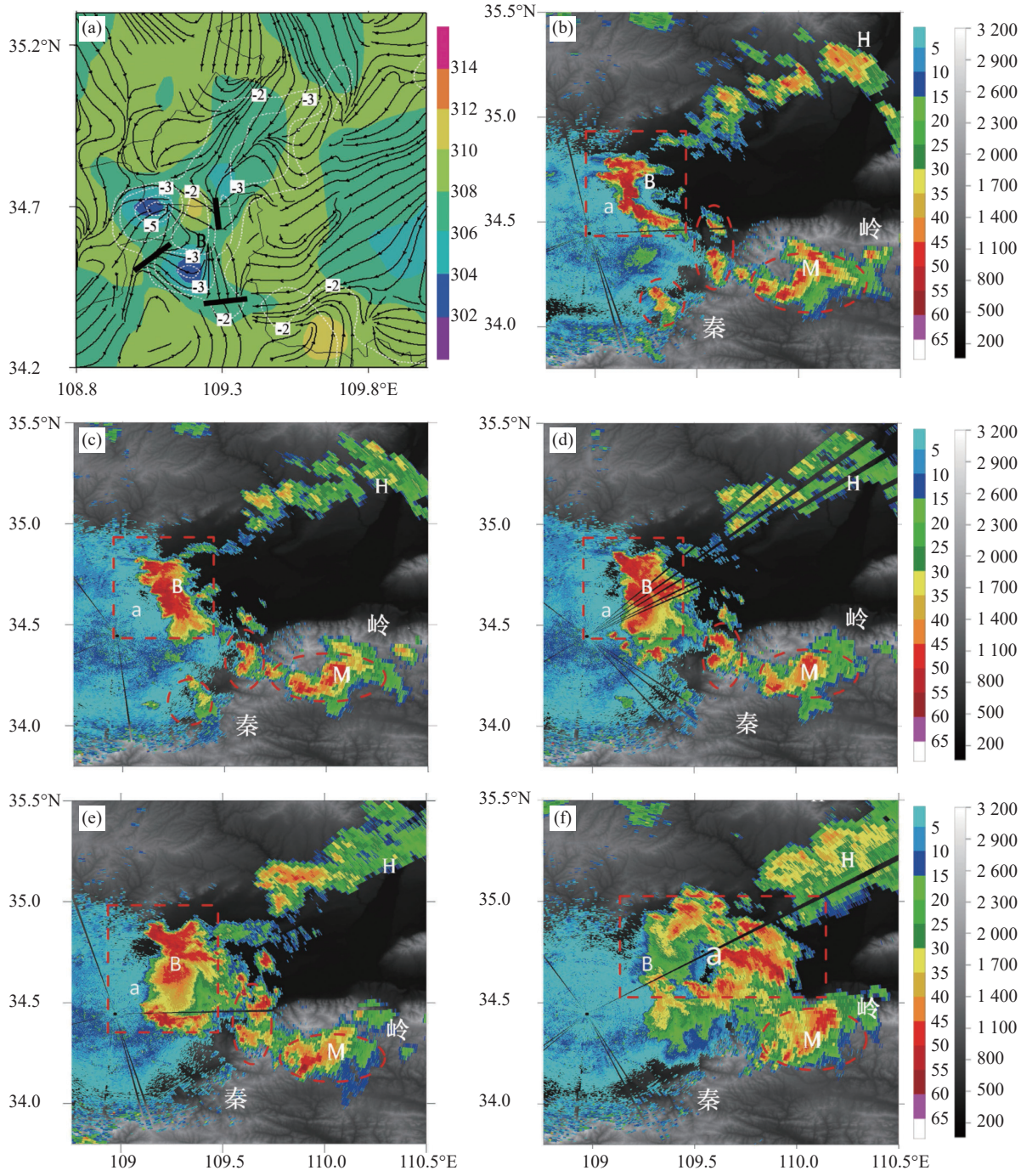


图 6 2020 年 8 月 5 日 20 时陕西中东部地面位温 (填色, 单位: K)、风场 (箭头流线, 黑色实线为辐合线)、1 h 变温 (白色等值线, 单位: ℃) (a)、20 时 06 分 (b)、20 时 24 分 (c)、20 时 42 分 (d)、21 时 (e)、22 时 (f) 泾河雷达 1.5°仰角基本反射率因子 (填色, 单位: dBz) 和地形 (灰色阴影, 单位: m) 分布 (红色方框代表 β 中尺度对流系统 a, 圆圈代表雷暴)

Fig. 6 The distributiong of (a) surface potential temperature (color-filled, unit: K), wind field (streamline, the black solid line denotes convergence line) and 1 h temperature change (white contour, unit: ℃) at 20:00 BT, basic reflectivity factor of the Jinghe radar (color-filled, unit: dBz) and topography (grey shaded area, unit: m) at elevation 1.5° at (b) 20:06 BT, (c) 20:24 BT, (d) 20:42 BT, (e) 21:00 BT and (f) 22:00 BT on 5 August in 2020 in mid-eastern Shaanxi (The red rectangle and circles represent the meso-β convective system named a and the thunderstorms, respectively)

向四周触发雷暴，或与秦岭山区触发移入平原地区的雷暴相遇加强 (图 6d、e)，雷暴逐渐呈环状排列，但强雷暴主要在其东北侧生成；22 时 00 分，洛南附近的 $M_{\beta}CS$ 并入 a (图 6f)。a 沿着风暴承载层的西南风平流，向东北方向缓慢移动，给平原地区带来局地大暴雨天气，a 从生成到移出陕西历经约 5 h。

平原地区北屯站的大暴雨出现在雷暴加强和维持阶段。高效率降水的环境场条件下，低层 γ 中尺度气旋性涡旋是造成大暴雨的直接原因。雷达回波显示，20 时 06 分平原地区低层 (1.5 km 附近) 存在偏东风与冷池出流形成辐合区 (图略)。20 时 12 分低层辐合区中北屯站附近可见气旋性辐合的 γ 中尺度涡旋 (图 7a、f)，入流区偏东风带来水汽注入涡旋，涡旋不断发展增强 (图 7b、g、c、h)，低层 γ 中尺度气旋性涡旋有利于上升运动的增强 (Nielsen et al., 2020)，20 时 24 分雷暴的上升运动进一步增强，45 dBz 反射率因子达到 10 km 以上 (图 7k、l)，超过−20 ℃ 层高度 (9.38 km)，风暴对流非常旺盛。20 时 48 分 (图 7d、i) γ 中尺度气旋性涡旋东北侧新生的对流单体切断了低层偏东风入流，强度开始减弱，辐合不明显，仅维持气旋性旋转，21 时 06 分仍可见 γ 中尺度气旋性涡旋 (图 7e、j)，γ 中尺度气旋性涡旋在阎良地区维持约 1 h，直接造成 8 月 5 日 20—21 时北屯站降水量达 103.7 mm 的极端强降水。

冷池驱动及低层垂直风切变相对于雷暴出流边界方向的有利配置是平原地区雷暴加强和维持的原

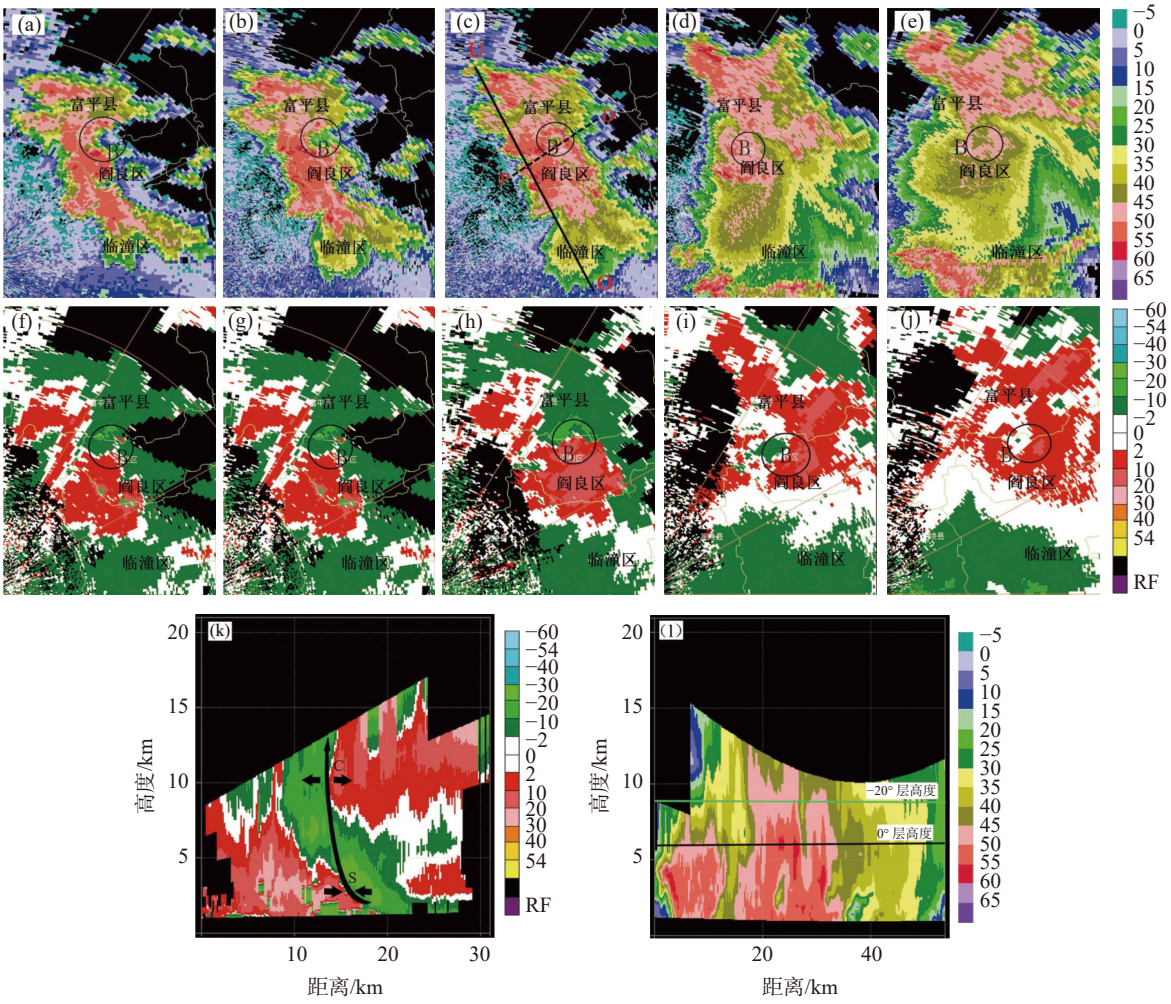


图 7 2020 年 8 月 5 日 20 时 12 分 (a、f)、20 时 18 分 (b、g)、20 时 24 分 (c、h)、20 时 48 分 (d、i)、21 时 06 分 (e、j) 泾河雷达 1.5°仰角基本反射率因子 (a—e，单位：dBz) 和径向速度 (f—j，单位：$m \cdot s^{-1}$)，20 时 24 分分别沿图 c 虚线 PD 和实线 OU 的径向速度剖面 (k) 和雷达基本反射率因子剖面 (l) (图 a—g 中圆圈代表 γ 中尺度涡旋；图 k 中 C 点为辐合区，S 为辐散区)

Fig. 7 The (a-e) basic reflectivity factor (unit: dBz) and (f-j) radial velocity of the Jinghe radar (unit: $m \cdot s^{-1}$) at elevation1.5° at (a, f) 20:12 BT, (b, g) 20:18 BT, (c, h) 20:24 BT, (d, i) 20:48 BT, (e, j) 21:06 BT, and (k) radial velocity cross-section along the dotted line PD at 20:24 BT, (l) basic reflectivity factor cross-section along solid line OU in Fig. 7c (The circles represent meso-γ-scale vortex in Fig. 7a-g. The C denotes convergence zone and S denotes divergence zone in Fig. 7k)

因。由 5 日 20 时—6 日 00 时地面位温、风场和 1 h 变温 (图 8a、b) 可见, M_βCS a 形成的冷池范围增大并主要向东北方向扩展, 冷池的东北侧与地面东北风形成明显的地面辐合线即雷暴出流边界, 雷暴出流边界随冷池向东北方向推进而向东北方向移动。由 5 日 20 时暴雨区沿纬向风场垂直剖面 (图 8d) 可知, 850 hPa 以下大气边界层为东北风或偏东风, 850—700 hPa 主要为西南风, a 系统东北侧雷暴出流边界移动方向为东北, 与大气边界层东北风或偏东风向大致相反, 与 850—700 hPa 的西南风几乎相同 (图 8e), 根据低层垂直风切变和雷暴加强维持的研究理论 (Wilson, 1998; 俞小鼎等, 2012; 俞小鼎等, 2020) (图 8c), 当雷暴出流边界移动方向和边界层风向相反, 而与边界层以上的风向相同时, 对流容易在垂直方向上发展, 有利于雷暴的加强和维持, 因此 a 系统东北侧雷暴得以加强和维持。

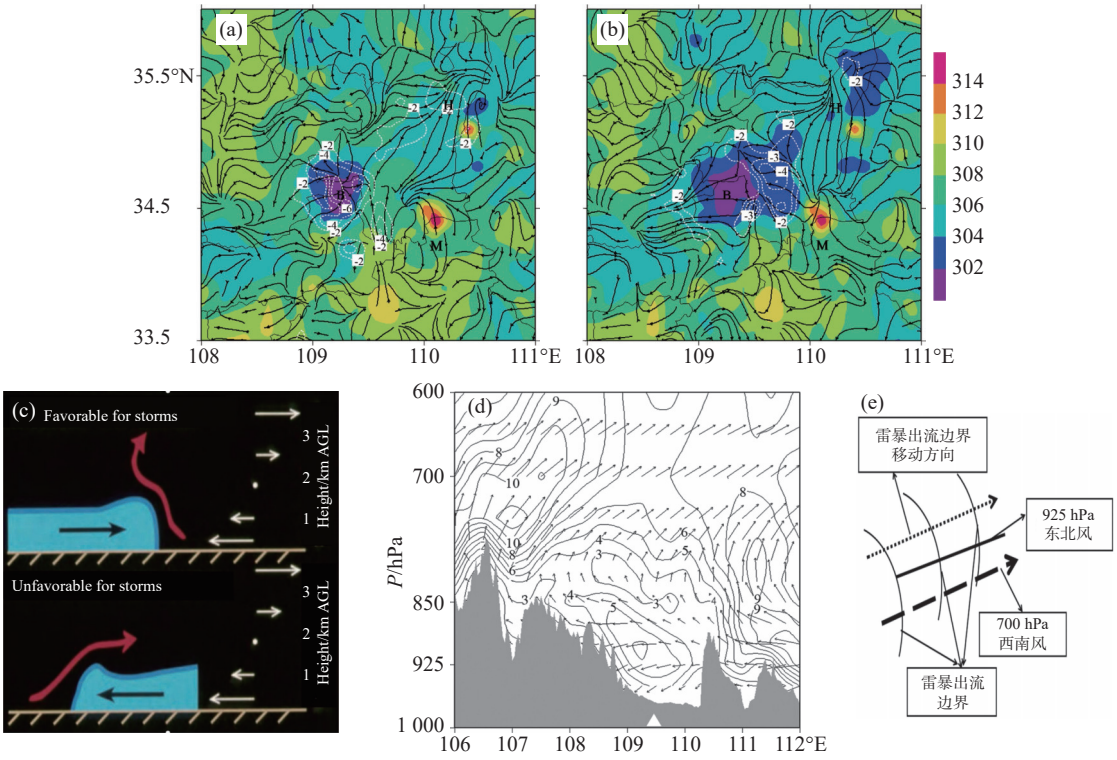


图 8 2020 年 8 月 5 日 21 时 (a)、5 日 22 时 (b) 陕西中东部地面位温 (填色, 单位: K)、地面风场 (箭头流线) 和 1 h 变温 (白色等值线, 单位: ℃), 边界移动方向与低层垂直风切变方向的配置 (c, 俞小鼎等, 2020), 5 日 20 时暴雨区沿纬向风速 (等值线, 单位: $m\cdot s^{-1}$) 和风场 (箭头) 垂直剖面 (阴影为地形, △为暴雨区, 下同) (d) 和低层垂直风切变相对于雷暴出流边界移动方向示意图 (e)

Fig. 8 The surface potential temperature (color-filled, unit: K), wind field (streamline) and 1 h temperature change (white dash line, unit:℃) at (a) 21:00 BT and (b) 22:00 BT on 5 August in mid-eastern Shaanxi, (c) the direction of boundary movement is closely related to the configuration of low-level vertical wind shear direction and thunderstorms (Yu et al., 2020), (d) the vertical profile of the zonal wind speed (contour, unit: $m\cdot s^{-1}$) and wind field (arrow) in the rainstorm area at 20:00 BT on 5 August 2020 (The triangles and shaded area is storm area and terrain respectively, the same below), (e) the moving direction of the low-level vertical wind shear relative to the thunderstorm outflow boundary

洛南附近 M_βCS 的维持与地形持续触发雷暴单体密切相关。秦岭东段洛南西南部山脉走向与东南风近乎垂直, 有利于洛南麻坪站 (图 9 中 M 处) 西南侧触发雷暴单体。5 日 20 时 00 分 (图 9a) 秦岭东段南坡 M 附近有雷暴单体回波生成, 5 日 21 时 30 分 (图 9b) M 附近的回波范围增大。5 日 22 时 30 分 (图 9c) 在 M 地区西南侧出现多个对流单体, 雷暴单体生成方向与平流方向相反, 雷暴后向传播。同时, M 地区东北部回波向东北移动, 5 日 23 时 59 分 (图 9d) 可看到 M 地区东北侧的回波继续向东北方向移动, 而 M 地区西南侧的雷暴单体向东北方向移动。多个雷暴单体在西南风平流作用下向东北方向移动, 经过洛南北部 (M 附近), 造成大暴雨天气。6 日 03 时之后洛南西部仅有零星对流单体产生, 洛南地区强降水基本结束。

5 地形对雷暴的触发作用

边界层急流被地形强烈抬升, 在层结不稳定条件下可以导致雷暴的触发 (俞小鼎, 2012), 秦岭南坡抬升边界层东南风触发洛南地区的雷暴。暴雨过程

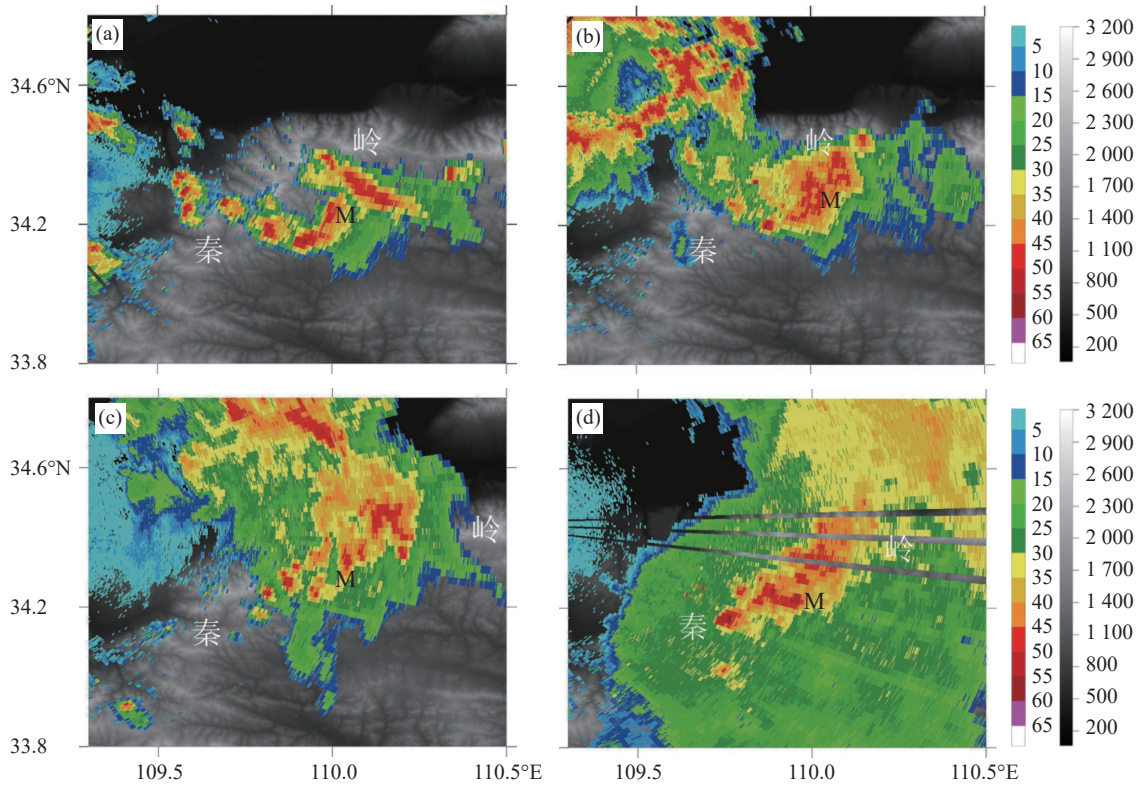


图 9 2020 年 8 月 5 日 20 时 00 分 (a)、5 日 21 时 30 分 (b)、5 日 22 时 30 分 (c)、5 日 23 时 59 分 (d) 泾河雷达 1.5°仰角基本反射率因子 (填色, 单位: dBz) 与地形 (灰色阴影, 单位: m) 空间分布

Fig. 9 The spatial distribution of basic reflectivity factors (color-filled, unit: dBz) of Jinghe radar at elevation 1.5° and terrain (grey shaded, unit: m) at (a) 20:00 BT, (b) 21:30 BT, (c) 22:30 BT and (d) 23:59 BT on 5 August 2020

中低层南海-广东-湖南-湖北至洛南地区为偏南风转东南风, 暴雨区 (110°E, 34°N) 自 05 日 17 时—6 日 02 时边界层 850 hPa (距地面 1 km 以下) 维持 6~8 $m\cdot s^{-1}$ 东南风 (图 10), 风向与洛南附近秦岭山脉近乎垂直, 有利于地形抬升触发雷暴。

利用公式 (3) 计算得到爬流产生的运动速度, 由洛南暴雨区西侧沿 109.75°E 作地形强迫低层风爬流产生的垂直运动剖面可见, 8 月 5 日 18 时—6 日 03 时, 洛南附近 (34°N) 秦岭迎风坡至 700 hPa 一直存在地形强迫的上升运动, 5 日 21 时 (图 11a)—6 日 03 时 (图 11b) 上升运动中心值维持在 1.2×10^{-1} $m\cdot s^{-1}$, 6 日 03 时之后边界层东南气流减弱, 地形强迫的上升运动也开始减弱, 强降水基本结束。

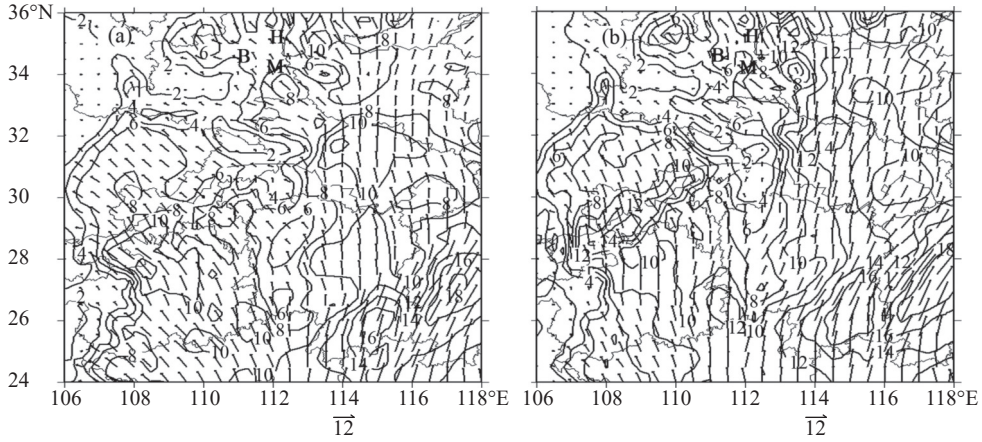


图 10 2020 年 8 月 5 日 21 时 (a)、6 日 00 时 (b) 850 hPa 风场 (箭头) 和风速 (等值线, 单位: $m\cdot s^{-1}$) 分布

Fig. 10 The distribution of wind field (arrow) and wind speed (contour, unit: $m\cdot s^{-1}$) at 850 hPa at (a) 21:00 BT on 5 August and (b) 00:00 BT on 6 August 2020

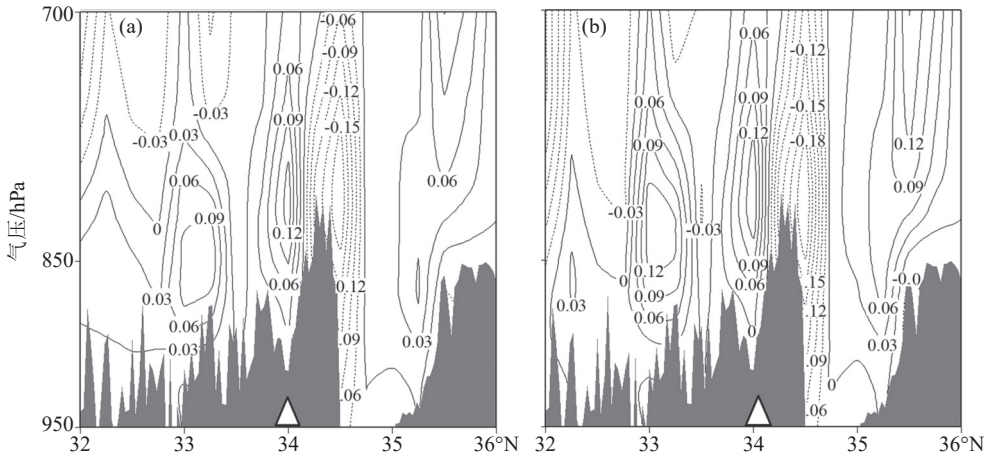


图 11 2020 年 8 月 5 日 21 时 (b)、6 日 00 时沿 109.75°E 地形强迫低层风爬流产生的垂直速度 (等值线, 单位: m·s^{-1}) 径向剖面

Fig. 11 The adial profile of vertical velocity (contour, unit: m·s^{-1}) induced by low-level climbing currents forced by topology along 109.75°E at (a) 21:00 BT on 5 August and (b) 00:00 BT on 6 August 2020

6 结论与讨论

本文利用高空常规观测资料、地面气象站资料、ERA5 再分析资料和多普勒天气雷达资料, 对 2020 年 8 月 5—6 日陕西中东部的平原和秦岭山区洛南县两处局地突发大暴雨的环流背景、环境场条件和中尺度对流系统 (MCS) 演变特征及成因进行了分析, 得到主要结论如下:

(1) 本次大暴雨是在弱天气尺度强迫下发生的, 暴雨区 500 hPa 为副高控制, 700 hPa、850 hPa 陕西中东部无明显的天气尺度系统主导, 地面上没有冷锋。 700 hPa 未出现明显的大范围较强的偏南风及强的水汽输送带, 但大气边界层内有大范围的较强偏南风转偏东风向暴雨区输送水汽。暴雨区本地水汽含量非常充沛, 大气整层可降水量 50~70 mm, 大气可降水量偏离气候平均 1.5~2 σ, 对流有效位能 3 000~4 800 J·kg^{-1}, 充沛的整层大气可降水量和大的对流有效位能相结合, 低的 CIN 和抬升凝结高度, 深厚的暖云湿层和 0—6 km 弱的垂直风切变, 为突发性大暴雨的发生提供有利的环境场条件。

(2) 平原地区雷暴的触发与地面弱冷空气及地形密切相关, 前期降水形成的地面弱冷空气在关中中东部形成地面辐合线, 地面辐合线触发雷暴与地形触发的雷暴合并形成 β 中尺度对流系统 ($M_\beta CS$) 向东北方向移动, 给关中中东部平原地区带来暴雨天气。强雷暴中低层出现 γ 中尺度涡旋使得上升运动增强造成平原地区 103.7 mm·h^{-1} 极端短时强降水。冷池驱动、低层垂直风切变相对于雷暴出流边界移动方向的有利配置是平原地区雷暴加强和维持的原因。雷暴出流边界移动方向与边界层东北风或偏东风相反, 与边界层以上西南风方向相同, 有利于雷暴的加强和维持。

(3) 下午至夜间稳定维持的较强边界层东南风是秦岭山区洛南附近雷暴触发和维持的关键因素。秦岭山脉的走向与边界层东南风近乎垂直, 东南风爬流产生的上升运动触发雷暴, 秦岭迎风坡触发雷暴单体并后向传播在西南风平流作用下形成“列车效应”造成洛南大暴雨天气。

此次弱天气尺度强迫下局地突发性大暴雨过程的水汽输送特征, 异于有明显天气尺度系统影响的陕西区域性暴雨。对于副高控制下有着充沛的水汽条件和强的不稳定能量的暴雨预报, 暴雨发生最关键的因素为触发机制, 地面冷空气和地形是触发对流的关键因素。平原地区暖区雷暴的触发, 地面冷空气是其关键因素, 当发现陕北、关中北部地区出现明显的降水天气系统时, 除了考虑陕北、关中北部的暴雨天气外, 还需要考虑系统性降水产生的冷池出流与东北风暖湿气流形成准线性辐合线, 触发对流; 秦岭山区南侧的暴雨预报, 需要关注边界层偏东风的强弱、持续时间、水汽输送的方向, 若出现地形触发局地雷暴, 依据模式预报分析充沛水汽和对流有效位能持续的时间, 判断雷暴持续触发的可能性、雷暴单体产生列车效应的可能性, 对模式预报进行订正, 尽可能提前发布暴雨预报预警。

参考文献 (References):

安礼政,刘安宁,宋昊冬,等.2021.淮北地区一次弱天气尺度强迫背景下MCS 过程分析与模拟[J].气象科学,41(5):657−667. An L Z, Liu A N, Song H D, et al. 2021. Analysis and simulation of an MCS process in Huaibei area against weak weather scale forcing [J]. Journal of the Meteorological Sciences,41(5):657−667 (in Chinese). doi:10.12306/2021jms.0018

杜继稳,侯明全,梁生俊,等. 2007. 陕西省短期天气预报技术手册[M]. 北

京:气象出版社:136. Du J W, Hou M Q, Liang S J, et al. 2007. Shaanxi Provincial short-term weather forecast technical manual [M]. Beijing:Meteorological Press:136 (in Chinese)

郭大梅,潘留杰,李明娟,等.2022.关中北部一次暴雨水汽条件及不稳定分析[J].高原气象,41(6):1481−1491. Guo D M, Pan L J, Li M J, et al. 2022. Water vapor condition and instability analysis of a rainstorm in northern Guanzhong [J]. Plateau Meteorology,41(6):1481−1491 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2021.00090

金妍,李国平.2021.爬流和绕流对山地突发性暴雨的影响[J].高原气象,40(2):314−323. Jing Y, Li G P. 2021. Impact of flow around and flow over in sudden rainstorm on mountains [J]. Plateau Meteorology, 40(2):314−323 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2020.00041

李国平,孙建华,王晓芳.2021.中国西南山地突发性暴雨特征与机理研究的新进展[J].气象科技进展,11(4):57-63. New Research Progress on Characteristics and Mechanism of Sudden Rainstorm in Southwest China [J]. Advances in Meteorological Science and Technology,11(4):57-63 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095−1973.2021.04.010

李明娟,郭大梅,冯典,等.2023.弱天气系统强迫下一次突发性大暴雨成因分析[J].高原气象,42(4):934−948. Li M J, Guo D M, Feng D, et al. 2023. Mechanism analysis of an abrupt torrential rain event under weak synoptic forcing [J]. Plateau Meteorology,42(4):934−948 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2022.00101

刘成瀚,王月,阎琦,等.2023.超低空急流形成的爬、绕流对长白山地区一次突发性暴雨的影响[J].暴雨灾害,42(3):273−282. Liu C H, Wang Y, Yan Q, et al. 2023. Impact of flow over and flow around caused by super low-level jet on a sudden rainstorm over the Changbai Mountains [J]. Torrential Rain and Disasters,42(3):273−282 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−035

刘勇,郭大梅,胡启元.2014. 2012 年 7 月 27 日陕北佳县特大暴雨天气的成因[J].干旱气象,32(3):424−430. Liu Y, Guo D M, Hu Q Y. 2014. Cause analysis of an extremely heavy rainstorm in Jiaxian county in the north Shaanxi Province on July 7th 2012 [J]. Arid Meteorology, 32(3):424−430 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006−7639(2014)−03−0424

孙继松,王华,王令,等.2006.城市边界层过程在北京 2004 年 7 月 10 日局地暴雨过程中的作用[J].大气科学,30(2):221−234. Sun J S, Wang H, Wang L, et al. 2006. The role of urban boundary layer in local convective torrential rain happening in Beijing on 10 July 2004 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,30(2):221−234 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2006.02.05

沈晓玲,冯博,李锋,等.2024.一次弱天气背景下浙江局地暖区暴雨成因分析[J].气象,50(2):170−180. Shen X L, Feng B, Li F, et al. 2024. Cause analysis of rainstorm in local warm sector under a weak weather background in Zhejiang Province [J]. Meteorological Monthly,50(2):170−180 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2023.051901

徐珺,毕宝贵,谌芸,等.2018. “5·7”广州局地突发特大暴雨中尺度特征及成因分析[J].气象学报,76(4):511−524. Xu J, Bi B G, Chen Y, et al. 2018. Mesoscale characteristics and mechanism analysis of the unexpected local torrential rain in Guangzhou on 7 May 2017 [J]. Acta Meteorologica Sinica,76(4):511−524 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2018.016

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 sub-tropical high in Hebei [J]. Meteorological Monthly,48(6):677−690 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.040101

俞小鼎,周小刚,王秀明.2012.雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J].气象学报,70(3):311−337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M. 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection [J]. Acta Meteorologica Sinica,70(3):311−337 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2012.030

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]. Torrential Rain and Disaster,32(3):202−209 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2013.03.002

俞小鼎,王秀明,李万莉,等. 2020. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京:气象出版社:195-196. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al. 2013. Nowcasting thinking and method of flash heavy rain [J]. Beijing:Meteorological Press:195-196 (in Chinese)

赵强,陈小婷,王楠,等.2022.副热带高压影响下陕西关中强对流发生的环境场特征及触发机制[J].气象,48(1):28−43. Zhao Q, Chen X T, Wang N, et al. 2022. Environmental characteristics and trigger mechanism of severe convection under the influence of subtropical high in Guanzhong area of Shaanxi Province [J]. Meteorological Monthly,48(1):28−43 (in chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.061001

Davis R S. 2001. Flash flood forecast and detection methods. Severe Convective Storms [M]. Boston:American Meteorological Society Press,481-526

Grumm R, Robert H . 2001. Standardized anomalies applied to significant cold season weather events: preliminary findings [J]. Weather Forecasting,16(6):736−754. doi:10.1175/1520−0434(2001)016<0736:SAATSC>2.0.CO;2

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2018. ERA5 hourly data on pressure levels from 1959 to present [Z]. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). doi:10.24381/cds.bd0915c6

Imamovic L S C. 2019. Mountain volume control on deep-convective rain amount during episodes of weak synoptic forcing [J]. Journal of the AtmosphericSciences,76(2):605−626.doi:10.1175/JAS−D−18−0217.1

Nielsen E R, Schumacher R S. 2020. Observations of extreme short-term precipitation associated with supercells and meso-vortices [J]. Monthly Weather Review,148(1):159−182. doi:10.1175/MWR−D−19−0146.1

Tian F Y, Zheng Y G, Zhang T, et al. 2015. Statistical characteristics of environmental parameters for warm season short-duration heavy rain fall over central and eastern China [J]. Journal of Meteorological Research,29(3):370−384. doi:10.1007/s13351−014−4119−y

Wang H, Luo Y L, Jou B J D. 2014. Initiation, maintenance, and properties of convection in an extreme rainfall event during SCMREX: observational analysis [J]. Journal of Geophysical Research, 119(23):13206−13232. doi:10.1002/2014JD022339

Wu M W, Luo Y L. 2016. Mesoscale observational analysis of lifting mechanism of a warm-sector convective system producing the maximal daily precipitationin China mainland during pre- summer rainy season of 2015 [J]. Journal of Meteorological Research, 30(5):719−736. doi:10.1007/s13351−016−6089−8

Wilson J W, Crook N A, Mueller C K, et al. 1998. Nowcasting thunderstorms: a status report [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,79:2029−2099. doi:10.1175/1520−0477(1998)0792.0.CO;2

(责任编辑 唐国瑛)