

刘嘉慧敏,潘留杰,郭大梅,等.2023.商洛金丝峡“6.26”极端短时强降水成因分析[J].暴雨灾害,42(6):659–669. LIU Jiahui-min, PAN Liu-jie, GUO Damei, et al. 2023. Comprehensive analysis of the extreme short-time heavy rain event on 26 June 2022 in Jinsi Gorge, Shangluo [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 42(6), 659–669 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022–256

商洛金丝峡“6.26”极端短时强降水成因分析

刘嘉慧敏^{1,2}, 潘留杰^{1,2}, 郭大梅^{1,2}, 屈丽玮^{1,2}, 吉庆^{1,2}, 郑然³

(1. 陕西省气象台, 西安 710014; 2. 秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室灾害性天气研究与应用中心, 西安 710044; 3. 四川省气候中心, 成都 610072)

摘要:受河套低槽和低涡切变的共同影响,2022年6月26日12:00—13:00(北京时,下同)陕西商洛境内商南县西部的金丝峡出现了极端短时强降水(简称“6.26”过程),小时雨强高达108.3 mm·h⁻¹,是一次典型的由中尺度新生雷暴引发的局地强降水过程。局地性和突发性强、持续时间短、降水强度大,各家业务模式均出现漏报。本文基于常规气象观测资料及加密自动站观测资料、多普勒天气雷达资料与欧洲中期天气预报中心第五代大气再分析资料(ERA5),对此次短时强降水成因进行了详细分析。结果表明:(1)该过程发生在500 hPa河套低槽配合700 hPa低涡切变缓慢东移的环流背景下,商南地区动力抬升条件和能量条件较好,对流发生前K指数达到42.83℃。(2)局地充沛的水汽加之低层较强的垂直上升运动可将水汽迅速向上输送,有利于在金丝峡形成极端短时大暴雨。(3)金丝峡附近热力非均匀下垫面造成的局地环流和变压风引起的局地流场之间形成的中小尺度地面辐合线是导致金丝峡极端短时强降水的主要原因。金丝峡特殊的河谷地形,一方面有利于触发对流,另一方面阻挡了低层东南气流沿山坡抬升,进一步加强了金丝峡上空大气的辐合,促使暴雨增幅。

关键词:局地暴雨;新生雷暴;中尺度辐合线;地形作用

中图分类号: P458.1+21.1

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2022–256

Comprehensive analysis of the extreme short-time heavy rain event on 26 June 2022 in Jinsi Gorge, Shangluo

LIU Jiahui-min^{1,2}, PAN Liujie^{1,2}, GUO Damei^{1,2}, QU Liwei^{1,2}, JI Qing^{1,2}, ZHENG Ran³

(1. Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710014; 2. Key Laboratory of Eco-Environment and Meteorology for the Qinling Mountains and Loess Plateau, Xi'an 710044; 3. The Climate Center in Sichuan Province, Chengdu 610072)

Abstract: Affected by the Hetao trough and low vortex, an extreme short-term heavy rainfall (referred to as the "6.26" event) occurred on 26 June 2022 from 12:00 BT to 13:00 BT in the western part of Shangnan County in Shaanxi province. During this process, an hourly rainfall of up to 108.3 mm was observed. This event was a typical local heavy rainstorm event caused by a newly-born mesoscale thunderstorm, which was characterized by its localized, sudden, short duration, and high-intensity precipitation. All numerical models failed to predict this event. Based on the data from conventional meteorological observations, encrypted automatic weather stations, Doppler weather radar, and the fifth-generation atmospheric reanalysis data of the European Center for Medium-Range Weather Forecasting (ERA5), this study analyzed in detail the environmental field characteristics and convective triggering mechanisms of this short-time heavy precipitation event. The results are as follows: (1) This event occurred under a combined circulation background of the 500 hPa low trough in Hetao and 700 hPa low vortex shear slowly moving eastward. The dynamic uplift and energy conditions over Shangnan were favorable, and the K-index reached 42.83℃ before the convection occurred. (2) The local abundant water vapor and the strong vertical upward movement at the lower level could rapidly transport the water vapor upward, which was conducive to the formation of short-term heavy rain over Jinsi Gorge. (3) The small and medium-scale surface convergence line formed between the local circulation caused by the thermal heterogeneity underlying surface near Jinsi Gorge and the local flow field caused by variable pressure wind is the main reason for the extremely short-term heavy precipitation in Jinsi

收稿日期: 2022-12-08; 定稿日期: 2023-09-08

资助项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JQ-279); 中国气象局复盘总结专项(FPZJ2023-129)

第一作者: 刘嘉慧敏, 主要从事灾害性天气预报技术研究。E-mail: 857392276@qq.com

通信作者: 郑然, 主要从事短期气候预测研究。E-mail: zhengran0512@163.com

Gorge. In this process, the special valley terrain of Jinsi Gorge played a significant role. On the one hand, it triggered the generation of convection. On the other hand, because of its block, the low-level southeast airflow rose along the mountain slope. This further strengthened the convergence of the atmosphere over Jinsi Gorge, which finally enhanced the precipitation of this rainstorm.

Key words: local heavy rain; newly-born thunderstorm; mesoscale convergence line; topographical action

引 言

秦岭山区地形复杂、河流峪口众多,发生的短时强降水局地性和突发性强,年平均短时强降水频次最高达108次,且自北向南呈增加趋势。秦岭山区短时强降水伴有明显的日变化特征,多发于夜间和午后。由于数值预报对此类中小尺度天气存在较大时空偏差,加之强降水的前兆信号不明显,极易出现漏报,因此做好秦岭山区短时强降水精准预报的难度较大。2022年6月26日12:00,秦岭山区东麓商南县金丝峡附近出现了短时强降水,小时雨强达到 $108.3\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。由于降水突然,强降水范围小,本次过程的预报效果并不理想,从6月25日20:00起报的各类数值模式24 h降水预报来看(图略),无论是全球模式还是区域中尺度模式均存在漏报。CMA-MESO预报最大降水量级为中雨,明显弱于实况。CMA-GD模式虽然报出了大雨量级,但仍存在干偏差。近年来,在全球变暖的背景下,极端降水事件频发(Tabari, 2020),特别是短时强降水事件的发生频率在东亚及北美等地区均呈上升趋势(Pendergrass, 2018; 贺晓露等, 2023),如四川冕宁“6.26”突发性大暴雨(陈永仁和李跃清, 2021)、天津“7.22”中尺度短时强降水(王莹等, 2021)、郑州“7.20”短时特大暴雨(苏爱芳等, 2021)等,均给当地人民生命财产安全造成巨大损失。

此类暴雨一直是我国气象学者和科技工作者关注的重点,相关研究涵盖地形辐合线、干线、锋面、切变线等各种中尺度辐合线及重力波诱发或中低层锋生均能触发对流天气(俞小鼎等, 2016; 王艳兰等, 2020; 赵强等, 2021)。中尺度辐合线通常由热力非均匀的下垫面、上游冷池流出与环境场相互作用、海风锋等形成(车军辉等, 2017; 章翠红等, 2018; 张晶等, 2021)。陈双等(2016)通过对2009年7月29日北京香山中尺度短时局地大暴雨进行分析,指出北京北部山区的雷暴冷池流出与环境偏南风辐合共同触发了雷暴新生。谢家旭和李国平(2021)对四川盆地西南部的山地突发性暴雨过程中的重力波特征进行天气动力学分析发现,此次山地突发性暴雨是典型重力波诱发的暴雨事件。王莹等(2021)通过诊断分析一次发生在天津主城区的突发性短时强降水过程,发现造成此次暴雨的城区孤立风暴是由城市热岛、上游冷池出流的弱冷空气、系统性东北风和午后形成的中尺度海风锋共同触

发,预报难度非常大。除了中尺度环流系统的直接影响,大多数短时强降水发生在特殊的地形附近。中尺度地形造成的气流爬坡、绕流等动力效应,使得气流在迎风坡辐合,加强垂直上升运动,进而触发雷暴新生(周祖刚等, 2002; 罗菊英等, 2020; 苏涛等, 2020)。同时中尺度地形会阻挡冷锋、雷暴冷池流出,从而导致冷空气在山前堆积产生回流,这使得对流系统稳定少动或列车效应明显增加,造成短时强降水(李超等, 2018; 徐郡等, 2018)。李艳等(2022)重点对太行山地形对对流系统触发、发展、移动路径的影响进行分析,发现山脉-平原的陆面分布在特定的地形结构处形成气候场上的地形辐合区,其受到冷锋系统的动力抬升容易形成更强的地形辐合带,从而触发对流单体群。李跃清等(2011)发现地形抬升、定常地形涡旋等多种地形综合作用是四川“雅安天漏”的主要原因。上述均说明地形对中尺度对流触发有着至关重要的作用。另外,中尺度地形加热产生的热力作用也会改变近地面风场的变化(任素玲等, 2019)。

金丝峡地处秦岭南麓连接巴山北坡,境内地势起伏,谷岭相间,平均海拔约1 000 m,建有约50个气象监测站。本文从天气环流背景、环境条件、中尺度对流系统触发与维持机制方面,对此次金丝峡极端短时强降水的成因进行综合分析,以更深入认识秦岭山区强降水的发展演变规律。

1 资料说明

本文使用的资料主要有:(1)陕西省气象大气探测中心提供的2022年6月26日08:00—20:00商洛市地面加密气象站观测资料,用于分析此次短时强降水过程天气实况特征。该资料涵盖10 min雨量、气温、露点、风向、风速和海平面气压等要素,陕西省气象信息中心采用传统质量控制算法对站点资料进行质控。(2)2022年6月25日20:00—27日08:00的欧洲中期天气预报中心发布的第五代全球再分析(ERA5)格点资料,用于分析造成此次强降水过程的环流形势演变特征。该资料垂直方向共30层,时空分辨率分别为1 h和 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 。所用要素有位势高度、相对湿度、温度、垂直速度、风场及比湿等。(3)2022年6月26日11:00—14:00商洛C波段多普勒天气雷达逐6 min体扫资料,采用VCP21体扫模式,用于分析中小尺度对流系统的演变。资料包含基本反射率因子、组合反射率因子及

径向速度等产品,垂直方向19层。(4)由于商洛没有探空站,故使用邻近卢氏探空站提供的2022年6月26日常规高空探空资料,用于分析对流发生前大气层结特征。

2 降水实况与雷达回波特征

2022年6月26日12:00—13:00陕西省商南县金丝峡出现局地短时强降水(图1a),小时雨强达到了 $108.3\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,突破该站建站以来小时雨强极值,超过

$20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的降雨落区范围小,突发性强。本次短时强降水发生地河沟众多,地势较周边明显偏高,海拔约在1400 m以上(图1b)。从金丝峡站10 min雨量时间演变可见(图1c),在12:00之前没有明显降水。12:10降水突然增至10.1 mm,之后10 min雨量持续增强,于12:50达到最大,即28.6 mm,同时伴有闪电。13:10后对流系统减弱,10 min雨量迅速减小至5 mm以下,随着系统东移出金丝峡强降水趋于结束。

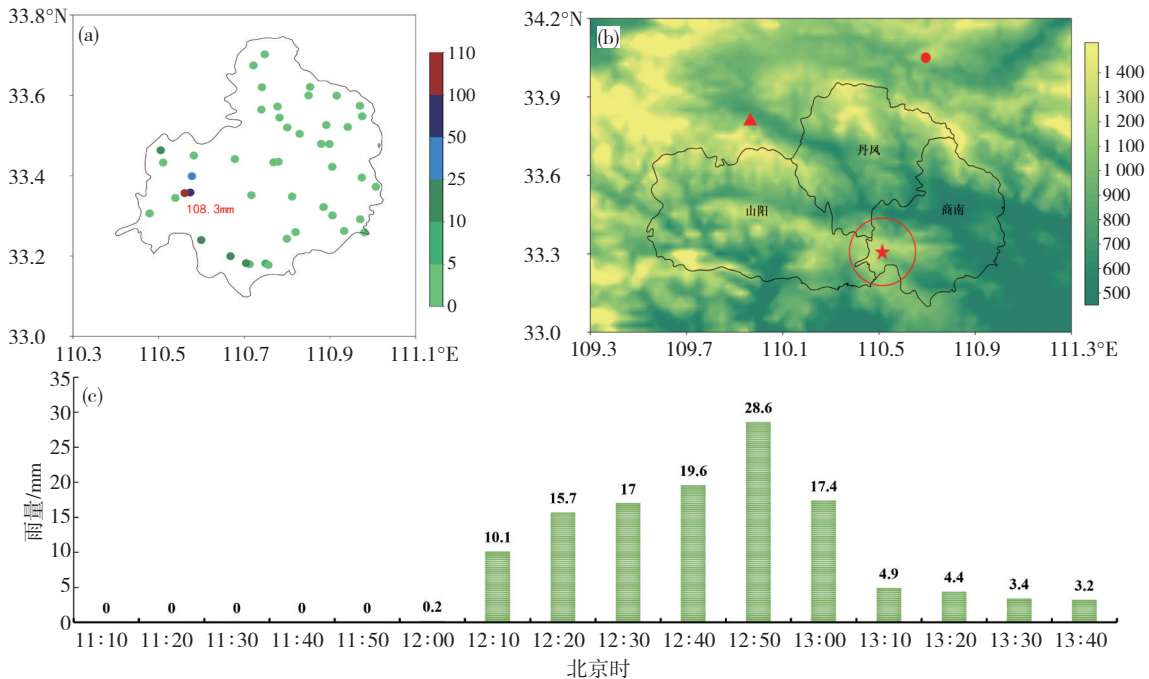


图1 2022年6月26日12:00—13:00商南县监测站累计雨量(a,单位:mm)、商洛地形分布(b,单位:m)、金丝峡站10 min雨量演变(c)(图b中红色圆圈为金丝峡地区,红色五角星为雷暴发生地,下同;红色实心圆为卢氏站探空位置,红色三角为商洛雷达位置)

Fig.1 (a) Accumulated rainfall (unit: mm) at the monitoring station in Shangnan County from 12:00 BT to 13:00 BT on 26 June 2022. (b) Topographic distribution (unit: m) in Shangluo. (c) 10-min precipitation at Jinsi Gorge Station from 11:10 BT to 13:40 BT. The red circle, five-pointed star, solid circle and triangle represent Jinsi Gorge area, the place where the thunderstorm occurred and the sounding position on the Lushi and the radar position in Shangluo, respectively. The same below

暴雨的发生与多种尺度天气系统的相互作用密不可分,而中小尺度系统是最直接的影响系统(丁一汇,2019)。商洛多普勒天气雷达较好地监测了“6.26”金丝峡极端短时强降水的对流系统演变过程。从雷达组合反射率因子演变可见(图2),11:17在商南金丝峡附近未有对流单体生成;11:39有一雷暴单体生成并开始发展;11:45该雷暴单体大于等于35 dBz的回波已覆盖金丝峡大部,强度显著增加。12:30雷暴达到强盛阶段,最大组合反射率因子达到65 dBz以上,超过45 dBz的回波已全部覆盖金丝峡,此时雨量达到最大。12:50左右,金丝峡雷暴系统开始减弱;13:13该地大部被35~40 dBz回波覆盖,转为层云降水。结合商洛多普勒雷达反射率因子和径向速度剖面(图3),11:39金丝峡附近有弱回波发展(图3a),11:45回波迅速加强(图3b),最大反射率因子为54.5 dBz。12:30回

波顶高伸展至对流层顶(图3c),中心最大反射率因子达到63.9 dBz,最大反射率高度伸展至6~8 km,此时金丝峡10 min雨量达到17 mm。对应该时次雷达径向速度剖面(图3f),在风暴入流一侧存在一支很强的斜升气流,并从上部流出,这支强烈的上升气流可为风暴输送水汽,维持风暴的发展;另外有一支干冷的下沉气流从风暴后部中层流入,从风暴的底部流出。两支气流互不妨碍又相互促进,是风暴流场自组织的一种机制或自维持结构,其在4~6 km附近强烈辐合,即有强上升气流发展。12:47回波强度减弱,中心最大反射率因子降至55.5 dBz(图3d)。13:33回波中心最大反射率因子已降至30 dBz(图3e),转为层云降水。

综上所述,“6.26”过程属于典型的局地新生雷暴造成的短时强降水过程,新生雷暴突发性强,生命史

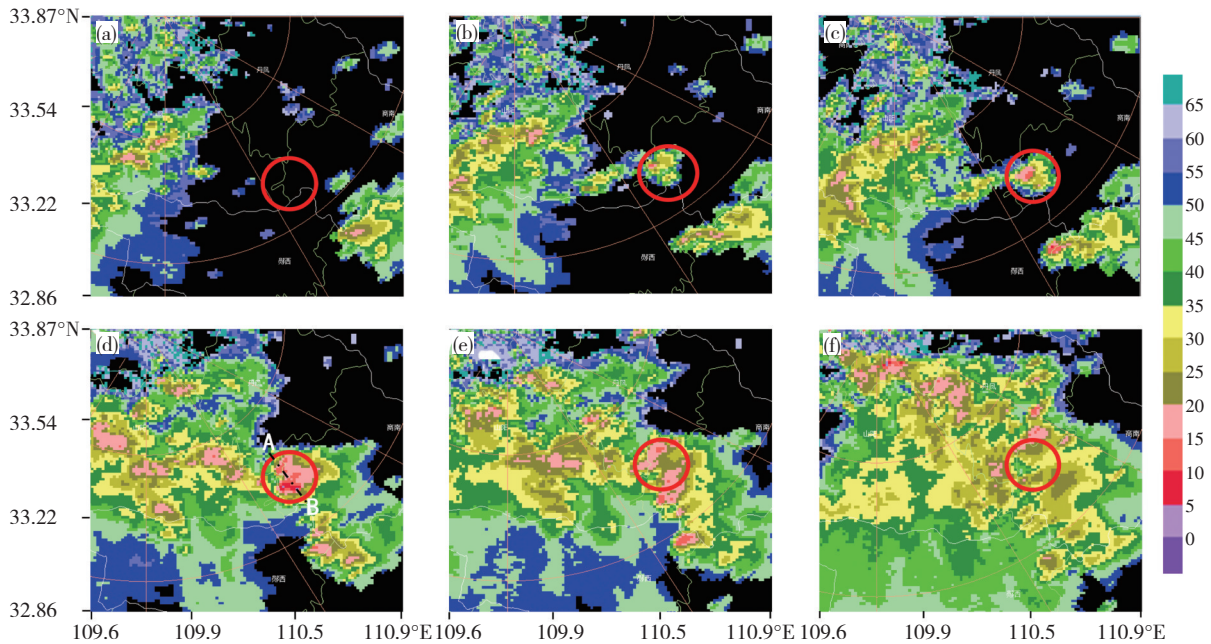


图2 2022年6月26日 11:17 (a)、11:39 (b)、11:45 (c)、12:30 (d)、12:47 (e)、13:13 (f)商洛多普勒天气雷达组合
反射率因子(单位: dBZ) (图2d中虚线AB为图3f商洛多普勒达径向速度剖面位置)

Fig.2 The composite reflectivity factor (unit: dBZ) on Shangluo Doppler radar at (a) 11:17 BT, (b) 11:39 BT, (c) 11:45 BT, (d) 12:30 BT, (e) 12:47 BT, (f) 13:13 BT on 26 June 2022. The dotted line AB in Fig. 2d shows the Radial velocity profile position in Fig. 3f

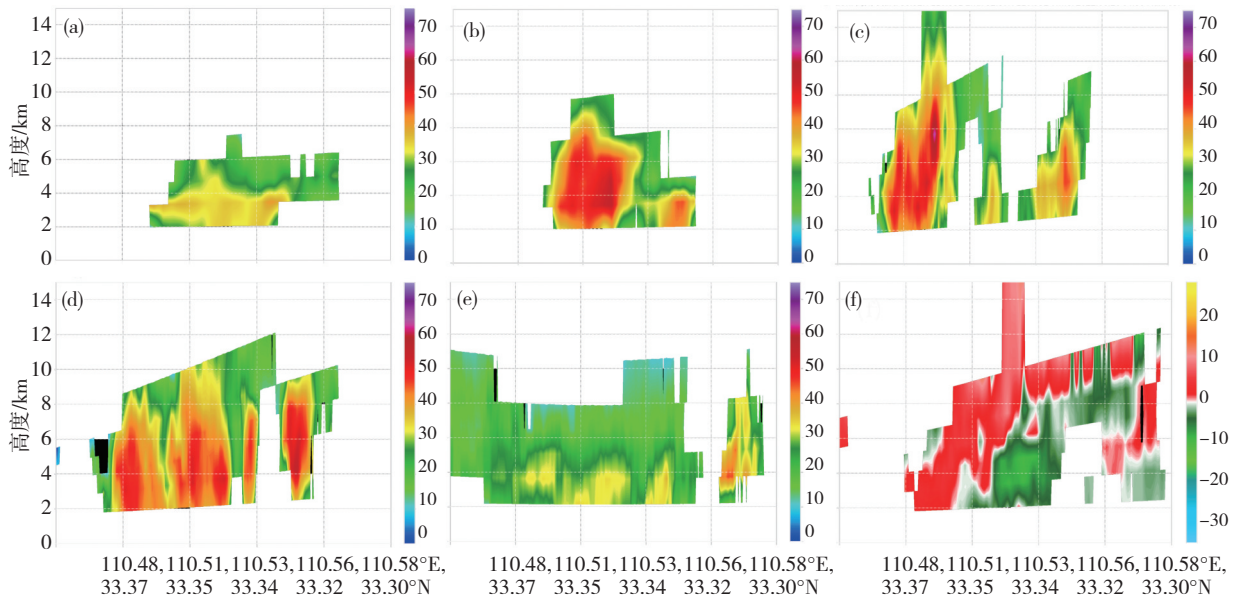


图3 2022年6月26日 11:39 (a)、11:45 (b)、12:30 (c)、12:47 (d)、13:33 (e)商洛多普勒雷达反射率因子
(单位: dBZ)和 12:30 (f)沿图2d中虚线AB的径向速度(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)剖面

Fig.3 The Dopple radar composite reflectivity factor (unit: dBZ) profile at (a) 11:39 BT, (b) 11:45 BT, (c) 12:30 BT, (d) 12:47 BT, (e) 13:33 BT and (f) the radial velocity (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) profile along the dotted line AB in Fig. 2d at 12:30 BT on 26 June 2022

短,中心最大雷达反射率因子超过 65 dBZ,且基本在金
丝峡附近发展和减弱衰亡,局地性强。

3 短时局地大暴雨发生的环流背景与环境条件

3.1 环流背景

此次极端短时强降水过程发生在 500 hPa 河套低

槽东移配合低层低涡切变的环流背景下。26 日 08:00
(图 4a), 500 hPa 低槽位于河套西侧—四川中部, 商洛
地区处于槽前西南气流控制中, 太平洋副热带高压(简
称副高)588 dagpm 线位于广东—浙江一带, 700 hPa 四
川东部有低涡生成。12:00 系统缓慢东移至甘肃陇南
—四川东北一带(图 4b), 500 hPa 低槽加强发展, 商洛

上空槽前西南气流最大风速增至 $28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 垂直上升运动加强, 由 08:00 的 $-0.4 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 变为 $-1.6 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, 槽前系统性抬升加强。588 dagpm 线北边界到达湖北南部, 副高外围暖湿气流北上, 为陕西南部输送水汽, 同时四川低涡东北部切变加强, 陕西南部低层动力及水汽条件转好。

从垂直剖面图可以看出, 26 日 08:00 商洛上空 850 hPa 以下有较弱的下沉运动, 整层以偏西风为主, 中低层有弱西南风, 相对湿度较好(图 4c)。到了 12:00 随着系统的东移, 垂直上升运动明显东移加强, 商洛整层大气转为一致上升, 垂直上升速度最强超过 $-1.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, 动力抬升条件好(图 4d)。随着副高北抬, 外围暖湿气流的水汽输送加强, 商洛上空大气湿层加厚, 最大湿层位于 600~700 hPa, 相对湿度超过 95%。注意到 12:00 金丝峡附近及东侧边界层内有东南气流沿山脉

西伸发展, 其对雷暴发展的影响将在后文讨论。

3.2 环境条件

3.2.1 不稳定条件

从 26 日 12:00 850 hPa 与 500 hPa 温度差值场看出(图 5a), 商洛地区整体温差在 24°C 以上, 假相当位温的纬向剖面显示(图 5b), 金丝峡西侧 106°E 附近存在密集带, 低层存在锋区。金丝峡处于该锋区的暖区一侧, 近地面至 850 hPa 附近为假相当位温大值区, 量值为 360~370 K, 表明底层大气高温、高湿, 中层大气存在低值区, 在垂直结构上表现为明显的“上低下高”位势不稳定层结。

2022 年 6 月 26 日 08:00, 卢氏站探空显示对流有效位能已有 $375.7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, K 指数达到 38.8°C (图略)。利用 ERA5 再分析资料绘制 12:00 金丝峡大气垂直结构(图 6)可见对流有效位能非常强, 达 4

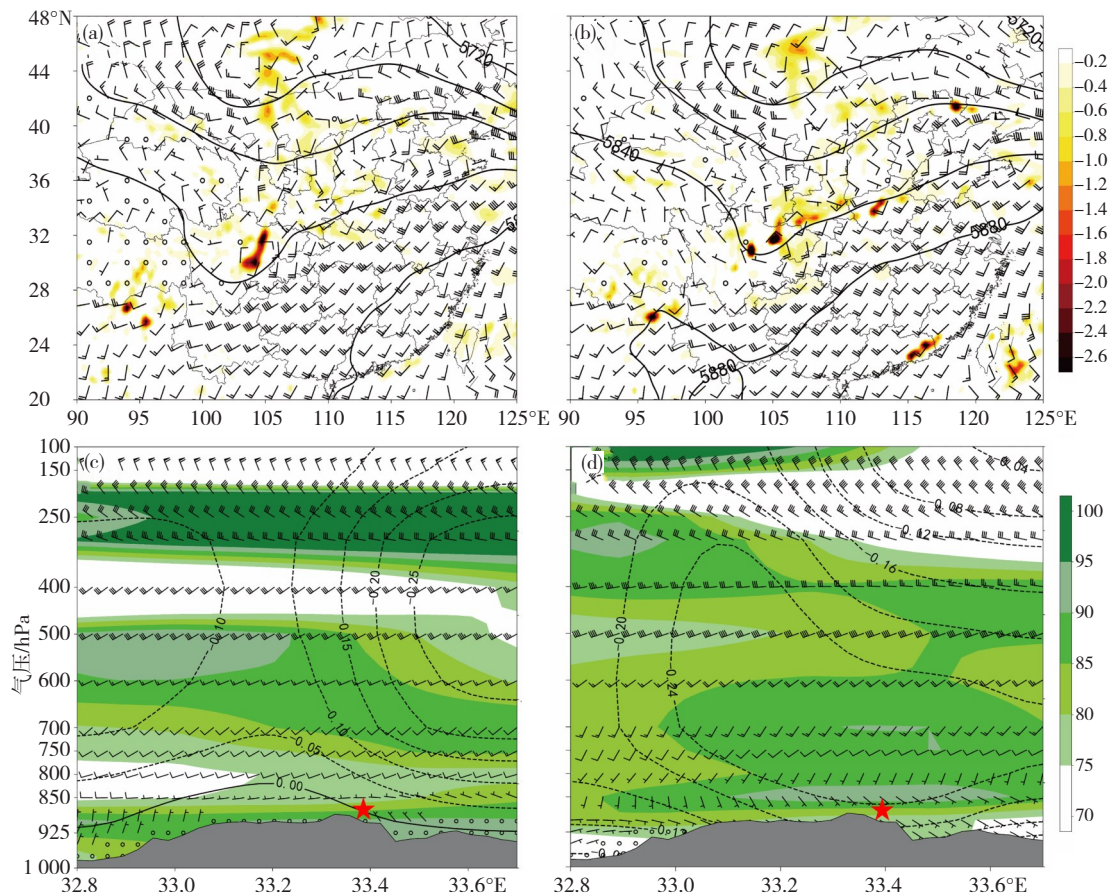


图 4 2022 年 6 月 26 日 08:00 (a)、12:00 (b) 500 hPa 高度场(等值线, 单位: gpm)及垂直速度(填色, 单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)和 700 hPa 风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)分布; 08:00 (c)、12:00 (d) 各层风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、垂直速度(单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)及相对湿度(填色, 单位: 100%)沿坐标 $(110.32^\circ\text{E}, 33.25^\circ\text{N})$ 至 $(110.83^\circ\text{E}, 32.83^\circ\text{N})$ 垂直剖面图 (图 c、d 中虚线为不超过 0 的垂直速度分布; 灰色阴影为地形, 下同)

Fig.4 The height field (isoline, unit: gpm) and vertical velocity (color-filled, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) at 500 hPa and wind field (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) distribution at 700 hPa on Shangluo at (a) 08:00 BT, (b) 12:00 BT. The vertical profile of wind field (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), vertical velocity (unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) and relative humidity (color-filled, unit: 100%) from $(110.32^\circ\text{E}, 33.25^\circ\text{N})$ to $(110.83^\circ\text{E}, 32.83^\circ\text{N})$ at (c) 08:00 BT, (d) 12:00 BT. The dotted line is the vertical velocity with values less than 0 in Fig.4c and Fig.4d.

The gray shadow is the terrain, the same below

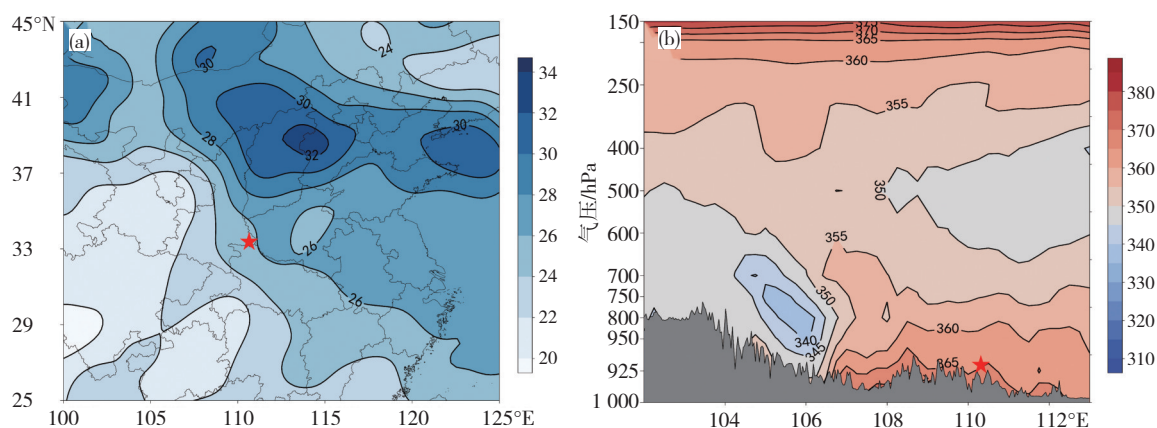


图5 2022年6月26日12:00 850 Pa与500 hPa温度差值场(a,单位: °C)及12:00沿33.25°N

经短时强降水中心的假相当位温(单位: K)纬向剖面图(b)

Fig.5 (a) The temperature difference field (unit: °C) between 850 hPa and 500 hPa at 12:00 BT, (b) the zonal profile of pseudo equivalent potential temperature (unit: K) along the short-time heavy precipitation center (33.25°N) at 12:00 BT on 26 June 2022

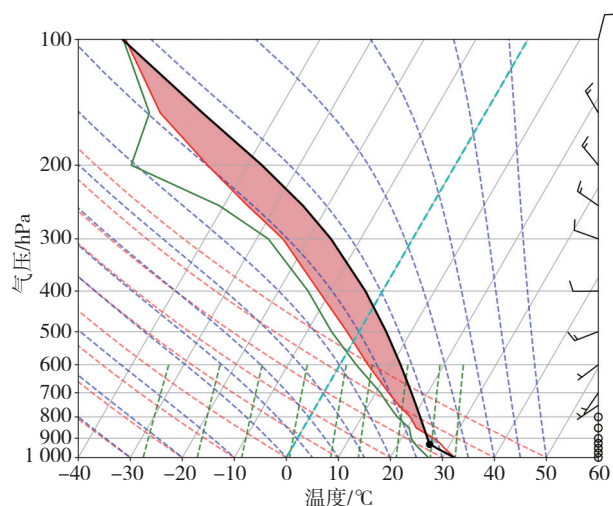


图6 2022年6月26日12:00金丝峡大气垂直结构

Fig.6 The atmosphere vertical structure over Jinsi Gorge at 12:00 BT on 26 June 2022

$289.69 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, K指数达到 $42.83 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 表明大气显著不稳定, 这是此次雷暴能够快速发展的重要原因。但0—3 km垂直风切变大约在 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下, 0—6 km约在 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下, 表明此对流过程环境场垂直风切变较弱。研究表明组织性较好的强风暴通常发生在较强的低层垂直风切变(大于 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)环境中(张文龙等, 2014), 这是此次雷暴过程局地性强、生命史短, 没有出现组织化对流的主要原因。

3.2.2 局地水汽条件

为揭示此次对流过程的水汽来源, 本节详细分析了大尺度的水汽输送情况和局地水汽演变特征。从图7可见, 对流发生前期的08:00, 水汽沿着副高外围向四川东北部、湖北—黄淮一带输送。受低涡气旋性气流辐合影响, 四川东北部水汽辐合明显, 商洛地区水汽通量散度呈弱辐合。12:00的水汽通量偏南风分

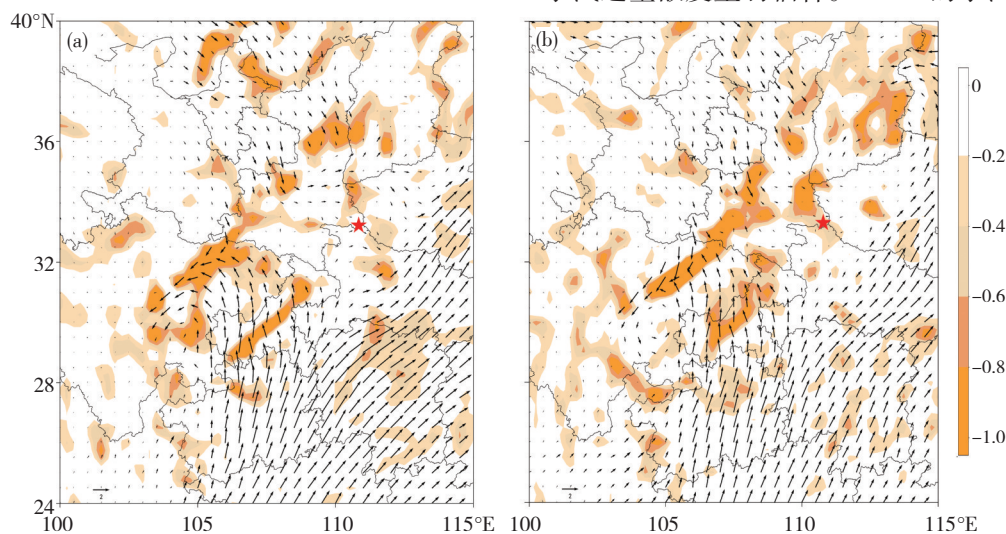


图7 2022年6月26日08:00(a)、12:00(b)商洛850 hPa水汽通量(箭头,单位: $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)及水汽通量散度(填色,单位: $10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)分布

Fig.7 The distribution of 850 hPa water vapor flux (arrow, unit: $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) and water vapor flux divergence (color, unit: $10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) at (a) 08:00 BT and (b) 12:00 BT over Shangluo on 26 June 2022

量加强,四川低涡东侧水汽输送被推至陕南地区,商洛上空水汽辐合强度较08:00显著加强,由 $-0.2 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 变为 $-1.0 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上,表明雷暴发生前低层水汽不断向商洛地区输送汇合。

对对流性降水而言,若不考虑降水蒸发作用,局地的瞬时降水强度主要取决于水汽垂直递减率和对流有效位能的大小(孙继松,2017)。从金丝峡比湿和垂直速度剖面时序图(图8)看出,08:00金丝峡上空850 hPa以下比湿已超过 $15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,雷暴发生前局地水汽条件很充足,但此时近地层为下沉运动。直至10:00金丝峡上空850 hPa以下转为上升运动。11:00起金丝峡低层比湿明显增加,达到 $16.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,中低层均转为垂直上升运动。12:00金丝峡上空整层转为上升运动,将低层充足的水汽迅速向上输送,强降水开始。

此次雷暴发生前期商南地区大气层结已具备高能高湿条件,12:00不稳定能量非常强,中低层增强的垂直上升运动将充沛的水汽向上空输送,造成短时强降水。但雷暴仅在金丝峡附近生成发展造成局地短时强降水的成因将在下文进行讨论。

4 极端短时强降水成因分析

强对流天气形成通常需要具备不稳定的大气层结、一定的水汽和较好的抬升触发等条件。通常而言,前二者较容易满足,对流能否触发是强天气形成的关键环节(Doswell III, 2008; 俞小鼎等, 2012)。Doswell III (1987)指出中尺度上升运动对对流触发起主要作用,天气尺度上升运动通常不直接触发雷暴,而是使得大气变得更加不稳定。中尺度辐合线是触发对

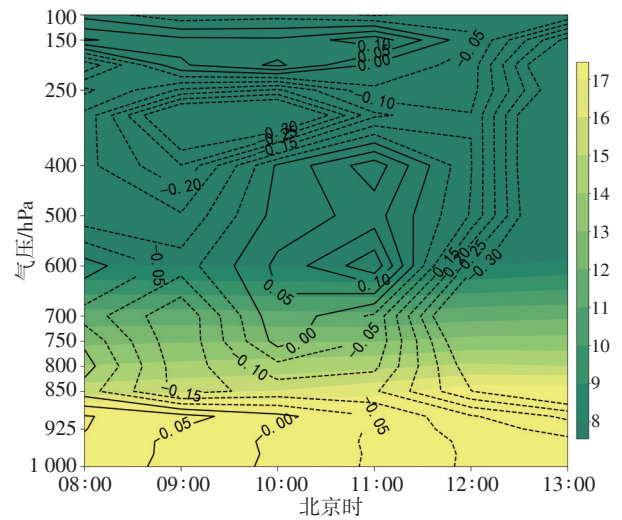


图8 2022年6月26日08:00—13:00金丝峡各层比湿(填色,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)及垂直速度(等值线,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)演变

Fig.8 Evolution of specific humidity (color, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) and vertical velocity (isoline, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) at each layer of Jinsi Gorge from 08:00 BT to 13:00 BT on 26 June 2022

流的重要系统之一,其对应显著的局地抬升运动,并造成近地面层水汽充分混合,再配合局地复杂地形的影响,极易触发对流。

4.1 中尺度对流系统触发与维持机制

从地面温度场和3 h变压场分析(图9),雷暴发生前,11:00金丝峡山顶地面2 m气温约为 24°C ,沿北坡逐渐增加,温差最大达到 5°C 以上。由于北侧山坡地表受太阳辐射加热作用,升温高于周边自由大气。若以大气温度直减率约为 $0.65^\circ\text{C}/(100 \text{ m})$ 计算,以北坡底金丝峡镇站为例,11:00温度约为 29°C ,其与金丝峡山顶海拔相差约1 100 m,相对于山顶周围同高度大气,温度约为 22°C ,显然山坡相对于周围同高度大气为热源。同时,在北坡还存在明显的1 h正变温,变

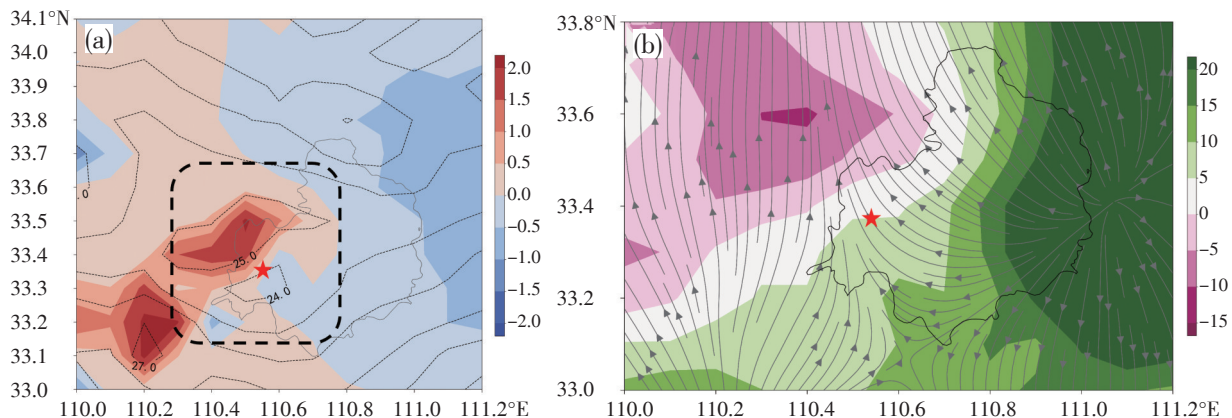


图9 2022年6月26日11:00地面2 m温度场(填色,单位: $^\circ\text{C}$)及1 h变温(等值线,单位: $^\circ\text{C}$) (a), 3 h变压场

(填色,单位: $1 \times 10^{-1} \text{ Pa}$)及地面流场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) (b) (图a中虚线方框代表变压梯度区)

Fig.9 (a) The 2-m temperature field (color-filled, unit: $^\circ\text{C}$) and 1-h temperature change (contour, unit: $^\circ\text{C}$), (b) the 3-h variable pressure field (color-filled, unit: $1 \times 10^{-1} \text{ Pa}$) and the surface flow field (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 11:00 BT on 26 June 2022.

The dashed box represents the variable pressure gradient area in Fig. 9a

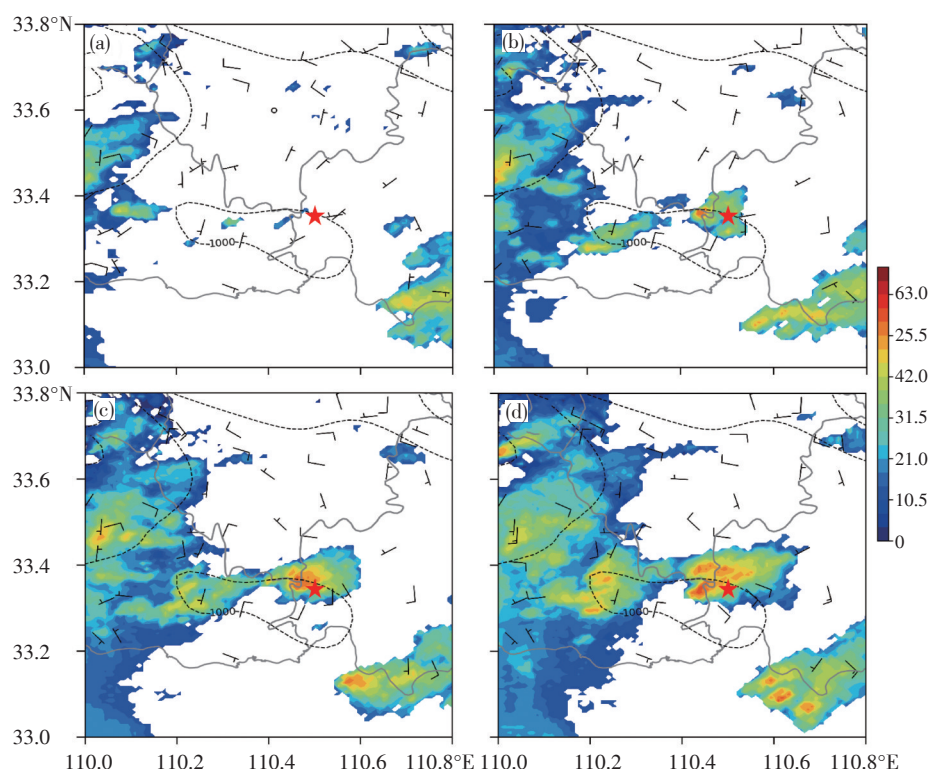


图10 2022年6月26日11:20 (a)、11:40 (b)、11:50 (c)、12:00 (d)商南地面风场(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)及商洛雷达组合反射率因子演变(填色,单位: dBZ) (图中虚线为海拔高度1 000 m等值线)

Fig.10 Evolution of surface wind field (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and the Dopple radar composite reflectivity factor (color-filled, unit: dBZ) at (a) 11:20 BT, (b) 11:40 BT, (c) 11:50 BT, (d) 12:00 BT over Shangnan on 26 June 2022. The dotted line is 1 000 m above sea level

温幅度最大达到 $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这种非均匀的热力差异易形成局地热力环流,即金丝峡北坡为爬坡上升气流。另外,商南县东南部有明显的3 h正变压,西北部存在3 h负变压,在金丝峡附近形成明显的变压梯度带,有利于偏南风的发展(图9b)。

从地面风场叠加雷达回波来看(图10),11:20,在温差较大的变压梯度带上出现了弱的偏北风与偏南风辐合。11:40,商南金丝峡附近偏南风增至 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,辐合强度较前一时次加强,此时沿着辐合线有雷暴单体生成,中心反射率因子为30 dBZ。之后,商南西侧多站转为偏南风,与其交界的山阳、丹凤多站转为偏北风,造成金丝峡附近风场辐合进一步增强,加剧了近地层抬升运动,配合高能高湿的环境条件,雷暴单体迅速发展。12:00,沿着地面辐合线附近雷暴中心反射率因子最大已超过50 dBZ,金丝峡附近强降水开始。由此可见,前期热力非均匀的下垫面和变压风使得金丝峡局地流场发生了变化,形成中小尺度地面辐合线,促进对流触发。

4.2 地形对强降水的增幅作用

沿雷暴发生地的垂直剖面可见(图11),08:00—09:00四川东部低涡还未北移(图12a),金丝峡附近受较弱的偏西气流控制,上空没有明显的辐合区(图

12d),商南近地层风场很弱,850—700 hPa 主要以偏西气流为主(图11a, b)。10:00低涡北上发展(图12b),其东部外围偏东偏南气流随之北抬影响金丝峡地区。11:00低涡加深发展(图12c),850 hPa 偏东气流开始西伸控制金丝峡上空;受地形阻挡作用,偏东气流在金丝峡上空形成辐合抬升区,这在近地层散度场得以验证(图12e)。随着该东南气流西伸爬坡至金丝峡附近,辐合区和垂直上升运动随之西移,强度较08:00明显加强,辐合中心达到 $-4\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 以上(图11c)。12:00低层东南迅速加强发展(图12e),该气流不仅能将周边的局地水汽向雷暴发生地输送,随着气流沿山脉爬坡抬升还对雷暴触发有一定辐合抬升作用。此时金丝峡上空为强烈的辐合场,辐合中心达到 $-8\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 以上,垂直运动旺盛,对流迅速发展(图11d)。随着雷暴冷池出流加强,山区周边逐渐被辐散气流所控制,辐合减弱,雷暴趋于消亡(图略)。

上述分析表明,金丝峡特殊的河谷地形一方面触发了对流的产生,另一方面受地形阻挡,低层东南气流沿山爬坡抬升,进一步加强了金丝峡上空气流的辐合,有利于暴雨增幅。随着雷暴冷池出流加强,切断了水汽补给,周边形成辐散场,垂直运动减弱,雷暴逐渐消亡。

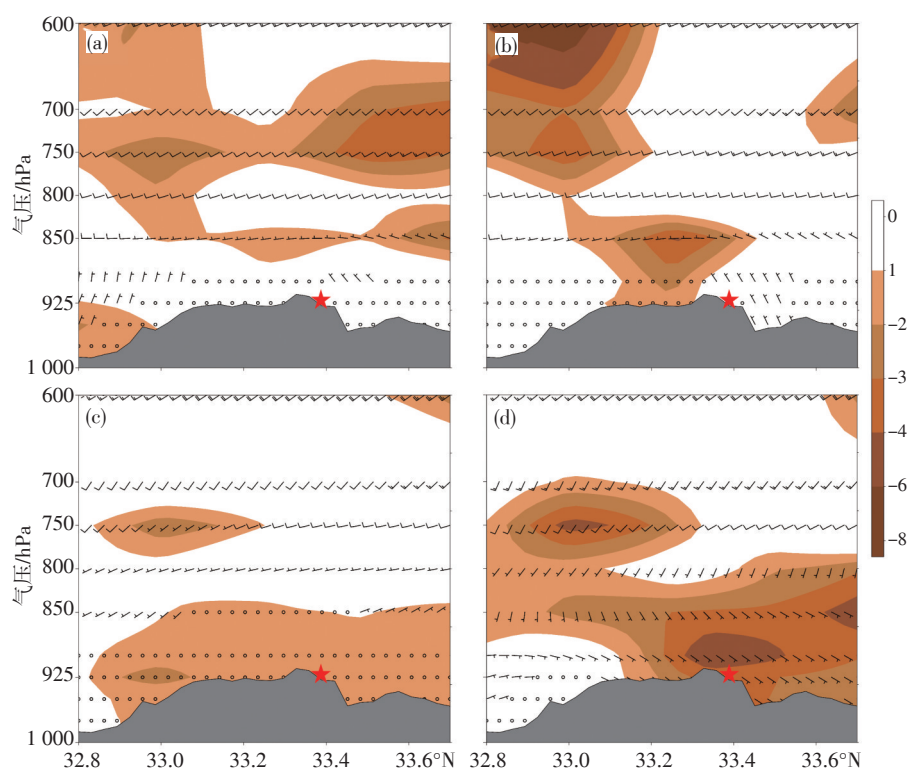


图 11 2022 年 6 月 26 日 08:00(a)、09:00(b)、11:00(c)、12:00(d)商南县风场(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、散度(填色, 单位: $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)沿坐标(110.32°E , 33.25°N)至(110.83°E , 32.83°N)垂直剖面图

Fig.11 Profile of wind field (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and divergence (color-filled, unit: $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) from (110.32°E , 33.25°N) to (110.83°E , 32.83°N) at (a) 08:00 BT, (b) 09:00 BT, (c) 11:00 BT, and (d) 12:00 BT over Shangnan County on 26 June 2022

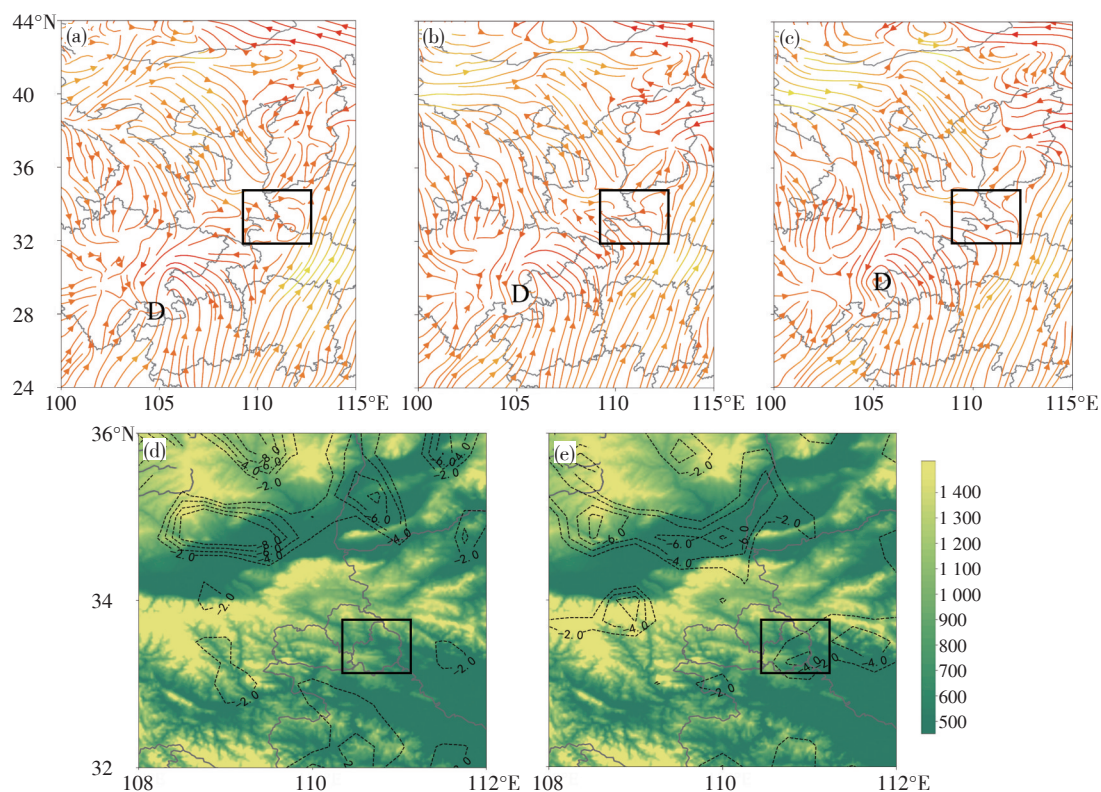


图 12 2022 年 6 月 26 日 09:00 (a)、10:00 (b)、11:00 (c)商洛 925 hPa 流场(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)分布及 09:00 (d)、10:00 (e) 925 hPa 散度场(填色, 单位: $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)和地形(填色, 单位: m)分布(D 代表低涡; 黑色方框为商南地区)

Fig.12 The Flow field distributions (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at 925 hPa at (a) 09:00 BT, (b) 10:00 BT, (c) 11:00 BT on 26 June 2022, and divergence (unit: $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) and terrain (color-filled, unit: m) distribution (D is the low vortex and the black box represents the Shangnan region)

5 结论与讨论

本文利用加密气象站观测资料、多普勒天气雷达数据和ERA5再分析资料,利用天气学诊断分析方法,从环流背景、环境条件及中尺度对流系统触发与维持机制方面,对各天气数值模式均漏报的陕西商洛“6.26”金丝峡极端短时强降水的成因进行综合分析。主要得到以下结论:

(1) “6.26”过程是一次典型的由局地新生雷暴引发的中尺度局地大暴雨过程,突发性强,雷暴生命史持续时间短,约1.5 h。2022年6月26日12:00—13:00金丝峡10 min雨量最大达到28.6 mm,小时雨强达到108.3 mm·h⁻¹,突破了小时降水历史极值。

(2) 该过程发生在500 hPa河套低槽配合700 hPa低涡切变缓慢东移的环流背景下,伴随副高的缓慢西伸北抬,商南地区整体的动力抬升和水汽条件较好。午后,金丝峡存在非常强的不稳定能量,局地水汽异常充沛,配合低层加强的垂直上升运动可将水汽迅速向上输送,有利于短时强降水发生发展。

(3) 雷暴发生前,金丝峡北坡气温较周围同等高度大气气温偏高,同时存在明显的1 h正变温,变温幅度最大超过1.6℃,这种热力非均匀的下垫面造成局地热力环流。另外,商南东南部有明显的3 h正变压,其西北部存在3 h负变压,在金丝峡附近形成明显的变压梯度带,有利于偏南风的发展。商南金丝峡附近热力非均匀的下垫面和变压风造成局地流场发生变化,形成中小尺度地面辐合线,有利于触发对流。

(4) 该过程中金丝峡特殊的地形和边界层内发展的东南气流对对流的触发与维持具有重要作用。一方面这支气流将周边的局地水汽向雷暴发生地输送,另一方面受金丝峡地形影响,这支气流沿山脉爬坡,造成垂直方向明显的辐合抬升,进一步促进了雷暴的新生和发展,有利于暴雨增幅。

此次金丝峡极端短时强降水过程物理机制复杂,数值模式和预报员均弱报了此次过程,对此类过程的可预报性有待开展进一步分析。此外,该过程的下垫面极为复杂,既有超过10 km的峡谷,又有海拔超过3 000 m的高峰,它们对造成此次极端短时强降水的中尺度系统触发、传播及发展演变作用等需要结合新型大气垂直探测资料进一步深入研究。

参考文献(References):

车军辉,郭红艳,史茜,等.2017.地面辐合线演变与多尺度天气过程的相互作用分析[J].干旱气象,35(1):91-99. Che J H, Guo H Y, Shi Q, et al. 2017. Interaction between surface convergence lines and multi-scale

- weather processes [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 35(1):91-997 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-01-0091
- 陈双,王迎春,张文龙.2016.北京香山“7.29” γ 中尺度短时段地大暴雨过程综合分析[J].暴雨灾害,35(2):148-157. Chen S, Wang Y C, Zhang W L. 2016. A comprehensive analysis of the meso- γ scale local heavy rain event around Xiangshan in Beijing on 29 July 2009 [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 35(2):148-157 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2016.02.007
- 陈永仁,李跃清.2021.攀西地区冕宁“6.26”突发性暴雨成因分析[J].高原山地气象研究,41(4):8-17. Chen Y R, Li Y Q. 2021. Cause analysis of an abrupt rainstorm on June 26, 2020 in Mianning of Panxi Region [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 41(4):8-17 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-2184.2021.04.002
- 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]. *Torrential Rain and Disasters*, 38(5):395-406 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.05.001
- 贺晓露,郝元甲,祁海霞,等.2023.湖北“8·12”极端降水特征及成因初探[J].暴雨灾害,42(1):13-23. He X L, Hao Y J, Qi H X, et al. 2023. Analysis of characteristics and causes of “8.12” extreme precipitation in Hubei Province [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 42(1):13-23 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022-109
- 罗菊英,张家国,许冠宇,等.2023.2020年夏季鄂西南一次极端暴雨过程成因分析[J].沙漠与绿洲气象,17(2):26-35. Luo J Y, Zhang J G, Xu G Y, et al. 2023. Analysis of the causes of an extreme rainstorm in western Hubei in the summer of 2020 [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 17(2):26-35. doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.02.004
- 李超,崔春光,蒋兴文,等.2018.特殊地形对鄂东北一次局地强降水过程的作用机制分析[J].气象,44(9):1117-1135. Li C, Cui C G, Jiang X W, et al. 2018. Mechanism analysis of the effect of special topography in middle-lower reaches of Yangtze River on local severe precipitation in Northeast Hubei [J]. *Meteorological Monthly*, 44(9):1117-1135 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.09.001
- 李艳,王玉,陈鲜艳.2022.太行山地形影响其东麓强对流系统触发、发展、移动路径的个例分析[J].地球科学进展,37(5):472-483. Li Y, Wang Y, Chen X Y. 2022. Influence of the Taihang Mountains on the initiation, development, and track of a convective precipitation system [J]. *Advances in Earth Science*, 37(5):472-483 (in Chinese). doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2022.026
- 李跃清,张晓春.2011.“雅安天漏”研究进展[J].暴雨灾害,30(4):289-295. Li Y Q, Zhang X C. 2011. Main Advances in the Research of “Yaan Sky Leakage” [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 30(4):289-295 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2011.04.001
- 任素玲,赵玮,王建林,等.2019.感热加热对华北及其周边对流活动的影响[J].气候与环境研究,24(5):597-610. Ren S L, Zhao W, Wang J L, et al. 2019. Effect of sensible heat on convective activities in North China and Its Surrounding Areas [J]. *Climatic and Environmental Research*, 24(5):597-610 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18161
- 苏爱芳,吕晓娜,崔丽曼,等.2021.郑州“7.20”极端暴雨天气的基本观测分析[J].暴雨灾害,40(5):445-454. Su A F, Lv X N, Cui L M, et al. 2021. The basic observational analysis of “7.20” extreme rainstorm in Zheng-

- zhou [J]. *Torrential Rain and Disasters*,40(5):445–454(in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2021.05.001
- 苏涛,董美莹,余贞寿,等.2020.浙江天目山背风坡对流触发个例的对比分析[J]. *气象*,46(2):158–168. Su T, Dong M Y, Yu Z S, et al. 2020. Comparative analysis of convective initiation on the lee side of the Tianmu Mountain [J]. *Meteorological Monthly*,46(2):158–168 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2020.02.002
- 孙继松.2017.短时强降水和暴雨的区别与联系[J]. *暴雨灾害*,36(6):498–506. Sun J S. 2017. Differences and relationship between flash heavy rain and heavy rainfall [J]. *Torrential Rain and Disasters*,36(6):498–506 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2017.06.002
- 王艳兰,伍静,唐桥义,等.2020.2019年6月桂林三次强降水天气成因对比分析[J]. *暴雨灾害*,39(2):136–147. Wang Y L, Wu J, Tang Q Y, et al. 2020. Comparative analysis on the cause of three heavy rainfall events in Guilin in June 2019 [J]. *Torrential Rain and Disasters*,39(2):136–147 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2020.02.004
- 王莹,董畅,易笑园,等.2021.天津城区一次 γ 中尺度短时暴雨的热动力环境分析[J]. *气象*,47(4):398–411. Wang Y, Dong C, Yi X Y, et al. 2021. The thermal and dynamic environmental field analysis of a meso- γ scale short-time rainstorm in Tianjin [J]. *Meteorological Monthly*,47(4):398–411 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2021.04.002
- 谢家旭,李国平.2021.重力波与对流耦合作用在一次山地突发性暴雨触发中的机理分析[J]. *大气科学*,45(3):617–632. Xie J X, Li G P. 2021. Mechanism analysis of a sudden rainstorm triggered by the coupling of gravity wave and convection in Mountainous Area [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*,45(3):617–632 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2009.20137
- 徐珺,毕宝贵,湛芸,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
- 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,周小刚,王秀明.2016.中国冷季高架对流个例初步分析[J]. *气象学报*,74(6):902–918. Yu X D, Zhou X G, Wang X M. 2016. A preliminary case study of elevated convection in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,74(6):902–918 (in Chinese). doi:CNKI:SUN:QXXB.0.2016–06–007
- 张晶,姚文,陈海涛,等.2021.渤海北部东岸海风锋活动及其触发对流特征分析[J]. *气象与环境学报*,37(2):33–40. Zhang J, Yao W, Chen H T, et al. 2021. Characteristics of sea breeze fronts and triggered convection on the eastern coast of the northern Bohai Sea [J]. *Journal of Meteorology and Environment*,37(2):33–40 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673–503X.2021.02.005
- 张文龙,崔晓鹏,黄荣.2014.复杂地形下北京雷暴新生地点变化的加密观测研究[J]. *大气科学*,38(5):825–837. Zhang W L, Cui X P, Huang R. 2014. Intensive observational study on evolution of formation location of thunderstorms in Beijing under complex topographical conditions [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*,38(5):825–837 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.1401.13102
- 章翠红,夏茹娣,王咏青.2018.地形、冷池出流和暖湿空气相互作用造成北京一次局地强降水的观测分析[J]. *大气科学学报*,41(2):207–219. Zhang C H, Xia R D, Wang Y Q. 2018. Observational analysis of a local heavy rainfall in Beijing caused by terrain, cold pool outflow and warm moist air interactions [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*,41(02):207–219(in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20160115001
- 赵强,王楠,高星星,等.2021.西安连续两天短时暴雨的对流条件及触发机制对比分析[J]. *高原气象*,40(4):801–814. Zhao Q, Wang N, Gao X X, et al. 2021. Comparative analysis of convective conditions and triggering mechanisms of short-term rainstorm in Xi'an on two consecutive days [J]. *Plateau Meteorology*,40(4):801–814 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2020.00053
- 周祖刚,王伟民,姜勇强,等.2002.地形对两湖气旋发展影响的数值试验[J]. *气象科学*,22(4):474–481. Zhou Z G, Wang G W M, Jiang Y Q, et al. 2002. A numerical experiment of two lake's cyclone case [J]. *Journal of the meteorological sciences*,22(4):474–481 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1009–0827.2002.04.013
- Doswell III C A. 1987. The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection: A case study example [J]. *Weather Forecasting*,2(1):3–16. doi:10.1175/1520–0434(1987)0022.0.CO;2
- Doswell III C A. 2008. *Severe Convective Storms* [J]. Boston:Springer:1–26.
- Pendergrass A G. 2018. What precipitation is extreme [J]. *Science*,360(6393):1072–1073. doi:10.1126/science.aat1871
- Tabari, H. 2020. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability [J]. *Scientific Reports*,10(1):13768. doi:10.1038/s41598–020–70816–2

(责任编辑 唐国瑛)