

刘胜男,冯典,郭大梅,等. 秦岭山区东麓一次短时强降水特征及成因分析[J]. 中低纬山地气象, 2023, 47(1): 82 - 89.

## 秦岭山区东麓一次短时强降水特征及成因分析

刘胜男,冯典,郭大梅,肖贻青,王洁,刘菊菊

(陕西省气象台,陕西 西安 710014)

**摘要:**利用陕西省区域自动站常规观测资料、NCEP  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 再分析资料、华山站地面雨滴谱观测资料、商洛市雷达观测资料,从宏观和微观两方面对 2021 年 7 月 22—23 日秦岭山区东部 1 次强降水过程特征进行分析。结果表明:该次山区暴雨在实况上具有强降水范围小、持续时间长、短时雨量大、极易引发地质灾害的特点。该次山区暴雨发生在弱天气强迫和强层结不稳定的环境下,由地形抬升和 850 hPa 冷平流共同触发此次对流。高层辐散抽吸使得上升气流加强,合并商洛市山阳县特殊地形的增幅作用共同造成山阳县法官镇短时雨强的极端性,小尺度地形作用下风的辐合和温度差异使得强降水在局地长时间维持。强降水在微观层面上表现为高浓度的小雨滴和部分大雨滴的共同作用。850 hPa 水汽通量在此次暴雨预报中具有一定的指示意义,22 日 20 时山区强降水在发展之前,商洛市东南部水汽通量突增至  $20 \sim 30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。雷达上表现为商洛市北部和南部 30 ~ 45 dBz 的大片层积混合云回波长时间维持,局地回波云团的合并对应降水增强。

**关键词:**短时强降水;秦岭山区;雨滴谱;水汽输送

**中图分类号:**P458.1<sup>+</sup>21 **文献标识码:**A

## Characteristics of a Short - time Heavy Rainfall Process in Eastern Piedmont of Qinling Mountains

LIU Shengnan, FENG Dian, GUO Damei, XIAO Yiqing, WANG Jie, LIU Jujū

(Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710014, China)

**Abstract:** Using the routine meteorological observation data, the  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  NCEP reanalysis data, the raindrop spectrum observation data of Huashan Station and the radar data of Shangluo, the characteristics of a heavy rainfall process in the east of Qinling Mountains during July 22 - 23, 2021 was analyzed from both macro and micro aspects. The results show that, this rainfall occurred in mountain area has the characteristics of small heavy rainfall range, long duration and large rainfall, which can easily cause geological disasters. This heavy rain occurred in the environment of weak weather forcing and strong stratification instability. The convective cells were triggered by the weak cold air on 850 hPa and the orographic uplift. The high - level wind divergence increased the rainfall in Faguan Town. The convergence of wind and the gradient of temperature on the surface played an important role in sustaining the convective system. The microphysical information indicates that the surface heavy precipitation was composed of a high concentration of small raindrops and a few large raindrops. The intensity of water vapor transport on 850 hPa could have influence on the heavy rain. The water vapor flux increased to  $20 \sim 30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  at 20:00 22 July before the strong precipitation occurred in mountain area. The radar echoes of 30 ~ 45 dBz maintained in the north and south of Shangluo and the heavy rain is related to the merger of echoes.

**Key words:** short - time heavy rainfall; Qinling Mountains; raindrop size distribution; water vapor transportation

收稿日期:2022 - 01 - 07

第一作者简介:刘胜男(1993—),女,硕士,助工,主要从事灾害性天气预报研究,E-mail:2560100852@qq.com。

资助项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JQ - 279):基于 AI 的关中城市群气温网格预报订正技术研究;陕西省自然科学基金基础研究计划项目(S2023 - JC - YB - 1982):陕西秦岭山区地形触发的致灾性突发暴雨形成机制研究。

## 0 引言

作为强对流天气,短时强降水突发性强、强降水时段集中,破坏力强,致灾可能性大。山区的短时强降水由于尺度较小、对流生成和发展机制复杂<sup>[1-2]</sup>,特别是当天气强迫较弱时,预报员和模式预报都很难预测对流的发生和发展趋势,威胁人民的生命财产安全。前人针对山区强降水做过大量研究。傅佩玲等<sup>[3]</sup>对广州2017年1次特大暴雨分析发现,其初始对流由偏南暖湿气流和地形的相互作用产生,形成准静止的雨带,不断加强的暖湿气流维持了对流的发展,并发现其雨滴谱呈现出显著的暖区降水特征。朱文洁等<sup>[4]</sup>发现华北弱冷空气侵入台风倒槽,河南商城受远距离台风影响,加之大别山地形增幅,造成商城特大暴雨。王楠等<sup>[5]</sup>对2015年秦岭北麓1次短时强降水研究发现,秦岭的阻挡作用使得冷锋过境转为偏西风,与迎风坡相配合对降水产生增幅作用,导致强降水的发生。作为中国南北区划以及亚洲东部亚热带和暖温带的过渡带,秦岭南北气候统计特征有很大差异。秦岭的主要高峰都位于陕西境内,秦巴山地特殊地形也使得关中和陕南的暴雨天气有很多地方性的特点<sup>[6-8]</sup>。为了提高对山区暴雨的预报预警能力,有必要对秦岭山区暴雨的个例加以积累,加深对秦岭山区强降水特征的了解,为提高短时强降水预报准确率提供科学参考。2021年7月22—23日,沿秦岭山脉东部和汉中市北部局地出现了1次短时强降水天气,此次过程由于天气强迫特征弱,预报效果并不理想。以往个例分析多停留在宏观特征层面,因而有必要结合微观雨滴谱的特点对本次弱天气强迫背景下山区短时强降水的降水特点和影响因素进行较全面的分析。

## 1 降水实况

7月22日午后开始,陕西省商洛市陆续出现分散性阵雨天气,到夜间沿秦岭山区的降水逐渐加强。从22日09时—23日09时24h累计降水量(图1a)可以看出,强降水主要发生在商洛市北部和南部、渭南市南部、汉中市洋县和佛坪县附近。结合不同时段降水分布(图略)以及短时强降水站数和最大雨强演变(图1b)可以发现:22日14—20时,西安市、延安市、渭南市、商洛市、汉中市等地陆续出现局地短暂的阵性降水,这一时段内逐时次内发生短时强降水的站数少、且较分散;22日20时—23日00时是山区强降水发展阶段,仅21—22时发生短时强降水的就有7站次,且都位于商洛市境内。23日00时强降水短暂减弱后进入强盛阶段,这一阶段发生短时强降水的站次数最多、雨强最大,主要沿秦岭分布在商洛市北部和南部、渭南市南部以及汉中市佛坪县和洋县;23日05—08时,商洛市境内强降水持续,最大雨强在 $30 \sim 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ;23日09时之后,山区强降水结束。本次过程表现为单点短时雨量大、持续时间长、强降水中心分散。22日09时—23日09时,全省共40站次24h累计降水量超过50mm,9站次超100mm,最大降水量出现在商洛市山阳县法官镇171.2mm。过程中89站次雨强超 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,最大 $86.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,24h最大降水量和小时雨强均位于商洛市山阳县法官镇。由于强降水发生在秦岭山区一带,且最强降水时段出现在夜间,渭南市、商洛市等多地受灾情况严重。据统计,渭南市华州区金堆镇等多地山区发生山洪,多地河流水位暴涨,大水冲毁桥梁、路面和河堤,隧道道路、电力、通讯中断,房屋倒塌、农作物绝收,仅渭南市洛南县就有77961人受灾。

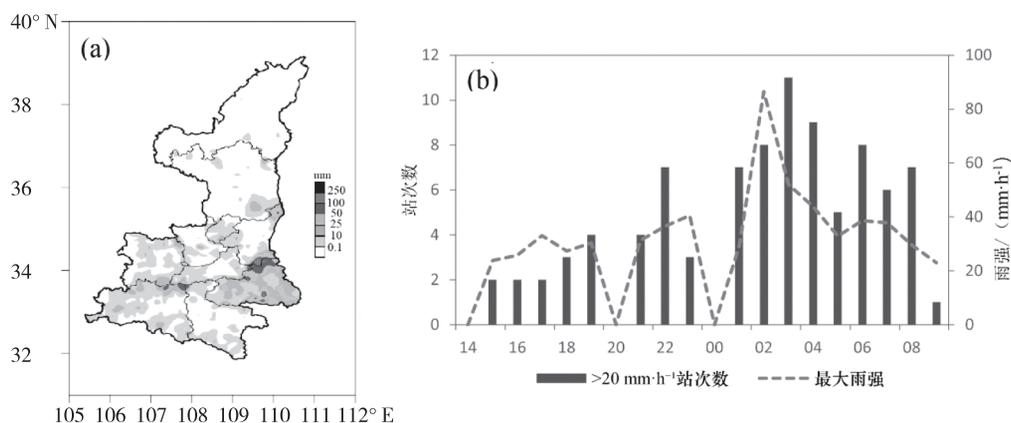


图1 7月22日09时—23日09时累计降水量分布(a)及22日14时—23日09时发生短时强降水的站次数和最大雨强演变(b)  
Fig. 1 Cumulative precipitation distribution from 09:00 22 July to 09:00 23 July (a), the temporal variations of stations happened short-time heavy rainfall and hourly maximum rainfall intensity from 14:00 22 July to 09:00 23 July (b)

## 2 天气形势和探空资料分析

由图1可见,山区暴雨主要在22日20时之后发展加强,因此对22日20时的形势场进行分析。500 hPa(图2a)贝加尔湖气压槽和温度槽重合,贝湖低槽发展到最强时对应 $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷中心。陕西省位于贝湖低槽南部,槽后为较强的偏北气流,北方冷空气被引导向南输送。减弱后的低涡移至山西临汾附近,低涡后部较弱的偏西北风引导冷空气进一步向陕西南部输送。副热带高压北抬,在日本海稳定维持,华北表现为西低东阻的环流形势。700 hPa(图2b)高低压之间为一致的偏南风,但风速仅有 $4\sim 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,暖湿空气的输送使得层结不稳定

进一步增强。22日20时,台风“烟花”中心移至浙江以东的洋面上,强度较08时明显增大。日本海高压南侧和台风北侧之间的气压梯度进一步加大,在850 hPa(图2c)形成东风急流,为太平洋水汽向西输送进入内陆提供良好的水汽通道。由图2c还可以看出,850 hPa上,商洛市东部温露差达到 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,水汽条件较好。值得注意的是通常来自台风外围的水汽是湿热的,而850 hPa温度场显示偏东风携带了弱冷平流,有利于触发不稳定能量释放。由700~850 hPa环流形势场可以发现,强降水发生前秦岭山区上空并无切变、低涡等天气尺度动力抬升系统的作用,说明本次过程天气尺度强迫较弱,极容易造成漏报。

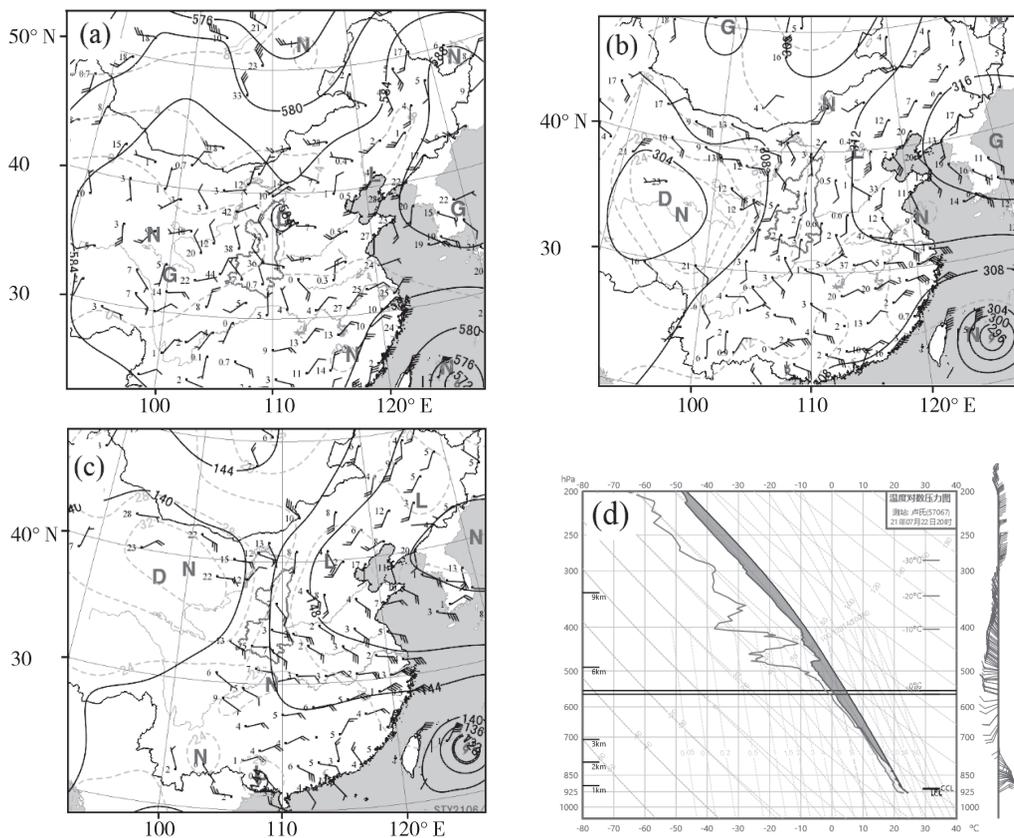


图2 7月22日20时500 hPa(a)、700 hPa(b)、850 hPa(c)位势高度、风场和温度露点差;河南卢氏站探空图(d)  
 Fig. 2 500 hPa(a); 700 hPa(b); 850 hPa(c) geopotential height, wind field and depression of dew point and sounding figure of Lushi Station in Henan (d) at 20:00 22 July

因陕西省商洛市无探空站,故采用河南省卢氏站的探空资料。从图2d可见:925~650 hPa之间大气接近饱和,中低层水汽条件好,对流层高层较干,温湿层结曲线形成向上开口的喇叭口形状,上干冷、下暖湿的特征明显,具备对流性天气的典型探空曲线特征。此时,CAPE值较大( $1516.6\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ )且呈细长型,有利于深厚湿对流的发生<sup>[9]</sup>;中

低层风速小,垂直切变弱,不利于形成组织性非常强的对流系统(如超级单体),850 hPa以上风向随高度升高顺转,有明显暖平流,500 hPa附近风场逆转,有弱冷平流,这种温度结构有利于位势不稳定的增强;K指数 $42.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,SI指数为 $-3.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,指示层结非常不稳定;CIN为 $0.3\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,抬升凝结高度(LCL)和自由对流高度(CCL)都很低,接近925

hPa,对流很容易被触发。综上所述,大气层结上反映的弱对流抑制、低抬升凝结高度、强的对流不稳定,都表明商洛市上空的环境场已经非常有利于短时强降水的发生。

### 3 山区短时强降水特征分析

#### 3.1 雨滴谱特征

雨滴谱的形成与复杂的微物理和动力过程有关,例如碰撞—破碎、蒸发以及气流导致的雨滴筛选等。通过研究雨滴谱的形状可以加深理解降水形成的微物理机制,更好地把握此次短时强降水的微观特征<sup>[10]</sup>。华山站位于秦岭东麓山顶,海拔2064.9 m,对分析本次山区降水的雨滴谱特征有一定代表性。

图3给出了华山站降水时段内雨滴谱分布(DSD)、粒子有效直径( $D_m$ )及雨强的变化情况, $N(D)$ ( $D$ 代表一定直径范围的粒子数浓度)。从图3b可见,华山最强降水时段在22日21—22时,达18.2

$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。23日03—05时雨强维持 $16 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,12 h累积降水量为74 mm,达到暴雨量级。由图3a可见,华山站雨滴谱在此次降水中以中小粒子为主,大多数粒子直径在 $0 \sim 1.5 \text{ mm}$ 之间,较少的粒子超过 $2 \text{ mm}$ , $D_m$ 全部在 $0.5 \sim 2 \text{ mm}$ 之间, $N(D)$ 则一直维持在较高水平。这是由于山区海拔高度更高,距离云底更近,限制蒸发和碰并过程,因此呈现出山区降水尺度小、小粒子浓度高的特点<sup>[11-12]</sup>。最强降水时段均对应雨滴谱快速拓宽和 $D_m$ 的增大(图3b),华山最强降水时段在22日21—22时和23日03—05时,该时段内最大雨滴的直径均超过 $3 \text{ mm}$ , $D_m$ 均 $>1.5 \text{ mm}$ 。22时之后雨强由 $18.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 迅速降低到 $0.7 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,对应粒子直径谱迅速收窄和 $D_m$ 迅速降低到 $0.5 \text{ mm}$ 。说明本次局地短时强降水是高浓度小雨滴和部分大雨滴的共同贡献,且大雨滴的贡献更为重要,正是由于雨滴谱的迅速拓宽才在局地产生了瞬时的高雨强。

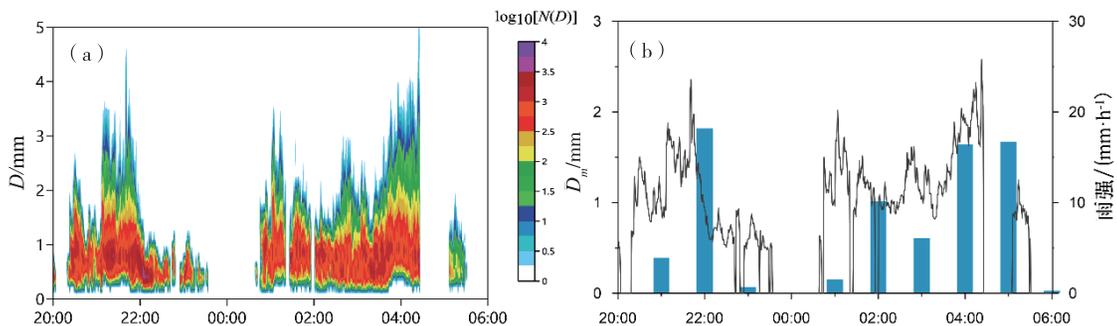


图3 7月22日20时—23日07时华山站雨滴谱分布(阴影, $N(D)$ 单位: $\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ )(a)以及 $D_m$ (黑色实线)和雨强(蓝色柱状)(b)的演变

Fig. 3 The temporal variation of raindrop distribution (shadow, unit of  $N(D)$ :  $\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1}$ ) (a),  $D_m$  (black solid line) and hourly rainfall (blue bars) (b) of Huashan Station from 20:00 22 July to 07:00 23 July

#### 3.2 水汽输送和垂直环流

实况显示(图1b),本次山区强降水在22日20时之后发展,23日00—05时最为强盛,23日08时结束。对比相应时段各层的水汽通量发现,此次过程以850 hPa的水汽输送最为显著。22日14时来自东南方向的水汽输送不明显,不足 $10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (图4a)。22日20时,台风烟花外围东南气流增强,形成良好的水汽通道,商洛市东南部的的水汽通量可达 $20 \sim 30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,且在地形作用下辐合,商洛市南部出现中心值达 $-4 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽辐合中心(图4b)。22日20时—23日00时仅商南县就有7站次发生短时强降水。23日02时,商洛市东南部的的水

汽通量依然大于 $20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (图4c),靠近秦岭一带向北的分量增加,商洛市北部水汽辐合增强,中心值可达 $-4 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。23日02—08时,沿秦岭的汉中市佛坪县、渭南市南部、商洛市北部和南部都出现了雨强 $>30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的强降水。23日08时水汽输送减弱,通量值全部降到 $20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下(图4d),过程强降水时段趋于结束。可见,850 hPa东路水汽通量强度的变化在本次山区暴雨预报中可以起到一定的指示作用,20时商洛市东南部水汽通量突增至 $20 \sim 30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 对应实况山区强降水的发展,水汽通量强盛时的强水汽辐合区对强降水的落区也有一定的反映。

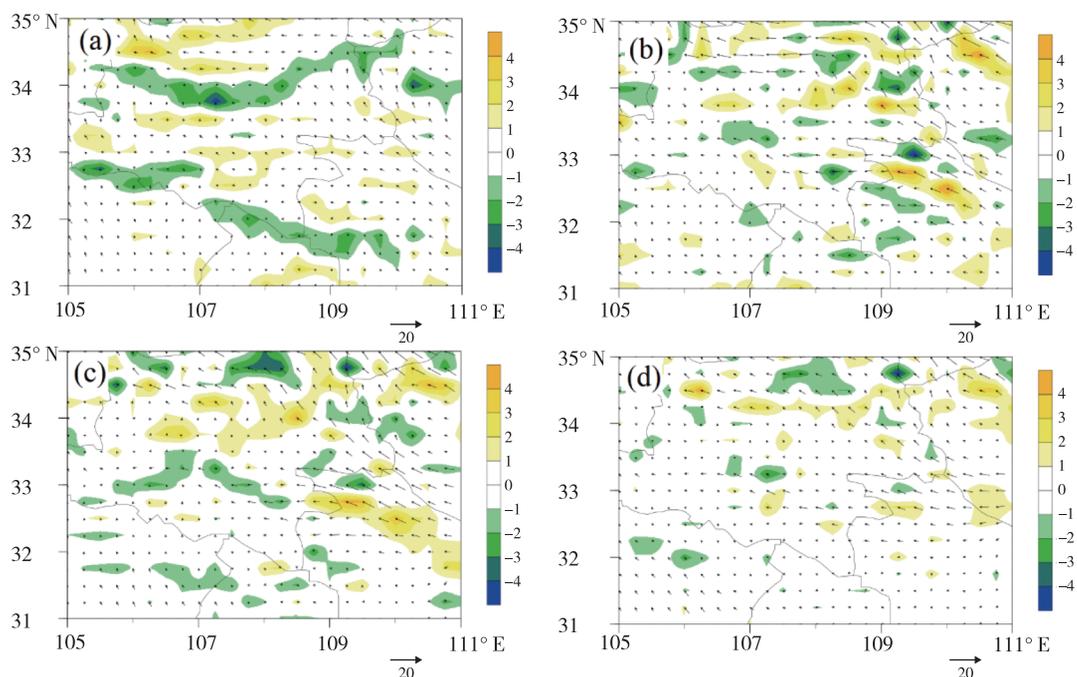


图4 22日14时(a)、22日20时(b)、23日02时(c)、23日08时(d)850 hPa水汽通量(箭头,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )和水汽通量散度(阴影,单位: $10^{-7} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 4 The 850 hPa water vapor flux (vector, unit:  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and moisture flux divergence (shadow, unit:  $10^{-7} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at 14:00 22 July (a); 20:00 22 July (b); 02:00 23 July (c); 08:00 23 July (d)

本次过程暴雨点较为分散,降水分布不均,选取山阳县法官镇(海拔415.6 m)和华州区金堆镇(海拔1484 m)2个暴雨中心做纬向剖面,进行对比分析,寻找法官镇极端短时强降水(小时雨强 $>50 \text{mm}$ )的原因。降水实况显示(图略):法官镇23日01—02时雨强达到 $86.5 \text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,23日02—03时雨强为 $52 \text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ;金堆镇最大雨强在23日03—04时, $39.1 \text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。从图5两地的标记处可见:两地均处于东风气流的迎风坡,且从20时开始两地低层的相对湿度都在90%以上。分时段对比可以发现,22日20时法官镇300~400 hPa有较为明显的高空风辐散,高空风速比金堆站要大(图5a、5d),这种高层辐散区的抽吸作用有利于低层的上升运动和降水增强。且从地形剖面看,法官镇的地形和气流更垂直,地形抬升作用也会更强。在高层抽吸和地形抬升的共同作用下,23日02时,法官镇的上升气流可达500 hPa(图5b),水汽上升凝结造成深厚的湿层,90%相对湿度层发展到700 hPa,08时发展到500 hPa(图5c)。而金堆站90%的相对湿度层都在700 hPa以下,且金堆站500 hPa附近的干层更为明显(图5e、5f)。深厚的湿层可以进一步减少雨滴蒸发,更有利于引发强降水。由此可见,高空辐散和地形抬升的共同作用使得上升气流发展形成深厚的湿

层,是造成本次山区极端短时强降水的重要条件。

### 3.3 低层冷平流作用

850 hPa的冷空气对此次对流过程有一定的触发作用。22日14时,风力较弱,商洛市东部显示有弱的冷平流中心(图略),从雷达图可见柞水、商州、洛南等地22日下午都有小的对流单体生成(图8a)。22日20时风力加大、冷平流加强(图6a),这种低层的冷平流有利于触发对流并加大近地层水汽在暴雨区的辐合抬升凝结。商洛市北部最强冷平流可达 $1 \times 10^{-3} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$ ,冷暖平流沿秦岭东段交汇。从前面对实况的分析可知,22日20时—23日00时是商洛市山区暴雨的发展阶段,这一时段发生短时强降水的站点都集中在商洛市,23日02时冷平流中心减弱到 $0.6 \times 10^{-3} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$ ,23日08时之后冷平流强度再次减弱(图6b)。由此可知,850 hPa东路冷空气是本次山区强降水的触发机制之一。

此次过程降水量最大的2个中心(金堆镇和法官镇)均在 $110^\circ \text{E}$ ,因此,沿 $110^\circ \text{E}$ 做经向剖面。从图6c可以看出,22日14时商洛市附近的对流不稳定发展到最强,超过15 K,随着冷平流侵入和降水的发生,边界层温度降低,对流不稳定得到释放,不稳定性显著降低,23日08时之后底层假相当位温降低到350 K以下(图6d)。

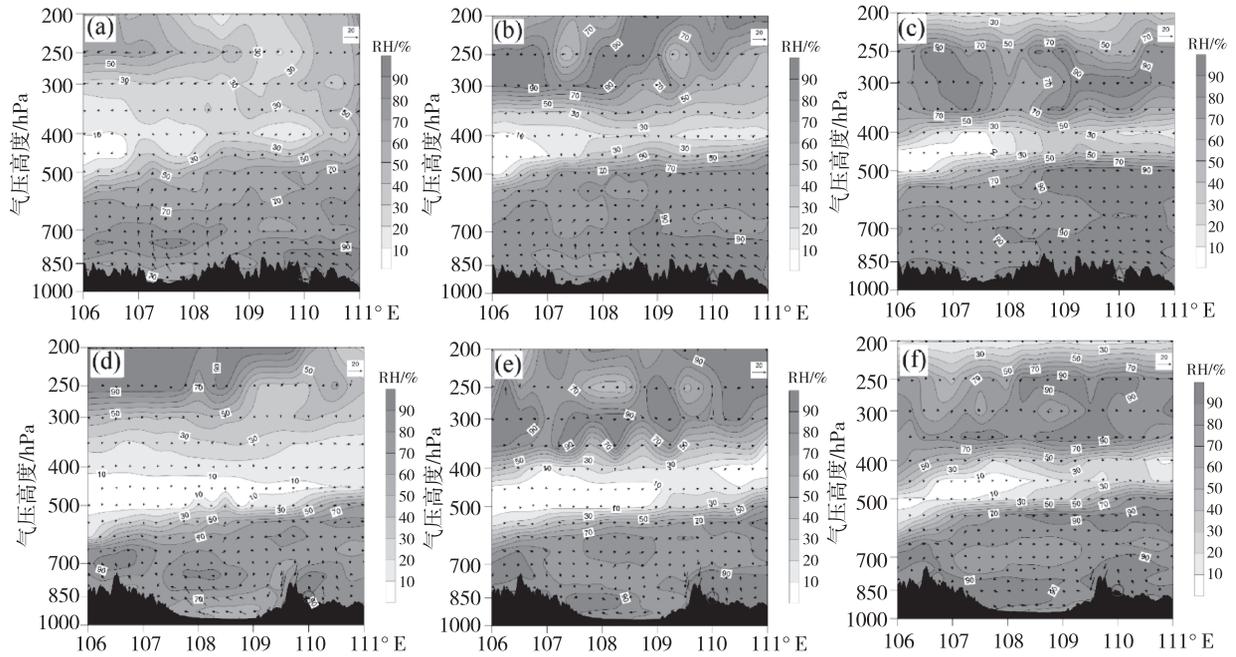


图5 22日20时(a)、23日02时(b)、23日08时(c)法官镇,22日20时(d)、23日02时(e)、23日08时(f)金堆镇相对湿度和风剖面(u,单位: $m \cdot s^{-1}$ ;  $\omega$ ,单位: $0.1 Pa \cdot s^{-1}$ ) (图中“ $\Delta$ ”处代表法官镇的位置,“ $\circ$ ”处代表金堆镇的位置)

Fig. 5 Longitude - height cross section of zonal vertical circulation (u, unit:  $m \cdot s^{-1}$ ;  $\omega$ , unit:  $0.1 Pa \cdot s^{-1}$ ) and humidity in Faguan Town at 20:00 22 July (a), 02:00 23 July (b), 08:00 23 July (c) and Jindui Town at 20:00 22 July (d), 02:00 23 July (e), 08:00 23 July (f) (“ $\Delta$ ” is the location of Faguan Town, “ $\circ$ ” is the location of Jindui Town)

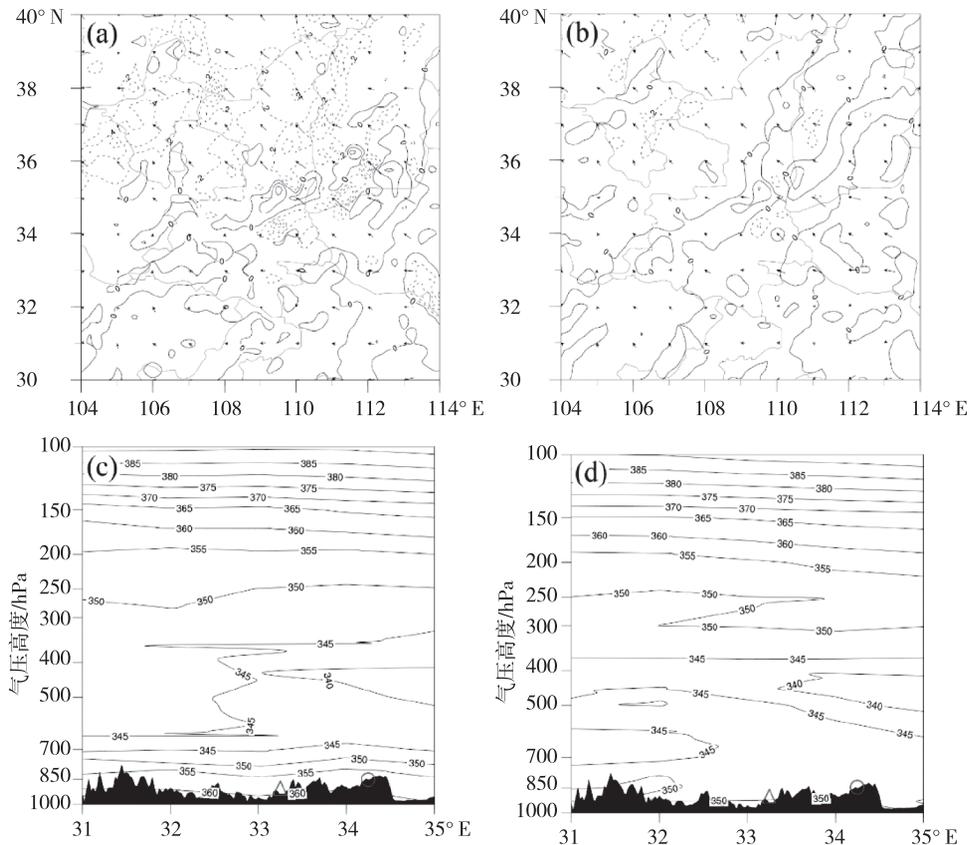


图6 22日20时(a)、23日08时(b)温度平流(等值线,间隔: $0.2 \times 10^{-3} K \cdot s^{-1}$ )和22日14时(c)、23日08时(d)假相当位温剖面(等值线,单位:K) (图中“ $\Delta$ ”处代表法官镇的位置,“ $\circ$ ”处代表金堆镇的位置)

Fig. 6 The temperature advection at 20:00 22 July (a), 08:00 23 July (b) (isolines, interval:  $0.2 \times 10^{-3} K \cdot s^{-1}$ ) and latitude - height cross section of potential pseudo - equivalent temperature at 14:00 22 July (c), 08:00 23 July (d) (isolines, unit: K) (“ $\Delta$ ” is the location of Faguan Town, “ $\circ$ ” is the location of Jindui Town)

### 3.4 特殊地形作用

本次降水强度最大的2个中心主要位于商洛市山阳县(法官镇)以及商洛北—渭南南(金堆镇)的交界地带(图1a)。商洛市地处秦岭南麓,秦岭支脉在商洛市内形如手掌,主山脉呈西南东北走向,地形总体走势为:西北高、东南低<sup>[7]</sup>。故低层东南风和地形坡向夹角更小,对降水的增幅作用最有利<sup>[3-14]</sup>。从22日22时加密站地面风场(图7)可见,偏东气流向西移动时遇到秦岭阻挡后分为多支分别从河谷进入。进入河谷的偏东风沿地形爬升时不断触发对流,雷达上表现为商南县和山阳县不断有回波新生并向西传播(图8b)。山阳县的地形类似布兜状,南支气流沿河谷向北推进时,在峡谷地带风速增大,与回流风发生辐合,对山阳县对流的发展极为有利。此外由于山谷辐射降温的差异,山阳县南北侧山区都有3℃左右的温差,这有利于局地垂直风切变的增强,最终促使暴雨发展<sup>[15]</sup>。而北侧商洛北—渭南南的强降雨带沿秦岭东部最高峰的脊线分布,这与从商州区河谷和洛南县河谷进入的气流触发对流后合并以及地形的抬升增幅作用有很大关系。

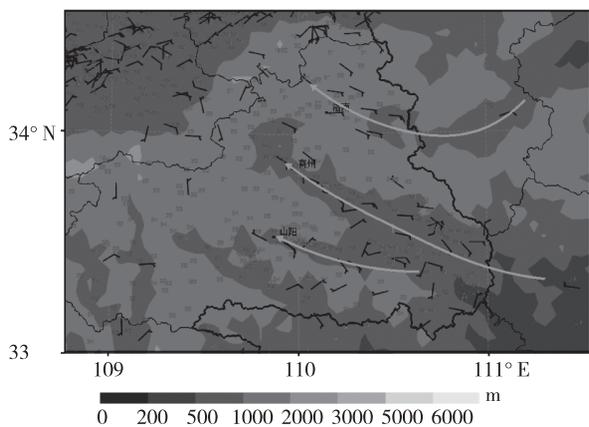


图7 2021年7月22日22时地面加密风场和温度场叠加商洛市地形

Fig. 7 Surface wind and temperature at 22:00 22 July 2021 and topography of Shangluo

## 4 雷达回波特征

从商洛市雷达回波看出,22日午后开始,商洛市境内不断有分散的回波单体新生,向东北方向传播。这些快速移动的回波单体给商洛市镇安县、商州区、洛南县造成了局地阵雨天气。22日16—19时(图8a)局地回波合并增强,给商州和洛南造成局地短时强降水。这一阶段中,回波尺度小、移速快,强降水持续时间非常短。第2阶段是22日20时—

23日00时。这一阶段500 hPa表现为弱西风,850 hPa东南风强劲,偏东气流携带大量水汽西进时,受地形和冷空气的触发作用,在雷达上表现为商南县和山阳县30~45 dBz回波在西北拓展,并逐渐演变为大片的层积云回波(图8b)。洛南县和商州区的回波则是先减弱后增强。这一阶段的前期,即20—22时给洛南县北部和商南县南部造成 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的短时强降水。第3阶段23日00—04时是回波发展最强盛的阶段(图8c),商南县回波消散,山阳县回波范围扩大、强度增加,表现为对流层云混合区且稳定少动。洛南—商州的单体在00—01时也逐渐合并发展为层积云回波并向北传播。23日01时14分和02时14分山阳县东部有局地强回波发展,中心大于45 dBz,导致山阳县法官镇雨强达到 $86.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。23日03—04时山阳县、华州区有大于45 dBz的小范围强回波发展,导致山阳县、华州区分别有2站雨强超过 $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。23日02—04时汉中市佛坪县也有2站雨强超过 $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。这一阶段回波主体移动缓慢,局地强回波的发展造成了商洛市南部和北部以及汉中市佛坪县雨强大、持续时间长。第4阶段是23日04—09时(图8d),回波在环境风的影响下转为向东南方移动,后逐渐减弱消散。这一阶段前期,山阳县最大雨强维持在 $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,洛南—渭南南部稳定维持有45 dBz的强回波区,并缓慢向南移动。强回波的稳定维持给这两地交界处持续造成 $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的短时强降水,23日05时后强降水中心南移到商州区。23日09时后商州区回波也逐渐减弱消散(图8e),本次山区强降水过程趋于结束。

综上所述,30~45 dBz的大片层积云回波稳定维持,造成强降水持续时间长;局地对流云团发展导致强降水局地性强;第3阶段中01—03时,即回波最强盛阶段,山阳县东部和洛南县西部有速度模糊,出现大于 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东南风低空急流(图8f),这表明东南风急流的建立为降水源源不断地输送水汽,是本次短时强降水发生的重要条件。山阳县东南部正负速度对形成的气旋性辐合中心,有利于水汽辐合和低层上升运动加强。

## 5 结论

(1)本次过程是发生在弱天气强迫背景下的1次山区极端短时强降水。强降水中心和地形关系密切,单点短时雨量大、持续时间长。强降水发生前环境场表现为较强的层结不稳定性,LCL和CCL接近925 hPa,来自台风外围的偏东气流西进到秦岭

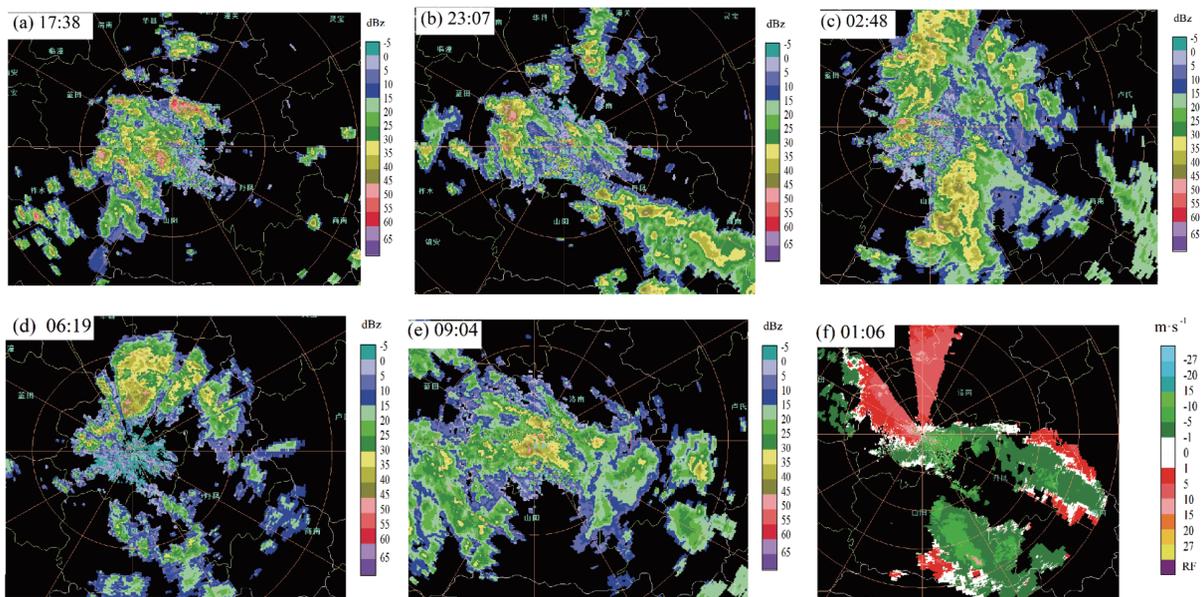


图8 雷达组合反射率(a~e)和2.4°仰角径向速度(f)

Fig. 8 Composite radar reflectivity (a~e) and radial velocity at 2.4° elevation (f)

东麓时,在地形抬升和850 hPa弱冷空气的共同作用下触发上升运动释放不稳定能量,造成短时强降水天气。

(2)风和湿度场剖面表明,300 hPa风场的辐散抽吸合并地形作用导致上升气流增强造成深厚湿层,对山阳县法官镇23日01—03时的极端高效率降水起到了重要作用。小尺度特殊地形配合山谷辐射降温形成温度梯度区,有利于对流中心长时间在山阳县维持。

(3)雨滴谱资料显示,降水时段内小雨滴浓度一致保持着较高的水平,强降水对应着雨滴谱快速拓宽,大雨滴的存在保证了较高的降水效率,使得短时间内在局地产生强降水。

(4)22日20时山区强降水发展之前,850 hPa水汽通量突增至 $20 \sim 30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,这对预测强降水的发生可以起到一定的指示作用,水汽通量强盛时的强水汽辐合区对强降水的落区也有一定的反映。

(5)根据雷达回波特征可将降水分为4个阶段:22日午后分散性热对流阶段,回波尺度小、移速快;22日20时山区强降水发展阶段,商南县和山阳县的回波被激发和传播,发展为层积云回波;23日00—04时为降水最强盛的阶段,洛南—商州回波的合并加强,大片层积云回波稳定维持,且不断有大于45 dBz的小范围强回波发展;23日04时后为回波转向阶段,回波移动方向由向北移动转为向东南方移动,后逐渐减弱。因而30~45 dBz的大片层积云回波稳定维持及局地对流云团发展是造成此次

短时强降水的直接原因。

### 参考文献

- [1] 刘涛,王瑾. 一次冰雹天气的数值模拟及地形敏感性试验研究[J]. 中低纬山地气象, 2022, 46(1): 10-18.
- [2] 陈绍河,赵胜男,骆艺仁. 1907号南海台风“韦帕”造成防城港大暴雨诊断分析[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(4): 8-14.
- [3] 傅佩玲,胡东明,张羽,等. 2017年5月7日广州特大暴雨微物理特征及其触发维持机制分析[J]. 气象, 2018, 44(4): 500-510.
- [4] 朱文洁,王志强,孙永霞,等. “云娜”台风影响的商城特大暴雨过程分析[J]. 河南气象, 2006(1): 25-26.
- [5] 王楠,赵强,井宇,等. 秦岭北麓一次冷锋触发的短时强降水成因分析[J]. 高原气象, 2018, 37(5): 1277-1288.
- [6] 徐娟娟,郝丽,屈丽玮,等. 陕南东部一次短时强降水天气的成因分析[J]. 中低纬山地气象, 2019, 43(1): 9-14.
- [7] 殷志有,王俊,孙军鹏. 秦岭山地暴雨与地形关系分析研究[J]. 陕西气象, 2004(1): 8-10.
- [8] 毕宝贵,刘月巍,李泽椿. 秦岭大巴山地形对陕南强降水的影响研究[J]. 高原气象, 2006, 25(3): 485-494.
- [9] 俞小鼎,王秀明,李万莉,等. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京: 气象出版社, 2020: 348-349.
- [10] 王俊,王文青,王洪,等. 短时强降水和冰雹云降水个例雨滴谱特征分析[J]. 高原气象, 2021, 40(5): 1071-1086.
- [11] 张丰伟,张逸轩,韩树浦,等. 2016年5月6日重庆万盛短时强降水雨滴谱特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(4): 46-51.
- [12] 程鹏,常祎,刘琴,等. 祁连山春季一次层状云降水的雨滴谱分布及地形影响特征[J]. 大气科学, 2021, 45(6): 1232-1248.
- [13] 施倩雯,柯莉萍,聂祥,等. 织金县短时强降水时空分布特征分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2022, 39(2): 49-52.
- [14] 傅抱璞. 地形和海拔高度对降水的影响[J]. 地理学报, 1992, 12(4): 302-314.
- [15] 孙继松. 城市精细天气预报的理论与技术研究进展[J]. 气象科技进展, 2014, 4(1): 15-21.