

肖贻青,胡启元,井宇,等. 西安东部一次局地短时强降水天气过程分析[J]. 陕西气象,2020(6):1-8.

文章编号:1006-4354(2020)06-0001-08

西安东部一次局地短时强降水天气过程分析

肖贻青^{1,2},胡启元¹,井宇¹,王洁¹,刘勇¹

(1. 陕西省气象台,西安 710014;

2. 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室,西安 710014)

摘要:利用常规观测资料,NCEP $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 再分析资料和卫星云图、多普勒雷达、微波辐射计等多源数据,对2019年8月9日西安东部发生的一次局地短时强降水天气过程进行较为全面的中尺度特征分析。结果表明,小尺度的地面辐合和地形抬升是该次短时强降水的触发及加强条件;台风外围的偏东气流为强降水提供了充足的水汽和不稳定能量,且前期大气层结显示出较强的对流不稳定,有利于短时强降水触发后较大能量的释放并提升降水效率。短时强降水发生阶段监测到明显的干冷空气侵入过程,干冷空气可触发新对流,加强不稳定层结,加快水滴蒸发以增加潜热,从而加强了短时强降水。雷达反射率图上显示西安东部位于蓝田上、下游的对流单体在蓝田县附近形成对峙,并不断合并加强,是造成该地较强短时强降水的主要原因之一。

关键词:短时强降水;干冷空气入侵;地形抬升;西安东部

中图分类号:P458.2

文献标识码:A

强对流天气是指伴随雷暴现象的对流性大风(≥ 17.2 m/s)、冰雹、短时强降水。该类天气的突发性和局地性强、生命史短,地面观测^[1]和模式预报^[2]可能会遗漏或忽视这些小尺度系统,因此强对流天气成为预报业务中的难点问题^[3]。强对流的发生发展,往往受天气尺度和中小尺度系统的综合影响^[4],其中天气尺度系统包括高低空急流、锋面等^[5];但另一方面,强对流与中小尺度过程或系统联系更为直接。目前的研究认为边界层辐合线^[6]、地形抬升^[3]及热力变化都是对流触发的原因,但在不同环境下对流的生成和发展机制也不完全相同,其中强对流云团的初生位置及可能的演变机制是短时强对流天气预报面临的主要挑战之一^[7-8]。夏季特别是在弱天气系统强迫下,预报员很难判断对流是否继续发展或持续移动^[9]。姚静等^[10]对黄土高原强对流天气分析表明,地面干线和辐合线是触发强对流天气的主要原因。刘勇^[11]对陕西一次强对流风暴的诊断发现,干侵入

是强对流发生的重要条件之一。潘留杰等^[12]发现,在一些情况下,天气尺度分析不足以判断强天气发生的潜势条件。还有大量研究^[13-19]对陕西的强对流天气进行个例分析和探讨,每次过程的主要影响条件和发生机理都不完全一样,对强对流天气的研究有必要持续而深入的进行,并利用大量个例来验证结论。

2019年主汛期,陕西强对流天气整体较少,且主要以短时强降水为主。2019年8月9日凌晨,关中东部发生短时强降水,强度较大,致灾性强,其中西安市蓝田县的短时强降水造成了泥石流、滑坡等灾害,为当地人民生命财产带来了严重危害。利用常规观测资料,NCEP($1^{\circ}\times 1^{\circ}$)再分析资料,卫星云图和多普勒雷达、微波辐射计等多源数据,对该过程进行较为全面的分析和总结,有助于提高预报员对此类强对流天气的敏感性,提升强对流天气的预报技能和预警服务,有助于防灾减灾决策能力的提升。

收稿日期:2019-10-27

作者简介:肖贻青(1990—),女,汉族,陕西渭南人,硕士,工程师,主要从事灾害性天气研究。

基金项目:陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室面上项目(2019M-10)资助

1 实况分析

2019年8月8日21时至9日09时,陕西省出现了区域性短时强降水。降水主要集中在关中东部和陕南西部,并造成西安东部出现了暴雨,降水落区如图1所示,其中最大降水出现在蓝田县,12小时降水量为100.6 mm。此次短时强降水突发性强,预报难度大,且造成了蓝田县境内滑坡等地质灾害,这里主要对关中东部以蓝田为主的短时强降水进行分析。

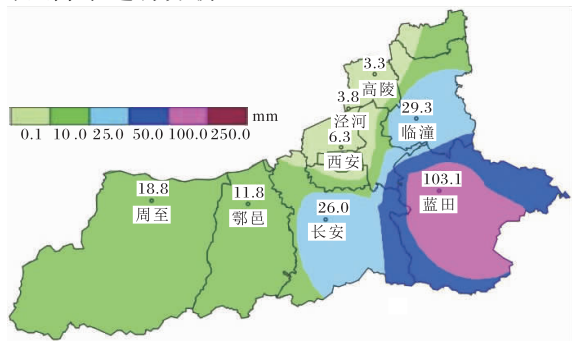


图1 2019-08-08T21—09T09 西安地区实况降水量分布

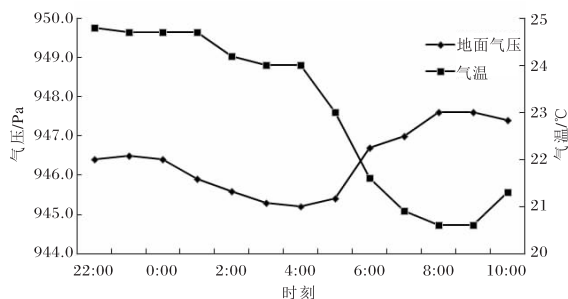
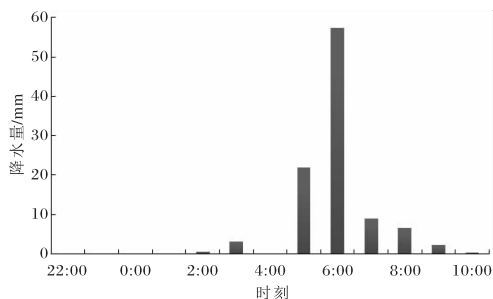


图2 2019-08-08T22—09T10 蓝田站降水(a)和气温、地面气压(b)变化

2 中尺度分析

8日20时中尺度分析如图3所示,从环流形势上看,500 hPa等压面上在甘肃东部和河套地区均有低槽存在,陕西位于槽前,受西南短波气流扰动影响;700 hPa和850 hPa在陕甘宁交界处均存在切变,受台风外围偏东气流影响,关中和陕南中低层水汽条件非常好,大部区域 $t-t_d \leq 6^\circ\text{C}$,且在陕西、甘肃、宁夏交界处存在 $t_{850-500} > 26^\circ\text{C}$ 的不稳定能量区。从中尺度分析来看,关中西部具备强对流天气发生的各项有利条件,关中东部暂时缺少抬升触发条件。

从8日20时西安泾河站探空(图4)温度廓线和露点廓线可以看出,300 hPa以上及500 hPa以下湿度条件较好,500 hPa与300 hPa之间存在

针对蓝田站8月8日21时至9日10时的降水(图2a)进行了分析,可以看出,降水主要从8月9日05时开始,至10时基本结束。最强降水时段主要集中在05—07时,最大雨强为57.4 mm/h,07时后雨强迅速减弱至10 mm/h以下,10时后雨强不足1 mm/h。8日22时至9日08时蓝田站的气温和地面气压(图2b)显示,从9日04时(此次短时强降水开始前)至08时,该站气温由 24.0°C 降低至 20.6°C ,气压从945.2 hPa上升到947.6 hPa,其气温和地面气压的相关系数可以达到-0.98。同时,对周边站点的气象要素进行了分析,结果表明:此次短时强降水发生前,蓝田站的气温普遍高于周边各站;而短时强降水开始后,蓝田站气温陡然下降,其他站则没有显著变化。说明造成短时强降水的对流系统范围较小,仅在蓝田站附近引起了冷空气的下沉堆积。

$t-t_d > 20^\circ\text{C}$ 的空气柱,可认为在中高层存在显著的干冷空气带;700 hPa以下平均比湿达到12 g/kg,500 hPa以上比湿则迅速下降至1 g/kg以下,低层大气湿度条件较好,大气层结不稳定。从状态曲线上还可以看到,850 hPa以下存在34 J/kg的抑制对流有效位能(CIN),有利于低层能量的蓄积;CAPE为1 003.8 J/kg,呈细长状,其形态有利于短时强降水^[20];抬升凝结高度和自由对流高度分别位于860 hPa和790 hPa,相对较低,若有气团抬升则非常容易触发对流。另外,K指数为 33°C ,抬升指数Li为-1.95,对流温度 T_g 为 31.9°C ,这些对流参数均表现为大气层结不稳定度大,有利于短时强降水的形成和发展。由此可知,关中地区在热力、水汽和能量方面,均具有短

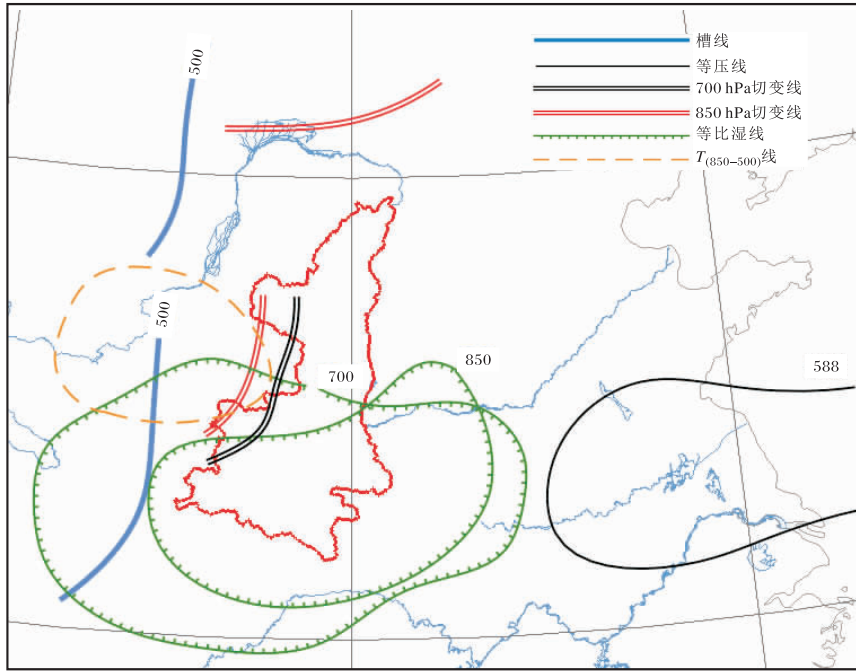


图3 2019-08-08T20 中尺度分析

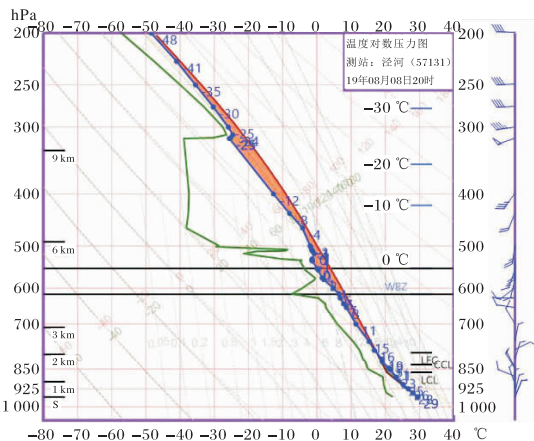


图4 2019-08-08T20 泾河站 T-logP 图

时强降水发生的有利条件。

3 短时强降水特征分析

3.1 温度、湿度场

利用西安泾河站微波辐射计对近地层(0~

1 km)大气温度、整层(0~10 km)相对湿度的剖面随时间序列变化(图5)进行分析。可以看出近地层1 km(图5a)以下,8月9日00时起温度开始表现出明显的下降,04时后较强冷空气骤然从高层侵入至地面,且随着时间不断加强,地面温度迅速下降至20℃以下;08时后气温开始缓慢回升。从相对湿度(图5b)变化可以看到,9日00时起,地面至8 km(400 hPa左右)大气的相对湿度均在60%以上,尤其是中层2~6 km,相对湿度达到90%以上,湿层非常深厚;05时起高层有显著干空气入侵,8 km(400 hPa)以上的相对湿度在短时间内快速降至0%,且随着时间向低层入侵,中低层相对湿度从90%下降至50%以下;干空气入侵仅维持不足2 h,07时后整层大气相对湿度快速增加,中层恢复显著湿区特征。

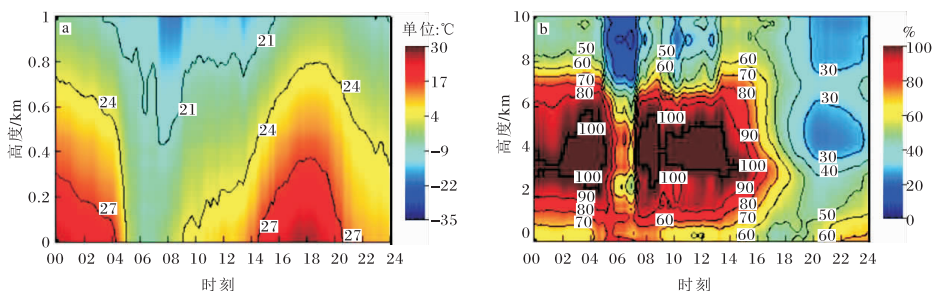


图5 2019-08-09 微波辐射观测的温度(a)、相对湿度(b)随高度时间序列剖面

从以上分析可以看出,在短时强降水发生期间,高层有明显的干冷空气入侵,一方面干冷空气可直接触发新的对流;另一方面干冷空气在做下沉运动过程中与云中饱和水汽混合,云中雨滴蒸发冷却,下沉气流能形成地面的冷空气堆,可抬升低层暖湿空气上升形成新的对流单体,并且由于在风切变环境下,下沉气流把高空的水平动量带到地面,在低空加强了与暖空气的辐合作用,从而维持和加强短时强降水。

3.2 假相当位温

8日20时850 hPa假相当位温(图6a)显示,陕南西南部存在高值中心,其向东北方向延伸至

关中东部,形成假相当位温高能区,关中东部假相当位温中心接近 60°C 。9日02时(图6b),高能区能量舌加强,假相当位温中心增强至 70°C 左右,且等值线更密集,能量更加集中。同时,从8日20时西安泾河站的假相当位温的垂直廓线(图略)可以分析得到,500 hPa以下假相当位温随高度显著递减,850 hPa与500 hPa温差为 20°C 左右,说明中低层存在较强的对流性不稳定,这是一种潜在不稳定。当没有扰动时呈现出稳定气层特征;一旦发生气流辐合或越山等受迫抬升过程,气层达到饱和后转化为真实不稳定,进而释放大量不稳定能量,对流加强发展。

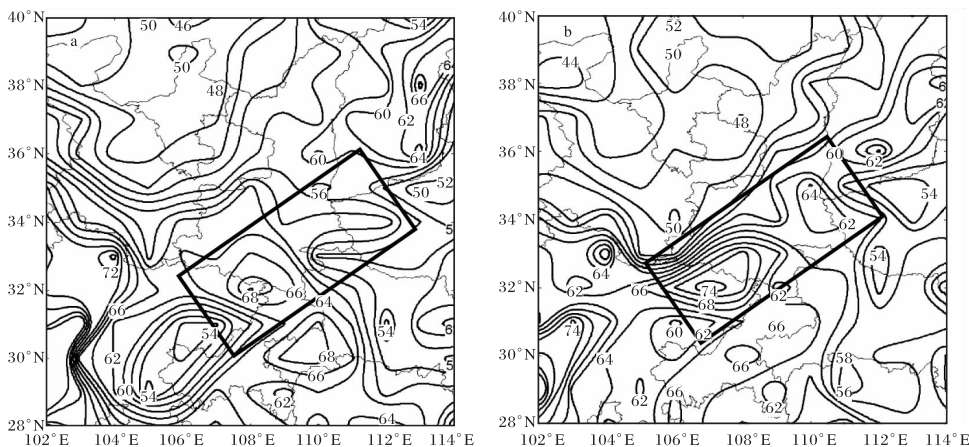


图6 2019年8月850 hPa假相当位温(单位为 $^{\circ}\text{C}$)分布
(a 8日20时,b 9日02时;图中长方形框为高能舌区)

3.3 垂直上升速度

对垂直上升运动发展状况进行分析,结果表明:8月9日02时700 hPa(图7a)垂直速度在蓝田及以东地区表现为一定范围的上升运动,上升运动中心位于东部的渭南地区;对应850 hPa(图7b)上升运动范围扩大,且上升强度明显增加,中心依然位于渭南地区。由此可知,蓝田附近在9日凌晨大气层结已经受到明显的动力抬升,且高度可达到700 hPa以上,但东部的上升运动更加显著,可能更容易触发强对流天气的发生,从而判断蓝田附近的短时强降水会受东部强对流的影响而合并加强。

3.4 地面中尺度系统

对强对流发生期间地面加密风场(图8)进行分析,在短时强降水发生前,05:00(图8a)蓝田站

以西地面盛行偏西风,以东为偏东风,但风速整体较小,辐合较弱;05:30(8b),地面风速加强,蓝田站附近存在中尺度辐合,形成地面小尺度低压环流,持续时间较长;06:00(图8c)系统缓慢向东移动;07:00(图8d),中尺度辐合中心减弱为地面辐合线,向东北方向移动进入渭南境内,蓝田境内的短时强降水开始减弱,东部渭南地区开始加强。由此可知,地面辐合是造成短时强降水的触发和维持条件。

3.5 地形作用

蓝田县位于秦岭北麓的骊山山脚,骊山海拔1302 m,本站海拔540.2 m,南部以秦岭为界,北部则是平原地形,处于平原到高山的地形过渡地区。地形特征示意图如图9(见第6页)所示,短时强降水发生前,蓝田站西部盛行偏西气流,东部

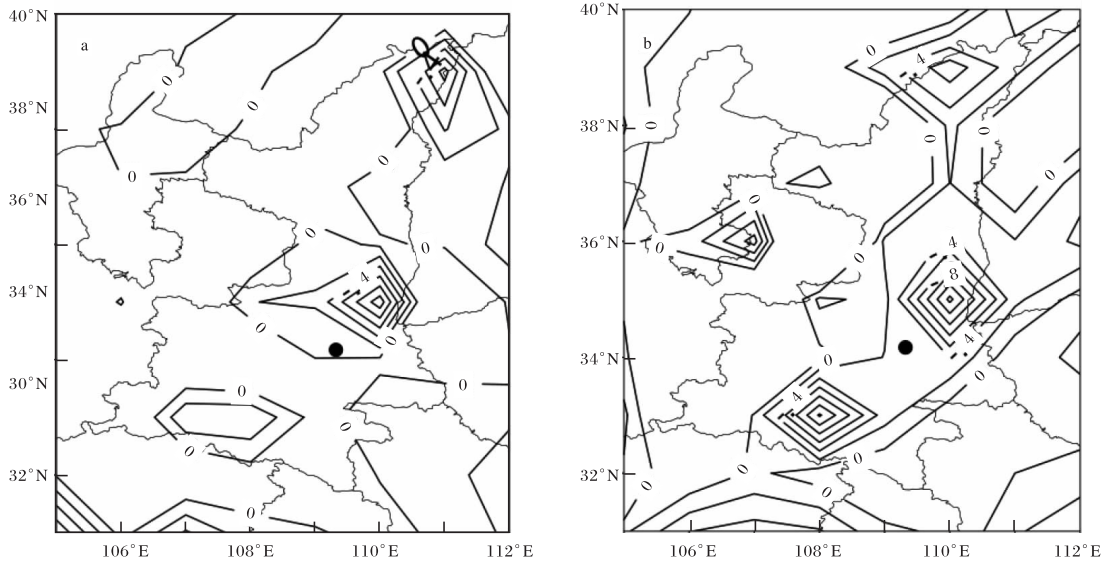


图7 2019-08-09T02 垂直速度场

(a 700 hPa, b 850 hPa; 单位为 hPa/s; 黑色圆点为蓝田站)

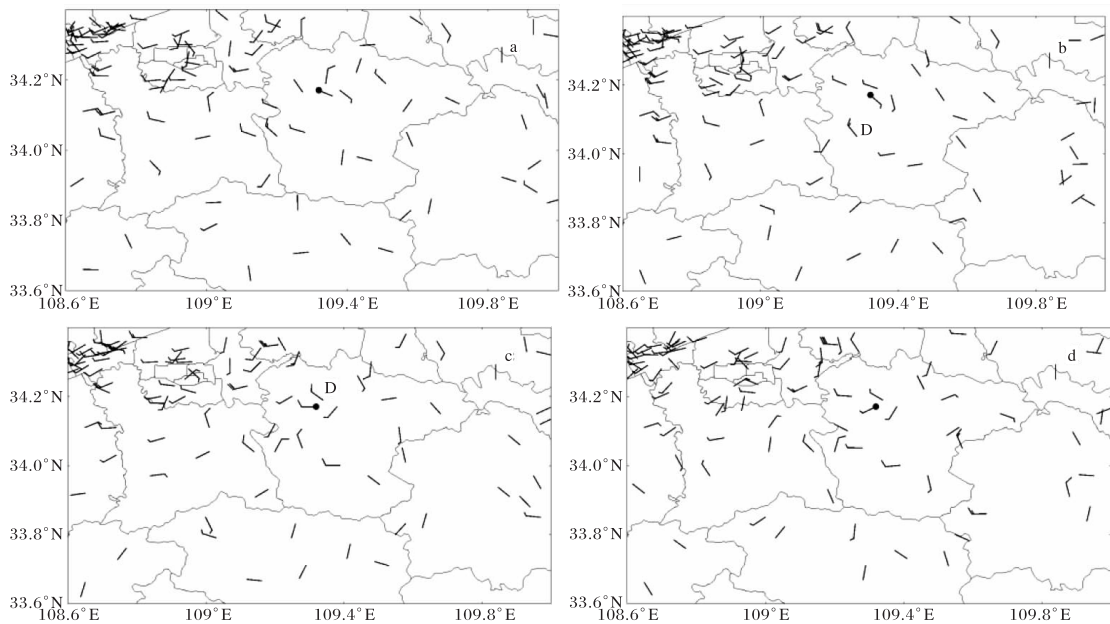


图8 2019-08-09 地面区域站风场

(a 05:00, b 05:30, c 06:00, d 07:00; 黑色圆点为蓝田站; D表示中尺度辐合)

渭南地区则以偏东气流为主;偏西气流在蓝田附近迎风坡被抬升,强迫抬升的气块可触发局地对流,释放已蓄积的大量不稳定能量,使对流快速发展。此外,偏西气流从骊山南部和秦岭北部之间的狭道穿过,沿着山谷地形进入渭南境内后转为西南风,从而和渭南东部偏东气流形成气流辐合,触发渭南境内的对流。当气流穿过两山之间的峡谷,狭管效应会造成风速增加,从而使气流辐合加

强,短时强降水加强。在偏东风的引导下,对流向蓝田方向移动发展。

4 卫星云图特征

从卫星云图相当黑体温度(TBB)分布可以看出,9日06时(图10a),蓝田东部上空已生成对流云团,中心云顶亮温约为 -52°C ,尺度约为10 km,对应其境内有8个区域站出现20 mm/h以上的短时强降水,其中2个区域站的雨强大于

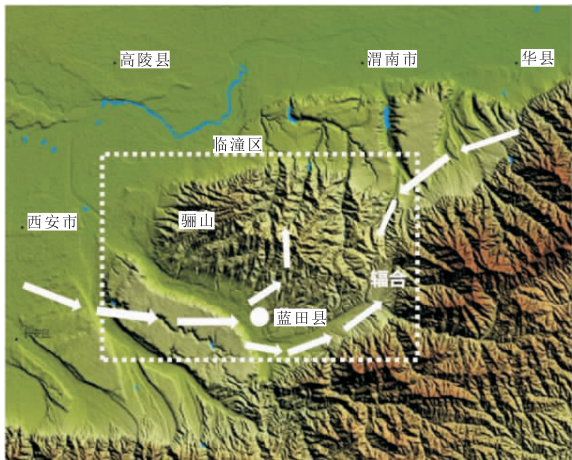


图9 蓝田地形特征及2019-08-08—09短时强降水过程气流示意(文见第4页3.5)

50 mm/h。07时(图 10b),对流云团有所加强, -52℃云团尺度增加至 40 km 以上,中心向东移动至渭南境内,蓝田县 4 站出现 20 mm/h 以上的短时强降水,最大雨强为 40.5 mm/h,渭南境内也开始出现较大的短时强降水,最大雨强达 35.5 mm/h。从卫星云图看出造成这次短时暴雨的对流云团为中- γ 及中- β 尺度,云顶亮温为 -52~-42℃,蓝田的短时强降水区位于 TBB 亮温区西部边缘梯度大值区,但冷云区面积较小,持续时间较短。同时也说明此次过程水汽条件非常好,从而造成降水效率高,引起较强的短时强降水。

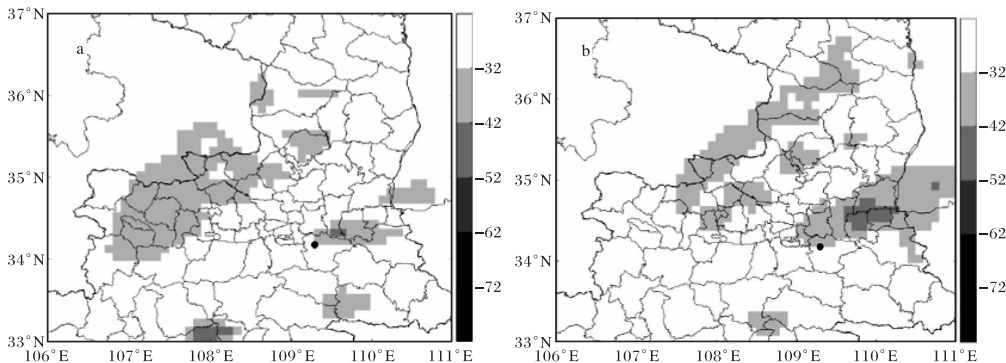


图10 2019-08-09 卫星云图 TBB(单位为℃)分布 (a 06 时,b 07 时;黑色圆点为蓝田站)

5 雷达特征

5.1 组合反射率

9日01时,蓝田站出现了孤立的对流单体,中心强度约 30 dBz,反射率因子边界呈椭圆状且清晰;02时该单体稳定少动,中心强度和尺度稍有增加,且在蓝田的上下游均触发了其他新的较小对流单体;03时对流单体明显加强,中心强度增大到 55 dBz,蓝田站下游东部地区在秦岭北部初生的对流单体快速发展,上游独立的对流单体逐渐增多;04时,在渭南地区生成的对流单体快速发展合并,形成了沿蓝田、华县、华阴呈东北—西南向的带状对流回波,回波的生成、发展及移动方向受地形影响明显,说明了本次短时强降水过程中,地形对对流的生成和发展有重要作用。值得注意的是,01—04时主要强回波区位于渭南境内,3 h 累积降水量有 2 站达到 30 mm 以上,而蓝

田境内仅出现零散的阵性降水。

9日04:30,蓝田上游回波向东移动,下游回波向西移动,在蓝田站附近持续合并加强,形成了积状云对流回波,中心强度达 60 dBz 以上;该对流单体受上游偏西风,下游偏东风辐合影响,在原地持续加强;06:46 后形成了大片积状层状云混合回波。实况显示,04:30 以后蓝田县开始出现明显短时强降水,至 07 时 3 h 内有 8 站累积降水量达到 50 mm 以上。

从雷达反射率因子可以看到,蓝田境内独立的对流单体基本是沿山脉地形形成,当多个对流单体合并加强,雷达回波上显示为明显的层状云和对流云混合型降水回波时,才造成了较大的短时强降水;上、下游的对流单体沿着地形移动至蓝田境内,且长时间对峙,是造成该地强降水的主要原因。

5.2 径向速度

对主要降水时段 1.5° 仰角径向速度(图 12)进行分析。05:00, 雷达所在的西安站主导风向为西南风, 在蓝田及其东部存在较为明显的辐合; 背景风场随着时间加强, 蓝田境内的辐合强度也有所增加, 且范围有所扩大。06:03, 西安站地面风

速显著增加, 1.5° 仰角径向速度图上出现了明显的速度模糊, 退模糊后的偏西风可达 19 m/s 以上, 该时刻地面也观测到 12 m/s 以上的极大风速; 蓝田站附近的中尺度辐合范围减小, 风速也出现了速度模糊, 表明环境风场速度增加, 有利于地面中尺度风速辐合加强, 从而短时强降水加强。

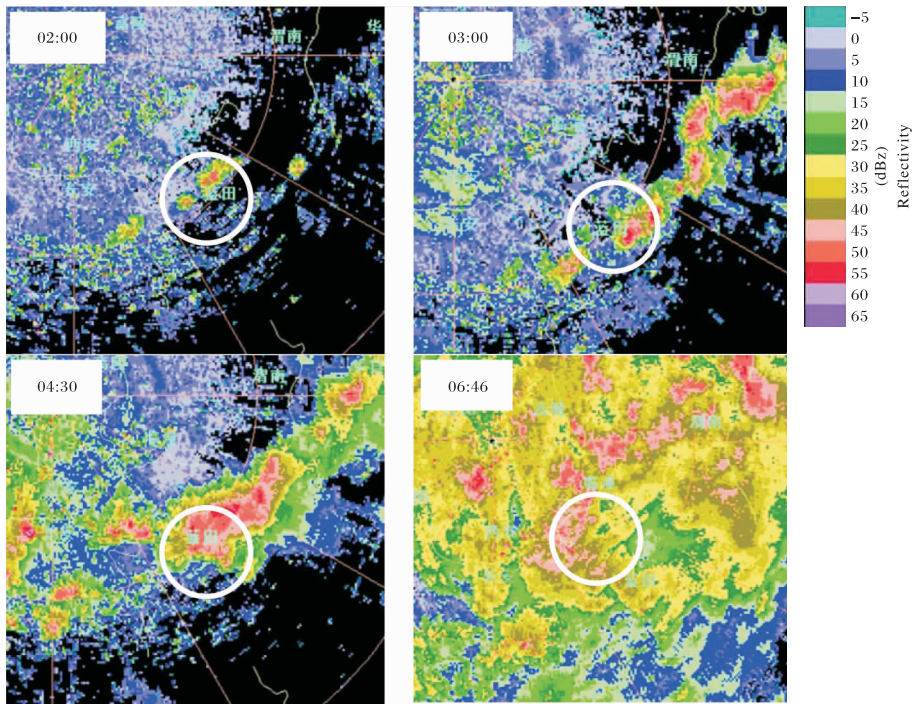


图 11 2019-08-09 西安多普勒雷达组合反射率因子
(白色圆圈表示蓝田县发生短时强降水的区域)

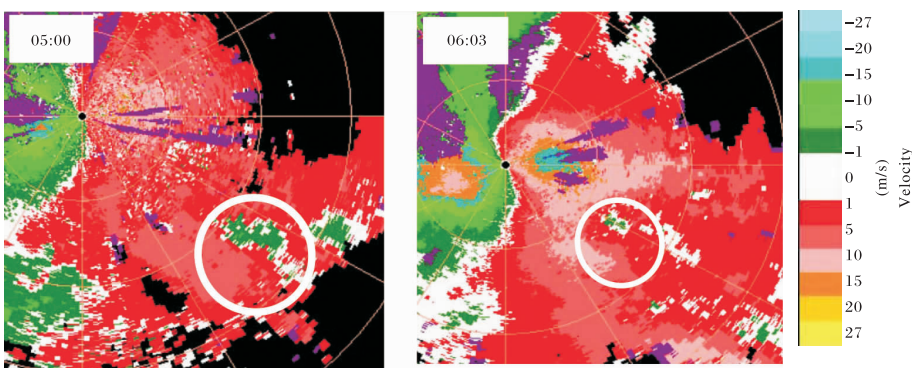


图 12 2019-08-09 西安多普勒雷达 1.5° 仰角径向速度
(白色圆圈表示风速辐合区)

6 结论

(1) 上游短波槽及台风外围明显的偏东水汽输送使关中大部分区域具有非常有利于短时强降水的水汽和热力条件。蓝田短时强降水局地性

强、持续时间短, 降水效率高。

(2) 此次过程有明显的干冷空气侵入, 其入侵时间与短时强降水的发生时间一致。干冷空气的侵入可触发新对流、加强层结不稳定性及促进释

放潜热以维持强对流,在这次过程中有增强短时强降水的重要作用。

(3)蓝田县位于秦岭北麓的山脚,在上游盛行偏西气流的情况下,气流迎风坡被抬升,强迫抬升的气块可触发局地对流;且由于狭管效应,使山下地面风速增加,从而加强地面辐合,以维持和加强本次短时强降水。

(4)造成蓝田县局地短时强降水的对流单体是在本地生成发展,与上、下游的对流单体沿地形合并后快速加强,并在本地长时间对峙形成有组织的对流。

参考文献:

- [1] WECKWERCH T M. The effect of small-scale moisture variability on thunderstorm initiation[J]. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(11): 4017-4030.
- [2] LYNN B H, DAVID R, PETER S, et al. Improved simulation of Florida summer convection using the PLACE land model and a 1.5-order turbulence parameterization coupled to the Penn State-NCAR mesoscale model[J]. *Mon Wea Rev*, 2001, 129(6): 1441-1461.
- [3] LIN P F, CHANG P L, JOU B J D. Warm season afternoon thunderstorm characteristics under weak synoptic-scale forcing over Taiwan Island[J]. *Wea Forecasting*, 2011, 26(2): 44-60.
- [4] 俞樟孝,丛黎强. 浙江大范围强对流过程中的中尺度(α)低压[J]. *气象学报*,1990,48(4): 500-505.
- [5] 陆汉城,杨国祥. 中尺度天气原理和预报[M]. 北京:气象出版社,2004.
- [6] WILSON J W, SCHREIBER W E. Initiation of convective storms at radar-observed boundary layer convergence lines[J]. *Mon Wea Rev*, 1986, 114(12): 2516-2536.
- [7] OLSEN D A, JUNCKER N W, KORTY B. Evaluation of 33 years of quantitative precipitation forecasting at the NMC[J]. *Wea Forecasting*, 1995, 10(3): 498-511.
- [8] FRITSCH J M, CARBONE R E. Improving quantitative precipitation forecasts in the warm season: An USWRP research and development strategy[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2004, 85(7): 955-965.
- [9] WAKIMOTO R M, MERPHEY H V. Analysis of a dryline during IHOP: Implications for convection initiation[J]. *Mon Wea Rev*, 2009, 137(3): 912-935.
- [10] 姚静,井宇,赵强,等. 黄土高原一次连续性强对流天气分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2017, 11(3): 55-64.
- [11] 刘勇. 陕西一次槽前强对流风暴的诊断分析[J]. *高原气象*, 2006, 25(4): 687-695.
- [12] 潘留杰,张宏芳,王楠,等. 陕西一次强对流天气过程的中尺度及雷达观测分析[J]. *高原气象*, 2013, 32(1):278-289.
- [13] 姚静,屈丽玮,朱庆亮,等. 陕西省强对流天气气候特征分析与对流指标探讨[J]. *陕西气象*,2017(3): 29-35.
- [14] 武麦凤,吉庆,米洁. 长波调整背景下陕西关中东部强对流天气过程分析[J]. *干旱气象*, 2015, 33(4): 644-650.
- [15] 许新田,刘瑞芳,郭大梅,等. 陕西一次持续性强对流天气过程的成因分析[J]. *气象*, 2012, 38(5): 533-542.
- [16] 赵强,韩洁,陈晓婷. 黄土高原一次副高外围暴雨的对流环境及触发条件分析[J]. *陕西气象*, 2020(3):1-8.
- [17] 郭莉,康晓甫,刘坤,等. 一次副高控制下的局地大暴雨天气分析[J]. *陕西气象*,2019(6): 6-11.
- [18] 肖贻青,黄少妮,娄盼星,等. 副热带高压控制下一次区域性强对流暴雨成因分析[J]. *陕西气象*, 2018(5): 6-12.
- [19] 陈小婷,赵强,刘瑞芳,等. 关中一次阵风锋触发的强对流天气分析[J]. *陕西气象*,2019(5):6-11.
- [20] 俞小鼎. 短时强降水临近预报的思路与方法[J]. *暴雨灾害*,2013,32(3):202-209.