

李静睿,刘佩佩,陈小婷,等. 秦巴山区一次罕见雷暴大风天气成因分析[J]. 陕西气象,2020(3):9-15.

文章编号:1006-4354(2020)03-0009-07

# 秦巴山区一次罕见雷暴大风天气成因分析

李静睿<sup>1</sup>,刘佩佩<sup>1</sup>,陈小婷<sup>2</sup>,梁雪<sup>1</sup>

(1. 安康市气象局,陕西安康 725000;2. 陕西省气象台,西安 710014)

**摘要:**利用 MICAPS 资料、NCEP $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 逐 6 h 再分析数据以及 FY-2G 卫星、安康雷达探测等资料,对 2019 年 6 月 2 日发生在秦巴山区的一次罕见雷暴大风天气进行成因综合分析。结果表明:2 日陕南中东部地区存在有利于强对流风暴发生和发展的热力不稳定条件;地面图上,傍晚前后从关中向陕南发展移动的冷池触发了本次雷暴大风天气;过程发生时,云图上中尺度对流系统云系逐渐东移南压,云顶亮温梯度最大区域和地面冷池前方辐合线位置基本一致;雷暴大风发生时低层雷达速度图上有显著的大风速核、明显的中层径向辐合和低层辐散及其雷达强回波质心的下降,这些都为雷暴大风天气的预报预警提供了一定的指示。

**关键词:**雷暴大风;冷池;云顶亮温;大风速核;强回波质心

**中图分类号:**P458.121

**文献标识码:**A

雷暴大风天气因其尺度小,局地性强,生命期短,预报难度较大,故对这类天气的分析与总结显得尤为重要。针对雷暴大风国内学者从形成、触发机制、雷达特征等方面都进行了大量的研究<sup>[1-9]</sup>,程月星等<sup>[4]</sup>关于 2016 年北京地区一次雷暴大风的研究表明,在新生单体与风暴主体合并下山的过程中,对流强度与冷池强度均迅速增强。赵杰等<sup>[7]</sup>研究表明,大风雷达回波生成于较高层,在大风发生前出现了较为明显的反射率因子核心降低和中层径向辐合,有利于地面大风的出现。孟妙志等<sup>[9]</sup>对关中秋季飚线天气成因和中尺度特征分析的研究表明,由中高层干冷平流引起对流不稳定发展,高层强上升运动激发低层扰动,地面干线是强对流的触发机制。研究表明,风暴强下沉气流辐散、强冷池密度流和层状云部分降水粒子蒸发对弓形回波阶段地面灾害性大风的增幅作用几乎相当,冷池合并是极端雷暴大风产生的重要原因和触发机制<sup>[10-18]</sup>。安康地处秦巴山区,受地形影响 10 m 风场风速常年平均在 3 级以下,强对流和寒潮大风发生时也很少出现大范围的大风

(6 级以上)天气。而在 2019 年初夏,安康地区出现了大范围的雷暴大风天气,为历史之罕见,因此对这次天气过程的成因从多角度进行分析总结,有利于提高安康地区雷暴大风天气的预报预警能力。

## 1 资料来源及天气实况

资料采用地面自动观测站实况资料,NCEP $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 逐 6 h 再分析数据资料,安康雷达站资料。雷达资料包括组合反射率、径向速度、基本反射率等。

2019 年 6 月 2 日 19—23 时,安康市大部分县区发生了一次雷暴大风天气过程。安康市地面观测站实测资料显示,石泉县、汉阴县、汉滨区出现了七级以上大风,石泉观测站出现了 22.3 m/s 的极大风速,创建站以来历史记录;汉阴县极大风速为 23.2 m/s,为 2010 年以来最大风速;汉滨区极大风速为 17.8 m/s,为 1987 年以来最大风速。同时石泉县、镇坪县部分乡镇出现了小冰雹,并伴有短时降水,1 h 最大降水量出现在镇坪县牛头店为 22.7 mm(21—22 时)。安康市地处秦巴山区,由于山脉的屏障作用,通常风速较小,而像

收稿日期:2019-09-22

作者简介:李静睿(1991—),女,汉族,陕西安康人,本科,工程师,主要从事短期天气预报和强对流天气研究。

6月2日出现这么大面积的雷暴大风天气实为罕见。风暴所经之地,气温骤降,气压骤升,风速突增,风向突变。以石泉站(图1)为例,2日19—23时阵风风速极大值达22.3 m/s,1 h气温下降幅

度最大为11.3℃,3 h气压上升6.9 hPa,露点温度上升3.4℃,风向由西北风突变为西南风,气象要素变化剧烈程度为安康有气象记录以来之少见。

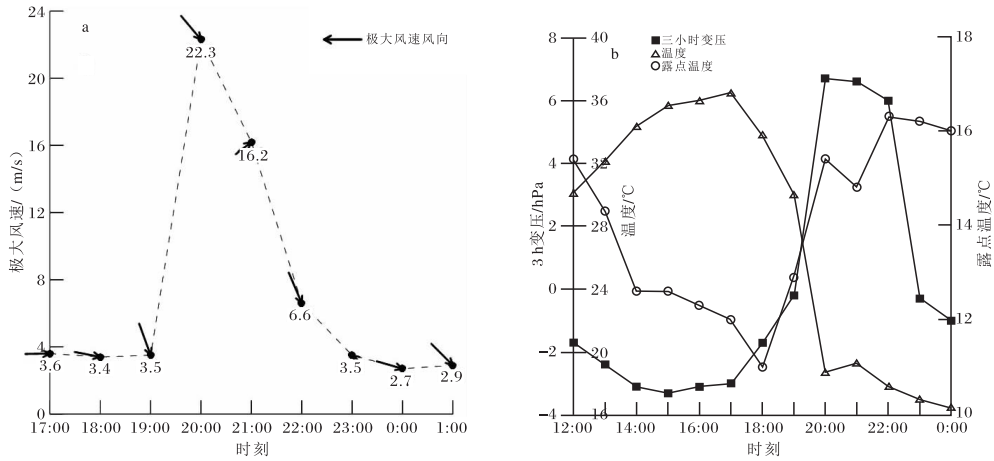


图1 2019-06-02 安康石泉站极大风速和风向(a)及3 h 变压、温度、露点温度随时间变化(b)

## 2 成因分析

### 2.1 高空形势分析

从2日20时500 hPa环流形势图(图2a)上可以看出,陕西处在东北冷涡底部后部,受内蒙东部到华北西部下滑槽后西北气流控制。下滑槽后风场与等温线有一定夹角,不断有冷空气东移南下,在陕西中南部形成-12℃的冷中心。同时从探空资料的温度露点差来看(图略),其差值较大,有明显的干冷平流影响安康。700 hPa和850 hPa天气图(图略)上,我国西南地区到陕西北部有暖脊发展。高低层的冷暖配置,有利于大气不稳定层结的建立。由探空资料可以看出,安康站850 hPa

和500 hPa的温度差值为36℃,同时,08时西安站850 hPa和300 hPa的温度差值已达66℃,表现出上下层强的不稳定潜势。陕西强对流经验指标表明:当08时850 hPa和300 hPa的温度差值超过55℃时,发生强对流的概率可达65%以上。陕西中南部地区,700 hPa温度露点差为21℃;同时通过NCEP1°×1°再分析数据资料分析沿32.5°N相对湿度垂直分布(图2b)来看,在105°E~109°E的中层(700~500 hPa),自东向西存在明显的干层,这种中空的干层加强了大气的对流不稳定性,有利于中层干空气卷入风暴,使得降水粒子经过干空气时剧烈蒸发,进而使下沉气流

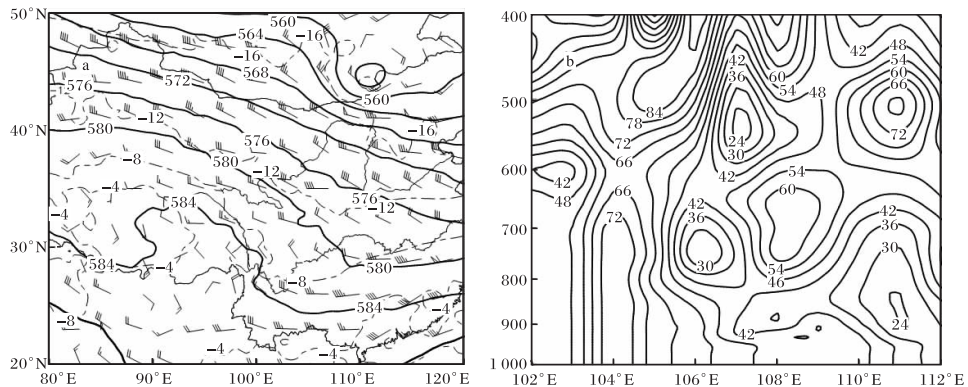


图2 2019-06-02T20 500 hPa形势场(a 实线为等高线、单位为 dagpm;虚线为等温线,单位为℃)、沿32.5°N相对湿度/%垂直剖面(b)

加强,从而形成雷暴大风天气。200 hPa上(图略),安康地区正好处在高空急流轴上,这加剧了高低层的垂直风切变,有利于对流风暴的组织发展和维持。

## 2.2 环境场条件

安康极端大风发生在21:07,安康站20时的探空资料(图3a)能代表雷暴大风天气发生前的环境场特征。探空数据显示,08时安康站对流有效位能为0 J/kg,20时上升到1 218.3 J/kg,说明大气在经过白天晴空辐射,能量累积后,不稳定能量明显增大,在受到一定触发时,易发生强对流。下沉有效位能由08时的0.5 J/kg上升至20时的108.3 J/kg,有利于雷暴大风天气的发生;SI指数由 $-2.37^{\circ}\text{C}$ 变为 $-2.58^{\circ}\text{C}$ ,发生对流的潜势整体都增大。20时安康站的 $T\text{-Ln}P$ 图上中低层较干,因此本次过程以干对流为主。700 hPa以下,大气递减率接近干绝热递减率,有利于云底降水的蒸发,从而产生负浮力并使得地面强风强度进一步增大。同时 $0^{\circ}\text{C}$ 层和 $-20^{\circ}\text{C}$ 层分别位

于600 hPa和400 hPa上下,温度层结高度有利于局地冰雹的发生。

由于实况探空分辨率较低,不能代表不同地理位置的大气层结状态,下面利用 $\text{NCEP}1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 逐6 h再分析数据资料进行分析。2日20时沿 $32.5^{\circ}\text{N}$ 做假相当位温、散度、垂直速度剖面(图3b),可以看出假相当位温整体为上小下大垂直分布。 $32.5^{\circ}\text{N}$ , $106.5^{\circ}\text{E}$ 是这个时次大风发生的中心位置,其附近区域700 hPa以下均为假相当位温高值区,最大能量中心为336 K,500~600 hPa为低值区,中心值为324 K,且从地面到500 hPa,假相当位温随高度而递减,说明大气处于对流不稳定层结之中。从垂直速度与散度剖面来看,在 $106^{\circ}\text{E}$ 附近,低层850 hPa有 $(6\sim 7)\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 的强辐散中心,在350 hPa配合有 $(5\sim 6)\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 的辐合中心,与之相伴随的垂直下沉速度在700~600 hPa达到了3~4 m/s左右,较天气尺度垂直运动的量级明显要大的多,这样的上下层配置有利于雷暴大风的产生。

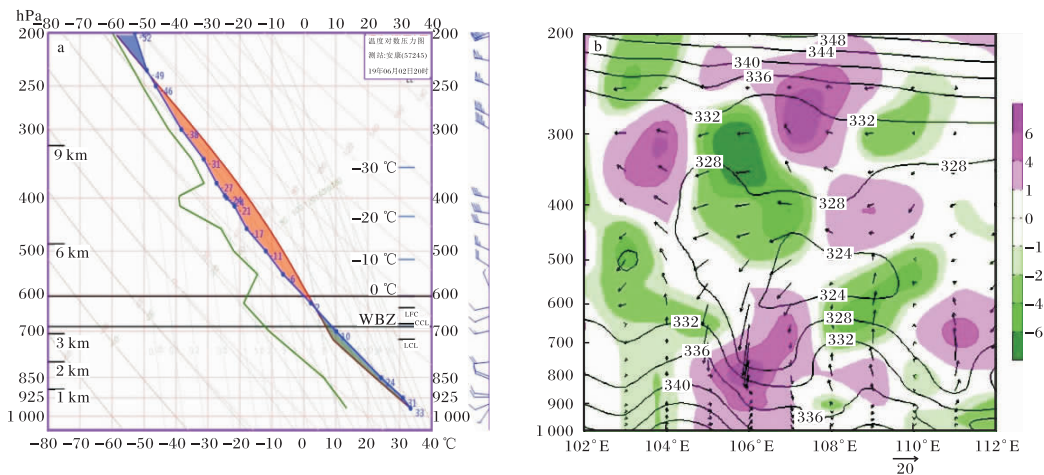


图3 2019-06-02T20安康站 $T\text{-Ln}P$ 图(a)和沿 $32.5^{\circ}\text{N}$ 假相当位温(粗黑色实线,单位为K)和经向环流(箭头,垂直风速 $w\times 10$ ,单位为m/s)、散度(填色区,单位为 $10^{-5}\text{ s}^{-1}$ )的垂直剖面(b)

## 2.3 地面形势和触发机制

2日08时安康受热低压控制,以晴天为主,受太阳短波辐射影响增温明显,有利于能量累积和低层的热力不稳定性不断加大。2日11时地面图上(图略),新疆经河西走廊有冷空气扩散南下,陕南仍受地面热低压控制,升温较快。15时开始,受冷空气影响,宝鸡西部已经出现雷阵雨天

气,而安康仍然处于晴空区。到了17时,安康地区大部分区县地面温度达到 $36^{\circ}\text{C}$ 左右,而汉中和宝鸡西部,气温只有 $25^{\circ}\text{C}$ 左右。20时(图略),地面图上青藏高原东侧存在中心气压为1 012.5 hPa的冷空气,经西路影响关中和陕西南部地区。此时,关中中西部风速明显增大,风向为一致的西西北风,平均风速为10 m/s左右,汉中已转为西北

风,而安康大部仍然维持高温状态。地面上冷暖分布不均匀,陕南东部具有比关中和陕南西部更好的能量条件。在一定的触发机制下,易在暖湿一侧产生对流,下面具体分析一下本次雷暴大风过程的触发机制。

由前面分析可知,2日午后关中西部已受冷空气影响,从云图可知(图略)在宝鸡和咸阳西北部已出现了小范围的对流,其中宝鸡北部对流更强。16时,从国家区域站地面填图上可以看出,宝鸡中部已出现降水,地面气温较上一时次已下降了 $8^{\circ}\text{C}$ 左右,并出现 $16\text{ m/s}$ 的偏西北风;17时,汉中西部有对流云团生成,关中西部有云团发展东移南压,二者逐渐合并,降水范围扩大。伴随着降水发生,从地面变压场和变温场来看地面有冷池形成,宝鸡中南部出现正变压和负变温中心,与之伴随在冷池前沿,宝鸡东部和咸阳南部、西安西部地面区域站风向由西南风转为西北风。冷池的出流与前方的暖气流形成了地面辐合线,进而激发新的对流发展。随着对流发展并逐渐东移南压,冷池也逐渐东移南压且范围逐渐增大,强度增强。18时关中西部已出现了 $2\text{ hPa}$ 的正变压中心和 $-3^{\circ}\text{C}$ 的负变温中心。从图4可以看出,19时(图4a),陕西中南部出现了 $3\text{ hPa}$ 的正变压和

$-5^{\circ}\text{C}$ 负变温中心,同时地面风场上有明显辐散,尤其在冷池移向的前侧风向较大,最大风速达 $18\text{ m/s}$ 。冷池内部密度较大的冷空气与其东南部的热低压形成了温度和气压梯度带,地面风速进一步增大,地面暖空气遇到干冷的下沉气流侵入,使得暖空气抬升,促进对流进一步发展<sup>[18]</sup>。安康位于秦岭南侧,随着关中地区冷池东移南压,在冷池下山过程中,其内部密度较大的冷空气沿山脉而下<sup>[18]</sup>,抵达安康川道地区。到了20时(图4b)冷池中心已移入汉中东部、安康西部,冷池中心已达 $5\text{ hPa}$ 正变压中心,冷池的强度有所增强,这与程月星等<sup>[4]</sup>得出的风暴主体合并下山的过程中,冷池强度迅速增强的结论是一致的。由冷池前沿形成的偏西北风与安康的偏南气流形成辐合线,触发了秦巴山区的强对流天气,进而为安康地区带来一次雷暴大风天气。

综上所述,此次过程发生在大气不稳定背景下,地面图上西路冷空气形成初始扰动,关中西部产生了弱降水。随着降水的产生,降水粒子经过中层干冷空气时剧烈的蒸发冷却形成强下沉气流,进而在地面形成冷池,冷池在翻山下坡时强度增强。随着冷池发展东移,其前方的地面强辐散气流与南部的偏南气流形成辐合线,进而触发了

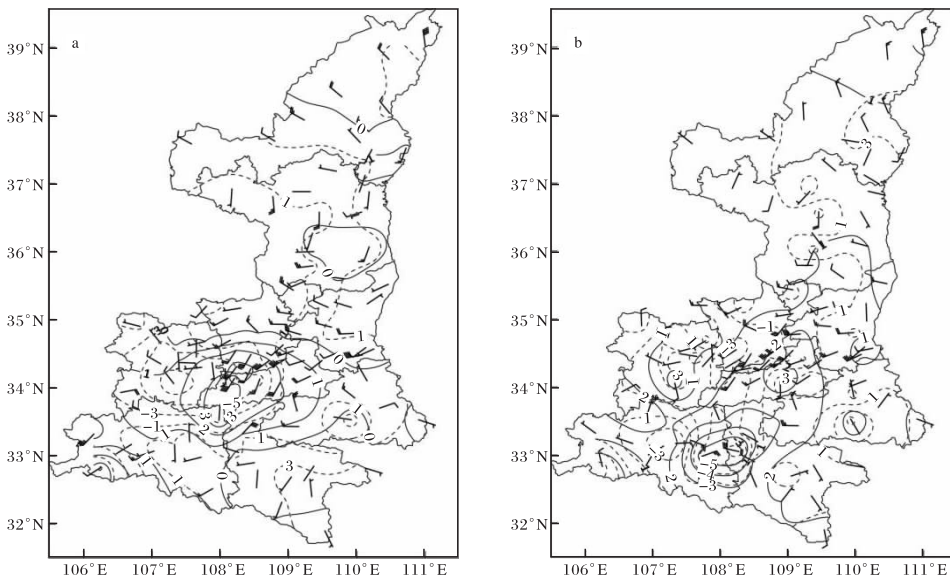


图4 2019-06-02 陕西地区1 h变压(实线,单位为hPa)、1 h变温(虚线,单位为 $^{\circ}\text{C}$ )及整点风场(a 19时,b 20时)

秦巴山区的雷暴大风天气。

#### 2.4 卫星云图特征

可见光云图(图略)上,2日14时在陇南与陕西西部交界区有中- $\beta$ 尺度的对流云系发展,色调白亮,有明显的上冲云顶和暗影;15时,在青海和甘肃南部有东东北-西西南走向的一锋面云系影响关中和陕南西部地区,在锋面云系前侧有中- $\alpha$ 尺度的对流云团新生;16时,两个对流云团合并,形成中尺度对流系统,逐渐东移南压,影响陕西中南部。17时,对流云系已影响宝鸡和汉中中西部地区,而此时关中和陕南中东部仍为晴空区,大气不稳定性较西部大,对流云团沿着热力不稳定性大的区域逐渐东移南压。到了19时(图5a),强对流云团前沿的层状云已开始影响安康西北部地区;20时(图5b),云系迅速东移发展,其云顶亮温

明显降低且小于 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的面积增大,说明垂直运动剧烈且发生对流天气的范围在逐渐增大;汉中东北部到安康西北部云顶亮温低于 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而此处强对流天气也最为剧烈,这个位置与同时刻地面冷池前沿的辐合线的位置相一致。21时(图5c),MCS缓慢东移,影响安康大部,随即安康中东部出现了大面积的雷暴大风天气,这个时刻云图形态上总体上有“厂”字型的结构特征,且在“厂”字型的顶部有明显的反气旋弯曲存在<sup>[19]</sup>,强对流发生在“厂”字型的空白区,这种锋面云带南侧的新生对流云团动态,对短临天气预警来讲是提早做好准确预报的关键点<sup>[19]</sup>。22时(图5d),对流云团明显减弱,云顶亮温较前两个时次有所增加,结构变得松散,相伴随的天气剧烈程度也较前两个时次明显减弱。

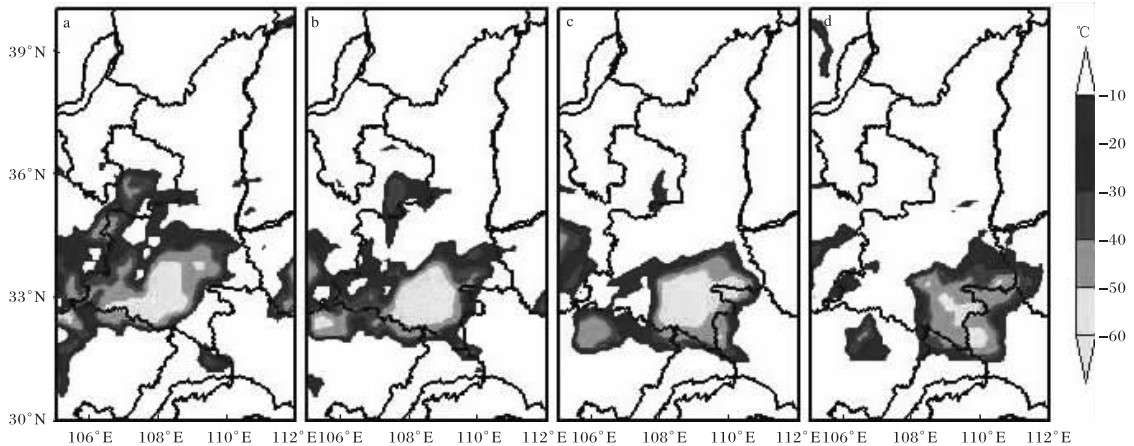


图5 2019-06-02TBB逐时演变(单位为 $^{\circ}\text{C}$ ;a 19时;b 20时;c 21时;d 22时)

#### 2.5 多普勒雷达特征

从安康站的雷达组合反射率产品可以看出(图略),19—21时有多个强回波中心逐渐东移影响安康地区,且回波强度在东移过程短时间内减弱,从相应时次各仰角反射率因子对比可以看出,伴随着强回波质心的下降,与之对应地面出现了雷暴大风天气。

如图6a所示,19:32在石泉中西部有中心强度为55 dBz的强回波,强回波由上游两个对流单体逐渐合并形成。为了展示风暴单体的空间垂直结构,沿雷达径向(图6a直线方向)做反射率因子剖面。从图6b、图6c可看出,在距离雷达60 km左右,即图6a强回波中心,从19:32到19:45,这种强

回波中心的由8 km下降到4 km,对应的地面相应位置上,石泉的后柳区域站19:43观测到12.8 m/s的地面大风。从雷达平均速度剖面上看(图略),相应位置3~5 km上,径向速度差值达到19~22 m/s,具有中层径向辐合特征,低层出现明显的辐散。整体来说,从 $0.5^{\circ}$ 仰角平均径向速度图(图7)上分析可得,本次雷暴大风过程中,低仰角上出现了西北风大风速核,并逐渐东移南压,随着系统的移动,自西北向东南影响安康地区。退速度模糊后,可知19:40大风速核经石泉,距离石泉地面高度约1.3 km的位置风速为24 m/s,大风速核逐渐东移经过汉阴、安康,在20:57距离安康地面高度大约0.2 km的位置径向风速达到了20 m/s左右。与之

对应,石泉在 19:52 出现了 22.3 m/s 的极大风速,汉阴在 20:21 出现了 23.2 m/s 的极大风速,安康在 21:07 出现了 17.8 m/s 的极大风速。这与崔讲

学等<sup>[1]</sup>的大风灾害与宏、微尺度的大风核有密切关系的研究结果相一致,这是低仰角、近距离的大风速核引发地面雷暴大风的直接反应。

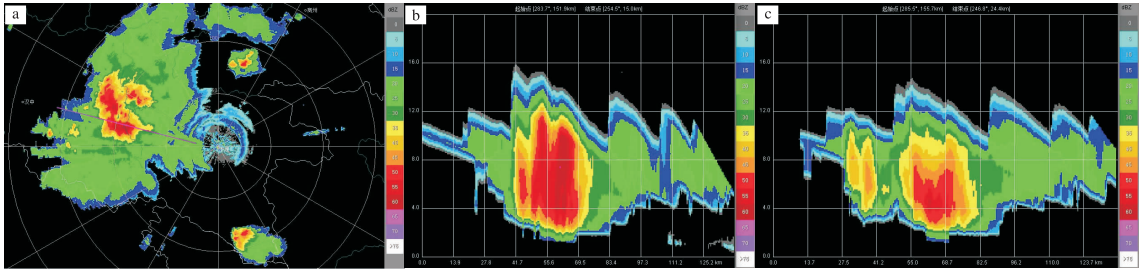


图6 2019-06-02T19:32 安康站雷达组合反射率(a, 直线为 b、c 所做剖面方向)和基本反射率因子剖面(b 19:32;c 19:45)

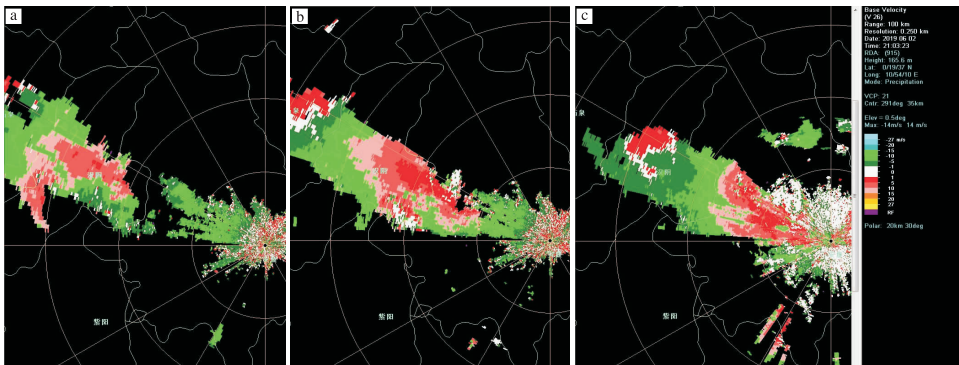


图7 2019-06-02 安康站 0.5°仰角平均径向速度(a 19:45;b 20:32;c 20:57)

总的来说,从雷达特征演变分析可得,本次雷暴大风天气,出现了强风暴在移动过程中强反射率因子核心下降,伴随着中层径向辐合和低层强烈的辐散,在近距离低仰角的平均径向速度图上出现大风速核的多普勒雷达回波特征。俞小鼎等<sup>[2]</sup>指出反射率因子核心的逐渐降低并伴随云底以上速度辐合的多普勒雷达回波特征,可以用来提前数分钟预警下击暴流的发生。

### 3 结论与思考

(1)本次雷暴大风天气发生时,存在上冷下暖的大气不稳定层结,中层的干冷平流和白天辐射增温使得大气的对流不稳定性进一步增大,为对流的产生提供了有利的层结和能量条件。

(2)在地面西路冷空气的初始扰动下,产生了降水,降水粒子在经过干冷空气时强烈蒸发冷却,形成地面冷池,随着冷池发展南压东移,与前方偏南气流形成辐合线,进而触发了秦岭南麓山区的强对流。

(3)云图上有中尺度对流系统发展,随着云顶亮温的降低,强对流天气范围在逐渐增大;且最低亮温的中心位置与同时刻地面冷池前沿的辐合线的位置基本一致。

(4)雷暴大风发生前低层雷达速度图上有显著的大风速核、明显的中层径向辐合和低层辐散及雷达强回波质心的下降,这些都为雷暴大风天气的预报预警提供了一定的指示。

### 参考文献:

[1] 崔讲学,张家国,王仁乔. 等. 武汉一次下击暴流天气的成因分析[J]. 暴雨灾害,200,26(4):369-371.  
 [2] 俞小鼎,张爱民,郑媛媛,等. 一次系列下击暴流事件的多普勒雷达分析[J]. 应用气象学报,2006, 17(4):385-392.  
 [3] 周后福,刁秀广,赵倩,等. 一次连续下击暴流天气的成因分析[J]. 干旱气象,2017,35(4): 641-648.  
 [4] 程月星,孙继松,戴高菊,等. 2016年北京地区一次雷

- 暴大风的观测研究[J]. 气象, 2018, 44(12): 1529-1541.
- [5] 康岚, 刘炜桦, 肖递祥, 等. 四川盆地一次极端大风天气过程成因及预报着眼点分析[J]. 气象, 2018, 44(11): 1414-1423.
- [6] 杨芳园, 沈茜, 周稀, 等. 云南省一次飏线大风天气过程的中尺度特征分析[J]. 暴雨灾害, 2018, 37(1): 48-56.
- [7] 赵杰, 潘启学, 黄桂东. 贵州三都 7.22 大风天气分析[J]. 中低纬山地气象, 2019, 43(4): 64-68.
- [8] 王春玲, 崔力, 杜丽娅, 等. 濮阳市一次雷雨大风天气过程分析[J]. 陕西气象, 2016(6): 22-26.
- [9] 孟妙志, 卢晔, 王仲文, 等. 关中秋季飏线天气成因和中尺度特征分析[J]. 陕西气象, 2017(2): 1-6.
- [10] 王秀明, 俞小鼎, 周小刚等. “6.3”区域致灾雷暴大风形成及维持原因[J]. 高原气象, 2012, 31(1): 504-514.
- [11] 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.
- [12] 孟妙志, 卢晔, 王仲文. 关中阵风锋环境场和雷达特征分析[J]. 陕西气象, 2019(5): 12-16.
- [13] 庞翻, 李建芳, 蔡英, 等. 宝鸡一次阵风锋天气过程分析[J]. 陕西气象, 2013(2): 11-15.
- [14] 公衍铎, 郑永光, 罗琪. 冷涡底部一次弓状强飏线的演变和机理[J]. 气象, 2019, 45(4): 483-495.
- [15] 李强, 王秀明, 张亚萍, 等. 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, 2019, 45(2): 203-215.
- [16] 陈云辉, 许爱华, 许彬, 等. 江西一次极端雷暴大风过程的中尺度特征与成因分析[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(2): 126-134.
- [17] 朱平, 俞小鼎. 青藏高原东北部一次罕见强对流天气的中小尺度系统特征分析[J]. 高原气象, 2019, 38(1): 1-13.
- [18] 章翠红, 夏茹娣, 王咏青. 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, 2018, 41(2): 207-219.
- [19] 侯建忠, 薛春芳, 陈小婷, 等. 西北地区东北部两次强降水的环流及云图对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2018, 12(5): 32-38.