

王瑾婷,牛乐田,刘勇,等. 陕西盛夏一次强雷暴天气成因分析[J]. 陕西气象,2020(4):1-8.

文章编号:1006-4354(2020)04-0001-08

陕西盛夏一次强雷暴天气成因分析

王瑾婷¹,牛乐田²,刘勇³,高萌¹,刘帆¹

(1. 咸阳市气象局,陕西咸阳 712000;2. 渭南市气象局,陕西渭南 714000;

3. 陕西省气象台,西安 710000)

摘要:利用常规观测资料、地面加密观测资料和 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 逐 6 h 再分析资料,对 2017 年 7 月 27—28 日发生在西北地区东部的一次以短时暴雨为主、局地伴有强风和冰雹的强雷暴天气特征及成因进行分析。结果表明:此次过程发生在副热带高压控制区内部;过程期间 500 hPa 无低值系统影响,中层无干冷空气入侵,低层东路冷空气持续侵入是此次强雷暴天气发生的主要触发条件;高低空急流耦合产生的次级环流提供了持续强劲的上升运动,低层充沛的水汽、较强的动力以及不稳定的大气层结等条件对强降水的发展起到促进作用;过程开始阶段,陕北短时暴雨落区与水汽通量大值区完全对应,而在过程后期关中及陕南东部的暴雨出现在水汽通量大值区西北侧约 30~40 km 风速辐合的区域;雷达图上强反射率因子区与短时暴雨以及冰雹发生位置相对应,阵风锋的出现以及径向速度上强风速核和气旋式辐合也促使短时强降水和大风天气加强。

关键词:强雷暴;副热带高压;东路冷空气;急流耦合

中图分类号:P458.1211;P435

文献标识码:A

雷暴发生在强烈的对流云中,其产生时伴有雷鸣和闪电,且有强烈的阵雨或暴雨,偶有下击暴流、冰雹和龙卷风发生^[1]。张敏锋等^[2]研究指出我国雷暴发生的次高值区包括了青藏高原与其邻近地区,研究该地区雷暴活动特征对于雷暴天气预测和防御指导具有一定意义。陶诗言^[3]、丁一汇^[4]在研究了暴雨和强对流天气后指出,强雷暴天气发生在低空暖湿气流、700 hPa 和 500 hPa 极为干燥的空气侵入雷暴区的条件下;同时,强对流的发展和地面雷暴大风的强弱与中层干冷空气有关。王金兰^[5]研究显示,由于副高控制下高层干冷空气的下沉作用促进了对流层在垂直方向的发展,低空热力正环流的生消对暴雨的加强及维持起着十分重要作用。张宏芳等^[6]对陕西省 76 个台站 1960—2010 年雷暴个例统计分析认为西太

平洋副热带高压、北半球极涡对陕西暖季雷暴空间模态有显著影响,国内许多气象专家对高原东侧发生的暴雨做了不少研究,盛夏暴雨大多与 500 hPa 短波槽的东移发展以及副热带高压迅速南退有密切关系,副高西北侧易于发生雷雨天气和局地性暴雨^[7-10]。同时,陕西气象工作者对盛夏陕西地区产生的强雷雨天气做了大量分析表明^[12-16],副热带高压控制,低层干侵入、良好的水汽辐合条件等均是该地产生强雷暴天气的主要原因。

从以往研究来看,对副高活动影响下的暴雨或强对流天气的研究颇多,主要包括副高活动对于大尺度环流形势改变而产生有利于强天气发生的影响系统,或者副高的维持所积累的水汽和能量在其边缘易于发生强天气,但对副高控制区内发生的强雷暴天气形成机理研究较少;因此,本文

收稿日期:2020-02-21

作者简介:王瑾婷(1992—),女,陕西宝鸡人,硕士,助工,从事短期天气预报及其研究。

通信作者:牛乐田(1980—),男,陕西西安人,学士,高工,从事短期天气预报研究。

基金项目:公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306006);中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-118);咸阳市重大科技专项(2017k01-35);咸阳市重点研发计划(2019k02-117)

对2017年7月27—28日在副高控制区内陕西境内发生的一次强雷暴天气过程进行综合分析,以期为副高控制区内陕西境内此类复杂强对流天气的预报预警工作提供一定的科学参考。

1 强雷暴天气实况

2017年7月27日下午至28日凌晨,陕西省自北向南出现了一次强雷雨、冰雹、大风天气过程。27日13时榆林靖边、铜川宜君出现短时暴雨,随后系统逐步南移;27日下午到傍晚影响关中地区;28日凌晨在陕南商洛地区结束。整个过程历时约20 h,全省共出现37站雷暴天气,主要位于陕北南部和关中,共出现116站暴雨。其中延安出现区域性暴雨,榆林、铜川、宝鸡、咸阳、西安、商洛、安康等地出现分散性暴雨。68站小时降雨量 ≥ 30 mm,其中28日06时商洛山阳张家湾小学1 h降雨量达70 mm。从各县防雷工作站收集的非测站资料发现,27日17时在宝鸡东南部与咸西西南部交界区域出现冰雹,岐山站冰雹直径为7 mm;岐山、眉县、兴平、蓝田、户县、渭南等地出现17.0~36.1 m/s的大风,其中咸阳武功27日17:25测站出现36.1 m/s瞬时大风,观测站周边农田、树木全部受损,高压线塔被大风吹倒。

整个过程呈现出历时长、跨越地区多、灾害种类多样的特点。影响系统移动发展自北向南,经历不同地区,带来的天气现象复杂多变,局地突发特征明显,预报预警难度较大,过程降水量及强天气如图1。

2 天气尺度和中尺度特征

2.1 天气学背景

7月27日08时(北京时,下同),500 hPa天气图(图2)上,欧亚大陆高纬度为两槽一脊形势,副热带高压(下简称副高)西伸到100°E,副高脊线位于30°N,内蒙古东胜—甘肃合作—青海都兰有西风槽,陕西处于副高控制之中。27日14—20时,副高不断西伸,脊线向西延伸约4个经度。此次过程500 hPa高空槽偏弱且始终未东移至陕西北上空,陕西始终处于副高控制之中。分析影响系统的垂直结构发现,700 hPa切变线位于500 hPa槽前西南暖湿气流中,与陕西相距较远,不是此次强雷暴天气的影响系统。27日08时延安和西安

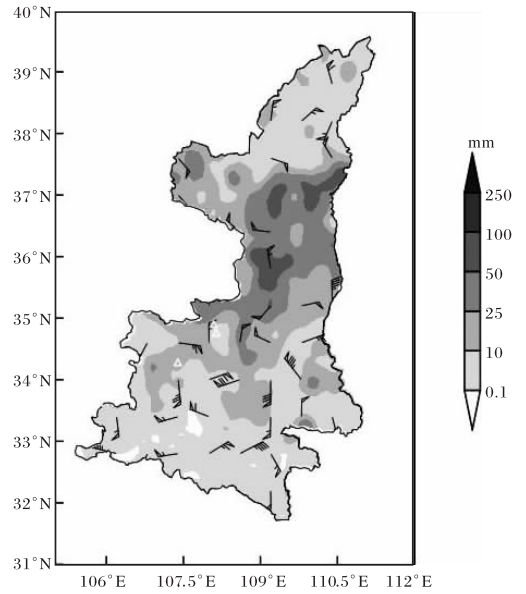


图1 2017-07-27—28陕西总降雨量,24 h内极大风速(风向杆,超过7级),冰雹发生区(白色三角标识)

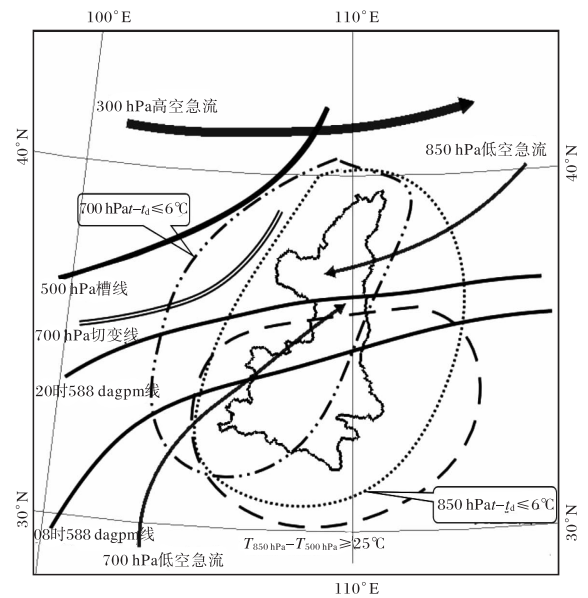


图2 2017-07-27陕西及其周边中尺度天气系统

500 hPa温度分别为 -1°C 和 0°C ,20时分别为 -3°C 和 -2°C ,均出现了下降;700 hPa延安和西安当日08时和20时温度没有变化,中层没有冷空气侵入。

300 hPa上,从甘肃中部—内蒙古中部至东北地区有一宽广的急流区,宽度超过500 km,急流核位于内蒙古—吉林—辽宁一带,最大风速出现在内蒙古通辽市,风速值达到56 m/s,陕西位于高空急流入口区右后侧辐散区。28日08时高空急流轴

东移且略有南压,其西侧南压约 3~4 个纬距,位于 38°N 附近。陕西的气象工作者研究认为,形势场上高空急流右后侧辐散区有利于陕西关中和陕南产生暴雨^[11],本文与该研究结果相一致。

850 hPa 上,内蒙古东部—河套—贝加尔湖有高压,高压南侧从东北经华北有大于 12 m/s 东北风吹向延安,关中中西部位于低空急流左前侧。27 日 20 时,偏东风加强且南压到关中地区,西安站偏东风达 16 m/s,延安站 12 h 温度由 20 °C 下降到 15 °C,有东北方向的干冷空气进入陕西关中,形成低空干冷空气入侵,这与以往提及的影响强对流天气发生的重要条件之一是中层干空气入侵是不同的^[3-4]。

地面上,27 日 08 时 35°N 以南,100°E 以东有低压稳定维持。其西北侧甘肃中部存在高压。27 日 17 时,宁夏附近形成一较大的高压中心,与其东南侧热低压形成南北对应状态。地面高压系统长时间维持,其右侧有偏东路冷空气不断侵入到陕西中南部。同时,偏东路冷空气对地面低压系统形成阻挡,有利于冷暖气流较长时间在该地区交汇。

此次强雷暴自北向南发展过程中,中层 500~700 hPa 的冷空气强度很弱,没有形成中层干空气侵入;过程前期低层 850 hPa 受副高控制,湿度条件较好,同时,陕北南部至陕南地区 850 hPa 与 500 hPa 温度差 ≥ 25 °C,大气不稳定性较高。后期随着东路冷空气持续不断向陕西地区输送,暖湿气流与低层冷空气在陕西中南部对峙,在其双方前沿,层结不稳定增强,也就是关中地区出现强雷暴并伴有大风、冰雹。

2.2 次级环流

利用陕西省 96 个自动气象站每小时的观测资料分析地面中尺度系统变化(图 3)。27 日 14 时,关中北部宜君出现一个水平尺度约为 150 km 的中尺度涡旋 D3,同时,在榆林南部、延安西北部也出现一个未完全闭合的中尺度涡旋 D2,在榆林西部靖边附近出现直径为 80 km 的中尺度涡旋 D1,靖边中山涧站 1 h 降雨量达 32.8 mm。三个中尺度涡旋引起多处局地强降水,从垂直速度沿 110°E 纬向垂直剖面(图略)可发现,次级环流的强上升支正好位于 35°N~38°N,也就是强天气此

时发生区域。

27 日 17 时,D3 向东南移动至关中东部。此时,渭南大荔、华州,西安阎良以及三桥阿房宫站均出现大风天气;而 D1 和 D2 基本维持原地不动,同时,在关中西部出现新的中尺度涡旋 D4,该涡旋的出现引起该区域内强天气发生。从实况资料来看,宝鸡凤县黄牛铺镇 1 h 降雨量达到 66.2 mm,17 时岐山站出现冰雹;关中多地出现 17~36.1 m/s 瞬时大风。20 时,300 hPa 高空急流轴东移,中尺度涡旋 D4 也随之东移至咸阳—西安,西安和咸阳多个监测站出现短时暴雨。23 时,850 hPa 从甘肃南部一带南下的西北风逐渐进入陕西关中—陕南,引导地面中尺度涡旋 D4 向东南方向移动至商洛,在商洛多个地方出现短时强降水,最大降雨量为商洛商州,1 h 累计降水量达到 61.5 mm。而后直至 28 日 08 时(图略),该中尺度涡旋在商洛一带稳定维持,给陕南商洛造成持续性强降水,08 时以后涡旋逐渐减弱并移出陕西,趋于消散。

此次强雷暴过程与高低空急流耦合引发的次级环流作用有着密切联系。850 hPa 东北急流带来的冷空气经华北平原向西经陕北北部到达陕甘宁交界,陕西延安及关中地区正好位于低空急流的左前侧辐合区、高空急流入口区右侧辐散区,低层辐合高层辐散的高低空环流配置非常有利于强对流天气的发生。在垂直速度沿 110°E 纬向垂直剖面图(图 4)上,27 日 08 时,在 300 hPa 高空急流轴(42°N 左右)入口区右侧(35°N~40°N)有强烈的上升气流,与 850 hPa 低空急流左前方的上升气流重合,最大速度在 400 hPa 附近为 -7.5×10^{-3} Pa/s。高空急流入口区左侧为下沉气流,在 42°N~47°N,最大速度在 500 hPa 附近为 30×10^{-3} Pa/s。20 时,在 300 hPa 上升气流速度下降明显,850 hPa 附近出现多个速度小于 -7.5×10^{-3} Pa/s 的上升气流,位置在 36°N 以南,此时,高空急流的动量下传明显,使得地面涡旋不断发展并移动。总体来看,陕西上空中低层均受副高外围西南气流控制,高空急流的出现造成其入口区内抽吸作用明显,同时还使得干冷空气平流发展并增强,加上低空急流引发的暖湿气流输送,这样的高低空配置加强了大气的潜在不稳定性,从而激发了次

级环流的产生,次级环流引起的强上升气流触发不稳定能量释放,控制陕西南部及关中地区,为强对流风暴的发生提供良好的动力条件。

结合以上分析结果有以下发现。(1)中尺度涡旋 D1、D2 在原地稳定发展维持,此时次级环流引起的强上升支使得不稳定能量在原地释放,引起

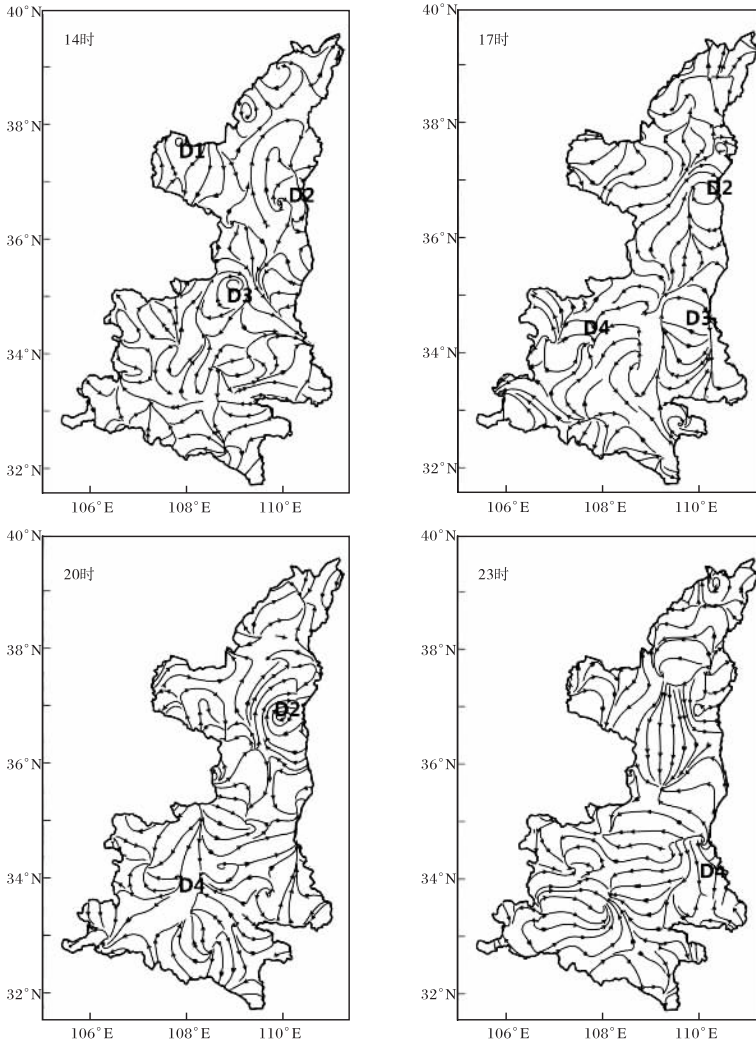


图3 2017-07-27 地面中尺度涡旋的发展演变过程(流线为地面风场)

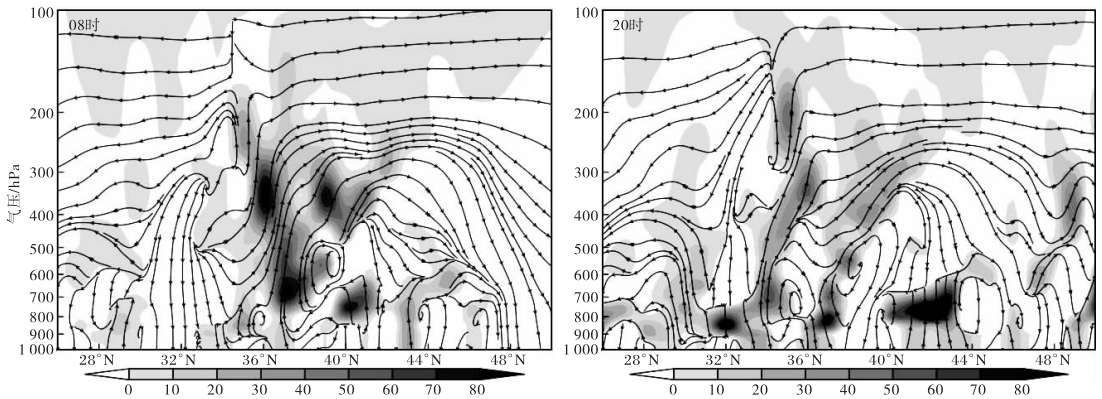


图4 2017-07-27T08-20 垂直速度沿 110°E 纬向垂直剖面图(垂直速度 $\omega \times (-100)$ (阴影区,单位为 10^{-2} Pa/s); $u-\omega$ 风场(流线))

多地产生局地短时强降水。(2)中尺度涡旋 D3 和 D4 的移动方向变化可能与高空急流产生的次级环流有着直接的联系。过程初期,低层东北气流明显,但 D3 和 D4 移动方向并没有指向西南,而是向东南方向移动影响西安咸阳交界区域,这正是由低层冷高压不断南压与高压后侧偏北明显加强引起的;到了过程后期,高空急流区风速下降,此时低层出现多个上升气流大值区,且位置出现在 36°N 以南,两个涡旋 D3 和 D4 明显移往陕南东部。显然,这种现象与高空急流的移动方向引起的动量下传使其引发的次级环流移动方向变化明显有关。(3)由于高低空急流变化引起次级环流变化,导致地面中尺度涡旋发展、扩散,并且多股强劲的上升气流持续维持,为强雷暴的产生提供了良好的动力基础。

3 物理量条件

3.1 不稳定能量

从延安、西安不稳定指数来看,08 时:延安站,K 指数为 39°C ,SI 指数为 -0.13°C ,对流有效位能(CAPE 值)为 $1\ 356.5\ \text{J/kg}$, 0°C 层高度为 $5.6\ \text{km}$,不稳定能量充沛,有利于强对流天气产生;同时,西安站的 K 指数为 37°C ,SI 指数为 -1°C ,CAPE 值为 $629\ \text{J/kg}$, 0°C 层高度为 $5.9\ \text{km}$,不稳定能量积聚,为后期关中地区的强天气的发生提供有利条件。20 时:延安站 K 指数下降为 30°C ,SI 指数上升至 4.91°C ,CAPE 值也因为前期能量的释放下降到 $1.8\ \text{J/kg}$;西安站,K 指数上升至 47°C ,SI 指数下降至 -5.57°C ,但此时 CAPE 值明显加大,为 $2\ 562.5\ \text{J/kg}$ 。受副高控制,关中地区暖湿条件充足,能量条件积聚,有了动力条件的触发,强对流天气迅速加剧,使得关中以及陕南多地产生强雷雨天气。

3.2 温度平流

温度平流不仅会造成大气层结的不稳定,同时也会引发垂直运动的产生。分析 $850\ \text{hPa}$ 温度平流可以发现:27 日 08 时(图 5a)榆林中部有冷平流,中心强度 $-25\times 10^{-5}\ ^{\circ}\text{C/s}$,宁夏存在较为明显的暖平流,中心强度 $20\times 10^{-5}\ ^{\circ}\text{C/s}$,冷、暖平流中心近似椭圆状,在偏东风影响下,关中东部出现弱的冷平流;14 时(图 5b)冷平流区域扩大,南移

到关中东部地区;20 时(图 5c)冷平流中心南移到陕南东部,中心值略有下降为 $-18\times 10^{-5}\ ^{\circ}\text{C/s}$,位于宁夏附近的暖平流中心南移且范围扩大,在关中地区水平方向出现冷、暖、冷中心配置。可见冷暖气团的交汇,导致强烈的不稳定条件加剧,对应此时关中出現强雷暴并伴有冰雹和瞬时大风。从温度平流沿 108°E 的纬向垂直剖面可以发现,27 日 14 时(图 5d), $950\sim 700\ \text{hPa}$ 为暖平流,其中心强度达到 $30\times 10^{-5}\ ^{\circ}\text{C/s}$, $600\sim 500\ \text{hPa}$ 为冷平流,有 $-20\times 10^{-5}\ ^{\circ}\text{C/s}$ 的冷平流中心, $400\ \text{hPa}$ 以上则为暖中心。在关中地区强天气发生区垂直方向上有“暖、冷、暖”配置,大气层结不稳定增强,具备了强天气发生的有利条件。

3.3 涡度、散度场

27 日 08 时,涡度场(图略)上, $850\sim 700\ \text{hPa}$ 陕西北部有正涡度大值区,强度达 $10\times 10^{-5}\ \text{s}^{-1}$,而在 $500\ \text{hPa}$ 有强负涡度区。随着高压南移,涡度大值中心自北向南不断延伸;27 日 20 时, $850\sim 300\ \text{hPa}$ 陕西关中以及陕南上空也出现正涡度区,并有多涡度中心,中心值超过 $6\times 10^{-5}\ \text{s}^{-1}$,该大值区维持至 28 日 02 时,与降水中心呈现出相同的分布状态。散度场(图略)上, $850\sim 700\ \text{hPa}$ 陕西北部上空辐散值低于 $-0.4\times 10^{-5}\ \text{s}^{-1}$,存在辐合区,而 $500\ \text{hPa}$ 有大范围的强辐散区,中心值为 $6\times 10^{-5}\ \text{s}^{-1}$,此时降水主要出现在陕北榆林、延安一带。从 27 日 14 时辐合区范围逐渐扩大,且全省均出现了辐合区,强度也有所增大,对应的降水强度和范围也随之增强。27 日 20 时,低层辐合中心值达到最大,绝对值超过了 $12\times 10^{-5}\ \text{s}^{-1}$,此时对应关中一带的降水也达到峰值,之后,随着辐合区南移且中心值减弱,强降水雨带也随之南移至陕南一带。

3.4 水汽条件

分析 $850\ \text{hPa}$ 水汽通量散度以及风场可知:27 日 08 时(图 6a),陕北地区出现一致的偏东风,从东北—华北—陕北的偏东气流携带冷湿空气逐渐在陕北北部—宁夏中部积聚,榆林市区和佳县存在水汽通量大值区,中心值为 $15\ \text{g}/(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$;14 时(图 6b),水汽输送带范围逐渐扩大,中心略南移,最大强度达到 $16\ \text{g}/(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$,位于榆林靖边,该地区中山涧雨量测站 13 时小时雨量达

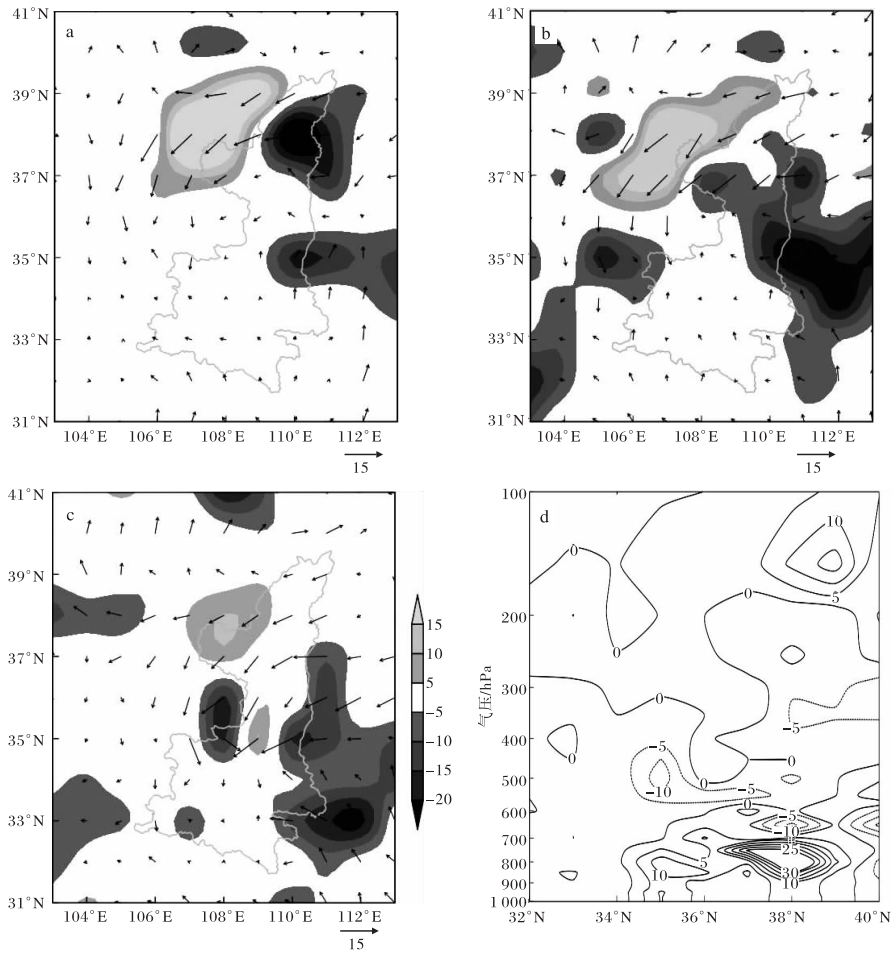


图5 2017-07-27 850 hPa 温度平流(阴影区,单位为 $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C/s}$)和风场(矢量箭头,单位 m/s)
(a 08 时, b 14 时, c 20 时)及温度平流沿 108°E 纬向垂直剖面图(d 14 时;单位为 $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C/s}$)

32.4 mm,随着高压南移加强,其南侧偏东风影响到关中地区;20时(图6c),陕北南部以及关中地区处于水汽输送带中,水汽通量超过 $17 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$,大值中心位于渭南潼关和华阴,此时西安及咸阳东北方向个别雨量测站出现强降水,其中西安六村堡雨量监测站19时小时降雨量为65.3 mm,此后高压继续南压;28日02时(图6d),陕南东部地区逐渐转为东南风,将南方暖湿空气不断地输送至渭南南部及商洛地区,水汽通量大值中心位于商洛商南县,中心值达 $19 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$,此时商洛柞水营盘镇28日02时小时降雨量达47 mm。不难发现850 hPa高压系统不断南压,其右侧风场自北向南移动过程中不断变化,为影响系统长时间持续提供充足的水汽和动力供给。综合分析暴雨落区、水汽通量和全风速的位置关系,可以发现,陕北强降水开始阶段,水汽通量大

值区与短时暴雨落区对应位置近乎一致;出现在关中及陕南东部的短时暴雨并不是出现在水汽通量大值区内,而是出现在水汽通量大值区西北侧约30~40 km,但有风速辐合的区域。因此,后期降水的产生可能是由于前期能量积聚,低层风速辐合大触发不稳定释放,加之水汽输送,动力和水汽条件综合影响使得短时暴雨产生。

4 雷达回波特征

此次强雷暴过程在宝鸡、咸阳交界地区发生了冰雹及大风。从西安多普勒雷达基本反射率因子图上可以发现,27日16:00,在宝鸡的西部有多个强回波单体生成,强回波大多呈块状结构,面积较小,随后回波略向东移且面积逐渐扩大,回波强度为40~50 dBz,上述地区出现短时暴雨和大风。17:20(图7a),强回波继续发展仍呈块状结构,位于凤翔、麟游、岐山、陈仓之间,回波强度增加

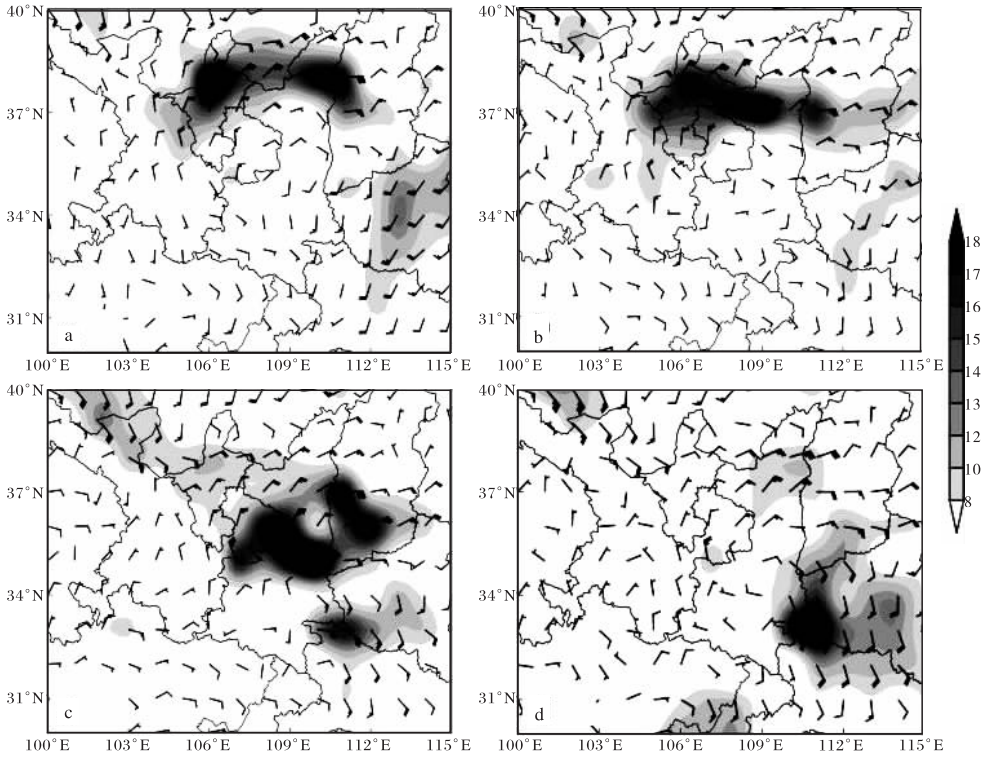


图6 2017-07-27—28 850 hPa 风场和水汽通量(阴影区,单位为 $g/(cm \cdot hPa \cdot s)$;
a 08 时, b 14 时, c 20 时, d 28 日 02 时)

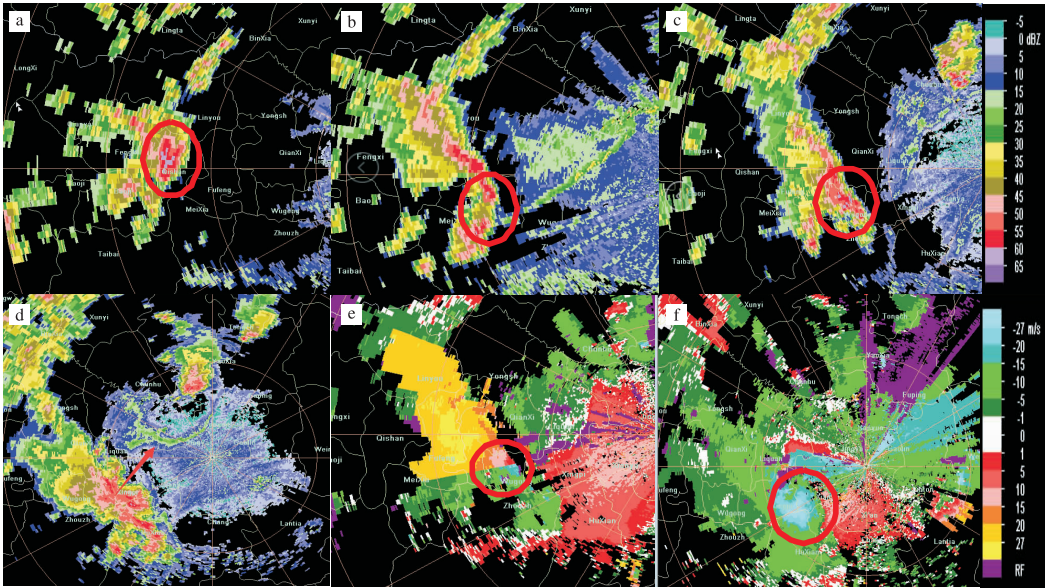


图7 2017-07-27 西安雷达基本反射率因子(仰角为 1.5° ; a 17:20, b 17:54, c 18:28, d 19:03)
以及径向速度(仰角为 0.5° ; e 18:28, f 19:03)

到 $50 \sim 60$ dBz,最强中心达 65 dBz,对流云正好位于岐山(图中红圈标注),且维持时间超过 10 min,此时岐山观测到冰雹发生。强回波缓慢东移,在其移动前沿处眉县、扶风以咸阳市具有块状回波单体不断嵌入,整个回波由块状结构逐渐

转为线状。17:54(图 7b),回波发展为清晰的线状“弓形回波”结构,弓形回波前端下沉冷空气向东扩散,且出现断裂口(图中红圈标注)。18:28(图 7c)弓状回波断裂处与前方暖湿气流交汇,此时回波加强,武功境内雷达反射率因子大于 65

dBz(图中红圈标注),对应径向速度(图7e)出现气旋式辐合,在咸阳乾县、礼泉、永寿、淳化等地出现了短时大风,其中武功瞬时大风达36.1 m/s。与此同时,铜川北部也产生了块状对流云,强度不断发展,在其前侧出现窄带回波,长度增大达到70 km以上,形成明显的阵风锋。19:03(图7d),阵风锋前沿通过铜川到达咸阳东北部(图中红色箭头标注),同时,从西边东移的线状回波北侧减弱,南部不断有新生单体与之合并,加上阵风锋影响,在咸阳南部和西安中西部地区出现径向速度大于27 m/s的大风速核(图7f红圈标注),即有大风和短时强降水天气发生。

5 结论

(1)此次雷暴天气过程主要发生在副高西伸加强的过程中,高原以东地区无明显的短波槽或低涡东移,中层(500 hPa和700 hPa)并没有强冷空气的入侵,低层(850 hPa和地面)偏东路冷空气持续不断的侵入是强雷暴天气的主要触发条件。

(2)强雷暴主要发生于低空急流的左前侧,高空急流入口区右后侧。次级环流为强天气的发生提供了持续强劲的上升运动,低层高压底部不断有冷空气侵入,引起了地面中尺度涡旋发生,其移动、发展与强天气的发生有很好的对应关系。

(3)850 hPa温度平流场冷中心移动、发展路径与强天气的发生区域有很好的对应关系,在关中中西部冰雹、大风发生之前,该区域垂直方向上温度分布呈现“暖、冷、暖”结构,对此类局地灾害性高的天气具有一定的指示意义。

(4)综合暴雨落区以及水汽通量和全风速的位置关系,陕北榆林强降水开始阶段,水汽通量大值区与短时暴雨落区对应近乎一致;降水开始后,出现在关中及陕南东部的短时暴雨并不是出现在水汽通量大值区内,而是出现在水汽通量大值区西北侧约30~40 km风速辐合的区域。

(5)此次强雷暴天气雷达图上,大于50 dBz的反射率因子区域与短时暴雨以及冰雹发生位置有很好的对应关系,阵风锋的出现以及径向速度上大于27 m/s的强风速核和气旋式辐合也促使

短时强降水和大风天气加强。

参考文献:

- [1] 马明,吕伟涛,张义军,等.我国雷电灾害及相关因素分析[J].地球科学进展,2008,23(8):856-865.
- [2] 张敏锋,冯霞.我国雷暴天气的气候特征[J].热带气象学报,1998,4(2):61-67.
- [3] 陶诗言.暴雨和强对流天气的研究[J].大气科学,1979,3(3):227-238.
- [4] 丁一汇.我国飚线发生条件的研究[J].大气科学,1982,6(1):18-27.
- [5] 王金兰,寿绍文,张广周,等.一次副高控制下暴雨过程的数值模拟和诊断分析[J].河南师范大学学报(自然科学版),2009,37(3):159-162.
- [6] 张宏芳,董佩明,沈桐立.陕西暖季雷暴的主模态及其可能的影响机制[J].大气科学,2000,24(1):47-57.
- [7] 张晓露,李照荣,周筠珺,等.西北地区东部夏季一次典型暴雨的分析和数值模拟[J].干旱气象,2015,33(4):616-625.
- [8] 巩敏莹,靳英燕.西北区东部一次雷暴天气过程的诊断分析[J].高原气象,2009,28(1):203-208.
- [9] 井宇,陈闯,屈丽玮,等.副高边缘西安地区一次短时暴雨分析[J].陕西气象,2018(4):7-12.
- [10] 顾清源,肖逸祥,黄楚惠,等.低空急流在副高西北侧连续性暴雨中的触发作用[J].气象,2009,35(4):59-67.
- [11] 杜继稳,侯明全,梁生俊,等.陕西省短期天气预报技术手册[M].北京:气象出版社,2007:49-60.
- [12] 刘嘉慧敏,马晓华,黄少妮,等.陕西中南部初夏和盛夏暴雨过程对比分析[J].陕西气象,2019(4):7-12.
- [13] 高萌,刘帆,王瑾婷,等.关中一次大暴雨天气过程成因分析及陕西智能网格预报检验[J].陕西气象,2019(5):28-34.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.