

高宇星,王瑞英,杜萌萌,等. 西安一次突发性短时暴雨环境条件及成因分析[J]. 陕西气象,2023(6):26-32.

文章编号:1006-4354(2023)06-0026-07

西安一次突发性短时暴雨环境条件及成因分析

高宇星^{1,2,3},王瑞英¹,杜萌萌¹,黄 蕾¹,张雅斌⁴,翟 园^{1,3}

(1. 西安市气象局,西安 710016;2. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院,西安 710048;

3. 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 710016;

4. 陕西省气象信息中心,西安 710014)

摘 要:利用常规气象观测资料、长安站风廓线雷达和 NECP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料等,对 2016 年 7 月 24 日西安短时暴雨的环流形势及中尺度特征进行分析。结果表明:此次暴雨突发性强、过程雨量大、降水时段集中、对流性明显,主要受中低层快速东移南压的冷式切变线和地面低压等系统影响,副热带高压外围西南暖湿气流为暴雨天气建立了稳定的水汽通道;层结“上干下湿”、“上冷下暖”,高温、高湿、高能的环境非常有利于不稳定能量集聚与释放;造成西安地区短时暴雨的对流云团具有初生强度大、发生发展迅速等特点,当关中地区椭圆形对流云团与陕南南部的中 β 对流云团逐渐合并,使对流云团发展加强,云顶亮温(black body temperature, TBB)大值区主要位于西安地区,TBB 中心值降至 -70°C ,TBB 中心附近出现 66.6 mm/h 最大雨强;秦岭北麓山区反射率因子超过 55 dBz 的分散孤立对流单体迅速发展合并,易引发暴雨灾害,需加强雷达资料监测研判;强降水发生前,风廓线雷达的低空风速明显增大,形成低空急流,冷暖平流加强层结不稳定,配合超低空急流产生短时强降水。

关键词:短时暴雨;环境条件;暴雨成因;风廓线雷达

中图分类号:P458.121.1

文献标识码:A

暴雨的发生是由多种尺度天气系统相互作用影响的结果,中尺度天气系统发展是造成暴雨天气的主要原因。短时暴雨由于历时短、突发性强,常规观测手段难以捕捉,中尺度系统对降水时段、强度及落区的影响一直是气象工作者研究的重点和难点^[1]。陶诗言^[2]指出,中小尺度环流系统直接影响暴雨天气的发生,大尺度环流形势间接提供有利条件。丁一汇等^[3]对 1991 年特大暴雨的低空急流进行分析,研究得出江淮梅雨期低空急流与暴雨强度有关。李国平等^[4]回顾了西南涡对暴雨影响的研究以及取得的最新成果,重点通过新型资料探究西南涡的中尺度结构变化特征。高维英^[5]甄选出 2010—2020 年陕西省弱天气影响下的暖区暴雨过程,发现暖区暴雨具有异常的高

能、高湿条件,有明显的中尺度特征,易发生在弱垂直风切变中。

西安位于秦岭山区北麓段,河流和峪口多,地形坡度大,并处于青藏高原东侧下风坡,加之受关中城市群下垫面影响等因素,是滑坡、泥石流和中小河流洪水等暴雨次生灾害的高风险区^[6]。近年来关中地区暴雨也受到了国内专家学者的广泛关注。张雅斌等^[7]认为关中盛夏突发性暴雨有利的动力触发条件是地面切变线、近地层显著东南风及不稳定扰动增大。张弘等^[8]和刘勇等^[9]分析了关中突发性大暴雨的特征,暴雨主要是受东风急流以及西风带共同作用产生。毕旭等^[10]通过分析秦岭北麓暴雨特征得出关中处于西太平洋副热带高压(以下简称副高)边缘时,上干冷下暖湿的

收稿日期:2022-12-16

作者简介:高宇星(1992—),女,汉族,陕西榆林人,硕士,工程师,主要从事短期天气预报及其研究。

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开放基金课题(2022G-28)

不稳定层结和超绝热状态,为暴雨提供了有利的发展环境。随着探测手段的发展,应用新型观测资料可对暴雨天气发生的潜势提前做出估计和判断。风廓线雷达利用大气湍流对电磁波的散射作用来探测大气,连续获得测站高分辨率的风场变化特征^[11],可用于研究常规探测手段难以捕捉的中小尺度系统。相对于传统的测风手段,风廓线雷达能够提供高精度、高时空分辨率的风廓线数据,直观地反映各类天气现象,显示出锋面、气旋和高空槽等天气系统的演变过程^[12]。2016年7月24日,西安出现了一次突发性强、降水时段集中、过程雨量大的极端降水事件,并引发城市内涝,造成人民生命财产严重损失。此次过程引起气象专家和学者广泛关注,之后也取得不少研究成果^[13-15]。利用卫星云图、风廓线雷达和多普勒天气雷达等高时空分辨率资料,结合常规探测资料,通过对西安此次短时暴雨天气过程的中尺度特征分析,寻找预报着眼点,进一步提高暴雨预警服务水平。

1 暴雨实况

2016年7月24日晚,西安市出现雨强大于50 mm/h的短历时暴雨过程(以下简称“7·24”

暴雨),最强降雨时段为19—22时,强降雨中心主要位于西安主城区。24日18时至25日08时全市有29个气象观测点降雨量大于50 mm,3站降雨量大于100 mm。

图1给出了“7·24”暴雨期间西安降水实况、极大风分布以及强降雨周边区域站的逐小时雨量。从空间分布来看,暴雨区主要位于西安市城区及其东北部地区,极大风主要出现在城区及其北部区县。从时间演变来看,此次暴雨天气具有突发性强、降雨强度大的特点。西安小寨站19—20时1 h降雨量从1.2 mm迅速增大到56.8 mm,20—22时累积降雨量达115.6 mm;电子科大站20—22时累积降雨量为112.8 mm,突破了西安城区1951年以来24 h最大降雨量记录(1991年7月28日西安城区24小时降雨量为110.7 mm);临潼交口站21时降雨量开始突增,22时雨强达到62 mm/h,23时迅速回落,历时短,雨量大,造成了严重的城区内涝。强降雨期间伴有大风天气,极大风主要集中在20—21时,西安草滩站极大风速33.3 m/s(出现在20:07),泾河站18.6 m/s(出现在20:16)。

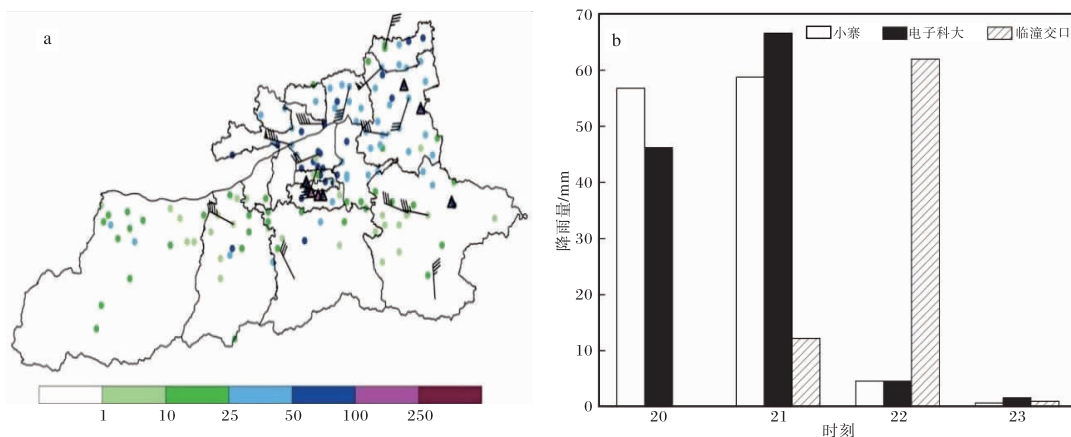


图1 2016-07-24 西安地区暴雨过程降雨量(单位为 mm)实况和24 h内极大风分布(a;△代表过程最大小时降雨量大于50 mm的站;审图号为GS(2020)4619号)与暴雨中心逐小时降雨量(b)

2 环境条件

2.1 大尺度环流背景

24日08时200 hPa天气图上(图略),南压高压强盛,欧亚中高纬度受西风急流控制,西北地区东部受反气旋环流影响,有利于中低层上升运

动。500 hPa上欧亚中高纬地区维持两槽一脊型,西太平洋副热带高压控制大陆东部,588 dagpm线西伸北抬至38°N,105°E附近,贝加尔湖东北方向有东北冷涡显著发展,关中处于冷涡底部低槽和副高西北侧之间的西南气流中。700 hPa

上,关中上游河套至陇南一带有切变线存在,西安为 8 m/s 西南风,比湿为 10 g/kg。850 hPa 上,切变线位于陕西北部至关中西部一带,西安为 8 m/s 偏南风,比湿 15 g/kg。20 时(图 2),500 hPa 上,副高略有增强、西伸北抬,东北冷涡略有东移,陕西上空的高度场较 08 时略有北抬,850 hPa 切变线东移南压至关中西部至陕南地区。

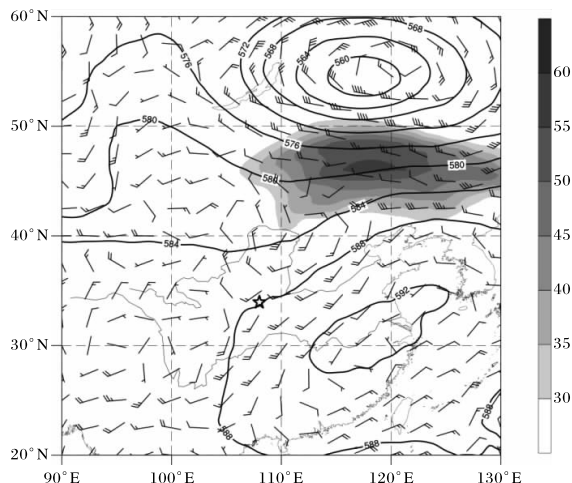


图2 2016-07-24T20 200 hPa 急流(阴影, >30 m/s)、500 hPa 高度(等值线,单位为 dagpm)和 700 hPa 风场(风羽,单位为 m/s)环流形势(☆为西安所在位置)

海平面气压场上(图略),24 日 08 时西安位于低压前部,17 时低压东移,陕西周边受大范围热低压控制,西安转为受低压后部偏北气流影响。

地面风场上,24 日 14 时东北风与西南风形成显著辐合区;20 时,切变辐合区进一步发展加强,西安地区有明显的风速辐合中心,地面辐合线造成的垂直上升运动有利于对流的触发。

综上所述,短波槽东移和副高外围西南气流共同影响,配合低层明显的切变辐合,为暴雨的发生提供了较好的动力抬升和暖湿条件,高空急流使关中空不稳定层结加强,为“7·24”暴雨提供了有利环境条件。

2.2 水汽与热力不稳定条件

24 日 08 时,从图 3a 中可以看到,水汽通量辐合区位于河套至陇南一带,沿着切变形成水汽辐合区,随着冷空气南下,切变线东移;14 时(图略),强辐合区移至陕西北部;20 时(图 3b)低层切变线位于关中地区,冷暖气流交汇形成水汽辐合中心,水汽通量辐合区与对流活动最强区域相吻合,此时强降水区主要位于西安地区。副高东北—西南向分布,引导西南暖湿气流输送水汽,此次暴雨过程水汽主要来源于孟加拉湾,快速发展的水汽输送及水汽辐合为暴雨发生提供有利的水汽积聚条件^[13]。之后,整层水汽辐合减小,水汽通量辐合区移出陕西,降水明显减弱。

从表 1 中可见,7 月 24 日 08 时,K 指数、沙氏指数 SI 和对流有效位能 CAPE 分别为 36°C 、 -0.36°C 和 $1\,887.7\text{ J/kg}$, 存在对流抑制能量(CIN)。

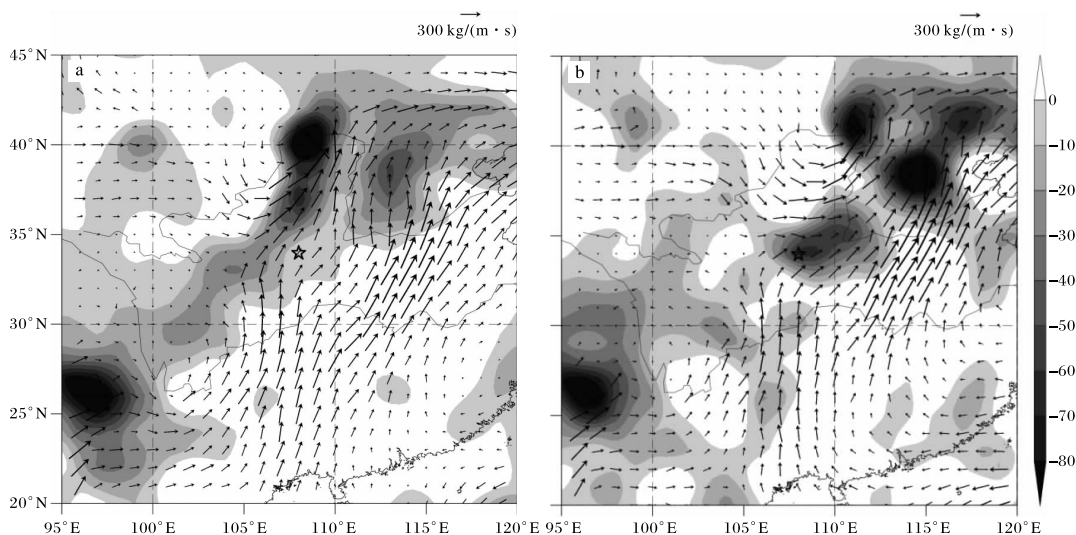


图3 2016-07-24 整层水汽通量(箭头,单位为 $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$)和水汽通量散度(阴影,单位为 $10^{-3}\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)(a 08 时,b 20 时;☆为西安所在位置)

14 时,对流抑制能量消失,对流有效位能 CAPE 达到 3 055.3 J/kg。受持续性高温和午后地面加热作用,中尺度扰动和局地地形等触发影响,不稳定能量剧烈释放,形成强对流天气。20 时,短时暴雨仍未结束,不稳定能量未释放完,CAPE 为 1 431.4 J/kg。24 日 08 时泾河探空站温度对数压力图(图略),600 hPa 以下为深厚湿层,400 hPa 以下风向随高度顺时针旋转,有暖平流,300~400 hPa 有冷平流,干冷空气侵入下滑,不稳定能量增大;14 时温度对数压力图(图 4),湿湿层结曲线呈“上干下湿”的“喇叭口”形状,整层位势不稳定增大,0℃层高度达到 6 km,抬升凝结高度约 2 km,暖云层较厚,0~6 km 垂直风切变较弱,降水效率高。

表 1 2016-07-24 泾河探空站探空指数

指数	08 时	14 时	20 时
CAPE/(J/kg)	1 888.7	3 055.3	1 432.7
SI/℃	-0.36	2.34	-3.35
0℃高度/m	5 686	5 706	5 536.25
K/℃	36	32	44
-20℃高度/m	8 761.3	9 018.6	9 115.4

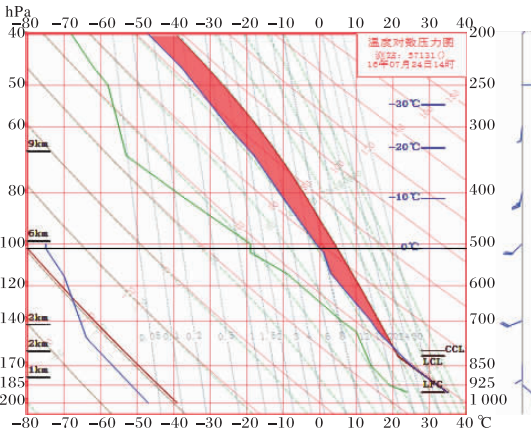


图 4 2016-07-24T14 泾河探空站温度对数压力图

3 中尺度特征分析

3.1 FY-2F 卫星对中尺度对流云团的识别

24 日 18 时(图 5a),陕北—关中有一松散的中尺度对流云团,TBB 中心达-65℃,同时陕南南部出现水平尺度大于 100 km 的弓状对流云团,西安及以东地区对流云团尚未明显发展。19 时(图 5b),位于陕北—关中的对流云团发展东移至关中中西部,TBB<-65℃区域扩大,对流云团快速发展,冷云盖的面积不断增大,其周边开始出现强降水。20 时(图 5c),关中中西部对流云团中心东移南压,边界形状从不规则形状逐渐向团

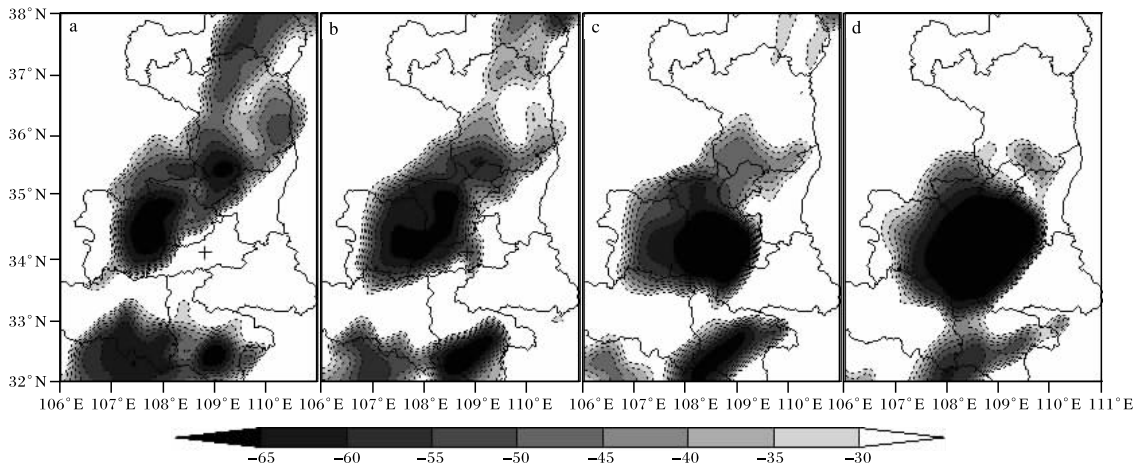


图 5 2016-07-24 FY-2F 卫星 TBB(阴影,单位为℃;“+”为西安;a 18 时,b 19 时,c 20 时,d 21 时;审图号为 GS(2020)4619 号)分布

状结构发展,演变为结构密实的近椭圆形,云团发展成熟。21 时(图 5d),关中地区椭圆形对流云团与陕南南部的中β对流云团逐渐合并,TBB 大值区主要位于西安地区,TBB 中心云顶亮温降至

-70℃,位于 TBB 中心的西安城区出现 66.0 mm/h 的过程最大雨强。22—23 时,关中和陕南对流云团完全合并,维持东移发展,TBB 中心<-70℃的区域移至西安东部局地,临潼出现 62.0 mm/h

的雨强。23 时后云顶亮温逐渐升高,对流云团结构进一步松散,TBB 中心 $<-65^{\circ}\text{C}$ 的面积迅速缩小,团状结构消失,降水减弱。

3.2 多普勒雷达对中尺度系统的识别

图 6 为“7·24”暴雨期间泾河站多普勒天气雷达组合反射率因子产品。18:28(6a),秦岭北麓山区、咸阳一带有局地的积云降水回波发展,35 dBz 以上回波对应的中尺度系统向西安城区移近。19:42(6b),分散的对流单体增强、合并,回波范围明显增大,西北方向咸阳附近出现反射率

因子 50 dBz 以上,水平尺度大于 100 km 的中尺度强对流回波带,回波中心强度在 55 dBz 以上,对应区域开始出现短时暴雨。20—21 时,在强对流回波整体东移过程中,有新发展的对流单体并入,回波范围进一步增大,主体先后经过西安城区、高陵和临潼,部分地方出现强降水。23 时,西安回波强度减弱,降水明显减小。

卫星云图上对流云团和雷达图上回波移动发展趋势基本一致。

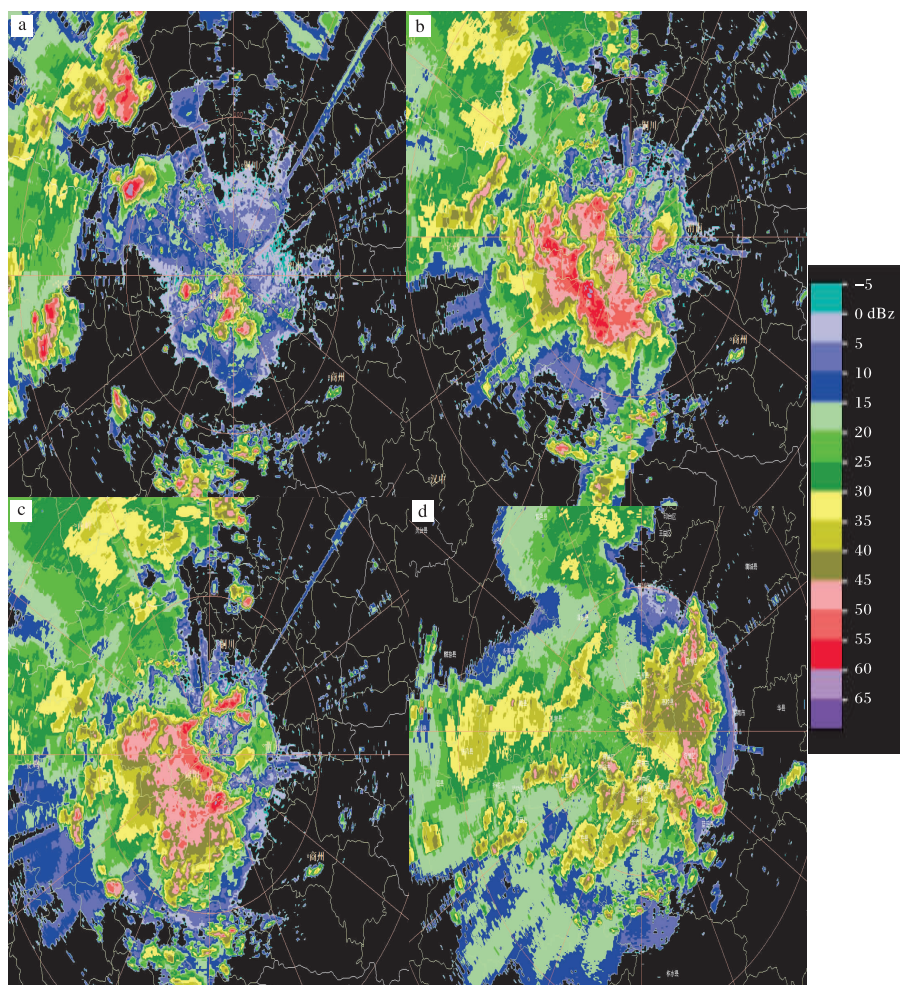


图 6 2016-07-24 西安泾河多普勒雷达组合反射率因子
(单位为 dBz;a 18:28,b 19:42,c 20:00,d 21:03)

19:31(图略),径向速度图上西安以北以东北风为主,西安南侧有偏南风发展,并在西安附近形成辐合。20:11(7a),低层风向风速有明显变化,0~50 km 之间等距离圈上出现偏西风急流,强度

约为 18 m/s,地面风场实况出现大风天气。20:29(7b)偏西风急流加强,强度达到 20 m/s。21:20(图略)速度图西安附近为辐散区,降水迅速减弱。

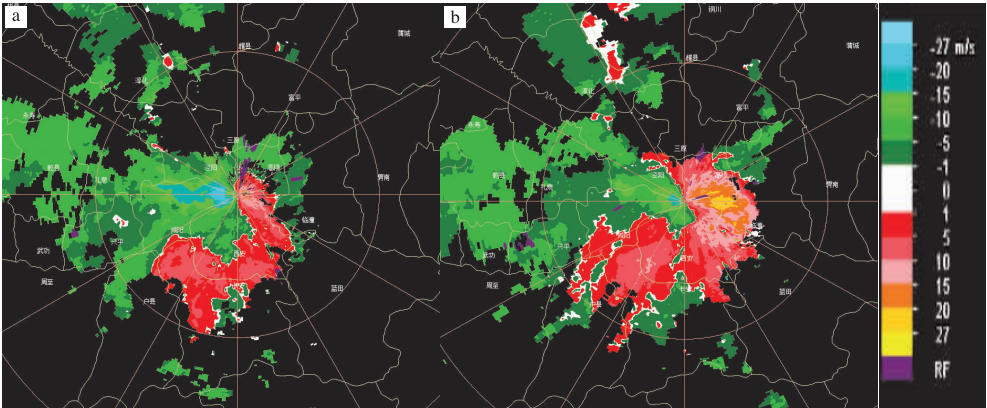


图7 2016-07-24 西安泾河雷达径向速度场(单位为 m/s;a 20:11,b 20:29)

3.3 风廓线雷达对低空急流的识别

西安 G-II 型固定式边界层风廓线雷达安装在西安市长安区气象观测站^[16],位于秦岭山下 12 km 处,强降雨区距离观测站 10 km,因此其探测资料对强降雨的代表性较好。

局地强降水与边界层低空急流存在正反馈作用^[17],超低空急流的形成加剧急流前侧风速辐合,造成降水增强^[18];同时,强降水造成迅速降温,热力强迫导致边界层气流加速。图 8 给出风廓线雷达观测的 7 月 24 日西安市长安区上空水平风向风速的变化图。降水即将开始前,伴随空

气中水汽含量逐渐增大,低层风场扰动逐渐向高空扩展,19:30—20:00,0~1 km 的低空风速明显增大,形成超低空急流,最大风速达到 30 m/s。距离风廓线雷达 14 km 的喂子坪站地面风场实况出现 12.1 m/s 极大风(19:24)。风向风速的不连续性非常明显,强的风垂直切变为降水的发生提供了触发机制。此次长安站主要降水时段出现在 20—22 时,20:30 前后为长安区降雨最强时段,21 时降雨量达 34.8 mm/h。21:30 后急流逐渐减弱,强降雨区逐渐东移。02 时整层转为以偏北气流为主,长安站降水结束。

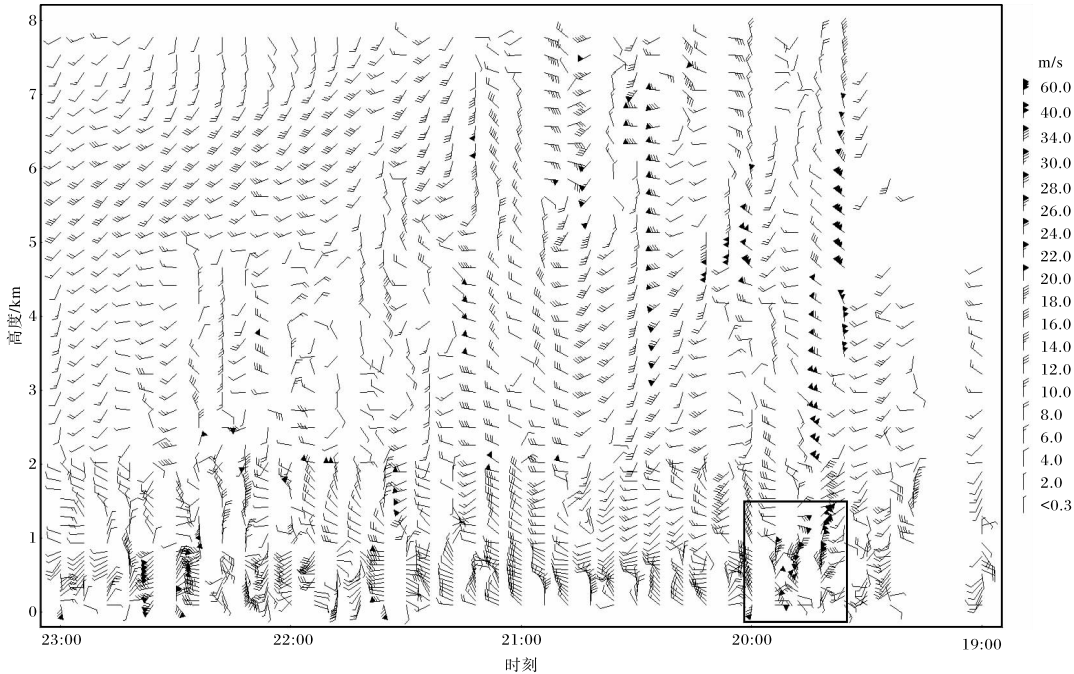


图8 2016-07-24 长安站风廓线雷达水平风时间-高度分布图(方框内为超低空急流)

4 结论与讨论

利用常规气象观测资料、长安站风廓线雷达和 NECP $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料等,对 2016 年 7 月 24 日西安短时暴雨的环流形势及中尺度特征进行分析,主要结论如下。

(1)“7·24”西安暴雨具有突发性强、过程雨量大、降水时段集中、对流性明显的特点。暴雨期间,中低层切变线和地面低压系统东移南压,东北冷涡底部冷平流导致关中上空不稳定层结加强,副热带高压外围西南暖湿气流,层结“上干下湿”、“上冷下暖”为“7·24”大暴雨提供了有利环境条件。

(2)温湿层结曲线呈“上干下湿”的“喇叭口”形状,上部干层明显,下部饱和湿层更加深厚,高温、高湿、高能的环境非常有利于不稳定能量集聚与释放。

(3)暴雨期间,关中地区出现了发展成熟、结构密实的近椭圆形中尺度对流云团,当 TBB 降至 -70°C ,TBB 中心附近出现 66.6 mm/h 最大雨强。秦岭北麓山区反射率超过 55 dBz 的分散孤立对流单体迅速发展合并,易引发暴雨灾害,需加强雷达资料监测研判。

(4)从风廓线雷达可以看出,强降水即将开始前,低空风速明显增大,形成超低空急流,风向风速的不连续性非常明显,为降水的发生提供了触发机制。

参考文献:

- [1] 章丽娜,王秀明,熊秋芬,等. “6.23”北京对流暴雨中尺度环境时空演变特征及影响因子分析[J]. 暴雨灾害,2014,33(1):1-9.
- [2] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京:科学出版社,1998:29-33.
- [3] 丁一汇. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究[M]. 北京:气象出版社,1993:69-130.
- [4] 李国平,陈佳. 西南涡及其暴雨研究新进展[J]. 暴雨灾害,2018,37(4):293-302.
- [5] 高维英. 弱天气系统下陕西暖区暴雨分型及其环境场特征[J]. 陕西气象,2022(6):1-6.
- [6] 杜继稳. 降雨型地质灾害预报预警:以黄土高原和秦巴山区为例[M]. 北京:科学出版社,2010:8-17.
- [7] 张雅斌,马晓华,薛湛彬,等. “0812”关中盛夏突发性暴雨中尺度特征分析[J]. 热带气象学报,2017,33(2):187-200.
- [8] 张弘,梁生俊,侯建忠. 西安市两次突发性暴雨成因分析[J]. 气象,2006,32(5):80-86.
- [9] 刘勇,薛春芳. “6·29”西安突发性特大短时暴雨过程分析[J]. 陕西气象,2007(1):1-4.
- [10] 毕旭,王丽,张雅斌,等. 陕西秦岭北麓致灾短时暴雨特征及预警技术[J]. 灾害学,2019,34(2):124-129.
- [11] 张霄琛. 现代气象观测[M]. 北京:北京大学出版社,2000:289-298.
- [12] 曾瑾瑜,夏丽花,陈文键. 福建省风廓线雷达资料在一次强对流天气过程中的应用[J]. 气象与环境科学,2014,37(3):40.
- [13] 胡皓,李丽平,王建鹏,等. 2016 年陕甘宁地区一次强降水的大气环流特征及水汽输送途径[J]. 干旱气象,2018,36(5):776-781+793.
- [14] 张雅斌,罗慧,赵荣,等. 西安致灾短时暴雨中尺度与动力指数特征[J]. 热带气象学报,2019(5):614-628.
- [15] 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.
- [16] 张寅,樊超,赵娜,等. 长安风廓线雷达测风资料的可靠性验证[J]. 干旱气象,2017,35(3):507-515.
- [17] 孙继松. 北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究[J]. 大气科学,2005,29(3):445-452.
- [18] 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.