

青藏高原东侧边坡地区一次强对流天气过程中尺度分析

万占鑫,肖万有,乔戈,任桂萍,马宁

(嘉峪关市气象局,甘肃嘉峪关 735100)

摘要:利用常规气象观测资料、区域自动站资料、FY-2E 卫星云顶亮温资料、兰州多普勒雷达资料和 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料,对 2018 年 7 月 18 日发生在青藏高原东侧边坡地区的一次强对流天气的环流背景、物理量场和中尺度系统特征进行了分析。结果表明:从高原中部东移的高原槽为此次强对流天气过程提供了有利的天气形势,地面辐合线和地形抬升共同触发此次强对流天气;700 hPa 低空急流输送的暖湿水汽及其在暴雨区的辐合为强降水的发生提供了水汽和不稳定能量,上冷下暖的平流输送进一步增强了大气不稳定性;镶嵌在 MCS 中缓慢移动的中- β 尺度对流风暴是产生局地短历时暴雨的直接系统。

关键词:强对流天气;高原槽;中尺度对流系统;不稳定能量

中图分类号:P458.11

文献标识码:A

甘肃河东地处青藏高原东侧边坡地带,地形地貌复杂,受特殊地形的影响,甘肃河东夏季天气复杂多变,强对流天气频发,冰雹、短时强降水出现频次高。而另一方面,它深处内陆,远离海洋,属于典型的温带大陆性干旱半干旱气候,地表生态环境脆弱,短历时暴雨极易形成山洪、中小河流洪水等灾害,给人民生命安全和财产安全造成严重危害。如何对高原东侧边坡地区的强降水天气进行临近预报和监测预警,已经有很多学者进行了研究。如王宝鉴等^[1]、李晓霞等^[2]分析了甘肃陇东南暴雨过程的中尺度特征;任余龙等^[3]、井喜等^[4]、王川等^[5]分析了青藏高原东侧暴雨的发生机制和环境场;傅朝等^[6]分析了甘肃陇东南暖区暴雨多普勒雷达特征。这些研究总结分析了青藏高原东侧的暴雨预报的天气尺度模型,物理量场和不稳定能量阈值指标以及中尺度特征等。还有许多学者^[7-13]对我国中东部和西北地区的强降水暴雨天气进行了大量分析,取得了很丰硕的成果。

然而,由于地形地貌及气候的不同,处在不同区域不同季节的暴雨天气又有其各自的特点。如 2018 年 7 月 18 日傍晚,甘肃河东中西部地区发生的局地短历时暴雨引发山洪,导致甘肃临夏州受灾严重,而造成这次暴雨的直接系统是一个中- β 尺度的强对流风暴。本文将在前人研究的基础上利用高空观测、地面观测、区域自动站、FY-2E 卫星云顶亮温、兰州多普勒雷达和 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析等资料,对 2018 年 7 月 18 日傍晚发生在青藏高原东侧边坡地区的强对流天气从大尺度环流背景、物理量场和中尺度特征等方面进行分析,希望对青藏高原东侧边坡地区暴雨和强对流天气的预报预警积累一些可用的参考信息。

1 数据资料与研究方法

所用资料为 2018 年 7 月 17—19 日高空观测资料、地面观测资料、区域自动站资料、FY-2E 卫星云顶亮温资料、兰州多普勒雷达资料和 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料。使用 MICAPS、

收稿日期:2019-05-22

作者简介:万占鑫(1988—),男,汉族,甘肃金塔人,理学学士,工程师,从事短期天气预报和强对流天气研究。

基金项目:甘肃省气象局面上项目(Ms2020-10)

GRADS 和雷达 PUP 等气象软件,应用天
理和方法、卫星气象学、雷达气象学和天气诊断学
等方法对青藏高原东侧边坡地区一次强对流天气
进行分析。

2 结果与分析

2.1 天气实况及灾情

2018年7月18日19时至19日00时,甘肃
临夏州中部出现了强降雨天气过程,其中东乡县、
和政县和广河县部分地方累计雨量达暴雨级别,
局部地方达大暴雨量级。图1a是本次过程18日
08时至19日08时累计雨量图,其中全州共计27
个区域站降雨量超过50mm,5个区域站降水超
过100mm,最大累计降水量出现在和政县梁家

20时至19日00时部分代表站点逐小时降水量
分布情况,可以看出此次局地暴雨天气过程降水
主要集中在18日19—22时,具有历时短、强度大
的特点,东乡县那勒寺在20—21时出现了小时雨
强为82.8mm的短时强降水,其强度在西北地区
极为罕见。经后续核查,此次强对流天气引发的
局地暴雨,造成了临夏州12.1万人受灾,农作物
受灾面积达62km²,同时由于降水历时短、强度
强、降水时段集中,局地暴雨天气引发了山洪暴
发,造成13人死亡,3人失踪,多处道路、水渠、河
堤和桥梁等基础设施被冲毁,经济财产损失共计
约5.64亿元。

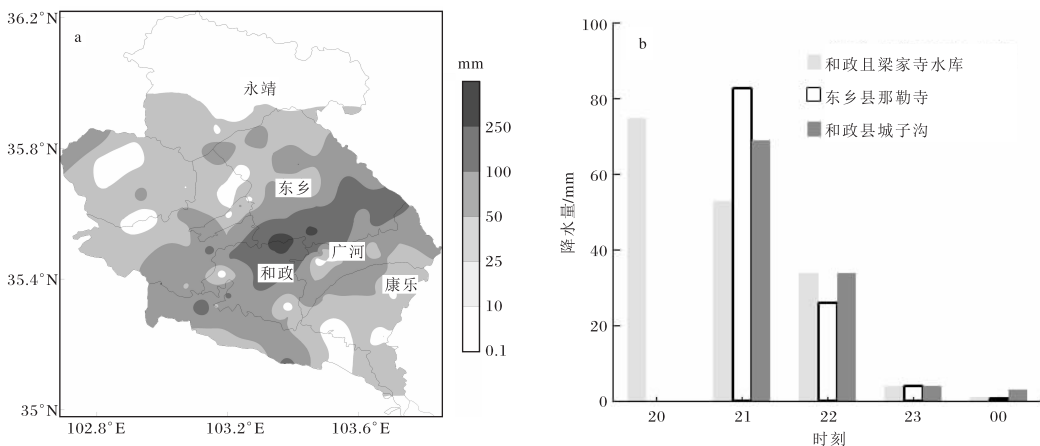


图1 2018-07-18T08—19T08 甘肃临夏州累计降雨量图(a)及部分代表站点逐小时降水量(b)

2.2 大气环流背景

强对流天气一般都是在一定的大尺度环流背
景下发生的。过程发生前,100 hPa 上南亚高压
呈带状分布,东部脊线不断东伸北抬,过程发生
时,东部脊线正好位于甘肃临夏州,高空辐散流
场利于上升运动维持发展(图略)。500 hPa 上
2018年7月17日中纬度地区青藏高原西部有
高原切变线形成,西太平洋副热带高压西伸脊
点位于107°E、27.4°N;18日08时,高原切变
线东移,在青海中部地区发展为高原槽;20时
(图2a),高原槽进一步东移至甘肃武威至青
海东南部一线,西太平洋副热带高压西伸至
103°E、27.4°N,甘肃临夏州处于副高西北
侧和高空槽前强盛西南气流中。对应低层700
hPa上(图略),高原槽前青海东部与甘肃交
界处有低值系统,其东北侧有东

北—西南向暖式切变线。切变线南侧偏南气
流发展加强为低空急流,低空急流不断将来自
孟加拉湾和南海的暖湿气流向北输送,并在甘
肃河东地区向低值中心辐合,临夏州处于急流
出口区左前侧。低空急流为强对流天气的
发生提供了动力、水汽和不稳定能量条件。由
18日20时中尺度分析可知(图2b),暴雨区
位于高层辐散、低层辐合、高原槽前和低空
急流出口区左前侧相重叠的区域。高低空系
统耦合为此次强对流天气的发生提供了非常
有利的动力条件;700 hPa 低空急流输送水
汽和不稳定能量,进一步增强了大气的对流
不稳定性;地面上明显的西北风与东南风风
向辐合线以及高原边坡地形强迫抬升作用触
发了此次强对流天气。

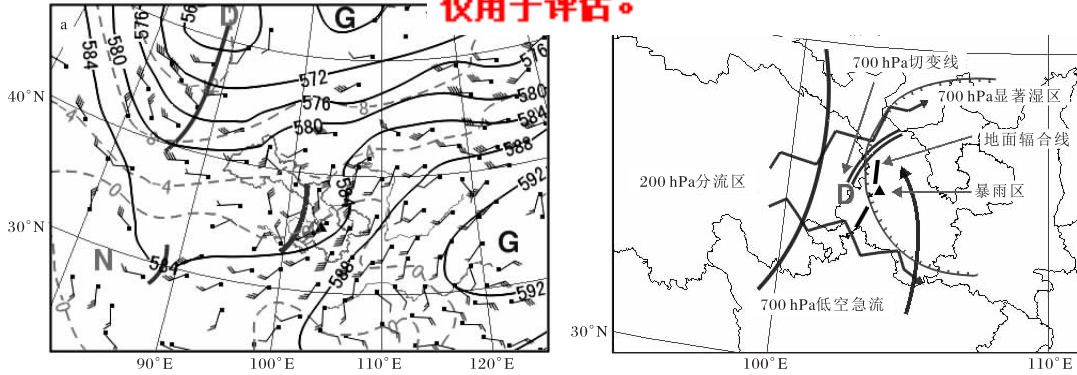


图2 2018-07-18T20 500 hPa形势场(a)(实线为等高线,单位为 dagpm;虚线为等温线,单位为℃;粗实线为槽线)和中尺度分析(b)(图中黑三角为暴雨区)

2.3 中尺度环境条件

2.3.1 水汽条件 强降水的发生需要充沛的水汽条件。分析18日20时地面和高空实况资料可见(图略),暴雨区附近从对流层中下层至地面的温度露点差均 $\leq 2^{\circ}\text{C}$,700 hPa至地面整层大气比湿均在 $12\sim 14\text{ g/kg}$,由此可以说明对流层中低层水汽非常充沛,在其他有利条件配合下易产生暴雨。

从18日20时沿 35.5°N 水汽通量散度和风场垂直剖面图(图3a)可知,暴雨区(103.4°E 、 35.5°N)地势有明显的西高东低的分布特点,对流层低层偏东暖湿气流受地形抬升作用明显,偏东暖湿气流与偏西干冷气流在 103°E 附近交汇,产生了明显辐合上升运动,水汽辐合区从近地面向上延伸到500 hPa高度附近,水汽辐合中心位于

600 hPa,中心值为 $-6.0\times 10^{-7}\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$ 。从暴雨区(103.4°E 、 35.5°N)水汽通量和水汽通量散度的时间高度剖面图(图3b)可知,强降水发生时,对流层中层600 hPa维持强度为 $10\text{ g}/(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$ 水汽通量中心,临近强降水发生时,水汽通量中心高度逐渐下降至700 hPa附近,而水汽辐合在600 hPa高度为最强,中心强度为 $-6.0\times 10^{-7}\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$ 。结合地形分析可知,水汽输送和水汽辐合中心均在对流层中低层,且水汽输送最强时段早于水汽辐合最强时段。虽然水汽通量和水汽通量散度变化与强降水发生对应关系较好,但与发生在高原东侧边坡地区如甘肃陇东南地区的暴雨过程相比,本次过程的水汽输送中心和辐合中心高度要明显偏高,水汽输送和辐合强度则偏弱。

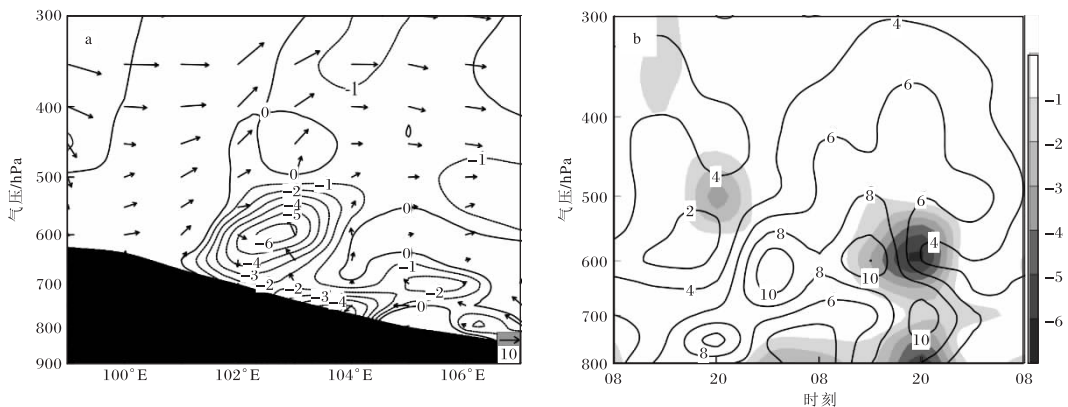


图3 2018-07-18T20沿 35.5°N 水汽通量散度(单位为 $10^{-7}\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$)、风场(单位为 m/s)垂直剖面(a)和2018-07-17T08—19T08沿暴雨区(103.4°E 、 35.5°N)的水汽通量(等值线,单位为 $\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$)、水汽通量散度(阴影,单位为 $10^{-7}\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$)时间垂直剖面(b)

2.3.2 不稳定条件和探空环境条件 假

温(θ_{se})可以表征大气温度、压力和湿度的综合特征,它的分布可以反映大气中能量的分布状况。分析本次过程发生时 θ_{se} 垂直分布,从7月18日20时沿 35.5°N 假相当位温垂直剖面(图4)可知,暴雨区附近及其下游地区近地层 θ_{se} 维持在356 K以上。这是由于700 hPa 偏东南气流为暴雨区输送水汽和能量,近地层大气高温高湿造成的。而该区域上层600 hPa附近 θ_{se} 仅为344 K左右,垂直方向上近地层与600 hPa之间等 θ_{se} 线密集, θ_{se} 相差达12 K以上。 θ_{se} 随高度递减的分布特征表征该区域大气具有明显对流不稳定性。在暴雨区上游地区 102°E 附近,等 θ_{se} 线非常陡峭,以352 K等 θ_{se} 线为例,高度从300 hPa附近一直下降到600 hPa。等 θ_{se} 线陡峭分布利于涡度的倾斜发展,为低层垂直涡度的发展创造了有利条件^[14]。

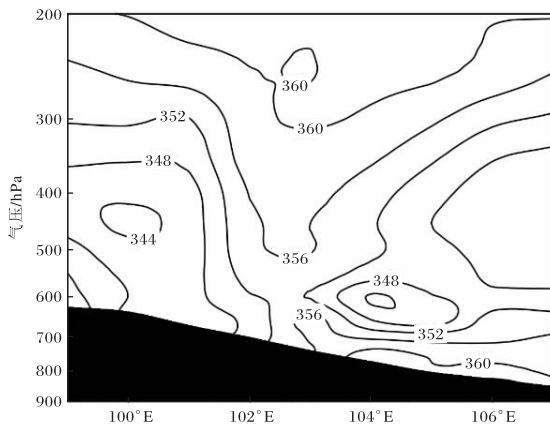


图4 2018-07-18T20 沿 35.5°N 假相当位温
(单位为 K)垂直剖面

$T-\ln p$ 探空图能够反映测站和周边一定范围内上空的各种气象要素的垂直分布特征。由于临夏无探空站,而榆中探空站和暴雨区距离相对较近且海拔高度基本一致,两地大气层结稳定度基本相似,差异主要体现在近地层风向风速上,榆中风速更大,偏南风分量更大,因此用榆中探空资料对此次过程的探空环境进行分析。从2018年7月18日20时榆中站探空的 $T-\ln p$ 图(图5)可知,近地层至450 hPa之间湿度条件较好,仅在750~650 hPa之间为相对干层。从风的垂直切变分布状况来看,近地层以偏东南风为主,且地面

400 hPa 风向随高度逆转,有冷平流输送。这种上冷下暖的平流输送可进一步加强大气层结不稳定性。对流有效位能 CAPE 达 1485.4 J/kg ,其垂直分布呈“瘦长型”,结合深厚的水汽垂直分布, 0°C 层高度超过了6 km,暖云层深厚,非常利于短时强降水天气的发生。从探空层结曲线分布来看,低层750 hPa附近有一浅薄的逆温层,近地层有弱的对流抑制能量(CIN为 $24\sim 30 \text{ J/kg}$),对低层不稳定能量的积累十分有利。此外,抬升凝结高度(LCL)和自由对流高度(LFC)均在700 hPa以下,较低的LCL和LFC也非常利于对流的触发。

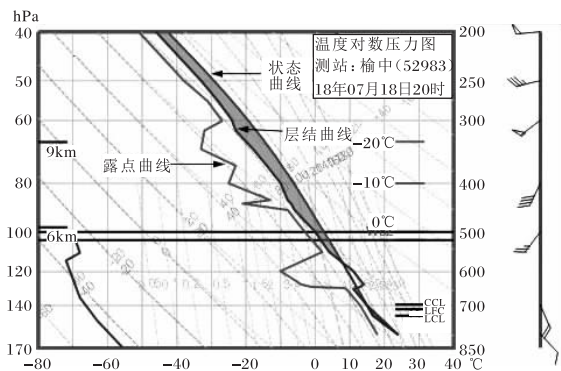


图5 2018-07-18T20 榆中站探空 $T-\ln p$

2.3.3 动力条件 由暴雨区的涡度、散度和垂直速度时间垂直剖面(图6)可知,强降水发生前,对流层整层以负涡度为主,无明显辐合辐散和向上的垂直运动。强降水开始和维持时段,中低层转为正涡度且涡度迅速增加,在600~500 hPa之间有明显正涡度中心,中心强度达 $8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,高层仍维持负涡度。散度场上中低层转为辐合、高层转为辐散,且高层辐散强度略大于中低层辐合强度,高层抽吸作用较为明显。这种中低层气旋性辐合环流和高层反气旋性辐散环流为上升运动的发生发展提供了有利的动力条件,在600~500 hPa之间出现了强度为 -1.0 Pa/s 的上升运动大值中心。强降水减弱停止后,整层涡度和散度趋于减弱,整层的垂直运动也开始转为弱的下沉运动。由上述可知,对流层中低层强正涡度、高层辐散中低层辐合和垂直方向上强上升运动与强降水的发生有很好的对应关系,为此次强降水发生提供了有利的动力条件。

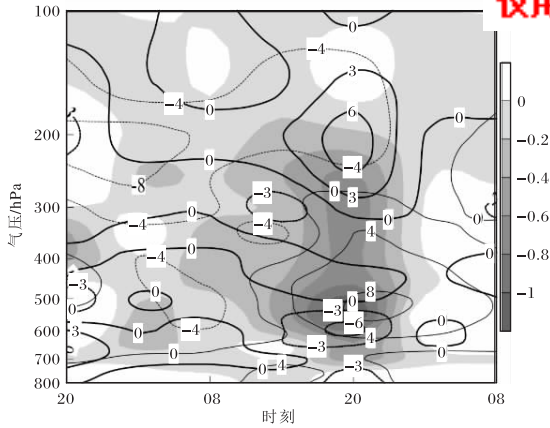


图6 2018-07-17T20—19T08 沿暴雨区(103.4°E、35.5°N)涡度(细线,单位为 $10^{-5} s^{-1}$)、散度(粗线,单位为 $10^{-5} s^{-1}$)和垂直速度(阴影,单位为Pa/s)时间垂直剖面

2.4 强对流中尺度特征

2.4.1 卫星云图中尺度特征 利用FY-2E卫星逐小时TBB资料,分析造成强降水的中尺度对流云团演变特征。分析图7可知,18日16:30(图7a),青海东部有较小的中- β 尺度对流云团A新生发展,四川、甘肃、青海交界处存在中- α 尺度对

系统还未对甘肃产生影响。17:30(图7b),对流云团A、B向东移动开始进入甘肃境内,且云团A西南侧有新生对流云团C生成;18:30(图7c),上述3个对流云团东移合并加强为中- α 尺度对流云团D,云团D中甘肃、青海交界和四川西北部分别出现了 $t_{BB} < -72^\circ C$ 的云区;19:30(图7d),云团D缓慢东移并发展为较大尺度的中尺度对流系统(MCS),19:30—23:30 MCS的 $t_{BB} < -52^\circ C$ 区域逐渐发展变大后稳定维持,其形状逐渐发展为椭圆形。20:30—22:30(图7e、f、g)MCS对流发展最为旺盛,MCS中不断有积云单体新生合并发展,出现了中心值 $t_{BB} < -72^\circ C$ 的云区,对流中心长时间稳定维持在临夏州中部,造成了该地区大强度的短历时暴雨。23:30(图7h),MCS冷云罩($t_{BB} < -52^\circ C$)范围仍在扩大,但其强度已经开始减弱,TBB值高于 $-72^\circ C$ 。19日00:30(图7i),MCS开始趋于松散分裂,随着时间推移,对流云团逐渐减弱消散,降水过程趋于结束。综合上述分析,表1给出对流云团与降水

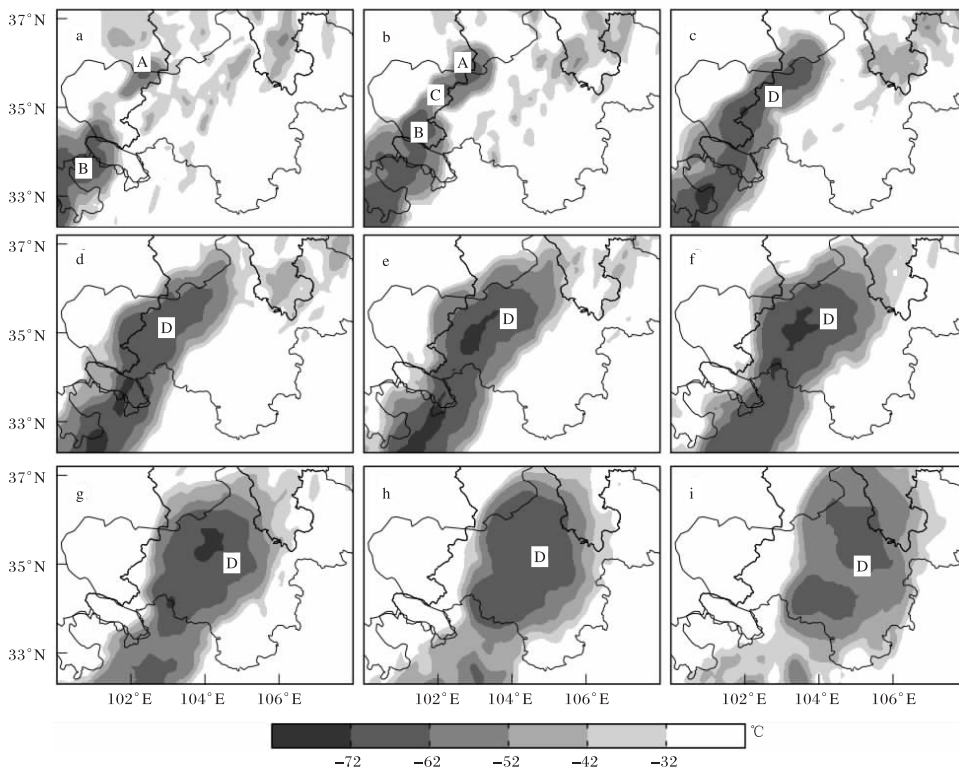


图7 2018-07-18—19 FY-2E 卫星 TBB 演变

(a 16:30; b 17:30; c 18:30; d 19:30; e 20:30; f 21:30; g 22:30; h 23:30; i 00:30)

表 1 2018-07-

降雨时段	TBB 最小值 中心/°C	短时强降水		强降水发生位置
		发生频次/站次	最大雨强/(mm/h)	
19—20 时	-71	10	74.8	TBB 梯度大值区附近
20—21 时	-75	30	82.8	TBB 最小值中心和梯度大值区附近
21—22 时	-74	37	75.5	TBB 最小值中心和梯度大值区附近
22—23 时	-74	5	50.4	TBB 最小值中心和梯度大值区附近

强度、落区的关系。强降水的发生与对流云团的强烈发展有密切关联,强降水主要集中在对流云团强烈发展和发展成熟时段,强降水落区大多处在对流云团 TBB 最小值中心附近和 TBB 梯度大值区附近。MCS 发展最旺盛($t_{BB} < -72$ °C 的云区在 19—22 时稳定维持在临夏州中部)的时段内,该区域附近出现了短时暴雨,共计 82 站次短时强降水,其中最大小时雨强为东乡县那勒寺,20—21 时降水量达 82.8 mm。

2.4.2 雷达特征分析 利用兰州多普勒天气雷达资料分析对流单体的演变。由组合反射率演变可知,18:27(图略),在和政县境内新生对流单体 A 和 B,对流单体 A 中心强度大于 40 dBz,对流单体 B 中心强度大于 50 dBz。18:56(见第 7 页图 8a),受对流层中层西南气流引导,对流单体 A 和 B 分别向东北和正北方向移动并发展加强,对流单体 B 中心强度大于 65 dBz,在对流单体 A 东南侧有对流单体 C 新生。19:34(见第 7 页图 8b),对流单体 B 分裂为两块对流单体并趋于减弱消亡,对流单体 A 和对流单体 C 合并加强形成中心强度超过 60 dBz 的中- β 尺度对流单体 D。19:34—20:22 对流单体 D 强度维持并缓慢向东北方向移动,对应地面区域站在该时间段内降水强度最大,19—20 时连续出现了雨强超过 70 mm/h 的短时强降水。分析 19:42 雷达反射率因子(见第 7 页图 9a)可知,1.5°、2.4°仰角对流单体 D 均有明显“V 型”缺口,沿风暴移动方向对反射率因子作垂直剖面,强回波具有明显“悬垂”结构,强回波主要集中在 6 km 以下到近地面,回波顶高超过了 12 km。分析该时次的雷达平均径向速度(见第 7 页图 9b)可知,雷达径向速度 3.4°、4.3°仰角风暴区域有中尺度辐合区,沿风暴移动

方向对平均径向速度作垂直剖面,有明显低层径向辐合、高层径向辐散的结构。以上均表明对流单体 D 为对流发展非常旺盛、降水效率极高的低质心风暴,对应该时段地面区域站出现了 10 min 雨强超过 20 mm/h 的强降水。20:34(图 8d),对流单体 D 与其他新生对流单体合并为呈东北—西南向的线状多单体风暴(中尺度雨带),范围增大但强度趋于减弱。21:20(图略),线状多单体风暴范围进一步增大但强度无明显变化,对应地面区域站仍有短时强降水出现,但降水强度已明显减弱。此后,线状多单体风暴逐渐向东北方向移动,临夏州强降水逐渐趋于结束。综上可知,低质心的中- β 尺度强对流风暴缓慢移动并长时间维持在临夏州中部造成了局部短历时暴雨。

3 结论

(1)2018 年 7 月 18 日青藏高原东侧边坡地区短历时暴雨天气过程发生在南亚高压东部脊线、500 hPa 高原槽前、700 hPa 低空急流和地面辐合线相互配合的有利环流背景下。高层辐散、低层辐合和中层槽前正涡度平流为强对流天气的发生发展提供了有利的动力条件。

(2)对流层中低层充足的暖湿水汽输送为暴雨区提供了充沛的水汽和不稳定能量,上冷下暖的平流输送增强大气层结不稳定性。“瘦长型”CAPE 分布、深厚暖云层、低层浅薄逆温层和弱对流抑制能有利于短时强降水发生,地面辐合线和地形抬升共同作用触发了此次强对流天气。

(3)中- α 尺度的 MCS 中不断有对流单体生消、合并加强,镶嵌在 MCS 中发展极为旺盛的高强度、低质心和移动缓慢的中- β 尺度强对流风暴是造成临夏州中部局部短历时暴雨的直接影响系统。

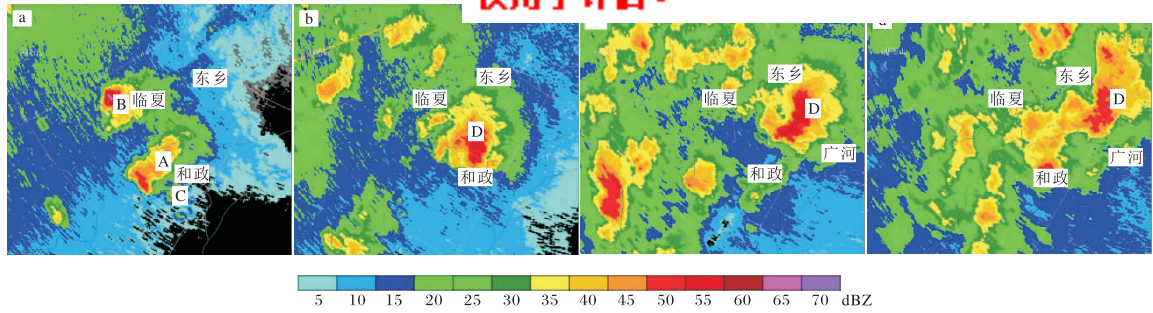


图8 2018-07-18兰州多普勒天气雷达组合反射率(a 18:56;b 19:25;c 19:59;d 20:34)

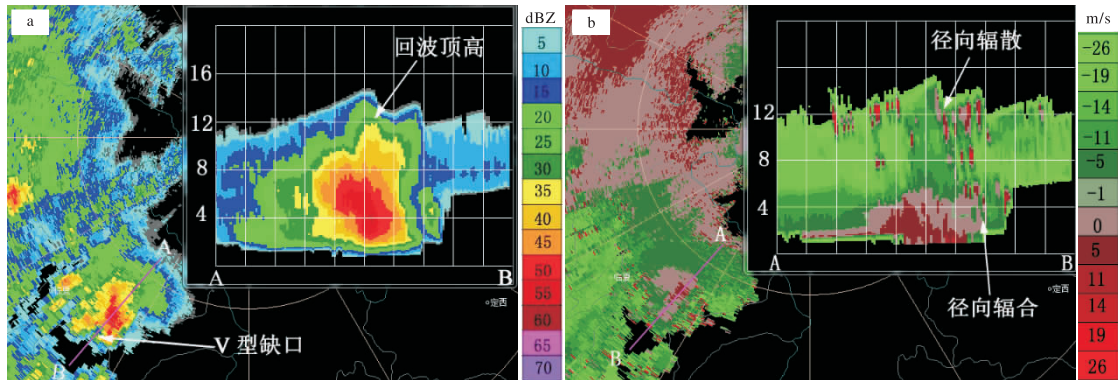


图9 2018-07-18T19:42 反射率因子(a, 2.4°仰角)和平均径向速度(b, 3.4°仰角)

参考文献:

- [1] 王宝鉴,孔祥伟,傅朝,等. 甘肃陇东南一次大暴雨的中尺度特征分析[J]. 高原气象, 2016, 35(6): 1551-1564.
- [2] 李晓霞,尚大成,谌芸,等. 甘肃陇南两次不同强度暴雨天气的中尺度特征分析[J]. 高原气象, 2013, 32(5):1389-1399.
- [3] 任余龙,杨文月,武学琴,等. 青藏高原东部边缘一次大暴雨发生机制研究[J]. 干旱气象, 2010, 28(3):315-321.
- [4] 井喜,李栋梁,李明娟,等. 青藏高原东北侧一次突发性大暴雨环境场综合分析[J]. 高原气象, 2008, 27(1):46-57.
- [5] 王川,寿绍文. 一次青藏高原东侧大暴雨过程的诊断分析[J]. 气象, 2008, 29(7):7-12.
- [6] 傅朝,杨晓军,周晓军,等. 2013年6月19—20日甘肃陇东南暖区暴雨多普勒雷达特征分析[J]. 气象, 2015, 41(9):1095-1103.
- [7] 刘元珺,何豫秦,彭菊蓉,等. 一次西南涡引发 MCC 暴雨的中尺度分析[J]. 陕西气象, 2017(1):5-9.
- [8] 牛奔,张家国,吴涛,等. 鄂西北一次超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析[J]. 暴雨灾害, 2016, 35(1):45-52.
- [9] 牛淑贞,张一平,梁俊平,等. 郑州市两次短时强降水过程的环境条件和中尺度特征对比[J]. 暴雨灾害, 2016, 35(2):138-147.
- [10] 张云惠,王勇,支俊,等. 南疆西部一次强降雨的多普勒雷达分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2009, 3(6):17-20.
- [11] 胡启元,李萍云,井宇,等. “17·7”榆林特大暴雨成因及多普勒雷达特征分析[J]. 陕西气象, 2018(2):10-15.
- [12] 曲良璐,谭甜甜,周雪雁. 阿克苏地区一次强对流天气卫星云图及雷达特征分析[J]. 陕西气象, 2017(5):6-12.
- [13] 牛乐田,王英,李春娥,等. 关中地区一次突发性暴雨天气成因分析[J]. 陕西气象, 2016(4):13-17.
- [14] 吴国雄,蔡雅萍,庄晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1995, 53(4):387-405.