

石光普,王银花,刘世华,等. 甘肃靖远“8·10”致洪短时强降水成因分析[J]. 陕西气象,2022(4):30-36.

文章编号:1006-4354(2022)04-0030-07

甘肃靖远“8·10”致洪短时强降水成因分析

石光普¹,王银花¹,刘世华²,冯娅茹¹,白登元¹

(1. 白银市气象局,甘肃白银 730900;2. 白银市水务局,甘肃白银 730900)

摘要:利用 ERA-interim 再分析资料、FY-2G 卫星云图、多普勒雷达资料以及常规气象观测资料,对 2018 年 8 月 9—10 日甘肃靖远致洪致灾短时强降水的成因进行了诊断分析。结果表明:此次短时强降水天气具有空间尺度小、持续时间短、强度大的特点;在西太平洋副热带高压西伸北抬、伊朗高压北上东伸的大尺度环流背景下,甘肃中部处于两高压之间的弱切变辐合区;强降水发生前,低层暖湿平流的增温增湿使不稳定层结发展;低层正涡度辐合加强了水汽的垂直输送,地面气旋性风场、次级环流为强对流提供了有利的动力条件;强降水过程中没有高空槽、低空急流的配合,垂直风切变较弱,在副热带高压边缘高温高湿环境下,中小尺度热低压使该区域热力不稳定增加,中低层弱冷空气入侵、地面辐合线对强对流天气的发生起到了触发和组织作用;造成此次强降水天气的中- γ 尺度对流云团,生成在地面热低压和中尺度辐合线附近,具有明显的低质心强降水雷达回波特征。

关键词:甘肃靖远;短时强降水;垂直螺旋度;水汽通量散度;垂直累积液态水含量

中图分类号:P458.121

文献标识码:A

短时强降水具有历时短、强度大、范围小,易于形成洪水和内涝的特点,往往给水文测报和防洪调度造成较大压力,因此短时强降水是汛期监测预报预警工作中的重点和难点^[1-5]。青藏高原东北侧是西北地区夏季降水异常敏感区域,而甘肃中部是西北地区显著的干旱少雨中心之一^[6]。在全球变暖的背景下,极端天气气候事件发生频率增加、强度增大,区域性强降水的次数有增加趋势^[7]。西北干旱半干旱区由强降水引发的山洪、泥石流等灾害时有发生^[8-10],如 2010 年“8·8”舟曲特大山洪泥石流灾害^[11-12]、2012 年“5·10”甘肃岷县特大山洪灾害^[13-14]的主要触发因素是局地性强、短时强度大、突发性强的短历时强降雨型的强对流天气。近年来极端暴雨事件说明中尺度对流暴雨仍具有不可预报性^[15],还需要不断加强研究来提高预报预警水平。

甘肃靖远县位于黄河上游,地处腾格里沙漠

南缘和祁连山余脉向黄土高原丘陵沟壑区过渡地带,黄河过境 154 km,境内沟壑纵深,地形地貌复杂,植被覆盖差,土壤持水量低,下垫面多为黄土和沙石,所以短时暴雨具有形成洪水速度快,地表产生径流量大的特点,极易引发山洪灾害,造成人员伤亡、财产损失和基础设施毁坏^[16-18]。2018 年 8 月 9 日夜间至 10 日凌晨,甘肃省白银市靖远县突发强降水,受其影响,靖远县北滩镇粮窖村八泉砂河、刘川镇范家窑村大砂河爆发山洪,造成人员伤亡、道路损毁、房屋受损等重大灾害,直接经济损失 24 473.42 万元;因此,有必要对这次致洪强降水天气的成因做深入的分析,为汛期预报预警提供借鉴。

1 天气实况

此次致灾强降水的主要降雨时段在 2018 年 9 日 20 时至 10 日 02 时,靖远县北滩镇上游的永新乡松柏站降雨量达到 63.0 mm,永新乡站

收稿日期:2021-09-28

作者简介:石光普(1978—),男,汉族,甘肃合作人,高工,从事天气预报和气候变化研究。

基金项目:甘肃省气象局科研项目(Ms2020-11);白银市政府科技计划项目(2016-2-68R)

降雨量达 33.2 mm,刘川镇范家窑村鹰嘴站降雨量 77.6 mm,刘川镇范家窑村上游白银深部铜矿站降雨量 52.5mm(图 1a)。对永新乡松柏站和刘川镇鹰嘴站降雨量做分时雨量图(图 1b),可见两个站的主要降水历时只有 3 h。松柏站降水时段为 9 日 20—23 时,最大雨强达 44.4 mm/h;鹰嘴站降水时段为 9 日 23—10 日

02 时,最大雨强达 62.6 mm/h。如此大的雨强在甘肃河西五市以及兰州、白银等地发生的次数极少^[19],在西北干旱半干旱区也是少见的,如舟曲“8·8 曲特大山洪泥石流灾害中监测到的最大雨强为 77.3 mm/h。可以看出,此次降水过程具有短时强度大、空间尺度小、降水历时短、极端性强的特征。

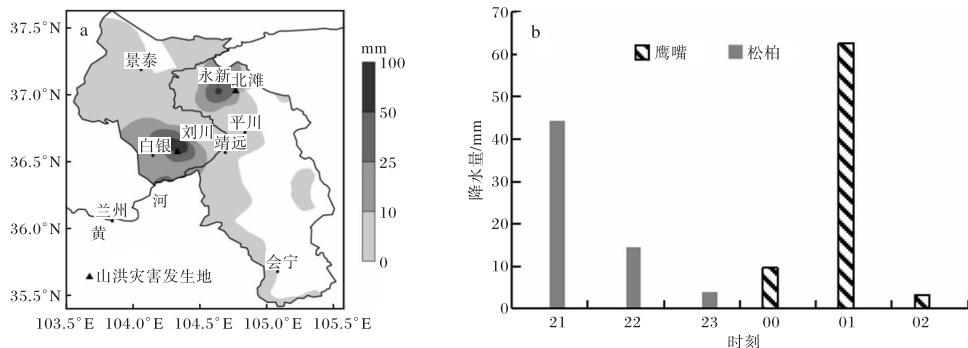


图 1 2018-08-09T20—10T02 甘肃省白银市降水空间分布(a;审图号为 GS(2020)4619 号)和永新乡松柏站、刘川镇鹰嘴站降水量时间分布(b)

2 天气分析

2.1 环流背景和天气形势

过程前,8 月 1—8 日西太平洋副热带高压西伸北抬,强度偏强,588 dagpm 线西伸至甘肃东部,副高西脊点位于 38°N、107°E 附近(图 2a)。由

于副高西伸脊点稳定少动,甘肃中东部持续处于副热带高压外围的暖湿气流中,甘肃中部 700 hPa 比湿持续维持在 10~11 g/kg,兰州至靖远各地有 5~6 d 出现了 30℃ 以上的高温天气,表明过程的前期甘肃中部环境大气处于高温高湿状态。

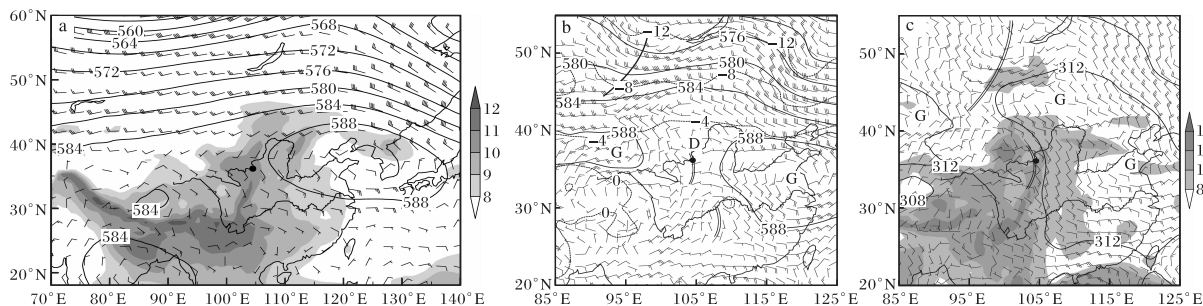


图 2 2018-08-01—08 500 hPa 平均高度场(实等值线)、700 hPa 平均风场和比湿(色斑)(a)、2018-08-09T20 500 hPa 高度场(实等值线)、温度场(虚等值线)和风场(b)及 700 hPa 高度场(实等值线)、风场和比湿(色斑)(c)(高度场单位为 dagpm;风场单位为 m/s;比湿单位为 g/kg;温度单位为℃)(•为甘肃省靖远县位置,下同)

9 日 20 时 500 hPa(图 2b),西太平洋副热带高压西脊点继续维持在西北地区东部,伊朗高压发展东伸至青海西部,甘肃中部位于两高压之间的弱切变辐合区。700 hPa 上甘肃中部也处于切变辐合区(图 2c),500 hPa、700 hPa 风切变虽然都比较弱,但位置相叠加,有利于上升运动加强。

500 hPa 高空槽位于新疆东部到蒙古西部一带,槽底有弱冷平流,但由于河套至蒙古为弱的高压脊,不利于冷空气的南下。

从 8 月 9 日 08 时甘肃榆中站探空图可以看到(图略),甘肃中部上空具有“上干下湿”的特征,高低层风切变弱,对流有效位能弱,CAPE 值只有

6.5 J/kg, 对流抑制能量 CIN 为 262.3 J/kg, 有利于不稳定能量在低层积聚。9 日午后, 兰州到靖远一带气温高达 30~33 °C, 20 时甘肃中部 $\Delta t_{(700-500)} \geq 17$ °C。由于下垫面强烈加热, 对流层中下层的层结不稳定强烈发展, 地面到 500 hPa 的温差进一步加大, CAPE 值增大至 1 559 J/kg, CIN 值减小至 53 J/kg, 沙氏指数 SI 由正值转为负值 (-0.42 °C), 表明热力不稳定加强, 对流不稳定有

了很好的发展(图 3a)。同时, 对流层中低层存在明显的湿层, 在 600 hPa 以上的中高层为干空气, 下湿上干的配置有利于对流的加强发展。从白银市上空温度平流垂直分布(图 3b)可以看出, 700 hPa 以下为强的暖平流, 而 700 hPa 以上冷平流偏弱。可见这是一次由低层暖平流强迫造成的分散性强对流天气, 此类天气局地性强、降水量级大^[20], 而强降水落区和量级往往是短期预报中的难点。

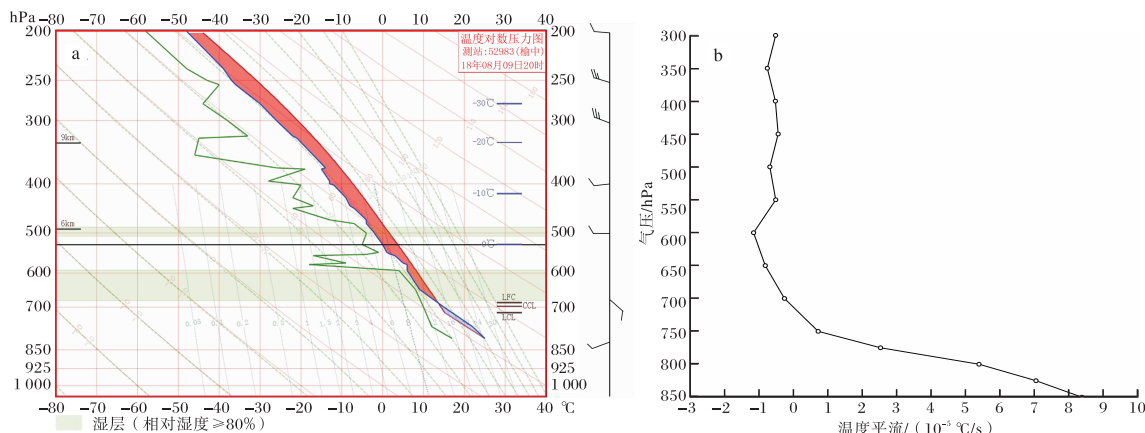


图 3 2018-08-09T20 榆中探空图(a)和 36°N~37°N、102°E~104°E 区域平均温度平流的垂直分布(b)

2.2 螺旋度分析

垂直螺旋度作为一种动力触发机制, 对天气系统的移动、发展及强对流和大暴雨天气的预报有一定的指示意义^[21-23], 正的旋转风螺旋度大值中心及其演变较好地对应造成暴雨的中尺度涡旋(暴雨中心)的发生位置及演变, 较大的螺旋度值是暴雨及低层中尺度低涡和地面气旋系统发生发展的机制之一^[24]。

8 月 9 日 20 时 700 hPa 层上, 沿四川北部到甘肃中部为垂直螺旋度正值区, 与切变辐合区位置相一致, 在 36.5°N、104°E 附近为垂直螺旋度大值中心, 垂直螺旋度大值区位置与强降水落区高度一致(图 4a)。从强降水发生区 36.5°N~37.5°N 的平均垂直螺旋度剖面图(图 4b)可见, 强降水发生区上空低层 650 hPa 以下有强正螺旋度发展, 表明低层有强烈气旋性辐合上升运动, 而

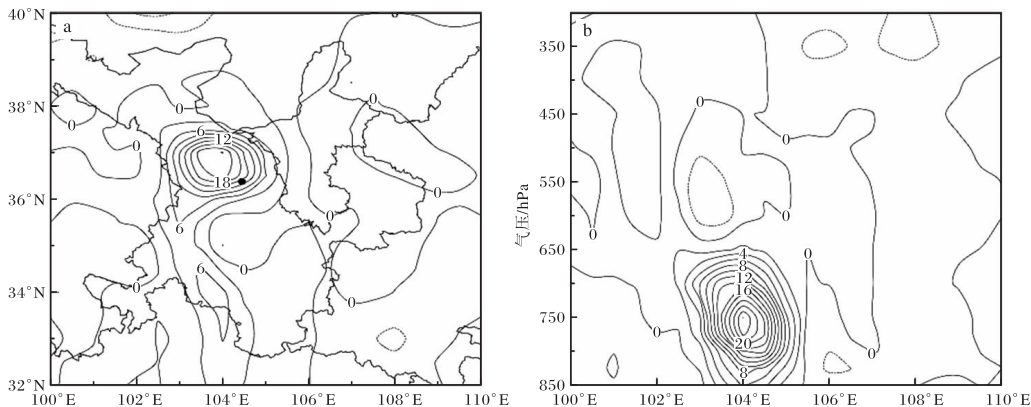


图 4 2018-08-09T20 700 hPa 垂直螺旋度(a;审图号为 GS(2020)4619 号)和 36.5°N~37.5°N 平均垂直螺旋度剖面图(b)(单位为 10^{-6} hPa/s²)

中高层600~500 hPa为负螺旋度,表明中高层大气呈反气旋且伴有水平辐散的螺旋转动。垂直螺旋度呈低层正、中高层负的配置,为强对流的产生、加强、维持创造了有利的动力条件。垂直螺旋度正的大值中心在750 hPa,中心值 $\geq 26 \times 10^{-6} \text{ hPa/s}^2$,低层正的垂直螺旋度远大于中高层负螺旋度,表明此次强对流天气主要由低层正涡度辐合产生。

2.3 水汽条件

水汽对强降水的发生非常重要,充沛的水汽供应是产生强降水的必要条件。8月9日20时(图2c),700 hPa上甘肃中部南风偏弱,只有6 m/s,没有低空急流存在;但由于副热带高压边缘有偏南气流持续稳定的水汽输送,甘肃中东部700 hPa上形成比湿达10~12 g/kg的高湿区。

强降水的发生需要充沛水汽输送,但更重要的是水汽是否在该区汇聚。为此计算了此次暴雨上空的水汽通量散度。从700 hPa水汽通量散度

场(图5a)可见,青海高原东部到甘肃中部为水汽辐合区,但甘肃中部与辐合中心相距较远。为进一步探究造成强降水的水汽辐合特征,沿36.5°N作水汽通量散度和垂直速度剖面图(图5b),可见在强降水发生区上空低层800~750 hPa存在强烈水汽辐合,辐合中心在104°E~105°E之间,中心强度达 $-7 \times 10^{-7} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ 。700 hPa以下水汽通量散度为负值区,700 hPa之上为水汽通量散度的正值区,这种低层辐合、高层辐散的抽吸机制有利于水汽的上升运动。结合该区上空垂直速度分析可见,上升运动在750~650 hPa最为强烈,并且从地面到500 hPa高度为垂直上升气流,加强了水汽的垂直输送。文宝安^[25]曾研究指出,对流层低层水汽在大气水汽中占有重要位置,低层和近地层有丰沛的水汽输送和辐合,不仅引起对流层下部出现凝结,而且还可通过铅直输送引起对流层上部出现凝结,为强降水的发生提供有利的水汽条件。

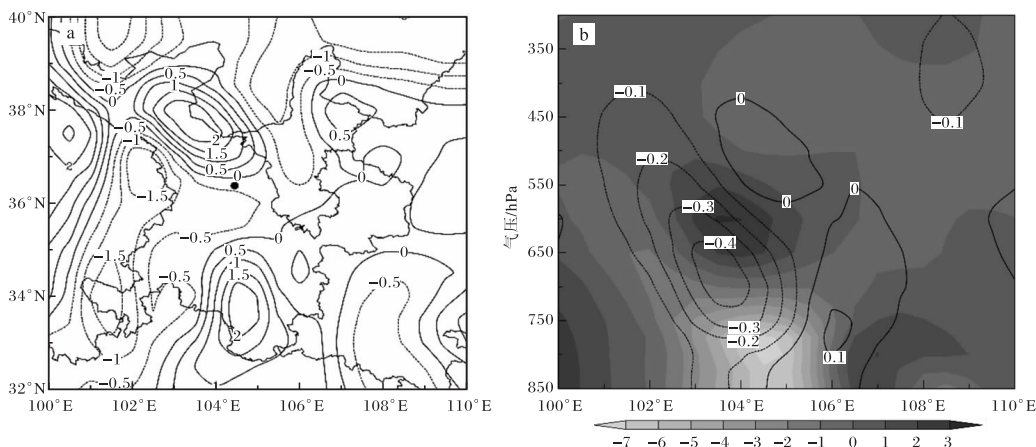


图5 2018-08-09T20 700 hPa水汽通量散度(单位为 $10^{-7} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$)(a;审图号为GS(2020)4619号)和沿36.5°N的水汽通量散度(阴影;单位为 $10^{-7} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ 、垂直速度(等值线;单位为Pa/s)剖面图(b)

2.4 层结条件

假相当位温(θ_{sc})能够表征大气中的能量分布以及对流不稳定,是用能量学方法研究强对流天气的有效参数^[26]。强降水发生前期,甘肃中部上空700 hPa盛行东南风,低层暖湿气流的持续输送有利于形成大气层结的不稳定。由图6a可见,8月9日20时,700 hPa上 θ_{sc} 高能舌从四川北部北伸至甘肃中部,甘肃中部地区处于 θ_{sc} 高能舌前

部,强度达78℃。沿36.5°N做 θ_{sc} 空间垂直剖面图(图6b),可发看出 θ_{sc} 大值中心在106°E附近,强降水区(104°E~105°E)处于高能舌前部, θ_{sc} 高能舌从地面延伸到700 hPa。从地面到500 hPa, θ_{sc} 随高度递减,所以500 hPa以下气层是不稳定的,表明强降水发生之前存在低层暖湿平流的增温增湿,使得低层大气层能量积聚,热力不稳定层结有了很好的发展。

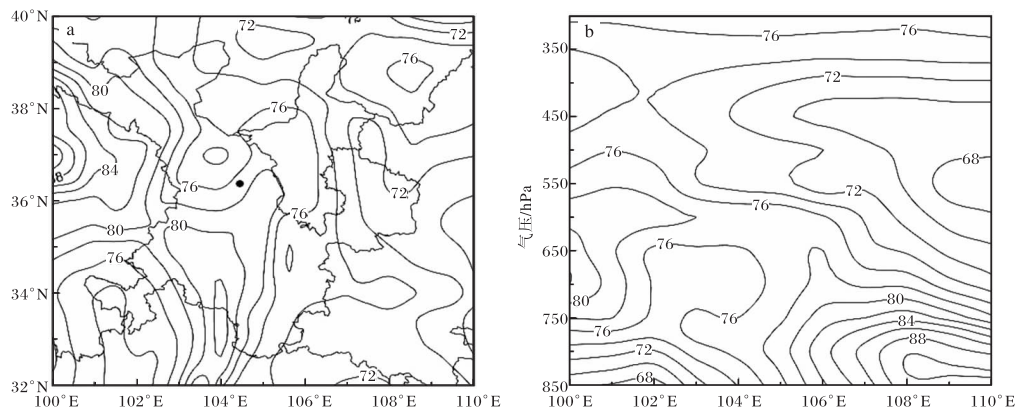


图6 2018-08-09T20 700 hPa 假相当位温场(a;审图号为GS(2020)4619号)和沿36.5°N假相当位温剖面图(b)(单位为℃)

2.5 中尺度对流系统触发条件及发展演变

强对流天气的形成,与中小系统关系密切,如地面的中小尺度低压、气旋辐合中心、辐合线和切变线等。在水汽和层结不稳定条件满足的情况下,低层的辐合能够触发不稳定能量的释放,造成对流性天气^[27]。

8月9日午后,甘肃中部气温上升到30~33℃,近地面层的气温升高加剧了气层的不稳定度。9日17—23时甘肃中部的兰州、靖远到宁夏的同心之间,存在一个中小尺度热低压,低压周围风场呈气旋性切变,有利于产生辐合上升运动;9日20时至10日02时甘肃中部到宁夏西部有地面辐合线形成并维持(图7),中尺度热低压与地面辐合线的存在,使该区域热力不稳定增加,上升运动加强,为对流发展提供了抬升触发机制。

为进一步研究此次强对流天气的触发机制,沿104.5°E作8月9日20时流场垂直剖面图(图8)。可见在36.50°N~38.25°N之间600 hPa以下为上升运动,在600 hPa以上有弱的下沉运动叠置在上升运动中心之上,下沉运动产生的对流抑制作用有利于对流不稳定能量的充分积累。在39°N附近,500 hPa以下为下沉运动,中心在800 hPa,使得中层冷空气向暖区入侵,直接触发强对流发生。从流场剖面图上看到,在37.5°N~39.5°N之间,700 hPa以下形成一个顺时针次级环流圈,使得冷空气在低层由北向南输送,抬升暖

区暖湿空气上升,在次级环流圈南侧形成强劲的上升运动,不断激发对流产生,为对流性强降水的发生提供了动力条件。

9日20时(图7a),陇中至宁夏地面辐合线附近有多个对流云团生成,并逐渐加强。21时(图7b)靖远北部与宁夏交界处的对流云迅速发展成强对流单体。从兰州多普勒雷达1.5°仰角反射率因子演变可见,从9日20时开始位于靖远县北部的对流云团快速发展,永新与北滩乡之间一直存在中心强度为50~60 dBz的强回波(图9a),垂直累积液态水含量VIL维持在15~20 kg/m²,强回波持续到22时后逐渐减弱,造成靖远县北部局地强对流暴雨,永新乡松柏站3 h累计降雨量达63 mm。

造成靖远县刘川镇强降水的对流系统,是由兰州到白银一带生成的多个强对流单体在东移过程中合并加强所形成的。9日20时,地面辐合线附近已有多多个中-γ尺度对流云团生成(图7),由于地面辐合线位置稳定且移动缓慢,对流单体在其附近不断合并加强。23时在白银和靖远县之间的对流云团发展进入鼎盛期,在对应的反射率因子图上,大于45 dBz的强回波排列紧密,中心强度达50~55 dBz(图9b),强降水期间强回波对应的垂直累积液态水含量VIL维持在约10~15 kg/m²。直到10日02时后,地面热低压减弱,地面辐合线逐渐东移,对流云团随之减弱,降水趋于结束,其中靖远县刘川镇鹰嘴站3 h累计降雨量达77.6 mm。

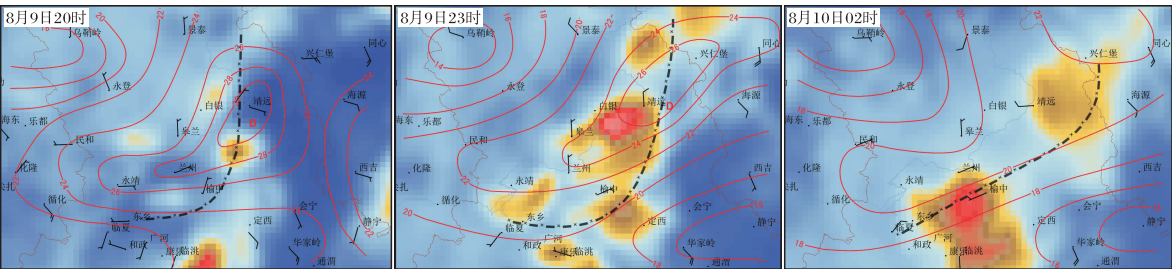


图7 2018-08-09T20—10T02地面风场(点划线为地面辐合线)、温度场(等值线,单位为℃)及FY-2G高分辨率红外云图演变

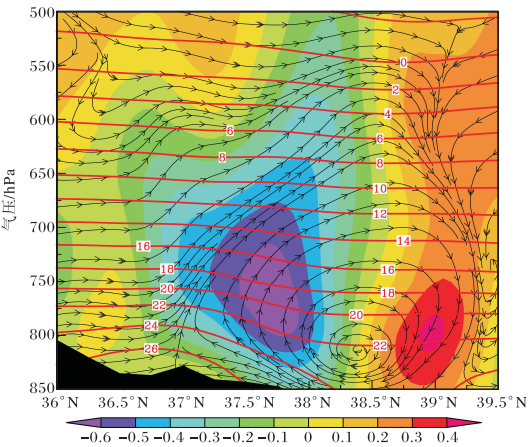


图8 2018-08-09T20沿104.5°E流场、垂直速度(影阴,单位为Pa/s)、温度场(红色实线,单位为℃)剖面图

靖远县永新乡和刘川镇一带强降水期间,40 dBz以上的回波高度普遍在4 km以下,无高悬强回波和回波悬垂,低质心短时强降水雷达回波特征明显。

3 结论与讨论

(1)2018年8月9—10日,西太平洋副热带高压西伸北抬,稳定少动的环流背景使得甘肃中东部处于高温高湿的环境,对流层低层水汽的辐合和垂直输送,为强降水发生提供了有利的水汽条件。

(2)低层正涡度辐合为强降水发生提供了有利的动力条件。强降水发生前低层暖湿平流的增温增湿,使得低层大气层能量积聚,甘肃中部地区

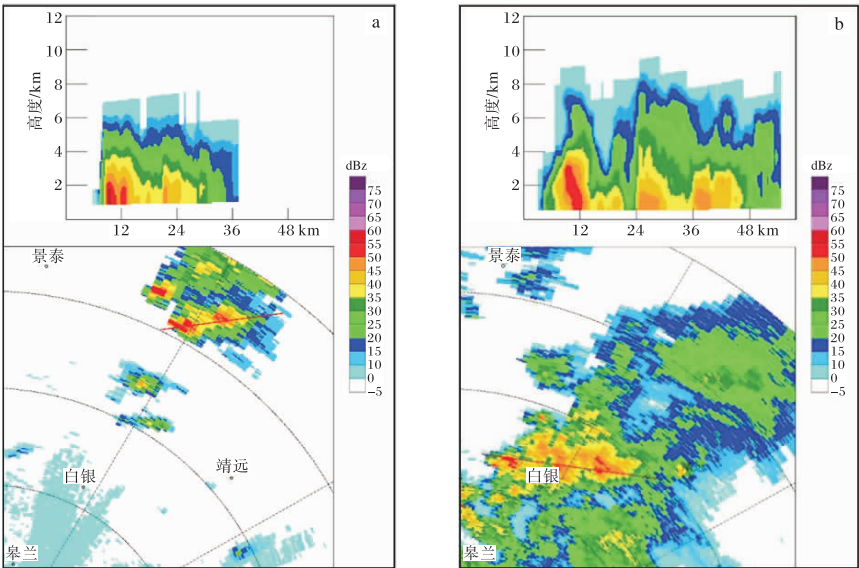


图9 2018-08-09—10兰州多普勒雷达1.5°仰角反射率因子及沿红色实线的垂直剖面图(a 9日20:49;b 10日00:09)

处于 θ_{se} 高能舌前,热力不稳定层结有了很好的发展。

(3)此次致灾短时强降水的形成与中小系统关系密切,中小尺度热低压使该区域热力不稳定

增加,中低层弱冷空气入侵、地面辐合线为强对流提供了触发机制,地面气旋性风场、南风气流和西北下沉气流耦合产生的次级环流为强对流提供了持续强劲的上升运动。

(4)此次强降水天气过程中,无高悬强回波和回波悬垂,低质心短时强降水雷达回波特征明显。

参考文献:

- [1] 陈元昭,俞小鼎,陈训来. 珠江三角洲地区重大短时强降水的基本流型与环境参量特征[J]. 气象, 2016,42(2):144-155.
- [2] 张弘,侯建忠. 青藏高原东北侧干旱半干旱地区持续强降水的一种形成机制[J]. 陕西气象,2008(3): 1-5.
- [3] 裴惠娟,陈晋,李雯,等. 甘肃省暴雨洪水时空分布及风险评估[J]. 自然灾害学报,2017,26(3):167-175.
- [4] 温丽叶,靳莉君,邱淑会,等. 近 10 a 黄河中游致洪暴雨物理量诊断分析[J]. 人民黄河,2014,36(7): 7-8.
- [5] 李萍云,赵强,王楠,等. 2005—2018 年陕西短时强降水时空分布特征[J]. 陕西气象,2019(5):34-39.
- [6] 谌芸,李强,李泽椿. 青藏高原东北部强降水天气过程的气候特征分析[J]. 应用气象学报, 2006,17(8):98-103.
- [7] 李栋梁,谢金南,王文. 中国西北夏季降水特征及其异常研究[J]. 大气科学,1997,21(3): 331-340.
- [8] 赵映东. 甘肃省暴雨洪水灾害的特点及防治[J]. 甘肃科学学报,2007,19(3):80-82.
- [9] 李德国,贾珺奎,金兴国. 甘肃省 2018 年防汛抗旱减灾工作回眸[J]. 中国防汛抗旱,2019,29(1):129-131.
- [10] 孙玉莲,祁晓龙,马玉坤,等. 临夏地区强降水气候变化特征及其影响条件分析[J]. 气象与环境科学,2020(1):68-74.
- [11] 曲晓波,张涛,刘鑫华,等. 舟曲“8.8”特大山洪泥石流灾害气象成因分析[J]. 气象,2010,36(10): 102-105.
- [12] 张之贤,张强,陶际春,等. 2010 年“8.8”舟曲特大山洪泥石流灾害形成的气候特征及地质地理环境分析[J]. 冰川冻土,2012,34(4):898-905.
- [13] 何秉顺,郭良,左吉昌. 甘肃岷县“5.10”特大山洪灾害调查[J]. 中国水利,2012(15):23-25.
- [14] 狄潇泓,许东蓓,肖玮,等. “5.10”岷县短时暴雨斜压锋生特征和不稳定条件分析[J]. 干旱气象, 2017,35(1):108-115.
- [15] 黄玉霞,王宝鉴,黄武斌,等. 我国西北暴雨的研究进展[J]. 暴雨灾害, 2019,38(5): 515-525.
- [16] 石光普,杨文科,王将,等. 2012 年白银市一次局地暴雨天气过程诊断分析[J]. 甘肃科学学报,2014, 26(1):22-26.
- [17] 陈少勇. 白银市山洪评估气象指标分析[J]. 科技创新导报,2007(31):133-135.
- [18] 张海霞. 靖远县山洪灾害成因及防治措施探讨[J]. 甘肃科技, 2011,27(16):72-73+104.
- [19] 孟丽霞,许东蓓. 甘肃省短时强降水的时空特征[J]. 沙漠与绿洲气象,2017,11(6):34-39.
- [20] 刘新伟,段海霞,杨晓军,等. 甘肃东部两次短时强降水天气过程对比分析[J]. 干旱气象,2017,35(5):868-873.
- [21] 尤红,姜丽萍,彭端,等. 2005 年 6 月广东特大暴雨垂直螺旋度分析[J]. 气象,2007,33(4):71-76.
- [22] 史小康,李耀东,刘健文,等. 华北一次暴雨过程的螺旋度分析[J]. 自然灾害学报,2012,21(4):48-56.
- [23] 李耀东,刘健文,高守亭. 螺旋度在对流天气预报中的应用研究进展[J]. 气象科技,2005,33(1):7-11+36.
- [24] 李耀辉,寿绍文. 旋转风螺旋度及其在暴雨演变过程中的作用[J]. 南京气象学院学报,1999,22(1):95-102.
- [25] 文宝安. 物理量计算及其在暴雨分析预报中的应用—水汽通量与水汽通量散度[J]. 气象,1980,31(6):34-36.
- [26] 孙继松,戴建华,何立富,等. 强对流天气预报的基本原理与技术方法[M]. 北京:气象出版社, 2014:23.
- [27] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社,2000:383-460.