

高宇星,毕旭,王瑞英,等.多源新型探测资料在西安一次强对流天气中的应用[J].陕西气象,2021(5):15-22.

文章编号:1006-4354(2021)05-0015-08

多源新型探测资料在西安一次强对流天气中的应用

高宇星^{1,2},毕旭²,王瑞英²,翟园²,刘峰²,黄蕾²

(1. 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;

2. 西安市气象台,西安 710016)

摘要:利用西安微波辐射计、西安风廓线雷达、FY-4A 卫星云图等新型探测资料,对 2018 年 7 月 26 日发生在西安地区的一次强对流天气过程进行分析。结果表明:(1)微波辐射计可以较好地反映液态水含量、大气相对湿度和云底高度在降水过程中的垂直变化规律。液态水含量越大,降水强度越强;相对湿度在强对流发生时呈现中间层的大值区向低层扩展趋势,中高层相对湿度明显减小,2 km 以下相对湿度急剧增加,加剧层结不稳定;云底高度在强对流前有剧烈波动,强降水时段降为 0 km。(2)在对流天气发生前,风廓线雷达水平风具有明显的垂直切变,水平风向、风速的不连续性明显。(3)FY-4A 闪电探测产品可以监测覆盖区域的总闪电,其分布与雷达回波及对流云团发展位置相吻合,时间变化趋势一致;卫星云图 TBB 最小值中心($<-65\text{ }^{\circ}\text{C}$)区域出现明显降水、大风天气,强降水位于对流云团内部、TBB 最小值中心附近。

关键词:强对流天气;微波辐射计;风廓线雷达;FY-4A 卫星

中图分类号:P412:P458

文献标识码:A

强对流天气具有突发性、强度大、局地性明显的特点,对于西安来说,暴雨、雷暴大风是夏季出现频率较高的强对流天气,其发生发展的机理相当复杂,常规监测手段难以捕捉,因此针对强对流天气的临近预报仍具有挑战性。目前研究手段主要为天气雷达及卫星云图特征的识别和外推,并结合探空资料进行潜势预报^[1]。随着探测手段的发展,应用新型观测资料可对强对流天气发生的潜势提前做出估计和判断,临近预报水平从而取得明显进步^[2]。大多数情况下,单一资料无法完整揭示天气系统的发展演变,在业务中需要配合多种资料才能完整把握其运动规律,多源新型探测资料已逐步应用于强对流天气监测预警中^[3-6]。探空资料反映强对流天气出现前大气温、湿层结构,雷蕾等^[7]利用探空资料甄别夏季强对流天气的类别;魏东等^[8]通过比较特种探空与常规探空

在强天气中的表现,探讨利用探空物理量预报强对流天气可行性。微波辐射计能够实时、连续遥测地面到 10 km 的大气温度、水汽、湿度、液态水分布等多种气象参数^[9-11],计算 MKI、KI、TT 和 HI 等不稳定指数^[12],对强对流天气有预警指示作用,可以为中小尺度天气研究提供决策依据。风廓线雷达采用微波遥感技术,应用多普勒原理,连续获得测站高分辨率的风场变化特征^[13],对研究中小尺度天气系统有重要作用。FY-4A 静止卫星多通道扫描成像辐射计的光谱通道达到 14 个,为实时天气监测提供高精度产品,其搭载的闪电成像仪(lightning mapping imager, LMI)利用闪电光辐射在 777.4 nm 中性氧原子近红外吸收谱线中最强^[14]实现对闪电的定位。这些高时空分辨率的探测产品可以为强对流实时监测和预警预报提供有

收稿日期:2020-10-24

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

通信作者:毕旭(1974—),男,陕西榆林人,学士,高工,主要从事天气预报及相关技术研发应用。

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青年基金课题(2019Y-4)。

效信息,具有重要的应用前景。

以往的研究多以单一观测分析为主,综合利用微波辐射计、风廓线雷达等新型探测资料对强对流天气的监测分析仍不多见。西安已建成风廓线雷达和微波辐射计,目前这类具有高时空分辨率的实时资料已应用于业务中。本文选取2018年7月26日西安一次强对流天气过程,侧重新型探测资料在对流预报方面的应用,对强对流天气特征进行判别,为新型资料在这类天气中的预报提供一定的参考依据。

1 资料

利用西安站 MWP967KV 型地基多通道微波辐射资料,西安泾河站移动风廓线雷达水平风资料,西安多普勒雷达资料,中国气象局国家卫星气象中心 FY-4A 卫星资料的闪电成像仪数据和反演产品,地面、高空观测资料等对2018年7月26日发生的一次强对流天气实时监测结果进行详细分析,探索新型资料在强对流天气中的变化特征及应用。

2 天气及其形势概况

2018年7月26日12—18时,西安出现短时暴雨,并伴有雷暴大风(图1),此次对流天气主要发生在西安城区及其北部、东部区县,最大降水量星火路立交站为42 mm,其中最大降水强度为40 mm/h,短时强降水造成城区26处积水,极大风速三桥阿房宫站为29.0 m/s,全市总闪电1683次,其中云闪1130次,云地闪553次。

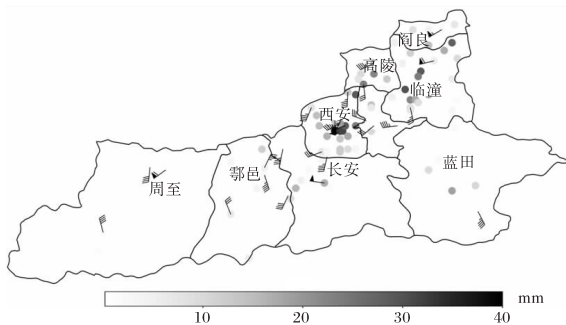


图1 2018-07-26 西安小时最大降雨量及超过6级的极大风速(风向杆)叠加图

降水过程发生前大陆高压和副热带高压持续偏北,7月17—26日西安地区连续10 d出现35℃以上高温天气,高温高湿有利于能量积累。

7月26日08时,500 hPa高空图上,关中地区受副热带高压控制;700 hPa图上,关中处于偏南暖湿气流中,河套至陇南一带存在显著切变线,西安处于风速辐合区,比湿为10 g/kg;850 hPa图上,关中为暖脊,陕西南部一带存在切变线,西安比湿为15 g/kg;地面风场上,08时关中地区近地层受东北风控制,12时秦岭一带存在辐合线,14时阵风锋产生的大风转为偏南风,14—16时地面降温非常明显,阵风锋过境气温持续下降,20时关中地区转为受西北气流控制,对流过程结束。

3 新型探测资料结果分析

3.1 微波辐射计

微波辐射计可以较好地反映液态水含量、大气相对湿度和云底高度在降水过程的垂直变化规律以及天气的变化特征^[15]。采用微波辐射计反演的液态水含量、温湿度廓线、云底高度以及由此反演计算得到的大气不稳定参数来分析此次对流天气过程。图2给出2018年7月26日10时至20时西安微波辐射计探测数据的时间剖面。此次过程,西安站降水集中在14—16时,小时最大雨量19 mm,出现在14—15时,微波辐射计探测降水时段与实况的降雨时段对应。液态水含量的变化与云量增减有关,降水期与非降水期的液态水含量有明显的差别^[16],非降水期液态水含量小于0.1 g/m³,当中低层液态水含量大于0.14 g/m³时,地面开始出现降水。在降水时段液态水含量呈现明显上升趋势,与降水强度有很好的对应关系,当液态水含量值越大时,降水强度越强^[17]。从图2a可以看出,14—16时强降雨期间,近地层液态水含量出现峰值区(≥ 0.28 g/m³),主要集中在0~2.4 km。16时后西安站转为小阵雨天气,液态水含量峰值区迅速减小,降水结束后液态水含量回落至0.1 g/m³以下,可以考虑将液态水含量大于0.1 g/m³作为降水临近的参考指标。

在相对湿度廓线上(图2b),10—14时整层大气相对湿度大于80%的高值区主要位于3~5 km,气层呈现上下干、中间湿的特征。降水开始前20 min,整层大气相对湿度明显波动;强对流发生时,相对湿度呈现出中间层大值区向低层扩展的趋势,中高层相对湿度明显减小,2 km以

下的相对湿度急剧增加,高层是小于 20% 的低值区,低层为大于 90% 的高值区,近地层达到饱和,上干下湿加剧层结不稳定。相对湿度随高度上升而递减,出现这一现象的原因可能是由于强降水伴随低层辐合上升、高层辐散下沉。一方面,下沉气流将上层的干冷空气带到下层,上升气流在抬升的过程中凝结成雨滴降落。另一方面,降水开始后水滴的拖曳作用导致近地面相对湿度较大。降水持续期间,充足的水汽及强劲的上升运动将水汽向上输送,中层大气逐渐趋于饱和,饱和区域向上扩展。降水结束时,大气相对湿度逐渐回落

至对流开始前的状态,相对湿度大值区中心上升至 3~5 km。

大气中空气相对湿度达到饱和时有利于云的形成,云底高度反映了空中水物质向地面的发展程度^[18]。12 时前(图 2c),云底高度位于 5 km 左右;12—14 时(对流开始前)云底出现剧烈波动;降水开始前 30 min,云底高度迅速降低,降水开始时降至 1 km 左右;14—15 时降水最强时段,云底高度近似为 0 km;降水减弱后,云底高度起伏较大;16 时后降水结束,云底高度逐渐平稳回升。通过此次过程来看,当出现强降水时,云底高度表

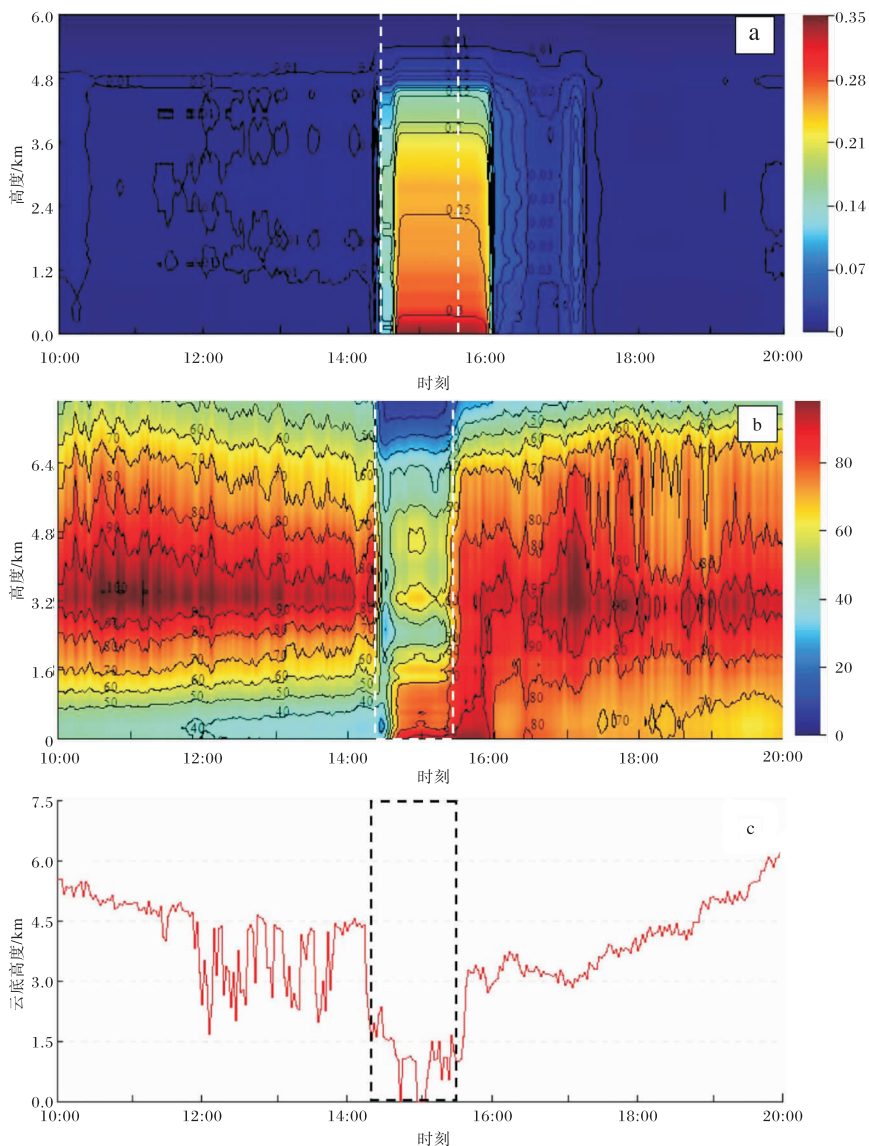


图2 2018-07-26 微波辐射计液态水含量(a,单位为 g/m^3)、相对湿度(b,单位为%),时间剖面图及云底高度(c)随时间变化图(图中虚线框内为强降水时段)

现为近似为零的特征。在强降水期间,大气相对湿度达到饱和或过饱和,云底高度则反映了空中水物质向地面的发展程度,水汽饱和和有利于空中水物质向地面发展。

地面降水的产生滞后于液态水含量、相对湿度和云底高度变化,随着降水的发生,各要素均发生骤变。云底高度的谷值与大气相对湿度和液态水含量峰值有很好的对应关系。降水结束,液态水含量、相对湿度、云底高度均趋于稳定。微波辐射计对西安上空的温、湿度分布有较好的探测性能,这些气象参数可以较好地反映强对流发展过程中的水汽变化规律。

不稳定指数实时监测结果以及二次反演计算出的多个大气不稳定参数对强对流天气预报有指示效果^[19]。图3给出2018年7月26日13—17时西安微波辐射计表大气不稳定指数变化特征。对流云降水开始前1 h, KI指数、TT指数和SI指数的数值没有明显变化,其中KI指数和TT指数均为大值。降水过程发生前10 min, KI指数从44.96 °C降为36.68 °C, TT指数从49.4 °C降为39.48 °C, SI指数从-2.68 °C升高至2.02 °C。强降水期间, SI指数达到峰值,为5.75 °C, KI指数、TT指数降至最低,分别降为21.2 °C和32.6 °C。SI、KI、TT三者数值在对流发生时有明显变化,随时间变化率比其他时段高,大气不稳定程度增加,发生强对流天气的概率不断增大。对流发生前后不稳定指数剧烈变化,14:30 SI指数达到峰值,同一时间 KI指数、TT指数降至谷值,峰值和谷值出现的时间较一致,这可能是因不稳定度指数均由微波辐射计反演的相同时刻的大气温、湿廓线计算而得。表1给出2018年7月26日西安微波辐射计大气不稳定指数。当强降水过程结束时,不稳定能量完全释放,CAPE值从对流前1451.5 J/kg降为0 J/kg, SI值由负值转为正值,层结趋于稳定。KI、SI、TT、CAPE等指数可用来预警西安地区强对流及暴雨天气,各指数的数值大小可以为对流云降水开始阈值提供参考^[20],对于对流性降水的发生有指示意义。

3.2 风廓线雷达

利用风廓线雷达可以获得高时空分辨率的水

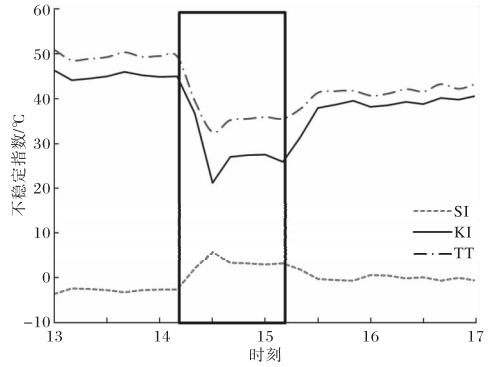


图3 2018-07-26微波辐射计表大气不稳定指数变化特征(图中黑色方框内为强降水时段)

表1 2018-07-26T13—T16 西安微波辐射计大气不稳定指数

不稳定指数	13时	14时	15时	16时
CAPE值/(J/kg)	1451.5	1147.1	0	0
SI指数/°C	-3.68	-2.72	2.89	0.56
KI指数/°C	46.37	44.94	27.53	38.26
TT指数/°C	50.94	49.51	35.93	40.7

平风资料,随时间变化的各高度层风羽图可以实时监测水平风的垂直切变及其切变发展的深度^[21]。图4给出的是2018年7月26日西安市泾河上空水平风向风速的变化图。13—14时,1 km以下为偏东风,1 km以上风向顺转为西南风,3700 m高度上风向已经转为偏西风,从水平风随高度的变化可知底层有较强暖平流,为强降水的产生积累了不稳定能量^[22]。雷暴等强对流的出现往往具有明显的风垂直切变,通过分析风廓线雷达的水平风垂直切变可判断雷暴发生的可能性。14:30后,近地层偏东风转为偏西风,风向风速的不连续性非常明显,这为降水的发生提供了触发机制;随着能量下传,风速也逐渐下传,阵风锋带来的大风主要是雷暴的出流导致。14:50泾河站出现18 m/s的极大风速,1 km以上为大于12 m/s的西南风急流带,风速随高度增加而明显增大,最大风速达24 m/s,西南气流的高度不断向下扩展,低空急流伴随着低层暖平流,为此次降水提供了水汽条件,泾河站1 h最大降水量为12.7 mm,出现在15—16时。16时之后,中低层已转为一致的偏西风,风速逐渐

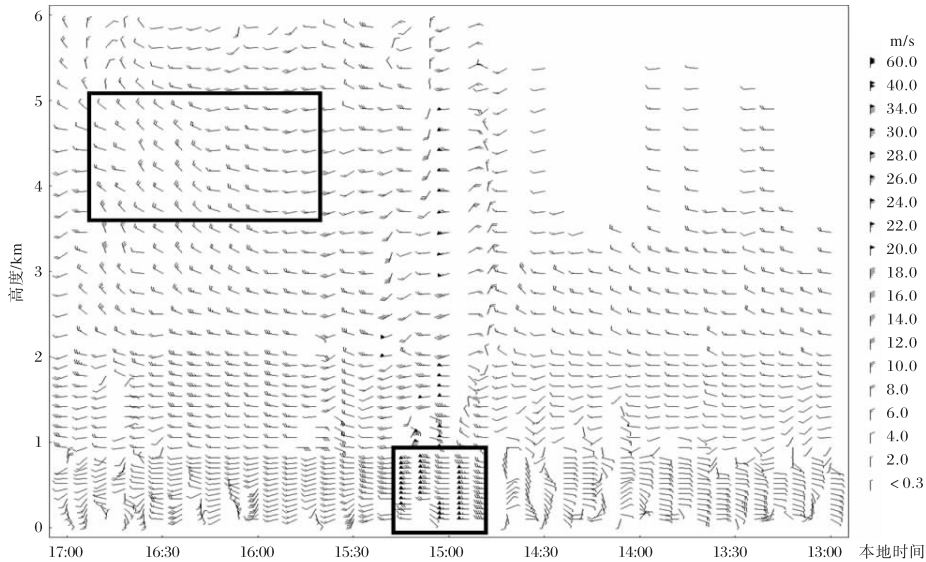


图4 2018-07-26 西安市泾河站风廓线雷达水平风向风速时间-高度变化图
(正方形黑色方框内为超低空急流,长方形黑色方框内为中高层西北气流)

减小,降水强度随之减弱,16:30 转为西北风,降水结束。

观测资料显示,在强降水即将发生时水平风向风速的不连续性明显,出现风向风速切变。风速大小可以判断急流的强弱,由此可见,在强对流发生之前,明显的风垂直切变可为强对流的临近预报提供依据。本文采用的是风廓线雷达的水平风数据,今后会开展对垂直风速、大气折射指数等的研究。在风廓线雷达空间观测点稀疏的现实条件下,单部风廓线雷达的观测产品只能从一个点的垂直风场结构反映具有四维特征的天气系统物理结构的演变特征^[23]。3部及以上的风廓线雷达可以组成一个小型区域观测网,或通过风廓线雷达、多普勒雷达和L波段探空组网技术的研究,建立多源探测风场资料集合平台,揭示大气风场的垂直结构及天气影响系统特征。

3.2 FY-4A 卫星

FY-4A 闪电探测产品可以监测覆盖区域的总闪电,不仅能够实现大尺度对流系统中的闪电监测,而且能够对小对流云团中的闪电活动进行监测^[24]。图5给出26日13—16时累计闪电分布图。可以看出在此次强对流天气过程中,关中地区闪电较多,尤其是关中东部一带闪电活动较为密集,这与13—16时关中东部的强降水相对

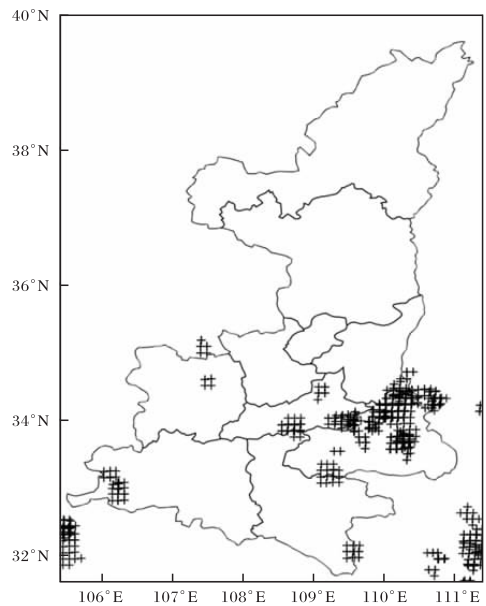


图5 2018-07-26T13—16时强对流天气
累计闪电分布

应。多普勒雷达资料显示,26日12:59 西安西南部有对流单体生成,对流发展高度在3~6 km,回波强度持续加强。13:50(图6a)西安南部山区有分散的对流单体活动,回波中心强度超过65 dBz。14:13(图6b)阵风锋前部触发多个对流单体,对流单体快速发展合并,雷暴发展加强,出现雷暴大风和强降雨天气。与之相对应的速度图上(图略),阵风锋位于风暴出流边界风速梯度最

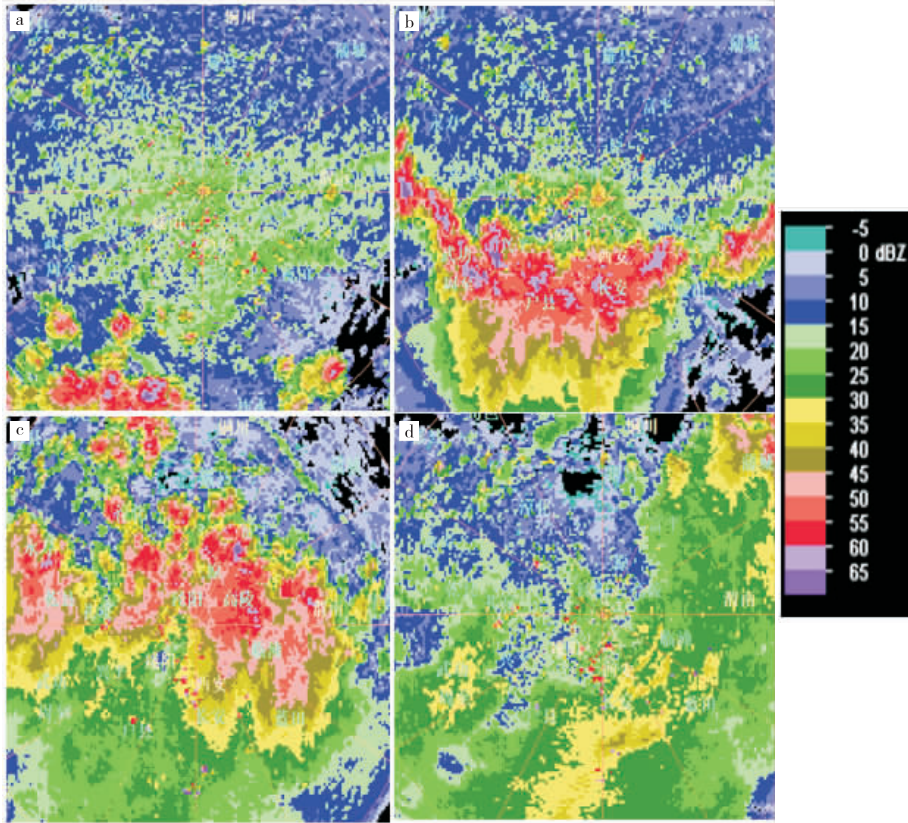


图6 2018-07-26 西安多普勒雷达组合反射率因子(a 13:50,b 14:13,c 15:27,d 16:35)

大区域,结合实况观测,大风主要出现在阵风锋后部强的反射率因子梯度区,且强回波有所断裂的部位^[25]。15:09(图6c)对流云团东移北上,45 dBz以上强回波范围扩大,对流单体合并形成中-β尺度的对流雨团,西安东北区域出现强降雨天气。16:35(图6d),回波减弱东移,开始出现松散结构,反射率强度在30~35 dBz左右,闪电活动开始减弱。19:03回波趋于消散,该区域基本无闪电活动。闪电活动与对流系统密切相关,当关中东部对流系统旺盛时,闪电也较为密集,闪电的空间位置分布、时间变化与强雷达回波及对流云团有一致性^[26],对对流系统判别和短临预警研究有指示意义。

FY-4A卫星云图TBB的范围及其变化与对流发展演变相关,图7给出26日13:30—16:30 FY-4A卫星逐小时TBB变化,发现14时(图略)西安偏西地区对流云团TBB中心小于 -60°C ,对流云团快速发展东移,西安周边出现降水。15:00(图7a)卫星闪电基本位于TBB值为 $-70\sim-55^{\circ}\text{C}$ 的区域内,TBB中心(中心值 $<-65^{\circ}\text{C}$)区

域出现明显降水、大风天气。强降水位于对流云团内部,TBB中心附近,此时西安城区为强降水(1h最大降水量星火路立交站为40 mm、北关站为32.8 mm)。风速大值区位于西安北部,泾河站极大风为18 m/s(14:50)、高陵站17 m/s(15:04)。16:00(图7b)云团东移发展扩大,TBB值小于 -60°C 的范围扩大,TBB最大梯度区位于西安东北部,此时降雨大值区集中在西安东部,对应临潼北田站、雨金站分别出现29.8 mm/h、28.9 mm/h的最大雨强。1h后(图7c)TBB值逐渐上升,对流活动渐趋减弱。18:00(图7d)TBB值大于 -50°C ,降水过程结束。

4 结论及讨论

(1)微波辐射计可以较好地反映降水过程中大气相对湿度、云底高度和云液态水含量的垂直变化规律。当液态水含量大于 0.14 g/m^3 时,地面开始出现降水,随降水过程发展云液态水含量明显上升。整层大气相对湿度在临近降水前出现明显波动。云底高度在降水最强时段近似为零。

(2)不稳定指数实时监测结果以及二次反演

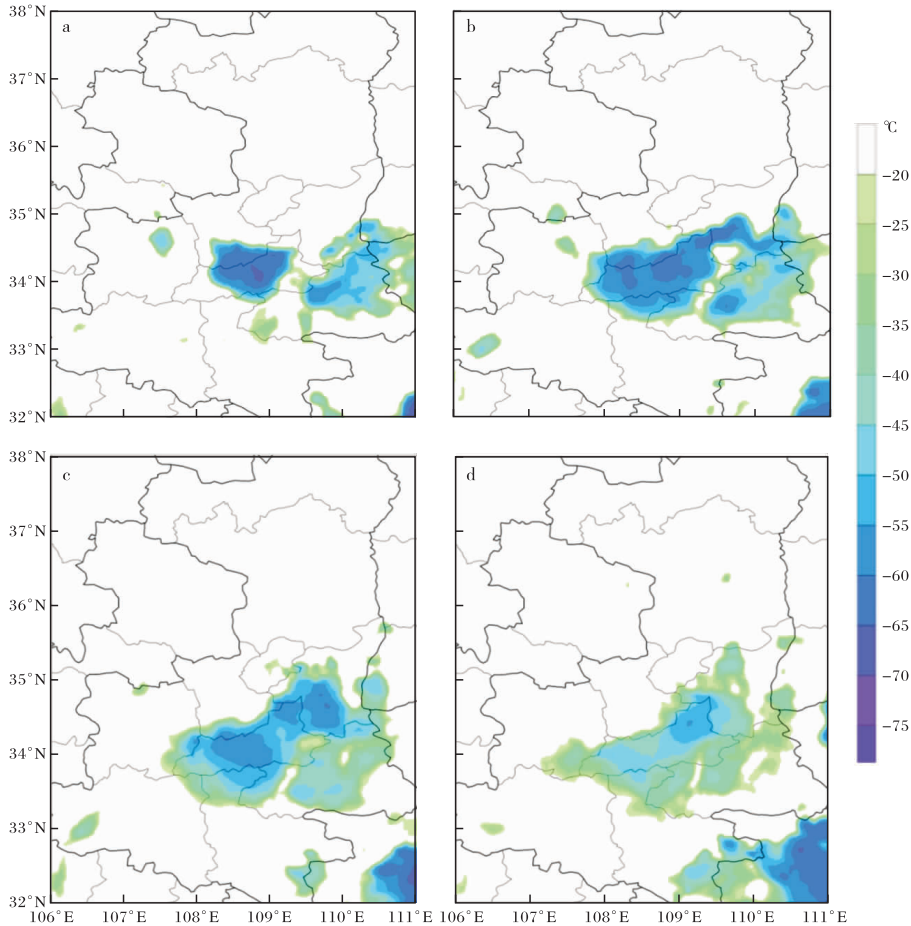


图7 2018-07-26 FY-4A 卫星 TBB 变化(a 15:00;b 16:00;c 17:00;d 18:00)

计算出的多个大气不稳定参数,对强对流天气预报有指示作用。在临近降水的 10 min, KI 指数、TT 指数、SI 指数随时间变化率比其他时段高;强降水期间 SI 指数达到峰值, TT 指数、KI 指数降至最低。

(3) 风廓线雷达水平风资料对强对流也有较好的指示意义,为强对流临近预报提供依据。强对流发生前,风廓线雷达资料显示环境大气场存在明显的水平风垂直切变,随着能量下传,风速也逐渐下传。

(4) 闪电活动与对流系统密切相关,当对流系统旺盛时, LMI 探测到的闪电也较为密集。强降水位于对流云团内部、TBB 中心附近, TBB 中心 ($< -65\text{ }^{\circ}\text{C}$) 区域出现明显降水、大风天气, TBB 值越低以及低值区的范围越大, 对流活动越强。

(5) 高时空分辨率的新型探测产品能直观地

反映对流过程中降水、风场的变化特征,为强对流实时监测、预警预报提供有效信息;但得出的一些结论还未经大量样本验证,尚待进一步定量分析研究。

参考文献:

- [1] 俞小鼎,周小刚,王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报, 2012, 70(3): 311-337.
- [2] 陶诗言,丁一汇,周晓平. 暴雨和强对流天气的研究[J]. 大气科学, 1979, 3(3): 228-238.
- [3] 郑飒飒,刘东升,范思睿,等. 基于多源探测资料对四川一次冰雹天气的分析[J]. 高原山地气象研究, 2019, 39(2): 43-48.
- [4] 万蓉. 我国暴雨研究中新型探测资料反演技术及其应用[J]. 气象科技进展, 2014, 4(2): 24-35.
- [5] 汪小康,王晓芳,崔春光,等. 用新型探测资料分析

- 武汉一次短时强降水过程的中尺度对流系统[J]. 暴雨灾害, 2012, 31(4): 321-327.
- [6] 李聪, 姜有山, 姜迪, 等. 一次冰雹天气过程的多源资料观测分析[J]. 气象, 2017, 43(9): 1084-1094.
- [7] 雷蕾, 孙继松, 魏东. 利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别[J]. 气象, 2011, 37(2): 136-141.
- [8] 魏东, 孙继松, 雷蕾, 等. 三种探空资料在各类强对流天气中的应用对比分析[J]. 气象, 2011, 37(4): 412-422.
- [9] 刘红燕, 李炬, 曹晓彦, 等. 遥感大气结构的地基 12 通道微波辐射计测量结果分析[J]. 遥感技术与应用, 2006, 22(2): 222-229.
- [10] 梁谷, 李燕, 岳治国, 等. 地基微波辐射计探测空中水个例分析[J]. 陕西气象, 2005(1): 24-26.
- [11] 肖贻青, 胡启元, 井宇, 等. 西安东部一次局地短时强降水天气过程分析[J]. 陕西气象, 2020(6): 1-8.
- [12] 唐仁茂, 李德俊, 向玉春, 等. 地基微波辐射计对咸宁一次冰雹天气过程的监测分析[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 806-813.
- [13] 张霁琛. 现代气象观测[M]. 北京: 北京大学出版社, 2000: 289-298.
- [14] 曹冬杰. 风云四号静止卫星闪电成像仪监测原理和产品算法研究进展[J]. 气象科技进展, 2016(1): 94-98.
- [15] 王健, 吕新生, 赵克明, 等. 地基微波辐射计对乌鲁木齐暴雨天气过程的观测分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2012, 6(3): 45-49.
- [16] 敖雪, 王振会, 徐桂荣, 等. 地基微波辐射计资料在降水分析中的应用[J]. 暴雨灾害, 2011, 30(4): 358-365.
- [17] 董保举, 高月忠, 张丽芬. 新型探测资料在滇西北高原一次暴雨过程监测中的应用[J]. 气象科技, 2014, 42(6): 1077-1082.
- [18] 范焯, 郭学良, 张佃国, 等. 北京及周边地区 2004 年 8、9 月层积云结构及谱分析飞机探测研究[J]. 大气科学, 2010, 34(6): 1187-1200.
- [19] 屈晓茜, 王泽斌, 陈昶, 等. 微波辐射计在西安咸阳机场强对流短临预报过程中的应用分析[J]. 科技风, 2019(23): 139, 151.
- [20] 张秋晨, 王俊, 李雪. 地基微波辐射计资料在对流云降水前的变化特征初探[J]. 高原气象, 2018, 37(6): 1578-1589.
- [21] 杨引明, 陶祖钰. 上海 LAP-3000 边界层风廓线雷达在强对流天气预报中的应用初探[J]. 成都信息工程学院学报, 2003, 18(2): 155-160.
- [22] 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): 40-48.
- [23] 曾瑾瑜, 汪学渊, 潘宁. 风廓线雷达资料在福建省气象局的业务应用现状与展望[J]. 海峡科学, 2017(12): 61-68.
- [24] 曹冬杰, 陆风, 张晓虎, 等. 风云四号卫星闪电探测产品在强对流天气监测中的应用[J]. 卫星应用, 2018(11): 18-23.
- [25] 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.
- [26] 陈洁, 曹继军, 苏炳彦, 等. 2008—2016 年陕西省雷电灾害特征分析[J]. 陕西气象, 2019(4): 33-36.