

陈小婷,彭力,邹长艳,等.商洛一次致灾短时强降水中尺度特征及预报预警分析[J].陕西气象,2021(2):1-8.

文章编号:1006-4354(2021)02-0001-08

商洛一次致灾短时强降水中尺度特征 及预报预警分析

陈小婷^{1,2},彭力³,邹长艳⁴,马晓华¹,胡启元¹,刘菊菊¹

(1.陕西省气象台,西安 710014;

2.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;

3.铜川市气象局,陕西铜川 727031;

4.武警第一机动总队直升机支队乌鲁木齐场站,乌鲁木齐 830017)

摘要:利用常规气象观测资料、陕西地面加密气象站监测资料、FY-4A 卫星红外云图、商洛多普勒雷达及多家数值模式预报产品,从提高预报预警、防灾减灾能力角度出发,对 2020 年 5 月 4 日商洛一次致灾性短时强降水天气的中尺度特征进行分析,总结有益的预报着眼点。结果表明:4 日午后商洛北部下垫面加热不均形成高温、负变压中心,500 hPa 冷空气越过秦岭后叠置在低层暖空气之上,大气不稳定性增加,低层东北路冷空气侵入不稳定区,形成地面辐合线触发不稳定能量释放产生强对流天气。强降水出现在中- β 尺度云团西北侧云顶亮温(TBB)梯度大值区。商州区腰市镇强的风速风向辐合以及气旋式旋转,使雷暴单体发展加强,强回波质心高度达 2~4 km,停滞缓动,高降水效率形成局地 80.5 mm/h 的强降水。ECMWF 模式 CAPE 值及整层可降水量的 EFI(extreme forecast index)指数、中尺度模式回波及降水量预报对过程极端性有一定的指示意义;对于地形条件复杂的地质灾害高风险区,在强降水发生有利的背景条件下,应根据强降水出现在地面加密资料要素梯度大值区,晚于雷电峰值时段等特征,密切监视天气演变,尽早发布预报预警,为防灾避险争取宝贵时间。

关键词:短时强降水;中尺度特征;预报预警;商洛

中图分类号:P458.2:X43

文献标识码:A

短时强降水是指 1 h 雨量大于等于某特定阈值的降水事件,1 h 降雨量 ≥ 50 mm 可称为极端短时强降水^[1]。短时间内强的降水可形成暴雨,造成农田渍涝、城市内涝,甚至引发泥石流、山洪等地质灾害,造成重大经济损失和人员伤亡,加强对其机理研究及邻近监测预警具有重要意义。很多学者针对本地长时间的短时强降水个例数据,分析其时空分布特征^[2-3],进行天气学分型^[4-5],统计本地短时强降水的预报预警指标^[6-8],建立客观

预报方法^[9],为强对流天气的防御提供帮助。随着高时空分辨率新资料的发展应用,短时强降水的中尺度特征得到更好解释^[10-15],为预报预警提供新的依据。徐珺等^[10]对复杂地形下一次短时强降水天气分析认为:小尺度地形辐射降温配合城市热岛在山前形成高温梯度区,山风与南风对峙使地面辐合线在山前移速变慢有助于热带云团的生成。吴进等^[11]分析表明,地面辐合线型强降水发生前 1 h 温度变率显著增大,3 h 前地面比

收稿日期:2020-08-08

作者简介:陈小婷(1984—),女,陕西宝鸡人,高工,硕士,主要从事灾害性天气预报及诊断分析研究。

基金项目:中国气象局预报员专项项目(CMAYBY2020-129);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研究课题(2020K-1)

湿增大,关注边界层气象要素及衍生物理量演变对强降水预警有一定指示意义。杨晓军等^[15]发现闪电密度的时空分布与强降水时空分布有较好的一致性,但在时间上闪电密度的变化提前于强降水落区的变化。

秦巴山区是陕西省暴雨频次高值区,秦岭山谷地区是陕西山洪水灾多发区^[16]。近年来秦岭南北麓的高温、干旱、暴雨等极端天气气候事件频发,气候生态灾害风险增大。2015年8月3日秦岭北麓西安多个区县降雨量突破历史极值,山洪、泥石流引发严重人员伤亡和基础设施破坏,导致陇海铁路西安段连续中断两天^[17-18]。2016年7月31日秦岭南麓商洛地区出现突发性强降水,导致金丝峡景区部分道路和车辆冲毁,2人死亡,景区被迫关停2个多月,经济损失超2亿元^[19]。秦岭的青山绿水既是自然财富,也是经济财富,山地凭借其特有的自然资源优势发展旅游产业是当地经济的重要增长点,而频发的暴雨洪涝使山地景区面临着越来越严重的次生灾害潜在风险,且其旅游产品的安全问题涉及到越来越庞大的人群^[20]。商洛地处秦岭南麓,研究该地区短时强降水天气的特征、成因及预报预警技术,对发挥气象在生态保护和修复中的支撑保障作用,提高广大人民群众避灾自救和抵御灾害风险的能力,巩固脱贫攻坚的成绩有重要意义。

2020年5月4日傍晚前后,商洛地区出现强对流天气,商州区腰市镇解村1h降雨量达到80.5mm,过程累计降雨量达108.8mm,突发短时强降水导致2万余人受灾。本文利用卫星、雷达、加密自动站等多种气象观测资料分析此次短时强降水过程的中尺度特征,同时对常用数值模式产品预报效果进行了分析,探讨有益的预报着眼点,以期更有效地做好此类天气的预报预警工作,发挥气象在保护人民生命财产安全以及秦岭生态修复中的支撑保障作用。

1 天气实况及灾情

2020年5月4日17时至5日00时商洛出现强对流天气,以短时强降水为主,局地伴有雷暴大风。从累计降雨量(图1a,见第3页)、强降水站次及雷电分布图(图1b,见第3页)可以看出:强

天气主要位于商洛东北部,集中在20—21时,局地性强、强度大。累计11站次出现短时强降水(1h降雨量 ≥ 20 mm),最大雨强为商州区腰市镇解村站为80.5mm/h,累计降水量108.8mm,达到大暴雨量级,沙河子镇和腰市镇解村出现8级大风。强天气导致烤烟、玉米等农作物受灾,多处河堤、桥梁、道路冲毁,商州区23370余人受灾,直接经济损失468.5万元,其中沙河子、腰市两镇灾害最严重。

雷电监测显示(图1b),4日17时至5日00时商洛地区共出现747次闪电,其中云闪451次,云地闪296次。17时从商洛东北部开始出现闪电,18—19时闪电频次迅速增多,19—20时达到峰值,1h闪电244次,22时之后显著减少。可见对流活动发展迅速,时段集中,闪电峰值提早降水峰值1h,闪电高密度区和后1h强降水落区基本匹配,闪电频次的迅速增加对强降水早期预警有很好的指示意义。

2 大气环流背景及探空资料分析

4日08时,500hPa上欧亚中高纬上空呈两槽一脊型,陕西北部受槽后脊前偏北气流影响,中南部地区有浅槽。20时(图2a)系统东移,500hPa陕西中北部有强冷平流向南输送,低槽加深位于陕西东南部,随着低槽东移携带冷空气过境,大气层结不稳定性增加,陕西东南部850hPa与500hPa温差达到29℃。850hPa风速显著增大,东北风和东南风在陕南东部汇合,形成气旋性辐合,为对流的发生提供了动力条件。随着偏南气流发展,西安、河南卢氏一带比湿增大至10~11g/kg,商洛东部温度露点差为0.2℃,水汽条件较好。地面图上(图略),华北地区冷高压底部东北路回流冷空气影响关中和陕南东部,产生东北西南向的地面辐合,有利于对流触发。

从卢氏站探空图(图2b)可以看出,大气700hPa以下基本呈饱和状态,中层500hPa附近有明显的干冷空气,是较为典型的上干下湿结构,有利于对流的发生。近地面为4.8m/s的偏东风,使冷空气向西侵入,形成低层冷垫,强迫抬升暖湿空气,在850hPa附近形成逆温层,500hPa

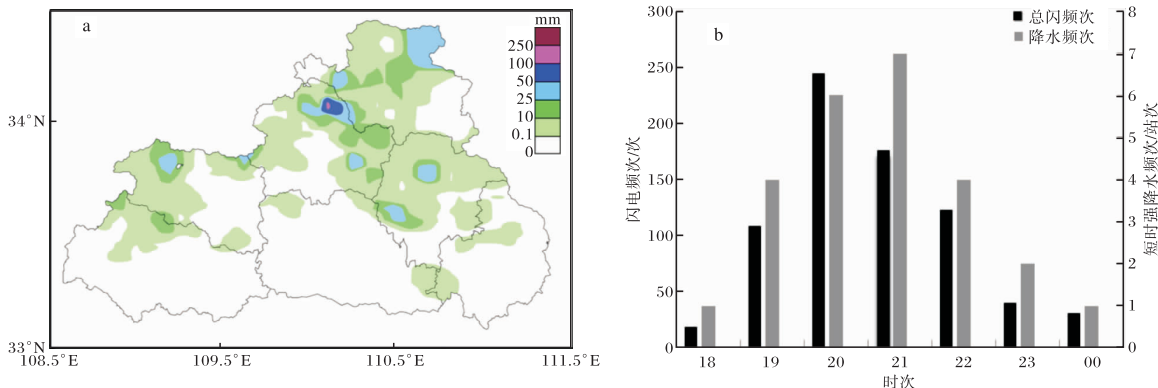


图1 2020-05-04T17—05T00 商洛累计降雨量(a)及雷电总闪频次、1 h $\geq$ 10 mm 降水频次演变图(b)(文见第2页)

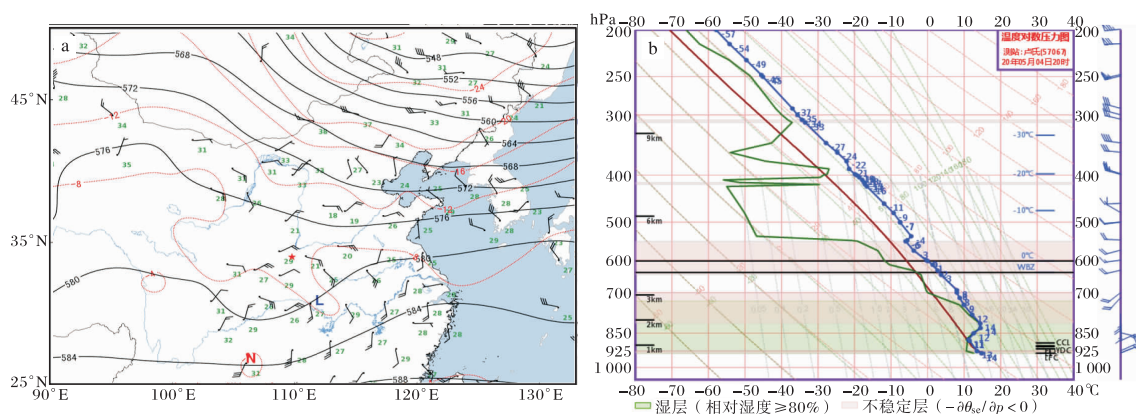


图2 2020-05-04T20 环流形势(a 黑色、红色等值线分别为 500 hPa 位势高度及等温线;风向杆为 850 hPa 风场;绿色数值为 850 hPa 与 500 hPa 温差;星号位置为腰市镇)及河南卢氏站温度对数压力图(b)

附近为 6 m/s 的偏西风,0~6 km 垂直风切变大于 10 m/s,属中等强度,有利于对流的维持和发展。可见,500 hPa 低槽过境,槽前正涡度平流有利于上升运动加强,同时高层冷平流使大气层结不稳定性增大;低层气旋式辐合和地面辐合线提供了良好的动力条件;陕西东南部 850 hPa 比湿达到 10 g/kg 以上,低层东路回流冷空气侵入水汽、能量条件较好商洛地区,产生地面辐合,触发不稳定能量释放,形成强对流天气。

3 中尺度特征分析

3.1 卫星云图演变特征

随着大气不稳定层结建立和上升运动发展加强,5月4日17:30 秦岭北界晋陕豫三省交界处有中- β 尺度云团生成发展,云顶亮温(TBB)为一64℃(图略),云团移动缓慢,有向西后向传播的趋势。18:45(图3a)秦岭北界长安、柞水交界处

有中- γ 尺度云团生成,TBB为一51℃,并向东发展。19:30(图3b)两云团合并形成带状,商洛北部5站出现雨强大于10 mm/h 的强降水,最大雨强为丰河村35.9 mm/h。20:00后(图3c)洛南上空云团迅速发展加强,云型呈椭圆形,结构密实,TBB降至-79℃,小于-58℃的面积扩大到3 000 km²,表明强的上升运动发展,在对流云顶西侧 TBB 梯度大值区的洛南县、商州区交界处6站出现雨强大于10 mm/h 的强降水,其中腰市镇雨强达到80.5 mm/h。随后云团呈椭圆形并向东南方向移动造成洛南、商州区南部及丹凤短时强降水,22:00(图3d)影响商洛地区的对流云团范围减小,强度减弱,雨强显著减小。可见,此次短时强降水主要发生在20:30—21:30,由水平尺度为100 km左右的中- β 尺度云团迅速加强发展形成,具有局地性强、维持时间短的特征。

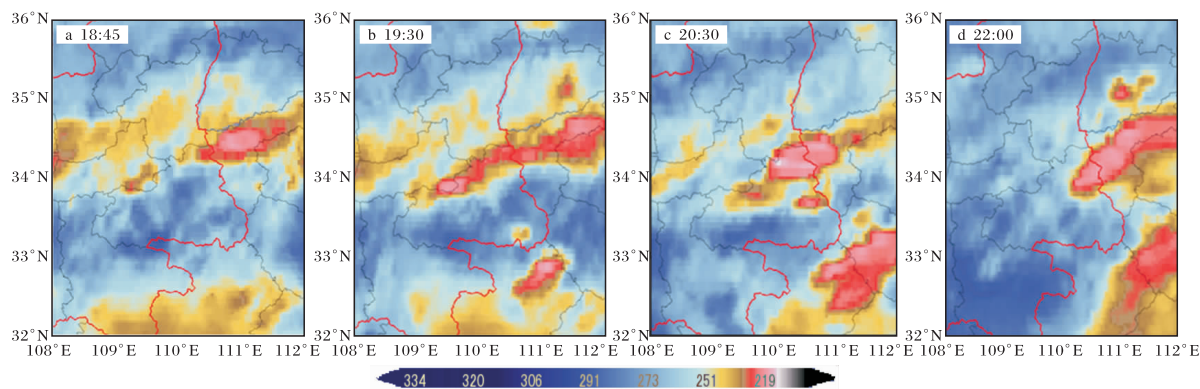


图3 2020-05-04 FY-4 红外云图

3.2 雷达回波演变特征

由于山区地形遮挡,商洛多普勒雷达低仰角回波遮挡严重,因此选取 1.5° 以上仰角和组合反射率因子综合分析雷达回波发展演变特征。腰市镇距离雷达本站 16 km 左右, 1.5° 和 4.3° 仰角垂直方向分别对应 1.4 和 2.1 km。

商洛组合反射率因子演变显示,19:03(图略)商州区东北部开始有雷暴发展,出现 3 个中心值

大于 45 dBz 的回波单体,随后回波发展加强。19:20(图 4a)45 dBz 以上回波面积显著增大,最强回波达到 60 dBz 以上。19:32 A 单体减弱趋于消失, B、C 单体迅速加强,中心强度可达 65 dBz。19:43(图 4b)B 单体减弱, C 单体仍然维持较强强度,对应速度图上 1.5° 至 4.3° 仰角均表现出风场气旋式旋转特征(图 4e),小尺度旋转导致上升运动加强,基本反射率因子图上出现弱回

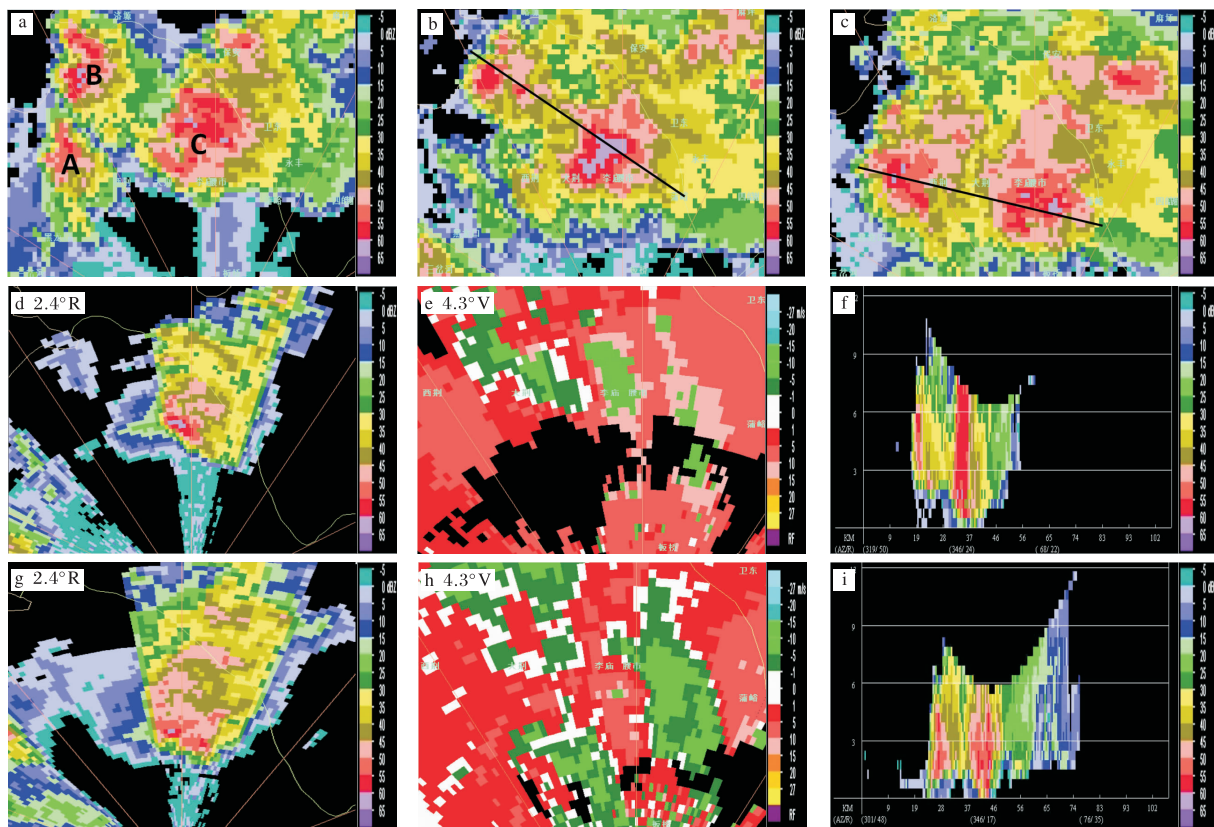


图4 2020-05-04 商洛多普勒雷达图(a、b、c分别为 19:20、19:43、20:17 组合反射率因子; d、e 为 19:43; g、h 为 20:17; f、i 分别为沿 b、c 中黑色直线的基本反射率因子剖面图)

波及高梯度区(图 4d),从剖面图(图 4f)可以看出,雷暴发展旺盛,55 dBz 伸展高度可以达到 7 km 以上,腰市镇开始出现降水,19:50 的 10 min 降雨量为 11 mm。19:55 旋转速度对有所东移,对应回波顶高为 8 km(图略)。腰市镇上空 60 dBz 的回波一直维持到 20:17(图 4c)。之后强回波开始向东南移动,腰市镇上空仍然存在 45~50 dBz 的回波,对应速度图上开始转为反气旋式环流(图 4h),回波强度略有减弱,梯度减小(图 4g),回波高度明显降低,强回波质心低,50 dBz 的强回波主要位于 4 km 以下的暖云层中(图 4i),降水效率高,20:20 腰市镇 10 min 降雨量为 22 mm。21:03(图略)之后回波移出腰市镇,强降水中心移动到商州区东南部。可见,小尺度的气旋式旋转导致局地上升运动强烈发展,多单体风暴中的 C 单体在腰市镇上空强烈发展,且强回波停滞缓动,回波质心低,降水效率高,造成该地区小时雨强达到 80.5 mm/h,雷暴发展达到最旺盛阶段开始出现强降水,回波质心下降,强度减弱阶段雨强达到峰值。

3.3 地面加密站要素特征分析

从加密站气象要素演变来看,4 日上午商洛北部天气晴朗,山区海拔高,受太阳辐射升温明显。14:00 较 08:00 升温接近 16℃,商州区、洛南县中北部形成 32℃ 的温度高值中心及 -2.8 hPa 的 3 小时变压中心(图 5a、图 5b,见第 7 页)。相较而言,商洛南部云量多,升温幅度小。由于局地下垫面加热不均,位于秦岭山脉南麓的商洛北部午后低层为暖空气控制,南北之间形成明显的温度及变压梯度,当冷空气越过秦岭后,冷平流叠加在暖气团之上,大气对流不稳定增强,同时局地热力不稳定及负变压中心形成,有利于空气辐合上升,触发不稳定能量释放,形成雷暴天气。

风场演变显示,18—19 时,洛南县中部由 2 m/s 左右偏东风增强至 6 m/s 左右偏东风,携带冷空气向西侵入,19 时洛南县大部分地区 24 h 降温 6~10℃(图 5c,见第 7 页),中南部 1 h 降温 3~5℃,与商州区之间形成明显的温度梯度。19—20 时商州区从 5 m/s 东南风转为 8 m/s 偏北风,20 时之后迅速减弱为 1~2 m/s 东南风。较强偏北风带

来冷空气入侵的同时,与周围较弱东南风之间形成辐合,有利于上升运动发展,触发强对流天气。

腰市镇解村站(降水量最大)要素演变(图 5e,见第 7 页)显示,19 时前以 1.6~5.4 m/s 东南风为主,之后转为 5.5~10.7 m/s 偏东风,同时温度降幅增大,40 min 降温 3.5℃,明显高于气温日变化的降幅。19:50 风向逆时针转为偏北风,10 min 降水量达 11 mm,由于降水出现,温度进一步下降。20:10 东北风增大至 12.1 m/s,商州区北部偏北风和洛南县偏东风之间形成地面辐合线(图 5d,见第 7 页),随后 10 min 降雨量达到 22 mm。与周边站点对比可以看出,腰市镇解村站风速变化最剧烈,最大风速达到 19.5 m/s,风向逆时针旋转,洛南县和商州区之间存在直径 20 km 左右的气旋式环流,局地强的风速风向辐合以及气旋式旋转造成腰市镇极端强降水。随着偏北风南下,21:00 辐合线南压至丹凤北界,短时强降水中心南移。

4 预报防御思考及讨论

对业务常用数值模式预报效果进行分析,探讨此次天气的可预报性及如何更好地做好预报服务,为防灾减灾提供参考。

ECMWF 细网格环流形势及环境条件预报显示:午后商洛地区具有良好的动力条件及水汽条件,冷空气侵入高温高湿的不稳定区,有利于触发不稳定能量释放,形成强对流天气。ECMWF 细网格、GRAPES、NCEP 三家全球数值模式降水量预报结果及调整趋势表明午后商洛地区将出现明显降水,可见利用全球模式资料可以提早 12 h 做出短时强降水潜势预报,但是无法估计降水极端性。

ECMWF 的 EFI(extreme forecast index,下简称 EFI)指数是基于集合预报产品发展的一种极端天气预报方法^[21],其绝对值大小可以反映事件的异常度,该指数可以提示预报员极端事件的可能性,属于早期预警产品。此次过程中,ECMWF 细网格整层可降水量的 EFI 指数(PWAT-EFI,图 6a,见第 8 页)14 时后在关中东部、陕南东部大于 0.6,商洛北部局地达到 0.7,表明水汽含量存在一定的异常性。对流有效位能的 EFI 指数

(CAPE-EFI,图 6b,见第 8 页)同样在商洛地区存在大于 0.5 的大值中心,表明该地区不稳定能量条件存在一定的极端性。华南中尺度模式 GRAPES-MARS、华东区域数值模式 WARMS V2.0(下简称 WARMS V2.0)均预报 4 日 16—23 时有对流回波发展影响商洛地区,最强回波强度 55 dBz 以上(图 6c,见第 8 页),雨强可以达到 50 mm/h 以上,其中 WARMS V2.0 强降水中心位于商洛中北部,最强时段在 4 日 21 时,6 h 降雨量可达 100 mm 以上(图 6d,见第 8 页)。结合潜势预报、CAPE-EFI 和 PWAT-EFI 的信息,应该对出现极端性天气这种高影响低概率事件保持足够的关注和警惕。

在临近时段需要加强对雷达、卫星、闪电以及加密站资料分析,利用前文总结的对预报有指示意义的中尺度演变特征,做好强天气的监测预警。这些特征包括:冷空气入侵的时间、位置;温度、变压的高梯度区;闪电的峰值早于降水峰值;中尺度云团 TBB 梯度大值区;雷达回波发展到旺盛阶段降水开始,减弱阶段达到峰值,强回波低质心且停滞缓动。另外,0~2 h 回波及分钟级降水客观预报产品可为强降水临近预报提供技术支持。此次过程中,19:45 雷暴发展旺盛阶段,陕西省短时临近智能预报服务系统^[22]回波外推显示,未来 1 h 回波在商州东北部维持,强度为 45~55 dBz,移动缓慢,2 h 后向东南移动,对商州区的影响结束。Z-I 关系计算的腰市镇解村 20—21 时降水强度最强,达到 70 mm/h 左右,有助于预报员尽早发布预报预警。对于地形条件复杂的地质灾害高风险区,在强降水发生有利的背景条件下,要充分应用高时空分辨率观测资料及预报产品,密切监视天气发展演变,尽早发布预报预警,做到宁空勿漏、宁高勿低。

5 结论

(1)500 hPa 低槽过境,槽后冷平流增强大气层结不稳定度;商洛地区良好的水汽和能量条件为强对流天气发生提供有利的环境背景。

(2)短时强降水发生前商洛北部地区存在下垫面加热不均形成的高温、负变压中心,高层冷空气翻越秦岭后叠置在低层暖空气之上,使大气层

结不稳定增强;低层东北路冷空气入侵,形成地面辐合线,触发上升运动释放不稳定能量,产生强对流天气。

(3)强降水出现在中尺度云团云顶亮温(TBB)梯度大值区;雷暴发展最旺盛阶段开始出现强降水,回波质心下降,强度减弱阶段雨强达到峰值;雷电总闪频次峰值早于强降水峰值,有助于提早发布预警信号。

(4)风场气旋式旋转导致局地对流单体强烈发展,强回波停滞缓动,回波质心 2~4 km,降水效率高,有利于短时强降水发生。腰市镇风场变化较周边站点更剧烈,存在强的风速风向辐合以及气旋式旋转,是其降水明显强于周边站点的原因。

(5)对此类天气预报预警有益的产品及特征包括:ECMWF 模式 CAPE-EFI 及 PWAT-EFI、中尺度模式回波及降水量预报产品对天气极端性的指示;中- β 尺度云团 TBB 梯度大值区、雷电总闪高密度区、地面加密资料要素梯度大值区以及雷达回波外推产品对降水落区的指示意义。对于地形条件复杂的地质灾害高风险区,在强降水发生有利的背景条件下,应结合中尺度特征演变,尽早发布预报预警,为防灾避险争取宝贵时间。

参考文献:

- [1] 俞小鼎. 短时强降水临近预报的思路与方法[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(3): 202-209.
- [2] 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.
- [3] 姚蓉, 唐佳, 王晓雷, 等. 湖南短时强降水时空分布及相关环境参数统计分析[J]. 灾害学, 2020, 35(2): 116-121.
- [4] 杨诗芳, 郝世峰, 冯晓伟, 等. 杭州短时强降水特征分析及预报研究[J]. 科技通报, 2010, 26(4): 494-500.
- [5] 冯晋勤, 汤达章, 曹长尧. 福建西部山区短时暴雨雷达回波特征及中小尺度系统分析[J]. 气象, 2014, 40(3): 297-304.
- [6] 郝莹, 姚叶青, 郑媛媛, 等. 短时强降水的多尺度分析及临近预警[J]. 气象, 2012, 38(8): 903-912.

- [7] 李德俊,唐仁茂,熊守权,等. 强冰雹和短时强降水天气雷达特征及临近预警[J]. 气象,2011,37(4): 474-480.
- [8] 黄艳,俞小鼎,陈天宇,等. 南疆短时强降水概念模型及环境参数分析[J]. 气象,2018,44(8):1033-1041.
- [9] 白晓平,靳双龙,王式功,等. 基于 Logistic 回归和多指标叠加的短时强降水预报模型[J]. 气象科学,2018,38(4):135-140.
- [10] 徐珺,毕宝贵,谌芸,等. "5.7"广州局地突发特大暴雨中尺度特征及成因分析[J]. 气象学报,2018,76(4):511-524.
- [11] 吴进,李琛,于波,等. 两类短时强降水天气边界层气象要素变化特征[J]. 气象,2018,44(7):902-910.
- [12] 郭荣芬,鲁亚斌,李华宏. 盛夏昆明两次致灾大暴雨对比分析[J]. 灾害学,2018,33(4):122-128.
- [13] 吴涛,牛奔,许冠宇,等. 利用天气雷达平均散度产品分析短时强降水大气低层辐合特征[J]. 暴雨灾害,2018,37(4):319-329.
- [14] 万瑜,曹兴,杨莲梅. 中亚低涡背景下中天山地区一次短时强降水过程中尺度特征[J]. 气象与环境学报,2018(4):1-10.
- [15] 杨晓军,刘维成,宋强,等. 甘肃中部地区短时强降水与闪电关系初步分析[J]. 干旱气象,2015,33(5):802-807.
- [16] 杜继稳,侯明全,梁生俊,等. 陕西省天气预报技术手册[M]. 北京:气象出版社,2007:22-25.

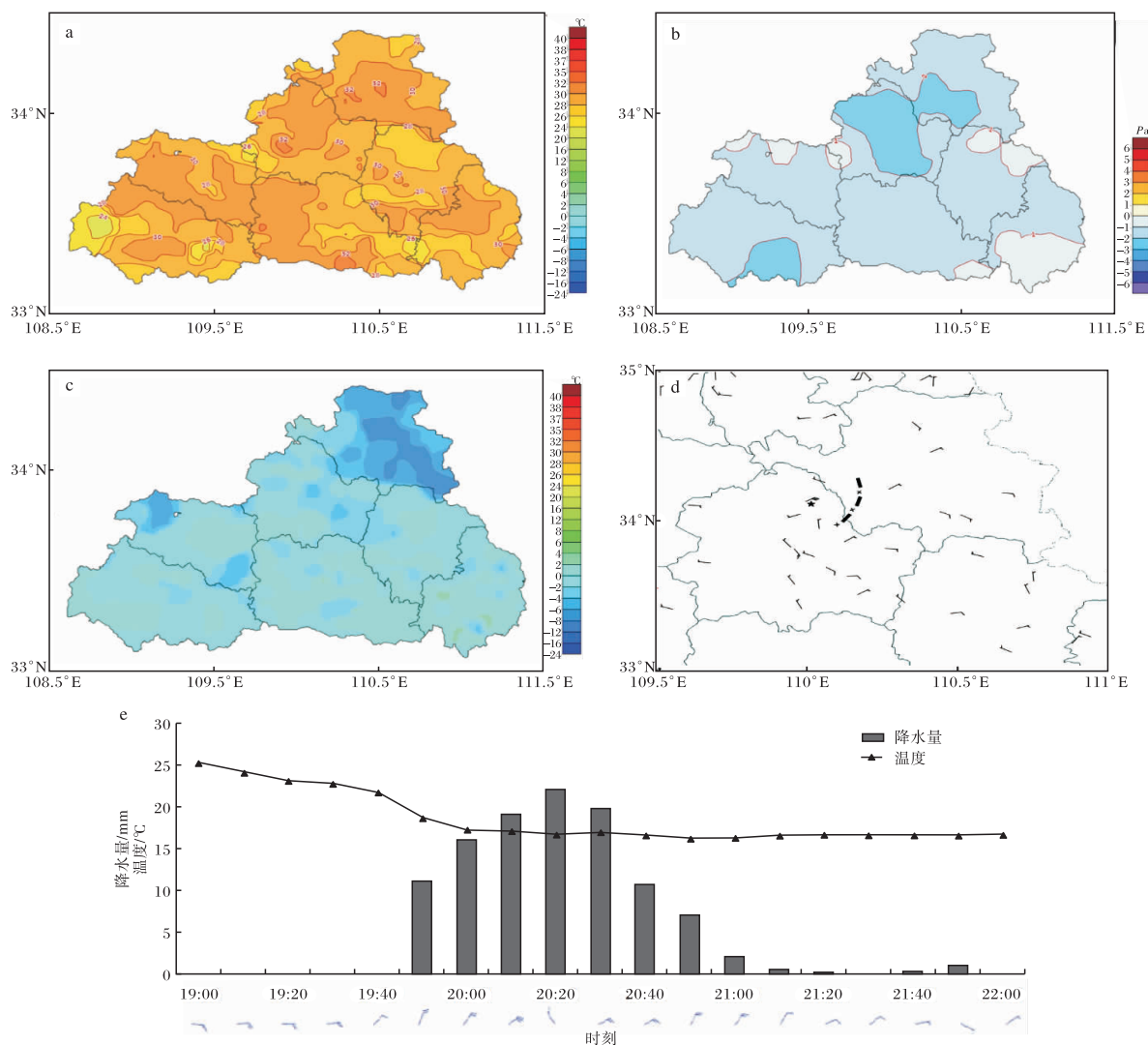


图5 2020-05-04 商洛地区地面加密要素分布特征(a 14时气温;b 14时3h变压;c 19时24h变温;d 20:10地面风场及辐合线)及腰市镇解村站19—22时10min要素演变图(文见第5页)

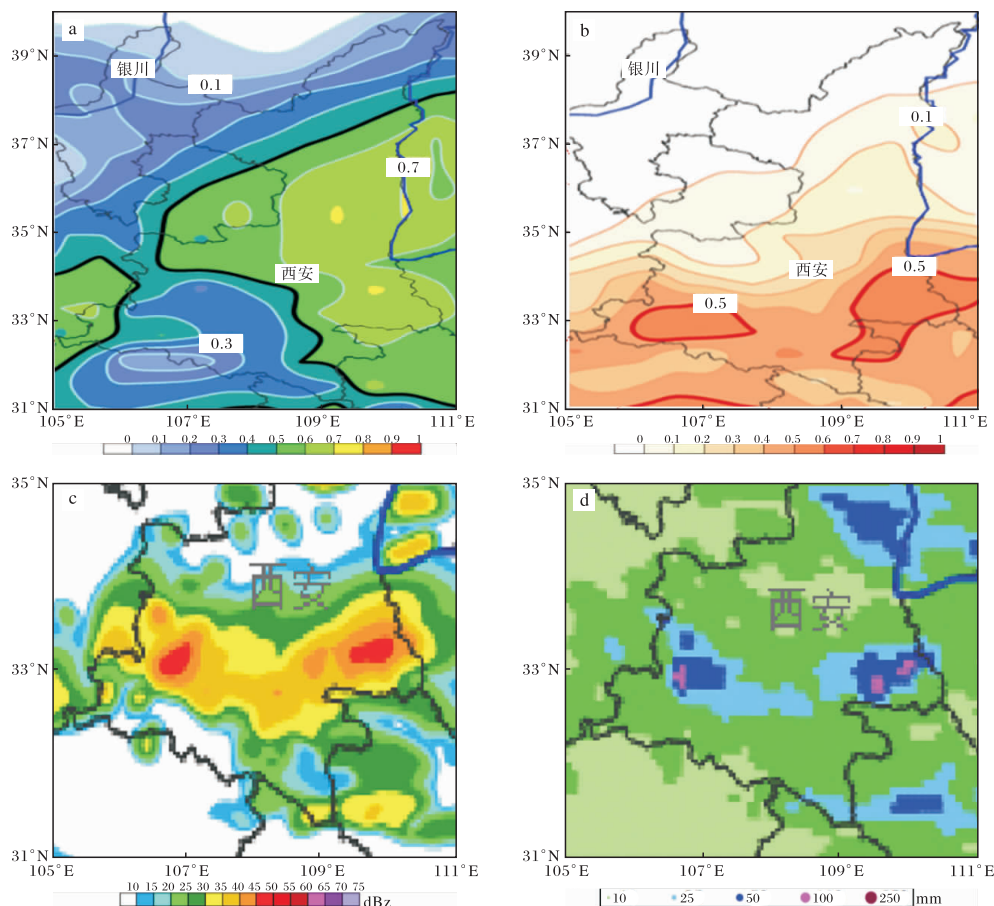


图6 2020-05-04 ECMWF模式预报4日20时PWAT-EFI(a)、CAPE-EFI(b)以及华东区域模式预报4日21时回波(c)、4日19至5日01时6h降水量(d)(文见第5页)

- [17] 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):122-127.
- [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.
- [19] 侯建忠,井宇,陈小婷,等. 2016年商洛"7·30"局地突发性大暴雨综合分析及预报着眼点探讨[J]. 陕西气象,2017(5):1-5.
- [20] 王彦泽,王晓峰. 基于未确知测度模型的秦岭华阳古镇景区暴雨防灾减灾能力评价[J]. 自然灾害学报,2017,26(1):67-79.
- [21] LALAURETTE F. Early detection of abnormal weather conditions using a probabilistic extreme forecast index[J]. Q J R Meteorol Soc,2003,129(594):3037-3057.
- [22] 胡启元,姚静,王楠. 陕西省短时临近智能预报服务系统简介[J]. 陕西气象,2019(5):44-50.