

宁欣婷,王文波,杨丽,等. 多源观测资料在延安两次强对流天气监测预警中的应用[J]. 陕西气象,2025(2):9-18.

文章编号:1006-4354(2025)02-0009-10

多源观测资料在延安两次强对流天气 监测预警中的应用

宁欣婷¹,王文波^{1,2},杨丽^{1,2},薛丹妮¹,李雨星¹

(1. 延安市气象台,陕西延安 716000;

2. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室,西安 710016)

摘要:利用 NCEP($1^{\circ}\times 1^{\circ}$)逐 6 h 再分析资料,延安多普勒天气雷达、微波辐射计、风廓线雷达以及探空观测等资料,对延安市 2023 年 6 月 26 日和 6 月 27—28 日的两次强对流天气进行分析。结果表明:(1)6 月 26 日,延安位于高空槽后部的西北气流中,受到干冷空气输送的影响,同时低层存在风向切变,导致了降雹天气;而 6 月 27—28 日,受高空西风槽前暖湿气流、低层偏南风以及风向辐合的共同作用,导致了降雹和降水天气的发生。(2)6 月 26 日多普勒天气雷达有明显的 V 型回波特征,对应了降雹天气过程,而 6 月 27—28 日降雹前多普勒雷达出现了钩状回波特征。两次强对流天气过程中降雹时段的 V 型回波与钩状回波均存在有界弱回波区,强回波均接地,V 型回波强回波质心高度要低于钩状回波,同时 V 型回波强度横向伸展的范围也较宽;另外,降水时段雷达回波比降雹时段要弱。(3)6 月 26 日局地降雹发生时,微波辐射计的温湿廓线显示有冷空气向下侵入,出现上冷下暖的不稳定层结现象,积分云液水含量和整层水汽垂直积分在降雹过程中无明显的规律性变化;6 月 27—28 日降水时段高空温度上升,中层大气相对湿度趋于 100%,积分云液水含量和整层水汽垂直积分在降水前增加,降水时段保持较大值,降水结束后减弱。(4)从两次强对流天气过程中风廓线雷达水平风资料中均可以看到明显的风向随高度顺时针旋转的特征,6 月 26 日降雹前至降雹时段,高空有干冷空气,而低层则为偏南风;对于 6 月 27—28 日的强对流天气,对流层低层至中层在降水前至降水最强时段均为偏南风,在降水结束后逐渐转为偏北风。

关键词:强对流天气;多普勒天气雷达;微波辐射计;风廓线雷达

中图分类号:P458.3

文献标识码:A

强对流天气尺度小,时间短,具有突发性,常对人们的生命财产安全造成严重影响。延安市夏季强对流灾害性天气尤为显著,且强对流天气发生的机理相对复杂,利用常规监测手段进行预报存在一定的难度。近年来,微波辐射计、毫米波云雷达、风廓线雷达等新型观测设备逐渐应用到强对流天气的相关业务与科研中,高精度、高时空分辨率的非常规观测资料可对强对流天气潜力的预

估和判断提供帮助,使临近预报水平得到显著进步^[1-2]。在强对流天气诊断分析方面,张树民等^[3]、高晓梅等^[4]和周慧等^[5]分别对江苏、山东、湖南的典型强对流天气过程进行了动力、热力条件以及雷达回波特征等的演变分析。在业务应用中,微波辐射计可实现对温度、湿度及液态含水量的连续监测,可分析得到短时临近天气预报指标,对降水、冰雹天气有重要的预警和指示作用^[6]。

收稿日期:2024-06-19

作者简介:宁欣婷(1994—),女,汉族,陕西宜川人,硕士,助工,主要从事灾害性天气预报及研究。

基金项目:延安市气象局生态·水环境资源开发与应用研究实验室 2023 年度科研课题(2023M-8);秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2021K-3;2022G-1)

风廓线雷达可以连续获得大气垂直分布的水平廓线,是加强灾害性天气监测能力的重要手段^[7]。专家学者利用微波辐射计资料,针对降雹天气过程中温湿参量及水汽含量演变规律,分析冰雹产生的原因,为降雹天气的预警提供了指示作用^[8-9]。黄晓莹等^[10]提出在强降水天气时段,微波辐射计对流参数的增大与减小和实况降水的发生与强弱有对应关系,可用于预报降水的发生与强弱。王万筠等^[11]利用微波辐射计测得温度和露点温度代替探空曲线资料,并结合风廓线雷达等观测资料,对天津一次局地暴雨过程的温湿场特征进行了诊断和分析。通过对强对流天气时风廓线雷达产品的分析发现,风廓线雷达能够实时监测风的基本变化趋势和切变,捕捉干侵入过程,且能够连续观测与降水有关的高低空急流发生发展的全过程,从而进一步为强对流天气的短时临近预报提供较好的指示意义^[12-15]。另外,王欣等^[16]提出风廓线雷达对水平风的垂直结构有较强的探测能力,并将风廓线雷达资料与同步探空仪资料进行了对比,验证了风廓线雷达资料的可信度。尽管各地在强对流天气观测方面的研究已经多且细,但在黄土高原复杂地形影响下,强对流天气的新型观测资料分析还相对较少,目前延安地区的微波辐射计、风廓线雷达等新型观测设备已投入业务应用中,中尺度对流性天气的监测能力得到进一步加强。本文主要通过通过对延安市2023年6月26日和6月27—28日发生的冰雹、降水天气中多源观测资料的特征进行分析,探讨两次强对流天气发生发展的规律,

为强对流天气的预报预警提供一定的参考依据。

1 资料

所用资料包括 NCEP($1^\circ \times 1^\circ$)再分析资料、常规地面观测资料、L波段风廓线雷达资料(YKD2型)、探空观测资料,以及延安多普勒天气雷达资料、微波辐射计(YKW1型)资料、毫米波测云仪等多源观测资料。风廓线雷达、微波辐射计和毫米波测云仪等观测设备位于延安市国家基本气象站(下称延安观测站)。

2 天气实况及环流背景

2.1 天气实况

2023年6月26日12时至22时,延安市自西北向东南出现了冰雹天气(图1a),其中延安市宝塔区在17:09和18:16发生了两次持续时间均为20 min的降雹天气,降雹地点分别位于宝塔区东部的甘谷驿及东南部的临镇地区,此次强对流天气过程中,延安观测站上空均未出现降雹和降水天气。2023年6月27日14时—28日08时,延安市出现雷暴大风、短时强降水及冰雹天气,其中27日下午17:50在宝塔区北部的蟠龙地区出现了降雹天气,持续时间约为10 min,27日14时—28日08时延安市各县(区)气象监测站累计降水量如图1b所示。6月27日08时—28日08时极大风分布如图1c所示。对于此次强对流天气,延安观测站累计降水量为23.3 mm,降水于6月27日19时后开始,28日00—02时为降水间歇时段,02时后又出现少量降水,04时后降水结束,最强降水时段出现在27日20—21时。

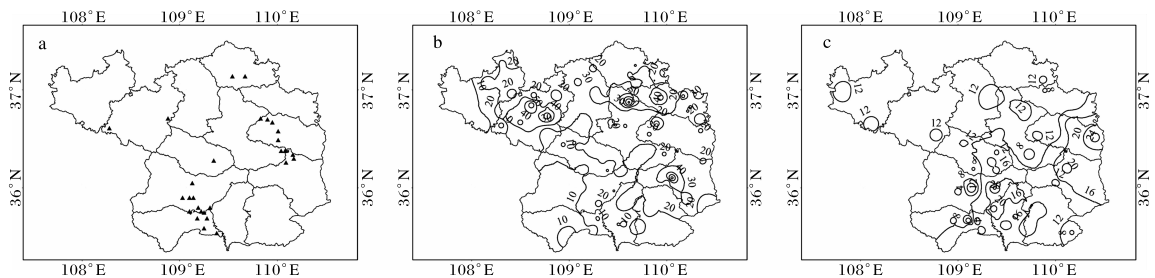


图1 2023-06-26延安市各县(区)冰雹落区(a黑色实心三角形为冰雹落区)、2023-06-27T14—28T08延安市各县(区)累计降水量(b单位为mm)和2023-06-27T08—28T08延安市各县(区)极大风分布(c单位为m/s)

(审图号为GS(2024)0650号)

2.2 环流背景

6月26日08时,陕西位于500 hPa高空槽后

部的西北气流中,有干冷空气向陕西北部输送(图2a),低层有风向切变(图3a、图3b)。由延安观测

站 6 月 26 日 08 时探空图(图略)可知,26 日 08 时,延安上空湿层较厚,零度层高度为 4 050.5 m,此时上干下湿的结构不显著,但随着午后近地面升温,延安上空不稳定层结逐渐发展。

6 月 27 日 08 时,在 500 hPa 高度场上,陕西西侧存在西风槽(图 2b),低层有偏南气流,利于

水汽的输送,且延安西北方向存在风向辐合(图 3c、图 3d)。6 月 27 日 08 时与 20 时延安观测站的探空图(图略)显示,27 日 08 时和 20 时,延安观测站上空 CAPE 值和抬升指数 LI 的绝对值均增大,表明大气不稳定度是显著增强的。

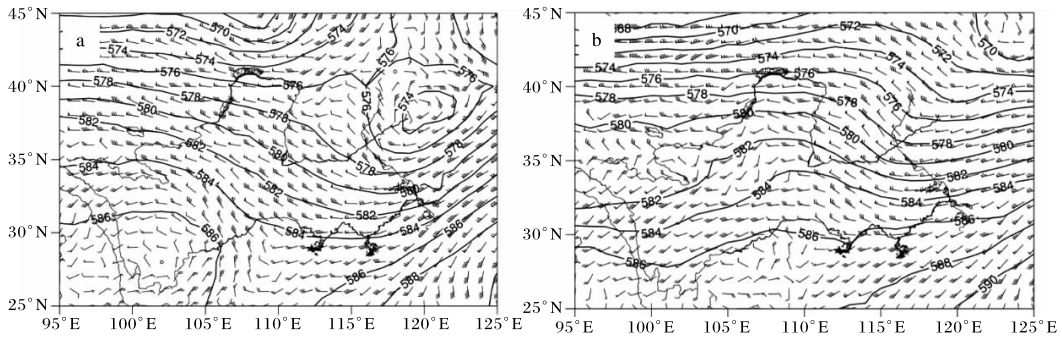


图 2 2023 年 6 月 500 hPa 位势高度场(单位为 dagpm)和风场(风羽)(a 26 日 08 时; b 27 日 08 时)(审图号为 GS 京(2022)1061 号)

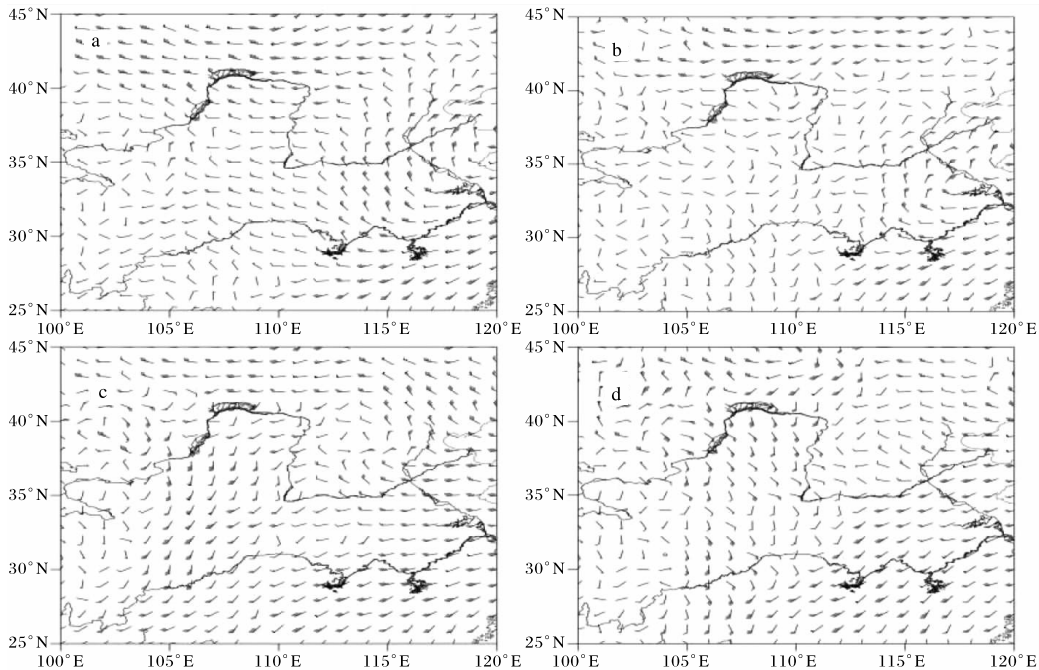


图 3 2023 年 6 月风场(a 26 日 08 时 700hpa, b 26 日 08 时 850hpa, c 27 日 08 时 700hpa, d 27 日 08 时 850hpa)(审图号为 GS 京(2022)1061 号)

3 多普勒雷达特征

图 4 为延安两次强对流过程中多普勒天气雷达组合反射率因子和 2.4° 仰角测得的基本反射率因子。由 6 月 26 日 16:54 时的 2.4° 仰角基本反射率因子图(图 4a)可知,宝塔区东部出现了 V

型回波,中心强度大于 65 dBZ,结合 16:54 雷达组合反射率因子垂直剖面图(图 5a),超过 60dBZ 的强回波多在 5km 以下,强回波质心较低且接地,存在有界弱回波区,回波强度横向伸展的范围较宽。17:09 位于宝塔区东部的甘谷驿地区出现

降雹;18 时后 V 型回波的回波中心已移动至宝塔区东南部(图略);26 日 18:23(图 4b)宝塔区东南部临镇地区的雷达回波中心强度超过 60 dBZ(降雹时段),随后强回波继续向东南方向移动并减弱,降雹过程逐渐结束。6 月 27 日 17:47 雷达组合反射率因子图(图 4c)显示,该时刻强对流云团已经移入宝塔区北部,存在钩状回波特征,且回波中心强度超过 65 dBZ,由该时刻雷达组合反射率垂直剖面图(图 5b)得知,超过 60dBZ 的强回波扩展的高度比 6 月 26 日 V 型回波要高,强回波质

心高度超过 5 km 并接地,存在有界弱回波区,宝塔区北部蟠龙地区开始降雹,降雹结束后该地区又出现了短时暴雨,此时段内强回波一直在蟠龙地区上空;27 日 19 时后,有范围较广且均匀的片状雷达回波自西南向东北移入宝塔区,27 日 20:33(图 4d),强对流降水回波位于宝塔区中部,回波中心强度达到 55 dBZ;27 日 23 时后北部的片状回波逐渐向东南方向发展并移动,至 28 日 01:52(图 4e),宝塔区城区上空有范围较小的强对流云团;28 日 03:57(图 4f),宝塔区上空已无强

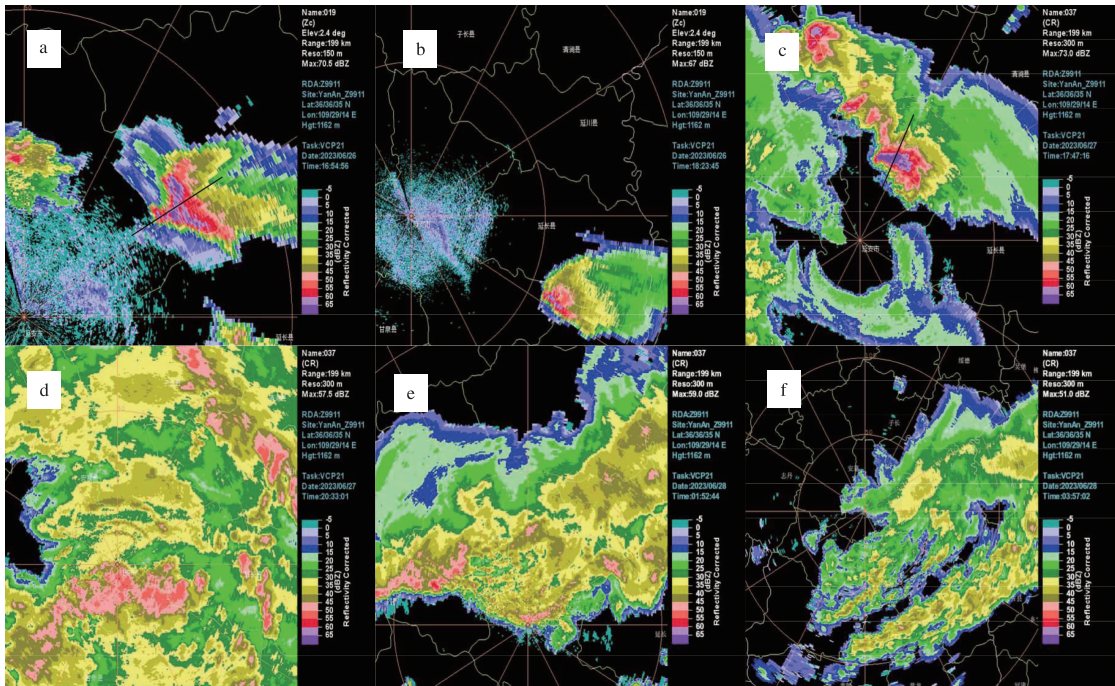


图 4 2023-06-26—28 延安多普勒天气雷达 2.4°仰角基本反射率因子(a 26 日 16:54;b 26 日 18:23)和组合反射率因子(c 27 日 17:47;d 27 日 20:33;e 28 日 01:52;f 28 日 03:57)

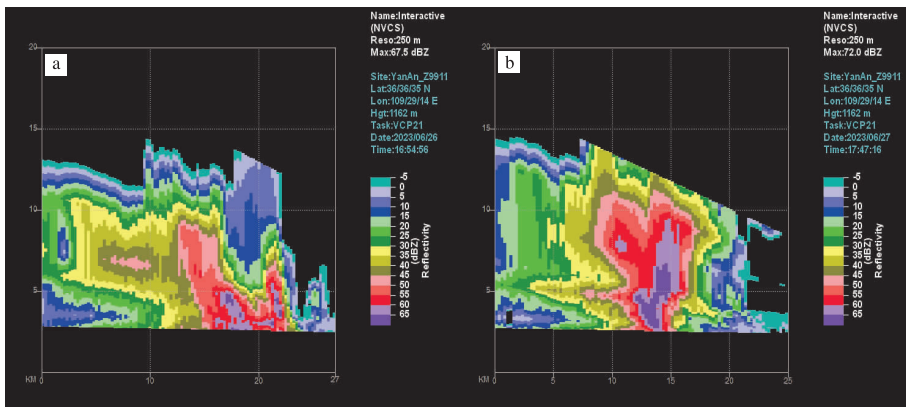


图 5 2023-06-26—28 延安多普勒天气雷达沿图 4a 和图 4c 中黑色线段的反射率因子垂直剖面(a 26 日 16:54;b 27 日 17:47)

对流云团,降水趋于结束。由两次强对流过程中的雷达回波特征可以看出,26日多普勒天气雷达有明显的V型回波特征,对应了降雹天气过程,且降雹时段回波中心强度超过了60 dBZ;而对于27—28日的强对流天气,在降雹前多普勒雷达出现了钩状回波特征,且降水时段的强对流云团的回波中心强度要稍弱于两次强对流天气过程中的降雹时段。两次强对流天气过程中降雹时段的V型回波与钩状回波的强回波均接地,V型回波的强回波质心高度要低于钩状回波,同时回波强度横向伸展的范围也较宽。选取6月26日强对流过程发生时段的对流单体风暴,绘制其雷达组合

反射率因子、垂直液态含水量、回波顶高及回波质心高度的时序演变图(图6)。由图6可知,强对流发生时段,所选对流单体的反射率因子最大为73 dBZ(17:24),垂直液态水含量在17:42超过70 kg/m²,回波顶高超过11 km,回波质心高度在17:54达到最高,为5.4 km,6月26日18:29后,随着降雹趋于结束,垂直液态水含量与回波顶高迅速减小。6月27—28日降水时段所选对流单体的生命史较6月26日降雹时段短(图略),且反射率因子最大为61 dBZ,垂直液态水含量最大可达28 kg/m²,回波顶高不超过7 km,回波质心高度不超过4 km,均低于降雹时段对应数值。

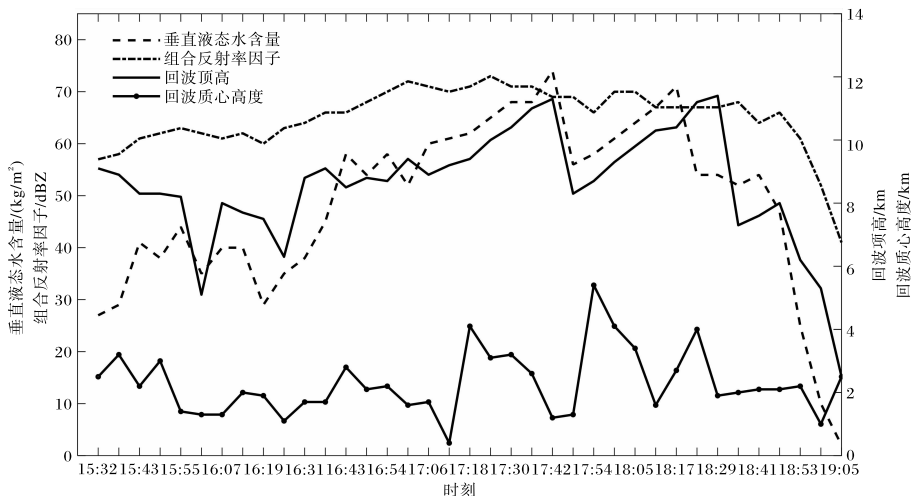


图6 2023-06-26 延安多普勒雷达对流单体的组合反射率因子、垂直液态水含量、回波顶高和回波质心高度时序演变图

4 微波辐射计特征

图7和图8分别表示6月26日、6月27日08时—28日08时延安观测站上空的温度廓线和相对湿度廓线。

由图7可知,6月26日01时前后,延安观测站上空1 km以下存在较显著的逆温层,08时后近地面显著增温,观测站上空温度呈上冷下暖分布,05—09时,距离延安观测站3 km以上高空相对湿度达到90%以上,由延安观测站内毫米波测云仪的观测资料可知,此时段内云层较厚,且云底高度较低。26日12时后,延安观测站上空1~3 km处的相对湿度在50%~60%之间,高空为深厚的干层。26日15:34,10℃及以下各温度层气

温均有先下降后上升的小幅波动现象,且于15:54出现极小值,即发生降雹前,10℃及以下各温度层气温出现极小值,表明延安观测站上空有冷空气向下侵入,有利于不稳定层结的形成;26日18:42,即宝塔区的降雹过程结束后,整层大气的温度小幅下降且低层相对湿度有所增加。从图8可以看出,6月27日14—15时,整层大气温度出现小幅波动,此时延安观测站上空1 km以上的相对湿度也突然增大,通过延安观测站内毫米波测云仪的观测资料可知,此时段出现了三层云,且第三层云(从延安观测站到天空遇到的第三层云)较厚。结合延安观测站处的小时降水资料和温湿廓线可以发现,降水开始及结束时段,延安观测站温度和

湿度均有显著变化。27日16:54之后,延安观测站上空整层大气温度有所下降,相对湿度大值区从中间层向高空和下垫面扩展;而在降水时段,10℃及以下各温度层气温均有上升的现象,6 km以上高

空的相对湿度显著降低,中层大气的相对湿度趋于100%;28日03:42后,延安观测站上空的降水趋于结束,此时10℃及以下各温度层气温下降,6 km以上高空的相对湿度增加至90%以上。

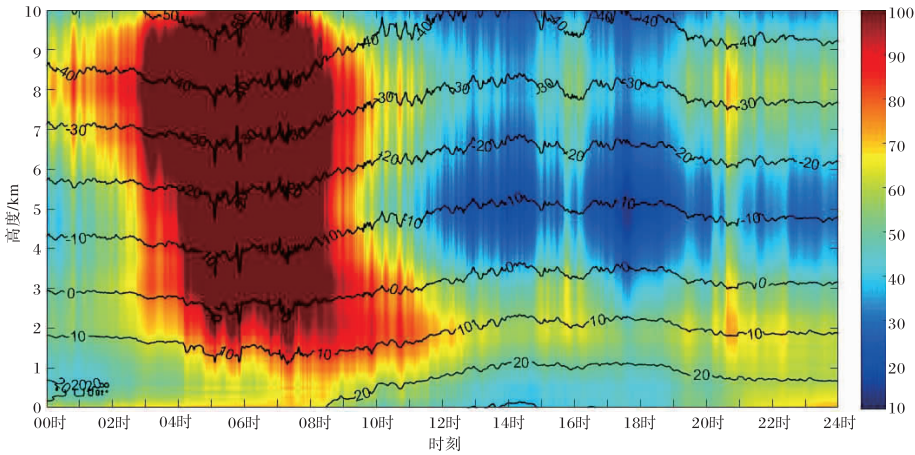


图7 2023-06-26 延安站微波辐射计温度(黑色等值线,单位为℃)和相对湿度时间-高度变化图(色标值,%)

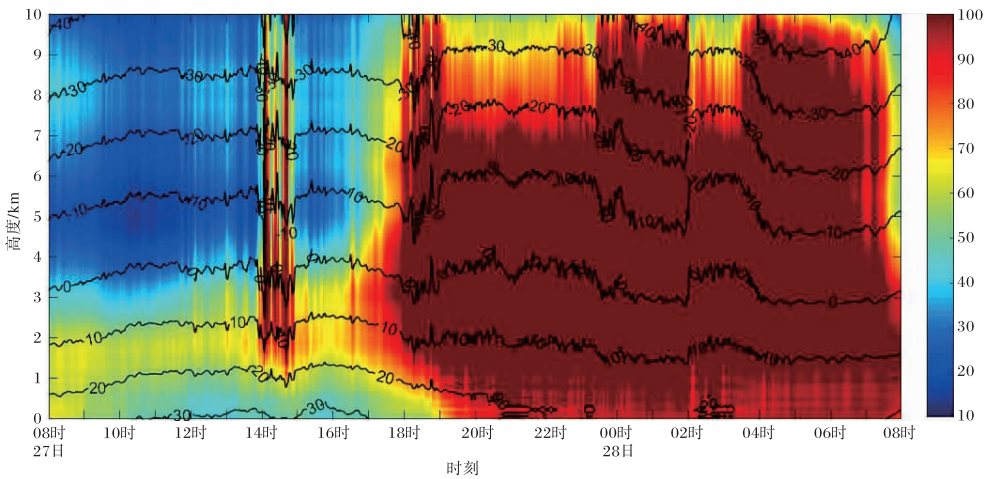


图8 2023-06-27T08—28T08 延安站微波辐射计温度(黑色等值线,单位为℃)和相对湿度时间-高度变化图(色标值,%)

从6月26日延安观测站微波辐射计测得的积分云液水含量和整层水汽垂直积分变化(图9)可以看出,26日00—08时,延安观测站的积分云液水含量出现跃增现象,而整层水汽垂直积分则缓慢增加,该阶段两者均出现了三次峰值,且最大值出现的时间段均在26日07—08时。从湿度廓线资料可知26日05—09时延安观测站3 km以上高空相对湿度达到90%以上,且毫米波测云仪观测到此时段云层较厚,云底高度较低,积分云液

水含量表现为跃增现象,这可能与延安观测站上方的云层移动有关。26日下午17—19时,积分云液水含量保持在0.1 mm以下,无显著的波动变化,而整层水汽垂直积分含量则呈现无规则的小幅波动。图10为27日08时—28日08时延安观测站积分云液水含量和整层水汽垂直积分的变化图,由图可知,27日08—13时,整层水汽垂直积分逐渐由2.6 cm增加到接近4.0 cm,而积分云液水含量无显著变化,27日13:56—15:00,积

分云液水含量和整层水汽垂直积分均出现了显著的波动变化,对应 27 日 14—15 时延安观测站上空的云层较多。27 日 16 时后,整层水汽垂直积分缓慢增加,而积分云液水含量则在 18:34 后呈现显著的波动增加,在降水时段(27 日 19 时—28 日 00 时和 28 日 02—04 时),两者均保持较大值,

无显著变化,不同之处在于积分云液水含量在 28 日 00:28—02:00(降水间歇)由较大值迅速降低至 0.4 mm,出现显著的波动变化,随后在 02 时后又跃增至 1.4 mm。28 日 04:16 后,延安观测站降水结束,积分云液水含量迅速降低,而整层水汽垂直积分缓慢降低。

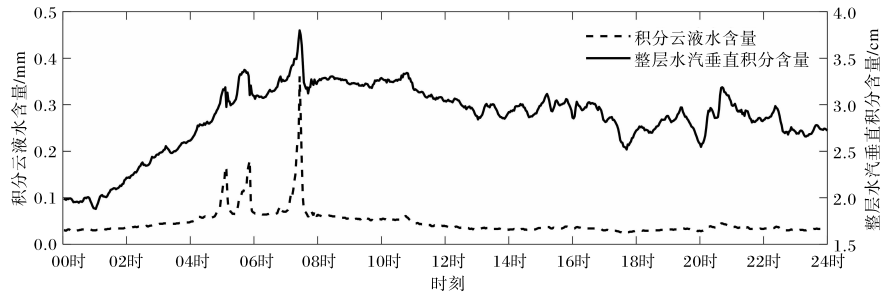


图 9 2023-06-26 延安站积分云液水含量与整层水汽垂直积分含量变化图

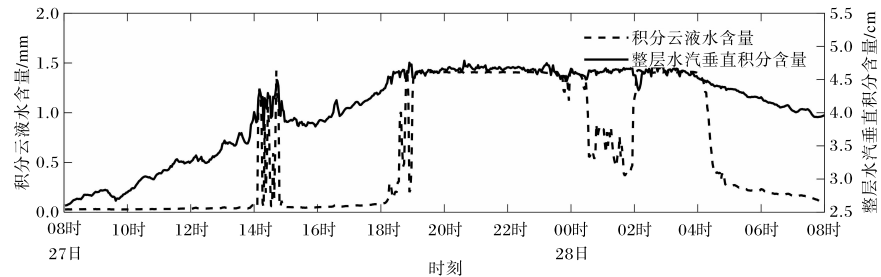


图 10 2023-06-27T08—28T08 延安站积分云液水含量与整层水汽垂直积分含量变化图

表 1 和表 2 分别给出由微波辐射计观测资料计算得到的 6 月 26 日 14—20 时与 6 月 27 日 18 时—28 日 07 时逐小时不稳定指数。26 日下午 TT 指数在 50 °C 左右变化,K 指数在 20~31 °C 之间变化,且 TT 指数、K 指数和 CAPE 值均在冰雹过程开始(17:09)前较高,由于冰雹未出现在延安观测站上空,不稳定能量释放较少,所以冰雹过程结束后,CAPE 值未出现大幅降低。对于 6 月 27—28 日的强对流降水天气而言,TT 指数、K

指数和 CAPE 值均在降水前(27 日 19 时前)较高,TT 指数和 K 指数在降水时段(27 日 19—22 时)呈现小幅度降低的趋势,在降水过程彻底结束后(28 日 04 时后)小幅升高;另外,在 6 月 27—28 日的降水过程中,CAPE 值在降水开始及降水最强时段出现大幅降低现象,在降水结束后则显著升高。由此可知,微波辐射计得到的不稳定指数能在一定程度上反映两次强对流发生过程中的大气不稳定特征。

表 1 2023-06-26T14—20 延安站微波辐射计观测资料计算得到的逐小时不稳定指数

不稳定指数	14 时	15 时	16 时	17 时	18 时	19 时	20 时
TT 指数/°C	47.28	51.92	51.07	48.94	48.88	48.97	51.17
K 指数/°C	24.38	30.76	28.81	24.87	23.73	25.47	25.25
CAPE 值/(J/kg)	815.46	858.03	478.31	714.91	651.43	515.16	505.39

表 2 2023-06-27T18—28T07 延安站微波辐射计观测资料计算得到的逐小时不稳定指数

不稳定指数	18 时	19 时	20 时	21 时	22 时	23 时	00 时
TT 指数/ $^{\circ}\text{C}$	55.89	49.01	41.94	41.1	40.09	40.41	41.8
K 指数/ $^{\circ}\text{C}$	41.51	37.68	34.57	32.59	31.75	31.8	31.88
CAPE 值/(J/kg)	1 941.66	892.69	78.77	-9.52	-7.02	-4.22	47.87
不稳定指数	01 时	02 时	03 时	04 时	05 时	06 时	07 时
TT 指数/ $^{\circ}\text{C}$	48.47	43.19	40.79	46.55	51.69	51.36	51.22
K 指数/ $^{\circ}\text{C}$	34.17	30.98	32.04	34.03	35.81	35.86	36.34
CAPE 值/(J/kg)	510.59	353.61	32.62	136.39	405.46	418.73	463.62

5 风廓线雷达特征

图 11 和图 12 分别表示 6 月 26 日 08 时—20 时和 6 月 27 日 08 时—28 日 08 时延安观测站水平风向风速随时间高度的变化图,图 11 采用风廓线雷达半小时平均采样高度上的产品数据绘制,图 12 采用风廓线雷达一小时平均采样高度上的产品数据绘制。

由图 11 可以知,6 月 26 日 09—12 时延安观测站在近地面为偏东风或东南风,且在 1 km 以上转为偏西风,4 km 以上高空为西北风,具有风向随高度顺时针旋转的特征,表明低层有暖平流输送,有利于加强层结不稳定及低层扰动,从而使不稳定能量触发^[17]。6 月 26 日 12:30—20:00,观测站上空 2~5 km 高度层为西北风,而近地面为偏南风,表明高空有干冷的空气,为不稳定状态的触发提供了有利条件。另外,6 月 26 日 17:00 与 17:30,延安观测站上空仍有风随高度顺时针旋转的特征,说明降雹前(26 日 17:09)存在暖平流输送。由图 12 可知,6 月 27 日 10—16 时,从

近地面到 3 km 高度处,风向逐渐由偏东风转为偏南风,即低层存在暖平流输送,随后在 27 日 17:50 宝塔区北部出现了降雹天气。27 日 17—21 时(降水前至降水最强时段)从近地面至 6 km 高空均为南风或偏南风,且低层风速增加,27 日 21 时后降水减弱,3 km 以上高空转为偏西风。降水结束后(28 日 04 时后),1 km 以上高空已转为偏北风,且 1 km 以下的低空也逐渐由偏西风转为偏北风。

6 结论与讨论

(1)2023 年 6 月 26 日延安市的强对流天气主要受到高空干冷空气输送和低层风向切变的影响,随着午后近地面增温,不稳定层结不断发展,产生了局地降雹天气。6 月 26 日多普勒天气雷达有明显的 V 型回波特征,对应了降雹天气过程,回波中心强度多在 65 dBZ 以上,且强回波接地,存在有界弱回波区,回波质心高度较低,回波强度横向伸展的范围较宽。6 月 27—28 日延安市的强对流天气主要影响系统为西风槽,低层偏

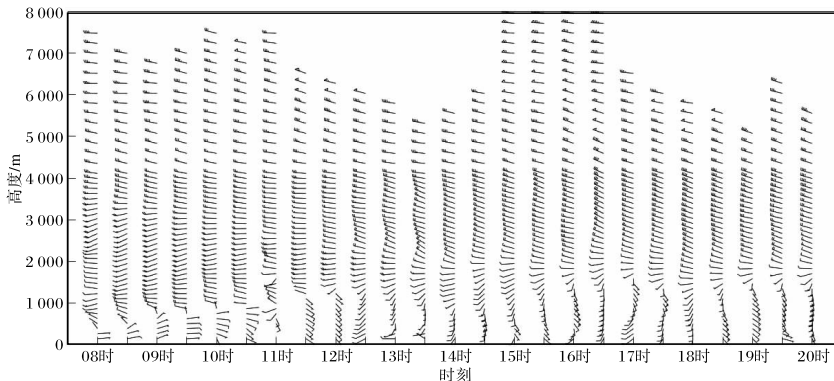


图 11 2023-06-26T08—20 延安站水平风向风速时间-高度变化图

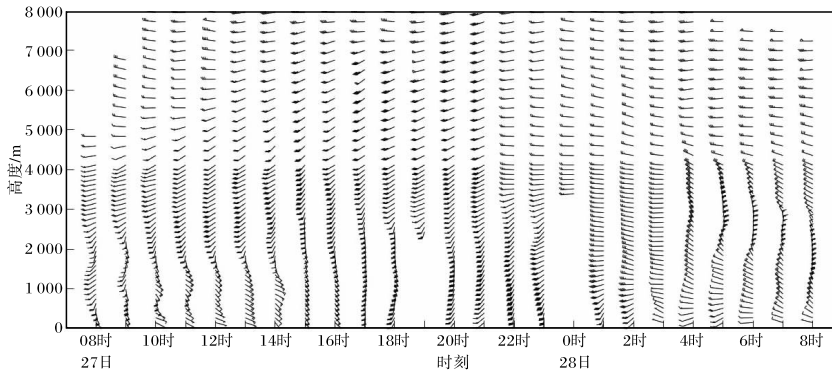


图 12 2023-06-27T08—28T08 延安站水平风向风速时间-高度变化图

南气流有利于输送水汽,为降水提供条件,延安西北方向存在低层风向辐合,为午后强对流的发展提供了一定的条件。造成 6 月 27—28 日宝塔区降水的对流单体的生命史较 6 月 26 日降雹时段的短,6 月 27—28 日降雹前多普勒天气雷达有明显的钩状回波特征,且强回波接地,存在有界弱回波区,强回波质心高度较 26 日 V 型回波要高一些,6 月 27—28 日降水时段雷达回波也弱于 6 月 26 日降雹时段。

(2)6 月 26 日延安市东南部发生降雹天气时,从微波辐射计的温湿廓线可以看出冷空气向下侵入、上冷下暖等利于不稳定层结发展的特征,但积分云液水含量与整层水汽垂直积分无明显的规律性变化;对于 6 月 27—28 日的强对流天气,微波辐射计的温湿廓线在降水前后变化较显著,降水时段高空温度上升,中层大气相对湿度趋于 100%,积分云液水含量和整层水汽垂直积分在降水前增加,降水时段保持较大值,降水结束后减弱。另外,微波辐射计观测资料计算得到的 TT 指数、K 指数和 CAPE 值能在一定程度上反映两次强对流发生过程中的大气不稳定特征。

(3)两次强对流天气降雹前,从风廓线雷达水平风资料均可以看出风向随高度顺时针旋转的特征,低层有暖平流输送,利于不稳定能量的触发;对于 6 月 27—28 日的强对流天气,对流层低层至中层在降水前至降水最强时段均为偏南风,在降水结束后逐渐转为偏北风。

(4)在强对流天气过程中,微波辐射计资料和风廓线雷达的水平风资料均表现出一定的层结不稳定特征,为强对流的实时监测及预警提供了一

定程度的信息支撑。由于本文只选取了两次强对流天气进行特征分析,所得结论尚未经过大量样本数据的验证,所以要探讨多源资料在强对流天气过程中的普适性变化规律,还需筛选更多典型的强对流天气过程,进行深入的研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 张树民,缪燕,周金磊,等. 副热带高压脊线附近江苏两次强对流天气对比分析[J]. 暴雨灾害,2017,36(5):422-430.
- [4] 高晓梅,马守强,王世杰,等. 山东两次强对流天气雷达特征及环境场对比[J]. 气象科技,2018,46(6):1188-1200.
- [5] 周慧,周莉,蔡荣辉,等. 2020 年湖南两次典型混合型强对流天气过程对比分析[J]. 气象科技,2023,51(2):222-232.
- [6] 王周翔,王旗,于翠红,等. 微波辐射计的应用及研究进展[J]. 现代农业科技,2017(9):223-224.
- [7] 吴蕾,陈洪滨,康雪. 风廓线雷达与 L 波段雷达探空测风对比分析[J]. 气象科技,2014,42(2):225-230.
- [8] 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.
- [9] 黄治勇,徐桂荣,王晓芳,等. 基于地基微波辐射计资料对咸宁两次冰雹天气的观测分析[J]. 气象,2014,40(2):216-222.

- [10] 黄晓莹,毛伟康,万齐林,等.微波辐射计在强降水天气预报中的应用[J].广东气象,2013,35(3):50-53.
- [11] 王万筠,殷海涛,陈涛.微波辐射计资料模拟探空曲线在一次局地暴雨过程中的应用[J].信息系统工程,2015(11):78-80.
- [12] 方德贤,董新宁,周国兵,等.两种垂直风廓线的对比及应用Ⅱ:不同降水条件下风廓线特征[J].高原气象,2017,36(4):971-983.
- [13] 方桃妮,黄艳,叶妍婷,等.边界层风廓线雷达资料在浙中强对流天气中的应用[J].气象科技,2022,50(3):369-379.
- [14] 吴庆梅,张胜军,刘卓,等.北京一次对流暴雨过程的干冷空气活动及作用[J].高原气象,2015,34(6):1690-1698.
- [15] 郑石.边界层风廓线雷达在暴雨探测中的分析应用[D].南京:南京信息工程大学,2012.
- [16] 王欣,卞林根,彭浩,等.风廓线仪系统探测试验与应用[J].应用气象学报,2005,16(5):693-698.
- [17] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.天气学原理和方法[M].4版.北京:气象出版社,2000:433-434.