

彭力,赵强,陈小婷,等. 关中北部一次冰雹天气不同雷达特征对比分析[J]. 陕西气象,2021(6):1-8.

文章编号:1006-4354(2021)06-0001-08

关中北部一次冰雹天气不同雷达特征对比分析

彭力^{1,2},赵强³,陈小婷³,张雄^{1,2},徐浩天^{1,2}

(1. 铜川市气象局,陕西铜川 727000;

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. 陕西省气象台,西安 710014)

摘要:利用常规气象观测数据、ERA-5再分析资料、两种波段多普勒雷达产品、FY-2F云顶亮温TBB资料对2020年5月21日陕西一次强对流天气过程进行分析。结果表明:强对流发生在有利天气背景和环境条件下,对流云自北向南迅速移动发展增强,强天气区位于对流云后部TBB等温线密集处;C波段雷达产品在风暴演变过程中识别出了线状回波、三体散射回波特征,风暴单体具有明显的悬垂结构,单体质心短时间内迅速下降对应地面出现大风,三体散射回波在高低仰角依次出现对地面降雹有指示意义;X波段雷达偏振参量在风暴单体发展与成熟阶段有明显差异,发展阶段利用融化层以上的 Z_{DR} 柱可以对风暴单体发展趋势做出预判,成熟阶段融化层以下 R_{HV} 在0.8~0.9且 Z_{DR} 和 K_{DP} 随高度降低不断增大的区域为降落冰雹融化区,可以作为地面降雹的预判。

关键词:冰雹;风暴参数;双偏振;偏振参量

中图分类号:P412.25;P458.121.2

文献标识码:A

冰雹作为陕西主要灾害性天气之一,其产生有明显的季节变化和空间分布差异。5、6月对流性天气多发,关中平原及其以北地区往往有区域性冰雹发生,雹灾对农业生产常造成不同程度影响^[1-2]。多普勒天气雷达具有较高的时空分辨率,是监测和预警强对流天气的主要工具。国内学者^[3-14]应用多普勒天气雷达监测产品进行了冰雹预警研究,总结了各地利用多普勒雷达产品进行冰雹预警的指标,主要包括对流云回波顶高、组合反射率因子强度、强回波伸展高度、弱回波和悬垂回波、钩状回波、三体散射特征、垂直累积液态水含量,以及径向速度图上的中气旋、风暴顶辐散等,这些指标对冰雹预警有很好的指示意义。陈关清等^[15]指出雷达产品特征配合冰雹指数对冰雹预警有重要参考意义,张芳等^[16]统计了雷达产

品与冰雹直径的线性相关性,陕西的气象学者^[17-18]认为垂直累积液态水含量密度的跃增对大冰雹有较好指示意义。相比常规天气雷达,双偏振天气雷达可以发射垂直和水平两个方向偏振电磁波,除获取水平反射率因子外,还能对云内部粒子相态信息进行识别,提供降水粒子特征产品等偏振参数^[19]。刘红亚等^[20-21]等分别对冰雹天气的双偏振雷达特征进行分析,总结了冰雹出现时的偏振参数特点。关中北部地形复杂,冰雹、雷暴等对流性天气频发,强对流天气监测主要使用西安C波段多普勒天气雷达(简称C波段雷达)。近年来铜川、咸阳X波段全固态双偏振多普勒天气雷达(简称X波段雷达)先后建成,在人影指挥、天气预警方面发挥了重要作用。目前尚未建立X波段雷达对关中北部冰雹预警的指标,缺乏

收稿日期:2021-02-08

作者简介:彭力(1990—),男,汉族,陕西商洛人,学士,工程师,主要从事灾害性天气预报工作。

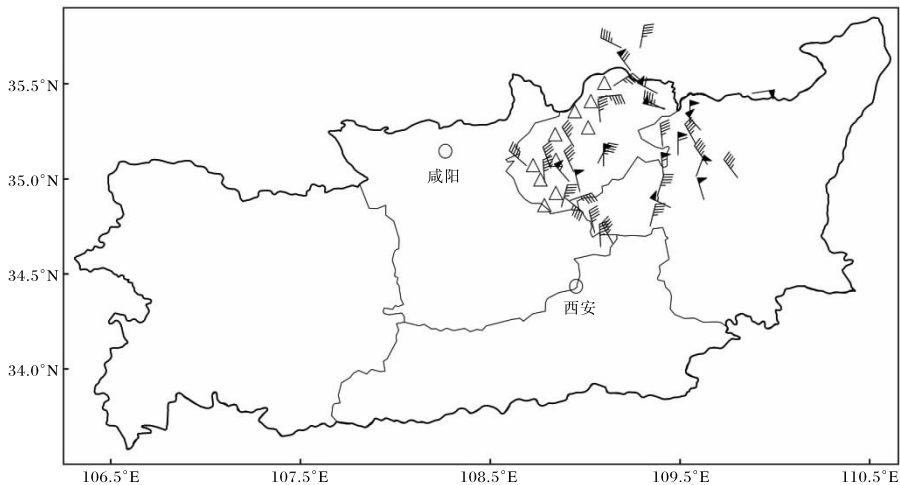
基金项目:中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z034-80);陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2021Y-12;2020G-14)

C、X波段雷达回波产品的对比研究。本文对关中北部一次冰雹产生的天气背景进行分析,主要对比C、X波段雷达回波产品特征,分析X波段雷达偏振参数特点,总结冰雹出现前的预警指标。

1 强对流天气过程概述

2020年5月21日午后,陕西省中北部地区出现了一次大范围的强对流天气过程。21日13:20左右延安市北部有对流回波生成,随后对流回波发展加强向南移动,16:18强回波移入铜川市,铜

川自北向南出现了大范围的强对流天气,对流过程伴随明显的雷电活动和短时大风,铜川大部分地方出现了冰雹(图1)。根据自动气象站监测显示,随着对流云团迅速南移,铜川自北向南出现了8~9级的大风,最大瞬时风速达到23.6 m/s(走马梁站)。自动站记录、灾情收集到的冰雹直径在5~30 mm,有多种经济作物不同程度受灾,18:05强回波移出铜川,并逐渐减弱,对流天气结束。



圆圈分别为西安C波段雷达、咸阳X波段雷达位置。

图1 2020-05-21T16—18地面自动站17 m/s以上大风(风羽,单位为m/s)和降雹(三角)实况

2 资料说明

使用2020年5月21日地面常规气象观测资料、高空观测资料,ERA-5逐小时 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 再分析资料,西安C波段多普勒天气雷达产品和咸阳YLD1-D型全固态X波段双偏振多普勒天气雷达产品,FY-2F云顶亮温TBB资料,利用天气学诊断法对冰雹产生的天气学背景条件和环境条件进行分析,对冰雹天气中西安C波段雷达基本产品和咸阳X波段雷达产品进行对比,总结冰雹发生的预报着眼点和两种不同类型天气雷达降雹前后的产品特征。

3 天气形势及环境条件分析

5月21日08时(图2a),500 hPa内蒙古中部有冷槽发展东移,冷槽后河套以北有小于 -16°C 的冷空气中心,贝加尔湖南部至陕北北部有西北急流发展南压,陕西上空干冷平流明显;700 hPa陕北以偏北气流为主,延安探空站温度露点差为

17°C ,为明显干区;850 hPa新疆高压脊前强偏北气流与南部偏南气流在陕北形成东北—西南向切变线。从温湿条件来看,陕北—关中850 hPa为 16°C 暖中心,延安站温度露点差 $\leq 5^{\circ}\text{C}$,为湿区。500 hPa干冷平流叠加低层暖中心,延安站850 hPa与500 hPa温度差达到 27°C ,大气上冷下暖形成明显位势不稳定层结。200 hPa高空急流穿过陕西中部上空。地面图(图略)上,内蒙中部—陕北有热低压发展。天气系统高低层配置利于强对流天气发生。21日13时(图2b),500 hPa陕北上空干冷平流维持,陕北北部西北急流进一步向南发展,850 hPa切变线东移南压,延安站850 hPa与500 hPa温度差增大到 35°C ,大气不稳定性进一步加大,地面低压内部存在中尺度辐合抬升,200 hPa高空急流通风作用维持,天气尺度辐合抬升和强不稳定层结为对流天气发生发展提供了有利背景场。

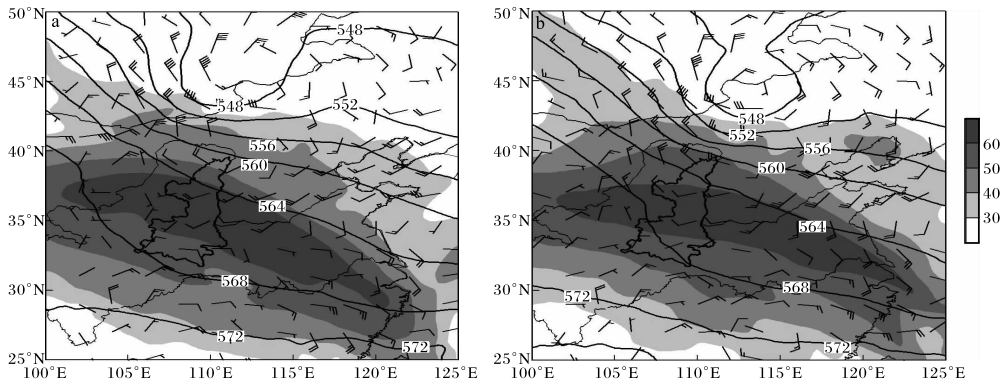
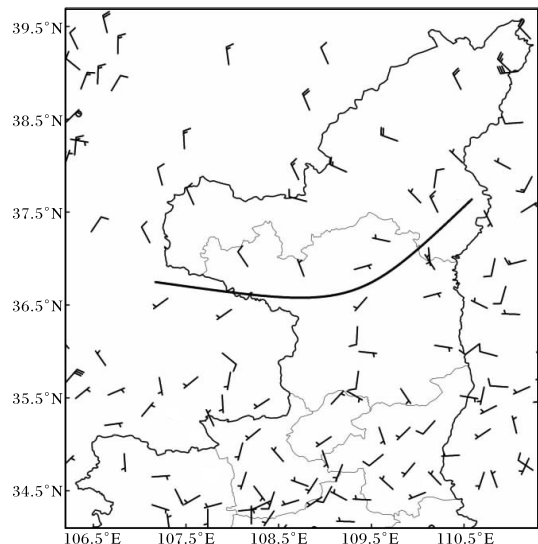


图2 2020-05-21T08(a)和2020-05-21T13(b)500 hPa位势高度场(等值线,单位为 dagpm)、850 hPa 风场(风羽,单位为 m/s)及200 hPa 急流(阴影,单位为 m/s)

对流云团于13:20左右在延安北部被触发,延安探空站资料能代表对流天气发生前的环境条件。21日08时延安站探空图(图略)显示,大气层结曲线中干下湿,近地面至850 hPa存在逆温,利于低层不稳定能量累积,600~400 hPa存在明显干层,中层干冷空气夹卷,利于产生强的下沉气流,从而造成地面大风;600 hPa以下风随高度顺转为暖平流输送,600~400 hPa风随高度逆转为干冷平流侵入,大气上干冷下暖湿,大气层结具有强的不稳定性。表征大气层结稳定度的SI指数为 $-0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,总指数TT为 $48\text{ }^{\circ}\text{C}$,K指数为 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$,由于近地层逆温存在,CAPE值为 0 J/kg 。利用13时地面观测资料,对延安站探空曲线抬升点的温度、露点进行订正,订正后的CAPE值达到了 1827 J/kg ,表明了午后大气呈现强的热力不稳定。大气0~6 km的垂直风切变为 9.5 m/s ,随着500 hPa西北急流和低层切变线南压,0~6 km的垂直风切变不断加大,利用ERA-5再分析资料计算午后延安探空站0~6 km垂直风切变增加到 14 m/s ,垂直风切变的增强利于对流有组织化发展。08时大气 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高为4 km, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高7 km,适宜的 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度为冰雹产生提供了有利环境条件。地面加密自动站显示,陕西中北部位于热低压底部,午后地面辐射增温,延安南部、关中北部地面温度不断增加;13时地面风场上,对流被触发前,延安中北部存在明显的中尺度辐合线(图3),中尺度辐合线在延安北部触发对流,对流云团在强的不稳定大气层结下迅速发展,沿500 hPa西北气流引导,迅速向南移动

并不断有组织化发展增强。



实线为地面中尺度辐合线。

图3 2020-05-21T13地面风场(风羽,单位为 m/s)

4 FY-2F 卫星云图云顶亮温特征

云顶亮温TBB可以反映对流云团的生成、发展、消亡。21日13时左右,受地面中尺度系统触发,延安北部有多个中 γ 尺度的对流云团生成,对流云团呈近东西向线状排列,在强不稳定层结及中等强度垂直风切变作用下,中 γ 尺度对流云团迅速增强且快速向东南方向移动。14时, γ 尺度对流云团发展合并形成中 β 尺度对流云团,其 $t_{\text{BB}} \leq -35\text{ }^{\circ}\text{C}$;15时,中 β 尺度对流云团进一步发展, $t_{\text{BB}} \leq -40\text{ }^{\circ}\text{C}$;16时(图4a),中 β 尺度对流云团移至铜川市北部,其水平尺度在200 km左右,云团中 $t_{\text{BB}} \leq -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围进一步扩大,云团中有 t_{BB}

≤ -45 °C冷中心发展;16 时后,对流云团南移发展,经过铜川市上空,造成铜川自北向南大范围强对流天气;17 时(图 4b),对流云团发展旺盛,云团中有大面积 $t_{BB} \leq -45 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的冷中心存在,铜川位

于中 β 尺度对流云团后侧 TBB 等温线密集处;18 时后,对流云继续向东南移出铜川,其中最强 TBB 减弱至 -35 °C 左右,关中北部对流天气结束。

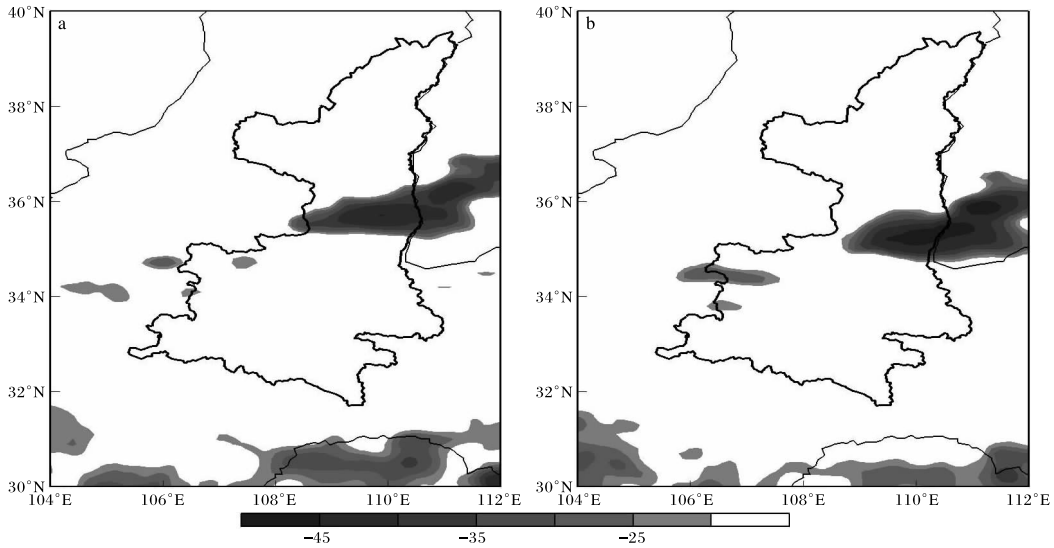


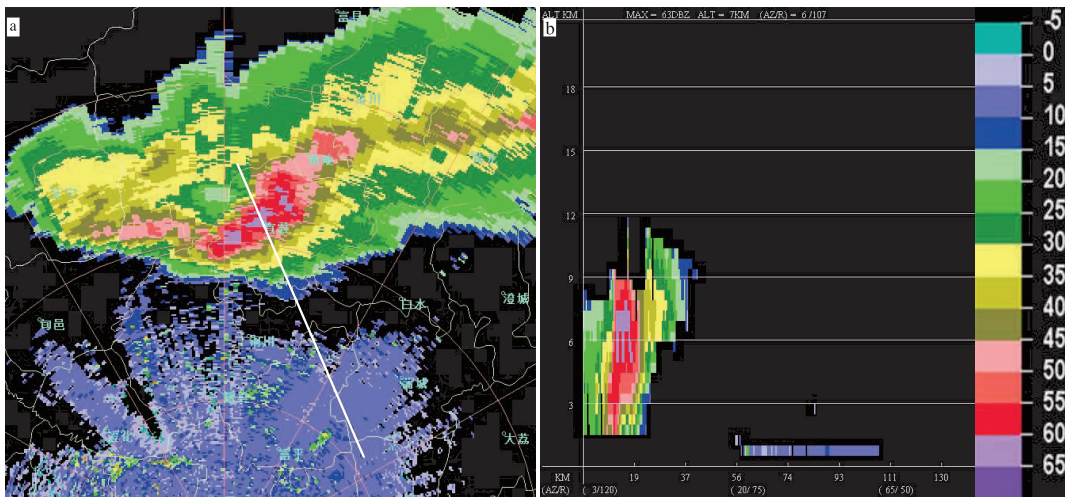
图 4 2020-05-21 FY-2F 云顶亮温(阴影,单位为 °C;a 16 时,b 17 时)

5 雷达回波特征对比分析

5.1 C 波段雷达

西安 C 波段雷达资料显示,21 日 13:20 左右,延安北部有大于 35 dBz 的积云对流回波生成,之后对流单体迅速发展增强成线状对流回波带,并且向南移动。16:12,线状对流回波移至铜川北部,线状回波带中有中心强度大于 60 dBz 的

对流单体发展,之后,线状回波继续南移,线状回波内多个对流单体不断生消发展;16:24,铜川北部线状回波发展呈类似弓形结构;16:30(图 5a),类似弓形结构更加明显,线状回波内多个对流单体中心强度达到 63 dBz 以上。沿着回波移动方向,对其内部最强对流单体反射率因子垂直剖面进行分析(图 5b)。对流单体 3 km 以下出现了明



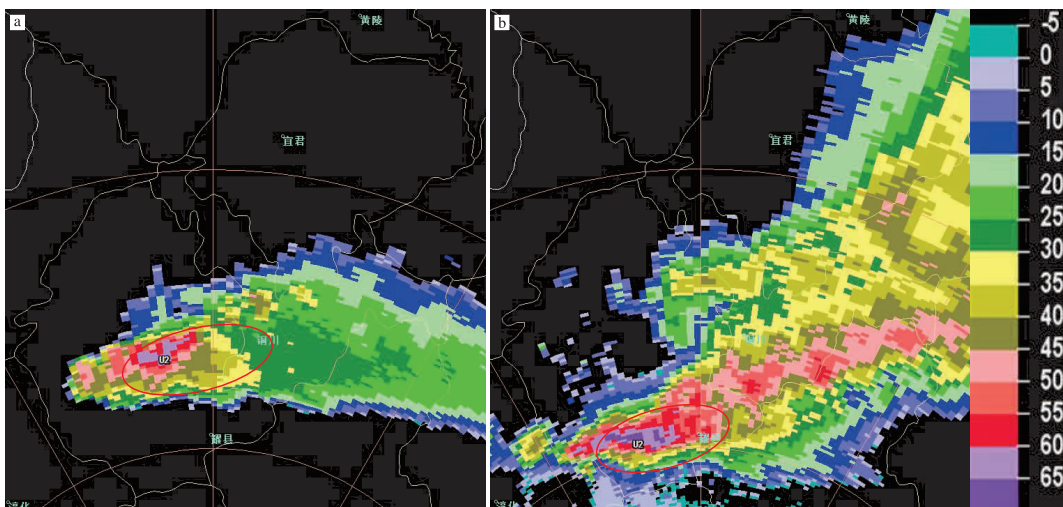
白色直线为基本反射率因子剖面方向。

图 5 2020-05-21T16:30 西安 C 波段雷达组合反射率因子(a)和基本反射率因子(单位均为 dBz)垂直剖面(b)

显弱回波区,5 km 附近出现回波悬垂,对流单体中大于 50 dBz 的强回波伸展到了 9 km 附近,表明单体内上升气流比较强盛,地面附近出现回波墙,反射率因子达到了 60 dBz,表明冰雹已经接近地面,宜君国家观测站 16:36 观测到了 5 mm 的降雹天气。0.5°平均径向速度图(图略)上,线状回波的类似弓形结构移动方向后侧的负速度区内出现了大范围的正速度区,退速度模糊后最大径向速度达到-25 m/s。16:54 之后,线状回波的类似弓形结构逐渐模糊,线状回波南部有新生对流形成,新生单体并入线状回波后部,迅速发展增强南移,在铜川南部造成大范围大风和冰雹天气;17:54,线状回波移出铜川,对流云团线型结构逐渐变松散,随后南移逐渐减弱。

根据西安 C 波段雷达识别的风暴单体,选取 16:54—17:36 铜川南部线状回波后部对流单体 U2(图 6),对其从发展到成熟阶段的对流参数特征(表 1)和雷达产品进行分析。16:54,对流单体 U2 最强反射率因子达到 58 dBz,基于单体和基于格点的垂直累积液态水含量差异不大,基本反射率因子的垂直分布显示单体倾斜结构不明显;16:54—17:00,单体 U2 逐渐发展至成熟,强的上

升气流将单体内冰水粒子带到高层,单体内雹胚不断增长,U2 内最大反射率因子增长到 61 dBz,伸展高度达到了 8 km,基本反射率因子垂直分布显示,单体 U2 开始出现倾斜结构和悬垂回波;17:06—17:12 单体 U2 发展成熟,在强上升气流托举下,单体 U2 内部小冰雹不断上下翻滚增长,最大反射率因子达到 66 dBz,基于单体和基于网格点的垂直累积液态水含量差值迅速增加,单体顶高伸展到 11 km。17:06 单体 U2 沿雷达径向 6.0°仰角的基本反射率因子图上(图 6a)出现了三体散射回波,17:12 沿雷达径向的三体散射回波开始出现在 4.3°仰角,与单体 U2 对应的地面人影作业点(马吉站)在 17:12 开始观测到降雹。16:54 单体 U2 质心高度为 7.2 km,经 2 个体扫后,17:06 单体质心高度迅速下降至 4.0 km,地面出现大风天气。17:12—17:36 单体 U2 最大反射率因子迅速降落至距离地面 2 km 左右的高度,三体散射回波特征依次先后在 3.4°、2.4°、1.5°仰角(图 6b)基本反射率因子图上出现,铜川南部出现大范围冰雹天气,最大冰雹直径达 30 mm 左右,单体 U2 的质心高度和单体顶高也逐渐下降;17:36 之后,单体 U2 逐渐减弱消散。



红色圆圈为对流单体 U2。

图 6 2020-05-21 西安 C 波段雷达基本反射率因子三体散射特征(a 17:06,6.0°仰角;
b 17:30,1.5°仰角;单位为 dBz)

5.2 X 波段雷达

利用咸阳 X 波段雷达分析线状对流回波的

特征。16:11 线状对流回波移至铜川北部,线状回波中对流单体组合反射率因子达到 52 dBz,较

表 1 2020-05-21 对流单体 U2 不同时刻风暴参数特征

风暴参数	16:54	17:00	17:06	17:12	17:18	17:24	17:30	17:36
单体顶高/km	8.4	8.0	7.4	11.0	10.0	9.2	9.0	8.6
最大反射率因子高度/km	5.3	8.0	5.5	5.1	1.9	1.8	1.7	1.6
单体质心高度/km	7.2	6.4	4.0	4.0	3.8	3.2	4.0	3.0
最大反射率因子/dBz	58	61	65	66	65	67	66	65
基于单体的垂直累积液态水含量/(kg/m ²)	31	35	56	69	58	53	62	42
基于网格点的垂直累积液态水含量/(kg/m ²)	30	35	45	50	35	45	45	40

C 波段雷达偏弱,之后线状回波向南移动;16:30 线状回波呈现出类似弓形结构,回波中最强对流单体的组合反射率因子增加到 57 dBz。最强对流单体反射率因子剖面显示,大于 50 dBz 强回波扩展到 8.5 km,呈现出和 C 波段雷达一致的中高层回波悬垂结构。16:24—16:54, X 波段雷达 0.5° 平均径向速度图上,在线状回波后部,出现了速度模糊区,速度模糊区范围和强度较 C 波段雷达偏弱。17:00—18:00,选取同时刻与 C 波段雷达线状回波后部单体 U2 对应的单体(下简称单体 A)进行分析,单体 A 成熟时最强组合反射率因子达 62 dBz,悬垂结构明显,17:17—17:39, X 波段雷达 0.5°~5.3° 仰角基本反射率因子图上(图略),发现了三体散射回波。

此次强对流天气发展迅速,移动较快,利用 X 波段雷达分析单体 A 在 16:55—17:33 偏振特征参量,主要研究 0 °C 层和 -20 °C 层间差分反射率因子(Z_{DR})、差分相移因子(K_{DP})、零延迟相关系数(R_{HV})的偏振参量变化。利用 ERA-5 再分析资料计算得到 16:00—17:00 铜川上空 0 °C 层高约 4 km, -20 °C 层高约 7 km。

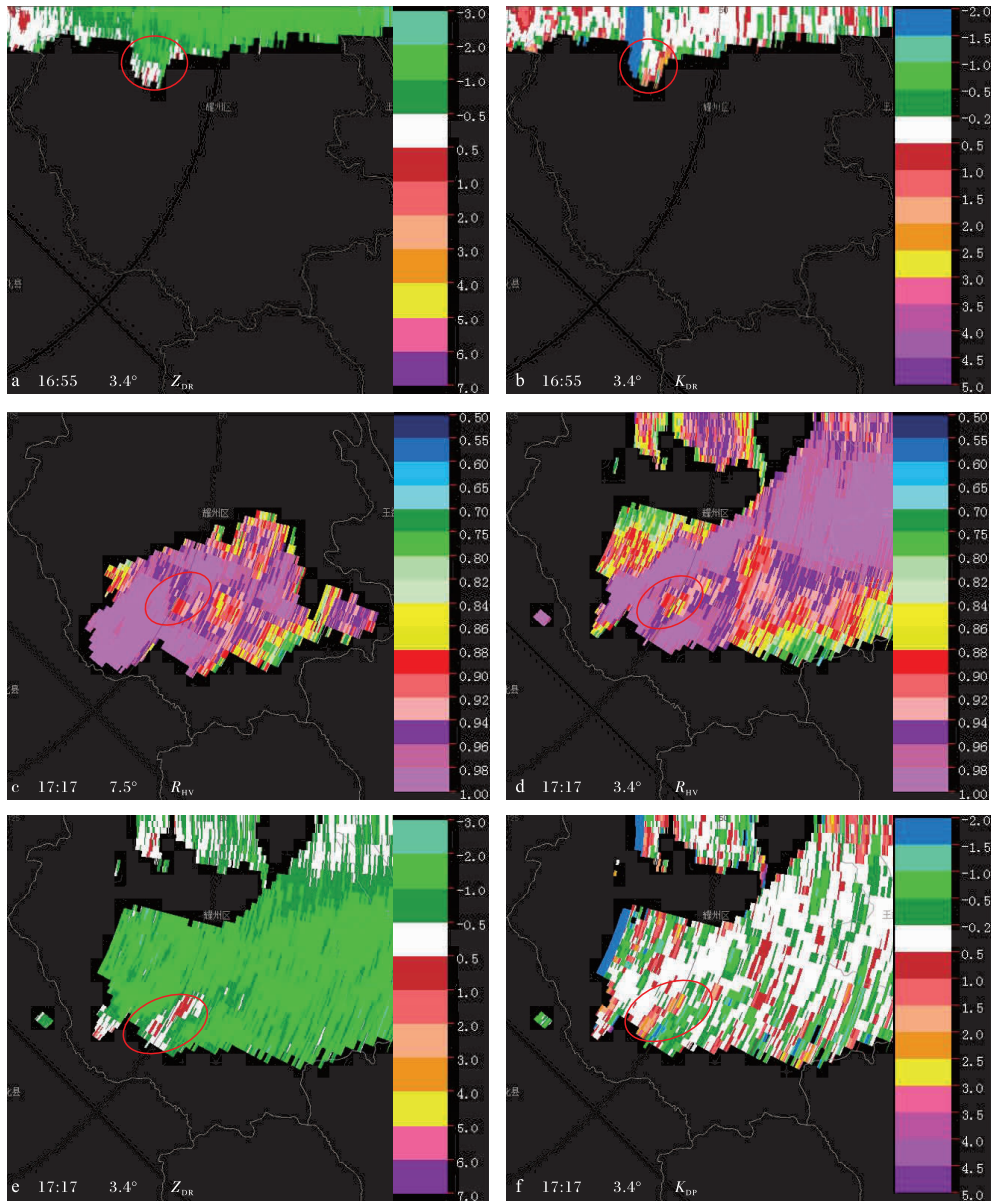
16:55 单体 A 处于发展阶段,组合反射率因子为 47 dBz; 3.4° 仰角以下单体 A 内 Z_{DR} 在 1~2 dB, 对应粒子为小雨滴, 3.4° 仰角(高度约为 4.1 km), 单体内存在 Z_{DR} 为 0.5~1 dB 的正值区(图 7a), 0 °C 层之上 Z_{DR} 正值区正是 Z_{DR} 柱所在, Z_{DR} 柱具有预测云体发展趋势的能力^[22], 0 °C 层之上强上升气流对雨滴进行筛选, 高度越高雨滴直径越小, Z_{DR} 正值区迅速减小, 在强上升气流作用下单体 A 迅速发展。 K_{DP} 与液态水密切相关, 3.4° 仰角, 单体 A 内存在 K_{DP} 为 1~2(°)/km 的正

值(图 7b), 3.4° 仰角之上单体内 K_{DP} 不断减小, 6.2° 仰角(高度约 6.1 km) K_{DP} 为 0(°)/km。通过分析 Z_{DR} 、 K_{DP} 表明, 单体 A 内部在 0 °C 层和 -20 °C 层之间存在液态水粒子, 液态水粒子与单体内部冰晶凝结核碰并不断增长。17:17 单体 A 发展成, 单体内组合反射率因子达到 58 dBz 以上, 大于 50 dBz 强回波从地面延伸至 8.5 km, 地面出现降雪。分析单体 A 中 R_{HV} 显示, 7.5° 仰角(高度约 8.2 km), 单体内 R_{HV} 在 0.88~0.94(图 7c), 有冰雹粒子存在, 对应的 Z_{DR} 、 K_{DP} 为零, 表明为干的冰雹粒子; 3.4° 仰角(高度约 4.5 km), Z_{DR} 为 0.5~1.0 dB(图 7e), K_{DP} 在 1.0~2.5(°)/km(图 7f), 此时单体内上升气流依然强盛, 0 °C 层之上有 Z_{DR} 柱存在, 单体内 R_{HV} 达到 0.82~0.93(图 7d), 粒子的一致性变差, 此时, 单体内冰雹与液态水相混合; 3.4° 仰角以下冰雹降落融化, R_{HV} 维持在 0.8~0.9; 1.5° 仰角(高度约 2.7 km), Z_{DR} 达到 2~3 dB, K_{DP} 在 2~4(°)/km, Z_{DR} 、 K_{DP} 在 0 °C 以下随高度降低增大, 表明了冰雹逐渐融化成外包水膜的冰雹^[23]。根据单体内不同高度偏振参量的变化, 能够对不同高度粒子特征做出判断, 融化层以下, R_{HV} 在 0.8~0.9, Z_{DR} 、 K_{DP} 随高度降低不断增大的区域, 为融化冰雹区。

6 结论

本文对 2020 年 5 月 21 日午后关中北部的一次强对流天气过程的天气形势、大气环境条件和卫星云图、雷达产品特征进行分析, 得出以下结论。

(1) 高层干冷气流叠加低层暖湿空气, 陕西中北部形成的强不稳定层结, 切变线附近的辐合抬升为对流发展维持提供了有利动力条件, 地面中尺度系统在陕北触发对流, 在较强的垂直风切变



红色圆圈为对流单体 A。

图 7 咸阳 X 波段雷达不同仰角 Z_{DR} (a, e; 单位为 dB)、 K_{DP} (b, f; 单位为 $(^\circ)/\text{km}$)、 R_{HV} (c, d)

作用下对流有组织性发展加强,沿引导气流方向迅速向南移动,适宜的 0°C 、 -20°C 层高度为冰雹产生提供了有利环境条件。

(2) 对流云向南迅速移动发展增强,对流云团内 $t_{BB} \leq -45^\circ\text{C}$, 强天气区位于对流云团后部 TBB 等温线密集处。

(3) C 波段雷达产品在风暴演变过程中识别出了线状回波、三体散射特征。雷暴单体具有明显的悬垂结构,低仰角近距离径向速度图上出现速度模糊,对流单体质心高度短时间内迅速下降

预示地面出现大风,三体散射回波在高低仰角依次出现,对地面降雹有指示意义。

(4) X 波段雷达风暴反射率因子较 C 波段雷达偏弱,单体反射率因子特征与 C 波段雷达一致。风暴单体发展与成熟阶段雷达偏振参量有明显差异,发展阶段,融化层以上有 Z_{DR} 柱存在,利用 Z_{DR} 柱可以对单体发展趋势做出预判;单体成熟阶段, Z_{DR} 柱依然存在,融化层高度之下 R_{HV} 在 $0.8 \sim 0.9$ 且 Z_{DR} 和 K_{DP} 随着高度降低增加的区域,为融化冰雹降落区,可以作为地面降雹的预判。

参考文献:

- [1] 许新田,宁志谦,唐伯波,等. 陕西冰雹气候特点及环流特征分析[J]. 陕西气象,2002(5):4-6.
- [2] 万红莲,宋海龙,朱婵婵,等. 过去2000年来陕西地区冰雹灾害及其对农业的影响研究[J]. 高原气象,2017,36(2):538-548.
- [3] 俞小鼎. 强对流天气的多普勒天气雷达探测和预警[J]. 气象科技进展,2011,1(3):31-34.
- [4] 汤兴芝,黄兴友. 冰雹云的多普勒天气雷达识别参量及其预警作用[J]. 暴雨灾害,2009,28(3):261-265.
- [5] 樊志超,高继林,王治平,等. 湘西北山区夏季冰雹云多普勒雷达定量判别指标[J]. 气象,2006,32(12):50-55.
- [6] 樊鹏,肖辉. 雷达识别渭北地区冰雹云技术研究[J]. 气象,2005,31(7):16-19.
- [7] 李云川,王福侠,裴宇杰,等. 用CINRAD-SA雷达产品识别冰雹、大风和强降水[J]. 气象,2006,32(10):64-69.
- [8] 王若升,张彤,樊晓春,等. 甘肃平凉地区冰雹天气的气候特征和雷达回波分析[J]. 干旱气象,2013,31(2):373-377.
- [9] 鲁德金,陈钟荣,袁野. 等. 安徽地区春夏季冰雹云雷达回波特征分析[J]. 气象,2015,41(9):1104-1110.
- [10] 孟妙志,卢晔,王仲文,等. 关中秋季飏线天气成因和中尺度特征分析[J]. 陕西气象,2017(2):1-6.
- [11] 张晶,姚文,孙丽红,等. 营口地区3次致灾性冰雹过程对比分析[J]. 陕西气象,2017(3):6-11.
- [12] 张微,刘星光,高倩楠,等. 黑龙江绥棱县一次超级单体强冰雹成因分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2019,13(5):62-67.
- [13] 崔丽曼,苏爱芳,张宇星,等. 2016年河南省一次大范围强对流天气成因分析[J]. 气象与环境学报,2020,36(2):9-19.
- [14] 李晓霞,李常德,马国涛,等. 一次冰雹天气过程的潜势条件和中尺度特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2020,14(4):69-77.
- [15] 陈关清,杨群,李伟栋,等. 贵州铜仁连续两次冰雹天气过程的对比分析[J]. 干旱气象,2016,34(1):163-172.
- [16] 张芳,虎文珺,晁剑. 青海省东部农区冰雹天气分析及预警研究[J]. 沙漠与绿洲气象,2020,14(1):63-71.
- [17] 刘嘉慧敏,郑然,梁绵,等. 2018年陕西商洛一次罕见强雹暴环境条件及雷达特征分析[J]. 陕西气象,2020(2):1-11.
- [18] 孟妙志,任欢,李静睿,等. 关中西部致灾大冰雹天气分析[J]. 陕西气象,2021(1):1-7.
- [19] 张培昌,魏鸣,黄兴友,等. 双线偏振多普勒天气雷达探测原理与应用[M]. 北京:气象出版社,2018:38-49.
- [20] 刘红亚,杨引明,张晶,等. 一次冰雹天气的WSR-88D双偏振雷达特征分析[J]. 气象与环境科学,2020,43(2):1-10.
- [21] 江慧远,魏鸣,张深寿,等. 一次冬季冰雹的双偏振多普勒天气雷达回波分析[J]. 气象科学,2019,39(6):755-762.
- [22] 林文,张深寿,罗昌荣,等. 不同强度强对流云系S波段双偏振雷达观测分析[J]. 气象,2020,46(1):63-72.
- [23] 冯晋勤,张深寿,吴陈锋,等. 双偏振雷达产品在福建强对流天气过程中的应用分析[J]. 气象,2018,44(12):1565-1574.