

王文波,宁欣婷,杨丽,等.延安一次强冰雹天气多源观测资料分析[J].陕西气象,2025(3):10-17.

文章编号:1006-4354(2025)03-0010-08

延安一次强冰雹天气多源观测资料分析

王文波^{1,2},宁欣婷¹,杨丽^{1,2},贺新¹,张小龙¹

(1. 延安市气象局,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:利用延安多普勒天气雷达、风廓线雷达、微波辐射计以及常规气象观测资料和 ERA5 再分析资料,对 2023 年 8 月 24 日延安地区发生的强冰雹天气进行分析。结果表明:在中高层干冷平流强迫作用下,低层辐合线和露点锋触发此次冰雹云的发生发展,0℃、-20℃高度和强垂直风切变条件均有利于强冰雹的形成。微波辐射计和风廓线雷达能够有效监测到冰雹发生前中高层干冷空气侵入和低层暖湿层建立特征,以及 0~3 km 垂直风切变的显著增强,这为冰雹预警提供了重要参考依据。强冰雹雷达回波表现出明显的三体散射回波特征,旁瓣回波可作为强冰雹预警的充分判据。强冰雹发生时最大反射率因子在 65 dBZ 以上,50 dBZ 以上强回波伸展至-20℃高度以上,VIL 在 50 kg/m² 以上,并维持一定时间。

关键词:强冰雹;微波辐射计;风廓线雷达;旁瓣回波

中图分类号:P458.121.2

文献标识码:A

延安市位于黄土高原丘陵沟壑区,冰雹是主要的灾害性天气之一,多发频发的冰雹给当地的农业生产和人民生活等带来严重危害。作为陕西省优质苹果核心产区,其苹果种植面积广泛、品质优良。然而,每年 6—8 月冰雹多发期正值苹果果实膨大至成熟的关键生育期,冰雹灾害严重制约着苹果的高品质生产。因此,冰雹天气的早预警、早防御对保障苹果产业的高质量发展至关重要。

冰雹按直径(d)大小分为四个等级,即弱冰雹($d < 5$ mm)、中等强度冰雹(5 mm $\leq d < 20$ mm)、强冰雹(20 mm $\leq d < 50$ mm)和特强冰雹($d \geq 50$ mm)^[1]。随着全球气候变暖,近年来延安市冰雹天气频次增多,极端性增强,冰雹预警的时效性和准确性成为气象预测面临的一项挑战。汤兴芝等^[2]对华东一次极端冰雹天气的雷达回波特征进行了分析,结果发现极端冰雹是由具有强中气旋的超级单体造成,有超级单体雹暴的典型

结构特征。陆飞等^[3]对 2021 年苏中南地区的一次强冰雹过程研究发现,强冰雹发生前大气层具有较强的对流环境参数特征,地面辐合线引发冰雹对流云团形成和发展。李聪等^[4]利用微波辐射计、风廓线雷达和雨滴谱仪等观测资料对 2015 年一次冰雹天气进行了分析,探讨了新型观测资料在冰雹预警中的应用。唐佳等^[5]研究了低层暖平流强迫下大冰雹超级单体风暴结构特征,发现在风暴强烈发展阶段有低层辐合、中层双涡管式旋转和高层辐散特征。这些研究为冰雹的预警提供了宝贵的经验和理论依据。

延安市现已部署了新一代多普勒天气雷达、微波辐射计、风廓线雷达、云雷达等多种气象探测设备,这些设备能够对延安地区的强对流天气进行更加精密的监测,为冰雹的预报预警提供依据。本文利用延安市新一代多普勒天气雷达、风廓线雷达和微波辐射计观测资料,结合常规高空、地面

收稿日期:2024-10-09

作者简介:王文波(1982—)男,汉族,陕西咸阳人,本科,工程师,主要从事灾害性天气预报。

基金项目:中国气象局大气探测重点开放实验室开放课题(2021KLAS05M);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);延安市生态·水环境资源开发与应用研究实验室课题(2023M-8)

观测资料以及ERA5再分析资料,对2023年8月24日延安地区发生的一次强冰雹天气进行分析,为今后延安市强冰雹天气的监测预警提供参考。

1 冰雹实况与灾情

2023年8月24日延安市出现强对流天气。气象观测站和人工影响天气作业点收集的冰雹数据显示,13:12—18:30(北京时间,下同),安塞区、子长市、宝塔区、甘泉县、富县5县区13个乡镇出现不同程度的冰雹(图1)。13:12—15:15,安塞区自北向南出现直径达10 mm冰雹,其中招安镇冰雹持续时间长达40 min,最大冰雹直径50 mm。13:45—14:37,子长市自西向东出现直径达4 mm冰雹。14:48—15:20,宝塔区万花山镇和甘泉县石门镇出现直径5~8 mm冰雹。17:50—18:40,富县张家湾镇出现直径20 mm冰雹。冰雹发生期间部分气象观测站伴有短时降水和瞬时大风,甘泉县石门测站1 h降水量25.5 mm,富县张家湾测站1 h降水量29.2 mm,宝塔区、甘泉县出现6级瞬时大风。冰雹天气造成大面积农作物和苹果受灾严重。

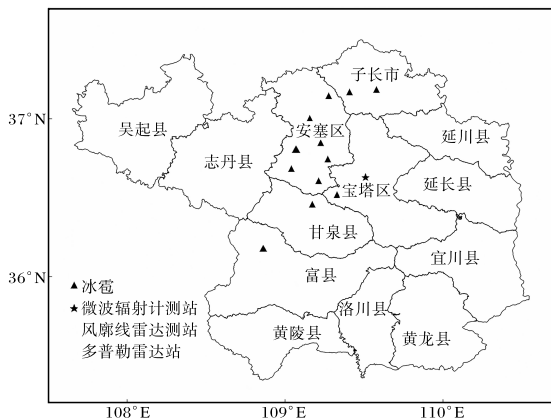


图1 2023-08-24T08—20 延安市冰雹落区分布图

(审图号为陕S(2021)023号)

2 天气形势背景

8月24日08:00(图2a),延安市处于200 hPa高空急流出口区左侧,其存在的正涡度辐散有利于上升运动的发展。500 hPa高空槽位于华北西部,700 hPa温度槽落后于高度槽,延安地区受槽后西北气流控制。高空冷平流随着西北气流扩散南下,在中高层形成干区冷层,增强了大气不稳定

性,有利于冰雹粒子的增长。850 hPa陕北西部受冷切变线影响,切变线南侧偏南气流控制着延安地区,在低层形成浅薄的暖湿层,提供了冰雹所需的不稳定能量和水汽。从天气形势的高低层配置来看,延安地区呈现出“上干下湿”的大气不稳定层结,为午后冰雹的形成和发展提供了必要的环境条件。850 hPa切变线附近伴有露点锋,两侧有明显的露点温度梯度。在地面上,配合有辐合线发展。11:00—12:00,延安北部形成东北风与西南风的辐合,辐合线附近开始有对流云发展,对流云随着露点锋和辐合线向东南方向缓慢移动。露点锋和辐合线是此次对流发生发展的触发机制,其风场的辐合和湿度梯度的存在为对流风暴的触发提供了必要的抬升条件和水汽条件。从延安站探空图可见(图2b),温度与露点曲线呈“喇叭口”形态,850 hPa温度露点差为2.8℃,500 hPa温度露点差增大至29.6℃。850 hPa附近存在一个相对湿度大于80%的浅薄湿层,其上部为厚度233 m的逆温层,该逆温层的存在阻止暖湿空气的垂直运动,使不稳定能量和水汽在低层积聚,增强了大气的不稳定性,为冰雹的形成提供了热力不稳定和能量条件。

对流有效位能(CAPE)作为表征大气稳定度的重要参量,能够反映强对流天气过程中大气的稳定性程度,CAPE值越大,对流发展越强烈。8月24日08:00,延安地区冰雹发生区域CAPE在100~300 J/kg。12:00,CAPE明显增强,达到500~900 J/kg。14:00,强冰雹区域的CAPE达到900~1 100 J/kg。适宜的冰雹融化层高度是形成冰雹的重要指标之一。实际上,冰雹融化层更接近于湿球温度0℃层而不是干球温度0℃层^[6]。8月24日,延安地区湿球温度0℃层和-20℃层高度分别为3 513 m和7 266 m,均处于形成冰雹的适宜高度范围内。

3 微波辐射计特征

微波辐射计能够高频次探测0~10 km大气层内气温、湿度、水汽等气象要素,为强对流天气监测预警提供热力参数支撑。延安站微波辐射计位于冰雹发生区域东南侧,其温湿廓线演变显示(图3),冰雹发生前,大气温湿度廓线呈现增温趋

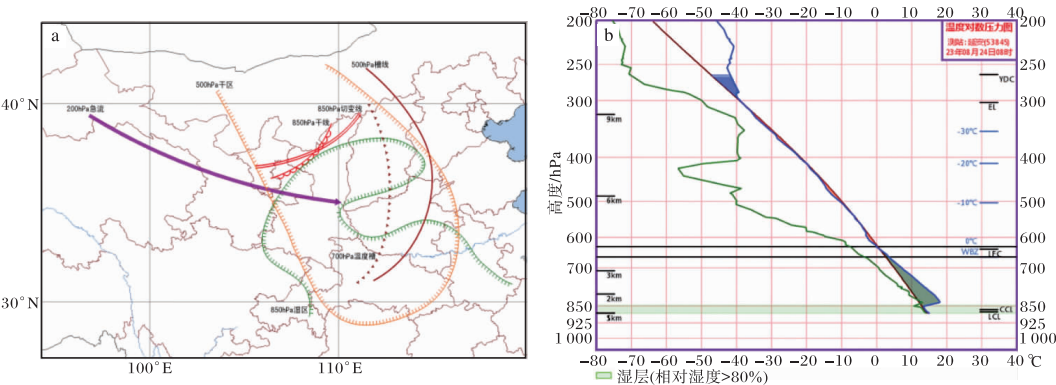


图 2 2023-08-24T08 中尺度分析(a)和延安站探空图(b)(审图号为 GS(2019)3082 号)

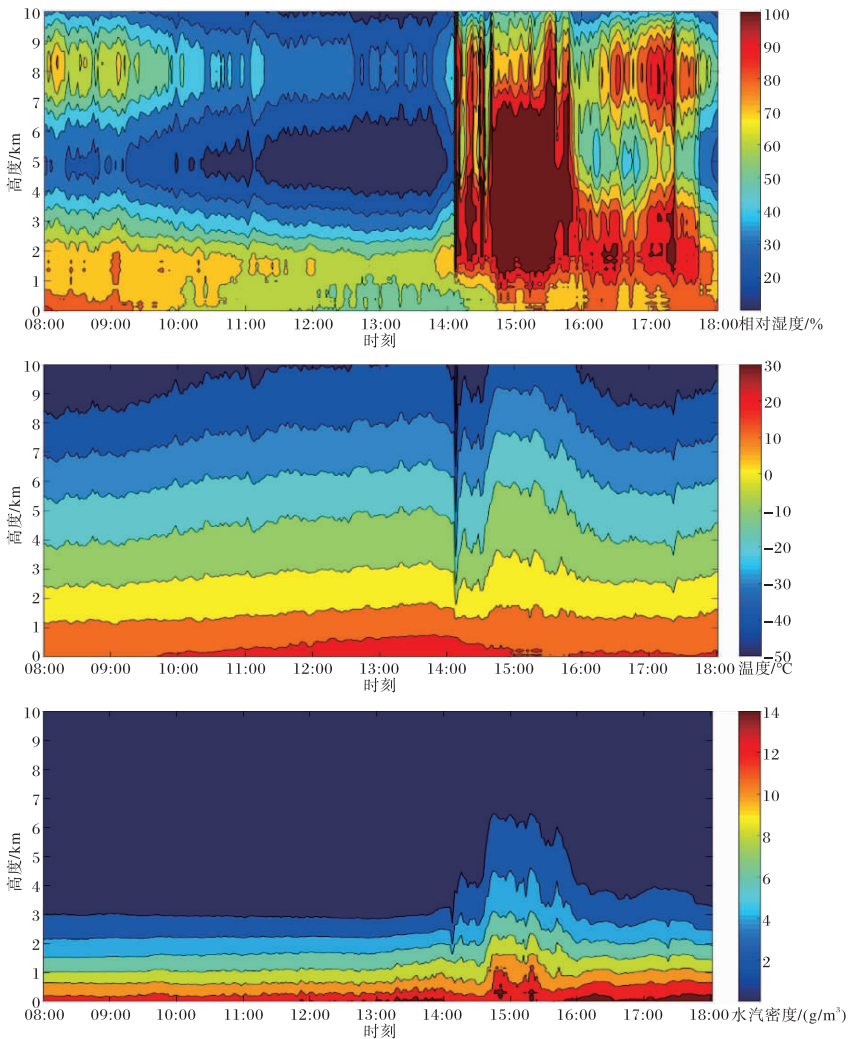


图 3 2023-08-24T08—18 延安微波辐射计相对湿度、温度和水汽密度演变图

势,近地面层增温更加明显。13:00,微波辐射计测站近地面气温 26.5℃,位于测站上游的安塞区气象观测站气温 26.0℃,此时,安塞区北部开始有冰雹云形成发展。14:00,测站上游已经出现冰雹,由于测站未出现降水,近地面气温继续上升,

13:50 气温达到 29.0℃。冰雹发生前,大气相对湿度廓线呈现减小趋势,受中高层干冷平流侵入影响,中层相对湿度减小趋势特别明显,5 km 附近相对湿度由 29%减小至 15%,4~6 km 相对湿度减小至 20%以下,在中高层形成显著的干层,

并维持至测站出现降水。水汽密度廓线显示, 08:00—14:00, 899 hPa 以下的低层水汽密度维持在 $8\sim 12\text{ g/m}^3$, 这表明低层大气中维持着较好的水汽条件。14:00 后, 近地层气温快速下降, 1~7 km 相对湿度达到饱和, 大气中的水汽含量迅速增加, 水汽密度廓线出现明显的陡升, 这与微波辐射计测站出现降水有关。微波辐射计反演的抬升指数 (LI 指数) 和 KI 指数显示, 08:00—14:00 两个指数呈现出多个波峰和波谷的波动结构, LI 指数在 $-8.7\sim -5.7$ 之间波动, 而 KI 指数维持在 $35\sim 40$ 之间。14:00, 微波辐射计测站出现降水, KI 指数陡升, LI 指数陡降。KI 指数的增大和 LI 指数的减小均表明大气层结的不稳定性增强。虽然微波辐射计测站未直接观测到冰雹, 但仍捕捉到在冰雹发生前, 低层暖湿增强与中层干冷侵入的耦合作用, 这对提前预警冰雹有着重要的参考意义。

4 垂直风切变特征

垂直风切变对冰雹云的组织和发育至关重要, 其强度直接影响到冰雹的形成和增强。8月24日08:00, 延安探空站观测数据显示 0~6 km 垂直风切变强度为 18 m/s , 达到中等强度以上, 为午后冰雹的形成和发育提供了动力条件。600 hPa 以下风向随高度的增加顺时针旋转, 表明低层存在暖平流, 600 hPa 以上风向随高度的增加逆时针旋转, 表明中高层存在冷平流, 这种热力层配置有利于大气不稳定层结的维持和增强。与传统的探空观测相比, 风廓线雷达能够实时高精度探测大气的三维风场、垂直运动速度和大气折

射率等气象要素, 连续的风场信息能够更好地捕捉对流发展阶段风场的垂直结构, 是对传统探空观测的有力补充。此次冰雹发生区域位于延安风廓线雷达测站西侧及北侧 $15\sim 80\text{ km}$ 监测范围内。从风廓线雷达垂直风场演变可见 (图 4), 3~6 km 维持着一致的西北风, 且风速随高层逐渐增强。13:45, 6 km 高度风速增大至 18 m/s , 表明中层冷平流已经开始影响到测站。14:45 最大风速达到 20 m/s 。低层 1 km 高度附近, 西风逐渐转为西南风, 近地面西风转为东风, 风速为 2 m/s , 这一转变表明冰雹发生前低层大气中的水汽条件逐渐增强。13:00, 风廓线雷达测站上游开始有冰雹云的形成和发育, 低层西南风向上伸展至 1.5 km 高度, 风速增大至 6 m/s , 西南风的增强不仅为冰雹的形成输送了更多的水汽, 还提供了不稳定能量。同时, 0~6 km 高度垂直风切变开始增强。13:30—14:00 测站上游强冰雹形成阶段, 0.5~1.5 km 风速维持在 6 m/s , 风向由西南风转为南风, 0~6 km 垂直风切变进一步增强, 尤其是 0~3 km 垂直风切变增强更加明显。可见, 强冰雹形成过程中, 有强的上升运动发展, 0~3 km 垂直风切变的增强对强冰雹预报有一定的指示意义。垂直风切变的增强使对流云发生倾斜, 这有利于低层暖湿气流的流入, 并避免后部下沉气流对上升气流的抑制, 从而维持和发育对流活动。14:00 风廓线雷达测站开始出现降水, 低层南风向向上伸展至 3 km。17:00—18:00, 0~6 km 继续维持着强垂直风切变, 为冰雹云的发育提供动力支持。

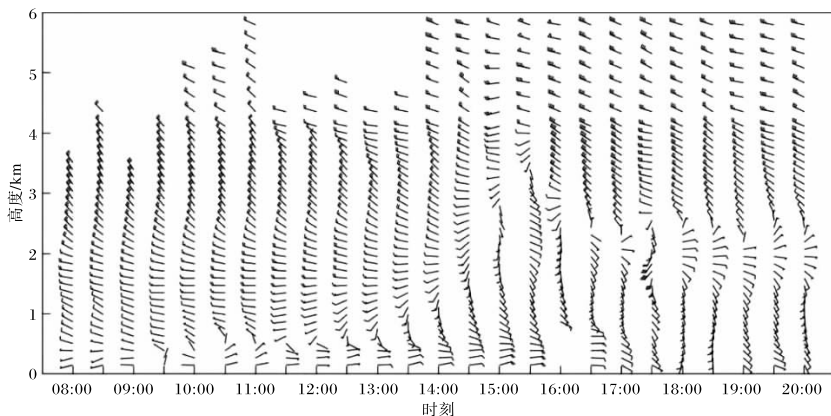


图 4 2023-08-24T08—20 延安风廓线雷达风场演变图

5 多普勒天气雷达特征

冰雹云的形成发展有两个阶段,第一阶段发生在安塞区和子长市,第二阶段发生在富县。

12:00,安塞区北部生成多个初生对流单体,并向东南方向移动合并。13:02,合并形成 A、B、C、D 四个对流单体风暴,风暴最大反射率因子 61 dBZ,垂直积分液态水含量(VIL) 35 kg/m²。13:08(图 5 a、b),风暴 A 向东移动,风暴 B 向南移动,而风暴 C、D 逐渐减弱消亡,风暴 B 在 2.4° 仰角以上径向速度出现中尺度气旋。中尺度气旋内的上升旋转气流将低层暖湿空气向上输送,为雹胚的形成提供必要的水汽和能量。同时,上升气流促使雹胚向更高层发展,使其经过多次的融化和再冻结过程不断增大。13:13,风暴 A、B 最

大反射率因子达到 62~66 dBZ,风暴 A 在 2.4° 仰角以上径向速度出现中尺度气旋,3.4° 仰角以上反射率因子出现弱三体散射回波,表明在中高层大气中有冰雹粒子形成。而风暴 B 在 1.5° 仰角反射率因子出现弱回波区,此时安塞区化子坪镇出现中等强度冰雹。13:19,风暴 A 继续维持着弱三体散射回波和中尺度气旋,低层反射率因子出现弱回波区,此时安塞区坪桥镇出现中等强度冰雹。13:25—13:31(图 5c、d),风暴 A 三体散射回波消失,由于中尺度气旋仍然存在,风暴继续维持。风暴 B 径向速度上有径向辐合发展,最大反射率因子增大至 68 dBZ,弱回波区增强,其高度超过 2.4° 仰角。这表明风暴内上升气流增强,有利于冰雹粒子的形成和增长。在风暴 B 的入流

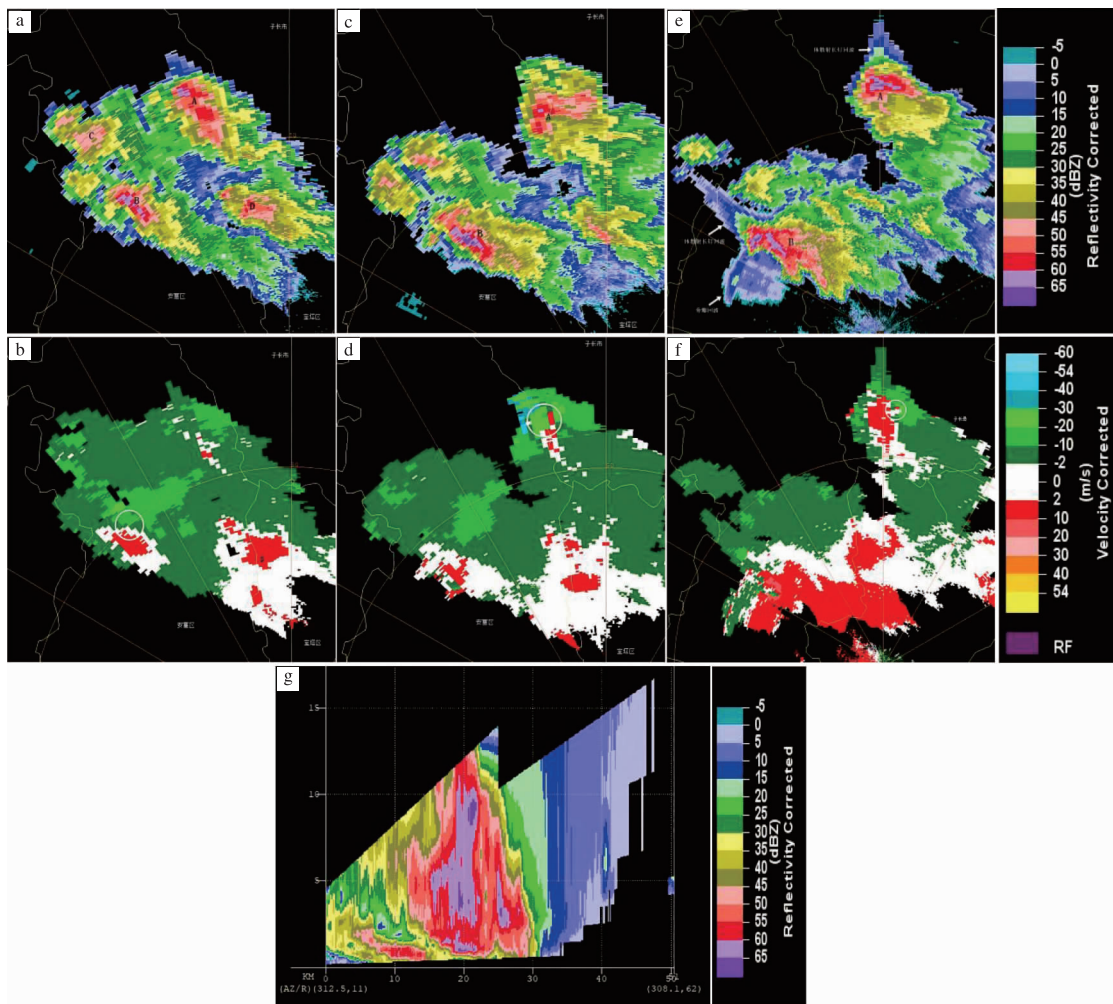


图 5 2023-08-24 对流单体风暴 4.3° 仰角反射率因子(a 13:08, c 13:25, e 13:49)、3.4° 仰角径向速度(b 13:08, d 13:25, f 13:49; 白色圆圈代表中尺度气旋)、风暴 B 沿雷达径向垂直剖面图(g 13:49)

侧,反射率因子梯度明显增大,大于 50 dBZ 回波伸展至 -20°C 高度附近,安塞区建华镇、真武洞镇出现中等强度冰雹。13:37,对流单体风暴 A、B 最大反射率因子为 63~64 dBZ,风暴 A 在 2.4° 仰角以上反射率因子再次出现三体散射回波,说明中高层大气中再次形成冰雹粒子。与此同时,风暴 B 反射率因子较前一时刻有所减弱,但 50 dBZ 以上回波区域扩大。风暴 A 和风暴 B 径向速度上有中尺度气旋和径向辐合发展。13:43—13:49(图 5e、f),风暴 A 继续向东移动, $1.5^{\circ}\sim 6.0^{\circ}$ 仰角反射率因子均出现三体散射回波,最大反射率因子达到 67 dBZ。风暴低层入流处存在强回波梯度墙,强回波中心高度 2.7 km,4 km 高度有弱回波区。 $3.4^{\circ}\sim 4.3^{\circ}$ 仰角径向速度上继续维持着中尺度气旋,子长市出现弱冰雹。13:43,风暴 B 在 2.4° 仰角以上径向速度出现中尺度气旋,最大反射率因子达到 69 dBZ,大于 50 dBZ 回波向上伸展至 10 km,7 km 高度附近回波强度在 55 dBZ 以上。 2.4° 仰角以上反射率因子出现三体散射回波,其一侧伴有旁瓣回波, $4.3^{\circ}\sim 6.0^{\circ}$ 仰角的旁瓣回波表现更加明显。旁瓣回波的出现表明风暴的底层至高层存在大冰雹粒子,安塞区招安镇开始出现强冰雹。13:49,风暴 B 回波顶高伸展至 11.2 km,形成高耸的强回波(图 5g),大于 50 dBZ 回波伸展至 -20°C 高度以上, -20°C 高度反射率因子达 60 dBZ 以上,VIL 为 62 kg/m^2 。 $1.5^{\circ}\sim 6.0^{\circ}$ 仰角均有明显的三体散射回波,在其一侧继续伴随着旁瓣回波, 1.5° 仰角旁瓣回波最大反射率因子 12 dBZ, 6.0° 仰角旁瓣回波最大反射率因子 17 dBZ,可见在风暴的底层至高层有大冰雹粒子存在。13:55—14:24,风暴 A 继续维持三体散射回波,最大反射率因子 65~70 dBZ,随着径向速度上中尺度气旋的消亡,风暴 A 逐渐减弱消亡。14:01—14:13,风暴 B 最大反射率因子维持在 67~70 dBZ,三体散射回波依然明显,但旁瓣回波的减弱表明中高层的冰雹粒子开始减小。14:19—14:48, 3.4° 仰角以下三体散射回波呈现出减弱趋势,安塞区高桥镇出现中等强度冰雹。14:48—15:00,风暴 B 径向速度上再次出现中尺度气旋,风暴 B 得到维持和发展,并继续向南移

动。15:00—15:12,风暴 B 最大反射率因子在 69~70 dBZ,在 4.3° 仰角以上反射率因子再次出现三体散射回波,但大于 50 dBZ 的回波未伸展至 -20°C 高度,甘泉县石门镇出现弱冰雹,宝塔区万花镇出现中等强度冰雹。微波辐射计和风廓线雷达测站上空,最大反射率因子在 45 dBZ 以下,测站未出现冰雹。15:18 后,风暴 B 减弱消亡,第一阶段冰雹结束。

16:58—17:34,富县西北部有对流云发展,形成两个初生对流单体。17:46,对流单体合并形成对流单体风暴 E,其最大反射率因子达 69 dBZ,并在低层开始出现弱回波区。17:51(图 6 a、b),风暴 E 在 2.4° 仰角以上反射率因子出现弱三体散射回波,表明中高层有冰雹粒子形成。同时, 3.4° 仰角径向速度出现中尺度气旋。17:57,中尺度气旋进一步增强,风暴 E 继续发展增强。18:03—18:09(图 6 c、d),风暴 E 最大反射率因子 68~71 dBZ,三体散射回波显著增强,大于 50 dBZ 回波向上伸展至 7.7 km,超过 -20°C 高度,此时富县张家湾镇出现强冰雹。18:09—18:39,径向速度上中尺度气旋逐渐消亡,但反射率因子维持在 64~72 dBZ,三体散射回波逐渐减弱,表明风暴中冰雹粒子开始减小。18:45,三体散射回波继续减弱并最终消散,第二阶段冰雹结束。

对比风暴 A、B、E 的回波特征可见,冰雹发生前,径向速度上均有中尺度气旋的发展和消亡。冰雹发生时,反射率因子表现出三体散射回波特征,低层存在弱回波区,在低层入流侧有强回波梯度墙。强冰雹的反射率因子从低层至高层均有更加明显的三体散射回波特征,其一侧还可能伴有旁瓣回波的出现。分析三个对流单体风暴的最大反射率因子(DBZM)、垂直积分液态水含量(VIL)、强回波中心高度(HT)、回波顶高(TOP)时序演变(图 7)发现,冰雹发生时,最大反射率因子均在 60 dBZ 以上,这表明风暴中存在大量的冰雹粒子,强冰雹的反射率因子在 65 dBZ 以上,并持续一定的时间,最大可以达到 72 dBZ。垂直积分液态水含量(VIL)在降雹时陡增至 40 kg/m^2 以上,中等强度以下冰雹的 VIL 维持在 $40\sim 50\text{ kg/m}^2$,而强冰雹的 VIL 维持在 50 kg/m^2 以上,

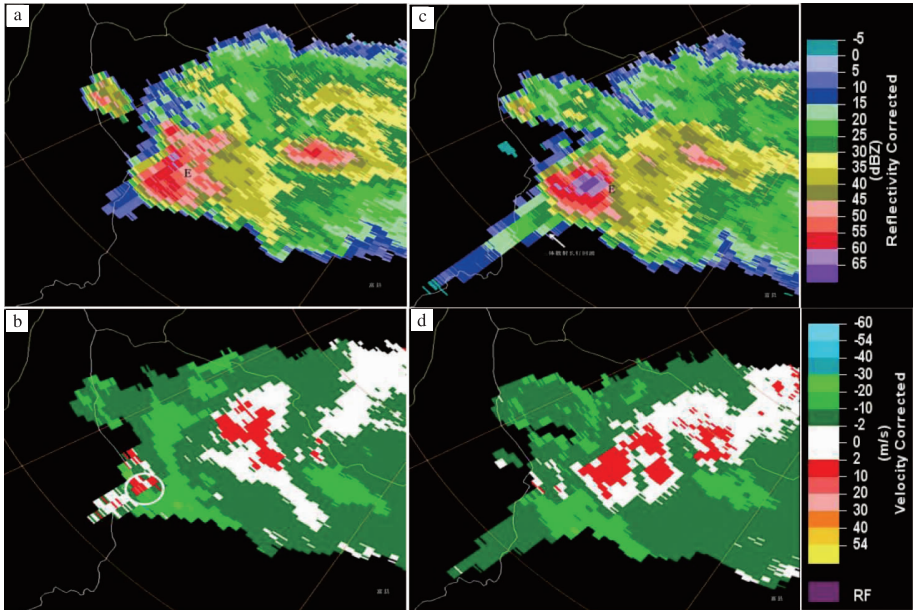


图6 2023-08-24 对流单体风暴 E 4.3°仰角反射率因子(a 17:51,c 18:03)和 3.4°仰角径向速度图(b 17:51,d 18:03;白色圆圈代表中尺度气旋)

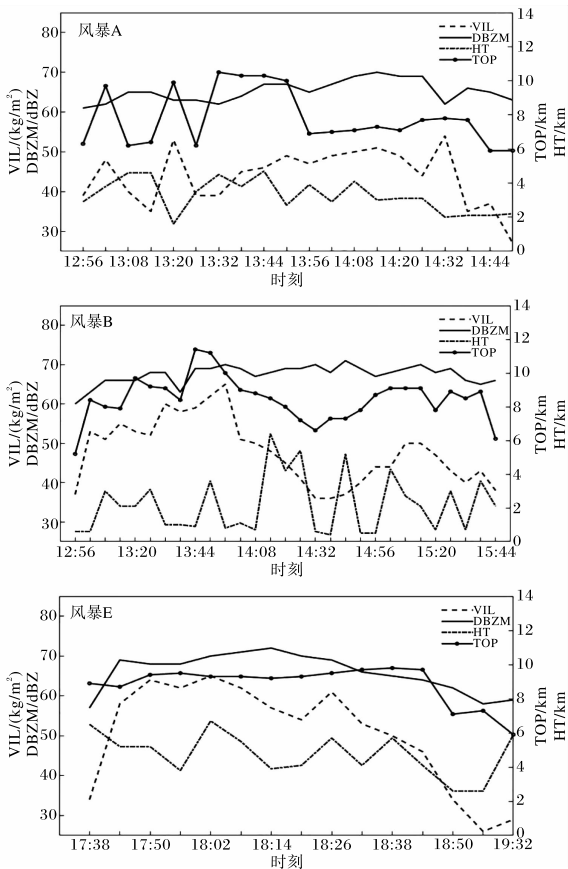


图7 2023-08-24 对流单体风暴 A、B、E 最大反射率因子 DBZM、垂直积分液态水含量 VIL、强回波中心高度 HT、回波顶高 TOP 时序演变图

最大达到 $60 \sim 65 \text{ kg/m}^3$,持续时间长达 60 min。VIL 的增大和持续高值表明风暴中有冰雹形成所需的丰富液态水。强回波中心高度在 $2 \sim 4 \text{ km}$ 高度上下起伏,强冰雹的回波中心高度可伸展至 $4 \sim 6 \text{ km}$,表明风暴中上升气流旺盛,有利于大冰雹形成。发生冰雹时,回波顶高在 -20°C 高度附近及以上,强冰雹回波顶高可伸展至 $10 \sim 11 \text{ km}$ 高度, 11 km 高度反射率因子可达 50 dBZ 以上, -20°C 高度反射率因子可达 60 dBZ 以上,形成高耸的强回波。

6 结论

通过对 2023 年 8 月 24 日延安地区强冰雹天气的多源观测资料分析,得出以下结论。

(1)此次冰雹是在中高层干冷平流强迫作用下发生的,干冷平流增强并叠加在低层暖湿区上,使大气的对流不稳定性不断增强。浅薄逆温层下积聚了形成冰雹所需的不稳定能量和水汽,低层辐合线和露点锋触发不稳定能量释放和对流系统的发展。适宜的湿球温度 0°C 、 -20°C 层高度以及强垂直风切变均有利于强冰雹的形成。

(2)冰雹发生前,微波辐射计能够有效监测到中高层干冷空气侵入与低层暖湿气流的耦合过程,湿度廓线演变对干冷空气的侵入表现得特别

明显。在冰雹发生临近时刻,风廓线雷达有效捕捉到 0~3 km 垂直风切变增强,其强度变化与对流发展具有相关性。两种观测资料对冰雹的预警具有重要的参考意义。

(3)该次强冰雹反射率因子表现有明显的三体散射回波,最大反射率因子在 65 dBZ 以上,50 dBZ 以上强回波伸展至 -20°C 高度以上,形成高耸的强回波。旁瓣回波可作为大冰雹预警的一个充分条件。中等强度以下冰雹的 VIL 在 $40\sim 50\text{ kg/m}^2$,强冰雹的 VIL 在 50 kg/m^2 以上,并维持一定时间。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 汤兴芝,俞小鼎,姚瑶,等. 华东一次极端冰雹天气过程雷达回波特征的比较分析[J]. 高原气象, 2023,42(4):1078-1092.
- [3] 陆飞,阮蔚琳,邓雯,等. 2021 年盛夏苏中南一次强冰雹过程大气环境与雷达回波特征[J]. 暴雨灾害, 2022,41(2):167-173.
- [4] 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.
- [5] 唐佳,张昆,唐明晖,等. 低层暖平流强迫下两次大冰雹超级单体风暴结构特征分析[J]. 暴雨灾害, 2023,42(1):37-46.
- [6] 俞小鼎,王秀明,李万莉,等. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京:气象出版社,2020.
- [7] 汤兴芝,俞小鼎,熊秋芬,等. 鄂西南冬末一次罕见的强冰雹过程分析[J]. 气象,2022,48(5):618-632.
- [8] 肖婷,张羽,张志坚,等. 多源新型探测资料在一次强对流天气中的应用[J]. 广东气象,2022,44(6): 11-15.
- [9] 栾亚睿,陈春艳,汪雪云,等. 奎玛流域两次冰雹天气成因分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2022,16(2):78-84.
- [10] 赵海英,王秀明,周晋红. 山西高原大冰雹与小冰雹的环境参量对比分析[J]. 高原气象,2023,42(2):417-426.
- [11] 王晓君,郑媛媛. 普洱市不同等级冰雹天气的雷达回波特征对比分析[J]. 气象,2022,48(7):868-877.
- [12] 王研峰,黄武斌,王聚杰,等. 一次甘肃天水强冰雹的雷达回波特征及成因分析[J]. 高原气象, 2019,38(2):368-376.