

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.

文章编号:1006-4354(2021)01-0001-07

关中西部致灾大冰雹天气分析

孟妙志^{1,2},任欢²,李静睿³,乔丹杨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.宝鸡市气象局,陕西宝鸡 721006;3.安康市气象局,陕西安康 725000)

摘要:利用高空及地面天气图、宝鸡多普勒雷达资料,分析了2015年7月18日和2016年6月12日关中西部陇县两次大冰雹强对流天气成因及雷达特征。分析表明,两次过程环境条件比较一致,冷涡槽后西北气流携带的冷空气形成了对流不稳定层结有利条件,地面露点锋是强对流的触发机制。2015年7月18日冰雹是由中气旋的超级单体风暴产生,2016年6月12日冰雹是强单体风暴造成。两次过程中,持续的垂直累积液态含水量 $\geq 55 \text{ kg/m}^2$ 、反射率因子 $\geq 60 \text{ dBz}$ 和三体散射是大冰雹出现的重要特征。雷达冰雹指数(HI)、风暴追踪信息(STI)等产品可作为提前发布强对流天气预警的参考。

关键词:大冰雹;超级单体风暴;强单体风暴;垂直累积液态含水量及密度

中图分类号:P458.1212

文献标识码:A

冰雹天气研究一直受到学者们的重视^[1-5],研究表明,冰雹天气在有利的天气背景下产生,小冰雹发生频次高,特殊地形不仅成为产生冰雹的源地,而且影响冰雹路径。陕西关中渭北有两个冰雹源地^[6]:子午岭和六盘山冰雹源地。关中西部宝鸡市的陇县位于六盘山冰雹源地直接影响区,是宝鸡市冰雹最多的县区,年均降雹5.2次,最多1983年达12次,但直径 $\geq 2 \text{ cm}$ 的大冰雹出现频次较少(年均不到1次),针对大冰雹天气的分析研究也较少。2015年7月18日、2016年6月12日陇县均出现大冰雹且降雹时间长,为宝鸡近5年少见的大冰雹天气,造成陇县烤烟、玉米等农作物绝收。多普勒雷达为短时临近监测冰雹提供了有效工具。本文对这两次大冰雹天气产生背景特别是多普勒雷达特征进行分析,为短时临近预报预警提供经验指标。

1 天气概况

2015年7月18日15—17时,宝鸡市的陇县

出现冰雹天气(简称“2015-07-18”冰雹过程),降雹持续30~40 min,冰雹最大直径4 cm左右,同时出现短时强降水和7级以上大风。2016年6月12日18—20时,陇县出现雷阵雨伴冰雹天气(简称“2016-06-12”冰雹过程),先后两次降雹时间累计35 min,冰雹最大直径2 cm。这两次冰雹天气均发生在陇县,其特点为局地性强、强度大、降雹时间长、每次都出现两轮降雹。从宝鸡多普勒雷达反射率因子可以看出,这两次冰雹天气原始风暴均在上游华亭生成,向东南移动,进入陇县并发展。

2 环流形势及大气层结稳定度

“2015-07-18”冰雹过程 2015年7月18日08—20时天气图上,500 hPa陕西处在蒙古冷涡后部的偏北气流中并配有一 $8 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度槽。700 hPa自河西地区有干舌伸到平凉,平凉、西安之间有风向切变;850 hPa有暖脊移入河套,关中有湿区。陕西具有上干冷、下暖湿的大气层结,是

收稿日期:2020-06-24

作者简介:孟妙志(1964—),女,汉族,甘肃平凉人,学士,高工,从事天气预报及技术研究。

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开放研究基金项目(2019M-14);宝鸡市气象局创新基金项目(202003)

利于陕西强对流天气出现的天气形势背景^[7]。14时地面图上,平凉有一露点锋,从卫星云图可以看出沿干线有对流云形成,将发展东移影响宝鸡。露点锋是这次强对流天气的触发系统。

“2016-06-12”冰雹过程 2016年6月12日08—20时天气图上,500 hPa 陕西处于槽后西北气流中,温度槽位于陕西西侧平凉附近,温度槽后河西有 ≥ 16 m/s 明显西北气流,有较强的冷平流输送到陕西。700 hPa 河西地区到平凉有干舌,并配合有 ≥ 12 m/s 显著西北气流;850 hPa 上关中有湿舌,平凉和西安之间有风向切变。08—14时地面图上平凉附近有露点锋,利于触发强对流天气。

可以看出,两次冰雹天气过程有相似的天气系统配置(图略),冷涡后部西北气流携带干冷空气侵入,低层有暖湿气流并配合有切变,为这两次强对流天气发生提供了有利的天气背景。不同之处,“2016-06-12”冰雹过程温度槽后河西有显著西北气流,冷平流显著。从中尺度分析可见,强对流发生于温度槽、低层切变、地面露点锋、 $t_{(850-500)}$ > 28 °C 叠置区域。

分析距陇县最近的平凉探空站的大气层结。2015年7月18日08时,平凉近地层有逆温。由平凉对流指数(表1)可见,沙氏指数(SI)为2.9 °C, K指数为19 °C, CAPE为0 J/kg, 风垂直切变为 $2.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 即平凉站具有不稳定能量小、层结稳定的特征;但500 hPa 以下风向随高度顺转有暖平流,以上风向随高度逆转有冷平流,有利于层结向不稳定发展。20时,平凉 SI 为-1.1 °C, K指数增大为33 °C, CAPE 增大为234 J/kg, 风垂直切变增大为 $2.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 与08时比较,平凉不稳定能量增加,风垂直切变增大,层结演变为对流不稳定,有利于强对流天气发生发展。08—20时0 °C层、-20 °C层高度均上升,分别为4 440 m 和7 750 m,符合本地冰雹指标值($Z_0 < 5 \text{ km}$ 、 $Z_{-20} < 8 \text{ km}$ 、-20 °C层位于400 hPa 等压面上)^[6],有利于冰雹形成。合适的 Z_0 和 Z_{-20} 非常重要^[8]。

2016年6月12日08时,平凉站 SI 为2.9 °C, K指数为19 °C, CAPE 为0 J/kg, 风切变为 $2.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 层结稳定,近地层有逆温有利于能量积累。20时,平凉 SI 为-3.3 °C, K指数为33 °C, CAPE 为

1 060 J/kg, 风垂直切变增大为 $3.1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 即平凉层结不稳定,对流不稳定能量大,非常有利于强对流发展。

综上所述,陇县两次冰雹过程中,08时近地层有逆温利于能量积累,由于高层冷平流、低层暖平流,08—20时大气层结由稳定演变为对流不稳定,非常利于对流发展。0 °C层、-20 °C层高度达到本地冰雹指标值($Z_0 < 5 \text{ km}$ 、 $Z_{-20} < 8 \text{ km}$)。

表1 两次冰雹过程平凉对流指数

对流指数	“2015-07-18”		“2016-06-12”	
	冰雹过程		冰雹过程	
	08时	20时	08时	20时
K 指数/°C	19	33	19	33
沙氏指数/°C	2.9	-1.1	2.6	-3.3
CAPE 值/(J/kg)	0	234	0	1 060
比湿/(g/kg)	13	21	14	17
$t_{(850-500)}$ /°C	25	28	23	31
850~200 hPa 垂直切变/ 10^{-3} s^{-1}	2.5	2.6	2.3	3.1
0 °C 层高度/m	4 435	4 440	4 450	4 504
-20 °C 层高度/m	7 292	7 750	7 327	7 610

3 “2015-07-18”冰雹过程雷达特征

3.1 回波演变特征

“2015-07-18”冰雹过程历时2 h,即15—17时,先后受尺度为26 km 左右的两个单体风暴(图1中A、B)影响。单体A是15:00 自上游华亭移入陇县,15:09—16:04 影响陇县,其中15:15—15:40时反射率因子(R)连续5个体扫出现三体散射和旁瓣回波,回波中心强度为55~65 dBz,回波顶高(ET)为11~14 km,垂直累积液态含水量(VIL)为55~64 kg/m²且梯度很大。受单体A的影响,陇县出现第一次大冰雹天气,持续时间为20 min 左右。单体A在16:11 减弱,在其右后侧形成单体B,16:11—17:00 影响陇县,其中16:23—16:41 反射率因子连续4个体扫出现三体散射,中心强度达50~64 dBz, ET 为11~12 km, VIL 为50~68 kg/m²且梯度大。受单体B的影响,陇县出现第二次降冰雹,持续时间15 min 左右。图1为宝鸡多普勒雷达图上显示的

单体主要时段 VIL 演变,由图 1 可见,单体 A、B 为中心强度大、结构紧密、梯度大的风暴。对照分

析可见当两个单体 R 值 ≥ 60 dBz 且 VIL 值 ≥ 55 kg/m² 出现三体散射特征时对应降大冰雹。

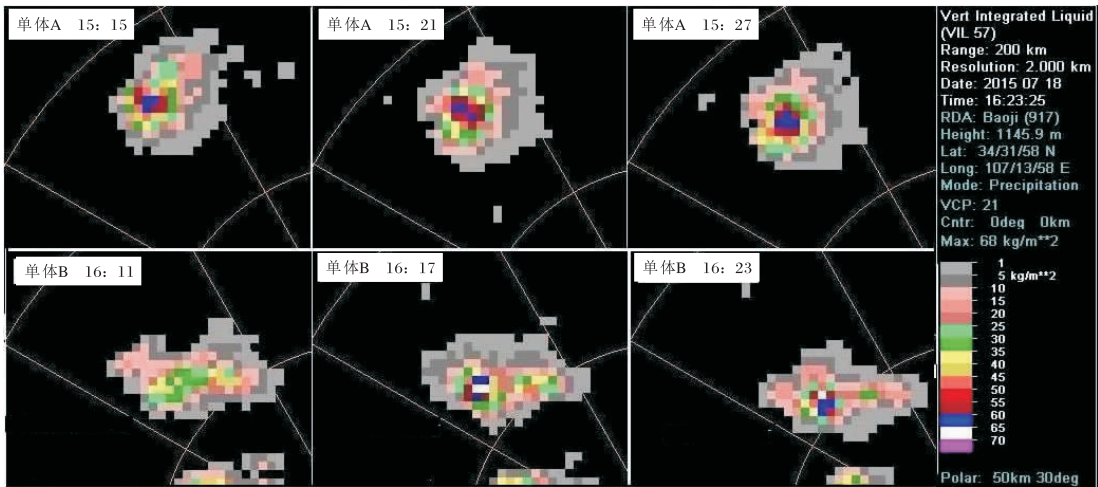


图 1 2015-07-18 宝鸡多普勒雷达风暴单体 A、B 主要发展时段垂直累积液态含水量演变

3.2 反射率因子勾状回波特征

雷达 PUP 四分屏可以显示风暴的结构^[9]。图 2 为 15:21 单体 A 反射率因子(a 0.5°,c 2.4°, d 6.0°)和径向速度(b 1.5°)图。0.5°、2.4°仰角的反射率因子图中,单体 A 具有明显的三体散射特征和有勾状回波形态,图 2b 双箭头处低层入流指向风暴的缺口,图 2d 中 6.0°仰角反射率因子 ≥ 55 dBz 强回波中心落在低层弱回波处,即低层

入流缺口对应的弱回波区之上存在强回波悬垂。沿雷达径向通过最强反射率因子核心所作垂直剖面(图 2e)显示强回波悬垂明显,回波悬垂上反射率因子 ≥ 50 dBz 高度达到 9 km,远在日常 -20 °C 层(7.6 km)高度以上,剖面左侧的强回波(达 65 dBz)区域对应大冰雹的下降通道,回波已经接地,与陇县出现的直径为 4 cm 的大冰雹相对应。

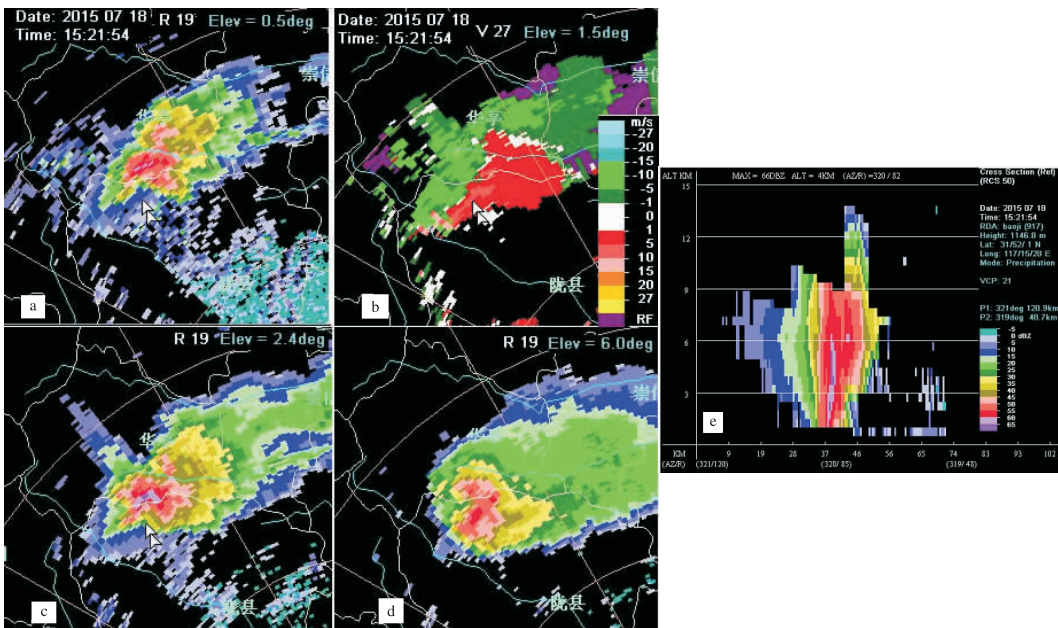


图 2 2015-07-18T15:21 宝鸡多普勒雷达上单体 A 反射率因子(a 0.5°;c 2.4°;d 6.0°)和径向速度(b 1.5°)及沿雷达径向通过最强反射率因子核心垂直剖面图(e)

3.3 中气旋特征

中气旋是雹暴的重要特征,“2015-07-18”冰雹过程中雷达产品未识别出中气旋,经过人工退模糊后,可识别出中气旋。图3是单体A在4.3°仰角上的径向速度图15:09(a)和15:34(b),图中双箭头处中气旋持续5个体扫。中气旋、勾状回

波形态表明单体A是超级单体风暴。

4 “2016-06-12”冰雹过程雷达特征

陇县强对流历时1 h 40 min,即17:56—19:36,先后受尺度为25 km左右两个单体风暴A1、A2影响(图4),A1是自上游华亭移入发展的单体风暴,A2是A1减弱时右前发展的新单体风暴。

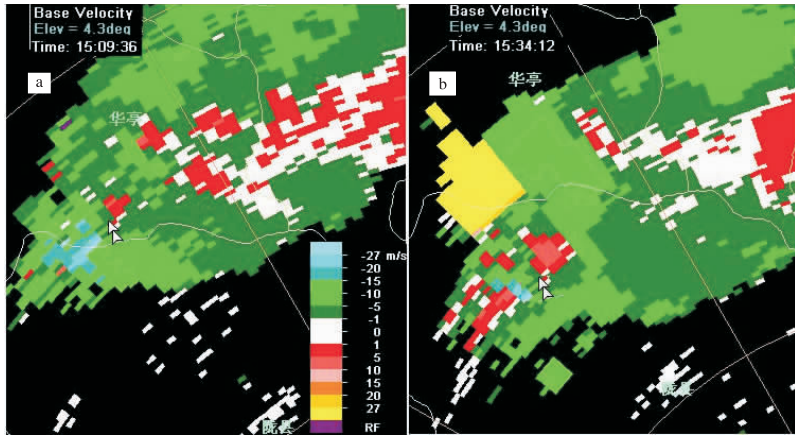


图3 2015-07-18 宝鸡多普勒雷达4.3°仰角上的径向速度图(a 15:09;b 15:34)

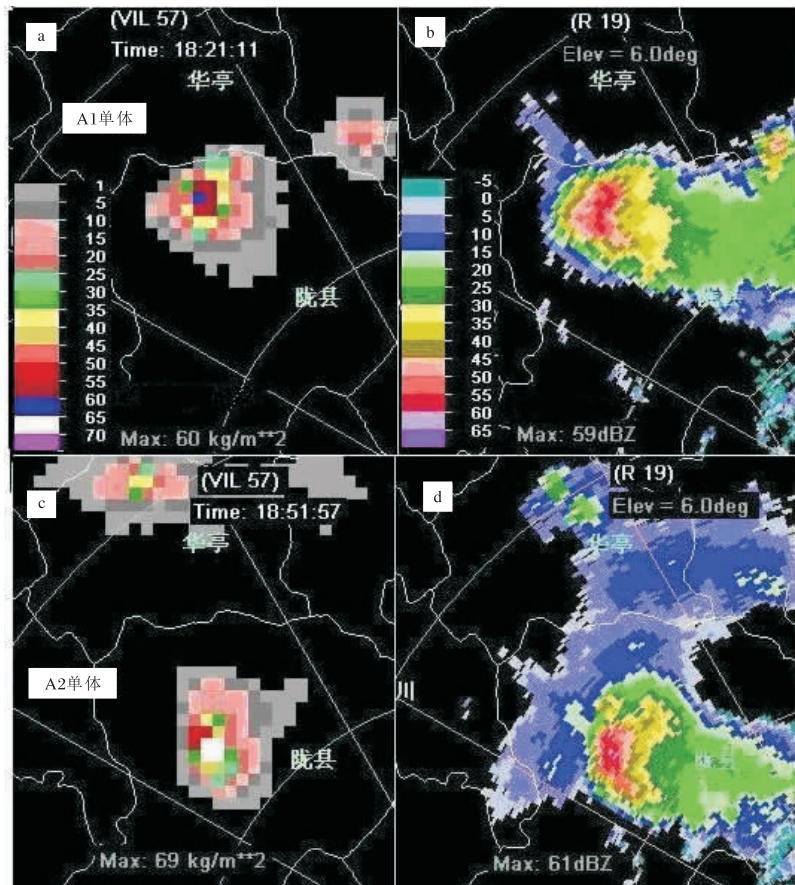


图4 2016-06-12 宝鸡雷达 VIL(a 18:21;c 18:58)和6.0°仰角上反射率因子(b 18:21;d 18:58)图

17:56—18:45, 风暴单体 A1 影响陇县, 其中 18:02—18:33(图 4a、图 4b) 风暴 A1 发展持续 6 个体扫并出现三体散射和旁瓣回波特征, 回波顶高 ET 为 12~14 km, 反射率最大强度为 60~65 dBz, VIL 中心值达 60 kg/m² 且梯度大, 陇县降雹时间持续 20 min, 降雹最大直径约为 2 cm。18:45 风暴 A1 减弱时其右前发展新单体 A2, 18:51—19:36 风暴 A2 影响陇县, 其中 18:51—19:16(图 4c、图 4d) 风暴 A2 快速加强并持续 5 个体扫的三体散射特征, 回波顶高 ET 为 13~15 km, 反射率达 60~65 dBz, VIL 中心值达 69 kg/m² 且梯度很大, 对应陇县出现 15 min 降雹, 冰雹最大直径为 2 cm。19:36 时风暴 A2 减弱。

由 6 月 12 日陇县产生冰雹时两个单体在旺盛阶段的剖面图(图 5a、图 5c, 见第 7 页)可见, 两个单体的强反射率中心高度达到 6 km 以上, 强回波达到 9 km(远高于当日 -20 °C 高度 7.6 km), 三体散射特征明显。径向速度剖面(图 5b、图 5d, 见第 7 页)显示, A1 单体和 A2 单体在强反射率中心 6 km 高度上均有径向辐合, 这是风暴强烈发展的动力, 在风暴后侧低层都有径向辐散。

综上所述可以看出, 17:56—19:36 陇县两次降雹先后受两个强单体风暴影响, A1 风暴持续 6 个体扫、A2 风暴持续 5 个体扫维持三体散射和旁瓣回波特征但未出现勾状回波, 也未识别到中气旋。

5 两次过程垂直累积液态含水量(VIL)特征

VIL 产品是判断冰雹等灾害性天气的有效指标之一。降雹单体尤其是强降雹单体在成熟前期有明显 VIL 跃增现象^[10], 在 VIL 达到最大值后开始降雹。从“2015-07-18”冰雹过程和“2016-06-12”冰雹过程中风暴单体主要时段 VIL 最大值演变可以看出, 两次过程中第一个风暴单体(A、A1)有共同特征: 发展迅速, 经 1~2 个体扫 VIL 值跃增至最大为 60 kg/m², 其后长时间持续高值, 6 个体扫的 VIL 值 ≥ 55 kg/m², 对应维持三体散射特征并降大冰雹。第二个风暴单体(B、A2)的 VIL 值呈脉冲式变化、在 45~69 kg/m² 之间变动, 即新单体生成后, VIL 值跃增明显, 在降雹时段 VIL 值 ≥ 55 kg/m², 降雹后 VIL 值 < 40 kg/m²。VIL 的跃增反映了冰雹粒子在生长区碰并增长。

进一步分析大冰雹发生期间 VIL 的变化特征, 定义风暴单体 VIL 值与顶高之比为 VIL 密度。有研究表明^[11] 风暴单体 VIL 密度超过 4 kg/m³, 单体会产生大冰雹。

表 2 为两次大冰雹风暴单体在其强盛阶段的最大反射率因子及其高度、回波顶高和 45 dBz 回波高度、VIL 和 VIL 密度。从表 2 可见, 两次风暴单体内最大反射率因子均超过 60 dBz, 最大为 65 dBz, 对应高度在 6~7 km; 45 dBz 回波高度在 10~11 km; 回波顶高为 13~15 km。其中 VIL 值为 60~69 kg/m², VIL 密度为 4.4~4.7 kg/m³。

表 2 陇县两次大冰雹过程最强时间风暴单体特征值

时间	最大反射率因子/dBz	最大反射率因子高度/km	回波顶高/km	45 dBz 回波高度/km	VIL 值/(kg/m ²)	VIL 密度/(g/m ³)
2016-06-12T18:21	60	6.5	13.5	10.5	60	4.4
2016-06-12T18:58	64	7.0	15.0	10.0	69	4.6
2015-07-18T15:21	65	6.0	13.5	10.0	63	4.7
2015-07-18T16:23	60	7.0	14.5	10.5	68	4.7

综上所述, 两次过程中风暴单体出现三体散射和旁瓣回波时, R 值 ≥ 60 dBz、VIL 值持续 ≥ 55 kg/m² 且 VIL 的密度大于 4 kg/m³, 对应有大冰雹产生。刘嘉慧敏等^[12] 对陕北陕南冰雹个例中 VIL 密度进行统计, 显示 VIL 密度值与大冰

雹关系有地域差别。

6 冰雹指数和风暴追踪信息产品使用检验

对流风暴能否产生冰雹及风暴未来影响区域是短临预报预警的重点和难点, 宝鸡雷达冰雹指数(HI)和风暴追踪信息(STI)产品是短临预报业

务的重要参考依据。通过这两次大冰雹过程,对雷达预测产品也进行了检验。

6.1 风暴产生冰雹概率

冰雹指数(HI)产品可以识别出两次大冰雹天气过程中产生的冰雹:预测产生大冰雹的概率为100%,冰雹最大直径约为6 cm左右。

“2015-07-18”冰雹过程 冰雹指数(HI)产品给出18日15:15—15:46时段、16:23—16:48时段大冰雹概率为100%,预测冰雹直径为5.7 cm,较实况冰雹直径4 cm略偏大。

“2016-06-12”冰雹过程 冰雹指数(HI)产品6月12日18:08—19:16时段持续预测风暴产生大冰雹的概率为100%,冰雹直径为3~6 cm,与实况冰雹直径2 cm相比,预报值偏大。

比对分析 HI 产品和风暴发展特征可见,当单体R值 ≥ 60 dBz且VIL值 ≥ 55 kg/m²,单体出现三体散射时段,HI产品预测大冰雹的概率为100%,且预测大冰雹出现(较实况)早、结束晚,即预测降雹时间长、有提前量,因此可参考冰雹指数产品发布预警。

6.2 风暴路径

风暴追踪信息(STI)产品提供未来1 h、每15 min的风暴移动路径。比对两次过程风暴实际轨迹和预测风暴路径(图6)。两次过程引导气流均为西北气流。图6中风暴是即将影响陇县的单体,两次过程风暴起始位置比较一致。“2015-07-18”冰雹过程中,与风暴实际路径比较,预测路径偏向风暴右侧、移速差别小,略偏快;“2016-06-12”冰雹过程中预测路径偏向风暴左侧、移速偏快。雷达预测风暴路径呈直线匀速、风暴实际轨迹呈曲折非匀速;预测路径与风暴实际轨迹夹角在30°以内。风暴移动主要受引导气流和地形等影响,由于风暴移动的复杂性,雷达预测风暴路径与风暴实际轨迹存在误差,使用时可考虑预测风暴路径左右30°区域受风暴影响。

7 结论

(1)冷涡槽后西北气流携带的冷空气为两次大冰雹强对流发生提供对流不稳定的条件,地面露点锋是强对流的触发系统。有利大背景下形成强单体风暴、超级单体风暴。

(2)雷达分析表明,陇县两次大冰雹均是强单体风暴产生,其中“2015-07-18”过程是具有勾状回波形态且存在中气旋的超级单体风暴。强单体风暴及其右后产生新单体风暴,造成两轮降雹。监测预警中需关注强单体风暴降雹后减弱时激发的新生强单体可能造成第二波降雹。

(3)大冰雹产生于风暴反射率因子 ≥ 60 dBz且VIL值 ≥ 55 kg/m²,可观测到三体散射特征;大冰雹产生时,VIL密度大于4 kg/m³。风暴三体散射出现1~2个体扫开始降冰雹。

(4)可参考雷达冰雹指数(HI)、风暴追踪信息(STI)产品提前发布冰雹预警。当(HI)产品预报冰雹直径 > 4 cm时,可出现大冰雹,但预测冰雹尺寸偏大。未来风暴影响地可考虑(STI)产品预测风暴路径左右30°区域。

参考文献:

- [1] 李秀琳,张丽娟,贾金海,等.渭南市冰雹天气雷达回波特征分析[J].陕西气象,2006(1):12-15.
- [2] 毕旭,刘勇,李强.一次阵风锋触发的局地强冰雹天气过程分析[J].陕西气象,2011(1):11-14.
- [3] 曹雪梅,蒋小莉,王凌军,等.延安宝塔区近10年冰雹时空分布与历史状况对比[J].陕西气象,2016(1):13-16.
- [4] 姚静,屈丽玮,朱庆亮,等.陕西省强对流天气气候特征分析与对流指标探讨[J].陕西气象,2017(3):29-35.
- [5] 鲍向东,王国安,王君,等.河南省冰雹天气环境参量特征分析[J].陕西气象,2019(4):17-20.
- [6] 杜继稳,侯明全,梁生俊,等.陕西省短期天气预报技术手册[M].北京:气象出版社,2007:256-265.
- [7] 孟妙志,韩洁,王仲文,等.陕西2011年7月连续强对流天气成因及特征分析[J].陕西气象,2013(4):1-6.
- [8] 摩晓农,俞小鼎,于波,北京盛夏一次罕见大冰雹事件分析[J].气象,2008,34(2):10-17.
- [9] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社,2006:314.
- [10] 刁秀广,朱君鉴,黄秀韶,等.VIL和VIL密度在冰雹云判据中的应用[J].高原气象,2008,27(5):1131-1138.
- [11] 胡胜,罗聪,张羽,等.广东大冰雹风暴单体的多普

勒天气雷达特征[J].应用气象学报,2015,26(1):57-65.

见强雹暴环境条件及雷达特征分析[J].陕西气象,2020(2):1-12.

[12] 刘嘉慧敏,郑然,梁绵,等.2018年陕西商洛一次罕

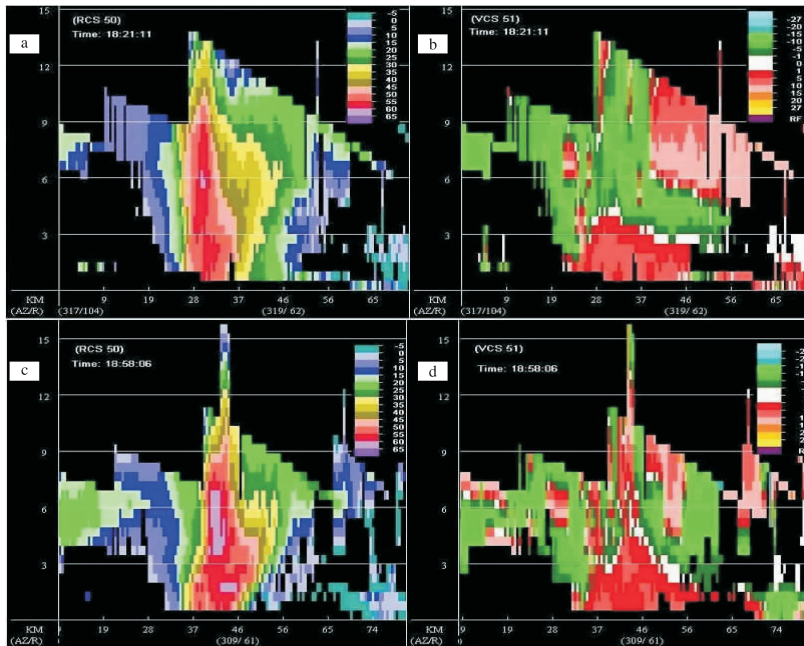
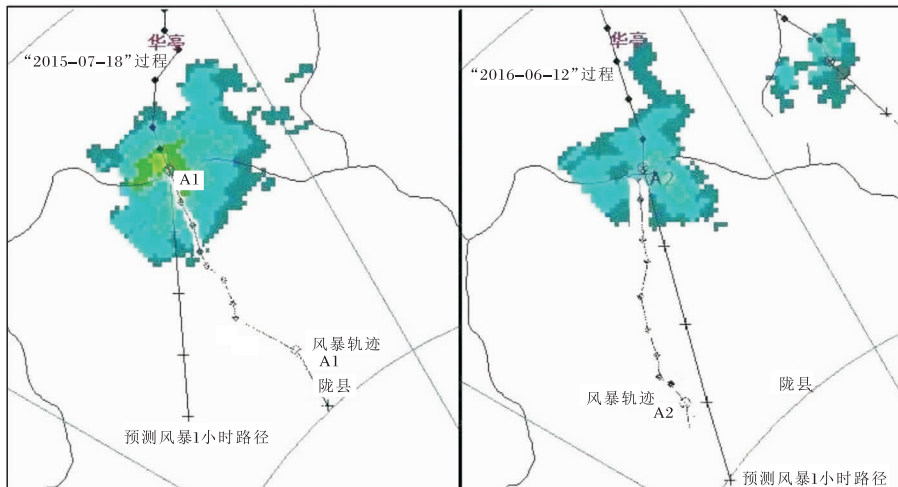


图5 2016-06-12宝鸡雷达反射率因子剖面(a 18:21,A1单体;c 18:58,A2单体)和径向速度剖面(b 18:21,A1单体;d 18:58,A2单体)(文见第5页)



实线为 STI 产品预测风暴 1 小时路径;虚线是风暴的实际轨迹。

图6 “2015-07-18”和“2016-06-12”冰雹过程(STD)产品风暴路径和风暴实际轨迹比较(文见第6页)