

张晓茹,贾宏元,谭志强,等.宁夏南部山区两次冰雹过程对比分析[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(3):29-37.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2021.03.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



宁夏南部山区两次冰雹过程对比分析

张晓茹^{1,2,3},贾宏元^{1,2,3},谭志强^{1,2,3},纪晓玲^{1,2,3*},马国涛⁴

(1.中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室,宁夏 银川 750002;

2.宁夏气象防灾减灾重点实验室,宁夏 银川 750002;3.宁夏气象台,宁夏 银川 750002;

4.固原市气象局,宁夏 固原 756000)

摘要:利用“葵花-8”卫星、多普勒雷达、常规气象观测和 0.125°×0.125° ERA-Interim 再分析资料,对 2018 年 6 月宁南山区午后发生的两次冰雹过程进行对比分析,旨在探明山区降雹及大冰雹生成的有利监测指标。结果表明:“西高东低”形势下,高空急流配合中低层切变线和地面中尺度辐合线有利于冰雹天气的发生。当反射率因子 ≥ 60 dBZ、液态水含量 ≥ 35 kg/m²、回波顶高 ≥ 7 km,降雹概率为 100%;中低层速度大值区持续存在时,降雹可能性很大。降雹易发生在云体发展强盛处及最大云顶亮温梯度前端,且亮温越低、亮温梯度和降温率越高时,降雹直径越大。同一地区,高层辐散越明显、近饱和层和高水汽含量层伸展越高、垂直风切变越大,对流云团发展将越旺盛,最强回波伸展高度将越高,降雹直径将越大。

关键词:山区;冰雹;中尺度辐合线;亮温梯度;雷达回波

中图分类号:P458.121.2

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2021)03-0029-09

冰雹是一种中小尺度天气现象,具有突发性、短时性、局地性和致灾性的特点,会严重危害国民经济和人民生活财产。因此,分析冰雹天气成因及触发机制^[1-4]、了解冰雹天气分布特征及天气系统分型^[3,5-13]、总结冰雹天气各项物理量及判别指标^[14-19]和提高冰雹天气预报及预警能力^[20-25],一直是众多学者的研究重点。

宁夏冰雹天气具有季节性强、雹日高度集中的特征,6 月为其高发期,占总次数的 20.3%。降雹随气温呈明显日变化,其中 87%的降雹出现在中午至傍晚(12—20 时)。南部山区(六盘山山系东南地区的海原县和固原市)因受地形影响而为雹灾多发区,

降雹频次占宁夏境内冰雹发生总次数的 57%,但针对该地区冰雹天气的对比分析研究较少。因此,本文结合“葵花-8”静止气象卫星、多普勒雷达、常规气象观测和 0.125°×0.125° ERA-Interim 的 6 h 间隔再分析资料等,分别从环流形势、环境场和中尺度特征等方面,对 2018 年 6 月发生在宁夏南部山区泾源县的两次冰雹过程进行对比分析,旨在总结山区降雹及大冰雹生成的有利监测指标,提高宁夏本地小范围强天气临近预报及监测预警水平。

1 天气实况

2018 年 6 月 11 和 29 日午后,固原市泾源县出现了冰雹天气,其中,11 日 13:54—14:50 (BT,下同)泾源县泾河源镇(106.38°E,35.42°N)和新民乡(106.41°E,35.35°N)先后出现的冰雹(以下简称“6·11”过程),最大直径为 3 cm,局部积雹厚度达 6 cm;29 日 14:05—14:34 泾源县泾河源镇和兴盛乡(106.37°E,35.45°N)发生的冰雹过程(以下简称“6·29”过程),最大降雹直径为 6 cm,积雹厚度为 10 cm。

收稿日期:2019-12-26;修回日期:2020-11-05

基金项目:国家自然科学基金地区科学基金项目(41865008);第五批宁夏回族自治区青年科技人才托举工程项目

作者简介:张晓茹(1991—),女,助理工程师,主要从事灾害性天气监测预警研究。E-mail: 1359194111@qq.com

通信作者:纪晓玲(1967—),女,正高级工程师,主要从事短期(时)天气预报及灾害性天气预报方法研究。E-mail: jixlingyc@163.com

两次冰雹过程都伴有短时强降水和雷电等强对流天气,并给当地造成了较大的经济损失。

2 环流形势及影响系统

“6·11”过程前后 24 h 内,08 时 500 hPa 天气图上,欧亚范围环流形势基本为两槽一脊,亚洲中高纬受宽广脊区控制,贝加尔湖(简称“贝湖”)附近的切断低涡沿脊缓慢东南向移动,配合 -20°C 的冷中心。宁夏处于“西高东低”形势下,东西高差达 80 gpm。11 日 08 时(图 1a),阻塞形势逐渐建立(20 时闭合高压中心形成于 105°E , 65°N 附近)。切断低压位于贝加尔湖东侧,配合 -16°C 的闭合冷中心。我国西部处于高压脊控制内,冷空气沿脊下滑影响宁夏, -12°C 线压至宁夏中部。同时,200 hPa 存在风速 $>40\text{ m/s}$ 的高空西北急流。700 hPa 宁夏南部至甘肃南部有切变线东移。850 hPa 宁夏北部有暖切变线。中低层为偏南气流影响,暖湿平流明显。配合地面有冷锋东移南下至内蒙古境内,宁夏处于冷锋前部,位于低压带底部,河套地区至河西走廊有辐合线(图 1b)。

“6·29”过程前后 24 h 内,08 时 500 hPa 天气图上欧亚范围也为两槽一脊(图 1c),高压脊位于中西伯利亚至内蒙古西部,东移发展中不断有冷空气沿脊下滑。宁夏处于“西高东低”形势下,东西高差达 80 gpm,大部地区处于 -8°C 线控制内。同时,200 hPa 也存在风速 $>40\text{ m/s}$ 的西北急流。700 hPa 宁夏南部

至甘肃南部有低涡切变线存在。850 hPa 宁夏东南部与陕甘交界处有低涡且配合暖式切变线。地面东移冷锋配合东北气旋位于东北至内蒙古中东部,高原东部至宁夏中北部有辐合线(图 1d)。

比较两次冰雹过程可发现,“6·11”过程除和阻塞形势有关外,其余环流特征与“6·29”过程具有较多共性:一是均发生在“西高东低”环流背景下,属于冷涡后部西北气流型,冷空气沿脊前西北气流东移南下影响宁夏,为强对流发生发展提供了动力条件;二是中低层宁夏南部有切变线东移,配合地面有辐合线,利于低层暖湿空气的辐合抬升,造成层结不稳定(冰雹出现在 700 和 850 hPa 切变线附近);三是冰雹均发生在午后,太阳辐射热力作用使得对流迅速增强。

3 环境场特征

利用 2018 年 6 月 11 日和 29 日 14 时 $0.125^{\circ}\times 0.125^{\circ}$ ERA-Interim 再分析资料,从抬升条件、水汽条件和不稳定条件 3 方面对两次降雹落区的环境场特征进行对比分析。

3.1 抬升条件

两次降雹过程中,南部山区均是高空干冷气流配合低层西南暖湿气流,上下层扰动明显,且高层冷槽和中低层切变线的位置呈明显前倾结构,使得上升运动得以加强。这种大尺度动力抬升条件为降雹提供了一定的触发作用。为进一步揭示对流发生时

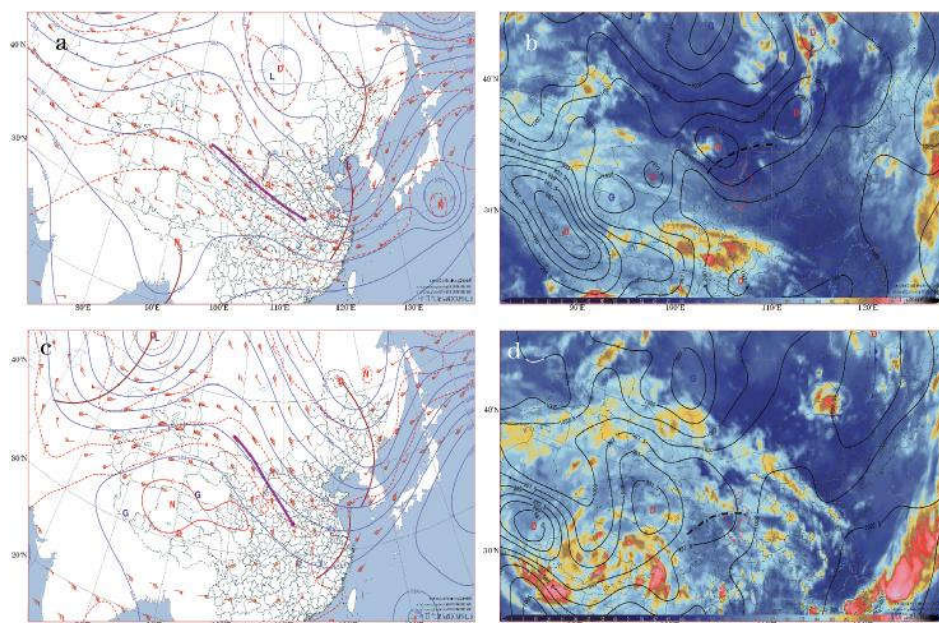


图 1 11 日(a)、29 日(c)08 时 200 hPa 风场(风向杆, m/s)、500 hPa 高度场(蓝色线, dagpm)、温度场(红色线, $^{\circ}\text{C}$)及 11 日(b)、29 日(d)08 时地面形势和红外云图

动力抬升的强弱,对 11 和 29 日 14 时沿 106.4°E (泾河源镇所在经度)的垂直涡度剖面进行分析(图 2a、2b),结果显示:“6·11”过程发生时,降雹区域为 $35.3^{\circ}\sim 35.5^{\circ}\text{N}$,有一气旋性涡柱从 1 000 hPa 延伸至 700 hPa 附近,正涡度中心约处于 800 hPa,强度为 $6\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$,而 700~400 hPa 为负涡度区,负涡度中心位于 500~600 hPa,强度为 $-8\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 。垂直涡度的这种配置表明该过程低层辐合,中高层辐散,降雹发生、发展所需的抬升条件得到满足。“6·29”过程高层辐散更加明显,负涡度层更为深厚,且负涡度柱略微向北倾斜,表现为 700 hPa 以上基本为辐散层,辐散中心位于 200 hPa,强度为 $-10\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 。正涡度中心位于 850 hPa 左右,强度为 $6\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 。研究表明,当高层辐散量高于低层辐合量时,对流云发展会增强^[26]。“6·29”过程高层辐散更显著,垂直上升运动更强烈,因此带来的强对流天气更明显。

研究发现中尺度抬升机制是冰雹等强对流天气被触发的必要条件,而近地面中尺度抬升作用尤为关键^[27]。由图 2c 和 2d 中的 14 时地面涡度场分布可知,两次降雹过程中,海原至彭阳一带均有一条西北—东南向的中尺度辐合线,但“6·11”过程的降雹区处在辐合线西侧的辐散区中,而“6·29”过程中辐合线较宽广,降雹区位于正涡度中心偏南处,辐合强度约 $1\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 。从 14 时地面加密自动站风场上也

可加以印证:“6·11”过程中南部山区辐合线较弱,降雹区基本为 2 m/s 的偏南风或偏东风,而“6·29”过程中的地面辐合线尤为清晰,降雹区处于强西北风(10 m/s)和较强东南风(4 m/s)的辐合区中。这进一步表明,地面强冷空气的入侵,使得“6·29”过程中的中尺度辐合线扰动更加明显,由此触发的冰雹天气更加强烈。

3.2 水汽条件

图 3 给出了 11 日和 29 日 14 时相对湿度和比湿沿 106.4°E 的垂直剖面,从中可以发现,水汽分布在两次降雹过程中均呈现“上干下湿”的特征。“6·11”过程中,降雹区 $\geq 60\%$ 的相对湿度由 1 000 hPa 延伸至 700 hPa 附近,850 hPa 以下相对湿度 $\geq 70\%$,但高湿区位于冰雹落区的北部。从比湿剖面可知,该过程 850 hPa 以上的比湿均低于 10 g/kg,降雹区域最大比湿为 11 g/kg,分布在 850 hPa 附近。“6·29”过程,中低层水汽条件明显更好,对强对流天气的产生更加有利,其中,水汽含量高于 10 g/kg 的层结伸展至 700 hPa 以上,850 hPa 以下比湿超过 14 g/kg。相对湿度剖面图显示高湿区($\geq 90\%$)涵盖降雹落区,且该过程的近饱和层高度更高,可达 400 hPa 高度(约 7.5 km)。此外,该过程中 700~500 hPa 的相对湿度均 $\geq 80\%$,高湿区伸展至 0°C 层(约 5.5 km)以上。700~500 hPa 恰好为冰雹形成和增长的主要高

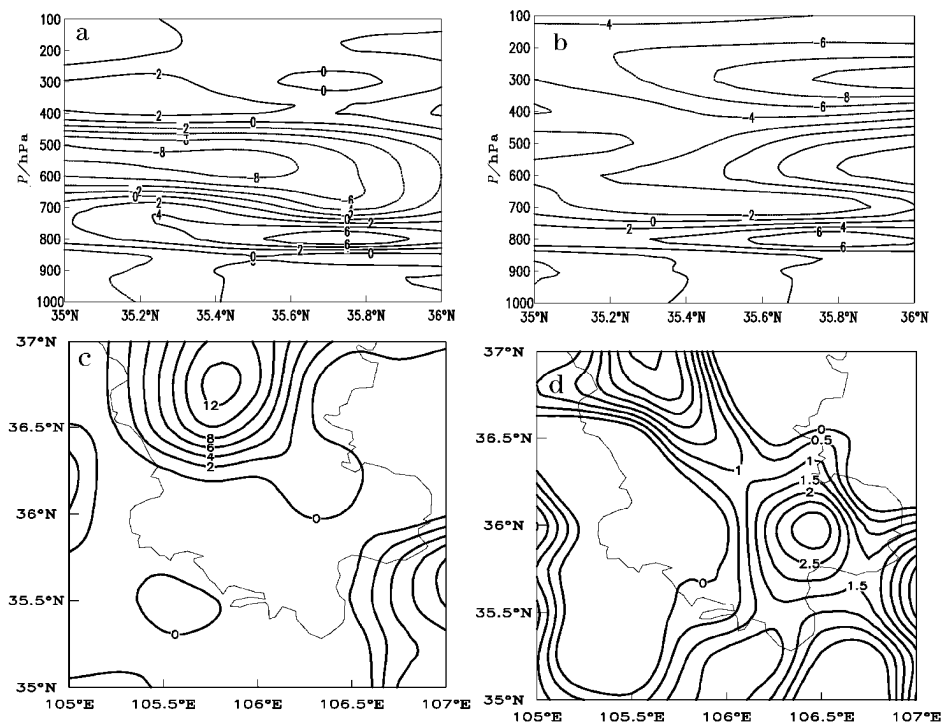


图 2 11 日(a)、29 日(b)14 时沿 106.4°E 的垂直涡度剖面(黑色线, 10^{-5} s^{-1})及 11 日(c)、29 日(d)14 时地面涡度场(黑色线, 10^{-5} s^{-1})

度,高湿条件有利于云内冰雹粒子的形成增长^[7],这可能也是“6·29”过程降雹直径更大的原因之一。

3.3 不稳定条件

假相当位温(θ_{se})是表征大气温、压、湿综合特征的物理量,其水平和垂直分布与强对流天气的发生、发展密切相关。由 θ_{se} 垂直剖面场可知,两次降雹过程的 θ_{se} 在中低层均呈现随高度升高而降低的特征,表明存在对流不稳定层,有利于冰雹等强对流天气的发生和发展。“6·29”过程的不稳定层结伸展高度更高,可达400 hPa(“6·11”过程约500 hPa)。此外,图4显示了11日和29日14时850 hPa的 θ_{se} 水平分布场,可看出两次过程的降雹区均位于高能区中, θ_{se} 超过340 K且水平梯度较大,不稳定能量聚集明显。但是,“6·29”过程的能量更强,主要表现为“6·29”过程中 θ_{se} 超过350 K,且冰雹落区位于能量高值中心区偏北侧,该处的假相当位温线密集,两区域吻合较好,而“6·11”过程中高能中心位于甘肃南部,离降雹区域较远。

此外,利用11日和29日14时地面温度和露点温度对甘肃省平凉市崆峒站(宁夏南部地区业务预报中常用该站点资料)当天08时的探空资料进行订正,以此对两次过程中的不稳定能量进行诊断分析(表1)。结果发现,两次过程均在午后呈现出对流不

稳定增加的趋势,表明午后大气升温,热力不稳定发展明显。其中,“6·11”过程中订正后的对流有效位能(CAPE)值为1 334 J/kg,抬升指数(LI)为-5.1℃,说明该过程不稳定能量较强,且热力不稳定条件有利于冰雹的产生。此外,0℃层和-20℃层高度分别为4.3 km(600 hPa)和7.1 km(400 hPa),极有利于冰雹的形成。“6·29”过程中的CAPE(811 J/kg)和LI值(-0.8℃)较弱,0℃层和-20℃层高度较高,但0~6 km风矢量差较大,为2.4 m/s。研究发现,合适的条件下,垂直风切变值越强,越有利于大冰雹的产生^[19]。同时,“6·29”过程中的对流抑制有效位能(CIN)为117.5 J/kg,而“6·11”过程为0 J/kg。事实表明,适当的对流抑制能量的存在可使不稳定能量在低层积聚,有利于强对流的发展。因此,“6·11”过程降雹直径较小的可能原因和该过程无对流抑制能量、使冰雹发生前对流能量积累不足有关。

4 中尺度分析

4.1 卫星云图特征分析

利用“葵花-8”静止气象卫星逐10 min红外云图资料可知,“6·11”过程主要由低涡云系尾部发展的块状对流云团引起,云团较分散,但对流发展旺盛,降雹区域云体白亮,且下边界有稍许卷云羽存在

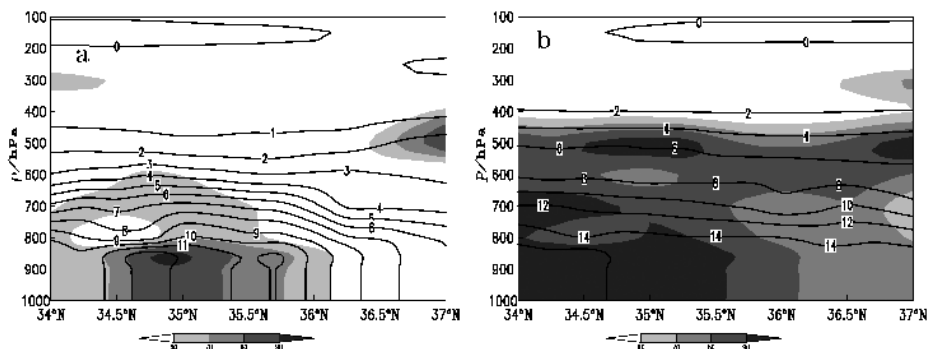


图3 11日(a)和29日(b)14时沿106.4°E的相对湿度 $\geq 60\%$ (阴影)和比湿(黑色线,单位:g/kg)的垂直剖面

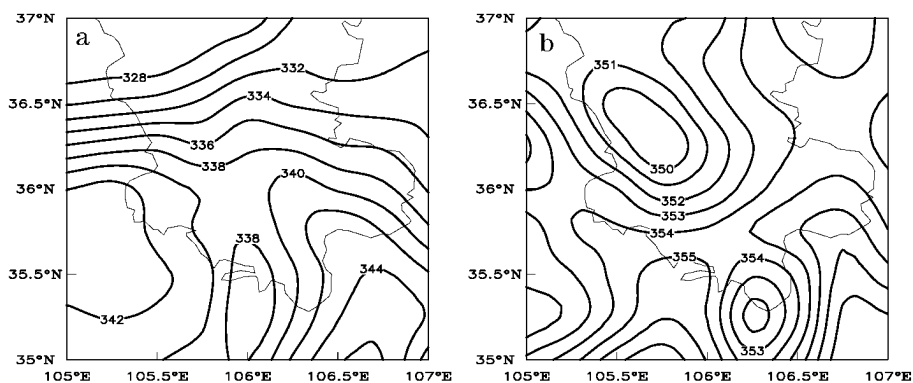


图4 11日(a)和29日(b)14时850 hPa假相当位温水平分布场(单位:K)

表1 “6·11”和“6·29”过程中崆峒站
探空资料对比

	“6·11”过程			“6·29”过程		
	08 时	订正后	20 时	08 时	订正后	20 时
CAPE/(J/kg)	0	1334.0	431.0	0	811.0	561.0
CIN/(J/kg)	0	0	270.4	0	117.5	10.5
LI/(℃)	3.7	-5.1	-6.2	2.8	-0.8	-10.3
W _g /(m/s)	1.6	1.6	1.9	2.4	2.4	1.5
ZH/(km)	4.3	4.3	4.6	5.5	5.5	5.1
-20H/(km)	7.1	7.1	7.5	8.5	8.5	8.8

注:CAPE、CIN、LI、W_g、ZH 和 -20H 分别表示对流有效位能、对流抑制有效位能、抬升指数、0~6 km 风矢量差、0℃层高度和-20℃层高度,其中,0℃和-20℃层高度订正前后的值相同。

(图 5a 红圈)。陈渭民^[28]指出,风的垂直切变是判断是否降雹的一个重要依据,在卫星云图上判断风的垂直切变可根据云顶卷云砧的长度来决定,卷云羽越长,风的垂直切变越大。该过程中降雹云团较小,卷云砧表现较弱,卷云羽较短。“6·29”过程主要受高空急流云系影响,呈反气旋弯曲的盾状结构,前侧云系较松散,多起伏的对流云团。陈渭民^[28]也指出,高空急流冷平流重叠到暖湿气流上方会引起对流云系。该过程降雹区域云团较“6·11”过程表现更密实、更白亮(图 5b 红圈),表明对流发展更旺盛,云顶高度更高。

利用“葵花-8”B13 通道(中心波长 10.4 μm)的观测数据,以云顶亮温(TBB)230 K(-43℃)为阈值对降雹期间强对流云团进行识别提取,并计算云顶亮温、亮温梯度和降温率等云团特征参数(计算方法详见文献[29-30])。研究指出,TBB、亮温梯度和降温率能反映对流云团发展程度及对流活跃强度,一般 TBB 越低、亮温梯度和降温率越大,表明云顶伸展

越高,云体纹理越丰富,对流发展越旺盛^[29-30]。“6·11”过程降雹持续时间较长(56 min),但最大冰雹直径(3 cm)和积雹厚度(6 cm)都较小,对应的平均云顶亮温和最低亮温分别为 228.6、228.0 K,最大亮温梯度和降温率分别为 11.7℃/km 和 12.0℃/h(表达)。“6·29”过程中的各项云团特征参数表现明显优于“6·11”过程,其中,平均云顶亮温和最低亮温分别比“6·11”过程低 6.9 K 和 8.0 K,最大亮温梯度和降温率分别是“6·11”过程的 2.7 倍和 2.0 倍,且“6·29”过程 TBB≤221 K(-52℃)的冷云面积超过 4 000 km²,而冷云面积也是对流发展程度的间接表示^[29]。由此可知,“6·29”过程中对流云团发展更活跃旺盛,云顶伸展高度更高,对流强度更强,从而短时间内大量降雹(积雹厚度 10 cm),且冰雹直径更大(最大冰雹直径 6 cm)。

表2 “6·11”和“6·29”过程对流云团
特征参数对比

	T /min	D _{max} /cm	H /cm	TBB _{avg} /K	TBB _{min} /K	G _{max} /(℃/km)	CR /(℃/h)
“06·11”	56	3	6	228.6	228.0	11.7	12.0
“06·29”	29	6	10	221.7	200.0	31.8	24.0

注:T、D_{max}、H、TBB_{avg}、TBB_{min}、G_{max} 和 CR 分别表示降雹持续时间、最大冰雹直径、积雹厚度、平均云顶亮温、最低亮温、最大亮温梯度和降温率。

此外,通过分析两次过程降雹落区及云团特征参数间的对应关系,可以发现云图资料对冰雹落区预报也有较好的指示作用。图 6 给出了两次降雹过程中识别的对流云团,并对亮温梯度≥5.0℃/km 的区域进行了填色。两次降雹均发生在云体发展强盛处及亮温梯度最大处的前端。已有研究发现^[11,21,30-31],云顶亮温在 233~213 K,亮温梯度不低于 8℃/0.05°,冷云顶降温率达 10℃/h 时,冰雹等强对流天气发生概率较大,且易出现在冷云发展前端,对应亮温梯度

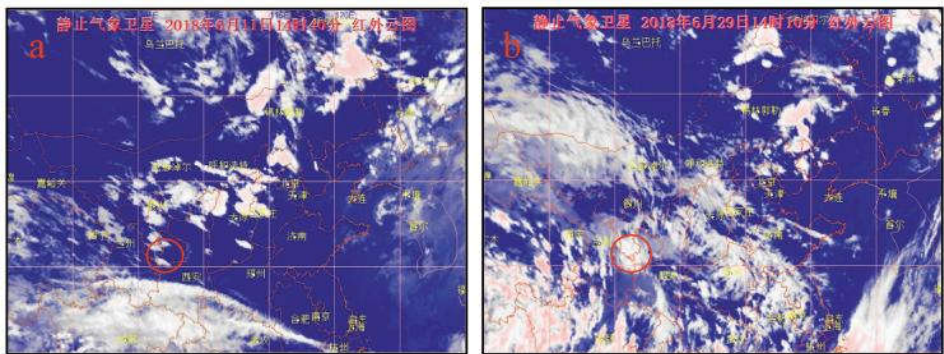


图5 11 日 14:40 BT(a)和 29 日 14:10 BT(b)“葵花-8”红外云图

大值区。宁南山区两次冰雹过程的云团特征参数值均符合或高于上述研究阈值。因此,本研究所得的云团参数值对冰雹的监测和预警有一定参考价值,可作为宁夏降雹的有利云团监测指标,且云团参数表现越强烈,大冰雹产生概率越高。

4.2 雷达资料特征分析

利用固原多普勒雷达资料对两次降雹过程进行分析,由13—15时组合反射率可知,这两次过程的雷达回波均是积云为主的混合性回波,降雹单体大多呈现结构密实的块状结构,且自西北向东南移动。“6·11”过程源于小对流单体原位发展,前期较分散,随后在缓慢移动中合并发展成片,持续时间较长。“6·29”过程前期强回波中心集中,后期趋于分散,且移动速度很快。

“6·11”过程,降雹单体于13:22生成并发展,13:52中心强度达60 dBZ,之后对流持续加强,回波强度为60~65 dBZ的范围于14:27达最大(图7a),随后减弱移出泾源。过程中实心冰雹指数持续8个体扫,冰雹概率(POH)≥90%,强冰雹概率(POSH)≥70%。液态水含量(VIL)最强达35~40 kg/m²,出现在14:07(图7b)。径向速度显示中低层入流为主和高层辐散,且出现速度模糊(图7c中红圈)。从图7d单体趋势来看,雷达回波特征显著:降雹期间最大反射率因子接近60 dBZ,最大反射率因子高度明显下降;降雹前期VIL出现增加的现象,且POH和POSH持续20 min为100%,这符合已有研究结果—POH为100%、POSH≥70%时,出现冰雹甚至大冰雹的可能性高^[32,33]。此外,该过程单体回波顶高约

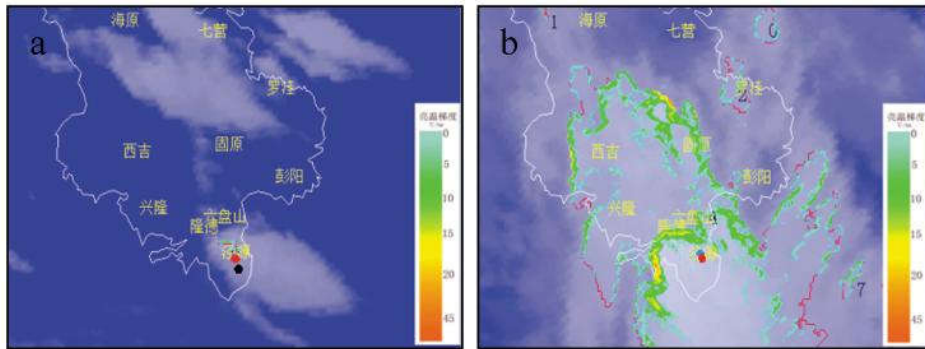


图6 11日14:10 BT(a)和29日14:30 BT(b)“葵花-8”强对流云团亮温梯度分布
(彩色线,℃/0.05°,红色实线为识别的强对流云团边界线,红色、黑色和蓝色实心标记所在地分别为泾河源镇、新民乡和兴盛乡)

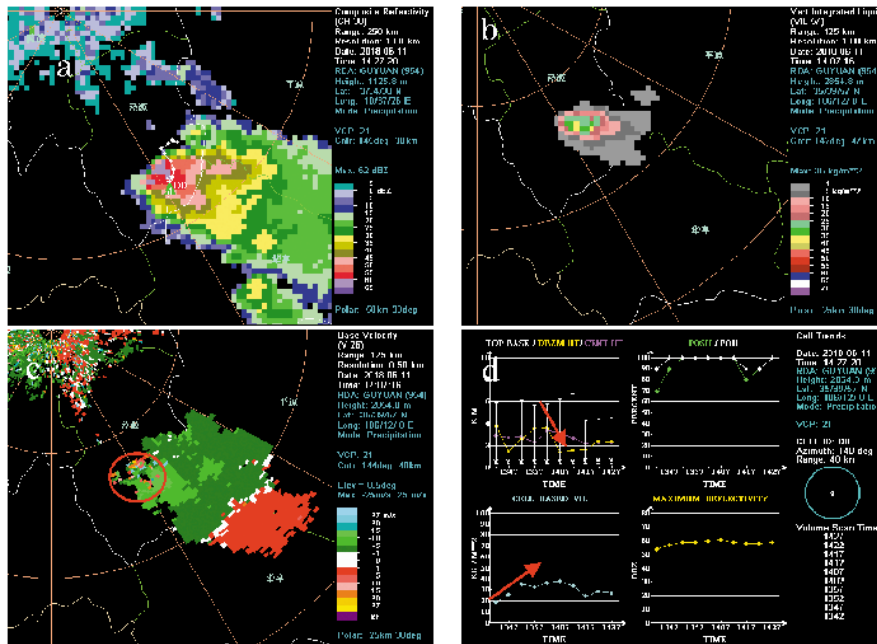


图7 11日14:27 BT 雷达组合反射率(a,单位:dBZ)、14:07 BT 液态水含量(b,单位:kg/m²)、径向速度(c,单位:m/s)及单体 D0 风暴趋势(d,D0 为单体编号)

7.5 km, 最大反射率因子超过 60 dBZ 的高度仅 3.6 km, 表明强对流伸展高度较低。

与“6·11”过程相比,“6·29”过程中对流单体持续时间较短,但雷达回波特征更显著。13:52 降雹单体明显加强于 14:17 发展至最强, 回波强度>65 dBZ (图 8a)。过程实心冰雹指数持续 10 个体扫, POH 持续为 100%, POSH $\geq 80\%$ 。单体发展最强阶段(14:17)基本反射率图上观测到旁瓣回波(图 8b 红圈)。过程中 VIL 值达 40~45 kg/m³, 明显高于“6·11”过程(图 8c)。径向速度图上中低层以汇合流场为主, 出现速度大值区, 且明显存在速度模糊(图 8d 红圈)。同时, 单体结构图上(图 8e), 降雹期间最大反射率为 60 dBZ, 最大反射率因子高度出现骤降, POH 和 POSH 始终为 100%, 且降雹前期 VIL 持续增加。此外, 该过程单体回波顶高更高(接近 10 km), 最大反射率因子超过 60 dBZ 的高度达 7.4 km。汤兴汁等^[16]研究发现, 当强回波(45 dBZ)出现高度越高时, 云内具有的上升气流越强。这进一步表明, “6·29”过程中对流发展更强, 强回波伸展高度更高, 产生大冰雹的条件也更有利。

5 结论

(1)宁夏南部山区 6 月午后出现的两次冰雹过程均发生在“西高东低”环流形势下, 属于冷涡后部西北气流型。脊前冷空气配合高空西北急流和中低层偏南气流形成高空干冷、低层暖湿的垂直动力配置,

且 500 hPa 冷槽与 700 hPa 及 850 hPa 切变线位置呈明显前倾结构, 为冰雹天气的发生提供了大尺度的动力条件。地面辐合线的生成成为冰雹天气提供了中尺度抬升机制, 促进了强对流天气的爆发。

(2)涡度、水汽和不稳定能量等参数在两次过程中具有较明显差异。“6·11”过程中的 CAPE 和 LI 值较大, 0℃和-20℃层高度更适宜, 但无对流抑制有效位能, 不稳定能量无法在低层积聚。“6·29”过程负涡度层更加深厚、高层辐散强度更强, 近饱和层和高水汽含量层伸展更高, 不稳定层结更厚。假相当位温及其水平梯度更大, 0~6 km 垂直风切变更强, 由此触发的冰雹天气更加剧烈, 降雹直径更大, 积雹厚度更深。

(3)“葵花-8”静止气象卫星资料对冰雹落区和强度预报有较好的指示作用。当云顶亮温不高于 228 K、亮温梯度和降温率分别不低于 12℃/km 和 12℃/h 时, 冰雹天气发生的概率较大。降雹易发生在云体发展强盛处及亮温梯度最大处的前端, 且亮温越低、亮温梯度越大, 降温率越高, 降雹直径越大。

(4)雷达回波资料对冰雹天气的参考作用较大。当降雹单体结构密实, 反射率因子 ≥ 60 dBZ, 液态水含量 ≥ 35 kg/m³, 回波顶高 ≥ 7 km, 实心冰雹指数持续存在, 中低层存在速度大值区, 且单体趋势中最大反射率因子高度下降, 冰雹概率为 100%, 液态水含量增加等现象被观测到时, 降雹的可能性较大。最大反射率因子超过 60 dBZ 的高度越接近-20℃层高

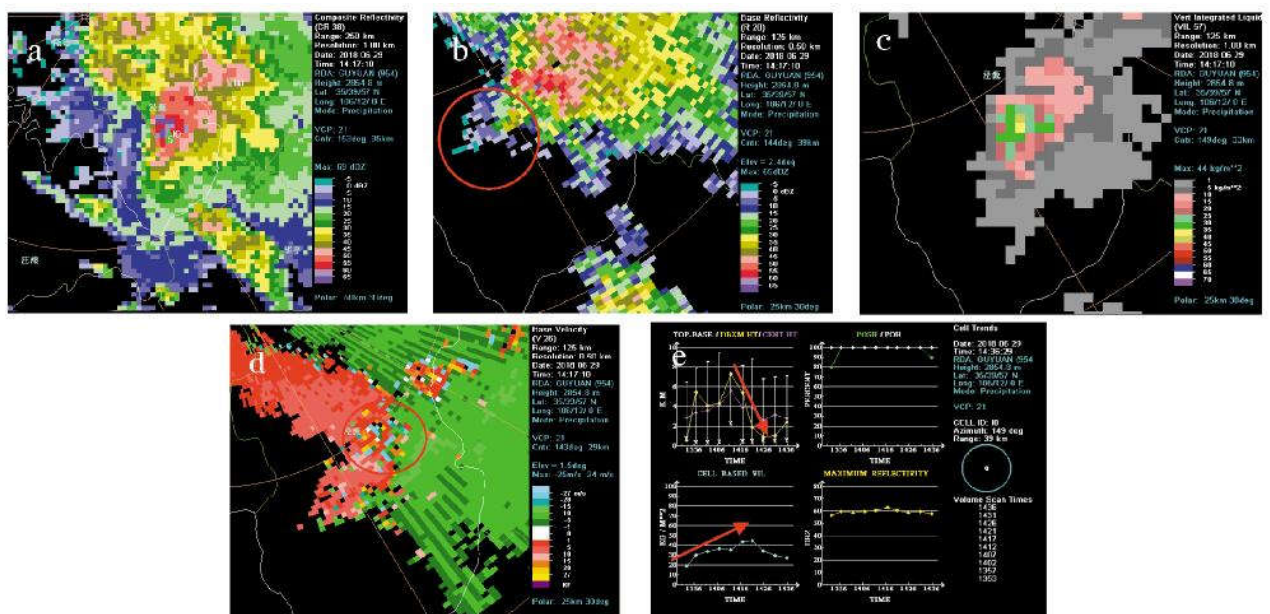


图 8 29 日 14:17 BT 组合反射率(a, 单位: dBZ)、基本反射率(b, dBZ)、液态水含量(c, 单位: kg/m³)、径向速度(d, 单位: m/s)和单体 IO 风暴趋势(e, IO 为单体编号)

度,大冰雹出现概率越高。

参考文献:

- [1] 孙旭映. 甘肃省冰雹天气形成机理、特征及雷达识别技术研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2007.
- [2] 樊明月,张佃国,龚佃利,等. 山东冰雹形成机制及雹云催化技术模拟一个例研究 [J]. 大气科学学报,2013,36(1):107-120.
- [3] 尉英华,陈宏,张楠,等. 冷涡影响下一次冰雹强对流天气中尺度特征及形成机制 [J]. 干旱气象,2018,36(1):27-33.
- [4] 张桂莲,刘林春,赵斐,等. 前倾槽背景下河套地区一次强冰雹天气成因分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2019,13(4):1-8.
- [5] 纪晓玲,陈晓光,贾宏元,等. 宁夏冰雹的分布特征[J]. 灾害学,2006,21(4):14-17.
- [7] 农孟松,祁丽燕,黄明策,等. 基于环流分型的广西冰雹潜势预报研究[J]. 气象,2008,34(6):46-52.
- [8] Cao Z H. Severe hail frequency over Ontario, Canada: Recent trend and variability [J]. Geophys Res Lett, 2008,35(14):L14803.
- [9] 饶彤华,陈海波,张成军. 宁夏南部山区冰雹气候特征分析[J]. 安徽农业科学,2011(15):251-253.
- [10] 杨侃,桑建人,李艳春,等. 宁夏 50a 冰雹气候特征[J]. 干旱气象,2012,30(4):609-614.
- [11] 蓝渝,郑永光,毛冬艳,等. 华北区域冰雹天气分型及云系特征[J]. 应用气象学报,2014,25(5):538-549.
- [12] Punge H J, Kunz M. Hail observations and hailstorm characteristics in Europe: A review [J]. Atmos Res, 2016,176-177:159-184.
- [13] 王培涛,王凤娇,张婷婷. 山东滨州市冰雹天气分型和预报方法研究[J]. 沙漠与绿洲气象,2019,13(3):33-40.
- [14] 徐阳春. 雷达判别宁南山区冰雹云的综合指标[J]. 高原气象,1991,10(4):420-425.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 刘佳,张思进. 福建一次强冰雹天气的物理量及雷达回波特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2010(4):40-43.
- [18] 马鸿青,于雷,司丽丽,等. 保定地区冰雹的气候及物理量参数特征[J]. 干旱气象,2014,32(4):616-628.
- [19] 严红梅,梁亮,黄艳,等. 金华地区 18 次冰雹天气的大气环境与雷达回波特征分析 [J]. 暴雨灾害,2019,38(1):48-58.
- [20] 王建兵,汪治桂,张胜智,等. 甘南高原冰雹短时预报的客观相似预报方法[J]. 干旱气象,2010,28(1):87-90.
- [21] 常平. 鲁西北地区强对流天气预报关键技术研究[D]. 兰州:兰州大学,2010.
- [22] 纪晓玲,闫军,郑鹏徽,等. 2011 年 8 月宁夏连日强对流天气监测预警技术分析 [J]. 干旱区研究,2014,31(5):905-914.
- [23] 钱莉,滕杰,杨鑫. 逐步消空法在祁连山区东部冰雹预报中的应用[J]. 干旱气象,2016,34(3):560-567.
- [24] Punge H J, Bedka K M, Kunz M, et al. Hail frequency estimation across Europe based on a combination of overshooting top detections and the ERA-INTERIM reanalysis [J]. Atmos Res, 2017,198:34-43.
- [25] 赵海军,潘玲,王庆华,等. 临沂冰雹发生规律及预警技术研究[J]. 气象与环境科学,2018,41(2):83-90.
- [26] 赵瑞金,史锐,董保华,等. 应用多普勒天气雷达资料分析强对流天气的垂直廓线特征[J]. 气象科学,2008(增刊):64-70.
- [27] 张萍萍,龙利民,张宁,等. 2009 年 6 月 6 日鄂北冰雹天气过程分析[J]. 气象与环境学报,2012,27(2):10-15.
- [28] 陈渭民. 卫星云图观测原理和分析预报[M]. 北京:气象出版社,2015:324-330.
- [29] 徐双柱,吴涛,张萍萍. 风云 3 号气象卫星资料在暴雨预报中的应用[J]. 灾害学,2011,26(3):97-102.
- [30] 张春龙,肖稳安,邓树民,等. 基于气象卫星观测资料的雷电预报指标研究[J]. 黑龙江气象,2012,29(1):21-24.
- [31] 刘永生,陈华凯,王宁. 德州市一次冰雹过程诊断分析[J]. 农家科技(下旬刊),2017(8):292.
- [32] 邵玲玲,黄宁立,王倩怡,等. 冰雹指数产品剖析及在灾害性强降水预报中的应用[J]. 气象,2006,32(11):48-52.
- [33] 郑芬,冯德花,王郦,等. 文山州两次强冰雹天气的环流背景和雷达产品对比分析 [J]. 贵州气象,2013,37(增刊):55.

Comparison of Two Hail Processes in the Mountainous Region of Southern Ningxia

ZHANG Xiaoru^{1,2,3}, JIA Hongyuan^{1,2,3}, TAN Zhiqiang^{1,2,3}, JI Xiaoling^{1,2,3*}, MA Guotao⁴

(1.Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, CMA, Yinchuan 750002, China;

2.Ningxia Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan 750002, China;

3.Ningxia Meteorological Observatory, Yinchuan 750002, China;

4.Guyuan Meteorological Bureau, Guyuan 756000, China)

Abstract To ascertain the favorable monitoring indicators of hail generation in the mountainous region, the comparison of two hail processes occurred in the afternoon of June 2018 in the mountainous region of southern Ningxia was analyzed, by using conventional observation, reanalysis data from ERA-Interim, Himawari-8 satellite and doppler radar data. The results showed that the synoptic situation of “high in the east but low in the west”, the upper-level jet stream accompanied with the shear line and the surface meso-scale convergence line were favorable for the occurrence of hail. The possibility of hail was 100% with the condition of the radar reflectivity factor of ≥ 60 dBZ, the vertical integrated liquid of $\geq 35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, the echo top of ≥ 7 km. The probability of hail was high when the maximum radial wind in the middle and lower layers persisted. The hail was easy to occur in the region of cloud with strong developed and in front of the area with the largest brightness temperature gradient. When the cloud-top brightness temperature was lower but the gradient and the genting cooling rate were higher, the diameter of hail would be larger. For the same region, the development of convective cloud and the extension of the strongest radar echo would be promoted, and the larger hail would generate under conditions of the more obvious high-level divergence, the higher extension of nearly saturated and high moisture content layer, and the greater vertical wind shear.

Key words mountainous region; hail; meso-scale convergence line; brightness temperature gradient; radar echo