

张晓辉,高艳春,易永力,等.承德市冰雹时空分布特征及雷达预警指标分析[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(2):16-22.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2022.02.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



承德市冰雹时空分布特征及雷达预警指标分析

张晓辉¹,高艳春¹,易永力¹,谭国明¹,相云^{2*}

(1.承德市气象局,河北 承德 067000;2.河北省气象科学研究所,河北 石家庄 050021)

摘要:利用1981—2016年承德市9个气象观测站的冰雹观测资料及2012—2016年11次冰雹天气过程的多普勒雷达回波资料,对承德市冰雹的时空分布特征、冰雹云的雷达回波特征进行统计分析。结果表明:承德冰雹主要发生在东北部的高海拔地区。20世纪80年代是承德市冰雹高峰期,90年代后逐渐减少。承德冰雹次数的月分布呈“单峰型”变化,6月冰雹次数最多,一日中14—17时降雹概率最大,降雹的持续时间一般在10 min以内。承德冰雹的定量预警指标为最大回波强度>60 dBZ,回波顶高>10 km,相邻2个体扫的垂直液态累积含水量跃增值>20 kg/m²,5、6月垂直液态累积含水量分别>38、33 kg/m²;定性判断的依据有中尺度径向辐合、风暴顶辐散、“V”型缺口。

关键词:冰雹;时空分布;预警指标

中图分类号:P458.121

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2022)02-0016-07

冰雹作为一种自然灾害,对人民群众的生命财产危害巨大,一场强烈的冰雹会对农业、畜牧业、交通、通信、城市建筑等造成毁灭性的打击。近年来,已有许多国内外的专家学者对冰雹天气特征进行了分析研究,Počakal等^[1]、Tuovinen等^[2]、Berthet等^[3]、Mohr等^[4]研究发现,山脉附近和中纬度地区是欧洲冰雹的多发地,且冰雹发生的时间主要集中在5—9月的下午和傍晚时段;López等^[5]、Winston等^[6]通过对雷达探测冰雹的判别方法研究,提出以垂直累积液态含水量、最大反射率因子等雷达参量作为变量的判别分析模型。符琳等^[7]通过对近50 a我国北方冰雹趋势的成因分析发现,20世纪80年代末至今降雹次数基本低于近50 a的平均值;苏永玲等^[8]通过对比不同环流背景下冰雹特征发现,冰雹发生在冷

涡背景下以动力强迫为主,在副高背景下以热力强迫为主;吴迎旭等^[9]通过分析发现,在非典型环流系统下,产生冰雹的主要因子有不稳定层结、低层水汽输送或辐合、地面辐合抬升;魏勇等^[10]对石河子地区3次冰雹天气过程的雷达回波特征分析发现,回波强度和回波顶高度的变化、速度对和逆风区的出现以及垂直累积液态含水量增加等,都对产生冰雹有指示意义;王存亮等^[11]分析了石河子一次强冰雹天气的多普勒天气雷达特征,得到>50 dBZ强回波区及>60 dBZ强回波中心和中气旋及逆风区的出现、>50 dBZ强回波区高度远高于当天0℃层的高度等特点,对冰雹的预报有很好的指示作用。

河北省冰雹天气的时空分布及雷达产品特征分析表明^[12-15],20世纪80年代末—90年代初降雹达到高峰期,冰雹日数在1994年发生明显突变,冰雹云回波强度普遍>60 dBZ,垂直累积液态含水量普遍>35 kg/m²,回波顶高普遍在8~11 km,基本径向速度图上表现为辐合。这些研究都为冰雹灾害的研究提供了理论依据。承德地处华北东北部,多山地,地形地貌十分复杂,易于冰雹天气的发生,复杂地形也使冰雹预报难度加大,需深入细致的研究。目前承德

收稿日期:2020-06-13;修回日期:2020-12-31

基金项目:河北省重点研发计划(18226835D);国家遥感科学重点实验室开放基金(OFSLRSS201820);河北省气象局预报员专项(18ky39)

作者简介:张晓辉(1987—),男,工程师,主要从事天气预报与专业气象服务业务与研究。E-mail:945302079@qq.com

通信作者:相云(1975—),女,高级工程师,主要从事应用气象业务与研究。E-mail:yunvee@sina.com

本地冰雹的研究取得了一定进展,王宏等^[16]通过分析一次飰线过程的雷达产品,得到大风、冰雹等强对流天气与垂直累积液态含水量的剧减、跃增和持续高的回波顶高存在一定的关系;高艳春等^[17]分析发现,冰雹等强对流天气发生在低云顶亮温发展前端高梯度区的概率较大;彭九慧等^[18]利用 GIS 技术总结了承德市冰雹灾害的风险区划,得到丰宁冰雹灾害风险最高。但这些研究主要是针对承德市冰雹个例和冰雹灾害风险区划分析,并未对冰雹的气候特征及雷达预警指标进行系统的归纳总结,因此本文利用 1981—2016 年承德市冰雹资料、2012—2016 年 11 次冰雹天气过程的多普勒雷达回波资料,详细分析了承德市冰雹的时空分布特征以及冰雹天气的多普勒雷达回波特征,并得到承德市冰雹预警定量指标和定性的判别依据,以期为承德市冰雹天气的灾害研究和防灾减灾提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料及来源

1981—2016 年承德市 9 个气象观测站的冰雹观测资料,2012—2016 年承德市 C 波段雷达观测资料,均来源于承德市气象局。

1.2 资料处理与方法

本文规定在各站冰雹观测记录中,某站在某日(00—24 时 BT,下同)观测记录有冰雹,不论时间长短,都记为一个冰雹日。

考虑到承德市观测站处于雷达静锥区,而丰宁、围场、平泉、兴隆和宽城距雷达站 >100 km,受地形影响,低仰角的雷达回波无法被探测到。因此本文选取距离雷达站 20~50 km 的隆化、滦平、承德县的 11 次冰雹过程进行分析。

利用线性变化倾向率方法^[19]对承德市冰雹的气候趋势进行分析。

2 承德市冰雹的时空分布特征

2.1 冰雹的空间分布特征

承德市 1981—2016 年出现冰雹总次数为 717 次,年平均为 19.9 次。从 1981—2016 年冰雹次数空间分布(图 1)可知,冰雹次数由北向南总体趋于减少,北部高海拔地区冰雹最多,尤其是丰宁和围场,冰雹次数 >100 次,东部的平泉也是冰雹的多发区,冰雹次数接近 90 次,宽城最少,为 64 次,其他地区为 65~77 次。承德市冰雹多发区在东北部高海拔的区域。

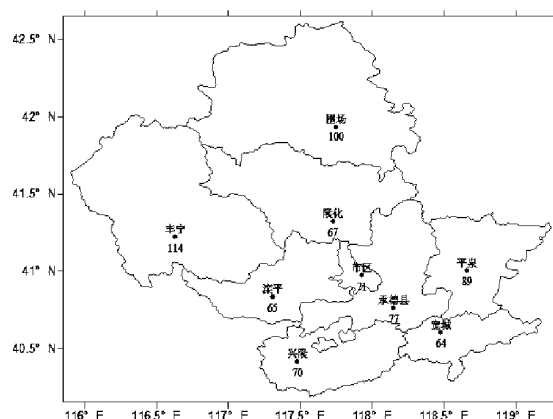


图 1 1981—2016 年承德市各站冰雹次数空间分布
(单位:次)

2.2 冰雹的时间变化特征

2.2.1 冰雹的年变化特征

由 1981—2016 年冰雹时间序列(图 2)得出,承德市冰雹年代际变化显著,总体呈先增后减的趋势,冰雹出现次数最多的是 1990 年,为 58 次;出现次数最少的是 2009 年,仅 3 次。从冰雹的线性趋势线可知,1981—1990 年承德市冰雹次数以 24.3 次/10 a 的速度递增,20 世纪 90 年代以后,出现频率趋于减少,每 10 a 减少 10.8 次,此倾向率通过了 0.01 的显著性检验。

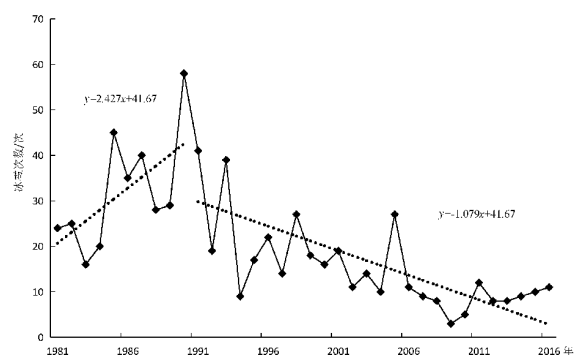


图 2 1981—2016 年承德市冰雹次数逐年变化和线性趋势

2.2.2 冰雹的月变化特征

统计 1981—2016 年承德市冰雹出现时间发现,承德市冰雹出现在 3—11 月,主要集中在 5—8 月。月冰雹出现次数呈明显的“单峰型”分布,3—6 月冰雹次数迅速增加,6 月达到峰值,7 月以后呈逐月下降的趋势。5—8 月降雹总数为 569 次,占全年降雹总数的 79.4%,其中 6 月冰雹出现次数最多,为 220 次,占全年降雹总数的 30.7%(图 3)。每年的 5—8 月

河北省受冷涡影响频繁,90%的降雹是由冷涡造成的^[20],500 hPa形势场上,冷涡中心一般位于贝加尔湖附近或内蒙古中部到河北北部一带,其南部为低槽^[21],冷涡携带的冷空气沿高空槽南下到达河北上空,而低层受暖平流影响,形成“上冷下暖”的不稳定层结,午后到傍晚时段随着热力和动力条件的加强,在地面冷锋、中尺度辐合线、干线等触发下,导致降雹发生^[21]。

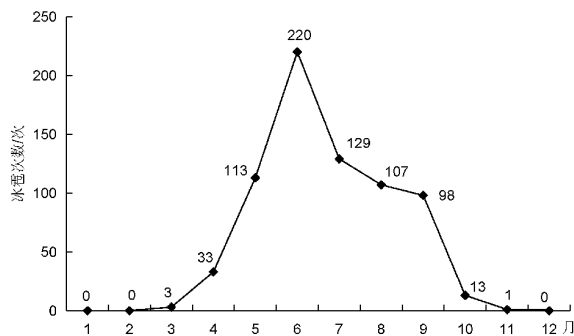


图3 1981—2016年承德市冰雹次数的月分布

2.2.3 冰雹的日变化及持续时间

热力条件在冰雹天气发生时起重要作用^[22]。由承德市各时段出现冰雹的百分比(图4a)可知,承德市冰雹日变化特征明显,主要出现在08—20时,占冰雹出现几率的84.5%,其中12—20时,冰雹出现几率占78.9%。12—16时冰雹出现几率逐渐增加,14—17时是全天冰雹出现几率最大的几个时段,均>10%。这是因为此时段地面气温较高,不稳定能量易累积,导致近地层大气极不稳定,只要有中小尺度系统触发,就极易发生冰雹天气^[23]。由此可见,日辐射通过下垫面对边界层的增热作用,是导致冰雹天气发生的重要热力因素。

冰雹持续时间长短是影响冰雹灾害轻重的因素之一,一般持续时间越长灾害越严重^[24]。从冰雹的持续时间(图4b)来看,承德市冰雹持续时间在10 min以内的占总次数的87.4%,在10~20 min的占

10.4%,>20 min的仅占2.1%。

3 冰雹雷达预警指标分析

3.1 冰雹的雷达产品特征分析

表1是承德市11次冰雹过程的组合反射率、回波顶高、垂直累积液态含水量、垂直累积液态含水量跃增的特征统计。

表1 冰雹的雷达产品统计

出现日期	出现时间	降雹地点	组合反射率/dBZ	回波顶高/km	垂直累积液态含水量/(kg·m ⁻²)	垂直累积液态含水量跃增/(kg·m ⁻²)
2012-06-18	19:16	隆化	63	11	63	25
2012-07-11	14:31	滦平	63	10	38	25
2013-05-19	11:01	承德县	63	10	38	30
2013-06-11	17:21	滦平	63	7	33	20
2014-05-19	13:11	滦平	65	13	38	不明显
2014-06-09	13:02	承德县	58	8	43	25
2014-06-16	18:01	滦平	63	10	33	25
2014-08-21	16:21	隆化	65	11	53	20
2015-05-17	17:18	承德县	63	11	43	23
2016-05-01	20:07	滦平	63	13	38	25
2016-6-29	16:18	滦平	63	11	48	33

冰雹过程最大回波强度均>58 dBZ,其中仅有2014年6月9日承德县冰雹过程最大回波强度为58 dBZ,其余过程最大回波强度均>60 dBZ,占99%,2014年5月19日滦平和2014年8月21日隆化冰雹过程出现的最大回波强度最强,达65 dBZ。因此可将最大回波强度>60 dBZ,作为承德市冰雹预警的一个参考依据。

回波顶高是对流天气强弱程度的重要标志,它反映了云内垂直上升气流的强度,上升气流又是决定云内所能形成的最大水滴或冰雹尺度的重要因素^[25],且回波顶高的高度为雹胚生长提供了足够长的增大

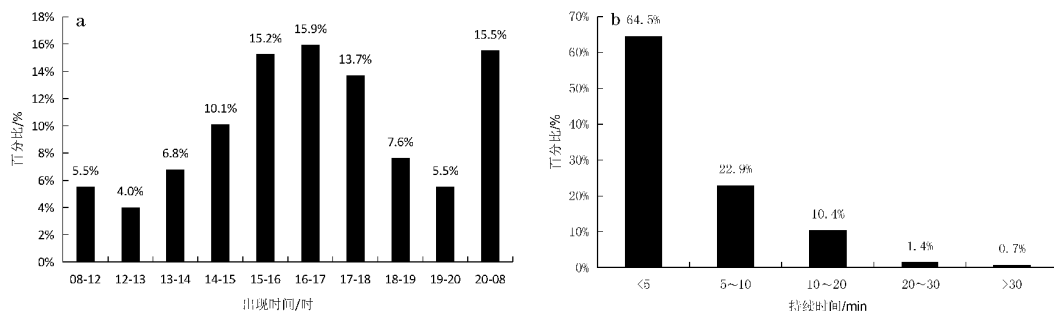


图4 1981—2016年承德市冰雹发生时段(a)及持续时间(b)的百分比序列

路径^[26],回波顶高度越高,云内上升气流越强,雹胚生长路径越长,越易产生冰雹。根据河北本地冰雹的预警指标,发生冰雹的回波顶高一般在 8~11 km^[12-14]。由表 1 可知,除 2013 年 6 月 11 日滦平和 2014 年 6 月 9 日承德县冰雹过程的回波顶高<10 km 外,其余均>10 km,占 82%,2014 年 5 月 19 日和 2016 年 5 月 1 日滦平冰雹过程的回波顶高最高,达 13 km。因此可将回波顶高>10 km 作为冰雹预警的参考依据之一。必须指出的是,一些回波顶高达到上述的高度时也曾有冰雹的发生,所以在冰雹预报时要把回波顶高和其他回波特征联系起来分析,以减少冰雹空报的发生。

上述冰雹过程的最大垂直累积液态含水量 VIL_{max} 最小为 33 kg/m²,分别出现在 2013 年 6 月 11 日和 2014 年 6 月 16 日滦平的冰雹过程中; VIL_{max} 最大为 63 kg/m²,出现在 2012 年 6 月 18 日隆化的冰雹过程中。冰雹过程主要发生在 5—8 月,路亚奇等^[27]研究发现,5—9 月降雹的 VIL_{max} 指标分别为 36、31、33、33、39 kg/m²,因此上述冰雹过程 5—6 月降雹的 VIL_{max} 指标与此研究结果相差不大,而 7—8 月本文得到的 VIL_{max} 较后者的明显偏大,由于本文研究的个例中,7 和 8 月的个例仅各一次,得到降雹的 VIL_{max} 指标不具普遍性,因此可将 $VIL_{max} > 38$ 、33 kg/m² 分别作为承德市 5、6 月冰雹的预警指标之一。垂直累积液态含水量的跃增可作为降雹的主要指标^[28-29]。在冰雹发展初期的 2~4 个体扫垂直累积液态含水量一般会有一个跳跃性增长,除 2014 年 5 月 19 日滦平冰雹过程外,其余过程降雹前相邻 2 个体扫垂直累积液态含水量均有明显跃增,且 2 个相邻体扫跃增值在 20~33 kg/m²,这与王福侠等^[14]得到的“降雹前相邻 2 个体扫垂直累积液态含水量的

跃增值在 10~30 kg/m²”基本一致。因此可将相邻 2 个体扫垂直累积液态含水量的跃增值>20 kg/m² 作为承德市冰雹的预警指标之一。

3.2 冰雹的雷达回波特征分析

3.2.1 回波形状和移速

分析上述冰雹过程的回波形状和移速发现,除 2013 年 5 月 19 日和 2016 年 5 月 1 日冰雹过程回波呈带状外,其余过程冰雹云回波都呈块状。在冰雹云发展初期,一般移动速度不大,发展较成熟时,移速明显加大,不同回波移动速度相差较大,一般在 30~60 km/h。

3.2.2 径向速度

冰雹云回波因持续时间短、突发性强,在基本径向速度资料中,以分析中小尺度特征为主。分析上述冰雹过程的基本径向速度资料可知,出现冰雹天气时基本径向速度资料上一般伴有风场的辐合,在 11 次冰雹个例中中尺度径向辐合占 9 次,其中出现弱风切变 2 次,反气旋式辐合 3 次(图 5a),气旋式辐合 2 次(图 5b),纯辐合 2 次,无明显特征的冰雹过程占 2 次,无明显特征的冰雹过程则是在西南气流的背景下出现。因此中尺度径向辐合是承德市冰雹云回波的典型风场结构。

3.2.3 风暴顶辐散

风暴顶辐散是与风暴中强上升气流密切相关的小尺度特征^[29-30],产生冰雹需要强烈的上升运动。上述冰雹过程中,6 次过程出现风暴顶辐散(图 6),说明风暴顶辐散可以作为承德市判断冰雹发生的依据,但是在利用风暴顶辐散判断地面冰雹时,检验风暴顶辐散有时非常困难,必须使用适当的仰角对风暴顶取样,当风暴距雷达较近时,必须使用高仰角,此时穿过风暴顶取样将不在同一高度。因此,风暴顶

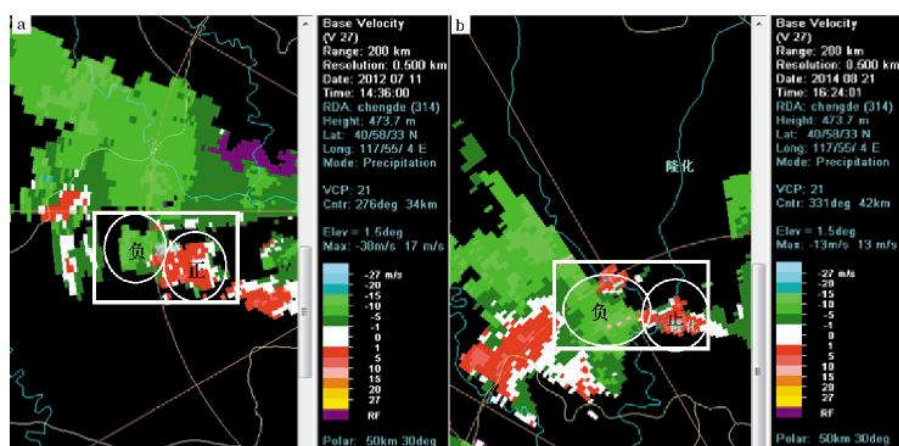


图 5 2012 年 7 月 11 日 14:36 1.5°V(a,反气旋式辐合)和 2014 年 8 月 21 日 16:24 1.5°V(b,气旋式辐合)

辐散不可以独立作为地面降雹的判据,应与反射率因子特征配合使用以增加其可靠性。

3.2.4 “V”型缺口

根据“V”型缺口的定义和最佳观测仰角^[31-32],分析上述冰雹过程的反射率因子图发现,7次冰雹过程出现“V”型缺口(图7),因此,可将“V”型缺口作为承德市冰雹的预警依据之一。虽然“V”型缺口可以作为冰雹的预警依据,但是它同样给其他天气的预报预警带来弊端,由于出现“V”型缺口时,缺口区内回波出现空缺或严重衰减,对缺口区内晴雨预报错误或降水预报量级偏小,导致缺口区内冰雹、雷暴、大风等漏报。

4 结论

通过分析承德市1981—2016年冰雹资料和2012—2016年11次冰雹天气过程的多普勒雷达回波资料,得出以下结论:

(1)承德市冰雹分布呈北多南少的特点,主要分

布于东北部的高海拔地区,东南部低海拔地区较少。

(2)承德市冰雹年代际变化显著,20世纪80年代是冰雹高峰,每10 a增加24.3次,90年代至今呈逐渐减少的趋势,每10 a减少10.8次。

(3)承德市出现冰雹的季节性显著,最早出现在3月,最晚出现在11月。冰雹次数的月变化呈“单峰型”分布,冰雹主要集中在5—8月,6月冰雹最多。从冰雹的日变化来看,冰雹主要出现在14—17时。冰雹的持续时间较短,一般在10 min以内,持续时间>20 min的很少。

(4)最大回波强度>60 dBZ、回波顶高>10 km、相邻2个体扫垂直液态累积含水量的跃增值>20 kg/m³,在5.6月时垂直液态累积含水量分别>38.33 kg/m³等雷达产品特征,可以作为承德市冰雹预警的定量指标。中尺度径向辐合、风暴顶辐散、“V”型缺口等都可以作为承德市冰雹预警的定性判断依据。

致谢:感谢河北省气象局正高级工程师付桂琴对本文提出的宝贵修改意见。

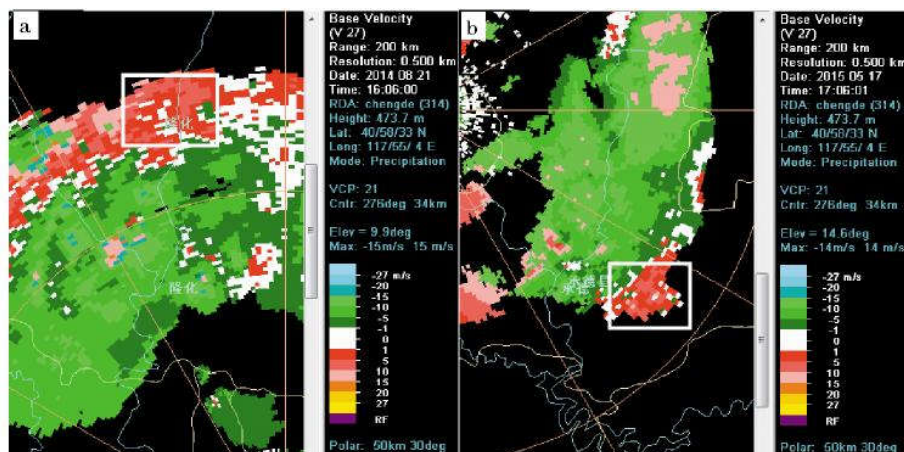


图6 径向速度图中的风暴顶辐散

(a为2014年8月21日16:06 9.9°V, b为2015年5月17日17:06 14.6°V;单位:m/s)

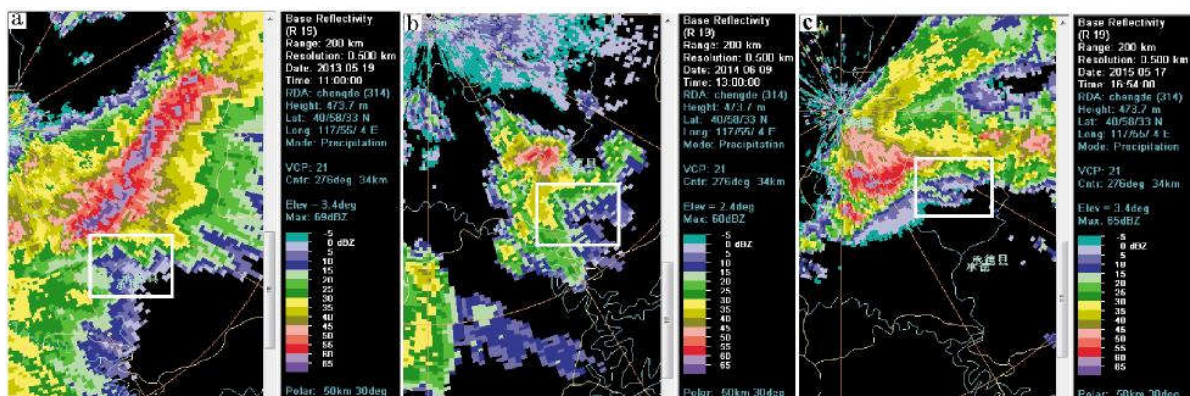


图7 反射率因子图上的“V”型缺口

(a为2013年5月19日11:00 3.4°R, b为2014年6月9日13:00 2.4°R, c为2015年5月17日16:54 3.4°R;单位:dBZ)

参考文献:

- [1] López L, Marcos J L, Sánchez J L, et al. CAPE values and hailstorms on northwestern Spain [J]. Atmospheric Research, 2001, 56(1-4): 147-160.
- [2] TUOVINEN J P, PUNKKA A J, RAUHALA J, et al. Climatology of severe hail in Finland: 1930-2006 [J]. Mon Wea Rev, 2009, 137(7): 2238-2249.
- [3] Berthet C, Dessens J, Sanchez J L. Regional and yearly variations of hail frequency and intensity in France [J]. Atmospheric Research, 2011, 100(4): 391-400.
- [4] MOHR S, KUNZ M. Recent trends and variabilities of convective parameters relevant for hail events in Germany and Europe [J]. Atmospheric Research, 2013, 123: 211-228.
- [5] López L, Sánchez J L. Discriminant methods for radar detection of hail [J]. Atmospheric Research, 2009, 93(1): 358-368.
- [6] WINSTON H A, RUTHI L J. Evaluation of RADAP II severe storm detection algorithms [J]. Bull Amer Meteor Soc, 1986, 61(2): 142-150.
- [7] 符琳, 李维京, 张培群, 等. 近 50 a 我国冰雹年代际变化及北方冰雹趋势的成因分析[J]. 气象, 2011, 37(6): 669-676.
- [8] 苏永玲, 马秀梅, 马元仓, 等. 高空冷涡和副高背景下青海冰雹特征对比分析 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2018, 12(4): 22-29.
- [9] 吴迎旭, 张慧君, 周一, 等. 黑龙江省非典型天气系统下短时强降水和冰雹特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(6): 59-67.
- [10] 魏勇, 雷微, 王存亮, 等. 石河子地区三次冰雹天气过程的综合分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2013, 7(1): 21-27.
- [11] 王存亮, 魏勇, 郭金强. 石河子一次强冰雹天气的多普勒天气雷达特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2011, 5(5): 43-46.
- [12] 刘艳杰, 周玉都, 马庚雪. 河北廊坊冰雹天气特征统计分析[J]. 气象与环境科学, 2018, 41(1): 108-115.
- [13] 王秀玲, 郭丽霞, 高桂琴, 等. 唐山地区冰雹气候特征与雷达回波分析[J]. 气象, 2012, 38(3): 344-348.
- [14] 王福侠, 张守宝, 裴宇杰, 等. 可能降雹多普勒雷达产品特征指标分析[J]. 气象科技, 2008, 36(2): 228-232.
- [15] 顾光芹, 史印山, 池俊成, 等. 河北省冰雹气候特征及其与环流异常的关系 [J]. 高原气象, 2011, 30(4): 1132-1138.
- [16] 王宏, 马凤莲, 王万筠. 一次飑线过程的多普勒雷达资料分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2009, 3(3): 39-43.
- [17] 高艳春, 张晓辉, 彭九慧, 等. 2015 年 7 月 27 日承德市强对流天气过程分析[J]. 内蒙古气象, 2016(4): 20-24.
- [18] 彭九慧, 王多, 赵岩, 等. 基于 GIS 的承德市冰雹灾害风险区划[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(1): 105-109.
- [19] 吴占华, 窦利军, 李瑞芳, 等. 山西省冰雹天气变化的气候特征分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(29): 212-220.
- [20] 河北省气象局. 河北省天气预报手册[Z]. 北京: 气象出版社, 1987: 160.
- [21] 李江波, 王宗敏, 王福侠, 等. 华北冷涡连续降雹的特征与预报[J]. 高原气象, 2011, 30(4): 1119-1131.
- [22] 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.
- [23] 高晓梅, 王令军, 王世杰, 等. 1952-2012 年潍坊地区冰雹时空分布特征[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(3): 77-82.
- [24] 王建刚, 何清, 徐建春, 等. 新疆阿勒泰冰雹灾害气候特征[J]. 干旱气象, 2014, 32(1): 114-119.
- [25] 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.
- [26] 王伏村, 丁荣, 李耀辉, 等. 河西走廊中部冰雹天气的环流和多普勒雷达产品特征分析 [J]. 高原气象, 2008, 27(6): 1343-1349.
- [27] 路亚奇, 曹彦超, 张峰, 等. 陇东冰雹天气特征分析及预报预警[J]. 高原气象, 2016, 35(6): 1565-1576.
- [28] 敖泽建, 傅朝, 蒋友严, 等. 甘南高原“4·15”冰雹天气的多普勒雷达特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(2): 27-33.
- [29] 张崇莉, 钱宝敏, 和卫东, 等. VIL 产品在高山雷达中的应用研究[J]. 高原气象, 2012, 31(2): 562-567.
- [30] 陈鲍发, 马中元. 江西局地冰雹 WebGIS 雷达拼图回波特征分析[J]. 气象与环境科学, 2019, 42(2): 104-114.
- [31] LEMON L R, 沈文祥. 用风暴结构来识别冰雹[J]. 浙江气象, 1983(4): 38-41.
- [32] 夏文梅, 王晓君, 孙康远, 等. V 型缺口在 C 波段多普勒雷达中的应用研究[J]. 气象, 2016, 42(1): 67-73.

Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Radar Early Warning Indicators of Hail in Chengde City

ZHANG Xiaohui¹, GAO Yanchun¹, YI Yongli¹, TAN Guoming¹, XIANG Yun²

(1.Chengde Meteorological Bureau, Chengde 067000, China;

2.Hebei Institute of Meteorological Sciences, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract Based on the hail observation data of 9 meteorological stations in Chengde from 1981 to 2016 and the Doppler radar echo data of 11 hail processes from 2012 to 2016, the spatial and temporal distribution characteristics of hail and the radar echo characteristics of hail clouds in Chengde are statistically analyzed. The results show that the hail in Chengde mainly occurs in the northeast high-altitude area. The occurring trend first increases to the peak in the 1980s and then gradually decreases after the 1990s. The monthly distribution of hail frequency in Chengde shows a “single peak” change, with the most in June. The probability of hail is the highest from 14:00 to 17:00 in a day, and the duration of hail is generally less than 10 min. The quantitative early warning indicators of hail in Chengde include the maximum echo intensity exceeding 60 dBZ, the echo top height exceeding 10 km, the jump value of vertical liquid cumulative water content of two adjacent individuals exceeding 20 kg/m² and the vertical liquid cumulative water content in May and June exceeding 38 and 33 kg/m² respectively. The qualitative indicators are based on mesoscale radial convergence, storm top divergence and “V” gap.

Key words hail; spatial and temporal distribution; early warning indicators