

王晓君,郑媛媛,2022. 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,48(7):868-877. Wang X J,Zheng Y Y, 2022. Comparative analysis of radar echo characteristics of different grades of hail weather in Pu'er[J]. Meteor Mon,48(7): 868-877(in Chinese).

## 普洱市不同等级冰雹天气的雷达 回波特征对比分析<sup>\*</sup>

王晓君<sup>1</sup> 郑媛媛<sup>2,3,4</sup>

1 云南省普洱市气象局,普洱 665000

2 中国气象局交通气象重点开放实验室,南京 210041

3 江苏省气象科学研究所,南京 210041

4 南京气象科技创新研究院,南京 210041

**提 要:** 利用探空资料、CIND3830-CC 天气雷达和地面观测资料,以 2013—2020 年云南普洱市 21 次冰雹天气过程为样本,将冰雹直径 $\geq 20$  mm 的风暴单体定义为大冰雹风暴单体,5 mm $\leq$ 直径 $< 20$  mm 的风暴单体定义为中冰雹风暴单体,直径 $< 5$  mm 的风暴单体定义为小冰雹风暴单体(GB/T27957—2011),对比分析小冰雹、中冰雹、大冰雹风暴单体的多普勒雷达回波特征。结果表明:冰雹风暴单体的共同特征是:高顶高底结构、风暴的高质心伸展高度 $\geq 5$  km、回波梯度较大、组合反射率 $CR \geq 55$  dBz、垂直液态水含量 $VIL \geq 23$  kg $\cdot$ m<sup>-2</sup>、45 dBz 顶高 $H_{45\text{ dBz}} \geq 7.5$  km、 $H_{45\text{ dBz}} - H_{0^\circ\text{C}} \geq 2.8$  km。67%的冰雹风暴单体在降雹前 5~10 min 出现 VIL 跃增现象,跃增幅度越大,相应 VIL 越大。冰雹风暴单体均存在明显的辐合特征,大冰雹风暴单体往往具有中气旋特征。大冰雹风暴单体的 $VIL/H$ 、 $H_{50\text{ dBz}} - H_{-20^\circ\text{C}}$ 和成熟阶段持续时间均显著大于中、小冰雹风暴单体的相同指标。大冰雹风暴单体的回波悬垂结构、DVIL( $VIL/ET$ )和旋转速度往往多(大)于中、小冰雹风暴单体的相同指标。回波顶高(ET)、VIL 跃增特征、TBSS 和 V 形缺口都不能作为识别不同等级冰雹的指标。

**关键词:** 冰雹等级,预报,回波特征,径向速度,垂直剖面

**中图分类号:** P412

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.041202

## Comparative Analysis of Radar Echo Characteristics of Different Grades of Hail Weather in Pu'er

WANG Xiaojun<sup>1</sup> ZHENG Yuanyuan<sup>2,3,4</sup>

1 Pu'er Meteorological Office of Yunnan Province, Pu'er 665000

2 Key Laboratory of Transportation Meteorology, CMA, Nanjing 210041

3 Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210041

4 Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences, Nanjing 210041

**Abstract:** Based on the air-sounding data, the CIND3830-CC CINRAD data and surface meteorological data, and 21 hail weather processes in Pu'er during 2013—2020, this study gives the definition to storm cells with hail diameter  $\geq 20$  mm as large hail storm cells, storm cells with hail diameter  $\geq 5$  mm and less than 20 mm as medium hail storm cells and storm cells with hail diameter  $< 5$  mm as small hail storm cells (GB/T27957—2011). The Doppler radar echo characteristics of small hail, medium hail and large hail are comparatively

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划(2018YFC1507503)、国家自然科学基金项目(41075072)共同资助

2021 年 8 月 26 日收稿; 2022 年 3 月 11 日收修定稿

第一作者:王晓君,主要从事人工影响天气研究. E-mail:1034561861@QQ.com

通讯作者:郑媛媛,主要从事强对流天气临近预报技术研究. E-mail:zhengyy63@sina.com

analyzed. The results show that hail storm cells have common characteristics. High top and high bottom structure of the radar echo, height above 5 km and large echo gradient and composite reflectivity ( $CR \geq 55$  dBz,  $VIL \geq 23$  kg  $\cdot$  m $^{-2}$ ,  $H_{45\text{ dBz}} \geq 7.5$  km,  $H_{45\text{ dBz}} - H_{0^\circ\text{C}} \geq 2.8$  km. VIL shows jump phenomenon in 67% hail storm cells, appearing 5–10 min before the occurrence of hail falls. The bigger the magnitude of the jump, the greater the corresponding VIL. The hail storm cells have obvious convergence characteristics and large hailstorm cells often have mesocyclone characteristics. All the large hail storm cells are significantly greater than the medium and small hail storm cells in  $VIL/H$ .  $H_{50\text{ dBz}} - H_{-20^\circ\text{C}}$  of most large hail storm cells are significantly greater than those of medium and small hail storm cells. Large hail storm cells in mature stage often lasts significantly longer than medium and small hail storm cells. The echo overhang structure of large hail storm cells is often more than the medium and small hail storm cells, and DVIL and the rotation speed are often greater than medium and small hail storm cells. ET, VIL jump characteristics, TBSS and V-notch can not be used as indicators to identify different grades of hails.

**Key words:** hail grade, forecast, echo characteristic, radial velocity, vertical profile

## 引 言

冰雹是普洱市春、夏季的主要气象灾害之一,常给烤烟、咖啡、蔬菜、水果等农业、高产值农副产品业带来重大灾害损失,冰雹还会导致人畜伤亡,严重威胁人民生命和财产安全。由于冰雹具有突发性强、持续时间短、影响范围小的特点,加上普洱山川河流纵横交错,复杂的地形地貌所产生的中尺度环流可能触发冰雹等灾害性天气(陶诗言,1980),普洱市冰雹天气预报难度较大。随着近年来普洱市茶叶、烤烟、咖啡、橡胶等经济作物栽种面积的迅速增加,冰雹天气的预报预警研究具有重要实际意义。

多普勒天气雷达探测数据具有较高的时空分辨率,对预报冰雹的发生、发展具有重要的指示意义,目前已广泛应于冰雹的监测分析和短时临近预报。国内的气象工作者针对 S 波段多普勒天气雷达中冰雹天气回波特征进行了分析,叶爱芬等(2006)对一次冰雹天气过程的回波结构进行了详细分析,刘兵等(2009)对张家界 5 个降雹过程中典型的冰雹云雷达回波特点和形态进行了总结,王莎等(2019)总结了冀东地区 36 个冰雹风暴的最大基本反射率因子、风暴顶高、垂直累积液态水含量等特征,并得出了冰雹预报指标。俞小鼎等(2006)、应冬梅等(2007)、何炳伟等(2018)统计得出了强对流天气的雷达回波特征的共性,如冰雹的指状回波、回波窟窿、弱回波区(WER)或有界弱回波区(BWER)、三体散射长钉、“V”型缺口等特征。双偏振雷达投入应用后,潘佳

文等(2020)、林文等(2020)对 S 波段双偏振雷达中冰雹的回波特征也进行了分析。杨吉等(2020)统计分析了冰雹过程发展、成熟和降雹阶段的观测特征及微物理过程。王建恒等(2020)利用双多普勒雷达径向速度资料反演出格点的三维风速(流场),并结合回波特征分析了雹云云体结构。张文海和李磊(2019)还利用广东 10 部 S 波段多普勒天气雷达的三维拼图资料,研究发现人工智能对冰雹这类非线性强天气过程具有较强的识别能力。云南省的张腾飞等(2006)、段鹤等(2014a;2014b)、周泓等(2014)、李湘等(2015)、尹丽云等(2021)也利用 C 波段多普勒天气雷达资料总结了云南典型冰雹事件的雷达回波特征,得出了云南部分地区冰雹的统计特征和预警指标。此外,俞小鼎(2014)指出了国内大多数人对冰雹融化层的近似高度的认识错误,郑永光等(2017)论述了冰雹融化层高度与湿球温度之间的物理联系,并在文章结论中明确指出湿球温度  $0^\circ\text{C}$  层才是冰雹融化层的近似高度。上述研究对冰雹的预报预警有较好的指导意义,但缺乏不同等级冰雹的雷达回波特征对比分析,实际应用上还没有冰雹直径的预报依据,从而影响了冰雹危害程度的评估能力。本文利用普洱 CIND3830-CC 天气雷达资料、常规气象资料,以 21 次冰雹天气过程为样本,对比分析不同等级冰雹的雷达回波异同。

## 1 资 料

选取 2013—2020 年普洱市全部 21 次有详细记

录的冰雹天气过程(2019—2020 年普洱市出现严重干旱,未收集到有详细记录的冰雹过程),它们具有完整的雷达和地面观测资料。实况资料取自云南自动站数据、普洱国家基本气象站和国家一般气象站人工观测数据、媒体报道数据、灾情直报数据;常规气象资料使用 MICAPS 数据和探空站数据(探空站名为思茅高空气象观测站),雷达资料选取普洱天气雷达同期采集的所有资料,包括相对径向速度、反射率因子、垂直累积液态水含量(VIL)、风廓线、垂直剖面等产品。

地面气象观测规范要求值班观测员随时观测和记录出现在视区内的最大冰雹的最大直径,存在观测范围的局限性。郑永光等(2017)指出,虽然我国目前已经布设完成了较为完备的气象观测网,但仍难以全面监测极端强对流天气,因此灾害现场调查和其他观测信息仍是现有监测网的必要补充。为最大限度保障冰雹直径资料的科学性和可靠性,选取的资料除了具有完整的雷达和地面观测资料外,还同时满足了以下 3 个条件:(1)冰雹直径资料由气象部门值班观测员记录,确保资料记录的及时、准确、规范。(2)冰雹直径资料取自位于县城主城区的普洱国家基本气象站和国家一般气象站(县城主城区降雹关注度高,利于媒体报道,也利于相关部门及时开展灾情调查,报道和调查数据可为气象观测数据提供对比分析验证)。(3)气象、媒体和相关部门灾情资料中的冰雹直径数据一致。媒体和相关部门未报道或未发布冰雹直径数据时,以气象部门观测数据为准。根据以上资料选取条件,从 2013—2020 年普洱市境内的 74 次冰雹中选取了 21 次冰雹天气过程进行研究。需要说明的是,即使选取的冰雹个例满足了以上资料选取条件,仍然可能存在最大冰雹降落在观测员视区外而导致冰雹直径记录值小于实际值且媒体和相关部门数据又未能进行必要补充订正的情况,需要在业务工作中不断收集完整的冰雹过程资料,以对文中结论做进一步验证或补充完善。

## 2 不同等级冰雹风暴单体雷达回波特征对比分析

将冰雹直径 $\geq 20$  mm 的风暴单体定义为大冰雹风暴单体,5 mm $\leq$ 直径 $< 20$  mm 的风暴单体定义

为中冰雹风暴单体,直径 $< 5$  mm 的风暴单体定义为小冰雹风暴单体(GB/T27957—2011)。

对比大、中、小冰雹风暴单体的组合反射率(CR)、45 dBz 和 50 dBz 顶高高度( $H_{45\text{ dBz}}$ 、 $H_{50\text{ dBz}}$ )及其与特殊层( $H_{0^\circ\text{C}}$ 、 $H_{-10^\circ\text{C}}$ 、 $H_{-20^\circ\text{C}}$ )高度的高差、回波顶高(ET)、VIL、DVIL(VIL 密度 =  $VIL/ET$ )、VIL/H( $H=ET$ —回波底高)、悬垂结构特征、径向速度特征、冰雹持续时间等参数,找出不同等级冰雹风暴单体中上述因子的异同,为不同等级冰雹天气的识别和预报提供参考。

### 2.1 不同等级冰雹风暴单体的反射率特征对比

统计发现,所有冰雹的  $CR \geq 55$  dBz(表 1),其中大冰雹风暴单体的 CR 为 57~64 dBz,平均为 61 dBz;中冰雹风暴单体的 CR 为 55~67 dBz,平均为 60 dBz;小冰雹风暴单体 CR 为 56~64 dBz,平均为 60 dBz。表明普洱不同等级冰雹风暴单体的 CR 无显著差异,CR 仅能作为冰雹的识别指标而不能作为冰雹等级的识别因子。

以图 1 中 6 次冰雹风暴单体为例,分析以 45 dBz 为基础值的冰雹风暴单体的梯度,大冰雹风暴单体的梯度为 12 dBz $\cdot$ km $^{-1}$ 、18 dBz $\cdot$ km $^{-1}$ ;中冰雹风暴单体为 14 dBz $\cdot$ km $^{-1}$ 、22 dBz $\cdot$ km $^{-1}$ ;小冰雹风暴单体的梯度为 14 dBz $\cdot$ km $^{-1}$ 、14 dBz $\cdot$ km $^{-1}$ 。分析表明冰雹风暴单体均具有较高的反射率梯度,与短时强降水回波差异显著(段鹤等,2014a;2014b),但不同等级冰雹中差异不明显。

针对冰雹风暴单体做基本反射率垂直剖面计算  $H_{45\text{ dBz}}$ (表 1、图 1)。可见所有冰雹个例的  $H_{45\text{ dBz}} \geq 7.5$  km,其中大冰雹风暴单体的  $H_{45\text{ dBz}}$  为 7.5~9.7 km,平均为 8.8 km;中冰雹风暴单体的  $H_{45\text{ dBz}}$  为 7.5~13.0 km,平均为 8.8 km;小冰雹风暴单体  $H_{45\text{ dBz}}$  为 7.5~9.7 dBz,平均为 8.1 km。分析表明普洱大、中等级冰雹风暴单体的  $H_{45\text{ dBz}}$  无显著差异,小冰雹风暴单体的  $H_{45\text{ dBz}}$  略小于大、中冰雹,  $H_{45\text{ dBz}}$  仅能作为冰雹的识别指标(段鹤等,2014a;2014b)而不能作为冰雹等级的识别因子。

计算冰雹风暴单体的  $H_{50\text{ dBz}}$ (表略),发现  $H_{50\text{ dBz}}$  在相同等级冰雹风暴单体中存在一定差异,而在不同等级冰雹风暴单体中差异不明显。如图 1 中,大冰雹风暴单体  $H_{50\text{ dBz}}$  均为 8.5 km;中冰雹风

暴单体  $H_{50\text{ dBz}}$  为 7.4 km 和 8.5 km,平均为 8 km;小冰雹风暴单体的  $H_{50\text{ dBz}}$  为 9.0 km 和 7.5 km,平均为 8.3 km。数据表明  $H_{50\text{ dBz}}$  不能作为冰雹等级的识别因子。

表 1 普洱市冰雹天气个例发生的地点、时间、冰雹直径及其反射率等特征

Table 1 Occurrence location, time, hail diameter, reflectivity and other characteristics of hail weather processes in Pu'er										
日期/ (年.月.日)	地点时间 /BT	直径/ mm	CR/dBz	$H_{45\text{ dBz}}$ /km	$H_{50\text{ dBz}}-H_{-20\text{ }^{\circ}\text{C}}$ /km	ET/km	VIL /( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )	DVIL /( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	(VIL/H) /( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	
2013.2.2	江城 19:02	6	61	7.5	-0.4	9.7	28	2.9	4.5	
2013.3.8	澜沧 20:07	5	56	9.8	0.5	11.7	28	2.4	3.5	
2013.4.28	江城 15:01	11	59	7.6	-1.4	11.8	33	2.8	3.9	
2014.3.22	景谷 16:42	20	57	8.5	1.5	10.0	38	3.8	5.4	
2014.4.4	江城 17:20	4	61	9.7	1.7	11.8	40	3.4	4.7	
2014.4.4	江城 17:46	35	64	9.5	2.2	11.8	45	3.8	5.3	
2014.5.5	江城 22:14	11	67	9.0	0.9	12.6	43	3.4	4.6	
2015.3.23	江城 17:24	11	56	8.5	-1.6	10.0	28	2.8	4.1	
2015.4.21	景谷 15:35	5	55	8.0	-1.5	9.6	23	2.4	3.5	
2016.4.17	江城 18:45	6	55	9.0	-0.3	10.6	33	3.1	4.5	
2016.4.19	澜沧 19:09	23	63	9.7	0.6	10.0	38	3.8	5.9	
2016.4.21	江城 17:36	14	62	13.0	5	15.5	48	3.1	3.9	
2017.2.2	景谷 17:15	3	59	7.5	-0.9	9.0	28	3.1	4.7	
2017.2.2	江城 22:51	19	66	7.5	0	8.8	28	3.2	5.0	
2017.2.3	宁洱 16:38	30	60	7.5	0	7.8	28	3.6	5.1	
2018.3.11	宁洱 17:35	4	64	7.5	-1.6	8.5	28	3.3	4.3	
2018.3.17	江城 17:59	5	58	7.5	-0.8	9.5	28	2.9	4.3	
2018.3.17	江城 19:59	2	56	7.5	-0.8	9.5	30	3.2	4.6	
2018.3.23	宁洱 19:29	10	67	7.5	-1.6	9.0	35	3.9	4.9	
2018.4.2	江城 18:40	7	59	10.0	0.9	14.0	40	2.9	3.5	
2018.4.17	墨江 16:33	12	57	9.5	0.8	12.0	40	3.3	4.2	

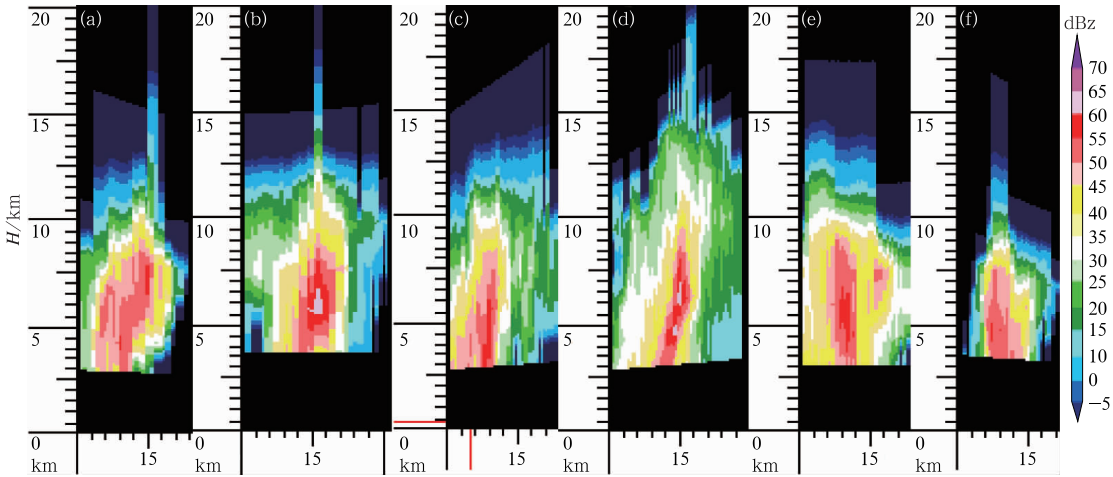


图 1 不同时刻、不同大小冰雹风暴单体的基本反射率垂直剖面

(a)2014 年 3 月 22 日 16:42 景谷,(b)2016 年 4 月 19 日 19:09 澜沧大冰雹;  
(c)2013 年 4 月 28 日 15:01,(d)2014 年 5 月 5 日 22:14 江城中冰雹,  
(e)2014 年 4 月 4 日 17:20 江城,(f)2017 年 2 月 2 日 17:15 景谷小冰雹

Fig. 1 Basic reflectivity vertical profile of hail storm cells with different sizes and at different times  
(a, b) large hail storm cells (a) in Jinggu at 16:42 BT 22 March 2014, (b) in Lancang at 19:09 BT 19 April 2016;  
(c, d) medium hail storm cells in Jiangcheng at (c) 15:01 BT 28 April 2013, (d) 22:14 BT 5 May 2014;  
(e, f) small hail storm cells (e) in Jiangcheng at 17:20 BT 4 April 2014, (f) in Jinggu at 17:15 BT 2 February 2017

统计分析冰雹风暴单体成熟阶段回波顶高(ET)特征(表 1),发现所有冰雹的  $ET \geq 7.8$  km,大冰雹风暴单体中的 ET 为 7.8~11.8 km,平均为 9.9 km;中冰雹风暴单体的 ET 为 8.8~15.5 km,平均为 11.1 km;小冰雹风暴单体的 ET 为 8.5~11.8 km,平均为 9.7 km。不同等级冰雹中,中冰雹风暴单体的 ET 略高于大冰雹和小冰雹风暴单体;21 次冰雹中,ET 最大的 3 次冰雹风暴单体出现在 2014 年 5 月 5 日 22:14(图 2e)、2016 年 4 月 21 日 17:36(图 2f)、2018 年 4 月 2 日 18:40(图略)江城的中冰雹风暴单体中,分别达 12.6、15.5、14.0 km(表 1),远大于大冰雹风暴单体的 ET 值。此外,分析图 2 发现,降雹天气过程中,冰雹风暴单体外的回波也具有较高的 ET 值,但高 ET 值下方并未出现降雹,特别在 2014 年 5 月 5 日 22:14 江城降雹过程中,冰雹风暴单体东南侧(图 2e),即江城城区东南部 ET 达 14 km 以上,但地面未出现降雹。统计 2016 年普洱市小时雨量  $\geq 50$  mm 且有完整雷达资料的 42 次短时强降水发现,有 86%(36 次)短时强降水的  $ET \geq 7.8$  km,但均未出现冰雹,表明 ET 不能作为识别冰雹的因子,也不能作为识别不同等级冰雹的因子。

## 2.2 不同等级冰雹风暴单体 $H_{45\text{ dBz}}$ 、 $H_{50\text{ dBz}}$ 与 $H_{0^\circ\text{C}}$ 、 $H_{-10^\circ\text{C}}$ 、 $H_{-20^\circ\text{C}}$ 层高度的高差对比分析

计算冰雹风暴单体的  $H_{45\text{ dBz}} - H_{0^\circ\text{C}}$ 、 $H_{45\text{ dBz}} -$

$H_{-10^\circ\text{C}}$ 、 $H_{45\text{ dBz}} - H_{-20^\circ\text{C}}$ 、 $H_{50\text{ dBz}} - H_{0^\circ\text{C}}$ 、 $H_{50\text{ dBz}} - H_{-10^\circ\text{C}}$ 、 $H_{50\text{ dBz}} - H_{-20^\circ\text{C}}$  发现所有冰雹风暴单体中,  $H_{45\text{ dBz}} - H_{0^\circ\text{C}} \geq 2.8$  km,为 2.8~8.3 km,平均为 4.4 km,该特征可有效识别出冰雹风暴单体和其他降水相态的风暴单体,与前期研究一致,可作为冰雹的识别因子之一(段鹤等,2014a;2014b);但  $H_{45\text{ dBz}} - H_{0^\circ\text{C}}$  在不同等级冰雹风暴单体中无明显差异。

在不同等级冰雹风暴单体中差异最明显的是  $H_{50\text{ dBz}} - H_{-20^\circ\text{C}}$  在同一等级冰雹中差异较小(表 1)。所有大冰雹风暴单体的  $H_{50\text{ dBz}} - H_{-20^\circ\text{C}} \geq 0$ ,为 0~2.2 km,平均为 1.1 km;中冰雹风暴单体的  $H_{50\text{ dBz}} - H_{-20^\circ\text{C}}$  为 -1.6~5.0 km,平均为 -0.1 km;小冰雹风暴单体的  $H_{50\text{ dBz}} - H_{-20^\circ\text{C}}$  为 -0.9~1.7 km,平均为 -0.6 km;且有 100% 的大冰雹风暴单体的  $H_{50\text{ dBz}} - H_{-20^\circ\text{C}} \geq 0$  km,59% 的中、小冰雹风暴单体中,  $H_{50\text{ dBz}} - H_{-20^\circ\text{C}} < 0$  km;即大多数大冰雹风暴单体的  $H_{50\text{ dBz}} - H_{-20^\circ\text{C}}$  与中、小冰雹风暴单体  $H_{50\text{ dBz}} - H_{-20^\circ\text{C}}$  存在显著差异,可作为识别大冰雹风暴单体和中、小冰雹风暴单体的参考因子。

## 2.3 不同等级冰雹风暴单体 VIL、DVIL、VIL/H 特征对比

统计分析普洱冰雹风暴单体的垂直累积液态水含量(VIL)特征,发现所有冰雹  $VIL \geq 23\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,显著大于普洱短时强降水风暴单体中的 VIL 值(段鹤等,2014a;2014b),可作为冰雹的识别参考因子之一。

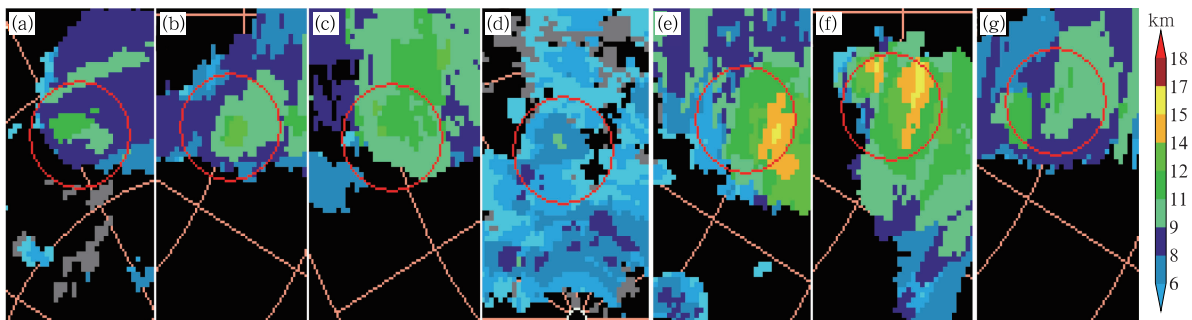


图 2 不同时刻、不同大小冰雹风暴单体的 ET

(a)2014 年 3 月 22 日 16:42 景谷,(b)2014 年 4 月 4 日 17:46 江城,(c)2016 年 4 月 19 日 19:09 澜沧,  
(d)2017 年 2 月 3 日 16:38 宁洱大冰雹;(e)2014 年 5 月 5 日 22:14 江城,  
(f)2016 年 4 月 21 日 17:36 江城中冰雹;(g)2014 年 4 月 4 日 17:20 江城小冰雹  
(圆圈:冰雹风暴单体所在位置)

Fig. 2 ET of hail storm cells with different sizes and at different times

(a, b, c, d) large hail storm cells (a) in Jinggu at 16:42 BT 22 March 2014,  
(b) in Jiangcheng at 17:46 BT 4 April 2014, (c) in Lancang at 19:09 BT 19 April 2016,  
(d) in Ning'er at 16:38 BT 3 February 2017; (e, f) medium hail storm cells in Jiangcheng at (e) 22:14 BT 5 May 2014,  
(f) 17:36 BT 21 April 2016; (g) small hail storm cells in Jiangcheng at 17:20 BT 4 April 2014  
(red circle: hail storm cells)

大冰雹风暴单体的 VIL 为  $28 \sim 45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 平均为  $37 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ; 中冰雹风暴单体的 VIL 为  $23 \sim 48 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 平均为  $33 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ; 小冰雹风暴单体 VIL 为  $28 \sim 40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 平均为  $32 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。分析表明大冰雹风暴单体的 VIL 仅略高于中小冰雹风暴单体, 不能作为冰雹等级的识别因子。

尝试计算 DVIL ( $DVIL = VIL/ET$ ), 用以弥补 VIL 的不足。统计发现, 所有冰雹的  $DVIL \geq 2.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 其中大冰雹风暴单体的 DVIL 为  $3.6 \sim 3.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 平均为  $3.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 中冰雹风暴单体的 DVIL 为  $2.4 \sim 3.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 平均为  $3.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 小冰雹风暴单体 DVIL 为  $3.1 \sim 3.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 平均为  $3.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。分析表明, 大冰雹风暴单体中的 DVIL 高于中小冰雹(中、小冰雹平均不足  $3.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ), DVIL 在普洱雷达中对大冰雹和小冰雹风暴单体有一定的识别作用(段鹤等, 2014a; 2014b)。

考虑风暴单体远离雷达时, 雷达能够探测到的回波底高较实际值偏高, 位于  $0.5^\circ$  仰角探测高度以

下的未能被探测到的回波增多, 会导致风暴单体的 VIL 计算值小于实际值, 相应的也会导致 DVIL 较实际值偏小, 因此引入  $VIL/H$  ( $H = ET - \text{回波底探测高度}$ ), 用以弥补 DVIL 的不足。计算  $VIL/H$  发现(表 1), 大冰雹风暴单体的  $VIL/H$  为  $5.1 \sim 5.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 平均为  $5.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 中冰雹风暴单体的  $VIL/H$  为  $3.5 \sim 5.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 平均为  $4.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 小冰雹风暴单体  $VIL/H$  为  $4.3 \sim 4.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 平均为  $4.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 即所有大冰雹风暴单体中的  $VIL/H$  均大于中、小冰雹,  $VIL/H$  在不同等级冰雹中存在显著差异, 可作为冰雹等级的识别因子。

分析发现, 21 次冰雹风暴单体中有 14 次 (67%) 在降雹前 5~10 min 出现 VIL 跃增现象, 跃增幅度在  $5 \sim 20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 平均为  $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ; 跃增幅度越大, 相应 VIL 越大, 跃增提前时间量也越大(图 3), 在未出现跃增的 7 次过程中, VIL 均不足  $28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

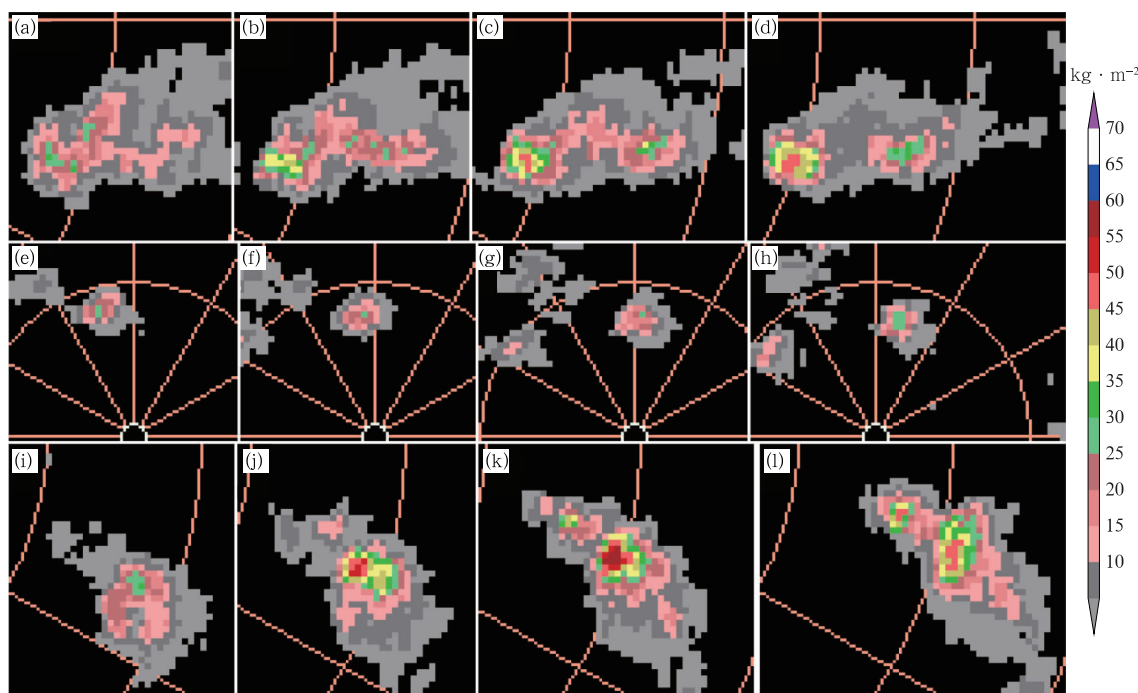


图3 不同时刻降雹前、不同大小冰雹风暴单体的 VIL 变化

(a~d) 2014 年 4 月 4 日 (a) 17:30, (b) 17:35, (c) 17:41, (d) 17:46 江城大冰雹;  
(e~h) 2017 年 2 月 3 日 (e) 16:22, (f) 16:27, (g) 16:32, (h) 16:38 宁洱大冰雹;  
(i~l) 2016 年 4 月 21 日 (i) 17:18, (j) 17:23, (k) 17:29, (l) 17:36 江城中冰雹

Fig. 3 VIL changes of hail storm cells with different sizes before hailstorm at different times

(a~d) large hail cells storm in Jiangcheng at (a) 17:30 BT, (b) 17:35 BT, (c) 17:41 BT, (d) 17:46 BT 4 April 2014;  
(e~h) large hail cells storm in Ninger at (e) 16:22 BT, (f) 16:27 BT, (g) 16:32 BT, (h) 16:38 BT 3 February 2017;  
(i~l) medium hail storm cells in Jiangcheng at (i) 17:18 BT, (j) 17:23 BT, (k) 17:29 BT, (l) 17:36 BT 21 April 2016



统计发现,不同等级冰雹的跃增量不存在显著差异(表略),且不同等级冰雹中均出现部分冰雹跃增、部分冰雹无明显跃增现象。例如图 3 中,2014 年 4 月 4 日江城大冰雹降雹前 VIL 出现了  $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  的跃增(图 3a,3b),跃增提前于降雹 10 min 左右(图 3a~3d),而 2017 年 2 月 3 日宁洱大冰雹天气过程中 VIL 无跃增现象(图 3e~3h),降雹前 4 个体扫时段内 VIL 均为  $28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ;2016 年 4 月 21 日江城中冰雹风暴中,降雹前出现了  $20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  的跃增(图 3i,3j),跃增提前于降雹 10 min 左右(图 3i~3l),而在 2013 年 3 月 8 日澜沧、2015 年 4 月 21 日景谷、2017 年 2 月 2 日江城的中冰雹过程中均未出现跃增现象(图略),降雹前 4 个体扫时段内 VIL 分别为 28、23、28  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ;小冰雹过程中,2014 年 4 月 4 日江城降雹前 10 min 出现了  $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  的跃增,而 2017 年 2 月 2 日景谷的冰雹过程中无明显跃增现象。表明 VIL 越增特征和跃增量不能作为不同等级冰雹的识别因子。

## 2.4 不同等级冰雹风暴单体的径向速度特征对比

分析冰雹风暴单体的径向速度发现,冰雹风暴单体均存在明显的辐合特征,表现形式包括:中气旋(图 4a,4b)、中尺度辐合区(图 4c,4d)、逆风区(图 4e,4f)、风速风向辐合(图 4g,4h)等(表 2)。

4 次大冰雹风暴单体中,共出现 3 次(占 75%)中气旋特征:1)核心区直径不足 10 km;2)旋转速度为  $12 \sim 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;3)垂直伸展高度超过风暴垂直厚度的  $1/3$ ;4)满足上述 3 类指标的持续时间为 3~4 个体扫时间,还有一次大冰雹风暴单体中出现了风速风向辐合特征,大冰雹风暴单体旋转速度为  $8.5 \sim 22.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,平均为  $13.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;17 次中、小冰雹风暴单体中,共出现中气旋 3 次(占 17.6%)、中尺度辐合带 3 次、逆风区 3 次、风向风速辐合 8 次,中、小冰雹风暴单体的旋转速度为  $3.0 \sim 18.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,平均为  $7.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。分析表明,大冰雹风暴单体往往具有中气旋特征,普洱大冰雹风暴单体的旋转速

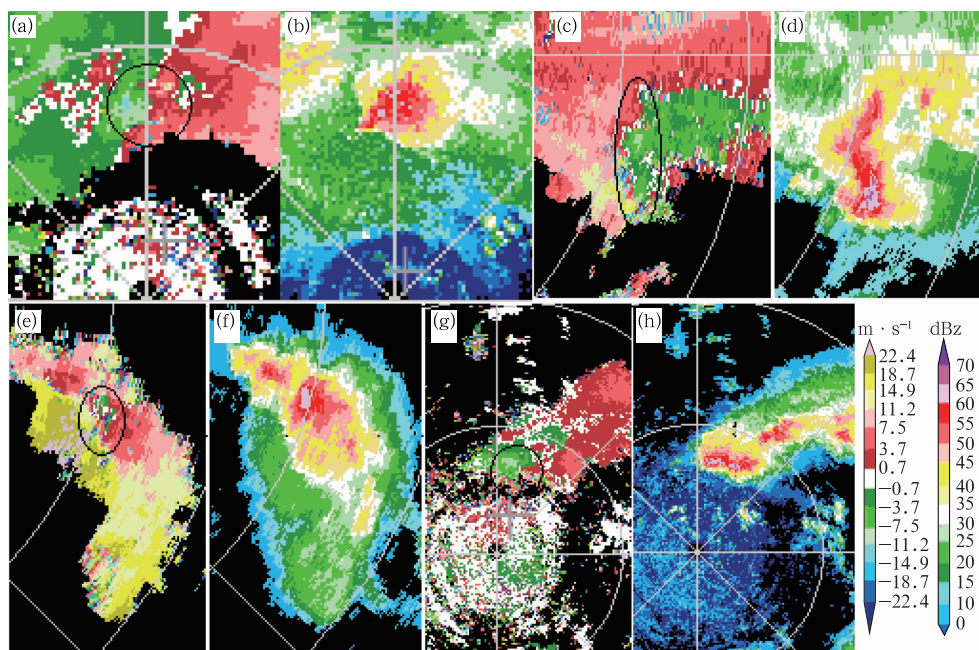


图 4 不同等级冰雹典型个例的(a,c,e,g)0.5°仰角径向速度和(b,d,f,h)CR  
(a,b)2017 年 2 月 3 日 16:38 宁洱大冰雹(黑圈:中气旋);(c,d)2014 年 5 月 5 日 22:14  
江城中冰雹(黑圈:中尺度辐合带);(e,f)2016 年 4 月 21 日 17:36 江城中冰雹  
(黑圈:逆风区);(g,h)2018 年 3 月 11 日 17:35 宁洱小冰雹(黑圈:中尺度辐合带)

Fig. 4 (a, c, e, g) Radial velocity and (b, d, f, h) CR at 0.5° elevation of typical hail cases of different grades  
(a, b) large hail storm cells in Ninger at 16:38 BT 3 February 2017 (black circle: mesocyclone);  
(c, d) medium hail storm cells in Jiangcheng at 22:14 BT 5 May 2014 (black circle: mesoscale convergence zone);  
(e, f) medium hail storm cells in Jiangcheng at 17:36 BT 21 April 2016 (black circle: upwind area);  
(g, h) small hail storm cells in Ninger at 17:35 BT 11 March 2018 (black circle: mesoscale convergence zone)

表 2 普洱市冰雹天气个例的环境场垂直风切变、冰雹直径及其径向速度和回波形态

Table 2 Vertical wind shear of ambient field, hail diameter, radial velocity and echo pattern of hail weather processes in Pu'er

日期/(年.月.日)	地点时间 BT	直径/mm	径向速度特征	是否有悬垂结构	旋转速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	持续时间/min
2013.2.2	江城 19:02	6	中尺度辐合	无	10.0	10
2013.3.8	澜沧 20:07	5	辐合	无	6.0	多次合并
2013.4.28	江城 15:01	11	逆风区	无	5.0	30
2014.3.22	景谷 16:42	20	辐合	有	8.5	66
2014.4.4	江城 17:20	4	中气旋	无	18.5	多次合并
2014.4.4	江城 17:46	35	中气旋	有	12.2	58
2014.5.5	江城 22:14	11	中尺度辐合	有	9.5	65
2015.3.23	江城 17:24	11	逆风区	无	3.2	10
2015.4.21	景谷 15:35	5	中尺度辐合	无	6.0	5
2016.4.17	江城 18:45	6	辐合	无	4.0	50
2016.4.19	澜沧 19:09	23	中气旋	有	22.0	>40
2016.4.21	江城 17:36	14	逆风区	无	10.0	50
2017.2.2	景谷 17:15	3	辐合	无	5.5	20
2017.2.2	江城 22:51	19	中气旋	有	13.0	60
2017.2.3	宁洱 16:38	30	中气旋	有	12.0	36
2018.3.11	宁洱 17:35	4	辐合	无	5.3	53
2018.3.17	江城 17:59	5	辐合	无	5.0	26
2018.3.17	江城 19:59	2	辐合	无	3.0	20
2018.3.23	宁洱 19:29	10	辐合	有	5.0	48
2018.4.2	江城 18:40	7	中气旋	无	12.0	61
2018.4.17	墨江 16:33	12	辐合	无	3.0	26

度与中、小冰雹风暴单体存在一定差异,大冰雹风暴单体的旋转速度往往大于中、小冰雹风暴单体。

分析冰雹风暴单体的旋转速度和回波形态发现,大冰雹风暴单体 100%出现了明显的悬垂结构,而中、小冰雹风暴单体中仅有 17.6%出现悬垂结构。存在悬垂结构的 7 次风暴单体的平均旋转速度为  $11.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,无悬垂结构的 14 次风暴单体的旋转速度为  $6.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,表明是否出现悬垂结构对冰雹等级的识别有一定参考价值。

3 不同等级冰雹风暴单体成熟阶段的持续时间

将冰雹风暴单体中满足滇南冰雹识别指标的时段视为冰雹风暴单体的成熟阶段(段鹤等,2014a;2014b)。统计 19 次冰雹风暴单体(另外 2 次冰雹风暴单体为多次、多块回波合并降雹,不做统计)情况,发现大冰雹风暴单体成熟阶段的持续时间为 36~66 min,平均为 50 min;中冰雹风暴单体的持续为 5~65 min,平均为 36.8 min;小冰雹风暴单体的持续时间平均为 31 min。分析表明普洱市大冰雹风暴单体的成熟阶段持续时间显著长于中、小冰雹风暴单体的持续时间(平均为 35.6 min)。

4 不同等级冰雹风暴单体中 TBSS、V 形缺口等特征对比

分析发现,21 次冰雹风暴单体中,共出现三体散射回波(TBSS)4 次,其中 2 次出现在大冰雹风暴单体中,分别出现在 2014 年 3 月 22 日 16:42 景谷(图略)和 2014 年 4 月 4 日 17:46 江城(图 5b),1 次出现在 2017 年 2 月 2 日 22:51 江城的中冰雹风暴单体中(图 5c),1 次出现在 2014 年 4 月 4 日 17:20 江城的小冰雹风暴单体中(图 5a)。说明不同等级冰雹风暴单体中均可出现 TBSS 特征,TBSS 不能作为不同等级冰雹的单一识别因子,该结论与郭艳(2010)、王晓君等(2014)的研究结论一致,郭艳(2010)对大冰雹指标 TBSS 进行了研究,指出 C 波段(波长 5 cm)雷达更容易探测到 TBSS 特征,但它可能是由大雨滴而不仅仅是冰雹造成,而对于 S 波段(波长 10 cm)的多普勒天气雷达,TBSS 往往与大冰雹相关。王晓君等(2014)对 2004—2013 年普洱 C 波段天气雷达中带有 TBSS 特征的 27 个风暴单体进行了研究,发现其中有 11 个带有 TBSS 特征的风暴单体不满足滇南冰雹识别指标(段鹤等,2014a;2014b),具有 45 dBz 回波伸展高度不足 7 km、垂直



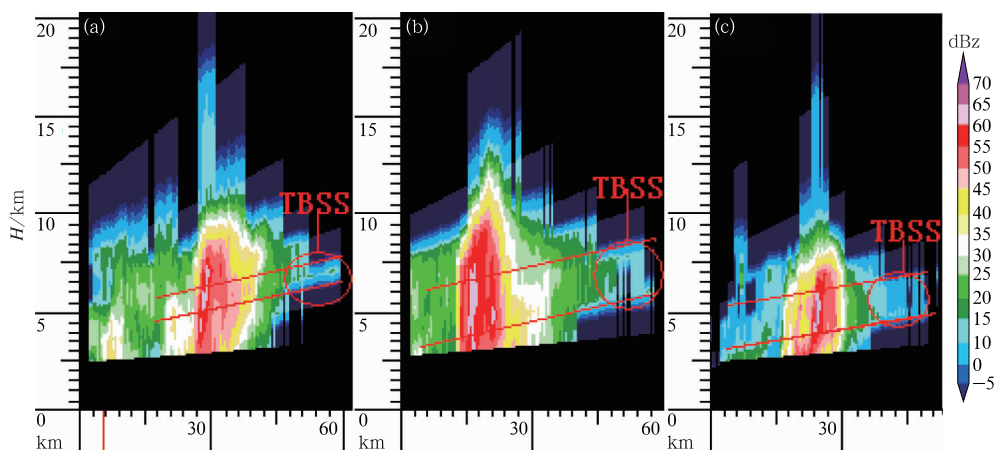


图 5 不同时刻、不同大小的江城冰雹风暴单体中的 TBSS

(a)2014 年 4 月 4 日 17:20 小冰雹风暴单体, (b)2014 年 4 月 4 日 17:46 大冰雹风暴单体,  
(c)2017 年 2 月 2 日 22:51 中冰雹风暴单体

Fig. 5 TBSS in a hail storm cells with different sizes and at different times in Jiangcheng

(a) small hail storm cells at 17:20 BT 4 April 2014, (b) large hail storm cells at 17:46 BT 4 April 2014,  
(c) medium hail storm cells at 22:51 BT 2 February 2017

液态水含量密度不足  $3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、回波宽度不足 12 km 等特征,风暴单体影响区域也未收到冰雹记录或灾情。此外还发现,普洱 C 波段天气雷达中出现 TBSS 时,59% 的回波出现了降雹,11% 的回波出现了大冰雹。冯晋勤等(2018)也收集到出现 TBSS 但无大冰雹对应出现的个例。

分析发现,21 次冰雹风暴单体中,共出现 V 形缺口 3 次,分别出现在 2016 年 4 月 21 日 17:36 江城中冰雹风暴单体、2017 年 2 月 3 日 16:38 宁洱的大冰雹风暴单体、2018 年 3 月 23 日 19:29 宁洱的中冰雹风暴单体中(图略),表明 V 形缺口不能作为不同等级冰雹的识别因子。

## 5 结 论

通过 2013—2020 年普洱不同等级冰雹风暴单体的对比分析,得到以下结论:

(1)冰雹风暴单体共有的特征是:高顶高底结构、风暴的高质心伸展高度均达 5 km 以上、回波梯度较大、 $CR \geq 55 \text{ dBz}$ 、 $VIL \geq 23 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $H_{45 \text{ dBz}} \geq 7.5 \text{ km}$ 、 $H_{45 \text{ dBz}} - H_0 \geq 2.8 \text{ km}$  等特征。

(2)67% 的冰雹风暴单体出现 VIL 跃增现象,跃增提前于降雹 5~10 min;跃增幅度越大,相应 VIL 越大,无跃增特征的冰雹风暴单体的 VIL 较小。VIL 越增特征和跃增量在不同等级冰雹中无显

著差异。所有大冰雹风暴单体的  $VIL/H$  显著大于中、小冰雹风暴单体的  $VIL/H$ ;大多数大冰雹风暴单体的  $H_{50 \text{ dBz}} - H_{-20^\circ\text{C}}$  显著大于中、小冰雹风暴单体的  $H_{50 \text{ dBz}} - H_{-20^\circ\text{C}}$ ,  $VIL/H$ 、 $H_{50 \text{ dBz}} - H_{-20^\circ\text{C}}$  可作为识别大冰雹和中、小冰雹风暴单体的参考因子。

(3)冰雹风暴单体均存在明显的辐合特征,大冰雹风暴单体往往具有中气旋特征。大冰雹风暴单体中的回波悬垂结构往往多于中、小冰雹风暴单体;大冰雹风暴单体中 DVIL 和旋转速度往往大于中、小冰雹风暴单体。

(4)大冰雹风暴单体的成熟阶段持续时间往往显著长于中、小冰雹风暴单体的持续时间。

(5)ET 不能作为识别冰雹的因子,也不能作为识别不同等级冰雹的因子。不同等级冰雹风暴单体中均会出现 TBSS 特征, TBSS 和 V 形缺口不能作为不同等级冰雹风暴单体的单一识别因子。

## 参考文献

- 段鹤,夏文梅,苏晓力,等,2014a. 短时强降水特征统计及临近预警[J]. 气象,40(10):1194-1206. Duan H, Xia W M, Su X L, et al, 2014a. Features statistics and warning of flash heavy rains[J]. Meteor Mon, 40(10): 1194-1206 (in Chinese).
- 段鹤,严华生,马学文,等,2014b. 滇南冰雹的预报预警方法研究[J]. 气象,40(2):174-185. Duan H, Yan H S, Ma X W, et al, 2014b. Study of the method for hail forecasting and warning in Southern Yunnan[J]. Meteor Mon, 40(2): 174-185 (in Chinese).
- 冯晋勤,张深寿,吴陈锋,等,2018. 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, 44(12):1565-1574. Feng J Q, Zhang S S, Wu C F, et al, 2018. Application of dual polarization weather radar products to severe convective weather in Fujian [J]. Meteor Mon, 44(12):1565-1574(in Chinese).
- 郭艳, 2010. 大冰雹指标 TBSS 在江西的应用研究[J]. 气象, 36(8): 40-46. Guo Y, 2010. TBSS as large-hail indicator in Jiangxi Province[J]. Meteor Mon, 36(8):40-46(in Chinese).
- 何炳伟, 胡振菊, 高伟, 等, 2018. 常德多普勒天气雷达强雹暴三体散射统计分析[J]. 气象, 44(3):455-462. He B W, Hu Z J, Gao W, et al, 2018. Statistical analysis about severe hailstorm TBSS in Changde Doppler Weather Radar[J]. Meteor Mon, 44(3):455-462(in Chinese).
- 李湘, 张腾飞, 胡娟, 等, 2015. 云南冰雹灾害的多普勒雷达特征统计及预警指标[J]. 灾害学, 30(3):88-93, 98. Li X, Zhang T F, Hu J, et al, 2015. Doppler radar statistical characteristics and early warning index of Yunnan hail disaster[J]. J Catastrophol, 30(3):88-93, 98(in Chinese).
- 林文, 张深寿, 罗昌荣, 等, 2020. 不同强度强对流云系 S 波段双偏振雷达观测分析[J]. 气象, 46(1):63-72. Lin W, Zhang S S, Luo C R, et al, 2020. Observational analysis of different intensity severe convective clouds by S-band dual-polarization radar[J]. Meteor Mon, 46(1):63-72(in Chinese).
- 刘兵, 戴泽军, 胡振菊, 等, 2009. 张家界多个例降雹过程对比分析[J]. 气象, 35(7):23-32. Liu B, Dai Z J, Hu Z J, et al, 2009. Comparative analysis of several hailing cases in Zhangjiajie[J]. Meteor Mon, 35(7):23-32(in Chinese).
- 潘佳文, 魏鸣, 郭丽君, 等, 2020. 闽南地区大冰雹超级单体演变的双偏振特征分析[J]. 气象, 46(12):1608-1620. Pan J W, Wei M, Guo L J, et al, 2020. Dual-polarization radar characteristic analysis of the evolution of heavy hail supercell in Southern Fujian [J]. Meteor Mon, 46(12):1608-1620(in Chinese).
- 陶诗言, 1980. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社: 225. Tao S Y, 1980. Heavy Rain in China[M]. Beijing: Science Press: 225(in Chinese).
- 王建恒, 陈瑞敏, 胡志群, 等, 2020. 一次强雹云结构的双多普勒雷达观测分析[J]. 气象学报, 78(5):796-804. Wang J H, Chen R M, Hu Z Q, et al, 2020. Dual Doppler radar observations and analysis of the structure of a severe hailstorm[J]. Acta Meteor Sin, 78(5):796-804(in Chinese).
- 王莎, 沙勇, 宋金妹, 等, 2019. 冀东地区冰雹云多普勒雷达参数特征分析[J]. 气象, 45(5):713-722. Wang S, Sha Y, Song J M, et al, 2019. Characteristic analysis of hail cloud Doppler radar parameters in the eastern Hebei Province[J]. Meteor Mon, 45(5):713-722(in Chinese).
- 王晓君, 夏文梅, 段鹤, 等, 2014. 三体散射长钉(TBSS)在 C 波段雷达中的应用研究[J]. 气象, 40(11):1380-1388. Wang X J, Xia W M, Duan H, et al, 2014. The application research of three-body scatter spike (TBSS) in C-band weather radar[J]. Meteor Mon, 40(11):1380-1388(in Chinese).
- 杨吉, 郑媛媛, 徐芬, 2020. 江淮地区一次冰雹过程的双线偏振雷达观测分析[J]. 气象学报, 78(4):568-579. Yang J, Zheng Y Y, Xu F, 2020. An analysis of a hail case over the Yangtze and Huai River Basin based on dual-polarization radar observations[J]. Acta Meteor Sin, 78(4):568-579(in Chinese).
- 叶爱芬, 伍志方, 程元慧, 等, 2006. 一次春季强冰雹天气过程分析[J]. 气象科技, 34(5):583-586. Ye A F, Wu Z F, Cheng Y H, et al, 2006. Analysis of a severe hail event occurred in Guangdong in spring[J]. Meteor Sci Technol, 34(5):583-586(in Chinese).
- 尹丽云, 梅寒, 张腾飞, 等, 2021. 云南中部一次出现多个超级单体雹暴的强对流过程环境场和雷达回波特征[J]. 气象, 47(4):424-438. Yin L Y, Mei H, Zhang T F, et al, 2021. Environmental conditions and radar characteristics of a severe convective hailstorm with multiple supercells in central Yunnan Province[J]. Meteor Mon, 47(4):424-438(in Chinese).
- 应冬梅, 许爱华, 黄祖辉, 2007. 江西冰雹、大风与短时强降水的多普勒雷达产品的对比分析[J]. 气象, 33(3):48-53. Ying D M, Xu A H, Huang Z H, 2007. A comparative analysis of Doppler radar products in hail, gale and short-time heavy rainfall in Jiangxi [J]. Meteor Mon, 33(3):48-53(in Chinese).
- 俞小鼎, 2014. 关于冰雹的融化层高度[J]. 气象, 40(6):649-654. Yu X D, 2014. A note on the melting level of hail[J]. Meteor Mon, 40(6):649-654(in Chinese).
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等, 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. Principle and Operational Application of Doppler Weather Radar[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 张腾飞, 段旭, 鲁亚斌, 等, 2006. 云南一次强对流冰雹过程的环流及雷达回波特征分析[J]. 高原气象, 25(3):531-538. Zhang T F, Duan X, Lu Y B, et al, 2006. Circulation background for a severe convective hailstorm weather process in Yunnan and its Doppler radar echo features[J]. Plateau Meteor, 25(3):531-538(in Chinese).
- 张文海, 李磊, 2019. 人工智能在冰雹识别及临近预报中的初步应用[J]. 气象学报, 77(2):282-291. Zhang W H, Li L, 2019. A preliminary application of artificial intelligence on the detection and nowcasting of hail weather[J]. Acta Meteor Sin, 77(2):282-291(in Chinese).
- 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎, 2017. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象, 43(6):641-652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D, 2017. Some essential issues of severe convective weather forecasting[J]. Meteor Mon, 43(6):641-652(in Chinese).
- 周泓, 段玮, 赵爽, 等, 2014. 滇中地区冰雹的多普勒天气雷达及闪电活动特征分析[J]. 气象, 40(9):1132-1144. Zhou H, Duan W, Zhao S, et al, 2014. Characteristics analysis of Doppler radar echoes and lightning of hailstorms in central Yunnan Province [J]. Meteor Mon, 40(9):1132-1144(in Chinese).

(本文责编:俞卫平)