

普洱市不同等级冰雹天气的雷达回波特征对比分析*

王晓君¹ 郑媛媛^{2,3,4}

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

摘要: 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 $\geq 20\text{mm}$ 的风暴单体定义为大冰雹风暴单体, 直径 $\geq 5\text{mm}$ 但 $< 20\text{mm}$ 的风暴单体定义为中冰雹风暴单体, 直径 $< 5\text{mm}$ 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: (1) 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 $\geq 5\text{km}$ 、回波梯度较大、 $\text{CR} \geq 55\text{dBz}$ 、 $\text{VIL} \geq 23\text{kg/m}^2$ 、 $\text{H}_{45\text{dBz}} \geq 7\text{km}$ 、 $\text{H}_{45\text{dBz}} - \text{H}_{0} \geq 2.8\text{km}$ 。(2) 67%的冰雹风暴单体在降雹前5~10min出现VIL跃增现象, 跃增幅度越大, 相应VIL越大。(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。(4) 大冰雹风暴单体的 VIL/H 、 $\text{H}_{50\text{dBz}} - \text{H}_{-20}$ 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。(5) 大冰雹风暴单体的回波悬垂结构、 DVIL 和旋转速度往往多(大)于中、小冰雹风暴单体的相同指标。(6) ET 、 VIL 跃增特征、 TBSS 和 IV 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

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

WANG Xiaojun¹ ZHENG Yuanyuan^{2,3,4}

1 Pu'er Meteorological Bureau 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 to 2020. Furthermore, Storm cells with hail diameter $\geq 20\text{mm}$ were defined as large hail storm cells, storm cells with hail diameter $\geq 5\text{mm}$ and less than 20mm were defined as medium hail storm cells, storm cells with hail diameter $< 5\text{mm}$ were defined as small hail storm cells (GB/T27957-2011). The results show that the forecast indexes as, (1) It is concluded that the hail storm monomer shared characteristics. High top and high bottom structure of the radar echo, it is height above 5 km and large echo gradient and $\text{CR} \geq 55\text{ dBz}$ 、 $\text{VIL} \geq 23\text{ kg/m}^2$ 、 $\text{H}_{45\text{dBz}} \geq 7.5\text{ km}$ 、 $\text{H}_{45\text{dBz}} - \text{H}_0 \geq 2.8\text{ km}$ 。(2) VIL jumped phenomenon in a 67% hail storm cells, and jumped phenomenon to the occurrence of hail early time $5 \sim 10\text{ min}$. The magnitude of the jump, the greater the corresponding VIL is larger。(3) The hail storm cells are obvious convergence characteristics and large hailstorm cells often have mesocyclone characteristics。(4) All the large hail storm cells VIL/H significantly greater than that of medium and small hail storm cells VIL/H . Most large hail storm cells $\text{H}_{50\text{dBz}} - \text{H}_{-20}$ significantly greater than medium and small hail

*基金项目: 国家重点研发计划“重大自然灾害”专项(2018YFC1507503)、国家自然科学基金(41075072)共同资助

第一作者: 王晓君, 主要从事人工影响天气研究。Email: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。Email:zhengyy63@sina.com

1 storm cells. Mature stage of large hail storm cells duration is often significantly longer duration of medium
2 and small hail storm cells. (5) The echo overhang structure of large hail storm cells is often more than the
3 medium and small hail storm cells, and DVIL and the rotation speed is often greater than medium and small
4 hail storm monomer. (6) ET, VIL jump characteristics, TBSS and V-notch can not be used as indicators to
5 identify different grades of hail.

6 **Keywords:** Hail grades; Forecast; Echo characteristic; Radial velocity; Vertical profile

8 引言

9 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
10 值农副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
11 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
12 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
13 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
14 加，冰雹天气的预报预警研究具有重要实际意义。

15 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
16 指示意义，目前已广泛应用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
17 多普勒天气雷达中冰雹天气回波特征进行了分析，叶爱芬等人（2006）对一次冰雹天气过程
18 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
19 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
20 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，还有的气象工作
21 者统计得出了强对流天气的雷达回波的共性（俞小鼎等，2006；应冬梅等，2007）：如冰雹
22 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
23 口等特征。双偏振雷达投入应用后，潘佳文（2020）、林文（2020）等人对 S 波段双偏振雷
24 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
25 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
26 三维风速（流场），并结合回波特征分析了雹云云体结构。张文海还利用广东 10 部 S 波段多普
27 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
28 别能力。云南省的张腾飞（2006）、段鹤（2014a, b）、周泓（2014）、李湘（2015）、尹
29 丽云（2021）等人也利用 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
30 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
31 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
32 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℃层才是冰雹融化层的近似高
33 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
34 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
35 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
36 比分析不同等级冰雹的雷达回波异同。

37 1 资料

38 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
39 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
40 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
41 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
42 气象观测站，位置为 100° 59′ 28″ E，22° 48′ 58″ N），雷达资料选取普洱天气雷达同期
43 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、
44 垂直剖面等产品。

1 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
 2 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
 3 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
 4 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
 5 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
 6 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
 7 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
 8 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)。
 9 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
 10 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
 11 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
 12 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
 13 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
 14 作中不断收集完整的冰雹过程资料,以对文中结论进行进一步验证或补充完善。

15 2 不同等级冰雹风暴单体雷达回波特征对比分析

16 将冰雹直径 $\geq 20\text{mm}$ 的风暴单体定义为大冰雹风暴单体,直径 $\geq 5\text{mm}$ 但 $< 20\text{mm}$ 的风暴单
 17 体定义为中冰雹风暴单体,直径 $< 5\text{mm}$ 的风暴单体定义为小冰雹风暴单体
 18 (GB/T27957-2011)。

19 对比大、中、小冰雹风暴单体的组合反射率(CR)、45dBz和50dBz顶高高度($H_{45\text{dBz}}$ 、 $H_{50\text{dBz}}$)
 20 及其与特殊层(0°C 、 -10°C 、 -20°C)高度的高差、回波顶高(ET)、VIL、DVIL(VIL密度= VIL/ET)、
 21 VIL/H ($H=\text{ET}$ -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
 22 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。

23 2.1 不同等级冰雹风暴单体的反射率特征对比

24 统计发现,所有冰雹的CR均 $\geq 55\text{dBZ}$ (表1),其中大冰雹风暴单体的CR为57~64dBZ,
 25 平均为61dBZ,中冰雹风暴单体的CR为55~67dBZ,平均为60dBZ,小冰雹风暴单体CR为56~
 26 64dBZ,平均为60dBZ,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
 27 识别指标而不能作为冰雹等级的识别因子。

28 表1 普洱市冰雹天气个例发生地点、时间、冰雹直径及其反射率等特征

29 Table 1 Occurrence location, time, diameter, reflectance and other characteristics of hail weather
 30 processes in Pu'er

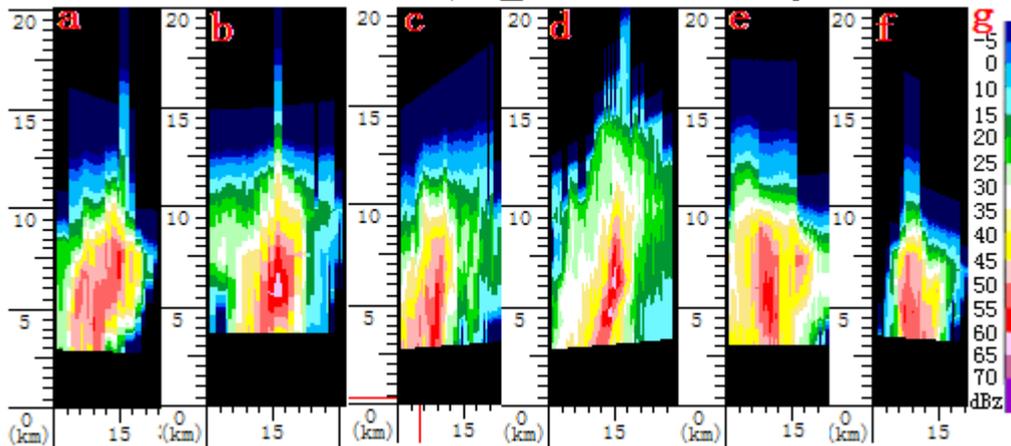
日期	地点 时间	直径 /mm	CR /dBz	$H_{45\text{dBz}}$ /km	$H_{50\text{dBz}}-H_{-20}$ /km	ET /km	VIL /(kg/m^2)	DVIL /(g/m^3)	VIL/H /(g/m^3)
2013.2.2	江城19:02	6	61	7.5	-0.4	9.7	28	2.9	4.5
2013.3.8	澜沧20:07	5	56	9.8	0.5	11.7	28	2.4	3.5
2013.4.28	江城15:01	11	59	7.6	-1.4	11.8	33	2.8	3.9
2014.3.22	景谷16:42	20	57	8.5	1.5	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	-0.3	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	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	0.9	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

1 注：CR为单体的组合反射率； H_{45dBz} 、 H_{50dBz} 分别为45dBz和50dBz顶高高度； H_{20} 为-20℃层高度；ET为风暴单体成熟阶段回波顶高；
2 VIL为垂直累积液态水含量；VIL密度DVIL=VIL/ET；H=ET-回波底高。

3 以图1中6次冰雹风暴单体为例，分析45dBz为基础值的冰雹风暴单体的梯度，大冰雹风
4 暴单体的梯度为12dBz/km、18dBz/km；中冰雹风暴单体为14dBz/km、22dBz/km；小冰雹风
5 暴单体的梯度为14dBz/km，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
6 异显著（段鹤等，2014），但不同等级冰雹中差异不明显。

7 针对冰雹风暴单体做基本反射率垂直剖面（RHI）计算 H_{45dBz} （表1、图1）。可见所有冰
8 雹个例的 $H_{45dBz} \geq 7\text{km}$ ，其中大冰雹风暴单体的 H_{45dBz} 为7.5~9.7km，平均为8.8km，中冰雹风
9 暴单体的 H_{45dBz} 为7.5~13.0km，平均为8.8km，小冰雹风暴单体 H_{45dBz} 为7.5~9.7dBZ，平均为
10 8.1km；表明普洱大、中等级冰雹风暴单体的 H_{45dBz} 无显著差异，小冰雹冰雹风暴单体的 H_{45dBz}
11 略小于大、中冰雹， H_{45dBz} 仅能作为冰雹的识别指标（段鹤等，2014）而不能作为冰雹等级的识
12 别因子。

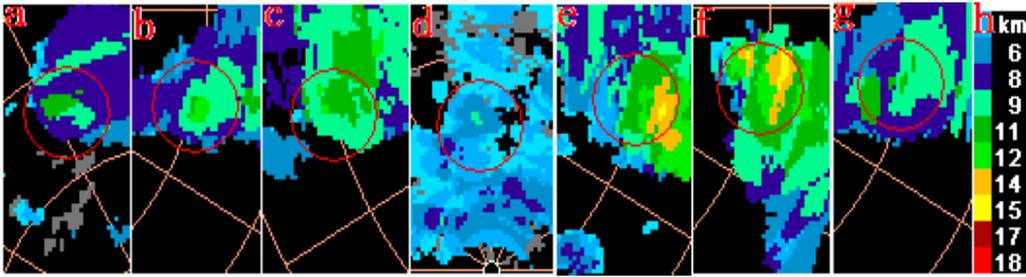


13 图1 冰雹风暴单体的基本反射率垂直剖面(RHI)
14 2014年3月22日16:42景谷(a)、2016年4月19日19:09澜沧(b)大冰雹风暴单体的RHI；2013年4月28日15:01
15 江城(c)、2014年5月5日22:14江城(d)中冰雹风暴单体的RHI；2014年4月4日17:20江城(e)、2017年2月2
16 日17:15景谷(f)小冰雹风暴单体的RHI；g为色标
17

18 Fig.1 Basic reflectance vertical profile (RHI) of hail storm cells. RHI of large hail storm cells
19 (a)16:42 on March 22, 2014 in Jinggu, (b) 19:09 on April 19, 2016 in Lancang; RHI of medium hail
20 storm cells (c) 15:01 on April 28, 2013 in Jiangcheng, (d) 22:14 on May 5, 2014 in Jiangcheng;
21 RHI of small hail storm cells (e) 17:20 on April 4, 2014 in Jiangcheng, (f) 17:15 on February
22 2, 2017 in Jinggu. (g) legend

23 计算冰雹风暴单体的 H_{50dBz} （表略），发现 H_{50dBz} 在相同等级冰雹风暴单体中存在一定差异，
24 而在不同等级冰雹风暴单体中差异不明显。例如图1中，大冰雹风暴单体 H_{50dBz} 均为8.5km；中
25 冰雹风暴单体 H_{50dBz} 为7.4km和8.5km，平均为8km；小冰雹风暴单体的 H_{50dBz} 为9.0km和7.5km，

1 平均为8.3km, 表明 H_{50dBz} 不能作为冰雹等级的识别因子。



2 图2 冰雹风暴单体的ET(圆圈内为冰雹风暴单体所在位置)

3 2014年3月22日16:42景谷(a)、2014年4月4日17:46江城(b)、2016年4月19日19:09澜沧(c)、2017年2
4 月3日16:38宁洱(d)大冰雹风暴单体的ET; 2014年5月5日22:14江城(e)、2016年4月21日17:36江城(f)中
5 冰雹风暴单体ET; 2014年4月4日17:20江城小冰雹风暴单体的ET(g); h为色标

6 Fig.2 ET of hail storm cells(The hail storm cells is in the red circle).ET of large hail storm
7 cells (a) 16:42 on March 22, 2014 in Jinggu, (b) 17:46 on April 4, 2014 in Jiangcheng, (c) 19:09
8 on April 19, 2016 in Lancang, (d) 16:38 on February 3, 2017 in Ninger;ET of medium hail storm
9 cells (e) 22:14 on May 5, 2014 in Jiangcheng, (f) 17:36 on April 21, 2016 in Jiangcheng; ET of
10 small hail storm cells (g) 17:20 on April 4, 2014 in Jiangcheng, (h) legend

12 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 $ET \geq 7.8\text{km}$,
13 大冰雹风暴单体中的ET为7.8~11.8km,平均为9.9km;中冰雹风暴单体的ET为8.8~15.5km,
14 平均为11.1km;小冰雹风暴单体的ET为8.5~11.8km,平均为9.7km。不同等级冰雹中,中冰
15 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最大的三次冰雹风暴单体
16 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
17 (图略)江城的中冰雹风暴单体中,分别达12.6km、15.5km、14.0km(表1),远大于大冰
18 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
19 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
20 雹风暴单体东南侧(图2e),即江城城区东南部ET达14km以上,但地面未出现降雹。统计2016
21 年普洱市小时雨量 $\geq 50\text{mm}$ 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
22 降水的 $ET \geq 7.8\text{km}$,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
23 同等级冰雹的因子。

24 2.2 不同等级冰雹风暴单体 H_{45dBz} 、 H_{50dBz} 与 0°C 、 -10°C 、 -20°C 层高度的高差对比分析

25 计算冰雹风暴单体的 $H_{45dBz}-H_0$ 、 $H_{45dBz}-H_{-10}$ 、 $H_{45dBz}-H_{-20}$ 、 $H_{50dBz}-H_0$ 、 $H_{50dBz}-H_{-10}$ 、 $H_{50dBz}-H_{-20}$ 发现所
26 有冰雹风暴单体中, $H_{45dBz}-H_0$ 均 $\geq 2.8\text{km}$,为2.8~8.3km,平均为4.4km,该特征可有效识别
27 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
28 (段鹤等,2014);但 $H_{45dBz}-H_0$ 在不同等级冰雹风暴单体中无明显差异。

29 在同一等级冰雹中差异较小,且在不同尺度冰雹风暴单体中差异明显的仅有 $H_{50dBz}-H_{-20}$
30 (表1)。所有大冰雹风暴单体的 $H_{50dBz}-H_{-20}$ 均大于等于0,为0~2.2km,平均为1.1km;中冰
31 雹风暴单体的 $H_{50dBz}-H_{-20}$ 为-1.6~5.0km,平均为-0.1km;小冰雹风暴单体的 $H_{50dBz}-H_{-20}$ 为-0.9~
32 1.7km,平均为-0.6km;且有100%的大冰雹风暴单体的 $H_{50dBz}-H_{-20} \geq 0\text{km}$,59%的中、小冰雹风
33 暴单体中, $H_{50dBz}-H_{-20} < 0\text{km}$;即大多数大冰雹风暴单体的 $H_{50dBz}-H_{-20}$ 与中、小冰雹风暴单体
34 $H_{50dBz}-H_{-20}$ 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。

35 2.3 不同等级冰雹风暴单体VIL、DVIL、VIL/H特征对比

36 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
37 $VIL \geq 23\text{kg/m}^2$,显著大于普洱短时强降水风暴单体中的VIL值(段鹤等,2014),可作为冰雹的
38 识别参考因子之一。

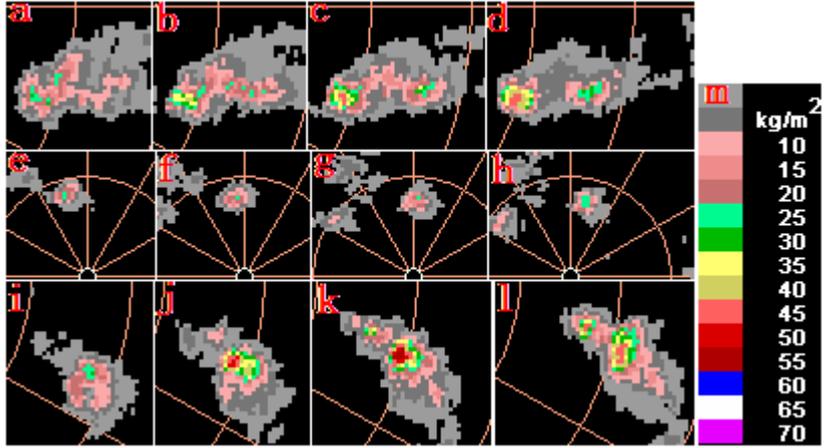
39 大冰雹风暴单体的VIL为28~45 kg/m^2 ,平均为37 kg/m^2 ,中冰雹风暴单体的VIL为23~

1 48kg/m², 平均为33kg/m², 小冰雹风暴单体VIL为28~40kg/m², 平均为32kg/m², 表明大冰雹
2 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。

3 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
4 DVIL≥2.4g/m³, 其中大冰雹风暴单体的DVIL为3.6~3.8g/m³, 平均为3.8g/m³, 中冰雹风暴
5 单体的DVIL为2.4~3.3g/m³, 平均为3.0g/m³, 小冰雹风暴单体DVIL为3.1~3.4g/m³, 平均为
6 3.3g/m³。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3.1g/m³),
7 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, 2014)。

8 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° 仰角
9 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
10 的也会导致DVIL较实际值偏小, 因此引入VIL/H (H=ET-回波底探测高度), 用以弥补DVIL的
11 不足。计算VIL/H发现(表1), 大冰雹风暴单体的VIL/H为5.1~5.9g/m³, 平均为5.4g/m³;
12 中冰雹风暴单体的VIL/H为3.5~5.0g/m³, 平均为4.2g/m³; 小冰雹风暴单体VIL/H为4.3~
13 4.7g/m³, 平均为4.6g/m³; 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
14 同等级冰雹中存在显著差异, 可作为冰雹等级的识别因子。

15 分析发现, 21次冰雹风暴单体中有14次(67%)在降雹前5~10min出现VIL跃增现象, 跃
16 增幅度在5~20kg/m², 平均为10kg/m²; 跃增幅度越大, 相应VIL越大, 跃增提前时间量也越
17 大(图3), 未出现跃增的7次过程中, VIL均不足28kg/m²。



18 图3 降雹前冰雹风暴单体VIL变化
19

20 2014年4月4日江城大冰雹风暴单体降雹前VIL特征17:30 (a)、17:35 (b)、17:41 (c)、17:46 (d); 2017年2
21 月3日宁洱大冰雹风暴单体降雹前VIL特征16:22 (e)、16:27 (f)、16:32 (g)、16:38 (h); 2016年4
22 月21日江城中冰雹风暴单体降雹前VIL特征17:18 (i)、17:23 (j)、17:29 (k)、17:36 (l); m为色标
23 Fig.3 VIL changes of storm cells before hailstorm. VIL changes of large hail storm cells before
24 hailstorm. April 4, 2014 in Jiangcheng, (a) 17:30, (b) 17:35, (c) 17:41, (d) 17:46; VIL changes
25 of large hail storm cells before hailstorm. February 3, 2017 in Ninger, (e) 16:22, (f) 16:27,
26 (g) 16:32, (h) 16:38; VIL changes of medium hail storm cells before hailstorm. April 21, 2016
27 in Jiangcheng, (i) 17:18, (j) 17:23, (k) 17:29, (l) 17:36. (m) legend

28 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
29 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
30 出现了10kg/m²的跃增(图3a、3b), 跃增提前于降雹10min左右(图3a、3b、3c、3d), 而
31 2017年2月3日宁洱大冰雹天气过程中VIL无跃增现象(图3e、3f、3g、3h), 降雹前4个体扫
32 时段内VIL均为28kg/m²; 2016年4月21日江城中冰雹风暴中, 降雹前出现了20kg/m²的跃增(图
33 3i、3j), 跃增提前于降雹10min左右(图3i、3j、3k、3l), 而在2013年3月8日澜沧、2015
34 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

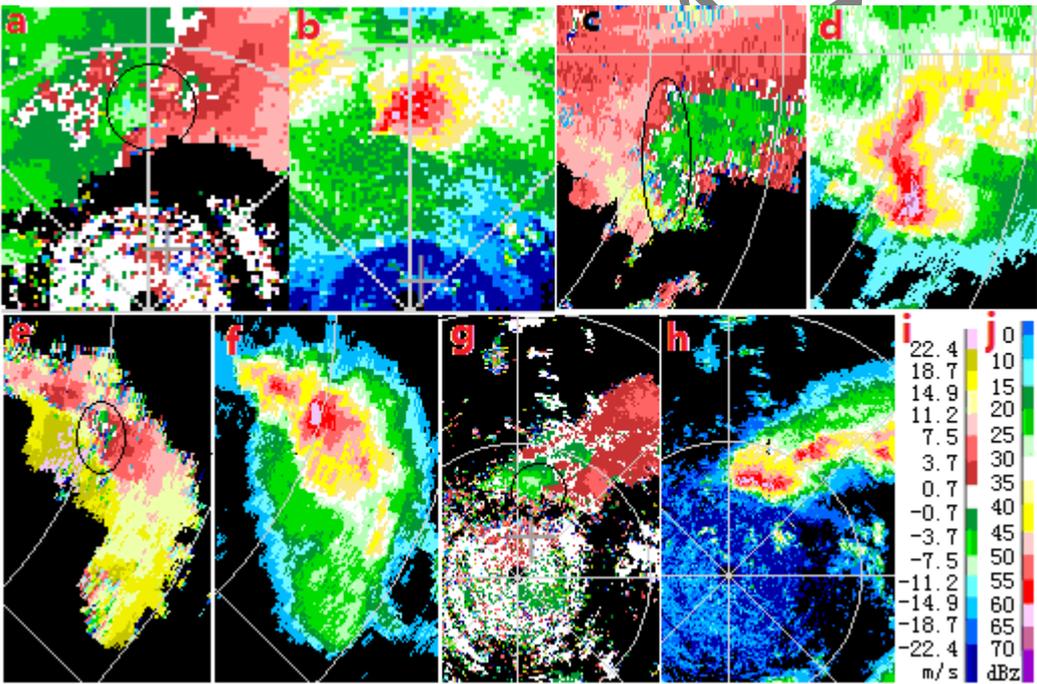
1 个体扫时段内VIL分别为 28kg/m^2 、 23kg/m^2 、 28kg/m^2 ；小冰雹过程中，2014年4月4日江城降
 2 雹前10min出现了 10kg/m^2 的跃增，而2017年2月2日景谷的冰雹过程中无明显跃增现象。表明
 3 VIL越增特征和跃增量不能作为不同等级冰雹的识别因子。

4 **2.4 不同等级冰雹风暴单体的径向速度图特征对比**

5 分析冰雹风暴单体的径向速度图发现，冰雹风暴单体均存在明显的辐合特征，表现形式
 6 有：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
 7 合（图4g、4h）等（表2）。

8 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)
 9 旋转速度为 $12\sim 22\text{m/s}$ ；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
 10 续时间为 $3\sim 4$ 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
 11 暴单体旋转速度为 $8.5\sim 22.0\text{m/s}$ ，平均为 13.7m/s ；17次中、小冰雹风暴单体中，共出现中
 12 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
 13 单体的旋转速度为 $3.0\sim 18.5\text{m/s}$ ，平均为 7.3m/s 。分析表明，大冰雹风暴单体往往具有中气
 14 旋特征，普洱大冰雹风暴单体的旋转速度与中、小冰雹风暴单体存在一定差异，大冰雹风暴
 15 单体的旋转速度往往大于中、小冰雹风暴单体。

16 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
 17 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
 18 均旋转速度为 11.7m/s ，无悬垂结构的14次风暴单体的旋转速度为 6.9m/s ，表明是否出现悬
 19 垂结构对冰雹等级的识别有一定参考价值。



20
 21 图4 不同等级冰雹典型个例的 0.5° 仰角径向速度(V)、CR
 22 2017年2月3日16:38普洱大冰雹单体V (a)、CR (b)，黑圈内为中气旋；2014年5月5日22:14江城中冰雹单
 23 体V (c)、CR (d)，黑圈内为中尺度辐合带；2016年4月21日17:36江城中冰雹单体V (e)、CR (f)，黑圈
 24 内为逆风区；2018年3月11日17:35普洱小冰雹单体V (g)、CR (h)，黑圈内为辐合；i, j为色标

25 Fig. 4 Radial velocity (V) and CR at 0.5° elevation Angle of typical hail cases of different grades.
 26 Large hailstorm cells in Ninger at 16:38 on February 3, 2017, (a)V (The mesocyclone is in the
 27 black circle), (b) CR; Medium hail cells in Jiangcheng at 22:14 on May 5, 2014, (c)V (The mesoscale
 28 convergence zone is in the black circle), (d) CR; Medium hail storm cells in Jiangcheng at 17:36

1 on April 21, 2016, (e) V(Inside the black circle is the upwind area), (f) CR; Small hail cells
 2 in Ninger at 17:35 on March 11, 2018, (g)V(The mesoscale convergence zone is in the black circle),
 3 (h) CR; (i)、(j) legend

4 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

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

日期	地点时间	直径/mm	径向速度特征	是否有悬垂结构	旋转速度/(m/s)	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以上
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

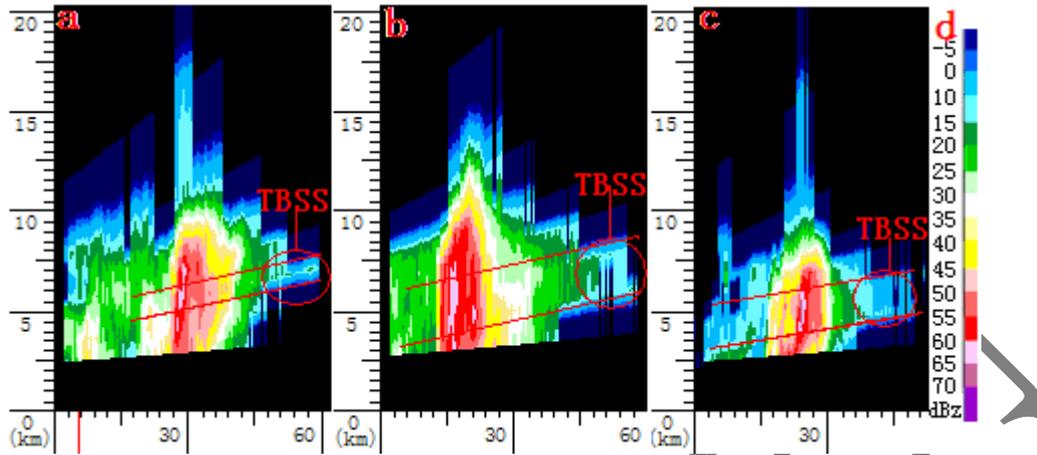
7 3 不同等级冰雹风暴单体成熟阶段的持续时间

8 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
 9 等，2014）。统计19次冰雹风暴单体（另外2次冰雹风暴单体为多次、多块回波合并降雪，
 10 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36min~66min，平均为50min，
 11 中冰雹风暴单体的持续为5min~65min，平均为36.8min，小冰雹风暴单体的持续时间平均为
 12 31min。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
 13 续时间（平均为35.6min）。

14 4 不同等级冰雹风暴单体中 TBSS、V 形缺口等特征对比

15 分析发现，21次冰雹风暴单体中，共出现TBSS特征4次，其中2次出现在大冰雹风暴单体
 16 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
 17 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
 18 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，
 19 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（2014）等人
 20 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5cm）雷达
 21 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10cm）
 22 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

1 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
2 单体不满足滇南冰雹识别指标(段鹤,2014),具有45dBz回波伸展高度不足7km、垂直液态
3 水含量密度不足 $3\text{g}/\text{m}^3$ 、回波宽度不足12km等特征,风暴单体影响区域也未收到冰雹记录或
4 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
5 出现了大冰雹。冯晋勤等(2018)等人也收集到出现TBSS但无大冰雹对应出现的个例。



6 图5 冰雹风暴单体中的TBSS

7
8 2014年4月4日17:20江城小冰雹风暴单体中的TBSS(a);2014年4月4日17:46江城大冰雹风暴单体中的
9 TBSS(b);2017年2月2日22:51江城中冰雹风暴单体中的TBSS(c);d为色标

10 Fig.5 TBSS in a hail storm cells. (a) Small hail cells in Jiangcheng at 17:20 on April 4, 2014.
11 (b) Large hail cells in Jiangcheng at 17:46 on April 4, 2014. (c) Medium hail storm cells in
12 Jiangcheng at 22:51 on February 2, 2017. (d) legend

13 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
14 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
15 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。

16 5 结论

17 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:

18 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5km以上、回
19 波梯度较大、 $\text{CR} \geq 55\text{dBz}$ 、 $\text{VIL} \geq 23\text{kg}/\text{m}^2$ 、 $\text{H}_{45\text{dBz}} \geq 7.5\text{km}$ 、 $\text{H}_{45\text{dBz}} - \text{H}_0 \geq 2.8\text{km}$ 等特征。

20 2、67%的冰雹风暴单体出现VIL跃增现象,跃增提前于降雹5~10min;跃增幅度越大,相应
21 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
22 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
23 冰雹风暴单体的 $\text{H}_{50\text{dBz}} - \text{H}_{-20}$ 显著大于中、小冰雹风暴单体的 $\text{H}_{50\text{dBz}} - \text{H}_{-20}$,VIL/H、 $\text{H}_{50\text{dBz}} - \text{H}_{-20}$ 可作为
24 识别大冰雹和中、小冰雹风暴单体的参考因子。

25 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
26 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
27 往往大于中、小冰雹风暴单体。

28 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。

29 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
30 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。

31 参考文献

32 33 段鹤,严华生,马学文,等,2014a.滇南冰雹的预报预警方法研究[J].气象,40(2):

34 174-185. Duan H, Yan H S, Ma X W, et al, 2014a. Study of the method for hail forecasting

1 and warning in Southern Yunnan[J]. Meteor Mon, 40(2): 174-185 (in Chinese).
2 段鹤, 夏文梅, 苏晓力, 等, 2014b. 短时强降水特征统计及临近预警[J]. 气象,
3 40(10): 1194-1206. Duan H, Xia W M, Su X L, et al, 2014b. Features statistics and
4 warning of flash heavy rains[J]. Meteor Mon, 40(10): 1194-1206 (in Chinese).
5 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
6 用分析[J]. 气象, 44(12): 1565-1574. Feng J Q, Zhang S S, Wu C F, et al, 2018.
7 Application of dual polarization weather radar products to severe convective weather in
8 Fujian[J]. Meteor Mon, 44(12): 1565-1574 (in Chinese).
9 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,
10 2010. TBSS as large-hail indicator in Jiangxi Province[J]. Meteor Mon, 36(8): 40-46 (in
11 Chinese).
12 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].
13 气象, 44(3): 455-462. He B W, Hu Z J, Gao W, et al, 2018. Statistical analysis about
14 severe hailstorm TBSS in Changde Doppler weather radar[J]. Meteor Mon, 44(3): 455-462
15 (in Chinese).
16 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
17 害学, 30(3): 88-93, 98. Li X, Zhang T F, Hu J, et al, 2015. Doppler radar statistical
18 characteristics and early warning index of Yunnan hail disaster[J]. J Catastrophol, 30(3):
19 88-93, 98 (in Chinese).
20 林文, 张深寿, 罗昌荣, 2020. 不同强度强对流云系S波段双偏振雷达观测分析[J].
21 气象, 46(1): 63-72. Lin W, Zhang S S, Luo C R, et al, 2020. Observational analysis of
22 different intensity sever convective clouds by S-band dual-polarization radar[J]. Meteor Mon,
23 46(1): 63-72 (in Chinese).
24 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):
25 23-32. Liu B, Dai Z J, Hu Z J, et al, 2009. Comparative analysis of several hailing cases in
26 Zhangjiajie[J]. Meteor Mon, 35(7): 23-32 (in Chinese).
27 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
28 [J]. 气象, 46(12): 1608-1620. Pan J W, Wei M, Guo L J, et al, 2020. Dual-polarization
29 radar characteristic analysis of the evolution of heavy hail supercell in Southern Fujian[J].
30 Meteor Mon, 46(12): 1608-1620 (in Chinese).
31 陶诗言, 1980. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社: 225. Tao S Y, 1980. Heavy Rain
32 in China[M]. Beijing: Science Press: 225 (in Chinese). (查阅所有网上资料,
33 未找到对应的英文翻译, 请联系作者确认)
34 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].
35 气象学报, 78(5): 796-804. Wang J H, Chen R M, Hu Z Q, et al, 2020. Dual Doppler radar
36 observations and analysis of the structure of a severe hailstorm[J]. Acta Meteor Sin, 78(5):
37 796-804 (in Chinese).
38 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,
39 45(5): 713-722. Wang S, Sha Y, Song J M, et al, 2019. Characteristic analysis of hail
40 cloud Doppler radar parameters in the Eastern Hebei Province[J]. Meteor Mon, 45(5):
41 713-722 (in Chinese).
42 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
43 [J]. 气象, 40(11): 1380-1388. Wang X J, Xia W M, Duan H, et al, 2014. The
44 application research of three-body scatter spike (TBSS) in C-band weather radar[J]. Meteor

1 Mon, 40(11): 1380-1388 (in Chinese).

2 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
3 象学报, 78(4): 568-579. Yang J, Zheng Y Y, Xu F, 2020. An analysis of a hail case over
4 the Yangtze and Huai River Basin based on dual-polarization radar observations[J]. Acta
5 Meteor Sin, 78(4): 568-579 (in Chinese).

6 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,
7 34(5): 583-586. Ye A F, Wu F Z, Cheng Y H, et al, 2006. Analysis of a severe hail event
8 occurred in Guangdong in Spring[J]. Meteor Sci Technol, 34(5): 583-586 (in Chinese).

9 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
10 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,
11 2021. Environmental conditions and radar characteristics of a severe convective hailstorm
12 with multiple supercells in central Yunnan Province[J]. Meteor Mon, 47(4): 424-438 (in
13 Chinese).

14 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
15 比分析[J]. 气象, 33(3): 48-53. Ying D M, Xu A H, Huang Z H, 2007. A comparative
16 analysis of Doppler radar products in hail, gale and short-time heavy rainfall in Jiangxi[J].
17 Meteor Mon, 33(3): 48-53 (in Chinese).

18 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
19 象出版社. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. Principle and Operational Application
20 of Doppler Weather Radar[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese). (查阅所
21 有网上资料, 未找到对应的英文翻译, 请联系作者确认)

22 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
23 the melting level of hail[J]. Meteor Mon, 40(6): 649-654 (in Chinese).

24 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
25 [J]. 高原气象, 25(3): 531-538. Zhang T F, Duan X, Lu Y B, et al, 2006. Circulation
26 background for a severe convective hailstorm weather process in Yunnan and its Dopplar
27 radar echo features[J]. Plateau Meteor, 25(3): 531-538 (in Chinese).

28 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,
29 77(2): 282-291. Zhang W H, Li L. 2019. A preliminary application of artificial intelligence
30 on the detection and nowcasting of hail weather[J]. Acta Meteor Sin, 77(2): 282-291 (in
31 Chinese).

32 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):
33 641-652. Zheng Y G, Tao Z Y, Yu X D, 2017. Some essential issues of severe convective
34 weather forecasting[J]. Meteor Mon, 43(6): 641-652 (in Chinese).

35 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
36 [J]. 气象, 40(9): 1132-1144. Zhou H, Duan W, Zhao S, et al, 2014. Characteristics
37 analysis of Doppler radar echoes and lightning of hailstorms in central Yunnan Province[J].
38 Meteor Mon, 40(9): 1132-1144 (in Chinese).