

文章编号:1673-8411(2018)03-0048-05

## 闽北春季冰雹 CINRAD 雷达产品特征分析

彭建东<sup>1</sup>, 张丽凡<sup>2</sup>, 黄待静<sup>1</sup>

(1. 南平市气象局, 福建 南平 353000; 2. 建瓯市气象局, 福建 建瓯 353100)

**摘要:** 利用建阳新一代天气雷达特征参数资料, 结合常规探空资料和实况资料, 对近6a(2008~2013)闽北春季(3~6月)地面降雹出现前垂直积分液态含水量(VIL)的演变特征、强中心高度(Ht)、风暴顶高(TOP)和组合反射率强度(CR)临界值进行统计分析发现:降雹前, 94%的雹云单体的VIL出现了“跃增”现象, 1个体扫时间 $\Delta VIL \geq 12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 且跃增后的 $VIL \geq 31 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , VIL跃增时间提前量 $\Delta T$ 平均为5.7个体扫时间;降雹前6min内总样本的Ht平均值高度陡降了1.4km, 所有的小冰雹降雹前VIL都只有一次跃增, 降雹前VIL多次跃增的, 冰雹直径都较大。

**关键词:** 闽北; 冰雹; 雷达特征参数

中图分类号: P49

文献标识码: A

## Characteristics of CINRAD radar products for spring hail in North Fujian

Peng Jiandong<sup>1</sup>, Zhang Lifan<sup>2</sup>, Huang Daijing<sup>1</sup>

(1. Nanping Meteorological Bureau, Nanping Fujian 353000;

2. Jianou Meteorological Bureau, Jianou Fujian 353100)

**Abstract:** Based on the characteristic parameters of Jianyang new generation weather radar, combined with conventional sounding data and observation data, the evolution characteristics of vertical integrated liquid water content (VIL), strong center height (Ht), storm top height (TOP), and combined reflectance intensity (CR) threshold before the occurrence of spring (March–June) hail in North Fujian in recent 6 years (2008–2013) were studied. The results showed that the VIL of 94% hail cloud monomers had a significant “jump” phenomenon, in a datum time,  $\Delta VIL \geq 12 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , and after jumping the  $VIL \geq 31 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , the average advance time ( $\Delta T$ ) of VIL jump was 5.7 datum time. Six minutes before hailing, the Ht average height of the total sample dramatically declined 1.4 km. There was only a jump of the VIL before small hailing, when the VIL has many jumps before hailing, the hail diameter is generally large.

**Keywords:** Northern Fujian, hail, radar characteristic parameter

南平市地处福建省北部, 又称闽北。该市多为山区, 地形复杂, 是冰雹等中小尺度灾害性天气易发地区。闽北全年各月都可能出现冰雹, 以3~6月份最多, 其它月份较少, 而春季又为烟叶生长的关键期, 特别是闽北“十九大”烟叶生产规划落实以来, 冰雹等强对流天气对烟叶生产的影响将越来越大。

目前天气雷达是冰雹等中小尺度灾害性天气最主要的探测手段<sup>[1]</sup>。近年来随着我国新一代多普勒天气雷达的建设和产品开发应用, 在冰雹等强对流天气监测方面取得了显著成就<sup>[2-5]</sup>。国内外的研究表明<sup>[6-12]</sup>, 垂直积分液态水含量(VIL)、强中心高度(Ht)、风暴顶高(TOP, 即 $\geq 30 \text{ dBz}$ 回波所在高度)和组合反

收稿日期: 2017-12-20

作者简介: 彭建东(1988-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事短时临近天气预报预警工作。

射率因子(CR)等物理量产品对冰雹等强对流天气具有较好的指示作用。

VIL作为一种新的预报因子最早由Greene<sup>[13]</sup>等提出。Amburn<sup>[14]</sup>等进一步研究发现,VIL对冰雹有很好的判别作用,并得到一些判别指标。20世纪80年代以后VIL已经成为美国天气雷达判别强对流天气造成的暴雨、暴雪、和冰雹等灾害性天气的一种有效工具。在国内,VIL在冰雹云识别预报和人工影响天气作业条件识别等方面也得到了较好的应用,是使用率较高的雷达产品之一。如付双喜<sup>[15]</sup>、刁秀广<sup>[16]</sup>、刘治国<sup>[17]</sup>等对VIL资料在冰雹识别预测方面进行了研究分析,均取得了较好的效果,发现冰雹云VIL变化也具有自身的独特变化特征,如降雹前VIL值“跃增”式增长(或爆发式增长)等,但其判别指标因各地气候天气差异和雷达型号不同有较大差异。另外,汤兴芝<sup>[18]</sup>对宜昌地区进行了统计分析,指出利用45dBz雷达强回波高度可较好地识别冰雹云,且降雹前45dBz回波顶高会出现跃增现象并有一定的提前量。俞小鼎<sup>[19]</sup>等指出,如果-20℃等温线对应的高度之上有超过45dBz的反射率因子核,则有可能产生大冰雹。但这些研究都是基于本地化应用的基础上展开的,因此有必要利用CINRAD雷达资料产品开展对闽北春季冰雹的本地化应用研究,找出闽北春季冰雹云VIL、Ht、TOP和CR等产品本地化的预测和识别指标,以期为本地冰雹预报识别和人工防雹作业提供参考和指导。

## 1 资料说明

文中使用的资料为:2008~2013年建阳多普勒天气雷达资料、邵武高空探测资料、地面实况观测资料和人工收集的降雹实况资料。分析地面实况与人工收集降雹实况等资料可得:近6a3~6月南平市共出现18个降雹日(见表2),结合建阳多普勒天气雷达资料可知,期间对我市造成明显降雹的雹云单体共计有31个。利用邵武探空资料分析18个降雹日当天08时或20时(北京时)的0℃层和-20℃层高度特

征,统计发现,降雹时0℃层高度一般在3.9~5.3km、-20℃层高度在6.9~8.8km。文章的主要目的是利用建阳新一代天气雷达(CINRAD/SA)的逐体扫资料分析31个雹云单体从初生、发展、成熟到消亡不同发展时期的VIL、CR及强中心高度Ht、风暴顶高TOP等雷达产品数据资料的演变特征,找出冰雹的本地化的预测和识别指标。分析VIL时应选用距离雷达站20~150km范围内的降雹样本资料(因为距离太近,风暴上层雷达探测不到,强度、高度和VIL等值严重失真;受地球曲率和最低探测仰角0.5°的影响,距离太远则雷达探测不到风暴的底部,也会使强度、高度和VIL值失真)。

## 2 雹云单体的雷达资料统计分析

### 2.1 雹云单体降雹前VIL、CR、Ht、TOP特征

文中主要分析降雹样本实况出现前的VIL、CR、Ht、TOP等雷达产品数据演变特征,表1为从31个雹云单体的VIL、CR、Ht、TOP等雷达产品数据中读取的关键指标。

由表1可得:3~6月闽北雹云单体降雹前 $VIL_{max}$ 最小为 $32\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,最大为 $85\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,平均为 $54.6\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ;降雹前雹云单体最强组合反射率因子CR最小为60dBz,最大为74dBz,平均为67.9dBz;降雹前时雹云单体Ht-H0最小为1.2km,最大为5km,平均为2.4km;降雹前雹云单体风暴顶高TOP最小为7.6km,最大为16.4km,平均为11.6km。

降雹时雹云单体VIL最小为 $26\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,最大为 $71\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,平均为 $45.4\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ;降雹时雹云单体组合反射率因子CR最小为57dBz,最大为74dBz,平均为65.4dBz。

另外,统计分析雹云单体的Ht变化曲线发现31个雹云单体在降雹前Ht都出现不同程度的下降,为了客观的表示这一特征,分析总样本的Ht平均值的时间演变曲线就显得很有必要。按体扫时间顺序对每一个雹云单体的Ht依次取值,将最接近降雹时间的体扫时间定义为T,前一个体扫时间为T-1,后一

表1 2008~2013年春季(3~6月)的雹云单体特征物理量值

总样本	0℃层高度 (km)	-20℃层 高度(km)	降雹前 $VIL_{max}$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )	降雹前CR (dBz)	降雹前Ht-H0 (km)	降雹前TOP (km)	降雹时 $VIL_{实况}$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )
最小值	3.9	6.9	32	60	1.2	7.6	26
最大值	5.3	8.8	85	74	5	16.4	71
平均值	4.4	7.7	54.6	67.9	2.4	11.5	45.4

个体扫时间为T+1,以此类推,制作成Ht时间序列,每个降雹单体样本均可得到一个Ht随时间变化的序列。通过对31个样本对应体扫时间的Ht值求平均,得到闽北冰雹云Ht平均值的时间变化曲线(图1),从图中的总样本Ht的变化曲线可以看出,冰雹云的强中心高度先是缓慢增加,再快速降低,接着再抬升,降雹前T-1~T时间段冰雹云的Ht平均值高度在6分钟内陡降了1.4km,从4.9km直接降到了3.5km。

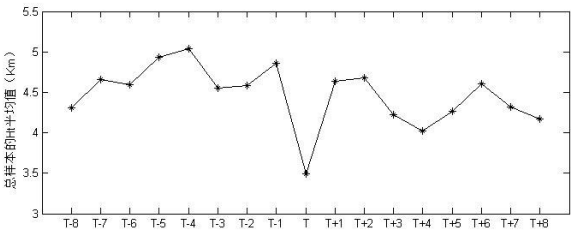


图1 雹云单体总样本Ht平均值的时间演变曲线

2.2 冰雹样本VIL跃增识别指标

表2 2008~2013年3~6月份的雹云单体VIL跃增情况

日期	降雹地点、 降雹单体编号	VIL跃增 情况	VIL跃增 时间	降雹 时间	时间提前量(单 位:1个体扫)	1个体扫VIL 最大跃增量(kg·m <sup>-3</sup> )
2010.03.05	邵武(H8)	26-58-73	15:53-16:05	16:23	3	32
	邵武(G3)	24-40	16:59-17:05	17:59	9	16
2013.03.19	武夷山(X5)	27-39	13:37-13:43	14:07	4	12
2013.03.20	光泽(P2)	32-48-61	03:04-03:16	03:34	3	16
	建阳(K4)	16-44	03:23-03:29	03:41	2	28
	邵武(F8)	14-32-75	04:24-04:36	04:48	2	43
	松溪(J7)	14-43	05:09-05:15	06:15	12	29
2013.03.23	光泽(W1)	25-37-53	13:00-13:12	13:42	5	16
	武夷山(T3)	20-43	13:54-14:00	14:12	2	23
	浦城(N0)	38-51	14:44-14:50	14:56	1	13
2013.03.24	顺昌(X2)	38-56	23:53-23:59	01:29	15	18
2008.04.08	光泽(V8)	9-24	21:54-22:00	22:06	1	15
2009.04.16	光泽(R6)	21-33	12:12-12:18	12:18	0	12
2012.04.10	邵武(E4)	5-35	20:22-20:28	22:34	21	30
	武夷山(A4)	47-62	21:58-22:04	22:04	0	15
	光泽(X0)	7-32	21:46-21:52	22:16	4	25
2012.04.11	光泽(O9)	6-34	14:23-14:29	15:35	11	28
2012.04.12	光泽(R7)	12-32	13:25-13:31	14:13	7	20
2012.04.15	延平(K7)	48-61	15:19-15:25	15:37	2	13
2013.04.17	顺昌(R4)	19-31	18:31-18:37	19:31	9	12
2010.05.18	浦城(E1)	25-37	10:08-10:14	12:32	12	13
	光泽(R3)	36-49-61-80	13:32-13:50	14:38	8	19
	政和(D6)	无跃增(△VIL最多增加9)		15:14		
	顺昌(Q4)	37-39	17:51-17:57	18:09	2	17
2013.05.09	光泽(V4)	16-31	14:30-14:36	15:12	6	15
2011.06.15	光泽(Q6)	35-49-69	16:18-16:30	17:30	10	20
	浦城(W7)	56-68	18:18-18:30	18:36	1	12
2011.06.20	政和(O3)	26-39	13:42-13:48	13:54	1	13
	邵武(N7)	33-65	18:33-18:39	19:09	5	32
2011.06.21	浦城(I1)	14-38	17:34-17:40	18:34	9	24
2011.06.23	政和(S0)	23-40	14:59-15:05	15:29	4	17
平均值					5.7	

文章重点分析的是雹云单体 VIL 跃增情况,表2给出了2008~2013年春季所有雹云单体 VIL 的跃增情况,从表2中可以看到,31个雹云单体样本中有30个样本的 VIL 值发生了跃增,1个体扫时间 VIL 跃增值最小为  $12\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,最大为  $43\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,VIL 跃增时间提前量平均为 5.7 个体扫时间。如果将跃增条件设定为 1 个体扫时间  $\Delta\text{VIL}\geq 12\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,且跃增后的  $\text{VIL}\geq 31\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,则有 29 个雹云单体样本符合条件,不符合条件的 2 个雹云单体样本分别为 2010.5.18 政和(D6)、2008.04.08 光泽(V8)。下面将详细分析这 2 个不符合条件的雹云单体样本。

(1)2010.5.18 政和(D6):图2给出了雹云单体 D6 的各雷达产品数据变化特征曲线,从 VIL 曲线看,其 VIL 值在降雹时 15:14 达到最大  $71\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,在此之前 VIL 一直是缓慢增加的,1 个体扫的最大增幅出现在 14:56~15:02, VIL 由  $46\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$  增加到  $55\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,增加了  $9\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,达不到本文设定的跃增标准,属于漏报。虽然雹云单体 D6 降雹前 VIL 值没有发生跃增,但是从其它雷达产品数据变化特征曲线也可以得出该单体将降雹的信号:(1)从 CR 变化曲线看,CR 由起初的 56dBz 一直在逐渐增加,在降雹时间的前一个体扫时刻达到最大值 74dBz,由此判断整个单体是非常强的;(2)从 TOP 变化曲线可以看出降雹前 TOP 曲线是呈线性增加的,推断整个单体回波是一直向上发展的, TOP 最高伸展到 12km,接近对流层顶的高度;(3)雹云单体 D6 的 Ht 在降雹前 2 个体扫时刻达到最大值 9.9km,之后的 2 个体扫时间 D6 的强中心高陡然下降到 2.7km,从探空资料可得当日  $0^{\circ}\text{C}$  高度为 4.9km,  $-20^{\circ}\text{C}$  高度为 8.2km,换言之,16:02~16:14 期间,雹云单体 D6 的强中心高度从  $-20^{\circ}\text{C}$  层以上高度迅速降至  $0^{\circ}\text{C}$  层高度以下。综上,可以判断这是一个雹云单体。

(2)2008.04.08 光泽(V8):其只满足给定的 2 个跃增条件(1个体扫时间  $\Delta\text{VIL}\geq 12\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,且跃增后的  $\text{VIL}\geq 31\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )中的前一个条件,后一个条件不满足,属于漏报。

综上,若跃增条件定为 1 个体扫时间  $\Delta\text{VIL}\geq 12\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,且跃增后的  $\text{VIL}\geq 31\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,则有 29 个雹云单体样本符合条件,2 个雹云单体样本漏报,准确率为 94%,漏报率 6%。

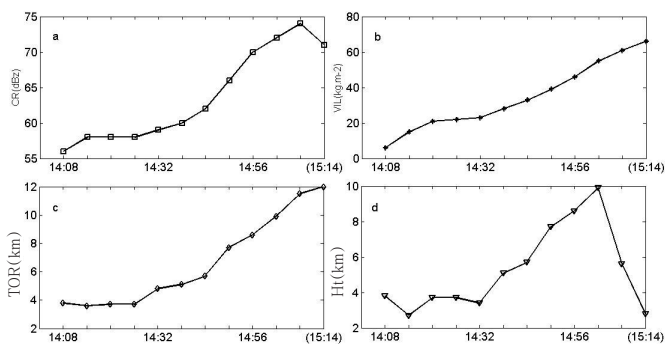


图2 雹云单体D6降雹前的CR、VIL、TOP、Ht变化曲线

### 2.3 降雹直径跟 VIL 的关系

每次降雹除了一些恰好发生在气象台站附近的会有准确直径的数据,其它收集到的冰雹直径资料多为描述,诸如拇指大小等。由于形状描述的模糊,一般情况下记录的冰雹直径跟实际大小大概会存在几毫米的误差。基于上述原因,文中在统计冰雹直径时不采用具体直径,而是将之归纳为 4 个等级,黄豆、蚕豆、鸽子蛋、乒乓球,它们的直径分别大约为 5mm、10 mm、20 mm 和 40 mm,冰雹直径接近哪个等级就将之归为该等级(1 代表黄豆大小、2 代表蚕豆大小、3 代表鸽子蛋大小、4 代表乒乓球大小)。拟合发现冰雹直径与降雹前  $\text{VIL}_{\text{max}}$  成正相关,拟合相关系数  $R^2=0.661$ ,两者之间强相关。而冰雹直径与降雹时的 VIL 虽然也成正相关,但拟合相关系数  $R^2=0.406$ ,两者之间相关性不好。说明冰雹直径只跟降雹前  $\text{VIL}_{\text{max}}$  有关联,且降雹前  $\text{VIL}_{\text{max}}$  越大,冰雹直径也可能越大。

### 2.4 降雹直径跟 VIL 跃增的关系

扣除 1 个 VIL 值未发生跃增的雹云单体样本,分析剩下 30 个雹云单体样本从初生发展到降雹的过程,可以发现雹云单体总样本的 VIL 的跃增情况可分为 3 种(这里只统计雹云单体第一次降雹前的 VIL 跃增分类,一个单体多次降雹的情况也只统计第一次降雹前的 VIL 跃增情况):

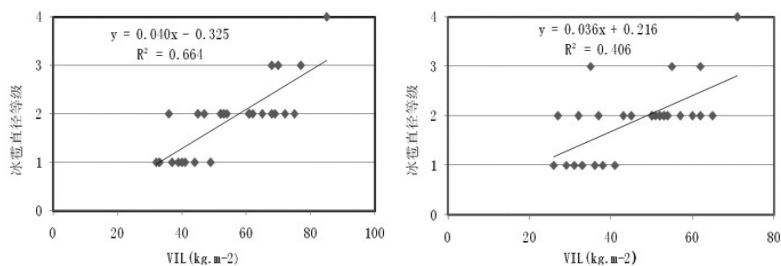


图3 VIL 值与冰雹直径等级分布图(左图的 VIL 值为降雹前  $\text{VIL}_{\text{max}}$ ,右图的 VIL 值为降雹时的 VIL)



(1)只有一次跃增,该类型共19个样本,其中9个降雹直径等级1,9个降雹直径等级2,1个降雹直径等级3。

(2)连续的多次跃增,如雹云单体2010.05.18光泽(R3)在13:32~13:50期间VIL连续跃增了3次,先从 $36\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 跃增到 $49\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 再跃增到 $61\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 最后跃增到 $80\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,1个体扫时间分别跃增了 $13\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $12\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $19\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。该类型共6个样本,其中4个降雹直径等级2,1个降雹直径等级3,1个降雹直径等级4。

(3)不连续的多次跃增,这种情况是指间隔时间很短(一般为1个体扫时间)的多次跃增,而间隔时间很长的一般都对应着多次降雹过程。如雹云单体2011.06.20邵武(N7),降雹时间为19:09,在18:33~18:51VIL变化情况为 $33\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\sim 65\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\sim 54\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\sim 70\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,期间第一个体扫间隔VIL跃增了 $32\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,第二个体扫间隔VIL值减少了 $11\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,第三个体扫间隔VIL值跃增了 $16\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,VIL两次跃增之间间隔了1个体扫时间,且该体扫间隔(18:39~18:45)VIL值没有不但没有增加反而有所下降。该类型共5个样本,其中4个降雹直径等级2,1个降雹直径等级3。

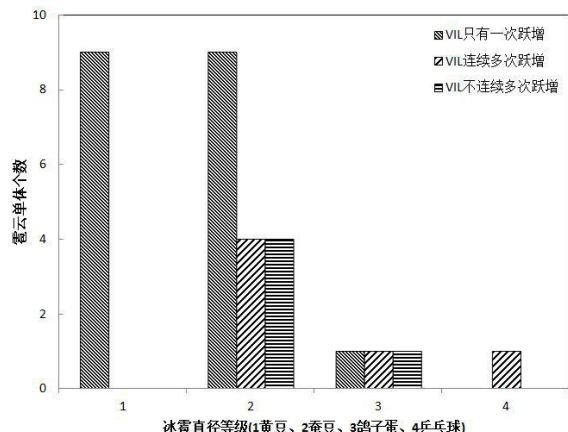


图4 不同跃增分类的雹云单体样本数

综上,所有的小冰雹降雹前VIL都只有一次跃增,降雹前VIL多次跃增的,冰雹直径都较大。

### 3 结论

(1)统计近6a(2008~2013)年闽北春季(3~6月)的降雹情况,发现降雹时 $0^{\circ}\text{C}$ 层高度在 $3.9\sim 5.3\text{km}$ , $-20^{\circ}\text{C}$ 层高度在 $6.9\sim 8.8\text{km}$ 。降雹前的 $\text{VIL}_{\text{max}}$ 最小为 $32\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,且降雹前 $\text{VIL}_{\text{max}}$ 越大,冰雹直径也可能越大。CR、TOP临界值分别为 $60\text{dBz}$ 、 $7.6\text{km}$ ,Ht临界值为 $0^{\circ}\text{C}$ 层以上 $1.2\text{km}$ 。

(2)若将跃增条件设定为一个体扫时间 $\Delta\text{VIL}\geq$

$12\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,且跃增后的 $\text{VIL}\geq 31\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,则准确率94%,漏报率6%。VIL跃增时间提前量 $\Delta T$ 平均为5.7个体扫时间。降雹前6min内总样本的Ht平均值高度陡降了 $1.4\text{km}$ 。

(3)所有的小冰雹降雹前VIL都只有一次跃增,降雹前VIL多次跃增的,冰雹直径都较大。

#### 参考文献:

- [1] 俞小鼎,王迎春,陈明轩,等.新一代天气雷达与强对流天气预警[J].高原气象,2005,24(3):456-464.
- [2] 郭泽勇,郑清,毛小燕,等.天气雷达VIL产品的算法设计及应用[J].广东气象,2008,30(3):29-31.
- [3] 张正国,邹光源,刘丽君,等.雷达回波顶高(ET)产品在广西冰雹云识别中的应用研究[J].气象研究与应用,2014,35(4):89-92.
- [4] 杨恩施,黄开刚,刘国忠.2013.3.23百色市致灾冰雹天气过程成因分析[J].气象研究与应用,2015,36(2):43-46.
- [5] 郑艳,刘丽君,吴春娃.近10a海南岛冰雹天气统计特征与概念模型[J].气象研究与应用,2015,36(4):15-20.
- [6] 张羽,吴小芳,胡胜,等.2009年广州第一场强对流天气的强对流单体雷达特征[J].广东气象,2009,31(4):8-10.
- [7] 阎雍,黄艳芳,姚志国,等.武汉一次强冰雹天气过程分析[J].广东气象,2010,32(06):2528.
- [8] 汪海恒,朱永兵,叶永恒,等.韶关市区一次罕见大冰雹灾害性天气过程分析[J].广东气象,2013,35(3):12-19.
- [9] 郝建平,曹刚,刘子文,等.广东冰雹天气个例的雷达产品特征分析[J].广东气象,2015,37(1):75-80.
- [10] 李宜爽,刘蕾,王艺.广西柳州2016年4月一次致灾冰雹天气过程分析[J].气象研究与应用,2016,37(3):52-56+138.
- [11] 李影虹,苏文,陈芳丽.2016年6月4日华南一次罕见强对流天气过程分析[J].广东气象,2017,39(4):10-14.
- [12] 周长青,徐冬英,徐靖宇,等.2016年春季湖南一次连续冰雹天气过程个例分析[J].气象研究与应用,2017,38(2):22-26+120.
- [13] Greene D R, R A Clark. An indicator of explosive development in severe storms[R]. 7th conference on severe local storms, Missouri, 1971.
- [14] Amburn S A, P L Wolf. VIL density as a hail indicator [J]. Wea Forecasting, 1997, 12:473-478.
- [15] 付双喜,安林,凤琴,等.识别冰雹云中的应用及估测误差分析[J].高原气象,2004,23(6):810-814.
- [16] 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):1131-1139.
- [17] 刘治国,陶键红,杨建才,等.冰雹云和雷雨云单体VIL演变特征对比分析[J].高原气象,2008,27(5):1363-1373.
- [18] 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.
- [19] 俞小鼎,姚秀萍,熊延南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社,2006.