

李湘, 张腾飞, 胡娟, 等. 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, 2015, 30(3): 088 - 093. [Li Xiang, Zhang Tengfei, Hu Juan, et al. Doppler radar statistical characteristics and early warning index of Yunnan hail disaster[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(3): 088 - 093.]

# 云南冰雹灾害的多普勒雷达 特征统计及预警指标\*

李湘<sup>1</sup>, 张腾飞<sup>2</sup>, 胡娟<sup>1</sup>, 鲁韦坤<sup>3</sup>

(1. 云南省气象台, 云南昆明 650034; 2. 云南省人影中心, 云南昆明 650034;  
3. 云南省气候中心, 云南昆明 650034)

**摘要:** 利用云南省 2006 - 2007 年多普勒雷达产品及冰雹灾情资料, 选取冰雹直径大于 5 mm 的 22 次灾害性冰雹天气过程进行分型统计。结果表明: 云南春季南支槽影响型雹灾回波水平尺度大, 回波核高度高, 易出现典型钩状回波、弓形回波、“V”型缺口、弱回波区、悬垂结构等典型的超级单体特征; 夏季中纬度西风槽影响型和减弱的西行台风影响型雹灾水平尺度、回波形状和垂直伸展高度均不如前者典型, 但易出现三体散射现象。春季南支槽影响型雹灾的联合预警指标有回波强度大于 50 dBz、回波核高于 6 km、30 dBz 水平尺度大于 30 km、WER 大于 4 km、出现典型超级单体特征、速度场出现风场辐合、气旋性辐合、逆风区等、VIL 出现明显跃增(最好大于 30 kg/m<sup>2</sup>)、冰雹概率大于 100%、出现中尺度气旋; 夏季中纬度西风槽影响型和减弱的西行台风影响型雹灾的联合预警指标有回波强度大于 50 dBz、回波核高于 4 km、30 dBz 水平尺度大于 20 km、速度场出现风场辐合、气旋性辐合、逆风区等、出现三体散射现象、VIL 出现明显跃增(最好大于 30 kg/m<sup>2</sup>)、冰雹概率大于 80%、出现中尺度气旋。

**关键词:** 冰雹灾害; 多普勒雷达; 统计特征; 预警指标; 云南

**中图分类号:** P406; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000 - 811X(2015)03 - 0088 - 07

**doi:** 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.03.017

云南地处低纬高原和青藏高原东南麓, 强大的地形作用使得中小尺度天气系统频繁发生。在 2007 - 2010 年气象灾害经济损失比例中, 风雹灾害成为仅次于旱灾、洪涝、低温雨雪冰冻的第四大气象灾害, 仅 2009 年云南大风、冰雹和雷电灾害就造成 285.6 万人受灾, 58 人死亡(其中大风、冰雹灾害造成 12 人死亡), 直接经济损失高达 142 171.4 万元。本人已对云南灾害性冰雹的时空分布及大尺度环流特征进行了分型讨论<sup>[1]</sup>。关于多普勒雷达在冰雹监测预警中的应用, 不少学者都做过细致的研究, 但多针对 S 波段雷达<sup>[2-5]</sup>, 缺乏针对云南 C 波段雷达冰雹灾害回波特征及产品特征的分型统计分析<sup>[6-8]</sup>, 而 5 cm 的 C 波段雷达相较于 10 cm 的 S 波段雷达有探测范围小, 对冰雹等大粒子衰减大等特点, 加上云南地形复杂, 山体对回波的阻挡作用明显, 急需提出切实好用的灾害性冰雹预警指标, 为云南的防灾减灾工作提供重要支持。

## 1 冰雹灾害的环流分型

选取云南 2006 - 2007 年收集到的冰雹直径

5 mm 及以上的雹灾 22 次, 并依据降雹当日 08:00 和 20:00 探空资料按影响系统进行了环流分型(表 1), 其中南支槽影响型有(N 型)8 次、中纬度西风槽影响型有(D 型)9 次、减弱的西行台风影响型有(T 型)5 次。有 4 次 N 型降雹发生在非汛期, 雷达处于关闭状态, 有 1 次 T 型降雹发生时未收集到雷达数据, 因而在表 1 中没有给出。

## 2 雹云的基本反射率与强回波核高度特征

冰雹云的后向散射能力远远大于一般性降水, 在雷达 PPI 图上表现为强的基本反射率, 表 2 中给出了各类型冰雹云发展到最强盛时的基本反射率, 从中可见云南 90% 的雹灾冰雹云基本反射率因子大于 50 dBz, 小于 50 dBz 的雹灾中, 1 次是接近雷达的最大探测距离(150 km), 距离衰减严重, 1 次是属于有组织的弓形回波降雹, 冰雹云的水平尺度很大, 在雷达回波图中很好识别, 比较各降雹类型的反射率因子, 未发现不同类型之间有明显差异, 因此将 50 dBz 作为云南灾害性冰雹预警的临界值。

\* 收稿日期: 2014 - 12 - 12 修回日期: 2015 - 02 - 02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41265001); 云南省气象局预报员专项(TQ201506); 云南省科技惠民计划(2014RA002); 中国气象局云南物理环境重点开放实验室开放课题(2009001)

作者简介: 李湘(1982 -), 女, 云南丽江人, 工程师, 主要从事短期、短临天气预报及研究. E-mail: nopear0852@sina.com

表 1 雹灾环流分型及降雹前冰雹云的垂直液态水含量(VIL)变化特征

降雹类型	降雹日期/地点	地面降雹时间	雷达特征分析的 可能降雹起始时刻	距雷达/km	降雹前 20~30 min VIL/(kg/m <sup>2</sup> )	降雹前 10 min VIL/(kg/m <sup>2</sup> )	降雹时 VIL/ (kg/m <sup>2</sup> )	降雹后 VIL/ (kg/m <sup>2</sup> )
N 型	2006-04-06/蒙自	22:30-24:00	04-06 23:07	90	20	30	35	15
	2006-04-09/彝良	18:58-19:06	04-09 18:50	45	25	35	45	25
	2007-04-07/宁洱	18:30	04-07 18:18	50	35	40	45	30
	/江川	21-22 时前后	04-07 22:10	75	30	40	40	25
	2007-05-28/墨江	15:00-15:40	05-28 15:14	75	20	40	50	30
D 型	2006-05-21/丽江	20:18	05-21 20:17	20	10	10	30	*
	2006-06-22/嵩明	18:50-19:20	06-22 19:07	40	10	25	40	*
	2006-07-23/弥勒	17:20	07-23 17:03	135	1	5	25	25
	2007-05-27/澄江	15:10	05-27 15:11	55	20	25	35	5
	/弥勒	16:30	05-27 16:28	130	5	20	45	20
	2007-06-04/元谋	17:37-17:58	06-04 17:15	115	25	20	45	30
	2007-06-25/弥勒	16:38-17:05	06-25 16:38	140	5	10	20	20
	2007-06-28/澄江	13:30-14:36	06-28 13:50	60	15	20	30	5
	2007-06-30/江川	19:56-20:35	06-30 20:19	80	5	20	35	10
T 型	2006-07-15/石林	17:00-18:00	07-15 17:38	100	10	15	35	15
	2006-07-16/安宁	17:08-17:30	07-16 17:02	50	30	40	40	30
	2006-07-27/峨山	14:15	07-27 14:09	105	1	15	25	5
	/澄江	18:30	07-27 18:12	65	0	15	20	5
	2007-08-21/江川	14:50-15:00	08-21 14:39	65	1	20	35	10
	2007-08-23/江川	18:00-18:03	08-23 18:09	85	10	15	25	20

(注:表中\*为该个例未收集到 VIL 产品数据)

表 2 冰雹云的最大反射率及强回波核高度(35~40 dBz)

基本反射率(Z)/dBz	合计/次	N 型/次	D 型/次	T 型/次	35~40 dBz 回波 高度(H)/km	合计/次	N 型/次	D 型/次**	T 型/次
40 ≤ Z ≤ 50	2	1	1	0	H ≤ 4	1	0	1	0
50 < Z ≤ 55	4	0	2/1*	2	4 < H ≤ 6	5	0	2	3
55 < Z ≤ 60	12	3	5/2*	4	6 < H ≤ 8	7	3	2	2
Z > 60	2	1	1	0	H > 8	4	2	1	1

(注:表中\*为未收集到基数据用组合反射率产品替代,\*\*为该型有 3 次雹灾未收集到基数据而未参与统计)

强回波核所在高度能够很好地反映出降雹对流单体风暴中心的伸展高度,表 2 中同时给出了 35~40 dBz 强回波核高度(H),可见强回波核  $H < 4$  km 的雹灾出现 1 次(前文中提到距离衰减严重的那次雹灾),  $4 < H < 6$  km 的雹灾出现 5 次,  $6 < H < 8$  km 的雹灾出现 7 次,  $H > 8$  km 的雹灾出现 4 次,剔除距离衰减个例,所有雹灾 35~40 dBz 强回波核均出现在 4 km 以上(接近或高于降雹当日的零度层高度),其中 5 次南支槽影响型雹灾强回波核高度均大于 6 km,2007 年 4 月 7 日发生在宁洱县境内的雹灾强回波核高度达 9.5 km,说明南支槽影响型降雹强回波核所在高度更高,冰雹粒子的碰并增长区厚度更大,十分有利于大冰雹的产生,因此可将春季南支槽型 35~40 dBz 强回波核高度高于 6 km,夏季中纬度西风槽影响型和减弱的西行台风影响型 35~40 dBz 强回波核高度高于 4 km 作为云南灾害性冰雹的预警指标之一。

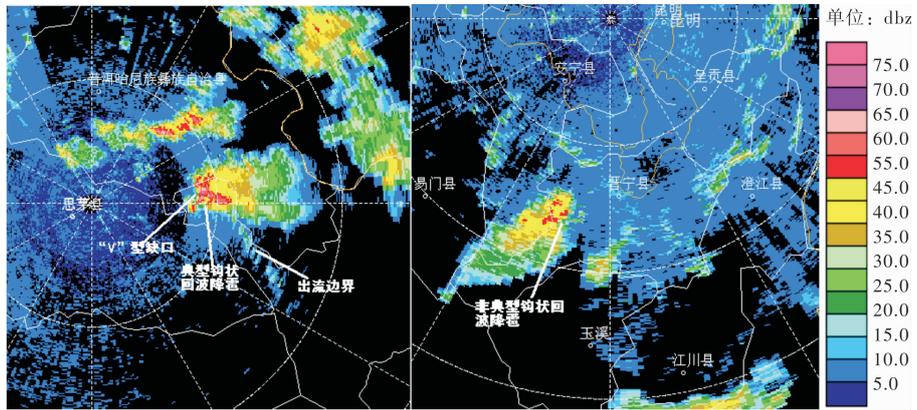
### 3 雹云的水平尺度及形状特征

冰雹云中强回波的尺度与上升气流密切相关,强回波的水平尺度越大,说明对流发展过程越剧烈,产生降雹的可能性越大<sup>[9]</sup>,从表 3 中可见冰雹云发展强盛期 30 dBz 的水平尺度均大于 20 km,75%的冰雹云水平尺度大于 30 km,前文中提到的有组织的弓形回波降雹水平尺度达 120 km,在弓形回波前部出现了冰雹直径达 60 mm 的强雹灾。发展成熟的冰雹云外形结构呈现出非典型钩状回波、典型钩状回波、弓形回波、带状回波、“V”型缺口、出流边界等特殊形状(图 1),其中典型钩状回波和非典型钩状回波出现的概率较高,而弓形回波和带状回波出现的较少(表 3)。从不同类型雹灾的水平尺度和形状特征看,南支槽型雹灾水平尺度更大、出现了更多的典型钩状回波、弓形回

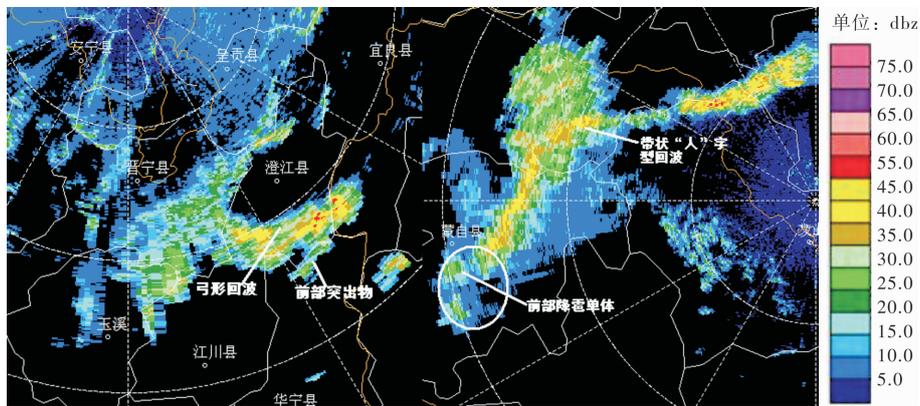
表3 冰雹云的水平尺度及形状特征

30 dBz 水平尺度(L)/km	合计/次	N型	D型*	T型	回波形状	合计/次	N型	D型*	T型
20 < L ≤ 30	5		弥勒(1)、弥勒(2) 弥勒(3)、澄江(2)	峨山	典型钩状回波	8	彝良、 宁洱 墨江	丽江、澄江(1) 元谋	石林 峨山
30 < L ≤ 40	8	彝良 宁洱	嵩明、澄江(1) 元谋、江川(2)	石林 安宁	非典型钩状回波	8		嵩明、弥勒(1) 弥勒(2)、弥勒(3) 澄江(2)、江川(2)	安宁 江川(3)
40 < L ≤ 60	5	墨江	丽江	澄江(3)、 江川(3)、 江川(4)	弓形回波	3	江川(1)		澄江(3) 江川(4)
L > 100	2	蒙自、 江川(1)			带状回波	1	蒙自		

(注：表中\*为未收集到基数据用0.5°仰角产品代替)



(a)普洱雷达站 2007年4月7日 17:38 (b)昆明雷达站 2006年7月16日 17:02



(c)昆明雷达站 2006年7月27日 18:06 (d)文山雷达站 2006年4月6日 23:07

图1 降雹点0.5°仰角的雷达基本反射率 PPI 显示

波、带状回波、“V”型缺口等超级单体特征，而中纬度西风槽影响型和减弱的西行台风影响型雹灾出现了更多的非典型钩状回波特征，回波的水平尺度也相对小一些，因此将云南南支槽影响型雹灾的水平尺度指标定为 30 km，其它类型降雹水平尺度指标定为 20 km。

#### 4 雹云的垂直结构特征

为了更直观地了解冰雹云的垂直结构特征，我们利用 Micaps3.1 提供的基数据交互工具对降雹前后雷达基本反射率做沿低层入流方向的 VCS 垂直剖面(图略)，从中可以看到有近一半的雹灾出

现了典型的弱回波区 (WER) 和悬垂结构特征, 由于 WER 的尺度直接反映了雹暴上升气流的强度和区域大小, 与冰雹灾害密切相关, 我们统计了已出现的 WER 尺度特征 (表略), 发现云南的雹灾 WER 的水平尺度大都在 3 ~ 10 km 之间, 比我国东部雹灾 WER 尺度小, 但南支槽影响型雹灾的 WER 尺度要大一些 (WER > 8 km 的雹灾均为南支槽影响型), 倾斜的悬垂结构也更加明显, 这与南支槽影响型大的环境风垂直切变密切相关。下面我们以前文以 WER 尺度最大、维持时间最长的 2007 年 4 月 7 日发生在宁洱县的南支槽影响型雹灾为例, 仔细分析冰雹云发展期、强盛期、减弱期的垂直结构变化特征, 7 日 16: 00, 位于普洱雷达站北侧 20 km 附近的对流开始逐渐发展东扩, 17: 38 宁洱县 (原普洱哈尼族彝族自治县) 出现了典型的钩状回波和有界弱回波区 (BWER), 回波中心强度达 60 dBz (图 1a), 从沿入流方向并过风暴中心的 VCS 垂直剖面 (图 2a) 可见, 17: 59 冰雹云迅速发展出现倾斜特征, 强回波核上升到离地面 4 km 高度上, 正下方出现 WER, 18: 07 冰雹云强烈发展, 悬垂结构更加典型, 强回波核上升到离地面 6 km 的高度, BWER 清晰可见, 说明冰雹云已发展到强盛阶段, 18: 18 强回波核高度开始下降, 冰雹云水平尺度明显扩大, 说明冰雹云已开始减弱, 18: 29 强回波核高度继续下降, 并在近地面形成“回波墙”, 18: 30 宁洱县黎明乡出现 30 mm 强冰雹, 降雹点正是“回波墙”的位置。

### 5 雹云的三体散射特征 (TBSS)

三体散射 (TBSS) 是指雷达能量在强反射率因

子区向前散射而形成的异常回波, 常呈现类似细长钉子状从强回波区沿径向伸展, 俞小鼎等人给出了东部 S 波段雷达“三体散射的一些个例” [10], 指出三体散射特征是大冰雹存在的充分和非必要条件, 表 4 中给出了云南冰雹云三体散射特征, 从表中可见, 不考虑地物遮挡和附近其它对流单体回波的遮挡, 15 次雹灾中有 10 次出现了三体散射, 出现三体散射的概率明显比 S 波段雷达高, 结合前文的分析还发现在冰雹云水平尺度、强回波高度、悬垂结构等特征不明显的弥勒、澄江、江川等雹灾中出现了较为明显的三体散射特征, 从表 4 中还可以看出观测到三体散射的雹灾直径从 5 ~ 40 mm 不等, 不一定对应 20 mm 以上的大冰雹, 因此三体散射现象可以作为云南冰雹预警一个切实好用的补充指标, 但不能作为大冰雹的预警指标使用。

### 6 雹云的速度场特征

强雹灾在雷达径向速度上往往伴随有风向辐合、气旋性风场辐合、中尺度气旋、逆风区等强的中小尺度天气特征, 降雹前 30 min 雷达径向速度往往就有所体现, 逐渐在成片的正速度或负速度区中出现小范围符号相反的速度 (较弱的逆风区)、风向辐合区或气旋性辐合流场特征, 从表 5 的统计结果看风场辐合出现了 3 次, 气旋性辐合流场出现 6 次, 逆风区出现 8 次, 8 次雹灾降雹前 30 min 没有明显的中小尺度天气特征, 1 次出现了速度模糊, 速度场中的风场辐合、气旋性辐合、逆风区可作为冰雹天气识别与预警的参考指标。

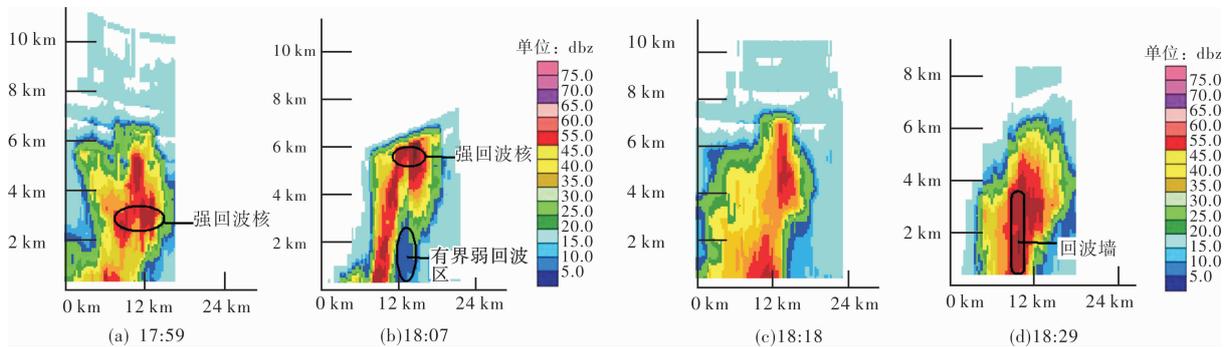


图 2 2007 年 4 月 7 日普洱雷达基本反射率沿入流方向并过风暴中心的 VCS 垂直剖面图

表 4 冰雹云的三体散射特征

有无三体散射	地点/冰雹直径/mm			合计/次
	N 型	D 型*	T 型	
有三体散射	江川/15 ~ 40	弥勒/30、弥勒/20、弥勒/10、澄江/10	石林/20、峨山/15、澄江/15、江川/10、江川/5	10
无三体散射	蒙自/60、宁洱/30	澄江/20、元谋/20	安宁/20	5
附近回波遮挡	墨江/25	丽江/7、嵩明/10、江川/15		4
地形遮挡	彝良/15			1

(注: 表中 \* 为该型有 3 次雹灾未收集到基数据而未参与统计)

表5 冰雹云的径向速度特征统计

径向速度特征	风场 辐合/次	气旋性 辐合/次	逆风区/次	无明显 特征/次
降雹前30 min	3	6	8	8
降雹前后	4	13	6	1

## 7 雹云的垂直液态水含量特征(VIL)

VIL产品是假定回波均由液态水形成的条件下,通过经验公式将反射率数据转换成垂直累加的相当液态水含量产品,在许多地区VIL是冰雹预报一个很好用的指标。表1以雷达特征分析的可能降雹开始时间为基准,统计了降雹前20~30 min、降雹前10 min、降雹时和降雹后的VIL值,实际降雹时间往往比用雷达特征分析的可能降雹时间要晚一些,即实际预警提前量比统计结果更长。从表中可以看到在雹灾发生前20~30 min有50%的雹灾VIL值在10 kg/m<sup>2</sup>及以下,50%的雹灾VIL值已明显增大,若选30 kg/m<sup>2</sup>为阈值则有3次雹灾可被识别出来;在降雹前10 min有6个降雹过程可被识别出来,降雹时有15个降雹过程可被识别出来,降雹前30 min到降雹时VIL值出现了明显的跃增,可作为冰雹预警的一个重要指标。

## 8 雹云的冰雹指数(HI)和中气旋(M)特征

冰雹指数是风暴结构是否产生冰雹的一个指

标,它是在0℃层以上检查高反射率值,然后计算出包括小冰雹概率、大冰雹概率和最大冰雹尺寸的一种产品。表6中统计了降雹前20~30 min、降雹前10 min、降雹时的冰雹概率和冰雹直径,从表中可以看出降雹前30 min有14次雹灾被预报出可能降雹,降雹前10 min所有的雹灾均被预报可能降雹,但冰雹指数是基于0℃层设定计算的反射率因子繁衍产品,在产品繁衍时采用了固定的0℃层(3.2 km),可能给冰雹指数的计算带来偏差,如2007年4月7日发生在江川的降雹过程冰雹直径异常偏高,且统计时还发现冰雹指数虽然对冰雹过程的识别率较高,但空报率也非常高,在利用时最好结合其它指标联合使用。

若对流风暴具有很强的气旋性旋转特征(正负速度中心在10 km以内,速度差在25 m/s或以上,且呈现出三维对称结构),在中气旋产品中将被识别出中尺度气旋,从降雹过程的中尺度气旋产品中可以看出20次雹灾仅有4次被识别出有中尺度气旋存在,1次在降雹前30 min发现有中尺度气旋,降雹前5 min再次发现有中尺度气旋,其它3次均在降雹前5 min发现有中尺度气旋,可见中尺度气旋作为一种强风暴特有的速度特征,在云南作为冰雹预报指标使用有一定的局限性,主要是多数对流风暴虽然存在气旋性辐合流场,但远远达不到被定义为中尺度气旋的强度,但若发现有中尺度气旋存在则意味着对流风暴将强烈发展,应及时发布冰雹、大风等强对流预警。

表6 降雹前的冰雹指数和中气旋特征统计

降雹类型	降雹地点	降雹前20~30 min (大雹概率/小雹概率)	降雹前20 min 冰雹直径/cm (大雹概率/小雹概率)	降雹前10 min 冰雹直径/cm (大雹概率/小雹概率)	降雹前10 min 冰雹直径/cm	降雹时(大雹概率/ 小雹概率)	降雹时冰雹 直径/cm	时间/(中气旋底/ 中气旋顶高)
N型	蒙自	80%/100%	1.9	100%/100%	2.54	100%/100%	3.17	前30分/(6.1/7.6 km) 前5分/(6.1/7.6 km)
	彝良	30%/70%	1.27	100%/100%	3.17	100%/100%	3.81	前5分/(2.0/2.8 km)
	宁洱	100%/100%	5.08	100%/100%	3.81	100%/100%	4.44	未识别出中尺度气旋
	江川 <sup>(1)</sup>	100%/100%	8.26	100%/100%	8.89	100%/100%	7.62	未识别出中尺度气旋
	墨江	100%/100%	2.54	100%/100%	3.81	100%/100%	5.72	未识别出中尺度气旋
D型	丽江	40%/80%	1.27	70%/100%	2.54	100%/100%	2.54	未识别出中尺度气旋
	嵩明	未识别	未识别	90%/90%	1.9	100%/100%	3.18	未识别出中尺度气旋
	弥勒 <sup>(1)</sup>	80%/100%	1.9	60%/80%	1.27	未识别	未识别	未识别出中尺度气旋
	澄江 <sup>(1)</sup>	未识别	未识别	70%/90%	1.9	100%/100%	2.54	未识别出中尺度气旋
	弥勒 <sup>(2)</sup>	未识别	未识别	70%/90%	1.9	100%/100%	3.17	前5分/(1.8/3.7 km)
	元谋	80%/100%	1.9	80%/100%	1.9	100%/100%	3.81	未识别出中尺度气旋
	弥勒 <sup>(3)</sup>	50%/80%	1.27	40%/80%	1.27	60%/70%	1.27	未识别出中尺度气旋
	澄江 <sup>(2)</sup>	70%/80%	1.27	70%/80%	1.9	80%/100%	1.9	未识别出中尺度气旋
	江川 <sup>(2)</sup>	20%/80%	1.27	70%/100%	1.9	20%/80%	1.27	前5分(4.0/6.5 km)
T型	石林	10%/80%	1.27	60%/90%	1.27	100%/100%	3.17	未识别出中尺度气旋
	安宁	100%/100%	3.17	100%/100%	3.17	100%/100%	3.17	未识别出中尺度气旋
	峨山	未识别	未识别	50%/80%	1.27	90%/90%	1.9	未识别出中尺度气旋
	澄江 <sup>(3)</sup>	未识别	未识别	60%/70%	1.27	80%/90%	1.9	未识别出中尺度气旋
	江川 <sup>(3)</sup>	未识别	未识别	50%/60%	1.27	100%/100%	3.17	未识别出中尺度气旋
	江川 <sup>(4)</sup>	50%/80%	1.27	100%/100%	1.9	100%/100%	2.54	未识别出中尺度气旋

(注:表中降雹地点若相同则按出现顺序排序)

表 7 冰雹灾害综合预警指标

	春季 N 型	夏季 D 型和 T 型
雷达回波特征	(1)回波中心强度 50 dBz; (2)35 ~ 40 dBz 回波高度 $\geq 6$ km; (3)30 dBz 水平尺度 $\geq 30$ km; (4)4 km 以上的弱回波区; (5)典型钩状回波、弓形回波、带状回波、“V”型缺口、回波墙、悬垂结构等特征; (6)速度场提前 30 min 出现风场辐合、气旋性辐合、逆风区等。	(1)回波中心强度 50 dBz; (2)35 ~ 40 dBz 回波高度 $\geq 4$ km; (3)30 dBz 水平尺度 $\geq 20$ km; (4)速度场提前 30 min 出现风场辐合、气旋性辐合、逆风区等; (5)三体散射现象。
雷达产品阈值	(1)VIL 值提前 30 min 开始出现跃增; (2)VIL 值 $\geq 30$ kg/m <sup>2</sup> ; (3)冰雹概率 $\geq 100\%$ ; (4)中尺度气旋。	(1)VIL 值提前 30 min 开始出现跃增; (2)VIL 值 $\geq 30$ kg/m <sup>2</sup> ; (3)冰雹概率 $\geq 80\%$ ; (4)中尺度气旋。

## 9 冰雹灾害的综合预警指标

通过以上的分析,可以看出云南不同天气型的冰雹灾害在雷达回波特征上有较为明显的差别,春季南支槽影响型降雹水平尺度大,强回波中心高度高,出现了较多典型钩状回波、弓形回波、带状回波、“V”型缺口等特征,弱回波区和倾斜的悬垂结构也很明显,三体散射出现的频率却不高;而许多夏季中纬度西风槽影响型和减弱的西行台风影响型的降雹个例在水平尺度、回波形状、垂直伸展高度上都不如南支槽型典型,却出现了三体散射现象,因此对各天气型冰雹灾害的预警指标应分别讨论,同时多种指标的联合使用也十分必要。表 7 中综合给出了不同天气型的雷达回波特征及产品阈值。若雷达回波中心强度达到 50 dBz (指标 1),则预示可能出现冰雹天气,此时应进一步关注其它指标的变化。若回波水平尺度、垂直伸展高度进一步增大,回波形状也出现了降雹指征(指标 2、3、4),则预示发生冰雹的可能性增大,此时应考虑发布冰雹预警信号;若水平尺度上变化不大,但速度场上有明显的指征(指标 6),VIL 值也出现跃增(产品指标 1),同时冰雹概率在 80% ~ 100%(产品指标 3),也应考虑发布冰雹预警信号;若水平尺度上变化不大,速度场上也无明显的特征,但 VIL 值出现了明显的跃增(产品指标 1),同时伴随有三体散射现象(指标 7),也应考虑发布预警信号。若 VIL 值进一步跃增到 30 kg/m<sup>2</sup>及以上(产品指标 2)应立即发布冰雹预警信号。若

出现了中尺度气旋(产品指标 4)或典型冰雹形状特征(指标 5)应立即发布强冰雹预警信号。

## 参考文献:

- [1] 李湘,胡娟,鲁韦坤,等. 云南灾害性冰雹天气的时空分布和环流特征分析[J]. 成都信息工程学院学报, 2014, 29(S2): 72-77.
- [2] 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.
- [3] 黄莉,詹莹玉,白龙,等. 2013 年广西春季混合型强对流天气分析[J]. 灾害学, 2014, 29(4): 38-42.
- [4] 井喜,屠妮妮,井宇,等. 毛乌素沙漠东部边缘中 B 尺度暴雨和冰雹综合分析[J]. 灾害学, 2010, 25(1): 73-77.
- [5] 应冬梅,许爱华,黄祖辉,等. 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, 2007, 33(3): 48-53.
- [6] 张腾飞,段旭,鲁亚斌,等. 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, 2006, 25(3): 531-538.
- [7] 李磊,朱莉. “20110629”云南特大区域性冰雹天气过程分析[J]. 云南大学学报:自然科学版, 2013, 35(2): 199-207.
- [8] 张崇莉,和爱群,钱宝敏,等. 滇西北高原冰雹天气的多普勒雷达回波特征[J]. 云南大学学报:自然科学版, 2011, 33(Supp. 2): 367-373.
- [9] 尹丽云,徐远,郭荣芬,等. 滇中夏季冰雹天气背景及防雹作业时机的分析研究[J]. 云南大学学报:自然科学版, 2009, 31(4): 383-388.
- [10] 廖玉芳,俞小鼎,吴林林,等. 强雹暴的雷达三体散射统计与个例分析[J]. 高原气象, 2007, 26(4): 812-820.

(下转第 98 页)

## The Vulnerability Assessment of Residences in Rainstorm Waterlogging in Cities —A Case Study on Shanghai

Shi Yong

(Department of Tourism and Management, University of Zhengzhou, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In recent years, in the international increasingly attention under the background of disaster prevention and mitigation, disaster vulnerability study become the theme of the study of disaster science and gradually into the social sustainable development strategy. On the basis of previous work at home and abroad, we constructed the vulnerability curve of residence structure in allusion to different income groups by the synthesis method. Using GIS to make spatial distribution, we carried out vulnerability special spreading in Tianping Street which was suffered from “Matsa” the most, the typical waterlogging disaster scenario in history, to make sure key areas and main objects of protection, to provide scientific basis for decision-making, and to achieve sustainable development of cities.

**Key words:** city; rainstorm waterlogging; vulnerability assessment; vulnerability curve; scenario simulation; GIS; Shanghai

.....  
(上接第 93 页)

## Doppler Radar Statistical Characteristics and Early Warning Index of Yunnan Hail Disaster

Li Xiang<sup>1</sup>, Zhang Tengfei<sup>2</sup>, Hu Juan<sup>1</sup> and Lu Weikun<sup>3</sup>

(1. Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650034, China; 2. Yunnan Weather Modification Center, Kunming 650034, China; 3. Yunan Climate Center, Kunming 650034, China)

**Abstract:** Using Doppler radar products and hail disaster data of Yunnan Province during 2006-2007 and selecting 22 hailing process with hail diameters greater than or equal to 5mm, the hail weathers are classified statistically analyzed. Results show that, The Southern Branch trough type hails in spring has echo large horizontal scales and high kernel, as well as typical hook echo and bow echo and V notch and weak echo region and overhanging structure, on the other hand, the mid latitude westerly trough type and westward typhoon type hails in summer easy to produce three body scattering. In spring there are a few Joint early-warning index such as echo strength more than 50dBz, kernel higher than 6km, 30dBz -horizontal scale greater than 30km, WER greater than 4km, typical supercell characteristics, wind field convergence, the cyclonic convergence, adverse wind area, VIL jump, hail probability greater than 100% and meso-scale cyclone; In summer there are still a few Joint early-warning index such as echo strength more than 50dBz, kernel higher than 4km, 30dBz-horizontal scale greater than 20km, wind field convergence, the cyclonic convergence, adverse wind area, three body scattering, VIL jump, hail probability greater than 80% and meso-scale cyclone.

**Key words:** hail disaster; Doppler radar; statistical characteristics; early warning index