

段鹤, 严华生, 马学文, 等. 2014. 滇南冰雹的预报预警方法研究. 气象, 40(2): 174-185.

## 滇南冰雹的预报预警方法研究<sup>\* 1</sup>

段 鹤<sup>1,2</sup> 严华生<sup>2</sup> 马学文<sup>1</sup> 罗庆仙<sup>1</sup> 刘建平<sup>1</sup>

1 云南省普洱市气象局, 普洱 665000

2 云南大学大气科学系, 昆明 650091

**提 要:** 利用普洱市探空资料、CIND3830-CC 新一代天气雷达资料、地面观测资料, 对 2004—2011 年滇南普洱、西双版纳冰雹天气过程进行统计分析, 总结出冰雹 4 个预报指标: (1) 当单体回波满足冰雹云的初始特征和发展阶段特征时, 可预报未来出现冰雹的可能较大, 预报提前 60 min 以内; (2) 当回波的组合反射率  $\geq 55$  dBz、宽度  $\geq 12.0$  km、梯度  $\geq 15$  dBz  $\cdot$  km<sup>-1</sup>、 $H_{45 \text{ dBz}} \geq 7.5$  km、2—5 月  $H_{45 \text{ dBz}} - H_0 \geq 3.1$  km 且  $H_{45 \text{ dBz}} - H_{-20} \geq -0.5$  km、6—8 月  $H_{45 \text{ dBz}} - H_0 \geq 2.0$  km 且  $H_{45 \text{ dBz}} - H_{-20} \geq -1.2$  km、 $VIL \geq 30$  kg  $\cdot$  m<sup>-2</sup>、 $D_{VIL} \geq 3.0$  g  $\cdot$  m<sup>-3</sup> 时, 预报有冰雹发生, 预报提前 12~102 min; (3) 当回波具有弱切变特征、45 dBz 回波顶高  $\geq 7.5$  km、2—5 月  $H_{45 \text{ dBz}} - H_0 \geq 3.1$  km 且  $H_{45 \text{ dBz}} - H_{-20} \geq -0.5$  km、6—8 月  $H_{45 \text{ dBz}} - H_0 \geq 2.0$  km 且  $H_{45 \text{ dBz}} - H_{-20} \geq -1.2$  km 时, 可预报有冰雹出现, 预报提前 18~54 min; (4) 若除去飢线和下击暴流回波, 当回波的  $VIL \geq 30$  kg  $\cdot$  m<sup>-2</sup>、 $D_{VIL} \geq 3.0$  g  $\cdot$  m<sup>-3</sup> 时, 可预报有冰雹出现, 预报提前 12~54 min。此外, 还总结了冰雹云的生命期特征等, 并利用 2012 年发生的冰雹天气过程检验了预报指标。

**关键词:** 天气预报, 冰雹, 统计特征, 垂直剖面, 飢线

**中图分类号:** P456 P415

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.02.005

## Study of the Method for Hail Forecasting and Warning in Southern Yunnan

DUAN He<sup>1,2</sup> YAN Huasheng<sup>2</sup> MA Xuewen<sup>1</sup> LUO Qingxian<sup>1</sup> LIU Jianping<sup>1</sup>

1 Puer Meteorological Office of Yunnan Province, Puer 665000

2 Department of Atmospheric Science, Yunnan University, Kunming 650091

**Abstract:** Based on the air-sounding data, the CIND3830-CC CINRAD data and surface observation data, the hail event processes seen in Puer and Xishuangbanna during 2004—2011 are analyzed. The results show that: (1) hail can be forecasted 60 min in advance when initial and developing features of hail-cloud appear in the radar echo images. (2) Hail can be forecasted 12 to 102 min earlier before the event occurs, if echo composite reflectivity  $\geq 55$  dBz, width  $\geq 12.0$  km, gradient  $\geq 15$  dBz  $\cdot$  km<sup>-1</sup>,  $H_{45 \text{ dBz}} \geq 7.5$  km,  $H_{45 \text{ dBz}} - H_0 \geq 3.1$  km and  $H_{45 \text{ dBz}} - H_{-20} \geq -0.5$  km during February—May,  $H_{45 \text{ dBz}} - H_0 \geq 2.0$  km and  $H_{45 \text{ dBz}} - H_{-20} \geq -1.2$  km,  $VIL \geq 30$  kg  $\cdot$  m<sup>-2</sup>,  $D_{VIL} \geq 3.0$  g  $\cdot$  m<sup>-3</sup> during June—August. (3) If the echo shows the features of weak shear, echo top in 45 dBz  $\geq 7.5$  km,  $H_{45 \text{ dBz}} - H_0 \geq 3.1$  km and  $H_{45 \text{ dBz}} - H_{-20} \geq -0.5$  km during February—May,  $H_{45 \text{ dBz}} - H_0 \geq 2.0$  km and  $H_{45 \text{ dBz}} - H_{-20} \geq -1.2$  km during June—August, hail can be forecasted with 18—54 min in advance. (4) In addition to squall line and downburst, hail can be forecasted 12—54 min earlier if  $VIL \geq 30$  kg  $\cdot$  m<sup>-2</sup>,  $D_{VIL} \geq 3.0$  g  $\cdot$  m<sup>-3</sup>. Besides, this paper summarizes the characteristics of hail-cloud lifetime, and tests forecast indice by using the hail process in 2012.

**Key words:** forecast, hail, statistic feature, vertical profile, squall line

\* 国家自然科学基金项目(41075072)和中国气象局预报员专项(CMAYBY2013-063)共同资助  
2012 年 12 月 2 日收稿; 2013 年 5 月 8 日收修定稿  
第一作者: 段鹤, 主要从事天气预报研究. Email: T\_n\_t@126.com

## 引言

早在20世纪70年代,雷雨顺等(1978)就对冰雹天气进行了系统深入的研究。近年来,刘玉玲等(1998)、彭治班等(2001)、金永利等(2002)、尤莉等(2006)致力于冰雹的预报方法的研究,建立了天气形势预报、物理量参数预报等预报方法,在短期天气预报业务应用中取得了较好的效果。此外,国内外科学家在应用雷达识别冰雹云方面做了大量的工作,Mather等(1976)把45 dBz高度 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 层高度( $H_0$ )+3.3 km作为地面降雹的判据,瑞士、法国、意大利(Federer, et al, 1978/1979)等国将45 dBz高度 $\geq H_0 + 1.4$  km作为冰雹识别指标,河南省把40 dBz作为有无冰雹的判据之一(张素芬等, 1999),陕北地区用711雷达的45 dBz强回波顶高 $\geq H_0 + 2.3$  km作为判据来识别冰雹云(樊鹏等, 2005),这些研究为冰雹云的短临预报提供了参考。

但是,针对低纬高原地区的滇南冰雹的研究却十分少见,滇南普洱、西双版纳地处低纬高原地区,春夏季冷暖空气交汇频繁,致使冰雹成为滇南春夏季主要的气象灾害之一,冰雹常给农作物带来重大灾害损失,还会导致人畜伤亡,严重威胁人民生命和财产安全。冰雹具有突发性强、持续时间短、影响范围小的特点,加上滇南山地面积占总面积的95%以上,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, 1985),增加了滇南冰雹预报的难度。随着近年来滇南地区茶叶、烤烟、咖啡、橡胶等经济作物栽种面积的迅速增加,使得滇南冰雹的预报预警方法研究更具有重要实际意义。

本文利用常规气象资料找出适宜于滇南冰雹的物理量参数潜势预报指标,利用普洱CIND3830-CC

新一代天气雷达研究滇南冰雹云的临近预报指标,并将两个指标结合起来,建立滇南冰雹的预报预警方法。

## 1 资料

选取2004—2011年普洱、西双版纳地区所有的冰雹天气过程进行分析,共24次冰雹天气过程,43例冰雹云。当任意1站出现冰雹或出现灾情时,记为1例冰雹云(同一冰雹云影响多个站点时计为1例,43例冰雹云导致60个乡镇降雹)。实况取自普洱、西双版纳自动站数据和灾情直报数据。常规气象资料取自MICAPS数据和思茅探空站数据,雷达资料选取普洱新一代天气雷达2004—2012年采集的所有资料,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。

冰雹的发生时间和落区特征为(表1):24次滇南冰雹天气过程均发生于2—8月,其中4月12次,占50%,3月5次,占21%,6月3次,占12.5%,2、5、7和8月各1次。43例冰雹云出现的时段:14—23时42次,09时1次;出现最多的时段为17—18时,共18次,占41.8%,其次为15时6次,占14.0%,20时5次,占11.6%,16和21时各3次,各占7%,14、19和22时各2次,23时1次。冰雹落区:墨江境内出现15次降雹,景洪14次,思茅10次,宁洱8次,勐腊5次,勐海3次,澜沧、镇沅各2次,江城1次。

## 2 冰雹发生前的环境场特征

分析冰雹发生前12 h内的探空资料(思茅探空站位于雷达站西南侧,直线距离6.2 km),总结冰雹发生前的环境场特征。

表1 冰雹天气过程发生的月份及对应的次数、 $H_0$ 、 $H_{-20}$ ( $-20^{\circ}\text{C}$ 层高度),冰雹云出现时刻及对应次数

Table 1 The time,  $H_0$ ,  $H_{-20}$  ( $-20^{\circ}\text{C}$  layer) and frequency of hail weather and the time and frequency of hail-cloud

月份	冰雹天气过程/次	$H_0/\text{km}$	$H_{-20}/\text{km}$	冰雹云出现时刻及对应次数
2	1	3.9	7.1	09、23时各1次
3	5	3.8~4.3	7.2~7.5	14、19、22时各2次
4	12	3.9~4.7	7.2~8.1	15时6次
5	1	5.0	8.3	16时3次
6	3	5.2~5.5	8.4~8.9	17时9次
7	1	5.2	8.6	18时9次
8	1	5.0	8.3	20时5次,21时3次

## 2.1 0℃、-20℃层高度特征

0和-20℃层分别是云中冷暖云分界线高度和大水滴的自然冰化区下界,是雹云特征的重要参数。普洱降雹天气过程中,0和-20℃层高度的日变化平均值均 $<0.2$  km。

降雹天气过程对应的  $H_0$  为 3.8~5.5 km,平均 4.5 km,其中,2和3月冰雹对应的  $H_0$  为 3.8~4.3 km,4月冰雹对应的  $H_0$  为 3.9~4.7 km,5—8月冰雹对应的  $H_0$  为 5.0~5.5 km(表1)。

降雹天气过程对应的  $H_{-20}$  为 7.1~8.9 km,平均 7.8 km,其中,2和3月冰雹对应的  $H_{-20}$  为 7.1~7.5 km,4月冰雹对应的  $H_{-20}$  为 7.2~8.1 km,5—8月冰雹对应的  $H_{-20}$  为 8.3~8.9 km(表1)。

## 2.2 $T_{850}$ 、 $T_{500}$ 、 $T-T_{d850}$ 和 $T-T_{d500}$ 特征

分析发现,普洱探空资料中,20时的  $T_{850}-T_{500}$  值明显大于 08时的  $T_{850}-T_{500}$  值。

20时前开始降雹的天气过程共 22例,对应的  $T_{850}$  为 13~20℃,平均 16.5℃;  $T_{500}$  为 -2~-13℃,平均 -8℃;  $T_{850}-T_{500}$  为 21~28℃,平均 24.6℃。

20时后开始降雹的天气过程共 2例,对应的  $T_{850}$  分别为 26和 25℃;  $T_{500}$  分别为 -9和 -5℃;  $T_{850}-T_{500}$  分别为 35和 30℃。

降雹天气过程对应的  $T-T_{d850}$  平均值为 2.8℃,其中,有 22次(91.7%)过程的  $T-T_{d850} \leq 5^\circ\text{C}$ ,可视作湿区,并有 17次过程的  $T-T_{d850} \leq 2^\circ\text{C}$ 。

降雹天气过程对应的  $T-T_{d500}$  平均值为 11.3℃,其中,有 6次过程的  $T-T_{d500} \leq 5^\circ\text{C}$ 。

上述分析表明 92%的降雹天气具有明显的上冷下暖特征,75%的降雹天气具有明显的上干冷,下暖湿特征,利于对流发展。

## 2.3 SI指数、K指数、 $\sum\theta_{se}$ 能量锋和 $\theta_{se500}-\theta_{se850}$

降雹天气过程中,有 72.3%的 SI指数  $\leq 0$ ,K指数为 29~45℃。

83.3%降雹天气过程中,冰雹落区位于  $\theta_{se500}-\theta_{se850}$  负值中心区域或中心附近。87.5%降雹天气过程中,冰雹落区位于  $\sum\theta_{se}$  能量锋( $\sum\theta_{se}=\theta_{se500}+\theta_{se700}+\theta_{se850}$  反映了 500~850 hPa 总能量的分布)中心区域或南缘。

## 3 冰雹云的雷达回波特征

### 3.1 冰雹云生命期特征

将冰雹云的生命期分为 4个阶段:分析滇南冰雹云的基本反射率发现,雷达观测到冰雹云的第 1个体扫回波往往为点状或面积很小的弱回波,第 2或第 3个体扫回波才具有明显的回波中心,因此,将冰雹云第 1~3个体扫时段定义为初始阶段,将第 1~3个体扫中首个具有明显回波中心,中心高度在 4~5 km 左右,强度在 40~45 dBz 的回波视为冰雹云的初始回波;将冰雹云初始阶段之后至降雹之前的时段定义为发展阶段;降雹的时段定义为成熟阶段;组合反射率降低至 55 dBz 到回波消散的时段定义为消散阶段。

滇南的降雹形式有:移入回波降雹(4次)、回波单体发展降雹(19次)、回波合并降雹(19次)、飊线迅速生成降雹(1次)。

移入回波降雹无发展阶段特征,其成熟阶段维持时间差异较大,分别为:18、52、24和 108 min。

回波单体发展降雹具有明显的生命期特征,19次降雹过程中,发展阶段维持时间为 24 min 2次,其余为 30~48 min(89.5%);成熟阶段生命期为:30~48 min 16次(84.2%)、18~24 min 2次、60 min 1次。

回波合并降雹在发展阶段存在爆发性增长,生命期特征无规律;成熟阶段维持时间:30~36 min 11次(57.9%)、18~24 min 6次、52和 72 min 各 1次。

飊线迅速生成降雹仅出现 1次,发展阶段为 24 min 左右,成熟阶段为 42 min 左右。

滇南冰雹的消散阶段常常形成层状云回波,维持时间长。

### 3.2 冰雹云的初始及发展阶段回波特征

除移入回波降雹和飊线迅速生成降雹外,回波单体发展降雹(19次)、回波合并降雹(19次)具有初始回波特征和发展阶段特征(88.3%)。

在前期研究基础上(段鹤等,2011),进一步总结完善单体发展降雹的 I、II 两种初始特征和发展过程特征, I 型 12 块(表略),有 1个初始特征和 3个发展阶段特征:

(1) 初始回波强中心高度在 4~5 km 左右,接近 0°C 层高度,强度在 40~45 dBz(图 1a)。

(2) 第一发展阶段:1~4 个体扫时间(图 1a~1c),垂直方向上,回波中心强度变化缓慢,回波总体强度迅速增长,顶高跃增,30~40 dBz 左右的回波迅速增加,水平方向上强度和面积均明显增长。

(3) 第二发展阶段:单体的高度和强度缓慢变化(图 1c 和 1d),但单体的强中心移向回波的某一侧,一般移向回波移动的反方向,此阶段维持 1~5 个体扫时间不等。

(4) 第三发展阶段:2~4 个体扫,水平方向上回波宽度(即冰雹云云体的宽度)迅速增长,达到或超过 12 km,回波中心强度和垂直高度迅速增长,顶高跃增,45 dBz 回波顶高达到或超过 7.5 km,回波中心强度超过 55 dBz,出现降雹(图 1d~1f)。

II 型有 7 块,具有 1 个初始特征和 2 个发展阶段特征(表略):

(1) 初始回波强中心高度在 4~5 km 左右,接近 0°C 层,强度在 40~45 dBz 左右(图 1g)。

(2) 第一发展阶段:2~4 个体扫,垂直方向上,回波中心强度迅速增强,顶高跃增,40~45 dBz 回波顶高超过 7.5 km,45 dBz 的回波面积较小;水平方向上回波面积增长缓慢,回波宽度仅 6~11 km 左右(图 1g~1i)。

(3) 第二发展阶段:2~4 个体扫,回波总体强度和中心强度迅速增强,中心强度超过 55 dBz,顶高跃增,水平方向上回波宽度迅速增长,达到或超过 12 km,出现降雹(图 1j~1l)。

回波合并降雹包括单体合并降雹和飏线与单体合并降雹两种。单体合并降雹的特征是:

(1) 存在多个零散的块状或带状对流单体。

(2) 初始回波处于发展、加强阶段,强中心高度接近 0°C 层高度,强度在 40 dBz 左右。

(3) 初始回波迅速移向其他单体,与其他单体合并,强度迅速加强,宽度达到或超过 12 km,45 dBz 回波顶高达到或超过 7.5 km,回波中心强度超过 55 dBz,出现降雹。

当多个单体合并时,甚至合并形成有规律的条、带排列,出现有规律的组织结构,并发展成为飏线的情况。而飏线与单体合并较容易判断,在飏线移动方向上出现对流单体时,飏线中的强回波常常与对流单体合并加强,形成冰雹云。

飏线迅速生成降雹仅出现 1 次,2007 年 4 月 7

日的飏线过程中,回波强度发展迅速,4 个体扫时间内,由 30~40 dBz 的块状回波,迅速发展为 50~55 dBz 的弓状回波,生成飏线并达到成熟期,此类降雹无明显前兆特征。

此外,统计分析冰雹云初始阶段的移速特征发现,存在与其他单体合并后成片状不能判断移速的情况(2011. 6. 27)和合并后速度较慢的情况(2007. 7. 27 两块,2011 年 8 月 31 日 1 块,3 块回波移速均为 25  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ),其他 39 例(90.7%)移速  $\geq 30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,其中有 13 例的移速超过 50  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。速度图中,所有冰雹云的初始阶段均存在明显的辐合特征,主要表现为逆风区。

### 3.3 冰雹云的成熟阶段特征

统计冰雹云成熟阶段的组合反射率(CR)、回波宽度、回波梯度、45 dBz 顶高高度( $H_{45 \text{ dBz}}$ )、速度图特征、垂直风切变特征、回波移速、是否倾斜、VIL、VWP、以及冰雹云成熟阶段生命期等特征。以不同月份、不同雷达扫描区域、不同发展方式、时间最长和最短、冰雹直径最大、 $H_{45 \text{ dBz}}$  最高、径向速度切变量最小的 10 次冰雹云为图例(图 2)。

#### 3.3.1 冰雹云成熟阶段的总体特征

统计 43 块冰雹云发现,冰雹云成熟阶段的移速较初始阶段移速无明显变化;冰雹云总体为块状 27 块、带状 16 块;冰雹云宽度为 12.0~32.0 km(图 2b),带状回波宽度相对较小;对冰雹云作垂直剖面发现,仅有 46.5% 的冰雹回波存在明显的倾斜特征(图 2h 和 2q)。此外,冰雹云的典型特征 TBSS 共出现 8 次(2007. 4. 10 和 2008. 2. 28 各 2 块;2008. 3. 8、2008. 4. 14、2010. 4. 16 及 2010. 5. 09 各 1 块;图 2b、2i、2j 和 2l)、弱回波区 3 次(2007. 4. 7 有 1 块;2007. 4. 10 有 2 块;图 2h)、V 型缺口特征 1 次(2004. 4. 14)。

#### 3.3.2 冰雹云成熟阶段的反射率特征

冰雹云成熟阶段的反射率特征为:组合反射率(CR)为 55 至 69 dBz(图 2r);对冰雹云做垂直剖面发现,除 2008 年 3 月 8 日 09:15 景洪城区的冰雹为 6.9 km 外,冰雹云的  $H_{45 \text{ dBz}}$  为 7.5~12.4 km(图 2n),以 45 dBz 为基础值分析冰雹云的梯度发现:梯度均大于 15  $\text{dBz} \cdot \text{km}^{-1}$ (图 a 和 2k),其中,39.5% 的冰雹云梯度大于 20  $\text{dBz} \cdot \text{km}^{-1}$ (表 2,注意:同一回波同时影响多个乡镇时,显示一个数据;同一回波先后影响时的数据用“,”隔开;不同回波之间的数据

用“;”隔开;因 VIL 尾数仅显示 3 或 8,故取色标中的最低值)。

### 3.3.3 冰雹云成熟阶段的 VIL、 $D_{VIL}$ 、VWP 特征

统计分析冰雹云成熟阶段的垂直液态水含量(VIL)特征发现(表略),除 2008 年 3 月 8 日 09:15 景洪城区的 VIL 值为  $25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  外,冰雹成熟阶段的 VIL 值为  $30 \sim 60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,平均  $45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。冰雹发生前所有冰雹回波在一个体扫时间内均出现  $5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  以上的跃增;有 70.1% 的冰雹出现了  $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  以上的跃增;有 27.9% 的冰雹出现了  $15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  以上的跃增。

滇南冰雹云的 VIL 值明显偏小:76.7% 的冰雹云达不到 VIL 的冰雹预警指标( $45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ),由于 VIL 产品是反映降水云体中,在某一确定的底面积的垂直柱体内液态水总量的物理量产品,是回波反射率因子数据转换成等价液态水值在垂直方向上的累加,即 VIL 是假设反射率因子 Z 都是由液态水粒子所贡献的,是累加值。因此,VIL 偏小的原因可能为:(1)滇南地区地形复杂,95% 为山区,可能存在遮挡;(2)有 46.5% 的滇南冰雹回波存在倾斜特征;(3)雷达扫描时,其扫描策略决定了靠近雷达和远离雷达的冰雹云的顶部和底部不能被探测到。

由于 VIL 将冰雹中的冰晶粒子所贡献的反射率因子视为液态水粒子所贡献,而导致冰雹的 VIL 累加值偏高,那么  $VIL/H$  ( $H$  为回波总体的高度)也应偏高。因此,尝试分析 VIL 密度的  $D_{VIL} = VIL/H$ ,以弥补 VIL 的不足,分析发现,冰雹云的  $D_{VIL}$  为  $3.0 \sim 6.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  (表 2)。统计短时强降水(小时雨量  $\geq 30 \text{ mm}$ )和大风的  $D_{VIL}$  发现,除两次飑线导致的强降水外(2006 年 7 月 27 日降水回波的  $D_{VIL}$  为  $3.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、2009 年 3 月 31 日  $D_{VIL}$  为  $3.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ),强降水的  $D_{VIL}$  均低于  $2.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,除飑线导致的大风和下击暴流大风外,大风的  $D_{VIL}$  均低于  $1.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。说明滇南冰雹云的  $D_{VIL}$  与大风和短时强降水的  $D_{VIL}$  存在显著差异,可用  $D_{VIL}$  弥补 VIL 的不足。

风廓线产品(VWP)是平均水平风随高度变化的图形显示产品。它的算法是使用当前体扫模式的每个仰角的全方位扫描录取的速度资料,计算半径为 30 km 的水平区域中总共 30 个由用户定义的高度上的二维平均水平风(刘志澄等,2002),从而得到平均风向风速随高度变化的垂直廓线,而且通过验证(胡明宝等,2000)。统计 43 次冰雹云中 30 km

水平区域内的 7 次冰雹发现,7 次均存在明显的垂直风切变特征(1 次存在明显的风向切变),其中 6 次的风切变较强的区域集中在  $2.1 \sim 4.6 \text{ km}$ ,1 次为  $5.8 \sim 7.3 \text{ km}$ ,切变均达  $4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,此结果与径向速度图的垂直剖面中的分析结果一致。

### 3.3.4 冰雹云成熟阶段的负温区厚度特征、45 dBz 强回波在负温区中的厚度特征

冰雹成熟阶段负温区厚度( $ET-H_0$ )为  $4.2 \sim 11.9 \text{ km}$ ,大水滴冰化区( $ET-H_{-20}$ )高度为  $0.5 \sim 8.8 \text{ km}$ ,负温区厚度和大水滴冰化区范围较大,且负温区厚度范围与国内其他研究(李德俊等,2011)差异较大,其原因可能为:滇南冰雹与回波顶高高度无明显对应关系,而 45 dBz 强回波高度与滇南冰雹有较好对应关系(段鹤等,2011)。因此,研究 45 dBz 强回波在负温区中的厚度特征(表 2):滇南冰雹的  $H_{45 \text{ dBz}} - H_0$  为  $2.0 \sim 8.3 \text{ km}$ ,其中,2—5 月: $3.1 \text{ km} \leq H_{45 \text{ dBz}} - H_0 \leq 8.3 \text{ km}$ ,6—8 月: $2.0 \text{ km} \leq H_{45 \text{ dBz}} - H_0 \leq 7.2 \text{ km}$ ;87.8% 的冰雹云中,在大水滴冰化区中存在强度达 45 dBz 的回波,2—5 月: $-0.5 \text{ km} \leq H_{45 \text{ dBz}} - H_{-20} \leq 5.1 \text{ km}$ ,6—8 月: $-1.2 \text{ km} \leq H_{45 \text{ dBz}} - H_{-20} \leq 4.0 \text{ km}$ 。

### 3.3.5 冰雹云成熟阶段生命期与其他特征的对应关系

统计分析冰雹云成熟阶段的生命期发现:

(1)  $0.5^\circ$  仰角中,径向速度切变量  $\leq 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的 12 块冰雹云的成熟阶段生命期均  $\leq 30 \text{ min}$  (切变量 = 强回波中最大正速 + 最大负速度 / 2),而径向速度切变量  $\geq 6.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的 31 次冰雹过程中,有 28 块(90.3%)冰雹云的成熟阶段生命期  $\geq 36 \text{ min}$ 。

(2)  $CR > 60 \text{ dBz}$  的 9 块冰雹云的成熟阶段生命期均  $\geq 36 \text{ min}$  (表 2 和表 3)。

(3)  $D_{VIL} > 5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  的 13 块冰雹云的成熟阶段生命期有 11 块超过 36 min,占 84.6% (表 2 和表 3)。

(4)  $H_{45 \text{ dBz}} - H_0 \geq 5.0 \text{ km}$  的 13 块冰雹云的成熟阶段生命期有 10 块  $\geq 36 \text{ min}$ ,占 76.9%。

(5) 19 次回波单体发展降雹过程中,有 17 次(89.5%)冰雹云的发展阶段生命期与成熟阶段生命期时间差小于 6 min (差别较大的两次分别为 2004 年 4 月 18 日和 2005 年 3 月 20 日)。

上述特征可为判断冰雹云成熟阶段生命期的维持时间提供参考。

### 3.3.6 冰雹云成熟阶段的速度图特征

冰雹云成熟阶段的速度图中,除了发生在景洪

小街出现 1 次速度模糊不能判断以外,冰雹云均存在明显的辐合特征,辐合特征表现形式有(存在同回波带有多个特征的情况):弱切变(11 块)、中尺度辐合(13 块)、逆风区(14 块)和大风区(24 块)等。分析径向速度的垂直剖面图发现,所有回波均存在高低层风速差异较大的特征即垂直风切变特征。其中,中尺度辐合是指在径向速度图中存在尺度为 20~200 km 的辐合;逆风区在径向速度图中,强回波的大片正(负)速度区内,包含了一片负(正)速度区,并有明显的零速度圆环或半圆环将二者隔开;弱切变满足如下判据:(1)核区直径 $\leq 10$  km。(2)转动速度小于中气旋识别的转动速度,大于  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。(3)垂直伸展厚度均超过 3 km。(4)满足上面 3 类指标的持续时间超过两个体扫时间。大风区的定义:普查 2004—2011 年  $0.5^\circ$  仰角径向速度图发现,径向速度 $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的回波在垂直高度具有风速、风向上较为接近的特征,而径向速度较小的强对流回波中,

往往存在高层风向和风速的突变,据此,定义大风区为  $0.5^\circ$  仰角径向速度图中,风速 $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,且回波整体移速一致即不存在明显风速辐合的区域。

### 4 冰雹云的预报指标的选取

冰雹发生前的环境场中的 0 和  $-20^\circ\text{C}$  层高度、 $T_{850}$ 、 $T_{500}$ 、 $T - T_{d850}$ 、 $T - T_{d500}$ 、SI 指数、K 指数、 $\sum \theta_{se}$  能量锋、 $\theta_{se500} - \theta_{se850}$  等特征为未来 12 h 内冰雹的潜势预报提供了一定参考,而冰雹云的多普勒雷达回波特征,为冰雹的临近预报提供了定性甚至定量化的指标。

#### 4.1 初始回波特征及发展特征预报冰雹云

对 2010—2011 年滇南大风和短时强降水(小时雨量 $\geq 30 \text{ mm}$ )的多普勒雷达特征进行总结,发现所得结论与段鹤等(2011)研究的统计特征一致,即:大

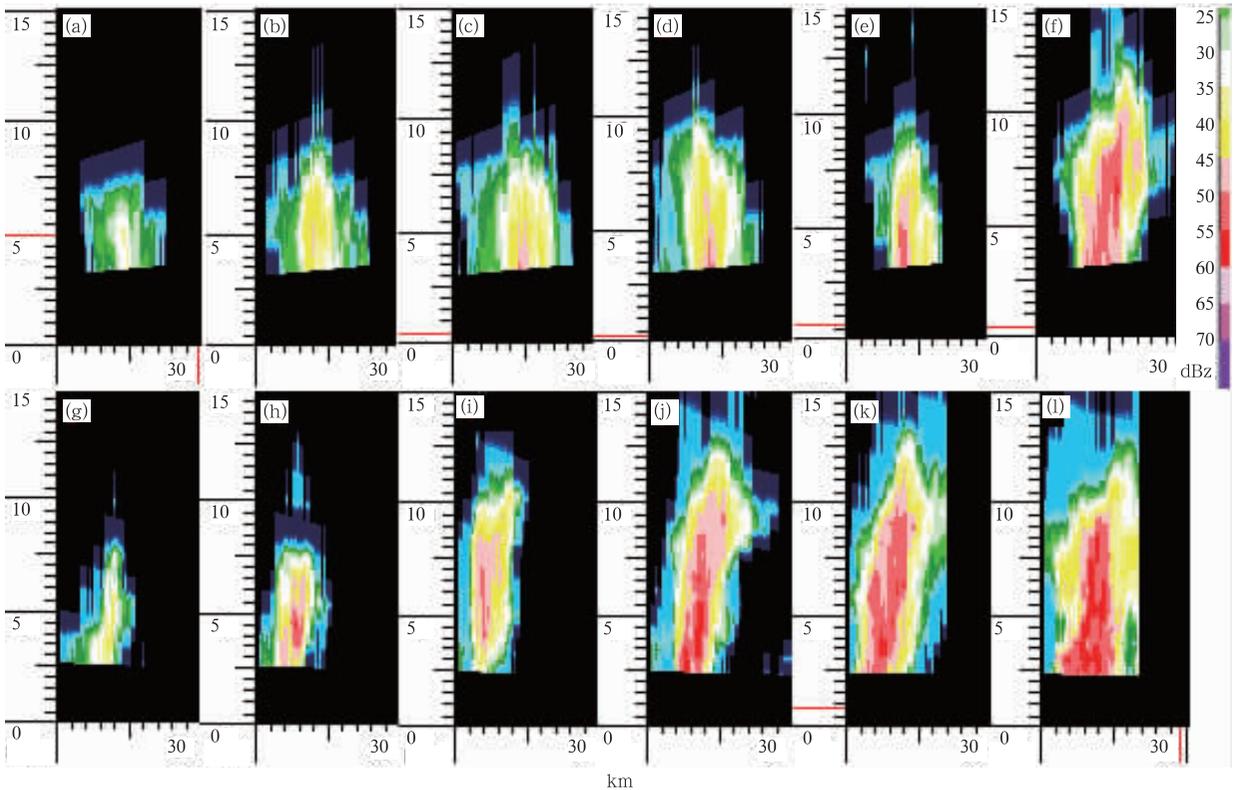


图 1 2007 年 4 月 7 日降雹单体的基本反射率垂直剖面  
 (a) 15:57, (b) 16:08, (c) 16:18, (d) 16:34, (e) 16:45, (f) 16:56,  
 (g) 20:45, (h) 20:51, (i) 20:56, (j) 21:02, (k) 21:08, (l) 21:19

Fig. 1 Vertical profiles of base reflectivity in convective cells on 7 April 2007  
 (a) 15:57 BT, (b) 16:08 BT, (c) 16:18 BT, (d) 16:34 BT, (e) 16:45 BT, (f) 16:56 BT,  
 (g) 20:45 BT, (h) 20:51 BT, (i) 20:56 BT, (j) 21:02 BT, (k) 21:08 BT, (l) 21:19 BT

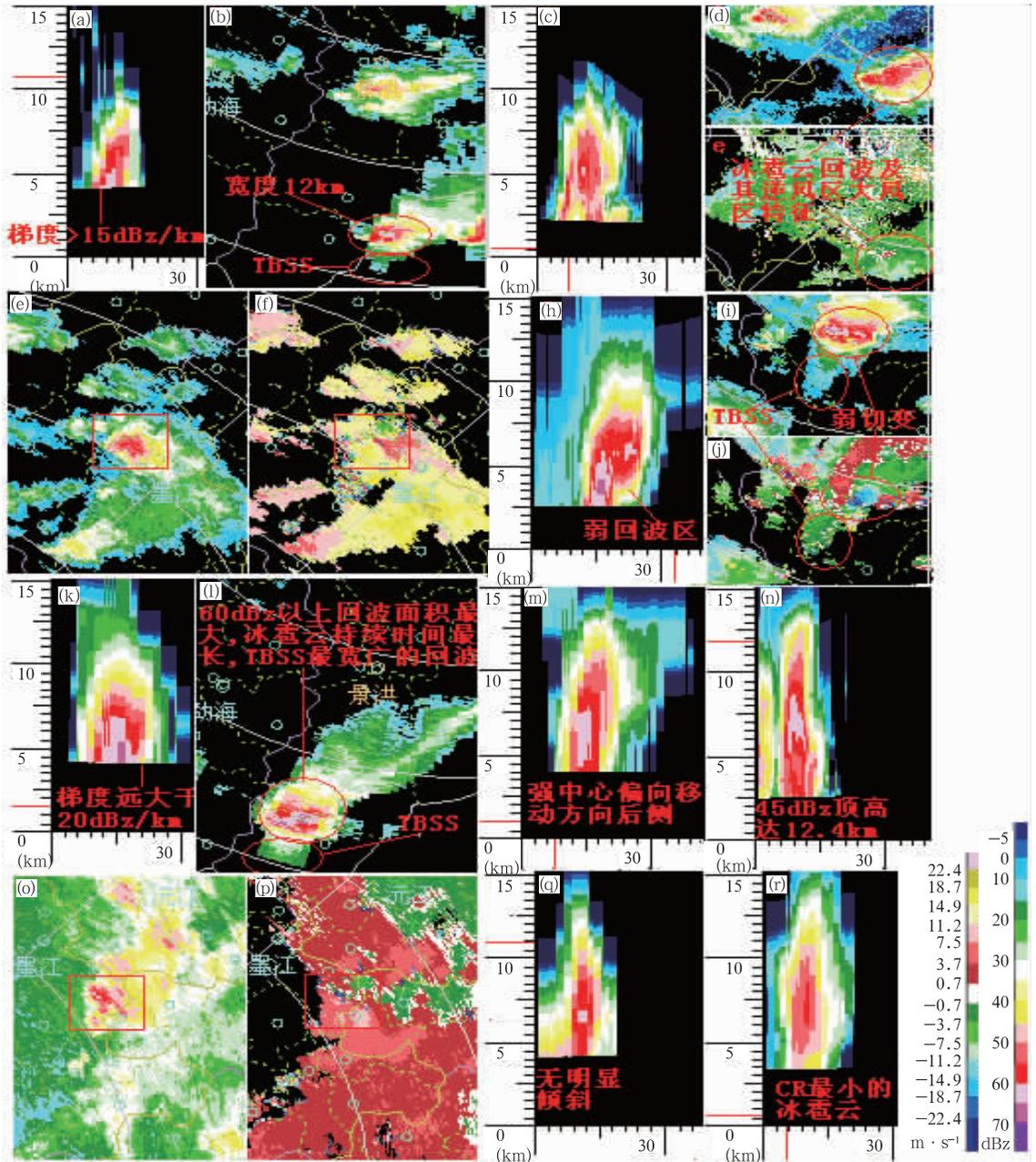


图2 冰雹回波的基本反射率垂直剖面(RHI)、CR、 $0.5^\circ$ 仰角基本反射率(R)和 $0.5^\circ$ 仰角径向速度(V), 2008年2月28日18:59景洪勐龙 RHI(a)、R(b), 2005年3月21日14:47思茅龙潭和六顺 RHI(c)、CR(d)、R(e), 2009年3月31日14:51墨江双龙和新安 CR(f)、V(g), 2007年4月10日15:23景洪勐龙 RHI(h)、R(i)和V(j), 2008年4月18日18:19景洪勐龙 RHI(k)、R(l), 2010年5月9日15:35景洪小街 RHI(m), 2007年6月24日22:26墨江通关、龙潭、鱼塘 RHI(n), 2011年6月27日20:00墨江龙坝 CR(o)、V(p), 2006年7月27日18:29镇沅勐大 18:29 RHI(q), 2011年8月31日21:52墨江团田 RHI(r)

Fig.2 Echo basic reflectivity vertical profile (RHI), CR,  $0.5^\circ$  elevation basic reflectivity (R) and radial velocity (V) RHI (a) and R (b) in Menglong at 18:59 BT 28 February 2008; RHI (c), CR (d) and R (e) in Longtan and Liushun at 14:59 BT 21 March 2005; CR (f) and V (g) in Shuanglong and Xinan at 14:51 BT 31 March 2009; RHI (h), R (i) and V (j) in Menglong at 15:23 BT 10 April 2007; RHI (k) and R (l) in Menglong at 18:19 BT 18 April 2008; RHI (m) in Xiaojie at 15:35 BT 9 May 2010; RHI (n) in Tongguan, Longtan and Yutang at 22:26 BT 24 June 2007; CR (o) and V (p) in Longba at 20:00 BT 27 June 2011; RHI (q) in Mengda at 18:29 BT 27 July 2006; RHI (r) in Tuantian at 21:52 BT 31 August 2011

表2 冰雹云的发生日期、地点、时间、0和-20℃层以上的45 dBz回波的厚度、CR及 $D_{VIL}$   
 Table 2 Time and place of hail clouds and thickness of 45 dBz echo in layers above 0℃ and -20℃

日期/年.月.日	主要影响地点、时间	$H_{45\text{ dBz}}-H_0$ /km	$H_{45\text{ dBz}}-H_{-20}$ /km	CR/dBz	$D_{VIL}/g \cdot m^{-3}$
2004.4.13	澜沧谦迈(20:23)	4.4	1.2	57	4.0
2004.4.14	宁洱磨黑(17:32),勐先(17:56), 普义(18:00)(同一回波)	4.5,5.5,5.5	1.4,2.4,2.4	57,57,57	5.3,5.6,4.7
2004.4.15	宁洱城区(17:11)	3.5	0.5	63	4.0
2004.4.18	勐海城区(18:04)	4.5	1.2	55	3.1
2005.3.20	勐腊象明(19:21)	8.3	5.1	62	5.6
2005.3.21	思茅龙潭和六顺(14:47)	3.8	0.8,0.8	55	4.7
	南屏和倚象(15:18)	近雷达>4.5	>1.5	60	—
2006.7.27	镇沅勐大(18:29),振太(18:55)	5.7,3.7	2.4,0.4	60,60	4.6,4.7
2007.4.7	宁洱黎明(18:29)	6.1	3.3	62	4.2
	思茅城区(19:47)	近雷达>4.8	>2	60	—
	景洪普文(20:45)	4.0	1.2	66	5.7
	景洪普文(21:24)	4.9	2.1	66	4.2
2007.4.10	景洪大渡岗和勐养(15:19), 勐龙(15:33)	4.6,5.0	1.4,1.9	64,69	4.7,4.5
	勐海城区(15:19)	5.0	1.8	64	5.1
2007.6.24	墨江雅邑、双龙、联珠(22:05), 龙坝(21:49)、通关、龙潭、鱼塘 (22:21),泗南江(23:13)	6.6,2.6,7.0, 3.4	3.6,-0.4, 4.0,0.4	55,60,60,55	3.8,5.3,5.2,5.0
2008.2.28	景洪勐龙(18:59), 景洪勐养(18:27)	3.6,4.1	0.4,0.9	60,60	6.5,6.3
2008.3.8	景洪城区(9:15)	2.9	-0.6	60	6.3
2008.4.14	澜沧中部(20:10)和云仙(20:21) (同一回波)	2.8,2.7	0.1,0.0	55,55	5.6,5.4
	勐海布朗山(17:17),景洪勐龙 (18:25)、小街(18:41)(同一回波)	3.3,6.7,6.7	0.6,,4.0,2.0	55,66,60	5.9,5.1,5.1
2008.6.24	思茅龙潭两次冰雹过程,分别为 (18:07)和(18:55)	2.1,2.2	-1.2,-1.1	55,55	3.0,3.0
2009.3.31	墨江双龙和新安(14:47)	4.8	1.6	55	3.9
	新抚和景星(16:21)	4.0	0.8	55	4.8
	孟弄(15:50)	5.8	2.6	55	3.2
	宁洱墨黑、勐先、同心 (20:08—20:29)	4.2	1.0	55	4.8
2009.4.5	景洪勐龙(16:54),普文(16:43)	4.4,4.8	0.5;0.9	55,60	3.5,4.5
	勐腊象明和曼腊(18:23)	3.4	-0.5	55	4.3
2009.4.10	江城嘉禾(17:24)	4.5	1.5	55	3.5
2009.4.11	景洪城区9.5(17:04)	5.1	1.9	60	4.5
2009.4.12	勐腊关累10.8(17:27)	6.4	3.6	55	3.3
2010.3.30	思茅南屏(17:12),倚象(17:39)	近雷达>3.4	—,—	60,60	—,—
2010.4.16	勐腊勐仑(17:43)	6.3	3.4	60	3.6
2010.5.09	景洪小街(15:35)	4.6	1.7	60	4.9
2011.6.27	墨江龙坝(20:00)	3.2	0.1	60	4.1
2011.8.31	墨江团田(21:52)	4.9	1.7	55	3.7

风回波仅有50%存在明显的辐合特征、回波中心强度为30~55 dBz(下击暴流大风除外)、85%左右的回波移速 $\geq 50\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ;短时强降水的辐合特征明显、85%左右的移速 $< 30\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、回波强度集中在40~45 dBz、高度集中在6.5 km以下、强中心常低于4.5 km。

结合大风、短时强降水的特征和单体发展形成的冰雹云(占44.2%)的初始特征和发展特征,可在回波发展阶段识别出未来可能出现的强对流天气的形式。

因单体发展形成的冰雹云都具有初始回波特征和发展阶段特征,而大风、短时强降水过程中未发现

表 3 冰雹云的发生日期、地点、成熟阶段生命期、径向速度切变量和主要径向速度特征  
 Table 3 Time and place of hail-cloud and its maturity stage, radial velocity of tangential components and main radial velocity

日期/年.月.日	主要影响地点	成熟阶段生命期/min	成熟阶段径向速度切变量/ $m \cdot s^{-1}$	主要径向速度特征
2004.4.13	澜沧谦迈	18	10.0	弱切变、大风区
2004.4.14	宁洱磨黑,勐先,普义(同一回波)	42	9.8	均为逆风区、大风区
2004.4.15	宁洱城区	48	7.4	逆风区
2004.4.18	勐海城区	18	14.0	弱切变
2005.3.20	勐腊象明	42	8.0	中尺度辐合、大风区
2005.3.21	思茅龙潭和六顺	42	7.2	均为大风区、风速辐合
	南屏和倚象	48	7.2	逆风区、大风区
2006.7.27	镇沅勐大,振太	30,30	4.0,3.9	均为逆风区、RIJ
2007.4.7	宁洱黎明	42	7.0	逆风区、大风区
	思茅城区	42	8.5	中尺度辐合、大风区
	景洪普文	52	12.5	弱回波区、弱切变
	景洪普文	36	7.5	中尺度辐合、大风区
2007.4.10	景洪大渡岗和勐养,勐龙	36,36	8.5,8.5	均为 TBSS、弱回波区、弱切变
	勐海城区	36	7.7	中尺度辐合、大风区
2007.6.24	墨江雅邑、双龙、联珠、龙坝、通关、龙潭、鱼塘、洒南江	36,36,36,36	7.5,8.5,7.6,7.6 (弱切变时间短、范围小取较小值)	均为弱切变 (时间短、范围小)
2008.2.28	景洪勐龙,景洪勐养	36,36	7.4,7.2	均为 TBSS、大风区
2008.3.8	景洪城区	30	4.8	TBSS、大风区
2008.4.14	澜沧中部和云仙(同一回波)	24	4.4	逆风区、大风区
	勐海布朗山,景洪勐龙、小街(同一回波)	114	12.3	TBSS、弱切变
2008.6.24	思茅龙潭两次冰雹过程	24,24	4.0,4.0	均为逆风区、大风区
2009.3.31	墨江双龙和新安	24	3.5	大风区
	新抚和景星	24	5.0	中尺度辐合区
	孟弄	24	4.8	逆风区、大风区
	宁洱墨黑、勐先、同心	24	5.8	中尺度辐合区、大风区
2009.4.5	景洪勐龙,普文	36,30	12.5,12.0	弱切变;弱切变
	勐腊象明和曼腊	36	10.3	逆风区、大风区
2009.4.10	江城嘉禾	72	9.0	中尺度辐合区、大风区
2009.4.11	景洪城区	30	6.0	逆风区
2009.4.12	勐腊关累	52	8.5	中尺度辐合区、大风区
2010.3.30	思茅南屏,倚象	48,48	8.4,6.6	均为逆风区、大风区
2010.4.16	勐腊勐仑	36	6.3	中尺度辐合区、TBSS
2010.5.09	景洪小街	42	10.6	TBSS、(速度模糊)
2011.6.27	墨江龙坝	18	5.6	逆风区
2011.8.31	墨江团田	36	6.5	中尺度辐合区

满足冰雹初始回波特征和发展阶段特征的单体,但由于未能得出各发展阶段之间有必然的联系,因此,只能得出如下结论:单体发展形成的冰雹云(占有冰雹的 44.2%)可以通过其初始特征和发展过程特征进行提前识别,当满足初始特征和所有发展阶段特征时,可预报将出现冰雹,预报提前时间 60 min 以内(预报提前时间=雷达回波出现符合识别指标的时间与地面降雹起始时间的间隔~雷达回波出现

符合识别指标的时间与地面降雹终止时间的间隔)。而单体合并形成的冰雹云的发展阶段中,单体合并的随机性较大,发展迅速,不能作为冰雹预报指标。

#### 4.2 滇南冰雹的常规预报指标

根据冰雹云成熟阶段的特征,得出冰雹的临近预报指标,满足下列所有指标时,可预报将出现冰雹,预报提前时间 12~108 min。

- (1) 回波的组合反射率 $\geq 55$  dBz。
- (2) 回波宽度 $\geq 12.0$  km。
- (3) 强回波梯度 $\geq 15$  dBz $\cdot$ km $^{-1}$ 。
- (4)  $H_{45\text{ dBz}} \geq 7.5$  km、2—5月  $H_{45\text{ dBz}} - H_0 \geq 3.1$  km 且  $H_{45\text{ dBz}} - H_{-20} \geq -0.5$  km; 6—8月  $H_{45\text{ dBz}} - H_0 \geq 2.0$  km 且  $H_{45\text{ dBz}} - H_{-20} \geq -1.2$  km。
- (5)  $VIL \geq 30$  kg $\cdot$ m $^{-2}$ 、 $D_{VIL} \geq 3.0$  g $\cdot$ m $^{-3}$ 。
- (6) 不存在速度模糊时,回波存在明显的辐合特征、垂直风切变特征。
- (7) 不存在单体合并影响回波移速时,回波移速 $\geq 25$  km $\cdot$ h $^{-1}$ 。

### 4.3 滇南冰雹特殊的预报指标

#### 4.3.1 弱切变、 $H_{45\text{ dBz}}$ 、 $H_0$ 、 $H_{-20}$ 特征预报冰雹

2004—2011年,共收集到弱切变回波12块(存在同一回波影响多个乡镇的情况),其中有11块造成冰雹(有8块伴有大风),有1块仅出现大风(2007年7月1日)。

分析2007年7月1日弱切变回波发现,该回波与冰雹回波的区别有: $H_{45\text{ dBz}}$ 仅6.1 km、 $H_{45\text{ dBz}} - H_0$ 仅0.7 km。因此,可以在回波满足:(1)弱切变特征;(2) $H_{45\text{ dBz}} \geq 7.5$  km、2—5月  $H_{45\text{ dBz}} - H_0 \geq 3.1$  km 且  $H_{45\text{ dBz}} - H_{-20} \geq -0.5$  km、6—8月  $H_{45\text{ dBz}} - H_0 \geq 2.0$  km 且  $H_{45\text{ dBz}} - H_{-20} \geq -1.2$  km 时预报有冰雹出现。因弱切变特征维持时间为24~60 min,因此,此预报指标提前时间可达18~54 min。

#### 4.3.2 $VIL$ 、 $D_{VIL}$ 特征预报冰雹

分析滇南地区所有灾害天气的 $VIL$ 特征发现:短时强降水回波的 $VIL$ 中心一般为13~18 kg $\cdot$ m $^{-2}$ 、 $D_{VIL} < 2.1$  g $\cdot$ m $^{-3}$ ,但飊线导致的两次强降水过程中, $VIL$ 值较高:2006年7月27日和2009年3月31日强降水对应的 $VIL$ 均达30 kg $\cdot$ m $^{-2}$ ;一般大风回波的 $VIL < 18$  kg $\cdot$ m $^{-2}$ 、 $D_{VIL} < 1.7$  g $\cdot$ m $^{-3}$ ,但飊线导致的大风的 $VIL$ 可达30 kg $\cdot$ m $^{-2}$ (例如2006年7月27日)、下击暴流大风的 $VIL$ 值可达60 kg $\cdot$ m $^{-2}$ 。

若除去飊线和下击暴流,冰雹的 $VIL$ 和 $D_{VIL}$ 与大风和短时强降水的 $VIL$ 和 $D_{VIL}$ 出现了显著的差异。

因此,除去飊线回波和下击暴流回波,可将 $VIL \geq 30$  kg $\cdot$ m $^{-2}$ 且 $D_{VIL} \geq 3.0$  g $\cdot$ m $^{-3}$ 视为冰雹的预报指标。 $VIL$ 高值维持时间为18~60 min左右,因此,此预报指标提前时间12~54 min。

## 5 预报指标检验

### 5.1 检验飊线中冰雹预报指标的可用性

由于2004—2011年飊线导致的大风和强降水的 $VIL$ 值较高,接近冰雹云的 $VIL$ 值,并出现33块45 dBz回波顶高 $\geq 7.5$  km而未降雹的回波。此外,24次冰雹过程中,共有11次受飊线影响,因此,详细分析此11次飊线中的回波特征,探讨是否需要为飊线制定特殊的冰雹预报指标:

11次飊线中,共有233块强回波未出现降雹,中心强度为45~62 dBz,有200块回波的 $H_{45\text{ dBz}}$ 低于7.5 km,有33块回波单体的 $H_{45\text{ dBz}} \geq 7.5$  km而未出现降雹。对比33块回波与冰雹回波的特征,差异有(有同一回波存在多个差异的情况):(1)15块回波强度 $< 55$  dBz;(2)11块回波宽度仅6~10 km;(3)26块回波的 $VIL < 30$  kg $\cdot$ m $^{-2}$ 且 $D_{VIL} < 3.0$  g $\cdot$ m $^{-3}$ 。分析表明,冰雹预报指标适用于飊线。

### 5.2 利用2012年发生的冰雹天气过程检验预报指标

2012年共出现3次冰雹天气:2012年8月13日墨江泗南江、文武出现冰雹;2012年8月18日澜沧县糯福乡出现冰雹;2012年4月10日16时左右景洪市区出现冰雹。因最后一次冰雹过程无雷达资料,对前两次个例进行检验。

2012年8月13日墨江泗南江、文武01:32—02:06出现冰雹(图3a、3b和3c),该冰雹为3个单体合并降雹,01:32开始,回波的组合反射率为65 dBz左右、宽度16.0 km左右、梯度 $\geq 20$  dBz $\cdot$ km $^{-1}$ 、 $H_{45\text{ dBz}}$ 为10.6 km、 $H_{45\text{ dBz}} - H_0$ 为4.9 km、 $H_{45\text{ dBz}} - H_{-20}$ 为2.1 km、 $VIL$ 为50 kg $\cdot$ m $^{-2}$ 、 $D_{VIL}$ 为4.2 g $\cdot$ m $^{-3}$ 、存在中尺度辐合特征(切变量9 m $\cdot$ s $^{-1}$ )和强烈的垂直风切变特征、移速27 km $\cdot$ h $^{-1}$ ,满足冰雹的预报指标,可预报未来该回波影响的区域将出现冰雹,最长提前预报时间34 min。

2012年8月18日澜沧县糯福乡03:38—04:01出现冰雹(图3d、3e和3f),该冰雹为单体合并降雹;03:38开始,回波的组合反射率为60 dBz左右、宽度13.0 km左右、梯度 $\geq 20$  dBz $\cdot$ km $^{-1}$ 、 $H_{45\text{ dBz}}$ 为9.9 km、 $H_{45\text{ dBz}} - H_0$ 为4.5 km、 $H_{45\text{ dBz}} - H_{-20}$ 为1.2 km、 $VIL$ 为35 kg $\cdot$ m $^{-2}$ 、 $D_{VIL}$ 为3.2 g $\cdot$ m $^{-3}$ ,

由于速度模糊不能准确判断辐合切变量和垂直风切变特征,因与多个单体合并仅能判断前期移动速度为  $26 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,满足冰雹的预报指标,可预报未来

该回波影响的区域将出现冰雹,最长提前预报时间 23 min.

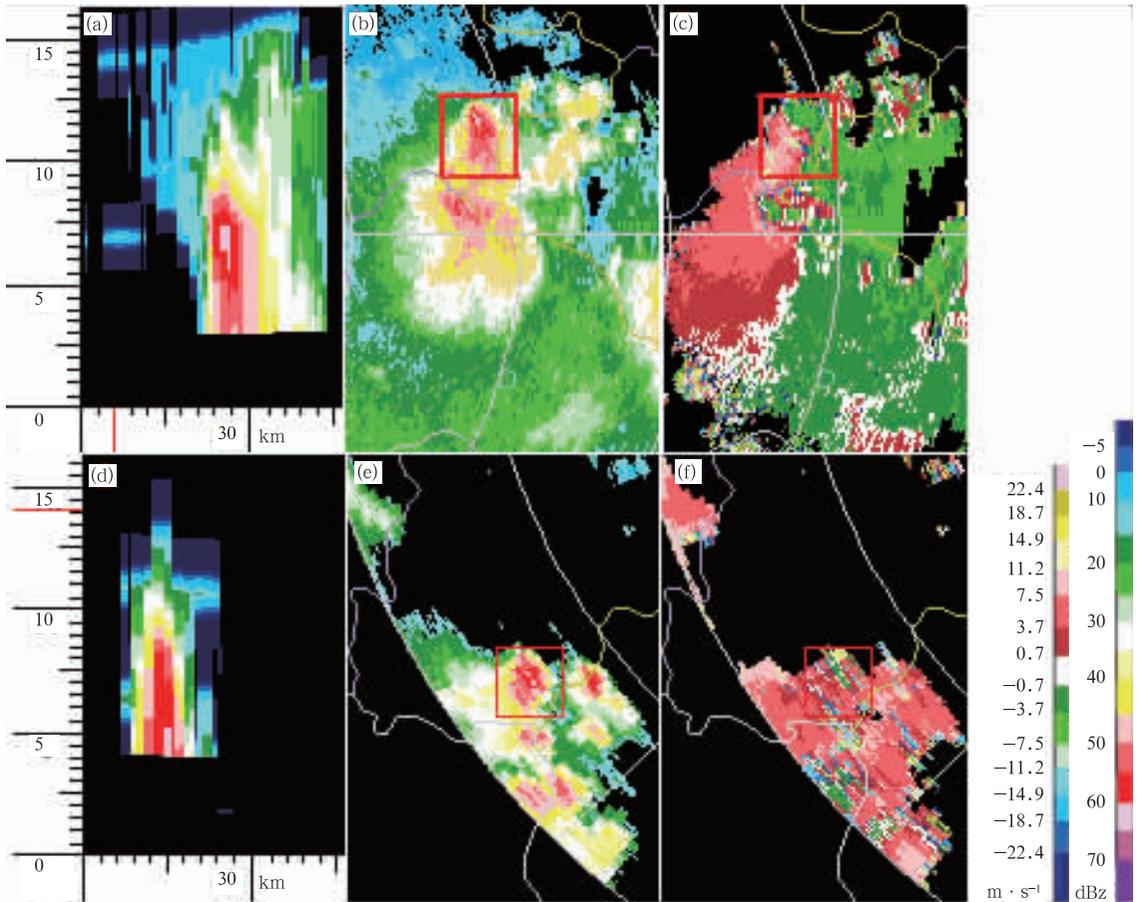


图 3 2012 年冰雹回波的基本反射率垂直剖面、CR 和  $0.5^\circ$  仰角径向速度, 2012 年 8 月 13 日 01:32 墨江泗南江、文武基本反射率垂直剖面(a)、CR(b)、 $0.5^\circ$  仰角基本反射率(c), 2012 年 3 月 21 日 03:38 澜沧县糯福乡基本反射率垂直剖面(d)、CR(e)、 $0.5^\circ$  仰角基本反射率(f)

Fig. 3 Base reflectivity vertical profile, CR and  $0.5^\circ$  elevation radial velocity of hail-cloud at 01:32 BT 13 August

(basic reflectivity vertical profile (a), CR (b) and  $0.5^\circ$  elevation basic reflectivity (c) in Sinanjiang and Wenwu at 01:32 BT 13 August 2012; Base reflectivity vertical profile (d), CR (e) and  $0.5^\circ$  elevation basic reflectivity (f) in Nuofu at 03:38 BT 21 March 2012)

上述分析表明:冰雹的常规预报指标对滇南 2012 年的冰雹有较好的预报效果。

## 6 结 论

研究滇南冰雹的预报预警指标发现:

(1) 得出了冰雹的常规预报指标:当回波的组合反射率  $\geq 55 \text{ dBz}$ 、宽度  $\geq 12.0 \text{ km}$ 、梯度  $\geq 15 \text{ dBz}$

$\cdot \text{km}^{-1}$ 、 $H_{45 \text{ dBz}} \geq 7.5 \text{ km}$ 、2—5 月中  $H_{45 \text{ dBz}} - H_0 \geq 3.1 \text{ km}$  且  $H_{45 \text{ dBz}} - H_{-20} \geq -0.5 \text{ km}$ 、6—8 月中  $H_{45 \text{ dBz}} - H_0 \geq 2.0 \text{ km}$  且  $H_{45 \text{ dBz}} - H_{-20} \geq -1.2 \text{ km}$ 、 $V_{\text{IL}} \geq 30 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 、 $D_{\text{VIL}} \geq 3.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  时,预报有冰雹发生,预报提前 12~102 min.

(2) 得出了冰雹的初始特征和发展阶段特征预报方法:当单体回波满足冰雹云的初始特征和发展阶段特征时,可预报未来出现冰雹的可能较大,预报

提前 60 min 以内。

(3) 得出了冰雹的特殊预报指标:当回波具有弱切变特征、45 dBz 回波顶高  $\geq 7.5$  km、2—5 月  $H_{45\text{ dBz}} - H_0 \geq 3.1$  km 且  $H_{45\text{ dBz}} - H_{-20} \geq -0.5$  km、6—8 月  $H_{45\text{ dBz}} - H_0 \geq 2.0$  km 且  $H_{45\text{ dBz}} - H_{-20} \geq -1.2$  km 时,可预报有冰雹出现,预报提前 18~54 min;若除去飑线和下击暴流回波,当回波的  $VIL \geq 30\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $D_{VIL} \geq 3.0\text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$  时,可预报有冰雹出现,预报提前 12~54 min。

(4) 总结了冰雹云的生命期特征。

(5) 利用 2012 年发生的冰雹天气过程检验了预报指标,预报效果好。

## 参考文献

- 段鹤,严华生,王晓君,等. 2011. 滇南中小尺度灾害天气的多普勒统计特征及识别研究. 气象, 37(10):1216-1227.
- 樊鹏,肖辉. 2005. 雷达识别渭北地区冰雹云技术研究. 气象, 31(7): 16-19.
- 胡明宝,高太长,汤达章. 2000. 多普勒天气雷达资料分析与应用. 北京:解放军出版社,165-169,54-55.
- 金永利,张蓄. 2002. 北京地区一次降雹过程和冰雹微物理特征. 气象, 28(1):18-25.
- 雷雨顺,吴宝俊,吴正华. 1978. 冰雹概论. 北京:科学出版社,56-110.
- 刘玉玲,李耀东,张方友,等. 1998. 与冰雹有关的几个新物理参数. 航空气象科技, 6:4-12.
- 刘志澄,李柏,翟武全. 2002. 新一代天气雷达系统环境及运行管理. 北京:气象出版社,100-101.
- 李德俊,唐仁茂,熊守权,等. 2011. 强冰雹和短时强降水天气雷达特征及临近预警. 气象, 37(4):474-480.
- 彭治班,刘健文,郭虎等. 2001. 国外强对流天气的应用研究. 北京:气象出版社.
- 陶诗言. 1985. 中国之暴雨. 北京:科学出版社,225.
- 尤莉,徐玉强,程玉琴等. 2006. 赤峰地区冰雹天气的环流特征及其预报. 气象, 32(4):101-105.
- 张素芬,鲍向东,牛淑贞. 1999. 河南省人工消雹作业判据研究. 气象, 25(9):36-40.
- Federer B, Waldvogel A. 1978/1979. Plan for the swiss randomized hail suppression experiment—Design of Grossversuch IV. Pure and Applied Geophys, 117 (3): 548-571.
- Mather G K, Treddenick D, Parsons R. 1976. Observed relationships between the height of the 45 dBz contours in storm profiles and surface hail reports. J Appl Meteor, 15 (12): 1336-1340.