

段鹤, 严华生, 王晓君, 等. 滇南中小尺度灾害天气的多普勒统计特征及识别研究[J]. 气象, 2011, 37(10): 1216-1227.

滇南中小尺度灾害天气的多普勒 统计特征及识别研究^{*1}

段 鹤^{1,2} 严华生² 王晓君¹ 刘建平¹ 白永恩¹

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 CIND3830-CC 新一代天气雷达资料、地面观测资料、探空资料, 对 2004—2009 年滇南普洱、西双版纳典型的中小尺度强对流天气的多普勒雷达回波特征进行统计分析, 总结冰雹、大风、短时强降水的识别方法和预报指标。结果表明: 冰雹云初始回波中心强度在 40 dBz 左右, 高度在 5 km 左右, 接近 0℃ 层高度。冰雹云径向速度 $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 辐合特征明显, 97% 的移速 $\geq 30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 中心强度为 55~69 dBz。97% 的冰雹云的 45 dBz 回波顶高 $\geq 7.5 \text{ km}$, 92% 的冰雹云的 45 dBz 回波顶高超过 -20℃ 层高度; 大风回波可分为 4 种类型。96% 的大风回波径向速度 $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 50% 的辐合特征明显, 85% 的移速 $\geq 30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 大风回波中心强度为 30~55 dBz; 强降水回波的辐合特征明显, 79% 的回波径向速度 $< 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 85% 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, 强中心高度低于 4.5 km, 85% 的强降水回波移速 $< 30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。这些特征可为短时临近预报提供参考。

关键词: 冰雹, 统计特征, 大风, 短时强降水, 垂直剖面, 爬线

Analysis on Doppler Radar Statistical Features and Distinguishing Methods of Mesoscale and Microscale Disastrous Weather in Southern Yunnan

DUAN He^{1,2} YAN Huasheng² WANG Xiaojun¹ LIU Jianping¹ BAI Yong'en¹

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

2 Department of Atmospheric Sciences, Yunnan University, Kunming 650091

Abstract: Using the CIND3830-CC data of CINRAD, the radiosonde and the surface meteorological data, we analyzed the Doppler radar echo features of the mesoscale and microscale strong convective weather system in Pu'er and Xishuangbanna during 2004 to 2009. In addition, we summarized the identification methods and the forecast targets about hail and gale, and short-time strong rainfall. It may be concluded that the initial echo center intensity of hail cloud is about 40 dBz, and the height of hail cloud is about 5 km, approaching to 0℃ isotherm. The radial velocity of hail cloud $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the moving speed $\geq 30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, the echo center intensity is about 55 to 69 dBz and convergent features are obvious. The hail cloud intensity of the radar echo top is about 45 dBz. The height of 97% of the hail cloud is higher than 7.5 km, and that of 92% of the hail cloud is colder than -20℃. The echo of gale can be divided into 4 types. The radial velocity of 96% of the gale echo is more than $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the convergent features of 50% of the gale echo are obvious. The moving speed about 85% of gale is more than $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ and the echo center intensity of gale is 30 to 55 dBz. The echo convergent features are obvious. The radial velocity of

* 云南省气象局预报员技术开发专项(YB201012)和国家自然科学基金项目(41075072)共同资助
2010 年 11 月 15 日收稿; 2011 年 5 月 11 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

79% of echo is less than $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The moving speed of 85% of echoes is estimated to be less than $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Then its intensity is 40 to 45 dBz and height is less than 4.5 km. The moving speed of echo is less than $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. And then we got the reference material in the short-term weather forecast.

Key words: hail, statistic analysis, gale, short-time strong rainfall, vertical section, squall line

引 言

冰雹、大风和短时强降水($\geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)是普洱、西双版纳主要的中小尺度气象灾害,其在 2004—2009 年导致的经济损失超过 6 亿元,占气象灾害总损失的 25% 以上,由于其发生、发展突发性和局地性强,预报难度大。近年来,国内外越来越重视对多普勒雷达资料及其产品的理论和应用研究,多普勒雷达资料已广泛应用于中小尺度强对流天气的监测分析和短时临近预报。

Burgess 等^[1]对强对流天气探测和预警方面作了综述,国内的气象工作者针对冰雹、大风、短时强降水等不同灾害类型的中小尺度雷达回波特征进行了分析:朱君鉴等^[2-7]进行了详细的个例分析,刘兵等^[8]对张家界多个降雹过程进行了对比分析,王彦等^[9]对 46 次雷暴大风天气的雷达产品特征进行了统计分析和归类,胡波等^[10]对浙江 2005—2008 年短时临近强降水的预报技术进行了总结。郑媛媛等、应冬梅等、陈晓燕等^[11-13]则分析了不同地区的典型超级风暴单体发生发展的演变过程及其显著的结构特征,伍志方等、刘淑媛等^[14-15]利用多普勒雷达资料对造成暴雨、冰雹等中小尺度对流系统结构进行了研究,还有的气象工作者统计得出了强对流天气的雷达回波的共性^[15-17]:如冰雹的指状回波、回波穹窿、弱回波区(weak echo region, WER)或有界弱回波区(bounded weak echo region, BWER)、三体散射长钉、“V”型缺口等特征;强降水的暖平流、牛眼等特征。上述研究利于提高对强对流天气的监测和预报能力。

但是,国内在短时临近预报研究中,冰雹、大风和短时强降水等强对流天气的多普勒天气雷达回波特征研究大多数限于个例分析,比较全面系统地分析研究、归纳统计和对比不同类型中小尺度天气系统的多普勒特征则十分少见。而且所得出的强对流天气雷达回波的共性会受雷达距冰雹云距离的影响,在不同季节中还会存在差异,使得这些指标存在不确定性。在实际应用中还发现,这些指标的时效

性差,判别出强对流天气时,往往灾害天气已经发生。因此迫切需要对滇南中小尺度灾害天气的多普勒特征进行统计分析,研究冰雹、大风和短时强降水的识别方法和预报指标。

本文选取 2004—2009 年,滇南普洱、西双版纳主要的中小尺度天气灾害中,71 次强对流天气,95 块回波进行分析,并总结冰雹、大风和短时强降水等强对流天气的主要特征,找出中小尺度强对流天气的预报指标,为短时临近预报提供了实用参考标准。

1 资 料

选取 2004—2009 年普洱、西双版纳地区的强对流天气共 71 例,冰雹 19 例,大风 20 例,短时强降水 32 例,其中 11 例中既有大风又有冰雹,分别进行归类。当任意一站出现灾害天气或出现灾情时,记为一例强对流天气,若一组图中有两个以上特征或同一种特征造成了两种强天气,均分别计一次。大风是指地面测站测得的达到大风标准的地面强风或乡镇中造成严重风灾的天气,短时强降水是指 1 小时降水量 $\geq 30 \text{ mm}$ 的降水。实况取自普洱、西双版纳自动站数据和灾情直报数据。雷达资料选取普洱新一代天气雷达 2004—2009 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。

2 冰雹云的识别

通过对冰雹云的基本反射率特征、冰雹云的形状、移速及其径向速度图特征、VIL 特征、45 dBz 回波顶高与环境温度的对应关系以及冰雹云的初始回波特征和发展阶段特征来找出冰雹云的识别方法和预报指标。

2.1 冰雹云的基本反射率特征

2004—2009 年普洱、西双版纳收集到冰雹天气共 19 次,其中有 11 次为飑线天气系统影响,8 次为

较独立的对流回波单体影响,累计有37块冰雹云,54个乡镇降雹(存在同一块回波移动过程中造成多个点降雹)。

37块冰雹云中,有35块的中心强度为55~65 dBz,其他2块强度分别达66 dBz(2007年4月7日)和69 dBz(2007年4月10日)。分析发现(表略)冰雹直径大小与强回波的面积和中心强度有关,与回波顶高(18.3 dBz的高度)无明显对应关系。

2.1.1 冰雹云的基本反射率垂直剖面特征

近几年,河南省把40 dBz作为有无冰雹的判据之一^[18],南非^[19]和瑞士、法国、意大利^[20]等国将45 dBz高度作为冰雹识别指标,樊鹏^[21]还利用 Marshall-Palmer(1948)雨滴谱指数分布形式和 Smith(1975)等人得出的湿冰球等效雷达反射率因子表达式推导出最初冰雹增长区的等效因子是44 dBz,并依此开展陕西渭水地区冰雹识别研究,本文结合前期国内外研究成果和本地长期观测资料,分析滇南40、45和50 dBz回波顶高对滇南冰雹的识别能力。

对37块冰雹云作反射率垂直剖面发现(所有强度剖面沿最能反映回波强度和范围的方向剖,速度剖面开始点和结束点的延长线过雷达中心):40和50 dBz回波顶高在不同降雹过程中,所在的高度差异大,无规律性;45 dBz回波顶高在不同降雹过程中的特征是:除2008年3月8日09:15(北京时,下同)发生于景洪市城区的冰雹(6.9 km)外,其他36块冰雹云中45 dBz回波顶高为7.5~15.6 km(拔海高度,下同;雷达天线海拔1924 m)。

统计分析11次飏线天气中未收集到降雹信息的233块强回波(45~62 dBz)发现,仅有33块回波单体的45 dBz顶高 ≥ 7.5 km而未收集到降雹信息,其他200块强回波单体的45 dBz回波顶高均低于7.5 km。

以强回波最多的3次飏线过程为例进行分析:2008年4月14日的飏线具有时间长、强度强、影响范围大的特点,造成普洱和西双版纳的损失达4000多万,并造成2人重伤,7人轻伤。此次强对流过程中,先后出现29块强回波单体,其中,45 dBz回波顶高低于7.5 km的21块强回波均未降雹,而45 dBz回波顶高 ≥ 7.5 km的8块强回波中,有5块出现了降雹。飏线生成前,共出现12块强回波,其中景谷南部、镇沅与宁洱交界处、墨江景星和孟弄、

勐海勐混的强回波的45 dBz回波顶高 ≥ 7.5 km,而未收到降雹信息,但当勐海勐混的回波东移到勐海布朗山和景洪小街之间时发生了降雹(表1),此外,景洪勐龙的强回波的45 dBz回波顶高 ≥ 7.5 km,也出现了降雹(表1)。飏线生成后,长达250~310 km、宽22 km,共17块强回波单体,单体强度为50~63 dBz,飏线影响的区域为澜沧、思茅、宁洱和墨江包括县城在内的大部分地区。图1a为澜沧县上空回波的垂直剖面,其中有两块回波的45 dBz回波顶高 ≥ 7.5 km。图1b为思茅区上空回波的垂直剖面,其中有1块回波的45 dBz回波顶高 ≥ 7.5 km。图1c和1d分别为宁洱和墨江上空回波的垂直剖面,其中强回波的45 dBz回波顶高均低于7.5 km,飏线过境后收集到的灾情是澜沧县、思茅区出现冰雹、大风和降水,而宁洱和墨江无冰雹出现,仅有大风和降水。

2009年3月31日,4块降雹回波的45 dBz顶高均 ≥ 7.5 km,降雹回波外的25块强回波中,仅有景谷正兴镇北部回波的45 dBz回波顶高 ≥ 7.5 km而未收集到降雹信息。

2009年4月10日,除降雹回波外,35块强回波的垂直剖面中,仅有5块回波(墨江双龙、宁洱把边和普义、思茅云仙、勐海勐宋)的45 dBz回波顶高 ≥ 7.5 km而未收到降雹信息。

统计分析其他8次冰雹天气发现,除降雹回波外,强度达到45 dBz及以上的回波共43块,仅有4块回波的45 dBz回波顶高 ≥ 7.5 km而未收集到降雹信息(2007年6月24日景洪勐罕、2008年6月24日澜沧糯扎渡、2009年4月11日勐腊勐判、2009年4月12日景洪勐罕)。

上述分析表明,19个降雹日中,97%(百分率取整,下同)的冰雹云的45 dBz回波顶高 ≥ 7.5 km,未收集到降雹信息的强回波中,86%的强回波的45 dBz回波顶高低于7.5 km。因此,可将45 dBz回波顶高是否达到7.5 km视为判断冰雹云的指标之一。

此外,文献^[16]指出:WSR-88D冰雹算法中,判断大冰雹的主要判据是检验 -20°C 高度以上有无超过45 dBz的反射率因子,对此,分析降雹日当天思茅探空站中 -20°C 层高度发现:37块冰雹云中,有34块(92%)冰雹云的45 dBz回波顶高超过 -20°C 层高度,表明该算法适用于普洱3830-CC雷达。

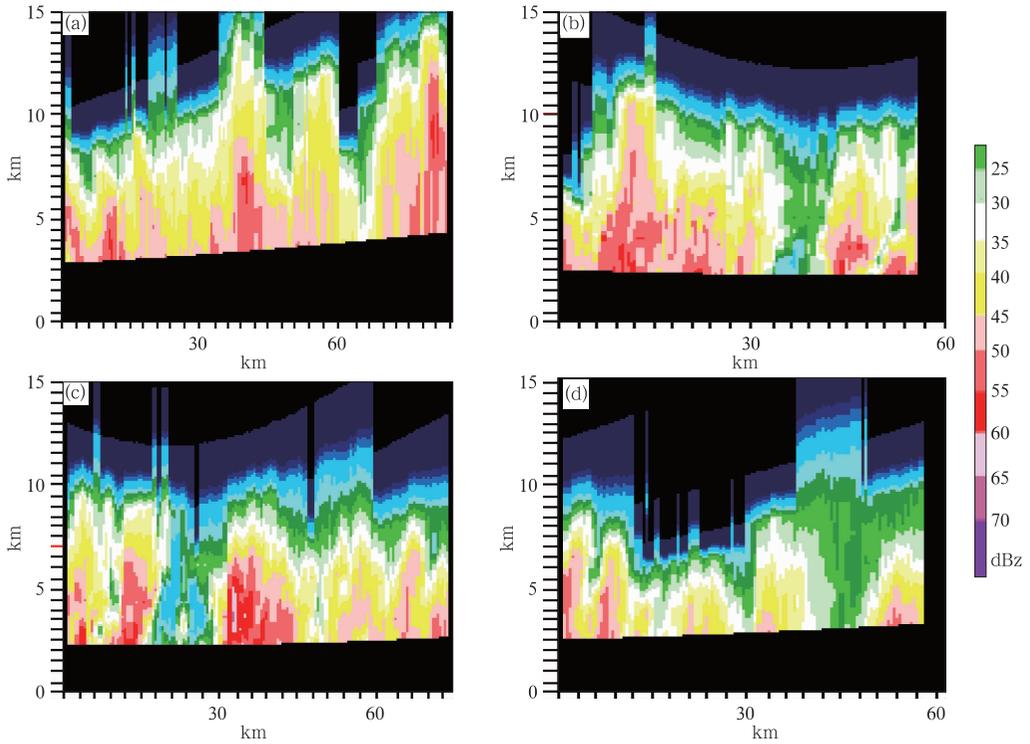


图 1 2008 年 4 月 14 日 20:10 不同站点的飊线垂直剖面
 (a) 澜沧县;(b) 思茅区;(c) 宁洱县;(d) 墨江县

Fig. 1 The vertical cross-sections of the squall line at 20:11 BT 4 April 2008 at
 (a) Lancang, (b) Simao, (c) Ning'er, and (d) Mojiang

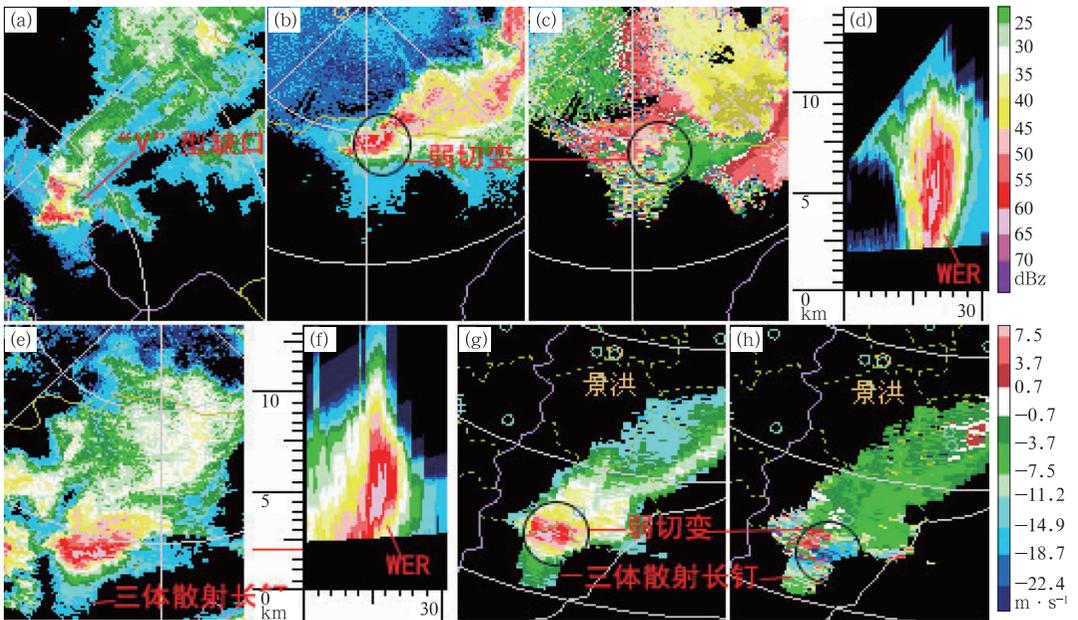


图 2 降雹回波的反射率形状及其速度图特征

(a)2004 年 4 月 14 日 18:00“V”型缺口;(b)2007 年 4 月 7 日 20:45 基本反射率;
 (c)径向速度和(d)基本反射率垂直剖面;(e)2007 年 4 月 10 日 15:25 基本反射率
 和(f)基本反射率垂直剖面;(g)2008 年 4 月 14 日 18:25 基本反射率和(h)径向速度

Fig. 2 Shape and speed features of radar reflectivity

(a) Echo V type gap at 18:00 BT 14 April 2004; (b) base reflectivity; (c) radial velocity and
 (d) vertical profile about base reflectivity at 20:45 BT 7 April 2007; (e) base reflectivity and
 (f) vertical profile about base reflectivity at 15:25 BT 10 April 2007; (g) base reflectivity and
 (h) radial velocity at 18:25 BT 14 April 2008

2.2 冰雹云的形状、移速及其径向速度图特征

统计分析普洱、西双版纳的降雹回波的形状特征发现(表 1),除 2007 年 4 月 7 日飚线为一整体弓状回波外,冰雹云均为强回波单体,最常见的形状为块状,其次为带状。

基本反射率图中,共有 6 个降雹日中的 10 块回波具有典型的冰雹云的特征:三体散射长钉 6 块(2007 年 4 月 10 日、2008 年 2 月 28 日、2008 年 4 月 14 日各 2 块)(图 2e,2g)、“V”型缺口 1 块(2004 年

4 月 14 日)(图 2a)、弱回波区 3 块(2007 年 4 月 7 日有 1 块、2007 年 4 月 10 日有 2 块)。

37 块冰雹云的径向速度图中(见表 1,一块回波带有多个特征),出现中尺度辐合特征 11 块、逆风区 11 块、弱切变(图 2b,2c;2g,2h)11 块、强回波后部入流急流(RIJ)3 块、弱回波区(WER)3 块(图 2d,2f)、风速辐合 1 块,大风区 22 块。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;逆风区是在径向速度图中,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

表 1 冰雹云形状、大小和速度图特征

Table 1 The shapes, sizes, and velocity diagram of hail cloud

日期/年.月.日	冰雹云出现的地点、45 dBz 顶高和时间	冰雹云形状	冰雹云主体长、宽/km	冰雹云径向速度特征
2004.4.13	澜沧谦迈 9 km(20:23)	块状	17、11	中尺度辐合、大风区
2004.4.14	宁洱磨黑 9 km(17:32)、勐先 10 km(17:56) 普义 10 km(18:00)(同一回波先后影响)	V 型	15、15	逆风区、大风区
2004.4.15	宁洱城区 8.2 km(17:11)	块状	13、8	有 RIJ
2004.4.18	勐海城区 9.1 km(18:04)	块状	15、10	弱切变
2005.3.20	勐腊关累 15.6 km(19:21)	块状	20、11	中尺度辐合、大风区
2005.3.21	思茅龙潭和六顺 8 km(14:47) 南屏和倚象 8.7 km(15:18)	块状 带状	14、6 27、9	大风区、风速辐合 中尺度辐合、大风区
2006.7.27	镇沅勐大 11 km(18:29)、振太 9 km(18:55)	带状	19、6	逆风区、有 RIJ
2007.4.7	宁洱黎明 10.6 km(18:29) 思茅城区 9.3 km(19:47) 景洪普文 8.5 km(20:45) 景洪普文 9.4 km(21:24)	块状 带状 带状 块状	17、18 50、14 18、8 15、9	逆风区、大风区 中尺度辐合、大风区 弱回波区、弱切变 中尺度辐合、大风区
2007.4.10	景洪大渡岗和勐养同一回波 8.6 km(15:19)、勐龙 9 km(15:33) 勐海城区 9 km(15:19)	块状 块状	15、10 20、11	三体散射长钉、 弱回波区、弱切变 中尺度辐合、大风区
2007.6.24	墨江雅邑、双龙、联珠 12 km(22:05); 龙坝 8 km(21:49);通关、龙潭、 鱼塘 12.4 km(22:21);泗南江 8.8 km(23:13)	块状	19、14	弱切变
2008.2.28	景洪勐龙 7.5 km(18:59) 景洪勐养 8 km(18:27)	块状	两块回波都 为 12、12	都有三体散射 长钉和大风区
2008.3.8	景洪城区 6.9 km(9:15) 澜沧中部 7.6 km(20:10) 勐海布朗山 8.1 km(17:17)	块状 块状 块状	19、15 15、10 23、16	逆风区、大风区 逆风区、大风区
2008.4.14	景洪勐龙 11.5 km(18:25)、小街 11.5 km (18:41)(与布朗山为同一单体影响) 思茅云仙 7.5 km(20:21)(澜沧中部西移)	块状 块状	20、16 14、10	弱切变、三体散射长钉 逆风区、大风区
2008.6.24	思茅龙潭两次冰雹过程, 分别为 7.5 km(18:07)、7.6 km(18:55)	块状	16、19	逆风区、大风区
2009.3.31	墨江双龙和新安 9 km(14:47) 新抚 8.2 km(16:21)和景星 10 km(16:21) 孟弄 10 km(15:50) 宁洱墨黑、勐先、同心 8.4 km(20:08~20:29)	块状 带状 块状 带状	21、15 27、14 9、8 49、9	大风区 中尺度辐合、大风区 逆风区、大风区 中尺度辐合、大风区
2009.4.5	景洪勐龙 8.6 km(16:54)、普文 9 km(16:43) 勐腊象明、曼腊 7.6 km(18:23)	块状 块状	14、17 16、12	弱切变 逆风区、大风区
2009.4.10	江城嘉禾 9 km(17:24)	带状	50、18	中尺度辐合、大风区
2009.4.11	景洪城区 9.5 km(17:04)	块状	19、11	逆风区
2009.4.12	勐腊关累 10.8 km(17:27)	带状	21、11	中尺度辐合、大风区

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 ≤ 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)满足上面三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—2009 年,0.5°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°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。

分析上述特征发现,冰雹的共性^[16-17]对普洱、西双版纳的冰雹云识别能力较差,普洱、西双版纳的冰雹云最普遍的特征是:辐合特征明显、径向速度大($\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)(表 1)。

2.3 冰雹云中 VIL 的跃增特征

垂直液态水含量(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。

分析降雹过程中 VIL 值发现,冰雹发生前,有明显的 VIL 跃增现象,冰雹发生之后,常发现 VIL 值突然减小(图略)。

从 2006 年 7 月 27 日 19—20 时 VIL 变化图中还发现(图略),飏线中 VIL 值两次跃增时段与地面两次冰雹发生时间相对应。

分析其他出现冰雹灾害的天气过程也表明:VIL 值跃增特征是识别冰雹云的有效标志。

此外,收集到的冰雹灾害的天气过程中,降雹回波对应的 VIL 值在 $48 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右,回波中心强度在 52~64 dBz 之间,与国外观测结果相符合。

但是,VIL 的变化特征和冰雹的反射率因子大小和形状特征一样,时效性差,判别出强对流天气时,往往灾害天气已经发生。

2.4 冰雹云的初始回波特征、发展阶段特征

普洱和西双版纳的降雹形式有:移入回波降雹(4 次)、回波单体发展降雹(14 次)、回波合并降雹(18 次)、飏线迅速生成降雹(1 次)。除移入回波降雹和飏线迅速生成降雹外,其他冰雹云都具有初始

回波特征和发展阶段特征(86%)。

移入回波降雹是指冰雹云从其他区域移入,无法辨别其初始特征。

回波单体发展生成的冰雹云具有明显的初始特征和两种发展过程,第一种 12 块(表略),有 1 个初始特征和 3 个发展阶段:(1)初始回波强中心高度在 5 km 左右,接近 0°C 层高度,强度在 40 dBz 左右(图 3a)。(2)第一发展阶段中,单体强度明显增强,但单体仅在垂直方向上迅速增长,而在水平方向上增长缓慢。此阶段维持 2~4 个体扫时间(图 3a, 3b, 3c)。(3)第二发展阶段中,单体的高度和强度缓慢变化(图 3c, 3d),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 3~5 个体扫时间不等。(4)第三发展阶段中,回波中心强度和垂直高度迅速增长,2~4 个体扫时间后,45 dBz 回波顶高达到或超过 7.5 km,并出现降雹(图 3d, 3e, 3f)。第二种有 2 块,具有 1 个初始特征和 2 个发展阶段(图略):(1)初始回波强中心高度在 5 km 左右,接近 0°C 层,强度在 40 dBz 左右。(2)第一发展阶段中,初始回波在垂直高度迅速增长,40 dBz 回波顶高超过 7.5 km,但强度达 45 dBz 的回波不存在或面积较小;水平方向上强回波中心位于回波中心位置,回波水平方向上面积增大较明显,此阶段维持 2~4 个体扫时间。(3)第二发展阶段中,回波中心强度迅速增大,2~3 个体扫时间后出现降雹。

回波合并降雹也有明显的初始特征,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,45 dBz 回波顶高达到或超过 7.5 km,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。

由冰雹云初始回波高度在 5 km 左右,强度在 40 dBz 左右的特征、冰雹云的发展阶段特征和冰雹云的 45 dBz 回波顶高 ≥ 7.5 km 的特征,可以提前识别出冰雹云,除迅速合并和迅速发展的少数冰雹云回波外,大多数冰雹云可以提前识别出来。

此外,统计冰雹云的移速发现,37 块冰雹云中,有 36 块的移速 $\geq 30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,仅 2006 年 7 月 27 日的移速小于 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (数值为 $25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)。

至此,得出了冰雹云的两个识别方法:冰雹云的初始特征和发展阶段特征识别、45 dBz 回波顶高特征识别。满足任一识别特征或两个特征时,出现降雹的可能性较大。

3 大风的 Doppler 雷达特征及分型

2004—2009 年,滇南普洱、西双版纳共收集到灾害性大风天气 20 次,25 块大风回波(表 2),由于每次大风都具有典型的多普勒识别特征,可将其分为大风区型大风、强回波中的弱切变大风、飏线大

风、下击暴流大风等 4 种。

3.1 大风区型大风

统计分析发现,25 块大风回波中(表 2),有 8 块回波引起的大风为大风区型大风,其特征是:(1)地面大风与大风区相对应,大风发生在大风区正下方或前方边缘。(2)大风区回波呈片状,面积范围和强度范围都较大,回波中心强度为 30~55 dBz 不等。(3)大风区中,63%为移入回波。(4)中高层的径向速度接近 0.5° 仰角径向速度。(5)径向速度图中,无明显辐合辐散特征。(6) 0.5° 仰角径向速度图中,风速 $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。(7)有 4 块大风区型回波的移速无法判断:移动过程中与多个单体合并(2004 年 5 月 13 日)、回波的面积、形状和强度在移动过程中迅速变化(2006 年 8 月 4 日共两块、2008 年 7 月 4 日)。

3.2 强回波中的弱切变大风

弱切变大风是指具有弱切变特征的强回波引起的地面大风。25 块大风回波中,有 6 块回波引起的大风为强回波中的弱切变大风(表 2)。

表 2 滇南大风时间、地点和大风类型

Table 2 Time, location and type about gales in southern Yunnan

日期/年.月.日	具体时间	地点(测站)	灾害	大风类型
2004.4.13	23:05—23:07	澜沧	$25.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 大风	飏线大风
2004.4.18	17:15—17:18	澜沧	$17.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 大风	飏线大风
	18:00—18:20	勐海	大风致灾	弱切变
2004.5.13	17:44	思茅	$14.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	大风区
2005.3.21	17:59—18:01	思茅	$18.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	大风区
2006.6.15	17:00—18:30	勐龙和小街附近	风灾	下击暴流
2006.7.27	19:00—20:00	镇沅田坝和勐大	风灾	飏线大风
2006.7.29	20:20—22:30	江城测站和嘉禾	测站 $17.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 大风	飏线大风
	21:00 左右	思茅倚象	风灾	飏线大风
2006.8.4	10:00 左右	思茅云仙、景谷	风灾	均为大风区
2007.4.7	19:30—19:35	澜沧	$22.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 大风	大风区
2007.4.8	18:49—18:59	澜沧	$23.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 大风	大风区
2007.4.10	15:15—16:30	勐龙和小街附近	风灾	弱切变
2007.6.24	22:00—23:00	墨江南部	风灾	弱切变
2007.7.1	18:30	宁洱黎明乡	风灾	弱切变
2008.1.25	16—17	思茅六顺	风灾	大风区
2008.4.14	23:59	勐腊	$19.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 大风	飏线大风
	20:44	思茅	$17.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 大风	飏线大风
2008.7.4	17:00—19:00	思茅南屏	风灾	大风区
2009.3.31	20:05—20:07	澜沧	$17.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 大风	飏线大风
2009.4.5	16:50	景洪普文	风灾	弱切变
	16:00—17:00	勐龙和小街附近	风灾	弱切变
2009.4.10	17:30	江城嘉禾	风灾	飏线大风
2009.4.18	16:10	勐腊勐醒农场	风灾	飏线大风

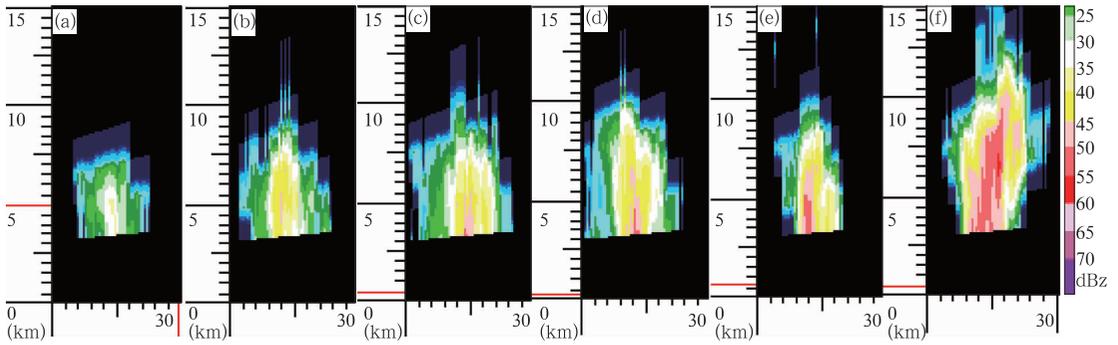


图 3 2007 年 4 月 7 日降雹单体的基本反射率垂直剖面

(a) 15:57; (b) 16:08; (c) 16:18; (d) 16:34; (e) 16:45; (f) 16:56

Fig. 3 The vertical profile of the base reflectivity at different time on 7 April 2007 in convective cells

(a) 15:57 BT, (b) 16:08 BT, (c) 16:18 BT, (d) 16:34 BT, (e) 16:45 BT, and (f) 16:56 BT

弱切变大风具有的特征是(图略):(1)由强回波(45 dBz 以上)块状单体引起,回波中存在正负速度中心,核区直径 ≤ 10 km。(2)回波中旋转特征的垂直伸展厚度均超过 3 km。(3)强回波所在的环境风场速度较小。(4)弱切变大风中的旋转速度为 $10 \sim 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,未达到中气旋标准。(5)满足上面四类指标的持续时间超过两个体扫时间。

对比弱切变导致的冰雹发现,2004—2009 年收集到的 12 块弱切变回波(存在同一回波先后影响多个乡镇的情况),有 8 块造成了冰雹和大风,3 块单独造成冰雹,1 块只出现大风。

3.3 飊线引起的大风

飊线引起的大风可以分为飊线后部入流急流(rear-inflow jets, RIJ)和飊线后部云砧引起的大风两种。10 次飊线大风中(表 2),有 2 次是 RIJ 下方近地面产生的大风,8 次为飊线后部云砧引起的大风。

RIJ 引起的大风的特征是(图 4a,4b,4e 和 4f):(1)RIJ 位于强回波后部。(2)RIJ 区与地面大风区对应。(3)RIJ 范围较小,但持续时间较长,往往造成较严重的灾害。

飊线后部云砧引起的大风较常见,其特征是:(1)当云砧范围大,存在大片大风区时,大风发生在大风区内,与强回波无明显对应关系(图 4c 和 4d)。(2)当云砧范围小,大风区范围小时,大风常发生在强回波后侧风速相对较大的区域(图 4g 和 4h)。(3)所有云砧内的大风区常常伴随飊线的成熟期和消散期,往往造成较严重的灾害。(4)飊线后部云砧

引起的大风中有 4 次存在明显辐合特征,3 次不明显,1 次存在部分速度模糊(2008 年 4 月 14 日勐腊)。

3.4 下击暴流大风

2004—2009 年普洱雷达仅观测到惟一次下击暴流事件,发生在 2006 年 6 月 15 日 17:00—18:30,位于景洪市小街乡附近,此次下击暴流导致云南天然橡胶公司东风农场出现地面大风,遭受巨大损失:橡胶折倒达 338 hm^2 ,受灾总面积达 2200 hm^2 ,直接经济损失 442 万元。

此次强回波单体的径向速度图中,由于回波强度高和距离雷达较远的原因,负速度区内存在部分速度模糊现象,正速度区的特征是:不存在速度中心,径向速度小于 $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。此外,回波不存在明显的旋转特征,且环境风场的风速小,回波整体移速仅为 $5.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从径向速度垂直剖面图中可以判断(图略), 0.5° 仰角到 4.3° 仰角都存在辐合特征,即从 3.8 km 到 11 km 高度上都存在辐合。

分析强回波单体的基本反射率垂直剖面发现(图 5),强回波中心区域的强度达 60 dBz 以上,17:29—17:39 在强度迅速发展(图 5)的情况下,出现强中心底部持续下沉的现象,特别是 17:39—17:45 出现了强回波中心迅速下冲的现象,5 分钟内,强回波顶下冲达 3.4 km(图 5c 和 5d),底部下冲超过 0.75 km,导致 60 dBz 的强回波中心高度低于 3.8 km,17:55—18:00 也出现了强回波中心迅速下冲的现象。东风农场海拔高度为 665~700 m,那么 17:45 和 18:00,强度达 60 dBz 的回波中心距地面不足 3.2 km。

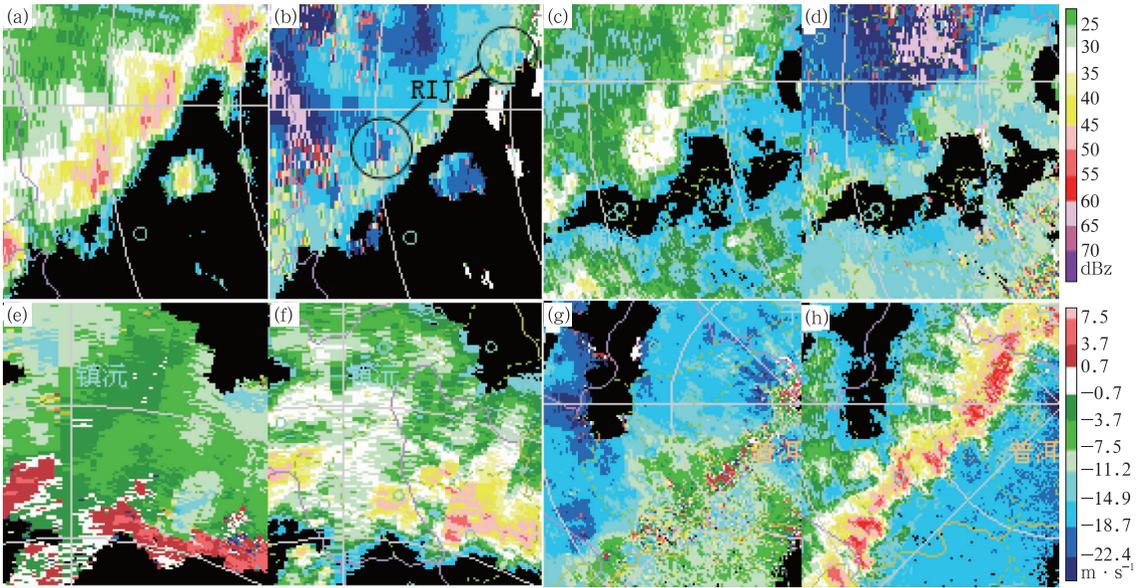


图4 飏线大风的基本反射率图和径向速度图

2004年4月13日22:56 澜沧上空基本反射率(a)和径向速度(b);

2004年4月18日17:14 澜沧上空基本反射率(c)和径向速度(d);

2006年7月27日19:53 镇沅上空基本反射率(e)和径向速度(f);

2008年4月14日20:42 思茅、澜沧上空基本反射率(g)和径向速度(h)

Fig. 4 The base reflectivity (a, c, e, g) and radial velocity (b, d, f, h) about gale in squall line

at Lanchang, 22:56 BT 13 April 2004 (a, b); Lanchang, 17:14 BT 18 April 2007 (c, d);

Zhenyuan, 19:53 BT 27 Junly 2006 (e, f); and Simao and Lanchang, 20:42 BT 14 April 2008 (g, h)

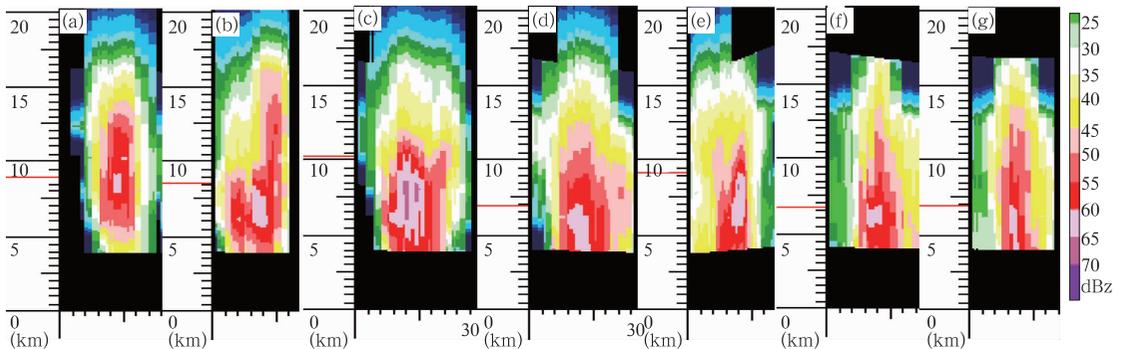


图5 2006年6月15日下击暴流单体的基本反射率垂直剖面

(a) 17:29; (b) 17:34; (c) 17:39; (d) 17:45; (e) 17:50; (f) 17:55; (g) 18:00

Fig. 5 The base reflectivity vertical profile of downburst on 16 June 2006

(a) 17:29 BT, (b) 17:34 BT, (c) 17:39 BT, (d) 17:45 BT,

(e) 17:50 BT, (f) 17:55 BT, and (g) 18:00 BT

国外的 Roberts 等^[22] 和国内的俞小鼎等^[23] 均研究表明,在孤立雷暴产生下击暴流之前,往往有反射率因子的持续下降和云底以上的辐合,并可以利用这一事实提前几分钟做出下击暴流预警,结合2006年6月15日强回波垂直剖面特征中,云底以上的辐合特征和反射率因子的持续下降特征以及地面的灾害形式,可以判断此为一次下击暴流事件。

统计大风回波的径向速度特征、辐合特征和移速

发现:(1)除下击暴流大风外,大风回波都具有径向速度大($\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)的特征。(2)50%的大风回波中存在辐合特征(速度模糊时不作统计)。(3)大风回波中有18块(85%)回波的移速超过 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (4次无法判断移速的回波不作统计)。

此外,分析冰雹、大风过程中的中层径向辐合(mid-altitude radial convergence, MARC)特征发现(图略),仅有4次(2004年5月13日,2007年4月7

日,2007年4月8日和2008年4月14日20:44)存在明显的 MARC 特征,而且,2007年4月7日,2007年4月8日的两次 MARC 并没有地面大风与之对应。

4 短时强降水的多普勒雷达特征

统计分析 2004—2009 年 32 次短时强降水天气,33 块短时强降水回波的移速发现(表 3),强降水回波整体移速缓慢,仅有 5 次(15%)超过 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (2007 年 6 月 28 日,2008 年 5 月 17 日,2009 年 7 月 13 日,2007 年 4 月 12 日,2009 年 3 月 31 日,后两者为飚线引起强降水),其他短时强降水回波的移速为 $10 \sim 25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

表 3 滇南短时强降水的时间、地点和主要降水回波的多普勒雷达特征

Table 3 Time, location and radar echo features about short-time rainfall in southern Yunnan

日期/年.月.日	具体时间	地点(测站)	降水/mm	径向速度图特征	基本波反射率特征
2004.5.17	00:00—01:00	景洪	31.9	中尺度辐合、垂直风切变	40~45 dBz,层积混合云
2004.7.20	22:00—23:00	江城	44.4	中尺度辐合、垂直风切变	40~45 dBz,层积混合云
	23:00—24:00	江城	45.9		
2004.7.22	01:00—02:00	景洪	30.2	逆风区	40~45 dBz,层积混合云
2004.9.5	18:00—19:00	景谷	42.4	中尺度辐合、垂直风切变	50~55 dBz,积云为主
2005.6.29	15:00—16:00	墨江	32.4	逆风区	50 dBz,积云为主
2005.7.4	15:00—16:00	景谷	30.0	中尺度辐合	40~45 dBz,层积混合云
2005.7.8	08:00—09:00	澜沧	42.3	逆风区、垂直风切变	40~45 dBz,层积混合云
2005.7.11	21:00—22:00	景谷	31.9	中尺度辐合	40~45 dBz,层积混合云
2005.7.14	00:00—01:00	澜沧	30.0	逆风区	40~45 dBz,层积混合云
2005.7.22	03:00—05:00	景洪勐养	61.0	逆风区、垂直风切变	40 dBz,层积混合云
2005.7.25	01:00—02:00	澜沧	36.8	逆风区	40~45 dBz,层积混合云
2005.8.13	19:00—20:00	思茅	41.4	中尺度辐合	40~45 dBz,层积混合云
2005.8.22	18:00—19:00	墨江	32.0	逆风区、垂直风切变	40~45 dBz,层积混合云
2006.5.14	00:00—01:00	景洪	31.0	风速辐合	40~45 dBz,层积混合云
2006.7.27	19:00—20:00	墨江	30.6	中尺度辐合、垂直风切变、RIJ	50~55 dBz,积云为主
2006.8.22	07:00—08:00	墨江	56.3	中尺度辐合、垂直风切变	40~45 dBz,层积混合云
2006.9.19	06:00—09:00	景洪嘎洒	96.4	逆风区	40 dBz,层积混合云
2007.4.12	15:00—16:00	景洪	31.1	中尺度辐合、垂直风切变	40~45 dBz,层积混合云
2007.6.28	18:00—19:00	思茅	57.4	逆风区、垂直风切变	45~50 dBz,积云为主
2007.7.6	14:00—15:00	宁洱黎明	42.5	逆风区、垂直风切变	40 dBz,层积混合云
2007.7.25	18:00—19:00	思茅	37.5	逆风区、垂直风切变	40~45 dBz,层积混合云
2008.5.17	20:00—21:00	宁洱	31.7	风速辐合、垂直风切变	45~50 dBz,层积混合云
2008.5.30	19:00—20:00	思茅	30.4	逆风区、垂直风切变	40~45 dBz,层积混合云
2008.8.18	15:00—16:00	景洪	38.6	中尺度辐合	40~45 dBz,层积混合云
2009.3.31	19:00—20:00	墨江	31.0	逆风区、垂直风切变	45~50 dBz,积云为主
2009.6.5	13:00—14:00	思茅	40.7	逆风区	40~45 dBz,层积混合云
2009.6.16	04:00—05:00	宁洱	43.5	逆风区、垂直风切变	40~45 dBz,层积混合云
2009.7.11	19:00—20:00	思茅	42.7	逆风区、垂直风切变	40~45 dBz,层积混合云
2009.7.12	16:00—17:00	思茅	45.7	中尺度辐合、垂直风切变	40~45 dBz,层积混合云
2009.7.13	06:00—07:00	景洪	33.1	逆风区、垂直风切变	40~45 dBz,层积混合云
2009.7.20	06:00—07:00	墨江	38.9	中尺度辐合、垂直风切变	40~45 dBz,层积混合云
2009.9.1	07:00—08:00	景洪	39.0	中尺度辐合	40 dBz,层积混合云

慢于大风区,此外,大风区为整体速度快,而风速辐合是指同一回波在移动方向上后部移速较大而产生的辐合。

4.1 短时强降水的基本反射率、径向速度及垂直剖面特征

基本反射率图中,85%的短时强降水回波为层积混合云降水(表 3),大部分短时强降水是由范围较大的降水过程中局部的中小尺度对流系统引起,回波中心强度集中在 $40 \sim 45 \text{ dBz}$ 之间,反射率垂直剖面图中可以看到,短时强降水中的回波集中在 6.5 km 以下(5 次积云降水例外),强回波中心集中在 4.5 km 以下,而且强度梯度小(图略)。

径向速度图中,短时强降水回波中出现中尺度辐合特征 14 块、逆风区特征 17 块(表 3),风速辐合 2 块,风速辐合与大风区相似,但回波整体移速明显

可将短时强降水分为中尺度辐合型、逆风区型(图略)和风速辐合型 3 种。

统计短时强降水回波的径向特征发现:径向速

度大($\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)的短时强降水回波仅有 7 块(3 块为飑线引起的强降水、2 块为风速辐合造成的强降水、2 块大风区,占 21%),而在径向速度垂直剖面图中,有 21 块(64%)回波具有低层风速小、高层风速大的垂直风切变特征。

4.2 短时强降水的风廓线产品(VWP)特征

新一代天气雷达速度方位显示风廓线产品(VAD wind profile, 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^[24],从而得到平均风向、风速随高度变化的垂直廓线,新一代天气雷达完成一次体积扫描需要 5~10 min,因此每隔 5~10 min 就有一张测站上空的风廓线图产生,中小尺度系统

引起的风场变化被充分显示,而且通过验证^[25],风廓线产品与探空测风所得的结果一致性相当好,因此分析风廓线产品可以在一定程度上揭示暴雨过程中垂直风场的相对真实结构。

宁洱县距离雷达中心 26 km,出现在宁洱的短时强降水的风廓线资料(VWP)特征比其他县区更能反映出暴雨的垂直风场结构,此外,由于有 64% 的强降水回波具有强烈的垂直风切变特征,所以选取 2008 年 5 月 17 日具有强烈垂直风切变的个例进行分析。

图 6 为 5 月 17 日 19:18—21:24 的雷达风廓线资料,从图中可以看出,宁洱上空为西南气流区,存在较强的垂直风切变,风速从低层到高层先增后减,而且维持较长的时间,说明此次暴雨过程中深厚的西南气流风场的存在,这种风场为暴雨的产生提供了充足的水汽和能量。

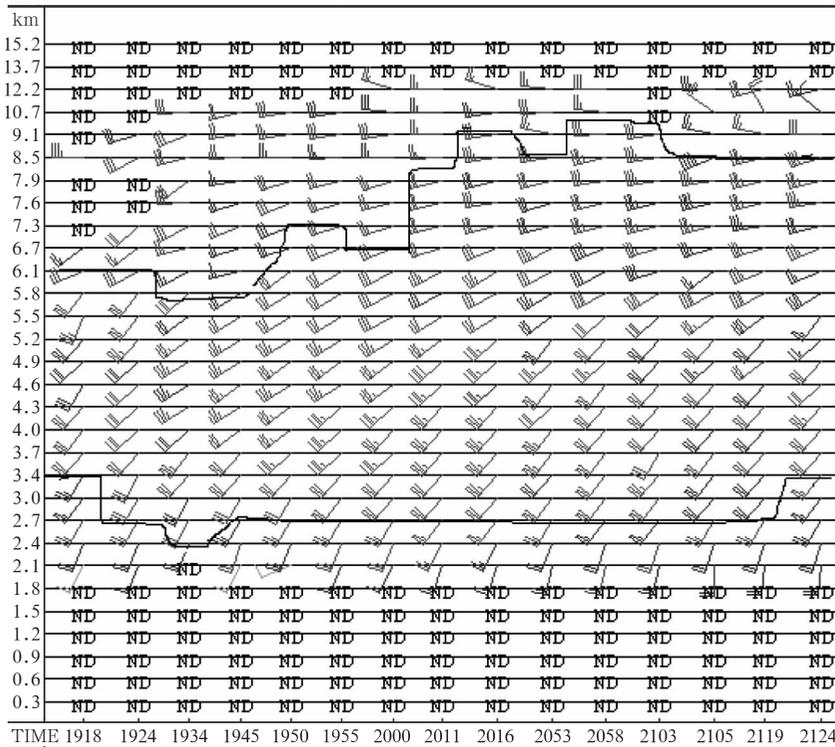


图 6 2008 年 5 月 17 日 19:18—21:24 雷达风廓线

Fig. 6 The VWP products from 19:18 BT to 21:24 BT 17 May 2008

19:18 前 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (急流区)的西南气流区下部位于 3.4 km 以上,虽存在垂直切变,但降水强度较弱;19:18 后气流向下传,19:29—19:45 波动 16 min 后,急流区维持在 2.7 km 高度以上,直至 21:19,强降水正发生在 19:50—21:03 之间,小时降水量达 31.7 mm,表明急流下传加强是此次强降水出现的重要原因之一;19:45—21:03,急流区上部波

动明显,厚度明显扩大,其中 20:16—20:53 和 20:58—21:03 急流区厚度达最大,对照基本反射率图发现,这个时段与最强降水阶段有较好的对应关系。21:19 后,急流区范围迅速减小,并迅速消失,降水迅速减弱。

以上分析看出低空西南气流向下传递和急流厚度明显扩大与强降水的发生有密切的关系。

分析距雷达中心 30 km 以内,有强烈垂直风切变特点的其他 8 次短时强降水发现,VWP 图中,强降水时段对应高空风速加大和大风范围最大的时段,而下传特征仅在低空风速较大的两次过程中(2008 年 5 月 17 日,2007 年 6 月 28 日)较为明显。

此外,分析发现,短时强降水发生区域,往往与中尺度辐合区中心或逆风区中心位置相对应,特别是小时雨量超过 50 mm 的两次过程中,还出现了辐合中心移动缓慢的特征;强降水回波的垂直累积液态含水量(vertically integrated liquid, VIL)值一般在 $25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下(仅飑线强降水偏高),而且强降水发生前后,VIL 值变化不明显。

5 结 论

对比分析滇南普洱、西双版纳典型的中小尺度强对流天气的多普勒速度特征和反射率因子及其导出产品特征,发现:

(1) 滇南冰雹云回波的中心强度为 55~69 dBz,而短时强降水的强中心为 40~45 dBz,大风回波中心强度 30~55 dBz。

(2) 92% 的冰雹云的 45 dBz 回波顶高超过 -20°C 层高度,且有 97% 的冰雹云的 45 dBz 回波顶高 $\geq 7.5 \text{ km}$,而 85% 的短时强降水的回波中心强度仅为 40~45 dBz,顶高也在 6.5 km 以下。

(3) 冰雹云初始回波强中心强度在 40 dBz 左右,高度在 5 km 左右,接近 0°C 层高度,而 85% 的强降水回波中心低于 4.5 km。

(4) 100% 的冰雹回波和 96% 的大风回波具有径向速度大($\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)的特征,而强降水回波中径向速度大的仅占 21%。

(5) 97% 的冰雹云回波和 85% 的大风回波的移速 $\geq 30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,而强降水回波中,仅有 15% 的回波移速 $\geq 30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

(6) 冰雹和短时强降水都具有中尺度辐合或逆风区或弱切变等辐合特征,而大风回波中,仅有 50% 左右存在明显辐合特征。

(7) VIL 产品仅对冰雹的发生有较好的指示性意义;VWP 产品对短时强降水的发生有较好的指示作用。

(8) 强回波中,出现弱切变特征时,有 67% 造成冰雹和大风,33% 单独造成冰雹或大风。

参考文献

[1] Burgess D W, Lemon L R. Severe thunderstorm detection by

radar[M]. // Atlas, Radar in Meteorology. American Meteorol Society, Boston, 1990: 619-647.

- [2] 朱君鉴,刁秀广,曲军,等. 4. 28 临沂强对流灾害性大风多普勒天气雷达产品分析[J]. 气象, 2008, 21-26.
- [3] 李兰,陈正洪. 2006 年 4 月 11—13 日湖北省大风致灾分析[J]. 气象, 2007, 33(5): 23-27.
- [4] 叶爱芬,伍志方,程元慧,等. 一次春季强冰雹天气过程分析[J]. 气象科技, 2006, 34(5): 583-586.
- [5] 郭虎,段丽,杨波,等. 0679 香山局地大暴雨的中小尺度天气分析[J]. 应用气象学报, 2008, 19(3): 265-275.
- [6] 孙靖,王建捷. 北京地区一次引发强降水的中尺度对流系统的组织发展特征及成因探讨[J]. 气象, 2010, 36(12): 19-27.
- [7] 李德俊,唐仁茂,熊守权,等. 强冰雹和短时强降水天气雷达特征及临近预警[J]. 气象, 2011, 37(4): 474-480.
- [8] 刘兵,戴泽军,胡振菊,等. 张家界多个例强雹过程对比分析[J]. 气象, 2009, 35(7): 23-32.
- [9] 王彦,唐熠,赵金霞,等. 天津地区雷暴大风天气雷达产品特征分析[J]. 气象, 2009, 35(5): 91-96.
- [10] 胡波,杜惠良,滕卫平,等. 基于云团特征的短时临近强降水预报技术[J]. 气象, 2009, 35(9): 104-111.
- [11] 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等. 一次典型超级单体风暴的多普勒雷达观测分析[J]. 气象学报, 2004, 62(3): 317-327.
- [12] 应冬梅,郭艳. 江西省一次强对流天气的多普勒天气雷达产品分析[J]. 江西气象科技, 2003, 26(3): 20-22.
- [13] 陈晓燕,付琼,岑启林,等. 黔西南州一次分裂型超级单体风暴环境条件和回波结构分析[J]. 气象, 2011, 37(4): 423-431.
- [14] 伍志方,张沛源. 一次强对流天气的多普勒特征分析[J]. 高原气象, 2001, 20: 202-207.
- [15] 刘淑媛,郑永光,陶祖钰. 利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动与暴雨关系[J]. 热带气象学报, 2003, 19: 285-290.
- [16] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [17] 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.
- [18] 张素芬,鲍向东,牛淑贞. 河南省人工消雹作业判据研究[J]. 气象, 1999, 25(9): 36-40.
- [19] Mather G K, Treddenick D, Parsons R. Observed relationships between the height of the 45dBz contours in storm profiles and surface hail reports[J]. J Appl Meteor, 1976, 15(12): 1336-1340.
- [20] Federer B, Waldvogel A. Plan for the swiss randomized hail suppression experiment. Design of Grossversuch IV[J]. Pure and Applied Geophys (1978/1979), 117 (3): 548-571.
- [21] 樊鹏. 用风廓线剖面 45dBz 高度选择防雹作业时机[J]. 陕西气象, 1994, 4: 29-31.
- [22] Roberts R D, Wilson J W. A proposed microburst nowcasting procedure using single Doppler radar[J]. J Appl Met, 1989, 28: 285-303.
- [23] 俞小鼎,张爱民,郑媛媛,等. 一次系列下击暴流事件的多普勒天气雷达分析[J]. 应用气象学报, 2006, 17(4): 385-392.
- [24] 刘志澄,李柏,翟志全. 新一代天气雷达系统环境及运行管理[J]. 北京: 气象出版社, 2002: 100-101.
- [25] 胡明宝,高太长,汤达章. 多普勒天气资料分析与应用[M]. 北京: 解放军出版社, 2000: 165—169, 54-55.