

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. 气象, 40(11):1380-1388.

三体散射长钉(TBSS)在 C 波段雷达中的应用研究^{*}

王晓君¹ 夏文梅² 段 鹤¹ 王秀英¹

1 云南省普洱市气象局,普洱 665000

2 江苏省气象科学研究所,南京 210008

提 要: 利用普洱 CIND3830-CC 天气雷达资料、地面观测资料进行统计分析,研究 2004—2013 年普洱 C 波段天气雷达中 27 次三体散射长钉(TBSS)的统计特征、地面降雹与 TBSS 的对应关系,并对 TBSS 在冰雹预警方面的应用进行探讨,结果表明:(1)C 波段雷达中,产生 TBSS 的回波的反射率因子范围为 55.0~68.4 dBz,70% 的 TBSS 出现在反射率因子 ≥ 60 dBz 时。(2)TBSS 的维持时间为 10~79 min,63% 的 TBSS 维持时间超过 20 min。(3)TBSS 一般出现在 4.0~9.5 km,最低出现在 2.6 km,最高出现在 11.4 km。(4)TBSS 长 5.6~22.4 km,宽 1.5~14.6 km,TBSS 宽度与强回波区径向外侧的 60 dBz 以上回波的面积成正比,但 TBSS 的长度与反射率因子核心的强度和宽度无明显对应关系。(5)出现 TBSS 时,59% 的回波出现了降雹,11% 的回波出现了强冰雹。(6)出现 TBSS 且出现降雹的过程中,TBSS 预报冰雹的时间提前量为 5~100 min,平均为 34.5 min。(7)在出现 TBSS 且出现降雹的过程中,TBSS 的宽度与冰雹的大小或降雹密度成正比。此外,分析了出现 TBSS 但未降雹的原因,找出了 TBSS 配合垂直液态水含量密度(D_{VIL})和 45 dBz 伸展高度、TBSS 配合回波宽度和 45 dBz 伸展高度的预报冰雹的方法,在出现 TBSS 特征的回波中,上述方法的预报准确率分别达 89% 和 94% (临界成功指数为 0.89 和 0.94)。

关键词: C 波段天气雷达, 冰雹, TBSS 特征, 统计分析, 预警

中图分类号: P412

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.11.011

The Application Research of Three-Body Scatter Spike (TBSS) in C-Band Weather Radar

WANG Xiaojun¹ XIA Wenmei² DUAN He¹ WANG Xiuying¹

1 Puer Meteorological Office of Yunnan Province, Puer 665000

2 Jiangsu Provincial Institute of Meteorological Science, Nanjing 210008

Abstract: Based on the CIND3830-CC weather radar data and surface observational data in Puer City, this study reports the statistical characteristics of 27 times of three-body scatter Spike (TBSS) in C-band weather radar from 2004—2013, the corresponding relation between hails shooting on the ground and TBSS as well as the application of TBSS in hailstorm warning. The results are as follows: (1) The reflectivity range of TBSS echo is 55.0—68.4 dBz, and 70% TBSS appears when reflectivity factor is ≥ 60 dBz. (2) TBSS maintaining time is 10—79 min, and 63% is above 20 min. (3) TBSS usually happens in the height of 4.0—9.5 km, and the minimum/maximum height is 2.6 km/11.4 km. (4) TBSS is 5.6—22.4 km in length, and 1.5—14.6 km in width. The width of TBSS is proportional to the area of echo (at least 60 dBz) along the radially lateral direction, but the length does not have clear correspondence with the reflectivity factor. (5) Hailstorm weather happens in the case of 59% echoes with the occurrence of TBSS. The severe hail appears in 11% of the radar echo. (6) Hailstorm forecasting time by TBSS is 5—100 min in ad-

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006004 和 GYHY201306025),中国气象局预报员专项(CMAYBY2013-063)及云南省科技惠民计划(2014RA002)共同资助

2014 年 1 月 10 日收稿; 2014 年 4 月 16 日收修定稿

第一作者:王晓君,主要从事天气预报服务. Email:1034561861@qq.com

通信作者:夏文梅,主要从事天气雷达资料分析与应用研究工作. Email:njxiawm@sina.com

vance, 34.5 min on average when TBSS and hailstorm appear together. (7) When TBSS and hailstorm both happen, the width of TBSS is proportional to the size or density of hailstorm. Furthermore, the reason that TBSS appears but hailstorm does not come down simultaneously is discussed, and the forecasting hailstorm methods, with the accuracy of 89% and 94% respectively, are also found out by using TBSS combining D_{VIL} and 45 dBz strong echo height or TBSS combining echo breadth and 45 dBz strong echo height (Critical Success Index are 0.89 and 0.94).

Key words: C-band weather radar, hailstorm, TBSS characteristics, statistical analysis, warning

引言

Zrníc(1987)指出,三体散射特征(three-body scatter signature)是由包含大的水凝结物如大的湿冰雹对雷达波的米散射所引起的。Zrníc(1987)以及 Wilson 等(1988)最早研究了 this 雷达回波假象,Zrníc 称之为“三体散射特征”,Wilson 等(1988)称其为“火焰回波(flare echo)”或“雹钉(hail spike)”。Lemon(1998)将其称为“三体散射长钉”(three-body scatter spike, TBSS),并发展了该理论,将其作为大冰雹的识别和预警指标,Lemon(1988)指出,S 波段雷达回波中三体散射长钉(以下简称 TBSS)的出现是存在大冰雹的充分条件而非必要条件,在观测到 TBSS 后的 10~30 min 内,地面有可能出现大于 2~5 cm 的降雹。TBSS 表现为一个从高反射率值中心沿雷达直径朝远离雷达方向伸出的长 10~30 km 的异常回波区域。它是一个具有低反射率因子值和接近零的朝向雷达的多普勒速度值的区域。它的谱宽值较大,而且常常比较杂乱。

近年来,多普勒天气雷达资料得到了广泛的应用研究,国内也在多普勒天气雷达上大量观测到了TBSS,并且对它们进行了分析研究,如廖玉芳等(2003)研究了2002年5月14日发生在湖南常德的一次超级单体的TBSS特征。冯晋勤等(2004)分析了2002年12月19日发生在闽南和粤东地区的一次冬季冰雹过程的TBSS特征,王令等(2004)、俞小鼎等(2005)、郭艳等(2005)、朱敏华等(2006)、李向红等(2010)和陈贵川等(2011)也观测到了具有TBSS特征的风暴,并对其进行了研究。此外,廖玉芳等(2007)利用我国各地11次强对流事件中23个产生S波段雷达三体散射的雹暴的新一代天气雷达数据,总计499个三体散射样本资料,综合并详细地讨论了TBSS应用于强冰雹辅助预警的可能性。郭

艳(2010)利用江西省 2002—2007 年的地面观测和雷达资料进行统计分析,研究地面降雹与 TBSS 之间的对应关系,并且对 TBSS 在大冰雹预警方面的应用进行了探讨。

上述研究为 TBSS 的广泛应用和研究打下了坚实的基础,但对于 C 波段雷达中的 TBSS 特征研究较少,往往仅限于个例分析,缺乏大量、细致的分析研究。

本文利用云南省普洱市 2004—2013 年的 C 波段天气雷达和地面观测资料进行统计分析,研究地面降雹与 TBSS 之间的对应关系,并且对 TBSS 在冰雹预警方面的应用进行探讨。

1 TBSS 理论

如图 1 所示,雷达发射的电磁波遇到反射率因子核心区 C 时,一部分通过后向散射返回雷达形成回波,一部分继续向前,还有一部分被 C 向四面散射,其中散射到地面的电磁波部分会被吸收,部分被

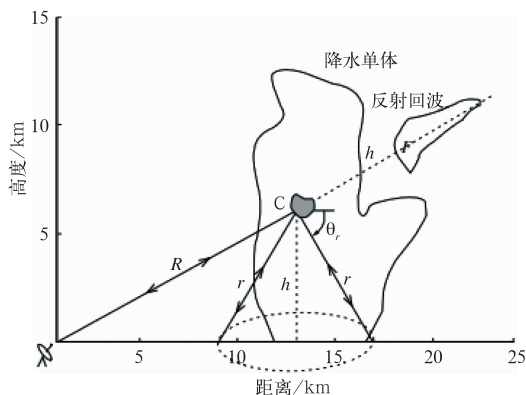


图 1 造成 TBSS(或火焰回波)的雷达信号路径示意图
(C 处的阴影代表造成该回波假象的 >60 dBz 的
反射率因子核心; Wilson et al, 1988)

Fig. 1 Schematic diagram of the radar signal path responsible for the three-body scatter spike
(The dark shading near point C represents the core of above 60 dBz responsible for producing the artifact; Wilson et al., 1988)

地面反射回C,再次被C散射,部分电磁波再次散射回到雷达,如果该散射能量超过雷达的噪声功率,雷达检测到该回波信号后,将这部分回波定位在更远的雷达波束的径向上(多次散射增加了电磁波的传输距离,所以定位更远)。这就是三体散射现象,三体指雷达、反射率因子核心区C和地面。

2 资料

选取2004—2013年普洱、西双版纳地区所有组合反射率 ≥ 50 dBz的回波进行分析。实况取自普洱、西双版纳自动站数据和灾情直报数据。雷达资料选取普洱天气雷达2004—2013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)、垂直剖面等产品。

普查2004—2013年普洱、西双版纳地区所有组合反射率 ≥ 50 dBz的回波发现,共有27块回波出现TBSS特征,其中有16块回波出现冰雹,占59%,有3次出现强冰雹(直径20 mm以上),占11%。普查2004—2013年普洱、西双版纳地区29次冰雹过程,49块冰雹云发现,共有16块冰雹云出现TBSS特征,占33%,其中有10次TBSS较为典型,易于识别,其他6次维持时间较短或仅在1~2个仰角上出现TBSS特征。

3 TBSS的统计特征

3.1 TBSS在C波段雷达资料上统计特征

27个出现TBSS特征的回波的最大组合反射率(CR)为57.4~68.4 dBz,普遍大于60 dBz,有8块回波在强度达到55 dBz时出现TBSS(2004年4月14日17:27—17:43、18:14—18:29,2007年4月7日16:56—17:17,2009年4月5日18:13—18:39,2009年4月10日15:38—15:49、16:51—17:01,2009年4月11日16:37—16:48、16:37—17:03,部分图片见图5),其余回波达到60 dBz时出现TBSS,TBSS出现在距雷达中心30~140 km之间(表1)。

垂直高度上,TBSS一般出现在4.0~9.5 km,最低出现在2.6 km(2005年3月21日14:52—15:13),最高出现在11.4 km(2005年3月20日18:48—19:10、19:15—19:51),出现TBSS特征的

回波顶高为8.2~14.7 km(表略)。

TBSS主要在强回波位于雷达的南半边时出现(占93%),普洱C波段雷达扫描仰角包括14层(0.5°、1.5°、2.4°、3.4°、4.3°、5.3°、6.7°、7.5°、8.7°、10.0°、12.0°、14.7°、16.7°、19.5°),从表1可知,30 km内未观测到TBSS,31~60 km之间出现1次,61~90 km之间出现10次,91~120 km之间出现10次,121~150 km之间出现6次。

分析发现,61~90 km之间能观测到TBSS的全貌,是TBSS的最佳观测范围,如图1和图2为强回波分别出现在63和69 km(回波伸展高度最高的两次过程),在回波中心强度达到60 dBz的回波的后侧均出现了TBSS,出现的仰角范围为0.5°~6.7°,且维持时间分别达36和22 min。分析其他位于61~90 km之间的TBSS过程发现,回波中心强度达到60 dBz的回波后侧均出现了TBSS特征。

而分析所有TBSS发现,TBSS最明显的仰角为1.5°~3.4°(图2、图3),即最佳观测仰角为1.5°~3.4°(因大部分过程中,4.3°仰角中无TBSS特征,因此取3.4°)。

3.2 TBSS在C波段雷达产品上的特征

统计发现,TBSS是一个沿着雷达径向从强回波区向远离雷达方向伸出的异常回波(图2和图3),由表1可见,TBSS的长度与是否降雹无关,分析出现TBSS且降雹的过程发现,TBSS的长度与冰雹大小无明显对应关系(表略),因此统计所有TBSS,而不要求其长度 ≥ 10 km,TBSS的长度和宽度分别为5.6~22.4和1.5~14.6 km(见表1),强度为6.1~29.2 dBz(图3g),径向速度图上,TBSS为速度模糊或 $-7.5 \sim 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的区域(图2、图3),TBSS的谱宽一般较大,可达 $8.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,分布较杂乱,但在普洱C波段雷达中,出现强对流天气时,往往所有回波的谱宽值均较大,且分布杂乱,TBSS的谱宽与其他回波差异不大(图略)。

3.3 TBSS的回波形态

分析发现,C波段雷达中,CR图中TBSS特征最为明显,且TBSS形态和各仰角中的形态基本一致,实际观测的TBSS的形态有3种:长钉状、宽广的长方形状和细长方形状。

普洱C波段雷达中,长钉状的TBSS最为常见,如图4a~4f,图4a中的TBSS最为常见,共出现7次;

表 1 2004—2013 年 TBSS 出现时间与对应回波参数

Table 1 Characteristics of the TBSS (including date, time, maximum CR, echo width, length, width, range, elevation, D_{VIL} , and hail) in Puer from 2004 to 2013

日期	时间	CR/dBz	TBSS 长、 宽/km	范围 /km	TBSS 出现 的仰角/ $^{\circ}$	D_{VIL} / $g \cdot m^{-3}$	回波 宽/km	有无 冰雹
2004.04.14	17:27—17:43	60.9	14.4、9.0	121	0.5~1.5	2.8	9.0	无
2004.04.14	19:58—20:12	64.6	11.0、6.0	97	0.5~3.4	2.9	9.1	无
2004.04.14	18:14—18:29	57.4	5.8、1.5	107	2.4	2.3	11.0	无
2004.04.18	17:54—18:04	61.2	11.1、14.0	102	2.4~4.3	3.1	15.0	有
2005.03.20	18:48—19:10	61.4	13.7、7.1	69	0.5~6.7	2.9	8.4	无
2005.03.20	19:15—19:51	63.7	13.4、8.5	63	0.5~6.7	5.9	19.8	有
2005.03.21	14:52—15:13	65.8	11.0、8.5	30	1.5~10.0	5.0	12.0	有
2006.06.27	18:24—18:34	62.0	7.2、4.9	139	0.5~1.5	4.6	12.0	有
2007.04.07	16:56—17:17	63.0	10.5、10.6	99	0.5~3.4	4.2	23.9	有
2007.04.10	14:48—15:50	67.5	17.2、13.5	61	0.5~4.3	4.5	16.0	有
2007.04.10	15:05—15:44	64.5	11.5、14.3	130	0.5~1.5	4.7	16.1	有
2007.04.10	17:31—17:52	62.5	10.0、5.4	81	0.5~3.4	2.8	8.0	无
2008.02.28	14:57—16:16	67.9	17.1、11.0	61	0.5~4.3	3.6	9.5	无
2008.02.28	15:34—16:32	63.2	11.0、10.0	63	0.5~4.3	2.7	13.0	无
2008.02.28	18:59—19:04	60.2	5.6、4.5	137	0.5~1.5	6.3	20.0	有
2008.03.08	09:31—09:47	61.2	10.4、4.1	90	0.5~2.4	6.3	12.0	有
2008.04.14	17:27—19:04	68.4	11.0、14.6	140	0.5~2.4	6.3	17.8	有
2008.04.14	19:44—20:05	63.0	8.3、9.3	73	0.5~3.4	3.5	9.3	无
2009.04.05	18:13—18:39	60.1	10.6、7.6	91	0.5~3.4	4.3	17.0	有
2009.04.10	15:38—15:49	61.0	10.3、6.1	105	0.5~2.4	2.8	7.5	无
2009.04.10	16:51—17:01	59.0	11.7、4.0	110	0.5~2.4	2.9	6.0	无
2009.04.11	16:37—17:03	58.4	10.0、4.0	98	0.5~2.4	3.8	15.5	有
2009.04.11	16:37—16:48	59.6	9.6、9.6	96	0.5~2.4	2.9	9.6	无
2010.04.16	17:33—18:20	66.4	12.5、10.0	109	0.5~3.4	3.6	17.5	有
2010.05.09	15:03—15:24	60.6	12.5、8.0	133	0.5~3.4	7.1	20.0	有
2013.04.15	14:33—15:29	61.9	22.4、7.2	71	0.5~5.3	3.4	12.0	有
2013.04.15	15:24—16:24	62.4	10.0、6.8	81	0.5~4.3	4.5	13.0	有

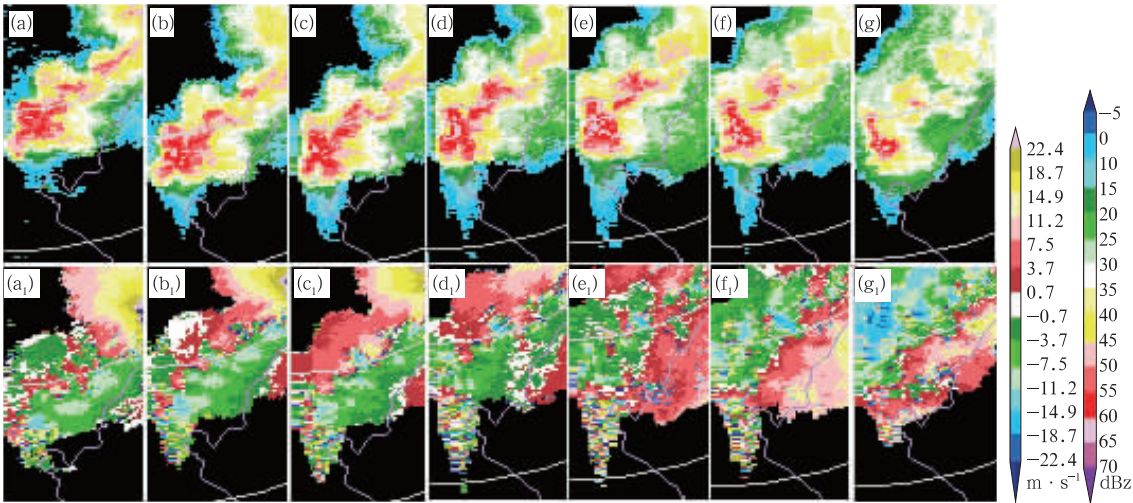


图 2 2005 年 3 月 20 日 19:21 在不同仰角处基本反射率(a~g, R)和径向速度($a_1 \sim g_1$, V)中的 TBSS 特征
(a, a_1) 0.5° , (b, b_1) 1.5° , (c, c_1) 2.4° , (d, d_1) 3.4° , (e, e_1) 4.3° , (f, f_1) 5.3° , (g, g_1) 6.7°

Fig.2 The TBSS signatures of basic reflectivity (a—g, R) and radial velocity ($a_1 \sim g_1$, V)
at different elevations at 19:21 BT 20 March 2005

(a, a_1) 0.5° , (b, b_1) 1.5° , (c, c_1) 2.4° , (d, d_1) 3.4° , (e, e_1) 4.3° , (f, f_1) 5.3° , (g, g_1) 6.7°

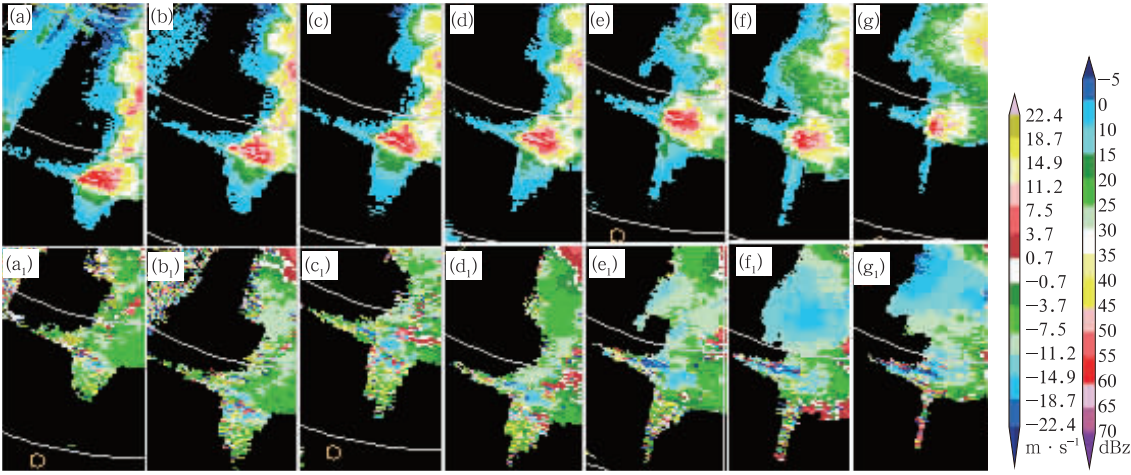


图 3 2005 年 3 月 20 日 18:59 在不同仰角处基本反射率(a~g, R)和径向速度($a_1 \sim g_1$, V)中的 TBSS 特征
(a, a_1) 0.5°, (b, b_1) 1.5°, (c, c_1) 2.4°, (d, d_1) 3.4°, (e, e_1) 4.3°, (f, f_1) 5.3°, (g, g_1) 6.7°

Fig. 3 The TBSS signatures in basic reflectivity (a—g, R) and radial velocity ($a_1 \sim g_1$, V)
at different elevations at 18:59 BT 20 March 2005

(a, a_1) 0.5°, (b, b_1) 1.5°, (c, c_1) 2.4°, (d, d_1) 3.4°, (e, e_1) 4.3°, (f, f_1) 5.3°, (g, g_1) 6.7°

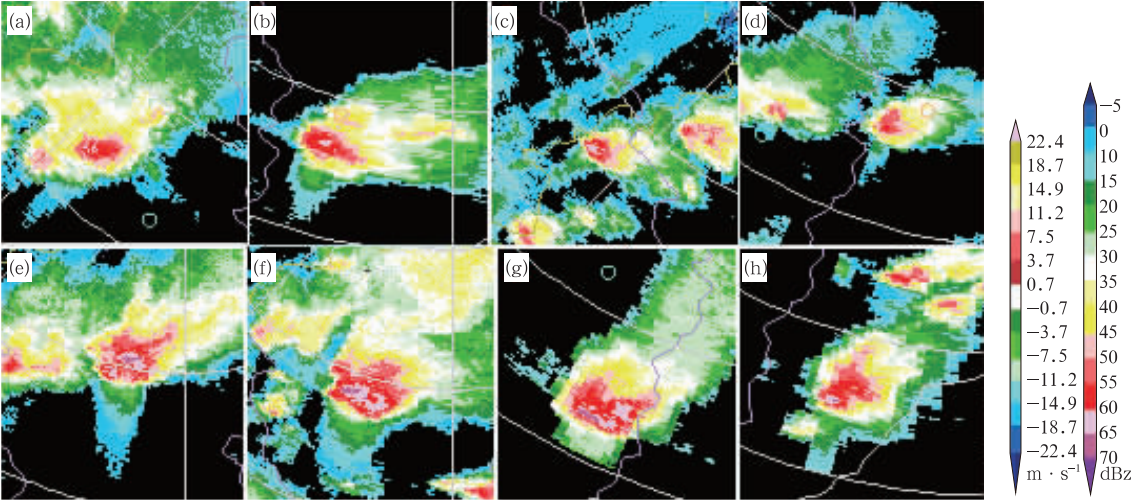


图 4 TBSS 在 CR 中的各种形态

(a)2005 年 3 月 20 日 19:21, (b)2007 年 4 月 7 日 17:07, (c)2008 年 4 月 14 日 19:54,
(d)2009 年 4 月 11 日 16:37, (e)2008 年 2 月 28 日 15:29, (f)2007 年 4 月 10 日 15:19,
(g)2008 年 4 月 14 日 17:38, (h)2010 年 5 月 9 日 15:19

Fig. 4 The patterns of TBSS in CR

(a) 19:21 BT 20 March 2005, (b) 17:07 BT 7 April 2007, (c) 19:54 BT 14 April 2008,
(d) 16:37 BT 11 April 2009, (e) 15:29 BT 28 February 2008, (f) 15:19 BT 10 April 2007,
(g) 17:38 BT 14 April 2008, (h) 15:19 BT 9 May 2010

TBSS 和旁瓣均较明显的回波共出现 2 次(图 3、图 4b),但仅有图 4b 对应降雹,两次 TBSS 过程最大的区别为强回波的宽度;图 4c 中的 TBSS 特征较难识别,27 次中共出现 3 次此类与多单体回波同时出现并相临近的 TBSS;有 4 次与图 4d 中的 TBSS 类似

(即共 5 次),TBSS 较弱,且维持时间不足 12 min,不容易识别;图 4e 和 4f 中出现典型的较宽广、长度较长的 TBSS 特征,TBSS 的宽度与强回波区径向外侧 ≥ 60 dBZ 的回波的面积成正比,虽然图 4e 和 4f 中的 TBSS 较典型,但图 4e 中的 TBSS 无冰雹对应

(45 dBz 回波伸展高度不足、VIL 值明显偏小),而图 4f 中的 TBSS 对应大冰雹(直径达 10 cm),表明 TBSS 的形态、面积大小与是否降雹无关,此类典型的 TBSS 共出现 4 次。

图 4g 为宽广的长方形状,共出现 3 次此形态的 TBSS, TBSS 的宽度均与强回波区径向外侧的 60 dBz 以上回波的面积成正比,图 4g 中的 TBSS 对应降雹密度较大的冰雹,其他两次为直径为 8.7 cm 的大冰雹和降雹密度较大的冰雹。

图 4h 为细长形状的 TBSS,共出现 3 次。

上述分析表明, TBSS 面积、维持时间(表 1)与是否降雹、雹粒大小无明显对应关系,而降雹过程中,宽广的、面积较大的 TBSS 往往对应大冰雹过程或降雹密度较大的降雹过程。此外,分析两次有 TBSS 和旁瓣回波的过程发现,回波宽度可能对是否降雹有一定影响。

根据 TBSS 的定义, TBSS 长度取决于径向外侧超过 60 dBz 的距离库所在的高度、强回波区径向外侧的回波长度和下垫面特性。由于普洱雷达覆盖的区域为普洱和西双版纳大部分地区,山区面积占总面积的 95% 以上,山川河流纵横交错,下垫面特性极为复杂,加之普洱 C 波段雷达中, 55 dBz 以上的回波即可产生 TBSS,使得 TBSS 长度的对应关系较为复杂,在此暂不讨论。此外,分析发现, TBSS 的长度与 CR 中心强度无明显对应关系,与冰雹大小和降雹密度无明显对应关系(表 1)。

4 TBSS 预报冰雹的效果

统计发现, 27 次有 TBSS 特征的回波中, 有 16 次(59%)有冰雹出现(表 1), 而 49 块冰雹云中, 仅有 16 块(33%)冰雹云出现 TBSS 特征, 可见单独的 TBSS 特征作为 C 波段雷达中冰雹的预警指标的效果一般。C 波段雷达中, TBSS 并非探测冰雹的充分或必要条件。

4.1 TBSS 预报冰雹的时效

由于普洱和西双版纳地区山区面积占总面积的 95% 以上, 地面观测报告难度较大, 虽近年来大范围栽种的农作物例如烤烟、橡胶、咖啡等作物的受灾情况为冰雹的记录提供了较好的参考, 一定程度上避免了冰雹灾情的漏报, 但往往仅能为冰雹的出现提供参考, 而不能提供具体降雹时间, 冰雹灾情往往

只能得到冰雹的开始降雹时间和部分的降雹时段。

统计分析 16 次有 TBSS 特征并出现降雹的过程发现, TBSS 伴随整个降雹过程, 甚至降雹结束(CR 低于 55 dBz)后 1 个体扫时间内仍有 TBSS 出现。因此, TBSS 出现一段时间后, 若 CR 低于 55 dBz 时仍有 TBSS 出现(略图), 不能视为冰雹的预警指标。

假定出现 TBSS 时, 就开始发布回波未来影响区域有冰雹出现, 将开始出现 TBSS 的时间和开始降雹的时间差到开始出现 TBSS 的时间与冰雹结束时间差视为 TBSS 对冰雹预警的时间提前量, 那么 16 次有 TBSS 特征并出现降雹的过程中, TBSS 对冰雹预警的时间提前量为 5~100 min。

由于冰雹在云中的增长时间约在 10~35 min 之间(张培昌等, 2001), 冰雹预警时间小于 10 min 的原因可能为雷达探测方位、角度和距离等各种因素导致 TBSS 没有更早地被观测到或观测记录不充分, 而提前量超过 35 min 的原因可能为 TBSS 伴随整个降雹时段难以区分具体提前量以及预警提前量的定义方式。

4.2 TBSS 和其他回波特征的综合应用

分析 C 波段雷达中, 出现 TBSS 特征但未出现冰雹的原因: 45 dBz 回波伸展高度($H_{45\text{ dBz}}$)不足, 垂直液态水含量密度($D_{\text{VIL}} = \text{VIL}/H$, H 为回波顶高)较小, 回波宽度较小。

段鹤等(2011)研究表明, $H_{45\text{ dBz}} \geq 7.5\text{ km}$ 为滇南冰雹的识别指标中的基本条件之一, 统计分析 27 次出现 TBSS 特征的强回波的 $H_{45\text{ dBz}}$ 发现, 有 3 块回波(2007 年 4 月 10 日 17:31—17:52、2008 年 2 月 28 日 14:57—16:16 和 15:34—16:32)的 $H_{45\text{ dBz}}$ 高度未达 7.5 km(图略), 分别为 7.0、6.5、6.0 km, 此 3 块回波均未出现降雹, 其他回波均满足 $H_{45\text{ dBz}} \geq 7.5\text{ km}$ 。统计 49 块冰雹云发现, 均满足 $H_{45\text{ dBz}} \geq 7.5\text{ km}$ 。因此, 在满足 $H_{45\text{ dBz}} \geq 7.5\text{ km}$ 的条件下探讨 TBSS 与 D_{VIL} 、TBSS 与回波宽度配合的冰雹的预警方法。

4.2.1 TBSS、 $H_{45\text{ dBz}}$ 与 D_{VIL} 配合识别和预警冰雹

统计分析 27 次 TBSS 发现, 有 4 次 TBSS 的 $\text{VIL} < 30\text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (2004 年 4 月 14 日 18:14—18:29、2007 年 4 月 10 日 17:31—17:52、2008 年 3 月 8 日 09:31—09:47、2009 年 4 月 10 日 15:38—15:49), 其中有 1 次出现冰雹(2008 年 3 月 8 日

09:31—09:47),其他 23 次过程中, VIL 值为 $30\sim 60\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,但仅有 16 次出现冰雹(表略)。

49 块冰雹云 VIL 值的特征发现(表略),除 2008 年 3 月 8 日冰雹的 VIL 值为 $25\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 外,冰雹成熟阶段的 VIL 值为 $30\sim 60\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, VIL 值明显偏小(冰雹云 VIL 的常用预警指标为 $45\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$)。

上述分析表明,单独的 VIL 值难以区分冰雹回波和一般强回波,因此尝试引入 VIL 密度(D_{VIL}),以弥补 VIL 的不足,Amburn 等(1997)首先提出了 D_{VIL} ,郑媛媛等(2004)对 D_{VIL} 进行了应用研究。 VIL 识别冰雹的原因在于 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 D_{VIL} 也应偏高,分析发现,49 块冰雹云的 D_{VIL} 为 $3.0\sim 6.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (表略)。而 27 次 TBSS 中,未降雹的 11 次 TBSS 中有 9 次的 D_{VIL} 为 $2.3\sim 2.9\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中有 3 次的 VIL 值为 $20\sim 25\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,回波顶高为 $8.5\sim 10.4\text{ km}$, D_{VIL} 为 $2.3\sim 2.9\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (图略),另有 3 次(共 4 次)具有与图 5 相类似的特征:(1) 出现 TBSS 的时段内, VIL 最大值为 $25\sim 30\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,对应回波顶高为 $9.5\sim 10.2\text{ km}$, $D_{VIL}<3.0\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,大部分时段为 $2.6\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,仅有一个体扫时段内出现 $2.9\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (16:43, VIL 为 $30\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,回波顶高为 10.2 km ,图 5c₁ 和图 5c₂)。(2) VIL 达到 $30\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 的时间短、范围很小(图 5c₁ 和图 5c₂)。(3) VIL 无跃增现象。其他有两次超过 $3.0\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,但维持时间仅为 1~2 个体扫时间(图略)。

统计短时强降水(小时雨量 $\geq 30\text{ mm}$)和大风的 D_{VIL} 发现,除两次飊线导致的强降水外(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 $2.1\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,除飊线导致的大风和下击暴流大风外,大风的 D_{VIL} 均低于 $1.7\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

因此,可用 TBSS 特征和 D_{VIL} 配合识别和预警冰雹:当出现 TBSS、 $D_{VIL}\geq 3.0\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $H_{45\text{ dBz}}\geq 7.5\text{ km}$ 时可预报未来有冰雹出现,预报准确率为 89%(该准确率的统计仅针对有 TBSS 特征的回波,临界成功指数为 0.89),当出现 TBSS、 $H_{45\text{ dBz}}\geq 7.5\text{ km}$ 但 $D_{VIL}<3.0\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时可预报未来无冰雹出现,预报准确率为 100%。

4.2.2 TBSS、 $H_{45\text{ dBz}}$ 与回波宽度配合识别和预警冰雹

回波宽度是指过回波强中心,沿回波最窄的部

分对回波作基本反射率的垂直剖面,计算剖面图中最左侧 30 dBz 的回波距雷达中心线的距离 D_1 ,和最右侧 30 dBz 的回波距雷达中心线的距离 D_2 , D_2 与 D_1 之差为强回波的回波宽度(由于衰减而产生回波径向后侧 V 形缺口时,不能计算其宽度)。图 6 是 TBSS 回波基本反射率垂直剖面(RHI)。

统计分析 27 次出现 TBSS 特征的回波发现(表 1),共有 17 次回波的宽度 $\geq 12\text{ km}$,其中 16 次出现冰雹,占 94%。而宽度 $<12\text{ km}$ 的 10 次回波中均未出现冰雹。

以最具代表性的 4 次宽度 $<12\text{ km}$ (图 6a~6d)和 4 次宽度 $\geq 12\text{ km}$ (图 6e~6h)的回波为例进行分析。

图 6a 为 2004 年 4 月 14 日 17:32 基本反射率的 RHI,回波宽 9.0 km ,中心强度为 60.9 dBz ,强中心面积较小,在 $\geq 55\text{ dBz}$ 回波的径向后侧产生了 TBSS,该类回波共出现 4 次。图 6b 为 2004 年 4 月 14 日 19:58 的 RHI,回波宽 9.1 km ,强中心为 64.6 dBz ,强中心面积小,但垂直伸展高度范围较大,在 $\geq 60\text{ dBz}$ 回波的径向后侧产生了 TBSS,该类回波共出现 2 次。图 6c 为 2009 年 4 月 10 日 16:56 的 RHI,回波宽 6.0 km ,强中心 59 dBz ,在 $\geq 55\text{ dBz}$ 回波的径向后侧产生了 TBSS,该类回波共出现 2 次。图 6d 为 2009 年 4 月 11 日 16:37 的 RHI,回波宽 9.6 km ,强中心为 59.6 dBz , 55 dBz 以上回波的面积很小,在 $\geq 55\text{ dBz}$ 回波的径向后侧产生了 TBSS,该类回波共出现 2 次。图 6a~6d,均无冰雹出现。

而图 6e~6h 分别为冰雹影响范围最大、小冰雹、大冰雹(直径达 8.7 cm)和降雹密度较大的冰雹回波,中心强度 $\geq 60\text{ dBz}$,在 $\geq 60\text{ dBz}$ 回波的径向后侧产生 TBSS,回波宽度均 $\geq 12\text{ km}$,均产生了冰雹。

分析 49 次冰雹云发现,其宽度均 $\geq 12\text{ km}$ 。分析发现,回波宽度与回波强中心面积的对应关系较好,回波宽度与是否降雹对应关系较好。

因此,可用 TBSS 特征和回波宽度配合识别和预警冰雹:当出现 TBSS、回波宽度 $\geq 12\text{ km}$ 、 $H_{45\text{ dBz}}\geq 7.5\text{ km}$ 时可预报未来有冰雹出现,预报准确率为 94%(该准确率的统计仅针对有 TBSS 特征的回波,临界成功指数为 0.94),当出现 TBSS、 $H_{45\text{ dBz}}\geq 7.5\text{ km}$,但回波宽度 $<12\text{ km}$ 时可预报未来无冰雹出现,预报准确率为 100%。

4.2.3 TBSS 过程中回波宽度和 D_{VIL} 的关系

统计分析 27 次 TBSS 特征对应的回波发现,回

波宽度与 D_{VIL} 大小无对应关系(表 1),但回波宽度和 $D_{VIL} \geq 3.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的面积及维持时间成正比。

宽度 $< 12 \text{ km}$ 的回波具有以下特征(图 6a~6d):

(1) 50~55 dBz 的回波面积较小,60 dBz 以上回波面积较小或不存在,45~49 dBz 的回波面积较小(图 6a~6d)。

(2) VIL 无跃增现象,或出现 VIL 跃增时,回波顶高相应跃增,导致 D_{VIL} 增加不明显(图 5)。

(3) VIL 强中心与强回波中心位置对应关系较好, VIL 强中心面积较小,往往与 50 dBz 以上的回波面积对应,维持时间较短(图 5)。

而宽度 $\geq 12 \text{ km}$ 的回波具备以下特征(16 次中,存在 1 次特例):

(4) 50~55 dBz 的回波面积较大,60 dBz 以上回波面积和 45~49 dBz 的回波面积较大(图 6e~6h)。

(5) VIL 跃增现象较普遍,回波顶高跃增不明

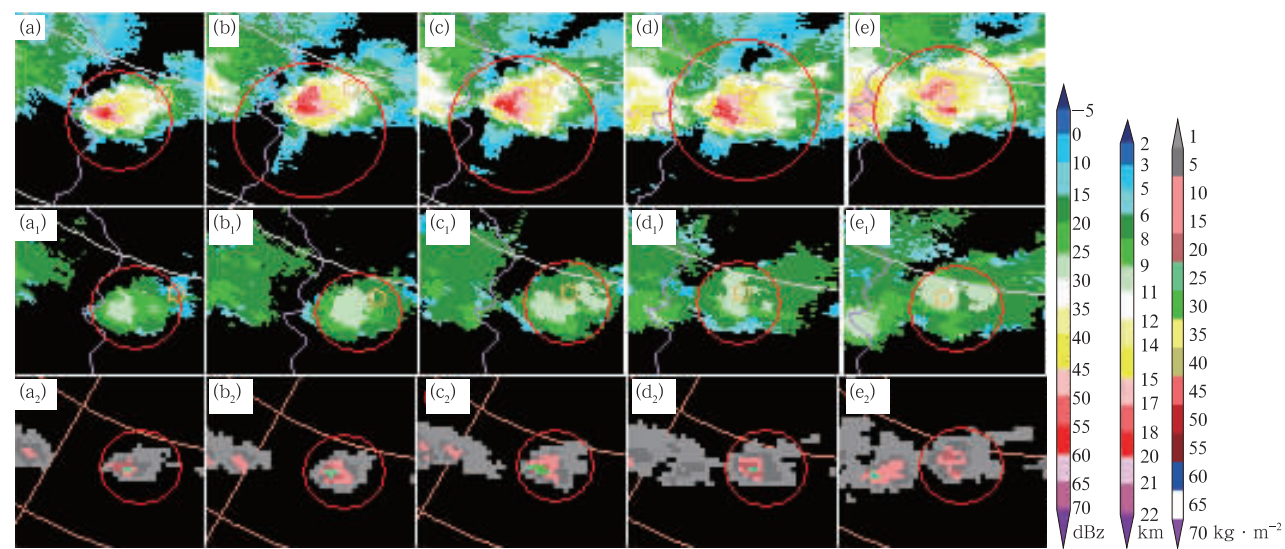


图 5 2009 年 4 月 11 日 16:32—16:53 CR(a~e)及其对应的回波顶高(a₁~e₁, ET)和 VIL (a₂~e₂)

(a, a₁, a₂)16:32 BT, (b, b₁, b₂)16:37, (c, c₁, c₂)16:43, (d, d₁, d₂)16:48, (e, e₁, e₂)16:53

Fig. 5 Temporal characteristics of CR (a~e) and its ET (a₁~e₁) and VIL (a₂~e₂) from 16:32 to 16:53 BT 11 April 2009

(a, a₁, a₂)16:32 BT, (b, b₁, b₂)16:37, (c, c₁, c₂)16:43, (d, d₁, d₂)16:48, (e, e₁, e₂)16:53

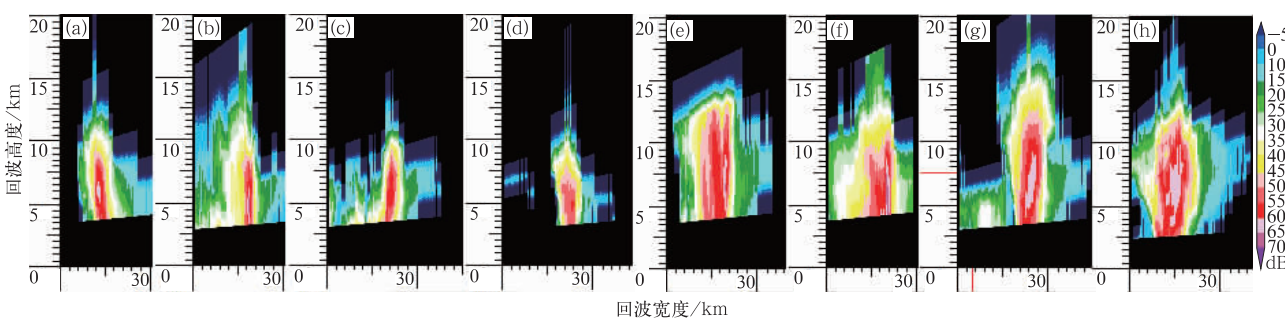


图 6 产生 TBSS 的回波的基本反射率垂直剖面(RHI)

(a)2004 年 4 月 14 日 17:32 的 RHI, (b)2004 年 4 月 14 日 19:58 的 RHI, (c)2009 年 4 月 10 日 16:56 的 RHI, (d)2009 年 4 月 11 日 16:37 的 RHI, (e)2010 年 5 月 9 日 15:19 的 RHI, (f)2008 年 4 月 14 日 17:38 的 RHI, (g)2010 年 4 月 16 日 17:54 的 RHI, (h)2005 年 3 月 20 日 19:21 的 RHI

Fig. 6 The vertical profiles of hailstorms with TBSS

(a) 17:32 BT on 14 April 2004, (b) 19:58 BT 14 April 2004, (c) 16:56 BT 10 April 2009, (d) 16:37 BT 11 April 2009, (e) 15:19 BT 9 May 2010, (f) 17:38 BT 14 April 2008, (g) 17:54 BT 16 April 2010, (h) 19:21 BT 20 March 2005

显(持续较高), VIL 跃增时中心强度或强中心面积明显增大,导致 D_{VIL} 增加明显(图略)。

(6) VIL 强中心与强回波中心位置对应关系较好, VIL 强中心面积较大,往往与 50 dBz 以上的回波面积对应,维持时间较长(图略)。

5 结 论

统计分析发现,C 波段雷达中 TBSS 有如下特征:

- (1) 产生 TBSS 的最小回波 CR 值为 55 dBz。
- (2) TBSS 的最佳观测范围为 61~90 km,最佳观测仰角为 1.5~3.4°。
- (3) TBSS 的维持时间为 10~79 min,63% 的 TBSS 维持时间超过 20 min。
- (4) TBSS 一般出现在 4.0~9.5 km,最低出现在 2.6 km,最高出现在 11.4 km。
- (5) TBSS 长 5.6~22.4 km,宽 1.5~14.6 km,宽度与强回波区径向外侧的 60 dBz 以上回波的面积成正比,但 TBSS 的长度与反射率因子核心的强度和宽度无明显对应关系。
- (6) 出现 TBSS 且出现降雹的过程中,TBSS 预报冰雹的时间提前量为 5~100 min,平均为 34.5 min。
- (7) 出现 TBSS 且出现降雹的过程中,TBSS 的宽度与冰雹的大小或降雹密度成正比。
- (8) 单独的 TBSS 特征对冰雹的预报预警准确率仅为 59%,TBSS 配合 D_{VIL} 、 $H_{45\text{ dBz}} \geq 7.5\text{ km}$ 或 TBSS 配合回波宽度、 $H_{45\text{ dBz}} \geq 7.5\text{ km}$,预报准确率可分别达 89% 和 94%(临界成功指数为 0.89 和 0.94)。
- (9) 回波宽度与 D_{VIL} 大小无对应关系,但回波

宽度和 $D_{VIL} \geq 3.0\text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的面积及维持时间成正比。

参考文献

- 陈贵川,谌芸,乔林,等. 2011. 重庆“5.6”强风雹天气过程成因分析. 气象,37(7):871-879.
- 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.
- 冯晋勤,罗保华. 2004. 一次冬季降雹过程的 CINRAD/SA 回波特征. 气象,30(5):21-24.
- 郭艳. 2010. 大冰雹指标 TBSS 在江西的应用研究. 气象,36(8):40-46.
- 郭艳,应冬梅,刘冬梅. 2005. 江西“4·12”降雹过程的多普勒雷达资料分析. 气象,31(11):47-51.
- 廖玉芳,俞小鼎,郭庆. 2003. 一次强对流系列风暴个例的多普勒天气雷达资料分析. 应用气象学报,14(6):656-662.
- 廖玉芳,俞小鼎,吴林林,等. 2007. 强雹暴的雷达三体散射统计与个例分析. 高原气象,26(4):812-820.
- 李向红,唐熠,郑传新,等. 2010. 一次多种强对流天气过程的雷达回波特征分析. 气象,36(8):61-71.
- 王令,康玉霞,焦热光,等. 2004. 北京地区强对流天气雷达回波特征. 气象,30(7):31-35.
- 俞小鼎,王迎春,陈明轩,等. 2005. 新一代天气雷达与强对流天气预警. 高原气象,24(3):456-464.
- 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 2001. 雷达气象学. 北京:气象出版社.
- 朱敏华,俞小鼎,夏峰. 2006. 强烈雹暴三体散射的多普勒多天气雷达分析. 应用气象学报,17(2):215-225.
- 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等. 2004. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析. 气象学报,62(3):317-328.
- Amburn S A, Wolf P L. 1997. VIL density as a hail indicator. Wea Forecasting,12,473-478.
- Lemon L R. 1998. The radar “Three-Body Scatter Spike”: An operational large-hail signature. Wea Forecasting,13,327-340.
- Wilson J W, Reum D. 1988. The flare echo: Reflectivity and velocity signature. J Atmos Oceanic Tech,5(2):197-205.
- Zrnice D S. 1987. Three-body scattering produces precipitation signature of special diagnostic value. Radio Sci,22:76-86.