

郭艳. 大冰雹指标 TBSS 在江西的应用研究[J]. 气象, 2010, 36(8): 40-46.

大冰雹指标 TBSS 在江西的应用研究^{* 1}

郭 艳

江西省气象台, 南昌 330046

提 要: 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。结果表明, TBSS 作为 ≥ 19 mm 的大冰雹的预警指标具有很好的应用效果。其准确警报率(*POD*)为 0.818, 错误警报率(*FAR*)为 0.182, 而临界成功指数(*CSI*)达 0.692。在多普勒天气雷达产品中, TBSS 是一个沿着雷达径向从强风暴核区向外延伸的、具有低的反射率因子值, 零或朝向雷达的低速度值和高速度谱宽值的区域。它一般首先出现在中高层(4~9 km), 然后逐渐降低, 最低可达 1.0 km。利用 TBSS 预报大冰雹的时间提前量最大达到 77 分钟。实际观测到的 TBSS 特征存在各种不同的形态, 而且不同距离处观测 TBSS 特征的最佳仰角存在很大差异。总之 TBSS 特征可以作为大冰雹的有效判据。

关键词: 雷达, 大冰雹, TBSS 特征, 预警

TBSS as Large-Hail Indicator in Jiangxi Province

GUO Yan

Jiangxi Provincial Meteorological Observatory, Nanchang 330046

Abstract: The 2002—2007 radar data and observations from Jiangxi were examined statistically to determine the correspondence between surface hail and the three-body scatter spike (TBSS). We have discussed its operational use as a large hail (≥ 19 mm) warning criterion in Jiangxi. The result indicated that TBSS as large hail indicator is of very good application significance. The probability of detection (*POD*) using the TBSS is 0.818. The false alarm ratio (*FAR*) is 0.182 for large hail. And the critical success index (*CSI*) is 0.692. As in the previous studies, the TBSS is an echo region aligned radially downrange from an intense reflectivity core and is usually characterized by low reflectivity and near-zero or weak inbound velocities. Spectrum widths are very broad and often noise-like. It is found almost exclusively aloft in the mid-levels (4—9 km) and then to descend with hail descent. A distinct advantage of the TBSS as a warning criterion is a lead-time of up to 77 minutes. The TBSS has various appearances and occurs at different elevation with the distance changing. In brief, the TBSS is an effective large hail criterion.

Key words: radar, large hail, TBSS (three-body scatter spike) signature, warning

引 言

Zrnic^[1]发现了三体散射现象, 称其为“三体散射特征 (three-body scatter signature)”, Wilson 等^[2]称其为“火焰回波 (flare echo)”或“雹钉 (hail

spike)”。Lemon^[3]基于多普勒天气雷达进一步发展了该理论, 提出了利用“三体散射长钉 (three-body scatter spike, 缩写为 TBSS)”识别大冰雹的雷达预警技术。他指出, 这种在雷达图像上观测到的虚假回波是探测大冰雹的充分非必要条件。三体散射长钉(以下简称 TBSS)通常出现在雷达体积扫描

* 中国气象局气象新技术推广面上项目(编号:CMATG2008M42)

2009 年 4 月 26 日收稿; 2010 年 3 月 5 日收修定稿

作者:郭艳, 主要从事基于天气雷达的短时临近预报技术研究. Email: yan_guo@163.com

的中层,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,随着新一代多普勒天气雷达观测网的建设和应用,国内也陆续在多普勒天气雷达上观测到伴随大冰雹出现的 TBSS,并且对它们进行了分析研究。如廖玉芳等^[4]研究了 2002 年 5 月 14 日发生在湖南常德地区的一次具有 TBSS 特征的超级单体风暴,冯晋勤等^[5]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^[6]和郭艳等^[7-9]也观测到了具有 TBSS 特征的风暴。另外,廖玉芳等^[10]还利用 11 次强对流事件中 23 个产生三体散射的强对流风暴,对三体散射的统计特征进行了分析和讨论。刘兵等^[12]对张家界多个例降雹过程做了对比分析。但是,对于 TBSS 与大冰雹之间的统计关系以及 TBSS 作为大冰雹指标的应用研究,目前国内仍是空白。

本文利用江西省 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。

1 TBSS 理论

Zrnich^[1]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(普通降水粒子为瑞利散射)所引起的”。如图 1 所示,这一雷达回波特征是三重散射的结果(三体相互作用),图中 C 代表超过 60 dBz 强反射率因子中心, R 为 C 距离雷达的距离, h 是 C 距离地面的高度, F 为 TBSS 回波的起点。雷达发射的电磁波遇到 C 处的冰雹后,一部分通过粒子的后向散射返回雷达天线形成回波。另外一部分电磁波能量则向四周散射,其中散射到地面的部分电磁波会被地面反射回 C,而 C 将这部分能量再次散射回到雷达天线。由于多次散射增加了电磁波的传输距离,雷达将这部分回波定位在更远的位置,严格来说, TBSS 是一种虚假的回波, TBSS 所在的区域实际上并不存在一个反射体。同时,多次散射也衰减了大部分能量,所以 TBSS 的反射率因子值一般较小。

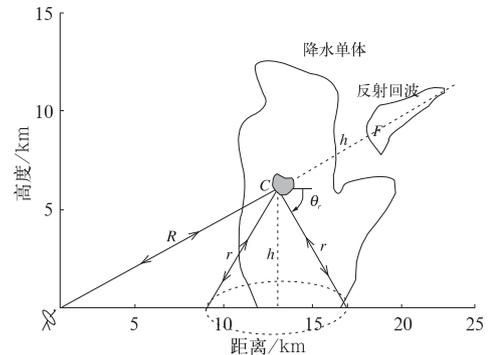


图 1 造成三体散射长钉(或火焰回波)的雷达信号路径示意图,其中点 C 处的阴影代表造成该回波假象的大于 60 dBz 的反射率因子中心

(摘自 Wilson and Reum, 1988)

Fig. 1 Schematic of the radar signal path responsible for the three-body scatter spike (or flare echo). The dark shading near point C represents the 60 dBz core

responsible for producing the artifact (from Wilson and Reum, 1988)

平均径向速度主要与降水粒子的垂直运动和径向运动有关,而产生 TBSS 的冰雹粒子都具有较大的降落速度,也就是说,除非在非常强的上升气流中,其垂直速度一般为负值,因此, TBSS 的平均径向速度常常为弱的负速度。由于经过地面的再次反射,植被等其他地面物体的运动给 TBSS 的平均径向速度造成很大的噪声污染,使得它的谱宽值很大。

当雷达波长 λ 确定后,球形粒子的散射情况主要取决于粒子直径 d 和入射波长 λ 之比。对于 $d \ll \lambda$ 的小球形粒子的散射,称为瑞利散射。 $d \approx \lambda$ 的大球形质点的散射,称为米散射^[11]。因此,对于直径相同降水粒子, TBSS 现象的发生频率随着波长的增加而降低。所以, C 波段(波长 5 cm)雷达更容易探测到 TBSS 特征,但它可能是由大雨滴而不仅仅是冰雹造成,而对于 S 波段(波长 10 cm)的多普勒天气雷达, TBSS 往往与大冰雹相关。

2 数据资料

使用的资料包括 2002—2007 年江西省的危险天气报告历史记录和利用南昌及吉安多普勒天气雷达基数据反演得到的三种基本产品(反射率、速度和谱宽)。

普查了南昌多普勒天气雷达正式投入使用(2001年底)以来,江西省出现 ≥ 10 mm的冰雹并且有对应多普勒天气雷达资料的日期,共有14天。然后把这14天中产生冰雹天气的并且从雷达资料上能识别出的风暴作为一个雹暴样本,从而获得26个雹暴样本,另外对这14天的雷达资料进行了普查,发现2个风暴具有TBSS特征,但由于未经过地面测站,无法确定它们是否产生了灾害天气,但也把它们作为TBSS风暴样本用于研究。因此我们共获得28个风暴样本。

3 统计结果

3.1 TBSS 作为大冰雹指标的 CSI 统计结果

对上述28个风暴样本进行统计后,得到表1。由表1可知,28个风暴样本中,有11个 ≥ 19 mm的大冰雹事件,而这11个大冰雹事件中有9个伴有TBSS,其他2个产生大冰雹的风暴没有观测到TBSS特征;还有2个样本是没有冰雹记录但是观测到TBSS特征的风暴;另外有15个样本为小冰雹事件,所有的小冰雹事件都没有产生TBSS。

表 2 TBSS 风暴样本在多普勒天气雷达资料上的统计特征

Table 2 Characteristics of the TBSS storms based on Doppler radar data

Storm ID	冰雹		风暴		提前量/min	TBSS			
	时间	冰雹直径/mm	范围/km	强度/dBz		时间	仰角/ $^{\circ}$	高度/km	
1	20020407xj		100	73		21:36—21:42	2.4~1.5	4.4~3.0	
2	20020407fz		80~100	72		22:24—22:30	2.4~1.5	4.7~3.0	
3	20020407yc	17:16—17:29	19	180	0	17:16	1.5	6.8	
4	20020407zs	21:03	24	100	77	19:46—20:04	2.4~1.5	4.3~3.0	
5	20030412sr	15:00—15:21	20	120~150	29	14:31—15:01	3.4~1.5	8.5~5.5	
6	20040411cr	18:40—19:00	60~100	90~100	54	17:46—19:18	3.4~2.4	6.4~4.8	
7	20040722zx	15:28—15:34	20	150	8	15:20	2.4	7.7	
8	20050504fc	17:16—17:18	23	45	75	0	17:17—17:23	9.9~6.6	8.0~4.7
9	20050516lt	16:17—16:19	25	10~20	75	29	15:48—16:00	14.6~2.4	8.9~4.0
				10~20	76		16:24	14.6	4.1
10	20060411ja	15:25—15:48	40	20~40	71	66	14:19—14:54	6.6~1.5	5.0~1.0
11	20060610nc	15:46—15:57	23	20	72	8	15:38—15:44	14.6	5.5

3.2.2 TBSS 在多普勒天气雷达产品上的特征

统计表明,TBSS在不同的多普勒天气雷达产品上都表现为一个沿雷达直径从强风暴核区向离开雷达方向伸出的长10~30 km的异常回波区域。在基本反射率产品上,它的值一般小于20 dBz,如图2a和图2d。在基本速度产品上,它一般为接近零的朝向雷达的速度值,即为 $-10\sim 0$ m \cdot s $^{-1}$,如图2b和图2e。图2c和图2f为2个雹暴产生的TBSS

利用CSI计算公式,我们可以得到以TBSS作为 ≥ 19 mm的大冰雹的预报指标的应用效果。

准确警报率:POD=0.818

错误警报率:FAR=0.182

临界成功指数:CSI=0.692

表 1 28 个风暴样本的统计结果

Table 1 The statistics of the 28 storms

大冰雹(≥ 19 mm)	Y	Y	N	N
TBSS	Y	N	Y	N
样本个数	9	2	2	15

3.2 TBSS 的统计特征

3.2.1 TBSS 在多普勒天气雷达资料上统计特征

表2是11个TBSS风暴样本在多普勒天气雷达资料上的统计特征。统计结果显示,TBSS可以出现在雷达10~180 km探测半径范围内,出现TBSS的风暴中心强度普遍大于70 dBz,但2004年7月22日的风暴虽然只有61 dBz,也照样出现了TBSS。TBSS一般首先出现在中高层(4~9 km),然后逐渐降低,最低可达1.0 km。利用TBSS进行大冰雹预警的时间提前量,最小为0 min,而最大达到77 min。

特征对应的速度谱宽图像,可以看出,TBSS的谱宽值通常较大,一般可达 10 m \cdot s $^{-1}$ 以上,而且分布比较杂乱。

总之,在多普勒天气雷达产品上,TBSS是一个沿着雷达径向从强风暴核区向外延伸的、具有低的反射率因子值、零或朝向雷达的低速度值和高速度谱宽值的区域。

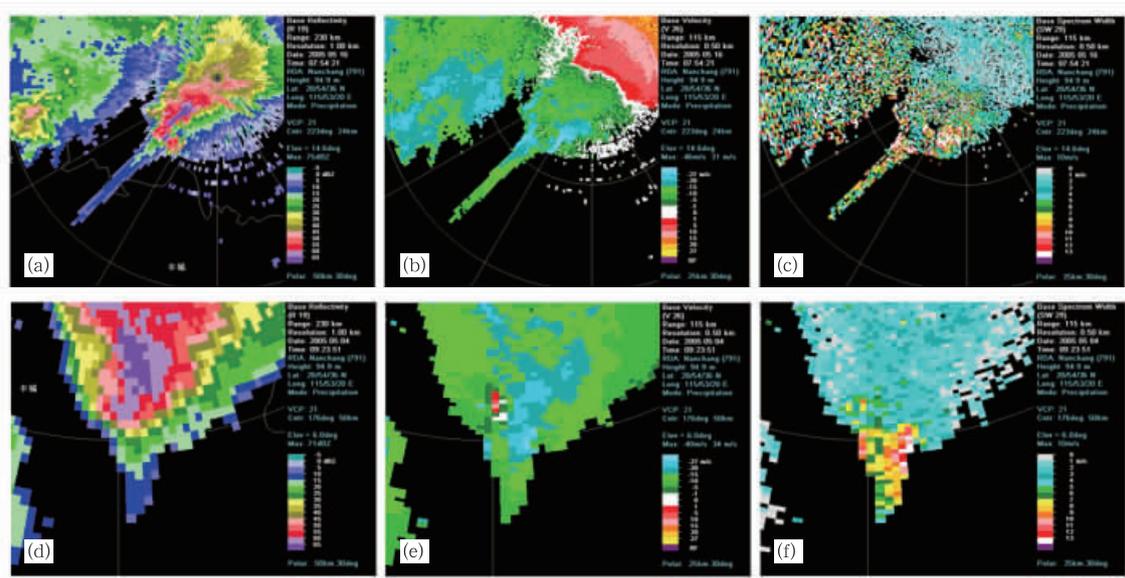


图 2 不同多普勒天气雷达产品上的 TBSS 特征

2005 年 5 月 16 日基本反射率(a)、基本速度(b)和基本谱宽(c),仰角为 14.6°;

2005 年 5 月 4 日基本反射率(d)、基本速度(e)和基本谱宽(f),仰角为 6.0°

Fig. 2 The TBSS signatures on different Doppler radar products

The base reflectivity (a), base velocity (b) and base spectrum width (c) products on 16 May 2005 at the elevation of 14.6°,

The base reflectivity (d), base velocity (e) and base spectrum width (f) products on 4 May 2005 at the elevation of 6.0°

3.2.3 TBSS 的不同回波形态

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。而雹暴离开雷达的距离、方位以及周边回波情况,往往都会影响对 TBSS 的观测,实际观测到的 TBSS 特征存在各种不同的形态。如图 3b~3f

上的 TBSS 特征相对较明显,可见清晰的“长钉”结构,并且在相邻的几个仰角上都有出现(图略),这样的 TBSS 相对比较易于识别。而图 3a、图 3g 和图 3h 上的 TBSS 特征则比较弱,且只在 1~2 个仰角上能识别出,这种情况下,结合相关雷达产品资料的分析就显得非常重要。

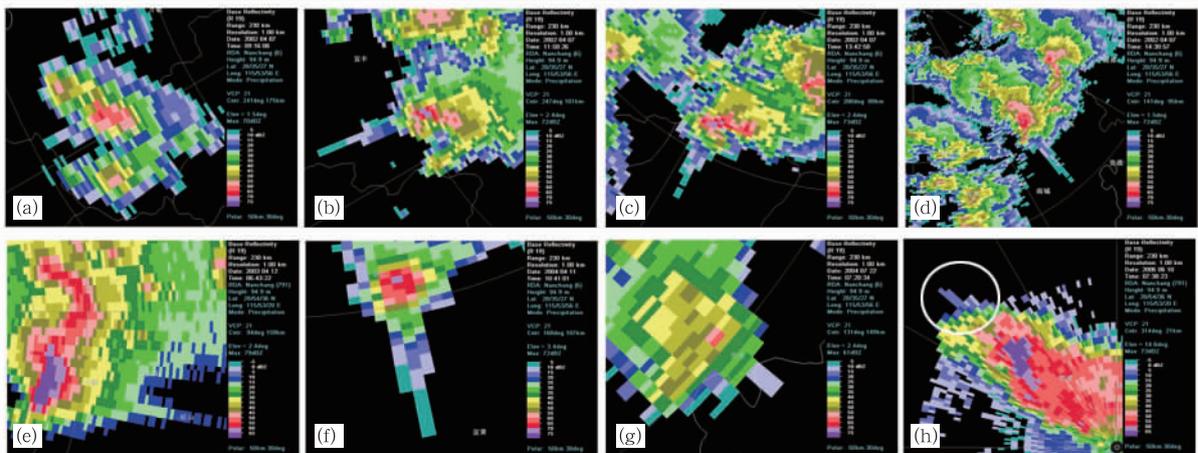


图 3 TBSS 在多普勒天气雷达上的各种回波形态

2002 年 4 月 7 日(a)宜春(1.5°), (b) 上高(2.4°), (c) 峡江(2.4°)和(d)抚州(1.5°)雹暴以及(e)2003 年 4 月 12 日(2.4°), (f)2004 年 4 月 11 日(3.4°), (g)2004 年 7 月 22 日(2.4°)和(h)2006 年 6 月 10 日(14.6°, 白色圆圈所示)雹暴的 TBSS

Fig. 3 Different TBSS features on Doppler radar

(a) Yichun (elevation 1.5°), (b) Shanggao (2.4°), (c) Xiajiang (2.4°) and (d) Fuzhou (1.5°) TBSSs on 7 April 2002 and the TBSSs on (e) 12 April 2003 (2.4°), (f) 11 April 2004 (3.4°), (g) 22 July 2004 (2.4°), (h) 10 June 2006 (14.6°, within the white circle)

4 讨论

4.1 TBSS 作为大冰雹指标的效果

如前所述,所有的小冰雹事件都没有产生 TBSS,而观测到 TBSS 特征的风暴都产生了大冰雹,即 TBSS 出现总是伴随着大冰雹事件。如图 4a 为 2004 年 4 月 11 日产生鹅蛋大冰雹(约 60~100 mm)的崇仁局地强对流风暴,在降雹 1 h 前就探测到明显的 TBSS 特征。图 4b 是 2004 年 7 月 22 日的资溪局地强对流风暴, TBSS 特征出现 8 min 后地面发生了 20 mm 的

降雹。但是,并非所有产生大冰雹的风暴都观测到 TBSS 特征。11 个大冰雹事件中有 9 个伴有 TBSS,另外 2 个风暴则没有观测到 TBSS。分析发现,在没有观测到 TBSS 特征的风暴的周围,尤其是沿径向远离雷达的方向上往往存在其他风暴,也就是说,很可能这 2 个风暴产生了 TBSS 特征,但由于它的反射率因子值较小而被其他的风暴掩盖了。如图 4c,雷达位于风暴的南面,图中南面的风暴产生了 20 mm 的冰雹,由于在该风暴的北面,即远离雷达的方向上有另外一个风暴单体,使得我们无法判断该雹暴是否产生了 TBSS 特征。

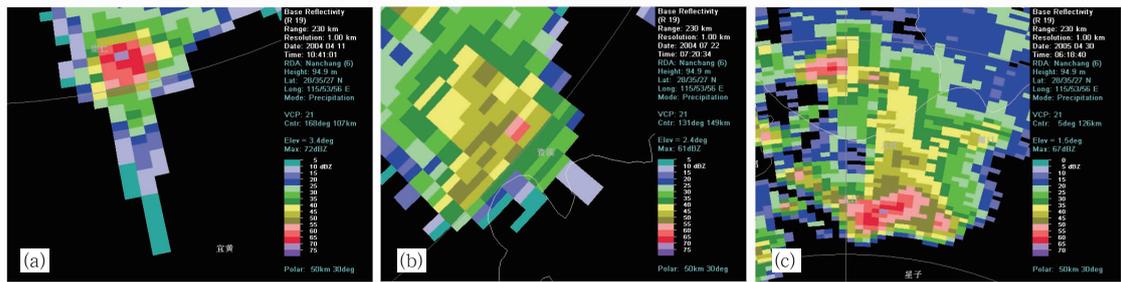


图 4 雹暴的 TBSS 特征

(a) 2004 年 4 月 11 日的 TBSS, (b) 2004 年 7 月 22 日的 TBSS, (c) 2005 年 4 月 30 日的雹暴

Fig. 4 Hailstorms with and without TBSSs

(a) TBSS on 11 April 2004 (3.4°), (b) TBSS on 22 July 2004 (2.4°), (c) hailstorm on 30 April 2005

因此, TBSS 特征对大冰雹的产生有很好的指示意义,但由于探测方位和风暴环境的影响会导致这种特征被掩盖。所以, TBSS 是探测大冰雹的充分非必要条件。

4.2 TBSS 作为大冰雹指标的预警时效

许多研究指出,冰雹在云中的增长时间约在 10

~35 min 之间,这个时间越长,冰雹越大^[11]。Lemon^[3]也发现,直径大于 2.5 cm 的冰雹一般在 TBSS 出现后 10~30 min 内降落地面,这与冰雹在云中的增长时间不谋而合。但是,从表 2 可以看出,利用 TBSS 进行大冰雹预警的时间提前量,最小为 0 min,即 TBSS 特征与地面降雹几乎同时出现,而最大达到 77 min。这似乎与成雹理论相矛盾,不过,

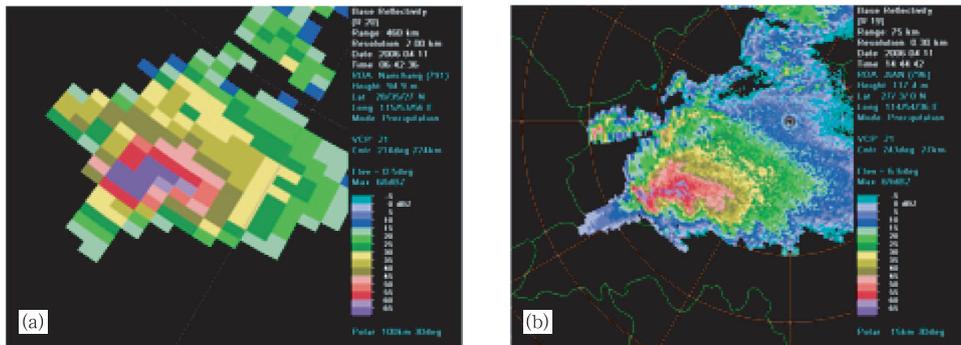


图 5 2006 年 4 月 11 日吉安雹暴在不同雷达上的回波形态

(a) 在南昌雷达上的回波形态, (b) 在吉安雷达上的回波形态

Fig. 5 Reflectivity products of the Ji'an 11 April 2006 hailstorm on different radars

(a) Reflectivity on Nanchang radar, and (b) reflectivity on Ji'an radar

从观测事实来看,这些情况的确客观存在。那么,如何解释 TBSS 预警时效与成雹理论之间的矛盾呢?

TBSS 预警时效较小甚至没有提前量可能是由于雷达探测方位、角度和距离等各种因素导致 TBSS 没有更早地被观测到。

对于 TBSS 预警时效大于冰雹的云中增长时间,一种解释是,我国的地面观测报告体系远不如美国的健全和完善,无法得到充分的地面实况。那么实际的提前量可能更短,只是我们没有较早地观测到降雹。

对于 TBSS 预警时效大于冰雹的云中增长时间的问题,另一种可能的解释是,冰雹 10~35 min 的云中增长时间只是一般情况,对于上升气流非常强盛的雹暴来说,由于系统更稳定而持久,所以冰雹在上升气流中的增长时间可以超过 30 min,甚至 1 h,那么 TBSS 的预警时效自然也就超过 1 h。例如(见表 2),2004 年 4 月 11 日的崇仁雹暴,连续观测到 TBSS 特征的时间长达 92 min,而根据 TBSS 理论,TBSS 特征就是风暴中的冰雹造成的,可见,冰雹在崇仁雹暴中的增长时间远远超过了 1 h,它的预警时效达到 54 min 也就不足为奇了;2006 年 4 月 11 日的吉安雹暴,降雹前 66 min 就观测到了 TBSS 特征,持续时间达到 35 min,而且仅测站记录的连续降雹时间就达到 23 min 之久,可以推断,其冰雹增长的时间可能远超过 35 min。另外,廖玉芳等^[10]的研究结果也表明,TBSS 的持续时间几乎都超过 30 min,其中持续时间在 30~60 min 的情况居多,还有部分 TBSS 持续时间超过 90 min。

更多的情况下可能是这两者兼而有之。当然,以上只是推断,实际情况则需要更多的研究加以论证。

4.3 TBSS 的观测和应用

根据 TBSS 的产生原理可知,要探测到三体散射,雷达波束必须穿越冰雹生长区,即 $-30\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间,该区间含有大量的大冰雹和过冷却水滴,雷达反射率因子值特别大,最有利于产生三体散射。

若不考虑雷达天线海拔高度和地球曲率等因素的影响,雷达测高和测距公式可表示为:

$$H = R \sin \delta$$

$$L = R \cos \delta$$

其中, H 是雷达波束中心轴线在斜距 R 处离地面的

高度, δ 为天线仰角, L 为水平距离。

如表 2 所示,TBSS 一般出现在 3~9 km,即主要在雹暴的中高层。结合公式(1)可知,不同距离处观测 TBSS 特征的最佳仰角有很大差异。距离雷达 50 km 以内的最佳观测仰角为 6.6° 以上,距离雷达 50~150 km 范围内的最佳探测仰角为 $1.5^{\circ}\sim 3.4^{\circ}$ 。由于产品分辨率的影响,距离雷达 150 km 以外比较难观测到明显的 TBSS 特征,只能在最低仰角观测且特征比较弱而不易识别,而 200 km 以外则几乎无法观测到 TBSS 特征。如图 5 所示为 2006 年 6 月 10 日出现在吉安的雹暴,图 5a 为距离该雹暴约 230 km 以外的南昌雷达所探测到的回波,图中没有 TBSS 特征,且回波结构粗糙。图 5b 为距离该雹暴约 40 km 的吉安雷达所探测到的回波形态,图中可见清晰的 TBSS 特征和钩状回波结构。

5 结 论

综上所述,关于大冰雹指标 TBSS 在江西的应用情况,得到以下结论:

(1) TBSS 作为 $\geq 19\text{ mm}$ 的大冰雹的预警指标具有很好的应用效果。其准确警报率(POD)为 0.818,错误警报率(FAR)为 0.182,而临界成功指数(CSI)达 0.692。其中 2 个没有观测到 TBSS 特征的风暴很可能产生了 TBSS 特征,但被其周围的风暴所掩盖。

(2) 在多普勒天气雷达产品上,TBSS 是一个沿着雷达径向从强风暴核心区向外延伸的,具有低的反射率因子值,零或朝向雷达的低速度值和高速度谱宽值的区域。

(3) TBSS 一般首先出现在中高层(4~9 km),然后逐渐降低,最低可达 1.0 km。利用 TBSS 进行大冰雹预警的时间提前量,最小为 0 min,而最大达到 77 min。

(4) 实际观测到的 TBSS 特征存在各种不同的形态。

(5) 不同距离处观测到 TBSS 特征的最佳仰角有很大差异。距离雷达 50 km 以内的最佳观测仰角为 6.6° 以上,距离雷达 50~150 km 范围内的最佳探测仰角为 $1.5^{\circ}\sim 3.4^{\circ}$ 。由于产品分辨率的影响,距离雷达 150 km 以外比较难观测到明显的

TBSS特征,只能在最低仰角探测且特征比较弱而不易识别,而 200 km 以外则几乎无法观测到 TBSS 特征。

总之,统计分析表明,TBSS 特征可以作为大冰雹的有效判据。如何在业务应用中更好地利用这个指标,如自动地识别等方面的工作是需要进一步研究的方向。

致谢:本文的构思和写作过程中,得到美国气象局预警决策培训部 Leslie R. Lemon 先生的悉心指导,特此表示衷心的感谢!

参考文献

- [1] Zrníc D S. Three body scattering produces precipitation signature of special diagnostic value[J]. *Radio Sci*,1987,22: 76-86.
- [2] Wilson J W, Reum D. The flare echo: Reflectivity and velocity signature[J]. *Atmos Ocean Technol*,1988,5 :197-205.
- [3] Lemon L R. The radar “three-body scatter spike”: An operational large-hail signature[J]. *Wea Forecasting*, 1998, 13: 327-340.
- [4] 廖玉芳,俞小鼎,郭庆. 一次强对流系列风暴个例的多普勒天气雷达资料分析[J]. *应用气象学报*,2003,14(6): 656-662.
- [5] 冯晋勤,罗保华. 一次冬季降雹的 CINRAD/ SA 回波特征[J]. *气象*,2004,30(5): 21-23.
- [6] 王令,康玉霞,焦热光. 北京地区强对流天气雷达回波特征分析[J]. *气象*,2004,30(7): 31-35.
- [7] 郭艳,应冬梅,刘冬梅. 江西“4. 12”降雹过程的多普勒雷达回波分析[J]. *气象*,2005,31(11): 47-51.
- [8] 郭艳. 江西一次突发性局地强对流天气的雷达回波特征分析[J]. *气象与减灾研究*,2007,30(1): 30-36.
- [9] 郭艳. 江西突发性局地强对流的多普勒雷达回波特征分析[J]. *气象与减灾研究*,2008,31(2): 30-36.
- [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.
- [11] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社,2001.
- [12] 刘兵,戴泽军,胡振菊,等. 张家界多个例降雹过程对比分析[J]. *气象*,2009,35(7):23-32.