

何炳伟,胡振菊,高伟,等,2018.常德多普勒天气雷达强雹暴三体散射统计分析[J].气象,44(3):455-462.

## 常德多普勒天气雷达强雹暴三体散射统计分析\*

何炳伟<sup>1</sup> 胡振菊<sup>2</sup> 高伟<sup>2</sup> 陈科<sup>2</sup>

1 成都信息工程大学资源环境学院,成都 610225

2 常德市气象局,常德 415000

**提 要:** 对常德及周边地区 10 次强雹暴过程中 18 个风暴单体产生的 404 次三体散射样本进行统计分析,并对影响三体散射观测的原因进行了详细分析。结果表明:(1)反射率因子强度是能否产生三体散射的关键因素,产生三体散射特征的最小反射率因子强度为 58 dBz,在此临界值之上,反射率因子强度越强,越易产生三体散射;(2)风暴核回波强度的垂直分布是 三体散射出现频数在高度 4 km 左右、仰角 1.5°、距离 90 km 左右达到峰值的主要影响因素;(3)三体散射随方位分布在 180°~360°出现频数最多,风暴单体移动下风方有径向长度较长的回波区时,导致三体散射特征被覆盖,是影响三体散射观测的根本原因,风暴单体相对雷达位置和移动方向通常决定径向外侧是否有影响三体散射观测的回波;(4)三体散射回波强度与风暴径向外侧弱回波相当或强时,三体散射特征能被识别。

**关键词:** 三体散射长钉,强雹暴,频次,分布特征,影响因素

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.03.013

## Statistical Analysis About Severe Hailstorm TBSS in Changde Doppler Weather Radar

HE Bingwei<sup>1</sup> HU Zhenju<sup>2</sup> GAO Wei<sup>2</sup> CHEN Ke<sup>2</sup>

1 College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 Changde Meteorological Office of Hunan Province, Changde 415000

**Abstract:** Statistical analysis was performed on 404 samples of three-body scatter spike (TBSS) in 18 storm cells of 10 severe hailstorm processes in Changde and the surrounding areas, and the causes influencing TBSS observation were analyzed in detail. The conclusions can be drawn as follows. (1) Reflectivity intensity is the key factor for TBSS. As a factor causes TBSS features, the minimum reflectivity intensity should be 58 dBz. The more it is above this critical value, the easier TBSS will come into being. (2) The peak of TBSS can be reached under the following conditions: at altitude of 4 km or so, 1.5° elevation, distance of 90 km or so, and the vertical distribution of the storm core echo intensity is a predominant impact factor during this process. (3) The frequency of TBSS is the most from 180° to 360°. Usually, longer length echo area in the leeward direction of wind storms can cause TBSS to be covered. This is the basic factor affecting the TBSS observation. The storm cells relative to the position and moving direction of radar usually decide whether there are echoes influencing TBSS observations in the radial outer side. (4) If intensity of TBSS echo and storm radial outer side weak echo are quite strong, the TBSS features can be identified from the storm radial outer side weak echo.

**Key words:** three-body scatter spike (TBSS), severe hailstorm, frequency, distribution characteristics, impact factor

\* 湖南省气象局 2016 年预报员专项(XQKJ16C005)资助

2016 年 10 月 16 日收稿; 2018 年 1 月 10 日收修定稿

第一作者:何炳伟,主要从事资源环境遥感应用研究. Email:hebinwei@163.com

通信作者:胡振菊,主要从事短临预报预警研究. Email:zhj\_zhs@163.com



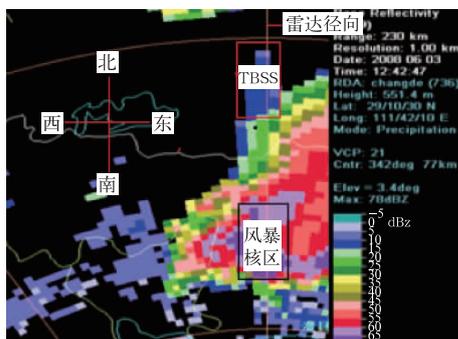


图 2 TBSS 个例分析示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of TBSS case analysis

## 2 资料与方法

常德新一代多普勒天气雷达(CINRAD/SB)海拔高度 551 m,2002 年 4 月正式投入业务使用,截至 2015 年 5 月,为常德及其周边地区提供了各类型的灾害性天气雷达资料。本文所用资料为 2002—2015 年常德雷达探测到常德及周边地区的 12 次强雹暴(强雹暴定义为冰雹直径 $\geq 20$  mm)过程,其中 10 次强雹暴过程常德雷达探测到 TBSS 特征,2 次无 TBSS 特征,还利用 2004 年 4 月 21 和 29 日长沙雷达资料与常德雷达资料进行对比分析。表 1 为

表 1 12 次强雹暴过程样本(天气过程以年月日命名)

Table 1 Twelve samples of severe hailstorm processes (named after the year-month-day)

天气过程	冰雹直径/cm	TBSS 次数/主要影响因素	天气过程	冰雹直径/cm	TBSS 次数/主要影响因素
20020514	3	129/无	20030603	4~5	66/无
20040421	4	0/被覆盖	20040429	10	2/被覆盖
20050430	2	17/无	20050531	6	22/距离雷达较远
20070727	4	0/反射率因子强度偏弱	20080603	3	76/无
20080727	2	3/反射率因子强度偏弱	20110722	2	11/反射率因子强度偏弱
20110727	3	4/反射率因子强度偏弱	20150403	2~3	74/无

12 次强雹暴天气过程样本。定义雷达某次体扫某个仰角观测到某个风暴单体产生 TBSS 就构成 1 个样本,依次类推,10 次强雹暴过程的 18 个风暴单体共产生 404 个 TBSS 样本。

## 3 TBSS 统计特征分析

### 3.1 TBSS 与反射率因子强度的关系

分 4 个区间统计 TBSS 出现频数与反射率因子强度( $R$ )的对应关系,表 2 为对应分布表。从表 2 分析得出: $R \geq 65$  dBz 出现 TBSS 的频数为 291 次,占 72.0%, $60$  dBz $\leq R < 65$  dBz 出现 TBSS 的频数为 108 次,占 26.7%, $R \geq 60$  dBz 出现的频数合计为

399 次,占 98.8%, $55$  dBz $\leq R < 60$  dBz 出现的频数为 5 次, $R < 55$  dBz 出现的频数为 0,产生 TBSS 特征最小反射率强度为 58 dBz。统计数据表明:TBSS 频数随反射率因子强度增强而增加,强度越强,越容易产生 TBSS。Lemon(1998)研究美国的 TBSS 时指出,对于 5 dBz 的反射率因子显示阈值,要产生一个能分辨出的 TBSS,必须风暴核的  $R > 63$  dBz,上述统计结果与 Lemon(1998) 和廖玉芳等(2007) 的研究结果基本相同。Lemon(1998)还指出 S 波段天气雷达出现 TBSS 是强冰雹的充分条件(但不是必要条件)。因此,在实际的雷达观测和分析中,当  $R \geq 60$  dBz 时,特别是  $R \geq 65$  dBz 时,应仔细分析是否出现 TBSS 特征,一旦有应直接发布强冰雹预警。

表 2 TBSS 出现频数与反射率因子强度的对应关系

Table 2 TBSS frequency with reflectivity factor intensity distribution

强度分区	$R < 55$ dBz	$55$ dBz $\leq R < 60$ dBz	$60$ dBz $\leq R < 65$ dBz	$R \geq 65$ dBz
出现频数/次	0	5	108	291

### 3.2 TBSS 随高度的分布

统计 TBSS 与高度的对应关系得出:98.0%的

TBSS 出现在 1~10 km 高度,78.7%的出现在 2~7 km 高度,而 3~4、4~5 km 高度分别出现 78 和 77 次,共占 38.4%,达到峰值,1 km 高度以下无

TBSS 特征出现, 11 km 高度以上出现 2 次, TBSS 出现的最大、最小高度分别为 12.6、1 km, TBSS 出现频数随高度变化特征为 2 km 以后急剧增加, 4 km 左右达到峰值, 7 km 以后急剧减少(图 3)。TBSS 出现频数随高度变化的这种表现特征由以下 2 个因素引起: 一是 3~6 km 为强雹暴回波的垂直伸展主要核心区, 是反射率因子强度最大值主要区域, 二是 4 km 左右高度为环境温度 0°C 层存在的主要区域(随意选择 6 次强雹暴过程: 2015 年 4 月 3 日、2004 年 4 月 21 日、2004 年 4 月 29 日、2005 年 4 月 30 日、2002 年 5 月 14 日、2003 年 6 月 3 日, 利用 NCEP 再分析资料得到常德地区 0°C 层高度分别为 4、4.2、4.7、4.8、4.4 和 4.7 km, 这证明 0°C 层高度主要位于 4 km 高度左右, 与其他学者研究结果一致), 冰雹在该区域处于湿增长, 其散射能力明显增强。

### 3.3 TBSS 随仰角的分布

图 4 为 TBSS 与仰角的统计对应关系, 从图 4 分析得出: 1.5° 仰角出现频数最高 106 次, 2.4°、3.4° 仰角出现频数分别为 91、70 次, 3 个仰角合计出现 267 次, 占 66.1%, 而 9.9° 仰角无 TBSS 特征, TBSS 出现频数随仰角变化特征为先随仰角增大而增多, 1.5° 仰角达到峰值, 再随仰角增大而减少, 6.0° 仰角以后出现频数急剧减少, 9.9° 仰角出现频数变为 0。

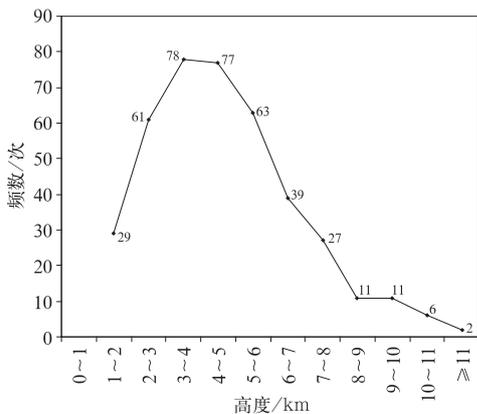


图 3 TBSS 随高度分布

Fig. 3 TBSS with height distribution

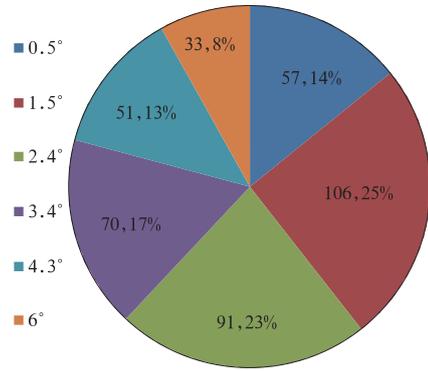


图 4 TBSS 随仰角分布

Fig. 4 TBSS with elevation distribution

### 3.4 TBSS 随距离的分布

分 5 个区间统计 TBSS 出现频数与距离的对应关系(表 3), 从表 3 分析得出: 237 次 TBSS 出现在离雷达 50~100 km 处, 占 58.7%, 100~150 km 区间出现 76 次, 50~150 km 区间累计出现 313 次, 占 77.5%, TBSS 出现最大距离为 218 km, 最小距离为 40 km。TBSS 出现频数随距离的变化关系为先随距离增大而增多, 在 90 km 左右处达到峰值, 然后再随距离增大而减少, 150 km 以后急剧减少。

TBSS 随仰角主要分布在 1.5°、2.4°、3.4°, 随距离主要分布在 50~150 km, 随高度主要分布在 2~7 km, 常德雷达 1.5° 仰角 50、100、150 km 对应的高度分别为 2.0、3.8、5.7 km, 2.4° 仰角 50、100、150 km 对应的高度分别为 2.4、5.4、8.3 km, 3.4° 仰角 50、100、150 km 对应的高度分别为 3.7、7.1、10.9 km, 从以上数据的分布对应关系得出: TBSS 随仰角、距离的分布特征与随高度分布特征具有高度统一性, 即影响分布特征的因素相同。实际预警业务工作中, 分析是否出现 TBSS 特征, 应选择反射率因子核对应于 4 km 左右高度的仰角, 如强对流单体的反射率因子核心区离雷达较远选择低仰角, 离雷达较近选择高仰角。TBSS 随高度、距离变化特征与廖玉芳等(2007)的统计结果比较一致, TBSS 与仰角、高度的对应关系与朱敏华等(2006)对 2004 年 6 月 26 日发生在连云港地区的一次强雹暴过程研

表 3 TBSS 出现频数与距离的对应关系

Table 3 TBSS frequency with distance distribution

风暴单体离雷达距离/km	0~50	50~100	100~150	150~200	200~230
TBSS 出现频数/次	57	237	76	25	9

究结果存在一定差异。

### 3.5 TBSS 随方位的分布

分 4 个区间统计 TBSS 与方位的关系, TBSS 在 270°~360°方位区间出现频数最多达 215 次, 占 53.2%, 在 180°~270°方位区间出现 137 次, 两个方位区间合计 352 次, 占 87.1%, 0°~90°方位区间出现 33 次, 90°~180°方位区间出现最少为 19 次(图 5)。值得一提的是在 45°~135°方位区间几乎没有观测到 TBSS(2004 年 4 月 29 日强对流过程出现 2 次不明显 TBSS 特征), 统计数据表明: TBSS 具有明显的方位分布特征, 其具体原因在 4.3 节探讨。

## 4 影响 TBSS 产生和观测的主要因素

### 4.1 风暴核反射率因子强度的影响

从 TBSS 形成原理可知, 影响 TBSS 产生的因素很多。本文所列的 12 次强雹暴过程观测事实表明: 反射率强度是影响 TBSS 产生的一个主要因素之一。例如, 2007 年 7 月 27 日、2008 年 7 月 27 日、2011 年 7 月 22 日、2011 年 7 月 27 日强雹暴过程, 风暴核强度在演变过程中很少  $R \geq 65$  dBz, 产生 TBSS 的次数为 0 或明显偏少。由式(1)可知, 反射率强度增强时  $\alpha$  会变大(不考虑其他因素影响), TBSS 伸展长度就越长, TBSS 在回波图上的表现特征就越明显, 图 6 为反射率强度变化引起的 TBSS 伸展长度变化对比图。观测事实、统计数据和理论表明: 冰雹云强度越强, 越容易产生 TBSS, 且其特征越容易被识别, 反射率因子强度是 TBSS 特征产生的一个关键因素。

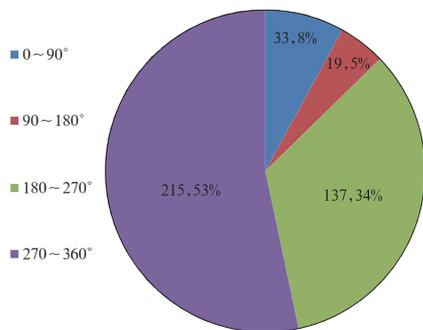


图 5 TBSS 随方位分布

Fig. 5 TBSS with azimuth distribution

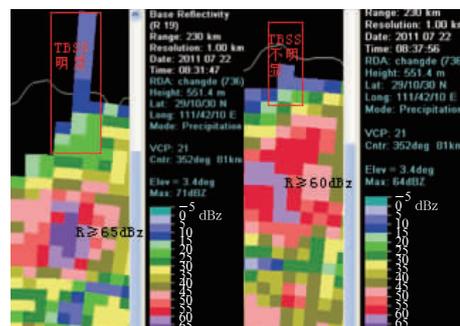


图 6 反射率强度变化引起的 TBSS 伸展长度变化对比

Fig. 6 Contrast of TBSS stretch length caused by variation of reflectivity intensity

### 4.2 风暴径向外侧回波与 TBSS 虚假回波的相互影响

假定距离雷达  $R$  处某点回波的反射率因子、强度分别为  $Z_1$ 、 $A$ , TBSS 在该点产生的虚假回波反射率因子、强度分别为  $Z_2$ 、 $D$ , 该点实测的反射率因子、强度分别为  $Z$ 、 $C$ , 则有:

$$10\lg Z_1 = A \quad (3)$$

$$10\lg Z_2 = D \quad (4)$$

$$10\lg Z = C \quad (5)$$

$$Z_1 + Z_2 = Z \quad (6)$$

式(4)一式(3)可得:

$$Z_2/Z_1 = 10^{0.1(D-A)} \quad (7)$$

式(5)一式(3)可得:

$$C = A + 10\lg(Z/Z_1) \quad (8)$$

式(6)和式(7)代入式(8)可得:

$$C = A + 10\lg[1 + 10^{0.1(D-A)}]$$

TBSS 对真实回波强度的增加值为  $10\lg[1 + 10^{0.1(D-A)}]$  dBz, 表 4 为  $(D-A)$  取整数  $-10 \sim 10$  真实回波强度的增加值。从表 4 得出: 真实回波强度值与 TBSS 在该点产生的虚假回波强度值相差不大时 ( $B = -2, -1, 0, 1, 2$ ), 真实回波强度实测值可增加 2~4.1 dBz, 对于 5 dBz 的反射率因子显示阈值, 反射率因子产品显示时有可能就采用下一级色标来显示, 可以从真实回波中分辨出 TBSS 特征, 例如, 2005 年 5 月 31 日强雹暴过程(图 7); 随着  $(D-A)$  值的增大, 真实回波对 TBSS 回波强度的贡献越来越小, 当  $(D-A) = 10$  dBz 时, 该点实测回波强度约等于 TBSS 虚假回波强度, 表明真实回波对 TBSS 回波强度几乎没有贡献。因此, 当风暴沿径向外侧

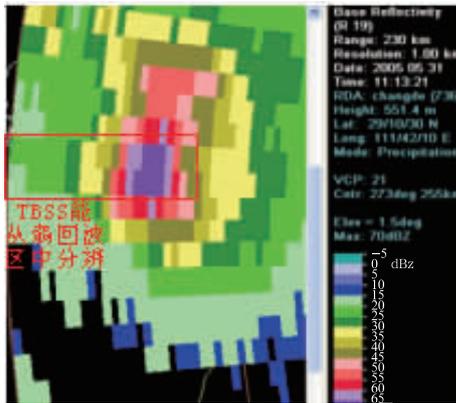


图 7 弱回波中可以分辨出 TBSS 特征  
Fig. 7 TBSS distinguished from  
low intensity echo area

真实回波强度较小 ( $R \leq 20$  dBz), 真实回波强度与 TBSS 在该点产生的虚假回波强度相差不大时, 可从真实回波区域中分辨出 TBSS 特征, 随着  $(D-A)$  值的增大, 越易从真实回波区域中分辨出 TBSS 特

表 4 随  $(D-A)$  值变化实测强度增加值 (单位: dBz)

Table 4 The measured intensity increase with the change of  $(D-A)$  value (unit: dBz)

$(D-A)$ 的取值	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
实测强度增加值	0.4	0.5	0.6	0.8	1	1.2	1.5	1.8	2	2.5	3
$(D-A)$ 的取值	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
实测强度增加值	3.5	4.1	4.7	5.4	6.1	7	7.8	8.6	9.5	10.4	

方向在雷达径向的投影分量都存在与雷达径向外侧方向相反的分量, 当风暴单体移动方向与雷达径向外侧方向正好相反, 即两者夹角大约为  $180^\circ$ , 投影切向分量不大时, 最容易产生 TBSS。常德雷达观测事实表明: 当风暴单体移动方向在雷达径向的投影分量存在与雷达径向外侧方向相反的分量时, 风暴上风方向没有存在覆盖 TBSS 特征的真实回波, 易于观测 TBSS 特征。

为进一步证实这个事实, 利用长沙和常德雷达资料对 2004 年 4 月 21 日和 29 日强雹暴过程进行对比分析 (图 9)。长沙雷达和常德雷达相距 152 km, 两部雷达对这两次强雹暴过程进行了连续完整的监测和跟踪。分析 2004 年 4 月 21 日强雹暴过程 18:50—19:45 时段内的常德雷达产品表明: 风暴位于雷达正东偏南方向, 向东北方向移动, 风暴核离雷达的距离为 87~107 km,  $0.5^\circ$  仰角的风暴核反射率强度最大值主要为 60~65 dBz, 其中有 3 个时段产品强度最大值在 65~70 dB, 风暴核所处位置

征。当  $(D-A) = -5$  dBz 时, TBSS 对真实回波强度贡献为 1.2 dBz, 反射率因子产品显示时极小可能采用下一级色标来显示, 当  $(D-A) = -10$  dBz 时, 实测回波强度约等于真实回波强度, TBSS 特征被真实回波所覆盖不能被观测到。这解释了 TBSS 特征被雷达径向风暴下风方回波覆盖的根本原因。

#### 4.3 风暴单体相对雷达位置和移动方向对 TBSS 观测的影响

为了表征风暴单体移动方向, 约定某个风暴单体在某个仰角累计达到 3 次 TBSS 特征以上对该风暴单体标注示意图, 6 次强雹暴过程中 13 个风暴单体满足该条件, 图 8 中黑点线 (图中, 风暴单体“2015 年 4 月 3 日汉寿”采用  $6^\circ$  仰角, 其他采用  $1.5^\circ$  仰角作图, 编号为起始点) 为 13 个风暴单体在某个仰角产生 TBSS 时的分布示意图。由图可知: 把 13 个风暴单体移动方向 (与环境引导气流方向大致相同) 沿雷达径向和切向做投影, 可得到 13 个风暴单体的移动



图 8 13 个风暴单体产生的 TBSS 分布, 常德市各县年平均冰雹日数及冰雹路径叠加示意图

Fig. 8 Superposition schematic diagram of TBSS distribution of the 13 storm cells, average annual hail days, and hail path in Changde City

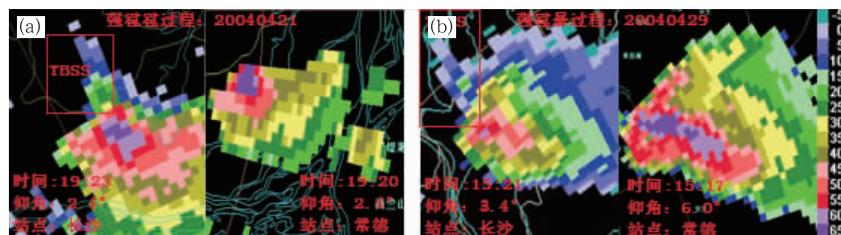


图9 2004年4月21日(a)和29日(b)长沙、常德雷达三体散射观测对比图

Fig. 9 Comparison of TBSS observations in Changsha and

Changde Radars on 21 (a) and 29 (b) April 2004

对应高度为 1.8~2.2 km, 1.5°、2.4°、3.4°仰角的风暴核反射率强度最大值主要在 65~70 dBz, 风暴核所处位置对应高度分别为 3.3~4.0、4.6~5.7、6.1~7.4 km, 由于风暴下风方向存在 25~45 dBz 的真实回波, 0.5°~9.9°仰角均无 TBSS 特征被观测到。分析长沙雷达相同时间段产品发现: 风暴位于雷达西北方, 向东北方向移动, 距离雷达为 67~80 km, 0.5°仰角的风暴核反射率强度最大值为 55~70 dBz, 有 2 个时次观测到 TBSS 特征, 1.5°、2.4°、3.4°、4.3°仰角的风暴核反射率强度最大值主要为 65~70 dBz, 风暴核所处位置对应高度分别为 2.9~3.0、4.0~4.2、5.1~5.5、6.3~6.6 km, 4 个仰角被观测到 TBSS 特征的频次分别为 8、9、9、8 次, 6.0°仰角的风暴核反射率强度最大值为 55~60 dBz, 只有 1 个时次观测到 TBSS 特征, 9.9°仰角无 TBSS 特征。分析 2004 年 4 月 29 日强雹暴过程 14:58—15:29 时段内的两站雷达产品资料可知: 风暴向东北方向移动, 位于常德雷达东北方向, 距离雷达为 50 km 左右, 风暴位于长沙雷达西北方向, 距离雷达为 135 km 左右, 常德雷达 0.5°仰角的风暴核反射率强度最大值主要为 60~65 dBz, 有 1 个时次最大值达 68 dBz, 1.5°、2.4°、3.4°、4.3°、6.0°、9.9°仰角的风暴核反射率强度最大值主要为 65~72 dBz, 中高层的回波强度值强于中低层, 在 6.0°仰角观测到不明显的 TBSS 特征, 长沙雷达 0.5°、1.5°、2.4°、3.4°仰角的风暴核反射率强度最大值为 55~65 dBz, 显著小于常德雷达, TBSS 特征被明显观测到。两站雷达产品资料表明: 风暴相对于两部雷达都处于理想的探测距离, 常德雷达没有观测到 TBSS 特征或不明显, 长沙雷达观测到明显的 TBSS 特征, 其原因为常德雷达风暴下风方向存在大片真实回波, TBSS 特征被覆盖。常德、长沙雷达观测事实和 TBSS 形成原理表明: 沿风暴单体径向外侧区

域(风暴上风方向)无回波、风暴或回波区域径向长度较短, 真实回波不会覆盖风暴单体产生的 TBSS 特征, 容易观测到 TBSS; 反之, 在风暴单体径向外侧, 即下风方向存在足够覆盖 TBSS 特征的真实回波, 不容易观测到 TBSS 或观测不到 TBSS, 风暴单体相对雷达位置和移动方向通常决定沿风暴单体径向外侧区域有无大片回波或回波的径向长度。

图 8 地图部分为常德 1960—2010 年各县年平均冰雹日数及冰雹路径示意图, 西部山区石门和桃源年平均冰雹日数均为 1.1 d, 东部平原安乡和汉寿年平均冰雹日数分别为 0.6 和 0.5 d, 西部山区比东部平原明显偏多; 常德地区强雷暴春末夏初多为东北冷涡型或高原型, 其引导气流多为西北风和西南风, 当风暴单体位于 180°~360°方位区间产生 TBSS 特征时, 其特征很容易被观测到, 这两个因素很好地解释了 TBSS 的方位统计分布特征, 与廖玉芳等(2007)的研究结果相同。

## 5 结 论

通过对常德及周边地区 12 次强雹暴过程的三体散射特征进行详细分析研究, 得到如下结论:

(1) 在最小反射率因子显示阈值为 -5 dBz 情况下, 72.0% 的 TBSS 出现在  $R \geq 65$  dBz 时, 产生 TBSS 特征的最小反射率因子强度为 58 dBz, 12 次强雹暴过程观测事实、统计数据 and 理论表明反射率因子强度是影响 TBSS 产生的关键因素, TBSS 频数随反射率因子强度增强而增加, 强度越强, 越容易产生 TBSS。

(2) TBSS 在高度 4 km 左右出现频数最高, 在距离 90 km 左右处达最大值, 在仰角 1.5°达到峰值。因此, 实际预警业务工作中, 分析是否出现 TBSS 特征, 可根据风暴相距雷达的距离选择合适

的仰角,风暴核离雷达较远时选择低仰角,离雷达较近时选择高仰角。

(3) 87.1%的 TBSS 出现在  $180^{\circ}\sim 360^{\circ}$  方位区间, TBSS 具有明显方位分布特征,强风暴单体相对雷达位置和移动方向(引导气流方向)是造成 TBSS 方位分布特征的根本原因,当风暴单体径向外侧区域无回波、风暴或回波区域径向长度较短,真实回波不会覆盖 TBSS 特征,容易观测到 TBSS;当风暴单体径向外侧有足够覆盖 TBSS 特征的真实回波,不容易观测到 TBSS 或观测不到 TBSS。实际预警业务工作中,分析是否出现 TBSS 特征,应根据风暴的位置和移动方向选择合适的雷达进行观测预警。

(4) 当风暴径向外侧回波强度较小 ( $R \leq 20$  dBz),与 TBSS 在该点产生的虚假回波强度相差不大或小时,可从真实回波中分辨出 TBSS 特征,随着 TBSS 强度值增大,越容易从真实回波中分辨出 TBSS 特征;当风暴径向外侧回波强度较强时 ( $R \geq 25$  dBz),TBSS 特征被覆盖,不容易被观测到。

(5) TBSS 是强冰雹特有的特征,12 次强雹暴对流事件中 10 次观测到 TBSS 特征, TBSS 可以作为强冰雹预警的重要指标。

## 参考文献

陈秋萍,陈齐川,冯晋勤,等,2015。“2012.4.11”两个强降雹超级单体

- 特征分析[J].气象,41(1):25-33.
- 冯晋勤,俞小鼎,傅伟辉,等,2012.2010年福建一次早春强降雹超级单体风暴对比分析[J].高原气象,31(1):239-250.
- 郭艳,2010.大冰雹指标 TBSS 在江西的应用研究[J].气象,36(8):40-46.
- 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[J].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[J].高原气象,26(4):812-820.
- 麻服伟,2007.哈尔滨强冰雹雷达回波特征[J].气象,33(2):88-92.
- 马中元,苏俐敏,湛芸,等,2014.一次强飚线及飚前中小尺度系统特征分析[J].气象,40(8):916-929.
- 陶岚,戴建华,孙敏,2016.一次雷暴单体相互作用与中气旋的演变过程分析[J].气象,42(1):14-25.
- 周泓,段玮,赵爽,等,2014.滇中地区冰雹的多普勒天气雷达及闪电活动特征分析[J].气象,40(9):1132-1144.
- 朱敏华,俞小鼎,夏峰,等,2006.强烈雹暴三体散射的多普勒天气雷达分析[J].应用气象学报,17(2):215-223.
- Lemon L R,1998.The radar “three-body scatter spike”:an operational large-hail signature[J].Wea Forecasting,13(2):327-340.
- Wilson J W,Reum D,1988.The flare echo:reflectivity and velocity signature[J].J Atmos Oceanic Technol,5(2):197-205.
- Zrnić D S,1987.Three-body scattering produces precipitation signature of special diagnostic value[J].Radio Sci,22(1):76-86.