

孟蕾, 桑友伟, 夏扬, 等, 2024. 天气雷达三体散射长钉回波特征分析[J]. 气象, 50(6): 675-685. Meng L, Sang Y W, Xia Y, et al, 2024. Analysis of echo characteristics of three-body scatter spike for weather radar[J]. Meteor Mon, 50(6): 675-685 (in Chinese).

天气雷达三体散射长钉回波特征分析*

孟 蕾^{1,2} 桑友伟^{1,2} 夏 扬³ 高文娟^{1,2} 刘达之^{1,2}

1 中国气象局气象干部培训学院湖南分院, 长沙 410125

2 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 长沙 410118

3 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

提 要: 利用 2016—2020 年中国中东部地区 47 个强对流个例中 50 部 S 波段多普勒天气雷达的基本反射率因子产品资料, 在筛选出 2626 个样本的基础上, 分析三体散射长钉(TBSS) 特征。结果表明: TBSS 在 1.5 km 和 5 km 高度附近出现频次最高; 在 2.4° 仰角出现频次最高。TBSS 主要出现在雷达静锥区边缘至雷达径向距离 210 km 范围, 在距离雷达 115 km 附近达到峰值; TBSS 在雷达极坐标系中呈现南多北少、西多东少的形势; 当对流风暴移动方向与雷达径向方向的夹角大于 30° 时有利于观测到 TBSS。TBSS 回波强度在起始端径向向外 0~15 km 范围内迅速降低至 5 dBz, 15 km 之后在 -5~10 dBz 波动, TBSS 区域中 70% 以上为低于 25 dBz 的弱回波; 99% 的 TBSS 长度小于 40 km, 不同长度的 TBSS 形态符合正态分布。TBSS 出现频次和长度与强回波的中心最高值和区域面积没有显著相关关系。

关键词: 三体散射长钉(TBSS), 天气雷达, 分布特征, 雷达回波, 冰雹

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.022002

Analysis of Echo Characteristics of Three-Body Scatter Spike for Weather Radar

MENG Lei^{1,2} SANG Youwei^{1,2} XIA Yang³ GAO Wenjuan^{1,2} LIU Dazhi^{1,2}

1 Hunan Branch of CMA Training Centre, Changsha 410125

2 Key Laboratory of Hunan Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Changsha 410118

3 CMA Training Centre, Beijing 100081

Abstract: Using the basic reflectivity factor PPI image data of 47 severe convective cases from 50 S-band Doppler weather radars in the central-eastern region of China from 2016 to 2020, the three-body scatter spike (TBSS) characteristics are analyzed based on the screening of 2626 TBSS samples. The results show that TBSS is most frequently observed at altitudes of 1.5 km and 5 km and at the elevation 2.4°. TBSS is mainly observed in the range from the edge of the radar static cone area to the radar radial distance of 210 km. It reaches its peak at the spot 115 km away from the radar. In the radar polar coordinate system, TBSS appears more in the south than in the north, and more in the west than in the east. It is better to observe TBSS when the angle between the moving direction of the convective storm and the radial direction of the radar is larger than 30°. The TBSS echo strength decreases rapidly to 5 dBz within 0—15 km radially outward from the beginning, and fluctuates in the range of -5 and 10 dBz after 15 km, with more than

* 中国气象局气象干部培训学院重点项目(2022CMATCZD12)、湖南省气象局研究型业务预报预测专项(XQKJ22C011)和湖南省气象局 2024 年创新发展专项(CXFZ2024-FZZX46)共同资助

2023 年 6 月 20 日收稿; 2024 年 4 月 5 日收修定稿

第一作者: 孟蕾, 主要从事雷达产品数据分析及应用. E-mail: 231386923@qq.com

通讯作者: 桑友伟, 主要从事短时临近预报预警研究. E-mail: 809877607@qq.com

70% of the TBSS zone being weak echoes weaker than 25 dBz. 99% of TBSS length is under 40 km, and the patterns of TBSSs with varying lengths follow a normal distribution. No significant correlation is found between the frequency and length of TBSS occurrences and the highest value of the high echo core and the area of the high echo.

Key words: three-body scatter spike (TBSS), weather radar, distribution characteristic, radar echo, hail

引 言

三体散射长钉(TBSS)是多普勒天气雷达预警大冰雹的重要回波图像之一,是出现在强回波中心径向向外侧的窄带状弱回波(Lemon, 1998)。有关TBSS的研究在国外开始较早,TBSS的形成机理模型最早由Zrnić(1987)基于雷达气象学基本原理和S波段多普勒天气雷达观测事实提出,认为TBSS是一种由冰雹粒子和地面之间的多次散射造成的雷达回波假象。Wilson and Reum(1988)对不同波段雷达回波图像上TBSS的形成和影响因子探究发现,由于3 cm和5 cm波段雷达电磁波波长较短,TBSS也有可能由大的液态水滴引发。Lemon(1998)在综合了前人研究的基础上,对TBSS回波形态进行了细致描述,指出TBSS是S波段雷达探测对流风暴时指示有大冰雹的充分非必要条件。Zrnić et al(2010)则进一步研究得出基于TBSS的冰雹尺寸估算模型。

随着多普勒天气雷达的双偏振升级,Hubbert and Bringi(2000)重点讨论了TBSS对差分反射率因子(Z_{DR})的影响。Kumjian(2013)认为双偏振雷达回波图像上的TBSS主要表现为在强回波中心附近往往具有高于6 dB的 Z_{DR} 值和低于0.5的相关系数(CC)。TBSS因其独特的回波特征(Lindley and Lemon, 2007)及其与冰雹的关联性,始终作为冰雹个例研究重点之一(Donavon and Jungbluth, 2007; Blair et al, 2011; Carburanu et al, 2014; Montopoli et al, 2021)。

中国气象局自1998年开始布署中国新一代天气雷达(CINRAD)网络(俞小鼎等, 2006),我国在2002年湖南常德雷达回波图像上首次发现TBSS(廖玉芳等, 2003)。随后国内众多学者(朱敏华等, 2006; 廖玉芳等, 2007)对TBSS进行了专项研究,利用S波段雷达资料分析得出TBSS出现时间与降雹时间有较好的对应关系,同时郭艳(2010)、王晓君等(2014)、王晓君和郑媛媛(2022)研究指出TBSS并

不能作为C波段雷达预警大冰雹的重要指标,张曦等(2022)对比了S波段雷达和波长5.56 cm的北京大兴国际机场相控阵雷达对TBSS的观测效果,发现后者呈现的TBSS特征更显著,这些研究结论与国外学者(Wilson and Reum, 1988; Lemon, 1998)的研究结论一致。除了专项研究,关于TBSS的特征分析也成为了国内冰雹个例研究重点之一(麻服伟, 2007; 周泓等, 2014; 雷瑜等, 2022; 汤兴芝等, 2023)。

2020年前后,我国进行多普勒天气雷达双偏振升级,国内学者关注TBSS在偏振参量产品中的特征(杨吉等, 2020; 潘佳文等, 2021; 夏凡等, 2023; 韩颂雨等, 2023)。潘佳文等(2020)研究发现闽南地区一次雹暴过程TBSS的起始位置和远端均出现 Z_{DR} 大值区,并且出现CC低值区,这与Kumjian(2013)的研究结论一致。杨吉等(2020)在研究中发现南京冰雹个例TBSS特征与北美TBSS统计特征存在着差异,这说明收集国内更多的TBSS样本进行统计分析是十分有必要的。

在前期研究基础上,TBSS的自动识别技术逐步发展,虽然已有学者对雷达径向速度产品中的TBSS进行了讨论与分析(Zrnić, 1987; Wilson and Reum, 1988; 戴建华等, 2012),但是目前TBSS的自动识别主要采用反射率因子产品。Mahale et al(2014)改进了美国强风暴实验室研发的水凝物分类算法(HCA),采用梯形隶属度函数对TBSS进行自动识别;王萍等(2014)通过文献分析人为设定标准模板,利用模板匹配法对TBSS进行自动识别。这两种方法中用于比对参照的TBSS模型主要由人为主观设置,使得部分识别结果与观测事实不符(杨吉等, 2020)。为针对国内更多的TBSS样本进行统计分析,更好地提升TBSS识别的自动化水平,本研究基于2016—2020年中国中东部地区强对流天气个例不同地区S波段多普勒天气雷达基本反射率因子PPI图像,筛选TBSS样本,提取TBSS三维空间分布特征、反射率因子分布特征和形态分布特征,构建更加科学合理的TBSS自动识别参照模型。

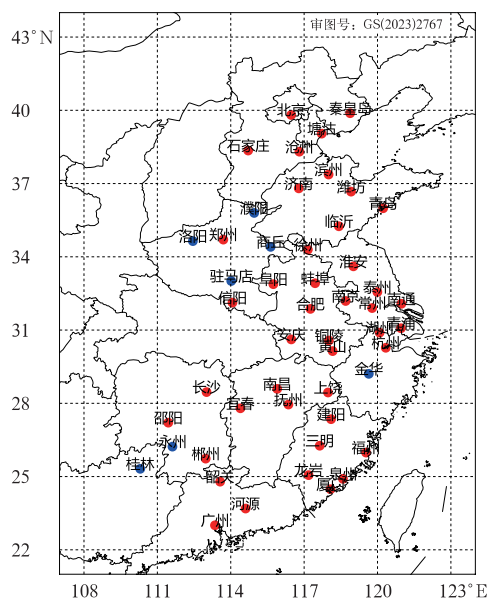
1 数据资料

所用雷达产品资料为 2016—2020 年中国中东部地区 47 个强对流天气个例 50 部 S 波段多普勒天气雷达基本反射率因子 19 号产品 PPI 图像资料,其中有 SA 型雷达 43 部、SB 型雷达 7 部(图 1),包含了 4 个仰角(0.5° 、 1.5° 、 2.4° 和 3.4°)的产品文件,雷达基本反射率因子最低显示阈值为 -5 dBz。文中所用时间均为世界时。

2 TBSS 形成机理与判定标准

2.1 TBSS 形成机理

图 2a 为 TBSS 形成原理示意图, A 为雷达, C 为冰雹粒子。在一个脉冲时间段内,当电磁波由雷达



注:红点为 SA 型雷达,蓝点为 SB 型雷达。

图 1 雷达站点分布

Fig. 1 Distribution of radar stations

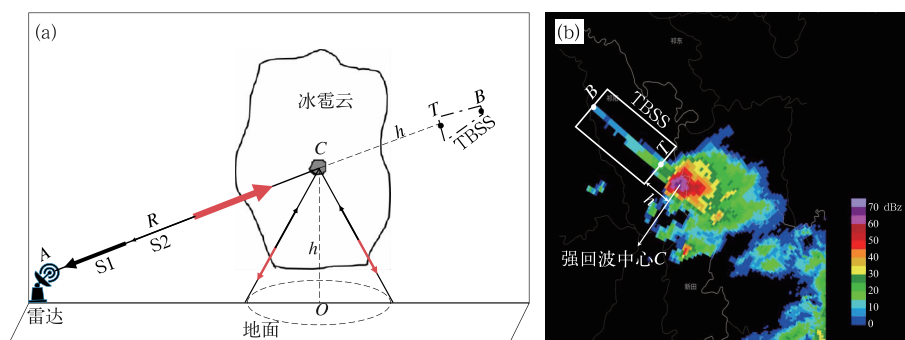


图 2 TBSS(a)形成原理示意图和(b)实例

Fig. 2 Schematic diagram of (a) TBSS formation principle and (b) example of TBSS

A 出发到达冰雹粒子 C 时,电磁波被冰雹粒子向四周散射,经后向散射回到雷达 A 的电磁波被记为信号 S1,在雷达回波图像上显示为“强回波中心 C”(图 2b)。还有一部分电磁波到达地面,被地面进行第二次散射,其中一部分电磁波回到冰雹粒子 C,被冰雹粒子进行第三次散射,其中被散射回到雷达 A 的电磁波记为信号 S2。根据雷达测距原理(张培昌等,2001),经历了三次物体散射后回到雷达的信号 S2 被雷达记录为一个与冰雹粒子 C 同径向方向但径向距离更远的目标物所引起的回波,然而该目标物非真实存在,因此虽该回波为 TBSS,但为虚假回

波,如图 2b 所示。

2.2 TBSS 判定标准

2.2.1 强度判定标准

根据 Lemon(1998)对 TBSS 基本反射率因子 PPI 图像描述和统计指标(Lemon,1998;朱敏华等,2006;廖玉芳等,2007),TBSS 的强度判定标准可量化为:一种出现在 ≥ 60 dBz 强回波中心径向向外侧延伸方向的,回波强度 ≤ 20 dBz 的窄带状回波。

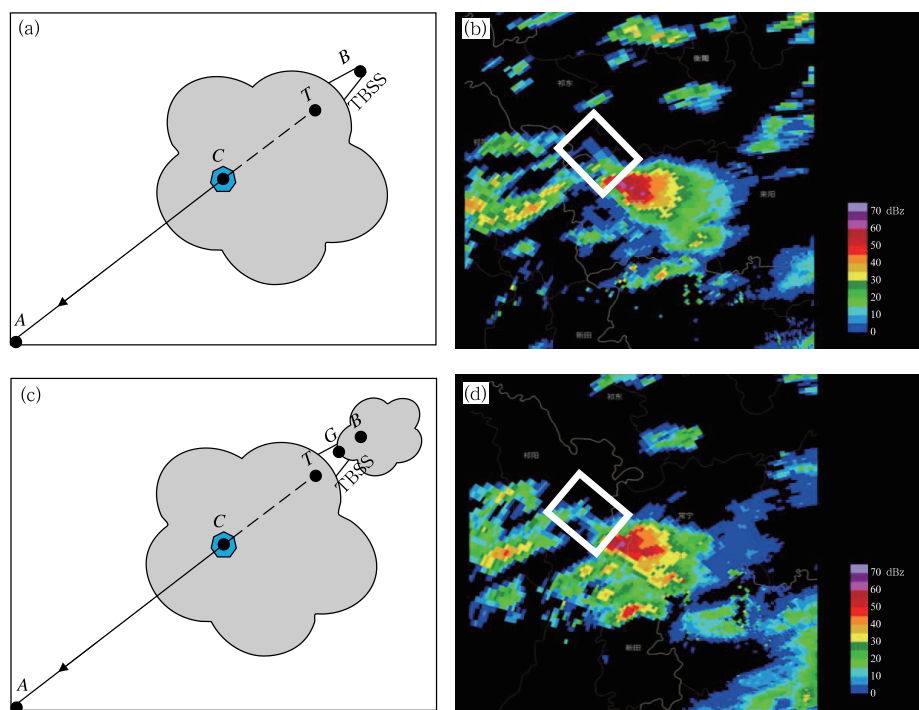
2.2.2 TBSS 长度判定标准

根据 TBSS 的形成机理模型(Zrnić,1987)和

TBSS 强度判定标准, 设定 TBSS 长度判定标准。对应图 2a 所示, TBSS 起始端 T 的径向距离 AT 对应三体散射过程中电磁波所走最短路径的 $1/2$, 即 $AC+CO$, 故有 $AC+CT=AC+CO$, 其中 CO 垂直于地面, 是冰雹粒子距离地面的高度。TBSS 终点端 B 一般定位于自 T 开始沿径向方向, 回波强度逐渐降低至 ≤ 20 dBz 的窄带状回波的最远端。理论上 TBSS 长度 $TB=AB-AT$, 但在实际情况中, TBSS 经常被真实降水回波完全遮挡或部分遮挡 (胡胜等, 2015; 刁秀广等, 2022)。当强回波中心可见, 但其径向方向为真实降水回波时, 不可辨识出 TBSS, 认为无 TBSS; 当 TBSS 被真实降水回波部分遮挡时, 对 TBSS 长度 TB 作如下规定:

(1) 若 TBSS 起始端 T 被遮挡, 终点端 B 可见 (图 3a, 3b), 则 $TB=AB-AT$ 。

(2) 若 TBSS 起始端 T 被遮挡, 终点端 B 也被遮挡, 径向方向上真实降水回波离雷达最近的点记为 G (图 3c, 3d), 则 $TB=AG-AT$ 。



注: 图 b, d 中白色方框所示为 TBSS。

图 3 TBSS(a, c) 长度计算规则示意图与 (b, d) 相应实际雷达图像
(a, b) TBSS 起始端被遮挡, (c, d) TBSS 起始端和终点端均被遮挡
Fig. 3 Comparison of (a, c) TBSS length calculation rules and
(b, d) actual radar images

(a, b) obscured situation at the beginning of TBSS, (c, d) obscured situation at both the beginning and the end of TBSS

3 TBSS 分析方法

3.1 TBSS 样本人工筛选与基础信息提取

对雷达基本反射率因子 19 号产品文件进行人工判定, 根据以下标准筛选 TBSS 样本: 在雷达一次体扫过程中, 某个仰角的基本反射率因子 19 号产品 PPI 图像上存在 1 个强回波 (≥ 60 dBz, 下同) 中心, 其径向外侧方向上可辨识有 TBSS, 就构成 1 个样本。共筛选出 2626 个 TBSS 样本。逐个样本提取雷达产品文件的体扫时间、仰角、强回波中心方位角与径向距离、强回波区内最高反射率因子, 计算强回波的面积和所在高度, 得到每个 TBSS 样本的基础信息。

3.2 TBSS 模板构建

(1) 强回波中心位置设定: 根据 TBSS 形成原理, 在雷达极坐标系中设强回波中心对应的方位角

和径向距离分别为 α 和 R , 强回波中心距离地面高度为 h 。

(2) 关注区域范围设定: 考虑到中国目前发现的 TBSS 最长长度为 69.7 km (廖玉芳等, 2007), 在每个基本反射率因子产品文件中, 选择方位角区间 $[\alpha-10, \alpha+10]$ 与径向距离区间 $[R+h, R+h+70]$ 所包含的范围作为关注区域 M (图 4a)。

(3) TBSS 反射率因子模板构建: 将 M 区域中每个格点的基本反射率因子 $M_{i,j}$ ($i \in [\alpha-10, \alpha+10], j \in [R+h, R+h+70]$) 对应记录在 20×70 的矩阵模板 P 中 $P_{i,j}$ ($i \in [1, 20], j \in [1, 70]$) 格点位置 (图 4b)。当 $M_{i,j}$ 的径向距离超过雷达有效探测范围 230 km, 或已出现 $M_{i,j} \leq 20$ dBZ 的弱回波后又出现 $M_{i,j+1} > 20$ dBZ 的回波时, 则该径向方向记录至 $M_{i,j}$ 为止, 得到单个 TBSS 反射率因子分布模板。

(4) TBSS 形态模板构建: 将矩阵模板 P 进行二值化, 在回波显示阈值为 -5 dBZ 的情况下, 将雷达回波 ≥ -5 dBZ 的格点赋值为 1, 雷达回波 < -5 dBZ 格点的赋值为 0, 得到单个 TBSS 形态模板。

3.3 单个 TBSS 模板特征分析

通过个例分析 TBSS 反射率因子模板 (图 5) 发现, TBSS 模板特征有两种形式。第一种形式是典型 TBSS 的单峰形态, 峰值表征 TBSS 的长度, 出现在强回波中心 $[\alpha-3, \alpha+3]$ 方位角区间, 回波长度自强回波中心方位角 α 向左右两边迅速递减 (图 5a~5c), 即使 TBSS 的长度缩短, 在 $[\alpha-3, \alpha+3]$ 区间 TBSS 模板也保持了单峰直方图形态 (图 5d~5f)。第二种形式是非典型 TBSS 的单峰形态, 虽然受附

近真实降水回波干扰, 在原始雷达回波图像上识别 TBSS 较困难 (图 5i), 但在 TBSS 模板图像上, $[\alpha-3, \alpha+3]$ 区间内呈现显著的单峰形态 (图 5g, 5h)。

通过观察 2626 个单个 TBSS 反射率因子模板和形态模板发现, 符合判定标准的 TBSS 主要出现在方位角区间 $[\alpha-3, \alpha+3]$, 且 50% 以上的 TBSS 主要出现在方位角区间 $[\alpha-1, \alpha+1]$ 。

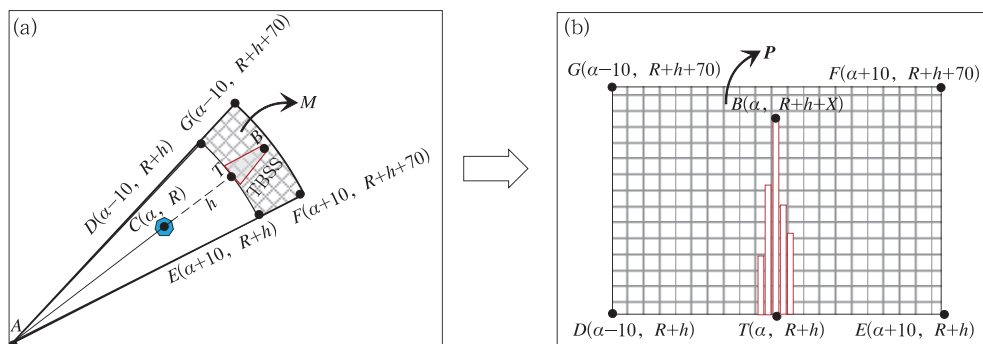
3.4 TBSS 统计特征分析

根据 TBSS 的基础信息, 定义与 TBSS 关联的强回波中心所在高度、雷达仰角为 TBSS 的高度和雷达仰角, 分析 TBSS 随高度和仰角的分布特征; 定义与 TBSS 所关联的强回波中心方位为 TBSS 方位, 对其在以雷达为中心的极坐标系中进行方位分析; 对 TBSS 样本方位角区间 $[\alpha-3, \alpha+3]$ 反射率因子模板和形态模板对应格点数据求平均值, 得到反射率因子统计模板和形态统计模板, 根据模板提取出反射率因子在 TBSS 区域范围内不同位置 and 不同区间上的统计分布特征, 分析 TBSS 回波形态统计特征中体现出的长度差异和形态分类。

4 TBSS 特征分析

4.1 TBSS 随高度与仰角的分布特征

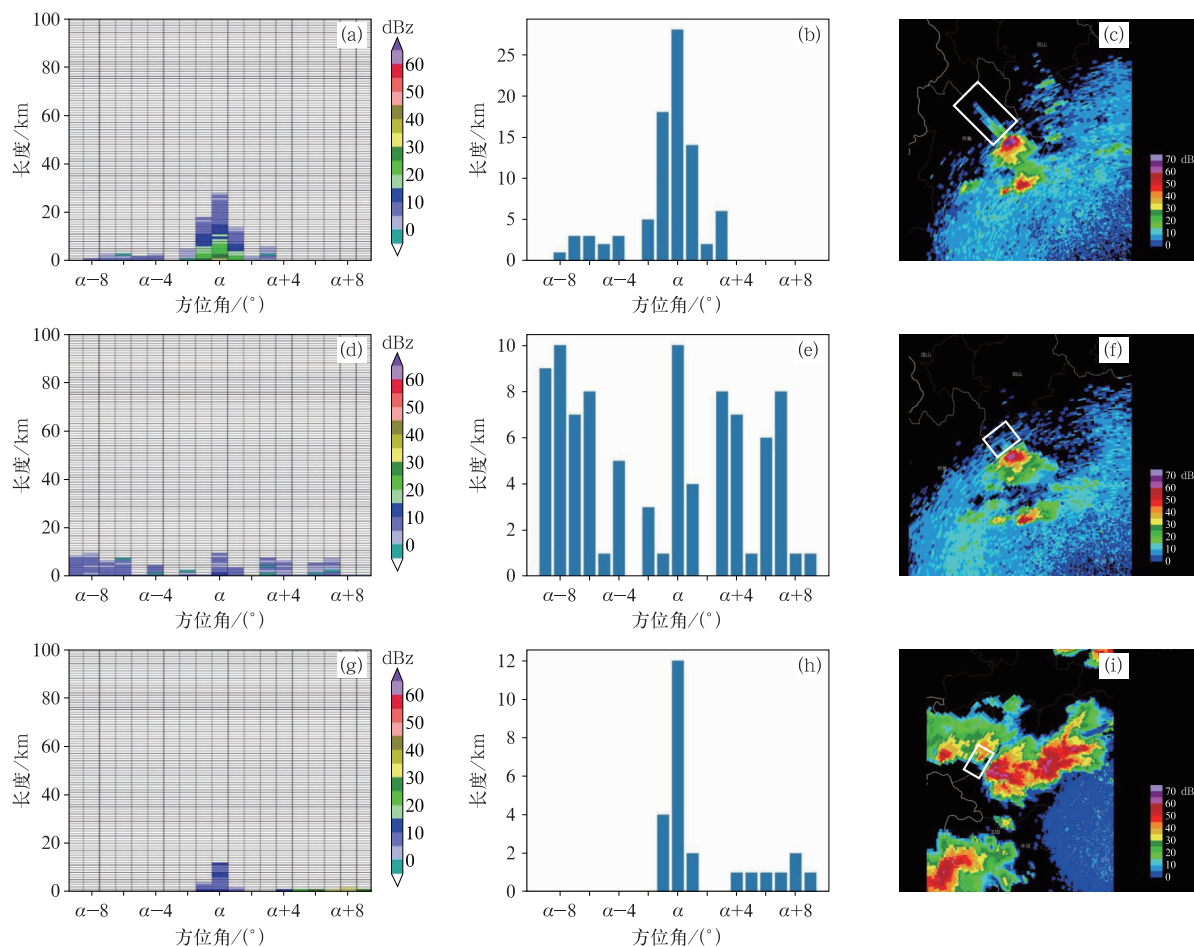
2626 个 TBSS 样本中, 所在高度最高为 9.26 km, 高于 9 km 仅为 3 次, 最低为 0.66 km, 低于 1 km 的 TBSS 出现频次为 77 次, 其余 2546 次 TBSS 出现在 1~9 km 高度范围 (图 6a)。



注: 图 b 中以网格图表示 20×70 的矩阵模板 P , 每个格点对应图 a 中 M 区域的 $1^\circ \times 1$ km, 以红色柱形表示 TBSS 在矩阵模板的数据记录区域。

图 4 TBSS 在雷达回波图像上 (a) 区域选定与 (b) 模板构建示意图

Fig. 4 Schematic diagram of (a) area selection and (b) template construction on TBSS radar echo image



注:图 c,f,i 中白色方框所示为 TBSS。

图 5 2016 年(a~f)4 月 10 日(a~c)14:12 和(d~f)14:42 广州雷达,(g~i)6 月 10 日 09:30 秦皇岛雷达的 TBSS(a,d,g)模板特征,(b,e,h)长度分布与(c,f,i)基本反射率因子 PPI 图像

Fig. 5 Comparison of TBSS (a, d, g) template features, (b, e, h) length distribution and (c, f, i) reflectivity PPI images of Guangzhou Radar at (a—c) 14:12 UTC and (d—f) 14:42 UTC 10 April 2016, and (g—i) Qinhuangdao Radar at 09:30 UTC 10 June 2016

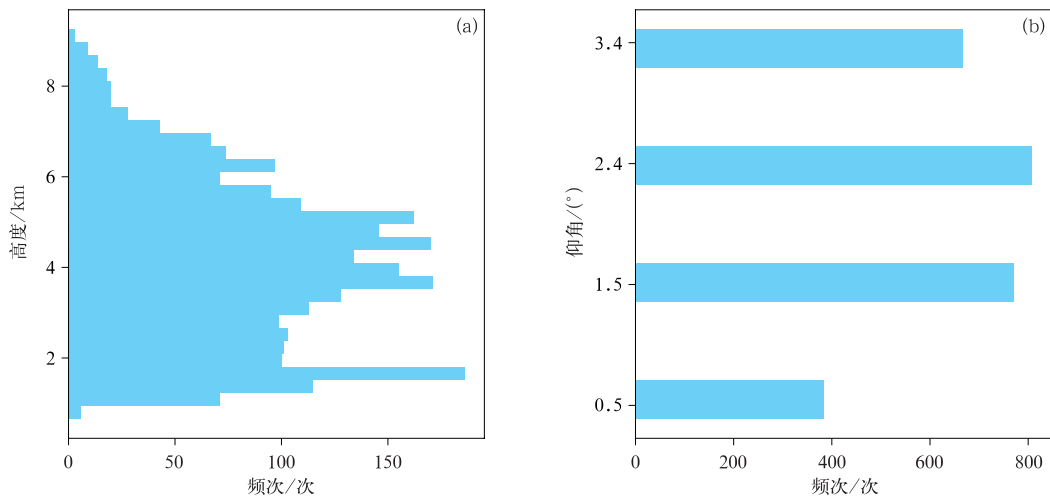


图 6 TBSS 关联强回波中心出现频次随(a)高度和(b)仰角分布

Fig. 6 Frequency distribution of strong echo centers associated to TBSS with (a) height and (b) elevation angle

TBSS 随高度的分布总体呈双峰特征,2 个峰值分别出现在 1.5 km 和 5 km 高度附近,这与何炳伟等(2018)对常德雷达统计的结果有所不同。常德雷达 TBSS 随高度分布呈单峰特征,峰值出现在 4 km 附近。一般认为 4 km 是融化层高度,冰雹下落过程中经过融化层时外部包裹了水膜,使得散射能力增强,出现 TBSS 的频次最高。本研究中双峰特征的形成可能有两种原因:一是根据 TBSS 形成机理模型(Zrnić,1987),当冰雹距离地面高度越低时,电磁波在三体散射过程中所走的最短路径越短,有更多的能量返回雷达,TBSS 容易显示在雷达回波图像上;二是本研究的雷达资料中包含了多部雷达对同一次冰雹过程的探测信息,某一部雷达因真实降水回波遮挡探测不到的低层 TBSS 被邻近其他雷达探测到,低层的 TBSS 显示出来。

由于 TBSS 样本中只包含有 4 个仰角的雷达文件,因此只统计了 4 个低仰角 TBSS 分布情况(图 6b)。TBSS 主要集中在 $1.5^{\circ} \sim 3.4^{\circ}$ 的 3 个仰角,出现频次先随仰角的增加而增加,后随仰角的增加略有减少。其中,出现在 2.4° 仰角的频次最高,达到 806 次,出现在 0.5° 仰角的频次最低,仅为 383 次。

4.2 TBSS 方位分布特征

TBSS 主要出现在雷达静锥区边缘至径向距离 210 km 范围之内。自静锥区边缘至雷达径向距离 115 km, TBSS 出现频次逐渐增加,至雷达径向距离 115~210 km,出现频次逐渐减少(图 7b)。出现在

210 km 之外的 TBSS 样本极少,廖玉芳等(2007)认为这与雷达波束未能充满有关。本研究认为也与雷达的有效探测范围为 230 km 有关,当雷达径向距离超过 210 km 时, TBSS 一般在雷达图像上难以显示完整,无法支持人工判识。

TBSS 方位分布极不均匀,总体呈南多北少、西多东少的形势(图 7a)。具体地,在 $135^{\circ} \sim 315^{\circ}$ 是 TBSS 高值区,在 $0^{\circ} \sim 135^{\circ}$ 是低值区。TBSS 在 $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 方位区间出现频次最低,只有 50 次,在 $225^{\circ} \sim 270^{\circ}$ 方位区间出现频次最高,高达 542 次。

TBSS 方位分布的不均匀性与真实降水回波的遮挡有关。中国地处中纬度西风带,当对流风暴的降水回波向下风方向延展时容易遮挡东北方位的 TBSS(廖玉芳等,2007),导致在雷达东北方位判识出的 TBSS 最少。以 2016 年 6 月 10 日冰雹天气过程为例,秦皇岛雷达(图 8a)与北京雷达(图 8b)探测到同一个冰雹云,强回波中心在秦皇岛雷达西北方向,方位角为 289.92° ,径向距离为 173 km,雷达回波图像上可见 TBSS;冰雹粒子在北京雷达东北方向,方位角为 65.31° ,径向距离为 124 km,无法辨识出 TBSS,因为冰雹粒子强回波中心径向外侧的位置被对流风暴下风方向的降水回波遮挡。

进一步分析 185 组持续 3 个体扫以上的 TBSS 样本,计算相关对流风暴移动方向与雷达径向方向的夹角(图 8c),夹角最小值为 37.7° ,最大值为 172.4° 。在 $90^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 的样本数最多,为 107 个,其次是 $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$,样本数为 69 个, $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 和 $150^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 的样本数均不超过 6 个,说明当对流风暴移动方向,即降水

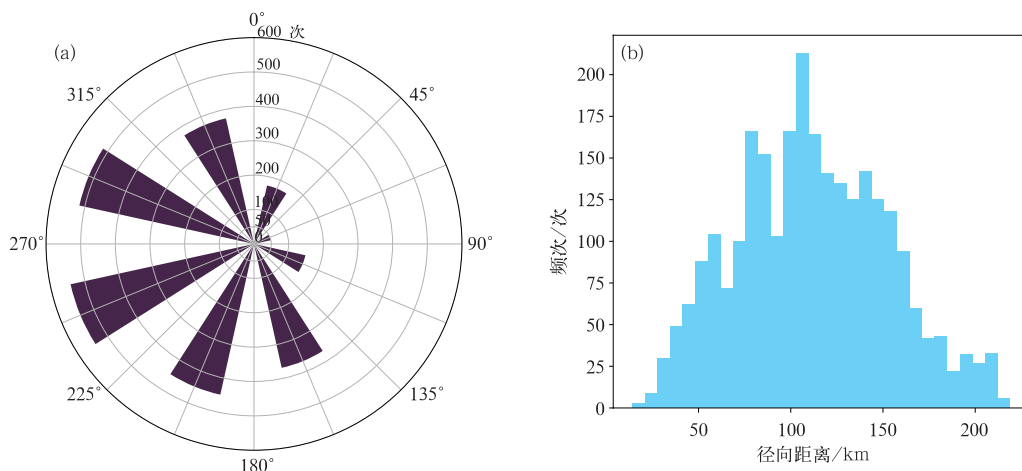


图 7 TBSS 在雷达(a)不同方位,(b)不同径向距离的频次分布

Fig. 7 Frequency distribution of TBSS with different (a) directions and (b) radial distances of radar

回波延展方向,与雷达径向方向越一致时,TBSS 越有可能被部分遮挡或完全遮挡,不利于人工判识,当对流风暴移动方向与雷达径向方向的夹角大于 30° 时,TBSS 被识别的概率较高。

4.3 TBSS 反射率因子分布统计特征

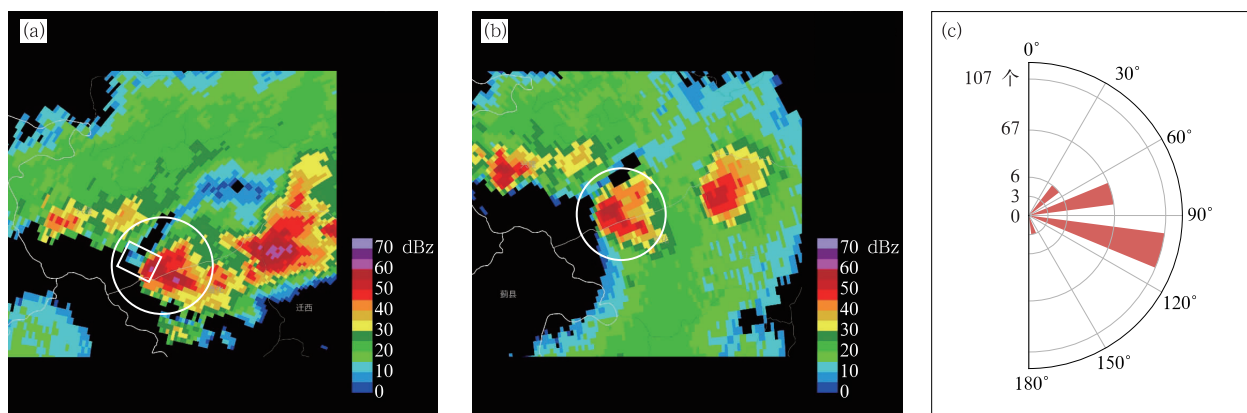
TBSS 的反射率因子分布统计特征(图 9a)显示出 TBSS 主要为低于 20 dBz 的弱回波,但由于真实降水回波的遮挡,在 TBSS 起始端 1~2 km 范围内出现了高于 20 dBz 的回波。TBSS 在各方位角的回波强度沿雷达径向方向递减,在雷达径向距离 0~15 km 范围内迅速降低,在 15 km 附近已降至 5 dBz,15 km 之外在 -5~10 dBz 波动(图 9a)。-5~20 dBz 的回波出现频次总占比为 73.2%,其中 5 dBz 出现频次

最高(图 9b)。尽管本研究中将遮挡了 TBSS 起始端的真实降水回波记录在内,但依然能显示出一 5~20 dBz 的弱回波占 TBSS 区域 70%以上。

4.4 TBSS 回波形态统计特征

TBSS 形态统计特征显示出 TBSS 长度最长为 61 km,小于廖玉芳等(2007)观测到的 69.7 km。长度在 40 km 以下的 TBSS 占比达到 99%,其中 10~19 km 和 1~10 km 长度的 TBSS 占比为最高和次高,分别是 43%和 40%。TBSS 长度中值为 11 km,75%的 TBSS 长度大于 7 km,小于 16 km。

TBSS 回波形态统计特征总体符合正态分布(图 10a),通过显著性水平检验,其概率密度函数为:



注:图 a,b 中白色圆形所示区域为同一个对流风暴强回波中心,图 a 中白色方框所示为 TBSS。

图 8 (a,b)2016 年 6 月 10 日 09:12(a)秦皇岛和(b)北京雷达回波图像,
(c)对流风暴移动方向与雷达径向方向的夹角特征

Fig. 8 (a, b) Radar echo image of (a) Qinhuangdao Radar and (b) Beijing Radar at 09:12 UTC 10 June 2016, (c) angle characteristics between movement direction of convective storm and radial direction of radar

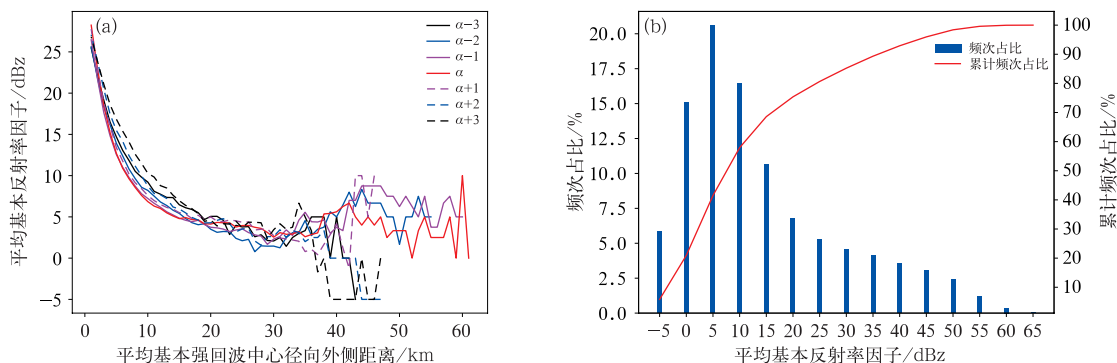
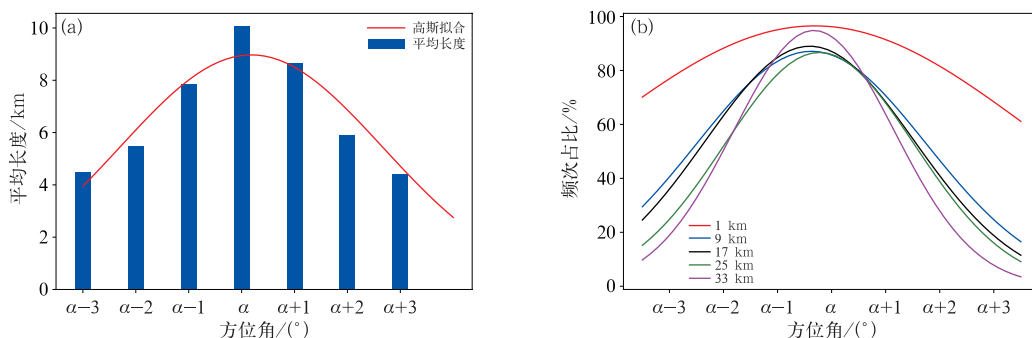


图 9 TBSS 平均基本反射率因子(a)随强回波中心径向外侧距离的变化及(b)频次和累计频次占比

Fig. 9 (a) Variation with radial distance from high echo core, (b) frequency ratio and cumulative frequency ratio of TBSS mean basic reflectivity factor



注:图 b 中曲线表示 TBSS 在某个长度不同方位角出现频次占相同长度所有方位角最高频次的比值分布。

图 10 TBSS 在不同方位角的(a)平均长度与高斯拟合,
(b)各长度出现频次占比分布

Fig. 10 (a) Average length and Gaussian fitting, (b) frequency ratio distribution of TBSS in different directions at each radial distance

$$p(y) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中: y 是 TBSS 统计模板在方位角 $[\alpha-3, \alpha+3]$ 区间内不同方位角的长度; $p(y)$ 是其概率密度函数; μ 为 y 的平均值,经过计算 $\mu=6$ km; σ 为 y 的标准差,经过计算 $\sigma=2.41$ km。

分析 TBSS 在相同雷达径向距离不同方位角的频次分布特征,发现其分布均符合正态分布,并且随着径向距离的增加,分布形态由扁平型变为尖高型(图 10b),与王萍等(2014)将 TBSS 分为“楔带状”和“直带状”两种形态相对应,但相比王萍等(2014)仅以 TBSS 长度是否大于 10 km 为依据区分两种形态的分类方式,本研究可提供更细致的分类依据。

4.5 TBSS 影响因素讨论

所有 TBSS 样本关联的强回波区域面积平均值为 12.8 km²,第 25%分位值为 4 km²,中位数为 8 km²,第 75%分位值为 16 km²。TBSS 长度与强回波区域面积的相关系数为 0.34,未通过显著性水平检验,与廖玉芳等(2007)认为两者有相关性的结论相异。

53.6%的 TBSS 样本所关联的强回波中心最高值 $Z_{\max} \geq 65$ dBz,46.4%的样本强回波中心最高值 $Z_{\max}=60$ dBz,前者出现频次没有显著高于后者,同时强回波中心值的高低也与 TBSS 的长度没有显著相关关系。这一点与 Lemon(1998)的研究结论相同,与廖玉芳等(2007)、何炳伟等(2018)研究的结论有所不同。廖玉芳等(2007)认为 TBSS 长度与强回波中心区域面积、强回波中心最高值有显著相关关

系。何炳伟等(2018)研究认为 TBSS 出现频数随反射率因子强度增强而增加。本研究与前人研究结论不同的原因在于:根据 TBSS 形成机理(Zrnić, 1987),TBSS 的形成受到雷达电磁波、雷达有效探测范围内不同目标物属性、大的降水粒子(冰雹)散射能力、下垫面的漫反射等多种因素影响,廖玉芳等(2007)、何炳伟等(2018)的研究结论主要建立在少数几部雷达或单部雷达观测到的 TBSS 样本基础上,而本研究涉及到的 50 部雷达位于中国中东部地区不同省份,这些雷达所在的地理位置、地形条件、大气环境等均不相同,多部雷达观测到的 TBSS 样本与单部雷达观测到的 TBSS 样本在统计特征上呈现差异是合理的。

5 结论和讨论

利用 2016—2020 年中国中东部地区 47 个强对流天气个例 50 部 S 波段多普勒天气雷达基本反射率因子 PPI 图像资料,在人为筛选出 2626 个 TBSS 样本基础上,分析 TBSS 随高度、仰角、方位的分布,反射率因子特征和回波形态特征,得到如下结论:

(1)本研究中 TBSS 出现频次随高度的分布呈现双峰特征,分别在 1.5 km 和 5 km 高度附近出现峰值,与何炳伟等(2018)认为 TBSS 出现频次在高度 4 km 附近达到单峰峰值的研究结论不同;在 0.5°、1.5°、2.4°、3.4°这 4 个雷达仰角中,TBSS 在 2.4°仰角出现频次最高,在 0.5°仰角最低。

(2)TBSS 主要出现在雷达静锥区边缘至雷达径向距离 210 km 范围,出现频次沿着雷达径向方向先增加后减少,在距离雷达 115 km 附近达到峰

值;受真实降水回波遮挡影响,TBSS 方位分布极不均匀,呈现南多北少、西多东少的分布特征,在东北方位出现最少,西南方位出现最多,尤其是在 $225^{\circ}\sim 270^{\circ}$ 方位出现频次最高;当对流风暴移动方向与雷达径向方向的夹角大于 30° 时有利于观测到 TBSS。

(3)通过构建 TBSS 模板,对 TBSS 区域内反射率因子分布和回波形态特征做定量化分析。TBSS 回波强度自起始端沿径向方向递减,回波强度在起始端径向向外 $0\sim 15\text{ km}$ 范围内迅速降低至 5 dBz , 15 km 之后在 $-5\sim 10\text{ dBz}$ 波动,TBSS 区域内 70% 的回波强度低于 25 dBz ;TBSS 长度最长为 61 km ,小于廖玉芳等(2007)观测到的 69.7 km 。99% 的 TBSS 长度在 40 km 以下,75% 的 TBSS 长度大于 7 km ,小于 16 km ,不同长度的 TBSS 回波形态均符合正态分布,随着其长度增加,TBSS 回波形态逐渐由“楔带状”转变为“直带状”,与王萍等(2014)研究结论相对应。

(4)TBSS 出现频次和 TBSS 长度与其关联的强回波中心最高值和强回波区域面积没有显著相关关系,这与廖玉芳等(2007)和何炳伟等(2018)的研究结论不同。其根本原因在于 TBSS 的出现受到多种因素影响,包括雷达电磁波、雷达有效探测范围内不同目标物属性、大的降水粒子(冰雹)散射能力、下垫面的漫反射等,当各种因素不尽相同时,研究结论也会发生改变。

利用长时间序列的单偏振雷达产品对 TBSS 定量化分析,有利于雷达数据的挖掘与强冰雹监测预警。随着天气雷达进行双极化升级,更多雷达偏振参量(如 Z_{DR} 、CC 等)可为 TBSS 的自动识别提供更多有利的条件,在以后的研究中纳入相关产品进行定量化分析,将进一步提高强冰雹天气自动识别效率。

参考文献

戴建华,陶岚,丁杨,等,2012.一次罕见飑前强降雹超级单体风暴特征分析[J].气象学报,70(4):609-627. Dai J H, Tao L, Ding Y, et al, 2012. Case analysis of a large hail-producing severe supercell ahead of a squall line[J]. Acta Meteor Sin, 70(4): 609-627 (in Chinese).

刁秀广,李芳,万夫敬,2022.两次强冰雹超级单体风暴双偏振特征对比[J].应用气象学报,33(4):414-428. Diao X G, Li F, Wan F J, 2022. Comparative analysis on dual polarization features of two severe hail supercells[J]. J Appl Meteor Sci, 33(4): 414-428 (in Chinese).

郭艳,2010.大冰雹指标 TBSS 在江西的应用研究[J].气象,36(8):40-46. Guo Y, 2010. TBSS as large-hail indicator in Jiangxi Province[J]. Meteor Mon, 36(8): 40-46 (in Chinese).

韩颂雨,司波,勾亚彬,等,2023.一次飑前降雹超级单体分裂过程的雷达回波及流场特征分析[J].气象学报,81(3):430-444. Han S Y, Si B, Gou Y B, et al, 2023. Analysis on radar echo and airflow fields of a splitting hail-producing supercell ahead of a squall line[J]. Acta Meteor Sin, 81(3): 430-444 (in Chinese).

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. He B W, Hu Z J, Gao W, et al, 2018. Statistical analysis about severe hailstorm TBSS in Changde Doppler weather radar[J]. Meteor Mon, 44(3): 455-462 (in Chinese).

胡胜,罗聪,张羽,等,2015.广东大冰雹风暴单体的多普勒天气雷达特征[J].应用气象学报,26(1):57-65. Hu S, Luo C, Zhang Y, et al, 2015. Doppler radar features of severe hailstorms in Guangdong Province[J]. J Appl Meteor Sci, 26(1): 57-65 (in Chinese).

雷瑜,黄武斌,黎倩,等,2022.不同天气分型下甘肃河东地区强冰雹天气多普勒雷达产品特征[J].干旱气象,40(2):234-243. Lei Y, Huang W B, Li Q, et al, 2022. Characteristics of Doppler radar products of strong hails under different weather classification in Hedong Region of Gansu Province[J]. J Arid Meteor, 40(2): 234-243 (in Chinese).

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. Liao Y F, Yu X D, Guo Q, 2003. Case study of a series of severe convective storms based on China New Generation (Doppler) Weather Radar data[J]. J Appl Meteor Sci, 14(6): 656-662 (in Chinese).

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. Liao Y F, Yu X D, Wu L L, et al, 2007. Statistic and case studies on radar three body scattering of severe hailstorm[J]. Plateau Meteor, 26(4): 812-820 (in Chinese).

麻服伟,2007.哈尔滨强冰雹雷达回波特征[J].气象,33(2):88-92. Ma F W, 2007. Radar echo characteristics of a strong convection in Harbin on June 18, 2003[J]. Meteor Mon, 33(2): 88-92 (in Chinese).

潘佳文,高丽,魏鸣,等,2021.基于 S 波段双偏振雷达观测的雹暴偏振特征分析[J].气象学报,79(1):168-180. Pan J W, Gao L, Wei M, et al, 2021. Analysis of the polarimetric characteristics of hail storm from S band dual polarization radar observations[J]. Acta Meteor Sin, 79(1): 168-180 (in Chinese).

潘佳文,魏鸣,郭丽君,等,2020.闽南地区大冰雹超级单体演变的双偏振特征分析[J].气象,46(12):1608-1620. Pan J W, Wei M, Guo L J, et al, 2020. Dual-polarization radar characteristic analysis of the evolution of heavy hail supercell in southern Fujian[J]. Meteor Mon, 46(12): 1608-1620 (in Chinese).

汤兴芝,俞小鼎,姚瑶,等,2023.华东一次极端冰雹天气过程雷达回波特征的比较分析[J].高原气象,42(4):1078-1092. Tang X Z, Yu X D, Yao Y, et al, 2023. Comparative analysis of radar echo characteristics of an extreme hail storm process in East China[J]. Plateau Meteor, 42(4): 1078-1092 (in Chinese).

王萍,杜雪峰,徐考基,2014.天气雷达反射率因子图像中三体散射自动识别[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),47(8):711-718. Wang P, Du X F, Xu K J, 2014. Automatic identification of

- three-body scatter spike in the Doppler radar reflectivity image[J]. J Tianjin Univ (Sci Technol), 47(8): 711-718(in Chinese).
- 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[J]. 气象, 40(11): 1380-1388. Wang X J, Xia W M, Duan H, et al, 2014. The application research of three-body scatter spike (TBSS) in C-band weather radar[J]. Meteor Mon, 40(11): 1380-1388(in Chinese).
- 王晓君, 郑媛媛, 2022. 普洱市不同等级冰雹天气的雷达回波特征对比分析[J]. 气象, 48(7): 868-877. Wang X J, Zheng Y Y, 2022. Comparative analysis of radar echo characteristics of different grades of hail weather in Pu'er[J]. Meteor Mon, 48(7): 868-877 (in Chinese).
- 夏凡, 龚佃利, 潘佳文, 等, 2023. 双偏振雷达水凝物分类算法优化及在雹暴云的应用分析[J]. 气象, 49(11): 1343-1358. Xia F, Gong D L, Pan J W, et al, 2023. The hydrometeor classification optimum algorithm for polarimetric radar and its application for the hailstorm cloud[J]. Meteor Mon, 49(11): 1343-1358 (in Chinese).
- 杨吉, 郑媛媛, 徐芬, 2020. 江淮地区一次冰雹过程的双线偏振雷达观测分析[J]. 气象学报, 78(4): 568-579. Yang J, Zheng Y Y, Xu F, 2020. An analysis of a hail case over the Yangtze and Huai River Basin based on dual-polarization radar observations[J]. Acta Meteor Sin, 78(4): 568-579(in Chinese).
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等, 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. Principle and Application of Doppler Weather Radar[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕, 2001. 雷达气象学: 2版[M]. 北京: 气象出版社. Zhang P C, Du B Y, Dai T P, 2001. Radar Meteorology [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 张曦, 黄兴友, 刘新安, 等, 2022. 北京大兴国际机场相控阵雷达强对流天气监测[J]. 应用气象学报, 33(2): 192-204. Zhang X, Huang X Y, Liu X A, et al, 2022. The hazardous convective storm monitoring of phased-array antenna radar at Daxing International Airport of Beijing[J]. J Appl Meteor Sci, 33(2): 192-204(in Chinese).
- 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. Zhou H, Duan W, Zhao S, et al, 2014. Characteristics analysis of Doppler radar echoes and lightning of hailstorms in Central Yunnan Province [J]. Meteor Mon, 40(9): 1132-1144(in Chinese).
- 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. Zhu M H, Yu X D, Xia F, et al, 2006. Analysis on strong hail storm three-body scattering signature using Doppler weather radar data[J]. J Appl Meteor Sci, 17(2): 215-223(in Chinese).
- Blair S F, Deroche D R, Boustead J M, et al, 2011. A radar-based assessment of the detectability of giant hail[J]. Electron J Severe Storms Meteor, 6(7): 1-30.
- Carbunaru D V, Sasu M, Burcea S, et al, 2014. Detection of hail through the three-body scattering signatures and its effects on radar algorithms observed in Romania[J]. Atmosfera, 27(1): 21-34.
- Donavon R A, Jungbluth K A, 2007. Evaluation of a technique for radar identification of large hail across the Upper Midwest and Central Plains of the United States[J]. Wea Forecasting, 22(2): 244-254.
- Hubbert J C, Bringi V N, 2000. The effects of three-body scattering on differential reflectivity signatures[J]. J Atmos Oceanic Technol, 17(1): 51-61.
- Kumjian M R, 2013. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part III: artifacts[J]. J Operational Meteor, 1(21): 265-274.
- Lemon L R, 1998. The radar "three-body scatter spike": an operational large-hail signature[J]. Wea Forecasting, 13(2): 327-340.
- Lindley T T, Lemon L R, 2007. Preliminary observations of weak three-body scatter spikes associated with low-end severe hail [J]. Electron J Severe Storms Meteor, 2(3): 1-15.
- Mahale V N, Zhang G F, Xue M, 2014. Fuzzy logic classification of S-band polarimetric radar echoes to identify three-body scattering and improve data quality[J]. J Appl Meteor Climatol, 53(8): 2017-2033.
- Montopoli M, Picciotti E, Baldini L, et al, 2021. Gazing inside a giant-hail-bearing Mediterranean supercell by dual-polarization Doppler weather radar[J]. Atmos Res, 264: 105852.
- 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.
- Zrnić D S, Zhang G, Melnikov V, et al, 2010. Three-body scattering and hail size[J]. J Appl Meteor Climatol, 49(4): 687-700.

(本文责编: 何晓欢)