

桑友伟,孟蕾,谭佳,等,2026. S 波段双偏振天气雷达旁瓣回波特征分析[J]. 气象,52(8):986-998. Sang Y W, Meng L, Tan J, et al, 2026. Analysis of sidelobe echo characteristics of S-band dual-polarization weather radar[J]. Meteor Mon, 52(8):986-998 (in Chinese).

S 波段双偏振天气雷达旁瓣回波特征分析^{*}

桑友伟^{1,2} 孟蕾^{1,2} 谭佳³ 唐佳^{1,4} 龙敏⁵

1 气象防灾减灾湖南省重点实验室,长沙 410118

2 中国气象局气象干部培训学院湖南分院,长沙 410125

3 湖南省保靖县气象局,保靖 416500

4 湖南省气象台,长沙 410118

5 湖南省永顺县气象局,永顺 416700

提 要: 为了对 S 波段双偏振天气雷达的旁瓣回波进行量化研究,基于 2021—2025 年湖南长沙、郴州、常德、湘西、怀化共 5 部 SAD 型多普勒双偏振天气雷达的平面位置显示(PPD)图像资料,人工筛选 445 个旁瓣回波样本,提取其水平反射率因子(Z_H),差分反射率因子(Z_{DR}),相关系数(CC)和差分传播相移率(K_{DP})等 4 类产品数值构建数值矩阵,统计分析旁瓣回波的空间分布特征和各类产品平均数值特征。结果表明:旁瓣回波在雷达极坐标系中呈东西均匀、南少北多分布,出现频数最高的区域集中在雷达静锥区至 100 km 范围和 3.0~4.0 km 融化层高度;旁瓣回波在 PPI 图像上集中出现在强回波中心径向距离 ± 6 km、方位角 $4^\circ\sim 40^\circ$ 范围内,最高频数位于与强回波中心相同径向距离、侧向 $12^\circ\sim 13^\circ$ 方位角的位置;75%的旁瓣回波 $Z_H\leq 8.0$ dBz、 $Z_{DR}\leq 0.56$ dB、 $CC\leq 0.92$,其中 Z_H 出现在 0~5 dBz、 Z_{DR} 出现在 0~1 dB、CC 出现在 0.9~1.0 的频数分别为最高;虽然旁瓣回波的雷达双偏振参量低值特征显著,但是在方位角跨度 $\geq 30^\circ$ 的旁瓣回波样本中,有 26.0%的样本末端存在 $Z_{DR}\geq 5$ dB 的特征。研究结果有助于提升旁瓣回波的识别效率,为未来实现旁瓣回波自动识别技术奠定基础。

关键词: 旁瓣回波,双偏振天气雷达,冰雹

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.112401

Analysis of Sidelobe Echo Characteristics of S-Band Dual-Polarization Weather Radar

SANG Youwei^{1,2} MENG Lei^{1,2} TAN Jia³ TANG Jia^{1,4} LONG Min⁵

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

2 Hunan Branch of CMA Training Centre, Changsha 410125

3 Baojing Meteorological Station of Hunan Province, Baojing 416500

4 Hunan Meteorological Observatory, Changsha 410118

5 Yongshun Meteorological Station of Hunan Province, Yongshun 416700

Abstract: To conduct a quantitative study on the sidelobe echoes of the S-band dual-polarization weather radar, based on the plan position indicator (PPI) data of five SAD-type doppler dual-polarization weather radars in Changsha, Chenzhou, Changde, Xiangxi and Huaihua in Hunan Province from 2021 to 2025, 445 sidelobe echo samples were manually screened in this study. On this basis, a numerical matrix was constructed and the values of sidelobe echoes from four types of products were extracted, including horizontal polarization reflectivity (Z_H), differential reflectivity (Z_{DR}), correlation coefficient (CC), and specific

^{*} 中国气象局气象干部培训学院重点项目(2025CMATCZDIAN21)和湖南省气象局 2024 年创新发展专项(CXFZ2024-FZZX46)共同资助

2025 年 7 月 21 日收稿; 2026 年 5 月 21 日收修定稿

第一作者:桑友伟,主要从事短时临近预报预警研究. E-mail:ywsang@163.com

differential phase (K_{DP}). Statistical analysis was conducted on the spatial distribution characteristics of sidelobe echoes and the average value characteristics of various products. The results show that the sidelobe echoes are evenly distributed in the east-west direction, with fewer echoes in the south and more in the north, in the radar polar coordinate system. The areas with the highest occurrence frequency of sidelobe echoes are concentrated in the range from the radar static cone area to 100 km and at the melting layer height of 3.0–4.0 km. The sidelobe echoes mainly appear within the range of ± 6 km in radial distance from the high echo core and 4° – 40° in azimuth, and the highest frequency is located at the same radial distance as the high echo core and 12° – 13° azimuth on the lateral side. The sidelobe echoes have significant low-value characteristics in radar polarization parameters. 75% of the sidelobe echoes exhibit $Z_H \leq 8.0$ dBz, $Z_{DR} \leq 0.56$ dB, and $CC \leq 0.92$, with Z_H most frequently occurring in 0–5 dBz, Z_{DR} in 0–1 dB, and CC in 0.9–1.0. Although the low values of polarimetric radar variables in sidelobe echoes are distinct, 26.0% of the samples with azimuthal spans $\geq 30^\circ$ exhibit a terminal $Z_{DR} \geq 5$ dB. The research results are conducive to improving the identification efficiency of sidelobe echoes and are a valuable basis for future's automatic identification of sidelobe echoes.

Key words: sidelobe echo, dual-polarization weather radar, hail

引言

天气雷达是监测灾害性天气的利器,它由发射机发射电磁波能量探测天气系统,接收机接收天气系统产生的后向散射能量,当返回的能量强度高于雷达接收机最小可测功率时,天气系统可显示在回波图像上(张培昌等,2001)。在理想情况下,雷达天线可将全部电磁能量汇聚成单一方向的高指向性波束进行辐射。而在实际工作状态下,虽然绝大部分电磁波能量可集中向某一个方向辐射出去,但也有极少部分电磁波能量向其他方向辐射出去。集中在两个半功率点方向所夹区域内的绝大部分辐射称为主瓣,其余方向的辐射称为旁瓣。

虽然旁瓣中发射/接收的功率通常与主瓣内的功率相差几个数量级,但当雷达接收机接收到旁瓣返回的信号时,有可能对真实的弱降水回波形成干扰(Nai et al, 2020),影响雷达定量估测降水的准确性(Hu et al, 2023)或者雷达径向速度图上对龙卷的识别(Bentley et al, 2021; Boettcher and Bentley, 2022)。因此,研究人员采用了多种方法对旁瓣回波进行抑制:Fowle(1964)、Brandon(1973)设计非线性调频(NLFM)波形,并与窗函数加权方法相结合;Argenti and Facheris(2021)采用二次非线性优化方法,设计发射波形和接收滤波器;Hu et al(2023)在总结前人研究的基础上,采用主成分提取方法进一步改善雷达弱信号的估测,消除位于雷达图像边缘

的旁瓣回波。目前的主流算法已能有效抑制一般情况下的旁瓣回波,通常可在雷达回波图像中将其消除,但遇到云中冰雹形成区这类强散射目标物时,旁瓣回波会和主瓣回波同时显示(Doviak and Zrnić, 1993; Bringi and Chandrasekar, 2001; 廖玉芳等, 2008)。Friedrich and Hagen(2004)认为,只有当目标的反射率因子超过 50 dBz 时,旁瓣才会对雷达数据产生显著影响。在反射率因子平面位置显示(PPI)图像上,主瓣回波通常显示为强回波中心,旁瓣回波显示为位于强回波中心侧面、与其径向距离相等的狭长弱回波带(廖玉芳等, 2008);在距离高度显示产品(RHI)图像上,旁瓣回波显示为位于强回波中心顶端的尖顶回波(麻服伟, 2007)。

旁瓣回波因此成为了天气雷达预警大冰雹的重要回波图像之一。何炳文等(2020)对湖南 5 次强冰雹事件的 159 个旁瓣回波样本开展深入分析,发现 S 波段天气雷达的旁瓣回波可以作为强冰雹预报预警的充分依据。周泓等(2014)、陈瑞敏等(2021)、刘瑾等(2022)、唐佳等(2023)和汤兴芝等(2023)对冰雹个例的研究发现,在产生大冰雹的超级单体雷达回波图像中,强回波中心附近通常会伴有显著的旁瓣回波特征。随着我国多普勒天气雷达双极化改造的进行,江慧远等(2019)、张羽等(2023)、袁韬等(2024)和杨湘婧等(2025)研究发现,强冰雹个例双偏振雷达图像上的旁瓣回波具有两个典型特征:低差分反射率因子(Z_{DR})值和低相关系数(CC)。但目前的研究仅限于定性描述,尚未对旁瓣回波的双偏

振特征进行精确的定量化分析,这可能影响到预报员对雷达图像的解读(Nai et al,2020),因此对旁瓣回波的双偏振特征进行量化研究具有重要意义。

本研究基于 2021—2025 年湖南强冰雹个例的多普勒双偏振天气雷达产品资料,筛选旁瓣回波样本,提取旁瓣回波双偏振产品数值构建数值矩阵,统计分析旁瓣回波空间和数值分布特征,有助于提升旁瓣回波的识别效率,为未来实现旁瓣回波自动识别技术奠定基础。需要说明的是,考虑到所用雷达均采用 PPI 扫描模式,且后续旁瓣回波识别主要基于 PPI 图像,因此本研究重点分析 PPI 图像上旁瓣回波的特征。

1 数据来源

所用资料为 2021—2025 年湖南 7 个强冰雹个例及相关多普勒双偏振天气雷达产品数据(表 1),包括长沙、郴州、常德、湘西、怀化共 5 部 SAD 型雷达的水平反射率因子(Z_H)、差分反射率因子(Z_{DR})、相关系数(CC)和差分传播相移率(K_{DP})产品的 PPI 图像资料。其中长沙、郴州雷达产品包括 0.5° 、 1.5° 、 2.4° 、 3.4° 、 4.3° 、 6.0° 等 6 个仰角,常德、湘西、怀化雷达产品包括 0.5° 、 1.5° 、 2.4° 、 3.3° 、 4.3° 、 5.2° 、 6.2° 、 7.5° 、 8.7° 等 9 个仰角。雷达产品资料由

表 1 2021—2025 年湖南 7 个强冰雹个例及其观测雷达测试信息
Table 1 Information of seven severe hail cases in Hunan Province from 2021 to 2025

日期(年-月-日)	出现冰雹地点	冰雹最大直径/cm	观测雷达	雷达天线第一旁瓣电平/dB	雷达天线远端旁瓣电平($\pm 10^\circ$ 之外)/dB	功率增益/dB
2021-5-7	宜章县、永兴县、汝城县	2	郴州	水平: -27.03 垂直: -30.01	水平: ≤ -40.0 垂直: ≤ -40.0	水平: 44.99 垂直: 45.14
2021-5-9	耒阳市、常宁市	2				
2021-5-11	嘉禾县、桂阳县	5				
2021-5-16	永兴县、苏仙区	2				
2021-5-10	浏阳市、宁乡市	8	长沙	水平: -27.08 垂直: -29.26	水平: ≤ -40.0 垂直: ≤ -40.0	水平: 44.63 垂直: 44.62
2023-11-9	湘乡市、宁乡市、长沙市	5				
2025-3-2	凤凰县、保靖县	6	湘西	水平: ≤ -29.0 垂直: ≤ -29.0	水平: ≤ -42.0 垂直: ≤ -42.0	水平: 44.94 垂直: 44.86
			怀化	水平: -33.33 垂直: -33.33	水平: ≤ -40.0 垂直: ≤ -40.0	水平: 45.20 垂直: 45.20
			常德	水平: -30.55 垂直: -30.08	水平: ≤ -42.0 垂直: ≤ -42.0	水平: 44.81 垂直: 44.96
	南县、沅江市、安化县、岳阳市	5				

中国气象局气象探测中心 ROSE 系统转换雷达基数据生成,ROSE 系统在转换过程中采用了杂波过滤、干扰过滤、超折射过滤、亮带订正、遮挡补偿、衰减订正、差分传播相移率订正等多种质量控制手段。5 部雷达天线系统第一旁瓣电平、远端旁瓣电平和功率增益的测试信息如表 1 所示。5 部雷达方位角分辨率均为 1° ,径向距离分辨率均为 1 km。本文所用时间均为北京时。

2 旁瓣回波形成原理与判定标准

2.1 旁瓣回波形成原理

在雷达接收电磁波生成的回波 PPI 图像上,以观测者立于雷达所在位置并朝向强回波中心为基准,来区分左旁瓣回波和右旁瓣回波。旁瓣回波形成过程如图 1 所示,天气雷达一般以顺时针方向在

某一仰角作方位扫描,当天线右旁瓣首先探测冰雹区时,其后向散射能量被雷达接收后会被误认为是主瓣产生的回波,主瓣此时所在方位和径向距离显示在雷达图像上,形成左旁瓣回波;随后天线主瓣探测冰雹区,其后向散射能量作为强回波中心显示在雷达图像主瓣所在位置;最后天线左旁瓣探测冰雹区时,其后向散射能量被雷达接收后会被误认为是主瓣产生的回波,主瓣此时所在方位和径向距离显示在雷达图像上,形成右旁瓣回波(廖玉芳等,2008;何炳文等,2020)。

以 2021 年 5 月 11 日 14:42 郴州雷达 4.3° 仰角 Z_H 产品 PPI 图像为例(图 2),强回波中心最大值为 73 dBz,其所在径向方向左右两侧出现旁瓣回波,同时径向方向外侧伴有三体散射长钉(TBSS)(Lemon, 1998;廖玉芳等,2007),旁瓣回波与 TBSS 均为虚假回波,两者在图像上呈“弯弓射箭”状态。

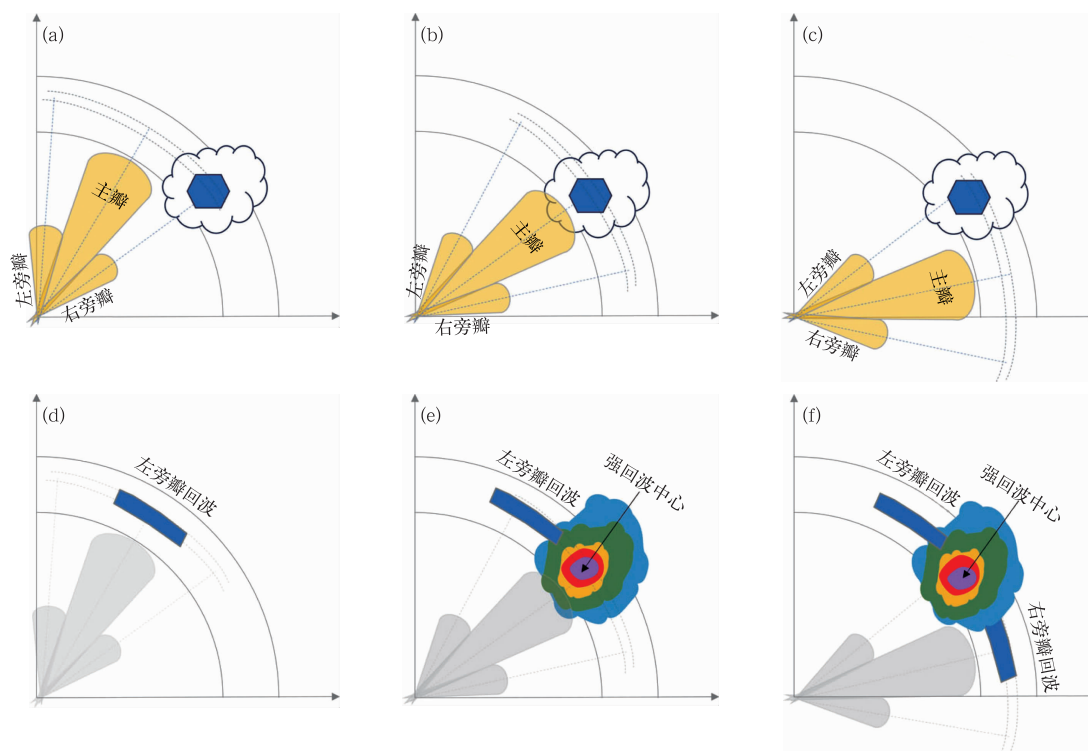
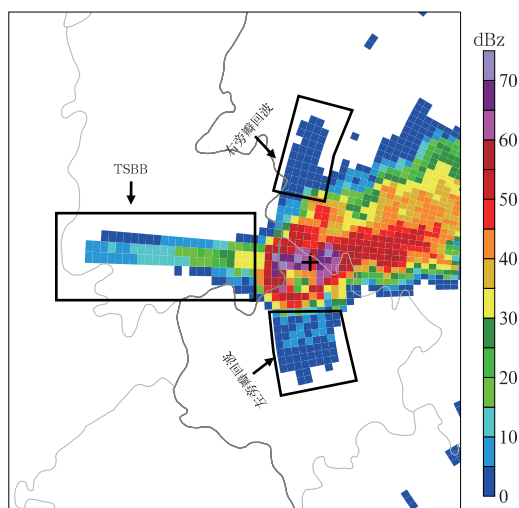


图 1 旁瓣回波形成原理示意图

(a~c) 3 种天线扫描状态, (d~f) 对应图 1a~1c 状态下旁瓣回波的形成过程

Fig. 1 Schematic diagram of sidelobe echo formation mechanism (a—c) antenna beam scanning conditions in three scenarios, (d—f) corresponding sidelobe echo formation processes

图 2 2021 年 5 月 11 日 14:42 郴州雷达 4.3° 仰角 Z_H 图像旁瓣回波Fig. 2 Sidelobe echoes in the Z_H image at 4.3° elevation of Chenzhou Radar at 14:42 BT 11 May 2021

2.2 旁瓣回波判定标准

本研究所用雷达的测试信息表明,雷达水平方

向上第一旁瓣电平约为 $-33.33 \sim -27.05$ dB,远端旁瓣电平为 ≤ -40 dB。由于雷达接收功率与天线增益的平方呈正比,因此,在基本反射率因子图像上,主瓣回波和旁瓣回波的强度差异由双程天线增益的差异决定(Doviak and Zrnić, 1993)。计算可得第一旁瓣[通常位于主瓣的 $\pm(1.0^\circ \sim 2.5^\circ)$]回波的反射率因子理论上应比主瓣回波低 54.10~66.66 dB,而远端旁瓣($\pm 10^\circ$ 之外)回波理论上比主瓣回波至少低 80 dB。由于雷达产品显示阈值为 -5 dBz,只有当主瓣探测到冰雹等散射能力强的目标时,其对应的旁瓣回波才有可能显示。当强回波中心为 60 dBz 时,这些旁瓣回波的基本反射率因子理论值通常低于 6 dBz,但由于雷达电磁波可能受到波束填充效应、地物杂波等影响,一般旁瓣回波通常会高于 6 dBz。廖玉芳等(2008)、何炳文等(2020)、汤兴芝等(2023)对旁瓣回波基本反射率因子 PPI 图像的描述和统计指标表明:旁瓣回波位于 60 dBz 及以上强回波中心的侧面,与其径向距离相等,强度一般不超过 20 dBz。

鉴于上述分析,本研究设定双偏振雷达水平反

射率因子图像上对旁瓣回波的判定标准为:(1) $Z_H \geq 60$ dBz 强回波中心侧面,与强回波中心等径向距离的 $Z_H \leq 20$ dBz 狭长弱回波带;(2)位于强回波中心左侧/右侧/左右双侧伸展的旁瓣回波分别称为左/右/双旁瓣回波。考虑到雷达实际探测中,旁瓣回波经常被真实降水回波完全覆盖或部分覆盖(刘瑾等, 2022;唐佳等, 2023)。因此在判定标准的基础上,进行如下规定:(1)当强回波中心可见,但附近存在大面积真实降水回波导致无法辨识出旁瓣回波,认为无旁瓣回波;(2)当旁瓣回波被真实降水回波部分覆盖时,仅将符合判定标准的回波区域作为旁瓣回波区域。

3 旁瓣回波分析方法

3.1 样本筛选

根据旁瓣回波判定标准,基于 2021—2025 年湖南 7 个强冰雹个例双偏振天气雷达 Z_H 产品 PPI 图像资料,人工筛选旁瓣回波样本,将同一 PPI 图像上不同强回波中心相关的旁瓣回波作为独立样本。共筛选出 445 个旁瓣回波样本,其中左旁瓣回波样本为 290 个,右旁瓣回波样本为 72 个,双旁瓣回波样本为 83 个。左旁瓣回波出现概率较高,占比为 65.2%,右旁瓣回波与双旁瓣回波出现概率接近,分别为 16.1%和 18.7%。

3.2 数值矩阵构建

为了客观定量分析旁瓣回波,参考王萍等(2014)、孟蕾等(2024)构建 TBSS 数值矩阵的方法,为每个旁瓣回波样本的 Z_H 、 Z_{DR} 、CC 和 K_{DP} 产品构建数值矩阵,主要包括 3 个步骤。

(1)确定强回波中心。设定雷达极坐标系中旁瓣回波相关的强回波中心方位角和径向距离分别为 α (单位:°)和 R (单位:km),点 $C(\alpha, R)$ 表示强回波中心位置。

(2)设定关注区域范围。廖玉芳等(2008)指出旁瓣回波弱回波带中心与高反射率因子核中心的夹角 $\geq 10^\circ$,并与强回波到雷达的距离相等。因此,为了尽可能提取到所有旁瓣回波特征,在 Z_H 、 Z_{DR} 、CC 和 K_{DP} 中选择方位角区间 $[\alpha - 50^\circ, \alpha + 50^\circ]$ 与径向距离区间 $[R - 12 \text{ km}, R + 12 \text{ km}]$ 所包含的范围作为

旁瓣回波关注区域 N (图 3)。

(3)构建数值矩阵。将关注区域的每个 $1^\circ \times 1 \text{ km}$ 格点 $N_{i,j}$ 上 Z_H 、 Z_{DR} 、CC 和 K_{DP} 旁瓣回波数值记录在 101×25 矩阵的对应位置 $Q_{i,j}$ 。

$$N_{i,j} (i \in [\alpha - 50^\circ, \alpha + 50^\circ] \\ j \in [R - 12 \text{ km}, R + 12 \text{ km}]) \quad (1)$$

$$Q_{i,j} (i \in [1, 101] \\ j \in [1, 25]) \quad (2)$$

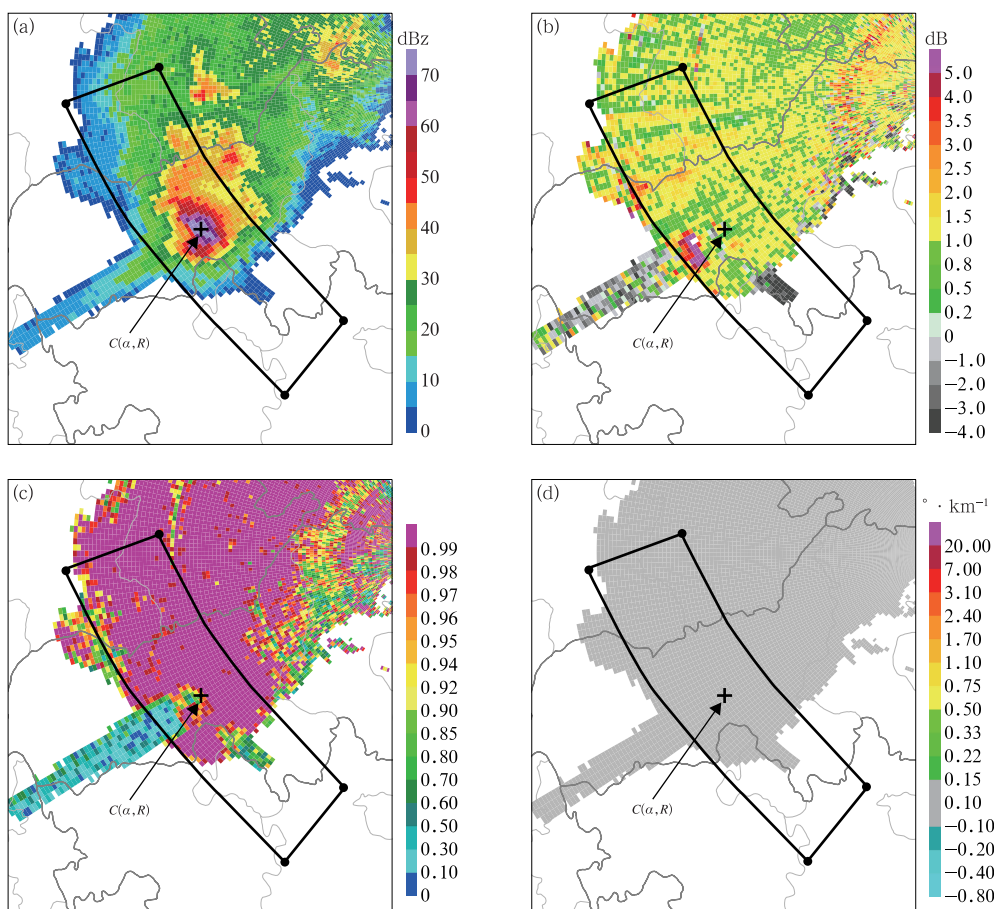
构建时,对于左旁瓣回波仅记录方位角在 $[\alpha - 50^\circ, \alpha]$ 的格点,对于右旁瓣回波仅记录方位角在 $[\alpha, \alpha + 50^\circ]$ 的格点,对于双侧旁瓣回波则记录方位角在 $[\alpha - 50^\circ, \alpha + 50^\circ]$ 的格点。为排除真实降水回波的干扰,在记录过程中,对于左旁瓣回波和右旁瓣回波,当在某一个径向距离 j 上, $Q_{i,j}$ 出现 $Z_H \leq 20$ dBz 后又出现 $Q_{i-1,j}$ 的 $Z_H > 20$ dBz 的情况时,则停止记录;对于双旁瓣回波,其两侧分别按同时出现左旁瓣回波和右旁瓣回波情况处理。

图 4 为 2023 年 11 月 9 日 06:04 长沙雷达左旁瓣回波样本的数值矩阵可视化图像,数值矩阵保留了强回波中心方位角在 $[\alpha - 50^\circ, \alpha]$ 的相应数值。通过构建旁瓣回波数值矩阵,使所有旁瓣回波样本无论位置、朝向和强弱,都转变成为大小一致的数值矩阵,便于后续开展统计分析。

值得说明的是,逐个分析旁瓣回波样本及其数值矩阵发现,尽管数值矩阵构建过程中滤除了 $Z_H > 20$ dBz 的真实降水回波,但依然可能受到 $Z_H \leq 20$ dBz 的弱真实降水回波的干扰,这一点在右旁瓣回波中体现得更加明显,这可能是廖玉芳等(2008)、何炳文等(2020)的研究中没有观测到右旁瓣回波或双旁瓣回波的原因之一。

3.3 统计分析

以旁瓣回波相关的强回波中心位置作为旁瓣回波的位置,提取所有样本强回波中心的方位角、径向距离和高度信息,统计分析旁瓣回波样本的空间分布特征。针对 Z_H 、 Z_{DR} 、CC 和 K_{DP} ,分别计算旁瓣回波数值矩阵中各个格点位置的平均值,得到平均值矩阵后进行量化分析;同时将每个旁瓣回波 Z_H 产品数值矩阵进行二值化处理后进行累加求和,得到旁瓣回波形态矩阵后分析旁瓣回波覆盖的格点情况。在二值化处理过程中,将 $Z_H \leq 20$ dBz 的格点赋值为 1,其他格点赋值为 0。



注：“+”为强回波中心，黑色边框范围为旁瓣回波关注区域，下同。

图 3 2023 年 11 月 9 日 06:04 长沙雷达左旁瓣回波样本(a) Z_H 、(b) Z_{DR} 、(c) CC 和(d) K_{DP} 图像

Fig. 3 Images of (a) Z_H , (b) Z_{DR} , (c) CC and (d) K_{DP} products of the left sidelobe echo samples from Changsha Radar at 06:04 BT 9 November 2023

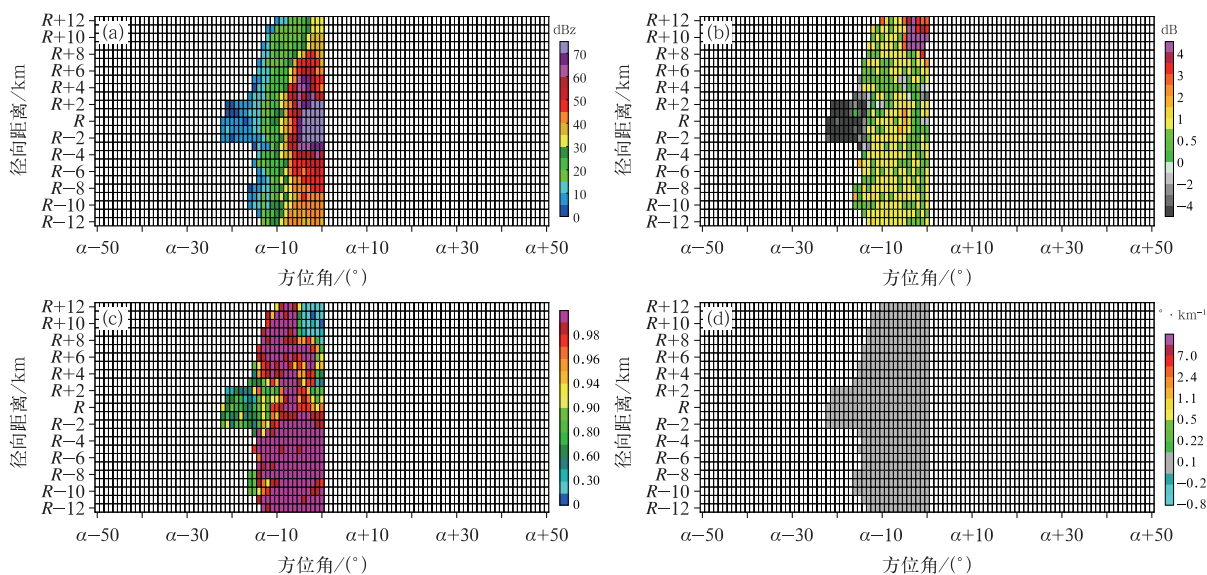


图 4 2023 年 11 月 9 日 06:04 长沙雷达左旁瓣回波样本(a) Z_H 、(b) Z_{DR} 、(c) CC 和(d) K_{DP} 数值矩阵可视化图像

Fig. 4 Visualization images of numerical matrices for (a) Z_H , (b) Z_{DR} , (c) CC and (d) K_{DP} of left sidelobe echo samples from Changsha Radar at 06:04 BT 9 November 2023

4 旁瓣回波特征

4.1 旁瓣回波空间分布特征

4.1.1 旁瓣回波方位分布特征

旁瓣回波在雷达极坐标系中总体呈现东西均匀、南少北多的分布特征(表 2)。位于雷达 0°~180°、180°~359°方位的旁瓣回波频数分别占总数的 49.2%、50.8%;位于雷达 90°~270°、270°~90°方位的旁瓣回波分别占总数的 39.8%、60.2%。不同类型旁瓣回波方位分布呈现显著差异。左旁瓣回波

分布在雷达 0°~180°、180°~359°方位的占比分别是 52.0%和 48.0%,分布在雷达 90°~270°、270°~90°方位的占比分别是 24.8%和 75.2%;右旁瓣回波分布在雷达 0°~180°、180°~359°的占比分别是 76.4%和 23.6%,分布在雷达 90°~270°、270°~90°方位的占比分别是 79.2%和 20.8%;双旁瓣回波分布在雷达 0°~180°、180°~359°的占比分别是 15.7%和 84.3%,分布在雷达 90°~270°、270°~90°方位的占比分别是 57.8%和 42.2%。总体而言,左旁瓣回波主要集中在北部,东西分布均匀;右旁瓣回波主要集中在东部和南部;双旁瓣回波主要集中在西部,南北分布均匀。

表 2 2021—2025 年湖南 7 个强冰雹个例旁瓣回波中心在不同方位角区间的分布(单位:个)

Table 2 Distribution of sidelobe echo centers in different azimuth intervals of seven severe hail cases in Hunan Province from 2021 to 2025 (unit: count)								
类型	0°~45°	45°~90°	90°~135°	135°~180°	180°~225°	225°~270°	270°~315°	315°~359°
左旁瓣回波	84	35	19	13	1	39	51	48
右旁瓣回波	6	9	38	2	7	10	0	0
双旁瓣回波	6	2	5	0	24	19	27	0
合计	96	46	62	15	32	68	78	48

旁瓣回波的方位分布特征与雹暴空间分布密切相关。湖南冰雹天气主要出现在春季(3—5 月)和秋季(9—11 月),这两个季节冷暖空气团多在湖南北部交汇,使得雹暴系统主要生成并活动于雷达探测范围的偏北方向,从而导致雷达观测中旁瓣回波呈现出明显的南少北多分布特征。根据旁瓣回波形成原理,强回波中心左右两侧应均可观测到旁瓣回波,但是不同类型旁瓣回波在空间分布上出现了显著差异,这与我国处于中纬度西风带有关。受引导气流偏西风影响,对流风暴中降水粒子产生的雷达回波多向偏东方向延展,位于雷达北部的风暴容易被遮挡右旁瓣回波而露出左旁瓣回波;位于雷达南部的风暴容易被遮挡左旁瓣回波而露出右旁瓣回波;位于雷达西部的风暴则容易露出双旁瓣回波(图 5)。

4.1.2 旁瓣回波径向分布特征

统计表明,旁瓣回波在雷达静锥区边缘至 230 km 内均可出现(表 3),33.9%的旁瓣回波出现在雷达径向距离<50 km 内,51.2%的旁瓣回波出现在雷达径向距离 50~100 km 内,表现出先随径向距离增加而增加,到 50~100 km 达到最高值,然后再随

径向距离增加而减小。左旁瓣回波和右旁瓣回波在 50~100 km 出现频数最高,双旁瓣回波在静锥区边缘至 50 km 出现频数最高。这主要是由于雷达探测对流风暴的最佳径向距离范围为 20~110 km(俞小鼎等,2006)。

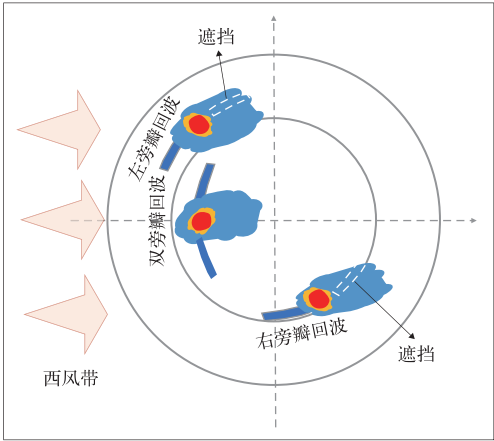


图 5 不同类型旁瓣回波空间分布与盛行西风关系示意图
Fig. 5 Schematic diagram of relationship between the spatial distribution of different types of sidelobe echoes and the prevailing westerly winds

表 3 2021—2025 年湖南 7 个强冰雹个例旁瓣回波中心所在不同径向距离区间的分布(单位:个)

Table 3 Distribution of sidelobe echo centers in different radial distance intervals of seven severe hail cases in Hunan Province from 2021 to 2025 (unit: count)

类型	<50 km	50~100 km	100~150 km	150~200 km	200~230 km
左旁瓣回波	86	154	48	2	0
右旁瓣回波	21	41	0	8	2
双旁瓣回波	44	33	2	0	4
合计	151	228	50	10	6

4.1.3 旁瓣回波随高度分布特征

旁瓣回波出现的最大高度为 8.8 km,最低高度为 0.9 km,平均高度为 4.1 km。72.4%的旁瓣回波出现在 2.0~6.0 km 高度,其中在 3.0~4.0 km 附近出现频数最高,然后向上向下迅速递减(图 6)。这是因为所选个例时段为春秋季节,环境大气 0℃ 层高度在 3.0~4.0 km,冰雹在下落过程中经过融化层附近时,冰雹外层融化,形成水膜,散射能力增强,旁瓣回波更容易被观测到。

4.2 旁瓣回波形态特征

旁瓣回波形态矩阵显示,出现在强回波中心左侧和右侧的旁瓣回波分别为 373 个和 155 个(图 7)。旁瓣回波出现频数自强回波中心向左右两侧方向先增加后减小。90%的左旁瓣回波出现在强回波中心侧面 $[\alpha-40^{\circ},\alpha-4^{\circ}]$ 方位,最高频数(285 个)位于 $\alpha-13^{\circ}$ 方位角;90%的右旁瓣回波出现在强回波中心侧面 $[\alpha+4^{\circ},\alpha+44^{\circ}]$ 方位,最高频数(91 个)位于 $\alpha+12^{\circ}$ 方位角。90%的左旁瓣回波出现在

强回波中心径向距离 $[R-6\text{ km},R+7\text{ km}]$ 区间,最高频数出现在 R 上;90%的右旁瓣回波出现在强回波中心径向距离 $[R-7\text{ km},R+7\text{ km}]$ 区间,最高频数也出现在 R 上。

廖玉芳等(2008)分析旁瓣回波与强回波中心方位角关系时指出左旁瓣回波位置与强回波区位置夹

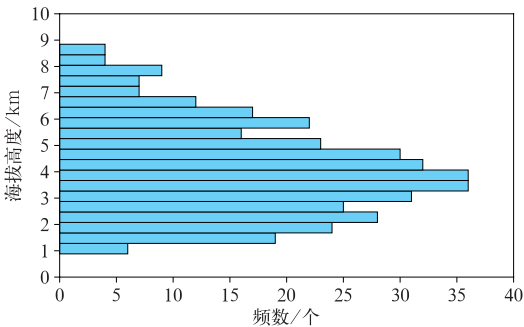


图 6 2021—2025 年湖南 7 个强冰雹个例旁瓣回波随高度分布特征

Fig. 6 Distribution characteristics of sidelobe echoes with height of seven severe hail cases in Hunan Province from 2021 to 2025

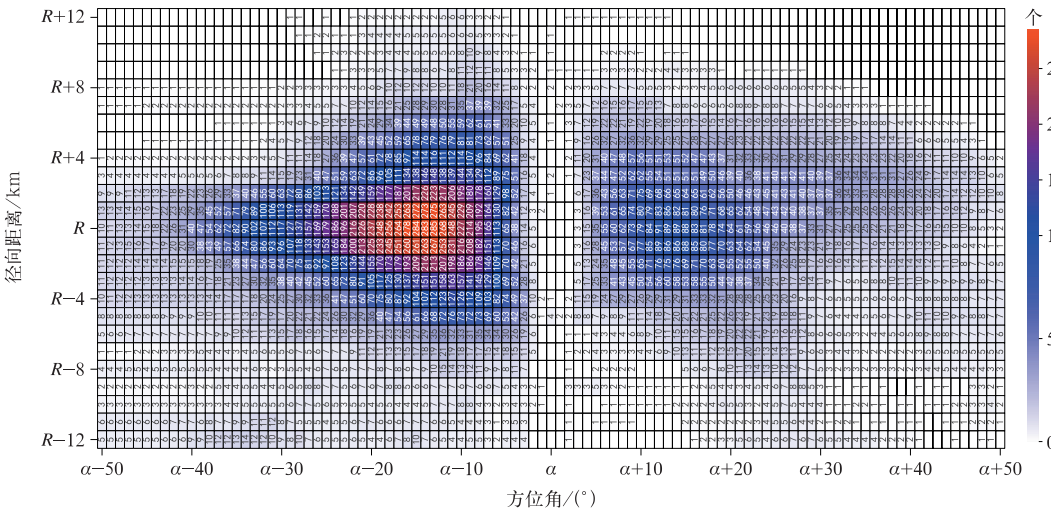


图 7 2021—2025 年湖南 7 个强冰雹个例旁瓣回波形态矩阵统计特征

Fig. 7 Statistical characteristics of sidelobe echo morphological matrix of seven severe hail cases in Hunan Province from 2021 to 2025

角在 10° 或以上,何炳文等(2020)研究发现旁瓣回波切向长度与雷达站形成的夹角通常为 $2^\circ \sim 12^\circ$,本研究中 90% 以上的旁瓣回波出现在强回波中心 ± 6 km 的径向距离、侧向 $4^\circ \sim 40^\circ$ 的方位角范围内,与前人研究结论相比,该方位角范围更为宽广。其中旁瓣回波出现频数最高的区域位于与强回波中心相同径向距离、侧向 $12^\circ \sim 13^\circ$ 方位角的位置,这一结论与前人研究结果相近。

4.3 旁瓣回波双偏振参量特征

4.3.1 旁瓣回波双偏振参量平均值特征

根据旁瓣回波形态矩阵特点,并考虑到在强回波中心径向外侧方向可能存在 TBSS 等弱回波干扰,选取方位角 $[\alpha - 50^\circ, \alpha + 50^\circ]$ 、径向距离 $[R - 6 \text{ km}, R + 6 \text{ km}]$ 研究旁瓣回波各双偏振参量平均值矩阵(图 8)发现, Z_H 自强回波中心向左右两侧迅速下降至 $\leq 15 \text{ dBz}$, 强回波中心左侧 $[\alpha - 10^\circ, \alpha]$ 、右侧 $[\alpha, \alpha + 15^\circ]$ 内均存在明显的梯度大值区,左侧 $[\alpha - 50^\circ, \alpha - 10^\circ]$ 内、右侧 $[\alpha + 15^\circ, \alpha + 50^\circ]$ 内 Z_H 位于 $-5 \sim 15 \text{ dBz}$, 右侧变化速率小于左侧。 Z_{DR} 自强回波中心向左右两侧呈现显著波动,在 $[\alpha - 20^\circ, \alpha]$ 和 $[\alpha, \alpha + 20^\circ]$ 迅速降低至 $\leq -1 \text{ dB}$, 在 $\alpha \pm 35^\circ$ 位置出现 $0 \sim 2 \text{ dB}$ 的极大值,且右侧极大值高于左侧,然后再迅速降低至 $< 0 \text{ dB}$ 。 CC 在强回波中心左侧 $[\alpha - 20^\circ, \alpha]$ 区间由 > 0.95 迅速减至 < 0.6 , $[\alpha - 20^\circ, \alpha - 50^\circ]$ 区间内位于 $0.4 \sim 0.7$, 右侧相对左侧减速较慢,直到 $\alpha + 35^\circ$ 才下降至 0.6 , 随后继续下降至 ≤ 0.5 。由

于雷达产品算法中当 $CC < 0.9$ 时, K_{DP} 在图像上为 $0^\circ \cdot \text{km}^{-1}$, 对于 $CC < 0.9$ 的旁瓣回波, K_{DP} 图像上仅显示其区域, 数值为 $0^\circ \cdot \text{km}^{-1}$, 因此可不再讨论旁瓣回波的 K_{DP} 数值情况。

本研究所涉及的 5 部雷达, 能在 PPI 图像上显示回波的旁瓣与主瓣的夹角不超过 10° , 那么理论上旁瓣回波与主瓣回波的无叠加区应为旁瓣回波的末端不超过 10° 的范围, 其余方位角范围均为旁瓣回波和主瓣回波的叠加区。由于旁瓣回波较弱, 与主瓣回波叠加时几乎不会影响主瓣回波的数值, 比如水平反射率因子为 50 dBz 的主瓣回波叠加 -4 dBz 的旁瓣回波后几乎没有变化。但是如果 -4 dBz 出现在晴空或与弱回波叠加, 则会成为 -4 dBz 的虚假回波或小幅度增强弱回波区。因此旁瓣回波双偏振参量平均值特征(图 8)显示自强回波中心向两侧的回波梯度比较大, Z_H 和 CC 数值自强回波中心向外呈现近乎单调递减的情况, 尤其是 CC 作为表征水平偏振信号和垂直偏振信号相似程度的参量(胡明宝, 2016), 迅速地降低为 0.9 之下, 而旁瓣回波的 Z_{DR} 数值则呈现独特的“先负后正”的振荡, 这可能是旁瓣与主瓣信号混合和不同散射体极化特性差异共同作用的结果(Kumjian, 2013)。

4.3.2 旁瓣回波双偏振参量分位数特征

为减少真实降水回波对旁瓣回波数值量化的干扰, 进一步明确 3 类双偏振产品分位数特征, 根据形态矩阵中强回波中心位于 $[\alpha - 4^\circ, \alpha + 4^\circ]$ 的分析结果, 在方位角 $[\alpha - 50^\circ, \alpha - 4^\circ] \cup [\alpha + 4^\circ, \alpha + 50^\circ]$ 、径

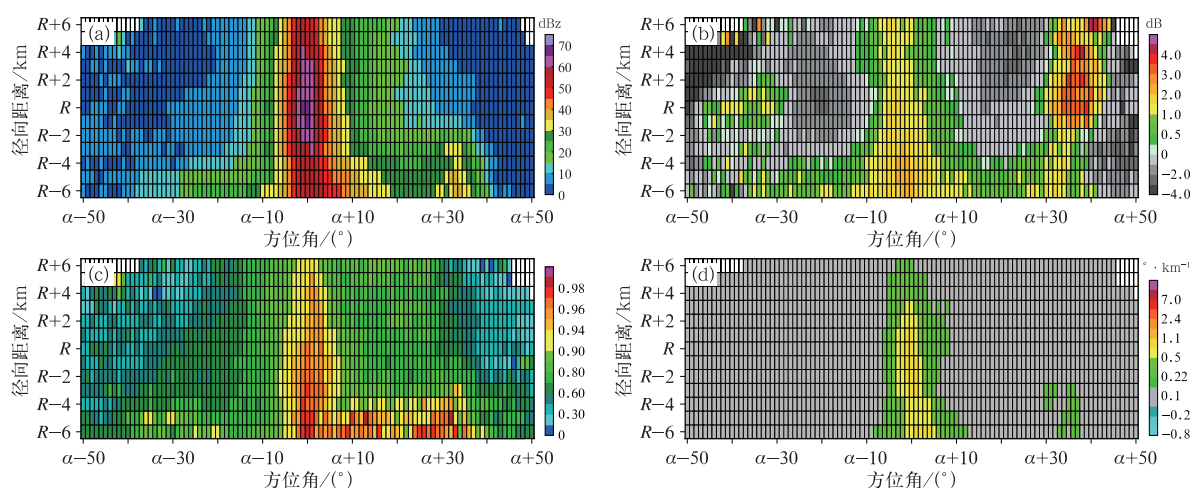


图 8 2021—2025 年湖南 7 个强冰雹个例旁瓣回波的 (a) Z_H , (b) Z_{DR} , (c) CC 和 (d) K_{DP} 产品平均值矩阵可视化图像

Fig. 8 Visualization images of average value matrices for (a) Z_H , (b) Z_{DR} , (c) CC and (d) K_{DP} products of sidelobe echoes of seven severe hail cases in Hunan Province from 2021 to 2025

向距离 $[R-6\text{ km}, R+6\text{ km}]$ 范围内,取每组样本 $Z_{\text{H}}\leq 20\text{ dBz}$ 的格点进行双偏振参量特征分位数(表 4)讨论。可见 Z_{H} 平均值大于中位数,且 75%分位数与最大值相差较大,说明较高的 Z_{H} 值只出现在极少数格点。 Z_{DR} 平均值为负值,75%分位数与最大值相差约 7.25 dB,说明只有极少数格点出现 $Z_{\text{DR}}\geq 7\text{ dB}$ 的情况。CC 平均值与中位数接

近,与降水回波 CC 数值一般为 0.9~1.0(张林等, 2022)相比,旁瓣回波的 CC 数值是偏低的,其 25%分位数与最小值相差 0.665,说明虽然 CC 值较降水回波偏低,但并未出现极端低值情况。

4.3.3 旁瓣回波双偏振参量低值特征及其讨论

图 9 为旁瓣回波 3 类雷达产品在低值部分(即 $Z_{\text{H}}<20\text{ dBz}$)的分布。分析发现, Z_{H} 出现在 $[0,5)\text{ dBz}$

表 4 2021—2025 年湖南 7 个强冰雹个例 Z_{H} 、 Z_{DR} 和 CC 分位数

变量	平均值	最小值	25%分位数	中位值	75%分位数	最大值
Z_{H}/dBz	3.93	-11.50	-1.00	3.00	8.00	20.00
Z_{DR}/dB	-1.07	-7.81	-2.93	-0.93	0.56	7.81
CC	0.770	0.005	0.670	0.820	0.920	1.000

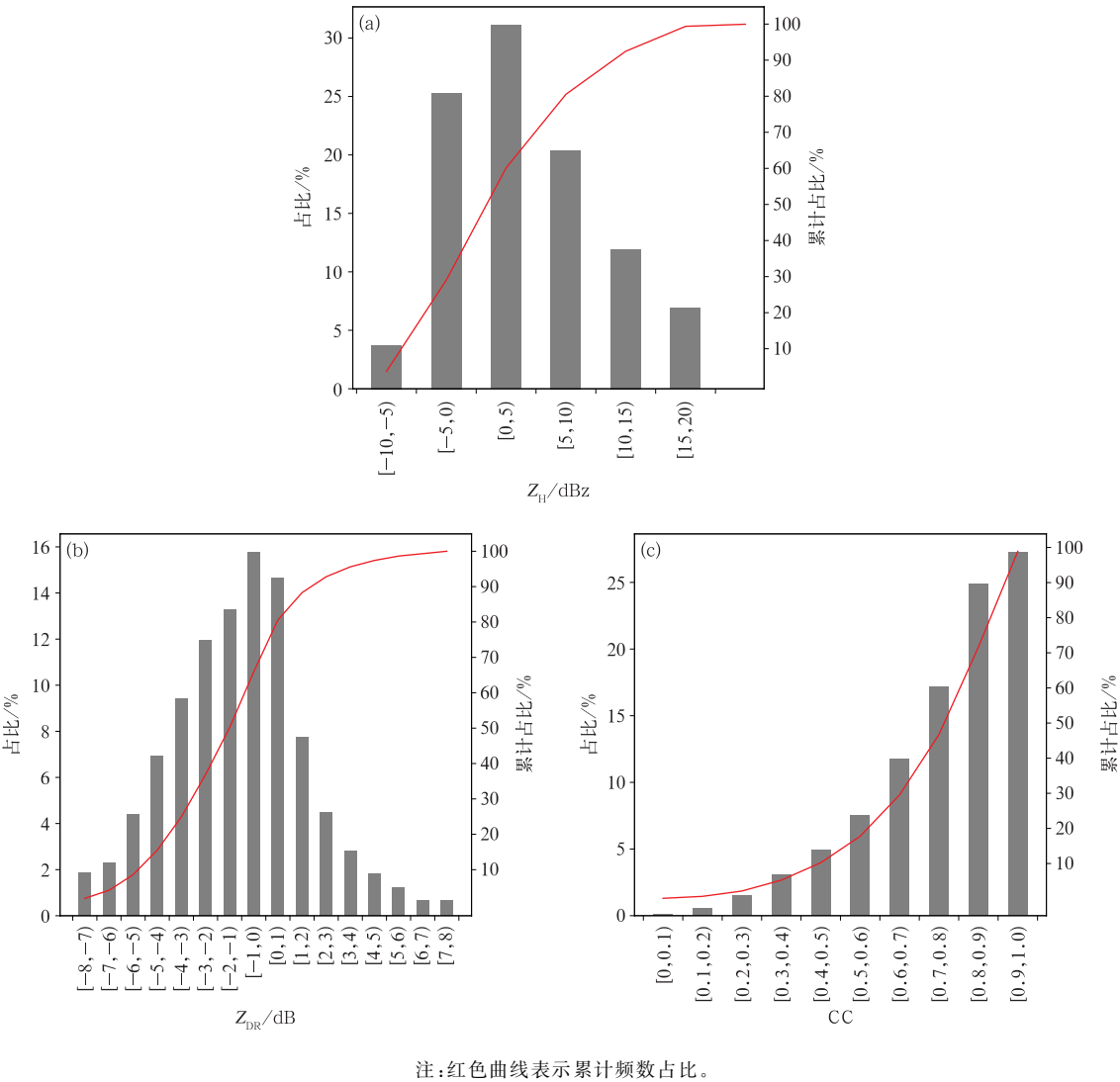


图 9 2021—2025 年湖南 7 个强冰雹个例旁瓣回波(a) Z_{H} 、(b) Z_{DR} 和(c)CC 产品低值部分分布
Fig. 9 Distribution of low-value parts in (a) Z_{H} , (b) Z_{DR} and (c) CC products of
sidelobe echoes of seven severe hail cases in Hunan Province from 2021 to 2025

区间的频数最高,其次为 $[-5,0)$ dBz 区间,出现在 $[-10,15)$ dBz 区间的累计频数占比达到 99.4%。 Z_{DR} 出现在 $[-1,0)$ dB 区间的频数最高,在 $[-8,0)$ dB 区间的累计频数占比达到 62.3%。CC 在 $[0.9,1.0)$ 区间的频数最高,在 $[0.6,0.9)$ 区间增长速率最快,在 $[0,0.9)$ 区间的累计频数占比达到 71.5%。

总体而言,旁瓣回波 Z_H 、 Z_{DR} 和 CC 数值主要集中在低值区,但是少数情况下, Z_{DR} 出现 7 dB 以上的高值,CC 出现 1.0 的高值,这些特征符合非降水回波特点。张林等(2022)认为在国产 CINRAD/SAD 双偏振雷达中,非降水回波相比降水回波数值范围更加宽泛,降水回波的 Z_{DR} 多为 0~2.5 dB,CC 多为 0.9~1.0;非降水回波的 Z_{DR} 为-7.5~7.5 dB,CC 为 0.1~1.0。Mahale et al(2014)认为与旁瓣回波同为虚假回波的 TBSS 的 Z_{DR} 最低可达-6 dB,CC 在 80% 的情况下 ≤ 0.77 。Picca and Ryzhkov(2012)、潘佳文等(2020)、袁韬等(2024)观察发现 TBSS 区域中 Z_{DR} 虽然总体呈现低值特征,但沿强回波中心径向距离出现了 Z_{DR} 从较高的正值迅速递减至负值的特点,并且明确了 Z_{DR} 高值区是 TBSS 起始端的表征意义。对于旁瓣回波,袁韬等(2024)只观测到了 Z_{DR} 和 CC 的低值特征,未发现 Z_{DR} 高值。

本研究观测到,尽管旁瓣回波的雷达双偏振参量普遍呈现低值特征,但是 Z_{DR} 仍存在高值。统计结果显示,在强回波中心方位角 $\alpha \pm 35^\circ$ 位置,旁瓣回波的 Z_{DR} 会出现 0~2 dB 的显著极大值。通过对所有旁瓣回波样本的逐例分析发现,当旁瓣回波的方位角跨度 $\geq 30^\circ$ 时,其末端区域可能出现 $Z_{DR} \geq 1$ dB 的高值区,部分样本甚至出现 $Z_{DR} \geq 5$ dB 的极值。在所有方位角跨度 $\geq 30^\circ$ 的 192 个旁瓣回波样本中,

有 50 个样本末端在 $Z_H \leq 20$ dBz、 $CC \leq 0.9$ 的情况下,出现了 $Z_{DR} \geq 5$ dB 的高值区,占比达 26.0%。以 2025 年 3 月 2 日 17:52 湘西雷达 3.3° 仰角旁瓣回波图像为例(图 10),其关联的强回波中心最大值为 67 dBz,旁瓣回波方位角区间为 $[\alpha - 32^\circ, \alpha]$,在其末端 $[\alpha - 32^\circ, \alpha - 28^\circ]$ 方位角区间, Z_H 平均值仅为-1.93 dBz,CC 平均值仅 0.37, Z_{DR} 平均值为 3.2 dB,最高达到 7.8 dB。该旁瓣回波的 Z_{DR} 在靠近强回波中心的位置出现负值,而在远离强回波中心的末端出现正值,与上一节中旁瓣回波 Z_{DR} 平均值自强回波中心向两侧“先负后正”振荡相对应。

5 结 论

本研究基于 2021—2025 年湖南 5 部 SAD 型多普勒双偏振天气雷达 PPI 图像资料,在人工筛选 445 个旁瓣回波样本的基础上,构建数值矩阵,提取旁瓣回波的水平偏振反射率因子(Z_H)、差分反射率因子(Z_{DR})、相关系数(CC)和差分传播相移率(K_{DP})等 4 类产品数值,统计分析旁瓣回波的空间分布特征和各类产品数值特征,得到如下结论。

(1)旁瓣回波与雹暴的空间分布密切相关,在雷达极坐标系中呈现东西均匀、南少北多的分布特征,但不同类型旁瓣回波呈现不同的空间分布特征。受我国地处西风带,风暴中降水粒子产生的雷达回波向雷达偏东方向延展影响,左旁瓣回波主要集中在北部,右旁瓣回波主要集中在东部和南部,双旁瓣回波主要集中在西部。旁瓣回波在雷达静锥区至 100 km 出现频数最高。旁瓣回波出现在距雷达天

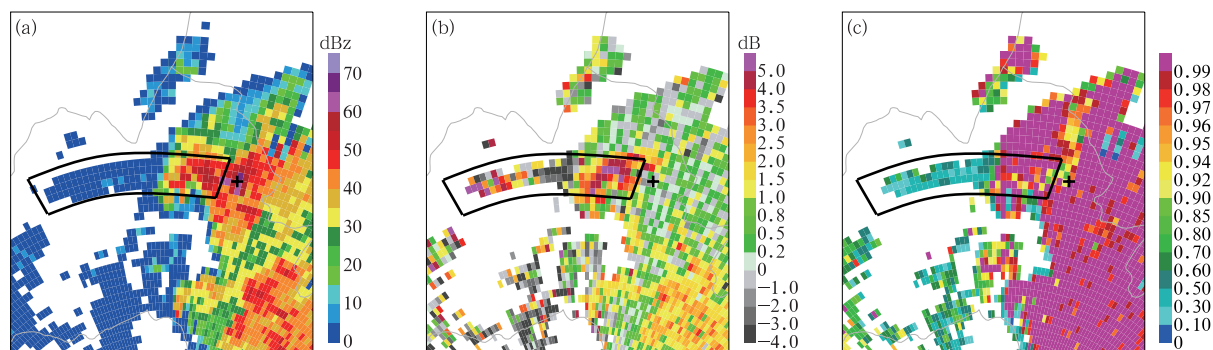


图 10 2025 年 3 月 2 日 17:52 湘西雷达旁瓣回波样本(a) Z_H 、(b) Z_{DR} 和(c)CC 图像

Fig. 10 Images of (a) Z_H , (b) Z_{DR} and (c) CC products of sidelobe echo samples from Xiangxi Radar at 17:52 BT 2 March 2025

线0.9~8.8 km高度,尤其在融化层3.0~4.0 km附近出现频数最高。

(2)90%以上的旁瓣回波出现在强回波中心 ± 6 km的径向距离、侧向 $4^\circ\sim 40^\circ$ 的方位角范围内,与前人研究结论相比,该方位角范围更为宽广;旁瓣回波出现频数最高的区域位于与强回波中心具有相同径向距离、侧向 $12^\circ\sim 13^\circ$ 方位角的位置,这一结论与前人研究结果较为一致。

(3)统计分析表明,旁瓣回波在 Z_H 图像上表现为从强回波中心向左右两侧迅速递减至 ≤ 15 dBz的弱回波,并且右旁瓣回波的下降速率显著慢于左旁瓣回波;在CC图像上,旁瓣回波表现为从强回波中心向左右两侧迅速由 >0.95 下降至 <0.6 ;但旁瓣回波在 Z_{DR} 图像上则呈现“先负极大值后正极大值”振荡,先迅速下降至 ≤ -1 dB,然后回升至 $0\sim 2$ dB;而在 K_{DP} 图像上,旁瓣回波区域的基本表现为 $0^\circ\cdot\text{km}^{-1}$,仅在强回波中心附近观测到 $>0^\circ\cdot\text{km}^{-1}$ 的数值。

(4) Z_H 、 Z_{DR} 和CC等3类雷达双偏振参量中旁瓣回波区域的数值范围分别为 $-11.5\sim 20.0$ dBz、 $-7.81\sim 7.81$ dB和 $0.005\sim 1.000$,三者的平均值分别为3.93 dBz、 -1.07 dB和0.77;75%的旁瓣回波 $Z_H\leq 8.0$ dBz、 $Z_{DR}\leq 0.56$ dB、 $CC\leq 0.92$,其中 Z_H 出现在 $0\sim 5$ dBz、 Z_{DR} 出现在 $0\sim 1$ dB、CC出现 $0.9\sim 1.0$ 的频数分别为最高,并且受CC低值的影响, K_{DP} 为 $0^\circ\cdot\text{km}^{-1}$;虽然旁瓣回波的雷达双偏振参量低值特征显著,但在方位角跨度不小于 30° 的旁瓣回波样本中,有26.0%的样本在末端出现了 $Z_{DR}\geq 5$ dB的高值区域。

本研究定量分析了旁瓣回波的双偏振参量特征,为后续自动识别研究提供了理论基础。然而,由于样本筛选过程中排除了无法在单偏振雷达反射率因子图像中明确识别的样本,未来在开发自动识别算法时,需要特别考虑那些虽然在单偏振反射率因子图像中被遮挡或被干扰,但可以通过 Z_{DR} 、CC等双偏振参量被有效识别的旁瓣回波样本。

参考文献

- 陈瑞敏,赵孝伟,于海磊,等,2021.一次长生命史超级单体风暴的雷达观测特征[J].暴雨灾害,40(4):419-429. Chen R M, Zhao X W, Yu H L, et al, 2021. Characteristics of a supercell storm with long life cycle based on analysis of weather radar data[J]. Torr Rain Dis, 40(4): 419-429(in Chinese).
- 何炳文,胡振菊,高伟,等,2020.湘西北地区强冰雹的多普勒天气雷

- 达旁瓣回波统计分析[J].暴雨灾害,39(3):269-275. He B W, Hu Z J, Gao W, et al, 2020. Statistical analysis of Doppler weather radar side-lobe echo for severe hail in Northwest Hunan Area[J]. Torr Rain Dis, 39(3): 269-275(in Chinese).
- 胡明宝,2016.气象雷达资料分析与应用[M].北京:气象出版社. Hu M B, 2016. Analysis and Application of Meteorological Radar Data[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 江慧远,魏鸣,张深寿,等,2019.一次冬季冰雹的双偏振多普勒天气雷达回波分析[J].气象科学,39(6):755-762. Jiang H Y, Wei M, Zhang S S, et al, 2019. An analysis on the dual polarization Doppler weather radar echo of winter hail[J]. J Meteor Sci, 39(6): 755-762(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).
- 廖玉芳,俞小鼎,吴林林,等,2008.S波段多普勒天气雷达旁瓣回波的特征分析[J].热带气象学报,24(2):183-188. Liao Y F, Yu X D, Wu L L, et al, 2008. Characteristics of the hailstorm side-lobe echo from S-band Doppler weather radar[J]. J Trop Meteor, 24(2): 183-188(in Chinese).
- 刘瑾,王丛梅,胡志群,等,2022.华北地区一次长生命史超级单体雹暴特征观测[J].气象科技,50(3):390-402. Liu J, Wang C M, Hu Z Q, et al, 2022. Characteristics of a long-life supercell hailstorm in North China[J]. Meteor Sci Technol, 50(3): 390-402(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).
- 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).
- 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).
- 唐佳,张昆,唐明晖,等,2023.低层暖平流强迫下两次大冰雹超级单体风暴结构特征分析[J].暴雨灾害,42(1):37-46. Tang J, Zhang K, Tang M H, et al, 2023. Structural characteristics of two heavy hail supercell storms forced by low-level warm advection[J]. Torrential Rain Dis, 42(1): 37-46(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).
- 杨湘娟,唐明晖,袁韬,等,2025. 基于双偏振雷达和 FY-4A 卫星资料的一次湖南秋季强冰雹预警特征分析[J]. 气象,51(1):68-84. Yang X J, Tang M H, Yuan T, et al, 2025. Analysis on early warning characteristics of an autumn severe hail in Hunan Province based on dual-polarization radar and FY-4A satellite data [J]. Meteor Mon, 51(1):68-84(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).
- 袁韬,唐明晖,陈伟,等,2024. 南岭地区一次高架雷暴冰雹过程双偏振特征分析[J]. 暴雨灾害,43(3):332-341. Yuan T, Tang M H, Chen W, et al, 2024. Dual polarization characteristics of an elevated thunderstorm hail event in the Nanling Region[J]. Torr Rain Dis, 43(3):332-341(in Chinese).
- 张林,李峰,吴蕾,等,2022. CINRAD/SAD 双偏振雷达非降水回波识别技术[J]. 应用气象学报,33(6):724-735. Zhang L, Li F, Wu L, et al, 2022. Non-precipitation identification technique for CINRAD/SAD dual polarimetric weather radar[J]. J Appl Meteor Sci, 33(6):724-735(in Chinese).
- 张培昌,杜秉玉,戴铁丕,2001. 雷达气象学:第 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).
- 张羽,姚聃,杨金红,等,2023. 基于 S 波段双偏振雷达和 X 波段相控阵雷达的超级单体观测分析[J]. 气象科技,51(3):419-430. Zhang Y, Yao D, Yang J H, et al, 2023. Analysis of a supercell using S-band dual-polarization radar and X-band phased array radar[J]. Meteor Sci Technol, 51(3):419-430(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).
- Argenti F, Facheris L, 2021. Radar pulse compression methods based on nonlinear and quadratic optimization[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 59(5):3904-3916.
- Bentley E S, Thompson R L, Bowers B R, et al, 2021. An analysis of 2016-18 tornadoes and National Weather Service tornado warnings across the contiguous United States[J]. Wea Forecasting, 36(6):1909-1924.
- Boettcher J B, Bentley E S, 2022. WSR-88D sidelobe contamination: from a conceptual model to diagnostic strategies for improving NWS warning performance [J]. Wea Forecasting, 37(6):853-869.
- Brandon P S, 1973. The design of a nonlinear pulse compression system to give a low loss high resolution radar performance[J]. Marconi Rev, 36:1-45.
- Bringi V N, Chandrasekar V, 2001. Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Doviak R L, Zrnić D S, 1993. Doppler Radar and Weather Observations[M]. 2nd ed. San Diego: Academic Press.
- Fowle E, 1964. The design of FM pulse compression signals[J]. IEEE Trans Inform Theory, 10(1):61-67.
- Friedrich K, Hagen M, 2004. Wind synthesis and quality control of multiple-Doppler-derived horizontal wind fields[J]. J Appl Meteor Climatol, 43(1):38-57.
- Hu J Q, Dong X C, Tian W M, et al, 2023. A novel optimization strategy of sidelobe suppression for pulse compression weather radar[J]. Remote Sens, 15(12):3188.
- Kumjian M, 2013. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part I: description of the polarimetric radar variables[J]. J Oper Meteor, 1(19):226-242.
- Lemon L R, 1998. The radar “three-body scatter spike”: an operational large-hail signature[J]. Wea Forecasting, 13(2):327-340.
- 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.
- Nai F, Boettcher J, Curtis C, et al, 2020. The impact of elevation sidelobe contamination on radar data quality for operational interpretation[J]. J Appl Meteor Climatol, 59(4):707-724.
- Picca J, Ryzhkov A, 2012. A dual-wavelength polarimetric analysis of the 16 May 2010 Oklahoma City extreme hailstorm[J]. Mon Wea Rev, 140(4):1385-1403.

(本文责编:王婷波)