

## 地物对新一代天气雷达双偏振量的影响研究

罗雨彤 吴翀 刘黎平 吴蕾 李瑞义 郑佳锋 袁亮

### A study of ground influences on the CINRAD dual polarization observations

LUO Yutong, WU Chong, LIU Liping, WU Lei, LI Ruiyi, ZHENG Jiafeng, YUAN Liang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11676/qxxb2024.20240016>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于高分辨率高程数据统计分析新一代天气雷达组网的地形遮挡影响

Statistical analysis of terrain blockage impacts on the CINRAD network based on DEM data

气象学报. 2020, 78(4): 705–720 doi: [10.11676/qxxb2020.037](https://doi.org/10.11676/qxxb2020.037)

#### 线性规划在X波段双线偏振多普勒天气雷达差分传播相移质量控制中的应用

Application of linear programming on quality control of differential propagation phase shift data for X-band dual linear polarimetric Doppler weather radar

气象学报. 2019, 77(3): 516–528 doi: [10.11676/qxxb2019.023](https://doi.org/10.11676/qxxb2019.023)

#### 基于对流风暴结构的双偏振雷达 $Z_{DR}$ 柱识别及应用研究

Identification of the  $Z_{DR}$  column in dual polarization radar observations based on convective storm structure and related applications

气象学报. 2023, 81(6): 943–957 doi: [10.11676/qxxb2023.20230050](https://doi.org/10.11676/qxxb2023.20230050)

#### 一次强降水超级单体的双偏振雷达观测分析

Analysis of a high precipitation supercell based on dual polarization radar observations

气象学报. 2020, 78(1): 86–100 doi: [10.11676/qxxb2020.003](https://doi.org/10.11676/qxxb2020.003)

#### 基于S波段双偏振雷达观测的雹暴偏振特征分析

Analysis of the polarimetric characteristics of hail storm from S band dual polarization radar observations

气象学报. 2021, 79(1): 168–180 doi: [10.11676/qxxb2021.001](https://doi.org/10.11676/qxxb2021.001)

#### 副热带高压背景下极端短时强降水的双偏振相控阵雷达观测分析

Analysis of an extreme flash rain event under the background of subtropical high based on dual-polarization phased array radar observations

气象学报. 2022, 80(5): 748–764 doi: [10.11676/qxxb2022.060](https://doi.org/10.11676/qxxb2022.060)



扫码关注公众号，获取更多信息！

# 地物对新一代天气雷达双偏振量的影响研究\*

罗雨彤<sup>1,2</sup> 吴 翀<sup>2</sup> 刘黎平<sup>2</sup> 吴 蕾<sup>3</sup> 李瑞义<sup>3</sup> 郑佳锋<sup>1</sup> 袁 亮<sup>1</sup>  
LUO Yutong<sup>1,2</sup> WU Chong<sup>2</sup> LIU Liping<sup>2</sup> WU Lei<sup>3</sup> LI Ruiyi<sup>3</sup> ZHENG Jiafeng<sup>1</sup> YUAN Liang<sup>1</sup>

1. 成都信息工程大学大气科学学院, 成都, 610225

2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京, 100081

3. 中国气象局气象探测中心, 北京, 100081

1. School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China

2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

3. CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081, China

2024-01-30 收稿, 2024-05-06 改回.

罗雨彤, 吴翀, 刘黎平, 吴蕾, 李瑞义, 郑佳锋, 袁亮. 2024. 地物对新一代天气雷达双偏振量的影响研究. 气象学报, 82(6): 827-839  
Luo Yutong, Wu Chong, Liu Liping, Wu Lei, Li Ruiyi, Zheng Jiafeng, Yuan Liang. 2024. A study of ground influences on the CINRAD dual polarization observations. *Acta Meteorologica Sinica*, 82(6):827-839

**Abstract** The magnitude of dual polarization observations is much smaller than the reflectivity factor ( $Z_H$ ), and the accuracy of the observations is the basis for the application of dual polarization radar data. Anomalies in dual polarization observations caused by ground have largely been overlooked in the past. For the first time, utilizing the observation data from 93 CINRAD radars upgraded with dual polarization, the characteristics and scope of ground influence are determined by the anomalous areas after long-term data accumulation. Statistical analysis is then conducted to reveal the overall proportion of the influence in CINRAD radars, the main sources of the influence, the relationship between the influence and radar types and observation modes, the temporal variations of the influence, the nature of the influence and the distribution characteristics of dual polarization observations. Results are as follows: (1) The ground can cause significant deviations of the accumulated values of dual polarization observations from the precipitation interval, the differential reflectivity factor ( $Z_{DR}$ ) is decreased by more than 1 dB, the correlation coefficient ( $\rho_{HV}$ ) falls below 0.92, and the standard deviation of differential phase ( $\Phi_{DP}$ ) is greater than  $10^\circ$ . This characteristic served as the main basis for identifying ground influence. (2) The ground influence is not limited to the near-ground region. As the elevation angle increases, the sidelobe reception of ground signals can also produce similar effects. The proportion of influence in the near-ground region can reach 14% to 32%, while at high elevation angles it reaches 4% to 7%, far more severe than the beam blockage. (3) The ground influence is mainly caused by mountains and buildings with strong scattering capabilities. When the site is below the terrain height, surrounding mountains are the main contributors; when the site is close to the terrain height, buildings within urban areas are the main contributors. (4) The ground influence can be quantitatively described by the superposition of random errors and systematic errors, leading to increased uncertainty in the dual polarization observations within the affected area at a specific time. Moreover, the influence is more severe in the mainlobe region than in the sidelobe region.

**Key words** CINRAD, Dual polarization upgrade, Ground influence, Mainlobe and sidelobe, Quality control, Statistical study

\* 资助课题: 国家重点研发计划项目(2022YFC3003901、2023YFC3007501)、国家自然科学基金项目(42305156、U2142210)、安徽省自然科学基金(2208085UQ05)、灾害天气国家重点实验室开放课题(2023LASW-B21)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2024J001)。

作者简介: 罗雨彤, 主要从事雷达气象学研究。E-mail: 1219223261@qq.com

通信作者: 吴翀, 主要从事雷达气象学研究。E-mail: wuchong@cma.gov.cn

**摘要** 双偏振量的数量级远小于回波强度( $Z_H$ ),观测资料的准确是双偏振雷达资料应用的基础,地物引起的双偏振量异常此前大多被忽视。使用中国93部双偏振升级后的新一代天气雷达观测资料,通过长时间数据累积后的异常区确定地物影响的特征和范围,进而统计分析该影响在中国业务雷达中的整体比例、影响的主要来源、影响与雷达型号和观测模式的关系、影响随时间的变化情况、影响的性质及双偏振量的分布特征等,得到的结论如下:(1)地物使得双偏振量的累积值严重偏离降水区间,差分反射率因子( $Z_{DR}$ )累积值偏低1 dB以上,相关系数( $\rho_{HV}$ )降至0.92以下,差分传播相移( $\Phi_{DP}$ )的标准差大于 $10^\circ$ ,该特征成为识别地物影响的主要依据。(2)地物影响不限于低层,仰角抬升后副瓣接收的地物信号也能产生类似的效果,大部分雷达近地面区域的影响占比在14%—32%、高仰角为4%—7%,远比地物对波束的遮挡影响严重。(3)地物影响主要由具备强散射能力的山脉和建筑物引起,当站点低于地形时,周围山脉是主要贡献者;当站点与地形高度接近时,周围建筑物是主要贡献者。(4)地物影响可用随机误差与系统误差的叠加来定量描述,使影响区内的双偏振量在单一时次的观测不确定度增大,且主瓣区域的影响比副瓣区域更严重。

**关键词** 新一代天气雷达,双偏振升级,地物影响,主瓣和副瓣,质量控制,统计研究

**中图法分类号** P412.25

## 1 引言

中国从1998年开始大规模建设新一代天气雷达(CINRAD),截至2024年1月已建成了252部雷达组成的天气雷达监测网。自2015年起,业务雷达网开始进行双偏振升级改造,截至2023年4月已有93部完成了升级并投入业务使用。双偏振雷达同时发射水平和垂直方向的偏振波来探测降水粒子,可以得到如差分反射率因子( $Z_{DR}$ )、差分传播相移( $\Phi_{DP}$ )、差分传播相移率( $K_{DP}$ )和相关系数( $\rho_{HV}$ )等与降水粒子的大小、相态和浓度相关的双偏振量。近年来的研究证实,双偏振升级后的业务雷达能更准确地识别和剔除非气象回波(Tang, et al, 2014; 马建立等, 2019; 刘宗庆等, 2021),基于双偏振量的水凝物相态识别方法能够大幅度提升冰雹的识别率(Wu, et al, 2018; 吴举秀等, 2023),定量降水估测算法在使用双偏振关系后精度也进一步提升(张哲等, 2021; Ma, et al, 2021)。

良好的质量是双偏振雷达资料应用的基础,数据质量评估是业务应用前必要的环节。影响雷达探测数据质量的主要因素包括地物、避雷针、标定以及衰减等(朱丹等, 2018; 王超等, 2019; 李思腾等, 2021)。其中,地物影响在此前研究中大多聚焦于建筑物、山脉等对电磁波传播的遮挡现象,中国除高原地区外,其余地区的新一代天气雷达受波束遮挡影响较小(柳云雷等, 2020; Tan, et al, 2023)。对于地物本身的强散射信号主要通过杂波识别算法和滤波器结合进行抑制。WSR-88D天气雷达最早使用无限脉冲响应(IIR)椭圆滤波器对静态杂波

图识别出的杂波位置进行滤波,由于其暂态响应对地物抑制性能的影响不能完全去除,后改用抑制特性更优的回归滤波器(Kadi, et al, 1995; Torres, et al, 1999)。针对静态杂波图的缺陷,Hubbert等(2009)引入可实时判别杂波位置的杂波减轻决策(CMD)算法,但会将窄谱宽、0速度的天气回波误判为杂波,Li等(2013)提出结合时域和频域的谱杂波识别(SCI)算法弥补了该不足。中国的新一代天气雷达目前采用自适应高斯频域(GMAP)滤波器,在滤除杂波的同时可通过高斯拟合恢复余下的天气回波(Siggia, et al, 2004; 何建新等, 2010; 程元慧等, 2020)。但是,上述有关地物抑制方法的研究主要针对单偏振雷达的反射率因子( $Z_H$ ),双偏振升级后 $Z_H$ 和 $Z_V$ (垂直通道的反射率因子)都需进行地物抑制,而现有地物抑制方法对 $Z_{DR}$ 、 $\rho_{HV}$ 、 $\Phi_{DP}$ 等双偏振量的影响尚未见评估。

基于长期观测数据的统计研究是评估地物影响的常用方法(文浩等, 2017; 谢晓林等, 2023)。针对地物对双偏振量的影响,Wu等(2021)利用广东省2016、2017年第一批双偏振升级的新一代天气雷达观测数据,初步统计发现地物位置的偏振量与正常降水回波差异较大,分析可能是地物产生的非瑞利散射以及滤波器对不同杂波水平的响应引起的两个正交通道的异常造成的。但该现象对于双偏振升级后的新一代天气雷达是否具有普适性?地物影响的主要来源是什么?对数据质量的影响有何种性质?目前还缺乏系统的研究。针对以上问题,使用中国93部双偏振升级后的新一代天气雷达观测资料,通过长时间数据累积后的异常区确

定地物影响的特征和范围,统计分析该影响在中国业务雷达中的整体比例、影响的主要来源、影响与雷达型号和观测模式的关系、影响随时间的变化情况、影响的性质及双偏振量的分布特征,为将来进一步研究这种影响对降水估测和相态识别等产生的偏差提供依据。

## 2 地物影响的定义和统计方法

本研究选取 2016—2023 年完成双偏振升级的 93 部新一代天气雷达,站点及型号分布见图 1。其中,华北地区 10 部、华中地区 15 部、华东地区 35 部、华南地区 14 部、西南地区 13 部、西北和东北地区分别有 4 和 2 部,保证了研究结果具有足够的代表性。针对地物回波随空间、时间变化极小的特点,采用长时间数据累积的方法,从整年汛期观测数据中筛选出中等强度的较大范围降水个例(限制  $Z_H$  位于 27—33 dBz、降水面积占  $2.4^\circ$  仰角 PPI 比例  $\geq 15\%$ ),确保样本不受冰雹、非气象回波、不同距离灵敏度的影响,再对有效观测值 ( $Z_H$ 、 $Z_{DR}$ 、 $\rho_{HV}$ 、 $\Phi_{DP}$  的标准差 ( $SD(\Phi_{DP})$ )、地物抑制前的反射率因子 ( $Z_T$ ) 进行点对点平均。随着累积次数的增加,不同降水类型的差异减小,地物与降水回波的差异增大。

图 2 以洛阳站 (Z9379) CINRAD/SAD 型双偏振雷达为例,给出了 2023 年 4—9 月长期累积数据

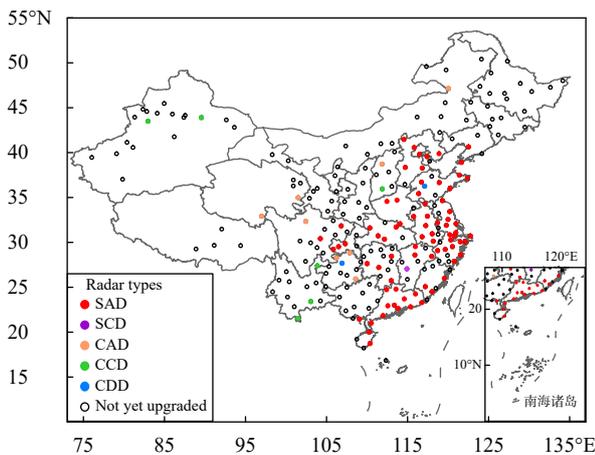


图 1 不同型号新一代天气雷达 (CINRAD) 的站点分布 (图中不同颜色的圆点代表不同型号的雷达,黑色圆圈代表暂未做双偏振升级的雷达)

Fig. 1 Distribution of stations for different types of China New Generation Doppler Weather Radar (CINRAD) (dots in different colors represent different types of radars, black circles represent radars that have not been upgraded to dual polarization)

的水平和垂直结构。洛阳雷达在  $0.5^\circ$  仰角的东南区域 ( $100^\circ$ — $120^\circ$  方位) 长期无有效观测值,通过叠加地形的垂直结构发现,这是雷达附近山脉遮挡波束传播造成的。除了广泛认知的地物遮挡外,双偏振量在累积数据中也呈现出明显的差异。雷达近处 50 km 内的水平结构中出现了大片  $Z_{DR} < 0.5$  dB、 $\rho_{HV} < 0.92$ 、 $SD(\Phi_{DP}) > 10^\circ$  的异常区,而正常的降水回波经过长时间累积后  $Z_{DR}$  位于  $0.5$ — $1.5$  dB、 $\rho_{HV} > 0.98$ 、 $SD(\Phi_{DP}) < 4^\circ$ 。异常区内的  $Z_T$  大于 45 dBz,表明这是由地物引起的异常,因此将  $\rho_{HV} < 0.92$  或  $SD(\Phi_{DP}) > 10^\circ$  的区域认为是地物影响区。尽管新一代天气雷达的 GMAP 滤波器能够较好地  $Z_H$  中的地物去除并恢复降水信息(异常区的  $Z_H$  与周围基本一致),但对于量级更小、两个通道一致性要求更高的双偏振量,GMAP 暂无法较好地恢复。

通过图 2f—i 累积数据的垂直结构,将地物影响进一步细分。低层仰角,上述异常区与波束指向周围的山脉直接对应,  $Z_T$  与  $Z_H$  差值 ( $\Delta Z_H$ )  $> 10$  dBz,定义为主瓣地物影响区 (Mainlobe Ground Influence, MGI)。随着仰角升高、波束指向远离山脉,强度相关的地物特征几乎消失 ( $0$  dBz  $< \Delta Z_H \leq 10$  dBz),此时仍存在一定面积的双偏振异常区。考虑到新一代天气雷达天线第一副瓣电平约为  $-29$  dB,认为该区域是由副瓣发出的电磁波遇到地物引起的异常,定义为副瓣地物影响区 (Sidelobe Ground Influence, SGI)。观测量处于正常降水区间的,定义为无地物影响区 (No Ground Influence, NGI)。无有效观测数据的,定义为波束遮挡区 (Beam Blockage)。

通过上述定义,主要从以下 5 个方面开展地物对双偏振量的影响研究: (1) 使用 93 部新一代天气雷达的累积数据,逐仰角层计算不同类型地物影响的面积比例,统计出该影响的整体情况。(2) 从 93 部雷达中筛选出地物影响严重和影响轻微的两组,通过分析周围地形、夜间灯光数据和人口密度的相关讨论地物影响的主要来源。(3) 从 93 部雷达中筛选出不同型号和不同观测模式的站点,对比不同生产厂家和扫描策略下地物影响的差异。(4) 从 93 部雷达中筛选出运行时间最长的典型站点,分析地物影响在较长一段时间内的年际变化情况。(5) 从 93 部雷达中筛选出 1 部地物影响严重的典型雷达,根据累积的异常区回溯整年汛期的时间序列数据,量化统计每次观测的误差分布,探究地

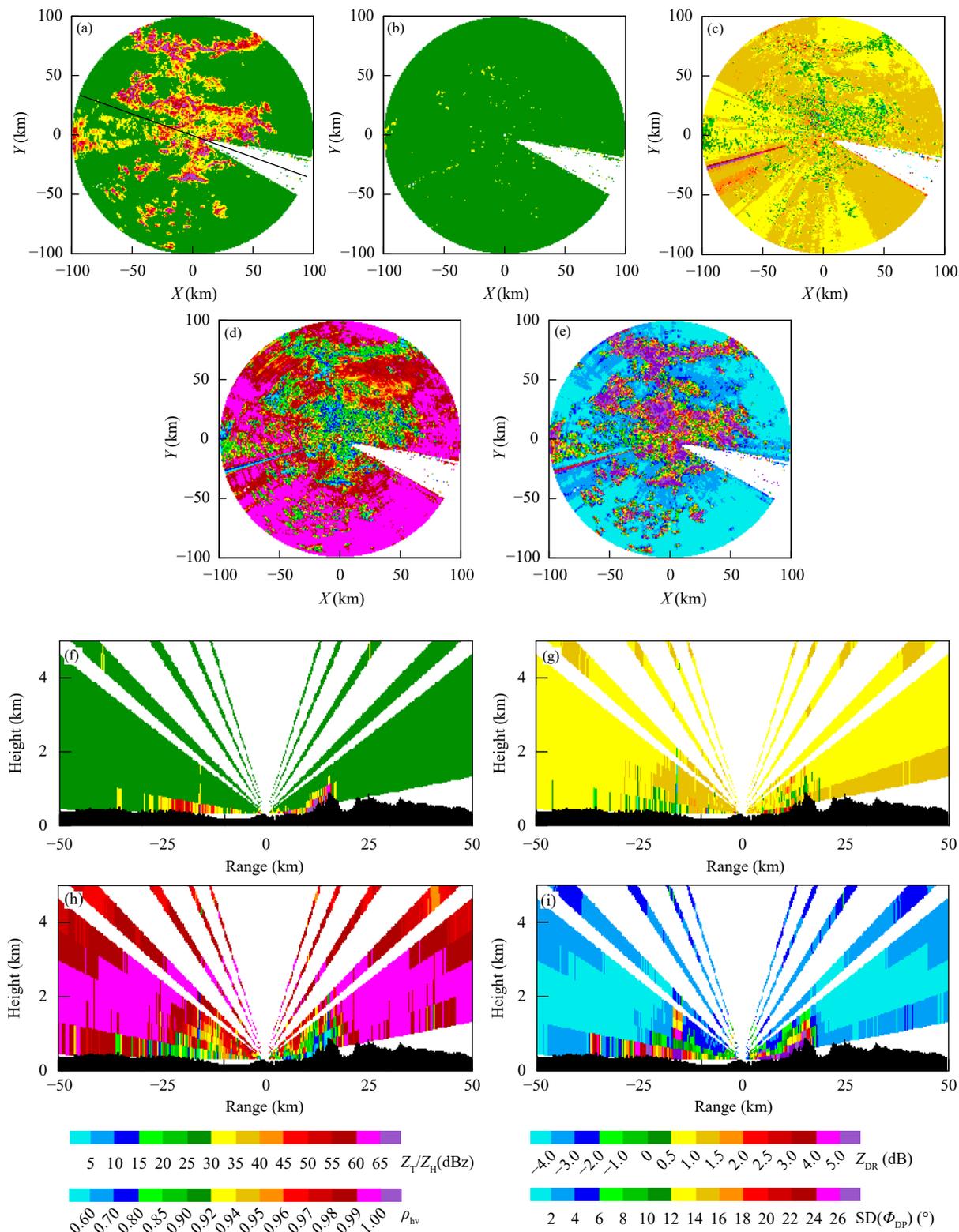


图2 累积数据的水平和垂直结构 (a, f)  $Z_T$ 、(b)  $Z_H$ 、(c, g)  $Z_{DR}$ 、(d, h)  $\rho_{HV}$ 、(e, i)  $SD(\Phi_{DP})$  (站点为洛阳站, 累积数据选取2023年4—9月, 水平结构为 $0.5^\circ$ 仰角, 黑实线为垂直结构的径向切线, 方位角为 $110^\circ$ 和 $290^\circ$ , 黑色剖面代表地形)

Fig. 2 Horizontal and vertical structures of accumulated data (a, f)  $Z_T$ , (b)  $Z_H$ , (c, g)  $Z_{DR}$ , (d, h)  $\rho_{HV}$ , (e, i)  $SD(\Phi_{DP})$  (the station is Luoyang, and the accumulated data are selected from April to September of 2023, horizontal structure is with  $0.5^\circ$  elevation, the black solid line is the radial tangent of the vertical structure, with azimuths of  $110^\circ$  and  $290^\circ$ , the area shaded in black represents terrain)

物影响的性质。

### 3 地物影响特征的统计分析

#### 3.1 新一代天气雷达地物影响的整体情况

为了获取 93 部新一代天气雷达的地物影响概况,根据前面对双偏振量异常区的定义,逐仰角统计各站点 2023 年汛期累积数据中主瓣地物、副瓣地物、波束遮挡、无影响区域的占比,具体为符合阈值的像素点数量/该仰角有效观测范围内总像素点数量。有效观测范围考虑了不同仰角波束在对流层内的探测范围差异,在 4.3°仰角以下限制为 100 km,6.0°、9.9°、14.6°、19.5°仰角分别限制为 80、50、35 和 25 km。

图 3a—c 以箱线图方式给出了 93 部雷达的地物占比分布及随仰角的变化。在 0.5°仰角,大部分雷达主瓣地物影响区的面积比例为 2%—10%,最

严重的站点超过 15%;副瓣地物影响区的面积比例 10%—22%,最严重的超过 35%。随着仰角升高,主瓣地物影响区占比迅速降至 2% 以下,但副瓣地物影响区的占比仍保持在 4%—7%。考虑雷达在高仰角(>6.0°)的有效观测范围本身就不大,副瓣占比还可能随仰角的升高而增大。对于波束遮挡现象而言,大部分雷达 0.5°仰角的占比不超过 5%,1.5°以上仰角不超过 1%,可忽略不记。由此可见,尽管中国建设新一代天气雷达时充分考虑了地形的影响,但地物引起的双偏振量异常区已超过了地物引起的遮挡,成为影响数据质量的重要因素。

统计同时发现,大部分站点在箱线图上的排名随仰角变化很小,即低仰角受地物影响较大的站点高仰角影响同样较大,反之亦然。图 3d、e 以大兴站(Z9010)和嵯洒站(Z9041)SAD 型雷达为例,给出了两种存在显著差异的地物影响比例直方图。

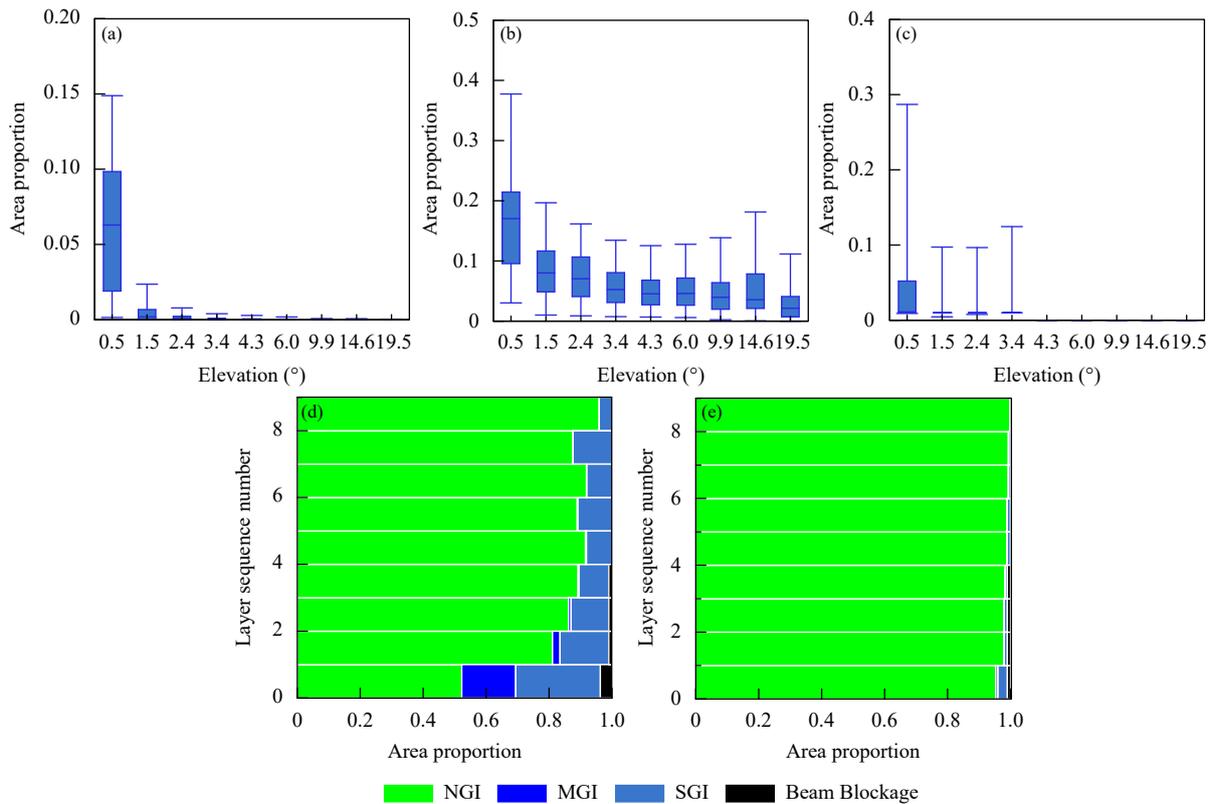


图 3 (a) 主瓣地物影响区、(b) 副瓣地物影响区、(c) 波束遮挡区的面积比例箱线图(图中上、下限分别代表面积比例从高到低排列在 5% 和 95% 的数值,箱体的上下限分别代表排列在 25% 和 75% 的数值,方框中线为中位数),不同类型地物影响的面积比例直方图 (d) 大兴站、(e) 嵯洒站

Fig. 3 Box plots of area proportions of (a) MGI, (b) SGI, (c) Beam Blockage (upper and lower limits of the graph represent the values of the area proportions ranked from the highest to the lowest at 5% and 95%, and the upper and lower limits of the box represent the values ranked at 25% and 75%, the middle lines of the boxes show median values), histograms of area proportions for different types of ground influence at (d) Daxing station, (e) Shengsi station

大兴雷达受地物影响严重,在 $0.5^\circ$ 仰角下主瓣、副瓣、遮挡对应的占比分别达到17.1%、27.0%和3.7%,共计47.8%。随着仰角抬升,副瓣影响区的占比仍可维持在10%左右。相比之下,嵯泗雷达受地物的影响很小, $0.5^\circ$ 仰角主瓣、副瓣、遮挡的占比分别为0.6%、3.1%和0,且仰角升高后几乎无副瓣地物影响特征出现。该差异为筛选典型、讨论地物影响的来源奠定了基础。

### 3.2 地物影响的来源分析

对电磁波具备强散射能力的地物主要有雷达站周围的山脉和城市建筑物,但尚不清楚二者如何贡献了双偏振量的异常区。为此,使用NASA发布的SRTM数字高程模型(Farr, et al, 2007)计算雷达天线高度与周围100 km内平均地形高度的差值(单位: km),用于直接量化山脉的影响;使用EOG发布的夜间灯光数据(VIIRS Nighttime Lights, VNL)

(Elvidge, et al, 2021)和LandScan Global发布的人口数据(Dobson, et al, 2000)计算雷达周围100 km内的平均灯光亮度(单位:  $\text{nW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{km}^2)$ )和人口密度(单位:  $\text{人}/\text{km}^2$ ),用于间接量化城市建筑物的影响。为了提升研究的显著性,从93部雷达2023年汛期累积数据中筛选出地物影响严重的典型雷达站(平均地物影响占比排名前25%,共24部)和影响轻微的典型雷达站(平均地物影响占比排名后25%,共24部),站点信息见表1。

图4a—c以箱线图方式给出了两组对照雷达的站点地形高度差、夜间灯光亮度和人口密度的量化对比。从图4可见,受影响轻微组雷达天线大多高于周围地形0.16—0.90 km,夜间灯光亮度0.15—0.73  $\text{nW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{km}^2)$ ,人口密度75—204  $\text{人}/\text{km}^2$ 。而受影响严重组雷达天线大多高于周围地形0.05—0.24 km,夜间灯光亮度1.69—6.09  $\text{nW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{km}^2)$ ,

表1 地物影响严重和轻微的典型雷达站信息

Table 1 Typical sites with severe and minor ground influence

影响严重组			影响轻微组		
站号	站点	平均地物影响占比	站号	站点	平均地物影响占比
Z9200	广州	0.279760	Z9350	忻州	0.008223
Z9024	海坨山	0.261598	Z9023	阿尔山	0.009482
Z9030	新源	0.199799	Z9870	昭通	0.009628
Z9572	湖州	0.168986	Z9691	西双版纳	0.010424
Z9551	合肥	0.165109	Z9094	习水	0.011684
Z9010	大兴	0.162377	Z9041	嵯泗	0.012878
Z9755	深圳	0.162361	Z9976	玉树	0.013140
Z9571	杭州	0.162114	Z9096	榕江	0.013313
Z9532	青岛	0.160614	Z9559	黄山	0.017998
Z9280	成都	0.157949	Z9873	红河	0.018461
Z9516	徐州	0.157684	Z9357	济宁	0.020218
Z9518	连云港	0.154579	Z9060	神农架	0.020962
Z9592	厦门	0.150061	Z9852	遵义	0.022927
Z9531	济南	0.141239	Z9575	绍兴	0.032291
Z9536	潍坊	0.139934	Z9597	金华	0.032784
Z9250	南京	0.138340	Z9837	阿坝州	0.033844
Z9379	洛阳	0.138303	Z9973	黄南	0.038758
Z9717	宜昌	0.138140	Z9095	务川	0.040324
Z9580	舟山	0.136685	Z9073	万宁	0.041545
Z9731	长沙	0.134742	Z9570	衢州	0.046111
Z9556	安庆	0.132656	Z9763	清远	0.052224
Z9417	营口	0.130148	Z9792	九江	0.056209
Z9898	海口	0.124019	Z9735	郴州	0.057839
Z9754	汕头	0.122846	Z9376	信阳	0.058093

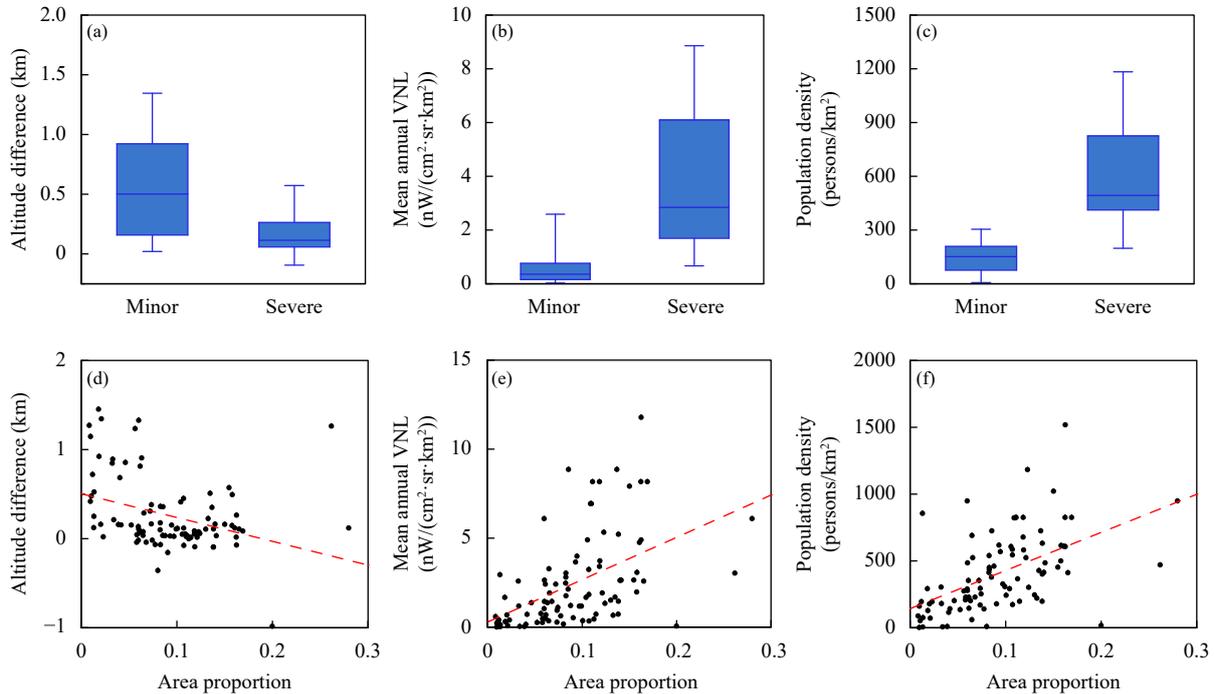


图4 地物影响轻微和严重的两组雷达 (a) 站点地形高度差、(b) 平均夜间灯光亮度、(c) 人口密度的箱线图 (箱线图中上、下限分别代表面积比例从高到低排列在 5% 和 95% 的数值, 箱体的上、下限分别代表排列在 25% 和 75% 的数值, 方框中线为中位数), 93 部雷达的平均地物影响面积比例与 (d) 站点地形高度差、(e) 平均夜间灯光亮度、(f) 人口密度的散点图 (红色虚线为散点拟合线)

Fig. 4 Box plots of (a) altitude difference, (b) mean annual VNL, (c) population density for two sets of radars with minor and severe ground influences (upper and lower limits in the box plots represent the values of the area proportions ranked from the highest to the lowest at 5% and 95%, and the upper and lower limits of the box represent the values ranked at 25% and 75%, the middle lines of the boxes show median values), scatter plots of the area proportions of ground influence with (d) altitude difference, (e) mean annual VNL, (f) population density for 93 radars (the red dashed line are scatter points fit lines)

人口密度 409—825 人/km<sup>2</sup>。两组对照雷达的夜间灯光亮度和人口密度箱线图几乎没有重叠区, 站点地形高度差的箱线图重叠区也不大, 说明地物影响严重的雷达多位于城市发展水平较高 (夜间灯光亮度高、人口密集) 的地区, 同时雷达架设高度距离地形越近时受影响概率也越大。

基于上述发现, 进一步使用 93 部雷达的平均地物影响占比分别与站点地形高度差、夜间灯光亮度和人口密度做散点图 (图 4d—f)。其中, 地物影响程度与夜间灯光亮度和人口密度呈现显著的正相关, 城市发展水平低则建筑少, 地物影响占比小; 城市发展水平高则建筑多, 地物影响占比大, 该结论适用于中国绝大部分业务雷达。而地物影响程度与周围地形总体呈现出雷达高于地形时影响占比小、雷达低于地形时影响占比大的趋势, 但相关较差。特别是当雷达天线高度略高于周围地形时, 出现了较多的离群点, 需要结合雷达型号、周围环境具体分析。总之, 在今后雷达建设时, 城市化的

稠密建筑物分布与等射束高度图同样重要, 需作为选址的参考依据。

### 3.3 地物影响与雷达型号和观测模式的关系

93 部新一代天气雷达由 SAD、SCD、CAD、CCD、CDD 共 5 个型号组成。由于型号间的部署规划差异, 导致各型雷达周围的地形和建筑分布特征不同, 进而呈现的地物影响程度也不同。为此, 基于平均地物影响占比与站点地形高度差、夜间灯光亮度和人口密度的统计结果, 进一步以分类散点图的方式展开分析 (图 5a—c)。其中, 76 部 SAD 型雷达在数量上占绝对主导, 主要部署于东南沿海的经济发达地区, 对应的天线高度大多距离地面较近、周围城市化程度较高, 受地物的影响也较严重。仅有少数 SAD 型雷达部署在距离地面较高的山顶 (例如神农架站、黄山站、衢州站等, 散点位于图 5a 左上角区域), 尽管上述站点周围的人口密度和灯光亮度不算低, 但地物影响的程度却很轻。其

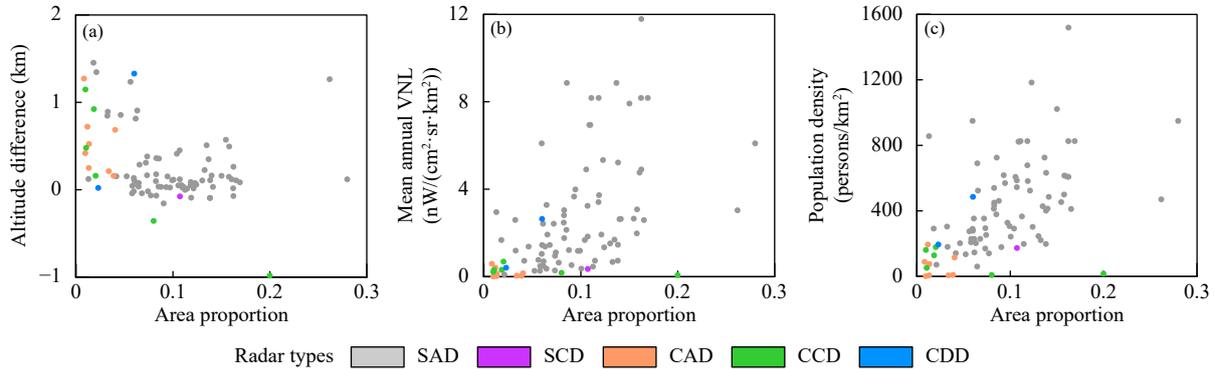


图5 不同型号雷达的平均地物影响面积比例与(a) 站点地形高度差、(b) 平均夜间灯光亮度、(c) 人口密度的散点图  
Fig. 5 Scatter plots of the area proportions of ground influence with (a) altitude difference, (b) mean annual VNL, (c) population density for different types of CINRAD

余型号的17部雷达(SCD型1部、CAD型8部、CCD型6部、CDD型2部)主要部署于中西部地区、城市化率较低,因此大部分站点不论位于山顶或近地面,地物影响都不大(图5a左侧区域)。仅当部分SCD/CCD型雷达位于明显低于地形的山谷时(新源站、奇台站、吉安站,图5a中部偏下区域),尽管站点周围的城市化率几乎为0,但地物影响的程度却偏重。总而言之,当站点显著高于地形时,任何型号受地物影响程度都很轻;当站点与地形高度接近时,取决于部署地区的城市化率,SAD型严重而其余型号很轻;当站点显著低于地形时,任何型号雷达的地物影响程度都偏重。

中国新一代天气雷达主要采用3种观测模式,分别为降水模式1(VCP11、5 min扫描14层仰角)、降水模式2(VCP21、6 min扫描9层仰角)和晴空模式(VCP31、10 min扫描5层仰角),对应的天线转速和脉冲累积数不同。为研究其是否造成地物影响差异,选取开展精细化观测试验的杭州站SAD型雷达在2021—2023年采集的5、6、7、8、9、12、14、15层仰角以及125、250 m距离分辨率的数据集。对数据集中相同空间分辨率的降水数据逐年进行累积,再逐仰角统计不同观测模式下主瓣和副瓣地物影响面积占比(方法同3.1节),所得分类折线图如图6。对比发现,尽管各观测模式的累积点数差别较大(例如晴空模式第1层仰角为63点、降水模式1为16点),但双偏振异常区的占比差异很小且随仰角变化趋势一致,表明地物影响与扫描策略的关系不大。2023年各模式在高仰角存在细微差异主要是模式增多后累积样本减小且

样本量不均匀导致的。

### 3.4 地物影响随时间的变化

根据3.2节的研究结果,地物影响主要与雷达周围的地形和建筑物有关。其中,地形几乎不会随时间变化,但建筑物会因城市化的发展而引入不确定因素。为研究地物影响的时间变化特征,选取2016年第一批完成双偏振升级的广州站和韶关站SAD型雷达作为典型,对比业务运行6a来地物占比的变化情况(2018—2019年因质量控制算法错误导致双偏振量无法使用)。图7以分类折线图形式给出了地物影响(当前仰角主、副瓣地物占比之和)的年际变化特征,可见对于某一站点而言,双偏振异常区随仰角的变化趋势是独特且几乎固定的,但异常区的整体占比存在不确定性。广州雷达2017年的双偏振异常区占比较2016年增加2%,2020年较2017年又增加8%,2020年后趋于稳定;韶关雷达2016—2023年的面积比例曲线几乎重合,年际差异小于3%。

图8给出了广州和韶关雷达新增地物影响区(2022与2016年相比)的空间分布,并与两年的夜间灯光亮度数据对比分析。可见,广州地区的夜间灯光亮度平均值从2016年的 $5.72 \text{ nW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{km}^2)$ 增强至2022年的 $9.93 \text{ nW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{km}^2)$ ,夜间灯光的新增大值区与广州雷达西北、东南方向的新增地物影响区基本对应。而韶关雷达2016—2022年的夜间灯光亮度平均值仅从 $0.22 \text{ nW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{km}^2)$ 增强至 $0.42 \text{ nW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{km}^2)$ ,夜间灯光亮度高值区和地物影响区均无明显变化。基于上述发现,对于城市化率急剧变化地区的新一代天气雷达,双偏振数据质量需要以年为单位进行评估。

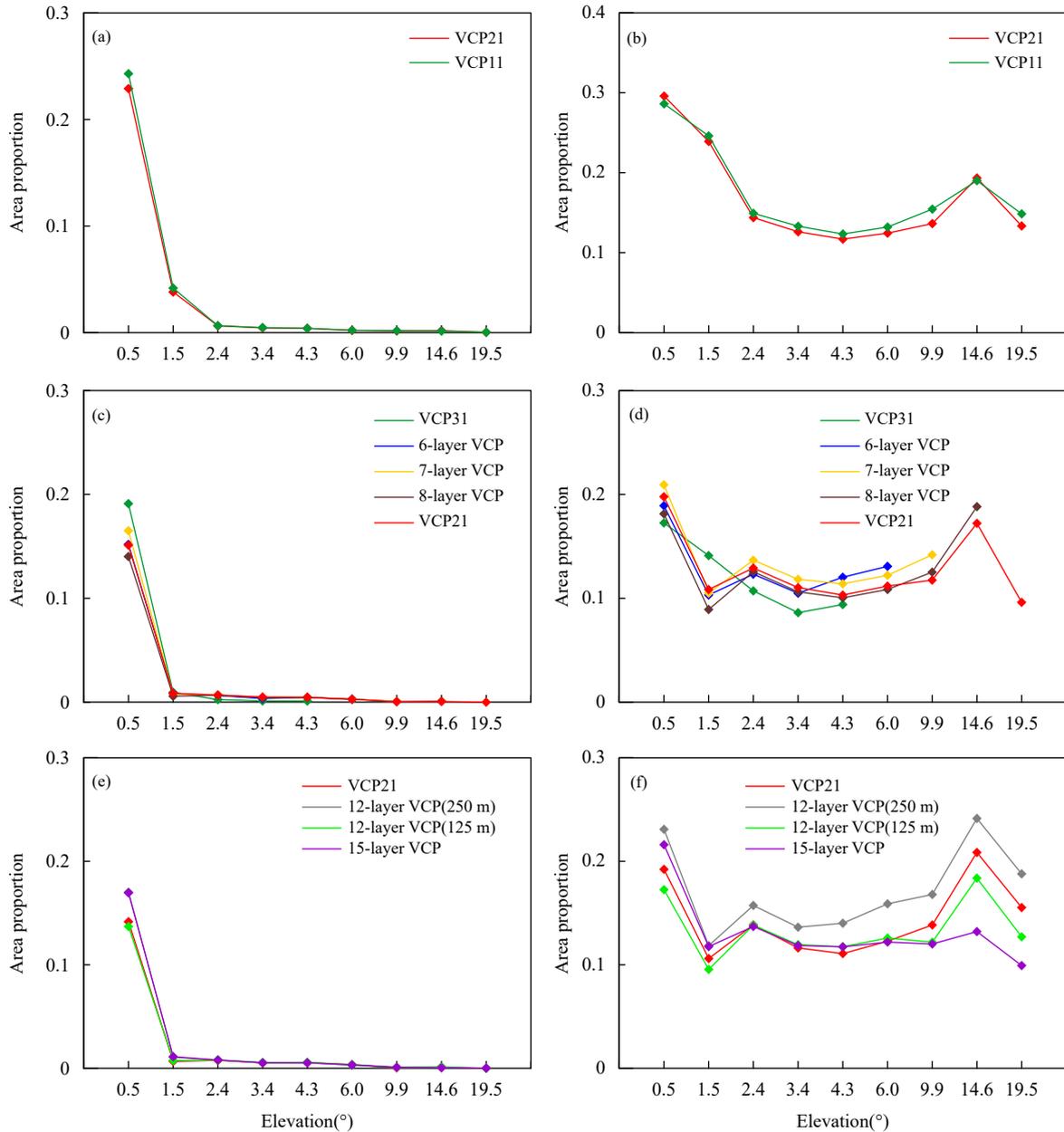


图 6 不同观测模式的主瓣 (a、c、e) 和副瓣 (b、d、f) 地物影响面积比例随仰角的变化情况 (a、b. 2021 年, c、d. 2022 年, e、f. 2023 年; 12 层观测模式括号中的数字代表距离分辨率, 站点为杭州站)

Fig. 6 Variations of the area proportions of MGI (a, c, e) and SGI (b, d, f) with elevation angle for different observation modes (a, b. 2021; c, d. 2022; e, f. 2023; 12-layer VCP numbers in parentheses represent distance resolution, the station is Hangzhou)

### 3.5 地物影响的性质及双偏振量的分布特征

尽管通过长期数据的累积已清晰发现了地物导致  $Z_{DR}$  和  $\rho_{HV}$  偏小、 $SD(\Phi_{DP})$  偏大的异常区, 但目前尚不清楚累积数据的异常特征是否与单一时次的观测相同, 能否进一步通过累积特征来对实况数据进行订正。为此, 选取地物影响严重的南京站 SAD 型雷达, 根据累积异常区逐像素点回溯 2023 年 4—

9 月的时间序列数据, 进而统计不同影响区的双偏振量 ( $Z_{DR}$ 、 $\rho_{HV}$ 、 $SD(\Phi_{DP})$ ) 分布特征 (图 9)。在无地物影响的正常降水区域,  $Z_{DR}$  主要位于  $-0.84—1.47$  dB, 且  $Z_{DR}$  出现正值的概率要明显高于负值出现概率,  $\rho_{HV}$  和  $SD(\Phi_{DP})$  分别高度集中于  $0.98—1.01$  和  $0.5^{\circ}—3.5^{\circ}$ 。相比之下, 主瓣和副瓣地物影响区的双偏振量分布非常离散,  $Z_{DR}$  在非降水区间

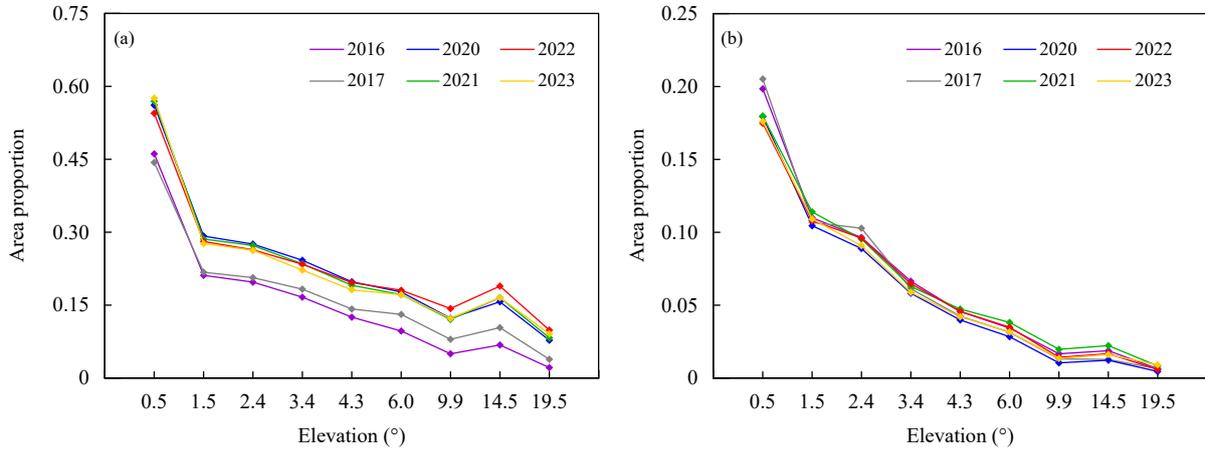


图 7 2016—2017 年和 2020—2023 年地物影响面积比例 (主瓣+副瓣) 的变化情况 (a. 广州站, b. 韶关站)  
 Fig. 7 Variations of the area proportions of MGI and SGI in 2016—2017 and 2020—2023 (a. Guangzhou station, b. Shaoguan station)

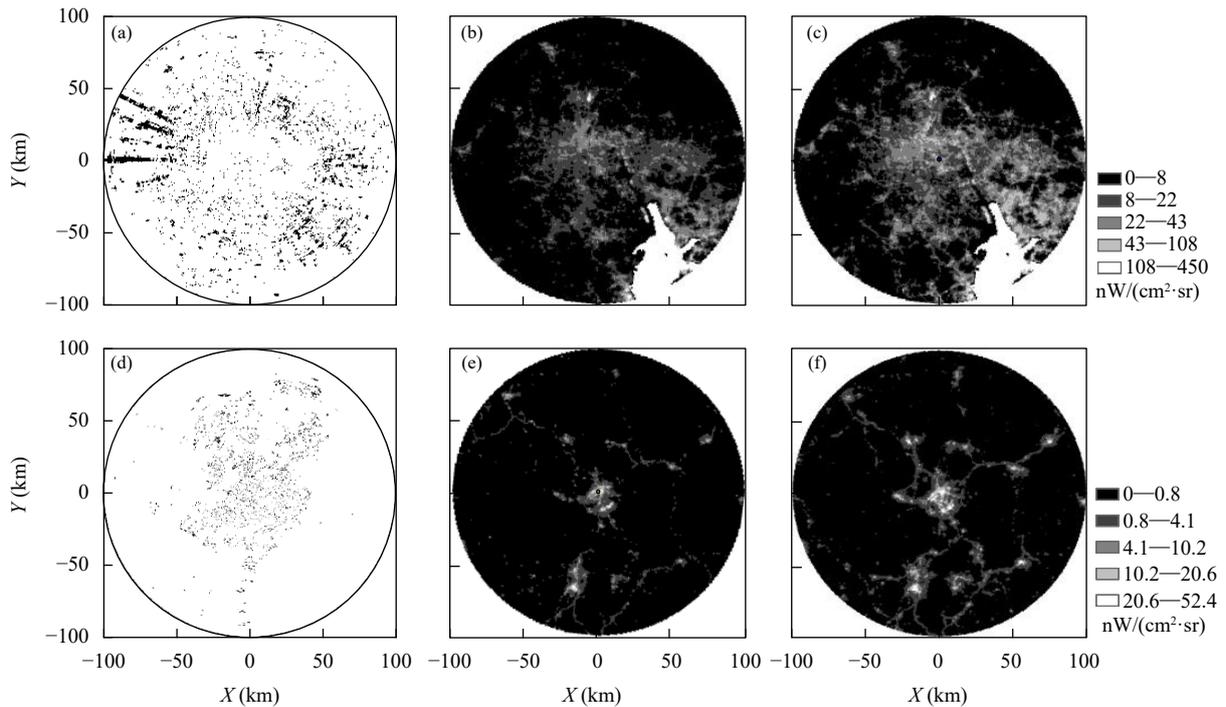


图 8 0.5°仰角 2022 年较 2016 年地物影响新增区 (a, d. 黑色区域)、2016 年 (b, e) 和 2022 年 (c, f) 的平均夜间灯光亮度 (a—c. 广州站, d—f. 韶关站)  
 Fig. 8 The increased areas of ground influence in 2022 compared to that in 2016 at 0.5° elevation (a, d, black areas) and annual VNL in 2016 (b, e) and 2022 (c, f) (a—c. Guangzhou station, d—f. Shaoguan station)

的频次显著增加, 且负值的概率要明显高于正值, 导致累积数据中呈现偏小的  $Z_{DR}$ ; 地物影响区的  $\rho_{HV}$  和  $SD(\Phi_{DP})$  几乎失去了峰值分布的特征, 导致累积数据的偏差非常大。基于该统计结果, 地物影响可定量描述为随机误差与系统误差的叠加, 使得双偏振量在单一时次的不确定性增大、出现偏离降水区

间的奇异值, 长期平均后又趋于稳定、形成与降水数据的显著差异, 且主瓣地物影响区的分布要比副瓣更离散、偏离降水区间的情况更严重。

图 10 以 2023 年 9 月 7 日的台风“海葵”为例, 给出了广州站 SAD 雷达一个时次的双偏振量径向廓线。尽管台风降水较为均匀,  $Z_H$  大多在 20—35 dBz,

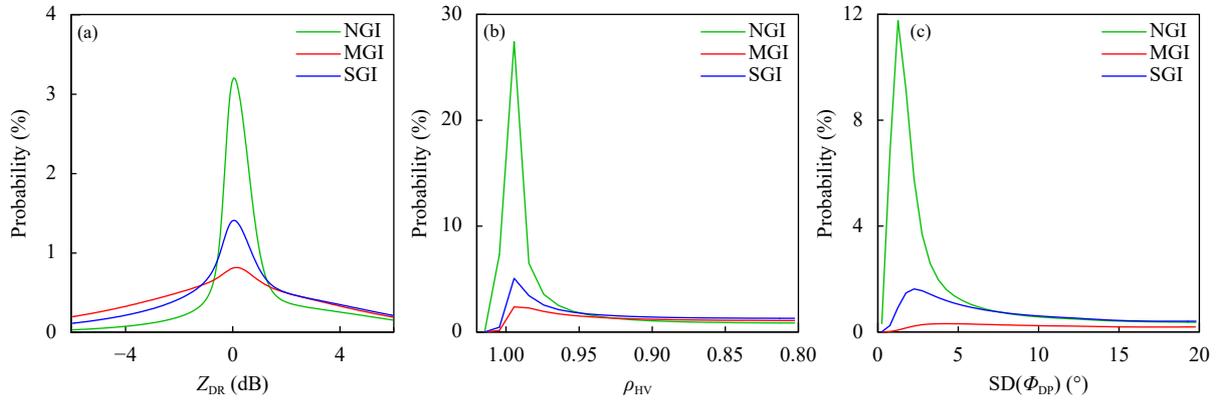


图9 主瓣、副瓣和无地物影响区双偏振量的分布情况 (a)  $Z_{DR}$ 、(b)  $\rho_{HV}$ 、(c)  $SD(\Phi_{DP})$  (站点为南京站, 时间序列数据选取2023年4—9月)

Fig. 9 Distributions of dual polarization observations in MGI, SGI and NGI (a)  $Z_{DR}$ , (b)  $\rho_{HV}$ , (c)  $SD(\Phi_{DP})$  (the station is Nanjing, and the time series data are selected from April to September of 2023)

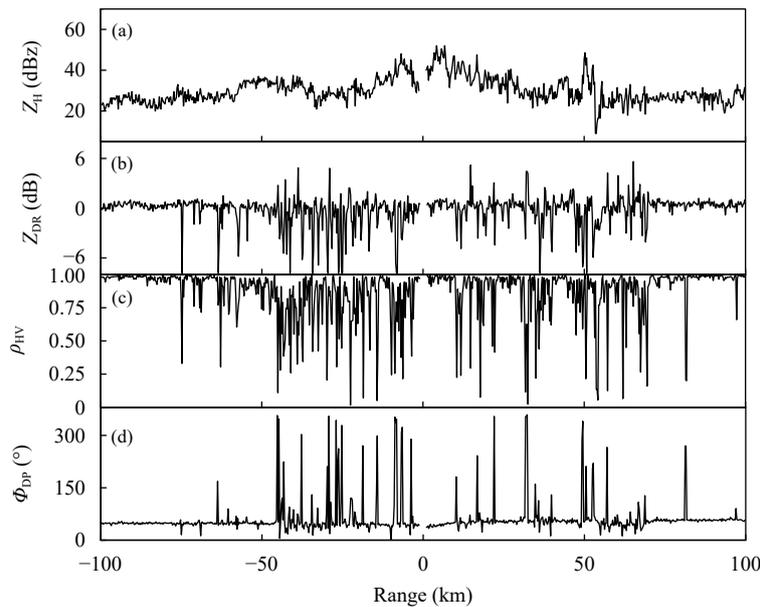


图10 广州站2023年9月7日21时18分0.5°仰角、60°和240°方位角 (a)  $Z_H$ 、(b)  $Z_{DR}$ 、(c)  $\rho_{HV}$  和 (d)  $\Phi_{DP}$  的径向廓线  
Fig. 10 Radial contours of (a)  $Z_H$ , (b)  $Z_{DR}$ , (c)  $\rho_{HV}$ , (d)  $\Phi_{DP}$  at Guangzhou station at 0.5° elevation, 60° and 240° azimuth at 21:18 BT 7 September 2023

但地物导致的双偏振奇异值清晰可见。其中,  $Z_{DR}$  奇异值在-6—5 dB, 且负值的比例更高;  $\rho_{HV}$  奇异值出现在0.1—0.7,  $\Phi_{DP}$  奇异值出现在100°—300°。对于实况数据中的地物影响, 由于其波动程度和偏差范围均存在随机性, 很难使用滤波和偏差订正方式完全恢复, 建议通过实况与累积特征相结合的方式判断后予以去除。

#### 4 结 论

使用中国2016—2023年93部双偏振升级后

的新一代天气雷达观测资料, 统计分析地物影响在业务雷达中的整体比例、影响的主要来源、影响与雷达型号和观测模式的关系、影响随时间的变化情况、影响的性质及双偏振量的分布特征, 所得结论如下:

(1) 地物影响使得双偏振量严重偏离降水区间, 经过长时间的累积表现为  $Z_{DR}$  偏低1 dB以上,  $\rho_{HV}$  降至0.92以下,  $SD(\Phi_{DP})$  大于10°, 该累积特征成为识别地物影响的主要依据。

(2) 地物影响不仅限于低层, 仰角抬升后雷达

副瓣接收到的地物信号也能产生与主瓣类似的影响。大部分雷达近地面区域主瓣地物影响占比为2%—10%、副瓣地物影响占比10%—22%；高仰角主瓣占比降至2%以下、副瓣占比仍在4%—7%，地物引起的双偏振量异常远比地物对波束的遮挡现象严重。

(3)地物影响主要由具备强散射能力的山脉和建筑物引起。当站点高于地形时，地物影响均轻微；当站点低于地形时，周围山脉导致地物影响均偏重；当站点与地形高度接近时，部署地区城市化率高、建筑物多的雷达地物影响严重。

(4)地物影响可定量描述为随机误差和系统误差的叠加，使地物影响区的双偏振量在单一时次的不确定性增大、出现偏离降水区间的奇异值，且主瓣地物影响区偏离降水区间情况比副瓣更严重。由于地物影响引起的奇异值波动程度和偏差范围均存在随机性，建议将实况数据与累积特征相结合进行判断后予以去除。

本研究对双偏振升级后新一代天气雷达的地物影响情况进行了统计分析，为实际业务中双偏振量的使用提供了一定参考。未来需要进一步讨论地物在定量降水估测和相态识别中的影响。为提高新一代天气雷达的数据质量，还需要与厂家配合，从雷达硬件上改进信号处理算法。

## 参考文献

- 程元慧, 傅佩玲, 胡东明等. 2020. 广州相控阵天气雷达组网方案设计及其观测试验. *气象*, 46(6): 823-836. Cheng Y H, Fu P L, Hu D M, et al. 2020. The Guangzhou phased-array radar networking scheme set-up and observation test. *Meteor Mon*, 46(6): 823-836 (in Chinese)
- 何建新, 王旭, 刘艳. 2010. 自适应高斯频域滤波器在天气雷达中的应用. *气象*, 36(6): 117-121. He J X, Wang X, Liu Y. 2010. Application of adaptive Gaussian frequency filter to weather radar. *Meteor Mon*, 36(6): 117-121 (in Chinese)
- 李思腾, 马建立, 陈明轩等. 2021. 网络化衰减订正方法在北京 X 波段网络化雷达中的应用. *气象学报*, 79(5): 804-816. Li S T, Ma J L, Chen M X, et al. 2021. The application of network attenuation correction method on the X-band network radar in Beijing. *Acta Meteor Sinica*, 79(5): 804-816 (in Chinese)
- 柳云雷, 李昌兴, 张乐坚等. 2020. 基于高分辨率高程数据统计分析新一代天气雷达组网的地形遮挡影响. *气象学报*, 78(4): 705-720. Liu Y L, Li C X, Zhang L J, et al. 2020. Statistical analysis of terrain blockage impacts on the CINRAD network based on DEM data. *Acta Meteor Sinica*, 78(4): 705-720 (in Chinese)
- 刘宗庆, 王敏, 景号然等. 2021. 基于优化模糊逻辑的双线偏振天气雷达成地物杂波识别算法研究. *高原山地气象研究*, 41(1): 90-96. Liu Z Q, Wang M, Jing H R, et al. 2021. Research on ground clutter identification algorithm of dual-polarization weather radar based on optimized fuzzy logic. *Plateau Mountain Meteor Res*, 41(1): 90-96 (in Chinese)
- 马建立, 陈明轩, 李思腾等. 2019. 线性规划在 X 波段双线偏振多普勒天气雷达差分传播相移质量控制中的应用. *气象学报*, 77(3): 516-528. Ma J L, Chen M X, Li S T, et al. 2019. Application of linear programming on quality control of differential propagation phase shift data for X-band dual linear polarimetric Doppler weather radar. *Acta Meteor Sinica*, 77(3): 516-528 (in Chinese)
- 王超, 吴翀, 刘黎平. 2019. X 波段双线偏振雷达数据质量分析及控制方法. *高原气象*, 38(3): 636-649. Wang C, Wu C, Liu L P. 2019. Data quality analysis and control method of X-band dual-polarization radar. *Plateau Meteor*, 38(3): 636-649 (in Chinese)
- 文浩, 刘黎平, 张扬. 2017. 多普勒天气雷达成地物回波识别算法改进. *高原气象*, 36(3): 736-749. Wen H, Liu L P, Zhang Y. 2017. Improvements of ground clutter identification algorithm for Doppler weather radar. *Plateau Meteor*, 36(3): 736-749 (in Chinese)
- 吴举秀, 胡志群, 夏凡等. 2023. 基于贝叶斯方法的冰雹大小识别研究. *气象学报*, 81(5): 801-814. Wu J X, Hu Z Q, Xia F, et al. 2023. Hail size discrimination based on the Bayesian method. *Acta Meteor Sinica*, 81(5): 801-814 (in Chinese)
- 谢晓林, 杨澧, 董元昌等. 2023. 复杂地形背景下双偏振雷达数据质量评估方法. *气象科技*, 51(3): 346-355. Xie X L, Yang L, Dong Y C, et al. 2023. Data quality assessment method of dual-polarization radar in complex terrain. *Meteor Sci Technol*, 51(3): 346-355 (in Chinese)
- 张哲, 戚友存, 朱自伟等. 2021. 深圳 S 波段与 X 波段双偏振雷达在定量降水估计中的应用. *气象学报*, 79(5): 786-803. Zhang Z, Qi Y C, Zhu Z W, et al. 2021. Application of radar quantitative precipitation estimation using S-band and X-band polarimetric radars in Shenzhen. *Acta Meteor Sinica*, 79(5): 786-803 (in Chinese)
- 朱丹, 谷军霞, 师春香等. 2018. 新一代天气雷达布网设计的有效覆盖和地形遮挡分析. *气象*, 44(11): 1434-1444. Zhu D, Gu J X, Shi C X, et al. 2018. Analysis of effective coverage and terrain blockage for next generation radar network design. *Meteor Mon*, 44(11): 1434-1444 (in Chinese)
- Dobson J E, Bright E A, Coleman P R, et al. 2000. LandScan: A global population database for estimating populations at risk. *Photogramm Eng Remote Sens*, 66(7): 849-857
- Elvidge C D, Zhizhin M, Ghosh T, et al. 2021. Annual time series of global VIIRS nighttime lights derived from monthly averages: 2012 to 2019. *Remote Sens*, 13(5): 922
- Farr T G, Rosen P A, Caro E, et al. 2007. The shuttle radar topography mission. *Rev Geophys*, 45(2): RG2004
- Hubbert J C, Dixon M, Ellis S M. 2009. Weather radar ground clutter. Part II: Real-time identification and filtering. *J Atmos Ocean Technol*, 26(7):

- 1181-1197
- Kadi A P, Loupas T. 1995. On the performance of regression and step-initialized IIR clutter filters for color Doppler systems in diagnostic medical ultrasound. *IEEE Trans Ultrason, Ferroelectr, Freq Control*, 42(5): 927-937
- Li Y G, Zhang G F, Doviak R J, et al. 2013. A new approach to detect ground clutter mixed with weather signals. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 51(4): 2373-2387
- Ma Y Z, Chandrasekar V. 2021. A hierarchical Bayesian approach for bias correction of NEXRAD dual-polarization rainfall estimates: Case study on hurricane Irma in Florida. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 18(4): 568-572
- Siggia A D, Passarelli Jr R E. 2004. Gaussian model adaptive processing (GMAP) for improved ground clutter cancellation and moment calculation//Proceedings of the 3rd European Conference on Radar Meteorology. Visby: ERAD, 67-73
- Tan S J, Chen H N. 2023. A conditional generative adversarial network for weather radar beam blockage correction. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 61: 4103014
- Tang L, Zhang J, Langston C, et al. 2014. A physically based precipitation-nonprecipitation radar echo classifier using polarimetric and environmental data in a real-time national system. *Wea Forecasting*, 29(5): 1106-1119
- Torres S M, Zrnic D S. 1999. Ground clutter canceling with a regression filter. *J Atmos Ocean Technol*, 16(10): 1364-1372
- Wu C, Liu L P, Wei M, et al. 2018. Statistics-based optimization of the polarimetric radar hydrometeor classification algorithm and its application for a squall line in South China. *Adv Atmos Sci*, 35(3): 296-316
- Wu C, Liu L P, Chen C, et al. 2021. Challenges of the polarimetric update on operational radars in China—ground clutter contamination of weather radar observations. *Remote Sens*, 13(2): 217

---

## 作者勘误

由于作者原因，导致《气象学报》2024年第82卷第4期发表的《华北平原及沿山和沿海五个城市夏季短历时降水过程的日变化分析》（作者：丁乙、窦晶晶、王迎春、苗世光、樊利强）首页英文题目中“summer”误作“summer”。特此声明并致歉意！