

李哲, 吴翀, 刘黎平, 等. 双偏振相控阵雷达误差评估与相态识别方法. 应用气象学报, 2022, 33(1): 16-28.  
DOI: 10.11898/1001-7313.20220102

# 双偏振相控阵雷达误差评估与相态识别方法

李 哲<sup>1)2)</sup> 吴 翀<sup>2)</sup>\* 刘黎平<sup>2)</sup> 宗 蓉<sup>3)</sup> 罗 鸣<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(复旦大学大气与海洋科学系/大气科学研究院, 上海 200438)

<sup>2)</sup>(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

<sup>3)</sup>(深圳市国家气候观象台, 深圳 518000)

## 摘 要

选取 2020 年 3—9 月深圳求雨坛的 X 波段双偏振相控阵雷达探测数据, 与同位置的 S 波段双偏振雷达进行对比。通过一定限制条件定量分析引入误差的原因, 发现反射率因子  $Z_H$  和差分反射率  $Z_{DR}$  的标定误差和随机误差较大, 其中  $Z_H$  误差变化范围为  $-0.5 \sim 4.5$  dB,  $Z_{DR}$  误差变化范围为  $-0.7 \sim 0.2$  dB。在上述较大误差影响下, 传统模糊逻辑相态识别方法的水凝物相态识别结果不可靠, 因此根据不同相态的雷达参量特征范围以及融化层高度建立基本结构为二叉树的决策树相态识别方法。针对上述方法的实际应用效果, 分别从水凝物相态识别结果对误差的敏感性和空间分布的合理性进行评估, 结果表明: 决策树相态识别方法的水凝物相态识别结果稳定性高于模糊逻辑相态识别方法, 且在对流云中的水凝物相态分布更加合理, 能够发挥 X 波段双偏振相控阵雷达在研究云内水凝物相态演变的优势。

**关键词:** 双偏振相控阵雷达; 误差分析; 水凝物相态识别

## 引 言

近年相控阵技术由军用逐渐向民用领域发展, 从单偏振相控阵雷达向双偏振相控阵雷达发展。相比机械扫描雷达, 相控阵雷达采用电扫描方式, 多个发射和接收单元的发射接收系统, 可实现快速扫描并获取更高分辨率的数据<sup>[1-3]</sup>。X 波段双偏振相控阵雷达建设条件灵活<sup>[4]</sup>, 还可以弥补 S 波段双偏振雷达网低仰角存在观测盲区的不足, 因此, 中国气象局在广东开展了多部 X 波段双偏振相控阵雷达协同观测试验, 对冰雹生成的微物理过程以及龙卷开展精细化研究<sup>[5]</sup>。

尽管相控阵雷达在扫描周期上具有优势, 但过快采样会降低采样准确性, 相控阵雷达的宽波束也会使距离雷达较远的回波被明显平滑, 难以探测到细微结构。为了验证相控阵雷达数据的可靠性, 刘

俊等<sup>[6]</sup>对比分析 X 波段相控阵雷达与 X 波段机械扫描雷达的回波数据, 发现相控阵雷达受平滑作用影响导致探测的弱回波面积减少, 强回波面积增加。考虑到升级为双偏振的相控阵雷达, 其双偏振参量的可靠性也很重要, 因此需要对双偏振相控阵雷达的探测能力进行全面对比。双偏振相控阵雷达存在不同的数据误差, 研究发现双偏振相控阵雷达因受接收机内部噪声<sup>[7]</sup>、大气环境扰动<sup>[8]</sup>以及回波自身变化等影响可产生严重的随机性误差。特别是对于数量级较小的双偏振参量, 噪声会降低双偏振算法的稳定性。双偏振相控阵雷达还受阵列天线结构影响, 雷达波束宽度、天线收发增益等系统参数随扫描角改变而变化, 其中 X 波段雷达衰减比 C 波段、S 波段雷达更强<sup>[9]</sup>, 从而导致严重的系统性误差<sup>[10]</sup>。系统性误差主要分为雷达整体性误差与仰角变化产生的误差<sup>[11]</sup>, 不同参量的系统性误差会对雷达相态识别方法产生不同影响, 使识别准确性降低。因此

2021-09-15 收到, 2021-11-16 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目(41875036), 国家重点研发计划(2018YFC1507400)

\* 通信作者, 邮箱: wuchong@cma.gov.cn

需获取准确的随机性误差和系统性误差量级,并有必要定量分析该误差对于相态识别结果的影响。

双偏振雷达通过发射和接收水平及垂直方向的偏振波,获得不同形状、不同尺寸观测目标在不同方向的回波以及存在的差异信息,进而实现相态识别。目前相态识别常用模糊逻辑相态识别(fuzzy logic hydrometeor classification, FHC)方法, FHC方法由Zadeh<sup>[12]</sup>提出,经Straka等<sup>[13]</sup>和Zrnice等<sup>[14]</sup>引入雷达气象领域。FHC方法的主要优势在于利用隶属度函数设定各相态参量过渡阈值,有效解决不同相态之间参量重叠的问题,将多种参量的识别结果进行综合考虑,得到最合理的结果。然而,曹俊武等<sup>[15]</sup>发现FHC方法识别结果中各相态参量特征值并不明确。针对该问题, Park等<sup>[16]</sup>对FHC方法进行优化,加入融化层高度和降水类型等信息,并考虑数据误差和波束展宽影响,以提高数据特征值不明显相态识别结果的准确性。在不同误差对FHC方法识别结果影响的研究中,徐舒扬等<sup>[17]</sup>利用广州S波段双偏振雷达数据,通过引入系统性误差和随机性误差定量分析误差对于识别结果稳定性的影响,发现引入不同量级误差后相态识别结果变化明显,主要原因是FHC方法在相态识别过程中,部分参量间权重系数非常接近,由此得到的合成值也几乎相同,识别结果易受误差影响。水凝物相态识别是一种较为复杂的分类问题, Hunt等<sup>[18]</sup>提出的二叉决策树算法在分类中起重要作用,决策树算法易于理解并能够实现可视化分析,逐级将对象进行分类。X波段雷达数据衰减严重,误差较大,利用决策树算法可以提高衰减较小参量的优先级,降低误差较大参量对识别结果的影响,提高其准确性,因此研究决策树算法在X波段双偏振相控阵雷达相态识别中的应用有重要意义。

随着粤港澳大湾区相控阵雷达布网的推进<sup>[19-20]</sup>,目前已有15部X波段双偏振相控阵雷达投入试运行。但受相控阵雷达独特的天线结构和扫描方式的影响,数据往往存在不同类型的误差,同时FHC方法识别结果易受误差影响出现异常相态,将影响新布网雷达的实际应用效果。因此,本文在定量分析X波段双偏振相控阵雷达不同类型数据误差的基础上,建立基本结构为二叉树的决策树相态识别(decision tree hydrometeor classification, DHC)方法,对DHC方法进行误差敏感性检验和识别效果检验,并

与FHC方法进行对比,以改善相态识别效果。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据选取与质量评估方法

本文使用2020年3月4日—9月15日深圳求雨坛站X波段双偏振相控阵雷达(简称X-PAR)22317个时次反射率因子 $Z_H$ (单位:dBZ)、相关系数 $\rho_{hv}$ 、差分反射率 $Z_{DR}$ (单位:dB)、差分传播相移 $\Phi_{DP}$ (单位:°)、差分相移率 $K_{DP}$ (单位:°·km<sup>-1</sup>)等参量的三维体扫数据。X-PAR采用全相参脉冲多普勒、双偏振以及相控阵体制,数据水平分辨率为30 m,垂直方向为12层仰角,时间分辨率为92 s,原始数据经过衰减订正处理。通常S波段雷达衰减较弱,在升级改造过程中经过严格标定,观测数据可靠性高,因此为了与X-PAR原始数据对比,选取相同位置的S波段双偏振雷达(简称S-POL)作为参照雷达,S-POL水平分辨率为250 m,垂直方向为9层仰角,时间分辨率为6 min。

利用S-POL原始数据,对X-PAR的 $Z_H$ 和 $Z_{DR}$ 可靠性进行验证。由于两部雷达所处位置相同,高度相差9 m,可忽略经纬度匹配问题,根据S-POL原始数据格点的仰角、方位角、径向距离以及扫描时间,在X-PAR原始数据中找到仰角、方位角、扫描时间接近的格点。S-POL和X-PAR库长不一致,故以S-POL库长为基准,对该长度下的X-PAR原始数据进行平均处理,建立仰角、方位角、距离库一一对应的匹配点对,为了减小米散射对两个波段对比的影响, $Z_{DR}$ 的误差计算仅选择小到中雨的降水过程。在此基础上,将误差细分为标定误差(时间和仰角)、衰减订正误差、波束展宽误差和随机误差,通过改变单一变量,保持其他变量不变,分类对误差定量分析。在讨论随机误差时,基于X-PAR原始数据,通过限制距离去除波束展宽带来的误差,限制 $\Phi_{DP}$ 的大小去除衰减订正误差,固定仰角层去除仰角变化带来的标定误差,以及去除因时间变化带来的标定误差。其中仰角和距离的选择应保证匹配点对足够多且不受地物回波影响。同理在对标定误差、衰减订正误差和波束展宽误差讨论时,采用相同的限制条件去除其他误差干扰,但需要对原始数据进行滤波处理去除随机误差。限制条件见表1。

表 1 X-PAR 不同误差的限制条件

Table 1 Limiting conditions for different errors of X-PAR

误差种类	表征误差的变量	限制条件			
		数据处理	距离	$\Phi_{DP}$	其他限制
标定误差	时间	滤波	20~30 km	$\leq 5^\circ$	仰角(X-PAR:4.5°,S-POL:4.3°)
	仰角	滤波	20~30 km	$\leq 5^\circ$	去除标定随时间的误差
衰减订正误差	$\Phi_{DP}$	滤波	25~30 km	$\geq 5^\circ$	仰角(X-PAR:4.5°,S-POL:4.3°),去除标定随时间的误差
波束展宽误差	距离	滤波	所有距离	$\leq 5^\circ$	仰角(X-PAR:4.5°,S-POL:4.3°),去除标定随时间的误差
随机误差	$Z_H$ 标准差、 $Z_{DR}$ 标准差	未滤波	20~30 km	$\leq 5^\circ$	仰角(X-PAR:4.5°,S-POL:4.3°),去除标定随时间的误差

1.2 FHC 方法的限制及 DHC 方法的优势

FHC 方法通过构建隶属度函数,将输入的雷达参数利用模糊规则计算合成值,每个相态对应 1 个合成值,合成值最大的相态即为识别结果。FHC 方法在计算过程中,不同参量的权重系数较接近,各参量优先级几乎一致,使得识别结果易受误差影响。X-PAR 波长相比于 S-POL 更短,对于椭球粒子的后向散射截面更大,散射特性不同会导致一定误差,其

中  $Z_H$  偏差量级较小,接近 0。对于直径较大的粒子,两种波长的  $Z_{DR}$  存在明显差异,当粒子直径为 0.3~0.8 cm 时,X-PAR 的  $Z_{DR}$  偏大 0.3 dB<sup>[21]</sup>。同时 X-PAR 还因阵列天线硬件限制存在较大系统误差以及衰减订正误差。在以上误差共同影响下,导致 FHC 方法识别结果出现异常,为解决上述问题,本文提出 DHC 方法,其流程如图 1 所示。

在雷达参量的选用上,DHC 方法保留 FHC 方

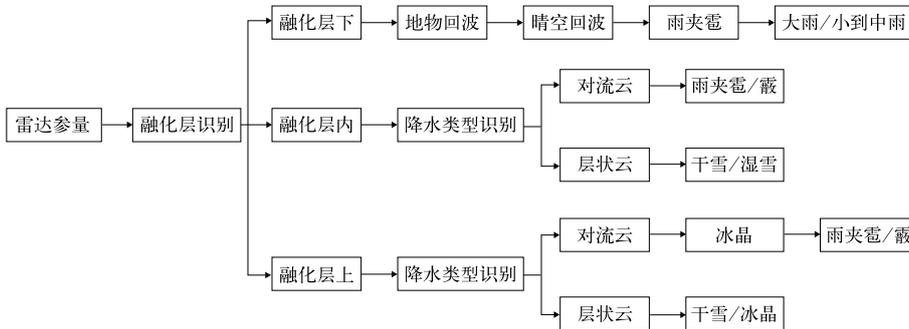


图 1 DHC 方法流程

Fig. 1 Flow chart of DHC method

法中  $Z_H, \rho_{hv}, K_{DP}$  及融化层高度和降水类型,误差较大的  $Z_{DR}$  未保留。水凝物分类与 FHC 方法保持一致,包括以下 9 种:地物回波、晴空回波、干雪、湿雪、冰晶、霰、小到中雨、大雨和雨夹雹。DHC 方法避开使用各个参量以及辅助信息同时进行判别,从特征值较为特殊且误差较小的参量开始,误差较大参量最后进行判别,逐级分离出相态,以降低误差对于相态识别结果的影响。在融化层以下,利用  $Z_H, \rho_{hv}$  依次分离出参量特征范围明显的地物回波、晴空回波和雨夹雹,利用  $K_{DP}$  区分大雨和小到中雨;在融化层内,通过  $\rho_{hv}$  区分层状云中的干雪和湿雪,  $Z_H$  和  $\rho_{hv}$  区分对流云中的雨夹雹和霰;在融化层以上,将融化层高度和  $Z_H$  相结合区分层状云中的干雪和冰晶,以取代误差较大的  $Z_{DR}$ ,对流云中则先利用  $Z_H$  分离出冰晶,再结合  $\rho_{hv}$  区分雨夹雹和霰。判别过程中融

化层高度信息通过 MLDA(melting layer detection algorithm)<sup>[22]</sup> 获得,在当日 L 波段探空数据获取的湿球温度 0℃ 高度基础上,利用该高度上下位置雷达观测到的融化物空间分布情况计算不同方位角的融化层顶和底层的高度;降水类型采用肖艳姣等<sup>[23]</sup> 提出的区分方法,将组合反射率因子水平梯度、35 dBZ 回波顶高的水平梯度和垂直累积液态水含量密度作为分离参数,利用模糊逻辑算法分离层状云和对流云。

针对 DHC 方法的效果评估,主要从两个方面与 FHC 方法开展对比。第一是方法的误差敏感性检验对比,由于 X-PAR 误差由系统性误差和随机性误差两部分组成<sup>[24]</sup>,因此在对原始数据进行初步订正后,人为引入两种误差,统计两种方法各相态变化比例。第二是相态空间分布合理性对比,利用 X-

PAR 滤波后数据,得到一段时间内融化层以下、融化层内和融化层以上各相态所占比例的统计结果以及典型个例相态分布结构,并以 S-POL 的识别结果作为客观验证,分析 DHC 方法识别结果的合理性。

## 2 基于统计的 X-PAR 误差分析

### 2.1 $Z_H$ 及 $Z_{DR}$ 总误差

本文选取 2020 年 3 月 18 日 10:30(北京时,下同)X-PAR 和 S-POL 的  $Z_H$  和  $Z_{DR}$  原始数据进行对比,说明 X-PAR 总误差存在的特点,其中 S-POL 仰角为  $4.3^\circ$ ,X-PAR 仰角为  $4.5^\circ$ ,对比结果见图 2。由图 2 可知,X-PAR 反射率因子整体高于 S-POL,受衰减作用的影响,X-PAR 未探测到 S-POL  $90^\circ \sim$

$180^\circ$ 方位角强回波后的边缘弱回波。由于米散射效应,两部雷达的  $Z_{DR}$  在  $Z_H$  大于 40 dBZ 的区域差别较大。整体上,X-PAR 的  $Z_H$  和  $Z_{DR}$  存在系统性偏移和随机波动,在距离雷达较远的位置,系统性偏移有增大趋势,可能是因为不同位置衰减订正效果不同和 X-PAR 波束较宽对雷达采样造成影响。以上对比表明: $Z_H$  和  $Z_{DR}$  均存在一定误差,经统计  $Z_H$  总误差 80%以上位于  $-1 \sim 5$  dB,平均为 1.6 dB, $Z_{DR}$  总误差 80%以上位于  $-0.8 \sim 0.2$  dB,平均为  $-0.17$  dB。总误差由多种因素共同导致,误差按特征表现为系统性误差和随机性误差,产生的原因主要有标定随时间和仰角的变化、衰减订正效果不同、波束宽度较宽和随机噪声,为了定量分析不同原因引起的误差占比及特点,需要对总误差进行分类讨论。

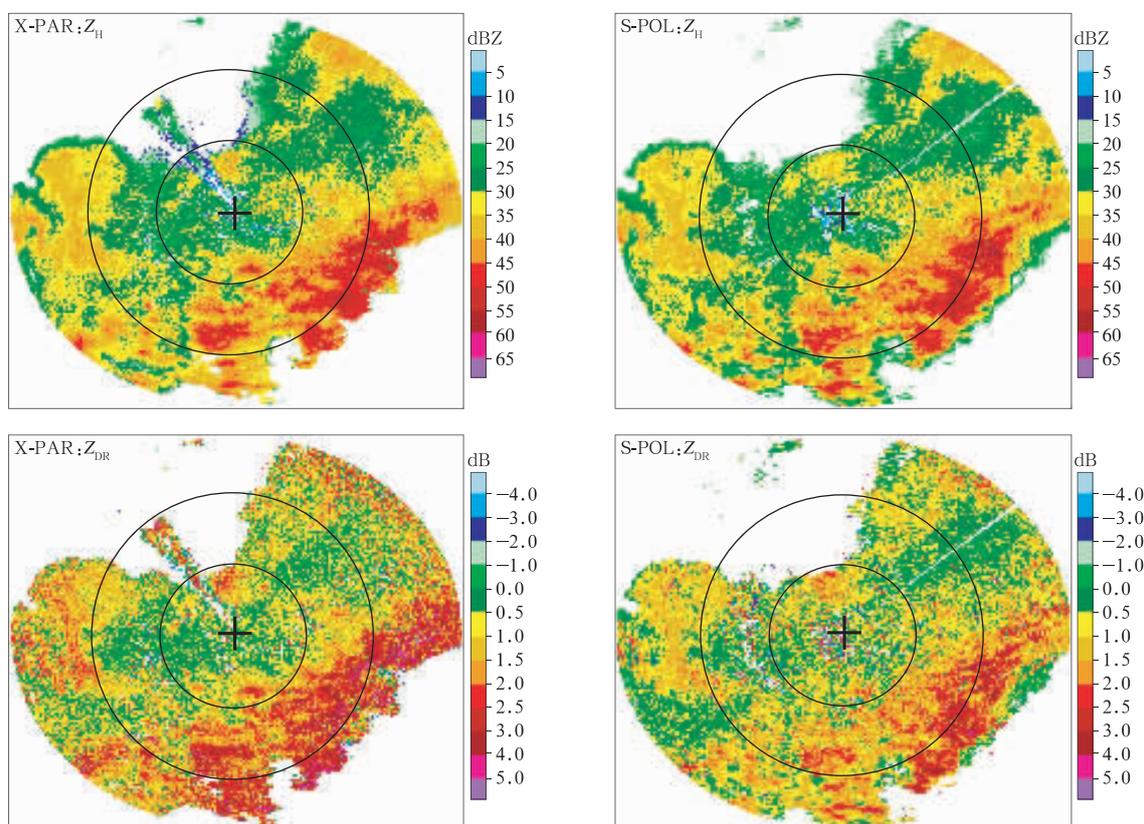


图 2 2020 年 3 月 18 日 10:30 X-PAR 与 S-POL 的  $Z_H$  和  $Z_{DR}$  水平结构  
(相邻距离圈间距为 15 km, + 为雷达位置)

Fig. 2 The horizontal structure of  $Z_H$  and  $Z_{DR}$  of X-PAR and S-POL at 1030 BT 18 Mar 2020  
(the distance between adjacent circles is 15 km, + denotes the location of radar)

### 2.2 $Z_H$ 及 $Z_{DR}$ 随机误差

依据表 1,选取 2020 年 3—9 月降水个例,通过逐小时订正时间误差,保持距离、仰角和  $\Phi_{DP}$  不变讨

论随机误差。由图 3 中 X-PAR 的  $Z_H$  和  $Z_{DR}$  标准差与随机误差对比频次可以看到, $Z_H$  随机误差均匀分布在零值上下, $Z_{DR}$  随机误差多处于  $-0.5 \sim 0.5$  dB。

随着标准差增加,两参量随机误差范围均有所扩大,但对于 $Z_H$ 标准差大于2 dB, $Z_{DR}$ 标准差大于0.2 dB的区域,由于点数较少造成规律不明显,为了进一步探究随机误差的分布规律,分段绘制 $Z_H$ 和 $Z_{DR}$ 随机误差量级占比图,并与总误差进行对比。由图3可知, $Z_H$ 和 $Z_{DR}$ 随机误差相对于总误差范围均有所减少,且更加聚集,其中 $Z_H$ 随机误差80%以上位于 $-2.5\sim 2.5$  dB,平均为0, $Z_{DR}$ 随机误差80%以上位于 $-0.4\sim 0.4$  dB,平均为0。 $Z_H$ 标准差为0~3 dB

比标准差超过3 dB的随机误差分布更加聚集,误差范围也相对减小,说明随着数据波动增加,随机误差也随之增加,但变化不明显; $Z_{DR}$ 标准差变化也表现出相同趋势。为了降低随机误差对于后续相态识别结果的影响,采用以某格点前后4个库长为1组数据,对该组数据进行排序,去除极小值和极大值,求取该组数据平均值,对X-PAR原始数据进行滤波处理。

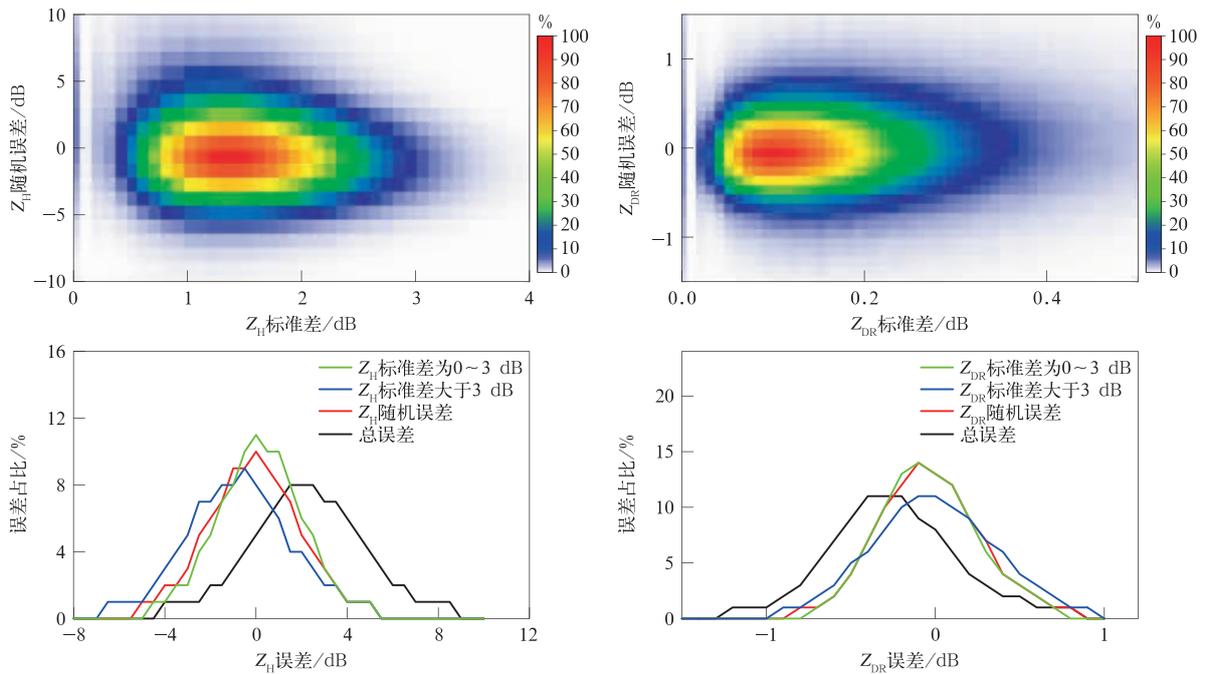


图3 X-PAR的 $Z_H$ 和 $Z_{DR}$ 随机误差对比频次及误差量级占比

Fig. 3  $Z_H$  and  $Z_{DR}$  random error comparison frequency and error magnitude ratio of X-PAR

### 2.3 $Z_H$ 及 $Z_{DR}$ 标定误差

X-PAR标定误差是时间变化产生误差与仰角变化产生误差的叠加,因此将标定误差分为时间误差和仰角误差进行讨论。依据表1,利用2020年3—9月滤波后数据,保持距离、仰角和 $\Phi_{DP}$ 不变讨论时间误差,分析误差对比频次及时间误差量级占比(图4)。去除时间误差,利用同时间的滤波后数据,通过保持距离、 $\Phi_{DP}$ 不变讨论仰角误差,对仰角进行分段,选择 $-5.0^\circ\sim -1.5^\circ$ , $-10.5^\circ\sim -5.1^\circ$ 两段,分析 $Z_H$ 和 $Z_{DR}$ 的仰角误差量级占比(图4)。由 $Z_H$ 及 $Z_{DR}$ 时间误差频次可以看到,两参量因时间变化产生的误差分布均匀,不因时间改变产生较大变化,时间误差量级占比显示在去除其他误差后, $Z_H$ 及

$Z_{DR}$ 时间误差的范围相对更加聚集,其中 $Z_H$ 时间误差80%以上位于 $-0.5\sim 4.5$  dB,平均为2.3 dB, $Z_{DR}$ 时间误差80%以上位于 $-0.6\sim 0$  dB,平均为 $-0.23$  dB。仰角误差量级占比显示仰角变化产生的 $Z_H$ 误差相对较小,且误差范围对称分布在0附近, $Z_H$ 仰角误差80%以上位于 $-2.5\sim 2.5$  dB,平均为0.43 dB,而 $Z_{DR}$ 仰角误差相对较大,80%以上位于 $-0.7\sim 0.1$  dB,平均为 $-0.22$  dB,同时受X-PAR收发增益因扫描指向角改变而发生变化的影响,仰角偏离法向更多,误差范围更大。定量分析时间和仰角变化产生的标定误差,可以发现两种误差量级均较大,因此对滤波后数据进行逐小时订正,以提高相态识别结果的准确性。

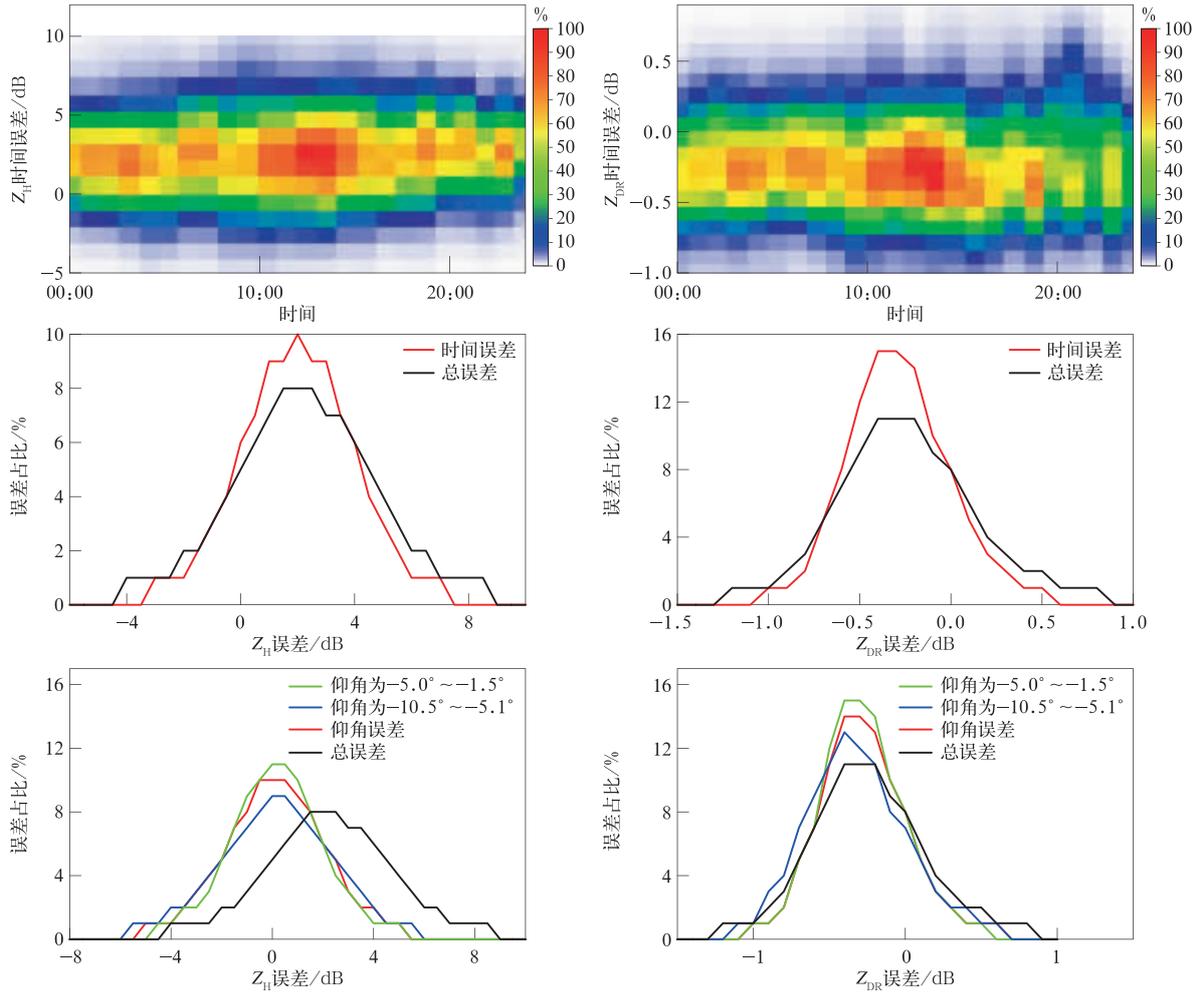


图 4 X-PAR 的  $Z_H$  和  $Z_{DR}$  标定误差对比频次及误差量级占比

Fig. 4  $Z_H$  and  $Z_{DR}$  calibration error comparison frequency and error magnitude ratio of X-PAR

### 2.4 $Z_H$ 及 $Z_{DR}$ 衰减订正误差

X-PAR 原始数据经过衰减订正处理,但在强回波和弱回波订正效果并不相同,即出现衰减订正误差。依据表 1,利用 2020 年 3—9 月滤波后数据,通过逐小时订正时间误差,保持距离和仰角不变讨论

衰减订正误差(图 5)。由图 5 可知, $Z_H$  衰减订正误差主要分布在  $-3 \sim 3$  dB, $Z_{DR}$  衰减订正误差主要分布在  $-0.7 \sim 0.2$  dB,但随着  $\Phi_{DP}$  增加,点数减少,误差变化规律不明显。为了进一步探究衰减订正误差的量级,对  $\Phi_{DP}$  进行分段讨论,结果显示  $Z_H$  衰减订

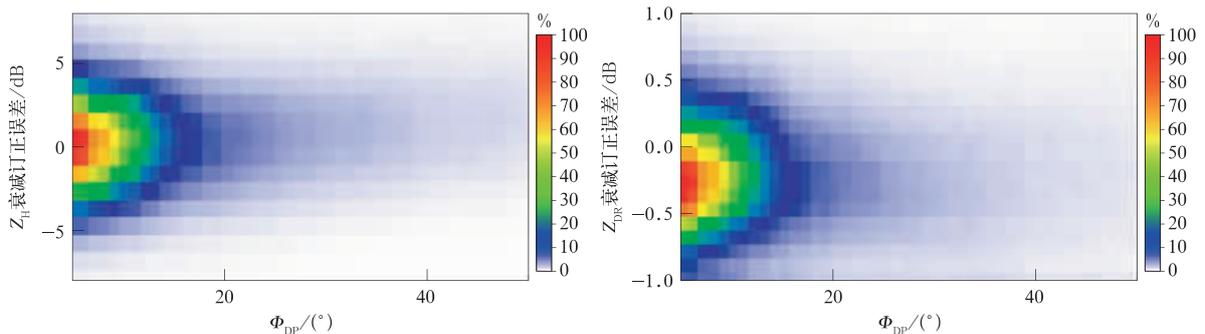
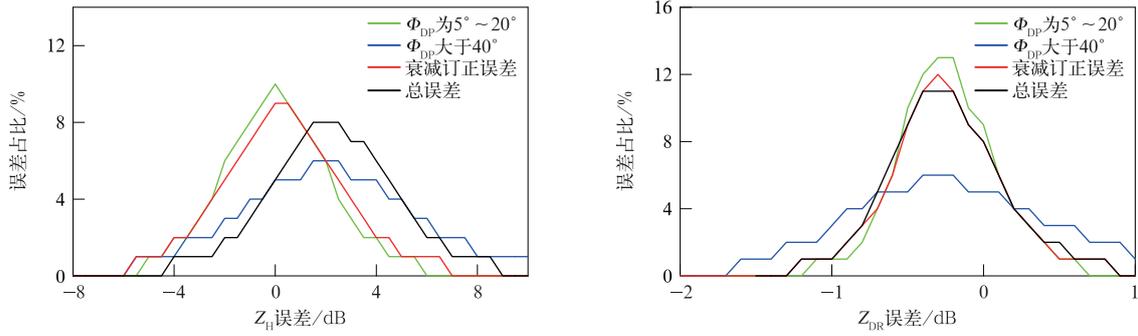


图 5 X-PAR 的  $Z_H$  和  $Z_{DR}$  衰减订正误差对比频次及误差量级占比

Fig. 5  $Z_H$  and  $Z_{DR}$  attenuation correction error frequency and error magnitude ratio of X-PAR



续图 5

正误差 80% 以上位于  $-3 \sim 3$  dB, 平均为 0.57 dB,  $Z_{DR}$  衰减订正误差 80% 以上位于  $-0.7 \sim 0.2$  dB, 平均为  $-0.19$  dB。通过对比  $\Phi_{DP}$  不同的  $Z_H$  和  $Z_{DR}$  衰减订正误差发现超过  $40^\circ$  的  $\Phi_{DP}$  误差范围明显增大, 主要因为衰减订正采用固定系数, 衰减越大, 订正的误差也越大, 所以该误差主要受衰减订正效果影响, 且仅在距离雷达较远、衰减较强的区域较严重。

### 2.5 $Z_H$ 及 $Z_{DR}$ 波束展宽误差

X-PAR 波束宽度较宽会影响雷达径向探测能力。依据表 1, 利用 2020 年 3—9 月滤波后数据, 通过逐小时订正, 时间误差, 保持  $\Phi_{DP}$  和仰角不变讨论波束展宽误差。由图 6 可知,  $Z_H$  波束展宽误差主要

位于  $-2.5 \sim 2.5$  dB,  $Z_{DR}$  波束展宽误差主要位于  $-0.3 \sim 0.2$  dB, 两参量误差随距离增加无明显变化趋势。为了进一步分析波束展宽对数据的影响, 讨论不同距离范围误差量级占比, 图 6 显示  $Z_H$  波束展宽误差对称分布在 0 附近, 其中 80% 以上位于  $-2.5 \sim 2.5$  dB, 平均为 0.39 dB,  $Z_{DR}$  误差 80% 以上位于  $-0.7 \sim 0.2$  dB, 平均为  $-0.21$  dB。通过对比 5~15 km 和 34~42 km 的误差占比可知, 误差随距离改变未发生明显变化, 说明该部分误差主要是 X-PAR 波束宽度较宽导致对分散的气象目标采样时, 目标统计特征被严重均一化而产生误差, 且  $Z_H$  误差量级较小,  $Z_{DR}$  较大。

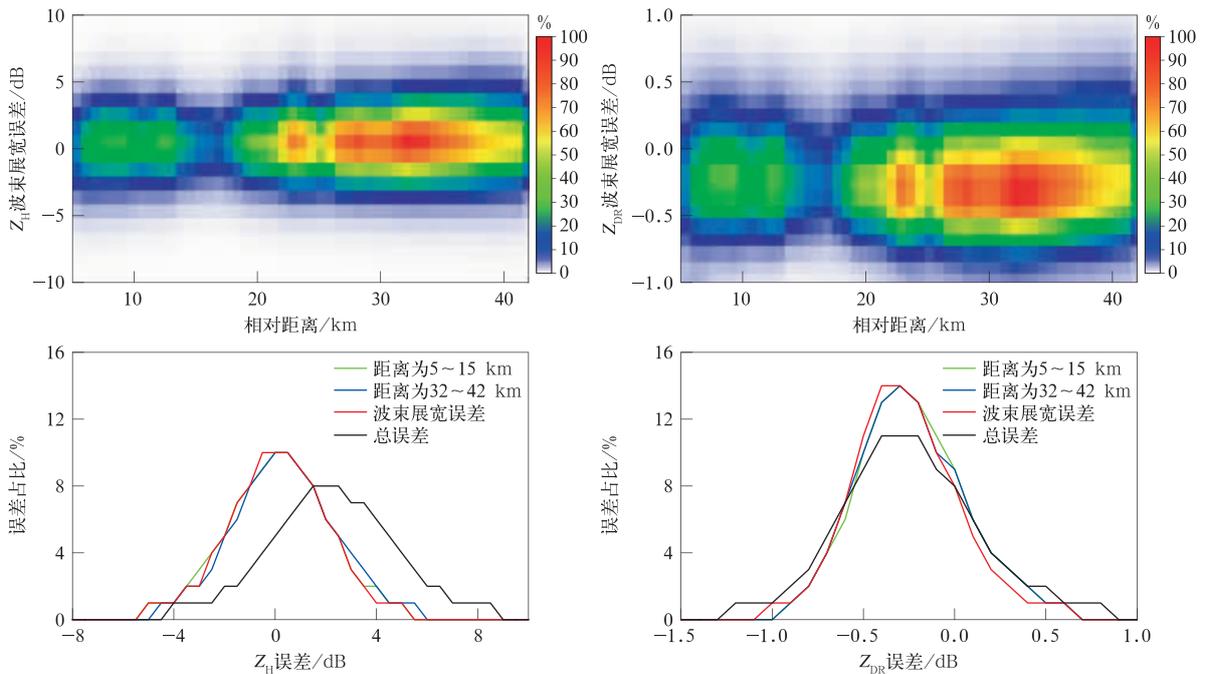


图 6 X-PAR 的  $Z_H$  和  $Z_{DR}$  波束展宽误差对比频次及误差量级占比

Fig. 6  $Z_H$  and  $Z_{DR}$  beam broadening error frequency and error magnitude ratio of X-PAR

### 3 DHC 方法与 FHC 方法对比及识别结果验证

#### 3.1 相态识别方法误差的敏感性试验

由于  $Z_{DR}$  整体误差较大, DHC 方法中未使用该参量。基于数据订正后的 2020 年 3—9 月降水个例, 选择向数据引入变化范围为  $-3 \sim 3$  dB 的  $Z_H$  平均系统误差, 采用生成高斯白噪声方式模拟平均值为 0, 不同量级标准差的  $Z_H$  随机误差。图 7 为两种方法分别引入  $Z_H$  系统误差和随机误差后各相态变化率,  $\rho_{hv}$  和  $K_{DP}$  的误差影响较小可忽略。由图 7 可知,  $Z_H$  系统误差对 DHC 方法识别的雨夹雹、大雨、霰和晴空回波影响较大, 其中雨夹雹和晴空回波变化率为  $-50\% \sim 50\%$ , 大雨和霰变化率为  $-25\% \sim$

$25\%$ 。 $Z_H$  系统误差对 FHC 方法识别的大雨、霰、晴空回波、冰晶、湿雪、地物影响较大, 其中雨夹雹和冰晶变化最大, 雨夹雹变化率为  $-40\% \sim 90\%$ , 冰晶为  $-50\% \sim 60\%$ 。 $Z_H$  随机误差仅对 DHC 方法识别的雨夹雹产生较大影响, 其变化率最大达到  $60\%$ , 对于其余 8 种相态, DHC 方法识别的变化率均小于  $10\%$ , 特别是地物、干雪、湿雪和小雨, 变化率接近 0。 $Z_H$  随机误差对 FHC 方法识别雨夹雹、大雨、冰晶、晴空回波和地物均有影响, 其中雨夹雹变化率可达  $130\%$ , 大雨为  $70\%$ , 冰晶、晴空回波和地物为  $20\%$ 。通过向两种方法引入  $Z_H$  不同误差, 雨夹雹、大雨和霰识别均对  $Z_H$  误差敏感, 原因主要在于 3 种相态的  $Z_H$  权重很大, 识别结果很大程度上取决于  $Z_H$  的大小, 但对于冰晶、湿雪、地物, FHC 方法相态识别变化率均大于 DHC 方法。

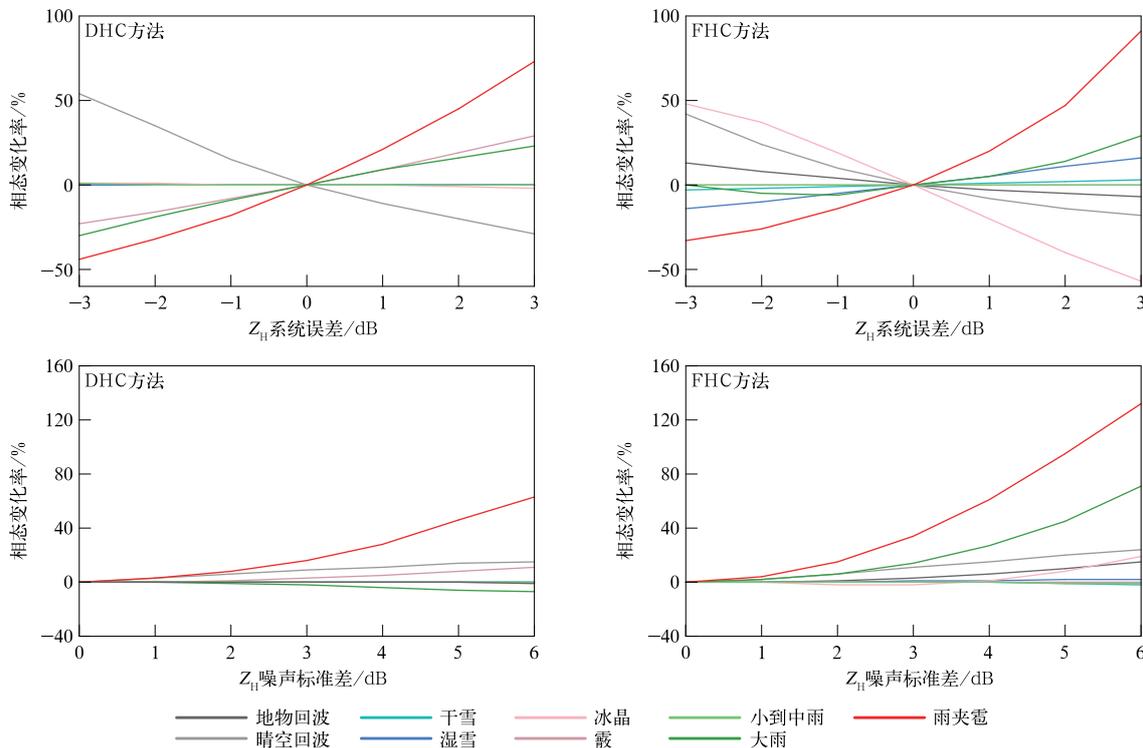


图 7 向  $Z_H$  分别引入系统误差和随机误差后相态变化率  
Fig. 7 Phase change rate after introducing system error and random error to  $Z_H$

#### 3.2 相态识别结果的空间分布对比

选取 2020 年 3—4 月 X-PAR 典型降水个例分为融化层以下、融化层内、融化层以上 3 个高度进行识别结果统计, 计算各高度不同相态所占比例。通过计算得到两种方法对于干雪、湿雪、冰晶、小雨、大雨等相态的识别结果无明显差异, 5 种相态存在的环境完全符合其生成所需的条件, 两种方法识别结

果基本合理。但在融化层内, FHC 方法识别出地物和晴空回波两种异常相态, 其中 7% 的地物处于该层次, 晴空回波为 20%, 3—4 月融化层位于 3400 m 高度, 该高度下不应出现这两种相态。同时两种方法均识别出雨夹雹, 通常雨夹雹出现在融化层附近, 其数量随高度增加而减少<sup>[25]</sup>, 且周围应有霰和湿雪存在。DHC 方法识别的雨夹雹在 3 个高度上均存

在,而 FHC 方法识别的雨夹雹仅存在于融化层以下,未识别出霰,这不符合雨夹雹和霰的实际分布规律,可见 DHC 方法对于地物、晴空回波、霰和雨夹雹在各层次的相态空间分布结果更加合理。

### 3.3 典型个例的相态识别结果对比及合理性

图 8 为 2020 年 3 月 18 日 09:37 对流云降水个例中 X-PAR 和 S-POL 的  $Z_H$ ,  $\rho_{hv}$  和  $Z_{DR}$  空间分布。由图 8 可知,S-POL 在该区域  $Z_H$  超过 45 dBZ,A 区域强中心甚至达到 60 dBZ,对应强中心的  $\rho_{hv}$  低于 0.94,表现为明显的雨夹雹特征。B 区域和 C 区域  $Z_H$  超过 45 dBZ, $\rho_{hv}$  大于 0.95,且处于融化层以上,更符合霰的特征。云内相态结构表现为融化层内主要是冰雹和霰,融化层以下强回波区域主要是大雨,

融化层以上主要是霰。对应 X-PAR 的观测结果(图 8),A 区域回波同样较强,但在强回波后出现了强衰减导致的 V 型缺口,在 V 型缺口的两侧  $Z_{DR}$  由正值突变为负值, $\rho_{hv}$  也因 X-PAR 信噪比低,而被明显低估,同时 B 区域的  $Z_H$  也有较强的衰减,衰减可达 5 dBZ 以上。在这种因衰减导致误差较大的对流云降水中,利用 X-PAR 滤波后数据的 FHC 方法在 A 区域、B 区域、C 区域的识别结果与利用 S-POL 原始数据得到的识别结果存在明显差异(图 9),A 区域内,FHC 方法因  $\rho_{hv}$  被低估将 X-PAR 探测水凝物识别为地物;在 V 型缺口两侧以及 B 区域、C 区域,FHC 方法会因衰减将 X-PAR 探测水凝物识别为冰晶或干雪。而 DHC 方法对 X-PAR 探测水凝

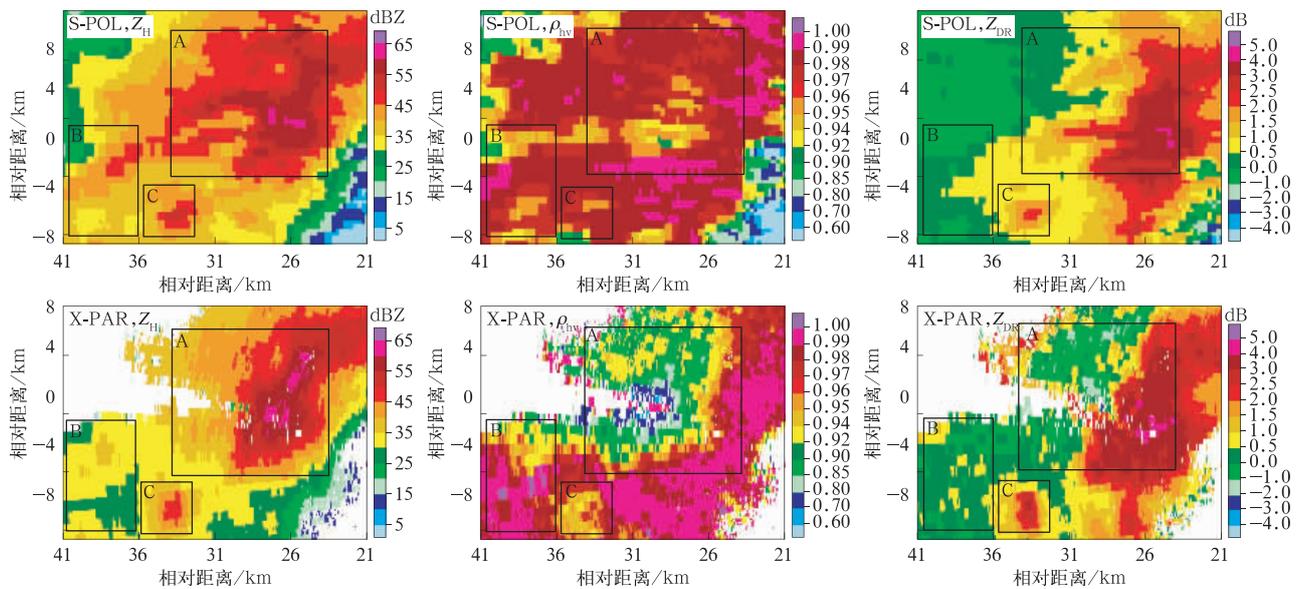


图 8 2020 年 3 月 18 日 09:37 X-PAR 和 S-POL 的  $Z_H$ ,  $\rho_{hv}$  和  $Z_{DR}$  水平结构(6.3°仰角)

Fig. 8 The horizontal structure of  $Z_H$ ,  $\rho_{hv}$  and  $Z_{DR}$  of X-PAR and S-POL at 0937 BT 18 Mar 2020(the elevation:6.3°)

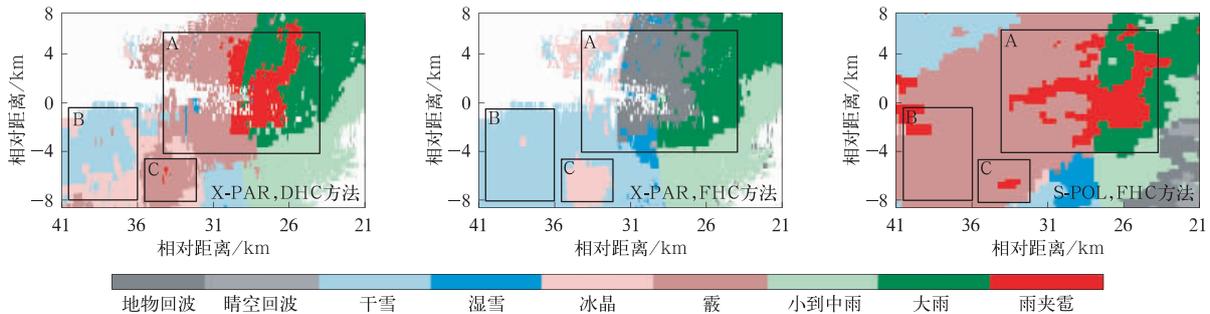


图 9 DHC 方法和 FHC 方法对于 2020 年 3 月 18 日 09:37 X-PAR 和 S-POL 探测水凝物相态识别结果(6.3°仰角)

Fig. 9 Hydrometeor classification results of DHC method and FHC method in X-PAR and S-POL at 0937 BT 18 Mar 2020(the elevation:6.3°)

物的识别结果在强回波以及强回波后的衰减区与 S-POL 识别结果基本一致,相对于 FHC 方法识别结果更加合理。但当衰减过大时,如在 B 区域,X-PAR 的  $Z_H$  衰减超过 5 dBZ,误差过大导致两种方法对 X-PAR 探测水凝物的识别结果均存在异常。

选取 2020 年 5 月 11 日 23:00 大范围层状云降水个例,对比两种方法在层状云中相态识别结果的合理性。由图 10 可知,X-PAR 和 S-POL 对  $Z_H$  和  $Z_{DR}$  观测结果差异不明显,而在距离雷达 15 km 范围内,S-POL 易受地物影响而存在较大范围  $\rho_{hv}$  偏小的区域。在距离雷达 30 km 以上的融化层附近,X-

PAR 受宽波束的影响出现部分方位角融化层附近  $\rho_{hv}$  被低估的现象。从两部雷达各参量分布可以看到,该个例在融化层以下主要为小到中雨,融化层及融化层以上主要为干雪、湿雪和冰晶等相态。对应图 11 的相态分布,DHC 方法对 X-PAR 探测水凝物的识别结果与 S-POL 识别结果基本一致,符合图 10 中雷达参量的分布特点,但对于 S-POL,由于靠近雷达的  $\rho_{hv}$  偏小,所以在融化层以下识别出较多的地物回波。对比两种方法利用 X-PAR 滤波后数据得到的识别结果可知,FHC 方法受雷达宽波束的影响在靠近融化层以下的区域识别出大范围地物,可

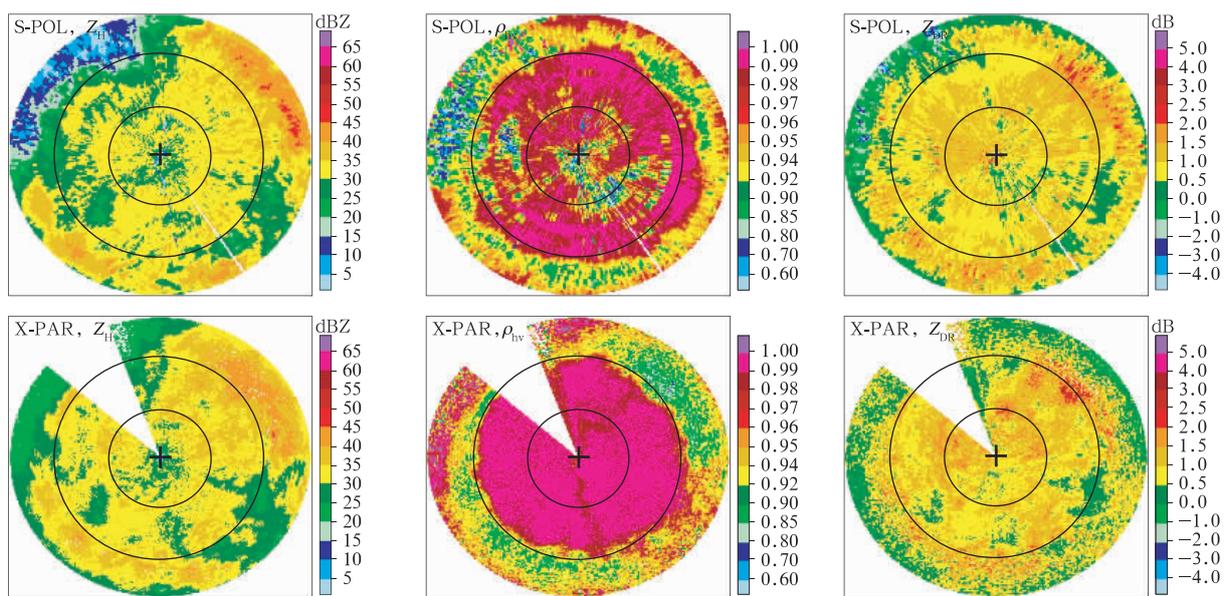


图 10 2020 年 5 月 11 日 23:00 X-PAR 和 S-POL 的  $Z_H, \rho_{hv}$  和  $Z_{DR}$  水平结构  
( $6.3^\circ$ 仰角,相邻距离圈间距为 15 km,+为雷达位置)

Fig. 10 The horizontal structure of  $Z_H, \rho_{hv}$  and  $Z_{DR}$  of X-PAR and S-POL at 2300 BT 11 May 2020  
(the elevation: $6.3^\circ$ ,the distance between adjacent circles is 15 km,+ deontes the location of radar)

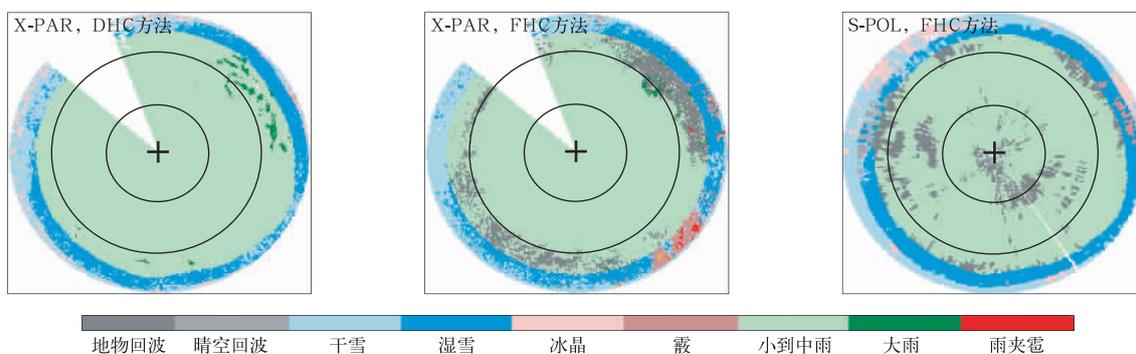


图 11 DHC 方法和 FHC 方法对于 2020 年 5 月 11 日 23:00 X-PAR 和 S-POL 探测水凝物相态识别结果  
( $6.3^\circ$ 仰角,相邻距离圈间距为 15 km,+为雷达位置)

Fig. 11 Hydrometeor classification results of DHC method and FHC method in X-PAR and S-POL at 2300 BT 11 May 2020  
(the elevation: $6.3^\circ$ ,the distance between adjacent circles is 15 km,+ deontes the location of radar)

见 FHC 方法因地物回波的  $\rho_{hv}$  权重较大, 导致识别结果产生误判。

#### 4 结论与讨论

研究表明:

1) 对 X-PAR 的  $Z_H$  和  $Z_{DR}$  误差定量分析表明: 两参量的标定误差和随机误差均较大,  $Z_H$  误差变化范围为  $-0.5 \sim 4.5$  dB,  $Z_{DR}$  误差变化范围为  $-0.7 \sim 0.2$  dB, 其中因仰角变化产生的标定误差随扫描角偏离阵面法向而增大。衰减订正误差及波束展宽误差相对较小,  $Z_H$  误差为  $-2.5 \sim 2.5$  dB,  $Z_{DR}$  误差为  $-0.7 \sim 0.1$  dB。同时, 衰减订正误差因衰减增强而增大, 而波束展宽误差随距离的变化并不明显。

2) 通过向误差订正后 X-PAR 的  $Z_H$  引入系统性误差和随机性误差进行检验, DHC 方法和 FHC 方法识别的雨夹雹、晴空回波、大雨和霰受  $Z_H$  误差影响较大, 其中雨夹雹和晴空回波因  $Z_H$  系统性误差产生的变化率为  $-50\% \sim 50\%$ , 大雨和霰的变化率为  $-25\% \sim 25\%$ 。对于其余 5 种相态, DHC 方法因  $Z_H$  系统性误差和随机性误差产生的变化率低于  $10\%$ , 普遍低于 FHC 方法中的相态变化率, 相态识别结果稳定性整体高于 FHC 方法。

3) 通过选取典型个例, 利用 S-POL 原始数据得到的识别结果检验 DHC 方法在 X-PAR 滤波后数据中的实际应用效果。发现在对流云降水中, DHC 方法对于融化层以下的雨夹雹和大雨区分力更强, 相态垂直结构更加连续, 且 DHC 方法不会因衰减产生误判。在层状云降水中, DHC 方法不会因  $\rho_{hv}$  被低估将水凝物识别为地物回波。

由于 X 波段数据衰减严重, 当衰减超过 5 dBZ 时, DHC 方法也因较大误差存在误判。相控阵天气雷达作为一种新型天气雷达, 还未在我国北部地区广泛布网, 因此如何提高强衰减条件下 DHC 方法的可靠性, 验证该方法在我国北部地区应用效果还需要开展更多工作。

#### 参考文献

- [1] 张光义. 相控阵雷达原理. 北京: 国防工业出版社, 2009: 13-21.  
Zhang G Y. Principles of Phased array Radar. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 13-21.
- [2] 吴翀, 刘黎平, 汪旭东, 等. 相控阵雷达扫描方式对回波强度测量的影响. 应用气象学报, 2014, 25(4): 406-414.
- [3] 马舒庆, 陈洪滨, 王国荣, 等. 阵列天气雷达设计与初步实现. 应用气象学报, 2019, 30(1): 1-12.  
Ma S Q, Chen H B, Wang G R, et al. Design and initial implementation of array weather radar. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(1): 1-12.
- [4] 吴翀, 刘黎平, 仰美霖, 等. X 波段双偏振雷达相态识别与拼图的关键技术. 应用气象学报, 2021, 32(2): 200-216.  
Wu C, Liu L P, Yang M L, et al. Key technologies of hydro-meteor classification and mosaic algorithm for X-band polarimetric radar. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(2): 200-216.
- [5] 刘黎平, 吴林林, 吴翀, 等. X 波段相控阵天气雷达对流过程观测外场试验及初步结果分析. 大气科学, 2014, 38(6): 1079-1094.  
Liu L P, Wu L L, Wu C, et al. Field experiment on convective precipitation by X-Band phased-array radar and preliminary results. *Chinese J Atmos Sci*, 2014, 38(6): 1079-1094.
- [6] 刘俊, 黄兴友, 何雨芬, 等. X 波段相控阵气象雷达回波数据的对比分析. 高原气象, 2015, 34(4): 1167-1176.  
Liu J, Huang X Y, He Y Q, et al. Comparative analysis of X-Band phased array antenna weather radar measurements. *Plateau Meteorology*, 2015, 34(4): 1167-1176.
- [7] 刘黎平, 吴翀, 汪旭东, 等. X 波段一维扫描有源相控阵天气雷达测试定标方法. 应用气象学报, 2015, 26(2): 129-140.  
Liu L P, Wu C, Wang X D, et al. Test and calibration methods for X-band active phased-array weather radar. *J Appl Meteor Sci*, 2015, 26(2): 129-140.
- [8] Ryzhkov A V, Schuur T J, Burgess D W, et al. The joint polarization experiment: Polarimetric rainfall measurements and hydrometeor classification. *Bull Amer Meteor Soc*, 2005, 86(6): 809-824.
- [9] Park S G, Bringi V N, Chandrasekar V, et al. Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X band. Part I: Theoretical and empirical basis. *J Atmos Oceanic Technol*, 2005, 22(11): 1621-1632.
- [10] 杨金红, 高玉春, 程明虎, 等. 相控阵天气雷达波束特性. 应用气象学报, 2009, 20(1): 119-123.  
Yang J H, Gao Y C, Cheng M H, et al. Beam characteristics analysis on phased array weather radar. *J Appl Meteor Sci*, 2009, 20(1): 119-123.
- [11] 张蔚然, 吴翀, 刘黎平, 等. 双偏振相控阵雷达与业务雷达的定量对比及观测精度研究. 高原气象, 2021, 40(2): 424-435.  
Zhang W R, Wu C, Liu L P, et al. Research on quantitative comparison and observation precision of dual polarization phased array radar and operational radar. *Plateau Meteorology*, 2021, 40(2): 424-435.
- [12] Zadeh L A. Fuzzy algorithms. *Information & Control*, 1968, 12(2): 94-102.
- [13] Straka M J, Zrníc D S. An Algorithm to Deduce Hydrometeor

- Types and Contents from Multiparameter Radar Data // 26th Conference on Radar Meteorology, 1993: 513-515.
- [14] Zrníc D S, Ryzhkov A, Straka J, et al. Testing a procedure for automatic classification of hydrometeor types. *J Atmos Oceanic Technol*, 2001, 18(6): 892-913.
- [15] 曹俊武, 刘黎平, 葛润生. 模糊逻辑法在双线偏振雷达识别降水粒子相态中的研究. *大气科学*, 2005, 29(5): 827-836.  
Cao J W, Liu L P, Ge R S. A Study of fuzzy logic method in classification of hydrometeors based on polarimetric radar measurement. *Chinese J Atmos Sci*, 2005, 29(5): 827-836.
- [16] Park H S, Ryzhkov A V, Zrníc D S, et al. The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: Description and application to an MCS. *Wea Forecasting*, 2009, 24(3): 730-748.
- [17] 徐舒扬, 吴翀, 刘黎平. 双偏振雷达水凝物相态识别方法的参数改进. *应用气象学报*, 2020, 31(3): 350-360.  
Xu S Y, Wu C, Liu L P. Parameter improvements of hydrometeor classification algorithm for the dual-polarization radar. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(3): 350-360.
- [18] Hunt E B, Marin J, Stone P J. *Experiments in Induction*. New York: Academic Press, 1966.
- [19] 傅佩玲, 胡东明, 黄浩, 等. 台风山竹(1822)龙卷的双极化相控阵雷达特征. *应用气象学报*, 2020, 31(6): 706-718.  
Fu P L, Hu D M, Huang H, et al. Observation of a tornado event in outside-region of Typhoon Mangkhut by X-band polarimetric phased array radar in 2018. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(6): 706-718.
- [20] 王洪, 孔凡铀, Jung Youngsun, 等. 面向资料同化的 S 波段双偏振雷达质量控制. *应用气象学报*, 2018, 29(5): 546-558.  
Wang H, Kong F Y, Jung Y S, et al. Quality control of S-band polarimetric radar measurements for data assimilation. *J Appl Meteor Sci*, 2018, 29(5): 546-558.
- [21] 蔡启铭, 徐宝祥, 刘黎平. 降雨强度、雨区衰减与双线偏振雷达观测关系的研究. *高原气象*, 1990, 9(4): 347-355.  
Cai Q M, Xu B X, Liu L P. A study of the relation between raininess, extinction of rain cloud and parameters measured by a dual linear polarization radar. *Plateau Meteorology*, 1990, 9(4): 347-355.
- [22] Giangrande S E, Krause J M, Ryzhkov A V. Automatic designation of the melting layer with a polarimetric prototype of the WSR-88D radar. *J Appl Meteor Climatol*, 2008, 47(5): 1354-1364.
- [23] 肖艳姣, 刘黎平. 三维雷达反射率资料用于层状云和对流云的识别研究. *大气科学*, 2007, 31(4): 645-654.  
Xiao Y J, Liu L P. Identification of stratiform and convective cloud using 3D radar reflectivity data. *Chinese J Atmos Sci*, 2007, 31(4): 645-654.
- [24] 丁青兰, 刘黎平, 葛润生, 等. 双线偏振多普勒雷达测量精度的理论分析. *应用气象学报*, 2003, 14(1): 30-38.  
Ding Q L, Liu L P, Ge R S, et al. Theoretical analysis of measurement accuracy of dual linear polarization Doppler radar. *J Appl Meteor Sci*, 2003, 14(1): 30-38.
- [25] 朱士超, 袁野, 吴月, 等. 江淮地区孤立对流云统计特征. *应用气象学报*, 2019, 30(6): 690-699.  
Zhu S C, Yuan Y, Wu Y, et al. Statistical characteristics of isolated convection in the Jianghuai Region. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(6): 690-699.

## Error Evaluation and Hydrometeor Classification Method of Dual Polarization Phased Array Radar

Li Zhe<sup>1)2)</sup> Wu Chong<sup>2)</sup> Liu Liping<sup>2)</sup> Zong Rong<sup>3)</sup> Luo Ming<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> (*Department of Atmospheric and Oceanic Sciences & Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438*)

<sup>2)</sup> (*State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

<sup>3)</sup> (*Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen 518000*)

### Abstract

Phased array radar is faster in scanning speed than mechanical scanning radar, but due to the influence of antenna structure and attenuation, phased array radar will produce larger system error and random error. The mainstream fuzzy logic hydrometeor classification method has little difference in the weight coefficients of each parameter, and the calculated composite values are often close, so the hydrometeor classification results are easily affected by data errors. The detection data of the X-band dual polarization phased array radar at Qiuyutan, Shenzhen, from March to September in 2020 are compared with the S-band dual polarization radar at the same location. The points close to the elevation, azimuth and radial distance of the two radars are obtained to establish matching datasets to calculate the errors of X-band dual-polarization phased array radar. Quantitative analysis of the causes for the introduction of errors through certain restriction conditions reveals that the calibration error and random error of the reflectance factor  $Z_H$  and the differential reflectance  $Z_{DR}$  are relatively large. The error range of  $Z_H$  is  $-0.5-4.5$  dB, and the error of  $Z_{DR}$  is  $-0.7-0.2$  dB. After the preliminary correction of calibration error and random error, it is found that there are still some errors in data, which make the hydrometeor classification result of fuzzy logic method unreliable, so the decision tree hydrometeor classification method with the basic structure of binary tree is established according to the characteristic range of radar parameters of different hydrometeors and the height of the melting layer. In order to verify the practical application effects of the above methods, the error sensitivity of hydrometeor classification results and the rationality of hydrometeor spatial distribution are evaluated respectively. Typical examples are selected to further evaluate the rationality of the decision tree hydrometeor classification method by comparing the parameters and hydrometeor classification results of X-band dual polarization phased array radar and S-band dual polarization radar. The evaluation results show that the stability of the decision tree hydrometeor classification method is higher than that of the fuzzy logic method, and the hydrometeor distribution in the convective cloud is more reasonable, which can give full play to the advantage of X-band dual polarization phased array radar in studying the phase evolution of particles in the cloud.

**Key words:** dual polarization phased array radar; error analysis; hydrometeor classification