

X 波段双偏振相控阵天气雷达与 S 波段天气 雷达组网拼图方法研究*

耿飞^{1,2} 刘黎平¹ 王飞² 吴翀¹ 李哲³ 吴林林² 朱家杉⁴

1 中国气象科学研究院灾害天气科学与技术全国重点实验室, 北京 100081

2 中国气象局人工影响天气中心, 北京 100081

3 复旦大学大气与海洋科学系/大气科学研究院, 上海 200438

4 广东省气象数据中心, 广州 510080

摘要: 近年来, 我国多个地区密集布设了 X 波段双偏振相控阵天气雷达 (X-PAR), X-PAR 具有时空分辨率高的探测优势, 但有限的探测范围和数据质量问题限制了其观测资料的应用, 为了更好发挥 S 波段双偏振雷达 (S-POL) 与 X-PAR 密集组网的观测优势, 获得准确精细的三维雷达观测场。本研究针对不同波长雷达的物理量, 构建数据质量评价参数, 实现单波长雷达网的插值拼图; 进一步, 将 S-POL 拼图作为准确但粗糙的背景场, 并结合 X-PAR 拼图的细节结构, 实现 S-POL 与 X-PAR 拼图融合。结果表明, 通过计算相应数据质量评价参数, 结合雷达探测点与拼图网格点的空间距离, 设置权重将各雷达共同进行插值拼图, 能够使拼图保留各雷达观测共性特征和数据质量较高的观测结果。S-POL 与 X-PAR 雷达拼图融合方法同时实现了对 S-POL 整体强度分布和 X-PAR 细节特征的保留。本方法能够有效发挥密集组网 S-POL 与 X-PAR 观测优势, 得到相对准确且精细的三维雷达观测场。

关键词: X 波段双偏振相控阵天气雷达, S 波段天气雷达, 雷达组网, 雷达拼图

Study on the Network Mosaic Method of X-band Dual-polarization Phased Array Weather Radars and S-band Weather Radars

Geng Fei^{1,2} Liu Liping¹ Wang Fei² Wu Chong¹ Li Zhe³ Wu Linlin² Zhu Jiashan⁴

1 State Key Laboratory of Severe Weather Meteorological Science and Technology, Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081

2 CMA Weather Modification Centre, Beijing 100081

3 Department of Atmospheric and Oceanic Sciences & Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438

4 Guangdong Meteorological Data Centre, Guangzhou 510080

Abstract: In recent years, the X-band dual-polarization phased array weather radars (X-PAR) have been densely deployed in multiple regions across China, with the advantage of high

*国家自然科学基金项目 (U2142210), 国家重点研发计划 (2023YFD2302700), 中国气象局云降水物理与人工影响天气重点开放实验室创新基金资助项目 (2024CPML-C026) 共同资助

第一作者: 耿飞, 主要从事大气物理学、雷达气象学研究。E-mail: gengf@cma.gov.cn

通信作者: 刘黎平, 主要从事大气物理学、雷达气象学研究。E-mail: lpliu@cma.gov.cn

spatiotemporal resolution. However, the data quality and limited coverage of single X-PAR are restricted factors of its application. Taking advantage of the radar network consist of the S-band dual-polarization weather radar (S-POL) and X-PAR, the research aims to obtain precise three-dimensional observation results. In this study, the data quality evaluation parameters were constructed for the radar variables of radars with different wavelengths to achieve the interpolation and mosaicking of single-wavelength radar networks. Furthermore, by calculating the deviations between the S-POL and X-PAR radar mosaics, the S-POL mosaic was taken as a background field with the low-resolution and credible characteristic, and integrate the observed detail structures from the X-PAR mosaic, the fusion of the S-POL and X-PAR radar mosaics was realized. The results show that by calculating the data quality evaluation parameters, combining the spatial distance from radar bins to grid points, and setting weights to perform interpolation and mosaicking for each radar, the mosaics can retain the high-quality observations and common observational characteristics of each radar. The fusion method of the S-POL and X-PAR radar mosaics simultaneously realizes the retention of the intensity distribution of the S-POL and the detailed features of the X-PAR. This method can utilize the observational advantages of the densely networked S-POL and X-PAR and obtain an accurate and detailed three-dimensional radar observation field.

Key words: X-band dual-polarization phased array weather radar, S-band weather radar, radar networks, Radar mosaic

引言

中小尺度对流系统空间尺度小、时间演变快、致灾严重,且很多天气现象出现在中下层,加上复杂地形的影响,6 分钟为观测周期、空间分辨率相对低的 S 波段双偏振天气雷达 (S-band dual-polarization weather radar, S-POL) 观测和预警这些灾害天气可能存在观测盲区 and 快速演化信息的缺失。为此,我国多个地区布设了 X 波段双偏振相控阵天气雷达 (X-band dual-polarization phased array weather radar, X-PAR), 以弥补 S 波段雷达网的不足。从探测特点分析, X-PAR 的时空分辨率明显高于业务组网的 S-POL, 但单部 X-PAR 探测范围小, 对大范围、强降水的天气存在观测缺失; S-POL 受衰减影响小、探测范围大, 数据质量较好, 但时空分辨率比较低。如何通过不同波长雷达的组网拼图, 获得大范围精细准确的三维雷达观测场, 是组网雷达数据应用的关键问题。

对于 S 或 C 波段天气雷达网, 目前已建立了比较成熟的组网拼图方法。常见的雷达观测网格化插值方法包括最近邻插值, 线性内插, Cressman 插值 (Weygandt et al, 2002), Barnes 插值 (Askelson et al, 2000) 等。已有的 S 波段业务组网雷达拼图研究表明, 对单部雷达进行水平方向最近邻插值, 垂直方向线性插值的网格化方案效果较好, 当各雷达观测偏差较小

时, 利用雷达距离指数加权平均能够较好实现多雷达拼图融合(肖艳姣, 2007; Zhang et al, 2005)。Sun et al (2019) 针对三部 S 波段天气雷达反射率因子, 发现与最近邻插值、线性内插和 8 点插值相比, 自适应的 Barnes 插值方法能够获得更加连续且分辨率较高的网格化插值结果。Langston et al (2007) 针对组网雷达观测存在时间差的问题, 将插值距离、雷达径向距离和观测时间差三个方面的权重乘积作为拼图插值权重, 获得了时空连续且能够保留细节特征的拼图结果。针对雷达观测点分布不均匀的问题, Scovell and Al-Sakka (2016) 基于二叉空间分割树原理, 结合 Barnes 连续校正, 实现多雷达反射率因子三维拼图, 在保留雷达观测数据密集区细节特征的同时避免观测稀疏区的欠平滑问题。针对华南组网 S-POL 的对比研究显示, 相比于先对单部雷达网格化插值再进行多雷达拼图融合的方法, 将多部雷达观测直接加权插值能够获得更加合理的拼图结果(李哲, 2022)。除了对雷达观测的加权插值方法外, 利用变分方法实现对笛卡尔坐标下雷达观测的求解能够兼顾雷达拼图的连续性和细节特征的保留(Roca-Sancho et al, 2014; Brook et al, 2022), 在雷达观测稀疏区获得较好的拼图结果, 但对于密集组网观测地区, 加权插值方式更加高效。

针对 S (或 C) 波段的雷达组网拼图研究表明, 由于雷达的布设普遍距离较远, 观测样本在雷达远端相对稀疏, 雷达数据质量问题主要源于远端分辨率下降和波束非均匀(Ryzhkov, 2007), 因此雷达拼图融合主要利用雷达观测距离来设置权重。而对于密集组网布设的 X 波段天气雷达, 它的时空分辨率较高, 共同覆盖区的观测密度较大, 单部雷达的观测范围较小, 数据质量的问题较 S 波段雷达更为复杂。以往针对 S (或 C) 波段雷达网的拼图方法对 X 波段雷达已不再完全适用。

尽管利用最近邻插值法对多部 X 波段雷达观测反射率因子进行组网拼图, 能够有效补充业务雷达探测的低空盲区(吴翀等, 2016)。但根据数据质量调整置信度阈值, 利用雷达观测距离与衰减影响计算拼图融合权重, 可以更好发挥 X 波段雷达观测优势, 获得准确精细的组网拼图结果(吴翀等, 2021)。此外, 也有研究根据 X 波段雷达观测距离、积分衰减、零滞后相关系数(ρ_{HV})等反映雷达观测数据质量的参量, 确定拼图插值权重进行组网拼图, 获得了与附近 S 波段雷达接近的观测结果(Liu et al, 2007)。针对组网雷达观测时间差的问题, 可使用归一化互相关方法估计移动向量, 对时间和空间采用线性插值实现单部雷达观测的网格化处理, 再进行多雷达拼图(Kim et al, 2019)。对长沙机场阵列天气雷达回波强度融合的试验表明, 计算雷达每个方位向和仰角方向分辨率扩展系数, 并依次进行插值填充, 然后利用均值法对多个收发子阵反射率因子进行融合, 能够得到更为准确、精细且细节突出的回波结构(叶开等, 2020)。相比于以往针对 S (或 C) 波段雷达的组网拼图方法, 针对 X 波段天气雷达网的插值拼图方法应避免低质量观测数据对拼图结果的“污染”, 同时最大化保留回波细节特征。

已有的拼图方法普遍针对雷达反射率因子, 对于双偏振物理量的拼图方法研究较少。此外, X 波段天气雷达的优势在于获得更加精细的低层降水观测信息, 与 S 波段天气雷达网形

成优势互补，但目前对于 S 波段与 X 波段天气雷达网的拼图融合方法研究仍然不足。

目前，国际上开展的综合外场试验初步验证了 1 分钟分辨率的 X 波段天气雷达（机械扫描雷达）网在地形复杂地区和重要气象保障区局地强天气监测和预警方面的明显作用，形成了一系列数据处理方法和应用成果（Mahale et al,2014; Brewster et al, 2017; Diederich et al, 2015; Anagnostou et al, 2018; Chandrasekar et al, 2018），但 X 波段相控阵天气雷达并没有进入到这些组网研究中，S 和 X 波段雷达组网技术也只处于综合试验阶段，并没有进行大范围推广。我国已经进入了 X 波段相控阵天气雷达组网业务应用阶段（程元慧等，2020；肖靖宇等，2022；Zhao et al, 2024），但现有的业务应用还主要依靠单一波长的雷达观测或简单的组网拼图产品，尚未能很好发挥 S 波段与 X 波段天气雷达密集组网优势，实现不同波长雷达探测能力的互补，亟需建立多波段雷达组网拼图融合方法，获得相对准确精细的三维雷达观测场，为云降水物理精细结构及其演化特征分析、雷达定量估测降水、强对流灾害天气预报预警等提供数据支撑。

1 数据概况

1.1 雷达参数

本研究选用广东省的 S 波段双偏振多普勒天气雷达（S-POL）和 X 波段双偏振相控阵天气雷达（X-PAR）为主要研究数据。其中 S-POL 的数据经过了严格的标定，数据质量相对稳定可靠。X-PAR 是一款全固态相参、有源相控阵、脉冲多普勒、双偏振天气雷达。S-POL 与 X-PAR 均包含反射率因子 Z_H （单位：dBZ）、零滞后相关系数 ρ_{HV} 、差分反射率因子 Z_{DR} （单位：dB）、双程差分传播相位 Φ_{DP} （单位：°）、差分传播相移率 K_{DP} （单位：°km）的三维体扫数据。

X-PAR 在垂直方向采用相控阵电子扫描的方式，完成一个方位角 RHI（Range Height Indicator）扫描后切换到下一个方位角，时间分辨率得到了明显提升。相比于传统机械扫描天气雷达的 VCP21 模式，相控阵雷达的 VRHI 观测模式对目标不同高度的观测时差更小，避免了逐仰角 PPI 机械扫描方式造成的雷达回波在垂直方向上的不连续。在窄发窄收的观测模式下，X-PAR 扫描波束从 0.9°开始，以 1.8°步进扫描到 20.7°，共 12 层仰角，方位步进 0.9°，一次体扫时间为 92s。该 X-PAR 水平半功率波束宽度为 3.6°，垂直波束宽度为 1.8°，与常规机械扫描天气雷达 1°的波束宽度相比，X-PAR 的波束宽度很宽，采用了 0.9°方位步进的超分辨率 I/Q 信号处理算法对方位分辨率进行了改善，得到 0.9°方位角分辨率的雷达数据。两种型号雷达的主要参数如表 1 所示。需要说明的是，X-PAR 切换不同观测模式后的最大探测距离、方位步进、仰角范围和时间分辨率均可作相应调整，表 1 中只给出了窄发窄收观测模式下的主要参数。

表 1 X-PAR 与 S-POL 主要参数

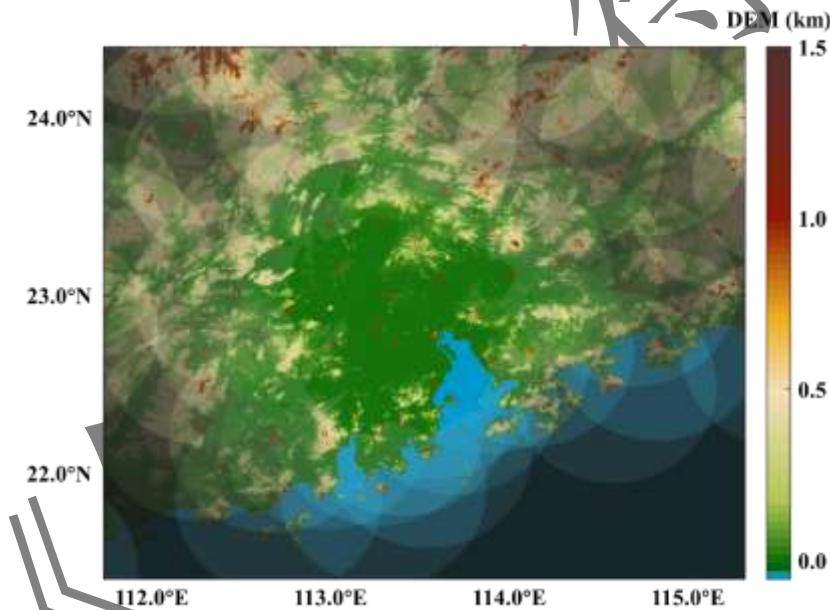
Table 1 Main technical parameters of X-PAR and S-POL

雷达参数	X-PAR	S-POL
------	-------	-------

工作频率/ GHz	9.3~9.5	2.8
峰值功率/ W	256	≥ 650 kW
观测用时/ s	92	360
最大探测距离/ km	60	230
距离分辨率/ m	30	250
仰角扫描范围/ °	0.9~20.7，以 1.8 步进	0.5, 1.5, 2.4, 3.4, 4.3, 6.0, 9.9, 14.6, 19.5
波束宽度/ °	水平：≤3.6；垂直：≤1.8	水平：≤1；垂直：≤1
阵面法向角/ °	15	/
观测模式	VRHI	VPPI

1.2 雷达分布

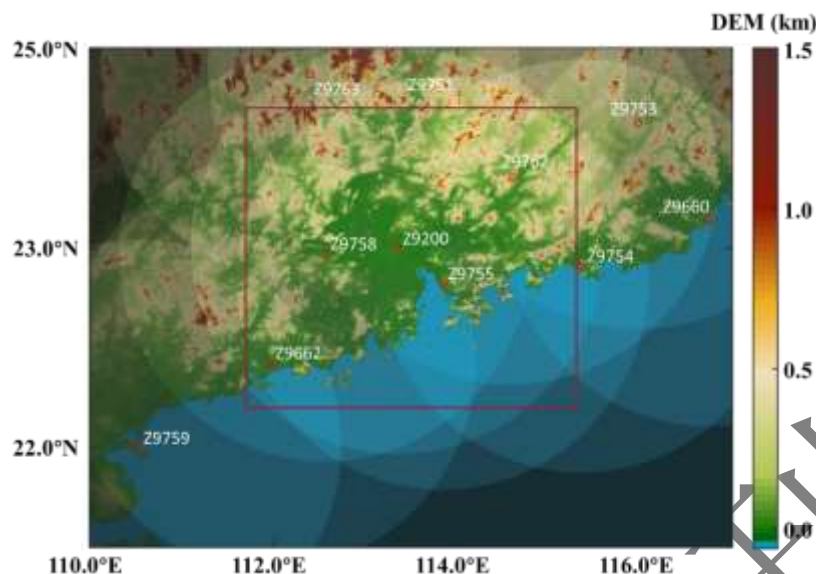
广东省大湾区附近 X-PAR 的分布概况如图 1 所示，广东及周边区域布设的 S-POL 如图 2。可见该地区基本均可实现三部以上 X-PAR 和 S-POL 的共同覆盖，这为获得精细准确的三维降水雷达观测场提供了有利条件。



注：红色圆圈为雷达位置，明暗表示雷达观测覆盖情况。

图 1 广东大湾区附近 X-PAR 位置与地形高程图

Fig. 1 The location of the X-PARs near the Guangdong Greater Bay Area and digital elevation model (DEM)



注：红色圆圈为雷达位置，明暗表示雷达观测覆盖情况，图中褐色方框区域为图 1 的范围

图 2 广东省及其周边 S 波段天气雷达与地形高程图

Fig. 2 The location of the S-POLs in Guangdong and its around areas and digital elevation model (DEM)

1.3 数据质控

在进行拼图之前，需要对雷达数据进行质量控制。本研究对 S-POL 资料利用零滞后相关系数 ρ_{HV} 与信噪比数据剔除非降水回波（吴翀, 2019），利用线性规划方法（Giangrande et al, 2013），采用 9 点 Savitzky-Golay 滤波器，计算得到 S-POL 的 K_{DP} 。基于已有方法（Geng and Liu, 2023a; 2023b）对 X-PAR 的 Z_H 和 K_{DP} 进行质控和计算，以 S-POL 观测数据转换为 X 波段后为基准，X-PAR 质控后的 Z_H 平均偏差在 1 dBZ 以内。由于 X-PAR 的差分反射率因子 Z_{DR} 未保存原始观测数据，本研究只对厂家衰减订正后的 Z_{DR} 进行滤波去噪和系统偏差订正。

2 不同波长雷达组网拼图方法

基于 S-POL 与 X-PAR 的探测能力，S-POL 数据质量较好，但远端空间分辨率下降明显，中高层仰角存在较大的观测空隙，拼图的关键在于利用多雷达组网改善空间分辨率。X-PAR 时空分辨率较高，但水平波束较宽，受衰减影响较大，数据质量问题复杂，拼图的关键在于保留精细观测信息的同时，避免质量差的观测数据对拼图结果的污染。为此，本研究提出针对密集组网的 S-POL 与 X-PAR 拼图方法。该方法的整体思路为：首先建立时空分辨率低的 S-POL 拼图和时空分辨率高的 X-PAR 拼图，然后将两组拼图进行时空匹配（包括空间匹配和 S-POL 拼图的时间外推），将可靠性更高的 S-POL 拼图作为基准，与 X-PAR 拼图作差得到一组与 S-POL 空间分辨率相同的粗糙偏差网格，将该粗糙偏差网格进行插值得到与 X-PAR 空间分辨率一致的精细偏差网格，利用 X-PAR 拼图与精细偏差网格相加，即可得到

整体回波强度与 S-POL 拼图一致，同时保留 X-PAR 拼图细节的拼图融合结果。最终拼图融合结果的时间分辨率与 X-PAR 观测（1.5 min）相同，水平空间分辨率为 50 m，包含反射率因子、差分反射率因子及差分传播相移率三组物理量，主要分为以下几个步骤实现：

（1）利用研究区内地面雨滴谱观测资料，模拟计算降水粒子的雷达物理量，计算得到不同波段雷达物理量拟合关系。

（2）对研究区建立两组拼图网格，一组精细网格（水平分辨率为 50 m）用于 X-PAR 的插值拼图，一组粗糙网格（水平分辨率为 500 m）用于 S-POL 的插值拼图。根据不同波长和不同参量的数据质量问题，构建数据质量评价参数作为数据质量权重，结合雷达探测点与目标网格点的距离权重，将同一波段的多部雷达观测数据同时向拼图网格进行加权插值，分别得到各雷达物理量 500 m 分辨率的 S-POL 拼图结果和 50 m 分辨率的 X-PAR 拼图结果。

（3）首先根据计算得到的不同波段雷达物理量拟合关系，将 X-PAR 拼图物理量转换到 S 波段以便于与 S-POL 拼图的融合；针对两种雷达时间分辨率不同的问题，对 S-POL 拼图进行线性外推实现与 X-PAR 拼图的时间匹配；然后对两波长雷达拼图的匹配点进行差值即可得到一组粗糙偏差（水平分辨率 500 m），将该粗糙偏差进行距离指数权重插值得到精细偏差（水平分辨率 50 m），使用精细偏差对 X-PAR 拼图进行订正，得到的即是 S-POL 拼图与 X-PAR 拼图的初步融合结果。

以上为多雷达拼图方法的概述，主要流程如图 3 所示，具体细节在 2.1-2.3 进行详述。

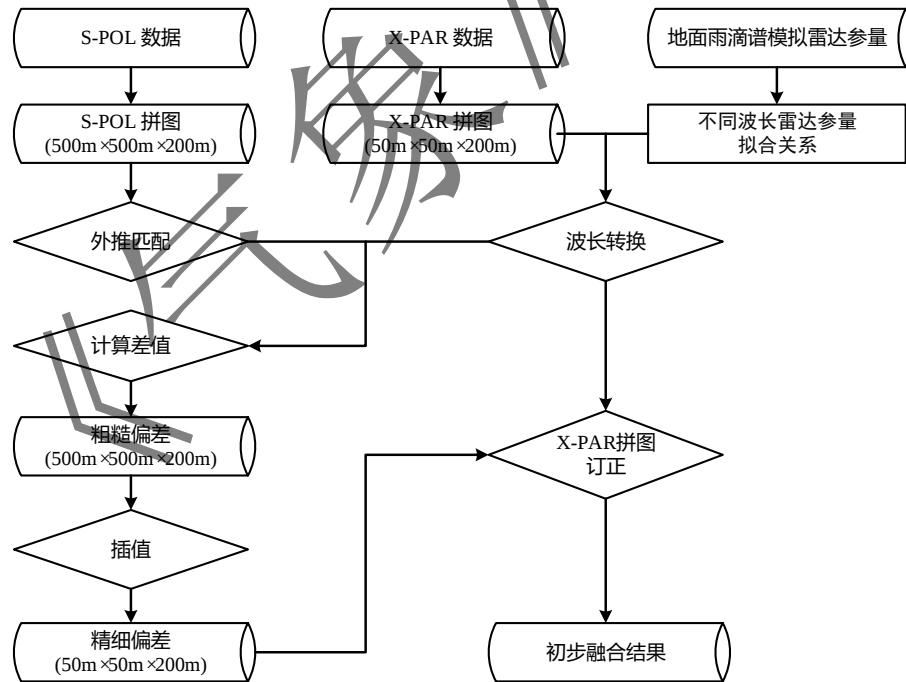


图 3 S-POL 与 X-PAR 雷达网拼图融合方法流程图

Fig. 3 Radar mosaic fusion method of multi-band radar network

2.1 不同波长雷达物理量拟合关系计算

选用 OTT Parsivel 激光雨滴谱仪 (Wu and Liu, 2017) 观测数据来模拟计算雷达物理量，

计算得到不同波长雷达物理量拟合关系。该雨滴谱仪布设在广东省惠州市龙门观测站，观测时间分辨率为 1 min，采样面积为 54 cm²，可测量的粒子尺度和下落末速度分为 32 个非等距区间，分别为 0~25 mm，0~20.8 m/s。

对雨滴谱资料的质量控制包括以下几个方面，首先将降水强度小于 0.5 mm/h 或单次采样内粒子总数小于 50 的数据作为噪声剔除 (Tokay et al, 2013)，然后利用粒子直径计算得到的粒子下落末速度理论值 (Atlas et al, 1973)，将该下落末速度的 ±60% 为阈值，剔除严重偏离理论值的数据 (Jaffrain and Berne, 2011)。

利用扩展边界条件法，可计算得到雨滴的复数散射函数 (Barber and Yeh, 1975)。其中，粒子轴线假设为铅直方向，雨滴椭率利用 (Pruppacher and Beard, 1970) 给出的关系式进行计算。进一步，即可利用雨滴谱数据模拟得到雷达物理量，计算不同波长雷达参量的拟合关系。

对于单个降水粒子，雷达电磁波的后向散射矩阵可以表示为：

$$\begin{bmatrix} E_H^r \\ E_V^r \end{bmatrix} = \frac{e^{-jkr}}{r} \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_H^i \\ E_V^i \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： E_H^i 、 E_V^i 为水平和垂直偏振波的入射电场强度， E_H^r 、 E_V^r 为粒子散射的电场强度， j 为虚数单位， k 为波数， r 为传播距离； S_{HH} 、 S_{HV} 、 S_{VH} 、 S_{VV} 为散射矩阵的四个复数散射函数。分别用 0 和 180 表示前向散射和后向散射。对于雨滴谱分布为 $N(D)$ 的雨区，雷达参量可利用以下公式 (Bringi and Chandrasekar, 2001) 计算：

$$Z_{H,V} = \frac{\lambda^4}{\pi^5 |U|^2} \int_0^{D_{\max}} 4\pi |S_{HH,VV}(180, D)|^2 N(D) dD \quad (2)$$

$$Z_{DR} = 10.0 \log_{10} \left(\frac{Z_H}{Z_V} \right) \quad (3)$$

$$K_{DP} = \frac{180.2}{\pi} \int_0^{D_{\max}} \text{Re}[S_{HH}(0, D) - S_{VV}(0, D)] N(D) dD \quad (4)$$

式中： $U = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2}$ ， ε 为复相对介电常数

2.2 单波长雷达网拼图方法

针对不同波长雷达探测特性，首先对单一波长雷达网进行拼图。其中 X-PAR 拼图的水平空间分辨率为 50 m，S-POL 拼图的水平空间分辨率为 500m，两组拼图的垂直分辨率均设置为 200 m。拼图的雷达物理量包括反射率因子 Z_H ，差分反射率 Z_{DR} ，差分传播相移率 K_{DP} ，其中 Z_H 在拼图时的单位由 dBZ 转换为 mm⁶/m³ 后进行插值 (Warren and Protat, 2019)。

为便于计算，首先建立目标经纬度网格坐标，并计算各网格点对应的雷达观测极坐标，实现坐标转换 (肖艳皎, 2007)。在雷达极坐标下对该网格点进行水平方向 (方位角、距离方向) 的最近邻匹配，提取每部雷达在目标网格点上方和下方相邻两个仰角的观测，然后根据数据质量和雷达探测数据与拼图网格点的距离设置插值权重，将多部雷达观测数据同时进行

加权插值，获得目标网格点的单波长雷达网插值拼图结果。

在雷达仰角 20° 以内，可以近似将仰角方向作为垂直方向考虑。对目标网格点 $P(\alpha_p, \beta_p, h_p)$ ，组网雷达在该点的极坐标为 (e_k, a_k, r_k) ，其中 k 代表雷达编号。如图 4 所示，以两部雷达为例，对于网格点 P ，可以获得第一部雷达在 P 点相邻上下两个仰角对应的极坐标点 (e_{12}, a_1, r_1) 和 (e_{11}, a_1, r_1) 以及第二部雷达在 P 点相邻上下两个仰角对应的极坐标点 (e_{22}, a_2, r_2) 和 (e_{21}, a_2, r_2) ，其中方位角 a 和距离 r 为网格点对应雷达极坐标的最近邻匹配点。对于两部雷达在 P 点上下观测的四个点，根据雷达探测能力，计算观测点的数据质量评价系数 w_{kq} ，进一步根据观测数据的质量评价系数和垂直方向的距离计算插值权重，对各观测点进行加权平均得到目标点 P 的插值结果 $f^a(e, a, r)$ 。

$$f^a(e, a, r) = \sum_{k=1}^n [w_{k1} f_k^a(e_{k1}, a_k, r_k) + w_{k2} f_k^a(e_{k2}, a_k, r_k)] / \sum_{k=1}^n (w_{k1} + w_{k2}) \quad (5)$$

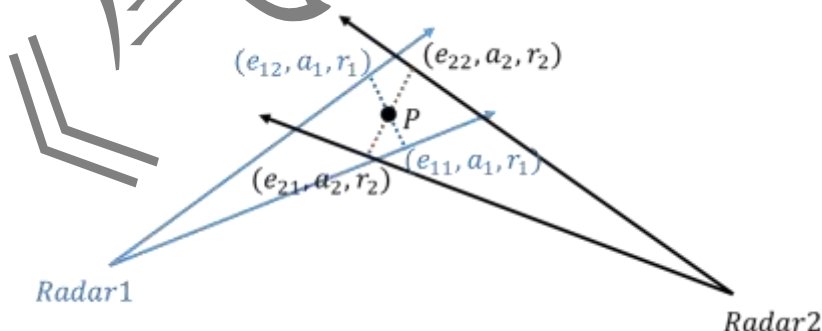
$$w_{k1} = w_{kq1}^2 w_{kd1} \quad (6)$$

$$w_{k2} = w_{kq2}^2 w_{kd2} \quad (7)$$

$$w_{kd1} = \exp \left[-\frac{r_k^2 (e_k - e_{k1})^2}{R_{v0}^2} \right] \quad (8)$$

$$w_{kd2} = \exp \left[-\frac{r_k^2 (e_k - e_{k2})^2}{R_{v0}^2} \right] \quad (9)$$

式中： n 为能够覆盖拼图目标点的雷达数量， $f_k^a(e_{k1}, a_k, r_k)$ 和 $f_k^a(e_{k2}, a_k, r_k)$ 分别为雷达 k 在目标点下方和上方的观测匹配点。 w_{k1} 和 w_{k2} 为相应的插值权重，由数据质量系数和垂直距离权重两部分构成， w_{kq1} 和 w_{kq2} 为相应观测数据的质量系数， w_{kd1} 和 w_{kd2} 为雷达观测点向目标网格点插值的垂直距离指数权重， r_k 为目标点距离雷达的径向距离， $(e_k - e_{k1})$ 与 $(e_k - e_{k2})$ 在此处的单位为 rad ， R_{v0} 设定为 500 m。



注：射线代表雷达相邻两层仰角的径向。

图 4 两部雷达对目标点 P 的匹配点示意图

Fig. 4 Schematic diagram of matching points of two radars to the target point P

对于观测数据的质量评价系数 w_{kq} ，需要根据雷达探测能力和观测物理量的特性进行设置，主要考虑以下几项评价指标。

$$w_r = \exp\left(-\frac{r^2}{R_w^2}\right) \quad (10)$$

$$w_n = 1/(2/SNR + 1) \quad (11)$$

$$w_a = \exp\left(-0.69 \frac{\varphi_{DP}^2}{\varphi_{DPT}^2}\right) \quad (12)$$

$$w_d = \exp\left(-\frac{d_v^2}{R_{v0}^2}\right) \quad (13)$$

式 (10) ~ 式 (13) 中:

w_r 为雷达距离权重, 主要考虑随着径向距离增加, 波束展宽、空间分辨率下降、充塞系数降低等因素造成的数据质量问题, 是雷达组网拼图中各物理量都要考虑的重要参数。本研究研究的距离参数 R_w 对 S-POL 设置为 300 km, 对 X-PAR 设置为 30 km。

w_n 为信噪比权重, 对 S-POL 而言, 降水区的信噪比普遍较高, 在剔除非降水回波后, 能够获得数据质量较好的观测结果。但对 X-PAR 而言, 由于雷达在 20km 处最小可测回波已经达到 10dBZ 以上, 加上衰减的影响, 强降水区的信噪比往往偏低, 该权重主要抑制低信噪比的雷达观测数据的影响。

w_a 为衰减权重, 对于 S-POL 而言, 忽略降水的衰减影响。但 X-PAR 的 Z_H 和 Z_{DR} 在降水区受衰减影响很大, 衰减订正后依然存在误差, 该权重用来抑制严重衰减后的雷达观测数据的影响, 由于雨区衰减率和差分衰减率均与 K_{DP} 存在准线性关系, 利用前向传播相位差 φ_{DP} 反映路径积分衰减, 参考吴翀等人 (2021) 的研究, 参数 φ_{DPT} 设定为 80° 。

w_d 为观测点距离权重, 对于 S-POL 而言, 雷达径向远端相邻两个仰角的波束垂直距离很大, 在进行垂直内插时可能会引入较大误差。为此, 引入观测点距离权重, 用来进一步抑制与网格点距离过远的观测数据的影响。 d_v 为雷达探测点与目标网格点的距离, 距离参数 R_{v0} 设定为 500m。

对于不同波长雷达的不同观测物理量, 质量系数评估方法有所不同。对于 S-POL, 主要数据质量问题为雷达波束展宽造成的径向远端数据质量下降, 雷达观测点与网格目标点间距过大造成的匹配误差, 以及低信噪比的观测数据质量较差。对于 X-PAR, 主要数据质量问题为雷达径向远端的波束展宽、雨区信号衰减及灵敏度较低。本研究对 Z_H 进行了严格的衰减订正, 但由于 X-PAR 的基数据只存储了基于 Φ_{DP} 和固定参数的 Z_{DR} 衰减订正结果, 难以进行进一步的衰减订正, 所以提高 Z_{DR} 插值中衰减所占的权重。由于 X-PAR 雷达灵敏度较低, 经过雨区衰减后, 信噪比偏低的数据权重也需要进行抑制。

最后, 考虑波束遮挡问题引入 w_o (默认取 $w_o=1$), 对各雷达观测中受到严重遮挡、地物、避雷针影响的部分进行剔除 ($w_o=0$), 对有遮挡但不严重的部分降低该数据的权重

($w_0=0.1$)，优先应用其他雷达观测结果进行插值拼图。 w_0 的判定主要基于地形波束遮挡率（张亚萍等, 2002）的计算结果，对地形波束遮挡率大于 30% 的部分取 $w_0=0.1$ ，对地形波束遮挡率大于 50% 的部分取 $w_0=0$ ；针对建筑物或地物影响，对雷达历史探测信息进行统计得到反射率因子均值，对与相邻方位反射率因子差异达到 1dB 的库取 $w_0=0.1$ ，差异达到 3dB 的库取 $w_0=0$ 。对避雷针所在方位角，取 $w_0=0$ 。对不同波段雷达各物理量的质量评价方法如表 2 所示。

表 2 不同雷达各物理量数据质量系数计算方法

Table 2 Calculation formulas for data quality coefficients of the variables

	X-PAR	S-POL
Z_H	$w_{kq} = w_0(w_r + 0.3w_a + 0.3w_n)$	$w_{kq} = w_0(w_r + 0.7w_d + 0.3w_n)$
Z_{DR}	$w_{kq} = w_0(w_r + 0.7w_a + 0.3w_n)$	$w_{kq} = w_0(w_r + 0.7w_d + 0.3w_n)$
K_{DP}	$w_{kq} = w_0(w_r + 0.3w_n)$	$w_{kq} = w_0(w_r + 0.7w_d + 0.3w_n)$

这样，即可计算得到每部雷达在目标网格点上方和下方两个观测点的数据质量评价系数，结合雷达观测点和目标点的距离计算得到插值权重，进行加权平均后即可获得该目标网格点的单一波长雷达网观测的插值结果。

2.3 S-POL 与 X-PAR 雷达拼图融合方法

在完成了单一波长雷达组网拼图后，能够获得时间分辨率为 1.5 min，水平空间分辨率为 50 m 的 X-PAR 拼图和时间分辨率为 6 min，水平空间分辨率为 500 m 的 S-POL 拼图。然后以 S-POL 拼图作为相对粗糙但准确可靠的基准场，将 S-POL 拼图与 X-PAR 拼图（根据拟合关系转换为 S 波段）中匹配的网格点的差值作为 X-PAR 拼图的粗糙偏差，对粗糙偏差进行插值获得相对平滑的高分辨率 X-PAR 拼图的精细偏差，然后对 X-PAR 拼图进行订正，即可得到初步融合结果。

由于两组拼图的时间分辨率存在差异，在计算粗糙偏差时，首先需要对 S-POL 的拼图结果进行外推，与 X-PAR 的拼图结果进行匹配。基于实际观测对比，当降水回波水平方向梯度较大时，两组拼图的空间错配可能造成反射率因子 ± 30 dBZ 以上的偏差，并表现出高低错落的条状高值分布。考虑到两组拼图的时间差非常小（5 min 以内），并且粗糙偏差向精细网格的插值处理对匹配误差具有抑制作用，在实际计算中，将雷达回波短时间内的空间变化简化为不同高度层回波在水平方向的刚体运动。

定义平均四次误差 MQE（式 14）（采用四次方运算，使 MQE 对偏差的高值更为敏感），表征 S-POL 拼图结果与 X-PAR 拼图结果的一致性；以 500m 为步长设置移动矢量的东西向分量和南北向分量，对比 8km 范围内的所有移动矢量下两组拼图的 MQE，取最小 MQE 对应的移动矢量作为当前高度层 S-POL 拼图的外推矢量。需要说明的是，受制于探测能力，S-POL 拼图在对流层底层，X-PAR 拼图在对流层中上层均可能出现较大范围的缺测。外推矢量的计算要求具有充足的观测样本，当 S-POL 拼图或 X-PAR 拼图在某一层的观测样本量

偏低时（本研究将这一样本量阈值定为 S-POL 拼图在 2 km 高度层样本量的 1/2），则利用相邻层次的外推矢量作为该层次的外推矢量。

$$MQE = \sum_{i=1}^n (Z_{Si} - Z_{Xi})^4 / n \quad (14)$$

式中： Z_{Si} （单位：dBZ）为 S-POL 拼图在 i 点坐标的反射率因子， Z_{Xi} （单位：dBZ）为 X-PAR 拼图（经过波长转换为 S 波段后）在 i 点坐标的反射率因子。

在对 S-POL 拼图逐层进行矢量外推后，即可根据经纬度网格坐标索引实现 S-POL 拼图和 X-PAR 拼图的空间匹配。将两组拼图在匹配点的差值作为 X-PAR 拼图的粗糙偏差。进一步计算距离指数权重，将粗糙偏差插值到 X-PAR 拼图的网格坐标点，获得 X-PAR 拼图的精细偏差分布。

$$D_{Hj} = \frac{\sum_{d_{hij}=2km, d_{vij}=0.4km} w_{ij} D_{Li}}{\sum_{d_{hij}=2km, d_{vij}=0.4km} w_{ij}} \quad (15)$$

$$D_{Li} = M_{Si} - M_{Xi} \quad (16)$$

$$w_{ij} = \exp\left(\frac{-d_{ij}^2}{roi^2}\right) \quad (17)$$

$$d_{ij}^2 = d_{hij}^2 + (z_f \times d_{vij})^2 \quad (18)$$

式中： D_H 为待求的 50 m 分辨率精细偏差， D_L 为 500 m 分辨率的粗糙偏差， w_{ij} 为距离指数权重， M_{Si} 为 S-POL 拼图在 i 点的偏振物理量， M_{Xi} 为 X-PAR 拼图在 i 点的偏振物理量， d_{ij} 代表粗糙偏差网格点与精细偏差网格点的距离参数，其中 d_{hij} 代表水平距离， d_{vij} 代表垂直距离，设置垂直插值系数 $z_f=5$ ，用来降低垂直方向插值的权重。本研究中，对目标网格点，选择水平 2 km 垂直 400 m 范围内的粗糙偏差进行插值， roi 取 2 km。

计算得到 X-PAR 拼图结果的精细偏差网格后，即可得到 X-PAR 拼图订正后的结果，即 S-POL 与 X-PAR 的初步融合结果 M_{XC} 。

$$M_{XC} = M_X + D_H \quad (19)$$

受波束充塞不足、数据样本量偏少等原因的影响，初步融合的结果在回波边缘或底层的连续性较差。因此，针对目标网格点可能存在的以下四种情况，按照相应的方法确定该点最终的雷达拼图融合结果。

（1）如果该点存在 X-PAR 拼图数据和精细偏差数据，并且该点计算精细偏差时使用的粗糙偏差数据量超过指定阈值（本研究设定为 200 个）。直接采用 M_{XC} 作为该点的最终拼图融合结果。在实际拼图融合中，绝大多数网格点均满足此类情况。

（2）如果该点 X-PAR 拼图数据缺失，但存在 S-POL 拼图数据。将相应位置的 S-POL 拼图进行最近邻插值作为拼图融合结果。

(3) 如果该点存在 X-PAR 拼图数据和精细偏差数据, 但该点计算精细偏差时使用的粗糙偏差数据量小于指定阈值。这种情况普遍出现在 X-PAR 拼图的边缘, 该区域周围可以匹配的 S-POL 拼图结果相对较少。当粗糙偏差样本量不足时, 计算的精细偏差可靠性较差。对这部分网格点, 根据粗糙偏差的样本量设置权重, 对 M_{XC} 与 S-POL 拼图结果进行加权平均, 得到的结果作为该点的拼图融合结果。

(4) 如果该点处于大气低层 S-POL 探测盲区, S-POL 拼图数据缺失, 无法获得精细偏差数据, 但存在 X-PAR 拼图数据。使用该点坐标底层到 2 km 高度内的精细偏差数据的平均值作为该点的精细偏差, 对 X-PAR 拼图结果进行订正, 作为该点最终拼图融合结果。

四种情况的计算方案如公式 20 所示, 最终得到的 M 即为 S-POL 与 X-PAR 雷达网拼图融合结果。

$$M_j = \begin{cases} M_{XCj} & N_j \geq N_{th} \\ M_{Sj} & M_{Xj} \text{ 缺失} \\ w_{xj}M_{XCj} + w_{sj}M_{Sj} & N_j < N_{th} \\ M_{Xj} + D_{Hj_s} & M_{Sj} \text{ 缺失, Alt} < 1.5\text{km} \end{cases} \quad (20)$$

$$w_{xj} = 1 / \{1 + \exp[-2(N_j/40 - 4)]\} \quad (21)$$

$$w_{sj} = 1 - w_{xj} \quad (22)$$

$$D_{Hj_s} = \frac{\sum_{d,h,jk=0,Alt=0}^{d,h,jk=0,Alt=2km} D_{Hk}}{Num_k} \quad (23)$$

式中: M_{Sj} 为 S-POL 拼图在精细网格点 j 处的最近邻插值, N_j 为计算点 j 的精细偏差时能够应用到的粗糙偏差的样本数, N_{th} 作为阈值在本研究中取为 200; 当存在初步融合结果 M_{XCj} , 但插值样本量不足 N_{th} 时, 则对 j 点的拼图结果进行加权计算, w_{xj} 为初步融合结果 M_{XCj} 的权重, w_{sj} 为 S-POL 拼图 (M_{Sj}) 的权重; 当该点为 S-POL 低层盲区且存在 X-PAR 拼图结果时, D_{Hj_s} 代表 X-PAR 拼图在 j 点的替代精细偏差, 它是该位置从底层到 2 km 高度层之间的精细偏差的平均值, Num_k 代表 j 点位置 0~2 km 高度层精细偏差的样本量。

3 结果

3.1 不同波长雷达参数的拟合结果

由于降水粒子群对不同波长雷达的散射特性存在差异, 在进行 X-PAR 与 S-POL 的对比和不同波长雷达拼图融合时, 需要对雷达观测物理量进行波长转换。利用 2019 年至 2022 年雨滴谱观测资料分别计算 X 波段和 S 波段的雷达物理量, 并对两波长的 Z_H (dBZ)、 K_{DP} ($^{\circ}\text{km}$) 进行指数拟合, 对 Z_{DR} (dB) 进行多项式拟合 (如图 5)。从 Z_H 的分布来看, 弱降水粒子尺度较小, 对 X 波段和 S 波段电磁波的散射均为瑞利散射, 二者呈现很好的线性关系, 随着粒子尺度增加, 瑞利散射的假设不再对两个波长同时有效, 二者的 Z_H 分布开始变得相对离散。两波长的 Z_{DR} 在降水粒子较小时同样表现出一致的线性关系, 但随着粒子尺度

增大，两波长的水平偏振波与垂直偏振波的散射差异对 Z_{DR} 的值产生了较大影响。 K_{DP} 的值与雷达波长负相关，两波长 K_{DP} 呈现准线性关系。两波长雷达物理量拟合结果如下。

$$Z_{HS} = 1.194Z_{HX}^{0.948} \quad (24)$$

$$K_{DPS} = 0.2733K_{DPX}^{1.041} \quad (25)$$

$$Z_{DRS} = \frac{p_{1s}Z_{DRX}^3 + p_{2s}Z_{DRX}^2 + p_{3s}Z_{DRX} + p_{4s}}{Z_{DRX}^2 + q_{1s}Z_{DRX} + q_{2s}} \quad (26)$$

式中： $p_{1s}=1.125$, $p_{2s}=-5.976$, $p_{3s}=9.997$, $p_{4s}=-0.1347$, $q_{1s}=-5.385$, $q_{2s}=9.834$

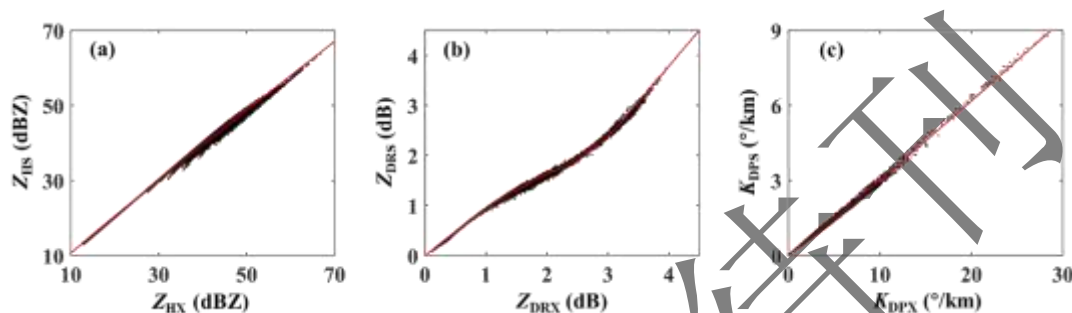


图 5 基于雨滴谱数据模拟计算的 X 波段与 S 波段雷达物理量拟合关系

(a-c) X 波段向 S 波段 (a) Z_H , (b) Z_{DR} , (c) K_{DP} 转换的拟合曲线

Fig. 5 Scatterplots and fitting relationship of the variables of S-band and X-band; (a-c): the fitting curves of the conversion from X-band to S-band.

3.2 单一波长雷达拼图结果

强对流天气系统是短临预警业务中天气雷达观测的主要目标，回波细节结构对于研判对流系统特征和短临预警具有重要意义。本研究以 2022 年 5 月 11 日 07:12（世界时，下同）广东一次强对流天气为例，对提出的拼图方法进行检验。

单部 S-POL 的观测可能存在径向远端分辨率下降，回波细节特征缺失等问题，这些均不利于强对流的观测分析。通过多雷达组网观测，增加同一气象目标的观测样本，能够有效改善上述问题。如图 6 所示，各雷达对该强对流系统的观测具有较好的一致性，但受波束展宽的影响， Z_H 和 Z_{DR} 表现出不同程度的方位分辨率偏低特征。多雷达拼图结果整体保留了各雷达观测的共性特征，同时使 Z9200 观测中的波束遮挡问题（如图 6a）、Z9662 观测中 K_{DP} 高值中心东北侧的噪声（如图 6f）等问题得到抑制，获得了空间相对连续，共性结构特征得以保留的强对流观测结果。

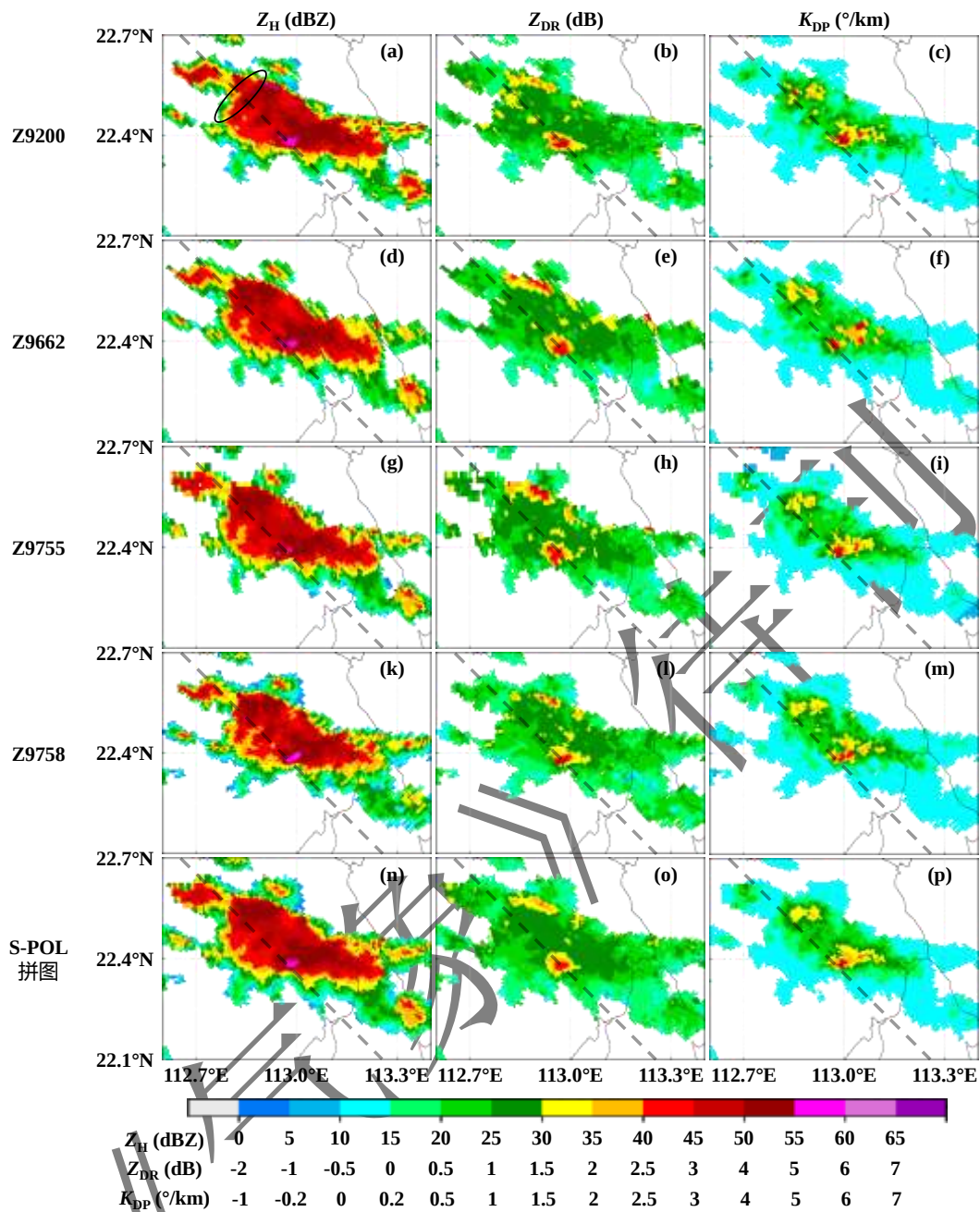


图 6 2022 年 5 月 11 日 07:12 广东省一次对流天气 2 km 高度层 (a-m) 单部 S-POL CAPPI 与 (n-p) 多雷
达拼图 CAPPI 结果

(a,d,g,j,m) Z_H , (b,e,h,k,n) Z_{DR} , (c,f,i,l,o) K_{DP}

Fig. 6 CAPPI of Z_H (a, d, g, j, m), Z_{DR} (b, e, h, k, n), and K_{DP} (c, f, i, l, o) from (a-m) single S-POL and (n-p) radar mosaic at 2 km altitude for a severe convective cloud system in Guangdong Province at 07:12 UTC 5 May 2022

对于 X-PAR, 由于衰减严重和灵敏度较差, 单部 X-PAR 对强降水后侧存在严重缺测 (如图 7a~7m)。利用组网雷达拼图, 能够有效实现对降水系统的完整观测, 同时较好保留单部雷达观测回波的细节特征。对比可见, 各雷达计算得到的 K_{DP} 虽然整体分布具有相似性, 但强度和空间结构均存在一定差异, 主要原因一方面是径向远端波束展宽, 导致波束非均匀问

题及回波结构沿方位向平滑，另一方面是对 Φ_{DP} 噪声信息进行抑制的过程中，低通滤波可能会引入误差。多雷达拼图获得了整体较为连续且具有细节特征的 K_{DP} 结构，并保留了各雷达观测的共性特征。对比各雷达观测的 Z_{DR} ，可见径向远端产生了非常明显的高估，这可能与过度衰减订正有关，在多雷达拼图过程中，由于严格约束了衰减严重部分的插值权重，在 Z_{DR} 的拼图结果中，雷达径向远端 Z_{DR} 偏高的问题得到了有效抑制。整体来看，各物理量获得了较为完整精细的拼图结果。

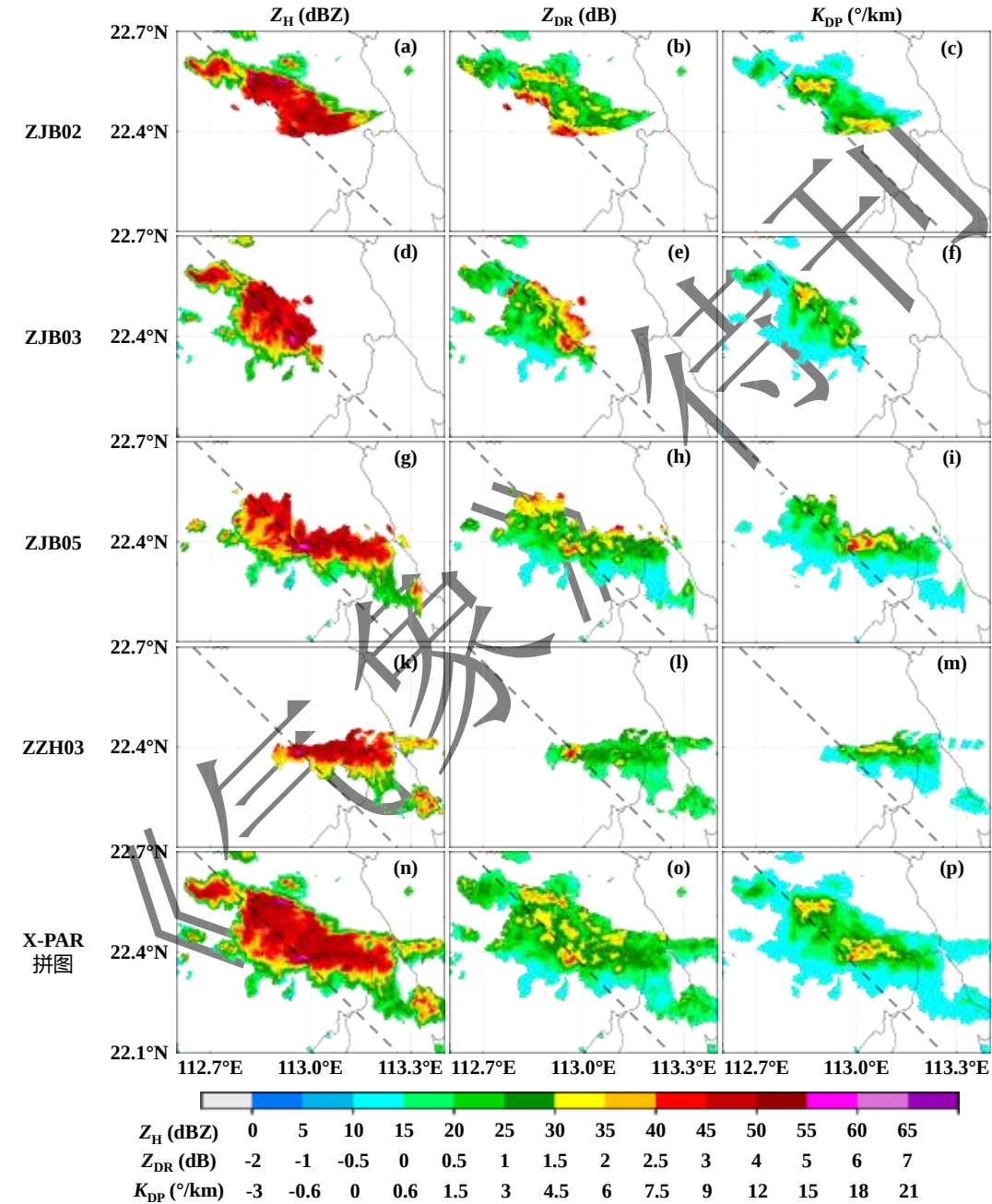


图 7 2022 年 5 月 11 日 07:12 广东省一次对流天气 2 km 高度层 (a-m) 单部 X-PAR CAPPI 与 (n-p) 多雷达拼图 CAPPI 结果
(a,d,g,j,m) Z_H , (b,e,h,k,n) Z_{DR} , (c,f,i,l,o) K_{DP}

Fig. 7 CAPPI of Z_H (a, d, g, j, n), Z_{DR} (b, e, h, k, n), and K_{DP} (c, f, i, l, o) from single X-PAR (a–m) and radar mosaic (n–p) at 2 km altitude for a severe convective cloud system in Guangdong Province at 07:12 UTC 5 May 2022

3.3 偏差计算

以 3.2 所展示的对流降水观测为例，根据 2.3 节所述的外推矢量计算方法，计算得到 S-POL 逐层外推矢量，分别计算 S-POL 拼图外推前和外推后与 X-PAR 拼图的差值，结果如图 8 所示。强对流降水回波水平梯度较大，回波移动导致的错配会在两拼图的差值上表现出条状正负极大值错落分布的形态。对比外推前和外推后的拼图差值，可见外推前的 Z_H 差值和 K_{DP} 差值均表现为明显的正负极大值错落分布，经过外推后，这种条状高值错落分布的现象得到明显缓解，粗糙偏差的空间分布更加连续。由于 S-POL 拼图是多部雷达 6min 内多个仰角连续观测数据的融合结果，拼图并不代表某一固定时间点，再加上雷达观测空间分辨率的差异，外推处理后，两组雷达拼图的偏差仍然存在空间较为离散的极大值和极小值分布。但这些极端高低值会在加权平均过程中得到抑制，最终得到相对连续平滑的精细偏差计算结果。

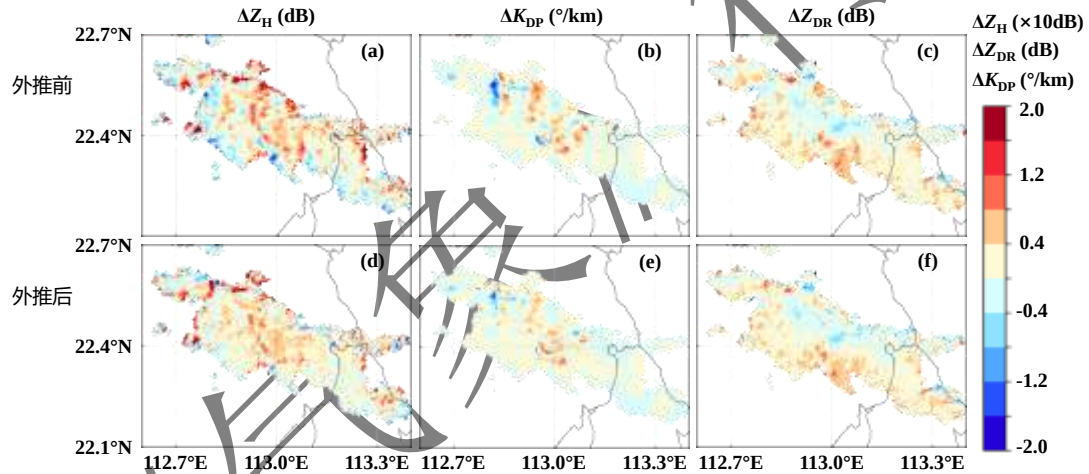


图 8 2022 年 5 月 11 日 07:12 广东省一次对流天气 4 km 高度 S-POL 拼图外推前(a) Z_H , (b) K_{DP} , (c) Z_{DR} 与外推后(d) Z_H , (e) K_{DP} , (f) Z_{DR} 的粗糙偏差

Fig. 8 Low-resolution deviation of Z_H (a, d), K_{DP} (b, e), Z_{DR} (c, f) before (a–c) and after (d–f) S-POL radar mosaic extrapolation at 4km altitude for a severe convective cloud system in Guangdong Province at 07:12 UTC 5 May 2022.

进一步利用 2.3 所述方法，对 X-PAR 的粗糙偏差进行插值，得到与 X-PAR 拼图网格(50m × 50m × 200m)匹配的精细偏差(如图 9)。其中 Z_H 和 K_{DP} 的误差高值中心均位于该对流系统中心部分，这是因为该对流中心位置距离各部雷达的距离均较远，各雷达在对对流中心部位的探测时，都受到了严重衰减、波束展宽、信噪比较低的影响，导致该部位数据质量较差，在本个例中产生了一定的低估。而 X-PAR 的 Z_{DR} 拼图偏差整体呈现出南侧偏低，北侧偏高的空间分布特征，经对比发现，该现象主要源于回波南侧雷达观测与北侧雷达观测的系统偏

差订正不足，这可能与 Z_{DR} 的衰减订正与标定误差有关。

总体而言，插值得到的精细偏差分布与图 8 中粗糙偏差的空间分布特征基本一致，同时图 8 中那些由于空间错配造成的极端噪声得到了很好的抑制。进一步，根据 2.3 所述方法，利用精细偏差对 X-PAR 拼图结果进行订正，即可将 S-POL 观测作为背景值与 X-PAR 拼图的精细结构进行融合。

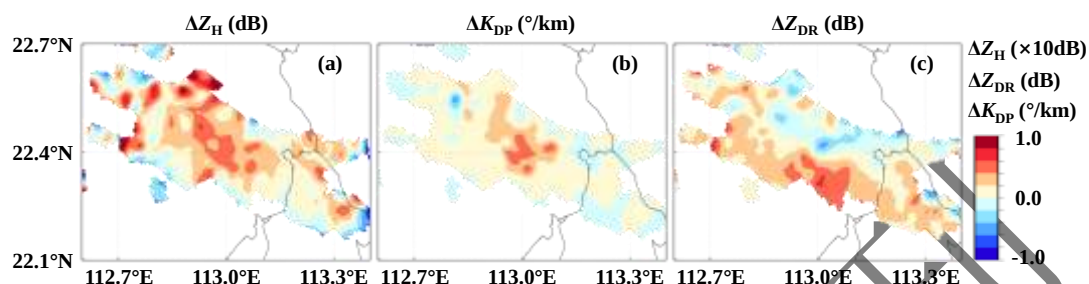


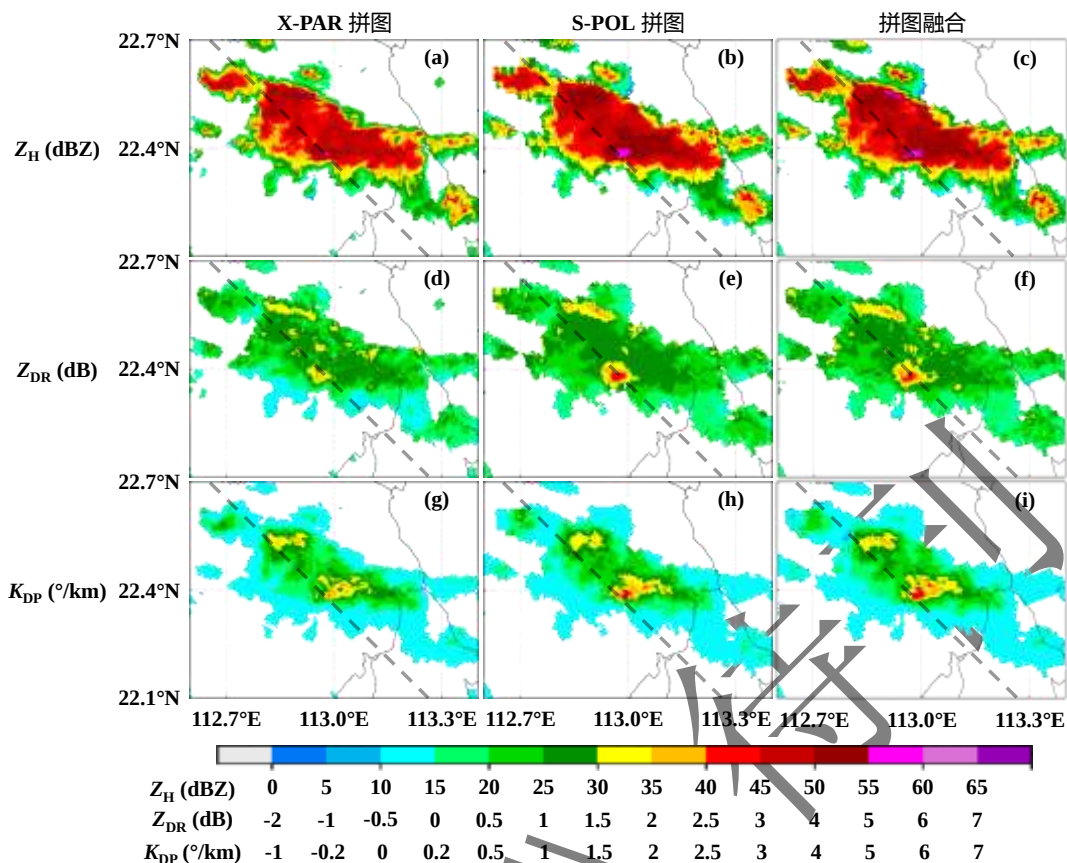
图9 2022年5月11日07:12广东省一次对流天气4 km高度层利用粗糙偏差插值后得到的(a) Z_H , (b) K_{DP} , (c) Z_{DR} 精细偏差

Fig. 9 High-resolution deviation of (a) Z_H , (b) K_{DP} , (c) Z_{DR} at 4 km altitude for a severe convective cloud system in Guangdong Province at 07:12 UTC 5 May 2022.

需要说明的是，精细偏差分布图中，回波边缘处（如西侧，北侧）存在偏差高值，这主要是因为是在雷达回波边缘，网格点周围的粗糙偏差样本量偏低，不利于噪声的抑制，按照 2.3 中所述方法，对于这些插值样本量偏低的网格点，会采用与 S-POL 加权融合的方式进行赋值，避免质量较差的偏差估计对最终拼图融合结果的污染。

3.4 融合效果

S-POL 与 X-PAR 雷达拼图融合的目的是充分利用 S-POL 拼图数据质量可靠的特性和 X-PAR 拼图分辨率较高的优势，得到准确精细的三维雷达观测场。为此，雷达拼图融合结果的回波结构和强度应与 S-POL 拼图基本一致，同时保留 X-PAR 拼图中的细节特征。S-POL 与 X-PAR 雷达拼图融合结果如图 10 所示，可以看出，S-POL 拼图与 X-PAR 拼图（已根据 2.1 中拟合关系转换到 S 波段）的空间结构特征基本一致，但受到雨区严重衰减和波束展宽对数据质量的不利影响，X-PAR 各物理量拼图在高值中心部分存在低估，融合后的各物理量的强度得到较好订正，与 S-POL 拼图基本一致，同时保留了 X-PAR 拼图中的细节特征。



注：虚线为图 11 的剖面

图 10 2022 年 5 月 11 日 07:12 广东省一次对流天气 (a, d, g) X-PAR (转换为 S 波段), (b, e, h) S-POL 拼图及 (c, f, i) 拼图融合结果在 2km 高度层的 CAPPI

(a, b, c) Z_H , (d, e, f) Z_{DR} , and (g, h, i) K_{DP}

Fig. 10 CAPPI of (a, b, c) Z_H , (d, e, f) Z_{DR} , and (g, h, i) K_{DP} from (a, d, g) X-PAR (converted to S-band) mosaic, (b, e, h) S-POL mosaic and (c, f, i) mosaic fusion at 2km altitude for a severe convective cloud system in Guangdong Province at 07:12 UTC 5 May 2022.

沿图 10 中虚线进行剖面 (结果如图 11), 对比拼图融合结果, 可见由于 S-POL 雷达间距较大, S-POL 的拼图中, 大气底层存在探测盲区, 1km 以下存在较大范围缺测, X-PAR 雷达布设更加密集, 大气底层探测能力更强, 拼图融合结果可见 S-POL 拼图中底层缺测部分得到了较好补盲。另外, 由于 X-PAR 灵敏度较低, 且探测范围较小, 所以存在弱回波缺测、静锥区缺测的问题, 拼图融合后, 对 X-PAR 的这部分缺测也得到了较好补盲。融合后的拼图实现了 X-PAR 和 S-POL 雷达的相互补盲, 获得了更加完整的三维观测场信息。

从强度信息来看, 剖面结构与 CAPPI 表现出相似的结果, 以东侧的回波悬垂为例, X-PAR 拼图的 Z_H 和 Z_{DR} 高值中心存在强度偏低的问题, 融合后的 Z_H 、 Z_{DR} 一方面保留了 X-PAR 拼图中的悬垂细节特征, 同时高值中心的强度也与 S-POL 拼图相一致。相比于 S-POL 拼图的 K_{DP} 剖面特征, X-PAR 拼图中 K_{DP} 西侧悬垂高值中心范围偏大, 东侧悬垂高值中心范围偏小,

472 这种偏差也在融合后得到校正。

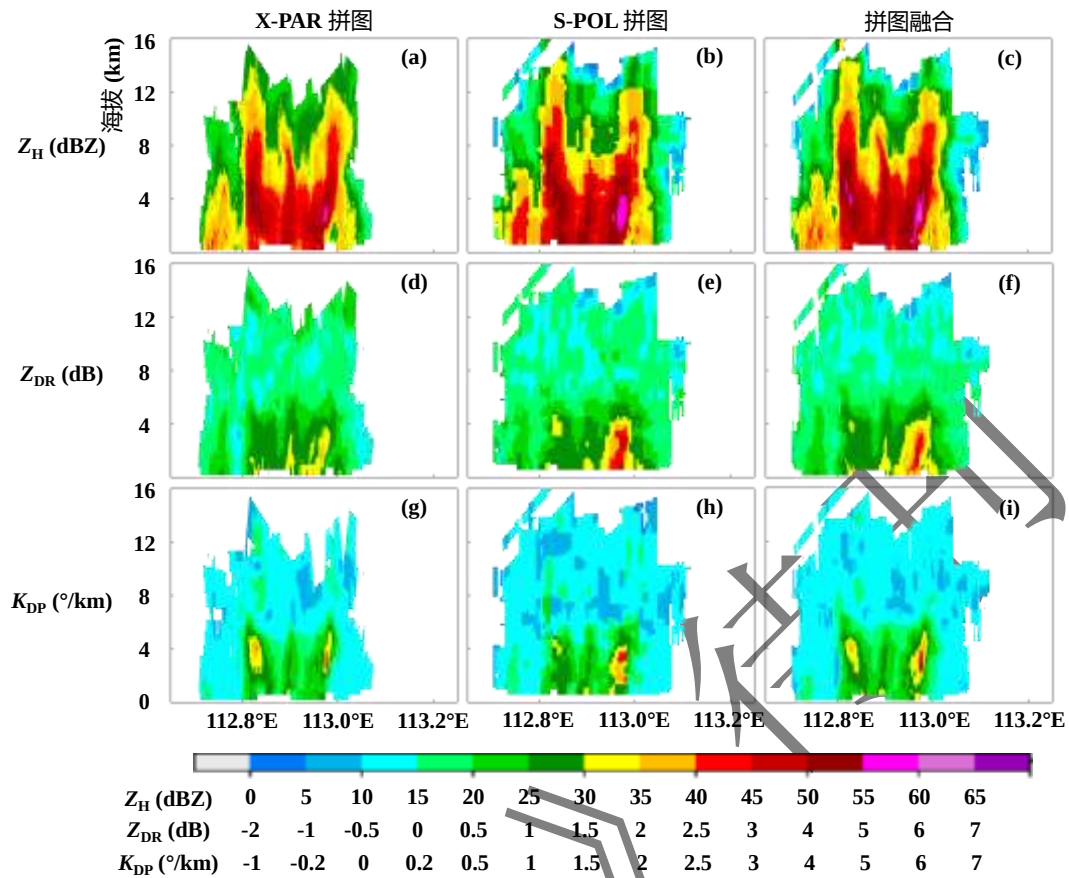
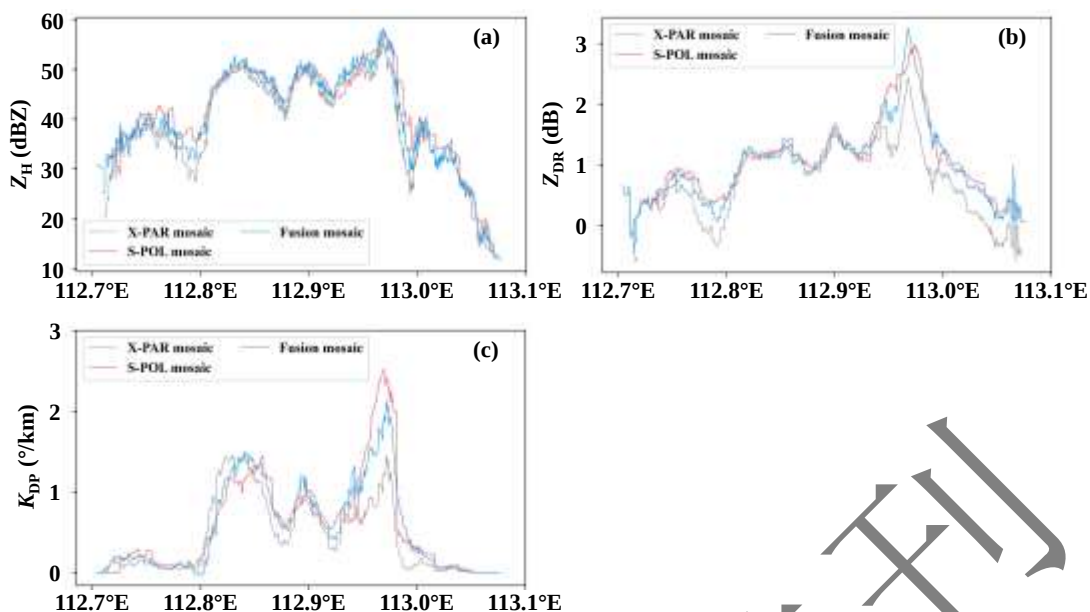


图 11 2022 年 5 月 11 日 07:12 广东省一次对流天气 (a,d,g) X-PAR (转换为 S 波段), (b,e,h) S-POL 拼图及 (c,f,i) S-POL 与 X-PAR 拼图融合结果的对流云垂直剖面

(a, b, c) Z_H , (d, e, f) Z_{DR} , and (g, h, i) K_{DP}

Fig. 11 Vertical profiles of (a, b, c) Z_H , (d, e, f) Z_{DR} , and (g, h, i) K_{DP} from (a, d, g) X-PAR (converted to S-band) mosaic, (b, e, h) S-POL mosaic and (c, f, i) mosaic fusion for a severe convective cloud system in Guangdong Province at 07:12 UTC 5 May 2022

沿图 10 中虚线 2 km 高度层的三组拼图结果进行分析, 对比融合前后雷达参量的变化, 结果如图 12 所示, 整体来看, 拼图融合结果 (蓝色曲线) 的各物理量, 既包含了 X-PAR 拼图 (灰色曲线) 的细节变化特征, 同时整体强度分布也与 S-POL 拼图 (红色曲线) 比较一致。其中 X-PAR 的反射率因子数据质量相对较好, X-PAR 拼图与 S-POL 拼图的结果在整体强度分布上表现基本一致, 部分 X-PAR 拼图中强度偏低的区域, 经过融合后得到明显改善。对东部强回波区, Z_{DR} 拼图和 K_{DP} 拼图中, X-PAR 均表现出明显低估, 融合后结果的强度和 S-POL 基本一致。拼图融合整体实现了以 S-POL 拼图为背景值, 同时保留 X-PAR 拼图细节特征的目的。



注：灰色曲线为 X-PAR 拼图（转化为 S 波段），红色曲线为 S-POL 拼图，蓝色曲线为拼图融合结果
图 12 图 11 RHI 剖面中 2022 年 5 月 11 日 07:12 广东省一次对流天气 2 km 高度层 (a) Z_H , (b) K_{DP} , (c) Z_{DR} 的拼图结果

Fig. 12 The mosaic results of (a) Z_H , (b) K_{DP} , and (c) Z_{DR} along the 2-km altitude layer for a severe convective cloud system in Guangdong Province at 07:12 UTC 5 May 2022 in the RHI shown in Figure 11

4 结论与讨论

针对 X-PAR 和 S-POL 的探测能力，本研究分别提出针对组网 X-PAR 和组网 S-POL 的雷达拼图方法，实现对单波长雷达网的组网拼图，并进一步对 S-POL 与 X-PAR 雷达网拼图进行融合，发挥多波段雷达组网观测优势，形成相对准确精细的三维雷达观测场。得到以下结论：

(1) S-POL 的特性在于数据质量较高，观测较为准确，但 S-POL 布设间距相对较远，在拼图过程中，为抑制雷达远端空间分辨率下降造成的插值误差及波束展宽导致的数据质量下降，本研究综合考虑雷达观测点与目标网格点间距、雷达径向距离、波束遮挡和信噪比四个方面的影响设置插值权重，并相应调整垂直方向线性内插为指数权重插值，将多部 S-POL 观测进行同时插值实现 S-POL 组网拼图。结果显示该拼图方法能够保留各雷达观测的共性特征，得到细节特征明显且空间连续的拼图结果。

(2) X-PAR 的特性在于空间分辨率较高，但观测范围较小，波束宽度较宽，雷达灵敏度较低且受衰减影响较大，在拼图中，数据质量的问题比 S-POL 更为复杂。因此在多雷达拼图过程中，需要对不同物理量计算相应数据质量评价系数，对数据质量差的观测进行抑制，然后结合观测点与目标点的距离，设置插值权重进行拼图。结果显示该方法能够使多雷达拼

图更多应用到数据质量可靠的 X-PAR 观测资料, 避免质量较差的观测数据对拼图的污染, 克服单部 X-PAR 对强降水区观测不完整不连续的问题, 获得了相对连续完整且细节特征得以保留的 X-PAR 拼图结果。

(3)根据两种雷达时空分辨率和观测数据质量的差异, 将 S-POL 拼图作为分辨率较低, 细节特征不足但相对准确的背景场, 与 X-PAR 拼图进行时间匹配并计算得到粗糙偏差, 对粗糙偏差进行距离指数权重插值得到细节偏差, 以此对 X-PAR 拼图进行订正, 即可得到 S-POL 拼图与 X-PAR 拼图的融合结果。结果表明, 该方法能够实现对 S-POL 观测中的低空补盲和对 X-PAR 观测中的弱回波区补盲, 并且整体实现了最终融合拼图强度分布特征与 S-POL 拼图相一致, 同时保留 X-PAR 拼图细节结构的目的, 获得了相对准确精细的三维雷达观测场。

需要说明的是, 基于 Warren and Protat (2019) 的研究结果, 本研究在进行拼图时将反射率因子的单位由 dBZ 转换为 mm^6/m^3 , 但使用 mm^6/m^3 插值的结果会比使用 dBZ 插值结果偏大, 在肖艳姣 (2007) 的对比研究中, 使用 dBZ 插值的结果总体上更接近观测值, 反射率因子在插值拼图时的单位如何选取, 仍需基于实际观测开展进一步的对比验证; 本研究对 X-PAR 的数据质量控制及其与 S-POL 的雷达拼图融合方法均建立在地面雨滴谱数据模拟雷达物理量分析的基础之上, 利用雨滴谱数据统计得到的雷达参量拟合关系对冰雹及融化层及以上的混合相态则不再适用。此外, 本研究提出的 S-POL 拼图与 X-PAR 拼图时空匹配方法比较简单, 对降水回波短时间 (5 min) 内的变化采用了刚体假设进行外推, 该方法忽略了单层 CAPPI 中各网格点可能存在的时间差及 5 min 内回波可能出现的涡旋、生消等复杂演变, 可能会给 X-PAR 拼图偏差的计算引入新的误差, 在实际应用中, 可综合考虑对精度和运算效率的需求, 利用更准确的外推匹配方法或不进行外推, 结合外推匹配效果, 灵活调整 S-POL 和 X-PAR 的时空匹配方式, 改进雷达拼图融合效果。

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实地试验[J]. 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[J]. Meteor Mon, 46(6): 823-836 (in Chinese).
- 李哲, 2022. X 波段双偏振相控阵雷达降水粒子相态识别及组网拼图方法研究[D]. 上海: 复旦大学. Li Z, 2022. Hydrometeor classification and network mosaic method for X-band dual polarization phased array radar[D]. Shanghai: Fudan University (in Chinese).
- 吴翀, 2019. 双偏振雷达的资料质量分析, 相态识别及组网应用[D]. 南京: 南京信息工程大学. Wu C, 2019. Data quality analysis, hydrometeor classification and mosaic application of polarimetric radars in China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese).
- 吴翀, 刘黎平, 吴海涛, 2016. 多部 X 波段天气雷达测量偏差分布及组网拼图结果分析[J]. 高原气象, 35(3): 823-833. Wu C, Liu L P,

Wu H T, 2016. Measurement bias and mosaics analysis for X band Doppler radars[J]. Plateau Meteor, 35(3): 823-833 (in Chinese).

吴翀, 刘黎平, 仰美霖, 等, 2021. X 波段双偏振雷达相态识别与拼图的关键技术[J]. 应用气象学报, 32(2): 200-216. Wu C, Liu L P, Yang M L, et al, 2021. Key technologies of hydrometeor classification and mosaic algorithm for X-band polarimetric radar[J]. J Appl Meteor Sci, 32(2): 200-216 (in Chinese).

肖靖宇, 杨玲, 俞小鼎, 等, 2022. 佛山相控阵阵列雷达探测 2020 年 9 月 4 日短时强降水天气过程的分析[J]. 气象, 48(7): 826-839.

Xiao J Y, Yang L, Yu X D, et al, 2022. Analysis of short-time severe rainfall on 4 September 2020 detected by phased array radar in Foshan[J]. Meteor Mon, 48(7): 826-839 (in Chinese).

肖艳姣, 2007. 新一代天气雷达三维组网技术及其应用研究[D]. 南京: 南京信息工程大学. Xiao Y J, 2007. Three-dimensional multiple-radar reflectivity mosaics and it's application study[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese).

叶开, 杨玲, 马舒庆, 等, 2020. 阵列天气雷达高分辨率强度场融合方法研究[J]. 气象, 46(8): 1065-1073. Ye K, Yang L, Ma S Q, et al, 2020. Research on high-resolution intensity field fusion method of array weather radar[J]. Meteor Mon, 46(8): 1065-1073 (in Chinese).

张亚萍, 刘钧, 夏文梅, 等, 2002. 雷达定量估测区域降水波束阻挡系数的计算[J]. 南京气象学院学报, 25(5): 640-647. Zhang Y P, Liu J, Xia W M, et al, 2002. The calculation of beam blockage coefficients in estimating regional precipitation with radar[J]. J Nanjing Inst Meteor, 25(5): 640-647 (in Chinese).

Anagnostou M N, Nikolopoulos E I, Kalogiros J, et al, 2018. Advancing precipitation estimation and streamflow simulations in complex terrain with X-band dual-polarization radar observations[J]. Remote Sens, 10(8): 1258.

Askelson M A, Aubagnac J P, Straka J M, 2000. An adaptation of the Barnes filter applied to the objective analysis of radar data[J]. Mon Wea Rev, 128(9): 3050-3082.

Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R S, 1973. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence[J]. Rev Geophys, 11(1): 1-35.

Barber P, Yeh C, 1975. Scattering of electromagnetic waves by arbitrarily shaped dielectric bodies[J]. Appl Opt, 14(12): 2864-2872.

Brewster K A, Bajji A, Philips B J, et al, 2017. CASA dallas-fort worth urban testbed observations: networks of networks at work[C]//Proceedings of the Special Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, 97th AMS Annual Meeting. Seattle: AMS.

Bringi V N, Chandrasekar V, 2001. Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press.

Brook J P, Protat A, Soderholm J S, et al, 2022. A variational interpolation method for gridding weather radar data[J]. J Atmos Ocean Technol, 39(11): 1633-1654.

Chandrasekar V, Chen H N, Philips B, 2018. Principles of high-resolution radar network for hazard mitigation and disaster management in an urban environment[J]. J Meteor Soc Japan, 96A: 119-139.

Diederich M, Ryzhkov A, Simmer C, et al, 2015. Use of specific attenuation for rainfall measurement at X-band radar wavelengths. Part II: rainfall estimates and comparison with rain gauges[J]. J Hydrometeorology, 16(2): 503-516.

Geng F, Liu L P, 2023a. Study on attenuation correction for the reflectivity of X-band dual-polarization phased-array weather radar based on a network with S-band weather radar[J]. *Remote Sens*, 15(5): 1333.

Geng F, Liu L P, 2023b. Study on the backscatter differential phase characteristics of X-band dual-polarization radar and its processing methods[J]. *Remote Sens*, 15(5): 1334.

Giangrande S E, McGraw R, Lei L, 2013. An application of linear programming to polarimetric radar differential phase processing[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 30(8): 1716-1729.

Jaffrain J, Berne A, 2011. Experimental quantification of the sampling uncertainty associated with measurements from PARSIVEL disdrometers[J]. *J Hydrometeorology*, 12(3): 352-370.

Kim Y, Maki M, Lee D I, et al, 2019. Three-dimensional analysis of the initial stage of convective precipitation using an operational X-band polarimetric radar network[J]. *Atmos Res*, 225: 45-57.

Langston C, Zhang J, Howard K, 2007. Four-dimensional dynamic radar mosaic[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 24(5): 776-790.

Liu Y X, Wang Y T, Chandrasekar V, et al, 2007. Real-time three-dimensional radar mosaic in CASA IP1 testbed[C]//Proceedings of the 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona: IEEE: 2754-2757.

Mahale V N, Brotzge J A, Bluestein H B, 2014. The advantages of a mixed-band radar network for severe weather operations: a case study of 13 May 2009[J]. *Wea Forecasting*, 29(1): 78-98.

Pruppacher H R, Beard K V, 1970. A wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 96(408): 247-256.

Roca-Sancho J, Berenguer M, Sempere-Torres D, 2014. An inverse method to retrieve 3D radar reflectivity composites[J]. *J Hydrol*, 519: 947-965.

Ryzhkov A V, 2007. The impact of beam broadening on the quality of radar polarimetric data[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 24(5): 729-744.

Scovell R, Al-Sakka H, 2016. A point cloud method for retrieval of high-resolution 3D gridded reflectivity from weather radar networks for air traffic management[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 33(3): 461-479.

Sun M, Wang H J, Li Z M, et al, 2019. Study on reflectivity data interpolation and mosaics for multiple Doppler weather radars[J]. *EURASIP J Wirel Comm*, 2019: 145.

Tokay A, Petersen W A, Gatlin P, et al, 2013. Comparison of raindrop size distribution measurements by collocated disdrometers[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 30(8): 1672-1690.

Warren R A, Protat A, 2019. Should interpolation of radar reflectivity be performed in Z or dBZ?[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 36(6): 1143-1156.

Weygandt S S, Shapiro A, Droegemeier K K, 2002. Retrieval of model initial fields from single-Doppler observations of a supercell thunderstorm. Part I: single-Doppler velocity retrieval[J]. *Mon Wea Rev*, 130(3): 433-453.

Wu Y H, Liu L P, 2017. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the Tibetan Plateau and southern China[J]. *Adv Atmos Sci*, 34(6): 727-736.

Zhang J, Howard K, Gourley J J, 2005. Constructing three-dimensional multiple-radar reflectivity mosaics: examples of convective storms and stratiform rain echoes[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 22(1): 30-42.

615 Zhao K, Huang H, Lu Y H, et al, 2024. Operational phased array radar network for natural hazard monitoring and warnings in urban
616 environments over the greater bay area, China[J]. B Am Meteor Soc, 105(11): E2152- E2174.

《气象》