

刘于新,马建立,陈明轩,等,2024.S波段与X波段天气雷达探测参量差异及组网融合处理研究[J].气象,50(4):488-498. Liu Y X, Ma J L, Chen M X, et al, 2024. Study on differences and fusion mosaic methods of parameters between S-band and X-band weather radars[J]. Meteor Mon, 50(4):488-498(in Chinese).

# S 波段与 X 波段天气雷达探测参量差异及 组网融合处理研究\*

刘于新<sup>1,2</sup> 马建立<sup>2</sup> 陈明轩<sup>2</sup> 史朝<sup>1</sup>

1 成都信息工程大学电子工程学院, 成都 610225

2 北京城市气象研究院, 北京 100089

**提 要:** 随着 X 波段双偏振雷达探测网的增多, 与 S 波段双偏振雷达开展组网观测愈发具有必要性。利用北京地区 2021 年 7 月 27 日的一次强对流天气过程的观测资料, 对 X 波段双偏振雷达组网观测值和 S 波段双偏振雷达观测值进行一致性定量分析, 结果表明: 两者观测的反射率因子( $Z$ )一致性好, 差分反射率( $Z_{DR}$ )差异集中在 0 dB 值附近,  $Z \geq 30$  dBz 时, 差分相移率( $K_{DP}$ )差异显著。根据观测值差异特征, 比较了探测参量直接融合和距离指数权重融合两种数据融合方式, 通过分析偏振参量垂直剖面图发现, 融合后可以相互弥补探测盲区,  $K_{DP}$  通过距离指数权重融合的方式过渡更加自然。本文融合效果可供不同波段雷达融合组网提供参考。

**关键词:** S 波段双偏振雷达, X 波段雷达网, 融合组网

中图分类号: P411, P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.121801

## Study on Differences and Fusion Mosaic Methods of Parameters Between S-Band and X-Band Weather Radars

LIU Yuxin<sup>1,2</sup> MA Jianli<sup>2</sup> CHEN Mingxuan<sup>2</sup> SHI Zhao<sup>1</sup>

1 College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

**Abstract:** With the increasing number of X-band dual-polarization radar networks, making network observation of X-band dual-polarization radars and S-band dual-polarization radars has become more necessary. Based on the observation data of the severe convective weather in Beijing on 27 July 2021, the consistency of polarization parameters between the X-band radar network and S-band dual-polarization radar is quantitatively analyzed. The results indicate that Beijing X-band radar networks and S-band dual-polarization radar have a favorable consistency on reflectivity factor ( $Z$ ), and the differences of differential reflectivity ( $Z_{DR}$ ) are concentrated near 0 dB, specific differential phase ( $K_{DP}$ ) has significant difference in the area where  $Z \geq 30$  dBz. Based on the characteristics of the observed polarization parameter differences, two fusion mosaic methods of parameters are compared; one is direct fusion mosaic and the other is distance-weighted with an exponent. By analyzing vertical cross-section (VCS) of polarization parameters, we see that the blind area of radars could be made up for each other, and  $K_{DP}$  can have a more natural transition

\* 国家重点研发计划(2022YFC3003901)资助

2022 年 6 月 6 日收稿; 2024 年 1 月 4 日收修定稿

第一作者: 刘于新, 主要从事天气雷达数据处理分析研究. E-mail: ly.xx@qq.com

通讯作者: 马建立, 主要从事偏振雷达算法及业务应用研发. E-mail: jlma@ium.com

through the fusion mosaic method distance-weighted with an exponent. The fusion effect could provide some references for different band radars needing fusion mosaic.

**Key words:** S-band dual-polarization radar, X-band radar network, fusion mosaic

## 引言

自1998年起,我国开启新一代天气雷达的布网建设工作,至今已建成基本覆盖全国的天气雷达业务网。新一代天气雷达能够定量探测降水回波的强度、径向速度、速度谱宽等信息,其高时空分辨率、准确的探测能力已成为中尺度灾害性天气极为有效的监测与预警工具。然而,地面固定的单部雷达探测范围有限,不足以覆盖复杂变化的天气系统,加上我国的地形条件非常复杂,大部分业务雷达在 $0.5^\circ$ 仰角普遍存在不同程度的遮挡现象,限制了新一代天气雷达网对于低层气象目标的探测能力。庄薇等(2013)在雷达定量降水估测过程中研究发现,能否得到靠近地面的、未受遮挡的高质量雷达回波与估测精度的提升密切相关。可见,完善的低空探测能力对于雷达网的业务使用非常重要。为了更好地揭示天气系统相关的大气运动规律,对天气系统发生的变化做出全面、客观、细致的机理研究,很有必要开展多部雷达联合观测。

与目前布网的新一代天气雷达相比,X波段双偏振多普勒天气雷达(以下简称X波段雷达)的径向分辨率比业务S/C波段雷达分辨率高,可对业务S/C波段雷达低空探测盲区 and 静锥区盲区进行补盲探测,对业务雷达起到有益的补充作用。由于在相同波束宽度下雷达天线的尺寸与波长成正比,S与C波段天线直径较大,而X波段天气雷达天线尺寸相对较小,站点建设、雷达架设均更为便携。X波段雷达的造价较为低廉,少量的资金即可建设更多的雷达,可为山区及重点监测区域提供精细的观测资料(陈洪滨等,2012),提升局地灾害天气监测预警能力。马舒庆等(2019)、程元慧等(2020)、Chandrasekar et al(2010)指出,多部X波段雷达组成的探测网对龙卷、低空急流、下击暴流等灾害天气探测能力优于业务天气雷达,因此X波段雷达网与业务雷达的联合组网探测,可有效增强灾害天气的探测能力。

国外开展X波段雷达组网观测时间比较早,如美国X波段雷达网自适应观测系统(CASA)的成功

应用(Chandrasekar et al, 2010; 2013; Wang and Chandrasekar, 2009; 2010),对多个国家布设X波段雷达网产生了重要影响。受CASA的影响,日本在东京城市群建设了X波段雷达网(Kim and Maki, 2012; Maki et al, 2008)开展暴雨灾害天气监测。国内,北京、佛山、上海、广州、南京等地已建设了X波段雷达观测网(马建立等, 2019; 戴春容等, 2019; 苏永彦和刘黎平, 2020; 吴翀等, 2016),用于冰雹、龙卷、局地强对流雷暴等灾害天气监测,其他地区也在积极推进X波段雷达网的建设。

国内研发的X波段雷达基本采用双发双收的偏振探测模式,可获得差分反射率( $Z_{DR}$ )、差分相位( $\Phi_{DP}$ )、差分相移率( $K_{DP}$ )、相关系数( $\rho_{hv}$ )等双偏振参数,可提升对降水粒子形状、尺寸及分布的判断,并应用于灾害天气的预警、人工影响天气作业的指挥等方面。当然,X波段雷达也存在探测范围小、易受雨区衰减的影响等缺点。目前,国内X波段雷达网与业务S波段雷达通常是分开运行的,两者有各自的业务系统,没有融合为一个整体运行。随着X波段雷达网建设在国内逐渐增多,其与业务雷达组网观测将成为必然的趋势。两者对同一目标的探测存在着差异,有必要开展对X波段雷达网和业务S波段雷达探测参量差异性分析,为下一步组网融合做好准备。

2016年北京市气象局开始筹建X波段双偏振雷达观测网(以下简称“BJ-Xnet”),到2020年底,北京地区建设了9部X波段雷达。马建立等(2012)研究指出X波段雷达衰减对探测参量的影响大,多部X波段雷达组网后,雷达之间可相互弥补衰减。吴翀等(2021)研究指出X波段雷达组网后得到的双偏振参量要优于单部X波段雷达探测的双偏振参量。此外X波段雷达容易发生米散射,雨滴直径大于2 mm时,X波段雷达发生米散射的概率增大,而S波段雷达仍为瑞利散射,对较大雨滴而言,X波段和S波段雷达散射机制不同(张培昌等, 2018)。因此,X波受雷达组网后得到的双偏振参量与S波段雷达得到的双偏振参量是否具有可比性,需要利用实际探测的数据进行对比分析。

本文利用北京地区BJ-Xnet和S波段雷达对共

同覆盖区域探测参量反射率因子  $Z$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$ 、 $\rho_{hv}$  进行差异分析,定量比较双偏振参量在两种波段雷达上的差异,为北京地区 S/X 波段雷达探测数据融合组网方式提供决策依据,并对比两种融合组网方式的优缺点。

## 1 雷达观测资料及对比方法

BJ-Xnet 与 2 部 S 波段雷达共同构成北京地区高时空分辨率灾害天气监测网。由于雷达资料的空间分辨率不均匀、质量不好等问题,为保证 BJ-Xnet 和 S 波段雷达对比数据的数据可靠性及时空一致

性,首先对雷达数据进行质量控制,其次通过坐标转换,将 BJ-Xnet 观测值和 S 波段雷达观测值分别插值到笛卡尔坐标系下进行比较。

### 1.1 雷达数据资料简介

北京地区的雷达体制均为机械扫描式速调管雷达,两种型号雷达的主要参数如表 1 所示。北京各个雷达位置及探测范围见图 1, X 波段雷达距离圈为 75 km, S 波段雷达距离圈为 230 km,偏北的是海陀山 S 波段雷达,偏南的是南郊 S 波段雷达,图中灰色阴影区域即为本文数据分析区域。

表 1 S 波段天气雷达与 X 波段天气雷达观测参数

工作参数	S 波段	X 波段
雷达体制	速调管	速调管
工作频率/GHz	2.7~3.0	9.3~9.5
峰值/kW	750	70
极化方向	线性水平、线性垂直	线性水平、线性垂直
天线直径/m	8.6	2.4
波束宽度/(°)	≤1.0	≤1.0
探测距离/km	460	150
距离分辨率/km	0.250	0.075
扫描模式及用时	VCP21/6 min	VCP21/3 min

X 波段雷达波长短,当  $(D/\lambda) > 1/16$  时,容易发生米散射,其中  $D$  为雨滴直径, $\lambda$  为波长。雨滴直径约大于 2 mm 时, X 波段雷达散射进入米散射区域,因此在选用对比资料时,不宜采用冰雹天气过程数据(其直径通常大于 2 mm),而选用纯降雨天气过程数据开展 BJ-Xnet 与 S 波段雷达观测对比。由于 3 km 高度探测数据基本不受地物影响, BJ-Xnet 和南郊 S 波段雷达都有很好的覆盖,因此选择 3 km

高度 CAPPI 探测数据。其中,海陀山 S 波段雷达海拔高度为 2203 m,最低探测仰角为  $0.5^\circ$ ,而 BJ-Xnet 与其在 3 km 高度观测数据交汇少,因此海陀山 S 波段雷达不参与雷达数据观测数据对比。本文对比分析数据选取 2021 年 7 月 27 日北京一次对流降雨天气的观测数据。

### 1.2 雷达数据质量控制

本文雷达观测数据均已进行雷达标定,标定内容包括  $Z$  探测灵敏度和  $Z_{DR}$  系统误差。 $Z$  探测灵敏度标定方法采用理论值与实际灵敏度对比,若两者相差小,说明雷达反射率因子可信。 $Z_{DR}$  系统误差标定方法为微雨法,选取  $0.5^\circ$  和  $1.5^\circ$  仰角回波及回波强度  $20 \text{ dBz} < Z < 25 \text{ dBz}$  的数据,并限定参量纹理值  $SD(Z) < 2 \text{ dBz}$ 、 $SD(Z_{DR}) < 1 \text{ dB}$ 、 $SD(\Phi_{DP}) < 5^\circ$ 、 $\rho_{hv} > 0.98$  为小雨数据。各根径向从第一个距离库开始寻找连续 10 个以上距离库满足该条件,视为有效的小雨数据。为了防止衰减  $Z_{DR}$  的影响,若首个距离库值大于  $25 \text{ dBz}$ ,则终止该径向数据查找,并转到下根径向继续查找满足条件的值。本文采用的

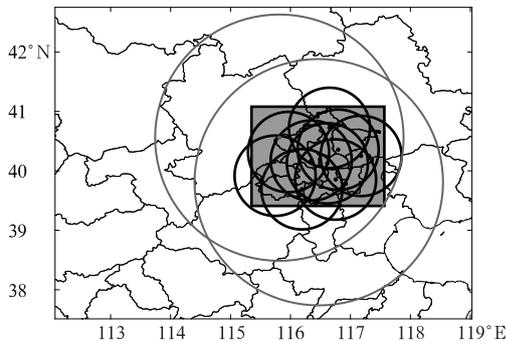


图 1 北京 9 部 X 波段雷达与 2 部 S 波段雷达天气雷达网布局

Fig. 1 Network illustration for 9 X-band radars and 2 S-band radars in Beijing

全部雷达数据均已采用该方法标定了  $Z_{DR}$  系统误差,并修正了  $Z_{DR}$  观测值。

此外,雷达数据质量控制,还包括:非气象回波的识别剔除、 $\Phi_{DP}$  线性规划质量控制、 $Z$  和  $Z_{DR}$  衰减订正。衰减订正采用相位订正方法(何宇翔等,2009a;2009b);S波段和X波段雷达  $K_{DP}$  值的估算均利用线性规划后的  $\Phi_{DP}$  进行拟合;由于S波段雷达衰减减小,本文不对其观测数据进行衰减订正。数据质量控制方法具体如下:

(1)非气象回波剔除:主要利用非气象回波和气象回波在雷达探测参量以及参量纹理特征的不同,开展非气象回波的识别剔除。具体方法详见周聪等(2019)。

(2) $\Phi_{DP}$  线性规划质量控制:采用数学统筹方法——线性规划(linear programming)对雷达探测的  $\Phi_{DP}$  进行数据质量控制,有效剔除双偏振雷达在米散射条件下产生的后向差分传播相移( $\delta$ ),以及保证  $K_{DP}$  的非负属性和  $\Phi_{DP}$  的递增累积属性。具体方法详见马建立等(2019)。

(3)衰减订正:采用相位订正方法进行  $Z$  和  $Z_{DR}$  衰减订正,该方法首先需要确定  $\Phi_{DP}$  的初始相位。初始相位确定方法:经非气象回波识别剔除后,从每根径向第一个距离库开始寻找,若连续  $N$  个距离库回波  $>15$  dBz,则连续  $N$  个距离库  $\Phi_{DP}$  均值视为该径向的初始相位,X波段雷达  $N=13$ ,S波段雷达  $N=5$ 。

### 1.3 格点插值方法

为了更加精准、直观地开展 BJ-Xnet 和 S 波段雷达观测数据比较,选择共同覆盖区的格点数据进行分析。将各个双偏振参量值插值到 3 km 高度笛卡尔坐标网格点上,网格分辨率为 300 m,插值方法采用径向和方位最近邻居与垂直线性内插法,具体方法详见肖艳姣和刘黎平(2006)。

### 1.4 X波段雷达数据组网方式

由于X波段雷达具有衰减大的特点,其雷达数据组网方式与业务雷达组网方式存在差异。多个X波段雷达对空间中同一点的观测值,应选取衰减最小的那个雷达观测值作为该点的观测值更为合理。双偏振参量受信噪比(SNR)影响大,通常SNR值越大,探测的双偏振参量可信度越高(杜牧云等,2011),在距离一定的条件下,回波强度越大,对应的

值越高,信噪比与回波强度是正比关系(Ryzhkov and Zrnica,2019)。因此 BJ-Xnet 数据组网方式是:非气象回波识别并剔除后,对同一个格点上多个X波段雷达探测的值,选择回波强度最大值对应的雷达作为基准,选取该雷达探测值( $Z$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$ 、 $\rho_{hv}$ )作为该格点的值。

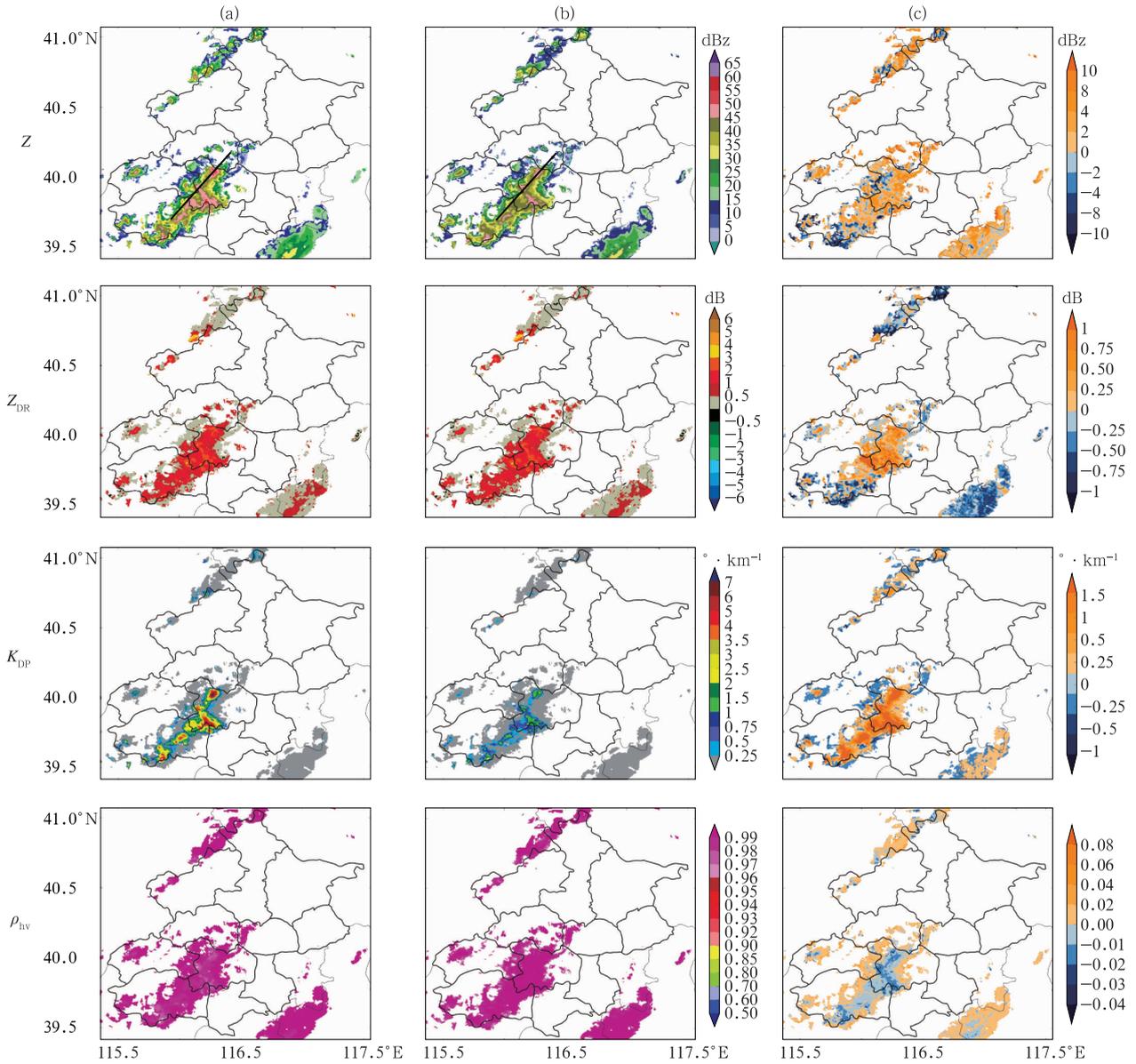
## 2 BJ-Xnet 和 S 波段雷达结果分析

### 2.1 探测差异比较

对双偏振雷达探测的4个参量( $Z$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$ 、 $\rho_{hv}$ )开展对比分析,其中, $Z_{DR}$  随观测仰角和观测方位的不同而变化, $K_{DP}$  是根据差分相位计算得到的,与雷达探测的波长  $\lambda$  有密切的关联。为准确比较 BJ-Xnet 和 S 波段雷达在探测反射率因子之间的差异(叶飞等,2020),选取 BJ-Xnet 和 S 波段雷达在 3 km 高度重合观测区域的雷达数据,结果见图 2。图中分别汇总了 BJ-Xnet、S 波段雷达在 3 km 高度的4个偏振参量值,以及 BJ-Xnet 与 S 波段雷达各偏振参量对应格点的差值。

由图 2 可知,在强回波区域 BJ-Xnet 的观测效果明显比 S 波段雷达观测的数值更高,整体上 BJ-Xnet 对  $Z$  的观测值比 S 波段雷达偏大 2 dBz;但在 BJ-Xnet 观测的一些边缘区域,S 波段雷达观测值比 BJ-Xnet 观测值更大。在重合区域, $Z$  差值的平均值为 1.80 dBz,标准差为 4.45 dBz; $Z_{DR}$  差值的平均值为 0.0310 dB,标准差为 0.5070 dB; $\rho_{hv}$  差值的平均值为 0.0043,标准差为 0.0119; $K_{DP}$  差值的平均值为  $0.3609^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$ ,标准差为  $0.7679^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$ 。由均值和标准差可知:BJ-Xnet 与 S 波段雷达探测  $Z$ 、 $Z_{DR}$  和  $\rho_{hv}$  一致性好; $K_{DP}$  一致性较差,在强回波区域时  $K_{DP}$  值差异十分明显,在回波强度小于 30 dBz 的区域,两者的  $K_{DP}$  都很小,无明显差异。

为了定量化评估 BJ-Xnet 与 S 波段雷达观测结果差异,统计了  $Z$  和  $Z_{DR}$  差值的直方图,重合区域有效格点总数为 41976 个。如图 3 所示,两者  $Z$  的差值在  $-3 \sim 6$  dBz 的格点数共有 34402 个,占总格点数的 81.96%(图 3a); $Z_{DR}$  的差值在  $-1 \sim 1$  dB 的格点数共有 39458 个,占总格点数的 94.00%,差值在  $-0.5 \sim 0.5$  dB 的占 74.49%(图 3b)。同时,两者  $Z$  的平均值最大差值,主要分布在  $10 \sim 15$  dBz; $Z_{DR}$  的平均值最大差值,主要分布在  $0.75 \sim 1.00$  dB。这



注:黑斜线为图 6~图 9 剖面位置。

图 2 2021 年 7 月 27 日双偏振参量  $Z$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$  和  $\rho_{hv}$  在 3 km 高度的 CAPPI 图

(a)BJ-Xnet, (b)S 波段雷达, (c)BJ-Xnet 与 S 波段雷达观测重合区域雷达差值

Fig. 2 Values of  $Z$ ,  $Z_{DR}$ ,  $K_{DP}$  and  $\rho_{hv}$  of BJ-Xnet and S-band radar at 3 km height on 27 July 2021

(a) BJ-Xnet, (b) S-band radar, (c) difference in the common area of BJ-Xnet and S-band radar

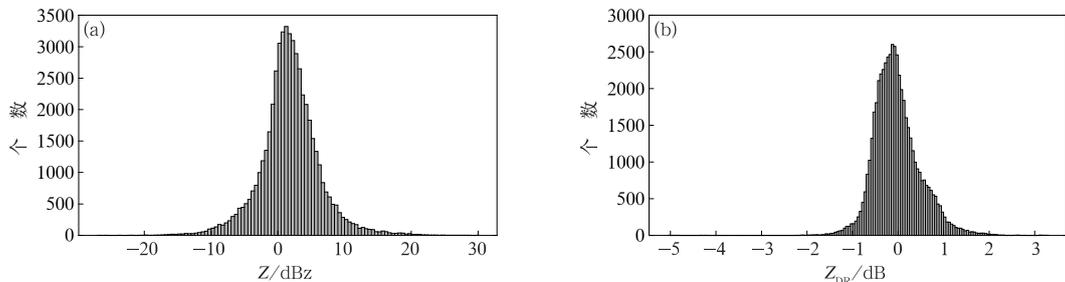


图 3 2021 年 7 月 27 日 BJ-Xnet 与 S 波段雷达差值统计直方图

(a)  $Z$ , (b)  $Z_{DR}$

Fig. 3 Statistical histogram of difference between BJ-Xnet and S-band radar on 27 July 2021

(a)  $Z$ , (b)  $Z_{DR}$

说明两个波段探测的强回波整体差异不大,弱回波部分差异明显,主要集中在X波段雷达探测半径处对应的边缘回波,如河北与北京延庆区交界的地方。原因可能是:(1)BJ-Xnet和S波段雷达在不同仰角下对云体采样的部位不同,导致在3 km高度插值后有显著差异;(2)云体相对BJ-Xnet和S波段雷达距离不一样雷达采样的体积不一样,导致回波差异显著。

$K_{DP}$ 在回波强度 $\geq 30$  dBz的重合区域,表现出明显差异,在 $< 30$  dBz区域,两者的 $K_{DP}$ 都很小。出现该差异的原因主要体现在以下两个方面:(1) $K_{DP}$ 数值与雷达波长呈正比关系(Zhang et al, 2000),见式(1),波长不一样 $K_{DP}$ 数值会不一样;(2)降水粒子对X波段雷达和S波段雷达前向散射的强度不一样。利用雷达探测数据,分别对两个波段数据进行 $Z$ 与 $K_{DP}$ 关系式拟合,可得到式(2)和式(3)。

$$K_{DP} = \frac{180}{\pi} \text{Re}(K_h - K_v) \\ = \frac{180\lambda}{\pi} \text{Re}[\langle n_{sh}(0) \rangle - \langle n_{sv}(0) \rangle] \quad (1)$$

式中: $K_h$ 为水平偏振等效传播常数, $K_v$ 为垂直偏振等效传播常数, $\lambda$ 为雷达波长, $s_{hh}$ 为水平散射振幅, $s_{vv}$ 为垂直散射振幅, $\langle n_{sh}(0) \rangle$ 表示对水平散射振幅积分, $\langle n_{sv}(0) \rangle$ 表示对垂直散射振幅积分, $n$ 表示粒子个数,Re表示取实部。

根据2021年7月27日探测数据,分别绘制了BJ-Xnet和S波段雷达的 $Z$ 与 $K_{DP}$ 散点图以及拟合曲线(图4和图5),并得到 $Z$ 与 $K_{DP}$ 的拟合关系式。

BJ-Xnet:

$$K_{DP} = 1.55 \times 10^{-9} Z^{5.64} \quad (2)$$

S波段雷达:

$$K_{DP} = 2.2552 \times 10^{-9} Z^{5.109} \quad (3)$$

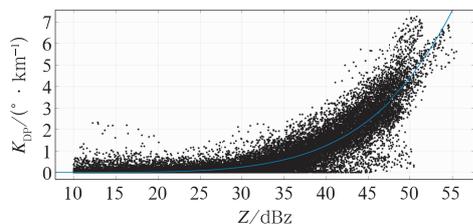


图4 2021年7月27日BJ-Xnet的 $Z$ 与 $K_{DP}$ 拟合关系分布

Fig. 4 Distribution of fitting relation for BJ-Xnet between  $Z$  and  $K_{DP}$  on 27 July 2021

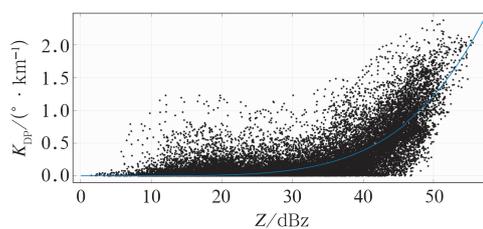


图5 2021年7月27日S波段雷达的 $Z$ 与 $K_{DP}$ 拟合关系分布

Fig. 5 Distribution of fitting relation for S-band radar between  $Z$  and  $K_{DP}$  on 27 July 2021

根据拟合函数可以得到,当 $Z \geq 30$  dBz时,X波段与S波段雷达 $K_{DP}$ 值近似呈现约3倍以上关系。如, $Z = 30$  dBz时,X波段雷达 $K_{DP} = 0.3321 \text{ °} \cdot \text{km}^{-1}$ ,S波段雷达 $K_{DP} = 0.0794 \text{ °} \cdot \text{km}^{-1}$ 。从这里可知,散射幅度对 $K_{DP}$ 的影响要大于波长对 $K_{DP}$ 的影响。

## 2.2 组网融合方法

方法1:BJ-Xnet和S波段雷达观测值直接融合

(1)在雷达观测资料重合区域,若 $Z$ 、 $Z_{DR}$ 、 $\rho_{hv}$ 既有BJ-Xnet观测值,又有S波段雷达观测值,则以S波段雷达观测值为准。

(2)在雷达观测资料重合区域,若 $K_{DP}$ 既有BJ-Xnet观测值,又有S波段雷达观测值,则以BJ-Xnet观测值为准。

(3)在S波段雷达探测盲区,直接采用BJ-Xnet观测数据填充;在BJ-Xnet探测盲区,如果S波段雷达 $K_{DP}$ 有值,则 $K_{DP}$ 值按式(2)和式(3),转变为X波段雷达 $K_{DP}$ 值。

方法2:BJ-Xnet和S波段雷达观测值以距离指数权重方式融合

在雷达观测资料重合区域,BJ-Xnet和S波段雷达 $Z$ 、 $Z_{DR}$ 、 $\rho_{hv}$ 观测值采用指数权重方法,见式(4)。 $K_{DP}$ 采用该方法时,S波段雷达 $K_{DP}$ 观测值按拟合的关系式扩大相应倍数后与BJ-Xnet对应的 $K_{DP}$ 组网。指数权重函数如下(孙敏等,2019):

$$\omega = e^{(-r^2/R^2)} \quad (4)$$

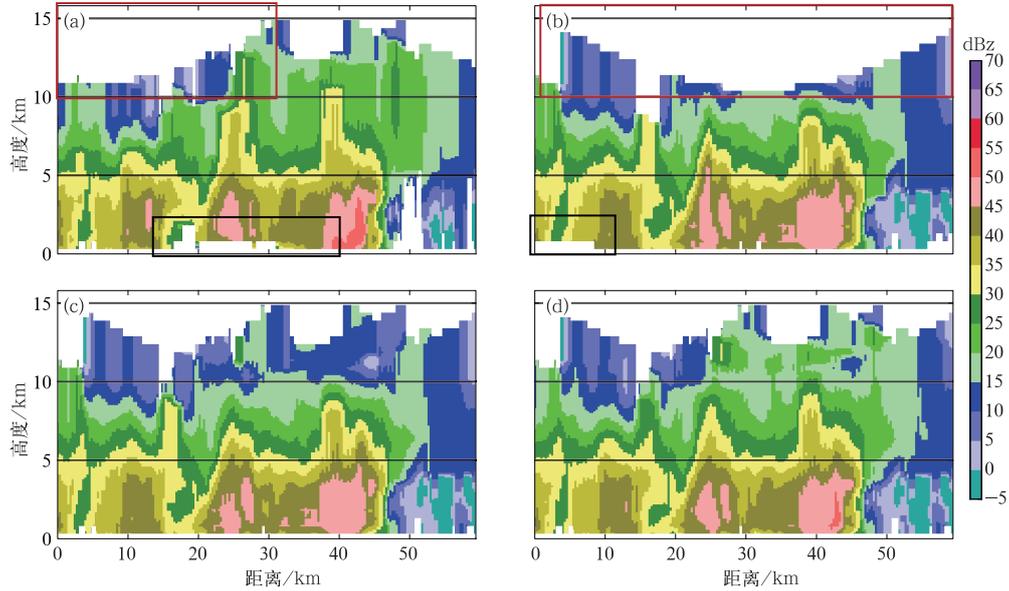
式中: $r$ 为网格点到雷达的距离, $\omega$ 为权重值, $R$ 为适当长度比例,本文中 $R = 150$  km。

## 2.3 结果对比

利用BJ-Xnet和S波段雷达垂直剖面(vertical

cross-section, VCS) 数据(图 2 中黑线位置), 对比分析按上述两种方法融合后, BJ-Xnet 和 S 波段雷达

垂直剖面融合效果, 见图 6~图 9, 其中垂直剖面数据为 30 层 CAPPI 数据插值得到, CAPPI 各层间



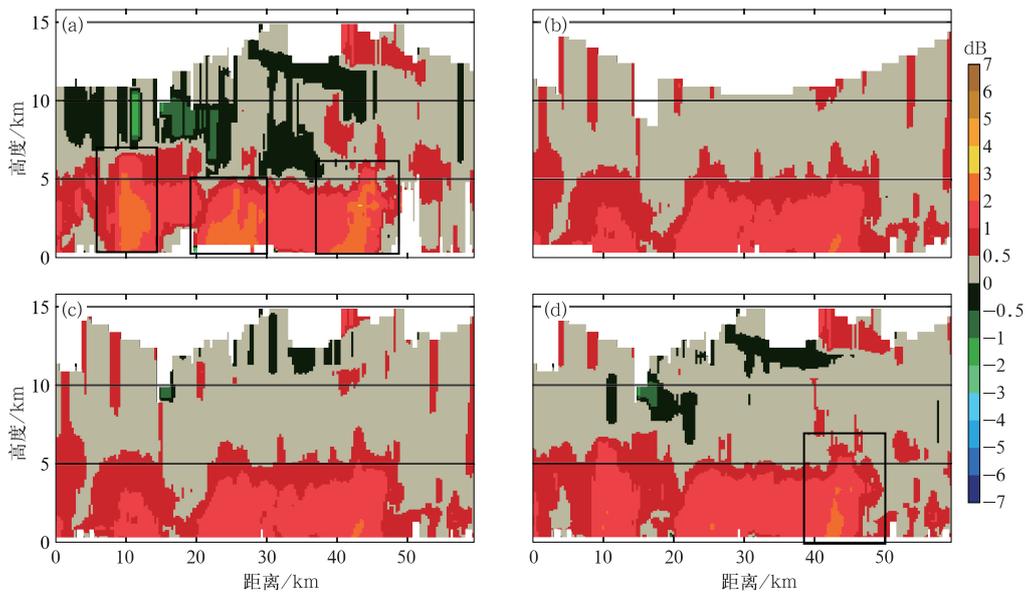
注: 红框表示回波“U”型区域, 黑框表示探测盲区。

图 6 2021 年 7 月 27 日沿图 2 中黑线 Z 垂直剖面融合效果对比

(a) BJ-Xnet, (b) S 波段雷达, (c) 方法 1 融合, (d) 方法 2 融合

Fig. 6 Fusion effects of the vertical cross-section of Z along the black line in Fig. 2 on 27 July 2021

(a) BJ-Xnet, (b) S-band radar, (c) Method 1 fusion, (d) Method 2 fusion



注: 黑框表示重点分析区域。

图 7 2021 年 7 月 27 日沿图 2 中黑线  $Z_{DR}$  垂直剖面融合效果对比

(a) BJ-Xnet, (b) S 波段雷达, (c) 方法 1 融合, (d) 方法 2 融合

Fig. 7 Fusion effects of the vertical cross-section of  $Z_{DR}$  along the black line in Fig. 2 on 27 July 2021

(a) BJ-Xnet, (b) S-band radar, (c) Method 1 fusion, (d) Method 2 fusion

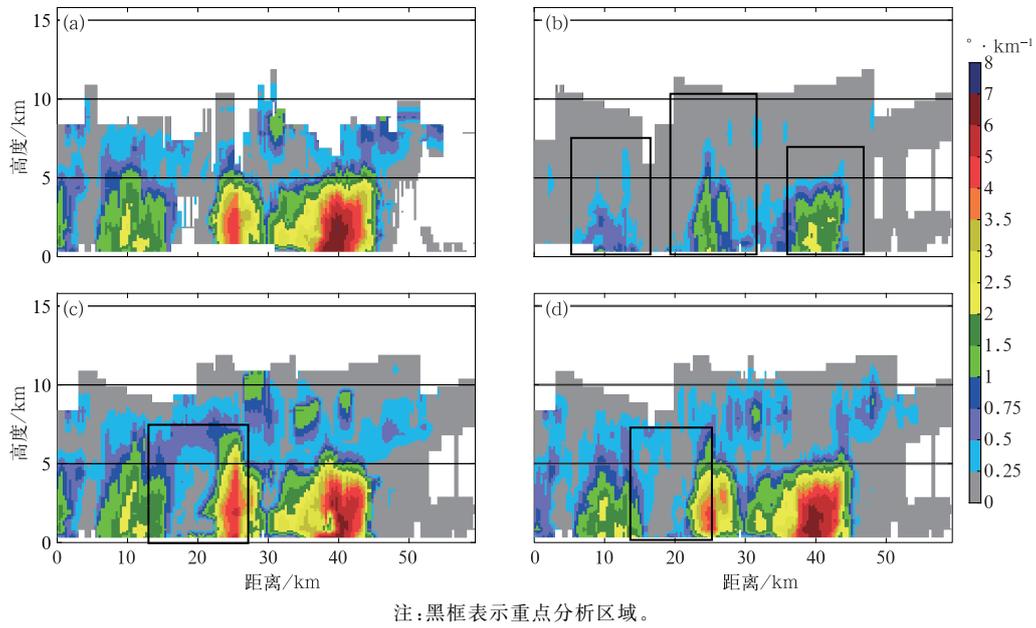


图 8 2021 年 7 月 27 日沿图 2 黑线  $K_{DP}$  垂直剖面融合效果对比  
 (a)BJ-Xnet, (b)S 波段雷达, (c)方法 1 融合, (d)方法 2 融合

Fig. 8 Fusion effects of the vertical cross-section of  $K_{DP}$  along the black line in Fig. 2 on 27 July 2021  
 (a) BJ-Xnet, (b) S-band radar, (c) Method 1 fusion, (d) Method 2 fusion

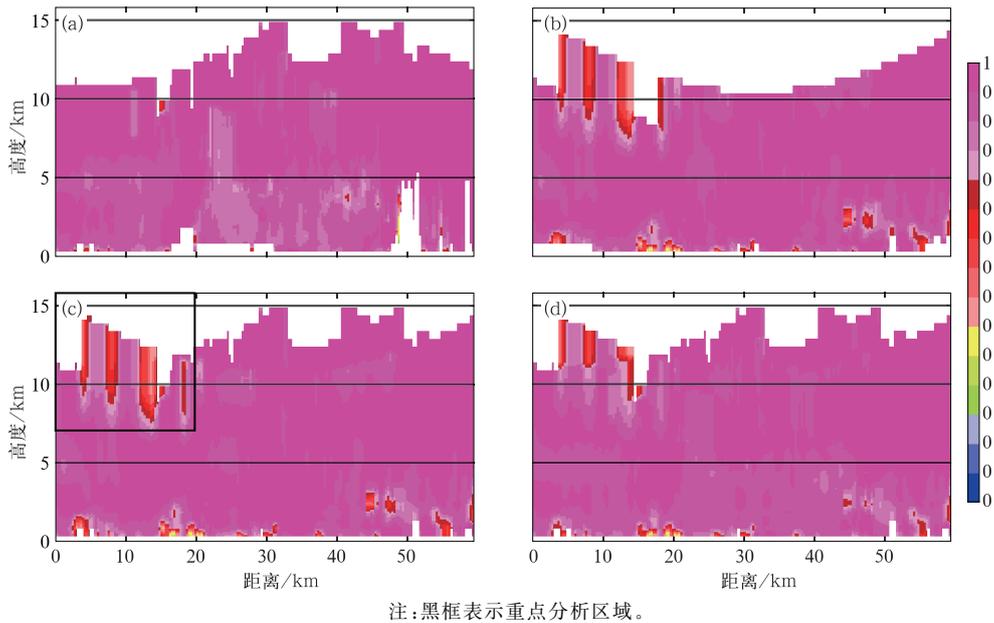


图 9 2021 年 7 月 27 日沿图 2 黑线  $\rho_{hv}$  垂直剖面融合效果对比  
 (a)BJ-Xnet, (b)S 波段雷达, (c)方法 1 融合, (d)方法 2 融合

Fig. 9 Fusion effects of the vertical cross-section of  $\rho_{hv}$  along the black line in Fig. 2 on 27 July 2021  
 (a) BJ-Xnet, (b) S-band radar, (c) Method 1 fusion, (d) Method 2 fusion

隔高度为 500 m,最低层为 500 m,最高层为 15000 m,格点分辨率为 300 m。图 6~图 9 分别为  $Z$ 、 $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$  和  $\rho_{hv}$  垂直剖面融合效果的比较。BJ-Xnet 和 S 波段雷达观测值以不同方法组网融合后的 CAPPI

结果如图 10 所示。

BJ-Xnet 和 S 波段雷达垂直剖面的整体回波结构差异不大,但存在些细微差别。在图 6a, 6b 黑色矩形方框标注的区域, BJ-Xnet 受北京地形和建筑

物的遮挡,存在少量的低空区域探测盲区,在与 S 波段雷达融合后,弥补了两者低空探测的不足。按方

法 1 融合后,更多保留了 S 波段雷达回波结构特征(图 6c);按方法 2 融合后,BJ-Xnet 和 S 波段雷达特

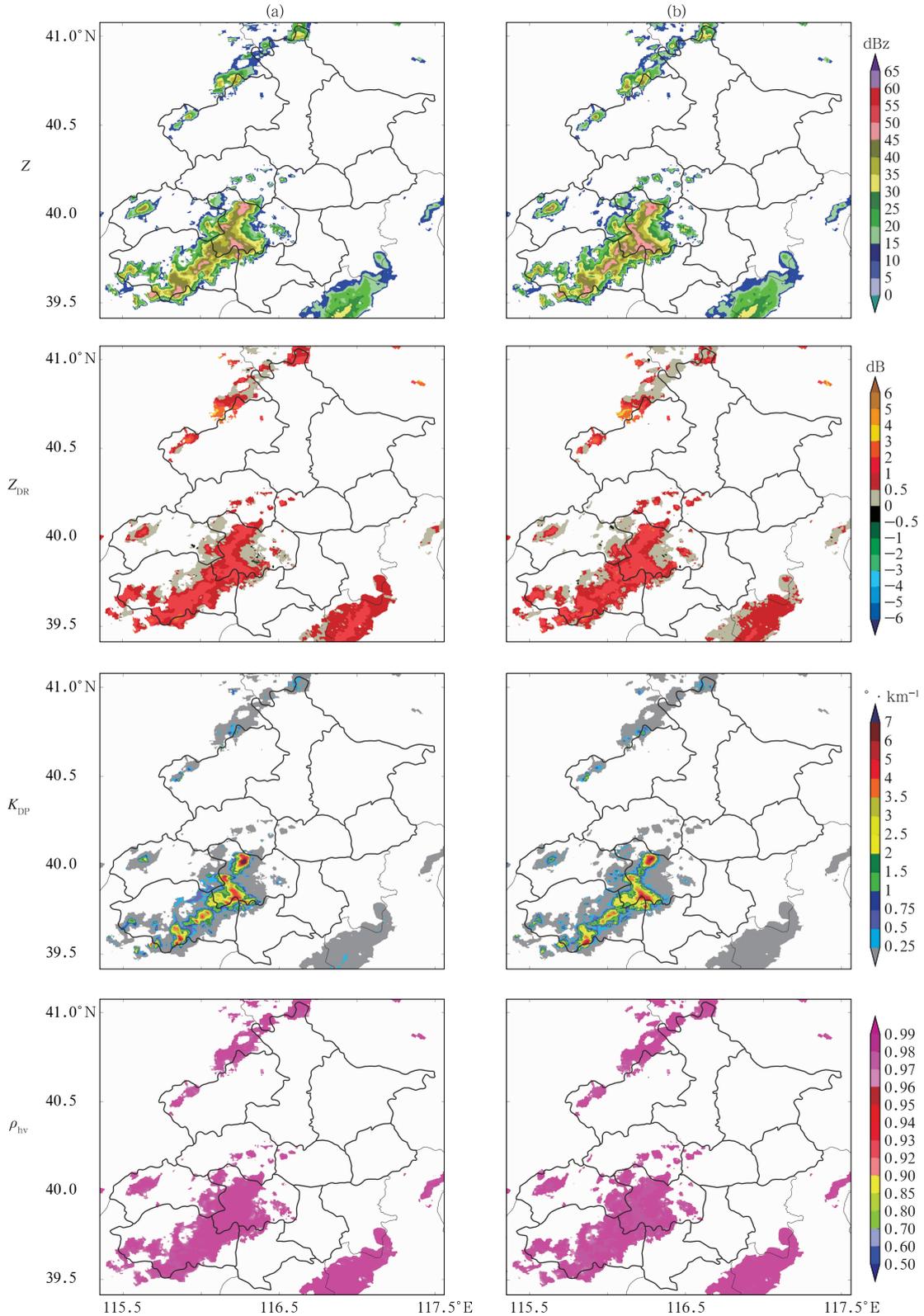


图 10 2021 年 7 月 27 日(a)方法 1、(b)方法 2 组网融合方式在 3 km 高度的 CAPPI 图

Fig. 10 The CAPPI results of (a) Method 1 and (b) Method 2 at 3 km height on 27 July 2021

征都有所保留(图6d)。图6a中半“U”型区域(红色框)和图6b回波顶的“U”型区域(红色框)分别是由X波段雷达和S波段雷达静锥区导致,两种方法融合后都对X波段雷达和S波段雷达“U”型区域有一定的补盲作用。

图7a黑色矩形方框标注的区域,BJ-Xnet对应的 $Z_{DR}$ 值比S波段雷达对应的值要略大,在8~12 km高度,BJ-Xnet对应的 $Z_{DR}$ 值与S波段雷达值差异明显。两者按方法1融合(图7c),整体保留了S波段雷达特征,并在S波段雷达缺测部分补上BJ-Xnet对应的 $Z_{DR}$ ;按方法2融合(图7d),黑色矩形区域中的上半部分保留的S波段雷达特征偏多,保留BJ-Xnet特征偏少,下半部分中BJ-Xnet和S波段雷达对应的 $Z_{DR}$ 值均有所保留。

图8b黑色矩形方框标注的区域,S波段雷达对应的 $K_{DP}$ 值与BJ-Xnet对应的 $K_{DP}$ 值差异大,30 dBz以上的回波区域整体保持了约3倍以上关系。方法2按指数权重融合后的 $K_{DP}$ 值(图8d)比方法1直接融合的 $K_{DP}$ 值(图8c)过渡更自然,如图8c中矩形方框内标注的区域。同时,融合之后的剖面图都较好地填补了BJ-Xnet和S波段雷达的探测盲区。

由图9可见,方法1(图9c)和方法2(图9d)融合后的 $\rho_{hv}$ 整体差异较小,主要差异体现在矩形方框区域的位置。

图10为采用方法1、方法2融合组网方式得到的CAPPI结果对比图。可以看到,方法1和方法2两者的融合方式得到的 $Z$ 、 $Z_{DR}$ 、 $\rho_{hv}$ 、 $K_{DP}$ 差异不大。

### 3 结 论

本文利用北京9部X波段雷达构成的BJ-Xnet探测网和S波段雷达联合探测的一次较强降水观测资料,通过分析BJ-Xnet与S波段雷达在重合区探测参量之间的差异,可得如下结论:

(1)BJ-Xnet选取衰减最小的雷达作为基准,并对该雷达 $Z$ 、 $Z_{DR}$ 进行衰减订正,得到BJ-Xnet的探测值与S波段雷达探测值, $Z$ 、 $Z_{DR}$ 、 $\rho_{hv}$ 大致相当,但 $K_{DP}$ 差异较大,BJ-Xnet、S波段雷达对应的 $K_{DP}$ 值可以通过拟合的函数关系式进行S波段雷达和X波段雷达 $K_{DP}$ 值相互转化。

(2)对BJ-Xnet和S波段雷达数据进行融合,根据垂直剖面数据结果看到,融合组网后可以弥补两者原本的探测盲区,对低空监测能力和雷达静锥区

监测能力具有提升作用。

(3)BJ-Xnet和S波段雷达重合观测区域,选择直接融合方式,数据融合结果偏重于S波段雷达探测值;选择距离指数权重方式融合, $K_{DP}$ 过渡更加自然。两种融合方式对于探测盲区的监测能力均有所提升。

### 参 考 文 献

- 陈洪滨,李兆明,段树,等,2012.天气雷达网络的进展[J].遥感技术与应用,27(4):487-495. Chen H B, Li Z M, Duan S, et al, 2012. The development of weather radar network[J]. Remote Sens Technol Appl, 27(4):487-495(in Chinese).
- 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观测试验[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).
- 戴春容,李兆明,蔡康龙,2019.佛山市X波段双偏振雷达地形遮挡与覆盖面积分析[J].广东气象,41(3):59-62. Dai C R, Li Z M, Cai K L, 2019. Terrain occlusion and coverage area analysis of X-band dual-polarization in Foshan Area[J]. Guangdong Meteor, 41(3):59-62(in Chinese).
- 杜牧云,刘黎平,胡志群,等,2011.C波段双线偏振多普勒雷达资料质量分析[J].暴雨灾害,30(4):328-334. Du M Y, Liu L P, Hu Z Q, et al, 2011. Data quality analysis of C-band dual linear polarimetric radar[J]. Torr Rain Dis, 30(4):328-334(in Chinese).
- 何宇翔,吕达仁,肖辉,2009a.X波段双线极化雷达差分反射率的衰减订正[J].高原气象,28(3):607-616. He Y X, Lv D R, Xiao H, 2009a. Attenuation correction of radar differential reflectivity for X-band dual polarization radar[J]. Plateau Meteor, 28(3):607-616(in Chinese).
- 何宇翔,吕达仁,肖辉,等,2009b.X波段双线极化雷达反射率的衰减订正[J].大气科学,33(5):1027-1037. He Y X, Lv D R, Xiao H, et al, 2009b. Attenuation correction of reflectivity for X-band dual polarization radar[J]. Chin J Atmos Sci, 33(5):1027-1037(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[J].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[J]. Acta Meteor Sin, 77(3):516-528(in Chinese).
- 马建立,苏德斌,金永利,等,2012.X波段双线性偏振雷达电磁波衰减对冰雹识别的影响[J].高原气象,31(3):825-835. Ma J L, Su D B, Jin Y L, et al, 2012. The impact of attenuation of X-band dual linear polarimetric radar on hail recognition[J]. Plateau Meteor, 31(3):825-835(in Chinese).
- 马舒庆,陈洪滨,王国荣,等,2019.阵列天气雷达设计与初步实现[J].

- 应用气象学报, 30(1): 1-12. Ma S Q, Chen H B, Wang G R, et al, 2019. Design and initial implementation of array weather radar[J]. *J Appl Meteor Sci*, 30(1): 1-12(in Chinese).
- 苏永彦, 刘黎平, 2022. S 波段双偏振雷达和 X 波段相控阵天气雷达中气旋识别结果对比[J]. *气象*, 48(2): 229-244. Su Y Y, Liu L P, 2022. Comparison of mesocyclone identification results between S-band dual polarization radar and X-band phased array weather radar[J]. *Meteor Mon*, 48(2): 229-244(in Chinese).
- 孙敏, 王海江, 何姣阳, 等, 2019. 多普勒天气雷达组网联合观测与数据融合[J]. *成都信息工程大学学报*, 34(5): 475-481. Sun M, Wang H J, He J Y, et al, 2019. Joint detection Doppler weather radar network and data fusion[J]. *J Chengdu Univ Inform Technol*, 34(5): 475-481(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).
- 肖艳姣, 刘黎平, 2006. 新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究[J]. *气象学报*, 64(5): 647-657. Xiao Y J, Liu L P, 2006. Study of methods for interpolating data from weather radar network to 3-D grid and mosaics[J]. *Acta Meteor Sin*, 64(5): 647-657(in Chinese).
- 叶飞, 梁海河, 文浩, 等, 2020. 基于单站 CAPPI 格点数据的相邻天气雷达均一性评估系统研究[J]. *气象*, 46(1): 50-62. Ye F, Liang H H, Wen H, et al, 2020. Research on homogeneity evaluation system of neighboring weather radars based on single-station CAPPI grid data[J]. *Meteor Mon*, 46(1): 50-62(in Chinese).
- 张培昌, 魏鸣, 黄兴友, 等, 2018. 双线偏振多普勒天气雷达探测原理与应用[M]. 北京: 气象出版社. Zhang P C, Wei M, Huang X Y, et al, 2018. Principles and Applications of Dual-Line Polarization Doppler Weather Radar Detection[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 周聪, 闵锦忠, 戚友存, 等, 2019. 基于线性规划方法处理 C 波段双线偏振多普勒天气雷达差分相位  $\varphi_C$  数据[J]. *气象科学*, 39(5): 617-625. Zhou C, Min J Z, Qi Y C, et al, 2019. Processing differential phase data from C-band dual-polarimetric Doppler weather radar on the basis of the linear programming[J]. *J Meteor Sci*, 39(5): 617-625(in Chinese).
- 庄薇, 刘黎平, 王改利, 等, 2013. 青藏高原复杂地形区雷达估测降水方法研究[J]. *高原气象*, 32(5): 1224-1235. Zhuang W, Liu L P, Wang G L, et al, 2013. Radar-derived quantitative precipitation estimation in complex terrain area in Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Plateau Meteor*, 32(5): 1224-1235(in Chinese).
- Chandrasekar V, Chen H N, Seo D J, 2013. Impacts of polarimetric CASA radar observations on a distributed hydrologic model[C] // EGU General Assembly 2013. Vienna: EGU.
- Chandrasekar V, McLaughlin D, Zink M, et al, 2010. The CASA IP1 tested after 5 years operation: accomplishments, breakthroughs, challenges and lessons learned[C] // Sixth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology. Sibiu.
- Kim D S, Maki M, 2012. Validation of composite polarimetric parameters and rainfall rates from an X-band dual-polarization radar network in the Tokyo Metropolitan Area[J]. *Hydrol Res Lett*, 6: 76-81.
- Maki M, Maesaka T, Misumi R, et al, 2008. X-band polarimetric radar network in the Tokyo Metropolitan area-X-NET[C] // Proceedings of the 5th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology. Helsinki: Finnish Meteorological Institute.
- Ryzhkov A V, Zrnicek D S, 2019. Radar Polarimetry for Weather Observations[M]. Cham: Springer.
- Wang Y T, Chandrasekar V, 2009. Algorithm for estimation of the specific differential phase[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 26(12): 2565-2578.
- Wang Y T, Chandrasekar V, 2010. Quantitative precipitation estimation in the CASA X-band dual-polarization radar network[J]. *J Atmos Ocean Technol*, 27(10): 1665-1676.
- Zhang G, Vivekanandau J, Brandes E, 2000. A method for estimating rain rate and drop size distribution from polarimetric radar measurements[C] // IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Honolulu: IEEE.

(本文责编: 戴洋)