

常衡,吴翀,刘黎平,等,2026. X 波段相控阵与 S 波段雷达组网融合方法研究[J]. 气象,52(9):1103-1116. Chang H, Wu C, Liu L P, et al, 2026. Research on the network fusion methodology for X-band phased array and S-band radars[J]. Meteor Mon, 52(9):1103-1116(in Chinese).

## X 波段相控阵与 S 波段雷达组网融合方法研究<sup>\*</sup>

常 衡<sup>1,2</sup> 吴 翀<sup>2</sup> 刘黎平<sup>2</sup> 文 浩<sup>3</sup>

1 山东省机场管理集团临沂国际机场有限公司气象台, 临沂 276034

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

3 中国气象局气象探测工程技术研究中心, 北京 100081

**提 要:** 针对 X 波段相控阵雷达时空分辨率高但观测范围小、存在各类影响数据可靠性误差的特点, 提出一种将其与 S 波段业务雷达进行高质量数据融合的方法。首先基于光流法对 S 波段雷达数据进行运动趋势外推, 将其时间分辨率由 6 min 提升至与 X 波段同步的 1.5 min, 继而分别采用最优插值与金字塔变换实现双波段雷达数据的空间融合, 得到对应的 SXnet-O 与 SXnet-K 数据。使用粤港澳大湾区雷达观测网 2022 年 5—6 月近 5000 组雷达体扫数据统计表明: 在时间维度上, 光流法外推结果在各项预报评分及相关系数上均优于传统持续性方法; 在空间维度上, 融合数据有效弥补了单雷达的探测盲区, 低空(500 m)回波覆盖率较 S 波段雷达提升约 2.5 倍。对比两种空间融合方法发现, SXnet-O 在系统偏差控制( $\pm 2$  dB 内比例达 92%)、参量一致性及边界稳定性上显著优于 SXnet-K。与单波段组网数据相比, SXnet-O 极大缩小了与 S 波段基准的偏差均值, 且有效整合了 X 波段结构精细度与 S 波段观测稳定性。

**关键词:** S 波段双偏振雷达, X 波段相控阵雷达, 数据融合, 组网拼图

**中图分类号:** P413

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.050702

## Research on the Network Fusion Methodology for X-Band Phased Array and S-Band Radars

CHANG Heng<sup>1,2</sup> WU Chong<sup>2</sup> LIU Liping<sup>2</sup> WEN Hao<sup>3</sup>

1 Meteorological Observatory, Linyi International Airport Co., Ltd., Shandong Airport Management Group, Linyi 276034

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 CMA Meteorological Observation Engineering Technology Research Center, Beijing 100081

**Abstract:** In view of the characteristics of X-band phased array radar, which offers high spatio-temporal resolution but limited observation coverage and various errors that affect the reliability of data, this study proposes a method of high-quality data fusion between X-band phased array radar and S-band operational radar. First, the optical flow method is applied to extrapolate the motion trends of S-band radar data, enhancing its temporal resolution from 6 min to 1.5 min, synchronized with X-band radar. Subsequently, the optimal interpolation algorithm and pyramid transform algorithm are employed for the spatial fusion of dual-band radar data, and the corresponding products SXnet-O and SXnet-K are obtained. Statistical analysis based on nearly 5000 radar volume scans from the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area radar network from May to June 2022 demonstrates that the time-matching results extrapolated by the optical

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(U2142210、42305156)、中国气象科学研究院科技发展基金项目(2023KJ037)和中国气象局大气探测重点开放实验室联合基金开放课题项目(U2021Z10)共同资助

2025 年 2 月 10 日收稿; 2026 年 5 月 7 日收修定稿

第一作者: 常衡, 主要从事雷达气象学研究. E-mail: 2683664684@qq.com

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

flow method outperform traditional persistence forecasting in terms of forecasting scores and correlation coefficients in the temporal dimension. In the spatial dimension, the fused data effectively compensate for the detection blind zones of a single radar, increasing the low-altitude (500 m) echo coverage by approximately 2.5 times compared to the S-band radar. Comparative results indicate that SXnet-O significantly outperforms SXnet-K in system bias control (92% of deviations within  $\pm 2$  dB), parameter consistency, and boundary stability. Compared with the single-band network data, SXnet-O greatly reduces the mean deviation from the S-band reference. Moreover, the structural precision of X-band and the observational stability of S-band get effectively integrated.

**Key words:** S-band dual polarization radar, X-band phased array radar, data fusion, networking mosaic

## 引 言

X 波段相控阵雷达具有灵活快速扫描、极高时空分辨率的优势,可观测到更低高度和更小尺度的降水变化,提高了灾害性天气的监测和预警能力、弥补了传统天气雷达的不足(张光义,2009;刘黎平等,2014;Chen and Chandrasekar,2016)。然而,现有 X 波段相控阵雷达在观测精度上仍面临一些挑战(柳云雷等,2020;吴翀等,2014;刘俊等,2015;苏永彦和刘黎平,2022),其有效探测范围不足 S 波段雷达的 25%(Saffle and Johnson,1997),较短波长在降雨中的衰减程度是 S 波段雷达的 10 倍以上,系统误差和天线误差等因素也会影响观测数据的准确性和可靠性。因此 X 波段相控阵雷达在资料应用过程中,需要将多部雷达组网提升观测范围,并订正误差提升数据可靠性,以更好地用于短时临近预报。

多波段雷达协同观测体系是天气雷达网的未来发展趋势,其关键瓶颈是不同波长雷达的时空分辨率匹配技术。针对国内业务使用的 S/C 波段新一代天气雷达网,肖艳姣和刘黎平(2006)以及王红艳等(2009)提出了基于经纬度匹配和距离加权的三维组网方法,将多部雷达(覆盖范围 230 km、更新时间 6 min)的反射率因子数据融合形成范围数百千米、更新时间 6~10 min 的三维拼图,该技术较好地解决了单部雷达静锥区和遮挡导致的地形盲区,但是对于地球曲率导致的低空盲区,以业务雷达的站点间距仍难以实现有效覆盖。因此,发展了 X 波段雷达网之间和 X 波段与 S 波段雷达的组网融合技术以解决低空盲区的问题。例如,美国在达拉斯-沃斯堡地区构建的 8 部 X 波段雷达网,将空间分辨率提升至 250 m,低层覆盖得到很大提升(Chandrasekar et al,2012;2018;Biswas et al,2022)。在国内,北

京、南京、粤港澳大湾区等地建设了 X 波段雷达网(张哲等,2021;吴翀等,2016;程元慧等,2020;张羽等,2020),所得融合数据初步体现出更高的观测分辨率和低层覆盖率(李毅聪等,2018)。尽管现有研究在多波段雷达融合中的空间分辨率优化方面成果显著,但对时间维度影响机制的研究尚不成熟,面临时空协调性不足的挑战。以我国主力的 S 波段业务雷达(时间分辨率 6 min)与 X 波段相控阵雷达(时间分辨率 1.5 min)为例,二者时间分辨率差异导致数据融合时存在 4.5 min 的时间差,进而影响强对流过程演变特征的连续捕捉。针对该问题,现有方法多依赖固定权重插值等传统静态融合方法(刘于新等,2024),效果存在一定局限性。

对于广东、浙江等地部署的 X 波段相控阵天气雷达,观测数据不仅衰减较大,同时阵列天线还会引入不同扫描角的观测误差(张蔚然等,2021)。尽管其观测资料在应用前基于偏振参量已做了一系列质量控制(刘黎平等,1997),包括地物回波识别去除(江源等,2009)、衰减订正(肖柳斯等,2021;施红等,2023)、系统偏差及强度订正(严勇,2013)、仰角误差订正等,但上述误差难以被彻底消除,不能保证订正后的数据质量与 S 波段数据完全一致(李哲等,2022)。因此,需要提出综合两种波段数据优势、实现融合组网的新方法。在遥感图像处理 and 降水估测领域,类似数据融合的算法已经被大量使用。其中,金字塔变换主要用于多尺度分解和融合,例如在卫星遥感中将 LandSat 与 MODIS 不同传感器或不同分辨率的图像整合,在保留整体结构的基础上增强数据的微观纹理(牛颖超等,2017)。最优插值算法主要用于多源数据融合与误差动态校正(如利用雨量站数据对天气雷达定量降水估测值进行订正),其优势在于基于误差协方差建模,以统计最优性最小

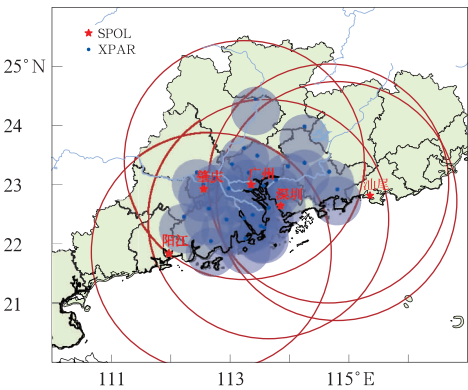
化分析误差方差,实现多源数据的优势互补(勾亚彬等,2014)。但在多波段雷达原始观测数据的融合领域,上述方法尚没有研究使用。

为此,本文利用粤港澳大湾区部署的 X 波段相控阵天气雷达网,针对其与 S 波段业务雷达数据融合中的两个核心问题展开研究:一是 S 波段与 X 波段雷达在时空分辨率上的固有差异问题,二是 X 波段相控阵雷达观测误差在现有技术中难以完全订正的问题。具体技术路线为:首先建立基于光流法的 S 波段雷达数据时间外推模型,将其时间分辨率提升至与 X 波段雷达匹配的更新频率,然后分别采用最优插值和金字塔变换对两种不同空间分辨率的数据进行融合和订正,以获得更准确可靠的三维组网数据,最后评估新方法所得融合数据较单波段雷达数据的优势。

1 资料与方法

1.1 资料选取

本研究采用了粤港澳大湾区 5 部 S 波段双偏振雷达(S-band dual-polarization radar, SPOL)和 28 部 X 波段相控阵雷达(X-band phased array radar, XPAR)的数据。雷达站点分布见图 1,其中,单部 SPOL 的最大探测距离为 230 km(图 1 中红色圆圈),其组网可完整覆盖粤港澳大湾区;图 1 中的蓝色范围则表示 28 部 XPAR 的组网覆盖范围(单部 XPAR 的有效探测半径为 43 km),可以看到,多部 X 波段相控阵雷达组网后其探测范围仍远小于 SPOL 探测,但基本能够覆盖粤港澳大湾区。两种雷达的性能对比见表 1。



注:红色圆圈表示 SPOL 的最大探测距离,蓝色阴影表示 XPAR 的覆盖范围。

图 1 粤港澳大湾区 SPOL 与 XPAR 站点分布  
Fig. 1 Distribution of SPOL and XPAR stations in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

1.2 SPOL 与 XPAR 的时空融合方法

在数据预处理阶段,对 SPOL 和 XPAR 数据分别进行质量控制,并采用不同的组网策略,得到时间分辨率为 6 min、空间分辨率为 500 m 的 S 波段雷达网三维格点数据,以及时间分辨率为 1.5 min、空间分辨率为 150 m 的 X 波段雷达网三维格点数据。然后,通过光流外推方法(以下简称光流法)处理 S 波段数据,使两种波段数据的时间分辨率保持一致。最后,采用两种空间融合方法,对不同空间分辨率的两种波段格点数据进行融合组网,得到时间分辨率为 1.5 min、空间分辨率为 150 m 的 S 波段与 X 波段雷达融合组网数据。

1.2.1 单波段雷达的数据组网方法

在获取 SPOL 原始数据后,首先采用模糊逻辑

表 1 SPOL 与 XPAR 性能参数对比

| Table 1 Comparison of performance parameters between SPOL and XPAR |             |                 |
|--------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------|
| 工作参数                                                               | SPOL        | XPAR            |
| 扫描范围                                                               | 0.5°~19.5°  | 0.9°~20.7°      |
| 仰角层数                                                               | 9           | 12              |
| 扫描时间                                                               | 6 min       | 1.5 min         |
| 扫描体制                                                               | 机械伺服控制方位和俯仰 | 水平机械扫描,垂直相控阵扫描  |
| 波束宽度                                                               | ≤1°         | 水平 3.6°,垂直 1.8° |
| 探测距离                                                               | ≤230 km     | ≤43 km          |
| 方位距离分辨率                                                            | 1000 m      | 30 m            |
| 观测模式                                                               | VPPI(VCP21) | VRHI            |

算法滤除地物杂波,通过采用双偏振参量构建隶属函数,实现非气象回波剔除(黄兴友等,2018)。然后,用滤波后的差分传播相移( $\Phi_{DP}$ )对反射率因子( $Z$ )和差分反射率因子( $Z_{DR}$ )做衰减订正处理(吴翀,2018)。经上述综合质量控制流程处理,较好地消除了非降水回波,最终获得可信度显著提升的极坐标数据集。再使用肖艳姣和刘黎平(2006)的方法将其转换为笛卡尔坐标系,并通过指数权重法结合雷达与格点间的距离信息进行拼接,形成了时间分辨率为 6 min、水平分辨率为 1000 m、垂直分辨率为 500 m 的 S 波段雷达网三维格点数据(SPOLnet)。而 XPAR 数据在生成三维格点的过程中,其衰减订正与误差控制流程同 SPOL 存在一定差异。首先,采用王超等(2019)提出的 X/S 双波段联合衰减订正算法:通过建立 X 波段  $\Phi_{DP}$  与 S 波段反射率因子的联合补偿模型,结合  $\Phi_{DP}$  参数动态调整衰减系数和系统偏差。针对 X 波段雷达特有的米氏散射效应,进一步引入耿飞(2023)提出的多波段散射特征转换模型,通过波长校正将 XPAR 的反射率因子统一转换为 S 波段雷达等效值。本研究使用的参量拟合关系如下:

$$Z_S = 1.194Z_X^{0.948} \quad (1)$$

式中: $Z_S$ 、 $Z_X$  分别为 SPOL 和 XPAR 的反射率因子。

$$K_{DPS} = 0.27733K_{DPX}^{1.041} \quad (2)$$

式中: $K_{DPS}$ 、 $K_{DPX}$  分别为 SPOL 和 XPAR 的差分传播相移率。

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

式中: $Z_{DRS}$ 、 $Z_{DRX}$  分别为 SPOL 和 XPAR 的差分反射率因子, $p_{1s}=1.125$ , $p_{2s}=-5.976$ , $p_{3s}=9.997$ , $p_{4s}=-0.1347$ , $q_{1s}=-5.385$ , $q_{2s}=9.834$ 。

最后利用吴翀等(2021)提出的置信度系数作为权重完成组网拼图,得到时间分辨率为 1.5 min、水平分辨率为 150 m、垂直分辨率为 500 m 的 X 波段相控阵雷达网三维格点数据(XPARnet)。

### 1.2.2 S 波段和 X 波段雷达反射率因子的时间匹配方法

本研究采用了 Bouguet(2001)提出的光流法来获得 SPOLnet 反射率因子的运动矢量场,并以此运动场为指导对 SPOLnet 数据分别进行 1.5、3.0 和 4.5 min 的外推,以获得 1.5 min 时间分辨率的 SPOLnet 数据。

对于光流法,运动矢量场由每层金字塔上的光流约束方程求解:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum w^2 I_{ix}^2 & \sum w^2 I_{ix} I_{iy} \\ \sum w^2 I_{ix} I_{iy} & \sum w^2 I_{iy}^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $u$ 、 $v$  分别为格点沿水平、垂直方向的速度分量, $w$  为假设在小区域  $\Omega$  内使用的窗口权重函数, $I_{ix}$ 、 $I_{iy}$  则是由不同格点上反射率因子沿水平、垂直方向的变换展开得到。

将原始雷达图像逐层降采样构建高斯金字塔,层间分辨率满足:

$$u_L = \frac{u}{2^L} \quad (5)$$

式中: $u=u_0$ ,表示原始分辨率层(即最高分辨率)上估计的水平方向光流速度分量, $u_L$  表示第  $L$  层金字塔(降采样后的低分辨率层)上估计的水平光流分量。

初始光流确定初始跟踪点,剩余光流在此基础上迭代优化以获取精确跟踪点。其计算是取参考与浮动图像上对应点的邻域窗口作平方差,当平方差最小时得到精确剩余光流,完成对应点跟踪。由此,点( $x, y$ )上的光流计算公式为:

$$\begin{aligned} I_L(x, y) &= \frac{1}{4} I_{L-1}(2x, 2y) + \\ &\frac{1}{8} [I_{L-1}(2x-1, 2y) + I_{L-1}(2x+1, 2y) + \\ &I_{L-1}(2x, 2y-1) + I_{L-1}(2x, 2y+1)] + \\ &\frac{1}{16} [I_{L-1}(2x+1, 2y-1) + I_{L-1}(2x+1, 2y+1) + \\ &I_{L-1}(2x-1, 2y-1) + I_{L-1}(2x-1, 2y+1)] \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $I_L$  代表高斯金字塔的第  $L$  层图像,通过对原始雷达反射率数据进行多尺度降采样得到; $I_{L-1}$  代表第  $L-1$  层的图像。

在获取雷达回波的光流后,采用 Germann and Zawadzki(2002)提出的半拉格朗日平流方案对雷达回波进行外推,时间步长为  $\Delta t$ ,位移量为  $a$ ,需要满足:

$$a_{n+1} = \Delta t u \left( t_0, x - \frac{a_n}{2} \right) \quad (7)$$

式中: $u \left( t_0, x - \frac{a_n}{2} \right)$  为  $t_0$  时刻回波在点  $\left( x - \frac{a_n}{2} \right)$  处的速度。

### 1.2.3 S 波段和 X 波段雷达数据的空间融合方法

#### (1) 基于最优插值的数据融合方法

针对 X 波段数据高空间分辨率(150 m)与 S 波



段数据高可靠性的互补特性,基于最优插值方法(李建通和张培昌,1996;李建通等,2000)构建融合模型:当格点同时存在双波段数据时,以X波段观测值为初始估计,通过引入S波段数据进行偏差校正[式(8)],其中权重系数 $P_i$ 依据各向同性相关函数求解[式(9)],单一数据格点则直接保留原始观测。

$$F_k = X_k + \sum_{i=1}^N (S_i - X_i) P_i \quad (8)$$

式中: $k$ 为融合后格点, $F_k$ 为S波段和X波段组网后格点 $k$ 的数据, $X_k$ 为格点 $k$ 上的XPARNET数据, $S_i$ 为在格点 $k$ 给定范围内第 $i$ 个格点的SPOLNET数据, $X_i$ 为第 $i$ 个格点处的XPARNET数据, $P_i$ 为第 $i$ 个格点处的权重系数(始终为正且总和为1), $N$ 为选取格点周围存在的S波段与X波段数据对数。

$$\sum_{i=1}^N P_i u_{ij} = u_{kj} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

式中: $j$ 表示观测格点, $u_{ij}$ 、 $u_{kj}$ 分别表示 $i$ 、 $j$ 两点和 $k$ 、 $j$ 两点之间的相关函数。

## (2) 基于金字塔变换的数据融合方法

通过多尺度分解与动态加权策略融合S波段与X波段雷达数据,旨在综合SPOL的稳定覆盖能力与X波段雷达的高分辨率优势,通过分层保留SPOL的低频结构信息并增强XPARNET的高分辨率细节,实现两种雷达数据的自适应优化融合。通过式(10)构建多尺度表征,在低频层保留S波段全局结构,高频层基于局部标准差动态融合X波段细节特征,见式(11)、(12),其中权重 $\bar{\omega}(x, y)$ 在强对流区域( $\sigma_X^2$ 显著)赋予X波段数据更高优先级。

$$\begin{cases} G_0 = 1 \\ G_i = \text{Down}_{\times 2}(G_{i-1}) & i \geq 1 \\ L_i = G_i - U_{p \times 2}(G_{i+1}) & 0 \leq i \leq i_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $G_i$ 表示第 $i$ 层的高斯金字塔, $L_i$ 表示第 $i$ 层的拉普拉斯金字塔,Down表示下采样函数,Down $_{\times 2}$ 表示 $2 \times 2$ 均值降采样, $U_{p \times 2}$ 为双三次插值上采样。

$$\bar{\omega}(x, y) = \frac{\sigma_X^2(x, y)}{\sigma_X^2(x, y) + \sigma_S^2(x, y) + \epsilon} \quad (11)$$

式中: $\sigma_X$ 、 $\sigma_S$ 分别表示X波段和S波段数据在 $15 \times 15$ 格点的窗口内的标准差; $\epsilon = 10^{-3}$ ,用于数据稳定。

$$F_i = \begin{cases} L_{S_0} & i = 0 \\ (1 - \bar{\omega}_i) & i \geq 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $L_{S_0}$ 通过对S波段雷达的原始图像进行拉普拉斯金字塔分解得到, $\bar{\omega}_i$ 为对应尺度的权重金字塔,

最后自顶向下逐层融合金字塔信息。

## 2 个例分析及效果检验

### 2.1 单波段雷达组网数据差异分析

在进行SPOLNET和XPARNET数据融合前,首先给出了2022年5月12日16:30(北京时,下同)两种数据的对比分析。SPOLNET和XPARNET数据都是由多部相同波段雷达数据组网得到的,由频次对比可见(图2a),相同高度层上两种数据的反射率因子趋势基本一致。从概率密度曲线(图2b)也可以看出,XPARNET中 $Z < 20$  dBZ时其概率密度远低于SPOLNET,体现了其对弱回波的灵敏度较差。

通过比较相关系数(R)、均方根误差(RMSE)、最大误差( $E_M$ )及平均误差(ME)等常规统计学参数(Wilks, 2011),可以看出SPOLNET相对于XPARNET,点对点数据之间并不完全一致(表2)。从垂直剖面对比(图2c, 2d)可以看到两种数据差异的具体来源,即由低层盲区、灵敏度问题未观测到的弱回波区域以及系统误差引起,但XPARNET的分辨率更高,回波结构更为精细。

### 2.2 SPOL数据时间匹配方法效果分析

本节选取典型时次观测数据,从降水宏观位置、快速演变细节两个方面验证光流法对雷达反射率因子融合的有效性,并对结果进行长期统计。为确保S波段与X波段雷达组网数据的空间一致性,采用特定高度层等高平面位置显示(CAPPI)数据进行外推处理,以此实现双波段雷达数据的时间对齐。

选取2022年5月12日的大范围降水过程作为典型个例,通过对比光流法外推结果与观测来验证其有效性。图3a显示,观测的降水系统整体呈东南偏东方向移动,图3b的外推预报结果显示,回波形态与位置均与对应时刻观测保持较高一致性。需指出的是,受光流法仅能追踪回波形变运动的原理限制,新生回波系统的演变过程无法被有效捕捉(图3b红色圆圈)。因此,本研究仅通过短时外推来实现X波段与S波段数据时间分辨率适配,最终采用 $\leq 6$  min的外推方案,可有效避免此类误差的影响。

降水位置的定量评估采用多阈值联合评分法

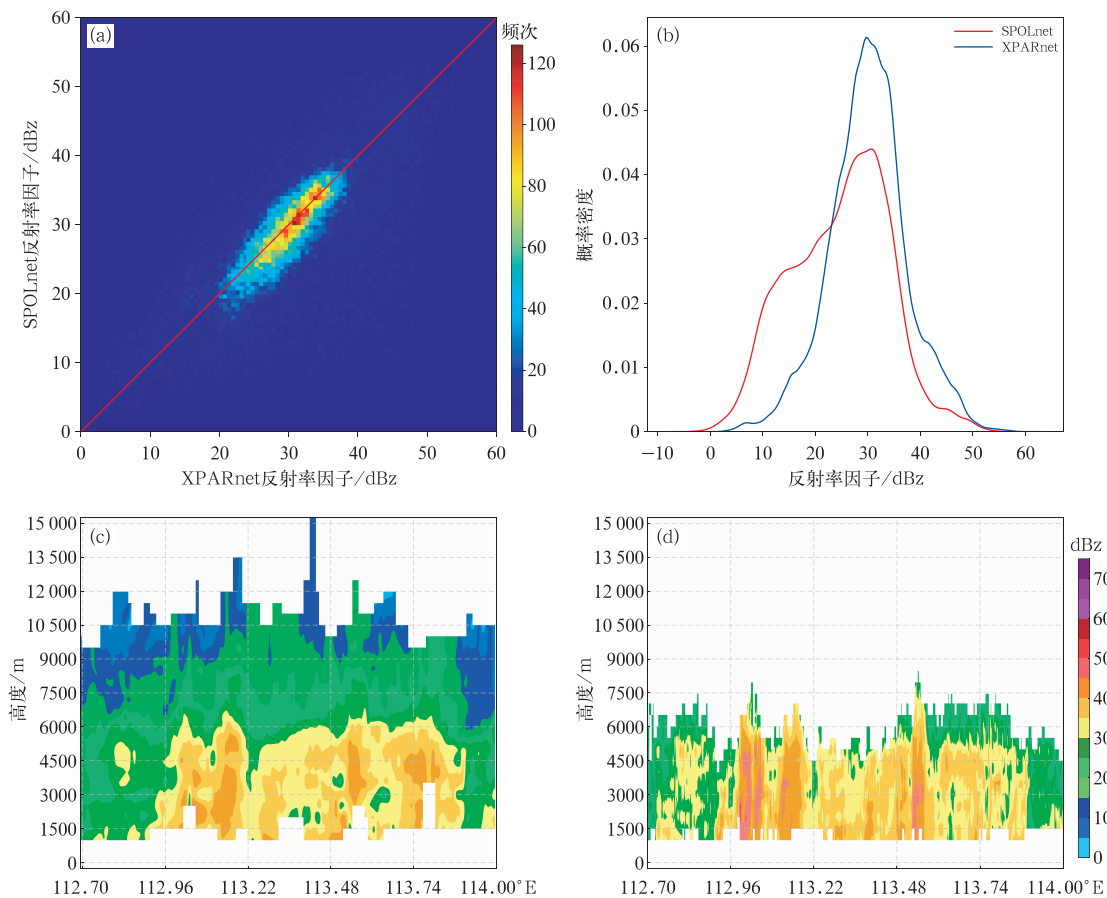


图 2 2022 年 5 月 12 日 16:30(a,b)3000 m 高度 SPOLnet 与 XPARnet 的反射率因子(a)频次对比和(b)概率密度曲线对比,(c)SPOLnet 与(d)XPARnet 的反射率因子沿 23°N 垂直剖面

Fig. 2 Comparison of (a) frequency and (b) probability density curves of reflectivity factor between SPOLnet and XPARnet at 3000 m altitude, and (c, d) vertical cross-section of reflectivity factor from (c) SPOLnet and (d) XPARnet along 23°N at 16:30 BT 12 May 2022

表 2 SPOLnet 相对于 XPARnet 的反射率因子统计指标

Table 2 Statistical metrics for reflectivity factor of SPOLnet relative to XPARnet

| 统计量        | 数值   |
|------------|------|
| $R$        | 0.76 |
| RMSE/dBz   | 5.25 |
| $E_M$ /dBz | 42.8 |
| ME/dBz     | 3.65 |

(阈值范围为  $0 \sim Z_{\max}$ , 间隔 5 dBz), 通过计算 POD (命中率)、FAR (虚警率) 和 CSI (临界成功指数), 以降低单一阈值敏感性。其中, POD 表示实际发生的降水回波中被准确预报的比例, 其值越大越好; FAR 表示在所有预报事件中空报的比例, 其值越小越好; CSI 则综合反映了整体预报的准确程度, 其值越大表明外推或融合效果越优 (Roebber, 2009)。

本文利用欧拉持续性方法 (以下简称欧拉方法) 的预报结果作为评估其他外推算法性能的基准

(Germann and Zawadzki, 2002)。结果如表 3 所示, 光流法各项评分均显著优于欧拉方法。在 6~18 min 预报时效内, POD 提升幅度达 0.8%~17.9%, CSI 提高 16.3%~21.0%, FAR 降低 2.3%~12.7%, 且随时效延长其优势更为显著, 表明光流法能有效改善雷达组网数据的时间匹配精度。

为系统评估光流法在不同天气条件下的适用性, 选取 2022 年 5 月 8 日至 6 月 7 日的 SPOLnet 连续观测数据集, 对比 6~30 min 时效光流法和欧拉方法的预报性能。基于  $R$ 、RMSE 和结构相似性指数 (SSIM) 的统计分析 (表 4) 表明, 光流法外推结果显著优于欧拉方法,  $R$  和 SSIM 更高, RMSE 更低, 特别在  $\leq 6$  min 的短时外推中, 光流法的优势更为显著, 说明光流法可有效利用回波运动趋势提升时间精度, 但随着外推时间增加, 误差累积导致其预报性能逐渐下降。

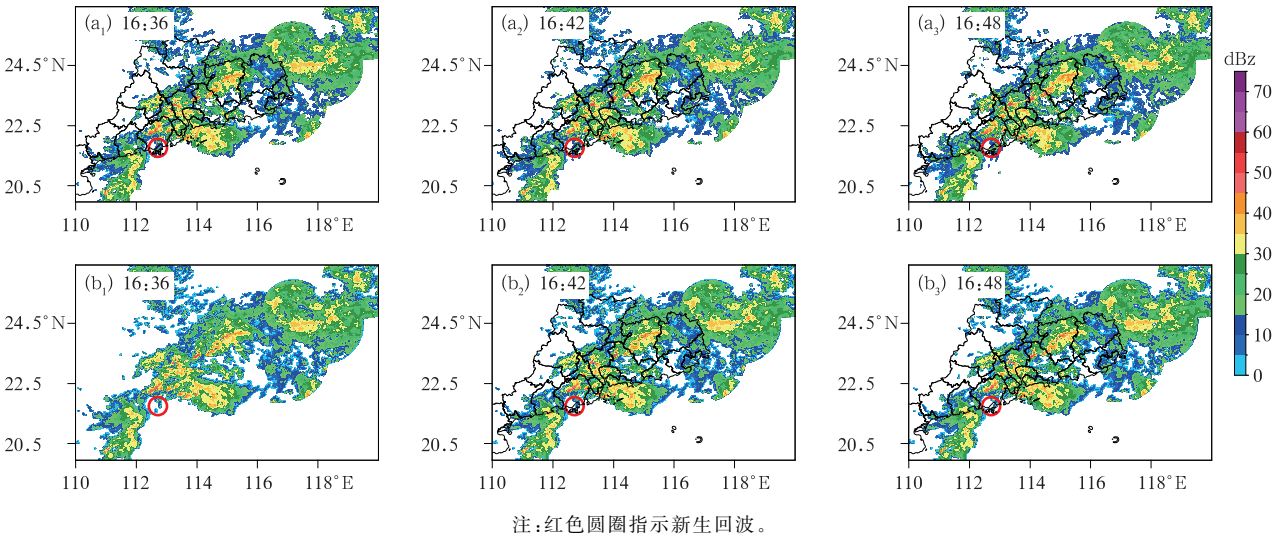


图 3 2022 年 5 月 12 日 3000 m 高度的反射率因子 CAPPI 图像  
(a)SPOLnet 观测,(b)利用 16:30 SPOLnet 数据的光流法外推(b<sub>1</sub>)6 min,(b<sub>2</sub>)12 min,(b<sub>3</sub>)18 min 结果  
Fig. 3 CAPPI images of reflectivity factor at 3000 m altitude on 12 May 2022  
(a) SPOLnet observation, (b) results of (b<sub>1</sub>) 6 min, (b<sub>2</sub>) 12 min, (b<sub>3</sub>) 18 min  
extrapolated from SPOLnet data by the optical flow method at 16:30 BT

表 3 2022 年 5 月 12 日 16:30 起报的反射率因子预报评分  
Table 3 Forecasting scores of reflectivity factor initiated at 16:30 BT 12 May 2022

| 预报方法 | 预报时效/min | POD   | FAR   | CSI   |
|------|----------|-------|-------|-------|
| 欧拉方法 | 6        | 0.881 | 0.134 | 0.775 |
|      | 12       | 0.794 | 0.234 | 0.639 |
|      | 18       | 0.745 | 0.291 | 0.570 |
| 光流法  | 6        | 0.889 | 0.104 | 0.938 |
|      | 12       | 0.923 | 0.100 | 0.837 |
|      | 18       | 0.879 | 0.164 | 0.750 |

表 4 2022 年 5 月 8 日至 6 月 7 日光流法和欧拉方法的反射率因子预报统计指标对比  
Table 4 Comparison of statistical metrics for reflectivity factor between forecasts by  
the optical flow method and Eulerian method from 8 May to 7 June 2022

| 预报时效/min | 光流法   |          |       | 欧拉方法  |       |       |
|----------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|
|          | R     | RMSE/dBz | SSIM  | R     | RMSE  | SSIM  |
| 6        | 0.825 | 3.378    | 0.816 | 0.811 | 4.000 | 0.811 |
| 12       | 0.782 | 4.387    | 0.778 | 0.761 | 5.178 | 0.765 |
| 18       | 0.745 | 5.089    | 0.763 | 0.725 | 5.875 | 0.751 |
| 24       | 0.713 | 5.623    | 0.736 | 0.695 | 6.363 | 0.719 |
| 30       | 0.685 | 6.047    | 0.706 | 0.667 | 6.752 | 0.689 |

为考察短时外推对回波细节演变的敏感性,选取小尺度快速演变的对流单体开展分析,评估数据融合对探测精度的提升作用。因 XPARnet 的分辨率更高,以 2022 年 6 月 7 日 16:42 的孤立对流单体为例,对比分析基于 SPOLnet 的光流法外推 1.5、3.0、4.5 min 的结果与 XPARnet 的空间一致性差异。由图 4 可见,光流法外推结果成功捕捉到回波向东南偏东方向移动的趋势(图 4a),且其与

XPARnet 观测的差值区域范围及强度较初始时刻 SPOLnet 观测与 XPARnet 观测的误差更小(图 4c, 4d),即光流法降低了不同时刻 SPOLnet 与 XPARnet 的强回波核心位置偏差,且该优势在 1.5~4.5 min 时段内持续保持。  
双偏振参量同样采用上述匹配方法进行试验,但是发现传统光流法的效果欠佳(图略),其主要原因是双偏振参量的非平稳演变特性与光流法的时间

连续性假设存在冲突。为此提出改进方案:通过计算反射率因子的光流得到光流场,为降水系统运动提供速度信息,再将其应用于双偏振参量,实现双偏

振参量与反射率因子同步移动并预测整体结构的移动趋势。图 5 为 2022 年 6 月 7 日 16:30 双偏振参量  $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$  及相关系数( $\rho_{HV}$ )的外推结果与观测对

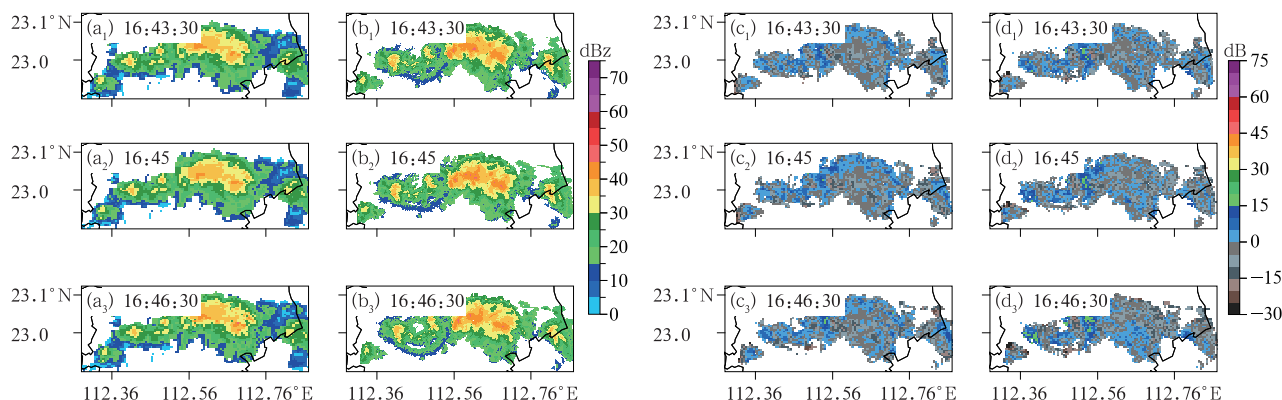


图 4 2022 年 6 月 7 日 16:42 基于 SPOLnet 反射率因子的 3000 m 高度光流法短时外推结果与观测对比

(a) 光流法外推 ( $a_1$ ) 1.5 min, ( $a_2$ ) 3.0 min, ( $a_3$ ) 4.5 min 结果, (b) XPARnet 观测, (c) 光流法外推结果与 XPARnet 观测的差值, (d) 16:42 SPOLnet 观测与 XPARnet 不同时刻观测的差值

Fig. 4 Comparison between nowcasts by optical flow method and observations based on SPOLnet reflectivity factor at 3000 m altitude at 16:42 BT 7 June 2022

(a) results of ( $a_1$ ) 1.5 min, ( $a_2$ ) 3.0 min, ( $a_3$ ) 4.5 min extrapolated by the optical flow method, (b) XPARnet observation, (c) difference between optical flow extrapolation and XPARnet observation, (d) difference of the observation between SPOLnet at 16:42 BT and XPARnet at different times

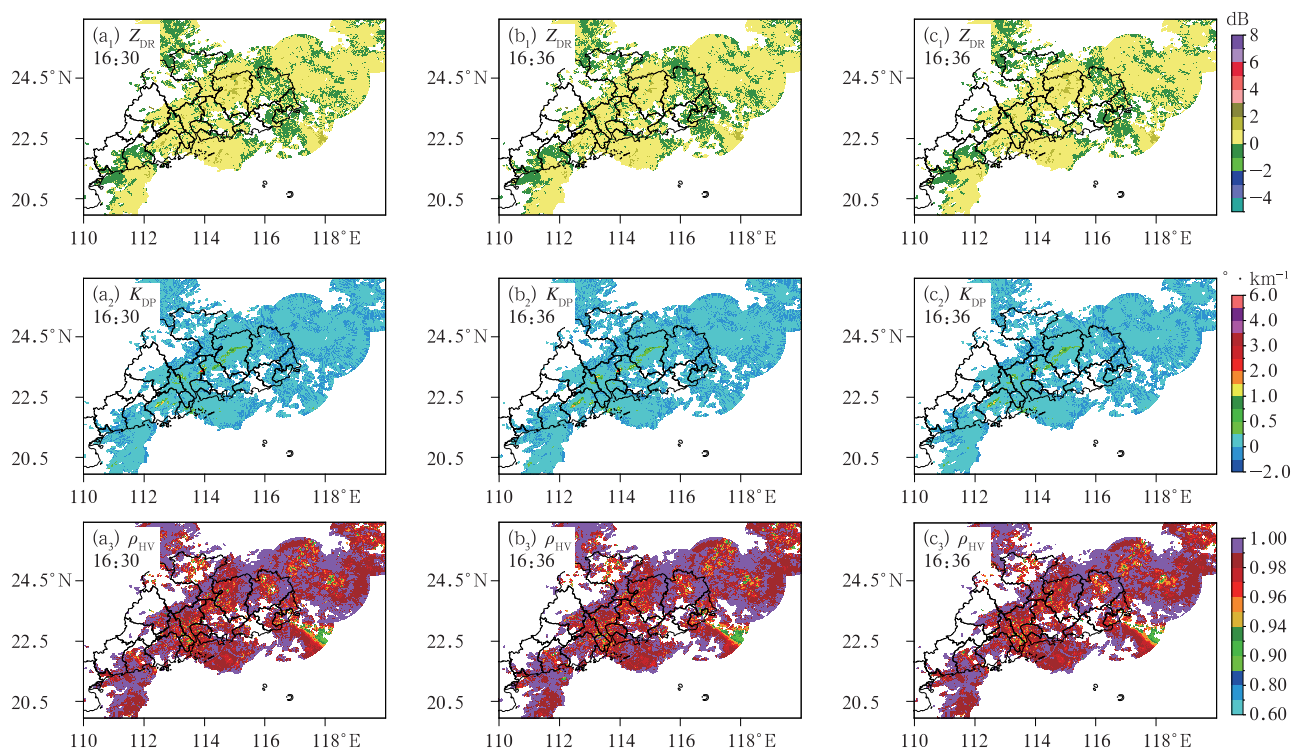


图 5 2022 年 6 月 7 日基于 SPOLnet 双偏振参量的 3000 m 高度光流法外推结果与观测对比

(a, b) 观测, (c) 基于 16:30 观测数据的 6 min 光流法外推结果

Fig. 5 Comparison between extrapolation results by optical flow method and observations based on SPOLnet dual-polarization parameters at 3000 m altitude on 7 June 2022

(a, b) observation, (c) 6 min optical flow extrapolation results based on the observation at 16:30 BT



比。由图可见,光流法外推的双偏振参量 CAPPI 图像在保留初始场微观结构特征的同时,实现了与回波移动趋势一致的空间位移。尽管存在局部形变(如  $\rho_{\text{HV}}$  边界模糊化),但其宏观分布形态与观测较为吻合,表 5 的定量评估进一步验证了基于反射率因子运动矢量驱动多参量协同外推的有效性。光流法在 6 min 时效下,各项双偏振参量的预报效果均优

于欧拉方法, $Z_{\text{DR}}$ 、 $K_{\text{DP}}$  和  $\rho_{\text{HV}}$  的  $R$  分别达到 0.818、0.787 和 0.693,较欧拉方法分别提升了 0.005、0.023 和 0.002。尽管在高相关性基数下提升绝对值较小,但  $R$  的稳步上升与 RMSE 的同步下降,证实了利用反射率因子运动矢量驱动偏振参量可有效减小偏振参量空间异质性对运动矢量提取的影响,提升了组网数据的时间精度。

表 5 2022 年 6 月 7 日 16:30 基于 SPOLnet 双偏振参量的预报结果统计指标对比  
Table 5 Comparison of statistical metrics for forecasts based on SPOLnet dual-polarization parameters at 16:30 BT 7 June 2022

| 指标   | 光流法             |                                      |                    | 欧拉方法            |                                      |                    |
|------|-----------------|--------------------------------------|--------------------|-----------------|--------------------------------------|--------------------|
|      | $Z_{\text{DR}}$ | $K_{\text{DP}}$                      | $\rho_{\text{HV}}$ | $Z_{\text{DR}}$ | $K_{\text{DP}}$                      | $\rho_{\text{HV}}$ |
| $R$  | 0.818           | 0.787                                | 0.693              | 0.813           | 0.764                                | 0.691              |
| RMSE | 0.189 dB        | $0.062^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$ | 0.104              | 0.192 dB        | $0.063^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$ | 0.105              |

2.3 S 波段与 X 波段雷达空间融合方法效果分析

在进行融合数据的效果分析时,选择覆盖范围更广的降水个例以展示两种数据的优点和缺点,并

进行组网前后的差异比较。利用 2022 年 5 月 12 日 16:30 的数据进行融合,并将得到的两种融合结果与原始观测进行比较,以验证该融合方法的效果。

图 6 展示了反射率因子的融合效果对比,其中

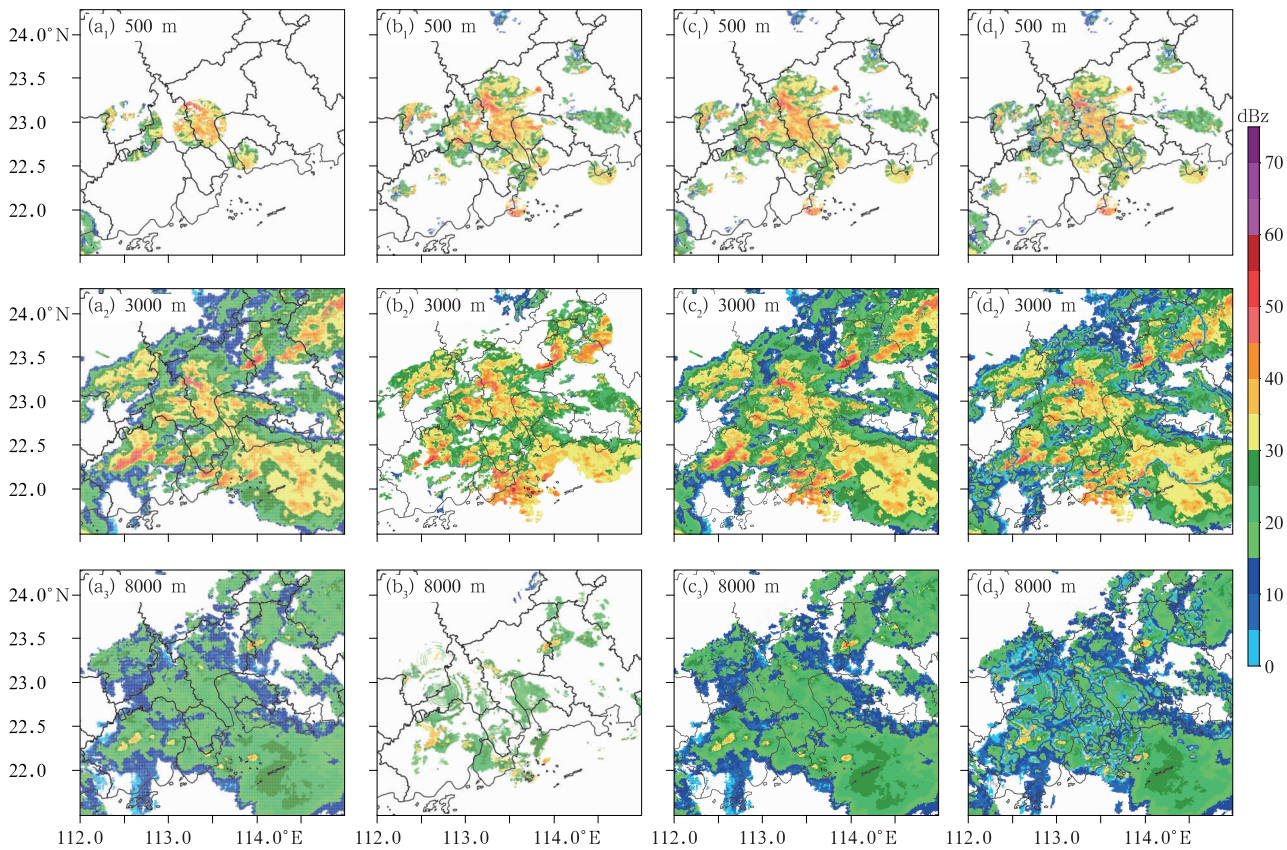


图 6 2022 年 5 月 12 日 16:30(a)SPOLnet,(b)XPARnet,(c)SXnet-O,(d)SXnet-K 在不同高度的反射率因子 CAPPI 对比  
Fig. 6 Comparison of CAPPI for reflectivity factor of (a) SPOLnet, (b) XPARnet, (c) SXnet-O, and (d) SXnet-K at different altitudes at 16:30 BT 12 May 2022

图 6a, 6b 为原始 SPOLnet 和 XPARnet 反射率因子的 CAPPI, 图 6c, 6d 分别对应基于最优插值法和金字塔变换法生成的融合数据 SXnet-O、SXnet-K。从图中可看出, 由于 SPOL 雷达观测存在低空盲区, SPOLnet 在 500 m 高度的观测不如 XPARnet 全面。XPARnet 在 3000 m 高度以上因相控阵的探测范围和灵敏度限制, 导致其探测范围小于 SPOLnet。不论采取哪种融合算法, S 波段与 X 波段雷达融合数据都能很好地保留原始 XPARnet 的高分辨率和内部精细化结构, 并有效补充了 XPARnet 中因灵敏度和衰减而缺失的 15 dBz 以下弱回波区域。同时, SXnet-K 在强回波区域面积较原始 SPOLnet 有明显缩减, 但在融合不同尺度数据时权重调整可能不够平滑, 导致边缘出现不自然过渡(如阶梯状伪影); 而 SXnet-O 同时保留了 X 波段雷达的精细结构和 S 波段雷达的大范围观测优势, 具体表现为边

界过渡自然(尤其在 3000 m 和 8000 m 高度强回波区)、弱回波补偿充分(尤其对 15 dBz 以下弱回波区域)、高空覆盖范围与原始 SPOLnet 基本吻合且强对流核心峰值强度偏差小( $< 2$  dBz)。

对于双偏振参量, 采取与反射率因子一致的融合方法, 结果显示 SXnet-O 在多源数据空间一致性处理上表现更好(图略)。针对  $Z_{DR}$  在强降水区出现的负值异常, SXnet-O 的过渡处理较 SXnet-K 更为平滑。对于经波长订正后的  $K_{DP}$ , SXnet-O 有效克服了 SXnet-K 连续性较差的问题。而对于噪声敏感的  $\rho_{HV}$ , SXnet-O 也表现出更好的空间连续性, 抑制了融合边界处的异常波动。即针对双偏振参量, SXnet-O 同样能够保留 X 波段雷达高分辨率精细结构和 S 波段雷达的大范围观测优势, 在弱回波补偿和边界过渡平滑度方面均优于 SXnet-K。图 7 给出了融合前后的垂直回波结构对比, 由图可见, XPARnet、

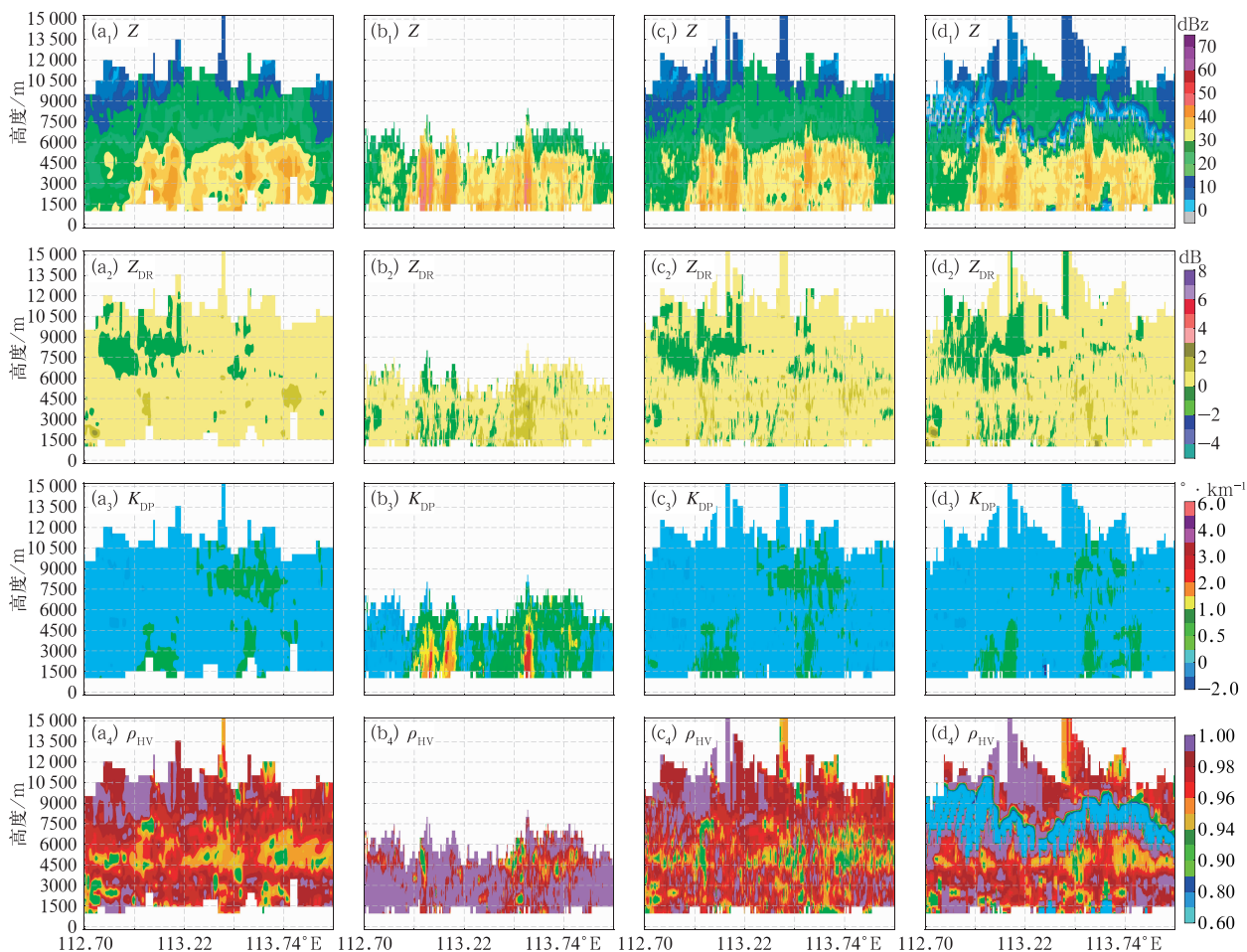


图 7 2022 年 5 月 12 日 16:30 (a) SPOLnet, (b) XPARnet, (c) SXnet-O, (d) SXnet-K 不同参量沿 23°N 的垂直剖面

Fig. 7 Vertical cross-section of different variables from (a) SPOLnet, (b) XPARnet, (c) SXnet-O, and (d) SXnet-K along 23°N at 16:30 BT 12 May 2022

SXnet-O 和 SXnet-K 相对于 SPOLnet 具有更高的空间分辨率,从而更准确地保留回波的细节特征,其中 SXnet-O 通过最优插值算法显著优化了垂直连续性,但 SXnet-K 由于基于金字塔变换的融合方法缺陷导致的边界效应使得  $Z$  和  $\rho_{\text{HV}}$  的垂直结构均比较差,特别是只有单一波段数据存在的高度层,其表现不是很理想。

为了进一步对比融合前后的数值差异,选取图 7 中 3000 m 高度绘制不同参量的变化曲线(图 8)。XPARNET 的  $K_{\text{DP}}$  跳动相对严重,但组网结果在调整融合策略后没有受到这些奇异值影响,数值更为贴近 SPOLnet 数据。由于 SXnet-O 对 XPARNET、SPOLnet 偏差的校正效果, SXnet-O 与 SPOLnet 的差值明显小于 XPARNET 与 SPOLnet 的差值。SXnet-K 变化趋势基本与 SXnet-O 一致,但该方法在融合过渡区的  $\rho_{\text{HV}}$  出现不连续(图略),与图 7 垂直剖面异常对应,导致其可信度降低。

## 2.4 S 波段与 X 波段雷达时空融合数据优势分析

基于 2022 年 5 月 10 日至 6 月 10 日完整数据集(XPAR:1.5 min 分辨率,共 3523 个时次;SPOL:6 min 分辨率,共 1201 个时次),计算了各参量在不同组网算法下的差值均值(表 6)。结果表明,采用基于最优插值的融合方法得到的 SXnet-O 与 SPOLnet 的差值平均的绝对值最小,验证了其校正能力。采用基于金字塔变换的融合方法得到的 SXnet-K 相较于 SXnet-O 对 SPOLnet 的差值绝对值显著增大,且对 XPARNET 的差值绝对值有所降低,但在  $\rho_{\text{HV}}$  上表现较差,与典型个例分析结果一致。

表 7 给出了不同高度的回波覆盖率。在 500 m 的低空,XPARNET 回波覆盖率(4.9%)显著高于 SPOLnet(1.6%),印证了 XPARNET 在近地面层的补盲优势。而在 3000 m 及以上高度,SPOLnet 则覆

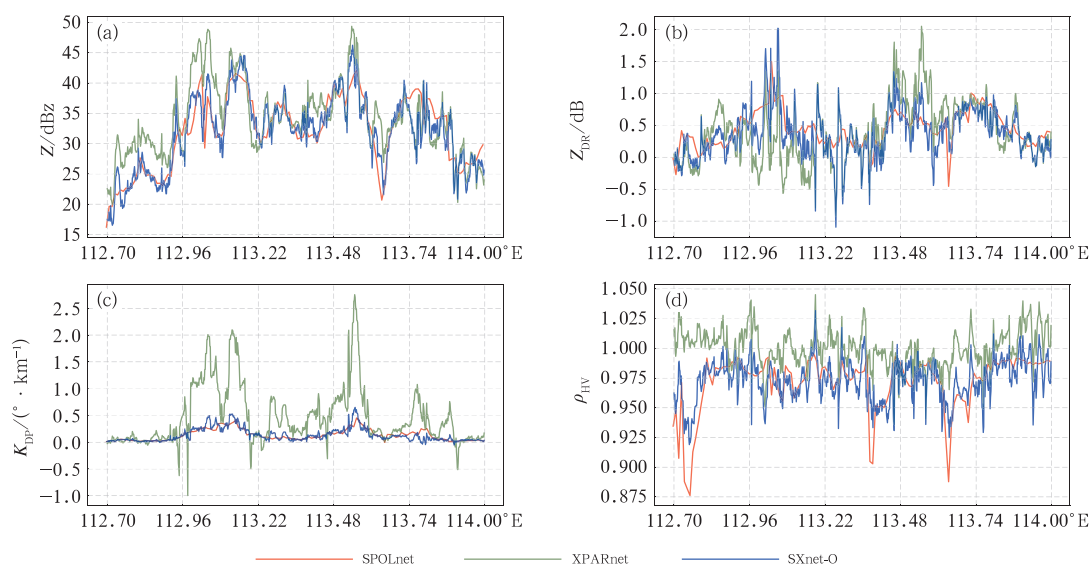


图 8 2022 年 5 月 12 日 16:30 不同数据的(a) $Z$ , (b) $Z_{\text{DR}}$ , (c) $K_{\text{DP}}$ , (d) $\rho_{\text{HV}}$ 沿  $23^\circ\text{N}$  在 3000 m 高度上的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of (a)  $Z$ , (b)  $Z_{\text{DR}}$ , (c)  $K_{\text{DP}}$ , and (d)  $\rho_{\text{HV}}$  from different datasets along  $23^\circ\text{N}$  at 3000 m altitude at 16:30 BT 12 May 2022

表 6 2022 年 5 月 10 日至 6 月 10 日 SPOLnet, XPARNET, SXnet-O 和 SXnet-K 不同参量的差值平均

Table 6 Average differences of different parameters for SPOLnet, XPARNET, SXnet-O and SXnet-K from 10 May to 10 June 2022

| 参量差值                                            | SPOLnet-XPARNET | SXnet-O-SPOLnet | SXnet-O-XPARNET | SXnet-K-SPOLnet | SXnet-K-XPARNET |
|-------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $Z/\text{dB}$                                   | -1.2839         | -0.0284         | -1.2790         | -0.0380         | -1.0500         |
| $Z_{\text{DR}}/\text{dB}$                       | 0.0150          | -0.0011         | 0.0080          | -0.0050         | 0.0030          |
| $K_{\text{DP}}/(\text{°} \cdot \text{km}^{-1})$ | -0.1971         | -0.0007         | -0.2040         | -0.0025         | -0.1500         |
| $\rho_{\text{HV}}$                              | -0.0138         | -0.0002         | -0.0140         | -0.1270         | -0.1130         |



盖更广,例如 8000 m 高度覆盖率为 30.9%,显著高于 XPARnet 的 2.2%。融合组网后, SXnet-O 在 500 m 的覆盖率较 SPOLnet 有明显提升,实现了双波段优势整合。值得注意的是,两种融合算法呈现显著差异, SXnet-O 与 SPOLnet 的覆盖率匹配度更

好,而 SXnet-K 弱回波覆盖率异常增高,其根源在于金字塔变换的高频增强机制会过度放大 X 波段回波细节,导致其偏差增大。因此,总体来看, SXnet-O 的预报效果显著优于 SXnet-K。

表 7 2022 年 5 月 10 日至 6 月 10 日 SPOLnet, XPARnet, SXnet-O 和 SXnet-K 不同高度的回波覆盖率(单位: %)

Table 7 Echo coverage rate (unit: %) of SPOLnet, XPARnet, SXnet-O and SXnet-K at different altitudes from 10 May to 10 June 2022

| 数据类型    | 反射率因子/dBz | 500 m | 3000 m | 8000 m |
|---------|-----------|-------|--------|--------|
| SPOLnet | 全部        | 1.6   | 30.0   | 30.9   |
|         | 0~15      | 17.1  | 36.1   | 59.6   |
|         | 16~30     | 69.8  | 50.4   | 39.8   |
|         | 31~50     | 12.4  | 13.0   | 0.2    |
| XPARnet | 全部        | 4.9   | 15.2   | 2.2    |
|         | 0~15      | 20.6  | 11.4   | 11.3   |
|         | 16~30     | 63.0  | 75.4   | 86.2   |
|         | 31~50     | 15.8  | 13.1   | 2.3    |
| SXnet-O | 全部        | 5.7   | 31.5   | 30.9   |
|         | 0~15      | 20.5  | 35.7   | 59.6   |
|         | 16~30     | 63.0  | 50.9   | 39.7   |
|         | 31~50     | 15.8  | 39.7   | 0.2    |
| SXnet-K | 全部        | 5.9   | 31.9   | 29.8   |
|         | 0~15      | 23.6  | 39.1   | 63.5   |
|         | 16~30     | 61.2  | 47.7   | 34.6   |
|         | 31~50     | 14.4  | 36.7   | 0.2    |

### 3 结论和讨论

本文提出了基于 SPOL 和 XPAR 的组网融合方法,包括利用基于光流外推的 SPOLnet 时间匹配方法以及分别基于最优插值和金字塔变换的空间融合方法,使用粤港澳大湾区的 5 部 SPOL 和 28 部 XPAR 的观测数据,分析了两种波段雷达数据时间匹配和融合组网的效果。主要结论如下:

(1) 基于光流法外推的 S 波段与 X 波段雷达时间匹配方法能够将 6 min 更新的 SPOL 数据按 XPAR 1.5 min 的更新时间重新匹配,所得结果与 XPAR 观测数据更吻合,能够更精确反映小尺度对流系统的快速演变。

(2) S 波段与 X 波段雷达空间融合方法既保留了 XPAR 的高分辨率优势,也弥补了 SPOL 的低空盲区及 XPAR 灵敏度的不足。两种融合方法中,基于最优插值的 SXnet-O 在空间覆盖、参量一致性及边界稳定性上更好,而基于金字塔变换的 SXnet-K 因高频增强导致强回波区域减小、边界振荡、双偏振

参量连续性差。

(3) 经过 XPAR 3523 个时次和 SPOL 1201 个时次的统计验证,时空融合结果弥补了单一波段雷达的观测局限,显著提升了 S 波段与 X 波段雷达的联合观测效能。基于最优插值的 SXnet-O 在保留双波段优势的同时,低空(500 m)的回波覆盖率较 SPOLnet 提升约 2.5 倍,高空(8000 m)覆盖率达 30.9%,与 SPOLnet 持平,且反射率因子偏差在  $\pm 2$  dB 内的比例达 92%,综合精度优于基于金字塔变换的 SXnet-K 及 XPAR 单波段组网数据。

需要说明的是,本研究提出的融合方法仍存在一定局限性。对于快速演变的对流系统和新生对流, SPOL 分钟级外推的位置存在误差。X 波段相控阵雷达网的误差订正依然有很多瓶颈,如频率订正、衰减订正依赖经验公式,当降水粒子谱分布复杂(如混合相态降水)时可能引入虚假信息。空间融合方法效果受雷达网密度影响较大,在 X 波段雷达覆盖稀疏区域,最优插值的权重分配易受误差模型假设影响导致融合精度下降。未来需进一步优化上述方法的细节,并结合地面观测提升复杂天气场景下

的融合稳定性。

## 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[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).
- 耿飞,2023. X波段双偏振相控阵天气雷达数据质控及其与S波段天气雷达组网拼图方法研究[D].南京:南京信息工程大学. Geng F, 2023. Study on the quality control of X-band dual-polarization phased array weather radar and its network mosaic method with S-band weather radar[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 勾亚彬,刘黎平,杨杰,等,2014. 基于雷达组网拼图的定量降水估测算法业务应用及效果评估[J]. 气象学报, 72(4): 731-748. Gou Y B, Liu L P, Yang J, et al, 2014. Operational application and evaluation of the quantitative precipitation estimates algorithm based on the multi-radar mosaic[J]. Acta Meteor Sin, 72(4): 731-748(in Chinese).
- 黄兴友,李盈盈,张帅,等,2018. 基于模糊逻辑的地物回波识别方法及效果检验[J]. 热带气象学报, 34(3): 305-313. Huang X Y, Li Y Y, Zhang S, et al, 2018. The algorithm and verification of ground clutter identification based on fuzzy logic[J]. J Trop Meteor, 34(3): 305-313(in Chinese).
- 江源,刘黎平,庄薇,2009. 多普勒天气雷达地物回波特征及其识别方法改进[J]. 应用气象学报, 20(2): 203-213. Jiang Y, Liu L P, Zhuang W, 2009. Statistical characteristics of clutter and improvements of ground clutter identification technique with Doppler weather radar[J]. J Appl Meteor Sci, 20(2): 203-213(in Chinese).
- 李建通,杨维生,郭林,等,2000. 提高最优插值法测量区域降水量精度的探讨[J]. 大气科学, 24(2): 263-270. Li J T, Yang W S, Guo L, et al, 2000. A study of improving precision of measuring regional precipitation in optimum interpolation method[J]. Chin J Atmos Sci, 24(2): 263-270(in Chinese).
- 李建通,张培昌,1996. 最优插值法用于天气雷达测定区域降水量[J]. 台湾海峡, 15(3): 255-259. Li J T, Zhang P C, 1996. Optimum interpolation method used for measuring regional precipitation with weather radar[J]. J Oceanogr Taiwan Strait, 15(3): 255-259(in Chinese).
- 李毅聪,胡沁,黄祖辉,等,2018. X波段移动雷达与S波段新一代天气雷达产品对比分析[J]. 江西科学, 36(3): 511-516. Li Y C, Hu Q, Huang Z H, et al, 2018. Comparison and analysis of X band mobile radar and CINRAD-SA radar products[J]. Jiangxi Sci, 36(3): 511-516(in Chinese).
- 李哲,吴翀,刘黎平,等,2022. 双偏振相控阵雷达误差评估与相态识别方法[J]. 应用气象学报, 33(1): 16-28. Li Z, Wu C, Liu L P, et al, 2022. Error evaluation and hydrometeor classification method of dual polarization phased array radar[J]. J Appl Meteor Sci, 33(1): 16-28(in Chinese).
- 刘俊,黄兴友,何雨琴,等,2015. X波段相控阵气象雷达回波数据的对比分析[J]. 高原气象, 34(4): 1167-1176. Liu J, Huang X Y, He Y Q, et al, 2015. Comparative analysis of X-band phased array antenna weather radar measurements[J]. Plateau Meteor, 34(4): 1167-1176(in Chinese).
- 刘黎平,王致君,徐宝祥,等,1997. 我国双线偏振雷达探测理论及应用研究[J]. 高原气象, 16(1): 100-105. Liu L P, Wang Z J, Xu B X, et al, 1997. Study on theory and application of dual-polarization radar in China[J]. Plateau Meteor, 16(1): 100-105(in Chinese).
- 刘黎平,吴林林,吴翀,等,2014. 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[J]. 大气科学, 38(6): 1079-1094. Liu L P, Wu L L, Wu C, et al, 2014. Field experiment on convective precipitation by X-band phased-array radar and preliminary results[J]. Chin J Atmos Sci, 38(6): 1079-1094(in Chinese).
- 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).
- 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[J]. 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[J]. Acta Meteor Sin, 78(4): 705-720(in Chinese).
- 牛颖超,周忠发,谢雅婷,等,2017. 基于金字塔变换算法优化的遥感图像融合[J]. 激光与光电子学进展, 54(1): 012801. Niu Y C, Zhou Z F, Xie Y T, et al, 2017. Remote sensing image fusion based on pyramid transform algorithm optimization[J]. Laser Optoelectron Prog, 54(1): 012801(in Chinese).
- 施红,顾松强,黄兴友,等,2023. 上海浦东X波段双线偏振雷达衰减订正效果分析[J]. 气象, 49(4): 487-494. Shi H, Gu S Q, Huang X Y, et al, 2023. Analysis of attenuation correction to an X-band dual-polarization Doppler weather radar at Pudong, Shanghai[J]. Meteor Mon, 49(4): 487-494(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).
- 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[J]. 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[J]. Plateau Meteor, 38(3): 636-649(in Chinese).
- 王红艳,刘黎平,王改利,等,2009. 多普勒天气雷达三维数字组网系统开发及应用[J]. 应用气象学报, 20(2): 214-224. Wang H Y, Liu L P, Wang G L, et al, 2009. Development and application of the Doppler weather radar 3-D digital mosaic system[J]. J Appl Meteor Sci, 20(2): 214-224(in Chinese).

- 吴翀, 2018. 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, 2018. Data quality analysis, hydrometeor classification and mosaic application of polarimetric radars in China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & 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).
- 吴翀, 刘黎平, 张志强, 2014. S 波段相控阵天气雷达与新一代多普勒天气雷达定量对比方法及其初步应用[J]. 气象学报, 72(2): 390-401.
- Wu C, Liu L P, Zhang Z Q, 2014. Quantitative comparison algorithm between the S-band phased array radar and the CINRAD/SA and its preliminary application[J]. Acta Meteor Sin, 72(2): 390-401(in Chinese).
- 肖柳斯, 胡东明, 陈生, 等, 2021. X 波段双偏振相控阵雷达的衰减订正算法研究[J]. 气象, 47(6): 703-716.
- Xiao L S, Hu D M, Chen S, et al, 2021. Study on attenuation correction algorithm of X-band dual-polarization phased array radar[J]. Meteor Mon, 47(6): 703-716(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).
- 严勇, 2013. 相控阵天气雷达强度订正研究[J]. 现代雷达, 35(5): 26-29.
- Yan Y, 2013. A study on reflectivity correction of phased array weather radar[J]. Mod Radar, 35(5): 26-29(in Chinese).
- 张光义, 2009. 相控阵雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社.
- Zhang G Y, 2009. Principles of Phased Array Radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press(in Chinese).
- 张蔚然, 吴翀, 刘黎平, 等, 2021. 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[J]. 高原气象, 40(2): 424-435.
- Zhang W R, Wu C, Liu L P, et al, 2021. Research on quantitative comparison and observation precision of dual polarization phased array radar and operational radar[J]. Plateau Meteor, 40(2): 424-435(in Chinese).
- 张羽, 田聪聪, 傅佩玲, 等, 2020. 广州 X 波段双偏振相控阵天气雷达观测试验进展[J]. 气象科技进展, 10(6): 80-85.
- Zhang Y, Tian C C, Fu P L, et al, 2020. Progress of observation experiment for X-band dual polarization phased array radars in Guangzhou[J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(6): 80-85(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[J]. 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[J]. Acta Meteor Sin, 79(5): 786-803(in Chinese).
- Biswas S K, Cifelli R, Chandrasekar V, 2022. Quantitative precipitation estimation using X-band radar for orographic rainfall in the San Francisco Bay Area[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 62: 4105715.
- Bouguet J Y, 2001. Pyramidal implementation of the lucas kanade feature tracker description of the algorithm[J]. Intel Corporation, Microprocessor Research Labs.
- 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.
- Chandrasekar V, Wang Y, Chen H, 2012. The CASA quantitative precipitation estimation system; a five year validation study[J]. Nat Hazard Earth Sys, 12(9): 2811-2820.
- Chen H N, Chandrasekar V, 2016. Real-time tornado detection and wind retrieval with high-resolution X-band Doppler radar network[C]// Proceedings of the 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Beijing: IEEE: 2150-2153.
- Germann U, Zawadzki I, 2002. Scale-dependence of the predictability of precipitation from continental radar images. Part I: description of the methodology[J]. Mon Wea Rev, 130(12): 2859-2873.
- Roebber P J, 2009. Visualizing multiple measures of forecast quality[J]. Wea Forecasting, 24(2): 601-608.
- Saffle R E, Johnson L D, 1997. NEXRAD product improvement overview[C]// Proceedings of the IEEE 1997 National Aerospace and Electronics Conference. Dayton: IEEE: 288-293.
- Wilks D S, 2011. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences [M]. 3rd ed. Oxford: Academic Press.

(本文责编: 张芳)