赵军平,张智察,周方毅,等.S 波段和 X 波段雷达定量降水估计在台风"格美"影响浙江期间的评估分析[J].海洋气象学报, 2025,45(1):12-22.

ZHAO Junping, ZHANG Zhicha, ZHOU Fangyi, et al. Evaluation and analysis of quantitative precipitation estimation using S-band and X-band radars during Typhoon Gaemi affecting Zhejiang [J]. Journal of Marine Meteorology, 2025, 45(1):12-22. DOI:10. 19513/j.cnki.hyqxxb.20241127001.(in Chinese)

S 波段和 X 波段雷达定量降水估计在台风"格美" 影响浙江期间的评估分析

赵军平1,张智察1,周方毅2,3,冯晓伟1,李闰秋1,刘佳利2

(1.浙江省气象台,浙江杭州 310017;2.浙江华盛雷达股份有限公司,浙江 绍兴 312035;3.华东区域相控阵天气雷达应用联合 实验室,上海 200030)

摘 要 利用 ERA5 数据、S 波段双偏振多普勒天气雷达、X 波段双偏振相控阵天气雷达和加密自动 气象站等资料,对2024年台风"格美"引发的浙江强降水成因进行分析。结果表明:(1)"格美"影响 期间,浙江东南沿海暴雨集中,累计降雨量大,温州南部出现特大暴雨。(2)西南季风和副热带高压 西侧的东南急流为"格美"提供了充足的水汽和能量,山脉地形对降水的增幅作用显著。(3)S 波段 双偏振雷达探测距离远,强回波区域数据可信度较高。X 波段相控阵雷达时空分辨率较高,能有效捕 捉降水过程中低仰角双偏振参数特征,有效提升低层盲区观测能力。X 波段的双偏振参数整体数值 相对较高,但在强回波之后表现出一定的衰减现象。(4)X 波段雷达组网、S 波段雷达的定量降水估 计(quantitative precipitation estimation,QPE)产品均对强降水的表征能力较好,但强降水样本数偏少 可能导致 QPE 评估指标出现较大波动。X 波段在局地强降水捕捉方面具备高分辨率优势,S 波段雷 达能探测更大范围降水,但对于 40 mm·h⁻¹以上的强降水估计能力偏弱。(5)X 波段雷达组网的 QPE 对降水落区和强度估计相对较好,不同雨强的命中率均高于 S 波段雷达。7 月 26 日 02—05 时,台州 强降水命中率平均为88%,较 S 波段提升 63%;但空报率和偏差也偏大。

关键词 台风"格美";X 波段双偏振相控阵天气雷达;S 波段双偏振多普勒天气雷达;定量降水估计 中图分类号: P412.25;P458.124 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2025)01-0012-11 DOI:10.19513/j.cnki.hyqxxb.20241127001

Evaluation and analysis of quantitative precipitation estimation using S-band and X-band radars during Typhoon Gaemi affecting Zhejiang

ZHAO Junping¹, ZHANG Zhicha¹, ZHOU Fangyi^{2,3}, FENG Xiaowei¹, LI Runqiu¹, LIU Jiali²

(1. Zhejiang Meteorological Observatory, Hangzhou 310017, China; 2. Zhejiang Whole Sense Radar Co., Ltd., Shaoxing 312035, China; 3. East China Phased Array Weather Radar Application Joint Laboratory, Shanghai 200030, China)

Abstract The causes of the heavy rainfall in Zhejiang induced by Typhoon Gaemi in 2024 are analyzed

收稿日期:2024-11-27;修回日期:2025-01-09

基金项目:浙江省气象局重点项目(2023ZDZL01);中国气象局气象能力提升联合研究专项重点项目(3NLTSZ007) 第一作者简介:赵军平,男,硕士,高级工程师,主要从事灾害性天气研究,zjp-1213@163.com。 using ERA5 data, S-band dual-polarization Doppler weather radar data, X-band dual-polarization phased array weather radar data and observations of dense automatic weather stations. The results are listed as follows. (1) During the influence of Typhoon Gaemi, torrential rain is concentrated along the southeastern coast of Zhejiang with significant accumulated rainfall, and extreme rainstorms are recorded in southern Wenzhou. (2) Abundant moisture and energy are provided to Typhoon Gaemi by the southwest monsoon and the southeast jet on the western flank of the subtropical high, and the mountainous terrain significantly enhances the precipitation. (3) The S-band dual-polarization radar is distinguished by its long detection range and high data reliability in regions of strong echoes. In contrast, the X-band phased array radar with superior spatiotemporal resolution, can effectively capture the characteristics of low-elevation dual-polarization parameters during precipitation events, significantly enhancing observing capabilities in low-level blind zones. Additionally, the X-band radar's dualpolarization parameters are higher overall, but exhibit a certain attenuation phenomenon after strong echoes. (4) The quantitative precipitation estimation (QPE) products derived from both the X-band radar network and the S-band radar are characterized by strong capabilities in representing heavy precipitation. However, the relatively limited number of heavy precipitation samples may result in significant fluctuations in the QPE evaluation metrics. The X-band radar has the advantage of high resolution in capturing localized intense rainfall, whereas the S-band radar can detect the precipitation over a broader area. Nonetheless, the ability to estimate the heavy precipitation exceeding 40 mm \cdot h⁻¹ is relatively weaker for the S-band radar. (5) The precipitation locations and intensities are well estimated by the QPE from the X-band radar network, and the probabilities of detection (PODs) for various rainfall intensities are higher than those achieved by the S-band radar. From 02:00 BJT to 05:00 BJT 26 July, the average POD for heavy rainfall in Taizhou reaches 88%, representing an improvement of 63% compared to the S-band radar; however, the false alarm rate and bias are also noticeably higher. Keywords Typhoon Gaemi; X-band dual-polarization phased array weather radar; S-band dualpolarization Doppler weather radar: quantitative precipitation estimation (OPE)

引言

台风是浙江高影响与强致灾的主要天气系统, 受环境场、中小尺度结构、路径强度和下垫面等因素 共同影响^[1-3],引发的强降水特征差异较大。台风 影响下的短时强降水(小时雨强 *I*≥20 mm・h⁻¹)容 易导致城市内涝、河流山洪、山体滑坡等灾害,给交 通、农业和居民生活带来严重影响,甚至威胁生命财 产安全^[4]。台风极端短时强降水的研究具有重要 意义,通过分析短时强降水发生条件、发展过程和估 测技术,有助于提高气象临近预报预警的精准度,为 相关部门的应急管理和决策提供支持,对社会稳定 和经济发展具有重要意义。S 波段和 X 波段双偏振 雷达是目前广泛应用于短时强降水机理研究及临近 预报预警的主要气象观测设施。

双偏振雷达能观测获得反射率因子($Z_{\rm H}$)、差分 反射率($Z_{\rm DR}$)、差分传播相移率($K_{\rm DP}$)和相关系数 ($C_{\rm c}$)等物理量。这些参数可以更精确地描述降水 粒子的雨滴谱特征,辅助识别对流单体的生命周期

变化,提前捕捉对流系统的形成与发展趋势,进行同 化应用可显著提升数值天气预报模式对降水系统三 维结构与动力特征的刻画能力[5-9],目前已在云降 水微物理研究^[10-11]、定量降水估计(quantitative precipitation estimation, QPE)^[12]和冰雹识别^[13-14]等 方面应用广泛。研究^[15]表明,S波段与X波段双偏 振雷达的探测性能存在显著差异,在性能和应用上 各有优缺点。S波段双偏振雷达采用机械扫描方 式,体扫间隔长达6 min,导致对快速演变的对流风 暴观测可能出现垂直结构失真且分辨率较低等问 题,但S波段双偏振雷达对强对流天气雨区衰减影 响较小,对远距离弱回波的探测能力更强。相比之 下,X波段双偏振雷达采用电子扫描方式,具有快速 扫描和多波束形成能力,时空分辨率较高,对于中小 尺度系统的垂直结构和演变细节观测更加精细,能 够清晰揭示单体触发和发展的过程^[16-17]。然而,X 波段双偏振雷达在降水环境中信号衰减严重,Z_H和 Z_{DR}的精确度较低^[18-21]。因此,S波段双偏振雷达 适用于稳定的大范围降水监测,而 X 波段相控阵雷

达更适合快速演变对流系统的精细观测,但需注意 降水衰减带来的数据误差。

为此,文中基于 S 波段和 X 波段双偏振雷达对 台风"格美"引发浙江局地强降水特征开展协同观 测研究。从急流维持、水汽输送、能量不稳定和地形 等方面探讨强降水形成机制,分析雷达双偏振参量 等特征,并对 S 波段和 X 波段双偏振雷达在 QPE 中 的表现进行评估分析,为提升台风短时强降水预报 预警能力提供科学依据。

1 数据资料

使用资料如下:(1)浙江 5 772 个常规地面自动气 象观测站资料。(2)欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts,ECMWF)发 布的 ERA5 数据,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。(3)苍 南、平阳、洞头和大陈风廓线雷达资料。(4)温州 (站号 Z9577)和台州(站号 Z9576)S 波段双偏振多 普勒天气雷达资料,其观测半径约为 230 km,径向 分辨率为250 m,波束宽度为 $1^{\circ} \pm 0.05^{\circ}$ 。(5)温州 5 部、台州 3 部 X 波段相控阵雷达资料,其观测半径 约为 45 km,径向分辨率为 30 m,时间分辨率约为 60 s,波束宽度均为 1.6° 。雷达数据均经过噪声滤 除、地物抑制、衰减订正、退速度模糊、差分传播相位 (Φ_{DP})退折叠、 K_{DP} 计算等步骤进行质控处理操作。 (6)1 h 累计 QPE 分别由上述 8 部 X 波段相控阵雷 达组网、2 部 S 波段双偏振雷达单部非组网反演得 到,由浙江宜通华盛科技有限公司生成^[22]。其中,X 波段组网小时累计降水量的时间分辨率为5 min,空 间分辨率为100 m。单部S 波段 QPE 的时间分辨率 为6 min,空间分辨率为500 m。X 波段组网和单部 S 波段融合 QPE 时间分辨率为6 min,空间分辨率 为500 m。

2 台风"格美"暴雨成因分析

2024 年第 3 号台风"格美"于 7 月 20 日下午生 成,21 日 14 时(北京时,下同)加强为强热带风暴, 22 日 20 时加强为台风,24 日 08 时增强为超强台风 并维持 16 h,登陆台湾前在花莲以东海面打转6 h, 于 25 日 00 时前后以强台风级在台湾省宜兰县南澳 乡沿海登陆(48 m·s⁻¹,15 级,945 hPa),25 日19:50 前后以台风级在福建省莆田市秀屿区二次登陆 (33 m·s⁻¹,12 级,972 hPa),而后西行北上,穿过福 建、江西等地(图 1a),给浙江沿海带来强风暴雨。

依据影响系统和降水配置关系,浙江降水分为两 个阶段:第一阶段为7月24—25日"格美"登陆前,受 东一东南气流影响;第二阶段为7月26—27日"格 美"登陆后西北行期间,受东南—南气流影响。第一 阶段最强降水出现在25日下午到傍晚,第二阶段出 现在26日凌晨到上午。7月25日下午—26日,温州 南部出现特大暴雨;7月24日08时—27日20时(图 1b),温州市泰顺县泗溪镇泗溪九峰(海拔为949m) 累计降水量单站最大,达874mm。





图 1 "格美"路径及 7 月 24 日 08 时—27 日 20 时浙江累计降水量 Fig.1 Track of Typhoon Gaemi and accumulated precipitation in Zhejiang from 08:00 BJT 24 to 20:00 BJT 27 July

第1期

2.1 低空急流和水汽条件

7月24日,浙江东南沿海开始受超强台风"格 美"外围环流偏东气流影响出现阵雨天气。24日夜 间—25日(图2a—b),两支水汽通道汇集在东南沿海 地区,一支为"格美"南部来自南海季风的水汽输送, 另一支为"格美"和副热带高压之间的东南急流水汽 输送,双通道强盛的水汽输送加强了东南沿海的水汽 值,温州市瓯海区茶山盘垟(海拔为700 m)小时雨强 达71.1 mm·h⁻¹。25日20时(图2c),"格美"登陆福 建莆田后,台风螺旋雨带影响东南沿海。26日02(图 2d)—06时(图略),台州受台风东侧偏南气流和南海 季风绕过台湾岛的东南气流共同影响,风向辐合明 显,水汽持续供给。850 hPa风速为20~26 m·s⁻¹,水汽 通量为36~45 g·cm⁻¹·hPa⁻¹·s⁻¹,台州出现大到暴雨,最 大小时雨强达55.1 mm·h⁻¹(两桥站,26日05时)。随 后台风缓慢向西北行,26—27日(图2e—f)强度逐 渐减弱,副热带高压西伸南海,西南季风水汽供应受 到抑制,东南沿海地区逐渐转为偏南急流,风速和水 汽通量明显下降,东南沿海降水减弱。



12 15 18 21 24 27 30 33 36 39 42 45 48 51 54 57 60

风矢—风场,风速单位为m·s⁻¹;色阶—水汽通量,单位为g·cm⁻¹·hPa⁻¹·s⁻¹;等值线—位势高度,单位为gpm, 其中红色粗等值线对应5 880 gpm; a、b中红色箭头—水汽输送通道。

图 2 850 hPa 风场和水汽通量 Fig.2 Wind and water vapor flux at 850 hPa

2.2 动力和不稳定条件

7月25日14时(图3a),东南沿海850hPa以下 为强辐合,散度为-20×10⁻⁵~-16×10⁻⁵s⁻¹,850~ 500hPa有强辐散,散度为12×10⁻⁵~16×10⁻⁵s⁻¹。近 地面层的假相当位温(θ_{se})较大,中心达 372 K,高温 高湿的环境有利于较高对流有效位能的形成和维持, 不稳定性增强。抬升凝结高度为 400 m 左右,气层抬 升达到饱和,K 指数为 36~40 ℃,潜热释放有利于自 由对流的发生,为强降水的发生提供了有利背景, 25日下午是此次过程温州地区降水最强时段。26日 东南沿海辐散中心向北移动至台州,26日03时 (图3b),850 hPa 以下辐合中心为-10×10⁻⁵~ -8×10⁻⁵ s⁻¹,850~500 hPa 散度为10×10⁻⁵~14×10⁻⁵ s⁻¹, 高低空配合有较好的抬升条件,台州出现强降水。上 升运动在对流弱不稳定或中性层结大气中强烈发展, 在降水中心上空存在强烈的上升运动,中心位于 500 hPa附近,达到-10~-8 Pa·s⁻¹。各物理量均较 25 日下午温州地区偏弱,对应雨强也偏小。





图 3 沿 27.5°N、28.5°N 纬向剖面上的散度和垂直环流分布

Fig.3 Distribution of divergence and vertical circulation in zonal cross sections along $27.5^{\circ}N$ and $28.5^{\circ}N$

2.3 地形增幅作用

浙江东南沿海的雁荡山和括苍山等山脉呈东 北—西南向分布,温州和台州地区从东向西地势海拔 逐渐增高,东南气流与山脉走向垂直,同时在两地交 界处存在一个喇叭口[1],特有的地形条件对台风近地 层环流有强迫作用,导致台风降水的增幅和强降水发 生频次的增加。迎风坡垂直速度和低层的辐合明显 强于平原地区,地形的动力辐合、抬升作用明显,导致 降水分布不均匀。东南沿海地区降水量在250 mm 以 下的站点地势较为平坦,250 mm 以上的站点大多分 布在高山附近,累计降水量大于 550 mm 的站点集中 分布在温州雁荡山东侧,最大值(874 mm)出现在温 州市泰顺县泗溪镇泗溪九峰站,该站点海拔为949 m, 相距较近的莒溪站海拔为143 m,两站累计降水量分 别为 874 mm 和 418 mm, 地形作用产生的降水增幅达 109%。25日下午(图 3a),东南气流在迎风坡一侧形 成了低层强辐合、高层强辐散,地形阻挡造成水汽辐 合,持续的东风急流、水汽辐合和水汽通量的加强,是 该站极端暴雨的主要成因。

3 双偏振雷达特征分析

为更好应用 S 波段和 X 波段雷达产品,了解各 自的产品性能和优劣势,开展台风降水协同观测的 科学试验、业务应用等,深入分析降水过程的微物理 特征,文中将分别对比温州和台州强降水时段 2 个 波段的雷达双偏振量产品。选取均能覆盖到同一片 强回波区域的 2 个波段雷达,温州黄石山 X 波段雷 达位于温州 S 波段雷达东北侧 8.8 km 的位置,台州 温岭龙岗山 X 波段雷达位于台州 S 波段双偏振雷 达西南侧约 35.3 km 的位置。

台风登陆前,7月25日下午温州受台风外围 强回波影响出现大范围持续性强降水。通过温州 双偏振雷达资料分析发现,14—19时"列车效应" 较为明显,尤其15—17时降水效率高,累计降水 量大。7月25日16:08(图4),由温州S波段雷达 和温州黄石山X波段雷达3km高度的回波及双 偏振参量特征对比可看出,S 波段雷达时空分辨率 偏低,回波较为杂乱,X 波段雷达的强回波显示和 弱回波衰减均相对更明显。大于 35 dBZ 的范围和 形态两者基本一致,最大值也均为 55~60 dBZ,但 对于大于 45 dBZ 的强回波,X 波段范围偏大、强度 偏强。X 波段雷达的 $K_{\rm DP}$ 、 $Z_{\rm DR}$ 强弱分布与其 $Z_{\rm H}$ 基 本一致,即强回波区对应较高的 $K_{\rm DP}$ 和 $Z_{\rm DR}$ 。相比 之下,S 波段雷达的 $K_{\rm DP}$ 存在一些放射性条状的负 值,而 $Z_{\rm DR}$ 的大值分布则显得较为零散和不连续。 台风登陆后,7 月 26 日 01—06 时,台州受台风东 北象限东南气流影响,回波由线状组织成片状,强 度逐渐增强,以低质心回波为主。7 月 26 日04:48 (图略),台州 S 波段和台州龙岗山 X 波段雷达

3 km高度的回波及双偏振参量特征对比结果与温州2部雷达结论较为一致。

综合来看,2个波段各具优势与不足,合理的组合使用将有助于提升观测效果。分析2个波段雷达的回波及双偏振参量特征可知,X波段相控阵雷达的反射率产品在强度分布上与S波段雷达相似,两者的回波轮廓具有较高的一致性,S波段雷达的分辨率相对较低,虽然大致特征能够体现,但表现得较为杂乱,影响了有效信息的提取。对比双偏振参量,2个雷达均能捕捉到强回波区域的特征,但X波段雷达波长更短,双偏振参数整体数值相对较高,与Park等^[23]通过散射模拟实验发现的结论一致,K_{DP}为S波段雷达的3倍。







图 4 2024 年 7 月 25 日 16:08 温州 S 波段和黄石山 X 波段雷达回波反射率因子及双偏振参量对比 Fig.4 Comparison of CAPPI products (reflectivity and dual-polarization parameters) between Wenzhou S-band radar and Wenzhou Huangshishan X-band radar at 16:08 BJT 25 July 2024

4 多波段雷达定量降水估计特征

4.1 定量降水估计算法

文中使用的单部 S 波段和 X 波段组网 QPE 产 品反演方法为:结合地形高程数据,避免底层偏振量 数据受到遮挡、衰减影响而偏低,选取离地 1 km 高 度范围内所有仰角的 Z_H和 K_{DP}的最大值作为地面格 点降水反演的数据源, X 波段组网 QPE 依照公式 (1)^[22]进行瞬时雨强的估算, S 波段单部雷达 QPE 产品则参考美国 WSR-88D 雷达业务运行降水反演 系统默认的关系式^[24],并对参数进行浙江本地优 化,形成公式(2)。之后通过将瞬时雨强乘以时间 间隔(S 波段逐 6 min, X 波段逐 5 min)并累加,可以 生成 1 h 累计降水产品。

$$R_{\rm X} = \begin{cases} 0.01 \times Z_{\rm h}^{0.71}, \ K_{\rm DP} < 0.3 \ (^{\circ}) \cdot \rm{km}^{-1} \\ 13 \times K_{\rm DP}^{1.2}, \ K_{\rm DP} \ge 0.3 \ (^{\circ}) \cdot \rm{km}^{-1} \end{cases}$$
(1)

 $R_{s} = \begin{cases} 0.02 \times Z_{h}^{0.71}, Z_{h} < 30 \text{ dBZ } \vec{x} K_{DP} < 1 (°) \cdot \text{km}^{-1} \\ 44 \times K_{DP}^{0.822}, Z_{h} \ge 30 \text{ dBZ } \vec{B} K_{DP} \ge 1 (°) \cdot \text{km}^{-1} \end{cases} (2) \\ \vec{x} + :R_{x} \Rightarrow X \ \vec{x} \notin \mathcal{B} \# \mathcal{A} \oplus \mathcal$

4.2 定量降水估计检验方案

X 波段和 S 波段的融合 QPE 产品。

根据《智能预报技术方法竞赛检验方案》^[26], 短时强降水可采用点对面检验方法,即以实况站点 为中心点,扫描半径为3km,该方法可有效缓解降 水落区的空间偏差问题。文中以浙江自动气象观测 站1h累计降水量观测值为基准,对雷达QPE产品 进行检验评估。检验评估指标包括威胁评分(threat

波段 QPE 补盲,其他区域用 S 波段 QPE,进而形成

score,TS)、命中率(probability of detection,POD)、空 报率(false alarm rate,FAR)、偏差(bias)。其计算方 法流程为:首先定义一组降水把最终的预测结果分 解成多个二分类问题(大于阈值的点设为正例,反 之设为负例),其次根据二分类混淆矩阵计算评分。 假设检验的降水阈值为 K, N_{TP} 表示观测不小于K且 预测也不小于K的次数, N_{FN} 表示观测不小于K 面 预测小于K的次数, N_{FP} 表示观测小于K 而预测不 小于K的次数。本试验使用的K分别为 20、30、40、 50 mm·h⁻¹。

$$V_{\rm TS} = \frac{N_{\rm TP}}{N_{\rm TP} + N_{\rm FN} + N_{\rm FP}}$$
(3)

$$V_{\rm POD} = \frac{N_{\rm TP}}{N_{\rm TP} + N_{\rm FN}} \tag{4}$$

$$V_{\rm FAR} = \frac{N_{\rm FP}}{N_{\rm TP} + N_{\rm FP}} \tag{5}$$

$$V_{\text{bias}} = \frac{N_{\text{TP}} + N_{\text{FP}}}{N_{\text{TP}} + N_{\text{FN}}} \tag{6}$$

式中:V_{TS}、V_{POD}、V_{FAR}、V_{bias}分别表示 TS、POD、FAR 和 bias 各值。

4.3 定量降水估计性能评估

为讨论单部 S 波段双偏振雷达(简记为"S")、 组网 X 波段双偏振雷达(简记为"X")、融合 S 波段 和 X 波段雷达(简记为"S+X")的 QPE 在此次过程 中的适用性,文中分别对这三种 QPE 产品进行性能 评估,开展空间降水、时序降水检验,并对检验的时 空演变进行分析。

4.3.1 空间降水检验

通过对 S、X 以及 S+X 三种 QPE 产品与站点观 测降水的空间分布图进行比较,从空间角度评估三 种 QPE 的性能,可以明显看出 X 的优势。在台州强 降水集中时段,7月 26日 02 时(图略),X 对降水雨 带的落区和强度估计与实况较为吻合,短时强降水 的 TS 评分为0.37,POD 为0.85,明显优于 S 和 S+X, 但 FAR 达0.61,bias 为2.18,较 S 和 S+X 偏高。三种 QPE 均漏报了临海市 40~50 mm·h⁻¹的短时强降 水。03 时,X 在降水落区和强度估计上仍有优势, TS 评分为0.53,POD 为0.84,TS 评分略偏低,而 S 对 40 mm·h⁻¹以上的强降水估计能力偏弱,S+X 虽有 改善但仍存在大范围漏报。04 时(图 5a—d),X 很 好地估计了乐清湾的强降水落区,TS 评分为0.62,

POD 达0.87, FAR 较 S 偏大了 105%, 因 X 波段雷达 探测边缘仰角高度抬升和衰减影响,没有反演出乐 清中西部和北部的强降水:S估计值明显偏低,TS 评分为0.55, POD 为0.61; S+X 的各项指标较 S 略有 提升,其中 POD 提升20.0%。05 时(图 5e-h),X 降水估计 POD 达到了0.97, TS 评分和 POD 较 S 分 别提升55.3%和77.7%,同时 FAR 较 S 和 S+X 均偏 大了 45%。由该降水时段平均来看, X 的 POD 为 0.88,较S和S+X分别提升62.9%和27.1%;TS评分 也是 X 最高,达0.57:但 X 的 FAR(0.38)和 bias (1.52) 也是最高, 其中 FAR 较 S 偏大78.4%。25 日 15-19时,温州地区的降水过程中,X在各时段的 降水落区和强度估计上均与实况更为接近(图略), S和S+X则明显偏低,同样存在FAR和bias明显偏 大的特征。由空间分布也可以发现,X 波段衰减较 为严重,近距离的组网 QPE 有较好的探测性能,远 离雷达中心一段距离后,距离越远强度下降越迅速。

空间降水检验分析表明,X 波段雷达组合 QPE 在降水落区范围和强度估计上表现最佳,S+X 融合 产品次之,S 波段雷达偏差较大。这不仅与 X 波段 雷达开展组网提高探测精度、增强数据完整性有关,

还在于其具有约3 cm 的短波长,具备更高的空间分 辨率,能够更精细地探测降水回波的空间结构,特别 是在捕捉局地对流性降水和细微降水结构方面表现 突出。此外,X波段雷达采用相控阵技术,具备0°~ 60°仰角的探测能力,静锥区较小,能够完整探测近 地面低层降水,弥补了S波段雷达在静锥区和低空 盲区的不足。S波段雷达天线受结构和扫描方式的 限制,仰角范围通常为0°~20°,静锥区较大,无法完 整探测雷达近端和低空的降水回波,导致对低层强 降水的探测能力受限,容易出现漏报和强度低估。 另外,S波段波长较长,空间分辨率相对较低,对小 尺度和局地强降水的捕捉能力不如 X 波段雷达。 远距离探测时还受地球曲率和波束拓展的影响,出现 波束上冲,无法有效探测低层降水。S+X 效果提升有 限的原因是目前业务上融合 S 波段和 X 波段产品的 简单做法以S波段 QPE 为主, 而X波段 QPE 仅作为 补盲。该问题有很大优化空间,例如可优先采用机器 学习方法,通过针对样本不平衡问题进行优化,增强 模型对强降水的估计能力。同时结合视觉深度学习 方法来改善雷达数据的时空特征提取和融合效果,达 到自适应融合的效应,而非人工选择补盲雷达。



图 5 2024 年 7 月 26 日 04:00 和 05:00 台州地区的 1 h 累计降水量 Fig.5 One-hour accumulated precipitation in Taizhou at 04:00 BJT and 05:00 BJT 26 July 2024

4.3.2 时序降水检验

7月26日02—05时(图6),台州地区降雨逐 渐增强,X和S+X对于雨强 $I \ge 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水 估测能力也逐渐增强,而S则先增强后下降。X的 TS评分从02时的0.37提高至05时的0.78,05时 POD达到0.97,较02时提升了13.8%,这一现象 可能与降水信号强度增强和范围扩大有关。研 究^[27-30]表明,当降水信号明显增强时,雷达往往能 更有效地捕捉信号,从而表现出更优的QPE性能; 相反地,当降水信号较弱,如微小尺度对流系统难以 被雷达探测时,容易发生漏报现象。此次过程中,台 州降水强度和范围显著增强,因此20 mm · h⁻¹评分 呈现明显增长趋势,各时次各段雨强 X 和S+X的 POD 均高于 S。雨强为 30~40 mm·h⁻¹时,各 QPE 产品均表现为先增强,04 时后下降的趋势。04 时, X 和 S+X 的 TS 评分约为 0.55,雨强 $I \ge 40$ mm·h⁻¹ 时,S 的 TS 评分和 POD 均为 0.31。转折点时强降 水强度最强、范围最大,强降水中心近似椭圆形,随 后降水强度减弱范围减小,强降水雨带呈狭长带 状,雷达 QPE 评分明显下降。雨强 $I \ge 50$ mm·h⁻¹ 时,各 QPE 评分也均逐渐下降,且 bias、POD、FAR 出现较大波动,主要由于极端短时强降水的样本 本身偏少,降水估测的不确定性增大,导致 QPE 误 差偏大。



图 6 2024 年 7 月 26 日 02:00—05:00 台州三种 QPE 产品评分检验时间序列

Fig.6 Time series of evaluation scores for three QPE products in Taizhou from 02:00 BJT to 05:00 BJT 26 July 2024

对于 7 月 25 日 15—19 时温州地区的降水, 三种QPE 产品性能评估与台州类似。雨强为 20~ 30 mm·h⁻¹时,X 性能逐渐增强,而 S 和 S+X 则先增 强后下降,转折点大约在 18 时,此时也对应着降水 强度和范围的明显减弱。雨强为 40~50 mm·h⁻¹时, 各 QPE 产品评分均出现较大的时间变化不确定性。 此外,从降水落区图可以看出,出现 40 mm·h⁻¹以上 短时强降水的区域站点分布较为稀疏,当邻域半径 较小时,更容易受到站点分布特征的影响,进而导致 QPE 不确定性增大。

5 总结和讨论

2024 年 7 月 24—27 日,台风"格美"给浙江东 南沿海地区带来强风暴雨,文中利用 ERA5 数据、S 波段双偏振多普勒天气雷达、X 波段双偏振相控阵 天气雷达和加密自动气象站等资料,从急流维持、水 汽输送、能量不稳定和地形等方面探讨强降水形成 机制,分析雷达双偏振量等参数特征,并对 S 波段和 X 波段双偏振雷达的 QPE 进行评估,得到以下 结论:

(1)台风"格美"强度强、云系范围广,近海岸时 移动缓慢。强盛的西南季风和副热带高压西侧的东 南急流为"格美"提供充足的水汽和能量,24 日 08 时,"格美"靠近台湾加强为超强台风并维持16 h,持 续强劲的水汽输送为浙江东南沿海带来暴雨大暴 雨,温州南部特大暴雨。

(2)浙江东南沿海台风降水地形增幅效应显 著,台风东北侧东南气流与山脉走向垂直,地形阻挡 造成了水汽辐合,持续的东风急流、水汽辐合和水汽 通量的加强,是此次极端暴雨的主要成因。

(3)S波段双偏振雷达探测距离远、强回波区域 数据可信度较高,但对于40 mm·h⁻¹以上的强降水 估计能力偏弱。X 波段相控阵雷达时空分辨率较 高、能够捕捉降水过程低仰角双偏振参数特征、有效 提升低层盲区观测能力。X 波段的双偏振参数整体 数值相对较高,但在强回波之后表现出一定的衰减 现象。

(4)X 波段雷达组网、S 波段雷达的 QPE 均能 较准确估计出强降水,而强降水样本数偏少会导致 QPE 的评估指标(POD、FAR 和 bias)出现较大波 动。X 波段雷达组网的 QPE 对降水落区和强度的 估计最优,不同雨强的命中率均高于 S 波段雷达,最高可达 100%。7 月 26 日 02—05 时,台州强降水 POD 平均为 0.88,较 S 提升 63%,但 FAR 和 bias 也 偏大,达到了 0.38 和 1.52,而 S 波段的两者则为0.22 和 0.69。

目前业务上融合 S 波段和 X 波段产品的做法 较简单,以 S 波段 QPE 为主,而 X 波段 QPE 仅作为 补盲。针对该融合方法所存在的不足,可优先采用 机器学习方法优化样本不平衡问题,再结合视觉深 度学习方法来改善雷达数据的时空特征提取和融合 效果,达到自适应融合的效应,从而提升强降水的协 同观测能力。

参考文献:

- [1] 娄小芬,马昊,黄旋旋,等.台风"利奇马"造成浙江极 端降水的成因分析[J].气象科学,2020,40(1):78-88.
- [2] 徐亚钦,叶妍婷,刘瑞,等.1814 号台风"摩羯"造成浙 江内陆强降水的动力特征分析[J].海洋气象学报, 2022,42(4):37-47.
- [3] 崔梦雪,向纯怡,张晗昀,等.台风"杜苏芮"(2305)引 发福建极端强降水的特征分析[J].海洋气象学报, 2023,43(4):11-20.
- [4] 朱志存,陈雄飞,王永峰,等.基于四维灾体模型的浙江 省气象灾害损失年景评价[J].海洋气象学报,2020,40
 (3):121-125.
- [5] 冯晋勤,刘铭,蔡菁.闽西山区"7·22"极端降水过程中 尺度对流特征[J].应用气象学报,2018,29(6): 748-758.
- [6] 王文波,李晓利,赵华,等."海棠"残留低压引发鲁中东部暴雨中尺度特征分析[J].气象与环境科学,2021,44(2):80-86.
- [7] 王金兰,陈红霞,段中夏,等.河南省一次致灾强对流天
 气的中尺度分析[J].气象与环境科学,2014,37(3):
 14-20.
- [8] 胡燕平,郭贺奇,武威,等.沙颍河流域一次极端短时强
 降水的中尺度特征分析[J].气象与环境科学,2021,44
 (4):63-71.
- [9] 王晓丽,赵桂香,杨璐,等.一次引发局地暴雨的中尺度 对流系统降水及风场结构特征[J].气象与环境科学, 2021,44(5):40-48.
- [10] 吴翀.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,2018.
- [11] 曹俊武,刘黎平,葛润生.模糊逻辑法在双线偏振雷达

识别降水粒子相态中的研究[J].大气科学,2005,29 (5):827-836.

- [12] 荀爱萍,张伟,黄惠镕,等.厦门市S波段双偏振雷达测
 雨效果分析[J]. 气象与环境科学, 2019, 42 (4):
 103-110.
- [13] 刘红亚,杨引明,张晶,等.一次冰雹天气的 WSR-88D 双偏振雷达特征分析[J].气象与环境科学,2020,43 (2):1-10.
- [14] 林文,张深寿,罗昌荣,等.不同强度强对流云系S波段 双偏振雷达观测分析[J].气象,2020,46(1):63-72.
- [15] 张好晴,张伟,郑辉,等.S 波段-X 波段雷达联合观测 在厦门局地短时强降水过程中的应用分析[J].气象与 环境科学,2023,46(4):85-94.
- [16] 苏永彦,刘黎平.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,2022,48(2): 229-244.
- [17] 刘黎平,吴林林,吴翀,等.X 波段相控阵天气雷达对流 过程观测外场试验及初步结果分析[J].大气科学, 2014,38(6):1079-1094.
- [18] HITSCHFELD W, BORDAN J. Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelengths[J]. J Atmos Sci, 1954, 11(1):58-67.
- [19] PARK S G, MAKI M, IWANAMI K, et al. Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X band. Part II: evaluation and application [J]. J Atmos Ocean Technol, 2005, 22(11):1633-1655.
- [20] 李哲,吴翀,刘黎平,等.双偏振相控阵雷达误差评估与相态识别方法[J].应用气象学报,2022,33(1):16-28.
- [21] 田聪聪,张羽,曾琳,等.X 波段相控阵雷达与 S 波段雷达的对比分析[J].广东气象,2021,43(3):55-59.
- [22] 周方毅,王国荣,杨杰毅.定量降水估测方法、设备、存储介质及产品:CN118759612A[P].2024-10-11.

- [23] PARK S G, BRINGI V N, CHANDRASEKAR V, et al. Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X band. Part I: theoretical and empirical basis [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2005, 22 (11):1621-1632.
- [24] RYZHKOV A V, GIANGRANDE S E, SCHUUR T J. Rainfall estimation with a polarimetric prototype of WSR-88D[J]. J Appl Meteor Climatol, 2005, 44(4):502-515.
- [25] 胡志群,刘黎平,楚荣忠,等.X 波段双线偏振雷达不同 衰减订正方法对比及其对降水估测影响研究[J].气象 学报,2008,66(2):251-261.
- [26]国家气象中心.智能预报技术方法竞赛检验方案 [Z]//中国气象局预报与网络司.预报司关于印发第 八届全国气象行业天气预报职业技能竞赛智能预报 技术方法单项实施方案的通知(气预函[2020]34号). 北京:中国气象局预报与网络司,2020.
- [27] RYZHKOV A V, SCHUUR T J, BURGESS D W, et al. The Joint Polarization Experiment: polarimetric rainfall measurements and hydrometeor classification [J]. Bull Amer Meteor Soc, 2005, 86(6):809-824.
- [28] CIFELLI R, CHANDRASEKAR V, LIM S, et al. A new dual-polarization radar rainfall algorithm: application in Colorado precipitation events [J]. J Atmos Ocean Technol, 2011, 28(3): 352-364.
- [29] GOURLEY J J, HONG Y, FLAMIG Z L, et al. Hydrologic evaluation of rainfall estimates from radar, satellite, gauge, and combinations on Ft. Cobb basin, Oklahoma[J]. J Hydrometeorol, 12(5):973-988.
- [30] KIRSTETTER P E, GOURLEY J J, HONG Y, et al. Probabilistic precipitation rate estimates with groundbased radar networks [J]. Water Resour Res, 2015, 51 (3):1422-1442.