

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, 2024, 44(4): 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<sup>1</sup>,张智察<sup>1</sup>,周方毅<sup>2,3</sup>,冯晓伟<sup>1</sup>,李闰秋<sup>1</sup>,刘佳利<sup>2</sup>

(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  $40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  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 Junping<sup>1</sup>, ZHANG Zhicha<sup>1</sup>, ZHOU Fangyi<sup>2,3</sup>, FENG Xiaowei<sup>1</sup>,  
LI Runqiu<sup>1</sup>, LIU Jiali<sup>2</sup>

(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 dual-polarization 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  $40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  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 dual-polarization Doppler weather radar; quantitative precipitation estimation (QPE)

## 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<sup>[1-3]</sup>,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  $I \geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )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<sup>[4]</sup>。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 and 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( $Z_H$ )、差分反射率( $Z_{DR}$ )、差分传播相移率( $K_{DP}$ )和相关系数( $C_c$ )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<sup>[5-9]</sup>,目前已在云降水微物理研究<sup>[10-11]</sup>、定量降水估计(quantitative precipitation estimation, QPE)<sup>[12]</sup>和冰雹识别<sup>[13-14]</sup>等方面应用广泛。研究<sup>[15]</sup>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<sup>[16-17]</sup>。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<sup>[18-21]</sup>。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5772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 $1.6^{\circ}$ 。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( $\Phi_{DP}$ )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<sup>[22]</sup>。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( $48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 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( $33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 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—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949 m)累计降水量单站最大,达874 mm。

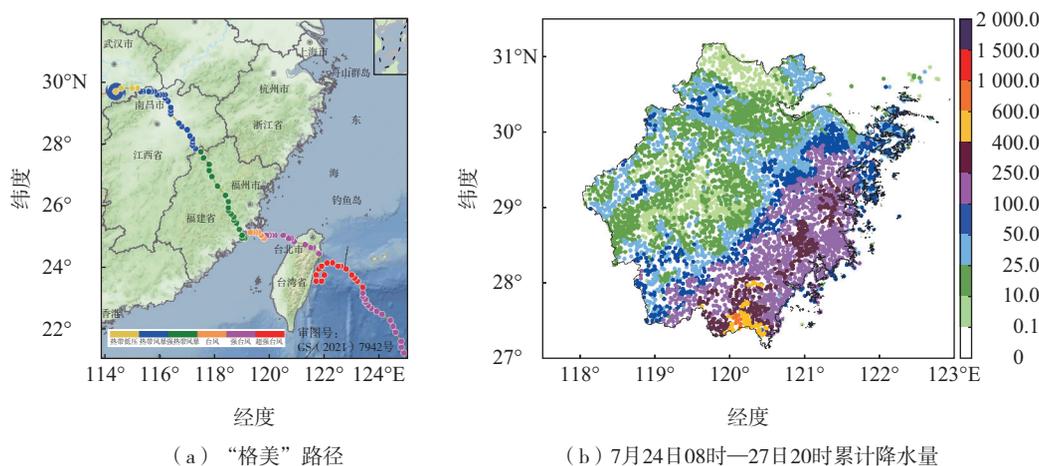


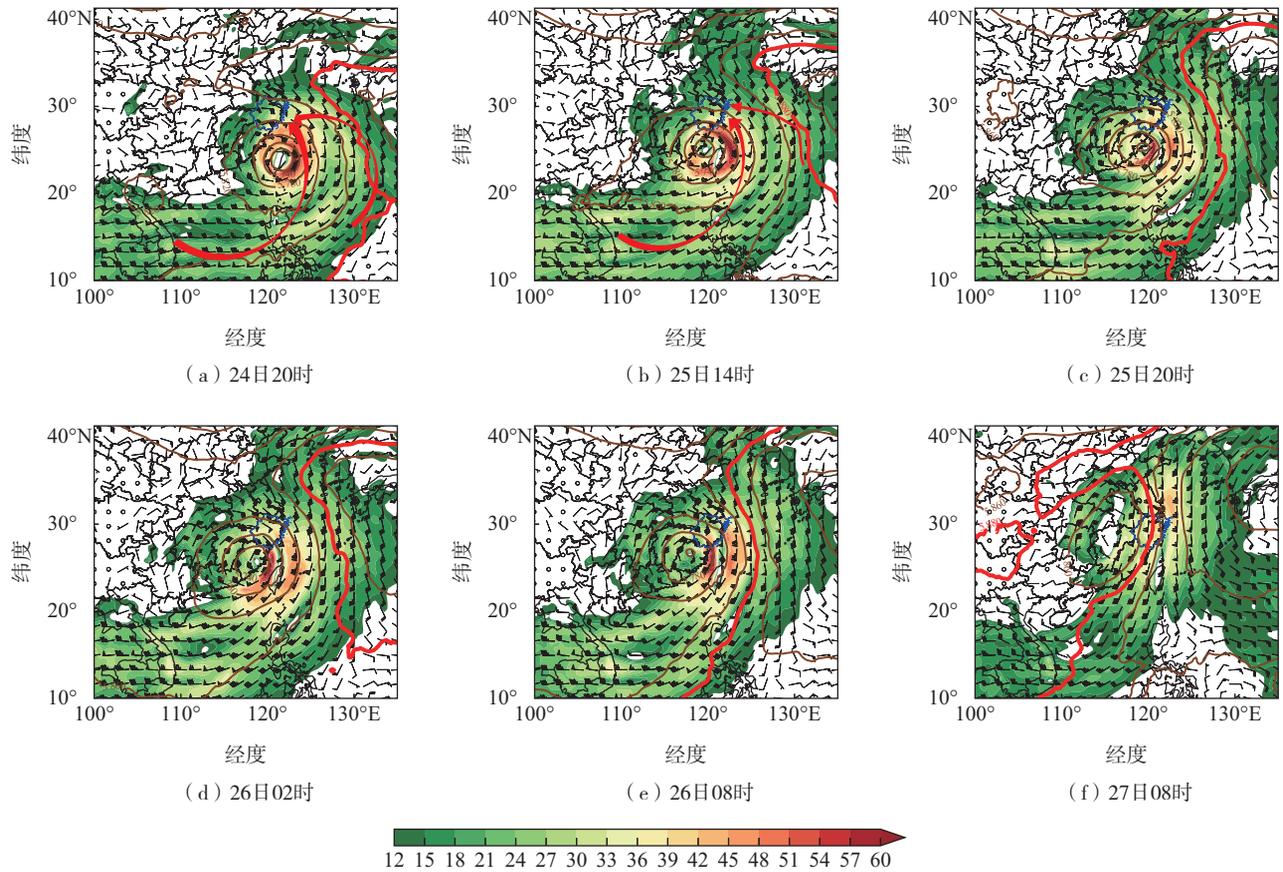
图1 “格美”路径及7月24日08时—27日20时浙江累计降水量

Fig.1 Track of Typhoon Gaemi and accumulated precipitation in Zhejiang from 08:00 BJT 24 to 20:00 BJT 27 July

### 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辐合,有利于对流不稳定能量的释放和降水强度的增强。25日14时(图2b)—18时(图略),受台风北侧东南气流影响,温州850 hPa风速最强为 $28\sim 32\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,水汽通量为 $48\sim 52\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ,均为此次过程极值。7月25日16时,出现了此次过程小时雨强最大

值,温州市瓯海区茶山盘垟(海拔为700 m)小时雨强达 $71.1\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。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时(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 $20\sim 26\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,水汽通量为 $36\sim 45\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ,台州出现大到暴雨,最大小时雨强达 $55.1\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (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。



风矢—风场, 风速单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 色阶—水汽通量, 单位为 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 等值线—位势高度, 单位为gpm, 其中红色粗等值线对应5880 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

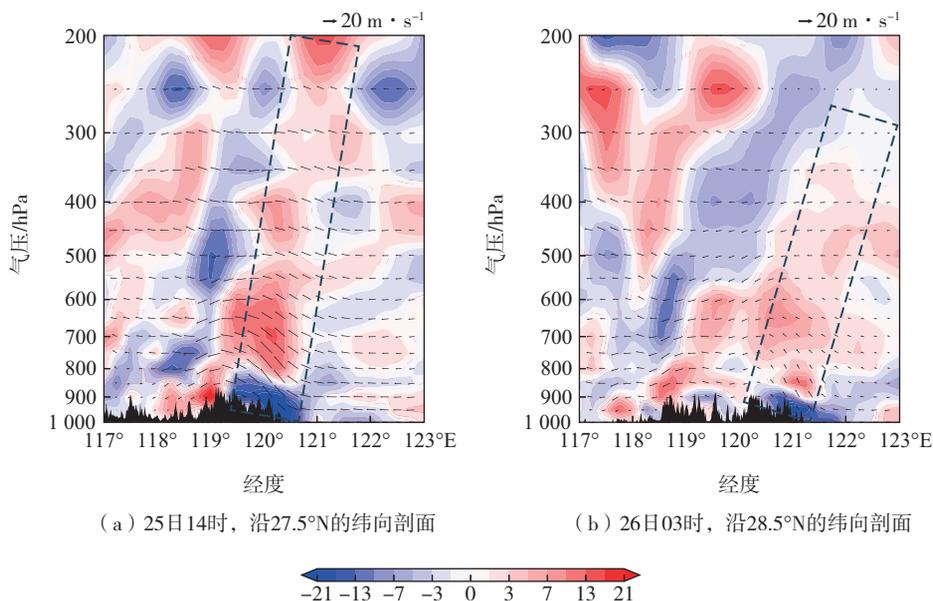
### 2.2 动力和不稳定条件

7月25日14时(图3a),东南沿海850 hPa以下为强辐合,散度为 $-20\times 10^{-5}\sim -16\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ ,850~500 hPa有强辐散,散度为 $12\times 10^{-5}\sim 16\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 。近

地面层的假相当位温( $\theta_{se}$ )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 $36\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,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 $-10 \times 10^{-5} \sim -8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,850~500 hPa散度为 $10 \times 10^{-5} \sim 14 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,

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 $-10 \sim -8 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。各物理量均较25日下午温州地区偏弱,对应雨强也偏小。



色阶—散度,单位为 $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ; 箭头—风场,风速单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 虚线框—低层辐合高层辐散。

图3 沿 $27.5^\circ\text{N}$ 、 $28.5^\circ\text{N}$ 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  $27.5^\circ\text{N}$  and  $28.5^\circ\text{N}$

### 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<sup>[1]</sup>,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

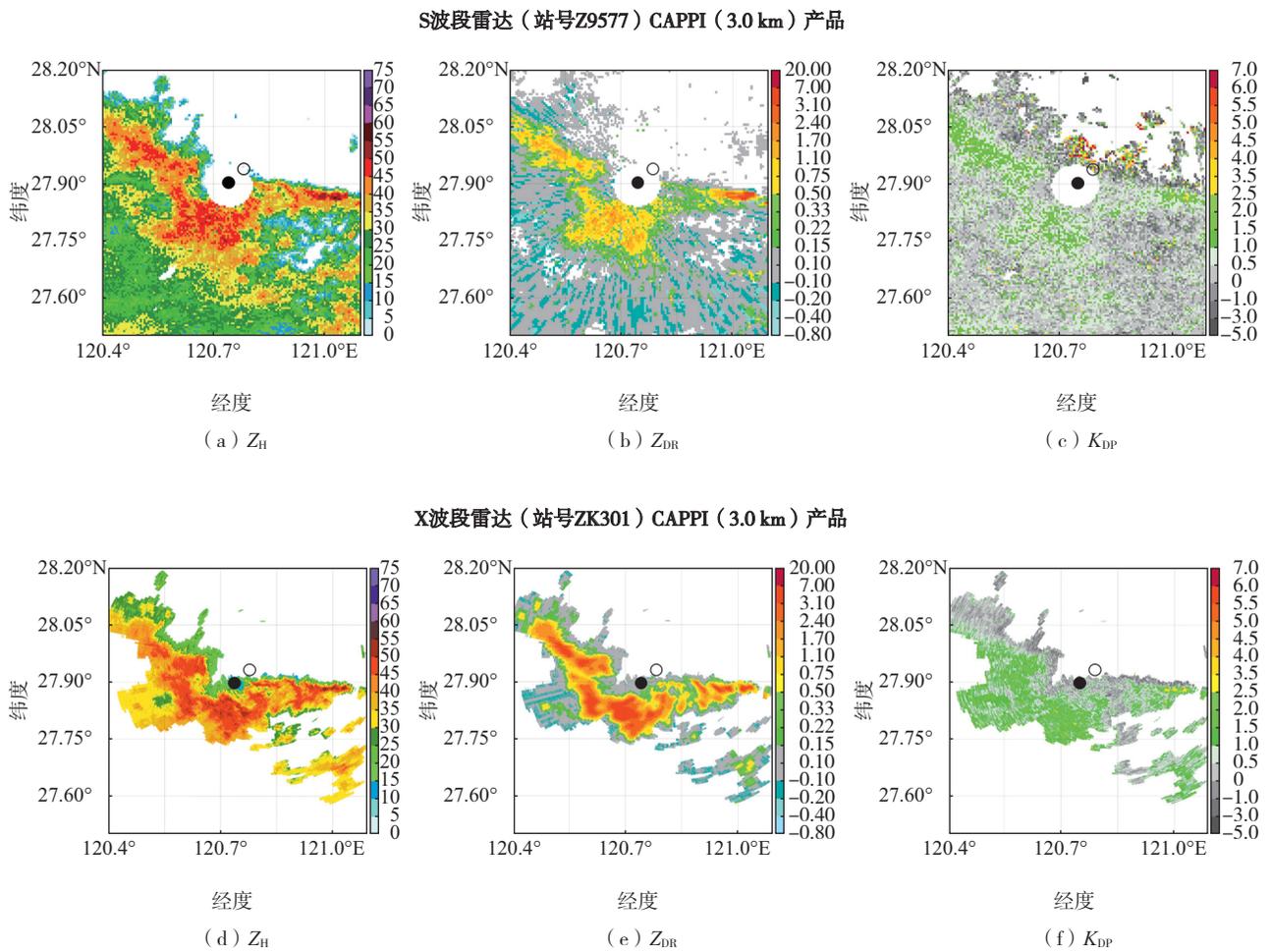
为更好应用S波段和X波段雷达产品,了解各自的产品性能和优劣势,开展台风降水协同观测的科学试验、业务应用等,深入分析降水过程的微物理特征,文中将分别对比温州和台州强降水时段2个波段的雷达双偏振量产品。选取均能覆盖到同一片强回波区域的2个波段雷达,温州黄石山X波段雷达位于温州S波段雷达东北侧8.8 km的位置,台州温岭龙岗山X波段雷达位于台州S波段双偏振雷达西南侧约35.3 km的位置。

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3 km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  $K_{DP}$ 、 $Z_{DR}$  强弱分布与其  $Z_H$  基本一致,即强回波区对应较高的  $K_{DP}$  和  $Z_{DR}$ 。相比之下,S 波段雷达的  $K_{DP}$  存在一些放射性条状的负值,而  $Z_{DR}$  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<sup>[23]</sup>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。



a、d 中色阶— $Z_H$ , 单位为 dBZ; b、e 中色阶— $Z_{DR}$ , 单位为 dB; c、f 中色阶— $K_{DP}$ , 单位为  $(^\circ) \cdot \text{km}^{-1}$ ; 黑色实心圆点—S 波段雷达, 位置为  $120.74^\circ\text{E}$ 、 $27.89^\circ\text{N}$ ; 黑色空心圆点—X 波段雷达, 位置为  $120.81^\circ\text{E}$ 、 $27.94^\circ\text{N}$ 。

图 4 2024 年 7 月 25 日 16:08 温州 S 波段和黄山 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)<sup>[22]</sup> 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<sup>[24]</sup>, 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。

$$R_x = \begin{cases} 0.01 \times Z_h^{0.71}, & K_{DP} < 0.3 \text{ (}^\circ\text{)} \cdot \text{km}^{-1} \\ 13 \times K_{DP}^{1.2}, & K_{DP} \geq 0.3 \text{ (}^\circ\text{)} \cdot \text{km}^{-1} \end{cases} \quad (1)$$

$$R_s = \begin{cases} 0.02 \times Z_h^{0.71}, & Z_h < 30 \text{ dBZ 或 } K_{DP} < 1 \text{ (}^\circ\text{)} \cdot \text{km}^{-1} \\ 44 \times K_{DP}^{0.822}, & Z_h \geq 30 \text{ dBZ 且 } K_{DP} \geq 1 \text{ (}^\circ\text{)} \cdot \text{km}^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $R_x$  为 X 波段组网 QPE;  $R_s$  为 S 波段单部雷达 QPE;  $Z_h = 10^{2H/10}$ , 单位为  $\text{mm}^6 \cdot \text{m}^{-3}$ 。X 波段 QPE 产品需要先对基础数据进行严格质控, 包括去除非气象回波和进行衰减订正。其中, 非气象回波去除采用朴素贝叶斯分类方法, 通过分析反射率纹理和径向速度等物理量, 计算地物、生物等非气象回波的概率, 滤除超过设定阈值的回波。衰减订正则利用订正前的反射率和  $K_{DP}$  估算衰减系数, 通过  $Z_H - K_{DP}$  方法<sup>[25]</sup> 对反射率进行修正, 从而补偿信号衰减影响, 确保数据准确性。而后对  $Z_H$  和  $K_{DP}$  进行坐标转换形成等经纬格点, 采用反距离权重开展三维组网。生成 X 波段组网 QPE 后, 在 S 波段有盲区的区域用 X 波段 QPE 补盲, 其他区域用 S 波段 QPE, 进而形成 X 波段和 S 波段的融合 QPE 产品。

### 4.2 定量降水估计检验方案

根据《智能预报技术方法竞赛检验方案》<sup>[26]</sup>, 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 3 km, 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 1 h 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

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  $K$  而预测小于  $K$  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  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

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

$$V_{POD} = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FN}} \quad (4)$$

$$V_{FAR} = \frac{N_{FP}}{N_{TP} + N_{FP}} \quad (5)$$

$$V_{bias} = \frac{N_{TP} + N_{FP}}{N_{TP} + N_{FN}} \quad (6)$$

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  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$  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  $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$  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当前业务上融合 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。

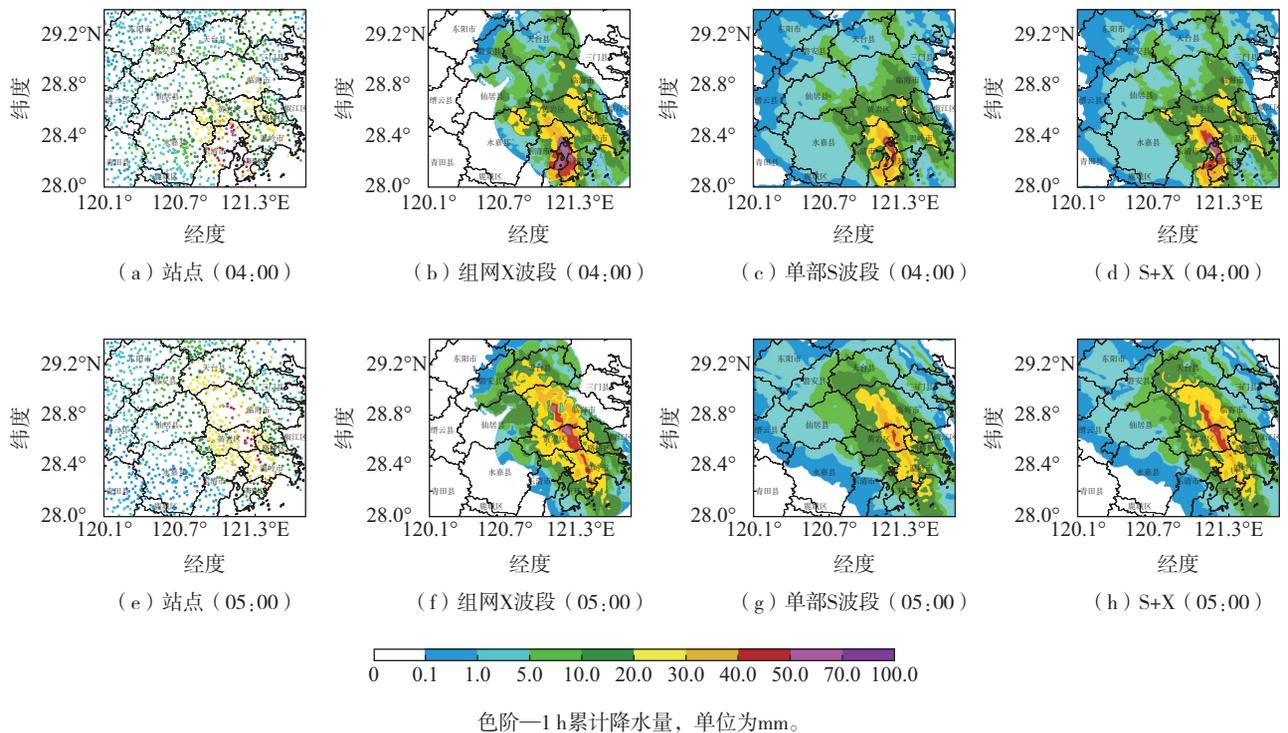


图 5 2024 年 7 月 26 日 04:00 和 05:00 台州地区的 1 h 累计降水量  
Fig.5 One-hour accumulated precipitation in Taizhou at 04:00 BJT and 05:00 BJT 26 July 2024

## 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 $I \geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 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<sup>[27-30]</sup>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 $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 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 $30 \sim 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 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 $I \geq 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 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 $I \geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 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。

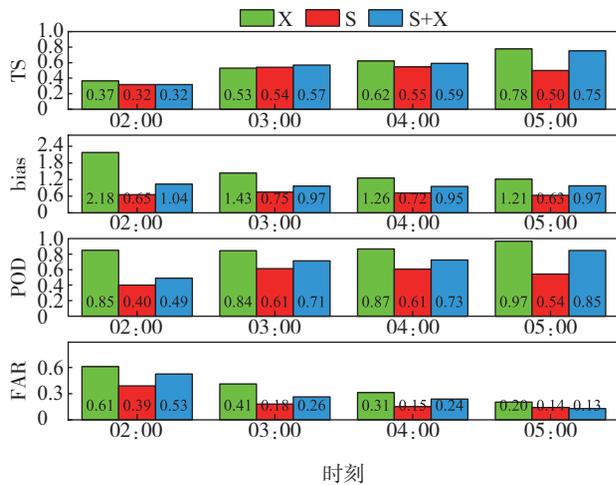
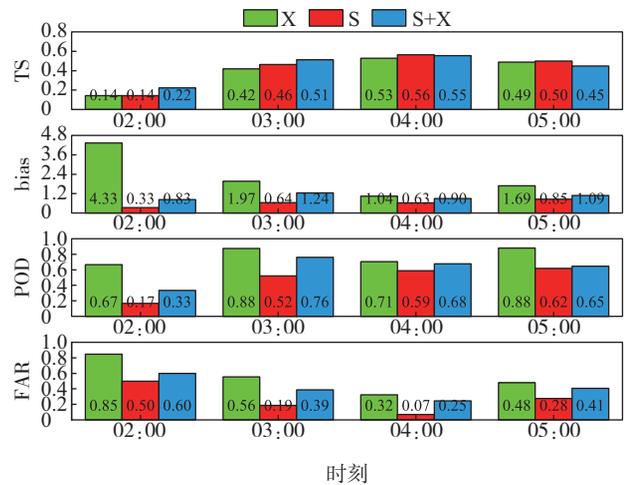
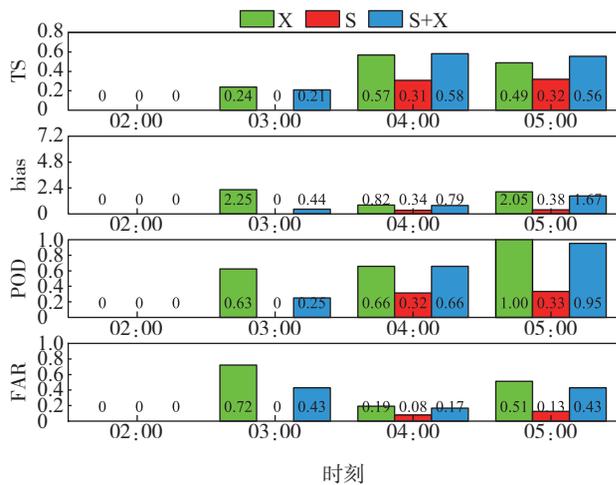
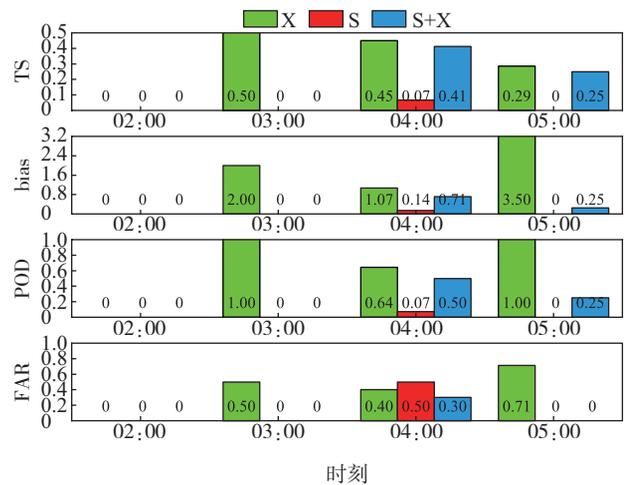
(a) 雨强 $I \geq 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (b) 雨强 $I \geq 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (c) 雨强 $I \geq 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (d) 雨强 $I \geq 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 

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 $20\sim 30\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 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 $40\sim 50\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 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 $40\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上短时强降雨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雨形成机制,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16h,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 $40\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上的强降雨估计能力偏弱。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雨,而强降雨样本数偏少会导致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,台州强降雨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,从而提升强降雨的协同观测能力。

## 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”造成浙江内陆强降雨的动力特征分析[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)引发福建极端强降雨的特征分析[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雨的中尺度特征分析[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,黄惠镛,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 ground-based radar networks [J]. Water Resour Res,2015,51(3):1422-1442.