

陶局,姚聘,肖艳姣,等,2026. 基于区域雷达组网的强对流天气监测预警方法[J]. 气象,52(4):415-431. Tao J, Yao D, Xiao Y J, et al, 2026. A monitoring and early warning method based on regional radar network for severe convective weather[J]. Meteor Mon, 52(4):415-431(in Chinese).

## 基于区域雷达组网的强对流天气监测预警方法<sup>\*</sup>

陶 局<sup>1,2</sup> 姚 聘<sup>2</sup> 肖艳姣<sup>2,3</sup> 滕玉鹏<sup>2</sup>

1 宁波市气象服务中心,宁波 315012

2 中国气象局气象探测中心,北京 100081

3 中国气象局武汉暴雨研究所,武汉 430205

**提 要:** 基于宁波及其附近区域的 7 部 S 波段双极化天气雷达,研制了一种基于区域雷达组网的强对流天气监测预警方法,并通过 43 个强对流过程对其业务能力进行量化评估。结果表明:区域雷达组网每分钟提供的数据量约为宁波单站 2.66 倍,且可为 1 km 以下边界层提供更多的观测信息;方法可及时响应区域内的强对流天气,冰雹预警和下击暴流预警可分别提前实况约 79.0 min 和 42.6 min;较宁波单站监测,方法识别对流初生提前约 4.0 min,预警冰雹过程提前约 12.2 min,预警下击暴流过程提前约 13.3 min,且在评估个例中对  $\gamma$  中尺度对流系统引发下击暴流的预警命中率为 100%;方法可适用于我国中东部、西部少部分及东北部少部分地区,覆盖面积约 44 000 km<sup>2</sup>,且在长江三角洲地区、湖北至广州一带、安徽到山东一带有较好的应用潜力。

**关键词:** 区域雷达组网,监测预警,强对流天气

**中图分类号:** P412, P456

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.071001

## A Monitoring and Early Warning Method Based on Regional Radar Network for Severe Convective Weather

TAO Ju<sup>1,2</sup> YAO Dan<sup>2</sup> XIAO Yanjiao<sup>2,3</sup> TENG Yupeng<sup>2</sup>

1 Ningbo Meteorological Service Center, Ningbo 315012

2 Meteorological Observation Centre, CMA, Beijing 100081

3 Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

**Abstract:** Based on 7 S-band dual-polarization weather radars in Ningbo and its surrounding areas, the paper develops a monitoring and early warning method of regional radar network for severe convective weather. Then, the novel method is quantitatively evaluated through 43 cases of severe convective weather. The result shows that the amount of data provided per minute by the regional radar network is about 2.66 times that of the single-site radar in Ningbo. And the radar network can provide more information for the observation of boundary layers below 1 km. The novel method can respond promptly to severe convective weather in the monitored area. Hail warning and downburst warning can be advanced about 79.0 min and 42.6 min ahead of the observation, respectively. Compared to the single-site radar station in Ningbo, the monitoring and early warning method of regional radar network can identify the convective initiation about 4.0 min in advance, and warn hail and downburst processes about 12.2 min and 13.3 min in advance.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金气象联合基金项目(U2542216、U2342216)、国家自然科学基金青年项目(42205145)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2026J066)和中国气象局决策气象服务专项重点项目(JCZX2023032)共同资助

2025 年 2 月 8 日收稿; 2025 年 7 月 10 日收修定稿

第一作者:陶局,主要从事中小尺度灾害天气及其机理研究. E-mail:850515302@qq.com

通讯作者:姚聘,主要从事强对流短时临近监测预警技术研究. E-mail:yaod@cma.gov.cn

respectively. At the same time, the early warning hit rate of the regional radar network for downburst triggered by  $\gamma$ -MCS reaches 100%. The method can be applied to all the central-east part of China and a small portion of the western and northeastern regions, covering approximately 44 000 km<sup>2</sup> area. Especially, the method could have a good application potential in the Yangtze River Delta, the area from Hubei to Guangzhou and the area from Anhui to Shandong.

**Key words:** regional radar network, monitoring and early warning, severe convective weather

## 引 言

强对流天气是指由中小尺度对流系统引发的冰雹、龙卷、雷暴大风和短时强降水等灾害性天气,具有局地性强、生命史短、破坏力大等特点,高时空分辨率的天气雷达是监测预警强对流天气的最佳手段(Huuskonen et al, 2014; 张小玲等, 2018; Cho and Kurdzo, 2020),基于单站雷达和组网雷达(全国和区域)进行监测预警是常用的两种方式。

基于单站雷达的监测预警主要由站点归属地的市(县)级单位通过新一代天气雷达业务软件 ROSE 开展,依托的产品包括 ROSE 系统生成的定量降水估测、中气旋识别、龙卷涡旋特征识别和冰雹识别等(文浩等, 2017; 杨春艳等, 2023; 陈卓等, 2024),这些产品的时间分辨率与体扫周期相同,生成时间则略滞后于体扫结束时间(赵瑞金和张进, 2018);在美国,单站雷达观测主要通过 AWIPS II (Advanced Weather Interactive Processing System II) 系统平台开展(Crum et al, 1998; Calhoun et al, 2014; Longmore et al, 2015),不仅可将全美国的单站观测数据提交至美国国家天气局预报员,该系统还搭建了与手机移动端的交互线路,可实时接收现场拍摄的照片、视频等。

全国雷达组网监测预警主要由国家级业务平台开展,通过天擎数据云平台下发业务数据,SWAN 和天衡、天衍等国家级平台基本实现了全国气象观测(赵培涛, 2020; 韩丰等, 2023),但产品下发至基层台站有约 15 min 的延迟。MRMS(Multiple-Radar/Multiple-Sensor System)业务系统是美国开展相关工作的主要平台(Smith et al, 2016; Qi and Zhang, 2017; Osborne et al, 2023),提供该国唯一的雷达拼图产品数据源。

单站雷达监测受限于扫描策略和客观指标等因

素,无法及时跟踪强对流系统这类快变天气系统的发展状态,且普遍存在低层探测盲区(俞小鼎等, 2005),全国雷达组网监测则受限于庞杂的数据加工和下发流程,难以及时向基层台站提供快变天气系统的监测信息。由基层台站各自构建适应本地强对流天气的区域雷达组网监测网络,是缓解此类问题的重要途径。

区域雷达组网监测是指由区域内相邻天气雷达站点构建的局地监测网络,可基于本地条件灵活配置监测预警模式,以满足各地强对流天气的精细化业务需求(程元慧等, 2020; 庄潇然等, 2023)。吴翀(2018)针对华南、南京和北京三个地区进行区域组网观测试验发现,S 波段双极化雷达成员可提供稳定、精细的组网结果,X 波段相控阵雷达成员可有效拓展近地面的低层探测区域;马雷鸣等(2023)开展了区域天气雷达布局建模仿真研发,实现了上海地区 S 波段和 X 波段天气雷达在强天气过程下的适应性协同观测; Misumi et al(2019)开展了东京区域极端对流天气观测试验,使用多普勒天气雷达、地面自动站和垂直探空仪等设备进行组网协同观测,发现精细化的雷达快扫组网体系能够更好应对大城市群中出现的极端性对流天气;Mahale et al(2014)则在美国 WSR88D 区域雷达组网体系中融合了 X 波段和 C 波段天气雷达,提高了组网扫描效率并有效填补了 S 波段雷达的低层观测盲区,能够捕捉更加精细的对流系统演变特征。

宁波地处我国中低纬度东部沿海,汛期强对流天气频发(陶局等, 2021),本文结合宁波周边 7 部 S 波段双极化天气雷达和数据流传输通信技术(蒋磊等, 2014),以宁波为研究对象研制了一种区域雷达组网的强对流天气监测预警方法(以下简称“方法”),并通过 43 个历史强对流天气过程对其进行业务能力评估,以期在基层台站应对强对流天气提供一种有效的策略。

# 1 资料与方法

## 1.1 资料

宁波及周边的 S 波段双极化天气雷达站点分布见图 1; 数据获取方式模拟基层台站的数据流传输方法, 通过数据流传输通信线路实时获取各站的单层 PPI(plan position indicator)扫描数据。

## 1.2 方法与算法

### 1.2.1 方法简介

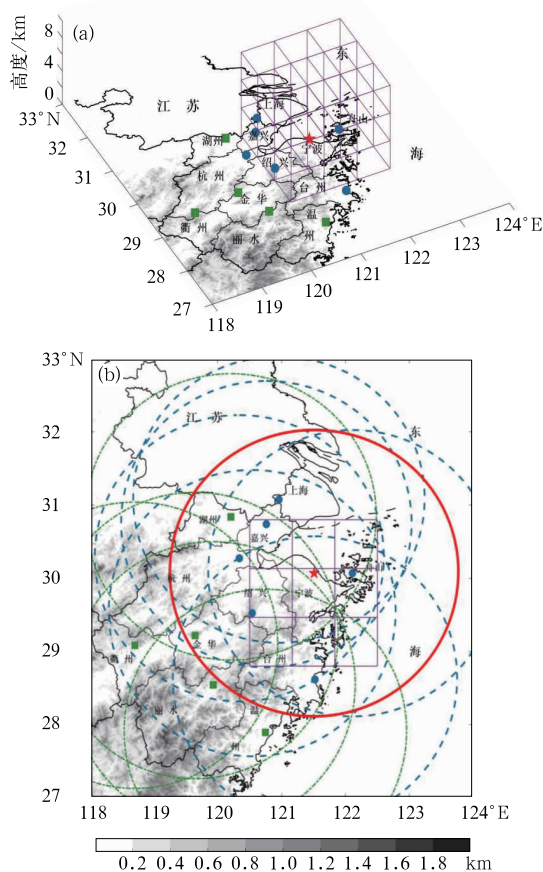
基于区域雷达组网的强对流天气监测预警方法, 可分为数据流构造和算法产品加工两步: 第一步为数据流构造, 基于流传输通信技术, 获取区域内各站实时扫描的零延迟单层 PPI(图 2, 以 VCP21 模式为例), 以 1 min 为间隔由服务器数据缓冲区同步接收, 构造 PPI 算法数据集, 根据观测数据集传来的数据反复更新算法数据集, 即可形成分钟级数据流。第二步为算法产品加工, 从分钟级数据流中获取本时段的 PPI 集合进入加工模块, 加工模块又可分为基于单层 PPI 的算法和基于垂直关联 PPI 的算法。

对于基于单层 PPI 的算法, 则在本分钟数据集中抽取所需 PPI 层数据进行加工, 如定量估测降水算法一般使用无波束阻挡的最低层 PPI, 则直接选择该层 PPI 进行运算; 若分钟数据集中存在由不同站点提供的多个所需层, 则可选择输出包含多站的多层 PPI 产品, 或对其进行格点化插值再输出; 若分钟数据集中不存在该层 PPI, 则至多可向前回溯 2 min, 得到所需层再做处理, 否则不输出本时次的产品。

对于基于垂直关联 PPI 的算法, 可根据与站点位置的相关程度进行灵活配置。对于与站点位置相关性较低的算法, 则可先分别处理各站各层 PPI 数据, 再进行基于 PPI 上距离库位置信息的关联处理, 如 Johnson et al(1998)的风暴识别算法(storm cell identification and tracking, SCIT), 二维风暴段先由单站单层 PPI 提取, 再根据其质心位置完成与其他各站 PPI 的匹配, 直接构建基于多站的三维风暴单体识别结果; 对于与站点位置强相关的算法, 则可从数据流中向前回溯同一站点的必要 PPI 数据, 加工完成后再做多站关联, 如肖艳姣等(2012)的径向速度退模糊算法, 需要参考低层零速度线位置对

高层的 PPI 进行速度退模糊处理, 即可从历史数据流进行回溯; 上述所有算法的数据回溯时间最多为 2 min, 否则不输出本时次的产品。

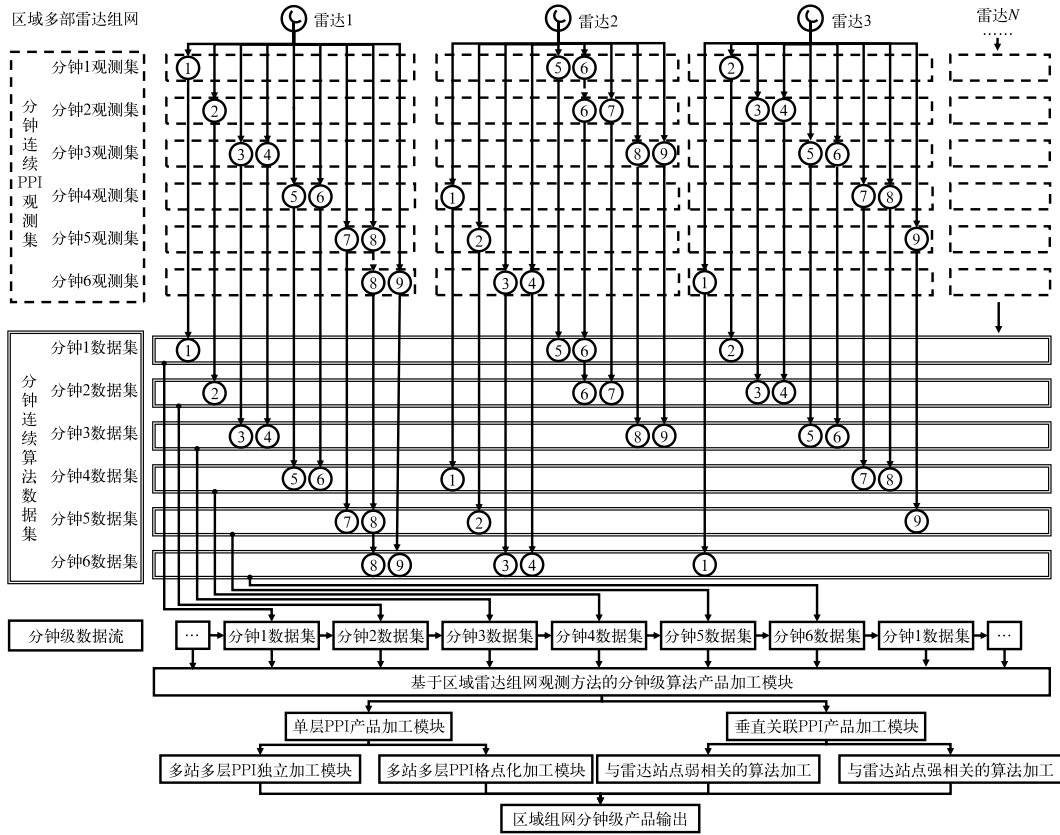
对比单站产品加工方式, 单部雷达大致有 3 种传统的产品加工方式, 其流程见图 3, VCP21 模式下 6 min 完成 9 层 PPI 的扫描, 方式 1 为扫描同时获取所需的 PPI 进行同步加工, 方式 2 为获取完整的各层 PPI 数据进行关联加工, 方式 3 为基于一次体扫的基数据文件, 再做解析加工。ROSE 客户端的产品加工流程以上 3 种均包含, 而 SWAN 客户端则主要采用方式 3, 相关产品的输出间隔在 6 min 或以上。



注: 红色星形为 Z9574 雷达站点, 蓝色圆点和绿色方块为其他雷达站点; 图 a 中立方体为本文研究区域; 图 b 中红色圆圈为 Z9574 雷达站点的 230 km 等效观测圈, 蓝色虚线圆圈和绿色点划线圆圈为其他站点的 230 km 等效观测圈, 网格为本文研究区域; 阴影为地形高度。

图 1 宁波及附近 S 波段双极化雷达站点分布 (a) 三维示意图, (b) 俯视图

Fig. 1 Distribution of S-band dual-polarization radar stations in Ningbo and nearby areas (a) three-dimensional diagram, (b) top view



注：圆圈中数字 1~9 代表 VCP21 模式下从低仰角到高仰角的 9 层 PPI；虚线框为观测数据，  
 双线框为算法所用数据，实线框为加工模块；下同。

图 2 区域雷达组网的强对流天气观测方法流程图

Fig. 2 Flow chart of the observation method of regional radar network for severe convective weather

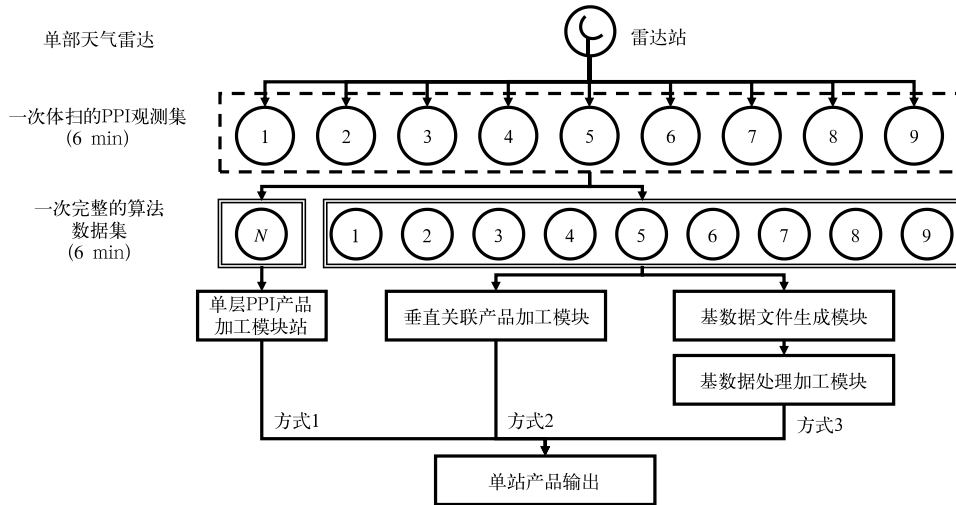


图 3 单站天气雷达观测方法流程图

Fig. 3 Flow chart of the observation method of a single-site radar

较单站加工方法，本方法将产品的更新频率由 6 min 提高至 1 min，可实现对流系统的分钟级跟踪

监测，且进入加工模块的 PPI 数据量也更多，但组网雷达数据至少为 4 个站。

### 1.2.2 单站风暴识别、冰雹预警和下击暴流预警算法

3 种基于单站观测的强对流天气相关算法,适用于宁波 Z9574 单站雷达,算法如下:

(1) 风暴识别算法。采用 Johnson et al(1998) 的 SCIT 算法做风暴识别,以单站的一个体扫数据为计算对象,先从体扫内各层 PPI 上逐径向获取一维风暴段(图 4a),以 30 dBz 为识别边界,再根据质心位置将相邻一维风暴段进行关联,得到每一个 PPI 上的二维风暴分量集合(图 4b),最后根据各层 PPI 上二维风暴分量的质心位置做垂直关联,即可识别到一个完整的三维风暴单体(图 4c),要求每个三维风暴单体至少包含两个垂直关联的二维风暴段,每个二维风暴段的面积也在 10 km<sup>2</sup> 以上;

(2) 冰雹预警算法。采用曹俊武和刘黎平(2006)的水平反射率因子法,从单站的一个体扫数据中提取关键信息,认为扫描范围内,0℃层以上出现 45 dBz 以上回波区,即存在冰雹,用式(1)表征这种属性,当  $Y_z > 60$  时,就认为对流系统中存在冰雹区;0℃层高度由每日 08:00 或 20:00(北京时,下同)的杭州探空数据提供。预警信号需由同一对流系统产生,且预警时效不超过 3 h;

$$Y_z = Z_{H3} + 10\log H_{max} \quad (1)$$

式中: $Z_{H3}$ 为在 0℃层高度且在 3 km 高度以上的最大回波强度, $H_{max}$ 为最大回波强度所在高度。

(3) 下击暴流预警算法。采用肖艳姣等(2021)的下击暴流预警算法,先基于单站的一个体扫数据完成风暴单体的捕获,再分别计算本体扫内各单体的属性参数(表 1),通过对应的隶属函数  $F(x)$

[式(2)],把表 1 中的参数作为输入变量,使用模糊逻辑法建立下击暴流临近预报概率方程  $P$ [式(3)],以指示临近时刻下击暴流发生的可能性,认定  $P$  的值超过 50%即为出现了下击暴流预警信号。

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x \leq T_L \\ \frac{x - T_L}{T_U - T_L} & T_L < x < T_U \\ 1 & x \geq T_U \end{cases} \quad (2)$$

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n F(x_i)W(x_i)}{\sum_{i=1}^n W(x_i)} \quad (3)$$

式中: $x$ 表示参量, $T_U$ 和  $T_L$ 分别为高、低临界值, $W(x)$ 为权重。

### 1.2.3 对单站风暴识别、冰雹预警和下击暴流预警算法的调整

对 3 种强对流天气单站算法进行调整,以适应方法中分钟级组网观测的运行体制,分别如下:

(1) 风暴识别算法。SCIT 算法的计算对象变为分钟数据集内多站多层的 PPI 集合,先分别对单个 PPI 处理,得到本分钟内所有的二维风暴段,再根据二维风暴段质心位置做关联处理,即可筛选出多站重叠观测区内的三维风暴段,除数据源外与原算法流程相同(图 4),识别产品的输出频次可提升至 1 min;

(2) 冰雹预警算法。先通过 SCIT 算法获取分钟数据集内的三维风暴单体,再基于单体对应的 PPI 数据,使用曹俊武和刘黎平(2006)的水平反射率因子法提取基于单体的冰雹预警结果,标准与原算法相同,除产品输出频次提升至 1 min 外,SCIT

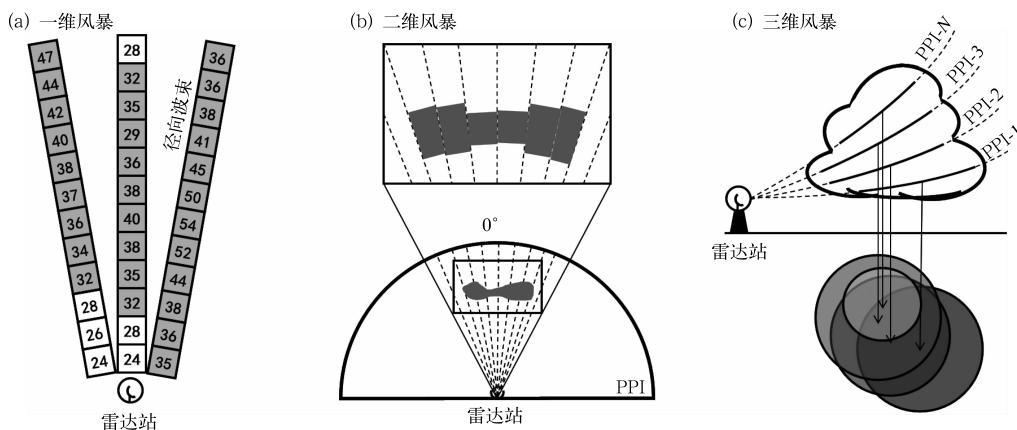


图 4 风暴识别算法(SCIT)流程图  
Fig. 4 Flow chart of the SCIT algorithm

算法也可过滤一部分杂波信号,提高输出结果的可靠性;

(3)下击暴流预警算法。先通过 SCIT 算法获

取分钟数据集内的三维风暴单体,基于单体对应的 PPI 数据计算其属性参数(表 1),再通过式(3)计算下击暴流概率,相关标准与原算法相同。

表 1 用于下击暴流临近预报的风暴单体雷达参量的高、低临界值及权重  
Table 1 The high and low critical values and weights of the membership function of the storm cell radar signature for downburst nowcasting

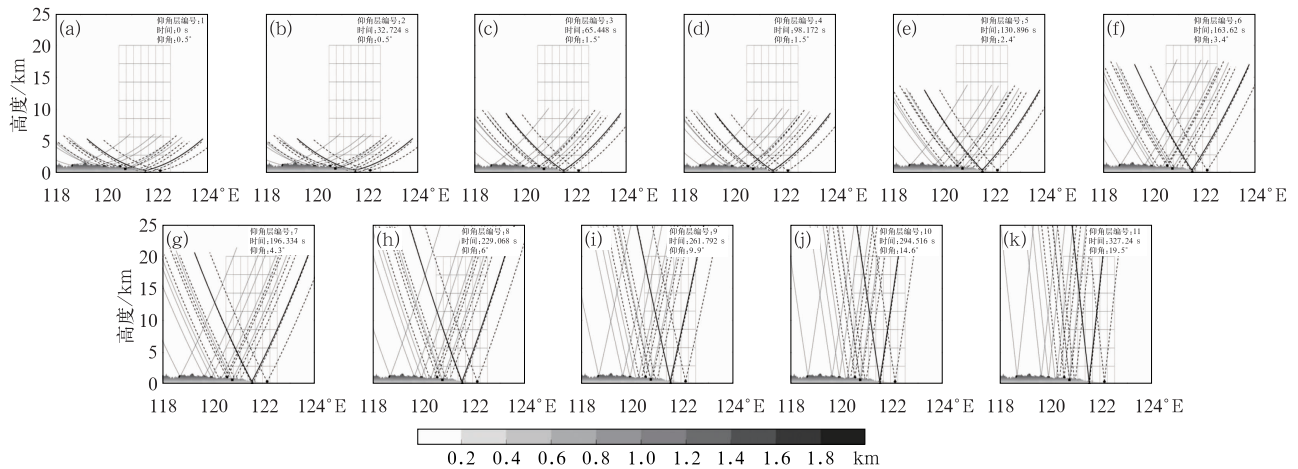
编号	参量	参量说明	低临界值	高临界值	权重
1	ZMAXTOP	最大反射率因子与顶高的乘积	400 dBz · km	750 dBz · km	0.55
2	ZTH	最小相当位温高度处的最大反射率因子	49 dBz	59 dBz	0.56
3	VIL	垂直累积液态含水量	20 kg · m <sup>-2</sup>	50 kg · m <sup>-2</sup>	0.50
4	SHI	强冰雹指数	10 J · m <sup>-1</sup> · s <sup>-1</sup>	100 J · m <sup>-1</sup> · s <sup>-1</sup>	0.36
5	RCL	中层径向辐合(MARC)特征的最强径向辐合分量强度等级	10 × 10 <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	40 × 10 <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	0.58
6	IMARC	MARC 特征的垂直积分径向辐合值	300 × 10 <sup>-4</sup> km · s <sup>-1</sup>	900 × 10 <sup>-4</sup> km · s <sup>-1</sup>	0.41
7	CMTH	MARC 特征中最小相当位温高度的最大径向辐合值	40 × 10 <sup>-4</sup> s <sup>-1</sup>	90 × 10 <sup>-4</sup> s <sup>-1</sup>	0.53
8	DV16	MARC 特征中 1~6 km 高度径向上的最大、最小速度差	15 m · s <sup>-1</sup>	25 m · s <sup>-1</sup>	0.59
9	DV06	中气旋 0~6 km 高度最大、最小速度差	15 m · s <sup>-1</sup>	25 m · s <sup>-1</sup>	0.62

### 1.3 方法可行性

设计理想扫描模型对本方法的可行性进行论证。以宁波市所在区域为主体向外扩展,设定 28.8°~30.8°N、120.5°~122.5°E 及 20 km 以下空域为模型观测区(图 1a 和图 5 网格区域),模型假设在标准大气折射条件下,各站均采用 VCP21 体扫模式从正北方向同时起扫,逐 PPI 扫描结果见图 5。取上海站、嘉兴站、杭州站、绍兴站、舟山站、台州站

(图 1 蓝色圆点),与宁波 Z9574 站共同构成本方法的主成员组 Main\_Group,湖州站、金华站、温州站、衢州站、丽水站作为备用成员(图 1 绿色方块),与其他 7 个站共同构成副成员组 Sub\_Group。

由图 5 可见,单站 1 个 PPI 的扫描周期约 32 s,1 个体扫周期经过网格区域的 PPI 至少为 11 个,其中最低 2 个仰角采用双脉冲重复频率(PRF)扫描方式分别获取多普勒参数和非多普勒参数(图 5a,5b 和 5c,5d),其余每个仰角各有 1 个 PPI。结合图 1b



注:实线为宁波 Z9574 单站扫描波束;虚线为 Main\_Group 扫描波束;点线为 Sub\_Group 扫描波束;网格对应图 1 中的研究区域,阴影为地形高度。

图 5 逐 PPI 理想扫描模型  
Fig. 5 Ideal scanning model of each PPI

可见,Main\_Group 在 1 个体扫周期内扫描波束均能基本覆盖网格范围,即基于 Main\_Group 可在宁波本地释用本方法。

基于理想扫描模型,对最大观测数据量进行定量分析。定义观测区的网格高度分辨率为 1 km、水平分辨率为 0.01°,设置 Z9574、Main\_Group 和 Sub\_Group 三个对照组,计算 VCP21 模式下每个高度平面上的分钟级观测数据占用率(同一高度平面上雷达观测到的格点数与总格点数的比值,简称占用率),输出 1~6 min 的逐分钟观测结果和分钟累计观测结果(图 6)。

日常业务中雷达产品的构造多基于 Z9574 分钟累计对照组的第 6 min 数据,由于 Z9574 本身建站高度约有 0.5 km,所以对 1 km 以下空域的占用率仅为 3%,1~10 km 高度的占用率均在 10%以上,占用率在 20%以上的是 2~4 km 高度;Main\_Group 逐分钟对照组 1 km 以下的占用率最大为 14%,20 km 以下最大值 48%出现在第 2 min 的 2 km 高度层,非零占用率平均约为 Z9574 逐分钟对照组的 2.66 倍,即理想情况下,Main\_Group 的观测效果优于 Z9574;Sub\_Group 逐分钟与 Main\_Group 逐分钟、Sub\_Group 分钟累计与 Main\_Group 分钟累计的 20 km 以下占用率之比分别约为 1.17 和 1.32,即 Sub\_Group 成员的观测也可填补一部分 Main\_Group 的盲区。

Main\_Group 逐分钟对照组是本方法在本文的释用组,由于多雷达扫描体制在业务中并非由正北

方向同步运行且在线雷达数量也会有动态变化,即实际运行情况与理想模型有一定差异,对此后文定义 True\_Group 作为实际对照, True\_Group 最大成员范围与 Main\_Group 一致。

### 1.4 方法评估

#### 1.4.1 评估个例来源

本文选取 43 个历史强对流天气个例进行应用评估,数据来源于宁波市气象局历年强对流灾害记录,记录中包含强对流天气致灾的时间、大致区域、人员伤亡和财产损失等信息,记录汇总渠道包括地方保险公司上报的气象出险数据、宁波空中交通管理局等单位提供的共享数据、乡镇街道气象网格员上报的格点气象灾情数据和媒体渠道获取的现场灾情数据等,进入灾害记录的信息会经过预报员的二次审核,如冰雹记录中应有冰雹落地证明、下击暴流记录中应有附近自动站瞬时风力 $\geq 8$ 级记录或现场风灾受灾情况证明。

#### 1.4.2 评估标准

认定 SCIT 算法识别到的对流单体(以 25 dBz 为影响边界),出现在受灾点半径 20 km 范围内,即为本次灾害的致灾单体。致灾单体应满足在途经受灾点前 2 h 内生命史连续,若在此期间出现了相关灾害的识别信号或预警信号,即认定为一次正确识别或正确预警。

#### 1.4.3 评估参数

所用到的评估参数定义如下:(1)算法时间差:

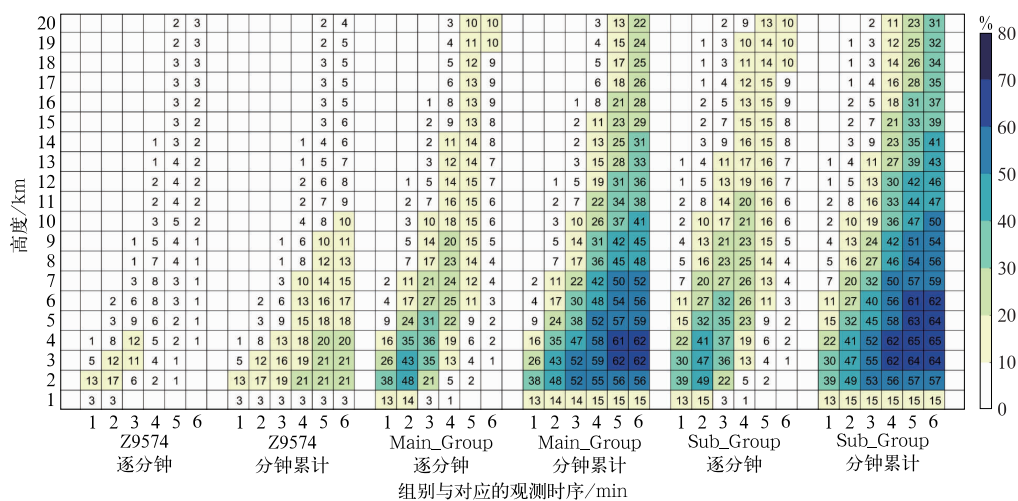


图 6 理想模型观测数据占用率分布

Fig. 6 Distribution of occupancy rate of ideal model observation data

True\_Group 算法产品提前 Z9574 的时间量,单位为 min;(2)识别成功率:算法产品能正确识别地面实际观测结果的次数与总个例数的比值;(3)识别提前量和预警提前量:算法产品之间或算法产品较地面实际观测结果的时间偏差,单位为 min;(4)命中率:算法产品能正确预警的次数与总个例数的比值。

## 2 天气个例应用结果评估

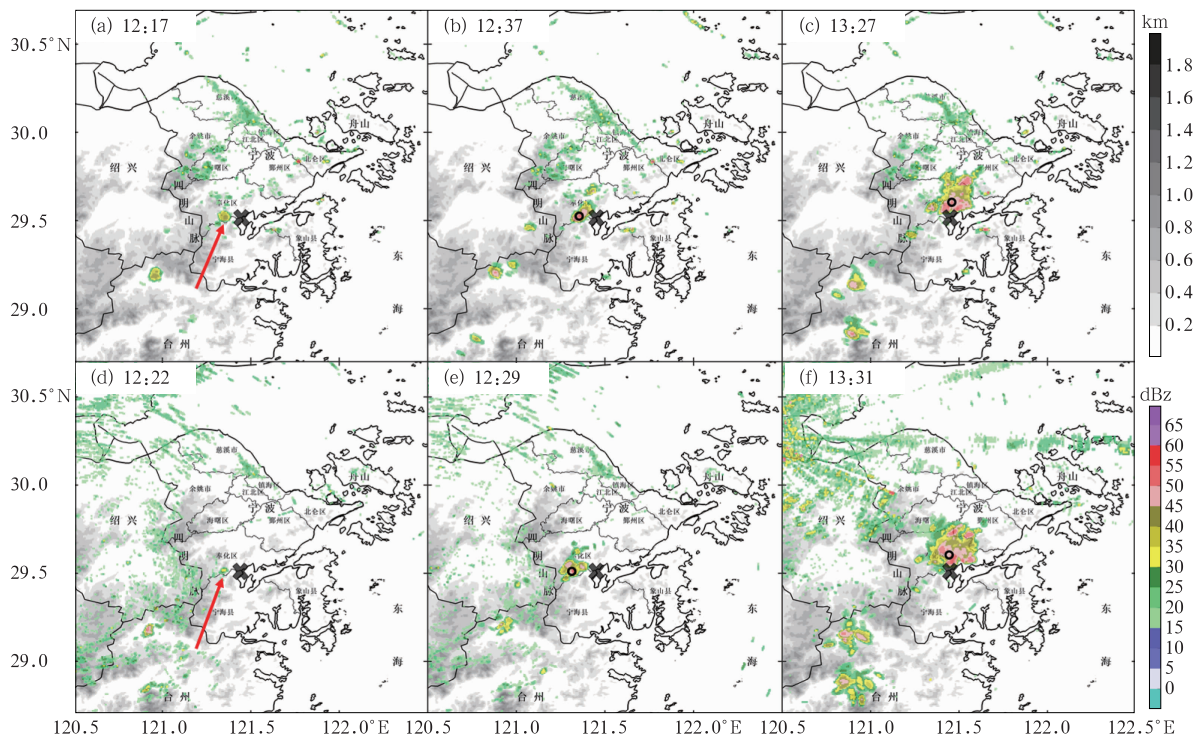
宁波地处我国中低纬度亚热带季风区,北侧、东侧和南侧为东海环抱,以西主要为南北走向的山脉,汛期易受海陆锋、重力内波和下垫面条件等因素影响,局地对流过程频发,其中引发冰雹的对流过程多始于初春,年均频次约为 10 d(仇娟娟,2012),而引发下击暴流(包含微下击暴流和雷暴大风等)的对流过程多活跃在夏季,且在宁波地区更为常见(马淑萍等,2019;樊李苗和俞小鼎,2020)。以下挑选了 3 次天气过程对本方法的业务能力进行检验。

### 2.1 风暴识别算法个例评估——2024 年 7 月 3 日极端短时强降水过程

2024 年 7 月 3 日午后,宁波中南部出现局地强对流天气,对流系统在奉化与宁海交界处初生并向东传播发展(图 7),13:00 左右途经奉化区雷虎站,随后测得该站小时降水量为 56.4 mm 的极端短时强降水。

Z9574 监测结果见图 7a~7c,12:17 首次观测到孤立回波信号(图 7a 红色箭头);12:37 首次识别到风暴单体,此后系统继续东移,途经雷虎站;13:27 最后一次识别到单体信号,同时系统发展结束并开始消亡。

True\_Group 监测结果见图 7d~7f,12:22 观测到回波信号(图 7d 红色箭头),12:29 首次识别到风暴单体,较 Z9574 早 8 min,随后系统东移途经雷虎站,最后一次识别到单体信号在 13:31,此后系统逐步消亡。



注:灰度填色为地形高度,“×”为受灾点,“○”为算法识别的单体质心位置,下同;

图 a 和图 d 中红色箭头指示首次观测到的孤立回波信号。

图 7 2024 年 7 月 3 日宁波地区组合反射率因子(填色)

(a~c)Z9574 识别结果,(d~f)True\_Group 识别结果

Fig. 7 Composite reflectivity factor (colored) of radar in Ningbo on 3 July 2024

(a—c) identification result of Z9574, (d—f) identification result of True\_Group

本个例中 True\_Group 的识别结果早于 Z9574,与 SCIT 算法特性及方法组网特性相关。True\_Group 在 12:29 对台州站和宁波站两个站的 PPI 进行了垂直关联判定,相关结果满足 SCIT 的判定标准,而受限于低层观测盲区和对流初期伸展高度有限等因素,Z9574 在 12:37 以前只有 0.5°仰角对应的 PPI 识别到回波信号,无法进入 SCIT 的垂直关联判定流程,因此未得到识别结果。

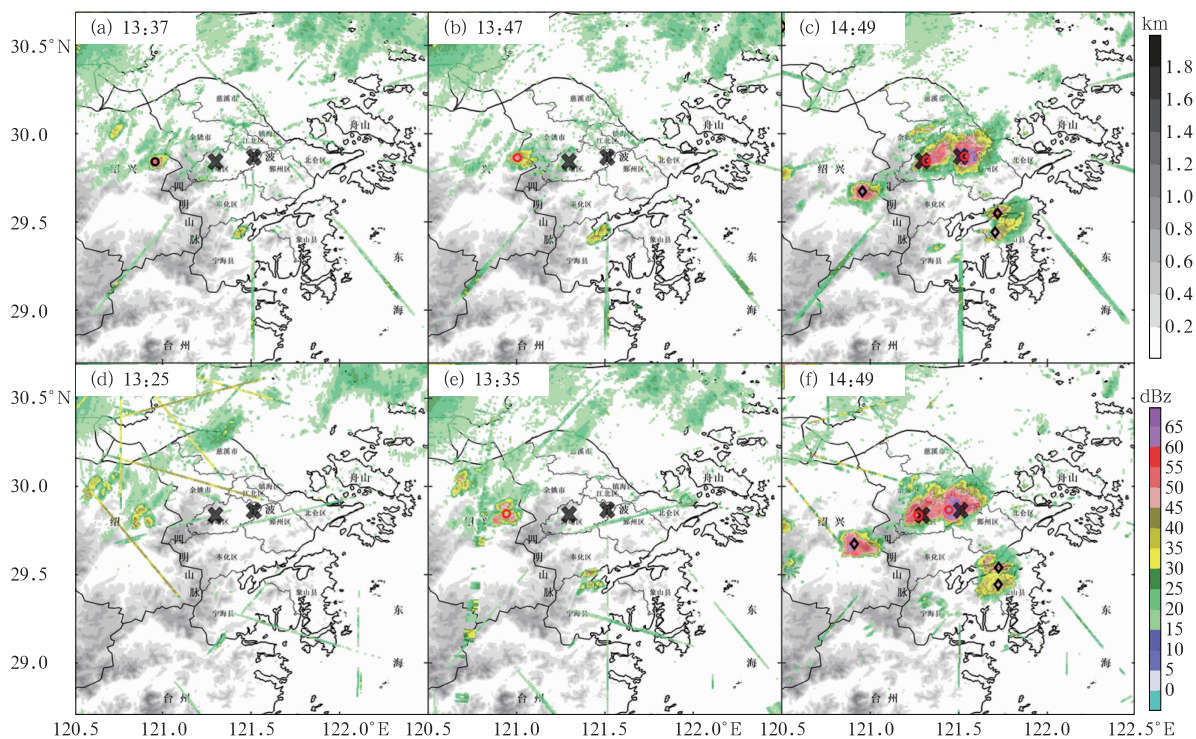
### 2.2 冰雹预警算法个例评估——2022 年 6 月 24 日冰雹过程

2022 年 6 月 24 日午后,宁波西部四明山附近不断爆发多单体风暴,风暴系统向东传播发展,14:00—15:00 途经宁波中部城区时出现强降雨过程(图 8)。

Z9574 监测结果见图 9a~9c,13:37 首次识别



图 8 2022 年 6 月 24 日约 14:30—15:00 宁波城区降雹情况  
Fig. 8 Hail condition in Ningbo urban area about 14:30—15:00 BT 24 June 2022



注:“○”为出现预警信号的致灾单体,“◇”为识别到的其他对流单体位置,下同。

图 9 2022 年 6 月 24 日宁波地区组合反射率因子(填色)  
(a~c)Z9574 预警结果,(d~f)True\_Group 预警结果  
Fig. 9 Composite reflectivity factor (colored) of radar in Ningbo on 24 June 2022  
(a-c) warning result of Z9574, (d-f) warning result of True\_Group

到致灾单体,13:47 首次识别到单体的冰雹预警信号(图 9b 红色圆圈),此时系统水平尺度在 20 km 左右,为  $\gamma$  中尺度对流系统,随后系统东移发展增强,分裂出两个强回波单体,分裂后的单体逐步发展出 60 dBz 以上强回波核;14:49 系统途经两个受灾点,并伴有降雹过程,此时单体继续维持冰雹预警信号。

True\_Group 监测结果见图 9d~9f,13:25 首次观测到回波信号,13:35 首次识别到致灾单体,并同时得到冰雹预警信号,较 Z9574 早 12 min,较实况早 74 min,此后系统继续东移发展,信号继续维持,14:49 左右途经受灾点。

本个例中使用的冰雹预警算法仅需单层 PPI 进入运算,True\_Group 通过多站 PPI 完成 SCIT 判定后,13:35 由杭州站  $1.5^\circ$  仰角对应的 PPI 提供了冰雹预警信息;受限于单体与站点的距离较远和单站雷达的体扫周期较长等因素,Z9574 在 13:37 才完成单体的捕获,此后的第 3 个体扫周期才在  $1.5^\circ$  仰角对应的 PPI 获取到冰雹预警信号。

### 2.3 下击暴流预警算法个例评估——2022 年 7 月 17 日下击暴流过程

2022 年 7 月 17 日中午,宁波市奉化区翡翠湾

码头出现下击暴流天气过程,致灾系统在四明山西侧初生,随后东移发展,12:50 左右途经翡翠湾,导致湾内部分浮桥和平台损坏,系泊在平台上的“浙奉渔体 60051”船缆绳断裂,漂离后被风刮翻,造成多人落水。

Z9574 监测结果见图 10a~10c,11:02 首次识别到单体信号,随后单体东移发展,12:09 首次识别到下击暴流预警信号,此时单体位于受灾点东侧约 20 km 位置,信号陆续维持至 12:52 单体经过受灾点后。

True\_Group 监测结果见图 10d~10f,11:00 首次识别到单体信号,单体向东传播,11:53 首次识别到下击暴流预警信号,较 Z9574 早 16 min,较实况提前 57 min,此后信号也陆续维持至单体经过受灾点。

本个例中 True\_Group 在 11:53 首次得到下击暴流预警信号,RCL 为  $84.5 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ,DV16 和 DV06 均为  $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,即多站 PPI 的计算结果显示当前单体发展具有较好动力条件,可能形成上冲云顶等致灾因素;Z9574 在相邻时次的计算结果显示,RCL 为  $47.4 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ,DV16 和 DV06 均为  $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,即判定动力条件有限,因此未进行预警。

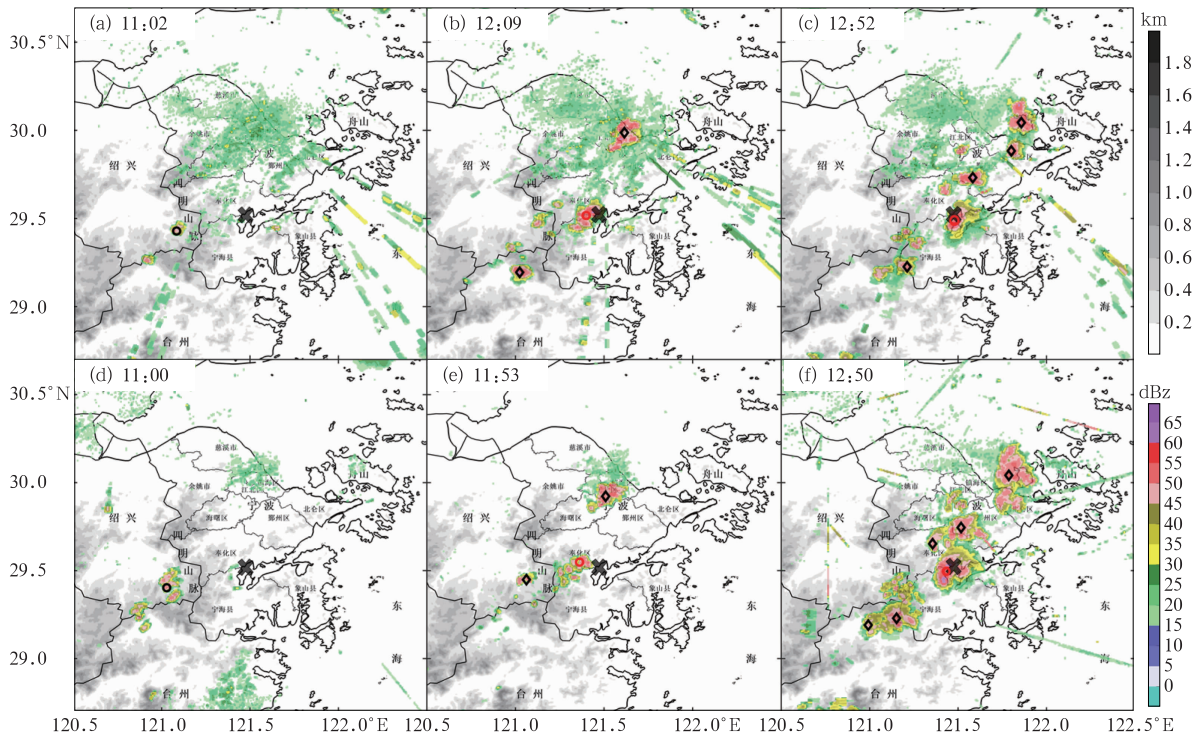


图 10 2022 年 7 月 17 日宁波地区组合反射率因子(填色)

(a-c)Z9574 预警结果,(d-f)True\_Group 预警结果

Fig. 10 Composite reflectivity factor (colored) of radar in Ningbo on 17 July 2022

(a-c) warning result of Z9574, (d-f) warning result of True\_Group

### 3 多过程应用结果评估

利用43个历史强对流天气过程对方法在宁波的应用情况做进一步评估,包含风暴识别过程14个、冰雹预警过程14个和下击暴流预警过程15个,评估结果如下。

#### 3.1 风暴识别的多过程评估

选取14个对流初生过程检验风暴识别算法,评估结果见表2,这14个过程中,Z9574和True\_Group均能识别到初生的对流单体,即识别成功率均为100%。其中,编号1、9和11的过程,True\_Group的识别时间较Z9574晚1min,编号2、5和12的过程,True\_Group的识别时间与Z9574相同,其余个例,True\_Group的识别时间均超前于Z9574;True\_Group在选中的14个过程中,平均识别时间较Z9574提前约4min。

14个过程中,发展为 $\beta$ 中尺度对流系统的有7次,其中True\_Group识别时间滞后于Z9574的有2次,较Z9574的平均识别提前量约为2.6min;发展为 $\gamma$ 中尺度对流系统的有7次,其中True\_Group识别时间滞后于Z9574的有1次,较Z9574的平均识别提前量约为5.4min。

综上,True\_Group能够正确识别宁波范围内初生的对流系统,识别时间较Z9574提前约4min,其中对 $\gamma$ 中尺度对流系统的识别能力更优,识别时间较Z9574提前约5.4min。

#### 3.2 冰雹预警的多过程评估

选取14个冰雹过程进行评估(表3),对于这14个过程,Z9574和True\_Group均能提前获取到对流单体的冰雹信息,命中率均为100%,较实况的提前量分别约为67min和79min。其中,编号9、10的过程,True\_Group的识别时间较Z9574晚1min,其余均等于或超前Z9574;True\_Group在选中的14个过程中,平均预警时间较Z9574提前约12.2min。

14个过程中,致灾系统为 $\alpha$ 中尺度对流系统的有3次,True\_Group预警时间均等于或超前Z9574,提前量约为9.3min,较实况提前约92.6min;致灾系统为 $\beta$ 中尺度对流系统的有9次,True\_Group预警时间滞后于Z9574的为1次,较Z9574的预警提前

量约为15.8min,较实况提前约74.7min;致灾系统为 $\gamma$ 中尺度对流系统的有2次,True\_Group预警时间滞后于Z9574的为1次,较Z9574的预警时间提前量约为0.5min,较实况提前约78.5min。

综上,True\_Group能够对宁波范围内的冰雹对流系统进行正确的预警,预警时间较实况提前约79.0min,预警提前量较Z9574约为12.2min,且对 $\alpha$ 中尺度对流系统的预警能力更优。

#### 3.3 下击暴流预警的多过程评估

选取15个下击暴流(包含雷暴大风)过程进行评估(表4),这15个过程中,Z9574未能对编号15的过程进行响应,此外均命中,即Z9574的命中率为93.3%,命中个例较实况的预警提前量为31.5min,而True\_Group的命中率为100%,较实况的预警提前量为42.6min。在Z9574命中的14个过程中,除编号1、3的过程中True\_Group的预警时间较Z9574分别晚3min和8min外,其余均提前于Z9574;True\_Group在Z9574命中的14个过程中,预警时间较Z9574平均提前约13.3min。

15个过程中,致灾系统为 $\beta$ 中尺度对流系统的有10次,其中True\_Group预警时间滞后于Z9574的有2次,较Z9574的预警提前量约为14min,较实况约为46min;致灾系统为 $\gamma$ 中尺度对流系统的有5次,True\_Group预警时间均超前于Z9574,较Z9574的预警提前量约为11.8min,较实况约为35.8min。

综上,True\_Group对宁波范围内的下击暴流有较好的预警能力,预警时间较实况提前约42.6min,较Z9574提前约13.3min,且对 $\gamma$ 中尺度对流系统的预警有较高的命中率,对 $\beta$ 中尺度对流系统的预警有较多的提前量。

## 4 可推广性讨论

得益于周边丰富的观测资源和数据流传输通信技术,宁波不仅可在本地零延迟实时获取周边各站的PPI观测结果,并能提供充足的PPI数据进入产品加工模块,确保了本方法在宁波本地的应用效果。

本方法的适用标准可总结如下:以目标站点为中心(如宁波以Z9574站点位置为中心),230km最佳观测范围内至少存在其他3部天气雷达,能够构建起至少4个站点的区域组网。对现阶段我国263部

表 2 风暴识别算法 (SCIT) 识别结果

Table 2 Identification results of the SCIT algorithm

序号	时间(BT)	过程简述	风暴单 体生命 史/h	致灾 系统 尺度	Z9574 识别时 间(BT)	True_Group 识别时间 (BT)	算法时 间差/ min
1	2017年7月 1日 12:45	12:45 左右宁波中北部余姚城区局地爆发孤立单体风暴,14:00 系统组织发展呈带状结构并在偏西系统风引导下东移离境,途经余姚东部上林小学站附近时出现小时降水量为 57.2 mm 的极端短时强降水	3.0	$\beta$	12:45	12:46	-1
2	2018年9月 1日 15:00	15:00 左右宁波多地零星出现弱回波,15:30 宁波中部奉化城区及奉化翡翠湾一带出现 2 个 $\gamma$ 中尺度多单体风暴,并开始组织发展,16:30 左右 2 个多单体风暴组织合并形成带状结构的 $\beta$ 中尺度风暴单体,引发了翡翠湾西侧的强天气过程	3.0	$\beta$	15:36	15:36	0
3	2019年8月 23日 11:40	11:30 左右宁波北部杭州湾南岸出现局地发展的孤立单体风暴,随后向东南方向移动发展进入宁波北部的余姚境内,12:30 发展成为 $\gamma$ 中尺度对流系统并开始与下游零散的风暴单体组织发展,期间宁波慈溪西部坎墩站观测到极端短时强降水,13:00 已形成清晰的弓状回波并继续向下游传播	3.0	$\gamma$	11:54	11:48	6
4	2020年7月 31日 00:30	00:30 左右宁波中南部的象山以西开始有弱回波发展,01:12 左右形成弱南北走向带状回波,01:48 左右带状回波向北侧翡翠湾沿岸发展,回波主体扭转为近圆形的 $\gamma$ 中尺度单体风暴,该时段内,象山西部许家山站监测到小时降水量为 53.8 mm	2.0	$\gamma$	30日 23:00	30日 22:54	6
5	2021年8月 9日 17:00	17:12 左右宁波西部山区有孤立对流单体触发,并在西北系统风引导下向东南方向组织发展,18:00 左右单体形成近圆形结构并出现 50 dBz 以上的回波核心,此后系统继续向下游传播并由近圆形结构扭转为弓形结构,19:00 左右弓形结构开始溃散,强回波核消失,期间宁波西南部山门、界岭等站监测到极端短时强降水	2.5	$\gamma$	17:12	17:12	0
6	2021年8月 22日 12:30	12:30 宁波中西部山区周边开始出现零星单体回波,13:30 左右零星单体局地发展成多个 $\gamma$ 中尺度对流系统并出现 50 dBz 以上的回波核心,14:00 以后多单体开始组织合并并向东移动进入宁波中部主城区,在此期间多核结构消失,形成带状回波并出现了面积较大的单回波核区域,同时青龙山站监测到极端短时强降水,15:00 以后带状结构逐步溃散并东移入海消亡	3.0	$\beta$	13:06	13:00	6
7	2021年9月 6日 16:00	12:00 宁波中部山区开始有较弱的多单体风暴向北移动传播,整体为零散的弱回波结构,18:00 左右系统稳定在宁波北部余姚与慈溪的交界处,回波结构更加紧凑,形成近圆形的 $\gamma$ 中尺度对流单体,18:42 系统仍维持局地发展特征,并开始出现 55 dBz 以上的回波核心,在此期间向湖水库站监测到小时降水量为 66.2 mm,19:00 以后组织结构开始溃散,随后与北来带状对流风暴合并	4.0	$\gamma$	15:36	15:30	6
8	2021年10月 15日 14:30	14:12 左右宁波北部的杭州湾南岸开始出现零星孤立对流单体,15:00 左右的回波核,在此期间的回波核,之后带状回波原址溃散,并向南北扩张,并在宁波北部余姚城区附近形成 2 个 50 dBz 以上的回波核,在此期间江中站监测到极端短时强降水,之后带状回波原址溃散	2.0	$\beta$	14:24	14:18	6
9	2022年7月 7日 14:30	14:30 左右宁波东部镇海区海岸线附近开始出现孤立对流单体活动,单体原址组织发展,15:08 单体形成近圆形结构并出现 50 dBz 以上的回波核,最大水平尺度在 10 km 左右,15:45 单体进入成熟阶段,位置稳定少动,水平尺度无明显变化,在此期间小港实验学校校站监测到极端短时强降水,16:00 系统开始溃散,并与南来风暴单体合并南移消亡	2.0	$\gamma$	14:37	14:38	-1
10	2022年8月 24日 12:00	12:00 左右宁波中西部及中南部的鄞州区境内开始出现局地对流活动,13:30 左右鄞州境内出现较为完整的 $\gamma$ 中尺度回波单体并缓慢北抬,向宁波中东部镇海区境内移动溃散,14:40 对流系统分裂呈多个小单体回波,主体结构瓦解,但很快重新局地组织化新生发展,15:00 回波主体进入镇海区域内,并重新形成近圆形结构和单个回波核,随后系统以 $\gamma$ 中尺度稳定维持在镇海区东侧海岸线附近,造成了鲍家洋站附近的极端短时强降水,16:00 回波原地消亡	4.5	$\gamma$	12:24	12:09	15
11	2023年6月 20日 11:00	受偏西系统风影响,12:00 左右宁波以西及宁波中西部山区不断有单体风暴新生发展,并快速组织化东移进入宁波境内,12:30 左右宁波中部出现有多个 $\gamma$ 中尺度单体风暴组成的东西向风暴簇,并有组织合并趋势,14:00 前后排列的风暴簇组织合并成较大的风暴单体,并继续快速东移出境,中河公园站观测到小时降水量为 52.5 mm 的极端短时强降水	4.5	$\beta$	11:12	11:13	-1
12	2023年8月 18日 13:00	受偏南暖湿气流和近地面海风锋共同影响,13:00 宁波北部杭州湾南岸开始出现多个孤立单体风暴触发发展,14:00 孤立单体组织发展形成近圆形结构,中心回波强度在 50 dBz 左右,同时给宁波北部余姚、慈溪等地带来极端短时强降水,16:00 左右系统在海岸线附近原址溃散消亡	3.0	$\beta$	13:05	13:05	0
13	2023年9月 20日 18:20	受西北冷空气过境影响,20日傍晚开始宁波上游多地激发出局地对流单体,18:30 左右宁波中南部翡翠湾西岸爆发局地多单体风暴,并迅速组织化发展,19:40 左右多单体合并基本完成,系统快速向下游传播,在此过程中宁波南部杨梅岭水库站监测到小时降水量为 52.9 mm 的极端短时强降水	3.5	$\gamma$	18:32	18:26	6
14	2024年7月 3日 14:00	受西南暖湿气流影响,12:15 左右宁波中南部翡翠湾西岸开始出现局地风暴触发发展,并在西南引导下快速向东北方向组织传播,14:37 左右翡翠湾西岸形成东北—西南向的带状回波,并有 2 个 50 dBz 以上的回波核,随后快速向东北方向传播,过程中雷虎站监测到极端短时强降水,15:20 左右系统溃散与周边其他风暴单体合并,此后东移消亡	1.5	$\beta$	12:37	12:29	8

表 3 冰雹算法预警结果  
Table 3 Warning results of the hail algorithm

序号	时间(BT)	过程简述	致灾系 统生命 史/h	冰雹 尺寸/ mm	致灾 系统 尺度	Z9574 预警时 间(BT)	True_Group 预警时 间(BT)	算法时 间差/ min
1	2016年6月 28日 18:36	受北来飊线系统东移过境影响,宁波多地出现雷暴大风天气,18:00左右飊线系统后向传播在其南侧山区一带激发出新的单体风暴,该风暴东移发展,途经宁波中西部的奉化城区时出现弱降雪	1.5	2	$\beta$	17:12	16:41	31
2	2017年8月 20日 13:18	受北来飊线系统东移过境影响,宁波中北部出现大范围强对流天气,12:40左右飊线前流出在杭州湾北岸激发出多个孤立的单体风暴,13:18左右在宁波北部慈溪引发弱降雪天气,并有居民反映看到了龙卷	1.5	2	$\beta$	13:13	12:47	26
3	2019年3月 21日 10:51	受大范围飊线系统东移过境影响,宁波中南部出现超强单体风暴过程,08:30左右飊线系统东移进入宁波境内,10:51左右发展出70 dBz以上的强核心,同时宁波南部的象山出现直径5 mm以上的降雪过程,境内的茅洋乡500亩*茶叶、西周镇蒙顶山茶场200亩茶叶茶芽及部分露天蔬菜受损	3.0	5	$\beta$	08:42	8:37	5
4	2019年4月 9日 16:49	受大范围飊线系统东移过境影响,宁波全境出现了大范围对流天气,16:32左右飊线系统前缘在宁波中部翡翠湾附近激发出单体风暴,16:49单体途经宁波中南部的象山、宁海等地时出现局地弱降雪过程,尺寸较小没有造成明显灾情	1.5	5	$\beta$	16:38	16:32	6
5	2020年3月 21日 17:36	本次过程为大范围对流云团东移过境时,云团移动前缘爆发的超强单体风暴所致,17:06左右系统途经杭州湾喇叭口海湾区,回波核强度爆发增长至70 dBz以上,此后系统呈带状继续组织增强,17:36左右在宁波北部余姚的雁湖村出现直径约10 mm冰雹,丈亭镇南部出现直径约5 mm冰雹,三七市镇东方华庭、统一年糕场、幸福村附近等均出现直径约5 mm冰雹,牟山镇青港村出现直径约10 mm冰雹,并有当地居民反映出现龙卷	4.5	10	$\alpha$	16:12	16:12	0
6	2021年5月 1日 00:42	受西北冷锋南下过境影响,4月30日夜间至5月1日凌晨,宁波中东部及沿海海域遭受大范围强对流天气,4月30日23:00宁波北仑嘉兴市已有东西向飊线系统南下而来,水平长度均在250 km,最大回波强度在55 dBz,5月1日00:30系统途经宁波北部沿海海岸线,回波区扭转成近圆形结构,00:42回波区内出现70 dBz以上强回波核,此过程中宁波北部慈溪等地出现降雪过程,并伴有较强的地面阵风,此后系统沿宁波东部海岸线继续南下发展	3.0	2	$\alpha$	23:18	22:51	27
7	2022年3月 14日 17:30	16:15宁波南部沿海海域开始出现局地对流活动,17:00风暴单体基本形成并向北移动,进入宁波中南部宁海境内,17:20左右系统在翡翠湾附近激发出单体并与本体组织合并,17:30系统组织发展至最强,主体为东北-西南向的带状回波,水平尺度在30 km左右,并出现55 dBz以上回波核,随后快速瓦解,此过程中宁波中南部宁海桥头出现小冰雹,此后原地消亡	2.0	2	$\beta$	16:24	15:30	54
8	2022年6月 24日 14:49	14:00左右宁波西部山区爆发多单体风暴,受偏西风引导逐渐东移发展增强,14:49途经宁波中部海曙、鄞州、江北城区、镇海东部等地时,形成了2个完整的强回波单体,中心强度均在55 dBz左右,并出现了强降雪过程	2.5	30	$\beta$	13:47	13:35	12
9	2022年6月 29日 14:00	13:00左右宁波北侧的杭州湾北岸,逐渐有孤立单体风暴沿海岸线爆发,14:00左右孤立单体间云桥相接,组织发展成带状结构的多单体风暴,同时嘉兴、海宁局地出现弱冰雹,最大直径约15 mm	5.0	10	$\beta$	13:40	13:41	-1
10	2022年7月 12日 14:52	13:30左右宁波中部的奉化山区出现孤立单体风暴,系统在原地快速组织发展,并在奉化城区、中部鄞州本站等地出现弱降雪过程	4.0	2	$\gamma$	13:42	13:43	-1
11	2022年7月 27日 13:36	12:20宁波中西部山区开始有孤立单体新生发展,13:00形成具有3个核心的局地多单体风暴,系统稳定少动,13:36多单体风暴分裂成一大一小2个风暴单体,随后在宁波中北部慈溪、余姚、海曙等区(县)均观测到降雪	2.0	10	$\beta$	12:14	12:13	1
12	2022年8月 6日 12:34	11:00左右宁波东部沿海观测到沿海岸线分布的西北-东南向的细长带状阵锋弱回波,回波向西西南方快速移动进入内陆,11:40左右带状回波上开始激发出单体风暴,形成线状排列的风暴簇,12:34左右风暴簇组织发展成2个较强的风暴单体,同时在宁波中部及附近山区也局地爆发出大量稳定少动的强单体风暴,多个水平尺度在40 km左右的强风暴单体基本覆盖了宁波中部和中北部全境,随后慈溪、余姚、鄞州、海曙等区(县)均观测到降雪过程,16:20多单体完成组织合并后向外扩展消亡,离开宁波境内	4.0	10	$\beta$	11:22	11:14	8
13	2022年11月 29日 02:20	受冷锋前部西南暖湿气流增强影响,28日下午宁波上游已经开始出现大片层状云与对流云夹杂的混合云回波,29日01:00左右本次致灾回波已在宁波西侧的金华山区形成,02:00左右回波组织增长,发展成水平尺度为80 km的近圆形回波结构,并出现70 dBz回波核,02:25风暴单体稳定维持进入宁波中南部宁海前童、跃龙等地,随后回波中心快速溃散,回波核瓦解成带状弓形结构,强度减弱至55 dBz左右,同时出现弱降雪过程,此后系统东移减弱消亡	3.5	2	$\alpha$	00:58	0:57	1
14	2024年7月 12日 12:47	受冷空气过境影响,11:30左右宁波中南部奉化翡翠湾西岸开始有对流活动,12:00多单体风暴沿翡翠湾南岸海岸线组织化发展形成东西向的带状回波,12:47左右带状回波开始组织成近圆心的 $\gamma$ 中尺度单体风暴,随后回波核快速瓦解,途经宁波中南部城区、宁海县跃龙街道模具城园区时出现降雪过程,随后系统东移消亡	2.0	10	$\gamma$	11:21	11:19	2

注:1亩约为666.67 m<sup>2</sup>。

表 4 下击暴流算法预警结果  
Table 4 Warning results of the downburst algorithm

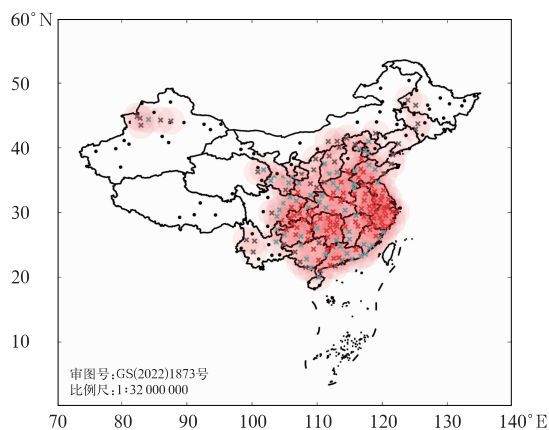
序号	时间(BT)	过程简述	致死系 统生命 史/h	最大 风力/ 级	致灾 系统 尺度	Z9574 预警时 间(BT)	Truc_Group 算法时 间差/ min
1	2016年6月 22日 14:37	受偏西系统风影响,宁波北侧线状对流系统自西北向东南后向传播,13:20尾部单体新生,14:37途经宁波中部的栎社国际机场附近时出现雷暴大风	3.0	7	$\beta$	14:26	14:29
2	2016年6月 28日 18:25	受中低层西南暖湿气流和中层西风系统共同影响,宁波东部有带状对流系统新生发展并向西向东途经宁波中北部地区,系统后向传播过程中尾部有单体爆发发展,并在约18:25途经宁波中部的奉化地区时引发雷暴大风,并伴有弱锋雪	4.0	8	$\gamma$	17:51	17:42
3	2016年7月 28日 14:00	受地表热力作用、地形和海风锋共同影响,13:00—15:00宁波中部至中北部地区爆发局地多单体风暴,多个站出现8~9级雷暴大风,14:00左右宁波中东部出现第1次雷暴大风过程	1.5	9	$\beta$	13:35	13:43
4	2016年7月 28日 15:09	背景同上,15:09宁波北部沿海出现第2次雷暴大风过程	1.5	9	$\beta$	14:25	14:14
5	2017年7月 5日 14:24	13:05左右宁波中南部爆发局地单体风暴,14:00左右单体分裂并受中层西南引导气流影响向东北方向移动,14:24左右途经宁波中部的奉化等地时出现8~10级大风,并伴有冰雹天气	2.5	10	$\beta$	13:35	13:31
6	2017年7月 12日 14:36	13:10左右宁波中南部翡翠湾沿岸局地爆发多个单体风暴,系统稳定少动并在14:00左右开始合并,约14:30系统合并为强风暴单体,14:36骤转北移,途经宁海时白岩岩站出现9级大风	2.0	9	$\beta$	14:03	13:42
7	2018年7月 26日 13:40	12:00左右宁波中北部地区开始出现多个局地爆发的单体风暴,13:20左右5个 $\gamma$ 中尺度单体风暴在宁波中部海曙区合并发展,13:40前后,宁波海曙农业试验园出现下击暴流过程,自动站小时降温达12℃	3.0	9	$\beta$	12:49	12:41
8	2018年8月 6日 15:00	14:00左右受海风锋影响,宁波中部到中北部爆发局地多单体风暴,并在东北引导气流影响下呈带状,向西南方向前向传播,14:42左右系统南侧新生 $\gamma$ 中尺度对流单体,途经鄞州区区本站时出现9级雷暴大风,15:00左右附近的鄞州燕岭小学也出现8级大风	2.0	9	$\gamma$	14:31	14:23
9	2019年7月 27日 17:34	14:45宁波东部沿海爆发局地单体风暴,并在东北引导气流影响向宁波中部传播,同时在宁波中到中南部也逐步爆发局地单体风暴,16:50左右宁波中部城区3个 $\gamma$ 中尺度对流系统开始合并,合并单体在17:34途经宁波中部的海曙洞桥站时出现10级雷暴大风	3.0	10	$\beta$	16:55	16:35
10	2020年7月 28日 14:00	12:00宁波中西部山脉爆发局地单体风暴,在偏西引导气流影响下东移发展,并逐渐形成带状结构,14:00左右途经宁波中部城区时,地面自动站多个站出现8~9级大风,并伴有小冰雹	3.0	9	$\beta$	13:54	13:18
11	2022年7月 12日 15:00	13:30左右宁波中西部山区开始有孤立单体初生发展,14:00左右风暴单体分裂发展,形成2个55 dBz以上的回波核,水平尺度在10 km左右,14:40分裂后的单体东移传播进入宁波中部主城区,回波核强度骤降系统开始溃散,随后地面多个站测得10~13级大风,此后系统与宁波中北部相继爆发的单体风暴合并发展,并伴有不同程度的雷暴大风	3.5	13	$\beta$	14:40	14:07
12	2022年7月 17日 12:50	11:30左右宁波中南部的翡翠湾西岸出现带状弱回波活动,并在其东侧有较小的 $\gamma$ 中尺度对流系统在偏西系统风引导下东移而来,12:09移来单体与地面带状回波交汇,开始爆发发展并继续组织化东移,12:40左右单体风暴已成近圆形结构,并出现55 dBz以上回波核,水平尺度在20 km左右,12:50左右单体途经奉化翡翠湾时核心迅速溃散,同时翡翠湾渔文化公园水域发生强下击暴流天气,造成湖面及湖边多辆游船倾覆,致7人死亡	2.0	12	$\gamma$	12:09	11:53
13	2022年7月 21日 14:10	11:00左右受洋面移来阵风锋系统影响,宁波东北部沿海海岸线已分布有西北—东南向的细长带状弱回波区,13:35左右随着带状系统向内陆西移,系统南北两侧均有单体风暴爆发发展,14:05系统北侧发展出完整 $\gamma$ 中尺度对流近圆形系统结构,但在10 min内迅速溃散,对应宁波大池墩水库出现9级风	1.0	9	$\gamma$	13:53	13:39
14	2022年7月 26日 17:40	受弱冷空气南下过境影响,宁波西北侧绍兴、嘉兴和杭州等地午后出现零星局地对流,16:00宁波中部地区开始出现带状分布的孤立单体风暴,17:00风暴单体组织发展,在宁波中东部形成近圆形的多单体风暴,并伴随多个强回波核,17:30系统多核合并形成较大的风暴单体并逐渐向带状结构扭转,开始进入宁波东部的北仑区一带,17:50系统途经北仑区时快速瓦解消散,回波核快速分裂减弱,此过程中出现8~10级大风,北仑区大榭站出现11~12级大风,随后对流系统东移入海消亡	3.0	12	$\beta$	16:58	16:40
15	2022年8月 23日 14:00	12:15左右宁波中西部开始有多个孤立单体风暴反复生消发展并向宁波中部海曙等地传播,13:20中西部多单体发生合并同时在宁波中部爆发出新生的 $\gamma$ 中尺度单体风暴,该风暴在海曙区归本农场站附近局地发展增强,14:00左右形成完整的圆形结构,随后迅速溃散分裂,同时农场附近监测到8级大风	1.5	8	$\gamma$	—	13:49

注:—为漏报。

业务考核雷达站点进行筛选,得到可适用本方法的站点情况,结果见图 11。其中,4 个站是为保证每分钟都尽量有低仰角 PPI 进入加工模块,以提高加工算法的稳定性,文本 True\_Group 的站点数量在 2020 年前均为 4 个站,配合 2 min 回溯策略,能基本满足业务实效;需要补充的是,由于我国建站时已考虑站点的分散程度、各站间距等情况,可不对其做量化要求。

组网方法覆盖的监测区见图 11 红色阴影区域,与适用本方法的站点位置对应(图 11 彩色叉号),总面积约为 44 000 km<sup>2</sup>,覆盖了上海、江苏和浙江等 22 个中东部省份全境、新疆西北部和东三省中部的部分地区,但未能覆盖我国西部大部分地区、北部内蒙古地区和东北部的部分省份。其中适用本方法 4 个站(图 11 棕色叉号)组网标准的站点数量为 190 个站,占全国考核站的 72.2%,对应 6 个站(图 11 青色叉号)和 8 个站(图 11 红色叉号)组网的站点数量分别为 150 个站和 91 个站,分别占全国考核站的 57.0%和 34.6%,其中适用 6 个站的区域基本覆盖我国中部到东部的大部分省份,8 个站的区域则集中分布我国东部的长江三角洲地区、中部的湖北至广州一带及安徽到山东一带。

综上,根据现阶段我国的天气雷达观测条件,组网方法可在我国中东部的大部分地区开展释用,而在观测资源较为丰富的长江三角洲等地,则可基于



注:黑色圆点为不适用站点,棕色叉号为可进行 4 个站组网的站点,青色叉号为可进行 6 个站组网的站点,红色叉号为可进行 8 个站组网的站点,红色阴影为适用本方法的观测区。

图 11 适用区域雷达组网方法的站点分布

Fig. 11 Distribution of radar stations applicable to regional radar network method

更加稠密的雷达站点,设计更多可靠的分钟级监测预警算法,再实现与其他分钟级观测设备(X 波段相控阵雷达、自动站等)的协同组网,以获得更好的业务实效,但本文的开发测试基于 S 波段天气雷达,对其他型号天气雷达的适用效果还需做进一步评估。

## 5 结论与讨论

研制了一种区域雷达组网的强对流天气监测预警方法,通过理想模型验证了其在宁波区域业务应用的可行性,再基于 3 种强对流监测预警算法和 43 个实际天气过程进行了定量评估,最后讨论了可推广性,结果表明:

(1)宁波区域组网可通过周边多部天气雷达实现,实际应用时取相邻的 7 部雷达即可满足分钟级精细化监测的需求;理想模型显示,7 部雷达组网的 Main\_Group 逐分钟提供的观测数据量约为宁波 Z9574 单部雷达的 2.66 倍,并可为 1 km 以下的边界层区域提供更多的观测信息;

(2)方法能够正确识别对流单体,14 个过程的识别时间较 Z9574 提前约 4.0 min,且对  $\gamma$  中尺度对流系统的识别能力更佳;

(3)方法能够正确预警冰雹过程,14 个过程的预警时间较实况平均提前约 79.0 min,较 Z9574 提前约为 12.2 min,且对  $\alpha$  中尺度对流系统的预警效果更佳;

(4)方法能够正确预警下击暴流过程,15 个过程的预警时间较实况平均提前约 42.6 min,较 Z9574 提前约 13.3 min,且对其中  $\gamma$  中尺度对流系统的预警命中率为 100%,对  $\beta$  中尺度对流系统的预警提前量可达 46 min;

(5)方法可适用于我国中东部、西部少部分和东北部少部分地区,覆盖面积约 44 000 km<sup>2</sup>,且在长江三角洲地区、湖北至广州一带、安徽到山东一带有良好的应用潜力。

本方法为基于区域多雷达体制和流传输通信技术构造的一种逐分钟 PPI 数据集处理和加工策略,能够在现有雷达资源基础上,提高强对流天气监测预警能力,同时为与分钟级观测设备组网协同提供一种思路。然而在多过程测试中也发现了不足之处,如无法突破观测体制机制壁垒,即不能同步控制成员雷达站的运行状态,导致某些时次的关键 PPI 层缺失,同时也存单部雷达数据质量不佳和多部雷

达间数据质量不匹配等问题(刘于新等,2024;鲁德金等,2024),对监测预警结果影响较大,后续考虑通过基于 PPI 的人工智能外推算法和质量控制技术(黄旋旋等,2024),扩充分钟数据集并做业务测试,再与其他主流业务产品做对比评估。

## 参考文献

- 曹俊武,刘黎平,2006. 双线偏振多普勒天气雷达识别冰雹区方法研究[J]. 气象,32(6):13-19. Cao J W, Liu L P, 2006. Hail identification with dual-linear polarimetric radar observations [J]. Meteor Mon, 32(6):13-19(in Chinese).
- 陈卓,郭晓梅,姚自伟,等,2024. 基于 ROSE2.0 的普洱地区 CINRAD/CC 雷达冰雹探测算法评估及参数本地化[J]. 气象科技,52(3):330-339. Chen Z, Guo X M, Yao Z W, et al, 2024. Evaluation of CINRAD/CC radar hail detection algorithm and parameter localization in Pu'er on ROSE2.0 [J]. Meteor Sci Technol, 52(3):330-339(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).
- 樊李苗,俞小鼎,2020. 杭州地区夏季午后雷暴大风环境条件分析[J]. 气象,46(12):1621-1632. Fan L M, Yu X D, 2020. Analysis on the environment conditions of afternoon thunderstorm in Hangzhou [J]. Meteor Mon, 46(12):1621-1632(in Chinese).
- 韩丰,高嵩,薛峰,等,2023. 基于 CUDA 的并行雷达拼图算法研究[J]. 气象,49(10):1246-1253. Han F, Gao S, Xue F, et al, 2023. Study of algorithms for radar networking based on CUDA [J]. Meteor Mon, 49(10):1246-1253(in Chinese).
- 黄旋旋,陈刚,赵坤,等,2024. 基于双偏振雷达变量垂直廓线特征的短时强降水和雷暴大风短时临近预报方法[J]. 气象,50(12):1519-1530. Huang X X, Chen G, Zhao K, et al, 2024. Improved nowcasting of short-time heavy precipitation and thunderstorm-gale based on vertical profile characteristics of dual-polarization radar [J]. Meteor Mon, 50(12):1519-1530(in Chinese).
- 蒋磊,冯径,王锦洲,等,2014. 面向气象雷达数据传输的流媒体流量控制研究[J]. 南京师大学报(自然科学版),37(1):81-86. Jiang L, Feng J, Wang J Z, et al, 2014. Researches on efficient radar data transmission control mechanisms for weather service networks [J]. J Nanjing Normal Univ (Nat Sic Ed), 37(1):81-86(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).
- 鲁德金,胡姮,吴蕾,等,2024. 天气雷达间一致性评估算法影响因子分析及改进[J]. 气象,50(4):475-487. Lu D J, Hu H, Wu L, et al, 2024. Influence factors analysis and improvement of consistency evaluation algorithm between weather radars [J]. Meteor Mon, 50(4):475-487(in Chinese).
- 马雷鸣,林红,储海,等,2023. 上海强对流智能预报业务新技术研究进展[J]. 地球科学进展,38(2):111-124. Ma L M, Lin H, Chu H, et al, 2023. Research progress of Shanghai operational intelligent forecast technologies on severe convection [J]. Adv Earth Sci, 38(2):111-124(in Chinese).
- 马淑萍,王秀明,俞小鼎,2019. 极端雷暴大风的环境参量特征[J]. 应用气象学报,30(3):292-301. Ma S P, Wang X M, Yu X D, 2019. Environmental parameter characteristics of severe wind with extreme thunderstorm [J]. J Appl Meteor Sci, 30(3):292-301(in Chinese).
- 仇娟娟,2012. 长三角地区强对流天气特征与对流参数分析[D]. 南京:南京信息工程大学. Qiu J J, 2012. Feature analysis on weather characteristics and convective parameters of strong convective weather in Yangtze River Delta [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 陶局,唐燕玲,易笑园,等,2021. 近 10a 浙江省极端短时强降水时空特征分析[J]. 暴雨灾害,40(6):599-607. Tao J, Tang Y L, Yi X Y, et al, 2021. Spatio-temporal characteristics of short-duration extreme rainfall in the recent ten years in Zhejiang Province [J]. Torr Rain Dis, 40(6):599-607(in Chinese).
- 文浩,刘黎平,张扬,2017. 多普勒天气雷达地物回波识别算法改进[J]. 高原气象,36(3):736-749. Wen H, Liu L P, Zhang Y, 2017. Improvements of ground clutter identification algorithm for doppler weather radar [J]. Plateau Meteor, 36(3):736-749(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 and Technology(in Chinese).
- 肖艳姣,万玉发,王珏,等,2012. 一种自动多普勒雷达速度退模糊算法研究[J]. 高原气象,31(4):1119-1128. Xiao Y J, Wan Y F, Wang J, et al, 2012. Study of an automated doppler radar velocity dealiasing algorithm [J]. Plateau Meteor, 31(4):1119-1128(in Chinese).
- 肖艳姣,王珏,王志斌,等,2021. 基于 S 波段新一代天气雷达观测的下击暴流临近预报方法[J]. 气象,47(8):919-931. Xiao Y J, Wang J, Wang Z B, et al, 2021. A downburst nowcasting method based on observations of S-band new generation weather radar [J]. Meteor Mon, 47(8):919-931(in Chinese).
- 杨春艳,孔璇璇,王芬,等,2023. ROSE2.0 在黔西南 4·14 强对流天气中的应用分析[J]. 中低纬山地气象,47(2):30-39. Yang C Y, Kong D X, Wang F, et al, 2023. Application analysis of ROSE2.0 in the strong convective weather on April 14th in southwest Guizhou [J]. Mid-Low Latitude Mount Meteor, 47(2):30-39(in Chinese).
- 俞小鼎,王迎春,陈明轩,等,2005. 新一代天气雷达与强对流天气预警[J]. 高原气象,24(3):456-464. Yu X D, Wang Y C, Chen M X, et al, 2005. Severe convective weather warnings and its

- improvement with the introduction of the NEXRAD[J]. *Plateau Meteor*, 24(3):456-464(in Chinese).
- 张小玲,杨波,盛杰,等,2018. 中国强对流天气预报业务发展[J]. *气象科技进展*, 8(3):8-18. Zhang X L, Yang B, Sheng J, et al, 2018. Development of operations on forecasting severe convective weather in China[J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 8(3):8-18 (in Chinese).
- 赵培涛,2020. 中国气象观测质量报告(2020)[M]. 北京:气象出版社. Zhao P T, 2020. *Meteorological Observation Quality Report of China (2020)* [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 赵瑞金,张进,2018. 雷达数据传输方式的改进及时效性分析[J]. *气象科技*, 46(2):257-261. Zhao R J, Zhang J, 2018. Mode improvement and timeliness analysis of radar data transmission [J]. *Meteor Sci Technol*, 46(2):257-261(in Chinese).
- 庄潇然,郑玉,王亚强,等,2023. 基于深度学习的融合降水临近预报方法及其在中国东部地区的应用研究[J]. *气象学报*, 81(2):286-303. Zhuang X R, Zheng Y, Wang Y Q, et al, 2023. A deep learning-based precipitation nowcast model and its application over East China[J]. *Acta Meteor Sin*, 81(2):286-303 (in Chinese).
- Calhoun K M, Smith T M, Kingfield D M, et al, 2014. Forecaster use and evaluation of real-time 3DVAR analyses during severe thunderstorm and tornado warning operations in the hazardous weather testbed[J]. *Wea Forecasting*, 29(3):601-613.
- Cho J Y N, Kurdzo J M, 2020. Weather radar network benefit model for flash flood casualty reduction[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 59(4):589-604.
- Crum T D, Saffle R E, Wilson J W, 1998. An update on the NEXRAD program and future WSR-88D support to operations [J]. *Wea Forecasting*, 13(2):253-262.
- Huuskonen A, Saltikoff E, Holleman I, 2014. The operational weather radar network in Europe[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 95(6):897-907.
- Johnson J T, Mackeen P L, Witt A, et al, 1998. The storm cell identification and tracking algorithm: an enhanced WSR-88D algorithm[J]. *Wea Forecasting*, 13(2):263-276.
- Longmore S, Miller S, Bikos D, et al, 2015. An automated mobile phone photo relay and display concept applicable to operational severe weather monitoring [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 32(7):1356-1363.
- Mahale V N, Brotzge J A, Bluestein H B, 2014. The advantages of a mixed-band radar network for severe weather operations: a case study of 13 May 2009[J]. *Wea Forecasting*, 29(1):78-98.
- Misumi R, Shoji Y, Saito K, et al, 2019. Results of the TOKYO metropolitan area convection study for extreme weather resilient cities (TOMACS) [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 100(10):2027-2041.
- Osborne A P, Zhang J, Simpson M J, et al, 2023. Application of machine learning techniques to improve multi-radar multi-sensor (MRMS) precipitation estimates in the western United States [J]. *Artif Intell Earth Syst*, 2(2):1-19.
- Qi Y C, Zhang J, 2017. A physically based two-dimensional seamless reflectivity mosaic for radar QPE in the MRMS system[J]. *J Hydrometeorol*, 18(5):1327-1340.
- Smith T M, Lakshmanan V, Stumpf G J, et al, 2016. Multi-Radar Multi-Sensor (MRMS) severe weather and aviation products: initial operating capabilities[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 97(9):1617-1630.

(本文责编:王婷波)