

基于区域雷达组网的强对流天气 监测预警方法

陶局^{1,2} 姚聃² 肖艳姣^{2,3} 滕玉鹏² 陈丹丹⁴

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

4 中国气象科学研究院, 北京 100081

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 个强对流过程对方法的业务能力进行量化评估, 结果表明: 区域组网每分钟提供的数据量约为宁波单站的 2.66 倍, 且可为 1 km 以下边界层提供更多观测信息; 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 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 γ 中尺度对流系统引发下击暴流的预警命中率为 100%; 方法可适用于我国陆域中东部、西部少部分及东北部部分地区, 覆盖面积约 44000 km², 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 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^{1,2} YAO Dan² XIAO Yanjiao^{2,3} TENG Yupeng² CHEN Dandan⁴

1 Ningbo Meteorological Service Center, Ningbo 315012

2 Meteorological Observation Centre, CMA, Beijing 100081

3 Wuhan Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

4 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

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

国家自然科学基金气象联合基金项目 (U2142211、U2342216) 和国家自然科学基金青年项目 (42205145) 共同资助

2025-02-08 收稿 2025-07-10 收修订稿

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: 姚聃, 主要从事强对流雷达监测预警技术研究. E-mail: yaod@cma.gov.cn

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 min and 42.6 min ahead of the observation, respectively. Compared to Ningbo radar station, the monitoring and early warning method of regional radar network can identify the convective initiation about 4 min in advance, and warn hail and downburst processes about 12.2 min 13.3 min in advance, respectively. At the same time, the early warning hit rate of the regional radar network for downburst triggered by $M_{\gamma}CS$ reaches 100%. (4) The method can be applied to all the central-east part of mainland China and a small portion of the western and northeastern regions, covering approximately 44000 km² of land area. Especially, the method could have a good application potential in the Yangtze River Delta, the region from Hubei to Guangzhou area and Anhui to Shandong area.

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 AWIPSII（advanced weather interactive processing system II）系统平台开展（Crum et al, 1998; Calhoun et al, 2014; Longmore et al, 2015），除可将全美的单站观测数据提交至 NWS（national weather service）预报员外，AWIPSII 系统还搭建了与手机移动端的交互线路，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”数据云平台下发的业务数据，“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一定延迟，约为 15 min；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），提供全美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。

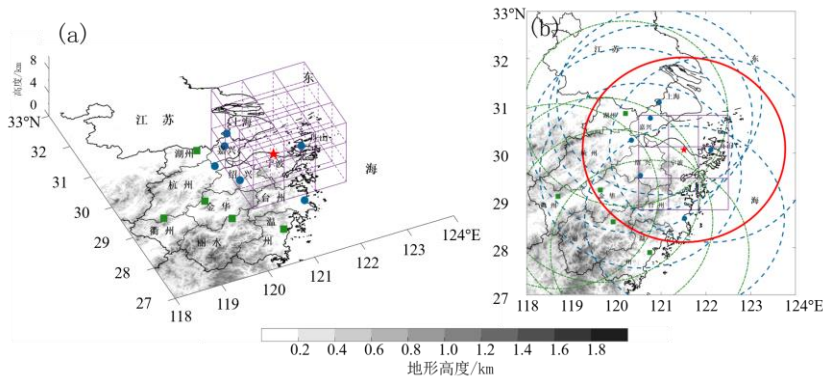
区域雷达组网监测是指由区域内相邻天气雷达站点构建的局地监测网络，可基于本地条件灵活配置监测预警模式，以满足各地强对流天气的精细化业务需求（程元慧等，2020；庄潇然等，2023）。吴翀（2018）针对华南、南京和北京三个地区进行了区域组网观测试验发现，S 波段双极化雷达成员能够提供稳定、精细的组网结果，X 波段相控阵雷达成员可有效拓展近地面的低层探测区域；马雷鸣等（2023）开展了区域天气雷达布局建模仿真研发，实现了上海地区 S 波段和 X 波段天气雷达在强天气过程下的适应性协同观测；Misumi et al（2019）开展了东京区域极端对流天气观测试验，使用多普勒天气雷达、地面自动站和垂直探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对流性天气；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（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，以期方法能为基层台站应对强对流天气提供一种有效的策略。本文第一节介绍了方法的基本原理并对其做可行性论证，同时介绍了后文中使用的 3 种监测预警算法；第二节对宁波 3 次强对流天气过程分别进行了方法的应用能力分析；第三节选取宁波 2016—2024 年出现的 43 个强对流过程，对方法做多过程应用能力评估；第四节讨论了本方法的全国推广能力；最后一节在总结结论的同时，讨论了方法在业务推广应用中可能存在的问题，并提出了后续的改进措施。

1 资料与方法

1.1 资料

宁波及周边共 12 部 S 波段双极化天气雷达的观测数据，站点分布如图 1；数据获取方式模拟基层台站的数据流传输方法，即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。



注：图 a 中红色星形为 Z9574 雷达站点、蓝色圆形和绿色方形为其他雷达站点，立方体为本文研究选区；图 b 中红色圆圈为 Z9574 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，网格为本文研究选区。

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)s three-dimensional diagram, (b) top view

1.2 方法与算法

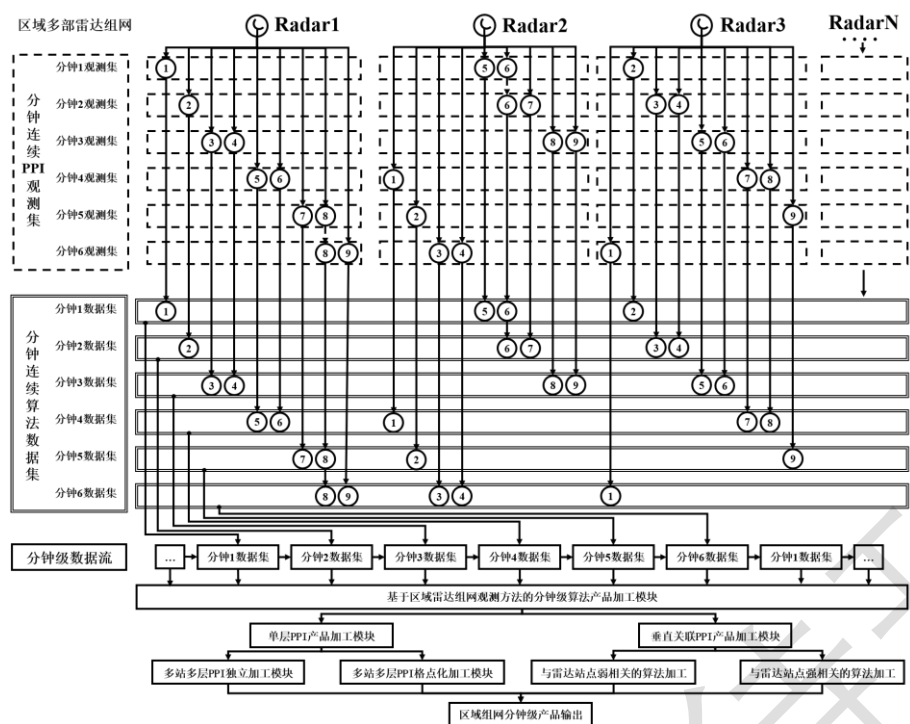
1.2.1 方法简介

介绍一种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,分别如下:

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 0 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。

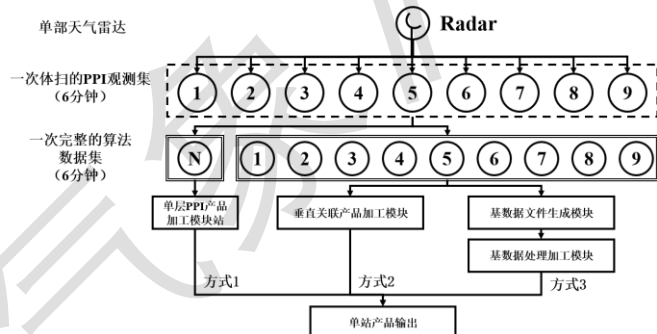
对于基于单层 PPI 的算法,则在本分钟数据集中抽取所需 PPI 层数据进行加工,如定量估测降水算法一般使用无波束阻挡的最低层 PPI,则直接选择该层 PPI 进行运算;若分钟数据集中存在由不同站点提供的多个所需层,则可选择输出包含多站的多层 PPI 产品,或对其



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。

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



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。

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

进行格点化插值再做输出；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，再做基于 PPI 上距离库位置信息的关联处理，如 Johnson et al (1998) 的 SCIT (storm cell identification and tracking) 风暴识别算法，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 0 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,其流程如图 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。

较单站的加工方法,本方法将产品更新频率由 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,但组网雷达数据需至少为 4 个站。

1.2.2 风暴识别、冰雹预警和下击暴流预警算法的原算法简介

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

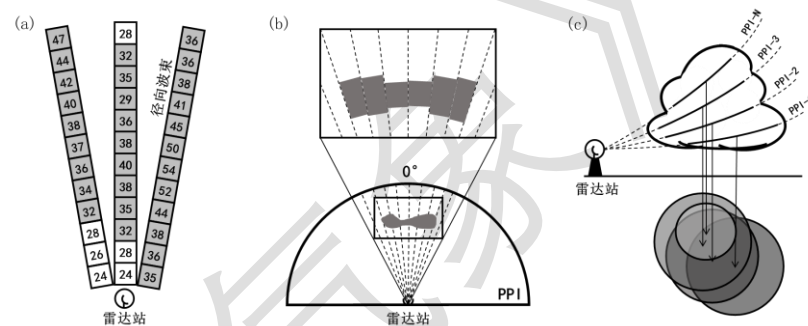


图 4 风暴识别算法 (SCIT) 流程图

Fig.4 Flow chart of the SCIT algorithm

(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至少在 10 km^2 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,方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°C 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℃层高度由每日临近的 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；

$$Y_z = Z_{H^3} + 10 \log H_{max} \quad (1)$$

式中 Z_{H^3} 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如表 1，通过对应的隶属函数 $F(x)$ （式 2），把表 1 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。

表 1 用于下击暴流临近预报的风暴单体雷达特征量隶属函数的高、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	单位	参量说明	低临界值	高临界值	权重
1	ZMAXTOP	dBz · km	最大反射率因子与顶高的乘积	400	750	0.55
2	ZTH	dBz	最小相当位温高度处的最大反射率因子	49	59	0.56
3	VIL	kg · m ⁻²	垂直累积液态含水量	20	50	0.5
4	SHI	J · m ⁻¹ · s ⁻¹	强冰雹指数	10	100	0.36
5	RCL	10 ⁻¹ s ⁻¹	MARC 特征的最强径向辐合分量强度等级	10	40	0.58
6	IMARC	10 ⁻⁴ km · s ⁻¹	MARC 特征的垂直积分径向辐合值	300	900	0.41
7	CMTH	10 ⁻⁴ s ⁻¹	MARC 特征中最小相当位温高度的最大径向辐合值	40	90	0.53
8	DV16	m · s ⁻¹	MARC 特征中 1~6 km 高度径向上的最大最小速度差	15	25	0.59
9	DV06	m · s ⁻¹	中气旋 0~6 km 高度最大最小速度差	15	25	0.62

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

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

1.2.3 风暴识别、冰雹预警和下击暴流预警算法的方法适应性调整

对 3 种强对流天气原算法进行调整，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;

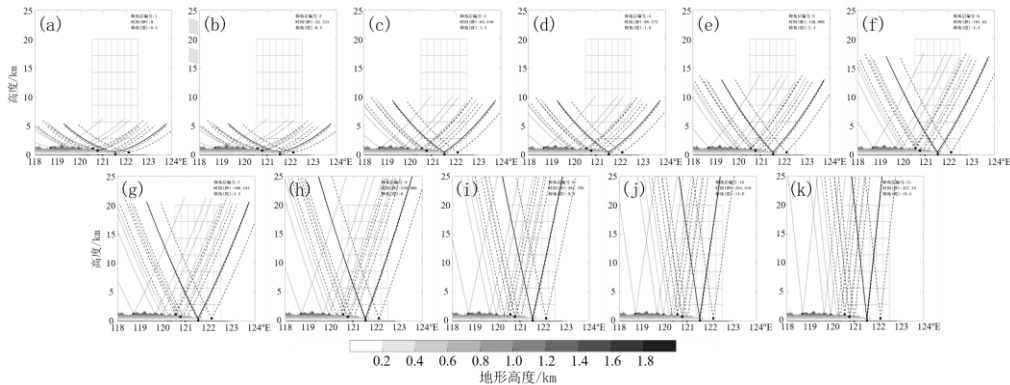
(2) 冰雹预警算法。先通过 SCIT 算法获取分钟数据集内的三维风暴单体,再基于单体对应的 PPI 数据,使用曹俊武和刘黎平(2006)的水平反射率因子法提取基于单体的冰雹预警结果,标准与原算法相同,除产品输出频次提升至 1 min 外, SCIT 算法也可过滤一部分杂波信号,提高输出结果的可靠性;

(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如表 1,再通过式 3 计算下击暴流概率,相关标准与原算法相同。

1.3 方法可行性论证

设计理想扫描模型对本方法的可行性进行论证。以宁波市行政区划边界为主体向外扩展,设定东经 120.5°~122.5°E、北纬 28.8°~30.8°N 及 20 km 以下空域为模型观测区(图 1 和图 5 空间网格区域),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 扫描结果如图 5。取上海站、嘉兴站、杭州站、绍兴站、舟山站、台州站(图 1 蓝色圆形标记),与宁波站 Z9574 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 绿色方形标记),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 PRF 扫描方式分别获取多普勒参数和非多普勒参数(图 5a, 5b 和图 5c,5d),其余每个仰角各有 1 个 PPI。结合图 1b 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 可在宁波本地释用方法。



注: 实线为 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。

图 5 逐 PPI 理想扫描模型

Fig.5 Ideal scanning model of each PPI

基于理想扫描模型，对方法的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，下简称占用率），输出 1~6 min 的逐分钟观测结果和分钟累积观测结果（图 6）。

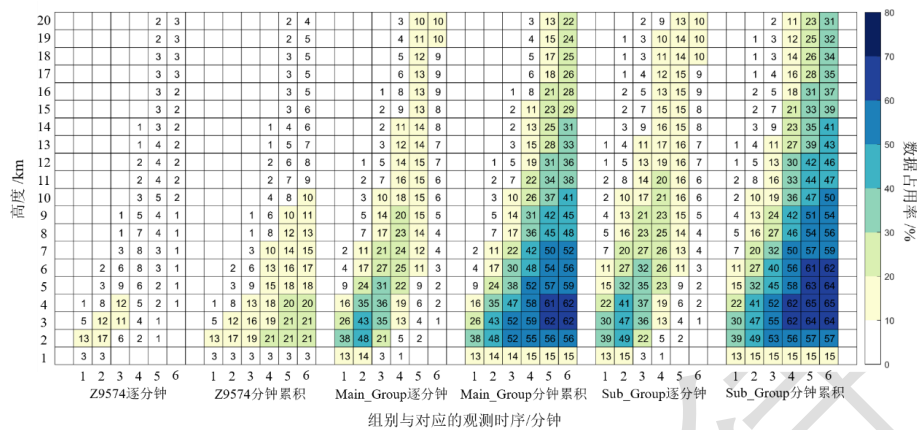


图 6 理想模型观测数据占用率分布

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

日常业务中雷达产品的构造多基于 Z9574 min 累积对照组的第 6 min 数据，其中由于 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 0 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 分钟累积与 Main_Group 分钟累积的 20 km 以下占用率之比平均值分别约为 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，如冰雹记录中应确有冰雹落地证明、下击暴流记录中应有附近自动站瞬时 ≥ 8 级风速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径受灾点前 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

使用到的评估参数为算法时间差、识别成功率、识别提前量、预警提前量和命中率，定义如下：

1. 算法时间差：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，单位为分钟；
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

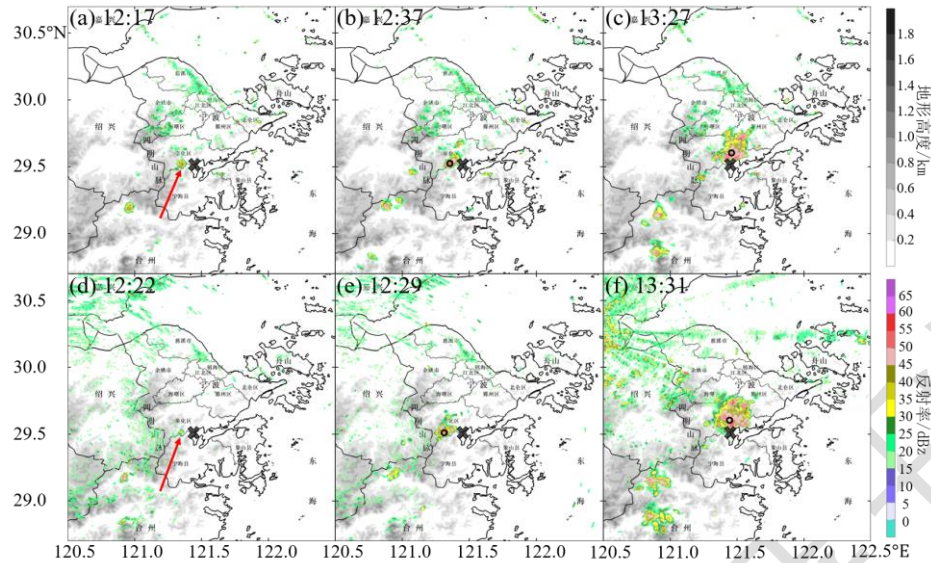
宁波地处我国中低纬度亚热带季风区，北侧、东侧和南侧为东海环抱，以西主要为南北走向的山脉，汛期易受海陆锋、重力内波和下垫面条件等因素影响，局地对流过程频发，其中引发冰雹的对流过程多始于初春，年均出现年均频次约为 10 d(仇娟娟, 2012)，而引发下击暴流（包含微下击暴流和雷暴大风等）的对流过程多活跃在夏季，且在宁波地区更为常见（马淑萍等, 2019；樊李苗和俞小鼎, 2020）。以下挑选了 3 次天气过程对本方法的业务能力进行检验。

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

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 左右途径奉化区雷虎站，随后测得该站小时降水量 56.4 mm 的极端短时强降水过程。

Z9754 监测结果如图 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，途径雷虎站（图 7 黑色叉号）；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。



注：阴影为地形高度，黑色叉号为受灾点，黑色圆圈为算法识别的单体质心位置，图 a 和图 d 红色箭头为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~e) 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-e) identification result of True_Group

True_Group 监测结果如图 7d~7f，12:22 观测到回波信号，12:29 首次识别到风暴单体，较 Z9574 早 8 min，随后系统东移途径雷虎站，最后一次识别到单体信号在 13:31，此后系统逐步消亡。

本例中 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——以 2022 年 6 月 24 日冰雹过程为例

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 途径宁波中部城区时出现强降雹过程，受灾实况如图 8。

Z9574 监测结果如图 9a~9c，13:37 首次识别到致灾单体，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 γ 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 系统途径两个受灾点，并伴有降雹过程，此时单体继续维持冰雹预警信号。

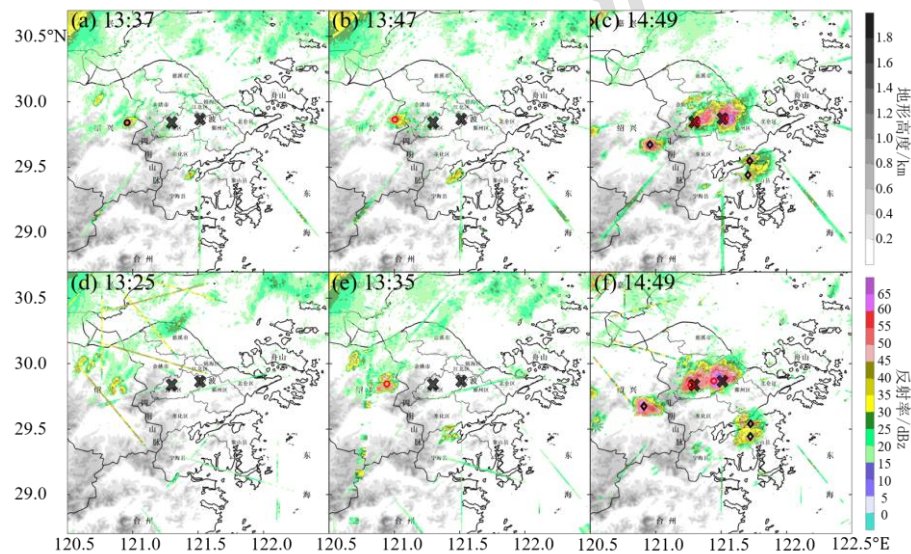
True_Group 监测结果如图 9d~9f，13:25 首次观测到回波信号，13:35 首次识别到致灾单体，并同时得到冰雹预警信号，较 Z9574 早 12 min，较实况早 74 min，此后系统继续东移发展，信号继续维持，14:49 左右途径受灾点。

本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，在 13:35 由杭州站 1.5°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°仰角对应的 PPI 获取到冰雹预警信号。



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 around 14:30-15:00 BT 24 June 2022



注：阴影为地形高度，黑色叉号为受灾点，黑色圆圈为致灾单体质心位置，红色圆圈为出现预警信号的致灾单体，黑色菱形为识别到的其他对流单体位置。

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~e) 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-e) warning result of True_Group

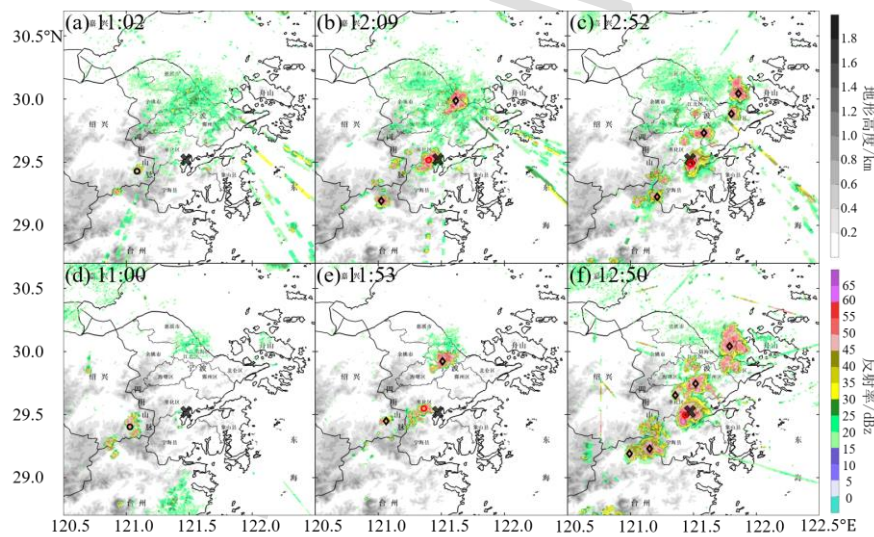
2.3 下击暴流预警算法个例评估——以 2022 年 7 月 17 日下击暴流过程为例

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 左右途径翡翠湾,导致湾内部分浮桥和平台损坏,系泊在平台上的“浙奉渔休 60051”船缆绳断裂,漂离后被风刮翻,造成 16 人落水,5 人获救,11 人死亡。

Z9754 监测结果如图 10a~10c, 11:02 首次识别单体信号,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 左右位置,信号陆续维持至 12:52 单体经过受灾点后。

True_Group 监测结果如图 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。

本例中 True_Group 在 11:53 首次得到下击暴流预警信号,物理量 RCL 为 $84.510^{-1} \cdot s^{-1}$ 、DV16 和 DV06 均为 $23 m \cdot s^{-1}$,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 $47.410^{-1} \cdot s^{-1}$ 、DV16 和 DV06 均为 $16 m \cdot s^{-1}$,即判定动力条件有限,因此未进行预警。



注:黑白填色为地形高度,黑色叉号为受灾点,黑色圆圈为致灾单体质心位置,红色圆圈为出现预警信号的致灾单体,黑色菱形为识别到的其他对流单体位置。

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-e) 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-e) warning result of True_Group

3 多过程应用结果评估

313 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，其中包含风暴
314 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。

315 **3.1 风暴识别的多过程评估**

316 选取 14 个对流初生过程检验风暴识别算法，评估结果如表 2，在本节的 14 个过程中，
317 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、
318 9 和 11 的过程，True_Group 的识别时间较 Z9574 晚 1 min，编号 2、5 和 12 的过程，True_Group
319 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；对算法时
320 间差求平均，True_Group 在选中的 14 个过程中，识别时间较 Z9574 提前约 4 min。

321 14 个过程中，发展为 β 中尺度对流系统的有 7 次，其中 True_Group 识别时间滞后于 Z9574
322 的有 2 次，较 Z9574 的平均识别提前量约为 2.6 min；发展为 γ 中尺度对流系统的有 7 次，
323 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 5.4 min。

324 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
325 约 4 min，其中对 γ 中尺度对流系统的识别能力更优，识别时间较 Z9574 提前约 5.4 min。

326 表 2 风暴识别算法（SCIT）识别结果
327 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系统性西风引导下东移离境，途径余姚东部上林小学站附近时出现小时 57.2 mm 的极端短时强降水过程	3.0	β	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 γ 中尺度多单体风暴，并开始组织发展，16:30 左右两个多单体风暴组织合并形成带状结构的 β 中尺度风暴单体，引发了翡翠湾西侧的强天气过程	3.0	β	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，随后向东南方移动发展进入宁波北部的余姚境内，12:30 发展成为 γ 中尺度对流系统并开始与下游零散的单单体组织发展，期间宁波慈溪西部坎墩站观测到极端短时强降水，13:00 已经形成清晰的弓状回波并继续向下游传播	3.0	γ	11:54	11:48	6
4	2020 年 7 月 31 日 00:30	0:30 左右宁波中南部的象山以西开始有弱回波发展，01:12 左右形成弱南部走向带状回波，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 γ 中尺度单体风暴，该时段内，象山西部许家山站监测到 53.8 mm 的小时降水量	2.0	γ	30 日 23:00	30 日 22:54	6
5	2021 年 8 月 9 日 17:00	17:12 左右宁波西部四明山山区有孤立对流单体触发，并在系统性西北风引导气流影响下向东南方向组织发展，18:00 左右单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、界岭等站监测极端短时强降水过程	2.5	γ	17:12	17:12	0
6	2021 年 8 月 22 日 12:30	12:30 宁波中西部四明山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 γ 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心区域，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	β	13:06	13:00	6

7	2021 年 9 月 6 日 16:00	12:00 宁波中部四明山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 γ 中尺度对流单体，18:42 系统仍维持局地发展特征，开始出现 55 dBz 以上的回波核心，在此期间梅湖水库站监测到 66.2 mm 的小时降水量，19:00 以后组织结构开始溃散，随后与北来带状对流系统合并	4.0	γ	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 左右零星单体局地组织发展形成与海岸线垂直的南北向带状多单体风暴，16:00 带状结构南北扩张，并在宁波北部余姚城区附近形成 2 个回波 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，此后带状回波原地溃散	2.0	β	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，单体原地组织发展，15:08 单体形成近圆形结构并出现 50 dBz 以上的 水薄荷 ，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站监测到极端短时强降水，16:00 系统开始溃散，并与南来 单单体 风暴合并南移消亡	2.0	γ	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 γ 中尺度回波单体并缓慢北抬，向宁波中东部的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 回波主体进入镇海境内，并重新形成近圆形结构和单个回波核，随后系统以 γ 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过程，16:00 回波原地消亡	4.5	γ	12:24	12:09	15
11	2023 年 6 月 20 日 11:00	受系统性偏西风影响，12:00 左右宁波以西及宁波中西部四明山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 γ 中尺度单体风暴组成的东西走向风暴簇，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 52.5 mm 的极端短时强降水	4.5	β	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过程，16:00 左右系统在海岸线附近原地溃散消亡	3.0	β	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小时降水量 52.9 mm 的极端短时强降水过程	3.5	γ	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里风暴多单体风暴触发发展，并在西南引导气流影响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到西南走向的带状回波，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单体风暴合并，此后东移消亡	1.5	β	12:37	12:29	8

328

3.2 冰雹预警的多过程评估

329

330

331

332

333

334

335

选取 14 个冰雹过程进行评估如表 3，对于表中的 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 67 min 和 79 min。其中，编号 9 和 10 的过程，True_Group 的识别时间较 Z9574 晚 1 min，其余均等于或超前 Z9574；对算法时间差求平均，True_Group 在选中的 14 个过程中，预警时间较 Z9574 提前约 12.2 min。

14 个过程中，致灾系统为 α 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 9.3 min，较实况提前约 92.6 min；致灾系统为 β 中尺度对流系统的有

336 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 15.8 min，
337 较实况提前约 74.7 min；致灾系统为 γ 中尺度对流系统的有 2 次，True_Group 预警时间滞
338 后于 Z9574 的为 1 次，较 Z9574 的预警时间提前量约为 0.5 min，较实况提前约 78.5 min；
339 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
340 况提前约 79 min，预警提前量较 Z9574 约为 12.2 min，且对 α 中尺度对流系统的预警能力更
341 优。

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	受北来飑线系统东移过境影响，宁波多地出现雷暴大风天气过程，18:00 左右飑线系 统后向传播在其南侧四明山一带激发出新的单体风暴，该风暴东移发展，途径宁波中西部 的奉化城区时出现弱降雹过程	1.5	2	β	17:12	16:41	31
2	2017 年 8 月 20 日 13:18	受北来飑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 左右飑线 前出流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雹 天气，并有居民反应看到了龙卷	1.5	2	β	13:13	12:47	26
3	2019 年 3 月 21 日 10:51	受大范围飑线过程东移过境影响，宁波中南部的宁海、象山等地出现超级单体风暴过 程，上午 08:30 强单体风暴出现在宁波以西的金华市，10:00 左右途径绍兴南部四明山山 脉时，分离出 2 个 60 dBz 以上的强回波核心并继续发展东移进入宁波境内，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 以上的降雹过程，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	β	08:42	8:37	5
4	2019 年 4 月 9 日 16:49	受大范围飑线过程东移过境影响，宁波全境出现了大范围对流天气，16:32 左右飑线 系统前缘在宁波中部翡翠湾附近激发出单体风暴，16:49 单体途径宁波中南部的象山、宁 海等地时出现局地弱降雹过程，尺寸较小没有造成明显灾情	1.5	5	β	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级单体风暴所致， 17:06 左右系统途径杭州湾喇叭口海湾区，回波核心强度爆发增长至 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约 10 mm 冰雹，丈亨 镇龙南出现直径约 5 mm 冰雹，三七市镇东方华庭、统一年糕场、幸福村附近等均有直径 约 5 mm 大小冰雹，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过 程	4.5	10	α	16:12	16:12	0
5	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 宁波北侧嘉兴市已有大范围东西走向的飑线系 统南下而来，水平长度约在 250 km，最大回波强度在 55 dBz，5 月 1 日 00:30 系统途径 宁波北部沿海海岸线，强回波区扭转成近圆形结构，00:42 强回波区内出现 70dBz 以上强 回波核，此过程中宁波东北部慈溪等地出现降雹过程，并伴有较强的地面阵风锋，此后系 统沿宁波东部海岸线继续南下发展	3.0	2	α	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 对流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新的单体风暴并与本体 组织合并，17:30 系统组织发展至最强，主体呈东北到西南走向的带状回波，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	2.0	2	β	16:24	15:30	54

		出现小冰雹，此后原地消亡							
3	2022 年 6 月 24 日 14:49	14:00 左右宁波西部四明山山区爆发多单体风暴，在系统性西风引导逐渐东移发展增强，14:49 途径宁波中部海曙、鄞州、江北城区、镇海东部等地时，形成了两个完整的强回波单体，中心强度均在 55 dBz 左右，并出现了强降雹过程	2.5	30	β	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，同时在嘉兴、海宁出现局地弱冰雹，最大直径约 10~20 mm	5.0	10	β	13:40	13:41	-1	
0	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，14:10 左右单单体风暴分裂出两个 γ 中尺度回波单体，多单体继续发展，14:52 左右，系统分裂的多个单体向四周扩散发展，并在奉化城区、中部鄞州本站等地出现弱降雹过程	4.0	2	γ	13:42	13:43	-1	
1	2022 年 7 月 27 日 13:36	12:20 宁波中西部四明山山区开始有孤立单体触发发展，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两个风暴单体，随后在宁波中北部慈溪横河、城区，中部海曙章水等地快速溃散消亡，附近均观测到了冰雹天气，并伴有雷暴大风过程	2.0	10	β	12:14	12:13	1	
2	2022 年 8 月 6 日 12:34	11:00 左右宁波东北部沿海观测到沿海岸线分布的西北到东南走向的细长带状阵风锋弱回波，回波向西南方快速移动进入内陆，11:40 左右带状回波上开始激发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，同时在宁波中部及四明山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)均观测到降雹过程，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	β	11:22	11:14	8	
3	2022 年 11 月 29 日 02:20	受冷锋前部西南暖湿气增强影响，11 月 28 日下午宁波上游已经开始出现大片层状云与对流云交杂的混合云回波，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，同时出现弱降雹过程，此后系统东移减弱消亡	3.5	2	α	00:58	0:57	1	
4	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孤立对流单体活动，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走向的带状回波，12:47 左右带状回波开始组织成近圆心的 γ 中尺度单体风暴，随后回波核快速瓦解，途径宁海中部城区、宁海县跃龙街道模具城园区时出现降雹过程，随后系统东移消亡	2.0	10	γ	11:21	11:19	2	

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)过程进行评估如表 4,对于表中的 15 个过程,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 31.5 min，而 True_Group 的命中率为 100%，较实况的预警提前量为 42.6 min。在 Z9574 命中的 14 个过程当中,除编号 1、3 的过程中 True_Group 的预警时间较 Z9574 分别晚 3 min 和 8 min 外，其余均提前于 Z9574; 对算法时间差求平均，True_Group 在 Z9574 命中的 14 个过程中，预警时间较 Z9574 提前约 13.3 min。

15 个过程中，致灾系统为 β 中尺度对流系统的有 10 次，其中 True_Group 预警时间滞后

352 于 Z9574 的有 2 次, 较 Z9574 的预警前量约为 14 min, 较实况约为 46 min; 致灾系统为
353 γ 中尺度对流系统的有 5 次, True_Group 预警时间均超前于 Z9574, 较 Z9574 的预警前量约
354 为 11.8 min, 较实况约为 35.8 min。

355 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
356 约 42.6 min, 较 Z9574 提前约 13.3 min, 且对 γ 中尺度对流系统的预警有较高的命中率, 对
357 β 中尺度对流系统的预警有较多的提前量。

358

359

360

表 4 下击暴流算法预警结果评估表

Table 4 Warning results of the downburst algorithm

序号	时间 (BT)	过程简述	致灾系统生命史/h	最大风力/级	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 22 日 14:37	受系统性西风影响, 上游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 途径宁波中部的海曙栎社国际机场附近时出现雷暴大风过程	3.0	7	β	14:26	14:29	-3
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生成发展并向自西向东途径宁波中北部地区, 系统后向传播过程中尾部有单体爆发式触发发展, 并在约 18:25 途径宁波中部的奉化地区时触发雷暴大风过程, 并伴有弱降雹	4.0	8	γ	17:51	17:42	9
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 宁波中至中北部地区爆米花式爆发局地多单体风暴, 多个站出现 8--9 级雷暴大风, 14:00 左右的宁波中东部出现第 1 次雷暴大风过程	1.5	9	β	13:35	13:43	-8
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	β	14:25	14:14	11
5	2017 年 7 月 5 日 14:24	13:05 左右宁波中南部爆发局地对流单体, 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 左右途径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	β	13:35	13:31	4
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单体对流过程, 系统稳定少动并在 14:00 左右开始合并, 14:30 左右系统合并为单单体, 14:36 缓慢北移, 途径宁海时白鸟岩站出现 9 级大风	2.0	9	β	14:03	13:42	21
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 γ 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	β	12:49	12:41	8
8	2018 年 8 月 6 日 15:00	14:00 左右受海风锋影响, 宁波中到中部爆发局地多单体风暴, 并在系统系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 γ 中尺度对流单体途径鄞州区区本站时出现 9 级雷暴大风, 15:00 左右附近的鄞州燕玲小学也出现 8 级大风	2.0	9	γ	14:31	14:23	8
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下宁波中部传播, 同时再宁波中到中部也逐步爆发局地单体风暴, 16:50 左右宁波中部城区 3 个 γ 中尺度对流系统开始合并, 合并单体在 17:34 途径宁波中部的海曙洞桥站时出现 10 级雷暴大风	3.0	10	β	16:55	16:35	20
10	2020 年 7 月 28 日 14:00	12:00 宁波中西部的四明山脉爆发局地单体风暴, 在系统性偏西风引导气流影响下东移发展, 并逐渐形成带状结构, 14:00 左右途径宁波中部城区时, 地面自动站多站出现 8~9 级大风, 并伴小冰雹	3.0	9	β	13:54	13:18	36
11	2022 年 7 月 12 日	13:30 左右宁波中西部四明山山区开始有孤立单体初生发展, 14:00 左右单体分裂发	3.5	13	β	14:40	14:07	33

	15:00	展,形成 2 个 55 dBz 以上的回波核心,水平尺度在 10 km 左右,14:40 左右分离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,随后地面多站测得 10~13 级大风,此后系统与宁波中北部相继爆发的多单体风暴合并发展,并依然伴有不同程度的雷暴大风过程							
12	2022 年 7 月 17 日	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 γ 中尺度对流系统在系统性偏西风引导下东移而来,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 以上回波核心,水平尺度在 20 km 左右,12:50 左右单体途径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过程,造成湖面及湖边多辆游船倾覆,致 7 人死亡	2.0	12	γ	12:09	11:53	16	
	12:50								
13	2022 年 7 月 21 日	11:00 左右受洋面移来阵风锋系统影响,宁波东北部沿海岸线已分布有西北到东南走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,系统南北侧均有单体风暴爆发发展,14:05 北侧单体形成完整 γ 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	γ	13:53	13:39	14	
	14:10								
14	2022 年 7 月 26 日	受弱冷空气南下过境影响,宁波西北侧绍兴、嘉兴和杭州等地出现午后零星局地对流过程,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 带状分布的风暴单体组织化发展,在宁波中东部形成近圆形的多单体风暴,并镶嵌多个强回波核,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 系统途径北仑区时快速瓦解消亡,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	β	16:58	16:40	18	
	17:40								
15	2022 年 8 月 23 日	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激发出新的 γ 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 左右形成完整的圆心结构,随后迅速溃散分裂,同时农场附近监测到 8 级大风	1.5	8	γ	-	13:49	-	
	14:00								

361 4 可推广性讨论

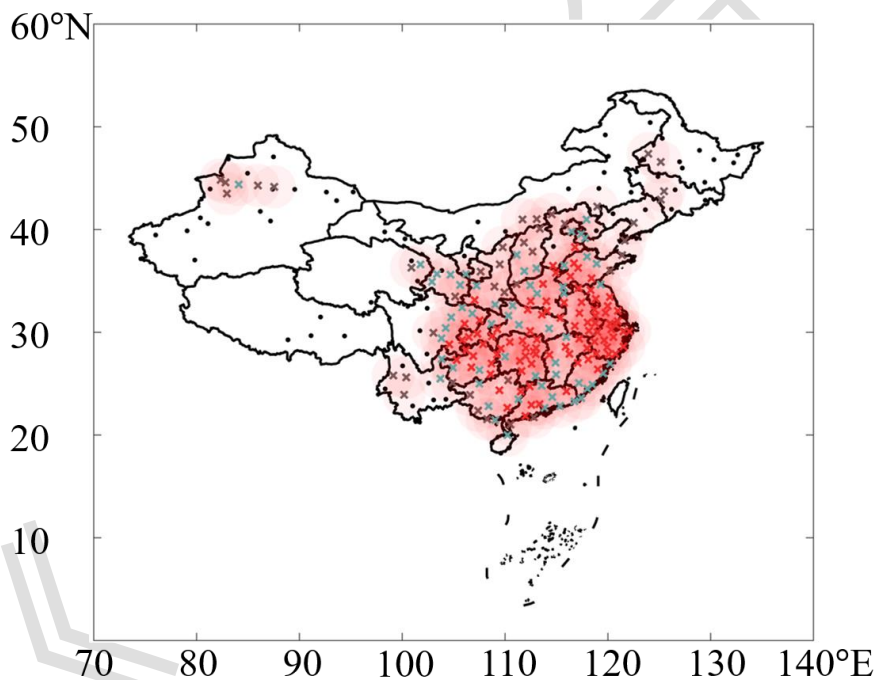
362 得益于周边丰富的观测资源和数据流传输通信技术,宁波不仅可以在本地 0 延迟实时获
363 取周边各站的 PPI 观测结果,并能提供充足的 PPI 数据进入产品加工模块,确保了方法在宁
364 波本地的应用效果。

365 提出一种方法的适用标准,以目标站点为中心(如宁波以 Z9574 站点位置为中心),230
366 km 最佳观测范围内至少存在其他 3 部天气雷达,能够构建起至少为 4 个站点的区域组网,
367 对现阶段我国 263 部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,结果如图
368 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
369 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
370 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,
371 可不对其做量化要求。

372 方法覆盖的监测区如图 11 红色阴影区域,它与适用本方法的站点位置对应(图 11 叉号),
373 总面积约为 44000 km²,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 青色叉号和红色叉号）和 8 个站（图 11 红色叉号）组网的站点数量为 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，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。



注：黑色圆点为不适用本方法的站点，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

5 小结与展望

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本方法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 个实际天气过程对方法进

行了定量评估,最后讨论了方法的可推广性,结果表明:

(1) 宁波区域组网可通过附近 12 部天气雷达实现,实际过程中由其中 7 部雷达提供数据已能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 min,且对 γ 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 min,较 Z9574 提前约为 12.2 min,且对 α 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 γ 中尺度对流系统的预警命中率为 100%,对 β 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部分地区,覆盖面积约 44000 km²,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;

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方法的不足之处,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控技术(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).
- 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).

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 thunder-storm 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).

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, 王玉发, 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 Y, 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, 孔德璇, 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 Meteorol, 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: Meteorological Press (in Chinese).

赵瑞金, 张进, 2018. 雷达数据传输方式的改进及时性分析[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, Saffie 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.