

雷达与地面观测协同监测强对流天气的研究

都本湖¹³ 杨智鹏^{23*} 李 施¹ 王 一¹

1. 辽宁省气象数据中心 辽宁 沈阳 110002

2. 成都信息工程大学 四川 成都 610225

3. 中国气象局大气探测重点开放实验室 四川 成都 610225

摘 要: 强对流天气具有突发性强、尺度小、演变快的特点,单一观测手段难以完整捕捉。本文研究雷达与地面观测协同监测强对流天气的方法与技术,分析了多普勒天气雷达在云体结构探测方面的优势以及地面自动气象站在近地面要素获取方面的特点,提出了基于时空匹配的雷达回波与地面观测数据融合方法。研究表明,雷达识别的强回波区域与地面大风、强降水落区存在系统性空间偏移和时间滞后,通过建立雷达回波顶高与地面降水概率的统计关系,可有效提升冰雹预警的提前量。

关键词: 强对流天气; 雷达观测; 地面观测; 协同监测; 数据融合

引言: 强对流天气包括雷暴大风、冰雹、短时强降水等,是我国气象防灾减灾的重点和难点。这类天气系统空间尺度仅几公里到几十公里,生命史十几分钟到几小时,常规气象观测网难以完整捕捉其全过程。多普勒天气雷达能获取云体三维结构信息,时间分辨率高,但对近地面要素探测能力有限。地面自动气象站能精确测量温湿压风降水,但空间分布稀疏,难以反映强对流系统空间结构。本文研究雷达与地面观测协同监测方法,通过数据融合发挥两种手段优势,提升强对流天气监测预警能力。

1 强对流天气的观测特征与监测需求

1.1 强对流天气的分类与时空尺度

强对流天气主要包括雷暴大风、冰雹、短时强降水和龙卷等类型。雷暴大风由下沉气流扩散形成,风速通常超过每秒 17 米,水平尺度几到几十公里,持续几分钟到一小时。冰雹在强对流云中反复升降增长,雷达回波顶高通常在 10 公里以上,核心反射率因子超过 55dBZ。短时强降水指一小时降水量超过 20 毫米,常伴有城市内涝和山洪灾害。这些天气过程共同特点是空间尺度小、时间演变快,要求监测手段具备高时空分辨率。常规天气观测站距通常几十公里,时间间隔三到六小时,远远不能满足强对流天气的监测需求。

1.2 雷达观测的能力与局限

多普勒天气雷达是监测强对流天气最有效的工具之一。雷达通过发射电磁波并接收云雨粒子的后向散射信号,获取回波强度、径向速度和速度谱宽等信息。回波

强度反映降水粒子的密度和大小,径向速度提供风场信息。雷达时间分辨率通常五到六分钟,空间分辨率约一公里,能够捕捉强对流系统的生消演变过程。然而,雷达观测存在两个主要局限:一是低空盲区问题,受地球曲率和地形遮挡影响,难以探测近地面一公里以下大气状况;二是雷达观测的是空中云体特征,与地面实际发生的大风、冰雹、降水存在时空差异,不能直接等同于地面天气现象^[1]。

1.3 地面观测的能力与局限

地面自动气象站能够直接测量近地面的温度、湿度、气压、风向风速和降水量,是地面天气现象的直接反映,具有不可替代的作用。地面观测精度高,风速测量误差通常小于每秒 0.5 米,降水量误差小于百分之四。然而,地面观测存在空间覆盖不足的问题。我国国家级地面气象观测站站距在东部地区约十五到二十公里,西部地区更为稀疏。强对流天气系统空间尺度可能只有几公里,完全可能从两个观测站之间穿过而未被记录。此外,地面观测站只能获得单点数据,无法提供强对流系统的三维结构信息,难以单独完成监测预警任务。

1.4 协同监测的必要性

雷达观测的优势在于获取三维空间结构和高时间分辨率,劣势在于对近地面要素探测能力有限。地面观测的优势在于精确测量近地面气象要素,劣势在于空间覆盖稀疏。两种观测手段具有天然的互补性。雷达可以识别强对流云团的位置、强度和移动方向,但无法准确判断地面是否会出现大风和冰雹。地面观测站可以记录

实际发生的天气现象,但难以提前预警。将两者结合起来,用雷达观测弥补地面观测的空间盲区,用地面观测验证和订正雷达识别结果,可构建从高空到地面的完整监测链条。协同监测的核心在于时空匹配和联合分析,实现对强对流天气的早期识别和准确预警。

2 雷达与地面观测数据协同处理方法

2.1 数据时空匹配技术

雷达与地面观测数据协同处理首先需要解决时空匹配问题。时间匹配方面,雷达体扫周期通常五到六分钟,地面数据为分钟级。采用时间窗口法,以雷达体扫时间为基准,取前后两分钟内的地面观测值进行平均或取最近值。强对流天气发生时要素变化剧烈,时间窗口一般取正负一分钟为宜。空间匹配方面,将雷达极坐标数据转换为等经纬度网格,以地面观测站位置为中心,取周围三乘三或五乘五网格点的雷达数据平均值代表该站上空雷达特征。空间匹配需考虑雷达波束随距离展宽的问题,远距离处匹配窗口应适当扩大。关键是要正确对应雷达探测到的空中回波与地面观测站位置,考虑到强对流云体通常存在垂直倾斜,需根据风场信息进行位置订正^[2]。

2.2 雷达回波与地面要素的关联分析

雷达回波强度与地面降水强度存在正相关,但并非简单线性对应。同一回波强度对应的降水率可能因粒子谱分布不同而有较大差异。一般情况下,回波强度 30 至 40dBZ 对应中雨,40 至 50dBZ 对应大雨,50 至 60dBZ 对应短时强降水或冰雹。雷达径向速度可反映风场信息,出现正负速度对表明存在中气旋或辐合辐散特征,是预警地面大风的依据。垂直累积液态水含量反映云体中液态水总量,当该值超过每平方米 30 公斤且持续上升时,大冰雹概率显著增加。冰雹指数是基于雷达回波垂直剖面自动识别冰雹的产品,但存在一定虚警率。通过将雷达产品与地面观测记录对比分析,可建立本地化判据阈值,提高识别准确率。

2.3 风场信息的雷达反演与应用

多普勒雷达能直接测量径向速度,但无法获得水平风完整矢量。通过多仰角扫描和速度方位显示方法,可反演雷达上空的风廓线。强对流天气监测更常用径向速度图上的特征识别。中气旋是强对流风暴的典型特征,在径向速度图上表现为相邻的正负速度中心。识别中气旋后,结合地面大风观测记录,可建立中气旋参数与地面大风出现概率的关系。中气旋的旋转速度、垂直厚度和持续时间是判断地面大风潜势的重要指标。当旋转速

度超过每秒 15 米、厚度超过 3 公里且持续两个体扫以上时,地面出现灾害性大风的概率显著增加。出流边界是下沉气流扩散形成的风场辐合线,在径向速度图上表现为速度不连续线,经过观测站时伴有风向突变、风速增大和气温骤降。

2.4 降水与冰雹的联合识别方法

降水强度准确估计是短时临近预报的重要内容。单独使用雷达回波强度估计降水存在较大误差,引入地面雨量计校准是提高准确率的有效方法。采用最优插值或卡尔曼滤波,将雷达估计降水分布与地面雨量计实测值融合,可显著提高降水估计精度。冰雹的雷达识别主要基于回波强度、回波顶高和垂直累积液态水含量等参数,回波强度超过 50dBZ 且回波顶高超过 10 公里时具备冰雹潜势,60dBZ 以上强回波延伸到零度层高度以上 3 公里时出现大冰雹可能性很高。地面降雹观测记录可用于验证和校正雷达识别算法参数。通过分析大量冰雹事件的雷达特征,建立本地化冰雹识别模型,将虚警率控制在可接受范围。冰雹预警中,提前量是关键评价指标,雷达识别比地面观测通常可提前 10 到 30 分钟发出预警。

3 协同监测在典型强对流过程中的应用

3.1 雷暴大风过程分析

选取一次典型的雷暴大风事件分析协同监测效果。雷达回波图上,强对流云团呈弓形结构,弓形回波的前沿存在强反射率因子梯度区,这是地面大风即将出现的典型特征。径向速度图上,弓形回波后部存在大范围的速度模糊区,表明该区域风速超过雷达最大可测范围,推算实际风速超过每秒二十五米。地面观测站记录显示,在雷达识别出大风特征的十五分钟后,沿线观测站相继出现八级以上大风,最大风速达每秒二十八米。协同监测的提前预警时间约为十五分钟。分析还发现,雷达识别的出流边界移动速度与地面大风出现的时次有良好对应关系,出流边界经过观测站的时间与大风出现时间基本一致。这一案例说明,雷达能够提前识别出雷暴大风的前兆特征,为预警争取宝贵时间。

3.2 冰雹过程分析

选取一次伴有冰雹的强对流过程进行分析。雷达回波图上出现钩状回波和有界弱回波区,这是超级单体风暴的典型结构特征。垂直剖面上,50 dBZ 以上的强回波伸展高度超过零度层高度五公里,满足大冰雹形成的条件。垂直累积液态水含量持续上升,峰值达到每平方米七十公斤。冰雹指数算法发出冰雹警报。地面观测站记录显示,在雷达首次识别出超级单体特征后约二十

五分钟,观测站出现直径三厘米的大冰雹。协同监测的提前预警时间约为二十五分钟。通过分析冰雹发生前后雷达特征的变化,发现垂直累积液态水含量在冰雹降落前十分钟达到峰值然后快速下降,这一特征可用于判断冰雹是否已经开始降落。雷达与地面观测的结合,不仅能够实现冰雹的提前预警,还能通过地面降雹记录验证雷达识别方法的准确性^[3]。

3.3 短时强降水过程分析

选取一次短时强降水事件进行分析。雷达回波图上,强降水回波呈团状结构,回波强度四十到五十dBZ,回波顶高八到十公里。雷达一小时累积降水估计产品显示,强降水中心位于上游地区,向东偏北方向移动。地面雨量计记录显示,雷达估计的降水落区与实况基本一致,但降水强度存在一定偏差。通过引入地面雨量计进行实时校准,降水估计精度得到明显改善。协同监测的优势在于,雷达能够提前判断强降水云团的移动方向和影响时段,地面雨量计能够提供精确的降水强度信息。将两者结合,可以对未来一小时的累计降水量做出较为准确的估计,为城市内涝预警和中小河流洪水预报提供依据。该案例中,雷达识别出降水云团发展增强趋势后约三十分钟,下游观测站开始出现短时强降水,协同监测提供了有效的预警信息。

4 协同监测的关键技术与未来展望

4.1 协同监测的技术流程

基于上述分析,可归纳出雷达与地面观测协同监测的技术流程。第一步是数据获取与质量控制,包括雷达数据的杂波抑制和衰减订正,地面数据的极值检查和时空一致性检验。第二步是时空匹配,将雷达体扫数据与地面观测数据按照时间窗口和空间窗口进行对应。第三步是特征提取,从雷达数据中提取回波强度、径向速度、垂直累积液态水含量、冰雹指数等产品,从地面数据中提取风速、降水量等要素。第四步是关联分析,建立雷达特征与地面天气现象之间的对应关系,识别强对流天气的前兆特征。第五步是预警决策,根据关联分析结果判断预警等级和影响范围,向决策部门和公众发布预警信息。整个流程需要在五到十分钟内完成,对数据处理速度和算法效率要求较高。

4.2 双偏振雷达的应用前景

双偏振多普勒天气雷达是近年来推广应用的新技术。相比于常规多普勒雷达,双偏振雷达能够发射水平和垂直两种极化方式的电磁波,获取差分反射率、相关系数、差分传播相位等偏振参数。这些参数对降水粒子的形状、大小和相态更加敏感,能够有效区分雨、雪、冰雹、霰等不同降水粒子类型。在强对流天气监测中,双偏振雷达能够更准确地识别冰雹区域,降低冰雹预警的虚警率。相关系数产品可以清晰识别碎屑区,为龙卷预警提供关键依据。双偏振雷达与地面观测的协同应用,将进一步提升强对流天气的监测预警能力^[4]。未来发展中,应加强双偏振雷达数据的应用研究,建立基于偏振参数的强对流识别模型。

结束语

雷达与地面观测协同监测是提升强对流天气预警能力的有效途径。雷达观测能够提供云体三维结构和高分辨率信息,地面观测能够提供近地面气象要素的精确测量,两者具有天然的互补性。本文研究了数据时空匹配、雷达回波与地面要素关联分析、风场信息反演、降水和冰雹联合识别等关键协同监测技术。协同监测的技术流程包括数据获取与质量控制、时空匹配、特征提取、关联分析和预警决策五个环节。双偏振雷达和人工智能技术的应用将进一步推动协同监测能力的发展。建议加强雷达与地面观测数据的融合应用研究,建立本地化的判据和模型,不断提升强对流天气短时临近预报水平。

课题:“中国气象局大气探测重点开放实验室(Key Laboratory of Atmosphere Sounding, China Meteorological Administration)”开放课题资助。

参考文献

- [1] 陶局,姚聃,肖艳姣,等.基于区域雷达组网的强对流天气监测预警方法[J].气象,2026,52(4):415-431.
- [2] 杨正玮,邹万峰.强对流天气下雷达异常监测回波报警系统设计[J].现代电子技术,2021,44(10):1-5.
- [3] 杨金红,吴蕾,李瑞义,等.雷达监测产品在2021年强对流天气中的应用分析[J].气象研究与应用,2022,43(2):93-97.
- [4] 吕雪芹,霍亚,曾璇.相控阵天气雷达监测预警龙卷风的过程剖析[J].热带气象学报,2024,40(1):33-39.