

拉萨市灾害性天气智能监测预报预警系统

洛桑 卫东 扎西罗杰 次珍 旦增格列

拉萨市气象局，西藏自治区拉萨市，850000；

摘要：拉萨位于青藏高原腹地，受高原强对流活动和季风系统共同影响，雷暴大风、短时强降水和冰雹等灾害性天气频繁发生，给城市安全运行和社会经济发展带来显著挑战。本研究在系统分析拉萨灾害性天气成因的基础上，构建了集多源观测融合、智能识别、短时临近预报与分级预警发布于一体的灾害性天气智能监测预报预警系统。系统依托C波段与X波段雷达、自动站、卫星及CLDAS等数据，通过深度学习算法和SWAN3.0框架实现对强对流生命史特征的快速识别及对0-12小时趋势的高精度预报。

关键词：拉萨；灾害性天气；智能监测；短时临近预报

DOI: 10.64216/3080-1494.25.10.068

引言

青藏高原具有独特的热力和动力特征，是影响我国天气气候的重要源区，高原复杂地形使局地强对流活动具有突发性强、时间尺度短和空间尺度小等显著特征。传统的监测与预报方法在高原地区受到雷达遮挡、观测稀疏和数据质量波动的制约，难以满足近年快速增长的城市安全管理、重大活动保障和公众气象服务需求。在气象现代化建设不断推进的背景下，如何依托多源观测，提升对强对流系统的识别能力，并通过人工智能与数值模式融合实现更高精度的短时临近预报，已成为拉萨气象业务体系升级的关键^[1]。本研究围绕灾害性天气特点，对智能监测、外推预报、预警发布和市区两级协同运行机制进行系统设计与验证，旨在构建一套适应高原条件、响应迅速、精度可靠的灾害性天气智能监测预报预警系统，以增强拉萨在极端天气背景下的综合防灾减灾能力。

1 拉萨市灾害性天气类型和成因

1.1 雷暴大风天气

拉萨市雷暴大风多发于夏半年，其形成与高原强烈的地表加热、高空急流扰动以及局地地形触发密切相关。受青藏高原热力差异控制，午后近地层迅速增温，使大气层结明显不稳定。当高空切变线或弱槽东移进入区域时，易触发发展迅速的强对流单体或多单体系统。由于拉萨河谷呈典型狭长地形，峡谷侧向辐合作用增强上升运动，使积雨云体垂直发展更为旺盛。雷暴成熟阶段的强下击暴流或后部入流可在地面形成突发性大风，常表现为短时极大风速、风向急剧摆动，且破坏性强。

1.2 短时强降水

拉萨短时强降水具有突发性强、局地性显著、影响链条长等典型高原特征。夏季受印度季风北上影响，低层暖湿气流可沿雅鲁藏布江谷通道输送至拉萨，叠加高原热力抬升作用，形成深厚湿层和显著不稳定能量。当高空存在急流出口区或高原涡旋活动增强时，上升触发条件更容易满足，导致深对流快速发展。受河谷地形限制，降水落区多呈条带状或片状分布，短时雨强可在极短时间内突破阈值，引发城市内涝和山洪、泥石流等次生灾害。在雷达应用中，高原地形导致回波衰减与地物杂波显著，使强降水回波定量估测偏差较大，给短时临近预报造成挑战。

1.3 冰雹灾害天气

拉萨冰雹灾害具有高原冷源强、云体发展快、局地致灾重的显著特征。高原大气普遍温度偏低，使0℃层高度显著降低，冰雹在对流云中更易形成并到达地面。夏季午后，地表强烈加热导致强上升气流触发深对流，云内存在显著的过冷水区和强上升运动，有利于雹胚不断冻结生长^[2]。当高空干冷空气南侵或强切变增强云体倾斜结构时，更容易形成与地形耦合的多单体或超单体强对流，从而产生大冰雹。拉萨周边山地坡度大、河谷开阔度变化明显，也使局地产流与辐合抬升得到强化，进一步提升冰雹生成概率。

2 拉萨建设灾害性天气智能监测预报预警系统的必要性

灾害性天气智能监测预报预警系统可显著提升拉萨在强对流识别、短时趋势判别和风险区域定位方面的

能力。人工智能算法在海量样本上训练后,可识别强对流生命史特征,补偿高原复杂地形导致的传统雷达质控不足问题。系统进一步结合融合预报与深度学习模型,提高0~2小时临近预报、2~12小时短临趋势预报的准确度和稳定性,为城市内涝防控、景区管理、重大活动保障提供更具针对性的决策支撑^[3]。

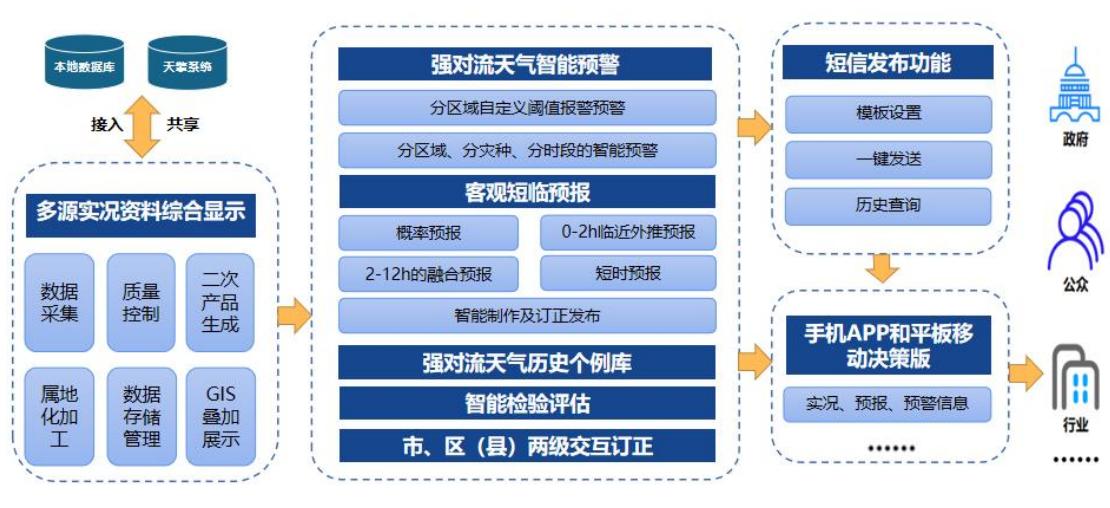


图1 技术路线

3.2 硬件设计

3.2.1 数据采集与传输单元

考虑拉萨高原稀薄空气和复杂地形对通信链路的影响,该单元采用冗余化设计,采集端覆盖自动站、雷达、卫星接收机、气象探空站以及区域增强型降水监测设备,并通过高精度授时系统实现分钟级数据同步。为降低高原天气对设备的损耗,所有前端采集硬件均配备耐低温与高辐射的工业级组件,通信节点以可自愈的网状拓扑构建,在任何单链路受阻时可自动切换路径,确保数据连续流动。

3.2.2 服务器与运算平台

平台由计算节点、存储节点和管理节点组成,各节点之间通过高速互联网络实现低延迟通信。计算节点采用多核CPU结合GPU加速的异构架构,可同时支持传统物理模式计算与深度学习模型推理,有利于在强对流快速发展时实现分钟级更新的短临预报。存储节点采用分布式文件系统,结合冷热分层策略,将高频分析数据置于高速SSD集群,历史个例库与长期检验资料归档于容量型存储中,以兼顾性能与成本。平台能够根据天气过程自动调度资源,在强对流高发时启用更多计算节点形成临时扩容,以保证雷达回波外推、概率预报和智能识别模型无延时运行。

3 系统设计

3.1 技术路线

拉萨市灾害性天气智能监测预报预警系统的总体架构以“多源融合、智能分析、分级响应”作为核心设计理念,具体技术路线如下:

3.2.3 用户终端与应急响应单元

预报业务终端采用多屏幕集成显示方式,能够同时呈现雷达拼图、卫星云图、自动站实况以及模式预测结果,且界面支持自由叠加、拖拽与缩放,以便在复杂天气过程中开展快速诊断。终端具备市区两级预报交互功能,基层预报员可在统一平台上进行落区订正、时效调整和预报说明标注。对于应急部门和政府指挥中心,系统提供专用大屏展示与简化交互界面,可在重大天气事件中快速获取灾害风险评估和预警等级变化。公众侧通过手机APP、短信平台及移动决策端实时接收预警信号、短临提醒和位置化风险提示,使全民能在雷暴大风、短时强降水和冰雹发生前及时采取防御措施。为适应高原多变的通信条件,终端通信模块采用弱网优化协议,并支持离线缓存预案信息,在关键时刻确保预警触达不受影响。

3.3 系统软件设计

3.3.1 数据处理与质量控制模块

鉴于拉萨地区高原地形复杂、雷达杂波显著、衰减影响明显,该模块构建分层质控流程,包括地物杂波识别、气候特征背景场订正及波束遮挡补偿等技术,确保雷达回波的可信度。自动站资料通过时序一致性检验、空间邻域比对和异常跳变识别等方法进行多级筛查,以

剔除受强风、积水或设备故障影响的噪声数据。卫星、微波辐射计和风廓线资料则通过融合算法生成垂直剖面信息，为对流触发诊断和模型同化提供高质量输入。所有质控后的数据按统一格式存储到大数据平台，并在分钟级周期内自动更新，为智能识别、外推算法和短临预报提供稳定输入来源。模块还包含实时监控机制，当数据链路中断或设备异常时可自动切换备用源并生成提示，保障整体系统在极端天气期间的连续性和可靠性。

3.3.2 智能识别与预报算法模块

模块基于雷达三维结构特征、自动站突变信号和卫星亮温变化构建多模态输入，将传统物理识别指标与深度学习网络结合，提高高原地区对流系统识别的敏感度。对于雷达外推，系统采用光流法与三维风场约束相结合的外推算法，可在强对流快速生消阶段保持稳定性，生成0至2小时的分钟级外推产品。在2至12小时预报方面，模块融合SWAN3.0框架与本地化训练模型，通过统计后处理技术减少地形影响带来的系统性偏差。冰雹识别模型将反射率、差分相移、上升运动强度等关键特征输入神经网络，以提升冰雹落区判断的准确率。

3.3.3 预报展示与决策支持模块

预报展示与决策支持模块面向业务人员和应急部门，旨在为复杂天气情境下提供直观、连续和可解释的决策信息。界面采用多图层GIS架构，将雷达、卫星、自动站、模型预报和灾害风险区域叠加呈现，并可根据用户需求自由切换时效、强度等级和灾种类型。模块提供交互式订正工具，预报员可对外推落区、雨强等级和预警发布范围进行快速调整，使人机协同达到最优效果。

在决策支持方面，系统结合历史个例库和实时环境场，自动生成风险等级评估、潜在影响区域和重点防御清单，帮助应急指挥机构提前部署防御措施。模块还能根据市区两级职责要求，将指导性预报同步传输至基层气象部门，实现同一事件在不同行政层级间的一致性响应。移动端界面保证预报员在外出或应急现场仍能实时获取最新监测信息并快速发布短临提示，从而形成完整、连续、可追溯的预报预警链条。

4 应用完善措施和推广建议

4.1 应用完善措施

为确保拉萨市灾害性天气智能监测预报预警系统在业务运行中持续保持高质量表现，并进一步提升其在高原复杂环境下的适应力，系统建设完成后应在应用环

节不断完善技术细节与服务流程：

4.1.1 需要继续加强多源观测资料的本地化质量控制

高原地形导致雷达回波易受地物杂波、波束遮挡和衰减影响，因此应在业务运行中持续优化适用于高原环境的杂波识别方法，通过引入地形修正参数、增强气候背景场约束以及改进衰减校准方法，使雷达产品的准确性和稳定性不断提高。同时在自动站资料处理方面，可结合时序检验、邻域比对和气候异常阈值等方法构建更严格的自动化质控流程，以有效剔除受恶劣天气、环境干扰或设备故障影响的异常数据，从而保证系统在输入端获得高可信度的实时资料，为预报算法提供可靠基础^[4]。

4.1.2 应推进智能识别模型的迭代训练

由于高原地区强对流系统生命史短、结构复杂且空间尺度小，单一模型难以适应所有类型的灾害过程，因此需要不断扩充本地化训练样本，包括雷暴大风、极端短时雨强、冰雹落区偏移等典型案例。同时可引入更高时空分辨率的再分析资料，丰富模型的环境场特征，使其在处理快速生消系统、强回波移动路径以及多单体合并和分裂等复杂情形时表现出更高的敏感度和稳定性。通过这种循环训练机制，模型将在真实业务数据驱动下不断学习高原强对流系统的独特演变规律，从而显著提高智能识别和短临预报的整体精度。

4.1.3 建议进一步强化市区两级的联动订正机制

由于拉萨地域跨度大、局地地形差异明显，灾害性天气分布常呈现强局地性，因此需要建立更加细化的协同流程，使市局与区县局能够在统一平台上进行及时的落区调整、时效订正和风险等级评估。通过建设标准化的订正界面和审核流程，可保证同一天气事件的预报在市县两级保持一致性，避免因信息不对称造成的预警偏差，从而提高整体业务链条的权威性和可信度。此外还应增强预报员与应急部门之间的协同沟通，构建更具操作性的跨部门联动机制，使预警能够在最短时间内传达至关键岗位，确保灾害防御行动高效启动。

4.2 推广应用措施

在推广应用方面，应充分发挥系统在高原城市防灾减灾体系中的综合作用，使其在更广范围内服务城市安全管理和社会发展需求。首先可推动系统在重大活动气象保障中的深度使用，通过移动终端、雷达拼图、实时外推和智能提示功能，为大型会议、节庆活动和重要工

程建设提供更高时效的气象风险预判。其次可将系统成果拓展至交通安全管理领域，例如在机场、铁路、公路沿线建立快速风险提醒机制，使突发强对流信息能够直接服务运行调度与应急处置。在电力巡护方面，可利用系统的短时强天气预报能力提前识别可能影响线路安全的区域，提高电力部门的巡护效率和设备运维主动性。此外在地质灾害防御领域，可将短时强降水识别结果与地质灾害风险图叠加使用，为山洪、泥石流等灾害的提前处置提供更精准的参考。

5 结束语

本研究围绕拉萨高原区域灾害性天气的成因特征及业务需求，构建了多源融合、智能识别与短时临近预报相结合的灾害性天气智能监测预报预警系统，并通过典型个例测试验证了其在复杂地形条件下的业务稳定性与预报准确度。系统在强对流快速发展阶段表现出更高的识别敏感度和更长的预警提前量，显著改善了以往观测受限和落区偏差较大的问题。

未来工作可在更高时空分辨率的观测资料、多模式集合预报、人机协同订正以及跨部门数据共享方面进一步拓展，使系统在城市治理、应急响应和社会服务中的

应用价值持续提升。本研究所形成的技术体系不仅能够加强拉萨市的气象防灾减灾能力，也可为高原复杂地形地区的气象现代化建设提供可复制的经验与应用示范。

参考文献

- [1] 孙艳云, 丛郁, 李东宇, 等. 基于人工智能技术的天气现象视频监测系统[J]. 电子设计工程, 2023, 31(08): 114-118.
- [3] 黄亮, 道路交通恶劣天气监测预警处置关键技术研发与应用. 江苏省, 江苏省气象服务中心, 2022-08-29.
- [4] 刘恺怿, 基于 ZigBee 的新一代天气雷达智能温湿度监测系统研究. 黑龙江省, 哈尔滨市大气探测技术保障中心, 2021-09-03.
- [5] 熊焱, 基于 CIMISS 的基层气象台灾害性天气实时信息智能自动化服务系统. 江西省, 南昌市气象局, 2019-07-18.

项目名称：拉萨市灾害性天气智能监测预报预警系统
(拉萨市科技局), 拉萨市科技局项目 (LSKJ202411) 资助。