

东北冷涡背景下垂直观测多要素 质量评估与典型应用分析*

郑 石^{1, 2} 张迪娅² 李 琳² 李宏硕² 刘钰婷²

1 中国气象科学研究院灾害天气科学与技术全国重点实验室, 北京 100081

2 辽宁省气象数据中心, 沈阳 110166

提 要: 沈阳现有的垂直观测系统评估体系并不完善, 评估工作大多依靠单一设备数据; 在东北冷涡强对流监测预警中, 多源垂直观测资料的应用分析能力也较为薄弱。文章旨建立冷涡环流背景下的多要素数据质量评估体系, 分析垂直观测设备在冷涡型强对流过程中的应用效果, 提高对冷涡天气的垂直立体监测和短期临近预报的能力。基于沈阳地基遥感垂直观测综合站的观测资料, 选取 2024 年 7 月 23—28 日辽宁特强区域暴雨过程, 结合探空观测数据, 建立多要素数据质量评估体系, 开展定量评估与应用分析。评估结果表明, 垂直观测系统的五类设备业务可用性均达到 100%, 数据质量满足业务要求。通过垂直观测多要素组合分析发现, 在东北冷涡、台风“格美”外围水汽输送和副热带高压共同影响下, 水汽迅速积聚、云系在垂直方向上发展迅速, 结合垂直温差、低层辐合上升和中层急流动量输送的叠加作用, 共同触发了本次强对流。本次过程中, 风廓线雷达提前 6~12 h 监测到了动力条件变化, 微波辐射计和 GNSS/MET 提前约 1.5 h 捕捉到水汽变化, 毫米波云雷达提前 30~60 min 监测到对流发展的临近特征。本研究建立的多要素质量评估体系, 可以满足垂直观测数据在东北冷涡背景下的质量评估与应用分析业务需求。多设备组合分析对于监测强对流天气动力触发、分析水汽演变过程以及临近预警等方面都显示出明显优势, 为辽宁地区强对流天气的精细化监测和短期临近预报提供了可靠的支撑。

关键词: 地基遥感垂直观测系统, 东北冷涡, 大气垂直廓线, 数据质量评估, 多要素融合

中图分类号: P413, P458 **文献标志码:** A **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.081402

Quality Evaluation and Typical Application Analysis of Multi-Element Vertical Observation Under the Northeast Cold Vortex

ZHENG Shi^{1, 2} ZHANG Diya² LI Lin² LI Hongshuo² LIU Yuting²

1 State Key Laboratory of Severe Weather Meteorological Science and Technology, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Liaoning Meteorological Data Center, Shenyang 110166

Abstract: The existing evaluation for the Shenyang vertical observation system are imperfect, with most evaluation work relying on single-equipment data. In addition, the capacity to conduct application analysis on multi-source vertical observation data in the monitoring and early warning of severe convective weather induced by Northeast cold vortex is still insufficient. The study intends to establish a multi-element data quality evaluation system, analyze the practical performance of observation during cold vortex severe convective weather processes, and enhance

*中国气象科学研究院灾害天气科学与技术全国重点实验室开放课题 (2025KFA11) 和 2025 年辽宁省科技计划联合计划项目 (2025-MSLH-377) 共同资助

2026 年 2 月 27 日收稿; 2026 年 8 月 14 日收修定稿

第一作者: 郑石, 主要从事雷达资料处理及应用研究. Email:510042894@qq.com

capability of vertical monitoring and nowcasting capabilities for cold vortex weather. Based on the observation data from the Shenyang Ground-based Remote Sensing Vertical Observation Comprehensive Station, this paper takes the extremely heavy regional rainstorm process in Liaoning from 23 to 28 July 2024, combines radiosonde observation data, establishes a multi-element data quality evaluation system, and carries out systematic evaluation and application analysis. The evaluation results indicate that the operational availability of all five types of equipment in the vertical observation system reaches 100%, and the data quality meets the operational standards. Multi-element combined analysis of vertical observations reveals that affected by the northeast cold vortex, water vapor transport from the periphery of Typhoon Gaemi, and the subtropical high, the water vapor rapidly accumulates, and the cloud systems in the vertical direction develop rapidly, combined with vertical temperature difference, low-level convergence and upward movement, as well as mid-level jet momentum transport, jointly trigger the severe convection process. During this process, the wind profile radar can indicate changes in dynamic conditions 6-12 h in advance, the microwave radiometer combined with GNSS/MET observation can capture precursor signals of water vapor fluctuations 1.5 h in advance, and the millimeter-wave cloud radar can monitor the imminent development characteristics of convection 30-60 min in advance. The established multi-element quality evaluation system can meet the multi-element data quality evaluation and application analysis of the vertical observation system under the cold vortex background. The multi-equipment combined analysis shows significant advantages in the identification of dynamic triggers, tracking of water vapor evolution, and imminent early warning of severe convective weather, providing reliable support for the refined monitoring and short-term forecasting of severe convective weather in Liaoning.

Key words: vertical observation of ground-based remote sensing, northeast cold vortex, atmospheric vertical profile, data quality evaluation, multi-element fusion

引 言

东北冷涡是影响我国东北地区夏季强对流的主要高空天气系统,其输送的干冷空气和近地面暖湿气流相遇时,容易引起局地强降水、雷暴大风等灾害性天气(任丽等, 2025; 钟水新, 2011)。近年来,东北冷涡背景下的极端强对流事件出现频率明显增多,对精细化垂直观测的需求也随之增加(刘玉莲等, 2025; 杨雪等, 2025)。

地基遥感垂直观测系统是我国新一代综合气象观测体系的重要组成部分(张鹏等, 2025),具有多设备协同与高时空分辨率的特点,可以对大气温湿廓线、云微物理特征、风场、水汽和气溶胶等多要素进行立体、连续的监测,进一步提升了对灾害性天气的垂直探测能力(李力等, 2024; 肖婷等, 2022)。垂直观测资料能够准确地反映大气三维结构、分析中小尺度天气系统的发展演变过程,资料的数据质量可能会影响强对流天气监测预警的准确性(茆佳佳等, 2025; 李彦霖, 2024)。2023年11月,沈阳完成了地基遥感垂直观测系统的建设,这是辽宁地区第一个综合垂直观测体系,集成了微波辐射计、风廓线雷达、毫米波云雷

达、GNSS/MET、气溶胶激光雷达五类设备及附属融合系统。该系统获取的高频次、高精度观测数据，可用于捕捉东北冷涡背景下的中小尺度对流系统演变(阎琦等，2024)。

微波辐射计可以全天候反演大气温湿廓线和云液态水路径，精准识别对流潜势(李红星等，2023；孔凡超等，2021)；毫米波云雷达能探测到云内的微物理粒子，增强云系演变和云内粒子的监测分析能力(李博宇等，2024；王卫民等，2024)；风廓线雷达能获取垂直风场的结构，为分析对流的动力条件提供参考(柯莉萍等，2023；罗敬等，2024)；GNSS/MET 可以反演大气可降水量，实现区域内水汽的连续监测(杜明斌等，2024；张京江和李炬，2025)；气溶胶激光雷达可揭示气溶胶垂直分布规律，用于辅助分析对流发生的环境背景(何敏等，2025；王文萧等，2025)。

然而，受仪器性能、天气过程、反演算法等多类因素影响，垂直观测数据质量会存在一定的误差和不确定性(茆佳佳等，2025)。目前在垂直观测数据质量控制与评估方向，已有学者进行了相关研究。刘未希等(2025)利用探空和再分析资料，建立了基于加权欧式距离的微波辐射计温度廓线评估方法；夏芸洁等(2024)利用风廓线雷达和激光雷达观测资料，提出了水平风场的分段曲面拟合优化算法；王惠莹等(2025)根据毫米波云雷达回波特征，提出杂波质量控制算法；远芳等(2022)利用多套再分析资料，采用综合决策方法评估 GNSS/MET 水汽产品精度；季承荔等(2024)结合微波辐射计资料改进气溶胶质量浓度的反演精度。但以上大部分研究都是针对单个设备开展，未考虑不同天气系统下研究的差异性。

目前涉及的东北冷涡研究中，大部分学者关注较多的是天气学成因分析和预报方向(钟水新，2011)，如通过分析冷涡结构、垂直风切变及水汽输送等，建立强降水落区预报指标，而现有的研究数据大多来自单一观测设备或传统探空资料。目前，对于沈阳地基遥感垂直观测系统多要素数据的量化评估工作还存在不足，缺少对冷涡天气过程数据准确性的检验和服务应用的精细化研究，不能满足区域性强对流天气精准监测预警的服务需求。

本研究基于东北冷涡天气背景，根据其环流特征和环境条件，建立地基遥感垂直观测数据质量评估体系，对微波辐射计、毫米波云雷达、风廓线雷达、GNSS/MET 及气溶胶激光雷达五种地基遥感设备开展数据质量评估研究。以 2024 年 7 月 23—28 日辽宁地区强对流过程为实例，分析垂直观测数据及观测产品在对流监测预警中的服务应用效果。本次过程受东北冷涡、台风“格美”外围水汽输送及副热带高压边缘不稳定能量共同影响，是 1951 年以来辽宁省同期最强的区域性暴雨过程，全省平均降水量达到了 192.8 mm，强降水中心位于沈阳及周边区域。通过本研究可以完善冷涡背景下多源垂直观测资料的质量评估与融合应用能力，提升新型探测资料在冷涡强对流天气过程中的支撑能力，为辽宁省强降水、雷暴大风等灾害性天气预报、预警提供数据支撑与技术参考。

1 数据与方法

1.1 观测数据

采用 2024 年 7 月 23——28 日时间段内,沈阳高空站的地基遥感垂直观测系统资料,该系统集成五类垂直设备,技术参数和主要数据产品为:微波辐射计为 K/V 波段,时间分辨率为 2 min,垂直探测范围为 0~10 km,主要反演数据包括大气温度、相对湿度等垂直廓线;毫米波云雷达为 Ka 波段,时间分辨率为 1 min,垂直探测范围为 0~15 km,主要观测数据有回波强度、径向速度及谱宽等;风廓线雷达的时间分辨率为 6 min,垂直有效探测范围为 0~10 km,主要观测数据包括水平风场、垂直速度廓线等;GNSS/MET 水汽观测系统的时间分辨率为 5 min,主要反演数据为大气可降水量;气溶胶激光雷达的时间分辨率为 5 min,垂直探测范围为 0~6 km,主要观测数据有气溶胶消光系数、退偏振比等垂直廓线。

为检验上述几类垂直观测数据的准确性,本文采用沈阳高空站同址的 L 波段探空数据作为验证基准,每日 08 时和 20 时(北京时,下同)分别进行探空放球观测,能够探测到 0~20 km 高度范围内的温度、气压、湿度和风场廓线,可作为评估垂直廓线数据准确性的依据。此外,还采用同址的分钟级地面观测数据,包括降水、温度、湿度、风速等要素,辅助开展东北冷涡背景下强对流过程的应用分析。

1.2 设备运行评估方法

评估设备运行状态的核心指标是业务可用性,具体含义为:评估时段内设备无故障运行且产品质量正常的时间,占规定应业务运行时间的百分比。按照设备类型、观测方式、数据传输模式及业务质量控制流程的不同,本文采用两种计算方法对五类设备运行进行评估。

风廓线雷达、毫米波云雷达、微波辐射计和气溶胶激光雷达这四类设备的观测产品都是连续时间序列,应以时间作为统计单元来计算业务可用性 A_0 , 公式如下:

$$A_0 = \frac{T_{on} + T_{pm} + T_s}{T_t} \times 100\% \quad (1)$$

式中: T_t 为规定应观测总时间; T_{on} 为设备正常运行且产品质量正常的总时间; T_{pm} 为维护性停机、维修性停机、专项活动停机等非故障性停机的总时间; T_s 为特殊情况停机的总时间。

GNSS/MET 水汽观测系统采用外部导航卫星信号,通过信号延迟反演整层水汽,数据以整点时次文件形式传输,其业务可用性 A_0 采用时次维度计算:

$$A_0 = \frac{N_{total} - N_{miss} - N_{incomplete} - N_{error}}{N_{total}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: N_{total} 为规定时段内应观测总时次数(按每日 24 次计算); N_{miss} 为未观测到数据文件的时次数; $N_{incomplete}$ 为数据文件解压后 M、N、O 文件存在缺失的时次数; N_{error} 为数据经质量检查后判定为错误的时次数。

1.3 数据质量评估方法

1.3.1 数据质量控制

根据相关要求，所有观测数据在评估前已进行质量控制。质量控制包括观测端和中心级质量控制两级。观测端质量控制是在设备端自动完成对状态信息、采样数据及反演产品的初步质量控制并附加质量控制标识；中心级质量控制是在数据集成后，通过智能化算法和多源数据交叉验证技术进行综合质量控制。

1.3.2 数据质量评估

本研究以时空匹配的同址探空数据为主要基准(李俊等, 2025)，对各类垂直观测产品的核心气象要素进行定量比对。以下分别针对微波辐射计温度与相对湿度、风廓线雷达风速与风向、毫米波云雷达云顶与云底高度、GNSS/MET 大气可降水量 (PWV) 与对流层总延迟 (ZTD)、气溶胶激光雷达瑞利拟合误差和有效探测距离开展评估。

以探空观测的温度和相对湿度为基准，对微波辐射计温度和相对湿度廓线进行评估，指标包括平均系统偏差 (BIAS)、均方根误差 (RMSE) 和相关系数 (R)。受探测原理影响，降水粒子会干扰微波辐射计观测信号，造成数据失真(傅新姝等, 2023)，因此应选择晴空或稳定有云天气下的观测样本，剔除降水时段和探空球漂移过大时的数据(董自鹏等, 2025)。0~10 km 高度内，采用线性插值方法，将探空数据插值到地基遥感垂直观测设备的观测高度层上。探空气球上升至 10 km 高度约需要 30 min，因此在评估时使用放球后 30 min 内的平均廓线进行对比。BIAS、RMSE 和 R 的计算公式如下：

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{ci} - x_{ti}| \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{ci} - x_{ti})^2}{n}} \quad (4)$$

$$R = \frac{n \sum_{i=1}^n x_{ci} x_{ti} - \sum_{i=1}^n x_{ci} \sum_{i=1}^n x_{ti}}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_{ci}^2 - (\sum_{i=1}^n x_{ci})^2} \cdot \sqrt{n \sum_{i=1}^n x_{ti}^2 - (\sum_{i=1}^n x_{ti})^2}} \quad (5)$$

式中： x_{ci} 为微波辐射计垂直廓线要素数值， x_{ti} 为探空廓线要素数值。

以探空观测的风为基准，评估风廓线雷达的风速、风向准确性，评估指标为 BIAS、RMSE 和 R。选取每日 07:15—07:45 与 19:15—19:45 的风廓线雷达数据，与对应时次的探空风场进行比对（比对前对水平风速和风向的偏差数据进行大误差剔除）。探空数据插值至风廓线雷达的高度层（边界层雷达为 0~6 km，对流层雷达为 0~12 km）

以探空数据反演的云高为基准，评估毫米波云雷达观测云高（云底高、云顶高）的相对

系统误差。为减少云随机变化的影响,选取云高变化较为平缓的层状云过程,只有当云底高(云顶高) ≥ 1 km 时,才进行相对系统误差 $\bar{x}$ 的计算,公式如下:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_{di} - x_{si}}{x_{si}}}{n} \times 100\% \quad (6)$$

式中: x_{di} 为云雷达第 i 个样本观测云高, x_{si} 为探空反演第 i 个样本云高, n 为样本总数。

以探空资料计算的 PWV 和 ZTD 为基准,评估 GNSS/MET 反演的 PWV 和 ZTD 准确性,评估指标为 BIAS、RMSE 和 R 。PWV 采用压强积分法计算(李成才和毛节泰, 1998), ZTD 基于大气折射率积分进行推导(Bevis et al, 1992)。针对气溶胶激光雷达,评估大气瑞利信号拟合一致性与有效探测距离两项指标。连续采集 1 组原始数据,以距离为横坐标,信号幅值为纵坐标,获得距离平方校正信号,采用美国 1976 标准大气模式瑞利散射距离平方校正信号。按式 (7) 计算斜率 k :

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} \quad (7)$$

式中: k 为重合区域一阶线性拟合斜率值; $\bar{x}$ 为重合区域 n 个信号点高度的平均值,单位: m; x_i 为重合区域 i 序号对应的探测点探测高度,单位: m; $\bar{y}$ 为重合区域 n 个点信号距离平方校正强度的平均值; y_i 为重合区域 i 序号对应的探测点信号距离平方校正强度; i 为测试数据序号 ($i=1,2,\dots,n$); n 为选定的一个确定高度范围内的测试数据个数。理想情况下校正后信号与理论瑞利信号完全一致,斜率应为 1,故可按照式 (8) 计算相对偏差 δ :

$$\delta = |k - 1| \times 100\% \quad (8)$$

为规避云、降水粒子对激光信号的衰减干扰,客观评估设备固有探测性能(孙灿等, 2025; Sassen, 1991),选取能见度 ≥ 10 km 的晴朗天气下的 1 min 原始数据,按式 (9) 计算信噪比 SNR,当 $\text{SNR} \geq 3$ 时为有效信号,对应的最大高度即为有效探测距离。

$$\text{SNR} = \frac{\text{Signal}}{\text{Noise}} \quad (9)$$

$$\text{Noise} = \sqrt{\frac{\sum_{i=m}^{m+n} (x_i - \bar{x})^2}{n+1}}$$

式中: Signal 为减背景后的信号强度, m 为计算背景基线的起始点, $m+n$ 为背景基线的结束点, x_i 为背景基线第 i 个数据值, $\bar{x}$ 为背景基线数据平均值。

2 设备运行评估与数据质量分析

2.1 设备运行评估

选取 2024 年 7 月 23—28 日强对流过程的数据进行了设备运行质量评估,指标包括业务可用性和数据获取率,评估结果列于表 1。在整个评估时段内,所有设备正常运行,没有出现设备故障,业务可用性全部为 100%,符合中国气象局业务指标的要求;数据获取率均高于 85%的考核指标,满足运行质量评估的要求,可以较好地支撑数据质量评估分析和产品应用的需求。

表 1 2024 年 7 月 23—28 日沈阳高空站地基遥感垂直观测系统设备运行评估结果

Table 1 Equipment operation evaluation results of Ground-Based Remote Sensing Vertical Observation System at Shenyang Upper-air Station on 23–28 July 2024				
设备名称	业务可用性/%	业务可用性指标/%	数据获取率/%	数据获取率指标/%
微波辐射计	100	85	100	85
毫米波云雷达	100	85	100	85
风廓线雷达	100	95	99	85
GNSS/MET	100	92	100	85
气溶胶激光雷达	100	85	88	85

2.2 多要素数据质量分析

2.2.1 微波辐射计温度、相对湿度准确性评估

经过筛选剔除降水时段和探空球明显漂移的数据后,共得到时空匹配的温度样本 356 对、相对湿度样本 407 对。依据上述方法进行评估,温度与相对湿度要素准确性计算结果列于表 2。

表 2 2024 年 7 月 23—28 日沈阳高空站微波辐射计、风廓线雷达和 GNSS/MET 多要素准确性评估结果
Table 2 Multi-element accuracy evaluation results of microwave radiometer, wind profiler radar and GNSS/MET at Shenyang Upper-air Station on 23–28 July 2024

要素	RMSE	R	BIAS
温度/℃	2.4	1	-0.92
相对湿度/%	13.18	0.88	0.75
风速/(m s ⁻¹)	1.9071	0.9505	-0.7123
风向/(°)	15.2965	0.9525	-11.392
PWV/mm	2.76	0.9574	-2.24
ZTD/mm	16.27	0.9619	-13.49

根据评估结果,温度廓线的 R 值为 1,说明微波辐射计反演的垂直温度分布和探空观测的温度变化趋势完全一致,系统随机误差较小。但 RMSE 值为 2.4 ℃,略大于业务考核标准 1.8 ℃,存在-0.92 ℃的 BIAS,表明反演值整体存在一定的离散度和系统性低估。相对湿度廓线的 RMSE 值为 13.18%,满足 $\leq 15\%$ 的业务要求; R 值为 0.88,能够较为准确地反映湿度垂直变化特征;BIAS 为 0.75%,有轻微的系统性高估,对整体反演精度的影响不大。图 1 为温度、湿度廓线 RMSE 值随高度分布情况。温度廓线(图 1a)显示,2 km 以下的低层大

气中，温度反演误差一般在 $1\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间，说明东北冷涡天气背景下，低层温湿层结比较稳定，设备探测性能较好； 2 km 以上的中高层大气中，受东北冷涡系统冷暖平流交汇、剧烈垂直梯度变化的影响，导致误差随高度增大，最大误差接近 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，反演的不确定性也相应增大。湿度廓线（图 1b）显示，由于中高层干冷空气入侵和湿度场垂直梯度增大，低层误差波动较小，高层误差增大，整体误差仍在阈值范围内。

综上，在本次东北冷涡天气过程中，微波辐射计对于 $0\sim 2\text{ km}$ 低层大气温湿廓线的反演准确性较高；而对中高层大气的探测，受冷涡系统导致的强垂直梯度变化以及冷暖平流过程影响，温度、湿度反演误差均有所增加。

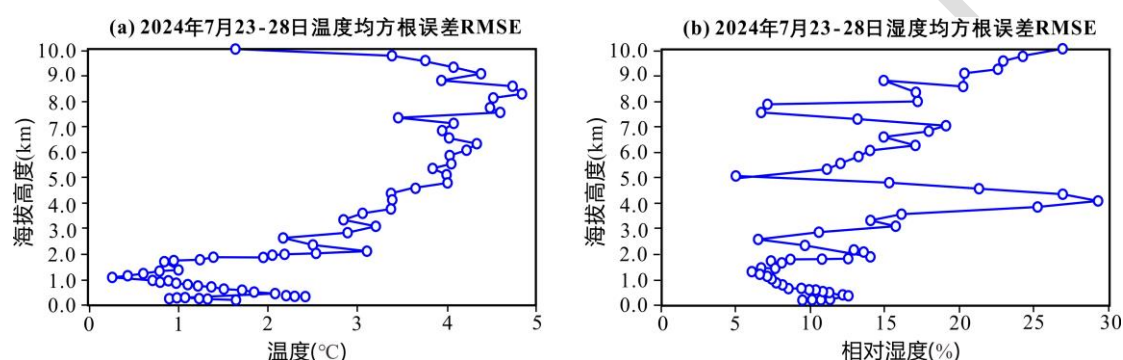


图 1 2024 年 7 月 23—28 日沈阳高空站微波辐射计 (a) 温度、(b) 湿度廓线 RMSE 随高度分布

Fig.1 RMSE distribution of (a) temperature and (b) humidity profiles from microwave radiometer with height at Shenyang Upper-air Station on 23–28 July 2024

2.2.2 风廓线雷达风速、风向准确性评估

在评估时段内，共得到时空匹配的风速样本 3224 对、风向样本 3056 对。依据上述方法计算风速、风向准确性指标，结果如表 3 所示。风速廓线评估结果显示 RMSE 值为 $1.91\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，满足 $\leq 2.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的业务要求；与探空值之间的 R 值为 0.9505，BIAS 值为 $-0.71\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，无明显系统偏差，能较为准确地反映风速的垂直变化。风向 RMSE 值为 15.30° ，满足 $\leq 20^{\circ}$ 的标准， R 值为 0.9525，BIAS 值为 -11.39° ，存在一定系统偏差，但不影响对风场结构的整体分析。

风速、风向的误差垂直分布结果显示（图 2）， 6 km 以下风速 RMSE 基本维持在 $1.5\sim 2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间，没有出现超阈值的情况，冷涡作用下的中低层风场扰动比较稳定，天气过程对雷达探测精度的影响较小。风向误差的垂直分布受到冷涡动力结构的影响较大， 2 km 以下近地面层的 RMSE 值为 $10\sim 15^{\circ}$ ，风廓线雷达能较为准确地捕捉到冷涡低层风向切变特征；冷涡边缘和高层过渡区，由于气流辐合辐散加强，误差出现局部峰值，但仍未超过阈值，说明风廓线雷达观测对冷涡复杂流场结构具有较好的响应能力。

在本次东北冷涡过程中，风廓线雷达获取的各高度层水平风场数据都满足业务要求。风场误差的垂直变化与冷涡系统的动力结构相符，说明该设备能够较为精准地体现冷涡背景下三维风场的精细演变特征。

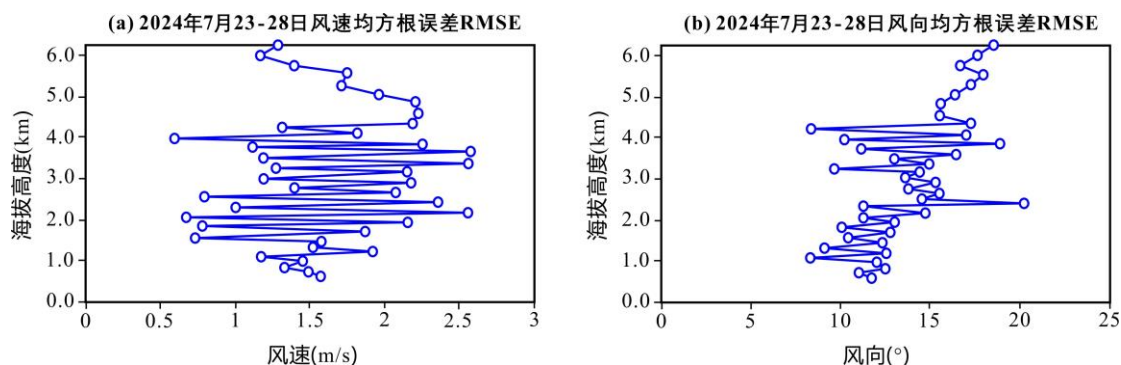


图2 2024年7月23—28日沈阳高空站风廓线雷达 (a) 风速、(b) 风向廓线 RMSE 随高度分布
Fig.2 RMSE distribution of (a) wind speed and (b) wind direction profiles from wind profiler radar with height at Shenyang Upper-air Station on 23–28 July 2024

2.2.3 毫米波云雷达云顶和云底高度准确性评估

在评估时段内,得到时空的云顶高度样本 1 对、云底高度样本 3 对。依据上述方法进行评估,云顶与云底高度的相对系统误差分别为-3.8%和-0.2%,均满足 $\pm 10\%$ 的业务指标。其中,云顶高度的绝对偏差为-267.9 m,云底高度的三组匹配样本观测偏差分别为-46.9、14.1和-1.9 m。从现有有限样本的初步分析来看,云雷达对云底高度的反演结果相对更稳定,其结论的可靠性有待更多观测样本进一步验证。

毫米波云雷达设备自身存在约 150 m 的近地面盲区,且低云底常伴随降水,增大了不确定性,因此评估时只保留了探空云高大于 1 km 的样本,导致样本量较少。东北冷涡发展成熟期,云系内部经常出现逆温层,限制大气垂直混合,使得云底边界更加清晰,有利于提高云雷达探测精度。为提升结论的可靠性与普适性,后续会持续收集不同天气发展阶段、不同云系类型的匹配个例样本,进一步检验云雷达在不同条件下的云高观测准确性。

2.2.4 GNSS/MET 大气可降水量和对流层总延迟准确性评估

在评估时段内,共得到时空匹配的 PWV 样本 7 对、ZTD 样本 9 对。依据上述方法计算的 PWV 和 ZTD 评估指标如表 3 所示。

评估结果显示, PWV 的 RMSE 值为 2.76 mm, 满足业务阈值 (± 3 mm); R 值为 0.9574, 与探空值一致性较好, 能够真实反映 PWV 时序变化规律。BIAS 值为-2.24 mm, 有轻微的系统性低估, 该偏差在过程中分布均匀, 未影响趋势的一致性 (图 3)。ZTD 的 RMSE 值为 16.27 mm, 满足 ≤ 18 mm 的要求, R 值为 0.9619, 比 PWV 拟合效果更好、线性相关性更高; BIAS 值为-13.49 mm, 在冷涡发展各个阶段都保持稳定, 与 ZTD 的量级相当。

由图 3 可知, 整个过程, GNSS/MET 反演得到的 PWV、ZTD 与探空结果变化趋势基本一致。7 月 23 日—26 日冷涡系统逐步发展增强, 两个参数持续上升, 在 7 月 26 日左右达到峰值。反演结果与探空结果的数值差异较小, GNSS/MET 对整层大气 PWV 和 ZTD 的反演精度与传统探空观测相近, 能清晰反映冷涡系统作用下水汽输送增强、大气状态演变的特征。

GNSS/MET 反演得到的 PWV 与 ZTD 数据, 精度都达到了业务所需的应用指标, 通过

东北冷涡背景下的水汽和大气延迟变化的连续监测,可以为强天气过程的分析 and 短时临预报提供重要的观测依据。

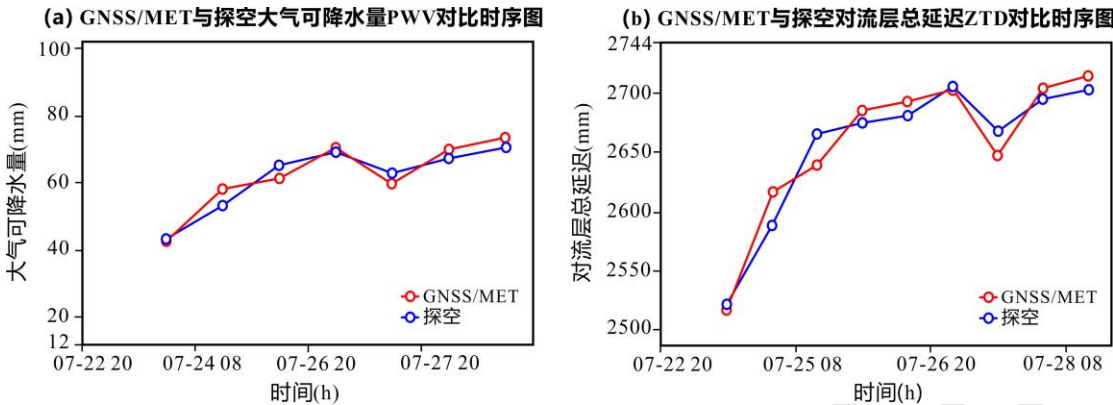


图3 2024年7月23—28日沈阳高空站 GNSS/MET (a) 大气可降水量、(b) 对流层总延迟与探空比对比时序图

Fig.3 Time series comparison of GNSS/MET (a) PWV and (b) ZTD with radiosonde data at Shenyang Upper-air Station on 23–28 July 2024

2.2.5 气溶胶激光雷达瑞利拟合误差和有效探测距离评估

在评估时段内,对气溶胶激光雷达的大气瑞利信号拟合一致性与有效探测距离进行了评估。由图 4a 可知,瑞利信号拟合相对偏差有小幅度的波动变化,平均一致性偏差为 0.1277%, 低于 $\leq 15\%$ 的业务阈值,说明激光雷达系统性能稳定。图 4b 显示,有效探测距离最大为 19.8 km, 满足 ≥ 10 km 的业务要求,在晴空条件下能够有效探测从边界层到对流层中下部的大气垂直结构。因此,在本次天气过程的晴空时段内,气溶胶激光雷达的瑞利信号拟合质量以及有效探测能力均符合业务指标。

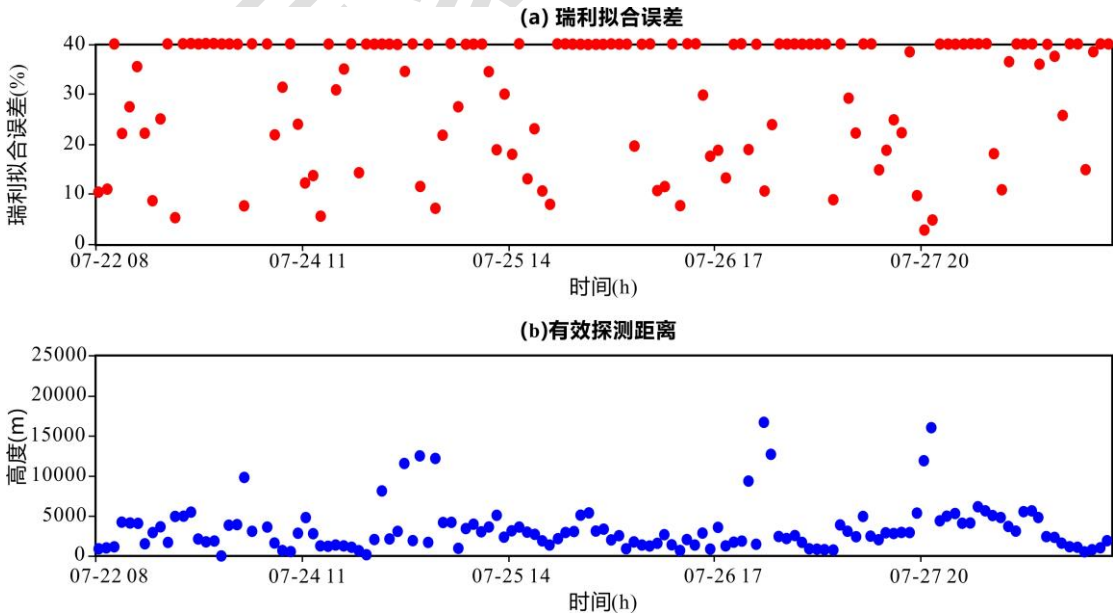


图4 2024年7月23—28日沈阳高空站气溶胶激光雷达 (a) 瑞利拟合误差和 (b) 有效探测距离时序图

Fig.4 Time series of (a) Rayleigh fitting error and (b) effective detection distance for aerosol Lidar at Shenyang

3 垂直廓线强对流过程应用分析

根据降水强度演变、天气系统发展规律及垂直结构等特征，本次强对流过程可分为 4 个阶段，分别为：系统发展初期（7 月 23 日），系统强盛期（7 月 24 日），系统维持期（7 月 25—26 日）与系统衰减消散期（7 月 27—28 日）。

3.1 强降水过程概况

2024 年 7 月 23—28 日，受台风“格美”外围云系和残余水汽、副热带高压以及西北风带冷空气共同影响，辽宁省出现持续 6 天的区域性强对流天气。最强降水出现在 25 日凌晨至 26 日傍晚。除阜新、朝阳外，其余 12 地市累计平均降水量超 100 mm，本溪、辽阳等 6 地市超过 250 mm。全省有 1404 个地面气象站点的累计降水量超过 100 mm，570 个站点超过 250 mm。沈阳市辽中区朱家房站累计降水量达 671.2 mm，超过了该区年平均降水总量（626.8 mm）；26 日，全省 248 个站点日降水量突破历史极值，朱家房站日降水量达到 416.7 mm。

图 5 为沈阳高空站的地面逐小时降水分布。发展初期，受副热带高压边缘暖湿气流影响，出现了微量降水，以积累水汽和能量。系统强盛期，高空槽东移配合低层切变线，触发首轮强降水（图 5b）。系统维持期，降水先减弱后增强，25 日以午后零星阵性降水为主（图 5c），累计降水量约 28 mm；低空急流水汽输送和地面气旋系统的共同影响下，26 日降水再次增强（图 5d），达到过程峰值，日降水量约 78 mm，逐小时降水分布波动较大、持续性强。图 5e 和 5f 显示，系统衰减消散期，天气系统减弱并继续东移，降水逐渐减弱，最后停止。

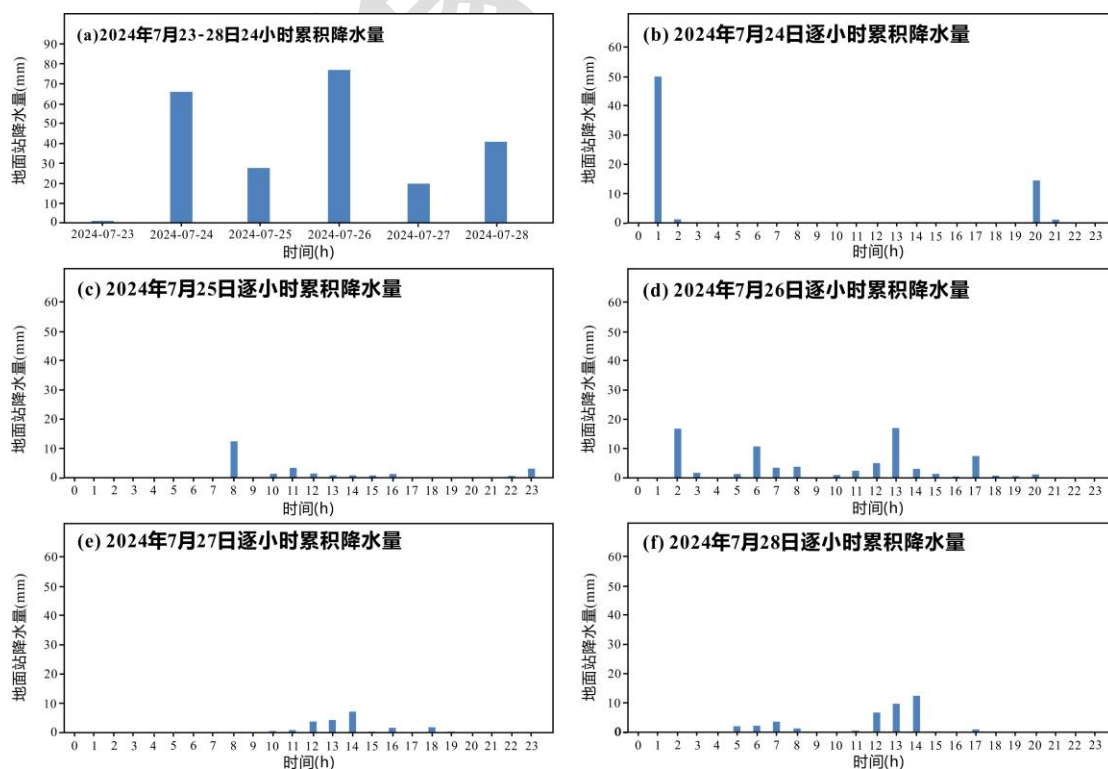


图5 沈阳高空站 2024 年 7 月 23—28 日地面观测降水情况

Fig.5 Overview of surface precipitation observations at Shenyang Upper-air Station on 23–28 July 2024

3.2 垂直廓线特征分析

3.2.1 湿湿廓线特征

微波辐射计可以获取大气垂直方向上的温度与湿度分布。图 6、图 7 微波辐射计湿湿廓线数据显示，温度廓线整体上垂直递减，近地面暖、高层冷；湿度廓线则存在低层湿、中层干、高层湿的垂直分布。

7 月 23 日系统发展初期，0~2 km 的近地面层温度为 20~26 ℃，6 km 以上的高层温度降到-28~-12 ℃，垂直温差达 30~40 ℃，热力不稳定度较高，没有明显逆温层，垂直混合条件良好，为对流发展提供了有利的热力条件。0~2 km 近地面层的相对湿度达到 80%~90%，水汽开始累积，为降水发生提供充足水汽；2~6 km 中层的相对湿度为 10%~30%，形成强度适中的干层，容易被强动力抬升突破；6 km 以上高层的相对湿度回升到 70%~80%，湿度较高，有利于不稳定层结的形成和对流云向上发展。24 日系统强盛期，大气的热力不稳定度达到最高，垂直温差维持在 30~40 ℃，凌晨时段温差达到峰值，没有明显逆温层抑制，垂直混合条件较好，为对流发展提供充足的热力条件。近地面相对湿度超过 90%，为强降水提供充足的水汽供应；中层仍存在一定的干层，有利于动力抬升，进一步引起对流突破；高层相对湿度为 70%~80%，高低层湿区相互配合，有利于对流发展。25—26 日系统维持期，热力不稳定程度减弱，垂直温差降低到 20~30 ℃，对对流发展的热力支撑作用明显下降；近地面温度白天上升到 22~26 ℃、夜间为 20~22 ℃，无明显逆温层，垂直混合条件一般。近地面相对湿度保持在 70%~90%，还有一定的水汽供应；但中层的干层强度变大，相对湿度降到 20%~40%，干层结构趋于稳定，抑制了水汽的垂直输送，限制了对流的发展高度，在高空槽残余影响和弱辐合抬升影响下发生几次弱对流降水。27—28 日系统衰减消散期，热力不稳定度继续减弱，没有明显的逆温层，垂直混合条件较差，不能满足对流发展所需的热力条件；近地面相对湿度仍维持在 70%~85%，但中层干层比较强，水汽垂直输送受到严重抑制，缺少动力抬升与热力条件的配合，不能形成有效降水，云系逐渐消散，降水逐渐停止。

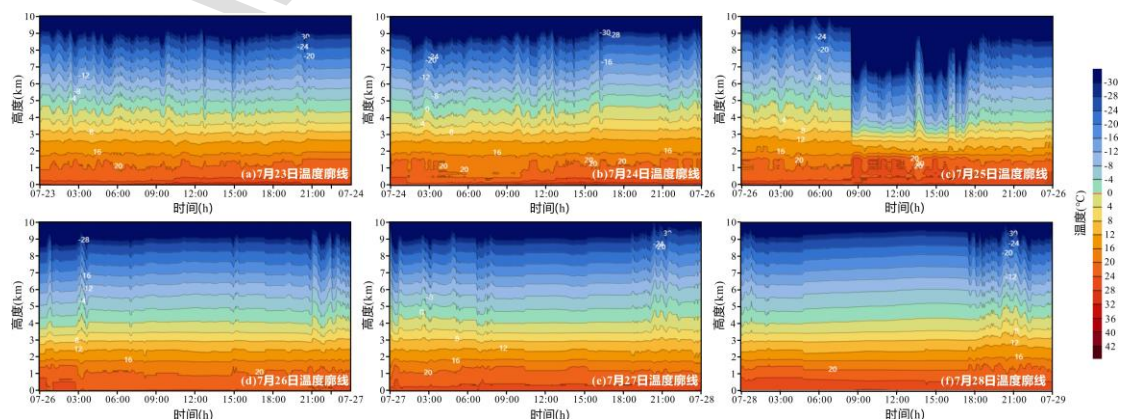


图6 2024 年 7 月 23—28 日沈阳高空站微波辐射计温度廓线特征

Fig.6 Characteristics of microwave radiometer temperature profiles at Shenyang Upper-air Station on 23–28 July 2024

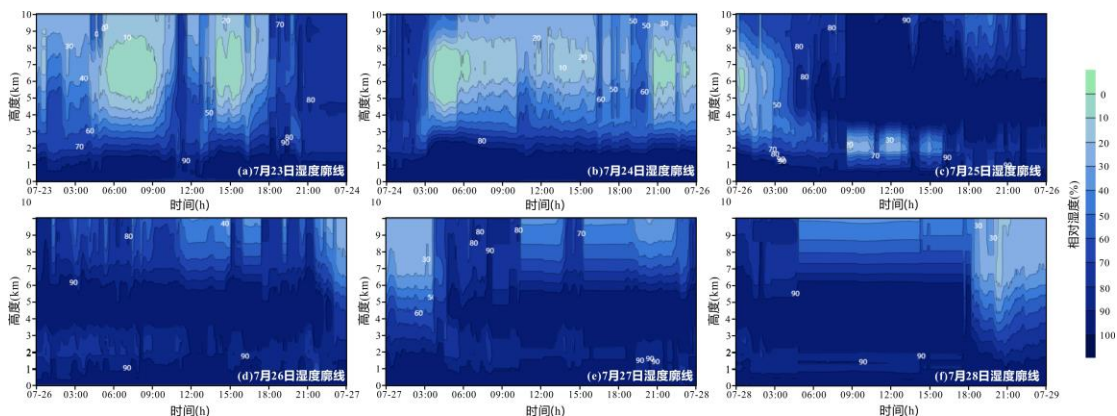


图 7 2024 年 7 月 23—28 日沈阳高空站微波辐射计湿度廓线特征

Fig.7 Characteristics of microwave radiometer humidity profiles at Shenyang Upper-air Station on 23–28 July 2024

强对流发展的各个阶段，与微波辐射计温湿廓线的变化规律基本一致。初期，垂直温差为 30~40 ℃、中层干层适中，是强对流形成的信号；强盛期，垂直温差维持在 30~40 ℃、近地面相对湿度超 90%，指示强降水的爆发；维持期，垂直温差缩小到 20~30 ℃、中层干层变强，仅能触发弱对流；衰减期，热力逐渐不足，中层干层偏强，系统逐步消散。近地面层是主要的水汽来源，始终保持在 70%~90%的相对湿度；中层的干层强度决定了对流高度和降水强度；高层相对湿度为 70%~90%，促进不稳定层结的形成。温湿廓线的垂直分布特点与变化规律，共同影响此次对流降水的类型、强度与和发生时间，为研究东北冷涡区域性暴雨的温湿环境特征及其对流触发机制提供了重要的观测依据。

3.2.2 风场特征

风廓线雷达可以反映大气垂直剖面的风速、风向和垂直速度，分析强对流过程中大气动力条件的变化，图 8、图 9 显示了风廓线雷达不同阶段的风场特征。

7 月 23 日系统发展初期，0~2.7 km 中低层盛行 6~10 m s⁻¹ 的西南风，冷涡强迫作用下出现低层气流辐合抬升，有强烈上升运动，垂直速度最大为 9 m s⁻¹，为水汽输送和对流启动提供动力；2.7~7.2 km 的中高层出现 14~25 m s⁻¹ 的西风急流，为降水发展提供动力支撑；7.2~9.0 km 的高层为 10~14 m s⁻¹ 的西风。为降水提供了充足的动力与水汽输送条件。24 日系统强盛期，风场动力条件较好，低层为 2~6 m s⁻¹ 的偏南风，持续输送暖湿水汽，辐合作用加强；凌晨，垂直上升运动维持在 9 m s⁻¹ 的最大速度，与强降水时段高度一致，为强对流发展和强降水提供充足的垂直动力条件。中层西风急流稳定在 10~25 m s⁻¹，为强上升运动提供动力支撑，高层风场保持稳定。25—26 日系统维持期，风场动力强度处于中等，有明显波动。25 日，低层仍以偏南风水汽输送为主，强度有所减弱；垂直上升运动转为间歇性扰动，8 时前后出现持续性的 9 m s⁻¹ 速度峰值，触发阶段性弱降水。中层急流强度保持稳定，冷涡强度出现波动，降水强度下降。26 日，动力扰动增强，垂直风场不稳定，降水多

时段分散。低层偏南风 and 垂直上升运动都是多峰值变化。在冷涡内部动力扰动加剧影响下，中层西风急流增强，风速达到 $14\sim 35\text{ m s}^{-1}$ ，急流核脉动明显，进而导致出现了分散性降水。27—28 日系统衰减消散期，动力不断衰减，风场扰动消失。低层暖湿水汽输送持续减弱，27 日午后只出现了局地性上升运动，28 日上升运动进一步减弱，基本没有明显的垂直动力支撑；中层西风急流强度下降到 $14\sim 25\text{ m s}^{-1}$ ，脉动减弱，和低层的动力耦合作用减弱。风场中层急流维持、低层扰动减弱，冷涡逐步东移并减弱，降水强度降到过程最低。

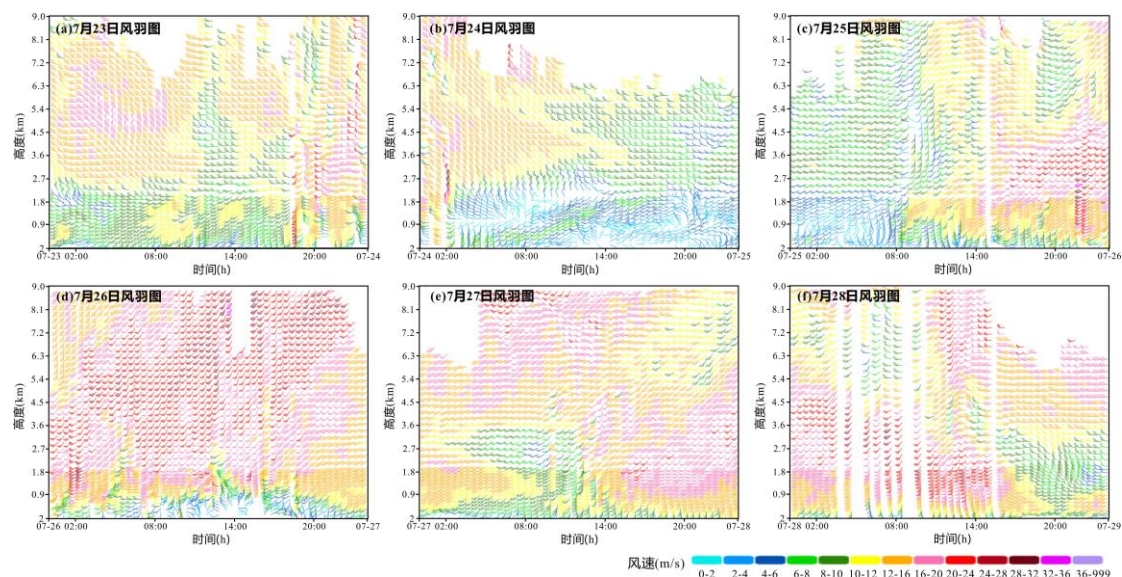


图 8 2024 年 7 月 23—28 日沈阳高空站风廓线雷达风羽图

Fig.8 Wind barb chart of wind profiler radar at Shenyang Upper-air Station on 23–28 July 2024

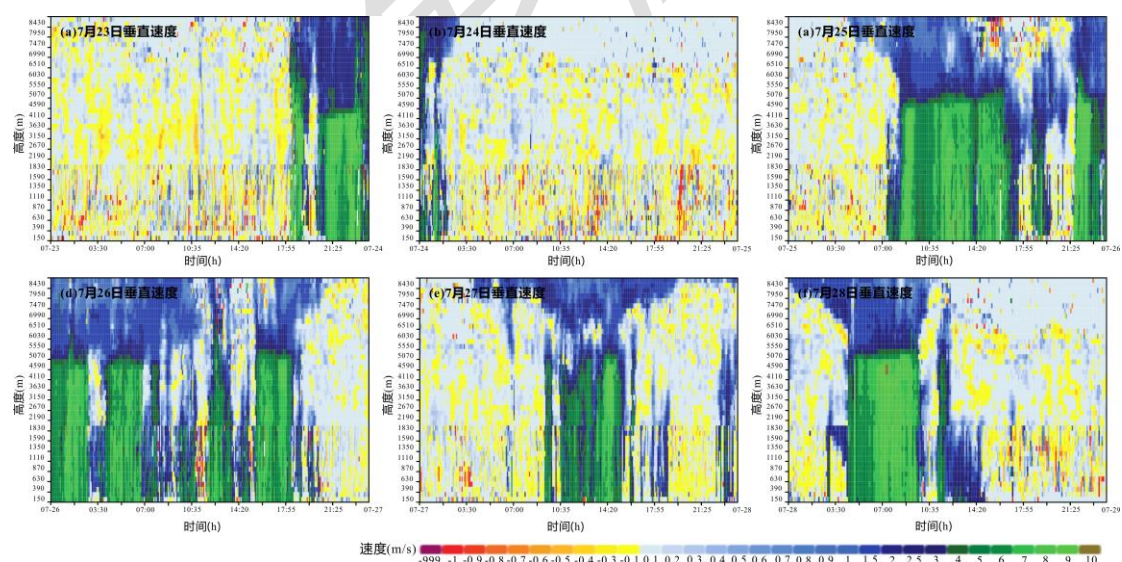


图 9 2024 年 7 月 23—28 日沈阳高空站风廓线雷达垂直速度

Fig.9 Vertical velocity of wind profiler radar at Shenyang Upper-air Station on 23–28 July 2024

从各阶段风场和降水的对应关系可以看出，风场演变对应了冷涡完整发展过程。初期，强降水爆发前 6~12 h，出现风场辐合抬升，低层西南风为 $6\sim 10\text{ m s}^{-1}$ 、垂直速度超过 5 m s^{-1} 、

中层西风急流达 $14\sim 25\text{ m s}^{-1}$ ，强对流动力开始启动；强盛期，强降水前 6 h，低层偏南风速为 $2\sim 6\text{ m s}^{-1}$ 、垂直速度超过 8 m s^{-1} 、中层西风急流为 $10\sim 25\text{ m s}^{-1}$ ，强降水即将发生；维持期，低层偏南风速为 $2\sim 10\text{ m s}^{-1}$ 、垂直速度为 $3\sim 9\text{ m s}^{-1}$ 、中层西风急流为 $14\sim 35\text{ m s}^{-1}$ ，对应弱对流和分散性降水；衰减期，低层风速小于 3 m s^{-1} 、垂直速度低于 2 m s^{-1} 、中层西风急流回落，动力逐渐衰减，降水结束。风廓线雷达可以捕捉到低层垂直速度和中层西风急流变化，提前 6~12 h 看出降水动力条件变化，低层垂直抬升、垂直风场结构及中层急流演变等特征，在强对流监测预警中有较好应用价值。本研究明确了东北冷涡动力配置对降水的影响和物理联系。

3.2.3 云系特征

毫米波云雷达可以探测到云系垂直结构和发展强度，进一步分析内部粒子运动情况，图 10、图 11 为云雷达反射率和径向速度产品，用于分析云系变化与降水的关系。7 月 23 日系统发展初期，对流云系开始快速发展。18 时前后对流活动明显增强，云底由近地面抬升至约 2 km 高度，云顶发展超过 10 km；出现 15~25 dBz 的强回波区，径向速度产品显示 0~4 km 高度层有 $-12\sim -5\text{ m s}^{-1}$ 的负速度区，反映出存在强烈的垂直上升运动，为对流发展提供动力。

7 月 24 日系统强盛期，00—01 时，云系发展程度最强，反射率因子达到 25~30 dBz，和地面站的降水峰值时段相对应，不稳定能量剧烈释放。此时云顶高度在 14 km 左右，强回波区范围变大，低层的垂直上升运动仍然存在；之后系统迅速减弱，16 时左右，云顶从 14 km 下降到 6 km 高度以下，主要强对流过程结束。25—26 日系统维持期，从之前的对流云系，变化为对流和层状混合云系，发展强度较系统强盛期明显减弱。云底高度在 0~2 km，云顶高度为 8~12 km，4~8 km 高度有大片均匀的层状云回波，反射率为 10~15 dBz。08 时、15 时等时段，反射率因子超过 20 dBz，局地对流活动活跃。径向速度显示，0~4 km 高度内一直存在 $-5\sim -10\text{ m s}^{-1}$ 的负速度区，中层干冷空气入侵导致局地抬升，云系多峰发展，形成了多时段、连续性的分散降水。27—28 日系统衰减消散期，冷涡系统减弱并向东移动，云系发展程度开始降低。27 日受外围弱气流波动影响，有小幅度的抬升运动，云顶高度降低，回波强度变弱，大部分为 10 dBz 以下的弱回波；28 日，云系开始消散，动力抬升基本不发挥作用，降水随之减弱并趋于停止。

从云系结构变化与强对流发展的对应关系可以看出，毫米波云雷达探测的云系垂直特征能够很好地反映云系发展过程。发展初期，云顶高超过 10 km，出现 15~25 dBz 强回波区域，低层径向速度达 $-5\sim -12\text{ m s}^{-1}$ ，显著的上升运动促使对流发生；强盛期，云顶高超过 12 km，出现大于 25 dBz 的强回波，约提前 30~60 min 指示强降水发生；维持期，云顶高维持 8~12 km，回波减弱至 10~20 dBz，低层仍存在上升气流，对应弱对流和多时段降水；衰减期反射率因子降至 10 dBz 以下，强回波区基本消失，云系消散，降水结束。云雷达可以提前 30~60 min 监测到反射率明显增强等降水临近特征，加上低层强烈上升大气的推动，直接触发了短时强

降水；中层干冷空气的持续侵入，有利于混合云结构的形成，进一步导致间歇性强降水的发生；最后因动力抬升不足，云系消散，降水停止。该设备在强对流临近监测和提前预警中有较好的应用效果，为研究天气系统成因以及提升短临预报精度提供了重要的观测依据。

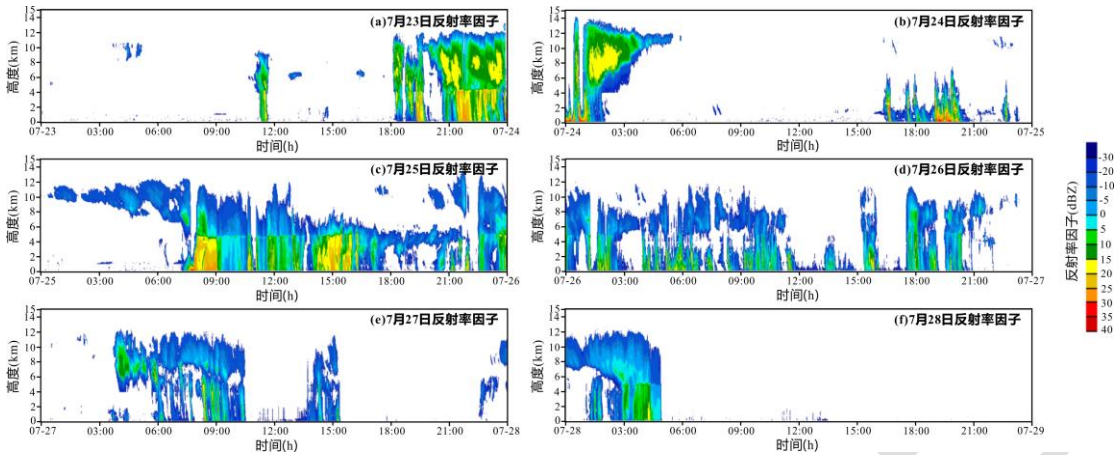


图 10 沈阳高空站 2024 年 7 月 23-28 日云雷达反射率因子

Fig.10 Cloud radar reflectivity factor at Shenyang Upper-air Station on 23–28 July 2024

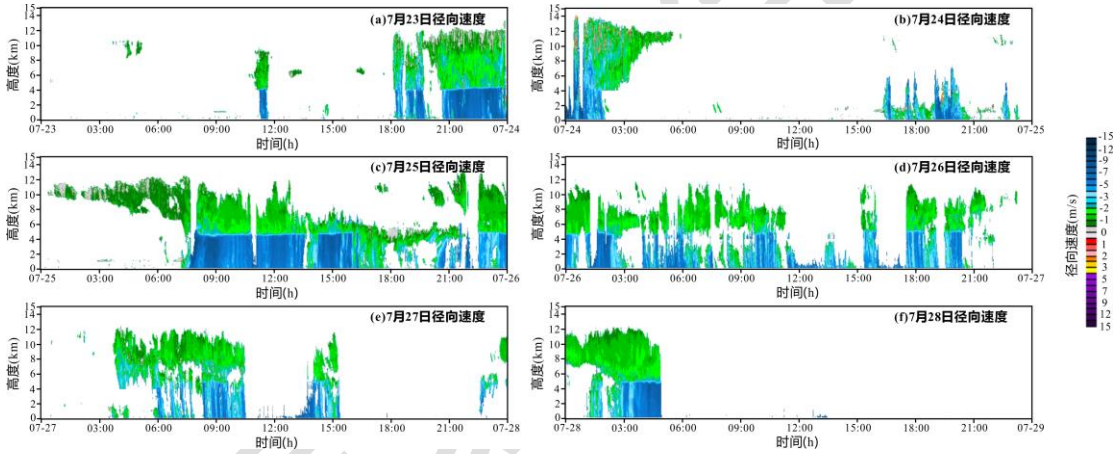


图 11 沈阳高空站 2024 年 7 月 23-28 日云雷达径向速度

Fig.11 Cloud radar radial velocity at Shenyang Upper-air Station on 23–28 July 2024

3.2.4 水汽特征

GNSS/MET 反演的 PWV 可以反映出整层大气水汽的积累和消耗过程，图 12 为 PWV 分布趋势，可结合微波辐射计温湿廓线来综合分析水汽特征。

7 月 23 日系统发展初期，PWV 持续累积，日间值较低，之后逐渐上升，到 23 时左右达到 42.3 mm，水汽逐渐聚集。此时的近地面层高温高湿、中层干层强度适中，低层水汽不断向上输送并与高层的湿层叠加，PWV 逐渐积累；根据微波辐射计数据，此时 0~2 km 的近地面层相对湿度超过 80%，与 PWV 累积趋势相符，在强降水发生前的 2~3 h 就已经出现了明显的水汽累积信号。24 日系统强盛期，PWV 在降水发生前迅速上升、降水时同步下降。23 日 23 时至 24 日 01 时的强降水时段内，最大小时降水量为 48.7 mm。强降水发生前约 1.5 h，PWV 从 42.3 mm 迅速上升到 56.8 mm，达到过程峰值，说明充足的水汽积累可以推动强

降水发生；强降水发生后，大气柱水汽开始清除，PWV 迅速下降。该阶段近地面层高温高湿、中层干层强度适中，有利于水汽垂直输送，PWV 迅速增大并保持较高值；结合微波辐射计数据，该阶段近地面相对湿度超过 90%，与 PWV 快速上升的特征一致。25—26 日系统维持期，PWV 出现波动，该时段发生间歇性弱降水。每次弱降水过程中，都显示出 PWV 上升、降水发生、PWV 下降的变化趋势，降水峰值时段与 PWV 波动上升过程相对应；单次降水结束后水汽迅速被消耗掉，如 25 日 PWV 从 58.3 mm 降到了 51.7 mm，说明降水对水汽有清除作用；未降水时段，PWV 在 50 mm 左右，表明只有水汽并不能引发降水，还需要大气抬升给予动力支持。该时段近地面层持续高湿，中层干层强度显明显增大，水汽垂直向上输送受到抑制，使 PWV 下降并保持在中等数值；根据微波辐射计数据可知，中层干层相对湿度为 20%~40%，干层抑制效果明显。27~28 日系统衰减消散期，PWV 数值不断下降。PWV 从 27 日的 73.2 mm 峰值迅速下降到 28 日的 46.9 mm 以下，没有出现明显的阶段性抬升变化，整层大气水汽含量持续减少。此时的水汽已经停止了垂直输送，不能积累足够的水汽，降水逐渐减弱，直到最后结束。该阶段近地面层的高湿状态已经减弱、中层干层持续偏强，水汽垂直输送停止，PWV 持续下降；结合微波辐射计数据可知，此时的中层干层相对湿度超过 35%，干层仍然发挥了抑制作用。

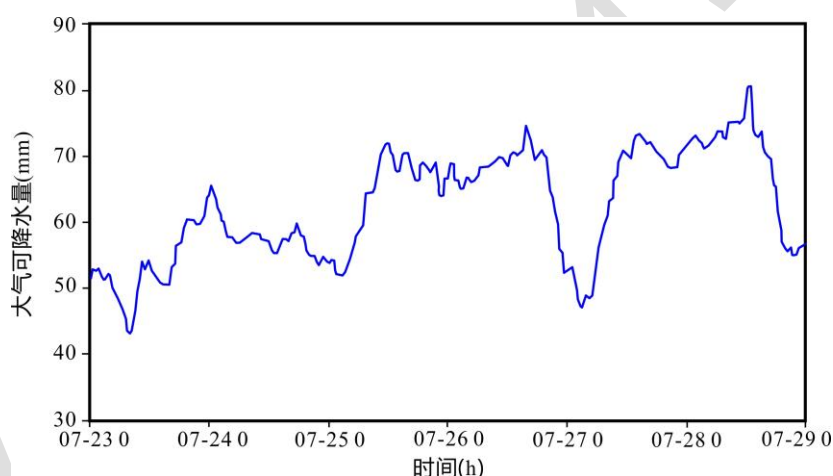


图 12 沈阳高空站 2024 年 7 月 23-28 日 GNSS/MET 大气可降水量特征分布

Fig.12 Characteristic distribution of GNSS/MET PWV at Shenyang Upper-air Station on 23–28 July 2024

PWV 的时序变化趋势能够反映大气水汽的累积与消散过程。系统发展初期，PWV 超过 40 mm 且持续上升，近地面相对湿度超过 80%，说明有较强的强对流发生概率；系统强盛期，PWV 快速升至 55 mm 以上，1.5 h 内变化超 15 mm，近地面相对湿度大于 90%，提前 1.5 h 显示了强降水即将发生的特征；维持期，PWV 在 48~58 mm 区间变化、中层干层相对湿度 20%~40%，对应了弱对流及间歇性的降水；系统衰减消散期，PWV 低于 47 mm 且持续下降，中层干层相对湿度超过 35%，说明水汽不足、降水结束。PWV 的变化与微波辐射计温湿垂直结构一致，二者的共同分析可以提升水汽前兆信号的时效性与准确性，强降水既需要充足的水汽供给，也需要有利的垂直结构驱动，为东北冷涡的对流性降水机理研究和短

期临近预报提供重要的多源观测资料。

3.2.5 气溶胶特征

气溶胶激光雷达能够反映气溶胶的垂直分布结构和时空变化特征，图 13、图 14 为气溶胶激光雷达的退偏振比和消光系数产品，可用来分析气溶胶分布与强对流发展、降水过程的关系。

7 月 23 日系统发展初期，气溶胶主要在近地面聚集、逐渐向上输送。00—06 时，近地面 1 km 高度内显示出大于 0.3 的高退偏振比与大于 0.9 的高消光系数，反映了此时在低层大气出现气溶胶堆积。12 时左右，由于冷涡外围上升气流的影响，气溶胶抬升至约 4~5 km 高度，出现了退偏振比与消光系数同时偏高的高值区域，说明气溶胶开始进行垂直输送，对应了该阶段的水汽持续累积过程。24 日系统强盛期，气溶胶垂直输送和高低层大气交换活动显著，与降水过程的变化对应。00—03 时的强降水时段，垂直上升运动强烈，将气溶胶和降水粒子同时向上抬升输送，达到 4~10 km 高度。气溶胶垂直分布范围变大、强度增加，高低层气溶胶和大气的交换活动较为明显。25—26 日系统维持期，气溶胶垂直活动强度适中，在间歇性降水和系统动力的共同作用下，气溶胶的抬升与下降交替出现。该时段内，气溶胶多次出现明显的垂直抬升过程，最大抬升高度可达 4~10 km，抬升后出现下降，高低层的垂直交换活动活跃。高退偏振比和高消光系数的共同高值区域间歇性出现，对应着该阶段的多时段弱降水与系统稳定。27—28 日系统衰减消散期，冷涡动力不断减弱，气溶胶垂直活动强度随之变弱。此时的气溶胶分布主要受到残留气流与局地环流影响，具有抬升强度弱、下降速度缓慢并逐步清除的特点。高值信号范围和强度都明显下降，过程结束后，气溶胶垂直结构趋于稳定。

东北冷涡的动力驱动与降水过程共同影响了气溶胶变化。冷涡发展期，在上升气流驱动下引起气溶胶的垂直输送；强盛期，强动力与降水过程一起推动了活跃的气溶胶垂直交换；消散期，弱动力使气溶胶逐渐下降并清除。发展初期，近地面 1 km 内退偏振比大于 0.3、消光系数大于 0.9，气溶胶抬升至 4 km 以上，提前 2~3 h 反映了强对流动力即将抬升。强盛期，气溶胶分布在 4~10 km、退偏振比与消光系数维持高值，可提前 2 h 预示强降水发生。系统维持期，气溶胶抬升高度 4~10 km，数值高低交替变化，对应弱对流及间歇性降水。衰减期参数全部下降，反映了系统消散与降水停止。该设备可用于分析系统动力、降水与气溶胶垂直分布之间的相互作用，为研究气溶胶输送及大气、云、降水之间的相互作用提供高分辨率的垂直观测参考数据。

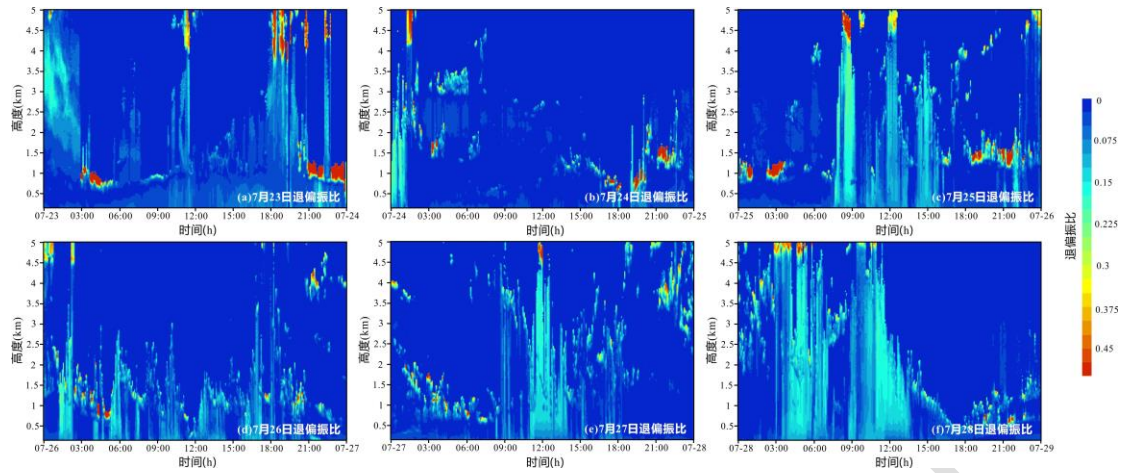


图 13 2024 年 7 月 23—28 日沈阳高空站气溶胶激光雷达退偏振比

Fig.13 Depolarization ratio of aerosol lidar at Shenyang Upper-air Station on 23–28 July 2024

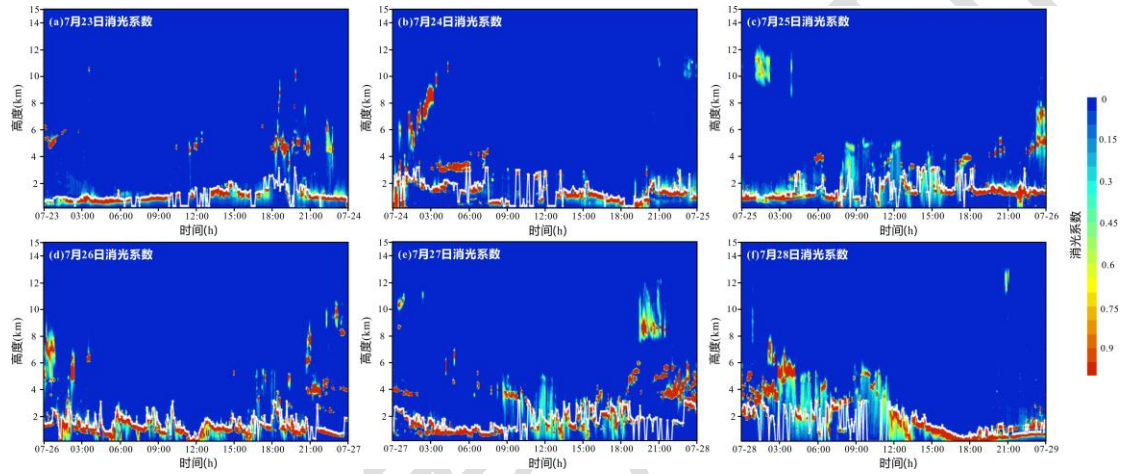


图 14 2024 年 7 月 23—28 日沈阳高空站气溶胶激光雷达消光系数

Fig.14 Extinction coefficient of aerosol lidar at Shenyang Upper-air Station on 23–28 July 2024

3.3 多要素融合分析

温湿与风场条件为强对流天气的发生和发展提供了关键的热力、动力条件，两类廓线共同作用影响对流系统的演变。对流发展初期，温湿廓线显示近地面为暖湿状态，温度为 20~26 ℃、相对湿度为 80%~90%，与高层干冷大气之间的垂直温差较大，不稳定能量迅速积累；风场廓线显示，低层盛行 6~10 m s⁻¹ 西南风，垂直上升运动强度较大，最大垂直速度可达 9 m·s⁻¹，中层西风急流输送动量，二者共同作用下导致对流发生。对流强盛阶段，近地面湿度超过 90%，大气热力不稳定程度增加，低层转为偏南风，风场辐合加强，在动力和热力共同推动下，大气突破了干层抑制，强对流得以充分发展。对流维持阶段，垂直温差变小，中层的干层程度加强，风场转变为间歇性的上升运动，热力和动力条件同时变弱，对流发展受到限制，只能支撑弱降水。可见，温湿、风场廓线的垂直结构与时序变化规律，同东北冷涡阶段性发展、降水强弱变化相对应，有效推动了强对流的发生与发展。

GNSS/MET 反演 PWV 和毫米波云雷达可以组合分析云系发展与水汽条件变化。对流发展初期，水汽迅速积聚，PWV 由 42.3 mm 上升到 56.8 mm；云系垂直发展剧烈，云底抬升

到 2 km，云顶高达 14 km，有强回波信号，为强降水的发生提供了充足水汽与云系活动。对流强盛期，PWV 保持在较高数值，保证水汽供应，降水后 PWV 迅速下降，体现出降水对水汽的消耗。系统衰减期，云系转为混合形态，PWV 数值波动变化，间歇进行水汽供应，此时的云顶高度有所降低、对流活动进一步减弱。二者的组合分析，提前约 1.5 h 捕捉到了强降水发生的水汽变化，通过分析水汽变化规律及云系特征，有效地提高强降水预警的时效性，为对流发展提供充足的物质基础。

气溶胶与温湿度、风场、云系、水汽等要素同步发展，可以很好地反映对流系统的不同发展阶段。对流初期，近地面 1 km 内退偏振比大于 0.3，消光系数大于 0.9，气溶胶抬升至 4 km 以上，提前 2~3 h 反映动力开始抬升；对流强盛期，气溶胶被抬升至 4~10 km 高度，高低层大气的气溶胶交换活动活跃，动力输送能力较强；对流衰减阶段，高值显著降低，系统开始消散。气溶胶垂直分布可以用来辅助分析动力条件的变化和对流各阶段的发展状态。

通过多源垂直观测资料的融合分析可知，几类设备互相补充，在东北冷涡强对流过程的精细化监测中发挥了重要作用。温湿与风场廓线的垂直温差、垂直速度等关键参数，可以形成对流的热力与动力基础；通过 GNSS/MET 和云雷达的水汽峰值、云顶高度、反射率等数据，共同分析水汽及云系变化，提高预警的时效性；气溶胶廓线的退偏振比、消光系数和抬升高度等参数，可作为动力条件的补充分析。各要素的时序演变和垂直结构都与东北冷涡系统的发生发展过程紧密相关，多要素的融合分析明确揭示了强对流过程的热力和动力条件、水汽变化、云系演变的完整过程，为强对流精细化监测预警提供了可靠的多源观测支撑与数据依据。

4 结论与讨论

本文利用沈阳地基遥感垂直观测系统多源数据，对 2024 年 7 月 23—28 日东北冷涡强对流天气过程，进行了数据质量评估与多要素融合机理研究，得到如下主要结论。

此次强对流天气过程中，沈阳高空站地基遥感垂直观测系统运行稳定。五类垂直观测设备业务可用性都达到 100%，数据获取率都大于 85% 的考核指标，满足在强对流天气过程中高时空分辨率和连续监测的业务需求。

多要素数据质量评估表明，垂直观测数据准确性整体较好。风廓线雷达、GNSS/MET 产品与探空观测的 R 值都达到 0.95 以上，可以准确反映冷涡背景下风场、水汽及大气状态变化。微波辐射计低层探测精度较高，2 km 以上受强温湿梯度影响误差增大。毫米波云雷达和气溶胶激光雷达数据都满足评估指标，可较为准确地分析云系结构和气溶胶分布。

多要素融合分析明确了强对流演变的物理过程。温湿与风场提供关键热力、动力条件，系统发展与强盛期，明显的垂直温差、低层辐合上升和中层急流动量输送，共同触发强对流；维持与衰减期，热力与动力条件同时减弱，对流逐渐消失。PWV 和云的垂直结构有较好对应关系，二者的高值时段与发展趋势几乎重合。气溶胶垂直分布也可辅助分析动力条件变化。

垂直观测系统在本次东北冷涡强对流监测预警中表现出较好的应用效果。本次过程中，风廓线雷达可提前 6~12 h 监测到动力条件变化。微波辐射计和 GNSS/MET 可提前 1.5 h 分析强对流水汽发展潜势。毫米波云雷达提前 30~60 min 监测到云反射率显著增强的对流临近特征。多源垂直观测数据清晰揭示了本次冷涡强对流天气的发生发展机制，为辽宁地区强对流天气的精细化监测与短临预报提供了有力支撑。

目前研究还存在一些不足。一是多源数据融合方法需进一步优化改进，当前主要是简单定量分析，未建立不同对流发展阶段的动态融合模型；二是观测数据的时空匹配精度有待提升，各观测设备的观测高度、时间分辨率存在细微差异，特别是在中高层温湿梯度剧烈位置，容易产生分析偏差；三是研究样本有限，本文只选取一次东北冷涡强对流过程，样本数量较少，广泛适用性不足。后续将重点优化多源数据融合算法、数据时空匹配方法、收集研究样本，充分发挥垂直探测资料应用价值，提升辽宁强对流天气监测预警能力与防灾减灾能力。

参考文献

- 董自鹏, 李星敏, 彭艳, 等, 2025. 探空气球漂移对微波辐射计与探空温度差异的影响[J]. 气象, 51(5): 529-541. Dong Z P, Li X M, Peng Y, et al, 2025. Impact of sounding balloon drift on temperature differences between microwave radiometer and radiosonde[J]. Meteor Mon, 51(5): 529-541(in Chinese).
- 杜明斌, 曹云昌, 朱佳蓉, 等, 2024. GNSS/PWV 在一次梅雨期暴雨中的模式预报应用[J]. 热带气象学报, 40(4): 573-585. Du M B, Cao Y C, Zhu J R, et al, 2024. Application of GNSS/PWV in the numerical weather prediction of a Meiyu rainstorm[J]. J Trop Meteor, 40(4): 573-585 (in Chinese).
- 傅新姝, 彭杰, 王晓峰, 等, 2023. 地基微波辐射计探测质量综合分析[J]. 气象, 49(10): 1235-1245. Fu X S, Peng J, Wang X F, et al, 2023. Comprehensive analysis on accuracy of ground-based microwave radiometer measurements[J]. Meteor Mon, 49(10): 1235-1245 (in Chinese).
- 何敏, 王金龙, 黄玉霞, 等, 2025. 河西走廊 2023 年春季两次强沙尘天气过程对比[J]. 干旱气象, 43(6): 856-866. He M, Wang J L, Huang Y X, et al, 2025. Comparison of two severe sand-dust weather processes over the Hexi Corridor in spring 2023[J]. J Arid Meteor, 43(6): 856-866 (in Chinese).
- 季承荔, 陈臻懿, 黄艺峰, 等, 2024. 基于激光雷达和微波辐射计的气溶胶质量浓度反演算法研究与分析[J]. 中国激光, 51(5): 0510005. Ji C L, Chen Z Y, Huang Y F, et al, 2024. Aerosol mass concentration retrieval algorithm based on LiDAR and microwave radiometry[J]. Chin J Lasers, 51(5): 0510005 (in Chinese).
- 柯莉萍, 张玉逵, 邹书平, 等, 2023. 风廓线雷达产品在冰雹天气过程中的应用[J]. 中低纬山地气象, 47(4): 36-40. Ke L P, Zhang Y K, Zou S P, et al, 2023. Application of wind profile radar products in hail weather process[J]. Mid-Low Latitude Mountain Meteor, 47(4): 36-40 (in Chinese).
- 孔凡超, 李江波, 王颖, 2021. 北京冬奥会云顶赛场微波辐射计反演大气温湿廓线分析[J]. 气象, 47(9): 1062-1072. Kong F C, Li J B, Wang Y, 2021. Analysis on atmospheric profiles retrieved by microwave radiometer at genting venue of Beijing olympic winter

- games[J]. Meteor Mon, 47(9): 1062-1072 (in Chinese).
- 李博宇, 常立秋, 郭丽红, 等, 2024. 一次台风暴雨天气过程毫米波测云仪数据特征分析[J]. 气象灾害防御, 31(1): 17-22. Li B Y, Chang L Q, Guo L H, et al, 2024. Data characteristic analysis of millimeter-wave cloud radar during a typhoon heavy rain process[J]. Meteor Disast Def, 31(1): 17-22 (in Chinese).
- 李成才, 毛节泰, 1998. GPS 地基遥感大气水汽总量分析[J]. 应用气象学报, 9(4): 470-477. Li C C, Mao J T, 1998. Analysis for remote sensing of atmospheric precipitable water using ground-based GPS receiver[J]. J Appl Meteor Sci, 9(4): 470-477 (in Chinese).
- 李红星, 高清泉, 郝国松, 等, 2023. 微波辐射计资料在河北大厂地区强对流天气监测与预警中的应用[J]. 中国新技术新产品, (23): 111-113. Li H X, Gao Q Q, Hao G S, et al, 2023. Application of microwave radiometer data in monitoring and early warning of severe convective weather in Dachang, Hebei[J]. China New Technol New Prod, (23): 111-113 (in Chinese).
- 李俊, 李力, 周云祥, 等, 2025. 地基遥感垂直观测系统与探空雷达数据分析研究[J]. 气象水文海洋仪器, 42(4): 1-5. Li J, Li L, Zhou Y X, et al, 2025. Data analysis and research on ground-based remote sensing vertical observation system and sounding radar[J]. Meteor Hydrol Marine Instrum, 42(4): 1-5 (in Chinese).
- 李力, 饶传新, 周云祥, 等, 2024. 地基遥感垂直观测系统数据质量评估与产品融合分析[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 46(6): 872-885. Li L, Rao C X, Zhou Y X, et al, 2024. Data quality evaluation and product fusion analysis of ground-based remote sensing vertical observation system[J]. J Hubei Univ (Nat Sci), 46(6): 872-885 (in Chinese).
- 李彦霖, 2024. 3 种新型探测资料在贵阳春季一次短时强降水天气过程中的分析应用[J]. 中低纬山地气象, 48(1): 62-70. Li Y L, 2024. Analytical application of three kinds of new observation data in a spring short-time severe precipitation process in Guiyang[J]. Mid-Low Latitude Mountain Meteor, 48(1): 62-70 (in Chinese).
- 刘未希, 李庆雷, 王玉玮, 等, 2025. 基于多源资料的地基微波辐射计温度廓线数据质量评估[J]. 气候变化研究快报, 14(2): 205-216. Liu W X, Li Q L, Wang Y W, et al, 2025. Quality assessment of ground-based microwave radiometer temperature profiles based on multi-source data[J]. Climate Change Res Lett, 14(2): 205-216 (in Chinese).
- 刘玉莲, 康恒元, 赵玲, 2025. 基于高分辨率资料的东北冷涡气候特征[J]. 气象, 51(7): 830-839. Liu Y L, Kang H Y, Zhao L, 2025. Climate characteristics of northeast cold vortex based on high resolution data[J]. Meteor Mon, 51(7): 830-839 (in Chinese).
- 罗敬, 杨帆, 谢清霞, 等, 2024. 基于风廓线雷达的贵州中部一次强对流天气特征分析[J]. 山地气象学报, 48(3): 32-39. Luo J, Yang F, Xie Q X, et al, 2024. Analysis of a severe convective weather in central Guizhou Province based on wind profiler radar[J]. J Mountain Meteor, 48(3): 32-39 (in Chinese).
- 茆佳佳, 季承荔, 陶法, 等, 2025. 地基遥感垂直观测业务技术及应用综述[J]. 气象科技进展, 15(2): 28-34. Mao J J, Ji C L, Tao F, et al, 2025. Overview of the atmospheric vertical observation technology for ground-based remote sensing and its operational application[J]. Adv Meteor Sci Technol, 15(2): 28-34 (in Chinese).
- 任丽, 卜文惠, 于震宇, 等, 2025. 一次伴有极端降水的东北冷涡过程分析[J]. 干旱气象, 43(6): 939-952. Ren L, Bu W H, Yu Z Y, et al, 2025. Analysis of a northeast cold vortex process accompanied by extreme precipitation[J]. Arid Meteor, 43(6): 939-952 (in

- Chinese).
- 孙灿, 王豫, 刘晓英, 等, 2025. 不同云雾和降水条件下相干多普勒测风激光雷达探测性能分析[J]. 大气与环境光学学报, 20(3): 312-324. Sun C, Wang Y, Liu X Y, et al, 2025. Performance analysis of coherent Doppler wind lidar detection under different cloud and precipitation conditions[J]. J Atmos Environ Opt, 20(3): 312-324 (in Chinese).
- 王蕙莹, 周自江, 张志强, 等, 2025. 毫米波测云仪反射率因子资料质量控制及评估[J]. 气象, 51(11): 1535-1546. Wang H Y, Zhou Z J, Zhang Z Q, et al, 2025. Quality control and evaluation for reflectivity factor data of millimeter-wave cloud radar[J]. Meteor Mon, 51(11): 1535-1546 (in Chinese).
- 王卫民, 徐八林, 雷勇, 等, 2024. Ka 波段毫米波云雷达对青藏高原东南缘降水回波的分析[J]. 气象, 50(3): 291-302. Wang W M, Xu B L, Lei Y, et al, 2024. Analysis of precipitation echoes from Ka-Band millimeter wave cloud radar on the southeast margin of the Tibetan Plateau[J]. Meteor Mon, 50(3): 291-302 (in Chinese).
- 王文萧, 谢承华, 王进, 等, 2025. 基于多源探测资料对石河子市一次低能见度天气的分析[J]. 气象, 51(8): 993-1005. Wang W X, Xie C H, Wang J, et al, 2025. Analysis of a low visibility weather event in Shihezi City based on multi-source observation data[J]. Meteor Mon, 51(8): 993-1005 (in Chinese).
- 夏芸洁, 韦涛, 李林, 等, 2024. 测风激光雷达与风廓线雷达的探测性能评估及数据融合[J]. 气象科技, 52(2): 151-162. Xia Y J, Wei T, Li L, et al, 2024. Detection performance evaluation and data fusion of doppler wind lidar and wind profiling radar[J]. Meteor Sci Technol, 52(2): 151-162 (in Chinese).
- 肖婷, 张羽, 张志坚, 等, 2022. 多源新型探测资料在一次强对流天气中的应用[J]. 广东气象, 44(6): 11-15. Xiao T, Zhang Y, Zhang Z J, et al, 2022. Application of multi-sourced, new types of detection data in a severe convective weather[J]. Guangdong Meteor, 44(6): 11-15 (in Chinese).
- 阎琦, 谭政华, 苏雨萌, 等, 2024. 东北冷涡背景下辽宁省一次罕见暴雪过程不同阶段降雪成因分析[J]. 气象与环境学报, 40(4): 1-9. Yan Q, Tan Z H, Su Y M, et al, 2024. Causes analysis of snowfall during different stages of a rare heavy snowstorm event in Liaoning Province under the background of northeast cold vortex[J]. J Meteor Environ, 40(4): 1-9 (in Chinese).
- 杨雪, 杨磊, 袁潮, 等, 2025. 基于相控阵雷达的东北冷涡背景下 γ 中尺度涡旋对合并型弓状回波的影响研究[J]. 气象, 51(2): 191-206. Yang X, Yang L, Yuan C, et al, 2025. Study on the influence of mesovortex on merged bow echo under the background of Northeast China cold vortex based on phased array radar[J]. Meteor Mon, 51(2): 191-206 (in Chinese).
- 远芳, 廖捷, 周自江, 2022. 中国地基 GNSS/MET 水汽产品质量控制及与再分析产品的对比评估[J]. 大气科学, 46(5): 1132-1146. Yuan F, Liao J, Zhou Z J, 2022. GNSS/MET water vapor data: quality control method and comparative analysis of reanalysis datasets[J]. Atmos Sci, 46(5): 1132-1146 (in Chinese).
- 张京江, 李炬, 2025. 北京一次焚风过程中 GNSS 水汽变化特征[J]. 气象科技, 53(5): 752-760. Zhang J J, Li J, 2025. Characteristics of GNSS water vapour variation during a foehn event in Beijing[J]. Meteor Sci Technol, 53(5): 752-760 (in Chinese).
- 张鹏, 李锐, 赵坤, 等, 2025. 中国综合气象观测系统的业务发展[J]. 气象学报, 83(3): 729-760. Zhang P, Li R, Zhao K, et al, 2025. Development of an integrated meteorological observation system in China[J]. Acta Meteor Sin, 83(3): 729-760 (in Chinese).

-
- 钟水新, 2011. 东北冷涡结构特征及其强降水形成机理研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院. Zhong S X, 2011. Structural features of cold vortex and its formation mechanism of heavy rainfall over Northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences & Chinese Academy of Meteorological Sciences (in Chinese).
- Bevis M, Businger S, Herring T A, et al, 1992. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. J Geophys Res: Atmos, 97(D14): 15787-15801.
- Sassen K, 1991. The polarization lidar technique for cloud research: a review and current assessment[J]. Bull Amer Meteor Soc, 72(12): 1848-1866.