

基于地基微波辐射计资料的一次雷雨过程分析

李金泽, 李筱杨, 才志超, 廖华夏

海军航空大学航空基础学院, 山东 烟台

收稿日期: 2025年12月11日; 录用日期: 2026年1月12日; 发布日期: 2026年1月20日

摘 要

利用HTG-4型地基微波辐射计资料对2020年8月14日成都双流机场一次雷雨天气进行了分析, 此次雷雨根据降水强度、性质, 可以分为弱雷雨和强雷雨两个阶段, 结果发现: 强雷雨阶段和弱雷雨阶段开始前, 湿度场主要呈现出“中层湿、上下干”的分布情况, 且随着降水的临近, 综合水汽含量会出现激增, 温度场会呈现出“中间暖、上下冷”的暖心结构; 再者, 雷雨开始前1 h, 空中液态水含量会出现剧烈波动, 但是强雷雨阶段与弱雷雨阶段相比, 液态水含量波动更缓和, 但最大值中心发展高度更高; K指数和Cape指数峰值与降水强度峰值在弱雷雨阶段有较好的对应关系, 可以很好的作为监测强对流天气出现、维持的标准。

关键词

地基微波辐射计, 航空安全, 雷雨

Analysis of a Thunderstorm Process Based on Ground-Based Microwave Radiometer Data

Jinze Li, Xiaoyang Li, Zhichao Cai, Huaxia Liao

School of Basic Sciences for Aviation, Naval Aviation University, Yantai Shandong

Received: December 11, 2025; accepted: January 12, 2026; published: January 20, 2026

Abstract

Using data from the HTG-4 ground-based microwave radiometer, an analysis was conducted on a

文章引用: 李金泽, 李筱杨, 才志超, 廖华夏. 基于地基微波辐射计资料的一次雷雨过程分析[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(1): 148-154. DOI: 10.12677/ccrl.2026.151019

thunderstorm event at Chengdu Shuangliu Airport on August 14, 2020. Based on precipitation intensity and characteristics, the thunderstorm could be divided into two stages: weak and strong. The results revealed that before the onset of both stages, the humidity field primarily exhibited a distribution pattern of “moist middle layer and dry upper and lower layers.” As precipitation approached, the integrated water vapor content surged, while the temperature field formed a “warm middle, cold upper and lower” structure. Additionally, one hour prior to the thunderstorm initiation, the airborne liquid water content showed significant fluctuations. However, compared to the weak thunderstorm stage, the liquid water content fluctuations were smoother during the strong thunderstorm stage, but the maximum value center developed to a higher altitude. The K index and CAPE index peaks corresponded well with the precipitation intensity peaks during the weak thunderstorm stage, making them effective criteria for monitoring the occurrence and persistence of severe convective weather.

Keywords

Ground-Based Microwave Radiometer, Aviation Safety, Thunderstorm

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

雷暴作为严重影响飞行安全的危险天气现象, 可通过诱发低空风切变、突发性阵风、雷电以及冰雹等要素, 显著削弱飞机的空气动力特性, 增加操控难度, 甚至引发航空事故[1]。因此, 实现雷暴的精准监测与预报, 对机场气象保障工作至关重要。目前, 业务化应用的航空气象探测手段主要包括探空、天气雷达和气象卫星。常规探空观测每日仅在 08 时和 20 时进行两次, 且站点分布相对稀疏, 其时、空分辨率均显不足, 难以实现对雷暴等中小尺度天气系统的连续有效监测[2][3]。天气雷达虽能对低云、雷暴等过程实现 24 小时不间断探测, 但其资料获取严重依赖降水粒子, 在无降水条件下探测能力受限。气象卫星虽具有覆盖范围广、时空分辨率较高的优势, 但其对大气垂直结构的探测能力有限, 尤其在 5 公里以下的低空区域, 卫星遥感数据的误差较大, 对低云的识别能力也存在明显不足。相比之下, 地基微波辐射计作为一种新兴的大气微波遥感设备, 凭借其高时空分辨率的优势, 能够对边界层大气的温度、湿度垂直结构以及云参数信息进行全天候、分钟级的高频连续监测[4]-[6]。这一技术特性恰好弥补了上述传统观测手段的不足, 成为航空气象监测体系的有效补充。通过数据融合, 微波辐射计还可反演云底高度、对流有效位能等产品, 从而显著增强对雷暴的监测预警能力。本文基于成都双流机场的 HTG-4 型地基微波辐射计观测资料, 将对一次雷雨天气过程开展分析, 以期提升航空气象保障能力提供参考依据。

2. 资料和方法

该项目中 HTG-4 型地基微波辐射计由北京爱尔达电子设备有限公司研制, 它能自动完成地面到高空 10 km 的大气温度、湿度要素的探测, 描述大气的热力特性, 直观输出温度廓线、湿度廓线等要素。它配置了两个探测频段, 14 个信号通道, 其中 7 个通道用来获取湿度廓线, 频率范围在 22~31 GHz, 7 个通道用来获取温度廓线, 频率范围在 51~58 GHz。安装在成都双流机场的 HTG-4 型辐射计的垂直廓线分辨率为: 2 km 以下为 100 m, 2~5 km 为 200 m, 5~10 km 为 400 m。其主要输出资料有温湿度廓线、综合水汽含量、液态水廓线、液态水路径、稳定度指数等。

3. 天气背景与降水过程分析

2020 年 8 月 14 日,成都双流机场 14:30 (世界时,下同)闻雷,14:40~17:40,出现 4 次短时雷雨天气,但降水强度不大,最大为 25 mm/h; 18:00 之后,出现连续雷雨天气,最大降水强度超过 85 mm/h,直到 20:00 之后,降水减弱,23:00 降水结束。根据此次降水特点,本文将 14:40~17:40 称为弱雷雨阶段,而将 18:00 之后的降水成为强雷雨阶段。

4. 地基微波辐射计输出资料分析

4.1. 湿度和温度演变特征

湿度及水汽含量演变特征是降水过程中需要关注的重要因素。图 1 为相对湿度随时间的演变图像。从图 1 中,我们可以看出,降水开始之前 4 小时,高空相对湿度主要呈现出“中层湿、上下干”的分布情况,最大湿区位于 4~6 km 高度上,从 11:00~14:40,其一直维持 95%以上的高值,对流层中层大气基本处于饱和、过饱和状态。降水开始前 10~20 min,该高值区相对湿度开始陡然下降,最大湿区开始向低空转移,15:50 之后,机场上空相对湿度主要呈现出“中层湿、中下层干”的分布情况,最大湿区位于 1~3 km 高度,这样的湿区分布情况,有利于不稳定层结的进一步维持。随后,在强雷雨阶段开始之前,机场上空高层大气相对湿度迅速升高,最大湿区位于 2.5~6 km 高度上,“中层湿、上下干”的湿度分布模式重新建立,降水开始之后,最大湿区高度又迅速降低,直至降水结束。

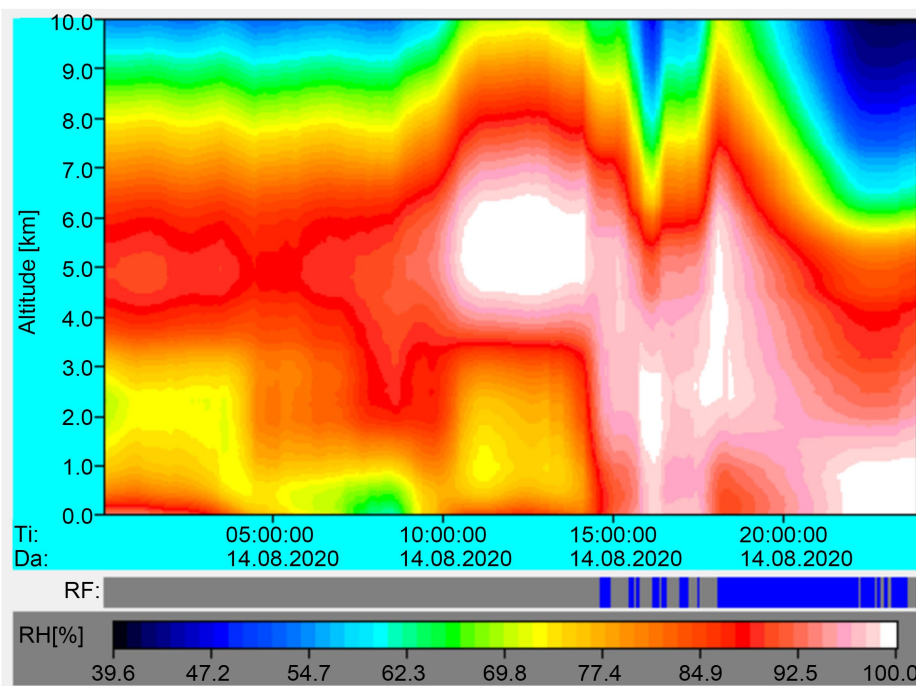


Figure1. Relative humidity profile
图 1. 相对湿度廓线

温度图像上(图 2),弱降水阶段开始前后,低层气温出现大幅度波动,随着降水的增强,波动逐渐增强,1.2 km 以下的低空出现明显升温,且出现“中间暖、上下冷”的暖心结构,随着降水的减弱,暖心结构逐渐减弱消失。强降水阶段开始前 5~10 min,对流层低空气温再次出现大幅度升温,暖心结构重建。从温度场上看,两次雷雨过程都伴随着气温场的升温现象。

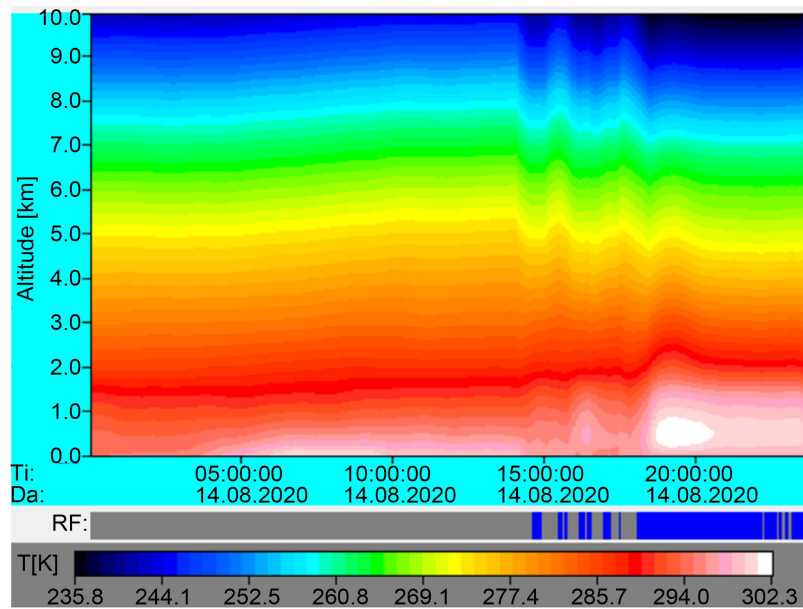


Figure 2. Temperature profile

图 2. 温度廓线

4.2. 综合水汽含量演变特征

地基微波辐射计可以反映降水过程中的综合水汽含量演变特征，对雷暴的监测预警具有重要意义。图 3 显示的是两次雷雨过程中的水汽含量时间序列图像。从图像上看，弱雷雨开始前 5~10 min，大气中的综合水汽含量出现激增，峰值大于 85 kg/m^2 ，属于非常强的降水条件[7]。弱雷雨阶段共出现四次水汽含量峰值，这与降水强度的四次峰值是相对应的，每次发生阵性降水后，综合水汽含量会迅速回落至 65 kg/m^2 左右，但仍比降水开始前的水平高。18:00 进入强雷雨阶段，综合水汽含量再次激增，峰值与弱雷雨阶段基本相当。与上一降水阶段相比，该阶段 IWV 值整体波动较小，且已知维持在 85 kg/m^2 以上，从而为强降水的维持提供了足够的水汽条件。

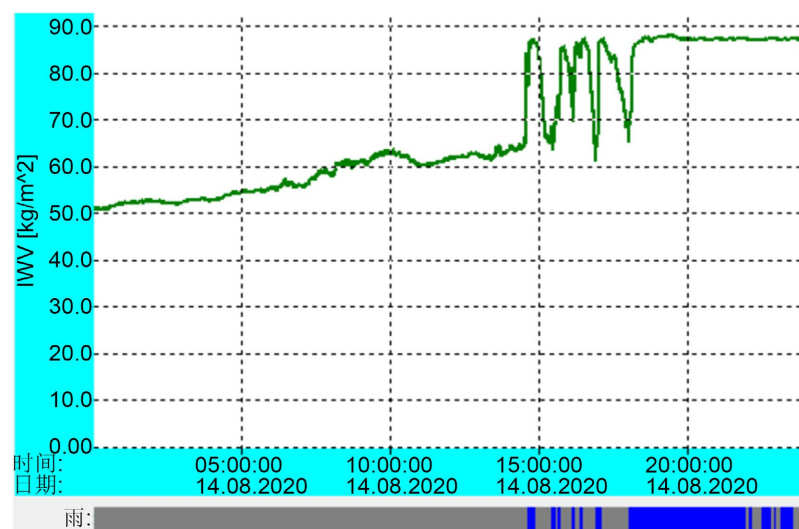


Figure 3. Integrated water Vapour

图 3. 综合水汽含量

4.3. 液态水廓线演变特征

液态水廓线(LPR)可以反映对流层中液态水的空间分布情况。从图 4 可以看出, 7:20~10:40, 空中有明显的液态水分布, 但发展高度不高, 大于 0.4 g/m^3 的液态水含量大值区位于 2~3 km 高度, 地面并未出现明显降水。随后, 空中液态水逐渐消退, 直到弱雷雨阶段开始前 1 h, 1~4 km 的空中, 液态水含量出现波动, 随着雷雨的临近, 液态水发展高度达到 8~9 km, 大于 0.75 g/m^3 的液态水含量大值区位于 4~6 km 附近, 这与牟艳彬等[8]对 2017 年夏季双流机场 20 例雷雨过程的分析结论基本一致。随着多个对流单体经过机场上空, 液态水含量出现多次峰值, 每次峰值的出现都对应着阵性降水的出现。进入强降水阶段, 大于 0.75 g/m^3 的液态水含量大值区较上一阶段高度进一步抬升, 大致位于 7 km 高度附近, 且液态水含量整体的波动性较上一阶段更小, 这表明该阶段对流更旺盛, 降水更具连续性。同时, 从云底高度的资料(图略)上也可以看出, 这一阶段的对流云系更低, 云量更多。

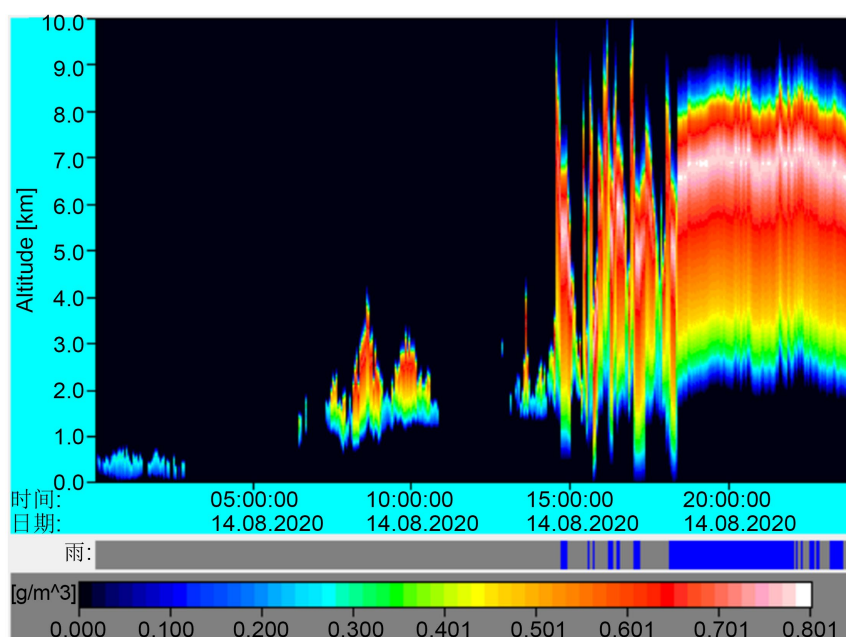


Figure 4. Liquid water profile

图 4. 液态水廓线

4.4. 不稳定度指数

地基微波辐射计可输出各种稳定度指数, 例如 K 指数、SI 指数、CAPE 指数等, 对于雷雨天气的检测、诊断具有重要意义。本文重点分析了此次雷雨过程 K 指数和 CAPE 指数的变化情况, 从图 5 可以看出, 在弱雷雨阶段开始前 1h, K 指数出现明显波动, 最大值大于 35°C , 这表明低层大气的增温增湿使得大气的不稳定度不断增加。随着降水的临近与增强, K 指数在 14:36 陡然上升, 随着降水的减弱, 又迅速下降, 这样的升降趋势在整个弱雷雨阶段出现了 4 次, K 值最大达到了 55°C , 最低则小 35°C , 基本与降水的升降趋势是一致的。进入强雷雨阶段后, K 值再次陡然上升至 55°C , 但相比于上一阶段的降水, 该阶段 K 值变化较为稳定, 一直在 55°C 附近小范围波动, 有利于对流行降水的维持。

CAPE 值反映的是不稳定能量的大小。从图 5 可以看出, CAPE 值在雷雨开始前 1h 也存在明显波动, 再者, 在弱雷雨阶段, CAPE 值的升降趋势与 K 值变化接近, 所不同的是, 每次短时降水结束后, CAPE 值直接下降为 0, 这再次表明弱雷雨阶段主要以小尺度对流单体影响为主, 降水范围相对较小。在者, 从

对流强度上看, 弱雷雨阶段 CAPE 值峰值最小为 970 J/kg, 最大为 1800 J/kg, 属于弱对流至中等对流的强度, 整体对流强度较弱。而进入强雷雨阶段, 对流明显增强, Cape 值一直维持在 2000 J/kg 以上, 最大值大于 2500 J/kg, 已属于强对流强度。

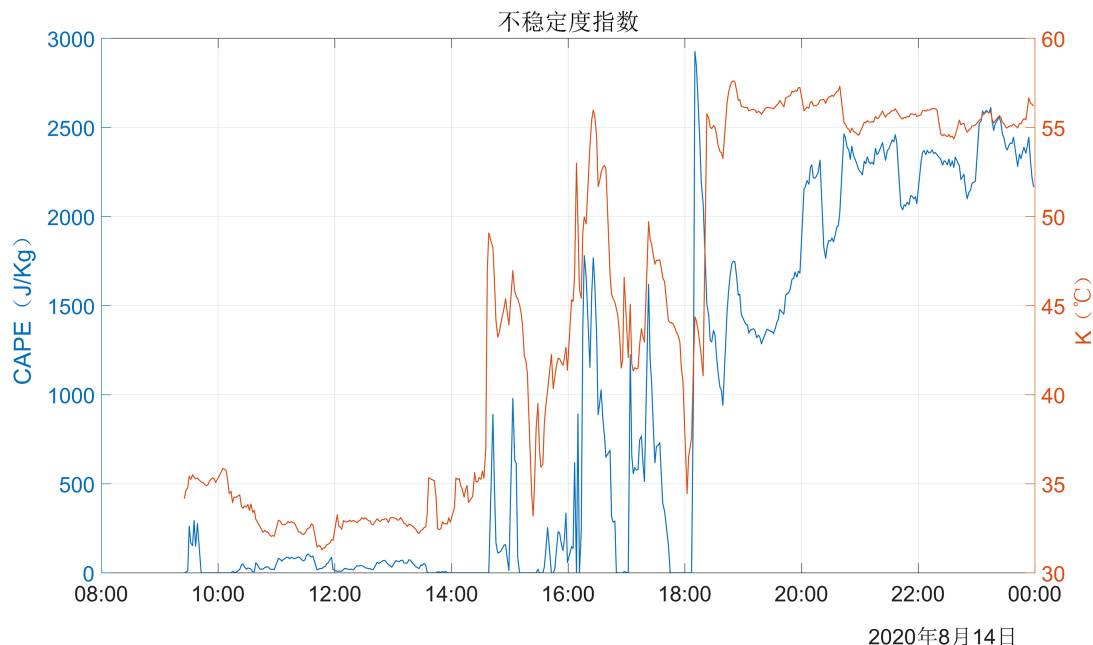


Figure 5. Stability indices
图 5. 稳定度指数

5. 小结

本文利用 HTG-4 型地基微波辐射计资料对 2020 年 8 月 14 日成都双流机场一次雷雨天气进行了分析, 根据降水强度、性质的变化, 将此次雷雨天气分为了两个阶段, 即弱雷雨阶段和强雷雨阶段, 通过对两个阶段雷雨过程的分析, 得出了以下结论:

1. 弱雷雨阶段和强雷雨阶段降水开始前, 空中相对湿度都呈现出“中层湿、上下干”的分布状态, 随着降水的增强, 温度场上出现“中间暖、上下冷”的暖心结构。
2. 雷雨开始前 5~10 min, 大气中的综合水汽含量会出现激增, 但两个雷雨阶段在后续综合水汽含量的变化上存在明显不同, 即弱雷雨阶段, 综合水汽含量波动更大, 而强雷雨阶段, 综合水汽含量变化则更为稳定。
3. 雷雨开始前 1 h, 空中液态水含量会出现明显波动, 随着降水增强, 液态水可以发展到 8~9 km 的高度上。强雷雨阶段与弱雷雨阶段相比, 大于 0.75 g/m³ 的液态水含量大值区发展高度更高, 液态水廓线波动更小, 表明后者比前者降水更具连续性。
4. K 指数和 CAPE 指数在雷雨开始前 1 h 会出现明显波动, 且在弱降水阶段, 两指数峰值与降水峰值有较好的对应, 可很好地作为监测强对流天气出现、维持的标准; CAPE 指数可以作为划分对流强度的重要标准, 强雷雨与弱雷雨阶段相比, 对流更强, 且更持久。

参考文献

- [1] 章澄昌. 飞行气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2000.

-
- [2] 韩丰, 杨璐, 周楚炫, 等. 基于探空数据集成学习的短时强降水预报试验[J]. 应用气象学报, 2021, 32(2): 188-199.
 - [3] 周雪松, 郭启云, 夏元彩, 等. 基于往返式平漂探空的 FY-3D 卫星反演温度检验[J]. 应用气象学报, 2023, 34(1): 52-64.
 - [4] Wilheit, T.T., Chang, A.T.C. and Chiu, L.S. (1991) Retrieval of Monthly Rainfall Indices from Microwave Radiometric Measurements Using Probability Distribution Functions. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **8**, 118-136. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1991\)008<0118:romrif>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1991)008<0118:romrif>2.0.co;2)
 - [5] Madhulatha, A., Rajeevan, M., Venkat Ratnam, M., Bhate, J. and Naidu, C.V. (2013) Nowcasting Severe Convective Activity over Southeast India Using Ground-Based Microwave Radiometer Observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **118**, 1-13. <https://doi.org/10.1029/2012jd018174>
 - [6] Xu, G., Xi, B., Zhang, W., Cui, C., Dong, X., Liu, Y., *et al.* (2015) Comparison of Atmospheric Profiles between Microwave Radiometer Retrievals and Radiosonde Soundings. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **120**, 101-117. <https://doi.org/10.1002/2015jd023438>
 - [7] 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象, 2017, 43(6): 641-652.
 - [8] 牟艳彬, 宋静, 傅文伶, 等. HTG-4 型微波辐射计的航空气象预报应用研究[J]. 高原山地气象研究, 2018, 38(1): 35-41.