# 基于2024年成都后汛期雷暴初生预报研究

#### 龙佳雨<sup>1,2\*</sup>,张永莉<sup>1#</sup>,方效辉<sup>2#</sup>

<sup>1</sup>成都信息工程大学大气科学学院,四川 成都 <sup>2</sup>安远县气象局,江西 赣州

收稿日期: 2025年6月15日; 录用日期: 2025年7月14日; 发布日期: 2025年7月21日

# 摘要

本研究采用多源气象观测数据融合的分析方法,重点探究了雷暴形成初期对流云团的动力热力特征及其 演变规律。研究基于中国气象局的地面自动气象站、探空站等常规观测数据,结合日本气象厅新一代静 止气象卫星葵花9号的高时空分辨率遥感资料,采用卫星云图的单通道阈值检测算法,配合多光谱通道协 同分析技术,对2024年成都地区后汛期发生的两次典型强对流天气过程中的云团初生阶段进行了系统性 观测研究。通过整合地基观测与天基遥感的多维度数据,重点分析了初生对流云团的光谱通道特征及其 与强降水过程的对应关系。研究结果显示:(1)雷暴天气从初生至成熟阶段历时短,天气尺度小,伴随 的每小时降水大多在20mm以上,极端情况下每小时可达到55mm以上。(2)单通道阈值法识别的初生 云团的云顶亮温值位于200 K至240 K,随时间推移呈下降趋势,当云顶亮温低于235 K的阈值时,雷暴 天气发生。(3)多通道协同方法下的雷暴云团在红外-分裂窗和红外-水汽通道的亮温差,在对流中心 附近15~30 km的占比随时间显著增加,当红外-分裂窗通道亮温差位于0.5~5 K之间时,降水量增大且 雷暴天气发生。(4)云有效半径的增大和云光学厚度的减小,表明雷暴云团从初生往成熟期过渡,是提 前预警的关键时刻,云有效半径超过30 µm,以及云光学厚度低于28时,雷暴天气发生概率增加,初生 云团云顶高度持续抬升至9~13 km,同时云顶温度下降,皆与对流发展密切相关。通过研究雷暴云团初 生阶段的对流云发展规律及其演变特征,对于提高成都地区及全国范围的气象预警准确性具有重要价值。 这不仅有助于减少极端天气对公共安全和工农业生产的影响,还能为防灾减灾工作提供科学依据。

#### 关键词

雷暴,葵花9号卫星产品,初生云团,强对流天气

# Research on Thunderstorm Initiation Prediction during the Late Flood Season of 2024 in Chengdu

Jiayu Long<sup>1,2\*</sup>, Yongli Zhang<sup>1#</sup>, Xiaohui Fang<sup>2#</sup>

\*第一作者。 #通讯作者。 <sup>1</sup>School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan <sup>2</sup>Anyuan County Meteorological Bureau, Ganzhou Jiangxi

Received: Jun. 15th, 2025; accepted: Jul. 14th, 2025; published: Jul. 21st, 2025

# Abstract

This study employs a multi-source meteorological observation data fusion approach to investigate the dynamic-thermal characteristics and evolutionary patterns of convective cloud clusters during the initial stages of thunderstorm formation. The research integrates conventional observation data from the China Meteorological Administration's surface automatic weather stations and radiosonde observations with high spatiotemporal resolution remote sensing data from the Japan Meteorological Agency's next-generation geostationary satellite Himawari-9. Using a single-channel threshold detection algorithm for satellite cloud imagery combined with multispectral channel correlation analysis technology, we conducted systematic observational research on the genesis phase of cloud clusters during two typical severe convective weather events occurring in the late flood season of 2024 in the Chengdu region. By synthesizing multi-dimensional data from ground-based and space-based observations, we focused on analyzing the spectral channel characteristics of incipient convective clouds and their correlation with heavy precipitation processes. Key findings include: (1) Thunderstorm events exhibited rapid development from initiation to maturity with mesoscale features, typically producing hourly precipitation exceeding 20 mm and reaching over 55 mm in extreme cases. (2) Cloud-top brightness temperature (BT) of developing clouds identified by the single-channel method ranged 200~240 K, showing a decreasing trend, with thunderstorms triggered when BT fell below 235 K. (3) In multispectral analysis, the brightness temperature difference (BTD) between infrared split-window and water vapor channels showed significant increase within 15~30 km of convective centers, with precipitation intensifying when BTD reached 0.5~5 K. (4) Increasing cloud effective radius (CER >30 µm) and decreasing cloud optical thickness (COT <28) signaled the transition to mature phase—a critical warning window. Concurrent cloudtop height ascent (9~13 km) and temperature decrease were closely associated with convective development. This investigation of convective cloud evolution during thunderstorm initiation provides valuable insights for improving severe weather warning accuracy in Chengdu and nationwide. The findings not only help mitigate impacts on public safety and socioeconomic activities but also offer scientific support for disaster prevention and mitigation efforts.

# **Keywords**

Chengdu Thunderstorms, Himawari-9 Satellite Products, Incipient Cloud Clusters, Severe Convective Weather

Copyright © 2025 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/

CC O Open Access

# 1. 引言

成都后汛期是该地区强对流天气的重要活跃时段,此期间大气层结呈现明显不稳定特征,水汽输送 持续充沛,极易激发雷暴等强对流天气系统[1]。这类天气过程具有突发性强、发展迅猛、持续时间短但 致灾性强等典型特征,常伴随短时强降水、雷暴大风和冰雹等极端天气现象,对城市基础设施和公共安 全形成严峻挑战[2]。以 2021 年 8 月下旬为例,成都市区遭遇突发性强对流袭击,最大小时降雨量突破 92.5 毫米,导致中心城区出现大面积内涝; 2020 年 9 月上旬,成都经历区域性雷暴过程,天府新区记录 到最大瞬时风速达 25.8 m/s 的雷暴大风,造成多处市政设施损毁,这些典型案例充分证实了后汛期强对 流天气的显著致灾特性[3]。本研究针对 2024 年成都后汛期雷暴初生云团的系统观测,将重点解析该特定 时段雷暴云团的触发机制、三维结构演变规律及微物理特征等关键科学问题,研究成果可为提升后汛期 强对流天气的精细化预报预警水平提供重要理论支撑和技术参考[4]。通过深入理解后汛期对流天气的发 生发展规律,有助于建立更具针对性的预警指标体系,显著提升灾害性天气的防范应对能力[5]。

目前国内外已有一系列应用卫星技术对强对流天气进行观测和预警的研究。巫俊威等[6] (2013)针对 2012 年 8 月 16~19 日成都地区出现短时、局地暴雨、特大暴雨的异常强降水天气,利用常规气象资料、 1°×1° NCEP 再分析资料和客观物理量场、卫星云图等资料,对造成此次强降水主要集中在成都地区西 部沿山一带的原因进行了分析,分析得出:在有利的环流背景下,中小尺度系统发生发展和演变是这次 暴雨产生的直接原因。杨洁等[7] (2021)针对 2019 年 2 月 21 日强对流冰雹过程分别利用葵花 8 号卫星资 料的 11.2 µm 通道与 7.0 µm 通道亮温差拟合和 11.2 µm 通道、7.0 µm 通道分段拟合对雷达回波进行反演, 发现在强对流识别上,11.2 µm 通道、7.0 µm 通道分段线性拟合比亮温差线性拟合效果要好,非强对流点 识别成强对流点的情况较少。

# 2. 资料概况

# 2.1. 葵花9号卫星介绍

日本葵花 9 号静止轨道气象卫星作为新一代地球观测平台,具备显著的时空监测优势。该卫星系 统采用先进的成像技术,可实现 10 分钟完成全圆盘扫描,并对重点区域实施 2.5 分钟高频次观测。其 搭载的高光谱成像仪(AHI)配置了 16 个独立探测通道,覆盖从可见光到红外波段的连续光谱。本研究 采用的 NetCDF4 格式卫星数据产品包含多个关键地球物理参数,特别值得关注的是,AHI 传感器的多 光谱探测能力使其各通道具有特定的光谱响应特性,可针对不同应用场景提供定制化观测服务。本文 主要选用的是葵花 9 号 AHI 第 10 通道(水汽吸收波段)、第 13 通道(红外窗区波段)和第 15 号通道(红外 窗区波段)。

#### 2.2. 降水数据

降水资料主要来自成都市气象台于后汛期时期内发出的灾害性天气预警信号单和四川省气象局统计 的降水时间、降水站数,结合二者数据考虑,可得到所需要的降水时段以得到雷暴初生时间。2024年后 汛期内主要的突出的雷暴个例有2例,7月22日、8月9日(表1),覆盖多个区、市和县,对应时间段内 的主要站点监测到的每小时雨量均超过20mm,符合并达到暴雨级别的标准。7月22日最大降水发生的 时段为2:00~3:00,雷暴云团初生时段为0:40~2:00,主要的降水中心为双流区和新都区。8月9日最大降 水发生的时段为11:00~13:00,雷暴云团初生时段为9:00~10:20,主要降水中心为双流区、温江区和新都 区。除此以外,通过Arcmap10.8 绘制降水填色图以直观地表示个例中的降水量大小,由此根据降水量绘 制每份个例的降水填色图与主要站点的降水随时间变化的折线图。

# 2.3. 研究内容

本文主要研究内容: 1) 收集资料以获悉后汛期内发布的雷雨预警和地面气象站观测数,结合二者判断有可能发生的雷暴或强降水天数以及对应具体时间段,收集、下载来自葵花9号的图像数据,主要为葵花9号的红外云图。2) 本文采用单通道阈值法、多通道协同和各类云属性来对雷暴进行特征提取。3)

在对流中心 15~30 km 的范围内分析雷暴初生云团基本特征以得出基本结论。

Table 1. Time periods and detailed information of two thunderstorm events during the 2024 flood season in Chengdo
表 1. 2024 年成都汛期内两次雷暴过程时间段以及详细信息

日期	降水峰值时间	初生云团发展时间	云团发展地点	经纬范围(大致)
7月22日	2:00~3:00	0:40~2:00	双流区、新都区	30.30°N~30.95°N 103.80°E~104.20°E
8月9日	11:00~13:00	9:00~10:20	双流区、温江区、新都区	30.30°N~30.95°N 103.75°E~104.20°E

# 2.4. 研究方法

# 2.4.1. 单通道阈值法的云检测

对流云的卫星识别主要使用的是阈值法,由于对流云的垂直发展旺盛,云顶高度甚至可达对流层顶(12~18 km),且对流云的云顶亮温极低,恰好通道13 (10.4 µm)对云顶温度极为敏感,可很好地检测低温区域,低温区域代表的正是对流云位置。详细方法为通过输入一个具体温度阈值,由于目标云和背景差异显著,卫星图像将被分割,最后输出结果为二值图像,反映到输出图像上则表现为对流云候选区为亮白色,非云区为黑色,例如,选取 2024 年 7 月 22 日葵花 9 号卫星全盘区域云图作为个例,运用温度阈值分割的方法导出为二值图像。设置固定的阈值(240 K),在遥感软件中多次识别,得到潜在的对流云系,以高精度的时间分辨率观察并分析其主要变化,得到并绘制出每个过程红外通道亮温随时间变化的折线图。

# 2.4.2. 多通道组合检测初生云系

为了更好地追踪初生阶段的雷暴云团,一般采用多通道组合的方法,对单通道阈值法进行一定程度的改进。使用红外-分裂窗通道亮温差,利用葵花9号的通道13和通道15两个邻近的红外窗区通道对不同目标物的敏感性,通过计算亮温差从而提取出所需要的信息。以及红外-水汽通道亮温差,它是由 红外窗区通道和水汽吸收通道的亮温差得到的,能够间接反映云顶高度相对于对流层顶的位置。当红外-分裂窗通道亮温差为正值,即:

$$BT\Delta = BT_{13} - BT_{15} > 0 \text{ K}$$
(1)

式(1)意味着红外 - 分裂窗通道亮温差大于 0 时对流云处在初生阶段;而式(2)红外 - 水汽通道亮温差为正 值,且亮温差较小通常位于 1 K 至 5 K 之间时,可被判别为此时的云顶尚未到达对流层顶,垂直发展才 刚刚开始,即初生阶段的对流云团。基于以上事实,只要合理利用多通道组合检测的方法,截取对应时 段目标地区上空云系在红外通道和水汽通道里的亮温以及它们的亮温差,就能基本判定该时刻存在潜在 初生对流的迹象。即:

$$BT\Delta = BT_{IR} - BT_{WV} > 0 \text{ K}$$
<sup>(2)</sup>

# 3. 研究结果

# 3.1. 降水信息

2024年后汛期,成都地区曾多次发生雷暴现象。作为一种短时强对流天气,如若能对其进行及时有效的预报,就能有效防范其后续带来的各种气象和地质灾害。根据前文所用到的降水数据和资料,后汛

期内观测到的比较显著的过程有以下时间段,详见表 1 和图 1。图 1(a)和图 1(b)中,7 月 22 日强降水主 要发生在温江区、崇州市和郫都区,三站点降水强度相当,雨量在 1 h 内的增幅大约为 18~25 mm,4 时 崇州站和郫都站达到峰值 24.6 mm 和 17.9 mm,5 时温江站达到峰值 18.3 mm,云团初生时间位于 3:00 至 4:20,从图 1(c)和图 1(d),8 月 9 日强降水主要发生在双流区和新都区,新都站雨量强度和变化较大,峰 值时的雨量为 58.2 mm,2 h 内增幅为 58 mm 左右,双流站雨量次之,2 h 内增幅为 17 mm 左右,初生云 团发展的时间为 0:40 至 2:00。综合以上的降水信息,可知对于雷暴这类短时强天气,从初生到成熟时间 较短,云团开始初生的时间大约在成熟前的1 h 到 2 h,天气尺度小,雷暴伴随的强降水大部分超过 20 mm 并且集中在几个站点发生。



**Figure 1.** (a) 1-hour precipitation color-filled map for Chengdu on 22 July; (b) Precipitation variation at Shuangliu and Xindu stations on 22 July; (c) 1-hour precipitation color-filled map for Chengdu on 9 August; (d) Precipitation variation at Shuangliu, Xindu and Wenjiang stations on 9 August

**图 1.** (a) 7 月 22 日成都 1 h 降水量填色图; (b) 7 月 22 日双流站、新都站降水量变化; (c) 8 月 9 日成都 1 h 降水量填 色图; (d) 8 月 9 日双流站、新都站、温江站降水量变化

# 3.2. 单通道云顶亮温特征

对单通道阈值法的云检测来说,AHI 传感器的通道 13 (10.4 μm)作为红外窗区通道,因为通道 13 具有高泛用性,是雷暴初生云团检测中关键的单通道,经检测后识别出云图上潜在的对流云系和绘制出每个过程红外通道亮温随时间变化的折线图(图 2),分析在单通道云检测下的初生云团,可见每个过程的对流云团 在发展阶段时云顶亮温呈现逐渐降低的趋势,7月 22 日云团开始初生时的亮温较低,为 235.24 K,随后在 一段时间内下降平缓,为1.98 K/10min,对应图 1(b)降水开始增大时的亮温为224.78 K,8 月 9 日亮温227.22 K 下降至208.09 K,下降速率约为2.39 K/10min,对应图 1(d)中降水开始增大时的亮温为217.21 K。由亮温降低,表明云顶高度不断上升,云内对流活动增强,云团发展至成熟前,亮温值普遍位于200~240 K 的区间,成熟后云顶接近对流层上部,极可能发生强雷暴,伴随强降水、大风或冰雹等灾害性天气。



**Figure 2.** Temporal variation of cloud-top brightness temperature for incipient thunderstorm clouds in the Chengdu Region 图 2. 成都地区初生雷暴云团云顶亮温随时间变化

#### 3.3. 多通道协同对比分析

#### 3.3.1.7月22日过程分析

对于7月22日的雷暴过程来说,7月22日凌晨0:40至2:00,云团初生的主要发生地点位于双流区,从初生云团发展阶段的红外云图(图3)可以看出,从0:40到0:50云团中心迅速往西南方向移动,扩散至双流、新都等地区,两地此刻降水为5.6mm和2.2mm,降水中心处云顶亮温为235.24K,1:00到1:20,云团中心停滞在双流区,双流站降水增大至14.0mm,云顶亮温进一步降低至226.08K,随之1:30到2:00中心往东北迁移,停留在双流区和龙泉驿区边界附近,2:00新都站达到降水峰值58.2mm,降水中心处云顶亮温达到最低,为219.40K。整个过程0:40至2:00亮温由235.24K到219.40K,云顶色调越来越白,云区越来越广,逐渐覆盖到目标区域。

表 2 是当日该时段亮温差结果。在 0:40~2:00, "分裂窗"亮温差占比呈波动变化,0:50 为最低值 86.67%,整体始终处于高位,1:40 达 100%,说明云团在目标区域几乎覆盖完全,组织化程度高。"分裂 窗"亮温差的平均值在 0:40 时到 1:20 呈现持续上升趋势(2.45 K→3.79 K),反映云顶冰晶化进程加速,1:20 达到峰值对应强冰晶增长阶段,随后略微降低,在 2:00 再次升高为 3.61 K;红外 - 水汽亮温差的占比增加,从 0:40 的 33.33%持续增加至 2:00 的 83.41%,显示云系在初生时发展和扩大,红外 - 水汽亮温差的平均值从 7.07 K 降至 4.11 K,高层湿度整体增加,有利于云团发展,尤其在 1:20~1:50 云团在垂直 发展过程处于快速发展阶段,水汽差降至 5.61 K,表明上升气流携带水汽至中层并饱和,后期水汽差进一步降至 4.11 K,显示云团突破环境阻碍,进入快速发展期。

#### 3.3.2.8月9日过程分析

8月9日9:00至10:20,图4所示初生云团地点为新都区、温江区和双流区,从每十分钟的红外云图可看出,大片的白亮的云区几乎覆盖了整个成都地区,9:00至10:20云团中心云团最冷最高的中心位于成都南部的新津区和双流区一带,后续云区将覆盖整个成都地区,整个过程对流中心附近的云顶亮温从227.22K下降到208.09K,10:30新都站检测到最大降水量为22.2mm。结合云顶亮温和云图,从云区的



规模和色调可看出该个例的雷暴强度较大。

**Figure 3.** Infrared imagery of incipient thunderstorm clouds in Chengdu on 22 July 2024. (a) 0:40; (b) 0:50; (c) 3:20; (d) 1:00; (e) 1:20; (f) 1:30; (g) 1:40; (h) 1:50; (i) 2:00

图 3. 成都 2024 年 7 月 22 日雷暴初生云团红外云图。(a) 0:40; (b) 0:50; (c) 3:20; (d) 1:00; (e) 1:20; (f) 1:30; (g) 1:40; (h) 1:50; (i) 2:00

Table 2. Proportion of brightness temperature difference values between two channels from 0:40 to 2:00 on July 22
表 2.7 月 22 日 0:40~2:00 两种通道亮温差数值占比情况

时间	红外 - 分裂窗通道亮温差在 0.5 K 至 5 K 之间的 占比/亮温差平均值	红外 - 水汽通道亮温差在1K至5K之间的占比/ 亮温差平均值
0:40	100%/2.45 K	33.33%/7.07 K
0:50	86.67%/2.57 K	20.00%/8.57 K
1:00	93.33%/2.96 K	16.67%/8.90 K
1:10	96.67%/3.36 K	20.00%/8.01 K
1:20	96.67%/3.79 K	30.00%/6.87 K
1:30	98.56%/3.71 K	43.33%/5.78 K
1:40	100%/3.22 K	56.67%/5.61 K
1:50	97.62%/3.33 K	64.88%/5.34 K
2:00	93.65%/3.61 K	83.41%/4.11 K



**Figure 4.** Infrared imagery of incipient thunderstorm clouds in Chengdu on 9 August 2024. (a) 9:00; (b) 9:10; (c) 9:20; (d) 9:30; (e) 9:40; (f) 9:50; (g) 10:00; (h) 10:10; (i) 10:20 图 4. 成都 2024 年 8 月 9 日雷暴初生云团红外云图。(a) 9:00; (b) 9:10; (c) 9:20; (d) 9:30; (e) 9:40; (f) 9:50; (g) 10:00; (h) 10:10; (i) 10:20

综合分析表 3 的两种通道的亮温差,红外分裂窗在 0.5 K 至 5 K 之间的占比从 9:00 的 43.33%逐渐增 加到 10:00 的 96.67%,在 10:00 到 10:20 维持稳定,显示该时段内云团快速增长和发展,逐渐覆盖目标区 域。"分裂窗"亮温差均值从 2.42 K 快速增至 5.93 K,表明雷暴云团正在强烈发展,云顶快速抬升,云 层中水汽含量较多,云顶冰晶化进程加速;红外 - 水汽通道亮温差的占比先是在 26.67%~36.67%波动,后来逐渐升高至 10:20 的 100%,亮温差平均值从 6.06 K 骤降至 0.17 K,显示高层饱和水汽层完全建立,反映强烈的高层辐散和卷云砧形成;该时期的云团有明显的演变阶段特征,可认为云团在 9:00~9:20 处在初始阶段,从数据可看出此时高层水汽输送尚未完全建立,而 9:20~10:20 处在快速发展阶段,分裂窗亮 温差突破 4 K,占比从 60%增至 70%,水汽通道亮温差占比跃升至 57.65%,云顶开始显著冰晶化。符合 初生云团发展时的特征。

基于以上分析,绘制出每次过程的九个时间点红外 - 分裂窗通道亮温差、红外 - 水汽通道亮温差各 自的占比和均值变化的折线图(图 5)。初步可以得出以下特征:

(1) 雷暴初生云团在红外卫星云图上的色调越来越白,对应云区在对流中心附近的高占比 (80%~100%)以及较低的云顶亮温(235 K),分布范围越来越大,云团一边移动一边发展。

(2) 初生云团的红外 - 分裂窗通道亮温差和红外 - 水汽通道亮温差在目标区域内的对应的占比随时间呈现上升趋势,其在目标区域内的占比到最后总体维持在 75%~100%之间,表明初生云团内部的对流 云系正在快速发展,对流活动增强,云团范围扩大。

(3) 初生云团的红外 - 分裂窗通道亮温差值随时间呈上升趋势,始终维持在 0.5 K 至 5 K 之间,云顶 高度升高,云层变厚,云层中冰晶或者其他云滴浓度增加,对流活动有所增强。 (4) 初生云团的红外 - 水汽通道亮温差值随时间逐渐减小,最后都保持在0K至8K左右,说明可能存在中层干空气入侵,差值快速降低,最后引发雷暴、大风、下击暴流等强对流天气的末期阶段。

**Table 3.** Proportion of brightness temperature difference values between two channels from 9:00 to 10:20 on August 9 表 3. 8 月 9 日 9:00~10:20 两种通道亮温差数值占比情况

时间	红外 - 分裂窗通道亮温差在 0.5 K 至 5 K 之间的 占比/亮温差平均值	红外 - 水汽通道亮温差在 1 K 至 5 K 之间的占比/ 亮温差平均值
9:00	43.33%/2.42 K	30.00%/6.06 K
9:10	56.67%/3.18 K	26.67%/5.68 K
9:20	53.33%/3.63 K	36.67%/6.11 K
9:30	60.00%/4.14 K	40.33%/6.00 K
9:40	70.00%/4.47 K	57.65%/2.75 K
9:50	83.33%/4.34 K	64.87%/1.20 K
10:00	96.67%/4.51 K	73.34%/0.46 K
10:10	100%/5.38 K	88.46%/0.21 K
10:20	99.29%/5.93 K	100%/0.17 K



**Figure 5.** Line charts of BTD percentage distribution and mean value variations using multi-channel combination method. (a) The proportion of the brightness temperature between infrared and split-window channels; (b) The proportion of brightness temperature difference in the infrared - water vapor channel; (c) The average change of the mean difference in brightness temperature between infrared and split-window channels; (d) The average change of brightness temperature difference in the infrared-water vapor channel

图 5. 多通道组合方法亮温差占比及均值变化折线图。(a) 红外 - 分裂窗通道亮温差占比情况;(b) 红外 - 水汽通道 亮温差占比情况;(c) 红外 - 分裂窗通道亮温差均值变化情况;(d) 红外 - 水汽通道亮温差均值变化情况

# 3.4. 其他通道

在葵花 9 号的 AHI 中,还存在一些可用的地球物理参数。其中包含云光学厚度、云有效半径、云顶高 度和云顶温度。云光学厚度表示光通过云层时的衰减程度,与云内液态水路径或冰水路径呈正相关,当其快 速增大时,反映云内水滴/冰晶浓度骤增,预示对流强化:云有效半径表示云粒子的平均粒径,云内水滴通过 碰并快速增大,从<10 μm 增至 15~25 μm,对流增强;云顶高度和云顶温度则与对流强度直接相关,是检测 雷暴初生的核心参数。以下是有关于所有过程的三种云属性的详情(图 6)。在强对流初生阶段,所有过程均 显示云有效半径成增长趋势,最终云有效半径多位于 27.8~44.5 um 的区间内; 8 月 9 日增长幅度大,一小时 内增幅均位于14 um 左右,为典型的强对流特征,粒子碰并剧烈,伴随雷暴、强降水甚至冰雹的天气过程; 而7月22日则表现出波动上升和缓慢上升的形势,涨幅位于1~6µm,但结合其他通道信息看并不代表无雷 暴初生云闭发展,同样有相对较弱的降水和雷暴过程发生。云光学厚度均有持续下降的趋势,8月9日下降 明显,7月22日则无明显变化。云光学厚度降低可能反映粒子因粒子碰并消耗小水滴导致粒子数浓度减少, 特别是在对流发展时期,上升气流加强使得大粒子抬升,小粒子消耗;云顶突破冻结层后,冰晶增多导致进 一步增大,但冰晶散射效率低于液态水,所以云光学厚度在云有效半径增加的同时是降低的,全球雷暴研究 中,85%的初生云团云有效半径呈现增长与云光学厚度下降同步[8]。最后云顶高度普遍升高和持续抬升,体 现强烈的垂直上升运动,将水汽和冰晶推向高层大气,值得注意的是,当云顶高度突破12 km (成都夏季对 流层顶附近),可能触发穿透对流层顶,释放极端能量;云顶温度方面,随着云顶高度升高,表现为随时间下 降的趋势,或者始终在低值附近小幅波动变化,云顶温度越低,对流发展越快越旺盛。



Figure 6. Temporal variations of four cloud properties during each event. (a) The effective radius of the cloud changes over time; (b) The optical thickness of clouds changes over time; (c) The altitude of the cloud changes over time; (d) The temperature of the cloud varies with time

图 6. 每个过程四种云属性随时间的变化情况。(a) 云有效半径随时间变化;(b) 云光学厚度随时间变化;(c) 云顶高度随时间变化;(d) 云顶温度随时间变化

#### 3.5. 各通道对比分析

综合对比降水基数据、单通道和多通道的结果,在云团初生过程进行至 50~60 min 的末期后,降水 量开始显著增加,此时亮温的阈值约为 235 K。两种多通道组合法对初生云团的水汽抬升和垂直发展更敏 感,红外-分裂窗通道亮温差和红外-水汽通道亮温差在末期的占比多在 80%~100%,但后者相较于前 者上升趋势更加明显,分裂窗亮温差中个别个例总是维持较高值,无法看出从初生到成熟过程的变化情 况。红外-分裂窗亮温差值在每次云团初生过程末期基本符合位于 0.5~5 K 的范围内,而红外-水汽通 道亮温差值在每次过程末期数值上下起伏较大,8月9日过程亮温差值在低于 1 K,为 0.17 K,7 月 22 日 过程亮温差值则是偏高,超过 5 K,因此两种多通道亮温差在分析雷暴初生云团特征方面各有优劣。虽然 使用单通道阈值法在对各个过程分析亮温变化后表现出较为一致的下降趋势,但仍然存在一定的局限性, 尽管如此,单通道依然可作为初步分析雷暴云团特征的方法。

云属性方面,云有效半径出现较为一致的显著增长,反映粒子碰并过程,与强对流相关,无异常个 例所以保留,而云光学厚度同样出现较一致的下降趋势,结合图 3 的单通道云顶亮温变化过程,当云顶 亮温降低至 235 K 的阈值时,云光学厚度大约为 35,此时雷暴云团快速发展,降水显著增加。云顶高度 和云顶温度都是与强对流直接相关的参数,所有过程云顶高度升高至 10~13 km,云顶温度降低至 210~230 K,所以可以认为当云顶亮温降低至 235 K 以下时,雷暴和强降水天气就会产生,结合多通道中雷暴云团 在对流中心的高占比和红外 - 分裂窗通道亮温差是否位于 0.5~5 K,云有效半径增长至 30 μm 以上,云顶 高度上升至 10~13 km 时可进一步判断雷暴天气的发展。

# 3.6. 预报分析与应用验证

#### 3.6.1. 时效性分析

本研究通过系统分析葵花 9 号卫星观测数据,建立了雷暴初生过程的时效性检验方法。研究采用单 通道阈值判识与多通道协同分析相结合的技术路线,重点考察了不同识别方法对雷暴初生时间的判定准 确性。通过设置科学的预报时间窗口,本研究实现了对预警提前量的定量评估。研究过程中,将卫星遥 感获取的云图特征参数与地面自动气象站的降水观测数据进行时空匹配分析(详见表 4)。结果表明: H 葵 花 9 号卫星的多光谱特征识别技术能够有效捕捉对流云团的发展演变过程。定量分析显示,基于卫星遥 感的预警方法相比传统地面观测具有显著的时效优势,其预警提前时间范围为 20~90 min,平均可达 55 min。这一发现为强对流天气的早期预警提供了新的技术支撑。

Table	• 4. Con	nparative	analysis o	f thunderstorm	early	warning times:	Himawari-9	spectral	channel	feature	identification	vs.
groun	d-based	l observati	ons									
	±++++ ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	ロットンボンス	· + + + / - 10		1 201 소 드 -		~ n _ l l l l l l l l l l l l l l l l l l	· // TL				

时间	地面观测站预警提前时间	卫星光谱通道特征识别法预警提前时间
7月22日	60 min	80 min
8月9日	90 min	180 min

表 4. 葵花 9 号光谱通道特征识别法与地面观测站对雷暴天气预警时间的对比分析

#### 3.6.2. 应用验证

为了进一步验证预报方法的普适性和稳定性,对于主汛期内部分没有被讨论到的过程,选取7月3 日、7月13日、8月3日作为用于验证该方法是否稳定的个例,同样借助葵花9号光谱通道的特征识别 法识别出雷暴初生云团到实际雷暴天气发生的时间差,计算平均预报提前量,并分析其稳定性和可靠性。 收集这些过程的地面观测站降水数据以及卫星云图资料,进行前文的预处理:使用本文提出的单通道阈 值法和多通道协同方法,对这些未使用的过程进行雷暴初生云团的识别和分析,将预报结果与实际观测 数据进行对比(表 5),结果如下:卫星光谱通道特征识别法比地面观测提前 20~50 min,平均提前 37 min。 研究结果表明对于其他的雷暴事件,该预报方法同样表现出较高的准确性和可靠性,验证了其在不同时 间和空间条件下的普适性。

Cable 5. Comparative analysis of forecast results versus observational data for additional events during the late flood sease           表 5. 后汛期内其他过程预报结果与实际观测数据对比

时间	地面观测站预警提前时间	卫星光谱通道特征识别法预警提前时间
7月3日	70 min	120 min
7月13日	50 min	90 min
8月3日	80 min	100 min

# 4. 结论与展望

# 主要结论

本文基于葵花9号卫星多光谱通道数据,结合单通道阈值法、多通道组合分析方法和云属性的分析 方法,对发生在 2024 年成都地区后汛期的 3 次雷暴初生云团的过程进行了分析。得到的主要结论如下:

(1) 雷暴云团从初生至成熟的时间短,历时约1~2h,天气尺度小,降水相对集中,云团初生开始至 50~60 min,降水量开始显著增加,1h或2h内降水量的增幅一般为20 mm以上,雷暴天气发生时产生 的降水多数在 20 mm 以上,极端情况下可达 55 mm 以上。云区在对流中心附近覆盖范围广,初生阶段已 于对流中心 15~30 km 的范围内全部覆盖。

(2) 利用 10.4 µm 的红外窗区通道的亮温阈值法可初步识别和分析初生的对流云团,初生云团的亮温 普遍位于 200 K 至 240 K 区间,随时间呈下降趋势,云顶亮温平均下降率为 3.16 K/10min,当云顶亮温 降低至阈值 235 K 以下时,表明对流云发展较旺盛,云顶高度不断上升,可能伴随雷暴和强降水。初生 云团发展至成熟前,云顶亮温一般降低至220K左右,标志着雷暴云团处于强烈发展的深对流阶段。

(3) 红外-水汽通道亮温差用以检测雷暴初生云团在对流中心处的占比效果较好,占比上升的趋势 更加明显,当雷暴云团红外-水汽通道亮温差在对流中心附近的占比均处于 80%~100%的水平时,反映 了云顶冰晶化进程加速,对流云组织化程度高,表明雷暴即将发生。利用红外-分裂窗通道判断雷暴云 团是否处于初生阶段效果较好,当红外分裂窗通道亮温差处于 0.5~5 K 时,反映云团强烈发展,云顶快速 抬升,云层中水汽含量较多,云顶冰晶化进程加速,能够作为初生云团垂直发展的关键指标。

(4) 雷暴初生云团的云有效半径随时间增加, 1h 内其增幅一般在 10 um 左右,反映云内粒子碰并过 程剧烈,与强对流天气密切相关,当云有效半径增加至 30 µm 以上,雷暴云团快速发展,雷暴即将发生。 雷暴初生云团的云光学厚度随时间减小,当其减小到 35 以下时,表明雷暴云团处于强烈发展的阶段。云 有效半径的增大和云光学厚度的减小这一组合特征表明雷暴云团从初生往成熟期过渡,是进行预报的关 键窗口期。云顶高度持续抬升至 9~13 km, 接近成都夏季对流层顶, 可触发穿透对流层顶, 释放极端能 量,云顶温度下降至 235 K 以下,温度越低对流发展越旺盛,二者直接标志雷暴发展的强度,可作为雷 暴初生的预报参考。

(5) 通过时效性检验和未使用过程的预报验证,基于葵花 9 号光谱通道特征识别法在识别雷暴初生 云团方面表现出较高的准确性和可靠性。相较于地面观测的方法,基于葵花9号光谱通道特征识别方法 能够有效提前预警时间 20~90 min, 平均提前时间为 55 min。

# 参考文献

- [1] 陈杨瑞雪.一次梅雨期暴雨过程中尺度可预报性和对流初生机制的集合模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国气象科学研究院, 2015.
- [2] 杜铠炫,姚德宽,祁倩,等. 基于 H8 卫星的昆明大暴雨过程对流云特征及触发机制分析[J]. 高原山地气象研究, 2023, 43(3): 51-58.
- [3] 韩林雨瞳,吴荣,王璐,等. 2022 年 7 月 28 日江苏——山东一次雷暴大风天气过程分析[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(8): 121-125.
- [4] 刘子楷. 基于静止气象卫星预警对流初生方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 德阳: 中国民用航空飞行学院, 2023.
- [5] 彭霞云, 罗玲, 李文娟, 等. 一次深秋高架雷暴形成的对流活动特征分析[J]. 暴雨灾害, 2025, 44(2): 197-206.
- [6] 巫俊威,李昕翼,周正斌,等.成都地区一次暴雨诊断分析[J].成都信息工程学院学报,2013,28(4):416-423.
- [7] 杨洁, 王兵, 刘峰, 等. 葵花8号卫星在白云机场一次强对流冰雹中的监测应用[J]. 沙漠与绿洲气象, 2021, 15(1): 46-53.
- [8] Heymsfield, A.J., Bansemer, A., Field, P.R., *et al.* (2020) Convective-Scale Ice Particle Growth and Its Relation to Precipitation Formation in Deep Convective Clouds. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **77**, 4035-4056.