

# 基于2024年成都七月上中旬雷暴初生预报研究

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8日; 录用日期: 2025年7月16日; 发布日期: 2025年7月25日

## 摘要

为了研究雷暴初生阶段的对流云团发生发展机理和云团相关特征, 以有效提高预警效率, 文章使用中国气象局常规气象观测资料与日本气象厅(JMA)的葵花9号卫星的云图资料, 利用卫星的单通道阈值法的云检测、多通道组合检测初生云系以及采用其他通道的方法, 对发生在2024年成都地区七月上中旬的2次雷暴初生云团特征及其产生的暴雨过程进行分析, 结果表明: 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20 mm以上, 极端情况下每小时可达到55 mm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  $\mu\text{m}$ , 以及云光学厚度低于25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干。5) 经时效性检验, 基于葵花9号光谱通道特征识别法相较于地面观测能够提前预警10~90 min, 表现出较高的准确性和可靠性。通过研究雷暴云团初生阶段对流云的形成机制及其演变特征, 有助于提升成都地区乃至全国的气象预警的精准性, 从而降低其对公众安全和国民生产的潜在危害, 对提高防灾减灾能力有一定的科学意义。

## 关键词

雷暴, 葵花9号卫星产品, 初生云团, 多光谱通道

## Research on Thunderstorm Initiation Forecasting in Early to Mid-July 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。

文章引用: 龙佳雨, 张永莉, 方效辉. 基于 2024 年成都七月上中旬雷暴初生预报研究[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(7): 1070-1082. DOI: 10.12677/ag.2025.157099

<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. 8<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jul. 16<sup>th</sup>, 2025; published: Jul. 25<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

To investigate the mechanisms of convective cloud cluster development during thunderstorm initiation and analyze their associated characteristics for improving early warning efficiency, this study utilizes conventional meteorological observation data from the China Meteorological Administration (CMA) and cloud imagery from the Japan Meteorological Agency's (JMA) Himawari-9 satellite. By employing single-channel threshold-based cloud detection, multi-channel composite detection for nascent cloud systems, and other channel-based methods, we analyze the characteristics of thunderstorm-initiated cloud clusters and their associated heavy rainfall events in Chengdu during early to mid-July 2024. The results indicate that: 1) Thunderstorm weather progresses rapidly from the initial to the mature stage, with small synoptic-scale features and hourly precipitation mostly exceeding 20 mm, reaching over 55 mm per hour under extreme conditions. 2) The brightness temperature of nascent cloud clusters identified by the single-channel threshold method ranges between 200 K and 240 K, showing a decreasing trend over time. Thunderstorms are likely to occur when the cloud-top brightness temperature falls below the threshold of 233 K. 3) For thunderstorm cloud clusters detected via multi-channel synergy, the brightness temperature differences (BTDs) between infrared (IR)-split window and IR-water vapor channels increase significantly within 15-30 km around the convective center. Precipitation intensifies, and thunderstorms are more likely to occur when the BTD in the IR-split window channel ranges between 0.5-5 K. 4) An increase in cloud effective radius and a decrease in cloud optical thickness indicate the transition of thunderstorm cloud clusters from the initial to the mature stage, which is a critical period for early warning. When the cloud effective radius exceeds 30  $\mu\text{m}$  and the cloud optical thickness drops below 25, the probability of thunderstorm occurrence increases. The continuous rise of cloud-top height to 9-13 km, accompanied by a decrease in cloud-top temperature, is closely related to convective development. 5) According to timeliness verification, the spectral channel feature identification method based on Himawari-9 provides warnings 10-90 minutes earlier than ground-based observations, demonstrating high accuracy and reliability. By studying the formation mechanisms and evolutionary characteristics of convective clouds during the initial stage of thunderstorm cloud clusters, this research contributes to enhancing the accuracy of meteorological warnings in the Chengdu region and nationwide. This advancement helps mitigate potential risks to public safety and national production, offering scientific significance for improving disaster prevention and mitigation capabilities.

## Keywords

Chengdu Thunderstorms, Himawari-9, Nascent Convective Clouds, Multi-Channel Composite Analysis

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/>



Open Access

## 1. 引言

强对流天气涵盖了诸如短时暴雨、龙卷风以及雷暴强风等灾害性气象，其上升运动发展强烈，这类天气因其范围小、突发迅速、持续时间短暂、地域性强且破坏力大等特性，对城市设施和人民构成了重大威胁，因此一直是气象预报人员密切关注的重点、难点对象之一[1][2]。成都地区七月上中旬期间常有

雷暴、阵雨、大风等极端天气现象发生,给城市运行和市民生活带来显著影响。近年来,成都多次遭到雷暴天气的侵袭,例如,2023年7月11~13日,成都出现持续性暴雨天气过程,全市累计雨量超过100毫米的站点达156个,最大降水量出现在都江堰市龙池镇,达289.4毫米;2021年7月15~17日,成都遭遇区域性暴雨过程,中心城区24小时最大降雨量达210.6毫米,造成多处道路积水[3]。可见对于强对流天气发生发展的监测和预警尤其是位于人口密度大的地区有着具有极为关键的社会经济意义。通过对2024年成都七月上中旬雷暴初生云团的研究,可以深入了解雷暴初生云团的基本特征,包括生成时间和位置、云顶亮温以及相关的云属性特征[4]。

目前国内外已有一系列应用葵花卫星对强对流天气进行观测和预警的研究。郭巍等[5](2019)基于Mecikalski提出的MB06算法,建立了适用于上海市对流初生判别以及预报方法,提取出葵花8号卫星的数据资料,经过对上海市两个月内的12次对流初生事件进行预报实验,结果表明成功预报的时间相较于对流开始出现的时间提前大约30分钟。杨磊等[6](2020)应用葵花8号卫星资料分析了沈阳市两次暴雨过程,结果表明该过程的短时强降水是红外和水汽通道亮温同步快速下降到 $-60^{\circ}\text{C}$ 并逐渐接近导致的。张琪等[7](2018)分析了初生雷暴的云图特征,并讨论了午后雷暴的成因,得出高原东部初生雷暴云团发展高度相对较低,云顶位于对流层之下,与海拔高度密切相关。Zhuge Xiao-Yong等[8](2017)利用葵花8号卫星上先进的Himawari-8成像仪(Advanced Himawari Imager, AHI)开发了一种快速云检测的算法。这种快速云检测算法主要是利用AHI上的1、3和4通道,这三个通道间任意两个通道的三个差值的均方根定义了一个基于可见光的云指数(Vegetation Condition Index, VCI)来用于云检测,即当目标卫星云图中所得的VCI小于某个阈值就可以判定为有云。

## 2. 资料概况

### 2.1. 葵花9号卫星介绍

日本的葵花9号静止气象卫星(Himawari-9)具有高时空分辨率(10分钟全圆盘观测,2.5分钟区域扫描)和多光谱观测(16个通道)的优势,目前葵花9号的观测频率为每10分钟一次,具有观测范围广、空间分辨率高、实时更新、多种图像模式的特点。本文所使用的是来自葵花9号的NetCDF4格式的卫星观测数据,其携带的高光谱成像仪(AHI)具有16个光谱通道,每个通道都有特定的波长范围和分辨率以作用于不同领域,本研究选用的是葵花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七月上中旬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年汛期主要的突出的雷暴个例总计为2例,7月9日、7月17日(表1),总共覆盖多个区、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,达到暴雨级别的标准。7月9日最大降水发生的时段为8:00~9:00,雷暴云团初生时段为5:40~7:00,主要降水中心为邛崃市和大邑县。7月17日降最大降水发生的时段为4:00~5:00,雷暴云团初生时段为3:00~4:20,主要的降水中心为温江区、崇州市和郫都区。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)收集资料以获悉七月上中旬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 Chengdu  
**表 1.** 2024 年成都汛期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 9 日	8:00~9:00	5:20~6:40	邛崃市、大邑县	30.12°N~30.70°N 103.10°E~103.50°E
7 月 17 日	4:00~5:00	3:00~4:20	温江区、崇州市、郫都区	30.50°N~30.80°N 103.55°E~103.90°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  $\mu\text{m}$ ) 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 9 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。对单通道阈值法的云检测来说，AHI 传感器的通道 13 (10.4  $\mu\text{m}$ ) 作为红外窗区通道，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及相应的雷暴云团初生时间。

### 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：

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

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：

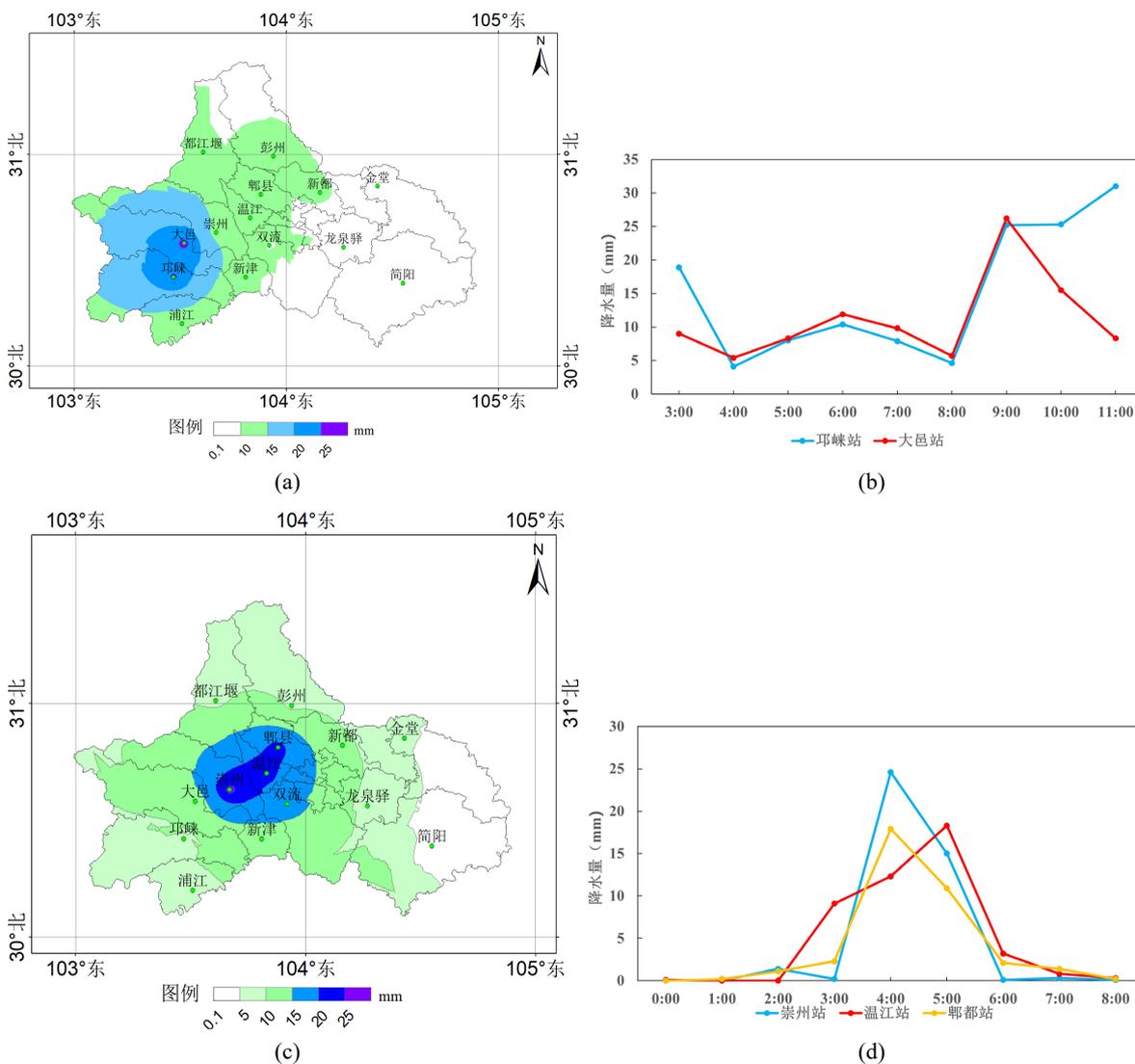
$$BT\Delta = BT_{IR} - BT_{WV} > 0K \quad (2)$$

## 3. 研究结果

### 3.1. 降水信息

根据前文所用到的降水数据和资料，七月上中旬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 9 日强降水主要发生于邛崃市和大邑县，两站降水强度相当，雨量在 1 h 内增

幅为 20 mm，9 时两站达到最大值分别为 25.2 mm 和 26.2 mm，云团初生时间位于 5:40 至 7:00，图 1(c)和图 1(d)中，7 月 17 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 mm~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，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。



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作，底图无修改。

**Figure 1.** (a) 1-hour precipitation color-filled map for Chengdu on 9 July; (b) Precipitation variation at Qionglai and Dayi stations on 9 July; (c) 1-hour precipitation color-filled map for Chengdu on 17 July; (d) Precipitation variation at Chongzhou, Wenjiang, and Pidushan stations on 17 July

**图 1.** (a) 7 月 9 日成都 1h 降水量填色图; (b) 7 月 9 日邛崃站、大邑站降水量变化; (c) 7 月 17 日成都 1h 降水量填色图; (d) 7 月 17 日崇州站、温江站、郫都站降水量变化

### 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  $\mu\text{m}$ )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 9 日亮温从最大值 253.14 K 快速下降至最小值 228.53 K, 下降速率约为 3.08 K/10 min, 对应图 1(b)降水开始增大时的亮温为 235.67 K, 7 月 17 日云顶亮温由 256.55 K 下降到 219.90 K, 相较其他过程其短时内降低得更迅速, 下降率为 4.58 K/10 min, 对应图 1(d)降水开始增大时的亮温为 233.90 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。

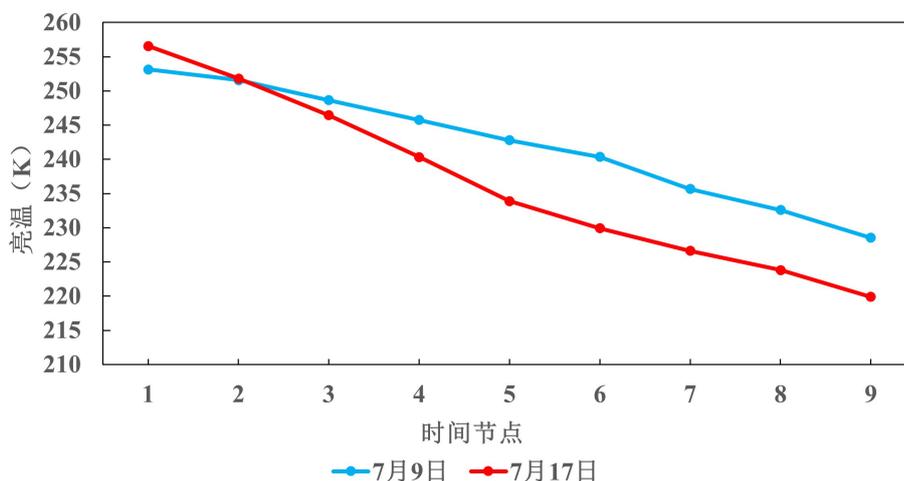


Figure 2. Temporal variation of cloud-top brightness temperature for incipient thunderstorm clouds in the Chengdu region during early-mid July

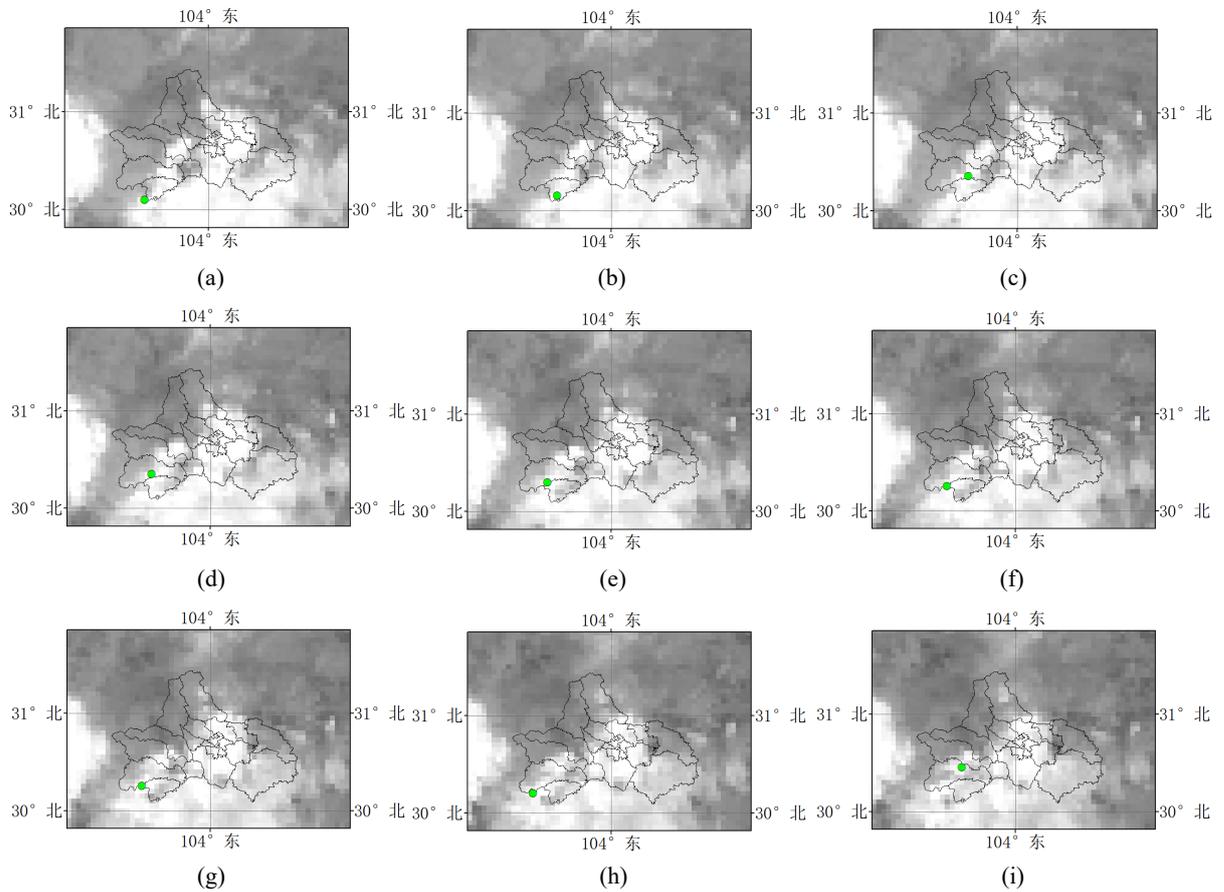
图 2. 成都地区七月上中旬初生雷暴云团云顶亮温随时间变化

### 3.3. 多通道协同对比分析

#### 3.3.1. 7 月 9 日过程分析

对于 7 月 9 日的雷暴过程来说, 由图 1(a)降水数据两站点 1 h 内具体的降水量分别为 25.2 mm, 26.6 mm, 达到“暴雨”等级的降水标准, 经过单通道阈值法, 确定该日初生云团的时间大致处在 5:40~6:40 之间。使用多通道组合的方法检测初生云系以更好地量化和精细化初生时间, 收集并得到位于该时段之间的 5:20 至 6:40 的红外卫星云图(图 3)。从云图可以看到在该段时期中, 对流中心的初生云团 5:20 到 5:30 集中在蒲江县, 此时降水量为 15.6 mm, 云顶亮温为 235.57 K, 之后的 5:40 到 6:40, 云团往北移动至邛崃市和大邑县附近, 云顶亮温由 253.14 K 快速下降至 228.53 K, 相应的降水量为 11.9 mm, 对应应在云图上则是由起初的灰色慢慢演变为亮白色, 表示对流强度增加, 之后便引发了雷暴和强降水的天气。

表 2 为多通道组合检验下 9 日的初生云团亮温差情况, 从结果来看, “分裂窗”亮温差占比较大, 呈波动变化, 5:20 到 6:00 先由 85.74% 上升到 88.89% 再下降到 85.47% 最后上升到 88.03%, 6:00 到 6:40 呈现下降趋势, 总体维持在 76%~88% 的高值水平, 说明目标区域上空的云团内冰晶覆盖率广, 组织化程度高。“分裂窗”亮温差平均值从 5:20 的 2.51 K 持续升高到 6:40 的 3.68 K, 对应图 2 中降水开始增大此时的红外分裂窗通道亮温差为 3.54 K, 表明云顶冰晶化增强, 符合对流发展阶段。红外-水汽通道亮温差的占比总体为快速增加的趋势, 仅在 6:40 降低 3.42%, 显示云团正在相比前一时刻快速扩大, 对流发展; 结合红外-水汽通道亮温差平均值来看, 5:20 到 6:10 由 8.05 K 下降到 5.65 K, 6:20 到 6:40 再略微上升至 7.00 K, 前者显著下降表明云顶抬升导致中层水汽饱和, 后者略升高可能反映云顶穿透至更干燥的高层, 推测整个云团初生过程主要以高层云或深对流云为主。



**Figure 3.** Infrared imagery of incipient thunderstorm clouds in Chengdu on 9 July 2024; (a) 05:20; (b) 05:30; (c) 05:40; (d) 05:50; (e) 06:00; (f) 06:10; (g) 06:20; (h) 06:30; (i) 06:40

**图 3.** 成都 2024 年 7 月 9 日雷暴初生云团红外云图; (a) 05:20; (b) 05:30; (c) 05:40; (d) 05:50; (e) 06:00; (f) 06:10; (g) 06:20; (h) 06:30; (i) 06:40

**Table 2.** Proportion of brightness temperature difference values between two channels from 05:20 to 06:40 on July 9

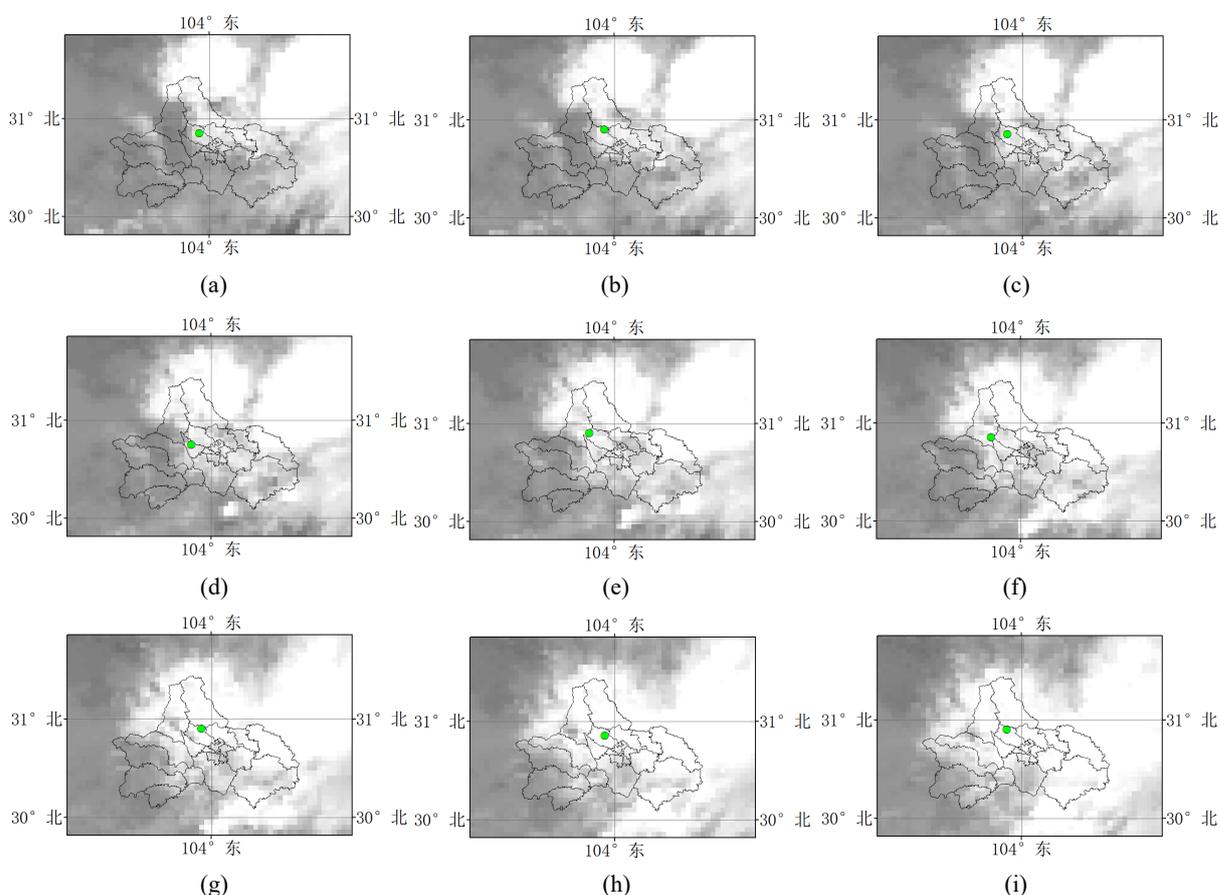
**表 2.** 7 月 9 日 5:20~6:40 两种通道亮温差数值占比情况

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
5:20	85.74%/2.51 K	1.71%/8.05 K
5:30	88.89%/2.52 K	4.27%/7.54 K
5:40	85.47%/2.64 K	9.40%/6.92 K
5:50	86.32%/2.87 K	23.08%/6.29 K
6:00	88.03%/3.10 K	29.91%/5.89 K
6:10	85.47%/3.29 K	38.46%/5.65 K
6:20	85.47%/3.38 K	40.17%/5.93 K
6:30	82.91%/3.54 K	40.17%/6.22 K
6:40	76.92%/3.68 K	36.75%/7.00 K

### 3.3.2. 7 月 17 日过程分析

7 月 17 日短时强降水主要发生在郫都区、温江区和崇州市, 1 h 降水量普遍达到了 20 mm 以上, 达

到大到暴雨的态势。图 4 红外云图 3:00 到 3:20, 云团主体主要位于郫都区和新都区内, 随着云系逐渐西移, 降水中心雨量由 0.1 mm 增大至 9.1 mm, 云顶亮温从 256.55 K 降低至 246.45 K, 3:30 到 3:40 云团中心短暂位于温江区内, 该时刻降水中心雨量为 9.8 mm, 云顶亮温为 240.32 K, 3:50 到 4:20 色泽白亮的云系已完全覆盖目标地区, 崇州站降水量最大, 为 24.6 mm, 其次为温江站 18.3 mm 温江站和郫都站 17.9 mm, 云团中心位于新都区和郫都区交界附近, 云系整体自东向西逐渐扩张覆盖至整个目标区域, 对应应在云图上表现为云顶的色调由灰白变成白色。



**Figure 4.** Infrared imagery of incipient thunderstorm clouds in Chengdu on 17 July 2024; (a) 03:00; (b) 03:10; (c) 03:20; (d) 03:30; (e) 03:40; (f) 03:50; (g) 04:00; (h) 04:10; (i) 04:20

**图 4.** 成都 2024 年 7 月 17 日雷暴初生云团红外云图; (a) 3:00; (b) 3:10; (c) 3:20; (d) 3:30; (e) 3:40; (f) 3:50; (g) 4:00; (h) 4:10; (i) 4:20

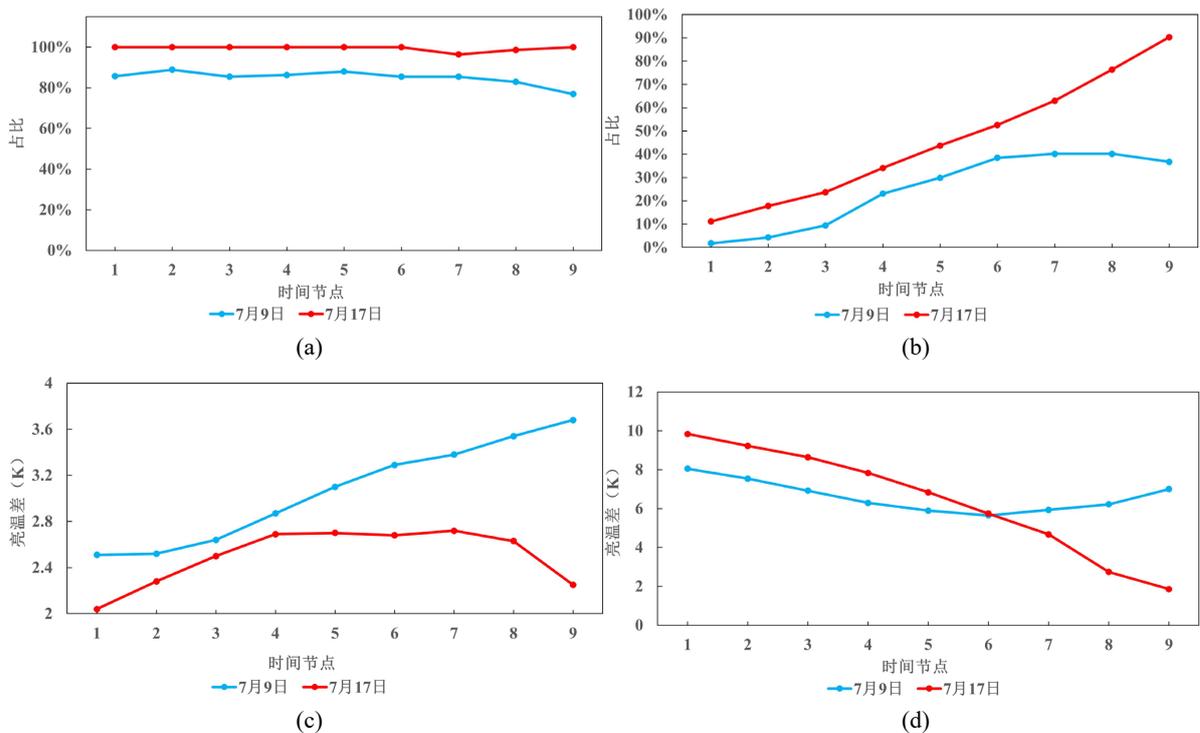
经过多通道协同的云检测, 得到表 3 的亮温差结果。根据红外 - 分裂窗通道亮温差的情况来看, 从 3:00 到 3:50, 占比始终稳定地保持在 100%, 仅在 4:00 略微下降到 96.43%, 随之上升到 4:20 时的 100%, 总体来看占比始终为高值, 初生时段目标区域几乎被云系覆盖完全, 表明组织化程度高。“分裂窗”亮温差平均值在 3:00 到 4:00 由 2.04 K 持续增加到 2.72 K, 随之降低至 4:20 的 2.25 K, 呈现先升后降的趋势, 初期从 2.04 K 升至 2.70 K, 反映云顶冰晶粒径增长, 4:00 时达到峰值 2.72 K, 恰好对应图 2 中降水开始增大时的时间, 对应雷暴形成的阶段; 红外 - 水汽通道亮温差在 3:00 到 4:20 的占比从 11.11% 迅速上升到 90.28%, 表明云团正快速发展和扩大; 红外 - 水汽通道亮温差均值由 3:00 的 9.84 K 持续快速下降至 4:20 的 1.86 K, 反映上升气流将中层水汽抬升并饱和。综合来看这个时间段云团在 1 小时内迅速向高层发展, 高层水汽含量上升, 水汽通道响应增强。

**Table 3.** Proportion of brightness temperature difference values between two channels from 03:00 to 04:20 on July 17  
**表 3.** 7月17日 3:00~4:20 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
3:00	100%/2.04 K	11.11%/9.84 K
3:10	100%/2.28 K	17.78%/9.23 K
3:20	100%/2.50 K	23.70%/8.64 K
3:30	100%/2.69 K	34.07%/7.83 K
3:40	100%/2.70 K	43.70%/6.84 K
3:50	100%/2.68 K	52.59%/5.74 K
4:00	96.43%/2.72 K	62.96%/4.67 K
4:10	98.61%/2.63 K	76.39%/2.74 K
4:20	100%/2.25 K	90.28%/1.86 K

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



**Figure 5.** Line charts of BTDR percentage distribution and mean value variations using multi-channel combination method. (a) Percentage distribution of BTDR; (b) Percentage distribution of BTDR; (c) Mean value variation of BTDR; (d) Mean value variation of BTDR

**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

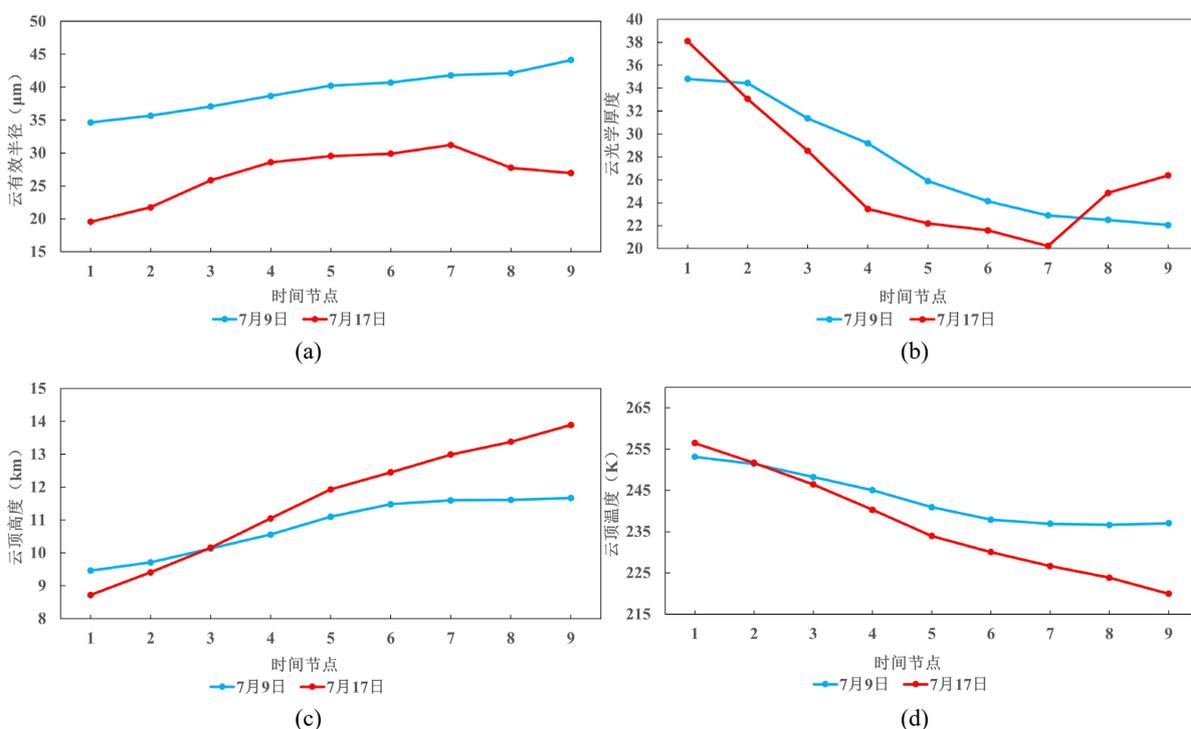
间呈现上升趋势，其在目标区域内的占比到最后总体维持在 75%~100%之间，表明初生云团内部的对流云系正在快速发展，对流活动增强，云团范围扩大。

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 0 K 至 8 K 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。

### 3.4. 其他通道

在葵花 9 号的 AHI 中，还存在云属性的特殊通道，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，当其快速减小时，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，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。结合图 6(a)中的数据，可以观察到云有效半径在雷暴初生阶段呈现明显的增长趋势，7月9日从 34.63  $\mu\text{m}$  增至 44.12  $\mu\text{m}$ ，7月17日从 19.54  $\mu\text{m}$  增至 26.95  $\mu\text{m}$ ，最终云有效半径多位于 27.8  $\mu\text{m}$ ~44.5  $\mu\text{m}$  的区间内，两次过程增长幅度大，一小时内增幅均位于 10  $\mu\text{m}$  左右，为典型的强对流特征，这种增长与强对流活动密切相关，尤其是当云有效半径超过 30  $\mu\text{m}$  时，表明云内粒子碰并剧烈，可能伴随强降水或冰雹，粒子碰并剧烈，伴随雷暴、强降水甚至冰雹的天气过程。从图 6(b)中可以看出，云光学厚度在雷暴发展过程中普遍下降，7月9日从 34.81 降至 22.05，7月17日从 38.1 降至 26.38，反映粒子因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



**Figure 6.** Temporal variations of four cloud properties during each event. (a) Cloud effective radius variation; (b) Cloud optical thickness variation; (c) Cloud-top height variation; (d) Cloud-top temperature variation

**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

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[9]。图 6(c)显示云顶高度在雷暴过程中显著升高,7月9日从 9.46 km 升至 11.67 km,7月17日从 8.72 km 升至 13.89 km,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。云顶温度方面,图 6(d)显示随着云顶高度升高,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。

### 3.5. 各通道对比分析

综合各通道的结果,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,7月9日亮温差值过高,超过 1~5 K 的范围,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。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(如 7月9日增至 44.5  $\mu\text{m}$ )无异常个例所以保留,云光学厚度均出现较一致的下降趋势,结合图 2 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 25,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 9~13 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  $\mu\text{m}$  以上,云顶高度上升至 9~13 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

基于上述对每次过程卫星光谱通道中的分析,对雷暴初生过程进行时效性检验。根据单通道阈值法和多通道协同法识别出的雷暴初生时间和相应的特征,设定一个合理预报时间窗口,用于评估预报的提前量。将预报窗口内的地面观测站降水数据与卫星云图特征进行对比分析(表 4),可验证雷暴初生云团在基于葵花 9 号的卫星光谱通道中的特征识别法能有效识别出对流云团的发展趋势。该结果表明基于葵花 9 号的光谱特征识别能够有效预警雷暴天气的发生,相较于地面观测站的预警,该方法提前预警的时间为 10~30 min,平均提前时间为 20 min。

**Table 4.** Comparative analysis of thunderstorm early warning times: himawari-9 spectral channel feature identification vs. ground-based observations

**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

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9日	160 min	190 min
7月17日	80 min	90 min

#### 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,对于七月上中旬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。

**Table 5.** Comparison of forecast results with actual observation data for other events in early-mid July  
**表 5.** 七月上中旬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

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 年成都七月上中旬的 2 次雷暴初生云团的过程进行了分析，重点对各次过程产生的初生云团的特征进行了系统研究。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 1~2 h，天气尺度小，云团初生开始至 50~60 min，降水量开始显著增加，1 h 或 2 h 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  $\mu\text{m}$  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 200~240 K 区间，随时间呈下降趋势，云顶亮温平均下降率为 3.16 K/10 min，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 220 K 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，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 且低于 3.5 K 左右时，雷暴云团发展迅速，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，1 h 内其增幅一般在 10  $\mu\text{m}$  左右，云内水滴通过碰并快速增大，对流增强，当云有效半径增加至 30  $\mu\text{m}$  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，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，当其减小时，反映云内水滴/冰晶浓度骤增，预示对流强化，当其减小到 25 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 10~30 min, 平均提前时间为 20 min。

## 参考文献

- [1] 姜晓飞, 章丽娜, 张昕, 等. 青藏高原夏季 FY-4A 卫星对流初生产品的分类识别[J]. 暴雨灾害, 2024, 43(2): 214-223.
- [2] 王永中, 段练, 陈会芝, 等. 成都地区雷暴的天气气候特征[J]. 成都信息工程学院学报, 2005(3): 341-346.
- [3] 王瑞. 基于深度学习的葵花 8 卫星亮温资料降水反演研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.
- [4] 王宏斌, 张志薇, 刘端阳, 等. 基于葵花 8 号新一代静止气象卫星的夜间雾识别[J]. 高原气象, 2018, 37(6): 1749-1764.
- [5] 郭巍, 崔林丽, 顾问, 等. 基于葵花 8 卫星的上海市夏季对流初生预报研究[J]. 气象, 2018, 44(9): 1229-1236.
- [6] 杨磊, 才奎志, 孙丽, 等. 基于葵花 8 号卫星资料的沈阳两次暴雨过程中对流云特征对比分析[J]. 暴雨灾害, 2020, 39(2): 125-135.
- [7] 张琪, 任景轩, 肖递祥, 等. 青藏高原东部初生雷暴云图特征及成因[J]. 气象科技, 2018, 46(5): 943-950.
- [8] Zhuge, X., Zou, X. and Wang, Y. (2017) A Fast Cloud Detection Algorithm Applicable to Monitoring and Nowcasting of Daytime Cloud Systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **55**, 6111-6119. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2017.2720664>
- [9] Heymsfield, A.J., Bansemmer, 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.