

成都市2024年秋初暴雨初生预报分析

袁振^{1*}, 赖明^{2#}, 刘晓达¹, 龙佳雨³

¹民航西南空管局气象中心, 四川 成都

²民航西南空管局航空气象技术研究及应用实验室, 四川 成都

³安远县气象局, 江西 赣州

收稿日期: 2025年6月11日; 录用日期: 2025年7月7日; 发布日期: 2025年7月15日

摘要

为提升暴雨预警准确率, 本研究利用中国气象局观测数据和日本的葵花9号卫星资料, 采用单通道阈值法和多通道分析法, 对2024年成都秋初两次暴雨过程进行分析。结果表明: (1) 暴雨发展迅速, 天气尺度小, 小时雨量多超20 mm, 极端达55 mm。(2) 单通道阈值法显示初生云团亮温为200~240 K, 低于235 K时暴雨发生。(3) 多通道分析中, 红外-分裂窗亮温差(0.5~5 K)与暴雨发生密切相关。(4) 云有效半径 > 30 μm 、光学厚度 < 28及云顶高度升至9~13 km时, 暴雨概率显著增加。通过研究暴雨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

成都初秋, 暴雨, 葵花9号卫星产品, 初生云团

Analysis and Forecasting of Rainstorm Onset in Early Autumn 2024 in Chengdu

Zhen Yuan^{1*}, Ming Lai^{2#}, Xiaoda Liu¹, Jiayu Long³

¹Southwest Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation of China, Chengdu Sichuan

²Aviation Meteorology Technology Research and Application Laboratory, Southwest Regional ATMB, CAAC, Chengdu Sichuan

³Anyuan County Meteorological Bureau, Ganzhou Jiangxi

Received: Jun. 11th, 2025; accepted: Jul. 7th, 2025; published: Jul. 15th, 2025

*第一作者。

#通讯作者。

Abstract

To improve the accuracy of heavy rainfall warnings, this study utilized observational data from the China Meteorological Administration and Japan's Himawari-9 satellite data, employing single-channel threshold and multi-channel analysis methods to analyze two heavy rainfall events in early autumn 2024 in Chengdu. The results show that: (1) Heavy rainfall develops rapidly, with small synoptic scales and hourly precipitation often exceeding 20 mm, reaching up to 55 mm in extreme cases. (2) The single-channel threshold method revealed that the brightness temperature of nascent cloud clusters ranged from 200 K to 240 K, with rainfall occurring when it dropped below 235 K. (3) In multi-channel analysis, the brightness temperature difference (BTD) between infrared and split-window channels (0.5~5 K) was closely associated with heavy rainfall. (4) The probability of heavy rainfall significantly increased when the cloud effective radius exceeded 30 μm , the optical thickness was below 28, and the cloud-top height rose to 9~13 km. By investigating the development patterns and evolutionary characteristics of convective clouds during the nascent stage of heavy rainfall cloud clusters, this study provides valuable insights for improving meteorological warning accuracy in Chengdu and nationwide. This not only helps mitigate the impact of extreme weather on public safety and industrial/agricultural production but also offers scientific support for disaster prevention and reduction efforts.

Keywords

Early Autumn in Chengdu, Rainstorm, Himawari-9 Satellite Product, Initial Cloud Cluster

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

秋初季节仍是成都地区暴雨天气的活跃期之一，常伴随短时强降水、暴雨大风等灾害性天气现象，对城市安全运行和人民生命财产构成严重威胁[1]。2019年8月末至9月初，成都连续出现强对流天气，其中9月4日新都区出现小时雨量75.6毫米的短时暴雨[2]。

郭巍等[3]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，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。董疆南等[4]选取2020年6月25日保定地区一次冰雹天气过程进行案例分析，使用雷达组合反射率验证该对流初生预警方法的准确性、时效性。竹利等[5]利用多源高分辨率资料对四川雅安的一次大暴雨过程对流触发机制进行了分析，结果表明对流层中层的中尺度低压系统为对流发展提供有利的动力和热力条件。张博等[6]利用葵花8号气象卫星数据，借鉴上海夏季初生对流的识别算法对成都平原三次初生对流案例进行检验。

成都平原强天气多发且有很强的地域性，其形成、发展、特征是气象预报领域的重点难点之一，对类似暴雨的强对流天气尽早识别，有助于强对流的预报预警有很好的指示和参考意义[7]。气象雷达虽然能有效监测大气中大水滴的实时分布，但通常只能在强对流系统形成后才能检测到，难以为早期预警提供及时有效的参考依据[8]。静止气象卫星的高分辨率观测数据为暴雨监测提供了重要技术支撑[9]。针对初生期对流系统的深入分析，特别是对其形成机制和演变规律的研究，将显著提升强对流天气的预警时效，从而降低极端天气事件可能造成的经济社会损失和人员伤亡风险[10]。通过对2024年成都秋初暴雨初生云团的研究，可以深入认识该季节背景下暴雨云团的生成机理、时空分布特征、云微物理属性演变

规律等关键科学问题, 为提升该时段强对流天气预报预警能力提供理论依据[11]。

2. 资料和方法

2.1. 资料

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, 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。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。该卫星系统的高时空分辨率特性为提升强降水等灾害性天气的短临预报准确率提供了新的技术途径。2024 年秋初时期主要的突出的暴雨个例有 2 例, 9 月 9 日和 9 月 16 日(表 1), 对应时间段内的主要站点监测到的每小时雨量均超过 20 mm, 达到暴雨级别的标准。常规气象观测数据就使用这两个个例。

Table 1. Time periods and detailed information of two thunderstorm events during the 2024 flood season in Chengdu
表 1. 2024 年成都秋初期两次暴雨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)
9 月 9 日	22:00~0:00	20:10~21:30	新都区、都江堰市	30.75° N~31.25° N; 103.70° E~104.55° E
9 月 16 日	6:00~7:00	3:00~4:20	邛崃市、大邑县	30.12° N~30.70° N; 103.10° E~103.50° E

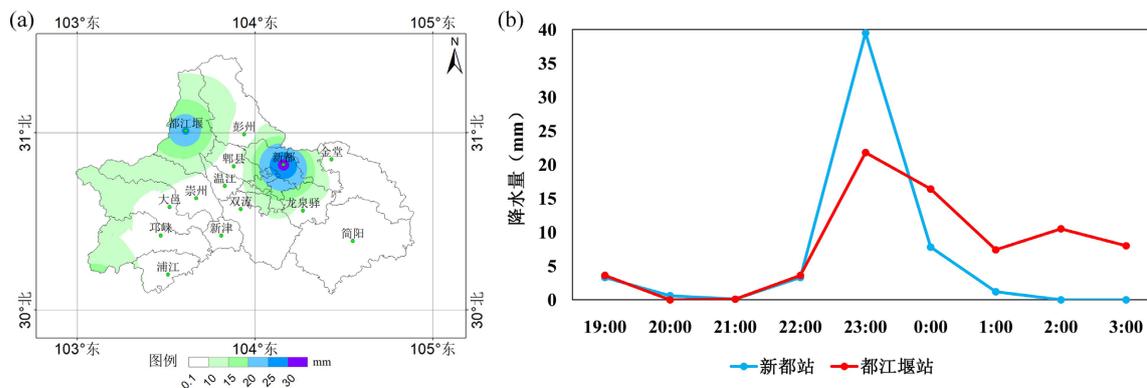
2.2. 方法

本文综合使用单通道阈值法的云检测和多通道组合检测初生云系检测方法, 其中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。本文选用的是葵花 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)。

3. 研究结果

3.1. 降水信息

2024 年秋初暴雨过程的情况见图 1。图 1(a)和图 1(b)中, 9 月 9 日强降水发生在新都区和都江堰市, 23:00 两站达到雨量最大值, 分别为 39.5 mm 和 21.8 mm, 1 h 内雨量增幅大约为 18 mm~36 mm, 初生云团发展时间为 20:10 至 21:30, 从图 1(c)和图 1(d)可见, 9 月 16 日强降水主要发生在邛崃市和大邑县, 两个站点降水强度相当, 于 7:00 达到雨量最大值, 分别是 30.6 mm 和 27.9 mm, 1 h 内雨量增幅大约为 8 mm~25 mm, 初生云团发展时间为 3:00 至 4:20。综合以上的降水信息, 可知对于暴雨这类短时强天气, 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, 暴雨伴随的强降水大部分超过 20 mm 并且集中在几个站点发生。



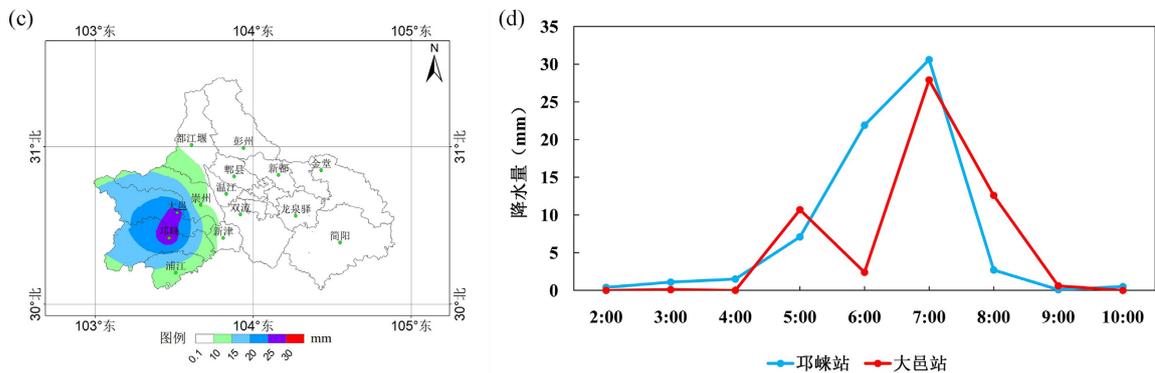


Figure 1. (a) 1-hour precipitation color-filled map for Chengdu on 9 September; (b) precipitation variation at Xindu and Dujiangyan stations on 9 September; (c) 1-hour precipitation color-filled map for Chengdu on 16 September; (d) precipitation variation at Qionglai and Dayi stations on 16 September

图 1. (a) 9月9日成都1h降水量填色图; (b) 9月9日新都站、都江堰站降水量; (c) 9月16日成都1h降水量填色图; (d) 9月16日邛崃站、大邑站降水量^①

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, 每个过程红外通道亮温随时间变化图(图略)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, 9月9日云顶亮温由 247.25 K 降低至 220.22 K, 下降率为 3.38 K/10min, 对应图 1(b)中降水开始增大时的亮温为 235.81 K, 9月16日云顶亮温从 249.78 K 降低至 221.59 K, 下降较为明显, 为 3.52 K/10min, 对应图 1(d)中降水开始增大时的亮温为 229.18 K。亮温值普遍位于 200 K~240 K 的区间, 从热力学角度分析, 云顶亮温的持续下降反映了强烈的上升运动将云顶推向更高、更冷的大气层。这一过程伴随着潜热释放, 进一步促进了对流发展。当亮温降至 235 K 以下时, 表明云顶已接近对流层中上部, 水汽凝结和冻结过程显著增强, 为强降水提供了充足的冰相粒子来源。成熟后云顶接近对流层上部, 极可能发生强暴雨, 伴随强降水、大风或冰雹等灾害性天气。

3.3. 多通道协同对比分析

3.3.1. 9月9日过程分析

9月9日的初生云团的时间大致处在 20:10~21:30 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, 收集并得到位于云团初生时间段内的红外卫星云图(图 2)。分析该时段内的红外云图, 初生云团位于成都西南方, 从 20:10 到 21:00 的云系中心位于温江区到郫都区一带, 对应的云顶亮温由 247.25 K 降低至 231.47 K, 该时段内降水不明显, 新都站和都江堰站测得的降水仅为 3.3 mm 和 3.6 mm, 随后 21:10 到 21:30 云系扩大并向东北方向移动, 云系中心随之转移到郫都区内, 亮温由 231.47 K 下降至 220.22 K, 两个站点降水分别增大至 39.5 mm 和 21.8 mm。整个过程云区色调变白, 范围逐渐扩散变大。

综合通道亮温差的分析(表 2), 红外 - 分裂窗通道亮温差在 0.5 K 至 5 K 之间的占比从 20:10 的 66.67% 迅速增加到 21:20 的 100%, 随后在 21:30 略微减小至 99.67%, 整体占比呈持续增加的趋势, 云区扩大、组织化程度高。“分裂窗”亮温差的平均值从 20:10 的 2.11 K 逐渐增至 21:30 的 5.06 K, 呈上升趋势, 另外上升速率与云顶相变潜热释放相关。当亮温差从 2.11 K 增至 5.06 K, 表明云顶已进入对流层上部, 冰相粒子主导的微物理过程释放潜热, 进一步促进对流发展; 红外 - 水汽通道亮温差在 1 K 至 5 K 之间的占比从 20:10 的 4.17% 逐渐增加到 21:30 的 100%, 同样呈增加趋势, 显示云区在目标区域逐渐覆盖完全, 组织化程度高。而红外 - 水汽通道亮温差的平均值在该时段内从 10.59 K 陡然下降到 2.38 K, 呈下降趋势, 红外 - 水汽通道亮温差的变化揭示了高层水汽输送与云顶发展的动态关系。亮温差的快速减小表

明云顶穿透至平流层下部，与中层干空气入侵共同作用，形成了有利于强对流的位势不稳定层结。这种热力-动力耦合过程是暴雨云团快速增强的关键机制。占比增加和平均值减小表明高层水汽输送在这段时间内突然增强，对流云顶升高，对流发展强盛，亮温差值较大的区域在扩大，支持对流云发展的判断。20:30~21:10 为可能为暴雨初生云团的发展增强期，两种通道亮温差的占比在短时间内猛增至 90%以上，分裂窗亮温差增加，红外 - 水汽通道亮温差减小，显示强烈的高层辐散。

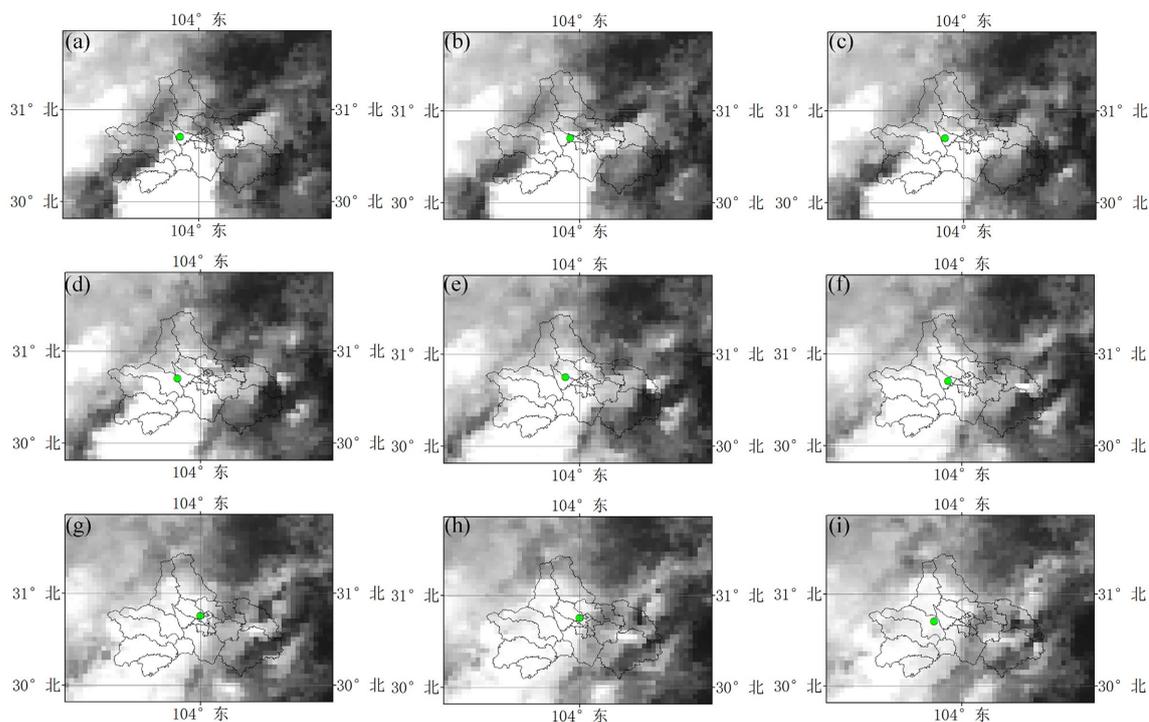


Figure 2. Infrared imagery of incipient thunderstorm clouds in Chengdu on 9 September 2024. (a) 20:10; (b) 20:20; (c) 20:30; (d) 20:40; (e) 20:50; (f) 21:00; (g) 21:10; (h) 21:20; (i) 21:30

图 2. 成都 2024 年 9 月 9 日暴雨初生云团红外云图。(a) 20:10; (b) 20:20; (c) 20:30; (d) 20:40; (e) 20:50; (f) 21:00; (g) 21:10; (h) 21:20; (i) 21:30^①

Table 2. Proportion of brightness temperature difference values between two channels from 20:10 to 21:30 on September 9
表 2. 9 月 9 日 20:10~21:30 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
20:10	66.67%/2.11 K	4.17%/10.59 K
20:20	70.83%/2.18 K	29.17%/7.32 K
20:30	72.27%/2.35 K	45.83%/4.82 K
20:40	95.83%/2.80 K	75.00%/3.66 K
20:50	95.83%/3.99 K	91.67%/2.94 K
21:00	95.83%/4.23 K	87.50%/2.79 K
21:10	100%/4.38 K	91.67%/2.95 K
21:20	100%/4.89 K	96.33%/2.61 K
21:30	99.67%/5.06 K	100%/2.38 K

3.3.2. 9月16日过程分析

9月16日, 初生云团发展地点为邛崃市和大邑县, 图3为此次过程的暴雨初生云团红外云图。大片云系主要集中在成都西部, 3:00到3:20云团中心向南移动, 移出成都地区。期间云顶亮温由249.78 K降低至238.71 K, 邛崃站和大邑站降水量为1.1 mm和0.1 mm。3:30到4:20云系中心向北移动, 最终停滞在邛崃市和大邑县之间附近。该时段亮温从238.71 K下降至221.59 K, 两站的降水增大到7.1 mm和10.7 mm, 云区色调灰白。随着对流云团的增强色调逐渐变白亮, 云区范围基本维持在本地西部。

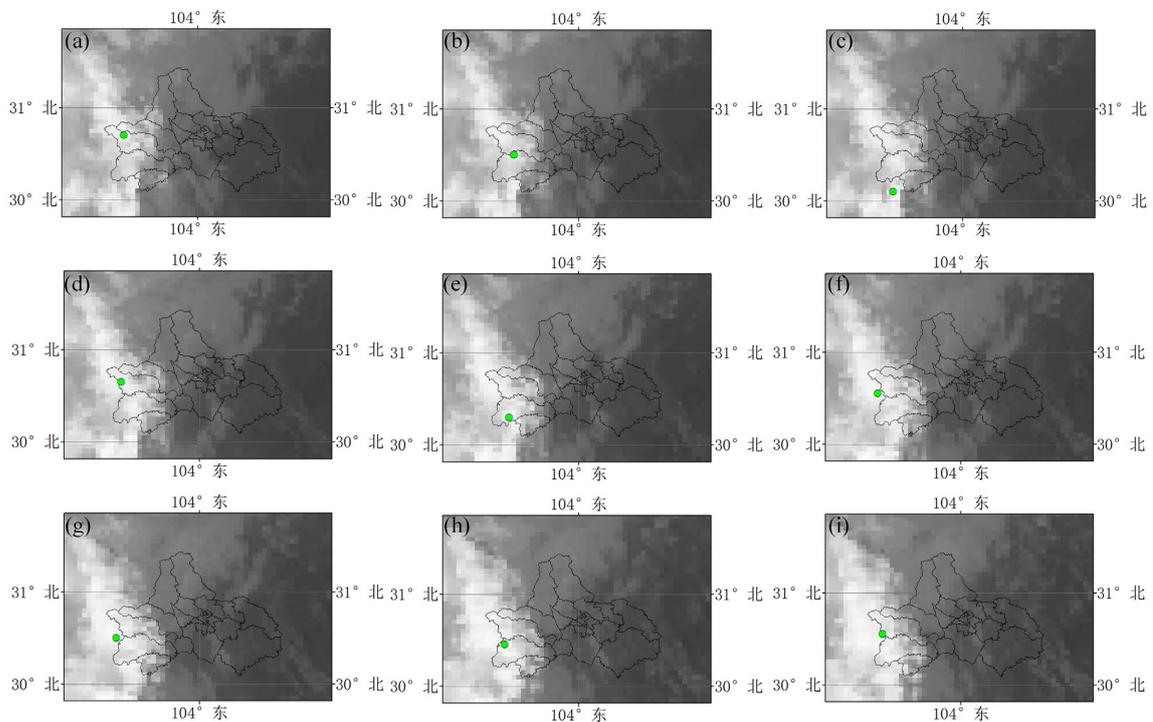


Figure 3. Infrared imagery of incipient thunderstorm clouds in Chengdu on 16 September 2024. (a) 3:00; (b) 3:10; (c) 3:20; (d) 3:30; (e) 3:40; (f) 3:50; (g) 4:00; (h) 4:10; (i) 4:20

图3. 成都2024年9月16日暴雨初生云团红外云图。(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) 4:20^①

结合两种亮温差来分析(表3), 红外-分裂窗通道亮温差在0.5 K至5 K之间的占比从3:00的95.73%迅速增加到3:20的100%, 之后略有波动, 最后稳定在4:20的99.15%, 整体保持在98%以上的高值, 平均值从3:00的1.72 K波动上升到3:40的2.07 K, 之后在3:50下降至2.00 K, 最后回升至4:20的2.31 K, 表明云顶高度逐渐升高, 对流处于发展阶段。红外-水汽通道亮温差在1 K至5 K之间的占比呈现波动变化, 峰值位于4:00的61.54%, 整体占比稳定, 表明云团在目标区域内无明显变化。红外-水汽通道亮温差的平均值从3:00的6.91 K下降到4:20的5.19 K, 呈下降趋势, 亮温差的迅速降低意味着云顶已延伸至平流层低层区域, 在与中层干燥气团侵入的协同作用下, 形成了潜在不稳定的层结状态。这种热力与动力相互作用的机制是导致暴雨云团急剧增强的核心因素。同时, 数值占比的上升与平均值的下降反映出高层水汽输送在此阶段出现显著增强, 促使对流云顶高度抬升, 对流活动趋于旺盛。亮温差较大区域的扩展现象进一步印证了对流云持续发展的趋势。逐渐接近5 K的阈值表明对流云可能仍处于发展阶段。亮温差值较大的区域扩大, 反映云顶高度上升或云体增厚。

两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见图4, 暴雨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。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。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。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, 最后引发暴雨、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 3:00 to 4:20 on September 16
表 3. 9月16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	95.73%/1.72 K	53.85%/6.91 K
3:10	99.15%/1.95 K	52.14%/6.58 K
3:20	100%/2.04 K	52.14%/6.08 K
3:30	99.15%/2.07 K	55.56%/5.77 K
3:40	99.15%/2.07 K	56.41%/5.69 K
3:50	98.29%/2.00 K	57.26%/5.38 K
4:00	99.15%/2.03 K	61.54%/5.51 K
4:10	99.15%/2.04 K	59.83%/5.44 K
4:20	99.15%/2.31 K	57.26%/5.19 K

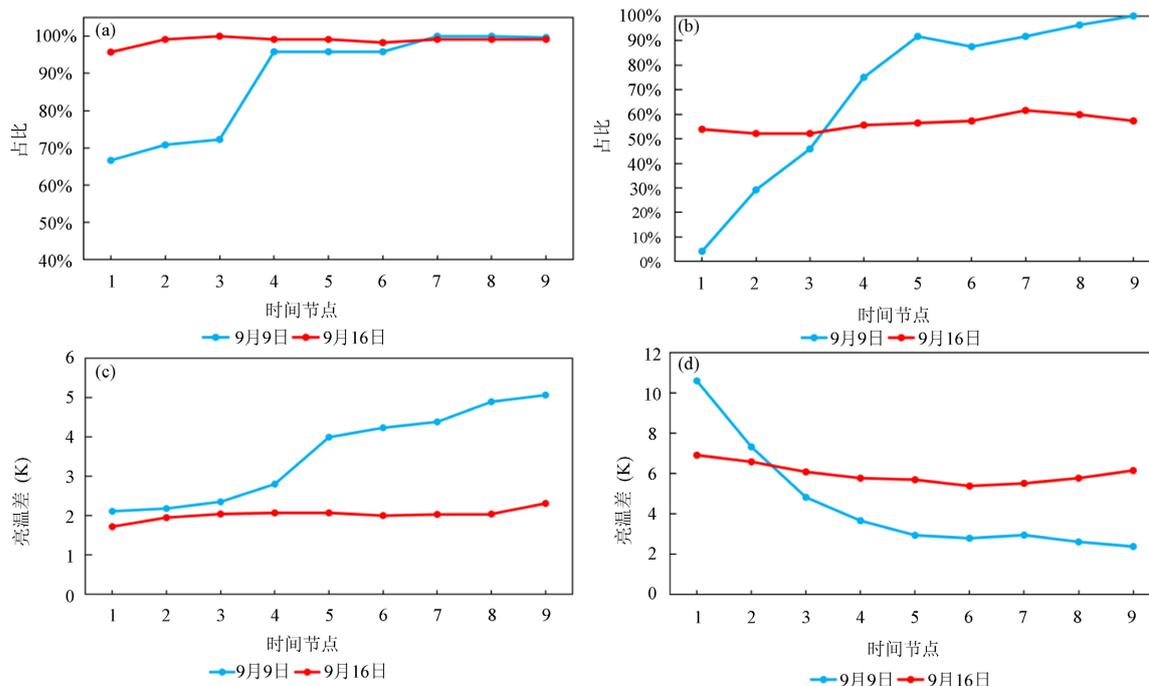


Figure 4. Line charts of BTD percentage distribution and mean value variations using multi-channel combination method. (a) Percentage distribution of BTD; (b) percentage distribution of BTD; (c) mean value variation of BTD; (d) mean value variation of BTD

图 4. 多通道组合方法亮温差占比及均值变化图。(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^①

3.4. 其他通道特征分析

在葵花9号的AHI中,除了包含可见光、红外、水汽的16个通道的标准数据外,还存在一些可用的地球物理参数。其中云属性的特殊通道,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 $<10\ \mu\text{m}$ 增至 $15\sim 25\ \mu\text{m}$,对流增强;云顶高度和云顶温度则与对流强度直接相关,是检测暴雨初生的核心参数。**图5**是有关于所有过程的三种云属性演变,在强对流初生阶段,所有过程均显示云有效半径呈增长趋势,最终云有效半径多位于 $27.8\ \mu\text{m}\sim 44.5\ \mu\text{m}$ 的区间内;9月9日增长幅度大,一小时内增幅均位于 $10\ \mu\text{m}$ 左右,为典型的强对流特征,粒子碰并剧烈,伴随暴雨、强降水甚至冰雹的天气过程;而9月16日则表现出波动上升和缓慢上升的形势,涨幅位于 $1\sim 3\ \mu\text{m}$,但结合其他通道信息看并不代表无暴雨初生云团发展,同样有相对较弱的降水和暴雨过程发生。云光学厚度均有持续下降的趋势,9月9日下降明显,9月16日则缓慢下降。云光学厚度降低可能反映粒子因粒子碰撞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,全球暴雨研究中,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。最后云顶高度普遍升高和持续抬升,此处已于前文证实,呈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 $12\ \text{km}$ (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。

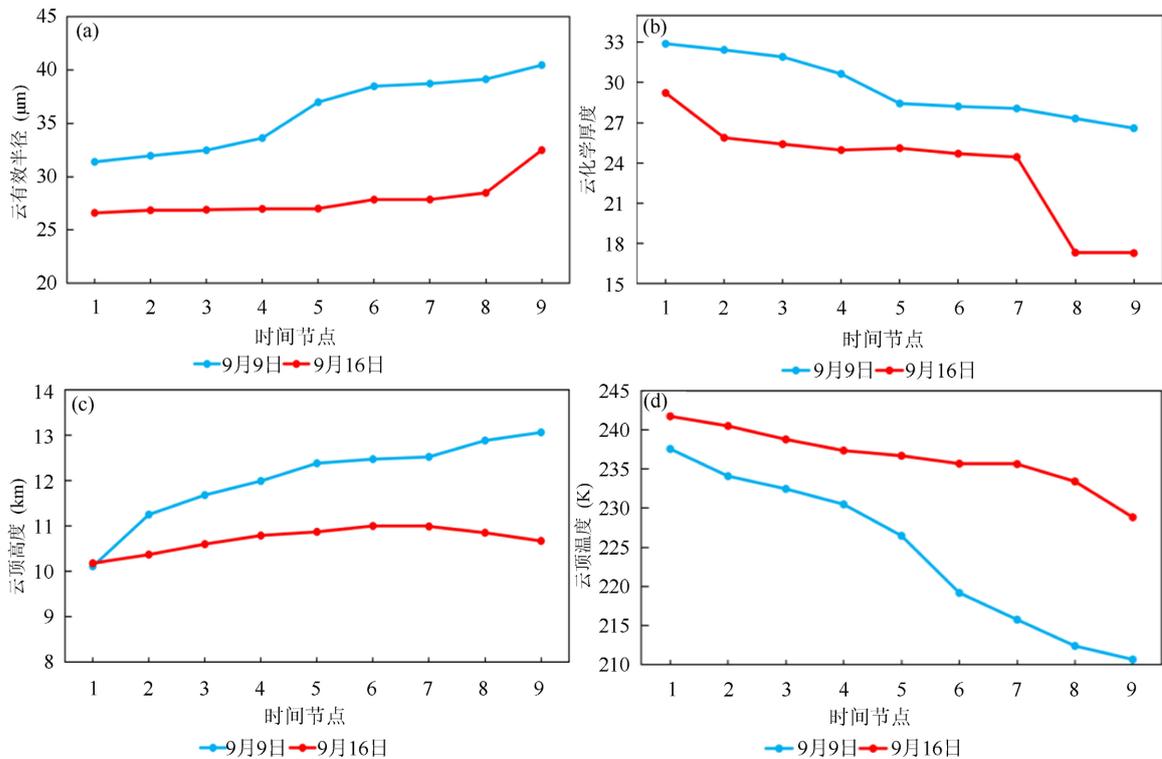


Figure 5. Temporal variations of four cloud properties during each event. (a) Cloud effective radius variation; (b) cloud optical thickness variation; (c) cloud-top height variation; (d) cloud-top temperature variation

图5. 每个过程四种云属性随时间的变化。(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^①

3.5. 预报时效性分析与应用验证

3.5.1. 时效性分析

基于上述对每次过程卫星光谱通道中的分析,对暴雨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暴雨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,得到9月9日地面观测站预警提前时间90分,卫星光谱通道特征识别法预警提前时间130分;9月16日地面观测站预警提前时间210分,卫星光谱通道特征识别法预警提前时间270 min。可验证暴雨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。表明基于葵花9号的光谱特征识别能够有效预警暴雨天气的发生,相较于地面观测站的预警,该方法提前预警的时间为40 min~60 min,平均提前时间为50 min。

3.5.2. 应用验证

为了进一步验证预报方法的普适性和稳定性,选取9月11日、9月14日降水作为用于验证该方法是否稳定的个例,得到9月11日地面观测站预警提前时间30分,卫星光谱通道特征识别法预警提前时间50分;9月14日地面观测站预警提前时间70分,卫星光谱通道特征识别法预警提前时间120分。卫星光谱通道特征识别法比地面观测提前20 min~50 min,平均提前37 min。表明对于其他的暴雨事件,该预报方法同样表现出较高的准确性和可靠性。

4. 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年成都地区秋初的2次暴雨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) 暴雨系统从形成到成熟具有快速演变特征,生命周期通常为1~2小时,呈现中小尺度特征。在发展阶段初期(约50~60分钟)降水强度开始明显增强,1~2小时内雨量增幅普遍超过20 mm/h,极端情况下可达55 mm/h以上。观测表明,初生阶段的云团在对流中心15~30 km范围内已形成完整覆盖。

(2) 基于10.4 μm 红外通道的亮温阈值技术可有效监测初生对流云团。分析显示,这类云团的云顶亮温主要集中在200~240 K范围,并以约3.16 K/10min的速率持续下降。当亮温降至235 K临界值以下时,表明对流显著增强,云顶快速抬升,通常伴随强降水过程。临近成熟阶段,云顶亮温多降至220 K左右,指示深对流发展。

(3) 研究证实,红外-水汽通道亮温差参数能有效表征对流中心发展状态。当该参数在对流核心区的覆盖率超过80%时,表明云顶冰晶化加速,对流组织化程度提高,预示暴雨即将来临。同时,红外-分裂窗通道对冰晶粒径敏感,亮温差在0.5~5 K区间时,表明云顶存在大量小冰晶。且差值增大与冰晶浓度增长正相关。当对流云发展时,强烈的上升气流将过冷水滴输送至冻结层,冰晶通过凝华和碰并过程快速增大,导致12.4 μm 通道的散射增强,亮温降低幅度大于10.4 μm 通道,从而增大,可作为判断云团垂直发展的关键指标。

(4) 验证结果显示,葵花9号卫星的多光谱识别技术具有较高预报准确性。相比传统地面观测,该技术可将预警时间提前40~60分钟,平均提前量达50分钟,显著提升了暴雨预警时效。

注 释

①文中图片由 ArcMap 10.8、Excel 软件制图。

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] 陈瑞, 游浩妍, 万翔. 基于 Himawari-8 卫星的气溶胶光学厚度反演[J]. 北京测绘, 2022, 36(6): 681-685.
- [3] 李静, 魏薇, 姚锦桃, 等. 基于葵花 8 号卫星影像的内蒙古地区积雪判识研究[J]. 干旱气象, 2025, 43(2): 300-307.
- [4] 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.
- [5] 董疆南, 吴剑坤, 张会. 基于 FY-4A 卫星资料的保定地区对流初生研究[J]. 农业灾害研究, 2025, 15(3): 210-212.
- [6] 竹利, 蒋兴文, 卢萍, 等. 雅安地区一次暖区暴雨过程的对流触发机制分析[J]. 大气科学, 2024, 48(5): 1693-1710.
- [7] 张博, 段炼, 肖晓, 等. 基于葵花 8 号卫星的成都地区初生对流研究[J]. 航空计算技术, 2023, 53(3): 55-59.
- [8] 梁皓, 许冬梅, 束艾青, 等. 葵花 8 号辐射率资料同化在一次川渝暴雨预报中的应用研究[J]. 高原气象, 2023, 42(6): 1478-1491.
- [9] 史文倩, 刘瑞雯, 王雨婷. 基于葵花 8 号卫星云图对厦门机场平流雾过程分析[J]. 科技创新导报, 2019, 16(25): 108-110.
- [10] 许冬梅, 沈菲菲, 李泓, 等. 新一代静止气象卫星葵花 8 号的晴空红外辐射率资料同化对台风“天鸽”的预报影响研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(3): 40-52.
- [11] 张琪, 任景轩, 肖递祥, 等. 青藏高原东部初生暴雨云图特征及成因[J]. 气象科技, 2018, 46(5): 943-950.