

四川省2023年主汛期强降水的云图释用

赖 明¹, 袁 振^{2*}, 刘晓达², 黄 帅³, 张永莉⁴

¹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

²民航西南空管局气象中心, 四川 成都

³四川省阿坝州小金县气象局, 四川 阿坝

⁴成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年6月25日; 录用日期: 2026年8月26日; 发布日期: 2026年9月3日

摘 要

全球变暖背景下极端强降水频发, 四川主汛期暴雨易引发地质灾害。本文选取2023年7月四川境内三次典型持续性强降水过程作为研究个例, 综合运用中国气象局地面自动气象站观测资料与日本葵花9号静止卫星多通道遥感数据, 采用天气学诊断手段, 系统对比分析三次暴雨过程的大尺度环流配置、中尺度对流云团演变规律以及红外、水汽通道云顶亮温演变特征。结果表明: ① 四川主汛期强降水过程的发生发展与西太平洋副热带高压的位置、强度密切相关, 多数过程伴随短波槽、气旋式切变系统, 部分过程叠加台风外围环流; ② 单次持续性降水过程由多轮对流活动接续演变构成, 对流云团初生阶段持续时间短, 短时强降水往往同步出现在对流初生时段; ③ 红外与水汽通道最低亮温持续降低是对流快速发展的典型判据, 在适宜环境条件下, 通过跟踪两类通道亮温动态变化, 可对强对流及短时强降水开展短时监测预警。本研究成果可为四川及西南地区暴雨短时预报、卫星云图本地化释用提供支撑。

关键词

主汛期, 强降水, 葵花9号卫星, 环流形势

Interpretation of Satellite Images Showing Heavy Rainfall during the 2023 Main Flood Season in Sichuan Province

Ming Lai¹, Zhen Yuan^{2*}, Xiaoda Liu², Shuai Huang³, Yongli Zhang⁴

¹Aviation Meteorology Technology Research and Application Laboratory, Southwest Regional ATMB, CAAC, Chengdu Sichuan

²Southwest Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation of China, Chengdu Sichuan

³Xiaojin County Meteorological Bureau of Aba Prefecture in Sichuan Province, Aba Sichuan

*通讯作者。

文章引用: 赖明, 袁振, 刘晓达, 黄帅, 张永莉. 四川省 2023 年主汛期强降水的云图释用[J]. 自然科学, 2026, 14(5): 573-581. DOI: 10.12677/ojns.2026.145061

Abstract

Against the backdrop of global warming, extreme heavy rainfall has become increasingly frequent, and torrential downpours during Sichuan's main flood season are prone to triggering geological disasters. This paper selects three typical episodes of persistent heavy rainfall in Sichuan in July 2023 as case studies. By comprehensively utilising observational data from the China Meteorological Administration's ground-based automatic weather stations and multi-channel remote sensing data from Japan's Aoi-9 geostationary satellite, and employing meteorological diagnostic methods, to systematically compare and analyse the large-scale circulation patterns, mesoscale convective cloud cluster evolution, and the evolution of cloud-top brightness temperatures in the infrared and water vapour channels during these three torrential rain events. The results indicate that: ① The occurrence and development of heavy precipitation events during Sichuan's main flood season are closely related to the position and intensity of the Western Pacific Subtropical High; most events are accompanied by short-wave troughs and cyclonic shear systems, whilst some are superimposed by the peripheral circulation of typhoons; ② A single persistent precipitation event consists of successive rounds of convective activity; the initial stage of convective cloud clusters is short-lived, and short-duration heavy rainfall often occurs simultaneously during this initial phase; ③ A continuous decrease in the minimum brightness temperature in the infrared and water vapour channels is a typical indicator of rapid convective development; under suitable environmental conditions, short-term monitoring and early warning of severe convection and short-duration heavy rainfall can be carried out by tracking the dynamic changes in brightness temperature across these two channels. The findings of this study can provide support for short-term forecasting of torrential rain and the localised interpretation of satellite cloud imagery in Sichuan and the south-western region.

Keywords

During the Main Flood Season, Heavy Rainfall, The Aoi-9 Satellite, Circulation Pattern

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

在全球气候变暖的大背景下, 极端天气气候事件频发, 强降水的出现频率持续升高、极端强度不断增强[1][2]。四川省地处中国西南部, 地形复杂多样, 受东亚季风、高原季风及局地环流共同调控, 高原低值系统、西南涡、低空急流等天气系统均会直接诱发省内暴雨; 每年 6~8 月为主汛期, 区域性强降水过程多发, 极易引发洪涝、滑坡、泥石流等次生灾害[3]-[5]。2023 年主汛期, 四川盆地及周边山区接连出现多轮区域性持续性暴雨, 其中 7 月持续性暴雨造成多地日降水量突破历史极值, 给当地防灾减灾工作带来严峻考验。

卫星云图是现代气象监测体系中的关键观测手段, 可直观展现降水系统宏微观结构特征, 尤其是高时空分辨率静止气象卫星观测数据, 为强降水过程实时监测与机理诊断提供了重要支撑[6]。诸葛小勇等

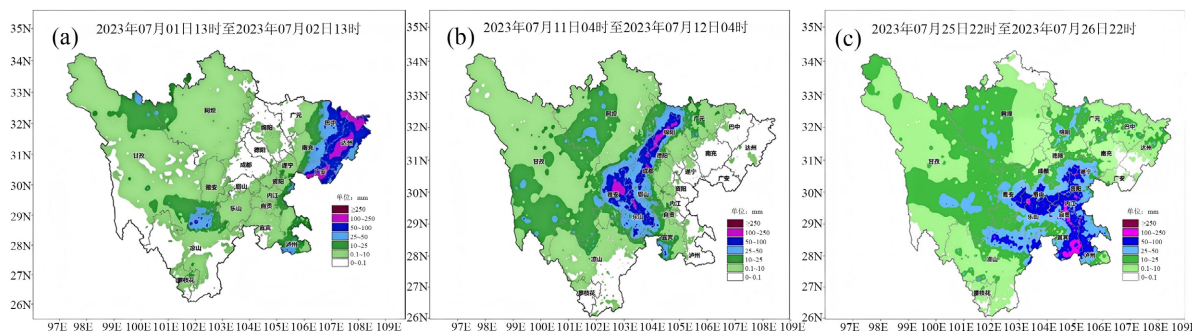
[7]依托葵花 8 号卫星研发快速云检测算法,证实经过偏差校正后,该算法可在更低算力消耗下实现与 CLAVR-x 算法相当的云识别效果;张琪等[8]针对高原东部初生雷暴开展云图特征分析,指出当地初生雷暴云顶高度偏低、未穿透对流层顶,其生成发展与区域海拔、近地面温湿度、地气温差等局地条件密切相关;徐珺等[9]结合葵花 8 号卫星资料,揭示了广州“5·7”局地特大暴雨的中尺度对流系统触发与维持机制。但四川区域地形起伏落差大,山地强迫抬升、区域水汽输送空间分异会显著改变卫星云图信号,现有云图判识经验无法直接适配本地复杂地形,亟需开展本地化订正与释用研究[10][11]。

本文选取 2023 年四川省主汛期葵花 9 号高分辨率卫星云图资料,结合地面、高空常规气象站点观测数据,系统剖析四川主汛期强降水过程的卫星云图演变特征及其与天气系统的配置关系。研究旨在厘清四川强对流降水云团时空演变规律,构建适配本地复杂地形的卫星云图释用指标,为区域暴雨短时临近预警提供技术支撑。相关研究结论能够弥补传统地面观测空间覆盖不足的短板,也可为西南地区极端强降水机理分析提供新的研究实例。

2. 资料和方法

2.1. 四川地区主汛期强降水过程的选取

四川地区 2023 年主汛期的强降水过程,主要发生在如图 1 所示的 3 个时间段。7 月 1 日至 7 月 3 日(图 1(a)),广元、巴中、南充、遂宁等地有大雨到暴雨,局部有大暴雨,对四川部分地区造成了不小的影响,尤其是引发了滑坡、泥石流、山洪等次生灾害。7 月 11 日至 7 月 12 日(图 1(b)),广元、绵阳、德阳、成都等地的部分地方有暴雨,其中部分地区有大暴雨(24 小时降雨量在 100 mm 以上),导致了绵阳市西北部龙门山区及其相邻地方出现区域性大暴雨天气,对当地造成了严重影响。7 月 25 日至 7 月 27 日(图 1(c)),绵阳、德阳、遂宁等地的部分地方有暴雨,局部地方有大暴雨,对四川省的大部分地区造成了一定的影响。



注:图 1 基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为川 S (2024) 00105 号的标准地图制作,底图无修改。

Figure 1. 24-hour precipitation on (a) 13:00 July 2, (b) 04:00 July 12, and (c) 22:00 July 26, 2023

图 1. 2023 年(a) 7 月 2 日 13 时, (b) 7 月 12 日 04 时, (c) 7 月 26 日 22 时 24 小时降水

2.2. 资料

本文使用了 2023 年 7 月的 3 次天气过程的常规气象观测资料和葵花卫星的数据,包含高空、地面资料、四川省降水观测资料数据。

葵花 9 号卫星的 AHIS 有 16 个观测波段(3 个为可见光, 3 个为近红外, 10 个为红外),全盘观测时间间隔为 10 分钟。葵花 9 号卫星的可见光波段分辨率为 0.5~1 公里,近红外和红外波段分辨率为 1~2 公里。即葵花 9 号卫星的时间分辨率为 10 分钟,空间分辨率有三种,分别是 0.5 公里、1 公里、2 公里,其中 0.5 公里的是波段 3 的空间分辨率,1 公里的是波段 1、2、4 的空间分辨率,2 公里的是波段 5~16 的空间分辨率。

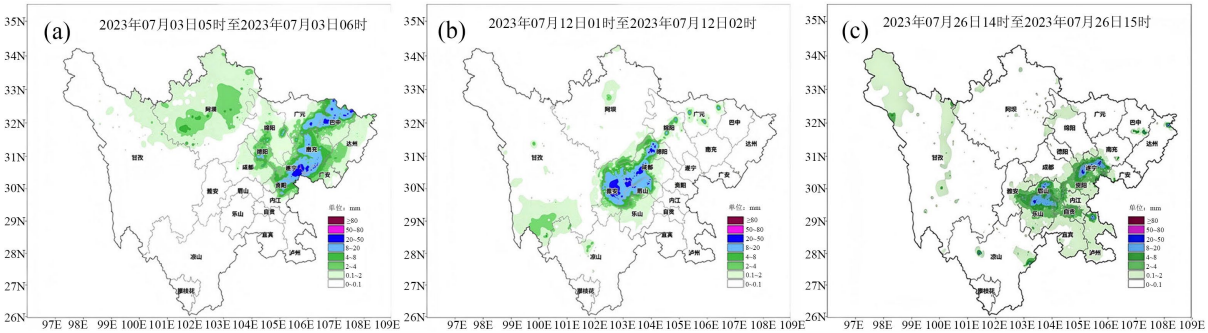
2.3. 研究方法

分析 2023 年 7 月 1 日~7 月 3 日、7 月 11 日~7 月 12 日、7 月 25 日~7 月 27 日 3 次天气过程的环流形势背景，高空水汽输送等特征，利用葵花 9 号卫星云图分析这 3 次四川的天气过程。重点研究对流云团的初生阶段和发展旺盛阶段，得到 2023 年 7 月四川地区强降水天气的云图释用结果。对流云团的识别采用了阈值法，即云顶相当黑体亮温低于 241 K，并且在对流初生阶段时期，云顶相当黑体亮温会降低[12]。

3. 环流形势和云图演变特征分析

3.1. 降水概况

从 2023 年 7 月 1 日~7 月 3 日、7 月 11 日~7 月 12 日、7 月 25 日~7 月 27 日这 3 次天气过程中各选取了一个时次的 1 小时降水量图，如图 2 所示。图 2(a)中降水多发生在四川北部，暴雨出现的地方在其东部。图 2(b)中发生降水的地方在四川中部，成都附近部分地区 1 小时降水量达到了 20 毫米以上，已经属于大暴雨的级别。图 2(c)中四川境内普遍有降水，暴雨主要发生在宜宾、遂宁、乐山等地及其附近。2023 年盛夏时期的 3 次天气过程期间都有暴雨、大暴雨的出现，对交通、农业等均有影响。



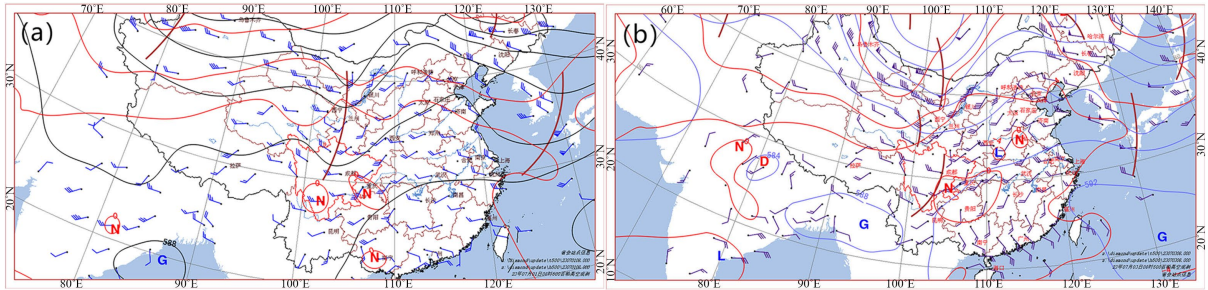
注：图 2 基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为川 S (2024) 00105 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 2. 1-hour precipitation on (a) 06:00 July 3, (b) 02:00 July 12, (c) 15:00 July 26, 2023

图 2. 2023 年(a) 7 月 3 日 06 时，(b) 7 月 12 日 02 时，(c) 7 月 26 日 15 时的一小时降水图

3.2. 环流形势对比分析

3.2.1. 2023 年 7 月 1 日~3 日环流形势场分析



注：图 3 基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS (2019) 1822 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 3. The situation at (a) 500-hPa at 08:00 1 July 2023; (b) 500-hPa at 08:00 3 July 2023

图 3. 2023 年 7 月(a) 1 日 08 时 500 hPa，(b) 3 日 08 时 500 hPa 高空形势

2023 年 7 月 1 日(图 3(a))和 7 月 3 日(图 3(b)) 08 时 500 hPa 环流形势对比可以发现，位于四川北部

与甘肃一带的高空槽不断加深、断裂并南移，移至四川地区的高空槽有利于为该槽前的四川地区带来阴雨天气。位于孟加拉湾处的副热带高压中心向东北移动至云南西部，位于太平洋上的副热带高压不断向西延伸，两个副热带高压的移动均影响了水汽从孟加拉湾通过西南气流向四川北部输送，水汽从我国南海处通过东南气流向四川东南处输送，有利于当地降水的产生。

在 2023 年 7 月 1 日 08 时 700 hPa 上(图略)，四川包括成都及其周边区域的温度露点差基本都在 2°C 以下，这些地区的 700 hPa 上空气基本接近于饱和状态，空气中的水汽含量占比高，有利于降水。在 2023 年 7 月 1 日 08 时 850 hPa，成都的东南处，即重庆、贵阳等地的温度露点差在 1°C 以下，成都的温度露点差在 5°C 左右，在成都的东南区域的 850 hPa 上空气接近饱和，有利于降水产生。水汽输送带在垂直空间上从高层到低层逐渐南移。

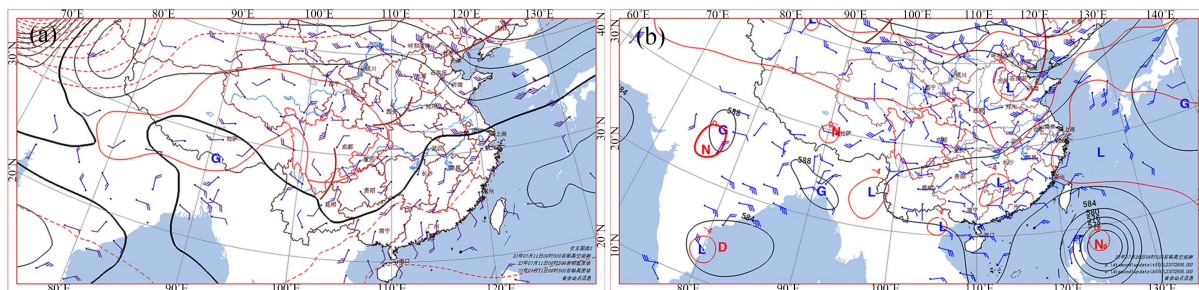
3.2.2. 2023 年 7 月 11 日~12 日环流形势场分析

2023 年 7 月 11 日 08 时 500 hPa 上，如图 4(a)所示，西太平洋副热带高压向西延伸，并在拉萨附近有一高压存在，使得水汽从孟加拉湾处经过了绕流才向川西和川北处输送，南海处的水汽通过西南气流向我国东南沿海等地输送。在成都附近存在呈气旋式切边，这一般会为当地带来强降水等恶劣天气。2023 年 7 月 11 日 08 时 700 hPa 和 850 hPa 上(图略)，成都附近的温度露点差都在 2°C 以下，空气接近饱和，水汽含量多，有利于降雨的产生，700 hPa 和 850 hPa 上都有西南气流为四川地区输送水汽，有利于降雨，850 hPa 上在成都及重庆之间存在气旋式环流，容易造成附近地区的降雨天气[13]。

3.2.3. 2023 年 7 月 25 日~27 日环流形势场分析

2023 年 7 月 25 日 08 时 500 hPa 上，如图 4(b)所示，西太平洋副热带高压整体位置比较偏东，高压中心在日本附近，造成了孟加拉湾和印度洋上的水汽基本没有向我国地区输送，加上太平洋西北部的台风的一定影响下，我国南海上的水汽通过云贵高原绕流向四川南方输送。

2023 年 7 月 25 日 08 时 700 hPa 和 850 hPa (图略)上，成都附近的温度露点差都在 5°C 以下，空气较饱和，水汽较充沛，有利于降雨，成都与重庆之间附近各存在一个呈气旋式辐合的环流，水平位置有所不同，都有利于降雨，同时在 700 hPa 和 850 hPa 上，西南气流都将孟加拉湾的水汽经过西藏以南的一个高压绕流向四川输送了水汽，有助于降雨的产生。



注：图 4 基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS (2019) 1822 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 4. The situation at 500 hPa at 08:00 on (a) July 11 and (b) July 25, 2023

图 4. 2023 年 7 月(a) 11 日和(b) 25 日 08 时 500 hPa 高空形势图

3.3. 云图分析

3.3.1. 2023 年 7 月 1 日~3 日云图分析

在 2023 年 7 月 2 日 22 时至 2023 年 7 月 3 日 06 时期间，成都东处到南处生成并发展了一条呈西南到东北走向的云团。从 2 日 22 时至 3 日 00 时，在图 5(a)~(c)中，云团刚刚生成，此时云团在云图上仅呈

现出几处范围较小、亮度较暗的点状特征,表明云团处于初生阶段。云团不断变化,部分云团不断扩大范围,并初现团状特征。在靠近成都东部的一段云团变得更为密集且白亮,这表明云团正在逐步发展。00时,成都东处到南处的云团已经初具雏形,整体表现为较为白亮的细胞状特征,中间的云团开始逐渐汇聚。到了04时(图5(d)),对流云团已经达到成熟阶段,初生阶段的细胞状云团已经汇聚在一起,在成都东边形成了一处十分白亮的团状云系。此时云团活动已经达到成熟阶段,范围相较于初生阶段明显变大,并且随着时间的推移,云团南边纤维状云系开始增多扩大,并且该云团逐渐与成都西北处的云团交汇,之后(图5(e)~(f))发展更强。整个过程中,云团从初生阶段到成熟阶段,经历了从点状到团状的演变,最终形成了一个较大的、白亮的对流云团。这一过程反映了云团在对流不稳定环境中的生成、发展和成熟过程。

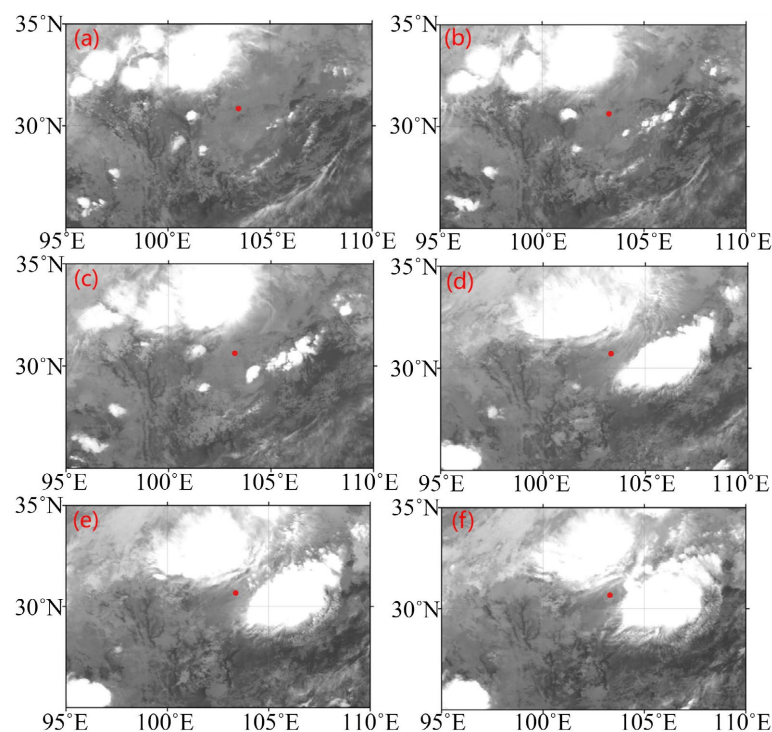


Figure 5. The cloud images at (a) 22:00 on the 2nd, (b) 23:00 on the 2nd, (c) 00:00 on the 3rd, (d) 04:00 on the 3rd, (e) 05:00 on the 3rd, (f) 06:00 on the 3rd of July 2023

图 5. 2023 年 7 月(a) 2 日 22 时, (b) 2 日 23 时, (c) 3 日 00 时, (d) 3 日 04 时, (e) 3 日 05 时, (f) 3 日 06 时云图

3.3.2. 2023 年 7 月 11 日~12 日云图分析

2023 年 7 月 11 日 18 时~2023 年 7 月 12 日 03 时期间,从 7 月 11 日 18 时开始,在图 6(a)~(c)中,成都周边及其南边区域不断有云团迅速抬升发展。这些云团呈现出细胞状特征,并且随着时间的推移,云团数量和大小都有所增加。云团亮度也逐渐变得更白亮,这些变化表明对流云团正在经历初生阶段。在初生阶段中,对流云团的水平尺度较小,一般卫星难以分辨,但在图 6(a)~(c)中可以比较清楚地看见这些初生的对流云团,这恰恰说明了葵花 9 号卫星的高精度观测。到了 7 月 12 日 01 时,在图 6(d)上该对流云团已经达到了成熟阶段。在这一阶段,云图上呈现出整体十分白亮的团状特征。此外,在该对流云团的西南处有一片色调较白亮、整体比较稀薄的纤维状云系,这表明该对流云团正向东南方向移动。图 6(e)~(f)中云团继续发展。总结来说,从 7 月 11 日 18 时至 7 月 11 日 20 时,成都周边及其南边区域的对流云团经历了初生阶段的过程,而到了 7 月 12 日 01 时,已经进入成熟阶段,并且显示出向东南方向移动的趋势。

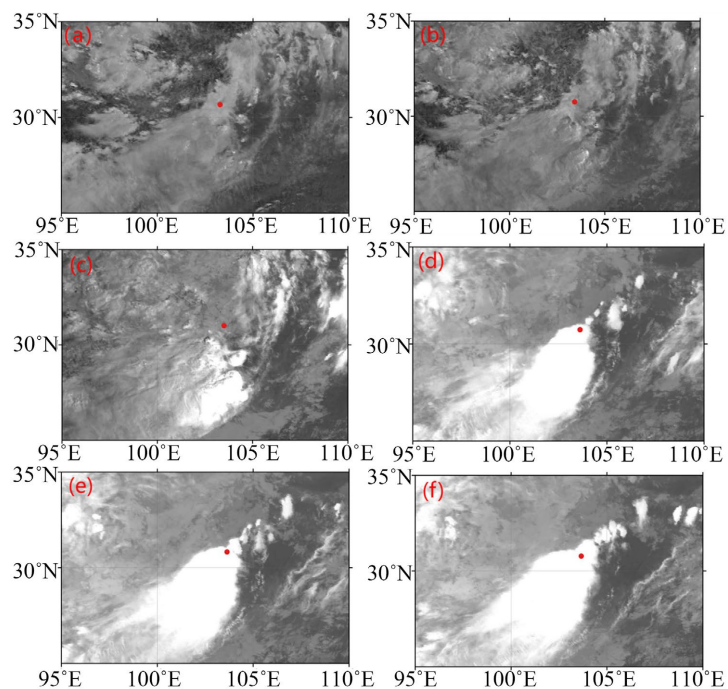


Figure 6. The cloud images at (a) 18:00 on the 11th, (b) 19:00 on the 11th, (c) 20:00 on the 11th, (d) 01:00 on the 12th, (e) 02:00 on the 12th, (f) 03:00 on the 12th of July 2023

图 6. 2023 年 7 月(a) 11 日 18 时, (b) 11 日 19 时, (c) 11 日 20 时, (d) 12 日 01 时, (e) 12 日 02 时, (f) 12 日 03 时云图

3.3.3. 2023 年 7 月 25 日~27 日云图分析

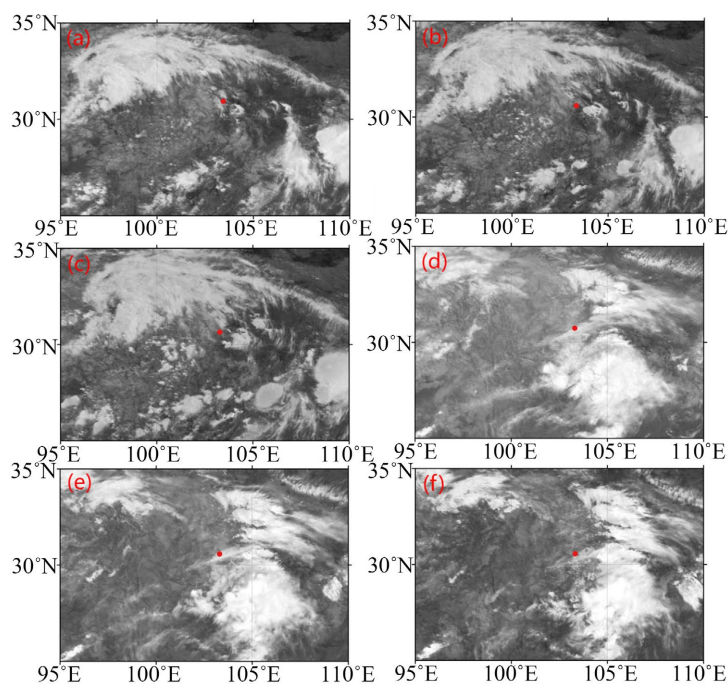


Figure 7. The cloud images at (a) 13:00 on the 25th, (b) 14:00 on the 25th, (c) 15:00 on the 25th, (d) 08:00 on the 26th, (e) 09:00 on the 26th, (f) 10:00 on the 26th of July 2023

图 7. 2023 年 7 月(a) 25 日 13 时, (b) 25 日 14 时, (c) 25 日 15 时, (d) 26 日 08 时, (e) 26 日 09 时, (f) 26 日 10 时云图

2023 年 7 月 25 日 13 时至 2023 年 7 月 26 日 10 时期间, 如图 7 所示, 四川地区经历了一次显著的对流云团活动。从 7 月 25 日 13 时开始, 图 7(a) 中四川地区出现了大量小云团, 这些云团在随后的两个小时内不断演变, 有的变小并消亡, 有的则通过汇聚变大, 同时也有新的云团生成。图 7(b) 中的云团继续移动, 到图 7(c) 中在成都南边, 即北纬 27° 左右, 形成了一条大致呈东西走向的云带, 这条云带由这些不断发展和汇聚的细胞状云团组成。到了 7 月 26 日 08 时, 图 7(d) 中对流云团的发展达到了旺盛状态, 位于成都南侧, 位置偏东, 这些云团呈现出整体十分白亮的团状特征。图 7(e)~(f) 中云团继续边东移边逐渐散开。2023 年 7 月 25 日至 26 日期间, 四川地区的对流云团活动主要受冷空气南下入侵和 700 hPa 和 850 hPa 上的气旋式辐合的低压系统等因素的影响, 导致了大量小云团的生成和演变, 最终形成了此次的对流云团活动。

3.4. 三次对流过程初生阶段的对比

通过 3 次强降水过程中红外、水汽亮温和降水的对比(图略), 除了在 7 月 2 日发生的对流活动的卫星红外和水汽通道的资料选取空间在 $25^{\circ}\text{N}\sim 31^{\circ}\text{N}$, $95^{\circ}\text{E}\sim 107^{\circ}\text{E}$ 范围内, 其余 2 次发生的对流活动的卫星红外和水汽通道的资料选取空间都在 $25^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $95^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$ 范围内, 一小时降水量资料分别选降水最强的荣县、天全、井研三个站点的观测资料。

7 月 2 日 22 时~3 日 01 时, 红外通道和水汽通道的最低亮温值总体上都呈现减小的趋势, 荣县一小时降水量在 01 时达到最大值, 数值在 19 毫米左右。7 月 11 日 17 时~20 时, 红外通道和水汽通道的最低亮温值总体上都呈现减小的趋势, 天全一小时降水量在 20 时达到最大值, 数值在 22 毫米左右。7 月 25 日 13 时~16 时, 红外通道和水汽通道的最低亮温值总体上都呈现减小的趋势, 井研一小时降水量在 16 时达到最大值, 数值在 17 毫米左右。当红外和水汽通道的最低亮温达到最低时, 一小时降水量达到最大。

4. 结论

本文以 2023 年四川主汛期三场典型区域性暴雨过程为研究对象, 综合运用地面自动站、高空常规观测及日本葵花 9 号静止卫星多通道观测资料, 通过天气学诊断、卫星云图演变对比、云顶亮温时序分析等手段, 系统探究强降水过程的环流配置、对流云团生消规律与红外/水汽通道亮温响应特征, 得到主要结论如下:

(1) 2023 年四川主汛期三次强降水过程均受西太平洋副热带高压位置、强度主导, 部分过程叠加台风外围环流作用; 中小尺度系统存在短波槽、低层气旋式切变, 孟加拉湾、南海两路水汽通过西南、东南气流持续输送至四川区域, 高低空湿度层结接近饱和, 为大范围暴雨形成提供充足水汽基础。三次过程环流配置存在差异: 7 月初过程受北抬高空槽驱动, 水汽向北输送; 7 月中旬副高西伸、本地低层气旋切变显著, 盆地中部暴雨集中; 7 月下旬副高偏东, 依靠台风外围环流引导南海水汽绕流进入川南。

(2) 持续 2~3 天的降水过程是由多批次独立对流云团接续发展构成, 各对流系统降水落区分化明显, 分别造成不同区域短时暴雨。对流云团整体生命周期仅数小时至十余小时, 其中初生阶段水平尺度小、维持时间极短, 短时强降水集中出现在对流初生时段; 葵花 9 号卫星 10 分钟高时间分辨率、公里级空间分辨率可清晰捕捉细小初生对流云团, 弥补常规观测时空密度不足的短板。三次过程云团演变路径各有特征: 7 月初云团呈西南-东北向带状发展, 7 月中旬对流在成都周边快速生成并向东南移动, 7 月下旬分散小云团持续新生合并, 最终形成东西向对流云带。

(3) 红外与水汽通道最低亮温变化可直观反映对流发展强弱, 三场典型暴雨过程均表现出统一规律: 对流初生阶段云顶亮温持续下降, 当红外、水汽通道亮温降至谷值时, 站点小时降水量同步达到峰值。在有利环流与水汽条件下, 持续跟踪两类通道最低亮温的动态演变, 能够提前识别对流发展趋势, 为四

川复杂地形下强对流、短时强降水的短时临近监测预警提供有效卫星判据。

参考文献

- [1] 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(7): 874-883.
- [2] 王蕾, 张百超, 石英, 等. IPCC AR6 报告关于气候变化影响和风险主要结论的解读[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(4): 389-394.
- [3] 杨康权, 卢萍, 肖递祥, 等. 高原低值系统影响下一次极端强降水天气诊断分析[J]. 高原山地气象研究, 2017, 37(2): 1-7.
- [4] 肖红茹, 王佳津, 肖样, 等. 四川盆地暖区暴雨特征分析[J]. 气象, 2021, 47(3): 303-316.
- [5] 张芳, 张芳华, 孔期, 等. 2018 年 5 月 21 日四川盆地极端大暴雨的中尺度成因和预报偏差分析[J]. 气象, 2022, 48(6): 691-704.
- [6] 桂海林, 诸葛小勇, 韦晓澄, 等. 基于 Himawari-8 卫星的云参数和降水关系研究[J]. 气象, 2019, 45(11): 1579-1588.
- [7] Zhuge, X. and Zou, X. (2018) Summertime Convective Initiation Nowcasting over Southeastern China Based on Advanced Himawari Imager Observations. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **96**, 337-353.
<https://doi.org/10.2151/jmsj.2018-041>
- [8] 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.
- [9] 徐珺, 毕宝贵, 湛芸, 等. “5.7”广州局地突发特大暴雨中尺度特征及成因分析[J]. 气象学报, 2018, 76(4): 511-524.
- [10] 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, 20(3): 341-346.
- [11] 牛金龙, 黄楚惠, 张译文. 近 20 a 成都区域性暴雨分布特征及分型预报着眼点[J]. 高原山地气象研究, 2026, 46(2): 56-65.
- [12] 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.
- [13] 谢新, 李国平, 郑建萌, 等. 爬流和绕流对四川盆地一次盛夏暴雨过程的影响分析[J]. 暴雨灾害, 2026, 45(2): 196-205.