

一次强对流天气的触发机制与演变过程分析

——基于多源观测数据的个例研究

雷 书*, 雷 鹿, 王镭鸿, 鲁峻岑, 蒋阳杰, 王子丹, 雷 琴, 王馨悦

四川省眉山市仁寿县气象局, 四川 眉山

收稿日期: 2025年9月9日; 录用日期: 2025年10月17日; 发布日期: 2025年10月31日

摘 要

采用地面气象观测站网、区域自动气象站、风云系列气象卫星、新一代天气雷达及MICAPS业务系统等多源观测资料, 对2021年5月2日至3日仁寿县区域性强降雨天气过程开展综合诊断分析。研究表明: 该过程具有显著的暖区降水与系统性降水复合特征。初期在高温高湿背景下, 大气不稳定能量积聚触发分散性强对流天气; 后期受冷暖空气交汇影响, 大气层结不稳定性加剧, 引发区域性持续强降水。关键影响因子包括: 低空西南急流持续输送充沛水汽、强垂直风切变促进对流发展、中低层明显辐合抬升运动。这些要素的时空耦合作用共同构成了此次极端降水天气的物理机制。预报偏差主要来源于对冷空气南下引发的降水增幅效应估计不足以及对不稳定能量二次释放产生的降水强度研判不够充分。

关键词

仁寿县, 强对流天气, 暖区降水, 低空急流, 垂直风切变, 辐合抬升, 物理机制

Analysis of the Trigger Mechanism and Evolution Process of a Severe Convective Weather Event

—A Case Study Based on Multi-Source Observation Data

Shu Lei*, Lu Lei, Leihong Wang, Juncen Lu, Yangjie Jiang, Zidan Wang, Qin Lei, Xinyue Wang

Meishan Renshou Meteorological Bureau of Sichuan, Meishan Sichuan

Received: September 9, 2025; accepted: October 17, 2025; published: October 31, 2025

*通讯作者。

文章引用: 雷书, 雷鹿, 王镭鸿, 鲁峻岑, 蒋阳杰, 王子丹, 雷琴, 王馨悦. 一次强对流天气的触发机制与演变过程分析[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(10): 1500-1504. DOI: 10.12677/aep.2025.1510164

Abstract

Using multi-source observational data from ground meteorological stations, regional automatic weather stations, Fengyun series meteorological satellites, new-generation weather radars, and the MICAPS operational system, this study conducts a comprehensive diagnostic analysis of the regional heavy rainfall event in Renshou County from May 2 to 3, 2021. The results indicate that this event exhibited distinct characteristics of warm-area precipitation combined with systematic precipitation. Initially, under conditions of high temperature and humidity, accumulated atmospheric instability triggered scattered severe convective weather. Later, influenced by the convergence of cold and warm air masses, atmospheric stratospheric instability intensified, leading to sustained regional heavy rainfall. Key influencing factors included: sustained transport of abundant moisture by the low-level southwest jet stream, strong vertical wind shear promoting convective development, and pronounced convergence-lifting motions in the middle and lower troposphere. The spatiotemporal coupling of these elements collectively formed the physical mechanism behind this extreme precipitation event. Forecast errors primarily stemmed from underestimating the precipitation amplification effect triggered by the southward movement of cold air and insufficient assessment of precipitation intensity resulting from secondary releases of instability energy.

Keywords

Renshou County, Severe Convective Weather, Warm-Boundary Precipitation, Low-Level Jet Stream, Vertical Wind Shear, Convergence Lift, Physical Mechanism

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

强对流天气作为大气能量剧烈释放的典型现象，其突发性、短生命史和强破坏力对生产生活构成显著威胁。根据气象学定义，这类天气需同时满足热力、动力及水汽三大条件：近地面暖湿空气与上层冷空气形成强烈垂直温度梯度(热力不稳定)，配合地形抬升或锋面触发机制(动力抬升)，以及充足的水汽供应维持对流强度。2023年6月10日泰州市的强对流过程即典型例证，东北冷涡背景下，槽后西北急流输送的干冷空气与低空暖湿气流叠加，形成上干冷、下暖湿的层结，最终由地面辐合线触发大风、冰雹等极端天气[1]。此类天气的演变常呈现多尺度相互作用特征，当前研究多聚焦于雷达回波、探空资料等多源资料的综合分析，以揭示其触发机制与演变规律，而深入理解其物理过程对提升预警信号精度至关重要。

本文聚焦强对流天气的触发机制与演变过程，通过多源观测资料的综合分析，揭示其物理本质与动态特征。研究重点包括：首先，解析热力-动力耦合作用下的初始触发机制，如泰州案例中地面辐合线对不稳定能量的抬升作用[1]；其次，探讨系统发展过程中的能量输送与结构演变，包括高低空急流、垂直风切变等对对流单体的协同影响；最后，结合雷达回波特征揭示强对流系统的生命周期与灾害性天气的关联性。

2. 天气概况

受强对流天气系统影响，我县连续出现两轮强降水过程。首轮降水呈现局地性特征，黑龙滩水库区

域累计降水量 76.7 毫米, 瞬时极大风速突破 12 级; 次轮降水范围显著扩大, 全县近三成站点达到暴雨标准, 文宫镇出现 87.0 毫米过程最大降水量。气象资料分析表明, 这两次过程均具有降水效率高、风雨叠加明显的特点, 最大小时雨强接近 50 毫米, 对水库调度和地质灾害防范提出较高要求。

3. 成因分析

3.1. 资料与方法

采用地面气象观测站网、区域自动气象站、风云系列气象卫星、新一代天气雷达及 MICAPS 业务系统等多源观测资料对此次过程的成因进行了分析。

3.2. 高空形势和影响系统分析

5 月 2 日 08 时大气环流形势呈现以下特征: 500 hPa 等压面受槽前西南气流控制; 700 hPa 等压面受偏南气流影响, 但湿度条件普遍欠佳, 仅盆地西北部水汽条件相对适宜; 850 hPa 等压面有低涡系统持续维持, 虽湿度条件不足, 但与 500 hPa 等压面形成显著温差, 大气不稳定能量条件较为充沛。

数值预报分析表明, 未来 12 小时内 500 hPa 等压面高原槽将东移影响盆地地区; 700 hPa 等压面偏南急流逐步建立, 水汽条件略有改善, 并伴随切变线生成; 850 hPa 等压面低涡切变稳定维持, 预计 2 日傍晚将引发不稳定能量释放, 导致县域范围内出现分散性雷雨天气, 局部乡镇可能出现冰雹等强对流天气[2]。

5 月 2 日 20 时 200 hPa 高空乐山以北出现典型分流区特征; 500 hPa 等压面受西风槽前西南气流显著影响; 700 hPa 等压面显示盆地全境受东南暖湿气流控制, 其中东北部及东南部区域比湿条件优越; 850 hPa 等压面虽受急流左侧干区影响湿度条件较差, 但与中层大气形成的显著热力差异仍具备较强对流不稳定能量, 存在触发分散性雷暴天气的潜势条件。气象监测表明, 5 月 3 日 08 时 200 hPa 高空急流轴线位于我省南部区域, 500 hPa 等压面上盆地东部及南部受槽前西南气流显著影响; 700 hPa 等压面显示盆地西部与攀西地区分别存在切变线系统, 整层大气可降水量处于较高水平; 850 hPa 等压面监测到盆地南部存在低涡环流系统。探空资料综合分析指出, 低层大气存在明显垂直风切变, 此类气象背景场极有利于强对流天气的生成与发展。

数值预报分析未来 12 小时内, 500 百帕高空高原槽系统将持续加深并向东移动; 700 百帕等压面上, 盆地南部切变线维持稳定, 同时盆地北部偏北气流呈现增强态势; 850 百帕高度层上, 盆地南部切变线持续存在, 大气湿度条件较为有利。

经综合研判, 未来 24 小时内, 500 百帕高原低槽将东移影响我省全域, 盆地主要受偏西波动气流控制, 700 百帕和 850 百帕等压面将有显著北风进入盆地区域。

3 日 20 时空环流配置如下: 500 百帕等压面上, 盆地主要受偏北气流影响, 其中盆地南部延伸至攀西地区存在切变线, 西北部出现显著负变温区; 700 百帕等压面上, 盆地受东北气流控制, 攀西地区维持切变线系统; 850 百帕等压面上, 盆地持续偏北气流, 东部及南部区域湿度场条件优越。大气层结探测数据显示, 盆地大部积聚较高不稳定能量, 为强对流降水天气的发生发展提供了有利环境条件。

3.3. 地面资料分析

3 日 20 时至 4 日 02 时观测时段, 盆地地区持续存在地面低压系统, 我县位于地面倒槽顶端这一关键气象位置。观测数据显示, 该时段盆地出现显著的三小时持续降压现象, 同时冷空气南下过程与暖湿气流形成有效交汇, 大幅提升大气水汽含量, 这些气象要素的共同作用, 是造成我县 3 日夜间系统性降水天气的主要成因。

3.4. 探空资料分析

分析垂直风切变、沙氏指数、K 指数、大气层结稳定度、湿层、对流有效位能等：

在 4 月 29 日至 5 月 1 日的降水前期，盆地全域维持晴热无雨天气态势。其中 5 月 1 日我县出现 34.3 摄氏度的极端高温。气象观测显示，850 百帕比湿量持续高于 14 克/千克，配合 850 百帕与 500 百帕的显著温差，形成不稳定能量聚集的层结条件，但受水汽输送不足影响[3]。

根据温江站 2 日 08 时至 3 日 20 时探空资料分析显示，2 日 08 时和 20 时两个时次 K 指数均超过 35℃ 阈值，850 hPa 与 500 hPa 温差达 20℃ 以上，沙氏指数 SI 持续为负值，表明我县大气层结处于强对流天气易发状态。值得注意的是，2 日 08 时对流有效位能(CAPE)仅为 148 J/kg，但在强对流天气发生前的 20 时已激增至 1228 J/kg 以上，充分反映出大气不稳定能量的显著积聚过程。虽然 2 日白天存在明显的能量激增现象，但由于湿层条件欠佳，加之高空扰动触发不稳定能量释放，最终导致 2 日夜间出现局地性雷雨天气，但未形成大范围强降水。3 日 08 时和 20 时探空资料显示 K 指数持续高于 35℃ 临界值，沙氏指数 SI 保持负值区间，大气不稳定能量持续累积。特别值得注意的是，当日对流有效位能(CAPE)呈现明显的日变化特征，从早晨至夜间呈现稳定增长态势。在冷空气南下与暖湿气流交汇的共同作用下，3 日我县大气湿度条件显著改善，湿层厚度明显增加。配合中低层偏南气流的持续输送，最终形成系统性降水过程，致使 3 日夜间出现全域性大雨至暴雨天气。

3.5. 雷达回波分析

成都雷达 5 月 2 日 17 时监测数据显示，我县境内已出现 30 dBZ 以上的分散性强对流回波。观测表明，此时强回波中心位于东部简阳市域，并呈条带状向我县方向移动。根据这一发展趋势，县气象局于 17 时 44 分依法发布雷电黄色预警信号。后续监测发现，18 时至 19 时回波系统在我县中部持续发展增强，至 18 时 30 分大化镇区域回波强度突破 55 dBZ，同时垂直累积液态水含量达到 50 kg/m²，符合冰雹天气形成标准。据此，县气象局于 18 时 31 分及时发布冰雹橙色预警信号。

分析成都雷达 5 月 3 日夜间资料：3 日夜间的降水由西向东，强降雨的时段主要在 4 日 03~05 时，资料可以看出，4 日 03 时 25 分强回波已位于彭山、东坡区，且由西北向东南方向向我县移来，到 4 日 04 时强回波中心位于我县，且不断生成发展，新生成的对流云团不断地合并沿西北 - 东南方向移动，前面的强回波单体在我县减弱后，后面的强降水回波又发展影响我县，也就是出现了“列车效应”，使得我县 4 日 03~04 时基本一直处于强回波控制，速度径向图可以看出，从 04 时开始，在我县一直存在中尺度对流辐合，此处正好对应我县此次暴雨的大值中心。垂直累积液态水含量显示，从 03 时开始我县的 VIL 逐渐增大，VIL 大值区范围加大，从风暴追踪信息图上也可以看到有对流云团不断经过我县，说明此时我县上空处于深厚的降水云系中。

3.6. 讨论与结论

此次降水过程具有明显的阶段性特征：前期(2 日夜间)主要受高温不稳定能量影响，出现局地强对流天气；后期(3 日)随着冷空气南下，与暖湿气流交汇形成系统性降水。本次过程虽然准确预判了前期分散性雷雨天气，但对后期系统性强降水的预报出现偏差。经分析，偏差原因包括：一是各数值预报模式对降水总量预测偏低；二是对冷空气南下引发的降水增幅效应估计不足；三是对不稳定能量二次释放产生的降水强度研判不够充分。

通过此次强对流天气的个例分析总结出：部分县级气象预报人员在基础环流形势分析不深入，高空及地面天气系统演变研判不细致，探空资料应用不充分，动力、热力、水汽等物理量诊断不全面，卫星云图产品解读不精准，地形影响评估不到位等问题。这种过度依赖数值模式预报产品的做法，将直接影

响预报结论的准确性和稳定性，当模式预报出现偏差时，极易导致预报结论与实况产生显著差异。

通过本研究总结出提升天气预报准确率实施要点：(1) 规范技术分析程序。天气过程研判应当实施分级诊断：宏观层面把握行星尺度环流演变，中观层面解析天气系统三维结构，微观层面验证物理量场配置特征。具体需整合高空分析图、地面观测网、探空曲线、卫星遥感等多源数据，形成初步预报意见后，应当开展多模式集合预报检验，并严格执行上级指导产品会商制度，确保预报结论的科学性与一致性；(2) 深化本地特征研究。预报业务人员应当建立持续积累的工作机制，重点提炼具有地域指示意义的预报参数。针对仁寿地区特殊的龙泉山地地形，需重点关注地形强迫产生的背风坡干区效应(降水减少幅度常达 50%~70%)及焚风增温现象(24 小时变温可达 8℃~10℃)。此类中小尺度地形效应会显著改变天气系统表现形态，必须建立精细化的地形影响数据库，并将其作为预报订正的核心参数。

参考文献

- [1] 章雯, 林慧. 泰州市一次强对流天气过程分析[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(2): 249-254.
<https://doi.org/10.12677/CCRL.2024.132026>
- [2] 张霞, 周建群, 申永辰, 等. 一次强冰雹过程的物理机制分析[J]. 气象, 2005, 31(8): 14-18.
- [3] 雷蕾, 孙继松, 魏东. 利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别[J]. 气象, 2011, 37(2): 136-141.