

重庆江北机场2025年4月两次春季雷暴对比分析

吴胜男, 周 旺, 谷 粒

中国民用航空西南地区空中交通管理局重庆分局, 重庆

收稿日期: 2025年9月3日; 录用日期: 2025年12月27日; 发布日期: 2026年1月4日

摘 要

本文针对2025年4月3日和4月18日两次春季雷暴过程, 从环流背景、探空资料及EC模式偏差三个维度开展分析。结果表明: 环流形势是两次雷暴强度分化的关键, 虽两者20时后均出现高空槽和中低层低值系统, 但4月18日因高空槽更显著、中低层辐合切变线清晰且高低层系统协同, 抬升条件远强于4月3日过程。探空数据亦显示其不稳定能量和垂直风切变更强, 而湿度条件并非强度差异主因。两次春季雷暴都表现为湿度一般, 传统对流有效位能(CAPE)、对流抑制能(CIN)等雷暴指标指示性较弱。EC模式预报表现呈明显分化, 其对大尺度背景驱动的强对流预报效果较好, 但对依赖中小尺度系统触发的强对流, 其在动力与水汽要素协同模拟方面具有一定的局限性。

关键词

春季雷暴, EC模式, 强对流, 探空资料

Comparison and Analysis of Two Spring Thunderstorm Processes in April 2025 at Chongqing Jiangbei Airport

Shengnan Wu, Wang Zhou, Li Gu

Chongqing Sub-Bureau of Southwest China Regional Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation Administration of China, Chongqing

Received: September 3, 2025; accepted: December 27, 2025; published: January 4, 2026

Abstract

This study analyzes two spring thunderstorm events on Apr 3 and 18, 2025, from three aspects:

文章引用: 吴胜男, 周旺, 谷粒. 重庆江北机场 2025 年 4 月两次春季雷暴对比分析[J]. 自然科学, 2026, 14(1): 57-66.
DOI: 10.12677/ojns.2026.141006

circulation background, sounding data, and ECMWF (EC) model biases. Results show the circulation pattern is key to the intensity difference between the two thunderstorms. Though both had upper-level troughs and low-level low systems after 20:00 (BT), the lifting conditions on Apr 18 were much stronger than those on Apr 3—due to a more prominent upper-level trough, clear convergence shear lines in the middle-low levels, and good coordination of upper-lower level systems. Sounding data also indicate stronger unstable energy and vertical wind shear on Apr 18, while humidity was not the main cause of the intensity difference. Both thunderstorms had moderate humidity, with weak indication from traditional indices like CAPE and CIN. The EC model's forecasting performance varied significantly: it worked well for severe convection driven by large-scale backgrounds, but had limitations in simulating dynamic and water vapor element coordination for severe convection triggered by meso-small-scale systems.

Keywords

Spring Thunderstorm, EC Model, Severe Convection, Comparative Analysis

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

在气象学与航空运输交叉领域，强对流天气尤其是雷暴，对航空安全及运营效率影响显著[1] [2]。重庆江北机场作为我国重要航空枢纽，其运行受天气条件制约明显，特别是在春季雷暴多发季节[3]-[5]。重庆江北机场雷暴季节性特征突出，春季雷暴日数约占全年 35%。回顾现有研究，针对春季雷暴的探讨多聚焦于长期统计特征分析，如雷暴的年际变化、季节分布及气候背景等[6]。而针对特定年份、特定时段内多次雷暴过程的对比研究，尤其是对“时间相近但强度、影响不同”的雷暴事件的精细化剖析较为匮乏。

2025 年 4 月，该机场接连经历两次春季雷暴过程，为研究雷暴对机场运行影响提供了典型案例。本文以 2025 年 4 月江北机场两次雷暴过程为研究对象，从环流背景配置、探空资料物理特征及数值模式(EC 模式)预报与实况对比三个维度展开系统分析，旨在揭示两次雷暴过程的天气特征差异及其成因，为江北机场及同类枢纽机场的春季雷暴精准预报提供科学依据，助力提升航空运输的安全性与运行效率。

2. 资料与过程概况

本文所用的形势资料和地面风、温压湿资料均来自 ERA5 再分析资料。常规地面观测资料和探空资料部分取自国家气象局提供的站点数据(重庆渝北站、重庆沙坪坝站)。模式预报资料为欧洲中心 EC 细网格预报资料。2025 年 4 月 3 日夜间至 4 日凌晨和 4 月 18 日夜间至 19 日凌晨重庆江北机场分别出现两次强雷雨天气过程。如表 1 所示第一次过程从 3 日 23:00~4 日 01:00 本场 1~5 区出现中等强度降水天气过程，其中短时有雷暴影响，过程累积降水量 7.9 毫米，含小阵雨降水时长约 4 小时。而第二次过程于 18 日 23:00 开始，19 日 01:39 结束，间歇出现多次雷雨，雨量为中到大阵雨为主，过程降水量 21.5 毫米。两次过程虽都出现在夜间相近时段，且持续时间相近，但由于强度差异，对航班影响差异较大。第一次过程为本场初雷，虽未提前预报，但是因强对流云团未覆盖本场跑道上空，所以未造成航班返航备降。

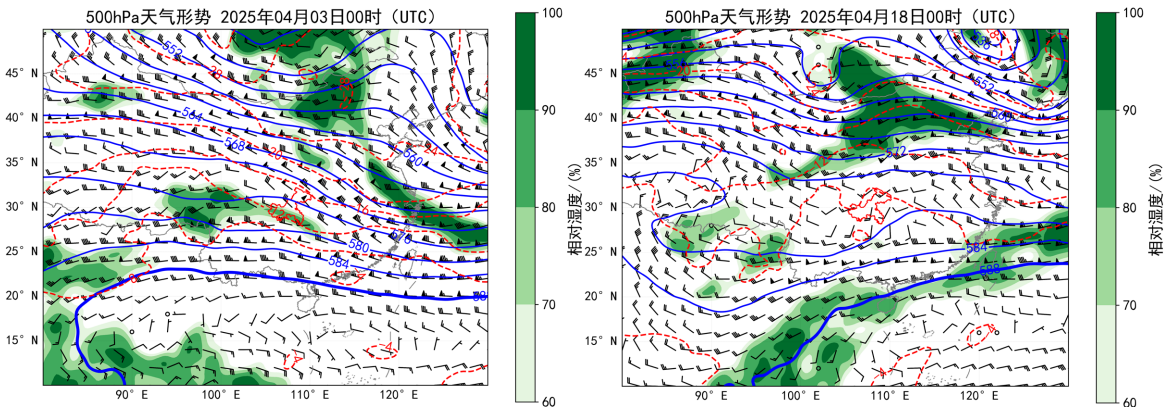
第二次过程虽提前准确预报，但是因雷暴云图覆盖区域较大，共计造成 17 个航班备降至周边机场。

Table 1. The impact of two spring thunderstorm processes on flights at Jiangbei Airport in 2025
表 1. 江北机场 2025 年两次春季雷暴过程对航班影响

过程	日期(UTC)	天气现象	航班影响
4 月 3 日夜间至 4 日凌晨	15:00~15:36	RA	无航班备降
	15:36~16:00	-TSRA	
	16:00~16:27	TSRA	
	16:27~17:00	SHRA	
4 月 18 日夜间至 19 日凌晨	15:00~15:37	TS	17 个航班备降
	15:37~16:00	TSRA	
	16:00~16:12	+TSRA	
	16:12~16:41	TSRA	
	16:41~17:39	-TSRA	

3. 天气过程分析

图 1 为 4 月 3 日 08 时与 4 月 18 日 08 时的高空形势场，系统配置差异显著。4 月 3 日 08 时，重庆从高空到低层的环流均呈“弱驱动、弱供给”特征：500 hPa 受西风带偏北气流掌控，等高线呈纬向平直延伸，无低槽、低涡等低值系统扰动，高空强辐散条件缺失，对低层空气的上升抽吸作用微弱；700 hPa 处于高压后部偏南风影响下，相对湿度零散分布，未形成连续的水汽输送通道，且温度层结偏稳定，中层大气对对流的垂直发展构成明显抑制；850 hPa 为弱偏南风，风速偏小且无显著辐合线、切变线等动力系统，水汽主要依赖局地蒸发，积累速度缓慢且总量不足，仅能触发局地小范围的浅对流，最终表现为弱雷暴。而图 1 中 4 月 18 日 08 时显示 500 hPa 上空有短波槽或切变线活动，槽后西北气流与槽前西南气流形成明显风场切变，槽前正涡度平流显著增强并叠加高空辐散，为对流发展提供了关键的高空动力触发机制；虽 700 hPa 受西南气流影响，但此时段相对湿度条件一般；850 hPa 则存在东南风与西南风交汇形成的辐合切变线，辐合上升运动突出，偏南气流带来的水汽通量较 4 月 3 日显著增加，已为对流提供水汽条件。需特别指出的是两次过程的湿度条件一般，说明春季雷暴的水汽条件并不需要特别充足。4 月 18 日夜间强对流的爆发，正是得益于高空槽与低层切变系统的持续加强和协同作用，这两个关键性系统的信号在 18 日 08 时已初步显现。



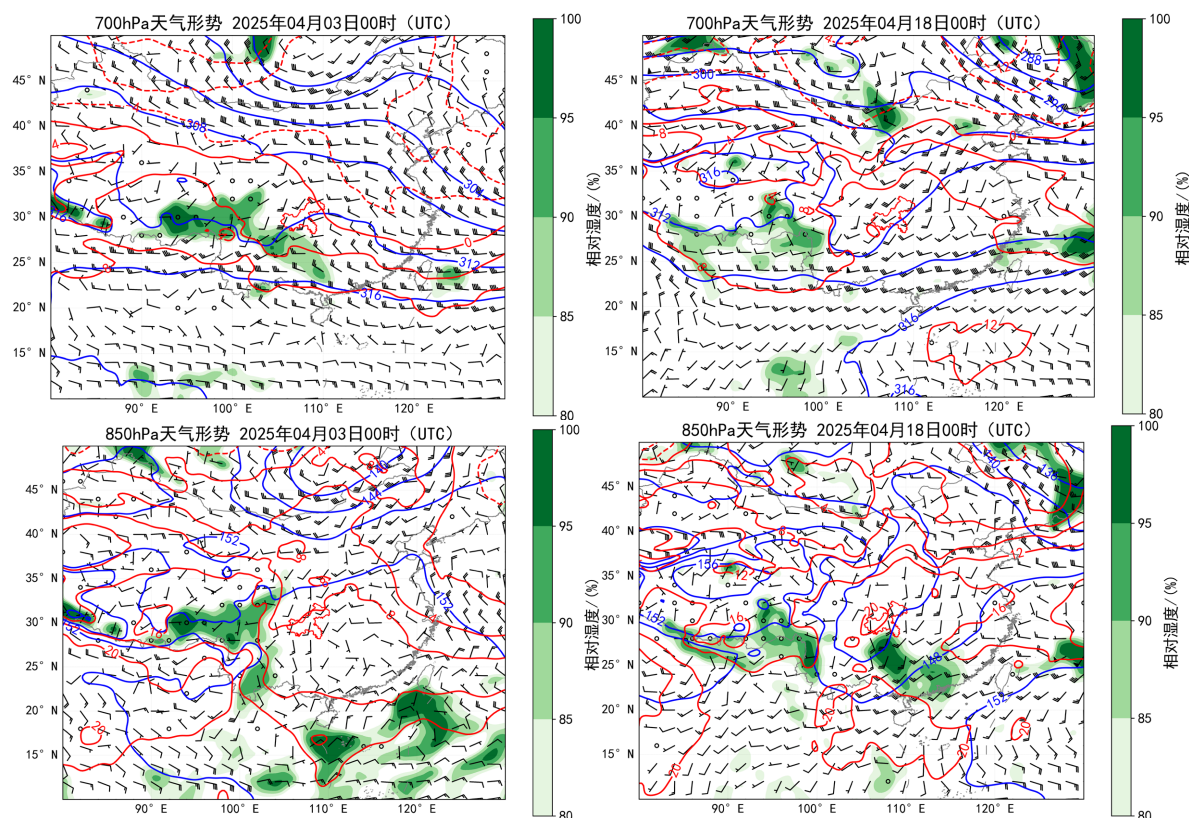


Figure 1. Circulation fields at 500 hPa, 700 hPa, and 850 hPa at 08:00 on April 3rd and 18th (blue contours represent geopotential height, unit: gpm; red solid lines represent positive temperatures, red dashed lines represent negative temperatures, unit: $^{\circ}\text{C}$; shaded areas represent relative humidity, unit: %; wind fields are indicated by wind barbs)

图 1. 4 月 3 日和 18 日 08 时 500 hPa、700 hPa、850 hPa 环流场(蓝色等值线表位势高度, 单位: gpm; 红色实线表示正温度, 红色虚线为负温度, 单位: $^{\circ}\text{C}$; 阴影图表相对湿度, 单位: %; 风场用风羽图表示)

图 2 中表现 4 月 3 日与 4 月 18 日重庆区域的环流形势呈现出一定的相似性, 但系统强度、位置及影响范围的差异仍显著, 直接决定了两次对流过程的强度分异。500 hPa 来看, 两次过程均出现高空槽系统, 但槽的强度与江北机场的位置差异明显。4 月 3 日 20 时, 重庆西北侧开始有高空槽生成发展, 但该高空槽中心距离江北机场较远, 对机场及周边区域的直接扰动作用较弱, 仅通过外围气流间接影响局地环流; 4 月 18 日 20 时, 重庆上空的高空槽系统更为显著, 槽线位置更偏东, 槽后西北气流与槽前西南气流的风速切变增强, 正涡度平流强度较 4 月 3 日明显提升, 对低层大气的抽吸抬升作用更突出, 为强对流的维持提供了更有利的高空动力背景。700 hPa 层面来看, 4 月 3 日 20 时, 重庆西南侧区域开始有低值系统(弱切变或低压环流)初步生成, 气流辐合强度较弱; 4 月 18 日 20 时, 700 hPa 存在清晰的辐合切变线, 切变线两侧的气流交汇特征明显, 辐合上升运动的垂直伸展高度与水平影响范围均大于 4 月 3 日, 对中层大气的扰动及水汽垂直输送能力更强。850 hPa 的系统演变趋势与 700 hPa 基本一致。从湿度条件来看, 两次过程 20 时无显著的高湿区集中分布, 水汽条件未成为两次过程的主导差异因子, 对流强度的分化主要仍由动力系统的强度与配置决定。综上, 20 时两次过程虽在系统类型上呈现相似性, 但 4 月 18 日的高空槽更显著、中低层辐合切变线更清晰, 系统的组织化程度与动力强度均优于 4 月 3 日, 而两次过程的湿度条件整体相当, 未构成关键差异。这种动力系统的强度分异, 是两次雷暴强弱之分的核心环流背景原因。

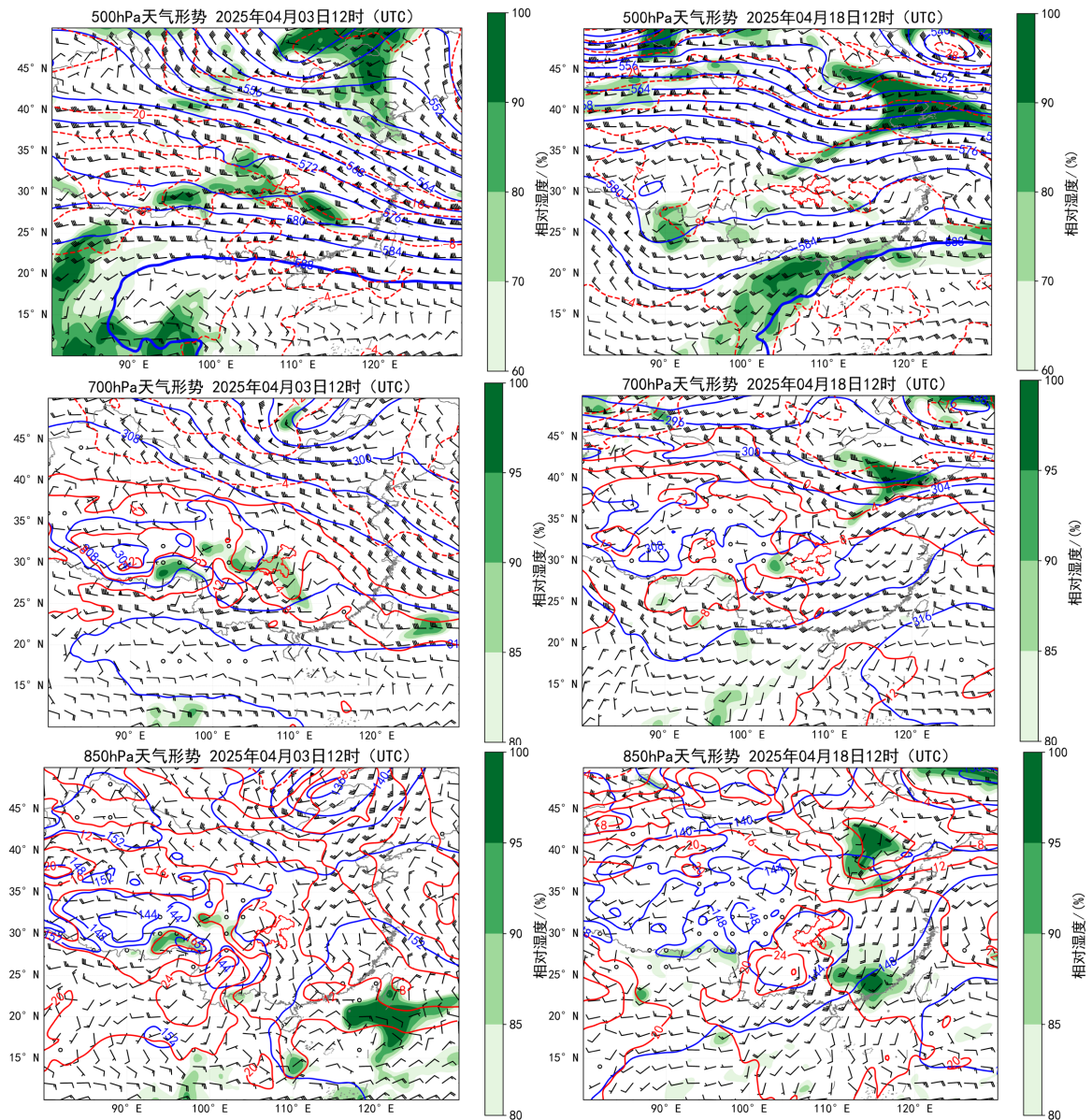


Figure 2. Same as Figure 1, with the time being 20:00 on April 3rd and 18th

图 2. 同图 1, 时间为 4 月 3 日和 18 日 20 时

图 3 为沙坪站中 2025 年 4 月 3 日、4 月 18 日 08 时及 20 时探空图, 从大气稳定度、对流潜力、垂直风切变及强天气迹象的维度对比可见, 两次过程的大气状态及天气潜力差异显著, 且 4 月 18 日呈现明显的日变化特征。4 月 3 日 08 时与 20 时的探空图(图 3(a)、图 3(b))均显示大气以稳定状态为主: 08 时对流有效位能(CAPE)积累较小, 且低层风速小、垂直风切变偏弱, 对流强度整体偏弱。4 月 18 日(图 3(c)、图 3(d))的探空图则体现出显著的日变化及强对流潜力: 08 时温度层结中绿线多位于蓝线下方, 大气稳定, CAPE 极低, 低层垂直风切变弱, 对流潜力差; 20 时中层(500~700 hPa)绿线明显偏离蓝线且位于其左侧, 形成显著不稳定能量区, CAPE 大幅增加, 自由对流高度(LFC)降低, 气块易突破抬升抑制, 同时垂直风切变强, 不稳定能量与强风切变协同作用下很快具备了短时强降水、雷暴等强对流天气的典型条件。综上, 4 月 3 日因能量与动力稍弱, 雷雨天气过程相对偏弱; 4 月 18 日则随日间演变, 从清晨稳定状态转

为夜间高不稳定能量叠加强垂直风切变的强对流有利条件。这种差异与日变化特征，本质上反映了春季气温回升、水汽输送变化背景下，大气从稳定到不稳定的动态演变规律。

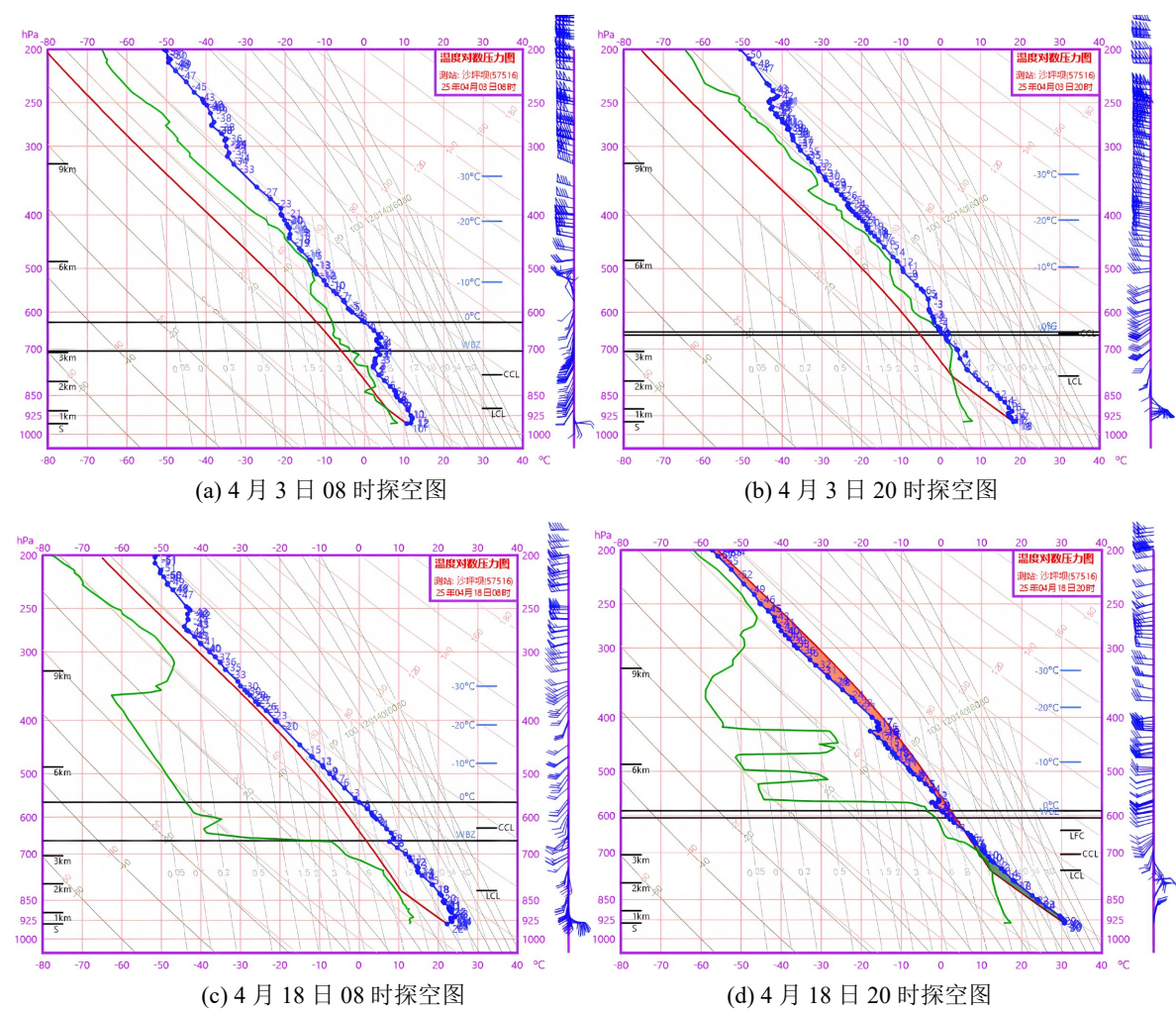


Figure 3. Temperature-logarithmic pressure diagram of Shapingba Station (diagrams a~b are for 08:00 and 12:00 Beijing Time on April 3rd, respectively; diagrams c~d are for 08:00 and 12:00 Beijing Time on April 18th, respectively)

图 3. 沙坪坝站温度对数压力图(图(a)~(b)分别为北京时 4 月 3 日 08 时和 12 时, 图(c)~(d)分别为 4 月 18 日 08 时和 12 时)

Table 2. Comparison of sounding indices at 08:00 and 20:00 BTC on April 13 and April 18, 2025 at Jiangbei Airport
表 2. 江北机场 2025 年 4 月 13 和 4 月 18 日 08 时和 20 时(北京时)各探空指数对比

物理量名称	4 月 3 日 08 时	4 月 3 日 20 时	4 月 18 日 08 时	4 月 18 日 20 时
K 指数	16.3	26.7	24.4	44.2
沙氏指数	8.96	6.76	-0.06	-4.13
对流稳定度指数	15.1	10.8	-12.9	-22.7
最大抬升指数	-0.2	-0.6	0.3	4.9
零度高度	4005	3630	4818	4489
-20 度层高度	7257	7289.3	7340.828	7823.952
整层比湿积分	2129.3	2597.8	2180.4	3675.3

续表

干暖盖指数	-31.3	-34.9	-36.5	792.9
对流凝结高度	779.7	656.4	627.9	554
抬升凝结高度	897.7	783.1	815.9	752.3
对流抑制有效位能	0	0	0	182.7
大风指数	5.6	29.9	41.6	33.5
风暴强度指数	264.7	264.2	281.2	44.4
抬升指数	3.8	3.9	-0.3	2.4
能量螺旋度	0	0	0	266.7
风暴相对螺旋度	-0.1	3	2	-2.9
垂直风切变	6.8	3.5	8.9	14.7

根据表 2 中 4 月 3 日和 18 日 08 时与 20 时的探空要素演变特征来看，两次过程均具备雷暴发生的基本前提：一是一定的水汽条件，整层比湿积分均在 2100 以上，且对流凝结高度低于 1000 米，近地面湿度条件利于凝结触发对流；二是抬升抑制较弱，最大抬升指数均接近 0，若存在地面辐合、地形抬升等外部条件均可触发对流发展，说明春季雷暴对流有效位能(CAPE)和对流抑制能(CIN)指数不能作为较好的参考指标。两次过程差异集中体现在大气不稳定性、对流能量、强天气潜力及垂直动力条件四个维度。在核心的不稳定性与对流能量上，4 月 3 日的 K 指数始终低于 30，属弱到中等不稳定，沙氏指数为正值，表明中层大气稳定，且对流有效位能 CAPE 始终为 0，无能量积累支撑强对流，呈现有不稳定但无能量的特征；4 月 18 日的 K 指数最终升至 44.2，沙氏指数转为负值，中层大气不稳定性显著增强，4 月 18 日 20 时次更出现高 CAPE 值和一定的对流抑制能(CIN)，形成强对流驱动条件。在强天气潜力方面，4 月 3 日的大风指数仅升至 29.9，风暴强度指数稳定在 264 左右，无短时大风、冰雹风险；4 月 18 日的大风指数达 41.6，虽 4 月 18 日 20 时风暴强度指数降至 44.4，但结合能量与不稳定性，短时大风、局地冰雹风险极高。垂直动力条件上，4 月 3 日维持弱垂直风切变，参加对流厚度为 0，不利于对流组织化；4 月 18 日 20 时次的垂直风切变更高，对流厚度达 367.1 米，风暴相对螺旋度升至 266.7，具备强对流旋转发展的动力基础。

综上，4 月 3 日雷雨过程整体偏弱，极端强对流风险偏低，但是需重点关注降水落区位置；4 月 18 日为强对流，不稳定性、能量与动力条件协同匹配更好，预报需重点聚焦强对流触发时间及强天气落区与强度。这一对比表明，雷暴强度的核心控制因子是不稳定性和对流能量的协同匹配，预报中需综合评估多参数关联性，而非依赖单一指标。但值得注意的是，春季雷暴的 CAPE 和 CIN 指数均较小，甚至可能为 0，说明不能作为预测春季雷暴是否发生的重要参考指标。

4. 模式与实况对比

4.1. 4 月 3 日夜间至 4 日凌晨过程

由图 4 和图 5 对比可知，EC 模式预报显示 3 日夜间凌晨 00 时前后，在 700~400 hPa 层存在较强的上升运动中心。而实况资料表明，实际的上升运动集中高度更低，主要在更贴近低层的区域，并且出现时间提前至 3 日 23 时。这说明模式在垂直运动的垂直分布和时间演变上存在一定偏差，对上升运动的触发时间和垂直伸展高度的模拟不够精准，可能是由于模式对边界层过程、局地热力触发等小尺度因素的刻画能力有限，导致上升运动的时空特征模拟与实况有出入。模式预报中低层配合有较强水汽条件，但实况显示模式预报的水汽条件比实际略差。这意味着模式在水汽的输送、辐合以及垂直分布的模拟上存在不足，可能是因为模式对水汽源地的水汽供应、低层水汽的湍流混合等过程的模拟不够准确，使得预报的水汽充沛程度与实况存在差异，进而影响了模拟效果。

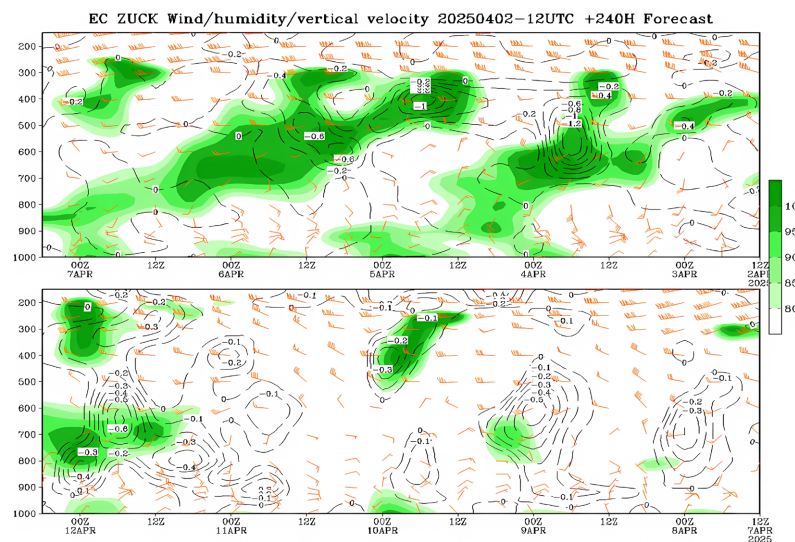


Figure 4. EC numerical model forecast time-height cross-section of single-station meteorological elements for the next 10 days (initial field at 20:00 BT on April 2. Among them, the dashed lines represent vertical velocity with the unit of Pa/s; the shaded areas represent relative humidity with the unit of %)

图 4. EC 数值模式预报单站未来 10 天气要素的时间 - 高度剖面图(4 月 2 日 20 时(北京时间)初始场。其中虚线为垂直速度, 单位: Pa/s; 阴影图为相对湿度, 单位%)

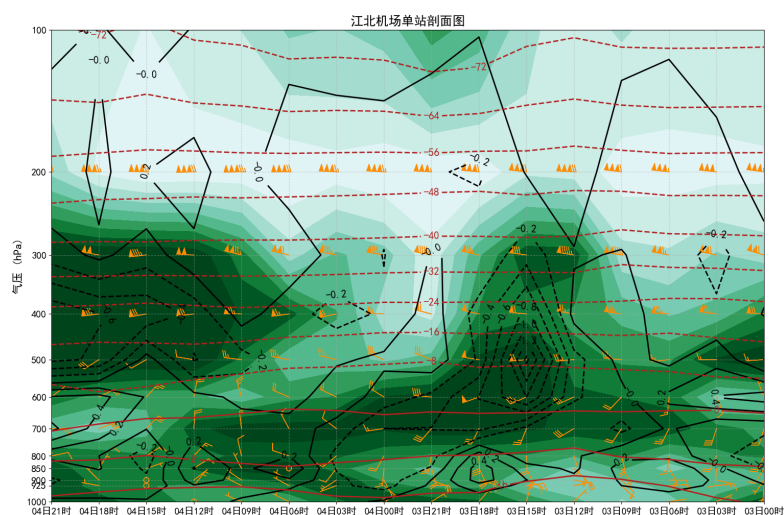


Figure 5. Time-height cross-section of Jiangbei Airport (106.5°E, 29.5°N) from 00:00 on April 3 to 21:00 on April 4 (UTC) (where black contour lines represent vertical upward motion with the unit of Pa/s; red solid lines represent positive temperature, red dashed lines represent negative temperature with the unit of °C; shaded areas represent relative humidity with the unit of %; wind field is represented by yellow wind barbs)

图 5. 4 月 3 日 00 时至 4 日 21 时(世界时)江北机场(106.5°E, 29.5°N)时间 - 高度剖面图(其中黑色等值线表垂直上升运动, 单位: Pa/s; 红色实线表示正温度, 红色虚线为负温度, 单位: °C; 阴影图表相对湿度, 单位: %; 风场用黄色风羽图表示)

4.2. 4 月 18 日夜至 19 日凌晨过程

如图 6 所示, EC 模式对 4 月 18 日夜以江北机场为核心的重庆区域对流过程存在明显漏报, 核心问题在于未能准确模拟出触发对流所需的动力与水汽关键条件, 整体预报与实况偏差显著。实况形势场

明确显示 4 月 18 日夜间存在足以支撑对流发展的垂直上升运动条件,这是对流启动与维持的核心动力基础。但从 EC 模式的时间-高度剖面图来看,对应时段内模式预报的垂直速度(虚线)未出现明显的正值上升运动中心,仅呈现极弱的垂直运动信号,完全未能捕捉到实况中关键的动力抬升条件。这一偏差可能源于两方面:一是模式对中低层辐合切变线的生成、加强过程模拟存在滞后或遗漏,而该系统正是触发低层空气抬升的直接动力源;二是对高空槽的动力强迫作用模拟不足。如图 7 所示,实况中 18 日夜间的上升运动区域伴随有相应的湿区支撑,但 EC 模式预报的相对湿度(阴影区)在对应时段、对应层次未呈现明显的高湿信号,水汽条件的模拟结果与实况差异较大。造成这一偏差的原因可能包括:模式低估了低层偏南气流的水汽输送强度,导致水汽通量累积不足;同时对边界层内水汽的辐合过程及垂直输送刻画不够精准,而边界层水汽汇聚正是对流低层湿度条件的重要来源,模式对小尺度边界层过程的分辨率限制,进一步加剧了湿度分布的模拟失真。综上,EC 模式因在动力抬升与水汽配置两个核心要素上的双重预报偏差,未能识别 4 月 18 日夜间的对流潜力,这也反映出当前数值模式在捕捉中小尺度强对流时,对关键系统演变及要素协同作用的模拟能力仍有较大提升空间。

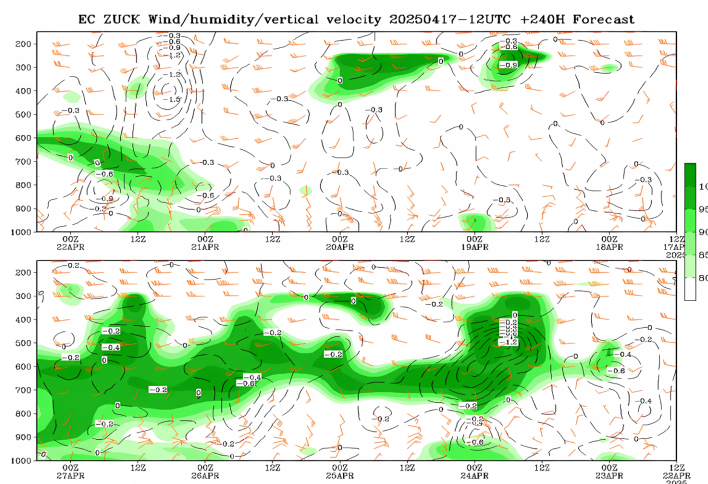


Figure 6. Same as Figure 4, with the initial field at 20:00 (Beijing Time) on April 17th
图 6. 同图 4, 初始场为 4 月 17 日 20 时(北京时)

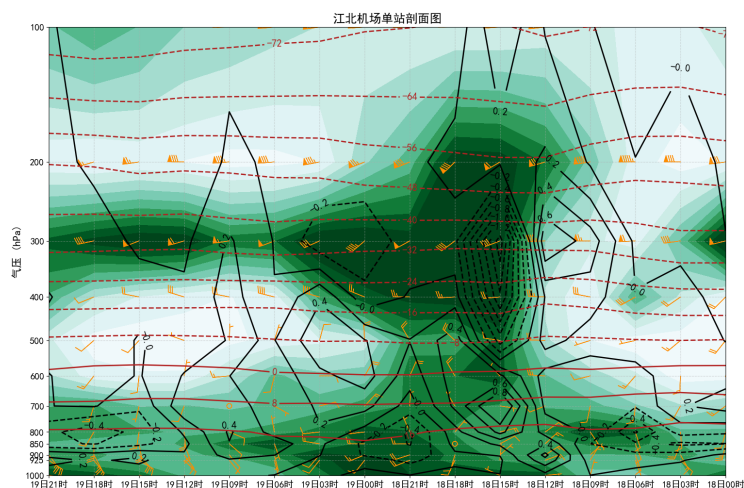


Figure 7. Same as Figure 5, with the time from 00:00 on April 18th to 21:00 on April 19th (UTC)
图 7. 同图 5, 时间为 4 月 18 日 00 时至 19 日 21 时(世界时)

5. 总结

本文从环流背景、探空资料及模式预报与实况对比三个维度,深入剖析了江北机场 2025 年 4 月两次春季雷暴过程的天气特征,主要结论如下:

1) 环流形势是决定两次雷暴强度不同的关键。4 月 3 日和 18 日的雷暴,虽在 20 时后都有高空槽和中低层低值系统,但 4 月 3 日高空槽离机场远、中低层系统松散,抬升力弱,形成偏弱的强对流天气;4 月 18 日高空槽更明显、中低层辐合切变线清晰,高低层系统协同提供强抬升力,形成强对流。探空数据也显示,4 月 18 日的不稳定能量和垂直风切变更强,而两次的湿度条件相近,不是强度差异的主因。两次春季雷暴过程体现出,整体湿度条件表现一般,且传统雷暴预报指标如对流有效位能(CAPE)和对流抑制能(CIN)的指示性较弱,不应作为春季雷暴的绝对判定依据。还应结合环流形势进一步分析。

2) EC 模式对两次雷暴的预报表现差别大。对 4 月 3 日弱对流,模式能抓住整体形势,预报的上升运动和水汽条件与实况基本相符,仅在上升运动的高度、时间及水汽细节上有小幅偏差;对 4 月 18 日强对流则完全漏报,未模拟出触发对流的上升运动和水汽条件,主要是因为模式难以准确刻画中低层切变线生成、高空槽动力作用等中小尺度过程。因此,EC 模式对大尺度背景驱动的强对流预报效果较好,但对依赖中小尺度系统触发的强对流,其在动力与水汽要素协同模拟方面的局限性显著。

参考文献

- [1] 陈梅,文小航,白爱娟,宋敏红. 昆明-万象航线一次强对流天气过程高分辨率数值模拟及影响分析[J]. 高原气象, 2025, 44(2): 507-520.
- [2] 黄洲升,田齐齐,唐卫贞. 强对流天气下航路多目标改航规划[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(4): 1648-1657.
- [3] 杨波,王园香,蔡雪薇. 我国华南江南春季雷暴气候特征分析[J]. 热带气象学报, 2019, 35(4): 470-479.
- [4] 刘开宇,龚娅,高勇,赵重安. 贵阳机场春季雷暴发生环境和条件的合成分析[J]. 贵州气象, 2006, 30(5): 3-6.
- [5] 盛杰,毛冬艳,沈新勇,蓝渝,何立富. 我国春季冷锋后的高架雷暴特征分析[J]. 气象, 2014, 40(9): 1058-1065.
- [6] 冯政林,李颜宏. 重庆江北机场雷暴气候特征分析[J]. 科技传播, 2012, 4(11): 86-87.