

重庆江北机场一次强对流天气背景下 雨雾成因探讨

吴胜男, 丁魅理, 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6月3日; 录用日期: 2025年7月3日; 发布日期: 2025年7月11日

摘 要

本文基于重庆江北机场气象自动观测资料、欧洲中心ERA5再分析资料、风廓线雷达探空资料及MICAPS常规气象资料, 采用对比分析方法讨论了2019年4月19日重庆江北机场一次强对流背景下雨雾天气产生的成因。分析表明, 强降水引起的雨雾天气应当同时满足强降水和大雾产生的两种条件才会发生。此次强降水伴雨雾过程主要是由于冷锋过境的冷空气触发强降水后, 锋面又有所西伸维持导致本场在高湿状态下而形成的。特征可概括为以下几点: 1) 从雷达回波的移动和减弱来看, 强对流条件下的雨雾多发生在回波移动缓慢, 回波强度有所减弱的时段。2) 冷锋过境的冷空气触发强降水后, 锋面又西伸维持。3) 随着降水的持续, 本场相对湿度达到97%以上且维持3小时以上。4) 本场的气压、风速变化保持相对平稳, 过程气压浮动不超过2 hPa, 10 Min平均风速稳定在2~3 m/s左右。

关键词

雨雾, 锋面, 强降水, 对比分析

Analysis of the Causes of Rain Fog under the Background of a Severe Convective Weather Event at Chongqing Jiangbei Airport

Shengnan Wu, Meili Ding, Li Gu

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

Received: Jun. 3rd, 2025; accepted: Jul. 3rd, 2025; published: Jul. 11th, 2025

Abstract

Based on the automatic meteorological observation data of Chongqing Jiangbei Airport, the ERA5

文章引用: 吴胜男, 丁魅理, 谷粒. 重庆江北机场一次强对流天气背景下雨雾成因探讨[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(4): 671-680. DOI: 10.12677/ccrl.2025.144067

reanalysis data from the European Centre, the wind profiler radar sounding data, and the conventional meteorological data from MICAPS, this paper uses the comparative analysis method to discuss the causes of the rain fog weather under the background of a severe convective event at Chongqing Jiangbei Airport on April 19, 2019. The analysis shows that the rain fog weather accompanied by heavy precipitation should meet the conditions for both heavy precipitation and fog formation to occur. This process of heavy precipitation accompanied by rain fog was mainly due to the fact that after the cold air triggered by the cold front passed through, the frontal surface further extended westward and maintained, causing the airport to be in a high-humidity state. The characteristics can be summarized as follows: 1) Judging from the movement and weakening of the radar echo, the rain fog under severe convective conditions mostly occurs during the period when the echo moves slowly and the echo intensity weakens. 2) After the cold air triggered by the cold front passed through, heavy precipitation was triggered, and then the frontal surface further extended westward and maintained. 3) As the precipitation continued, the relative humidity at the airport reached above 97% and remained for more than 3 hours. 4) The changes in air pressure and wind speed at the airport remained relatively stable, with the air pressure fluctuation not exceeding 2 hPa during the process, and the 10-minute average wind speed stably at about 2~3 m/s.

Keywords

Rain Fog, Frontal Surface, Heavy Precipitation, Comparative 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

大雾是一种比较常见的灾害性天气,对交通行业安全有较大影响。由大雾造成的大范围低能见度天气会导致航班取消,造成大量旅客滞留,严重影响航班的飞行安全及正常效率。因此,对于大雾天气的预报一直是冬季航空气象服务保障的重点和难点问题。我国雾的研究具有明显的地域特点,主要针对北方和西南地区的辐射雾、沿海的海雾展开[1]-[5]。而位于西南地区的重庆因其独特的地形地貌,长年多雾,有“雾都”之称。前人已对当地大雾天气做了一些基础研究[6][7]。

根据大雾天气的生成原因,可分为辐射雾、平流雾、雨雾、蒸发雾等,它们都有各自的活动规律[8]。其中雨雾天气是雨滴下落到云层以下的干空气中后,水滴蒸发为水汽,水汽冷却到露点温度后发生凝结而形成的雾。通常认为,雨雾指雨和雾共存的大雾称为雨雾,此时地面能见度小于 1 km。雨雾出现时的天气背景大概有以下两种,一是短时强降水,二是持续的弱降水[9]。对流性强降水,短时间内雨强达到高值,使能见度急速降低。持续性弱降水容易造成较大范围、长时间的低能见度天气,其出现的概率、持续时间、影响范围明显高于对流性强降雨。据刘德[10]等研究表明,重庆的雨雾多发生在亚洲地区经向环流相对较弱的背景下,多伴随连续小雨或小毛毛雨的天气。因此,对流性强降水和雨雾天气在重庆同时出现的情况较为罕见。

2019 年 4 月 19 日,重庆江北机场在 19 日 12:47~20 日 06:26 (北京时间)期间出现了间歇性强对流天气过程,同时在 19 日 16:30~17:25 出现了近 1 个小时的雨雾天气过程,此次强对流天气过程持续时间较长,期间过程总降水量达到 36.7 mm,共计造成 25 架次的返改航备降。由于此个例较为罕见,为深入分析此次强对流背景下雨雾天气产生的成因,本文选取了另外 3 例(北京时间 2018 年 4 月 5 日凌晨 00~10 时、2018 年 4 月 13 日凌晨 01~07 时以及 2019 年 4 月 28 日凌晨)相似环流背景下但没有伴随雨雾天气的强对流天气过程进行对比分析,以加强对江北机场强对流天气背景下雨雾成因分析,为后续该类天气预报和气象服务提供更可靠的科学依据。

2. 资料和方法

ERA5 是 ECMWF (欧洲中期天气预报中心)对 1950 年 1 月至今全球气候的第五代大气再分析数据集。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。其余资料来自重庆江北机场自观采集数据以及本场雷达数据,其中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)。为了更准确地了解江北机场 4 月 19 日雨雾天气特征,本文重点使用对比分析、中尺度分析以及结合数理统计、趋势分析等方法,分析个例的环流背景及气象要素特征。

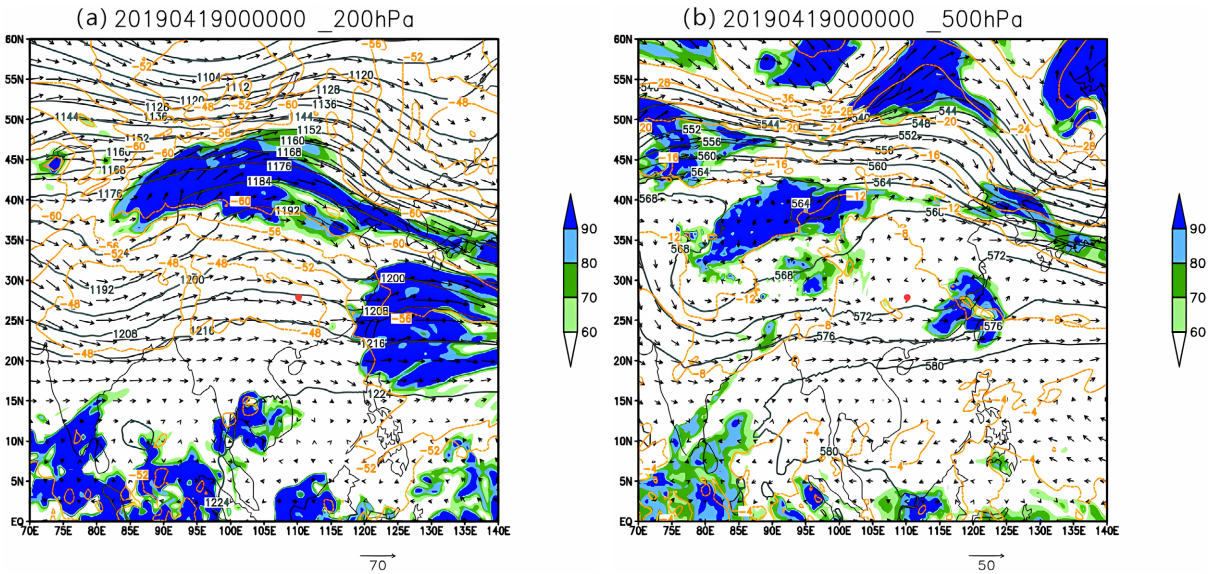
3. 过程回顾

3.1. 实况回顾

根据 4 月 19 日 08 时的实况资料来看(图 1), 重庆区域地面至 500 hPa 均为暖气团控制, 850 hPa 有一低涡维持, 700 hPa 与 500 hPa 均为西南气流但相对湿度一般, 200 hPa 为一致的西北气流控制, 风速 ≥ 22 m/s。700 hPa 与 500 hPa 温差达 18°C , 850 hPa 与 500 hPa 温差达 28°C 。同时, 重庆区域的东北面有一锋面正自西北向东南移动, 如果此锋面后续有西伸摆动之势, 将利于重庆区域地面的暖湿气团强迫抬升。该形势上为强对流天气的发展奠定了基础。

进一步对 19 日 08 时的温度对数压力图 T-lnp 图(图 2)进行分析, 可得如下特征: (1) 由地面到 500 hPa 区间内, 温度露点差小, 500 hPa 以上则温度露点差较大, 呈现出“上干下湿”的不稳定层结; (2) 垂直方向上, 风向随高度顺转, 有暖平流输送, 气层不稳定; (3) CAPE 值 134, K 指数 40.8, 沙氏指数 -3.25 符合重庆 4 月份发生对流的能量条件; (4) 从地面-900 hPa 垂直降温率约为 0, 有微弱的逆温层存在, 这也为下午的大雾奠定了基础。

图 3 给出 19 日夜间 20 时态势图, 对比 08 时实况来看, 中低层的辐合切变系统有所东移, 地面锋面出现了西伸维持的状态, 同时在重庆北部, 西安至蒙古地区出现了锢囚锋, 从而导致影响重庆的冷锋移动缓慢, 在触发了雷雨过程后没有快速东移。这一特殊的环流形势, 一方面有利于造成雷雨天气的发生和维持, 另一方面促成雨雾天气产生。据韩余[11]等研究表明, 重庆雨雾发生时, 地面冷高压中心位于我国北方地区, 有弱冷空气从重庆东北面渗透, 使得重庆地区降水后近地层水汽得到充分混合, 从而形成雨雾, 这一结论也比较符合图 3 所示的天气形势。



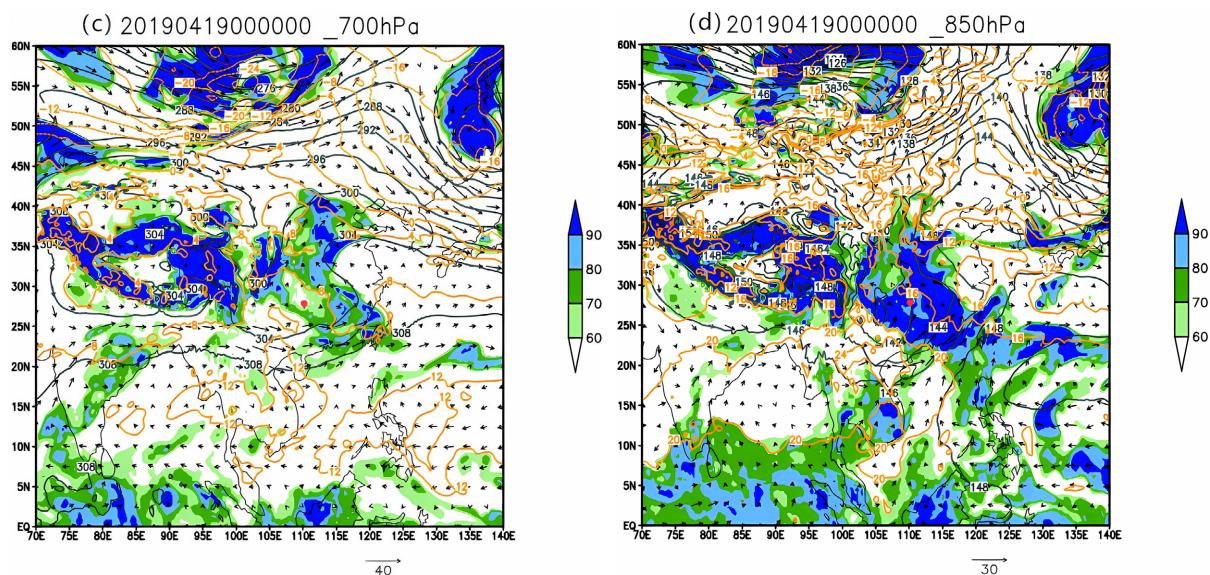


Figure 1. Synoptic Circulation fields at (a) 200 hPa, (b) 500 hPa, (c) 700 hPa and (d) 850 hPa at 08:00 on April 19 (Isopleths: Geopotential height, Unit: gpm; Yellow lines: Temperature, Unit: $^{\circ}\text{C}$; Shaded areas: Relative humidity, Unit: %; Vectors: Wind field, Unit: m/s; Red dot: Chongqing Jiangbei Airport)

图 1. 4 月 19 日 08 时 (a) 200 hPa、(b) 500 hPa、(c) 700 hPa 与 (d) 850 hPa 环流场 (等值线: 位势高度, 单位: gpm; 黄线: 温度, 单位: $^{\circ}\text{C}$; 阴影图: 相对湿度, 单位: %; 矢量: 风场, 单位 m/s; 红点: 重庆江北机场)

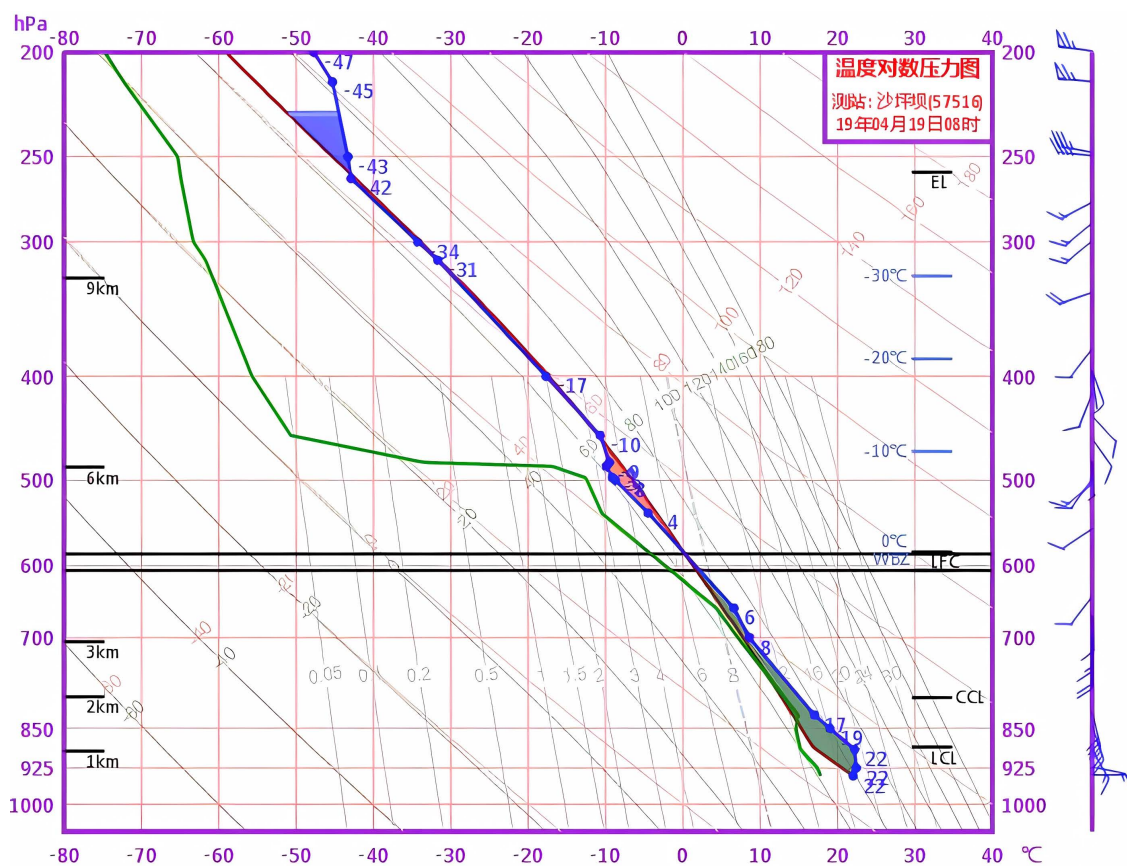


Figure 2. Temperature-logarithmic pressure chart at Shapingba Station, Chongqing at 08:00 on April 19

图 2. 4 月 19 日 08 时重庆沙坪坝站点温度对数压力图

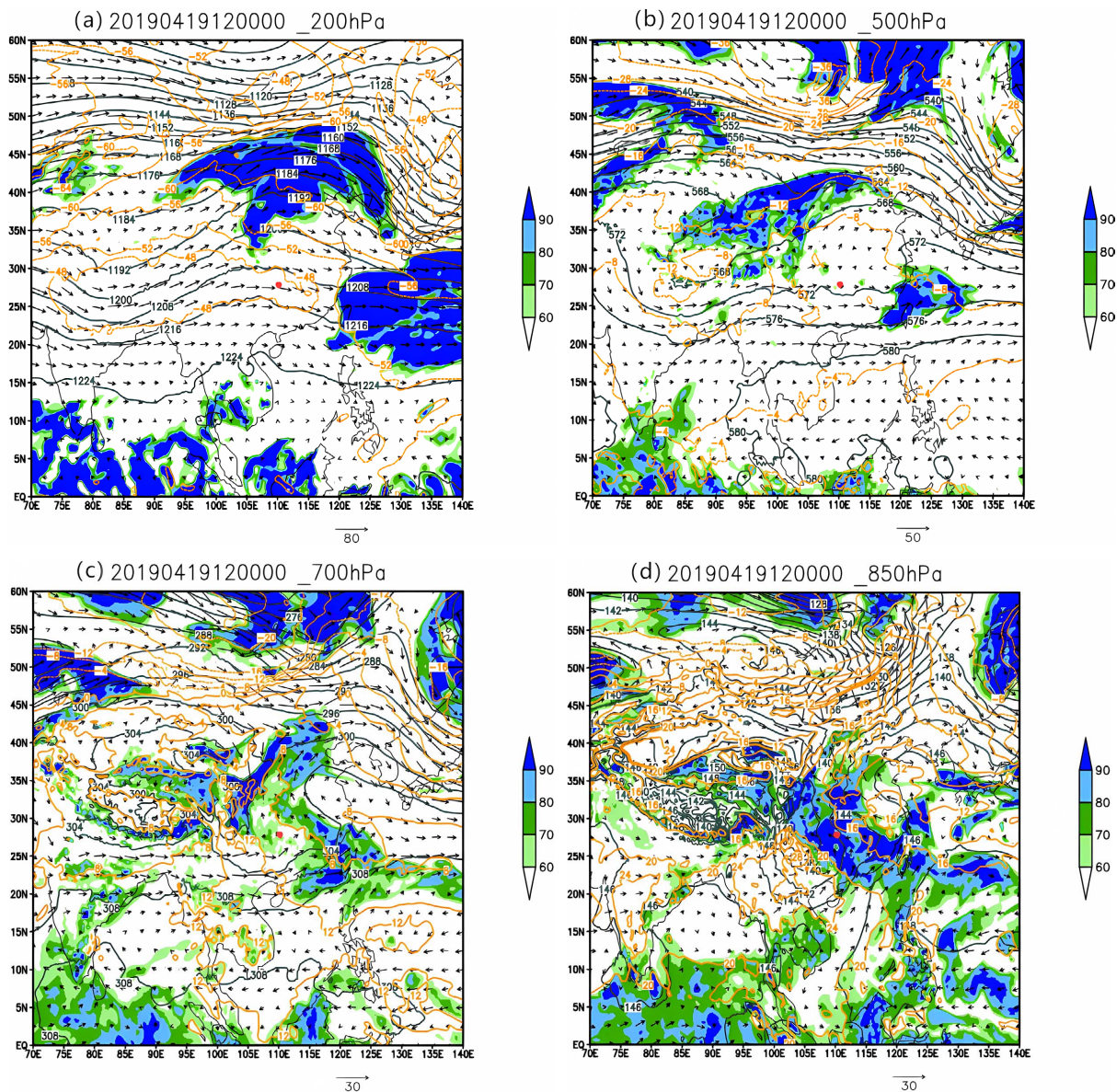


Figure 3. Synoptic Circulation fields at (a) 200 hPa, (b) 500 hPa, (c) 700 hPa and (d) 850 hPa at 20:00 on April 19 (Isopleths: Geopotential height, Unit: gpm; Yellow lines: Temperature, Unit: $^{\circ}\text{C}$; Shaded areas: Relative humidity, Unit: %; Vectors: Wind field, Unit: m/s; Red dot: Chongqing Jiangbei Airport)

图 3. 4月19日20时(a) 200 hPa、(b) 500 hPa、(c) 700 hPa 与(d) 850 hPa 环流场(等值线: 位势高度, 单位: gpm; 黄线: 温度, 单位: $^{\circ}\text{C}$; 阴影图: 相对湿度, 单位: %; 矢量: 风场, 单位 m/s; 红点: 重庆江北机场)

3.2. 探空资料分析

如图 4 所示, 在 13 时前后江北机场已被雷达回波覆盖并产生雷雨天气。随着时间推移, 雷达回波自西南向东北呈现缓慢移动之势并且主要以原地生消为主。16 时后, 覆盖本场的雷达回波顶高及反射率因子均有所减弱, 主要以 25~30 分贝回波强度为主, 减弱时段与本场起雾时段比较吻合。从雷达回波的移动和减弱来看, 强对流条件下的雨雾多发生在回波移动缓慢, 回波强度有所减弱的时段。

根据图 5 风廓线雷达资料来看, 19 日午后 13~16 时本场风随高度顺转, 有较强暖平流, 而在 16~17 时, 高空风开始变为随高度逆转, 有冷平流。同时在 17 时, 600 hPa 高度有小尺度低涡过境(图 5 中红圈

所示)。结合前期形势场分析来看,当锋面开始控制本场时,先有暖气团爬升,并在达到一定高度后形成下冷上暖的层结状态,这是此次雨雾天气的特点之一。

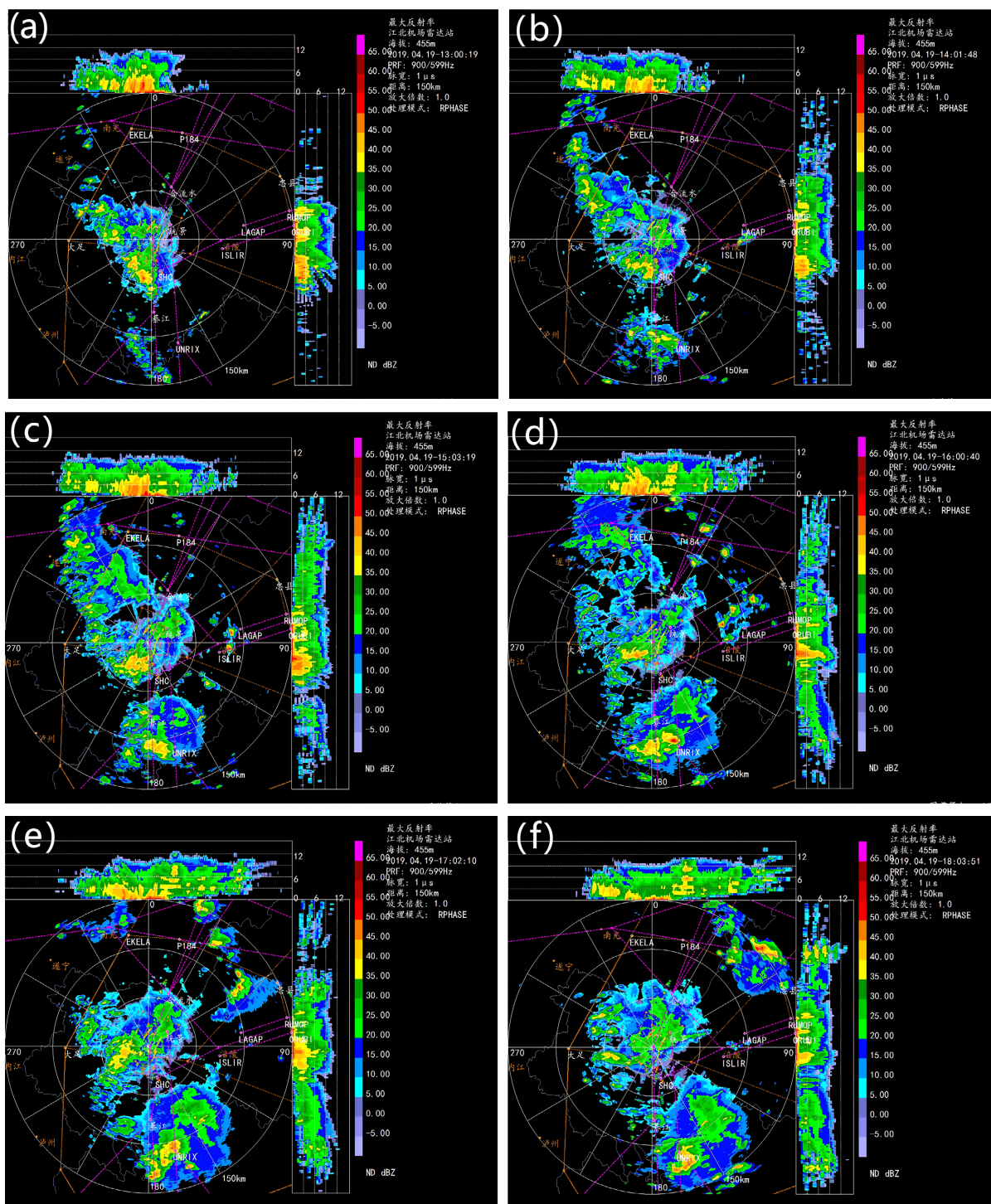


Figure 4. Maximum radar reflectivity charts from 13:00 to 18:00 on April 19, 2023 (Panels (a)~(f) correspond to radar images at 13:00, 14:01, 15:03, 16:00, 17:02, and 18:03, respectively)

图 4. 2023 年 4 月 19 日下午 13~18 时雷达最强反射率图(图中(a)~(f)分别为 13:00、14:01、15:03、16:00、17:02、18:03 的雷达图)

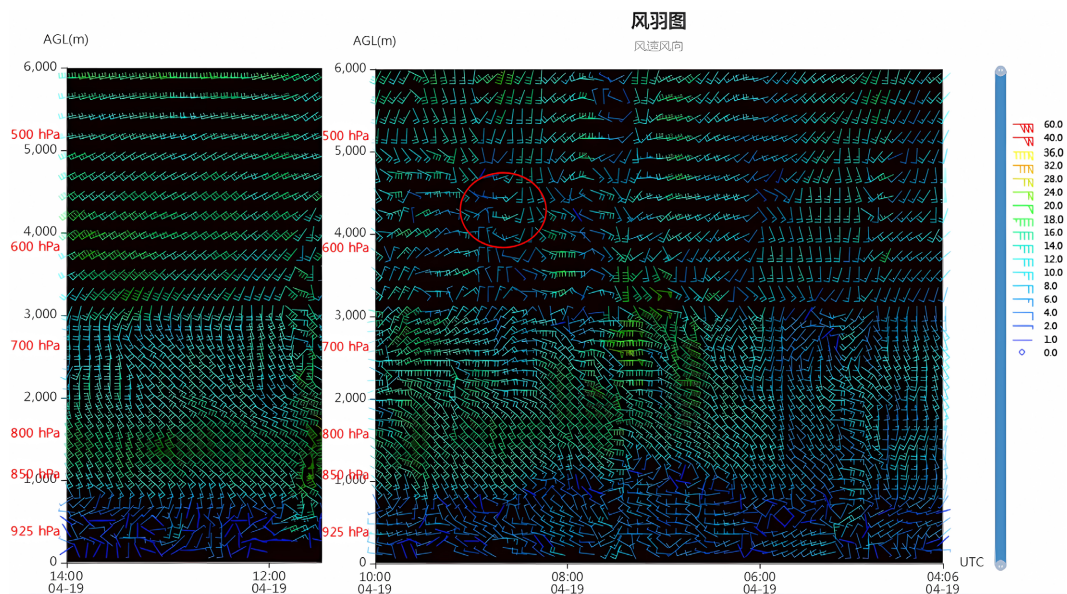


Figure 5. Time-series wind profiler data from 13:00 to 16:00 on April 19, 2023
图 5. 2023 年 4 月 19 日 13~16 时风廓线时序图

4. 对比分析

4.1. 环流形势对比

为进一步深入分析此次强对流背景下雨雾天气产生的成因，本节选取了另外 3 个对比个例(北京时间 2018 年 4 月 5 日凌晨 00~10 时、2018 年 4 月 13 日凌晨 01~07 时、2019 年 4 月 28 日凌晨)相似环流背景下但没有伴随雨雾天气的强对流天气过程进行对比分析。由于对比个例的雷雨天气过程均发生在当日凌晨，所以选用 20 时资料来进行对比分析。在分析中发现，3 个对比个例均有相似的环流背景，根据实况资料绘制的中尺度分析如图 6 所示。从该图可以看出这 3 次天气过程的环流背景总体呈两高一低型，新疆地区、华东 - 东北地区为明显冷高压，云贵川渝均为较强热低压，中高空有阶梯槽特征，冷锋过境较快。

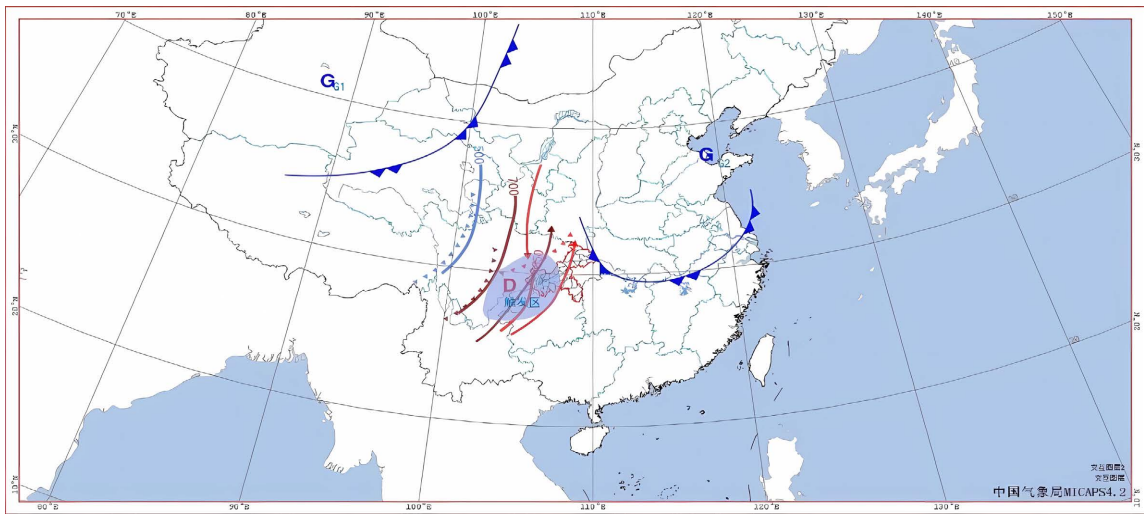


Figure 6. Composite mesoscale analysis chart of real-time data at 20:00 for three comparative cases (Average positions of each case)
图 6. 三个对比个例 20 时实况资料的中尺度分析综合图(各系统平均位置)

图 6 中一些物理量指标范围为:

冷空气相对强度: G1 为 1037 至 1050 hPa、G2 为 1022.5 至 1027.5 hPa, D 为 990 至 1002.5 hPa;

气压梯度: G1-D 为 35 至 50 hPa, G2-D 为 25~32.5 hPa;

西南气流强度: 700 hPa ≥ 10 m/s, 850 hPa ≥ 8 m/s;

温度差(层结不稳定): D700 $\geq 18^{\circ}\text{C}$, D850 $\geq 28^{\circ}\text{C}$ 。

如果就单纯分析强对流的天气形势来看, 这三次对比个例的天气过程与 2019 年 4 月 19 日有较多相似之处, 但最大的区别还在于锋面的移动和分布情况。三个对比个例的锋面移动较为迅速, 没有出现西伸维持的情况, 而且雷暴持续时间相对较短, 期间也没有低能见度天气出现。由此可见, 抓住锋面的移动和维持趋势对判断雷暴天气期间是否会伴随雨雾天气有着较为重要的作用。

4.2. 气象要素对比

在经过对上述案例的形势分析后, 下面将各案例在本场天气发生前后的自动观测系统的整点逐小时 10 min 平均风速、本站气压、相对湿度等要素进行进一步的分析。如图 7(a)所示, 2019 年 4 月 19 日天气过程整体的风速脉动较小, 甚至在雷雨发生期间(12~19 时)风速也保持在 2~3 m/s 之间波动, 而其余三次天气过程则整体风速脉动大且雷雨时段(00~08 时)的风速也明显大于该过程。因此, 较小的风速条件对雨雾的形成有着较为有利的作用。如图 7(b)所示, 2019 年 4 月 19 日天气过程过程发生的本站气压在雷雨发生前后波动小, 雷雨发生后仅有 2 hPa 以下的降压; 而其余 3 次过程则变化规律相似, 雷雨发生时气压降低, 随着天气过程的结束气压迅速升高, 升高幅度可达 10 hPa 以上, 波动较大。同时, 2019 年 4 月 19 日的过程整体气压值都较其余 3 次过程偏低, 近地层相对静稳。

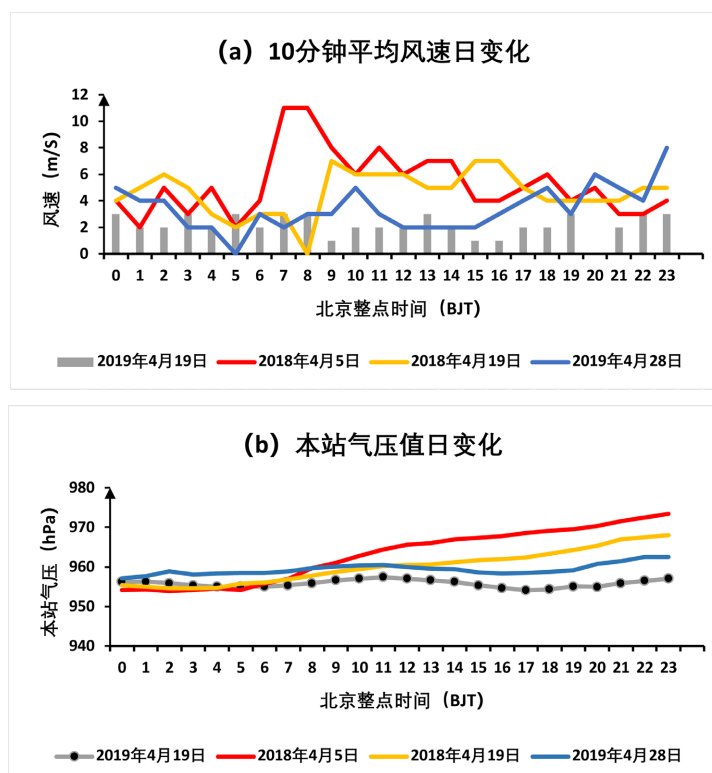


Figure 7. Diurnal variations of 10-minute average (a) Wind speed and (b) Air pressure during the weather process on April 19, 2019, and three comparative cases

图 7. 2019 年 4 月 19 日天气过程与三次对比个例的 10 分钟(a) 风速日变化和(b) 气压日变化

如图 8 所示, 4 次过程均有相似的特点, 随着雷雨的开始, 相对湿度均显著升高且最大湿度均能达到 90% 以上(详见图 8 中红框所示)。但从最大湿度的持续时间及绝对值来看, 2019 年 4 月 19 日天气过程最大湿度达到了 97% 且持续时间有 7 个小时以上, 有利于雨雾的形成。

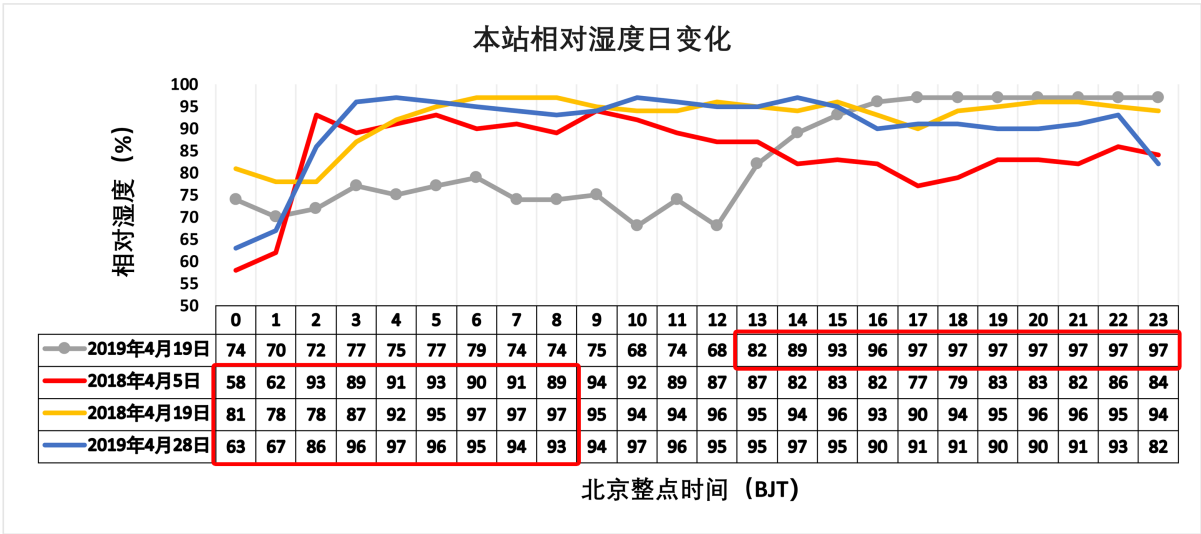


Figure 8. Diurnal variations of relative humidity during the weather process on April 19, 2019, and three comparative cases (The red-boxed values in the figure represent the relative humidity (RH) values during the thunderstorm period of this process)
图 8. 2019 年 4 月 19 日天气过程与三次对比个例相对湿度日变化(图中红框为该过程雷雨时段 RH 值)

如图 9 所示, 随着午后 12 时雷雨过程的开始, 个例 1 的相对湿度显著升高, 而本站气压和能见度则几乎同步开始下降, 比较巧合的是 17 时出现的最低能见度值恰好对应最低本站气压, 说明此次强降水伴雨雾过程的主导能见度与本站气压呈正相关而与相对湿度呈负相关。

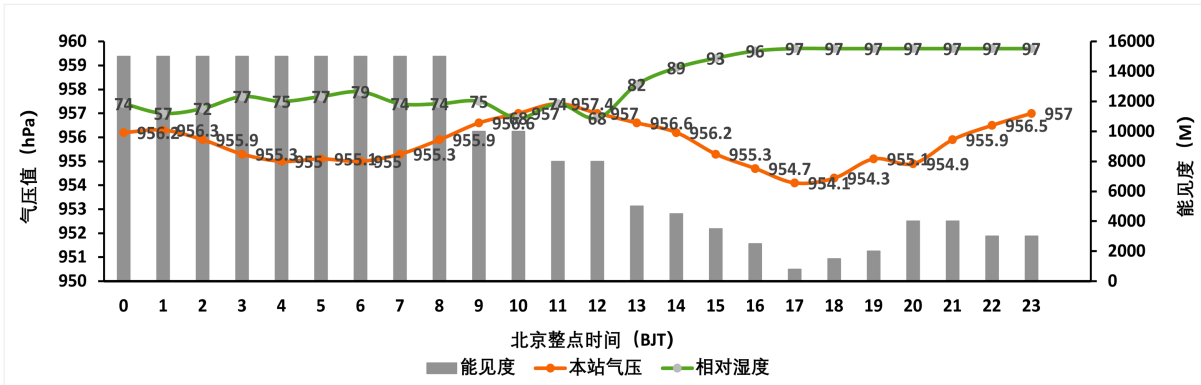


Figure 9. Twenty-four hours variation charts of visibility, air pressure, and relative humidity at the local station during the weather process on April 19, 2019
图 9. 2019 年 4 月 19 日天气过程本站能见度、气压以及相对湿度 24 H 变化图

5. 总结

本文主要采用对比分析的方法讨论了 2019 年 4 月 19 日重庆江北机场发生的一起强对流背景下雨雾天气产生的成因。综上分析可知, 强降水引起的雨雾天气应当同时满足强降水和大雾产生的两种条件才会发生。与单一的纯强降水天气相比, 虽然形势、要素、对流指标等存在一些相似的地方, 但仍有一些

细微的差别，特别是要注意一些主要影响系统例如锋面等的变化情况，它们的发展及移动规律会导致不同的天气发生。而江北机场此次强降水发生时是否伴有雨雾与锋面的位置和移动密切相关，整体特征可概括为以下几点：

- 1) 从雷达回波的移动和减弱来看，强对流条件下的雨雾多发生在回波移动缓慢，回波强度有所减弱的时段。
- 2) 冷锋过境的冷空气触发强降水后，锋面又西伸维持。
- 3) 随着降水的持续，本场相对湿度达到 97% 以上且维持 3 小时以上。
- 4) 本场的气压、风速变化保持相对平稳，过程气压浮动不超过 2 hPa，10 min 平均风速稳定在 2~3 m/s 左右。

参考文献

- [1] 朱智慧, 郑运霞, 刘飞, 等. 上海沿海海雾分类及其时空特征分析[J]. 气象, 2024, 50(12): 1509-1518.
- [2] 赵玉广, 李江波, 李青春. 华北平原 3 次持续性大雾过程的特征及成因分析[J]. 气象, 2015, 41(4): 427-437.
- [3] 钟加杰, 刘峰. 广州白云机场一次大雾伴随高架雷暴过程分析[J]. 气象研究与应用, 2015, 36(S1): 168-169.
- [4] 张序, 黄昕月, 兰梓洲, 等. 从极端天气事件演变规律看双流机场低能见度运行安全[J]. 成都信息工程大学学报, 2018, 33(4): 470-476.
- [5] 梁卫, 吴俊杰, 邹海波. 南昌昌北机场雾的分类特征与统计分析[J]. 气象, 2021, 47(10): 1255-1265.
- [6] 江玉华, 王强, 李子华. 重庆城区浓雾的基本特征[J]. 气象科技, 2004, 32(6): 450-455.
- [7] 马学款, 蔡芎宁, 杨贵名, 等. 重庆市区雾的天气特征分析及预报方法研究[J]. 气候与环境研究, 2007, 12(6): 795-803.
- [8] 苟杨, 周智晖, 廖波, 等. 近 30a 黔南地区辐射雾和雨雾时空分布特征[J]. 中低纬山地气象, 2023, 47(3): 73-79.
- [9] 陈英英, 成丹, 谭静, 等. 湖北省雨雾天气特征及影响因素研究[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(18): 61-66.
- [10] 刘德, 周国兵, 向波, 等. 重庆雾的天气成因[J]. 气象科技, 2004, 32(6): 461-466.
- [11] 韩余, 刘德, 王欢, 等. 重庆雾气候特征及天气成因分析[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(6): 116-122.