

# 贵阳机场两次不同成因的强降水天气对比分析

罗浩

中国民用航空西南地区空中交通管理局贵州分局, 贵州 贵阳

收稿日期: 2025年4月25日; 录用日期: 2025年5月23日; 发布日期: 2025年5月30日

## 摘要

本文基于贵阳机场分钟级自动观测数据、ERA5再分析资料及多普勒雷达等数据, 对2014年7月16日(天气尺度系统主导)和2021年5月13日(中尺度对流系统主导)两次强降水事件的成因及特征进行对比分析。研究发现: (1) 天气尺度强降水受高空槽、低涡系统、低空急流共同作用, 表现为大范围持续性降水, 累计雨量达164.4 mm, 但极端短时雨强较弱; (2) 中尺度强降水由暖平流强迫、地面辐合线及中层弱冷平流共同触发, 导致局地短时出现极端强降雨(最大分钟雨量2 mm, 累计雨量超过90 mm)并伴随冰雹; (3) 两类降水在环流配置、水汽来源、动力条件及对流触发机制上差异显著: 天气尺度降水依赖大尺度动力抬升, 中尺度降水则受局地热力与边界层辐合驱动。研究揭示了高原复杂地形下不同尺度天气系统的降水机制差异, 为航空气象精细化预报及灾害预警提供了科学依据。

## 关键词

暴雨, 短时强降水, 贵阳机场

# Comparison of Two Different Causes of Heavy Precipitation Weather at Guiyang Airport

Hao Luo

Guizhou Branch of Southwest Regional Air Traffic Administration of Civil Aviation of China, Guiyang Guizhou

Received: Apr. 25<sup>th</sup>, 2025; accepted: May 23<sup>rd</sup>, 2025; published: May 30<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Based on minute-level automatic observation data, ERA5 reanalysis data, and Doppler radar data from Guiyang Airport, this paper compares and analyzes the causes and characteristics of two heavy precipitation events on July 16, 2014 (dominated by a weather-scale system) and May 13, 2021 (dominated by a mesoscale convective system). The study finds: (1) Weather-scale heavy precipitation is caused by the joint action of upper-level troughs, low-vortex systems, and low-level jet

streams, resulting in large-scale and persistent precipitation with a cumulative rainfall of 164.4 mm, but weak extreme short-term rainfall intensity; (2) Mesoscale heavy precipitation is triggered by the combined effects of warm advection, surface convergence lines, and weak cold advection in the middle layer, leading to local short-term extreme heavy rainfall (maximum minute rainfall of 2 mm, cumulative rainfall exceeding 90 mm) accompanied by hail; (3) The two types of precipitation differ significantly in terms of circulation patterns, moisture sources, dynamic conditions, and convection triggering mechanisms: weather-scale precipitation relies on large-scale dynamic lifting, while mesoscale precipitation is driven by local thermal and boundary layer convergence. The study reveals the differences in precipitation mechanisms of different scale weather systems in complex terrain, providing a scientific basis for fine-scale forecasting of aviation meteorology and disaster warning.

## Keywords

Heavy Rain, Short-Term Heavy Precipitation, Guiyang Airport

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

强降水天气是威胁航空飞行安全的重要气象灾害之一，其突发性和局地性对航班起降、跑道运行及空中交通管制均可能造成严重影响。已有研究表明，强降水天气的形成与热力不稳定、动力抬升和水汽输送密切相关。许爱华等将强对流天气归纳为冷平流强迫、暖平流强迫及斜压锋生等五类机制[1]，蔡雪薇等通过对不同类型对流天气分析指出，环境热力和水汽的差异为形成不同的强对流天气提供了前提条件[2]；符式红等对海南两次相似背景下的强对流天气研究分析表明，水汽含量及其垂直分布、环境温度直减率和 0~3 km 水平风的垂直切变是海南岛强对流天气的预报关键因子[3]；其他一些学者对全国范围内的强降水天气进行了大量相关分析[4]-[10]。

贵阳龙洞堡机场位于云贵高原东麓，受复杂地形与多尺度天气系统共同作用，强降水频发且成因多样，其中暖湿气流与冷空气交汇、低空急流触发及中尺度对流系统发展等机制尤为显著[11]。近年来，随着全球气候变化与极端天气事件增多，贵阳机场强降水的时空分布特征及物理机制呈现新特点，亟需通过对比分析揭示其差异性成因，为精细化预报提供理论支撑[12] [13]。

贵阳机场的强降水常表现为两类典型模式：一是天气尺度强迫造成大范围持续性降水，二是中尺度对流系统导致的短时强降水，两类过程在环流配置、水汽来源及能量条件上差异显著，本文选取贵阳机场两次典型强降水过程(2014年7月16日和2021年5月13日)，结合贵阳机场分钟级自动观测资料、高低空常规观测资料、ERA5再分析资料等，从环流形势、水汽来源、动力条件及能量演变等方面进行对比分析，研究旨在揭示不同天气尺度背景下强降水的触发机制与维持条件，深化对高原机场复杂天气的认识，并为航空气象服务的精准化提供科学依据。

## 2. 资料和方法

本文所选用的资料包括：(1) 贵阳机场自动观测系统(AWOS)逐分钟观测数据；(2) 地面及高空常规观测资料；(3) ERA5逐小时高空再分析数据( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ )；(4) ERA5逐小时地面 Land再分析数据( $0.1^\circ \times$

0.1°); (5) 贵阳机场双偏振多普勒雷达数据。本文所涉及的时间均采用北京时。

另外, 本文在筛选降水数据时通过 AWOS 分钟降雨数据将雨强大小划分为三个等级: 中雨: 分钟降雨量大于等于 0.2 mm; 大雨: 分钟降雨量大于等于 0.4 mm, 极端强降雨: 分钟降雨量大于等于 0.8 mm, 以上三个等级的降水数据, 均须满足持续时间大于等于 5 分钟(min)的设定, 以上设定基于贵阳机场实际运行要求所定。

### 3. 不同成因强降水天气分析

#### 3.1. 天气尺度系统强降水天气

如图 1 所示, 2014 年 7 月 16 日, 贵阳机场遭遇了一次大暴雨事件, 24 小时累计降水量 164.4 毫米, 降雨过程中共计出现了 8 段中等强度及以上的降水(表 1), 其中有 3 段出现了大雨(09:52~11:33, 14:55~15:03, 16:40~16:55), 尽管最大分钟雨量达到了 1.2 毫米, 但超过 0.8 毫米的分钟雨量持续时间未能达到 5 分钟, 因此并未出现极端强降雨, 但在 9:52~11:41 这接近两小时内降雨量达到了 52.5 mm, 也达

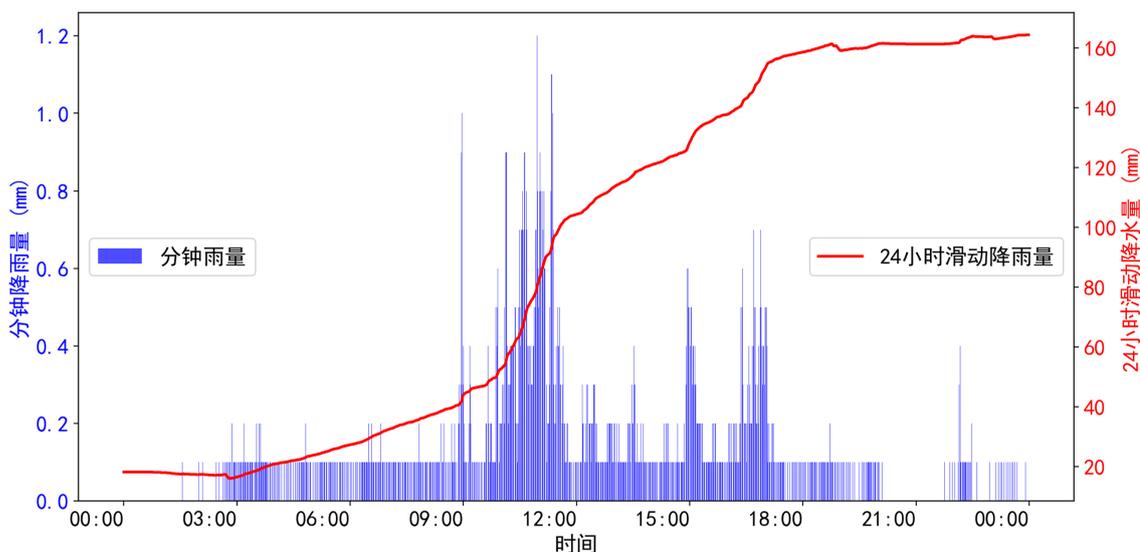


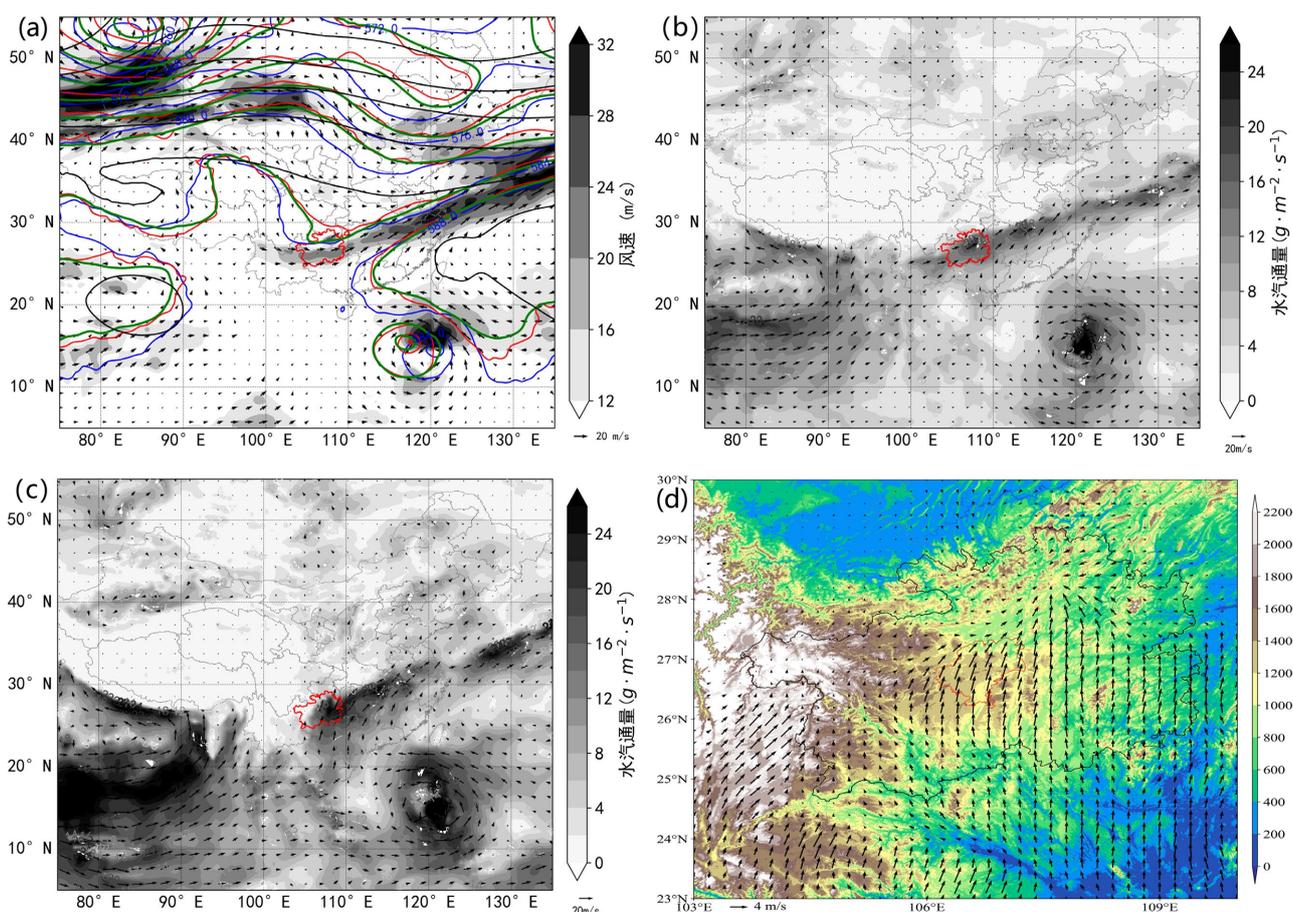
Figure 1. 2014-7-16 00:00-23:59 Guiyang Airport AWOS minute rainfall and 24-hour cumulative rainfall  
图 1. 2014 年 7 月 16 日 00:00-23:59 贵阳机场 AWOS 分钟雨量及 24 小时累计雨量

Table 1. Statistics of medium and above intensity rainfall segments at Guiyang Airport on July 16, 2014  
表 1. 2014 年 7 月 16 日贵阳机场中等强度及以上降水分段统计

开始时间(h:mm)	结束时间(h:mm)	累计雨量(mm)	持续时间(min)
8:52	9:00	3.8	9
9:36	9:40	1.5	5
9:52	11:41	52.5	106
12:18	12:30	2.9	12
12:51	12:56	1.2	6
13:27	13:33	2	7
14:54	15:17	8.5	24
16:21	17:04	15.5	43

到了短时强降水的标准。此次暴雨事件持续时间长，共计造成了贵阳龙洞堡国际机场 49 架次航班延误，44 架次航班返航/备降，经济损失较大，当日贵阳市最大 24 小时累计降雨量为 201.7 毫米，造成了严重的城市内涝。

如图 2 所示，2014 年 7 月 16 日 08 时，中高纬呈两槽一脊，东部大槽分为两段阶梯槽，南段从陕西南部穿越四川盆地达到云南中部一线(图 2(a))，贵州省中东部位于槽前西南气流，风速达到了 37 米/秒，副高西脊线位于 110°E 附近，台风威马逊位于西太平洋菲律宾沿岸附近，200 hPa (图略)显示，受印度洋低值系统挤压，南亚高压分裂为东西两部，西部位于青藏高原上空，东部位于云南上空，贵州省位于高压脊东侧偏东北气流控制，处于高层气流辐散区，图 2(a)红色实线显示，到了 16 日 20 时，台风威马逊向西北方向移动了 300 公里左右，588 线东移幅度较小(12 小时仅东移约 100~150 公里)，其北段位置稳定不动，印度洋上的低值系统基本维持原地，受此影响，贵州省中部及东部长时间处于 500 hPa 高空槽控制区，稳定少动，图 2(a)绿色实线显示，7 月 16 日当日 588 脊线位置与 20 时位置高度重合，说明 16

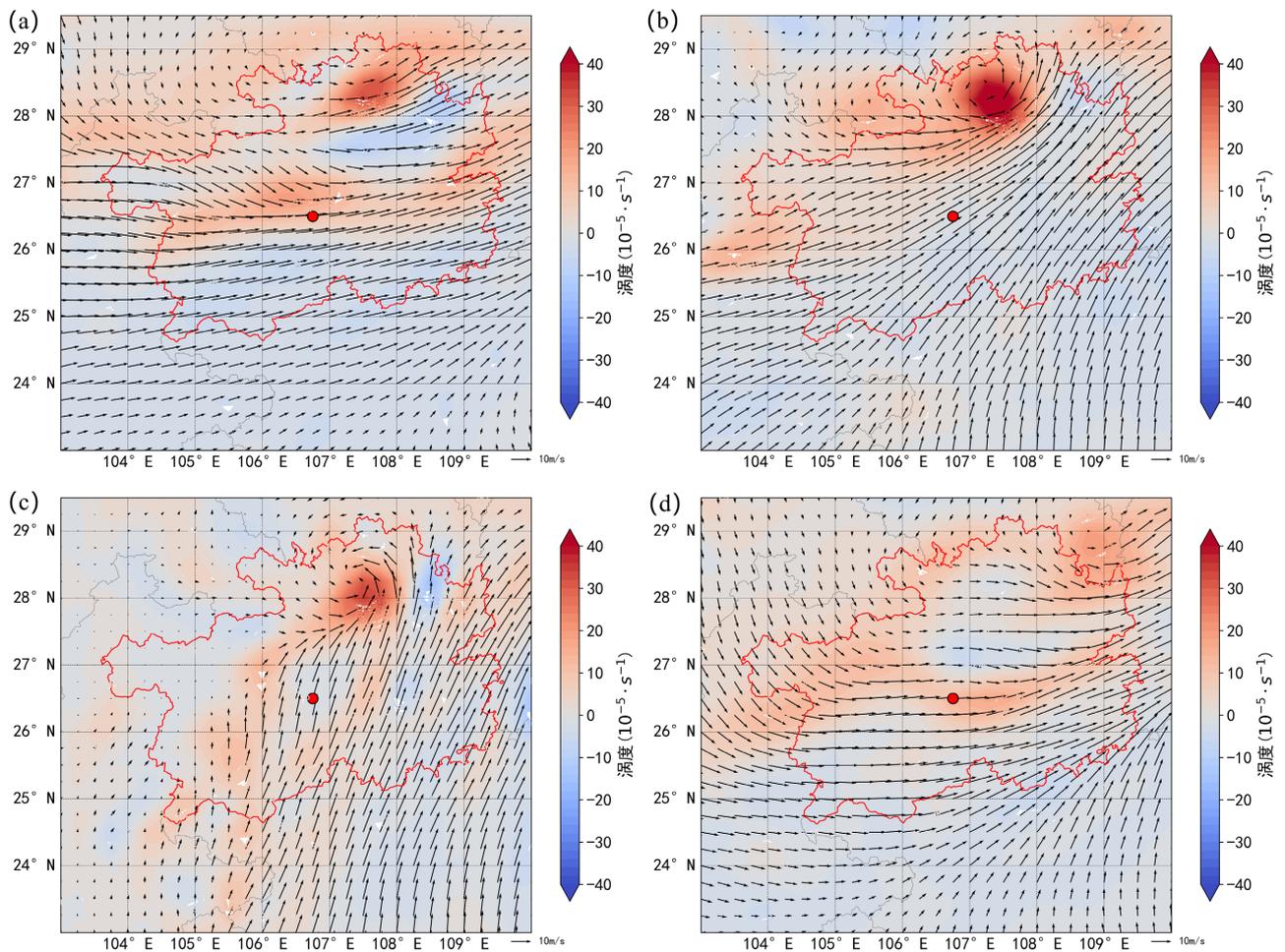


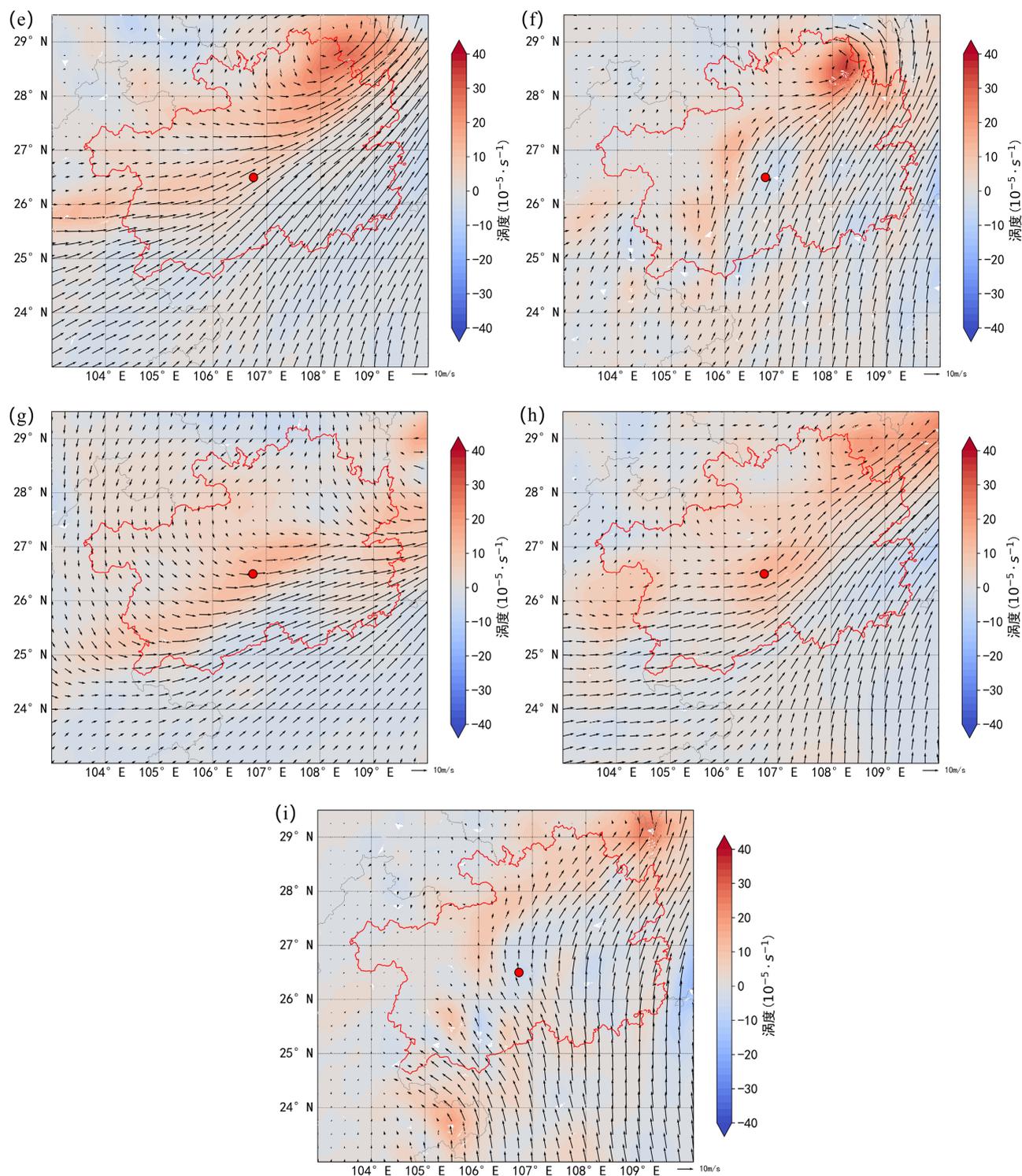
**Figure 2.** July 16, 2014 (a) 500 hPa geopotential field (contour: dagpm): blue: 08:00, green: 20:00, green: 24-hour average (08:00 on the 16<sup>th</sup> to 08:00 on the 17<sup>th</sup>), black: average of July 2014, 500 hPa wind field (wind vector:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 500 hPa wind speed (shaded:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), the purple curve in the figure is the 500 hPa trough; (b) 700 hPa water vapor flux at 08:00 on the 16<sup>th</sup> (shaded:  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 700 hPa wind field (wind vector:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ); (c) 850 hPa water vapor flux at 08:00 on the 16<sup>th</sup> (shaded:  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 850 hPa wind field (wind vector:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ); (d) terrain height (shaded: m) overlaid with surface wind field (wind vector:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

**图 2.** 2014 年 7 月 16 日(a) 500 hPa 高度场(等值线: dagpm): 蓝色: 08:00, 绿色: 20:00, 绿色: 24 小时平均值(16 日 08:00~17 日 08:00), 黑色: 2014 年 7 月平均值, 500 hPa 风场(风矢量:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 500 hPa 风速(填色:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 图中紫色曲线为 500 hPa 高空槽; (b) 16 日 08 时 700 hPa 水汽通量(填色:  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 700 hPa 风场(风矢量:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ); (c) 16 日 08 时 850 hPa 水汽通量(填色:  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 850 hPa 风场(风矢量:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ); (d) 地形高度(填色: m)叠加地面风场(风矢量:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

日 20 时至 17 日 08 时系统移动速度(主要指台风系统、副高系统以及高空槽)基本相当, 而印度洋上的低值系统则在夜间加快了西退速度, 图 2(a)黑色实线给出了 2014 年 7 月平均高度场的位置, 可以看到, 从月平均来看, 中高纬气流平直; 图 2(b)和图 2(c)分别给出了 700 hPa 和 850 hPa 在 16 日 08 时的水汽输送通量, 由图可见, 此次降水事件的水汽主要来源于印度洋, 台风威马逊反而切断了从西太平洋进入贵州的水汽来源, 尽管如此, 700 hPa 和 850 hPa 在贵州区域的水汽输送通量均超过了  $20 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 且随着 700 hPa 西南低空急流(风速  $35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )和 850 hPa 偏南超低空急流(风速  $21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )源源不断, 给暴雨的持续带来了充沛水汽的同时, 也造成了较强的位势不稳定。

如图 3(a)所示, 7 月 16 日 08 时, 500 hPa 高空槽位于贵州西北部, 贵州中部以北有较为明显的正涡度区, 同时在 700 hPa (图 3(b))和 850 hPa (图 3(c))上有低涡存在, 低涡中心位于贵州省东北部, 700 hPa 正涡度中心的最大值达到了  $40 \cdot 10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ , 到了 16 日 14 时, 500 hPa 高空槽东移幅度较小(图 3(d)), 700 hPa (图 3(e))和 850 hPa (图 3(f))上的低涡中心向东北方向略有移动, 700 hPa 的正涡度中心明显减弱, 开始处于消散状态, 850 hPa 的低涡中心正涡度变化不大, 到了 16 日 20 时, 500 hPa (图 3(g))显示高空槽已经南压至贵州省中南部, 贵阳机场位于槽后位置, 700 hPa (图 3(h))低涡已减弱成一致的西南气流, 且贵州中北部风速急剧减小, 850 hPa (图 3(i))上低涡也减弱消散, 整体偏南风速同样减小明显; 贵阳机场虽然并未处于低涡的中心位置, 但从 16 日 08 时至 20 时一直位于 700 hPa、850 hPa 急流轴的左侧的正涡度区, 并位于 500 hPa 槽前, 实况多普勒雷达图显示(图略), 贵阳机场并未处于当日大范围降水的中心位置,



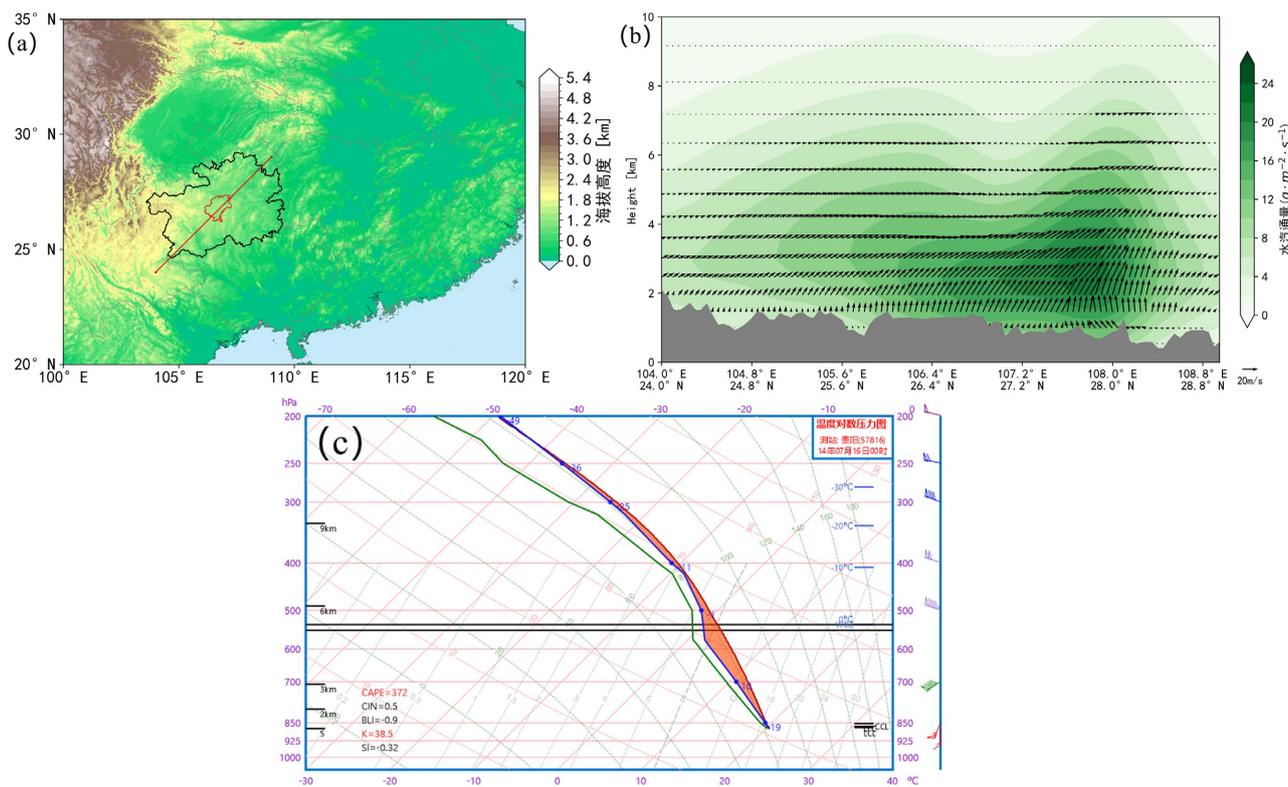


**Figure 3.** Vorticity (shaded:  $10^{-5} \cdot s^{-1}$ ) and wind field (wind vector:  $m \cdot s^{-1}$ ) in Guizhou on July 16, 2014. The red dots represent the location of Guiyang Airport. (a) 08:00 500 hPa; (b) 08:00 700 hPa; (c) 08:00 850 hPa; (d) 14:00 500 hPa; (e) 14:00 700 hPa; (f) 14:00 850 hPa; (g) 20:00 500 hPa; (h) 20:00 700 hPa; (i) 20:00 850 hPa

**图 3.** 2014 年 7 月 16 日贵州区域涡度(填色:  $10^{-5} \cdot s^{-1}$ )叠加风场(风矢量:  $m \cdot s^{-1}$ ), 图中红色圆点为贵阳机场位置。(a) 08 时 500 hPa; (b) 08 时 700 hPa; (c) 08 时 850 hPa; (d) 14 时 500 hPa; (e) 14 时 700 hPa; (f) 14 时 850 hPa; (g) 20 时 500 hPa; (h) 20 时 700 hPa; (i) 20 时 850 hPa

雨带整体呈东北-西南分布,覆盖范围为贵州省大部,降雨最大值的中心区正位于700 hPa至850 hPa正涡度的中心区域,贵州省东北部。

图4(b)显示了16日08时沿图4(a)中红色实线水汽通量的剖面图,可以看到沿着东北-西南向水汽通量大值区覆盖了红色实线所在的大部区域,大值中心位于贵州省东北部的铜仁市境内,最大值达到了 $32\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,同时,水汽大值区的厚度达到了6~8 km的高度,图4(c)显示了16日08时贵阳国家基准值(站号57816)探空图,同样可以看到整层湿度较大,K指数为39,沙氏指数为-0.32,对流有效位能CAPE指数为 $372\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,整个贵州省处于高湿高能区域,08时700 hPa西南风速为 $35\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,850 hPa风速为 $21\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,到了20时(图略),700 hPa风速减小到 $12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,850 hPa风速减小到 $6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,伴随着急流减弱和500 hPa高空槽过境,降水区域也东移南压,贵阳机场从18时以后转为小雨为主,暴雨区域结束。



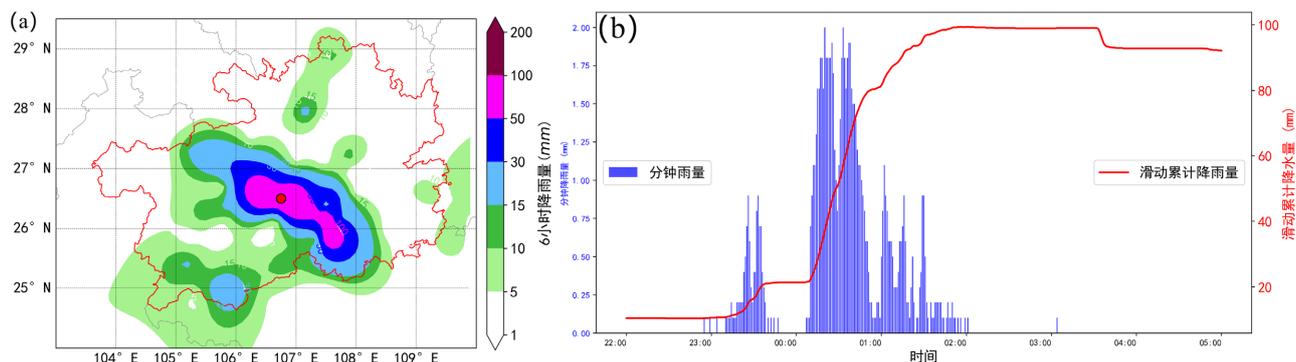
**Figure 4.** (a) Topographic height map of the southwest region; (b) Cross-section map at 08:00 on the 16<sup>th</sup> along the red solid line in (a), water vapor flux (shaded:  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and wind vector; (c) Sounding map of station 57816 at 08:00 on the 16<sup>th</sup>

**图 4.** (a) 西南区地形高度图; (b) 16 日 08 时沿(a)中红色实线剖面图,水汽通量(填色:填色:  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )及风矢量; (c) 16 日 08 时 57816 站探空图

### 3.2. 中尺度系统强降水天气

如图5所示,2021年5月12日夜间至13日凌晨,贵州省中部地区遭遇了一次短时强降水导致的暴雨天气,图5(a)显示了雨带呈西北-东南向分布,雨带中心覆盖了贵阳机场,贵阳机场当日降水如图5(b)所示,累计降雨量超过了90 mm,降雨时段集中在12日23:00~13日02:00这三个小时,最大分钟雨量达到了2 mm,中等强度及以上的降水分段如表2所示,共出现5段中等强度及以上的降水,最长的一段出现在13日00:10~00:53分,总共持续44分钟,累计雨量达到了58.7 mm,大大地超过了 $20\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的中国气象局短时强降水的定义标准,其中,00:10~00:51这42分钟的分钟雨量 $\geq 0.4\text{mm}$ ,达到了大雨

标准, 00:11~00:48 分这 38 分钟里, 分钟雨量  $\geq 0.8$  mm, 达到了极端强降雨的标准, 此次过程贵阳机场还出现了两段冰雹天气, 分别是 12 日 23:20~23:27 和 13 日 00:10~00:15, 累计造成 34 架次航班返航或备降。



**Figure 5.** (a) May 12, 2021, 20:00-May 13, 02:00 Guizhou Province 6-hour rainfall (unit: mm) distribution map; (b) 2021-5-12 22:00-05-13 05:00 Guiyang Airport AWOS minute rainfall and cumulative rainfall

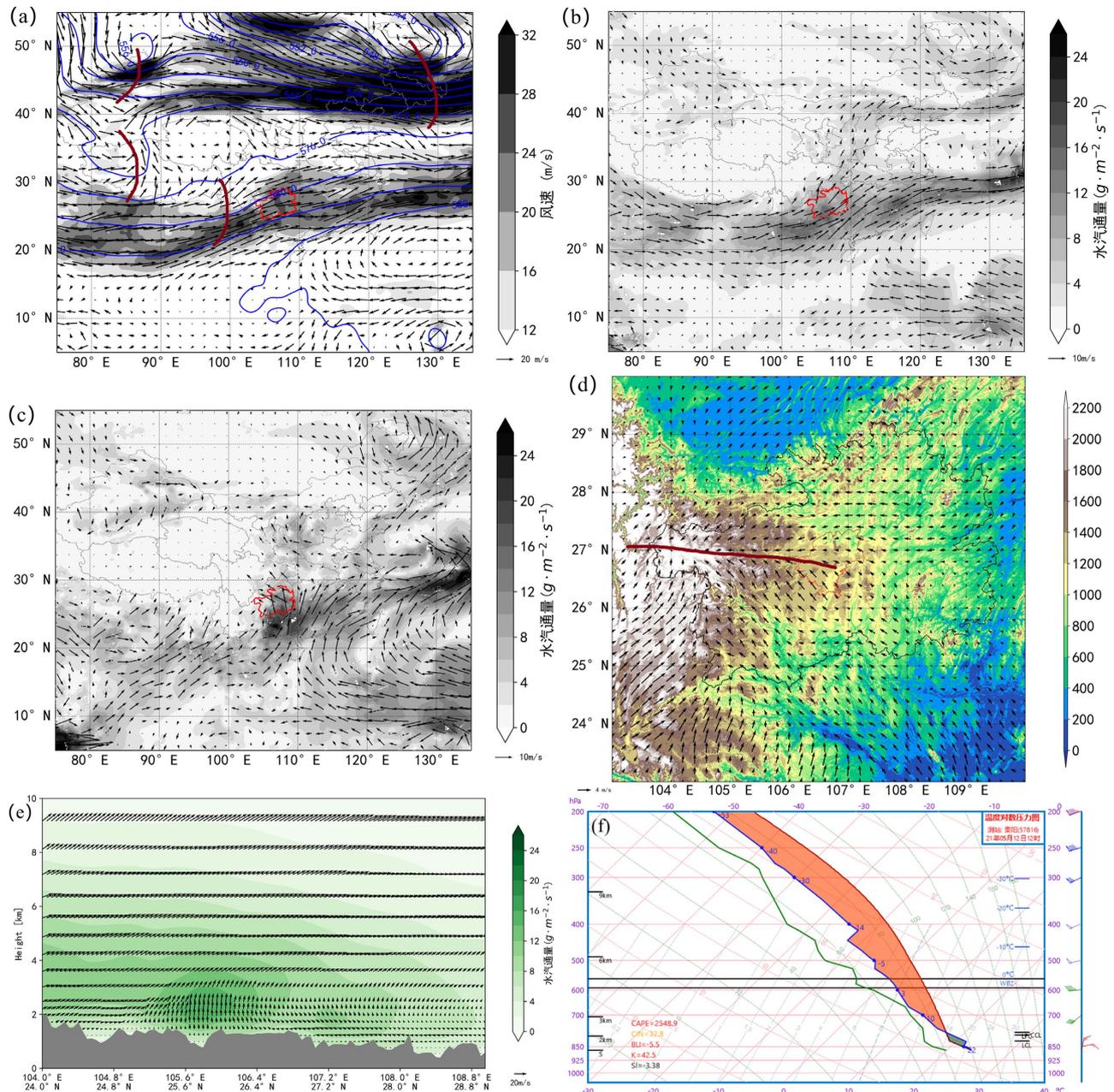
**图 5.** (a) 2021 年 5 月 12 日 20:00~13 日 02:00 贵州省 6 小时雨量(单位: mm)分布图; (b) 2021 年 5 月 12 日 22:00-13 日 05:00 贵阳机场 AWOS 分钟雨量及累计雨量

**Table 2.** Statistics of medium and above intensity rainfall segments at Guiyang Airport on May 12~13, 2021  
**表 2.** 2021 年 5 月 12~13 日贵阳机场中等强度及以上降水分段统计

开始时间(h:mm)	结束时间(h:mm)	累计雨量(mm)	持续时间(min)
23:18	23:38	9.4	21
0:10	0:53	58.7	44
1:00	1:19	11.5	20
1:27	1:32	3.2	6
1:38	1:42	1	5

如图 6 所示, 2021 年 5 月 12 日 20 时天气图显示, 500 hPa (图 6(a))贵州省处于南支槽前西南气流, 风速达到了  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 此时副高 588 脊线还位于华南沿海位置, 700 hPa (图 6(b))显示同样为西南急流控制, 最大风速同样达到了  $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 水汽来源主要为印度洋, 850 hPa (图 6(c))上, 偏南急流超过了  $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 水汽来源则分为两支, 一支西侧的印度洋暖湿气流, 从云南进入贵州西南部, 另一支是西太平洋的暖湿气流, 从广西进入贵州南部及东南部, 图 6(e)显示了水汽通量的垂直剖面, 可以看到整层呈上干下湿, 最大值集中在贵阳市西南部安顺一带, 最大值超过了  $16 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 图 6(d)显示地面风场叠加地形高度场, 可以看到在贵州省西部至中部一带存在明显的地面辐合线, 图 6(f)上, 贵阳市国家基准站 20 时探空图显示, K 指数为 42.5, 沙氏指数为 -3.38, 对流有效位能 CAPE 达到了  $2548 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 零度层高度位于 600 hPa 附近,  $-20^\circ\text{C}$  高度层位于 400 hPa 附近, 同时存在强烈的垂直风切变, 这种低空急流左侧高温高湿的环境, 加上合适的冰相层高度及垂直风切变, 非常有利于发生极端强对流天气, 触发因子则可以追踪到边界层辐合线的存在。

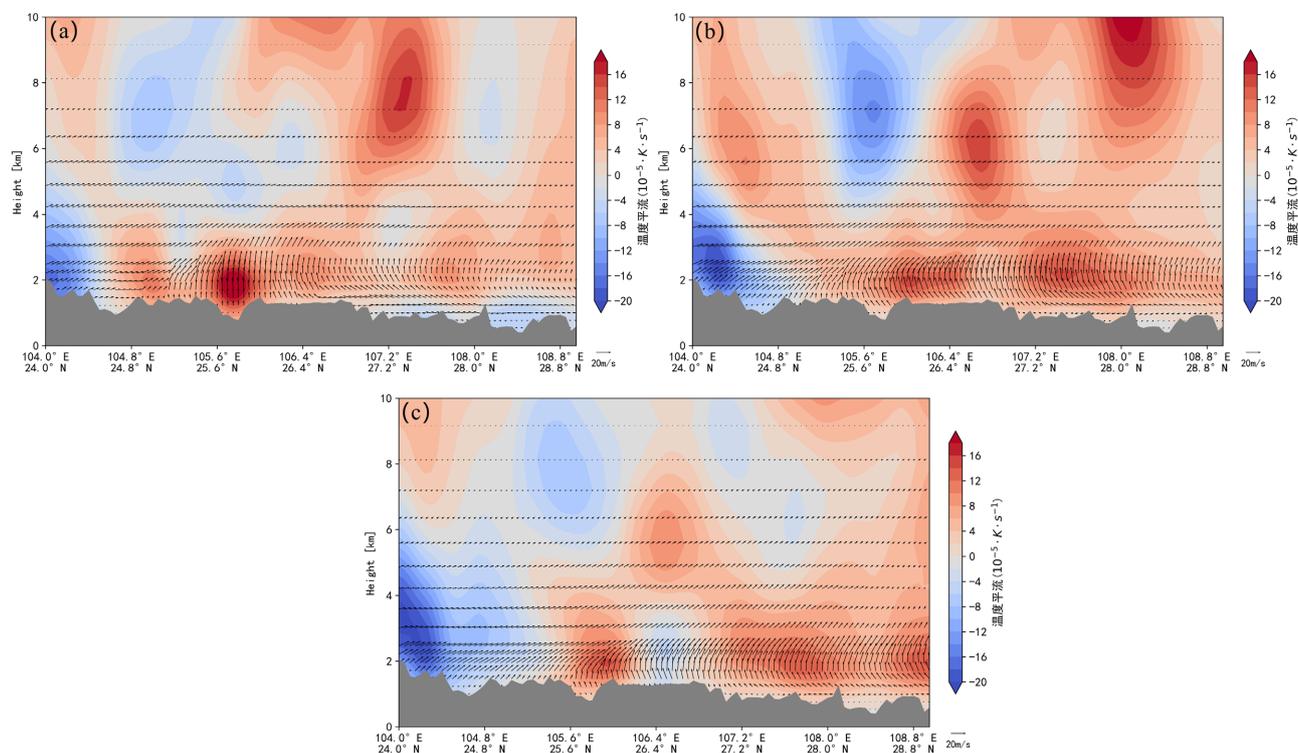
图 7 为温度平流沿图 4(a)红色实线的垂直剖面图, 在 12 日 20 时(图 7(a)), 在贵阳市以东区域, 整层均为暖平流控制, 而在贵阳市西南部的中层区域(4~6 km, 即 500 hPa 附近)有较弱的干冷平流, 到了 13 日 01 时(图 7(b)), 中层冷平流有所加强, 并略有东移至贵阳机场附近上空, 此时也是贵阳机场降雨强度最大的时段, 到了 13 日 05 时(图 7(c)), 中层的弱冷平流开始减弱, 地面的冷平流区域开始向东北方向



**Figure 6.** 20:00 May 12, 2021 (a) 500 hPa geopotential field (contour: dagpm), 500 hPa wind field (wind vector:  $m \cdot s^{-1}$ ), 500 hPa wind speed (shaded:  $m \cdot s^{-1}$ ), the brown curve in the figure is the 500 hPa trough; (b) 700 hPa water vapor flux (shaded:  $g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ), 700 hPa wind field (wind vector:  $m \cdot s^{-1}$ ); (c) 850 hPa water vapor flux (shaded:  $g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ), 850 hPa wind field (wind vector:  $m \cdot s^{-1}$ ); (d) Terrain height (shaded: m) overlaid with surface wind field (wind vector:  $m \cdot s^{-1}$ ), the brown curve in the figure is the surface convergence line; (e) Cross-section map at 20:00 on the 12<sup>th</sup> along the red solid line in Figure 4(a), water vapor flux (shaded:  $g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ) and wind vector; (f) Sounding map of station 57816 at 20:00 on the 12<sup>th</sup>

**图 6.** 2021 年 5 月 12 日 20 时。(a) 500 hPa 高度场(等值线: dagpm), 500 hPa 风速(填色:  $m \cdot s^{-1}$ ), 图中棕色曲线为 500 hPa 高空槽; (b) 700 hPa 水汽通量(填色:  $g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ), 700 hPa 风场(风矢量:  $m \cdot s^{-1}$ ); (c) 850 hPa 水汽通量(填色:  $g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ), 850 hPa 风场(风矢量:  $m \cdot s^{-1}$ ); (d) 地形高度(填色: m)叠加地面风场(风矢量:  $m \cdot s^{-1}$ ), 图中棕色曲线为地面辐合线; (e) 沿图 4(a)中红色实线剖面图, 水汽通量(填色: 填色:  $g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )及风矢量; (f) 12 日 20 时 57816 站探空图

移动, 此时降水也基本停止。结合前文所述可以看到, 贵阳机场此次短时强降雨导致的暴雨事件是一场典型的暖区强对流事件, 500 hPa 弱的干冷平流及贵阳机场上游地区的地面辐合线是触发对流的关键因子。



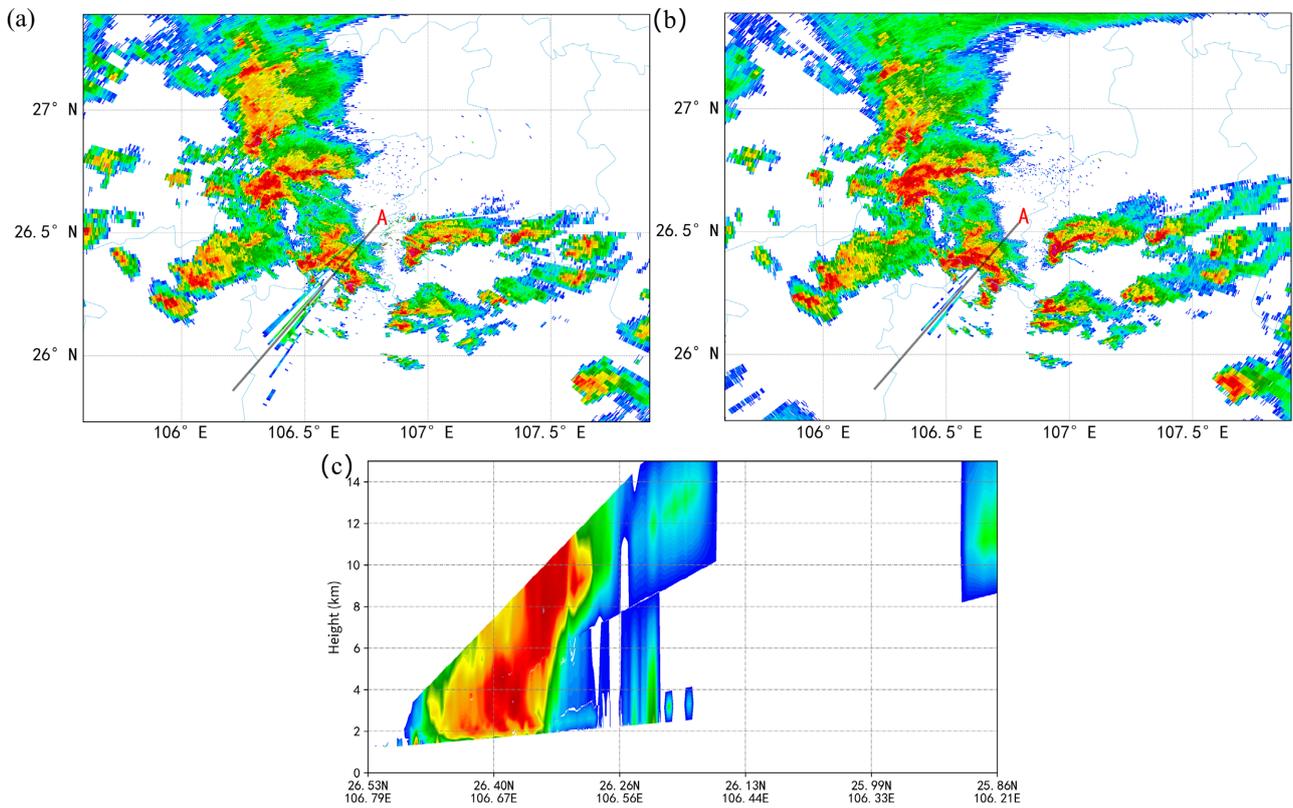
**Figure 7.** Vertical cross-section of temperature advection along the red solid line in Figure 4(a) (shaded:  $10^{-5}\cdot\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and wind field (wind vector:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) on May 12-13, 2021: (a) 20:00 on the 12<sup>th</sup>; (b) 01:00 on the 13<sup>th</sup>; (c) 05:00 on the 13<sup>th</sup>

**图 7.** 2021 年 5 月 12~13 日温度平流沿图 4(a) 红色实线垂直剖面(填色:  $10^{-5}\cdot\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ )及风场(风矢量:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ): (a) 12 日 20 时; (b) 13 日 01 时; (c) 13 日 05 时

此次强对流天气的覆盖区域不大,如图 5(a)所示,仅为贵州省中部一带,图 8(a)为贵阳龙洞堡机场多普勒雷达仰角  $2.4^\circ$  水平反射率因子图,图中红色 A 代表贵阳机场位置,受 500 hPa~700 hPa 西南风引导气流影响,当日对流云团从西南向东北移动,贵阳机场西南方向有一较强雷暴单体明显表现出了 V 型缺口和三体散射的特征,在  $3.36^\circ$  仰角(图 8(b))上, V 型缺口同样明显,三体散射仍有一定程度体现,结合 RHI 剖面图(图 8(c))可见明显的回波墙和回波穹窿,强回波质心最大值超过了 50 dBz,高度超过了 10 公里,结合图 6(f)可知,50 dBz 以上的区域达到了  $-30^\circ\text{C}$  的高度,非常有利于冰雹的形成与生长,在 23:20 分,该单体移经贵阳机场,机场出现了 7 分钟的降雹事件。

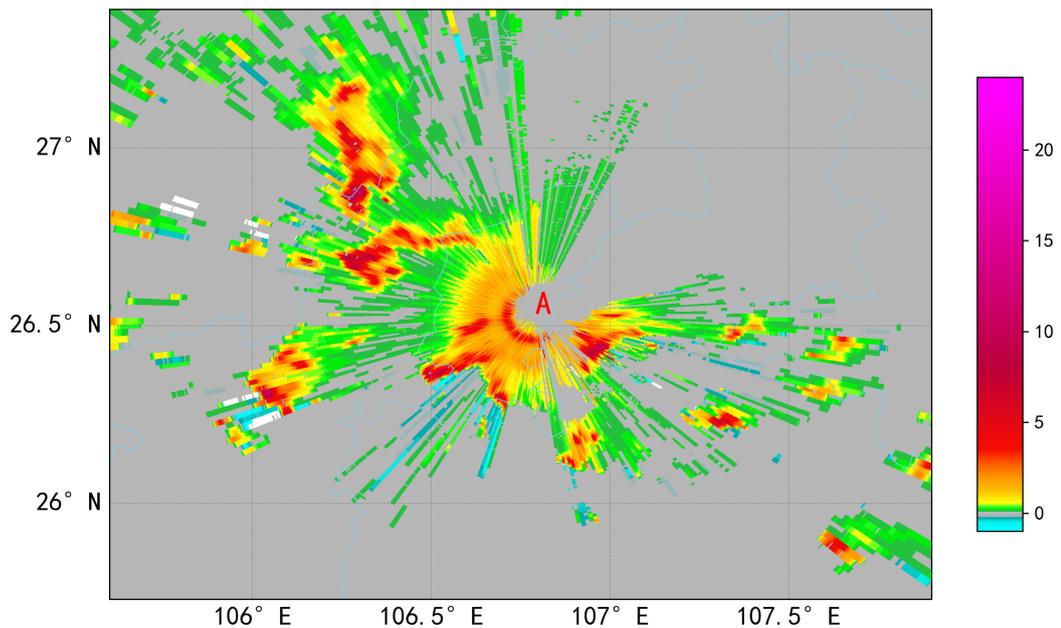
双偏振多普勒雷达的比差分相移(KDP)通过粒子形状敏感特征,有效弥补传统雷达参数的不足,成为强对流天气预警和强天气分析的关键工具,在暴雨、冰雹等极端天气监测中使用,可显著提升灾害识别精度,图 9 显示了 12 日 22:27 分贵阳龙洞堡机场多普勒雷达  $2.4^\circ$  仰角比差分相移的分布情况,可以看到在机场西南方向存在 KDP 较大的区域,但在大值区域后方存在一 V 型的空洞,较大的水平反射率因子 ( $>50$  dBz) 配合 KDP 空洞区,往往预示着冰雹的出现,另外, KDP 高值区 ( $>4^\circ\cdot\text{km}^{-1}$ ) 指示强上升气流和雨滴碰撞增长活跃区,通常出现在强降水出现的区域,图 9 中机场周围环绕着一个带状的 KDP 大值区(最大值达到了  $10^\circ\cdot\text{km}^{-1}$ ),并且在西南方向大值区后部出现了 KDP 空洞,这是短时强降水和冰雹将同时影响该区域的重要指示特征。

综上所述,天气尺度系统和中小尺度系统导致的暴雨天气在形成机制、空间尺度、降水特征及预报难度等方面存在显著差异,天气尺度系统主导的暴雨范围广,降水覆盖区域大,强度较低,以持续性中小雨为主,稳定性强,降水与天气系统移动同步;中小尺度系统主导的暴雨局地性强,降水集中在中小尺度



**Figure 8.** Guiyang Airport dual-polarization Doppler radar at 22:27 on May 12, 2021: (a) reflectivity at an elevation angle of 2.4° (unit: dBZ); (b) reflectivity at an elevation angle of 3.36° (unit: dBZ); (c) reflectivity profile along the gray solid line in (a) (unit: dBZ)

**图 8.** 2021 年 5 月 12 日 22:27 时贵阳机场双偏振多普勒雷达: (a) 2.4° 仰角反射率(单位: dBZ); (b) 3.36° 仰角反射率(单位: dBZ); (c) 沿(a)中灰色实线反射率剖面(单位: dBZ)



**Figure 9.** 2021-05-12 22:27 Guiyang airport dual-polarization Doppler radar 2.4° elevation angle specific differential phase (unit:  $^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$ )

**图 9.** 2021 年 5 月 12 日 22:27 时贵阳机场双偏振多普勒雷达 2.4° 仰角比差分相移(单位: 单位:  $^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$ )

系统活动区,强度极端,突发性显著,受地形或局地热力条件触发,因此中尺度暴雨天气预报难度较大,尤其是对流触发因子难以捕捉,本文所取为典型暖区强对流中暖平流强迫结合地面辐合线的典型事件。

#### 4. 结论

本文选取贵阳机场两次不同成因的典型强降水过程进行对比分析,主要得出以下结论:

(1) 2014年7月16日强降水事件为天气尺度系统主导的暴雨事件,以南支槽前西南气流与低空急流水汽输送为特征,高空槽、低涡及低空急流左侧正涡度区为降水提供持续动力抬升。此类降水范围广、持续时间长,但极端短时雨强不足,最大分钟雨量为1.2 mm,整体以中雨到小雨为主,未发生本文所定义的大雨和极端强降雨,但由于累计降雨时间较长,累计降雨量达到了164.4 mm,对航空运行影响较大,造成了大量航班延误及返航备降。

(2) 2021年5月12~13日强降水天气为中尺度系统主导的暴雨事件,主要受局地热力与边界层辐合驱动,发生发展迅速,短时雨强极端且伴随冰雹,最大分钟雨量达到了2 mm,出现了中雨、大雨及极端强降雨事件,其中极端强降雨持续了38分钟,期间累计降雨量超过50毫米,属典型的极端强降水事件,因此尽管持续时间较短,同样导致了大量航班返航备降。

(3) 天气尺度暴雨灾害依赖大尺度环流配置,预报难度相对较低;中尺度暴雨灾害受局地因子主导,对流触发机制复杂,需结合雷达等短临监测数据提升预警时效性。

本文仅针对两次典型暴雨事件进行了分析,从不同成因介绍了两种天气的预报着眼点。强降水天气是威胁航空飞行安全的重要气象灾害,对航班起降、跑道运行及空中交通管制均可能造成严重影响,因此还有赖于大量案例的累积和归纳分析,从而更科学地为航空运营、管制指挥和流量控制提供气象决策建议。

#### 参考文献

- [1] 许爱华,孙继松,许东蓓,等.中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J].气象,2014,40(4): 400-411.
- [2] 蔡雪薇,谌芸,沈新勇,等.冷涡背景下不同类型强对流天气的成因对比分析[J].气象,2019,45(5): 621-631.
- [3] 符式红,王秀明,俞小鼎.相似环流背景下海南两次不同类型强对流天气对比研究[J].气象学报,2018,76(5): 742-754.
- [4] 曹艳察,郑永光,盛杰,等.2018年7月15-17日北京极端强降水过程三类对流风暴及其强降水特征分析[J].气象,46(7): 885-897.
- [5] 李强,王秀明,周国兵,等.四川盆地西南低涡暴雨过程的短时强降水时空分布特征研究[J].高原气象,39(5): 960-972.
- [6] 盛杰,张小雯,孙军,等.三种不同天气系统强降水过程中分钟雨量的对比分析[J].气象,38(10): 1161-1169.
- [7] 蔡雄辉,邱学兴,郭婷,等.安徽北部一次局地特大暴雨过程的中尺度特征分析[J].沙漠与绿洲气象,15(4): 83-91.
- [8] 鲁亚斌,李华宏,闵颖,等.一次云南强对流暴雨的中尺度特征分析[J].气象,44(5): 645-654.
- [9] 徐珺,杨舒楠,孙军,等.北方一次暖区大暴雨降水成因探讨[J].气象,40(12): 1455-1463.
- [10] 马志敏,余珂,杨超,等.一次局地突发性暴雨过程成因及数值试验分析[J].云南大学学报,38(1): 72-80.
- [11] 罗阳,杨新宇,杨凤婷.2023年6月贵阳机场一次雷雨天气过程诊断分析[J].自然科学,2023,11(6): 926-934.
- [12] 邓小光,刘开宇.基于多源资料的贵阳机场强对流天气分析[J].自然科学,2024,12(2): 385-395.
- [13] 曹阳,邓小光,刘开宇.贵阳机场夏季一次强对流天气分析[J].自然科学,2023,11(6): 897-902.