

基于多源资料的贵阳机场强对流天气分析

邓小光, 刘开宇

民航贵州空管分局, 贵州 贵阳

收稿日期: 2024年2月21日; 录用日期: 2024年3月21日; 发布日期: 2024年3月29日

摘要

利用贵阳机场自动观测数据、ERA5再分析资料、贵阳市实况探空资料以及微波辐射计资料对贵阳机场一次持续时间较长的强对流天气过程进行了分析。得到以下结论: 6月18日~19日贵阳机场强对流天气过程产生的降水呈西南-东北向带状分布, 波动槽东移至贵州省且被副热带高压阻挡在贵州省中部, 同时低层切变线和地面辐合线配合较好, 导致其抬升运动明显且持久; 同时贵阳机场上空持久的高水汽含量且整层大气均达到饱和, 为此次过程提供了较好的水汽条件; 加上高层冷平流叠加低层暖平流、强垂直风切变以及CAPE、K指数等偏高均表征着此次过程大气不稳定性较高。因此, 贵阳机场遭遇了一次持续时间长且强度较高的强对流天气过程。通过进一步对微波辐射计资料进行分析得出强降水发生时段与贵阳机场实况观测记录数据相吻合, 说明微波辐射计在强对流天气中的应用不可或缺。

关键词

贵阳机场, 强对流天气, 多源资料, 微波辐射计

Analysis of Severe Convection Weather at Guiyang Airport Based on Multi-Source Data

Xiaoguang Deng, Kaiyu Liu

Guizhou Air Traffic Control Branch of Civil Aviation, Guiyang Guizhou

Received: Feb. 21st, 2024; accepted: Mar. 21st, 2024; published: Mar. 29th, 2024

Abstract

A long duration severe convective weather process at Guiyang Airport was analyzed by means of automatic observation data, ERA5 reanalysis data, real sounding data and microwave radiometer data. The following conclusions are drawn: The precipitation generated by the strong convective weather process at Guiyang Airport from June 18 to 19 was distributed in a belt from southwest to northeast. The wave trough moved eastward to Guizhou Province and was blocked by the sub-

tropical high in the central part of Guizhou Province. At the same time, the low-level shear line and the surface convergence line were well coordinated, resulting in obvious and lasting uplift. At the same time, the high water vapor content over Guiyang Airport and the whole atmosphere reached saturation provided better water vapor conditions for this process. Coupled with the cold advection at upper level superposition of warm advection at lower level, strong vertical wind shear, high CAPE and K index, the atmospheric instability of this process is relatively high. Therefore, Guiyang Airport encountered a strong convective weather process with long duration and high intensity. Through further analysis of microwave radiometer data, it is concluded that the occurrence period of heavy precipitation is consistent with the real observation data of Guiyang Airport, which indicates that the application of microwave radiometer in severe convective weather is indispensable.

Keywords

Guiyang Airport, Strong Convective Weather, Multi-Source Data, Microwave Radiometer

Copyright © 2024 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

强对流天气属于一种局地性自然天气现象, 通常包括雷暴大风、冰雹、龙卷和短时强降水等天气类型, 其特征为突发性强, 范围小, 破坏力极强, 是影响较为严重的天气现象[1]。由于局地强对流较小的时空尺度和较快的演变速度, 仍然是当前短临预报预警业务中的重点和难点[2]。其发生发展对民航安全平稳运行带来了很大的挑战, 因此, 加强对贵阳机场强对流天气的预报工作十分必要。

近年来, 国内有大量气象学家对强对流天气展开了研究。许爱华等[3]通过对 21 世纪以来中国中东部地区近百次强对流天气个例的环境场进行分析, 全面分析强对流天气形成的热力不稳定、动力抬升以及水汽条件, 从强对流的不稳定条件和主要触发条件方面提出中国强对流天气的 5 种基本类别: 暖平流强迫类、冷平流强迫类、斜压锋生类、高架对流类、准正压类, 其中前三类发生频率最高。刘帆等[4]指出了短时强降水需要中低层具有一定厚度的湿层和较厚的暖云层。许多学者对强对流触发条件的研究表明[5]-[11], 冷锋、地面辐合、干线(露点锋)、阵风锋等均为强对流的触发天气系统。

微波辐射计作为一种被动遥感探测设备, 2021 年 7 月正式投入贵阳机场使用, 其通过接收来自大气一定波段的微波辐射, 可全天候连续探测液态水含量、温湿度以及云底高等要素的垂直廓线[12] [13], 时间分辨率达分秒级, 垂直分辨率也较高, 同时还具有无人值守的优势, 现已在各项气象科研和业务工作中广泛应用。研究表明, 微波辐射计探测显示的降水情况与实况雨情基本相符[14], 反演值与实际观测值也较为接近[15]。

贵阳龙洞堡机场位于中国贵州省贵阳市东郊, 坐标为(106.7988°E, 26.5438°N), 海拔高度 1139 米, 地处云贵高原东麓。2023 年 6 月 18~19 日贵阳机场遭遇了一次持续时间较长的强对流天气过程, 此次天气过程造成了 6 个航班备降, 对民航运行带来了一定的影响。近年来, 综合利用多源数据开展强对流天气过程的分析研究还相对较少。因此, 本文利用贵阳机场常规观测数据、微波辐射计观测数据以及 ERA5 再分析地面和高空资料、贵阳市实况探空等多源数据对此次过程进行分析研究, 探索此次强对流天气过程发生机制以及新技术新资料的可应用性。

2. 数据

1) 2023年6月18日~6月19日贵阳龙洞堡机场逐小时常规观测场数据以及贵阳市实况探空资料。

2) 欧洲中心 ERA5 逐小时地面资料(地表气压、10米风、总降水和对流降水等)和高空资料(UV 风、位势高度、垂直速度、相对湿度、比湿等共 37 层), 空间分辨率 $0.25 \times 0.25^\circ$ 。

3) 贵阳机场 HTG-4 型地基多通道微波辐射计 2023 年 6 月 18 日~19 日观测数据, 该微波辐射计能自动完成地面到高空 10 km 的大气温湿探测, 时间间隔 3 min, 垂直共 93 层, 选用其输出产品包括液态水路径(LWP)、云底高(CBH)、液态水廓线(LPR)、相对湿度/绝对湿度廓线(HPC)等原始数据, 并通过数据解码对数据格式进行转换。

3. 过程回顾

2023 年 6 月 18 日~19 日, 贵阳机场遭遇了一次强对流天气影响, 此次过程持续时间较长, 降水强度较大, 6 月 18 日 20 点贵阳机场由南风转为北风控制, 同时相对湿度也迅速增大至 90% 以上, 见图 1, 其中红线表示风向变化, 绿线表示相对湿度(RH)变化, 横坐标表示 2023 年 6 月 18 日~19 日时间序列(北京时, 下同), 灰色虚线表示日界。

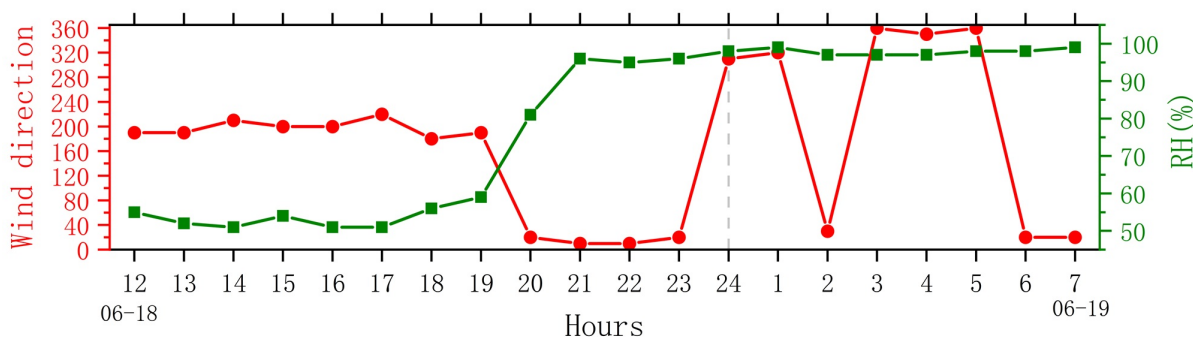


Figure 1. Time series of wind direction and relative humidity change at Guiyang Airport

图 1. 贵阳机场风向和相对湿度变化时间序列

分析表 1 贵阳机场降水观测纪要栏数据可知, 此次贵阳机场强降水过程从 6 月 18 日 20 点 40 分持续至 19 日 07 点 46 分, 其中最强的降水过程分布在 18 日 23~24 点, 中等强度的降水分布在 19 日 05 点左右。

Table 1. Precipitation observation record column of Guiyang Airport (ZUGY)

表 1. 贵阳机场(ZUGY)降水观测纪要栏

| 日期 | 纪要栏 |
|----------|---|
| 6 月 18 日 | -SHRA20 ⁴⁰ -SHRA23 ⁰⁵ - -SHRA23 ¹⁴ -SHRA23 ³⁰ - + SHRA23 ⁵⁶ -SHRA24 ⁰⁰ |
| 6 月 19 日 | SHRA00 ⁰⁰ - + SHRA00 ⁰⁷ -SHRA00 ¹⁹ - -SHRA00 ⁴⁶ - -RA01 ⁵⁸ -02 ²⁰ 03 ¹² - -SHRA04 ⁴³ -SHRA04 ⁵⁸ - -SHRA05 ¹³ -SHRA05 ⁵⁶ - -SHRA06 ³⁶ -SHRA07 ³⁰ - -SHRA07 ⁴⁶ - -RA10 ⁴⁸ -11 ³¹ |

利用欧洲中心 ERA5 再分析资料的小时总降水和小时对流降水数据对该次过程进行分析, 见图 2。通过分析 6 月 18 日 14 点~6 月 19 日 14 点的 24 小时总降水和小时对流降水可知, 此次过程降水区呈西南 - 东北向带状分布, 大值区位于贵州省中部, 最大值超过 120 mm/24 h。从对流降水图分布可知, 对流降水分布与总降水分布大致相同, 降水大值区均为对流降水。

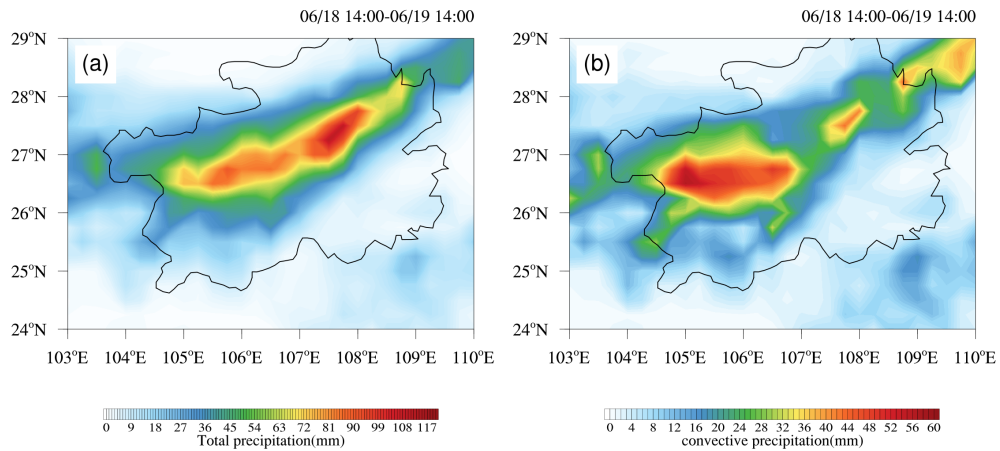


Figure 2. Spatial distribution of 24-hour total precipitation and convective precipitation from ERA5 reanalysis data in the European Center, where: (a) Total precipitation; (b) Convective precipitation

图 2. 欧洲中心 ERA5 再分析资料 24 小时总降水和对流降水空间分布图, 其中, (a) 总降水; (b) 对流降水

4. 过程分析

4.1. 形势场分析

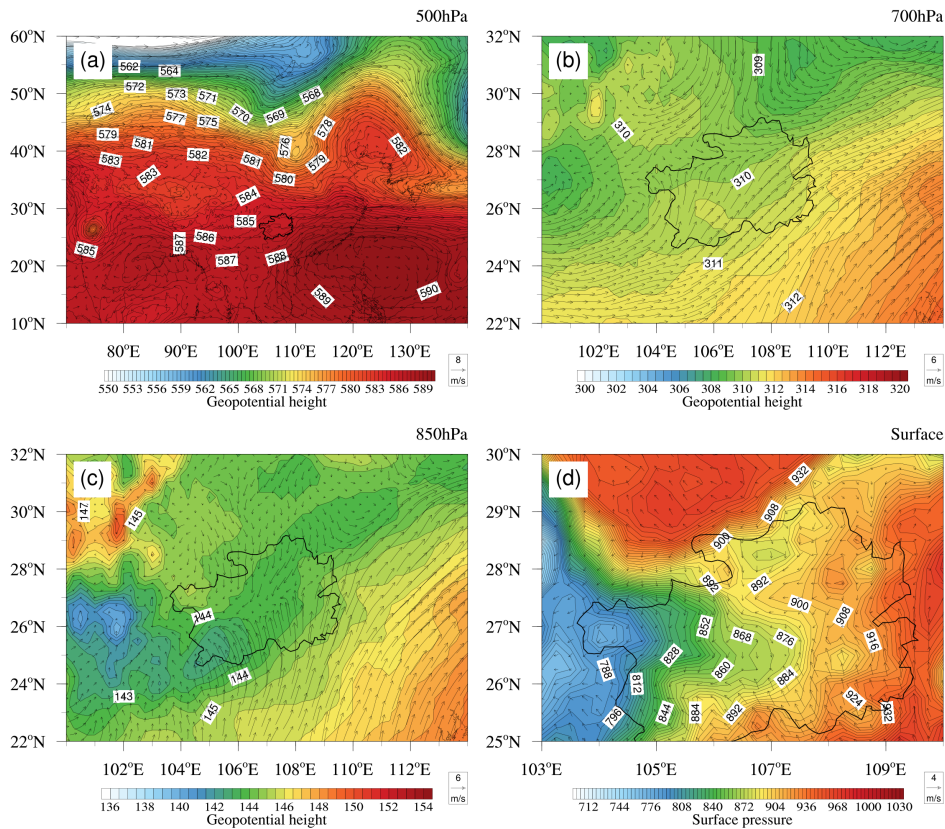


Figure 3. The situation field at 20 o'clock on June 18, 2023, with purple dots indicating the location of Guiyang Airport. (a) 500 hPa wind field and potential height field; (b) 700 hPa wind field and potential height field; (c) 850 hPa wind field and potential height field; (d) 10-metre wind field and surface pressure field

图 3. 2023 年 6 月 18 日 20 点形势场, 紫色点表示贵阳机场位置。(a) 500 hPa 风场和位势高度场; (b) 700 hPa 风场和位势高度场; (c) 850 hPa 风场和位势高度场; (d) 10 米风场以及地面气压场

挑选 2023 年 6 月 18 日 20 点和 6 月 19 日 10 点的 500 hPa、700 hPa、850 hPa 和地面的位势高度场、风场以及气压场数据进行分析, 6 月 18 日 20 点形势场见图 3, 6 月 19 日 10 点形势场见图 4。

分析图 3(a)可知, 500 hPa 中高纬地区呈现一槽一脊型分布, 槽位于我国内蒙古地区, 脊位于我国东北地区; 中低纬地区西太平洋副热带高压位于贵州省东南部, 贵州省受副高西北侧西南气流影响。700 hPa 槽线位于贵州省西北一侧, 贵州省西部为低位势高度区, 东部为高位势高度区, 贵州省大部受槽前西南气流影响。850 hPa 切变线位于贵州省中部地区, 位势高度场从西向东呈高 - 低 - 高分布。地面贵州省西侧低压控制, 北侧高压控制, 东侧高压控制, 地面辐合线呈西南 - 东北向影响贵州省中部及以北区域。

图 4 为贵阳机场强对流天气结束后的形势场。对比图 3 可知, 500 hPa 中高纬地区槽脊均已向东移动, 中低纬地区副高东退, 700 hPa 弱低涡环流位于贵州省中北部地区, 贵阳机场受低涡底部西南气流影响, 850 hPa 切变线南压至贵州省东南部, 贵阳机场转西北气流控制, 地面辐合线南压至贵州省东南部, 中部转为西北风控制。

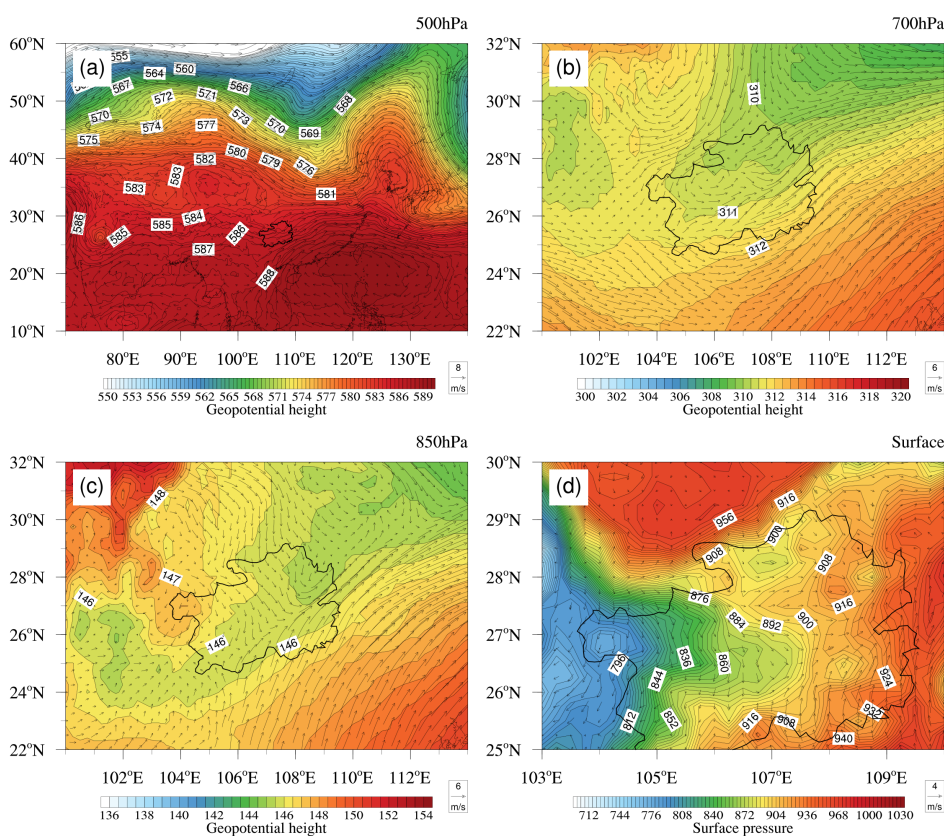


Figure 4. The situation field at 10 o'clock on June 19, 2023, with purple dots indicating the location of Guiyang Airport. (a) 500 hPa wind field and potential height field; (b) 700 hPa wind field and potential height field; (c) 850 hPa wind field and potential height field; (d) 10-metre wind field and surface pressure field

图 4. 2023 年 6 月 19 日 10 点形势场, 紫色点表示贵阳机场位置。 (a) 500 hPa 风场和位势高度场; (b) 700 hPa 风场和位势高度场; (c) 850 hPa 风场和位势高度场; (d) 10 米风场以及地面气压场

选取(23°N~24°N, 106°E~107°E)区域的垂直速度求区域平均表征贵阳机场上空垂直速度分布, 其高度 - 时间序列见图 5, 横坐标表示时间, 纵坐标表示气压(左)和高度(右)。由图 5 可知, 自 6 月 18 日下午 17 点开始, 上升运动明显增强且整层均为上升区, 分析图还可知, 此次过程持续时间较长, 从 6 月 18 日 17 点至 6 月 19 日 08 点均为强上升运动状态。

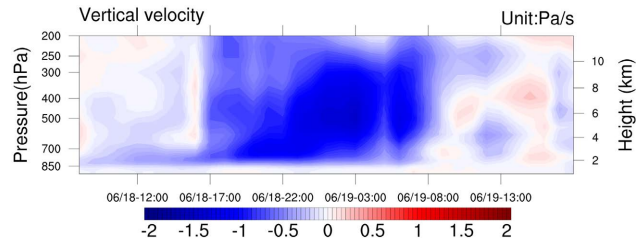


Figure 5. Vertical profile of vertical velocity of Guiyang Airport. The abscissa shows time, and the abscissa shows pressure (left) and altitude (right)

图 5. 贵阳机场垂直速度垂直剖面图。横坐标表示时间, 纵坐标表示气压(左)和高度(右)

综合形势场分析可知, 500 hPa 副高西北侧西南气流、700 hPa 槽前西南气流、850 hPa 切变线和地面辐合线同时处于贵州省中部, 这使得贵州省中部出现强烈的抬升运动, 由于副高的阻挡作用, 也会使得切变线长时间维持在贵州省中部, 导致抬升运动较为持久。

4.2. 水汽条件分析

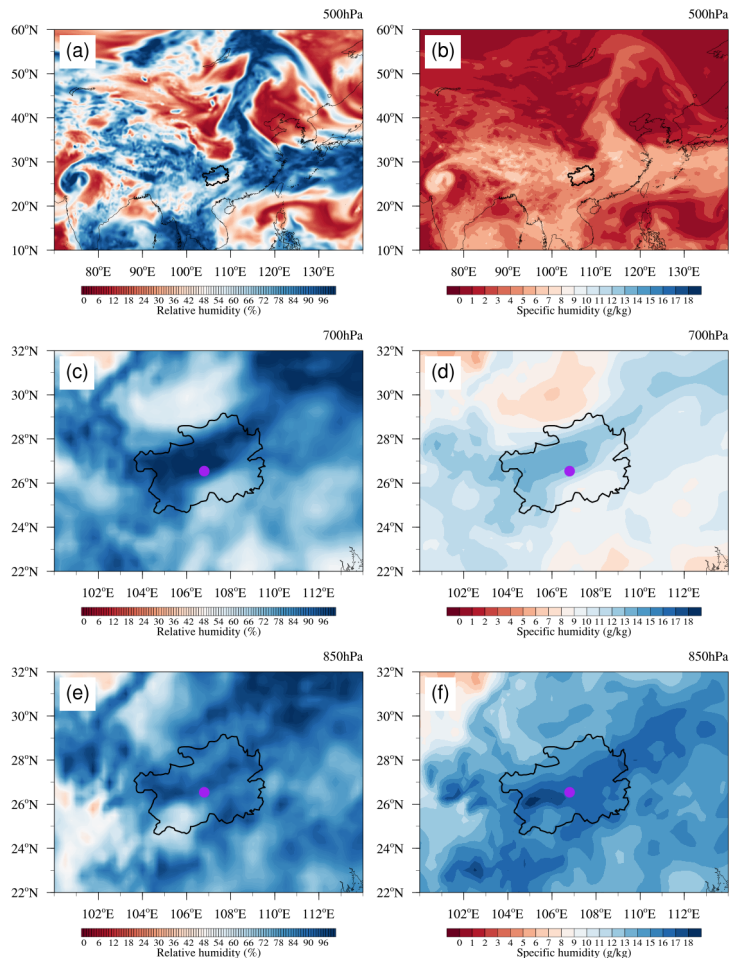


Figure 6. Relative humidity field and specific humidity field at 20 points on June 18, 2023, with purple dots indicating the location of Guiyang Airport. (a) (c) (e) are 500 hPa, 700 hPa and 850 hPa relative humidity fields, respectively; (b) (d) (f) are the specific wet fields of 500 hPa, 700 hPa and 850 hPa respectively

图 6. 2023 年 6 月 18 日 20 点相对湿度场和比湿场, 紫色点表示贵阳机场位置。(a) (c) (e) 分别为 500 hPa、700 hPa、850 hPa 相对湿度场; (b) (d) (f) 分别为 500 hPa、700 hPa、850 hPa 比湿场。

同样挑选 2023 年 6 月 18 日 20 点和 6 月 19 日 10 点的 500 hPa、700 hPa、850 hPa 的相对湿度场和比湿场对水汽条件进行分析, 6 月 18 日 20 点水汽场分布见图 6, 6 月 19 日 10 点水汽场分布见图 7。

由图 6 可知, 6 月 18 日 20 点 500 hPa、700 hPa、850 hPa 贵州省中部空气饱和程度较高, 相对湿度均达到 90% 以上; 从比湿条件来看, 贵州省中部 500 hPa 比湿分布在 6~8 g/kg 之间, 700 hPa 比湿分布在 10~14 g/kg 之间, 850 hPa 比湿分布在 12 g/kg 以上。从空间分布上来看, 相对湿度和比湿大值区均分布在贵州省中部和西南部, 呈西南 - 东北向分布。

对比 6 月 18 日 20 点的相对湿度场和比湿场可知, 图 7 中相对湿度场和比湿场大值区均已移出贵州省中部, 大值区分布在贵州省东南部。

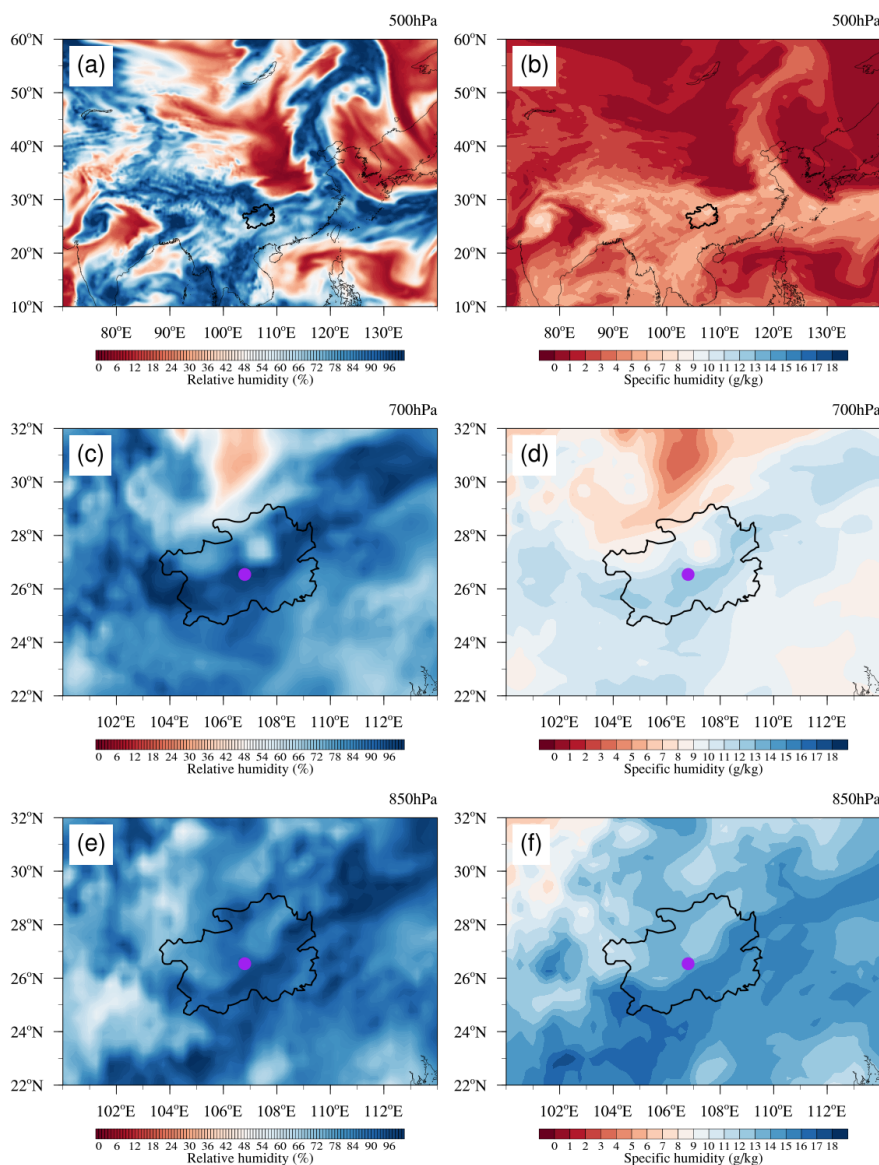


Figure 7. Relative humidity field and specific humidity field at 10:00 on June 19, 2023, with purple dots indicating the location of Guiyang Airport. (a) (c) (e) are 500 hPa, 700 hPa and 850 hPa relative humidity fields, respectively; (b) (d) (f) are the specific wet fields of 500 hPa, 700 hPa and 850 hPa respectively

图 7. 2023 年 6 月 19 日 10 点相对湿度场和比湿场, 紫色点表示贵阳机场位置。(a) (c) (e) 分别为 500 hPa、700 hPa、850 hPa 相对湿度场; (b) (d) (f) 分别为 500 hPa、700 hPa、850 hPa 比湿场

选取(23°N~24°N、106°E~107°E)区域的相对湿度和比湿求区域平均表征贵阳机场上空水汽分布状况, 其高度-时间序列如图 8, a) 表示比湿场随时间的分布情况; b) 表示相对湿度场随时间的分布情况, 横坐标表示时间, 纵坐标表示气压(左)和高度(右)。

由图 8(a)可知, 从 6 月 18 日 12 点~6 月 19 日 08 点, 贵阳机场近地面 850~700 hPa 比湿数值较高, 最高可达 18 g/kg, 表明贵阳机场上空大气的水汽含量较高; 从图 8(b)可知, 从 6 月 18 日 17 点~6 月 19 日 08 点, 贵阳机场整层均为高相对湿度区, 其相对湿度均大于 90%, 而这也表明贵阳机场上空大气的饱和程度较高。贵阳机场上空大气长时间的高水汽含量以及高饱和状态为持久的强对流天气过程提供了水汽条件支持。

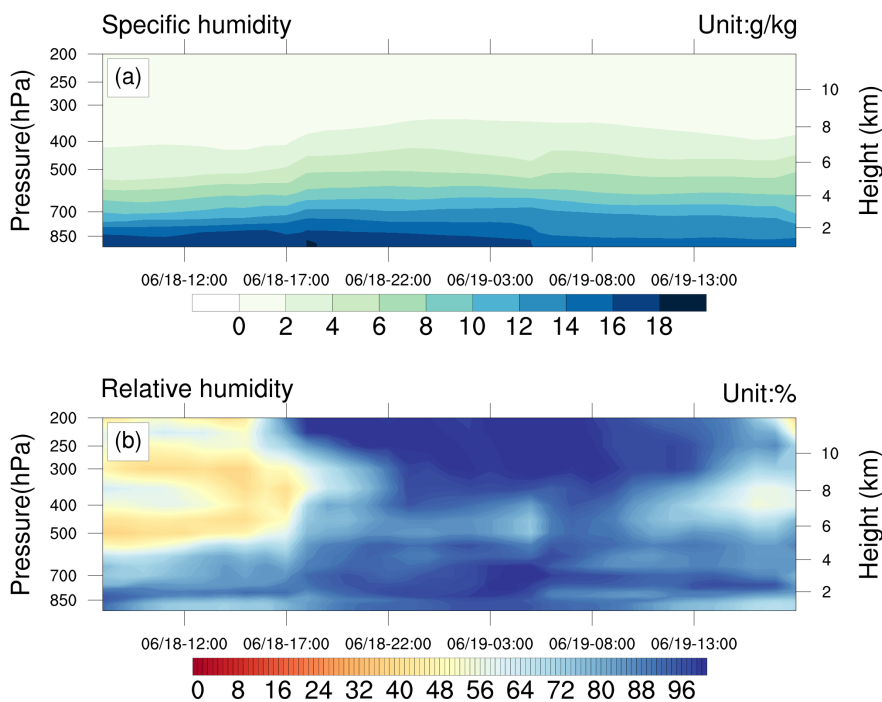


Figure 8. Vertical profile of specific humidity and relative humidity of Guiyang Airport, (a) specific humidity; (b) Relative humidity. The abscissa shows time, and the ordinate shows pressure (left) and altitude (right)

图 8. 贵阳机场比湿、相对湿度的垂直剖面图, (a) 比湿; (b) 相对湿度。横坐标表示时间, 纵坐标表示气压(左)和高度(右)

4.3. 能量条件分析

选取贵阳市探空站观测数据进行探空分析可知, 对流触发前, 2023 年 6 月 18 日 08 点贵阳探空图(图 9(a))呈“喇叭口”形态, 对流有效位能(CAPE)高达 1027.7 J/kg, K 指数达 35.6, 说明大气不稳定性较高。从风的垂直分布来看, 近地面西南风风速较小约 4 m/s, 风速随高度增大, 850 hPa 和 700 hPa 西南风风速 10~12 m/s, 表明垂直风切变较大; 400 hPa 转为西北风控制, 300 hPa 又转为西南风控制, 表明中低层风向随高度顺时针旋转, 为暖平流, 高层风向随高度逆时针旋转, 为冷平流。高层冷平流叠加在低层暖平流的不稳定结构加上垂直风切变较大极有利于对流天气的发生。

对流触发时, 2023 年 6 月 18 日 20 点(图 9(b))湿层明显增厚, CAPE 可达 588.9 J/kg, K 指数高达 42.8, 说明大气不稳定性依然较高。对流触发后, 2023 年 6 月 19 日 08 点(图 9(c))湿层同样较厚, 但 CAPE 已减小至 21 J/kg, 且 K 指数降至 36.1, 从风的垂直分布来看, 风向随高度逆转, 说明原低层暖平流结构已经破坏, 整层为冷平流控制, 而这也代表此次强对流过程走到了终点。

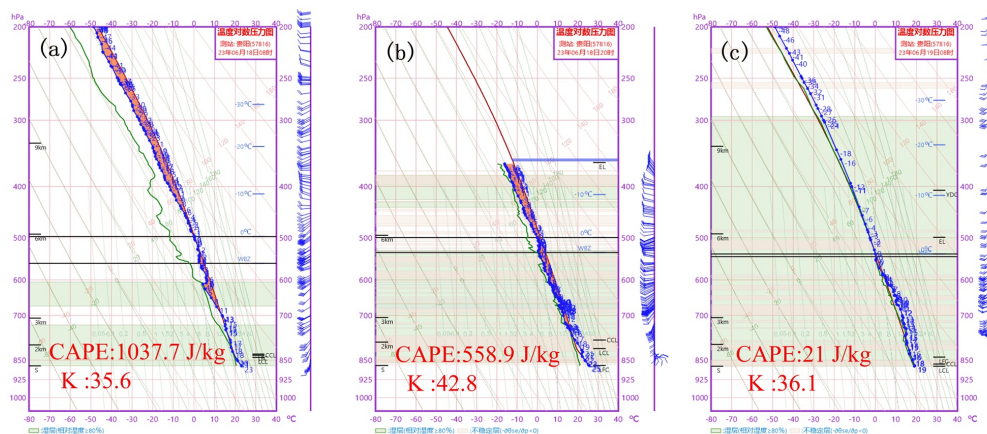


Figure 9. Sounding T-lnp diagram of Guiyang Station. (a) At 0800 on 18 June, before the convective trigger; (b) 20 o'clock on 18 June, when convection is triggered; (c) 08:00 June 19 after convective trigger

图 9. 贵阳站探空 T-lnp 图。(a) 对流触发前 6 月 18 日 08 点; (b) 对流触发时 6 月 18 日 20 点; (c) 对流触发后 6 月 19 日 08 点

综上所述, 6 月 18 日~6 月 19 日波动槽东移至贵州省且被副热带高压阻挡在贵州省中部, 同时低层切变线和地面辐合线配合较好, 导致其抬升运动明显且持久; 同时贵阳机场上空持久的水汽含量较高且整层大气均达到饱和, 为此次过程提供了较好的水汽条件; 加上高层冷平流叠加低层暖平流、强垂直风切变以及 CAPE、K 指数等偏高均表征着此次过程大气不稳定性较高。因此, 贵阳机场遭遇了一次持续时间长且强度较高的强对流天气过程。

5. 微波辐射计分析

利用贵阳机场微波辐射计原位观测资料可以更进一步分析此次强对流天气发生强度的变化。图 10 显示了贵阳机场 6 月 18 日~19 日强降水期间微波辐射计探测的液态水路径(LWP)和云底高(CBH)的变化情况。从图 10(a)可知, LWP 随时间变化呈现双峰型分布, 其中, 6 月 18 日晚上 23 点左右为最高峰, 其 LWP 值最大可达 8000 g/m², 次高峰分布在 6 月 19 日凌晨 05 点左右, 其 LWP 值最大可达 5000 g/m²。从图 10(b)云底高时间序列分析可知, 云底高对此次强对流过程也存在一定的反映, 在降水最强的时段, 其云底高也较低。

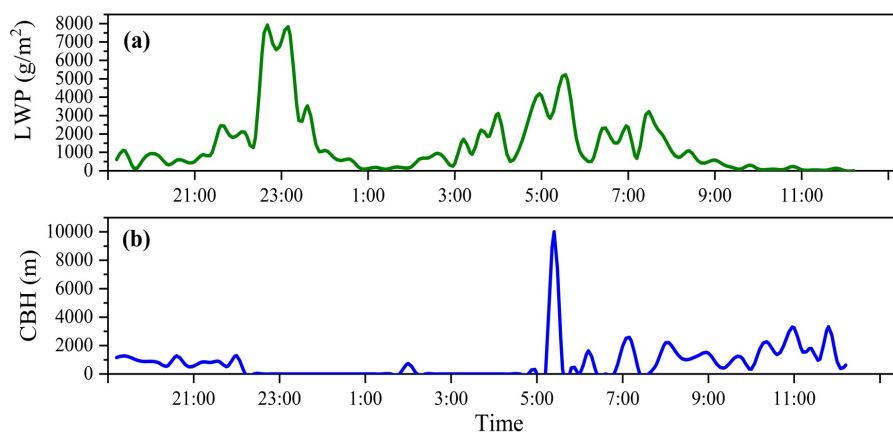


Figure 10. Liquid water path (LWP) and cloud base height (CBH) data of Guiyang Airport, where the horizontal coordinate represents time and the vertical coordinate represents variable value

图 10. 贵阳机场液态水路径(LWP)和云底高(CBH)数据, 其中横坐标表示时间, 纵坐标表示变量值

图 11 分别显示了微波辐射计探测的相对湿度廓线(RH)、绝对湿度廓线(HPC)以及液态水廓线(LPR)。综合分析图 11(a) (b) (c)可知, 贵阳机场上空相对湿度、绝对湿度以及液态水均呈现出先增强再减弱又增强的变化趋势, 且此变化趋势与贵阳机场实况观测记录极为吻合。6 月 18 日晚上 23 点左右强降水期间, 相对湿度大值区分布在地面至 4000 米之间, 且整层 RH 均大于 97%; 同时从 HPC 廓线上也能反映出相同时段内绝对湿度增强明显(最高可达 19.2 g/m^3), 且水汽抬升高度较高; LPR 廓线分布也可看出, 18 日 23 点左右液态水含量明显增多且高度较高, 其最大值可达 1.25 g/m^3 。同样, 6 月 19 日 05 点左右也显示出相对湿度增大且大值区有所抬升、绝对湿度也有所增多、液态水廓线也在 3700 米附近显示出大值区。

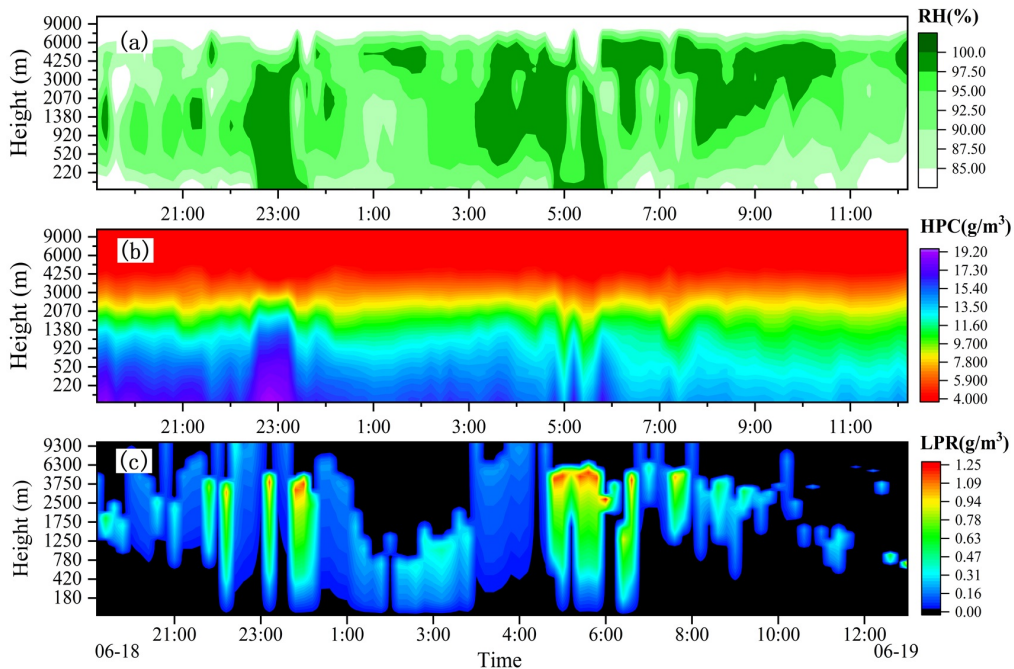


Figure 11. Relative humidity profile (RH), absolute humidity profile (HPC) and liquid water profile (LPR) of Guiyang Airport, where the horizontal coordinate represents time, the vertical coordinate represents height, and the colored part represents the corresponding variable

图 11. 贵阳机场相对湿度廓线(RH)、绝对湿度廓线(HPC)以及液态水廓线(LPR), 其中横坐标表示时间, 纵坐标表示高度, 填色部分表示对应变量

综上, 微波辐射计能够较为准确地追踪此次强对流天气过程强度变化特征, 其液态水路径、云底高、液态水廓线、相对湿度和绝对湿度廓线在反映强对流天气强度和持续时间方面具有较好的效果。

6. 结论

1) 此次强对流天气过程产生的降水呈西南 - 东北向的带状分布, 其发生原因为波动槽东移至贵州省且被副热带高压阻挡在贵州省中部, 同时低层切变线和地面辐合线配合较好, 同时水汽条件较好, 加上高层冷平流叠加低层暖平流、强垂直风切变以及 CAPE、K 指数等偏高均表征着此次过程大气不稳定性较高。因此, 不稳定大气且存在强烈的上升运动搭配充沛的水汽条件, 导致贵阳机场遭遇了一次持续时间长且强度较高的强对流天气过程。

2) 贵阳机场 HTG-4 型微波辐射计能够较为准确的追踪此次强对流天气过程强度变化特征, 其液态水路径、云底高、液态水廓线、相对湿度和绝对湿度廓线在反映强对流天气强度和持续时间方面具有较好的效果, 表明微波辐射计在强对流天气过程中的应用极为重要。

参考文献

- [1] 俞小鼎, 郑永光. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 391-418.
- [2] 郑永光, 周康辉, 盛杰, 等. 强对流天气监测预报预警技术进展[J]. 应用气象学报, 2015, 26(6): 641-657.
- [3] 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.
- [4] 刘帆, 高萌, 王瑾婷, 乔丹杨, 谢逸雯. 咸阳三类强对流天气环境物理量指标研究[J]. 陕西气象, 2022(3): 9-15.
- [5] 王冀, 李英, 文永仁. 川藏高原一次混合型强对流天气的观测特征[J]. 应用气象学报, 2021, 32(5): 567-579.
- [6] 樊李苗, 俞小鼎. 杭州地区夏季午后雷暴大风环境条件分析[J]. 气象, 2020, 46(12): 1621-1632.
- [7] 李典南, 刘春艳, 陈婷. 冷平流强迫背景下攀枝花市一次雷暴过程综合分析[J]. 高原山地气象研究, 2022, 42(2): 113-119.
- [8] 张琪, 任景轩, 肖递祥, 康岚. “5·6”四川盆地对流云团特征及触发机制[J]. 气象, 2017, 43(12): 1487-1495.
- [9] 杜牧云, 赵娴婷, 周伶俐, 等. 鄂西南一次早春强对流过程的多源资料分析[J]. 暴雨灾害, 2022, 41(2): 174-183.
- [10] 王晓娟, 邓荣耀, 陈三春. 四川盆地一次阵风锋触发的局地强对流天气雷达特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2018, 38(2): 62-66.
- [11] 周明飞, 杜小玲, 罗敬, 等. 贵州“5.15”极端风雹天气过程的环境场和雷达回波特征[J]. 暴雨灾害, 2022, 41(2): 158-166.
- [12] 周秀骥, 吕达仁, 黄润恒, 等. 大气微波辐射及遥感原理[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [13] 廖国男, 郭彩丽, 周诗健. 大气辐射导论[M]. 北京: 气象出版社, 2004.
- [14] 黄晓莹, 毛伟康, 万齐林, 等. 微波辐射计在强降水天气预报中的应用[J]. 广东气象, 2013, 35(3): 50-53.
- [15] 黄建平, 何敏, 阎虹如, 等. 利用地基微波辐射计反演兰州地区液态云水路径和可降水量的初步研究[J]. 大气科学, 2010, 34(3): 548-558.