

边界层风廓线雷达资料在贵阳机场一次强对流天气分析中的应用

罗 浩, 张亚男

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: 2022年8月12日; 录用日期: 2022年9月8日; 发布日期: 2022年9月15日

摘 要

本文利用贵阳机场CFL-03型风廓线雷达结合多源数据对2021年7月17日贵阳机场一次强对流天气进行了综合分析, 研究表明: 风廓线雷达资料能很好地反映贵阳机场上空水平风随高度的分布情况, 从而为强对流天气的短临监测和预警提供十分有用的帮助信息, 诸如判断低层大气冷暖平流, 低空急流强度, 冷空气入侵信号等; 通过风廓线雷达的实时监测和产品应用, 可以有效地捕捉到强对流天气发生前本地边界层内大气环境发生变化的微弱讯号, 风廓线雷达的垂直速度、信噪比和谱宽都与短时强降水有着很好的关联, 且信噪比和谱宽在强降水开始前30分钟左右出现了显著的变化特征, 这些信号再结合多普勒气象雷达的实时探测, 可以为高时空分辨率的预警服务提供有力的支撑; 贵阳机场风廓线雷达安装于跑道南端入口处, 其不仅可以实时测风, 还可以计算出水平风的垂直切变指数, 从而为进近和起飞的飞机提供垂直方向上的风切变预警。

关键词

边界层风廓线雷达, 信噪比, 谱宽, 风切变

Application of Boundary Layer Wind Profile Radar Data in a Severe Convective Weather Analysis of Guiyang Airport

Hao Luo, Yanan Zhang

Guizhou Air Traffic Control Sub Bureau of CAAC, Guiyang Guizhou

Received: Aug. 12th, 2022; accepted: Sep. 8th, 2022; published: Sep. 15th, 2022

Abstract

This paper uses the CFL-03 wind profile radar of Guiyang Airport combined with multi-source data to comprehensively analyze a severe convective weather in Guiyang Airport on July 17, 2021. The study shows that the wind profile radar data can well reflect the distribution of horizontal wind with altitude over Guiyang Airport, to provide useful information for short time monitoring and warning of severe convective weather, such as judging the cold and warm advection, low-level jet, cold air invasion signal, etc.; Through the real-time monitoring and product application of the wind profile radar, it can effectively capture the weak signal of the low-level atmospheric environment change in the local boundary layer before the occurrence of severe convective weather, the vertical velocity, signal-to-noise ratio and spectral width of the wind profile radar are all well correlated with short-term heavy precipitation, moreover, the signal-to-noise ratio and spectral width changed significantly about 30 minutes before the start of the heavy precipitation, these signals combined with real-time detection of Doppler weather radar, it can provide a strong support for the early warning services with high spatial and temporal resolution; Guiyang Airport wind profile radar is installed at the entrance to the southern end of the runway, not only can detect the wind filed in real time, the vertical wind shear index of the horizontal wind can also be calculated, which could provide a vertical wind shear warning for approach and take-off aircraft.

Keywords

Boundary Layer Wind Profile Radar, Signal to Noise Ratio, Spectrum Width, Wind Shear

Copyright © 2022 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

常规气象高空观测资料无论是在空间分辨率还是时间分辨率上均明显不足, 很难捕捉到中小尺度对流系统的发生及演变[1], 风廓线雷达(wind profiler radar)主要利用大气湍流对电磁波的散射作用来进行大气风场等物理量的探测, 是一种新型的探测设备, 其时空分辨率较高, 能提高中小尺度系统的探测能力, 是对常规探测资料的有效补充[2]。国外学者对于风廓线雷达的应用研究相对较早, 早在 1985 年, WAKASUGI 等人就利用风廓线雷达资料研究了冷锋系统下的空气及降水粒子的运动[3], 2004 年, BENJAMIN 等人总结了风廓线雷达资料在美国天气预报中的应用[4], 国内对于风廓线雷达的应用和研究虽然起步相对较晚, 但仍然已经有不少学者进行了大量研究, 方桃妮等研究了风廓线雷达资料在浙江中部地区强对流天气中的应用, 分析表明风廓线雷达的水平风场能提前获知冷空气入侵的讯息[2], 王佳伟等分析了成都两次暴雨期间风廓线雷达观测的低空风场特征, 研究表明强降水开始前风廓线雷达上能捕捉到低空急流加强和上层冷空气入侵的信号[5], 张月华等分析了风廓线雷达资料在乌鲁木齐一次大暴雪过程中的应用, 强调了水平风向风速和大气折射率结构常数 C_n^2 和垂直速度的垂直变化在短临预报中的应用价值[6], 罗娟研究了风廓线雷达资料在重庆暴雨过程中的应用, 分析表明风廓线雷达资料的高时空分辨率使得其能准确识别暴雨过程中的低槽、切变线和锋面等天气系统[7], 其他的业内学者则从多角度多视野对风廓线雷达资料的应用进行了大量研究[8]-[13]。

贵州省位于云贵高原东部, 全域海拔在 500~3000 米之间, 是全国唯一没有平原支撑的山地省份, 其

复杂多变的地形地貌使得数值预报往往出现较大偏差, 尤其是对于近地面风场的预报情况更是不尽如人意, 因此使用更为先进的边界层测风设备对于本地中小尺度对流系统的捕捉和预警尤为必要, 本文利用多源探测数据结合高分辨率风廓线雷达资料对 2021 年贵阳机场一次强对流天气进行了综合分析, 旨在研究风廓线雷达资料在短临天气预报中的预警指示作用, 提高本地对于强对流天气的短临预报能力。

2. 资料与方法

本文使用贵阳机场风廓线雷达资料进行研究分析, 该型雷达是由中国航天科工集团第二研究院二十三所研发的 CFL-03 型大气边界层风廓线雷达, 安装于贵阳机场跑道南端入口处(106°47'38"E, 26°32'41"N, 海拔 1150 米), 于 2019 年 1 月投入使用, 能探测测站上空 0~6 公里范围内水平方向风向风速、垂直速度和信噪比等资料[14], 时间分辨率为 6 分钟, 真高 1200 米以下垂直分辨率为 60 米, 1200 米以上则为 120 米。

除此之外本文选取的资料还包括: 1) 高空及地面常规观测资料; 2) 贵阳机场自动观测系统(AWOS)分钟级观测资料; 3) 贵阳机场多普勒气象雷达资料; 4) 欧洲中心 0.25° × 0.25° ERA5 逐小时高空再分析资料; 5) 日本 JMA 葵花 8 卫星逐小时云图资料, 包含反照率及云顶亮温数据; 6) 全球数字高程模型 DEM 地形数据。本文所涉及的时间均为北京时。

2021 年 7 月 17 日午后至夜间, 贵州省遭遇了一次大范围强对流天气, 如图 1 所示, 从 13:00 至 23:00, 全省累计有 24,462 次闪电活动记录, 439 个站点出现短时强降水(小时降水量 ≥ 20 mm), 2 个测站出现大风, 强对流天气区整体呈东北-西南带状影响贵州省大部地区, 有 14 个测站小时降水量超过了 80 毫米, 不仅造成了巨大的经济损失, 还对交通运输产生了极大的影响。

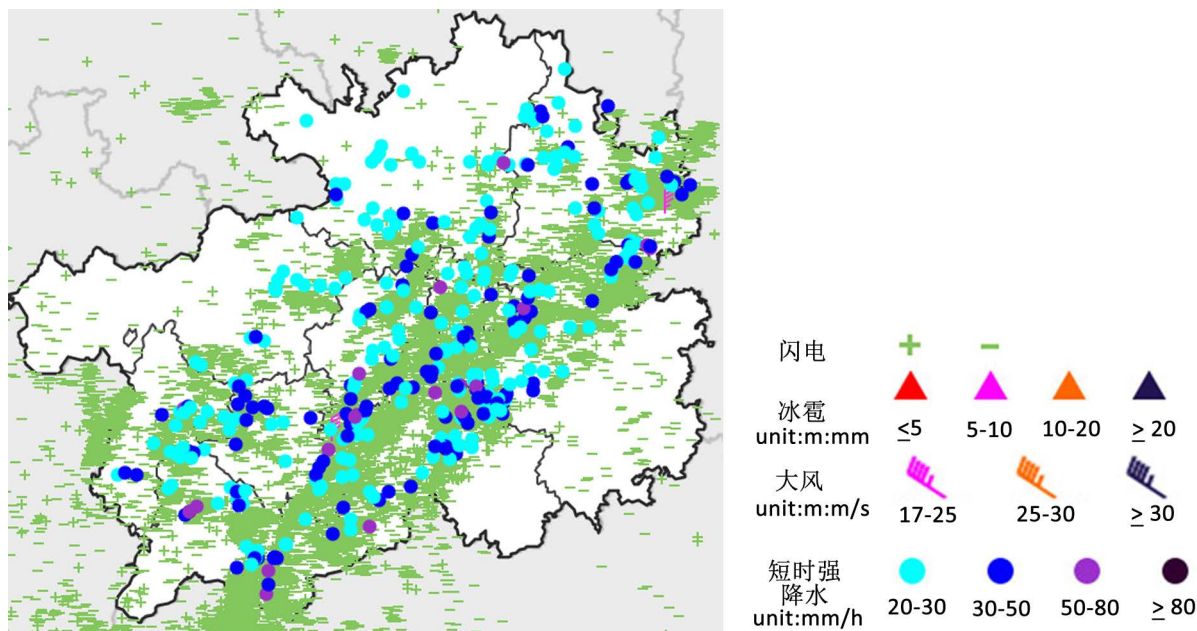


Figure 1. Synthetical monitoring of strong convection from 13:00 to 23:00 in Guizhou Province, July 17, 2021

图 1. 贵州省 2021 年 7 月 17 日 13:00~23:00 强对流综合监测

本文以贵阳龙洞堡国际机场作为事件关注中心, 当日贵阳机场过程降水量达到 54.3 毫米, 累计造成了 137 架次航班延误, 24 次航班返航或备降, 如图 2 所示, 最大的小时降水量集中在 16:50~17:50, 达到了 50.5 毫米, 此区域和降水时段将作为本文讨论和关注的重点。

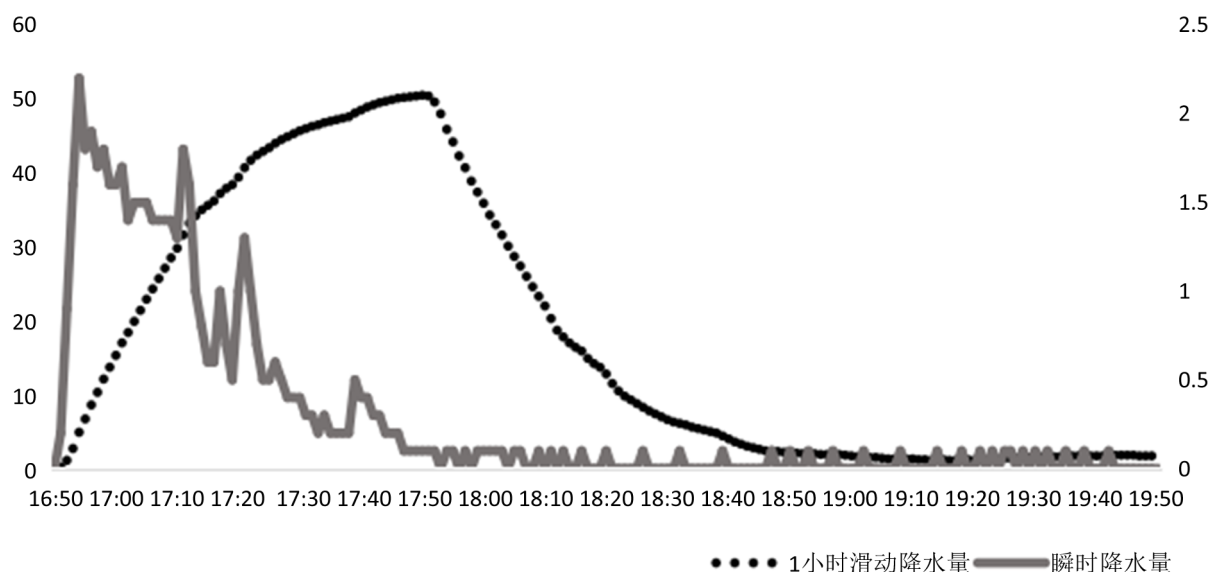


Figure 2. Monitoring of momentary precipitation and 1-hour sliding precipitation from 16:50~19:50 on July 17, 2021 by Guiyang Airport AWOS System

图 2. 贵阳机场 AWOS 系统 2021 年 7 月 17 日 16:50~19:50 瞬时降水量及 1 小时滑动降水量监测

3. 前期形势

3.1. 17 日 08 时形势场

如图 3(a)所示, 2021 年 7 月 17 日 08 时, 500 hPa 上青藏高原 588 脊线位于四川盆地东部一线, 与此同时副热带高压被海上的低压系统(7 月 18 日升级为热带风暴, 即造成郑州 7·20 特大暴雨的台风烟花)及华北平原低值系统共同切断, 588 线东撤至 130°E 附近, 中国南方整体上位于青藏高原与副高之间, 且有较强的低压系统发展形成阻塞形势; 700 hPa (图 3(b))和 850 hPa 上(图 3(c))可见贵州地区水汽输送的主要来源为印度洋, 水汽通道呈东北 - 西南向贯穿贵州省中东部的大部地区, 其中在黔东南地区均达到了急流强度(850 hPa 风速达到 12 m/s, 700 hPa 风速达到 16 m/s), 地面图上(图 3(d))气压场较弱, 整体上处于均压形势, 卫星云图显示贵州省南部及东部边缘已经有对流开始活动; 17 日 08 时贵阳探空站 K 指数达到了 42.6, SI 指数为 -3.47, 对流有效位能 Cape 指数达到了 682.4 J/kg, 大气处于极度不稳定的状态, 有利于对流天气的发生。

3.2. 17 日 08 时近地面及垂直风场

如图 4(a)所示, 17 日 08:00, 贵州省境内地面风场较弱, 在省的中东部及南部地区, 以偏东到东南风势力为主, 在省的中西部地区, 则以弱的偏北风为主, 地面风场并无明显的辐合形势, 但要注意的是在西北方向的上游地区川渝交界处存在明显的南北风辐合, 风速相对较大; 探空图(图 4(b))显示, 近地面 850 hPa 以下为弱的偏北风, 与贵阳机场风廓线雷达(图 4(c))可以相互印证, 850 hPa 到 700 hPa 之间为西南风, 从垂直风场的变化来看, 风向随高度为顺时针旋转, 有暖平流存在, 此时风廓线探测范围在真高 0~2 公里, 从 08:24 至 11:00, 贵阳机场近地面风向逐渐由北风转为南风, 真高 1920 米(700 hPa 附近)风速为 10m/s, 真高 300 米(850 hPa 附近)风速为 4 m/s, 并没有急流存在, 但整体上近地层的南风处于加大趋势。

3.3. 对流初发时刻风场特征

17 日 14:00, 如图 5(a)和图 5(c)所示, 贵阳市西北面 90~120 公里及东北面 30 公里处均有对流的云系生成, 从地面风场可以看到偏北风与偏南风之间逐渐形成了辐合线, 辐合线的位置位于贵阳市中北部地区, 到了 16:00,

如图 5(b)和图 5(d)可以看到, 南北风之间的辐合进一步加强, 但位置仍然位于贵阳市中北部, 雷达回波显示对流天气进一步在贵阳市中北部地区触发, 结合 ERA5 再分析资料高空形势分析(图略), 此时从 500 hPa 至 850 hPa 的槽线切变线仍位于贵州西北部地区, 可见地面辐合线是贵阳市区域内分散雷暴云团的主要触发机制。

图 6(a)是贵阳机场风廓线雷达从 14:00 至 16:30 期间的垂直风场, 由图可见, 700 hPa 附近(机场真高 1920 米)的西南气流在 15:00 前后一度得到了加强, 最大风速达到了 12 m/s, 此时近地面的风场仍为较弱的南风, 从地面至 700 hPa 附近是暖平流为主, 到了 16:00 前后, 真高 600 米以下风向逐渐转为偏东到东北风, 随后北风势力一直延展到真高 1000 米附近, 此时 1000 米以下风向随高度逆时针旋转, 有冷平流入侵, 图 6(b)是沿 27°N, 100°E~110°E 进行剖面后的风场、温度平流场和垂直速度叠加后的示意图, 由图可见, 800 hPa 以下弱的偏北风带来了贴地层的弱冷平流, 而 700 hPa 以上槽前的西南暖湿气流则带来了明显的暖平流和上升运动, 暖平流和上升运动的中心区域位于 106.5°E 至 108°E 之间。

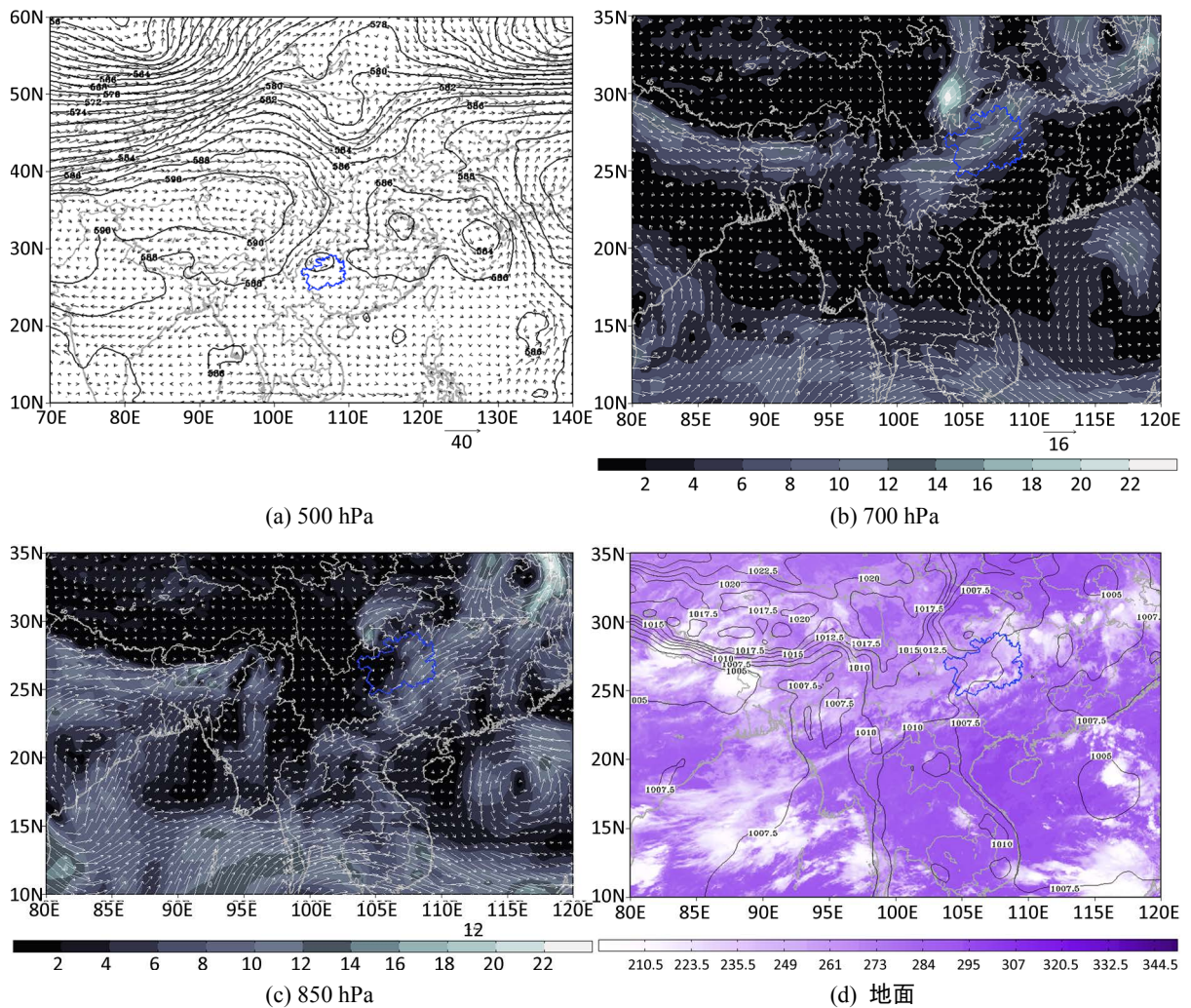


Figure 3. 08:00 July 17, 2021 (a) 500 hPa geopotential height (contour line, unit: dagpm), wind field (wind vector, unit: m/s); (b) 700 hPa water vapor flux divergence (colorfilled, unit: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$), wind field (win vector, unit: m/s); (c) 850 hPa water vapor flux divergence (colorfilled, unit: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$), wind field (wind vector, unit: m/s); (d) cloud top bright temperature of infrared band by Himawari-8 satellite (colorfilled, unit: K), mean sea level pressure (contour line, unit: hPa)

图 3. 2021 年 7 月 17 日 08:00 (a) 500 hPa 高度场(等值线, 单位: dagpm)、风场(风矢, 单位: m/s); (b) 700 hPa 水汽通量散度(填色, 单位: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)、风场(风矢, 单位: m/s); (c) 850 hPa 水汽通量散度(填色, 单位: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)、风场(风矢, 单位: m/s); (d) 葵花 8 红外卫星云顶亮温(填色, 单位: K)、海平面气压场(等值线, 单位: hPa)

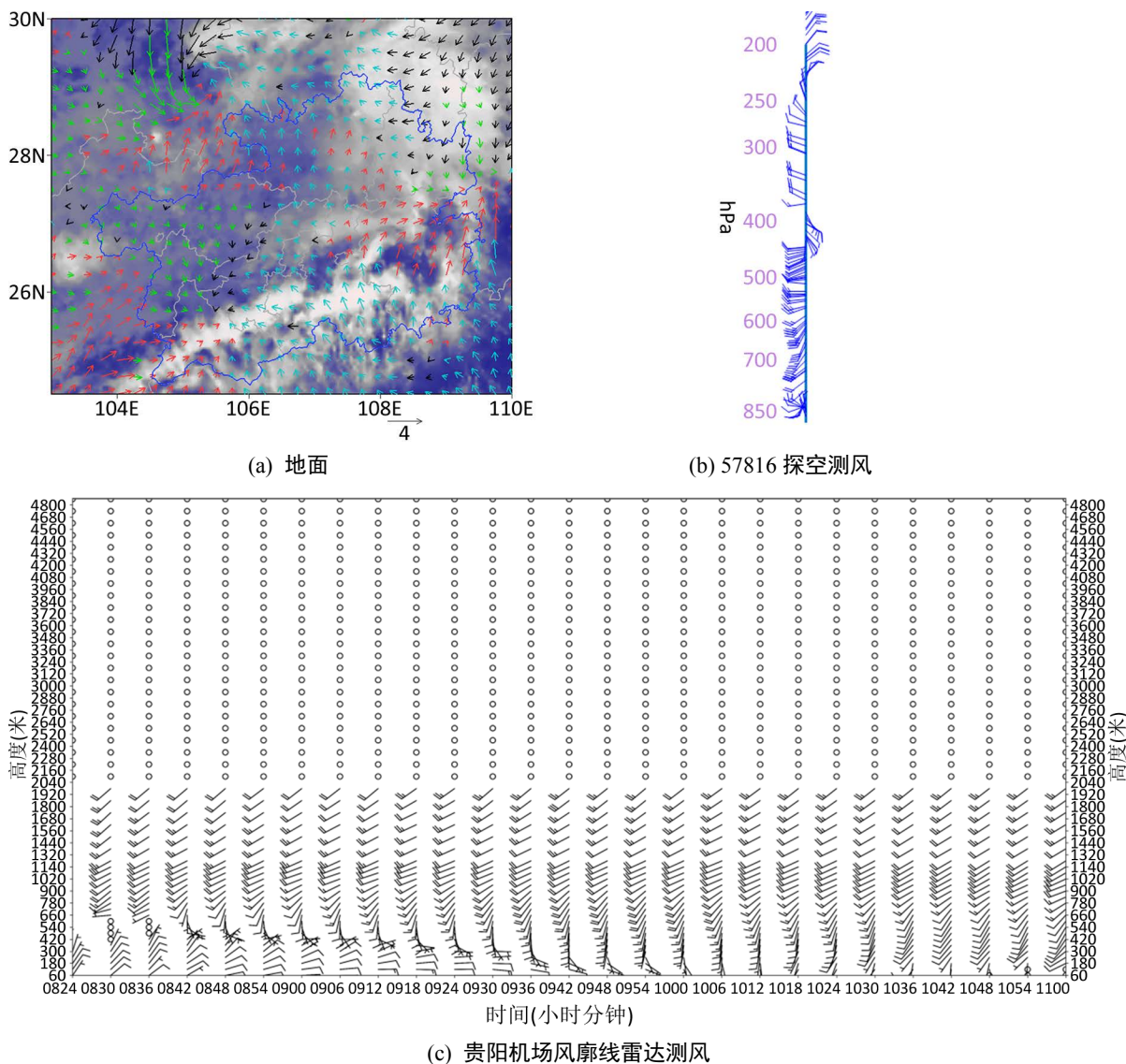


Figure 4. 08:00 July 17, 2021 (a) Cloud top bright temperature of infrared band by Himawari8 satellite (colorfilled, unit: K), ground wind field (wind vector, black: northeast wind, green: northwest wind, light blue: southeast wind, red: southwest wind, unit: m/s); (b) Guiyang Dongshan station (57816) vertical wind profile by sounding; (c) Wind filed detected by wind profile radar of Guiyang Airport

图 4. 2021 年 7 月 17 日 08:00 (a) 葵花 8 红外卫星云顶亮温(填色, 单位: K)、地面风场(风矢, 黑色: 东北风, 绿色: 西北风, 浅蓝色: 东南风, 红色: 西南风, 单位: m/s); (b) 贵阳东山探空站(57816)垂直风廓; (c) 贵阳机场风廓线雷达测风

4. 短时强降水期间的风廓线雷达特征

4.1. 风场

CFL-03 型风廓线雷达的主要产品包括: 垂直方向上的水平风向风速、垂直速度、信噪比、谱宽以及垂直风切变指数。如图 2 所示, 16:50~17:50 一小时之内, 贵阳机场 AWOS 系统记录了 50.5 毫米的短时强降水, 针对该时段前后一小时左右对各产品进行特征分析, 结合图 4(c)和图 6(a)可知, 17 日上午贵阳机场近地面风场由北转南, 随后真高 2000 米以下南风势力开始加强, 低层暖平流较为显著, 而从 16:00 左右开始, 真高 600 米以下逐渐转为偏东到东北风, 贴地层有冷平流入侵, 图 7 显示了 16:00~19:00 期间风场的进一步变化, 由图可见, 在短时强降水开始之前, 贴地层风场已经开始表现出了不连续的特征,

从 16:30 到 17:12, 真高 1000 米以下风场变化迅速, 自观显示, 从 16:50 至 17:12 短短的 22 分钟里, 降水量已达到 33.2 毫米, 因此可以推测近地面风场的变化与降水的拖曳作用和风暴下沉气流不无关联, 之后随着降水逐渐停歇, 近地面风场逐渐转为环境风场偏南风。

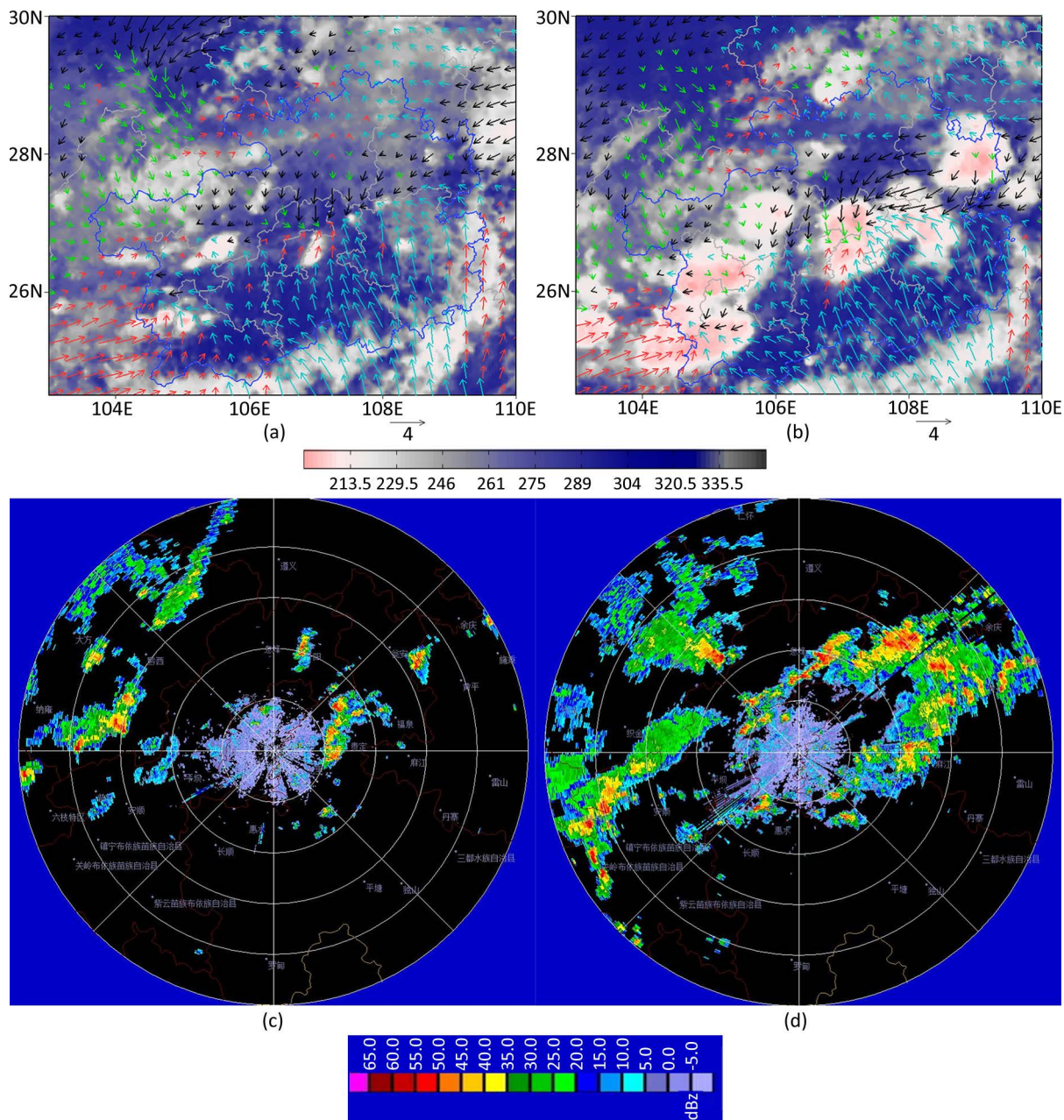
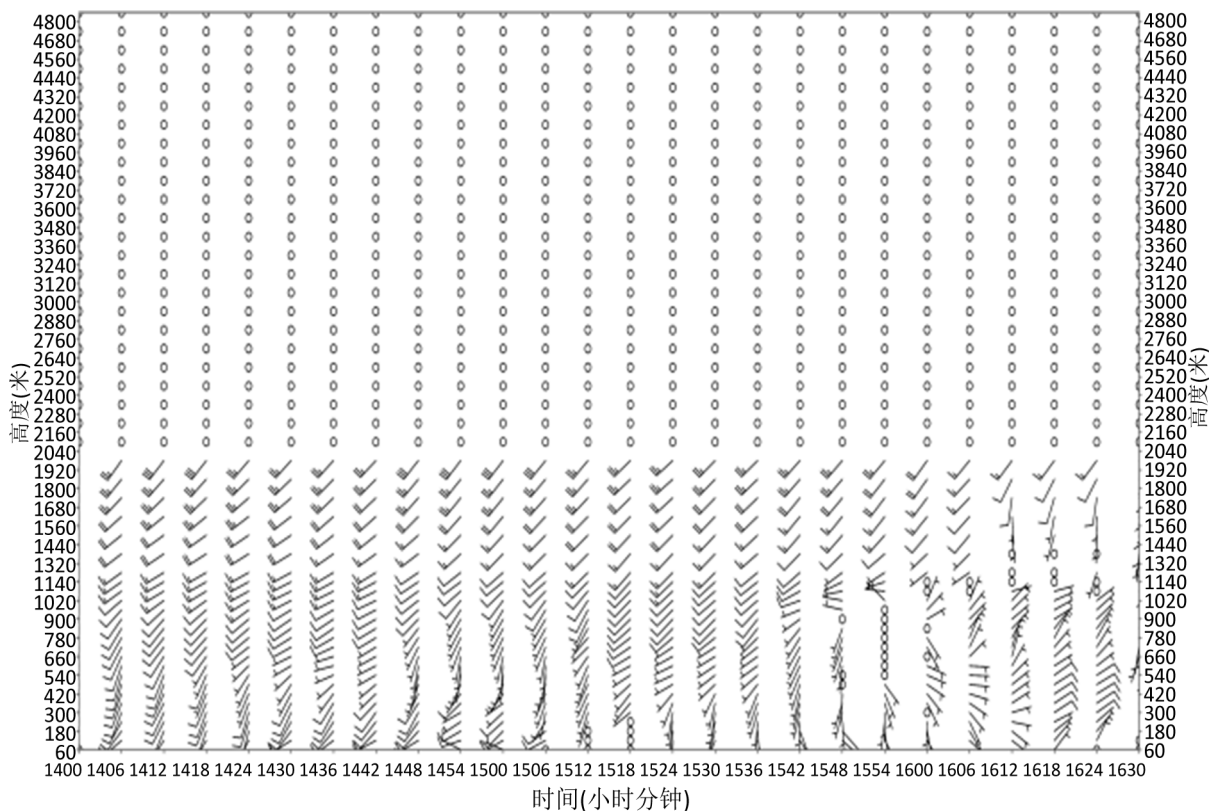
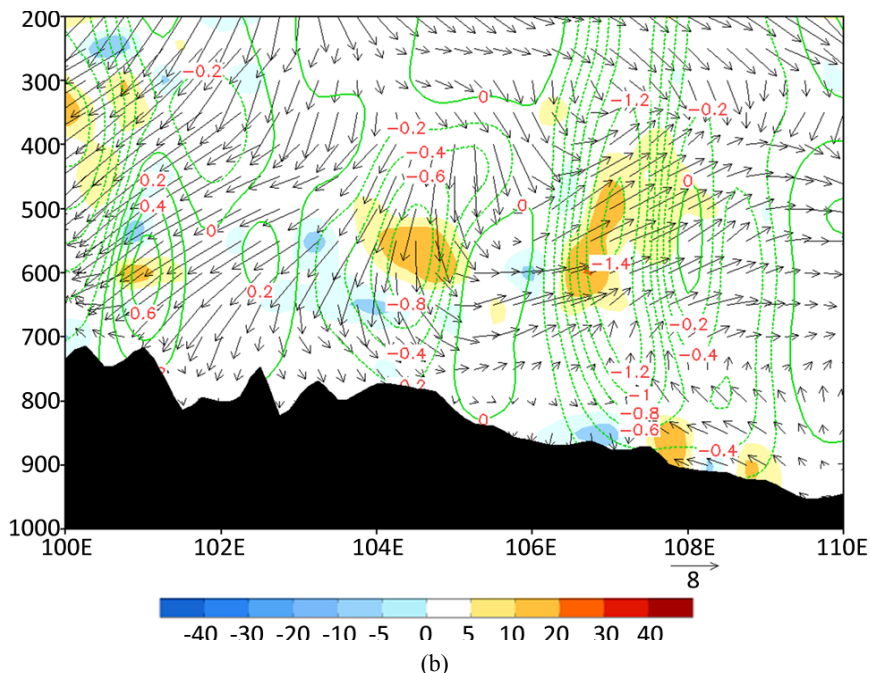


Figure 5. (a) 14:00 July 17, 2021 cloud top bright temperature of infrared band by Himawari8 satellite (colorfilled, Unit: K), ground wind field (wind vector, Black: Northeast wind, Green: Northwest wind, Light blue: Southeast wind, Red: Southwest wind, unit: m/s); (b) 16:00 July 17, 2021 himawari8 infrared satellite tbb (colorfilled, Unit: K), ground wind field (wind vector, Black: Northeast wind, Green: Northwest wind, Light blue: Southeast wind, Red: Southwest wind, unit: m/s); (c) Guiyang Airport Doppler radar PPI (elevation 2.5°) at 14:00 on July 17, 2021; (d) Guiyang Airport Doppler radar PPI at 16:00, July 17, 2021 (elevation 2.5°)

图 5. (a) 2021 年 7 月 17 日 14:00 葵花 8 红外卫星云顶亮温(填色, 单位: K)、地面风场(风矢, 黑色: 东北风, 绿色: 西北风, 浅蓝色: 东南风, 红色: 西南风, 单位: m/s); (b) 2021 年 7 月 17 日 16:00 葵花 8 红外卫星云顶亮温(填色, 单位: K)、地面风场(风矢, 黑色: 东北风, 绿色: 西北风, 浅蓝色: 东南风, 红色: 西南风, 单位: m/s); (c) 2021 年 7 月 17 日 14:00 贵阳机场多普勒气象雷达 PPI (仰角 2.5°); (d) 2021 年 7 月 17 日 16:00 贵阳机场多普勒气象雷达 PPI (仰角 2.5°)



(a)



(b)

Figure 6. (a) Wind field detected by wind profile radar of Guiyang Airport (14:00~16:30); (b) 16:00 Temperature advection (colorfilled: temperature advection, unit: 10^{-5} K s^{-1}), wind field (wind vector, unit: m/s), vertical velocity (green contour line, unit: Pa/s) along 27°N , $100^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$

图 6. (a) 贵阳机场风廓线雷达测风(14:00~16:30); (b) 沿 27°N , $100^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$ 垂直剖面, 16:00 温度平流(填色: 温度平流, 单位: $10^{-5} \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$)、风场(风矢, 单位: m/s)、垂直速度(绿色等值线, 单位: Pa/s)

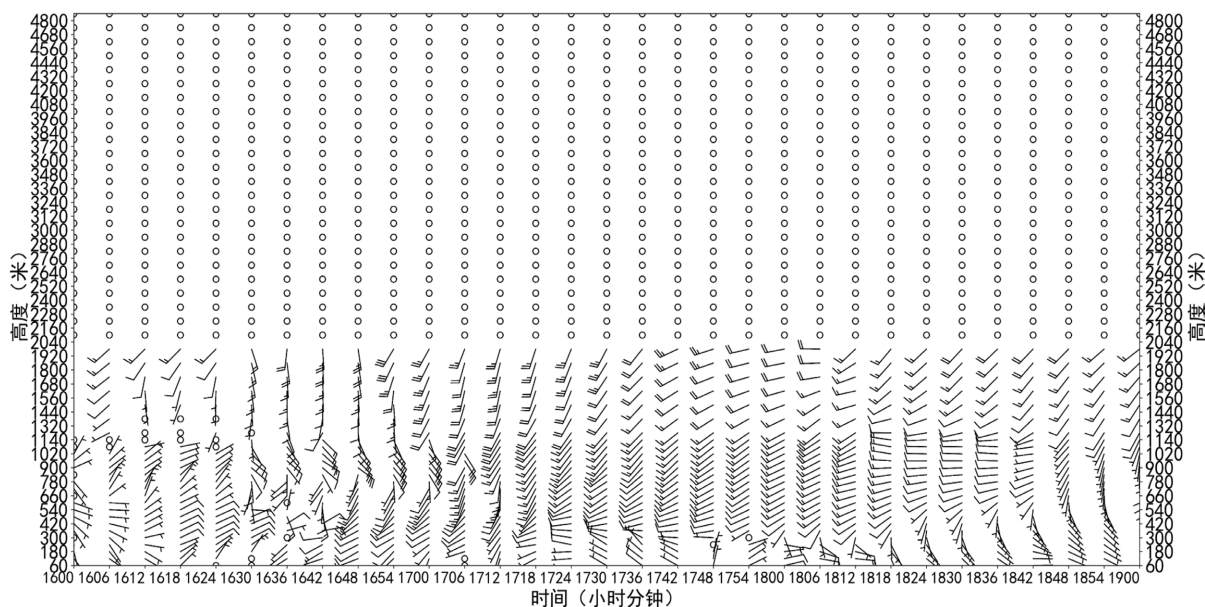


Figure 7. Wind field detected by wind profile radar of Guiyang Airport (16:00~19:00)

图 7. 贵阳机场风廓线雷达测风(16:00~19:00)

4.2. 垂直速度

风廓线雷达探测的垂直速度是测站上空大气垂直运动和降水粒子下沉运动的总和[2], 但是在实际应用中往往只考虑测量结果和降水发生发展之间的关系, 有研究表明, 当垂直速度大于 4 m/s 时代表降水的开始与持续, 贵阳机场风廓线雷达探测的垂直速度把正值定义为上升运动, 负值定义为下沉运动, 如图 8(a)所示, 在 16:36 分, 即短时强降水开始发生前的 14 分钟时, 近地面的垂直速度已经出现了 $> 4 \text{ m/s}$ 的区域, 随后这一大值区间不断向上延展, 在 17:36~18:12 之间达到了最大值, 并延展到当日风廓线雷达探测的上限高度(真高 1920 米), 垂直速度超过了 10 m/s , 随后垂直速度在 18:18 之后呈现出了陡然下降的趋势, 在短短的 6 分钟以内降到了 3 m/s 以下, 此时机场降水已经趋于停止。由于贵阳机场风廓线雷达与雨量筒安装位置距离相差 3 公里左右, 因此垂直速度只能代表测站上空的降水活动状态, 该指数作为参考指标有一定的短临参考意义, 但缺乏普遍的代表性。

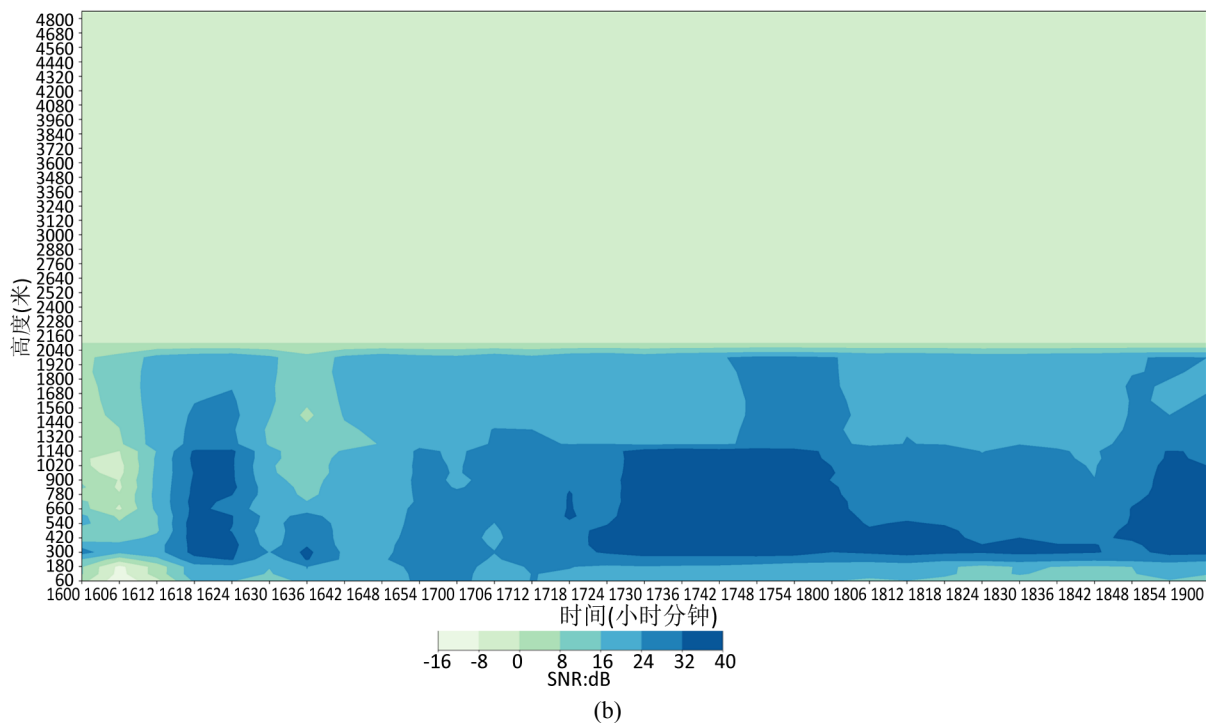
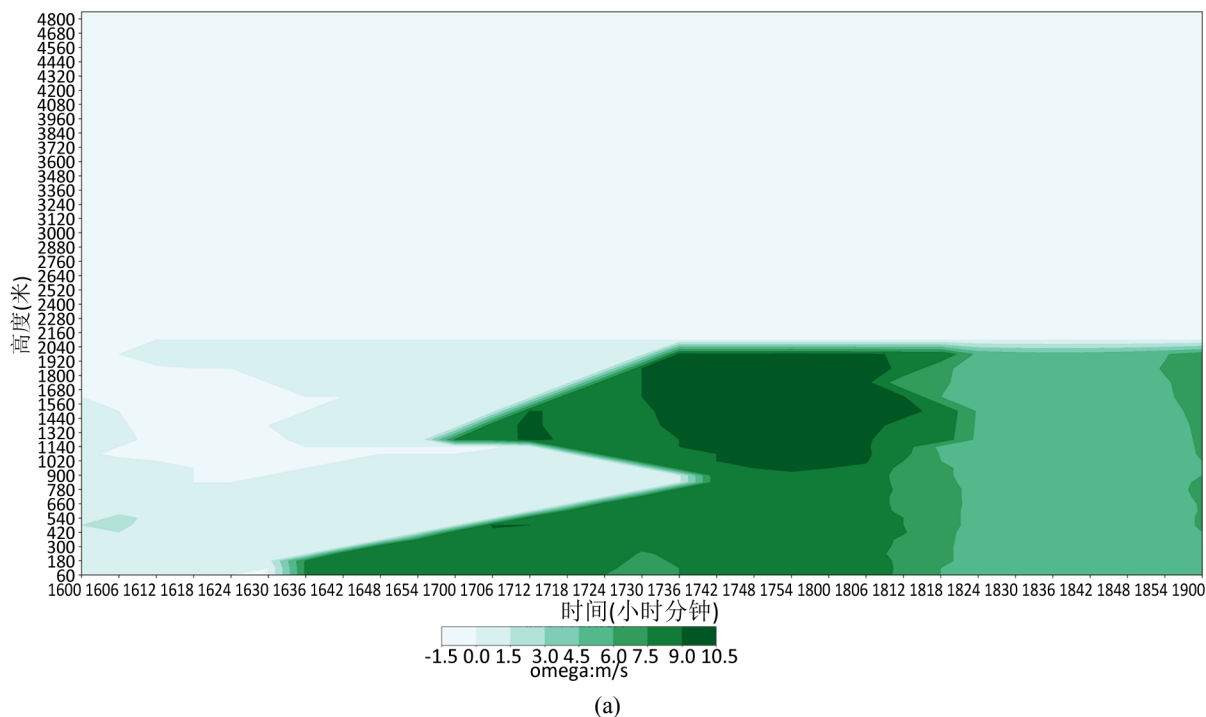
4.3. 信噪比

风廓线雷达信噪比(SNR)的变化与比湿梯度有显著的相关关系[15], 由于信噪比信号在随高度衰减的过程中遇到水汽分布不均匀等因素的影响就会造成信噪比的增强, 因此如图 8(b)所示, 在机场短时强降水开始前 32 分钟, 即 16:18 时机场上空信噪比就出现了异常增强的情况, 最大值超过了 32 dB , 随后经过了短暂的回落后, 信噪比从 16:54 分重新开始增强, 一直持续到了 18:18 左右, 期间最大值超过了 40 dB , 但相较于垂直速度, 信噪比增强区集中在真高 1200 米以下。在其他的外部环境不变的前提下, 降水粒子的活动是造成信噪比增强的最主要原因, 但当降水停止后, 信噪比固然是呈现出下降趋势, 但此时大气中的水汽仍然处于相对饱和的状态, 因此信噪比仍然维持了一段时间的较强值。

4.4. 谱宽

多普勒速度谱宽度(简称谱宽)越大, 代表在采样体内降水粒子的速度差异越大[16], 在不考虑非气象因素的情况下, 谱宽能很好地反应风切变和湍流的强度。如图 8(c)所示, 16:18 分左右, 贵阳机场风廓线

雷达探测的谱宽值出现了一次增强, 但幅度相对较小, 结合信噪比在此时间段的异常增强可以推测, 降水前机场上空低层大气已经出现了较强的风切变和湍流, 有利于对流不稳定度的增强, 为随后的短时强降水提供有利条件, 而在 16:50~18:00 期间, 谱宽出现了大幅度的增强, 该时段很好地对应了机场短时强降水出现的时段, 与其几乎重合, 谱宽最大值超过了 16 m/s, 原因可能是在降水时降水粒子下落的速度差异较大, 从而导致了谱宽增强。



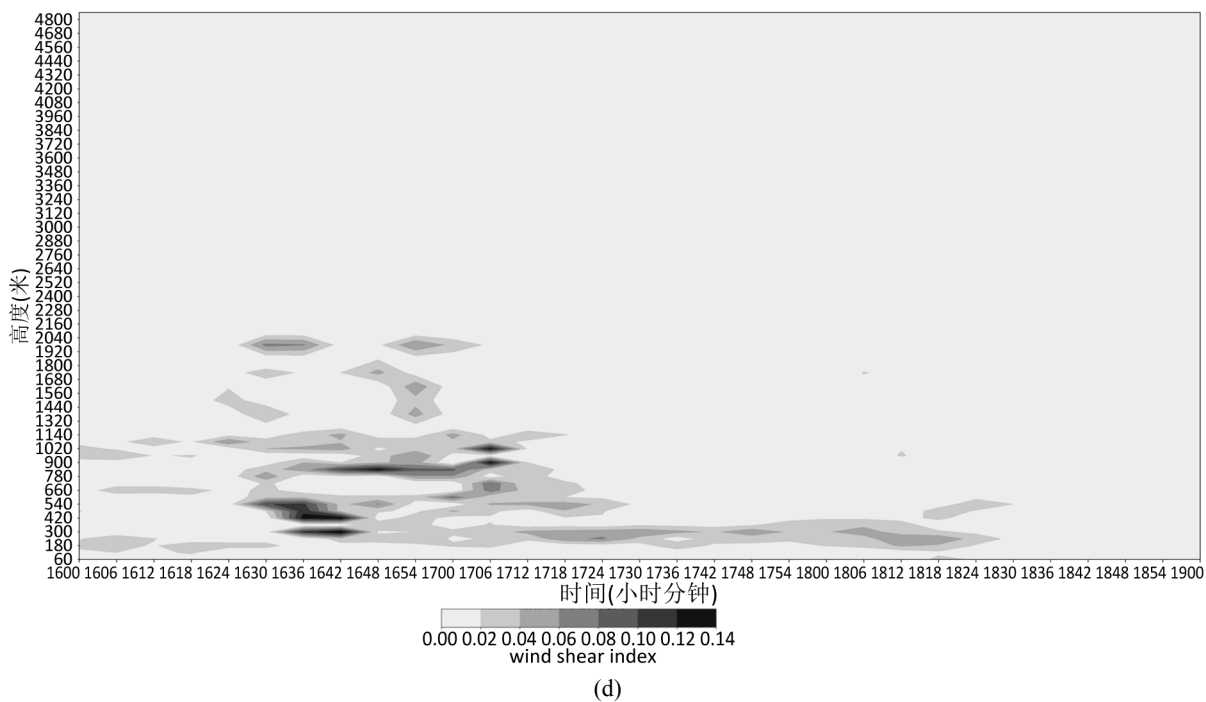
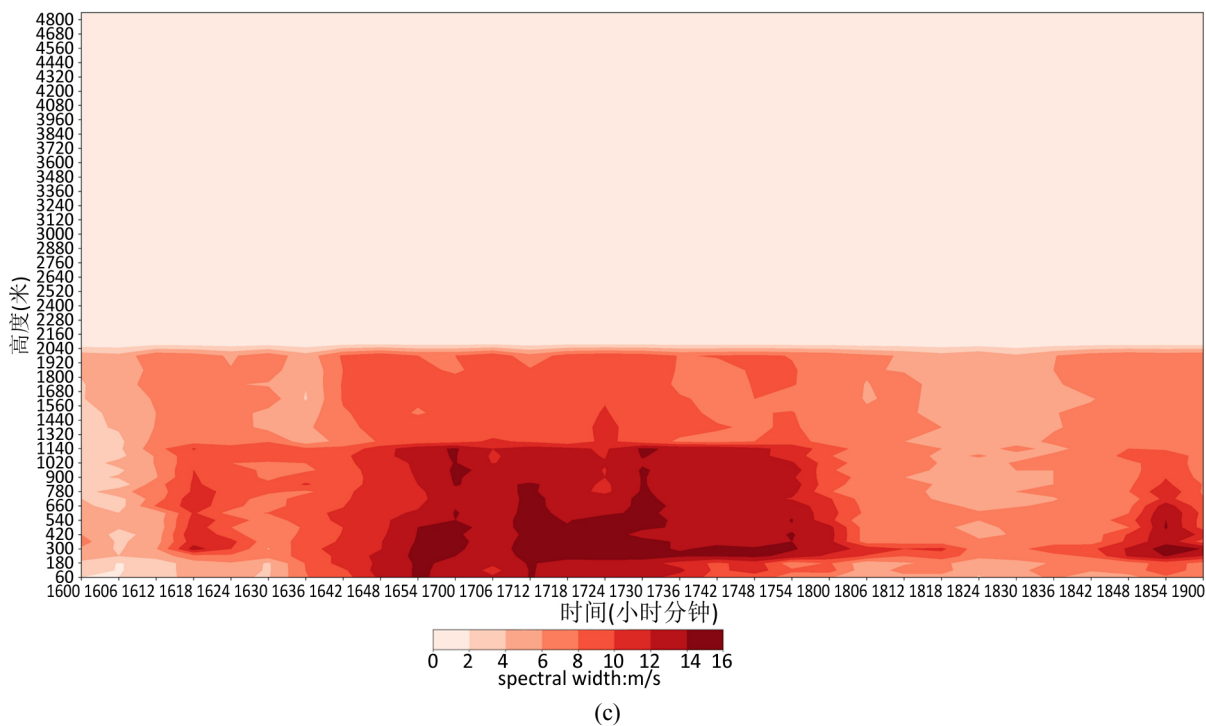


Figure 8. Wind profile Radar Detection at Guiyang Airport (16:00~19:00) (a) Vertical speed (colorfilled, unit: m/s); (b) signal-to-noise ratio (colorfilled, unit: dB); (c) Spectral width (colorfilled, unit: m/s); (d) Vertical wind shear index (colorfilled)
图 8. 贵阳机场风廓线雷达探测(16:00~19:00) (a) 垂直速度(填色, 单位: m/s); (b) 信噪比(填色, 单位: dB); (c) 谱宽(填色, 单位: m/s); (d) 垂直风切变指数(填色)

4.5. 水平风的垂直切变

国际民航组织对于水平风的垂直切变的强度定义中, 当切变指数介于 0.14 到 0.2 之间时, 视为重度

风切变[17], 图 8(d)显示, 在短时强降水开始前的 16:30 分, 机场真高 600 米以下出现了切变指数的大值区, 最大值超过了 0.14, 达到了重度风切变的程度, 低空风切变作为影响飞机飞行的隐形杀手, 危害性极大, 结合前文可知, 实际上从 16:18 分左右开始, 机场近地层就已经出现了较强的风切变和湍流, 该指标结合信噪比和速度谱宽, 可以为机场低空风切变短临预警提供较大的参考意义。

5. 结论

本文利用贵阳机场 CFL-03 型风廓线雷达结合多源数据对 2021 年 7 月 17 日贵阳机场一次强对流天气进行了综合分析, 重点研究了风廓线雷达探测资料在短临预报中的表现特征和指示意义, 得出以下结论:

1) 风廓线雷达资料能很好地反映贵阳机场上空水平风随高度的分布情况, 从而为强对流天气的短临监测和预警提供十分有用的帮助信息, 诸如判断低层大气冷暖平流, 低空急流强度, 冷空气入侵信号等信息均有助于提高本地强对流天气的短临预报服务。

2) 强对流天气在发生前, 本地边界层内的大气环境通常会出现一些细微的变化, 通过风廓线雷达的实时监测和产品释用, 可以有效地捕捉到这些微弱的讯号, 从而为提前预警提供帮助, 在本文涉及的短时强降水案例中, 风廓线雷达的垂直速度、信噪比和谱宽都与短时强降水有着很好的关联, 且信噪比和谱宽都在强降水开始前 30 分钟左右出现了显著的变化特征, 这些信号再结合多普勒气象雷达的实时探测, 可以为高时空分辨率的预警服务提供有力的支撑。

3) 低空风切变作为飞机飞行的隐形杀手, 是危害航空安全的重要极端天气, 由于其通常发生在局地狭小的范围, 难以被实时监测和预警, 贵阳机场风廓线雷达安装于跑道南端入口处, 其不仅可以实时测风, 还可以计算出水平风的垂直切变指数, 从而为进近和起飞的飞机提供垂直方向上的风切变预警。

参考文献

- [1] 周芯玉, 廖菲, 胡东明. 利用风廓线雷达对广东汛期短时强降水类暴雨过程低空风场特征的研究[J]. 热带气象学报, 2019, 35(3): 332-342.
- [2] 方桃妮, 黄艳, 叶妍婷, 等. 边界层风廓线雷达资料在浙中强对流天气中的应用[J]. 气象科技, 2022, 50(3): 369-379.
- [3] Wakasugi, K., Fukao, S., Kato, S., *et al.* (1985) Air and Precipitation Particle Motions within a Cold Front Measured by the MU VHF Radar. *Radio Science*, **20**, 1233-1240. <https://doi.org/10.1029/RS020i006p01233>
- [4] Benjamin, S.G., Schwartz, B.E., Koch, S.E., *et al.* (2004) The Value of Wind Profiler Data in U.S. Weather Forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **85**, 1871-1886. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-12-1871>
- [5] 王佳伟, 张琪, 张涛, 等. 成都两次暴雨期间风廓线雷达观测的低空风场特征[J]. 干旱气象, 2021, 39(1): 87-95.
- [6] 张月华, 王健, 郑玉萍, 等. 风廓线雷达资料在乌鲁木齐一次大暴雪过程分析中的应用[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(5): 49-54.
- [7] 罗娟. 风廓线雷达资料在重庆暴雨过程中应用分析[J]. 高原山地气象研究, 2017, 37(3): 40-45.
- [8] 董保举, 付志豪, 李明, 等. 风廓线雷达资料在暴雨天气过程特征分析中的应用[J]. 气象科技, 2012, 10(1): 74-78.
- [9] 曾瑾瑜, 夏丽花, 陈文键. 福建省风廓线雷达资料在一次强对流天气过程中的应用[J]. 气象与环境科学, 2014, 37(3): 40-48.
- [10] 翟亮, 王令, 刘文军. 两次降雪天气过程预报中边界层风廓线雷达资料的应用[J]. 气象科技, 2012, 40(5): 783-788.
- [11] 文彬, 梁文全, 邝家豪. 夏季风廓线雷达在雷州半岛强对流天气过程中的应用[J]. 广东气象, 2016, 38(5): 42-44.
- [12] 王令, 王国荣, 孙秀忠, 等. 应用多种探测资料对比分析两次突发性强降水[J]. 气象, 2012, 38(12): 281-290.
- [13] 王彦, 刘一玮, 孙晓磊. 利用风廓线雷达资料分析一次强降水过程的风垂直切变特征[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(2): 171-176.
- [14] 许丽萍, 刘敏, 李礼, 等. CFL-03 型边界层风廓线雷达的原理及其应用[J]. 分析仪器, 2014(5): 79-88.

- [15] 梅珏, 李新峰, 冯雷. 上海浦东机场风廓线雷达信噪比资料在云底高度判断中的应用研究[J]. 中国民航飞行学院学报, 2017, 28(6): 13-18.
- [16] 孙丽娜, 陈楠, 李妙英, 等. 南京地区一次短时强降水风廓线雷达资料特征分析[J]. 陕西气象, 2017(5): 13-16.
- [17] 罗浩, 刘烈霜, 李毅. 贵阳机场低空风切变成因分析和预报因子分析[J]. 空中交通, 2020, 318(3): 77-80.