

贵阳机场低空风切变成因初步分析

张亚男 罗浩

(中国民用航空西南地区空中交通管理局贵州分局, 贵阳 550000)

摘要: 利用ECMWF ERA5再分析资料、贵阳机场航空器语音报告、贵阳机场自动观测资料等, 通过合成分析及个例分析相结合的方法, 分析了贵阳机场冷锋型、昆明准静止锋型、低空急流型和局地对流型风切变发生时的环流形势、天气系统的配合以及风切变发生时的风场情况。结果表明: 1) 冷锋型风切变需关注偏北风在700 hPa和850 hPa上的东伸情况以及900 hPa上的南压程度, 机场跑道北端风向由南转北是风切变开始的信号; 2) 当准静止锋位于贵州省中西部时, 贵阳机场上空逆温层内的偏南急流及近地面的弱北风往往导致飞机遭遇垂直风切变, 当准静止锋在机场附近来回摆动时容易造成机场跑道南北两端出现对头风, 从而导致风切变; 3) 低空急流型风切变出现时, 低空急流与地面热低压相互配合, 近地面风场受地形影响导致机场跑道两端风速不连续而产生风切变; 4) 局地对流型风切变可结合天气雷达、机场自动观测数据来有效监测。

关键词: 低空风切变, 成因分析, 合成分析, 贵阳机场

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2023.02.009

Preliminary Analysis of Causes of Low-Level Wind Shear at Guiyang Airport

Zhang Yanan, Luo Hao

(Guizhou Air Traffic Control Sub-Bureau of CAAC, Guiyang 550012)

Abstract: Based on the ECMWF ERA5 reanalysis data, aircraft voice reports and automatic observation data of Guiyang Airport, by using composite analysis and case analysis, this paper analyzes the characteristics of atmospheric circulation, coordination between synoptic systems and wind field conditions when the low-level wind shear occurs at Guiyang Airport, including types of cold front, Kunming quasi-stationary front, low level jet and local convection. The results show that: (1) For the type of cold front, the eastward stretches of the north wind on 700 hPa and 850 hPa, and southward stretches of the south wind on 900 hPa play an important role in the early time. And it's a signal for the beginning of wind shear when the wind direction turns from south to north at the north end of runway. (2) When the quasi-stationary front is located in the midwest of Guizhou Province, the southerly jet in the inversion layer over Guiyang Airport and the weak north wind near the ground often cause the aircraft to encounter vertical wind shear. And when the quasi-stationary front swings back and forth near Guiyang Airport, the opposite wind direction at both ends of runway can lead to wind shear. (3) For the type of low-level jet, the low-level jet and the surface thermal depression cooperate with each other, also, the near ground wind field is affected by the terrain, which results in the discontinuous wind speed at both ends of runway. (4) The type of local convection can be effectively monitored in combination with weather radar and airport automatic observation data.

Keywords: low-level windshear, cause analysis, composite analysis, Guiyang Airport

0 引言

航空气象中的低空风切变是指发生在600 m高度以下空气层中, 风向和(或)风速突然变化的现象^[1]。它是航空器起飞和着陆阶段的重要危险因素, 具有持续时间短、尺度小、高度低、强度大、发生突然、预测难度大等特点, 因此被称为“空中隐形杀手”^[2-3]。早在1978年, Fujita^[4]首次在多普勒雷达上观测到

了“牛眼”形状的回波, 证实了可以用多普勒雷达探测下击暴流, 从而提取一些参数(如回波功率、谱宽、径向速度)来判定是否存在风切变及其危险级别; Wolfson等^[5]通过利用二维图像处理追踪单体增长特征和消散特征的方法对低空风切变进行预报; Williams^[6]提到辐射逆温型的低空急流天气可产生逆温风切变, 并且由于其强度通常较小, 容易被忽视; Harris等^[7]首次提出了直接计算差值滤波合成切变算法, 合成的切变产品逐步改进后与机载雷达相结合, 建立了早期的机载低空风切变预警系统。国内的相关研究中, 冯彦华^[8]通过分析广州白云机场低空风切变的时空特点及

收稿日期: 2021年12月22日; 修回日期: 2022年4月13日

第一作者: 张亚男(1992—), Email: ynu_zyan@163.com

通信作者: 罗浩(1988—), Email: ranally@163.com

其大气环流形势指出,广州低空风切变的发生与高压脊、脊后槽前、锋面低槽和热带环流等4种主要天气形势密切相关;马敏劲等^[9]统计分析了首都国际机场背景风特征和发生低空风切变时的风特征,表明高空动量下传可能是诱发机场低空风切变的重要机制;单乃超等^[10]对合肥机场一次雷暴型低空风切变的机理和成因进行了研究,指出机场低空风切变的产生主要是由 γ 中尺度对流单体底部的紊乱气流造成;翁雪玲等^[11]选取了3个大连机场典型低空风切变的天气个例,从个例分析的角度分析了大连机场典型低空风切变时的天气形势特点和低层的风场特征。对于西南地区,沈宏彬等^[12]分析西南地区低空风切变事件,指出昆明准静止锋是贵阳机场的主要影响系统;刘开宇等^[13]对2007—2011年发生在贵阳机场的冷锋型低空风切变案例进行了综合分析,揭示切变线和冷锋在低空风切变中的主导作用。

尽管过去已有大量学者^[14-15]对风切变的形成原因进行过研究,但其形成原因会随着各个机场所处位置的不同而有所差异。贵阳机场的风切变主要有冷锋型、昆明准静止锋型、低空急流型和局地对流型,目前有关贵阳机场四种类型风切变成因的系统分析较少。本文将用合成分析及个例分析相结合的方法对各类型的风切变进行详细分析,初步探讨各类型风切变发生的原因,以期对贵阳机场风切变的预报预警提供依据。

1 资料和方法

本文所选用的资料包括:1)2014—2020年贵阳机场接收到的低空风切变事件语音方式航空器空中报告;2)贵阳机场每日逐分钟的风向和风速资料、风廓线雷达资料、多普勒雷达资料;3)贵州省地面常规观测资料;4)08:00贵阳站探空资料;5)ECMWF ERA5 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 逐时再分析资料;6)地形数据GTOPO30是USGS以间隔30 s开发的全球数字高程模型DEM数据,并且经过41点滑动平均处理。本文所涉及的时间均为北京时。

2014—2020年贵阳机场收到的语音方式航空器空中报告的低空风切变事件共计63次,其中有9次风切变事件发生的高度在600 m及以上,因此本文不剔除发生高度在600 m及以上的风切变事件样本。按天气形势分型,冷锋型风切变29次,昆明准静止锋型13次,局地对流型11次,低空急流型10次。本文将对各类型风切变事件的背景场进行合成,以对各类型风切变事件发生的环境场及天气系统的配合情况有一个定性的认识;再挑选各类型的典型个例,从风场变化角

度进行具体分析,从而对风切变事件发生时的风向风速有一个定量的判断。其中背景场合成中,样本的时次以接收到的低空风切变事件语音方式航空器空中报告时间为准,半点为界,报告时间在半点及半点前则向前取前一个整点,报告时间在半点后则向后取后一个整点。

2 贵阳机场低空风切变成因分析

2.1 冷锋型

贵阳机场冷锋过境时往往伴随明显的风向由南向北的转变,锋线附近极易出现低空风切变。冷锋型低空风切变是贵阳机场发生频率最高的风切变类型,因此冷锋型低空风切变是贵阳机场四种风切变类型之前研究较多的^[13]。但对于风切变出现前及风切变出现时锋区的特征研究目前仍然较少,因此下文将风切变事件发生时的时间取整点后作为 t_0 时刻,对贵阳机场29次冷锋型风切变事件发生时的 t_0 时刻及发生前4 h的 t_{0-4} 时刻要素场进行合成。

从图1可以看到,风切变发生前4 h(图1a),700 hPa西南地区受槽前西南急流控制,急流核位于湘黔交界处,中心风速达16 m/s,高空锋区位于贵州省中部以北区域;风切变发生时(图1b),随着低空急流控制范围的减小以及急流轴的东移,等温线密集区略微南压,北风控制的区域出现明显的东伸,但向南扩展的程度并不明显。850 hPa上,在风切变发生前4 h(图1c),近地面冷空气主要从西北路径入侵贵州,锋区位于贵州中北部,呈准东西向,偏南风与偏北风形成的切变线位于省西北部,贵阳地区还受6~8 m/s的偏南风影响;而风切变发生时(图1d),锋区虽然只有略微南移,但南北风的交界线已南压至贵阳附近,且控制贵阳地区的偏南风已减弱至2~3 m/s。900 hPa上锋区的位置及变化特征与850 hPa上类似(图1e、图1f),但南北风辐合的位置相对偏东偏南,风切变发生前后,南北风的交界线出现明显的南移,贵阳地区的风向出现由南向北的转换,锋区的南压程度也是三层中最大的。总的来看,风切变发生前4 h,近地层上的锋区已位于贵州省中部,而700 hPa上锋区及南北风的交界线位于贵州省中部以北,在风切变发生过程中,贵州省偏南风的势力减弱,冷空气从西北路径侵入,整层北风控制区出现明显的南压东伸,而温度场上的变化不如风场上明显,因此冷锋型风切变需重点关注偏北风在700 hPa和850 hPa上的东伸情况以及900 hPa上的南压程度。

冷锋型低空风切变出现前后地面及空中风场变化明显。2021年3月19日18:49某航班在贵阳机场跑道上

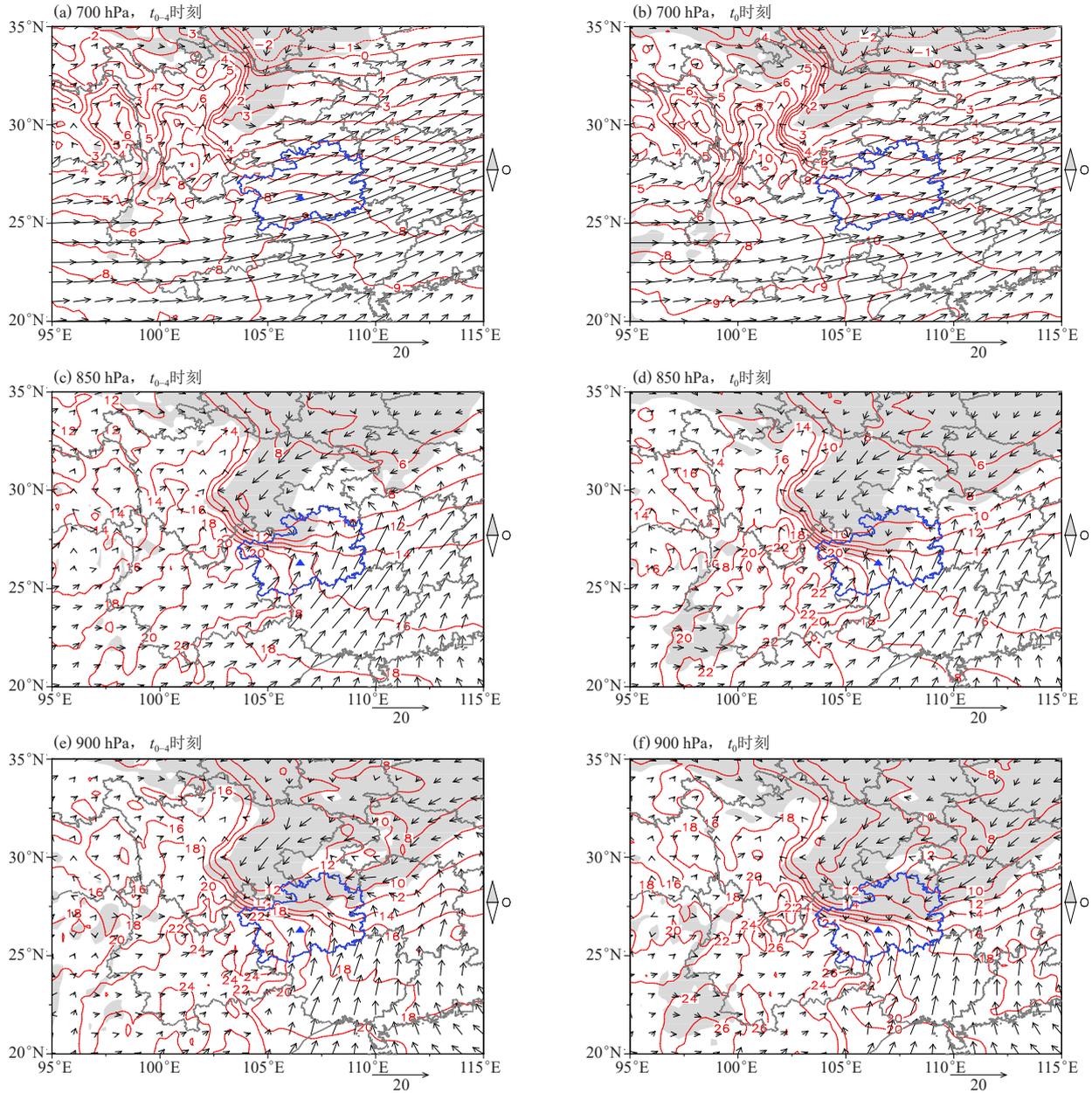


图1 700 hPa、850 hPa、900 hPa温度(等值线,单位:°C)、风场(风矢量,单位:m/s)和南北风(灰色:北风,白色:南风,单位:m/s)合成场(蓝色三角为贵阳机场所在位置)

Fig. 1 Composite temperature (contour, unit: °C), composite wind field (wind vector, unit: m/s) and composite north-south wind field (shade, gray: north wind, white: south wind, unit: m/s) on 700 hPa, 850 hPa and 900 hPa (blue triangle is the location of Guiyang Airport)

空20~30 m遭遇低空风切变复飞。下面,将针对该个例分析低空风切变发生前后贵阳机场地面及垂直方向上风向风速的变化情况。

从贵州省逐时10 m风场可以看到(图2),19日17:00地面辐合线位于贵州省中部,贵阳机场位于辐合线南侧。17:00—18:00,受冷空气影响,北风风速增加,辐合线快速南压至修文县与贵阳市白云区之间,修文站的风向由偏南风转为东北偏东风(图2a、

图2b);18:00—19:00,贵阳云岩区及南明区转为8~10 m/s的偏北风(图2c);19:00—20:00,辐合线南压至花溪以南(图2d),贵阳机场位于冷锋锋后。锋面过境期间,地面辐合线附近的南北风交汇明显,风向及风速均存在较大的不连续。

贵阳机场地面风向风速的变化情况可从机场自动观测资料得知(图3),19日18:29前贵阳机场以150°~200°的偏南风为主,风速在6 m/s左右;18:29

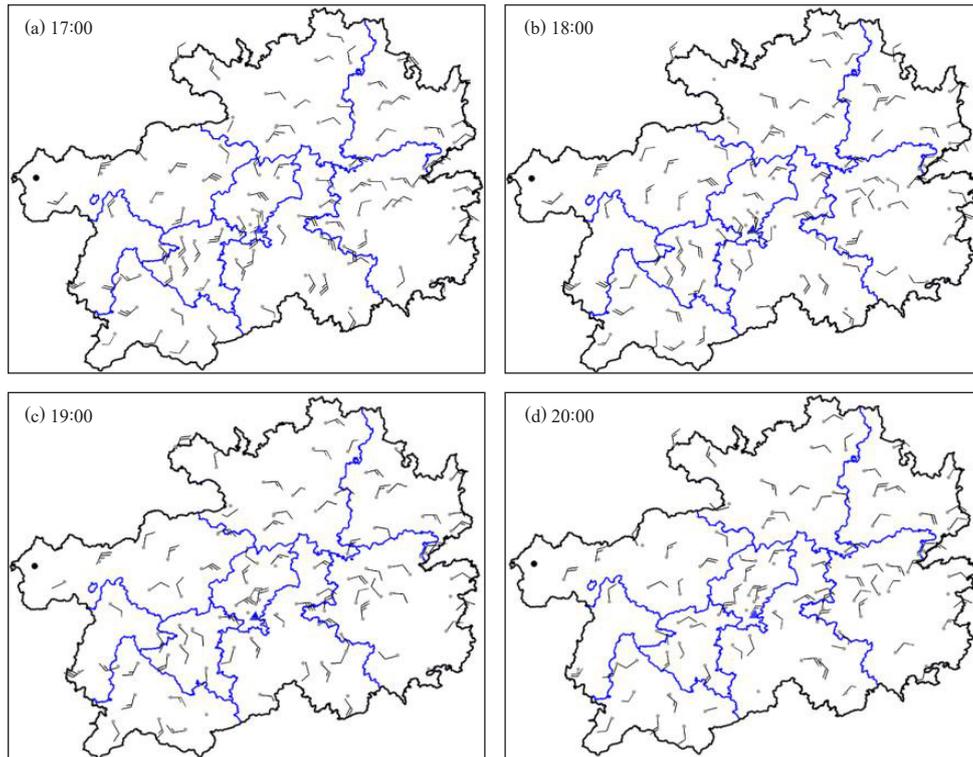


图2 2021年3月19日17:00—20:00贵州省地面常规观测10 m风场(蓝色三角为贵阳机场所在位置)
Fig. 2 10 m wind field of conventional observations at the surface in Guizhou Province from 17:00 BT to 20:00 BT on March 19, 2021(blue triangle is the location of Guiyang Airport)

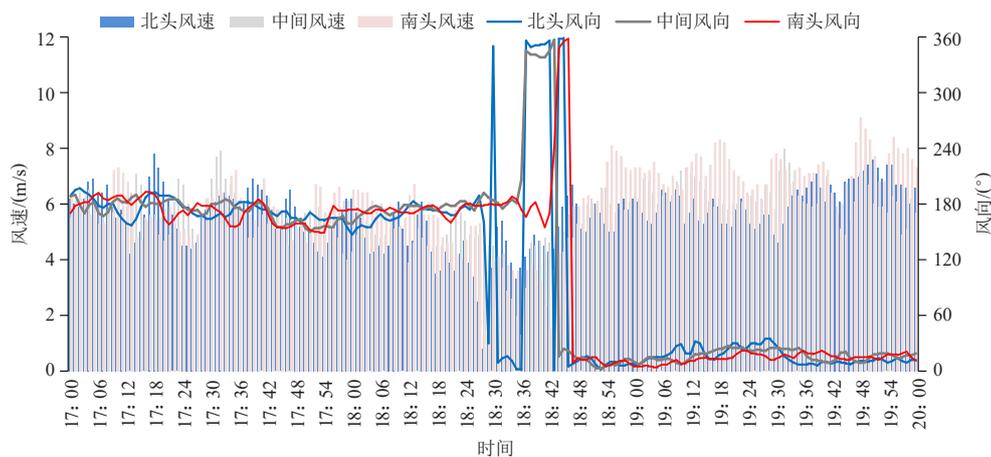


图3 2021年3月19日17:00—20:00贵阳机场逐分钟风向(折线)、风速(柱状)变化
Fig. 3 Change of minutely wind direction (broken line) and wind speed (columnar) of Guiyang Airport from 17:00 BT to 20:00 BT on March 19, 2021

跑道北端转为偏北风, 18:37跑道中间端转为北风, 18:44跑道南端转为北风, 整条跑道仅在15 min内便全部由南风转为北风, 并且北风的风速也在7 m/s左右。航空器报告风切变的时间在18:49, 即风向完全转为北风以后。

从图4可以看到冷空气从近地面及垂直方向入侵的情况, 由于贵阳机场风廓线雷达位于跑道南端, 19:00近地面依旧为南风, 在19:06才由南风转为北

风控制, 到20:00左右真高500 m以下才全部转为偏北风。因此, 即便整条跑道已经在18:44便转为北风, 但由于冷气团厚度的增加有一个过程, 期间冷暖气团在冷暖空气交界面上存在较强风切变, 使用跑道南端起/着陆的航空器依旧容易遭遇风切变。冷锋型低空风切变的短期预报需根据数值预报及经验订正判断冷锋过境的时间, 临近预报需实时监控机场上游站点的转风情况, 贵阳机场跑道北端风向由南转北是贵阳机

场风切变开始发生的信号。

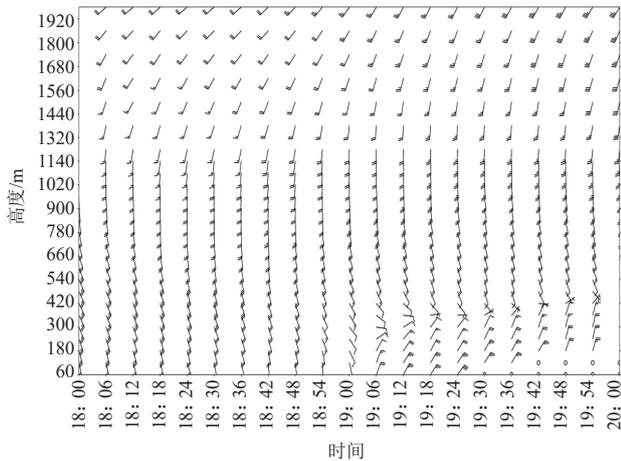
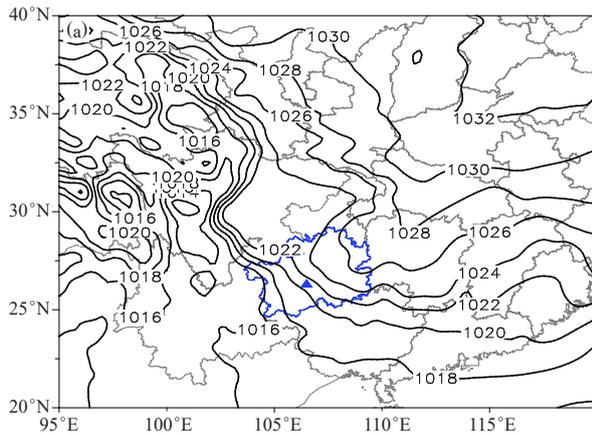


图4 2021年3月19日18:00—20:00贵阳机场风廓线资料
Fig. 4 Wind profile data of Guiyang Airport from 18:00 BT to 20:00 BT on 19 March 2021

2.2 准静止锋型

昆明准静止锋是我国西南地区东部云贵高原上



一个经常出现的天气系统，云贵地区平均每年约四分之一的时间内有昆明准静止锋存在^[16]，多出现在冬春季^[17]，对应13个准静止锋型低空风切变样本中有12个出现在冬春季，因此下文将对12个出现在冬春季的准静止锋型低空风切变事件样本进行合成。

昆明准静止锋型低空风切变的判断条件之一是准静止锋已在云贵地区维持至少2 d^[17]，对其出现时的海平面气压场进行合成可见(图5a)，等压线密集区位于贵州省中西部，准静止锋呈西北-东南向，贵阳虽然位于准静止锋锋后，但离锋面的经向距离通常在1个经度内；等压线高值区位于我国华北地区，高值区经河南-湖北-湖南中北部向贵州东北部扩张，说明此时冷空气来源于高压后部的东北回流，此路径下的冷空气相较西北及正北路径的强度更弱。从垂直方向上看(图5b)，锋面位于106°E左右，锋区内(105°~107°E)等温线密集程度不大，说明锋区强度较小；锋后700~900 hPa存在较厚的逆温层，逆温层的下界面在900 hPa左右，说明此时冷空气的厚度较薄，势力

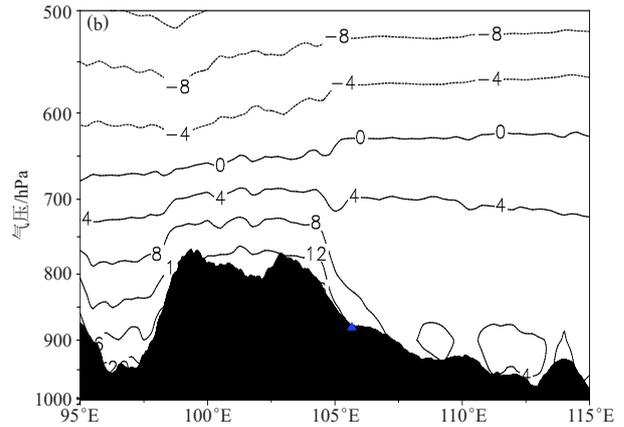


图5 昆明准静止锋在水平方向和垂直方向上的分布(蓝色三角为贵阳机场所在位置)
(a) 海平面气压合成图(单位: hPa), (b) 温度沿26°N的垂直剖面合成图(单位: °C)

Fig. 5 The distribution of Kunming quasi-stationary front in horizontal and vertical direction (blue triangle is the location of Guiyang Airport) (a) composite sea-level pressure (unit: hPa), (b) composite temperature along 26°N (unit: °C)

较弱。

从风场上看(图6)，700 hPa长江中下游以南的大范围地区为西南-东北向的低空急流控制，急流核位于湖南省，强度达19 m/s，而贵州省中部及以南区域风速均在17 m/s左右。850 hPa的风场则与700 hPa存在较大区别，从风速上看，无明显低空急流，贵州省大部分区域风速在5 m/s左右，相较700 hPa风速显著减小，说明两层之间存在风速的垂直切变。从风来看，全省大部区域的风向偏东，在贵州省西南部存在西南风与偏东风的辐合，省中部地区存在东北风与东南风的辐合，虽然辐合线附近存在风向切变，但是由

于风速较小，水平方向上风切变强度较弱，但若结合700 hPa的风向则可发现，850 hPa上贵州省中部地区的风向刚好与之相反，因此两层之间还存在风向的垂直切变。

2018年12月9日12:53，某航班在起飞阶段861 m处遭遇风切变。受准静止锋锋后的东北回流冷空气影响，贵阳机场近地面冬季盛行风向为东北风，且风速较小。11:00—13:00，贵阳机场整条跑道为一致的偏北风，跑道南端和北端的风向差多数在1°~20°，并且跑道南端与北端的风速差95%在1 m/s及以下，不存在明显的风向或风速切变。下面将针对近地面至中层

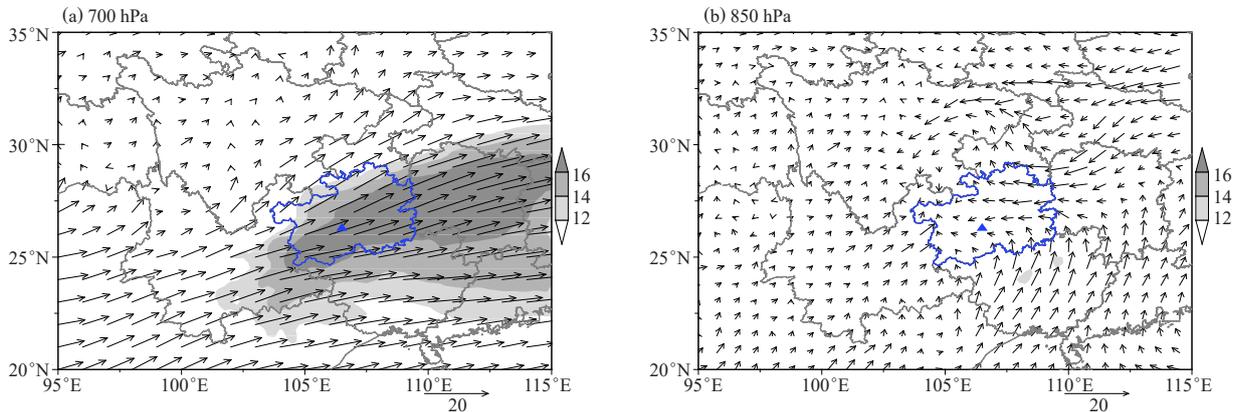


图6 水平风场(风矢量,单位: m/s)以及低空急流(填色,单位: m/s)合成图(蓝色三角为贵阳机场所在位置)
Fig. 6 Composite horizontal wind field (wind vector, unit: m/s) and low level jet (shade, unit: m/s)
(blue triangle is the location of Guiyang Airport)

的风场情况进行分析,以探求准静止锋型风切变发生的原因。

贵阳站点的探空图能够更加清晰地看到水平风场的垂直变化,图7a中可以看到,在800 hPa以下贵阳站为弱的东北风。结合图7b可见,在海拔高度1913 m以下为风速不超过5 m/s的偏北风,在海拔高度1913~2131 m风向有一个从偏北风向西南风的转变,风速也由2.1 m/s突增到9.8 m/s,在海拔高度2203 m(约800 hPa)就已达到低空急流的强度(风速在12 m/s及以上)。假设此时有飞机处于进近阶段,由于整条

跑道为一致偏北风,因此航空器将使用跑道南端进近着陆,在2200 m左右偏南风达到急流强度,航空器在进近过程中易出现顺风较大的情况;在进一步下降过程中,航空器从2131 m下降到1913 m,除了出现风速的急剧下降外,风向变化也由南向北转变,此时易出现风的垂直切变。对应图7a中的层结曲线可以看到,820~750 hPa(约1700~2500 m)存在明显的逆温层,此高度涵盖了两种形式产生的风切变,而逆温层的出现一方面受西南低空急流的影响,另一方面由于偏北风在向偏南风转变的过程中有一个减小的过程,导致冷空气的输送较近地面有所减弱;此外,逆温层离地面相对较高,因此准静止锋型风切变出现的高度也是四种类型中相对较高的(据统计,准静止锋型风切变出现在350 m以上的几率为58.3%,而冷锋型风切变、低空急流型风切变及局地对流型风切变出现在350 m以上的几率分别为35.7%、2.0%及18.1%)。除了逆温层内容易遭遇风切变外,当地面辐合线在贵阳机场附近来回摆动时,风向也将随着地面辐合线的摆动而出现南北风的反复转换,此时跑道近地面易出现南北风对吹的情况,出现明显的风向切变。

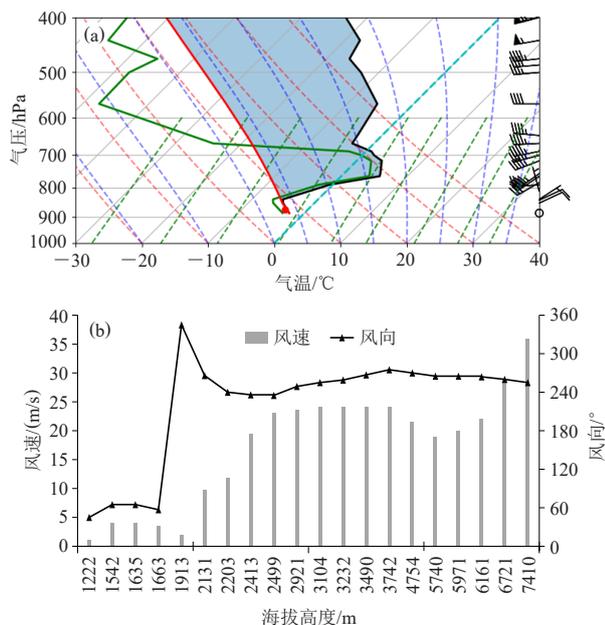


图7 2018年12月9日08:00贵阳站探空图(a)(黑线:层结曲线,绿线:露点曲线,红色:状态曲线)、风随高度的变化图(b)

Fig. 7 (a) T - $\log p$ (black line: stratification curve, green line: dew point curve, red line: condition curve), (b) change of wind with height of Guiyang Station at 08:00 BT on 9 December 2018

2.3 低空急流型

低空急流型风切变常出现在春季,高度通常在250 m以下。本文从近地面系统及中低层风场的角度进行分析,以便对此类型低空风切变出现的背景场有一个基本的认识;考虑到此类型低空风切变出现高度较低,因此可针对典型个例具体分析近地面的风场情况。

从700 hPa的风场图可以看到(图8a),滇东至湖北整个地区都受西南低空急流控制,急流中心位于湖南中西部,最大风速达17 m/s;贵州省除川黔交界处外均为风速大于12 m/s的急流影响,贵阳位于急流轴

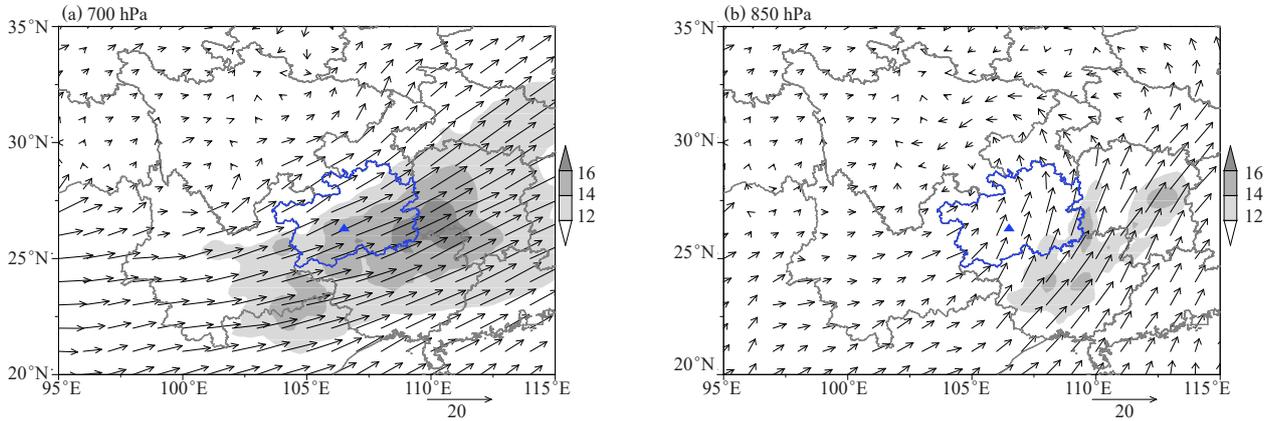


图8 14: 00水平风场(风矢量, 单位: m/s)以及低空急流(填色, 单位: m/s)合成图(蓝色三角为贵阳机场所在位置)
Fig. 8 Composite horizontal wind field (wind vector, unit: m/s) and low level jet (shade, unit: m/s) at 14:00 BT (blue triangle is the location of Guiyang Airport)

左侧; 850 hPa上(图8b), 贵州省受西南偏南气流控制, 虽未达到急流强度, 但是贵州中部最大风速也高达11 m/s。

从海平面气压场来看(图9), 整个四川、贵州以及云南东部均受低值系统控制, 低压中心位于川黔交界处, 对应在850 hPa上存在低压环流(图8b), 说明地面低压发展相对强盛, 此时贵阳受热低压控制, 且位于中心右侧。整体来看, 当700 hPa存在西南低空急流, 850 hPa存在偏南急流, 且贵阳位于急流轴左侧, 而地面热低压控制川黔区域, 贵阳位于中心右侧时, 贵阳机场常出现偏南大风。

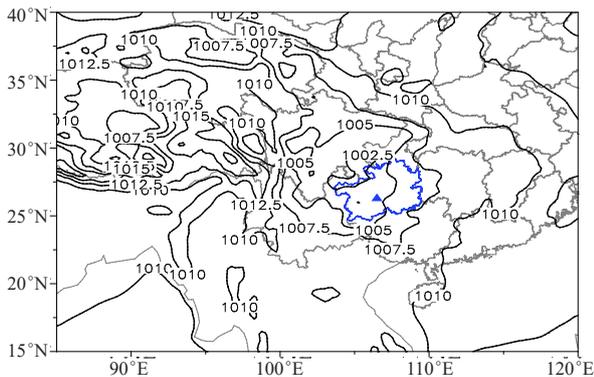


图9 14: 00海平面气压场合成(单位: hPa)(蓝色三角为贵阳机场所在位置)
Fig. 9 Composite sea-level pressure at 14:00 BT (unit: hPa) (blue triangle is the location of Guiyang Airport)

2018年3月3日18: 03, 某航班在起飞阶段250 m/s处遭遇风切变。2018年3月3日14: 00, 700 hPa上滇东至湖北整个地区都受西南低空急流控制(图略), 急流中心分别位于云贵交界处和湖南中西部。850 hPa上贵州省受偏南气流控制, 在华南至湖南存在西南-东北向的低空急流, 滇东地区也存在最大风速超过14 m/s

的急流核, 而地面贵州受热低压影响, 地面与中低层的配置与合成分析结果一致, 但此配置只能解释贵阳机场出现偏南大风的原因。考虑到风切变的出现具有局地性、突发性和瞬时性, 而低空急流型风切变通常出现在较低的高度, 因此下面将分析贵阳机场跑道南北两端逐分钟的风向、风速及风速差, 初步揭示低空急流型风切变发生的特征及原因。

如图10所示, 17: 30—18: 30, 贵阳机场跑道南北两端均为一致的偏南风, 风向在 $160^{\circ}\sim 200^{\circ}$, 集中在 180° 左右, 风向变化较小; 从风速上看, 56%的风速在8 m/s及以上, 最大风速达14 m/s。在南风情况下飞机使用跑道北端起飞或着陆, 南风风向稳定, 若风速也稳定, 即使风速较大, 水平方向也不易出现风切变, 而垂直方向上低层至中层均为偏南大风, 风速和风向在垂直方向的切变也较小, 此时飞机出现颠簸的可能性更大。但对比跑道南北两端的风速差可以发现, 风切变出现时, 跑道两端的最大风速差达6 m/s; 此外, 风速受地形的影响通常具有阵性的特征, 因此越接近下垫面风速受地形影响越大, 风的阵性特征也更明显, 因此低空急流型在低高度出现风切变的可能性是四种类型中最大的。2014—2020年贵阳机场接收到的低空风切变事件话音方式航空器空中报告中, 低空急流型风切变出现在50 m/s以下的概率为20%, 其次为冷锋型风切变, 出现概率为3.6%, 而静止锋型风切变及局地对流型风切变出现在50 m/s以下的概率均为零。

2.4 局地对流型

贵州省下垫面较复杂, 夏季局地对流天气频发, 局地对流通常尺度小、生消迅速、强度变化极快, 如果对流云团位于机场跑道上空或跑道延长线附近, 即便强度和范围不大, 也极易对飞机的起飞或着陆造成

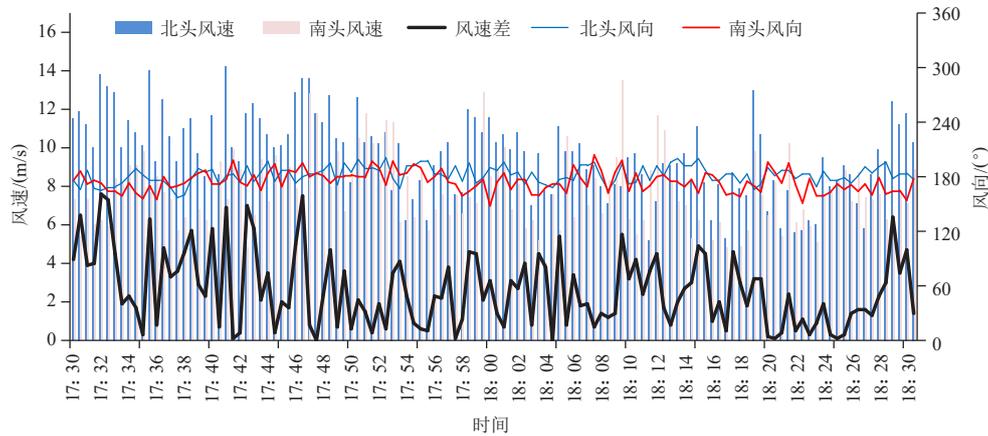


图10 2018年3月3日17:30—18:30贵阳机场逐分钟风向(折线)、风速(柱状)变化

Fig. 10 Change of minutely wind direction (broken line) and wind speed (histogram) of Guiyang Airport from 11:00 BT to 12:00 BT on 3 March 2018

威胁。传统的“流型识别法”基于大尺度环流型，对于有组织的对流风暴具有预报潜势；而对于尺度较小、相对孤立的局地风暴，通常使用“配料法”分析其温、湿、风参量的分布，业务预报中先分型后统计物理量阈值是一种快速有效的预报方法，但边界层辐合线、地形抬升、干线等中尺度系统能迅速而显著地改变局地环境，常常很难诊断^[18]。目前对局地对流天气的预报还比较困难，临近预报中主要依赖于天气雷达。

2018年8月21日11:45某航班使用跑道南端起飞

时在60 m高度处遭遇风切变。从雷达回波上可以看到(图11)，11:04—11:51，在贵阳机场周围10~120 km范围内有大量孤立对流云团，此消彼长，且几乎是原地生消。距离贵阳机场最近的强对流云团位于中心南侧15 km左右，强度最强为35~40 dBz左右，其余强对流云团距离机场相对较远；影响贵阳机场的回波主要为西北侧的降水回波，范围较大，强度在15~20 dBz，航空器遭遇风切变时强回波中心的范围已经有所减弱。

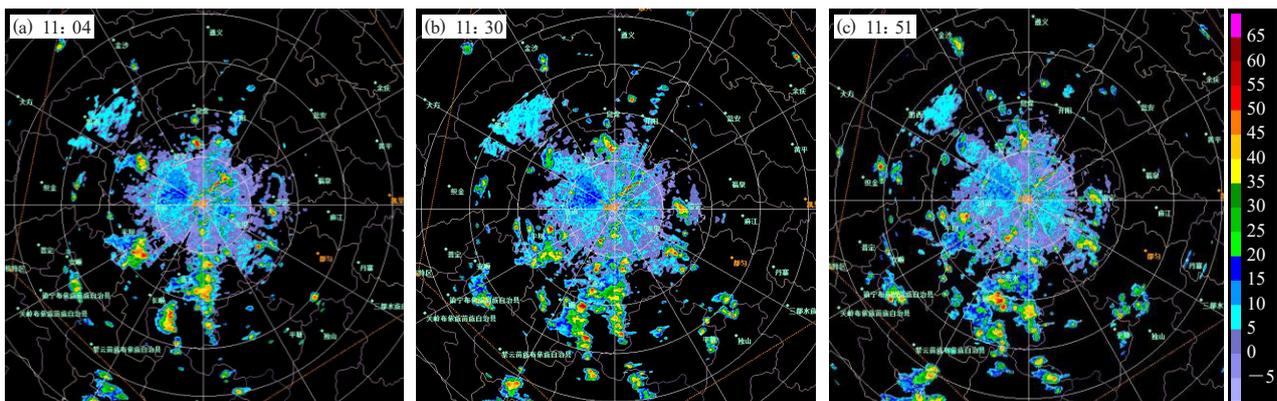


图11 2018年8月21日贵阳龙洞堡多普勒天气雷达组合反射率

Fig. 11 Composite reflectivity of Guiyang Longdongbao Doppler Weather Radar on 21 August 2018

虽然从雷达图上可以监测对流云的位置、强度及移动方向，但是不同强度及范围的对流云对机场的影响情况不同，尤其是当对流云团生消及强度变化都很快的情况下，依旧很难判断是否会出现风切变。然而从贵阳机场自动观测系统采集的风场可以看到(图12)，11:00—11:30，跑道北端受西北侧降水云团的影响以偏北风为主，跑道南端风向不稳定，偏南风居多，但期间两端风速均较小，多数不超过2 m/s；

11:30—11:40，两端风速略微增加，但多数不超过4 m/s，且风向均以偏南风为主；11:40—11:55，跑道两端的风速急剧增加，最大瞬时风速增加到12 m/s，且跑道北端与南端的风向刚好相反，因此极易遭遇低空风切变；12:00以后风速虽未即刻减小，但跑道两端的风向基本一致，不易出现低空风切变。

3 结论与讨论

本文通过天气形势分型、统计分析等方法，结合

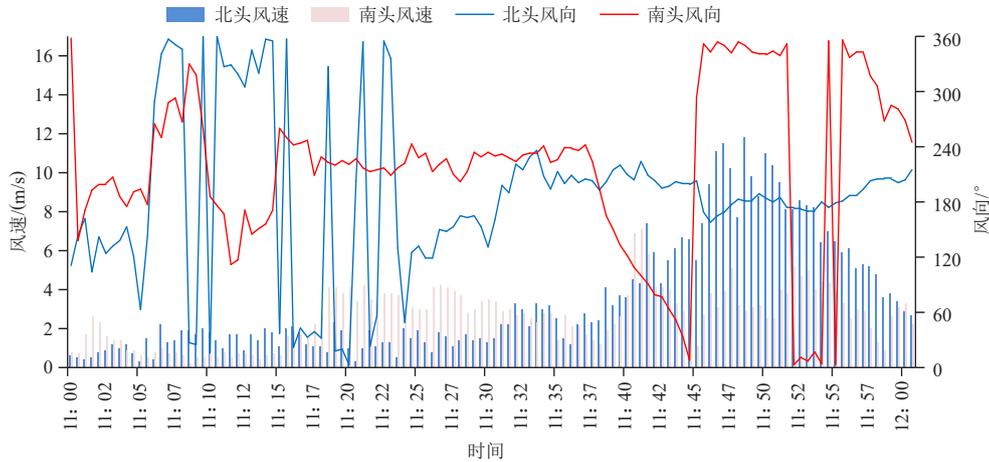


图12 2018年8月21日11: 00—12: 00贵阳机场逐分钟风向(折线)、风速(柱状)变化

Fig. 12 Change of minutely wind direction (broken line) and wind speed (histogram) of Guiyang Airport from 11:00 BT to 12:00 BT on 21 August 2018

典型案例,对贵阳机场冷锋型、昆明准静止锋型、低空急流型和局地对流型低空风切变的环流特征、关键天气系统配置及要素分布进行分型,并初步探究不同类型低空风切变的成因,得出以下结论。

1)冷锋型风切变的预报着眼点在于冷锋过境的时间,前期需关注偏北风在700 hPa和850 hPa上的东伸情况以及900 hPa上的南压程度,机场跑道北端风向由南转北是风切变开始的信号。

2)昆明准静止锋型风切变出现时,当锋面位于贵州省中西部,锋后机场上空700~900 hPa的逆温层内为偏南急流,近地面为弱北风,飞机易遭遇顺风较大和风的垂直切变;当准静止锋在机场附近来回摆动时容易造成机场跑道南北两端出现对头风,从而导致风切变。

3)低空急流型风切变出现时,西南地区700 hPa和850 hPa分别存在的西南及偏南低空急流与川黔区域的地面热低压相互配合,近地面风场受地形影响导致机场跑道两端风速不连续而产生风切变。

4)局地对流通常尺度小、生消迅速、强度变化极快,目前可结合天气雷达、机场自动观测数据来有效监测机场范围内低空风切变的发生发展。

参考文献

[1] 章澄昌. 飞行气象学(第二版). 北京: 气象出版社, 2008.
[2] Paul M, Yvette R. Observations of vertical wind shear heteroge-

neity in convective boundary layers. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(3): 843-861.
[3] 李秀连, 付强, 王科, 等. 风切变对飞行的影响及其预报时效分析. *气象科技*, 2010, 38(2): 170-174.
[4] Fujita T T. Objectives, operation, and results of NIMROD. 11th Conference on Severe Local Storms. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1979: 259-266.
[5] Wolfson M M, Delanoy R L, Forman B E, et al. Automated microburst wind shear prediction. *Lincoln Laboratory Journal*, 1994, 7: 399-426.
[6] Williams P. Aircraft trajectory planning for terrain following in incorporating actuator constraints. *Journal Aircraft*, 2005, 42(5): 1358-1362.
[7] Harris F I, Glover K M, Smythe G R. Gust front detection and prediction. 14th Conference on Severe Local Storms. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1985: 342-345.
[8] 冯彦华. 白云机场低空风切变的时空特点及其大气环流形势分析. *广东气象*, 2004, (4): 5-6.
[9] 马敏劲, 林超, 赵素蓉, 等. 北京首都国际机场低空风切变观测分析和数值模拟. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2013, 49(3): 70-76.
[10] 单乃超, 周后福, 陈少清, 等. 合肥机场一次低空风切变机理分析. *气象科技*, 2018, 46(6): 1240-1250.
[11] 翁雪玲, 于佳松, 徐建文. 大连机场典型低空风切变的成因分析. *气象与环境科学*, 2020, 43(1): 81-89.
[12] 沈宏彬, 赵润华, 张潇, 等. 西南地区低空风切变事件分析. *高原山地气象研究*, 2013, 33(3): 39-44.
[13] 刘开宇, 申红喜, 成永勤, 等. 贵阳机场冷锋型低空风切变的合成分析. *云南大学学报(自然科学版)*, 2011, 33(S2): 392-396.
[14] 刘开宇, 张映红, 曾维. 贵阳机场低空风切变的气候特征分析. *云南大学学报(自然科学版)*, 2012, 34(S1): 39-42.
[15] 逯野. 中川机场一次风切变天气成因分析. *科技风*, 2018, (29): 126-127.
[16] 段旭, 李英, 孙晓东. 昆明准静止锋结构. *高原气象*, 2002, 21(2): 205-209.
[17] 许美玲. 云南省天气预报员手册. 北京: 气象出版社, 2011.
[18] 王秀明, 俞小鼎, 周小刚. 雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论. *气象*, 2014, 40(4): 389-399.