

# 利用多源数据对 2019 年 2 月贵阳机场 准静止锋低云天气诊断分析

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, 贵阳 550012)

**摘要:**利用多源数据对贵阳机场 2019 年 2 月发生的昆明准静止锋低云天气进行诊断分析。结果表明:当贵阳机场发生低云天气时,昆明准静止锋位于  $24^{\circ}\sim 27.5^{\circ}\text{N}$ 、 $104.5^{\circ}\sim 109^{\circ}\text{E}$ ; 850 hPa 及以下的偏南气流为准静止锋背景下贵阳机场低云天气的发生提供了主要水汽来源,越接近地面,水汽来源越趋向于西太平洋;贵阳机场低云天气发生时,准静止锋具有浅薄冷空气层的特点,冷空气层平均厚度为 390 m,最厚 780 m,最浅时仅有 120 m。低云天气发生时,贵州中部一线多有地面辐合线出现,可分为三类:当准静止锋位于贵州西部或云南东部时,需要重点关注偏北风与东南风之间的辐合;当准静止锋东退时,近地面偏南气流大范围进入贵州中南部区域,并与偏北气流在贵州中部一线形成辐合;当准静止锋处于锋生时,较强的冷空气南下与昆明热低压前沿的偏南气流在贵州中部形成对峙,产生辐合线。

**关键词:**昆明准静止锋;低云低能见度;锋生函数;温度平流;水汽通量散度;地面辐合线

**中图分类号:** P441

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1674-2184.2023.02.006

## 引言

昆明准静止锋又称云贵准静止锋、滇黔准静止锋,是冬半年长期活跃在云贵高原上的天气系统,由于其单次维持时间长且出现次数多,因此对云贵地区冬半年的气候影响很大。昆明准静止锋不仅会带来低温凝冻天气<sup>[1]</sup>,还会触发暴雨等对流天气<sup>[2-3]</sup>。另外,常常伴随准静止锋而来的低云低能见度天气不仅严重影响地面交通,还会对航班的正常起降产生影响<sup>[4-6]</sup>,当机场出现云底高度低于 90 m 的低云或主导能见度降至 800 m 以下时,即可能会影响航班的正常起降,如果低云低能见度天气长时间维持,还会造成大量旅客滞留机场和航班大面积延误。从预报分析的角度出发,杨静等<sup>[7-8]</sup>不但总结了贵州锋面雾的基本特征和昆明准静止锋对贵州锋面雾的消生影响,指出贵州地区锋面雾通常发生在准静止锋后,具有浅薄云层、弱降水、弱逆温和地面水汽饱和等特征,还分析了昆明准静止锋雾的中尺度环境场及短期预报着眼点,强调了南支槽、850 hPa 切变线及偏南气流对准静止锋雾的影响。

贵阳机场位于云贵高原东部,冬春季受昆明准静止锋影响低云天气频发,不仅严重影响人们的正常出行,还常常造成大量航班返航备降,给航空公司带来

巨大的经济损失。尽管已在昆明准静止锋的形成、结构、环流特征等方面开展了大量研究<sup>[9-14]</sup>,但对于准静止锋近地面层风场结构的研究仍不够深入,严重制约了区域低云天气预报预警水平的提升。针对这一问题,本文利用地面常规观测资料进行加密插值处理,结合欧洲中心高精度地面再分析资料(ERA5 Land)和机场逐 6 min 风廓线雷达资料,重点研究了 2019 年 2 月贵州地区近地层风场结构和地面辐合线在昆明准静止锋发生发展及移动时的摆动情况,以期提升贵阳机场低云天气预报预警水平提供科技支撑。

## 1 资料和方法

本文选取的资料包括:(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)贵阳机场风廓线雷达逐 6 min 观测资料;(4)欧洲中心  $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$  ERA5 逐小时高空再分析资料;(5)欧洲中心  $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$  ERA5 Land 逐小时地面再分析资料;(6)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;(7)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。

昆明准静止锋的认定标准为云贵高原上地面锋线至少维持 2 d 以上<sup>[15]</sup>,地面锋线位置的确定是在综合考虑气象要素梯度、云量变化及地面风场的基础

收稿日期:2022-03-30

资助项目:中国民用航空西南地区空中交通管理局贵州分局科技项目(民航贵州空发[2023]9号)

作者简介:罗浩,工程师,主要从事数值天气预报研究。E-mail: ranally@163.com

通讯作者:张亚男,硕士研究生,主要从事短临天气预报研究。E-mail: ynu\_zyn@163.com

上进行人工判定。据统计, 2019 年 2 月云贵地区仅有 3 日(5~7 日)无昆明准静止锋存在, 静止锋存在的 25 日中伴随了 2 次锋消及 2 次锋生, 其余时候准静止锋多来回摆动, 当遇有冷空气加强时则西进, 当冷气团减弱且热低压发展时则东退。根据贵阳机场 AWOS 分钟级自动观测资料进行统计, 将昆明准静止锋背景下贵阳机场出现低云量 $\geq 5$ 个量(天空 8 等分)且云底高 $\leq 90$  m 并持续超过 2 h 的天气计为一次低云天气过程, 2019 年 2 月 1 日 00 时~3 月 1 日 00 时贵阳机场共计出现 20 次低云天气过程, 累计造成 3 架次航班复飞, 45 架次航班返航/备降, 具体分布时段如表 1 所示。由表可见, 2019 年 2 月贵阳机场大部分低云天气的发生有着较为明显的日变化特征, 主要集中在早晚两个时段, 发生时间通常在 08 时以前或 17 时以后, 平均持续时间为 6.36 h, 最长持续时间达到了 19.13 h (从 2 月 11 日 19:50 一直持续到次日 14:58)。由于早晚分别是航班出港和进港的高峰期, 因此造成大量航班延误, 甚至出现复飞或返航备降的情况。

本文对地面常规观测资料进行加密插值处理, 采用径向基函数三次样条插值(RBF Cubic Spline Interpolation), 插值经纬度范围分别为  $90^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ 、 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$ , 插值后网格数量为  $200\times 200$ , 插值后的地面场资料分辨率为  $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$ , 插值要素包括地面风向风速、主导能见度、气温、露点及相当位温。锋生函数采用标量锋生函数<sup>[16]</sup>:

$$F = \left( 2 \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\partial Q}{\partial y} \right) - 2 \left( \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \frac{\partial \theta}{\partial z} - D |\nabla_h \theta|^2 - \left[ E \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + 2H \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial y} - E \left( \frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 \right] \right) / |\nabla_h \theta|$$

(1)

式中:  $D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$ ,  $E = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$ ,  $H = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$ ; 当  $F > 0$  时表示有锋生作用, 反之表示有锋消作用。

2 准静止锋诊断分析

2.1 锋生区域分布

锋生函数大值区能够很好地对应昆明准静止锋的位置和强度<sup>[9]</sup>, 使用 ERA5 高空再分析数据对贵阳机场 2019 年 2 月共计发生的 20 次低云天气过程进行合成分析, 样本合成时取最接近低云发生的  $t_0$  时刻(以下简称  $t_0$  时刻)的整点数据(下同), 合成场能够反映出某一要素在不同时间范围内的总体分布情况。图 1 给出了相当位温和总锋生函数的合成场。如图所示,  $700$  hPa 上云贵地区并无明显锋生区域,  $850$  hPa 及  $900$  hPa 总锋生函数大值区主要分布于贵州中西部及南部地区, 与之对应的是相当位温的密集区域,  $900$  hPa 上总锋生函数大值区分布范围较  $850$  hPa 更广, 说明当贵阳机场低云天气发生时, 越接近地面则准静止锋的振荡范围越大。以贵州地区为事件关注区域, 当总锋生函数大值区位于贵州西部时呈准南北向, 锋生函数大值中心最西到达了  $104.5^{\circ}\text{E}$  附近, 而当总锋生函数大值区位于贵州中部一线时往往呈西北-东南向, 总锋生函数大值中心最北到达了  $27.5^{\circ}\text{N}$ 。整体而言, 总锋生函数大值区南北跨度在  $24^{\circ}\text{N}$  与  $27.5^{\circ}\text{N}$  之间, 东西跨度在  $104.5^{\circ}\text{E}$  与  $109^{\circ}\text{E}$  之间, 这与主观分析的准静止锋地面锋线位置变化是一致的。

2.2 天气形势及水汽来源

分析 20 次低云个例的环流背景场可知,  $500$  hPa (图略)中纬地区维持纬向偏西环流, 无明显槽脊活动, 由于昆明准静止锋的发展高度通常不超过  $700$  hPa<sup>[15]</sup>, 因此对  $700$  hPa、 $850$  hPa 及  $900$  hPa 的风场和湿度场进行合成分析(图 2)。如图所示,  $700$  hPa 合成风场显示为一致的西南气流, 风速达到了  $16\text{m/s}$  及以上的急流强度, 但并无明显水汽辐合,  $850$  hPa 和  $900$  hPa 则可见明显的水汽通量散度负值极大区, 主要分布于贵州省的中南部, 受地形高度的阻挡,  $900$  hPa 水汽辐合

表 1 2019 年 2 月 1 日~3 月 1 日贵阳机场准静止锋低云发生结束时刻及持续时间

日期	发生时间( $t_0$ 时刻)	结束时间	持续时间(h)	日期	发生时间	结束时间	持续时间(h)
2月1日	01:09	04:25	3.26	2月13日	19:50	02:13(次日)	6.38
2月1日	08:47	12:59	4.2	2月14日	03:51	11:08	7.28
2月1日	16:01	22:41	6.67	2月15日	18:02	21:28	3.43
2月5日	02:26	04:26	2	2月16日	22:40	00:57(次日)	2.28
2月8日	22:06	03:14(次日)	5.13	2月18日	00:59	03:58	2.98
2月9日	18:47	06:02(次日)	11.25	2月19日	00:09	11:20	11.18
2月11日	19:50	14:58(次日)	19.13	2月19日	19:43	07:56(次日)	12.22
2月12日	19:41	01:36(次日)	4.92	2月20日	18:23	20:24	2.02
2月13日	04:02	07:31	3.48	2月22日	19:55	22:02	2.12
2月13日	09:49	14:53	5.07	2月26日	19:45	07:54(次日)	12.15

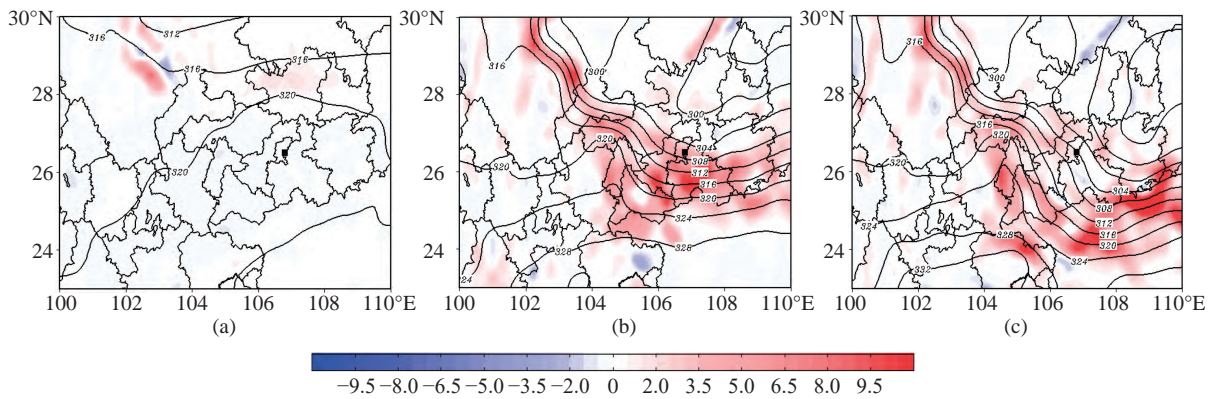


图 1  $t_0$  时刻相当位温 (等值线, 单位: K)、总锋生函数 (填色, 单位:  $10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 合成场 (a. 700 hPa, b. 850 hPa, c. 900 hPa, 黑色正方形表示贵阳机场所在位置)

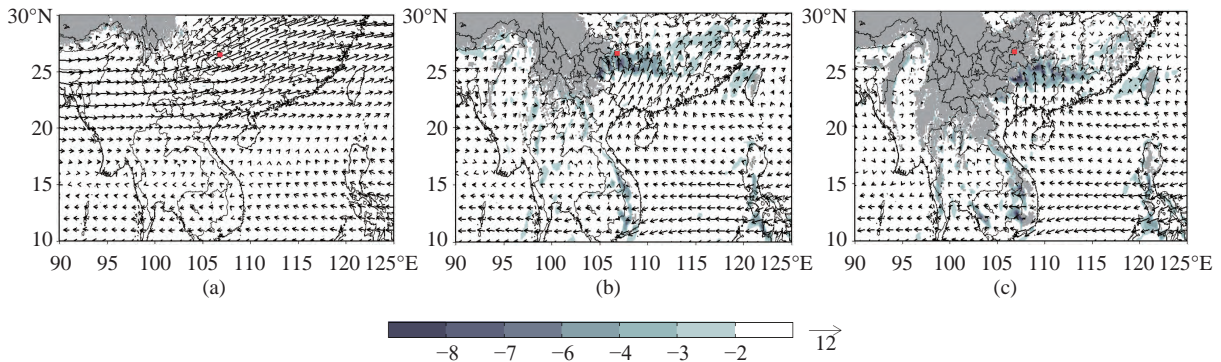


图 2  $t_0$  时刻风场 (风矢量, 单位: m/s)、水汽通量散度 (填色, 单位:  $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) 合成场 (a. 700 hPa, b. 850 hPa, c. 900 hPa, 灰色阴影表示高于指定气压层的地理区域, 红色正方形表示贵阳机场所在位置)

大值区相较于 850 hPa 更加偏南, 但强度却更强。由此可推测, 越接近地面, 尤其是 850 hPa 及其以下的层次, 水汽输送就越集中并趋近于饱和, 这与杜静等<sup>[7]</sup>的研究结论基本一致。结合风场来看, 850 hPa 上有来自印度洋经中南半岛绕流进入贵州区域与来自西太平洋经南海北上的两支暖湿气流, 而 900 hPa 上的水汽则主要来源于西太平洋; 这一方面是受地形影响, 另一方面则是由于来自印度洋的西南季风有着明显的雨季干季相互交错的特征, 冬季时往往较为干暖; 当暖湿气流从贵州南部山区持续向北输送, 由于地形摩擦和贵州中北部近地层冷空气的阻力逐渐缓滞, 导致这一带成为水汽辐合的集中区域。

从海平面气压场合成 (图 3a) 看, 昆明热低压中心在云南中部, 合成场低压中心气压值在 1010 hPa 以内, 而云贵高原东部是冷暖空气交汇的前沿地带, 等压线密集, 贵州省境内有 4 或 5 根等值线, 越接近西部地区, 等值线越密集并趋于南北走向。从地面风场合成 (图 3b) 看, 冷空气 (蓝色所代表的偏北风) 与暖空气 (红色所代表的偏南风) 交汇于云贵交界位置, 结合气压场及相当位温的密集分布可推断出地面锋线的位置, 总云量的合成场也反映出了准静止锋云界清晰的

特点, 锋面西侧暖区以晴好天气为主, 锋面东侧冷区则阴云密布, 多降水及低云低能见度天气<sup>[7]</sup>。

结合上文分析, 850 hPa 合成场偏南暖湿气流在水汽输送上有着显著的作用, 对 20 次个例逐一进行分析, 选择与  $t_0$  时刻最接近的 850 hPa 探空资料及地面观测数据进行对比 (数据样本计 19 次, 表 1 中  $t_0$  时刻 13 日 04:02 及 09:49 时刻较为接近, 均使用 13 日 08 时探空资料)。如图 4 所示, 850 hPa 偏南风共计出现 10 次, 偏北风 8 次, 偏东风 1 次, 而地面风向仅有 2 次偏南风出现, 其余 17 次均为偏北风, 这揭示了 2019 年 2 月贵阳机场低云天气发生时近地层冷暖气团配置的主导结构。就平均状况而言, 850 hPa 及以上贵州中南部区域受来自印度洋及西太平洋大范围暖湿空气水平输送的影响形成高湿环境, 同时由于云贵高原地形西高东低, 暖湿空气在向北水平运动时受地形摩擦作用或遇到来自偏东方向的气流后容易产生气旋性曲率, 位于贵州中部的贵阳机场正好位于气旋性曲率中心附近, 风向在偏东南风与偏东北风之间摆动; 地面风场则反映出与之不同的情况, 偏北风占据了绝对主导地位, 这说明冷空气垫的不可或缺, 下文将针对近地层冷暖平流的活动及冷空气垂直方向的厚



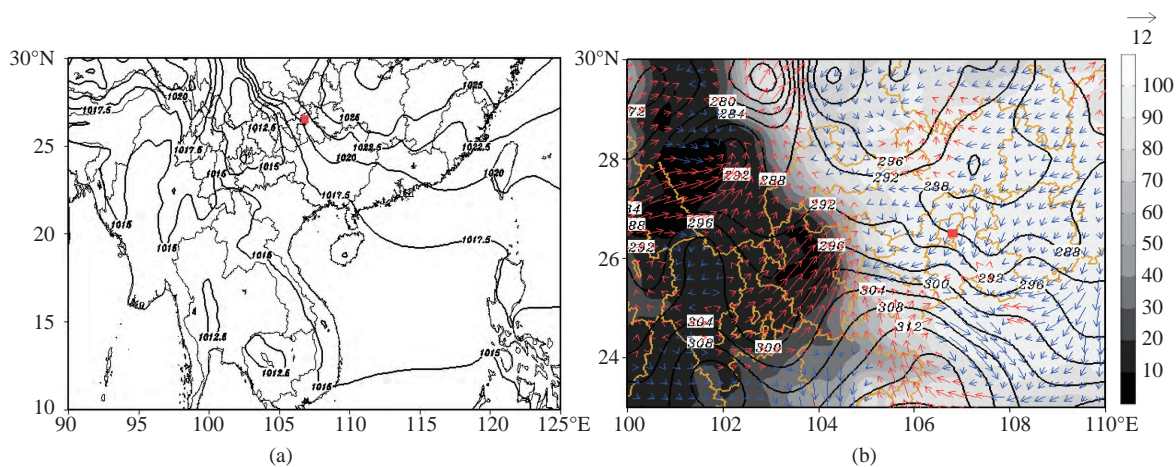


图 3 t0 时刻 (a) 修正海平面气压 (等值线, 单位: hPa) 和 (b) 地面风 (风矢量, 蓝色表示北风, 红色表示南风, 单位: m/s)、总云量 (填色, 单位: %)、相当位温 (等值线, 单位: K) 合成场 (红色正方形表示贵阳机场所在位置)

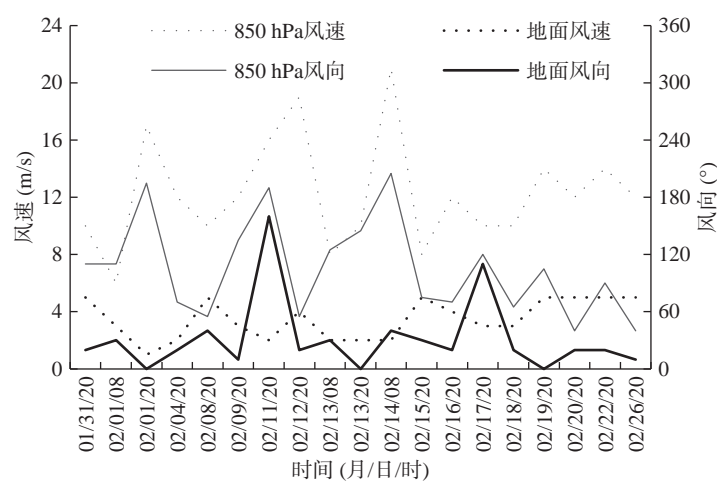


图 4 2019 年贵阳站 850 hPa 及地面风向、风速实况变化

度进行具体分析。

2.3 垂直结构

为了探究 2019 年 2 月昆明准静止锋在垂直方向上的结构特征, 对 20 次个例合成场部分要素沿 26°N 的经度-高度剖面(图 5)进行分析。如前文所述, 锋生函数大值区的范围横跨了 104.5°~109°E, 在垂直方向上最高只到达了 750 hPa 附近, 大部分都集中在 800 hPa 及以下区域。由此可以推断, 当贵阳机场发生低云低能见度天气时, 准静止锋的位置通常不会到达 104.5°E 以西, 垂直方向上的高度发展也通常不会超过 1000 m (以贵阳机场海拔高度 1139 m 为基准)。图 5b 可以清晰地看到水汽的来源主要是东南气流, 越接近地面, 水汽来源更趋向于西太平洋, 而位于近地面贴地层浅薄的偏东和偏东北冷气团虽然携带水汽较少, 却同样不可忽视。结合图 5c 可知, 近地层弱冷平流缓滞在东西向的倾斜坡面, 其上方的是暖空气控制的范围, 这样的冷暖结构在近地层形成了稳定的逆温层, 有利于长时间维持, 仅当有足够厚度的冷空气从中层或东

面侵入并破坏掉逆温层结构, 或当昆明热低压东北向发展并清除掉贵州中部贴地层冷空气势力时, 锋区结构才开始消亡。

贵阳机场自 2019 年起安装了风廓线雷达一部, 位于机场跑道南端, 风廓线雷达是利用大气湍流对电磁波的散射作用对大气风场等物理量进行探测的遥感设备, 能够有效探测大气边界层以内的风场结构, 对于贵阳机场而言其探测高度通常可达 3000 m 以上, 最高可达 5000 m 左右, 这对于研究准静止锋的风场结构来说已经足够。将近地面偏东到偏东北风视为冷空气, 偏南风视为暖空气, 冷暖空气分界处所在的高度减去地面高度视为冷空气的厚度, 同样对表 1 给出的低云天气发生 t0 时刻样本数据进行分析。如图 6 所示, 在 20 次样本中, 有 3 次近地面完全为偏南气流控制, 冷空气厚度记为 0 m, 这通常发生在地面辐合线来回摆动的情況之下, 并不代表冷空气势力的完全褪去; 其余 17 次近地面冷空气的厚度介于 120~780 m, 平均厚度仅为 390 m, 即在 850 hPa 附近, 这验证了前

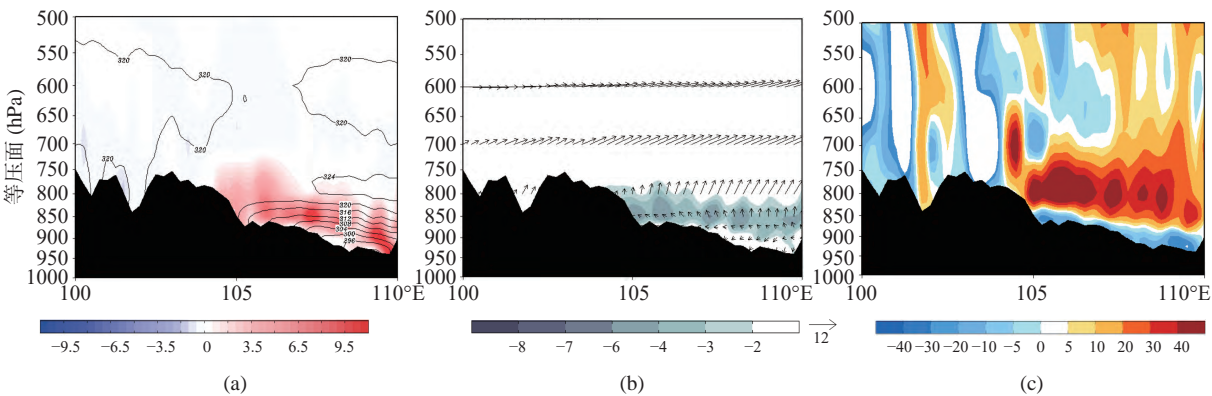


图 5 2019 年 2 月 20 次昆明准静止锋 t0 时刻合成的 (a) 总锋生函数 (填色, 单位:  $10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 与相当位温 (等值线, 单位: K)、(b) 风场 (箭头, 单位: m/s) 与水汽通量散度 (填色, 单位:  $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ )、(c) 温度平流 (填色, 单位:  $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 沿 26°N 的经度-高度剖面

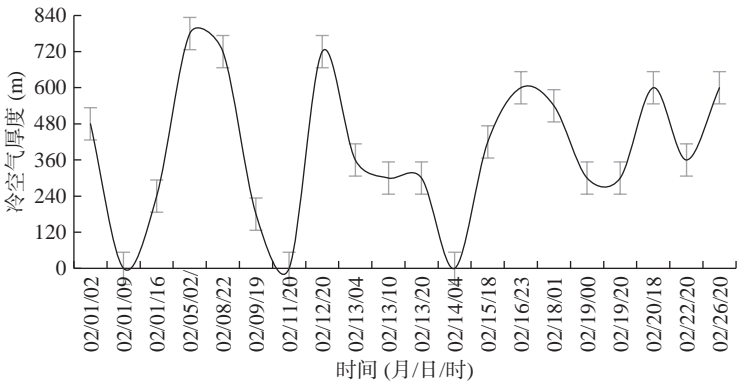


图 6 t0 时刻冷空气厚度

文所述的情况,冷空气高度较低且强度较弱,与位于冷空气之上的暖空气形成稳定的逆温层且长时间维持。分析风速可知,850 hPa 平均风速超过了 12 m/s,尤其是南风控制时风速往往更大,并携带有充沛的水汽,更容易造成大范围的低云低能见度及雨雾天气。需要注意的是,低云发生时 850 hPa 并不全为南风控制,而是介于偏东南风到偏东北风之间,贵阳机场通常位于其气旋性曲率中心附近,与此同时地面风场却

是北风占据了绝对主导地位,那从更大的水平尺度来观察,近地面又是什么情况呢?下文将针对这一问题继续研究。

3 地面辐合线特征

以贵阳机场为事件关注中心,通过对 20 次低云天气个例发生时的地面加密风场(图 7,经插值处理)逐一分析。如图所示,t0 时刻地面辐合线主要分布在

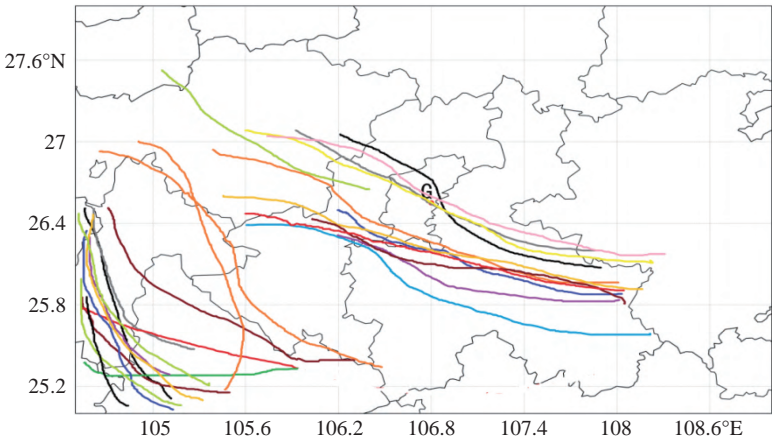


图 7 t0 时刻地面辐合线区域分布 (黑色 G 表示贵阳机场位置)

两个区域,即贵州西部云贵交界附近以及贵阳市中南部一线,有时单独出现,有时同时出现。如表 2 所示,在出现 7 次贵州中部偏北风与东南风之间的辐合时,同时在云贵交界处也出现了东南风与西南风之间的辐合。因此,表 2 中准静止锋前沿东南风与西南风之间的共 14 次辐合统计次数,实际是准静止锋锋后偏北风与东南风辐合共同出现 7 次以及单独出现 7 次的总和。从贵阳机场及其附近区域的地面风场情况来看,当准静止锋呈准南北向位于贵州西部地区时,锋区位置此时较为稳定,移动幅度较小;除了在云贵交界处有东南风与西南风的辐合之外,位于准静止锋锋后的区域需要关注的是偏北风与东南风之间的辐合。根据上文分析,近地层来自西太平洋上的暖湿气流自南而上,在遇有偏东到偏东北冷气团属性的气流后形成辐合,此类型辐合线多呈西北-东南走向,共计出现 7 次;当准静止锋呈东退趋势时,位于贵州西部云贵交界附近的辐合线随即消亡,伴随着准静止锋向东北方向摆动,辐合线北部位置变动较小,南部位置则东退北抬,最后同样呈西北-东南向位于贵州中部一线,此类型出现 4 次;当准静止锋前期锋消后重新建立且近地面冷空气南下时,准静止锋处于锋生阶段,冷空气前沿的偏北风与昆明热低压前部的偏南风形成南北辐合,此类型辐合强度较大,有时甚至触发对流天气或导致航班遭遇低空风切变,尤其是当热低压同样强盛时,辐合线往往能在贵州中部维持较长时间,此类型辐合线呈东西向或西北-东南向,2019 年 2 月仅出现 2 次。

由于昆明准静止锋具有雨滴小、降水弱等雨雾降

水特点<sup>[7]</sup>,因此本文使用地面风场结合能见度分布来分析准静止锋降水可能带来的低云低能见度天气。根据前文对地面辐合线的分类,选取不同时刻来分别代表准静止锋东退偏北风与偏南风辐合型(图 8a)、准静止锋后偏北风与东南风辐合型(图 8b)和准静止锋锋生偏北风与偏南风辐合型(图 8c)。如图所示,当准静止锋呈东退趋势时(图 8a),位于云贵交界处的西南风与东南风的辐合趋于消亡,随着南风势力的入侵,偏北气流退到贵州中部一线缓滞,形成西北-东南向辐合,此时有较大范围能见度低于 3 km 的雨雾分布,以贵阳市中部地区为辐合中心的能见度最低,机场也随之出现了大量因降水而产生的低云天气,造成航班延误和备降;当准静止锋稳定于贵州西部时(图 8b),东南风与西南风之间的辐合虽然不强,但仍有较大范围低能见度天气区配合,而贵阳市南部一线东南气流与偏北气流产生辐合则形成较大范围的低能见度天气区,几乎覆盖了贵阳市全部以及黔东南和黔南州的部分地区;而当有较强冷空气入侵时(图 8c),虽然南北风之间的辐合在毕节和贵阳市南部及黔南一线均有形成,但在对峙初期所激发的低能见度天气范围相对较小,但随着准静止锋逐渐成型,南风势力仍然强劲的情况之下,降水区域随之进一步扩大,从而导致更长时间的低云低能见度天气发生。

通过上述分析可知,无论是在准静止锋锋生或东退,还是准静止锋锋后的情况下,贵阳机场均可发生低云天气,其中准静止锋锋后型和准静止锋东退型占绝大多数,需要特别关注偏北风与东南风之间的辐合以及准静止锋东退时地面风场结构的变化。

表 2 t0 时刻地面辐合线各类型统计

准静止锋前沿 (东南风与西南风辐合)	准静止锋锋后 (偏北风与东南风辐合)	准静止锋东退 (偏北风与偏南风辐合)	准静止锋锋生 (偏北风与偏南风辐合)
14次(7次单独出现)	7次	4次	2次

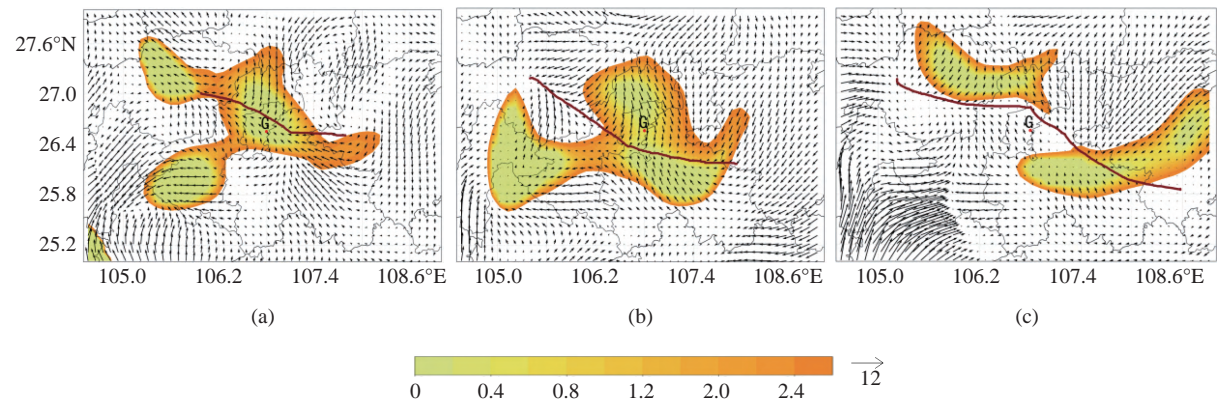


图 8 2019 年 2 月贵州地区不同时刻地面加密风场(风矢量,单位: m/s)和能见度(填色,单位: km)空间分布(a. 1 日 17 时, b. 9 日 20 时, c. 19 日 20 时,棕色实线表示地面辐合线,黑色 G 表示贵阳机场位置)



## 4 结论

本文利用多源数据对 2019 年 2 月贵阳机场发生的 20 次昆明准静止锋低云天气进行了综合诊断分析,重点研究了准静止锋近地层的温湿结构及水汽来源,并初步探讨了地面辐合线在准静止锋背景下对低云低能见度天气的影响,得出以下主要结论:

(1)当贵阳机场发生低云天气时,昆明准静止锋位于  $24^{\circ}\sim 27.5^{\circ}\text{N}$ 、 $104.5^{\circ}\sim 109^{\circ}\text{E}$ ,当锋面位于贵州西部或云南东部时多呈准南北走向,而当锋面东退至贵州中部地区时多呈西北-东南走向。

(2)850 hPa 及以下的偏南气流为准静止锋背景下贵阳机场低云天气的发生提供了主要水汽来源,具体表现在 850 hPa 上有来自印度洋及西太平洋的两支偏南暖湿气流,而受地形及印度洋西南季风干湿季明显的特征影响,越接近地面的水汽来源就越趋向于西太平洋,近地层稳定的水汽输送在向北平流的过程中与地形摩擦或受到来自偏东方向的气流后产生气旋性曲率,而贵阳机场正好位于气旋性曲率的中心附近,是水汽辐合的中心地带,易产生降水及低云低能见度天气。

(3)贵阳机场低云天气发生时准静止锋具有浅薄冷空气层的特点,冷空气层的平均厚度为 390 m,最厚时 780 m,最浅时仅有 120 m,浅薄的冷空气层在山区缓滞后形成贴地冷垫,与其上方的偏南急流形成稳定的温湿结构和逆温层,为低云天气的长时间维持提供了有利条件。

(4)贵阳机场发生准静止锋低云天气时贵州中部一线多有地面辐合线出现,可分为三类。当准静止锋位于贵州西部或云南东部时,需要重点关注偏北风与东南风之间的辐合,此类型辐合线多呈西北-东南走向;当准静止锋东退时,近地面偏南气流大范围进入贵州中南部区域,并与偏北气流在贵州中部一线形成

辐合,此类型辐合线也多呈西北-东南走向;当准静止锋处于锋生时,较强的冷空气南下与昆明热低压前沿的偏南气流在贵州中部形成对峙产生辐合线,此类型辐合线呈准东西向。

## 参考文献

- [1] 杜小玲,高守亭,彭芳. 2011年初贵州持续低温雨雪冰冻天气成因研究[J]. 大气科学, 2014, 38(1): 61-72
- [2] 肖艳林,池再香,严锐,等. 准静止锋背景下的贵州两次暴雨天气过程对比分析[J]. 中纬度山地气象, 2019, 43(1): 1-8
- [3] 杜正静,何玉龙,熊方,等. 滇黔准静止锋诱发贵州春季暴雨的锋生机制分析[J]. 高原气象, 2015, 34(2): 357-367
- [4] 徐海,周立,张潇. 一次准静止锋影响下的昆明长水机场大雾过程分析[J]. 高原山地气象研究, 2016, 36(3): 76-81, 96
- [5] 刘开宇,高勇,杨静. 贵阳机场一次云贵静止锋雾的诊断分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2019, 41(S1): 65-71
- [6] 杨凤婷,张媛. 贵阳机场一次准静止锋影响下的锋面雾天气诊断分析[J]. 中纬度山地气象, 2018, 42(3): 58-62, 79
- [7] 杨静,杜小玲,朱文达,等. 贵州锋面雾的基本特征及静止锋进退对其生消的影响分析[J]. 暴雨灾害, 2020, 39(5): 496-507
- [8] 杨静,吴哲红,汪超,等. 云贵准静止锋雾的中尺度环境场分析及短期预报着眼点[J]. 中纬度山地气象, 2018, 42(3): 1-10
- [9] 赵获. 昆明准静止锋的生成机制研究[D]. 云南: 云南大学, 2016
- [10] 段旭,段玮,邢冬. 昆明准静止锋客观判识方法研究[J]. 气象学报, 2017, 75(5): 811-822
- [11] 段旭,段玮,邢冬,等. 冬春季昆明准静止锋与云贵高原地形的关系[J]. 高原气象, 2018, 37(1): 137-147
- [12] 张亚男,段旭. 冬季1月昆明准静止锋进退及维持的结构特征[J]. 高原气象, 2018, 37(5): 1375-1387
- [13] 段旭,段玮,张亚男,等. 利用锋生函数对2008年年初昆明准静止锋生消过程的诊断分析[J]. 大气科学, 2019, 43(2): 325-338
- [14] 王曼,朱莉,段旭,等. 昆明准静止锋移动影响因子数值模拟试验[J]. 气象科技, 2021, 49(3): 362-371
- [15] 许美玲. 云南省天气预报员手册[M]. 北京: 气象出版社, 2011
- [16] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 95-106

## Diagnosis and Analysis of Quasi-stationary Front Low Cloud Weather at Guiyang Airport in February 2019 Based on Multi-source Data

LUO Hao, ZHANG Yanan\*

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

**Abstract:** Using multi-source data, Kunming quasi-stationary front low cloud weather occurring in Guiyang Airport in February 2019 is diagnosed and analyzed. It shows that when the low cloud weather occurs in Guiyang Airport, the Kunming quasi-stationary front is located at  $24^{\circ}\text{N}\sim 27.5^{\circ}\text{N}$  and  $104.5^{\circ}\text{E}\sim 109^{\circ}\text{E}$ , the southerly airflow at 850 hPa and below provides the main source of water vapor for the occurrence of low cloud weather in Guiyang Airport under the background of quasi-stationary front. The closer to the ground, the more the water vapor source is coming from the western Pacific. The quasi-stationary front has the characteristics of shallow cold air layer when the low cloud weather occurs in Guiyang Airport. The average thickness of the cold air layer is 390 meters, the maximum thickness is 780

meters, the shallowest was only 120 meters. Ground convergence line appears more often in central Guizhou when the quasi-stationary front low cloud weather occurs in Guiyang Airport, it can be divided into three types: When the quasi-stationary front is located in western Guizhou or eastern Yunnan, the convergence line between northerly winds and southeast winds should be pay more attention; When the quasi-stationary front retreats eastward, the southward airflow near ground moves into the central and southern regions of Guizhou, and form a convergence line with the northerly airflow; When the quasi-stationary front is at the frontogenesis step, a strong cold air encounters southerly airflow in the front of Kunming thermal low pressure in central Guizhou, which generates a convergence line.

**Key words:** Kunming quasi-stationary front, Low-level cloud and visibility, Frontogenesis function, Temperature advection, Water vapor flux divergence, Ground convergence line