

成都双流机场两次辐射雾发展过程对比分析

徐海, 杨桢楠, 胡俊峰

民航西南空管局气象中心, 四川 成都

收稿日期: 2026年6月18日; 录用日期: 2026年7月14日; 发布日期: 2026年7月28日

摘要

利用成都双流机场自动观测系统资料, 对2023年1月5日和3月3日两次辐射雾过程进行对比分析。两次过程环流背景相似, 均为高空槽快速东移后夜间转晴、辐射降温导致地面饱和, 但两条跑道端(02L、02R)能见度差异显著: 1月5日两端均出现浓雾, 最低能见度150 m; 3月3日仅02R端起雾, 02L端能见度维持在1000 m以上。结果表明, 起雾端气温稳步下降、相对湿度波动上升至97%以上, 未起雾端气温下降缓慢; 起雾端风速较小(1.0 m/s以下)、水平湍流动能较低(0.2 m²/s²以下), 但湍流强度偏大, 未起雾端风速偏大(最大2.1 m/s)、水平湍流动能较高(达0.6 m²/s²)而湍流强度偏小。利用机场地面风资料计算的湍流动能和湍流强度对辐射雾临近预报具有一定参考价值。

关键词

辐射雾, 能见度差异, 湍流

Comparative Analysis of Two Evolution Processes of Radiation Fog at Chengdu Shuangliu International Airport

Hai Xu, Linan Yang, Junfeng Hu

Meteorological Center, Southwest Air Traffic Management Bureau of CAAC, Chengdu Sichuan

Received: June 18, 2026; accepted: July 14, 2026; published: July 28, 2026

Abstract

Based on automatic observation data of Chengdu Shuangliu International Airport, compare two radiation fog events on January 5 and March 3, 2023. Both events occurred under similar circulation conditions: clear nights after the rapid eastward shift of upper-level troughs, where radiative cooling led to surface air saturation. However, visibility varied significantly between the 02L and 02R

runway thresholds. Dense fog affected both runways on January 5, with a minimum visibility of 150 m, while fog only occurred at the 02R threshold on March 3, and the visibility at the 02L threshold remained above 1000 m. The results show that fog-prone areas experienced steady temperature drops and fluctuating relative humidity rising above 97%, whereas temperature decreased slowly in fog-free areas. At foggy runway ends, the wind speed was below 1.0 m/s and horizontal turbulent kinetic energy was less than $0.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$, with relatively high turbulence intensity. In contrast, fog-free runway ends had a maximum wind speed of 2.1 m/s and higher horizontal turbulent kinetic energy up to $0.6 \text{ m}^2/\text{s}^2$, but lower turbulence intensity. Turbulent kinetic energy and turbulence intensity calculated from airport surface wind data can provide references for the nowcasting of radiation fog.

Keywords

Radiation Fog, Visibility Difference, Turbulence

Copyright © 2026 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

飞机起降有一定的能见度标准,能见度低于此标准,飞机将不能起降。成都双流国际机场秋冬季节常出现浓雾天气,导致出港航班大面积延误,旅客滞留,进港航班只能备降或返航,造成经济损失。双流机场有两条平行跑道,呈东北西南向,相距约 1.5 公里。西跑道南端(下文称为 02L 端)与东跑道南端(下文称 02R 端) (图 1)相距约 5 公里。双流机场气候志分析表明,双流机场两条跑道的跑道端 02L、02R 的能见度有较大差异,02L 端能见度低于 1000 m 的出现时长明显少于 02R 端。双流机场是否出现影响两条跑道的大雾天气是预报的重点。伍一等[1]分析了双流机场的 4 次大雾过程,认为两条跑道能见度差异与两条跑道附近的地表植被条件有关。02L 端附近更多建筑 and 水泥地面,02R 端附近更多植被,水汽更充分,同等天空条件下降温也更明显,因此能见度更低。Gultepe 等[2]综合了雾研究进展,认为地表条件通过水平不均匀性影响风场、温度、湿度及局部环流分布从而影响雾的形成。多项研究指出,在雾爆发性形成时,应有一定的湍流强度,在相同的天气条件下,近地面湍流对辐射雾的形成起重要作用[3]-[5]。

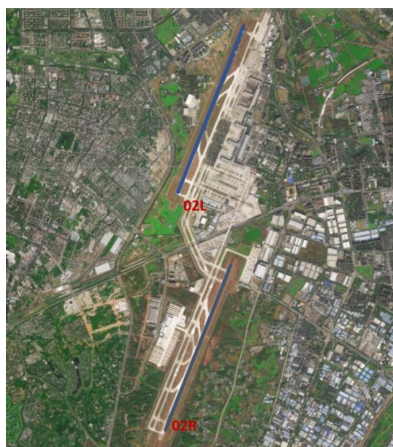


Figure 1. Schematic diagram of runways at Shuangliu International Airport
图 1. 双流机场跑道示意图

2023年1月5日和3月3日,双流机场均为前一日有降水,天气快速转好的天气条件。两天过程中两条跑道的水汽条件接近,而1月5日出现了大雾,02L端与02R端均低于起飞标准。3月3日则仅02R端出现了雾,能见度最低到150 m,而02L维持在1000 m以上。

本文利用常规探空资料、双流机场自动观测和人工观测资料,对两次过程的环流背景、气象要素变化情况进行分析,找出两条跑道能见度差异巨大的原因。双流机场预报员以往分析辐射雾形成时,多分析环流背景及地面湿度、风向和风速条件[6][7],由于探测资料限制,不能分析湍流强度。本文尝试利用双流机场自动观测系统地面风资料,分析双流机场雾形成时湍流的变化情况。

2. 资料及方法

本文采用温江站秒级探空资料,国家地面自动站温江、双流、新津站资料,双流机场自动观测系统资料、人工观测资料分析两个过程中的气象要素变化情况。国家自动站资料包括风、温、湿、压、能见度,时间分辨率为1小时。双流机场人工观测资料为降水观测,云量及云高观测。双流机场主跑道起降端(02L及02R)两套VAISALA的自动观测系统资料,包括风、温、湿、气压、能见度,其中风为超声测风仪,时间分辨率为15秒,温、湿及气压时间分辨率为1分钟。因风资料仅为二维资料,因此仅计算水平湍流强度及动能。湍流强度是风速标准差和平均风速的比值,本文参照刘熙明等[8]文中湍流强度及湍流动能的计算方法,以10 min为基准计算的水平风速标准差 σ 和10分钟平均风速的比值。其中水平风速标准差以公式 $\sigma = \sqrt{\frac{1}{40} \sum_{i=1}^{40} (U_i - \bar{U})^2}$ 计算。 U_i 为每15秒的数据,10分钟共计40个数据, $\bar{U}$ 为10分钟平均风速。 $TKE = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2}) = \frac{1}{2}(\sigma_u^2 + \sigma_v^2)$,其中 σ_u 、 σ_v 分别为东西向和南北向风速分量的风速标准差。上述资料分析时均采用10分钟平均。

3. 过程概况和天气形势分析

2023年1月5日,双流机场出现了雾天气,人工观测能见度最低200 m,器测能见度02L端最低150 m,02R最低150 m。3月3日,双流机场出现了碎雾,人工观测能见度最低1200 m,器测能见度02L端最低1500 m,02R端最低150 m。两个个例均发生在中高层低值系统快速东移,成都地区在夜间由阴天转为多云到晴,辐射降温导致地面空气饱和的情况下。500 hPa高空图上,1月4日20时到5日08,高空槽东移影响成都地区,5日08时成都地区位于减弱的高空槽底的西风气流控制;3月2日20时至3日08时,一短波槽快速东移,3日08时成都为高脊控制。700 hPa,1月4日20时至5日08时,成都上空为逐渐加强的高压环流控制;3月2日20时至3日08时,切变线快速东移,3日08时成都上空为高压环流控制。两次过程内四川盆地内均为均压区。

Table 1. Comparative analysis of meteorological elements for the cases on January 5 and March 3, 2023 at Shuangliu International Airport

表 1. 双流机场 2023 年 1 月 5 日与 3 月 3 日个例要素对比分析

时间	天气现象	最低人工观测能见度	前期过程降水情况	天空状况	周边站点 8 时能见度(km)	日出时间	02L 器测最低能见度	02R 器测最低能见度
2023 年 1 月 5 日	雾	200 m	小雨: 1 月 4 日 09:18~10:49, 降水量 0.0 mm	1 月 5 日 05 时转少云	温江 0.5、郫县 0.8、新津 0、双流 0.3、新都 0.5	8:01	1 月 5 日 08~09:45 低于 200 m	1 月 5 日 07:35~10:00 低于 200 m
2023 年 3 月 3 日	碎雾	1200 m	小雨: 3 月 2 日 22:45~3 月 3 日 00:19, 降水量 0.0 mm	3 月 3 日 03 时转少云	温江 0.3、郫县 0.9、新津 0、双流 0.4、新都 0.2	07:28	大于 1000 m	3 月 3 日 07:10~08:00 低于 200 m

温江、双流、新津、郫县为成都市周边区县，位于成都市中心城区西侧。两次过程中，双流、新津、郫县均出现了雾，且能见度在 08 时基本一致。其中新津为强浓雾，能见度为 0 km，温江分别为 0.5 km 与 0.3 km，距离机场最近的双流站分别为 0.3 km 与 0.4 km。两个个例的强度、时间、区域内能见度情况详见表 1。

对比分析两次过程前一日 20 时和当日 08 时探空图(图 2)可见，两次过程探空显示前一日 20 时测站上空有云，其中 1 月 4 日 20 时云层更厚。近地面均有微弱逆温。1 月 5 日 08 时与 3 月 3 日 08 时，925 hPa 以上均为晴空区，在近地面均有较强的辐射逆温和饱和层。1 月 5 日逆温层厚度为 136 m，逆温强度为 5.8℃。相对湿度 95%以上的厚度为 171 m，从地面到逆温层顶上方。3 月 3 日第一层逆温层厚度为 40 m，逆温强度为 2.7℃，第二层逆温层厚度为 92 m，逆温强度 0.8℃。相对湿度 95%及以上的厚度为 173 m，从地面到第二层逆温层顶下方。对应探空站地点温江站，能见度分别为 0.5 km 与 0.3 km。

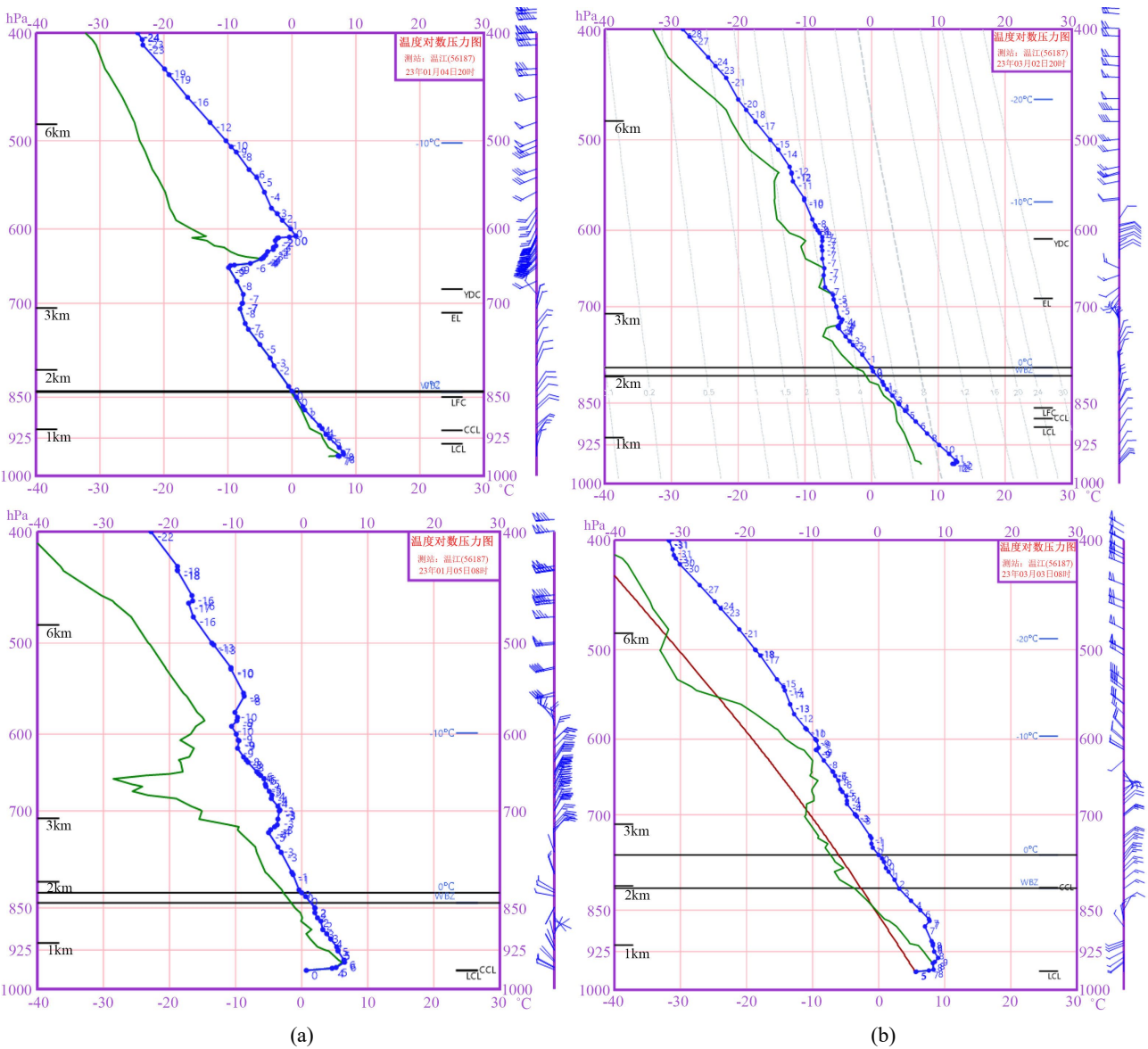
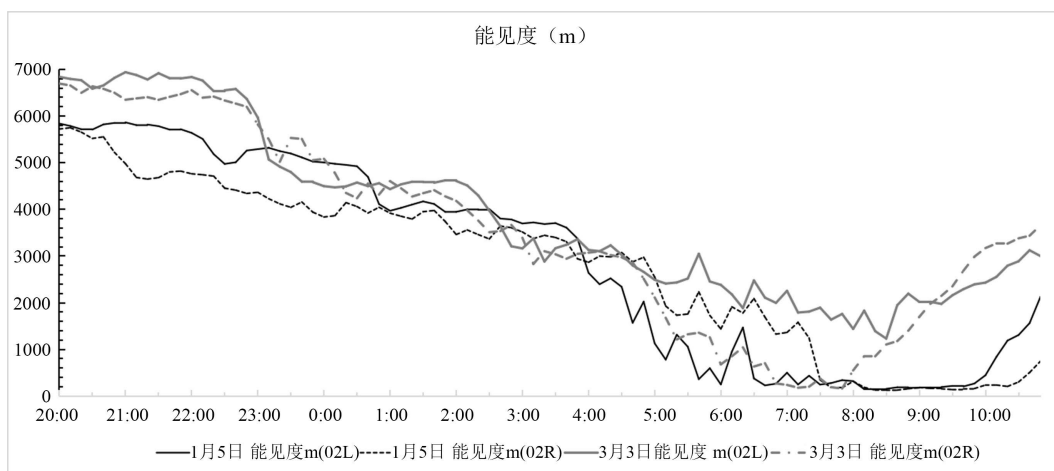


Figure 2. Radiosonde profiles at Wenjiang Station: (a) 5 January 2023 fog event; (b) 3 March 2023 fog event
图 2. 温江站探空((a) 2023 年 1 月 5 日过程探空; (b) 2023 年 3 月 3 日过程探空)

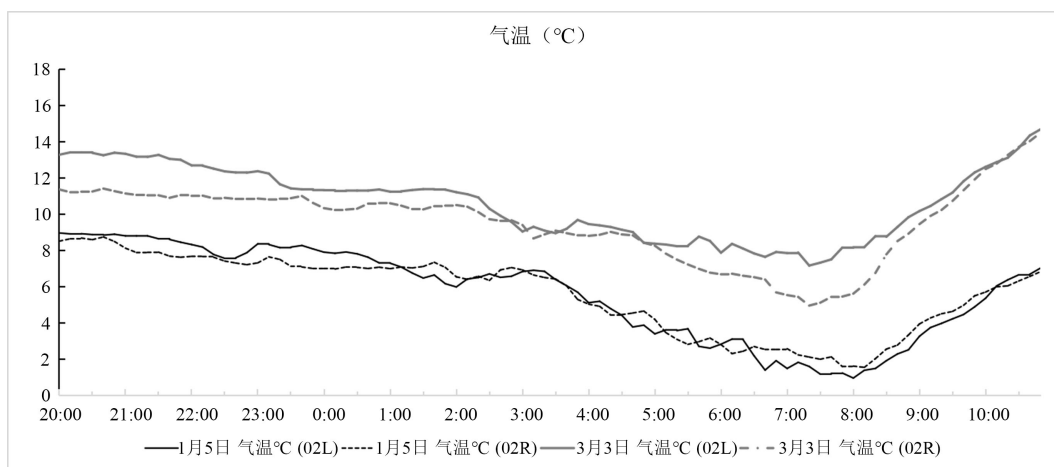
4. 地面气象要素分析

环流背景及层结分析可见,两个过程有较高的相似性,均为高空槽快速东移,天空在夜间转为晴空,辐射降温导致成都西部区县出现了浓雾。而在双流机场,出现了不同强度的雾,对运行的影响截然不同。以下对地面要素进行分析,以找出其差异特征。

能见度逐 10 分钟变化显示(图 3(a)), 1 月 4 日 20 时与 3 月 2 日 20 时, 02L 端与 02R 端的能见度接近, 且 1 月 4 日能见度比 3 月 2 日能见度低 1000 m。其后能见度缓慢波动降低, 到次日 01 时, 两个个例的能见度趋于一致, 到 04 时, 1 月 5 日 02L 端迅速降低, 05:10 降低至 1000 m 以下, 在 06:20 波动到 1600 m, 后迅速下降至 500 m 以下, 并在 08:10 后稳定在 200 m, 09:40 后逐步好转。1 月 5 日 02R 端能见度在 05 时开始下降明显, 在 07:30 陡然从 1500 m 下降至 500 m, 在 08:10 后稳定在 200 m, 10 时后逐步好转。3 月 3 日 02R 端从 5 时迅速下降, 06:40 下降至 500 m, 06:50~08:00 在 200 m 左右波动, 8 时后开始迅速上升。3 月 3 日 02L 端未起雾, 最低 1200 m。可见, 1 月 5 日的雾比 3 月 3 日浓, 持续时间长。根据能见度的变化情况, 1 月 5 日 02L 端, 可将雾的形成阶段定义为 4~5 时, 05:00~06:30 为发展阶段, 06:30~09:50 为雾的成熟阶段, 09:50 后为消散阶段。1 月 5 日 02R 端形成阶段为 04:00~07:10, 发展阶段为 07:10~07:30, 成熟阶段 07:30~10:00, 10 时后为消散阶段。3 月 3 日 02R 端雾的形成阶段为 04~05 时, 05:00~06:40 为发展阶段, 06:40~07:50 为成熟阶段, 07:50 后为消散阶段。



(a)



(b)

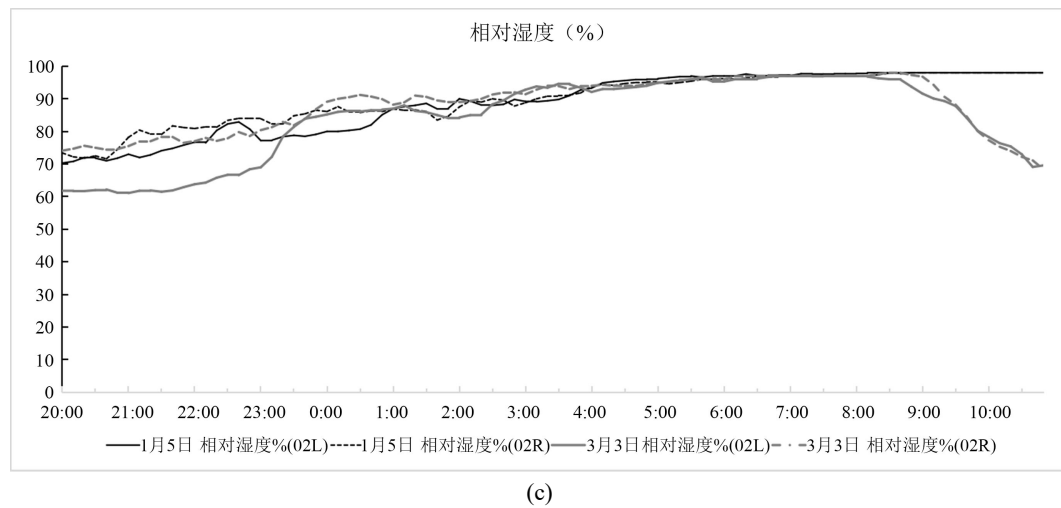


Figure 3. Temporal variations of visibility (m) (a), air temperature ($^{\circ}\text{C}$) (b) and relative humidity (%) (c)
图 3. (a) 能见度(m); (b) 气温($^{\circ}\text{C}$); (c) 相对湿度(%)变化

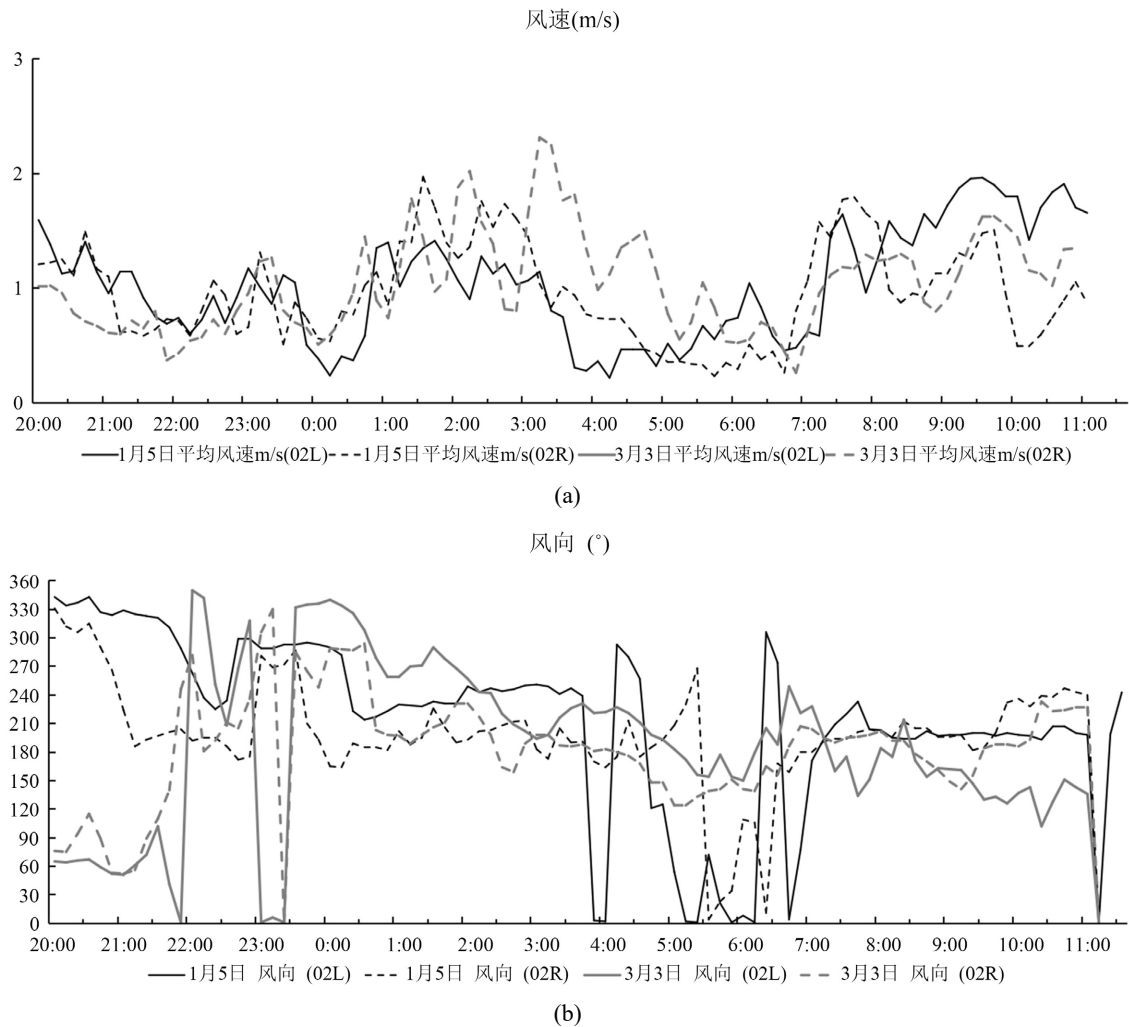


Figure 4. Temporal variations of average wind speed (m/s) (a) and average wind direction ($^{\circ}$) (b)
图 4. (a) 平均风速(m/s); (b) 平均风向($^{\circ}$)时间变化

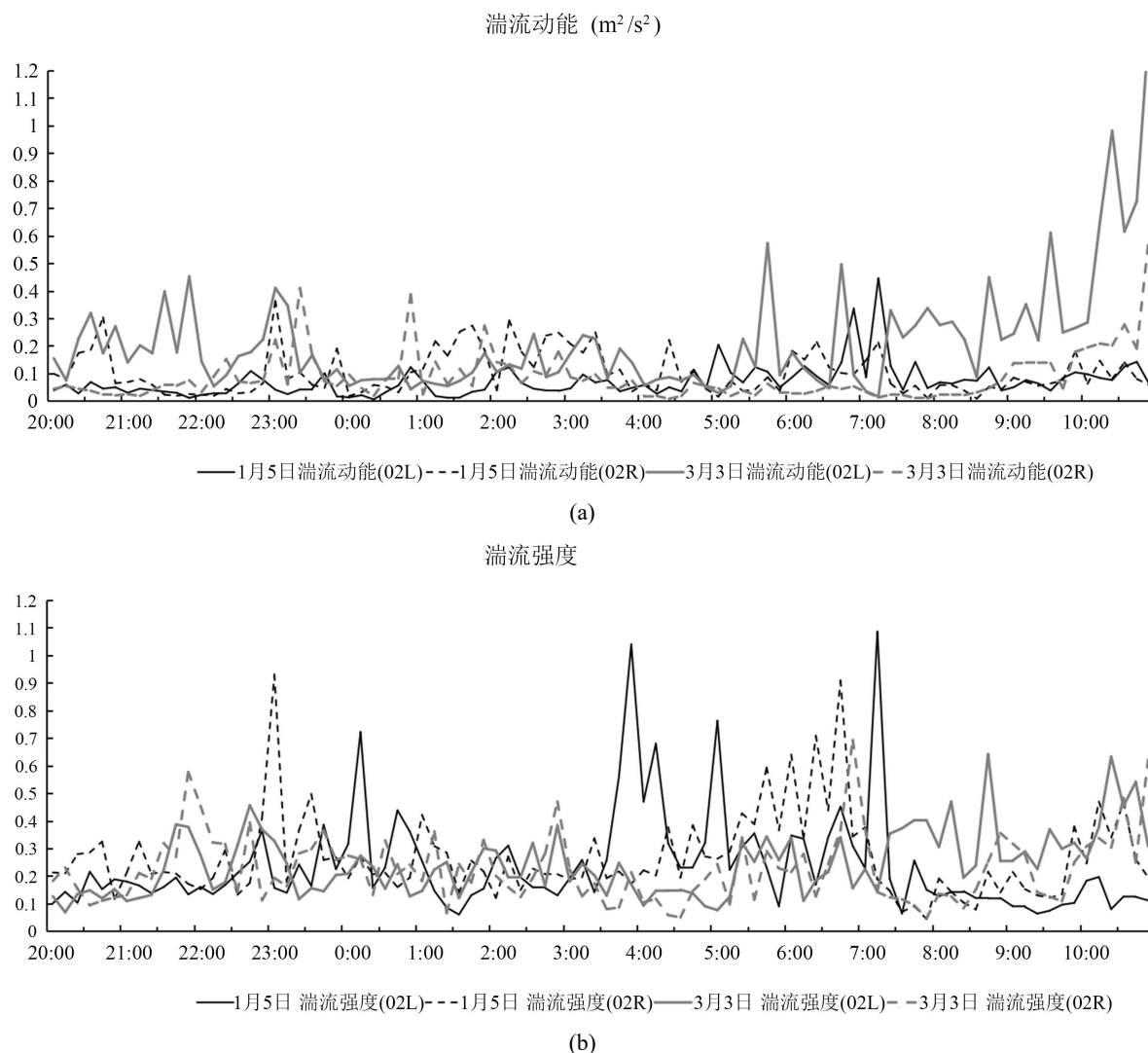


Figure 5. Temporal variations of turbulent kinetic energy (m^2/s^2) (a) and turbulence intensity (b)

图 5. (a) 湍流动能(m^2/s^2); (b) 湍流强度时间变化

图 3(b)显示, 1月5日 02L 端与 02R 端的温度变化趋势比较一致, 在 03:30 之前缓慢波动下降, 03:30 之后气温下降迅速, 到 08 时左右达到最低, 然后缓慢上升。3月3日跑道两端温度在 04:40 前相对稳定, 其中 02R 端下降了 1.8°C , 5 时后 02R 端由 9.8°C 下降至 5.8°C , 07:20 时达到最低。而 02L 端温度在 03 时前下降了约 3°C , 04 时后变化不明显, 在 9.0°C 附近波动, 最低出现在 07:20 时, 8.0°C 。1月5日跑道两端、3月3日 02R 端浓雾的形成时间与温度的迅速下降时间基本一致, 当温度变化不大时, 能见度会略有好转。如 1月5日 02R 端, 04:20~05:00, 气温略有上升, 同时期能见度维持不变, 05:00~05:30, 温度下降了 1.5°C , 能见度下降了 1000 m。02L 端, 05:50~06:20 气温上升了约 0.5°C , 能见度从 200 m 上升至 1100 m, 06:20~06:40 气温下降 1°C , 能见度下降至 200 m。可见, 在雾的生成、发展阶段, 气温稳步下降, 成熟阶段, 气温缓慢下降或维持, 天亮后回升。消散阶段, 气温迅速上升。

图 3(c)显示, 1月5日与 3月3日过程的相对湿度均波动上升, 6:30~08:00, 1月5日跑道两端相对湿度达到 98%, 3月3日两端相对湿度最高为 97%, 但 3月3日 02L 端相对湿度达到 97%的时间较 02R 端短。对应的能见度在 1月5日 02L 与 3月3日 02R 的能见度低于 500 m, 1月5日 02R 在 07:30 才迅

速下降, 3月3日02L则一直维持在1000 m以上。可见, 成熟阶段湿度维持高湿度不变, 生成、发展阶段, 湿度波动上升, 消散阶段湿度在前期维持, 后期迅速下降。高湿度仅是起雾的必要条件。

对比两日各跑道平均风速(图4(a))显示, 入夜后风速均在2.5 m/s以下。未起雾的3月3日02L端风速在03:50后明显高于起雾的1月5日两端和3月3日02R端, 最大2.1 m/s, 其中03:50~04:10维持在2.0 m/s以上, 05:10时后风速下降至1.5 m/s以下。3时后风速加大的时段和气温维持的阶段一致, 但5时风速减小后, 气温仍下降缓慢。

风向对比显示(图4(b)), 1月5日04~07时, 两端风向渐转为偏北风, 而3月3日, 两端风向较平稳, 维持偏南风。

湍流动能图(图5(a))显示, 1月5日及3月3日02R端, 在雾的生成和发展阶段, 湍流动能较小, 在 $0.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 及以下, 而3月3日02L端, 在05:30后维持较高的湍流动能, 最高达 $0.6 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。1月5日02L端, 06:50也达到了 $0.3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 以上, 但此时02L能见度已降低到500 m以下。可见, 在雾的生成和发展阶段, 起雾日(端)的湍流动能较小。

湍流强度图(图5(b))显示, 1月5日02L与02R在03:30~07:30期间, 湍流强度均有较大的时段, 最高接近1.0。3月3日02R湍流强度较小, 06:30前多在0.5以下, 02R在06:30后迅速增加, 07:10到了0.7, 然后迅速减小。3月3日02L则始终维持在0.4及以下。刘晓舟等[5]研究表明, 在辐射雾的形成阶段, 湍流强度较弱, 发展阶段, 湍流出现波动, 成熟阶段, 湍流强度往往较大。影响湍流强度的因素较多。风向变动时, 低频湍流增加, 能使湍流强度在风速减小的情况下增大; 风向趋于稳定时, 能使湍流强度在风速增大的情况下减小。两次过程对比发现, 3月3日02R端风速虽然较大, 但风向稳定, 湍流强度维持在较小的状态, 而起雾端(日)有湍流强度较大的时段。在雾的发展阶段, 湍流出现波动, 这与人研究一致。平均风速小而湍流强度较大, 表明整体环境平静, 无明显的水汽和温度平流, 但是风向变化明显, 在下垫面性质差异较大的情况下, 利于水汽和热量混合, 从而形成较大范围的雾。

进一步分析发现, 3月3日02L端, 05:10至日出时间, 风速减小至1.0 m/s, 气温并未快速下降。此时段内风速虽然减小, 但湍流动能维持较大的强度, 达 $0.6 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。由于资料限制, 不能计算湍流的垂直通量, 不能表明气温未快速下降是垂直混合大, 暖空气向下输送使地面气温维持。应进一步研究其他个例中湍流动能的变化情况。

综合上述分析, 未起雾的3月3日02L端, 在其他端雾的形成和发展阶段, 风速相对较大, 湍流动能较大, 湍流强度始终较弱, 气温下降不显著, 能见度下降缓慢。出现雾的1月5日与3月3日02R端, 风速整体较小, 湍流动能较小, 而湍流强度则有较大的时刻。

5. 结论和讨论

2023年1月5日及3月3日两次雾过程, 在晴夜、微风条件下生成, 日出后消散, 为典型的辐射雾天气。两次过程环流背景、地面要素对比显示, 两次过程环流背景类似, 地面相对湿度均达到97%, 但两日各端的能见度差异大。通过对比分析, 得出以下结论:

- (1) 在雾的生成、发展阶段, 起雾日(端)的气温稳步下降, 湿度波动上升, 未起雾端的温度下降缓慢, 湿度波动上升。
- (2) 起雾日(端)风速较小, 在1.0 m/s以下, 未起雾端风速较其他端大, 在其余日(端)雾的发展阶段, 风速最大达2.1 m/s; 在起雾日和未起雾日(端), 风向无明显变化特征, 风向可偏南或偏北。
- (3) 起雾日(端)湍流动能较小, 湍流强度较大, 未起雾端, 湍流动能较大, 湍流强度较小。

以往双流机场的个例研究发现[6][7], 双流机场辐射雾情况下, 风速多低于2.0 m/s, 此次分析进一步证实, 在雾的临近预报中, 应关注风速的大小, 但也应关注风速较大时气温的变化趋势。

同时, 利用有限资料计算水平湍流动能和水平湍流强度, 一定程度上反映了湍流在双流机场辐射雾中的作用, 在现有探测设备下, 通过计算湍流动能和湍流强度, 在临近预报中有一定参考价值。

参考文献

- [1] 伍一, 赵瑞达, 胡壮. 成都机场 2019-2020 年初辐射雾过程中微波辐射计应用[J]. 高原山地气象研究, 2020, 40(4): 77-81.
- [2] Gultepe, I., Tardif, R., Michaelides, S.C., Cermak, J., Bott, A., Bendix, J., *et al.* (2007) Fog Research: A Review of Past Achievements and Future Perspectives. In: Gultepe, I., *et al.*, Eds., *Fog and Boundary Layer Clouds: Fog Visibility and Forecasting*, Birkhäuser, 1121-1159. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8419-7_3
- [3] Price, J., Porson, A. and Lock, A. (2015) An Observational Case Study of Persistent Fog and Comparison with an Ensemble Forecast Model. *Boundary-Layer Meteorology*, **155**, 301-327. <https://doi.org/10.1007/s10546-014-9995-2>
- [4] 李子华, 黄建平, 孙博阳, 等. 辐射雾发展的爆发性特征[J]. 大气科学, 1999, 23(5): 623-629.
- [5] 刘晓舟. 南京冬季雾特征及湍流对雾过程的影响[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [6] 吴妮晏, 赵清越. 天府与双流机场 2022 年 1 月 9 日辐射雾特征对比分析[J]. 高原山地气象研究, 2024, 44(4): 135-141.
- [7] 袁艺, 赵瑞达, 邹永成. 双流机场辐射雾背景场特征及其典型个例分析[J]. 科技与创新, 2021(7): 21-24.
- [8] 刘熙明, 胡非, 邹海波, 等. 北京地区一次典型大雾天气过程的边界层特征分析[J]. 高原气象, 2010, 29(5): 1174-1182.