

双流机场一次低能见度事件的气象分析

赖明¹, 袁振^{2*}, 张永莉³

¹民航西南空管局航空气象技术研究及应用实验室, 四川 成都

²民航西南空管局气象中心, 四川 成都

³成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年6月27日; 录用日期: 2025年7月23日; 发布日期: 2025年7月30日

摘要

低能见度在交通运输方面影响较大, 随着民航事业的高速发展, 能见度预报越来越重要。本文利用常规气象观测数据, 对发生在2015年1月12日的双流机场的大雾天气过程, 通过分析此次大雾发生前的环流形势、气象要素、物理量以及层结条件等, 得到以下结论: 此次低能见度事件为辐射雾引发的。发生大雾前一晚的高空500 hPa为强的西北气流控制, 中低层均为反气旋性流场, 受冷空气影响, 辐散下沉运动明显, 从地面到925 hPa有一浅的逆温层, 抑制垂直扩散, 有利于晴空辐射冷却, 并抑制对流的形成。同时低层相对湿度增大到>90%, 气压逐渐增大, 地面温度明显下降, 导致水汽凝结, 维持静风条件, 风力大小<2 m/s, 微弱风场使水汽凝聚在盆地内, 另外, 大雾发生前的大气层结稳定维持, 且当天浅层有一些不稳定能量的增加, 出现了微弱扰动, 可促进雾滴碰并增长, 这些均有利于大雾天气的产生。再加上盆地地形的协同作用, 导致雾持续。通过对这次双流机场低能见度事件的细致分析, 有利于对双流机场低能见度的成因有了进一步的深入了解, 为民航精细化预报提供一定的科学依据。

关键词

双流机场, 低能见度, 辐射雾, 环流形势, 稳定度

Meteorological Analysis of a Low Visibility Event at Shuangliu Airport

Ming Lai¹, Zhen Yuan^{2*}, Yongli Zhang³

¹Aviation Meteorology Technology Research and Application Laboratory, Southwest Regional ATMB, CAAC, Chengdu Sichuan

²Southwest Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation of China, Chengdu Sichuan

³School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Received: Jun. 27th, 2025; accepted: Jul. 23rd, 2025; published: Jul. 30th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 赖明, 袁振, 张永莉. 双流机场一次低能见度事件的气象分析[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(4): 804-816.
DOI: 10.12677/ccrl.2025.144080

Abstract

Low visibility conditions significantly impact transportation systems. With the rapid development of civil aviation, visibility forecasting has become increasingly important. This study utilizes conventional meteorological observation data to analyze a heavy fog event at Shuangliu Airport on January 12, 2015. By examining the circulation patterns, meteorological elements, physical parameters, and atmospheric stratification conditions prior to the fog formation, the following conclusions were drawn: The low visibility event was triggered by radiation fog. The night before the fog occurred, the upper atmosphere at 500 hPa was dominated by strong northwesterly airflow, while the middle and lower layers exhibited anticyclonic flow patterns. Influenced by cold air, pronounced divergence and subsidence motions were observed. A shallow inversion layer extended from the surface to 925 hPa, suppressing vertical diffusion and favoring clear-sky radiative cooling while inhibiting convective development. Simultaneously, the relative humidity in the lower atmosphere increased to >90%, with gradually rising surface pressure and significant temperature drops that promoted water vapor condensation. Persistent calm wind conditions (<2 m/s) allowed moisture to accumulate within the basin. Additionally, the stable atmospheric stratification preceding the fog event, coupled with slight increases in unstable energy and weak disturbances in shallow layers, facilitated fog droplet coalescence and growth—all conducive to heavy fog formation. The basin's topographic effects further contributed to the fog's persistence. Through detailed analysis of this low visibility event at Shuangliu Airport, we gained deeper insights into the causative mechanisms, providing valuable scientific references for refined aviation weather forecasting.

Keywords

Shuangliu Airport, Low Visibility, Radiation Fog, Circulation Pattern, Atmospheric Stability

Copyright © 2025 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

气象能见度是指昼间以靠近地平线的天空为背景的, 视角大于 20 角分的地面灰暗目标物的能见度[1]。大气中常常存在着各种固体与液体杂质, 这些杂质会在一定的气象背景条件下聚集起来形成各种各样的天气现象进而影响大气透明度, 使能见度变小。航空气象中指出, 这类使能见度变小的天气现象统称为视程障碍。形成视程障碍的天气现象有云、雾、降水、风沙等天气。由于四川盆地的特殊地形, 对双流机场能见度影响最大的天气现象为雾, 雾是指悬浮于近地面气层中的水滴或冰晶, 使地面能见度小于 1 km 的天气现象[2]。大雾是比较常见的灾害性天气之一, 不仅对城市交通, 对高速公路、航空以及航海都有较大影响, 尤其与航空飞行活动关系密切, 冬季由于大雾造成飞机的反改航的现象时有发生。为了保证安全, 航空器在起飞降落时必须保证当时的能见度和跑道视程符合起飞、着陆机场的最低运行标准, 是判断飞行条件简单与复杂的依据之一, 也是决定机场开放与关闭, 飞机起降采用目视飞行规则与仪表飞行规则的依据之一, 恶劣能见度造成的飞行事故占有气象原因造成事故的一半左右。根据统计发生低能见度时的天气现象可知, 大雾特别是辐射雾是造成双流机场低能见度的主要天气。

由《中国人民共和国民用航空行业标准——民用航空气象》可知, 能见度<600 m 为对飞行有直接

影响。赵清越等[3]利用成都市 1980 年开始 31 年来 14 个气象站的观测资料, 统计分析成都市的低能见度(气象行业标准下分类的 A、B、C、D 四个低能见度级别)时空分布。不仅得出了成都市各个站点能见度的年变化趋势, 也得出了在成都市大范围区域, 哪些站点更容易出现浓雾天气, 同时分析了出现浓雾天气的原因。沈宏斌[4]通过对 1986~2010 年成都双流国际机场的自动观测资料进行统计分析, 得出了关于双流机场能见度分别在 800 m 以下、800~1500 m、1500~3000 m、3000~5000 m、5000 m~8000 m 的日变化特征和年变化特征以及年际变化特征; 还统计了低能见度天数与一些常规气象要素(气温、湿度等)的相关性, 分析能见度变化时不应单单依赖于单一要素而是需要联系大尺度环境来分析机场局地小气候的变化。周书华[5]等利用成都市气象局提供的成都市 13 个气象站点 1980~2010 年 31 年来的观测资料, 对成都市的五个区县作了能见度变化趋势的对比分析, 得出五个县能见度的年变化趋势、季节变化趋势。杨宝玲等[6]利用环流形势分析、物理量场演变、气象要素的变化分析了 2009 年 2 月 3 日宁夏出现的大雾天气。岳炼等[7]对双流机场 2016 年 12 月初一次持续性低能见度天气过程进行分析, 得出晴朗的夜空、逆温层、地面冷却辐射、水汽饱和以及近地面的微风状况等, 共同致使辐射雾的生成。吴妮晏等[8]对比分析了天府与双流机场 2022 年 1 月 9 日辐射雾特征, 得到两者辐射雾产生的差异。

随着航空事业的高速发展, 航空气象预报越来越重要, 预报的准确度要求越来越高。航空事业日益发展, 气象条件越来越受到重视。据统计, 造成航空事故的原因约 30%是天气原因, 低能见度约占天气原因中 50% [9]-[13]。因此, 为了保证所有旅客与机组人员的安全, 本文通过选取分析双流机场的一次典型的辐射雾事件, 从中了解大雾发生时的一些基本特征, 提高预报员提前预测大雾天气的能力, 保障航空飞行的安全。

2. 资料和方法

本文使用常规气象观测资料, 包括高空、地面观测、物理量和常用指数值, 如 k 指数场、低层散度场和垂直速度场、相对湿度场、温度平流场等。主要利用线性倾向估计法、环流形势分析和气象要素对比分析法进行研究。

1 月份是四川盆地发生大雾的高发期, 如 2013 年 1 月发生了 7 次大雾预警信号, 2014 年则发了 9 次, 2015 年 1 月上半旬发生大雾的频率较高, 1 月 1 日~13 日发生大雾 9 次, 13 日之后开始略有好转。此次过程对双流机场造成较大影响的三场大雾分别发生在 3 日、9 日、12 日, 选取发生在 9-12 日的一场范围较大的低能见度进行分析, 特别是 12 日大雾对双流机场影响最强, 大雾从 12 日 6:00 左右开始, 跑道能见度约为 200 m, 到 8:00 左右, 跑道能见度已经降到了 50 m, 已低于飞机正常起飞的最低能见度, 机场全面停航。09:18 分左右, 大雾开始逐渐散去, 机场仅西跑道开始运行。10:00 大雾基本散去, 机场的运行全面恢复, 航班的积压到晚上 22:00, 才逐渐恢复正常。此次大雾事件造成了上百架飞行的延误, 上万名旅客出行受阻, 可见此次大雾天气对民航的正常运行影响较大。

图 1 是 1 月 9 日 02 时~13 日 23 时能见度随时间变化曲线, 可以看出 9~13 日下午能见度都大于 2000 m, 夜间 02~08 时, 能见度都非常低, 除了 11 日夜间没有低于 600 m 以外, 其余日期均达到了直接影响飞行的浓雾水平, 且呈现为升-降-升-降的变化趋势, 可见四川盆地冬季夜间多辐射雾, 能见度低。

3. 环流形势分析

3.1. 高空环流形势分析

2015 年 1 月 9 日 08 时的 500 hPa 上(图略), 我国中低纬为多波动环流形势, 孟加拉湾有一深槽, 低

涡中心位于孟加拉湾北部,有大量水汽向中国大陆运输,成都地区受平直偏西风的影响且风力较大。9日20时(图略),中国中高纬地区为多波动环流形势,在甘肃与内蒙交界处有一脊,之前在孟加拉湾附近的槽分裂了一小低涡后继续东移,拉萨地区有一冷涡中心,成都由平直西风控制转为槽前西南气流控制,09日白天有大雾,槽前西南气流带来暖湿气流,提供了大雾后的水汽补充。10日08时(图略),乌拉尔山脉的低涡中心稳定存在,之前位于新西伯利亚的脊已东移至贝湖且在贝湖发展加深为一高脊。位于孟加拉湾附近的大槽已经东移到云南地区,成都位于槽前,继续受到西南气流的影响,有水汽输送。10日20时(图略),位于云南的槽仍然非常缓慢的东移,成都由西南气流控制转为受西北气流控制,风力微弱。11日08时(图略),此槽加深已移到四川盆地,成都到云南发展成一深槽,成都位于槽后受偏北气流的影响,风速增大。11日20时(图2(a)),该槽继续东移且分裂一小槽南下至孟加拉湾地区,成都仍然位于槽后,且由偏东北气流转为较强西北气流,有冷空气南下影响成都地区。12日08时(图2(b)),在印度有一低涡形成,成都依然位于大槽的后部成都也位于其槽后,依然受偏西北风影响,且有大量冷空气影响成都。12日20时,位于西安的槽加深,成都受偏北风影响,冷空气继续影响成都。13~15日成都稳定受西北气流影响,间或受平直西风影响,整个大雾过程高空500 hPa环流形势较稳定。

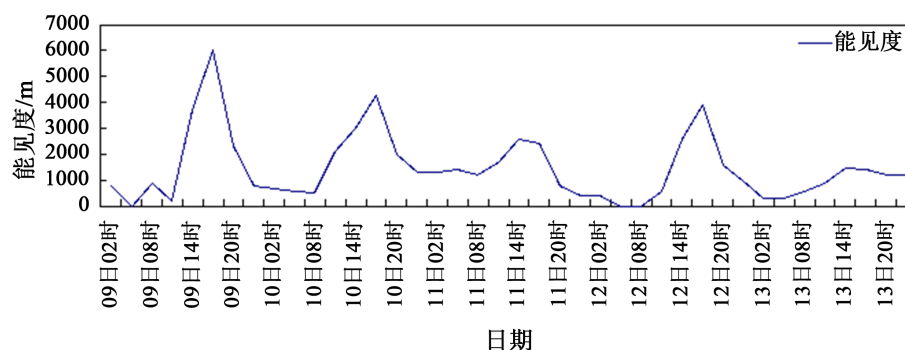


Figure 1. Temporal variation of visibility from January 9 to 13, 2015

图 1. 2015 年 1 月 9~13 日能见度随时间变化曲线

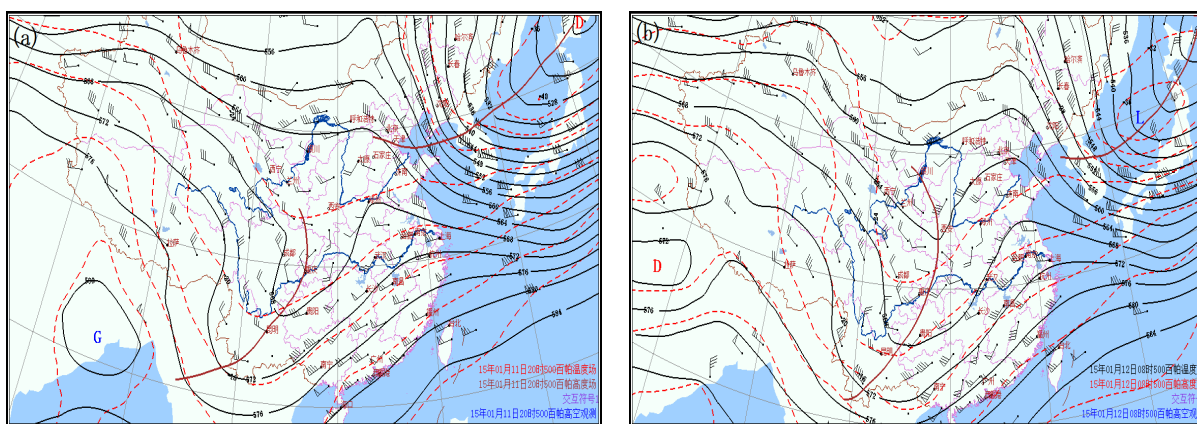


Figure 2. Circulation pattern analysis at 500 hPa at (a) 20:00 on January 11, 2015; (b) 08:00 on January 12, 2015

图 2. 500 hPa 环流形势分析, (a) 2015 年 1 月 11 日 20 时, (b) 2015 年 1 月 12 日 08 时

3.2. 低空环流形势分析

700 hPa 上, 2015 年 1 月 11 日 20 时(图 3(a)和图 3(c)), 在孟加拉湾至云南贵州一带有一范围较广的槽, 水汽被运送到我国大陆。贵阳附近有一范围较大的气旋性流场, 郑州有一范围较大的反气性流场,

成都位于两者之间,受弱偏东风影响。12日08时(图3(b)和图3(d)),拉萨地区有一高压形成,兰州有一浅脊,昨日的高脊已经移动到内蒙古地区。昨日的两个流场均东移,成都转为偏西风,风力较弱。且成都位于拉萨高压中心前部的下沉气流区,天气将转晴,利于辐射雾的产生。

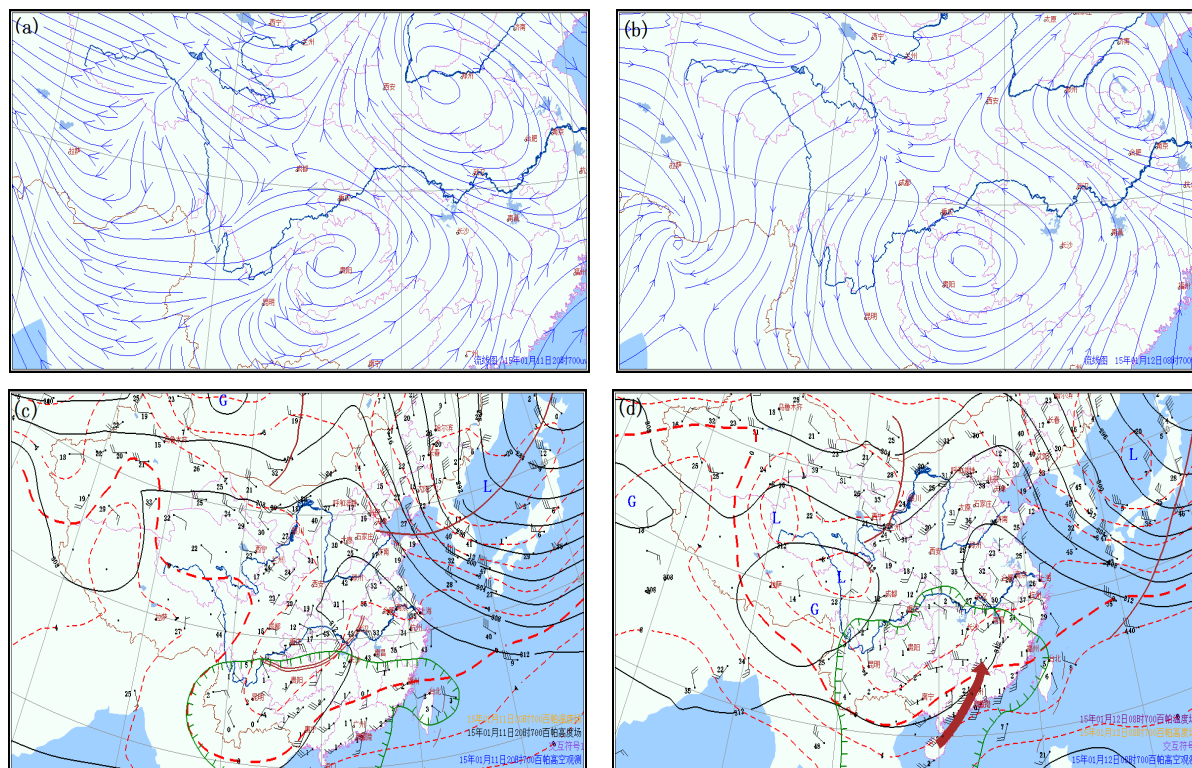
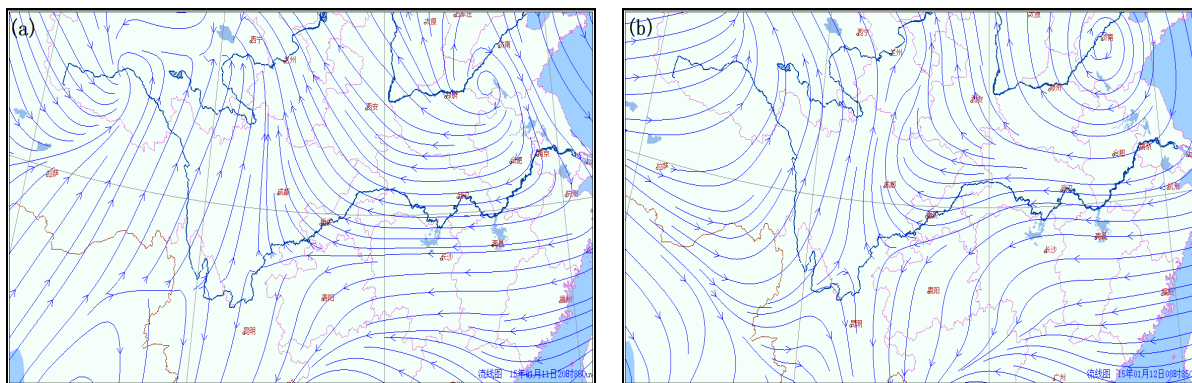


Figure 3. Analysis of flow field and circulation pattern at 700 hPa at (a) Flow field at 20:00 on January 11, 2015, (b) Flow field at 08:00 on January 12, 2015, (c) Circulation pattern at 20:00 on January 11, 2015, (d) Circulation pattern at 08:00 on January 12, 2015

图 3. 700 hPa 流场和环流形势分析图, (a) 2015 年 1 月 11 日 20 时流场, (b) 2015 年 1 月 12 日 08 时流场, (c) 2015 年 1 月 11 日 20 时环流形势分析, (d) 2015 年 1 月 12 日 08 时环流形势分析

850 hPa 流场和环流分析(图 4)中, 11 日 20 时(图 4(a)), 四川北部、甘肃、与陕西交界地有一暖中心, 成都在高压后部上升气流区, 受偏西南风影响, 暖湿气流继续向成都输送, 成都站的 T-Td 值为 1℃, 说明低层水汽达到饱和状态。12 日 08 时(图 4(b)), 成都地区受中心位于济南的反气旋性流场影响, 西南风减弱, 但 T-Td 值仍为 1℃, 水汽条件维持饱和状态。



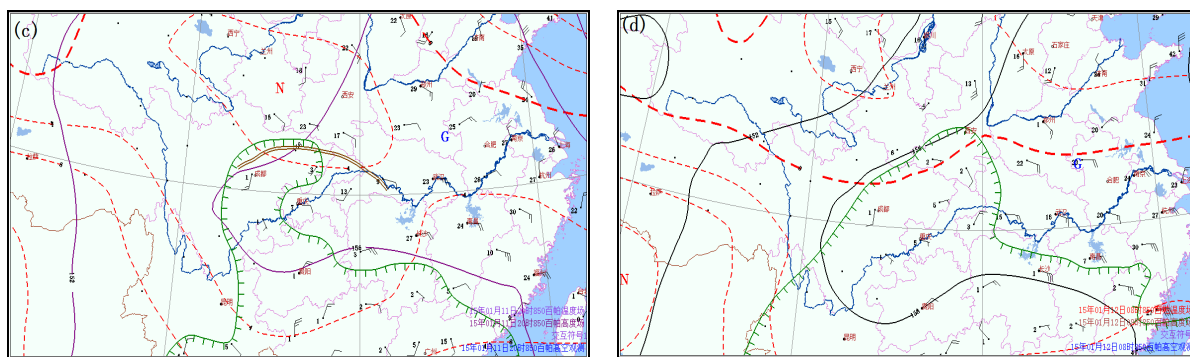


Figure 4. Analysis of flow field and circulation pattern at 850 hPa, (a) Flow Field at 20:00 on January 11, 2015, (b) Flow Field at 08:00 on January 12, 2015, (c) Circulation Pattern at 20:00 on January 11, 2015, (d) Circulation Pattern at 08:00 on January 12, 2015

图 4. 850 hPa 流场和环流形势分析图, (a) 2015 年 1 月 11 日 20 时流场, (b) 2015 年 1 月 12 日 08 时流场, (c) 2015 年 1 月 11 日 20 时环流形势分析, (d) 2015 年 1 月 12 日 08 时环流形势分析

3.3. 地面环流形势分析

2015 年 1 月 11 日 20 时的地面环流形势(图 5(a))中, 中国大部分地区受中心位于东北地区的高压环流控制, 冷高压中心强度大于 1040 hPa, 高压的前缘以影响至华南地区并入海, 成都也位于高压辐散区内, 风速偏小, 且 T-Td 值也为 1℃, 水汽达到饱和状态。23 时(图略), 四川的西南部有弱的闭合高压中心生成, 此时, 夜间天空晴朗, 十分利于辐射雾的产生。这样的高压环流和水汽饱和状态一直持续到 12 日的 08 时(图 5(b)), 大雾天气维持, 此时的闭合高压环流消失, 但仍在蒙古冷高压的前缘, 受下沉的冷空气影响, 大雾开始逐渐消散。

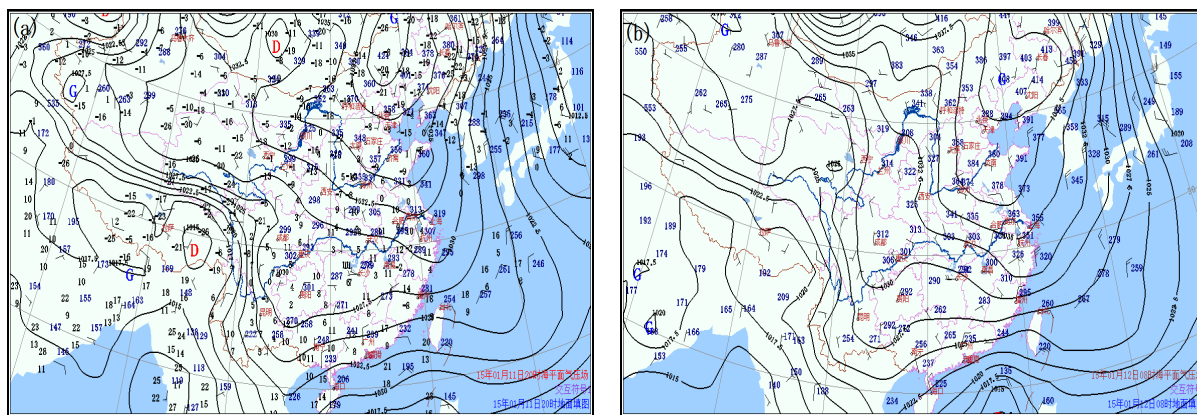


Figure 5. Surface circulation pattern analysis: (a) 20:00 on January 11, 2015, (b) 08:00 on January 12, 2015

图 5. 地面环流形势分析, (a) 2015 年 1 月 11 日 20 时, (b) 2015 年 1 月 12 日 08 时

4. 能见度与气象要素相关关系的分析

4.1. 能见度与气温的关系

能见度与气温随时间变化曲线如图 6 所示, 温度曲线与能见度曲线形态变化趋势相同, 且峰值点与谷值点也比较一致, 两者的正相关性超过了 99%的信度检验。9 日 14 时, 气温达到其峰值>10℃时, 能见度也达到这几天的峰值, 超过 6000 m; 随着气温的升降, 能见度也随之出现一致的起伏形势。到 12 日 05 时, 也就是此次大雾事件发生时, 气温低于 0℃, 而能见度也达到此时间段中的最低值, 接近于 0 m, 08 时后气温缓慢回升, 能见度也逐渐增大, 到了夜间的气温和能见度再次降低到谷值。

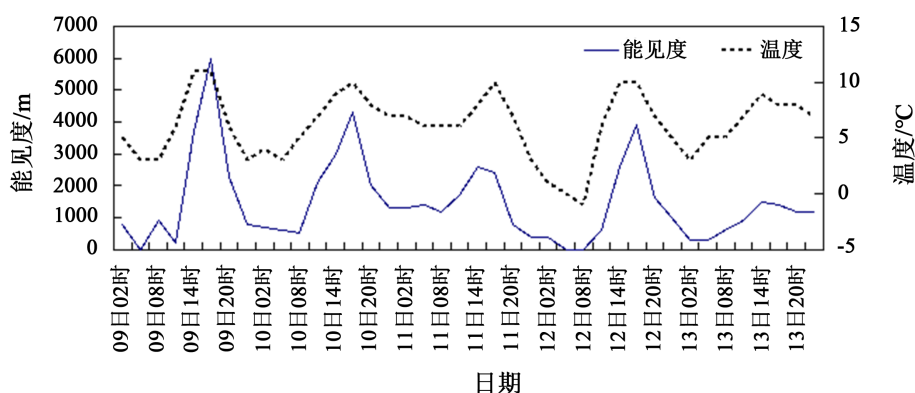


Figure 6. Temporal variations of visibility and air temperature

图 6. 能见度与气温随时间变化曲线

能见度与温度与露点温度差随时间的变化曲线图(图 7)中, 每天下午温度与露点温度差值最大, 而夜间温度露点差值很小, 接近于 0°C , 水汽达到饱和状态, 结合以上分析的温度再继续下降, 空气中的水汽会凝结成小液滴或小冰晶, 形成雾。9~3 日这几天, 除了 11 日晚上温度没有降至露点温度外, 其余天数温度和露点温度均已重合, 这也是造成 1 月上中旬出现雾的概率很高的主要原因之一。此次大雾事件主要发生当天 12 日 05~11 时, 温度露点曲线接近或已经重合, 达到 0°C 附近, 同时可以看出此时能见度也达到最低值。11 时开始地面吸收太阳辐射温度迅速升高, 大部分水汽逐渐被蒸发, 温度露点差值增大, 能见度也在逐渐增大。

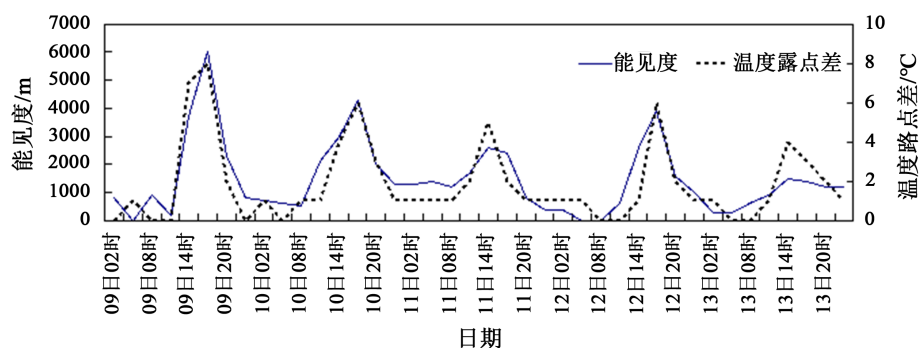


Figure 7. Temporal variations of visibility and temperature-dew point spread

图 7. 能见度与温度露点差随时间变化曲线

4.2. 能见度与气压的关系

图 8 是能见度与气压随时间变化曲线叠加图, 能见度与气压呈现出负相关关系, 12 日 08 时, 气压值达到这一天的峰值点, 大于 1030 hPa , 能见度也达到其最低值, 但与温度和能见度良好的正相关性相比, 气压与能见度的相关性稍弱一些, 只有当本站天气有明显变化或在晴朗夜间时, 大气能见度与气压之间的变化才具有一定规律性, 即呈负相关性。换句话说, 随着近地层气压升高, 冷空气变得活跃, 能见度在减小。

4.3. 能见度与相对湿度的关系

能见度与相对湿度随时间的变化曲线如图 9 所示, 相对湿度取自 925 hPa , 可以看出两者呈现良好的负相关性, 当相对湿度增大时, 能见度降低, 相对湿度降低, 能见度增大。能见度出现最低值时, 相对湿

度出现最大值, 接近 100%, 能见度与相对湿度的相关性, 比与气压的相关性强一些。

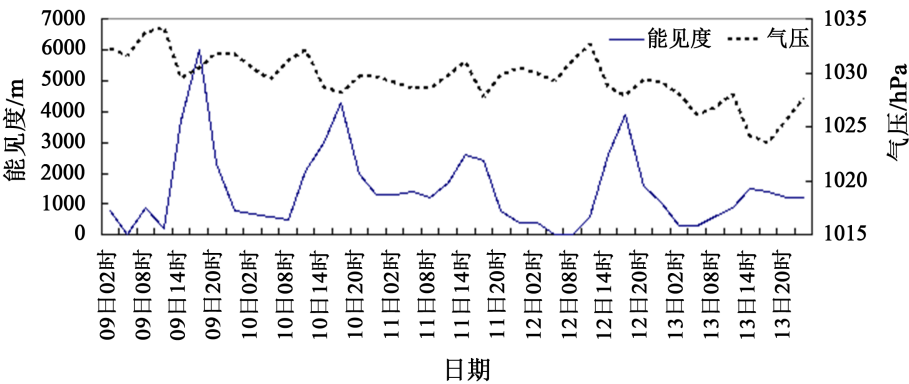


Figure 8. Temporal evolution curves of visibility and atmospheric pressure
图 8. 能见度与气压随时间变化曲线

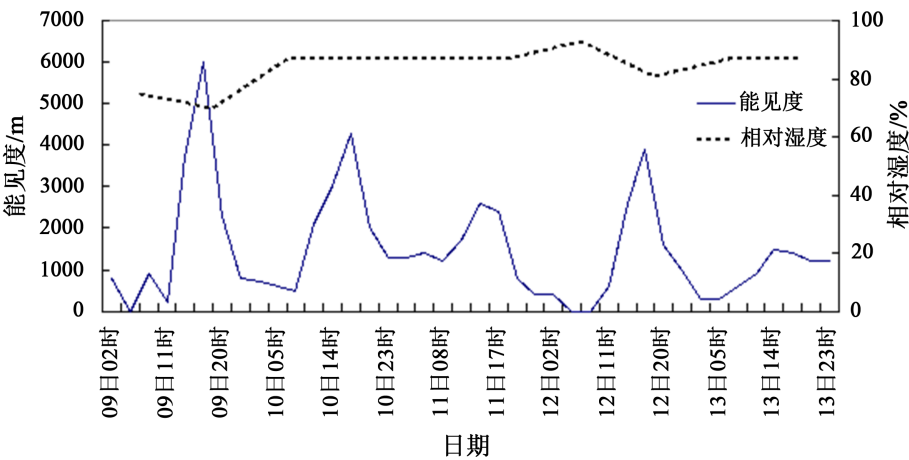


Figure 9. Temporal variation curves of visibility and relative humidity
图 9. 能见度与相对湿度随时间变化曲线

4.4. 能见度与风的关系

由成都 11 日 02 时~12 日 23 时地面的风场演变图(图 10)可知, 风力大小始终维持在 2 m/s 及以下, 大雾发生前一晚的 11 日 17~20 时表现为静风, 11 日 23 时~12 日 05 时, 地面维持偏西北风, 且风力大小为 2 m/s, 说明蒙古冷高压的冷空气不断向南扩散。11~12 日白天从 08 时到 20 时的云量情况主要以十分量云的阴天出现, 偶有 9 分量的云。由于夜间无云量的观测, 可忽略。



Figure 10. Wind direction and speed diagrams at 3-hour intervals from 02:00 on the 11th to 23:00 on the 12th
图 10. 11 日 02 时~12 日 23 时每隔 3 小时风向风速图

5. 物理量特征分析

5.1. 散度场特征

表 1 是 500~925 hPa 散度场, 辐合上升为负, 辐散下沉为正。925 hPa 层从 1 月 9 日 08 时~11 日 08 时一直都为下沉辐散区, 从 11 日晚开始就转为辐合上升区。850 hPa 与 925 hPa 大致类似, 从 1 月 9 日 08 时~11 日 20 时一直都为下沉辐散区, 大雾发生当天 08 时就转为辐合上升区。700 hPa 在 9 日与 12 日是下沉辐散区, 中间时段为辐合上升区, 而 9 日与 12 日恰恰是能见度最低两天。500 hPa 除了 10 日 20 时转为下沉辐散区, 其他时段一直为辐合上升区。11 日 08 时到 12 日 08 时连续三个时次的中低层可以发现低层有不稳定能量在增加, 上升气流变得越来越强, 近地面湍流运动开始加强, 上下层水汽以及热量得以交换, 雾层在向上发展, 可以看出 12 日 08 时大雾达到一个鼎盛阶段。

Table 1. Divergence fields at 500 hPa, 700 hPa, 850 hPa, and 925 hPa levels from January 9 to 13
表 1. 1 月 9~13 日 500 hPa、700 hPa、850 hPa、925 hPa 散度场

	9 日 08 时	9 日 20 时	10 日 8 时	10 日 20 时	11 日 8 时	11 日 20 时	12 日 8 时	12 日 20 时	13 日 08 时
500 hPa	—	—	—	+	—	0	—	—	+
700 hPa	+	+	—	—	0	—	+	+	+
850 hPa	+	+	+	+	+	+	—	—	—
925 hPa	+	+	+	+	+	—	—	—	0

5.2. 温度平流特征

从表 2 的 9~13 日中低层温度平流值变化可以看出, 10 日 08 时 500~925 hPa 整层气层均为暖平流, 其中 925 hPa 的暖平流最强, 925 hPa 往上均是较弱的暖平流, 10 日 20 时 700 hPa、850 hPa 开始有弱的冷平流侵入。11 日 08 时, 整层又恢复了暖平流, 此时的暖平流与 10 时 08 时相比 500 hPa 和 700 hPa 强度增加, 850 hPa 和 925 hPa 强度减弱, 到了晚上 20 时, 冷平流再次侵入成都, 925 hPa 为弱的暖平流, 以上气层均为较强的冷平流, 此次冷平流强度明显大于 10 日 20 时的强度。冷平流的侵入有利于温度降低到露点温度, 使空气中的水汽凝结, 从而有利于大雾天气的产生。到了 12 日 08 时, 各层有弱的暖平流侵入, 微弱的暖平流侵入有利于低层逆温层的建立, 对大雾维持有积极作用。

Table 2. Temperature advection values at 500 hPa, 700 hPa, 850 hPa, and 925 hPa levels from January 9 to 13
表 2. 9~13 日 500 hPa、700 hPa、850 hPa、925 hPa 温度平流值

	9 日 08 时	9 日 20 时	10 日 8 时	10 日 20 时	11 日 08 时	11 日 20 时	12 日 08 时	12 日 20 时	13 日 08 时
500 hPa	−13.1	−14.4	0.2	0.9	3.8	−3.5	−1.9	1.2	3.8
700 hPa	−3.3	−0.3	1.8	−0.8	5	−1.3	−0.5	3.8	1.6
850 hPa	0.9	3.8	0.7	−0.4	0.3	−0.3	0.9	0.5	0.7
925 hPa	1.2	−0.6	7.4	3.8	5	0.3	1.7	1.7	−0.4

5.3. 相对湿度特征

表 3 是 9~13 日 500 hPa、700 hPa、850 hPa、925 hPa 相对湿度的变化，从 10 号开始，850 hPa 层和 925 hPa 层，相对湿度就大于 85%，到了大雾前一天，925 hPa 相对湿度已经大于 90%，到大雾发生当天两层相对湿度均大于 90%，达到这几天的峰值，相对湿度的增大，利于雾的形成；到 12 日晚上，低层相对湿度又逐渐减小。且 700 hPa 的相对湿度一直较小，500 hPa 的相对湿度情况能从下表中看出在大雾发生前一个明显的降低趋势，中层相对湿度的降低不利于中高层云的生成，利于地面辐射降温。

Table 3. Relative humidity values at 500 hPa, 700 hPa, 850 hPa, and 925 hPa from January 9 to 13
表 3. 9~13 日 500 hPa、700 hPa、850 hPa、925 hPa 层相对湿度值

	9 日 08 时	9 日 20 时	10 日 8 时	10 日 20 时	11 日 08 时	11 日 20 时	12 日 08 时	12 日 20 时	13 日 08 时
500 hPa	61%	36%	74%	82%	82%	49%	28%	16%	3%
700 hPa	14%	24%	14%	5%	14%	26%	34%	26%	19%
850 hPa	62%	80%	92%	86%	86%	93%	92%	62%	93%
925 hPa	75%	70%	87%	87%	87%	87%	93%	81%	87%

从 11 日 20 时和 12 日 08 时的相对湿度垂直剖面(图 11)中可以看出，大雾发生的前一日晚上及当天低层相对湿度都已经达到了发生大雾的条件，且大雾发生当天 08 时，相对湿度达到最大。整个气层在图上可以看出呈现一个上干下湿的状态，有利于大雾的形成和维持。

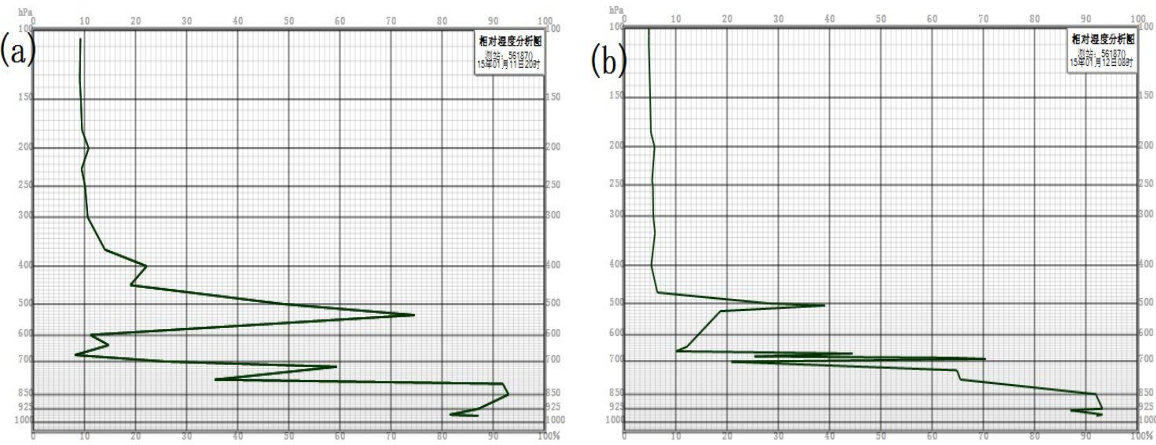


Figure 11. Vertical profiles of relative humidity at (a) 20:00 on January 11, 2015, (b) 08:00 on January 12, 2015
图 11. (a) 2015 年 1 月 11 日 20 时，(b) 2015 年 1 月 12 日 08 时的相对湿度垂直剖面图

6. 层结条件分析

6.1. 层结稳定度分析

K 指数与 SI 指数可以用来分析层结的稳定度，K 指数越小层结越稳定，SI 指数正值越大，层结越稳定。从表 4 的 9~13 日层结稳定度参数演变中可以看出，9~10 日 K 指数都较小，10 日 20 时甚至达到-10；9 日 SI 指数是这几日最大的，其次是 10 日；9~10 日的 500 hPa 与 850 hPa 假相当位温差也是较小值，层

结比较稳定。从 11 日开始，K 指数明显开始增大，到 12 日 08 时，K 指数达到这几天的最大值 12，SI 指数也是从 11 日开始降低，12 日 08 时达到最低。12 日 500 hPa 与 850 hPa 假相当位温差也是这几天中较大的，表明从 11 日晚上开始，成都地区不稳定能量在不断增强，大雾发生当天 08 时的不稳定能量达到五日中最强。不稳定能量的增加也使上下层水汽能量交换，雾层向上发展，08 时开始雾达到成熟阶段，这与上面分析的散度场的结论相吻合。

Table 4. Temporal evolution of three atmospheric stability parameters from January 9~13
表 4. 9~13 日三种层结稳定度参数演变

	9 日 08 时	9 日 20 时	10 日 8 时	10 日 20 时	11 日 08 时	11 日 20 时	12 日 08 时	12 日 20 时	13 日 08 时
K 指数	-3	6	-1	-10	2	9	12	6	4
SI 指数	10.41	7.65	9.18	8.47	6.47	5.77	5.18	7.41	7.77
500 hPa 与 850 hPa 假相 当位温差	-13	-9	-14	-10	-9	-7	-6	-5	-9

6.2. 逆温层分析

对 9~13 日成都探空站的低层和地面温度进行对比分析(表 5)得出，地面到 925 hPa 间有逆温层存在，使得水汽在低空凝结且不易扩散，利于大雾产生。12 日 08 时温度对数压力图见图 12(a)，从中可以明显看到一个接地逆温，与表 5 显示的一致，在地面与 925 hPa 之间有一个浅的逆温层，可以判断此次发生的大雾事件为辐射雾。另外，层结曲线在状态曲线右侧，说明气块温度小于大气层结温度，气块下沉，大气稳定。由于此次逆温厚度不大，从地面向上不超过 20 m，逆温下限与下垫面接触，湿度较大，逆温层顶阻止水汽向上输送，利于水汽在近地层汇合，有利于雾的产生。图 12(b)是 12 日 20 时的温度对数压力图，早上在近地层的逆温层已经消散，12 日双流机场的大雾事件已经结束。

7. 结论

本文利用 2015 年 1 月的常规气象观测资料，通过细致分析环流形势、气象要素、物理量场、以及层结条件，得到双流机场此次低能见度产生的原因如下：

Table 5. Temperature and corresponding stratification characteristics at 850 hPa, 925 hPa, and surface levels from January 9~13
表 5. 1 月 9~13 日 850 hPa、925 hPa、地面温度和对应的层结属性

	9 日 08 时	9 日 20 时	10 日 08 时	10 日 20 时	11 日 08 时	11 日 20 时	12 日 08 时	12 日 20 时	13 日 08 时
850 hPa 温度	2	2	0	1	1	1	0	2	2
925 hPa 温度	6	7	5	6	5	7	5	7	6
地面温度	3	6	5	8	6	7	-1	7	3
层结属性	逆温		等温			等温	逆温	等温	逆温

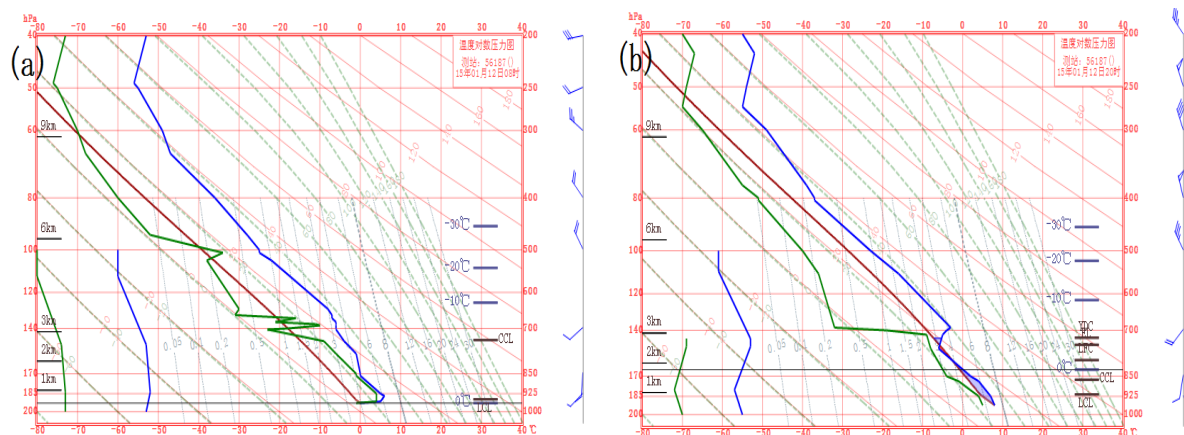


Figure 12. Temperature-logarithmic pressure diagram at (a) 20:00 on January 11, 2015; (b) 08:00 on January 12, 2015
图 12. (a) 2015 年 1 月 11 日 20 时, (b) 2015 年 1 月 12 日 08 时温度对数压力图

(1) 大雾发生前的高空为较强的西北气流, 且环流形势稳定少动。中低层有反气旋性流场, 辐散下沉, 低层有西南暖湿气流向盆地输送, 低层湿度较大, 高低空环流形势互相配合, 利于大雾天气的产生。

(2) 能见度与气温呈现良好的正相关性, 与气压呈现负相关性, 与低层相对湿度也呈现负相关性, 且相关性的大小为相对湿度 > 气温 > 气压, 另外, 温度露点差越小也越有利于雾的产生。即在水汽条件充足甚至饱和的情况下, 略有降温就会形成雾。四川盆地由于特殊地形, 风力常常偏弱, 也有利于辐射雾的产生。

(3) 散度场的分析指示出在大雾发生前一天低层有下沉气流, 随着时间推移, 850 hPa 的下沉气流转为上升气流, 与 700 hPa 的下沉气流汇合, 12 日 08 时 K 指数最大、SI 指数最小、500 hPa 与 850 hPa 假相当位温差较小, 均可说明此次大雾事件低层有不稳定能量的增加, 低层的上升气流使雾层向上发展, 使大雾继续发展到成熟阶段。

(4) 大雾发生前, 850 hPa、925 hPa 的相对湿度均 > 90%, 高层相对湿度较低, 整个气层呈现上干下湿的状态。另外, 大雾发生前一晚, 有冷平流侵入成都, 使低层温度降低, 当温度降低到露点时就会凝结成小液滴或小冰晶形成雾, 而大雾发生当天 08 时, 低层有弱暖平流侵入, 利于近地层的逆温层建立, 水汽不能向上输送, 当水汽集中在近地层, 而温度又降到足够低, TlnP 图中的逆温层厚度不大, 有利于辐射雾的形成。

因此, 此次双流机场低能见度天气过程的形成, 主要是“晴空辐射冷却 + 微弱动力扰动”共同作用产生辐射雾的结果, 同时加上冷空气渗透与盆地地形的协同作用, 水汽条件充沛, 导致此次辐射雾层持续至次日 10 时。通过分析此次双流机场典型低能见度案例解析辐射雾的形成机制, 为民航精细化预报提供一定的理论依据。

参考文献

- [1] 沈宏斌, 宋静. 成都双流机场能见度气候特征及气象相关性分析[J]. 成都信息工程大学学报, 2013, 28(6): 672-676.
- [2] 赵清越, 刘小渝, 李昕翼. 成都市民航气象行业标准下的低能见度时空分布特征研究[J]. 高原山地气象研究, 2014, 34(1): 57-61.
- [3] 周书华, 倪长健, 刘陪川, 等. 成都市 1980-2010 年能见度的变化趋势分析[J]. 成都信息工程学院学报, 2014, 29(1): 91-96.
- [4] 段桂兰, 王秀成, 陶建玲. 2004 年冬季一次大雾天气过程分析[J]. 陕西气象, 2005(4): 16-18.

- [5] 杨宝玲, 方宁莲, 郑鹏徽, 等. 2009年2月3日宁夏大雾天气过程分析[J]. 宁夏工程技术, 2010, 9(4): 303-306+313.
- [6] 孟鹏, 安昕, 杨黎黎. 2011年沈阳一次大雾天气成因分析[J]. 中国农业信息, 2012(13): 103-104.
- [7] 岳炼, 段炼. 双流机场一次低能见度天气过程分析[J]. 高原山地气象研究, 2020, 40(3): 66-72.
- [8] 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.
- [9] 徐妮. 广汉机场一次连日大雾天气过程分析[J]. 四川气象, 2002(4): 28-29.
- [10] 金秀珍, 林易. 贵州省一次大雾天气过程分析[J]. 贵州气象, 2009, 33(5): 22-24.
- [11] 庞双双, 孙喜辉, 金星. 哈尔滨机场一次连续性大雾天气过程分析[J]. 民航科技, 2009(5): 87-90.
- [12] 韦江红. 来宾市一次连续大雾天气过程分析[J]. 气象研究与应用, 2013, 34(S2): 71-72.
- [13] 谢小敏, 刘敏. 深圳一次罕见连续大雾天气的特点及成因[J]. 广东气象, 2006, 28(2): 30-32.