

重庆江北机场一次辐射平流雾天气过程分析

吴胜男, 刘 洋, 周 珂

中国民用航空西南地区空中交通管理局重庆分局, 重庆

收稿日期: 2026年9月7日; 录用日期: 2026年10月9日; 发布日期: 2026年10月19日

摘 要

为探究机场辐射雾伴雾平流天气的形成机制, 本文以2024年12月15日重庆江北机场辐射大雾天气过程为研究对象, 综合利用高空环流场、地面形势场、物理量诊断资料, 并重点结合微波辐射计等临近探测资料, 系统分析此次天气过程的成因、演变特征及关键影响因素。结果表明, 本次大雾为典型的辐射雾叠加雾平流的复合型天气过程: 高空“上干下湿、上稳下冷”的环流配置为辐射雾形成奠定基础, 地面冷高压外围的微风环境与气压梯度变化促进了近地面辐射冷却; 而微波辐射计观测揭示的1~2 km高度逆温层抑制了水汽垂直扩散, 配合晨间风向由偏南转偏北引发的雾平流, 成为大雾反复维持、能见度骤降的关键动力因素。研究结果可为同类机场低能见度天气的预报与服务提供参考。

关键词

辐射雾, 雾平流, 环流背景, 微波辐射计

Analysis of a Radiation Advection Fog Event at Chongqing Jiangbei International Airport

Shengnan Wu, Yang Liu, Ke Zhou

Chongqing Sub-Bureau of Southwest China Regional Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation Administration of China, Chongqing

Received: September 7, 2026; accepted: October 9, 2026; published: October 19, 2026

Abstract

To explore the formation mechanism of radiation fog with advection fog at airports, this study analyzes the heavy radiation fog event at Chongqing Jiangbei Airport on December 15, 2024, using upper-air circulation, surface weather conditions, physical quantity diagnosis, and microwave radiometer observations. Results show this was a typical composite fog event of radiation fog plus advection fog: the upper-atmosphere “dry upper/wet lower, stable upper/cold lower” configuration

laid the foundation for radiation fog formation; surface calm winds and pressure gradient changes enhanced near-surface radiative cooling; additionally, the 1~2 km inversion layer (warm cover structure) identified by microwave radiometer inhibited vertical water vapor diffusion, and combined with morning wind direction shift (southerly to northerly) triggering fog advection, which became the key factor for persistent heavy fog and sharp visibility drop. This study provides a reference for low-visibility weather forecasting at similar airports.

Keywords

Radiation Fog, Fog Advection, Circulation Background, Microwave Radiometer

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

辐射雾是我国冬半年航空领域高发的低能见度灾害性天气[1][2],主要形成于晴空少云、微风、近地面强辐射冷却及低层水汽充沛的气象条件下,具有突发快、能见度骤降、影响范围集中的特点。当辐射雾与平流雾叠加时,会显著增强雾体浓度、延长大雾维持时长,大幅提升机场精细化气象预报难度,给民航航班起降、机场安全运行及保障调度带来极大压力。

国内学者针对我国不同区域机场大雾天气的形成机理、演变特征及预报技术已开展大量系统性研究,积累了丰富的理论成果与实践经验[3]-[10]。现有研究多聚焦于单一辐射雾、平流雾天气的成因分析与预报检验,明确了地形、水汽、辐射冷却、风场等关键因子对机场大雾生消演变的影响机制,为机场低能见度天气预警保障工作奠定了重要基础。但针对四川盆地特殊地形下,辐射雾与平流雾耦合叠加的复合型大雾天气的精细化机制研究、数值模式偏差诊断及预报服务优化的针对性研究仍有待完善。

重庆江北国际机场坐落于四川盆地东部,区域地形闭塞、地貌条件复杂,特殊的地形格局造就了本地冬季多辐射雾的气候特征[11]。2024年12月15日,重庆江北国际机场发生一次典型的辐射雾伴局部平流叠加的天气过程,过程中伴随轻度霜冻,机场能见度最低降至100 m,跑道视程(RVR)最低仅200 m。受此次复合型大雾天气前期预报漏报影响,机场出现大量航班备降、延误情况,机场运行秩序受到严重冲击。基于此,本文以本次典型复合型大雾天气个案为研究对象,系统分析天气过程的大气环流背景、关键物理量配置、临近探测演变特征,同时对比剖析数值预报模式的预报偏差与成因,讨论盆地地形下机场辐射雾叠加平流雾的形成、维持及消散机制,梳理本次预报服务工作中的短板与不足,针对性提出机场大雾预报服务优化改进对策。研究结果可为西南盆地机场同类复合型低能见度天气的精准预报、预警服务及民航气象保障工作提供理论支撑与实践参考。

2. 天气概况与分析资料

2.1. 资料

本研究综合利用了多源观测与再分析资料,包括:1) 机场自动气象观测系统(AWOS,即自观资料)提供的逐时主导能见度、跑道视程(RVR)、风向风速、温度和湿度数据;2) 欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的ERA5再分析资料,用于分析高空环流、地面形势及物理量场;3) 重庆沙坪坝站(57516)的探空资料,用于分析大气层结;4) 中国气象局国家卫星气象中心的气象卫星红外云图;5) 机场布设的微波辐射

计提供的温度、湿度垂直廓线数据。

2.2. 天气概况

2024 年 12 月 15 日 06:00~07:00、08:07~10:24 (北京时, 下同), 重庆江北机场出现辐射大雾天气伴轻度霜, , 如图 1 能见度变化所示, 整个过程主导能见度最低 100 米, RVR 最低 200 米。其中 RVR < 550 米的时段为 08:15~10:07; 主导能见度<1000 米的时段为 08:07~10:24。

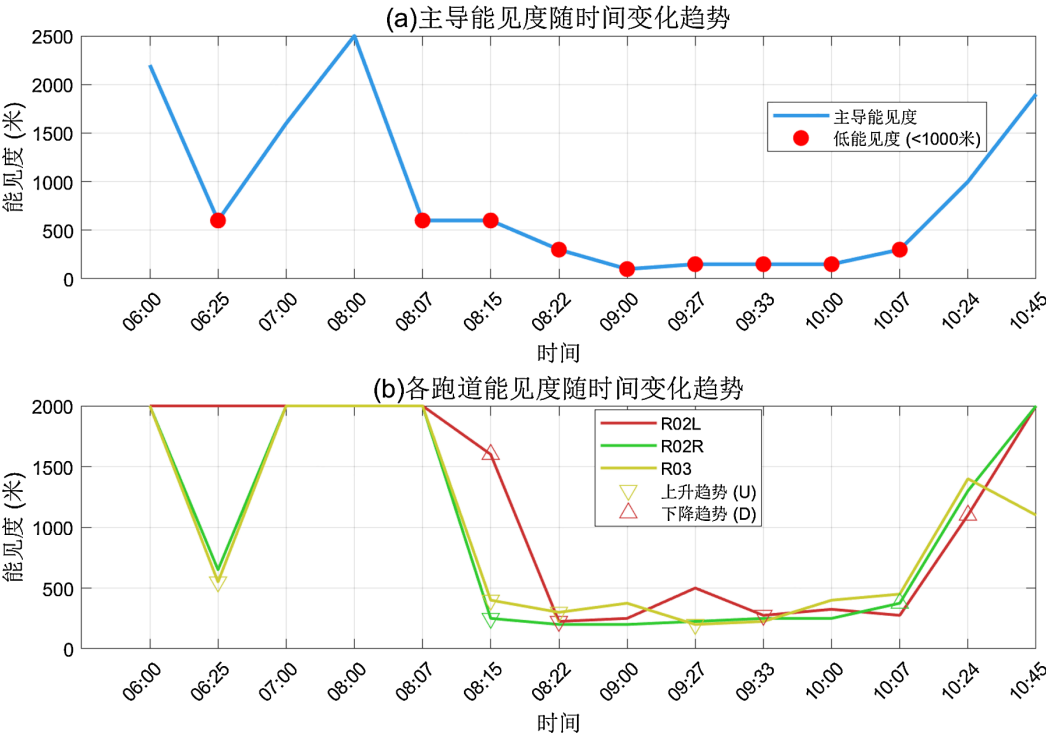


Figure 1. Variation of morning visibility at Chongqing Jiangbei Airport on December 15, 2024 (Unit: m. Note: (a) is the dominant visibility, (b) is the RVR at the end of the operating runway, where P2000 means greater than 2000 m; U means rising trend; D means falling trend; N means no special trend)

图 1. 重庆江北机场 2024 年 12 月 15 日晨间能见度变化情况(单位: 米。注: (a) 为主导能见度, (b) 为使用跑道端 RVR, 其中 P2000 表示大于 2000 米; U 表示上升趋势; D 表示下降趋势; N 表示无特殊趋势)

主导能见度演变呈现明显的阶段性特征: 06:00~07:00 能见度由初始 2000 米快速降至 1000 米以下, 07:00 后短暂回升, 08:07 起再次下降, 且在 200~500 米区间波动, 多次出现低于 300 米的低能见度; 各跑道 RVR 变化与主导能见度趋势基本一致, R02R 跑道 RVR 达最低值 200 米。低能见度期间, 机场跑道维持向北运行模式, 各跑道能见度差异较小, 表明大雾在机场范围内分布较为均匀。

2.3. 机场运行情况

受此次大雾天气前期预报漏报影响, 机场未提前采取针对性保障措施, 运行受到显著冲击。06:15~10:25 期间, 共 32 个航班备降周边机场, 其中天府机场接收 17 架次(占比 53%), 贵阳机场 8 架次(占比 25%), 双流、遵义等机场接收其余 7 架次。

本场实施低能见度程序(LVP)运行期间, 仅保障 45 架次航班起飞, 无任何航班落地, 天气突变对机场运行决策造成重大影响。此次大雾引发两个阶段的运行限制: 第一阶段(06:15~07:04)实施 LVP 程序, 保障 23 架次航班起飞, 无进港航班落地; 第二阶段(08:05~10:25)继续维持 LVP 程序, 起飞 22 架次, 仍

无落地航班。

3. 环流背景分析

3.1. 高空环流特征

根据图2和图3中14日08-20时西南地区高空形势场所示：14日08时至20时，200 hPa中纬度地区为平直西风气流带，低纬度受弱偏南气流影响，重庆位于西风带下，风速稳定且无明显波动，高空急流活动微弱，大气垂直运动受到显著抑制；500 hPa中层于14日08时转为槽后偏北气流控制，冷空气从中高层持续向南输送，增强了近地面层的冷却效应，仅上游存在弱波动需关注后续发展。700 hPa中低层在14日08时完成从切变线影响区向后部干区的转换，14日20时上游虽生成弱切变并向东移动，但整体湿度条件已明显下降；850 hPa和925 hPa低层环流偏弱，以高压控制为主，风速小且风向稳定，抑制了低层水汽的横向输送。

上述高空环流配置使大气层结趋于稳定，垂直混合作用减弱，中高层干冷空气的下沉增温效应与中低层残留的辐射冷却作用形成对冲，稳定的分层结构阻止了湍流混合对近地面冷却的干扰，而槽后偏北气流带来的干空气降低了大气整层湿度，使近地面更易达到饱和状态，为夜间辐射冷却创造了有利条件。

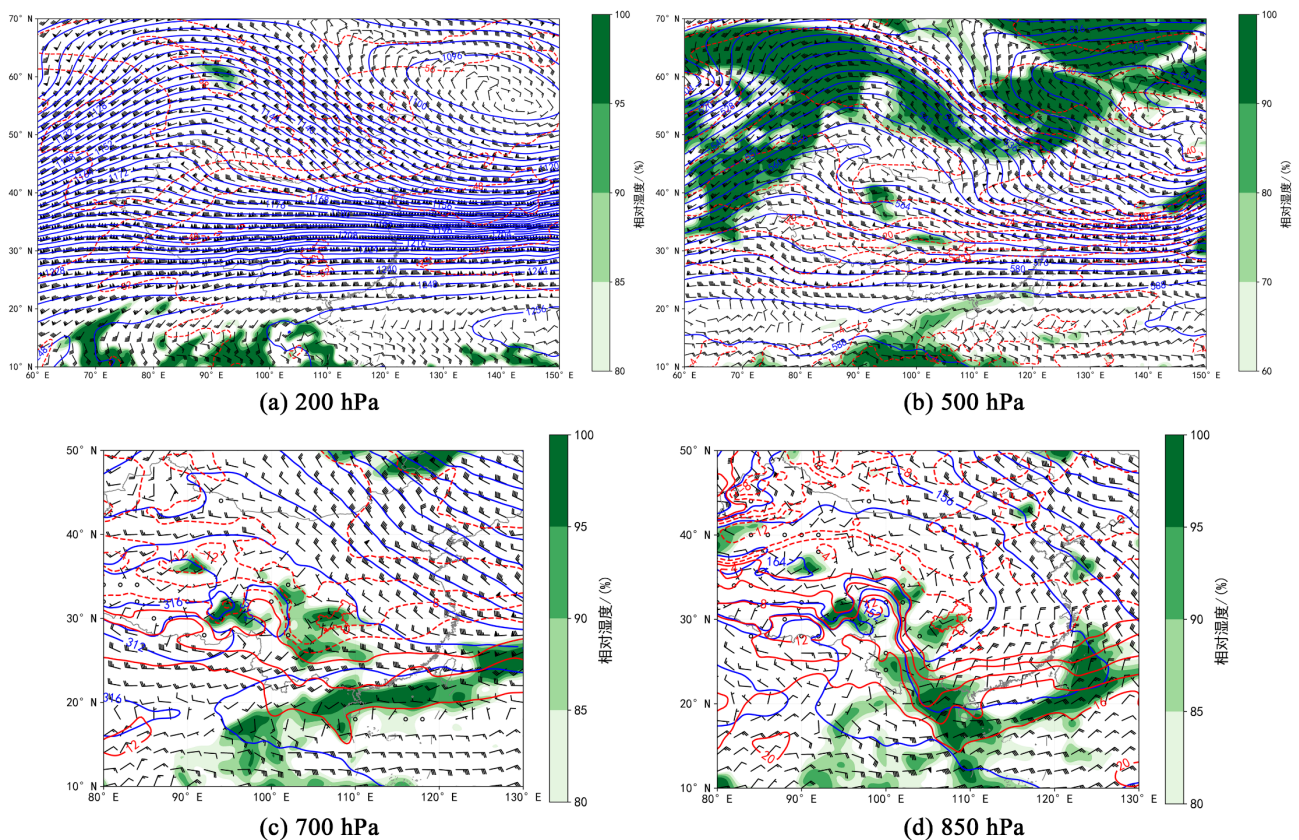


Figure 2. Analysis of upper-air situation field at 08:00 on the 14th (Beijing time) ((a)~(d) represent the circulation fields at 200 hPa, 500 hPa, 700 hPa and 850 hPa respectively. Among them, the blue contour lines represent geopotential height (unit: gpm); the red solid lines represent positive temperature, the red dashed lines represent negative temperature (unit: °C); the shaded map represents relative humidity (unit: %); the wind field is represented by wind barb map)

图 2. 14 日 08 时(北京时)高空形势场分析((a)~(d)分别表示 200 hPa, 500 hPa, 700 hPa, 850 hPa 环流场。其中蓝色等值线表位势高度, 单位:gpm; 红色实线表示正温度, 红色虚线为负温度, 单位: °C; 阴影图表相对湿度, 单位:%; 风场用风羽图表示)

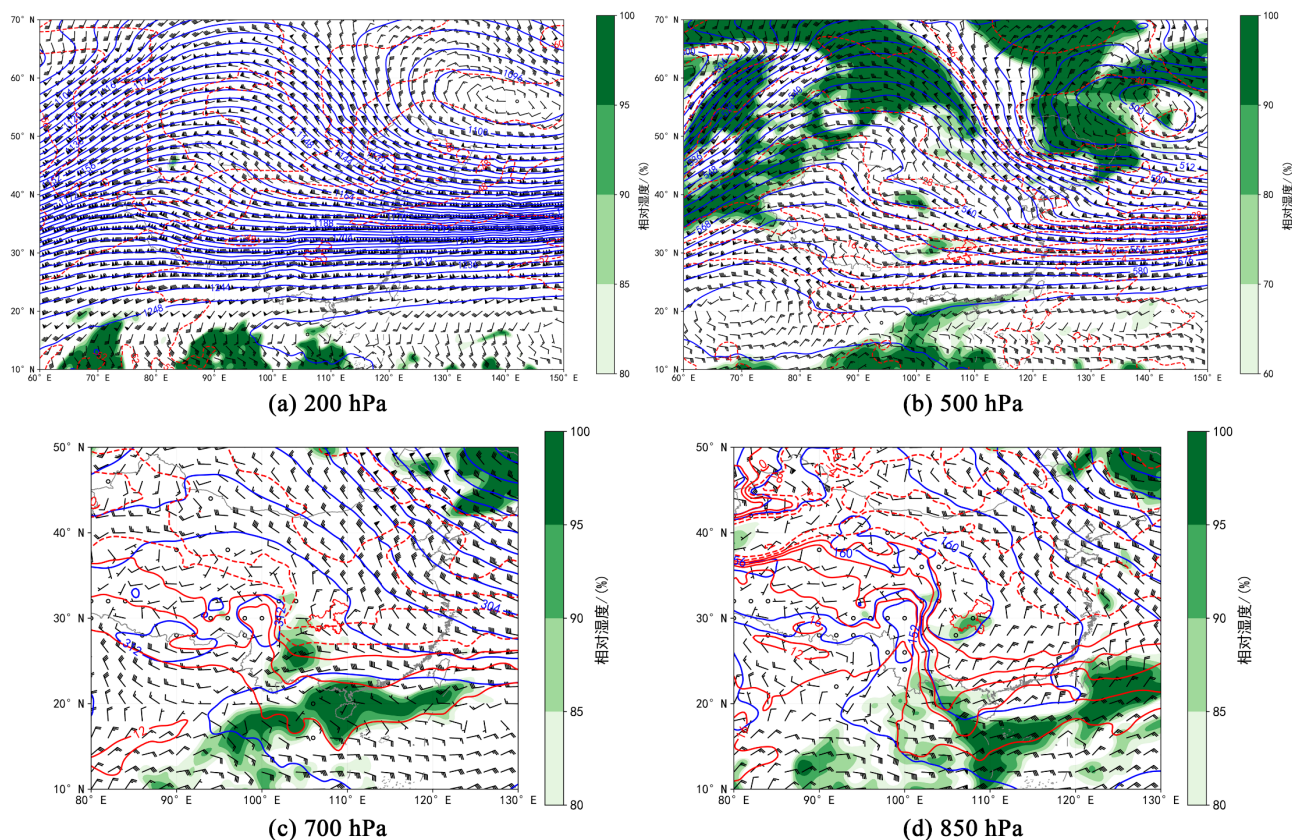


Figure 3. Analysis of upper-air situation field at 20:00 on the 14th (Beijing time) ((a)~(d) represent the circulation fields at 200 hPa, 500 hPa, 700 hPa and 850 hPa respectively. Among them, the blue contour lines represent geopotential height (unit: gpm); the red solid lines represent positive temperature, the red dashed lines represent negative temperature (unit: °C); the shaded map represents relative humidity (unit: %); the wind field is represented by wind barb map)

图 3. 14 日 20 时(北京时)高空形势场分析((a)~(d)分别表示 200 hPa, 500 hPa, 700 hPa, 850 hPa 环流场。其中蓝色等值线表位势高度, 单位: gpm; 红色实线表示正温度, 红色虚线为负温度, 单位: °C; 阴影图表相对湿度, 单位: %; 风场用风羽图表示)

3.2. 地面形势特征

地面气压场的演变进一步强化了辐射雾形成的环境基础。根据图 4 重庆周边地区地面形势场分析可知: 14 日至 15 日, 中国中部大部受强大冷高压环流控制, 重庆处于冷高压东南外围, 14 日 20 时起气压梯度显著增大, 15 日 00 时西南部形成闭合小高压中心, 使地面辐射冷却效应被显著放大。

冷高压前部的偏北风带来干冷空气的同时, 加速了地表热量的散失, 尤其在晴朗无云的夜间, 地面通过长波辐射快速降温; 尽管气压梯度加大可能引发大风, 但 14 日 20 时至 15 日 00 时, 重庆地区实际风速维持在 2~3 级的较低水平, 未形成强风扰动, 保障了近地面冷却过程的持续进行。此外, 闭合小高压中心的形成加剧了局地辐射冷却强度, 反气旋性环流使气流下沉增温仅局限于中高层, 近地面层因缺乏动力扰动, 冷却效率显著提高, 空气层结趋于超绝热状态, 为水汽凝结提供了理想条件。

3.3. 高低空配置的综合效应

本次天气过程形成了“上干下湿、上稳下冷”的典型辐射雾形成环境: 高空平直西风与槽后偏北气流抑制了系统性降水和大范围垂直运动, 850 hPa 以下低层高压环流使风速维持在 1~2 级的弱风级别, 既避免了强风对近地面水汽的平流输送, 又防止了湍流混合破坏逆温层形成; 500 hPa 及以上干冷空气的

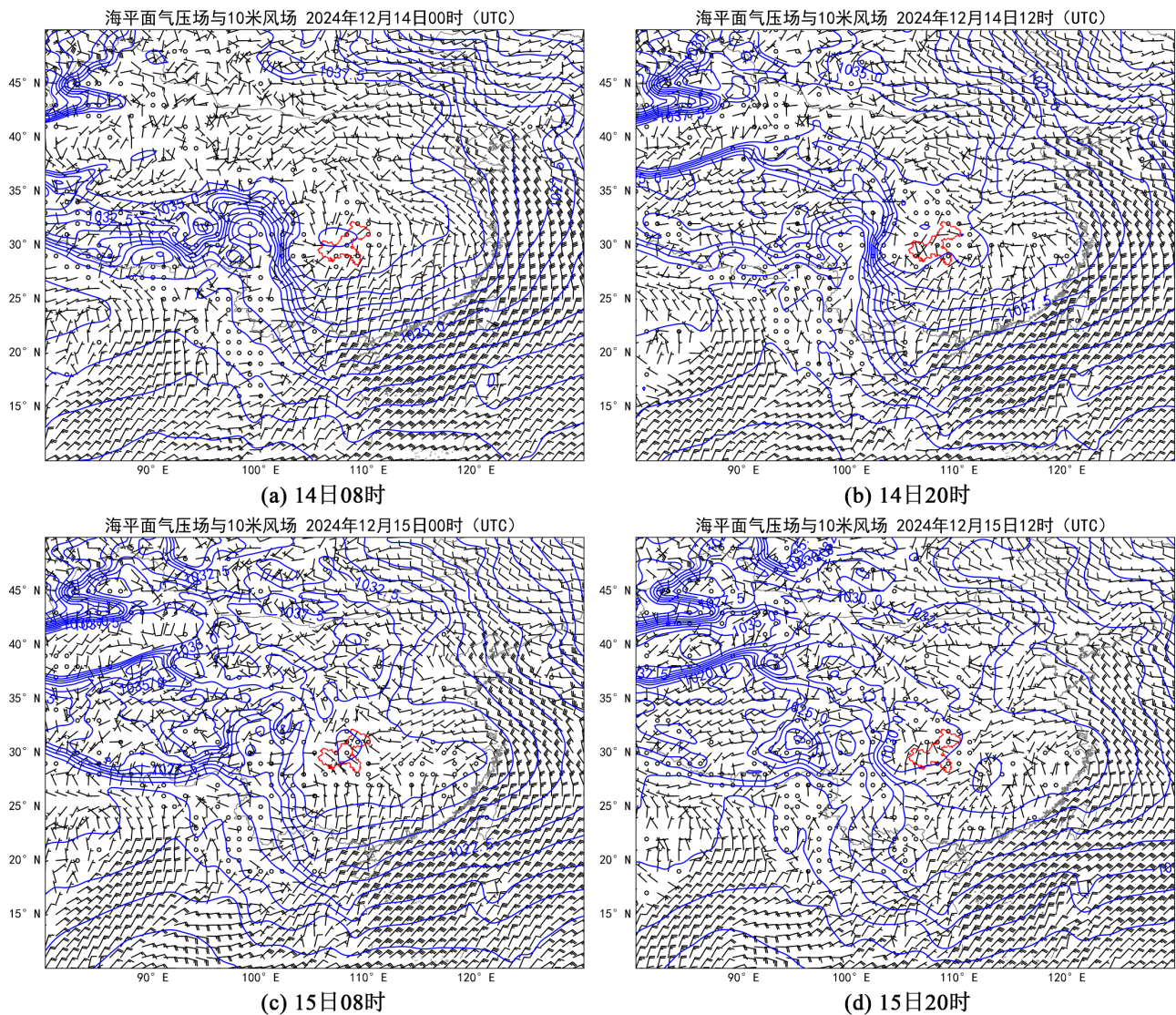


Figure 4. Variation of surface situation field in Chongqing ((a)~(d) represent the surface situation fields at 08:00 on the 14th, 20:00 on the 14th, 08:00 on the 15th and 20:00 on the 15th (Beijing time) respectively. Among them, the blue contour lines represent the sea level pressure field (unit: hPa); the wind field is represented by wind barb map)

图 4. 重庆地面形势场变化((a)~(d)分别表示 14 日 08 时、14 日 20 时、15 日 08 时、15 日 20 时(北京时)地面形势场。其中蓝色等值线: 海平面气压场, 单位: hPa; 风场用风羽图表示)

下沉增温虽抬升了大气整层温度, 但地面冷高压主导的强烈辐射冷却使近地面气温迅速下降, 当近地面空气冷却至露点温度时, 水汽在贴地层凝结成雾。

值得注意的是, 14 日 20 时至 15 日 00 时地面气压梯度加大但风速未显著增强, 形成的短暂静稳期进一步延长了辐射冷却时间, 使雾滴有更充分的时间聚集和维持, 最终导致重庆江北机场在 15 日凌晨至上午出现强辐射雾。

4. 物理量诊断分析

利用相对湿度、比湿、温度对数压力图及风场资料, 对此次大雾过程的水汽、层结、动力风场条件进行诊断分析, 揭示大雾形成的物理机制。

4.1. 水汽条件

根据图5重庆江北机场单站相对湿度和比湿剖面图可知：重庆江北机场14日早间有明显降水，为低层积累了充足的水汽。近地面至900~850 hPa低空区域相对湿度普遍达80%以上，部分区域接近或达到100%，比湿值在1~3 g/kg之间，绝对水汽含量丰富，为雾的形成提供了充足的物质基础；随着高度上升，相对湿度呈显著下降趋势，500 hPa以上相对湿度低于30%，比湿也降至1 g/kg以下，部分区域接近0，表明高层大气水汽稀少，水汽主要集中在近地面和对流层低层，形成“下湿上干”的水汽垂直分布特征，有利于近地面水汽凝结且不易向上扩散。

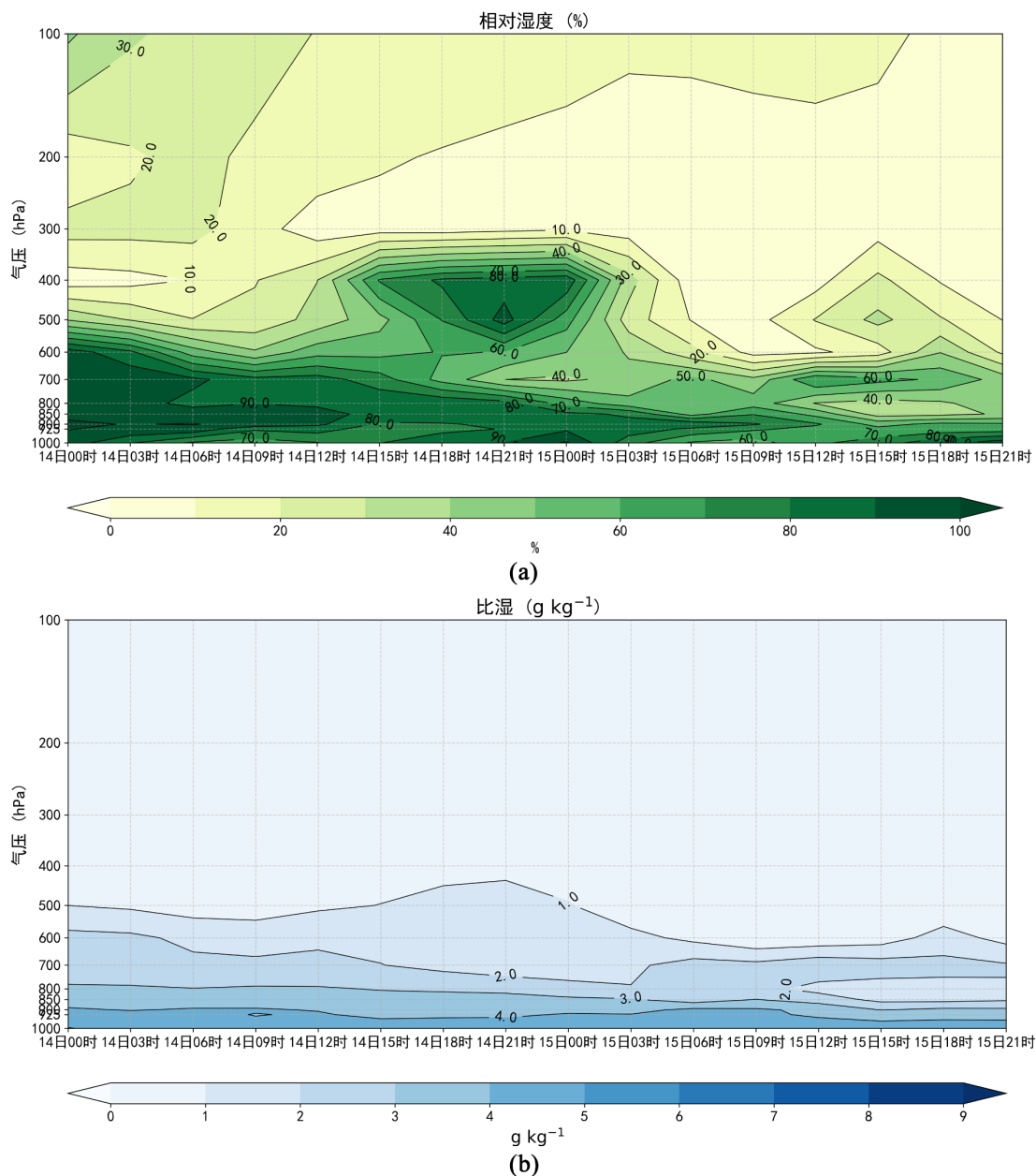


Figure 5. Vertical profile of relative humidity (unit: %) and specific humidity (unit: kg/kg) at Jiangbei Airport (106.5°E, 29.5°N) from 00:00 on December 14 to 21:00 on December 15 (Beijing time)

图 5. 12 月 14 日 00 时至 12 月 15 日 21 时(北京时)江北机场(106.5°E, 29.5°N)相对湿度(单位: %)与比湿剖面图(单位: kg/kg)

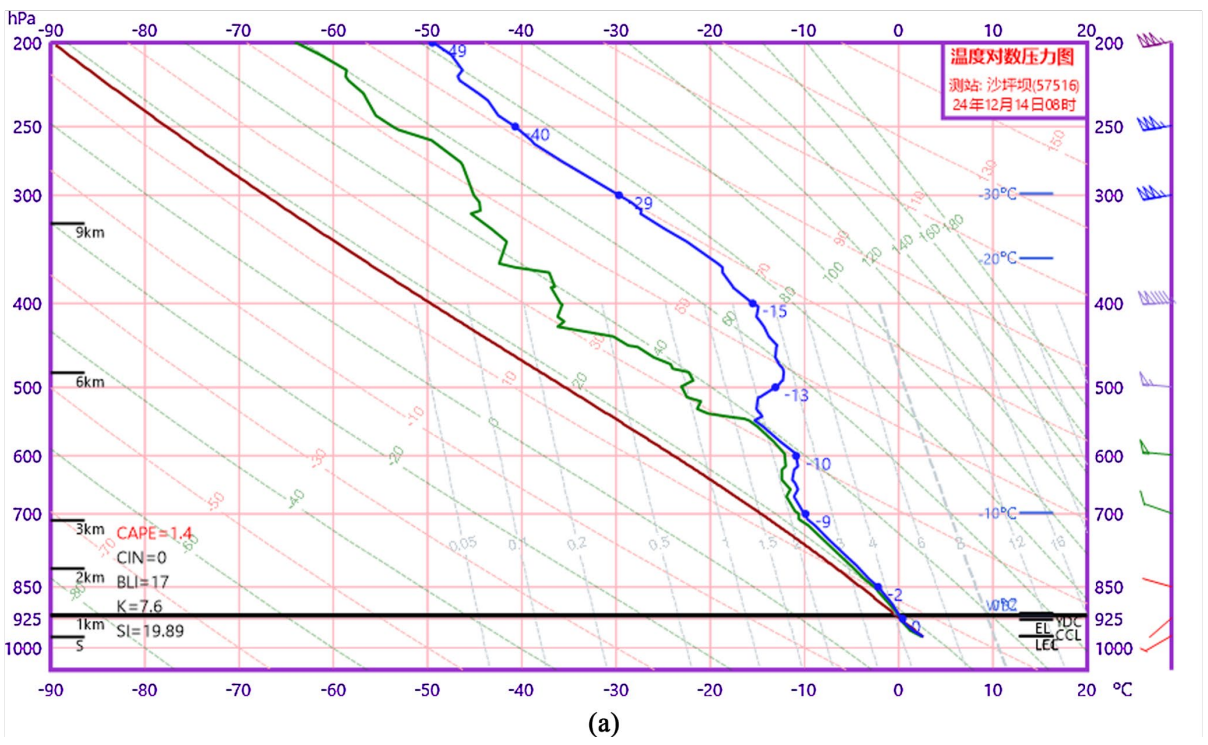
4.2. 层结条件

利用沙坪坝站(57516)温度对数压力图分析大气层结特征,12月14日08时,该地区从地面到高空未出现明显逆温层结,气温随高度呈稳定递减趋势,有利于水汽垂直输送和上升运动,为前期降水提供了热力和动力条件;14日20时,高层水汽略有减少,但整体湿度仍较大,天空未呈现完全晴朗的碧空状态,夜间仍存在一定的辐射降温条件,但降温幅度相对缓慢。需指出的是,沙坪坝探空站位于主城区,与机场存在一定空间距离及下垫面差异,低层温湿廓线未必完全代表机场实况。但探空所反映的逆温层结、整层湿度和稳定度等大气层结特征,主要受大尺度环流背景控制,空间代表性足以支撑背景分析,故本节利用沙坪坝站湿度条件及夜间辐射降温的总体趋势来评估机场情况。

根据图6(a)中12月14日08时沙坪坝的温度对数压力图显示,该地区从地面到高空的水汽条件均处于较好状态,并且未出现明显的逆温层结。这意味着在垂直方向上,气温随着高度的增加呈现出较为稳定的递减趋势,有利于水汽的垂直输送和上升运动,为可能出现的降水等天气现象提供了较为有利的热力和动力条件。而晚间20时(图6(b))的探空资料来看,高层水汽减少,但湿度仍较大。因为即使高层水汽有所减少,但较大的湿度表明空气中仍含有较多水汽,这些水汽在一定条件下仍有可能发生凝结、凝华等物理过程,从而影响夜间的天气状况,使得天空不会呈现出完全晴朗无云的碧空状态。综合来看,温度对数压力图所反映的水汽条件和逆温层结情况,以及晚间探空资料所呈现的湿度特征,表明夜间不会完全碧空。

4.3. 风场条件

如图7所示,15日晨间机场地面风向风速的变化特征来看,此次大雾的维持与加剧受风场演变影响显著。风向在05时后由偏南风转为偏北风,这一转变具有关键意义——机场以北地区此前可能存在雾(或低云)天气,偏北风的介入会将这些区域的水汽和雾体直接平流输送至本场,从而引发“雾平流”现象。这种平流过程不仅直接导致本场能见度迅速下降,还因持续的水汽输入使得大雾反复生成、难以消散,



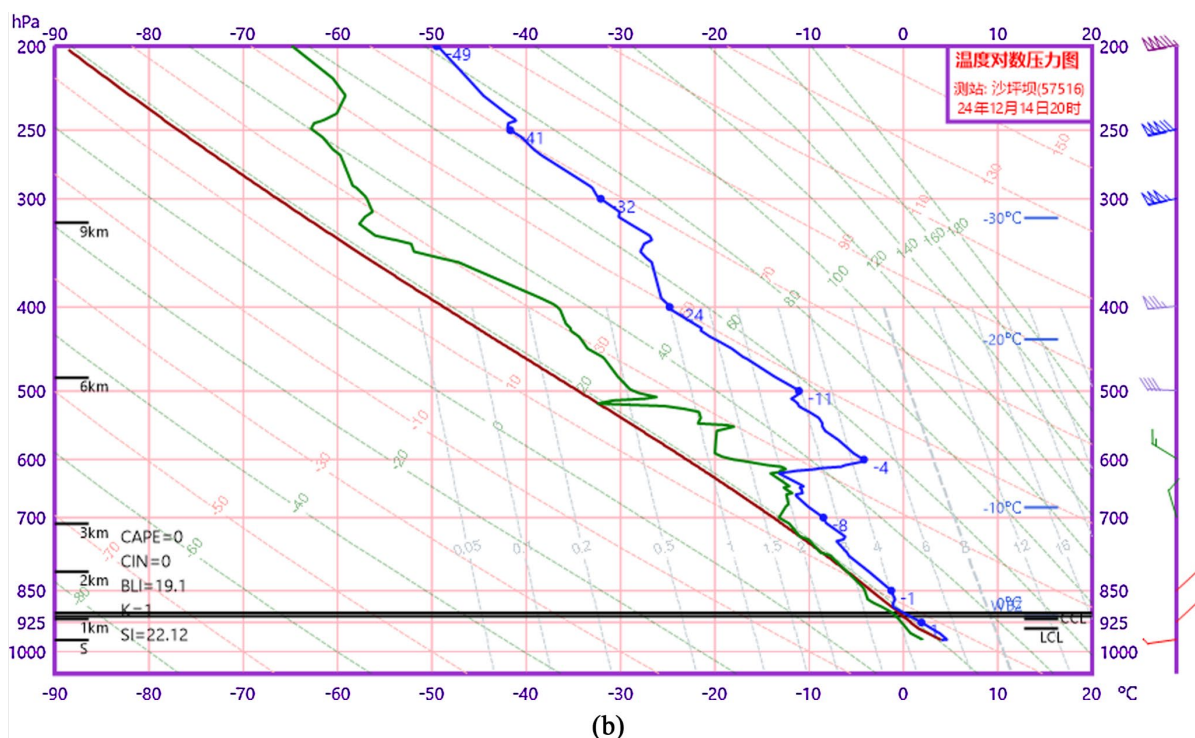


Figure 6. T-logP diagram of Shapingba Station ((a), (b) are 08:00 on December 14 and 20:00 on December 14 (Beijing time) respectively)

图 6. 沙坪坝站温度对数压力图((a), (b)分别为 12 月 14 日 08 时(北京时)和 12 月 14 日 20 时(北京时))

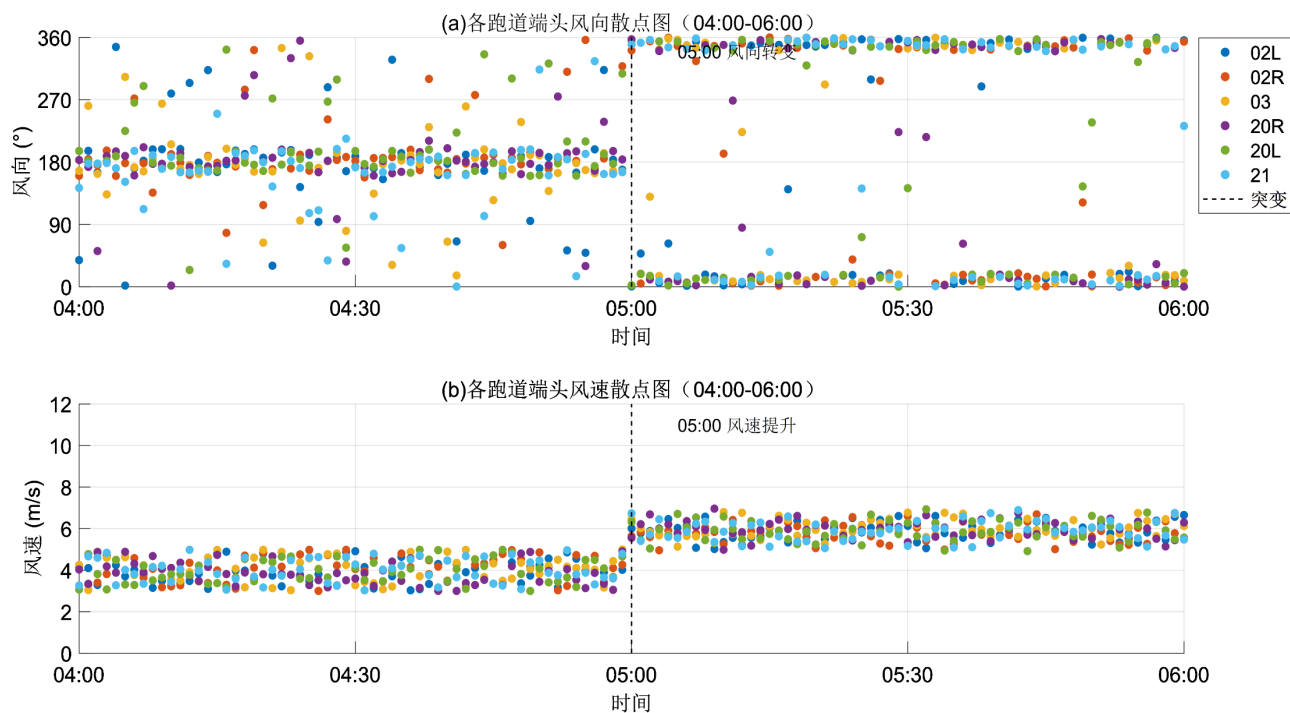


Figure 7. Variation of surface wind direction and speed at Jiangbei Airport from 04:00 to 06:00 on the 15th (Beijing time) (Wind direction unit: °; Wind speed unit: m/s)

图 7. 15 日 04~06 时(北京时)江北机场地面风向风速变化(风向单位: °; 风速单位: m/s)

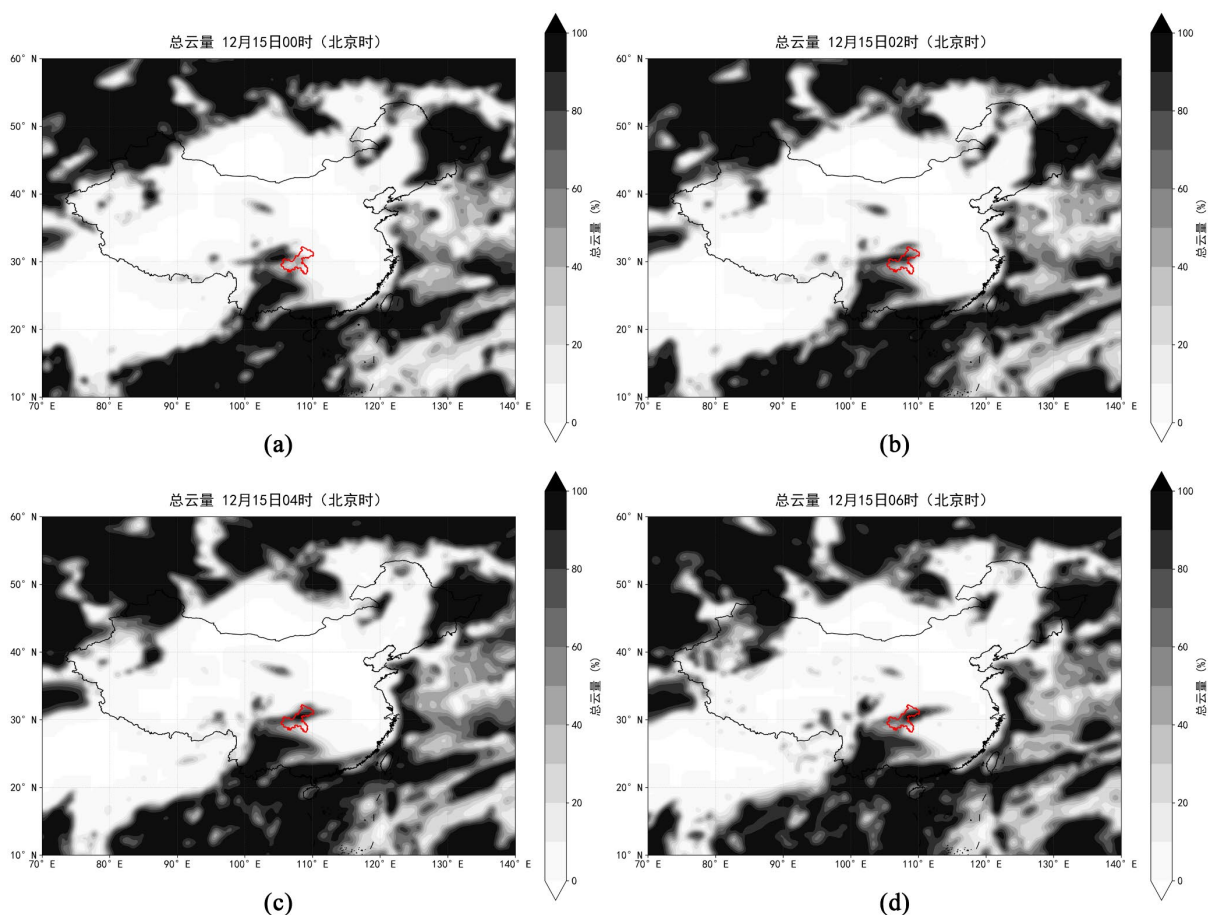
显著延长了大雾的持续时间。

15 日 05 时后, 机场地面风向由偏南风转为偏北风, 机场以北地区前期存在的雾体被偏北风平流输送至本场, 引发“雾平流”, 直接导致本场能见度迅速下降, 且持续的水汽输入使大雾反复生成、难以消散, 显著延长了大雾持续时间。风速变化对大雾的发展起到加速作用: 05 时风向转变前, 风速维持在 3~5 m/s, 既未强到破坏近地面逆温层结和水汽聚集, 又能促进局地水汽微弱交换, 为雾的形成提供了必要的水汽输送; 05 时后风速增大并超过 5 m/s, 不仅加快了北部雾体向本场的输送速率, 还增强了近地面空气湍流混合, 使水汽和雾滴更快速、广泛地扩散, 进一步加剧了大雾的强度和覆盖范围。风向转变与风速增大的组合效应, 是此次大雾反复与持续的核心动力机制, 偏北风带来雾体的“外来输入”, 风速增强加速了这一过程, 二者共同导致大雾快速形成且难以消散。

5. 临近探测资料分析

5.1. 云图特征

15 日 00:00~10:00 的 ERA5 再分析资料总云图(图 8)显示, 重庆江北机场夜间未完全碧空, 但周边云系较少且云层较薄, 使机场夜间具备一定的辐射降温条件, 但降温幅度缓慢, 增加了预报中对降温程度判断的难度。



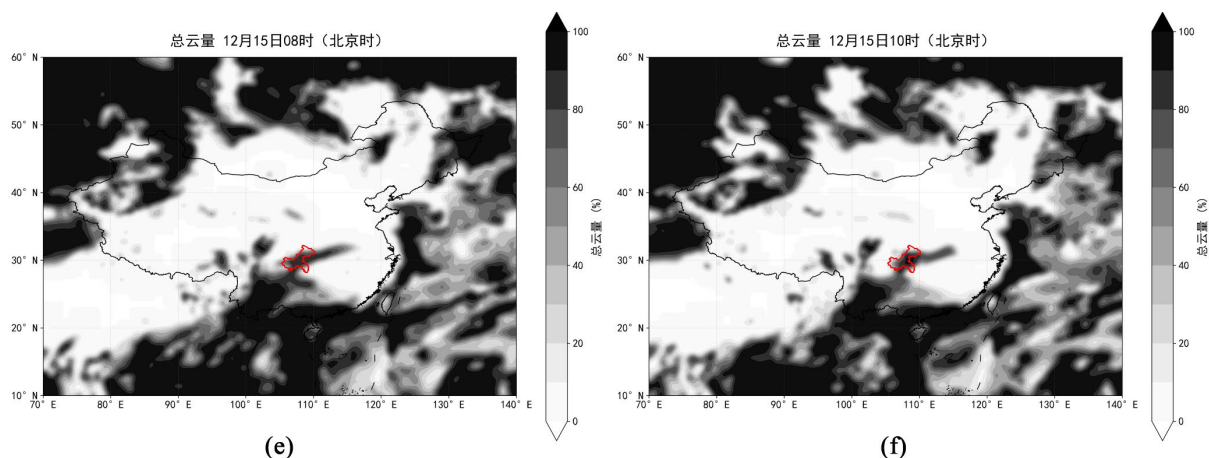


Figure 8. Evolution of total cloud images from 00:00 to 10:00 on the 15th. (Panels (a)~(f) correspond to 00:00, 02:00, 04:00, 06:00, 08:00, and 10:00 (Beijing Time), respectively.)

图 8. 15 日 00 时~10 时总云图变化((a)~(f)分别对应时刻 00:00、02:00、04:00、06:00、08:00 和 10:00 (北京时间))

5.2. 微波辐射计特征

根据图 9 中 15 日 03:00~09:30 机场微波辐射计温度廓线图显示, 此次大雾过程的层结特征与经典辐射雾存在显著差异: 近地面层未出现明显逆温层结, 0~1 km 高度维持 0.6~0.8°C/100m 的正常气温递减率, 而在 1~2 km 高度反复出现稳定逆温层, 形成典型的“暖盖”结构, 逆温强度达 1.2~2.5°C/100m, 06:00 时逆温强度达峰值 2.5°C/100m, 且逆温层底高度从 03:00 的 2.0 km 缓慢降至 09:00 的 1.5 km。

中层逆温层的存在为雾平流形成创造了关键条件: 一方面, 逆温层抑制了水汽垂直扩散, 使近地面湿空气持续堆积; 另一方面, 配合地面偏南暖湿气流(2~3 m/s), 构成稳定的湿平流输送通道。06:00 时逆温强度峰值与地面能见度最低值(<100 米)出现时间高度吻合, 证明逆温层强度与雾情严重程度呈正相关; 08:00 后逆温层强度虽略有减弱, 但层结稳定性仍维持, 成为大雾持续至上午的重要原因。

6. 总结

本文基于多源观测与再分析资料, 对 2024 年 12 月 15 日重庆江北机场一次辐射雾叠加平流雾的复合型浓雾过程开展综合分析, 讨论了此次复合型大雾的形成维持机制与预报难点, 并结合本地典型雾天气特征明确了研究成果的适用条件与预报启示。

本次复合型大雾与重庆冬季常规纯辐射雾具备相似的基础环境, 均形成于高空稳静、低层高湿、地面冷高压控制及夜间强辐射冷却的有利条件。二者主要差异在于, 纯辐射雾以局地降温凝结为主, 生消受日间升温与湍流混合调控, 演变相对简单; 而本次过程在辐射雾基础上叠加明显雾平流, 晨间偏南风向偏北风的转换将外围雾体输入本场, 配合 1~2 km 中层逆温“暖盖”结构抑制水汽垂直扩散, 使雾体维持时间更长、能见度降幅更大、预报难度显著提升。中层逆温持续稳定与风场突变叠加, 是本次低能见度天气持久、致灾性更强的核心原因。

结合本次过程特征, 可提炼出盆地机场复合型浓雾的关键预报着眼点: 在冬季稳静环流、地面冷高压控制的相似背景下, 需重点依托微波辐射计监测中层逆温的建立、增强与维持过程, 并密切关注晨间近地面风向由偏南转偏北的突变信号, 提前预判雾平流叠加风险, 有效规避单一辐射雾预报思路造成的漏报。

本研究结论主要适用于四川盆地及河谷类地形、易发生局地风场转换、常出现中层逆温结构的内陆机场, 对平原、沿海雾过程适用性有限。同时, 本文仅基于单次典型个例分析, 尚未开展多案例统计与



Figure 9. Temperature profile map of airport microwave radiometer from 03:00 to 09:30 in the early morning of the 15th (Beijing time)
图 9. 15 日凌晨(03:00~09:30 (北京时))机场微波辐射计温度廓线图

数值模拟定量试验, 相关物理量阈值、强度对应关系仍有待后续细化。未来可通过长序列案例统计与敏感性模拟, 进一步完善复合型大雾的定量预报指标, 提升西南地区机场低能见度天气的预警与保障能力。

参考文献

- [1] 张琤, 赵征, 徐恩东, 等. 基于大雾天气影响的离港航班延误影响量化评估方法[J]. 民航学报, 2025, 9(1): 48-52.
- [2] 江柯, 段炼. 影响航空飞行的大雾天气研究进展评述[J]. 科技和产业, 2022, 22(3): 279-284.
- [3] 彭鹏. 满洲里市大雾天气特征分析及航空气象保障对策[J]. 科技与创新, 2023(10): 93-95.
- [4] 苏蕾, 张玉轩, 梁秋枫, 等. 基于多源观测资料的闽南沿海和厦门机场一次大雾天气过程分析[J]. 气象科技, 2025, 53(5): 706-718.
- [5] 刘小渝. 双流机场一次中空急流背景下的大雾成因分析[J]. 高原山地气象研究, 2025, 45(S1): 128-134.

- [6] 王雨琪, 许东蓓, 段炼, 等. 2019 年 10 月 16 日准静止锋摆动对茅台机场大雾天气影响研究[J]. 山地气象学报, 2025, 49(4): 87-95.
- [7] 戚慧兰, 宝兴华, 陈军明, 等. 冀中南一次持续性大雾过程中雨雾的特征和成因分析[J]. 气象科技, 2026, 54(2): 258-270.
- [8] 杨彬彬. 禄口机场大雾低能见度天气变化特征分析[J]. 现代盐化工, 2023, 50(2): 85-87.
- [9] 刘超, 谭艳梅, 陈阳权, 等. 冬季乌鲁木齐城区和机场雾的特征及地面气象条件对比分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2023, 17(4): 118-124.
- [10] 南博文, 郑佳锋, 张杰, 等. 基于微波辐射计资料的西安机场两类雾的温湿参量演变特征[J]. 成都信息工程大学学报, 2026, 41(2): 216-222.
- [11] 韩余, 刘德, 王欢, 等. 重庆雾气候特征及天气成因分析[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(6): 116-122.