

微波辐射计探空资料对重庆江北机场一次辐射雾天气的应用分析

丁魅理, 吴胜男, 冯政林, 伍见军, 廖翼

民航重庆空管分局, 重庆

收稿日期: 2025年4月9日; 录用日期: 2025年5月22日; 发布日期: 2025年5月29日

摘要

本文基于重庆江北机场历史观测资料对机场近30年(1993~2022年)大雾天气进行统计分析,发现冬季是本场辐射雾的高发季节,而且在实际工作中容易漏报该类天气。因此,本研究将结合微波辐射计探测资料,对2023年12月9日晨间出现的典型大雾个例进行应用分析。结果表明:1) 此次大雾天气发生前,天空放晴早,夜间出现强烈的辐射降温,是一次典型的辐射雾天气过程。2) 微波辐射计的温度、湿度资料较好地反映了此次辐射雾过程的初生、发展和消散情况,为临近预报能提供一定的分析依据。3) 微波辐射计的时间分辨率较高,可有效弥补探空资料时间密度不足的缺点,其液态水路径产品也能辅助判断大雾的性质。

关键词

统计分析, 辐射雾, 微波辐射计

Application Analysis of Microwave Radiometer Data for a Radiation Fog Event at Chongqing Jiangbei Airport

Meili Ding, Shengnan Wu, Zhenglin Feng, Jianjun Wu, Yi Liao

Chongqing Air Traffic Management Sub-Bureau of CAAC, Chongqing

Received: Apr. 9th, 2025; accepted: May 22nd, 2025; published: May 29th, 2025

Abstract

Based on historical observational data from Chongqing Jiangbei International Airport, this study conducts statistical analysis of fog events over the past three decades (1993~2022), revealing that

文章引用: 丁魅理, 吴胜男, 冯政林, 伍见军, 廖翼. 微波辐射计探空资料对重庆江北机场一次辐射雾天气的应用分析[J]. 自然科学, 2025, 13(3): 664-675. DOI: 10.12677/ojns.2025.133070

winter constitutes the predominant season for radiation fog occurrence at this location, which is prone to underreporting in operational forecasting. Consequently, this investigation incorporates microwave radiometer measurements to perform an applied analysis of a representative fog event occurring on the morning of December 9, 2023. The findings demonstrate that: 1) Preceding this fog event, early atmospheric clearing and intense radiative cooling during nighttime collectively characterize a typical radiation fog process. 2) The temperature and humidity profiles derived from microwave radiometer effectively capture the complete lifecycle of the radiation fog, encompassing its initiation, development, and dissipation, thereby providing valuable analytical references for nowcasting applications. 3) The microwave radiometer's superior temporal resolution effectively compensates for the temporal sparsity inherent in radiosonde data, while its liquid water path product offers supplementary diagnostic capabilities for fog classification.

Keywords

Statistical Analysis, Radiation Fog, Microwave Radiometer

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

重庆直辖市位于四川盆地东部，区域内群山环绕，丘陵起伏延绵，长江、嘉陵江交汇贯穿全境，整个地形地貌较为复杂险峻。而重庆江北机场位于重庆市渝北区境内，四面环山，属于浅丘陵地形。机场跑道的南北两头及东侧均为地形低洼而潮湿的地形槽，植被茂盛，导致冬季多雾，1993~2022 年平均雾日为 69.9 天。由大雾造成的大范围低能见度天气严重影响飞机的飞行安全和航班正点率。因此，准确预报辐射雾天气的生消过程一直是民航气象从业者的难点。

微波辐射计是用微波进行遥感，从而对地物进行探测的微波接收机，它可以自动连续测量、监视天气的演变过程，为预报员提供实时大气的温湿数据；其中就包括风温时序图、液态水廓线、液态水路径 (LWP)、综合水汽含量(IWV)等产品，它们可以辅助预报员对雾天的温湿情况进行分析[1]。因此，微波辐射计资料对预测大雾天气的应用已越来越受重视，国内学者也广泛应用。张伦畅等验证了微波辐射计与探空资料的有效性与可靠性[2]；伍一等利用微波辐射计分析了成都双流机场 2019~2020 年初的辐射雾中跑道视程的变化特征[3]；桑林等在大兴机场一次辐射平流雾中用微波辐射计分析了该过程的水汽输送机逆温等要素分布[4]；方莎莎等基于微波辐射计资料对武汉市冬季典型大雾个例进行了探测分析[5]；姜淑娟等针对北京市冬季一次雾过程使用微波辐射计从湿度条件、温度廓线等方面进行了分析[6]。以上研究充分说明微波辐射计在雾的探测分析方面有重要作用。

2023 年 12 月 9 日，重庆江北机场在 07:18~10:14 (北京时)出现辐射大雾天气，能见度最低 200 米，RVR 最低 125 米。由于前期数值模式与实况偏差较大，导致对夜间辐射降温程度出现偏差。微波辐射计在探测雾天时具有一定优越性。因此，本文将重点利用微波辐射计资料对 2023 年 12 月 9 日晨间出现的辐射雾个例进行复盘分析讨论，为后续如何利用微波辐射计对大雾天气预报进行辅助订正提供科学依据。

2. 资料与方法

2.1. 微波辐射计简介

微波辐射计是一种用来接收在天线视场范围内的各种物体自身所辐射、散射或反射的微波噪声能量，

并把它等效变换成黑体温度表示出来的一种无源微波遥感电子仪器[7]。江北机场微波辐射计为采用北京爱尔达公司生产 Airda-HTG4 型地基多通道微波辐射计(以下简称 HTG4)。

2.2. 数据方法

本文首先基于重庆江北机场历史观测资料(1993~2022 年)对本场出现大雾天气(能见度 VIS 小于 1 KM)进行基础的数理统计分析。其次将重点利用本场的微波辐射计探空资料对 2023 年 12 月 9 日晨间出现的辐射雾个例进行应用分析(下文中没特别说明的地方均为北京时)。

3. 结果分析

3.1. 江北机场大雾天气统计

3.1.1. 造成低能见度的主要天气现象

根据图 1 表明近 30 年来影响机场能见度的主要天气现象是雾和降水,其他天气现象极少。其中雾日数 2074 天,占比 58.8%(辐射雾占比 30%);雨日数 1123 天,占比 31.8%;毛毛雨日数 321 天,占比 9.1%;雪日数 11 天,占比 0.3%。可见,辐射雾是造成重庆江北机场低能见度天气的主要原因。

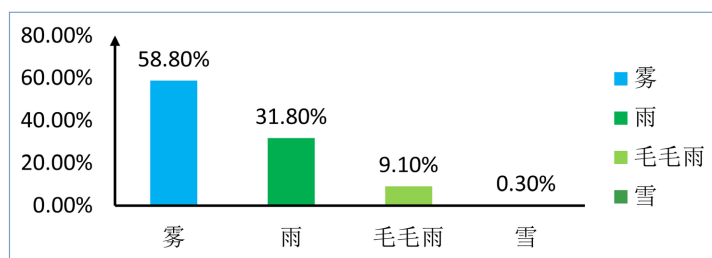


Figure 1. Frequency of days with visibility below 1 km caused by different weather phenomena (1993~2022)

图 1. 各天气现象引起能见度小于 1 km 的日数频率(1993~2022 年)

3.1.2. 平均每年雾日数逐月变化

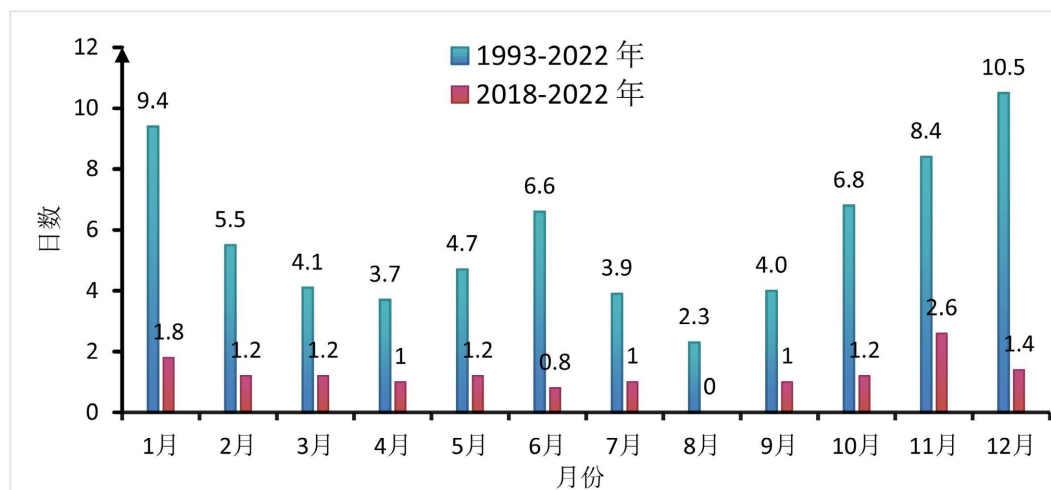


Figure 2. Monthly variations in mean annual fog days during 1993~2022 and 2018~2022

图 2. 1993~2022 年与 2018~2022 年平均每年雾日数逐月变化

根据图 2, 重庆江北机场 1993~2022 年平均总雾日数为 69.9 天。其中最易发生在 10~1 月, 雾日总数

为 35.1 天, 占全年雾日总数的 50%。雾日数最多为 12 月的 10.5 天, 最少的为 8 月的 2.3 天。从季节差异来看, 冬季(12 月、1~2 月)最多, 为 25.4 天, 占全年的 36%; 秋季(9~11 月)次之, 为 19.2 天, 占全年的 27.4%; 夏(6~8 月)、春季(3~5 月)最少, 为 12.8 天和 12.5 天。将过去 30 年与近 5 年大雾发生次数进行对比, 从年平均雾日数来看, 近年呈显著减少趋势, 最近 5 年(2018~2022 年)年平均雾日数已下降至 14.4 天。近 5 年(2018~2022 年)每月的雾日数也都有大幅度下降, 其中 11 月最高, 仅有 2.6 天, 其他月份保持在 1 天左右, 8 月没有出现。

3.1.3. 大雾持续时间差异

图 3 表示平均每年能见度小于 1 km 时, 大雾在不同持续时间段出现的次数。由图可知, 大雾在持续时间为 0~1 小时段内出现的次数最多, 达到 22.5 次; 其次为持续 2~4 小时和 1~2 小时, 出现次数分别为 13.8 次和 13.4 次; 超过 24 小时出现次数最少, 为 1.2 次。

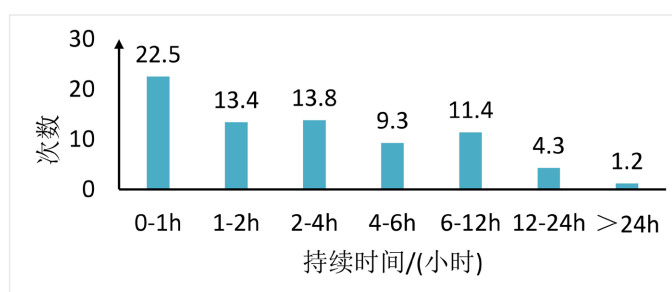


Figure 3. Frequency of dense fog occurrence by duration period
图 3. 大雾不同持续时间出现次数

3.2. 微波辐射计资料分析

3.2.1. 12 月 9 日辐射雾天气过程回顾

刘德等对重庆雾的天气成因进行了分析, 并指出辐射雾的形成机制依赖于晴夜、微风、近地面有充沛的水汽以及逆温层的形成[8]。因此下文将结合天气形势以及微波辐射计基于上述要素的探测资料进行重点分析。从形势上看(图略), 12 月 8 日 20 时的 500 hPa 重庆上空以偏西气流为主, 上游有浅槽活动; 700 hPa 重庆偏北地区有小高压, 机场上空有西南气流, 能分析出切变; 而 850 hPa 以偏南气流为主。因此, 从形势上看夜间有上云趋势。结合探空图(图 4)来看整层湿度大, 80%以上, 近地面整体风速较小。表 1 给出 8 日夜间到 9 日上午的观测纪要记录(此表中记录时间为 UTC 世界时), 从表中可知 8 日夜间 11~12 时天空逐渐拉开, 有 7 个量的高积云, 随后云层不断抬升, 云量逐渐减少, 直到 8 日 19 时左右近乎碧空。夜间气温一直递减, 8 日 17 时已降至空气饱和, 相对湿度达到 100%, 但此时本场并没有起雾, 下文基于微波辐射计资料的分析将解释这一现象。随着温度的逐渐降低, 水汽开始凝结, 能见度逐渐下降。日出前后, 近地面水汽蒸发加大, 水汽含量上升。图 5 为本场基准观测点大气透射仪探测的跑道视程与人工观测能见度的对比变化趋势图(UTC 时间), 可以看出从 23 时开始能见度逐渐向 1000 米以下发展, 此时跑道视程同步呈现迅速下跌趋势, 辐射雾天气逐渐形成; 00 时能见度降至 200 米, 跑道视程跌为 300 m, 是辐射雾最浓的时刻。随后, 云层增加(表 1)反而不利于雾消散, 大雾持续至将近 9 日 03 时, 辐射雾才开始消散, 能见度及跑道视程均抬升至 1000 m 以上。图 6 为基于 EC 数值预报的 12 月 8 日 08 时初始场的渝北站未来 48 小时垂直剖面图, 从图中可分析出 8 日夜间 20 时后至 9 日早间 09 时(图中矩形红框区域所示), 机场附近空中水汽含量充沛, 约 6000 米高度下相对湿度均在 80%以上且湿层连续, 提示阴天的可能性较大, 这与前面提到的辐射雾形成基本条件不符。此次过程的数值模式预报资料与表

1 统计的实况差距较大,尤其是针对夜间消云时间,数值预报产品出现了漏报,导致当日值班人员盲目相信数值预报产品而漏报了 9 日早间的大雾天气。

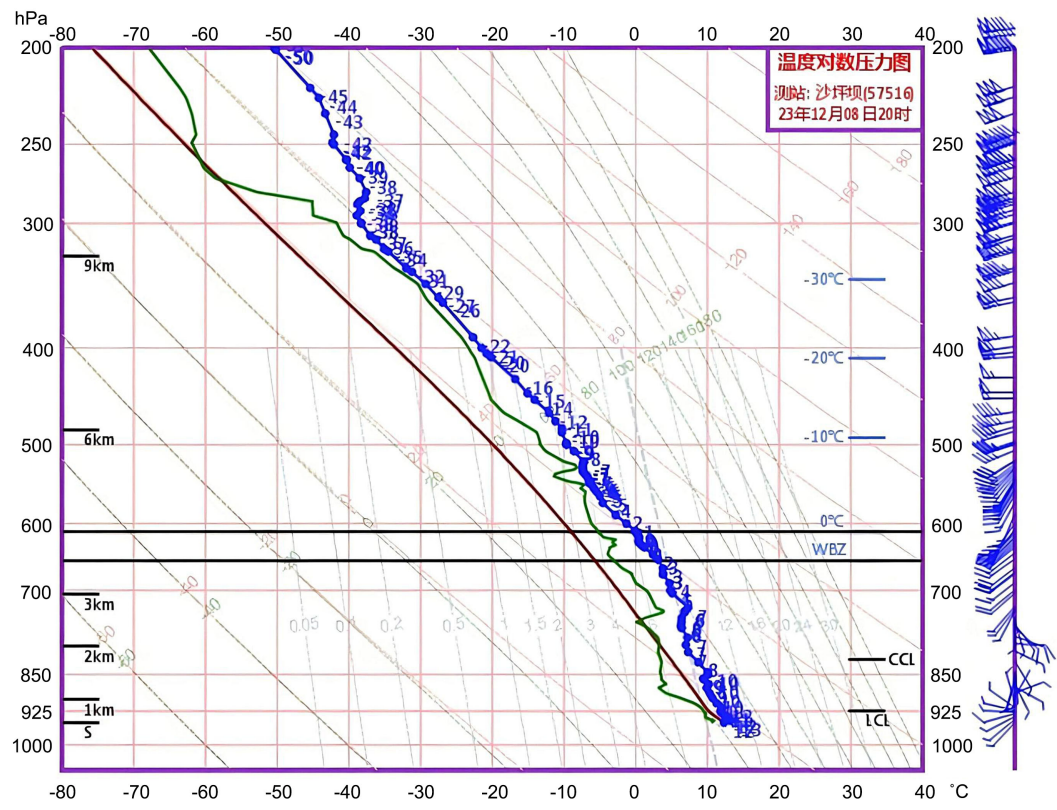


Figure 4. Aerological diagram of Shapingba Station at 20:00 on 8 December
图 4. 12 月 8 日 20 时沙坪坝站探空图

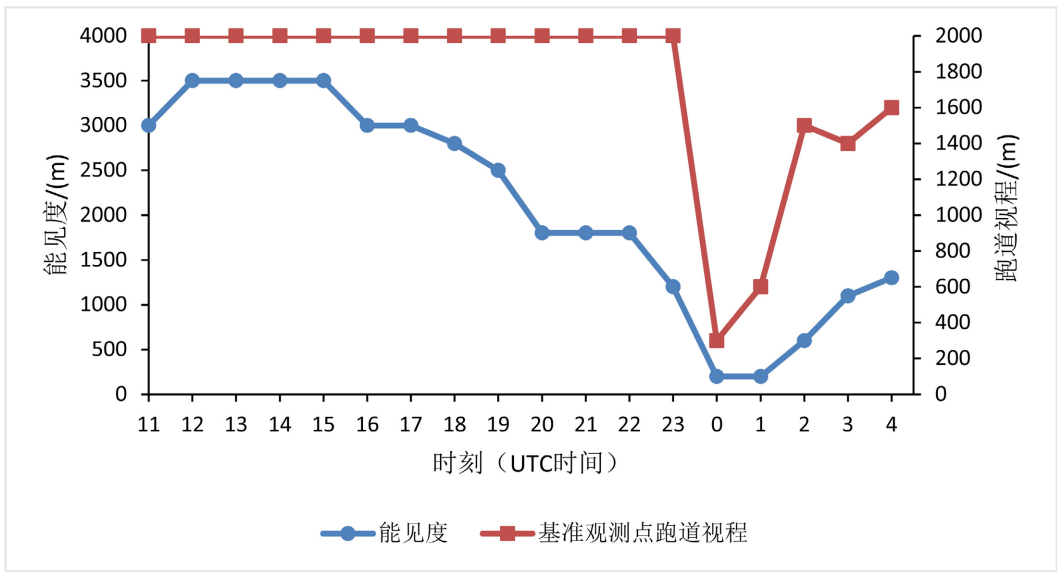


Figure 5. Comparative trend chart of runway visual range (RVR) measured by the transmissometer at the reference observation site versus manual visibility observations (UTC time)
图 5. 本场基准观测点大气透射仪探测的跑道视程与人工观测能见度的对比变化趋势图(UTC 时间)

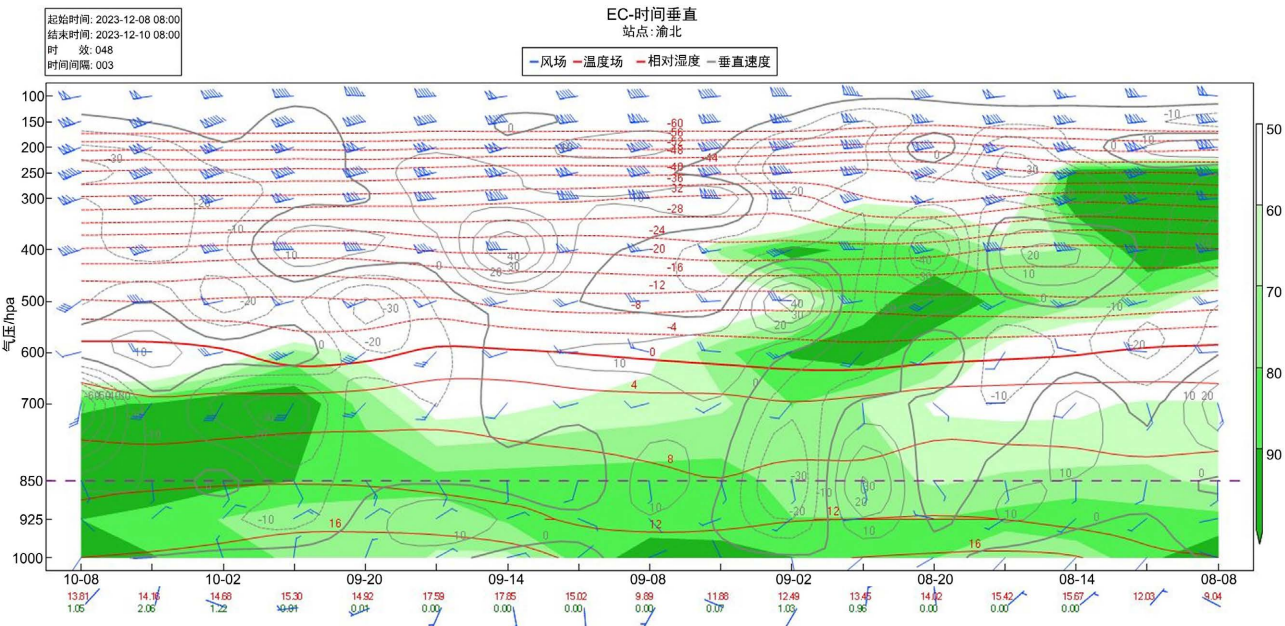


Figure 6. Vertical cross-section of wind profiles (units: m/s), temperature (red contours, units: °C), relative humidity (green shading, units: %), and vertical velocity (black contours, units: Pa/s) over the next 48 hours at Yubei Station, based on the EC model initial field at 08:00 UTC on 8 December

图 6. 基于 EC 模式的 12 月 8 日 08 时初始场的渝北站未来 48 小时垂直剖面的风廓线(单位: m/s)、温度(红色等值线, 单位: °C)、相对湿度(绿色色斑, 单位: %)和垂直速度(黑色等值线, 单位: Pa/s)

Table 1. Hourly synoptic records at Chongqing Jiangbei Airport from 11:00 UTC on 8 December to 04:00 UTC on 9 December 2023

表 1. 重庆江北机场 2023 年 12 月 8 日 11: 00~9 日 04:00 逐时天气纪要

时次(UTC 时间)	能见度	天气现象	云况	温度	露点	相对湿度
11	3000	BR	7AC4500	13.3	9.9	80
12	3500	BR	7AC4800	13.6	10.4	81
13	3500	BR	2AC4500 4Ci6000	12.7	10.9	89
14	3500	BR	4Ci6000	13.1	10.6	85
15	3500	BR	3Ci6000	11.9	10.9	94
16	3000	BR	3Ci6000	12.1	11.1	94
17	3000	BR	3Ci6000	11.5	11.5	100
18	2800	BR	3Ci6000	11.1	11.1	100
19	2500	BR	1Ci6000	10.8	10.8	100
20	1800	BR	1Ci6000	10.5	10.5	100
21	1800	BR	2Ci6000	9.5	9.5	100
22	1800	BR	2Ci6000	9.7	9.7	100
23	1200	BR BCFG	2Fs150 2Ci6000	9.5	9.5	100

续表

00	200	FG	FG60	8.8	8.8	100
01	200	FG	FG60	9.9	9.9	100
02	600	FG	4Fs60 5Sc600 8Sc1200	11	11	100
03	1100	BR	3Fs90 4Sc600 8Sc1200	11.5	11.5	100
04	1300	BR	2Fs60 3Sc900 8Sc1400	12.4	11.9	97

注：其中能见度、天气现象、云况为观测员人工观测；温度、露点、相对湿度为本场基准观测点的单点器测数据；纪要栏时间均为世界时，能见度和云高单位：m，温度和露点单位：℃，相对湿度单位：%。

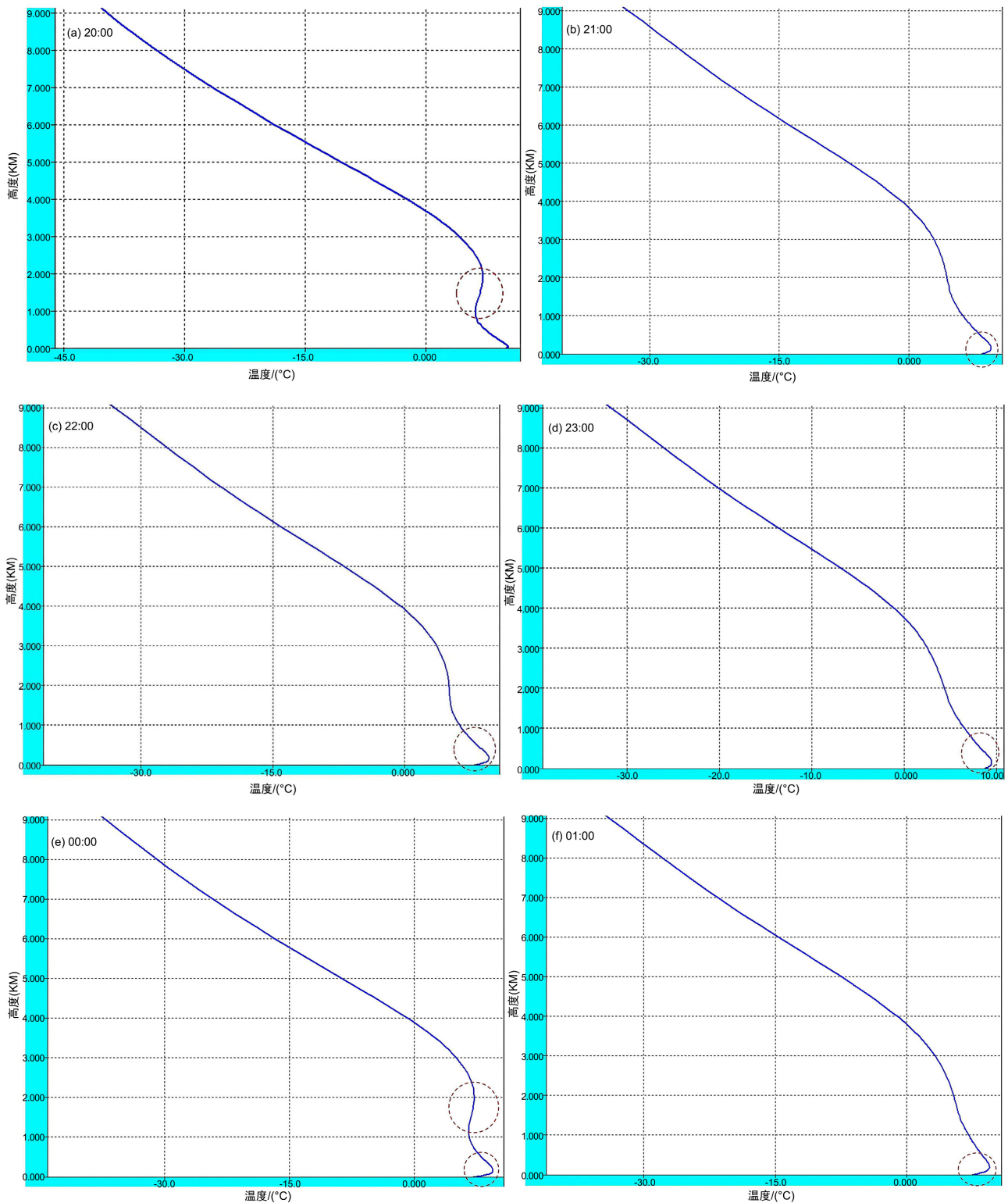
3.2.2. 垂直温度廓线分析

由垂直温度廓线(图 7, 图中红色虚线圆圈为逆温层位置, UTC 时间)分析可知, 8 日 20:00 时(图 7(a)), 在本场上空 1000~2000 m 高度开始有逆温层出现, 但此时逆温差仅为 0.8℃, 逆温强度为 0.08℃/100m, 近地面有微弱逆温出现; 21:00 时(图 7(b)), 垂直高度 120 m 以下开始出现逆温层, 逆温层由高空开始向近地层发展, 逆温差达到 1.6℃, 逆温强度为 1.33℃/100m; 22:00~23:00 近地面逆温层维持, 逆温厚度约达 150 m, 逆温强度为 0.72℃/100m, 有利于近地层的水汽保持饱和状态, 为雾的形成创造条件, 同时, 结合表 1 中的实况要素演变来看, 该时段的能见度由 1800 m 降为 1200 m, 是辐射雾形成的初始阶段; 00:00~02:00 (图 7(e)~(g))期间本场能见度均低于 1000 m, 近地面逆温层厚度依然处于维持状态均保持在 200m 以下, 逆温强度达 1.59℃/100m, 且 00:00 时的逆温层在 1000~2000 m 高度也有微弱发展, 是逆温层最厚的时段, 而此时此刻的能见度亦达到当日最低值 200 m, 辐射雾在增浓过程中是水汽液化的过程, 而液化过程是放热性质的, 因此逆温强度亦能达到峰值; 03:00~05:00 近地面逆温差逐渐减小, 期间逆温强度均小于 0.65℃/100m 逆温层在 05:00 时已经完全消失, 对应能见度也从 03:00 时抬升至 1000 m 以上, 辐射雾天气结束。图 8 给出了近地面逆温及逆温层厚度的逐小时变化折线图, 该图更为直观地显示出辐射雾在初生、发展、结束时逆温层厚度与逆温差的变化关系, 即: 22:00~23:00 逆近地面温层开始出现, 逆温差有所增大, 为辐射雾的初生阶段; 23:00~00:00 逆温差和逆温层厚度迅速增大, 均达到波峰, 能见度也在此期间迅速下降至最低值; 00:00~02:00 逆温差及逆温层厚度均开始减小, 但整个过程中逆温差依然大于 1℃, 能见度在 200~600 m 之间波动; 02:00 后逆温层厚度继续减小, 在 04:00 后逆温层趋近消失, 但 03:00~04:00 期间逆温差却出现升高的趋势, 结合纪要记录分析应该是空中出现了 600~1200 m 的层积云, 此现象并没有导致能见度下降, 而是整体缓慢抬升; 因此, 可以看出辐射雾的发展与逆温层厚度增加以及逆温差增大的时间段关系较大, 能见度最小的时段出现在逆温差和逆温层厚度最大的时间点附近。

3.2.3. 湿度条件分析

图 9 为基于微波辐射计的江北机场出雾前后空中湿度的变化情况, 根据图 7(a) (UTC 时间)可以看出, 在 8 日 20:00 前本场上空的高湿区主要集中在 3000~8000 m 高度, 相对湿度达 80%, 说明在此之前空中有一定的保温效果, 使近地层的降温率较慢, 不利于近地层大范围的辐射降温使湿度饱和, 这也解释了实况天气纪要在 8 日 17:00 水汽就达到饱和却没有起雾的原因; 20:00 后, 空中的高湿区逐渐向近地层发展, 2000 m 以下区域的湿度迅速增大, 相对湿度达 80%~90%, 说明近地层的大面积辐射降温过程开始启

动; 9 日 00:00~02:00 (图 7(b))期间, 近地层 2000 m 以下的相对湿度进一步增大, 达到 100% 的饱和状态, 与本场起雾的时段较为吻合; 9 日 02:00 后, 近地层的相对湿度以及湿层厚度开始逐渐减小, 本场能见度也在此后开始上升至 1000 m 以上, 辐射雾开始消散。



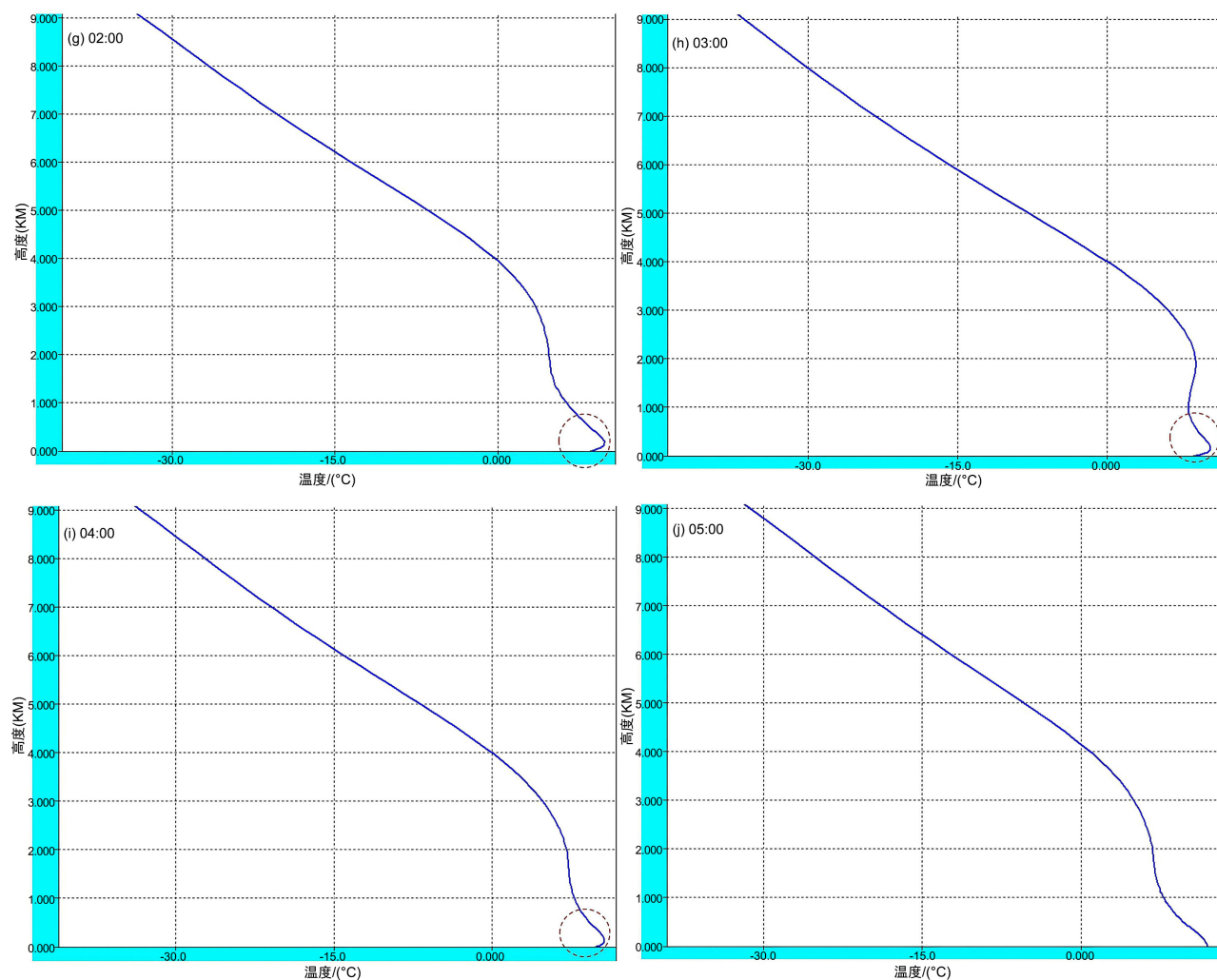


Figure 7. Vertical temperature profiles from microwave radiometer at Jiangbei Airport from 20:00 UTC on 8 December 2023 to 05:00 UTC on 9 December 2023 (Red dashed circles in the figure denote temperature inversion layers, Unit: °C, UTC time)

图 7. 江北机场 2023 年 12 月 8 日 20:00~9 日 05:00 微波辐射计垂直温度廓线(图中红色虚线圆圈为逆温区域, 单位: °C, UTC 时间)

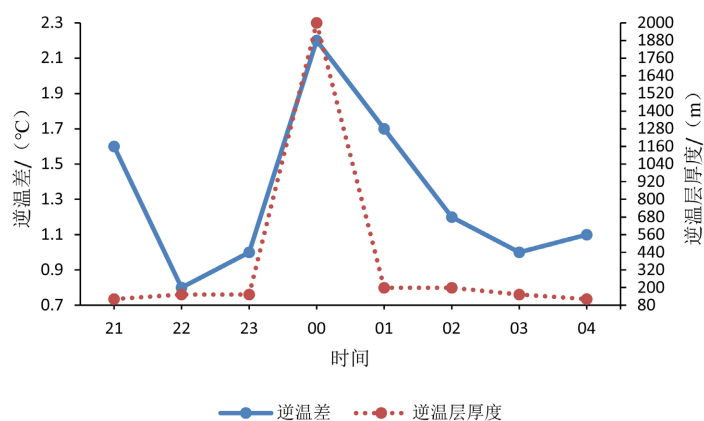


Figure 8. Microwave radiometer-based variations in temperature inversion intensity and layer thickness at Jiangbei Airport from 20:00 on 8 December 2023 to 04:00 on 9 December 2023 (UTC time)

图 8. 基于微波辐射计的江北机场 2023 年 12 月 8 日 20:00~9 日 04:00 逆温差及逆温厚度变化(UTC 时间)

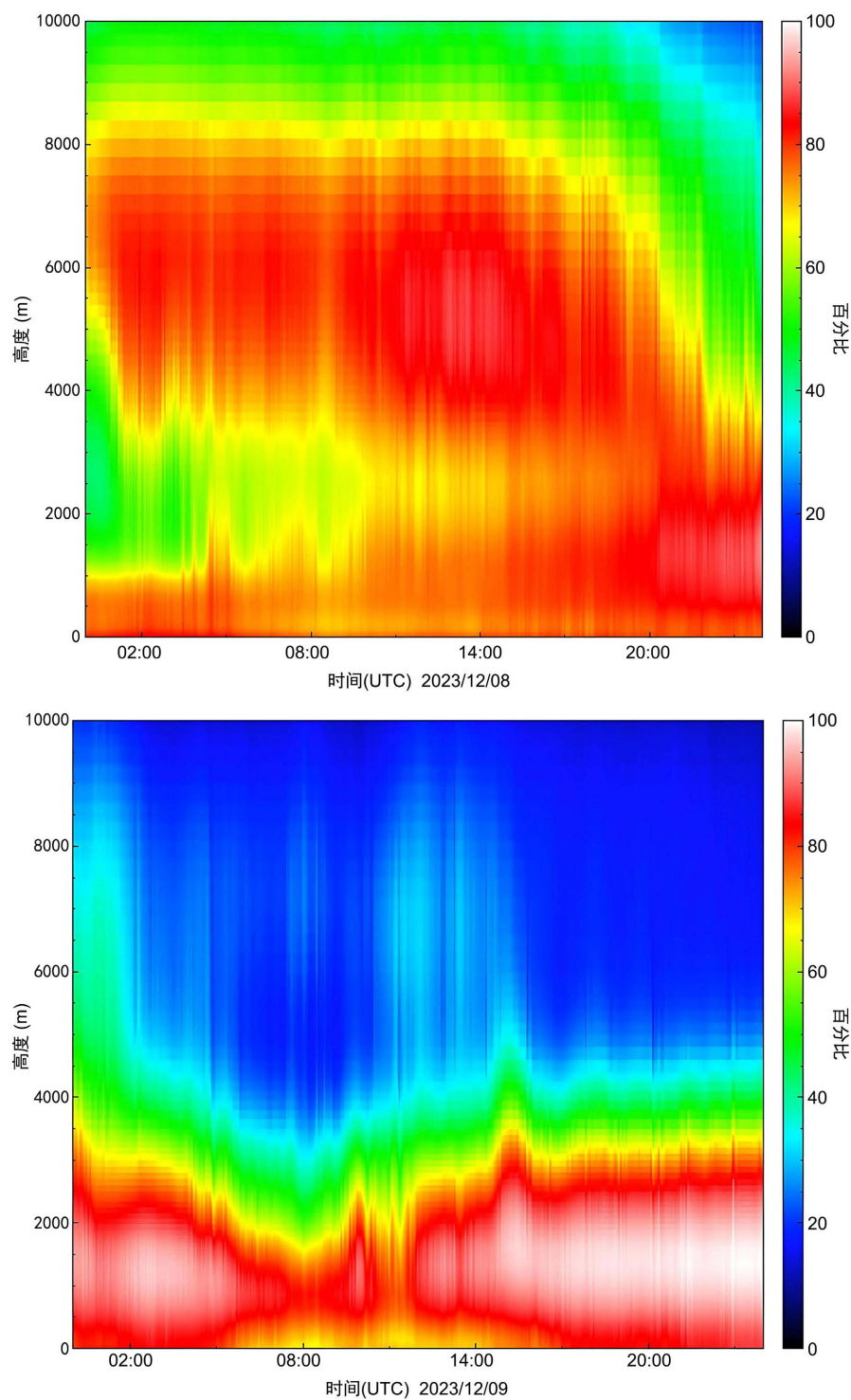


Figure 9. Vertical time-height profile of relative humidity measured by the microwave radiometer at Jiangbei Airport from 00:00 UTC 8 December to 24:00 UTC 9 December, 2023 (UTC time)

图 9. 江北机场 2023 年 12 月 8 日 00:00~9 日 24:00 微波辐射计垂直方向相对湿度随时间的变化(UTC 时间)

3.2.4. 液态水路径分析

郭丽君等认为液态水含量在一定程度上能代表雾层的厚度，液态水越高则雾层越厚，持续时间也越

长[9]。此次雾过程微波辐射计的液态水路径大值区(图 10 红色虚线圆圈, UTC 时间)在 03:00 时附近才出现, 滞后于大雾最浓时间约 3 h。这也从侧面说明此次雾过程液态水的直接贡献较小, 更多的还是辐射降温引起湿度饱和, 是一次典型的辐射雾天气过程。而 03:00 时液态水含量达到一大值与本场上空云量增多能较好对应, 说明水汽的直接平流输送在空中。

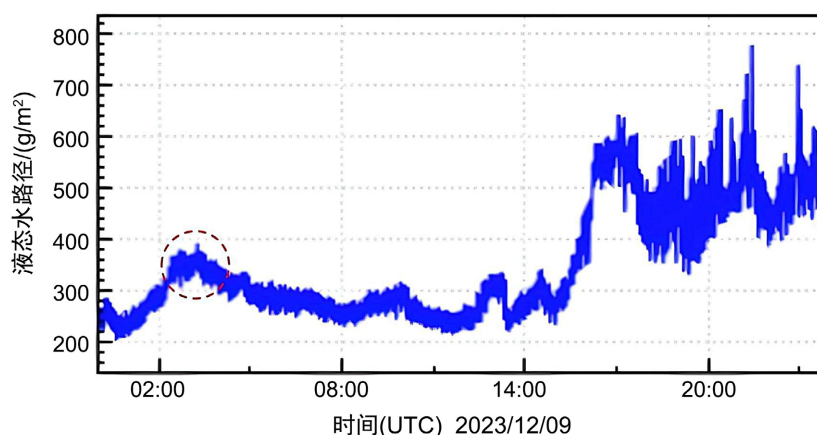


Figure 10. Liquid water path (LWP) derived from microwave radiometer at Jiangbei Airport (00:00~24:00 UTC, 9 December 2023) (UTC time)

图 10. 江北机场 2023 年 12 月 9 日 00:00~24:00 微波辐射计液态水路径(UTC 时间)

4. 结论与展望

通过对重庆江北机场 2023 年 12 月 9 日的天气背景和微波辐射计资料进行分析, 可以得出以下结论:

1. 此次大雾过程是一次典型地面长波辐射冷却引起的辐射雾天气过程, 微波辐射计的温度廓线产品在本场辐射雾开始前 3 h 便能率先探测到逆温层从高空逐渐移向地面并在开始前 1 h 探测到近地面逆温逐渐加强的过程, 在实际工作中可以指导预报员根据温度廓线来分析辐射雾开始前的逆温形成情况, 特别是近地面逆温强度超过 $1^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 时, 就应考虑辐射雾的初生可能; 辐射雾最浓时, 逆温差与逆温厚度也达到峰值, 与之有较好的对应关系, 该案例的逆温强度峰值达 $1.59^{\circ}\text{C}/100\text{m}$; 辐射雾结束期间也伴随逆温形势的减弱, 微波辐射计亦能探测到其变化。整个变化过程与能见度演变及大气透射仪跑道视程的变化基本同步, 也从侧面印证了其探测准确性。

2. 微波辐射计的垂直相对湿度产品也较好地反映了湿区由高空转向近地面的过程, 在辐射雾开始前 3 h 便探测到高空高湿区向地面发展的过程, 在起雾阶段也探测出水汽的饱和和维持状态; 辐射雾消散时, 近地面相对湿度也逐渐减小。

3. 在实际工作中, 预报员在分析了天气形势后可以多留意微波辐射计探测资料中的要素转折点、峰值点等来帮助判断此类辐射雾天气的初生、发展、消散时段, 特别是数值预报产品与实际天气形势误差较大时, 微波辐射计可以起到较好的纠错能力, 从而及时帮助预报员修订预报结论、提供更优质的航空气象服务。

4. 目前该微波辐射计仅能扫描机场小范围的垂直温度廓线等产品, 未来随着上游自动站微波辐射计组网的完善, 可以进一步提前分析上游地区大气要素的变化情况, 以便进一步提高预报提前量。

参考文献

- [1] 欧映瑜, 朱克云, 张杰, 等. 微波辐射计对昆明雾天的监测及应用[J]. 成都信息工程大学学报, 2018, 33(1): 54-61.

-
- [2] 张伦畅, 郑云杰, 杜新安, 等. 气象微波辐射计与探空比对分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2025, 42(1): 44-47.
 - [3] 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.
 - [4] 桑林, 王博, 窦利军, 等. 大兴机场一次辐射平流雾过程分析[J]. 黑龙江气象, 2023, 40(3): 9-11.
 - [5] 方莎莎, 陆鹏程, 廖可文, 等. 基于微波辐射计资料对武汉市冬季典型大雾个例的探测分析[J]. 气象与环境科学, 2020, 43(4): 81-87.
 - [6] 娄淑娟, 张蕾, 张磊. 微波辐射计对雾的监测个例分析[C]//中国气象学会. 中国气象学会 2007 年年会人工影响天气科技进展与应用分会场论文集. 广州: 中国气象学会, 2007: 93-96.
 - [7] 黄丽芬, 马海波. 微波辐射计在现代大气探测中的应用[J]. 低碳世界, 2016, 6(34): 246-247.
 - [8] 刘德, 周国兵, 向波, 等. 重庆雾的天气成因[J]. 气象科技, 2004, 32(6): 461-466.
 - [9] 郭丽君, 郭学良. 北京 2009-2013 年期间持续性大雾的类型、垂直结构及物理成因[J]. 大气科学, 2016, 40(2): 296-310.