

乌鲁木齐国际机场冬季一次雪后间歇性冻雾天气成因分析

张明旭, 尹才虎, 张亚莉, 刘 佳

民航新疆空中交通管理局气象中心, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2024年12月5日; 录用日期: 2025年1月6日; 发布日期: 2025年1月16日

摘 要

利用常规高空地面、FNL $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 再分析资料、地面气象自动站及微波辐射计资料对2023年12月30日~2024年1月2日乌鲁木齐国际机场冬季的一次雪后间歇性冻雾天气进行成因分析, 发现: (1) 此次间歇性冻雾天气过程是在500 hPa、700 hPa偏西气流或暖脊控制配合850 hPa较强的暖平流天气环流背景下产生的。(2) 地面温度变化是乌鲁木齐机场12月30日~1月2日冻雾天气有间歇性的重要原因之一。温度降低, 地面转偏北风均有利于乌鲁木齐机场冻雾的维持与发展。(3) 前期受北支槽东移影响, 北疆大部、天山山区有一次小雪天气过程, 为间歇性冻雾天气提供较好的水汽补充。(4) 稳定层结是冻雾维持、发展的必要条件。但在乌鲁木齐机场水汽条件达到一定程度时, 即使机场上空没有逆温层, 随着夜间降温乌鲁木齐机场仍会出现冻雾天气。

关键词

冻雾, 降雪, 微波辐射计

Analysis of the Causes of Intermittent Freezing Fog Weather after a Snowfall in Winter at Urumqi International Airport

Mingxu Zhang, Caihu Yin, Yali Zhang, Jia Liu

Meteorological Center, Xinjiang Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation, Urumqi Xinjiang

Received: Dec. 5th, 2024; accepted: Jan. 6th, 2025; published: Jan. 16th, 2025

Abstract

Using the conventional upper-air and surface data, FNL $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ reanalysis data, ground meteorological

文章引用: 张明旭, 尹才虎, 张亚莉, 刘佳. 乌鲁木齐国际机场冬季一次雪后间歇性冻雾天气成因分析[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(1): 69-76. DOI: 10.12677/ccr.2025.141008

automatic station data and microwave radiometer data, the causes of the intermittent freezing fog weather after a snowfall at Urumqi International Airport from December 30, 2023 to January 2, 2024 were analyzed. It was found that: (1) This intermittent freezing fog weather process occurred under the background of the weather circulation with westerly airflow or warm ridge at 500 hPa and 700 hPa, combined with relatively strong warm advection at 850 hPa. (2) The change of surface temperature is one of the important reasons for the intermittency of the freezing fog weather at Urumqi Airport from December 30 to January 2. The decrease in temperature and the shift of surface wind to northerly are both conducive to the maintenance and development of the freezing fog at Urumqi Airport. (3) Affected by the eastward movement of the northern branch trough in the early stage, there was a light snow weather process in most of northern Xinjiang and the Tianshan mountainous area, which provided a good supplement of water vapor for the intermittent freezing fog weather. (4) Stable stratification is a necessary condition for the maintenance and development of freezing fog. However, when the water vapor condition at Urumqi Airport reaches a certain level, even if there is no inversion layer over the airport, freezing fog weather will still occur at Urumqi Airport with the temperature drop at night.

Keywords

Freezing Fog, Snowfall, 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

低能见度天气是冬季影响民航飞行安全的重要灾害性天气，可对一定距离内观察目标的清晰度造成影响，影响正常飞行，在这种天气条件下飞行员的目视距离大大缩短，由于无法清晰辨认地面标志与障碍物而增加了飞行的复杂性与不确定性。国内学者对冻雾等低能见度天气有一定的研究[1]-[4]，黄继雄等[5]对影响首都机场的浓雾过程进行分析发现，浓雾的形成、发展和消散过程都不是一个缓慢的线性过程，其从一种平衡态向另一平衡态的跃变具有突发性和振荡性的特征。以及雾的消散与太阳辐射、气温升高、逆温层消失、强梯度风有关[6] [7]。

冬季，北疆沿天山一带常由于特殊天气条件与地形相结合，出现雾与层云交替的阴雾天气。这种天气与一般的辐射雾和平流雾有很大不同，又称为“阴雪天气”或“低云雾”天气，它是准噶尔盆地地形、地面积雪和特有天气条件下的共同产物。阴雾天气下，通常伴有小雪、米雪或雾凇等天气现象，但雪量通常为微量，一般出现在 11 月至次年 3 月[8]-[10]。乌鲁木齐机场冬季大雾常与准噶尔盆地阴雾天气相伴出现，维持时间短则数小时，长则 2~5 天，受日变化的影响，午后能见度较好，但常出现能见度时好时坏的反反复复现象，表现为有时雾抬升为层云，有时层云降至地面成雾，并伴有很低的碎层云，严重影响飞行安全。2023 年 12 月 30 日~2024 年 1 月 2 日乌鲁木齐机场出现 2023 年冬季以来累计持续时间最长、影响较大的一次低云、低能见度天气，对航班运行造成较大的影响。本文利用常规高空地面、FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料、新疆区域加密自动气象站及微波辐射计对低云低能见度天气的大尺度环流背景、环境场条件进行分析，以期望提高乌鲁木齐机场冬季低云低能见度天气的预报、服务能力，保障冬季复杂天气期间飞行安全。

2. 天气概况

2023 年 12 月 30 日~2024 年 1 月 2 日，北疆盆地出现了大范围的冻雾低云天气。冻雾发生前期，乌

鲁木齐机场气温较常年同期偏高, 冻雾出现时间较往年偏晚、持续时间较短、冻雾日数偏少。乌鲁木齐机场 12 月 30 日 22:39~31 日 03:00、31 日 07:42~12:00、31 日 20:00~1 日 07:00、1 日 21:09~2 日 09:30、2 日 10:10~13:30 出现冻雾, 主导能见度 100~900 米, 跑道视程 175~2000 米, 期间伴有低云, 云底高 30~60 米, 由于连续 4 日出现低云低能见度天气, 且低能见度天气的发生与早晚航班量较大时间重合度高, 对航班运行造成较大影响, 此次间歇性冻雾天气过程共造成进出港航班 209 架次延误, 返航备降航班 11 架次。此次北疆沿天山一带阴雾天气形成和维持的天气形势是暖脊型, 是冬季北疆沿天山一带形成阴雾天气的主要形势。在阴雾天气出现前有低槽侵入北疆, 造成一次降水天气后, 随后新疆被槽后暖脊控制, 地面蒙古高压稳定增强时, 最有利于阴雾天气的形成。

2023 年 12 月 30 日, 受北支槽东移影响, 北疆大部、伊犁河谷以及北疆沿天山一带多云小雪, 主要降水落区集中在伊犁河谷及北疆北部, 24 小时降水量最大达 4.2 mm, 整个过程降水强度不大。乌鲁木齐机场 30 日 08:30~20:30 小雪, 过程降水量 2 mm, 新增积雪深度 3 cm。低槽入侵使低层增湿, 后续快速转为暖脊使得中层增温有利于逆温形成。30 日夜间 20 时, 北疆沿天山一带出现阴雾天气后持续维持并加强, 30 日夜间至 1 日上午, 北疆沿天山一带出现大范围冻雾天气, 主导能见度 100~800 米, 各站点主导能见度均呈现出明显的日变化。

3. 环流形势

500 hPa 上, 12 月 28 日~29 日, 亚欧区域中高纬度环流形势呈现“两脊一槽”, 乌拉尔山-西西伯利亚地区为低涡槽控制, 里海-咸海和新疆地区为高空浅脊控制, 脊后西南风较强, 西南风最大风速达 $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 脊区北部等温线与等高线近乎垂直, 暖平流较强, 致使脊不断向东北方向伸展。29 日 20 时, 低涡进一步加深发展东移至乌拉尔山, 槽后强盛的西北气流不断引导冷空气南下。由图 1(a), 30 日 08 时, 北疆地区已处于低涡底部偏西及西南气流控制, 上游伊宁偏西风风速达 $28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 乌鲁木齐上空为西南风, 天山山区及北疆沿天山一带有一定的风向风速辐合, 有利于本场降雪。31 日 14 时, 高空槽已逐渐移出新疆区域, 全疆大部为偏西气流控制, 12 月 31 日~1 月 1 日, 北疆地区由低涡底部偏西气流逐渐转为暖脊控制, 为北疆沿天山一带断续出现冻雾天气提供稳定的天气形势, 1 月 2 日 14:00 后受高空槽影响北疆地区逐渐转为偏西气流, 稳定的天气形势逐渐被打破。

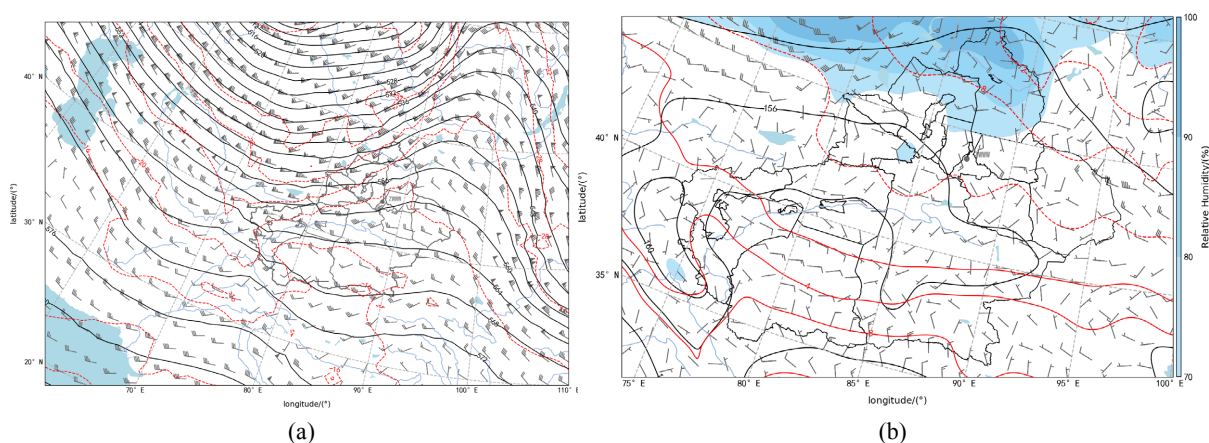


Figure 1. Weather situation field; (a) 500 hPa at 08:00 on December 30, 2023; (b) 850 hPa at 20:00 on December 31, 2023

图 1. 天气形势场; (a) 2023 年 12 月 30 日 08:00 500 hPa; (b) 2023 年 12 月 31 日 20:00 850 hPa

700 hPa 大尺度环流形势与 500 hPa 较匹配, 30 日 02 时, 高空槽位于北疆西部国境线, 槽后有明显

的冷平流,且在槽东移过程中有湿度与动力配合,北疆大部、天山山区均为高湿区,与降水落区基本吻合。在本场冻雾期间 700 hPa 风场较弱,700 hPa 形势和 500 hPa 相似,12 月 31 日~1 月 1 日偏西气流逐渐转为暖脊控制,北疆地区有明显暖平流。1 月 2 日 08:00 后受高空槽影响北疆地区逐渐转为偏西气流。

850 hPa 上,30 日 08 时,北疆区域为偏西、西北气流控制,风速较大,冷中心位于国境线以西达 -16°C ,北疆区域有明显的冷平流与 700 hPa 较匹配。由图 1(b),30 日 20 时,北疆区域冷平流减弱,伊犁河谷、北疆沿天山一带转为弱的偏西、偏北气流控制,为北疆沿天山一带夜间冻雾天气提供较为稳定的层结条件,31 日 14 时,本场上空逐渐转为东南风,后续东南风层建立并加强,1 日 08 时,有弱冷空气进入北疆,打破稳定层结,本场转为西北风,1 日 20 时开始中亚地区有暖舌逐渐向东北伸展至北疆西部,为北疆沿天山一带低层提供暖平流,建立稳定的逆温层,2 日 08 时,本场上空东南风层加强,2 日 20 时,北疆区域逐渐转为西北气流,稳定层结被彻底打破。

地面图上,29~30 日,地面高压逐渐东移,后与蒙古高压合并,30 日 17:00~31 日 02:00 北疆大部位位于带状高压下,虽然没有很强的气压梯度,但也不是最有利于出雾的地面形势。31 日~2 日北疆盆地处于均压场控制,有利于稳定层结的形成。

4. 间歇性冻雾成因分析

4.1. 地面气象要素特征

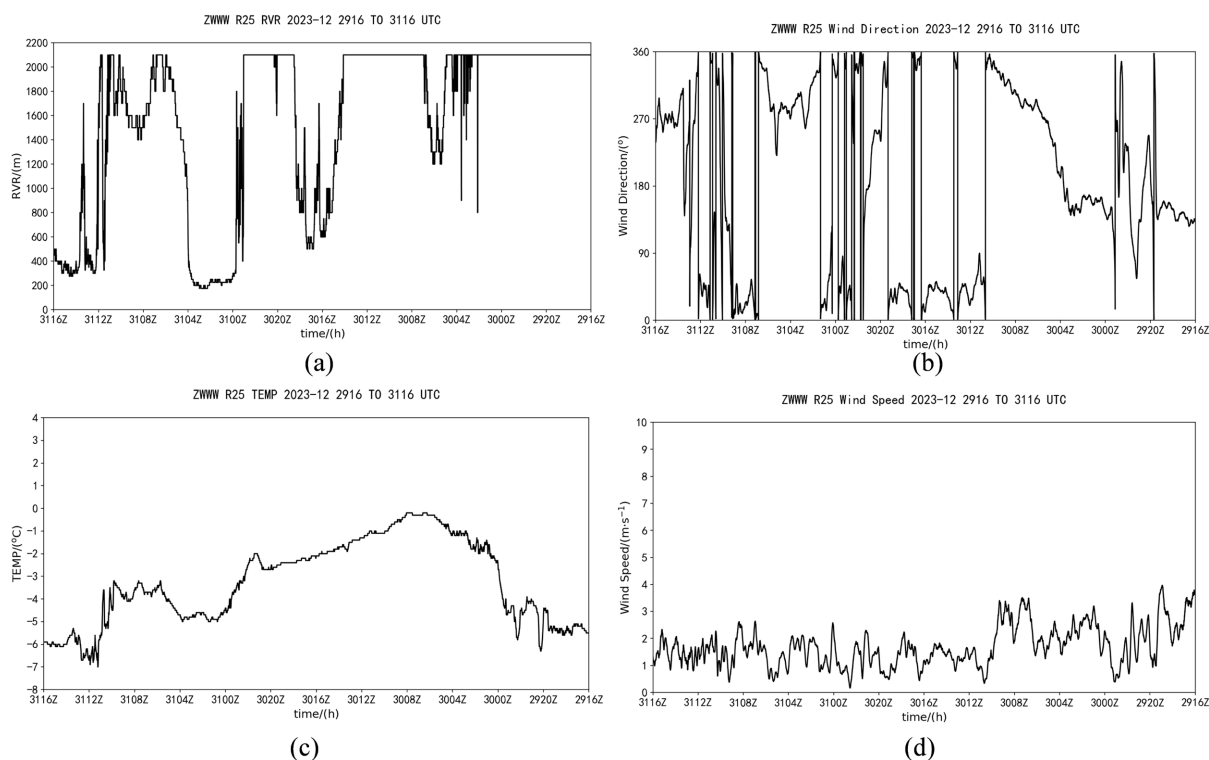


Figure 2. The evolution of RVR (Runway Visual Range) (a); wind direction (b); temperature (c); and wind speed (d) during the period of intermittent freezing fog at Urumqi Airport from December 30 to 31, 2023

图 2. 2023 年 12 月 30~31 日乌鲁木齐机场间歇性冻雾期间 RVR (跑道视程) (a); 风向(b); 温度(c); 风速(d)的演变

2023 年 12 月 30 日~2024 年 1 月 2 日,乌鲁木齐机场先后出现间歇性冻雾、低云、小雪(小米雪)等

多种复杂天气。冻雾的生消演变与地面要素的变化关系密切, 为分析间歇性冻雾过程中地面要素的变化情况, 故本文分析了冻雾期间乌鲁木齐机场 RVR (跑道视程)、温度、风向、风速演变, 绘制了 12 月 30 日~1 月 2 日气象要素的逐小时变化图。

由图 2 中可以看到, 12 月 30 日白天, 乌鲁木齐机场白天降雪期间受降雪影响 RVR 短时波动, 温度逐渐上升至 0℃, 期间乌鲁木齐机场风向以西北、东北为主, 风速相较于冻雾期间偏大。30 日夜间, 降雪逐渐停止, 随着本场温度略有下降, 乌鲁木齐机场 RVR 出现波动, 间歇性冻雾天气开始影响乌鲁木齐机场, 但波动期间 RVR 大多数时间维持在 600 米以上对运行影响有限, 随后本场转南风后 RVR 快速上升至 2000 米以上, 温度略有上升。直至 31 日早晨开始, 由于乌鲁木齐机场温度下降约 3℃, 风向由南风转为偏北风, 有利于近地层水汽凝结成雾及北部雾区扩散影响乌鲁木齐机场, 本场 RVR 快速跌至 200 米并维持, 直至 31 日中午受日变化影响逐渐升温, RVR 才逐渐缓慢上升至 2000 米以上。31 日夜间, 温度下降 4℃乌鲁木齐机场 RVR 快速跌至 400 米以下并维持, 期间风速一直较小。

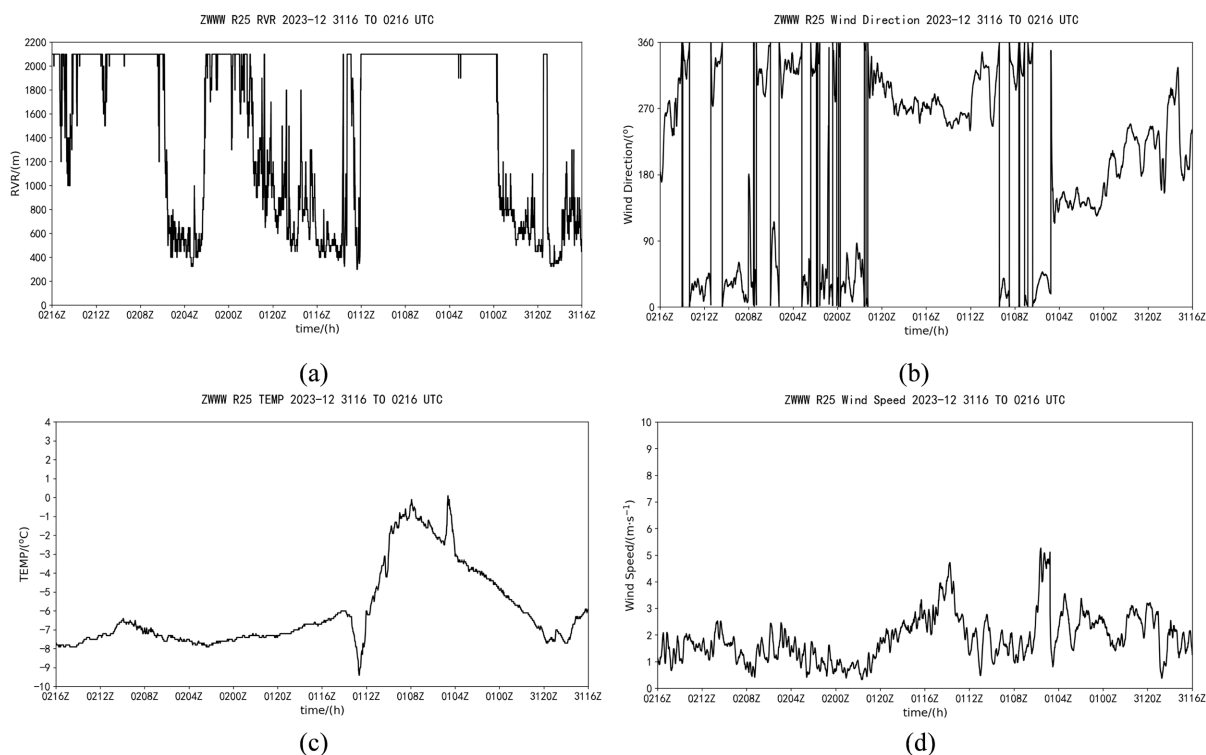


Figure 3. The evolution of RVR (Runway Visual Range) (a); wind direction (b); temperature (c) and wind speed (d) during the period of intermittent freezing fog at Urumqi Airport from January 1 to 2, 2024

图 3. 2024 年 1 月 1~2 日乌鲁木齐机场间歇性冻雾期间 RVR (跑道视程) (a); 风向(b); 温度(c); 风速(d)的演变

由图 3 中可以看到, 31 日后夜间, 乌鲁木齐机场 RVR 虽略有波动, 但仍长时间维持在 600 米以下, 凌晨风向逐渐转为南风, 合并日变化影响温度缓慢上升至 0℃, RVR 逐渐上升至 2000 米以上并维持。1 日夜间, 温度快速下降至 -9℃, RVR 下降至 400 米左右。其后, 除短时 RVR 随温度升高短时波动上升至 2000 米后, RVR 多数时间在 600 米以下, 乌鲁木齐机场维持冻雾天气, 直至 2 日中午。

综上所述, 乌鲁木齐机场温度的日变化是乌鲁木齐机场 12 月 30 日~1 月 2 日冻雾天气有间歇性的重要原因之一。发生在夜间的降温往往既有辐射降温亦有平流降温的贡献, 地面风向、风速也会影响冻雾天气的维持与发展。在早上、上午、下午发生的降温主要为风向变化带来的平流降温。地面降温与气温

日变化和局地风场的变化息息相关，日变化降温因素相对容易把握，而平流降温多与偏北风的出现或加强有关，因此预报冻雾的生消对于局地风场变化的预测至关重要，而这也是目前预报工作的难点所在。

4.2. 近地层和地面高湿

冻雾天气的形成需要有高湿条件，北疆沿天山冻雾天气的水汽来源，一是前期低值系统入侵带来的湿度增加，二是稳定积雪形成的雪面升华。此次冻雾前期，乌鲁木齐机场受高空槽东移影响 30 日 08:30~20:30 出现小雪，过程降水量 2 毫米，弱的降水天气使得北疆沿天山一带及北疆盆地相对湿度逐渐增大，由图 4(a)可知，至 30 日 22:00 北疆沿天山一带及北疆盆地国家自动站相对湿度达 90%以上，空气进一步饱和，为冻雾天气形成提供了极好的湿度条件。且在 30 日白天降雪过程中，北疆沿天山一带持续升温，由图 4(b)，30 日 17:00 北疆沿天山一带国家自动站 24 小时变温均为 6~10℃，乌鲁木齐机场 30 日最高温度 0℃，相较于 29 日升温 6℃。北疆沿天山一带均处于升温高湿环境下，夜间微弱的降温都会使得主导能见度快速下降。

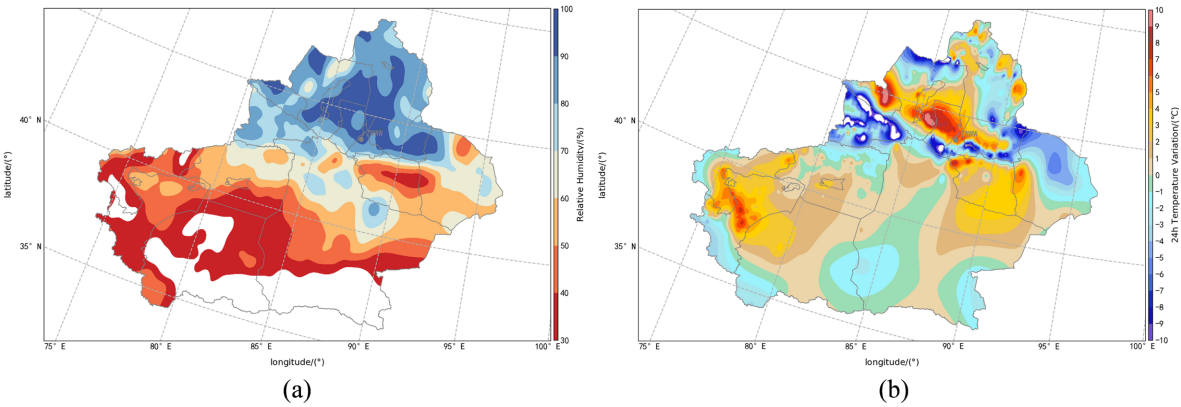


Figure 4. Automatic ground meteorological station; (a) 22:00, Dec. 30, 2023 relative humidity; (b) 17:00, Dec. 30, 2023 temperature change in 24 hours

图 4. 地面气象自动站; (a) 2023 年 12 月 30 日 22:00 相对湿度; (b) 2023 年 12 月 30 日 17:00 24 小时变温

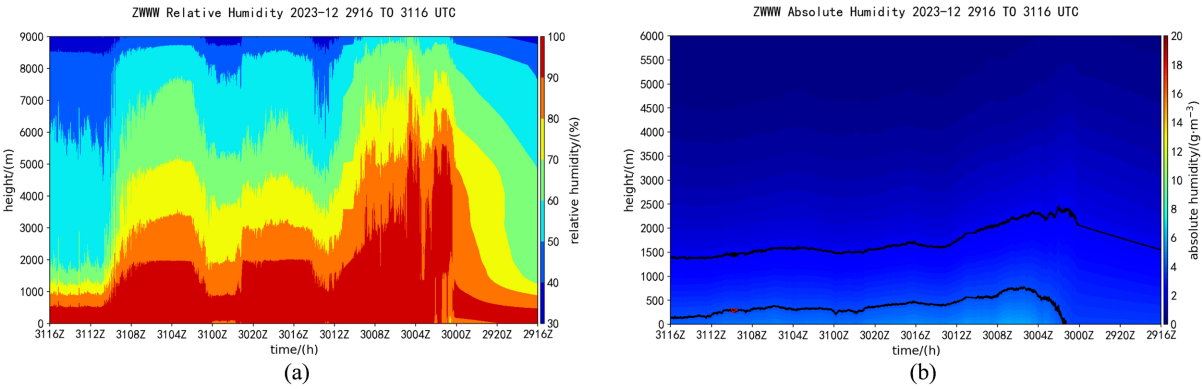


Figure 5. Humidity profiles of the microwave radiometer at Urumqi Airport: (a) relative humidity; (b) absolute humidity

图 5. 乌鲁木齐机场微波辐射计湿度廓线: (a) 相对湿度; (b) 绝对湿度

分析微波辐射计探测的相对湿度、绝对湿度，由图 5(a)，降雪期间乌鲁木齐机场整层湿度增大，6000 米以下处于高湿区，相对湿度达到 90%以上接近饱和。降雪结束后，中高层相对湿度逐渐下降，但机场

上空 1000 米以下仍处于高湿区。由图 5(b)，水汽主要集中在低空至地面，降雪开始底层绝对湿度增加至 $\geq 4 \text{ g/m}^3$ ，逆湿特征显著，绝对湿度大值基本都出现在 500 米以下甚至地面附近。从绝对湿度的连续演变可以看出，前期的降雪过程会给近地面带来明显的水汽增加，在近地层形成稳定的高湿环境，在冻雾发展阶段，绝对湿度条件较稳定，为乌鲁木齐机场后续的冻雾天气提供充沛的水汽条件。

4.3. 层结条件及边界层风场特征

由于新疆区域探空站相隔较远，北疆地区仅乌鲁木齐和克拉玛依站有探空资料，且乌鲁木齐探空站位于市区，市区海拔高度较机场高 300 m，无法代表此次大雾期间边界层特征，本文使用机场微波辐射计探测的温度廓线来分析逆温层变化情况，激光测风雷达分析边界层风场特征。

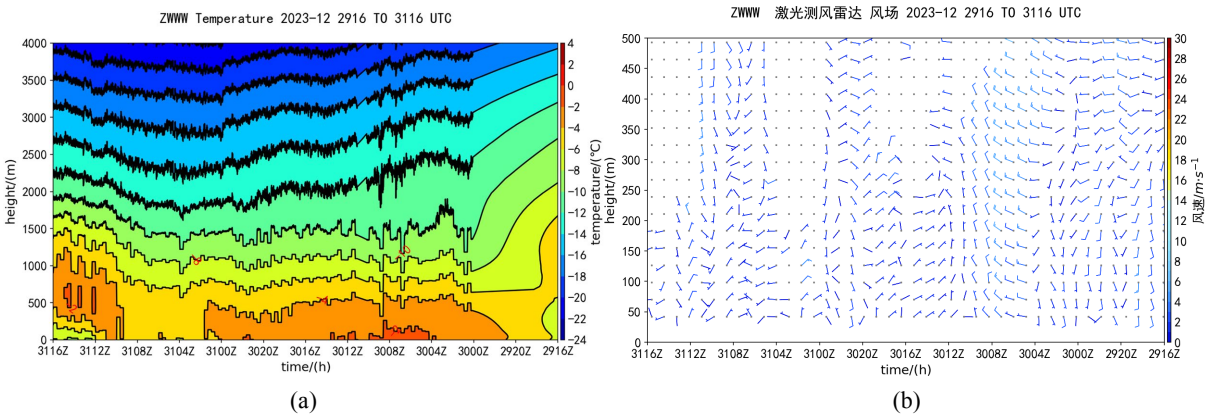


Figure 6. During the period of intermittent freezing fog at Urumqi Airport from December 30 to 31, 2023; (a) temperature profile of the microwave radiometer; (b) wind profile diagram of the wind lidar

图 6. 2023 年 12 月 30~31 日乌鲁木齐机场间歇性冻雾期间; (a) 微波辐射计温度廓线; (b) 激光测风雷达风廓线图

由图 6(a)，30 日白天乌鲁木齐机场地面逐渐升温，上空减温，30 日夜间此次间歇性冻雾天气开始时上空仍为减温，没有逆温层提供稳定的层结条件，故 30 日夜间冻雾期间 RVR 整体在 600 米以上。31 日早晨地面减温，500 米以下形成弱逆温层但持续时间较短，与 31 日早晨冻雾开始时间基本一致。31 日白天，机场上空仍为减温，直至 31 日夜间机场上空 500~1000 米高度逐渐升温，逆温建立，温度上升至 -2°C 以上，为 31 日夜间冻雾天气维持创造了稳定的层结条件。

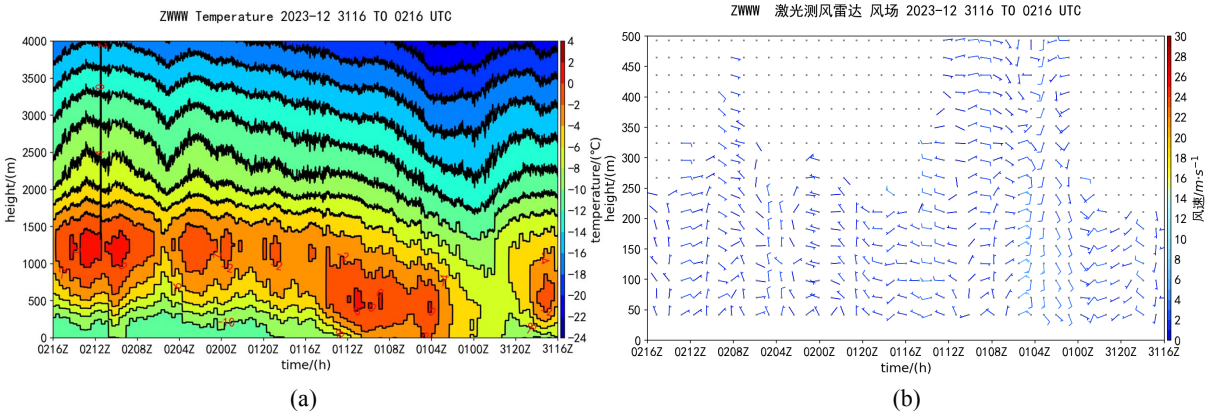


Figure 7. During the period of intermittent freezing fog at Urumqi Airport from January 1 to 2, 2024; (a) temperature profile of the microwave radiometer; (b) wind profile diagram of the wind lidar

图 7. 2024 年 1 月 1~2 日乌鲁木齐机场间歇性冻雾期间; (a) 微波辐射计温度廓线; (b) 激光测风雷达风廓线图

由图 6(b), 机场上空在集中降雪期间风向一直稳定为偏西风, 30 日夜间, 风向转为偏东 - 东北风, 31 日凌晨转为偏南风, 与 31 日凌晨 RVR 好转时间一致。31 日早晨转为东北风, 其中机场上空为偏东 - 东北风的时段均与机场冻雾时段接近。

由图 7(a), 1 日凌晨受弱扰动影响, 逆温层被短暂打破, RVR 短时波动上升至 200 米, 1 日白天近地面 1000 米以下逐渐升温, 温度上升至 0℃以上, 逆温层逐渐建立。1 日夜间, 近地面迅速降温, 逆温强度增强, 高度不断抬升, 23 时逆温层顶抬升至 1500 米附近并维持, 2 日上午逆温增强, 冻雾维持, 中午逆温层明显减弱, RVR 好转, 午后逆温层继续增强, 逆温层底短时接地。3 日凌晨受短波活动影响, 乌鲁木齐机场上空逆温层被彻底打破, 彻底结束此次间歇性冻雾天气。

由图 7(b), 机场上空 1 日凌晨风向一直稳定为偏西风, 1 日早晨转为偏南风, 本场转为轻雾天气, 1 日夜间风向转为稳定为偏西风, 2 日凌晨转为偏东 - 东北风, 其中机场上空为南风的时段与 RVR 在 200 米以上时段接近。且 12 月 30 日~1 月 2 日间歇性冻雾时段, 激光雷达数据均在 300 米以下。

5. 结论

通过对此次雪后间歇性冻雾天气过程的环流形势、水汽条件、层结及地面风场、微波辐射计资料的分析, 得出以下结论:

(1) 此次间歇性冻雾天气过程是在在 500 hPa、700 hPa 偏西气流或暖脊控制配合 850 hPa 较强的暖平流天气环流背景下产生的。

(2) 地面温度变化是乌鲁木齐机场 12 月 30 日~1 月 2 日冻雾天气有间歇性的重要原因之一。温度降低, 地面转偏北风均有利于乌鲁木齐机场冻雾的维持与发展。

(3) 前期受北支槽东移影响, 北疆大部、天山山区有一次小雪天气过程, 为间歇性冻雾天气提供较好的水汽补充。

(4) 稳定层结是冻雾维持、发展的必要条件。但在乌鲁木齐机场水汽条件达到一定程度时, 即使机场上空没有逆温层, 随着夜间降温乌鲁木齐机场仍会出现冻雾天气。

参考文献

- [1] 李子华. 中国近 40 年来雾的研究[J]. 气象学报, 2001, 59(5): 616-624.
- [2] 牛生杰, 陆春松, 吕晶晶, 等. 近年来中国雾研究进展[J]. 气象科技进展, 2016, 6(2): 6-19.
- [3] 王博妮, 徐芬, 田小毅, 等. 我国近年雾研究方法及其研究热点综述[J]. 气象科技, 2014, 42(1): 23-30.
- [4] 章国材. 中国雾的业务预报和应用[J]. 气象科技进展, 2016, 6(2): 42-48.
- [5] 黄继雄, 张庆红. 首都机场浓雾中的能见度突发性振荡及其演变规律[J]. 暴雨灾害, 2014, 33(3): 208-216.
- [6] 濮梅娟, 尚倩, 李子华, 等. 一次浓雾宏微观结构特征及快速消散的原因分析[J]. 高原气象, 2013, 32(3): 770-777.
- [7] 宋润田, 金永利. 一次平流雾边界层风场和温度场特征及其逆温控制因子的分析[J]. 热带气象学报, 2001, 17(4): 443-451.
- [8] 谭艳梅, 王旭, 马禹. 新疆雾天气的分析[J]. 新疆气象, 2002, 25(2): 9-10, 17.
- [9] 马禹, 任宜勇, 陈春艳, 等. 40 年来新疆雾的演变特征及大雾天气过程分析[J]. 干旱区地理, 2005, 28(4): 474-478.
- [10] 王春红. 乌鲁木齐国际机场 2009 年秋冬初雾天气的数值模拟分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2011, 5(5): 15-19.