

2022年冬季乌鲁木齐机场三场高影响大雾天气过程对比分析

张宇翔, 郭俊含, 李静轩, 张 茜

民航新疆空管局气象中心, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2024年2月20日; 录用日期: 2024年3月20日; 发布日期: 2024年3月27日

摘 要

本文基于 $1^\circ \times 1^\circ$ 的NECP再分析资料、气象自动观测系统(AWOS)、微波辐射计等观测资料, 对乌鲁木齐机场2022年冬季三场高影响大雾天气过程的环流背景、边界层内气象要素及相关物理量的分布特征进行了对比分析。结论表明: 1) 本文大雾个例具有低温低湿的特点, 浓雾区的水平尺度较小, 分布极不均匀。2) 所选个例的环流背景有利于大雾的发生。过程一与过程二为暖脊型, 过程三则为槽前型。大雾发生前的降雪对近地面层的增湿作用也不可忽视。3) 贴地层气温偏低, 且气温升降均伴随着RVR降低, 表明贴地层的辐射降温并非是造成大雾的唯一原因。贴地层相对湿度均不足90%, 表明大雾发生时的水汽条件一般。4) 大雾发生与维持时, 地面多为静风或微风。若风向频繁出现偏东风及偏西风的转换, 浓雾区会随之移动, 表现为跑道两端RVR频繁波动, 变化幅度大。5) 逆温层是大雾发生维持的必要条件, 适宜的逆温层顶高度与较强的逆温层有利于大雾的发生维持, 逆温层减弱或逆温层抬升形成脱地逆温层时, 大雾常常结束。6) 贴地层气象要素受下垫面影响较大, 气象要素与大雾的相关性难以确定。边界层内气象要素的变化则与大雾有一定的联系。

关键词

雾, 环流形势, 微波辐射计, 逆温层

Comparative Analysis of Three High-Impact Foggy Weather Processes at Urumqi Airport in Winter 2022

Yuxiang Zhang, Junhan Guo, Jingxuan Li, Qian Zhang

Xinjiang ATMB CAAC, Urumqi Xinjiang

Received: Feb. 20th, 2024; accepted: Mar. 20th, 2024; published: Mar. 27th, 2024

文章引用: 张宇翔, 郭俊含, 李静轩, 张茜. 2022年冬季乌鲁木齐机场三场高影响大雾天气过程对比分析[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(2): 356-366. DOI: 10.12677/ccrl.2024.132037

Abstract

Based on $1^\circ \times 1^\circ$ NECP reanalysis data, automated weather observing system (AWOS), microwave radiometer and other observation data, this paper compares and analyzes the circulation background, meteorological elements in the boundary layer and the distribution characteristics of related physical quantities of three high-impact fog weather processes in Urumqi Airport in winter 2022. The conclusion shows that: 1) The case of heavy fog in this article has the characteristics of low temperature and low humidity, and the horizontal scale of the dense fog area is small, with extremely uneven distribution. 2) The circulation background of the selected case is conducive to the occurrence of heavy fog. Process one and process two are warm ridge type, and process three is groove front type. The humidification effect of snowfall before the occurrence of heavy fog on the surface layer cannot be ignored. 3) The temperature in the surface layer is relatively low, and the temperature rise and fall are accompanied by a decrease in RVR, indicating that the radiation cooling in the surface layer is not the only cause of heavy fog. The relative humidity of the surface layer is less than 90%, indicating that the water vapor conditions during the occurrence of heavy fog are average. 4) When heavy fog occurs and is maintained, the ground is mostly calm or slightly windy. If there is a frequent transition between easterly and westerly winds in the wind direction, the dense fog area will move accordingly, manifested as frequent fluctuations in RVR at both ends of the runway, with a large amplitude of change. 5) The inversion layer is a necessary condition for the occurrence and maintenance of heavy fog. A suitable height of the inversion layer top and a strong inversion layer are conducive to the occurrence and maintenance of heavy fog. When the inversion layer weakens or rises to form a detached inversion layer, heavy fog often ends. 6) The meteorological elements in the surface layer are greatly affected by the underlying surface, and the correlation between meteorological elements and heavy fog is difficult to determine. The changes in meteorological elements within the boundary layer are somewhat related to heavy fog.

Keywords

Fog, Circulation Pattern, Microwave Radiometer, Inversion Layer

Copyright © 2024 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

雾是悬浮在近地面层大气中的大量细微乳白色水滴或冰晶的可见集合体[1]。根据雾维持期间的能见度的大小,可将雾划分为轻雾($1000\text{ m} \leq \text{能见度} < 10,000\text{ m}$)、大雾($500\text{ m} \leq \text{能见度} < 1000\text{ m}$)、浓雾($200\text{ m} \leq \text{能见度} < 500\text{ m}$)、强浓雾($50\text{ m} \leq \text{能见度} < 200\text{ m}$)、特强浓雾($\text{能见度} < 50\text{ m}$)五个级别。雾的强度达到大雾等级及以上时(即能见度 $< 1000\text{ m}$),会给居民日常出行带来诸多不便,严重影响交通运输行业的正常秩序,甚至会带来居民的生命财产损失。在民用航空领域,航空器的起飞与降落与所用跑道的跑道视程(简称 RVR)密切相关,当 RVR 低于 550 m 时,航班的正常起降会受到严重的限制,主导能见度(简称 VIS)低于 1000 m 的雾通常会导致 RVR 低于 550 m ,这是导致航班正常率降低的直接原因。因此,研究乌鲁木齐机场典型大雾天气是十分有必要的。

雾作为一种灾害性天气,大雾近年来受到了越来越多的学者关注。王旭等[2]利用 39 年气象观测站资

料研究了新疆大雾的时空分布特征及变化规律,表明大雾主要出现于北疆,尤以天山山区最多,年际变化、月变化、日变化无明显规律。谭艳梅等[3]利用39年气象观测站资料分析了新疆大雾的地面形势,指出地面形势分为带状高压型、东部高压型、南疆雾型。郑玉萍等[4]利用2000~2006年探空资料研究了大雾与低空逆温的关系,表明大雾出现时逆温层厚,顶高与底高低,逆温温差大,强度大。夏玉莲等[5]利用1971~2010年观测资料分析了乌鲁木齐机场北侧蔡家湖附近大雾天气的时间分布特征及变化规律,表明大雾主要发生于02~08时(北京时,下同),持续时间多在3小时以内。朱国栋等、韩磊等[6][7]统计发现,乌鲁木齐机场大雾天气常发生在气温 $-2\sim-10^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $\geq 85\%$ 、温度露点差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的条件下。朱雯娜等[8]通过分析微波辐射计资料,发现其能实时监测机场边界层水汽、温度层结的演变,可以有效弥补常规探空时间分辨率低的问题。王春红等[9]利用微波辐射计资料对多个持续浓雾天气个例进行了分析,表明贴地逆温的建立或加强是持续浓雾形成的关键。

本文利用NECP再分析资料($1^{\circ}\times 1^{\circ}$)、气象自动观测系统(AWOS)、微波辐射计资料,分析研究了2022年冬季三场高影响大雾天气过程($\text{VIS} < 1000\text{ m}$ 或 $\text{RVR} < 550\text{ m}$)的环流背景、边界层内气象要素和相关物理量的分布特征及变化规律,期望找到在此类低温、低湿条件下出现且分布不均匀的大雾生消机制及强度变化规律,以提高预报预警的提前量以及临近服务的质量,从而为航空管制部门提供更多的安全裕度。

2. 天气实况

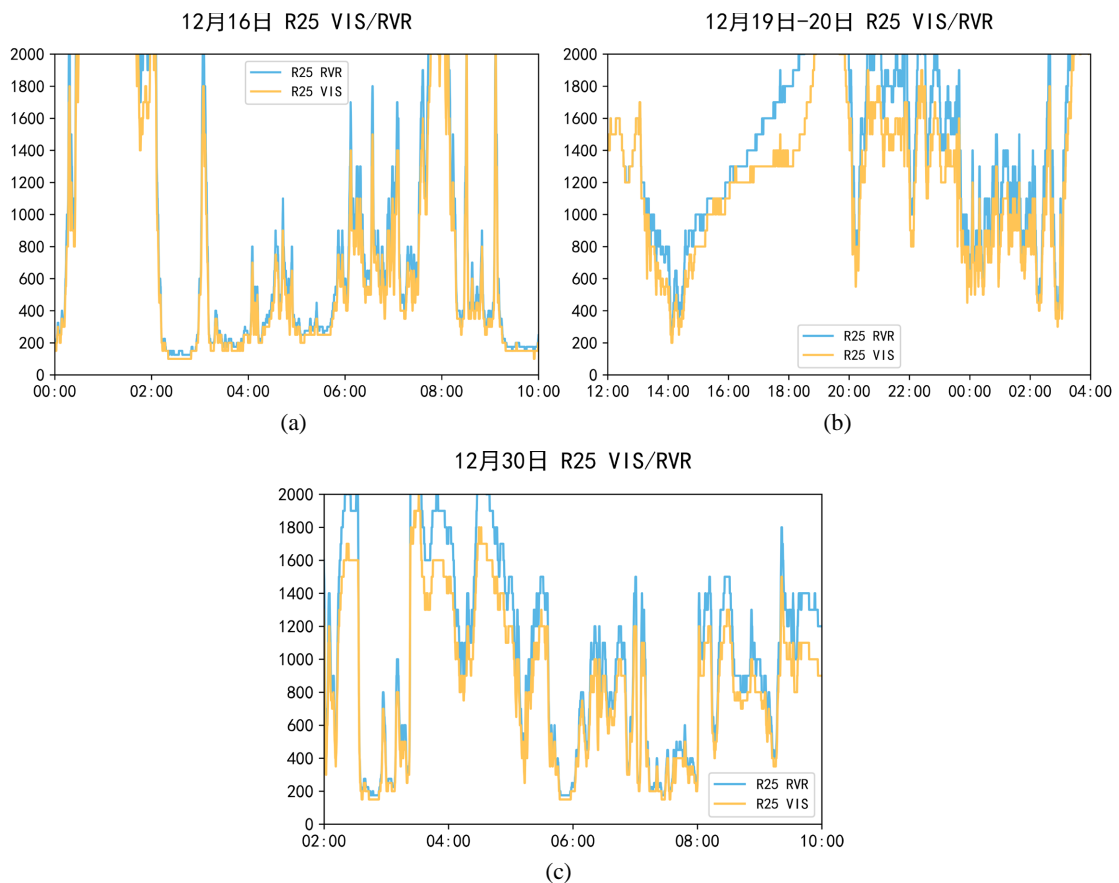


Figure 1. Dominant visibility and runway visual range at Urumqi Airport on December 16 (a), December 19 (b) and December 30 (c) (unit: m)

图 1. 乌鲁木齐机场 12 月 16 日(a)、12 月 19 日(b)、12 月 30 日(c)主导能见度及跑道视程(单位: m)

由图 1(a)可知,2022 年 12 月 16 日 01:50 至 09:30 乌鲁木齐机场出现一次大雾过程(下文简称过程一),期间 VIS 100~1100 m, 25 号跑道 RVR 150 m~P2000 (P2000 表示 RVR \geq 2000 m)。由图 1(b)可知, 2022 年 12 月 19 日 13:37 至 16:00、20:00 至 20 日 03:30 乌鲁木齐机场出现一次大雾过程(下文简称过程二),期间 VIS 100~1000 m, 25 号跑道 RVR 275 m~P2000。由图 1(c)可知, 2022 年 12 月 30 日 02:37 至 10:00 乌鲁木齐机场出现一次大雾过程(下文简称过程三),期间 VIS 100~1100 m, 25 号跑道 RVR 200 m~1900 m。由图 1 可知, 以上三次大雾过程多起始于凌晨, 次日上午基本结束, 期间 VIS 与 RVR 变化趋势较为一致, 表明大雾的发生、减弱、消散可能与气温的日变化有关。大雾发生之前, VIS 与 RVR 常常呈现波动下降趋势, 大雾发生时, VIS 与 RVR 则通常出现骤降, 大雾维持时, VIS 与 RVR 短时间内上下波动幅度很大, 大雾消散时, VIS 与 RVR 则出现陡升。这表明雾区的分布极不均匀, 浓雾区的水平尺度较小。由此可推断当近地面风场频繁转换时, VIS 与 RVR 会随之反复波动, 此类大雾的窗口期及消散时间可预报性较低, 会给航空运行带来较大的安全压力。

3. 环流背景

3.1. 2022 年 12 月 16 日大雾过程

500 hPa 上, 15 日白天, 新疆上游地区为暖脊控制, 新疆及下游地区为平直西风气流控制, 多短波活动。15 日 08 时, 北疆区域受横槽影响, 至 15 日 20 时, 横槽也迅速移至东疆、南疆东部一带, 给上述部分地区带来明显的降雪, 暖脊东移至 85°E 附近, 12 小时移动近 10 个经距, 随后北疆区域转为暖脊前部偏北气流控制, 形势逐渐趋于稳定。700 hPa 上, 15 日至 16 日北疆区域基本为偏北气流控制。850 hPa 上, 15 日至 16 日北疆区域受偏东气流控制, 乌鲁木齐区域由西北风转为东南风, 风速逐步增大至 8 m/s, 持续的东南风促使低空不断升温, 逆温层逐渐建立并加强, 有利于大雾的发生和维持。地面形势场上, 15 日至 16 日蒙古高压中心由新疆北部移至蒙古西部一带, 北疆沿天山一带位于蒙古高压底后部, 高压稳定少动。

3.2. 2022 年 12 月 19 日至 20 日大雾过程

500 hPa 上, 18 日 08 时欧亚地区环流形势表现为“一脊一槽”, 咸海一带为浅脊控制, 巴尔喀什湖至新疆西部有短波槽活动。浅脊后部有暖平流输送, 浅脊向北发展, 并逐步东移, 同时脊前短波槽迅速东移影响北疆区域, 给北疆部分地区带来降雪, 19 日 08 时, 短波槽已经东移至东疆区域, 北疆区域逐步转为西北气流控制, 形势趋于稳定。700 hPa 上, 18 日至 20 日北疆区域基本为偏北气流控制。850 hPa 上, 18 日至 20 日北疆西部至北疆沿天山一带有明显暖平流输送, 暖舌不断东伸, 850 hPa 上温度逐渐升高, 有利于逆温层的建立。地面形势场上, 19 日 20 时, 蒙古高压中心位于蒙古西部, 北疆区域为蒙古高压底后部的均压场控制。逆温层的建立以及地面均压场的稳定形势有利于大雾发生和维持。

3.3. 2022 年 30 日大雾过程

500 hPa 上, 29 日至 30 日欧亚地区呈现纬向环流形势, 咸海一带有短波活动, 新疆区域为槽前平直西风气流控制, 多弱扰动。700 hPa 上, 29 日至 30 日北疆区域基本为偏西气流控制。850 hPa 上, 29 日至 30 日北疆区域为偏东气流控制, 乌鲁木齐区域则为东南风, 持续的东南风有利于逆温层的建立。地面形势场上, 29 日至 30 日蒙古高压位于蒙古西部, 北疆区域为蒙古高压底后部均压场控制, 逆温层的建立以及地面均压场的稳定形势有利于大雾的发生和维持。

3.4. 环流形势分类

表 1 为上述三次大雾过程的环流形势分类, 可知 500 hPa 上过程一与过程二为暖脊型, 过程三则为

槽前型, 700 hPa 上三次大雾过程均无明显扰动, 850 hPa 上过程一与过程三存在东南风, 过程二则有暖舌存在, 地面上三次过程均为蒙古高压底后部的均压场或弱气压场控制。综上可知, 上述三次大雾过程的高低空及地面系统的配置基本属于利于大雾发生的典型环流形势, 即空中建立稳定的逆温层, 地面处于弱气压场控制, 大气层结趋于稳定。此外, 大雾发生前 1 至 2 日内的降雪对近地面层的增湿作用也不可忽视。

Table 1. Classification of circulation patterns

表 1. 环流形势分类

	过程一	过程二	过程三
500 hPa	暖脊型	暖脊型	槽前型
700 hPa	偏北气流	偏北气流	偏西气流
850 hPa	东南风	暖舌东伸	东南风
地面	蒙古高压底后部	蒙古高压底后部均压场	蒙古高压底后部均压场

4. AWOS 资料气象要素分析

4.1. 气温

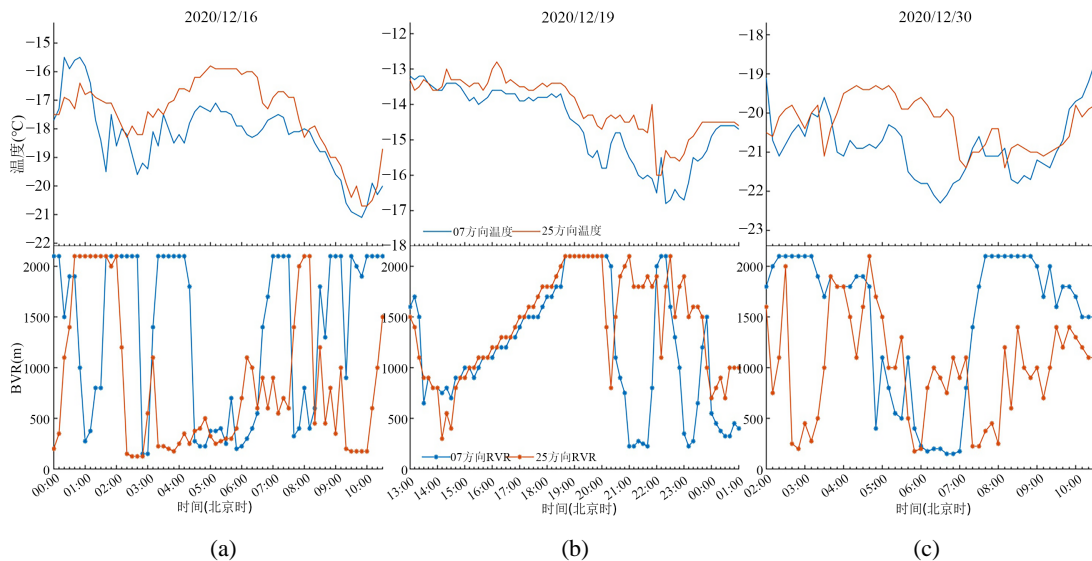


Figure 2. Air temperature (unit: °C) and runway visual range (unit: m) at Urumqi Airport on December 16 (a), December 19 (b) and December 30 (c)

图 2. 乌鲁木齐机场 12 月 16 日(a)、12 月 19 日(b)、12 月 30 日(c)气温(单位: °C)及跑道视程(单位: m)

由图 2(a)可知, 过程一大雾期间机场跑道气温在 -16°C ~ -20°C 之间, 25 号跑道气温高于 07 号跑道, 跑道两端气温变化趋势基本一致, 跑道两端 RVR 具有分布不均匀、上下波动幅度大、变化突然的特点, 且 25 号跑道 RVR 长时间小于 550 m, 总体来看, 气温的变化与 RVR 的变化无明显对应关系。大雾期间气温表现为先升后降, 气温升至最高时, 雾区均匀分布, 跑道两端 RVR 均小于 550 m, 此时 25 号跑道气温为 -16°C , 07 号跑道气温为 -17°C 。08:00 前后, 气温持续降低, 25 号跑道和 07 号跑道温差变小, 跑道两端 RVR 上下波动频繁, 25 号跑道气温降至 -20°C 左右时, 25 号跑道 RVR 再次降至 550 m 以下。10:00 左右气温开始回升, 25 号跑道 RVR 快速回升, 大雾天气结束。由图 2(b)可知, 过程二大雾期间机场跑

道气温在 $-13^{\circ}\text{C}\sim-15^{\circ}\text{C}$ 之间, 25号跑道气温高于07号跑道, 气温变化幅度小, 07号跑道降温速度快于25号跑道, 且跑道两端气温变化趋势基本一致, 跑道两端RVR存在突变, 上下波动幅度大。大雾期间气温总体表现为下降, 在07号跑道快速降温过程中(19日20:30~22:00), 07号跑道RVR出现明显下降, 但在25号跑道气温变化不大时(19日14:00~15:00), 25号跑道RVR也发生突然下降, 总体来看, 气温的变化与RVR的变化无明显对应关系。由图2(c)可知, 过程三大雾期间机场跑道气温在 $-19^{\circ}\text{C}\sim-22^{\circ}\text{C}$ 之间, 25号跑道气温大部分时间高于07号跑道, 跑道两端气温变化无明显对应关系, 气温变化幅度小, 跑道两端RVR具有分布不均匀、上下波动幅度大、变化突然的特点。大雾期间气温呈现波动变化, 07号跑道气温持续降至 -22°C 时, 07号跑道RVR低于550 m。25号跑道气温变化不大时, 25号跑道RVR同样也低于550 m。由上可见三次大雾过程中, 贴地层气温偏低, 基本低于 -15°C , 且气温升降均可能伴随着RVR降低, 说明贴地层的辐射降温并非是造成大雾的唯一原因。

4.2. 相对湿度

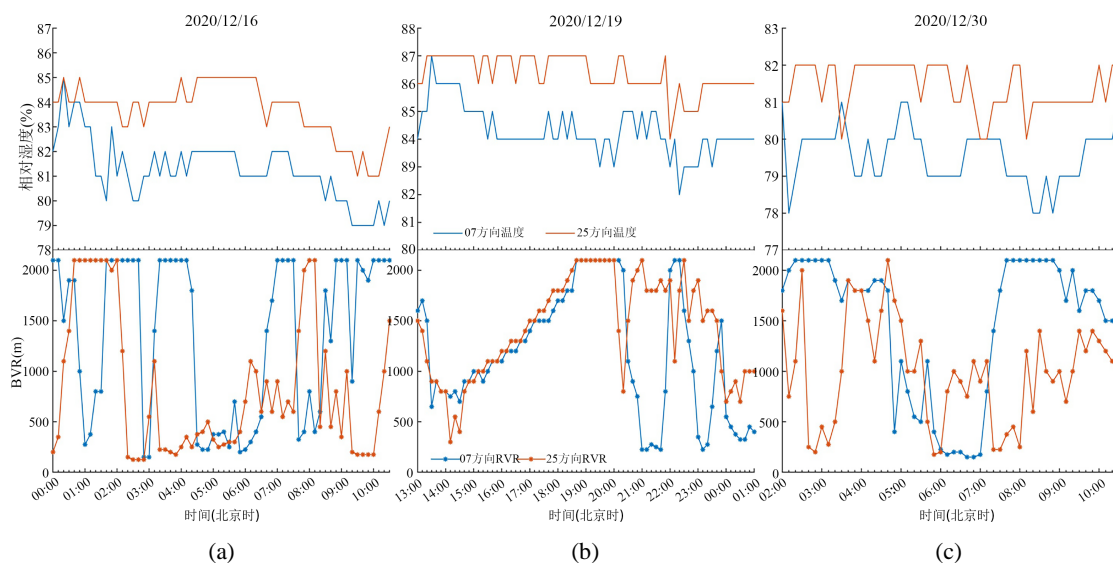


Figure 3. Relative humidity (unit: %) and runway visual range (unit: m) at Urumqi Airport on December 16 (a), December 19 (b) and December 30 (c)

图 3. 乌鲁木齐机场 12 月 16 日(a)、12 月 19 日(b)、12 月 30 日(c)相对湿度(单位: %)及跑道视程(单位: m)

由图3可知, 过程一大雾期间跑道两端相对湿度在80%~85%之间振荡。过程二大雾期间跑道两端相对湿度介于83%~87%。过程三大雾期间跑道两端相对湿度则为78%~82%。通常北疆沿天山一带的大雾天气发生时相对湿度在90%以上, 而上述三次大雾天气过程中, 跑道贴地层相对湿度均不足90%, 这说明上述大雾发生时的水汽条件一般, 可能处于临界值, 这意味着此类大雾的强度及维持时间可能随时发生改变, 可预报性较低。此外, 25号跑道相对湿度虽大于07号跑道, 但与跑道两端RVR的高低无明显的对应关系。

4.3. 地面水平风场

由图4(a)可知, 过程一大雾期间跑道两端风速不大, 基本为0~2 m/s, 且存在风向差异, 其中07号跑道以偏西、西南风为主, 25号跑道无持续风向, 当25号跑道转为偏东风时, 25号跑道RVR出现急剧下降, RVR的波动伴随风向的转变, 当偏东风长时间维持时, RVR也一直保持较低值, 当风向转为偏西或偏南风时, RVR缓慢上升。由图4(b)可知, 过程二大雾期间跑道两端以偏北风为主, 风速1~3 m/s,

25号跑道转为东北风时, 25号跑道RVR出现短暂波动, 07号跑道RVR与风向风速没有明显对应关系。由图4(c)可知, 过程三大雾期间跑道两端风向较为一致, 风速较小, 基本为0~1 m/s, 风向风速与RVR没有明显对应关系。

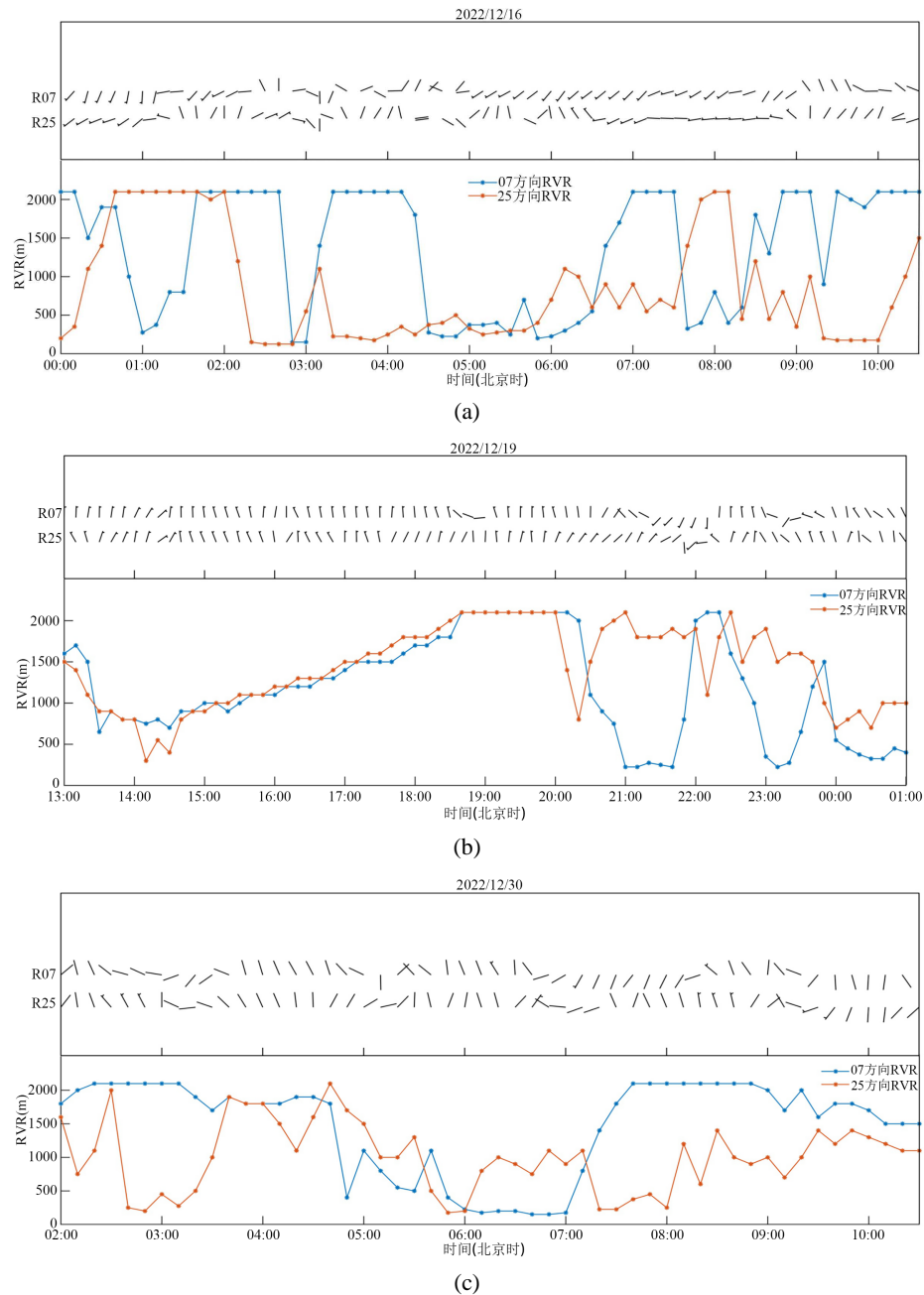


Figure 4. Surface horizontal wind field (unit: m/s) and runway visual range (unit: m) at Urumqi Airport on December 16 (a), December 19 (b) and December 30 (c)

图 4. 乌鲁木齐机场 12 月 16 日(a)、12 月 19 日(b)、12 月 30 日(c)地面水平风场(单位: m/s)及跑道视程(单位: m)

由此可见, 大雾发生与维持时, 地面风速不大, 多为静风或微风。大雾维持期间, 若风向频繁出现偏东风及偏西风的转换, 浓雾区会随之移动, 常表现为跑道两端 RVR 上下频繁波动, 且变化幅度大。

5. 微波辐射计资料气象要素分析

5.1. 温度

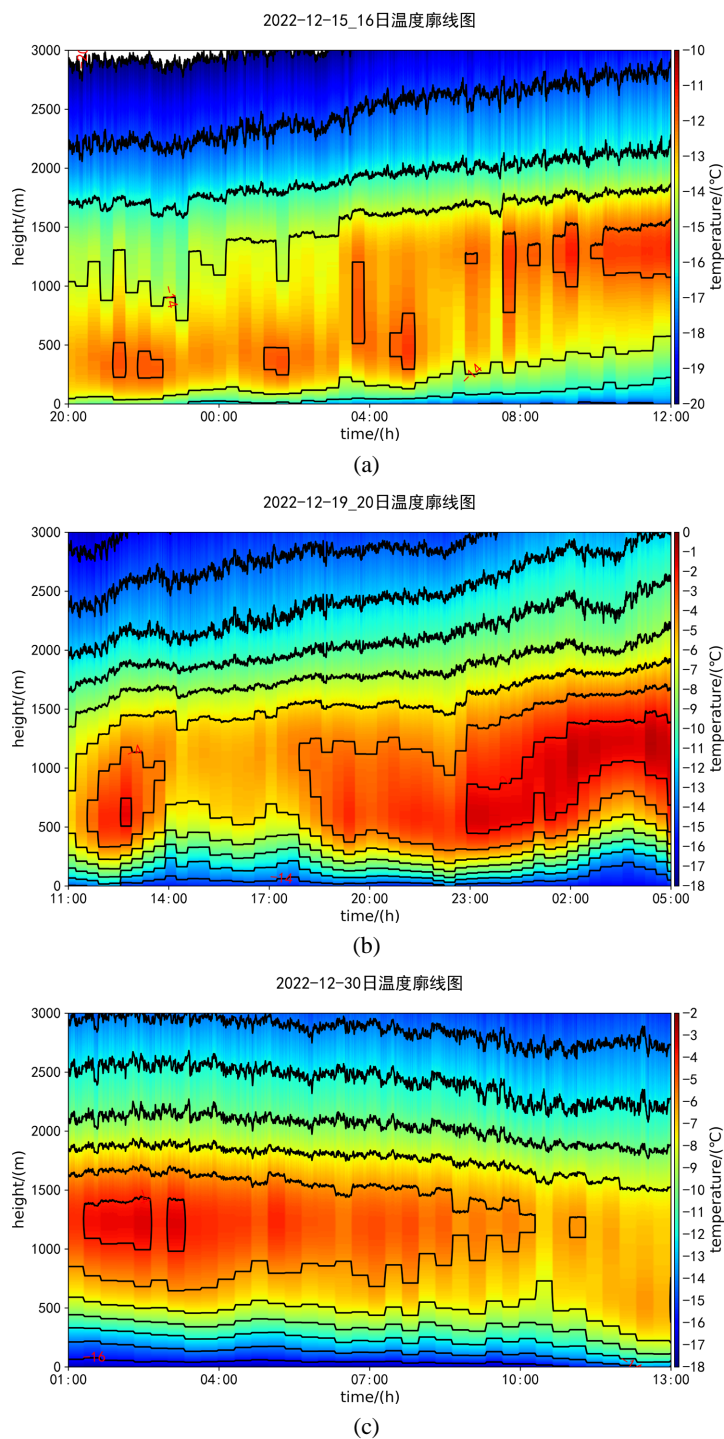


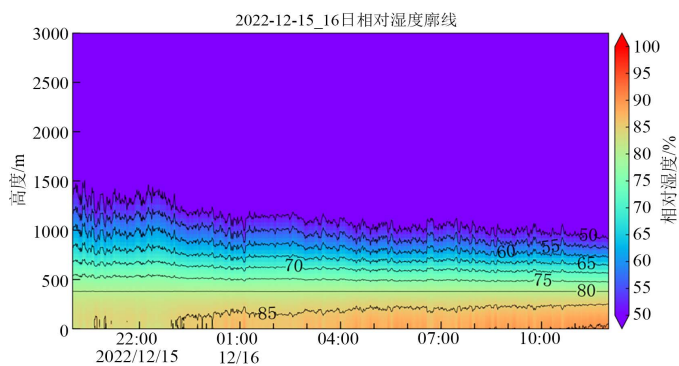
Figure 5. Temperature profile at Urumqi Airport on December 16 (a), December 19 (b) and December 30 (c) (unit: °C)

图 5. 乌鲁木齐机场 12 月 16 日(a)、12 月 19 日(b)、12 月 30 日(c)温度廓线(单位: °C)

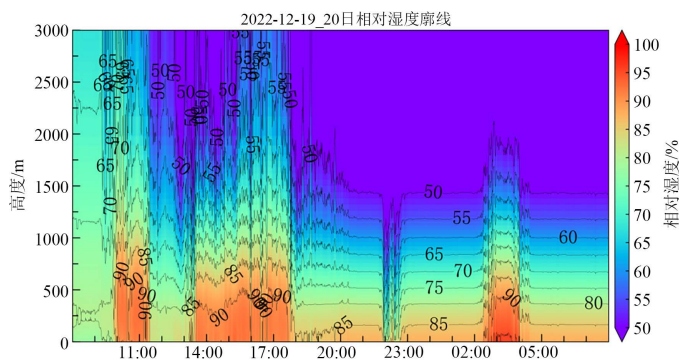
由图 5(a)可知,过程一大雾开始前本场上空已有逆温层,层结较为稳定,逆温层顶高度为 200~300 米,逆温差约为 2℃,02:00 前后贴地层缓慢降温,逆温差增至 4~6℃,逆温层厚度增加,逆温层顶高度逐步抬升至 500~1200 米。10:00 后,贴地层近乎为等温层,逆温层脱地,大雾基本结束。由图 5(b)可知,过程二大雾期间本场上空均有逆温层存在,层结较为稳定。19 日 12:00~13:00,逆温层顶高度在 600 米左右,逆温差约为 8℃,随后近地面层明显降温,逆温层强度略有减弱,逆温层顶逐步抬升至 1000 米左右,此时本场短时出现大雾。20:00,逆温层顶高度下降至 750 米左右,逆温差 10℃左右,本场再次出现大雾,03:30 前后,贴地层出现等温层,形成脱地逆温层,大雾基本结束。由图 5(c)可知,过程三大雾期间本场上空有逆温层,高度在 1300 米左右,逆温差 12℃左右,大雾结束时,逆温强度有所减弱,高度变化不大。由上可知,逆温层是本场大雾发生维持的必要条件,适宜的逆温层顶高度与较强的逆温层有利于大雾的发生维持,逆温层减弱或逆温层抬升形成脱地逆温层时,大雾常常结束。

5.2. 相对湿度

由图 6(a)可知,过程一大雾期间近地面层相对湿度为 85%左右,但相对湿度等值线高度持续缓慢下降,表明湿层变薄,水汽更为向下集中,近地面相对湿度略有变大,有利于大雾的发生与维持,大雾结束时相对湿度无明显的下降。由图 6(b)可知,过程二大雾期间近地面层相对湿度基本大于 85%,且存在爆发性增长的现象。19 日 13:30 前后,相对湿度爆发性增长至 90%以上,湿层变厚,此时本场出现大雾,能见度由 1600 米降至 1000 米。20:00 至 20 日 02:00 前后,近地面层相对湿度维持在 85%左右,且无突变现象。02:30 至 03:00 前后,相对湿度廓线再次出现爆发性增长,此时大雾逐渐结束。由图 6(c)可知,过程三大雾期间近地面层相对湿度维持在 80~85%之间,07:00 前后近地面层湿层有变厚的趋势,相对湿度上升至 85%以上,10:00 前后,相对湿度爆发性增长至 90%以上,湿层变厚,此时大雾反而结束。由边界层相对湿度廓线分布特征可知,此次大雾为平流辐射雾。



(a)



(b)

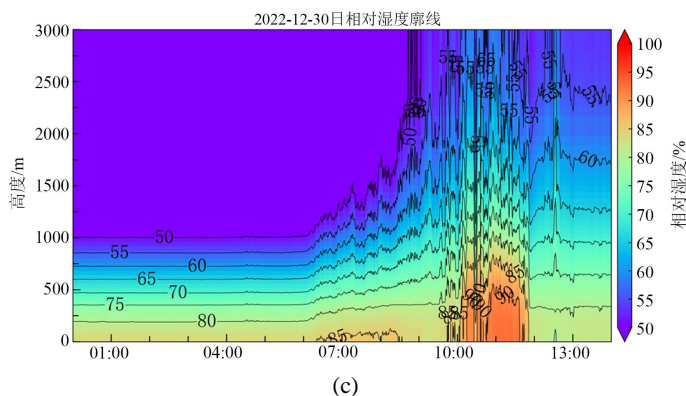


Figure 6. Relative humidity profile at Urumqi Airport on December 16 (a), December 19 (b) and December 30 (c) (unit: %)

图 6. 乌鲁木齐机场 12 月 16 日(a)、12 月 19 日(b)、12 月 30 日(c)相对湿度廓线(单位: %)

由上可知,上述三次大雾过程的水汽条件一般,近地面层相对湿度基本介于 80~85%。过程一相对湿度分布特征变化较为平稳,符合平流雾的水汽分布特征,但湿层较为薄,这表明过程一非典型平流雾,实际更可能为局地浓雾区的平流,从而导致机场能见度下降且跑道两端雾的浓度不均匀。过程二与过程三的相对湿度存在爆发性增长的现象,这通常意味着气温迅速下降。过程二出现于大雾开始前,过程三则出现于大雾结束前,说明辐射降温作用在过程二与过程三大雾的生消中起了重要且相反的作用。

6. 小结

1) 本文三次大雾过程具有低温低湿的特点,大雾期间 VIS 与 RVR 短时间内波动幅度大,表明浓雾区的水平尺度较小,分布极不均匀。近地面风场频繁转换时, VIS 与 RVR 会随之反复波动,此类大雾的窗口期及消散时间可预报性较低。

2) 本文三次大雾过程的环流背景均有利于大雾的发生。过程一与过程二为暖脊型,过程三则为槽前型。大雾发生前的降雪对近地面层的增湿作用也不可忽视。

3) 贴地层气温偏低,且气温升降均伴随着 RVR 降低,说明贴地层的辐射降温并非是造成大雾的唯一原因。贴地层相对湿度均不足 90%,表明大雾发生时的水汽条件一般,可能处于临界值。

4) 大雾发生与维持时,地面风速不大,多为静风或微风。大雾维持期间,若风向频繁出现偏东风及偏西风的转换,浓雾区会随之移动,常表现为跑道两端 RVR 上下频繁波动,且变化幅度大。

5) 逆温层是大雾发生维持的必要条件,适宜的逆温层顶高度与较强的逆温层有利于大雾的发生维持,逆温层减弱或逆温层抬升形成脱地低温层时,大雾常常结束。

6) 贴地层气象要素受下垫面影响较大,气象要素与大雾的相关性难以确定。边界层内气象要素的变化则与大雾有一定的联系。

参考文献

- [1] 中国气象局. GB/T 27964-2011 雾的预报等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [2] 王旭, 马禹, 冯志敏. 新疆雾的时空统计特征[J]. 新疆气象, 2002, 25(1): 6-8. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0799.2002.01.003>
- [3] 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. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0799.2002.02.004>
- [4] 郑玉萍, 李景林, 刘增强, 等. 乌鲁木齐冬季大雾与低空逆温的关系[J]. 沙漠与绿洲气象, 2007, 1(3): 21-25.

<https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0799.2007.03.005>

- [5] 夏玉莲, 赵忠, 王敏仲. 古尔班通古特沙漠南缘蔡家湖区域近 40 a 大雾变化特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2014, 8(4): 54-60. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0799.2014.04.009>
- [6] 朱国栋, 朱蕾, 王照刚. 乌鲁木齐机场低能见度天气的特征分析[J]. 中国民航飞行学院学报, 2020, 31(5): 65-68, 72.
- [7] 韩磊, 王春红, 王勇, 等. 乌鲁木齐国际机场“持续双低浓雾”天气特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(5): 9-16.
- [8] 朱雯娜, 王清平, 王春红, 等. 微波辐射计在乌鲁木齐机场浓雾监测中的应用[J]. 沙漠与绿洲气象, 2018, 12(5): 23-31.
- [9] 王春红, 王清平, 谭艳梅, 等. 微波辐射计资料在乌鲁木齐机场持续浓雾天气中的试验应用[J]. 气象科技进展, 2020, 10(4): 22-27.