

乌鲁木齐机场持续浓雾的爆发性特征及成因分析

谭艳梅, 王春红, 王清平, 陈阳权

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: 2023年8月21日; 录用日期: 2023年9月19日; 发布日期: 2023年9月26日

摘要

利用常规气象资料, 乌鲁木齐国际机场跑道自动气象观测系统(AWOS)、边界层风廓线雷达、微波辐射计等实时监测资料以及逐时新疆区域自动气象站资料, 对乌鲁木齐机场2014年11月~2017年3月出现的47次持续浓雾天气的爆发性特征进行分析, 主要结论如下: 1) 乌鲁木齐机场持续浓雾天气中, 爆发性发展个例占总数的34%, 其中突变为强浓雾的又占爆发性发展个例的62.5%。2) 浓雾爆发性发展前后, 地面相对湿度基本上处于并维持 $\geq 85\%$, 风向维持或转变为北-东北和西-西北风, 风速0~2 m/s。浓雾出现前5~15 min内的 $3.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}\sim 12^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 、30 min内 $3.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}\sim 12^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 的气温突降, 或1~3 h内的 $1.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}\sim 3^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 的持续降温, 分别对应着能见度不同程度的迅速降低。边界层500 m以下以偏北和偏西风为主, 近地层气温降低, 相对湿度迅速增大到85%甚至95%左右, 贴地逆温得以建立或加强。3) 浓雾爆发性发展前后, 绝对湿度条件较稳定, 近地层和地面的降温冷却作用, 使得对相对湿度在短时间内达到高湿成雾条件, 贴地逆温得以建立或加强, 从水汽和层结两个方面都对浓雾爆发性发展有着触发作用。4) 辐射降温 and 局地偏北风平流降温是地面和近地层降温的主要原因。在有利的天气形势下, 机场爆发性浓雾发生的预报关键点在于对地面和近地层降温时段和强度的预报, 局地风场变化是温度预报的重要关联变量。

关键词

持续浓雾, 爆发性发展, 贴地逆温, 辐射降温, 平流降温

Analysis on the Explosive Characteristics and Trigger Conditions of Persistent Heavy Fog at Urumqi Airport

Yanmei Tan, Chunhong Wang, Qingping Wang, Yangquan Chen

Meteorological Center of Xinjiang Air Traffic Management Bureau, Urumqi Xinjiang

Abstract

Utilizing conventional meteorological data, real-time data from the automatic weather observation system (AWOS), boundary layer wind profiler radar, and microwave radiometer at Urumqi International Airport, as well as hourly data from regional automatic weather stations across Xinjiang, this paper analyzes the explosive characteristics of 47 persistent heavy fog events occurring at Urumqi Airport from November 2014 to March 2017. The main conclusions are as follows: 1) Among the persistent heavy fog events, 34% showed explosive development, of which 62.5% abruptly intensified into heavy fog. 2) While the explosive development of heavy fog was occurring, surface relative humidity persisted at or above 85%, with wind direction maintaining or shifting to northerly-northeasterly and westerly-northwesterly winds at 0~2 m/s. The temperature decreases of $3.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}\sim 12^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ within 5~15 minutes prior to fog onset, the temperature of $3.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}\sim 12^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ drops abruptly within 30 minutes, or sustained decreases of $1.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}\sim 3^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ in the preceding 1~3 hours, correspond to rapid visibility reduction to varying extents. In the boundary layer below 500 m, northerly and westerly winds prevail, along with decreasing ground layer temperature and rapidly rising relative humidity to around 85% or even 95%, during which ground temperature inversion is formed or intensified. 3) Before and after the explosive development of heavy fog, absolute humidity conditions remained relatively stable. The ground layer cooling strengthened relative humidity, rapidly attaining fog-forming threshold, during which ground temperature inversion was formed or intensified. Both the cooling and inversion played triggering roles in water vapor and stratification to the explosive development of the heavy fog. 4) Radiative cooling and advection cooling are the main reasons for surface and ground layer cooling. Under advantageous weather conditions, the key to forecasting the airport's explosive fog lies in predicting the timing and intensity of surface and ground layer cooling, of which the local wind field is an important correlated variable.

Keywords

Persistent Heavy Fog, Explosive Development, Ground Temperature Inversion, Radiative Cooling, Advection Cooling

Copyright © 2023 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

浓雾是一种局地灾害性天气，常会出现爆发性增强现象，即在很短时间(约 30 min)内，雾突变为强浓雾或特强浓雾。这种突变不仅能诱发各种重大高速公路及水路交通事故，对航空安全和正常也有重大影响。爆发性浓雾的预警预报也是航空气象服务的难点问题之一[1] [2] [3]。

近年来，在爆发性浓雾天气观测特征和成因机制等方面已取得不少研究成果，主要集中在江苏、河北、山东等地的大雾天气。朱承瑛等在分析 2018 年江苏省秋冬季强浓雾发展特征时等指出，夜间辐射降温突然增强、底层弱冷空气入侵、日出后蒸发量加大及湖陆风效应是雾爆发性增长的触发因子[4]。方春刚等研究指出，夜间地面长波辐射冷却过程是造成华北地区雾爆发性增强的首要因素[5]。王庆等研究指出气温下降是济南冬季雾爆发性增强的直接原因，弱水汽输送产生的增湿作用对爆发性增强有一定的促进作用[6]。新疆准噶尔盆地南缘北疆沿天山一带是我国冬季雾比较集中的区域之一，经常出现范围较大

时间较长的冻雾天气,但相关的研究主要体现在时空分布、天气特点、天气形势、逆温特征等方面,对于雾的爆发性特点及其观测和预报分析开展的工作较少[7][8][9][10]。乌鲁木齐机场冬季浓雾天气多发,机场能见度急剧下降低于运行标准时,会使得空管交通管制指挥和机场运行保障无法按正常预案执行,导致进、离场航班的紧急返航、备降或是延误取消,严重影响飞行活动的安全、正常和效率。如乌鲁木齐机场2016年1月6日的爆发性浓雾天气,导致航班返航1班,备降9班,延误168班,取消58班。提高爆发性浓雾的预警提前量和预报准确性,是航空气象用户迫切希望。

2. 资料与方法

使用资料包括:2014年1月~2017年3月常规地面、高空气象资料,乌鲁木齐国际机场地面人工观测资料、例行(特殊)天气报告、跑道自动气象观测系统(AWOS)实时探测资料、边界层风廓线雷达资料。逐时新疆区域自动气象站资料。2016年10月~2017年3月乌鲁木齐机场微波辐射计资料等。

本文针对乌鲁木齐机场2014年1月~2017年3月出现的47个持续浓雾个例(以下均简称为机场浓雾)中的爆发性发展个例开展分析,雾的等级划分依据《中华人民共和国国家标准——雾的预报等级》即轻雾($1000\text{ m} \leq V < 10,000\text{ m}$)、大雾($500\text{ m} \leq V < 1000\text{ m}$)、浓雾($200\text{ m} \leq V < 500\text{ m}$)、强浓雾($50\text{ m} \leq V < 200\text{ m}$)、特强浓雾($V < 50\text{ m}$)。

3. 机场浓雾爆发性发展时能见度变化特点

机场浓雾出现时,能见度的变化主要表现为两种情形,一是“缓降”,即历经较长一段时间由轻雾

Table 1. Changes of ground elements of continuous fog during explosive development

表 1. 爆发性发展持续浓雾地面要素变化

个例编号	日期及时间(UTC)	爆发性发展形式	降温幅度	风	相对湿度/%	云底高或垂直能见度
★3	20140221 18:12~20140222 05:00	轻雾转强浓雾	12 min 降 1℃	东南风转西北风	>85	600 m 转 30 m
5	20140305 01:09~20140305 03:30	轻雾转强浓雾	14 min 降 1℃	南风转东北风	>80	>1500 m
★6	20141210 23:15~20141211 03:30	大雾转强浓雾	30 min 降 1℃	东南风转西北风	>85	90 m 转 30 m
10	20150114 02:35~20150114 11:00	轻雾转浓雾	5 min 降 1℃	东风转北风	>85	>1500 m
★12	20150117 03:30~20150117 06:00	大雾转强浓雾	3 h 降 5℃	东南风转西西北风	>85	>1500 m 转 30 m
★13	20150118 12:35~20150118 22:00	大雾转强浓雾	30 min 降 1℃	北风转风向不定	>85	>1500 m 转 30 m
★24	20151208 16:30~20151208 19:30	轻雾转浓雾	30 min 降 1℃	东南风转东北风	>90	>1500 m 转 30 m
★26	20151213 13:00~20151214 01:30	大雾转浓雾	30 min 降 1℃	西南风转西西北风	>85	210 m 转 30 m
30	20151230 02:00~20151230 04:00	轻雾转强浓雾	30 min 降 3℃	东南风转西北风	>85	>1500 m 转 60 m
31	20151230 20:30~20151231 04:00	轻雾转浓雾	30 min 降 3℃	东南风转西北风	>90	210 m 转 30 m
32	20160106 00:00~20160106 03:00	大雾转强浓雾	30 min 降 1℃	南风转北风	>90	90 m 转 30 m
★33	20160121 18:30~20160121 23:00	大雾转浓雾	30 min 降 1℃	北风	>80	270 m 转 120 m
★38	20161127 22:00~20161128 00:30	轻雾转浓雾	1 h 降 3℃	风向不定转西北风	>90	1300 m 转 30 m
★39	20161128 10:30~20161129 05:00	大雾转强浓雾	2 h 降 3℃	西北风转北风	>90	>1500 m 转 30 m
42	20161208 22:00~20161209 02:30	大雾转强浓雾	30 min 降 3℃	西南风转西北风	>90	>1500 m 转 30 m
★47	20170101 21:30~20170102 00:00	轻雾转强浓雾	21 min 降 1℃	西南风转西风	>85	>1500 m 转 30 m

注:个例编号前有“★”的为前期有降水过程。

或雾逐渐演变为浓雾；一是“骤降”，在半小时、十几分钟甚至几分钟之内就由轻雾、雾突变为浓雾或强浓雾，这种突变实际上就是浓雾的爆发性发展过程。在 47 个机场浓雾个例中，有 16 例表现为爆发性发展，占 34%，其中由轻雾、大雾突变为强浓雾的分别有 4 例和 6 例，由轻雾、大雾突变为浓雾的分别有 4 例和 2 例，突变为强浓雾的占了绝大多数，占爆发性发展浓雾的 62.5%，且有 5 例能见度均突降到 50 m，说明乌鲁木齐机场浓雾发展时的爆发性特征是较为显著的。具体见表 1。

机场持续浓雾爆发性发展时，大多数个例在能见度迅速降低的过程中，天空状况很快由无云或低云，变为天顶不可辨，垂直能见度下降到 30~60 m。大多数情况下跑道视程(RVR)急剧下降。如个例 3 (2014 年 2 月 21 日 18:12 UTC~22 日 05:00 UTC)，能见度在 12 min 内由轻雾突转特强浓雾，从 1400 m 下降到 50 m，RVR 也由 1500 m 迅速下降到 150 m 左右(见图 1(a))；部分情况下 RVR 有不同程度的波动振荡，如个例 47 (2017 年 1 月 1 日 21:30 UTC~2 日 00:00 UTC)，能见度在 21 min 内由大雾突转强浓雾，从 700 m 下降到 100 m，RVR 出现了波动振荡，即在 5 min 内由 > 1000 m 下降到 550 m 以下，继而又迅速上升到 1000 m 以上，但很快又下降低于 550 m，振荡约 13 min 后稳定低于 300 m (见图 1(b))。

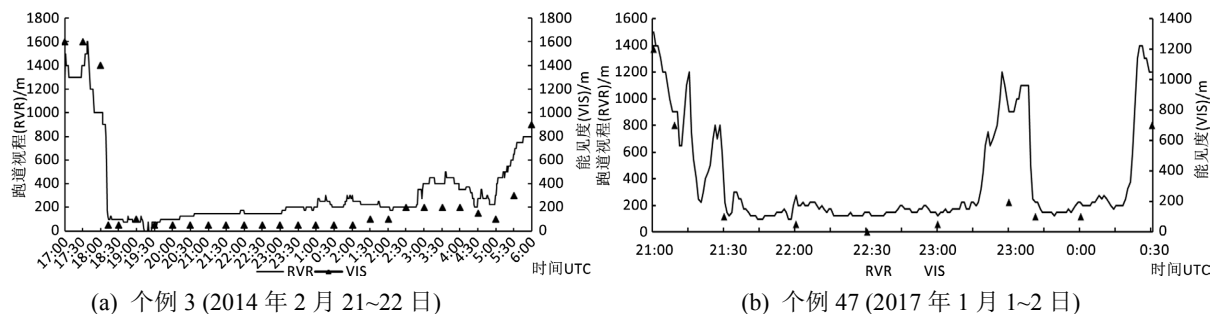


Figure 1. Evolution of visibility (VI) and runway visual range (RVR) in a typical case of explosive development fog
图 1. 爆发性发展浓雾典型个例能见度(VI)和跑道视程(RVR)的演变

4. 机场浓雾爆发性发展时气象要素变化特点

4.1. 地面气象要素

机场浓雾爆发性发展时(见表 1)，地面相对湿度基本上处于并维持 $\geq 85\%$ 的高湿状态。地面风速多为 0~2 m/s，风向维持或转变为北-东北和西-西北风。其中维持偏北风(北、东北、东)的 4 例，由偏南风(南、西南、东南)转为西-西北风或北-东北风的分别有 8 例和 3 例；由风向不定转为西-西北风的 1 例。地面气温有明显的降低现象，降温的剧烈程度和作用时间段有所不同，对应着能见度不同程度的突变(见表 1)：有 3 例(个例 3, 5, 10)在爆发性发展前短时间内(5~15 min)发生了剧烈降温，降温率达 $3.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}\sim 12^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ ，由轻雾或大雾直接突变为强浓雾。有 9 例(个例 6, 13, 24, 26, 30, 31, 32, 33, 42, 47)在浓雾爆发性发展前 30 min 内发生了明显降温，降温率 $2^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}\sim 6^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ ，其中由轻雾或大雾突变为强浓雾的 6 例，突变为浓雾的 4 例。有 3 例(个例 12, 38, 39)在浓雾爆发性发展前 1~3 h 持续降温，降温率 $1.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}\sim 3.0^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ ，由轻雾突变为浓雾的 1 例，大雾突变为强浓雾的 2 例。

4.2. 边界层气象要素

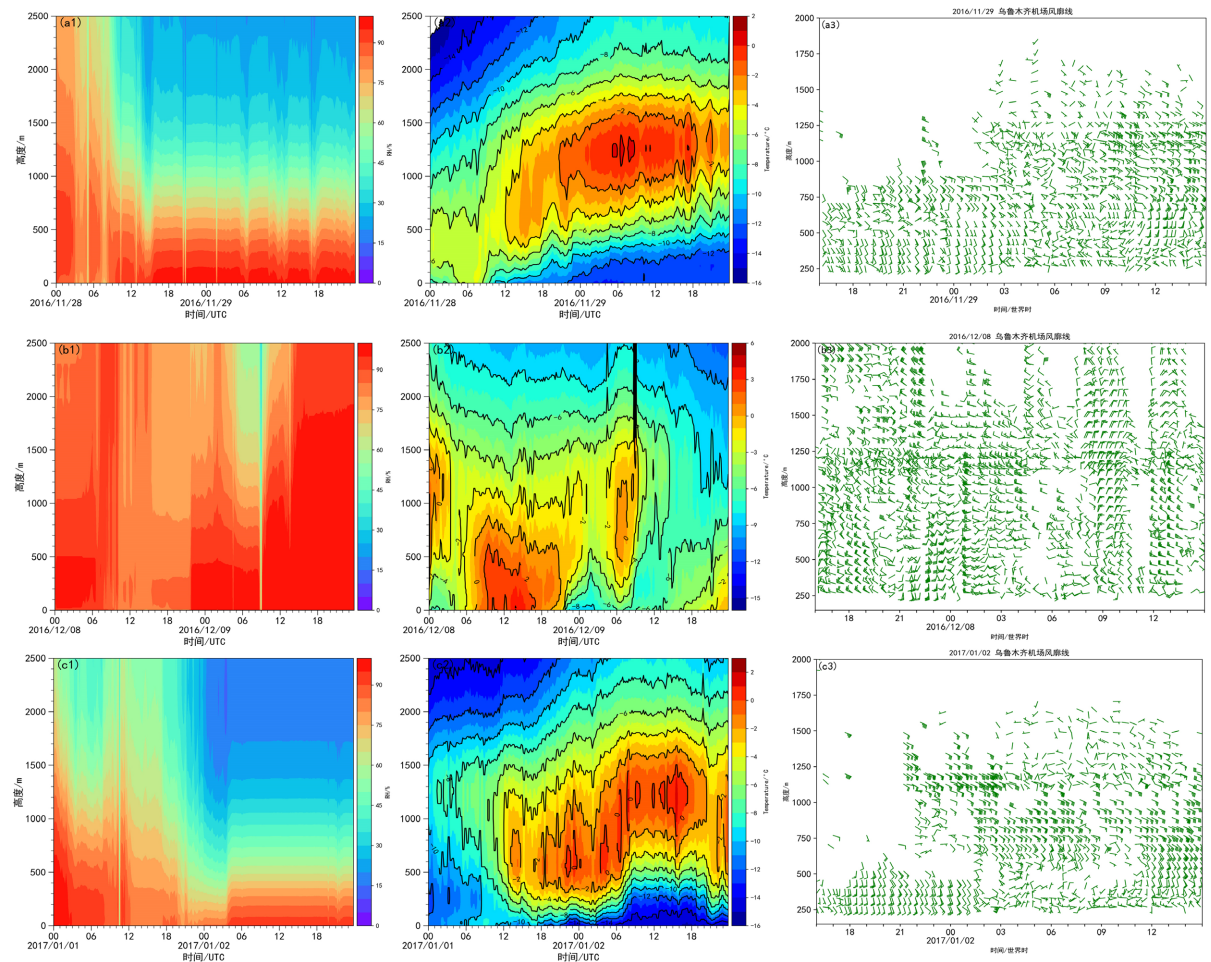
在可获取的监测资料中，4 例(个例 38, 39, 42, 47)机场微波辐射计资料可用，7 例(个例 10, 12, 13, 32, 39, 42, 47)机场边界层风廓线雷达资料可用，3 例(个例 39, 42, 47)上述两种资料均可用。

分析微波辐射计温湿廓线资料可知(表 2)，机场浓雾爆发性发展时，近地面 200 m 以下出现降温，近地层相对湿度增大到 85% 甚至 95% 左右，贴地逆温建立或加强。

Table 2. Temperature, humidity and wind characteristics of the boundary layer during the explosive development of dense fog
表 2. 浓雾爆发性发展的边界层温、湿、风特点

个例序号	微波辐射计温湿廓线	风廓线雷达边界层 500 m 以下空中风场
10	-	风向不定 1~2 m/s 转东北风 2~4 m/s
12	-	偏东风转东北风 2 m/s
13	-	西南风 2~4 m/s
32	-	东南风 2 m/s
38	200 m 以下至地面降温, 贴地逆温建立。 空中 RH ≥ 95%高湿层向下发展接地。	-
39	500 m 以下至地面降温, 贴地逆温建立。 RH ≥ 95%高湿层接地, 并向上发展增厚。	西北风 4~6 m/s
42	200 m 以下至地面降温, 贴地逆温建立。 200 m 以下近地层 RH ≥ 90%, 并向上发展增厚。	东北风 2~4 m/s
47	100 m 以下至地面降温, 贴地逆温加强。 近地面 RH ≥ 85%。	东南风 2~6 m/s

(注: 表中“-”表示无相关资料)。



第一至三行, 分别为个例 39 (2016 年 11 月 28~29 日)、个例 42 (2016 年 12 月 8~9 日) 和个例 47 (2017 年 1 月 1~2 日)。

Figure 2. Characteristics of boundary layer temperature, humidity and wind in typical cases of explosive development of dense fog. The first to third columns are relative humidity, temperature and boundary layer wind field respectively
图 2. 浓雾爆发性发展典型个例边界层温、湿、风特点, 第一至三列分别为相对湿度, 温度和边界层风场

分析边界层风廓线资料可知(表 2): 在机场浓雾爆发性发展前 1~2 h, 边界层 200~500 m 风场主要有维持或转变为偏北、偏西风(4 例), 以及维持西南或东南风(3 例)两种情形。

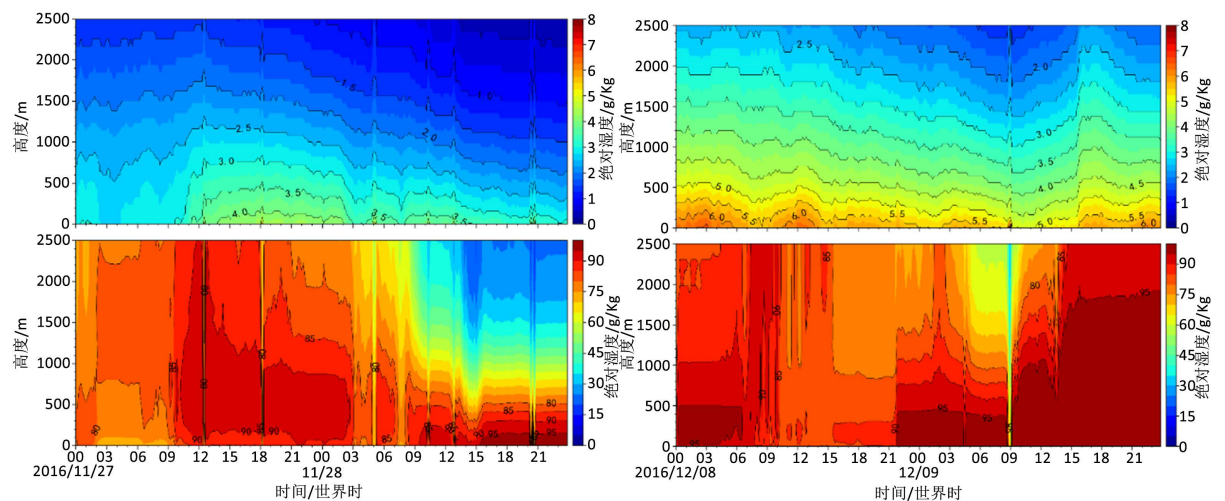
结合微波辐射计和风廓线资料共同分析可知: 个例 39 (图 2(a1), 图 2(b1), 图 2(c1))和个例 42 (图 2(a2), 图 2(b2), 图 2(c2)), 边界层分别为的西北风和东北风, 500 m 以下至地面, 200 m 以下至地面都出现了降温, 随着降温的出现, 贴地逆温建立, 同时高湿层接地并向上增厚发展。个例 47 (图 2(a3), 图 2(b3), 图 2(c3)), 边界层为东南风, 地面为偏西风, 100 m 以下至地面出现了降温, 原有的贴地逆温加强, 受空中东南风影响, 高湿层被压得十分贴近地面。

5. 浓雾爆发性发展的成因分析

5.1. 关于近地层和地面高湿

前人的研究指出, 北疆沿天山雾天气的水汽来源, 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[11]。乌鲁木齐机场持续浓雾天气基本上都是在先期有降水天气过程或者地面有积雪的情况下出现的[12]。机场 16 个爆发性发展的持续浓雾个例均是在地面有积雪的条件下出现的, 其中前 1~2 日有降雪的共 10 例, 约占 62.5% (表 1), 前期无降雪的个例均有稳定积雪且大都出现了积雪深度减少的情况(图表略), 说明有融雪或雪面升华现象发生。

对有微波辐射计资料的 4 例爆发性发展持续浓雾天气进行近地层水汽条件分析发现, 水汽主要集中在低空至地面, 1000 m 以下绝对湿度 $\geq 2 \text{ g/m}^3$, 逆湿特征显著, 绝对湿度大值基本都出现在 500 m 以下甚至地面附近。从其连续演变可以看出, 出雾前期的降水过程和地面的融雪增湿会给近地面带来明显的水汽增加(图 3), 在近地层形成稳定的高湿环境。在整个的持续浓雾过程中, 低空绝对湿度是呈现逐渐下降趋势的。浓雾爆发性发展阶段, 绝对湿度条件较稳定, 因此低层相对湿度的增大以及高湿层的发展应该是近地层降温所致。



(a) 个例 38 (2016 年 11 月 27~28 日, 雾前有降水过程) (b) 个例 42 (2016 年 12 月 8~9 日, 雾前日间融雪增湿)

Figure 3. Water vapor conditions for the explosive development of dense fog (absolute and relative humidity of microwave radiometer)

图 3. 浓雾爆发性发展的水汽条件(微波辐射计绝对湿度和相对湿度)

5.2. 关于地面和近地层降温

对于机场浓雾的爆发性发展而言, 根据上述要素变化特点分析, 地面和近地层的降温冷却作用, 不

但使得对相对湿度在短时间内达到高湿成雾条件，同时还使贴地逆温得以建立或加强，从水汽和层结两个方面来讲都在浓雾爆发性发展中起着触发的作用。

5.2.1. 平流降温冷却

冬季，准噶尔盆地因冷空气堆积，在近地面层形成明显的“冷湖效应”[13][14][15]。乌鲁木齐机场出雾时，绝大多数情况下准噶尔盆地及北疆沿天山一带在地面形势场上处于蒙古冷高压底部后部的均压场，地面冷高底部后部的北、东北风有利于盆地弱冷空气向沿天山一带输送。乌鲁木齐地处天山北麓，准噶尔盆地南缘，又处在中天山峡谷的西北出口端，没有系统性天气影响时多盛行山谷风，白天为北面盆地来向的谷风(偏北风)，夜间为南面山地峡谷来向的山风(偏南风)。夜间山风时，乌鲁木齐机场气温相对平稳，降温较为缓慢，有时甚至表现为升温。冬季机场平均的山风转谷风时间为上午 01:30~03:30 UTC，偏南风转偏北风时常会出现明显的冷平流降温。而当夜间山风不稳定时，偏南风、风向不定或静风转为偏北风时也同样会带来显著的平流降温。南风转北风后的降温幅度往往取决于转风过程的快慢以及盆地、乌鲁木齐机场以及市区的温差。转风过程越快，南北温差越大，转风后机场气温降低的幅度就越大。就边界层而言，偏北风有利于于盆地内低层冷空气平流渗透或楔入到近地层，导致近地层降温。以个例 30 (2015 年 12 月 30 日 02:00 UTC~04:00 UTC)为例(图 4(a))，浓雾出现前，机场夜间为 1~2 km 的轻雾天气，东南风 1~2 m/s 转西南风 1~2 m/s，气温为 -11°C ~ -12°C ，30 日 02:00 UTC，地面风由西南风 2 m/s 转为西北风 2 m/s 气温 30 min 内气温降至 -14°C ，主导能见度由 1600 m 骤降到 50 m。

5.2.2. 辐射降温冷却

乌鲁木齐机场冬季最低气温出现在早上 23~01 UTC，最高温度出现在下午 08~09 UTC，日变化降温在日落前后和日出前降温相对显著。夜间云量尤其是低云量对辐射降温的程度影响较大，低云量越多，云高越低，辐射降温的幅度越小，晴空少云则有利于夜间辐射降温。导致浓雾爆发性发展的辐射降温幅度一般要强于正常的日变化降温。以个例 38 (2016 年 11 月 27 日 22 UTC~28 日 03 UTC)为例，浓雾出现前为小雪轻雾天气，满天低云 900 m，气温 -7°C ，21 UTC 雪停后天空裂开，低云量减少，云高抬高为 1200~1400 m，偏西风转北风，气温开始下降，到 22 UTC 降至 -8°C ，能见度在 15 min 内由 1200 m 降至 400 m(图 4(b))。

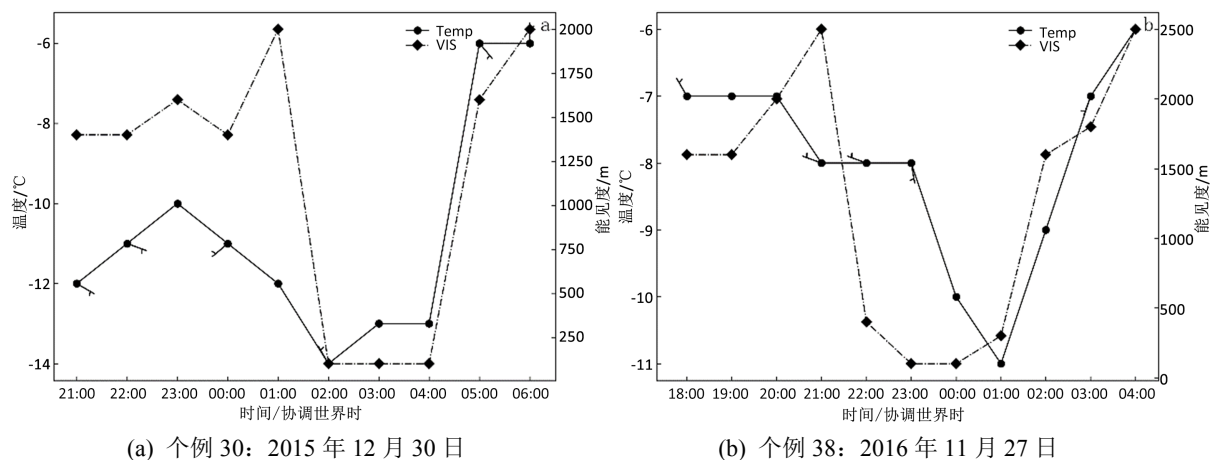


Figure 4. Example of changes of TEMP, VIS and WIND in the explosive development of fog caused by radiation cooling and flow drop

图 4. 辐射降温和平流降导致的浓雾爆发性发展 TEMP、VIS、WIND 变化示例

从机场浓雾爆发性发展的时间特点来看，后半夜 - 凌晨日出前 12 例，早上 - 上午 3 例，下午 1 例，

傍晚日落前后 2 例。早上、上午发生的降温冷却主要为北风带来的平流降温，下午和夜间的降温，有时以日变化辐射降温为主，有时则以北风平流降温为主，有时二者作用兼而有之。

6. 结论和讨论

6.1. 结论

1) 乌鲁木齐机场持续浓雾有爆发性发展特点。爆发性发展个例占持续浓雾个例的 34%，其中突变为强浓雾的又占爆发性发展个例的 62.5%。伴随能见度的迅速降低，跑道视程急剧下降或在不同程度的波动振荡中迅速下降，天空状况由无云或低云，变为天顶不可辨，垂直能见度下降到 30~60 m。

2) 机场浓雾爆发性发展前后，地面相对湿度基本上处于并维持 $\geq 85\%$ 的高湿状态风速多为 0~2 m/s，风向维持或转变为北-东北和西-西北风。浓雾出现前 5~15 min 内的 $3.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}\sim 12^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 、30 min 内 $3.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}\sim 12^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 的气温突降，或 1~3 h 内的 $1.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}\sim 3^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ 持续降温，分别对应着能见度不同程度的降低变化。边界层 500 m 以下以偏北和偏西风为主，近地层气温降低，相对湿度迅速增大到 85% 甚至 95% 左右，贴地逆温得以建立或加强。

3) 机场浓雾爆发性发展前后，绝对湿度条件较稳定，近地层及地面相对湿度的迅速增大以及高湿层的发展为降温所致。降温冷却作用不但使得对相对湿度在短时间内达到高湿成雾条件，同时还使贴地逆温得以建立或加强。从水汽和层结两个方面来讲都在浓雾爆发性发展中起着触发的作用。

4) 辐射降温和局地偏北风平流降温是地面和近地层降温的主要原因。在有利的天气形势下，机场爆发性持续浓雾发生的预报关键点主要在于对地面和近地层降温时段和强度的预报，而局地风场变化是温度预报的重要关联变量。

6.2. 讨论

1) 由于探测资料有限，本文仅针对有资料的部分个例进行了分析，得出的结论可能并不全面。乌鲁木齐机场的浓雾大多发生在北疆沿天山大范围有雾的情况下，北疆沿天山各站浓雾也有爆发性发展的情况。开展机场浓雾爆发性发展的特征及成因分析，对于北疆沿天山其他站点有借鉴和参考意义。

2) 在对乌鲁木齐机场可能导致浓雾爆发性发展的降温时段和降温强度的预报中，局地风场的变化是非常重要的关联要素。目前数值预报模式对冬季 2 m 气温、10 m 风场的预报表现不佳。风温变化的临近预报还需要预报员的主观经验来预测。在冬季静稳天气的弱气压场中，局地风场，尤其是风向的预报，是实际工作中的难点。希望今后能继续借助更加精细化的探测资料以及数值模式开展进一步探讨分析，以提高对此类天气的分析和预报能力。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 邓长菊, 甘璐, 尤焕冷, 等. 北京城市浓雾特征及其与交通预报服务的关系[J]. 暴雨灾害, 2012, 31(2): 188-192.
- [3] 濮梅娟, 严文莲, 商兆堂, 等. 南京冬季雾爆发性增强的物理特征研究[J]. 高原气象, 2008, 27(5): 1-8.
- [4] 朱承瑛, 朱毓颖, 祖繁, 等. 江苏省秋冬季浓雾发展的一些特征[J]. 气象, 2018, 44(9): 1208-1219.
- [5] 方春刚, 郭学良. 华北一次浓雾过程爆发性增强的微物理特征[J]. 应用气象学报, 2019, 6(2): 700-709.
- [6] 王庆, 李季, 樊明月. 济南爆发性增强冬季雾的物理特征分析[J]. 海洋气象学报, 2020, 2(9): 83-95.
- [7] 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.
- [8] 王春红, 汪宏伟. 乌鲁木齐机场天气原因对航班正常性的影响及服务对策分析[J]. 空中交通管理, 2010, 2(z1): 47-50.
- [9] 王清平, 朱蕾. 乌鲁木齐国际机场一次高影响大雾的成因分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(6): 46-51.

-
- [10] 郑玉萍, 李景林. 乌鲁木齐近 31 年大雾天气气候特征分析[J]. 气象, 2008, 34(8): 22-28.
- [11] 张家宝. 新疆短期天气预报指导手册[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1986.
- [12] 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.
- [13] 奥银焕, 陈玉春, 吕世华. 准噶尔盆地冬季一个例低空风、温、湿场的数值模拟[J]. 高原气象, 2005, 24(2): 160-166.
- [14] 李霞. 峡口城市乌鲁木齐冬季重污染的机理研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [15] 赵克明, 李霞, 孙鸣婧, 等. 乌鲁木齐冬季浅薄型焚风对大气扩散条件及空气质量的影响[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(1): 13-20.