

# 贵阳机场两次辐射雾过程对比分析

司林青

中国民用航空西南地区空中交通管理局贵州分局, 贵州 贵阳

收稿日期: 2022年4月14日; 录用日期: 2022年5月16日; 发布日期: 2022年5月26日

## 摘要

利用机场地面观测数据和ECMWF ERA5再分析资料等, 对贵阳龙洞堡机场2019年12月6日(过程1)和2022年1月18日(过程2)的辐射冻雾过程, 从气象要素时间演变、环流特征和水汽、热力及层结方面进行对比分析, 结果表明: 两次过程均为典型的雨后回暖天气下由于辐射降温形成的浓雾, 处于高空暖脊、地面弱气压场的形势下, 生成于晴夜、微风、辐射降温最强烈的凌晨, 前期弱降水为近地面提供大量水汽。在静稳大气环境下, 辐射雾出现越早、造成的能见度越低, 雾维持时间越长, 两次过程最低值均出现在2日08:00~10:30。过程1受雨后冷空气南下和午后多云水汽蒸发影响, 近地面层水汽含量低于过程2, 但雾维持阶段雾滴含量过程1仅比过程2略低。近地面层逆温越强、气温下降越快、雾滴越浓和微风且有一定上升运动有利于浓雾的发展和维持。两次过程湿度均未达到100%, 雾维持阶段温度露点差保持在0.5℃~0.6℃, 能见度均具有爆发性增强和消散耗时极短的特点。浓雾形成前两次过程气温下降根据速度均可分为3个阶段, 其中第一阶段降幅较慢, 第二阶段两次过程每小时均降低0.9℃, 第二和第三阶段间有气温小幅反弹。浓雾消散阶段, 气温呈直线上升。两次过程雾滴含量达到0.39 g/m<sup>3</sup>时能见度降至800 m, 降至0 g/m<sup>3</sup>时, 能见度快速升至3000 m以上。

## 关键词

浓雾, 温度露点差, 爆发性增强, 雾滴含量

# Comparative Analysis of Two Radiation Fog Processes at Guiyang Airport

Linqing Si

Guizhou ATM Sub-Bureau of CAAC, Guiyang Guizhou

Received: Apr. 14<sup>th</sup>, 2022; accepted: May 16<sup>th</sup>, 2022; published: May 26<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Based on the airport ground observation data and ECMWF ERA5 reanalysis data, the radiation

文章引用: 司林青. 贵阳机场两次辐射雾过程对比分析[J]. 自然科学, 2022, 10(3): 254-263.

DOI: 10.12677/ojns.2022.103032

freezing fog processes of Guiyang Longdongbao airport on December 6, 2019 (process 1) and January 18, 2022 (process 2) are compared and analyzed from the aspects of time evolution of meteorological elements, circulation characteristics, water vapor, heat and stratification. The results show that the two processes are the thick fog formed by radiation cooling in typical warm weather after rain, which is located in the upper warm ridge under the situation of weak air pressure field on the ground, it is generated in the early morning of sunny night, breeze and radiation cooling. The weak precipitation in the early stage provides a large amount of water vapor near the ground. In the static atmospheric environment, the earlier the radiation fog appears, the lower the visibility, and the longer the fog lasts. The lowest values of the two processes appear at 08:00~10:30 on the 2nd. Process 1 is affected by the southward movement of cold air after rain and the evaporation of cloudy water vapor in the afternoon. The water vapor content in the near surface layer is lower than that in process 2, but the droplet content in process 1 is only slightly lower than that in process 2 in the fog maintenance stage. The stronger the inversion in the near surface layer, the faster the temperature drops, the thicker the fog droplets and the breeze, and there is a certain upward movement, which is conducive to the development and maintenance of dense fog. The humidity in both processes did not reach 100%, and the temperature dew point difference in the fog maintenance stage was maintained at  $0.5^{\circ}\text{C} \sim 0.6^{\circ}\text{C}$ . The visibility had the characteristics of explosive enhancement and very short dissipation time. The temperature drop in the two processes before the formation of dense fog can be divided into three stages according to the speed. The decline in the first stage is slow, and the two processes in the second stage are reduced by  $0.9^{\circ}\text{C}$  per hour. There is a slight rebound in temperature between the second and third stages. In the fog dissipation stage, the temperature rises in a straight line. In both processes, when the droplet content reaches  $0.39 \text{ g/m}^3$ , the visibility decreases to 800 m, and when it decreases to  $0 \text{ g/m}^3$ , the visibility quickly rises to more than 3000 m.

## Keywords

Dense Fog, Temperature Dew Point Difference, Explosive Enhancement, Droplet Content

Copyright © 2022 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

雾是悬浮于近地层大气中的大量微细乳白色水滴或冰晶对能见度造成不利影响的天气现象[1], 根据《民用航空气象地面观测规范》等相关规定, 当近地面水汽凝结或凝华使主导能见度少于 1 km 时记录为雾(FG), 发生时相对湿度须在 90%以上。浓雾是一种灾害性天气现象, 严重威胁航空运行安全。沈俊等[2]发现, 低能见度是造成航空事故的最主要因素, 每年低能见度造成的经济损失比龙卷风还要大, 尤其是雾爆发性发展和增强, 造成能见度短时间内突降至 400 m 以下时, 极易引发飞行事故。如图 1, 贵阳机场位于中国贵州省贵阳市东郊, 图 1 中部黑色点处, 坐标为  $106.7988^{\circ}\text{E}$ 、 $26.5438^{\circ}\text{N}$ , 海拔高度 1139 m, 地处云贵高原东麓, 地形条件复杂, 周边山脉河流纵横, 充沛的水气以及山脉的阻挡作用, 造成该区域低能见度天气多发且影响较大。2019 年 12 月 6 日贵阳机场浓雾天气未能提前预报, 累计造成航班 110 架次延误和 15 架次备降, 2022 年 1 月 18 日浓雾天气提前预警, 经航班运行时刻调时, 对运行影响较小。这两次过程分别为近十年来影响最大和持续时间最长的浓雾天气, 因此对其进行对比分析十分重要。

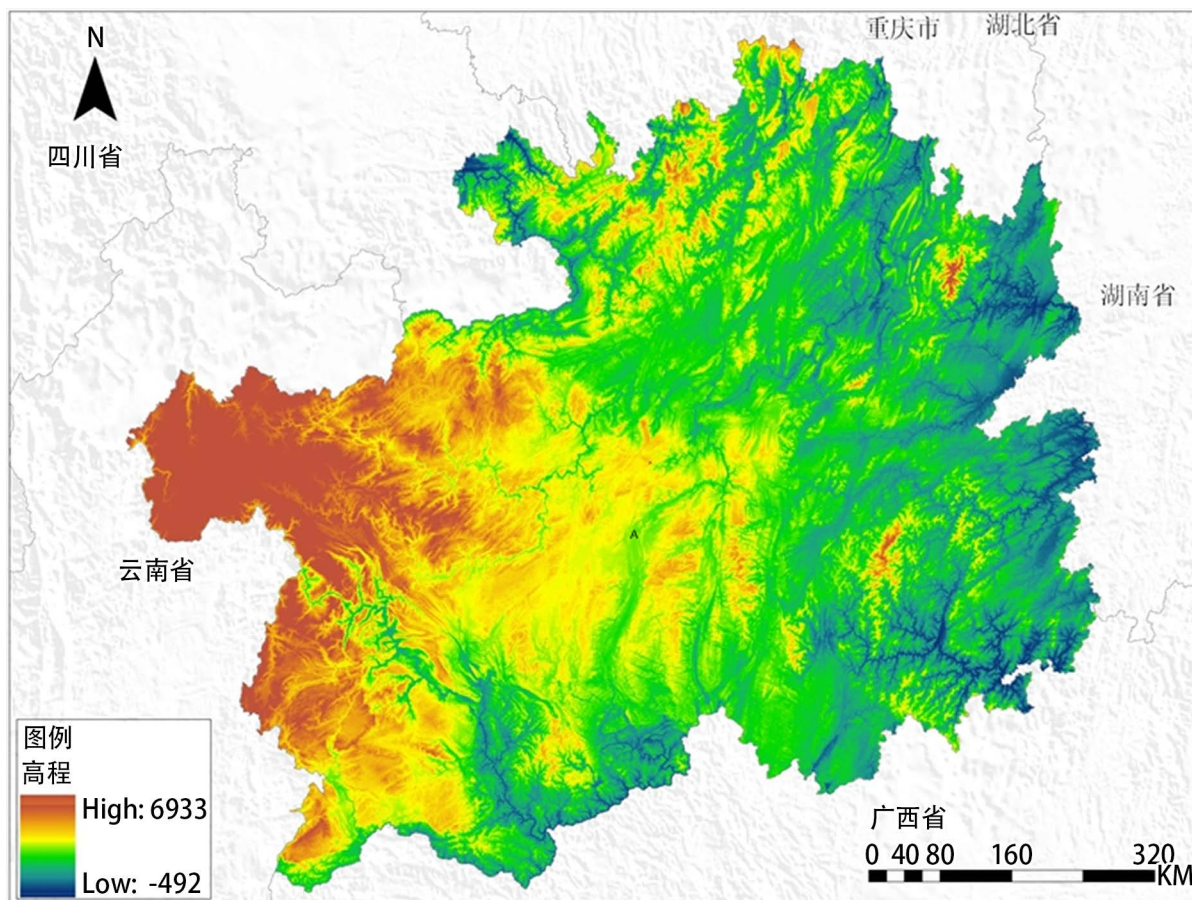


Figure 1. Electronic elevation map of the whole region of Guizhou Province

图 1. 贵州省全区电子高程图

国内外专家学者对雾从变化规律分析、成因分析、污染物浓度变化特征、气溶胶光学特性等方面进行了一系列的研究,取得了丰硕的成果。美国波河河谷试验[3]发现了因雾层平流导致雾层垂直方向的突发性发展特征;李子华等[4]在沪宁高速公路雾的观测研究中发现日出后贴地层的增温、逆温的分层结构以及湍流混合引起的动量、热量及水汽垂直输送是触发雾爆发性发展的动力、热力和水汽条件;濮梅娟等[5]进一步指出雾爆发性增强有三种物理原因,一是近地层出现冷平流,二是夜晚长波辐射增强,三是地表水分蒸发或湿平流及湍流混合。刘端阳等[6]分析了南京一次浓雾过程的微物理结构及演变特征,指出近地面层持续存在的水汽平流是造成能见度长时间低于 50 m 的主要原因。

近年来研究机场辐射雾造成的低能见度天气的成果也取得了显著进展。罗忠红等[7]利用机场观测资料和 NCEP 全球再分析资料,对厦门机场的一次爆发性浓雾天气过程进行分析,指出海风和地面长波辐射为此次浓雾爆发性形成提供主要热力冷却条件,风速的突增促使了雾的生成和爆发性增长。刘开宇等[8]普查了 1997~2005 年贵阳机场逐时的风、温、压、湿、能见度和降水资料,指出贵阳机场雾多发生在静风和弱的偏北风以及湿饱和空气条件下,高温利于辐射雾的产生。慕熙昱等[9]利用南京禄口机场 2011~2016 年分钟级地面观测数据对禄口机场低能见度现象进行分析,指出能见度分布具有较为明显的日变化特征,凌晨至早晨能见度最低,午后能见度达到最高,冬季低能见度可能出现的时间分布范围广,能见度与气象要素之间的关系复杂,并不呈现某种线性关系。袁娴等[10]对浦东机场低云、低能见度天气进行了分型,并探讨了一些常用天气要素与低云、低能见度天气的关系。王玮等[11]对我国中部的一

次大范围持续性大雾进行了诊断分析,发现逆温层强度与雾浓度密切相关,弱冷暖平流均有利于雾的发展。梁希豪等[12]利用 NECP/NCAR 再分析资料等,对银川河东国际机场两次持续性大雾天气过程从环流特征、动力特征、形成原因和维持机制等方面进行诊断分析,结果表明中高层大尺度的下沉运动是辐射雾出现和维持的重要因素,低层的暖湿水汽通道的建立以及水汽辐合区的出现,为大雾提供了充沛的水汽条件。朱虹等[13]利用机场自动气象观测系统数据和 NCEP/NCAR 再分析资料,对昭通机场两次辐射雾过程的天气形势、水汽条件和边界层结构等进行对比分析,探讨了两次辐射雾形成和维持条件的共性和差异,指出水汽含量和动力条件明显较好的过程,雾越浓,持续时间越长,机场低温、高湿的环境条件有利于雾维持,近地面风速有利于雾层混合,使机场区域雾爆发发展。

为深入分析贵阳机场冬季浓雾形成和发展的要素特征和物理机制,本文针对2019年12月6日和2022年1月18日发生的浓雾天气,利用机场逐分钟气象观测数据和ECMWF第五代全球大气再分析资料ERA5等多种信息,对两次过程的要素演变、环流特征、动力特征、形成原因和维持机制进行诊断分析和对比,以期为今后提高冬季浓雾预报准确率提供参考依据。

## 2. 资料介绍

贵阳龙洞堡机场西跑道装有维萨拉气象自动观测系统,对风、气温、湿度、能见度、降水量和云等要素进行观测,目前保存有逐分钟数据,另外观测员每小时进行1次人工观测作为补充。本文选取数据时段为2019年12月5日00:00~6日14:00(过程1)和2022年1月17日00:00~18日14:00(过程2),为便于比较,定义初始时刻为1日00:00。

环流形势及物理量分析选用ECMWF第五代全球大气再分析资料ERA5,资料起始时间为1979年,并持续更新至实时5d以内,其空间分辨率为31 km,时间分辨率为逐小时。地图数据选用ASTER GDEM v3,其是基于“先进星载热发射和反辐射计(ASTER)”数据计算生成,是目前唯一覆盖全球陆地表面的高分辨率高程影像数据,2019年8月5日,NASA和METI共同发布了ASTER GDEM v3版本。

## 3. 实况要素对比

通过对逐分钟数据的分析,可以更直观地发现两次辐射冻雾过程的细微变化和差异。

### 3.1. 能见度

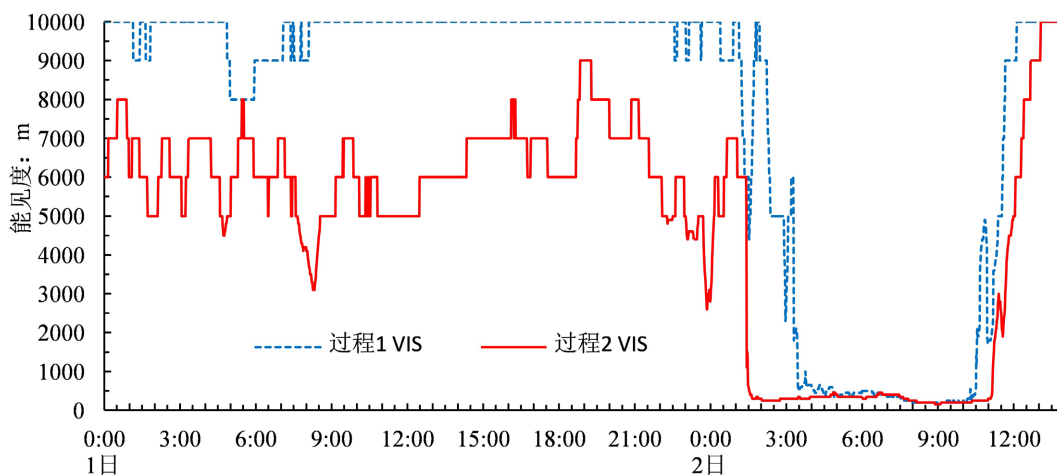


Figure 2. Comparison of visibility changes between the two processes  
图2. 两次过程能见度变化对比



如图 2，过程 1 能见度 2 日 03:18 下降至 3000 m 以下，03:27 下降至 800 m 以下，06:45~10:28 稳定在 400 m 以下，最低值 200 m，10:29~10:31 能见度快速抬升至 800 m，能见度  $\leq 800$  m 和  $\leq 400$  m 分别有 7 小时 4 分钟和 3 小时 43 分钟；过程 2 能见度 2 日 01:26 下降至 3000 m 以下，01:29 下降至 800 m 以下，01:34~11:08 稳定在 400 m 以下，最低值 150 m，11:09~11:10 能见度快速抬升至 800 m，能见度  $\leq 800$  m 和  $\leq 400$  m 分别有 9 小时 41 分钟和 9 小时 34 分钟。过程 1 浓雾形成前基础能见度明显优于过程 2，且能见度下降晚，抬升早，时间相对较短，最低值略高，两次过程在浓雾形成前 5000 m 和浓雾消散阶段 3000 m 附近均出现波动，且两次过程均具有爆发性增强特征。

### 3.2. 风向风速

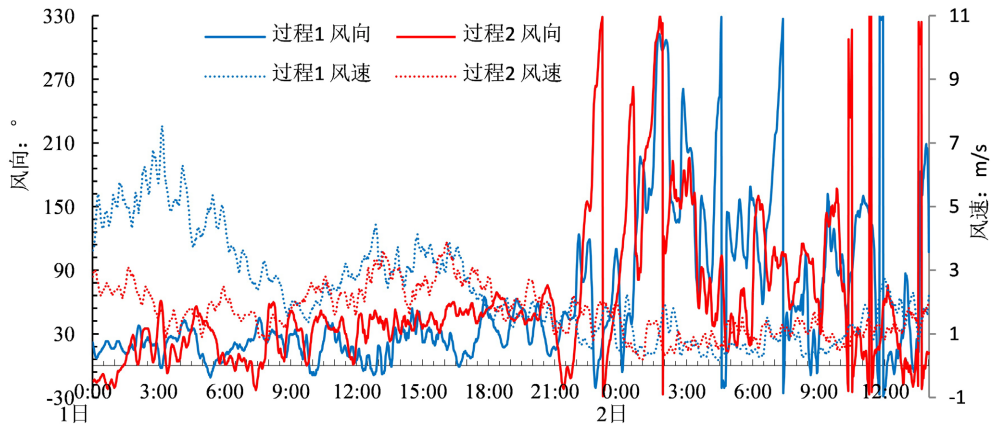


Figure 3. Comparison of ground wind field changes during the two processes  
图 3. 两次过程地面风场变化对比

如图 3，受地形影响，贵阳机场南风 and 北风为主导风向，为便于对比，令  $360^\circ = 0^\circ$ 、 $350^\circ = -10^\circ$ 、 $340^\circ = -12^\circ$ 、 $330^\circ = -30^\circ$ 。两次过程 1 日 00:00~22:00 均为北风，1 日 00:00~09:00 过程 1 风速显著高于过程 2 风速，1 日 09:00~22:00 风速差异不大，1 日 22:00~2 日 12:00 风速在 0.5~2 m/s，其中 1 日 22:00~2 日 01:00 仍为偏北风，2 日 01:00~2 日 03:30 偏南风偏多，2 日 03:30~2 日 12:00 风向不定，有利于雾层混合，过程 1 和过程 2 浓雾期间风速差异不明显。

### 3.3. 温度露点

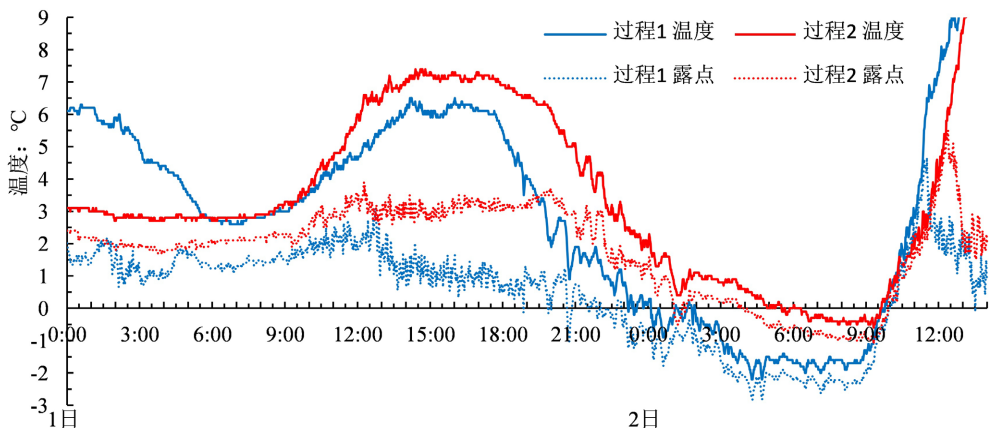


Figure 4. Comparison of two process temperature and dew point temperature changes  
图 4. 两次过程温度露点变化对比

如图 4, 两次过程在 1 日 07:30 气温均为 2.8℃, 过程 1 气温上升较过程 2 慢, 1 日最高气温过程 1 较过程 2 高 0.9℃。浓雾形成前两次过程气温下降均可分为 3 个阶段, 过程 1 中 1 日 16:00~17:30 气温下降 0.5℃, 降幅 0.33℃/h, 1 日 17:30~2 日 00:30 下降 6.3℃, 降幅 0.9℃/h, 2 日 02:30~04:30 下降 1.6℃, 降幅 0.8℃/h; 过程 2 中 1 日 17:30~19:30 气温下降 0.9℃, 降幅 0.45℃/h, 1 日 19:30~2 日 01:30 下降 5.4℃, 降幅 0.9℃/h, 2 日 02:30~06:30 下降 1.5℃, 降幅 0.5℃/h; 过程 1 和过程 2 分别在 2 日 00:40~01:10 和 2 日 01:10~01:40 存在一个 0.9℃和 0.8℃气温明显反弹。浓雾发展阶段, 过程 1 气温仍缓慢下降, 过程 2 稳定少变。2 日 08:45~10:25 过程 1 气温由-1.6℃升至 1.7℃, 升速 2.2℃/h, 2 日 09:20~11:00 过程 2 气温由-0.6℃升至 2.1℃, 升速 1.8℃/h。

两次过程中 1 日 00:00~12:00 露点温度缓慢抬升, 过程 2 露点温度高于过程 1。1 日 12:00 后过程 1 露点温度缓慢下降, 过程 2 露点温度维持不变。1 日 20:30 后两次过程露点温度均先随气温快速下降再维持再快速抬升, 且波动幅度与气温一致。浓雾维持阶段, 两次过程温度露点差保持在 0.5℃~0.6℃之间。

### 3.4. 湿度

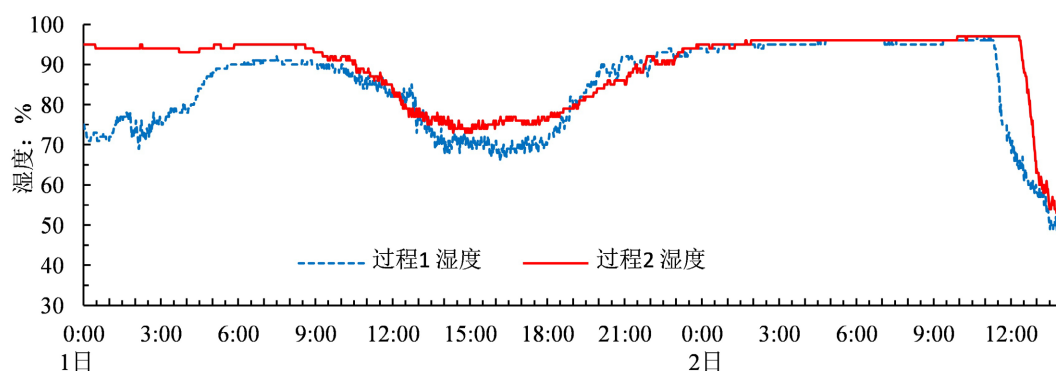


Figure 5. Comparison of relative humidity changes in the two processes

图 5. 两次过程相对湿度变化对比

如图 5, 过程 2 相对湿度总体高于过程 1, 最大湿度分别为 97%和 96%, 均未达到 100%。

### 3.5. 云和降水

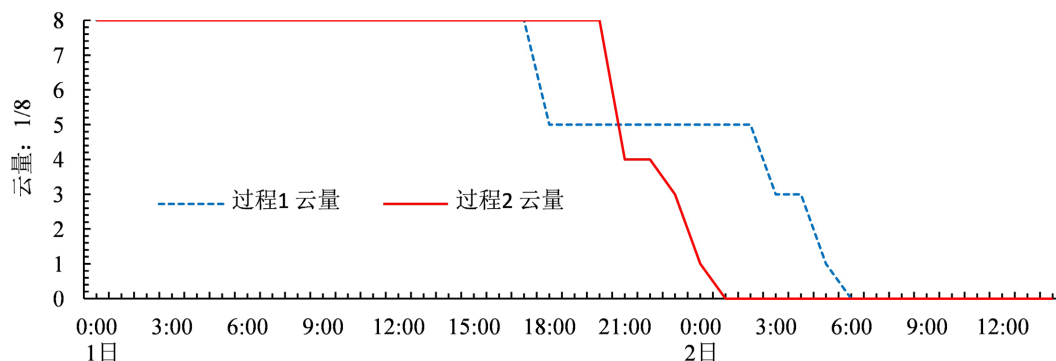


Figure 6. Comparison of two process cloud cover changes

图 6. 两次过程云量变化对比

国际民航组织把天空中的分为八个等分。如图 6, 过程 1 云量 1 日 17:00 由满云天转 5/8, 2 日 02:00~06:00 由 5/8 转为晴天; 过程 2 云量 1 日 20:00 由满云天转 4/8, 2 日 22:00~01:00 由 4/8 转为晴天。

过程 1 较过程 2 转多云时间早, 但转晴天时间晚。如图 7, 从降水量来看两次过程 1 日均有降水, 过程 2 降水明显多于过程 1, 且 1 日下午仍有少量降水。

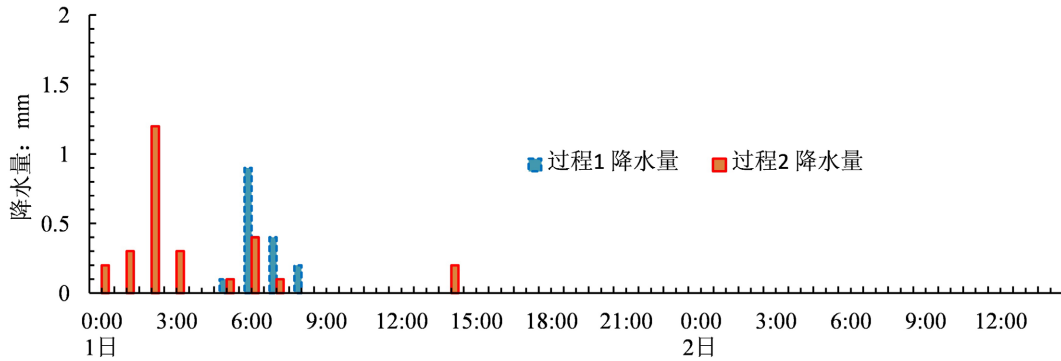


Figure 7. Comparison of precipitation changes between the two processes  
图 7. 两次过程降水量变化对比

### 3.6. 小结

可以看出这两次过程均为典型的雨后回暖天气下由于辐射降温形成的强浓雾, 形成于晴夜、微风、辐射降温最强烈的凌晨, 前期弱降水为近地面提供大量水汽, 由于过程 2 浓雾形成前降水明显多于过程 1, 且北风风速即冷空气强度明显小于过程 1, 因此露点温度和湿度明显高于过程 1, 基础能见度也低于过程 1。由于过程 1 较早转为多云天气, 因此气温下降较过程 2 早, 整体降温幅度大, 根据气温降低速度, 可将夜间降温分为三个阶段, 其中第一阶段降幅较慢, 第二阶段两次过程每小时均降低 0.9℃, 第二和第三阶段间有气温小幅反弹, 约 0.9℃, 不同点在于 2 日 04:00~09:00 两次过程能见度接近, 但过程 2 气温仍在下降, 过程 1 趋于稳定。由于过程 1 水汽含量低, 因此较晚达到饱和, 浓雾形成晚, 但两次均具有爆发性增强特征, 两次过程从 3000 m 降至 800 m 以下, 分别用时 9 分钟和 3 分钟, 从 400 m 以下升至 800 m 以上仅用时 1~2 分钟。浓雾维持期间风向不定, 风速 2 m/s 以下。浓雾消散阶段, 气温呈直线上升, 过程 1 升速 2.2℃/h, 过程 2 升速 1.8℃/h, 过程 2 升温晚, 主要由于雾更浓和日出较过程 1 晚, 当气温超过前一日 08:00 露点温度约 2℃时, 雾将快速消散。浓雾期间湿度并未达到 100%, 最大为 96%~97%, 温度露点差保持在 0.5℃~0.6℃之间。

### 4. 天气形势对比

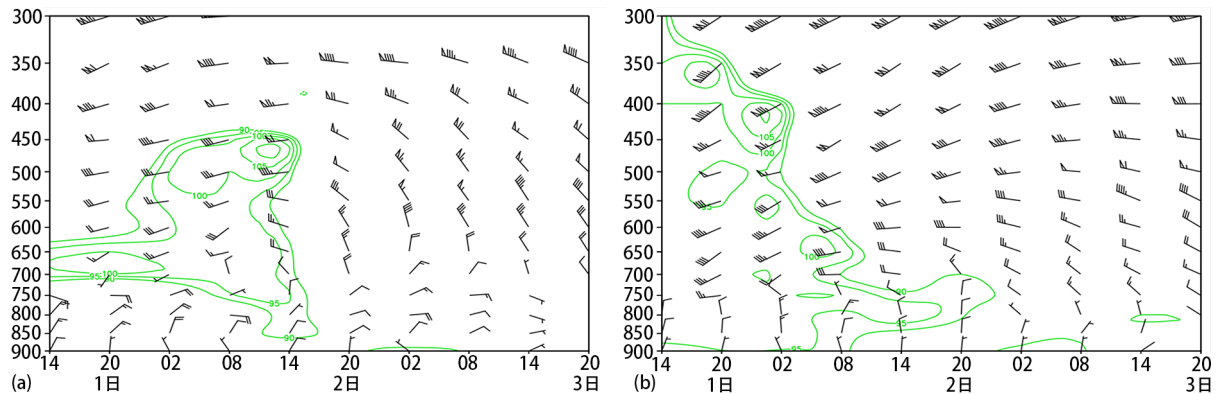


Figure 8. Comparison of the evolution of the weather situation ((a) Process 1, (b) Process 2)  
图 8. 天气形势演变对比((a) 过程 1, (b) 过程 2)

从图 8 可以看出, 两次过程浓雾发生前, 贵阳机场处于高空槽前, 中高层西南气流有明显水汽, 低层均为偏北气流, 冷暖交汇产生降水。过程 1 短波槽移动迅速, 700 hPa 和 500 hPa 槽先后于 1 日 08:00 和 17:00 左右过境, 整层湿度也在 17 时前后降至 85% 以下, 因此天空转多云时间比过程 1 早, 1 日 20:00 后, 整层转高压脊控制, 天空逐渐放晴, 地面为均压场。过程 2, 系统移动缓慢, 700 hPa 和 500 hPa 槽先后于 1 日 08:00 和 2 日 02:00 左右过境, 截至 1 日 20:00, 750 hPa 湿度仍大于 85%, 因此天空转多云时间晚, 但高空冷空气稳定, 天空放晴快, 地面为高压后部弱气压场。浓雾维持和消散阶段, 过程 1 低空为东北气流, 风速较过程 2 偏大, 过程 2 为弱偏北气流。两次过程天气形势均稳定, 有利于辐射雾形成和维持。

## 5. 浓雾生成和爆发性增长成因分析

近地层辐射冷却只能形成浅薄且持续时间较短的雾, 若要形成深厚、时间持续较长的雾, 则还需要湍流混合和平流等条件[14]。

### 5.1. 热力层结

**Table 1.** Process 1 850 hPa and 2 m temperature comparison (unit: °C)

**表 1.** 过程 1 850 hPa 和 2 m 温度对比(单位: °C)

时间	1 日 20:00	1 日 23:00	2 日 02:00	2 日 05:00	2 日 08:00	2 日 09:00	2 日 10:00	2 日 11:00
850 hPa 温度	1.57	1.48	1.27	0.85	0.75	0.85	0.96	1.49
2 m 温度	2.0	0.8	-0.4	-1.5	-1.6	-1.3	0.6	2.9
850 hPa 和 2 m 温度差	-0.4	0.7	1.7	2.4	2.4	2.2	0.4	-1.4

**Table 2.** Process 2 850 hPa and 2 m temperature comparison (unit: °C)

**表 2.** 过程 2 850 hPa 和 2 m 温度对比(单位: °C)

时间	1 日 20:00	1 日 23:00	2 日 02:00	2 日 05:00	2 日 08:00	2 日 09:00	2 日 10:00	2 日 11:00
850 hPa 温度	2.78	3.43	2.68	1.99	0.92	1.31	1.72	1.89
2 m 温度	6.1	2.8	1.1	0	-0.4	-0.4	0.9	1.9
850 hPa 和 2 m 温度差	-3.32	0.63	1.58	1.99	1.32	1.71	0.82	-0.01

严文莲等[15]对内陆雾爆发性增长研究时发现, 辐射雾在爆发性增长时, 低层存在贴地强逆温现象。贵阳机场两次过程中场面气压均在 895 hPa 附近, 因此将地面 2 m 温度与 850 hPa 温度进行对比, 来判断逆温层形成的时间和强度。如表 1 和表 2, 两次过程均在 1 日 20:00~23:00 间产生逆温, 过程 1 温度差最大为 2.4°C, 高于过程 2 的 1.9°C, 可见逆温强度并不是过程 2 雾浓度高于过程 1 的原因。过程 1 约 2 日 10:17 逆温层遭到破坏, 10:29~10:31 能见度快速抬升至 800 m, 过程 2 月 11:00 逆温层遭到破坏, 11:09~11:10 能见度快速抬升至 800 m, 可见这两次过程能见度在逆温层由于辐射升温受到破坏 9~15 分钟后快速抬升, 过程 2 雾浓度更大, 抬升更慢。

### 5.2. 水汽条件

雾的形成与发展离不开水汽条件, 研究显示辐射雾形成时的相对湿度多数达到 90% 以上[16]。雾的形成需要底层水汽达到饱和而产生凝结, 达到饱和有两种方式: 增湿、冷却。很多辐射雾产生之前都有降雨或降雪[17], 贵阳机场两次过程前均连续多日出现小雨, 地表潮湿多水, 近地层水汽含量较高, 叠



加夜间辐射降温，水汽达到饱和形成雾。

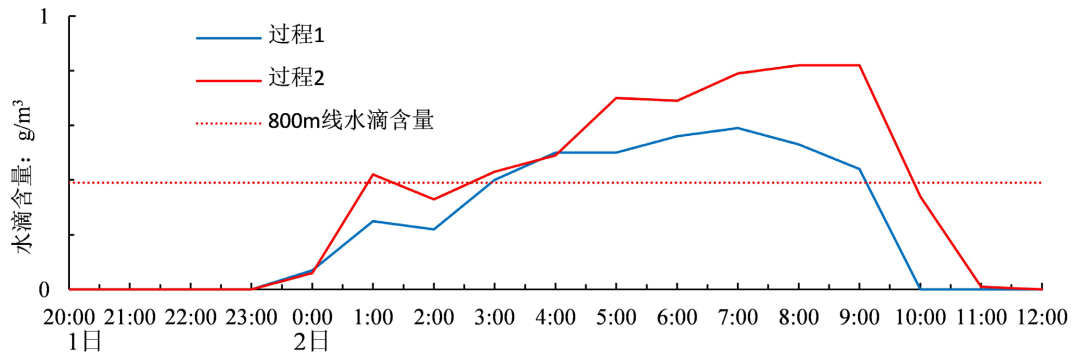


Figure 9. Comparison of water vapor content changes near the ground during the two processes  
图 9. 两次过程近地面水滴含量变化对比

如图 9，浓雾期间过程 2 近地面空气水滴含量均高于过程 1，能见度均低于过程 1。过程 1 和过程 2 水滴含量达到  $0.39 \text{ g/m}^3$  时能见度降至 800 m，水滴含量降至  $0 \text{ g/m}^3$  时，能见度快速升至 3000 m 以上。两次过程水滴含量最高值分别出现在 2 日 07:00 和 09:00，是因为这两时刻气温最低，但能见度最低值并不与此对应，两次过程能见度最低值均在 2 日 08:00~10:30。

### 5.3. 动力条件

辐射雾形成于近地面层，适宜的微风有利于雾的形成和发展，静风时，上下层空气无流动，只能形成很浅的薄雾，只有近地面微风时，既有利于上下层空气混合，使辐射冷却延伸到一定高度，才能形成浓雾[18]。两次过程浓雾期间，贵阳机场地面风速在  $0.5\sim 2 \text{ m/s}$ 。如图 10，两次过程在浓雾形成前均为弱的上升运动，中上层为下沉运动且 0 速度线高度与逆温层顶高度较为接近。过程 2 在 2 日 02:00 上升运动最强，达到  $-0.15 \text{ pa/s}$ 。

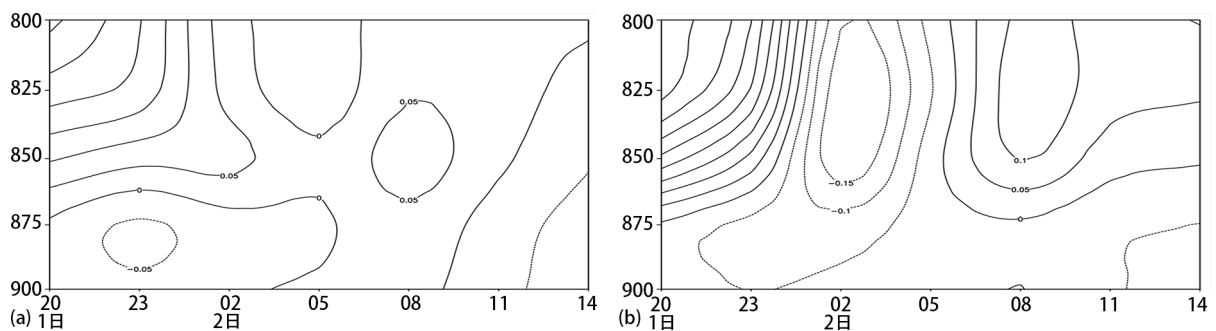


Figure 10. Comparison of vertical speed changes ((a) Process 1, (b) Process 2) (Unit: pa/s)  
图 10. 垂直速度变化对比((a) 过程 1, (b) 过程 2)(单位: pa/s)

由此可见，逆温层越强，气温下降越低，近地面层水滴含量越高，近地面微风且有一定上升运动有利于浓雾的发展和维持。两次过程能见度最低值均出现在 2 日 08:00~10:30。

## 6. 结论

综上所述，贵阳龙洞堡机场 2019 年 12 月 6 日和 2022 年 1 月 18 日两次冻雾过程均为典型的雨后回暖天气下由于辐射降温形成的强浓雾，处于高空暖脊、地面弱气压场的形势下，形成于晴夜、微风、辐射降温最强烈的凌晨，前期弱降水为近地面提供大量水汽，对比两次过程发现：

1) 在静稳大气环境下, 辐射雾出现越早、能见度越低, 雾维持时间越长, 两次过程在浓雾形成前 5000 m 和浓雾消散阶段 3000 m 附近均出现波动, 最低值均出现在 2 日 08:00~10:30。

2) 过程 1 受雨后冷空气南下北风偏大风速水汽辐散和午后转多云早水汽蒸发等影响, 近地面层水汽含量明显低于过程 2, 但雾维持阶段雾滴含量过程 1 仅比过程 2 略低。

3) 近地面层逆温越强、地面气温下降率越高、近地面层雾滴含量越高和近地面层微风且有一定上升运动有利于浓雾的发展和维持。

4) 两次过程湿度均未达到 100%, 过程 2 最大值 97%, 能见度最低 150 m, 过程 1 最大值 96%, 能见度最低 200 m, 浓雾维持阶段, 温度露点差保持在 0.5℃~0.6℃之间。

5) 过程 1 和过程 2 能见度均具有爆发性增强和消散耗时极短的特点, 从 3000 m 降至 800 m 以下, 分别用时 9 分钟和 3 分钟, 从 400 m 以下升至 800 m 以上仅用时 1~2 分钟。

6) 浓雾形成前两次过程气温下降根据速度均可分为 3 个阶段, 其中第一阶段降幅较慢, 第二阶段两次过程每小时均降低 0.9℃, 第二和第三阶段间有气温小幅反弹。浓雾消散阶段, 气温呈直线上升。

7) 两次过程雾滴含量达到 0.39 g/m<sup>3</sup> 时能见度降至 800 m; 水滴含量降至 0 g/m<sup>3</sup> 时, 逆温层由于辐射升温受到破坏 9~15 分钟后, 能见度快速升至 3000 m 以上。

## 参考文献

- [1] 朱承瑛, 朱毓颖, 祖繁, 等. 江苏省秋冬季强浓雾发展的一些特征[J]. 气象, 2018, 44(9): 1208-1219.
- [2] 沈俊, 阎凤霞, 王燕雄. 虹桥机场能见度变化特征分析[J]. 热带气象学报, 2008, 24(1): 99-104.
- [3] Fuzzi, S., et al. (1992) The Po Valley Fog Experiment 1989. *Chemical and Physical Meteorology*, 44, 448-468.
- [4] 李子华, 黄建平, 孙博阳, 等. 辐射雾发展的爆发性特征[J]. 大气科学, 1999, 23(5): 623-631.
- [5] 濮梅娟, 张国正, 严文莲, 等. 一次罕见的平流辐射雾过程的特征[J]. 中国科学 D 辑, 2008, 38(6): 776-783.
- [6] 刘端阳, 濮梅娟, 杨军, 等. 2006 年 12 月南京连续 4 天浓雾的微物理结构及演变特征[J]. 气象学报, 2009, 67(1): 147-157.
- [7] 罗忠红, 江航东, 梁升, 等. 2016 年厦门机场一次爆发性浓雾的天气条件分析[J]. 热带气象学报, 2020, 36(4): 499-507.
- [8] 刘开宇, 王世权, 刘贵萍, 等. 贵阳机场雾的气候统计分析[J]. 高原山地气象研究, 2007(S1): 73-79.
- [9] 慕熙昱, 徐琪, 周林义, 等. 基于 AWOS 数据的南京禄口机场低能见度特征统计研究[J]. 高原气象, 2018, 37(4): 1129-1142.
- [10] 袁娴, 陈志豪. 上海浦东机场平流雾的统计和监测分析[J]. 气象科学, 2013, 33(1): 95-101.
- [11] 王玮, 黄玉芳, 孔凡忠, 等. 中国东部一场持续性大雾的诊断分析[J]. 气象, 2009, 35(9): 84-90.
- [12] 梁希豪, 曾祥耀, 赵晔晖, 等. 银川河东国际机场两次持续性大雾过程的特征及维持机制[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2020, 45(12): 85-92.
- [13] 朱虹, 沈茜, 何娟. 昭通机场两次辐射雾过程的对比分析[J]. 气象科技, 2021, 49(5): 770-776.
- [14] 郑丽杰, 司林青. 2012 年 10 月 24-25 日哈尔滨机场大雾天气过程诊断分析[J]. 科学技术创新, 2013(19): 100-101.
- [15] 严文莲, 朱承瑛, 朱毓颖, 等. 江苏一次大范围的爆发性强浓雾过程研究[J]. 气象, 2018, 44(7): 892-901.
- [16] 李秀连, 陈克军, 王科, 等. 首都机场大雾的分类特征和统计分析[J]. 气象科技, 2008, 36(6): 717-723.
- [17] 王丽荣, 连志鸾. 河北省中南部一次大雾天气过程分析[J]. 气象, 2005, 31(4): 65-68.
- [18] 张礼春, 朱彬, 耿慧, 等. 南京一次持续性浓雾天气过程的边界层特征及水汽来源分析[J]. 气象, 2013, 39(10): 1284-1292.