

# 昭通机场两次辐射雾过程的对比分析

朱虹<sup>1</sup> 沈茜<sup>2</sup> 何娟<sup>2</sup>

(1 云南机场集团有限责任公司昭通机场, 昭通 657000; 2 云南昭通市气象台, 昭通 657000)

**摘要** 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 2019 年 1 月 3 日(“1·3”过程)和 12 月 7 日(“12·7”过程)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。结果表明: ①两次过程均发生在雨雪天气转晴后, 机场受高压底后部弱气压场控制, 但“1·3”过程水汽含量和动力条件明显优于“12·7”过程, 雾浓度和持续时间都大于“12·7”过程。②“1·3”过程是一次典型辐射雾, 形成于晴夜、微风、辐射降温最强烈的凌晨。雾过程中水汽充沛, 动力条件适宜, 有利于雾的形成和发展。③“12·7”过程辐射雾具有局地爆发性发展的特征, 雾爆发前由于水汽和动力条件较差, 机场仅形成了轻雾。日出后由于西南方向的雾层向北平流, 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。

**关键词** 辐射雾; 物理特征; 诊断分析; 爆发性发展

**中图分类号:** P426.4+1 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20200135 **文献标识码:** A

## 引言

雾是近地面大气层中悬浮着大量微小水滴或冰晶微粒对水平能见度造成不利影响的一种常见天气现象。根据《民用航空气象地面观测规范》, 当近地面水汽凝结或凝华使主导能见度降低到 1 km(含)至小于 10 km, 且相对湿度大于 75% 时记录为轻雾(BR), 当主导能见度降低至小于 1 km 时记录为雾(FG), 出现雾时相对湿度至少在 90% 以上<sup>[1]</sup>。雾作为直接影响能见度的天气现象, 常对交通运输造成不利影响。为提高雾预警能力, 气象学者对雾过程的数值模拟<sup>[2-3]</sup>、水汽来源和边界层特征<sup>[4]</sup>、持续和消散机制<sup>[5]</sup>等进行了诸多研究, 并积极对雾临近预报<sup>[6]</sup>、辐射雾自动化预报程序<sup>[7]</sup>进行探索。

昭通机场位于云贵高原北部, 海拔高度 1936 m, 属高原机场, 机场东面、西面山体呈南北弧形包围机场, 西南面地势开阔, 无山体阻挡。段玮等<sup>[8]</sup>指出造成云南辖区机场视程不适航的天气仅为雾, 并提出了高湿、弱风、稳定是雾稳定存在的气象条件。当机场出现雾时, 低能见度影响航空器进近降落和起飞离场, 常造成飞机复飞、延误或取消。2019 年 1 月 3

日和 12 月 7 日, 昭通机场出现两次辐射雾(以下分别简称“1·3”和“12·7”过程), “1·3”过程形成时间早, 持续时间长, “12·7”过程形成晚, 爆发突然。

利用 NCEP/NCAR  $1^\circ \times 1^\circ$  再分析资料、机场自动气象观测系统观测数据、机场周边鲁甸和昭通自动气象站观测数据对两次辐射雾过程进行对比分析, 探索两次过程成因。鲁甸观测场和昭通观测场相对机场位置如图 1 所示, 两个观测场海拔分别为 1916.0 m 和 1950.0 m, 距机场直线距离分别约 24.5 km 和 4.5 km。昭通机场沿 04 号跑道从南向北设置了 3 个气象观测场, 分别位于跑道南端入口向内约 340 m、北端向内约 1300 m、北端向内约 320 m。测量能见度的仪器是 Biral 公司的 VPF-710 前向散射仪, 测量范围 10 m~75 km, 每隔 15 s 测量一次, 能见度  $\leq 2$  km 时测量误差不超过 2%, 2~15 km 范围内误差不超过 8.3%。根据机场运行实际, 南端观测站为机场基准观测点, 观测项目用于机场报文编发和气候资料统计。

## 1 过程概述

利用昭通机场基准观测点采集的数据作两次过

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

作者简介: 朱虹, 女, 1993 年生, 本科, 助理工程师, 从事民航气象预报服务工作, Email: nxzhuhong@126.com

收稿日期: 2020 年 4 月 15 日; 定稿日期: 2021 年 5 月 18 日

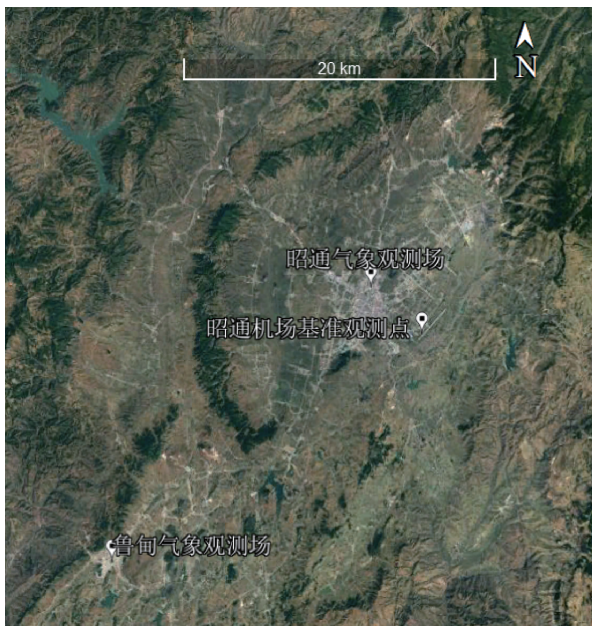


图 1 昭通机场及周围观测点 Google Earth 影像

程 01:00—11:00 器测能见度变化(图 2),“1·3”过程能见度从 01:38 开始低于 1 km,直至 10:05 上升达到 1 km,过程持续约 8.5 h。“12·7”过程中,夜间能见度在 7~10 km 之间波动,08:30 至 08:43 的 13 min 内,能见度由 6 km 突变至 900 m,轻雾转为雾,直至 10:04 上升至大于 1 km,过程持续约 1.5 h。器测数据显示两次雾过程中最低能见度均为 250 m,但通过人工综合观测机场范围内可见情况,“1·3”过程中最低能见度 50 m,“12·7”过程最低能见度 200 m,“1·3”过程雾浓度和持续时间都远大于“12·7”过程。

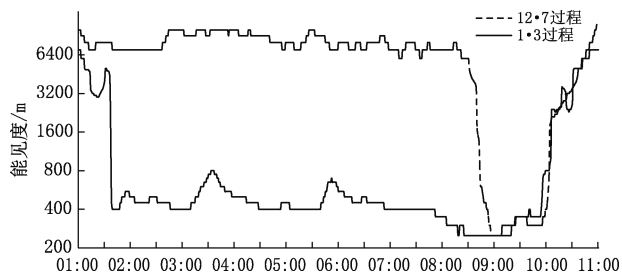


图 2 2019 年 1 月 3 日和 12 月 7 日昭通机场能见度变化

“1·3”过程前,2018 年 12 月 28 日至 2019 年 1 月 1 日,机场为低温降雪天气,29 日降短时中雪,积雪深度 4 cm;1 月 2 日天气转晴,地面观测记录显示 2 日 14:00 后天空状况为无云。“12·7”前一周机场为阴天低温天气,4 日和 5 日有小雪,积雪 2 cm;

6 日天气转晴,12:00 后天空无云。大致可以看出,两次辐射雾都发生在低温雨雪天气转晴的相似背景下。表 1 为两次过程中主要影响因素对比,自动站设备测得“1·3”前和“12·7”前的雨雪天气过程分别累积降水量 8 mm 和 3.7 mm。昭通机场地处内陆高原,降水过程的增湿作用是辐射雾水汽的重要来源,但根据观测经验,可测量的降水量并不是雾浓度和持续时间的决定因素。为揭示两次辐射雾的成因,下面将从天气形势和物理量诊断方面作进一步分析。

表 1 “1·3”过程和“12·7”过程中主要影响因素对比

	“1·3”过程	“12·7”过程
出现时间	01:38—10:04	08:43—10:03
持续时长/min	451	89
人工观测最低能见度/m	50	200
夜间辐射降温幅度/℃	11.3	15.5
前雨雪过程降水量/mm	8.0	3.7
地面凝结	霜	霜
人工观测天空状况	垂直能见度 50 m	无云

## 2 天气形势分析

“1·3”过程中,500 hPa 高度场上(图略),我国中纬度地区为“一槽一脊”形势,滇东北地区始终受“槽前脊后”的西南气流控制,符合云南辐射雾大气环流形势中偏西气流型—南支槽前型<sup>[9]</sup>。海平面气压场上,影响我国的冷高压前沿已入海,我国大部地区基本无冷空气活动,1 月 3 日 02:00(图 3a)昭通位于入海弱高压后部,近地面以偏南风为主。

“12·7”过程中,500 hPa 高度场上,昭通地区受槽后西北气流控制,形势稳定。海平面气压场上,柴达木盆地东南侧,川西高原西北部有一冷高压,冷空气在我国西北部地区堆积,东部沿海地区有一入海变性冷高压,12 月 7 日 08:00(图 3b),我国中部地区处于两高压之间的均压场控制下,昭通位于入海弱高压的底后部,气压梯度很小。

因此,两次过程的形成具有相似的天气形势:机场处于地面弱高压的底后部,高压控制下的晴空区有利于夜间辐射降温,同时无冷空气活动,天气形势稳定,有利于辐射雾形成。

## 3 物理量诊断分析

辐射雾的形成不仅需要稳定的天气形势,还需要充沛的水汽,有利的辐射降温,适宜的风力。下面将对动力条件、水汽条件、热力条件进行分析。

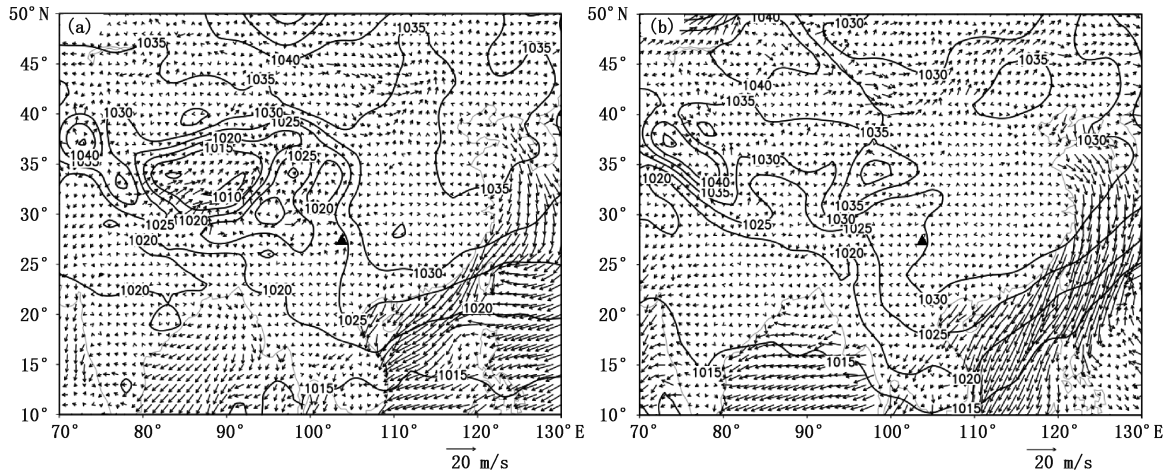


图3 2019年1月3日02:00(a)和12月7日08:00(b)海平面气压场和10 m风矢量合成  
(实心三角形表示机场所在位置,下同;气压单位:hPa)

### 3.1 动力条件

辐射雾形成于近地层,适宜的低层微风有利于雾的形成和发展<sup>[4]</sup>。近地层静风时,上下层空气没有流动,辐射冷却作用只能形成很浅的薄雾,难以扩散到高层。若风速过大,上下层空气流动过快,不利于大气降温到过饱和状态。只有近地面微风时,既有利于上下层空气混合,使冷却作用延伸到一定高度,又不影响低层大气冷却达到过饱和状态。图4为“1·3”过程中10 m高度全风速图,机场区域风速基本为2~3 m/s。“12·7”过程中,机场区域10 m高度全风速(图略)基本在1 m/s以下。

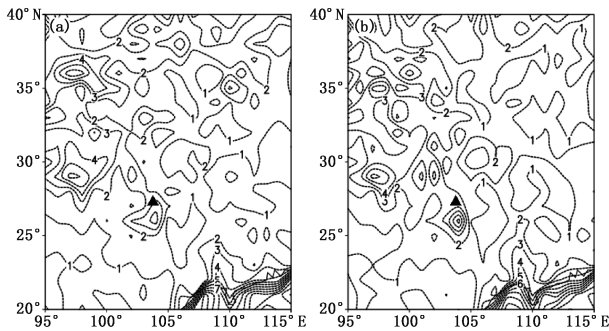


图4 2019年1月3日02:00(a)时和08:00(b)10 m  
风速(单位:m/s)

沿机场跑道中心位置作两次过程散度的垂直剖面图,如图5所示。“1·3”过程中(图5a),750 hPa以下散度为负,有弱气流辐合,有利于低层水汽聚集。垂直速度剖面图(图略)显示“1·3”过程中500 hPa以

下垂直速度为正,中低层整层均为下沉运动,有利于辐射降温 and 低层稳定结构的维持<sup>[10]</sup>,同时垂直运动为雾向高层扩散发展创造了一定的有利条件。“12·7”过程中,550 hPa以下散度(图5b)和垂直速度(图略)基本为0,没有气流的辐合辐散。

两次过程动力条件有明显差异。“1·3”过程近地面微风,同时有气流辐合和垂直运动配合,动力条件有利于雾形成。“12·7”过程近地面基本静风,大气垂直方向上静稳,不利于雾的形成和发展。

### 3.2 水汽条件

水汽是雾形成的必要条件之一,雾的发生需要足够大的近地面湿度<sup>[11]</sup>。露点温度指空气中水汽含量和气压保持不变,空气冷却至饱和时的温度,露点温度与气温的差值可以表示空气中水汽的饱和情况,差值越大空气中水汽含量越少,当差值为0℃时表示空气达到饱和。图6为两次过程前一日19:00至当日11:00气温和露点温度的变化,可以看出“1·3”过程中气温和露点温度差值很小,近地面湿度很大,而“12·7”过程23:00前气温和露点温度的差值较大,湿度较低。用 $\Delta T$ 表示 $T$ (温度)- $T_d$ (露点温度)，“1·3”过程19:00  $\Delta T$ 为0.7℃,相对湿度95%,19:47  $\Delta T$ 为0℃,空气达到饱和。“12·7”过程19:00  $\Delta T$ 为5.2℃,随后波动上升,20:06达6.2℃后逐渐减小,至00:55后 $\Delta T$ 基本为0℃,相对湿度保持100%。“1·3”过程10:05大雾开始消散,11:10  $\Delta T$ 才开始大于0℃;“12·7”过程10:04

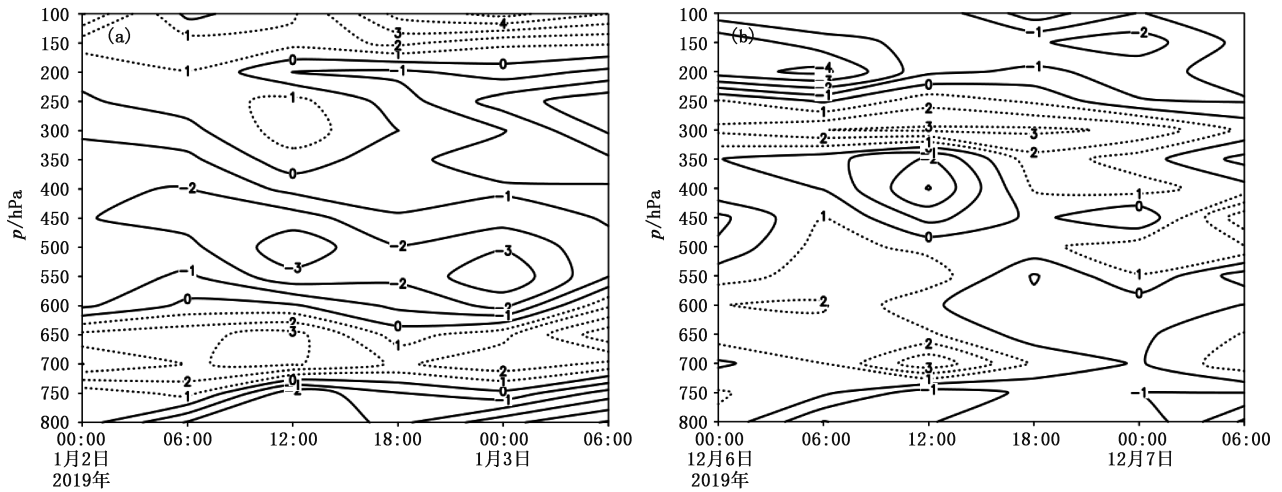


图 5 “1·3”过程(a)和“12·7”过程(b)散度(单位: $10^{-5} s^{-1}$ )沿机场跑道中心位置的高度-时间剖面

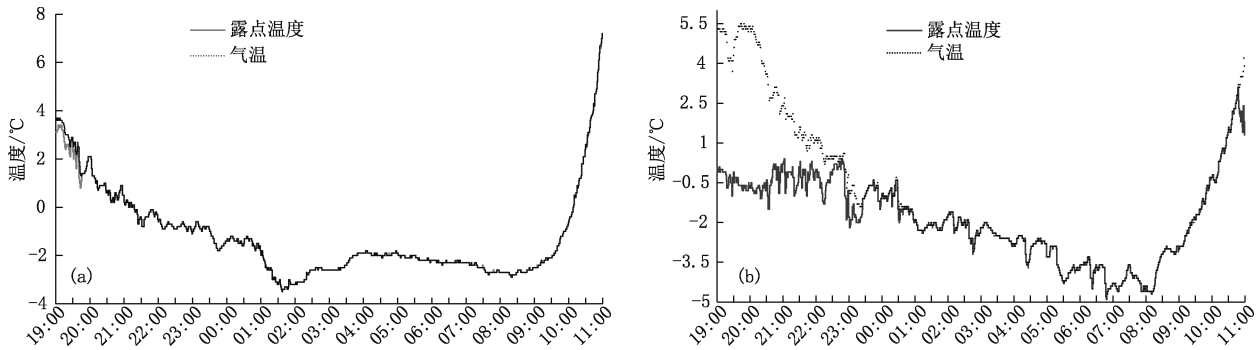


图 6 “1·3”过程 1 月 2 日 19:00 至 1 月 3 日 11:00(a)和“12·7”过程 12 月 6 日 19:00 至 12 月 7 日 11:00(b)气温和露点温度变化

开始消散,后  $\Delta T$  逐渐增大,上午 11:00 已增大至  $2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度降至 82%。从表 1 可知,“1·3”过程夜间降温幅度  $11.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,夜间最低气温  $-3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,出现在 01:38,此时正是雾形成的时刻,而“12·7”过程降温  $15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最低气温  $-4.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,也说明“12·7”过程空气中水汽含量更少,需要更低的温度促使空气达到饱和。

水汽通量可表示水汽的来源和输送方向,水汽通量散度体现了水汽的聚散特征。图 7 为两次雾过程初期水汽通量和水汽通量散度的合成图,“1·3”过程中昭通地区东南部有明显的水汽输送,机场位置为水汽通量散度的负值区,为大雾过程提供了一定的水汽补充。“12·7”过程则没有明显的水汽输送和辐合。因此,与“1·3”过程相比,“12·7”过程温度露点差大,水汽条件较差,致使“12·7”过程形成晚,持续时间短。

### 3.3 热力条件

稳定的大气层结能抑制空气的对流活动,是雾形成和维持的重要条件,逆温层的稳定结构使水汽在逆温层下积聚<sup>[4]</sup>。从图 8 温度的垂直变化可以看出,“1·3”过程近地层有  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (100 m 温度与 2 m 温度之差)的逆温层形成,在辐射雾过程中,逆温层稳定存在;“12·7”过程有  $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  的逆温结构出现。

### 4 “12·7”过程爆发性发展的原因分析

对“12·7”过程各物理量的分析表明,除低层有逆温外,其他物理量并未表现出利于雾发展的明显特征,雾爆发性发展的原因尚未阐明。许多研究均表明辐射雾发展增强基本都在夜间或凌晨,地面长波辐射导致的辐射降温对雾发生发展有重要作用<sup>[12-13]</sup>。在“12·7”雾形成前,由于夜间辐射降温,机场有轻雾出现,能见度稳定在 6 km 以上。自动气

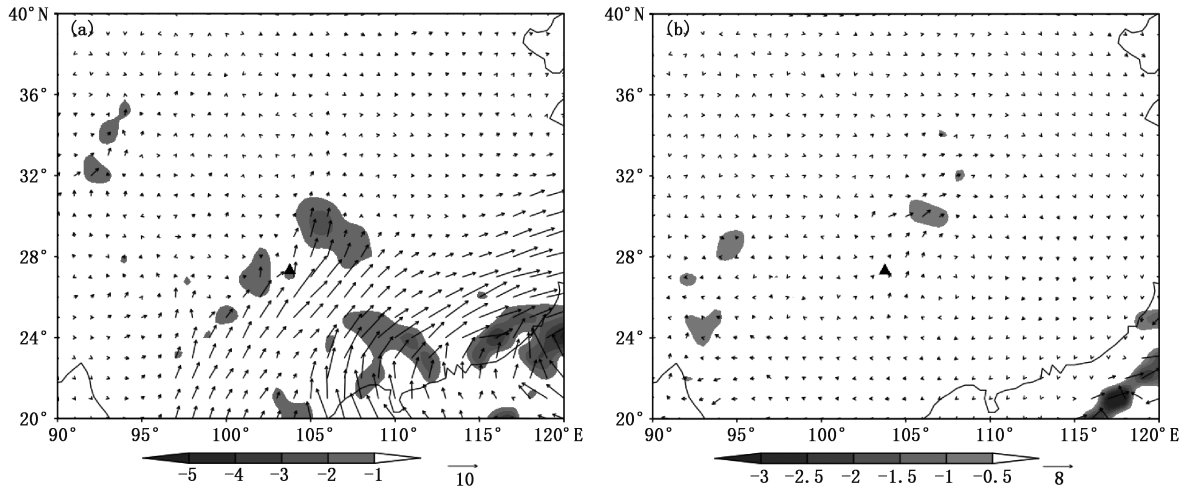


图7 2019年1月3日02:00(a)和12月7日08:00(b)750 hPa水汽通量矢量(矢量箭头,单位: $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ )和水汽通量散度(阴影区,单位: $10^{-7}\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$ )

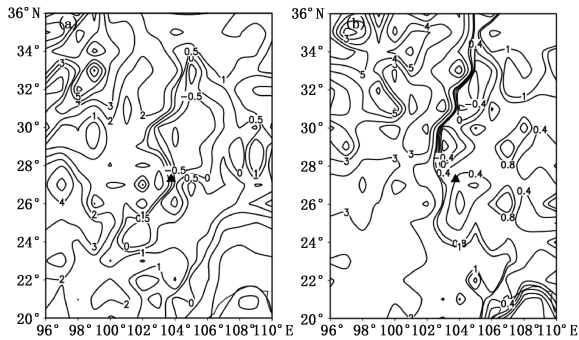


图8 2019年1月3日08:00(a)和12月7日08:00(b)100 m与2 m高度温度差(单位: $^{\circ}\text{C}$ )

象观测系统显示机场相对湿度达100%，但日出(07:41)前后能见度并未下降，日出1 h后能见度急转直下，爆发性发展成雾，造成预报员对当日雾的漏报。雾爆发性发展的原因有很多，在一定条件下，湍流混合作用使逆温层出现的分层结构<sup>[14]</sup>，副冷锋前弱冷空气入侵导致温度急剧下降<sup>[15]</sup>，风向转变带来的较冷气流<sup>[16-17]</sup>等都可以使雾爆发性增强。日出后爆发增强的辐射雾，太阳辐射加强后地表蒸发作用加剧是一个重要原因<sup>[12,16,18]</sup>。

为探索“12·7”过程爆发性发展的原因，对比分析了机场、鲁甸站和昭通站观测数据。12月7日鲁甸站有雾，07:37—11:12间器测能见度低于1 km，由于鲁甸站位于昭通机场西南面，地势平坦，无山体阻挡，且自06:50起机场风向一直以西南风为主，考虑“12·7”过程爆发性发展一定程度上受鲁甸雾层向

北平流的影响。08:00实况观测时可见机场西南方向被雾覆盖，分析机场跑道中间观测站和南端观测站能见度变化也发现雾层有从南向北扩散的特征，08:44南端观测站能见度900 m，此时中间观测站为6 km，08:59才降至700 m。距机场仅4.5 km的昭通站虽夜间至上午9:00前相对湿度大于98%，但能见度始终大于5 km，未出现雾。因此，对比了机场和昭通站的温度(图9a)和风速(图9b)变化。

07:10天亮后机场气温上升，07:32—08:12气温明显下降，由 $-3.6^{\circ}\text{C}$ 下降至 $-4.7^{\circ}\text{C}$ ，此时段温度下降受07:47—07:53地面风向由偏南风转向东北风引起的弱冷平流影响。降温幅度与凝结含水量之间有明显的相关关系，降温幅度越大，产生的凝结含水量越多，对雾中含水量的贡献越大<sup>[12]</sup>，但由于近地面风速基本 $<1\text{ m/s}$ ，多为静风，能见度未下降。08:13—08:43，随着气温升高，地面霜融化，蒸发作用使低层水汽含量进一步增大。08:15—09:18风速明显增大(1.2~2.2 m/s)，风向稳定在 $190^{\circ}\sim 220^{\circ}$ 之间，西南风有利于西南面的雾层向北平流，增大的风速有利于上下层空气混合，进一步促进雾发展，此时正是能见度明显下降的时段。08:44能见度下降至900 m，由轻雾转变成雾，09:00后气温稳步上升，10:00上升至 $-0.3^{\circ}\text{C}$ ，1 h内上升 $2.8^{\circ}\text{C}$ ，雾快速消散。昭通站气温在日出后均呈上升趋势，不利于空气冷却到过饱和状态。机场基准观测站和中部观测站在能见度骤降前风速均明显增大，昭通

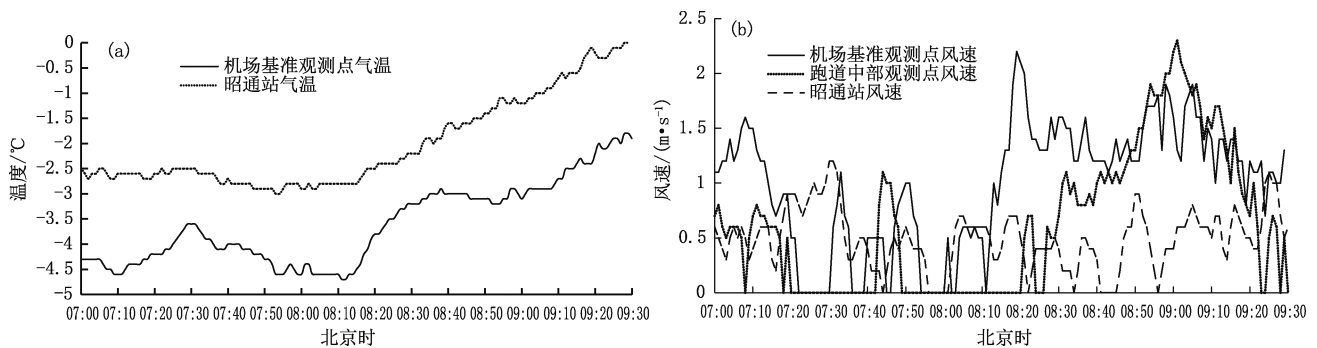


图9 2019年12月7日07:00—09:30机场与昭通站温度(a)和风速(b)变化

站期间风向也以西南风为主,但风速基本小于 $1\text{ m/s}$ ,且多个时刻为静风,不利于雾发展。

“1·3”过程是否存在和“12·7”过程相似的温度和风速变化特征? 1月3日在昭通机场雾形成的前40 min左右南端观测站风速由 $0.5\sim 1.1\text{ m/s}$ 增大到 $1.2\sim 2.6\text{ m/s}$ ,中间观测站由 $0\sim 0.9\text{ m/s}$ 增大到 $1.0\sim 2.9\text{ m/s}$ ,北端观测站从 $0.6\sim 1.2\text{ m/s}$ 增大到 $1.0\sim 2.6\text{ m/s}$ ;南端观测站和北端观测站在能见度低于 $1\text{ km}$ 前分别出现了 $2.2\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 和 $1\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 的降温率。因此,在两次雾形成前机场均出现了气温下降和风速增大。

## 5 结论

由于中小机场气象探测设备有限,能获取的观测资料较少,无法从微物理方面对两次雾成因进行深入分析。通过分析2019年1月3日和12月7日昭通机场两次雾过程中天气形势和物理量特征,并对12月7日雾爆发性发展的原因进行探索,结论如下:

(1)两次雾的发生具有在晴夜、微风、辐射降温和逆温层的背景条件,属于辐射雾。两次雾都发生在雨雪天气转晴,地面弱高压控制,无冷空气活动的有利天气形势下。在相似的背景条件下,两次雾形成的物理过程却不同。

(2)两次雾的动力条件和水汽条件有明显差异。“1·3”过程近地面湿度大,有水汽辐合,同时适宜的低层风速和垂直运动促进上下层空气混合,有利于雾的形成和发展;“12·7”过程局地水汽含量较少,是造成其形成晚、持续时间短的主要原因,同时近地面风速和垂直运动近乎为0,不利于辐射雾发展,在爆发性发展前机场仅出现了轻雾。

(3)“12·7”过程爆发性发展主要是由于日出后鲁甸地区雾向机场方向扩散,机场区域由于风向转北的冷平流作用和地表霜融化的增湿作用,维持着低温、高湿的环境条件,加之适宜风速的混合,最终造成此次雾的爆发性发展。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 何晖, 郭学良, 刘建忠, 等. 北京一次大雾天气边界层结构特征及生消机理观测与数值模拟研究[J]. 大气科学, 2009, 33(6): 1174-1186.
- [3] 贾思雨, 包云轩, 袁成松, 等. 不同辐射参数化方案对南京地区大雾过程数值模拟的影响[J]. 气象科技, 2018, 46(5): 932-942.
- [4] 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.
- [5] 马明明, 潘婧茹, 张雪蓉, 等. 江苏一次冬季强浓雾天气持续和消散诊断分析[J]. 气象科学, 2016, 36(3): 396-402.
- [6] 周建平, 张蕾, 王传辉, 等. 大雾临近预报中高密度能见度数据应用[J]. 气象科技, 2019, 47(5): 866-871.
- [7] 刘开宇. 贵阳机场辐射雾 MOS 预报系统的设计与实现[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2014, 36(S1): 112-116.
- [8] 段玮, 段旭, 邢冬, 等. 影响云南地区适航条件的视程障碍天气气候特征[J]. 气象科技, 2019, 47(2): 329-336.
- [9] 郭荣芬, 鲁亚斌, 海云莎. 云南辐射雾的气候分布特征及天气成因[J]. 气象科技, 2008, 36(3): 281-288.
- [10] 葛良玉, 江燕如, 梁汉明, 等. 1996年岁末沪宁线持续五天大雾的原因探讨[J]. 气象科学, 1998, 18(2): 181-188.
- [11] 张恒德, 饶晓琴, 乔林. 一次华东地区大范围持续雾过程的诊断分析[J]. 高原气象, 2011, 30(5): 1255-1260.
- [12] 陆春松, 牛生杰, 杨军, 等. 南京冬季一次雾过程宏观结构的突变特征及成因分析[J]. 大气科学, 2010, 34(4): 681-690.
- [13] 梁绵, 杨军, 王巍巍, 等. 雨后两次强浓雾的爆发性增强过程[J]. 气象科学, 2019, 39(2): 153-163.
- [14] 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.
- [15] 吴彬贵,马翠平,蔡子颖,等.辐射雾局地爆发性增强原因探讨[J].高原气象,2014,33(5):1393-1402.
- [16] 焦圣明,朱承瑛,朱毓颖,等.江苏地区一次罕见持续性浓雾过程的成因分析[J].气象学报,2016,74(2):200-212.
- [17] 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):1111-1118.
- [18] 濮梅娟,尚倩,李子华,等.一次浓雾宏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.

## Comparative Analysis of Two Radiation Fog Processes in Zhaotong Airport

ZHU Hong<sup>1</sup> SHEN Qian<sup>2</sup> HE Juan<sup>2</sup>

(1 Zhaotong Airport, Yunnan Airport Group Co., Ltd., Zhaotong 657000;

2 Yunnan Zhaotong Meteorological Bureau, Zhaotong 657000)

**Abstract:** Based on the NCEP/NCAR reanalysis data and the AWOS data, the weather situation, water vapour conditions and boundary layer structure of two radiation fog processes at Zhaotong Airport on January 3 and December 7, 2019, are compared and analyzed. The commonness and differences of the formation and maintenance conditions of the two radiation fogs are discussed. The results show that: (1) The two fog events both occurred after the rain and snow weather turned clear, and the airport was controlled by the weak pressure field behind the high-pressure bottom. However, the water vapour content and dynamic conditions of the “1.3” process were significantly better than those of the “12.7” process, and the fog concentration and duration were both greater than those of the “12.7” process. (2) The process of “1.3” was a typical radiation fog, which formed in the early morning when the weather was clear, the breeze was light, and the radiation temperature dropped most strongly. In the process of the fog, if the water vapour was abundant and the dynamic conditions were suitable, it would be conducive to the formation and development of the fog. (3) The radiation fog in the process of 12.7 had the characteristics of local explosive development. Before the burst of the fog, only a light fog formed at the airport due to poor water vapour and dynamic conditions. After sunrise, due to the fog layer in the southwest direction moved northward, the airport’s low temperature and high humidity environmental conditions were conducive to the maintenance of the fog. Moreover, the near-ground wind speed was conducive to the mixing of the fog layer, which led to the burst development of the fog in the airport area.

**Keywords:** radiation fog; physical characteristics; diagnostic analysis; burst development