

双流机场低能见度监测及预警系统的研究设计

郭忠立¹, 李 伟^{2,3}, 郭艳芬³

¹民航西南地区空中交通管理局, 四川 成都

²四川航空股份有限公司工程技术分公司, 四川 成都

³成都信息工程大学计算机学院, 四川 成都

Email: 444181895@qq.com

收稿日期: 2021年7月25日; 录用日期: 2021年8月19日; 发布日期: 2021年8月26日

摘 要

随着民航运输业的持续快速发展, 航班量日益增多, 而秋冬季的大雾天气日渐成为影响飞机航班正常的主要因素, 因此对机场大雾天气的监测预报具有非常大的应用价值。航空气象部门一般靠人工资料分析、人工监测, 持续跟踪来预报大雾以及其发展趋势, 预报员需要分析多种观测资料来判断是否会起雾, 这对预报员形成较大的预报压力。关于机场低能见度监测及预警系统的开发很有必要。系统利用数值预报资料建立低能见度预警模型, 首先对出雾形势进行分析, 在判断为易出雾的形势后, 再结合气象要素特征(湿度、风向、风速、温度变化和前期降水等)来综合判断出雾概率。同时, 基于葵花8号新一代静止气象卫星的高时空分辨率多通道数据, 使用3.9 μm 伪比辐射率法和3.9 μm 与11.2 μm 通道亮温差法进行雾区的监测和不同级别能见度的识别。

关键词

能见度, 气象要素, 双流机场, 监测预警

Research and Design of Low Visibility Monitoring and Warning System in Shuangliu Airport

Zhongli Guo¹, Wei Li^{2,3}, Yanfen Guo³

¹Southwest Regional Air Traffic Management Bureau CAAC, Chengdu Sichuan

²Engineering Technology Branch of Sichuan Airlines Technics, Chengdu Sichuan

³Department of Computer Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Email: 444181895@qq.com

Received: Jul. 25th, 2021; accepted: Aug. 19th, 2021; published: Aug. 26th, 2021

Abstract

With the continuous and rapid development of the civil aviation transportation industry, the number of flights has increased day by day, and the foggy weather in autumn and winter has gradually become the main factor affecting the normal flight of aircraft. Therefore, the monitoring and forecasting of foggy weather in airports has great application value. Aeronautical meteorological departments generally rely on manual data analysis, manual monitoring, and continuous tracking to forecast heavy fog and its development trend. Forecasters need to analyze a variety of observation data to determine whether it will fog, which puts a greater forecast pressure on forecasters. It is necessary to develop the monitoring and warning system of low visibility in airport. The system uses the numerical forecast data to establish the low visibility warning model. The fog situation is analyzed at first, and then the fog probability is comprehensively judged by combining the meteorological elements, such as humidity, wind direction, wind speed, temperature change and precipitation in the early stage. At the same time, based on the high-temporal-spatial resolution multi-channel data of the Himawari-8 geostationary meteorological satellite, the 3.9 μm pseudo-emissivity method and the 3.9 μm and 11.2 μm channel brightness temperature difference method are used to monitor the fog area and identify different levels of visibility.

Keywords

Visibility, Meteorological Factors, Shuangliu Airport, Monitoring and Forecasting

Copyright © 2021 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

2016 年 12 月份双流机场曾连续五天四夜发生大雾天气, 当近地面水汽达到饱和状态时, 水汽凝结成冰晶或小水滴, 导致能见度和跑道视程急剧下降, 影响机场运行标准甚至导致机场关闭。大面积的航班延误也造成了非常不好的社会影响。能否提前预报低能见度天气和监视低能见度天气发生的区域及生消时间, 成为航空气象保障工作的重点[1] [2]。

雾的形成条件与地面温度、露点温度、相对湿度、风速风向和太阳辐射等气象要素之间存在非线性关系, 形成时间特别快, 轻雾在数分钟内就能变成浓雾。此外, 四川盆地复杂的地形地貌导致局部区域容易发生团雾[3]; 对局部区域团雾的预报是个国际性难题, 这也为相关部门基于能见度实况进行大雾预警和机场封闭管控带来了困难。因为不同地区, 雾的特点和形成机理也不同, 雾也不同于雷雨大风这些强天气现象, 出现大雾时的天气要素不明显, 预报员需要分析多种观测资料来判断是否会起雾, 这对预报员形成较大的预报压力。如果通过研究成都机场大雾的预报机理和影响因子, 使用大量历史资料统计发生大雾时的天气要素特征, 并建立大雾的数值预报模型来进行发生大雾天气的概率预报, 这对减轻预报员冬季低能见度保障的压力以及对管制运行协调都有着非常大的帮助。

2. 浓雾与典型气象要素的关系及其相关物理量指标

2.1. 大雾天气及其影响因子

2.1.1. 大雾天气的形成原因

大雾是一种由悬浮近地面空气中微小水滴或冰晶组成的天气现象[4]。当空气中的湿度达到 100%时,

会引起气温下降，近地面层空气中水汽凝结成水滴，就会形成雾。大雾形成时，近地面的能见度比较低。会影响目视飞行，对飞行安全构成严重威胁。气象学上，根据能见度，定义了雾的等级，如表 1 所示。

本文统计了 2013~2019 年间双流机场的跑到能见度(RVR)，发现 RVR 有较明显的季节变化特征：冬季的 RVR 最低，春夏季较高，这与季节温度、湿度的变化息息相关。在四川盆地，春夏季温度高，且近地面湿度低，相对应的 RVR 就较好；而秋冬季随着温度降低，水汽易饱和，随之而来的近地面湿度就较大，RVR 随之降低。图 1 所示为双流机场 RVR 年平均变化。

Table 1. Level of fog
表 1. 雾的等级

等级	能见度
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	$V < 50\text{ m}$

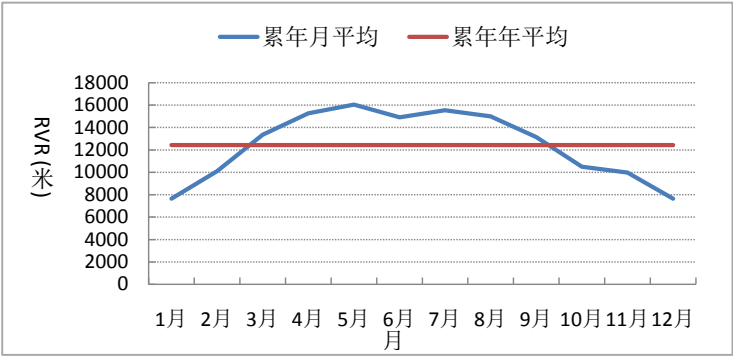


Figure 1. Annual average change of RVR at Shuangliu Airport
图 1. 双流机场 RVR 年平均变化

2.1.2. 大雾天气形势分析

传统的大雾天气预报方式是气象预报员根据大雾天气形势图的纹理特征来分析其高、低压中心，等压线形状、走向及密集度等，结合温度、湿度、风速风向进行预报。雾的形成是在低层大气比较稳定时，尤其是在晴空、近地层饱含水汽的凌晨至清晨时段；在大雾出现的前一天，上空纬度是平直的西风环流。在四川盆地内，大雾天气形成的主要特征是：1) 近地面至 925 hPa 之间，大气层呈中性状态；2) 在 925 hPa~500 hPa 之间，常出现逆温层，大气层状态稳定；3) 自地面至 400 hPa 之间，大气相对湿度大，接近准饱和状态。

分析时大雾天气形势时，综合提取 400 hPa、500 hPa、700 hPa、850 hPa 和 925 hPa 层次的位势高度、相对湿度、温度、露点、风向风速等高空数据，提取天气形势图的纹理特征，是辅助判断出雾的依据之一。

2.1.3. 大雾天气与典型气象要素的关系

因为不同地区，雾的特点和形成机理也不同，雾也不同于雷雨大风这些强天气现象，出现大雾时的天气要素不明显，预报员需要分析多种观测资料来判断是否会起雾。通过对双流机场 2013 年到 2019 年发生大雾时的自动观测资料进行统计分析发现，双流机场以辐射雾为主，而相对湿度、温度、风速与雾的形成有较好的相关性。

1) 雾与相对湿度的关系

统计双流机场大雾出现时各次雾过程的相对湿度(如图2所示),发现总体上相对湿度越大雾发生的频率越高、能见度越低,当相对湿度在90%~98%之间浓雾发生频率为88.3%,其中相对湿度在90%~95%之间时发生大雾的频率最大为74.5%,相对湿度为95%~98%是出现雾的概率仅为13.8%。

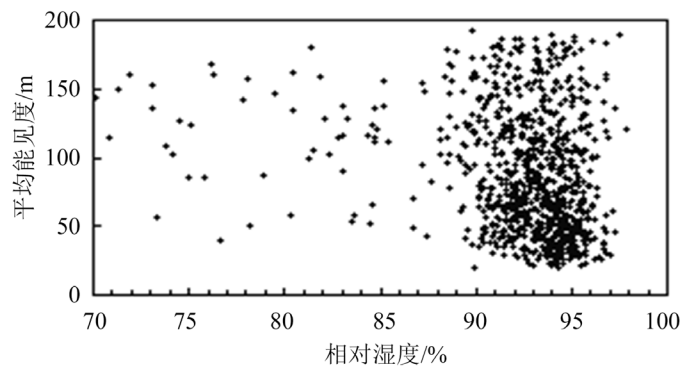


Figure 2. Scatter plot of visibility and relative humidity
图 2. 能见度与相对湿度散点图

2) 雾与温度的关系

双流机场浓雾发生概率随温度呈双峰型波浪变化(如图3所示),温度在0℃~5℃时出现浓雾的频率最高为30%,温度在10℃~15℃为次高发温度,浓雾发生频率为25%,整个路段有80.6%的大雾出现时温度在0℃~20℃之间,温度在-7℃~32℃范围内整个路段都有雾发生,而温度过高或过低都不利于浓雾的形成。当温度过低时大气中的水汽含量太少不易成雾,或者水汽可能直接凝结成小冰粒而不易形成雾。过高的温度会导致时大气的饱和水汽压升高,降温不易达到饱和也不易形成雾。前面的分析表明冬季和春季的大雾日数较多,两个温度段,冬季0℃~5℃浓雾频率大、春秋10℃~15℃浓雾频率大。

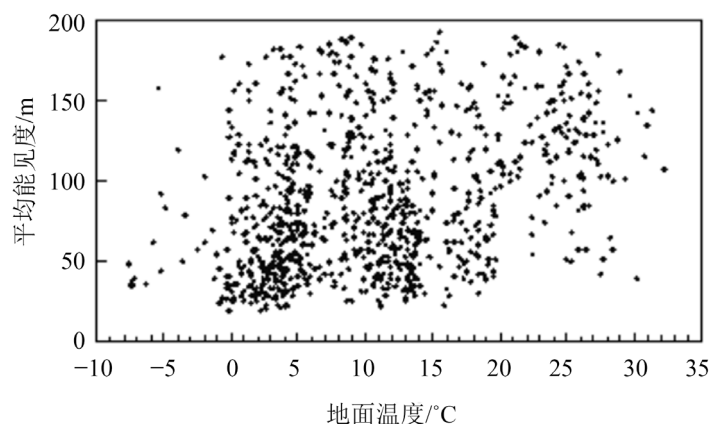


Figure 3. Scatter plot of visibility and ground temperature
图 3. 能见度与地面温度散点图

3) 雾与风场的关系

有雾时90%以上的风速在 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,有超过一半的浓雾出现时风速在 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下(如图4所示),这与辐射雾形成时大都是小风或静风的情况相对应。而当风速小于 0.3 m/s 时没有出现一次雾,一方面说明无风情况下不利于雾的形成;另一方面表明自动站的风探测仪器对小于 0.3 m/s 的风速不敏感。

通过对双流机场 2013 至 2019 年分钟级地面观测数据统计了单站地面气象要素指标，如表 2 所示。进行深入分析后得到雾预报的相关指标。

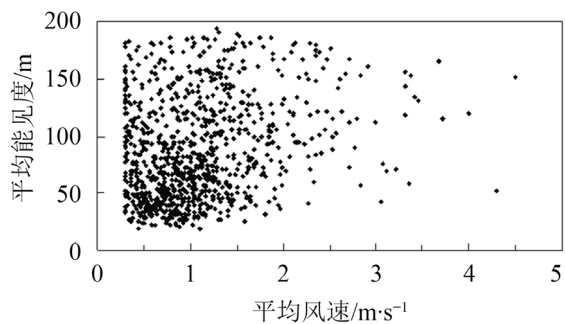


Figure 4. Scatter plot of visibility and average wind speed
图 4. 能见度与平均风速散点图

Table 2. Single-station ground meteorological element index
表 2. 单站地面气象要素指标

序号	地面要素	统计指标
1	风	非静风，一般 ≥ 0.4 m/s (97%)，其中 0.4~1.8 m/s (91%)
2	相对湿度	一般在 92%~98%，团雾可低至 88%
3	气温	成雾前气温下降(95%)，个别由于暖平流或潜热释放气温略升高
4	水平能见度	浓雾(能见度降至 200 米以下)形成前半小时，降幅达 500 米的几率占 85%，降幅达 1000 米的几率占 68%；形成前 10 分钟，能见度降幅达 500 米的几率占 50%
5	温度露点差	一般情况下：0.9℃~1.2℃时，能见度 < 1000 m；0.8℃~1.0℃时，能见度 < 500 m；<0.8℃时，能见度 < 100 m

2.2. 大雾概率预报方法

概率预报的意义在于，只要某种天气条件下，比较序列与参考序列越接近程度，则发生该天气的可能性就越大。两个序列接近程度的度量存在两方面情况，一是距离的接近，二是形态的接近。如图 5 中，曲线 A 代表参考序列，曲线 B 和 C 是两组比较序列。考察比较序列与参考序列的接近度，从不同的视角会得出不同的结论，如从距离来判断，显然曲线 B 与参考序列 A 接近，而如从形态来判断，则曲线 C 与 A 接近，因为 C 仅是 A 向下平移的结果，而曲线 B 与 A 则成反位相走向。显见，两种判据都不能完全反映出序列间的接近程度，实际应用过程中根据距离和形态的重要性，分别赋予适当的权重，构造综合的接近度。

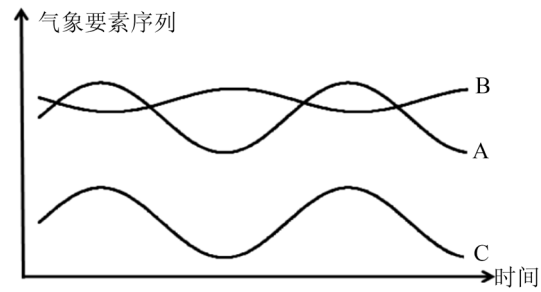


Figure 5. Diagram of relationships between sequences
图 5. 序列间的关系图

接近度的概念与距离的概念相反,接近度的值介于[0, 1]之间,接近度趋向于 1,则表示两个模糊集接近;而接近度趋向于 0,表明两个模糊集相离。本文用基于“接近度”的理念构建浓雾概率预报:选用地面气象资料,包括风(风向风速)气压,相对湿度、温度露点。根据以往研究结果,确定了与雾相关性较大气象要素指标,相对湿度(rh、rh1000、rh950、rh925)、以及地面和低层的风向风速(winds、windd、ws1000、wd1000)、反应逆温情况的 950 和 925 与地面温差(t9501000、t950-gr、t925-gr)。

3. 基于葵花 8 号卫星和地面气象要素的大雾识别监测

大雾和低能见度天气的常规监测方法是通过布设站点进行人工观测或能见度测量仪器自动观测,对于大范围的雾区监测,布设站点的方法不仅耗费大量的人力物力,而且观测站点的密度也难以满足监测的需要。气象卫星观测资料具有覆盖范围广、时空分辨率高的特点,因而卫星在监测雾的生消动态方面具有独特的优势。

3.1. 气象卫星葵花 8 号数据

气象卫星观测资料具有覆盖范围广、时空分辨率高的特点,因此在监测雾的生、消动态方面具有独特的优势。日本新一代气象卫星葵花 8 号[5]载有先进的可见光和红外扫描辐射计 AHI (Advanced Himawari Imager),拍摄的彩色图像对特定目标的观测达到每 2.5 分钟一次,无论在波段、分辨率还是传感器,都比同期其他卫星云图质量高。表 3 为葵花 8 号、风云 2 号和多功能运输卫星 MTSAT 的参数对比。

Table 3. Comparison of parameters of Sunflower 8, Fengyun 2 and MTSAT

表 3. 葵花 8 号、风云 2 号和 MTSAT 的参数对比

	葵花 8 号	风云 2 号	MTSAT-2
波段数	共 16 波段 VIS 3 + NIR 3 + IR 10	共 5 个波段 VIS 1 + IR 4	共 5 个波段 VIS 1 + IR 4
星下点空间分辨率	0.5 km, 1 km, 2 km	1 km	4 km
观测间隔	每 10 分钟一个全圆盘	每 30 分钟一个全圆盘	每 30 分钟一个全圆盘

葵花 8 号卫星数据以二进制存储,数据大小 1000×750 ,可将各通道云图合成为 RGB 图像,分辨率为 0.1 km,字节长度为 1,数据大小为 $Nlon \times Nlat \times 3$ 。图 6 为西南空管局气象中心下载的葵花 8 号卫星云图。

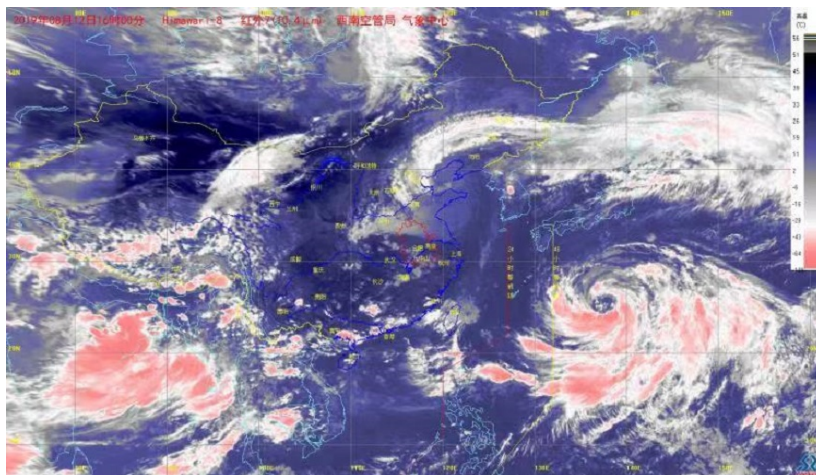


Figure 6. Satellite cloud image of Sunflower 8

图 6. 葵花 8 号卫星云图

3.2. 地面气象观测站数据

大雾天气的预测需要了解雾的天气形势、气象要素等信息,这对大雾的准确预报听重要的参考依据。根据大雾形成的条件,地面气象观测站收集的 10 分钟分辨率的相对湿度、温度、风速风向、降水量、能见度等信息与大雾的生、消过程密不可分,是辅助判断出雾的重要指标。通过对双流机场 2013~2019 年的地面观测资料统计,得到浓雾发生时刻各要素或物理量的平均值,并得到大雾预警的相关指标。图 7 所示为部分统计图,其中 TDZ_RVR_1A 是机场飞机接地地带的 1 分钟 RVR 值,TDZ_WIND_F2 是飞机接地地带的 2 分钟平均风数据,TDZ_HUMID 是飞机接地地带的湿度数据,TEMP-TD 是飞机接地地带温度和露点的差值。

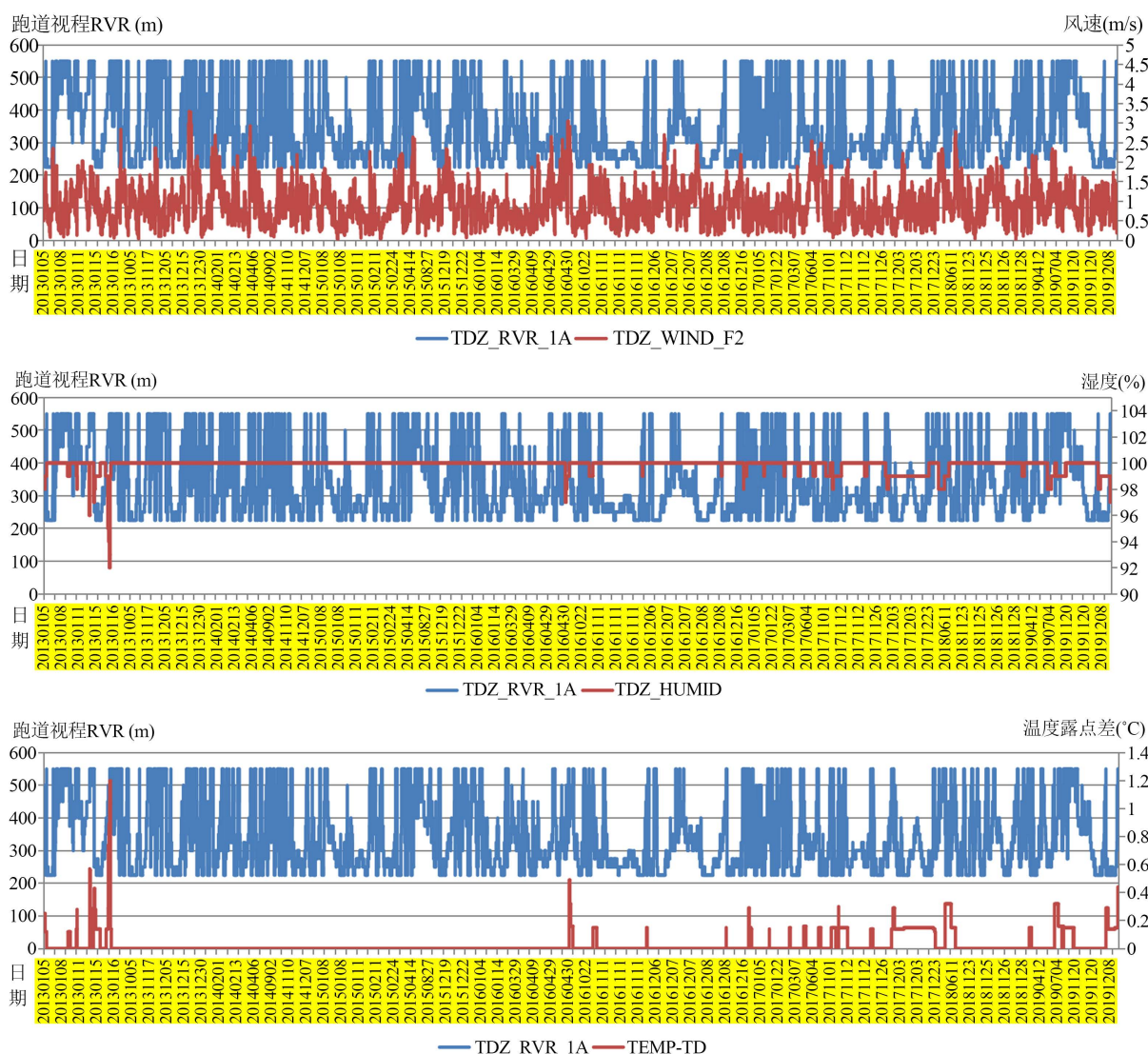


Figure 7. Statistical value of meteorological elements when fog occurs

图 7. 大雾发生时各气象要素统计值

3.3. 基于深度学习的大雾天气预警系统设计

本文利用深度学习模型,以浓雾天气形势图和地面气象要素作为数据集,利用卷积神经网络对大雾

天气形势图进行特征分类, 构建大雾识别模型, 并根据能见度等级进行预警提示。基于深度学习的大雾天气预警系统, 包含数据采集与标注、数据预处理、大雾识别训练、大雾估算等模块。数据采集与标注模块的功能是读取气象卫星数据和地面观测点数据, 同时按测试集和训练集将数据进行分类标记。数据预处理模块是对数据进行清洗, 去噪、做归一化处理, 并对数据进行增强处理, 以减少异常数据, 提高网络模型预测能力。大雾特征提取模块是根据大雾天气的卫星影像特性, 通过多尺度的特征融合策略获取影像的高层语义信息与低层空间信息, 得到雾型特征提取。大雾预测模型是采用级联卷积神经网络, 对大雾特征进行学习和训练, 并将训练好的模型进行预测。

4. 实验结果及分析

4.1. 实验数据预处理

该实验使用葵花 8 号数据需要结合双流机场地面站自动观测的数据, 根据地面站的地理位置信息与葵花 8 号卫星数据进行位置匹配, 并提取该位置的卫星数据, 以能见度为标准, 建立天气形势图与大雾等级的数据集。预测目标能见度分为 3 类, 其中第 0 类表示能见度范围 0~1 km, 第 1 类表示能见度范围 1~10 km, 第 2 类表示能见度范围在 10 km 以上。另根据非正态分布的特征、温度特征、正态分布非温度特征和时间序列整合分别对数据进行归一化处理[6]。

4.2. 实验结果及分析

该实验以成都机场自动观测资料、数值预报资料为输入序列, 以低能见度发生概率为预报输出的大雾预报及雾区监测系统, 该系统可以通过实时输入天气形势图和自动观测设备探测到的地面观测要素数据, 输出未来 24 小时发生大雾的概率。如图 8 所示, 左图为大雾发生时的雾区监测, 右图为出雾概率预测。

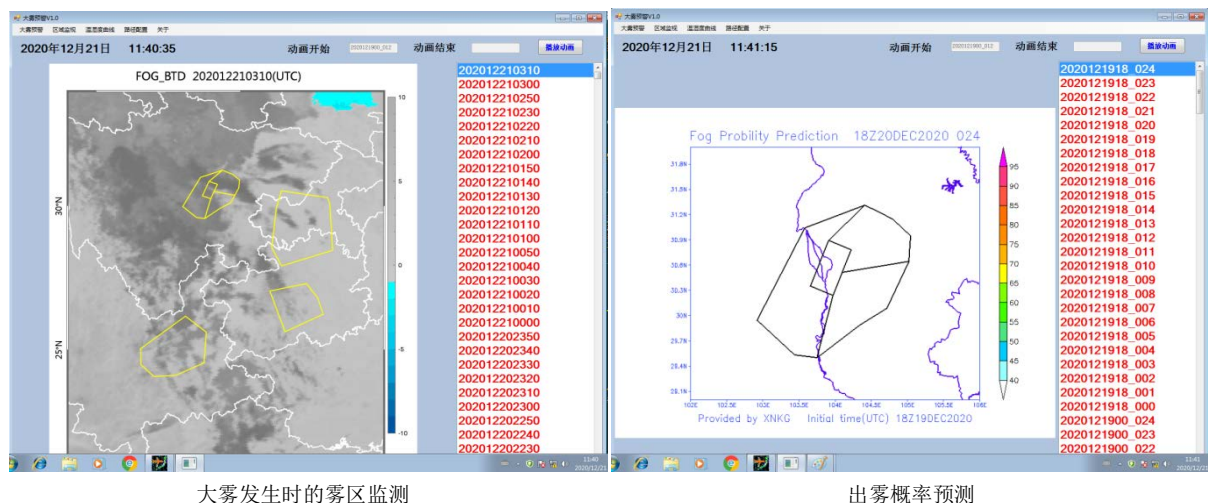


Figure 8. Low visibility monitoring and fogging probability prediction at Shuangliu Airport
图 8. 双流机场低能见度监测及出雾概率预测

通过多个个例的验证, 该系统准确度较高。将 2019 年 12 月 8 日探测资料接入系统, 可以得到 2019 年 12 月 9 日发生大雾的概率, 天府机场所在地出雾形势的概率达到 65%, 双流机场出雾形势概率超过 55%, 如图 9 所示。

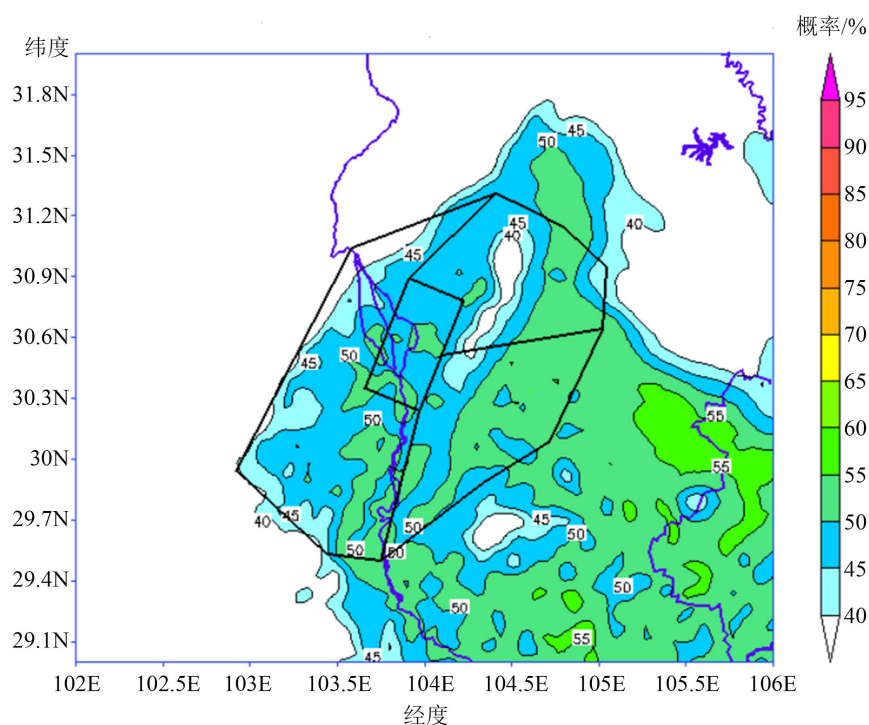


Figure 9. Probability of fogging at Tianfu Airport and Shuangliu Airport on December 8, 2019

图 9. 2019 年 12 月 8 日天府机场和双流机场的出雾概率图

经验证, 2019 年 12 月 9 日早上五点多双流机场开始起雾, 一直持续到九点左右。图 10 所示为双流机场跑道视程数据和自动站湿度数据。早上五点多, 自动站湿度数据开始上升到 95%, 之后达到 100%, 跑道视程开始出现波动, 随后下降到 500 米以下, 双流机场因大雾进入二类运行。该系统可以提前 24 小时预估出雾的概率, 对机场航班流量管理起到很大的帮助作用, 避免因低能见度天气造成大面积航班延误。

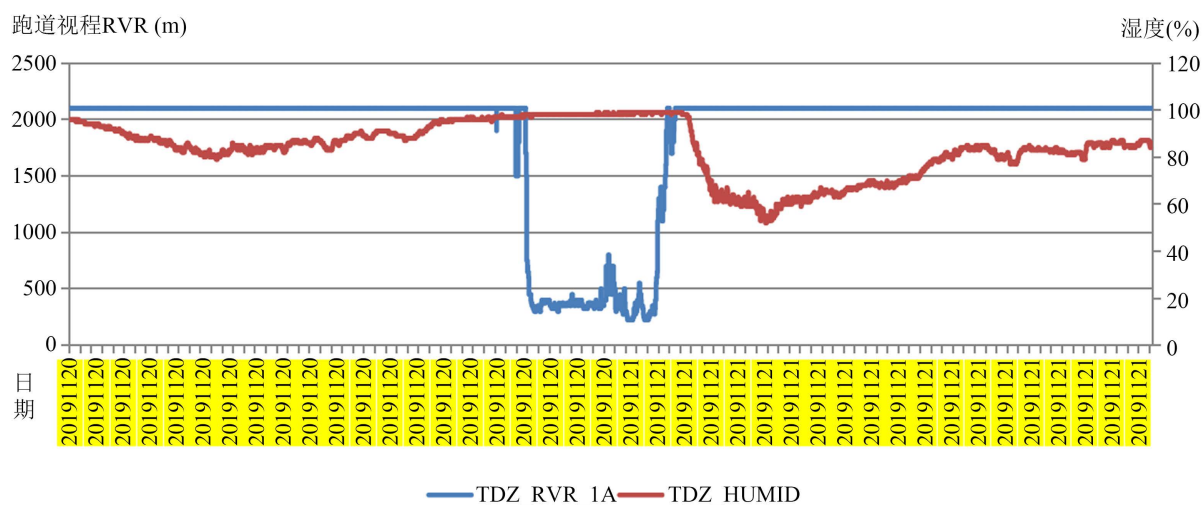


Figure 10. Runway visual range data and automatic station humidity data at Shuangliu Airport on December 9, 2019

图 10. 2019 年 12 月 9 日双流机场跑道视程数据和自动站湿度数据

5. 总结

本文利用实时数值预报资料来智能识别出是否起雾的天气形势, 利用双流机场自动观测资料、微波辐射计资料的观测要素数据来判断是否出雾的大雾预报模型, 此模型可以提前对大雾进行预警, 预报员收到预警后可以重点关注, 持续跟踪, 将详细结论通过电话、短信、视频、数据库系统等方式告知管制等相关用户, 这将极大提高的大雾天气时机场各部门的应对能力, 保证航班有序运行。

参考文献

- [1] 张序, 黄昕月, 兰梓洲, 等. 从极端天气事件演变规律看双流机场低能见度运行安全[J]. 成都信息工程大学学报, 2018, 33(4): 470-476.
- [2] 张序, 罗凤娥, 周川, 秦意, 俎振洲. 浓雾天气背景下昆明长水机场签派放行研究[J]. 航空科学技术, 2019(30): 50-55.
- [3] 陈玉蓉. 四川盆地低能见度天气的变化分析及其对机场运行的影响[D]: [硕士学位论文]. 天津: 中国民航大学, 2019.
- [4] Niu, S.J., Lu, C.S., Yu, H.Y., *et al.* (2010) Fog Research in China: An Overview. *Advances in Atmospheric Sciences*, **27**, 639-661.
- [5] 云燕. 日本向日葵-8 气象卫星[J]. 卫星应用, 2015(1): 75.
- [6] 孟凯, 曲晓黎, 赵娜, 等. 能见度气象监测数据质量检查方法初探[J]. 干旱气象, 2014, 32(5): 862-865.