

# 基于新一代葵花卫星资料的夜间雾识技术在贵阳机场的应用研究

唐 枫, 邓小光, 罗 娅

民航贵州空管分局, 贵州 贵阳

收稿日期: 2025年6月23日; 录用日期: 2025年8月5日; 发布日期: 2025年8月18日

## 摘 要

本研究利用葵花8/9号静止气象卫星2020~2024年高时空分辨率数据, 结合贵阳机场地面观测资料, 研究适用于山地机场的夜间雾卫星识别技术。通过量化3.9  $\mu\text{m}$ 与11.2  $\mu\text{m}$ 通道亮温差(BTD<sub>3.9-11.2</sub>)与能见度的相关性, 确定雾识别最佳阈值为 $-1.12^\circ\text{C}$ , 并融合低云剔除算法构建雾区检测模型, 准确率达94.2%。通过典型案例验证表明, 该技术可精准捕捉辐射雾生消过程, 为贵阳机场低能见度天气实时预警提供可靠技术支撑, 同时揭示云贵高原复杂地形下阈值本地化的必要性。

## 关键词

葵花卫星, 夜间雾识别, 亮温差法, ROC曲线

# Research on the Application of Nighttime Fog Identification Technology Based on New-Generation Himawari Satellite Data at Guiyang Airport

Feng Tang, Xiaoguang Deng, Ya Luo

Guizhou Air Traffic Management Branch, Civil Aviation Administration of China, Guiyang Guizhou

Received: Jun. 23<sup>rd</sup>, 2025; accepted: Aug. 5<sup>th</sup>, 2025; published: Aug. 18<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

This study utilizes high spatiotemporal resolution data from the Himawari-8/9 geostationary meteorological satellites (2020~2024) combined with ground observation data from Guiyang Airport

文章引用: 唐枫, 邓小光, 罗娅. 基于新一代葵花卫星资料的夜间雾识技术在贵阳机场的应用研究[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(8): 1158-1171. DOI: 10.12677/ag.2025.158108

to develop nighttime fog detection technology suitable for mountainous airports. By quantifying the correlation between brightness temperature difference (BTD<sub>3.9-11.2</sub>) of 3.9  $\mu\text{m}$  and 11.2  $\mu\text{m}$  channels and visibility, the optimal fog identification threshold was determined as  $-1.12^{\circ}\text{C}$ . The fog detection model, incorporating a low-cloud elimination algorithm, achieved an accuracy rate of 94.2%. Case validation demonstrates that this technology can precisely capture the formation and dissipation processes of radiation fog, providing reliable technical support for real-time low-visibility weather warnings at Guiyang Airport, while revealing the necessity of threshold localization under the complex terrain conditions of the Yunnan-Guizhou Plateau.

## Keywords

Himawari Satellite, Nighttime Fog Identification, Brightness Temperature Difference Method, ROC Curve

Copyright © 2025 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

贵阳龙洞堡国际机场(以下简称贵阳机场)地处贵州省会贵阳市东郊,机场标高 1138.9 m,是我国西部重要航空枢纽,机场周边地形条件复杂,常受低能见度天气影响。雾(能见度 < 1000 米的视程障碍现象)作为低能见度天气的核心致因,对民航安全正常运行带来较大影响。贵阳机场周边地面观测站点较少,空间覆盖有限,难以捕捉机场周边雾的生成与演变动态。而葵花系列卫星、风云系列等的新一代静止气象卫星通过高时空分辨率观测,突破了时空监测瓶颈,可敏感捕捉雾相变过程中的辐射特性差异,实现夜间无光照条件下的雾区精准识别。国内外学者对于卫星遥感雾监测技术进行了系统性研究,在静止气象卫星夜间雾识别、机器学习算法融合及多源数据协同监测方面成果显著。在静止卫星夜间雾识别技术方面,王宏斌等[1]基于葵花 8 号卫星数据,利用 3.9  $\mu\text{m}$  与 11.2  $\mu\text{m}$  通道亮温差和 3.9  $\mu\text{m}$  伪比辐射率法实现了中国地区夜间雾的识别。郝姝馨等[2] [3]通过 Himawari-8 红外数据提出多指数概率分布算法,定义海雾-水体分离指数,实现黄渤海夜间海雾动态跟踪。王宏斌等[4]进一步验证重污染条件下雾识别时,3.9  $\mu\text{m}$  伪比辐射率法 KSS 评分达 0.75。孙佳庆等[5]结合 CALIPSO 激光雷达验证了静止卫星对大雾垂向结构的探测能力。在机器学习与多源数据融合领域,YAO Z 等[6]融合 FY-4A 卫星与地面站数据,发现随机森林(RF)模型在雾识别中表现最优。张毅等[7]基于 FY-4A/AGRI 数据,采用最小二乘动态拟合实现南海海雾监测。付玉琴等[8]利用 MODIS 数据训练全卷积神经网络,北冰洋海雾检出率达 79.91%。胡争胜等[9]提出 GridDehazeNet 与 Real-ESRGAN 复合网络,显著提升雾区卫星影像清晰度。彭波等[10]结合 FY4A 与地面数据构建 LightGBM 等模型,雾分类准确率最高达 0.927。在雾的时空特征与算法优化方面,马慧云等[11]针对 Himawari-8 开发时序影像合成法,冬季陆地雾检测正确率 96.6%。胡晨悦等[12] [13]联合 CALIOP 激光雷达与静止卫星,发现福建沿海云下雾多发,其 FY-4A 监测算法准确率 83.5%。叶子恒等[14]分析京津冀雾演变过程,揭示平流雾受水汽输送调控,辐射雾分布受地形与热岛效应影响。高松影等[15]指出黄渤海海雾形成需满足气-海温差阈值。史文倩等[16]总结葵花 8 号卫星云图在厦门机场平流雾预报中的应用价值。尚华哲等[17]开发基于高程调整阈值的雾霾识别算法,误差率仅 4.17%。之前的研究主要集中于沿海地区,本文则立足与云贵高原山地机场,研究利用卫星的大范围覆盖能力对夜间雾识别的技术方法,为低能见度天气的实时预警提供技术参考。

2. 资料和方法

2.1. 卫星资料

葵花 8 号/9 号(Himawari-8/Himawari-9, 以下简称葵花卫星)静止气象卫星是由日本气象厅主导研发的新一代地球静止轨道气象卫星, 也是 Himawari 系列的第三代卫星。葵花 8 号于 2014 年 10 月 7 日发射, 2015 年 7 月正式投入业务运行, 葵花 9 号于 2016 年 11 月 2 日发射, 两颗卫星功能一致互为备份, 自 2022 年 12 月 14 日起, 葵花 9 号卫星作为主用。葵花 8 号/9 号卫星均定点于 140.7°E 赤道上空约 36,000 公里处, 可覆盖地球表面约三分之一区域, 适用于东亚及西太平洋地区的连续气象监测。葵花卫星的时空分辨率高, 全盘扫描频率达每 10 分钟一次, 机动区域可加密至 2.5 分钟, 空间分辨率在 0.5~2 km 之间。葵花卫星具有多光谱协同观测能力, 搭载了 16 通道高分辨率成像仪(表 1), 包含 3 个可见光通道、3 个近红外通道、1 个短波红外通道、3 个水汽通道、5 个红外通道及 1 个二氧化碳通道, 显著提升了对云层、地表温度及大气参数的捕捉精度, 为台风、雾等快速演变天气系统的动态追踪提供了不可替代的数据支持。本文选取 2020~2024 年的葵花卫星全圆盘资料, 其中 2022 年 12 月 14 日以前的为葵花 8 号卫星数据, 之后的为葵花 9 号卫星数据。

**Table 1.** Channel information of the Sunflower satellite  
**表 1.** 葵花卫星通道信息

| 通道号 | 中心波长(μm) | 波段类型                      | 星下点分辨率(km) | 主要应用场景         |
|-----|----------|---------------------------|------------|----------------|
| 1   | 0.47     | 可见光(VIS)                  | 1.0        | 气溶胶监测、海洋颜色观测   |
| 2   | 0.51     | 可见光(VIS)                  | 1.0        | 真彩色合成、植被识别     |
| 3   | 0.64     | 可见光(VIS)                  | 0.5        | 高分辨率云图、地表细节    |
| 4   | 0.86     | 近红外(NIR)                  | 1.0        | 云相态识别、植被指数     |
| 5   | 1.6      | 近红外(NIR)                  | 2.0        | 云粒子相态(冰/水)、雪覆盖 |
| 6   | 2.3      | 近红外(NIR)                  | 2.0        | 云微物理特性、气溶胶厚度   |
| 7   | 3.9      | 短波红外(SWIR)                | 2.0        | 地表热异常(火灾)、夜云监测 |
| 8   | 6.2      | 水汽(WV)                    | 2.0        | 中层大气水汽、风暴发展监测  |
| 9   | 6.9      | 水汽(WV)                    | 2.0        | 高层大气水汽、急流分析    |
| 10  | 7.3      | 水汽(WV)                    | 2.0        | 低层水汽、降水潜力评估    |
| 11  | 8.6      | 红外(IR)                    | 2.0        | 云顶相态、火山灰监测     |
| 12  | 9.6      | 红外(IR)                    | 2.0        | 臭氧层监测、对流层顶温度   |
| 13  | 10.4     | 清洁窗区红外(IR)                | 2.0        | 地表/云顶温度、热岛效应   |
| 14  | 11.2     | 红外窗区(IR)                  | 2.0        | 云检测、海表温度(SST)  |
| 15  | 12.4     | 红外窗区(IR)                  | 2.0        | 低层水汽、沙尘监测      |
| 16  | 13.3     | 二氧化碳吸收带(CO <sub>2</sub> ) | 2.0        | 云顶高度、大气稳定性分析   |

2.2. 地面观测资料

选取 2020~2024 年间贵阳机场地面气象观测数据、机场例行天气报告、机场自动气象观测系统(AWOS)的资料, 对贵阳机场历史雾天气的能见度进行提取。使用贵州省自动气象站数据, 提取全省范围的低能

能见度天气情况。

## 2.3. 研究方法

Turner J 等[18]在 1986 年提出, 在短波红外通道, 雾和云的发射率相近, 使用短波红外通道难以区分雾与云, 而在长波红外通道, 雾和地面发射率相近, 使用长波红外通道也难以区分雾与地面, 而结合 2 个波段, 由于不透明的雾在大气窗区通道辐射特性类似于黑体, 其比辐射率接近 1, 而在短波红外通道比辐射率明显要小, 因此雾区 3.9  $\mu\text{m}$  通道亮温小于 11.2  $\mu\text{m}$  亮温, 根据短波与长波红外通道的亮温差值探测无云层遮挡的地面雾区分布能较好地区分雾、高云和地面。因此, 可通过通道亮温差法计算 3.9  $\mu\text{m}$  和 11.2  $\mu\text{m}$  通道亮温差, 进行夜间雾的识别。对于葵花卫星而言, 利用其短波红外通道(3.9  $\mu\text{m}$ )和红外窗区通道(11.2  $\mu\text{m}$ )亮温差(BTD<sub>3.9-11.2</sub>)用于雾的检测和识别。计算公式如下:

$$\text{BTD}_{3.9-11.2} = \text{BT}_{3.9} - \text{BT}_{11.2}$$

其中:  $\text{BT}_{3.9}$ 、 $\text{BT}_{11.2}$  分别为通道 7 (中心波长 3.9  $\mu\text{m}$ )和通道 14 (中心波长 11.2  $\mu\text{m}$ )的亮温。对 2020~2024 年间贵阳机场出现的 5 次典型雾天气进行分析, 找出识别雾的有效阈值区间。

由于云的存在, 在雾的识别中会出现误判, 从而造成判别上的遗漏和虚判, 根据王宏斌等[4]的研究, 可以采取通道 14 (中心波长 11.2  $\mu\text{m}$ )的亮温对云进行剔除, 若该通道亮温值 < 260 K (即-13.15℃)时, 认为该处为低云而非雾。

## 3. 研究过程和结果

2020~2024 年间, 贵阳机场共出现 43 次雾天气过程, 其中持续时间超过 2 小时的 28 次, 同时因亮温法识别雾仅适用于夜间, 因此需排除日出之后出现雾的情况。对天气过程进行筛选后, 剩余 23 次雾天气过程, 作为此次研究的对象。

### 3.1. 卫星资料数据下载及处理

#### 3.1.1. 卫星资料数据格式选取

葵花卫星目前的数据资料分为 HSD 和 netCDF 两种格式。HSD 格式存储原始辐射率数据, 按扫描线和像素组织, 需自行计算地理位置, 文件体积较大(每时次全圆盘约 2.5 GB), 数据资料的整合度不高(每个通道均为单独数据文件), 主要用于卫星定标和算法开发, 而 netCDF 格式提供处理后的网格化地球物理产品, 直接包含经纬度坐标和质量控制标志, 文件体积更小(每时次全圆盘约 600 MB), 每时次数据文件中包含有全部 16 个通道的数据, 整合度高, 主要用于气象业务分析和可视化, 两者本质是原始“相机底片”与精修“成品照片”的关系, 因此, 本文使用 netCDF 格式的葵花卫星资料。

netCDF 格式的葵花卫星资料数据命名方式为: NC\_Hbb\_yyyymmdd\_hhmm\_rxx\_FLDK.0aaaa\_0bbbb.nc。其中 Hbb 表示卫星编号, H08 为葵花 8 号卫星, H09 为葵花 9 号卫星, yyyymmdd\_hhmm 表示卫星数据资料的观测时间, 即年月日与小时分钟。rxx\_FLDK.0aaaa\_0bbbb 主要表示卫星数据资料的覆盖范围, 分为 r14\_FLDK.02701\_02601、R21\_FLDK.02401\_02401、R21\_FLDK.06001\_06001 三类。如表 2 所示, 其中 r14\_FLDK.02701\_02601 类型资料覆盖区域为日本周边, 格点范围在 123°E~150°E、24°N~50°N 之间, 格点数为 2700 \* 2600, 单个时次文件大小 70MB 左右; R21\_FLDK.02401\_02401 覆盖区域为东亚、太平洋与大洋洲, 格点范围在 80°E~20°W、60°S~60°N 之间, 格点数为 2400 \* 2400, 单个时次文件大小 120 MB 左右; R21\_FLDK.06001\_06001 资料, 覆盖区域与前者相同, 均为东亚、太平洋与大洋洲, 格点范围同在 80°E~20°W、60°S~60°N 之间, 格点数为 6000 \* 6000, 单个时次文件大小 600 MB 左右。综合贵阳机场经纬度以、分析需要以及后续业务化对下载速度的要求, 以资料数据文件处理的性能需求, 选取

R21\_FLDK.02401\_02401 数据进行分析。

**Table 2.** Comparison of data coverage for Himawari satellite data in netCDF format

**表 2.** netCDF 格式的葵花卫星资料数据覆盖范围对照表

| 文件类型                 | 覆盖区域            | 经纬度范围                    | 格点数         | 单个时次文件大小  |
|----------------------|-----------------|--------------------------|-------------|-----------|
| r14_FLDK.02701_02601 | 日本              | 123°E~150°E<br>24°N~50°N | 2700 * 2600 | 70 MB 左右  |
| R21_FLDK.02401_02401 | 东亚、西太平洋、<br>大洋洲 | 80°E~20°W<br>60°S~60°N   | 2400 * 2400 | 120 MB 左右 |
| R21_FLDK.06001_06001 | 东亚、西太平洋、<br>大洋洲 | 80°E~20°W<br>60°S~60°N   | 6000 * 6000 | 600 MB 左右 |

### 3.1.2. 卫星资料数据下载

葵花卫星的数据资料可以在 JAXA 网站注册后，使用 FileZilla 工具通过 ftp.ptree.jaxa.jp 进行免费下载，该方法时效性较高，最新的卫星探测数据能够在 25 分钟内下载，具有较强的业务运用价值。

### 3.1.3. 卫星资料数据处理

资料数据下载到本地后，通过 Python 对葵花卫星数据进行处理，首先通过 netCDF4 库读取卫星资料数据，代码如下：

```
# 加载 netCDF 库
import netCDF4 as nc
# 读取卫星数据文件
dataset = nc.Dataset("satellite_data.nc")
# 提取关键气象参数
longitude = dataset['lon'][:] # 经度网格
latitude = dataset['lat'][:] # 纬度网格
channel14 = dataset['tbb_14'][:] # 11.2 μm 红外通道亮温
channel07 = dataset['tbb_07'][:] # 3.9 μm 短波红外通道亮温
```

通过 cartopy 库对地理空间进行处理，便于将卫星资料数据进行精准空间配准，代码如下：

```
# 导入地理信息处理库
import cartopy.crs as ccrs
import cartopy.io.shapereader as shpreader
# 设置地理投影系统
projection = ccrs.PlateCarree() # 等经纬度投影
# 定义研究区域范围 [min_lon, max_lon, min_lat, max_lat]
region_extent = [103.6, 109.5, 24.6, 29.5] # 以贵州省为例
# 加载行政区划边界
province_boundary = shpreader.Reader("Guizhou_Province.shp")
# 创建地理坐标系
ax = plt.axes(projection=projection)
ax.set_extent(region_extent) # 设置显示范围
```

通过 pandas 库定点数据提取贵阳机场数据，通过查找最近网格的方式提取该点的通道亮温数据，并

输出为 EXCEL 作为后续阈值研究的数据。代码如下：

```
# 导入结构化数据库
import pandas as pd
# 定义贵阳机场位置坐标
target_lon = 106.8 # 经度
target_lat = 26.54 # 纬度
# 查找最近网格点
lon_idx = np.argmin(np.abs(longitude - target_lon))
lat_idx = np.argmin(np.abs(latitude - target_lat))
# 提取位置数据
location_data = {
    '时间': timestamp,
    '经度': longitude[lon_idx],
    '纬度': latitude[lat_idx],
    '通道 07 亮温': channel07[lat_idx, lon_idx],
    '通道 14 亮温': channel14[lat_idx, lon_idx],
    '亮温差': brightness_temp_diff[lat_idx, lon_idx]
}
```

```
# 构建时间序列数据集
import pandas as pd
df = pd.DataFrame(all_location_data)
df.to_excel("airport_fog_data.xlsx") # 导出结构化数据
```

通过对导出的结构化数据与贵阳机场观测数据进行对比分析，研究通道亮温差法的本地化阈值，假设阈值区间为 $[\text{min\_bt\_diff}, \text{max\_bt\_diff}]$ ，并通过 numpy 库对通道亮温差法数据进行计算，同时对低云进行剔除，增加识别准确率。代码如下：

```
# 加载雾区识别核心算法所需数据计算库
import numpy as np
# 计算双通道亮温差
bt_diff = tbb_07 - tbb_14
# 初始雾区识别(基于亮温法)
fog_candidate = np.logical_and(bt_diff >="min_bt_diff", bt_diff <= "max_bt_diff")
# 低云剔除，当通道 14 亮温<260K 时判定为低云而非雾
low_cloud_mask = tbb_14 < 260 # 260K 阈值
final_fog_mask = np.logical_and(fog_candidate, ~low_cloud_mask)
```

matplotlib 库是可视化呈现框架，作为最终的绘图引擎，承担创建图形容器、渲染红外云图与雾区识别图层、添加色标与标题、控制字体样式和输出高清图像等可视化任务，实现对雾区识别情况的可视化功能，其中采用通道 14 数据绘制红外云图底图，采用灰色系，雾区识别情况采用蓝色系。

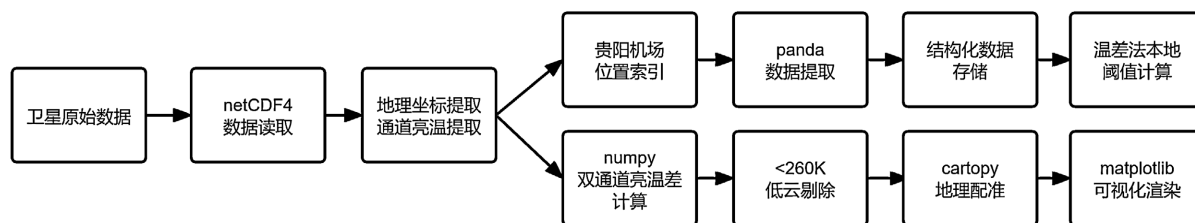
```
# 加载可视化渲染
```

```

import matplotlib.pyplot as plt
# 绘制红外云图底图
plt.pcolormesh(lon, lat, tbb_14-273.15,
               cmap='gray_r', vmin=-80, vmax=30)
# 叠加最终雾区识别结果
plt.pcolormesh(lon, lat, np.where(final_fog_mask, bt_diff, np.nan),
               cmap='Blues',alpha=0.7,vmin=min_bt_diff, vmax=max_bt_diff)

```

综上所述, 数据处理的流程如图 1 所示。采用 netCDF4 库作为数据读取引擎, 从.nc 文件中提取经纬度网格、红外通道亮温数据等科学数据集; cartopy 库是地理空间处理核心, 提供地图投影系统、行政区划边界加载、经纬度网格配置及坐标转换功能, 确保数据在地理坐标系中准确定位; pandas 库是结构化数据处理核心, 提取贵阳机场上空的亮温差并存储表和形式便于后续阈值分析; numpy 库是雾识别算法核心, 通过计算亮温差并进行低云剔除, 得到雾区数据组; matplotlib 是可视化呈现框架, 执行渲染红外云图底图与雾区识别图层等可视化任务。



**Figure 1.** Flowchart of Himawari satellite data processing for fog detection algorithm based on channel brightness temperature difference method

**图 1.** 基于通道亮温差法的雾识别算法的葵花卫星数据处理流程图

### 3.2. 雾识别算法阈值分析

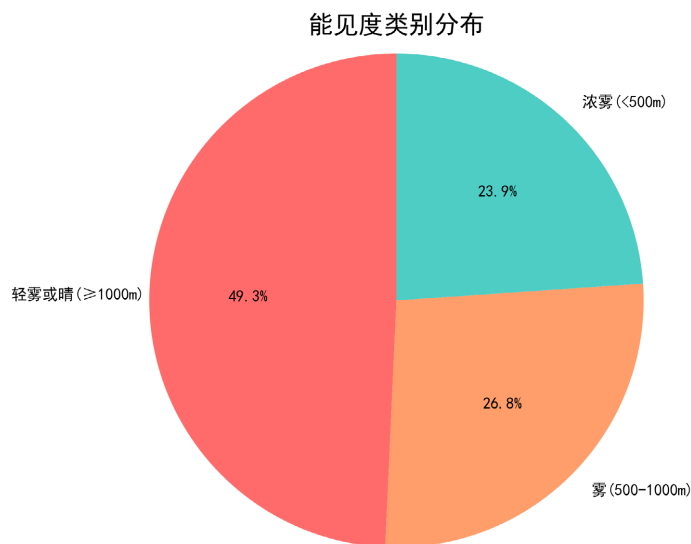
将 2020~2024 年经过筛选以后的 23 次雾天气过程, 采用上述 3.1 中所述方法得出 23 次雾天气过程的结构化数据, 数据包括卫星数据资料观测时间、通道 7 亮温、通道 14 亮温和两通道亮温差, 并将数据与同一时次的贵阳机场地面观测的能见度进行组合, 得到出现雾天气过程当日 12~23 时 UTC 的逐小时数据集, 数据集共计 276 条数据, 按照能见度数值, 将数据集分为浓雾(能见度 < 500 米)、雾(500 米 ≤ 能见度 < 1000 米)和轻雾或晴(1000 米 ≤ 能见度)三类, 据此进行阈值分析。

#### 3.2.1. 雾与通道亮温差特征分析

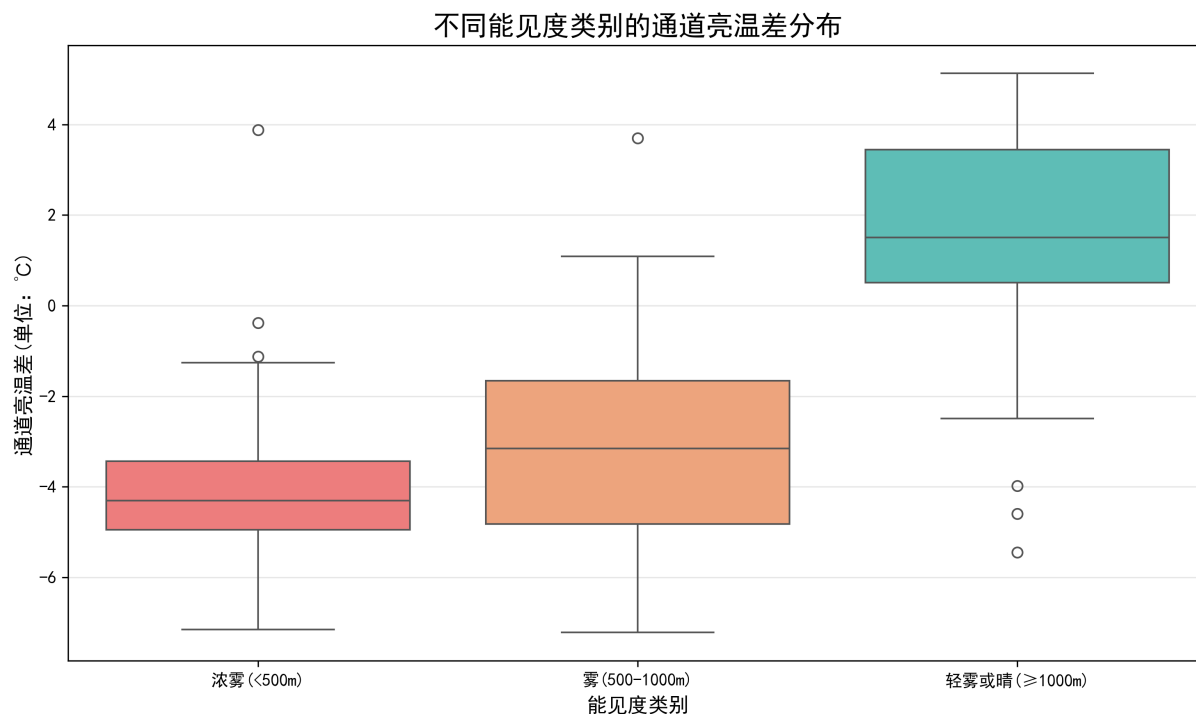
图 2 给出了 276 条数据的能见度类别分布情况, 有 136 个时次为轻雾或晴, 占比 49.3%, 有 74 个时次出现了雾, 占比 26.8%, 有 66 个时次出现了浓雾, 占比 23.9%。其中轻雾或晴的时次主要分布在 12UTC~17UTC 之间, 17UTC~23UTC 之间则以雾或浓雾为主。

图 3 给出了不同能见度类别的亮温差分布情况, 表明通道亮温差与能见度存在显著相关性: 浓雾(能见度 < 500 米)对应的亮温差中位数为 $-4.65^{\circ}\text{C}$ , 其四分位距(IQR)范围为 $-5.13^{\circ}\text{C}$ 至 $-4.19^{\circ}\text{C}$ , 且 75%的观测值低于 $-4.0^{\circ}\text{C}$ , 最小极值达 $-7.22^{\circ}\text{C}$ , 表明浓雾事件中亮温差呈现深度负值特征; 雾(能见度 500~1000 米)的亮温差中位数为 $-3.25^{\circ}\text{C}$ , 分布范围( $-5.08^{\circ}\text{C}$ 至 $3.70^{\circ}\text{C}$ )较浓雾更广, 但 75%的观测值仍低于 $-1.49^{\circ}\text{C}$ , 且存在若干正值异常点; 轻雾或晴好天气(能见度  $\geq 1000$  米)的亮温差中位数为 $-0.18^{\circ}\text{C}$ , 其数据分布最为分散( $-5.21^{\circ}\text{C}$ 至 $5.13^{\circ}\text{C}$ ), 75%分位数为 $1.09^{\circ}\text{C}$ , 且存在多个高亮温差( $>4^{\circ}\text{C}$ )的离群点。值得注意的是, 当亮温差低于 $-4^{\circ}\text{C}$ 时, 能见度基本不超过 1000 米(全部属于雾或浓雾), 而亮温差高于 $2^{\circ}\text{C}$ 时则全部对应轻

雾或晴好天气，这一分布规律验证了通道亮温差作为雾监测指标的有效性。



**Figure 2.** Hourly visibility category distribution from 12UTC to 23UTC during fog weather processes from 2020 to 2024  
**图 2.** 2020~2024 年雾天气过程当日 12UTC~23UTC 的逐小时能见度类别分布



**Figure 3.** Box plot of channel brightness temperature difference distribution for different visibility categories from 2020 to 2024

**图 3.** 2020~2024 年不同能见度类别的通道亮温差分布箱型图

### 3.2.2. 雾识别的起始最佳阈值计算

ROC 曲线(Receiver Operating Characteristic Curve, 接收者操作特征曲线)是一种用于评估二分类模型性能的经典工具, 广泛应用于机器学习、统计分析等领域[19]。本文使用 ROC 曲线评估不同通道亮温差

阈值识别雾的性能，主要研究的是雾的起始识别最佳阈值。

首先定义真正例率和假正例率，真正例率(TPR)又称为灵敏度，是所有正样本被分类器判定为正样本的比例，本文代表正确雾被识别的比例：

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN}$$

假正例率(FPR)是所有负样本被分类器判定为正样本的比例，本文代表无雾被错误识别为有雾的比例：

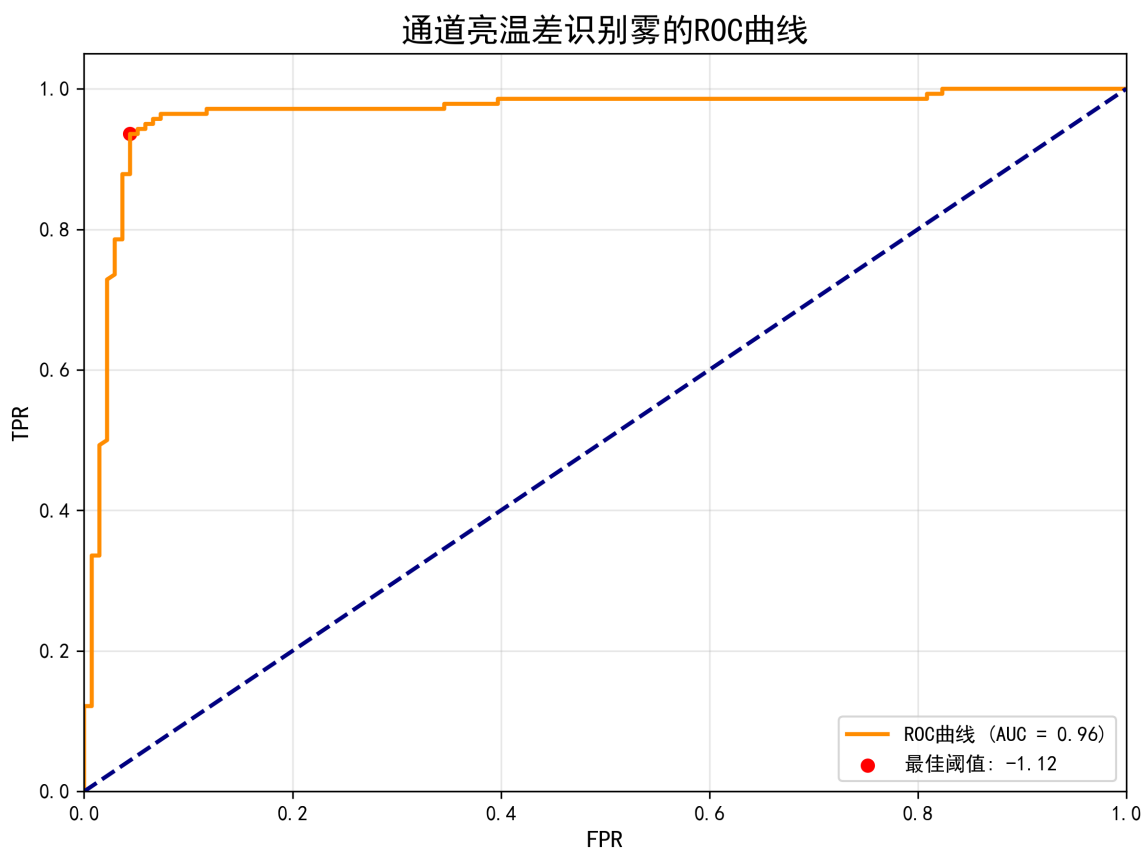
$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} = 1 - \text{特异度}$$

其中：真正例(TP)：实际为有雾，模型预测为有雾。假正例(FP)：实际为无雾，模型预测为有雾。真负例(TN)：实际为无雾，模型预测为无雾。假负例(FN)：实际为有雾，模型预测为无雾。

选择 Youden 指数最大的点作为最佳阈值，Youden 指数的计算方法：

$$\text{Youden} = TPR - FPR$$

取 Youden 指数最大时，即 TPR 最大化且 FPR 最小化，此时阈值的性能最佳。计算所有数据集中所有通道亮温差识别雾的 ROC 曲线，如图 4 所示，AUC = 0.96，说明通道亮温差识别雾的方法总体性能优异。当取 -1.12 为最佳阈值时，即通道亮温差小于 -1.12℃时开始识别为雾，此时阈值准确率(所有准确识别的比例)为 0.942，召回率(雾检出率)为 0.929，精确率(识别有雾实际有雾的比例)为 0.956，F1 分数(召回率与精确率的调和平均)为 0.942，显示出优异的识别性能。



**Figure 4.** ROC curve for fog identification based on channel brightness temperature difference

**图 4.** 通道亮温差识别雾的 ROC 曲线

3.2.3. 雾识别的起始最佳阈值验证

为验证雾识别起始阈值的有效性，将通道亮温差从-10℃至 10℃之间划分为 10 个阈值分区，统计每个阈值分区的雾出现概率，结果如图 5 所示。可以看出通道亮温差与雾天气过程发生与否之间的定量关系：通道亮温差在[-10, -5)区间时，雾发生率为 97.0%；通道亮温差在[-5, -4)区间时，雾发生率为 97.3%；通道亮温差在[-4, -3)区间时，雾发生率为 96.4%；通道亮温差在[-3, -2)区间时，雾发生率为 88.2%；通道亮温差在[-2, -1)区间时，雾发生率为 88.0%；通道亮温差在[-1, 0)区间时，雾发生率降低至 21.1%；当通道亮温差 > 0℃时，雾发生率仅为 10.7%，且主要出现在能见度接近 1000 米的临界状态，有效验证了 -1.1℃最佳阈值的有效性。

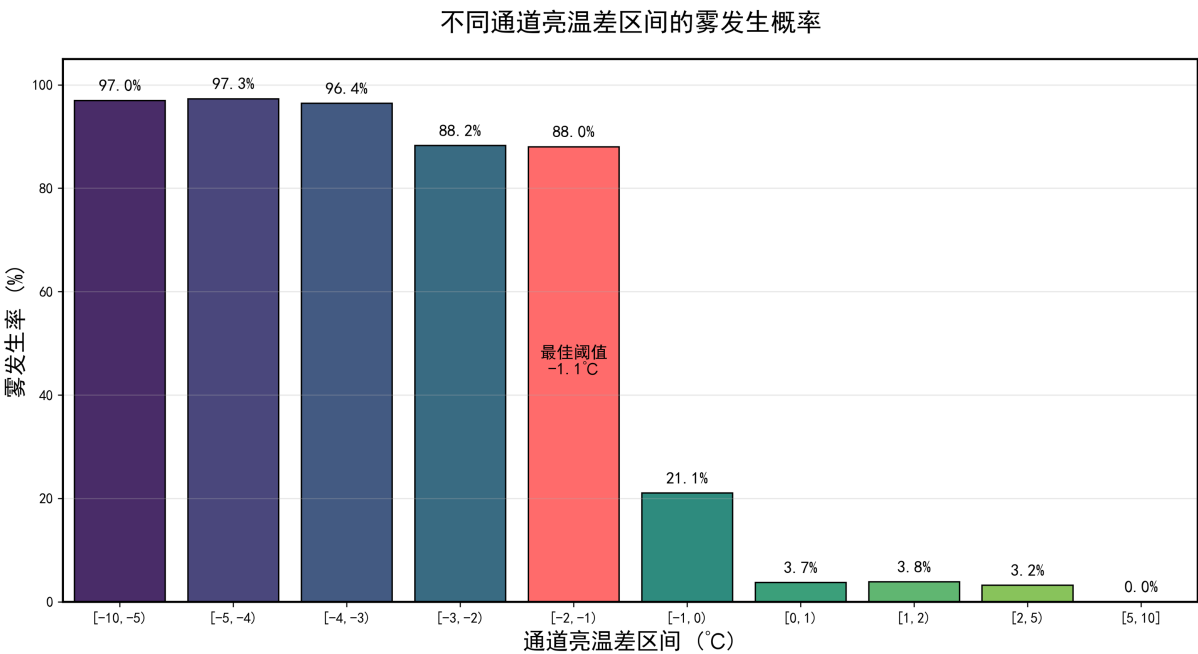


Figure 5. Probability of fog occurrence in different brightness temperature difference intervals across channels  
图 5. 不同通道亮温差区间的雾发生概率

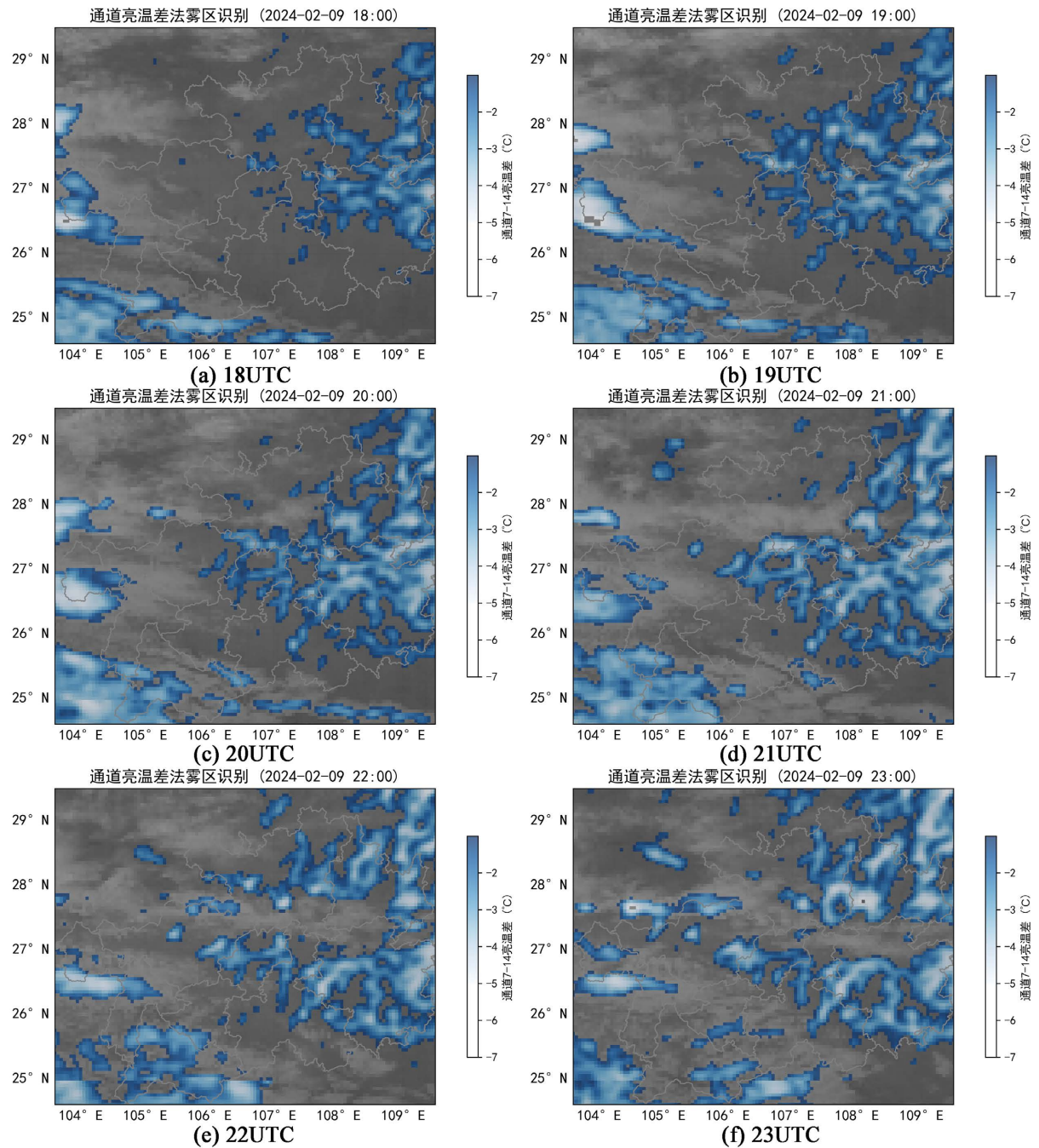
4. 典型案例

2024 年 2 月 9 日 19:56~10 日 03:05 (UTC)贵阳机场出现一次辐射雾天气过程，最低能见度 200 米，造成贵阳机场 57 架次航班延误，2 架次航班备降。对天气过程的夜间时段的能见度和通道亮温差进行统计(表 3)，可以看出按照上述分析总结的最佳起始识别阈值，该案例的通道亮温差能够准确识别低能见度天气。

使用上述 3.1 中的方法对该时段贵州区域的通道亮温差法识别雾的情况进行可视化(如图 6 所示)，

Table 3. Comparison of visibility and channel brightness temperature difference at Guiyang Airport from 17UTC to 23UTC on February 9, 2024  
表 3. 2024 年 2 月 9 日 17UTC~23UTC 贵阳机场能见度与通道亮温差对比表

| 时间       | 18UTC | 19UTC | 20UTC | 21UTC | 22UTC | 23UCT |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 能见度(米)   | 4000  | 3000  | 500   | 200   | 200   | 200   |
| 通道亮温差(℃) | -0.18 | -0.13 | -1.20 | -2.49 | -3.02 | -4.91 |

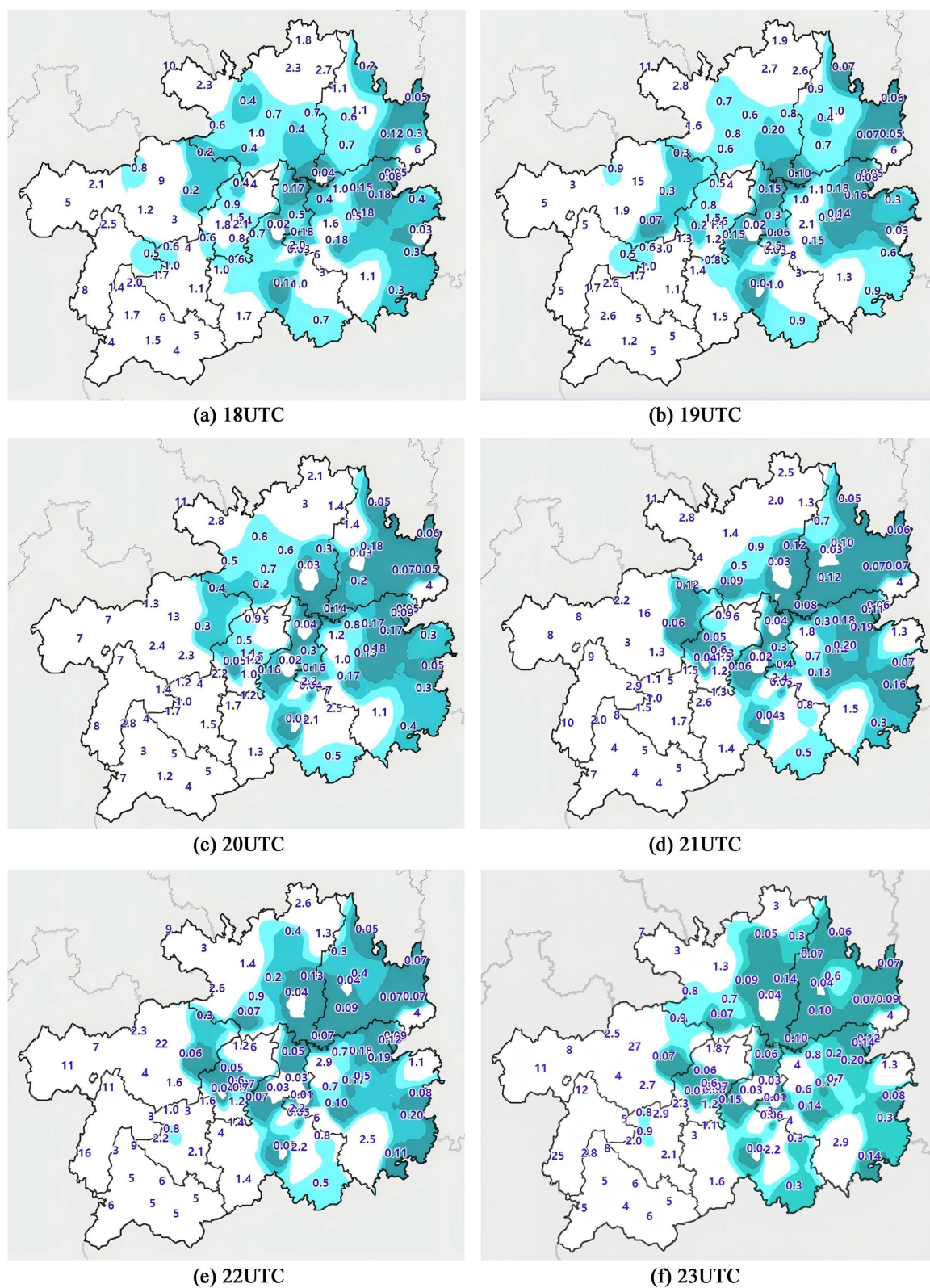


该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2018)1432 号的标准地图制作，底图无修改。

**Figure 6.** Identification of fog areas using channel brightness temperature difference method from 18UTC to 23UTC on February 9, 2024

**图 6.** 2024 年 2 月 9 日 18UTC~23UTC 通道亮温差法雾区识别情况

并与贵州省自动气象站的过去 1 小时最小能见度(如图 7 所示)进行对比。可以看出该方法在使用 $[-7, -1.12]$ 为雾区识别阈值时，能够较好地反演地面出现的低能见度区域，尤其是贵州中部、东部地区以及贵阳机场的反演效果较好，但在贵州西南部出现部分区域的虚假识别情况，需要结合当地的具体情况对阈值进行本地化调整。



**Figure 7.** Minimum visibility in the past 1 hour at automatic weather stations in Guizhou Province from 18UTC to 23UTC on February 9, 2024

**图 7.** 2024 年 2 月 9 日 18UTC-23UTC 贵州省自动气象站过去 1 小时最小能见度

## 5. 结论

本文基于 2020~2024 年葵花 8/9 号卫星数据及贵阳机场地面观测资料, 研究适用于云贵高原山地机场的夜间雾识别技术, 主要结论如下:

(1) 通道亮温差算法实现: 选用葵花卫星 netCDF 格式的数据, 构建  $3.9\ \mu\text{m}$  与  $11.2\ \mu\text{m}$  通道亮温差 (BTD<sub>3.9-11.2</sub>) 算法, 融合低云剔除算法可提升精度。

(2) 通道亮温差法阈值计算: 通过 ROC 曲线确定雾识别最佳起始阈值为  $-1.12^\circ\text{C}$ , 此时准确率 94.2%, 召回率 92.9%。

(3) 雾强度分级指标: 浓雾通道亮温差中位数为  $-4.65^\circ\text{C}$ , 显著低于雾的  $-3.25^\circ\text{C}$  以及轻雾的  $-0.18^\circ\text{C}$ , 定量支持雾强度反演。

(4) 业务化可行性: 通过实际案例验证了算法及阈值的有效性, 并通过图形化产品与实况能见度进行对比, 在贵阳机场与贵州中东部的适用效果较好。

## 基金项目

中国民用航空西南地区空中交通管理局创新类项目(基于贵阳龙洞堡机场重要天气案例库的辐射雾预报方法研究 SWATMB-202402)资助。

## 参考文献

- [1] 王宏斌, 张志薇, 刘端阳, 等. 基于葵花 8 号新一代静止气象卫星的夜间雾识别[J]. 高原气象, 2018, 37(6): 1749-1764.
- [2] 郝姝馨, 郝增周, 黄海清, 等. 基于 Himawari-8 数据的夜间海雾识别[J]. 海洋学报, 2021, 43(11): 166-180.
- [3] 郝姝馨. 基于新一代静止气象卫星的夜间海雾跟踪监测与分析研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京大学, 2021.
- [4] 王宏斌, 张志薇, 徐萌. 基于新一代静止气象卫星的重污染条件下雾的识别[C]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会科学技术年会论文集. 2018: 464-471.
- [5] 孙佳庆, 李军, 唐立明, 等. 卫星遥感监测一次大雾天气的个例研究[C]//中国气象学会年会. 第 33 届中国气象学会年会 S1 灾害天气监测、分析与预报. 2016: 1320-1331.
- [6] Yao, Z., Wang, C. and Jiang, C. (2024) Research on the Fusion of FY4A Satellite Data and Station Observation Data for Heavy Fog Recognition. *Theoretical and Applied Climatology*, 156, Article No. 59. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-05245-6>
- [7] 张毅, 靳奎峰, 刘子菁, 等. 基于风云四号卫星数据的南海海雾遥感监测[J]. 气象与环境科学, 2024, 47(2): 28-35.
- [8] 付玉琴, 衣立, 黎梦雅, 等. 基于多种机器学习模型的夏季北冰洋海雾卫星检测方法研究[J]. 海洋气象学报, 2024, 44(1): 14-23.
- [9] 胡争胜. 基于复合神经网络提升高空间分辨率卫星影像质量[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2023.
- [10] 彭波, 徐良军. 基于气象数据和 FY4A 数据雾的机器学习分类研究[J]. 科技风, 2025(13): 48-50.
- [11] 马慧云, 李亚楠, 吴晓京, 等. H8/AHI 卫星数据的白天陆地雾检测[J]. 遥感技术与应用, 2024, 39(4): 784-792.
- [12] 胡晨悦. 基于主被动卫星的福建海雾监测及垂向特征分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.
- [13] 胡晨悦, 丘仲锋, 廖廓, 等. 福建海雾的 CALIOP 遥感监测及基于 Himawari-8 的云下雾光谱特征分析[J]. 热带海洋学报, 2023, 42(4): 104-112.
- [14] 叶子恒, 龚安保, 徐峻, 等. 利用 Himawari-8 资料分析京津冀地区冬季雾的空间分布和演变过程[J]. 环境科学研究, 2024, 37(5): 939-949.
- [15] 高松影, 史月琴, 赵婷婷, 等. 黄渤海海雾诊断分析及卫星云图特征[J]. 海洋预报, 2025, 42(3): 21-33.
- [16] 史文倩, 刘瑞雯, 王雨婷. 基于葵花 8 号卫星云图对厦门机场平流雾过程分析[J]. 科技创新导报, 2019, 16(25): 108-110.
- [17] 尚华哲, 胡斯勒图, 陈良富, 等. 基于 Himawari-8 的卫星云和雾霾检测算法的应用[C]//中国气象学会. 第 34 届

---

中国气象学会年会论文集. 2017: 96.

- [18] Turner, J., Allam, R.J. and Maine, D.R. (1986) A Case Study of the Detection of Fog at Night USING Channels 3 and 4 on the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). *Meteor Mag*, **115**, 2885-2290.
- [19] 吴安坤, 郭军成, 黄天福. Logistic 回归联合 ROC 曲线模型在雷电潜势预报中的应用[J]. 中低纬山地气象, 2022, 46(2): 88-92.