

近10年贵阳机场辐射雾天气与城市空气质量 关联性研究

唐枫, 黄金全, 罗璇

民航贵州空管分局, 贵州 贵阳

收稿日期: 2025年7月1日; 录用日期: 2025年7月31日; 发布日期: 2025年8月21日

摘要

本文基于2015年~2024年贵阳机场辐射雾观测数据、AWOS自动观测系统资料及贵阳市空气质量监测数据, 采用统计分析、相关性检验及典型案例剖析等方法, 探究贵阳机场辐射雾天气与城市空气质量的关联性。研究发现: 近10年贵阳机场辐射雾发生频次呈波动上升趋势, 有雾时段空气质量指数(AQI)、PM2.5和PM10浓度年均值显著高于全年平均水平; 最低能见度与PM2.5/PM10浓度呈显著负相关, 辐射雾持续时间与污染物浓度呈显著正相关; 典型案例分析表明, 辐射雾形成前存在“污染物先期累积-雾滴凝结”过程, 春节燃放烟花爆竹所致的空气污染为辐射雾提供凝结核并加剧其发展。研究结果为贵阳机场辐射雾天气预报及航班运行决策提供了量化依据。

关键词

辐射雾, 空气质量, 能见度, 相关性分析

Study on the Correlation between Radiation Fog Weather at Guiyang Airport and Urban Air Quality in Recent 10 Years

Feng Tang, Jinqun Huang, Xuan Luo

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

Received: Jul. 1st, 2025; accepted: Jul. 31st, 2025; published: Aug. 21st, 2025

Abstract

This study investigates the correlation between radiation fog events at Guiyang Airport and urban

air quality based on observational data of radiation fog at Guiyang Airport from 2015 to 2024, AWOS automated observation system data, and air quality monitoring data from Guiyang City. Statistical analysis, correlation tests, and case study methods were employed. The findings reveal that over the past decade, the frequency of radiation fog at Guiyang Airport has shown a fluctuating upward trend. During foggy periods, the annual average values of the Air Quality Index (AQI), PM_{2.5}, and PM₁₀ concentrations were significantly higher than the annual averages. A significant negative correlation was observed between minimum visibility and PM_{2.5}/PM₁₀ concentrations, while a significant positive correlation existed between the duration of radiation fog and pollutant concentrations. Case analyses demonstrated that prior to radiation fog formation, a process of “pollutant accumulation followed by fog droplet condensation” occurs. Air pollution caused by fireworks during the Spring Festival provided condensation nuclei for radiation fog and exacerbated its development. The research results provide quantitative evidence for radiation fog forecasting at Guiyang Airport and decision-making for flight operations.

Keywords

Radiation Fog, Air Quality, Visibility, Correlation Analysis

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

贵阳市作为高原山地城市，近年来空气质量持续优化，2024 年环境空气质量优良率达 99.5%，但在辐射雾等低能见度天气高发时段，局地颗粒物污染风险仍显著存在。辐射雾由晴夜地表辐射冷却引发，逆温层阻碍污染物扩散，导致颗粒物累积，而污染物颗粒亦为辐射雾提供凝结核。学者们对低能见度天气与空气质量指数的关联机制进行了系统性研究，在雾霾污染特征与气象成因方面，姚志平等[1]对长春市的研究发现，雾霾期间 PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、SO₂ 浓度随能见度下降显著上升；朱丽等[2]分析泰州持续性雾霾指出，夜间高湿静稳条件促进雾形成，而白天湿度下降时雾转为以 PM_{2.5} 浓度升高为特征的霾；杨红子[3]在乌海市发现雾消散后 PM_{2.5} 浓度迅速反弹，表明湿沉降清除作用有限；孙卫武等[4]证实宁夏大雾过程中逆温层抑制扩散，导致 PM_{2.5} 浓度与能见度显著负相关；马艳等[5]对比青岛海雾与陆雾，指出冬季陆雾期间 PM₁₀、SO₂、NO₂ 浓度显著高于夏季海雾。在雾的时空分布与污染关联方面，赵欢等[6]基于成都 42 年数据揭示雾日呈“中心城区 > 东部 > 西北部”梯度分布，冬季占比最高；许敏等[7]分析廊坊重污染事件发现，当 AQI > 200 时，雾天污染更严重，且 1,500 m 以下稳定小风速层阻碍扩散；李云祯等[8]指出成都雾霾集中于秋冬季，城市化加剧中心城区雾日年际波动。在能见度与空气质量模型构建方面，阿来依·艾丁等[9]通过非线性拟合验证乌鲁木齐冬季模型准确率达 75%~86%，城北因高湿低能见度致 AQI 偏高 15%；代玉田等[10]构建德州 AQI 预报模型，确认相对湿度、能见度及雾霾是核心因子。在人工干预技术方面，赵月等[11]提出人工增雨可通过湿沉降缓解雾霾，但效果受云层条件制约。

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部，地形条件复杂(图 1(a))，山脉河流纵横，2015 年~2024 年间共发生辐射雾天气 89 次，共造成 1304 架次航班延误，185 架次航班返航备降，对航班运行影响较大。既往研究主要集中于气象要素变化机制方面，本文聚焦辐射雾天气与空气质量的相关性方面，为贵阳机场辐射雾天气预报提供新的思路和参考。

2. 资料与方法

本文定义的辐射雾天气过程,以贵阳机场地面观测资料中记录的能见度低于 1000 米时,且未伴随有连续降水现象以及碎雨云等(排除锋面雾)为判定标准,记录为 1 次辐射雾天气过程。

本文所用时间均为北京时间,所用资料包括贵阳机场 AWOS 自动观测系统资料、历史地面观测资料、欧洲中心 ERA5 逐小时再分析资料(空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$),贵阳市空气质量监测数据。根据贵阳市生态环境局公开资料显示,贵阳市建有 10 个空气质量监测站点(图 1(b)),选取贵阳市总体空气质量监测数据进行整体分析,选取距离机场西、北、南方向最近的 3 个站点(即:燕子冲、新华路、中院村)的单站监测数据进行个例分析研究。本研究选取 AQI (空气质量指数)、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度作为核心分析指标,主要基于其在贵阳地区空气污染中的代表性以及与辐射雾形成和维持的潜在物理关联性:PM_{2.5}、PM₁₀ 作为气溶胶的主要组分,是雾滴形成的核心凝结核,直接影响雾的微物理特性;AQI 则综合反映多种污染物(包括颗粒物)对空气质量的整体影响水平。其他污染物(如 CO、SO₂、NO₂、O₃ 等)虽对空气质量有贡献,但与其与辐射雾过程的直接物理联系相对较弱,或受复杂光化学反应影响较大(如 O₃),故未纳入本文的主要分析范围。

研究方法采用统计分析的方法对辐射雾天气过程和空气质量的变化情况进行分析,采取对比分析、相关性分析的方法分析辐射雾天气过程的持续时间、最低能见度与空气质量之间的相关性。最后选取典型辐射雾天气过程进行分析。

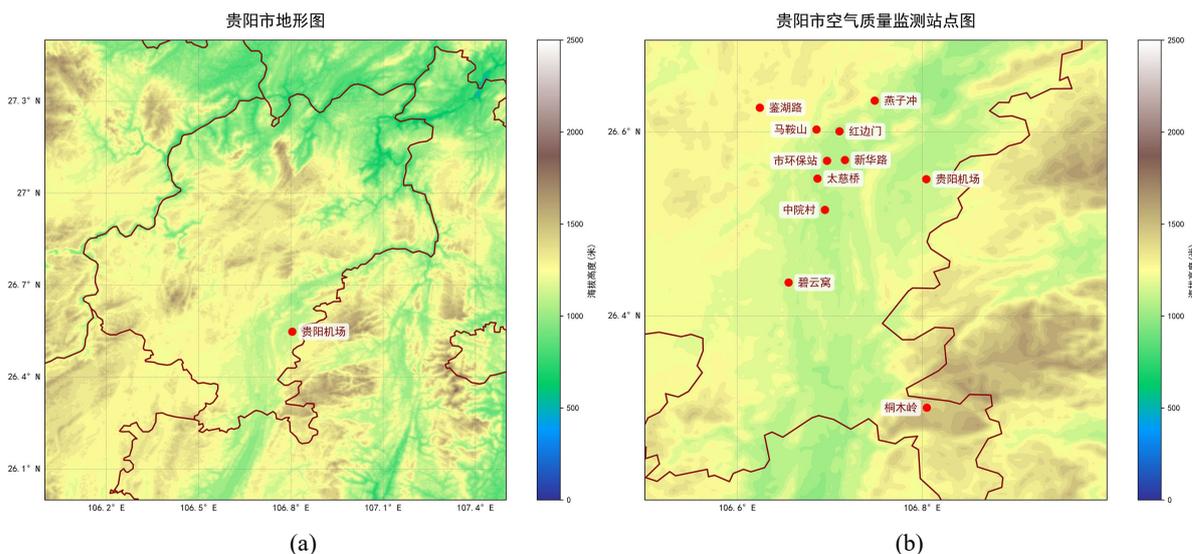


Figure 1. Topographic map of Guiyang City (a) and air quality monitoring station map of Guiyang City (b)
图 1. 贵阳市地形图(a)和贵阳市空气质量监测站点图(b)

3. 辐射雾天气过程与空气质量变化特征分析

3.1. 年际变化特征

图 2 给出了 2015 年~2024 年贵阳机场辐射雾发生次数与三项关键空气质量指标的年际变化。十年间,辐射雾发生频率呈现显著波动,并于 2020 年后出现明显上升趋势,在 2023 年达到峰值,2024 年虽回落但仍高于早期水平。与此同时,AQI、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 全样本的全年平均值表现出持续而显著的下降趋势,显示出贵阳市空气质量有了较大改善。聚焦于有雾样本时,可以看出在绝大多数年份里,AQI、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度的平均值均显著且系统地高于当年的全年平均值。尽管有雾样本的空气质量指标在

2020年后也呈下降趋势,但其改善幅度明显滞后于全年平均水平,尤其是在辐射雾频次激增的2021~2023年期间,有雾样本的AQI及颗粒物浓度并未随全年平均值的快速下降而同步降至最低点,在2023年的辐射雾发生高峰时尤为典型。综上所述,辐射雾天气过程与较高的综合空气质量及颗粒物污染水平存在紧密的共现关系。



Figure 2. Interannual variation characteristics of radiation fog at Guiyang Airport and interannual variation characteristics of major air quality indicators

图 2. 贵阳机场辐射雾年际变化特征与主要空气质量指标年际变化特征

3.2. 年变化特征

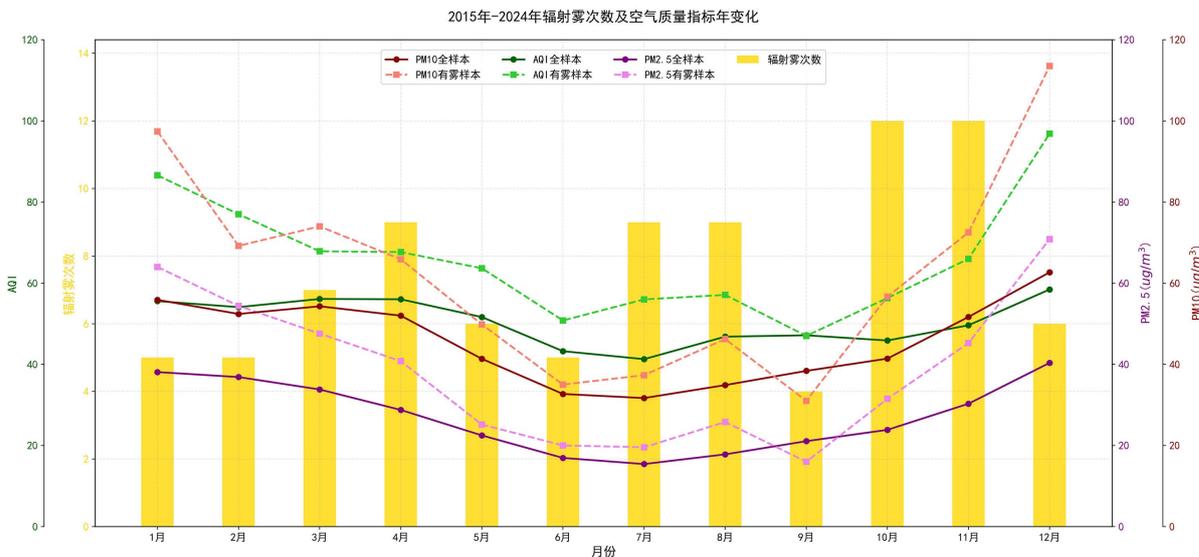


Figure 3. Interannual variation characteristics of radiation fog at Guiyang Airport and annual variation characteristics of major air quality indicators

图 3. 贵阳机场辐射雾年际变化特征与主要空气质量指标年变化特征

图 3 给出了贵阳机场辐射雾年际变化特征与主要空气质量指标月分布特征。辐射雾次数月分布波动

明显, 10 月和 11 月最多, 均达 12 次, 或因昼夜温差大、夜间地面辐射冷却强, 水汽易凝结成雾; 9 月最少, 仅 4 次, 可能是大气环流和湿度条件不利其形成。空气质量指标方面, 全样本中 AQI、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 数值各月有别, 12 月 AQI 达 58.44, PM_{2.5} 为 40.35, PM₁₀ 为 62.67, 均处高位, 这或许是冬季大气层结稳定、易形成逆温层, 抑制污染物扩散所致。对比有雾样本指标, 能看出辐射雾与空气质量的关联, 12 月有雾样本 AQI 为 96.83, 远超全样本的 58.44, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 也有较大差值, 说明辐射雾形成后, 雾滴吸附污染物且风速小, 不利于污染物扩散。整体上, 多数时候辐射雾次数多的月份, 有雾样本空气质量指标也高, 例如 10 月和 11 月, 辐射雾次数最多, 有雾样本各指标均较高; 但 7 月和 8 月虽辐射雾次数达 9 次, 空气质量指标表现为偏低情况, 7 月有雾样本的 AQI 为 56.0, PM_{2.5} 为 19.56 等, 这与夏季降水多、大气对流强, 净化空气并利于污染物扩散。综上, 贵阳机场辐射雾天气与城市空气质量有关联, 辐射雾常伴随空气质量下降出现, 但受季节、气象条件等多因素综合影响。

4. 辐射雾天气过程与空气质量的关联度分析

辐射雾天气过程对航班运行影响最为关键的两个因素即最低能见度和持续时间, 前者决定了辐射雾天气过程对航班的影响程度, 后者决定了辐射雾天气过程对航班的影响时间。因此, 本文将 2015 年~2024 年间共计 89 次辐射雾天气过程的最低能见度与持续时间进行分类, 并深入研究辐射雾天气过程与空气质量间的关联性。

4.1. 最低能见度与空气质量的关联度分析

本文将辐射雾天气过程中出现最低能见度按照以下标准进行分类, 其中最低能见度 ≥ 500 米且 <1000 米定义为雾, 最低能见度 ≥ 200 米且 <500 米定义为浓雾, 最低能见度 <200 米定义为强浓雾。

对上述三类不同最低能见度的辐射雾天气当日的空气质量分析可以看出(图 4), 不同最低能见度的辐射雾下, AQI、PM_{2.5} 与 PM₁₀ 浓度呈显著梯度变化: 雾(500~1000 m)时, 三者中位数最低(AQI 为 45.5、PM_{2.5} 为 20、PM₁₀ 为 40), 数据分布集中; 浓雾(200~500 m)阶段, 浓度中位数明显上升(AQI 为 60、PM_{2.5} 为 33、PM₁₀ 为 58), 离散度增加; 强浓雾(<200 m)时, 中位数进一步攀升(AQI 为 70.5、PM_{2.5} 为 47、PM₁₀ 为 79), 且 PM₁₀ 等出现高值异常点, 离散范围扩大。

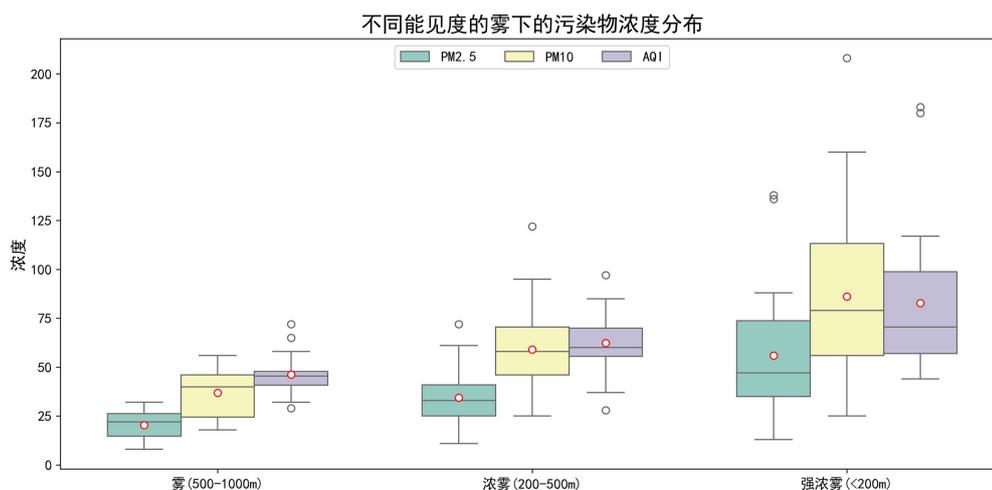


Figure 4. Distribution of major air quality indicators under different minimum visibility conditions
图 4. 不同最低能见度的主要空气质量指标分布图

而从不同最低能见度与空气质量指数的散点图(图 5)分析表明, 最低能见度与 AQI、PM_{2.5} 与 PM₁₀

浓度呈显著负相关。当能见度在雾(500~1000 m)时, PM_{2.5} 浓度多在 10~32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM₁₀ 为 18~56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, AQI 均值约 40, 数据点集中分布于低污染区间; 浓雾(200~500 m)时, PM_{2.5} 升至 37~52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM₁₀ 达 58~95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, AQI 突破 60, 部分样本如 2015 年 10 月 20 日出现 PM_{2.5} 61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的中度污染; 强浓雾(<200 m)时, 污染物浓度呈现跳跃式上升, PM_{2.5} 可达 74~138 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM₁₀ 峰值突破 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, AQI 常超 100, 且数据离散度显著增大。

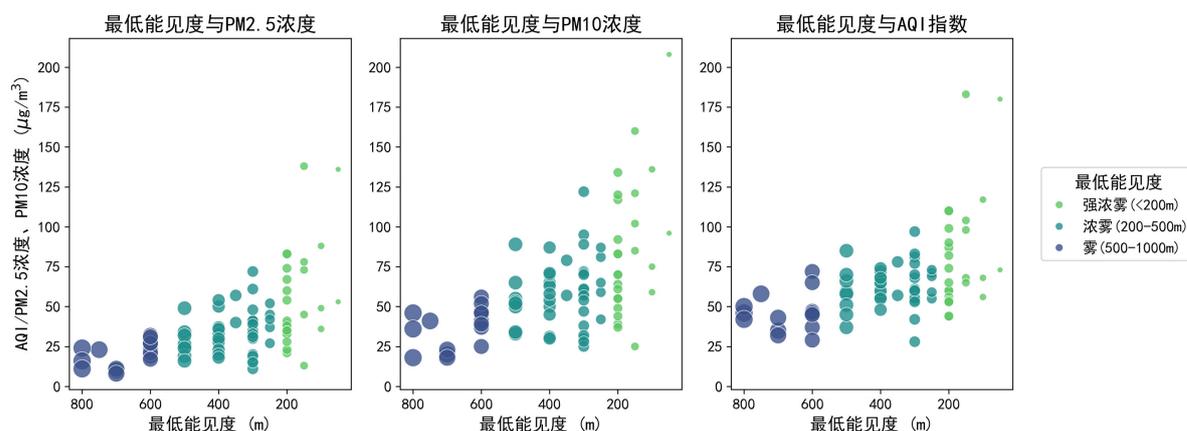


Figure 5. Scatter plot of major air quality indicators during radiation fog processes with different minimum visibility thresholds
图 5. 不同最低能见度辐射雾过程主要空气质量指标散点图

上述分析体现了“雾滴吸附颗粒物阻碍扩散”与“静稳气象(静风、逆温)抑制垂直扩散”的协同作用[7], 反映出污染物浓度越高、空气质量越差, 辐射雾最低能见度越低。

4.2. 辐射雾持续时间与空气质量的关联度分析

本文将辐射雾天气过程的持续时间按照以下标准进行分类, 其中持续时间不足 2 小时定义为短持续时间, 持续时间 ≥ 2 小时且 ≤ 6 小时定义为中等持续时间, 持续时间超过 6 小时定义为长持续时间。

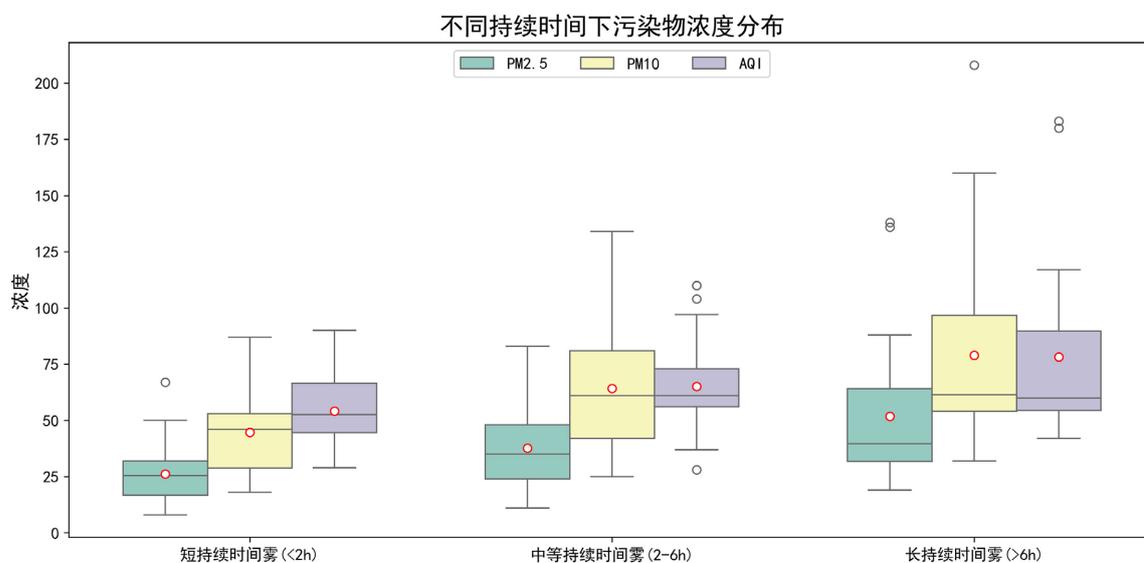


Figure 6. Distribution of major air quality indicators across different durations
图 6. 不同持续时间的主要空气质量指标分布图

对上述三类不同持续时间的辐射雾天气当日的空气质量分析可以看出(图 6), AQI、PM2.5、与 PM10 浓度浓度随持续时间延长呈现显著递增趋势: 短持续时间雾(<2 h)时, 三者中位数处于低位(AQI 为 52.5、PM2.5 为 25.5、PM10 为 46), 数据分布集中; 中等持续时间雾(2~6 h)阶段, 浓度中位数明显攀升(AQI 为 61、PM2.5 为 35、PM10 为 61), 离散度扩大; 长持续时间雾(>6 h)时, 污染物浓度与中等持续时间相比变化不大(AQI 为 60、PM2.5 为 39.5、PM10 为 61.5), 但数据点离散范围较中等持续时间翻倍。

而从持续时间与空气质量指数的散点图(图 7)可见, 三者呈显著正相关关系: 短持续时间雾中, PM2.5 多低于 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 仅 11.2% 样本超 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$; 中等持续时间雾中, PM2.5 在 $30\sim 70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 区间占比达 68.3%; 长持续时间雾中, PM2.5 超 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的样本占比升至 34.5%, PM10 突破 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的情况频繁出现。

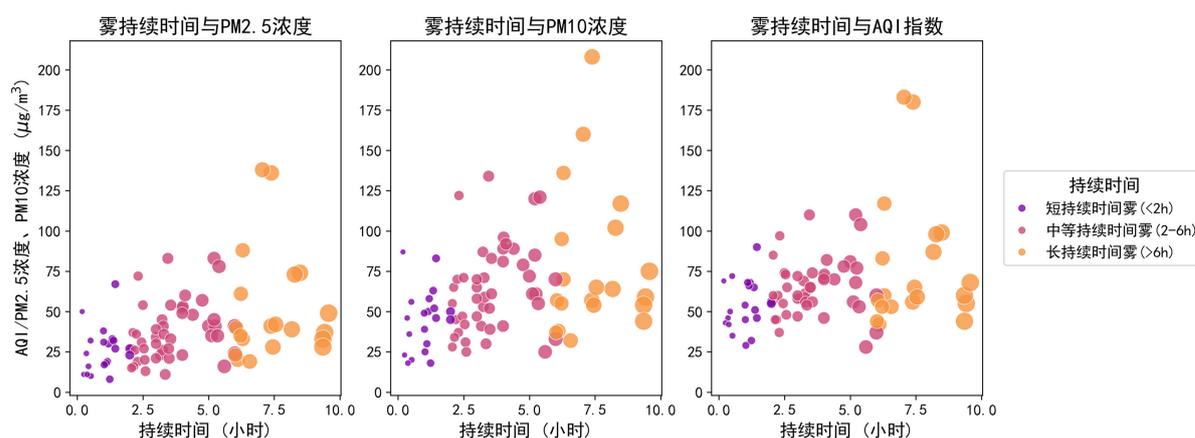


Figure 7. Scatter plot of major air quality indicators during radiation fog processes with different durations
图 7. 不同持续时间辐射雾过程主要空气质量指标散点图

上述分析可以看出, 由于近地面逆温层维持越稳定, 大气垂直扩散能力持续受限, 雾滴长时间吸附颗粒物形成“污染累积-雾滴增长”的正反馈, 导致辐射雾持续时间越长。

4.3. 相关性分析

本文采用 Spearman 秩相关检验作为基础分析方法, 该方法通过将原始数据转换为秩次(公式: $\rho = 1 - 6\sum d_i^2 / (n^3 - n)$)捕捉非线性关联, 能够有效解决环境数据非正态分布的问题[12]。图 8 给出了全部 89 组辐射雾天气过程的所有污染物数据, 持续时间与 AQI、PM2.5、PM10 呈显著正相关($\rho = 0.460$ 、 0.413 、 0.282 , p 均 <0.01), 最低能见度与三者呈显著负相关($\rho = -0.609$ 、 -0.562 、 -0.518 , p 均 <0.01), 其中最低能见度与 PM2.5 的负相关性($\rho = -0.63$)在热力图中表现为最深冷色调, 说明低能见度对污染的指示性更强。此外, 污染物间的相关性在热力图中呈现暖色集群: PM2.5 与 PM10 的 $\rho = 0.96$ (最深暖色), 证实颗粒物污染的同源性; SO₂、CO 等与 PM2.5 的 ρ 超 0.75, 反映一次污染源的主导作用, 而 O₃ 与其他污染物呈弱负相关($\rho = -0.15\sim -0.39$), 可能受静稳条件下光化学反应抑制影响。

Bootstrap 稳健性检验通过模拟抽样分布, 能够为相关性结论提供了重抽样层面的可靠性支撑, 尤其适用于小样本量下的统计推断, 确保结果不受单次抽样偏差影响[13]。本文使用 Bootstrap 稳健性检验方法, 通过对 89 次有效数据进行 1000 次重抽样, 构建相关系数的置信区间, 用于验证 Spearman 相关系数结果的可靠性, 规避抽样误差对结论的干扰。检验结果如表 1 所示: 持续时间与 PM2.5 的平均相关系数为 0.459 (95%置信区间: 0.284~0.609), 最低能见度与 PM2.5 为 -0.606 (95%置信区间: $-0.749\sim -0.444$), 所有污染物与雾特征的相关系数置信区间均未包含 0, 表明“持续时间越长/能见度越低 → 污染物浓度越高”的关联具有强稳健性。

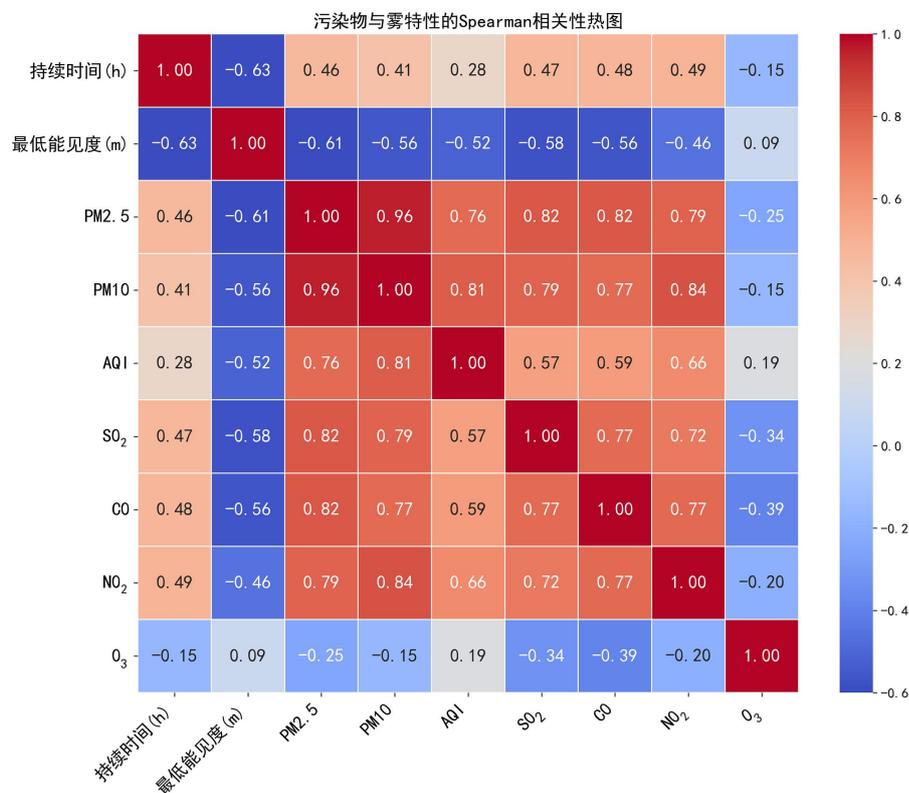


Figure 8. Spearman correlation heatmap between pollutants and radiation fog characteristics
图 8. 污染物与辐射雾特性的 Spearman 相关性热图

Table 1. Bootstrap robustness test results table

表 1. Bootstrap 稳健性检验结果表

变量关系	平均相关系数	95%置信区间	显著性(区间不含 0)
持续时间(h)/AQI	0.273	(0.052, 0.480)	是
持续时间(h)/PM2.5	0.459	(0.284, 0.609)	是
持续时间(h)/PM10	0.403	(0.205, 0.570)	是
最低能见度(m)/AQI	-0.509	(-0.670, -0.311)	是
最低能见度(m)/PM2.5	-0.606	(-0.749, -0.444)	是
最低能见度(m)/PM10	-0.556	(-0.711, -0.374)	是

本文通过 Spearman 秩相关系数检验揭示辐射雾持续时间、能见度与污染物的单调关联方向及强度，采用 Bootstrap 稳健性检验通过重抽样评估该关联在不同抽样场景下的稳定性和可靠性，构成“关联分析-可靠性验证”的完整关联度链条。分析结果一致表明：空气质量是辐射雾持续时间与最低能见度的重要指示因子，PM2.5 浓度每上升约 $2.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均持续时间延长 1 小时；PM2.5 浓度每上升约 $8.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均最低能见度降低 100 米，为将空气质量数据应用与辐射雾天气预报预警及航班运行决策提供了量化依据。

5. 典型天气案例分析

2024 年 2 月 10 日 03:56~11:05 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。

5.1. 天气形势分析

对 2 月 9 日 20 时的环流形势进行分析，高空以脊前西北气流控制为主，湿度条件差，地面均压场。从贵阳市探空站(站号：57816) 10 日 08 时的探空图(图 9)可以看出，近地面有浅薄湿层，同时近地面至 800 hPa 为深厚的逆温层，逆温达 5℃，500 hPa 有浅薄湿层，空中云层阻挡了太阳辐射增温，低层深厚逆温造就了静稳层结。

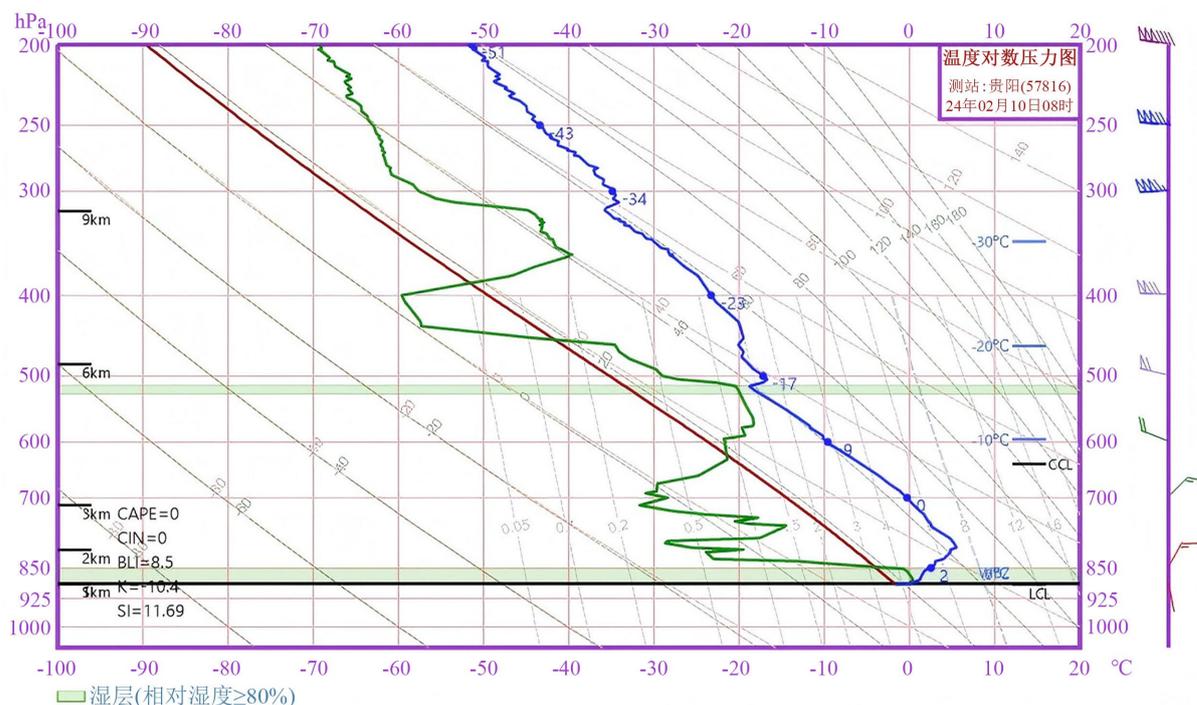


Figure 9. Guiyang temperature logarithmic pressure chart at 08:00 on 2024.2.10

图 9. 2024 年 2 月 10 日 08 时贵阳温度对数压力图

5.2. 能见度与空气质量指数变化特征

因 RVR (跑道视程)作为国际民航组织规定的低能见度天气下的机场运行标准，与大气能见度具有高度关联性，因此采用贵阳机场基准点的 RVR 数据与不同监测站点的空气质量指数及污染物浓度进行对比分析。从 2024 年 2 月 9 日 20:00~2 月 10 日 12:00 贵阳机场 RVR 与周边站点空气质量及污染物浓度时序图(图 10)可以看出，RVR 从 20:00 的 3200 米持续下降，至 04:00 骤降至 200 米并维持至 06:00，随后缓慢回升，此过程与燕子冲、中院村、新华路三站点的 AQI 及颗粒物浓度变化呈现显著协同性：以中院村为例，AQI 从 20:00 的 94 持续攀升至 01:00 的 500 并维持至 03:00，PM_{2.5} 同期从 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 跃升至 764 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，PM₁₀ 达 874 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，显示出辐射雾发展阶段污染物的快速累积，同时 RVR 的降低滞后于空气质量指标的上升，体现了“污染物先期累积 - 雾滴凝结”的辐射雾生成链条。整个过程中，地面风维持微风状态，抑制了污染物和雾滴的扩散。此外，三站点污染浓度存在空间分异，中院村站点在强浓雾时段 (01:00~03:00)各项指标显著高于燕子冲和新华路，可能与该站点所处地形或局地源排放有关。根据对污染物来源的调查，2 月 9 日为中国农历大年三十，贵阳市大规范燃放烟花爆竹，造成了短时间的空气污染，为辐射雾的形成提供了充足的凝结核。整体来看，图中 RVR 与空气质量指标的反向变化关系，体现了辐

射雾过程中“逆温抑制扩散-雾滴吸附污染物”的正反馈机制，为辐射雾与城市空气污染的相互作用提供了实时观测证据。

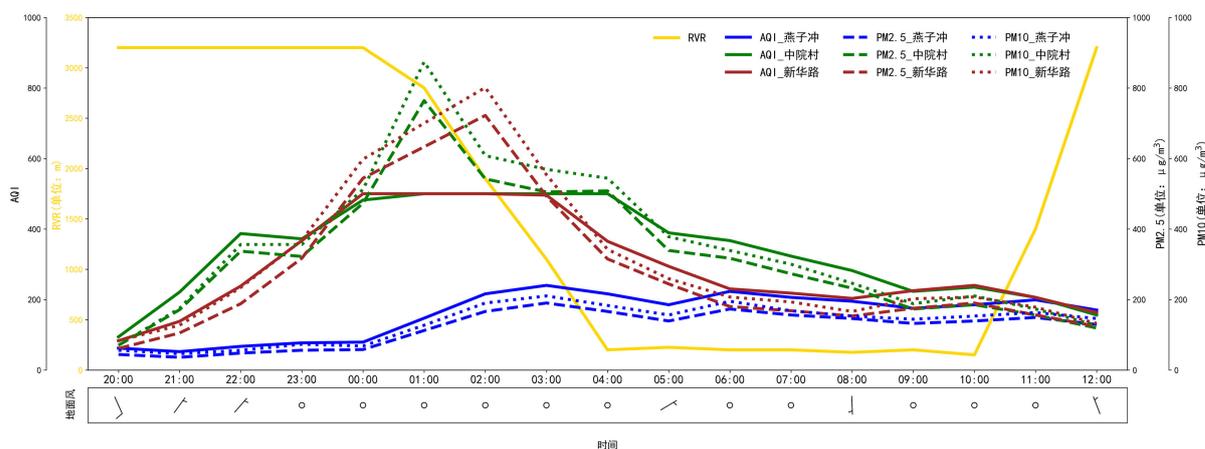


Figure 10. Temporal sequence diagram of RVR at Guiyang Airport and air quality with pollutant concentrations at surrounding stations from 20:00 on February 9 to 12:00 on February 10, 2024

图 10. 2024 年 2 月 9 日 20:00~2 月 10 日 12:00 贵阳机场 RVR 与周边站点空气质量及污染物浓度时序图

6. 结论

本文基于 2015~2024 年贵阳机场辐射雾观测数据、AWOS 自动观测系统资料及贵阳市空气质量监测数据，采用统计分析、相关性检验及典型案例剖析等方法，对辐射雾天气与城市空气质量的关联性进行研究，并以 2024 年 2 月 10 日典型辐射雾过程为例展开分析，得出结论如下：

(1) 2015~2024 年贵阳机场辐射雾发生频次呈波动上升趋势，有雾时段 AQI、PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度年均值显著高于全年平均水平，表明辐射雾天气与较高的颗粒物污染水平存在持续共现关系。

(2) 最低能见度与 PM_{2.5}/PM₁₀ 浓度呈显著负相关，PM_{2.5} 浓度每上升 8.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均最低能见度降低 100 米，低能见度对污染的指示性较强。

(3) 辐射雾持续时间与污染物浓度呈显著正相关，PM_{2.5} 浓度每上升 2.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均持续时间延长 1 小时。

(4) 2024 年 2 月 10 日案例中，中院村站点 PM_{2.5} 浓度从 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 升至 764 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较 RVR 下降时间提前约 3 小时，体现了“污染物先期累积-雾滴凝结”的辐射雾生成链条，且因春节燃放烟花爆竹造成空气污染提供凝结核加剧辐射雾发展。

不确定性与展望：本文虽揭示了贵阳机场辐射雾与空气质量的量化关联，但仍存在三方面局限性：首先，污染物监测站点与机场存在空间距离，难以精确捕捉雾体内部微物理过程，且未分析凝结核化学组分对雾滴形成的差异影响；其次，未量化局地地形与城市热岛对逆温层结构的调制作用，这可能解释与青岛[5]、成都[6]等平原城市研究的结论差异；第三，未引入风场辐合、边界层高度等关键动力参数建模，限制了对“静稳条件-污染物累积-辐射雾”反馈链条的完整解析。未来需结合气溶胶化学组分在线监测、激光雷达垂直探测及数值模拟等，深化地形-边界层-气溶胶的耦合机制研究；同时探索机器学习方法融合多源数据提升辐射雾起止时间与能见度转折点的预报精度。

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] 姚志平, 谢勇, 胡瑞, 等. 城市雾霾污染特征及其气象成因研究[J]. 环境科学与管理, 2023, 48(12): 51-55.
- [2] 朱丽, 张庆池, 王琴, 等. 2020年江苏泰州一次持续性雾-霾过程特征和成因分析[J]. 气象科技, 2022, 50(2): 243-253.
- [3] 杨红子. 乌海市雾对空气质量的影响[J]. 农业灾害研究, 2022, 12(2): 110-112.
- [4] 孙卫武, 何佳, 刘玉兰, 等. 一次连续大雾天气对空气质量的影响[J]. 农业科学研究, 2017, 38(2): 39-45.
- [5] 马艳, 黄容, 陈尚, 等. 青岛市雾和城市空气质量的特征及其相关关系[J]. 气象科技, 2015, 43(5): 925-931.
- [6] 赵欢, 庞轶舒. 成都地区雾的气候时空特征及其与近年空气质量的关系[J]. 高原山地气象研究, 2023, 43(3): 122-129.
- [7] 许敏, 李江波, 周玉都, 等. 廊坊市雾、霾分布概况及与重污染天气共存时的风场差异[J]. 环境工程技术学报, 2020, 10(5): 814-822.
- [8] 李云祯, 周平, 陈军辉, 等. 成都市空气质量指数与雾霾的关系研究[J]. 生态环境学报, 2016, 25(11): 1760-1766.
- [9] 阿来依·艾丁, 王健, 郎旭婷, 等. 乌鲁木齐雾日能见度与空气质量的关系及空气质量预报[J]. 新疆环境保护, 2023, 45(1): 25-32.
- [10] 代玉田, 王丽, 张优琴, 等. 德州市区空气质量与气象条件的关系[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(1): 281-284.
- [11] 赵月, 曲道宏, 崔修来, 等. 人工增雨对雾霾空气环境质量影响研究[J]. 科学技术创新, 2020(18): 168-169.
- [12] Hauke, J. and Kossowski, T. (2011) Comparison of Values of Pearson's and Spearman's Correlation Coefficients on the Same Sets of Data. *Quaestiones Geographicae*, **30**, 87-93. <https://doi.org/10.2478/v10117-011-0021-1>
- [13] 伏启翔, 覃愿, 王黎明, 等. 无金标准部分核实数据下基于 Bootstrap 的小样本齐性检验[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(2): 289-300.