

# 乌鲁木齐机场一次雨夹雪天气的数值模拟分析

尹才虎

民航新疆空中交通管理局, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2025年4月15日; 录用日期: 2025年5月14日; 发布日期: 2025年5月23日

## 摘要

利用WRF模式对2022年11月23日~24日乌鲁木齐机场的一次复杂天气过程进行了数值模拟, 分析得出: 此次过程中包含雨夹雪、雾、雨、雪等多种天气, 但乌鲁木齐机场航班正常率并未受影响, 主要是因为此次过程中降雨、降雪强度均较弱, 并且对于低能见度天气, 机组可以使用盲降; WRF参数化方案敏感性实验中WSM6和5-layer热扩散的组合, 模拟效果最好; 各个方案对高度场和温度场的模拟效果较好, 风场的模拟效果较差, 主要在纬向风的模拟效果差; 降水落区模拟效果好, 但大值区的降水量模拟效果差。对于组合反射率等高空间分辨率的雷达回波模拟, 数值模式只能模拟大致的范围和值区间, 不能达到较高精度的准确。

## 关键词

乌鲁木齐机场, 雨夹雪, 数值模拟, 敏感性实验

# Numerical Simulation Analysis of a Sleet Weather Event at Urumqi Airport

Caihu Yin

Xinjiang Air Traffic Management Bureau, Civil Aviation Administration of China, Urumqi Xinjiang

Received: Apr. 15<sup>th</sup>, 2025; accepted: May 14<sup>th</sup>, 2025; published: May 23<sup>rd</sup>, 2025

## Abstract

A numerical simulation of a complex weather process at Urumqi Airport from November 23 to 24, 2022 was conducted using the WRF model. The analysis showed that the process included various weather conditions such as sleet, fog, rain, and snow, but the normal flight rate at Urumqi Airport was not affected. This was mainly because the intensity of rainfall and snowfall was weak during the process, and for low visibility weather, the crew could use blind landing; The combination of WSM6 and 5-layer thermal diffusion showed the best simulation effect in the sensitivity experiment

of WRF parameterization scheme; The simulation effects of various schemes on the height field and temperature field are good, while the simulation effect of the wind field is poor, mainly in the simulation effect of zonal wind; The simulation effect of precipitation areas is good, but the simulation effect of precipitation in high-value areas is poor. For the simulation of radar echoes with high spatial resolution such as combined reflectivity, numerical models can only simulate approximate ranges and value intervals, and cannot achieve high accuracy.

## Keywords

Urumqi Airport, Sleet, Numerical Simulation, Sensitivity Experiment

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

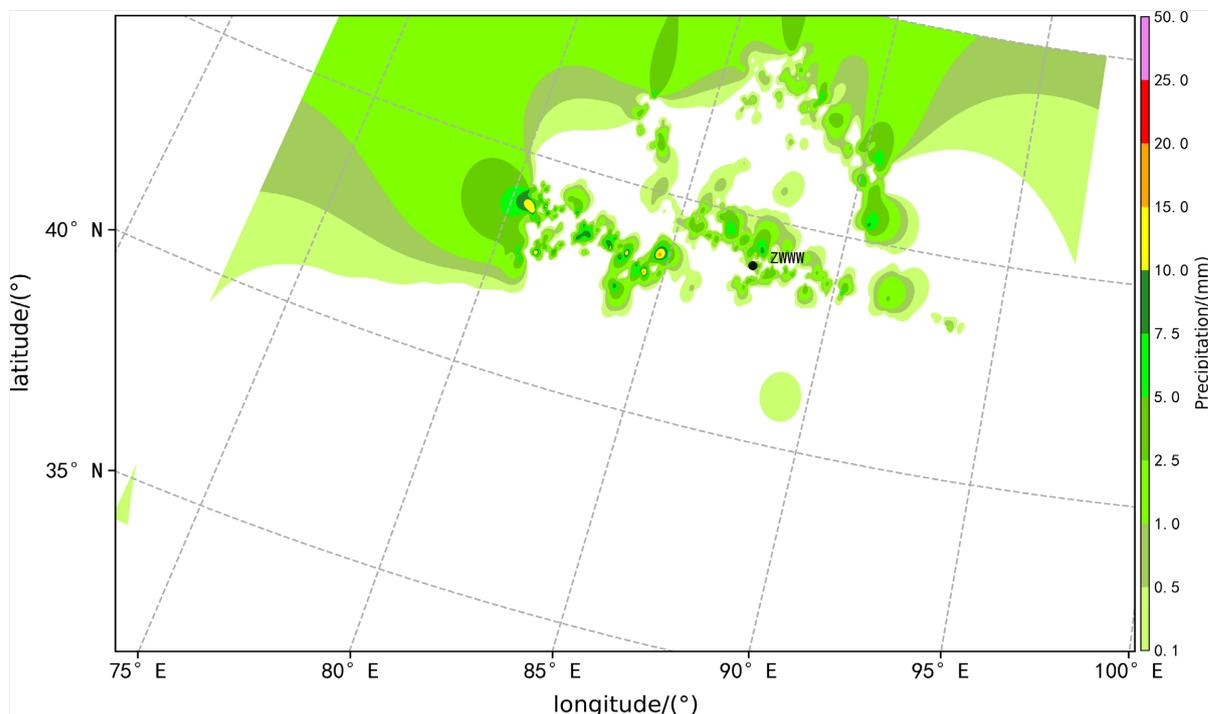
对于降水相态的转变与 WRF 模式的研究, 业内已有许多进展。孙莎莎[1]等通过利用多源观测资料分析了降水相态转变时的一些特征, 可以为临近预报提供参考。陶健红[2]等使用 WRF 模式模拟了一次暴雪天气过程, 表明 WRF 模式对应中小尺度暴雪有较强的模拟与预报能力。陈功[3]等对比分析了多种物理参数化方案, 指出各方案对云水粒子处理的差异是降水量差异的主要来源。高茜[4]等利用 WRF 模式研究了两次降雪过程中的微物理转化机制。刘香娥[5]等对一次降雪过程进行数值模拟, 分析了雪的增长过程中的特征。

雨夹雪天气相比暴雨、暴雪天气, 对人民生命财产安全危害较小, 但对于航班运行影响仍然较大。雨夹雪天气的预报难点主要在于把握降水相态转变的时间, 包括对中低层气温、风场及降水量的预报。WRF 模式是气象预报与诊断常用的数值模拟工具之一, 可以提高气象要素的时间分辨率与空间分辨率。并且通过调整预设的物理参数化方案, 使其更加匹配实况, 减少模拟的误差。本文利用 WRF 模式对 2022 年 11 月 23~24 日乌鲁木齐机场一次雨雪天气进行数值模拟, 从而分析此次过程中的模式效果和天气特点, 为后续雨夹雪天气的预报提供参考。

## 2. 天气概况

2022 年 11 月 23 日~24 日, 北疆大部有明显的降水天气产生(图 1), 部分地区 24 小时降水量达 15 mm 以上, 乌鲁木齐机场上游地区 24 小时降水量在 6~7 mm 左右。根据乌鲁木齐机场气象实况报文, 11 月 23 日~24 日乌鲁木齐机场交替出现雾、雨、雪天气。其中 23 日 06:53~08:00、12:00~12:30、20:09~23:00 出现大雾天气(温度为零上), 23 日 13:00、23:16 出现冻雾天气(温度为零下), 主导能见度 150~900 m, 云高 60~90 米。23 日 12:00~13:30、22:00、23:00~24 日 02:00、24 日 03:00~03:30 出现小雪天气, 23 日 14:00~14:30、22:30 出现小雨夹雪天气, 23 日 15:00~18:00 出现小雨天气, 此次过程乌鲁木齐机场累计降水量为 4.2 mm, 新增积雪深度为 1 cm。

从乌鲁木齐机场的组合反射率来看, 降雪开始时(图 2), 回波中心强度可达 25~30 dBZ, 当转为雨夹雪时(图略), 回波中心强度为 20~25 dBZ, 当转为小雨时(图略), 回波中心未覆盖本场, 本场上空回波较弱, 强度在 15 dBZ 以下。从径向速度图上来看(图略), 可以看到这个天气过程中, 环境风向为西北风, 风力较弱, 有弱的冷平流。



注：用软件 Python 绘制。

**Figure 1.** Interpolation map of regional automatic station precipitation from 08:00 on November 23, 2022 to 08:00 on November 24, 2022

**图 1.** 2022 年 11 月 23 日 08 时~24 日 08 时区域自动站降水量插值图

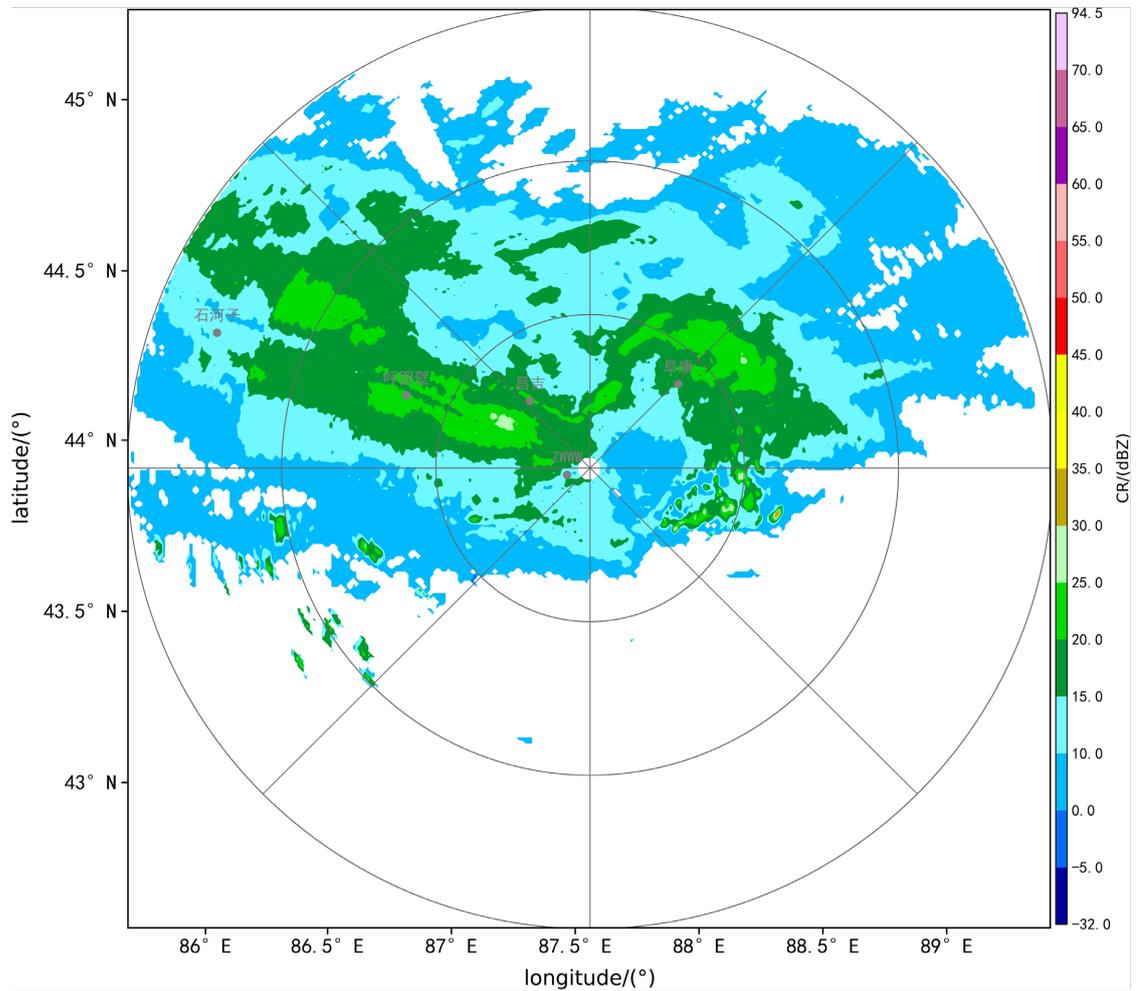
11 月 23 日乌鲁木齐机场起降 36 架次，航班正常率 100%。从数据上来看，当日的雾、雨、雪天气，对航班运行没有影响，主要原因分析如下：一是乌鲁木齐机场当日的航班量小，并且航班均有盲降资格，大雾天气造成的低能见度运行未影响正常率。二是此次雨雪过程中的降雪量小，降雪强度和降雨强度都不大，所以此次雨雪天气也未对正常率有影响。

### 3. 敏感性实验

基于现有的乌鲁木齐机场中尺度数值模式，挑选 WRF 物理参数化方案，并设计方案敏感性实验如下：长波辐射选择 RRTM，短波辐射选择 Dudhia，近地面层选择 Monin-Obukhov，行星边界层选择 YSU，积云参数化选择 Kain-Fritsch，微物理过程选择 WSM6、Goddard 和新 Thompson，主要是考虑这三个参数包含了对冰、雪、霰的模拟，陆面层选择 Noah 和 5-layer 热扩散，主要是考虑这两个参数包含雪盖的影响。微物理过程和陆面层两两互为对照组，共设计了 6 组方案(表 1)。

模拟的区域为亚欧区域(图略)，分辨率为 27 km，使用 Lambert 投影，投影中心为 44°N，87°E。模拟时段为 2022 年 11 月 22 日 14 时~2022 年 11 月 24 日 08 时，时间间隔为 3 小时，初始场和边界条件均使用 fnl0.25°。由于 WRF 模式在垂直方向是采用地形跟随质量坐标，地面以下是缺少数据的。乌鲁木齐机场位于北疆沿天山一带，受地形的影响效果较大。观察发现，乌鲁木齐机场的高空要素的模拟结果在 800 hPa 以下均为缺省值，所以使用 500 hPa 高度场、700 hPa 温度场、700 hPa 湿度场、700 hPa 风场作为本次模拟的检验要素。

检验方法是获取乌鲁木齐机场上空的模拟场和再分析场的时间序列，计算二者的皮尔逊相关系数，并做显著性检验。计算的结果为表 2，表中的数字代表皮尔逊相关系数，数字后加\*\*为通过了 99%的



注：用软件 Python 绘制。

**Figure 2.** Urumqi Airport, November 23, 2022 12:02 combined reflectivity

**图 2.** 乌鲁木齐机场 2022 年 11 月 23 日 12 时 02 分组合反射率

**Table 1.** Comparison table of WRF physical parameterization scheme

**表 1.** WRF 物理参数化方案对比表

名称	微物理过程	陆面层
方案一	WSM6	Noah
方案二	Goddard	5-layer 热扩散
方案三	WSM6	5-layer 热扩散
方案四	Goddard	Noah
方案五	新 Thompson	Noah
方案六	新 Thompson	5-layer 热扩散

显著性检验，数字后加\*为通过 95% 的显著性检验。可以看出 700 hPa 温度的模拟效果较好，正相关性均在 0.94 及以上，700 hPa 风场的模拟效果较差，其中 700 hPa 风场 U 分量，既纬向风的模拟，各方案均未通过显著性检验。综合来看，方案三的 700 hPa 温度与 700 hPa 相对湿度与再分析资料的正相关性较好，

所以使用方案三作为本次天气过程分析的数值模拟方案。

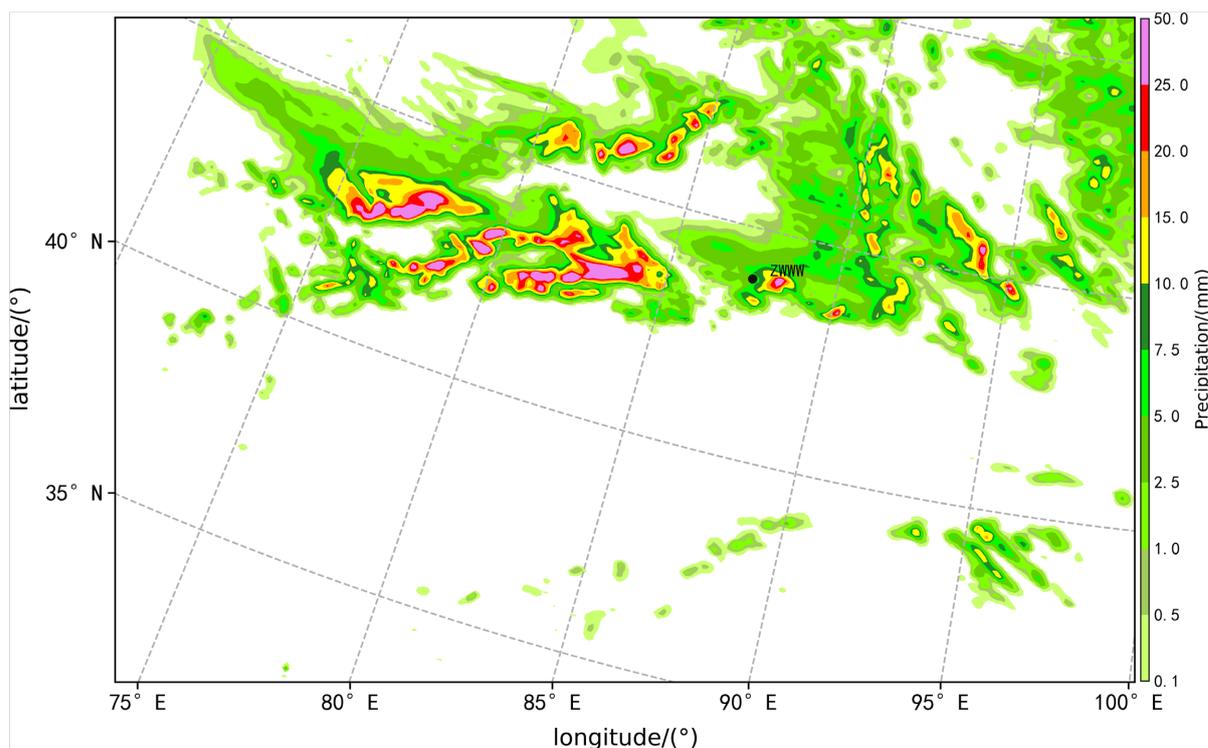
**Table 2.** Pearson correlation coefficient table of WRF simulation field and reanalysis field at Urumqi Airport  
**表 2.** 乌鲁木齐机场 WRF 模拟场与再分析场的皮尔逊相关系数表

名称	500 hPa 高度	700 hPa 相对湿度	700 hPa 温度	700 hPa 风场 U 分量	700 hPa 风场 V 分量
方案一	0.86**	0.82*	0.94**	0.64	0.89**
方案二	0.86**	0.82*	0.95**	0.69	0.90**
方案三	0.86**	0.85**	0.95**	0.65	0.91**
方案四	0.86**	0.78*	0.94**	0.67	0.89**
方案五	0.86**	0.84**	0.94**	0.66	0.89**
方案六	0.85**	0.87**	0.94**	0.69	0.91**

最终确定的 WRF 物理参数化方案为：区域采用三重双向嵌套，分别为亚欧区域、新疆区域和乌鲁木齐机场终端区(图略)，即 D01 区、D02 区和 D03 区，对应分辨率为 27 km、9 km、3 km，长波辐射选择 RRTM，短波辐射选择 Dudhia，近地面层选择 Monin-Obukhov，行星边界层选择 YSU，微物理过程选择 WSM6，陆面层选择 5-layer 热扩散，积云参数化选择了 Kain-Fritsch，D03 区不使用积云参数化。

#### 4. 模拟分析

对比模拟场(图 3)和实况(图 1)的降水量来看，新疆区域的降水落区模拟较为准确，主要是集中



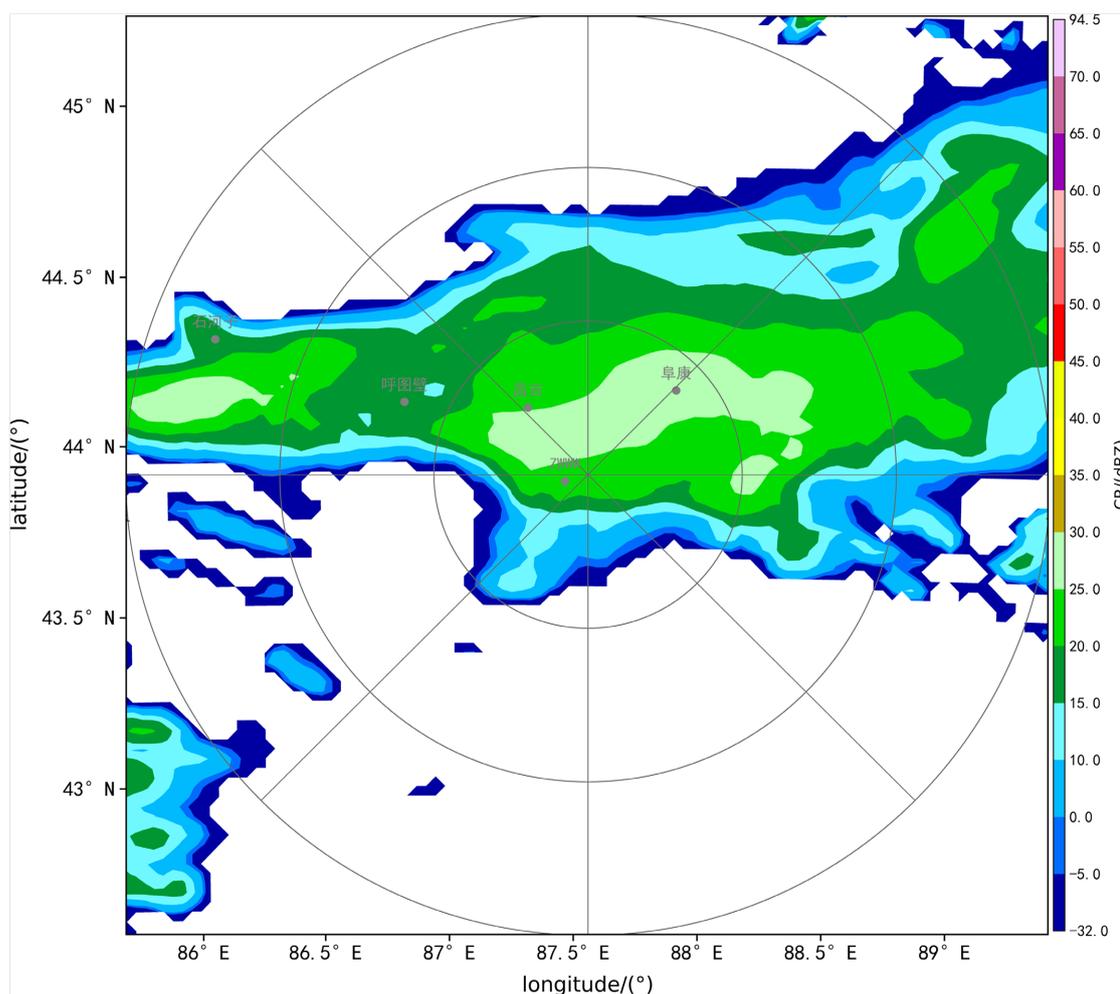
注：用软件 Python 绘制。

**Figure 3.** Total precipitation in WRF D02 area from 08:00 on November 23, 2022 to 08:00 on November 24, 2022

**图 3.** WRF D02 区 2022 年 11 月 23 日 08 时~24 日 08 时总降水量

在伊犁河谷至天山山区一带。但模拟的降水量明显偏大，其中降水量超过 15 mm 的范围远大于实况站点的范围。原因可能是对于单个降水量极高的站点，数值模式会将这个值进行范围放大，导致区域性的降水量偏大。从而说明数值模式对应降水量的极值，偏差较降水量的平均值模拟偏差会比较大。

根据乌鲁木齐机场模拟的组合反射率来看(图 4)，和实况(图 2)一致的是在乌鲁木齐机场北侧有一条明显的降水回波带，且总体强度均在 20~25 dBZ 左右。不一致的是在小范围内回波的区别，模拟场显示在乌鲁木齐东北侧 50~150 km 有回波带，但实况上并没有。主要原因是本次模拟只使用了 fnl0.25° 的资料作为初始场和边界条件，并未进行雷达资料的同化，所以对于组合反射率等高空间分辨率的气象要素，数值模式对于微小尺度上的要素，模拟准确率就较低。



注：用软件 Python 绘制。

Figure 4. WRF D03 zone combined reflectance at 12:00 on November 23, 2022

图 4. WRF D03 区 2022 年 11 月 23 日 12 时组合反射率

## 5. 结论

通过以上分析可以得出以下结论：(1) 本次乌鲁木齐机场的雾、雨、雪天气，虽然天气现象复杂，并未对航班正常率有所影响，主要是降雨强度和降雪强度并不强；低能见度天气由于航班均有盲降资格，也并未对正常率有影响；(2) 敏感性试验中 WSM6 和 5-layer 热扩散的组合相较于其他方案，表现比较好，

700 hPa 气温模拟效果好, 700 hPa 风场各方案模拟效果均较差; (3) 降水落区的模拟效果好, 但降水量大值区的量级模拟偏差较大, 说明对于降水量的极值, 数值模式的偏差会放大; (4) 对于雷达回波等高空间分辨率的要素, 数值模拟只能进行大致的范围预报, 对应微小尺度的模拟偏差较大。

### 参考文献

- [1] 孙莎莎, 孙艺, 徐婷婷, 等. 2021 年 11 月 7 日山东极端暴雪过程降水相态的多源观测特征分析[J]. 气象, 2023, 49(7): 830-842.
- [2] 陶健红, 张新荣, 张铁军, 等. WRF 模式对一次河西暴雪的数值模拟分析[J]. 高原气象, 2008(1): 68-75.
- [3] 陈功, 廖捷, 孙凌. WRF 微物理方案对四川一次强降水模拟的影响[J]. 高原山地气象研究, 2012, 32(1): 43-50.
- [4] 高茜, 郭学良, 刘香娥, 等. 北京北部山区两次降雪过程微物理形成机制的观测-模拟研究[J]. 大气科学, 2020, 44(2): 407-420.
- [5] 刘香娥, 何晖, 陈羿辰, 等. 北京地区一次降雪系统大气水凝物输送特征及降雪微物理机制的数值模拟研究[J]. 大气科学, 2022, 46(3): 507-519.