

不同微物理参数化方案对乌鲁木齐机场一次强降雪天气的数值模拟能力评估

张 茜

民航新疆空管局气象中心, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2022年10月17日; 录用日期: 2022年11月15日; 发布日期: 2022年11月23日

摘 要

本文以 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的NCEP再分析资料为初始场, 利用WRF模式对2021年1月23日乌鲁木齐机场出现的强降雪天气过程进行数值模拟研究。模式采用不同微物理参数化方案进行敏感性试验, 并与自动站降水数据和雷达基数据对比, 并分析了此次强降雪天气过程中水凝物的时空演变特征。研究表明: Thompson方案更好的模拟出了本次强降雪天气过程, 表现在模拟的降水的开始结束时间, 降水量的大小和中雪出现时间都与实况最接近。对比雷达反射率来看, Thompson方案和WSM6方案模拟的回波区域偏大, 强度偏强, Lin方案模拟的强度偏弱, 综合来看Thompson方案的模拟结果更接近雷达实际探测数据。从云微物理特征上看, 由于温度低, 三种方案基本模拟出的都是冰相粒子, Lin方案模拟的雪、冰晶和霰的含量比较均衡, 其中霰的含量是三个方案中最多的, Thompson方案模拟的雪含量最多, 冰晶和霰含量很少, WSM6方案模拟的雪和冰晶含量多, 其中冰晶含量是三种方案中最多的。

关键词

强降雪, 数值模拟, 云微物理过程

Numerical Simulation of a Heavy Snowfall at Urumqi Airport with Different Microphysical Parameterization Schemes

Qian Zhang

Xinjiang ATMB CAAC, Urumqi Xinjiang

Received: Oct. 17th, 2022; accepted: Nov. 15th, 2022; published: Nov. 23rd, 2022

文章引用: 张茜. 不同微物理参数化方案对乌鲁木齐机场一次强降雪天气的数值模拟能力评估[J]. 气候变化研究快报, 2022, 11(6): 1024-1032. DOI: 10.12677/ccrl.2022.116106

Abstract

In this paper, the NCEP reanalysis data of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ was used as the initial field, and the WRF was used to numerically simulate the heavy snowfall weather process at Urumqi Airport on January 23, 2021. Different microphysical parameterization schemes were used to carry out sensitivity tests, comparing with automatic station precipitation data and radar base data, and analyzed the spatial and temporal evolution characteristics of water condensate during the heavy snowfall. The results show that the Thompson scheme can better simulate the heavy snowfall weather process, which shows in the beginning and end time of simulated precipitation, the size of precipitation and the occurrence time of moderate snow are the closest to the real situation. Comparing with the radar reflectance, the echo area simulated by Thompson scheme and WSM6 scheme is large and the intensity is strong, while the intensity simulated by Lin scheme is weak. In general, the simulation results of Thompson scheme are closer to the actual radar detection data. Looking from the micro cloud physical characteristics, because of the low temperature, three basic simulating scheme are ice phase particles, Lin, a scheme of simulation of snow, ice and sleet content is relatively balanced, among them the content of graupel is one of the most in the three schemes, Thompson scheme simulation of snow, the most abundant content of ice crystals and sleet rarely, WSM6 scheme simulation of snow and ice crystals content more, The content of ice crystal is the most among the three schemes.

Keywords

Heavy Snowfall, Numerical Simulation, Cloud Microphysical Process

Copyright © 2022 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

近年来, 冬季暴雪灾害性天气频发, 暴雪也被广泛关注, 暴雪天气是新疆冬季最常见的灾害性天气之一。

很多学者对北疆强降雪做了大量研究, 主要集中在环流背景、天气尺度及多尺度配置、水汽特征和物理诊断等方面, 张俊兰[1]、陈涛[2]等分类总结了北疆暖区暴雪及冷锋暴雪的天气尺度模型, 万瑜[3] [4]等分析乌鲁木齐暴雪环流背景及成因, 表明暴雪落区出现在城区及周围, 降雪强度大且分布不均, 中尺度地形及城市热岛效应使乌鲁木齐暴雪具有明显的中- β 尺度特征。李圆圆[5]等对一次中亚低涡造成的暴雪天气也做了研究, 认为在配合有良好的动力条件下, 500 hPa 的偏南急流和 700 hPa 东风急流为暴雪提供了良好的水汽和热量输送。张云惠[6]等统计 2000 年以来北疆暴雪灾害空间分布表明, 乌鲁木齐地区平均每年发生暴雪 2 次, 仅次于伊犁河谷东南部山区的新源, 位居第二, 可见暴雪灾害与新疆地形关系密切。

崔彩霞等[7], 张俊兰[8]等针对北疆暴雪做了全面的天气学分析, 明确了北疆暴雪的主要影响系统、中尺度环境场特征和地形在暴雪天气中的增幅作用等。

有很多学者通过数值模拟研究降雪天气过程, 张恒德[9], 王秀英[10]通过数值模拟研究了强降雪的

发生机理, 对其特征进行了分析。随着数值预报的发展, 很多学者通过数值模式来研究不同云微物理方案对降雪模拟的差别以及降水相态变化的研究。李一凡[11], 刘香娥[12]就通过对降雪天气进行模拟并在此基础上分析了云微物理结构及各种水成物的形成机制。王淑彩[13], 于晓晶[14], 滕方达[15]则对降雪天气开展了云微物理参数化方案的敏感性试验, 分析不同云微物理参数化方案在降雪天气中的适用性。

本文选择 2021 年 1 月 23 日发生在乌鲁木齐机场的强降雪天气开展云微物理参数化方案的敏感性试验, 利用 NCEP 一日 4 次 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 再分析资料作为初始场, 利用 WRF 模式模拟对比不同云微物理参数化方案模拟的降水量、雷达回波、水凝物等物理量特征, 对不同方案对降水量和降水相态的把握进行分析, 为冬季降水预报及参数化方案的改进提供一定的参考依据。

2. 天气实况及天气形势分析

2021 年 1 月 22-24 日北疆大部、阿克苏北部及哈密北部山区出现小雪, 伊犁河谷、塔城北部及北疆沿天山一带部分地区出现中到大雪, 最大降雪中心为乌鲁木齐。乌鲁木齐机场 2021 年 1 月 23 日 02:30~24:00 出现小雪天气, 其中 06:39~07:00, 12:14~13:00 出现中雪, 累计降雪量达到 8.6 mm, 新增积雪深度 16 cm, 此次强降雪造成 50 架次航班延误和备降, 给乌鲁木齐机场的航班正常带来了极大影响。

2021 年 1 月 21 日 08 时 500 hPa 形势场可以看到, 欧亚范围为明显的径向环流, 西伯利亚至里咸海地区有低槽活动, 22 日 08 时东欧脊发展, 脊前西北风引导冷空气南下, 环流径向度进一步加深发展, 西西伯利亚低槽分裂短波与中亚低槽汇合, 中纬度锋区加强, 中亚低槽快速东移造成此次强降雪寒潮大风沙尘天气过程。

3. 数值模拟试验设计

3.1. 云微物理参数化方案设计

降雪主要是冷云降水所致, 冰相云微物理过程在其中起着至关重要的作用。合理的描述降雪云微物理过程是准确模拟降雪天气的关键之一, 选取对模拟区域的微物理过程描述合理的微物理方案对模拟效果的好坏具有至关重要的作用。因此选取了 WRF 模式中的三种含冰相过程的方案进行对比, 其中包括了 Lin 方案, Thompson 方案和 WSM6 方案。

Lin 方案包括对水汽、云水、雨水、云冰、雪和霰的预报, 在结冰点以下, 云水处理为云冰, 雨水处理为雪。Thompson 方案是一种包含冰、雪和霰过程的适用于高分辨率模拟的方案。与早前单参数总体微物理参数化方案相比, 该方案不仅改进了物理过程和程序代码, 还加入了一个查算表以提供更多详细的谱分档机制。该方案假设雪粒的尺度分布不仅与冰水含量有关, 而且还与温度有关, 并进一步假设雪粒为非球形, 其总体密度与粒径大小有反相关。WSM6 方案是对 WSM5 方案的补充和扩展, 另外包括了霰及其相关过程。该方案采用新的方法表示雪和霰粒子混合相的下落速度, 即对雪和霰采用混合率加权后, 所得单一下落速度值, 并且该下落速度还可用于沉降和增长过程。为了增加垂直廓线的精度。在下降过程中会考虑凝结、融化过程。

3.2. 资料和模拟方法

采用中尺度模式 WRF4.0 版本模拟此次降雪天气过程, 利用空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 、时间间隔 6 小时的 NCEP 再分析资料作为模式初始场和侧边界条件对 2021 年 1 月 23 日乌鲁木齐机场发生的一次大到暴雪进行模拟, 此次模拟设置了 27 km、9 km、3 km 三重嵌套网格, 9 km 分辨率覆盖新疆, 3 km 覆盖乌鲁木齐机场终端区。垂直方向 34 层, 共积分 48 小时。物理参数化方案见表 1。

Table 1. Physical parameterization scheme of WRF mode
表 1. WRF 模式物理参数化方案

物理参数化方案	具体方案名称
边界层方案	YSU 方案
长波辐射方案	Rrtm 方案
陆面方案	Noah 方案
短波辐射方案	Dudhia 方案
地面层方案	Monin-Obukhov 方案
积云对流参数化方案	Kain-Fritsch 方案(D3 区不采用)
微物理方案	Lin、Thompson、WSM6 方案

4. 模拟结果分析

4.1. 降水结果对比分析

从三种云微物理方案模拟的 D1 区的形势场可以看到(图略), 各个方案的模拟结果比较一致, 基本都模拟出了此次降雪过程的影响系统。

模式积分起止时间为 2021 年 1 月 22 日 08 时至 1 月 24 日 08 时。考虑到模式存在 12 小时的响应时间, 并考虑到该时段乌鲁木齐机场无降水, 因此这里仅选取模式 22 日 20 时至 24 日 08 时累计降水量与同时段实测降水量进行对比。图 1(a)为中国新疆地面自动气象站 2021 年 1 月 22 日 08 时至 1 月 24 日 08 时实测降水数据。

如图 1(b)~(d)所示, 通过新疆区域 2021 年 1 月 22 日 20 时-24 日 08 时降水实况图和三个微物理方案的模拟降水可以看出, 三个方案都模拟出了北疆区域这次降水过程, 强降水落区主要位于塔城地区、伊犁河谷、阿克苏北部山区及北疆沿天山一带, 强降水落区降水量达到 12~24 mm。三个方案均模拟出了强降水落区, 降水量级也达到了 12~24 mm。同时都对库尔勒附近降水模拟偏大, 对比北疆沿天山一带的降水落区可以看到, WSM6 方案对比 Lin 方案和 Thompson 方案模拟区域更接近实况。

对比乌鲁木齐机场的降雪情况来看, 乌鲁木齐机场实况降雪开始于 23 日 02:30, 三个方案的模拟降雪开始时间基本开始于 23 日 01:00, 降雪开始时间略偏早, 实况降雪结束时间为 24 日 00:00, Lin 方案结束时间为 23 日 15:00, Thompson 方案结束时间为 23 日 17:00, WSM6 方案结束时间为 12:00, 对比来看, 三个方案结束时间都偏早, 其中 Thompson 方案更接近实况。乌鲁木齐机场在降雪过程中出现了两个阶段的中雪天气, 分别是在 23 日 06:39~07:00 和 12:14~13:00, 三个方案都模拟出了第一段中雪时间, 而没有模拟出第二段中雪时段。乌鲁木齐机场此次降雪累积降水量为 8.6 mm, Lin 方案模拟总降水量为 8.02 mm, Thompson 方案为 8.64 mm, WSM6 方案为 10.34 mm, 可以看到, WSM6 方案明显偏大, Thompson 方案模拟降水量与实况一致。对比三个方案来看, 对此次乌鲁木齐机场强降雪的模拟 Thompson 方案的效果最好。

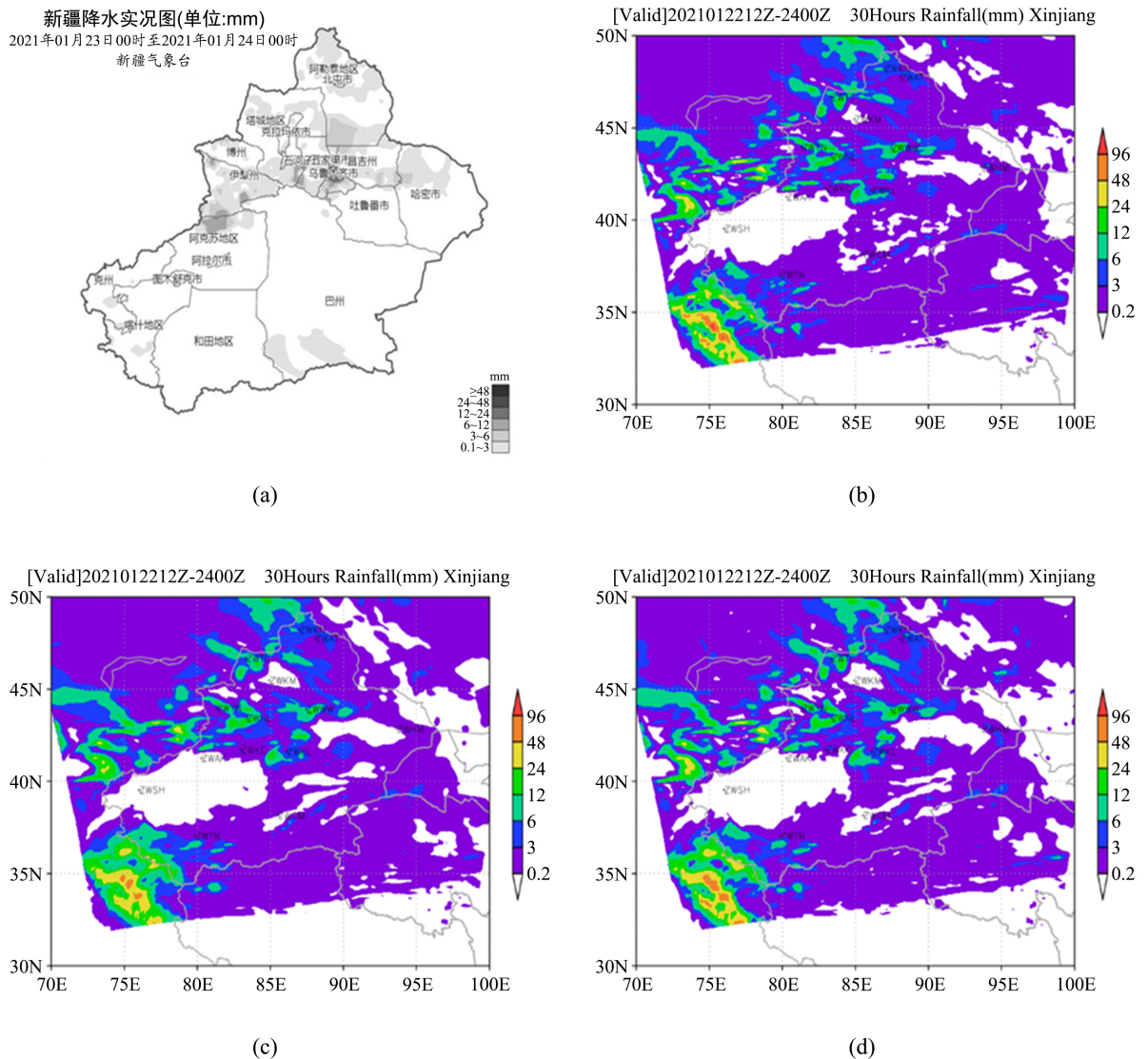


Figure 1. (a) Precipitation reality of National Automatic Station, precipitation simulation of Xinjiang region; (b) Lin scheme; (c) Thomson scheme; (d) WSM6 scheme (unit: mm)

图 1. (a) 国家自动站降水实况; (b) Lin 方案; (c) Thomson 方案; (d) WSM6 方案新疆区域降水模拟(单位: mm)

4.2. 雷达反射率模拟对比分析

雷达观测的反射率因子能很好的反映大气中的水物质的含量, 所以利用不同的云微物理参数化方案模拟的雷达反射率与雷达基数据进行比较。此次降雪, 乌鲁木齐机场在 1 月 23 日 06:39~07:00 出现了中雪天气, 强降雪导致能见度下降至 700 米。图 2(a)为乌鲁木齐机场强降雪时的雷达反射率图。如图 2(b)~(d)所示, 通过对比发现, 三个方案模拟的区域偏大, 且整体偏南。雷达回波强中心位于乌鲁木齐机场附近, 强度达到 30 dBZ, 昌吉雷达回波强度为 15~20 dBZ, Thompson 方案和 WSM6 方案的模拟的强回波区主要位于乌鲁木齐机场及其以南, Lin 方案模拟的强回波中心偏东。Thompson 方案和 WSM6 方案对鲁木齐机场回波模拟略偏强, 达到 35 dBZ, 而 Lin 方案模拟强度偏弱, 只有 15~20 dBZ, Thompson 方案模拟出了乌鲁木齐至昌吉及其以北方向的回波强度, 而 WSM6 方案和 Lin 方案对则没有模拟出该区域的回波强度。总体来说, Thompson 方案对强降雪时的雷达反射率的模拟效果最好。

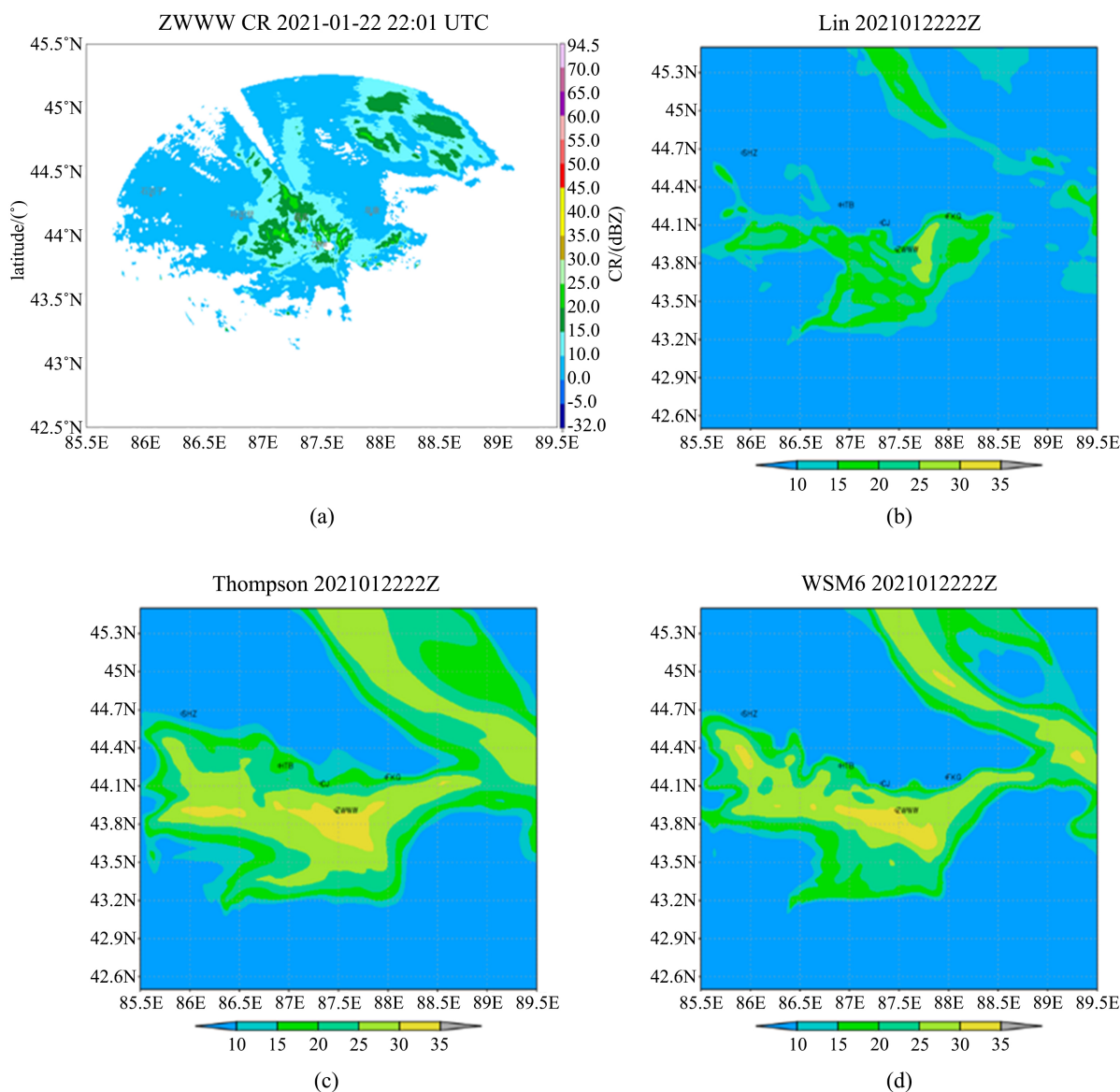


Figure 2. (a) Observed by Doppler radar, Simulated radar combined reflectance by (b) Lin scheme; (c) Thomson scheme; (d) WSM6 scheme at 06:00 on January 23, 2021 (unit dBZ)

图 2. (a) 2021 年 1 月 23 日 06 时多普勒雷达实测, (b) Lin 方案; (c) Thomson 方案; (d) WSM6 方案模拟的雷达组合反射率(单位 dBZ)

4.3. 云微物理粒子分布特征对比

如图 3(a)~(c)所示, 分析三种方案的水凝物粒子质量垂直积分随时间的变化可以看到, 三种方案中的粒子在降雪开始前都有一个明显的上升趋势, 基本上都是在 23 日 04~06 时达到最大, 后开始逐渐减小。三种微物理方案的粒子基本都以冰相粒子为主, 且三种方案的粒子含量差异较大, Lin 方案中出现了雪粒子、冰晶粒子和霰粒子, 其中霰粒子含量最多, 最大值达到了 $0.35 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其次是雪粒子, 霰粒子减少最快, 在 23 日 08 时之后, 霰粒子快速减少, 空中以雪粒子和冰晶粒子为主。Thompson 方案中以雪粒子为主, 其次还出现了少量的云水、冰晶粒子和霰粒子, 雪粒子的峰值达到了 $1.7 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。WSM6 方案中雪粒子最多, 冰晶粒子其次, 还有少量的霰粒子, 雪粒子的峰值达到了 $1.2 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

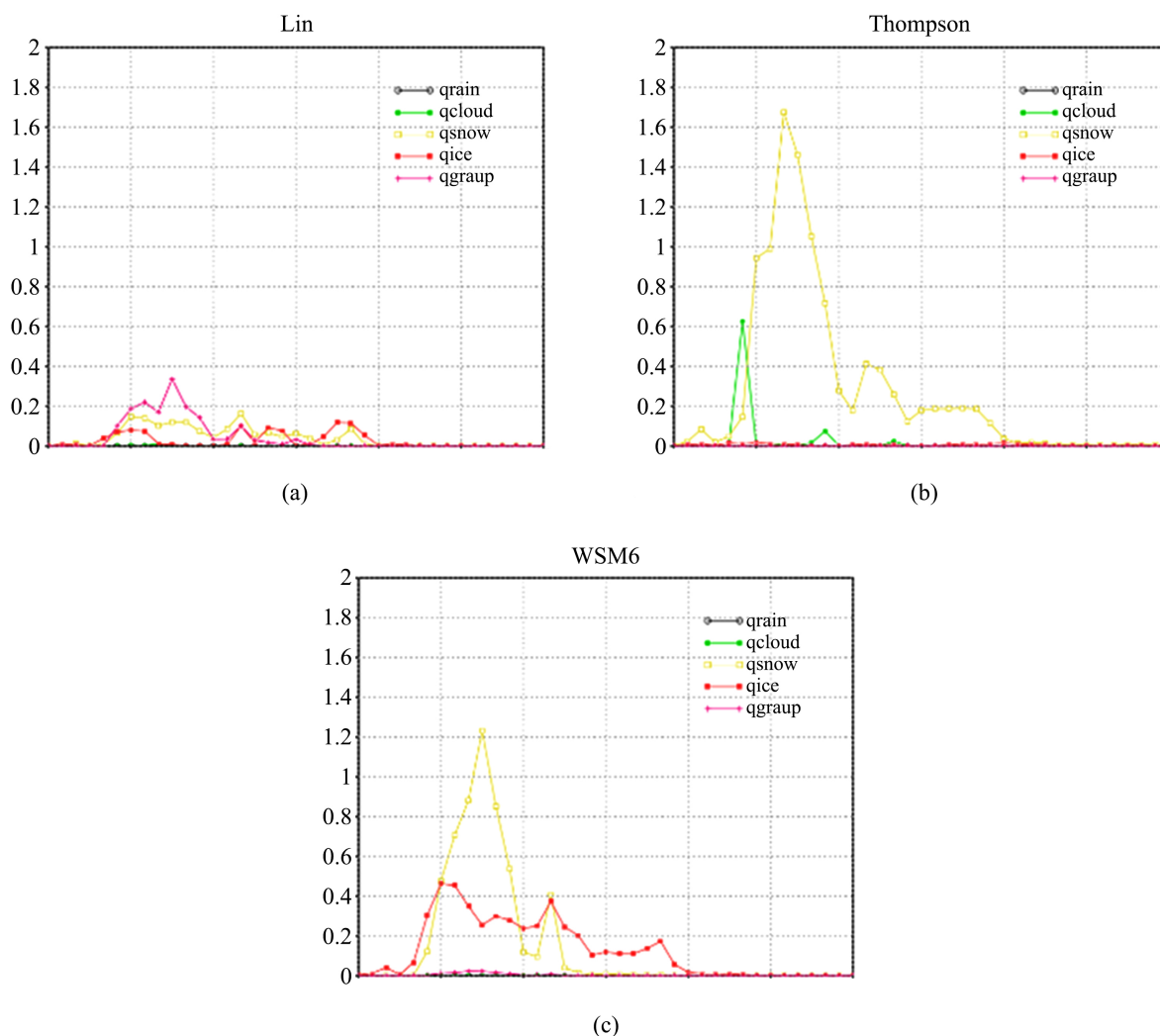


Figure 3. Variation of vertical integral of hydrogenic mass with time in (a) Lin scheme; (b) Thompson scheme; (c) WSM6 scheme (unit: $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

图 3. (a) Lin 方案; (b) Thompson 方案; (c) WSM6 方案中水凝物粒子质量垂直积分随时间的变化(单位: $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

分析三种微物理方案的水凝物粒子发现三种方案的主要水凝物粒子都是冰相粒子。如图 4 所示, 为三种云微物理方案模拟的乌鲁木齐机场冰相粒子含量的时间高度分布。如图 4(a1)、图 4(b1)、图 4(c1)所示, 可以看到 Lin 方案的雪粒子含量最少, Lin 方案中雪粒子基本分布在 900~400 hPa, 雪粒子最大值出现在 23 日 04~07 时之间, 位于 700 hPa 高度, 最大值达到 $5.5 \times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而 Thompson 方案和 WSM6 方案雪粒子含量较大, 两个方案的雪粒子基本都集中在 700 hPa 以下, 并且接地, 两个方案的雪粒子都出现在 23 日 02 时~08 时之间, 雪粒子大值基本都出现在 03~07 时之间, Thompson 方案雪粒子最大值达到了 $45 \times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, WSM6 方案达到 $40 \times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 雪粒子大值区高度基本都伸展到了 800 hPa 左右。而对于冰晶粒子, 如图 4(a2)、图 4(b2)、图 4(c2)所示, Lin 方案和 Thompson 方案的冰晶粒子高度都比较高, Lin 方案中冰晶粒子基本存在于 600~300 hPa, 冰晶粒子大值区位于 400 hPa 和 500 hPa, 最大值达到 $5 \times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Tompson 方案冰晶粒子存在的高度更高, 在 400~200 hPa 之间, 最大值区位于 350~300 hPa, 最大值达到 $0.8 \times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 冰晶粒子含量最大的是 WSM6 方案, 冰晶粒子含量从地面一致伸展至 300 hPa 左右, 冰晶粒子大值区位于 700~400 hPa 之间, 最大值达到 $10 \times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。如图 4(a3)、图

4(b3)、图 4(c3)所示, 为对霰的模拟, 三个方案模拟出的霰粒子基本都出现在 700 hPa 以下, 出现在 23 日 02~08 时, 其中 Lin 方案模拟出的霰粒子最多, 最大值到达了 $10 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Thompson 方案霰粒子最少, 最大值只有 $0.06 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 出现在乌鲁木齐机场出现中雪的时段, WSM6 方案最大值达到了 $0.9 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

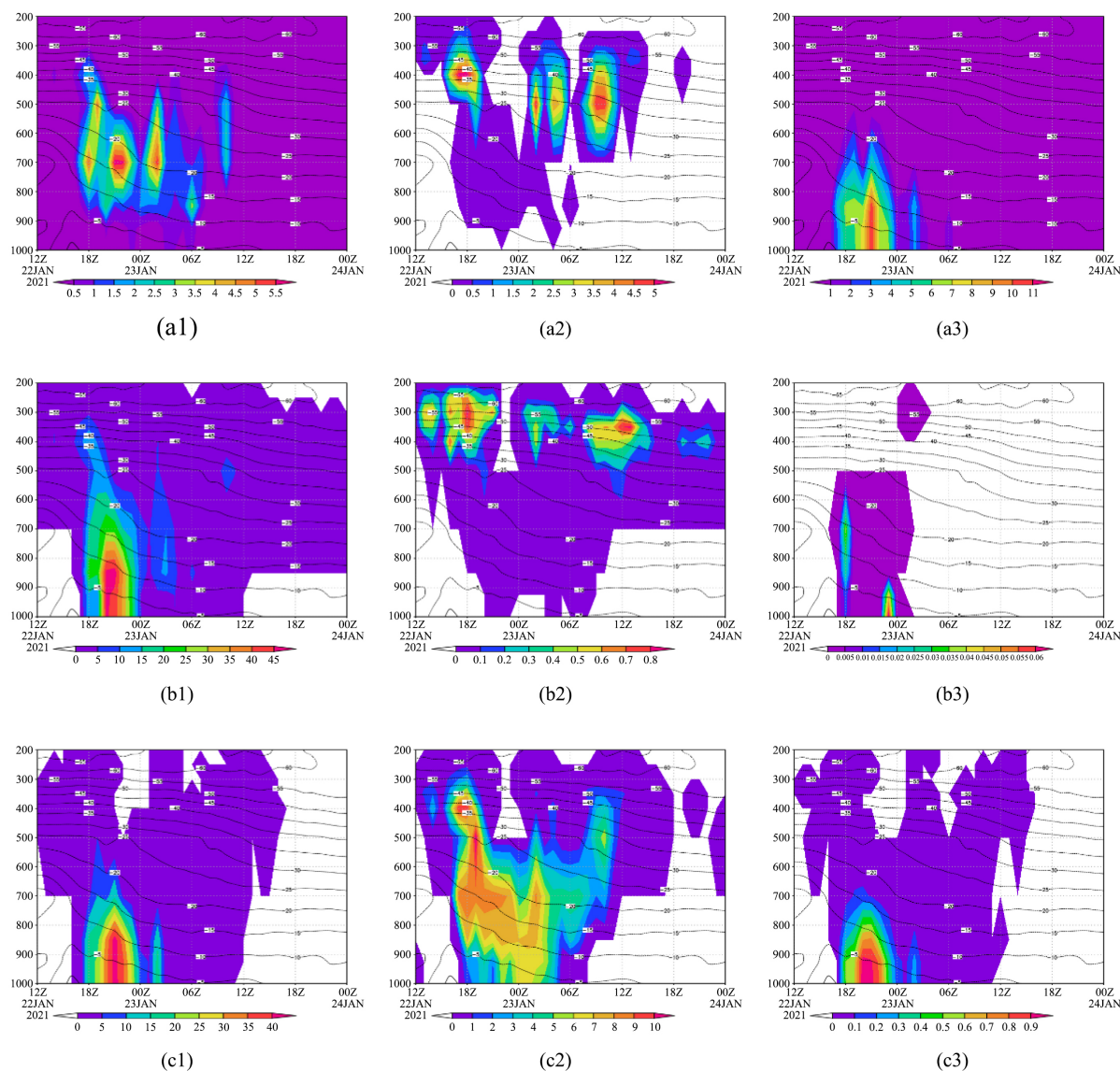


Figure 4. Time-height distribution of ice phase particle content in Urumqi Airport simulated by 3 cloud microphysics schemes (unit: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$); Lin scheme (a1, a2, a3), Thompson scheme (b1, b2, b3), WSM6 scheme (c1, c2, c3), Snow (a1, b1, c1), Ice Crystal (a2, b2, c2), Graupel (a3, b3, c3)

图 4. 三种云微物理方案模拟的乌鲁木齐机场冰相粒子含量的时间高度分布(单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$); Lin 方案(a1, a2, a3)、Thompson 方案(b1, b2, b3)、WSM6 方案(c1, c2, c3)、雪(a1, b1, c1)、冰晶(a2, b2, c2)、霰(a3, b3, c3)

综合以上可以看到, 三种方案模拟的冰相粒子各有侧重, Lin 方案各种粒子含量比较平均, 其中霰的含量最多, 也是三种方案里霰含量最多的。Thompson 方案雪的含量最多, 也是三种方案中雪含量最多的方案, 其他两种粒子含量很少。而 WSM6 方案雪和冰晶的含量都比较多, 其中冰晶的含量是三种方案中

最多的。雪和霰的分布基本在 700 hPa 以下，而冰晶的分布高度比较高，大值区基本都在 600 hPa 以上。

5. 小结

1) 此次新疆区域的降雪是西西伯利亚低槽分裂短波与中亚低槽汇合，中纬度锋区加强，中亚低槽快速东移造成的。

2) 三个方案都模拟出了此次北疆区域的降雪天气过程，其中 WSM6 方案对区域降雪分布模拟的最好，而乌鲁木齐机场的强降雪天气则是 Thompson 方案模拟的最好，降水量与实况基本一致，降水的开始和结束时间以及强降雪时段也都更接近实况。

3) 雷达反射率的模拟对比来看，Thompson 方案和 WSM6 方案模拟的强回波区域偏大，强度偏强，模拟出了乌鲁木齐机场强降雪时段的强回波中心，Lin 方案模拟的回波偏弱，强回波中心偏东，总体来看，Thompson 方案对雷达反射率的模拟更接近雷达探测数据。

4) 云微物理特征分析得到，三种方案基本上都包含的是冰相粒子，其中 Lin 方案中雪粒子、冰晶粒子和霰粒子含量比较均衡，其中霰粒子是三种方案中含量最多的，Thompson 方案中雪粒子最多，冰晶粒子和霰粒子含量很少，WSM6 方案雪粒子和冰晶粒子含量多，其中冰晶粒子含量是三种方案中最多的。

5) 三种方案中雪粒子和霰粒子的分布高度较低，基本都分布在 700 hPa 以下，且基本都出现在 23 日 02~08 时之间，而冰晶粒子则分布的高度较高，大值区都分布在 500 hPa 以上，且存在的时间更长。

参考文献

- [1] 张俊兰, 崔彩霞, 陈春艳. 新疆典型暴雪天气的水汽特征研究[J]. 高原气象, 2013, 32(4): 1115-1125.
- [2] 陈涛, 崔彩霞. “2010. 1. 6”新疆北部特大暴雪过程中的锋面结构及降水机制[J]. 气象, 2012, 38(8): 921-931.
- [3] 万瑜, 窦新英. 新疆中天山一次城市暴雪过程诊断分析[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(6): 8-14.
- [4] 万瑜, 曹兴, 窦新英, 陆辉, 王健. 中天山北坡一次区域暴雪气候背景分析[J]. 干旱区研究, 2014, 31(5): 891-897.
- [5] 李圆圆, 肖开提·多莱特, 杨莲梅, 张云惠. 一次中亚低涡造成的新疆暴雪天气过程分析[J]. 气象科学, 2014, 34(3): 299-304.
- [6] 张云惠, 贾丽红, 崔彩霞, 等. 2000-2011 年新疆主要气象灾害时空分布特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2015, 7(增刊): 20-23.
- [7] 崔彩霞, 庄晓翠, 贾丽红, 张俊兰. 新疆北部暴雪天气预报预警技术研究[M]. 北京: 气象出版社, 2017: 66-79.
- [8] 张俊兰, 万瑜, 闵月. 乌鲁木齐“2015.12.11”极端暴雪天气的综合分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(1): 1-10.
- [9] 张恒德, 宗志平, 安新宇. 2010 年 3 月 14 日华北强降雪的模拟和特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2013, 7(2): 1-8.
- [10] 王秀英, 廖留峰, 段鹤. WRF 模式对一次中低纬降雪天气的数值模拟分析[J]. 中低纬山地气象, 2018, 42(3): 11-17.
- [11] 李一凡, 肖辉, 杨慧玲, 等. 北京地区一次冬季降雪天气及其云微物理过程的数值模拟[J]. 成都信息工程大学学报, 2020, 35(1): 55-68.
- [12] 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, 46(3): 507-519.
- [13] 王淑彩, 平凡, 孟雪峰, 李玉鹏. 不同微物理参数化方案对我国北方一次大范围暴雪天气过程的数值模拟研究[J]. 大气科学, 46(3): 599-620.
- [14] 于晓晶, 于志翔, 唐永兰, 赵玲. 不同云微物理方案对新疆冷锋暴雪的预报影响分析[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(1): 33-41.
- [15] 滕方达, 李得勤, 蒋大凯, 等. 微物理过程参数化方案对辽宁一次暴雪的数值模拟差异分析[J]. 气象学报, 78(4): 608-622.