

# Numerical Simulation Analysis of Cloud Microphysical Processes Affecting the Precipitation Process of a Transitional Weather

Xiaodong Song<sup>1</sup> Shijun Sun<sup>2\*</sup> Yunpeng Zhang<sup>1</sup> Wei Hou<sup>3</sup> Shuyu Li<sup>4</sup>

1. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan, Shandong, 250001, China

2. Shandong Electric Power Meteorological Technology Innovation Center, Jinan, Shandong, 250001, China

3. State Grid Shandong Electric Power Company Emergency Management Center, Jinan, Shandong, 250001, China

4. Shandong Luruan Digital Technology Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250001, China

## Abstract

Two cloud microphysics schemes (Lin and WDM6) in the WRF model are utilized to simulate and analyze the precipitation process of a turning weather, and to investigate the influence of different cloud microphysics processes on the precipitation process. The results show that: the two schemes can well simulate the rainband direction of the precipitation process, but the accumulated precipitation still deviates from the actual measurement; the water vapor transport characteristics and vertical power structures simulated by the two schemes do not differ much, and the water vapor transport and upward motion provide favorable conditions for the heavy precipitation process; the Lin scheme simulates higher excess heights of the water vapor condensate cloud water and cloud ice, and a higher ice formation height; the Lin scheme simulates the solid precipitation is dominated by shrapnel, while the solid precipitation simulated by the WDM6 scheme is dominated by snow.

## Keywords

cloud microphysical processes; transient weather precipitation; numerical simulation

## 云微物理过程影响一次转折性天气降水过程的数值模拟分析

宋晓东<sup>1</sup> 孙世军<sup>2\*</sup> 张云鹏<sup>1</sup> 侯炜<sup>3</sup> 李述喻<sup>4</sup>

1. 国网山东省电力公司, 中国·山东 济南 250001

2. 山东省电力气象技术创新中心, 中国·山东 济南 250001

3. 国网山东省电力公司应急管理中心, 中国·山东 济南 250001

4. 山东鲁软数字科技有限公司, 中国·山东 济南 250001

## 摘要

利用WRF模式中两种云微物理方案(Lin和WDM6)对一次转折性天气降水过程进行数值模拟分析,探究不同云微物理过程对降水过程的影响。结果表明:两种方案能很好地模拟出降水过程的雨带走向,但累计降水量仍与实测存在偏差;两种方案模拟的水汽输送特征和垂直动力结构差异不大,水汽输送和上升运动为强降水过程提供了有利条件;Lin方案模拟的水汽凝结物云水和云冰的过度高度更高,成冰高度更高;Lin方案模拟的固态降水以霰为主,而WDM6方案模拟的固态降水以雪为主。

## 关键词

云微物理过程; 转折性天气降水; 数值模拟

**【基金项目】**山东鲁软数字科技有限公司和山东省电力气象技术创新中心科技项目——基于去中心化自组织协同计算的风功率预测转折性天气精准识别关键技术研究与应用项目(B90630240007)资助。

**【作者简介】**宋晓东(1977-),男,中国山东章丘人,本科,正高级工程师,从事防灾减灾、应急管理研究。

**【通讯作者】**孙世军(1964-),男,中国山东济南人,硕士,正高级工程师,从事电力气象防灾减灾、电网平衡研究。

## 1 引言

转折性天气是指能够发生重大转折性变化的天气,通常表现为温度、湿度、风速、降水量等气象要素的剧烈波动<sup>[1-3]</sup>。例如整个天气从没有降水到出现降水,或者降水从有转变为无的过程。这类天气往往由大气环流的突变或天气系统的快速演变引发,如冷锋过境、气旋发展等等。转折性天气对人类社会和自然环境产生重要影响,例如转折性降水影响粮食产量、扰乱交通、改变地表径流和影响水资源分布,转折性极端寒潮导致更多能源供应需求、引发人体心血管疾病。

降水是天气系统的核心环节,尤其在转折性天气过程中,降水的变化尤为显著。尉英华等<sup>[4]</sup>利用多源观测资料研究了一次地面冷锋过境引发的局地大暴雨过程,结果表明该次大暴雨是在低层回流冷空气侵入和副热带高压北抬的共同作用下发生的,并且不稳定层结位于稳定边界层结之上,形成了少见的冷区“高架对流”特征,进而导致了显著变化的短时强降水过程。施晓辉<sup>[5]</sup>利用再分析资料和轨迹追踪软件研究了一次东亚季风低压引发的华南地区极端降水事件,旨在进一步认识东亚季风低压的生成过程和华南极端降水事件的成因,结果表明季风低压在暴雨的不同阶段有不同垂直特征,季风低压带来的水汽对大暴雨具有重要影响。石霞等<sup>[6]</sup>研究了一次强降水的对流活动不稳定能量来源,结果表明强降水发生伴随大气湿位能充放过程,对流层低层的大气湿位能在强降水过程中起主导作用,其垂直输送起显著正贡献。

云微物理过程涉及水汽上升凝结,云水、云冰等粒子的形成、增长和相互作用,雨水、雪、霰等降水物质的形成与下落,是降水形成的核心机制,准确的降水模拟依赖于对云微物理过程的深入理解。周志敏等<sup>[7]</sup>对一次梅雨暴雨过程的云微物理过程做了分析,结果表明在降水强度急速上升阶段呈现出云冰融化为雨水占主导,而降水强度平缓阶段呈现出云水碰并为雨水占主导。祁璇等<sup>[8]</sup>分析了一次暖区降水的云微物理特征,结果表明雨水的主要来源是云水碰并增长,雨水的主要汇项是云冰的收集,另外霰融化为雨水也起到了关键的作用。

为了解不同云微物理过程对转折性天气降水过程的影响及可能原因,本文利用WRF模式中不同云微物理方案,对一次转折性天气降水过程进行了模拟。通过实测与模拟的对比分析,进一步研究转折性天气降水过程中的云微物理特征,旨在为转折性降水预报提供参考。

## 2 资料与模式设置

### 2.1 资料选取

本文使用的降水再分析资料获取自中国气象数据网的中国气象局陆面数据同化系统(CLDAS-V2.0)实时产品数据集,该数据产品覆盖范围为亚洲区域(0-65°N,60-160°E),空间分辨率为0.0625°×0.0625°,时间分辨率为逐小时。该降水数据融合了地面观测数据(经过质量控制后的2400余个国家级自动站以及业务考核的近4万区域自动气象站观测数据),卫星降水产品(国家卫星气象中心业务的FY2降水估计产品),国家气象信息中心业务的亚洲区域1h、0.0625°分辨率的东亚多卫星集成降水数据产品(EMSIP),融合降水产品(国家气象信息中心业务的中国区域1小时、0.1°分辨率的FY2/CMORPH降水与地面自动站降水融合产品)等多源数据,本文将这一数据作为评估模

式模拟效果的真值。

本文使用的初边界资料是ECMWF的第五代大气再分析资料(ERA5),时间间隔为6小时,水平范围是0-90°N、0-180°E,水平分辨率为0.25°×0.25°,垂直方向为38层,最高层为1hPa。

### 2.2 实验设计与方案选择

本文使用的是WRF模式4.6.0版本,模拟中心经纬度为(103°E,35°N),采用三重嵌套,水平分辨率分别为27km×27km、9km×9km、3km×3km,格点数分别为193×169、169×151、217×208,时间积分步长为150s,垂直方向有34层,最高为50hPa,模拟时间段为2020年8月15日08时(北京时,下同)至8月16日08时,其中前6小时为spin-up时间,不参与模拟结果分析,逐小时输出模拟结果。

选用Lin和WDM6云微物理方案来描述不同的云微物理过程,KF积云对流参数化方案,YSU边界层参数化方案,Noah陆面过程方案,RRTM长波辐射方案和Dudhia短波辐射方案。

## 3 个例介绍与环流形势分析

2020年8月15日-16日,四川盆地东北部出现了一次转折性暴雨天气过程,雨带自西南向东北延伸,相关研究<sup>[9]</sup>表明西南涡是导致此次暴雨过程的主要因素,且暴雨过程有明显的昼夜差异,出现夜间强、白天弱的特点。

对环流形势(图1)的分析表明,在降水前后,高纬度地区大尺度环流均表现出“两槽夹一脊”的特征;中纬度地区气流平直,有短波槽发展东移;四川盆地上空,受高原波动影响,存在一明显低槽,有利于气流抬升,导致暴雨。

## 4 模拟结果分析

### 4.1 降水分布

首先考察不同云微物理过程对降水模拟的影响。从累计降水量场(图2)可以看出,两种方案均能模拟出西南东北走向的雨带,这与实测较为相符。实测降水中心在104-105°E,31-32°N之间,两种方案额外模拟出了一个虚假降水中心在103-104°E,30-31°N之间,且Lin方案模拟的虚假降水中心范围较WDM6方案大。两种方案模拟的累计降水量均比实测偏高,最大偏高为80mm。

### 4.2 水汽输送特征

水汽输送是暴雨发生、发展和维持的必要条件<sup>[10-11]</sup>,水汽通量和水汽通量散度是定量描述水汽输送大小、方向和水汽聚集地的诊断量<sup>[12]</sup>。分析图3可知,两种方案模拟的水汽输送情况差异不大,最大水汽通量约为7kg/m<sup>2</sup>·hPa,最大水汽通量散度约为-1×10<sup>-6</sup>kg/m<sup>2</sup>·s·hPa。水汽输送为暴雨过程提供了有利条件。

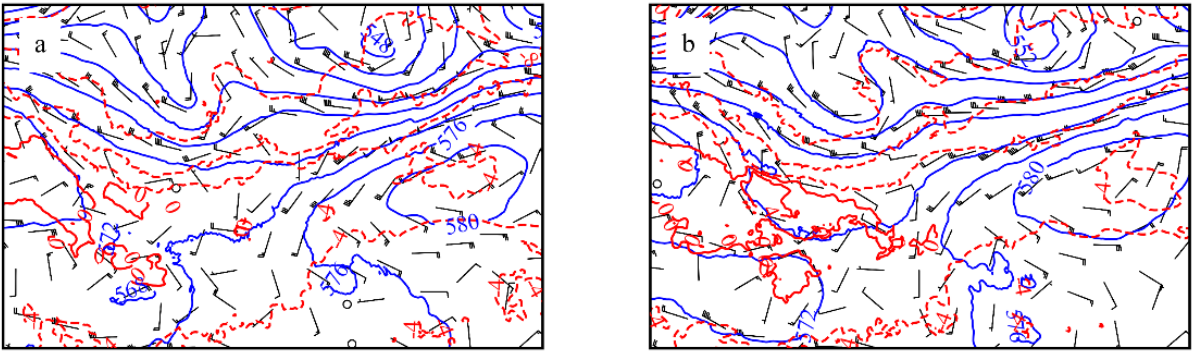


图 1 2020 年 8 月 15 日 08 时 (a)、8 月 15 日 20 时 (b) 500 hPa 位势高度 (蓝线, 单位: 10gpm)、温度 (红线, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ) 和风羽

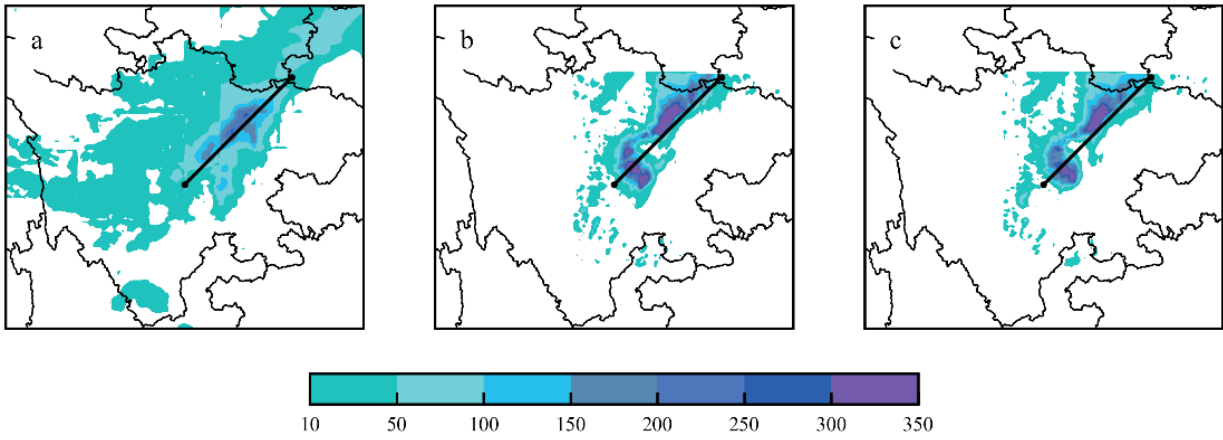


图 2 2020 年 8 月 15 日 14 时至 16 日 08 时实测 (a)、Lin 方案 (b) 和 WDM6 方案 (c) 模拟累计降水量 (单位: mm)。黑色线段为图 5 中截面位置

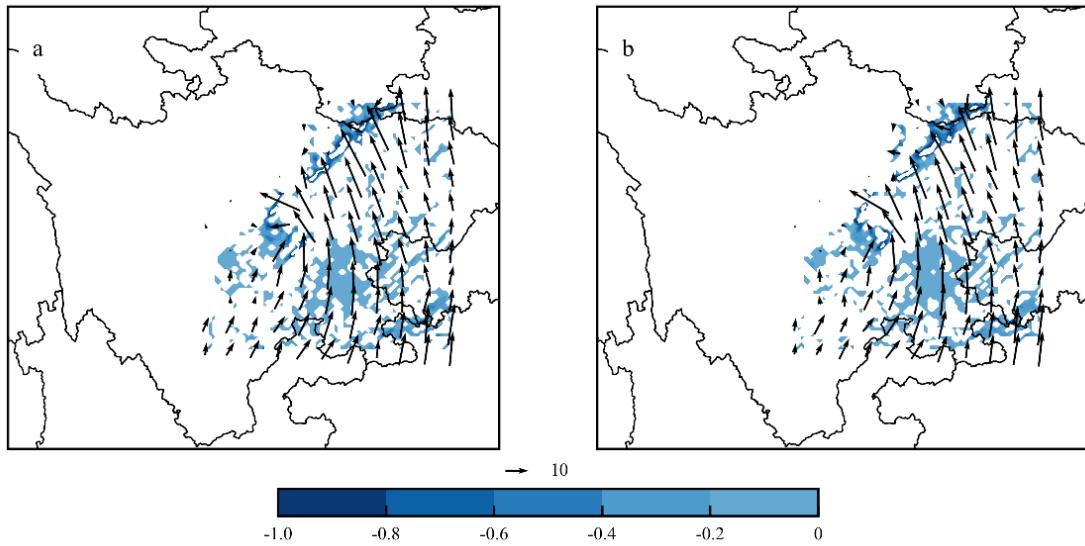


图 3 2020 年 8 月 16 日 02 时 Lin 方案 (a) 和 WDM6 方案 (b) 模拟的 700 hPa 水汽通量 (矢量, 单位:  $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{hPa}$ ) 和水汽通量散度 (填色, 单位:  $10^{-6} \text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{hPa}$ )

### 4.3 垂直动力结构

上升运动是触发暴雨的核心动力机制<sup>[13]</sup>。对两种方案模拟的绝对涡度和垂直速度分析表明，两种方案模拟的垂直结构差异不大，最大绝对涡度约为  $150 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ，最大垂直速度约为  $6 \text{ m/s}$ ，且垂直运动大值区和累计降水大值区有较好的对应。

### 4.4 水凝物垂直分布

为进一步了解两种方案在云微物理过程的差异，本文

给出了水汽与水凝物的垂直分布图（图 5）。结果表明，两种方案对水汽的垂直模拟差异不大，其最高输送至约  $250 \text{ hPa}$ ；Lin 方案模拟云水与云冰的过度高度约为  $300 \text{ hPa}$ ，较 WDM6 方案的  $500 \text{ hPa}$  更高，这表明 Lin 方案的成冰高度更高，而 WDM6 方案的云冰垂直分布更广泛；两种方案的雨水垂直分布差异不大；两种方案模拟的固态降水雪和霰的垂直分布差异不大，但 Lin 方案以霰为主，而 WDM6 方案以雪为主。

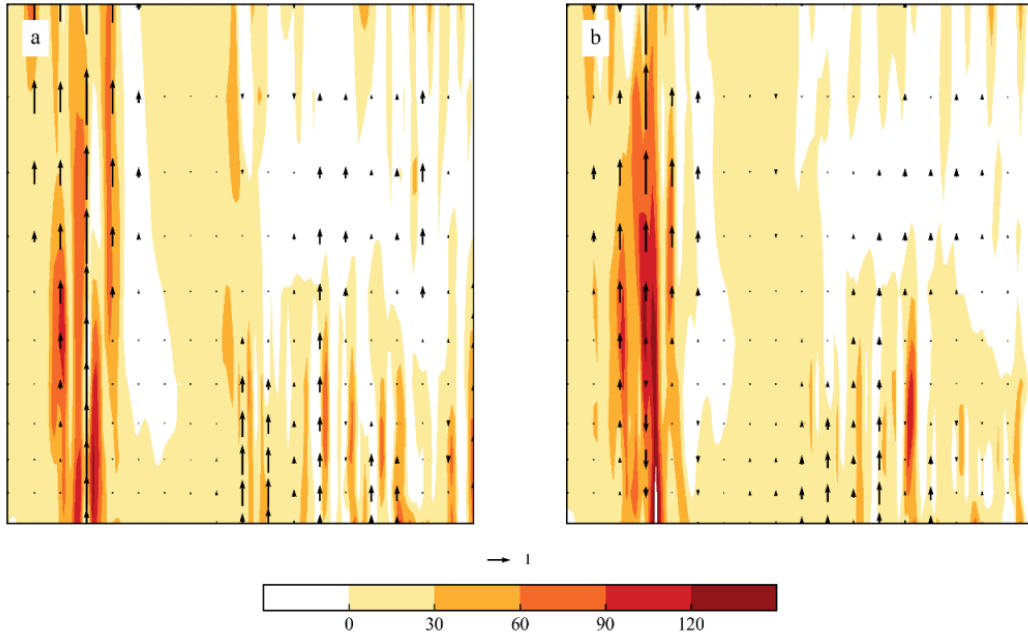


图 4 2020 年 8 月 16 日 02 时 Lin 方案 (a) 和 WDM6 方案 (b) 模拟的垂直风速 (矢量, 单位:  $\text{m/s}$ ) 和绝对涡度 (填色, 单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) 沿图 2 所示线段剖面

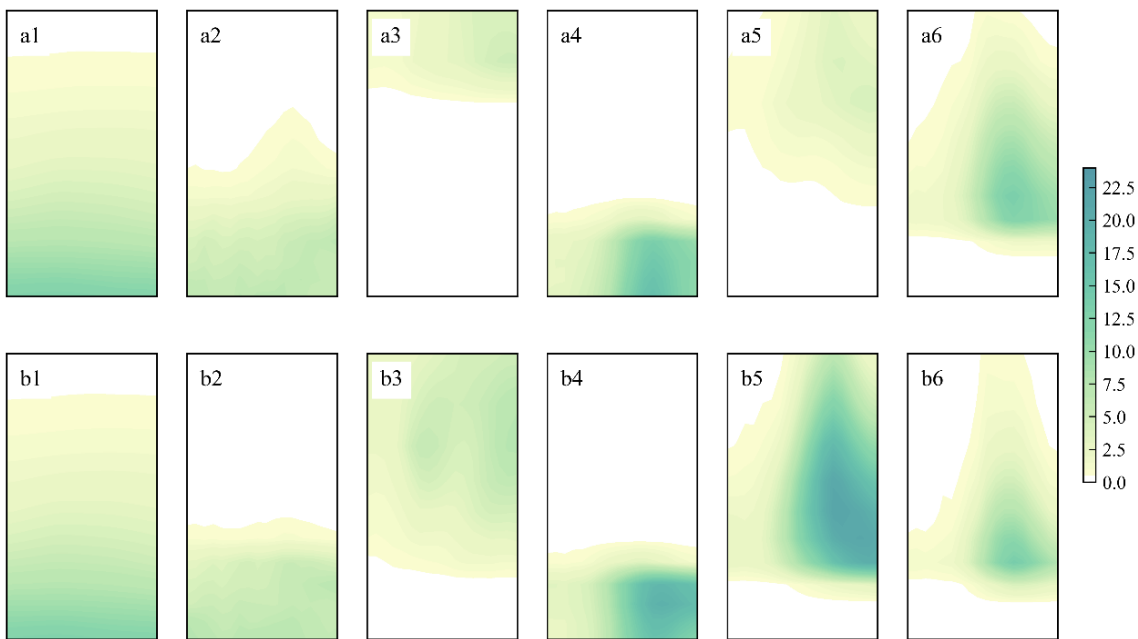


图 5 2020 年 8 月 15 日 14 时至 16 日 08 时 Lin 方案 (a1~a6) 和 WDM6 方案 (b1~b6) 模拟的水汽 (a1 和 b1)、云水 (a2 和 b2)、云冰 (a3 和 b3)、雨 (a4 和 b4)、雪 (a5 和 b5)、霰 (a6 和 b6)

## 5 结论

本文利用 WRF 模式对 2020 年 8 月 15 日 -16 日发生在四川盆地的一次转折性天气降水过程进行了模拟分析,探讨了 Lin 和 WDM6 两种云微物理过程对降水过程的影响,并对其水汽输送特征、垂直动力结构和水凝物垂直分布做了分析,得到以下结论:

(1) Lin 和 WDM6 方案较为准确地模拟出了此次降水过程的西南 - 东北走向的雨带,但模拟的累计降水量偏多,且模拟出了虚假降水中心。

(2) 两种方案模拟的水汽输送特征和垂直动力结构差异不大,水汽输送和上升运动为强降水过程提供了有利条件。

(3) Lin 方案模拟的水汽凝结物云水和云冰的过度高度更高,成冰高度更高;Lin 方案模拟的固态降水以霰为主,WDM6 方案模拟的固态降水以雪为主。

## 参考文献

- [1] 王少文,张寅,姜超. 有关转折性天气降水预报检验方法分析[J]. 北京农业,2012(27): 138.
- [2] 张冰,魏建苏,王文兰,等. 转折性天气降水预报检验方法及应用[J]. 气象科技,2012,40(03): 411-416.
- [3] 兰建春. 转折性天气降水预报检验方法及应用[J]. 南方农业,2016,10(27): 142-144.
- [4] 尉英华,陈宏,刘一玮,等. 盛夏一次地面冷锋过境引发局地大暴雨的成因分析[J]. 暴雨灾害,2021,40(04): 393-400.
- [5] 施晓晖. 广西北海一次强降水天气过程中的东亚季风低压活动特征[J]. 气象学报,2025,83(01): 20-32.
- [6] 石霞,刘维成,陈晓燕,等. 西北东部一次强降水形成机制及能量来源[J]. 干旱区研究,2025: 1-14.
- [7] 周志敏,王斌,郭英莲,等. 湖北一次梅雨期暴雨过程的数值模拟及云微物理特征分析[J]. 暴雨灾害,2023,42(04): 372-383.
- [8] 祁璇,平凡,沈新勇. 云微物理对一次吉林暖区降水过程的影响[J]. 大气科学,2021,45(05): 943-964.
- [9] 李方正,李国平. 一次西南涡影响下四川盆地夏季暴雨过程昼夜降水的对比分析[J]. 高原山地气象研究,2024,44(02): 1-8.
- [10] 李明娟,郭大梅,张蔚然,等. 陕西一次突发性大暴雨的中尺度特征及触发机制[J]. 暴雨灾害,2025,44(01): 19-30.
- [11] 杜一博,李双双,郭莉,等. 秦巴山区2021年一次极端暴雨水汽输送特征及影响系统分析[J]. 陕西气象,2025(01): 1-6.
- [12] SHANG W, LI S, REN X, et al. Event-based extreme precipitation in Central-Eastern China: large-scale anomalies and teleconnections[J]. Climate Dynamics, 2020,54(3-4): 2347-2360.
- [13] 黎凤丹,刘红双,肖蕾,等. 娄山中小尺度地形影响下贵州遵义一次大暴雨过程分析[J]. 山地气象学报,2024,48(06): 36-44.