黄悦桐，孙博，王会军，等，2026. “23.7”华北极端降水事件的WRF多物理参数化方案模拟与评估[J]. 高原气象，45(5)：1464−1477. Huang Yuetong，Sun Bo，Wang Huijun，et al.，2026. Modeling and evaluation of WRF multi-physical parameterization schemes for the "23.7" extreme precipitation event in North China[J]. Plateau Meteorology，45(5)：1464−1477. DOI：10.7522/j.issn.1000−0534.2026.00005. CSTR: 32265.14.gyqx.CN62−1061/P.2026.00005.

“23.7”华北极端降水事件的WRF多物理参数化方案模拟与评估

黄悦桐[1,2]，孙 博[1,2,3,4]，王会军[1,2,3,4]，于恩涛[1,4]，
陈 冬[5]，戴永玲[1,2]，唐文超[1,2]

（1. 南京信息工程大学气候系统预测与变化应对全国重点实验室/气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心，江苏 南京 210044；
2. 南京信息工程大学大气科学学院，江苏 南京 210044；
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)，广东 珠海 519082；
4. 竺可桢-南森国际研究中心，北京 100029；
5. 中国气象局地球系统数值预报中心，北京 100081）

摘要：针对2023年7月28日至8月1日华北地区的一次极端降水事件(以下简称“23.7”极端降水)，旨在评估WRF模式中多种参数化方案对该事件的模拟效果，筛选出最优方案组合，并诊断其模拟偏差的物理本质。本研究采用WRF-ARW V4.5.1模式，设计了包含6种微物理方案和4种积云对流方案的24组敏感性试验，并通过风险评分(以下简称TS评分)、分数技巧评分(以下简称FSS评分)等多种时空检验指标对各组降水模拟结果进行了系统性评估。结果表明：(1)动力降尺度模拟能够再现本次极端降水事件的雨带走向及落区，并随着模式分辨率的提升，动力降尺度模拟的准确性也得到了改善。(2)在所有方案组合中，WSM6微物理方案与KF积云对流方案的组合(WSM6-KF)对本次过程的降水落区、强度和演变趋势的综合模拟技巧最高，尤其对暴雨及以上量级的降水表现突出。深入诊断发现，该组合的优势在于能更准确地再现与强降水中心对应的深厚霰粒子分布及强烈的上升运动，从而抓住了此次极端降水的关键微物理和动力特征。(3)尽管最优方案(WSM6-KF)表现出色，但其模拟仍存在系统性偏差。与ERA5再分析资料对比可见，该方案对降水后期太行山地形强迫抬升区域的水汽输送路径和湿层厚度模拟不足，这直接导致了降水极值偏低和部分落区的西移。本研究为未来该区域极端降水的业务预报及模式改进提供了一定参考。

关键词：动力降尺度；极端降水；数值模拟；误差；水汽输送
文章编号：1000−0534(2026)05−1464−14 **中图分类号**：P458.3 **文献标识码**：A
DOI：10.7522/j.issn.1000−0534.2026.00005
CSTR: 32265.14.gyqx.CN62−1061/P.2026.00005

1 引言

随着全球变暖的加剧，极端降水事件的频率和强度持续增加，对人口、经济以及生态系统造成了严重影响(Chen and Sun，2019)。近年来，中国暴雨发生的频次显著增多且强度显著增大(周波涛等，2022)。华北地区是主要的农业生产区，人口密度大，深受东亚夏季风、西太平洋副热带高压(以下简称西太副高)脊线位置的影响(郝立生和丁一汇，2023)。每年7—8月，由于东亚夏季风的增

收稿日期：2025-06-12；**定稿日期**：2025-12-22
资助项目：国家自然科学基金项目(42088101)；南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)创新团队建设项目(311024001)
作者简介：黄悦桐(2000—)，女，黑龙江牡丹江人，硕士研究生，从事极端降水的研究. E-mail：huangyt@nuist.edu.cn
通信作者：孙博(1987—)，男，河北沧州人，教授，主要从事短期气候预测以及极端气候变异等研究. E-mail：sunb@nuist.edu.cn
© Editorial Department of *Plateau Meteorology* (CC BY-NC-ND)

强以及西太副高位置的向西延伸向北移动，极端降水事件经常发生（陶诗言，1980），而这一趋势在未来仍大概率继续上升（王予等，2021）。2023年7月29日发生的“23·7”极端降水事件打破了多个气象站点的历史降水记录，受影响人口超过500万，并导致了严重的经济损失（杨舒楠等，2023）。因此，提高华北地区极端降水的有效预报能力，对于防洪减灾及保障人身财产安全具有重要意义。

近年来，高分辨率观测数据的应用、物理过程参数化的完善以及计算能力的提升，极大地推动了数值天气预报模型的发展（沈学顺等，2020）。区域气候模型，如WRF模式可以通过使用全球模式及再分析数据进行高分辨率的动力降尺度模拟研究（张琳等，2026）。WRF模式在温度、风速和湿度等变量的模拟与预测中得到了广泛应用（张嘉荣和程雪玲，2020；鲍艳松等，2024；董泽新等，2025）。然而，其模拟精度在很大程度上受到所选参数化方案的影响，不同的方案组合会导致显著不同的模拟结果（王秀智等，2024；黄克秀等，2025），目前尚未发现可以适用于所有地区或事件类型的最佳组合方案。

在降水预报的模拟研究中，采用定量的方法进行验证具有重要意义（刘雨萌等，2025；潘留杰等，2025）。Brownlee（1965）提出了一种包含两个变量的预报检验列联表，通过其对事件进行分类并计算命中率（Probability of Detection，POD）、虚警率（False Alarm Ratio，FAR）等技巧进行评分。随后发展了风险评分（Threat Score，TS）、临界成功指数（Critical Success Index，CSI）等一系列评估指数（Schaefer，1990）。然而，传统的格点对格点的检验方法对细微的空间误差反应过于敏感，这一现象在高分辨率模型中表现得尤为明显（潘留杰，2017）。为提升验证效果，一些新型空间检验方法，例如分数技巧评分（FSS），通过消除对空间位移误差的敏感性来减少误差，能够为高分辨率降水预报提供更加可靠的评价依据（俞碧玉和朱科锋，2022）。

目前关于“23·7”极端降水事件的研究主要集中在物理机制上，如探讨其独特的天气背景、中尺度对流系统的活动特征、以及太行山精细地形的抬升与辐合作用等（杨舒楠等，2023；符娇兰等，2023；张芳华等，2023；张江涛等，2023；杨晓亮等，2023；李晓兰等，2025）。部分研究也探索了AI预报大模型在该事件中的应用潜力（Xu et al.，2024）。鉴于“23·7”极端降水独特的局地性和中尺度特征，高分辨率数值模拟是深入剖析其物理过程，并评估其可预报性的关键技术手段。然而，在高分辨率数值模式的框架下，针对此次极端降水事件的物理参数化方案系统性评估工作仍显不足，特别是对于不同方案组合模拟偏差背后的物理根源，尚未有深入的探讨。

因此，本文采用WRF-ARW（V4. 5. 1）模式对该事件进行了动力降尺度模拟分析，系统性地开展了24组物理参数化方案组合的数值试验。通过从时间和空间维度进行综合评估，筛选出表现最优的方案组合并诊断不同方案模拟效果优劣的物理根源，为提高华北地区极端降水事件的预报准确性提供依据。

2　数据来源与方法介绍

2. 1　数据来源

本研究使用的数据主要包括模式驱动数据和结果检验数据两类。

WRF模式的初始条件和边界条件基于美国国家环境预测中心（National Centers for Environmental Prediction，NCEP）提供的最终分析（Final Operational Global Analysis，FNL）数据集，该数据集的空间分辨率为1°×1°，时间分辨率为6 h。

结果检验数据采用中国气象局提供的地面自动气象站逐小时降水资料，以及欧洲中期天气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts，ECMWF）提供的第五代大气再分析资料（Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses for climate，ERA5）。ERA5数据的空间分辨率为0. 25°×0. 25°，时间分辨率为1 h。

文中涉及的地图是基于中华人民共和国自然资源部地图技术审查中心标准地图服务系统下载的审图号为GS（2024）0650号的标准地图制作，底图无修改。

2. 2　模型配置与试验设置

为探究“23. 7”华北极端降水事件的物理机制，本研究使用基于WRF模式的动力降尺度方法。本研究采用WRF-ARW V4. 5. 1模式进行了24组试验。以确保模式的准确性，模拟时间范围设定为2023年7月26日00:00（协调世界时，下同）至8月3日18:00，其中前48 h作为模式的初始化调整阶段。模式使用墨卡托投影，并设置了三层嵌套网格结构，外层、中层和内层网格的分辨率分别为27 km（70×64个格点）、9 km（121×130个格点）和3 km（211×229个格点）。每个网格区域均配置了34层垂

直气压层，覆盖从地面到50 hPa的高度范围，时间步长设定为72 s。

为了深入分析微物理过程及积云对流参数化方案对强降水模拟的影响，本研究设计了24组敏感性试验。试验选取了6种微物理方案进行对比，包括：Kessler方案（Kessler，1969）、Purdue-Lin（Lin）方案（Chen and Sun，2002）、WRF single-moment 6-class（WSM6）方案（Hong and Lim，2006a）、Thompson方案（Thompson et al.，2008）、Goddard方案（Tao et al.，2016）和WRF single-moment 7-class（WSM7）方案（Bae et al.，2018）。同时，试验还采用了4种积云对流参数化方案，分别是：Betts-Miller-Janjic（BMJ）方案（Janjic，1994）、Kain-Fritsch（KF）方案（Kain，2004）、Multi-scale Kain-Fritsch（MSKF）方案（Glotfelty et al.，2019）以及New Tiedtke方案（Zhang and Wang，2017）。此外，其他物理参数化方案均采用统一配置，具体包括：Yonsei-University（YSU）行星边界层方案（Hong et al.，2006b）、Dudhia短波辐射方案（Dudhia，1989）、RRTM长波辐射方案（Mlawer et al.，1997）、Noah-MP陆面过程方案（Niu et al.，2011）以及MM5近地面层方案（Jimenez et al.，2012）。基于以上配置，本研究共设计了24种不同的试验组合（表1）。在分辨率最高的第三层网格区域内，由于模式能够直接解析对流过程，因此关闭了积云对流参数化设置（Arakawa et al.，2016）。

表1 24组试验WRF模型配置

Table 1 Configuration of the WRF model for 24 experimental groups

试验组	微物理参数化方案	积云对流参数化方案
试验1	Kessler	Kain-Fritsch
试验2	Kessler	Betts-Miller-Janjic
试验3	Kessler	Multi-scale Kain-Fritsch
试验4	Kessler	New Tiedtke
试验5	Purdue Lin	Kain-Fritsch
试验6	Purdue Lin	Betts-Miller-Janjic
试验7	Purdue Lin	Multi-scale Kain-Fritsch
试验8	Purdue Lin	New Tiedtke
试验9	Goddard	Kain-Fritsch
试验10	Goddard	Betts-Miller-Janjic
试验11	Goddard	Multi-scale Kain-Fritsch
试验12	Goddard	New Tiedtke
试验13	WSM6	Kain-Fritsch
试验14	WSM6	Betts-Miller-Janjic
试验15	WSM6	Multi-scale Kain-Fritsch
试验16	WSM6	New Tiedtke
试验17	WSM7	Kain-Fritsch
试验18	WSM7	Betts-Miller-Janjic
试验19	WSM7	Multi-scale Kain-Fritsch
试验20	WSM7	New Tiedtke
试验21	Thompson	Kain-Fritsch
试验22	Thompson	Betts-Miller-Janjic
试验23	Thompson	Multi-scale Kain-Fritsch
试验24	Thompson	New Tiedtke

2.3 评估降水模式结果的方法

为定量评估各组试验的模拟性能，本研究从时间和空间两个维度建立了评估体系。

2.3.1 降水等级定义

依据国家标准《降水量等级》（GB/T 28592−2012），本文选取3个24 h累积降水量阈值进行检验：[0.1，50) mm（小雨至大雨）、[50，100) mm（暴雨）以及[100，250) mm（大暴雨）。

本文将累计24 h降水场转换为可供分类统计检验的二元事件场。对于任一给定的降水阈值，对观测场和模拟场中的所有格点进行遍历，若某格点的降水量在阈值区间内，则该格点在新生成的二元场中被赋值为“1”（表示事件发生）；反之则赋值为“0”（表示事件未发生）。这些二元场是后续计算分类预报指标的直接数据基础。

2.3.2 空间检验指标

在评估模式对降水空间分布的模拟能力，本研究选取了点对点的检验指标，即风险评分（TS）、命中率（POD）、虚警率（FAR）以及邻域空间检验指标，即分数技巧评分（FSS）方法。计算公式如下：

$$TS = \frac{N_1}{N_1 + N_2 + N_3} \tag{1}$$

$$POD = \frac{N_1}{N_1 + N_3} \tag{2}$$

$$FAR = \frac{N_2}{N_1 + N_2} \tag{3}$$

$$FSS = 1 - \frac{MSE_N}{MSE_R} \tag{4}$$

$$MSE_N = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \left[O_{(N)i,j} - M_{(N)i,j} \right]^2 \tag{5}$$

$$MSE_R = \frac{1}{N_x N_y} \left[\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} O_{(N)i,j}^2 + \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} M_{(N)i,j}^2 \right] \tag{6}$$

式中：N_1表示观测降水量与模拟降水量均超过特定阈值的网格点数量；N_2代表模拟降水量超过阈值，但观测降水量未达该阈值的网格点数量；N_3则表示

观测降水量超过阈值，而模拟降水量未达到该阈值的网格点数量；MSE_N表示在长度为N的邻域窗口内，观测值与模拟值的均方误差；MSE_R是指在观测值与模拟值超过阈值的格点与总格点比值的均方误差最大值；i和j分别代表x方向和y方向上的网格点；N_x和N_y分别为两个方向上的网格点总数。此外，O_N和M_N分别表示在邻域内观测场和模拟场超过预先设定阈值的格点与总格点的比值。这4项指标的取值范围均介于0~1之间。*TS*、*POD*、*FSS*的值越大，越趋近于1，表明模型的性能越优；而*FAR*值越小，则更为理想。在本研究中，FSS的计算基于一个固定边长的正方形邻域窗口，统一设定为5个格点，即在一个5×5的移动窗口上进行计算。

2.3.3　时间序列检验指标

为评估模式对区域平均降水时间演变的模拟能力，本研究也计算了模拟序列与观测序列之间的相关系数、均方根误差和标准差。相关系数反映二者位相一致性，均方根误差表征总体幅度偏差，标准差则衡量模拟序列的离散程度。

3　天气过程与观测特征

“23·7”极端降水事件发生在2023年7月29日00:00至8月1日00:00，主要由减弱的台风“杜苏芮”残留的低压涡旋与大陆高压系统的协同作用引发（张芳华等，2023；符娇兰等，2023）。此次降水形成了一条从东北向西南延伸的降雨带。7月29日，降水中心集中在河北中南部、河南北部、山东西部以及北京南部地区，其中在冀晋交界处的西南部和河北中部附近观测到降水峰值[图1(a)]。7月30日，降水中心逐渐向北京及河北中部移动，并在太行山东麓因地形抬升作用而显著增强[图1(b)]。

此次事件的主要成因是稳定且有利于停滞的环流背景。7月29日00:00[图1(c)]，欧亚大陆上空呈现出“两槽一脊”的阻塞环流形势，其中高压脊位于贝加尔湖区域。此时，台风“杜苏芮”残余涡旋位于华北地区南侧，陕西与甘肃上空形成一个倒槽结构。西太平洋副热带高压（WPSH）向西扩展至约40°N附近，其外围气流促使涡旋向北推进，并将暖湿气流输送到内陆地区。正是北方阻塞高压的阻滞作用与西侧副热带高压的引导作用相结合，导致台风“杜苏芮”残余低涡东移路径被阻断，被迫在华北地区长时间缓慢移动，这是构成此次持续性强降水的关键大尺度条件。

在此环流背景下，一条强度大且持续时间长的水汽输送带得以建立和维持。至18:00，河北南部及山东上空观测到强烈的水汽通量[图1(d)]。随着“杜苏芮”继续向北移动，它不仅携带南海的水汽，还受到台风“卡努”的补充水汽影响。由于太行山地形的阻挡作用，较多的水汽堆积在其东麓，在形成了强烈的水汽辐合，从而引发了长时间的极端降水事件。

综上，稳定的环流形势、双台风影响下的高强度水汽输送以及关键地形的动力抬升，三者的协同作用导致了此次极端降水事件的发生。因此，本文将以此为基准，系统性地检验24组方案的模拟能力差异，并深入诊断其背后的物理原因。

4　动力降尺度模拟结果及评估

4.1　降水时空特征

为了定量评估模式水平分辨率对此次极端降水过程模拟能力的敏感性，本研究对比了不同分辨率（27 km，9 km，3 km）下24个成员集合平均的48 h累计降水与站点观测插值场的空间分布（图2）。从观测降水[图2(a)]可知，河北中南部地区存在一条东北—西南走向的强降水带。在27 km的粗分辨率下[图2(b)]，模式虽然大致再现了雨带的位置，但在关键特征上表现出显著的系统性偏差、具体而言，模拟的降水场呈现出过度平滑的特征，基本无法分辨出极端降水的大值中心区，且强度被严重低估。当分辨率提升至9 km[图2(c)]，模拟能力有显著改善，模式开始能够部分解析出局地的降水极值中心，但其范围和强度与观测相比仍存在较大差异。在3 km的分辨率下[图2(d)]，模拟结果刻画出了由多个对流单体组成的精细结构，这是粗分辨率模拟无法捕捉的。因此，为深入评估不同物理参数化方案的优劣，下文的分析将全部基于3 km分辨率的结果。

根据站点观测数据，此次降水事件可细分为四个关键阶段（图3）。第一阶段（7月29日13:00前），降水量处于较低水平。第二阶段（7月29日13:00—20:00），逐小时降水量呈现明显增加的趋势。第三阶段（7月29日21:00至30日10:00），区域降水量在21:00达到约4 mm·h^{-1}的峰值，并在此期间保持较高水平。第四阶段（7月30日11:00后），逐小时降水量呈现明显下降趋势。在所有试验中，试验13在再现降水空间分布方面表现最为突出，同时在时间序列模拟的上也表现出色。该试验成功捕捉到7月29日13:00左右降水强度的增强过程，以及极端

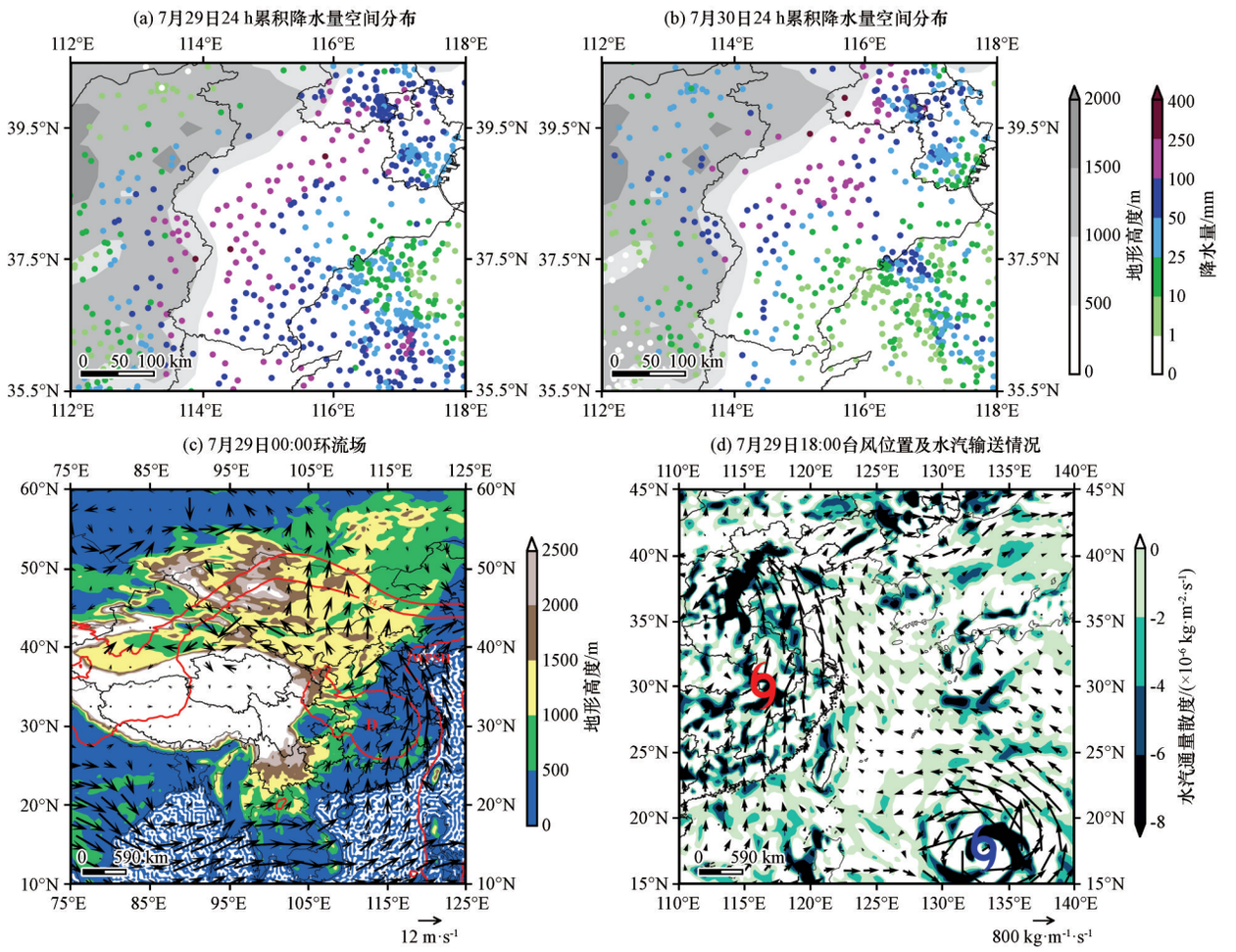


图1 2023年7月29—30日站点观测与环流形势要素分布

(a)29日和(b)30日24 h累积降水量(彩色实点，单位：mm)及地形高度(灰白阴影，单位：m)；(c)29日00:00 500 hPa位势高度(红色等值线，单位：dagpm)、850 hPa风场(矢量，单位：m·s^{-1})及地形高度(阴影，单位：m)，图中“D”和“WPSH”分别表示台风“杜苏芮”残余低涡和西太平洋副热带高压；(d)29日18:00整层水汽通量散度(阴影，单位：kg·m^{-2}·s^{-1})、水汽输送(矢量，单位：kg·m^{-1}·s^{-1})、台风卡努(蓝色)位置及29日00:00台风杜苏芮(红色)减弱为低压系统时的位置

Fig. 1 Distribution of station observation and circulation elements during 29—30 July, 2023. (a, b) 24 h accumulated precipitation (colored solid dots, unit: mm) and terrain height (gray-white shading, units: m) on 29 (a) and 30 (b) July; (c) geopotential height at 500 hPa (red contours, unit: dagpm), wind at 850 hPa (vector, unit: m·s^{-1}) and terrain height (shading, unit: m) at 00:00 on 29 July, with labels “D” (remnant vortex of Typhoon Doksuri) and “WPSH” (Western Pacific Subtropical High), (d) integrated water vapor flux divergence (shading, unit: kg·m^{-2}·s^{-1}), water vapor transport (vector, unit: kg·m^{-1}·s^{-1}) with the position of Typhoon Khanun (blue) at 18:00 on 29 July and Typhoon Doksuri (red) when weakening to a low-pressure system at 00:00 on 29 July

降水发生的具体时间和持续时间，与观测到的主要降水事件的起始和结束情况基本一致。与其他模拟结果类似，试验13对每小时降水量的峰值略有低估，但在所有试验中，其模拟的峰值基本为最高值。

ERA5数据集虽然对实际降水峰值强度有一定的低估，但成功捕捉了逐时降水量随时间变化的整体趋势，为后续开展误差分析提供了关键的参考价值。

4.2 试验结果评估

由于降水主要发生在7月29日和30日，因此选取这两天的数据基于站点观测数据对模式的模拟结果进行评估。针对3种不同的降水强度等级，即小到大雨(降水量为[0.1, 50) mm，标记为“1”)、暴雨(降水量为[50, 100) mm，标记为“2”)以及大暴雨(降水量为[100, 250) mm，标记为“3”)，分别计算了风险评分(TS)、命中率(POD)、虚警率(FAR)以及分数技巧评分(FSS)。表2列出了这两天各项指标的平均值，最后一列为上述4项指标赋予相同权重后得出的技巧评分排名。

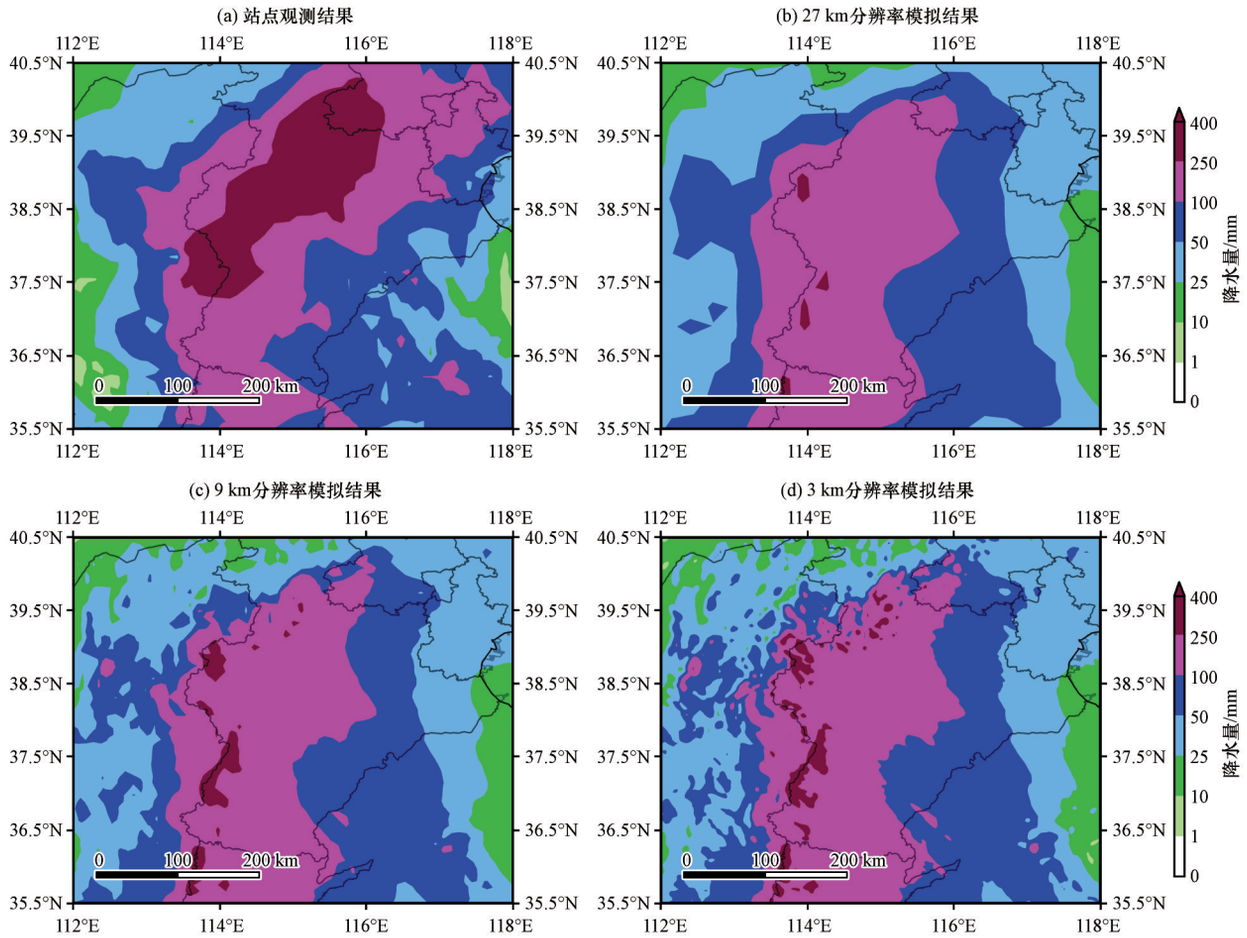


图2　2023年7月29日00:00至31日00:00观测与不同分辨率动力降尺度模拟结果的48 h累计降水量空间分布（单位：mm）

Fig. 2　Spatial distribution of 48-hour accumulated precipitation based on observations and dynamical downscaling simulations with different resolutions from 00:00 on 29 to 00:00 on 31 July, 2023. Unit: mm

在FSS评分中，从小到大雨的量级上，试验24的表现最为突出。然而，在大暴雨量级方面，试验13和试验15显示出更强的优势。此外，试验12、试验13以及试验24的$\overline{\mathrm{FSS}}$评分均达到了0.72，这表明它们与观测台站数据的匹配程度较高。从TS评分的角度来看，在小到大雨量级上，试验12表现出色，得分为0.67；在暴雨量级中，试验13和试验24并列最高，得分均为0.23；而在大暴雨量级方面，试验13表现尤为优异，得分为0.35。综合所有量级，试验13的$\overline{\mathrm{TS}}$处于最高水平，尤其针对极端降水区域。POD与FAR的分析表明，试验13表现出最高的命中率和最低的虚警率。在对所有评估指标给予同等权重的情况下，试验13的综合表现最为突出，能够最准确地再现降水的空间分布及强度特性，同时有效减少误报现象，并且更敏锐地捕捉极端降水事件的发生。作为一种用于模拟深对流过程的参数化方法，KF方案在描述对流系统的启动时间和发生位置方面表现出较高的精确性；而WSM6微物理方案则能够合理反映对流过程中各类水凝物的变化规律及其降水效率。

除了空间评估之外，本文还通过计算相关系数、均方根误差以及标准差对逐小时降水量序列进行了检验。其中，试验13的相关系数达到0.73，且均方根误差为1.22，明显小于其它组试验（图4）。

从空间和时间维度的综合评估结果来看，试验13（WSM6-KF组合方案）在降水分布、强度模拟以及时间序列特征方面表现出明显的优势。尽管在空间评估指标上，ERA5数据集未能准确捕捉极端降水区域，但其对于降水量随时间的演变趋势表现出了高度的一致性，这为后续开展模拟结果误差分析提供了重要的参考依据。

4.3　微物理方案中水成物模拟效果

由于最内层网格允许对流自行发展，仅体现在初始及边界条件上，因此为深入探究微物理方案在水成物生成方面的差异，基于均采用KF积云对流参数化方案的试验组合，对各微物理方案在本次事件模拟中的表现进行对比分析。本文选取模式模拟出现小时最大雨强的时刻，即7月29日22:00，沿

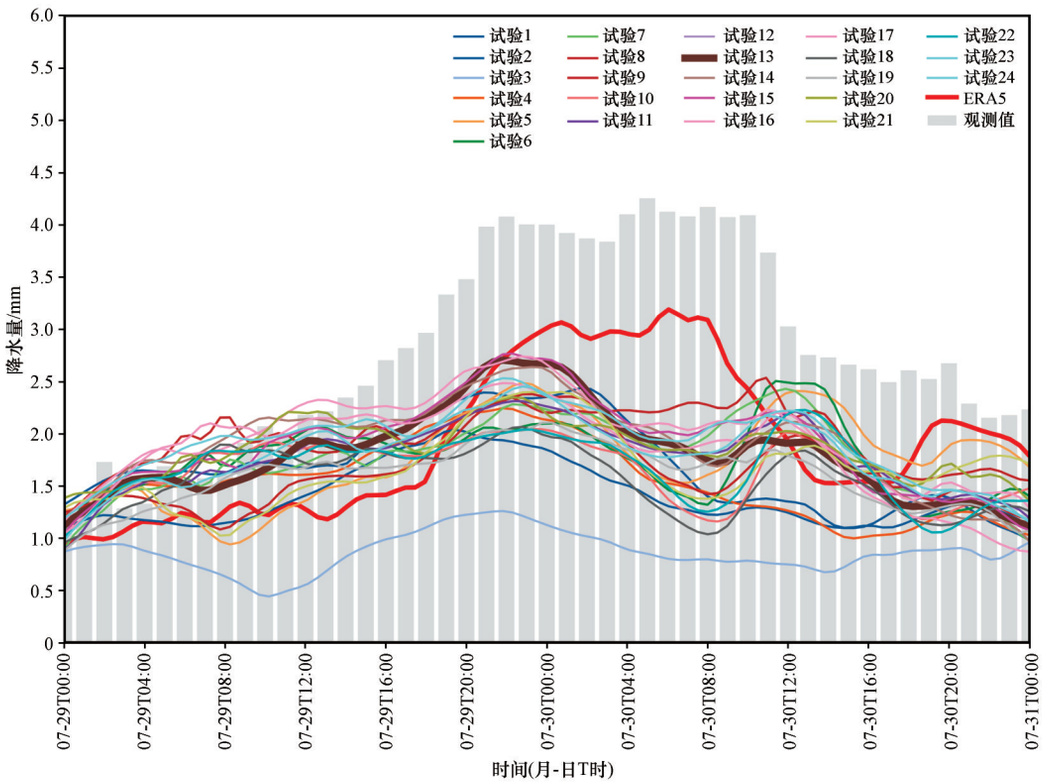


图3 2023年7月29—31日研究区域(112°E—118°E、35. 5°N—40. 5°N)平均小时降水量时间演变

Fig. 3 Temporal evolution of area-averaged hourly precipitation over the study area (112°E—118°E, 35. 5°N—40. 5°N) from 29 to 31 July, 2023

模拟降水最为集中的114°E进行垂直剖面分析。

在垂直动力结构方面，WSM6方案能够模拟出更为集中且强烈的上升运动中心，为高层水凝物的生成与发展提供了有利条件。相比之下，其他微物理方案在高区域模拟的上升运动中心相对分散或强度略弱(图5)。这表明WSM6与KF积云对流方案的相互作用，可能对模式动力场产生了更有效的反馈。

在水成物模拟方面，Kessler方案由于主要依赖暖云降水过程，尽管存在上升运动，但最终模拟出的降水强度较弱。对于能够模拟霰粒子生成的微物理方案，WSM6表现出更为集中分布且大量的霰粒子，表明WSM6方案在高空过冷区对霰粒子的生成和增长过程具有更好的模拟效果。作为冷云降水过程中的关键中间产物，霰粒子的生成量及分布直接影响地面强降水落区。WSM6模拟出的水汽混合比大值区与上方密集的霰粒子区域对应基本一致，表明大量霰粒子在下落过程中融化转化为雨水，驱动地面附近的强降水发生。虽然Lin、Godard、WSM7、Thompson方案也能模拟出较高的雨水混合比，但由于上升运动较弱或微物理转化过程效率不同，其综合模拟能力弱于试验13。

综上，通过在高分辨率区域关闭积云参数化方案，WSM6方案与模式直接解析的动力过程相结合，更真实地模拟出在此次强降水极值时刻与降水集中区域表现最佳，归因于其较好地模拟强上升运动中心以及云内霰粒子高效生成这一关键冷云降水机制。

4.4 动力降尺度结果与ERA5再分析数据的差异原因

基于上述结论，本研究选取ERA5数据作为误差分析的参考基准。相对湿度是分析大气稳定性和对流发展等过程的重要指标(Rao et al., 2021)。试验13及ERA5数据均显示，自29日00:00起，研究区域上空的平均相对湿度超过85%，表明区域水汽含量达，足以支持云层的形成和降水的发生[图6(a)，(b)]。当相对湿度达到或超过80%时，水汽更易发生凝结。7月29日12:00，相对湿度高于80%的湿层向上延伸至350 hPa的高度。然而，在22:00降水达到峰值后，该湿层的厚度有所减小，这反映了水汽含量的减少，同时也解释了模拟结果未能重现从7月29日22:00至30日10:00期间持续较高强度降水的原因。ERA5数据显示，相对湿度最高的时间段(7月29日18:00至30日00:00)与降水增强的时

表2　2023年7月29日和30日不同降水量范围的TS与FSS评分

Table 2　TS and FSS scores for different precipitation ranges on 29 and 30 July 2023

试验	TS_1	TS_2	TS_3	FSS_1	FSS_2	FSS_3	$\overline{TS}$	$\overline{FSS}$	$\overline{POD}$	$\overline{FAR}$	技巧排名
试验1	0.67	0.14	0.19	0.84	0.45	0.48	0.33	0.59	0.46	0.46	17
试验2	0.64	0.17	0.21	0.83	0.48	0.50	0.34	0.60	0.47	0.49	14
试验3	0.61	0.12	0.06	0.77	0.33	0.16	0.26	0.42	0.39	0.52	23
试验4	0.67	0.16	0.25	0.85	0.50	0.55	0.36	0.64	0.49	0.45	10
试验5	0.63	0.12	0.18	0.82	0.37	0.41	0.31	0.53	0.43	0.54	22
试验6	0.65	0.13	0.16	0.83	0.40	0.42	0.31	0.55	0.44	0.55	21
试验7	0.62	0.14	0.25	0.81	0.43	0.55	0.34	0.60	0.48	0.50	16
试验8	0.65	0.21	0.22	0.86	0.59	0.55	0.36	0.67	0.51	0.49	12
试验9	0.66	0.15	0.19	0.85	0.45	0.48	0.33	0.59	0.46	0.50	18
试验10	0.67	0.19	0.16	0.85	0.54	0.45	0.34	0.62	0.48	0.51	15
试验11	0.66	0.17	0.29	0.85	0.51	0.63	0.37	0.66	0.52	0.45	7
试验12	0.71	0.21	0.28	0.91	0.58	0.67	0.40	0.72	0.54	0.44	4
试验13	0.69	0.23	0.35	0.88	0.60	0.69	0.42	0.72	0.57	0.40	1
试验14	0.66	0.18	0.29	0.85	0.49	0.62	0.38	0.65	0.52	0.47	9
试验15	0.67	0.19	0.34	0.87	0.54	0.69	0.40	0.70	0.54	0.44	3
试验16	0.68	0.20	0.31	0.88	0.55	0.66	0.40	0.70	0.53	0.44	5
试验17	0.60	0.09	0.12	0.78	0.29	0.31	0.27	0.46	0.40	0.55	24
试验18	0.67	0.15	0.19	0.84	0.44	0.47	0.34	0.58	0.46	0.51	19
试验19	0.65	0.16	0.27	0.83	0.47	0.60	0.36	0.63	0.50	0.46	11
试验20	0.67	0.21	0.28	0.87	0.56	0.63	0.39	0.68	0.53	0.45	6
试验21	0.65	0.13	0.19	0.84	0.41	0.47	0.32	0.57	0.45	0.51	20
试验22	0.66	0.18	0.21	0.84	0.54	0.53	0.35	0.64	0.48	0.49	13
试验23	0.67	0.18	0.26	0.87	0.55	0.59	0.37	0.67	0.52	0.48	8
试验24	0.70	0.23	0.28	0.89	0.61	0.65	0.40	0.72	0.55	0.44	2
ERA5	0.60	0.16	0.22	0.79	0.41	0.46	0.33	0.55	0.51	0.48	/

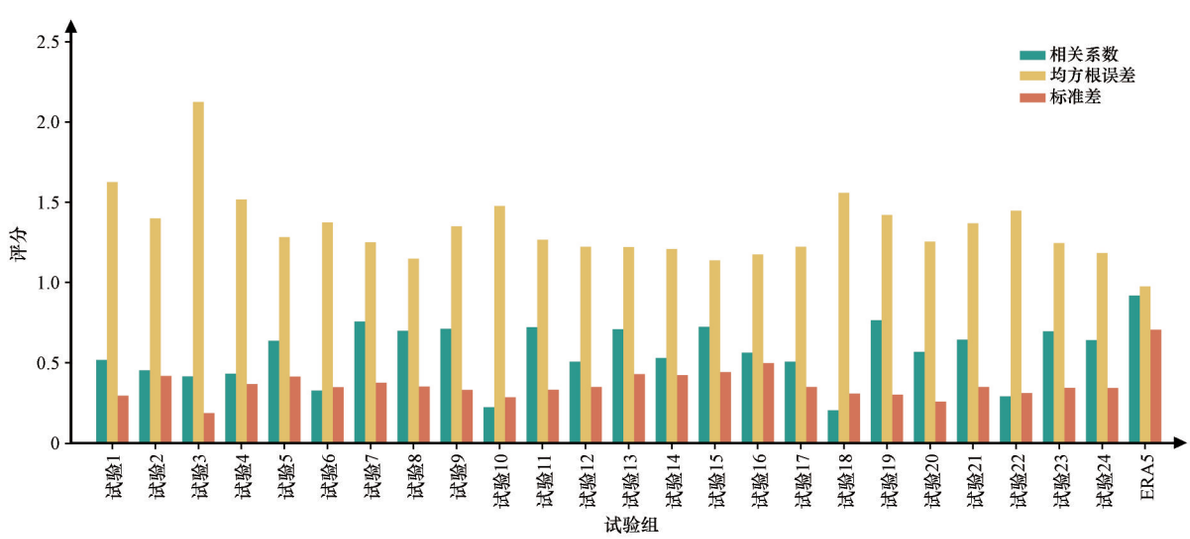


图4　2023年7月29—31日24组模拟试验、ERA5与站点数据小时降水量时间序列的相关系数、均方根误差及标准差

Fig. 4　Correlation coefficients, root mean square errors and standard deviations of hourly precipitation time series for 24 simulation experiments, ERA5 and station data from 29 to 31 July 2023

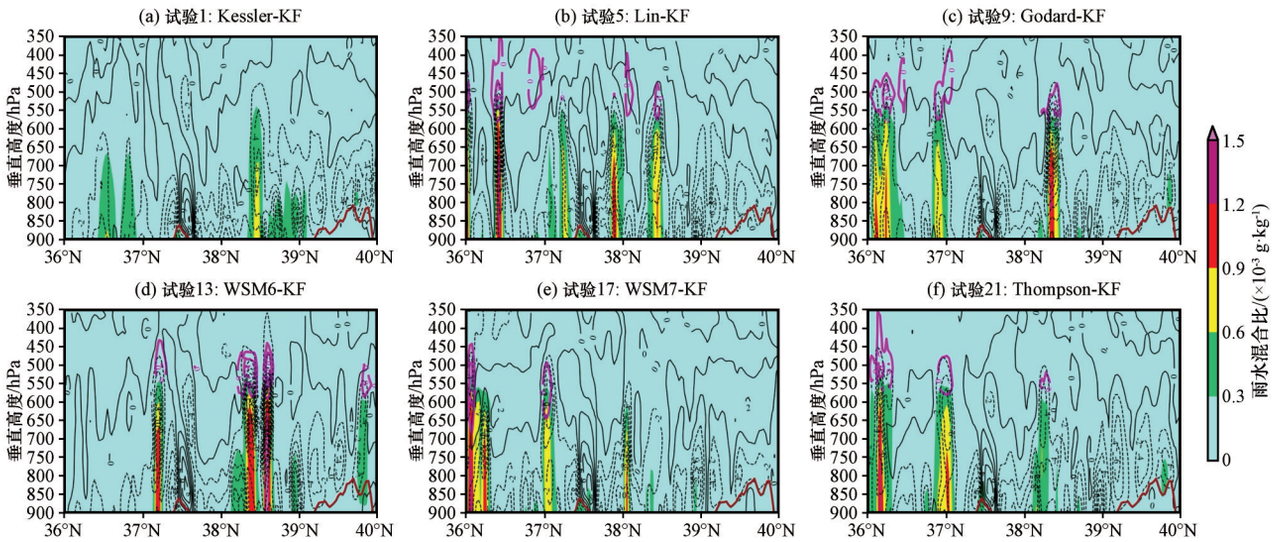


图5 2023年7月29日22:00不同微物理方案模拟的雨水混合比(阴影，单位：$\times10^{-3}$ g·kg^{-1})、垂直速度(黑色等值线，单位：Pa·s^{-1})、霰混合比(紫色等值线，单位：g·kg^{-1})及地形高度(棕色等值线)沿114°E的垂直剖面

Fig. 5 The vertical cross-section along 114°E of water vapor mixing ratio (shading, unit: $\times10^{-3}$ g·kg^{-1}), vertical velocity (black contour, unit: Pa·s^{-1}), graupel mixing ratio (purple contour, unit: g·kg^{-1}) and terrain height (brown contour) simulated by different microphysical schemes at 22:00 on 29 July 2023

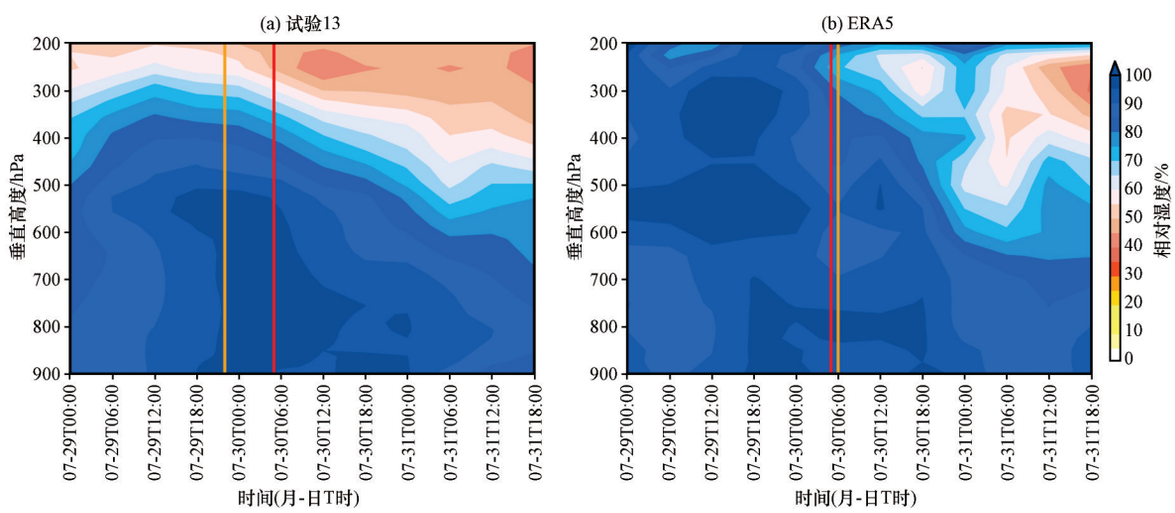


图6 2023年7月29日00:00至31日18:00研究区域平均相对湿度(阴影，单位：%)时间−高度垂直剖面

红色实线为站点数据出现最大小时降水强度时刻，橙色实现为两组数据分别出现最大小时雨强时刻

Fig. 6 The average relative humidity(shading, unit: %)vertical cross-section of time-height in the study area from 00:00 on 29 to 18:00 on 31 July, 2023. Red solid line is moments of maximum hourly precipitation intensity in station data; Orange solid line is moments of maximum hourly rainfall intensity in the two datasets respectively

间段一致，且湿层向上延伸超过300 hPa。7月30日06:00起，湿层厚度开始逐渐减小，并在20:00仍延伸至约400 hPa高度，随后迅速降低。这一变化趋势与ERA5数据中7月30日07:00降水峰值的出现相吻合。

通过对模拟降水与ERA5数据的对比分析发现，在降水过程的前两个阶段，模式模拟出的降水量略高于ERA5数据，但相差不大；而在第三阶段，两者之间的差异明显。通过计算不同阶段850 hPa高度上的水汽通量及其散度差异表明，降水前期模式模拟的整体趋势与ERA5数据基本一致[图7(a)，(b)]。然而，模型所反映的水汽输送强度高于ERA5数据，这在一定程度上解释了ERA5数据在前期阶段降水较弱的现象。在第三阶段，ERA5数据显示在研究区域北部出现持续向北的水汽输送。相比之下，试验13模拟结果显示水汽更多地被输送到太行山与华北平原之间的区域，而未能有效输送至河北中部及北京地区。这种差异导致降水中

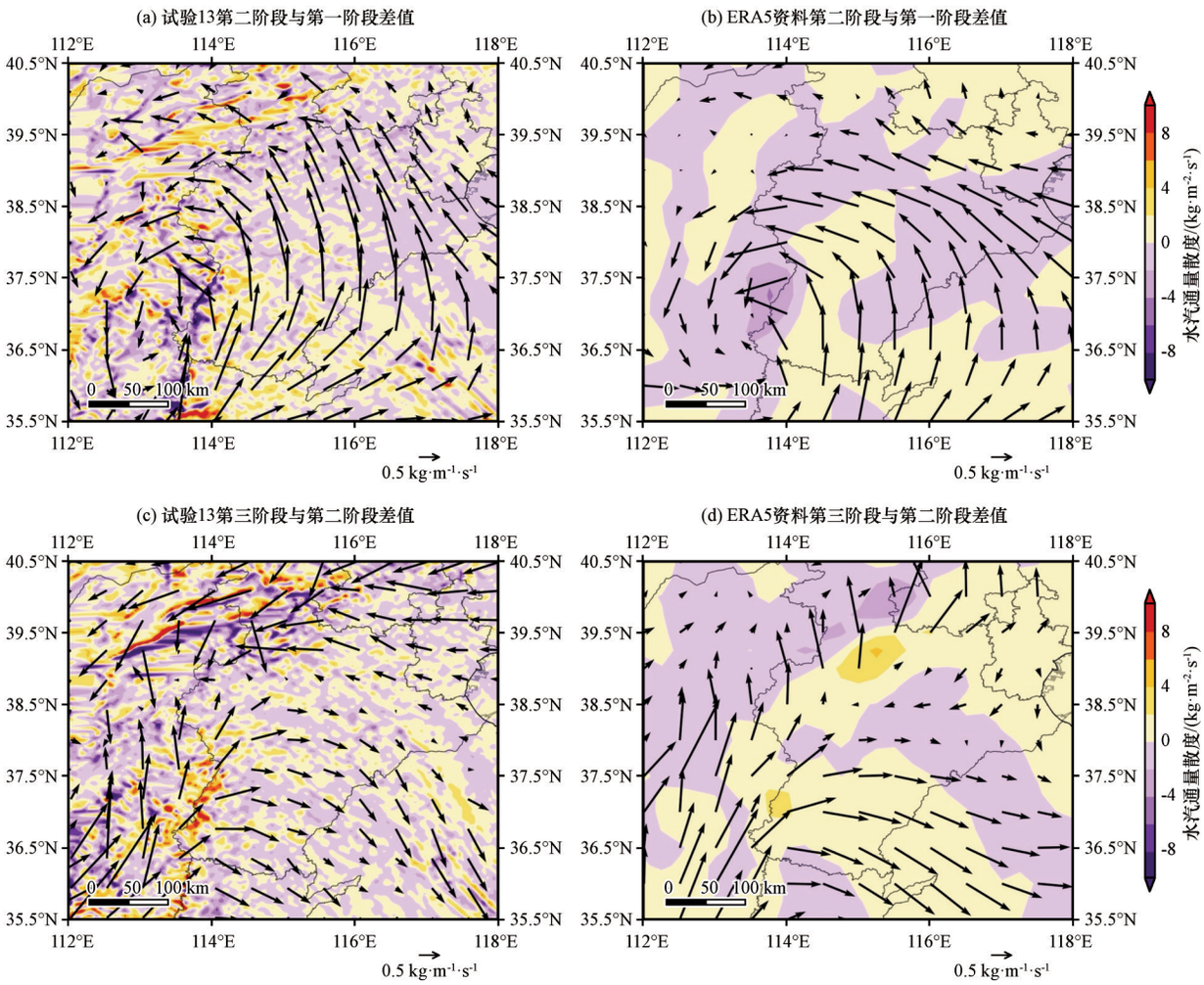


图7　“23. 7”华北极端降水不同阶段850 hPa水汽通量（矢量，单位：kg·m^{-1}·s^{-1}）与水汽通量散度（阴影，单位：kg·m^{-2}·s^{-1}）的阶段间差值分布

Fig. 7　Inter-stage difference distributions of 850 hPa water vapor flux (vector, unit: kg·m^{-1}·s^{-1}) and water vapor flux divergence (shading, unit: kg·m^{-2}·s^{-1}) during different stages of the "23. 7" extreme precipitation event in North China

心向西偏移，从而使得模型在上述区域表现出明显的降水低估问题[图7(c)，(d)]。综上所述，水汽输送强度的变化和路径的偏移是造成模拟降水分布误差的关键因素。

5　结论

本研究基于中尺度数值预报模式WRF V4. 5. 1对华北地区2023年7月29日至8月1日的一场典型的极端降水事件进行了动力降尺度模拟。研究分别采用了24组微物理过程、积云对流过程方案组合进行敏感性试验并通过时空技巧评分优选出最佳方案。与观测数据相比，采用WSM6-KF(试验13)参数化方案的配置对本次事件的模拟效果最佳。基于最佳方案，进行了动力降尺度结果与ERA5数据的对比分析，探究本次动力降尺度结果的优劣之处。本研究得到以下主要结论：

（1）WRF动力降尺度模拟结果均成功再现此次极端降水事件的雨带走向。对比分析表明，模式对降水模拟的准确性与水平分辨率密切相关。随着分辨率从27 km提升至3 km，模式对降水极值区的位置、强度以及内部精细结构的刻画能力得到了较大改善，并与实际观测更为一致。这充分说明，采用高分辨率进行动力降尺度是准确评估和研究此类极端降水事件的有效途径。

（2）WRF模式基本可以模拟出此次极端降水事件的时空格局，但不同的参数化方案组合会显著影响模拟降水的时空特征。通过计算TS、POD、FAR、FSS空间技巧评分，并计算模拟与观测的逐小时降水序列相关系数、均方根误差、标准差等时间技巧评分，WSM6-KF(试验13)方案在时空分布

上表现最佳。归因于WSM6微物理方案能够更准确地模拟出强上升运动中心以及霰粒子的生成，同时结合KF积云对流方案能够更好地再现本次事件的微物理过程。

（3）尽管试验13方案在本次极端降水事件的模拟中整体表现优异，但与ERA5再分析数据对比仍存在一定偏差。特别是在降水峰值时段，模拟的湿层厚度较薄。在太行山复杂地形区域，模拟的水汽输送路径与实际观测存在显著差异，这是导致降水模拟误差的主要原因。

综上所述，本文通过个例研究表明WSM6-KF参数化方案在大多数的指标上的表现优于其他方案，可为极端降水事件动力降尺度模拟的研究和预报提供一定参考。在未来研究中，可以尝试对模拟结果进行误差订正，以提升该地区极端降水预报的准确性。

参考文献（References）：

Arakawa A，Jung J H，Wu C M，2016. Multiscale modeling of the moist-convective atmosphere［J］. Meteorological Monographs，56：16. 1−16. 17. DOI：10. 1175/amsmonographs−d−15−0014. 1.

Bae S Y，Hong Songyou，Tao Weikuo，2019. Development of a single-moment cloud microphysics scheme with prognostic hail for the weather research and forecasting（WRF）model［J］. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences，55（2）：233−245. DOI：10. 1007/s13143−018−0066−3.

Chen Huopo，Sun Jianqi，2020. Increased population exposure to precipitation extremes in China under global warming scenarios［J］. Atmospheric and Oceanic Science Letters，13（1）：63−70. DOI：10. 1080/16742834. 2020. 1697168.

Chen Shuhua，Sun W Y，2002. A one-dimensional time dependent cloud model［J］. Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II，80（1）：99−118. DOI：10. 2151/jmsj. 80. 99.

Dudhia J，1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model［J］. Journal of the Atmospheric Sciences，46（20）：3077−3107. DOI：10. 1175/1520−0469（1989）046<3077：nsocod>2. 0. co；2.

Glotfelty T，Alapaty K，He Jian，et al.，2019. The weather research and forecasting model with aerosol-cloud interactions（WRF-ACI）：development，evaluation，and initial application［J］. Monthly Weather Review，147（5）：1491−1511. DOI：10. 1175/mwr−d−18−0267. 1.

Hong Songyou，Lim J O J，2006a. The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme（WSM6）［J］. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences，42：129 - 151.

Hong Songyou，Noh Y，Dudhia J，2006b. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes［J］. Monthly Weather Review，134（9）：2318−2341. DOI：10. 1175/mwr3199. 1.

Janjić Z I，1994. The step-mountain eta coordinate model：further developments of the convection，viscous sublayer，and turbulence closure schemes［J］. Monthly Weather Review，122（5）：927−945. DOI：10. 1175/1520−0493（1994）122<0927：tsmecm>2. 0. co；2.

Jiménez P A，Dudhia J，González-Rouco J F，et al.，2012. A revised scheme for the WRF surface layer formulation［J］. Monthly Weather Review，140（3）：898−918. DOI：10. 1175/mwr−d−11−00056. 1.

Kain J S，2004. The kain-fritsch convective parameterization：an update［J］. Journal of Applied Meteorology，43（1）：170−181. DOI：10. 1175/1520−0450（2004）043<0170：tkcpau>2. 0. co；2.

Kessler E，1969. On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations［M］//On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulations. Boston，MA：American Meteorological Society：1−84. DOI：10. 1007/978−1−935704−36−2_1.

Mlawer E J，Taubman S J，Brown P D，et al.，1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres：RRTM，a validated correlated-k model for the longwave［J］. Journal of Geophysical Research：Atmospheres，102（D14）：16663−16682. DOI：10. 1029/97jd00237.

Niu Guoyue，Yang Zongliang，Mitchell K E，et al.，2011. The community Noah land surface model with multiparameterization options（Noah-MP）：1. Model description and evaluation with local-scale measurements［J］. Journal of Geophysical Research，116（D12）：D12109. DOI：10. 1029/2010jd015139.

Rao N N，Paul S，Skekhar M S，et al.，2021. Unprecedented heavy rainfall event over Yamunanagar，India during 14 July 2016：an observational and modelling study［J］. Meteorological Applications，28（6）：e2039. DOI：10. 1002/met. 2039.

Schaefer J T，1990. The critical success index as an indicator of warning skill［J］. Weather and Forecasting，5（4）：570−575. DOI：10. 1175/1520−0434（1990）005<0570：tcsiaa>2. 0. co；2.

Tao Weikuo，Wu Di，Lang S，et al.，2016. High-resolution NU-WRF simulations of a deep convective-precipitation system during MC3E：Further improvements and comparisons between Goddard microphysics schemes and observations［J］. Journal of Geophysical Research：Atmospheres，121（3）：1278−1305. DOI：10. 1002/2015jd023986.

Thompson G，Field P R，Rasmussen R M，et al.，2008. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. part II：implementation of a new snow parameterization［J］. Monthly Weather Review，136（12）：5095−5115. DOI：10. 1175/2008mwr2387. 1.

Xu Hongxiong，Zhao Yang，Zhao Dajun，et al.，2024. Improvement of disastrous extreme precipitation forecasting in North China by

Pangu-weather AI-driven regional WRF model[J]. Environmental Research Letters, 19(5): 054051. DOI: 10. 1088/1748-9326/ad41f0.

Yang Zongliang, Niu Guoyue, Mitchell K E, et al., 2011. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 2. Evaluation over global river basins[J]. Journal of Geophysical Research, 116(D12): D12110. DOI: 10. 1029/2010jd015140.

Zhang Chunxi, Wang Yuqing, 2017. Projected future changes of tropical cyclone activity over the western north and south Pacific in a 20-km-mesh regional climate model[J]. Journal of Climate, 30(15): 5923-5941. DOI: 10. 1175/jcli-d-16-0597. 1.

鲍艳松, 季凌潇, 李欢, 等, 2024. 面向空投的青藏高原风场大涡模拟研究[J]. 高原气象, 43(2): 293-302. Bao Yansong, Ji Lingxiao, Li Huan, et al., 2024. Application of large eddy simulation on Qinghai-Xizang Plateau wind for airdrop[J]. Plateau Meteorology, 43(2): 293-302. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2023. 00051.

董泽新, 吴硕岩, 叶芳, 等, 2025. 基于WRF模式的CFD与LSTM技术对低空风切变数值模拟研究[J]. 高原气象, 44(2): 546-562. Dong Zexin, Wu Shuoyan, Ye Fang, et al., 2025. Numerical simulation of low-level wind shear using CFD and LSTM technology based on the WRF model[J]. Plateau Meteorology, 44(2): 546-562. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2024. 00119.

符娇兰, 权婉晴, 麦子, 等, 2023. “23·7”华北特大暴雨过程雨强精细化特征及动力和热力条件初探[J]. 气象, 49(12): 1435-1450. Fu Jiaolan, Quan Wanqing, Mai Zi, et al., 2023. Preliminary study on the refined characteristics of rainfall intensity and dynamic and thermodynamic conditions in the July 2023 severe torrential rain in North China[J]. Meteorological Monthly, 49(12): 1435-1450. DOI: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2023. 112701.

郝立生, 丁一汇, 2023. 华北夏季降水异常与华南前汛期降水异常的关系[J]. 高原气象, 42(2): 272-282. Hao Lisheng, Ding Yihui, 2023. Relationship between summer precipitation anomaly in North China and precipitation anomaly in the pre-flood season in South China[J]. Plateau Meteorology, 42(2): 272-282. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2022. 00063.

黄克秀, 尤元红, 卢燕宇, 等, 2025. 黑河上游高寒山区土壤水分模拟对Noah-MP模型参数化方案的敏感性评估[J]. 高原气象, 44(3): 770-779. Huang Kexiu, You Yuanhong, Lu Yanyu, et al., 2025. Sensitivity analysis of Noah-MP model parameterization schemes for soil moisture simulation in the high-cold region of the upper Heihe River Basin[J]. Plateau Meteorology, 44(3): 770-779. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2024. 00114.

李晓兰, 陈涛, 赵玮, 等, 2025. 太行山精细地形对“23·7”华北极端暴雨特征影响的观测分析[J]. 大气科学, 49(3): 629-644. Li Xiaolan, Chen Tao, Zhao Wei, et al., 2025. Observational analysis of mount Taihang's orographic effects on the“23·7” extreme precipitation event in North China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 49(3): 629-644. DOI: 10. 3878/j. issn. 1006-9895. 2403. 23161.

刘雨萌, 赵林, 李照国, 等, 2025. 一种偏差校正方法在青藏高原夏季CMIP6降水数据订正中的应用评估[J]. 高原气象, 44(1): 16-31. Liu Yumeng, Zhao Lin, Li Zhaoguo, et al., 2025. Application evaluation of a bias correction method in the correction of CMIP6 precipitation data for summer in Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology, 44(1): 16-31. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2024. 00046.

潘留杰, 薛春芳, 张宏芳, 等, 2017. 三种高分辨率格点降水预报检验方法的对比[J]. 气候与环境研究, 22(1): 45-58. Pan Liujie, Xue Chunfang, Zhang Hongfang, et al., 2017. Comparison of three verification methods for high-resolution grid precipitation forecast[J]. Climatic and Environmental Research, 22(1): 45-58. DOI: 10. 3878/j. issn. 1006-9585. 2016. 16012.

潘留杰, 张宏芳, 祁春娟, 等, 2025. 一个基于潜在影响的降水预报评分方法[J]. 高原气象, 44(3): 733-746. Pan Liujie, Zhang Hongfang, Qi Chunjuan, et al., 2025. A precipitation forecast score based on potential impact[J]. Plateau Meteorology, 44(3): 733-746. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2024. 00084.

沈学顺, 王建捷, 李泽椿, 等, 2020. 中国数值天气预报的自主创新发展[J]. 气象学报, 78(3): 451-476. Shen Xueshun, Wang Jianjie, Li Zechun, et al., 2020. China's independent and innovative development of numerical weather prediction[J]. Acta Meteorologica Sinica, 78(3): 451-476. DOI: 10. 11676/qxxb2020. 030.

石春娥, 李耀孙, 杨军, 等, 2015. MM5和WRF对中国东部地区冬季边界层模拟效果比较[J]. 高原气象, 34(2): 389-400. Shi Chune, Li Yaosun, Yang Jun, et al., 2015. Comparison of simulations on winter sounding profiles in PBL in East China between WRF and MM5[J]. Plateau Meteorology, 34(2): 389-400. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2013. 00206

陶诗言, 1980. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 225. Tao Shiyan, 1980. Rainstorm in China[M]. Beijing: Science Press, 225.

王秀智, 杨启东, 何帅辰, 等, 2024. WRF模式多参数化方案对东南亚低纬高原陆气耦合强度的模拟评估[J]. 高原气象, 43(4): 995-1010. Wang Xiuzhi, Yang Qidong, He Shuaichen, et al., 2024. Evaluation of land-atmosphere coupling strength in low-latitude highland of Southeast Asia by WRF model parameterization schemes[J]. Plateau Meteorology, 43(4): 995-1010. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2024. 00070.

王予, 李惠心, 王会军, 等, 2021. CMIP6全球气候模式对中国极端降水模拟能力的评估及其与CMIP5的比较[J]. 气象学报, 79(3): 369-386. Wang Yu, Li Huixin, Wang Huijun, et al., 2021. Evaluation of CMIP6 model simulations of extreme precipitation in China and comparison with CMIP5[J]. Acta Meteorologica Sinica, 79(3): 369-386. DOI: 10. 11676/qxxb2021. 031.

杨舒楠, 张芳华, 胡艺, 等, 2023. “23·7”华北特大暴雨过程的基本特征与成因初探[J]. 暴雨灾害, 42(5): 508-520. Yang Shunan, Zhang Fanghua, Hu Yi, et al., 2023. Analysis on the char-

acteristics and causes of the “23·7” torrential rainfall event in North China[J]. Torrential Rain and Disasters, 42(5): 508−520. DOI: 10. 12406/byzh. 2023−187.

杨晓亮, 金晓青, 孙云, 等, 2023. “23·7”河北太行山东麓罕见特大暴雨特征及成因[J]. 气象, 49(12): 1451−1467. Yang Xiaoliang, Jin Xiaoqing, Sun Yun, et al., 2023. Evolution characteristics and formation of the July 2023 severe torrential rain on the eastern foothills of Taihang Mountains in Hebei Province[J]. Meteorological Monthly, 49(12): 1451−1467. DOI: 10. 7519/j. issn. 1000−0526. 2023. 102301.

俞碧玉, 朱科锋, 2022. 多种空间检验方法在不同分辨率模式降水预报评估中的应用[J]. 气象科学, 42(3): 341−355. Yu Biyu, Zhu Kefeng, 2022. Application of multiple spatial verification methods to precipitation forecasts from different resolution models[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 42(3): 341−355. DOI: 10. 12306/2021jms. 0055.

张芳华, 杨舒楠, 胡艺, 等, 2023. “23·7”华北特大暴雨过程的水汽特征[J]. 气象, 49(12): 1421−1434. Zhang Fanghua, Yang Shunan, Hu Yi, et al., 2023. Water vapor characteristics of the July 2023 severe torrential rain in North China[J]. Meteorological Monthly, 49(12): 1421−1434. DOI: 10. 7519/j. issn. 1000−0526. 2023. 103003.

张嘉荣, 程雪玲, 2020. 基于CFD降尺度的复杂地形风场数值模拟研究[J]. 高原气象, 39(1): 172−184. Zhang Jiarong, Cheng Xueling, 2020. Numerical simulation of wind field in complex terrain based on CFD downscaling[J]. Plateau Meteorology, 39(1): 172−184. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2019. 00005.

张江涛, 何丽华, 李江波, 等, 2023. 河北“23. 7”极端暴雨过程特征及成因初探[J]. 大气科学学报, 46(6): 884−903. Zhang Jiangtao, He Lihua, Li Jiangbo, et al., 2023. Preliminary study on the characteristics and causes of the “23. 7” extreme rainstorm in Hebei[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 46(6): 884−903. DOI: 10. 13878/j. cnki. dqkxxb. 20230905001.

张琳, 张卫红, 尹金方, 等, 2026. WRF模式中初始土壤温湿度对华北冬季近地面要素预报的影响[J]. 高原气象, 45(1): 203−216. Zhang Lin, Zhang Weihong, Yin Jinfang, et al., 2026. Impact of initial soil temperature and moisture on the temperature and relative humidity at 2 m in the WRF model over North China in winter[J]. Plateau Meteorology, 45(1): 203−216. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2025. 00058.

周波涛, 蔡怡亨, 韩振宇, 2022. 中国区域性暴雨事件未来变化: RegCM4动力降尺度集合预估[J]. 地学前缘, 29(5): 410−419. Zhou Botao, Cai Yiheng, Han Zhenyu, 2022. Regional rainstorm changes in China: Ensemble projection *via* RegCM4 dynamical downscaling[J]. Earth Science Frontiers, 29(5): 410−419. DOI: 10. 13745/j. esf. sf. 2021. 9. 61.

Modeling and evaluation of WRF multi-physical parameterization schemes for the "23.7" extreme precipitation event in North China

Huang Yuetong[1, 2], Sun Bo[1, 2, 3, 4], Wang Huijun[1, 2, 3, 4], Yu Entao[1, 4],
Chen Dong[5], Dai Yongling[1, 2], Tang Wenchao[1, 2]

(1. *State Key Laboratory of Climate System Prediction and Risk Management/Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044, *Jiangsu, China*;
2. *School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044, *Jiangsu, China*;
3. *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai* 519082, *Guangdong, China*;
4. *Nansen Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*;
5. *Earth System Modeling and Prediction Centre, China Meteorological Administration, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: This study focuses on an extreme precipitation event that occurred in North China from July 28 to August 1, 2023, referred to as the "23. 7" extreme precipitation event. The purpose of this research is to assess the performance of various parameterization schemes within the WRF model in simulating this event, identify the optimal scheme combinations, and diagnose the physical causes of simulation biases. Using the Weather Research and Forecasting (WRF-ARW) model version 4. 5. 1, a total of 24 sensitivity experiments were conducted with six different microphysics schemes and four cumulus parameterization schemes. The precipitation simulation results were systematically evaluated using various spatial-temporal verification metrics, including the Threat Score (TS), the Fractions Skill Score (FSS) and so on. The results indicate that: (1) The dynamical downscaling simulations effectively reproduced the orientation and area of rainfall associated with this extreme precipitation event, with accuracy improving as model resolution increased. (2) Among all scheme combinations, the combination of the WSM6 microphysics scheme and the Kain-Fritsch cumulus scheme (WSM6-KF) demonstrated the highest overall skill in simulating the precipitation area, intensity, and evolution trend, particularly excelling in the simulation of heavy rainfall events and above. In-depth diagnosis revealed that this combination's strength lies in its ability to accurately reproduce the distribution of deep graupel and intense updrafts corresponding to the heavy precipitation center, thereby capturing the key microphysical and dynamical features of this extreme precipitation event. (3) Despite the strong performance of the optimal scheme (WSM6-KF), systematic biases were still present. Comparisons with ERA5 reanalysis data indicated that this scheme underestimated the water vapor transport pathways and moist layer thickness in the terrain-forced uplift regions of the Taihang Mountains during the later stages of precipitation, which directly resulted in an underestimation of peak precipitation and a westward shift of some rainfall areas. This study provides references for future operational forecasting of extreme precipitation in this region and insights for model improvement.

Key words: dynamical downscaling; extreme precipitation; numerical simulation; bias; water vapor transport