基于 WRF 模式的伊洛河流域场次降雨模拟与分析

陶　洁[1,2]，周翔宇[1]，李金晶[3,4]，赵启家[1]

（1.郑州大学 水利与交通学院，河南 郑州 450001；2.河南省水循环模拟与水环境保护国际联合实验室，河南 郑州 450001；3.黄河水利委员会黄河水资源中心，河南 郑州 450003；4.华北水利水电大学 黄河研究院，河南 郑州 450046）

摘　要：针对伊洛河流域地形起伏剧烈、降雨空间差异明显，且场次降雨模拟及微物理方案适用性研究相对较少、逐时动态过程研究仍不充分的问题，基于 WRF 模式对伊洛河流域 2021—2024 年 5 场典型降雨过程进行模拟，采用全球数据同化系统（GDAS）的 FNL 数据作为初始场与边界条件，评估不同微物理方案与下垫面条件对典型降雨过程的影响。结果表明：WRF 模式能够较好地再现伊洛河流域场次降雨的时空分布特征；但 Kessler、Lin、WSM6、Thompson 和 Eta 5 种微物理方案对降雨中心的位置和累积雨量、场次降雨的面平均雨量、累积雨量空间分布和逐时动态过程的模拟仍存在一定偏差，其中降雨中心累积雨量与面平均雨量整体偏大；Eta 方案综合表现相对稳定；更新下垫面数据后，模拟的降雨中心累积值整体降低约 6%，场次降雨的降雨中心和时空过程的模拟效果均明显提升。

关键词：WRF 模式；降雨模拟；微物理方案；下垫面更新；伊洛河流域

中图分类号：P426.6；P456.7　　**文献标志码**：A　　**doi**：10.13705/j.issn.1671-6833.2027.01.007

准确可靠的场次降雨模拟对揭示流域降雨时空演变特征、提高洪水预警和防洪调度能力具有重要意义[1-2]。随着数值天气预报技术的发展，中尺度数值模式的天气研究与预报模式 WRF（weather research and forecasting model）能够精细化地捕捉区域气象要素变化特征，已被广泛应用于流域降雨模拟研究[3]。例如 Maussion 等[4]评估了 WRF 模式对青藏高原一次降雨过程的模拟能力；于伟等[5]选取长江上游 4 场典型降雨过程，比较了不同参数化方案组合对降雨模拟结果的影响。张金萍等[6]分析了 WRF 模式对郑州短历时强降雨峰值及过程变化的模拟能力；钟泽文等[7]分析了 WRF 模式中不同微物理、陆面过程、积云对流和边界层方案组合对石羊河流域降雨模拟结果的影响；陶洁等[8]在岷江上游 WRF 降雨数值模拟中比较了初始场资料、预见期和下垫面条件对模拟结果的影响；Xu 等[9]分析了河南“7·20”特大暴雨不同微物理方案对极端降雨模拟的影响。可见，微物理参数化方案的选取在不同地区存在明显差异；现有研究多侧重单场或少数场次的降雨落区和量级的模拟分析，对降雨逐时动态过程的模拟研究仍不充分。

伊洛河流域山地丘陵与河谷平原并存，具有明显的“山地-河谷”过渡特征，地形起伏剧烈，降雨分布空间差异明显[10-11]，模拟难度较大[12]。目前该流域场次降雨过程的数值模拟及不同微物理方案适用性的研究相对较少。本文基于 WRF 模式选取伊洛河流域 2021—2024 年 5 场典型降雨过程，采用“微物理方案比较-综合表现相对稳定方案确定-下垫面更新实验”的分步实验思路，开展不同微物理参数化方案以及不同下垫面条件下多场典型降雨的时空动态过程模拟分析，以期为伊洛河流域气象水文预报、流域水资源管理提供支撑。

1　研究区概况

伊洛河流域是黄河中游下段的重要一级支流区，横跨河南、陕西两省，流域面积约 18 881 km^2，主

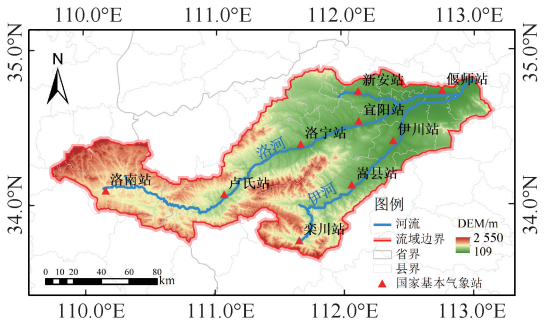
收稿日期：2026-09-01；**修订日期**：2026-10-09

基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFC3211301）；黄河水科学研究联合基金重点项目（U2443203）

作者简介：陶洁（1986—），女，江苏盐城人，郑州大学副教授，博士，博士生导师，主要从事河流生态水文、水环境与水资源管理研究，E-mail：taojie2015@zzu.edu.cn。

通信作者：李金晶（1981—），男，江苏射阳人，黄河水利委员会黄河水资源中心高级工程师，主要从事水文学及水资源研究，E-mail：lijinjing@whu.edu.cn。

要由伊河和洛河两大水系组成。流域属暖温带大陆性季风气候,地势总体西南高、东北低[13]。流域内降雨空间分布不均,上游降雨量总体高于下游[13-14],高值区主要分布在山地,河谷及邻近丘陵区偏低[10];时间上主要集中在6—9月。研究区概况见图1。



注:该图行政区划底图基于国家地理信息公共服务平台(天地图)行政区划可视化数据绘制,行政区划界线未作修改(审图号:GS(2024)0650号)。

图1 研究区域及气象站位置

Figure 1 Study area and locations of weather stations

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 WRF模式

区域网格设计。采用嵌套网格法降尺度计算天气过程,选取双层网格方式(图2),大尺度域d01覆盖河南省和陕西省,水平网格距为9 km;d02覆盖研究区伊洛河流域,水平网格距为3 km;区域中心经度设置为113.5°E,纬度为34.5°N,模拟积分步长为30 s。

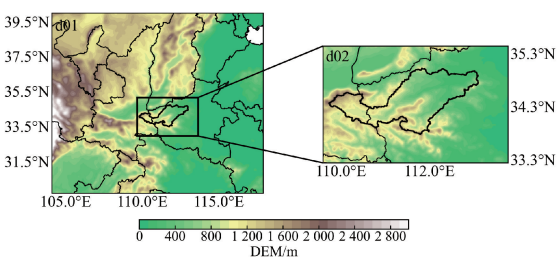


图2 WRF模式模拟区域设置

Figure 2 WRF model modeling domain configuration

微物理方案设计。WRF模式通过不同物理过程参数化方案表征云微物理、辐射传输、陆面交换、近地面层和边界层湍流等大气物理过程。采用MO近地面层方案[15]、Noah陆面过程方案[16]、RRTMG长短波辐射方案[17]和MYJ边界层方案[18]作为固定物理过程配置,外层区域采用Kain-Fritsch积云对流方案[19],内层区域关闭积云对流参数化。在保持初始场、边界条件及其他物理过程方案一致的基础上,仅改变微物理过程方案,分别选取Kessler[20]、Lin[21]、WSM6[22]、Thompson[23]和Eta[24]这5种微物理参数化方案开展对比实验,以分析伊洛河流域典型降雨过程模拟结果对微物理参数化方案的敏感性。

下垫面方案设计。WRF模式默认采用的土地利用为2001年MODIS 30 s(约900 m)分辨率数据,地形为GMTED2010 30 s(约900 m)DEM数据。由于默认土地利用资料与研究时段存在一定时间差,且空间分辨率相对较低,模式自带的下垫面数据在精度和时效性方面存在一定局限。

为便于考察下垫面更新对降雨模拟的影响,更新的下垫面为2013年30 m分辨率的ASTER高程数据与2020年500 m分辨率的MODIS土地利用数据。

为避免微物理过程参数化方案差异对下垫面敏感性分析产生干扰,采用分步递进的实验策略,在默认下垫面条件下通过敏感性实验确定综合表现相对稳定的微物理方案,随后在固定该微物理方案的基础上,构建下垫面敏感性实验组,包括默认下垫面控制实验(CTL)及更新下垫面数据实验(EXP)。

2.1.2 精度评价

利用均方根误差(*RMSE*)和平均绝对误差(*MAE*)对降雨精度进行评估。各指标计算公式如下所示:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(S_i - O_i)^2}; \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|S_i - O_i|。 \quad (2)$$

式中:S_i为第i个样本对应的模拟降雨量,mm;O_i为第i个样本对应的实测降雨量,mm;N为参与统计的有效配对样本数;i为样本序号。

2.1.3 反距离权重插值法

利用反距离权重(inverse distance weighting,IDW)插值法将实测站点降雨量插值至研究区格点,以比较实测与模拟的差异[25]。

2.1.4 最近格点法

最近格点法是一种基于空间距离的匹配方法,将离站点最近的模式格点降雨数据赋值给该站点,从而建立模式网格点与观测站点之间的对应关系[7]。

2.2 数据来源

WRF模式初始场和侧边界条件来源于美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction,NCEP)发布的全球数据同化系统(Global

Data Assimilation System, GDAS) FNL (Final Operational Global Analysis) 数据(https://gdex.ucar.edu/datasets/d083003/dataaccess)。该数据集时间分辨率为 6 h,水平空间分辨率为 0.25°×0.25°,包括温度、湿度、风场和气压等变量在内的初始场和边界条件。模型验证数据选用 9 个在伊洛河流域内具有一定空间代表性的国家基本气象站点(图 1)的 2021—2024 年逐小时降雨实测数据。

如表 1 所示,为涵盖伊洛河流域汛期不同月份的降雨过程,并兼顾近年来引发明显洪水的极端性事件,综合考虑降雨过程发生时段、降雨量、影响范围及观测资料完整性,选取 5 场典型降雨过程进行模拟。

表 1　5 场典型降雨基本信息

Table 1　Basic information of five typical rainfall event

降雨场次	降雨时间(北京)	降雨历时/h
20210718	2021-07-18-03:00~2021-07-21-23:00	92
20210916	2021-09-16-05:00~2021-09-19-15:00	82
20220828	2022-08-28-00:00~2022-08-30-10:00	58
20230616	2023-06-16-11:00~2023-06-18-19:00	56
20240715	2024-07-15-03:00~2024-07-18-00:00	69

3　结果分析

3.1　累积雨量模拟结果

3.1.1　累积雨量及空间分布

利用 WRF 模拟了 5 场典型降雨过程,表 2 显示了 5 场降雨中心的累积雨量及面平均雨量统计结果。图 3 展示了 20240715 场次降雨 5 种微物理方案下模拟的累积雨量空间分布,及经降雨反距离权重(IDW)插值的实测累积雨量空间分布结果。可见 WRF 模式对流域内降雨中心位置、降雨主要落区及雨带空间形态具有一定刻画能力,但各微物理方案下降雨中心累积雨量、降雨高值区范围及雨带延伸方向与实测相比仍存在一定程度差异,且降雨中心累积雨量均明显高于实测站点。

3.1.2　累积雨量精度评价

基于默认下垫面条件和 9 个气象站逐小时降雨数据,采用最近格点法匹配模拟与观测降雨,计算 5 种微物理方案下 5 场降雨过程中的 *RMSE* 和 *MAE*,结果如图 4 所示。可以看出各方案均出现高值离群点,且均值普遍高于中位数。分析发现高值离群点主要来自 20210718 场次降雨过程,反映出 WRF 模式在极端强降雨背景下对降雨量级的定量模拟仍存

表 2　5 场降雨 WRF 模拟值与实测值的对比

Table 2　Comparison between WRF simulations and observations for five typical rainfall events

降雨场次	实测站点累积雨量的最大值/mm	WRF 降雨中心的累积雨量/mm					面平均雨量/mm					
							实测值	WRF 模拟值				
		Kessler	Lin	Eta	WSM6	Thompson		Kessler	Lin	Eta	WSM6	Thompson
20210718	424.0(偃师)	526.38	662.53	652.93	527.57	429.89	106.91	151.57	166.34	139.80	160.76	111.13
20210916	152.3(洛南)	173.68	257.52	228.44	230.24	207.30	112.76	102.86	126.63	111.14	124.88	104.56
20220828	31.5(孟津)	70.26	112.04	71.39	91.90	77.22	17.62	19.48	52.26	34.71	50.02	44.40
20230616	85.2(嵩县)	96.54	111.80	83.76	106.24	98.57	57.34	45.37	60.61	44.81	61.48	57.08
20240715	110.1(洛南)	297.00	330.08	373.39	362.48	411.51	59.77	86.74	87.15	72.29	96.28	106.75

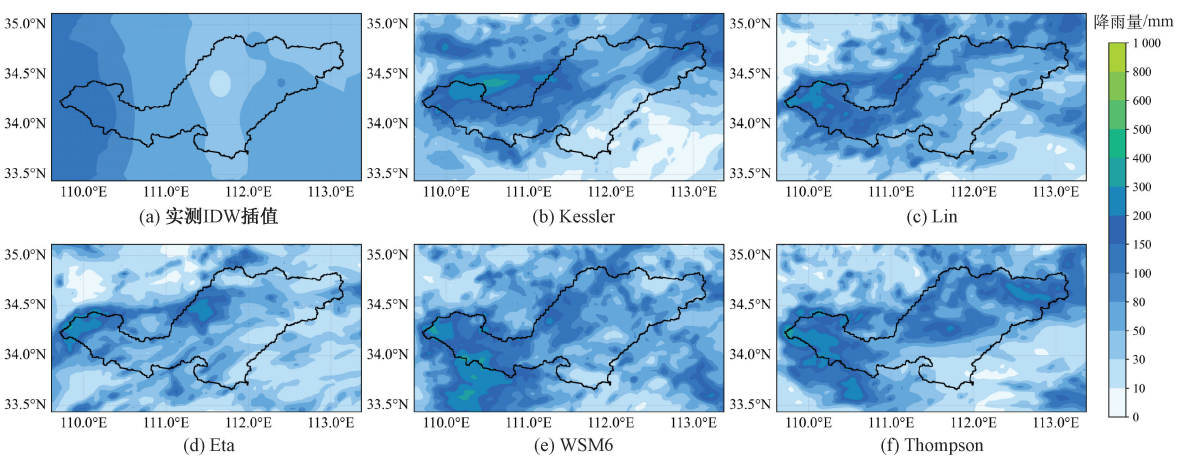


图 3　20240715 场次累积雨量空间分布

Figure 3　Spatial distribution of accumulated rainfall for the 20240715 event

在不确定性。5 种微物理方案下 Eta 方案的中位数整体偏低,误差离散程度较小。

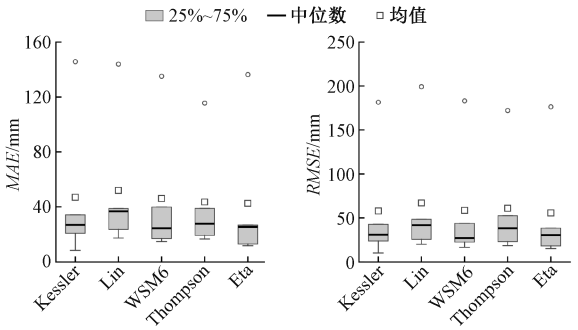


图 4　不同微物理参数化方案 *MAE* 和 *RMSE* 箱线图

Figure 4　Boxplots of *MAE* and *RMSE* for different microphysics parameterization schemes

图 5 为除 20210718 场次外其余 4 场典型降雨过程下不同微物理方案 *MAE* 和 *RMSE* 箱线图。与图 4 相比,图 5 整体误差水平明显降低,各方案误差分布更为集中,且未出现高值离群点。剩余 4 场降雨过程中,不同方案的典型误差水平处于相近量级,其中 Eta 方案误差水平整体较低,分布相对集中。Eta 方案相对稳定的模拟表现可能与其诊断式混合相微物理处理特点以及伊洛河流域复杂的地形条件有关。

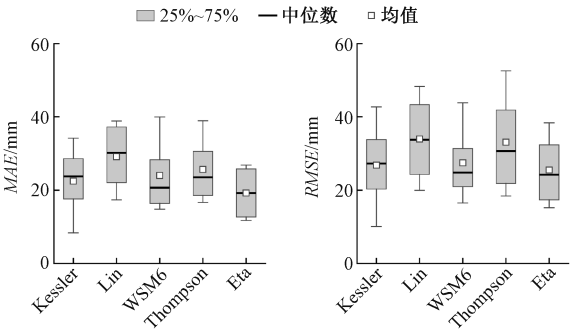


图 5　其余 4 场降雨过程下不同微物理参数化方案 *MAE* 和 *RMSE* 箱线图

Figure 5　Boxplots of *MAE* and *RMSE* for different microphysics parameterization schemes during the other four rainfall events

3.2　降雨过程模拟

图 6 为各场次降雨中心逐小时降雨过程与降雨中心偏离距离对比。实测序列为各场降雨实测气象站点中累积雨量最大的站点的逐小时降雨过程。

由图 6(a)~6(e)可知,WRF 模式能够整体反映降雨过程的时间演变特征,但对降雨中心处峰值和峰现时间的模拟存在偏差。其中,20230616 场次峰值模拟效果较好,Kessler 方案模拟峰值(9.43 mm/h)最接近实测峰值(9.8 mm/h)。20210718 和 20240715 场

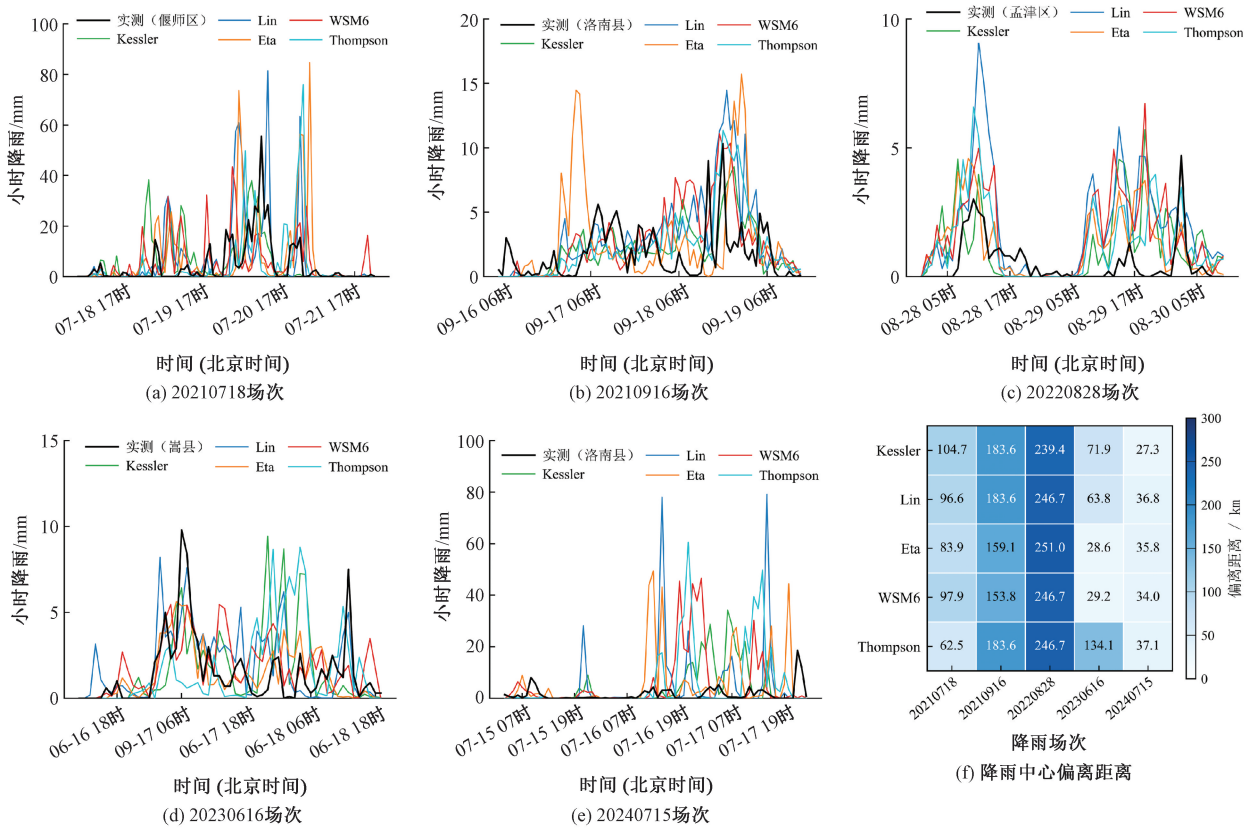


图 6　各场次降雨中心逐小时降雨过程与降雨中心偏离距离对比

Figure 6　Comparison of hourly rainfall processes at rainfall centers and offset distances between simulated and observed rainfall centers for each event

次峰值模拟偏差较大,20240715 场次各方案模拟峰值均存在高估现象。由图 6(f)可知,WRF 模式模拟的降雨中心位置与实测累积雨量最大站点位置存在不同程度的偏差。20220828 和 20210916 场次中降雨中心位置偏差较大,偏离距离分别达到 239.4~251.0 km 和 153.8~183.6 km。Eta 方案 5 场平均偏离距离最小,为 111.7 km,略优于 WSM6 方案(112.3 km)。综合考虑误差水平和模拟稳定性,选取 Eta 方案作为后续下垫面敏感性实验的基础微物理方案。

3.3 下垫面变化对降雨模拟的影响

3.3.1 下垫面变化对比

表 3 为下垫面更新前后土地利用结构调整,其中农田和混交林面积占比减少,草地面积明显增加,落叶阔叶林和城镇与建设用地占比有所上升。

表 3 不同下垫面的土地利用差异

Table 3 Differences in land use among different land-surface

土地利用类型	土地利用占比/%		土地利用类型	土地利用占比/%	
	CTL	EXP		CTL	EXP
常绿针叶林	0.15	0	农田	66.72	45.08
落叶阔叶林	2.02	26.30	城镇与建设用地	2.95	3.34
混交林	26.25	2.16	草地	0.49	22.17

不同下垫面条件下,高程变化较小,CTL 与 EXP 的最低高程分别为 102.45 m 和 102.36 m,最高高程分别为 2 098.72 m 和 2 098.75 m。

土地利用结构变化会改变地表能量分配和边界层结构,并可能进一步影响降雨过程[26-27]。以 20240715 降雨过程为例,更新下垫面后流域平均反照率增加 3.58%,白天平均感热通量增加 2.77%,潜热通量降低 10.91%,白天平均边界层高度增加 2.29%。

3.3.2 对累积雨量的影响

在固定 Eta 微物理方案的基础上,以 0.25°×0.25°、6 h FNL 资料作为初始场和边界条件,对 5 场典型降雨过程设置默认下垫面控制实验(CTL)和更新下垫面敏感性实验(EXP),分析对累积雨量的影响。

表 4 为 5 场降雨下垫面更新前后与实测的累积雨量统计对比。由表 4 可知,与默认下垫面相比,更新下垫面后模拟的降雨中心累积值整体降低约 6%,与实测站点数据更为接近。面平均雨量方面,更新下垫面后的模拟结果与默认相比变化不大,整体模拟效果反而是默认下垫面略好些。

表 4 5 场降雨下垫面更新前后与实测的累积雨量统计数据

Table 4 Accumulated rainfall statistics before and after land-surface updated for five rainfall events

降雨场次	实测最大站点的累积值/mm	WRF 降雨中心的累积雨量/mm		面平均雨量/mm		
		CTL	EXP	实测后计算值	CTL	EXP
20210718	424.0	652.93	536.93	106.91	139.80	154.48
20210916	152.3	228.44	201.91	112.76	111.14	109.23
20220828	31.5	71.39	74.04	17.62	34.71	35.04
20230616	85.2	83.76	81.35	57.34	44.81	44.21
20240715	110.1	373.39	365.15	59.77	72.29	74.42

图 7 为 20240715 场次降雨下垫面更新前后累积雨量空间分布对比图。对比默认下垫面,更新下垫面条件下模拟的降雨在流域西部及西南部有所增强,降雨中心位置向洛南县靠近,更接近实测情况。

3.3.3 对降雨过程的影响

下垫面更新对 WRF 模拟降雨过程演变的影响并非单一增强或减弱,而主要表现为雨区形态和降雨中心迁移特征的调整。以 20240715 场次为例,图 8 展示了该场次主峰前后实测 IDW 插值、CTL 实验和 EXP 实验的逐小时雨量空间分布。实测 IDW 插值结果显示,17 日 20 时前后降雨中心由流域东北部向南部移动,17 日 22—23 时向西部调整。默认下垫面条件下,WRF 模式能够模拟出降雨中心的形成过程,但降雨中心位置随着时间主要位于流域东北部、北部、中部,且部分时段雨量明显偏大。更新下垫面后,降雨中心的位置和过程发生调整,17 日 21—23 时降雨中心位于流域西部,较 CTL 实验更接近实测过程。

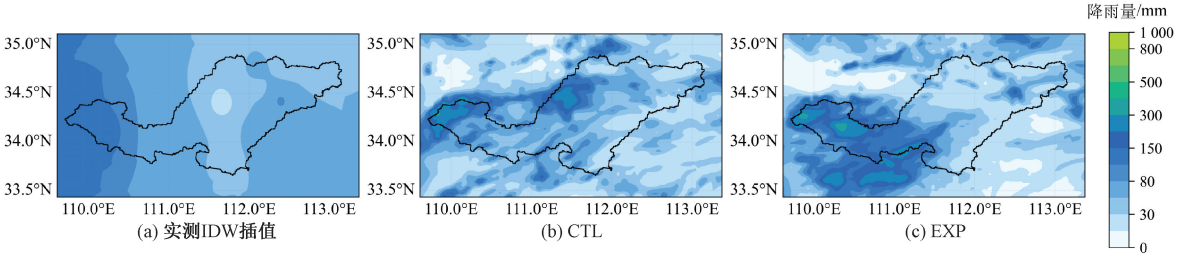


图 7 20240715 场次降雨下垫面更新前后累积雨量空间分布对比

Figure 7 Comparison of accumulated rainfall spatial distribution before and after land-surface data updated

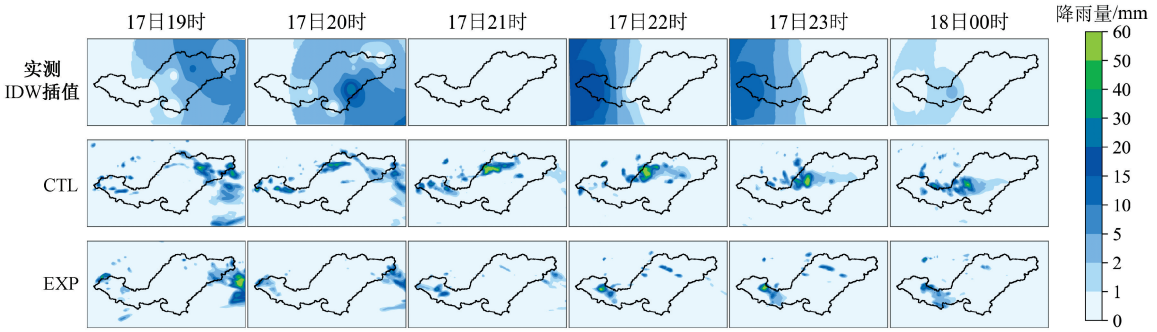


图 8　20240715 场次不同下垫面条件下逐小时降雨演变

Figure 8　Evolution of hourly rainfall under different land-surface conditions for the 20240715 event

综合降雨中心累积雨量、面平均雨量、累积雨量空间分布、降雨过程的模拟结果,更新下垫面后的模拟效果更接近实测,整体模拟效果更好。

4　结论

本文基于 WRF 模式对伊洛河流域 2021—2024 年 5 场典型降雨过程进行模拟与分析,主要结论如下。

(1)WRF 模式能够较好地再现伊洛河流域场次降雨的时空分布特征,但不同微物理参数化方案对降雨中心的位置和累积雨量、场次降雨的面平均雨量、累积雨量空间分布和逐时动态过程的模拟仍存在一定偏差。其中,降雨中心累积雨量与流域面平均雨量整体偏大。默认下垫面条件下,Eta 方案综合表现相对稳定,可作为伊洛河流域典型降雨模拟的优选微物理方案。

(2)在固定 Eta 微物理方案条件下,更新高程和土地利用数据后,场次降雨的降雨中心和时空过程的模拟效果明显提升,可为伊洛河流域洪水预报和水资源优化调度提供参考。

本文对实测雨量空间分布的刻画主要依赖站点插值结果,后续可结合雷达、卫星降雨和格点降雨等多源数据,进一步验证和改进伊洛河流域降雨模拟结果。

参考文献:

[1] Bao Hongjun, Wang Lili, Shen Xueshun, et al. A review: advances of flood forecasting of hydro-meteorological forecast technology [J]. Meteorological Monthly, 2016, 42(9): 1045-1057. [包红军, 王莉莉, 沈学顺, 等. 气象水文耦合的洪水预报研究进展[J]. 气象, 2016, 42(9): 1045-1057.]

[2] Zhang Jinping, Zhang Zhaoyang, Zuo Qiting. Urban waterlogging simulation and emergency response capacity evaluation with extreme rainstorms[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(2): 30-37. [张金萍, 张朝阳, 左其亭. 极端暴雨下城市内涝模拟与应急响应能力评估[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(2): 30-37.]

[3] Powers J G, Klemp J B, Skamarock W C, et al. The weather research and forecasting model: overview, system efforts, and future directions[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(8): 1717-1737.

[4] Maussion F, Scherer D, Finkelnburg R, et al. WRF simulation of a precipitation event over the Tibetan Plateau, China-an assessment using remote sensing and ground observations[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(6): 1795-1817.

[5] Yu Wei, Peng Yang, Yao Lishuang, et al. Effects of different parameterization schemes of WRF model on rainfall simulation in the Upper Yangtze River Basin[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(5): 98-105. [于伟, 彭杨, 姚礼双, 等. WRF 模式不同参数化方案对长江上游降雨模拟的影响[J]. 中国农村水利水电, 2023(5): 98-105.]

[6] Zhang Jinping, Zeng Muxiang, Guo Yuan. Simulation analysis of maximum hourly rainfall process in Zhengzhou rainstorm center based on WRF[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(3): 1-11. [张金萍, 曾苜翔, 郭元. 基于 WRF 的郑州市暴雨中心最大时降雨过程模拟分析[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(3): 1-11.]

[7] Zhong Zewen, Yi Shanzhen, Xie Wenhao. Influence on precipitation simulation by using different of parameterization schemes in WRF model in Shiyang River Basin[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(8): 6-9. [钟泽文, 易善桢, 谢文豪. WRF 模式不同参数化方案对石羊河流域降水模拟的影响[J]. 水电能源科学, 2021, 39(8): 6-9.]

[8] Tao Jie, Zhao Qijia, Zhao Yang, et al. Numerical simulation of precipitation in the upper Minjiang river basin [J]. Journal of China Hydrology, 2025, 45(4): 37-45. [陶洁, 赵启家, 赵阳, 等. 岷江上游降水数值模

拟研究[J]. 水文, 2025, 45(4): 37-45.]

[9] Xu Hongxiong, Zhao Dajun, Yin Jinfang, et al. Indirect effects of binary typhoons on an extreme rainfall event in Henan Province, China from 19 to 21 July 2021. 3. Sensitivities to microphysics schemes[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2023, 128(7): e2022JD037936.

[10] Nuo Chen, Rui Wang. Spatial differences in the response of runoff to climate and land use changes in the Yiluo River basin[J]. Journal of Resources and Ecology, 2024, 15(5): 1-13.

[11] Liang Guofu, Ding Shengyan. The impacts of climate and landuse changes on the runoff effects: case in the upper reaches of the Yihe River, the Yiluo River basin[J]. Geographical Science, 2012, 32(5): 635-640. [梁国付, 丁圣彦. 气候和土地利用变化对径流变化影响研究——以伊洛河流域伊河上游地区为例[J]. 地理科学, 2012, 32(5): 635-640.]

[12] Liu Kan, Chen Chaohui, He Hongrang, et al. Assessment of the convection-allowing scale WRF model using LBGM theory: a case study of severe torrential rain in Henan Province, July 2021[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2023, 46(5): 725-737. [刘侃, 陈超辉, 何宏让, 等. 基于局地增长模培育法的对流可分辨尺度 WRF 模式对河南"21·7"特大暴雨的预报评估[J]. 大气科学学报, 2023, 46(5): 725-737.]

[13] Gan Rong, Xu Mengsha, Zuo Qiting. Baseflow separation and spatiotemporal variation characteristics in the Yiluo River basin[J]. Resources Science, 2022, 44(9): 1824-1834. [甘容, 徐孟莎, 左其亭. 伊洛河流域基流分割及其时空变化特征[J]. 资源科学, 2022, 44(9): 1824-1834.]

[14] Liu Songtao, Zhang Dong, Li Yuhong, et al. Water sources and factors controlling hydro-chemical compositions in the yiluo river basin[J]. Environmental Science, 2020, 41(3): 1184-1196. [刘松韬, 张东, 李玉红, 等. 伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素[J]. 环境科学, 2020, 41(3): 1184-1196.]

[15] Monin A S, Obukhov A M. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere[J]. Contributions of the Geophysical Institute of the Academy of Sciences of the USSR, 1954, 24(151): 163-187.

[16] Tewari M, Chen Fei, Wang Wei, et al. Implementation and verification of the unified Noah land surface model in the WRF model[C]// 16th Conference on Numerical Weather Prediction. Seattle: American Meteor Society, 2004: 2165-2170.

[17] Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113: D13103.

[18] Janjić Z I. The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes[J]. Monthly Weather Review, 1994, 122(5): 927-945.

[19] Kain J S. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update[J]. Journal of Applied Meteorology, 2004, 43(1): 170-181.

[20] Kessler E. On the continuity and distribution of water substance in atmospheric circulations[J]. Atmospheric Research, 1995, 38: 109-145.

[21] Lin Y L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model[J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1983, 22(6): 1065-1092.

[22] Hong Songyou, Lim J J. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6)[J]. Journal of the Korean Meteorological Society, 2006, 42: 129-151.

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

[24] Ferrier B S, Jin Yi, Lin Ying, et al. Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta model[C]// 15th Conference on Numerical Weather Prediction. Seattle: American Meteor Society, 2002: 280-283.

[25] Tan Cancan, Zhang Runrun, Deng Zhimin, et al. Comparison of precipitation interpolation methods considering spatial autocorrelation of rainstorm precipitation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(6): 8-14. [谈灿灿, 张润润, 邓志民, 等. 基于暴雨空间自相关性的降水量插值方法比较[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 8-14.]

[26] Hou Chunhua, Li Fuping, He Baojie, et al. Influence of surface albedo and vegetation fractional coverage on thermal environment of mining area[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(12): 117-126. [侯春华, 李富平, 何宝杰, 等. 地表反照率和植被覆盖度对矿区热环境的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(12): 117-126.]

[27] Zhang Jie, Shi Peijun, Yang Jing, et al. The impact of the urbanization process on rainfall in Beijing: a case study of 7. 21 rainstorm[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(1): 113-125. [张杰, 史培军, 杨静, 等. 北京地区景观城市化进程对暴雨过程的影响——以"7·21"暴雨为例[J]. 地理学报, 2020, 75(1): 113-125.]

Simulation and Analysis of Event-based Rainfall in the Yiluo River Basin Based on the WRF Model

TAO Jie[1,2], ZHOU Xiangyu[1], LI Jinjing[3,4], ZHAO Qijia[1]

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan International Joint Laboratory of Water Cycle Simulation and Environmental Protect, Zhengzhou 450001, China; 3. Yellow River Water Resources Center, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou, 45003, China; 4. Yellow River Institute, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: To address the limited studies on event-based rainfall simulation, the applicability of microphysics schemes, and the hourly evolution of rainfall processes in the Yiluo River basin, where complex topography and pronounced spatial variability of rainfall pose challenges to rainfall simulation, five typical rainfall events during 2021-2024 were simulated using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. The FNL data from the Global Data Assimilation System (GDAS) were used as the initial boundary conditions to evaluate the effects of different microphysics schemes and land-surface conditions on typical rainfall processes. The results showed that the WRF model reasonably reproduced the spatiotemporal distribution characteristics of event-based rainfall in the Yiluo River basin. However, the five microphysics schemes, namely Kessler, Lin, WSM6, Thompson, and Eta, still exhibited certain deviations in simulating the locations and accumulated rainfall of rainfall centers, basin-mean rainfall, the spatial distribution of accumulated rainfall, and the hourly evolution of rainfall processes. The accumulated rainfall at rainfall centers and basin-mean rainfall were generally overestimated. Among the five schemes, the Eta scheme showed relatively stable overall performance. After the land-surface data were updated, the simulated accumulated rainfall at the rainfall centers decreased by approximately 6% overall, and the simulations of rainfall centers and the spatiotemporal evolution of rainfall processes were significantly improved.

Keywords: WRF model; rainfall simulation; microphysics scheme; land-surface update; Yiluo River basin