

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.024.

胡浩楠, 刘引鸽. 基于WRF模式的渭河上游夏季降水及气温模拟[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 256-264, 274.

HU Haonan, LIU Yingge. Simulation of Summer Precipitation and Temperature in the Upper Reaches of the Weihe River Based on the WRF Model [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 256-264, 274.

# 基于WRF模式的渭河上游夏季降水及气温模拟

胡浩楠<sup>1</sup>, 刘引鸽<sup>2</sup>

(1. 陕西师范大学 历史文化学院, 西安 710119;

2. 宝鸡文理学院 地理与环境学院/陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 陕西 宝鸡 721013)

**摘要:** [目的] 探索WRF模式不同方案在渭河上游的适用性, 探讨其降水格局形成的物理机制, 进而对该流域的水资源及环境管理预测提供依据。[方法] 采用最新的WRF V4.1.2模式, 选用Kain-Fritsch(K-F)和Grell-3两种积云对流参数化方案及其微物理过程, 进行了不同分辨率的渭河流域上游夏季降水及温度试验模拟及评估。[结果] 5 km分辨率下夏季6月、7月、8月两种方案模拟的气温略低于实际值, K-F方案和Grell-3方案误差分别为5.8%~10%及7%~12%。两种方案对降水模拟表现为偏高, 降水随海拔高度和纬度变化不规律, 误差分别为13%~39%和10%~25%。2 km分辨率下, K-F方案模拟的西南东南及西风气流较强, 表现出垂直速度波动变化大, 积云对流不稳定强烈, 对流性降水偏多。Grell-3方案模拟的偏南暖湿气流较强, 垂直速度较大, 随高度增加较快, 有利于大尺度强降水产生。5 km分辨率下夏季6月、7月、8月的气温及降水模拟对两种积云对流参数化方案具有较强的敏感性和适应性。K-F方案对气温模拟效果好于Grell-3方案, Grell-3方案对降水模拟效果优于K-F方案, 尤其是强降水区域模拟效果更好。分辨率提高到2 km时两种方案更能细致地模拟出降水及气温的空间分布格局, 高温及强降水区域更精细地展现出来。[结论] 两种方案对水汽输送及垂直速度的模拟均很敏感, 误差在可接受范围内。WRF模式中的K-F及Grell-3两种积云对流参数化方案适合于渭河上游的降水及气温模拟。

**关键词:** WRF模式; 降水和气温; 积云对流参数化; 渭河上游

中图分类号: P413

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0256-09

## Simulation of Summer Precipitation and Temperature in the Upper Reaches of the Weihe River Based on the WRF Model

HU Haonan<sup>1</sup>, LIU Yingge<sup>2</sup>

(1. School of History and Civilization, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;

2. College of Geography and Environment, Baoji University of Arts and Sciences/Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation of Shaanxi Province, Baoji, Shaanxi 721013, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study to explore the applicability of different schemes of the WRF model in the upper reaches of the Weihe River, discuss the physical mechanism of its precipitation pattern formation, and then provide a basis for the prediction of water resources and environmental management in the basin. [Methods] The latest WRF V4.1.2 model, Kain-Fritsch (K-F) and Grell-3 two cumulus convective parameterization schemes and microphysics schemes were used to conduct experiments with different resolutions on simulation and evaluation of the summer precipitation and temperature in the upper reaches of the Weihe River Basin. [Results] When the resolution is 5 km, the temperature simulated by the two schemes in June, July, and August in summer is slightly lower than the actual value, and the errors of the K-F scheme and the Grell-3 scheme are 5.8%~10% and 7%~12%, respectively. The simulation performance of the two schemes for precipitation is relatively high, and the precipitation varies irregularly with altitude and latitude, and the error tolerance rates are 13%~39% and 10%~25%. When the resolution is

收稿日期: 2022-06-07

修回日期: 2022-06-19

资助项目: 陕西省重点研发计划项目(2022SF-364); 国家自然科学基金(41771048)

第一作者: 胡浩楠(1993—), 男, 陕西商洛人, 博士研究生, 研究方向为气象模拟、历史灾害。E-mail: kuangbiao\_2009@163.com

通信作者: 刘引鸽(1965—), 女, 陕西兴平人, 博士, 教授, 主要从事气候变化与适应、资源环境管理及生态研究。E-mail: Yingeliu@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

2 km, the southwest, southeast and westerly winds simulated by the K-F scheme are strong, showing large fluctuations in vertical velocity, strong cumulus convective instability, and more convective precipitation. The southerly warm and humid airflow simulated by the Grell-3 scheme is stronger, the vertical velocity is larger, and it increases faster with height, which is conducive to the generation of large-scale heavy precipitation. The temperature and precipitation simulations in June, July, and August in summer at a resolution of 5 km have strong sensitivity and adaptability to the two cumulus convective parameterization schemes. The K-F scheme is better than the Grell-3 scheme in air temperature simulation, and the Grell-3 scheme is better in precipitation simulation than the K-F scheme, especially in heavy precipitation areas. When the resolution is increased to 2 km, the two schemes can simulate the spatial distribution pattern of precipitation and temperature in more detail, and the areas with high temperature and heavy precipitation can be displayed more precisely. [Conclusion] Both schemes are sensitive to the simulation of water vapor transport and vertical velocity, and the error is within an acceptable range. The K-F and Grell-3 cumulus convective parameterization schemes in the WRF model are suitable for the precipitation and temperature simulation in the upper reaches of the Weihe River.

**Keywords:** WRF model; precipitation and temperature; cumulus convection parameterization; upper reaches of the Weihe River

夏季气温及降水变化对区域农业生产及人民生活有极大影响。随着全球变暖,人类活动加剧,夏季强降水及高温引起的气象灾害增加,区域降水及气温变化成为学者们关注的热点<sup>[1-7]</sup>。随着中尺度数值模式的研发及应用,数值模式模拟成为研究天气气候系统变化的重要手段和方法。在区域气候模式中,WRF 模式具有完备的动力学框架和多源的参数化方案,包括了不同的积云对流和微物理过程,参数化方案的选择是降水及气温数值模拟的关键<sup>[8-9]</sup>,对于不同区域,不同参数方案模拟有较大差异<sup>[10-12]</sup>。因此,国内外许多学者一直在探讨不同区域条件下的 WRF 模式的模拟效果及适应性。如 Hamill<sup>[13]</sup>,Evans<sup>[14]</sup>,Kryza<sup>[15]</sup>等分别探讨了 WRF 模式模拟美国、澳大利亚东南部、波兰的区域降雨过程,对比探索不同方案下模拟降水过程的差异。Pour<sup>[16]</sup>与 Shih<sup>[17]</sup>等采用了 WRF 模式和河道汇流模型耦合,分析和探索模型模拟结果的误差来源。我国学者采用不同积云对流与微物理方案组合进行极端气候事件、台风路径及强度、东部季风区的降水等<sup>[18-21]</sup>模拟试验。吴海涛<sup>[22]</sup>、王佳<sup>[23]</sup>、梅钦<sup>[24]</sup>等探讨了不同积云参数方案的区域降水模拟精确度,认为模式中不同参数化方案组合对特定区域都有一定适应性及差异。

渭河是黄河最大的支流,渭河流域的气温及降水变化预测对黄河流域的环境管理建设有重要影响。渭河上游气温及降水对中下游有重大影响,降水及气温季节变化明显,降水空间分布不均。随着气候变暖及人类活动影响,该区域旱涝频发,水资源及生态环境安全受到威胁。因此,围绕渭河流域气候、水资源变化及人类活动的影响研究受到国内外众多学者的关注<sup>[25-30]</sup>,

并取得一定成果。但利用 WRF 模式,针对渭河流域上游的积云对流方案数值模拟研究较少。本文基于 5 km 及 2 km 分辨率,进行不同积云对流参数化方案过程组合,开展不同分辨率下的降水及气温试验比较分析,探讨不同方案组合对降水及气温模拟的空间特征及适应性。为探索渭河流域气温和降水的变化规律,以及流域水资源及生态环境管理提供依据。

## 1 模式、资料及试验设计

### 1.1 模式及方案介绍

WRF(Weather Research and Forecasting Model)模式是由美国国家大气研究中心(NCAR)、美国环境预测中心(NCEP)、FSL 及大学等机构联合研究开发出来的一种具有非静力平衡、高分辨率(1~10 km)的中小尺度完全可压非静力模式,可用于区域地学、空气质量及天气预报、气候模拟及预估等研究。经过不断的完善已经发展为最新的 WRF V4.1.2。WRF 模式的主要控制方程包括能量守恒方程、动量守恒及质量守恒方程、气体状态方程和水汽混合比守恒方程等大气物理动力学过程,模式参数化方案包含了辐射(短波/长波)传输过程、陆面过程(陆地/水面表层)、边界层、湍流/扩散过程等微物理过程参数化以及积云对流参数化。积云对流参数化方案对云物理过程、水循环动力过程、边界层过程以及辐射过程具有重要影响,对大气含水量和降水分布影响较大。其中 K-F 方案采用拉格朗日气块相关方法来判断是否有对流不稳定发生以及是否会导致云的增长。其利用一个伴有水汽上升下沉的简单云模式,并考虑了云中上升气流卷入和下曳气流卷出及相对粗糙的微物理过程

的影响<sup>[31-32]</sup>,因此对内陆站点的预报及降水的时空分布模拟上具有良好的效果<sup>[33]</sup>。而 Grell-3 方案是一个新的积云对流参数化框架,能够使用大量的假设集合,用降水量数据来训练参数化,并且可以利用集合以及数据同化技术来确定对三维模型反馈的最佳值,具有更高分辨率,下沉的效应能影响到周围其他网格,对分辨率小于 10 km 的区域模拟更有优势。

本研究采用 Kain-Fritsch (K-F) 和 Grell-3 积云对流参数化方案,及其他参数化方案,包括 RRTM 长波辐射方案, Dudhia 短波辐射方案, Noah 陆面过程方案, Yonsei University (YSU) 边界层方案和 Lin 微物理过程方案,对渭河上游降水及气温进行模拟评估。

## 1.2 数据及试验设计

模式初始数据为渭河上游及相邻区域 22 个气象站数据(<http://data.cma.cn>),利用美国国家环境预报中心提供的 FNL 再分析资料作为模型输入数据驱动模型(时间间隔为 6 h,水平分辨率为  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ ),选用中国国家气象信息中心提供的中国自动站与 CMORPH 降水产品融合的逐时降水量网格数据集(1.0 版)作为验证数据。选用国家气象中心国家级地面气象站基本气象要素资料空间插值建立的中国地面水平分辨率  $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$  的日值气温格点数据集(V2.0)作为验证数据对比模拟的气温空间分布结果(<http://data.cma.cn>)。

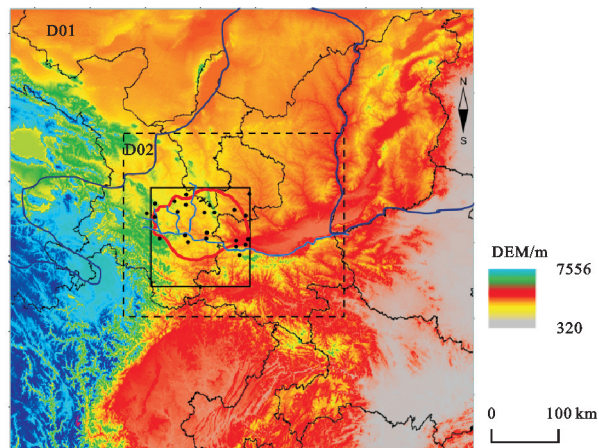
选用 WRF 模式的最新版本(V4.1.2),模拟区域采用双层嵌套,3 阶精度的 Rung-kutta 时间积分。区域中心经纬度为  $107.5^{\circ}\text{E}, 35.5^{\circ}\text{N}$ , 第一层(d01)和第二层(d02)网格区域格点数分别为  $80\times 60, 161\times 101$ 。水平网格距为 25 km 和 5 km,垂直方向分 45 层,层顶气压为 50 hPa。下垫面采用 MODIS 数据。选用 NCEP 再分析资料作为模型启动初始场和边界场,对 2018 年 5 月 1 日 0 时—9 月 1 日 0 时渭河流域及周边地区( $107^{\circ}\text{—}118^{\circ}\text{E}, 26.5^{\circ}\text{—}34.5^{\circ}\text{N}$ )夏季气温与降水进行模拟,前 30 d(5 月)为模型的起跑期,步长为 60 s,连续积分降水 24 h,3 h 输出一组数据。采用 5 km 和 2 km 水平分辨率检验 WRF 模式模拟的特征及适应性,模拟区域见(图 1)。使用模拟值与观测值的平均误差、均方根误差和相关系数对模拟结果进行检验,以评价模型在不同方案下对渭河上游地区的模拟效果。通过模拟水汽通量、大气垂直速度分析该流域降水的形成机制。

## 2 气温及降水模拟

### 2.1 不同积云对流参数化方案气温模拟

采用 5 km 分辨率,分别应用 K-F 和 Grell-3 积云对流参数化方案对 2018 年夏季每月的日均温进行模拟(图 2)。可以看出两种积云对流参数化方案均

能模拟出气温的高值区和低值区,受地形、海拔、纬度影响,气温表现出区域变化分布,低值区位于纬度较低海拔较高的西部山地,高值区位于海拔低的东南河谷。由于地形崎岖,气温分布也呈现明显的高低值区交叉分布。6 月、7 月、8 月的温度空间分布格局基本一致,7 月气温比 6 月高  $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ ,8 月气温比 7 月偏低。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2020)4619 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 模拟试验区域及地形分布

在 K-F 和 Grell-3 积云对流参数化方案下,提高水平分辨率到 2 km,模拟结果见图 3,可以看出模拟的精确度大幅提高,更小区域的温度分布被清晰地表现出来。在  $35^{\circ}\text{N}$  线附近沿河谷或山谷分布的  $20\sim 22^{\circ}\text{C}$  温度带,以及沿  $34^{\circ}\text{N}$  线组成的  $16\sim 18^{\circ}\text{C}$  散点温度带,都能在高分辨率的模拟结果中被体现,气温带的形态、分布、范围的模拟均比 5 km 分辨率要清楚。高于  $28^{\circ}\text{C}$  的温度带在南部也有分布,东部出现了气温高于  $30^{\circ}\text{C}$  的高温中心,西南部气温大多以  $6\sim 20^{\circ}\text{C}$  为主。

从各月的逐日模拟值与实际温度对比(图 4),可以看出,两种方案的模拟结果与实际温度日变化趋势一致,日温度的最高值及低值均能被模拟出来,对比分析了逐 3 h 的最高值模拟结果,表明高温峰值的模拟比实际有提前或滞后,但时间差较小。K-F 方案模拟略高于 Grell-3 模拟结果,而且在高海拔地区气温模拟偏高,低海拔地区气温模拟偏低。K-F 与 Grell-3 方案模拟误差分别为  $5.8\%\sim 10\%$  和  $7\%\sim 12\%$ ,皆表现出 6 月误差大,7 月误差最小。K-F 整体模拟效果较好,Grell-3 对于高温模拟较好。但需要注意的是,两种方案的模拟值均比实际气温偏低  $1\sim 2.5^{\circ}\text{C}$ ,可能与模型其他参数影响有关,因此在对渭河流域进行气温模拟时,需注意模拟结果偏低的情况,这部分有待进一步展开探究。



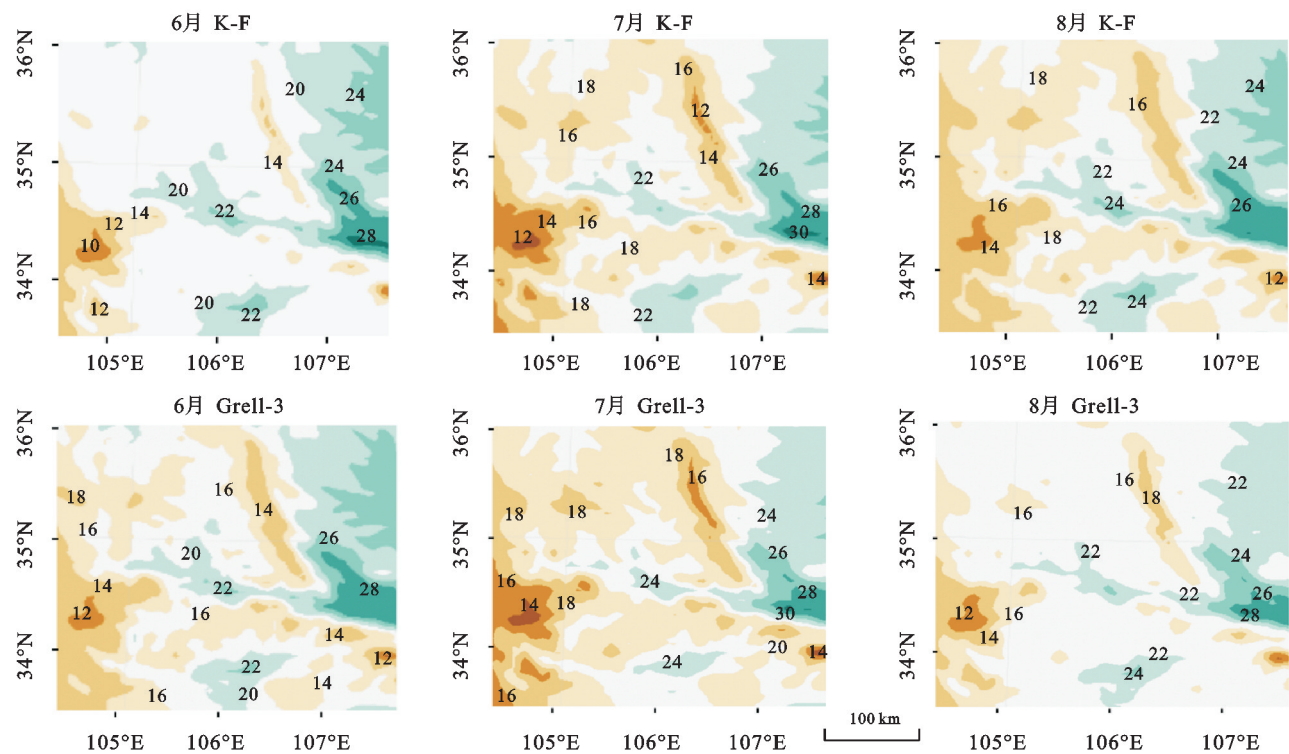


图 2 5 km 分辨率下夏季 K-F 及 Grell-3 积云对流参数化方案气温(℃)模拟

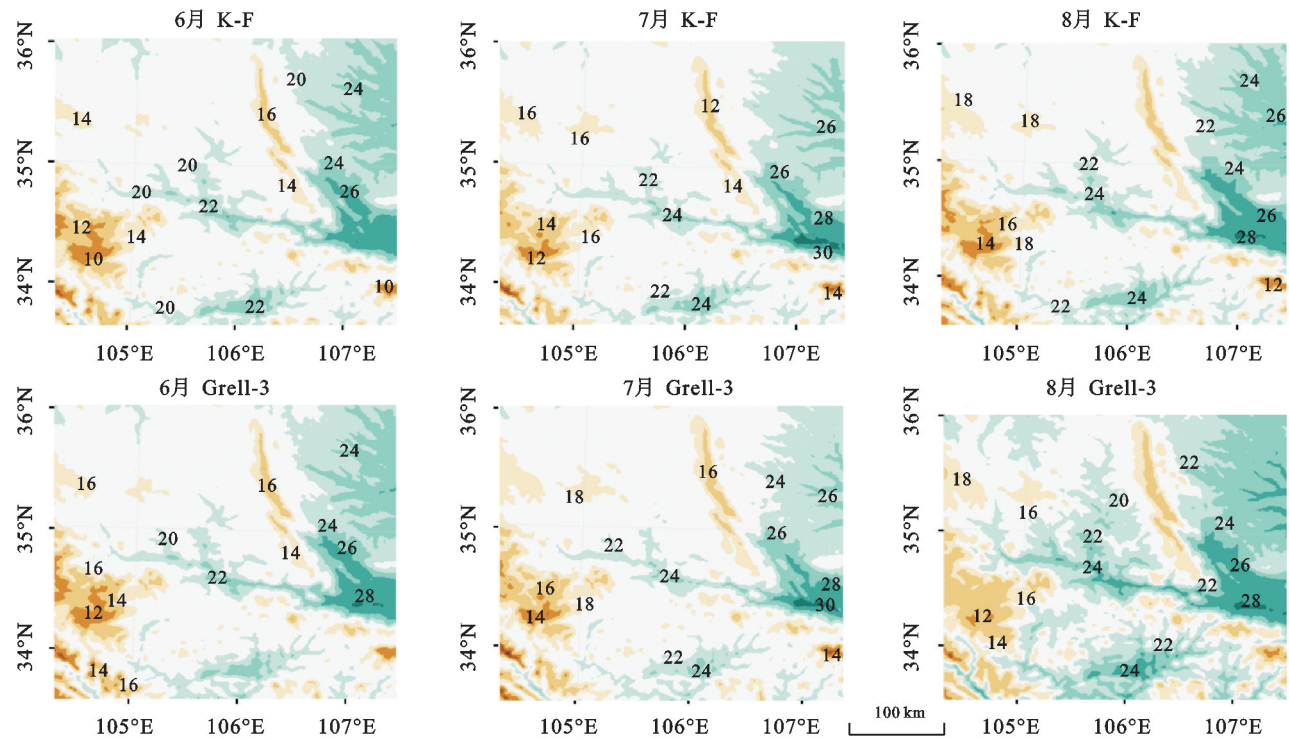


图 3 2 km 分辨率下夏季 K-F 及 Grell-3 积云对流参数化方案气温(℃)模拟

由图 5 可以看出,气温的空间差异主要受纬度和地形的影响,西部山区海拔高,温度低,东部以及河谷地区温度较高,高海拔地区气温低于低海拔的平原地区,因此高海拔区域模拟值略微高于实际值,其他区域模拟值小于实际值。

2.2 不同积云对流参数化方案降水模拟

由两种积云对流参数化方案降水模拟(图 6),可以

看出,夏季降水沿秦岭及渭河呈条带状分布的特征,南部降水多于北部,高值区域位于渭河源头乌鼠山脉、秦岭山区,河谷区域降水较少,模拟降水的空间分布与实际空间分布大体一致。6 月模拟的主要降水雨带大致沿河流及秦岭分布,呈东西走向,7 月模拟的主要降水雨带呈片状分布,模拟区南部呈现大范围雨带,在模拟区北部出现西北—东南走向狭长雨带,以及在西部出现小范

围东北—西南走向雨带,降水量大。8月模拟的主要降水带比较分散,降水减少。夏季的大多地区平均日降水量在 10 mm 以下,高于 10 mm 的降水区域较少,且主要位于研究区东南部。在 K-F 方案模拟中,6 月和 7 月

的降水量总体偏多,8 月模拟结果与实际大致接近。在 Grell-3 方案模拟中,受地形影响的降水分布格局被精细地展现出来,强降水的区域扩大,秦岭北部和南部一带的降水高值区也被清晰地描绘出来。

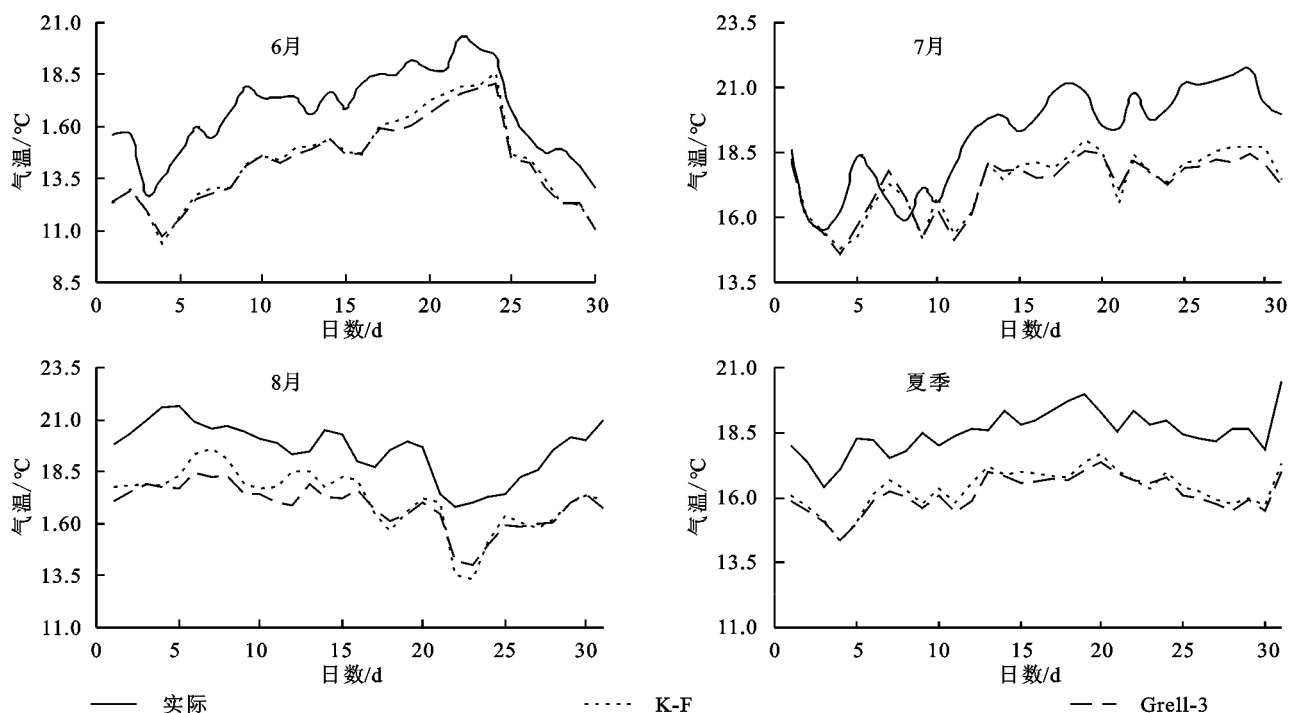


图4 各月逐日气温模拟与实际温度对比

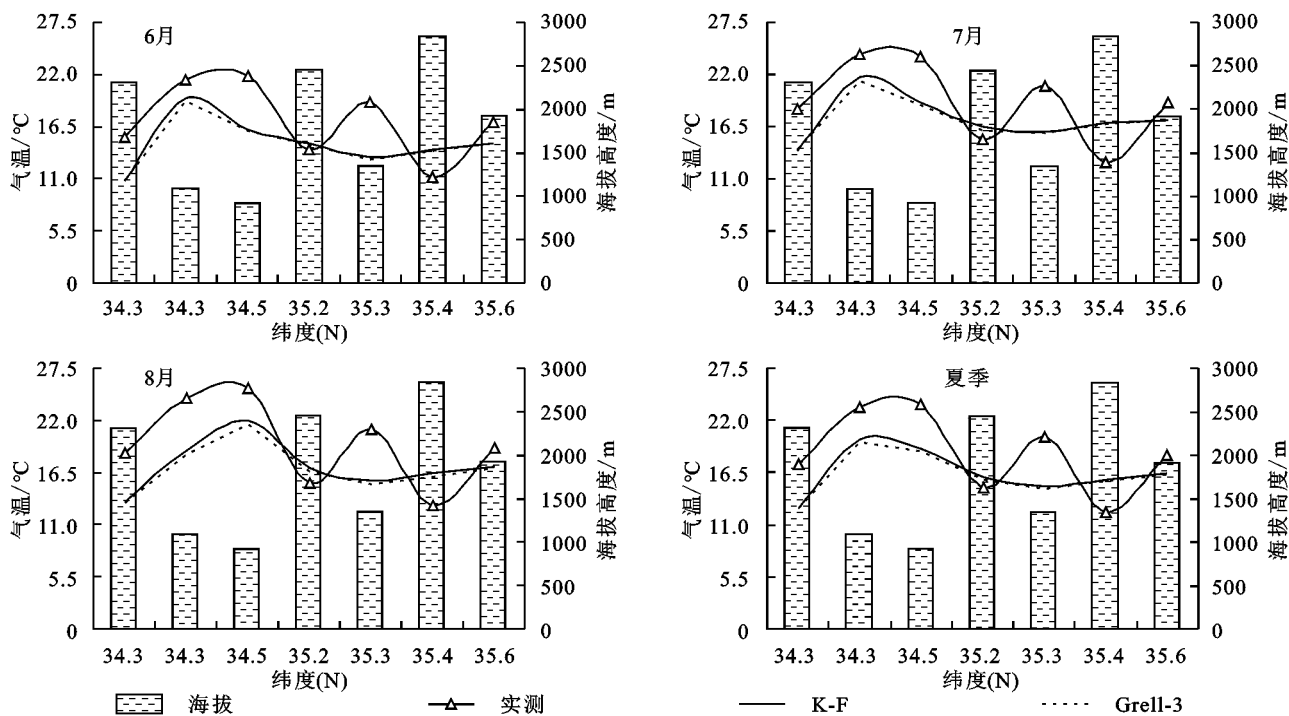


图5 不同纬度模拟结果剖面

为了检验不同分辨率对 WRF 模式积云对流参数化方案模拟效果,将两种方案的分辨率提高到 2 km,降水模拟结果见图 7,可以看出,强降水区域在南部,降水区域扩大,6 月、7 月、8 月降水模拟空间分布更精细,5 mm 及 10 mm 以上的降水清晰展现,而

且降水量高于 20 mm 的部分地区也被显现出来,呈点状分散于东南部地区。相比 K-F 方案,Grell-3 方案能够模拟出降水量达 50 mm 以上的高值中心。由于分辨率的提高,一些在低分辨率下未能模拟出的降水中心及降水带被显示出来,尤其是降水的区域格局



被清楚展现。由 6 月、7 月、8 月逐日降水变化(图 8)可以看出,两种积云对流参数化方案中,日降水的最大值均能被模拟出来,与实际降水趋势一致。但 6 月降水的模拟值较实际值轻微偏少,7 月、8 月模拟值总体高于实际值。依据逐 3 h 模拟结果,Grell-3 方案能够

较好模拟出强降水的高发时段及区域。由不同纬度模拟降水剖面(图 9)可以看出,降水随海拔高度变化规律不明,6 月、7 月在纬度 35.5°—35.6°N 强降水的区域基本一致,8 月强降水区域有些变化。这种降水的空间分布与区域的水汽来源及环境有一定关系。

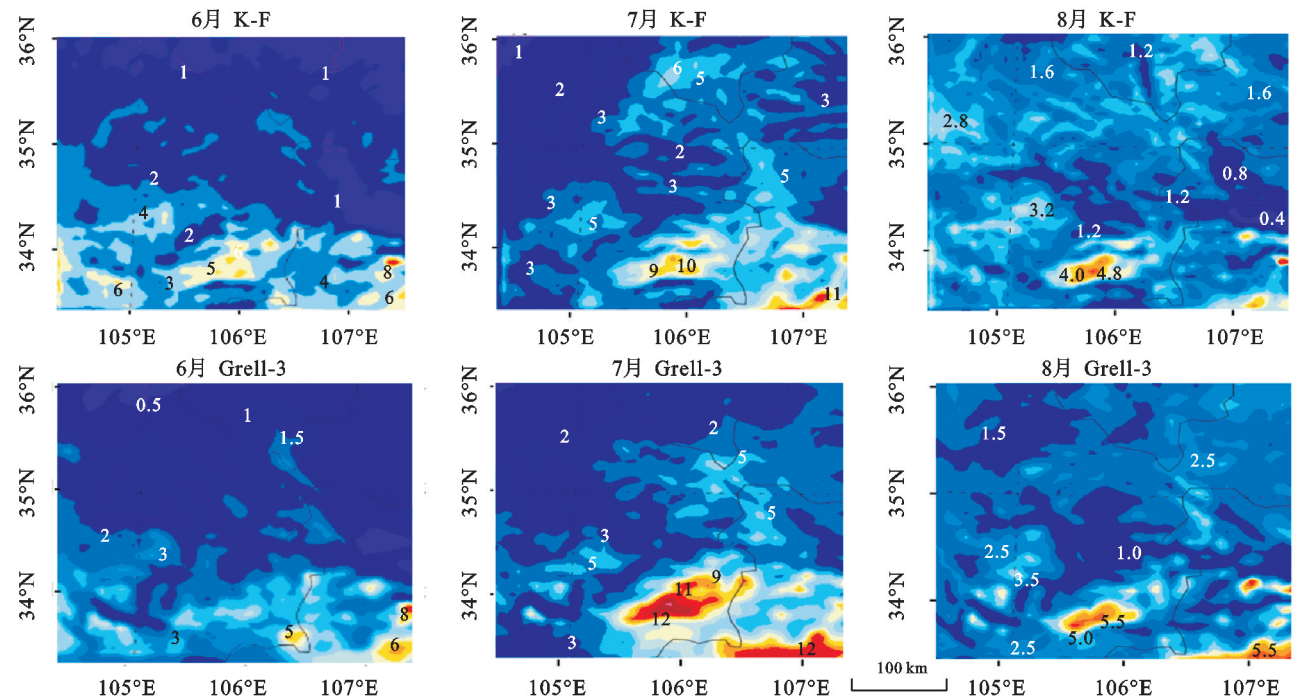


图 6 K-F 及 Grell-3 积云参数化方案 5 km 分辨率降水(mm)模拟

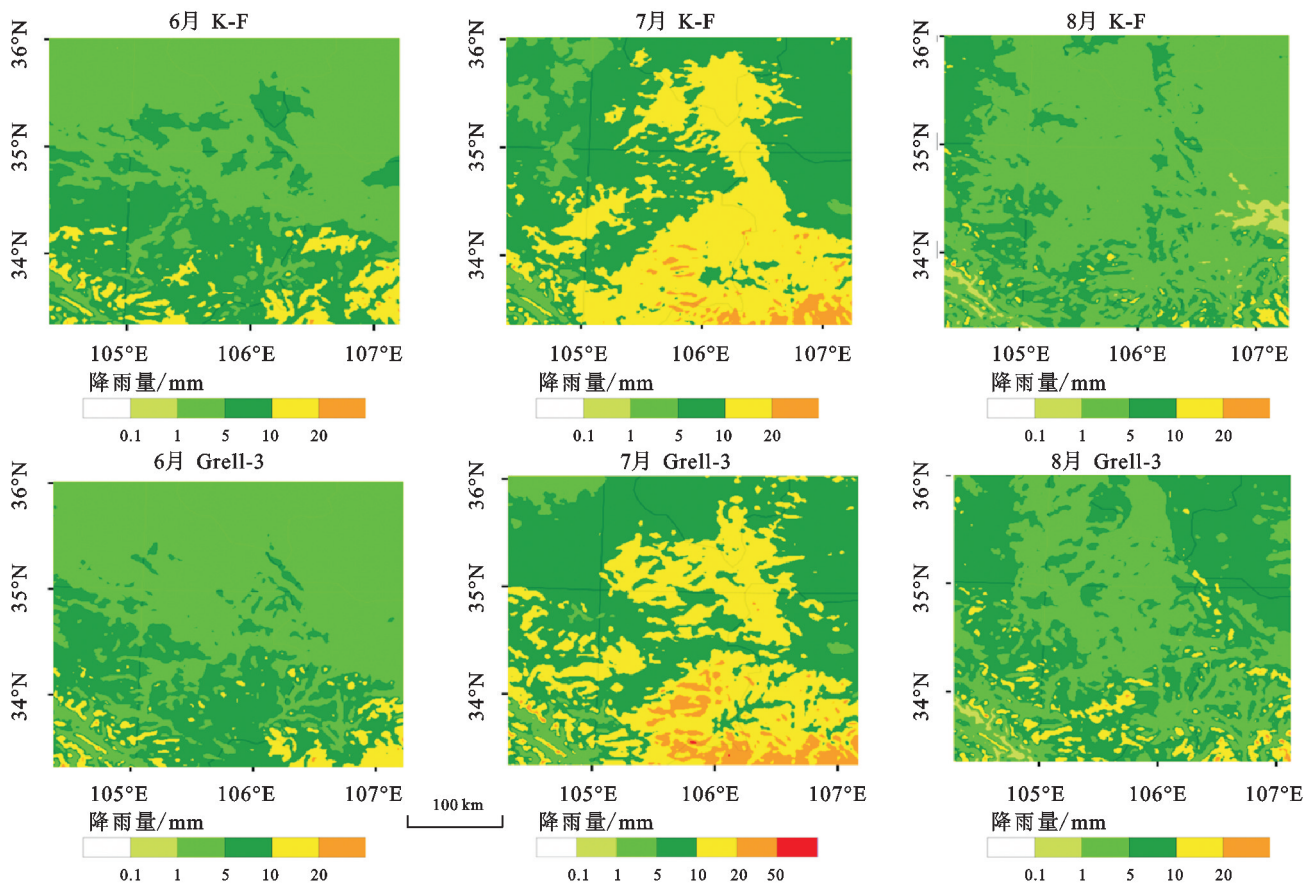


图 7 K-F 及 Grell-3 积云参数化方案 2 km 分辨率降水模拟

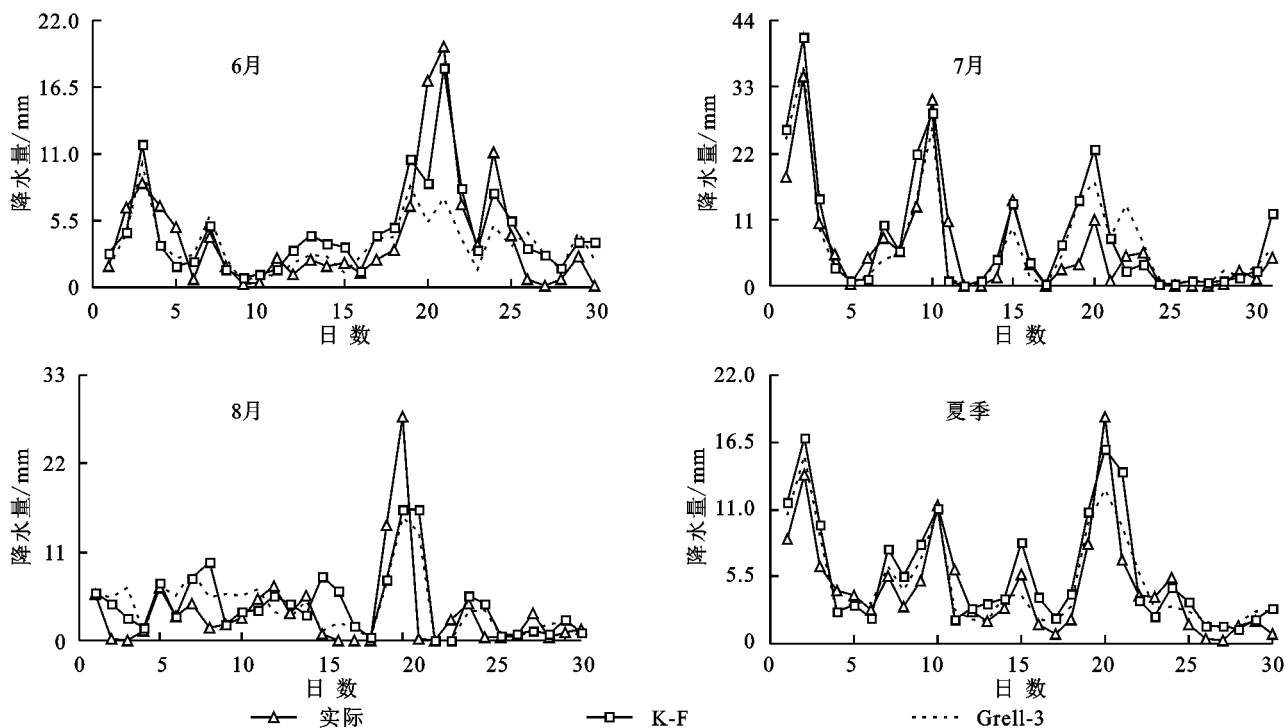


图8 各月逐日降水观测值与模拟值对比

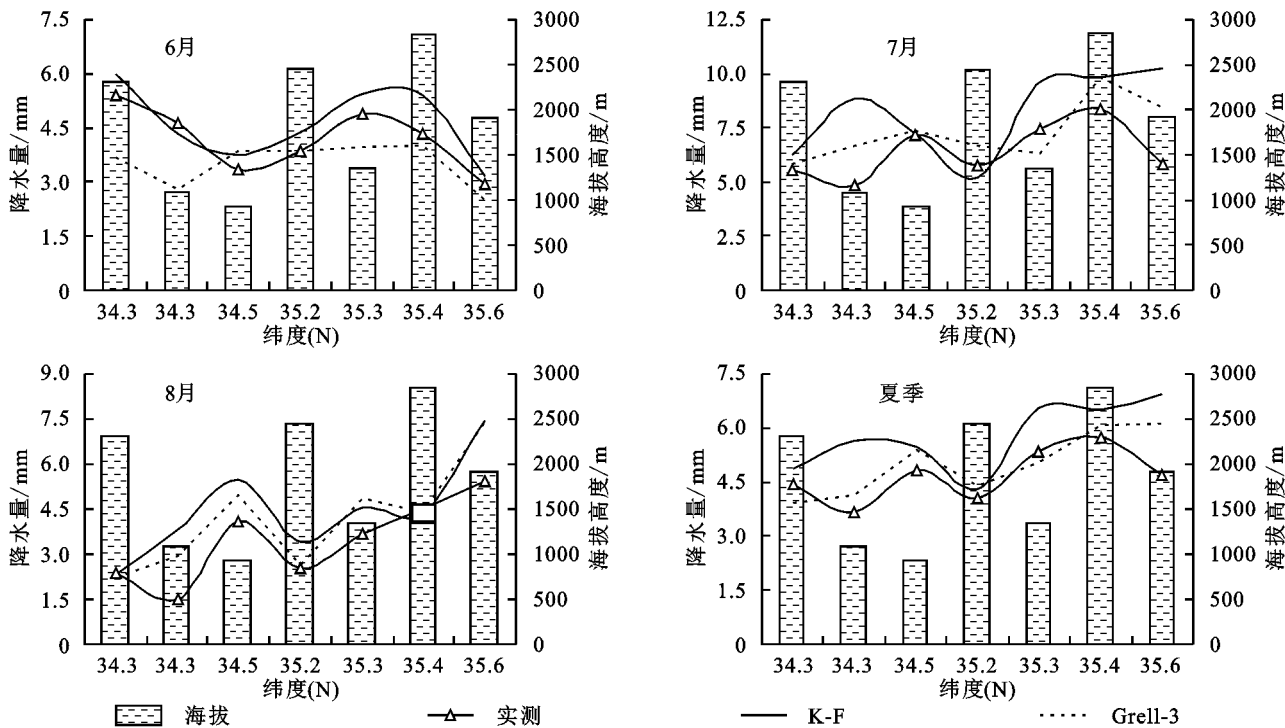


图9 不同纬度降水模拟结果剖面

### 2.3 模拟结果评估

选取典型站,利用 SPSS 进行均方根误差检验和相关系数检验,计算气温和降水模拟值与实测值之间的相关性,平均相关系数( $R$ )及均方根误差(RMSE)见表1。可能受模型其他参数影响,结果显示两种方案均存在一定误差,但就气温来说,K-F方案的均方根误差比Grell-3小,相对来说K-F方案气温模拟与实际观测更为接近。对于降水,Grell-3方案的均方根误差比K-F方案小,相

对来说Grell-3方案降水模拟与实际观测更为接近,且经过计算,K-F和Grell-3方案模拟的降水误差分别为13%~39%和10%~25%,模拟误差8月较大,6月小,Grell-3的模拟效果高于K-F方案。就相关系数来看,Grell-3方案的模拟结果与观测站点的相关性相对较高,能够较好模拟出强降水的高发时段及区域。总体来说,夏季气温模拟K-F方案优于Grell-3方案,夏季降水模拟Grell-3方案优于K-F方案。

表 1 不同方案各月平均气温及降水模拟值与实测值相关系数及均方根

月份	气温				降水			
	K-F		Grell-3		K-F		Grell-3	
	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE
6	0.714	4.12	0.721	5.18	0.748	7.15	0.712	7.09
7	0.616	3.66	0.599	4.86	0.783	9.49	0.894	6.61
8	0.651	3.96	0.693	4.98	0.341	8.25	0.425	7.36

2.4 降水影响因素分析

2.4.1 水分条件 我国夏季降水的水汽来源有 2 个通道,一是东风、南风将西太平洋副高南部水汽输送到我国内陆,二是西南风将水汽输送到我国华南对我国降水产生影响。图 10 为在 K-F 和 Grell-3 两种方案下模拟的夏季渭河上游地区整层的平均水汽通量分布。可以看出 K-F 方案模拟主要为来自西太平洋及孟加拉湾暖湿水汽北输,与来自西北及西方的水汽

汇合,为降水形成提供了条件。水汽通量最大区域主要位于南部,北部相对较少。Grell-3 方案下偏南的水汽输送较强,偏北的水汽比较弱,未显示出来自南方水汽与来自西北方水汽汇合的现象,这可能是其模拟降水比 K-F 方案模拟降水偏少的原因之一。但 Grell-3 方案能将区域地形对气流的作用表现出来,体现出了水汽通量明显的差异性。水汽通量的较大区域与降水模拟的较大区域基本一致。

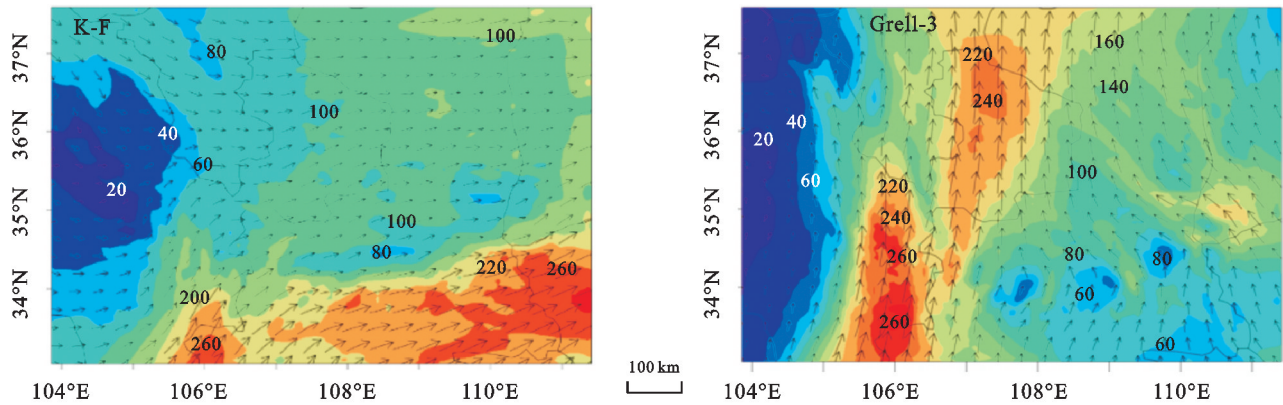


图 10 夏季平均整层水汽通量[ $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ]分布

2.4.2 大气不稳定 大气不稳定是夏季对流性降水形成的必要条件,垂直上升气流速度可以反映大气不稳定度。从图 11 可以看出,两种方案垂直速度的模拟均比较敏感。K-F 方案下低层 800 hPa 的速度为 0.003 m/s,高层最大垂直速度为 0.006 m/s,不同层次垂直速度出现波动变化,大气不稳定性强烈,模拟的对流性降水偏多。Grell-3 的方案模拟中,暖湿气流比较强,大气的不稳定性会激发网格尺度降水,

Grell-3 方案的垂直上升速度从低层 800 hPa 的 0.001 m/s 直线增加到 200 hPa 的 0.015 m/s,垂直速度显然大于 K-F 垂直对流速度,所以在 Grell-3 方案模拟中,多表现为大尺度的降水。这与之前的降水模拟结果相吻合。通过分析表明,更精细的网格分辨率对积云对流参数化模拟结果的精度有很好改善,对夏季对流性降水有很好的模拟效果,但其对大尺度降水的模拟不及低垂直分辨率。

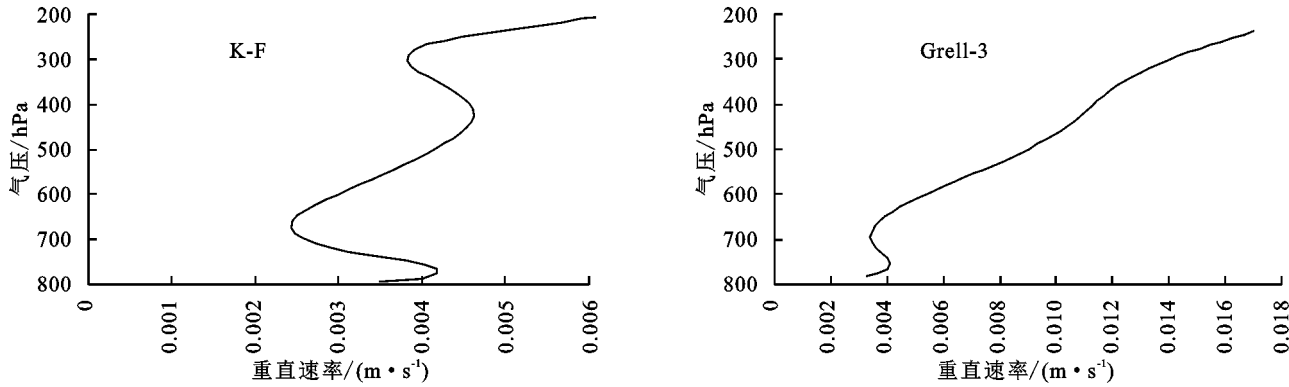


图 11 夏季平均垂直速度剖面



### 3 结论

渭河上游流域夏季6月、7月、8月的气温及降水模拟对K-F及Grell-3两种积云对流参数化方案具有较强的敏感性和适应性,各月逐日气温和降水模拟值与实际值变化趋势一致,尤其是高温和强降水被较好地模拟出来。对于气温模拟,6月误差大,7月误差最小,误差为5.8%~10%和7%~12%,K-F方案对气温模拟效果好于Grell-3方案,但两种方案模拟气温比实际值偏低1~2.5℃,因此在对渭河流域进行气温模拟时需注意这种情况,原因有待进一步探究。对于降水模拟,两种方案模拟值略高于实际值,模拟误差为13%~39%和10%~25%,Grell-3方案对降水模拟效果较好,尤其对于强降水分布模拟效果更好。模拟表明降水随海拔高度变化不明显,主要受水汽输送影响。

从大气不稳定性、水分条件模拟的水汽通量及垂直速度变化表明,两种方案模拟的积云对流过程的降水发生不同,K-F方案模拟的西南、东南及西风气流较强,垂直速度波动变化大,对流不稳定强烈,模拟的对流性降水偏多。Grell-3模拟偏南的暖湿气流较强,垂直速度较大,随高度增加较快,有利于大尺度强降水产生,更适合于大尺度降水模拟预测。综上,对于渭河上游地区,夏季气温模拟K-F方案更优,降水模拟Grell-3方案更优。

#### 参考文献:

- [1] 翟颖佳,李耀辉,徐影.RCPs情景下中国北方地区干旱气候变化特征[J].高原气象,2016,35(1):94-106.
- [2] 张冬峰,韩振宇,石英.CSIRO-Mk3.6.0模式及其驱动下Reg CM4.4模式对中国气候变化的预估[J].气候变化研究进展,2017,13(6):557-568.
- [3] 王晓君,马浩.新一代中尺度预报模式(WRF)国内应用进展[J].地球科学进展,2011,26(11):1191-1199.
- [4] 张磊,王春燕,潘小多.基于区域气候模式未来气候变化研究综述[J].高原气象,2018,37(5):1440-1448.
- [5] 刘引鸽,周欢欢,胡浩楠,等.西安地区土壤浅层温度变化特征[J].干旱区资源与环境,2019,33(8):153-159.
- [6] Liu Y, Wang N, Wang L, et al. Variation of cloud amount over China and the relationship with ENSO from 1951 to 2014[J]. International Journal of Climatology, 2016, 36(8):2931-2941.
- [7] Liu Y, Guo Z, Zhou Q, et al. The climate characteristics of the first date of  $\leq 0^{\circ}\text{C}$  temperature in East China [J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2015, 47 (2):243-253.
- [8] Efsthathiou G A, Zoumakis N M, Melas D, et al. Sensitivity of WRF to boundary layer parameterizations in simulating a heavy rainfall event using different microphysical schemes: Effect on large-scale processes [J]. Atmospheric Research, 2013, 132:125-143.
- [9] 屠妮妮,何光碧,张利红.WRF模式中不同积云对流参数化方案对比试验[J].高原山地气象研究,2011,31(2):18-25.
- [10] 廖镜彪,王雪梅,夏北成,等.WRF模式中微物理和积云参数化方案的对比试验[J].热带气象学报,2012,28(4):461-470.
- [11] Chen F, Dudhia J. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. Monthly Weather Review, 2001, 129 (4):569-585.
- [12] Lin Y L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1983, 22(6):1065-1092.
- [13] Hamill T M. Performance of operational model precipitation forecast guidance during the 2013 Colorado Front-Range floods [J]. Monthly Weather Review, 2014, 142(8):2609-2618.
- [14] Evans J P, Ekström M, Ji F. Evaluating the performance of a WRF physics ensemble over South-East Australia [J]. Climate Dynamics, 2012, 39:1241-1258.
- [15] Kryza M, Werner M, Wałszek K, et al. Application and evaluation of the WRF model for high-resolution forecasting of rainfall: a case study of SW Poland [J]. Meteorologische Zeitschrift, 2013, 22(5):595-601.
- [16] Pour M K, Irannejad P, Hajjam S. The evaluation of simulated discharge of coupled surface scheme and river routing in numerical weather prediction WRF: Case study Karoon river [J]. Journal of Earth Space Physics, 2010, 37(1):199-214.
- [17] Shih D S, Chen C H, Yeh G T. Improving our understanding of flood forecasting using earlier hydro-meteorological intelligence [J]. Journal of Hydrology, 2014, 512:470-481.
- [18] 刘伟光,陈海山,俞森.积云对流参数化方案对东亚夏季环流和降水模拟的影响[J].大气科学,2019,43(1):64-74.
- [19] 陈茂钦,徐海明,刘蕾,等.WRF3.1微物理参数化方案对两例暴雨的集合预报试验及可预报性分析[J].气象科学,2012,32(3):237-245.

(下转第274页)

- (5):317-323.
- [37] Dwyer J, Schmidt G. The MODIS Reprojection Tool. Earth Science Satellite Remote Sensing[M]. the United States:Springer, 2006:162-177.
- [38] Li Y P, Chen Y N, Sun F, et al. Recent vegetation browning and its drivers on Tianshan Mountain, Central Asia [J]. Ecological Indicators, 2021,129:107912.
- [39] Liu W, Mo X G, Liu S X, et al. Attributing the changes of grass growth, water consumed and water use efficiency over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2021,598:126464.
- [40] Huai B J, Wang J Y, Sun W J, et al. Evaluation of the near-surface climate of the recent global atmospheric reanalysis for Qilian Mountains, Qinghai-Tibet Plateau [J]. Atmospheric Research, 2021,250:105401.
- [41] Yadav S K, Lee E, He Y. Positive associations of vegetation with temperature over the alpine grasslands in the Western Tibetan Plateau during May[J]. Earth Interactions, 2022,26(1):94-111.
- [42] Jönsson P, Eklundh L. TIMESAT: A program for analyzing time-series of satellite sensor data[J]. Computers & Geosciences, 2004,30(8):833-845.
- [43] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968,63(324):1379-1389.
- [44] Hirsch R M, Slack J R, Smith R A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data [J]. Water Resources Research, 1982,18(1):107-121.
- [45] Hamed K H. Trend detection in hydrologic data; the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis [J]. Journal of Hydrology, 2008,349(3/4):350-363.
- [46] 宋春桥,游松财,柯灵红,等.藏北高原植被物候时空动态变化的遥感监测研究[J].植物生态学报,2011,35(8):853-863.
- [47] 袁巧丽,杨建.青藏高原草地植被物候变化及其对气候变化的响应[J].中国草地学报,2021,43(9):32-43.
- [48] Li L H, Zhang Y L, Liu L S, et al. Spatiotemporal patterns of vegetation greenness change and associated climatic and anthropogenic drivers on the Tibetan Plateau during 2000—2015[J]. Remote Sensing, 2018,10(10):1525.
- [49] Liu L L, Zhang X Y, Donnelly A, et al. Interannual variations in spring phenology and their response to climate change across the Tibetan Plateau from 1982 to 2013 [J]. International Journal of Biometeorology, 2016,60(10):1563-1575.

(上接第264页)

- [20] 智协飞,孙晶,周文友.2009年夏季西太平洋台风的集合预报和多模式集成预报试验[J].大气科学学报,2015,38(5):633-640.
- [21] 李响.WRF模式中积云对流参数化方案对西北太平洋台风路径与强度模拟的影响[J].中国科学:地球科学,2012,42(12):1966-1978.
- [22] 吴海涛,解宏伟,赵运天.不同物理参数化方案对黄河源区降雨模拟的适用性研究[J].水电能源科学,2019,37(7):9-13.
- [23] 王佳,梅钦,陈钰文.WRF模式不同微物理方案水凝物的预报能力检验与集成试验[J].气象,2017,43(5):552-559.
- [24] 梅钦,智协飞,王佳.WRF模式不同云参数化方案的暴雨预报能力检验及集成试验[J].大气科学学报,2018,41(6):731-742.
- [25] 胡浩楠,刘引鸽,马凯.渭河流域百年尺度水旱特征及其影响因素[J].水土保持通报,2020,40(2):255-262.
- [26] 雷江群,刘登峰,黄强.渭河流域气候变化及干湿状况时空分布分析[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2015,43(3):175-181.
- [27] 郭爱军,畅建霞,黄强,等.渭河流域气候变化与人类活动对径流影响的定量分析[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2014,42(8):212-220.
- [28] 任立良,沈鸿仁,袁飞,等.变化环境下渭河流域水文干旱演变特征剖析[J].水科学进展,2016,27(4):492-500.
- [29] 贾杰,姜丽红.气候变化与人类活动对渭河源区近30年径流量影响研究[J].地下水,2017,39(4):130-133.
- [30] 王丽洁,李永明,陈瑾,等.1980—2012年渭河源区气候因子演变特征及趋势分析[J].中国水土保持,2017(7):46-48.
- [31] Kain J S. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update[J]. Journal of Applied Meteorology, 2004,43(1):170-181.
- [32] Kain J S, Fritsch J M. The role of the convective “trigger function” in numerical forecasts of mesoscale convective systems [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 1992,49(1):93-106.
- [33] Crétat J, Pohl B. How physical parameterizations can modulate internal variability in a regional climate model [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2012, 69(2):714-724.