

2017年夏季秦岭降水的数值模拟及其空间分布

辛蕊, 段克勤

(陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119)

摘要: 秦岭是中国气候的分界线, 其高海拔地区降水数据的缺乏, 限制了对秦岭高山气候及水资源变化的研究。为认知秦岭地区降水的空间分布, 利用WRF模式, 采用GF、KF和BMJ 3种对流参数化方案, 对秦岭及周边地区2017年夏季降水进行了模拟。结果显示, 模拟和卫星数据都揭示降水与地形呈剖面一致性, 从南到北呈条带状分布的空间格局, 在秦岭出现一条降水高值带, 秦岭对水汽向北输送有明显的阻滞作用, 造成南坡降水量显著大于北坡。模拟值要比卫星降水数据偏大, 其中KF方案模拟降水偏多的主要原因为强烈的对流不稳定性导致对流降水的过高估计, GF方案则由于大气偏湿激发网格尺度降水, 造成大尺度降水的模拟偏多, 而BMJ方案模拟值与观测值最为接近。把模式分辨率提高到2 km, 可显著改善模式对秦岭山区的模拟水平, 但2 km高分辨率仍不足以完全显式解析积云对流过程, 需要恰当的积云参数化的协同作用。

关键词: WRF模式; 秦岭; 降水; 积云参数化; 水平分辨率

DOI: 10.11821/dlxb201911010

1 引言

秦岭作为中国北亚热带和暖温带气候的分界线, 南北跨距约200 km, 东西跨距约1600 km, 横贯中国中部, 其高大地形对水汽输送有明显的阻滞作用^[1]。秦岭不仅是关中的主要水源地, 也是“南水北调中线”的主要产水区。秦岭水资源的核心就是大气降水, 当前对秦岭及其周边地区的气候暖干化^[2-3]、旱涝格局^[4-6]和降水变化成因^[7-8]等方面做了大量研究, 但基本都利用的是秦岭南北平原区海拔低于600 m的气象资料, 广大高山区往往被忽略掉, 原因是秦岭山区中的台站稀少, 且位于谷地。在海拔大于1500 m的秦岭核心区, 因海拔较高(图1), 几乎没有降水观测资料, 导致对秦岭高山地区的降水变化并不十分了解。比如利用秦岭及周边地区加密的气象站降水数据, 发现夏季降水的空间变化表现为从汉中盆地向陕北递减^[9], 没有体现出秦岭降水高值区, 而实际随海拔的升高, 降水在秦岭高山区有增大趋势。

综观对秦岭地区的降水研究, 直至目前还没有关于秦岭高海拔地区降水的研究。单靠地面观测数据不能得到降水空间分布特征, 对全面认识秦岭地区大气降水及其水资源十分不利。虽然也可利用再分析和卫星资料进行山区降水研究^[10-11], 但这些资料存在误差较大和分辨率较低的缺点。鉴于此, 需要对秦岭地区的降水进行模拟研究, 一方面弥补地面观测的不足, 另一方面可从机理上研究秦岭地区的降水变化。

收稿日期: 2018-12-11; 修订日期: 2019-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771030); 中央高校基本科研业务费专项资金(2018CSLZ002) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41771030; The Fundamental Research Funds For the Central Universities, No.2018CSLZ002]

作者简介: 辛蕊(1994-), 女, 河北保定人, 硕士生, 主要从事区域气候变化数值模拟研究。E-mail: syrus.xin@snnu.edu.cn

通讯作者: 段克勤(1970-), 男, 甘肃平凉人, 博士, 教授, 主要从事全球变化研究。E-mail: kqduan@snnu.edu.cn

WRF 模式 (Weather Research and Forecasting Model, WRF) 是新一代中尺度数值天气预报系统, 是研究天气和气候变化的重要工具^[12-14]。该模式能够克服再分析资料分辨率太粗, 难以捕捉复杂地形下降水模式的弊端, 为研究水资源提供强有力的降水模拟^[15]。积云参数化方案^[16-18]和水平分辨率^[19-20]的优选是影响降水模拟的关键参数。积云参数与大尺度环流通过网格尺度动力的相互作用, 直接影响降水的物理过程, 是数值模式中十分重要的非绝热加热物理过程^[16]。水平分辨率则通过改变地形拖曳及地表强迫导致水汽输送发生变化, 从而影响降水^[20]。

在秦岭地区开展了有关强降水事件过程的模拟工作^[21-23], 但缺少对季节尺度的模拟分析, 且未涉及对降水过程模拟中关键参数的优选, 也没有对秦岭及周边降水的空间变化分析。基于此, 本文主要目的是使用 WRF V3.9 对 2017 年秦岭地区夏季降水进行模拟, 探讨不同积云参数化方案及水平分辨率对降水模拟的影响, 以期提供较高可信度的秦岭地区夏季降水的空间分布。

2 方案介绍及试验设计

2.1 3 种积云参数化方案介绍

由于云微物理的复杂性和模式网格尺度的限制, 对积云需进行参数化, 依据对积云微物理过程的不同表达, 通常有如下 3 种积云参数化方案。

Kain-Fritsch (KF) 方案。KF 方案主要通过拉格朗日气块法来判定对流不稳定性, 根据对流有效位能是否为正及云厚度是否超过最小深对流触发云厚度来判断对流的发生状态, 通过调整云底、云内质量通量及云内与周围环境的卷入卷出质量交换来约束对流的垂直结构, 基于对流调整时间来控制对流的强度^[24-25]。该方案在捕捉主要雨带的时空分布^[26]、季节平均模式和年周期^[27]时与观测数据表现出了良好的空间相关性, 但也存在着严重高估降水的弊端^[26-29]。

Betts-Miller-Janjic (BMJ) 方案。BMJ 方案认为积云对流产生的净潜热释放和对流降水会使原条件不稳定的大气在一定时间内重新处于平衡状态或中性状态, 方案中分别考虑深对流和浅对流的作用, 浅对流通过影响垂直方向上热量和水汽的重新分配, 从而为深对流调整提供必要的环境场^[30-31]。该方案能够更加合理的模拟加热曲线、潮湿不稳定性以及蒸发和冷凝的季节性循环^[32], 但是由于其不能捕捉到对流有效位能与降水之间的关系, 导致低估夏季降水, 尤其是沿海地区^[33]。

Grell-Freitas (GF) 方案。GF 方案在每个计算格点运行多套积云方案, 把计算结果取平均值反馈到模式中, 改进了云分辨尺度的转化, 通过云凝结核的云水到雨水的自动转化, 对依赖于气溶胶的云滴蒸发实现了与气溶胶的相互作用^[34-35]。WRF V3.9 对 GF 方案进行更新后, 其在对流过程、表面温度以及降水强度的模拟得到了明显改善^[36]。对夏季降水模拟时发现, GF 方案比 KF 方案更易捕捉大平原和北美季风区域的夜间降水行为^[37], 但是该方案被证实存在高估液水路径以及低估冰水含量的现象^[38]。

2.2 试验设计

本文模拟区域为秦岭及其周边地区 (图 1)。模式验证数据为陕西省 22 个气象站降水资料 (<http://cdc.nmic.cn>)。采用中国国家气象中心基于台站观测的降水量插值得到的逐日网格降水量实时分析系统数据集 (简称 CGPA) (<http://cdc.nmic.cn>), 来对比分析模拟的降水空间分布。该数据集水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 能精确反映中国日降水量分布, 是近年来发布的与地面观测最接近的格点降水产品^[39]。

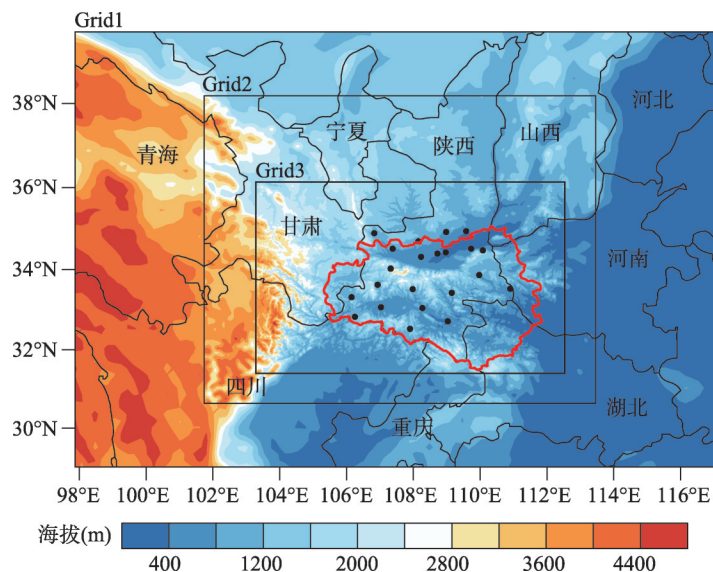


图1 模拟试验区域及地形分布(红线为秦岭南北研究范围, 黑点为气象站点)

Fig. 1 Simulation domain and topography distribution (the red contour is the study area of the Qinling Mountains, and the black dots represent meteorological stations)

本文使用WRF V 3.9进行2组模拟试验:

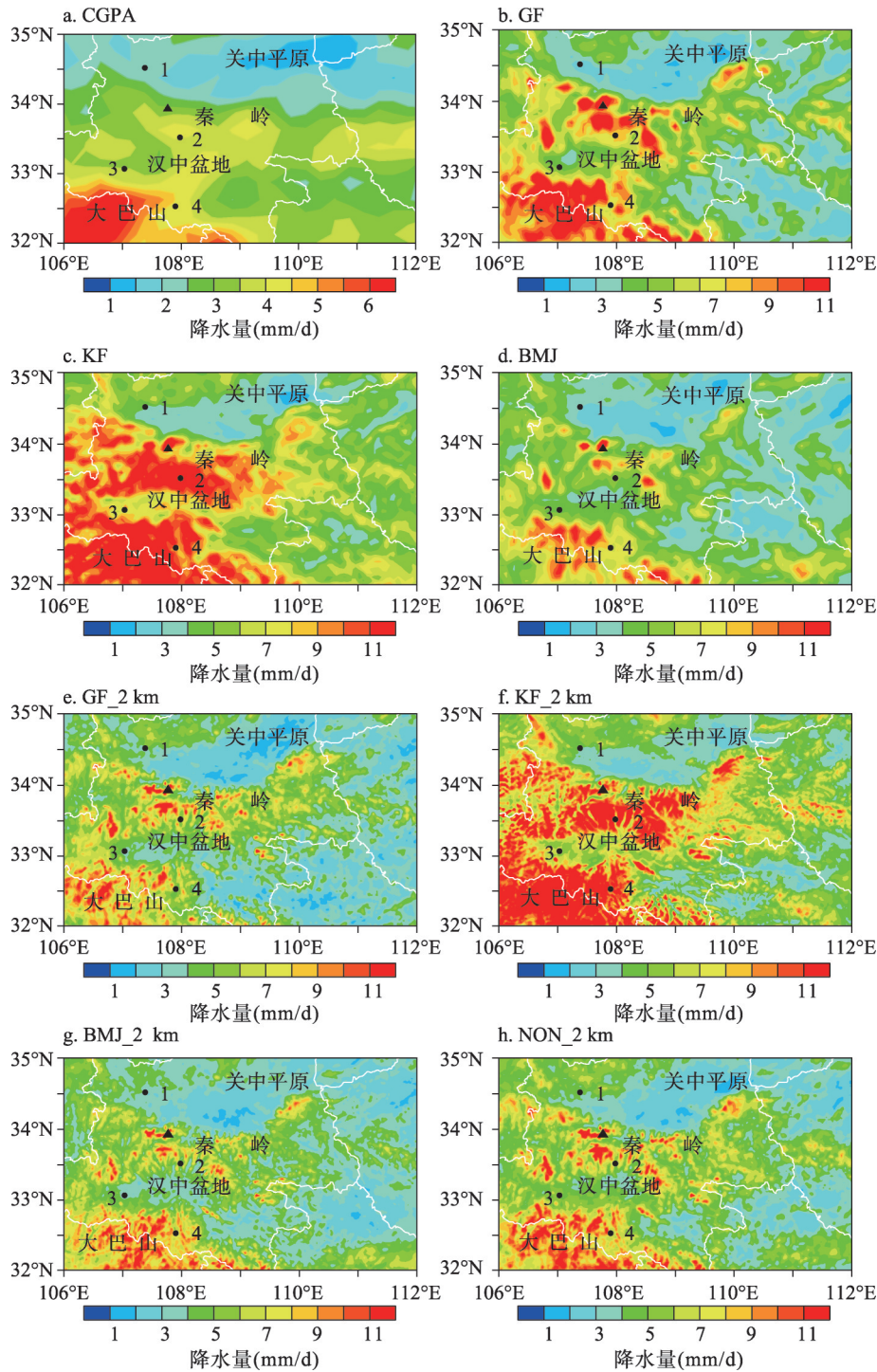
(1) 不同积云参数化试验方案。选取模拟试验的中心点为(34.5°N、107.5°E), 采用双重嵌套网格, 水平分辨率分别为18 km (Grid1) 和6 km (Grid2), 垂直方向分为35层, 模式层顶为50 hPa。驱动数据采用美国国家环境预报中心(NCEP)提供的再分析资料(FNL), 水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间间隔为6 h。选用KF、BMJ和GF 3种积云参数化分别对2017年5月1日00:00-9月1日00:00(世界时, 下同)进行模拟, 其中前31 d为模式起转时间, 不做分析。其他物理参数化方案包括: Lin微物理过程方案, YSU边界层方案, RRTM长波辐射方案, Dudhia短波辐射方案和Noah陆面过程方案。

(2) 高分辨率试验方案。此方案的设计是基于试验(1)的基础上, 如图1采用3层嵌套网格, 水平分辨率为18 km (Grid1)、6 km (Grid2) 和2 km (Grid3)。除原有的3种积云参数化方案外, 还增加了在最内层不使用积云参数化方案(NON_2 km)的设计。由于无论最内层分辨率为6 km还是2 km, BMJ方案均表现最佳, 因此NON_2 km方案中Grid1和Grid2均设定为BMJ方案。其余设置与试验(1)保持一致。

3 不同积云参数化方案模拟结果

3.1 2017年夏季降水的空间分布

从图2可以看出, 在2017年6-8月, CGPA日平均降水数据与WRF模式模拟的降水空间格局大体一致。由于WRF模式水平分辨率是CGPA的约4倍, 其模拟的降水场空间格局更加细致(图2a~2d), 在大巴山、汉中盆地、秦岭和关中平原地区, 都能够细致地描绘地形剧烈起伏带来的降水场的空间分布差异。同CGPA数据相比, WRF模式模拟结果更能体现山区(如秦岭和大巴山)降水的空间特征。此外, CGPA数据的获得也考虑了地形影响, 但由于分辨率较低和缺乏机理分析, 造成CGPA数据本身也存在一定的误差。



注：黑色三角形为秦岭主峰太白山，黑点1、2、3、4分别为凤翔站、佛坪站、汉中站、镇巴站。

图2 2017年夏季秦岭降水量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of summer precipitation in the Qinling Mountains (the black triangle represents Taibai Mountain, the main peak of the Qinling Mountains, and the black dots marked with 1, 2, 3, and 4 indicate the locations of Fengxiang Station, Foping Station, Hanzhong Station and Zhenba Station, respectively)

山区降水分布的特征是诸如山脉走向、海拔高度、坡向、坡度以及水汽含量和大气层结稳定度等因素综合影响的结果。从图2a~2d看, 3种积云参数化方案均能模拟出秦岭及周边地区夏季降水具有明显随纬度的分布特征, 整体上降水从南到北呈条带状分布的空间格局, 高值中心位于大巴山西部, 低值中心位于关中平原。但KF方案模拟降水较大, GF和BMJ方案模拟的降水空间变化格局比较一致, 都体现出在秦岭主体 $33.5^{\circ}\text{N}\sim 34^{\circ}\text{N}$ 之间出现一条降水高值带, 最大降水超过 10 mm/d , 秦岭北面的关中平原降水平均在 $1\sim 3\text{ mm/d}$, 而秦岭南面的汉中盆地降水平均在 $2\sim 4\text{ mm/d}$, 体现了秦岭对降水分布的空间影响。秦岭南侧是偏南气流的迎风坡, 地形抬升作用和冷锋过山产生的垂直扰动的叠加作用激发了垂直上升运动的强烈发展, 使得秦岭南坡降水量较大^[40]。相比较, 仅利用低海拔降水资料得到的秦岭及周边地区降水的空间分布^[9], 不能体现出秦岭山区的高降水带。

为了更加细致的比较WRF模式各方案对地形降水的捕捉能力, 绘制了 $107^{\circ}\text{E}\sim 108^{\circ}\text{E}$ 经向剖面平均降水量随纬度的变化(图3), 并与剖面附近的镇巴、汉中、佛坪、凤翔4个台站(图2)以及CGPA数据进行比较。CGPA、BMJ及GF方案与台站资料表现一致, 均能较好的表现出大巴山和秦岭南北坡降水与地形的剖面一致性, 雨峰雨谷基本上与山峰山谷一一对应, 但模拟值要比CGPA值大。尤其是在秦岭 107.5°E 处正好是太白山地区(最高海拔 3776 m), 在此的模拟值正偏差较大, 主要是由数值点风暴造成的。由于夏季暖湿气流北上, 再加上秦岭对气流的阻隔作用, 导致秦岭南坡降水大于北坡。与其他2种积云参数化方案相比, 无论是在量级上还是降水分布形态, KF方案在秦岭南坡地区存在显著的降水差异, 难以呈现降水与地形的剖面一致性。

采用Wang等评估再分析资料的方法^[41], 选取相关系数(R)、平均偏差(MBE)、平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)4个指标, 以22个气象观测值为参考对模拟结果进行评估。将效果分为7个等级, 代表效果好的评价因子最大评分为7, 反之评分为1, 评分最高则效果最优, 结果如表1所示。

BMJ方案在降水量级上与观测站点最为接近, 均方根误差、平均偏差、平均绝对偏差均为最小。KF方案模拟降水与观测站点相关性最高, 相关系数接近0.69, 但出现了十分明显的湿偏差。GF方案无论在量级上还是相关性方面都没有表现出明显的优越性。因此, 从评分结果来看, BMJ方案对秦岭平均降水量的模拟优于其他方案。

3.2 降水类型

模式模拟的总降水量由对流性降水和大尺度降水组成, 不同的积云参数化方案由于对流触发机制、闭合假设等的设定不同对不同类型的降水模拟也存在差异。为进一步分析哪类降水是导致降水差异的主要原因, 图4对比了3种积云方案模拟的对流性降水和大尺度降水, KF方案模拟结果显示对流性降水占主要地位, 而其余2种方案以大尺度降水为主。大尺度降水强度依次为 $\text{GF} > \text{KF} > \text{BMJ}$, 而对流性降水强度则为 $\text{KF} > \text{BMJ} > \text{GF}$ 。因此, KF方案与BMJ模拟的降水差异主要是由对流性降水的模拟偏多造成的, 而GF方案则是由于对大尺度降水模拟偏高。

4 高分辨率对模拟水平的改善

积云参数化方案通常针对较粗网格而设计^[42], 在高分辨率条件下能否直接显式解析积云对过程? 提高模式分辨率是否可优化降水的模拟效果? 这方面的研究值得进一步探讨。

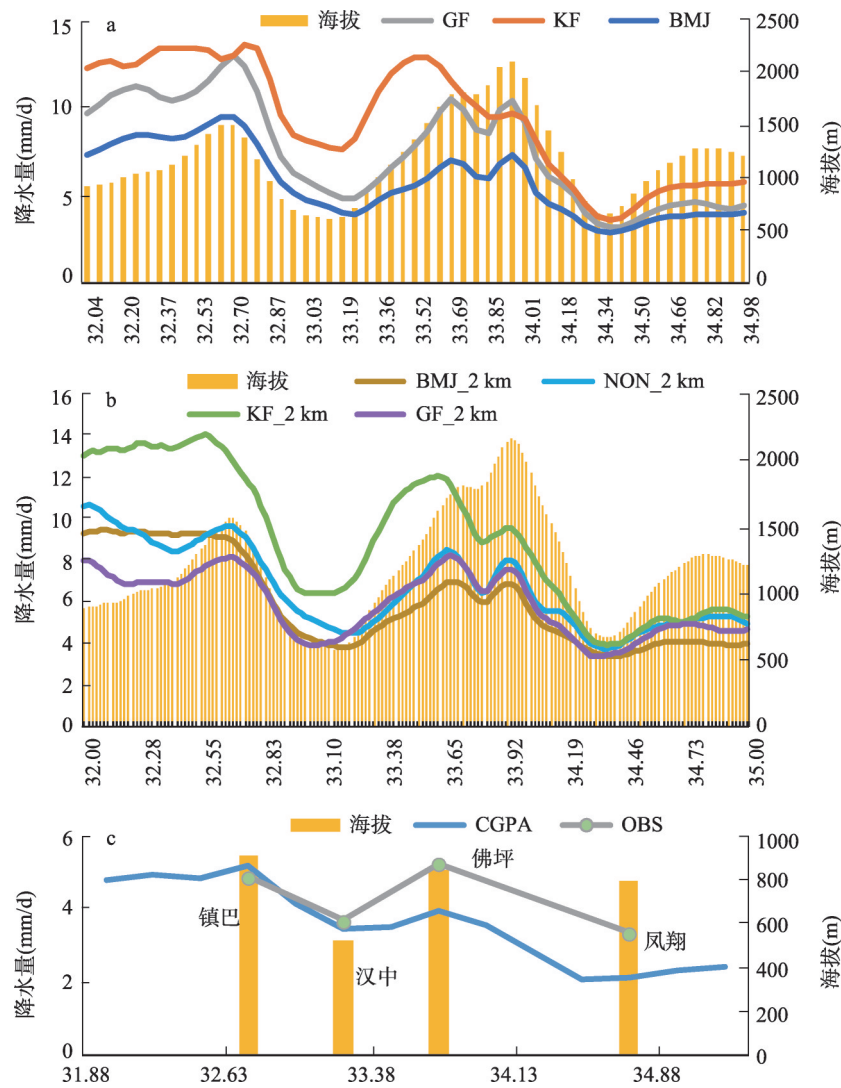


图3 107°E~108°E 经向降水剖面(a)、不同积云参数化方案模拟结果(b)与高分辨率下模拟结果(c)验证
Fig. 3 107°E-108°E meridional precipitation profile (a) Simulation results of different cumulus parameterization schemes; (b) Simulation results at high resolution; (c) Verification data

表 1 模拟方案评估结果

Tab. 1 Assessment of simulation results

	方案名称	R	MBE(mm/d)	MAE(mm/d)	RMSE(mm/d)	评分
试验(1)	BMJ	0.4756	0.5412	1.0757	1.4653	16
	KF	0.6859	3.4537	3.4537	4.3084	10
	GF	0.6438	1.2021	1.5951	1.8990	15
试验(2)	BMJ_2 km	0.3792	0.1989	0.9201	1.2377	21
	KF_2 km	0.5928	2.5415	2.5518	3.2045	11
	GF_2 km	0.4532	0.4384	0.9935	1.4683	18
	NON_2 km	0.5887	0.5399	1.0061	1.2311	21

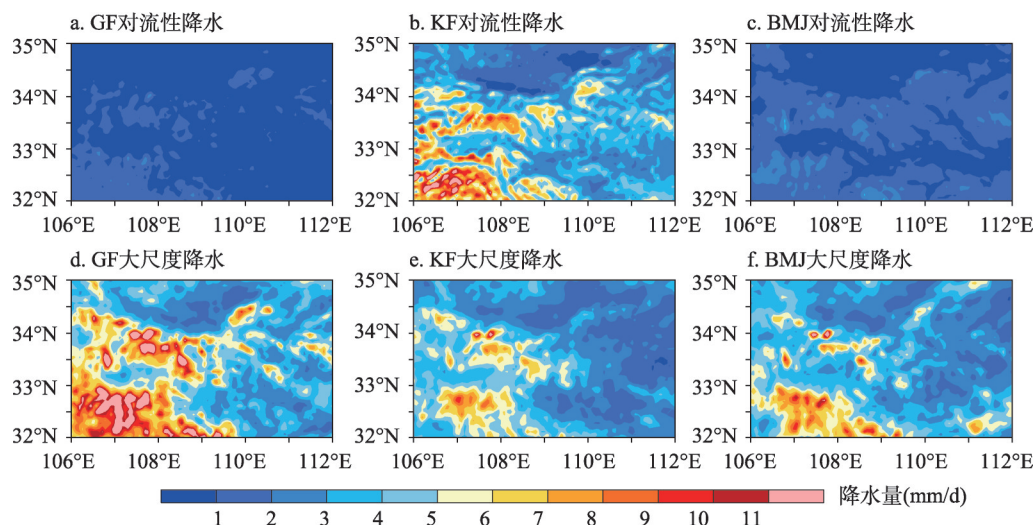


图4 秦岭6-8月不同类型降水空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of different types of precipitation during June-August

图2e~2h显示了在2 km分辨率条件下,各方案的模拟效果。相比6 km分辨率,所有方案对降水量的高估都得到了明显改善,且能够更加细致地刻画出降水的空间变化,但相关性有所下降(表1)。其中,NON_2 km方案的得分与BMJ_2 km方案一致,优于其他所有方案,但在两个最大降水发生位置,NON_2 km方案要比BMJ_2 km方案夏季降水多出1 mm/d(图3b)。因此,在秦岭这样地形复杂的区域,水平分辨率的提高更有利于改善对降水强度的模拟。2 km分辨率虽然能够在一定程度上显式解析积云对流过程,但选择恰当的积云参数化方案可以避免模式过度强化地形强迫作用,从而减少虚假降水的产生。

5 影响机理分析

通过对秦岭地区夏季降水的空间分布、量值以及降水类型的对比分析,表明不同积云参数化方案以及水平分辨的改变都会对模拟性能产生显著影响。因此,通过分析模型模拟的水分条件和大气不稳定性两个方面来解释产生差异的原因,可进一步认清秦岭地区降水的变化机理。

5.1 水分条件

水汽是形成降水的必要条件,其输送状况是研究降水必须考虑的重要因子。图5为6 km分辨率下各方案模拟的夏季秦岭地区整层平均的水汽通量,水汽来源主要有3条通道:来自孟加拉湾及西太平洋的水汽分别经由青藏高原东北侧、四川盆地和长江中下游平原输送至秦岭地区。其中,GF、KF模拟结果显示经由青藏高原东北侧、四川盆地以及长江中下游地区而来的水汽在33°N处汇合,受到秦岭的阻碍作用,在34°N附近水汽输送偏转为西南方向。由于BMJ方案模拟的偏东风较弱,因而没有显示出来自长江中下游地区水汽与其他两条水汽通道的汇合现象,这可能是导致该方案模拟的秦岭南坡水汽较其他2种方案偏少的原因之一。2 km分辨率下(图6),所有方案模拟的由南而来的水汽均有所降低,再加上青藏高原北侧的偏西风较弱的影响,导致水汽难以输送至秦岭,使得秦岭地区大气整体偏干。

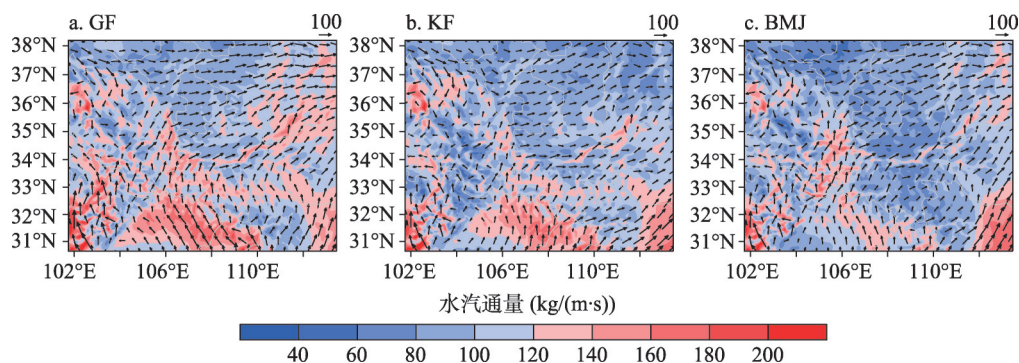


图5 6 km分辨率下夏季平均的整层水汽通量

Fig. 5 Average summer water vapor flux at a 6-km resolution

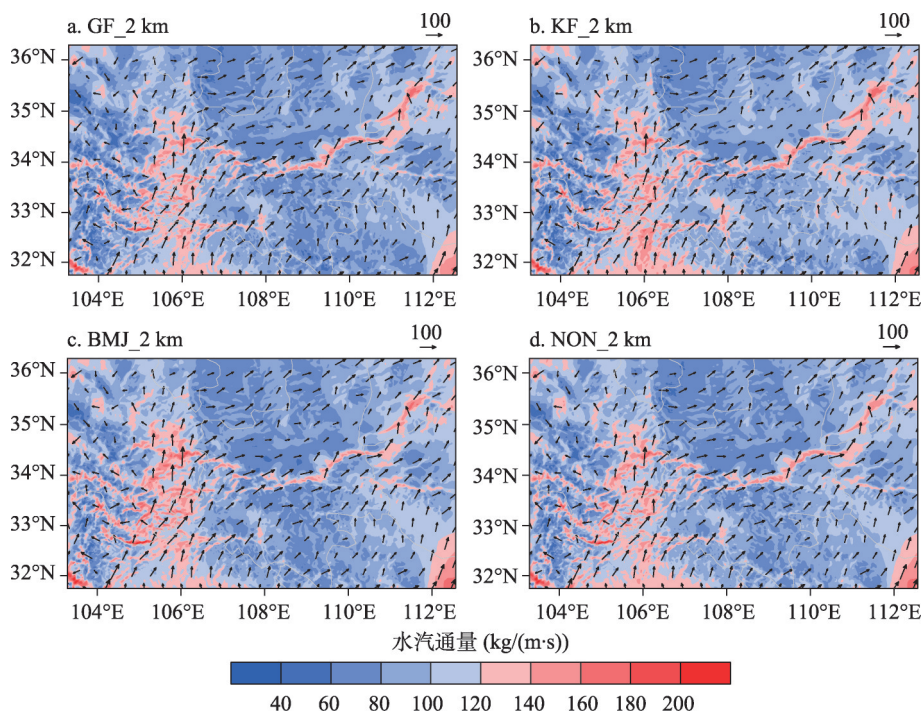


图6 2 km分辨率下夏季平均的整层水汽通量

Fig. 6 Average summer water vapor flux at a 2 km resolution

5.2 大气不稳定性

在水分供应充足的条件下, 上升运动越强烈, 大气越不稳定, 发生降雨的可能性就越大。图7给出了各方案模拟的垂直速度剖面图, 各参数化方案对垂直速度的模拟十分敏感, 大小和变化趋势均存在较大差异。6 km分辨率下, KF方案表现出强烈的上升运动, 最大垂直速度出现在400 hPa, 为 8.09×10^{-3} m/s, 而GF和BMJ方案模拟结果显示最大垂直速度出现在100 hPa, 分别为 5.71×10^{-3} m/s、 5.75×10^{-3} m/s。强烈的大气不稳定性促使KF方案模拟的对流性降水偏多(图4b), 而GF方案由于空气最为湿润, 大气环境的不稳定使得网格尺度的水汽容易达到饱和, 从而激发网格尺度降水, 因此该方案模拟的大尺度降水最多(图4a)。BMJ方案则由于水分条件和垂直速度均最弱, 所以总降水

量最小, 最接近观测。2 km 分辨率条件下, 各方案模拟的垂直速度均有不同程度的减小, 但未使用积云参数化的垂直风速比BMJ_2 km方案的垂直风速大 4.5×10^{-3} m/s。相比较而言, 积云参数化方案的选取对垂直速度的影响大于分辨率的提高。

为进一步对比各方案模拟大气对流不稳定性的差异, 图8给出了秦岭地区夏季整层平均对流有效位能(Convective Available Potential Energy, CAPE)的空间分布。6 km分辨率下的3种方案模拟结果表现出了较大的差异, KF方案显示了高度的对流不稳定性, 区域平均CAPE值达到了166.35 J/kg, 再加上较为充足的水汽条件, 导致对流性降水远大于其他2种方案, 成为该方案模拟总降水正偏差的重要原因。GF方案模拟的区域平均CAPE结果为144.53 J/kg, 和BMJ方案(148.21 J/kg)模拟结果相差不大, 与对流性降水结果一致, GF方案略小于BMJ方案。2 km分辨率下(图9), CAPE值显著变小, BMJ_2 km方案模拟的区域平均CAPE值仅为63.70 J/kg, 说明相比于不同参数化方案, CAPE值对于水平分辨率更加敏感。

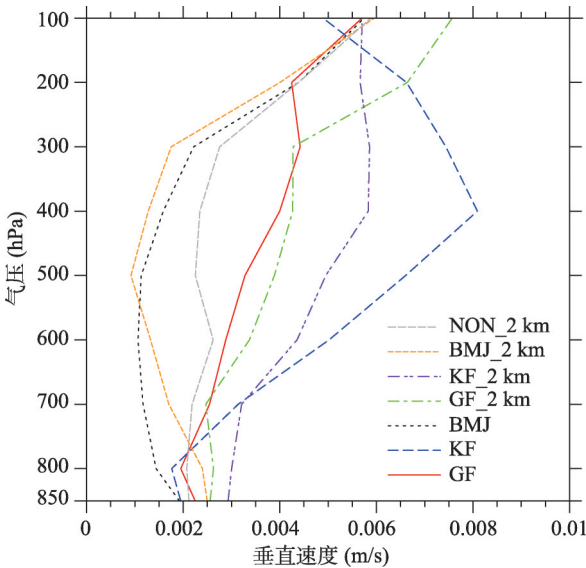


图7 垂直速度剖面图

Fig. 7 Vertical profiles of area-averaged mean of vertical velocity

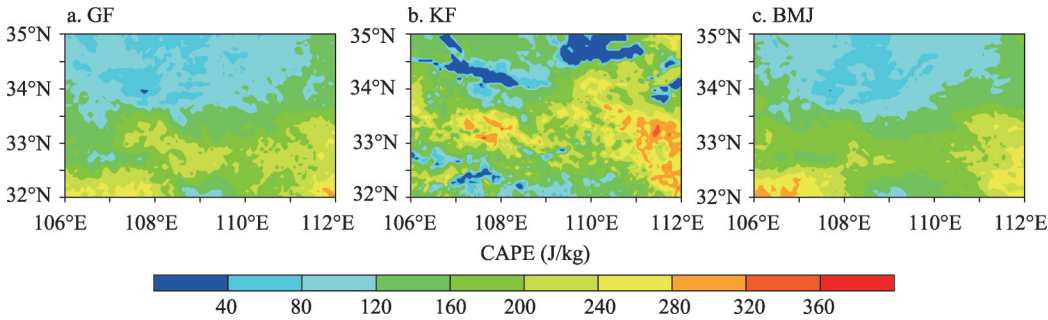


图8 6 km分辨率下整层对流有效位能(CAPE)的夏季平均值

Fig. 8 Summer average of vertically integrated convective available potential energy at a 6 km resolution

6 结论

秦岭作为南水北调中线的主要产水区, 其降水变化不仅关系到关中城市群水资源的可持续利用, 还影响到京津乃至华北地区的用水安全。本文基于WRF V3.9, 模拟了2017年秦岭地区夏季降水的空间分布。通过积云参数化和水平分辨率的敏感性试验, 优化该模式在秦岭降水研究中的适用性, 为研究秦岭水资源提供了新思路。结果表明:

(1) 各模拟方案及CGPA数据均能较好的反映出秦岭及其周边地区夏季降水从南到北呈条带状分布的空间格局, 高值中心位于大巴山西部, 低值中心位于关中平原。但模拟结果能更加细致的刻画出地形剧烈起伏带来的降水场的空间分布差异。

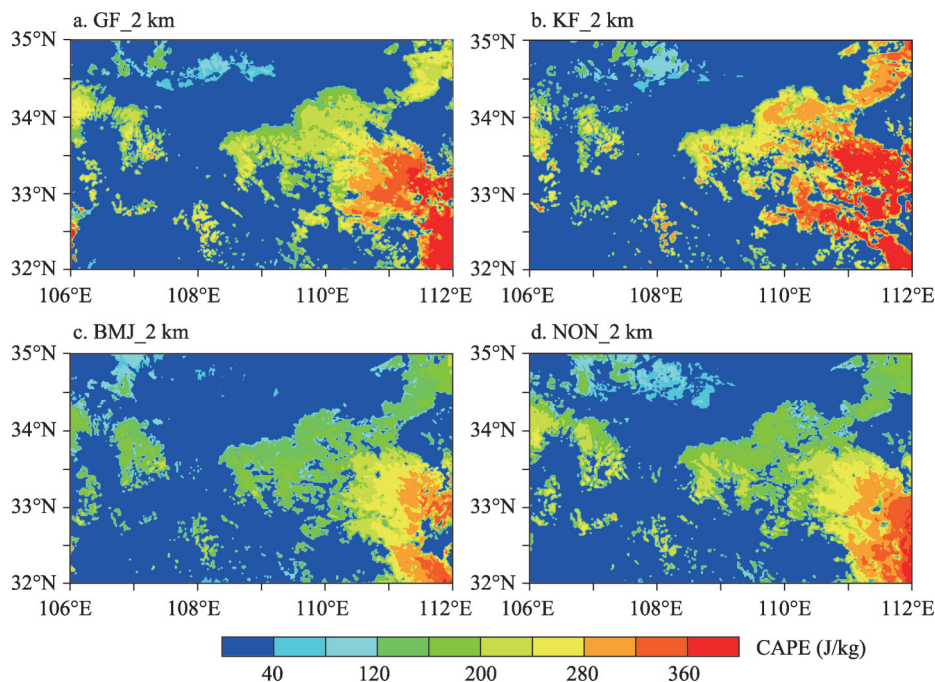


图9 2 km分辨率下整层对流有效位能(CAPE)的夏季平均值

Fig. 9 Summer average of vertically integrated convective available potential energy at a 2 km resolution

(2) 除KF方案,其他模拟结果及CGPA数据均与台站资料表现一致,较好的表现出大巴山和秦岭南北坡降水与地形的剖面一致性,由于秦岭对气流的阻隔作用,南坡降水大于北坡。但WRF模式对中小尺度地形抬升作用描述过强,模拟值要比CGPA值大。

(3) 6 km分辨率条件下,KF方案模拟降水偏多的主要原因在于强烈的对流不稳定性导致对对流降水的过高估计。GF方案则由于模拟的水汽条件偏湿,再加上大气环境的不稳定,使得网格尺度的水汽容易达到饱和,从而激发过多的网格尺度降水。BMJ方案与观测降水在量值上最为接近。

(4) 当模式分辨率由6 km提高到2 km分辨率时,对降水强度的模拟得到显著改善,无论是否采用积云参数化方案,均在一定程度上减小了对降水量的过高估计。但是2 km分辨率仍不足以完全显式解析积云对流过程,需要恰当的积云参数化的协同作用。

参考文献(References)

- [1] Zhang Xiaolong, Huang Lingmei, Shen Bing. Characteristics of runoff and its responses to rainfall change in typical basins of northern and southern regions of Qinling Mountains. *Water Resources and Power*, 2015, 33(1): 11-14. [张晓龙, 黄领梅, 沈冰. 秦岭南北典型流域径流特征及其降水变化响应. *水电能源科学*, 2015, 33(1): 11-14.]
- [2] Zhang Liwei, Yan Junping, Geng Huijuan, et al. The shifts of annual average temperature and precipitation belts in the south and north region of Qinling Mountains, Shaanxi province. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2011, 39(6): 81-85. [张立伟, 延军平, 耿慧娟, 等. 陕西秦岭南北年均气温及降水量带的移动. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(6): 81-85.]
- [3] Li Shuangshuang, Lu Jiayu, Yan Junping, et al. Spatiotemporal variability of temperature in northern and southern Qinling Mountains and its influence on climatic boundary. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(1): 13-24. [李双双, 芦佳玉, 延军平, 等. 1970-2015年秦岭南北气温时空变化及其气候分界意义. *地理学报*, 2018, 73(1): 13-24.]
- [4] Song Chunying, Yan Junping, Zhang Liwei. Temporal and spatial trends of drought and flood in the south and north of the Qinling Mountains in Shaanxi province. *Arid Zone Research*, 2011, 28(6): 944-949. [宋春英, 延军平, 张立伟. 陕西

- 秦岭南北旱涝灾害时空变化趋势分析. 干旱区研究, 2011, 28(6): 944-949.]
- [5] Li Minmin, Yan Junping. Drought and flood spatial and temporal variation in the Qinling Mountains. *Resources Science*, 2013, 35(3): 638-645. [李敏敏, 延军平. 全球变化下秦岭南北旱涝时空变化格局. 资源科学, 2013, 35(3): 638-645.]
- [6] Li Yingjie, Yan Junping, Liu Yonglin. Relationship between dryness/wetness and precipitation heterogeneity in the north and south of the Qinling Mountains. *Arid Zone Research*, 2016, 33(3): 619-627. [李英杰, 延军平, 刘永林. 秦岭南北气候干湿变化与降水非均匀性的关系. 干旱区研究, 2016, 33(3): 619-627.]
- [7] Peng Yan, Wang Zhao, Dong Yan, et al. Characteristics and reasons of local change of precipitation over Shaanxi during 1960-2012. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(4): 1050-1059. [彭艳, 王钊, 董妍, 等. 1960-2012年陕西降水变化特征及可能成因分析. 高原气象, 2016, 35(4): 1050-1059.]
- [8] Li Shuangshuang, Yang Saini, Liu Xianfeng. Spatiotemporal variability of extreme precipitation in north and south of the Qinling-Huaihe region and influencing factors during 1960-2013. *Progress in Geography*, 2015, 34(3): 354-363. [李双双, 杨赛霓, 刘宪锋. 1960-2013年秦岭—淮河南北极端降水时空变化特征及其影响因素. 地理科学进展, 2015, 34(3): 354-363.]
- [9] Pan Liujie, Zhang Hongfang, Chen Xiaoting, et al. Dominant modes of summer precipitation in Qinling and surrounding areas. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2018, 41(3): 377-387. [潘留杰, 张宏芳, 陈小婷, 等. 秦岭及周边地区夏季降水的主模态分析. 大气科学学报, 2018, 41(3): 377-387.]
- [10] Yang Jiao, Shi Lan, Miao Qilong, et al. Precision evaluation of three sets of remote sensing precipitation data in Qinling-Daba Mountains. *Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 35(2): 73-78. [杨娇, 史岚, 缪启龙, 等. 3套遥感降水资料在秦岭大巴山区精度评估分析. 江苏师范大学学报(自然科学版), 2017, 35(2): 73-78.]
- [11] Ren Liang, Wang Xiaofeng, Zeng Zhaozhao. The accuracy evaluation of TRMM 3B42 precipitation data in Shaanxi Qinling-Daba Mountains. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 45(1): 87-97. [任亮, 王晓峰, 曾昭昭. 陕西秦巴山区TRMM3B42卫星降水数据精度评价. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2017, 45(1): 87-97.]
- [12] Tian J, Liu J, Wang J, et al. A spatio-temporal evaluation of the WRF physical parameterisations for numerical rainfall simulation in semi-humid and semi-arid catchments of Northern China. *Atmospheric Research*, 2017, 191: 141-155.
- [13] Wang Xiaojun, Ma Hao. Progress of application of the Weather Research and Forecast (WRF) model in China. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(11): 1191-1199. [王晓君, 马浩. 新一代中尺度预报模式(WRF)国内应用进展. 地球科学进展, 2011, 26(11): 1191-1199.]
- [14] Zhang Xuezheng, Zheng Jingyun, He Fanneng, et al. Application of MODIS BRDF/Albedo Dataset in the regional temperature simulation of China. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(3): 356-366. [张学珍, 郑景云, 何凡能, 等. MODIS BRDF/Albedo数据在中国温度模拟中的应用. 地理学报, 2011, 66(3): 356-366.]
- [15] Norris J, Carvalho L M V, Jones C, et al. The spatiotemporal variability of precipitation over the Himalaya: Evaluation of one-year WRF model simulation. *Climate Dynamics*, 2017, 49(5/6): 2179-2204.
- [16] Xiong Zhe. Impact of different convective parameterization on simulation of precipitation for the Heihe River Basin. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(5): 590-597. [熊喆. 不同积云对流参数化方案对黑河流域降水模拟的影响. 地球科学进展, 2014, 29(5): 590-597.]
- [17] Ratna S B, Ratnam J V, Behera S K, et al. Performance assessment of three convective parameterization schemes in WRF for downscaling summer rainfall over South Africa. *Climate Dynamics*, 2014, 42(11/12): 2931-2953.
- [18] Yu E T, Wang H J, Gao Y Q, et al. Impacts of cumulus convective parameterization schemes on summer monsoon precipitation simulation over China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2011, 25(5): 581-592.
- [19] Xu J, Koldunov N, Remedio A R C, et al. On the role of horizontal resolution over the Tibetan Plateau in the REMO regional climate model. *Climate Dynamics*, 2018, 51(11/12): 4525-4542.
- [20] Lin C G, Chen D L, Yang K, et al. Impact of model resolution on simulating the water vapor transport through the central Himalayas: Implication for models' wet bias over the Tibetan Plateau. *Climate Dynamics*, 2018, 51(9/10): 3195-3207.
- [21] Li Pingyun, Wang Nan, Dai Changming, et al. Simulation analysis of terrain effect in Qinba Mountain area during the rainstorm in southern Qinling Mountains. *Shaanxi Meteorology*, 2018(1): 1-9. [李萍云, 王楠, 戴昌明, 等. 一次秦岭南麓暴雨中秦巴山区地形作用模拟分析. 陕西气象, 2018(1): 1-9.]
- [22] Mu Jianli, Li Zechun, Chen Yun, et al. Feature analyses of mesoscale convective system of a heavy rainfall in the Central Shaanxi Plain. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(1): 148-161. [慕建利, 李泽椿, 谌芸, 等. 一次陕西关中强暴雨中

- 尺度系统特征分析. 高原气象, 2014, 33(1): 148-161.]
- [23] Liu Yanfei, Long Xiao, Wang Hui. Numerical simulation studies on a rainstorm in central western Shaanxi. Plateau Meteorology, 2015, 34(2): 378-388. [刘燕飞, 隆霄, 王晖. 陕西中西部地区一次暴雨过程的数值模拟研究. 高原气象, 2015, 34(2): 378-388.]
- [24] Kain J S, Fritsch J M. The role of the convective "trigger function" in numerical forecasts of mesoscale convective systems. Meteorology and Atmospheric Physics, 1992, 49(1/4): 93-106.
- [25] Kain J S. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. Journal of Applied Meteorology, 2004, 43(1): 170-181.
- [26] Liu Weiguang, Chen Haishan, Yu Miao, et al. Impacts of cumulus convective parameterization schemes on simulation of East Asian summer circulation and rainfall. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(1): 64-74. [刘伟光, 陈海山, 俞淼, 等. 积云对流参数化方案对东亚夏季环流和降水模拟的影响. 大气科学, 2019, 43(1): 64-74.]
- [27] Huang D L, Gao S B. Impact of different cumulus convective parameterization schemes on the simulation of precipitation over China. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 2017, 69(1): 1406264. doi: 10.1080/16000870.2017.1406264.
- [28] Cretat J, Pohl B. How physical parameterizations can modulate internal variability in a regional climate model. Journal of the Atmospheric Sciences, 2012, 69(2): 714-724.
- [29] Cretat J, Pohl B, Richard Y, et al. Uncertainties in simulating regional climate of Southern Africa: Sensitivity to physical parameterizations using WRF. Climate Dynamics, 2012, 38(3/4): 613-634.
- [30] Janjic Z I. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. Monthly Weather Review, 1994, 122(5): 927-945.
- [31] Janjic Z I. Comments on "Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models". Journal of the Atmospheric Sciences, 2000, 57(21): 3686-3686.
- [32] Mukhopadhyay P, Taraphdar S, Goswami B N, et al. Indian summer monsoon precipitation climatology in a high-resolution regional climate model: Impacts of convective parameterization on systematic biases. Weather and Forecasting, 2010, 25(2): 369-387.
- [33] Li L F, Li W H, Jin J M. Improvements in WRF simulation skills of southeastern United States summer rainfall: Physical parameterization and horizontal resolution. Climate Dynamics, 2014, 43(7/8): 2077-2091.
- [34] Grell G A, Devenyi D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. Geophysical Research Letters, 2002, 29(14): 1693. doi: 10.1029/2002GL015311.
- [35] Grell G A, Freitas S R. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(10): 5233-5250.
- [36] Gbode I E, Dudhia J, Ogunjobi K O, et al. Sensitivity of different physics schemes in the WRF model during a West African monsoon regime. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 136(1/2): 733-751.
- [37] Gao Y, Leung L R, Zhao C, et al. Sensitivity of US summer precipitation to model resolution and convective parameterizations across gray zone resolutions. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(5): 2714-2733.
- [38] Wu L, Li J L F, Pi C J, et al. An observationally based evaluation of WRF seasonal simulations over the Central and Eastern Pacific. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(20): 10664-10680.
- [39] Liao Jie, Xu Bin, Zhang Hongzheng. Assessment of experiment of merging gauge observations with cmorph. Journal of Tropical Meteorology, 2013, 29(5): 865-873. [廖捷, 徐宾, 张洪政. 地面站点观测降水资料与CMORPH卫星反演降水产品融合的试验效果评估. 热带气象学报, 2013, 29(5): 865-873.]
- [40] Bi Baogui, Liu Yuewei, Li Zechun. Study on influence of the mechanical forcing of mesoscale topography on the extremely heavy rainfall in southern Shaanxi on 8-9 June 2002. Plateau Meteorology, 2006, 25(3): 131-140. [毕宝贵, 刘月巍, 李泽椿. 秦岭大巴山地形对陕南强降水的影响研究. 高原气象, 2006, 25(3): 131-140.]
- [41] Wang A H, Zeng X B. Evaluation of multireanalysis products with in situ observations over the Tibetan Plateau. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117: D05102. doi: 10.1029/2011JD016553.
- [42] Arakawa A. The cumulus parameterization problem: Past, present, and future. Journal of Climate, 2004, 17(13): 2493-2525.

Numerical simulation and spatial distribution of summer precipitation in the Qinling Mountains

XIN Rui, DUAN Keqin

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: The Qinling Mountains serve as a dividing line for China's climate. The dearth of precipitation data in high-altitude areas limits the study of climate and water resource changes in this region. To determine the spatial distribution of precipitation, the weather research forecasting (WRF) model was used to simulate summer precipitation in the Qinling Mountains and surrounding areas in 2017 by employing three convective parameterization schemes (KF, BMJ and GF). Both the simulation results and satellite data reveal that precipitation is consistent with the terrain's topography, and there is a spatial pattern of strip distribution from south to north accompanied by a high precipitation zone in the Qinling Mountains. The mountains have an evident blocking effect on the northward transport of water vapour, resulting in precipitation on the southern slope of the Qinling Mountains being significantly greater than that on the northern slope. However, the analogue value is larger than the satellite precipitation data. The primary reason that more precipitation is observed in the KF scheme simulation is that the strong convective instability leads to an overestimation of convective precipitation. The GF scheme simulates grid-scale precipitation, which result in more large-scale precipitation due to atmospheric wetness. The simulated values of the BMJ scheme are closest to the observed values. Increasing the resolution to 2 km can significantly improve the simulation level of the model in the Qinling Mountains, and there is great potential for improving precipitation estimation at the highest elevations of the mountains by using a suitable cumulus parameterization scheme.

Keywords: WRF model; Qinling Mountains; precipitation; cumulus parameterization scheme; horizontal resolution