

吴遥,唐红玉,蒋兴文,等. 不同边界层参数化方案在中国西南地区东部高分辨率气候模拟中的敏感性研究[J]. 热带气象学报, 2024, 40(2):248-257.

文章编号: 1004-4965(2024)02-0248-10

# 不同边界层参数化方案在中国西南地区东部高分辨率气候模拟中的敏感性研究

吴遥<sup>1</sup>,唐红玉<sup>1</sup>,蒋兴文<sup>2</sup>,董新宁<sup>1</sup>

(1. 重庆市气候中心, 重庆 401147;

2. 中国气象局成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610072)

**摘要:** 为了进一步评估和提高区域模式对西南地区东部高分辨率气候的模拟能力,利用WRF模式,采用多种边界层参数化方案(下称“不同方案”)对西南地区东部1998—2019年夏季降水和气温进行双重嵌套模拟(外层为D01,内层为D02)。对比不同方案模拟结果表明:多年平均降水量在D01中基本为湿偏差;D02中在四川盆地和重庆低海拔地区为干偏差,湿偏差主要位于贵州和重庆的城口、石柱和武隆一带的地形复杂区;总体上D01中ACM2方案误差最小,D02中MYJ方案误差最小。对多年平均气温的模拟在D01中除了四川盆地一带为暖偏差外其余大部地区基本为冷偏差,D02中大部地区为暖偏差;总体上D01和D02中MYJ方案误差最小,YSU方案最大。对于降水量和平均气温年际变化的模拟技巧在D01和D02中相对较高的地区均集中在重庆中西部和湖北大部地区;降水量总体为YSU方案最高,MYJ方案最低;平均气温总体为MYJ方案最高,ACM2方案最低。因此,提升模式分辨率至对流尺度后对不同气象要素模拟技巧最优的方案存在差异,需根据业务情况选择适合本地的参数化方案。

**关键词:** 西南地区东部;WRF模式;边界层方案

**中图分类号:** P435 **文献标志码:** A **Doi:** 10.16032/j.issn.1004-4965.2024.024

## 1 引言

以往研究指出:全球气候模式(Global Climate Model, GCM)在大尺度环流系统和雨带位置模拟中表现出很高的技巧<sup>[1-2]</sup>,但是,对于中小尺度的环流系统和气象要素等模拟还存在一定的偏差,特别在地形相对复杂地区<sup>[3-4]</sup>。相对于全球模式,区域气候模式由于具备更高的水平分辨率或根据中小尺度环流系统优化后的物理参数化方案,在中小尺度气象要素的时空特征模拟中具有一定的优势<sup>[5]</sup>。因此,在区域气候的业务研究或预

测中区域模式已经被广泛地应用<sup>[6]</sup>。西南地区东部(本文指(105~110°E, 27~32°N)所包含的区域,涵盖四川东部、重庆、贵州北部以及湖南西部局部和湖北西部的局部地区)位于青藏高原东侧,在地理位置上位于四川盆地向四周山脉逐渐过度地区,地形主要以山地和丘陵为主,地形地貌相对较为复杂。此外,该地区与太平洋和印度洋距离较近,受两个大洋的影响使得该地区在夏季整体水汽输送较强,这与除此之外的西南地区相比较存在一定的差异<sup>[6-8]</sup>。由于上述原因,西南地区东部夏季降水整体体现出较大的年际变化,成为我国夏季旱涝灾害易发生地区之一<sup>[9-13]</sup>。另外,在全

收稿日期:2022-07-15;修订日期:2024-03-01

基金项目:重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2022NSCQ-MSX0558);中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J031);重庆市气象局智慧气象技术创新团队项目(YWJSGG-202208)共同资助

通讯作者:唐红玉,女,青海省人,研究员级高级工程师,主要从事短期气候诊断预测业务和研究工作。E-mail: 782378285@qq.com

球变暖的大环境下,西南地区东部夏季旱涝灾害发生频率和强度都所有加剧,如1998年、2004年、2007年和2014年该地区均发生了区域或局地特大洪涝,而2001年、2006年、2011年和2013年发生了区域性的特大干旱。这些都对该地区的经济社会造成了较大的影响,因此提前对该地区夏季气温和降水的预测就显得尤为重要。

在业务开展气候预测时,基于区域气候模式的动力降尺度方法是当前常用预测技术之一。由于不同物理参数化方案对物理过程的描述存在差异,动力降尺度的重要前提需要对模式在特定区域的物理参数化方案进行适用性研究。而具有较多的物理参数化方案和具备高分辨率动力框架是WRF模式(Weather Research and Forecasting model)的优点之一,用户可以进行大量的试验来选择适合不同地区的物理参数化方案以提升预测技巧。以往的研究指出:数值模式的水平分辨率、物理参数化方案和初边界条件等对模式的模拟能力都具有很大的影响<sup>[14-16]</sup>。在当前短期气候预测中,随着数值模式的水平分辨率不断提高,甚至朝着对流分辨尺度发展。本文作者研究也指出提高模式分辨率可以有效提升地形复杂区域降水的模拟能力<sup>[17-18]</sup>。那么,在对流分辨率尺度,模式在西南地区东部模拟的降水和气温误差是否会随着分辨率的提高而减少(包括气候平均和年际变率等)并未可知。此外,行星边界层(Planetary Boundary Level, PBL)在地-气系统间的非线性作用起着重要作用,地面热力和动力是边界层内湍流重要影响之一<sup>[19-20]</sup>。加之当前边界层观测上的欠缺导致该方面理论并不成熟<sup>[21]</sup>,当前模式主要通过多种参数化方案来对边界层过程进行统计上的描述<sup>[22]</sup>,这就使得模式中不同边界层参数化方案在不同月份或季节、不同模拟区域、不同预测对象(如气温或降水)适合度不同<sup>[23-25]</sup>。西南地区东部由于其特殊地理位置使得该地区边界层的热力和动力作用非常复杂,故而针对该地区的边界层参数化方案敏感性试验就显得尤为重要。

基于上述问题,本文利用WRF模式,采用多种边界层参数方案对西南地区东部采用双层嵌套方式进行高分辨率数值模拟,以考察模式对不同边界层参数化方案和双重嵌套模拟结果的敏感

性,为后期进一步改进模式对该区域气温和降水模拟能力提供依据。

## 2 资料和方法

本文利用WRF(v3.9.1.1)模式进行双重嵌套模拟(单向嵌套),投影方式为兰勃特投影,使用的资料主要有:(1)NCEP(National Centers for Environment Prediction)提供的一日四次(世界时00、06、12、18时)的CFSR(Climate Forecast System Reanalysis)资料作为WRF模式初、边界条件,空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ,以及其提供的海温资料作为外强迫场,空间分辨率为 $0.312^\circ \times 0.312^\circ$ 。(2)覆盖亚洲区域( $60 \sim 160^\circ \text{E}$ ,  $0 \sim 65^\circ \text{N}$ )CLDAS(CMA Land Data Assimilation System)提供的逐小时降水量和平均气温产品(下称“观测资料”),空间分辨率为 $0.0625^\circ \times 0.0625^\circ$ 。该数据集利用多种来源地面、卫星等观测资料,采用多重网格变分同化、物理反演、地形校正等技术研制而成,在中国区域质量优于国际同类产品,且时空分辨率更高<sup>[26]</sup>。为了评估的统一性,WRF模式的输出结果和用于评估的数据均利用双线性插值方法统一插值到观测资料水平分辨率上进行评估。

为了量化评估模式不同方案模拟技巧,本文主要通过相关系数( $R$ )检验模式空间形态和年际变化的模拟技巧,均方根误差(RMSE)检验模式量级的模拟技巧,计算方法分别为公式(1)和(2)所示。相关系数主要反映观测和模拟值间关系密切程度。均方根误差由于其对观测和模拟值中较大或较小值的差异有敏感性很高,适合用于评估模式对量级的模拟技巧。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{\text{obs},i} - X_{\text{model},i})^2}{n}} \quad (2)$$

式中: $X_i$ 和 $Y_i$ 分别表示第 $i$ 个观测和模拟值, $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 分别表示所有观测和模拟的平均值, $X_{\text{obs},i}$ 和 $X_{\text{model},i}$ 分别表示第 $i$ 个观测和模拟值。

### 3 试验设计

本文采用三种不同边界层物理参数化方案(下称“不同方案”)进行敏感性试验,包括一种局地闭合方案(MYJ方案)和两种非局地闭合方案(ACM2和YSU方案)。其中MYJ方案由于利用Mellor-Yamada 2.5阶的局地闭合技术,总体上较适合层结处于弱稳定或稳定时的模拟<sup>[27]</sup>。ACM2方案采用非对称对流模型计算技术,在非局地时采用向上混合、局地时向下混合方式,有利于湍流

输送过程在边界层次网格中具有更好的描述能力<sup>[28]</sup>。YSU方案则利用倾斜方式计算非局地过程形成的动量,另外采用临界理查森数来计算边界层高度<sup>[29]</sup>。用于模式的其它主要物理参数化方案如表1所示,垂直方向共40层,顶层气压为50 hPa。模式从1998—2019年每年的5月1日00:00(世界时,下同)开始积分至8月31日18:00结束,5月作为spin-up时段,本文重点分析6—8月的模式输出结果。模式模拟区域及地形高度如图1所示。文中D01和D02分别代表模式外层区域和内层区域模拟结果。

表1 参数化方案设定表

参数化方案	D01	D02
区域设计方案	水平分辨率:15 km,格点数:383(经向)×334(纬向)	水平分辨率:5 km,格点数:367(经向)×358(纬向)
微物理方案	WSM6	WSM6
长波辐射方案	New Goddard	New Goddard
短波辐射方案	New Goddard	New Goddard
边界层方案	YSU/MYJ/ACM2	YSU/MYJ/ACM2
积云对流方案	GF	无
陆面过程	Noah	Noah

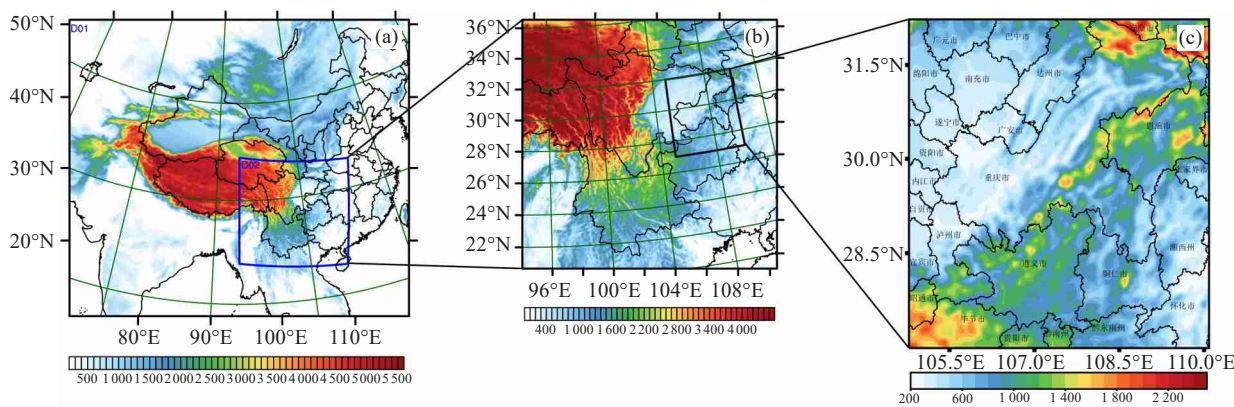


图1 模式模拟地形分布图(单位:m)

a中蓝色框为D02区域,b中黑色方框和c为西南地区东部。

### 4 结果分析

#### 4.1 空间分布特征分析

图2给出了观测资料和模式D01、D02模拟结果日平均降水量多年平均空间分布图。观测资料显示出夏季降水量大值中心主要集中在四川东北部与重庆接壤地区、四川盆地、重庆东南部与湖北和湖南接壤地区,日平均降水量达到了6 mm及以

上(图2a)。从模拟结果来看,不同方案在D01和D02中均基本反映出了降水量的相对大值中心,但降水量的分布形势和强度存在不同的差异。对比模式D01和D02模拟结果(图2b~2c和图2e~2f)发现不同方案在D01模拟降水明显比D02大,D01在大部地区日平均降水量都达到了6 mm及以上,最大可达10 mm。在不同方案之间,无论是D01还是D02,MYJ方案模拟降水量最大,YSU方案次之,ACM2方案最小。

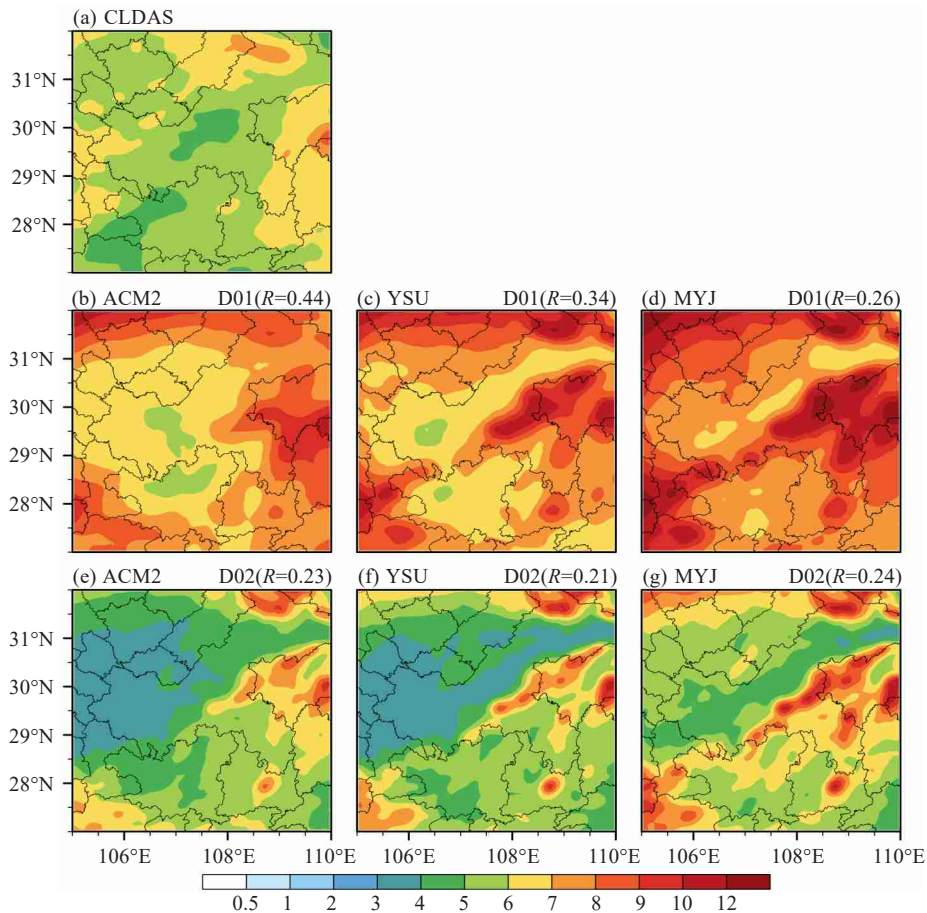


图2 观测(a)、不同方案模式模拟D01(b~d)和D02(e~g)夏季降水空间分布图(单位: $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$ )  
 右上角 $R$ 为观测与模式模拟结果的相关系数。

从降水量偏差图中可见(图3):不同方案D01在整个西南地区东部基本为湿偏差,偏差大值中心主要位于四川北部、重庆东南部和贵州西部地区,日平均降水量偏差最大可达 $5\text{ mm}$ 及以上,偏差相对低值中心位于四川盆地地区。在D01和D02间,不同方案相对高、低值中心均体现出一致性特征,但是D02在大部地区基本为干偏差,四川盆地为干偏差相对大值中心,日平均降水量干偏差最大可达 $2\text{ mm}$ 及以上;湿偏差主要位于贵州和重庆的城口、石柱和武隆一带。通过与模式地形分布图对比可见(图1和图3):D01湿偏差相对大值区和D02湿偏差区域主要位于地形复杂区。以往研究也指出<sup>[17-18,30]</sup>:模式在地形复杂区可能会产生虚假降水,提升分辨率可以一定程度改善湿偏差幅度。从D02模拟结果(图3d~3f)可以看出提升分辨率虽然减小了D01中湿偏差大值区的降水量级,但同时也给四川至重庆低海拔地区带了干偏差。总体而言D01中ACM2方案模拟降水误差

最小,D02中MYJ方案模拟误差最小。

作为表征气候特征的基本参数之一,气温的模拟是否准确也是衡量模式性能的主要指标之一。其次对于模式模拟降水较好的参数化方案是否在气温模拟中依旧表现出较高的技巧对于业务预测尤为重要。从图4中可以看出:观测资料显示出平均气温高值中心主要位于四川盆地及重庆沿长江河谷一带,达到了 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以上,低值中心主要位于贵州中西部、重庆城口及东南部海拔较高地区(图4a)。从模拟结果来看,不同方案在D01和D02中均基本反映出了平均气温的相对高值中心,但分布形势和强度存在不同的差异,这与降水量模拟的空间特征基本一致。对比模式D01和D02模拟结果(图4b~4c和图4e~4f)发现模式不同方案在D01模拟的平均气温明显比D02低。在不同方案之间,无论是D01还是D02,YSU模拟平均气温最高,MYJ方案次之,ACM2方案最低。

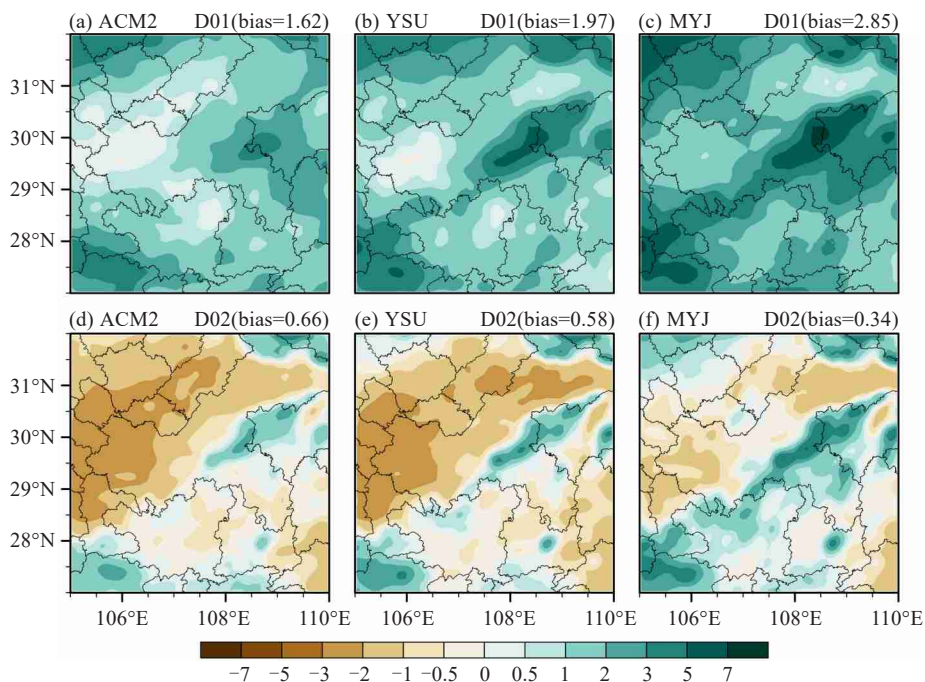


图3 不同方案模式模拟D01(a~c)和D02(d~f)夏季降水偏差空间分布图 偏差为模拟减去观测(单位:  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ), 右上角bias为区域平均偏差。

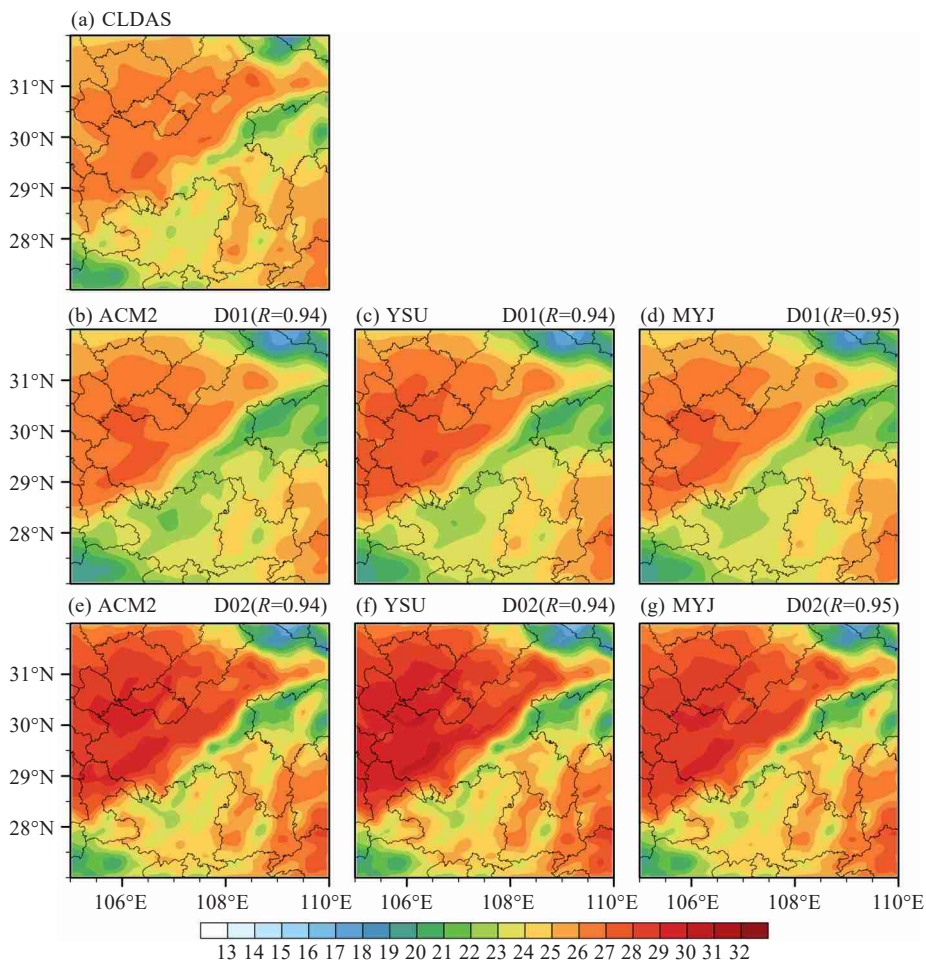


图4 同图2, 但为平均气温 单位:  $^{\circ}\text{C}$ 。

从平均气温偏差图(图5)中可见:不同方案在D01中的冷暖偏差区域体现出基本一致特征(图5a~5c),除了四川盆地一带为暖偏差(约0.5℃左右)外其余大部地区基本为冷偏差(约0.5℃左右);D02中大部地区为暖偏差,特别是四川盆地一带暖偏差达到了2℃及以上(图5d~5f)。对比D01和D02间,D02模拟平均气温整体较D01高,特别是贵州大部 and 重庆东南部地区由D01的

冷偏差变为了暖偏差。总体来看D01和D02中MYJ方案模拟平均气温误差最小,YSU方案最大。从提升模式分辨率D01和D02降水量和平均气温的模拟结果发现(图3、图5):提高模式分辨率后降水量模拟减少,对应平均气温增高。降水出现湿(干)偏差区域与平均气温冷(暖)偏差区域基本一致。但是对降水量和平均气温预测技巧较高的方案在D01存在差异,在D02中基本一致。

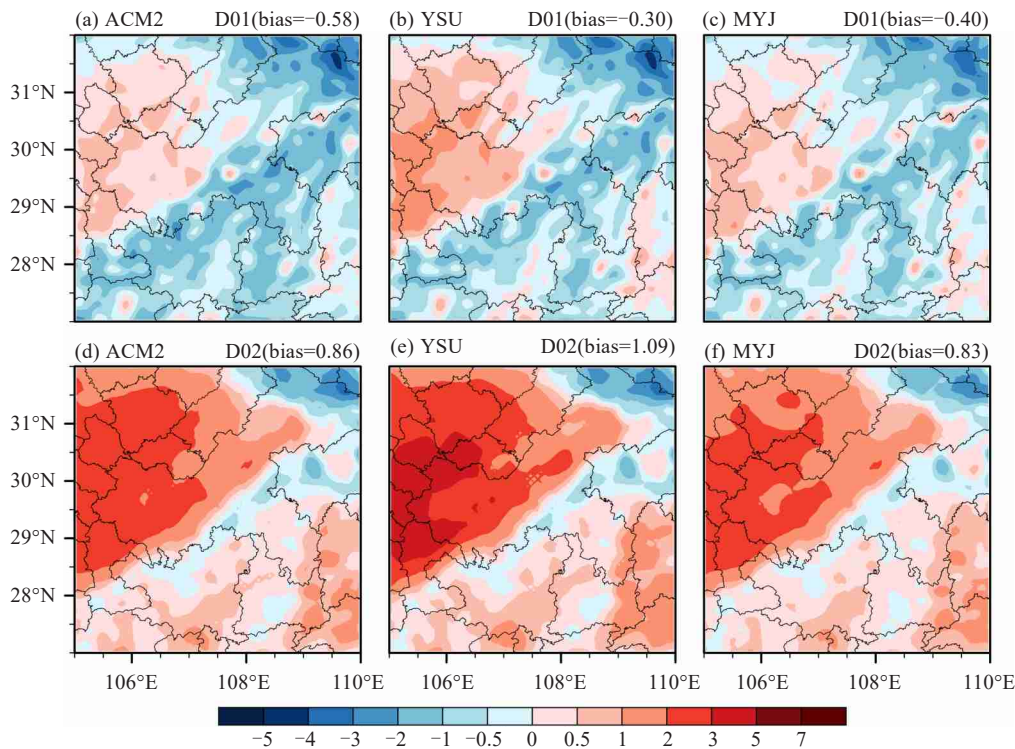


图5 同图3,但为平均气温 单位:℃。

#### 4.2 时间变化特征分析

虽然模式较好模拟出了西南地区东部降水量和平均气温的空间分布,但是在气候预测中,模式对其年际变化等的模拟能力也很重要。基于以上问题,图6和图7分别给出了降水量和平均气温年际相关系数的空间分布图。从图6中可看出:不同方案在D01和D02中模拟技巧相对较高的地区主要集中在重庆中西部和湖北大部地区,基本都通过了90%的显著性检验;相对低值区主要集中在四川东北部地区;D01模式技巧明显高于D02,主要表现在提升了除四川东北部其余大部地区的模拟技巧,但对四川东北部模拟技巧提升有限。在不同方案之间,无论是D01还是D02,YSU模拟技巧最高,ACM2方案次之,MYJ方案最低。

对于整个西南地区东部区域平均降水量可看出(图略):不同方案在D01中对大部分年份的夏季、7月和8月的平均降水量都高于观测,而D02中小于观测,在6月D01和D02大部分年份高于观测。可看出提升分辨率后导致夏季出现干偏差可能主要由于盛夏(7—8月)模拟降水量较观测偏少。通过统计西南地区东部区域平均降水量年际变化的 $R$ 和 $RMSE$ 可知(表2):无论是整个夏季还是分月上,D01和D02模拟结果总体为YSU方案更好( $R$ 相对更高, $RMSE$ 相对更小),可见提升模式分辨率后在不同方案下对年际变化模拟技巧改善有限,但是可以有效改善区域平均降水量量级模拟技巧。

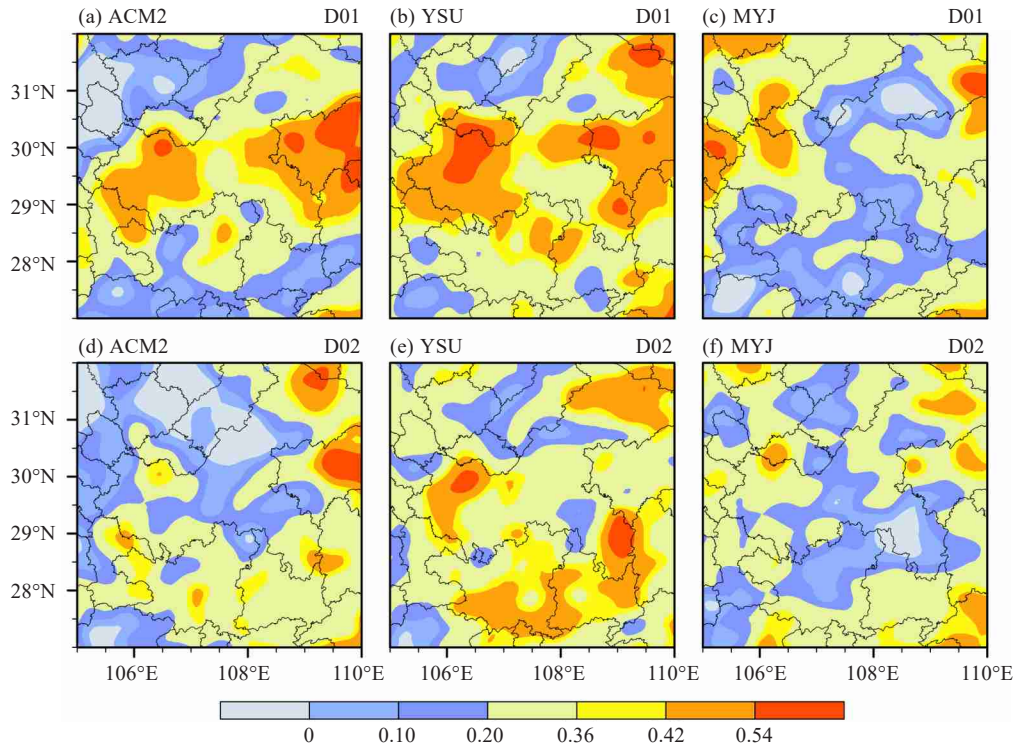


图6 不同方案模式模拟D01(a~c)和D02(d~f)夏季降水年际变化的相关系数空间分布图 0.36、0.42和0.54分别为通过0.10、0.05、0.01显著性检验区。

表2 不同方案模式模拟西南地区东部夏季区域平均降水年际变化相关系数和均方根误差表

区域	参数化方案	相关系数( $R$ )				均方根误差(RMSE)			
		JJA	JUN	JUL	AUG	JJA	JUN	JUL	AUG
D01	ACM2	0.47**	0.28	0.24	0.29	2.16	2.76	2.71	2.72
	YSU	0.55***	0.31	0.23	0.39*	2.41	3.5	2.97	2.62
	MYJ	0.39*	0.05	0.18	0.52**	3.2	4.75	3.09	3.2
D02	ACM2	0.33	0.26	0.03	0.2	1.43	1.76	2.77	2.15
	YSU	0.51**	0.34	0.19	0.44**	1.25	2.03	2.79	1.87
	MYJ	0.36*	-0.06	0.05	0.62***	1.34	2.97	2.61	1.52

注: \*、\*\*和\*\*\*分别为通过0.1、0.05、0.01显著性检验。

对于平均气温的年际变化的模拟(图7):不同方案在D01和D02中模拟技巧相对较高的地区与降水量模拟结果基本一致,因此此处就不再赘述。但是平均气温的模拟技巧明显高于降水量,表现为整个区域的技巧均有提升(图6和图7)。此外,D02中平均气温的模拟技巧高于D01,说明提升模式分辨率可以有效改善平均气温年际变化的模拟能力。对比不同方案之间,无论是D01还是D02,MYJ模拟技巧最高,YSU方案次之,ACM2方案最低。

对于整个西南地区东部区域平均气温可看出

(图略):不同方案在D01中对大部分年份的夏季、7月和8月模拟D01都低于观测,D02高于观测,这与降水量的年际变化情况正好相反;在6月D01和D02大部分年份高于观测。可见提升分辨率后在6—8月均出现了暖偏差。通过统计西南地区东部区域平均气温年际变化的 $R$ 和RMSE可知(表3):无论是整个夏季还是分月上,D01和D02模拟结果总体为MYJ方案相对更好( $R$ 相对更高,RMSE相对更小),可见提升模式分辨率后在不同方案下可以有效改善年际变化模拟技巧,但是降低了区域平均气温的量级模拟技巧。对比降水量和平均

气温的模拟技巧(表 2 和表 3);无论是 D01 和 D02 还是不同方案间,模式对平均气温的年际变化预测技巧均高于降水量( $R$  相对更高, RMSE 相对更

小),但是模拟技巧最高的方案存在差异,降水量为 YSU 方案,平均气温为 MYJ 方案。

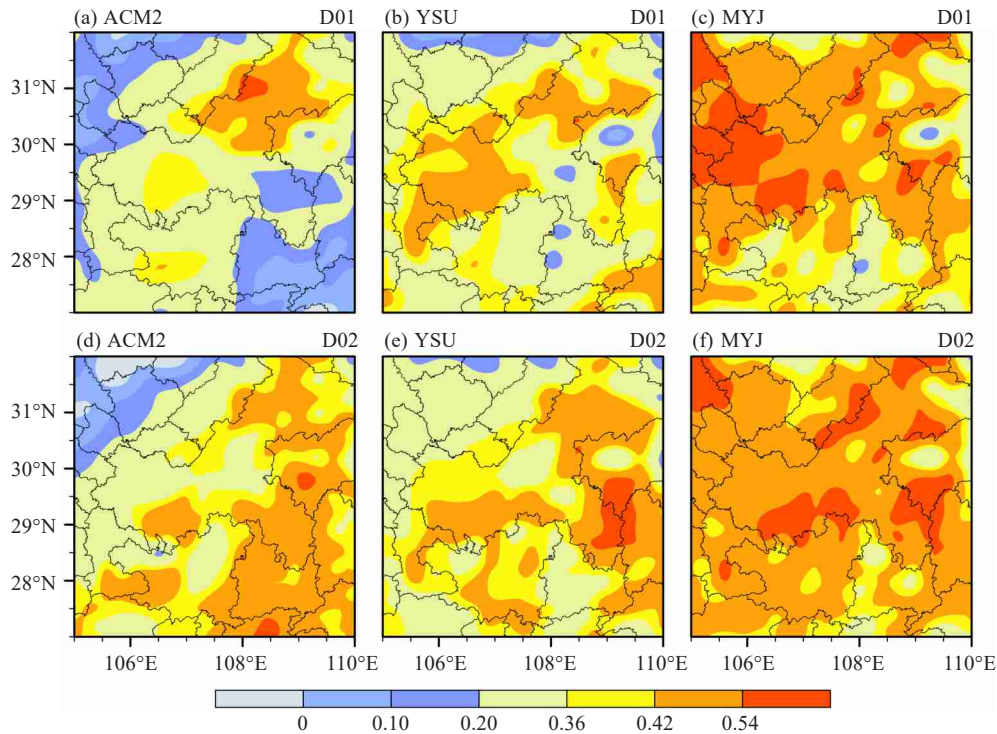


图7 同图 6,但为平均气温

表3 同表 2,但为平均气温

区域	参数化方案	相关系数( $R$ )				均方根误差(RMSE)			
		JJA	JUN	JUL	AUG	JJA	JUN	JUL	AUG
D01	ACM2	0.37*	0.49**	0.3	0.49**	0.84	0.86	1.63	1.45
	YSU	0.45**	0.55***	0.18	0.55***	0.62	0.81	1.02	1.35
	MYJ	0.58***	0.6***	0.22	0.69***	0.63	0.72	0.95	1.24
D02	ACM2	0.45**	0.52**	0.24	0.52**	1.04	1.24	1.62	1.09
	YSU	0.48**	0.57***	0.25	0.59***	1.22	1.44	1.73	1.12
	MYJ	0.62***	0.63***	0.29	0.74***	0.96	1.11	1.5	0.89

注: \*、\*\*和\*\*\*分别为通过0.10、0.05、0.01显著性检验。

## 5 结论与展望

本文利用 WRF 模式,采用了三种边界层物理参数化方案对西南地区东部夏季进行了双重单向嵌套高分辨数值模拟,分析了模式不同嵌套层对夏季降水量和平均气温的多年均值和年际变化模拟能力进行了分析,主要得到以下结论。

(1)对于降水量多年均值的模拟,不同方案在

D01 中基本为湿偏差;D02 中在四川盆地和重庆低海拔地区为干偏差,湿偏差主要位于贵州和重庆的城口、石柱和武隆一带的地形复杂区。总体而言 D01 中 ACM2 方案误差最小,D02 中 MYJ 方案最小。

(2)对于平均气温多年均值的模拟,不同方案在 D01 中除了四川盆地一带为暖偏差(约 0.5 °C 左右)外其余大部地区基本为冷偏差(约 0.5 °C 左右);D02 中大部地区为暖偏差,特别是四川盆地



一带达到了 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以上。总体而言D01和D02中MYJ方案模拟平均气温误差最小,YSU方案最大。

(3)不同方案对降水量和平均气温年际变化的模拟技巧在D01和D02中相对较高的地区均集中在重庆中西部和湖北大部地区。对区域平均年际变化模拟技巧无论是D01还是D02,降水量总体为YSU方案最高,MYJ方案最低,平均气温总体为MYJ方案最高,ACM2方案最低。

边界层参数化方案通过改变大气层结中的温、湿特性进而对气温和降水产生影响,但大气温、湿反馈影响的大尺度环流场同样会对降水量级及落区等产生影响,还需深入研究边界层结构

与气温和降水的物理联系。随着数值天气预报模式的分辨率越来越高,基于现有观测资料虽然显示出模式提升了地形复杂降水降水量级的模拟能力,但是高山区经常会有很大的地形降水,由于这些地区观测资料经常欠缺,该情况是观测资料不确定性还是模式性能问题还需要更精细资料进行分析。此外,能否准确预报次级环流(边界层湍流摩擦作用产生的强迫环流,如高空槽脊、高低空急流等附近都存在一种次级环流,并能产生较为明显的天气现象)也是评判模式性能的重要指标之一。这些都是需要进一步探讨的工作。

## 参 考 文 献:

- [1] JANG X W, YANG S, LI Y Q. Seasonal to interannual prediction of the Asian summer monsoon in the NCEP climate forecast system version 2[J]. *J Climate*, 2013, 26(3): 3 708-3 727.
- [2] KIM H M, WEBSTER P J, CURRY J A. Seasonal prediction skill of ECMWF System 4 and NCEP CFSv2 retrospective forecast for the Northern Hemisphere Winter [J]. *Clim Dyn*, 2012, 39: 2 957-2 973.
- [3] YANG X L, ZHOU B T, XU Y, et al. CMIP6 evaluation and projection of temperature and precipitation over China [J]. *Adv Atmos Sci*, 2021, 38: 817-830.
- [4] LANG Y, YE A Z, GONG W, et al. Evaluating skill of seasonal precipitation and temperature predictions of NCEP CFSv2 forecasts over 17 hydroclimatic regions in China [J]. *J Hydrometeorology*, 2014, 15: 1 546-1 559.
- [5] GIORGI F. Thirty years of Regional Climate Modeling: Where are we and where are we going next? [J]. *J Geophys Res Atmos*, 2019, 124, 5 696-5 723.
- [6] GAO X J, GIORGI F. Use of the RegCM system over East Asia: Review and perspectives [J]. *Engineering*, 2017, 3(5): 766-772.
- [7] 刘燕,王谦,程正泉.我国西南地区夏季降水异常的区域特征[J]. *大气科学学报*, 2002, 25(1): 105-110.
- [8] 马振峰,谭友邦.预测川渝地区汛期降水量的一种物理统计模型[J]. *大气科学*, 2004, 28(1): 138-145.
- [9] 蒋兴文,李跃清,李春,等.四川盆地夏季水汽输送特征及其对旱涝的影响[J]. *高原气象*, 2007, 26(3): 476-484.
- [10] 李永华,徐海明,刘德.2006年夏季西南地区东部特大干旱及其大气环流异常[J]. 2009, *气象学报*, 67(1): 122-132.
- [11] 李永华,徐海明,白莹莹,等.我国西南地区东部夏季降水的时空特征[J]. *高原气象*, 2010, 29(2): 523-530.
- [12] 李永华,徐海明,高阳华,等.西南地区东部夏季旱涝的水汽输送特征[J]. *气象学报*, 2010, 68(6): 932-943.
- [13] 李永华,卢楚翰,徐海明,等.夏季青藏高原大气热源与西南地区东部旱涝的关系[J]. *大气科学*, 2011, 35(3): 422-434.
- [14] 李永华,向波,卢楚翰,等.热带大气季节内振荡对西南地区东部夏季降水的影响及其可能机制[J]. *大气科学*, 2016, 40(2): 437-450.
- [15] 罗小青,杨梅学,王学佳,等.两种积云参数化方案对青藏高原夏季降水影响的模拟[J]. *高原气象*, 2014, 33(2): 313-322.
- [16] 何光碧,彭俊,屠妮妮.基于高分辨率地形数据的模式地形构造与数值试验[J]. *高原气象*, 2015, 34(4): 910-922.
- [17] 潘留杰,张宏芳,王建鹏,等.日本高分辨率模式对中国降水预报能力的客观检验[J]. *高原气象*, 2014, 33(2): 483-494.
- [18] 吴遥,李跃清,蒋兴文,等.WRF模拟青藏高原东南部极端旱涝年降水的参数敏感性研究[J]. *高原气象*, 2017, 36(3): 619-631.
- [19] 叶笃正,李崇银,王必魁. *动力气象学* [M].北京:科学出版社,1988: 138-153.
- [20] 伍荣生. *大气动力学* [M].北京:高等教育出版社,2002: 165-203.
- [21] 沈桐立,田永祥,葛孝贞,等.数值天气预报[M].北京:气象出版社,2003: 303-304.
- [22] HU X M, NIELSEN-Gammon J W, ZHANG F Q. Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2010, 49(9): 1 831-1 844.
- [23] KLEIN C, HEINZELLER D, BLIEFERNICHT J, et al. Variability of West African monsoon patterns generated by a WRF multi-physics ensemble [J]. *Climate Dyn*, 2015, 45(9): 2 733-2 755.

- [24] 王子谦,段安民,吴国雄. 边界层参数化方案及海气耦合对WRF模拟东亚夏季风的影响[J]. 地球科学, 2014, 44(3): 548-562.
- [25] KALA J, ANDRYS J, TOM J, et al. Sensitivity of WRF to driving data and physics options on a seasonal time-scale for the southwest of Western Australia [J]. *Climate Dyn*, 2015, 45(3): 633-659.
- [26] 师春香,潘昶,谷军霞,等. 多源气象数据融合格点实况产品研制进展[J]. 气象学报, 2019, 77(4): 774-783.
- [27] MELLOR G L, YAMADA T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems [J]. *Rev Geophys Space Phys*, 1982, 20(4): 851-875.
- [28] PLEIM J E. A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part I: Model description and testing [J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2007, 46: 1 383-1 395.
- [29] HONG S Y, LIM J J. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6) [J]. *Korean Meteorol Soc*, 2006, 42: 129-151.
- [30] 李娟. 四川盆地夜雨的时空变化特征及形成机理研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021: 58-78.

## Sensitivity Analysis of Different Boundary Layer Parameterization Schemes in High-Resolution Climate Simulation over East of Southwestern China

WU Yao<sup>1</sup>, TANG Hongyu<sup>1</sup>, JIANG Xingwen<sup>2</sup>, DONG Xinning<sup>1</sup>

(1. Chongqing Climate Center, Chongqing 401147, China;

2. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration/ Heavy Rain and Drought-Flood Disaster in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** To further assess and enhance the capabilities of regional models for high-resolution climate simulation in the east of Southwestern China (ESWC), the present study investigated two nested simulations (with D01 as the outer domain and D02 as the inner domain) of summer rainfall and temperature over the ESWC from 1998 to 2019. These simulations were conducted using the Weather Research and Forecasting (WRF) model coupled with various boundary layer parameterization schemes. The findings indicated that different parameterization schemes can lead to biases in the simulated mean annual rainfall. Specifically, the D01 domain exhibited a noticeable wet bias, while the D02 domain showed a dry bias in the Sichuan Basin and the lower altitudes of Chongqing. A wet bias was predominantly found in the complex terrain areas of Chengkou, Shizhu and Wulong in Chongqing, as well as in Guizhou. Overall, the YSU scheme in D01 and the MYJ scheme in D02 demonstrated the smallest bias in rainfall simulations. Regarding temperature simulations, a noticeable warm bias was present in D01 for the Sichuan Basin, with a cold bias in other areas. In D02, a warm bias was observed for most regions. The MYJ scheme exhibited the least bias, while the YSU scheme showed the greatest bias in both domains. The WRF model skillfully reproduced the interannual variability of rainfall and temperature in the midwest of Chongqing and most of Hubei. The YSU scheme outperformed others in rainfall simulation, while the MYJ scheme excelled in temperature simulation. These results suggest that the choice of an optimal scheme may vary depending on the meteorological parameter of interest, especially after model resolution is enhanced to the convective scale. Therefore, it is crucial to select the most suitable local scheme based on operational requirements.

**Key words:** East of Southwest China; WRF model; boundary layer parameterization scheme