

于丽娟,尹承美,林应超,等. 中国区域近地面风速动力降尺度研究[J]. 干旱气象,2017,35(1):23-28, [YU Lijuan, YIN Chengmei, LIN Yingchao, et al. Study of Dynamical Downscaling on Near Surface Wind Speed over China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(1):23-28], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-01-0023

中国区域近地面风速动力降尺度研究

于丽娟¹,尹承美¹,林应超²,何建军³

(1. 山东济南市气象局,山东 济南 250002;2. 南开大学环境科学与工程学院,天津 300071;
3. 中国气象科学研究院,灾害天气国家重点实验室/中国气象局大气化学重点开放实验室,北京 100081)

摘要:利用2006年NCEP FNL再分析资料和气象站点观测资料,评估中国区域近地面风速WRF动力降尺度效果。结果表明:WRF模式显著高估近地面风速,在风速较大(小)的区域,WRF模式低(高)估了近地面风速;春季和冬季WRF模式模拟的近地面风速误差较大,夏季和秋季模拟的风速误差相对较小;西北干旱区、青藏高原和华南地区WRF模式模拟的风速误差较大,其他地区风速误差相对较小;3种边界层参数化方案(YSU、MYJ和ACM2)中ACM2方案模拟的风速偏差最小。

关键词:动力降尺度;风速;WRF模式;风能评估

文章编号:1006-7639(2017)-01-0023-06 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-01-0023

中图分类号:P456.7

文献标识码:A

引言

再分析资料和全球气候模式(GCM)资料能准确描述大尺度环流和气候特征^[1-2],但由于其空间分辨率低,不能准确描述区域或局地环流和气候特征。在区域和局地气候研究、风能评估、水文陆面模型、陆面数据资料同化系统等领域,需要高分辨率的气象变量信息。目前降尺度方法是链接低分辨率气象资料到高分辨率气象资料的桥梁^[3]。降尺度主要有3种方法:发展更高分辨率的GCM;借助区域气候模式(RCM)的动力降尺度;发展统计降尺度技术^[4]。GCM的计算量较大,限制了其分辨率的提高。统计降尺度方法是利用不同尺度间物理量关系估计中小尺度物理量属性^[5],计算量少,缺点是缺少物理基础,气候变化时观测的这种关系会发生变化^[6]。基于RCM的动力降尺度方法物理意义明确,随着RCM和计算能力的发展,动力降尺度方法应用将会越来越广泛。

RCM能更准确地描述陆面信息的水平非均一性,进而能较好地模拟局地环流和气候特征。WRF(Weather Research & Forecasting)模式包括多种物

理参数化选项,再分析资料、GCM或天气预报模式资料均可作为WRF模式驱动场,使WRF模式成为应用较广的区域气候模式之一。基于WRF模式的动力降尺度研究主要集中在以下几方面:评估基于WRF模式的动力降尺度模拟效果^[7];评估WRF模式不同分辨率下的模拟差异^[8];不同物理参数化方案对模拟结果的影响^[9-10];采用集合预报方法,包括初始场扰动^[11]和采用不同的初始场资料^[12],研究其对WRF模式模拟的影响;陆面初始条件(如土壤温湿度和海面温度)对WRF模式模拟的影响^[13];资料同化对WRF模式模拟的改进^[14];大尺度环流对WRF模式模拟的影响^[15-16]。

在风能资源评估、区域和局地环流、空气质量数值模拟等研究领域需要高时空分辨率的风场资料。数值模拟是获得高分辨率风场资料的重要方法。研究人员对数值模式模拟风场效果进行了大量研究。王澄海等^[17]通过WRF模式对西北地区1月和4月的风速进行模拟并检验了模式的模拟效果,结果表明WRF模式在风场模拟上具有较好的性能;王万平等^[18]利用WRF模式模拟田湾核电站区域风

收稿日期:2016-07-07;改回日期:2016-09-10

基金项目:国家自然科学基金(41475038)、山东省气象局预报员专项项目(SDYBY2014-15)和中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室开放基金(LPCC201405)共同资助

作者简介:于丽娟(1983-),女,山东泰安人,工程师,硕士,主要从事短期预报和中尺度数值模拟研究。E-mail:yulijuan520520@163.com

通讯作者:何建军(1983-),江苏如东人,助理研究员,博士,主要从事中尺度数值模拟与大气环境研究。E-mail:hejianjun@cma.gov.cn

场并与实测资料进行比较,发现模式能较准确地预测三维风场;王文勇等^[19]研究发现 WRF 模式模拟复杂地形区风场存在较大偏差;邹振操等^[20]评估了不同地形资料对 WRF 模式模拟风场的影响,发现采用更高精度的地形资料后 WRF 模式模拟的近地面风速均有小幅改善;Jiménez 等^[21]研究了复杂地形去次网格地形参数化对 WRF 模式模拟近地面风场的影响,发现 WRF 低估了风速的极值,采用次网格地形参数化可以一定程度改进风场的模拟。综合而言,WRF 模式能基本模拟出风场变化特征,在不同区域模拟风场的准确率存在一定差异。

以往评估中尺度模式模拟风场的研究一般模拟时段较短,区域较小,因此有必要综合评估中国区域不同季节中尺度模式模拟风场的性能。本文利用 WRF 模式对 2006 年中国区域 NCEP FNL 再分析资料(以下简称 FNL 资料)进行动力降尺度,并利用站点观测资料评估 WRF 模式模拟近地面风场的性能。

1 资料和方法

1.1 WRF 模式设置

WRF 模式系统开发始于 20 世纪 90 年代后期,是美国国家大气科学研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)、国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)等多个部门联合开发的新一代高分辨率中尺度预报模式和资料同化系统,分为 ARW (Advanced Research WRF) 和 NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model) 2 个动力核,是目前世界上使用最广泛的中尺度数值模式之一,本文使用的是 WRF - ARW V3.3。

WRF 模式提供多种物理参数化选项,本文选用的物理参数化方案包括:WSM6 (WRF Single - Moment 6 - class) 微物理参数化方案^[22]、K - F 积云参数化方案^[23]、RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) 长波辐射参数化方案^[24]、Dudhia 短波辐射参数化方案^[25]、YSU 边界层参数化方案^[26]、Noah 陆面参数化方案^[27]。

Heikkila 等^[28]利用 WRF 降尺度到 10 km 研究挪威区域气候,与 ERA - 40 再分析资料相比,WRF 模式改进了平均气候和极端事件的模拟。本文采用两重单向嵌套,中心经纬度为 103.8°E、36.1°N,水平分辨率分别是 30 km 和 10 km,模拟区域分别为 209 × 179 和 508 × 415 格点,第二重嵌套覆盖中国大陆及周边地区(图 1)。模式垂直方向分为 35 层,2 km 以下分 16 层,顶层气压为 50 hPa,积分时间步

长为 150 s,模拟时段是 2006 年。

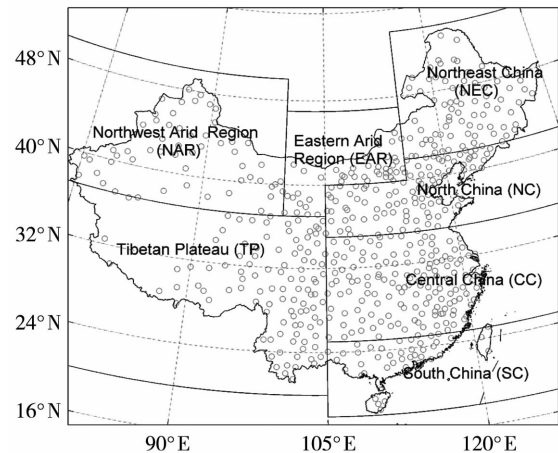


图 1 模式模拟的第二重嵌套区域和气象站点位置
Fig. 1 WRF model domain in D02 and the location of weather stations

驱动场(包括再分析资料或 GCM 资料等)为 RCM 提供初始场、侧边界条件和表面初始场(如土壤温湿度和海表温度)。降尺度时通过初始场和侧边界条件强迫 RCM,将驱动场天气背景信息传递到 RCM 模拟结果。当模拟区域较大或者模拟时段较长时,RCM 模拟的天气形势可能与驱动场天气形势有所偏差。确保 RCM 模拟结果与驱动场天气形势一致的方法包括分段模拟、分析 Nudging 法、谱 Nudging 法以及尺度选择偏差校正^[15]。Otte 等^[16]研究结果显示分析 Nudging 法可以改进 2 m 气温的平均值和极值的模拟,分析 Nudging 法保留了驱动场大尺度变化特征的同时调整了小尺度变化特征。当模式分辨率和驱动场分辨率差异较小时,分析 Nudging 法效果较好^[29]。本文采用分析 Nudging 法进行模拟以提高 WRF 模式的模拟效果,利用 FNL 资料作为 WRF 模式模拟的驱动场,FNL 资料水平分辨率是 1°,时间间隔为 6 h。

1.2 陆面资料

陆面资料是数值模式的重要输入数据,其中部分资料(如植被覆盖)是动态变化的,陆面资料的准确性直接影响数值模式对陆面过程和区域气候的模拟。气候波动也会反作用于陆面过程参数,如反照率、粗糙度等^[30]。在动力降尺度模拟研究局地 and 区域气候时,较少研究考虑了陆面资料精度及下垫面特征年际变化对模拟区域气候特征的影响。WRF 模式需要的陆面资料包括地形、土地利用、植被覆盖度、土壤类型,这些陆面资料直接决定了反照率、发射率、粗糙度、叶面积指数、植被根深、植被阻抗、土壤孔隙率、土壤热传导率等陆面参数,对模拟结果有

重要影响^[31-32]。准确的陆面资料对提高 WRF 模式模拟近地面乃至整个边界层气象场至关重要,然而在中国地区 WRF 模式默认的陆面资料精度较低,且时效性不好^[33-34]。随着遥感资料增多和资料精度的提高,采用高精度陆面资料提高数值模式模拟性能成为可能。本文采用的陆面资料包括 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 地形、2006 年 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 土地利用、基于 2006 年 MODIS NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 的植被覆盖度和 HWSD (Harmonized World Soil Database) 土壤类型资料。先前的研究已经评估了不同陆面资料对 WRF 模式模拟的影响^[35],本文将评估近地面风速的降尺度效果。

1.3 模式评估

很多动力降尺度模拟研究将模式模拟结果与观测格点资料进行比较^[9-10,14,36],然而一方面很多观测格点分辨率较低^[37-38],不能较好地描述区域和局地气候特征,另一方面站点资料插值到格点时会丢失一些局地信息,因此本文用站点观测资料评估 WRF 模式的模拟结果。WRF 模式直接输出的物理量包括 10 m 风速,通过比较站点观测风速与距离站点最近格点的模拟风速评估 WRF 模式模拟风速的准确率。

使用的观测资料是日平均 10 m 风速,该资料由中国气象局提供的 MICAPS 地面观测资料处理得到。MICAPS 资料每日 8 次地面常规观测(00、03、06、09、12、15、18、21 时,UTC,下同),部分站点仅在白天进行观测。用每日 00、06、12 和 18 时 4 个时次观测值计算日平均 10 m 风速。气象站点分布如图 1 所示,共计 559 个观测点。不同地区再分析资料的准确率和 WRF 模式模拟性能存在一定差异^[2,39]。根据地形和区域气候特征,将中国分成 7 个子区域(图 1)评估不同地区 WRF 模式动力降尺度模拟的质量,分区与 Yu 等^[36]的分区一致。

采用相关系数(R)、平均偏差(MB)、均方根误差(RMSE)、标准差(STD)4 个统计参数评估 WRF 模式模拟风速的性能,统计参数公式如下所示:

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (1)$$

$$MB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i) \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2} \quad (3)$$

$$STD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

上式中, F 和 O 分别是模拟和观测值, \bar{F} 和 \bar{O} 分别是模拟和观测平均值, x_i 表示观测或模拟值, \bar{x} 表示观测或模拟平均值, N 为样本数。

2 结果分析

图 2 是观测和模拟的 2006 年中国区域平均 10 m 风速比较。WRF 模式模拟和观测的区域平均风速时间相关系数为 0.90,说明 WRF 模式能准确地模拟风速的逐日变化特征。从图 2 可以看出,2006 年中国区域观测平均风速为 $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,WRF 模式模拟的平均风速为 $3.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,较观测风速高 68%。方差分析结果显示 WRF 模式模拟的风速显著偏高。从季节来看,春季和冬季 WRF 的模拟风速偏差较大,而夏季和秋季模拟风速偏差相对较小。先前的研究也发现不同区域 WRF 模式模拟的风速偏大,如马晨晨等^[40]采用 NCEP 和 EAR 资料作为驱动场评估 WRF 模式模拟夏季平凉地区气象场的准确率,发现模拟的近地面风速偏高 $0.83 \sim 0.92 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;何建军等^[33]分析不同陆面资料对 WRF 模式模拟兰州地区冬季近地面气象场的影响,发现 WRF 模式模拟的近地面风速偏高 $0.4 \sim 0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;顾沈旦等^[41]利用自动气象站资料评估 WRF 模式模拟济南地区夏季气象场的准确率,发现模拟风速偏高 $1.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。标准差用于描述物理量的波动幅度,观测和模拟的区域平均风速的标准差分别是 0.38 和 $0.66 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,说明 WRF 模式模拟的风速逐日变化幅度大于观测值的逐日变化幅度。造成 WRF 模式模拟近地面风速误差的可能原因主要包括:未考虑地形次网格参数化方案对风场的影响导致 WRF 模拟风速偏大^[42];YSU 边界层参数化方案模拟的湍流混合偏强,进而

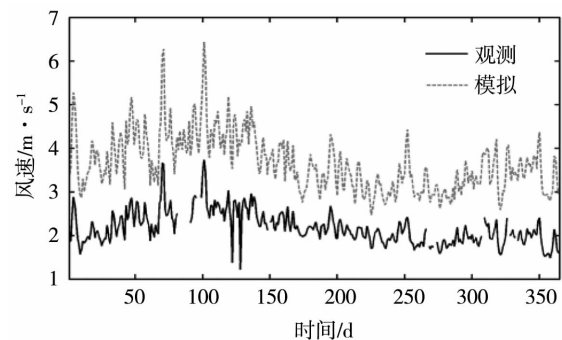


图 2 2006 年中国区域观测和 WRF 模式模拟的日平均 10 m 风速比较

Fig. 2 The comparison of regional daily average 10 m wind speed over China observed and simulated by WRF in 2006

导致 WRF 模式高估近地面风速^[43];通过比较 FNL 资料近地面平均风速和观测平均风速,发现 FNL 资料近地面风速偏高 33%,驱动场风速偏高可能导致 WRF 模式高估近地面风速。

图 3 是 WRF 模式模拟的中国区域平均风速及偏差的空间分布。模拟和观测的近地面风速空间相关系数为 0.52,通过 $\alpha=0.05$ 显著性水平的 t 检验,说明 WRF 模式能基本模拟风速的空间分布特征。近地面风速的分布存在显著的区域特征,中国西部大部分区域风速较大,而东部地区大部分区域风速相对较小。地形、地表植被覆盖和海陆分布是影响风速分布的主要因子,高原和山区风速较平原和盆地大,植被覆盖度低的地区(如沙漠)较植被覆盖度高的地区(如东南沿海)风速大,沿海地区(如华东沿海)较内陆地区(如华东内陆)风速大。Heik-

kila 等^[28]指出 WRF 模式模拟的沿海地区风速偏低,而模拟的内陆地区风速偏高,但这里未发现该现象。在 559 个观测站中,17 个站点 WRF 模式模拟的风速偏低,其中仅 5 个站点风速的平均偏差(MB) $< -1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,说明 WRF 模式模拟的近地面风速存在明显的系统偏差。为进一步分析 WRF 模式模拟的风速误差特征,图 4 列出 WRF 模式模拟风速平均偏差(MB)与观测风速的关系。可以发现风速偏差与平均风速的相关性较高,在大(小)风速区 WRF 模式模拟的风速偏低(高)。平均风速在 $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时风速偏差较小, $> 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时 WRF 模拟风速明显偏低。说明 WRF 模式低估了风速的空间变化,这与 Jiméneez 等^[21]的模拟结果一致。采用线性回归分析发现风速每增加 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,模拟的风速平均偏差(MB)减小 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

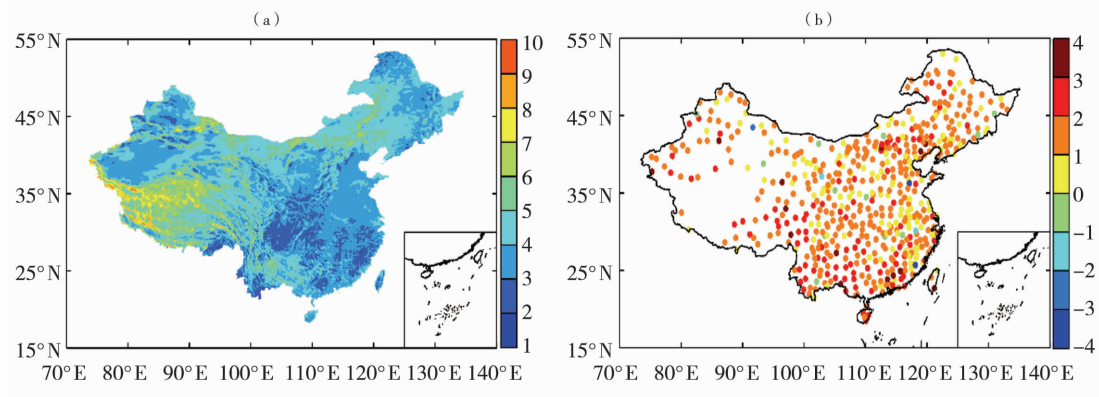


图 3 WRF 模式模拟的 2006 年平均 10 m 风速(a)和 10 m 风速偏差(b)的空间分布(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 3 The spatial distributions of annual average 10 m wind speed simulated by WRF (a) and the mean bias of 10 m wind speed (b) over China in 2006 (Unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

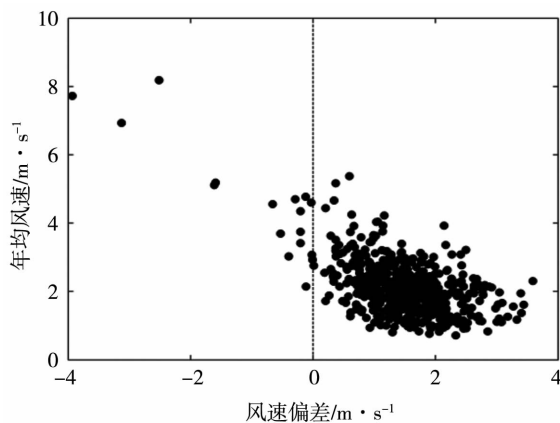


图 4 WRF 模式模拟的年均 10 m 风速偏差与观测的年均 10 m 风速散点图

Fig. 4 The scatter diagram of the mean bias of annual average 10 m wind speed simulated by WRF vs the observed annual average 10 m wind speed

均方根误差(RMSE)反映模式预报的综合误差水平,图 5 给出中国区域及各子区域 WRF 模式模拟近地面风速的 RMSE。WRF 模式模拟的近地面风速误差在春季和冬季相对较大, RMSE 均为 $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;秋季风速误差次之, RMSE 为 $1.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;夏季风速误差最小, RMSE 为 $1.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从区域差异来看,风速的 RMSE 最大值出现在中国南部(SC),其次依次为青藏高原(TP)、西北干旱区(NAR)、中东部地区(CC)、东北(NEC)、华北(NC)和干旱区东部(EAR), RMSE 最大值是最小值的 1.4 倍。复杂地形是造成 WRF 模式模拟风速误差的重要因子。风速的 RMSE 季节差异在 TP 地区最大(冬季风速 RMSE 是夏季风速 RMSE 的 1.5 倍),其次依次为 SC、CC、NC、NEC、EAR 和 NAR,即干旱区 WRF 模式模拟的风速误差季节差异很小,而青藏高原和我国南方地区 WRF 模式模拟风速误差的季节差异相对较大。

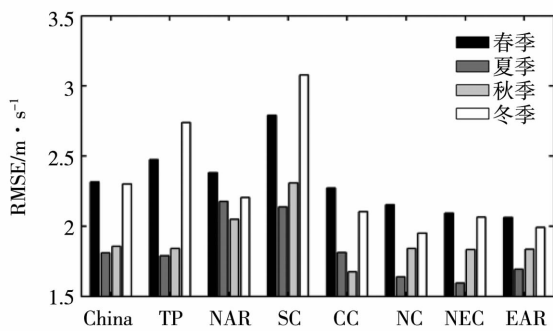


图5 中国区域和7个子区域WRF模式模拟的2006年10 m风速均方根误差(RMSE)
Fig. 5 The RMSE of 10 m wind speed simulated by WRF in China and seven sub-regions in 2006

边界层参数化方案是影响边界层气象要素模拟的重要因素,如张碧辉等^[43]利用WRF模式研究了MYJ和YSU边界层参数化方案对气象场模拟的影响,发现YSU方案模拟的边界层顶卷挟和边界层内混合作用偏强;张龙等^[44]利用WRF模式模拟研究了YSU、MYJ和ACM2边界层参数化方案对兰州地区近地面气象场的影响,发现MYJ边界层方案对于低层风、温的模拟结果明显优于YSU和ACM2方案。为进一步分析模拟的10 m风速影响因素,采用3种边界层参数化方案(YSU、MYJ和ACM2)模拟2006年7月的气象场,并比较不同参数化方案对10 m风速模拟的影响(图6)。YSU、MYJ和ACM2边界层参数化方案模拟的10 m风速均偏高,高估比率分别为55%、64%和44%。YSU、MYJ和ACM2模拟区域平均的日均风速与观测值的时间相关系数分别为0.91、0.91和0.92。ACM2方案模拟风速偏差最小,同时能更准确模拟风速的时间变化趋势。

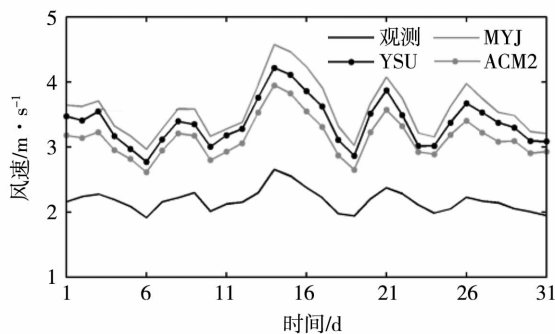


图6 不同边界层参数化方案模拟的中国区域2006年7月10 m风速与观测值的比较
Fig. 6 Observed and simulated 10 m average wind speed in July of 2006 over China from three boundary layer parameterization schemes

3 结论

(1) 2006年中国区域观测的平均风速为 $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, WRF模式模拟平均风速为 $3.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,较观测风速高68%。方差分析结果显示WRF模式模拟的风速显著偏高。风速偏差与风速的大小关系紧密,风速每增加 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,模拟风速的平均偏差减小 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在风速较大(小)的区域,WRF模式低(高)估了近地面风速。

(2) WRF模式模拟风速性能存在明显的季节和区域差异。春季和冬季WRF模拟近地面风速误差较大,秋季次之,夏季误差最小。从区域差异来看,西北干旱区、青藏高原和华南地区WRF模拟风速误差较大,其他地区风速误差相对较小。

(3) 边界层参数化方案是影响近地面风速模拟的重要因素,3种边界层参数化(YSU、MYJ和ACM2)方案中ACM2方案模拟风速偏差最小,YSU次之,MYJ方案模拟风速偏差最大。

参考文献

- [1] 赵天保,艾丽坤,冯锦明. NCEP再分析资料和中国站点观测资料的分析与比较[J]. 气候与环境研究, 2004, 9(2): 278-294.
- [2] 徐影,丁一汇. 美国NCEP/NCAR近50年全球再分析资料在我国气候变化研究中可信度的初步分析[J]. 应用气象学报, 2001, 12(3): 337-347.
- [3] Wilby R L, Dawson C W, Barrow E M. SDSM - A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts[J]. Environmental Modelling & Software, 2002, 17(2): 147-159.
- [4] 刘永和,郭维栋,冯锦明,等. 气象资料的降尺度方法综述[J]. 地球科学进展, 2011, 26(8): 837-847.
- [5] Fowler H J, Blenkinshop S, Tebaldi C. Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modeling[J]. International Journal of Climatology, 2007, 27(12): 1547-1578.
- [6] Winkler J A, Palutikof J P, Andresen J A, et al. The simulation of daily temperature time series from GCM output: Part II: Sensitivity analysis of an empirical transfer function methodology[J]. Journal of Climate, 1997, 10(10): 2514-2532.
- [7] Pan X D, Li X, Shi X K, et al. Dynamic downscaling of near-surface air temperature at the basin scale using WRF - a case study in the Heihe river basin, China[J]. Frontiers of Earth Science, 2012, 6(3): 314-323.
- [8] Soares P M M, Cardoso R M, Miranda P M A, et al. WRF high resolution dynamical downscaling of ERA-Interim for Portugal[J]. Climate Dynamics, 2012, 39(9-10): 2497-2522.
- [9] Mooney P A, Mulligan F J, Fealy R. Evaluation of the sensitivity of the weather research and forecasting model to parameterization schemes for regional climates of Europe over the period 1990-95[J]. Journal of Climate, 2013, 26(3): 1002-1017.
- [10] Yuan X, Liang X Z, Wood E F. WRF ensemble downscaling seasonal forecasts of China winter precipitation during 1982-2008

- [J]. *Climate Dynamics*, 2012,39(7-8):2041-2058.
- [11] Palmer T N, Doblus - Reyes F J, Hagedorn R, et al. Development of a European multimodel ensemble system for seasonal - to - interannual prediction (DEMETER)[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004,85(6):853-872.
- [12] Wang B, Yang H W. Hydrological issues in lateral boundary conditions for regional climate modeling: simulation of east Asian summer monsoon in 1998[J]. *Climate Dynamics*, 2008,31(4):477-490.
- [13] Koster R D, Mahanama S P P, Yamada T J, et al. Contribution of land surface initialization to subseasonal forecast skill: first results from a multi - model experiment[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010,37(2):L02402.
- [14] Xu J J, Powell Jr A M. Dynamical downscaling precipitation over Southwest Asia: impacts of radiance data assimilation on the forecasts of the WRF - ARW model[J]. *Atmospheric Research*, 2012(111):90-103.
- [15] Bowden J H, Nolte C G, Otte T L. Simulating the impact of the large - scale circulation on the 2 - m temperature and precipitation climatology[J]. *Climate Dynamics*, 2013,40(7-8):1903-1920.
- [16] Otte T L, Nolte C G, Otte M J, et al. Does nudging squelch the extremes in regional climate modeling[J]. *Journal of Climate*, 2012,25(20):7046-7066.
- [17] 王澄海,胡菊,靳双龙,等. 中尺度 WRF 模式在西北西部地区低层风场模拟中的应用和检验[J]. *干旱气象*,2011,29(2):161-167.
- [18] 王万平,何曼丽,陆继根,等. 基于 WRF 与田湾核电站外围检测系统的区域气象模拟对比分析[J]. *环境监测与预警*,2014,6(3):7-12.
- [19] 王文勇,陈楠. 山区风场的 WRF/CALMET 模式模拟[J]. *西南交通大学学报*,2010,45(6):990-996.
- [20] 邹振操,邓院昌. 三种地形数据下 WRF 模式风场模拟对比试验研究[J]. *水电能源科学*,2015,33(1):204-206.
- [21] Jiménez P A, Dudhia J. Improving the representation of resolved and unresolved topographic effects on surface wind in the WRF model[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011,51:300-316.
- [22] Hong S Y, Lim J O J. The WRF Single - Moment 6 - Class Microphysics Scheme[J]. *Journal of the Korean Meteorological Society*, 2006,42(2):129-151.
- [23] Kain J S. The Kain - Fritsch convective parameterization: An update[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2004,43(1):170-181.
- [24] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated - k model for longwave[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997,102(D14):16663-16682.
- [25] Dudhia J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two - dimensional model [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1989,46(20):3077-3107.
- [26] Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes[J]. *Monthly Weather Review*, 2006,134(9):2318-2341.
- [27] Chen F, Mitchell K, Schaake J, et al. Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996,101(3):7251-7268.
- [28] Heikkila U, Sandvik A, Sorteberg A. Dynamical downscaling of ERA - 40 in complex terrain using the WRF regional climate model [J]. *Climate Dynamics*, 2011,37(7-8):1551-1564.
- [29] Stauffer D R, Seaman N L. Multiscale four - dimensional data assimilation[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1994,33(3):416-434.
- [30] 张强,李宏宇,张立阳,等. 陇中黄土高原自然植被下垫面陆面过程及其参数对降水波动的气候响应[J]. *物理学报*,2013,62(1):190-201.
- [31] Hong S, Lakshmi V, Small E E, et al. Effects of vegetation and soil moisture on the simulated land surface processes from the coupled WRF/Noah model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009,114(D18):D18118.
- [32] 何建军,余晔,陈晋北,等. 植被覆盖度对兰州地区气象场影响的模拟研究[J]. *高原气象*,2012,31(6):1611-1621.
- [33] 何建军,余晔,刘娜,等. 复杂地形区陆面资料对 WRF 模式模拟性能的影响[J]. *大气科学*,2013,38(3):484-498.
- [34] 于丽娟,尹承美,何建军,等. 植被覆盖度算法对中国区域 WRF 模拟的影响[J]. *高原气象*,2015,34(3):714-721.
- [35] He J J, Yu Y, Yu L J, et al. Impacts of uncertainty in land surface information on simulated surface temperature and precipitation over China[J]. *International Journal of Climatology*, 2017. doi: 10.1002/joc.5041.
- [36] Yu E T, Wang H J, Sun J Q. A quick report on a dynamical downscaling simulation over China using the nested model[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2010,3(6):325-329.
- [37] Xie P P, Yatagai A, Chen M Y, et al. A gauge - based analysis of daily precipitation over east Asia[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2007,8(3):607-626.
- [38] Xu Y, Gao X J, Shen Y, et al. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009,26(4):763-772.
- [39] 董俊玲,韩志伟,张仁健,等. WRF 模式对中国城市和半干旱地区气象要素的模拟检验和对比分析[J]. *气象科学*,2011,31(4):484-492.
- [40] 马晨晨,余晔,何建军,等. 黄土高原地区两种再分析资料的模拟效果分析[J]. *高原气象*,2014,33(3):698-711.
- [41] 顾沈旦,于丽娟,尹承美,等. WRF 模式对济南地区夏季近地面气象场模拟效果评估[J]. *气象与环境学报*,2016,32(1):1-8.
- [42] 马晨晨,余晔,何建军,等. 次网格地形参数化对 WRF 模式在复杂地形区风场模拟的影响[J]. *干旱气象*,2013,31(1):96-105.
- [43] 张碧辉,刘树华,Liu H P,等. MYJ 和 YSU 方案对 WRF 边界层气象要素模拟的影响[J]. *地球物理学报*,2012,55(7):2239-2248.
- [44] 张龙,张镭,王颖,等. 基于 WRF 不同边界层方案的黄土高原丘陵冬季地面气象要素日变化模拟分析[J]. *干旱气象*,2012,30(2):158-168.

