

董旭光,孟祥新,伯忠凯,等. 山东高分辨率风能资源分布特征的数值模拟研究[J].海洋气象学报,2019,39(2):117-125.
DONG Xuguang, MENG Xiangxin, BO Zhongkai, et al. Numerical simulation of distribution characteristics of high resolution wind energy resources in Shandong[J].Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(2):117-125. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.02.012. (in Chinese)

山东高分辨率风能资源分布特征的数值模拟研究

董旭光,孟祥新,伯忠凯,邱燊,李娟

(山东省气候中心,山东 济南 250031)

摘要: 基于WRF3.8.1数值模式,利用FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料,对山东边界层10 m、70 m、100 m等高度2017年风场进行了逐日动力降尺度模拟,使用山东122个气象站逐日平均风速,对模拟结果进行了客观评估。结果表明:WRF模式可以较好地模拟出山东逐日平均风速变化特征,但模拟值普遍大于实测值,山东不同区域平均风速模拟效果差异较大,四季误差分析结果与全年略不同;山东沿海、半岛北部丘陵、崂山、日照中部五莲山、鲁中山区各山脉等区域以及微山湖、东平湖等大型湖泊区域年和四季10 m、70 m、100 m高度平均风速、平均风功率密度较大,大汶河、大清河、泗水河、沂河及其支流、淄河、潍河等流域中上游的山区间低矮平原地带较小,但各地风能资源的差异随高度增加而明显减小。平均风速、平均风功率密度时空分布结果可为山东内陆地区分散式低速风电场的选址、风能资源开发利用提供参考。

关键词: WRF模式; 平均风速; 平均风功率密度; 时空分布; 山东

中图分类号: P425.63 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)02-0117-09

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.02.012

Numerical simulation of distribution characteristics of high resolution wind energy resources in Shandong

DONG Xuguang, MENG Xiangxin, BO Zhongkai, QIU Can, LI Juan

(Shandong Climate Center, Jinan 250031, China)

Abstract Based on WRF3.8.1 and NCEP FNL data ($1^\circ \times 1^\circ$), a day-by-day dynamic downscaling simulation of the land boundary layer wind field at 10 m, 70 m, and 100 m in Shandong in 2017 is carried out. According to the daily mean wind speed of 122 weather stations in Shandong during the same period, the simulation results are evaluated. The results show that WRF model can soundly simulate the daily mean wind speed variations in Shandong, while the simulation value is generally larger than the measured value. The accuracy of simulation results of mean wind speed in different regions of Shandong shows obvious differences, and the characteristics of simulation error of each season are slightly different from those of the whole year. The yearly and seasonal mean wind speed and the annual mean wind power density at various heights are larger in the coastal areas of Shandong, the hills to the north of the peninsula, Mount Lao, Wulian Mountain in the central part of Rizhao, the central mountain area of Shandong, and large lakes such as Weishan Lake and Dongping Lake. The annual mean wind speed is relatively small in the low-lying plain areas of the middle and upper reaches of Dawen River, Daqing River, Si River, Yi River and its tributaries, Zi River, and Wei River. The differences of wind energy

收稿日期:2018-01-31; 修订日期:2018-10-12

基金项目:环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM201611);公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306034)

作者简介:董旭光,男,硕士,高级工程师,主要从事气候变化和气候应用研究等工作,dongxugg@sina.com。

resources in different regions decrease with the increase in height. The spatial and temporal distribution of annual and seasonal wind power density at different heights can provide reference for the site selection of the decentralized wind farm of low wind speed and the exploitation of wind energy resources in inland regions of Shandong.

Key words WRF model; mean wind speed; mean wind power density; spatial and temporal distribution; Shandong

引言

随着科技的日益发展,人们生活水平的提高,人类对能源的需求也越来越多。目前人类使用的能源主要来源于煤炭、石油和天然气等不可再生资源,在未来的发展中受限于这些资源的储量及可能导致的环境恶化,使用清洁的可再生能源日益受到人们的重视。风电作为环保清洁的可再生资源,是当今世界新能源开发中技术最成熟、最具规模开发条件和商业化发展前景的发电方式,并得到广泛的开发和应用^[1]。2016年,全球风电累计装机达到4.9亿kW,新增装机达到5460万kW,中国新增装机容量2337万kW(未统计台湾地区数据),累计装机容量达到1.69亿kW,风机装机规模连续8年位居全球首位^[2]。

国内外风能资源评估主要基于实测风资料或数值模拟,使用气象站或测风塔等观测资料进行的风能资源评估存在明显的局限性,研究表明,全球大部分地区^[3]气象站观测风速明显减小,其主要原因之一是受国民经济快速发展影响,大部分城市面积急剧扩张,城市区域土地利用类型改变导致下垫面粗糙度增加,使得当地气象站测风环境发生改变,导致城市区域的风速显著减小。而风能资源的开发利用多位于人类活动影响较小的山区、丘陵等乡村地区,使用气象站测风数据会显著低估当地风能资源实际特征。同时,气象站分布较稀疏,站与站间的距离达几十千米甚至上百千米,气象站测风高度为10m,而风电场更多关注风机轮毂高度(70m或更高)的风速,如果建立测风塔,需要耗费大量的人力、物力,且测风塔分布密度太稀疏又需要至少观测一年^[4]。

随着再分析数据和全球气候模式资料增多,为大范围的风能资源时空分布研究提供了基础数据,这些资料能准确地描述大尺度环流和气候特征^[5],但由于其空间分辨率低,不能准确描述区域或局地环流特征,尤其是风速,其时空变化受下垫面影响显著,对于复杂的山地、丘陵地区,再分析资料不能

详细刻画风速随地形的变化,这就需要发展高时空分辨率的全球气候模式,但受计算和储存量限制,全球高时空分辨率的再分析数据较难实现。因此,在研究缺乏现场观测地区的风能资源时,需要将再分析数据降尺度到更高的时空分辨率上。目前降尺度方法主要有统计降尺度和动力降尺度方法^[6],统计降尺度是利用不同尺度间的物理关系估算中小尺度物理量属性,其计算量小,但缺乏物理基础^[7]。区域气候模式物理意义明确,通过对再分析数据或全球气候模式数据的动力降尺度,可直接获得轮毂高度处的风速,且时空分辨率高,能较准确地模拟区域风能资源分布,这已经成为研究风能资源时空分布不可或缺的主要手段^[8]。董旭光等^[9]运用MM5/CALMET模式系统对山东沿海地区的风能资源进行了模拟;张德等^[10]利用加拿大WEST模式系统对中国风能资源分布进行了数值模拟;穆海振等^[11]运用TAPM模式系统对上海地区的风能参数进行了模拟;李晓艳和余志^[12]利用MM5模式对风能资源进行了数值模拟研究;董旭光等^[4]利用WRF及其3DVAR同化模块对环渤海区域风场进行了一整年的模拟,分析了70m高度风能参数的时空变化特征;惠小英等^[13]使用WRF模式对酒泉地区进行了风速模拟。诸多研究结果表明,区域气候模式可为缺乏观测数据地区提供精细化的风能资源研究基础资料。

本研究采用WRF3.8.1数值模式系统,通过对NCEP FNL再分析数据的动力降尺度,得到山东陆地和近海区域2017年不同高度逐时风场数据,通过分析山东近地面和风机轮毂高度风能资源的年内变化特征,找到内陆适合开发低风速风电场区域,研究结果对山东分散式低风速风电开发和利用^[14]具有积极的指导意义。

1 资料与方法

1.1 模式介绍及方案设计

WRF(Weather Research and Forecasting)模式是目前全球应用较广泛的中小尺度数值模式之一,

WRF 模式的模拟效果与模式空间分辨率、初始条件、模拟时长、参数化方案选取、驱动资料等多个因子有关^[15],不同下垫面、不同地区、不同季节和不同天气形势下 WRF 模式的模拟性能存在一定差异^[16]。本研究使用 NCEP FNL 1°×1°再分析资料为 WRF 模式提供初始场和侧边界条件。模式采用单向三重嵌套,中心经纬度为 112.0°E,40.0°N,水平格距分别为 27 km、9 km、3 km,格点数分别为 177×139,205×107,262×265(东西向×南北向),其中第三重区域包含山东陆地和环渤海区域,垂直方向为 38 层,距地面 2 km 以下共 22 层,1 km 以下 17 层。模拟时段为 2017 年 1 月 1 日—12 月 31 日,采用逐日模拟,每次模拟 31 h,起始时间为每日 14 时(北京时),前 6 h 作为模式起转时间,不参与后续分析,取第三重嵌套区域第 7 至 30 时次(即北京时每日 21 时至次日 20 时)输出结果做分析。参数化方案的选取直接影响 WRF 模式的模拟效果^[17],结合前期山东及周边区域风场模拟研究成果^[4,9],本研究选用 WSW6 微物理参数化方案,RRTM 长波辐射参数化方案,Dudhia 短波辐射参数化方案,YSU 边界层参数化方案,Noah 陆面过程参数化方案。第一重和第二重嵌套区域采用 Kain-Fritsch 积云参数化方案。

1.2 模拟结果处理方法

文中风能参数(年平均风速、年平均风功率密度、空气密度等)的统计方法由国家标准《风电场风能资源评估方法(GB/T 18710-2002)》^[18]规定的方法计算得到。

1.2.1 年平均风速

日平均风速为每日 00—23 时风速的平均,年、月平均风速为时段内 00—23 时风速的平均,其表达式为:

$$V = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (1)$$

式中: V 为平均风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), n 为设定时段的记录数, v_i 为第 i 个记录的风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

1.2.2 年平均风功率密度

设定时段的平均风功率密度表达式为:

$$D_{\text{wp}} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (\rho) (v_i^3) \quad (2)$$

式中: D_{wp} 为平均风功率密度(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), n 为设定时段的记录数, ρ 为空气密度(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), v_i^3 为第 i 个记录的风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)值的立方。

1.2.3 空气密度

利用模拟得到的气压和气温数据,按照下式计

算空气密度:

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (3)$$

式中: ρ 为空气密度(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), p 为气压(单位: Pa), R 为气体常数($287 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$), T 为绝对温度(单位: K)。

1.3 评估方法

文中使用的模拟效果检验资料为山东省气象信息中心提供的全省 122 个国家级地面观测站(泰山站除外)2017 年逐时风速观测资料。用于检验的模拟数据为逐时风速。使用的模拟和观测之间统计分析参数包括:相关系数(R)、平均偏差(MB)、均方根误差($RMSE$)、观测和模拟的一致性指数(IOA)^[19]等,公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (4)$$

$$MB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (6)$$

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (7)$$

式(4)—(7)中: P_i 为第 i 个模拟值, O_i 为第 i 个观测值, N 为时间样本总数, \bar{O} 为观测值的平均, \bar{P} 为模拟值的平均。 MB 、 $RMSE$ 越小表示模拟值和观测值之间的差异越小, R 、 IOA 越接近 1(0)表明模拟值和观测值之间的时空变化趋势吻合得越好(差)。

2 模拟结果分析

2.1 逐日平均风速模拟效果评估

山东 122 个站点 2017 年逐日模拟平均风速(由模拟的逐时小时风速计算得到)和实测平均风速的相关系数、一致性指数分别为 0.897、0.974,各站相关系数以长清站最高,为 0.853,莱州站最低,为 0.328,但均通过 0.01 显著性水平检验,表明 WRF 模式能准确地模拟出风速的逐日变化特征。相对来说,沿海地区气象站点年相关系数较低(图 1),这些站点又以夏季相关系数最低(图略),可能与沿海地区夏季复杂的局地环流日变化引起的海陆风变化有关,间接导致模拟平均风速和实测平均风速的

较大异质性。均方根误差和平均偏差分别为 $1.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 模拟值和实测值分别为 $3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $2.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, WRF 模拟风速高于观测风速。从四季对比结果看, 模拟风速在 $3.6 \sim 4.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 比观测风速高 $1.5 \sim 1.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。春季、夏季的

相关系数和一致性指数高于 0.880, 秋季、冬季则高于 0.899 (表 1)。四季的模拟风速均高于实测风速, 平均偏差、均方根误差一般在 $1.5 \sim 2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间。整体上看, WRF 模式可以很好地模拟出平均风速的逐日变化特征, 但模拟值高于实测值。

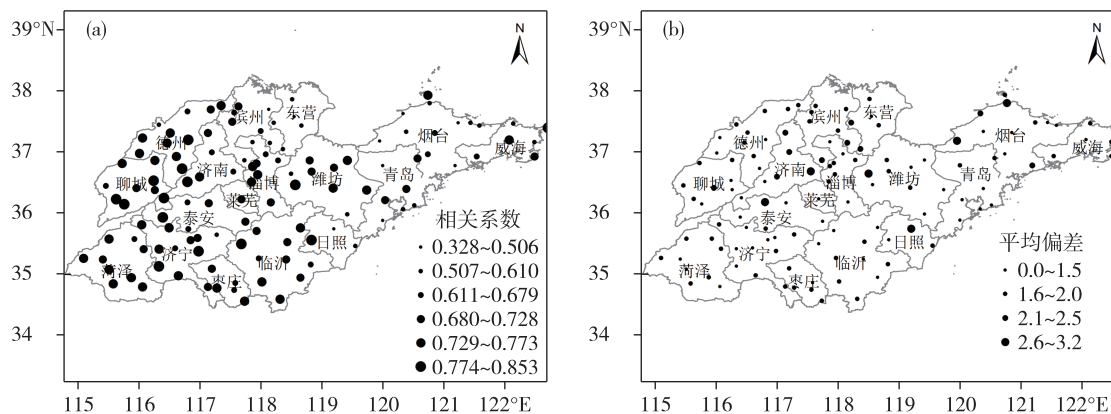


图 1 2017 年山东各气象站逐日模拟值和实测值相关系数(a)和平均偏差(b;单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)空间分布

Fig.1 Spatial distribution of correlation coefficient (a) and mean deviation (b; units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) between simulated and observed daily mean wind speed of meteorological stations in Shandong in 2017

表 1 山东 122 个国家级地面气象站实测风速与模拟风速对比分析

Table 1 Comparative analysis of observed and simulated wind speed of 122 meteorological stations in Shandong

时段	实测值/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	模拟值/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	平均偏差/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	一致性指数	相关系数	均方根误差/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
全年	2.4(1.0~5.2)	3.8(2.2~7.5)	1.6(0.0~3.2)	0.974(0.651~0.923)	0.897(0.328~0.853)	1.9(0.8~3.7)
春季	2.5(1.5~3.7)	4.0(2.2~6.6)	1.5(-0.3~3.5)	0.887(0.879~0.967)	0.894(0.387~0.821)	1.8(0.8~3.9)
夏季	2.1(1.2~3.5)	3.6(2.3~5.4)	1.5(0.0~3.2)	0.882(0.861~0.954)	0.896(0.107~0.837)	1.8(0.8~3.7)
秋季	2.0(1.0~4.1)	3.8(2.2~6.7)	1.8(0.2~4.4)	0.909(0.881~0.979)	0.951(0.357~0.985)	2.0(0.8~4.6)
冬季	2.3(1.3~5.2)	3.7(2.2~7.5)	1.5(-0.4~3.2)	0.899(0.871~0.974)	0.921(0.527~0.878)	1.8(0.8~3.6)

注:括号内数值为 122 个气象站各变量从最小值到最大值的变化区间。

2.2 不同气象站模拟与实测逐日平均风速对比

由成山头站和长岛站 2017 年逐日模拟平均风速和实测平均风速对比结果(图 2)可见, WRF 模式可以较好地模拟出气象站点逐日平均风速的时间变化, 成山头、长岛模拟和实测平均风速相关系数分别达到 0.844、0.737, 均通过 0.01 显著性水平检验, 一致性指数分别为 0.923、0.890, 逐日变化趋势较为一致。成山头站和长岛站模拟和实测平均风速平均偏差分别为 $1.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 均方根误差分别为 $1.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 模拟平均风速普遍大于实测平均风速。

2.3 模拟风场误差统计的空间分布

各气象站 2017 年模拟和实测平均风速相关系数和平均偏差的空间分布特征见图 1。可见, WRF 模拟的平均风速的相关系数空间分布区域差异明显, 鲁北、半岛沿海地区、鲁东南地区相关系数较

小, 小于 0.610, 鲁西、鲁西北、鲁中山区以南大部分地区、半岛部分地区相关系数相对较高, 一般在 0.680 以上。平均偏差则表现为与相关系数大致相反的空间分布, 相关系数低(高)的地区平均偏差相对较大(小)。冬季相关系数和平均偏差空间分布和全年类似(图略), 鲁西、鲁南、半岛中西部地区相关系数较高而平均偏差较低, 其中半岛大部分地区相关系数大于 0.662, 平均偏差小于 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 春季, 鲁西、鲁西南、鲁东南大部分地区和半岛地区相关系数较高, 半岛大部分地区及内部个别地区平均偏差较低; 夏季, 山东中西部地区相关系数较高, 其中鲁西北地区部分站点相关系数大于 0.765, 鲁中山区以北、鲁东南沿海地区、半岛地区平均偏差相对较大, 部分地区大于 $2.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 秋季相关系数和平均偏差与夏季类似。

从年和四季实测风速和模拟风速对比结果看,

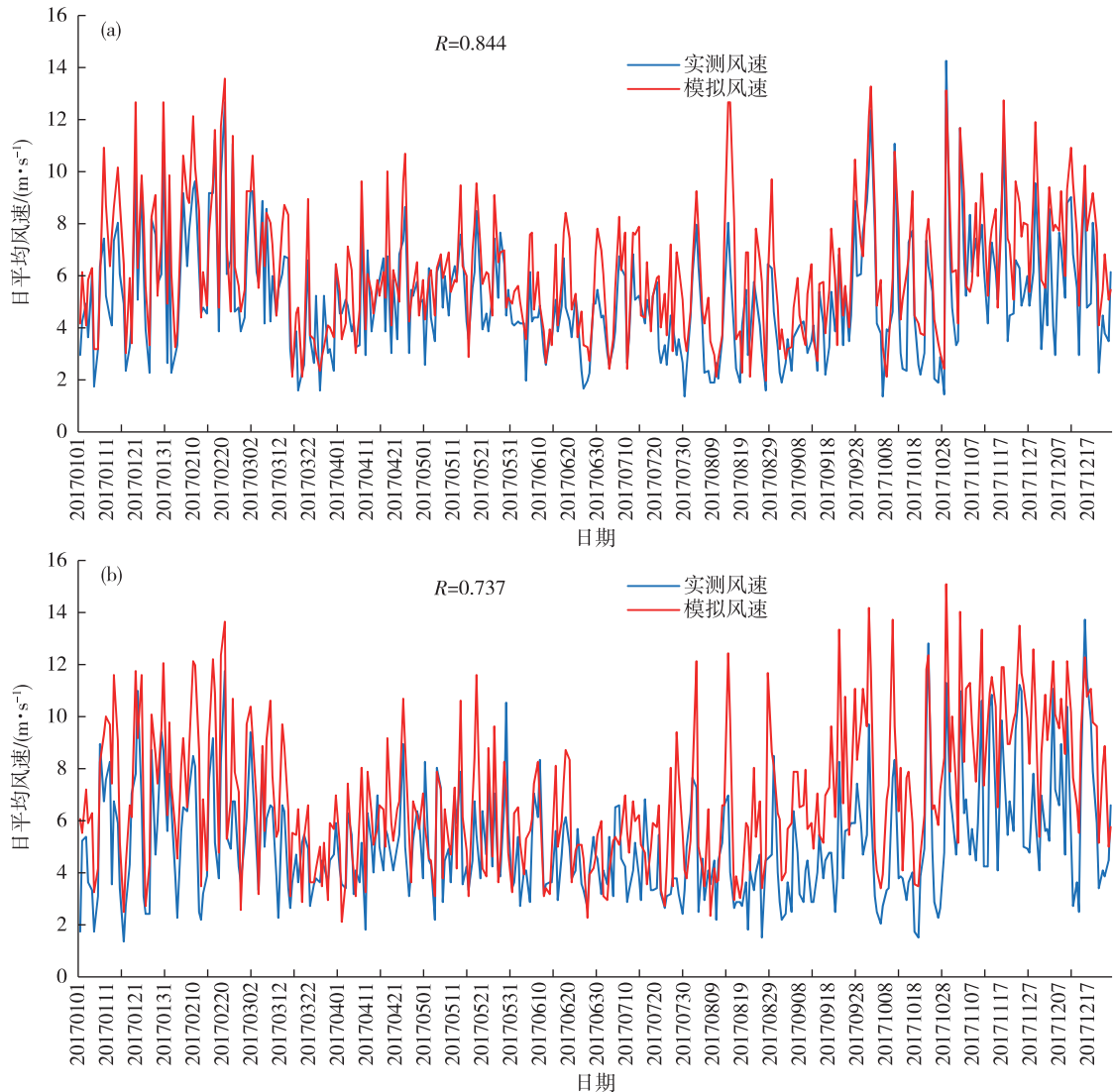


图 2 成山头站(a)和长岛站(b)2017年逐日平均风速(单位: $m \cdot s^{-1}$)模拟值和实测值对比
 Fig.2 Comparative analysis of simulated and observed daily mean wind speed (units: $m \cdot s^{-1}$) at 10 m at Chengshantou Station (a) and Changdao Station (b) in 2017

WRF 模式可以较好地模拟出山东陆地近地层实际风场特征,可应用模拟结果进行该地区的风场分析。

3 不同高度平均风速、平均风功率密度时空分布

3.1 10 m 平均风速时间变化

2017年山东122站模拟的平均风速年内变化明显(图3),总体上看,山东春季平均风速最大,其次为冬季,夏季各月平均风速较小。其中11月、5月、4月平均风速较大,大于 $4.0 m \cdot s^{-1}$,11月平均风速最大,为 $4.4 m \cdot s^{-1}$,其次为5月 $4.3 m \cdot s^{-1}$,4月 $4.1 m \cdot s^{-1}$,8月和1月平均风速最小,为 $3.5 m \cdot s^{-1}$ 。

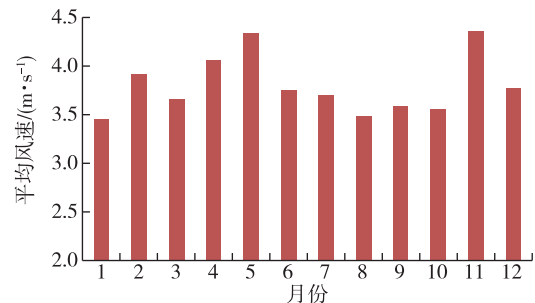


图 3 2017年山东122站逐月模拟10 m平均风速(单位: $m \cdot s^{-1}$)时间变化
 Fig.3 Temporal variation of simulated monthly mean wind speed (units: $m \cdot s^{-1}$) at 10 m of 122 meteorological stations in Shandong in 2017

3.2 平均风速与平均风功率密度空间分布

3.2.1 10 m 高度

2017年山东陆地和沿海地区10 m高度模拟平均风速区域差异明显(图4a)。沿海、半岛北部丘陵、崂山、日照中部五莲山、鲁中山区各山脉等地区以及微山湖、东平湖等大型湖泊地区年平均风速较大,大于 $4.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,部分地区大于 $5.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,鲁西北、鲁北内陆、半岛内陆等地区年平均风速小于 $4.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,鲁西南、鲁南、鲁中山区北部等地区小于 $3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,大汶河、大清河、泗水河、沂河及其支

流、淄河、潍河等流域中上游的山区间低矮平原地带年平均风速最小,部分地区小于 $3.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。年平均风功率密度空间分布(图4b)与年平均风速类似,沿海、丘陵山区、大型湖泊等地区年平均风功率密度大于 $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,鲁中山区周边山东内陆地区普遍小于 $150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,鲁中山区南北两侧各河流域中上游低矮平原地带最小,小于 $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。其他地区年平均风速一般在 $3.4 \sim 4.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,年平均风功率密度一般在 $50 \sim 150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

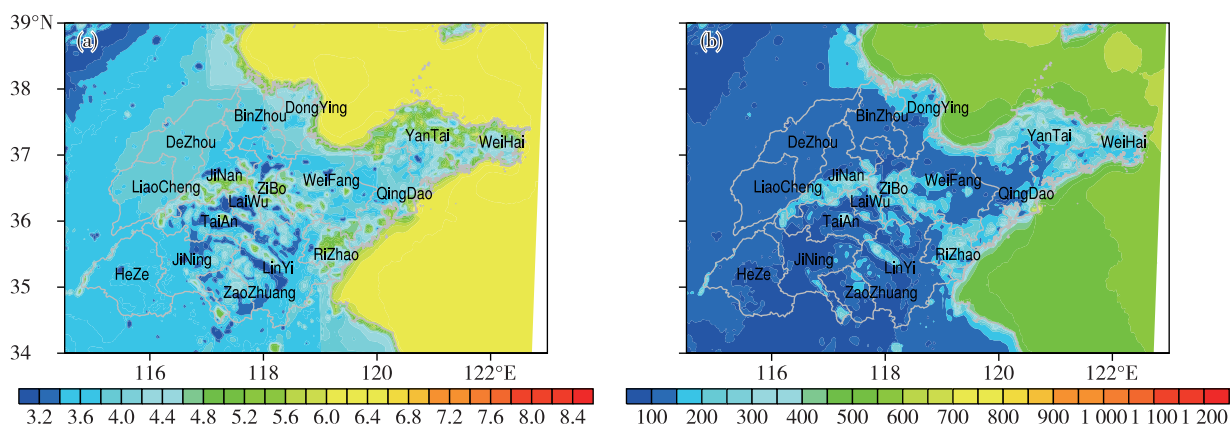


图4 山东2017年10 m高度年平均风速(a;单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和年平均风功率密度(b;单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)空间分布

Fig.4 Spatial distribution of annual mean wind speed (a; units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and annual mean wind power density (b; units: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) at 10 m in Shandong in 2017

3.2.2 70 m 高度

2017年70 m高度山东各地平均风速差异明显减小(图5a),各地年平均风速和年平均风功率密度比10 m高度明显增大,其中沿海、半岛北部丘陵、崂山、五莲山、鲁中山区各山脉等地区年平均风速较大,大于 $6.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,部分地区大于 $7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,相

应的年平均风功率密度(图5b)大于 $700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,部分地区大于 $900 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。鲁北、鲁西北等地区年平均风速大于 $6.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,年平均风功率密度在 $500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右。大汶河、大清河、沂河及其支流中上游的山区间低矮平原地带年平均风速最小,小于 $4.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,年平均风功率密度小于 $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

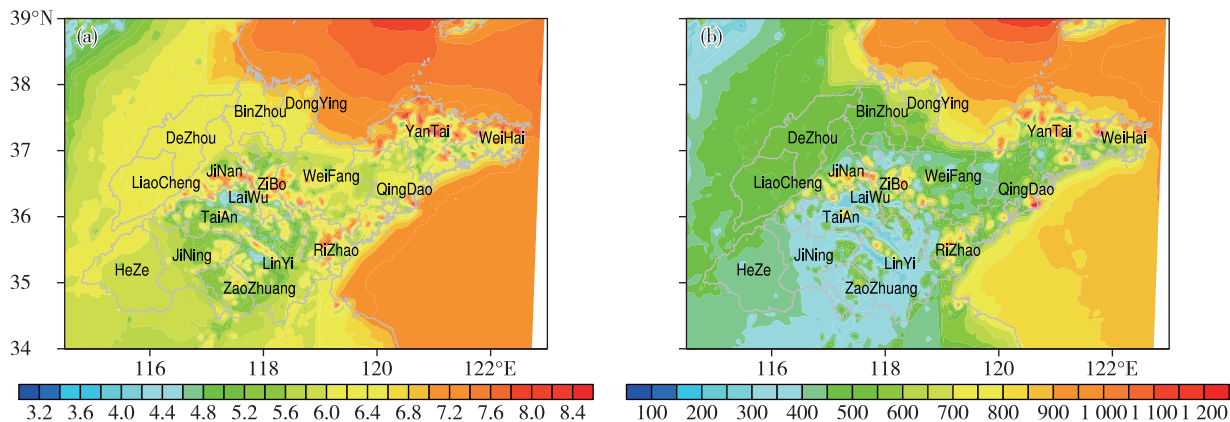


图5 山东2017年70 m高度年平均风速(a;单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和年平均风功率密度(b;单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)空间分布

Fig.5 Spatial distribution of annual mean wind speed (a; units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and annual mean wind power density (b; units: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) at 70 m in Shandong in 2017

其他地区年平均风速一般在 $5.0 \sim 6.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 年平均风功率密度一般在 $300 \sim 500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

3.2.3 100 m 高度

2017 年 100 m 高度山东各地平均风速差异比 70 m 高度减小(图 6a), 各地年平均风速和年平均风功率密度比 70 m 高度明显增大(图 6b), 大值区仍出现在沿海、半岛北部丘陵、崂山、五莲山、鲁中山区各山脉等地区, 年平均风速普遍大于 $7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 部分地区大于 $8.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 相应的年平均风功率密度大于 $900 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 部分地区大于 $1100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。鲁北、鲁西北及半岛北部大部分地区年平均风速大于 $7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 沿海岸线向内陆方向, 平均风速、平均风功率密度递减, 大汶河、大清河、沂河及其支流中上游的山区间低矮平原地带年

平均风速较小(小于 $5.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 其中大汶河流域上游小于 $4.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 年平均风功率密度小于 $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。其他地区年平均风速一般在 $6.0 \sim 6.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 年平均风功率密度一般在 $450 \sim 550 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

各高度四季平均风速、平均风功率密度与年平均空间分布类似(图略), 但数值差异明显, 春季各地区平均风速、平均风功率密度均高于年平均, 低值区域明显减小, 高值区域明显增大; 夏季各地区平均风速、平均风功率密度低于年平均; 秋季内陆地区平均风速、平均风功率密度小于年平均, 半岛沿海地区则大于年平均; 冬季各地区平均风速、平均风功率密度略大于年平均。

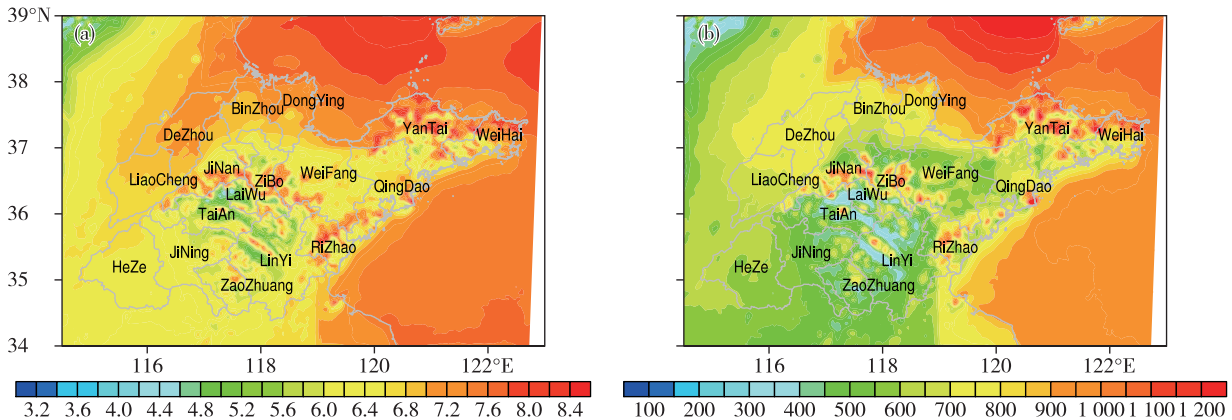


图6 山东 2017 年 100 m 高度年平均风速(a; 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和年平均风功率密度(b; 单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) 空间分布

Fig.6 Spatial distribution of annual mean wind speed (a; units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and annual mean wind power density (b; units: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) at 100 m in Shandong in 2017

4 模拟与观测风速差异的主要原因

由 2017 年山东各气象站逐日模拟值和实测值相关系数和平均偏差空间分布(图 1) 可以看出, 五莲、青州、章丘、莱州、蓬莱、肥城等地模拟和观测风速平均偏差相对较大($2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 这些站点多位于城市内, 近地面观测风速受周边高耸建筑的影响显著, 使得观测风速明显偏小。影响 WRF 模式模拟性能的因子较多, 不同地区、不同季节和不同天气形势下中尺度数值模式的模拟性均存在一定差异, 复杂的下垫面地形是 WRF 模式模拟风速偏差较大的重要因子。另外, 边界层参数化方案是影响边界层气象要素模拟效果的重要因素^[20], 张碧辉等^[17]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^[21]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, 结果表明, 不同边界层方案对近地面层风速、气温等气象要素模拟效果差异明显。

造成模拟值高于实测值的可能原因还包括格点代表性误差和未考虑次网格地形拖拽^[22]引起 WRF 模拟风速偏大, 顾沈旦等^[23]研究发现 2012 年 7 月 1—20 日 WRF 模拟的济南地区平均风速明显高于实测平均风速, 近 400 个区域自动站实测平均风速与模拟风速均方根误差在 $1.5 \sim 4.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 平均偏差为 $1.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 10 m 风速的均方根误差与地形、坡度、模式格点与观测站点的地形偏差显著相关。另外, YSU 边界层参数化方案模拟的湍流混合偏强等模式误差, 导致模拟高估近地面风速^[20], FNL 再分析资料近地面风速比观测风速偏高 33%, 再分析资料风速偏高^[22]也可能是导致模拟风

速高于观测风速的原因之一。

5 结论与讨论

本研究利用 WRF 数值模式对山东边界层不同高度风场进行了动力降尺度模拟,对不同高度平均风速、平均风功率密度的时空变化特征进行了研究,可以得到以下主要结论:

1) 利用 WRF 模式进行风场动力降尺度模拟研究可以较好地模拟山东地面风速,但模拟风速略高于观测风速。

2) 山东各地模拟和实测平均风速相关系数在鲁北、半岛沿海地区、鲁东南地区较小,鲁西、鲁西北、鲁中山区以南大部分地区、半岛部分地区相关系数相对较高。相关系数低(高)的地区平均偏差相对较大(小)。四季相关系数和平均偏差空间分布差异较大。

3) 山东各地 10 m、70 m、100 m 高度沿海、半岛北部丘陵、崂山、日照中部五莲山、鲁中山区各山脉等地区以及微山湖、东平湖等大型湖泊地区年平均风速较大,沿海岸线向内陆方向,平均风速、平均风功率密度递减,鲁中山区南北两侧各河流流域中上游低矮平原地带较小。四季平均风速和平均风功率密度空间分布类似,春季、冬季高于年平均值,夏季和秋季则小于年平均值,不同地区的风能资源差异随高度明显减小。

由此研究的结果来看,WRF 模式能够较好地模拟山东风速的时空分布特征。但受数值模式的技术水平限制以及模式参数化方案的不同,本研究模拟风速与观测风速仍存在一定差异。气象站测风结果受局地复杂下垫面的影响明显,而模式地形是格点平均,模式不能完全考虑气象站点复杂下垫面的影响,是造成模拟风速与实测风速偏差的原因之一。而风电场多位于空旷开阔的平原或丘陵地区,土地利用类型变化较小,下垫面特征相对城市地区简单,模拟风速结果会较城市地区更接近实际风速。从本研究的风场模拟结果看,山东内陆地区存在多处分散的风速大值区,在平原及丘陵和山区的高海拔地带,适合建设大规模风电场;在平原和丘陵过渡地带,可有选择地安装高功率风机;在鲁中山区各山脉、五莲山、半岛丘陵的海拔相对较高地区存在着风能资源丰富区,适宜建立小规模分散式风电场。本研究结果可为指导分散式低风速风电场选址和风能资源开发利用提供参考。

参考文献:

- [1] 李俊峰.风力 12 在中国[M].北京:化学工业出版社,2005:110.
- [2] 中国可再生能源学会风能专业委员会(CWEA).2016 年中国风电装机容量统计[J].风能,2017(2):32-44.
- [3] VAUTARD R, CATTIANX J, YIOU P, et al. Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness[J].Nature geosci, 2010, 3(11):756-761.
- [4] 董旭光,孟祥新,徐洪雄,等.环渤海区域风能资源 WRF 同化模拟及特征分析[J].自然资源学报,2014, 29(6):1029-1042.
- [5] 徐影,丁一汇,赵宗慈.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.
- [6] 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.
- [7] 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]. J Climate, 1997, 10(10):2514-2532.
- [8] 李泽椿,朱蓉,何晓凤,等.风能资源评估技术方法研究[J].气象学报,2007,65(5):708-717.
- [9] 董旭光,刘焕彬,曹洁,等.山东省近海区域风能资源动力降尺度研究及储量估计[J].资源科学,2011, 33(1):178-183.
- [10] 张德,朱蓉,罗勇,等.风能模拟系统 WEST 在中国风能数值模拟中的应用[J].高原气象,2008,27(1):202-207.
- [11] 穆海振,徐家良,杨永辉.数值模拟在上海海上风能资源评估中的应用[J].高原气象,2008,27(增刊):196-202.
- [12] 李晓燕,余志.基于 MM5 的沿海风资源数值模拟方法研究[J].太阳能学报,2005,26(3):400-408.
- [13] 惠小英,高晓清,桂俊祥,等.酒泉风电基地高分辨率风能资源的数值模拟[J].高原气象,2011,30(2):538-544.
- [14] 中华人民共和国国家能源局.NB/T 31107-2017 低风速风力发电机组选型导则[S].北京:中国电力出版社,2017:16-19.
- [15] 张宇,郭振海,张文煜,等.中尺度模式不同分辨率下大气多尺度特征模拟能力分析[J].大气科学,2010, 34(3):653-660.
- [16] HONG S Y, NOH Y, DUDHIA J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes[J].Mon Wea Rev,2006,134(9):2318-2341.

- [17] 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.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.GB/T 18710-2002 风电场风能资源评估方法[S].北京:中国标准出版社,2002:7-8.
- [19] 穆清晨,王咏薇,邵凯,等.山地复杂条件下三种边界层参数化方案对近地层风模拟精度初步评估分析[J].资源科学,2017,39(7):1349-1360.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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,2016,34(1):96-105.
- [23] 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.