

李艳, 汤剑平, 王元, 等. 2009. 区域风能资源评价分析的动力降尺度研究 [J]. 气候与环境研究, 14 (2): 192–200. Li Yan, Tang Jianping, Wang Yuan, et al. 2009. Application of dynamical downscaling method for assessment of wind energy resources [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (2): 192–200.

区域风能资源评价分析的动力降尺度研究

李艳¹ 汤剑平^{2,3} 王元² 江志红¹ 储惠芸²

1 南京信息工程大学江苏省气象灾害重点实验室, 南京 210044

2 南京大学中尺度灾害性天气教育部重点实验室, 南京 210093

3 江苏省气象局, 南京 210008

摘要 不同于以往的统计风能评估方法, 本研究将动力降尺度方法应用到江苏省的风能评价分析中。利用 NCEP/NCAR 再分析资料与江苏省 65 个地面气象观测站 1971~2000 年的观测资料, 建立了动力降尺度区域气候模式 MM5V3 的初始场和边界条件, 用较高分辨率 (水平分辨率为 5 km) 评估了江苏省 60 m 高度的风能分布, 分析了动力降尺度方法在区域风能资源评估中的有效应用。结果表明, 江苏省风能资源由东部沿海向西部内陆递减, 以西连岛为代表的东部沿海风能资源最丰富, 其次为长江三角洲地区, 太湖、洪泽湖及高邮湖地区的风能资源也比较丰富, 徐州市与南京市的风能资源最贫乏。分析表明, 动力降尺度方法能够用较高分辨率模拟局地环流和地面风的主要分布特征, 可以作为区域风能资源评价分析的有效手段。

关键词 动力降尺度 风能评价 区域气候模式

文章编号 1006-9585 (2009) 02-0192-09 **中图分类号** TK81 **文献标识码** A

Application of Dynamical Downscaling Method for Assessment of Wind Energy Resources

LI Yan¹, TANG Jianping^{2,3}, WANG Yuan², JIANG Zhihong¹, and CHU Huiyun²

1 *Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

2 *Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093*

3 *Jiangsu Provincial Meteorological Bureau, Nanjing 210008*

Abstract The dynamical downscaling of NCEP/NCAR reanalysis data is presented to investigate the wind energy resources in Jiangsu Province, and the approach is based on the regional climate model which is the fifth-generation PSU/NCAR Mesoscale Model Version 3 (MM5V3). The wind energy macroscopic characteristics are assessed by the analysis of the observations which come from the 65 weather stations during the year from 1971 to 2000, as well as the dynamical simulation in high resolution (5 km) in the three representative years. The results indicate the dynamical downscaling method is capable simulating the regional wind energy resources in high resolution. Wind power characteristics in Jiangsu Province are also recovered in this study, the results show that the most abundant wind energy at 60 m above the ground emerges on Xilian Island, the second locate on the Yangtze River delta as well as the

收稿日期 2008-01-21 收到, 2008-12-26 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金青年科学基金项目 40805039、中国气象局气候变化专项 CCSF2007-41、江苏省自然科学基金重点项目 BK2006730 和南京信息工程大学科研基金

作者简介 李艳, 女, 1975 年出生, 博士, 讲师, 主要从事风能评价分析与大气动力学方面的研究。E-mail: liyanytnj@163.com

lakes of Taihu, Hongze, and Gaoyou, and the poorest locations for wind energy occur in Nanjing and Xuzhou City.

Key words dynamical downscaling, assessment of wind energy, regional climate model

1 引言

当前,中国能源发展面临着人均能耗水平低、环境污染严重、能源利用率低以及可再生能源比例少等诸多问题。发展可再生能源,如风能,一方面可以缓解我国日益严重的能源危机,另一方面可以保护环境,促进我国经济的可持续发展。区域风能的评价分析是风能发展中首要而又关键的环节。独特的地理位置和地形特征形成了我国复杂而多变的风能气候,随着地球科学及交叉学科的发展,用较高分辨率对区域风能进行分析和估算具有越来越重要的理论意义和实际价值。近年来,区域风能资源评估研究中发展了多种评估方法,主要分为两大类:一是针对地面气象站历史观测资料,经过统计分析后水平插值形成风能等值线的空间分布(Sahin et al., 2005; Ozgur et al., 2006; Rehman et al., 2007);但当地面气象站稀疏不均匀、地形比较复杂时,该方法的准确性很难保证。另一是针对再分析格点资料,气象要素水平分布均匀,在定量反映整个区域要素的空间分布时具有优势;但是格点资料的水平分辨率低(通常为几百公里),难以细致描述山地和海岸带等地形复杂地区的风能气候特点(Bogardi et al., 1996; Lionello et al., 2003)。因此,科学合理地评估区域尺度风能特征,统计分析观测资料与再分析资料是基础,获得高分辨率风能气候资料才是准确评价复杂地形、地理环境地区风能特征的关键。降尺度方法(Downscaling)能够提高气象要素的空间分辨率,是根据现有观测资料与大尺度环流模式(GCM)资料获得高分辨率风能气候资料的重要途径。Bogardi et al. (1996)、Lionello et al. (2003)研究表明,低分辨率的格点资料必须经过降尺度处理才可以用于局地风能评估。

传统上,降尺度方法包括两类:统计/经验方法与物理/动力方法。统计/经验方法通过转换函数,建立大尺度气候预报因子与区域尺度气候预报变量之间的统计函数关系,计算量较小、能够

节省大量机时(Von Storch et al., 2000; 范丽军等, 2005; 范丽军等, 2007)。但是,统计/经验方法在建立转换函数时需要大量的观测资料,其理论应用也存在局限性。当大尺度的气候要素与区域尺度的气候要素之间相关关系不显著时,统计/经验方法就失去了其应用的理论依据(Mearns et al., 1999)。物理/动力方法是通过一个区域气候模式(RCM),利用大尺度的气候背景信息,建立更高分辨率的气象变量分布场(Giorgi et al., 1999; 陆其峰等, 2003; 张英娟等, 2005)。区域气候模式建立在大尺度与区域尺度要素之间非线性作用的基础上,能够分辨出由于局地地形、植被覆盖和土壤水文过程等产生的局地中尺度特征(Giorgi et al., 1989; Hong et al., 1999),改进模式对区域与局地要素的描述。区域气候模式的物理意义明确,能应用于任何地方而不受观测资料的影响。因此,区域气候模式被认为是获取高分辨率局地气候信息的有效动力降尺度方法。

本文利用区域气候模式 MM5 对区域风能评价分析中物理/动力降尺度方法的模式系统展开研究。区域气候模式 MM5 (刘栋, 2003; Leung et al., 2003a; Leung et al., 2003b; 汤剑平等, 2004; 赵彦厂等, 2008) 是区域气候研究领域应用中广泛应用且已被证实具有区域气候模拟能力的模式系统。文中选择江苏省作为研究样本区域,因为: 1) 其经济繁荣,人类活动频繁,对能源的需求量较大,而常规能源相对贫乏; 2) 其地处我国大陆东部沿海,拥有标准海岸线 954 km,沿海滩涂面积约 5 100 km²,风能资源比较丰富; 3) 其境内河网交错,水域面积较大,季风气候背景特殊,给局地风能资源的评估带来较大困难。因此,以江苏省为例,进行较高分辨率的风能评价分析具有重要的理论意义与应用价值。

2 资料和方法

文中使用的观测资料是江苏省 65 个地面气象站 1971~2000 年逐日平均风速、温度、气压和水汽压资料,地面气象站的地理分布覆盖江苏省。

使用的再分析资料是 NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996) 再分析资料, 其水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 垂直方向在 1 000~10 hPa 之间共有 15 层, 时间间隔为 6 h。

2004 年 4 月国家发展和改革委员会制定的《风能资源评价技术规定》中“代表年”的确定方法是: 根据地面气象资料 1971~2000 年的整编成果, 选择年平均风速等于或接近 30 年年平均风速 $\bar{V}_{30}$ 的年份, 定义为平均风速年; 选择年平均风速等于或接近 30 年年平均风速最大值 $\bar{V}_{\max}$ 的年份, 定义为最大值年; 选择年平均风速等于或接近 30 年年平均风速最小值 $\bar{V}_{\min}$ 的年份, 定义为最小值年。若存在多个年平均风速等于或接近 $\bar{V}_{30}$ (或 $\bar{V}_{\max}$ 、 $\bar{V}_{\min}$) 的年份, 则选择最靠近 2000 年的年份。由于观测站空间分布相对不均匀、观测仪器变更、台站位置迁移等原因均可能产生观测资料的非均一性, 所以在建立江苏省逐年平均风速时间序列时采用了 Jones 等 (1996) 提出的计算区域平均气候时间序列的方法: 首先, 将江苏省按经纬度划分为若干个网格, 网格距为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (图略), 计算每个网格内平均风速的时间序列, 再应用面积加权法计算江苏省区域平均的风速时间序列。

风能密度是气流在单位时间内垂直通过单位截面积的风能, 是评价一个地区风能潜力的最方便和最有价值的量。风能密度 ($\bar{W}$) 的计算公式为

$$\bar{W} = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \rho v^3 f(v) dv = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(\frac{3}{k} + 1\right), \quad (1)$$

其中, v 为风速 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), k 和 c 为 Weibull 双参数曲线族的形状参数与尺度因子。分别利用江苏省 6 个气象观测站 1 月和 7 月的每 6 h 与每 1 h 的观测风速数据, 根据 Weibull 分布进行平均风能密度的计算检验, 发现差异较小。考虑到模式输出逐时的模拟结果所占计算机资源较多, 因此均采用每 6 h 的风速计算平均风能密度 (Jing et al., 2006)。大气密度 ρ (单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) 可用下式计算:

$$\rho = \frac{1.276}{1 + 0.00366T} \left(\frac{p - 0.378e}{1000} \right), \quad (2)$$

其中, p 为大气压 (单位: hPa), e 为水汽压 (单位: hPa), T 为气温 (单位: $^\circ\text{C}$)。当风力机位置

的海拔高度超过 500 m 时, 大气密度的计算需进行高度订正, 经验公式为 $\rho = 1.225e^{-0.001z}$, z 为风力机所在海拔高度。

3 观测风能分析

从图 1 可以看出, 江苏省平均风速的年代际变化非常明显, 呈逐年下降的变化趋势, 并且 20 世纪 70 年代的平均风速较大, 均高于 30 年的平均风速, 80、90 年代的平均风速较小, 均低于 30 年的平均风速。从图上还能够清楚地分析出江苏省风能资料的代表年: 1972 年的平均风速为 $3.07 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 是 30 年中年平均风速最大的, 可作为最大值年; 1987 年的年平均风速与 30 年的平均风速相同, 为 $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 为平均风速年; 1997 年的平均风速为 $1.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 是 30 年中年平均风速最小的, 可以作为最小值年。

根据上文确定的“代表年”, 分别计算代表年江苏省风能资源的分布特征, 具体如图 2 所示。从图 2 可以看出, 3 个代表年平均风速与平均风能密度的分布特征比较相似, 主要表现出: 1) 江苏省风能资源最丰富的地面气象站是西北部的西连岛, 最大值年 (图 2a 和 2b) 与平均风速年 (图 2c 和 2d) 的平均风速均大于 $5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均风能密度均大于 $150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 最小值年 (图 2e 和 2f) 的平均风速为 $3.5 \sim 5.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均风能密度为 $120 \sim 150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; 2) 长江三角洲一带的昆

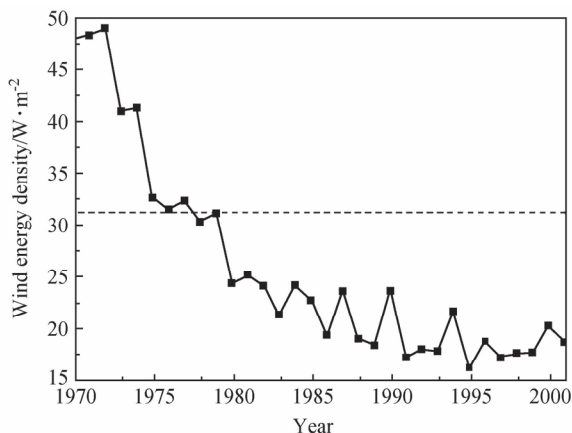


图 1 江苏省 1971~2000 年年平均风速 (虚线为 30 年的平均风速)

Fig. 1 Annual mean wind speed of Jiangsu Province during 1971—2000 (dashed line indicates mean wind speed for 30 years)

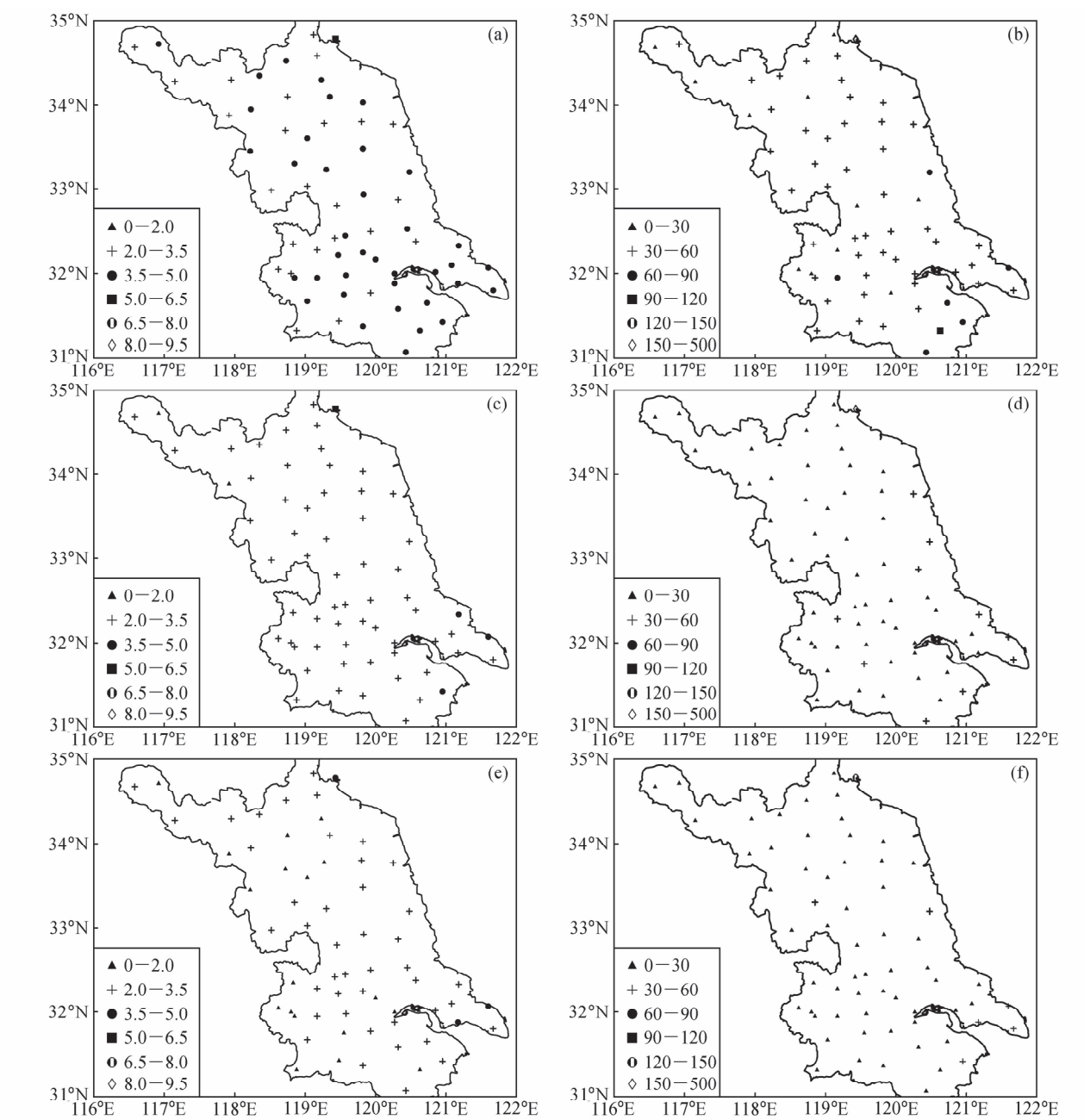


图2 江苏省年平均风速（左，单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）与年平均风能密度（右，单位： $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ）分布：（a）、（b）为最大值年；（c）、（d）为平均风速年；（e）、（f）为最小值年

Fig.2 The mean wind speed (left, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and mean wind energy density (right, units: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) in Jiangsu Province: (a), (b) the year with the maximum of annual mean wind speeds; (c), (d) the year with the average of annual mean wind speeds; (e), (f) the year with the minimum of annual mean wind speeds

山、苏州、东山，东南沿海的吕四风能资源比较丰富，最大值年（图 2a 和 2b）平均风速大于 $3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，平均风能密度大于 $90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ；3）内陆地区的平均风能密度较低，在平均风速年与最小值年（图 2c~f）均低于 $30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

4 动力降尺度风能评价分析

动力降尺度方法通过区域气候模式，综合当地的天气气候背景，细致考虑山地、海岸带等复杂

的地形特征,提高再分析资料的空间分布分辨率,为风能资源的评价分析提供更可靠的数据基础。

4.1 降尺度区域气候模式设计

降尺度区域气候模拟选用的模式为 PSU/NCAR 第 5 代中尺度模式 MM5V3 (Jimuy et al., 2001),该模式在 MM4、MM5V2 的基础上作了较大的改进,采用了完全非静力的动力框架结构,并且引入了陆面过程模式 NOAH LSM (Chen et al., 2001a, 2001b)。

模式采用 3 层嵌套网格 (图 3),区域的中心点设在 (33°N , 118°E),格点数分别为 37×37 、 64×64 和 109×112 ,水平分辨率分别为 45、15 和 5 km,模拟区域覆盖了包括江苏省在内的中国东部沿海。模式在垂直方向上分为不等间距的 25 个 σ 层,其中最低两层在 10 和 60 m 左右。模拟试验所选用的物理过程为 KF2 积云对流参数化过程、CCM2 辐射方案、MRF 的边界层方案和 NOAH LSM 陆面过程。模式将粗分辨率的 NCEP/NCAR 再分析资料经过双线性插值到模式的模拟区域后作为模式的初始和边界条件,模拟积分时间分别从代表年的每月 1 日 00 时 (北京时间,下同)到当月最后一天的 18 时,模拟结果输出的时间间隔为 6 h。

4.2 近地层平均气候态的模拟检验

为检验降尺度区域气候模式对代表年江苏省

气候的模拟能力,对比分析了模拟结果与观测资料的平均海平面气压场、850 hPa 风速场以及 10 m 高度风速场。文中仅以最小值年的对比分析结果为例进行说明,其他代表年的分析与此类似。

图 4 为模式模拟与 NCEP/NCAR 再分析资料的 850 hPa 风场和海平面气压。由图可见,模拟结果合理地再现了模拟区域环流的大尺度分布特征。在 850 hPa 高度上,区域气候模式模拟出了东部洋面与北部地区的风速大值区,以及西南部内陆地区的风速低值区,在风速量级上与 NCEP/NCAR 再分析资料结果比较接近,局地差异主要表现在太行山地区,模式模拟出了以太行山为中心的风速大值区,而 NCEP/NCAR 再分析资料在对应区域仅仅表现为风速的大值槽。出现这种差异的主要原因是系统水平分辨率不同,NCEP/NCAR 再分析资料的水平分辨率较低 ($2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$),而区域气候模式的分辨率较高 (45 km),因此相对而言,NCEP/NCAR 再分析系统中的地形高度要比文中区域气候模式的地形高度平坦得多,所以在地形陡峭的地区 (如太行山),NCEP/NCAR 再分析资料的风速分布会比较光滑,风速值也比区域气候模式的模拟结果低。在海平面气压场分布图 (图 4c 和 4d) 上,区域气候模式也较成功地模拟出了海平面气压场的分布特征,量级上非常接近,仅在华北地区的模拟结果稍大。

为了进一步分析区域气候模式对近地层风场的模拟能力,图 5 给出了观测 (图 5a) 与模式模拟 (图 5b) 的 10 m 高度风场。对比分析发现,区域气候模式能够较好地模拟出近地层风场的分布特征,如等风速线呈东西向分布,平均风速由东部沿海向内陆递减等特征。但在量级上,模式的模拟结果较观测值偏大。另外,由于模式充分考虑了地形、海陆分布等影响,在海岸线及湖泊周边地区的风速梯度较大,而观测结果是根据 65 个分布不均匀的地面站观测资料进行区域内插得到的,因此较为平滑。表 1 给出了 1972 年江苏省东部 10 个气象站在 10 m 高度上的年平均风速与模拟结果的对比分析,可见模拟的平均风速与气象站的年平均风速比较接近,相对误差在 $2.6\%\sim 27.6\%$,说明数值模式对江苏省风能资源分布特征的模拟是可信的。

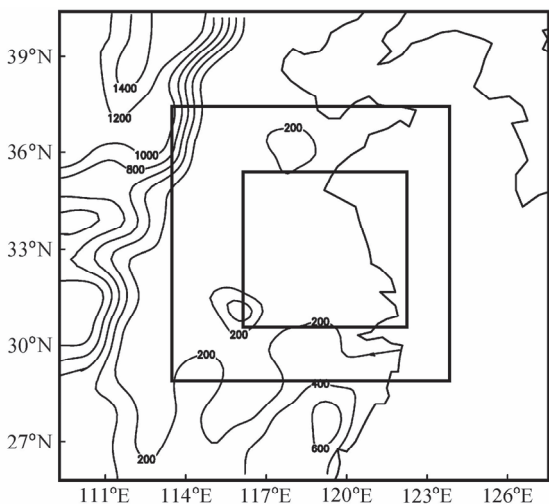


图 3 区域气候模式的地形及嵌套结构 (等直线表示地形海拔高度,单位: m)

Fig. 3 The topography and nested domains of the regional climate model (isoline indicate the height above sea level, units: m)

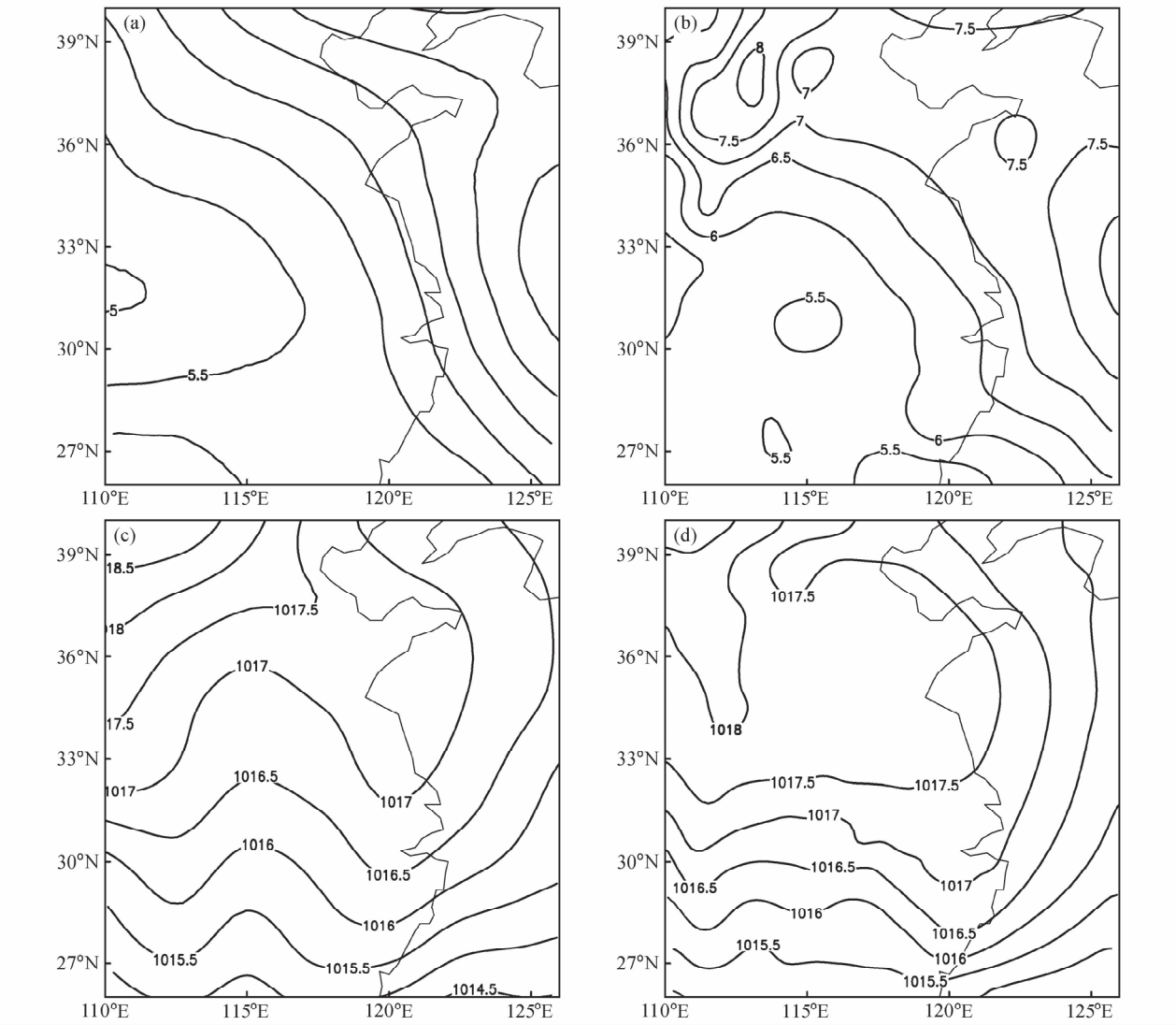


图 4 最小值年 NCEP/NCAR 再分析资料（左）与模拟结果（右）对比分析：(a)、(b) 850 hPa 风场（单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）；(c)、(d) 海平面气压场（单位：hPa）

Fig. 4 Comparison between the NCEP/NCAR reanalysis data (left) and the simulation (right): (a), (b) wind speed at 850 hPa (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (c), (d) sea-level pressure (units: hPa)

表 1 江苏省 10 m 高度的模拟风速与气象站观测值的对比

Table 1 Comparison of wind speed at the height of 10 m between simulated results and observational data in Jiangsu Province

站名	经度 (°E)	纬度 (°N)	模拟风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	实测风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	相对误差/%
沛县	116.92	34.72	4.04	3.62	11.6
西连岛	119.43	34.78	6.09	6.25	2.6
滨海	119.82	34.03	4.24	3.76	12.8
宝应	119.30	33.23	4.12	3.56	15.7
射阳	120.25	33.77	4.34	3.40	27.6
大丰	120.48	33.20	4.32	4.12	4.9
兴化	119.83	32.93	4.23	3.91	8.2
海安	120.45	32.53	4.27	3.71	15.1
常熟	120.73	31.65	4.27	4.09	4.4
苏州	120.63	31.32	4.27	4.74	9.9

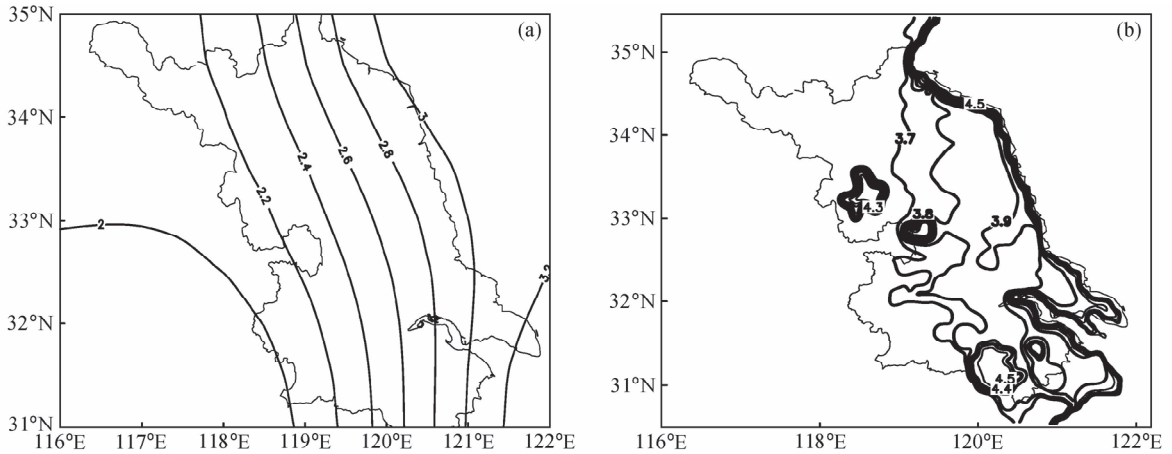


图 5 最小值年近地层平均风速对比分析: (a) 观测资料; (b) 模拟结果 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 5 The mean wind speed of surface layer: (a) observation; (b) simulation (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

鉴于上述分析, 可以认为降尺度区域气候模式能够定量地再现研究区域 850 hPa 风速场、海平面气压场的大尺度分布特征, 对近地层的风场分布特征也具有较强的模拟能力, 可以被用来进行风能资源的降尺度研究。

4.3 动力降尺度风能评价分析

由于目前随着风机技术手段的不断提高, 风机的安装高度也逐步增高, 因此本文选取模式在垂直高度上的第 2 层, 即 60 m 高度的模拟结果, 着重分析 60 m 高度上江苏省风能的蕴藏特点。首先计算每个输出时次的瞬时风速与瞬时风能密度, 然后取代表年内所有输出时次的瞬时风速与瞬时风能密度的算术平均作为代表年的平均风速与平均风能密度。

图 6 为 3 个代表年在 60 m 高度平均风速与平均风能密度分布, 可以清楚地分析出江苏省风能资源的区域分布特征: 平均风速 (平均风能密度) 等值线与海岸线平行, 并沿海岸线向内陆逐渐递减; 平均风速 (平均风能密度) 的大值区分布在东部沿海、长江三角洲等地区; 太湖、高邮湖、洪泽湖的平均风速 (平均风能密度) 也较大; 平均风速 (平均风能密度) 最小的地区是徐州市与南京市。

在风速大值年 (图 6a), 大于 $6.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的地区主要分布在东部沿海、长江三角洲、太湖、洪泽湖与高邮湖地区, 广大的西部内陆地区平均风速在 $6.0 \sim 6.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 徐州市与南京市的平均

风速最小。在平均风速年 (图 6c), $6.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的平均风速等值线位置略偏东, 大于 $6.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速大值区主要集中在东部沿海与长江三角洲, 而徐州市、连云港北部、南京市风速较低, 平均风速均在 $6.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下。风速低值年 (图 6e) 的平均风速较低, 风速的大值区主要分布在东部沿海、长江三角洲、太湖, 低值区主要分布在南京市及徐州市。

平均风能密度与平均风速的区域分布特征相似。在风速大值年 (图 6b) 与平均风速年 (图 6d), 尽管平均风速差异较大, 但平均风能密度的分布特征差异却较小, 均表现出以东部沿海、长江三角洲、太湖、高邮湖、洪泽湖为中心的平均风能密度的大值区, 平均风能密度均大于 $240 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 南京市与徐州市为平均风能密度的低值中心, 平均风能密度均小于 $210 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在风速低值年 (图 6f), 平均风能密度较低, 风能密度的局地特征也有所差异, 主要表现在以高邮湖为中心的平均风能密度的大值中心已不明显。

5 结论

本文针对地面气象站观测资料与再分析资料分辨率较低的问题, 提出利用区域气候模式 MM5V3, 采用动力降尺度的方法, 以较高分辨率 (水平分辨率为 5 km) 评价分析江苏省风能蕴藏的分布特征, 为风能资源的评估工作提出了新的方法思路, 相关结论如下:

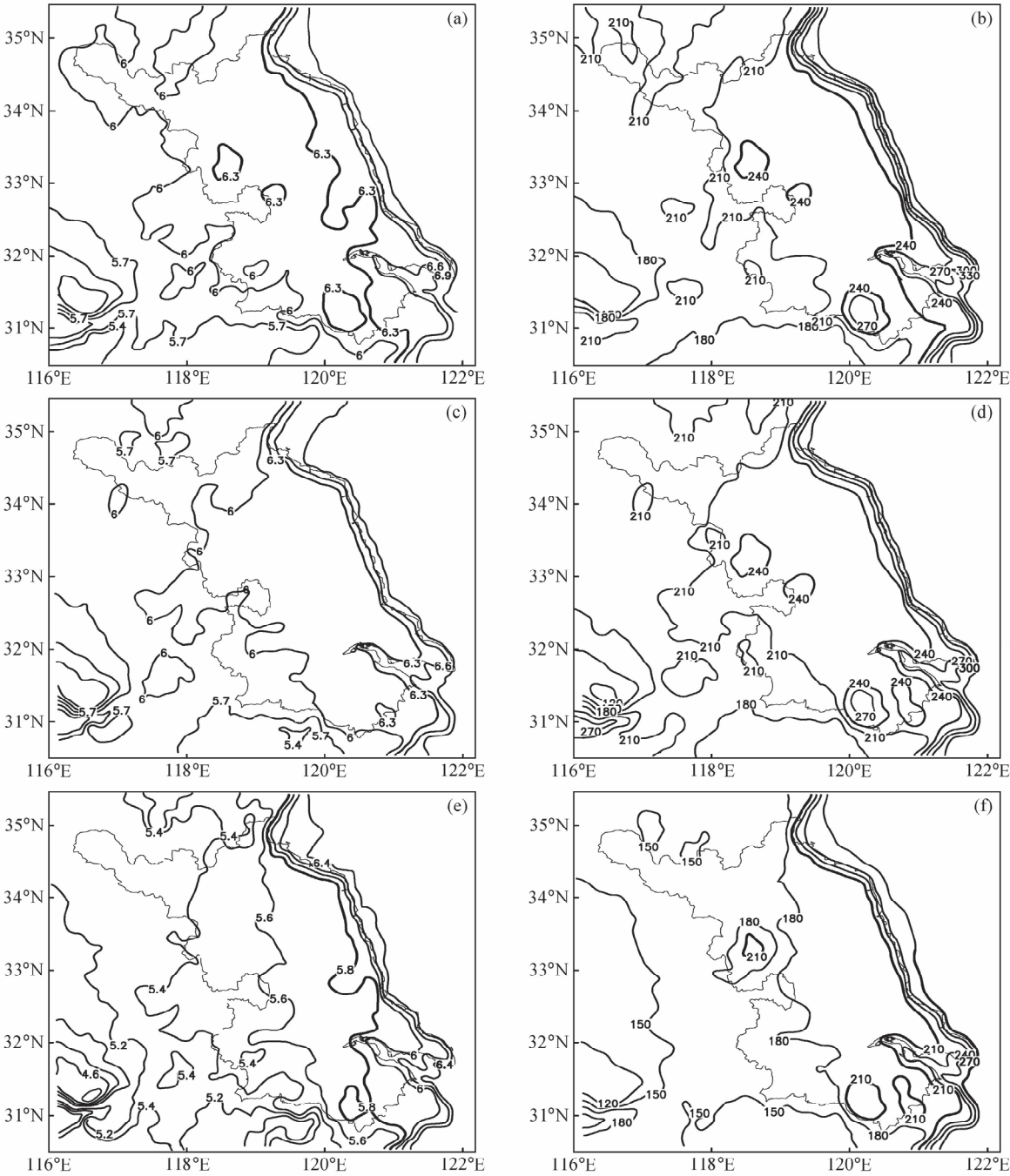


图 6 同图 2，但为 60 m 高度的模拟结果
Fig. 6 Same as Fig. 2, but for the simulations at 60 m above the ground

(1) 综合地面气象站观测资料与降尺度方法的模式分析，总结出江苏省风能资源的分布特征如下：江苏省平均风速与平均风能密度的等值线与海岸线平行，沿海岸线向内陆逐渐递减；以西连岛为代表的东部地区的风能资源最丰富，其次为长江三角洲地区，然后依次为太湖、洪泽湖及高邮湖地区，广大内陆地区的风能资源相对贫乏，

徐州市、南京市及连云港北部地区的风能资源最贫乏。

(2) 研究还揭示了区域气候模式的动力降尺度方法能够定量地再现研究区域在 850 hPa 风速场、海平面气压场的大尺度分布特征，对近地层的风场分布特征也具有较 强的模拟能力，可以用来进行风能资源的降尺度研究。

参考文献 (References)

- Bogardi I, Matyasovszky I. 1996. Estimating daily wind speed under climate change [J]. *Solar Energy*, 57: 239–248.
- Sahin B, Bilgili M, Akilli H. 2005. The wind power potential of the eastern Mediterranean region of Turkey [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93: 171–183.
- Chen F, Jimmy D. 2001a. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129: 569–585.
- Chen F, Jimmy D. 2001b. Coupling an advanced land surface hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part II: Preliminary model validation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129: 587–604.
- 范丽军, 符淙斌, 陈德亮. 2005. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 20 (3): 320–329. Fan Lijun, Fu Chongbin, Chen Deliang. 2005. Review on creating future climate change scenarios by statistical downscaling techniques [J]. *Advance in Earth Sciences (in Chinese)*, 20 (3): 320–329.
- 范丽军, 符淙斌, 陈德亮. 2007. 统计降尺度法对华北地区未来区域气温变化情景的预估 [J]. *大气科学*, 31 (5): 887–897. Fan Lijun, Fu Chongbin, Chen Deliang. 2007. Estimation of local temperature change scenarios in north China using statistical downscaling method [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (5): 887–897.
- Giorgi F, Bates T. 1989. The climatological skill of a regional model over complex terrain [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117: 2325–2347.
- Giorgi F, Mearns L O. 1999. Introduction to special section: Regional climate modeling revisited [J]. *J. Geophys. Res.*, 104: 6335–6352.
- Hong S Y, Juang H H, Lee D K. 1999. Evaluation of a regional spectral model for the East Asian monsoon case studies for July 1987 and 1988 [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 77: 553–572.
- Jimuy D, Gill D, Guo Y R, et al. 2001. PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and Users' Guide (MM5 Modeling System Version 3). NCAR/MMM.
- Jing Y N, Yuan X L, Feng J M, et al. 2006. Wind power density statistics using the Weibull model for inner Mongolia, China [J]. *Wind Engineering*, 30 (2): 161–168.
- Jones P D, Hulme M. 1996. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: Methods and illustrations [J]. *Int. J. Climate*, 16 (4): 361–377.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 779 (3): 437–471.
- 陆其峰, 潘晓玲, 钟科, 等. 2003. 区域气候模式研究进展 [J]. *南京气象学院学报*, 26 (4): 557–565. Lu Qifeng, Pan Xiaoling, Zhong Ke, et al. 2003. Advances in regional climate model studies [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 26 (4): 557–565.
- 刘栋. 2003. MM5 模式对区域气候模拟的性能试验 [J]. *高原气象*, 22 (1): 71–77. Liu Dong. 2003. Performance verification of mesoscale model MM5V3 to regional climate simulation [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 22 (1): 71–77.
- Lionello P, Nizzero A, Elvini E. 2003. A procedure for estimating wind waves and storm-surge climate scenarios in a regional basin: The Adriatic Sea case [J]. *Climate Res.*, 23: 217–231.
- Leung L R, Qian Y, Bian X, et al. 2003a. Hydroclimate of the western United States based on observations and regional climate simulation of 1981–2000. Part I: Seasonal statistics [J]. *J. Climate*, 16: 1892–1911.
- Leung L R, Qian Y, Bian X, et al. 2003b. Hydroclimate of the western United States based on observations and regional climate simulation of 1981–2000. Part II: Mesoscale ENSO anomalies [J]. *J. Climate*, 16: 1912–1928.
- Mearns L O, Bogardi I, Giorgi F, et al. 1999. Comparison of climate change scenarios generated from regional climate model experiments and statistical downscaling [J]. *J. Geophys. Res.*, 104 (D6): 6603–6621.
- Ozgun M A, Kose R. 2006. Assessment of the wind energy potential of Kutahya, Turkey [J]. *Energy Exploration and Exploitation*, 24: 113–129.
- Rehman S, El-Amin I M, Ahmad F, et al. 2007. Wind power resource assessment for Rafha, Saudi Arabia [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11: 937–950.
- 汤剑平, 苏炳凯, 赵鸣, 等. 2004. 东亚区域气候变化的长期数值模拟试验 [J]. *气象学报*, 62 (6): 752–763. Tang Jianping, Su Bingkai, Zhao Ming, et al. 2004. Long term climate change numerical simulation in east Asia [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 62 (6): 752–763.
- Von Storch H, Hewitson B, Mearns L. 2000. Review of empirical downscaling techniques, in regional climate development under global warming: Conference proceedings RegClim spring meeting [R]. Iversen T, Hoiskar B A K, Eds. *Gen. Tech. Rep.* 4, pp. 29–46. Jevnaker, Torbjornrud, Norway.
- 赵彦厂, 江志红, 吴息. 2008. 基于区域气候模式的江苏省风能评估试验 [J]. *南京气象学院学报*, 31 (1): 75–82. Zhao Yan-chang, Jiang Zhihong, Wu Xi. 2008. Wind energy resource evaluation for Jiangsu province based on RegCM3 [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 31 (1): 75–82.
- 张英娟, 高会旺, Lammel G. 2005. 区域气候模式 REMO 对东亚季风季节变化的模拟研究 [J]. *气候与环境研究*, 10 (1): 41–55. Zhang Yingjuan, Gao Huiwang, Lammel G. 2005. Simulation of monsoon seasonal variation of regional climate model REMO in east Asia [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 10 (1): 41–55.