

赵彦厂, 江志红, 吴息. 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, 2008, 31(1): 75-82

基于区域气候模式的江苏省风能评估试验

赵彦厂^{1,2}, 江志红¹, 吴息³

(1 南京信息工程大学 江苏省气象灾害重点实验室, 江苏 南京 210044

2 石家庄市气象局, 河北 石家庄 050081; 3 南京信息工程大学 大气科学学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 利用 2000 年 1 月 1 日—12 月 31 日 NCEP/NCAR 的再分析资料, 选取区域气候模式 RegCM3 对江苏省区域的风能进行细网格数值模拟。通过风速模拟场与同期实测场大尺度分布的对比分析表明, 模拟场能够较好地反映风场的空间分布形态, 而在细网格条件下, 模拟场更能真实地反映风场在特殊地形下的分布特征: 江苏省地面平均风能密度模拟值在 $60\sim 100\text{ W/m}^2$ 之间, 随高度上升而逐渐增大, 200 m 高度可达 $320\sim 380\text{ W/m}^2$; 沿海地区风能大于内陆, 苏中南地区大于苏北地区, 太湖等水域风能大于周围陆地; 低层风能的海陆间梯度变化明显, 高层则趋于平缓。通过分析认为, 风力发电场的最佳位置可在江苏中南沿海附近。

关键词: 风能; 资源评估; 区域气候模式

中图分类号: P461 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2022(2008) 01-0075-08

Wind Energy Resource Evaluation for Jiangsu Province Based on RegCM3

ZHAO Yan-chang^{1,2}, JIANG Zhi-hong¹, WU Xi³

(1. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, NUIST, Nanjing 210044, China

2. Shijiazhuang Meteorological Bureau, Shijiazhuang 050081, China

3. School of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044, China)

Abstract Using the NCEP/NCAR reanalysis data from January 1 to December 31 on 2000, the wind energy of Jiangsu Province was simulated by the Regional Climate Model (RegCM3). The comparative analysis of the simulated and observed data demonstrates that the spatial distribution of simulated wind field can well reflect the spatial pattern of the observed, and especially, the fine resolution simulation can more realistically reproduce the feature of winds over special terrains. The results of wind simulation show: 1) The surface mean wind energy density of Jiangsu increases with height from $60\text{--}100\text{ W/m}^2$ on the ground surface to $320\text{--}380\text{ W/m}^2$ at the height of 200 m. 2) The wind energy near the coast is larger than that in the inland, and the wind power in the central-south of Jiangsu than that in the north. Moreover, the availability of wind power above Taihu Lake and other lakes is more sufficient than nearby lands. 3) The gradient of wind power is sharp between land and sea at the lower levels, while it becomes gentle at the higher levels. As a result, this paper suggests that the best location for building wind power stations is the coastal regions in the central-south of Jiangsu Province.

Key words wind energy; resource evaluation; regional climate model

0 引言

风能作为可再生的绿色资源, 凭借其巨大的环保效益和商业潜力, 在全球的新能源和可再生能源

行业中发展迅速, 风电已成为近年来增长最快的能源。江苏省作为经济发展大省, 面临经济快速发展与供电能力不足、电网峰谷差值大, 以及环境压力日益加大等问题。开发风电资源是一种有效缓解电力

收稿日期: 2006-09-29 改回日期: 2007-04-20
基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2006730)
作者简介: 赵彦厂 (1976—), 男, 河北辛集人, 硕士, 工程师, 研究方向为短期气候预测及数值模拟, zhaoyan7611@126.com.

紧张的方法,而风能评估是风电场建设的前提和基础,可为风能利用提供科学依据。

以往国内外有关风能资源的评估工作大都使用台站 10 m 高度风速观测资料。薛桁等^[1-2]用台站风速观测值估算全国范围内的平均风能密度和海陆间风速变化规律。Celik^[3]用 Weibull 分布和 Rayleigh 模式讨论了土耳其南部区域内的风能分布。Lun 等^[4]用 Weibull 参数化的形式研究了长期风能观测数据序列的分布情况。Kavak 等^[5-6]比较了 Weibull 模式和 Rayleigh 模式研究风速和风能变化的情况,并对 Elizag 区域的风能参数进行分析,指出最佳建站地点。Li^[7]分析了香港离岸风的风能状况,并指出利用其建成风能发电站能够供给香港全年用电 6% 的电力,同时评估了风电的经济价值。Ahmet^[8]总结了当前风能研究的一般方法和风能发电机的发展现状。张一民等^[9]对江苏省区域内风能的分布和利用进行了研究,指出江苏省沿海为风能的丰富、较丰富区。高峰^[10]提出要充分利用江苏省自然条件优势,合理、有序地利用风能资源,并指出要积极储备海上风电项目。冯芝祥等^[11]分析了如东海上风能的情况。以上大量工作有力地促进了风能研究的发展,对于进一步扩大利用风能的区域提供了科学的参考依据。但是由于实际观测站稀少且分布不均匀以及海面资料缺乏等因素,使用上述方法所得结果不能精确地反映局地地形作用对风能的影响,也使风能资源评估难以细化,从而难以了解特殊地形下的风能分布以及沿海风能的变化特征。

为了进一步优化风力发电场位置的选择,根据国家发展和改革委员会和中国气象局颁布的《风能资源评价技术规定(修订稿)》的要求,有必要对江苏省风能资源的分布特征进行细致分析,以了解小尺度特殊下垫面下风能的特征,为风力发电场位置的选择提供更加精确的参考。为此利用区域气候模式 RegCM 3 选择与多年平均风能较为接近的 2000 年资料对江苏省区域风场进行细网格模拟试验,并与观测风场进行对比,在此基础上进行江苏省风能资源的评估试验。

1 RegCM 3 模式简介

20 世纪 90 年代以来,区域气候模式^[12-13]取得了迅速的发展,并已成为研究区域气候的一个重要工具。国内利用区域气候模式,在模式的适应性、模式检验、物理过程参数化、边界条件和初值问题,以及有关中国区域特定的地理环境和气候条件方面,

做了许多有益的工作^[14-20]。

RegCM 3 采用 MM 5 动力框架,垂直方向为 σ 坐标,水平方向采用“A rakaw a B”交错网格。模式的主要物理过程包括辐射方案、陆面过程、行星边界层方案、积云对流降水方案、大尺度降水方案和气压梯度方案。其中陆面过程采用 BATS1E 方案,该方案在水分循环、地表感热及动量通量计算方面与较早的 BATS 方案类似,可描述 18 种陆面覆盖和植被类型,它包括 1 层植被、1 层雪盖、3 层土壤,即 10 cm 的土壤表层、1~2 m 的根层和 3 m 的深土层。冠层和林冠的温度通过感热、辐射和潜热通量的能量平衡来诊断计算。气压梯度方案可以选择正常方式或静力平衡扣除方式。利用全球陆地覆盖特征和全球 30' 高度资料创建模式地形,使模式能更精确地表示出下垫面的状况。

在本文模拟实验中侧边界选择指数松弛方案,海洋通量参数化选择 Zeng 方案,压力梯度计算采用静力扣除方式。

2 资料及方法

2.1 资料

采用同年每日 4 次、水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的 NCEP/NCAR 再分析资料,插值到模式各层为模式提供初边值场,边界场每 6 h 更新一次,包括全球陆地覆盖特征 (GLCC) 资料,其中地形和植被数据分辨率分别为 10' 和 30'; 利用 2000 年江苏省 51 站逐日实测风速资料检验模式可行性。

2.2 方法

利用 RegCM 3 模式,用 2000 年 NCEP/NCAR 再分析资料作为初始边界场,模拟运算的区域位于 $115.84^\circ \sim 122.45^\circ \text{E}$, $29.85^\circ \sim 36.3^\circ \text{N}$ (图 1),中心在 119.07°E , 33.02°N ,涵盖江苏省及邻近海域。模式采用 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 的水平分辨率,垂直分为 18 层,模式层顶气压 $p_s = 5 \text{ hPa}$ σ 值根据压高公式和 σ 的转换公式获取;积分时间步长取 30 s,模式积分时间为 2000 年 1 月 1 日—12 月 31 日,通过模拟计算得到 2000 年的 18 层逐时风速。由风能密度计算公式 (1) 计算平均风能密度^[1,21] (单位: W/m^2):

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

式中: ρ 为空气密度; v_i 为每小时风速; n 为统计时段的小时数。

考虑到空气密度 ρ 水平方向的变化可忽略,通过密度公式计算得到 1Q 4Q 7Q 10Q 15Q 200 m 高

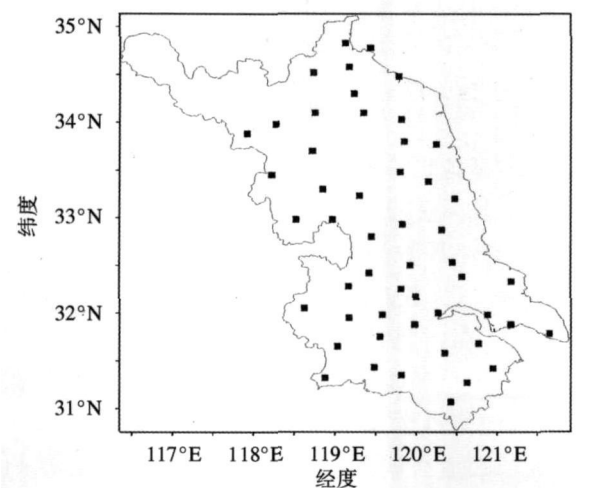


图 1 模拟计算的区域和江苏省 51 个气象观测站分布

Fig 1 Geographic distribution of 51 stations in the study area(Jiangsu)

度上的空气密度分别为 1.222 2, 1.214 4, 1.210 4, 1.205 0, 1.198 3, 1.188 0 kg/m³, 代入式 (1) 得到各高度的全年平均风能密度和各月平均风能密度。

3 模拟风与实测风的对比分析

3.1 模拟场与实测场大尺度分布对比

选取与江苏省 51 个气象观测站最邻近的模拟场网格点, 根据相似系数式 (2), 计算实测场和模拟场两者月平均风速和年平均风速的相似系数。

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i^2}} \quad (2)$$

式中: x_i 为第 i 点观测风速; y_i 为与第 i 台站最邻近的网格上模拟风速。

由表 1 可见, 风速实测值和模拟值两者的相似系数均在 0.97 以上, 表明模拟场与实测场分布非常相近。

表 1 实测值与模拟值的相似系数

Table 1 Similarity coefficients

between observed and simulated wind fields in 2000

月份	相似系数	月份	相似系数
1	0.97	7	0.98
2	0.98	8	0.97
3	0.98	9	0.97
4	0.98	10	0.97
5	0.97	11	0.97
6	0.97	12	0.97
年平均	0.97		

图 2a b 为江苏省内 51 站点实测年平均风速和相应 51 个格点年平均风速模拟场分布。由图可以看到, 两风速场均表现为自东向西递减的特征, 沿海地区风速大于内陆风速, 最大值在沿海地区, 而最小值则在徐州西北部, 表明模拟场能够较好地反映风速的空间分布形态。但对比其数值可知, 模拟值比实测值总体偏大, 尤其是在内陆地区。

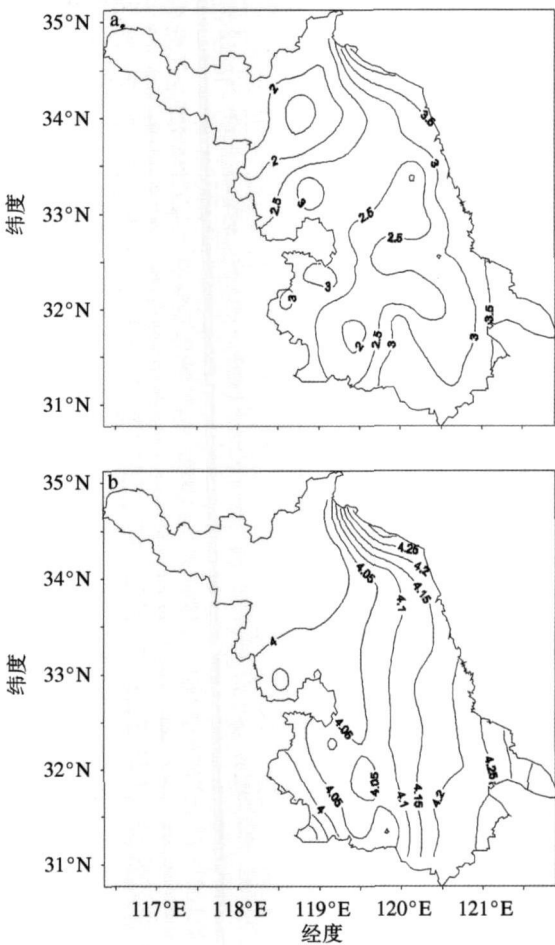


图 2 江苏省 51 站 2000 年平均风速分布 (单位: m/s)

a 实测场; b 模拟场

Fig 2 Mean wind speeds(m/s) of Jiangsu in 2000

a observation; b simulation

图 3 为实测场与模拟场相对差值百分比分布。由图可以看到, 相对差值的大小与站点所在位置密切相关, 一般地, 接近海面的站点模拟值和实测值相对差值较小, 在 30% 以下, 其中最小的差值位于江苏东北部西连岛、燕尾港附近, 差值在 10% 以内, 两站的地理位置比较特殊, 西连岛是离岛, 燕尾港位于海边; 而内陆地区的模拟值和实测值相对差值则较大, 达 40% ~ 130%。相对差值最大的沐阳位于江苏西北部的丘陵地区, 另外在江苏西南部地区存在

一个比较大的差值中心, 在 90% 以上。周淑贞等^[22]曾经指出, 由于城市的粗糙度大, 城市的平均风速都比其附近郊区要小, 并且城市与郊区风速的差值因时、因地、因风速而异。一般认为, 城市与其附近郊区相比, 年平均风速小 20% ~ 30%。本文中沿海附近地区实测值和模拟值差值在 30% 以下, 可认为结果基本可信; 内陆地区两者差值达 30% 以上, 究其原因, 可能与城市规模连年迅速扩张有关, 因为站点风场受周边建筑环境影响较大, 近年来城市的扩建及周围建筑的变化都对下垫面造成一定的影响, 从而有可能引起观测站风速的减小。

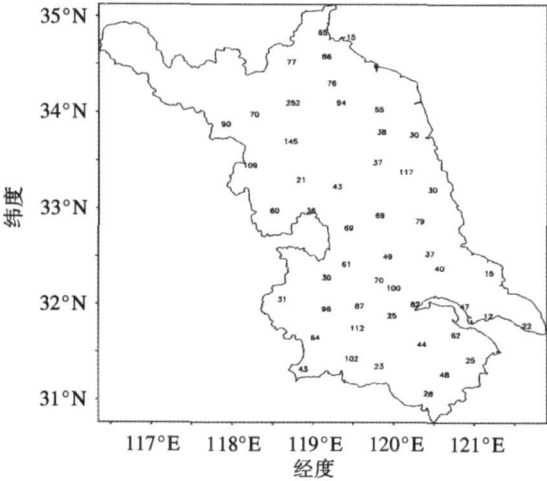


图 3 实测场与模拟场相对差值百分比分布 (单位: %)
Fig 3 The relative errors(%) of simulation in 2000

3 2 细网格风速模拟场分布特征

由上述分析可以看到, 风速实测场和模拟场大尺度分布基本一致, 表明模拟场能够比较准确地反映实测场的分布情况。但由于实测场站点分布稀疏, 无法反映局地地形对风速产生的影响, 而模拟场通过细化网格的计算可以得到加密的格点资料, 故有可能更好地反映风场的细致特征。图 4 5 分别为 2000 年细网格情况下平均风速和风能模拟场分布图, 范围在 115 84~ 122 45°E, 29 85~ 36 3°N, 格点间距为 10 km × 10 km, 格点数为 127 × 133。由图可看到风场在特殊地形作用下的诸多特征: 在沿海地区的风速梯度变化非常明显, 风速由海面向内陆急剧降低; 在太湖水域一带有明显闭合等值线, 说明局地地形作用对于风速的影响能够在模拟场中有所反映, 而该特征在站点稀疏的实测场中难以体现。

通过上述比较分析可以看到, 在大尺度背景下, 模拟场和实测场的空间分布形态非常相似, 说明模拟场在一定程度上能够反映实测场的空间分布; 而

在细网格条件下, 模拟场可以更好地反映特殊地形影响下风场的分布及变化特征。

4 风能模拟场分析

4 1 风能模拟场分布特征

4 1 1 平均风速模拟场分布

江苏省以平原为主, 地势低平, 相对变化较小, 绝大部分地区海拔在 50 m 以下, 仅有 5% 以下的低山丘陵分布在西北部 (徐州至宿迁) 和西南部的宁镇山脉, 因此局部地形对风速的分布影响有限, 风速主要呈现地带性分布。风速在陆面上分布相对均匀, 最大值在沿海附近, 达 5.2 m/s, 最小值在徐州一带, 为 3.8 m/s 左右。风速分布一方面呈现从东南向西北逐渐减小的趋势, 另一方面从沿海向内陆迅速降低, 变化梯度较大, 特别是海岸线附近区域最为明显。值得注意的是, 太湖水面风速可达 4.4 m/s 以上, 在内陆地区是较为明显的高值区 (图 4)。

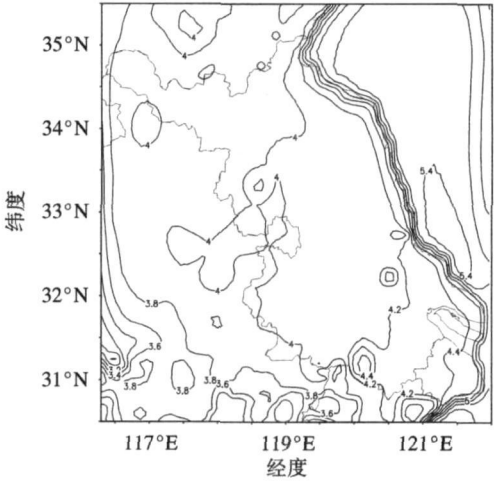


图 4 江苏省平均风速模拟场 (单位: m/s)
Fig 4 Simulated mean wind speeds(m/s) of Jiangsu in 2000

4 1 2 平均风能密度模拟场分布

江苏省 2000 年平均风能密度模拟场 (图 5) 总体呈东南—西北向逐步递减的特征, 即从东部沿海向西部内陆迅速减小, 数值在 60~ 100 W/m² 之间, 其中东部沿海最高, 在 80~ 100 W/m² 之间, 西北一带最低, 在 60 W/m² 左右。另外, 太湖水域上空年平均风能密度高于 100 W/m², 洪泽湖水域风能密度在 80 W/m² 左右, 均高于周围陆面。

从以上分析可以看出, 江苏省风能资源相对较丰富的地区主要在东部沿海海面及海岸附近, 以及内陆的太湖水域上空。

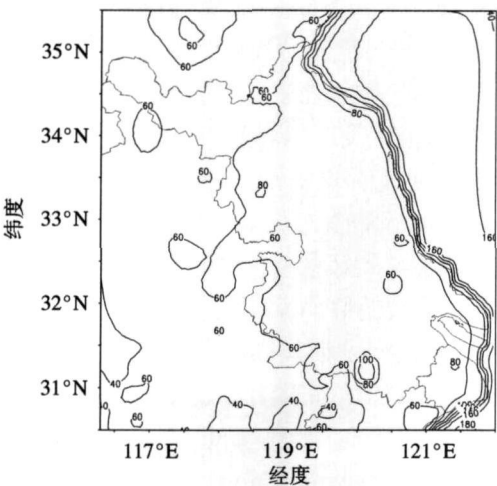


图 5 江苏省平均风能密度模拟场(单位: W/m^2)

Fig 5 Simulated mean wind energy density(W/m^2) of Jiangsu in 2000

4 2 风速与风能密度模拟场的季节变化

4 2 1 风速模拟场的季节变化

图 6a-d为江苏省 1 月、4 月、7 月、10 月的平均风速模拟场分布。考察各月风速可发现, 1 月平均风速最大, 在 $4.2 \sim 5.7 m/s$ 之间, 其中最大值在沿海海岸及太湖水面, 达 $5.4 m/s$ 以上, 最小值在徐州西北部; 内陆地区风速由东南向西北依次降低, 沿海地区风速则由海面向海岸迅速降低, 梯度变化极为明显。7 月平均风速最小, 在 $3.0 \sim 4.5 m/s$ 之间, 其中最大值在盐城北部沿海地区, 最小值在徐州西北部, 风速分布呈现由东南向西北逐渐减小的趋势, 海面到陆面的梯度变化很小。4 月和 10 月的平均风速居中, 数值在 $3.6 \sim 5.1 m/s$ 之间, 风速由沿海向内陆逐渐减小, 沿海地区的风速梯度变化比较明显, 4 月风速略大于 10 月风速。

值得注意的是, 受水体热力因素的影响, 太湖等水域风速显示出与海面相似的特征, 冬季 1 月水面平均风速在 $5.4 m/s$ 以上, 明显高于周围陆地风速, 春秋季仍有优势, 而夏季与周围陆地差别不大。

综上所述, 江苏省陆面风速模拟场的季节变化

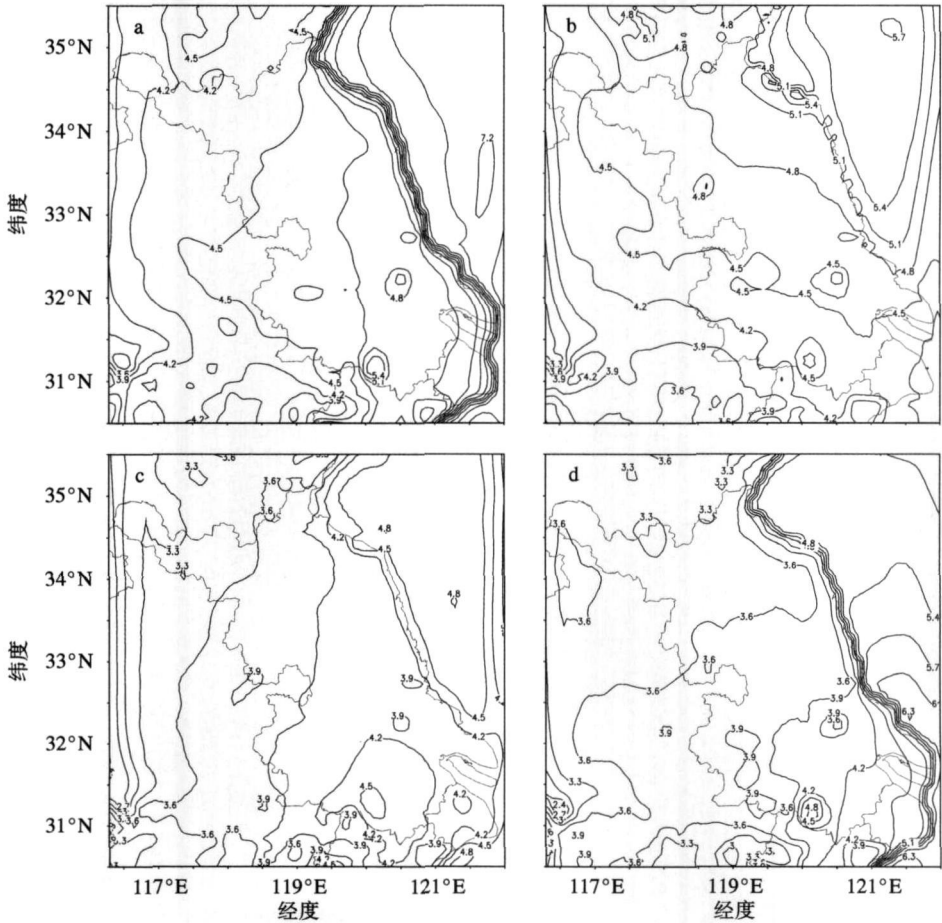


图 6 江苏省 1 月 (a)、4 月 (b)、7 月 (c) 和 10 月 (d) 平均风速模拟场 (单位: m/s)

Fig 6 Simulated monthly mean wind speeds(m/s) of Jiangsu in (a) January (b) April (c) July and (d) October 2000

基本规律是冬春季风速大于夏秋季, 沿海风速大于内陆, 1月风速最大, 7月最小, 沿海地区的风速梯度变化除夏季外均比较明显。

4 2 2 风能密度模拟场的季节变化

图 7a-d为江苏省 1月、4月、7月、10月 4个月的平均风能密度模拟场分布。由图可以看出, 1月风能密度最大, 陆地风能密度在 $60\sim 120\text{ W/m}^2$ 之间, 最大值分布在东部沿海海岸, 太湖上空也有相对高值区存在, 可达 120 W/m^2 以上, 海陆间风能梯度变化也极为明显。7月风能密度最小, 仅在 $30\sim 90\text{ W/m}^2$ 之间, 最小值在徐州西北部, 最大值分布在盐城沿海区域和太湖上空, 达 90 W/m^2 以上, 且风能密度海陆间风速梯度变化较小。4月和 10月的平均风能密度, 量级处于 1月和 7月之间, 海陆间风速梯度变化比较明显。

考察沿海地区的情况, 1月的风能密度极为丰富, 可达 240 W/m^2 以上, 4月和 10月的风能密度分别在 $90\sim 120\text{ W/m}^2$ 之间, 4月风能略大于 10月; 7

月风能密度最小, 仅在 $60\sim 90\text{ W/m}^2$ 之间。

太湖等水域与沿海海面的风能分布特征相似, 即除夏季月份外, 其风能密度明显高于周围陆地。

江苏省风能密度模拟场分布规律与风速分布相仿, 冬春季风能大于夏秋季, 沿海风能密度大于内陆, 并且风能的海陆差异在冬季最大, 夏季最小。

4 3 不同高度平均风能密度模拟场的分布

图 8a-e 分别为江苏省 40、70、100、150、200 m 高度的平均风能密度模拟场。由图可以看出, 40 m 高度的风能密度比地面有明显增加, 大部分地区在 $180\sim 220\text{ W/m}^2$ 之间, 北部徐州、宿迁一带最小, 在 $160\sim 180\text{ W/m}^2$ 之间, 而沿海海面风能密度最大, 达 $220\sim 260\text{ W/m}^2$ 。陆地风能密度由东南向西北地区依次降低, 沿海风能梯度变化非常明显, 风能从海面向陆地迅速减小。太湖上空风能密度在 $200\sim 220\text{ W/m}^2$ 之间, 和周围陆地相比有一定优势。

70 m 高度上, 局地地形的影响开始减小, 陆地大部分地区的风能密度在 $200\sim 280\text{ W/m}^2$ 之间, 沿

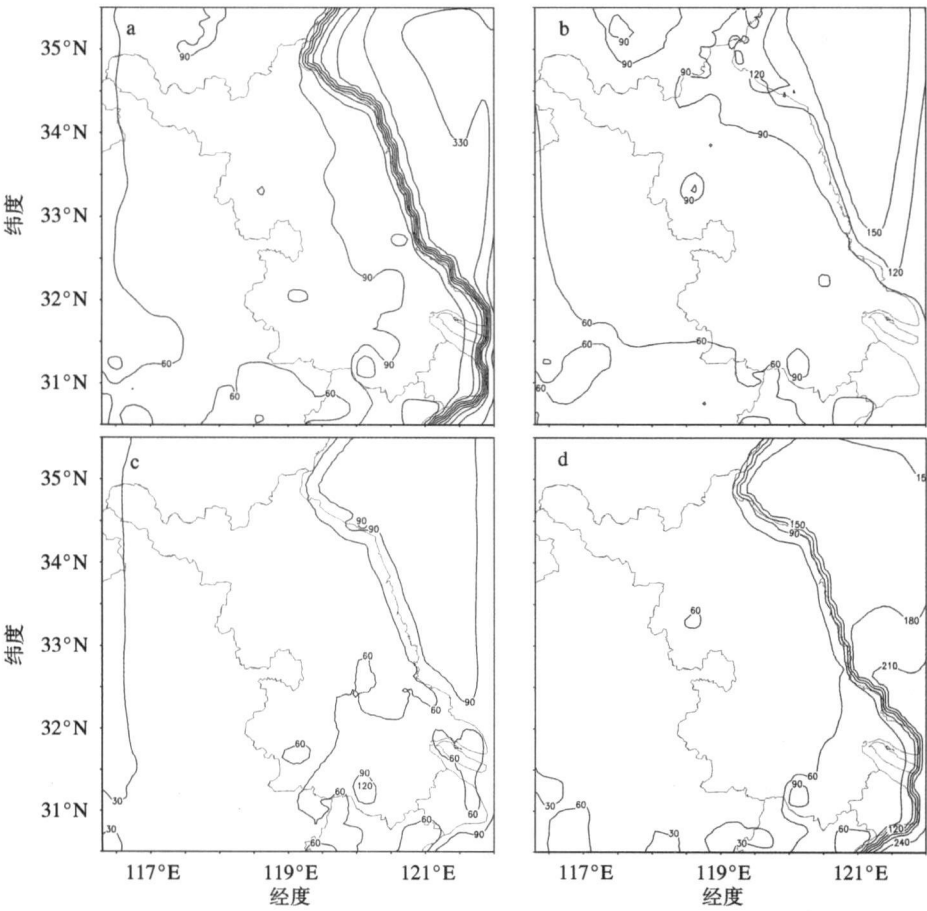


图 7 江苏省 1月 (a)、4月 (b)、7月 (c)和 10月 (d)平均风能密度模拟场 (单位: W/m^2)

Fig 7 Simulated monthly mean wind energy density(W/m^2) of Jiangsu in (a) January (b) April (c) July and (d) October 2000

海风能密度最大, 在 $260 \sim 300 \text{ W/m}^2$ 之间, 比 40 m 高度上略有增加。太湖水域风能比周围陆地仍略有优势, 在 240 W/m^2 左右。

100 m 高度上, 地形影响逐渐减小, 启东市东部陆面风能最大, 可达 300 W/m^2 以上, 陆地风能密度从东南到西北逐渐减小, 在 $240 \sim 300 \text{ W/m}^2$ 之间; 沿海风能密度在 $280 \sim 300 \text{ W/m}^2$ 之间, 比陆地略

大, 梯度变化不再如低层明显, 而太湖水域风能和周围相比差别已经不大。

在 150 m 高度上, 地形影响继续减小, 只有海陆之间有明显梯度变化。风能密度在 $280 \sim 340 \text{ W/m}^2$ 之间, 最大值在东部海岸, 可达 320 W/m^2 左右, 风能从东南向西北逐步减小, 海陆差异较低层有所减小, 启东市东部陆面风能略大于海面。

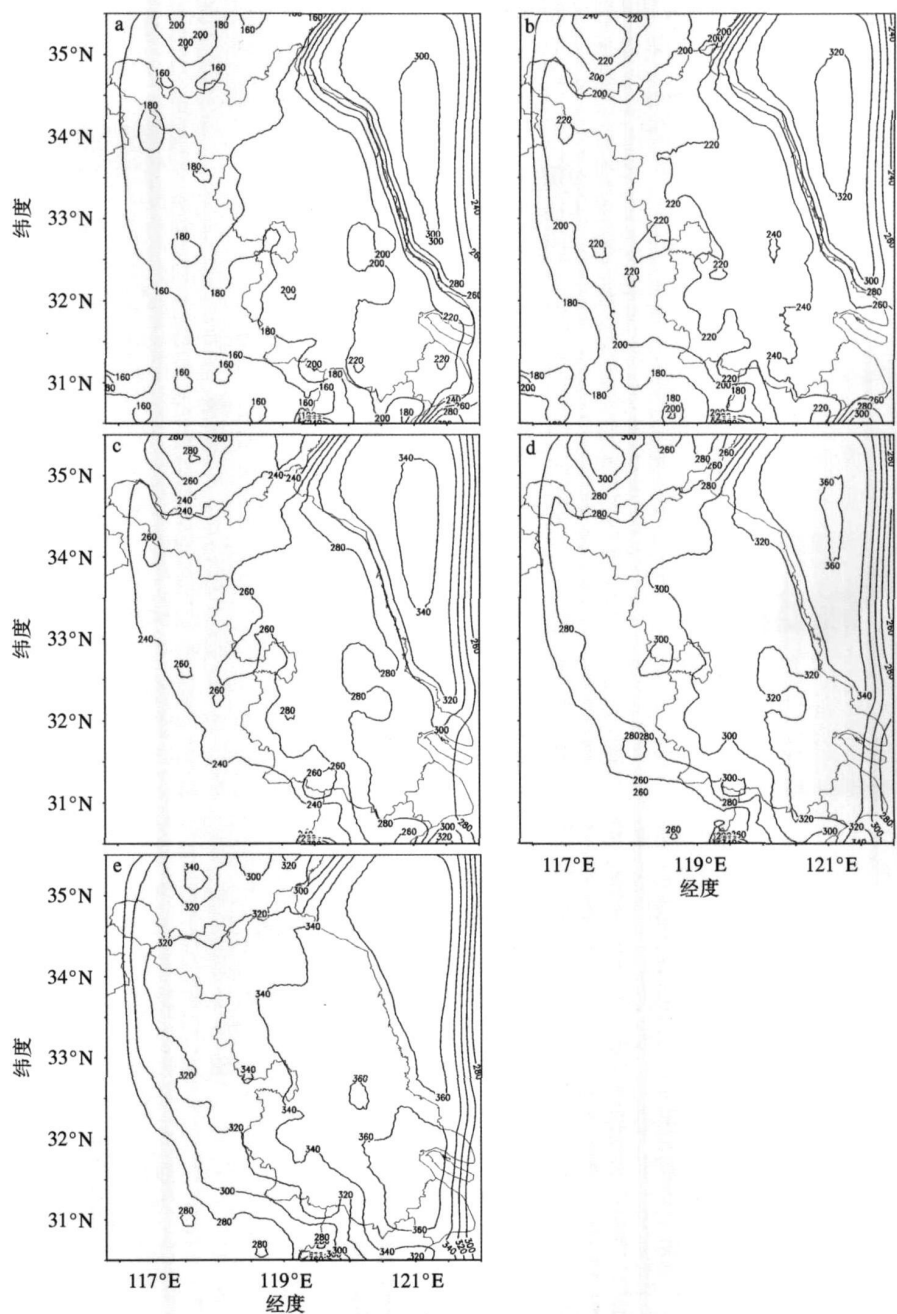


图 8 江苏省不同高度年平均风能密度模拟场 (单位: W/m^2)
a 40 m ; b 70 m ; c 100 m ; d 150 m ; e 200 m

Fig 8 Simulated annual mean wind energy density (W/m^2) at different heights in Jiangsu in 2000
a 40 m ; b 70 m ; c 100 m ; d 150 m ; e 200 m

200 m 高度上风能密度的海陆差异已经很小, 陆地风能密度在 $320\sim 380\text{ W/m}^2$ 之间, 最大值在沿海附近, 数值为 380 W/m^2 , 与陆地风能相别不大, 但北部地区风能依然较低。整体来看, 在 200 m 高度上地形影响已微乎其微。

综上所述, 江苏省风能密度随高度的上升而增大; 风能密度分布从沿海向内陆逐渐减小。在 40、70、100 m 高度上沿海海岸的风能均明显大于内陆地区, 梯度变化也相对较大, 随高度的增加, 该特征逐渐减弱。至 100 m 高度上风能密度的海陆差距明显降低, 梯度变化也随之减小, 200 m 高度风能的海陆差别更为微弱。100 m 高度以上的中南部沿海风能相比北部沿海略有优势。从地面至 40 m 高度, 太湖水域的风能密度相对于周围陆地存在较为明显的优势, 但随着高度的增加, 该优势逐渐减弱, 至 100 m 高度以上则基本消失。

5 结语

风速模拟场与实测场大尺度对比分析表明, 模拟场能够较好地反映风场的空间分布; 在细网格条件下, 模拟场能够更好地体现特殊地形影响下的风场分布特征, 而该特征在实测场中难以体现。

(1)江苏省地面平均风能密度模拟值在 $60\sim 100\text{ W/m}^2$ 之间, 随高度上升而逐渐增大, 200 m 高度可达 $320\sim 380\text{ W/m}^2$, 其中 10~40 m 范围内风能垂直梯度变化最大, 70~200 m 的风能密度随高度的变化趋于平缓。

(2)江苏省风能密度模拟场的地域分布特征表现为沿海地区风能大于内陆, 苏中南地区风能大于苏北地区, 陆地上风能分布无明显差异, 但在沿海地区存在相对丰富的风能资源, 其数量明显大于内陆。

(3)在 100 m 以下, 江苏省沿海地区的风能密度模拟值都比内陆地区有明显优势, 海陆间梯度变化明显, 但当高度大于 150 m 时, 上述特征逐渐减弱。另外, 太湖、洪泽湖等水域地面风速相对于周围陆地也存在一定优势, 但随着高度增加, 优势逐渐减弱, 100 m 以上基本消失。

通过分析认为, 风力发电场的最佳位置应在江苏中南沿海海面附近。

参考文献:

[1] 薛桁, 朱瑞兆, 杨振斌, 等. 中国风能资源贮量估算 [J]. 太阳能学报, 2001, 22(2): 167-170

[2] 薛桁, 朱瑞兆, 杨振斌. 沿海陆上风速衰减规律 [J]. 太阳能学报, 2002, 23(2): 207-210.

[3] Celik A. N. A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey [J]. Renewable Energy, 2004, 29(4): 593-604.

[4] Lun IY F, Lam J C. A study of Weibull parameters using long-term wind observations [J]. Renewable Energy, 2000, 20(2): 145-153

[5] Kavak E, Akpinar S. A statistical analysis of wind speed data used in installation [J]. Energy Conversion and Management 2005, 46(4): 515-532

[6] Kavak K, Akpinar S. An assessment on seasonal analysis of wind energy characteristics and wind turbine characteristics [J]. Energy Conversion and Management 2005, 46(11/12): 1848-1867.

[7] Li G. Feasibility of large scale offshore wind power for Hong Kong—a preliminary study [J]. Renewable Energy, 2000, 21(3/4): 387-402.

[8] Ahm et D S. Progress and recent trends in wind energy [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004(30): 501-543.

[9] 张一民, 沈才元, 沈凤英. 江苏省风能资源的分布和利用 [J]. 能源研究与利用, 1997, 9(1): 33-36.

[10] 高峰. 江苏省风能资源的开发和利用 [J]. 水力发电, 2000, 26(9): 59-60.

[11] 冯芝祥, 缪剑波, 梁玉楼. 如东海滨风能资源分析 [J]. 气象科学, 2000, 20(4): 526-530.

[12] 赵宗慈, 罗勇. 20世纪 90年代区域气候模拟研究进展 [J]. 气象学报, 1998, 56(2): 225-246

[13] 陆其峰, 潘晓玲, 钟科, 等. 区域气候模式研究进展 [J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(4): 557-565

[14] 罗勇, 赵宗慈. NCAR RegCM 2对东亚区域气候的模拟试验 [J]. 应用气象学报, 1997, 8(增刊): 124-133

[15] 龚威, 李维亮. 用改进的 NCAR 区域气候模式模拟中国夏季降水 [C] / 中国短期气候变化及成因研究. 北京: 气象出版社, 1996: 110-116

[16] 刘晓东, 江志红, 罗树如, 等. RegCM 3模式对中国东部夏季降水的模拟试验 [J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(3): 351-359.

[17] 和渊, 苏炳凯, 赵鸣. 区域气候模式 RegCM 2对标量粗糙敏感性试验 [J]. 气象科学, 2001, 21(2): 136-146.

[18] 万齐林. 区域气候数值模式研究及试验 [C] / 中国短期气候变化及成因研究. 北京: 气象出版社, 1996: 121-132.

[19] 吕世华, 陈玉春. 区域气候模式对华北夏季降水的气候模拟 [J]. 高原气象, 1999, 18(4): 632-640

[20] 张红平, 周锁钨, 薛根元, 等. 区域气候模式 (RegCM 2) 与水文模式耦合的数值试验 [J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(2): 158-165

[21] 张一民, 沈才元, 徐继先, 等. 江苏省风能简便计算方法的研究 [J]. 气象科学, 1997, 17(3): 268-273

[22] 周淑贞, 张超. 城市的风 [M] / 城市气候学导论. 上海: 华东师范大学出版社, 1985: 140-167