

王静¹ 曹洁¹ 邱黎¹ 董旭光¹ 李娟¹ 张海波¹

山东沿海风能资源分布特征及评估

摘要

利用山东省沿海测风塔 70 m 高度完整 1 a 的观测资料计算分析风能资源参数特征.结果表明:山东沿海地区平均风速与有效风功率密度分布特征相似,烟台沿海区域平均风速及有效风功率密度最大分别达到 6.7 m/s、463.5 W/m²,沿海北部地区风能资源最为丰富,日照地区最少;受海陆风作用,春季风能资源最好,其次是冬季,夏季最差,风速最大值基本出现在 14—16 时;年有效风能时数及百分率分别为 7 440 h、85%;风能密度分布基本以偏北或偏南方位较大.沿海区域风能资源分布特征与长年代评估结果及数值模拟结果基本一致.

关键词

山东沿海;风能资源;有效风功率密度;有效风能时数;有效风能时数百分率;风能密度分布

中图分类号 TK81

文献标志码 A

收稿日期 2013-04-19

作者简介

王静,女,硕士,工程师,主要从事气候应用工作.wangjing.1982@163.com

0 引言

随着化石资源(石油、煤炭)的大量开发,不可再生资源保有储量越来越少,人们意识到对可再生能源进行研究与开发的重要性与紧迫性.目前,国家已将新能源的开发提到了战略高度,风能、太阳能等再生能源将是未来一段时间新能源发展的重点.其中,被称为“蓝天白云”的风能资源,是一种取之不尽,又不会产生任何污染的可再生能源,由于其在减轻环境污染、减少温室气体排放、促进可持续发展方面的突出作用,越来越受到国家的高度重视.

近年来,世界风电装机容量以年均 30% 的速度快速增长,风电技术日渐成熟,展现了良好的发展前景.我国从 20 世纪 80 年代初开展全国风能普查工作,截止 2011 年共开展了 3 次全国风能普查和 1 次全国风能详查工作,对缓解我国电力紧张的局面、调整能源结构、促进生态改善、保障可持续发展具有重要的意义.朱瑞兆等^[1-2]早在 20 世纪 80 年代就对我国的风能资源分布进行过相关研究,之后其他学者对各地风能资源的分布及储量也做了深入的研究^[3-10].周荣卫等^[11]运用数值模拟手段对我国近海风况进行了高分辨率研究,黄世成等^[12]使用最小二乘技术对江苏省 80 m 高空风能进行了评估,贺志明等^[13]利用鄱阳湖地区测风塔资料研究分析了该地区近地层的风能资源特征,杨艳娟等^[14]利用 MM5/Calmet 模式模拟了天津沿海地区较高分辨率的风能资源分布状况并进行了评估.

山东省拥有较长的海岸线,海上风力发电资源也较为丰富.钱喜镇^[15]、赵家敏^[16]早期对山东省风能资源状况和发展前景做过相关研究,姜波等^[17]对山东半岛沿海风能资源进行了评估,董旭光等^[18]利用数值模式模拟山东北部沿海风随离岸距离的变化规律,李强等^[19]基于数值模式对山东威海区域风能资源进行了评估.由于第 3 次风能普查仍然是依据气象站 10 m 高度的测风资料,但由于城市化进程加快,气象站测风环境发生较大变化,影响测风的代表性,并且气象站点稀疏,远远不能满足风电场建设的需求,因此,在 2007 开展的“全国风能详查和评价项目”时,山东省气象局在具有风能开发潜力并具备大型风电场基本建设条件的地区,选取确定了滨州/东营、潍坊、烟台、威海、青岛、日照共 6 个沿海区域,设置建设 19 座风能资源观测塔(其中,70 m 塔 17 座、100 m 塔 2 座),建立起山东省风能资源专业观测网,开展长期观测,以满足风能资源开发利用的需要.本文利用 19

1 山东省气候中心,济南,250031

座测风塔 70 m 高度实测资料对山东沿海风能资源进行研究, 以为山东沿海地区风电产业发展提供依据。

1 资料来源及方法

1.1 资料来源

数据来源于山东沿海 19 座梯度测风塔 70 m 高度 2009 年 6 月 1 日—2010 年 5 月 31 日的观测资料, 风向风速传感器采用华云公司生产的 CAWS1000-GWS 型自动梯度观测系统。19 座测风塔位置分布如图 1 所示。本研究中所采用的参证站资料, 取自国家地面气象观测站。

1.2 资料处理方法

根据气象统计学理论, 对有缺测和无效数据的测风塔逐个进行插补订正, 使订正后风速数据有效完整率达到 100%。具体方法为: 利用各测风塔 70 m 高度观测获取的可靠实测数据与相应参证站 (或者相邻测风塔) 同时段的测风资料进行相关分析, 在满足统计样本数量的前提下, 选取 2 个站点日平均风速样本, 进行相关计算和检验。

采用检验统计量 F 检验相关系数的可靠性:

$$F = R^2 \frac{1 - R^2}{n - 2}, \quad (1)$$

其中 R 为相关系数, n 为样本量, 通过给定 0.01 的信度, 检验 F 值。

数据完整率 =

$$\frac{\text{应测数据量} - \text{缺测数据量} - \text{无效数据量}}{\text{应测数据量}} \times 100\% \quad (2)$$

1.3 风能参数计算方法

风能资源评估主要考虑以下几个参数^[20-21]:

1.3.1 有效风能时数

有效风能时数即统计出代表年测风序列中风速在 3~25 m/s 之间的累计时数。

1.3.2 风功率密度

风功率密度是与风向垂直的单位面积中风所具有的功率, 是衡量一个地区风能大小, 评价一个地区风能潜力的重要指标。设定时段内的平均风功率密度表达式为

$$D_{WP} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \rho \cdot v_i^3, \quad (3)$$

其中 D_{WP} 为平均风功率密度 (W/m^2), n 为设定时段内的记录数, ρ 为空气密度 (kg/m^3), v_i^3 为第 i 次记录的风速 (m/s) 值的立方。

平均风功率密度 D_{WP} 的计算应是设定时段内逐小时风功率的平均值, 不可用年 (或月) 平均风速计算年 (或月) 平均风功率密度。空气密度 ρ 按式 (4) 计算:

$$\rho = \frac{1.276}{1 + 0.00366t} \frac{p - 0.378e}{1000}, \quad (4)$$

其中 ρ 为空气密度 (kg/m^3), p 为大气压 (hPa), t 为

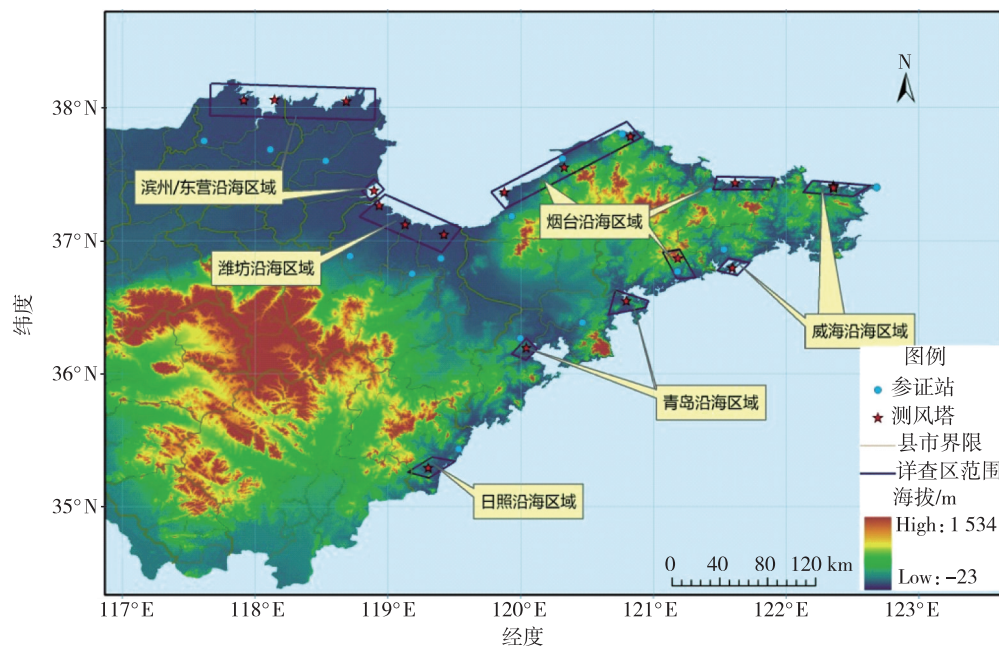


图 1 测风塔位置分布

Fig. 1 Distribution of wind towers

气温(℃), e 为水汽压(hPa).

1.3.3 有效风功率密度

有效风速 3~25 m/s 间的风功率密度,为可利用的风功率密度.

1.3.4 风向频率及风能密度分布

以 16 方位各风向频率描述风的方向分布特征.风向频率指设定时段各方位风出现的次数占全方位风向出现总次数的百分比.

风能密度计算公式为

$$D_{WE} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \rho \cdot v_i^3, \quad (5)$$

其中 D_{WE} 为设定时段的风能密度 ($W \cdot h/m^2$), n 为设定时段内的记录数, v_i 为第 i 次记录的风速 (m/s) 值, ρ 为空气密度,由式(4)给出.

风能密度分布是指设定时段各方位的风能密度占全方位总风能密度的百分比.

1.3.5 有效风功率密度等级指标

根据国内研究结果^[22],将 70 m 风功率分为 7 个等级,如表 1 所示.

表 1 70 m 高度有效风功率密度等级
Table 1 Grades and description of effective wind power density at 70 m

等级	风功率密度/ (W/m^2)	年平均风速参考值/ (m/s)	应用于并网 风力发电
1	<230	5.9	
2	[230~350)	6.7	
3	[350~460)	7.3	较好
4	[460~580)	7.9	好
5	[580~690)	8.4	很好
6	[690~920)	9.2	很好
7	[920~2 310)	12.5	很好

2 风能资源特征分析

2.1 空间分布特征

通过对各沿海区域观测时段内平均风速以及平均有效风功率密度的分析得出沿海风能资源空间分布特征.

从表 2 可以看出,山东沿海平均风速介于 4.1~7.0 m/s 之间,烟台沿海区域风速最大为 7.0 m/s,日照沿海区域风速最小为 4.1 m/s.总体来看,山东半岛东北部风速较大,日照地区风速最小,主要是因为山东半岛东北部沿海盛行偏北风,偏北气流通过海面减速很小,另外这一岸段多岬角、岬岛、岛

屿等^[23].

平均有效风功率密度与风速分布特征相似,介于 118.3~463.5 W/m^2 之间,烟台沿海区域平均风功率密度最大为 463.5 W/m^2 ,其次是威海沿海区域为 410.3 W/m^2 ,日照沿海区域最小(118.3 W/m^2).

表 2 各区域 70 m 高度风能参数

Table 2 Wind energy parameters at 70 m in each coastal area

区域	平均风速/ (m/s)	平均有效风功率密度/ (W/m^2)
滨州/东营沿海	6.4~6.6	306.8~356.5
潍坊沿海	5.9~6.2	258.4~293.5
烟台沿海	5.7~7.0	260.6~463.5
威海沿海	6.0~6.7	283.3~410.3
青岛沿海	5.6~6.1	241.8~256.6
日照沿海	4.1	118.3

2.2 时间分布特征

用山东沿海 19 座测风塔平均风速及有效风功率密度的月平均值代表该月山东沿海的平均风速及有效风功率密度,月变化如图 2 所示.19 座测风塔平均风速及有效风功率密度日变化如图 3 所示.

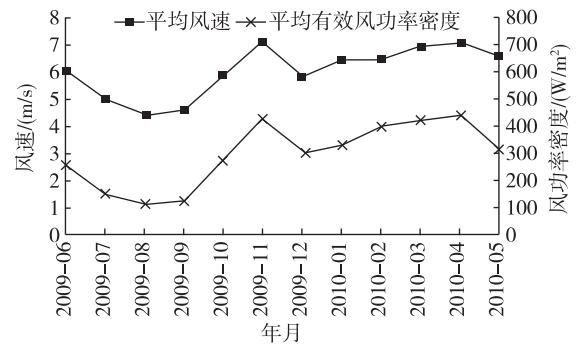


图 2 风速及有效风功率密度月变化
Fig. 2 Monthly change of wind speed and effective wind power density

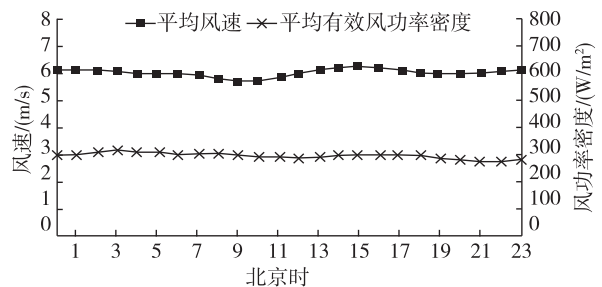


图 3 风速及有效风功率密度日变化
Fig. 3 Daily change of wind speed and effective wind power density

从月际分布来看,风能资源最好的月份是4和11月,平均风速均为7.2 m/s,平均有效风功率密度分别为443.6和427.9 W/m²,风能资源最低的月份是8月,平均风速及有效风功率密度分别为4.5 m/s、113.6 W/m²;从季节分布来看,春季风能资源最好,冬季次之,夏季最差.各区域测风塔均处于沿海地区,风速逐月变化反映了海陆风的季节变化规律.海风强盛的季节是春末夏初,陆风强盛的季节是秋末冬初.夏季海陆温差最小,8—9月风速达到最小.

从日变化曲线来看,平均有效风功率密度日变化不显著,14—16时平均风速最大,08—10时最小.海陆风有明显的日变化,一般海风在中午到傍晚时达到最强,陆风在夜间和早晨达到最强,另外的原因是由于太阳对地表的辐射加热所引起的.因此,白天特别是午后是一日中风能资源利用的最好时段.

2.3 有效风能时数及最大风速

有效风能时数各月均超过549 h,最高月份是1月,达到667 h;有效风能时数百分率均超过75.1%,最大月份是11月,占91.4%;年有效风能时数及百分率分别为7 440 h、85%.总体来看,春季有效风能时数及百分率相对较大,风能资源较好(表3).

表3 风能参数月际变化

Table 3 Monthly change of wind energy parameters

年月	有效风能时数/h	有效风能时数百分率/%	最大风速/(m/s)
2009-06	620	86.2	21.7
2009-07	602	80.9	30.5
2009-08	558	75.1	16.4
2009-09	549	76.2	18.7
2009-10	636	85.5	26.9
2009-11	658	91.4	24.4
2009-12	609	81.8	22.5
2010-01	667	89.6	21.7
2010-02	578	86.0	22.4
2010-03	656	88.3	23.9
2010-04	644	89.4	29.3
2010-05	663	89.2	24.5
年	7 440	85.0	30.5

2.4 风能密度分布特征

从图4可以看出,沿海各区域风能密度分布基本集中在偏北(N)或偏南(S)方位,偏东(E)和偏西(W)方位分布较少,主要原因是山东地处东亚季风区,冬夏季风向有明显转换.冬季(1月)受蒙古高压控制,山东处于高压中心东南侧,一般盛行偏北风;

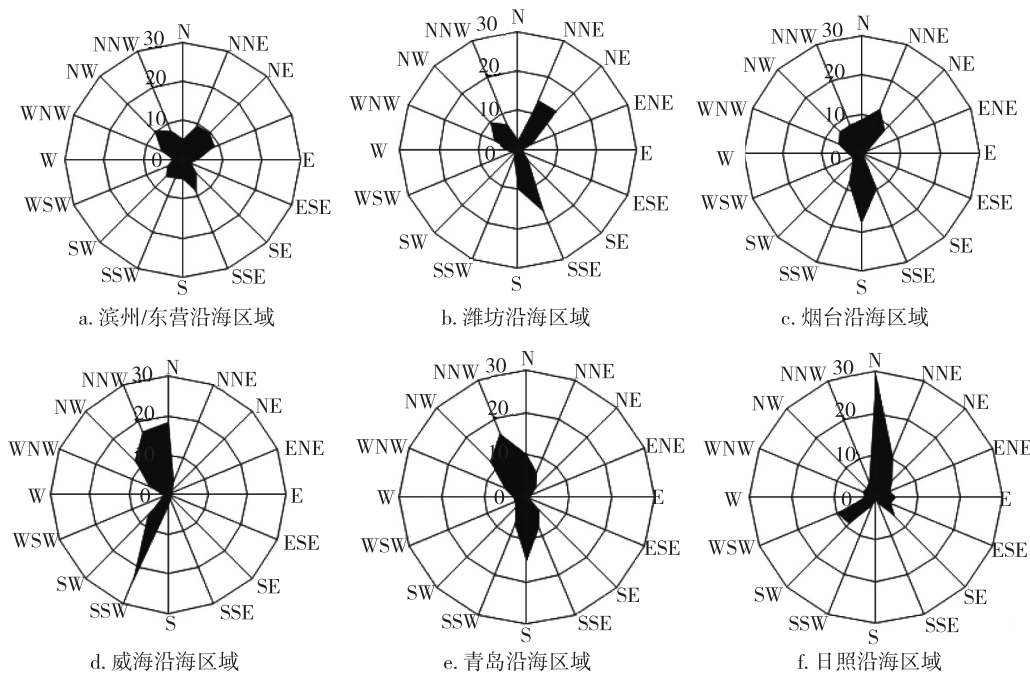


图4 各区域70 m高度风能密度分布

Fig. 4 Distribution of wind power density at 70 m in coastal area of Binzhou/Dongying(a), Weifang(b), Yantai(c), Weihai(d), Qingdao(e) and Rizhao(f)

春季(4月)蒙古高压势力减弱,偏北风减少,偏南风逐渐占主导位置;夏季(7月),山东受中心位于印度北部的强大热低压控制,因此大部分地区偏南风;秋季(10月),蒙古高压重新建立,夏季风逐渐被冬季风取代,大部分地区出现偏北风和偏南风共存的现象,但是偏南风略占优势。

2.5 风能资源长年代评估

选取风能资源长期平均状况评估参证站,重点考虑能够代表山东省各沿海区域平均风气候特征,根据山东省风气候的一般特点和沿海区域分布情况,筛选出符合要求(关键是近20 a 风速变化尽量不受台站测风环境影响)的参证站.利用观测年度各区域测风塔日平均风速与相应参证站同期风速进行相关性分析,相关系数均在0.7以上,可见,测风塔与参证站之间有着较好的相关性.对近20 a(1990—2009年)测风环境严重影响风速历史序列一致性的参证气象站,采用*t*检验进行一致性检验,采取比值或差值法,进行历史序列的一致性订正,订正后与测风塔观测年的计算结果基本一致,结果如表4所示。

表4 风能参数长年代估算结果(1990—2009年)

Table 4 Long time(1990—2009) evaluation result of wind energy parameters

项目	年平均风速/ (m/s)	年平均风功率密度/ (W/m ²)	风资源等级
均值	6.0	247.4	2
最大值	7.2	428.9	3
最小值	4.2	89.2	1

2.6 风能资源数值模拟结果

利用MM5中尺度气象模式和calmet微尺度模式,采用USGS30秒水平分辨率的DEM地形资料、SRTM3地形数据、分辨率1°×1°的NCEP再分析资料、山东省气象局探空资料以及地面观测资料,模拟2009年6月1日—2010年5月31日山东省70 m高度风能资源分布,模拟结果如图5、6所示。

由图5、6可以看出,山东沿海区域模拟结果与观测资料计算的风能资源分布特征基本一致,胶东半岛东部和北部距海岸40 km左右范围内的沿海一带是大风区,威海成山头附近海域风能资源尤为丰富,日照地区最小。

3 结论

1) 山东沿海平均风速及有效风功率密度分布

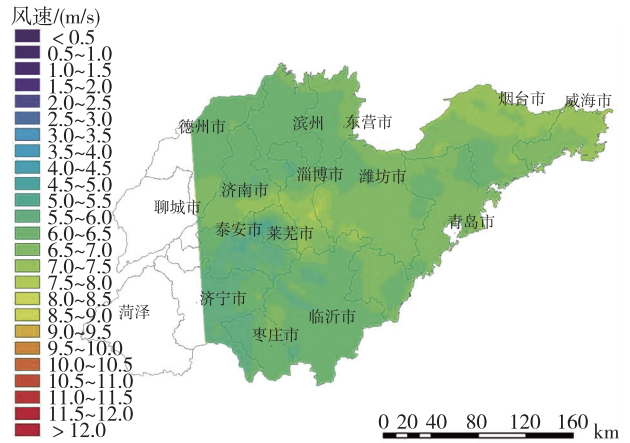


图5 山东省70 m高度平均风速模拟结果

Fig. 5 Simulation result of average wind speed at 70 m in Shandong

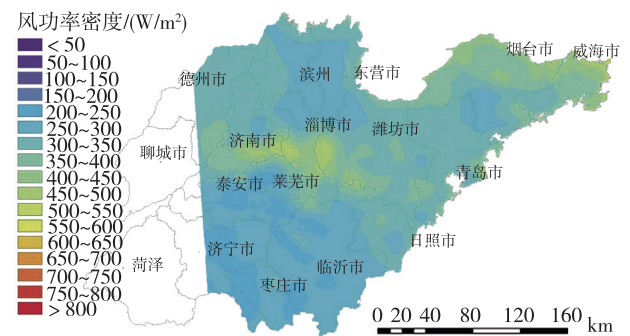


图6 山东省70 m高度风功率密度模拟结果

Fig. 6 Simulation result of wind power density at 70 m in Shandong

特征相似,且北部较大,日照地区较小;受海陆风作用影响,春季风能资源最好,冬季次之,夏季最差,风速最大值出现在一日的14—16时,最小值出现在08—10时;年有效风能时数及百分率分别为7 440 h,85%;风能密度分布基本以偏北(N)或偏南(S)方位较大。

2) 沿海测风塔风能资源分布特征与长年代评估结果及数值模拟结果基本一致。

参考文献

References

[1] 朱瑞兆,薛桁.风能的计算和我国风能的分布[J].气象,1981,7(8):26-28
ZHU Ruizhao, XUE Heng. The calculation and distribution of wind energy in China [J]. Meteorological Monthly, 1981, 7(8): 26-28
[2] 朱瑞兆,薛桁.中国风能区划[J].太阳能学报,1983,4

- (2):9-18
ZHU Ruizhao, XUE Heng. Zoning of wind energy in China[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 1983, 4(2): 123-132
- [3] 徐卫民, 曾辉, 陆长清. 江西省风能资源分析[J]. 江西能源, 2002(4): 43-46
XU Weimin, ZENG Hui, LU Changqing. Analysis of wind energy resource in Jiangxi province[J]. Jiangxi Energy, 2002(4): 43-46
- [4] 杨宏青, 刘敏, 冯光柳, 等. 湖北省风能资源评估[J]. 华中农业大学学报: 自然科学版, 2006, 25(6): 683-686
YANG Hongqing, LIU Min, FENG Guangliu, et al. Evaluation of wind energy resources in Hubei province[J]. Journal of Huazhong Agricultural University: Natural Science Edition, 2006, 25(6): 683-686
- [5] 龚强, 袁国恩, 汪宏宇, 等. 辽宁沿海地区风能资源状况及开发潜力初步分析[J]. 地理科学, 2006, 26(4): 483-489
GONG Qiang, YUAN Guoen, WANG Hongyu, et al. State and exploitation potentiality of wind energy resources in Liaoning littoral[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(4): 483-489
- [6] 龚强, 于华深, 蔺娜, 等. 辽宁省风能、太阳能资源时空分布特征及其初步区划[J]. 资源科学, 2008, 30(5): 654-661
GONG Qiang, YU Huashen, LIN Na, et al. Temporal-spatial distribution and regionalization of wind and solar energy resources in Liaoning province[J]. Resources Science, 2008, 30(5): 654-661
- [7] 朱飙, 李春华, 陆登荣, 等. 甘肃酒泉区域风能资源评估[J]. 干旱气象, 2009, 27(2): 152-156
ZHU Biao, LI Chunhua, LU Dengrong, et al. Wind energy resource assessment of Jiuquan, Gansu province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2009, 27(2): 152-156
- [8] 陈飞, 班欣, 祁欣, 等. 连云港沿海地区及近海风能资源评估[J]. 气象科学, 2008, 28(增刊1): 101-106
CHEN Fei, BAN Xin, QI Xin, et al. Evaluation of wind energy resource on the coastland and adjacent sea of Lianyungang[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2008, 28(sup1): 101-106
- [9] 郑红, 于宏敏, 魏磊, 等. 黑龙江省风能资源再分析[J]. 黑龙江大学学报, 2010, 37(3): 64-66
ZHENG Hong, YU Hongmin, WEI Lei, et al. Re-analysis of wind energy resource in Heilongjiang province[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 2010, 37(3): 64-66
- [10] 姜波, 刘富铀, 徐辉奋, 等. 浙江省沿海海洋风能资源评估[J]. 海洋技术, 2012, 31(4): 91-94
JIANG Bo, LIU Fuyou, XU Huiwen, et al. Evaluation of the wind energy resources in Zhejiang coastal area[J]. Ocean Technology, 2012, 31(4): 91-94
- [11] 周荣卫, 何晓凤, 朱蓉, 等. 中国近海风能资源开发潜力数值模拟[J]. 资源科学, 2010, 32(8): 1434-1443
ZHOU Rongwei, HE Xiaofeng, ZHU Rong, et al. Numerical simulation of the development potential of wind energy resources over China's offshore areas[J]. Resources Science, 2010, 32(8): 1434-1443
- [12] 黄世成, 任健, 王冰梅, 等. 江苏 80m 高度风能评估方法探讨[J]. 气象科学, 2009, 29(4): 519-523
HUANG Shicheng, REN Jian, WANG Bingmei, et al. Evaluation of wind energy at 80m in Jiangsu[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2009, 29(4): 519-523
- [13] 贺志明, 聂秋生, 刘熙明, 等. 鄱阳湖区近地层风能资源特征研究[J]. 资源科学, 2011, 33(1): 184-191
HE Zhiming, NIE Qiusheng, LIU Ximing, et al. Surface-layer wind energy resources over the Poyang lake area[J]. Resources Science, 2011, 33(1): 184-191
- [14] 杨艳娟, 李明财, 任雨, 等. 天津近海风能资源的高分辨率数值模拟与评估[J]. 资源科学, 2011, 33(10): 1999-2004
YANG Yanjuan, LI Mingcai, REN Yu, et al. High-resolution numerical simulation and assessment of the offshore wind energy resource in Tianjin[J]. Resources Science, 2011, 33(10): 1999-2004
- [15] 钱喜镇. 山东省风能资源开发现状及前景展望[J]. 山东气象, 1995, 15(4): 44-46
QIAN Xizhen. Future prospect and development status of wind energy resources in Shandong province[J]. Journal of Shandong Meteorology, 1995, 15(4): 44-46
- [16] 赵家敏. 山东省风能资源综述[J]. 山东电力高等专科学校学报, 1999, 2(4): 86-89
ZHAO Jiamin. The summary of wind energy resources in Shandong province[J]. Journal of Shandong College of Electric Power, 1999, 2(4): 86-89
- [17] 姜波, 赵世明, 徐辉奋, 等. 山东半岛沿海风能资源评估与分布研究[J]. 海洋技术, 2009, 28(4): 101-103.
JIANG Bo, ZHAO Shiming, XU Huiwen, et al. Assessment and study on distribution of wind energy resource in Shandong peninsula coast[J]. Ocean Technology, 2009, 28(4): 101-103
- [18] 董旭光, 张秀芝, 刘焕彬, 等. 山东北部沿海风随离岸距离的变化规律[J]. 资源科学, 2011, 33(7): 1317-1324
DONG Xuguang, ZHANG Xiuzhi, LIU Huanbin, et al. Wind speed variation with the distance from the coast of northern Shandong[J]. Resources Science, 2011, 33(7): 1317-1324
- [19] 李强, 李宏江, 董旭光, 等. 基于数值模拟的山东威海区域风能资源评估[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(1): 457-462
LI Qiang, LI Hongjiang, DONG Xuguang, et al. Evaluation of wind energy in Weihai city of Shandong province based on numerical simulation[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(1): 457-462
- [20] 中国水利水电建设工程咨询公司. 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, 2003
China Water Conservancy and Hydropower Construction Consulting Company. GB/T 18710—2002 Wind energy resource assessment methods inwind power station[S]. Beijing: China Standard Press, 2003
- [21] 中国气象科学研究院生态环境与农业气象研究所. 全国风能资源评价技术规范[S]. 北京: 气象出版社, 2003
Research Institution of Ecological Environment and Agri-

- cultural Meteorology in Chinese Academy of Meteorological Sciences. Technical specification for national wind energy resource assessment [S]. Beijing: China Meteorological Press, 2003
- [22] 文明章, 吴滨, 林秀芳, 等. 福建沿海 70 米高度风能资源分布特点及评估 [J]. 资源科学, 2011, 33 (7): 1346-1352
- WEN Mingzhang, WU Bin, LIN Xiufang, et al. Distribution characteristics and assessment of wind energy resources at 70 m height over Fujian coastal areas [J]. Resources Science, 2011, 33 (7): 1346-1352
- [23] 王建国. 山东气候 [M]. 北京: 气象出版社, 2005
- WANG Jianguo. Shandong climate [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005

Distribution characteristics and assessment of wind energy resources over Shandong coastal areas

WANG Jing¹ CAO Jie¹ QIU Can¹ DONG Xuguang¹ LI Juan¹ ZHANG Haibo¹

¹ Shandong Climate Center, Jinan 250031

Abstract Based on observational data at 70 m height from 19 wind towers from Jun 1, 2009 to May 31, 2010 in Shandong coastal areas, the reserves and distribution characteristics of wind speed and wind energy at 70 m height were analyzed using statistical methods. The results show that the distribution characteristics of the average wind speed are accordant with effective wind power density in Shandong coastal areas. The average wind speed and effective wind power density are up to 6.7 m/s and 463.5 W/m², respectively in Yantai coastal area. The wind energy resources are much richer in the north area than in other areas, with the poorest being in Rizhao area. Due to the influence of sea breeze, the wind energy resources are richest in spring, followed by winter, and poorest in summer, and the maximum of the daily wind speed appears in period of 14:00—16:00. Results also show that the mean annual effective hours of wind and its percentage are 7 440 h and 85%, respectively. The distribution of wind energy density is larger in the northerly or southerly azimuth. The distribution characteristics of wind speed and wind energy are generally consistent with the results of long time evaluation and numerical simulation.

Key words coastal zone of Shandong province; wind energy resources; effective wind power density; effective hours of wind; percent of valid hours of wind; distribution of wind energy density