doi:10.6043/j.issn.0438-0479.2016.02.011

巴基斯坦瓜达尔港的风能资源评估

郑崇伟[1,2,3],李崇银[1,2*],杨 艳[4],陈 雄[1]

(1.解放军理工大学气象海洋学院,江苏 南京 211101;2.中国科学院 大气物理研究所,大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京 100029;3.海军大连舰艇学院,辽宁 大连 116018;4.国家海洋局,北京 100860)

摘要:利用来自欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA-interim 风场资料,对瓜达尔港的风能资源展开评估.结果表明:1) 瓜达尔港的风能资源常年可用,风能密度、有效风速出现频率、不同等级风能密度出现的频率都表现出明显的单峰型月变化特征,峰值出现在 4—5 月,波谷出现在 11—12 月;年平均值分别为:风能密度 121 W/m^2,有效风速频率 43%,50 W/m^2 以上能级频率 55%. 2) 从风能玫瑰图看出,瓜达尔港的风能常年稳定由偏西南(SW)向的风贡献. 2 月和 11 月,400 和 500 W/m^2 及以上高风能密度主要由北北东(NNE)向的风贡献;5 月和 8 月,高风能密度主要由偏西南(SW)向的风贡献. 3) 瓜达尔港的风能主要经历了两个阶段:1979—2000 年期间,风能密度在 120 W/m^2 上下波动,有效风速出现频率在 45%上下浮动;2001—2014 年期间,风能密度在 110 W/m^2 上下波动,有效风速出现频率在 40%上下浮动. 4) 瓜达尔港的 6 级及以上大风频率常年在 1.5%以内;出现频率最高的为 3 级风(34.29%),其次是 4 级风(28.32%)和 2 级风(23.11%).

关键词:瓜达尔港;风能资源;风能密度;能级频率;风能玫瑰图

中图分类号:P 743 **文献标志码**:A **文章编号**:0438-0479(2016)02-0210-06

瓜达尔港(Gwadar Port)作为 21 世纪海上丝绸之路的关键节点(同时也是陆上丝绸之路的关键节点),位于巴基斯坦俾路支省西南部,为深水港.目前为止,关于瓜达尔港风能资源的评估尚处于空白状态.做好风能、波浪能等清洁、可再生能源的开发工作,将有效提高边远海岛、深远海、重要港口的生存能力及可持续发展能力[1-4].本文利用来自欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-range Weather Forecasts,ECMWF)1979—2014 年的 ERA-interim 风场资料,对瓜达尔港的风能资源展开评估,期望可以促进瓜达尔港可持续发展.

1 数据及计算

ERA-interim 再分析风场资料(含海表 10 m 的经向风、纬向风)来自 ECMWF,空间范围为 90°S～90°N,180°W～180°E;空间分辨率有 0.125°×0.125°,0.25°×0.25°,0.5°×0.5°,0.75°×0.75°,1.0°×1.0°,…,2.5°×2.5°,本文选择其中 0.125°×0.125°的空间分辨率;时间序列为 1979 年 1 月 1 日 00:00 至今,不断更新中,本文选择的时间范围为 1979—2014 年;空间分辨率为逐 6 h(每 6 h 一个数据),数据网址为 http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_daily/.

ERA-interim 再分析资料是继其早期产品 ERA-40 之后的新产品,该数据使用了分辨率更高的气象模式,在观测资料的应用及同化方法方面也有很大改进[5]:使用最新的 12 h 窗口的四维变分同化技术(4DVar),同化的资料包括卫星资料(ERS-1、ERS-2 和 QuikSCAT)、常规观测资料以及模式数据,作用在于提供 ECMWF 早期产品和新一代产品之间的衔接,目的是对 ERA-40 和更早的数据进行完善.ERA-interim 作为 ECMWF 最新开发的同化数据集,理论上应该比之前的ERA-15和ERA-40 更加精确.Dee 等[6]、Song 等[7]、Bao 等[8]曾将 NCEP—CFSR(National Centers for Environmental Pre-

收稿日期:2015-06-08 **录用日期**:2015-09-10

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2015CB453200,2013CB956200,2012CB957803,2010CB950400);国家自然科学基金(41275086,41475070)

* **通信作者**:lcy@lasg.iap.ac.cn

引文格式:郑崇伟,李崇银,杨艳,等.巴基斯坦瓜达尔港的风能资源评估[J].厦门大学学报(自然科学版),2016,55(2):210-215.

Citation:ZHENG C W,LI C Y,YANG Y,et al.Analysis of wind energy resource in the Pakistan's Gwadar Port[J]. Journal of Xiamen University(Natural Science),2016,55(2):210-215.(in Chinese)

http://jxmu.xmu.edu.cn

diction—Climate Forecast System Reanalysis)、NCEP—NCAR(National Centers for Environmental Prediction—National Center for Atmospheric Research)、ERA-interim 和 ERA-40 再分析几种数据与观测资料进行比较,发现 ERA-interim 在均方根误差和偏差方面更优.

本文利用 ERA-interim 再分析风场资料,分析了瓜达尔港的风能资源特征,主要包括:风能密度的月变化特征、风能资源开发的有效风速出现频率、能级频率、风能玫瑰图、风能密度的长期变化趋势、风力等级频率.风能密度定义为垂直于气流的单位截面上风的功率[9-10],计算方法为:

$$W=\frac{1}{2}\rho V^3. \tag{1}$$

式中:W 为风能密度,W/m^2;V 为风速,m/s;ρ 为空气密度,kg/m^3.利用 1979 年 1 月 1 日 00:00 时—2014 年 12 月 31 日 18:00 时逐 6 h 的 ERA-interim 风场资料,计算得到瓜达尔港 1979—2014 年逐 6 h 的风能密度.

2　瓜达尔港的风能特征

2.1　风能的月变化特征

瓜达尔港的风能在 1979—2014 年期间的月变化特征见图 1.该区域的风能密度呈明显的单峰型月变化特征,峰值出现在 4—5 月,达到 190 W/m^2;波谷出现在 11—12 月,70 W/m^2 左右;全年有一半月份在 100 W/m^2 以上,年均风能密度为 121 W/m^2.通常认为风能密度在 50 W/m^2 以上为可用,200 W/m^2 以上为丰富[11-13].显然,瓜达尔港的风能常年处于可用范围,在 4—5 月更是接近丰富范围;且本文计算的是海表 10 m 高度的风能,在实际的风机安装过程中,塔架通常会高于本文的计算高度,因而有更大的利用潜能.

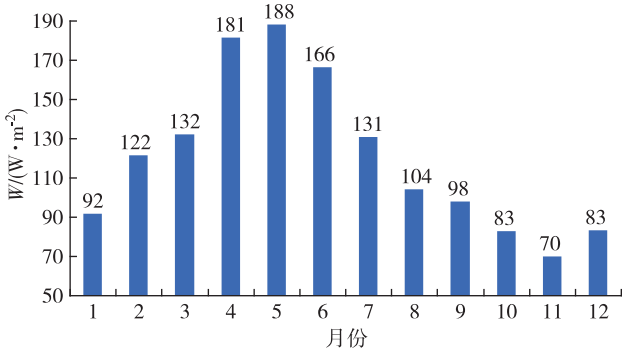


图 1　瓜达尔港风能密度的月变化特征

Fig. 1　Monthly characteristics of wind power density in the Gwadar Port

2.2　有效风速出现频率

在风能开发利用过程中,通常认为风速在 5～25 m/s 之间有利于风能资源的采集与转换,并将这个区间的风速定义为有效风速[14-15].统计瓜达尔港各月的有效风速出现频率见图 2.该区域的有效风速出现频率表现出明显的单峰型月变化特征,与风能密度的月变化特征相近.峰值出现在 4—5 月,出现频率高达 60%以上;波谷出现在 11—12 月,出现频率在 25%左右.太阳能由于受到白昼的限制,可用时间基本在 50%以内[16-17],而瓜达尔港有效风速的年均频率为 43%,这是该区域风能资源的明显优势.

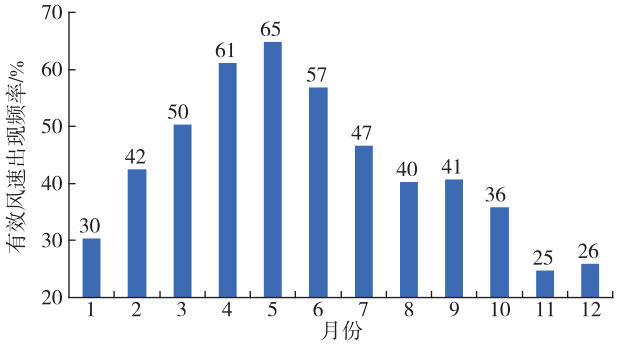


图 2　瓜达尔港各月的有效风速出现频率

Fig. 2　Monthly occurrences of effective wind speed in the development of wind energy in the Gwadar Port

2.3　能级频率

在风能开发过程中,通常认为风能密度在 50 W/m^2 以上为可用(有的标准为 100 W/m^2 以上),200 W/m^2 以上为丰富[11-13].统计瓜达尔港各月 50 W/m^2 以上,100 W/m^2 以上,200 W/m^2 以上的能级频率见图 3.各等级的能级频率都表现出单峰型月变化特征,与有效风速频率的月变化特征相近.50 W/m^2 以上能级频率:峰值为 4—5 月,出现频率都在 70%以上,其余大部分月份也都在 40%以上,年均出现频率为 55%,表明瓜达尔港的风能可利用率很高.100 W/m^2 以上、200 W/m^2 以上的能级频率与 50 W/m^2 以上的能级频率的月变化特征相近,只是数值上有所偏低.

2.4　风能玫瑰图

在风能开发过程中,对风向频率是极为关注的,如果常年的风向稳定,主要由 1 或 2 个风向主导,这就极有利于风机对风能的捕获,有效提高采集、转换效率,同时还有利于延长风机寿命.传统利用 Excel 软件、风能软件制作的雷达图,可以描述不同方向风速出现的频率,但是不能体现不同等级风速出现的频率.

http://jxmu.xmu.edu.cn

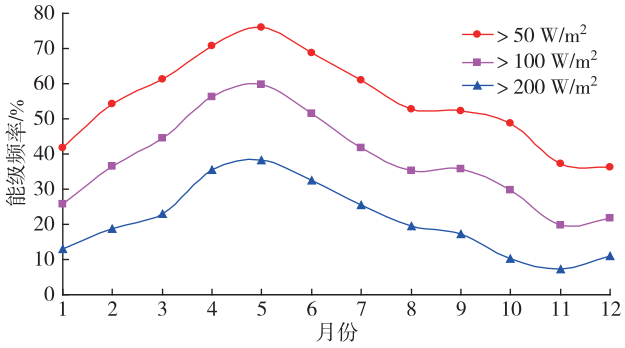
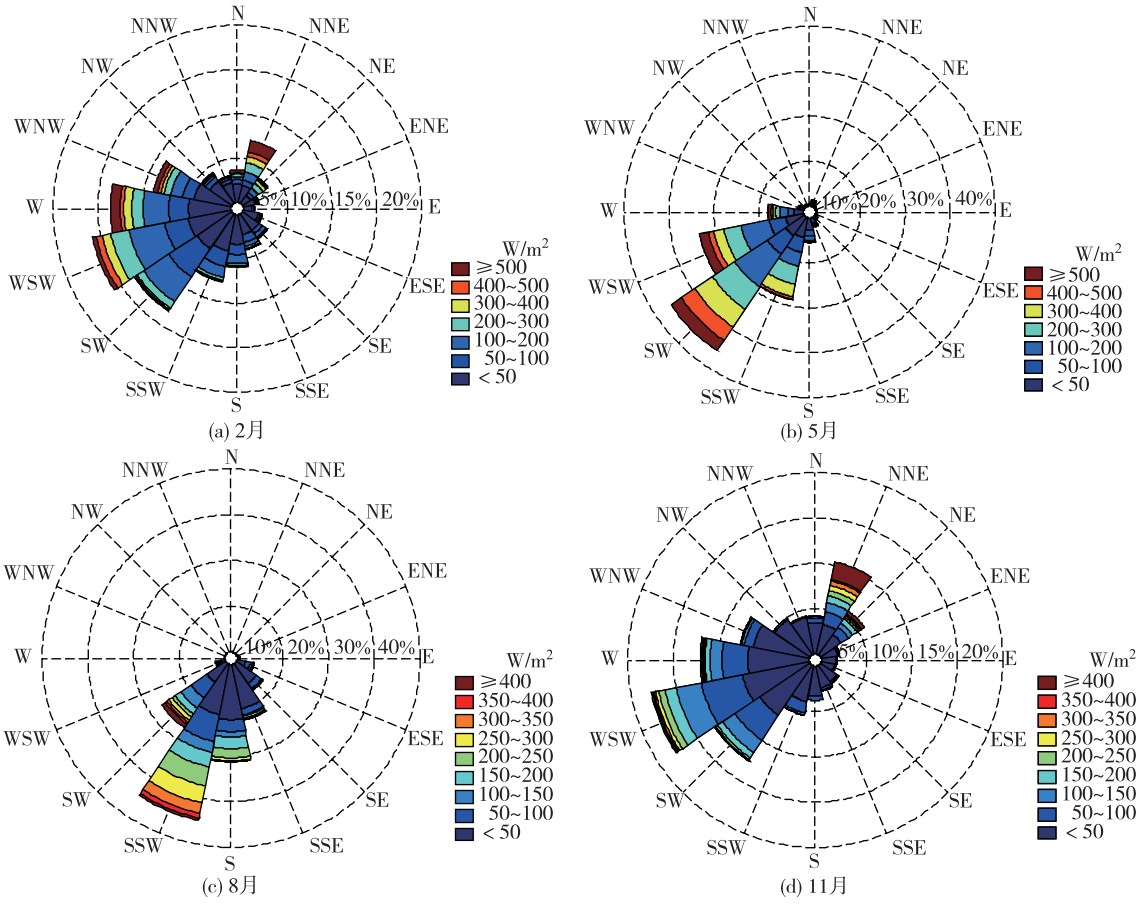


图 3 瓜达尔港各月的风能能级频率

Fig. 3 Occurrence of energy scale of wind power density in the Gwadar Port

本文绘制了一种风能玫瑰图,将风向分为 16 方位,即北(N)、南(S)、东(E)、西(W)、东北(NE)、东南(SE)、西北(NW)、西南(SW)、北北东(NNE)、东北东(ENE)、南南东(SSE)、东南东(ESE)、北北西(NNW)、西北西(WNW)、南南西(SSW)、西南西(WSW),统计每个方位不同等级风能密度出现的频率.采用该方法,分别以 2,5,8,11 月作为四季的代表月,绘制了瓜达尔港的风能玫瑰图,见图 4.

整体来看,瓜达尔港的风能常年稳定由偏 SW 向的风贡献,这对于风能开发是很有利的.2 月,出现频率最高的风是 WSW 向,占 15.9%,其中 0～50 和 100～200 W/m² 的风贡献率最高,分别为 5.5% 和 4.6%;W 向、SW 向出现的频率仅次于 WSW 向;500 W/m² 及以上的高风能主要由 NNE 向贡献(1.5%),其次是 W 向、WSW 向、WNW 向.5 月,风能主要由 SW 向贡献,占 35.8%,其中,100～200,200～300,300～400 W/m² 的风贡献率最高,分别为 10.0%,6.0%,4.0%;其次是 WSW 向,100～200 W/m² 的风贡献率最高(8.0%);500 W/m² 及以上的高风能主要由 SW 向贡献(2.6%),其次是 WSW 向.8 月,对风能贡献率最大的风是 SSW 向,占 34.8%,其次是 SW 向、S 向;高风能密度主要源自 SW、SSW 向.11 月,贡献率最高的风是 WSW 向,占 17.8%,其次是 SW 向、



50～100 表示含 50 而不含 100,其他同理.

图 4 瓜达尔港的风能玫瑰图

Fig. 4 Wind energy rose diagram in the Gwadar Port

http://jxmu.xmu.edu.cn

W 向;400 W/m² 及以上高风能密度主要源自 NNE 向,占 2.5%.

2.5　风能的长期变化趋势

将 1979 年 1 月 1 日—1979 年 12 月 31 日逐 6 h 的风能密度取平均值,得到 1979 年的风能密度,同样的方法得到瓜达尔港 1980—2014 年逐年的风能密度,并分析其线性趋势,见图 5(a).参考文献[18],还计算了瓜达尔港 1979—2014 年期间有效风速出现频率的长期变化趋势,见图 5(b).

1979—2014 年期间,风能密度的线性相关度$|R|=0.57$,通过了 95%的信度检验,回归系数为−0.59,表明瓜达尔港的风能密度在近 1979—2014 年期间以−0.59 W/(m²·a)的速度显著性逐年线性递减.有效风速出现频率的$|R|=0.60$,通过了 95%的信度检验,回归系数为−0.17,表明瓜达尔港的有效风速出现频率在 1979—2014 年期间以−0.17%·a⁻¹(这里的%是指有效风速出现频率,并非变率)的速度显著性逐年线性递减.分析发现,瓜达尔港的风能变化主要经历了两个阶段:1979—2000 年期间,变化趋势相对平缓,风能密度在 120 W/m² 上下波动,有效风速出现频率在 45%上下浮动;2001—2014 年期间,变化趋势相对平缓,风能密度在 110 W/m² 上下波动,有效风速出现频率在 40%上下浮动.在此只分析了瓜达尔港的风能在过去的变化趋势,在未来的工作中,可以利用人工神经网络[19]、希尔伯特-黄等方法[20-21],对风能的中长期变化趋势进行预估,为资源开发的中长期规划提供参考.

2.6　风力等级频率

大风大浪等恶劣海况对海上施工、海洋能开发利用有着严重威胁[22-23].风能资源开发对风力等级频率尤其是大风频率都极为关注,以蒲氏风力等级表为标准,统计了瓜达尔港各代表月及年均风力等级频率,见表 1.

2 月,出现频率最高的是 3 级风,其次是 4 级、2 级风;6 级及以上大风频率较低,为 1.32%,但明显高于其他季节.5 月,出现频率最高的是 4 级风,其次是 3 级、5 级风;6 级及以上大风频率较低.8 月,出现频率最高的是 3 级风,其次是 4 级、2 级风;6 级及以上大风频率较低.11 月,出现频率最高的是 3 级、2 级风,其次是 4 级风;6 级及以上大风频率较低.从全年来看,出现频率最高的是 3 级风,为 34.29%,其次是 4 级风

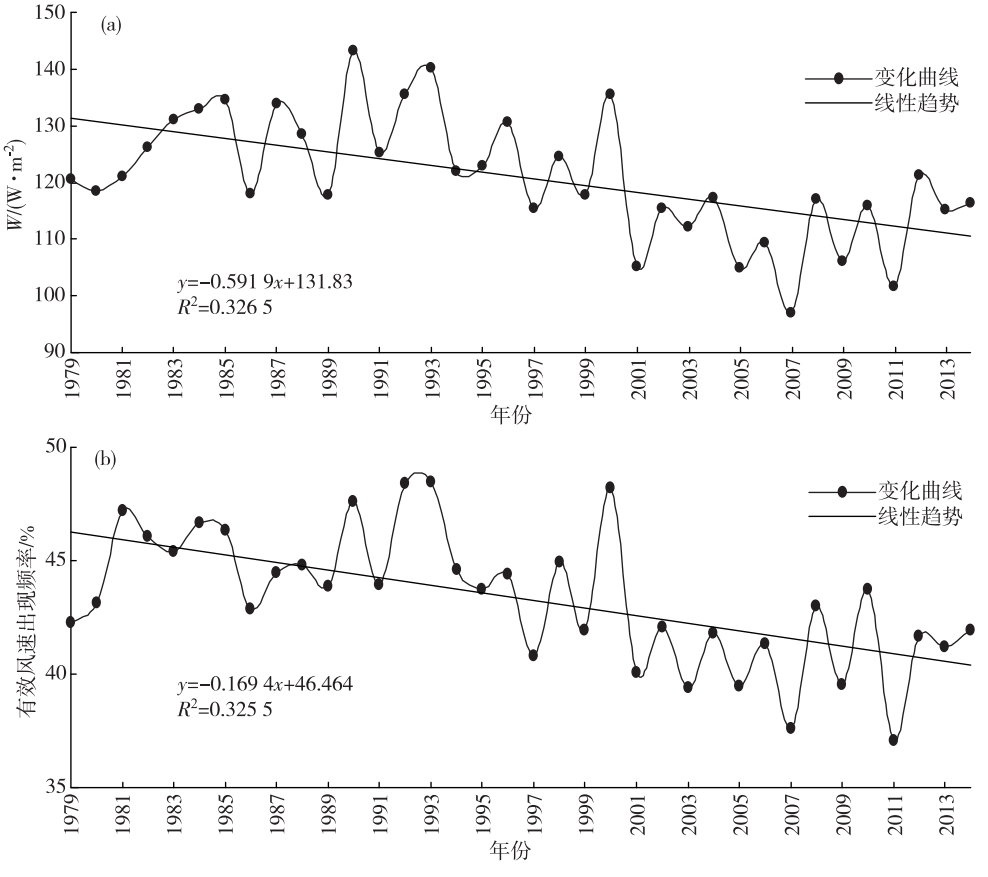


图 5　瓜达尔港风能密度(a)和有效风速出现频率(b)的长期变化趋势

Fig. 5　Long-term trend of wind power density (a) and occurrence of effective wind speed (b) in the Gwadar Port

http://jxmu.xmu.edu.cn

(28.32%)和 2 级风(23.11%);6 级及以上大风频率在 1.5%以内(0.71%).

表 1 瓜达尔港的风力等级频率

Tab.1 Occurrence of different scale wind speed in the Gwadar Port

风力等级	风速范围/(m·s^{-1})	风力等级频率/%				
		2 月	5 月	8 月	11 月	年均
0	0～0.2	0.25	0.07	0	0.19	0.08
1	0.3～1.5	6.22	1.48	1.59	9.07	4.77
2	1.6～3.3	23.56	10.22	25.09	35.00	23.11
3	3.4～5.4	33.86	28.92	38.49	36.37	34.29
4	5.5～7.9	26.72	39.70	29.68	15.79	28.32
5	8.0～10.7	8.07	18.77	4.93	2.94	8.71
≥6	≥10.8	1.32	0.85	0.22	0.65	0.71

3 结 论

本文利用 ERA-interim 风场资料,分析了瓜达尔港的风能资源特征,主要包括风能密度的月变化特征、风能资源开发的有效风速出现频率、能级频率、风能玫瑰图、风能密度的长期变化趋势、风力等级频率,得到如下主要结论:

1) 瓜达尔港的风能资源常年可用,风能密度、有效风速出现频率、不同等级风能密度出现的频率都表现出明显的单峰型月变化特征,峰值出现在 4—5 月(风能密度 190 W/m^2,有效风速频率 25%左右,50 W/m^2 以上能级频率 70%以上),波谷出现在 11—12 月(风能密度 70 W/m^2,有效风速频率 60%以上,50 W/m^2 以上能级频率 35%左右).年平均值分别为:风能密度 121 W/m^2,有效风速出现频率 43%,50 W/m^2 以上能级频率 55%.

2) 瓜达尔港的风能常年稳定由偏 SW 向的风贡献,这对于风能开发是很有利的.2 月、11 月,400 和 500 W/m^2 及以上高风能密度主要由 NNE 向的风贡献,5 月、8 月,高风能密度主要由偏 SW 向的风贡献.

3) 1979—2014 年期间,瓜达尔港的风能密度以 −0.59 W/(m^2·a)的速度逐年递减,有效风速出现频率以 −0.17 %·a^{-1} 的速度逐年递减.瓜达尔港的风能变化主要经历了两个阶段:1979—2000 年期间,风能密度在 120 W/m^2 上下波动,有效风速出现频率在 45%上下浮动;2001—2014 年期间,风能密度在 110 W/m^2 上下波动,有效风速出现频率在 40%上下浮动.

4) 瓜达尔港的 6 级及以上大风频率常年在 1.5%以内;出现频率最高的为 3 级风(34.29%),其次是 4 级风(28.32%)和 2 级风(23.11%),这对风能开发利用是有利的.

参考文献:

[1] 任建莉,罗誉娅,钟英杰,等.波力资源分析系统的实现及波能发电应用[J].浙江工业大学学报,2008,36(2):186-191.

[2] 郑崇伟,游小宝,潘静,等.钓鱼岛、黄岩岛海域风能及波浪能开发环境分析[J].海洋预报,2014,31(1):49-57.

[3] 游亚戈,马玉久.海洋能在海洋环境测量标上的应用[J].气象水文海洋仪器,2003(3):32-35.

[4] 郑崇伟,潘静,孙威,等.经略 21 世纪海上丝路之海洋环境特征系列研究[J].海洋开发与管理,2015,32(7):1-9.

[5] DEE D P, UPPALA S M, SIMMONS A J, et al. The ERA-interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137(656): 553-597.

[6] 庄晓宵,林一骅.全球海洋海浪要素季节变化研究[J].大气科学,2014,38(2):251-260.

[7] SONG L N, LIU Z L, WANG F. Comparison of wind data from ERA-interim and buoys in the Yellow and East China Seas [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2015, 33(1): 282-288.

[8] BAO X H, ZHANG F Q. Evaluation of NCEP—CFSR, NCEP—NCAR, ERA-interim, and ERA-40 reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau [J]. Journal of Climate, 2013, 26: 206-214.

[9] 陈飞,班欣,祈欣,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):101-106.

[10] ZHENG C W, PAN J, LI J X. Assessing the China Sea wind energy and wave energy resources from 1988 to 2009 [J]. Ocean Engineering, 2013, 65: 39-48.

[11] 郑崇伟,李崇银.中国南海岛礁建设:重点岛礁的风候、波候特征分析[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2015,45(9):1-12.

[12] 郑崇伟,李崇银.中国南海岛礁建设:风力发电、海浪发电[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2015,45(9):13-23.

[13] 黄世成,姜爱军,刘聪,等.江苏省风能资源重新估算与分布研究[J].气象科学,2007,27(4):407-412.

[14] 毛慧琴,宋丽莉,黄浩辉,等.广东省风能资源区划研究[J].自然资源学报,2005,20(5):679-683.

[15] 郑崇伟,潘静.全球海域风能资源评估及等级区划[J].自然资源学报,2012,27(3):364-371.

http://jxmu.xmu.edu.cn

[16] 郑崇伟.南海波浪能资源与其他清洁能源的优缺点比较研究[J].亚热带资源与环境学报,2011,6(3):76-81.
[17] 姚兴佳,隋红霞,刘颖明,等.海上风电技术的发展与现状[J].上海电力,2007(2):111-118.
[18] 郑崇伟,林刚,邵龙潭. 1988—2010 年中国海大浪频率及其长期变化趋势[J].厦门大学学报(自然科学版),2013,52(3):395-399.
[19] 毕硕本,徐寅,覃志年,等. EMD 在广西季节降水预报中的应用[J].应用气象学报,2010,21(3):366-371.
[20] 黄大吉,赵进平,苏纪兰.希尔伯特-黄变换的端点延拓[J].海洋学报:中文版,2003(1):1-11.
[21] 郑崇伟,李训强,高占胜,等.经略 21 世纪海上丝路之海洋环境特征:风候统计分析[J].海洋开发与管理,2015,32(8):4-11.
[22] 于小龙,潘伟然,张国荣,等.福建省台风灾害直接经济损失预评估模型[J].厦门大学学报(自然科学版),2011,50(6):1047-1052.
[23] 郑崇伟,周林,宋帅,等. 1307 号台风"苏力"台风浪数值预报[J].厦门大学学报(自然科学版),2014,53(2):257-262.

Analysis of Wind Energy Resource in the Pakistan's Gwadar Port

ZHENG Chongwei[1,2,3], LI Chongyin[1,2*], YANG Yan[4], CHEN Xiong[1]

(1.College of Meteorology and Oceanography, People's Liberation Army University of Science & Technology, Nanjing 211101, China; 2.National Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100028, China; 3.Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China; 4.State Oceanic Administration, Beijing 100860, China)

Abstract: In this study, the wind energy resource in the Gwadar Port was firstly analyzed, based on the ERA-interim wind production from European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF). The results show as follows: 1) The wind energy in the Gwadar Port is available all year round. The wind power density (WPD), occurrence of effective wind speed of wind energy resource, and occurrences of different levels of WPD all exhibit a clear single peak in the monthly variation. The peak appears in April and May, while trough appears in November and December. The annual average value is 121 W/m^2 for WPD, 43% for the occurrence of effective wind speed, and 55% for the occurrence of WPD greater than 50 W/m^2. 2) From the wind energy rose diagram, the wind energy in the Gwadar Port is mainly contributed by the southwest (SW) winds. In February and November, high wind energy with WPD≥400 W/m^2 and WPD≥500 W/m^2 is mainly contributed by the north-northeast (NNE) winds, while in May and August by SW wind. 3) During the period of 1979 to 2000, the WPD is about 120 W/m^2, and the occurrence of effective wind speed is 45%. During the period of 2001 to 2014, the WPD is about 110 W/m^2, and the occurrence of effective wind speed is 40%. 4) The gale occurrence (wind speed greater than class 6) is below 1.5% all year round. The wind speed of highest occurrence is class 3 (34.29%), followed by class 4 (28.32%) and class 2 (23.11%).

Key words: Gwadar Port; wind energy; wind power density; energy level occurrence; wind energy rose diagram

http://jxmu.xmu.edu.cn