

巴基斯坦瓜达尔港风能资源的历史变化趋势及预测

郑崇伟^{1,2,3,†} 高悦⁴ 陈璇¹

1. 解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101; 2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640; 3. 海军大连舰艇学院航海系, 大连 116018; 4. 中国海洋报社, 北京 100860; † E-mail: chinaoceanzcw@sina.cn

摘要 利用欧洲中期天气预报中心的ERA-Interim海表10 m风场资料, 计算巴基斯坦瓜达尔港的风能资源近36年(1979—2014年)期间的历史变化趋势, 并利用线性回归和BP神经网络两种方法, 对该港的风能资源进行长期年度预测, 得到以下结果。1) 瓜达尔港夏季的风能资源比冬季丰富, 且夏季的稳定性明显好于冬季。2) 近36年期间, 风能密度、有效风速频率和100 W/m²以上能级频率分别以-0.78 W/(m²·a), -0.21%/a和-0.22%/a的速度逐年显著递减, 且该趋势主要体现在夏季, 冬季无显著变化趋势; 风能资源的稳定性(变异系数、月变化指数和季节变化指数)无显著变化趋势。3) 从预测值来看, 瓜达尔港的风能资源在2015年与多年平均状态持平, 2016年则趋于更丰富; 2015—2016年, 风能资源的稳定性比多年平均状态略差。研究结果可以为“21世纪海上丝绸之路”建设以及中国海域的岛礁和港口建设提供依据和参考。

关键词 21世纪海上丝绸之路; 瓜达尔港; 风能资源; 历史变化趋势; 预测

中图分类号 P743

Climatic Long Term Trend and Prediction of the Wind Energy Resource in the Gwadar Port

ZHENG Chongwei^{1,2,3,†}, GAO Yue⁴, CHEN Xuan¹

1. College of Meteorology and Oceanography, People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing 211101; 2. Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640; 3. Navigation Department, Dalian Naval Academy, Dalian 116018; 4. China Ocean News, Beijing 100860; † E-mail: chinaoceanzcw@sina.cn

Abstract Based on the 36-year (1979–2014) ERA-Interim 10 m sea surface wind data from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), the climatic long term trend of the wind energy resource of the Gwadar Port of Pakistan was analyzed. Using two linear regression and artificial neural network (ANN) techniques, the wind energy resource in the long term was predicted. The results show that wind energy in summer is richer than that in winter. The stability in summer is better than that in winter. For the past 36 years, the wind power density, occurrence of effective wind speed and energy level occurrence have significant annual decreasing trends, of -0.78 W/(m²·a), -0.21%/a, -0.22%/a separately. These trends mainly exhibit in summer, while no significant variation in winter. The stability (coefficient of variation, monthly variability index and seasonal variability index) does not have a significant long term trend for the past 36 years. From the prediction value, the wind energy resource in 2015 is similar to the multi-year average value, while the wind energy resource in 2016 is richer than the multi-year average value. For the year 2015–2016, the prediction wind energy will be more unstable than the multi-year average status. The results can provide scientific reference for the 21st Maritime Silk Road construction, development of remote islands and ports in the China seas.

Key words 21st Maritime Silk Road; Gwadar Port; wind energy resource; climatic long term trend; prediction

作为“21 世纪海上丝绸之路”的关键节点之一,巴基斯坦瓜达尔港(Gwadar Port)的风能资源开发利用将有利于提高其可持续发展能力,同时可以造福沿线人民,成为我国的海外示范工程。资源开发应评估先行。郑崇伟等^[1]利用来自 ECMWF 的 ERA-interim 的风场资料,率先评估瓜达尔港风能资源的季节特征,结果表明:瓜达尔港的风能资源常年可用,年平均风能密度为 121 W/m^2 ,年平均有效风速频率为 43%;风能常年稳定地由偏西南向的风贡献。Chang 等^[2]对台湾地区的风速特征和风能资源进行分析,发现该地区蕴藏着较为丰富的风能资源。陈飞等^[3]利用 30 多年的气象资料,分析了连云港地区及其近海的风能资源特征,发现该地区风能储量丰富,风速变化稳定,有广阔的风能开发前景。毛慧琴等^[4]利用 100 多个观测站数据,对广东省沿海的风能进行分析,发现广东省风能的潜在开发区分布于沿海和河口一带,可开发量理论值为 $7.99 \times 10^3 \text{ MW}$ 。周荣卫等^[5]指出我国沿海风能资源非常丰富,沿海多年平均风功率密度约在 $300 \sim 800 \text{ W/m}^2$ 之间。郑崇伟等^[6-7]对我国南海重点岛礁的海浪发电和海上风电可行性展开论证,为南海岛礁建设提供科学依据。前人对我国近海的风能资源评估做了大量研究,但目前关于瓜达尔港风能的研究还较为稀少,针对其历史变化趋势和预测的研究更是凤毛麟角。

在风力发电和风力提水等风能的实际开发过程中,往往关注资源的历史变化趋势以及未来预测,以便为长期计划提供科学依据。本研究利用来自 ECMWF 的近 36 年 ERA-Interim 海表 10 m 风场资料,计算瓜达尔港的风能资源在近 36 年期间的历史变化趋势,并利用线性回归和 BP 神经网络两种方法,对该港的风能资源进行长期年度预测(30 分钟内的预测为超短期预测,72 小时内的预测为短期预测,10 天以上的预测为长期预测^[8]),为风能开发的长期规划、战略支撑点建设等提供科学依据,为“21 世纪海上丝绸之路”建设提供决策辅助。

1 资料与方法

1.1 资料

利用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)近 36 年(1979—2014 年)的 ERA-Interim 海表 10 m 风场资料。ERA-Interim 再分析资料是继其早期产品

ERA-40 之后的新产品,使用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^[9-10]。ERA-Interim 使用最新的 12 小时窗口四维变分同化技术,同化的资料包括卫星资料、常规观测资料以及模式数据,其作用是提供 ECMWF 早期产品与新一代产品之间的衔接,目的是对 ERA-40 以及更早的数据进行完善。ERA-Interim 风场的空间范围为 $90^\circ\text{S} \sim 90^\circ\text{N}$, $180^\circ\text{W} \sim 180^\circ\text{E}$;空间分辨率有 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$, $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, $0.75^\circ \times 0.75^\circ$, $1.0^\circ \times 1.0^\circ$, ..., $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ (本文选择的分辨率 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$);时间序列为 1979 年 1 月 1 日 00:00 至今(不断更新中)(本文选择的时间序列为 1979—2014 年);时间分辨率为逐 6 小时(每 6 小时一个数据)^[11]。Dee 等^[9]、Song 等^[10]、Bao 等^[12]及马永锋等^[13]曾将 NCEP-CFSR, NCEP-NCAR, ERA-Interim 和 ERA-40 Reanalysis 这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。

1.2 方法

利用 ERA-Interim 海表 10 m 风场资料,根据风能密度的计算方法^[14-15],首先计算得到近 36 年逐 6 小时的瓜达尔港海表 10 m 的风能密度数据。基于该数据,采用一元线性回归方法,计算分析瓜达尔港风能资源的历史变化趋势,主要包括风能密度、有效风速频率、能级频率、大风频率、稳定性在近 36 年的历史变化趋势(含 1 月、7 月和逐年的变化趋势)。此外,还利用 BP 神经网络和线性回归预测方法,对瓜达尔港的风能资源进行长期年度预测,主要包括风能密度、有效风速频率、能级频率和稳定性的预测。目前线性回归和 BP 神经网络预测方法比较成熟^[16-17],广泛运用于气候分析与预测^[18]、城市可持续发展^[19]、海平面预测^[20]、生态系统风险研究^[21]、金融预报^[22]等诸多领域。

线性回归模型:假设预报量为 y , 预测因子向量为 x , 则方程形式为 $\hat{y} = ax' + b$, 其中 \hat{y} 为相应于 y 的预测量形式,该表示形式是为了与预报量的实际值相区别; x' 表示 x (默认 x 为行向量形式)的转置; a 和 b 为方程的拟合系数。对于一般数据来说,该方程是超定的,为此,常采用最小二乘法求解系数,即:求取误差表达式 $\sum_{i=1}^n (y_i - ax'_i - b)^2$ 取最小值情况下的拟合系数,其中 n 为样本总量, y_i 及 x'_i 为相应的样本。

BP 神经网络拓扑结构如图 1 所示(以 3 层为例)。图 2 是相应于图 1 的网络运行流程, 其中 b_1 和 b_2 为相应神经元的阈值(可看做一个特殊的权值, 故在图 1 中未标识), 黑色实线及箭头表示数据间的映射关系和流动方向。输入层及隐含层的输入“1”可以叠加到输入向量中。输入向量为 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)^T$, 隐层输出向量为 $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m)^T$, \mathcal{L} 为激发函数, 输出层向量为 $\mathbf{O} = (o_1, o_2, \dots, o_k, \dots, o_l)^T$, 目标输出为 $\mathbf{D} = (d_1, d_2, \dots, d_k, \dots, d_l)^T$ 。输入层到隐层之间的权值向量为 $\mathbf{v}_i (1 \leq i \leq m)$, 表示隐层第 i 个神经元对应的权向量, 为行向量; 隐层到输出层之间的权向量为 $\mathbf{w}_i (1 \leq i \leq l)$, 为行向量; 每次训练的误差表示为 $\mathbf{E} = \frac{1}{2} \|\mathbf{D} - \mathbf{O}\|^2$, 其中 $\mathbf{E} = (e_1, e_2, \dots, e_k, \dots, e_l)^T$ 。各层之间可以采用线性或者非线性的转移函数, 如常用的 sigmoid 函数。在训练当中采用误差反馈的方案,

不断地调节权值(调节方式通常采用梯度下降法), 从而达到预期的训练效果。

2 风能资源的历史变化趋势

2.1 风能密度

将瓜达尔港 1979 年 1 月逐 6 小时的风能密度做平均, 得到该月的平均值, 同理得到 1979 年 1 月至 2014 年 12 月逐月瓜达尔港的风能密度。利用逐月的数据计算瓜达尔港在 1 月(代表冬季)、7 月(代表夏季)以及逐年的风能密度变化趋势, 结果见图 3。

1 月, 瓜达尔港的风能密度在 $50 \sim 170 \text{ W/m}^2$ 之间较为剧烈地波动, 线性相关度 $|R|=0.01$, 未通过显著性检验, 表明瓜达尔港 1 月的风能密度在近 36 年期间无显著性变化趋势。

7 月, 在强劲西南季风的影响下, 风能密度在 $90 \sim 210 \text{ W/m}^2$ 之间波动, 且数值明显高于 1 月。显

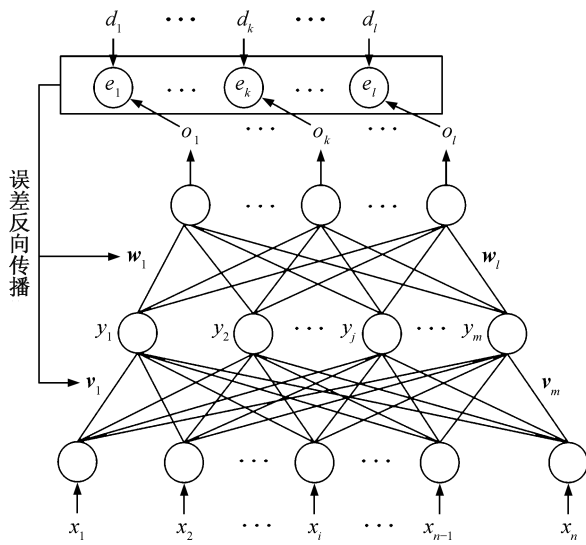


图 1 BP 神经网络拓扑结构^[16-17]

Fig. 1 Topology of BP neural network^[16-17]

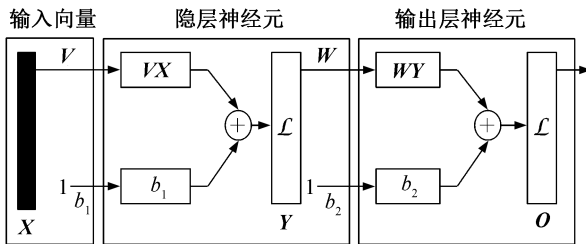


图 2 BP 神经网络运行流程

Fig. 2 BP neural network operation flow chart

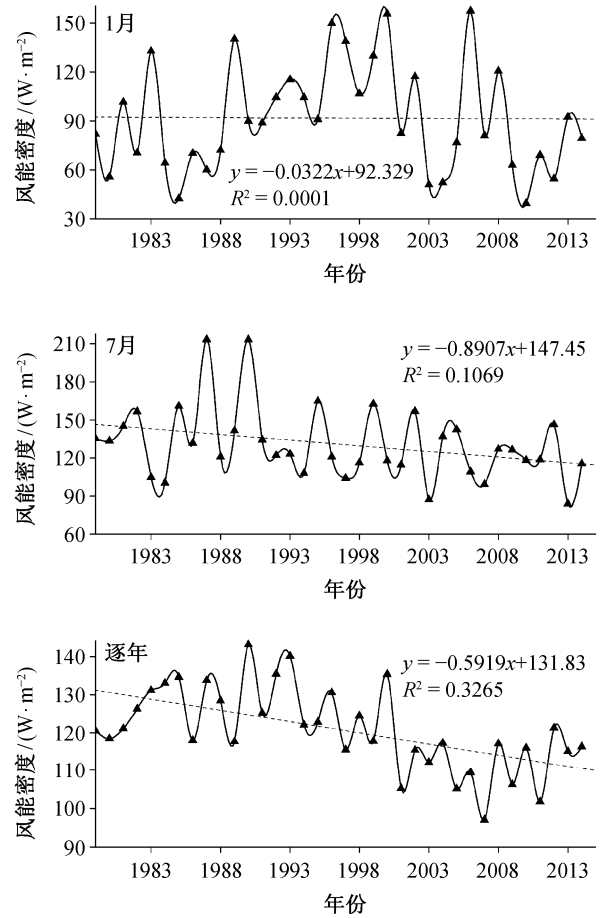


图 3 近 36 年 1 月、7 月和逐年的风能密度

Fig. 3 Monthly wind power density in January, July and annual value for the past 36 years

然,这是由于该区域冬季冷空气的强度没有夏季西南季风强劲。值得注意的是,瓜达尔港的情况与我国南海有着很大差异,南海的冷空气强度明显大于西南季风。风能密度的线性相关度 $R=0.33$, 通过 95% 的信度检验,线性趋势为 -0.89 , 即在近 36 年瓜达尔港 7 月的风能密度以 $-0.89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的速度显著性递减。从整体上看,瓜达尔港 7 月的风能密度特征分为两个时段:1979—1990 年在 $150 \text{ W}/\text{m}^2$ 上下波动,1991—2014 年在 $120 \text{ W}/\text{m}^2$ 上下浮动。

逐年,风能密度的线性相关度 $R=0.57$, 通过 99.9% 的信度检验,线性趋势为 -0.59 , 即在近 36 年期间,瓜达尔港的风能密度以 $-0.59 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的速度显著性逐年递减。从整体上看,年平均风能密度分为两个阶段:1979—2000 年在 $120 \text{ W}/\text{m}^2$ 上下波动,2001—2014 年在 $110 \text{ W}/\text{m}^2$ 上下波动。

2.2 有效风速频率

通常风速在 $5 \sim 25 \text{ m/s}$ 之间有利于风能资源的采集与转换,称为有效风速^[23-25]。利用 1979 年 1 月逐 6 小时的风速,统计该月瓜达尔港有效风速出现的频率(简称有效风速频率),用同样的方法得到 1979 年 1 月至 2014 年 12 月逐月的有效风速频率。利用逐月的数据计算瓜达尔港在 1 月、7 月以及逐年的有效风速频率变化趋势,结果见图 4。

1 月,有效风速频率在 30% 上下浮动。线性相关度 $R=0.07$, 未通过显著性检验,表明瓜达尔港 1 月的有效风速频率在近 36 年期间无显著性变化趋势。

7 月,有效风速频率的线性相关度 $R=0.37$, 通过 95% 的信度检验,线性趋势为 -0.25 , 即近 36 年瓜达尔港 7 月的有效风速频率以 $-0.25\%/a$ (这里的 % 是有效风速出现的频率,不是变率)的速度显著性递减。从整体上看,瓜达尔港 7 月的有效风速频率分为两个时段:1979—1990 年在 50% 上下波动,1991—2014 年在 40% 上下浮动。

逐年,有效风速频率的线性相关度 $R=0.60$, 通过 99.9% 的信度检验,线性趋势为 -0.17 , 即在近 36 年期间,瓜达尔港的有效风速频率以 $-0.17\%/a$ 的速度显著性逐年递减。从整体上看,年平均有效风速频率分为两个阶段:1979—2000 年在 45% 上下波动,2001—2014 年在 40% 上下波动。

2.3 能级频率

研究表明,虽然瓜达尔港 $200 \text{ W}/\text{m}^2$ 以上丰富

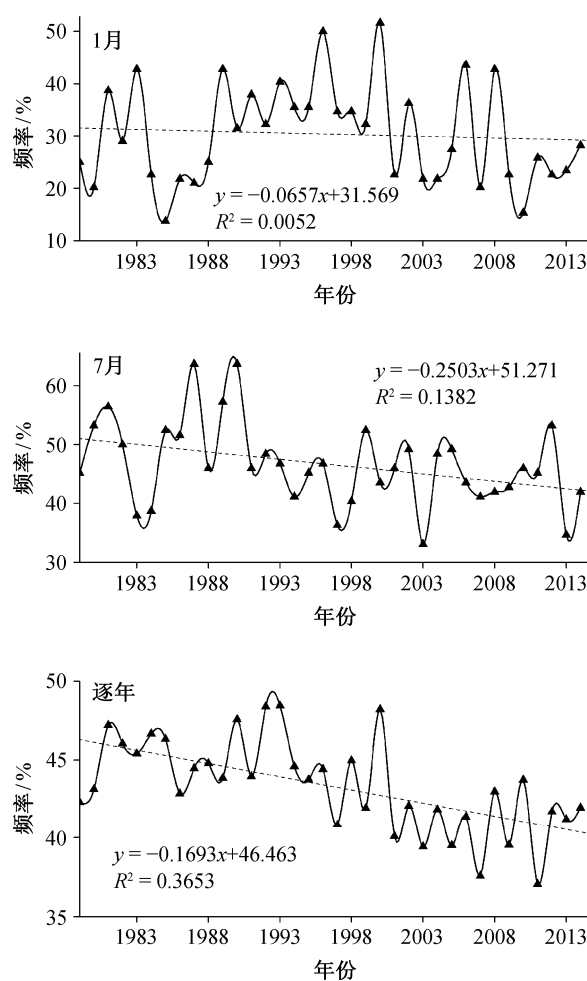


图 4 近 36 年 1 月、7 月和逐年的有效风速频率
Fig. 4 Monthly occurrence of effective wind speed in January, July and annual value for the past 36 years

能流密度出现频率较低,但 $100 \text{ W}/\text{m}^2$ 以上可用能流密度出现频率较为乐观^[1]。在此,统计分析瓜达尔港 $100 \text{ W}/\text{m}^2$ 以上能流密度出现的频率(简称 $100 \text{ W}/\text{m}^2$ 以上能级频率)的历史变化趋势。利用 1979 年 1 月逐 6 小时的风能密度,统计该月瓜达尔港 $100 \text{ W}/\text{m}^2$ 以上能级频率,用同样的方法得到 1979 年 1 月至 2014 年 12 月逐月的 $100 \text{ W}/\text{m}^2$ 以上能级频率。利用逐月的数据,计算瓜达尔港在 1 月、7 月以及逐年的 $100 \text{ W}/\text{m}^2$ 以上能级频率的变化趋势,结果见图 5。

1 月, $100 \text{ W}/\text{m}^2$ 以上能级频率在 30% 上下浮动。线性相关度 $R=0.08$, 未通过显著性检验,表明瓜达尔港的 $100 \text{ W}/\text{m}^2$ 以上能级频率在近 36 年期间的 1 月无显著性变化趋势。

7 月,线性相关度 $R=0.37$, 通过 95% 的信度检

验, 线性趋势为 -0.22 , 即在近 36 年的 7 月, 瓜达尔港的 100 W/m^2 以上能级频率以 $-0.22\%/a$ (这里的%是 100 W/m^2 以上能级频率, 不是变率)的速度显著性递减。从整体上看, 瓜达尔港 7 月的 100 W/m^2 以上能级频率分为两个时段: 1979—1990 年在 45%上下波动, 1991—2014 年在 40%上下浮动。

逐年, 线性相关度 $R=0.64$, 通过 99.9% 的信度检验, 线性趋势为 -0.18 , 即在近 36 年期间, 瓜达尔港 100 W/m^2 以上能级频率以 $-0.18\%/a$ 的速度显著性逐年递减。从整体上看, 年平均 100 W/m^2 以上能级频率在 30%~45%之间波动。

2.4 大风频率

风力等级频率是风能开发和防灾减灾中较受关注的要素^[26]。研究表明, 瓜达尔港出现频率最高风

力为 3 级(34.29%), 其次是 4 级(28.32%)和 2 级(23.11%), 6 级以上大风频率很低, 常年在 1.5%以内^[1]。我们统计得到 1979 年 1 月至 2014 年 12 月逐月的风力等级频率, 通过计算, 发现瓜达尔港 1 月、7 月以及逐年的 6 级以上大风频率无特别显著的变化趋势(图略)。

2.5 稳定性

风能资源的稳定性直接决定着风机对资源的采集和转换能力以及风机的寿命。Cornett^[27]曾计算全球海域波浪能的变异系数(coefficient of variation, Cv)、月变化指数(monthly variability index, Mv)和季节变化指数(seasonal variability index, Sv)来判断其稳定性。本文参考他的计算方法, 利用近 36 年逐 6 小时的风能密度, 计算瓜达尔港风能密度的 Cv, Mv 和 Sv 来判断其稳定性, 结果见图 6 和 7。

变异系数: 1 月在 1.4 上下浮动, 且无显著的长期历史变化趋势; 7 月在 1.0 上下浮动, 也不存在显著的变化趋势, 在 1995 年存在一个突变点。对比 1 月和 7 月的变异系数不难发现, 7 月的数值整体上偏小, 即 7 月的稳定性比 1 月好。变异系数的年平均值在 1.15 上下波动, 无显著的逐年变化趋势。

月变化指数: 1979—1994 年期间在 14 上下浮动。近 36 年期间, 瓜达尔港风能的月变化指数无显著的变化趋势, 但在 1996—2014 年期间却以 0.0394 的速度逐年显著性递增。

季节变化指数: 线性相关度 $R=0.04$, 未通过显著性检验, 表明瓜达尔港风能的季节变化指数在近 36 年期间无显著性变化趋势, 数值在 0.7 上下浮动。

2.6 滑动平均后的趋势

为了更真实地反映风能各要素的变化趋势, 我们对时间序列进行 5 点滑动, 分析风能密度、有效风速频率、 100 W/m^2 以上能级频率、变异系数、月变化指数和季节变化指数的历史变化趋势, 结果见表 1。可以看出, 瓜达尔港风能各要素在 1 月都不存在显著的变化趋势。7 月, 风能密度、有效风速频率以及 100 W/m^2 以上能级频率都表现出显著的递减趋势, 通过 95% 的信度检验; 滑动平均后, 上述 3 个要素的递减趋势更为显著, 均通过 99.9% 的信度检验。5 点滑动后, 风能密度、有效风速频率和 100 W/m^2 以上能级频率分别以 $-0.78 \text{ W/(m}^2 \cdot a)$, $-0.21\%/a$ 和 $-0.22\%/a$ 的速度逐年递减, 均通过

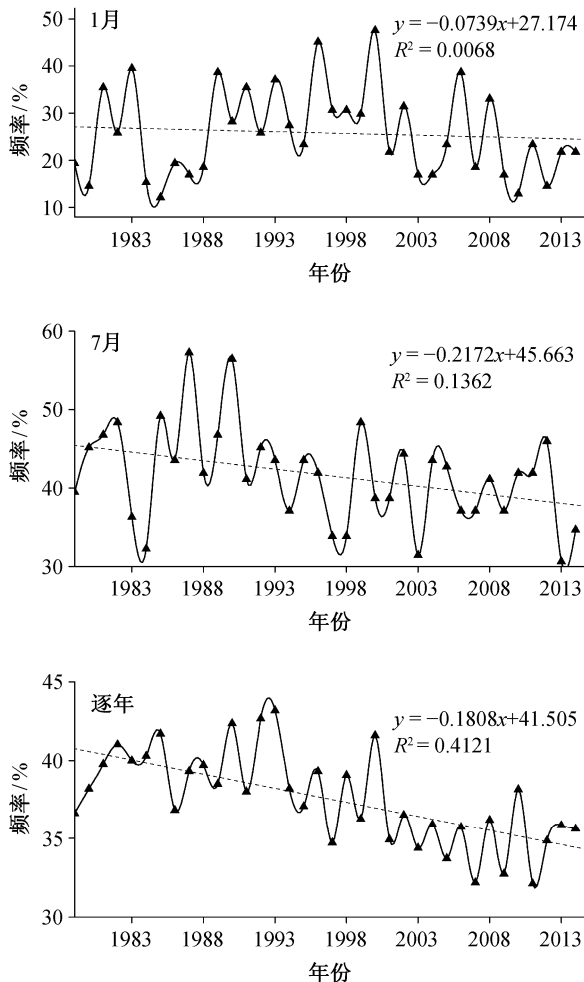


图 5 近 36 年 1 月、7 月和逐年的 100 W/m^2 以上能级频率
Fig. 5 Monthly occurrence of wind power density greater than 100 W/m^2 in January, July and annual value for the past 36 years

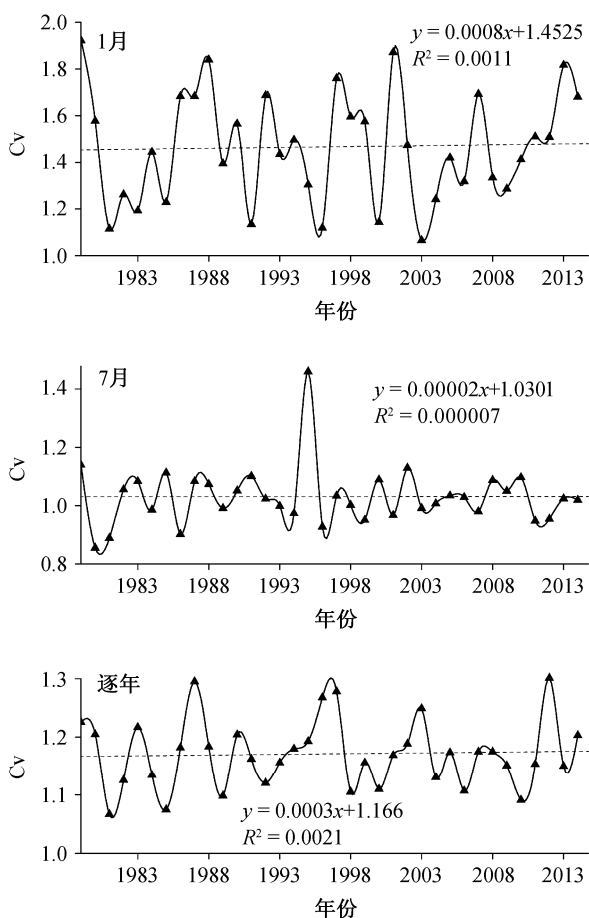


图 6 近 36 年 1 月、7 月和逐年的变异系数
Fig. 6 Monthly coefficient of variation in January, July and annual value for the past 36 years

99.9%的信度检验; 变异系数、月变化指数和季节变化指数在近 36 年期间无显著的变化趋势。

3 风能资源的中长期预测

历史变化趋势分析可以较为直观地展现风能资源在过去几十年的变化。在海洋开发过程中, 往往更关注未来半年、一年或两年的风能资源情况, 以

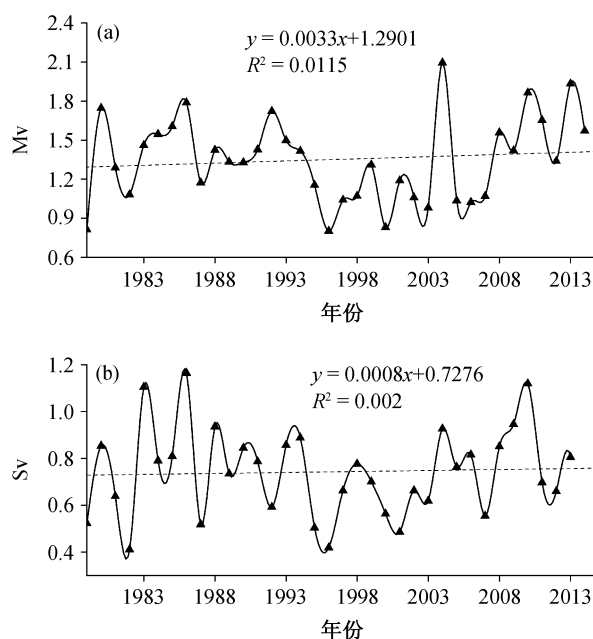


图 7 风能密度在近 36 年逐年的月变化指数(a)和季节变化指数(b)

Fig. 7 Monthly variability index (a) and seasonal variability index (b) for the past 36 years

便为长期计划提供依据。短期预报和历史变化趋势分析都不能满足需求, 这就需要长期预测。本文利用线性回归和 BP 神经网络两种方法, 对瓜达尔港的风能资源展开年度预测。

3.1 预测训练

利用 1979—2012 年逐月的风能密度、有效风速频率、能级频率和变异系数做预测训练, 对 2013 年 1 月至 2014 年 12 月逐月的数值进行预测。本文主要利用线性回归和 BP 神经网络两种方法进行预测, 结果见表 2。预测值与实际值之间的相关系数 (correlation coefficient, CC) 都通过 99.9% 的信度检验 ($CC > 0.60$), 均方根误差 (root mean square error, RMSE)、偏差 (Bias)、平均绝对误差 (mean absolute

表 1 瓜达尔港风能各要素的历史变化趋势
Table 1 Climatic long-term trend of the wind energy parameters of the Gwadar Port

风能要素	1 月		7 月		逐年	
	原始值	滑动平均	原始值	滑动平均	原始值	滑动平均
风能密度/($W \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)	-0.03	-0.05	-0.89*	-0.93**	-0.59**	-0.78**
有效风速频率/($\% \cdot a^{-1}$)	-0.07	-0.08	-0.25*	-0.25**	-0.17**	-0.21**
能级频率/($\% \cdot a^{-1}$)	-0.07	-0.09	-0.22*	-0.22**	-0.18**	-0.22**

注: *和**分别表示变化趋势通过 95%和 99.9%的信度检验, 其余未通过检验。

error, MAE)、离散系数(scatter index, SI)以及标准均方根误差(normalized root mean square error, NRMSE)也在可以接受的范围内。从整体上看, BP 神经网络的预测效果要优于线性回归预测, 基于人工神经网络的风能各要素的预测值与实际值之间的相关系数基本上都在 0.7 以上, 明显高于线性回归预测值。此外, 从 RMSE, Bias, MAE, NRMSE 和 SI 来看, 人工神经网络的误差均小于线性回归预测, 这在风能密度、有效风速频率、能级频率和变异系数等几个风能要素上都得到较好的体现。我们对比 3, 5, 7 层 BP 神经网络, 发现 5 层效果更优(表略)。因此, 下面利用 BP 神经网络(5 层网络)对风能各要素展开预测。

为了更直观地展现预测效果, 我们绘制风能密度、变异系数的真实值和预测值曲线(图 8)。从整体上看, 线性回归和方法 BP 神经网络方法对风能密度和变异系数都有一定的预测能力, 但 BP 神经网络的预测值曲线在走势上与真实值保持更好的一致性。BP 神经网络对风能密度在 2013 年 5 月和 2014 年 5 月的两个波峰、变异系数在 2014 年 1 月的波峰体现得更明显。值得注意的是, 两种预测方法都未能很好地刻画风能密度在 2013 年 9 月的相对峰值和变异系数在 2014 年 11 月的相对峰值。

3.2 各要素预测

利用线性回归和人工神经网络两种方法, 基于 1979—2014 年逐月的风能密度、有效风速频率、能级频率和变异系数, 对上述各要素做 24 个月的长期年度预测, 并将预测值与多年平均值进行比较, 结果见图 9。

由图 9(a)~(c)可见, 对于风能密度、有效风速频率和 100 W/m² 以上能级频率, 2015 年的预测值

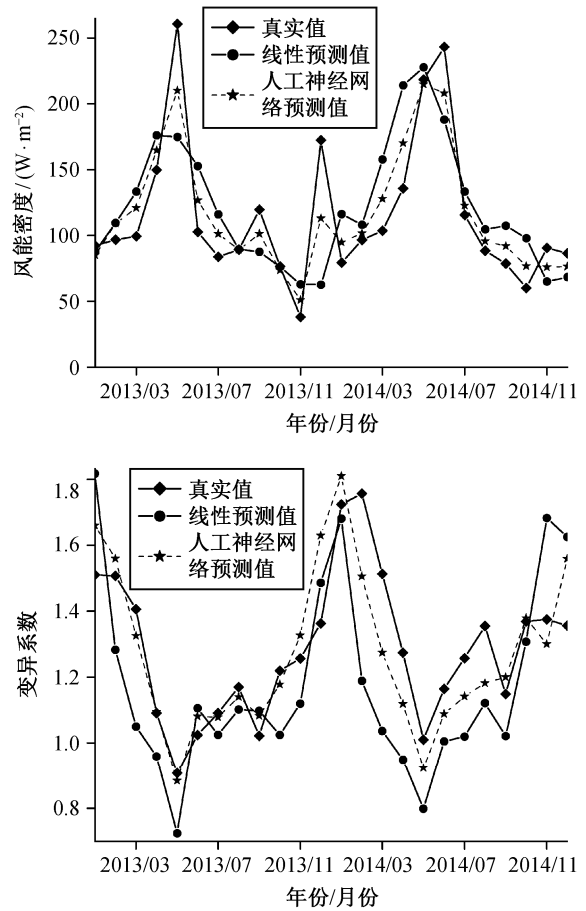


图 8 线性回归和人工神经网络对风能密度和变异系数的预测训练效果

Fig. 8 Prediction experiment of wind power density and coefficient of variation of the wind energy

与多年平均值基本上接近, 2016 年的预测值则明显高于多年平均状态, 尤其是风能密度。这意味着瓜达尔港的风能资源在 2015 年与多年平均状态持平, 2016 年则趋于更丰富。由图 9(d)可见, 变异系数的

表 2 两种预测方法对瓜达尔港风能资源的预测训练效果
Table 2 Prediction precision of the wind energy of the Gwadar Port

项目	风能密度		有效风速频率		能级频率		变异系数	
	线性回归	神经网络	线性回归	神经网络	线性回归	神经网络	线性回归	神经网络
CC	0.6593*	0.8608*	0.6724*	0.7331*	0.6634*	0.7002*	0.6352*	0.8484*
Bias	5.7897	3.0560	1.7890	-0.2516	1.9375	-0.5617	0.1101	0.0955
MAE	33.4049	18.2077	9.9247	7.3124	9.6059	9.0033	0.2073	0.1494
NRMSE	0.3347	0.1811	0.2795	0.2318	0.3174	0.2856	0.2028	0.1458
RMSE	42.8393	23.1813	12.4186	10.0006	12.5472	11.7034	0.2452	0.1762
SI	0.3316	0.1811	0.2766	0.2617	0.3136	0.2768	0.1812	0.1225

注: *表示相关系数通过 99.9%的信度检验, 其余未通过检验。

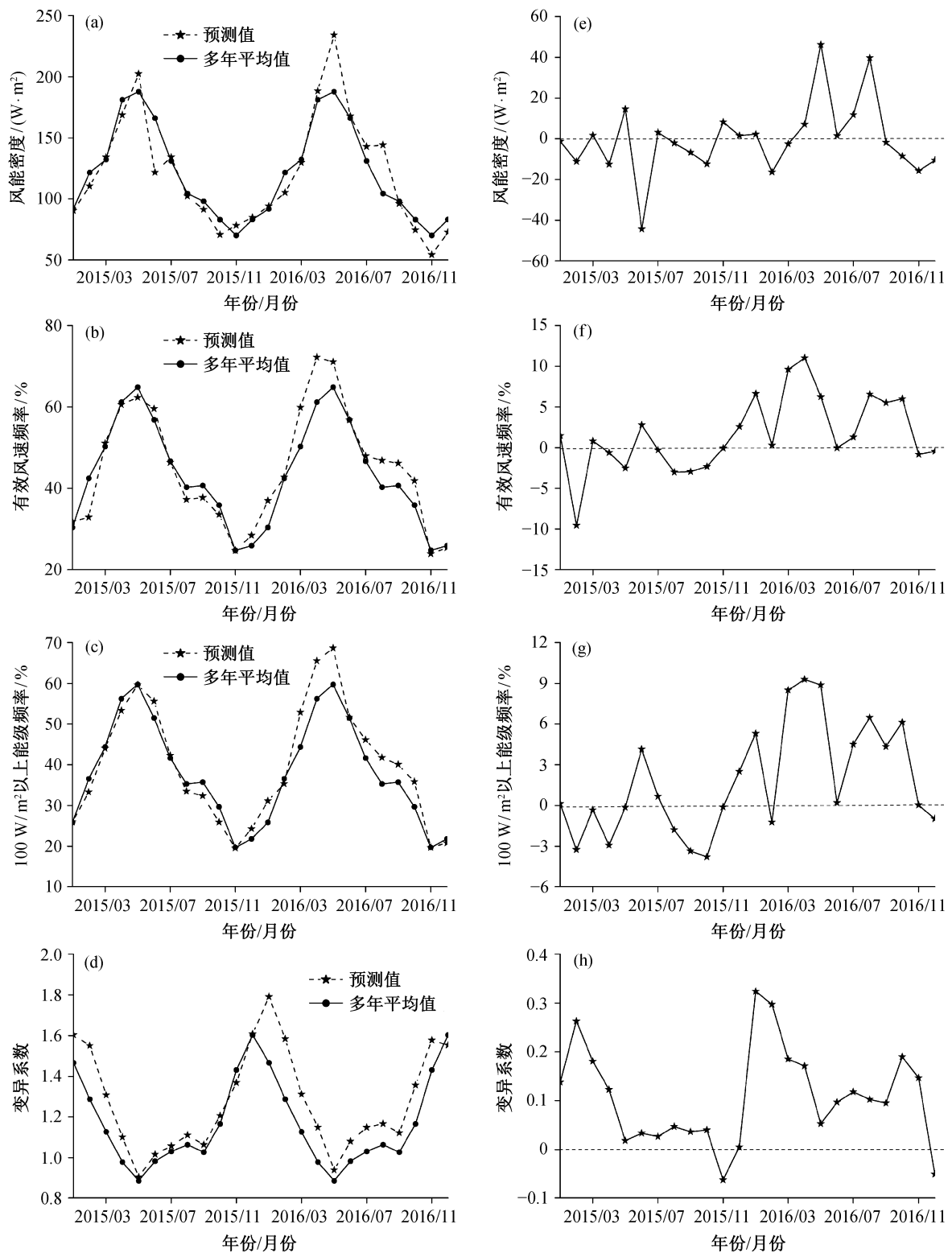


图 9 风能密度、有效风速频率、100 W/m² 以上能级频率和变异系数未来 24 个月的预测效果((a)~(d)) 以及预测值与多年平均值的差值((e)~(h))

Fig. 9 Prediction values of wind power density, occurrence of effective wind speed, occurrence of wind power density greater than 100 W/m² and coefficient of variation for the future 24 months ((a)~(d)), and the abnormal values between prediction and multi-year average value ((e)~(h))

预测值在 2015 年 5—11 月与多年平均值接近, 其余月份略高于多年平均值, 表明瓜达尔港 2016 年风能的稳定性比多年平均状态稍差。

为了更清晰地展现预测值与多年平均值的差异, 本文计算了预测值与多年平均值的差值, 结果见图 9(e)~(h)。从图 9(e)可见, 2015 年的预测值与多年平均值接近, 仅 2015 年 6 月明显低于多年平均值; 2016 年的风能密度比多年平均状态丰富(高出 $0\sim 40\text{ W/m}^2$)。从图 9(f)可见, 有效风速频率在 2015 年的预测值与多年平均值接近, 2016 年的预测值则明显高于多年平均值(高出 $0\sim 10\%$)。从图 9(g)可见, 100 W/m^2 以上能级频率的预测值 2015 年与多年平均值基本上接近, 2016 年的预测值比多年平均值高出 $0\sim 9\%$ 。从图 9(h)可见, 变异系数 2015 年和 2016 年的预测值都略高于多年平均值(尤其是 2016 年冬季), 表明预测的风能密度稳定性比多年平均的风能密度稳定性差。

4 结论

本文利用来自 ECMWF 的 ERA-Interim 海表 10 m 风场资料, 计算了瓜达尔港的风能资源在近 36 年期间的历史变化趋势, 并利用线性回归和 BP 神经网络两种预测方法, 对该港的风能资源展开长期年度预测, 结论如下。

1) 瓜达尔港夏季的风能密度为 $90\sim 210\text{ W/m}^2$, 明显比冬季($50\sim 170\text{ W/m}^2$)丰富; 年平均风能密度为 $100\sim 140\text{ W/m}^2$ 。夏季的有效风速频率(45%左右)和 100 W/m^2 以上能级频率(40%左右)明显高于冬季(有效风速频率、 100 W/m^2 以上能级频率都在 30%左右); 年平均有效风速频率为 35%~50%, 100 W/m^2 以上能级频率的年平均值为 30%~45%。风能资源的稳定性夏季好于冬季, 年平均变异系数、月变化指数和季节变化指数分别为 $1.0\sim 1.4$, $0.6\sim 2.4$ 和 $0.3\sim 1.3$ 。

2) 冬季, 瓜达尔港的风能密度、有效风速频率、能级频率和变异系数无显著变化趋势。夏季, 风能密度、有效风速频率和能级频率分别以 $-0.93\text{ W/(m}^2\cdot\text{a)}$ 、 $-0.25\%/a$ 和 $-0.22\%/a$ 的速度显著递减; 变异系数无显著变化趋势。近 36 年期间, 风能密度、有效风速频率和能级频率分别以 $-0.78\text{ W/(m}^2\cdot\text{a)}$ 、 $-0.21\%/a$ 和 $-0.22\%/a$ 的速度逐年显著递减, 稳定性(变异系数、月变化指数、季节变化指数)无显著性逐年变化趋势。

3) 从预测值来看, 风能密度、有效风速频率和 100 W/m^2 以上能级频率的预测值 2015 与多年平均值基本上接近, 2016 年的预测值则明显高于多年平均状态, 尤其是风能密度; 2015—2016 年, 预测风能资源的变异系数略高于多年平均值, 表明其稳定性比多年平均状态略差。

参考文献

- [1] 郑崇伟, 李崇银, 杨艳, 等. 瓜达尔港的风能开发可行性论证. 厦门大学学报(自然科学版), 2016, 55(2): 210-215
- [2] Chang T J, Wu Y T, Hsu H Y, et al. Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan. *Renewable Energy*, 2003, 28: 851-871
- [3] 陈飞, 班欣, 祈欣, 等. 连云港沿海地区及近海风能资源评估. *气象科学*, 2008, 28(增刊 1): 101-106
- [4] 毛慧琴, 宋丽莉, 黄浩辉, 等. 广东省风能资源区划研究. *自然资源学报*, 2005, 20(5): 679-683
- [5] 周荣卫, 何晓风, 朱蓉, 等. 中国近海风能资源开发潜力数值模拟. *资源科学*, 2010, 32(8): 1434-1443
- [6] 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. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(9): 1-6
- [7] 郑崇伟, 李崇银. 中国南海岛礁建设: 风力发电、海浪发电. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(9): 7-14
- [8] 谷兴凯, 范高锋, 王晓蓉, 等. 风电功率预测技术综述. *电网技术*, 2007, 31(2): 335-338
- [9] Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q J R Meteorol Soc*, 2011, 137: 553-597
- [10] Song L N, Liu Z L, Wang F. Comparison of wind data from ERA-Interim and buoys in the Yellow and East China Seas. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2015, 33(1): 282-288
- [11] ECMWF. ERA-Interim wind data [EB/OL]. (2011-01-01) [2015-06-22]. http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_daily/
- [12] 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. *Journal of Climate*, 2013,

- 26: 206–214
- [13] 马永锋, 卞林根. ERA-Interim 再分析和 NCEP FNL 分析资料在东南极中山站至 Dome A 断面的适用性研究. 极地研究, 2014, 26(4): 469–480
- [14] 王烨芳, 李成才, 石光明, 等. 江苏环港风电场风能资源特征分析. 北京大学学报(自然科学版), 2013, 49(6): 955–963
- [15] 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. 气象科学, 2007, 27(4): 407–412
- [16] 张吉豫, 刘先华, 梁堃, 等. 一种基于人工神经网络的基本块重排方法. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(1): 9–16
- [17] 陈克海, 解学通, 黄舟, 等. 人工神经网络在星载散射计海面风场反演建模中的应用. 北京大学学报(自然科学版), 2007, 43(4): 460–467
- [18] 黄茂怡, 黄嘉佑, 王勇, 等. 近年来 CCA 在气候分析与气候预测中的应用. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(1): 128–135
- [19] 郁亚娟, 王真, 郭怀成, 等. 基于人工神经网络的城市拓展区可持续发展指数序列研究. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(4): 496–502
- [20] 段晓峰, 许学工, 陈满春, 等. 基于长期验潮数据的海平面预测方法与案例应用. 北京大学学报(自然科学版), 2014, 50(6): 1065–1070
- [21] 陈辉, 李双成, 郑度. 基于人工神经网络的青藏公路铁路沿线生态系统风险研究. 北京大学学报(自然科学版), 2005, 41(4): 586–593
- [22] 谢袁洁, 黄香, 叶伟彰, 等. 人工神经网络及其在金融预报中的应用. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(3): 421–425
- [23] Miao W W, Jia H J, Wang D. Active power regulation of wind power systems through demand response. Science China Technology Science, 2012, 55: 1667–1676
- [24] Zheng C W, Pan J. Assessment of the global ocean wind energy resource. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 33: 382–391
- [25] 郑崇伟, 黎鑫, 陈璇, 等. 经略 21 世纪海上丝路: 海洋资源、相关国家的海洋开发状况. 海洋开发与管理, 2016, 33(3): 3–8
- [26] 郭梦婷, 蔡旭辉, 宋宇. 全国低风速气象特征分析. 北京大学学报: 自然科学版, 2016, 52(2): 219–226
- [27] Cornett A M. A Global wave energy resource assessment // Proceedings of the Eighteenth (2008) International Offshore and Polar Engineering Conference. Vancouver, 2008: Paper No. ISOPE-2008-TPC-579