

辽宁沿海地区风能资源时空分布的初步分析

姜波¹, 赵世明¹, 马治忠¹, 侯平平², 徐辉奋¹

(1. 国家海洋技术中心, 天津 300111; 2. 国家海洋局海水淡化与综合利用研究所, 天津 300192)

摘要: 利用 1997~2007 年辽宁省 7 个海洋站和 2007~2008 年 3 个临时观测站的实测数据, 使用 GIS 的反距离加权插值法, 初步分析了辽宁省沿海风能资源时空分布。结果为: 辽东湾沿岸风能资源丰富, 年平均风功率密度可达 250 W/m², 大连南部和东南沿海风能资源次之, 年平均风功率密度达到 175 W/m², 丹东沿海和大连东北部沿海属于风能可开发区, 年平均风功率密度仅有 75 W/m²。辽宁沿海风能资源春季最丰富, 年平均风功率密度可达 185 W/m², 秋季和冬季次之, 年平均风功率密度可达 158 W/m², 夏季最低, 年平均风功率密度仅有 88 W/m²。本研究初步掌握辽宁沿海的风能资源的分布规律, 对合理开发利用辽宁海岸带的风能资源和海洋功能区划修编有一定的理论依据和实用价值。

关键词: 风能资源; 有效风时; 风功率密度; 沿海地区; GIS

中图分类号: P74

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2011)12-0056-07

太阳辐射造成地球表面大气层受热不均, 引起大气压力分布不均。在不均压力作用下, 空气沿水平方向运动就形成风^[1]。风能是太阳能的一种转化形式, 是一种清洁的可再生能源。随着化石能源等一次性能源的日趋减少, 由于其在改变能源结构、保护环境、促进可持续发展的突出作用, 开发风能资源越来越受到国家的高度重视。

辽宁省在风能开发利用方面具有得天独厚的地理区位和自然条件。辽宁位于中国东北的南部, 介于 38°43'~43°26'N, 181°53'~125°46'E, 海岸线长达 2 110 km, 处于中国沿海风带上。辽宁省属于温带季风气候, 四季分明, 年平均风速高, 风功率密度大, 是我国风能资源相对丰富区之一。

目前, 国内很多学者采用不同的方法对辽宁省风能资源状况进行分析, 如: 利用部分气象站资料对风能资源储量进行分析^[2-3], 利用 MM5 数值模式对 2001 年 4 月辽宁沿海及近海海域的风能资源进行了数值模拟^[4], 利用部分风电场的实测风资料, 分析了辽宁沿海地区的风能资源特征及开发潜力^[5], 利用辽宁省部分气象站和风电场的风能资源数据, 对全省风能资源的时空分布进行了分析^[6]等。上述研究或者采用实测资料空间分布比较稀疏, 或者资料时间长度不够, 近年来观测仪器精度越来越高, 而所采用的数据均为 2002 年以前资料, 使得分析结果有一定片面性。辽宁沿海分属渤海辽东湾沿岸和黄海

北部沿岸, 因此, 本文分辽东湾西、北、东岸和黄海北岸 4 个区块进行分析。采用辽宁省 7 个海洋站和 3 个临时观测站的观测资料, 对辽宁沿海的风能资源状况进行分析研究, 初步掌握其风能资源的分布规律, 对合理开发利用辽宁海岸带的风能资源和海洋功能区划修编有一定的理论依据和实用价值。

1 风能资料来源及研究方法

1.1 资料来源

足够长的风速连续自记记录对提高风能计算精度是有帮助的, 但过短的资源不能准确反映当地的风况, 一般认为 5~10 a 或 10 a 以上的观测资料就能比较客观地反映该地区的真实状况^[7]。本次风能资源评估中, 引用了辽宁省芷锚湾、葫芦岛、鲅鱼圈、温坨子、老虎滩、小长山、东港 7 个海洋站(1997~2007 年)和王家屯、黄家围、大圈村 3 个临时站(2007~2008 年)实测资料(观测站分布见图 1), 这些资料包括: (1)各站点历年日最大风速、日极大风速、日最高气压、日最低气压、日最高气温、日最低气温等。(2)各站点历年逐时风速、风向; 逐日气温、气压(气温、气压资料每天 4 次, 分别为 2 : 00, 8 : 00, 14 : 00, 20 : 00)。

收稿日期: 2010-02-11; 修回日期: 2011-08-05

基金项目: 我国近海海洋综合调查与评价专项(908-01-NY)

作者简介: 姜波(1978-), 男, 山东即墨人, 硕士, 助理研究员, 主要从事数值模拟方向研究, 电话: 022-27686783, E-mail: qdji-angbo@163.com

因为 3 个临时站资料时间不统一,且时间也比较短,需要分析这些资料的可用性,分别利用毗邻的海洋站资料与临时站的建立线形回归模型^[8],将 4 个临时站资料递推延长至 1997~2007 年资料。

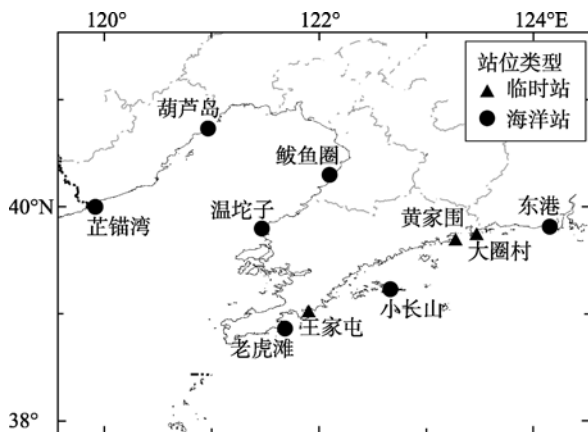


图 1 观测站位置分布图
Fig. 1 Observation sites

1.2 资料质量控制

通过检查网站的原始测风数据,对其完整性和合理性进行判断,检验出不合理的数据和缺测的数据及其发生的时间,参照备用的或可供参考的同期记录数据,对不合理数据再次进行判别,挑出符合实际情况的有效数据,回归原始数据。

1.2.1 资料完整性检验

计算测风有效数据的完整率按式(1)计算^[9]:

有效数据完整率=[(应测数目 - 缺测数目 - 无效数据数目)/应测数目]×100% (1)

本文所引用网站有效数据完整率达到 90%,符合风能资源评估要求。

1.2.2 资料合理性检验

资料合理性检验包括范围检验和趋势检验:

(1)合理范围检验: 0 小时平均风速 < 40 m/s; 0° 风向 < 360°。(2)合理变化趋势检验: 每小时平均风速变化 < 6 m/s。

1.3 研究方法

目前,通常采用的评价一个地区风能资源开发利用潜力的主要指标是有效风功率密度和年有效风时^[3],本次辽宁沿海风能资源评估主要考虑以下几个参数。

1.3.1 平均风速

平均风速为给定时间内瞬时风速的平均值,给

定时间从几秒到数年不等。平均风速(\bar{V}_E)按下式计算^[9-10]:

$$\bar{V}_E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (2)$$

其中, V_i 为风速(m/s)观测序列; n 为平均风速计算时间段内风速序列个数。

1.3.2 风速频率

以 1 m/s 为一个风速区间,统计代表年测风序列中每个风速区间内风速出现的频率。每个风速区间的数字代表中间值,如 5 m/s 风速区间为 4.6~5.5 m/s^[9-10]。

1.3.3 风向频率

根据风向观测资料,按 16 个方位统计观测时段内(年、月)各风向出现的小时数,除以总的观测小时数即为各风向频率^[9]。

1.3.4 有效风时

有效风时即统计出代表年测风序列中风速在 3~25 m/s 之间的累计小时数^[10]。

1.3.5 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,评价一个地区风能资源潜力的重要指标。设定段的平均风功率密度表达式为^[9]:

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

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

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,有效风功率密度是根据有效风速计算得到的风功率密度。空气密度 ρ 按式(4)计算:

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (4)$$

其中, P 为年平均大气压力,单位为 Pa; R 为气体常数 ($287 J/(kg \cdot K)$); T 为年平均空气开氏温标绝对温度。

1.3.6 风能资源总储量

风能资源总储量可按式(5)计算^[10]:

$$Q = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n S_i P_i \quad (5)$$

其中, n 为风功率等级数; S_i 为年平均风功率密度分布图中各风功率密度等值线间面积; P_i 为各风功率密度等值线间区域的风功率代表值。

1.3.7 威布尔(Weibull)分布参数 k, c 的估算

本文采用以平均风速和标准差估算 Weibull 两个参数^[10]。

以平均风速 \bar{V}_E 估计 μ , 以标准差 S_v 估计 σ :

$$\mu = \bar{V}_E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (6)$$

$$\sigma = S_v = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i - \mu)^2} \quad (7)$$

Weibull 两参数 k, c 按下式估计(保留 2 位小数):

$$k = \left(\frac{\sigma}{\mu} \right)^{-1.086} \quad (8)$$

$$c = \frac{\mu}{\Gamma(1+1/k)} \quad (9)$$

式中: $\Gamma(1+1/k)$ 为伽马函数。确定了风速的 Weibull 分布参数之后, 可以方便地求得平均风功率密度、有效风功率密度和有效风时。

平均风功率密度按式(10)计算^[10]:

$$\bar{W} = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (10)$$

有效风功率密度按式(11)计算^[11]:

$$\bar{W}_e = \frac{k \rho}{2c} \frac{\int_{v_S}^{v_B} v^3 \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] dv}{\exp\left[-\left(\frac{v_S}{c}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{v_B}{c}\right)^k\right]} \quad (11)$$

其中, v_S 为切入风速, v_B 为切出风速。本文分别取 3 m/s, 25 m/s。

有效风时按式(12)计算^[11]:

$$T_e = T_0 \left[\exp\left[-\left(\frac{v_S}{c}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{v_B}{c}\right)^k\right] \right] \quad (12)$$

在计算各个地区的风能资源时, 应把各海洋站风速统一换算到离地面 10 m 处的风速^[12]。可按式(13)计算:

$$V_{10} = k_h V_i \quad (13)$$

其中, V_{10} 为 10 m 高度处的风速; V_i 为 i 高度(m)处的已知风速; k_h 为风传感器高度换算系数。对 7 个海洋站和 3 个临时站分别用观测资料统计分析和威布尔(Weibull)分布计算风能参数, 其结果见表 1(限于篇幅仅列出了 6 个海洋站 2007 年计算结果)。

表 1 2007 年 6 个海洋站 10 m 高度上风能资源状况

Tab. 1 Wind energy status at the height of 10 m of six ocean stations

站名	平均风功率密度(W/m ²)			有效风功率密度(W/m ²)			有效风时(h)		
	观测值 统计分析	Weibull 分布计算	偏差(%)	观测值 统计分析	Weibull 分布计算	偏差(%)	观测值 统计分析	Weibull 分布计算	偏差(%)
芷锚湾	78	75	3.8	115	111	3.5	5 520	5 710	3.4
葫芦岛	94	91	3.2	149	147	1.3	5 268	5 311	0.8
鲅鱼圈	109	99	9.2	173	164	5.2	5 314	5 170	2.7
老虎滩	89	94	5.6	151	152	0.7	4 787	5 262	9.9
小长山	95	94	1.1	150	152	1.3	5 127	5 266	2.7
东港	109	99	9.2	173	164	5.2	5 314	5 170	2.7

注:偏差一律取绝对值

2 辽宁沿海风能分布特点

辽宁沿海风能资源比较丰富, 其风能资源主要特点分述如下。

2.1 风能要素的日、季、年变化

2.1.1 风速的日变化

图 2 中, 分别从辽东湾西、北、东岸和黄海北岸选取了芷锚湾、葫芦岛、鲅鱼圈、老虎滩 4 个海洋站代表月风速日变化曲线图(11 a 平均), 从图 2 中可以看出: 辽宁沿海地区白天风速明显大于夜间, 从

上午 8:00 左右风速开始增大, 15:00 左右达到最大, 然后开始减弱, 夜间到清晨风速变化比较平缓; 辽东湾沿岸比黄海北部沿岸具有更明显的昼夜变化, 芷锚湾日较差达 1.6~2.0 m/s, 葫芦岛日较差达 1.6~2.4 m/s, 鲅鱼圈日较差达 1.2~2.1 m/s, 老虎滩日较差仅 0.8~1.5 m/s。

2.1.2 风向及风能的季节变化

辽宁沿海地区冬、秋季盛行北风或者偏北风; 辽东湾沿岸春、夏季盛行南风或偏南风, 黄海北岸春、夏季风向比较分散, 春季除 WSW 风外 NNW 风

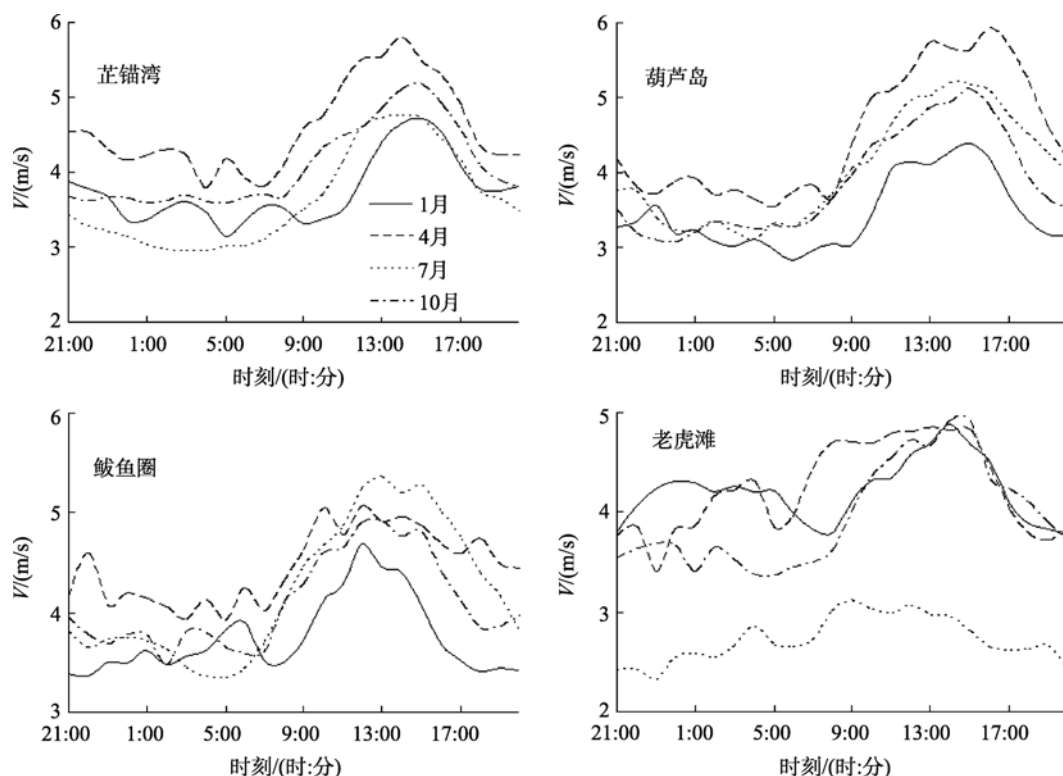


图 2 1997~2007 年 10 m 高度处风速日变化
 Fig. 2 The diurnal variations of wind speed at the height of 10 m from 1997 to 2007

和 N 风较多, 夏季除 ENE 风外 E 风和 WSW 风较多。限于篇幅, 本文仅给出芷锚湾风向玫瑰图, 见图 3。

从图 4 有效风功率密度和有效风时月变化可以看出: 辽宁沿海地区风能季节变化明显, 月变化呈双峰型分布, 春季最大, 秋季和冬季次之, 夏季最小, 体现了辽宁沿海春季大风的气候特点。

2.1.3 风能的年际变化

从图 5 有效风功率密度和有效风时年际变化可以看出: 各地有效功率和有效风时年际变化显著, 1997~2002 年相对于 2003~2007 年风能偏大。辽宁沿海风能资源出现阶段性特征的原因可能是: (1) 在全球气候变暖影响下, 东亚季风有所减弱, 从而使辽宁沿海地区风能减小, 但这需要进一步研究证明; (2) 随着港口建设、临海工业和沿海旅游等海洋开发活动获得前所未有的发展, 海洋站周围环境可能已经发生变化。

2.2 风速频率分布

图 6 为 4 个海洋站 10 m 高度处风速频率分布图。从图 6 中可以看出, 辽宁沿海地区 3~5 m/s 的风速频率最高, 其中芷锚湾 4 m/s 风速出现最多, 葫芦岛、

鲅鱼圈、老虎滩 3 m/s 风速出现最多。

3 基于 GIS 的辽宁沿海风能资源空间分布

计算得到的各海洋站和临时站的常年风功率密度和有效风时, 代表了各观测站所在地区风能资源状况, 但是他们不能直观地反映辽宁沿海风能资源的空间分布态势。为了评估无观测站地区的风能资源, 须通过空间插值, 如反距离权重插值(IDW)、Kriging 插值、通过回归方程插值等。

本文根据观测站的站位数据, 利用 IDW, 在 ArcGIS 中对计算结果进行空间内插, 得到辽宁沿海风能资源(有效风功率密度、有效风时和平均风功率密度)分布数据, 其结果见图 7 和图 8。

根据朱瑞兆等研究结果^[2], 将风能分为 4 个等级, 见表 2。

从图 7 和表 2 可以看出: 辽宁沿海风能资源包含了风能丰富区、较丰富区和可利用区。其中风能丰富区位于辽东湾沿岸: 锦州沿海、盘锦沿海、营口沿海、葫芦岛北部沿海和大连西北部沿海; 风能较丰富

区位于葫芦岛中段沿海和大连南部、东南沿海；风能可开发区葫芦岛南部沿海、大连东北沿海和丹东沿海。全省沿海地区有效风功率密度最高值在大连市

温坨子，为 412 W/m^2 ，最低值为大连市黄家围，为 124 W/m^2 ；有效风时最高的是营口市鲅鱼圈，达到 6586 h ，最低为大连市黄家围，只有 5129 h 。

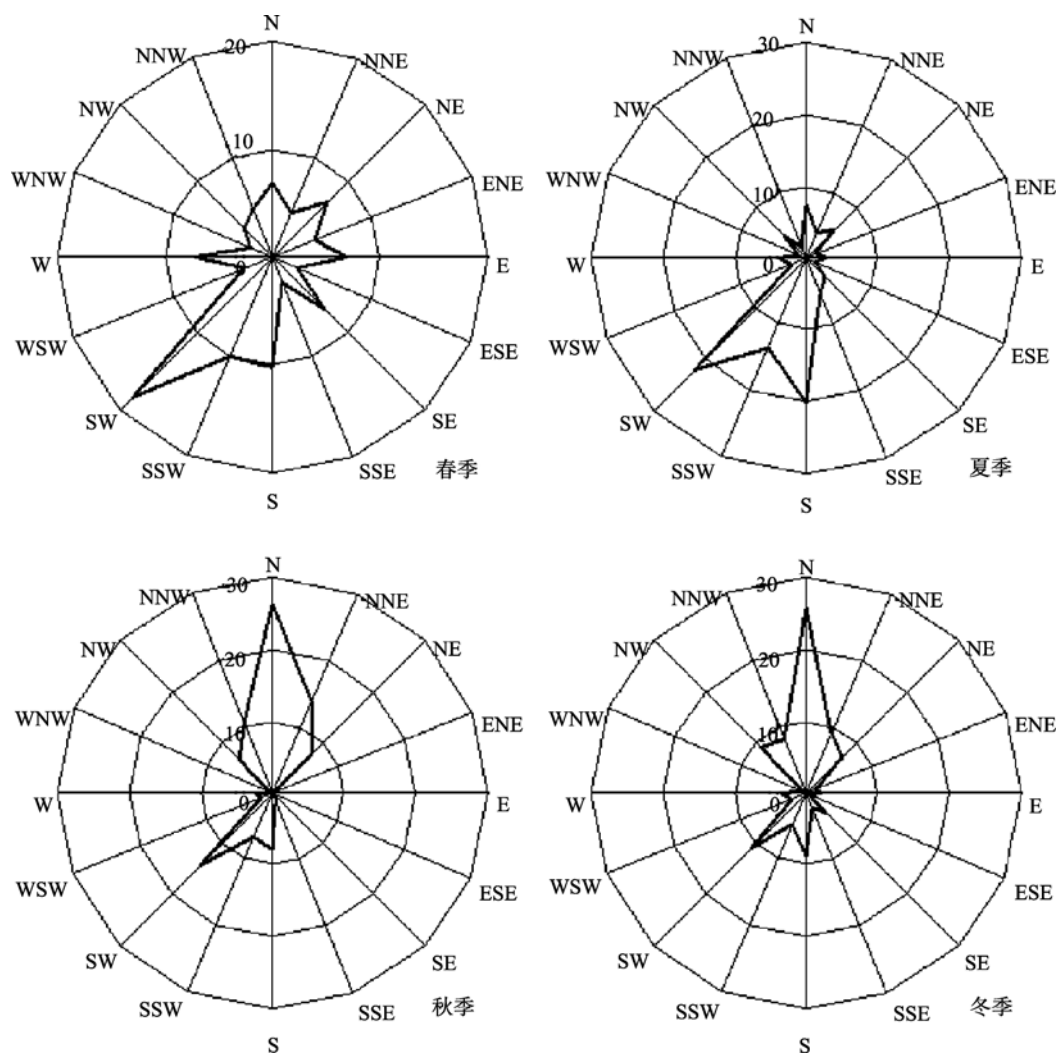


图3 芷锚湾 10 m 高度处风向玫瑰图

Fig. 3 Rose maps of wind direction at 10 m height of Zhimaowan

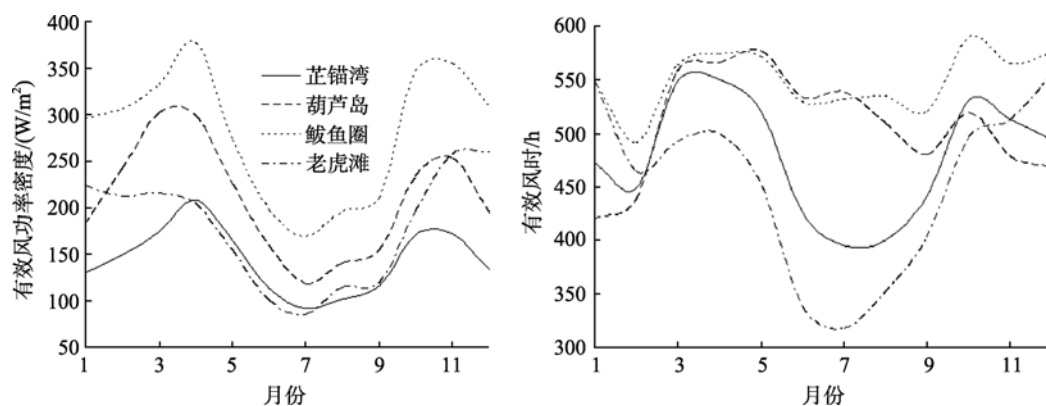


图4 10 m 高度处有效风功率密度和有效风时月变化

Fig. 4 The monthly variations of valid wind power density and valid hours of wind at the height of 10 m

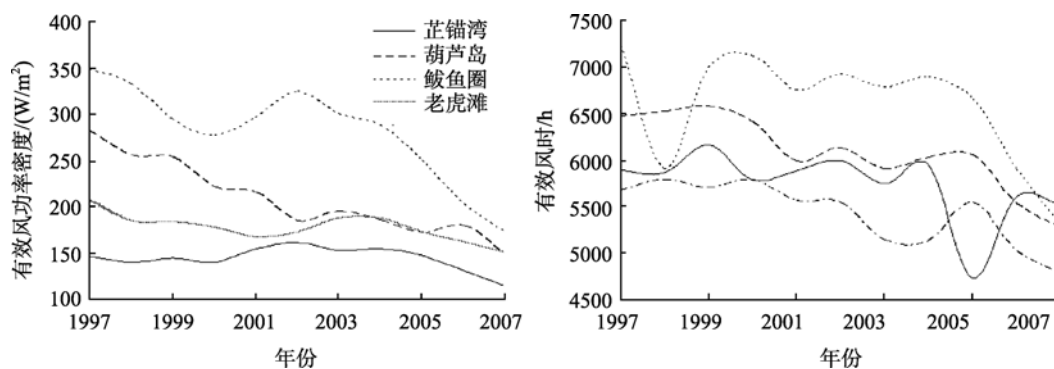


图 5 10 m 高度处有效风功率密度和有效风时年际变化

Fig. 5 Annual variations of valid wind power density and valid hours of wind at the height of 10 m

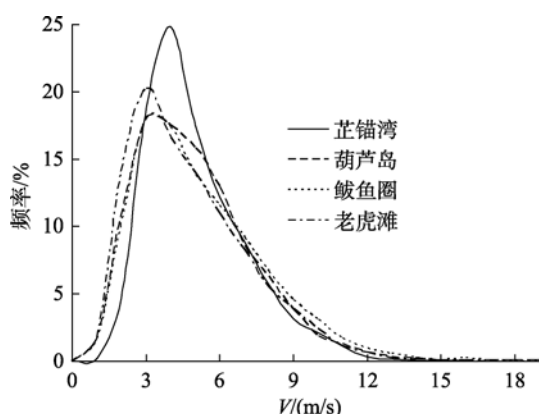


图 6 10 m 高度处风速频率

Fig. 6 Wind speed frequency at at the height of 10 m

表 2 10 m 高度风能区划指标

Tab. 2 Wind energy grade at the height of 10 m

风能区划	年有效风功率密度 (W/m^2)	年有效风时 (h)
丰富区	>200	>5000
较丰富区	$200\sim150$	$5000\sim4000$
可利用区	$150\sim50$	$4000\sim2000$
贫乏区	<50	<2000

从图 8 辽宁沿海平均风功率密度可以看出: 营口沿海和盘锦大部分沿海平均风功率密度为 $200\sim300 W/m^2$, 锦州沿海和葫芦岛北部沿海为 $150\sim200 W/m^2$, 丹东沿海和大连东北沿海为 $50\sim150 W/m^2$,

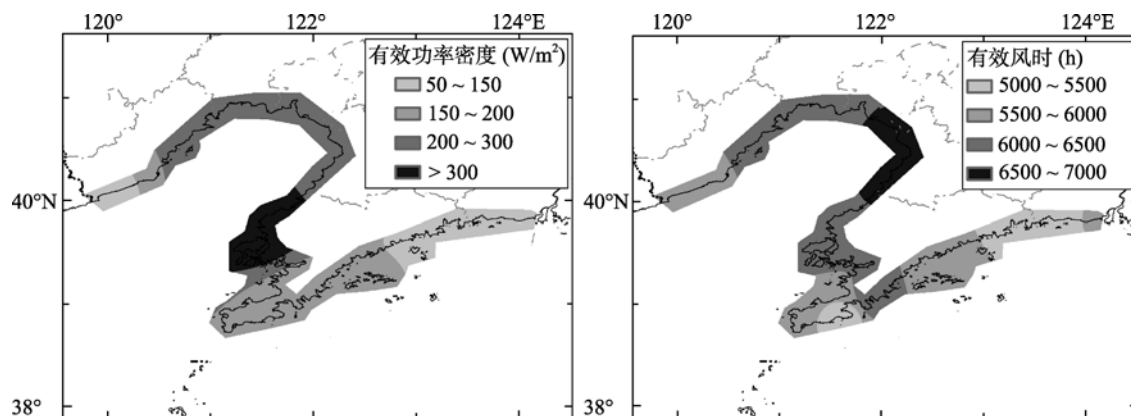


图 7 辽宁沿海有效风功率密度和有效风时分布

Fig. 7 Distributions of valid wind power density and valid hours of wind of the coast Liaoning province

葫芦岛南部沿海、大连南部和东南沿海为 $150\sim200 W/m^2$ 。

4 结语

本文利用辽宁 7 个海洋站 11 a 和 3 个临时站不少于 1 a 的观测数据, 计算了辽宁沿海风能资源及其

时空分布, 初步掌握辽宁省沿海地区风能资源的分布规律, 为辽宁省沿海地区制定海上风电场发展规划和政府决策提供科学依据, 为辽宁省海洋功能区划的修编提供技术支持。研究表明: 辽东湾沿岸风能资源丰富, 年平均风功率密度可达 $250 W/m^2$, 大连南部和东南沿海风能资源次之, 年平均风功率密度

达到 175 W/m^2 , 丹东沿海和大连东北部沿海属于风能可开发区, 年平均风功率密度仅有 75 W/m^2 。辽宁沿海风能资源春季最丰富, 年平均风功率密度可达 185 W/m^2 , 秋季和冬季次之, 年平均风功率密度可达 158 W/m^2 , 夏季最低, 年平均风功率密度仅有 88 W/m^2 。

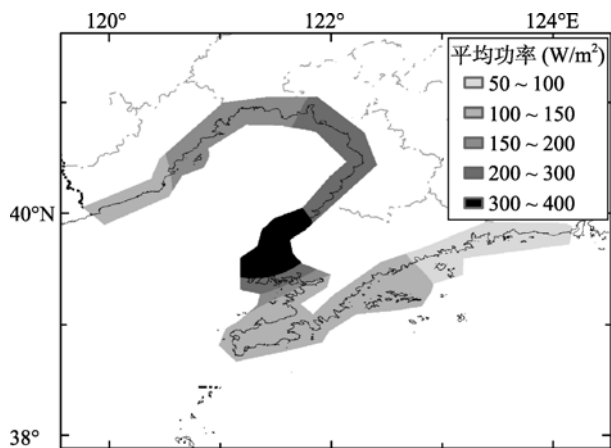


图 8 辽宁沿海平均风功率密度分布

Fig. 8 Distribution of average wind power density of the coast Liaoning province

此外, 因资料所限, 本文在计算中用 10 个观测站的气象数据, 进行了空间内插形成辽宁沿海风能资源分布, 其精度肯定受到影响, 特别是无观测站地区。为了提高计算精度, 还需要进一步增加海洋站

的数量, 特别是高空观测项目。

致谢: 感谢审稿专家和海洋科学编辑部刘珊珊老师提出的宝贵意见。

参考文献:

- [1] 刘万琨, 张志英, 李银凤, 等. 风能与风力发电技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 1.
- [2] 朱瑞兆, 薛彬. 风能的计算和我国风能的分布[J]. 气象学报, 1981, 7(8): 26-28.
- [3] 廖顺宝, 刘凯, 李泽辉. 中国风能资源空间分布的估算[J]. 地球信息科学, 2008, 10(5): 551-556.
- [4] 龚强, 袁国恩, 张云秋, 等. MM5 模式在风能资源普查中的应用试验[J]. 资源科学, 2006, 28(1): 145-150.
- [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.
- [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.
- [7] 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.
- [8] 李泽椿, 朱蓉, 何晓凤, 等. 风能资源评估技术方法研究[J]. 气象学报, 2007, 65(5): 708-717.
- [9] GB/T 18710-2002, 风电场风能资源评估方法 [S].
- [10] 国家发展改革委, 全国风能资源评价技术规程[S].
- [11] 胡志华. Weibull 分布及其在风能计算中的应用[J]. 云南师范大学学报, 1991, 11(1): 50-53.
- [12] 陈上及, 马继瑞. 海洋数据处理分析方法及其应用 [M]. 北京: 海洋出版社, 1991: 393.
- [13] 钱光明, 罗金铃, 戴景茹, 等. 广东省沿海风能储量及开发前景分析[J]. 广东气象, 1998, 4: 2-4.

Temporal-spatial distribution of the wind energy in Liaoning littoral

JIANG Bo¹, ZHAO Shi-ming¹, MA Zhi-zhong¹, HOU Ping-ping², XU Hui-fen¹

(1. National Ocean Technology Center, Tianjin 300111, China; 2. The Institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, State Oceanic Administration, Tianjin 300192, China)

Received: Feb., 11, 2010

Key words: wind energy resource; valid hours of wind; wind power density; coastal area; GIS

Abstract: The characteristics of wind energy along Liaoning coastal area were extracted from the wind data from 1997 to 2008 with the method of inverse distance weighted interpolation. The results show that the Liaodong Bay coastal area is rich in wind energy, which reaches 250 W/m^2 per year. The wind energy in the south and southeast of Dalian coastal area reaches 175 W/m^2 per year. Dandong and the northeast of Dalian coastal area is only a potential area for wind energy utilization, with a wind energy of about 75 W/m^2 per year. In addition, the resources in the Liaoning coastal area in spring are relatively high, which is about 1.2 times of that in autumn and in winter, and 2.1 times of that in summer. This research has practical value to the rational utilization of wind energy resources along Liaoning coastal area and the division of ocean functional area.

(本文编辑: 刘珊珊)