

俄罗斯北部海域风能资源的时空特征分析

王哲^{1,2}, 张韧^{1*}, 葛珊珊¹, 张明², 吕海龙³

(1. 国防科技大学 气象海洋学院, 江苏 南京 211101; 2. 东部战区海军海洋水文气象中心, 浙江 宁波 315000;
3. 解放军 91181 部队, 山东 青岛 266000)

摘要:利用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)风场资料,对 1997—2016 年俄罗斯北部海域风能资源展开评估,并建立选址指标体系,识别潜在海上风电场建址区域。结果表明:俄罗斯北部海域的风功率密度大小和风功率密度等级分布均为“西高东低”型,即巴伦支海风能资源最丰富且风功率密度等级最高,东西伯利亚海风能资源较少且风功率密度等级最低;有效风速出现频率为单谷型,夏季出现谷值,春季、秋季和冬季出现峰值;风功率密度变异系数有明显季节变化,冬季变异系数较高,夏季变异系数达到最低值;喀拉海适宜开发近海风能资源,巴伦支海适宜开发深海风能资源;风向频率最高的风向是 NE,其次是 NNE 与 ENE 向。研究结果可为未来国内相关单位参与北极风能资源开发提供依据和参考。

关键字:风功率密度;选址区划;海冰密度

中图分类号:P743

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2018)03-0465-13

doi:10.3969/j.issn.1671-6647.2018.03.013

全球气候变暖导致的北冰洋海冰融化及全球一体化进程的加快,使得北极地区自冷战后,再次成为全球关注的焦点。北极作为北美、欧亚、亚太三个大陆的“交点”,具有巨大的经济开发价值。北极东北航道的开通,可能会改变目前的世界航运格局,并产生巨大经济效益。随着北极海冰融化,北极地区丰富的石油、矿产和清洁能源等资源都将逐步具备可开发条件。若北极的海上风能资源得到有效开发,将对全球清洁能源优化配置、人类社会可持续发展有很大影响。海上风电具有资源丰富、发电利用小时数高、单机容量大、不占用土地、不消耗水资源以及适宜大规模开发等特点,是未来可再生能源的主要发展方向。

截至 2016 年,全球海上风电累计装机量排名前三位的国家分别是英国、德国和中国^[1]。北极地区风能资源丰富且分布广,技术可开发量约 1 000 亿 kW,约占全球风能资源的 20%^[2]。作为环北极国家,俄罗斯在清洁能源开发方面较为落后,目前仅有几个陆上风电项目。2016 年底,中国和俄罗斯签订了建设俄罗斯首个海上风电场的合作协议。

有学者已经对一些地区风能资源进行了评估^[3-5]。2015 年,国家电网公司与俄罗斯合作完成了俄罗斯北冰洋沿岸的风能资源评估,结果显示白令海、楚科奇海、巴伦支海、格陵兰岛、喀拉海相对适合开发风电^[6]。郑崇伟等^[7]从风功率密度、有效风速、风向等方面对瓜达尔港风能资源进行了评估,认为夏季瓜达尔港的风能资源较冬季丰富。李赫等^[8]对我国沿海海域的风能资源进行了评估,结果表明东海和南海平均风速大于黄海和渤海平均风速,且离岸风速大于近岸风速。张富强等^[9]从国际法、北极各国投资法律与政策、环境保护、原住民权利等角度,分析了开发北极风电过程中可能遇到的诸多约束,并借鉴其他国家在俄投资经验教训,提出了推进北极地区风电开发的若干建议。Onea 等^[10]对地中海近岸风能资源进行了评估,认为地中海北部及南部海域风能资源最为丰富。Nikolayev 等^[11]指出,俄罗斯是世界上潜在风能资源最大的国家,他从经济性方面探讨了俄罗斯和日本合作开发俄罗斯本土风能的可能性。Salo 和 Syri^[12]在 2014 年从经济性角

收稿日期:2017-03-29

资助项目:全球变化与海气相互作用专项——气候变化与北极响应及对策研究(20170436)

作者简介:王哲(1993-),男,陕西韩城人,硕士研究生,主要从事海洋战略风险方面研究。E-mail: 376657030@qq.com

* **通讯作者:**张韧(1963-),男,四川峨眉人,教授,博士,博士生导师,主要从事海战场环境保护方面研究。E-mail: zrpaper@163.com

(王燕 编辑)

度分析了在北极地区建设离岸风电场的可行性,并指出北极的海冰是建设风电场的一大挑战因素。Chade 等^[13]考虑到在北极偏远地区用柴油发电代价昂贵,探讨了风力发电的供电模式,认为所提方案可行并在 4 年内可收回成本。Boute^[14]考虑到在北极地区采用柴油发电会对北极自然生态环境造成破坏,提出了在北极地区开发风能资源的观点,以应对潜在的环境问题。

本文拟采用欧洲中期天气预报中心的再分析风场资料,从风功率密度的时空分布特点、有效风速出现频率和风能稳定性等方面,对俄罗斯北部海域的风能资源进行研究,同时尝试引入自然风险评估领域的相关概念,建立初步选址模型,对北极地区海上风能资源潜在开发海域进行识别。

1 研究数据及计算方法

利用 ERA-interim 的海表 10 m 再分析风场资料(空间分辨率 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)分析俄罗斯北部北冰洋沿岸($20^{\circ} \sim 180^{\circ} \text{E}$, $68^{\circ} \sim 83^{\circ} \text{N}$)的风能资源特征,主要包括风功率密度的 20 a(1997—2016 年)逐月(1—12 月)时空分布特征、有效风速出现频率的季节变化特征、风功率密度年际变化趋势、风能稳定性的季节变化特征等。

风功率密度为垂直于气流的单位截面上风的功率,计算方法^[15]为

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

式中, D_{WP} 为平均风功率密度(W/m^2); n 为在设定时间段内的记录数; ρ 为空气密度(kg/m^3), $\rho = P/RT$, P 为俄罗斯北部海域年平均气压, R 为气体常数, T 为俄罗斯北部海域年平均开氏温标绝对温度,计算得平均空气密度为 $1.34 \text{ kg}/\text{m}^3$; v_i 为第 i 次记录的风速值。

2 结 果

2.1 风功率密度的月变化特征以及等级分布

根据风功率密度等级划分标准^[16]可知, $150 \text{ W}/\text{m}^2 < \text{风功率密度} \leq 200 \text{ W}/\text{m}^2$ 时,风功率密度等级达到 3 级,用于并网风力发电效果较好; $200 \text{ W}/\text{m}^2 < \text{风功率密度} \leq 250 \text{ W}/\text{m}^2$ 时,风功率密度等级达到 4 级,用于并网风力发电效果好; $250 \text{ W}/\text{m}^2 < \text{风功率密度} \leq 300 \text{ W}/\text{m}^2$ 时,风功率密度等级达到 5 级,用于并网风力发电效果很好; $300 \text{ W}/\text{m}^2 < \text{风功率密度} \leq 400 \text{ W}/\text{m}^2$ 时,风功率密度等级达到 6 级,用于并网风力发电效果很好;风功率密度 $> 400 \text{ W}/\text{m}^2$ 时,风功率密度等级达到 7 级,用于并网风力发电效果很好。

俄罗斯北部海域 20 a(1997—2016 年)逐月(1—12 月)的风功率密度分布如图 1 所示。可以看出,风功率密度分布呈现较为明显的区域和季节特征,整体来看由东至西风功率密度呈减少趋势。以 $400 \text{ W}/\text{m}^2$ 等值线为例,1—3 月和 10—12 月,巴伦支海域风功率密度维持在 $400 \text{ W}/\text{m}^2$ 以上,尤其是诺尔辰角北部沿岸和新地岛西部在 2 月、3 月、11 月和 12 月时,具有明显高值中心($700 \text{ W}/\text{m}^2$)。4—9 月,巴伦支海域周边风功率密度基本维持在 $250 \text{ W}/\text{m}^2$ 以上。

根据文献^[17]的风功率密度分级标准,对风能资源的可利用价值进行判定,将计算的 20 a(1997—2016 年)逐月(1—12 月)平均风功率密度进行等级划分(图 2)。

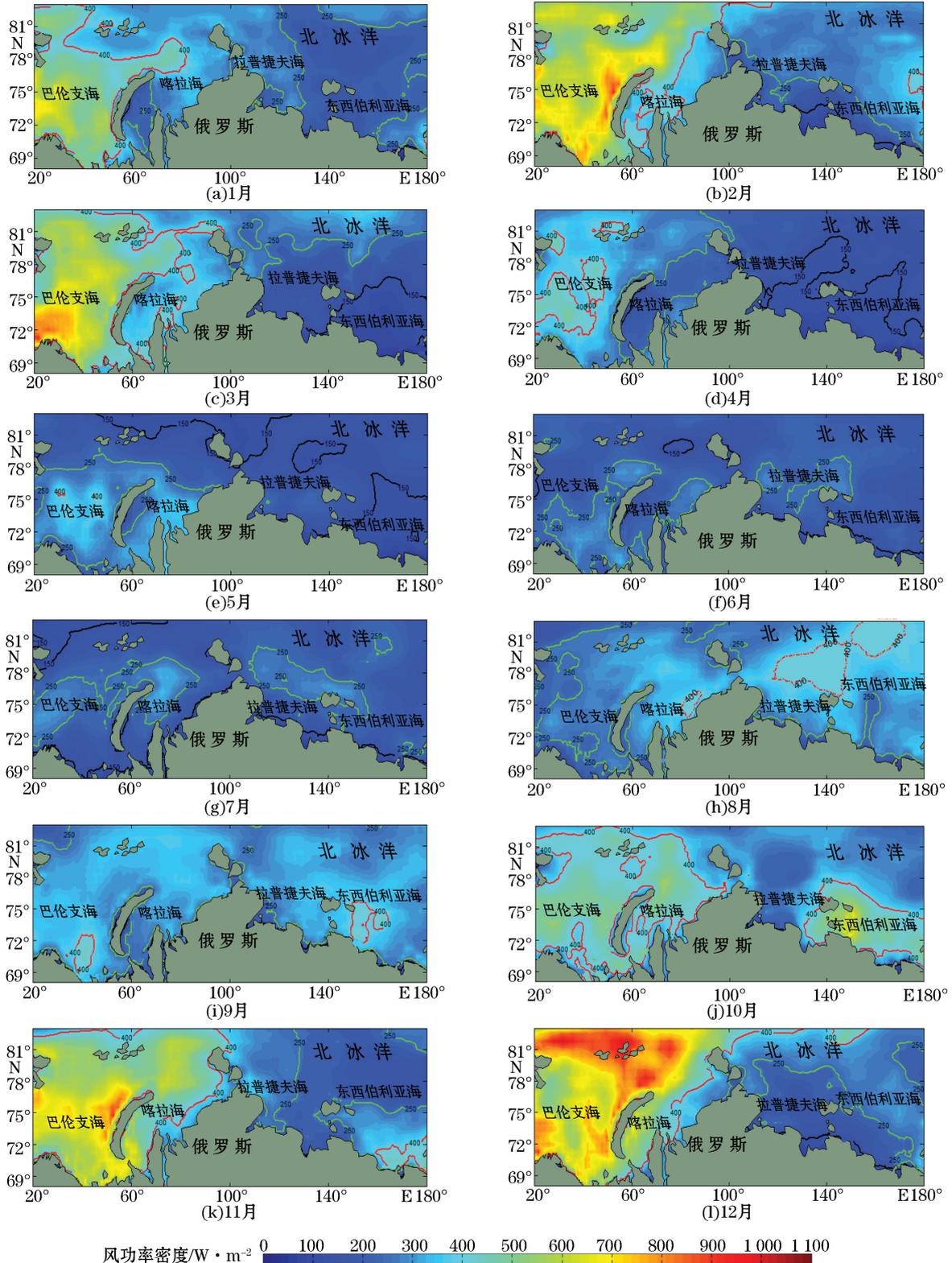


图 1 20 a(1997—2016 年)逐月(1—12 月)平均风功率密度分布

Fig.1 Monthly mean wind power density distribution from 1997 to 2016

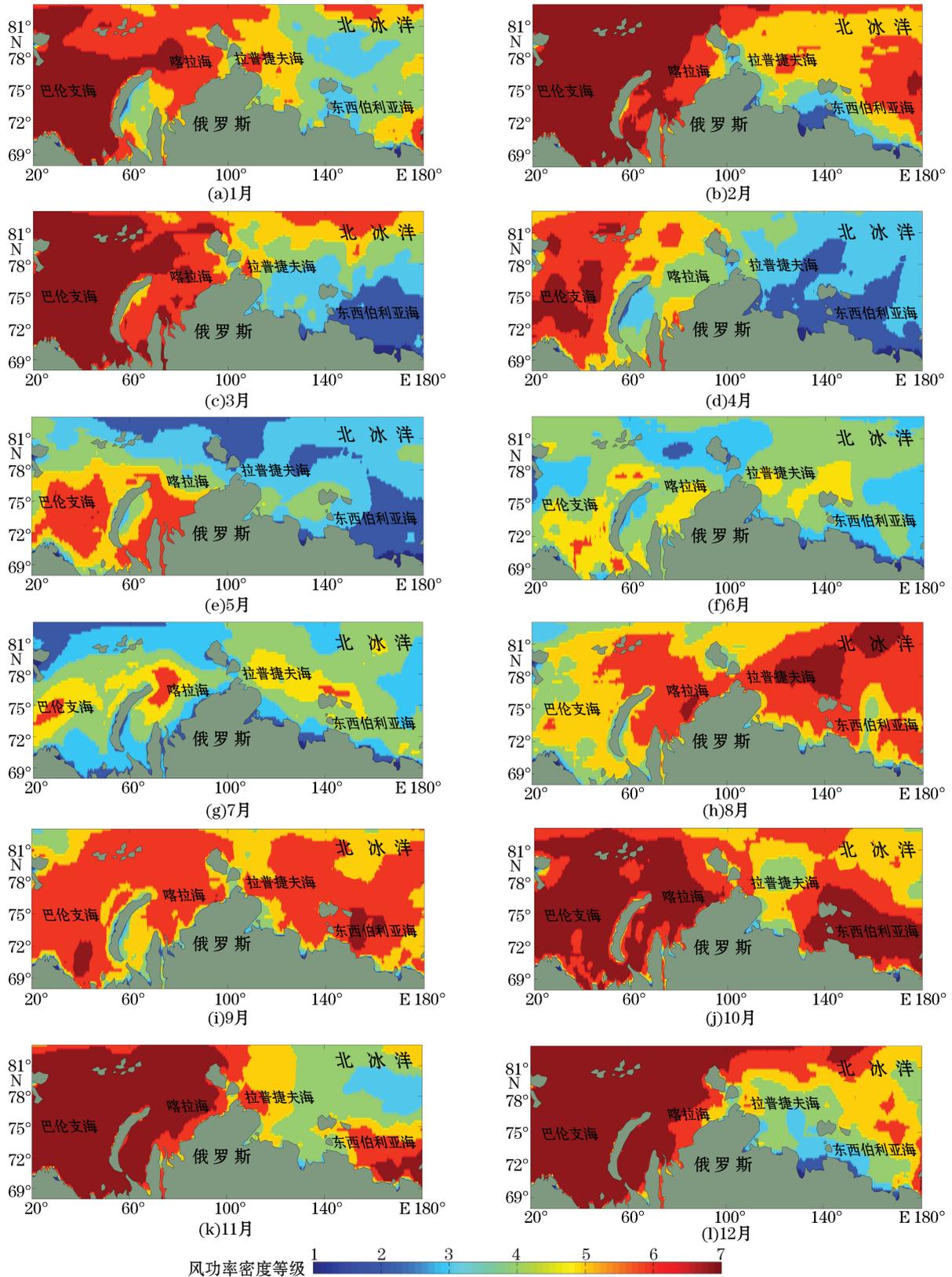
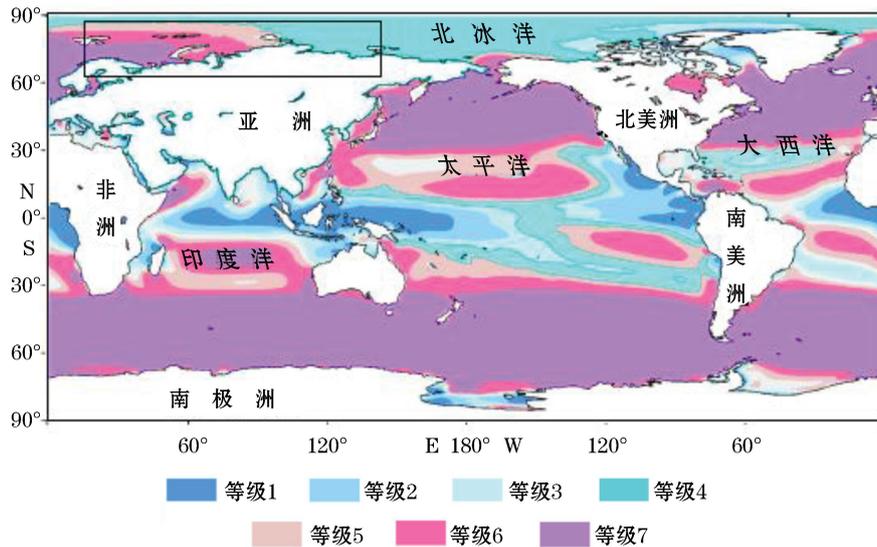


图 2 20 a(1997—2016 年)逐月(1—12 月)平均风功率密度等级划分

Fig.2 Category of wind power density from January to December from 1997 to 2016

1—5 月和 11—12 月,风功率密度等级由东西伯利亚海至巴伦支海依次递增。6—7 月,巴伦支海、拉普捷夫海、喀拉海和东西伯利亚海的风功率密度等级均较低,大部分海域的风功率密度等级不超过 4 级。8—10 月所研究的 4 个海域风功率密度等级均较高,达到 5 级以上。

整体来看,巴伦支海域风功率密度等级最高,除 5 月和 6 月,其他月份风功率密度等级均达到 6 级以上,风能资源十分丰富,可开发程度为很好;喀拉海域除 4 月和 7 月两个月,其他月份风功率密度等级均维持在 4 级以上,风能资源可开发程度为好;拉普捷夫海域除 4 月份外,其风功率密度等级均在 3 级及以上,风能资源可开发程度较好;3—5 月,东西伯利亚海域风能资源十分匮乏,但其他月份风功率密度等级在 3 级及以上,风能资源可开发程度较好。图 3 为 Zheng 等^[18]绘制的全球海上风能资源等级划分图,该图所用的数据资料与本文一致,均为 ERA-interim 再分析风场资料。可以看到本文的划分结果与图 3 中黑色方框区域内结果有较高一致性。



注:黑色方框区域对应本文研究区域
图 3 全球海上风能等级划分^[17]

Fig.3 Global distribution of wind power on the ocean^[17]

2.2 有效风速的出现频率

通常情况下,风速为 5~25 m/s 时,最有利于风能资源的采集与转换,将此区间的风速定义为有效风速^[19]。统计并分析 20 a(1997—2016 年)1 月(冬)、4 月(春)、7 月(夏)和 10 月(秋)的有效风速出现频率季节变化特征,结果如图 4 所示。由图可知,有效风速出现频率呈现出明显的单谷型季节变化特征,与风功率密度的月变化特征相近。有效风速出现频率谷值出现在 7 月(夏),出现频率低于 60%。波峰出现在 1 月(冬)、4 月(春)和 10 月(秋),出现频率达 70%以上;太阳能由于受到白昼的限制,可用时间基本在 50%以内^[19],而俄罗斯北部海域的有效风速的年均出现频率为 54.9%,相比于太阳能具有较大优势。

图 5 为 1997—2016 年累计有效风速出现频率,巴伦支海域有效风速年平均频率在 70%以上,风资源质量较其他海域高。

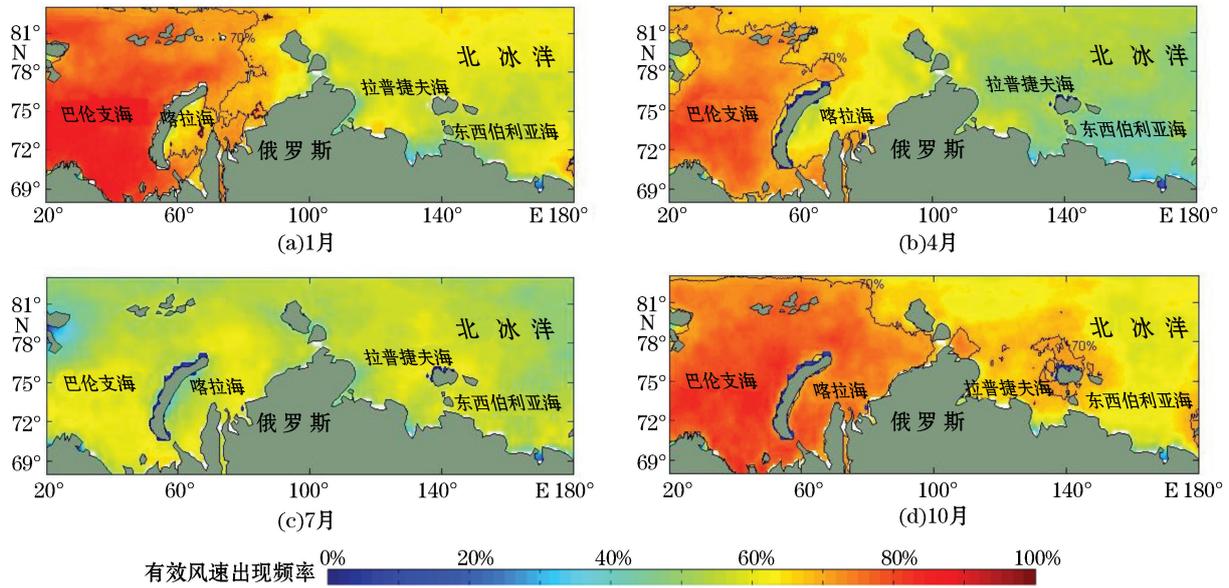


图4 20 a(1997—2016年)平均有效风速出现频率的季节变化

Fig.4 The seasonal variation of frequency of the mean effective wind speed from 1997 to 2016

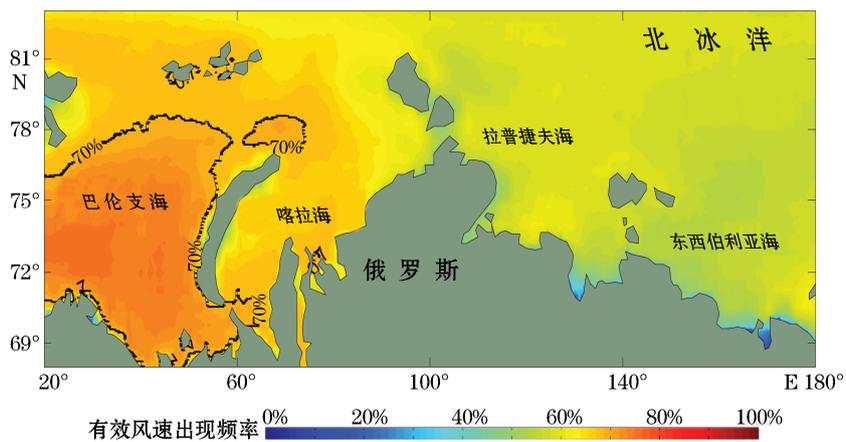


图5 20 a(1997—2016年)日平均有效风速的出现频率

Fig.5 The frequency of daily mean effective wind speed from 1997 to 2016

2.3 逐年风功率密度变化趋势

风能资源是清洁的可再生能源,海上风电场选址需要考虑被考虑选址的地区风能资源的长期变化趋势。本文通过计算各个格点的逐年(1997—2016年)平均风功率密度,对年份 $x = [1 : 20]$ 做线性回归,回归方程:

$$Y = a + bx, \quad (2)$$

式中, $b = \frac{L_{xy}}{L_{xx}}$, 其中 $L_{xx} = \sum_{i=1}^{20} (x_i - \bar{x})^2$, $L_{xy} = \sum_{i=1}^{20} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ 。

式(2)中 b 为所求的回归系数,该趋势还需通过 95% 的显著性检验。在处理过程中,将未通过显著性检验的回归系数取为 0(图 6)。可以看出,大部分海域的风功率密度呈现增长趋势,俄罗斯北部海域的风功率

密度回归系数为 0~2,上升趋势稳定。仅在巴伦支海域,风功率密度呈现下降趋势,其中绿色等值线区域内下降速度最快,回归系数<-6。

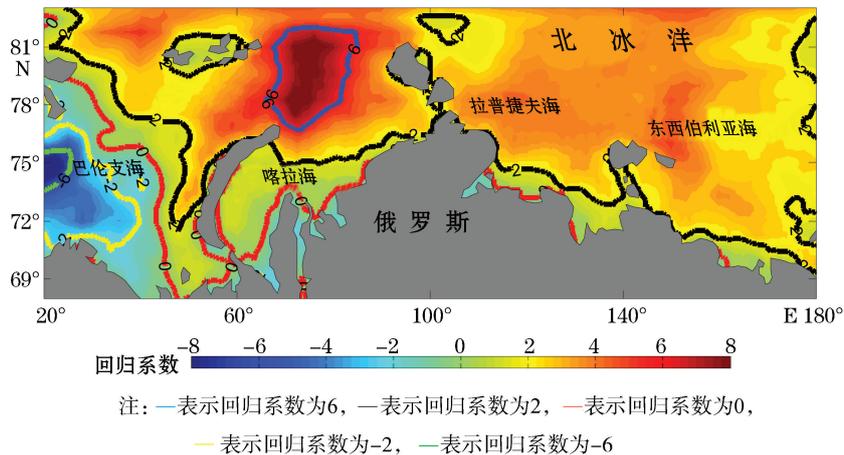


图 6 1997—2016 年风功率密度变化趋势等值线图

Fig.6 Trend of wind power density from 1997 to 2016

2.4 海上风能的稳定性

海上风能资源越稳定,越有利于长期利用。在波浪能和潮汐能^[20-22]等其他能源稳定性的评估之中,变异系数已经被广泛应用,变异系数越小,说明能量的稳定性越好。但在风能资源评估中,变异系数的应用并不常见,本文引入变异系数衡量风能资源的稳定性。

变异系数的计算公式为

$$C_v = \frac{S}{\bar{x}}, \quad (3)$$

式中, C_v 为变异系数, S 为序列标准差, \bar{x} 为序列均值。

分别计算逐格点的逐年(1997—2016年)1月(冬)、4月(春)、7月(夏)和10月(秋)四个月的月平均风功率密度,将所得数据代入式(3),可得不同季节的风功率密度变异系数(图7);分别计算逐格点的逐年(1997—2016年)12个月平均(1—12月)风功率密度,将所得数据代入式(3),可得风功率密度的年平均变异系数(图8)。

由图7可知,冬季,巴伦支海域大部分区域以及东西伯利亚海东部部分区域风功率密度变异系数<0.4。其他海域变异系数较高,基本处于0.4以上,特别在斯瓦尔巴群岛以及泰梅尔半岛东南方向,出现了高值中心,说明该处海域风能资源较不稳定。春季,变异系数为0.4的等值线分布在十月革命岛以西和新西伯利亚岛以东。夏季,俄罗斯北部大部分海域变异系数低于0.4,仅在新地岛周围和布尔什维克岛东部海域高于0.4。秋季,变异系数较其他季节高,其中东西伯利亚海域变异系数相比于其他海域较高,>0.4。由图8可知,风功率密度的多年平均变异系数较低,几乎所有区域变异系数均低于0.25,尤其在巴伦支海域,变异系数竟低于0.1。综上所述,巴伦支海域为所有海域中变异系数最低区域,风能稳定性最好,其次是亚马尔半岛以东区域。

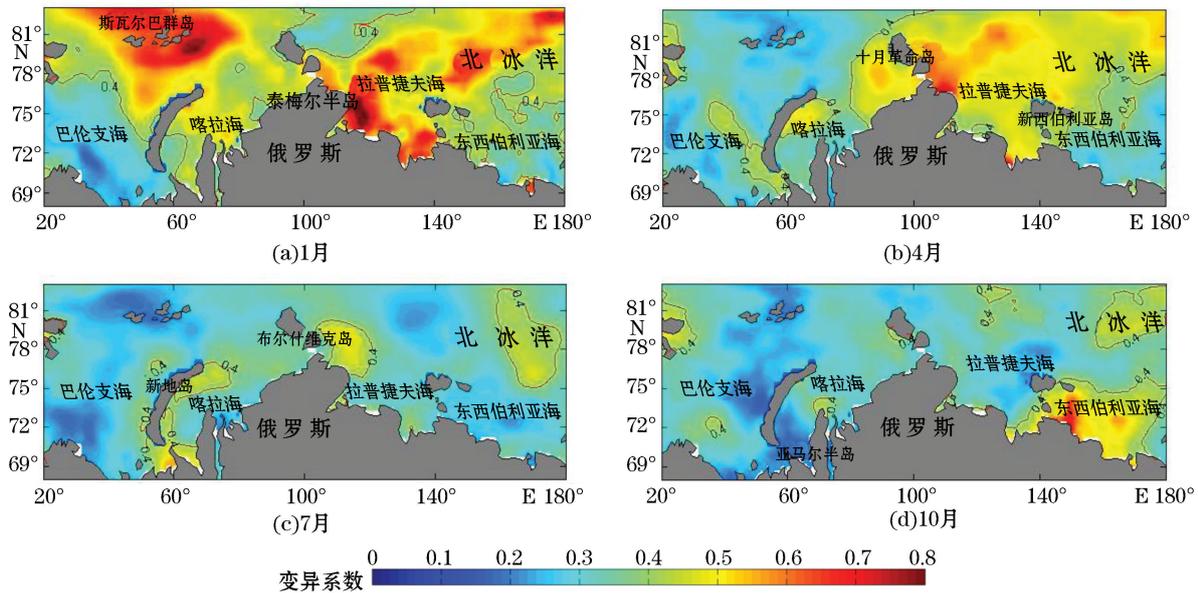


图7 各季度风功率密度变异系数

Fig.7 Coefficient of variation of the seasonal wind power density

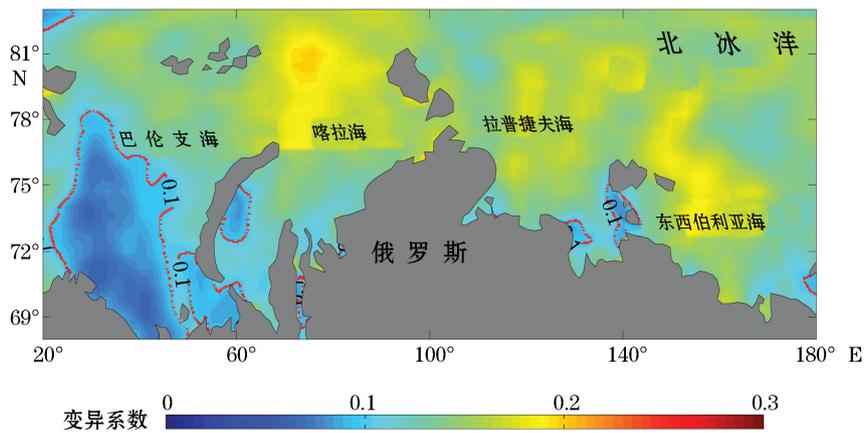


图8 多年平均风功率密度变异系数

Fig.8 Multi-year averaged coefficient of variation of wind power density

2.5 海上风电选址建模

海上风电项目发展的主要趋势有两点:其一是离岸越来越远;其二是功率越来越大。2012年前,欧洲海上风机离岸距离和工作水深项目基本处于“20-20曲线”内,即离岸20 km,工作水深20 m,而随后的几年项目提升至“60-60曲线”。

深海区域的风能资源较近海更为丰富,随着工程技术的不断发展,部分国家开始将目光转向深海区域,但高昂的建造成本是阻碍建造漂浮离岸风场的主要原因。

北极的深海风能资源开发选址除了需要考虑风能资源的可利用性,还需要考虑极寒天气、海床地质结构、最高波浪级别、环境生态保护、航道规避等多领域、多因素对其的影响。

考虑到各项指标对选址的重要性和指标数据资料的可获取性,本文初步研究仅选取影响海上风电场选

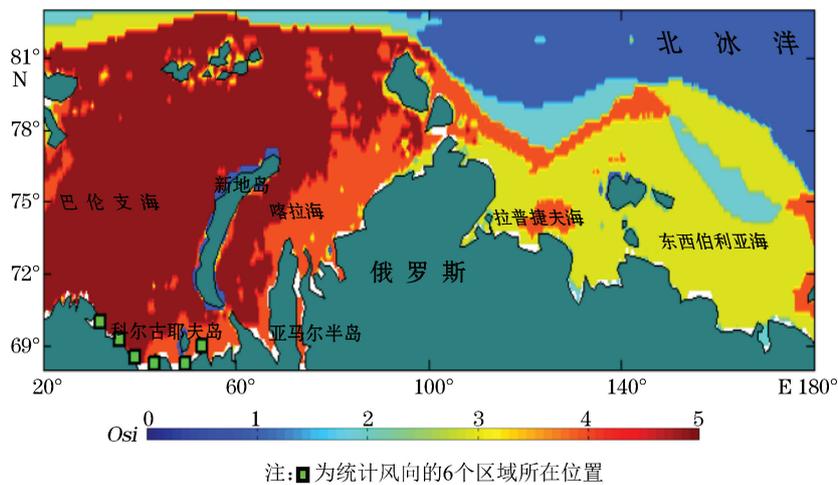
址的 4 个关键指标即风功率密度、有效风速出现频率、高程、海冰密度并对其进行标准化,将指标进行融合后选择最佳风电场地址。其中,高程数据采用 ETOP1 数据,空间分辨率 $0.0167^{\circ} \times 0.0167^{\circ}$;海冰密度数据为 1997—2016 年 ERA-interim 再分析场资料,空间分辨率为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ 。

指标融合公式为

$$Osi = Wpd + Ewsf + Sid + Wd, \quad (4)$$

式中, Wd (Water depth)为水深 0-2 值,当 $70 \text{ m} < \text{水深} \leq 700 \text{ m}$, $Wd = 2$;当 $0 \text{ m} < \text{水深} \leq 70 \text{ m}$ 时, $Wd = 1$;其他情况下, $Wd = 0$ 。 Wpd (Wind power density)为风功率密度 0-1 值,风功率密度 $> 150 \text{ W/m}^2$ 时, $Wpd = 1$,否则, $Wpd = 0$ 。 $Ewsf$ (Effective wind speed frequency)为有效风速频率 0-1 值,有效风速频率 > 0.6 时, $Ewsf = 1$,否则, $Ewsf = 0$ 。 Sid (Sea ice density)为海冰密度 0-1 值, Wd (Water depth)为水深 0-1 值。海冰密度 $< 60\%$ 时, $Sid = 1$,否则, $Sid = 0$; Osi (Optimal site index)为最优选址指数,取值范围为 0~5 中所有整数, $Osi \geq 4$ 时,具备开发条件, $Osi = 4$ 为近海开发优势区域, $Osi = 5$ 时为深海开发区域。要选出适合建设海上风电场的海域,需要使各指标的值均满足建设海上风电场的最低标准。

通过计算得出深海和近海选址区划图,如图 9 所示。可以看出,巴伦支海域适宜进行深海风电开发, $Osi = 5$,巴伦支海南部沿岸附近即科尔古耶夫岛周围浅海域适合近海风能开发。喀拉海西部部分海域(新地岛以东海域)同样具备深海开发条件($Osi = 5$),东部大部分海域(格达半岛和亚马尔半岛东北方向沿岸海域)适合近海风电开发($Osi = 4$)。



注:■为统计风向的6个区域所在位置

图 9 深海和近海风电场选址划分

Fig.9 Zoning of wind power plants in offshore and deep seas

2.6 选址建模敏感性分析

分别绘制高程的 0-2 值和有效风速出现频率、海冰密度、风功率密度的 0-1 值图(图 10),分析每个指标对选址结果的影响。蓝色区域值为 0,表示某指标在该区域不符合开发条件。绿色区域值为 1,深红色区域值为 2,均表示某指标在该区域满足开发条件。

图 10a 为高程 0-2 值图,可以看出,78°N 以南的海域符合深海或近海开发条件。图 10b 为有效风速出现频率 0-1 值图,以北地群岛为界,巴伦支海和喀拉海具备开发条件,但以东的拉普捷夫海和东西伯利亚海不具备开发条件。图 10c 为海冰密度 0-1 值图,81°N 以南以及 90°E 以西的大部分海域符合开发条件,其他海域均不符合开发条件。图 10d 为风功率密度 0-1 值图,可以看出整个俄罗斯北部海域均符合开发条件。

综上所述,阻碍拉普捷夫海和东西伯利亚海进行海上风能开发的原因主要有 2 个,其一是海冰密度过大,其二是有效风速出现频率过低。

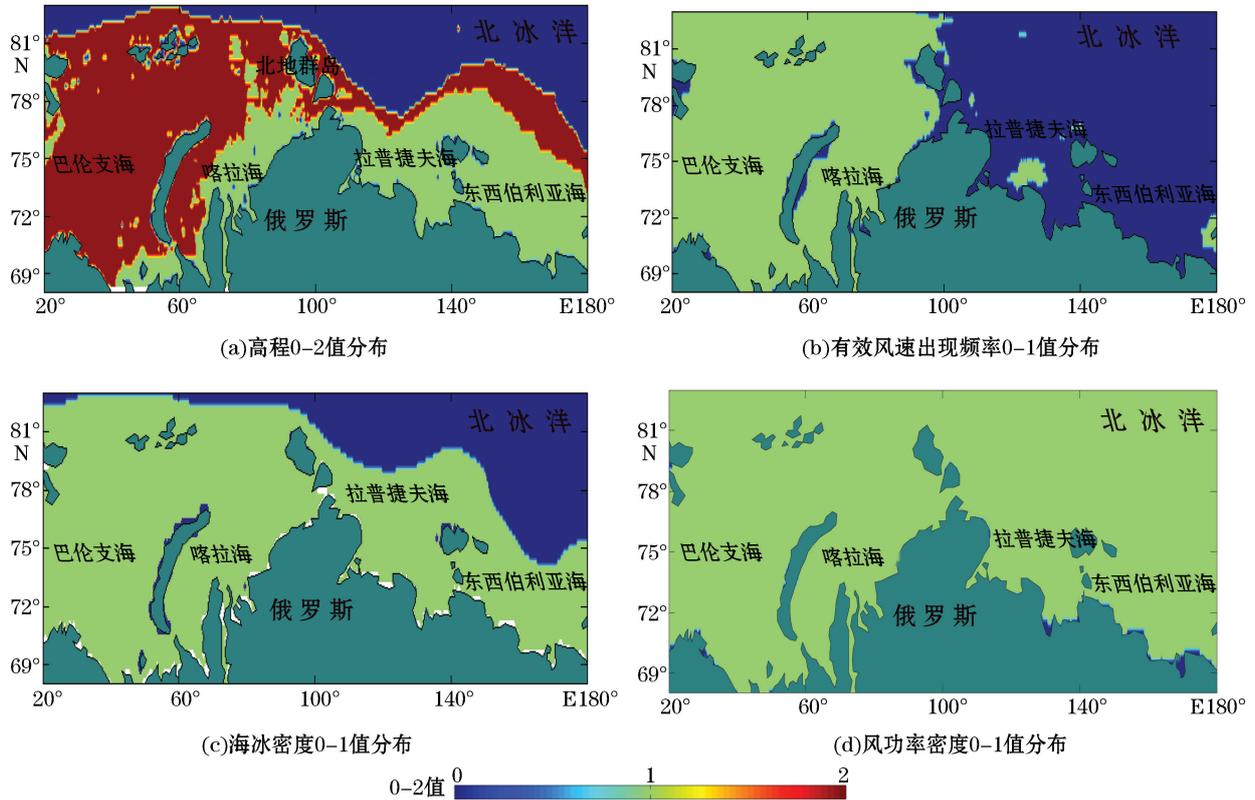


图 10 单指标对选址结果的影响

Fig.10 The impact of single index on location selection

2.7 对风能开发关键区域的风向统计分析

风能开发过程中,风向频率是重要的考虑因素,具有单一或2个主导风向对风能资源开发利用及对风机提高采集、转换效率十分有利。通过对风功率密度的分布进行分析,可知巴伦支海的深海风能资源最丰富,有巨大开发利用价值。因此,在巴伦支海选择离岸较近的6个区域,对其风向和对应的风功率密度大小进行统计分析,并绘制风功率密度玫瑰图(图11)。6个区域的中心所在经纬度:区域1中心(32°E,70°N),区域2中心(36°E,69°15'N),区域3中心(38°15'E,68°30'N),区域4中心(49°30'E,68°N),区域5中心(44°E,68°15'N),区域6中心(53°E,69°N),具体位置见图9。

从图11可以看出,科拉半岛北部沿岸的巴伦支海域风向范围很广,主导风向为NE方向,其次是NNE与ENE向。同时,高于3级风功率密度等级的风能资源非常丰富,说明采样区域风能资源较为丰富。

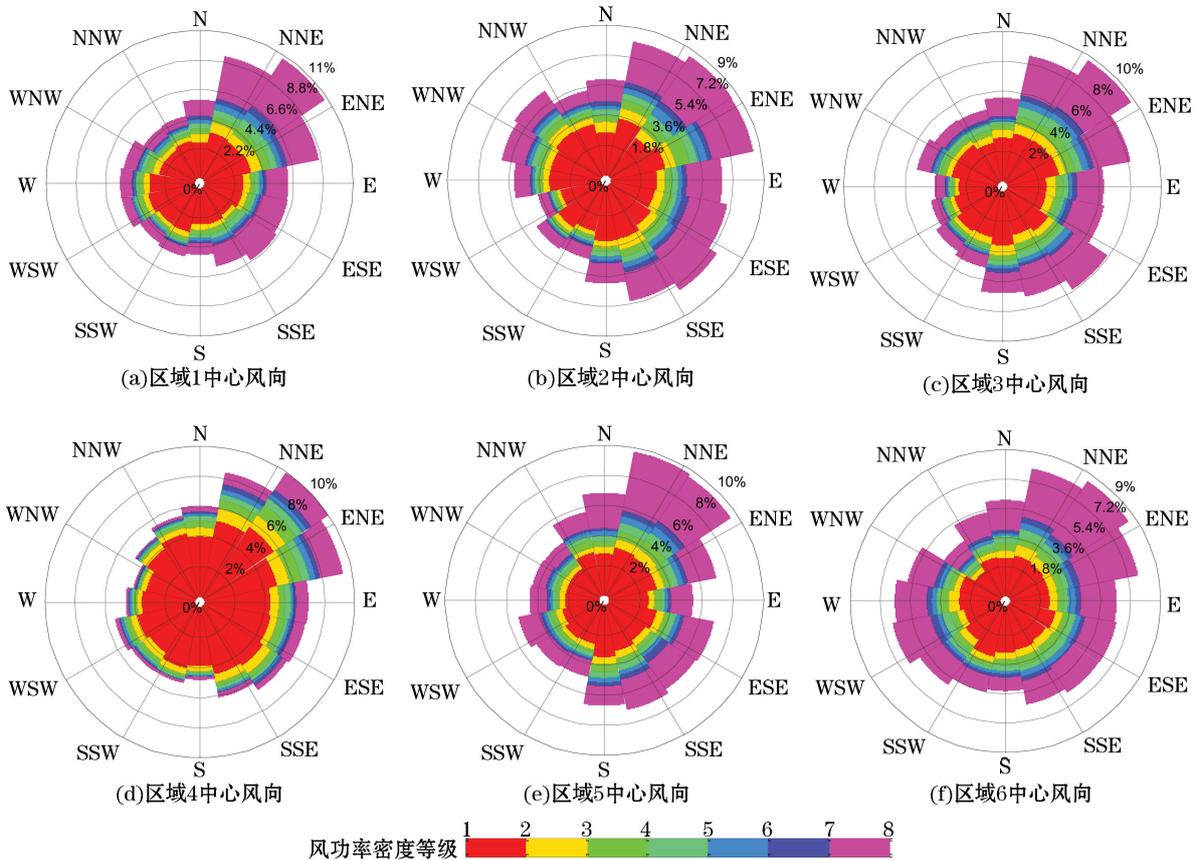


图 11 巴伦支海 6 个区域中心的风向玫瑰图

Fig.11 The wind rose map of six regional centres in Barents sea

3 结 论

本文从风功率密度、风向、有效风速出现频率等多个角度对俄罗斯北冰洋沿岸海域的风能资源进行了评估,得出结论:

1)俄罗斯北部海域的风功率密度和功率密度等级大小分布均呈现“西高东低”的态势。巴伦支海域风功率密度最大且功率密度等级最高;喀拉海域功率密度等级在 4 级以上;拉普捷夫海在 3 级以上;东西伯利亚海域基本在 3 级及以上。

2)有效风速出现频率表现出明显的单谷型季节变化特征。有效风速出现频率谷值出现在 7 月;波峰出现在冬季、秋季和春季;俄罗斯北部海域的有效风速的年均出现频率为 54.9%,巴伦支海域年平均有效风速出现频率维持在 70%以上。

3)俄罗斯北部海域的风功率密度变异系数有明显的季节变化。冬季时,风功率密度变异系数较低。春季,变异系数数值为 0.4 的等值线收缩至十月革命岛以西和新西伯利亚岛以东。夏季,俄罗斯北部大部分海域变异系数低于 0.4。秋季,变异系数整体较高。

4)巴伦支海域适宜进行深海风电开发,喀拉海以东以及拉普捷夫海域和东西伯利亚海域不利于深海风能资源开发。拉普捷夫海和东西伯利亚海暂时不适合进行深海和近海风能开发,主要原因是在此两处海域海冰密度过大,并且有效风速出现频率过低。

5)巴伦支海域主导风向为 NE 方向,其次是 NNE 与 ENE 向。

目前主流海上风电开发还是以浅海为主,欧洲对此已经积累了接近半个世纪的经验并在海上风电项目建设上,占绝大多数市场份额。而我国的海上风电相关建设、研发才刚刚起步。

针对俄罗斯海上风能开发的缺乏现状及本文所做区划结果,可以发现格达半岛和亚马尔半岛区域风功率密度最高,我国可以积极探索与俄罗斯的浅海风电开发合作。同时,巴伦支海的深海风能资源非常丰富,长远来看深海风电开发必然是未来的发展趋势,在把握浅海风电开发的同时,可尝试加强针对高纬度严寒气候条件、深海条件的风电机组设备的研发,攻克技术性难题,争取抢占深海风电开发先机。同时积极参与国际合作,共同开发深海风电机组与深海风电场,形成自主知识产权。

但是由于一些数据资料难以获取,本文仅选取了海上风电开发所需的几个必要条件作为指标进行评估,进行了宏观层面的最佳海上风能开发区域选址,因此所做研究仍十分有限。下一步研究工作中,将尽量考虑指标体系中的所有指标,进行选址区划,从而达到效益最大化。

参考文献(References):

- [1] Global Wind Energy Council(GWEC). Global wind power installed capacity statistics in 2016[J]. Wind Energy, 2017(2): 52-57. 全球风能理事会. 2016年全球风电装机统计[J]. 风能, 2017(2): 52-57.
- [2] LIU Z Y. Global energy internet[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015. 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [3] KAZET M Y, MOUANGUE R, KUITCHE A, et al. Wind energy resource assessment in Ngaoundere locality[J]. Energy Procedia, 2016, 93: 74-81.
- [4] SHARMA K, AHMED M R. Wind energy resource assessment for the Fiji Islands: Kadavu Island and Suva Peninsula[J]. Renewable Energy, 2016, 89: 168-180.
- [5] KARTHIKEYA B R, NEGIP S, SRIKANTH N. Wind resource assessment for urban renewable energy application in Singapore[J]. Renewable Energy, 2016, 87(5): 403-414.
- [6] China Energy Network News Center. How is the global energy Internet starting from the Arctic?[EB/OL]. [2017-04-20]. <http://www.escn.com.cn/news/show-310168.html>, 2016-04-05/2017-09-24. 中国储能网新闻中心. 全球能源互联网从北极开始到底是怎么做到的?[EB/OL]. [2017-04-20]. <http://www.escn.com.cn/news/show-310168.html>, 2016-04-05/2017-09-24.
- [7] ZHENG C W, LI C Y, YANG Y, et al. Wind energy resource assessment in the Kuala Lumpur, Pakistan[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2016, 55(2): 210-215. 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.
- [8] LI H, QI W J, CAO C Y, et al. Analysis of offshore wind energy resources in China's adjacent sea area[J]. Journal of Qingdao University (Natural Science Edition), 2014, 27(4): 31-34. 李赫, 齐文静, 曹春雨, 等. 中国毗邻海域海上风能资源分析[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2014, 27(4): 31-34.
- [9] ZHANG F Q, TIAN F, JIANG L P, et al. Study on soft environment of wind energy resources development in Arctic region[J]. China Electric Power, 2016, 49(3): 6-11. 张富强, 田丰, 蒋莉萍, 等. 北极地区风能资源开发软环境研究[J]. 中国电力, 2016, 49(3): 6-11.
- [10] ONEA F, DELEANU L, RUSU L, et al. Evaluation of the wind energy potential along the Mediterranean Sea coasts[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2016(5): 1-27.
- [11] NIKOLAYEV D, SAZONOV V. Prospects of Japan-Russia cooperation in wind energy[J]. Problems & Perspectives in Management, 2015, 13(1): 18-25.
- [12] SALO O, SYRI S. What economic support is needed for Arctic offshore wind power[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 31(31): 343-352.
- [13] CHADE D, MIKLIS T, DVORAK D. Feasibility study of wind-to-hydrogen system for Arctic remote locations-Grimsey island case study[J]. Renewable Energy, 2015, 76(3): 204-211.
- [14] BOUTE A. Off-grid renewable energy in remote Arctic areas: An analysis of the Russian Far East[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 59: 1029-1037.
- [15] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Wind farm wind energy resource assessment method; GB/T 18710—2002[S]. Beijing: Standard Press of China, 2002. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 风电场风能资源评估方法; GB/T 18710—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

- [16] WANG X L. Wind power density classification and wind energy zoning revision[J]. *China Electric Power*, 2010(10): 82-86. 王晓林. 风功率密度等级划分和风能区划的修订建议[J]. *中国电力*, 2010(10): 82-86.
- [17] ZHENG C, LI C, GAO C, et al. A seasonal grade division of the global offshore wind energy resource[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(3): 109-114.
- [18] MAO H Q, SONG L L, HUANG H H, et al. Study on the division of wind energy resources in Guangdong Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(5): 679-683. 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.
- [19] ZHENG C W. A comparative study on the advantages and disadvantages of wave energy resources and other clean energy in the South China Sea[J]. *Subtropical Resources and Environment*, 2011, 6(3): 76-81. 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.
- [20] ZHENG C W, ZHOU L, ZHOU L J. Seasonal variation of wave and wave energy in Xisha and Nansha waters[J]. *Advances in Marine Science*, 2011, 29(4): 419-426. 郑崇伟, 周林, 周立佳. 西沙、南沙海域波浪及波浪能季节变化特征[J]. *海洋科学进展*, 2011, 29(4): 419-426.
- [21] ZHENG C W, WANG Q, LI C Y. An overview of medium- to long-term predictions of global wave energy resources[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 79:1492-1502.
- [22] ZHENG C W, LI C Y. Propagation characteristic and intraseasonal oscillation of the swell energy of the Indian Ocean[J]. *Applied Energy*, 2017, 197: 342-353.

Spatial and Temporal Characteristics of Wind Energy Resources in Northern Sea of Russia

WANG Zhe^{1,2}, ZHANG Ren¹, GE Shan-shan¹, ZHANG Ming², LÜ Hai-long³

(1. *College of Meteorological and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China;*

2. Center East China Sea Fleet Oceanography and Meteorology Center, Ningbo 315000, China;

3. Unit 91181 of PLA, Qingdao 266000, China)

Abstract: Based on the wind data of the European Medium Weather Forecast Center, the wind energy resources of the northern Russian seas from 1997 to 2016 were evaluated and the site index system was established to identify the sites of the potential offshore wind power plants. The results showed that: The wind power density and its level distributions in the northern Russian seas bear the pattern of "west high east low". The wind energy resources of the Barents Sea are the most abundant and the wind power density is the highest, while the wind resources of the East Siberian sea are less and the wind power density is the lowest; The frequency of effective winds is single-grain, summer valleys, peaks in spring, autumn and winter; The variation coefficient of wind power density has obvious seasonal feature, the winter coefficient of variation is high and the summer coefficient of variation reaches the lowest value; Kara sea is suitable for the development of offshore wind energy resources, while the Barents Sea is suitable for the development of deep-sea wind energy resources; The dominant wind direction is NE, followed by NNE and ENE. The results can provide the basis and reference for the domestic enterprises to participate in the development of Arctic wind energy resources in future.

Key words: wind power density; location zoning; sea ice density

Received: March 29, 2017