

基于 ERA5 的黄渤海附近海域波浪能资源 时空特征分析*

乔守文¹ 孙嘉诚¹ 石洪源^{1,2} 孙庆颖¹

(1. 鲁东大学港口海岸防灾减灾研究院 烟台 264025; 2. 大连海事大学 大连 116000)

摘要 波浪能资源是一种重要的海洋可再生能源, 开发利用波浪能资源可以有效的缓解常规能源短缺问题带来的能源问题以及环境污染问题。对波浪能资源进行科学评估是进行海洋能资源利用的前提条件, 本文利用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasting, ECMWF)第五代再分析数据集(ECMWF Reanalysis v5 ERA5), 采用新的波浪能评估公式, 对黄渤海海域 1980—2018 年间波浪能资源展开评估, 主要计算指标包括波浪能可开发量频率、富集量频率、变异系数以及可利用波高占比等, 结果显示: 黄渤海区波浪能资源具有明显的季节性, 秋冬季节较高, 春夏季节较低, 冬季是波浪能资源开发的最佳季节; 波浪能富集区域主要集中在渤海海峡外侧、成山头东部以及长江口外海区域。在此基础上确定了波浪能资源的重点开发利用区, 为后续的波浪能开发提供参考。

关键词 ERA5; 波浪能评估; 能流密度; 富集度频率; 可用度频率

中图分类号 P731.5 **doi:** 10.11693/hyh20200200035

可再生能源利用技术的发展可以克服化石能源带来的风险, 比如全球变暖、环境污染等, 作为化石燃料的替代资源, 波浪能在可再生能源中能量密度最高(Leijon *et al*, 2003)。我国当下发展中, 大力开发和利用海洋能资源对于我国实行可持续发展战略, 建设生态文明, 缓解常规能源紧张带来的能源问题具有重大战略意义(管轶, 2011)。

20 世纪 70 年代, Tornkvist(1975)和 Hulls(1977)就已经利用有限的大洋船报资料和浮标资料对全球海洋沿岸波浪能资源分布情况展开分析, 结果显示北大西洋、太平洋东北部、澳大利亚南部沿岸以及南非的西南部沿岸等海域为全球波浪能富集区域, 中国海域属于波浪能贫瘠区域。船报数据虽然比较准确, 但是其有空间和时间的限制, 一些极端海况下波浪数据会有遗漏(Gulev *et al*, 2003)。随着海洋探测技术的发展和大规模海洋调查的开展, 特别是海浪数值

模式和卫星遥感的精确, 越来越多的卫星反演资料(Barstow *et al*, 1998)以及数值同化的再分析资料(Folley *et al*, 2009; Iglesias *et al*, 2010)等普遍被应用于波浪能的评估之中。

中国从 20 世纪 80 年代开展波浪能资源评估工作, 早期仅对部分海域展开分析(任建莉等, 2009), 全国性波浪能评估工作始于国家海洋局第二海洋研究所(王传崑等, 2009)。这些成果推进了我国波浪能评估工作的发展, 其后基于实测、数值模拟(郑崇伟等, 2011, 2012, 2013; 宗芳伊等, 2014)以及再分析数据(万勇等, 2014; 石洪源等, 2017)的波浪能评估工作相继开展。已有研究指出我国波浪能资源丰富地区为东海和南海, 考虑到波浪能资源的开发条件, 虽然东海和南海波能资源丰富, 但是该海域受台风影响较多(You *et al*, 2018), 波浪能装置在极端大浪和大风条件下生存力差, 遭受破坏风险高。因此, 我国波浪能的

* 国家重点研发计划, 2018YFB1501901 号; 国家自然科学基金, 51909114 号, U1806227 号。乔守文, 硕士研究生, E-mail: qiaoshouwen1997@163.com

通信作者: 石洪源, E-mail: hyshi@ldu.edu.cn

收稿日期: 2020-02-04, 收修改稿日期: 2020-03-23

实际开发利用可以放置在渤海或者黄海某些条件较好的区域,但是针对这两个海区的波能评估相对较少,同时波浪能评估多采用深水评估公式,但是黄渤海大部分水深相对较浅,利用深水公式评估过渡区、浅水区波浪能资源会造成评估结果的不准。鉴于上述原因,本文利用适用于各种水深条件的波浪能评估公式以及欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasting, ECMWF)提供的最新波浪数据集 ECMWF Reanalysis v5(ERA5),展开黄渤海波浪能资源评估工作。

1 数据资料

1.1 数据来源

ECMWF 是全球几家最主要的再分析数据中心之一。ERA5 是 ECMWF 第五代再分析数据集,相比 ERA-Interim(Dee *et al*, 2011), ERA5 同化系统使用了若干专为再分析而开发的综合预报系统(IFS cycle 41r2) (Hersbach *et al*, 2016), 数据准确性得到了显著改善(Meng *et al*, 2018; Czernecki *et al*, 2019)。ERA5 数据具有更高分辨率: 从地面到 0.01hPa(约 80km)分为 137 个垂向 σ 层, 水平分辨率为 31km(约 0.25°)。ERA5 提供的变量从 ERA-Interim 的 100 个增加到 240 个, 包括耦合波模型提供的波高和波向, 使用户能够更准确地分析过去的大气和海洋状态。许多研究人员将其用于大气和海洋研究, 如 Bechtel 等(2019)采用 ERA5 的风和波浪数据集, 进行风能和波能资源评估。Mahmoodi 等(2019)基于 ERA5 再分析数据集对波斯湾波浪能量的时空特征展开分析。

1.2 插值方法

ERA5 提供的数据时间分辨率为 1h, 空间分辨率为 0.25°, 在空间分辨率不高的情形下, 为了获得较高分辨率本文采用 Kriging 插值法处理数据集。Kriging 插值法可将数学函数与指定数量的点或指定半径内的所有点进行拟合以确定每个位置的输出值(Burrough, 1986)。

2 评价方法

2.1 波浪能评估公式

波浪能资源的时空分布状况可以通过波浪能的特征量和评价指标进行评估。基于波浪谱的能量通量可以表述为式(1):

$$P_w = \rho g \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} C_g(f, h) S(f, \theta) df d\theta, \quad (1)$$

式中, P_w , ρ , g , f , h , θ , $C_g(f, h)$ 和 $S(f, \theta)$ 分别表示波能流密度、海水密度、重力加速度、频率、水深、波向、群速以及波谱密度。

群速可以写成:

$$C_g = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \frac{L}{T}, \quad (2)$$

这里, T 是波浪周期, k 是波数 ($k = 2\pi/L$), L 为波长。

对于自由波而言, 其波能流密度可以写成有效波高 H_s 和能量周期 T_e 的函数:

$$P_w = \frac{1}{16} \rho g H_s^2 C_g(T_e, h). \quad (3)$$

通过式(1)和(2), 可以得到

$$P_w = \frac{1}{32} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \rho g H_s^2 \frac{L}{T_e}, \quad (4)$$

其中, 波长 L 的计算公式为: $L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kh)$ 。

因此, 式(4)可以写成:

$$P_w = \frac{1}{64\pi} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \rho g^2 H_s^2 T \tanh(kh). \quad (5)$$

该公式适用于各种水深条件, 对于深水区, $\frac{2kh}{\sinh(2kh)}$ 和 $\tanh(kh)$ 趋近于 1, 因此波能流密度可以写成:

$$P_w = \frac{1}{64\pi} \rho g^2 H_s^2 T, \quad (6)$$

式(6)为波能评估中常用的公式, 本文做出如下证明, 利用式(5)除以公式(6), 得到一个新的函数:

$$\lambda = \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \tanh(kh). \quad (7)$$

其中, λ 表示各种水深条件下的波能流密度对于深水区的波能流密度的比值。

以 kh 为未知数, 参考 You(2008)给出的深浅水定义 ($kh < 0.1\pi$ 为浅水, $kh > \pi$ 为深水, 介于二者之间为过渡区), 得到的 λ 变化见图 1, 可以看出: 浅水区域, 因为波浪的破碎, 利用深水公式计算会明显高估其波浪资源; 过渡区内, 使用深水公式部分海域是高估波浪能资源, 部分区域是低估波浪能资源, 最大低估量约为 20%; 深水区, 也存在极小一部分低估区域。之前的研究中, 仅仅指出利用深水公式会高估浅水区域的波浪能资源(Mahmoodi *et al*, 2019), 却没有指出在过渡区内对波浪能资源的低估, 因此在波浪能评估中利用深水公式是不准确的。

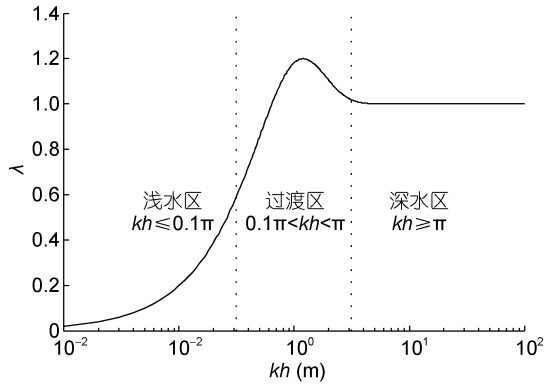


图 1 λ 随着 kh 的变化

Fig.1 The change of λ respect to the change of kh

注: λ : 各种水深条件下的波能流密度对于深水区的波能流密度的比值; k : 波数; h : 水深

考虑到水深对波浪能评估的影响, 本文利用 Beji(2013)提出的新的色散方程 μ_B 和将计算结果精度进行提高的公式 μ_* (Simarro *et al*, 2013), 把 μ_B 和 μ_* 代入公式(5)中得出新的波浪能评估公式(8):

$$P_w = \frac{\pi \rho g h H_s^2}{16 T_e} \left[\frac{1}{\mu_*} + \frac{2}{\sinh(2\mu_*)} \right], \quad (8)$$

其中, $\mu_* = \frac{\mu_B^2 + \mu_0 \cosh^2(\mu_B)}{\mu_B + \sinh(\mu_B) \cosh(\mu_B)}$, 而 $\mu_B = \frac{\mu_0 [1 + \mu_0^{1.09} e^{-(1.55 + 1.33\mu_0 + 0.216\mu_0^2)}]}{\sqrt{\tanh(\mu_0)}}$, 在式中: $\mu_0 = k_0 h =$

$$2\pi / L_0 = \omega^2 h / g = 4\pi^2 h / g T_e^2, \quad T_e \approx T。$$

2.2 评价指标

本文的评价指标借鉴现有研究成果(郑崇伟等,

2012; 万勇等, 2014; 石洪源等, 2017), 选用可用度和富集度频率以及变异系数进行定量分析黄渤海域的波浪能资源。

在评定波浪能资源的过程中, 将大于 2kW/m 出现的频率视为可用度频率, 大于 20kW/m 出现的频率视为富集度频率, 计算黄渤海 1980 年 1 月—2018 年 12 月逐 1h 的波能流密度, 对该海域波能流密度大于 2kW/m 和大于 20kW/m 出现的概率进行统计。

3 波浪能评估结果

3.1 黄渤海波浪要素的年特征

对中国近海的有效波高(H_s)、平均周期(\bar{T})、波能流密度(P_w)进行多年平均, 得出研究海域的波浪要素的分布规律(图)。从图 2 中可以看出, 研究海域年均波高最大值为 1.3m, 位于黄海东部地区。就海区而言, 渤海区域最小, 年均值不超过 0.8m。年平均周期以及波能流密度的分布和有效波高 H_s 的分布类似, 黄海东部最大。从波能分布来看, 和前期研究结果类似, 黄渤海区域波能资源并不丰富。

3.2 波浪能季节分布特征

对波浪而言, 由于其与风速关系密切相关, 我国不同的季节风速差异巨大, 因此在研究中应当给出不同季节的波能分布情况。本研究分别统计了冬季(12—2月)、春季(3—5月)、夏季(6—8月)和秋季(9—11月)四个季节的波能流密度(P_w)见图 3。

由图 3 可知, 我国周边海域的波能流密度分布具有季节性, 其中秋冬季节, 年均波能流密度较大; 春

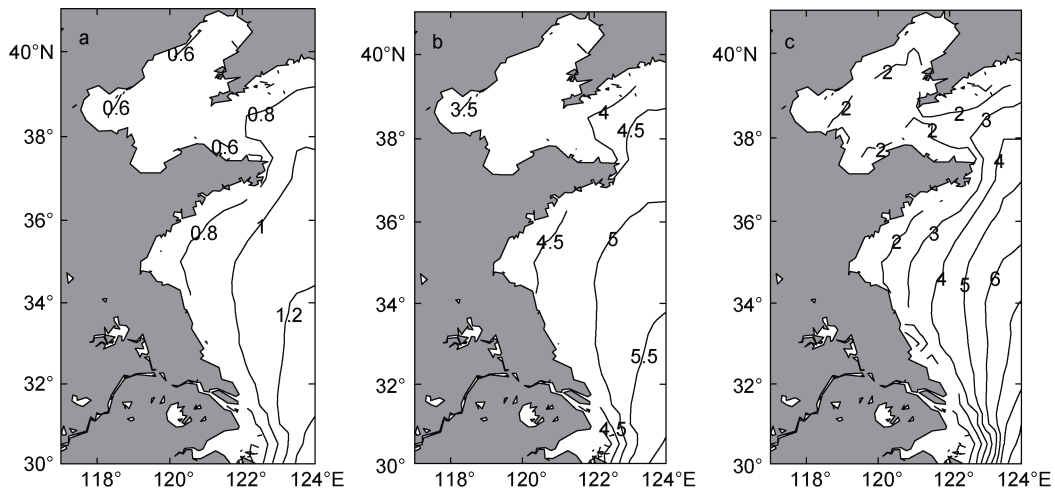


图 2 39 年平均波高(a, 单位:m), 年均平均周期(b, 单位:s)和年平均波能流密度(c, 单位: kW/m)

Fig.2 The 39-year mean wave height (a, unit: m), mean period (b, unit: s), and mean wave energy density (c, unit: kW/m) in

夏期间年均波能流密度较小。总的来看, 渤海四季变化明显, 整体仍低于黄海, 春夏两季波能流密度不足 2kW/m, 秋冬最大值可超过 4kW/m。黄海区域特征四季变化不大, 数值变化特征与渤海类似。在春季, 波能流密度的大值主要集中在: 黄海南部附近海域 (4—5kW/m); 夏季波能流密度大值区域分布与春季类似, 进入秋季, 波能流密度的大值区与春夏两季分

布相同, 约 6—8kW/m; 长江口附近波能流密度相对较大, 在 10kW/m。对黄渤海而言, 远海的波能流密度大于近岸, 黄海东南部为波能流密度较大海区, 具有较大的开发潜力; 渤海中部及渤海海峡附近海域秋冬季节波能流密度相较其他季节而言比较丰富, 具有开发价值。在冬季, 黄海地区波能流密度大部分区域较大, 数值变化呈现出东-西走向。

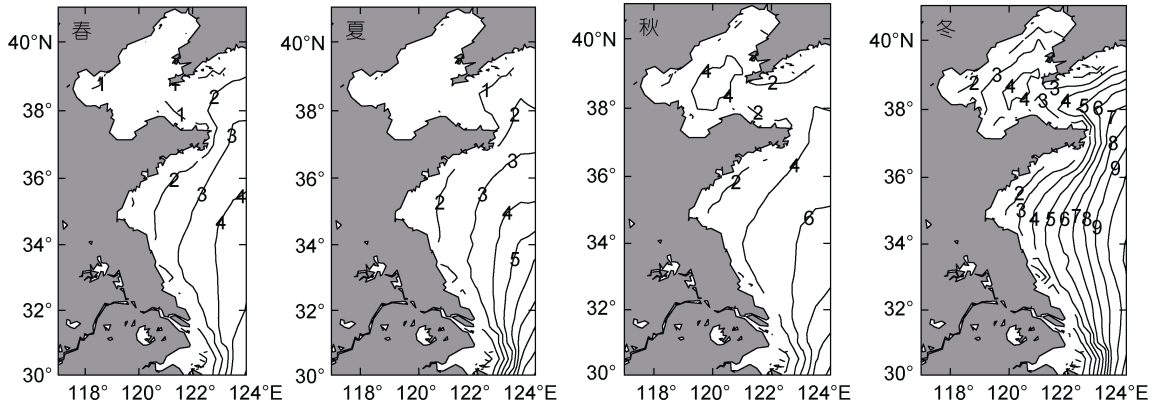


图 3 四季波能流密度分布(单位: kW/m)

Fig.3 The distribution of seasonal wave energy density (unit: kW/m)

3.3 新公式优越性分析

渤海是我国水深最浅的海域, 平均水深只有 18m, 在本文中, 将渤海作为公式验证的区域。在渤海中, 分别利用公式(6)和公式(8)计算 39 年波能流密度, 将二者进行比值分析, 结果见图 4。在水深较浅的区域, 深水公式出现了明显的高估; 尤其在黄河入海口处, 最大比值接近 140%, 在深水与浅水的过渡区, 比值在 90%—100%之间; 在深水中, 深水公式与浅水公

式比值基本为 100%, 说明在深水区域, 二者计算得到的波能流密度基本相等。

3.4 能级频率计算结果

39 年数据的能级频率统计结果见图 5。黄海大部分海域可用度频率在 30%以上, 有些区域可用度频率达 60%, 富集度频率大约在 2%—5%之间, 主要集中在黄海东部海域; 渤海地区可用度频率最小, 最大不超过 23%, 富集度出现的频率不超过 3%。

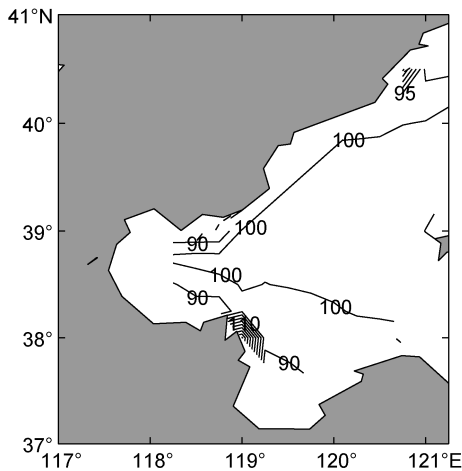


图 4 39 年公式(6)与公式(8)比值 (计算 39a, 单位: %)

Fig.4 The ratio of formula (6) to formula (8) for 39 years (unit: %)

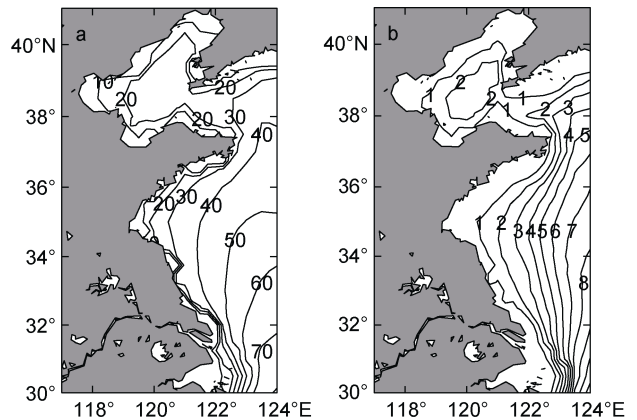


图 5 39 年可用度频率(a)及富集度频率(b)分布(单位: %)

Fig.5 Usable (a) and rich level (b) frequency distributions of 39 years (unit: %)

黄海大部分海域波浪四季期间可用度频率都较高(图 6, 7)。春季, 黄海东南部可用度频率在 50%以上, 其余海域较低, 渤海最小, 不足 20%; 富集度频率黄渤海域都较低, 最大值不足 5%。夏季, 渤海整体不足 10%, 黄海大部分海域可用度频率超过 30%, 最大可达 50%以上; 富集度频率有所增大, 但幅度不大, 最大富集度频率为 5%; 秋季, 可用度频率增

大, 最大值仍出现在黄海东南部海域, 接近 70%; 富集度频率有了较大提高, 最大值可达 8%, 出现在黄海东南部。冬季, 黄渤海域内可用度频率整体跃升, 渤海大部分海域在 30%以上, 黄海大部分海域集中在 50%以上, 渤海的富集度频率相较秋季而言有所下降, 最大值依旧不及 5%, 黄海富集度频率上升明显。

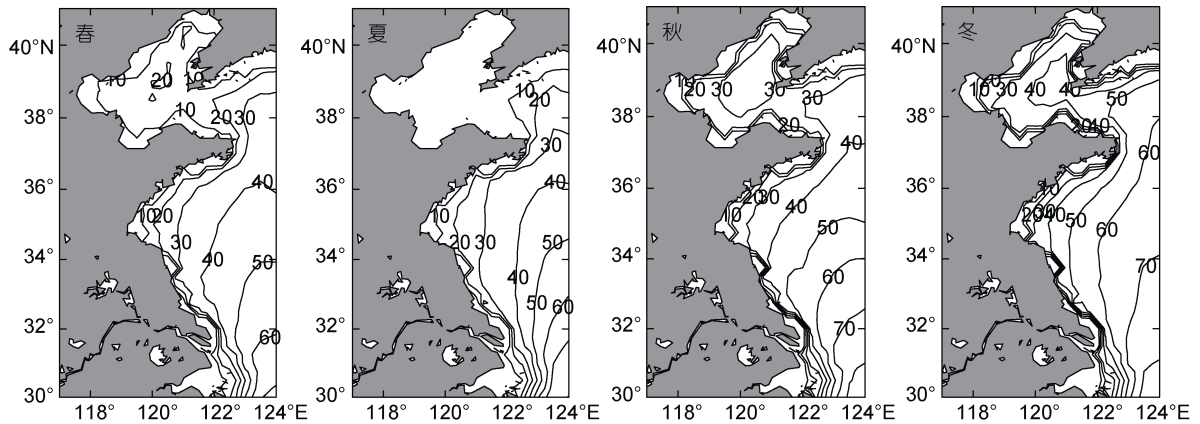


图 6 四季波浪能可用度频率分布(单位: %)

Fig.6 Seasonal usable level frequency distribution (unit: %)

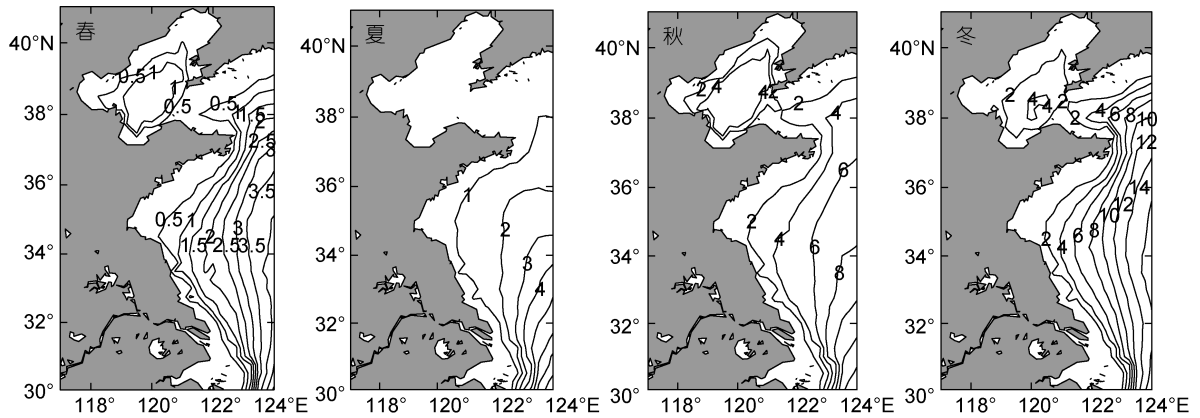


图 7 四季波浪富集度频率分布(单位: %)

Fig.7 Seasonal rich level frequency distribution (unit: %)

3.5 变异系数计算结果

将中国海域 1980—2018 年共 39 年的波能流密度按季节和年度分别进行了变异系数的计算, 计算结果见图 8 和图 9。按照季节来看, 春季, 黄海中部变异系数较小; 渤海中南部、黄海东南部海域变异系数较大; 夏季, 波能流密度变异性有增大的趋势, 波能最不稳定的季节; 秋季, 波能不稳定性延续夏季的趋势, 但是不稳定性减弱; 冬季, 波能趋于稳定, 其中黄海中部能稳定性最好(图 8)。

全年统计结果显示, 我国波能变异系数呈条带状分布, 总体上从南至北呈现增大的趋势, 但数值变化不大, 高值区最大不超过 2.3, 低值区不低于 0.5, 总体趋于稳定。沿海地区 39 年波能变异系数的低值区出现在黄海南部近长江口海域, 高值区位于渤海南部、黄海北部和渤海沿海地区(图 9)。

3.6 可利用波高结果

对于海洋能开发而言, 并不是所有波高都可以利用, 太小波浪带不动发电装置运转, 太大的波浪会

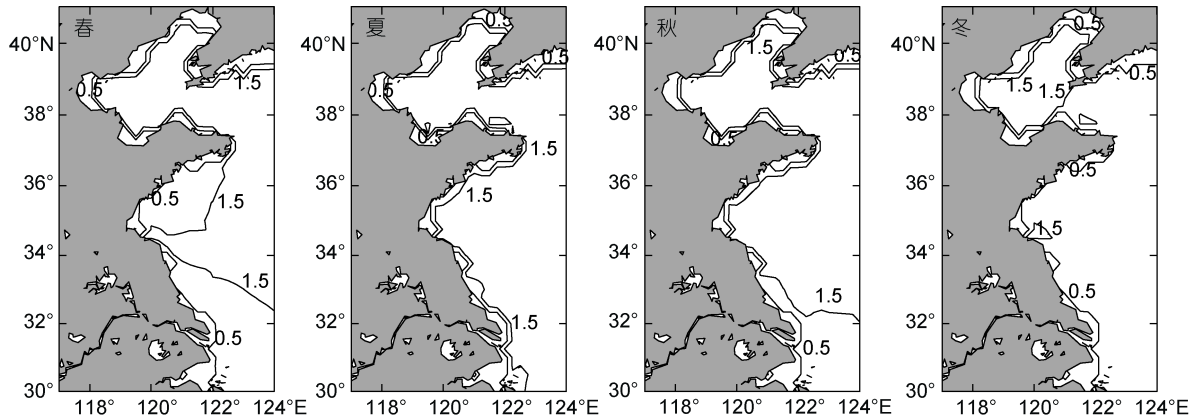


图 8 四季波能流密度的变异系数

Fig.8 Seasonal wave power density variability index distribution

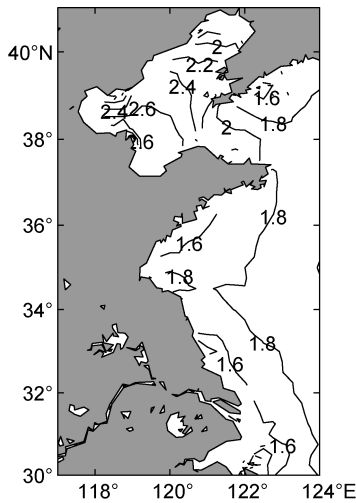


图 9 年均波能流密度的变异系数分布

Fig.9 Distribution of variability index to the mean wave power density

造成发电装置的损坏, 例如台风浪, 因此本文选择有效波高介于 1—4m 之间的波浪开展研究(图 10)。春季,

渤海可用波浪出现频率最大值集中在渤海中部, 不超过 20%。黄海分布呈现东南-西北走向, 大部分区域可用波浪出现频率超过 20%, 最大不超过 45%。夏季, 渤海可用波浪频率较低, 整体海域不超过 10%; 黄海大部分海域集中在 20%以上, 最大值在 40%左右。秋季, 可用波浪分布频率有所提高, 渤海还最大值分布在中部, 超过 30%; 黄海大部分海域超过 30%, 最大值可超过 50%。冬季, 可用波浪分布概率最大, 渤海大部分海域超过 30%; 黄海大部分海域超过 50%, 最大处可达 60%以上。黄海东南部海域四季都有开发价值, 渤海冬季具有开发价值。

3.7 重点开发利用区

根据刘首华等(2015)的定义, 波能流密度介于 0—1kW/m 属于波浪能贫乏区, 1—1.5kW/m 属于可利用区, 1.5kW/m 以上属于波浪能丰富区。结合上述分析, 本研究将成山头以东、渤海海峡外侧以及长江口外海海域作为重点开发利用区(图 11 黑框处), 与

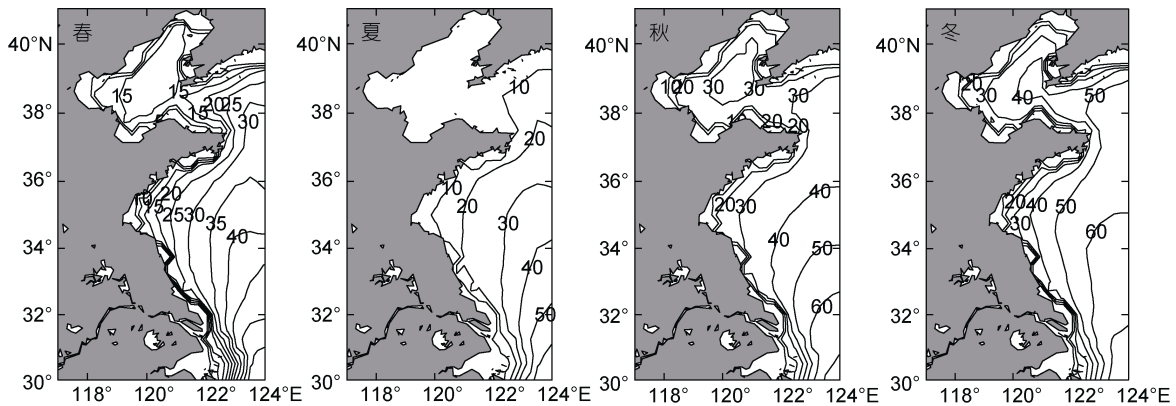


图 10 可用波浪四季分布(单位: %)

Fig.10 Usable wave distribution (unit:%)

前人分析相吻合(万勇等, 2014; 刘首华等, 2015)。该区域的波能流密度年均可达 3kW/m 以上, 可用度频率超过 30%, 富集度频率大于 2%, 长江口外海甚至可达 5%, 变异系数小于 1.8, 说明稳定性好, 便于采集与利用; 可利用波高频率大多数时间在 30% 以上, 冬季甚至可达 50% 以上, 具有较大的开发价值, 且渤海海域部分受台风影响小, 发电装置不易受到破坏。

在长江口外海海域的波浪能集中在 $5\text{--}9\text{kW/m}$, 与万勇等(2015)计算结果基本一致, 刘首华等(2015)计算出成山头附近海域波能流密度 10 年平均近岸区域在 1.5kW/m 以上, 与本文的 1.3kW/m 相差不大, 冬季计算数值在 3.5kW/m 与本文的 3kW/m 略有差异, 说明旧公式对数值计算存在高估, 新公式在提高准确度方面有所进步。

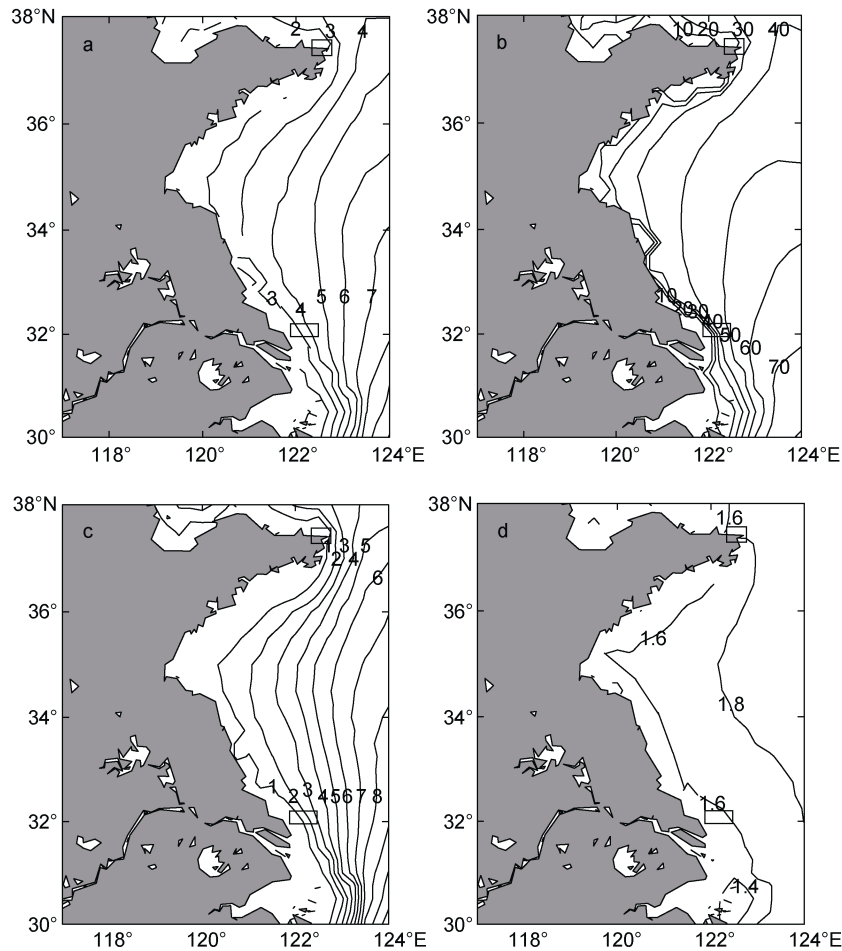


图 11 重点开发区的波能流密度(a, 单位: kW/m), 可用度频率(b, 单位: %), 富集度频率(c, 单位: %), 变异系数(d)
Fig.11 the key development areas of wave energy density (a, unit: Kw/m), usable (b, unit: %), rich level frequency (c, unit: %) and wave power density variability index distribution (d)
注: 黑色方框表示开发区域

4 结论

本文利用 ECMWF 最新的 ERA5 数据, 并利用新的波浪能评估公式, 对黄渤海海域 1980—2018 年间波浪能资源展开评估, 主要计算指标包括波浪能可用度频率、富集度频率、变异系数以及可利用波高占比等, 结果显示:

(1) 黄渤海区波浪能资源具有明显的季节性, 秋

冬季节较高, 春夏季节较低, 冬季是波浪能资源开发的最佳季节。

(2) 波浪能富集区域主要集中在渤海海峡外侧、成山头东部以及长江口外海区域。

(3) 沿海地区 39a 波能变异系数的低值区出现在长江入海口北部, 高值区位于渤海南部、黄海北部和渤海沿海地区。

(4) 对黄渤海而言, 长江口外海区域、渤海海峡

以及成山头附近海域波浪能资源最具有开发潜力。

综上所述, 本文利用新公式对原有波浪能计算方法进行改进, 对黄渤海海域的波浪能进行评估分析, 在近岸地区提高了精度, 使计算结果更加精确, 为今后在该海域的资源开发利用提供参考。

参 考 文 献

- 万 勇, 张 杰, 孟俊敏等, 2014. 基于 ERA-Interim 再分析数据的 OE-W01 区块波浪能资源评估. 资源科学, 36(6): 1278—1287
- 万 勇, 张 杰, 孟俊敏等, 2015. 基于 ERA-Interim 高分辨率数据的中国东海南海波浪能评估. 太阳能学报, 36(05): 1259—1267
- 王传崑, 卢 苇, 2009. 海洋能资源分析方法及储量评估. 北京: 海洋出版社
- 石洪源, 尤再进, 罗续业等, 2017. 基于 ERA-Interim 再分析数据的近 35 年中国海域波浪能资源评估. 海洋湖沼通报, 6: 30—37
- 任建莉, 罗誉娅, 陈俊杰等, 2009. 海洋波浪信息资源评估系统的波力发电应用研究. 可再生能源, 27(3): 93—97
- 刘首华, 杨忠良, 岳心阳等, 2015. 山东省周边海域波浪能资源评估. 海洋学报, 37(7): 108—122
- 郑崇伟, 苏 勤, 刘铁军, 2013. 1988—2010 年中国海域波浪能资源模拟及优势区域划分. 海洋学报, 35(3): 104—111
- 郑崇伟, 李训强, 2011. 基于 WAVEWATCH-III 模式的近 22 年中国海波浪能资源评估. 中国海洋大学学报, 41(11): 5—12
- 郑崇伟, 林 刚, 孙 岩等, 2012. 近 22 年南海波浪能资源模拟研究. 热带海洋学报, 31(6): 13—19
- 宗芳伊, 吴克俭, 2014. 基于近 20 年的 SWAN 模式海浪模拟结果的南海波浪能分布、变化研究. 海洋湖沼通报, (3): 1—12
- 孟宪贵, 郭俊建, 韩永清, 2018. ERA5 再分析数据适用性初步评估. 海洋气象学报, 38(1): 91—99
- 管 轶, 2011. 我国波浪能开发利用可行性研究. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文
- Barstow S, Haug O, Krogstad H, 1998. Satellite altimeter data in wave energy studies. In: Proceeding of International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis. Reston: ASCE, 2: 339—354
- Bechtle P, Schelbergen M, Schmehl R *et al*, 2019. Airborne wind energy resource analysis. Renewable Energy, 141: 1103—1116
- Beji S, 2013. Improved explicit approximation of linear dispersion relationship for gravity waves. Coastal Engineering, 73: 11—12
- Burrough P A, 1986. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. New York: Oxford University Press
- Czernecki B, Taszarek M, Marosz M *et al*, 2019. Application of machine learning to large hail prediction—the importance of radar reflectivity, lightning occurrence and convective parameters derived from ERA5. Atmospheric Research, 227: 249—262
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J *et al*, 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137(656): 553—597
- Folley M, Whittaker T J T, 2009. Analysis of the nearshore wave energy resource. Renewable Energy, 34(7): 1709—1715
- Gulev S K, Grigorieva V, Sterl A *et al*, 2003. Assessment of the reliability of wave observations from voluntary observing ships: insights from the validation of a global wind wave climatology based on voluntary observing ship data. Journal of Geophysical Research: Oceans, 108(C7): 3236
- Hersbach H, Dee D, 2016. ERA5 reanalysis is in production. ECMWF Newsletter, 147. Reading: ECMWF
- Hulls K, 1977. Wave power. The New Zealand Energy Journal, (4): 44—48
- Iglesias G, Carballo R, 2010. Wave energy resource in the Estaca de Bares area (Spain). Renewable Energy, 35(7): 1574—1584
- Leijon M, Bernhoff H, Berg M *et al*, 2003. Economical considerations of renewable electric energy production—especially development of wave energy. Renewable Energy, 28(8): 1201—1209
- Mahmoodi K, Ghassemi H, Razminia A, 2019. Temporal and spatial characteristics of wave energy in the Persian Gulf based on the ERA5 reanalysis dataset. Energy, 187: 115991
- Simarro G, Orfila A, 2013. Improved explicit approximation of linear dispersion relationship for gravity waves: another discussion. Coastal Engineering, 80: 15
- Tornkvist R, 1975. Ocean wave power station, report 28. Helsinki: Swedish Technical Scientific Academy
- You Z J, 2008. A close approximation of wave dispersion relation for direct calculation of wavelength in any coastal water depth. Applied Ocean Research, 30(2): 133—139
- You Z J, Shi H Y, Bai Y C, 2018. Impacts of storm wave-induced coastal hazards on the coast of China. Journal of Coastal Research, 85: 826—830

SPATIAL AND TEMPORAL CHARACTERISTICS OF WAVE ENERGY RESOURCES IN THE YELLOW SEA AND BOHAI SEA USING ERA5 DATASETS

QIAO Shou-Wen¹, SUN Jia-Cheng¹, SHI Hong-Yuan^{1,2}, SUN Qing-Ying¹

(1. *Institute of Ports and Coastal Disaster Mitigation, Ludong University, Yantai 264025, China;*

2. *Dalian Maritime University, Dalian 116000, China*)

Abstract Wave energy is an important marine renewable energy, the development and utilization of wave energy can effectively alleviate the energy problems caused by the shortage of conventional energy and environmental pollution. Scientific evaluation of wave energy resources is the prerequisite for the utilization of ocean energy resources. The wave energy resources in the Yellow Sea and Bohai Sea during the period of 1980—2018 were assessed based on the latest ERA5 data of ECMWF using the new wave energy evaluation formula. The main calculation indexes include power density, usable level frequency, rich level frequency, the coefficient of variation, and the proportion of available wave height, etc. Results show that the wave energy resources in the Yellow Sea and Bohai Sea have obvious seasonal feature and the resources are richer in winter and autumn and poorer in spring and summer. Winter is the best season for wave energy resource development. The wave energy enrichment areas are mainly concentrated in the outer part of the Bohai Strait, the eastern part of Chengshantou and the offshore area of the Changjiang (Yangtze) River estuary. On this basis, the key development and utilization areas of wave energy resources were determined, and these data provide reference points for wave energy resource exploitation.

Key words ERA5; wave energy assessment; power density; rich level frequency; usable level frequency