

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.03.013

中国东部大陆架海域波能流特性研究

殷 妍^{1,2}, 邓夕贵³, 王 慧⁴, 刘首华⁴, 徐 啸^{1,2,5}, 陶爱峰^{1,2}

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 3. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027;
4. 国家海洋信息中心, 天津 300171; 5. 江苏省交通运输厅港航事业发展中心, 江苏 南京 210004)

摘要: 基于欧洲中期天气预报中心提供的第五代再分析数据集中较高分辨率的波浪数据, 计算分析了 2017 年中国东部大陆架海域涌浪和混合浪波能流的时空分布特征, 研究了该海域波能流的传递特性。结果表明: 研究海域的混合浪、涌浪波能流都以流向外海为主, 波能流传递方向基本一致, 在数值上涌浪波能流明显小于混合浪波能流, 中国东部大陆架海域产生的较大波能流由各个海峡流向外海; 研究海域混合浪波能流分布具有明显的季节性, 秋冬季节较大, 春夏季节较小, 大值区主要集中在吐噶喇海峡、奄美海峡、宫古海峡和台湾海峡附近; 涌浪波能流空间分布的季节差异相对较小, 大值位于奄美海峡、宫古海峡和与那国海峡附近。

关键词: 中国东部大陆架; 波能流; 涌浪; 传递特性

中图分类号: P737 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2022)03-0096-08

Characteristic study of wave energy flux in the continental shelf of eastern China

YIN Yan^{1,2}, DENG Xigui³, WANG Hui⁴, LIU Shouhua⁴, XU Xiao^{1,2,5}, TAO Aifeng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. China Harbour Engineering Company Limited, Beijing 100027, China;
4. National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China;
5. Port and Waterway Development Center, Department of Transportation of Jiangsu Province, Nanjing 210004, China)

Abstract: Based on the higher resolution wave data in the fifth-generation reanalysis dataset provided by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, the temporal and spatial distribution characteristics of surge and mixed wave energy flux in eastern China Sea area in 2017 were calculated and analyzed, and the transmission characteristics of wave energy flux in this area were studied as well in this paper. The results show that the mixed wave and swell wave energy flux in the study area mainly flow to the open sea, and the transfer direction of wave energy flux is basically the same. The energy flux of swell wave is larger than that of mixed wave in number. Generally speaking, there is a large wave energy current in the eastern part of China's continental shelf, which flows from each channel to the open sea. The distribution of mixed wave energy flux in the study area has obvious seasonality, which is larger in autumn and winter and smaller in spring and summer, and the largest value is located near the Tokara, Amami, Miyako and Taiwan Strait.

Key words: the eastern part of China's continental shelf; wave energy flux; swell wave; transitive properties

随着我国海洋强国战略的大力推进,越来越多的海上经济、生态建设项目正如火如荼地展开,因此需要正确地认识海上波能流时空分布特征,以保障各项建设的顺利进行,为我国“海洋强国”战略的推进保驾护航。

20 世纪末,有关学者利用船报资料^[1-2]和卫星反演资料^[3]对全球海洋沿岸波浪能资源分布进行了研究分析,结果表明,中国海域属于波浪能贫瘠区域。随后,基于实测、数值模拟以及再分析等数据,中国开始了全国性的波能流分布特性研究。已有研究显示山东省周边海域波能流以 2 kW/m 以下为主^[4],东海和南海

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFE0104500, 2020YFD0900701); 国家自然科学基金(52101308)
作者简介: 殷妍(1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事水波动力学研究。E-mail: 1272806388@qq.com
通信作者: 陶爱峰(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事水波动力学研究。E-mail: aftao@hhu.edu.cn
引用本文: 殷妍, 邓夕贵, 王慧, 等. 中国东部大陆架海域波能流特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 96-103.
YIN Yan, DENG Xigui, WANG Hui, et al. Characteristic study of wave energy flux in the continental shelf of eastern China[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(3): 96-103.

是波能流的相对富集区,渤海较差^[5-7],研究海域的波能流均具有一定的季节特征^[8-10]。2014 年,国内首次实现了混合浪波能流的数值预报,并分别对西北太平洋海域的风浪能、涌浪能、混合浪能展开研究,结果表明涌浪波能流的稳定性明显好于风浪波能流^[11-12]。

前人对中国近海波能流的特性已有了一定的认识,且在中国近海波能流的季节性变化和空间分布特征上基本达成了共识,但是缺少对中国近海波能流传递特性的分析研究。因此,本文基于欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasting, ECMWF)提供的 2017 年 ECMWF Reanalysis v5 (ERA5)再分析数据中较高分辨率的波浪数据,计算分析中国东部大陆架海域涌浪和混合浪波能流的时空分布特征,研究该海域波能流的传递特性,拓展对中国近海波浪的认识。

1 数据获取

ECMWF 是全球最主要的再分析数据中心之一,是国际性天气预报研究和业务机构。ERA5 是 ECMWF 推出的第五代再分析数据集。相比于 ERA-Interim, ERA5 的水平和垂直分辨率显著提高, ERA5 还提供了更多的产品参数以及每小时的高分辨率产品,并已应用于大气和海洋的研究。如乔守文等^[13]基于 ERA5,采用新的波浪能评估公式对黄渤海海域 1980—2018 年波浪能资源进行了评估; Mahmoodi 等^[14]基于 ERA5 对波斯湾波浪能的时空特征进行了分析。

ERA5 可以提供较高精度的全球范围的波浪场数据。本文使用 2017 年的 ERA5 数据,选取数据的时间分辨率为 1 h,空间分辨率为 0.5°×0.5°,空间范围为 115.0°E ~ 135.0°E, 23.0°N ~ 41.5°N,包括中国东部近海(渤海、黄海和东海)和西北太平洋的部分海域。

本文按照世界气象学会的定义划分季节:春季(MAM)为 3—5 月;夏季(JJA)为 6—8 月;秋季(SON)为 9—11 月;冬季(DJF)为 12 月、1 月和 2 月。

2 研究方法

2.1 波能流计算公式

对于不规则波,波前单位宽度的波能通量(或波能流 P)可近似为^[15]

$$P = \rho g \iint c_g(f, h) E(f, \theta) df d\theta \tag{1}$$

其中
$$c_g = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] c \quad c = L/T \quad k = 2\pi/L$$

式中: ρ 、 g 、 f 、 h 、 θ 、 $c_g(f, h)$ 、 $E(f, \theta)$ 分别为海水密度、重力加速度、频率、水深、波向、群速和波谱密度; c 为波速; L 为波长; T 为波浪周期; k 为波数

波前单位宽度的波能流近似值为^[16]

$$P = \frac{1}{16} \rho g H_s^2 c_g(T_e, h) \tag{2}$$

式中: H_s 为有效波高; T_e 为能量周期。将 c_g 代入式(2), 则

$$P = \frac{1}{32} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \rho g H_s^2 \frac{L}{T_e} \tag{3}$$

其中
$$L = \frac{g T_e^2}{2\pi} \tanh(kh)$$

因此,式(3)可以写成:

$$P = \frac{1}{64\pi} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \rho g^2 H_s^2 T \tanh(kh) \tag{4}$$

式(4)适用于各种水深条件。对于深水区, $\left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right]$ 和 $\tanh(kh)$ 趋近于 1, 因此波能流可近似为

$$P = \frac{1}{64\pi} \rho g^2 H_s^2 T \tag{5}$$

2.2 波能流传递特性分析

波浪在传播过程中存在能量传递, 因此, 需要对波能流进行传递特性分析, 才能更好地了解中国东部大

陆架海域的波浪特性。

我国东部大陆架与西北太平洋之间主要有 7 个海峡,从北至南分别为朝鲜海峡、大隅海峡、吐噶喇海峡、奄美海峡、宫古海峡、与那国海峡以及台湾海峡(图 1),研究海域的波浪能主要通过这 7 个海峡与西北太平洋进行交换。在 7 个海峡中各设置一个计算点,以通过海峡流入中国近海的波能流为正、流出为负,计算各点的月均和年均波能流方向和大小。在研究区域内部选取 3 个参考点,根据计算点的波能流大小、方向以及参考点的常浪向研究波能流传递特性。

计算点坐标分别为 $A(128.0^{\circ}E, 33.5^{\circ}N)$ 、 $B(130.0^{\circ}E, 31.0^{\circ}N)$ 、 $C(129.5^{\circ}E, 30.5^{\circ}N)$ 、 $D(129.0^{\circ}E, 28.5^{\circ}N)$ 、 $E(126.5^{\circ}E, 25.5^{\circ}N)$ 、 $F(123.5^{\circ}E, 24.5^{\circ}N)$ 和 $G(120.5^{\circ}E, 25.5^{\circ}N)$ 。参考点坐标分别为 $O(123.5^{\circ}E, 35.0^{\circ}N)$ 、 $P(126.0^{\circ}E, 31.5^{\circ}N)$ 和 $Q(125.0^{\circ}E, 28.5^{\circ}N)$,位置图见图 1。

3 结果与分析

3.1 波能流大小时空分布特征

对于波浪而言,其能量的大小与传播和风有着密切的关系,我国不同季节的风速、风向差异较大,因此图 2 和图 3 给出了不同季节的波能流分布情况。

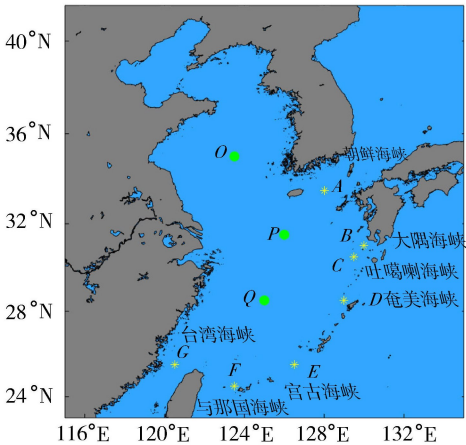


图 1 中国东部大陆架与相邻海域间的主要海峡及计算点和参考点位置

Fig.1 Main straits, calculation points and reference points between the continental shelf of eastern China and adjacent sea areas

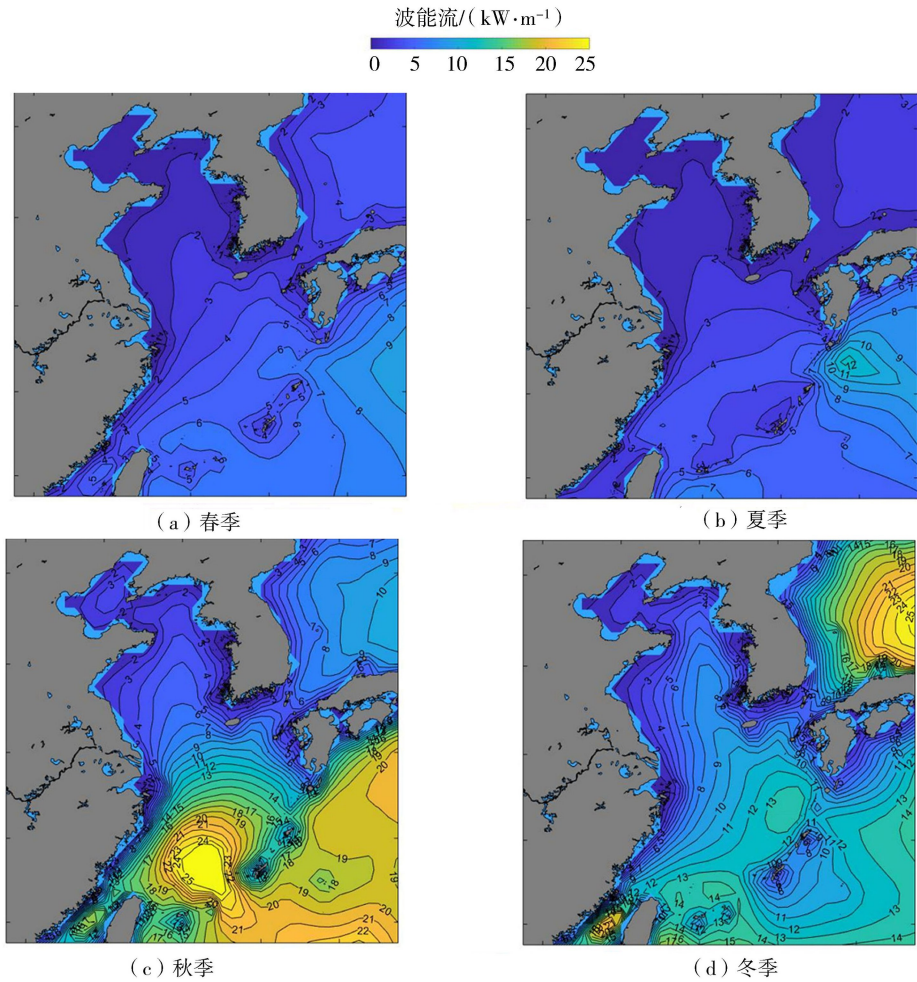


图 2 2017 年混合浪波能流四季分布

Fig.2 Seasonal distribution of mixed wave energy flux in 2017

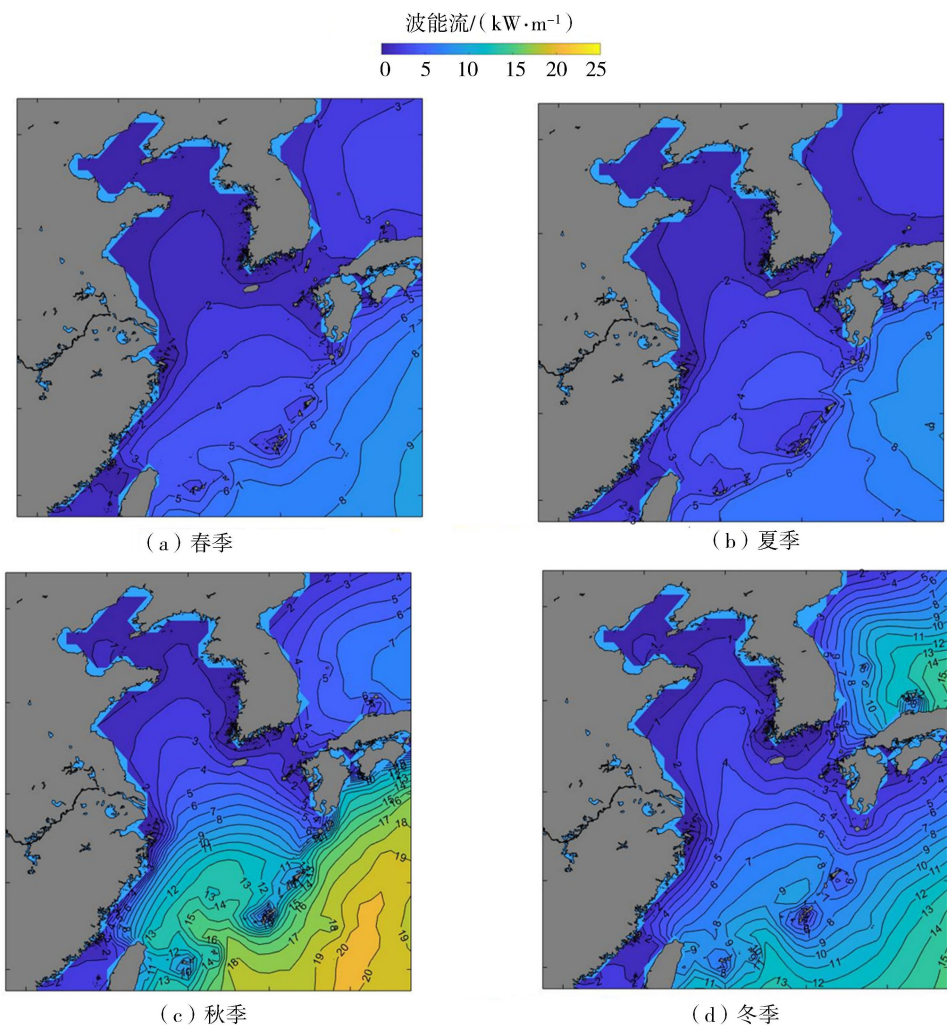


图 3 2017 年涌浪波能流四季分布
Fig. 3 Seasonal distribution of swell wave energy flux in 2017

3.1.1 混合浪

由图 2 可见,我国东部海域混合浪波能流分布具有季节性,其中秋冬季节波能流较大,春夏季节波能流较小。东海波能流四季变化明显,春夏季波能流最小为 3 kW/m,秋冬季波能流最大值可达 25 kW/m。相比于东海,黄海、渤海四季变化不大,波能流在 1 ~ 6 kW/m。春季,波能流的大值主要集中在东海南部和东南部海域,最大值可达 6 kW/m;到了夏季,波能流局部增大并且最大值向东北方向移动,出现在吐噶喇海峡和奄美海峡附近,最大值可达 12 kW/m;进入秋季,受台风等极端天气的影响,波能流大幅增大,最大值出现在东海东南部的宫古海峡附近,最大值达 25 kW/m;冬季,波能流稍有减小,最大值出现在台湾海峡附近,最大值达 21 kW/m。总的来说,远海的波能流大于近海,高值区呈现东北—西南走向,和东海大陆架外缘平行。波能流大值主要集中在吐噶喇海峡、奄美海峡、宫古海峡和台湾海峡。

3.1.2 涌浪

由图 3 可见,涌浪波能流空间分布的季节性差异并不显著,大值位于奄美海峡、宫古海峡和与那国海峡附近,向西北沿东海、黄海和渤海方向递减。在涌浪的传播过程中,受传播效应和变浅效应的影响,东海和西北太平洋等开阔海域的涌浪波能流比渤海、黄海等较狭窄区域高得多。但涌浪波能流大小在不同季节差异较大,春夏季最大值可达 4 ~ 5 kW/m;秋季最大值为 14 ~ 16 kW/m;冬季最大值为 8 ~ 9 kW/m。

3.1.3 年均波能流

图 4 为混合浪和涌浪的波能流年平均分布特征。从图 4 可见,混合浪年均波能流的大值区域分布在东海南部和东南部海域,最大值为 10 ~ 12 kW/m;渤海海域波能流最小,不足 2 kW/m。涌浪波能流大值主要分布在东海东南部海域,最大值为 7 ~ 9 kW/m;最小值在渤海,不足 1 kW/m。混合浪和涌浪波能流在空间分布上相似,

都由东南海域向西北海域递减,由远海向近岸递减。但在大小上相差较大,特别是在东海东南部海域。

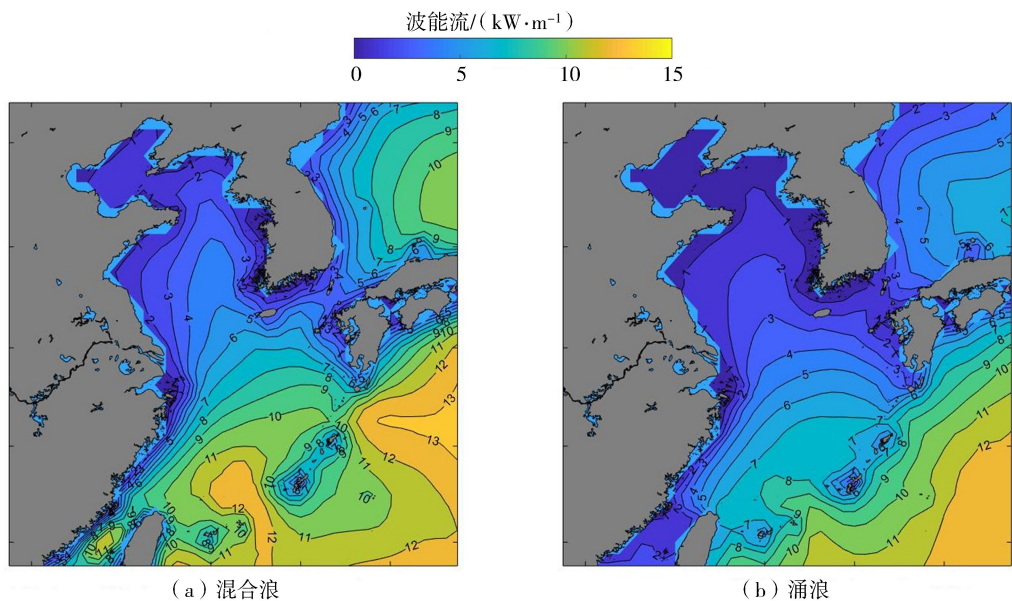


图4 2017年混合浪和涌浪波能流年平均分布

Fig.4 Annual average distribution of wave energy flux of mixed wave and swell wave in 2017

图5为各海峡计算点的年均波能流,可见混合浪波能流大值主要集中在吐噶喇海峡、奄美海峡、宫古海峡和台湾海峡附近。中国东部至南部海域与西北太平洋的能量传递较为频繁,涌浪波能流的大值主要集中在奄美海峡、宫古海峡和与那国海峡,涌浪主要通过这几个海峡进行能量的传递。各海峡的混合浪波能流都大于涌浪,但各海峡的波浪能占比不同。奄美海峡、宫古海峡和与那国海峡为涌浪主导,朝鲜海峡和台湾海峡则风浪占优,大隅海峡和吐噶喇海峡的风、涌浪能量不相上下。

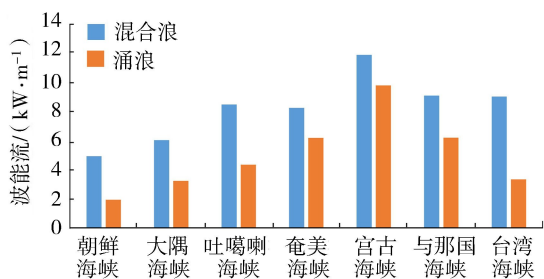


图5 2017年各海峡计算点混合浪和涌浪平均波能流

Fig.5 Average wave energy flux of mixed wave and swell wave at calculation points of each channel in 2017

3.2 波能流传递特性

分别计算7个计算点不同季节的波能流大小和方向,结果见图6和图7。图6、图7中以蓝色箭头表示波能流经过该计算点从中国东部近海流向西北太平洋(即波能流为负),以黄色箭头表示波能流经过该计算点从西北太平洋流入中国东部近海(即波能流为正);用箭头的宽度表示波能流的大小。同时,分别统计了参考点O、P和Q的波向频率分布,用橙色箭头表示出现频率较高的两个波向,以箭头长度表示频率的大小。

从图6可以看出,中国东部近海的混合浪波能流传递方向有着明显的季节性。春季,各计算点波能流都以流出为主,B、C点和F、G点波能流相对较大;O、P点向岸和离岸的波向频率都较高;Q点以离岸波向为主。外海有一部分波能流流入研究海域,但中国近海产生了更多波能流流向西北太平洋;夏季,受季风影响,较大的波能流从东南方向流入中国近海。东北方向上的计算点波能流有正有负,数值较小,基本持平。参考点的主要波向都以北向为主。在夏季,波能流主要由外海从东南方向流入中国近海,然后流向近岸,由于地形和水深的影响逐渐消散;到了秋季,波能流以从东北方向流入、西南方向流出为主。参考点的主要波向都为西南向。但是,流出的波能流相比从外海流入的波能流明显较大,说明中国近海产生了较多的波能流流向外海。冬季,受长时间西北季风的影响,计算点波能流都以流出为主,且数值较大。参考点波向也以南向为主。显然,中国近海生成大量波能流流向外海。

从图7可以看出,涌浪波能流的季节特征与混合浪基本一致,在大小上明显小于混合浪。春季,各计算点波能流都以流出为主且数值都较小。F点和G点的波能流明显大于其他计算点,这与Q点的主要波向为SSW相符。虽然3个参考点的主要波向大都指向沿岸,计算点波能流却都为负,但A~E点的波能流整体

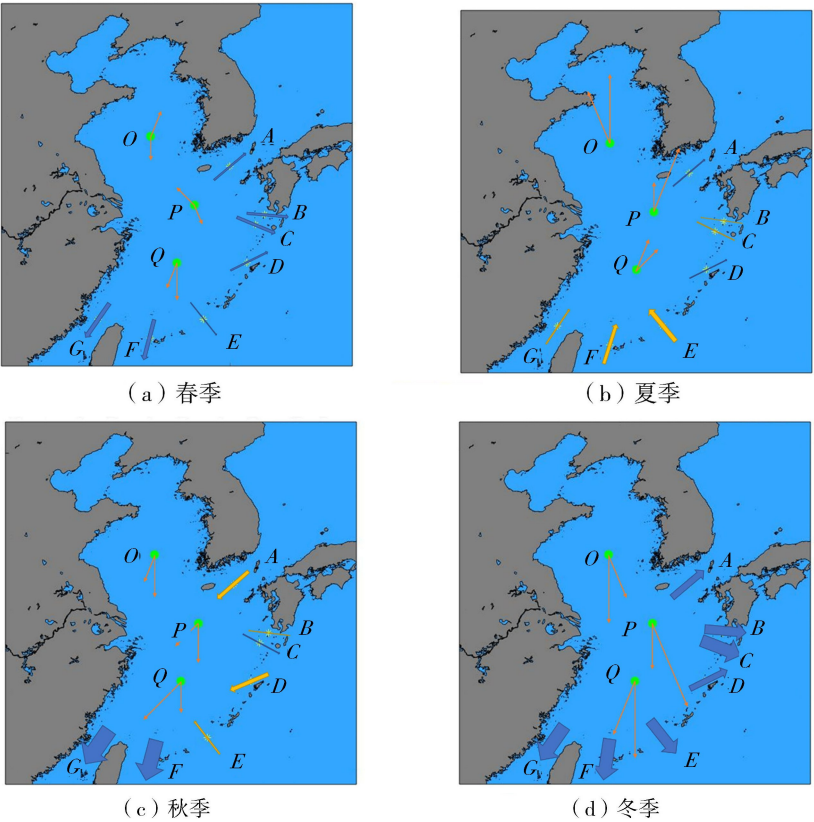


图 6 不同季节混合浪波能流传递方向

Fig.6 Energy transfer direction of mixed wave in different seasons

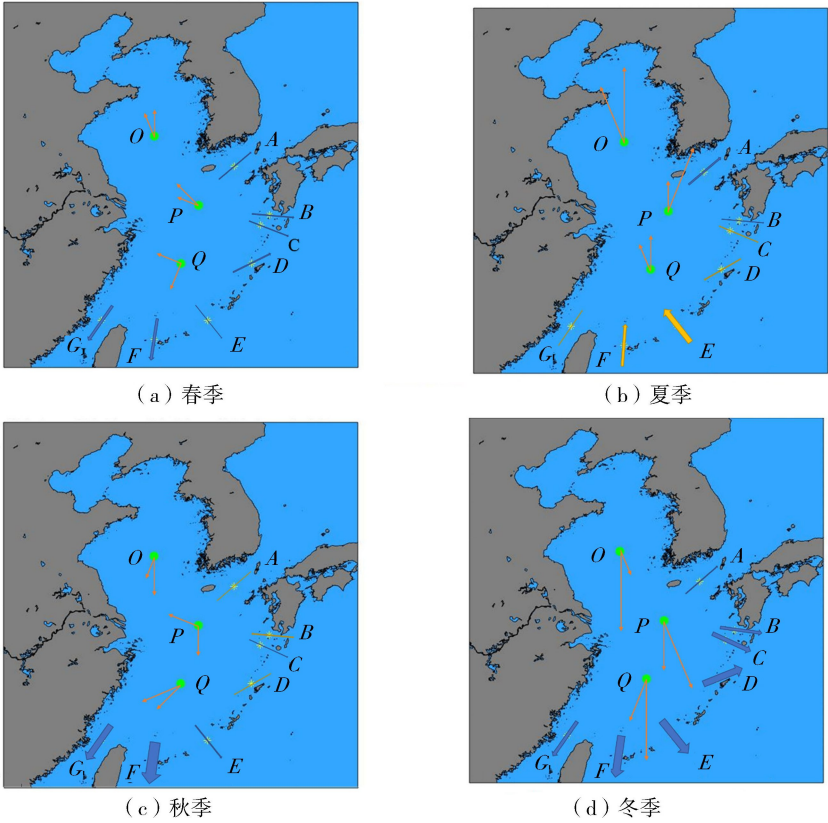


图 7 不同季节涌浪波能流传递方向

Fig.7 Energy transfer direction of swell wave in different seasons

较小,表明春季中国东部海域和西北太平洋的波能流动整体较少,中国东部海域内部波能流各个方向的流动都比较平均,但还是以流出为主。夏季,以东南方向流入为主,小部分通过 A 点流出海域,大部分研究海域的波能流在向岸流动中消散。秋季,中国东部近海产生了大量的波能流,通过 F 和 G 通道流出研究海域。到了冬季,各通道波能流都以流出为主,东南方向上的计算点波能流明显较大,研究海域内生成了大量的波能流。

图 8 为 2017 年混合浪和涌浪的传递方向示意图,可见各计算点混合浪波能流整体以流出为主,东向和西南向的计算点波能流流动较多。参考点的波向也以南向为主。中国东部近海混合浪波能流主要由该海域产生,并向南流入外海。涌浪波能流的传递方向与混合浪基本一致,在大小上明显小于混合浪波能流。

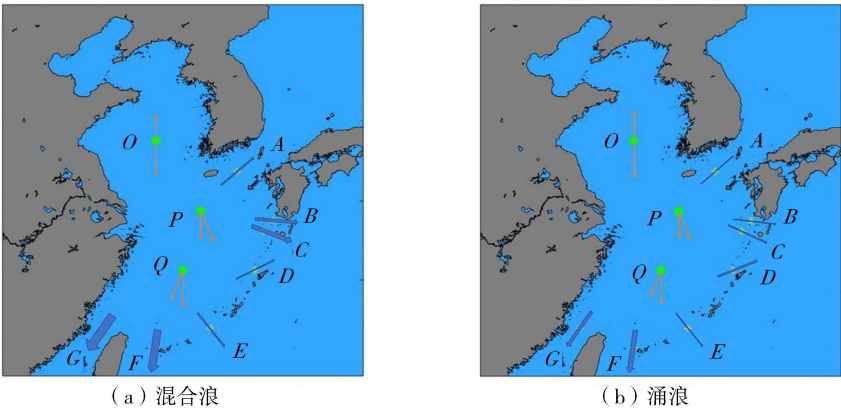


图 8 2017 年混合浪和涌浪波能流传递方向

Fig.8 Transfer directions of wave energy flows of mixed wave and swell wave in 2017

4 结 论

a. 研究海域的混合浪、涌浪波能流都以流出为主,波能流传递方向基本一致,在数值上涌浪波能流明显小于混合浪。只有在夏季,该海域波能流以外海流入为主。整体来看,研究海域产生的较大波能流由各个海峡流向外海。

b. 研究海域混合浪波能流分布具有明显的季节性,秋冬季节较大,春夏季节较小,大值区主要集中在吐噶喇海峡、奄美海峡、宫古海峡和台湾海峡附近。涌浪波能流空间分布的季节差异并不显著,大值位于奄美海峡、宫古海峡和与那国海峡附近。涌浪波能流明显小于混合浪波能流,但是都由东南海域向西北海域递减,由远海向近岸递减。

参考文献:

[1] TORNKVIST R. Ocean wave power station,report 28[R]. Helsinki:Swedish Technical Scientific Academy,1975.
[2] HULLS K. Wave power[J]. The New Zealand Energy Journal,1977(4):44-48.
[3] BARSTOW S F,HAUG O,KROGSTAD H E. Satellite altimeter data in wave energy studies[C]//Ocean Wave Measurement and Analysis. New York:ASCE,1998:339-354.
[4] 刘首华,杨忠良,岳心阳,等. 山东省周边海域波浪能资源评估[J]. 海洋学报,2015(7):108-122. (LIU Shouhua,YANG Zhongliang,YUE Xinyang,et al. Wave energy resource assessment in Shandong offshore[J]. Haiyang Xuebao,2015(7): 108-122. (in Chinese))
[5] 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. (YOU Yage,MA Yujui. The sea energy source application in the sea environment[J]. Meteorological,Hydrological and Marine Instruments,2003(3): 32-35. (in Chinese))
[6] 宗芳伊,吴克俭. 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[J]. 海洋湖沼通报,2014(3): 1-12. (ZONG Fangyi,WU Kejian. Research on distribution and variations of wave energy in South China Sea based on recent 20 years' wave simulation results using SWAN wave model[J]. Transactions of Oceanology amd Limnology,2014(3): 1-12. (in Chinese))
[7] 石洪源,尤再进,罗续业,等. 基于 ERA-Interim 再分析数据的近 35 年中国海域波浪能资源评估[J]. 海洋湖沼通报,2017 (6):30-37. (SHI Hongyuan,YOU Zaijin,LUO Xuye,et al. Assessment of wave energy resources for China sea area based on 35

years' ERA-Interim reanalysis data[J]. Transactions of Oceanology and Limnology,2017(6):30-37. (in Chinese))

[8] LIN Y,DONG S,WANG Z,et al. Wave energy assessment in the China adjacent seas on the basis of a 20-year SWAN simulation with unstructured grids[J]. Renewable Energy,2019,136:275-295.

[9] 万勇,张杰,孟俊敏,等. 基于 ERA-Interim 再分析数据的 OE-W01 区块波浪能资源评估[J]. 资源科学,2014,36(6):1278-1287. (WAN Yong,ZHANG Jie,MENG Junmin,et al. Assessment of wave energy resources for the OE-W01 area based on ERA-Interim reanalysis data[J]. Resources Science,2014,36(6):1278-1287. (in Chinese))

[10] 万勇,张杰,孟俊敏,等. 基于 ERA-Interim 高分辨率数据的中国东海南海波浪能评估[J]. 太阳能学报,2015,36(5):1259-1267. (WAN Yong,ZHANG Jie,MENG Junmin,et al. Wave energy assessment in the East China and South China Sea based on ERA-Interim high resolution data[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2015,36(5):1259-1267. (in Chinese))

[11] 郑崇伟. 利用 WW3 模式实现中国周边海域波浪能流密度数值预报:以 2 次冷空气过程为例[J]. 亚热带资源与环境学报,2014,9(2):18-25. (ZHENG Chongwei. Wave energy density forecast in China seas by WW3 wave model;a study based on two cold air events[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment,2014,9(2):18-25. (in Chinese))

[12] 郑崇伟,游小宝,陈晓斌,等. 西北太平洋海域风浪、涌浪、混合浪波浪能资源特征[J]. 气象科学,2014,34(4):408-413. (ZHENG Chongwei,YOU Xiaobao,CHEN Xiaobin,et al. Characteristics analysis on wave energy over Northwest Pacific Ocean in the last 44 years[J]. Journal of the Meteorological Sciences,2014,34(4):408-413. (in Chinese))

[13] 乔守文,孙嘉诚,石洪源,等. 基于 ERA5 的黄渤海附近海域波浪能资源时空特征分析[J]. 海洋湖沼通报,2020,52(6):1350-1358. (QIAO Shouwen,SUN Jiacheng,SHI Hongyuan,et al. Spatial and temporal characteristics of wave energy resources in the Yellow Sea and Bohai Sea using ERA5 datasets [J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica,2020,52(6):1350-1358. (in Chinese))

[14] MAHMOODI K,GHASSEMI H,RAZMINIA A. Temporal and spatial characteristics of wave energy in the Persian Gulf based on the ERA5 reanalysis dataset[J]. Energy,2019,187:115991.

[15] DEAN R G,DALRYMPLE R A. Water wave mechanics for engineers and scientists[M]. Singapore:World Scientific Publishing Company,1991.

[16] CORNETT A M. A global wave energy resource assessment[C]//The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. Cupertino, CA :International Society Offshore & Polar Engineers,2008.

(收稿日期:2020 - 10 - 12 编辑:胡新宇)

(上接第 46 页)

[52] 陈肖柏,刘建坤,刘鸿绪,等. 土的冻结作用与地基[M]. 北京:科学出版社,2006.

[53] 周家作,韦昌富,李东庆,等. 正冻土水热迁移的移动泵模型[J]. 冰川冻土,2016,38(4):1083-1089. (ZHOU Jiazu,WEI Changfu,LI Dongqing,et al. A moving pump model for hydrothermal migration in orthofrozen soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2016,38(4):1083-1089. (in Chinese))

[54] 毛雪松,李宁,王秉纲,等. 多年冻土路基水-热-力耦合理论模型及数值模拟[J]. 长安大学学报(自然科学版),2006(4):16-19. (MAO Xuesong,LI Ning,WANG Binggang,et al. Theoretical model and numerical simulation of water-thermal-mechanical coupling of permafrost roadbed[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2006(4):16-19. (in Chinese))

[55] 武建军,韩天一. 饱和正冻土水-热-力耦合作用的数值研究[J]. 工程力学,2009,26(4):246-251. (WU Jianjun,HAN Tianyi. Numerical study on hydrothermal and mechanical coupling of saturated permafrost[J]. Engineering Mechanics,2009,26(4):246-251. (in Chinese))

[56] 于天文. 吉林西部盐渍土水热盐力多物理场耦合模型研究[D]. 长春:吉林大学,2016.

[57] 汤瑞. 冻土水力传导系数及水热盐耦合分离冰冻胀模型研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.

[58] PHILIP J R,DE VRIES D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[J]. Eos,Transactions American Geophysical Union,1957,38(2):222-232.

[59] AN N,HEMMATI S,CUI Y. Numerical analysis of soil volumetric water content and temperature variations in an embankment due to soil-atmosphere interaction[J]. Computers and Geotechnics,2017,83:40-51.

[60] RUBIN J. Theoretical analysis of two-dimensional,transient flow of water in unsaturated and partly unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal,1968,32(5):607-615.

[61] 张明礼,温智,董建华,等. 多年冻土活动层浅层包气带水-汽-热耦合运移规律[J]. 岩土力学,2018,39(2):561-570. (ZHANG Mingli,WEN Zhi,DONG Jianhua,et al. Coupled water-vapor-heat transport in shallow unsaturated zone of active layer in permafrost regions[J]. Rock and Soil Mechanics,2018,39(2):561-570. (in Chinese))

[62] 李杨. 季节冻土水分迁移模型研究[D]. 长春:吉林大学,2008.

(收稿日期:2021 - 07 - 01 编辑:胡新宇)