研究论文 · Linn ARTICLE

# 黄渤海海域波浪时空变化特征分析

邱文博1、李冠宇1、徐俊臣1、胡轶群1、王亚丁1、石洪源2

(1. 国家海洋技术中心, 天津 300111; 2. 鲁东大学土木工程学院, 烟台 264025)

摘要:本文利用欧洲中期预报中心(ECMWF)第五代再分析数据集(ECMWF Reanalysis v5, ERA5),对 中国黄渤海海域 2000—2019 年的波浪进行了统计分析。得到如下的结论:1) 黄渤海海区波浪具有明显 的季节性,渤海区域有效波高呈现出周边小,中间大的特点;黄海海域有效波高呈现由南向北降低的 趋势;研究区域冬季有效波高均值大于其他季节。2) 平均周期 T 的季节分布类似于有效波高的季节均 值分布。渤海仅秋冬季 T 的均值存在大于 4 s 的区域;黄海海域 T 的季节分布也呈现由南向北递减的 趋势,其中长江口外海区域秋冬季 T 的季节均值可达 6 s。3) 有效波高距平场 EOF 分解结果显示,第 一模态表明了波浪变化具有明显的季节性特征;第二模态反映了季风的季节转换对有效波高的影响; 第三模态反映的可能是有效波高因地形不同而产生的变化。4) 代表点统计结果显示:渤海整个地区的 常浪向为 NNE-NE,强浪向以 NE 和 NNE 为主;黄海海域的常浪向为 SSE-SE 向,强浪向以 N 和 SSE 为主。

关键词:波浪;波浪特征;EOF;黄渤海海域 中图分类号:P753 文献标识码:A 文章编号:1000-3096(2021)07-0001-08 DOI:10.11759/hykx20201109001

黄渤海的波浪具有明显的季节性。针对黄渤海 地区的波浪特征分析,国内外学者已经做了很多相 关方面的研究<sup>[1-4]</sup>。其中,有一些研究是利用实测资 料开展,因实测资料具有时空限制性和区域性,无 法满足在长时间跨度、宽领域尺度情况下对波浪分 布特征的研究。随着卫星遥感的发展,利用卫星开展 波浪特征的研究也逐步展开,例如齐义泉等<sup>[5]</sup>为分 析黄海中部的风、浪基本统计特征及季节分布特征, 利用了卫星高度计遥感资料; 陈红霞等<sup>[6]</sup>为分析中 国近海随时间变化和季节变化的特点,利用了 TOPEX 卫星高度计资料。王广运等<sup>[7]</sup>根据 T/P 卫星 高度计资料和 ESR-1 卫星散射计资料, 推算出中国 两个海域多年一遇的波高极值。虽然卫星遥感技术 具有观测范围大、观测时间长的特点,但是其也存在 一定的局限性,例如在极端天气情况下,遥感数据 会出现较大误差,同时卫星轨道具有周期性,其周 期 10~35 d 不等,不能做到数据的实时覆盖性<sup>[8]</sup>。随 着数值模式的发展成熟,目前第三代数值模型广泛 被应用于海浪相关研究工作中,例如谢冬梅等<sup>[9]</sup>利 用 WAMC4 数值模型对东中国海 1950 年—2009 年 的波浪进行后报模拟,并以模拟数据为基础展开了 对该海域波浪时空分布特征的研究。陈国光<sup>[10]</sup>通过 SWAN 数值模型,对黄海海域波浪有效波高的季节变化特征展开了研究。

由此可以看出,前人已展开了较多关于黄渤海 波浪特征相关方面的研究,开展这些研究的数据主 要以实测数据、数值模拟或卫星资料为主。本文采 用 European Centre for Medium-Range Weather Forecasting (ECMWF)第五代再分析数据集(ECMWF Reanalysis v5, ERA5)的高时空分辨率的波浪场 (0.125°×0.125°),针对黄渤海区域近 20 a(2000— 2019 年)的波浪特征进行分析,包括四季有效波高 (Significant wave height, *H*<sub>s</sub>)和平均周期(Mean period, *T*)的分布规律,然后对波高进行 EOF 分解,最后选 取 4 个代表点给出其波浪玫瑰图。上述工作是前人 比较少涉及的,本研究主要分析了黄渤海地区波浪 在时间和空间的分布及其变化特征,所得结论对海 洋水文保障、海洋工程建设及运营等具有重要的科 学参考价值。

收稿日期: 2020-11-09; 修回日期: 2020-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(51909114)

<sup>[</sup>Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 51909114]

作者简介: 邱文博(1986—), 男, 工程师, 主要从事海洋观测技术研究, E-mail: 353045524@qq.com



## 1 数据资料

### 1.1 数据来源

ECMWF 在全球再分析数据集中,是比较知名的。其中它的 ERA5 数据集使用了专为再分析而开发的综合预报系统(IFS cycle 41r2)<sup>[11]</sup>,相比于 ERA-Interim<sup>[12]</sup>,数据准确性得到了显著改善<sup>[13-14]</sup>。许多研究人员将其用于大气和海洋研究,例如 Naseef 等<sup>[15-16]</sup>利用 39 a ERA5 数据(1979—2017 年)分别研究了台风对印度洋海域百年一遇波浪极值的影响以及该区域波浪及气候特征的变化趋势。Bruno 等<sup>[17]</sup>利用实测资料评估了 ERA5 数据在涌浪占主导海域的适用性,结果证明 ERA5 数据具有良好的适用性。本文利用黄海海域 2 个实测站点浮标观测数据(2011 年1月1日—2017 年12月31日)对 ERA5 的准确性进行验证,观测站位见图 1。

实测数据与 ERA5 数据对比结果见图 2 和表 1。经 计算统计 Y1 和 Y2 实测数据与 ERA5 数据的相关系数 分别为 0.91 和 0.97。因此,本文认为 ERA5 再分析数据 在我国海域具有一定的适用性,可用于本文相关研究。



- 图 1 研究区域、代表点(黑色圆圈)和验证点(黑色三角) 位置 (审图号: GS(2020)4631号)
- Fig. 1 Research area and locations of the representative and validation points (On drawing No. GS(2020)4631)





#### 表 1 实测站点和 ERA5 数据对比统计结果

Tab. 1Statistical results between the measured site and<br/>the ERA5 data

站位	数据量	偏离率	偏方差	相关系数
Y1	6 890	-0.07	0.16	0.91
Y2	8 706	-0.09	0.14	0.97

#### 1.2 研究范围

空间范围:本文选取渤海及黄海大部分区域 (117°~125°E,30°~41°N)作为研究对象(见图1),空间 分辨率为0.125°。为便于直观分析黄渤海区域波浪特 征,分别在渤海和黄海各选择两个代表点,命名为 A(119.75°E,38°N)、B(120.25°E,39.5°N)、C(123°E, 38.5°N)和 D(123°E,35°N)。

时间范围:本文计算时间为 2001—2019 年,共 20 a,时间分辨率为 1 h。

## 2 黄渤海波浪特征分析

#### 2.1 波高分布季节特征

黄渤海区域受季风影响明显,其风场的基本特征 为冬、夏季风盛行,冬季风持续时间为10月至次年



3月,期间由于蒙古高压控住南海北部,导致东北风盛行。夏季风持续时间为5月至9月中旬,期间由于印度低压和太平洋副热带高压的影响,导致偏南风盛行。

本文分别对黄渤海春(3—5月)、夏(6—8月)、秋 (9—11月)和冬(12月—次年2月)的有效波高H<sub>s</sub>展开 分析,其在黄渤海海域的年均分布见图3。

图 3 可知, 渤海区域整体有效波高较小, 呈现周

边小,中间大的特点,这与水深有密切关系。其中, 渤海中部年均有效波高可达 0.5 m 以上,周边海域年 均有效波高仅冬季可达 0.5 m 左右,其余季节不足 0.5 m;黄海海域有效波高呈现由南向北降低的趋势, 其中最大值出现在黄海南部的长江口外海域;北黄 海海域冬季年均有效波高最高可达 1.2 m,其余季节 均在 1 m 以下。



图 3 研究区域有效波高的季节年均值(单位: m) Fig. 3 Seasonal annual mean H<sub>s</sub> in the research area (Unit: m)

### 2.2 周期分布季节特征

平均周期 T 的季节分布类似于有效波高 H<sub>s</sub>的季节 均值分布(图 4)。渤海中间海域平均周期 T 的季节均值 较大,四周浅水区域平均周期 T 的季节均值较小,仅秋 冬季平均周期 T 的季节均值存在大于 4 s 的区域,春夏 季平均周期 T 的季节均值均不足 4 s。平均周期 T 的季 节均值在黄海海域也呈现出由南向北递减的趋势,其 中长江口外海区域秋冬季平均周期 T 的季节均值可达 6 s;北黄海海域全年 T 的季节均值均在 5 s 以下。

#### 2.3 有效波高的 EOF 分解

经验正交函数(EOF)方法现已经成为大气、海

洋及其他地球物理科学中数据分析的有利工具。该 方法最早在1902年由统计学家 Pearson<sup>[18]</sup>提出,该 方法通过将场的时间序列作为分析对象,将原始场 分解成两个不同的函数,分别为只依赖空间的函数 和只依赖时间的函数,然后将两个函数相乘,以此 进行分析。但在 20 世纪 80 年代以前,由于实测数 据稀缺,很难进行大范围领域和长时间宽度的 EOF 分析。随着卫星遥感技术的广泛应用和数值模拟技 术的完善,EOF 法逐渐应用于海洋领域的研究。例 如韩树宗等<sup>[19]</sup>利用 EOF 分解对南海海域 32 a 的波 浪场进行了研究。



图 4 研究区域平均周期的季节年均值(单位: s) Fig. 4 Seasonal annual mean *T* in the research area (Unit: s)

本文利用月平均处理的方法,将从 ERA5 上获 取的 2000—2019 年 20 a 的黄渤海浪场数据进行处理, 得到了 240 m 的逐月有效波高均值数据,然后求得 240 m 的距平场之后对其进行 EOF 分析。值得注意 的是,本分析中的距平不能采用 240 m 均值的距平, 这会造成第一模态对方差的贡献率很大,应按照月 份求得 12 m 的均值,再得到 20 a 中各月距平。

有效波高距平场 EOF 分析的前 5 个模态的方差 贡献率见表 2。其累积方差贡献率达到了 97.42%,其 中前 3 个模态的方差贡献率之和达到 93.91%,因此 本文对前 3 个模态进行了详细分析。

表 2 模态的方差贡献率(前 5 个) Tab. 2 Variance contribution rate of modes (Top 5)

						. /
模态	1	2	3	4	5	总和
贡献率/%	74.74	14.03	5.14	2.31	1.21	97.42

第一模态的方差贡献率为 74.74%。南黄海区 域为其空间分布的大值区域,大致呈 NW-SE 走向 (图 5a),大值区域位于长江口至济州岛连线的中间 区域,这里变化较大的原因主要是台风引起,造成 有效波高值起伏较大。此外,第一空间模态的有效波 高距平场在研究地区显示为正值,表明研究地区的 有效波高的总体变化趋势是同增或同减,表明了该 研究区域波浪变化的一致性。第一模态的时间序列 以1年为单位呈现周期变化,从图6可知,冬季的时 间序列呈现出>0的形态,表明黄渤海的有效波高在 冬季时增大的;春季的时间序列大部分呈现出<0的 形态,表明黄渤海的有效波高在春季是减小的。此模 态的物理意义是黄渤海波浪在风场的作用下,一年 内变化的主要趋势与形式和黄渤海区域的季风密切 相关。

第二模态的方差贡献率为 14.03%, 其空间分布 上在 34°N 附近有一条大致呈 E-W 方向的分界线, 以 南为负值, 以北为正值(图 5b), 表明两个分区的波高 变化呈现出相反的关系, 即 34°N 以北海域波高变化 幅度大, 以南海域波高变化幅度小。据推测, 此模态 的物理意义可能代表有效波高受季风周期性影响的 变化。时间系数在冬季呈现负值, 表明在冬季风增强





Fig. 6 Modal time coefficients of significant wave height anomaly field (Top 3)

的影响下,34°N 以北海域的波浪呈现增大的趋势, 34°N 以南海域有效波高变化除了受冬季风影响之外, 可能还受涌浪分布等影响;夏季的时候时间系数为 正,这个趋势刚好相反(图 6)。

第三模态的方差贡献率为 5.14%, 该模态的空 间分布情况, 从图 5 可知, 黄海深水区为其小值区域, 而渤海以及黄海沿岸区域为其大值区域。从图 6 可 知, 第三模态的时间系数呈现出以年为周期的变化 趋势, 对物理意义进行分析推断可知, 此模态的等 值线趋势是沿海岸或海底地形进行分布的, 这可能 表示地形对有效波高的某种影响。但该模态仅解释 了 5.14%的方差贡献率, 所以难以排除是一些较小 的物理过程对波浪变化的影响。

### 2.4 特征点波浪特征

以 A—D 为代表点,本文对 20 a 的黄渤海区域波浪特征展开具体分析,其中 4 个点的波浪玫瑰图见图 7。

A和B分别位于渤海海域的南部和北部,代表了

渤海不同海区的波浪特征。由图 5 可知 A 点波浪以 NNE 向为主,其频率为 17.6%,其次为 S 向,频率为 14.8%,有效波高 2.5 m 以上的大浪主要集中在 NNE 和 NE 向。B 点波浪主浪向为 NE 向,其频率可达 19.0%,次浪向为 S 和 SSW 向,二者相差不多,分别 为 13.5%和 13.2%,有效波高 2.5 m 以上的大浪仅 NE 向存在,相比 A 点波浪而言,这主要与冬季北风风区 长度有关,因此 A 点有效波高最大值高于 B 点。

*C* 点和 *D* 点分别位于北黄海和南黄海,其中 *C* 点波浪主浪向为 S 向,次浪向为 SSE 向,分别为 16.7%和 12.6%。有效波高大于 2.5 m 的大浪分布在 N、NWW 和 SE 向。*D* 点波浪的主浪向为 SSE 向,频 率为 14.3%,次浪向为 N 向,频率为 13.0%;有效波高大于 2.5 m 的大浪分布 N、SSE 和 SE 向。

与前人研究成果对比,本文对 20 a 波浪特征展开 分析,这在之前的研究中很少有人提及。根据特征点统 计结果,可以得到黄渤海海域主浪向、大浪分布等特征, 为海洋工程建设、海洋资源开发等提供一定参考。 研究论文 · Linn → ARTICLE



Fig. 7 Wave rose in representative points (2000–2019)

# 3 总结

前人研究中, 黄渤海海浪特征多集中在时空领 域研究, 例如波高周期的年均、季节时空变化等, 本 文采用 ECMWF 的 ERA5 再分析波浪数据, 首次利 用 EOF 分解的方法, 对黄渤海近 20 a 的波浪展开主 成分分析, 探讨黄渤海海浪特征表征的主次要因素, 从而为黄渤海海浪的特征分析、变化预测等提供一 种新思路。同时, 利用该数据集, 选取 4 个代表点, 获得波浪统计结果, 主要结论如下:

1) 黄渤海海区波浪具有明显的季节性,冬季有效波高均值大于其他季节,这与冬季风有直接联系。 其中,渤海区域有效波高呈现出周边小,中间大的特点,这与渤海的水深有一定联系;黄海海域有效 波高 H<sub>s</sub>呈现由南向北降低的趋势,最大值出现在长 江口外海域,冬季均值可达 1.7 m。

2) 黄渤海区域黄渤海平均周期 T 的季节分布类 似于有效波高的季节均值分布。渤海仅秋冬季 T 的 均值存在大于 4 s 的区域;黄海海域 T 的季节分布也 呈现由南向北递减的趋势,其中长江口外海区域秋 冬季 T 的季节均值可达 6 s,北黄海海区全年均值不 足 5 s。

3)有效波高距平场 EOF 分解结果显示,第一模态的方差贡献率为 74.74%,反映了波浪变化的主要形态,其时间系数为正,表明有效波高的变化趋势具有一致性,整个区域大致上是同增大或同减小;第二模态的方差贡献率为 14.03%,反映了季风的季节转换对有效波高的影响;第三模态的方差贡献率为 5.14%,其空间模态的等值线分布有和岸线或地形有贴近的趋势,代表的可能是地形的变化对有效

波高变化的影响。值得注意的是,本研究中对不同模态代表的意义可能并不具有空间的普适性,其具体含义待进一步研究。

4) 4 个代表点显示,整个渤海地区的常浪向为 NNE-NE,强浪向以 NE和 NNE 为主;黄海海域的常 浪向为 SSE-SE 向,强浪向以 N和 SSE 为主。这主要 是由于冬季风的风速大且持续时间长造成的。 该统 计结果,可为海洋工程建设提供一定参考。

#### 参考文献:

- 李燕. 第三代浅水波浪数值预报模式及其在黄渤海 域的应用[J]. 气象科学, 2006(3): 3265-3271.
   LI Yan. The SWAN model and its application in Yellow and Bohai Sea[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2006(3): 3265-3271.
- [2] 任惠茹,李国胜,崔林林,等.近 60 年来渤海海域波候变化及其与东亚环流的联系[J]. 气候与环境研究,2016,21(4):490-502.
   REN Huiru, LI Guosheng, CUI Linlin, et al. Wave climate

changes in Bohai Sea related to the East Asian circulation oscillations over the last sixty years[J]. Climatic and Environmental Research, 2016, 21(4): 490-502.

- [3] 姜波,丁杰,武贺,等. 渤海、黄海、东海波浪能资源 评估[J]. 太阳能学报, 2017, 38(6): 1711-1716.
  JIANG Bo, DING Jie, WU He, et al. Wave energy resource assessment along Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38(6): 1711-1716.
- [4] 徐佳丽,时健,张弛,等.近40年中国近海波浪数据库的建立及极值分析[J].海洋工程,2019,37(6):94-103.
  XU Lijia, SHI Jian, ZHANG Chi, et al. Establishment of China offshore wave database and analysis of wave extreme values in recent 40 years[J]. Ocean Engineering, 2019, 37(6): 94-103.
- [5] 齐义泉,施平,王静.黄海中部风、浪特征的初步分析[J].海洋通报, 1997, 16(6): 1-6.
  QI Yiquan, SHI Ping, WANG Jing. A preliminary study on characteristics of wind and wave over the central area of Yellow Sea[J]. Marine Science Bulletin, 1997, 16(6): 1-6.
- [6] 陈红霞,华锋,袁业立.中国近海及临近海域海浪的季节特征及其时间变化[J].海洋科学进展,2006,24(4):407-414.
  CHEN Hongxia, HUA Feng, YUAN Yeli. Seasonal characteristics and temporal variations of ocean wave in the chinese offshore waters and adjacent sea areas[J]. Advances in Marine Science, 2006, 24(4): 407-414.
- [7] 王广运,赵进平,宋如轼.利用卫星微波遥感资料推 算波浪极值[J].港工技术,2000(1):11-18.

WANG Guangyun, ZHAO Jinping, SONG Rushi. Seawave extreme estimation using satellite macro-wave remote-sense data[J]. Port Engineering Technology, 2000(1): 11-18.

- [8] SHI H, SUN J, YOU Z, et al. The assessment of ERAinterim wave data in the China Sea[J]. Desalination and Water Treatment, 2020, 187: 56-62.
- [9] 谢冬梅,陈永平,张长宽.东中国海波浪分布特征研究[J].水运工程,2015(2):189-196.
  XIE Dongmei, CHEN Yongping, ZHANG Changkuan. On wave distribution of the East China Sea[J]. Port & Waterway Engineering, 2015(2): 189-196.
- [10] 陈国光, 翟方国, 李培良, 等. 黄海海浪季节变化的数值模拟研究[J]. 海洋科学, 2016, 40(11): 155-168.
  CHEN Guoguang, ZHAI Fangguo, LI Peiliang, et al. Numerical study of wave height seasonality in the Yellow Sea[J]. Marine Sciences, 2016, 40(11): 155-168.
- [11] DEE D P, UPPALA S M, SIMMONS A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137: 553-597.
- [12] HERSBACH H, DEE D. ERA5 reanalysis is in production[N]. ECMWF Newsletter, p 147. https://www. ecmwf. int/en/newsletter/147/news/era5-reanalysis-production. Accessed 11 Dec 2018.
- [13] MENG X, GUO J, HAN Y. Preliminarily assessment of ERA5 reanalysis data[J]. Journal of Marine Meteorology, 38(1): 91-99.
- [14] CZERNECKI B, TASZAREK M, MAROSZ M, et al. Application of machine learning to large hail prediction: the importance of radar reflectivity, lightning occurrence and convective parameters derived from ERA5[J]. Atmospheric Research, 2019, 227: 249-262.
- [15] NASEEF T M, KUMAR V S. Influence of tropical cyclones on the 100-year return period wave height—A study based on 39 year long ERA5 reanalysis data[J]. International Journal of Climatology, 2020, 40(4): 2106-2116.
- [16] NASEEF T M, KUMAR V S. Climatology and trends of the Indian Ocean surface waves based on 39-year long ERA5 reanalysis data[J]. International Journal of Climatology, 2020, 40(2): 979-1006.
- [17] BRUNO M F, MOLFETTA M G, TOTARO V, et al. Performance assessment of ERA5 wave data in a swell dominated Region[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(3): 1-19.
- [18] PEARSON S. On lines and plans of closest fit to system of points in space philosophical[J] Philosophical Magazine, 1902, 2(6): 559-572.
- [19] 韩树宗, 董杨杨, 张水平, 等. 南海波浪时空变化特 征研究[J]. 海洋湖沼通报, 2020(2): 1-9.

研究论文 · ┃:□□□ ARTICLE

HAN Shuzong, DONG Yangyang, ZHANG Shuiping, et al. Study of the temporal and spatial variations of wave

in South China Sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020(2): 1-9.

# Spatial and temporal variation characteristics of the waves in the Yellow Sea and Bohai Sea

QIU Wen-bo<sup>1</sup>, LI Guan-yu<sup>1</sup>, XU Jun-chen<sup>1</sup>, HU Yi-qun<sup>1</sup>, WANG Ya-ding<sup>1</sup>, SHI Hong-yuan<sup>2</sup>

(1. Nation Ocean Technology Center, Tianjin 300111, China; 2. School of Civil Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China)

**Received:** Nov. 9, 2020 **Key words:** wave; wave characteristics; EOF; Yellow and Bohai Sea

Abstract: Herein, the waves in the Yellow Sea and Bohai Sea in China between 2000 and 2019 were examined using the ECMWF Reanalysis V5 (ERA5) data set. It was found that: (1) An evident seasonality is observed in the waves in the Yellow Sea and Bohai Sea areas. In the Bohai Sea, the significant wave height ( $H_s$ ) shows characteristics of a smaller surrounding area and a larger middle area. However, the  $H_s$  in the Yellow Sea tends to decrease from south to north. The mean value of  $H_s$  in winter is higher than those in other seasons; (2) The seasonal distribution of the mean period (T) is similar to the seasonal mean distribution of  $H_s$ . The mean value of T in the Bohai Sea is greater than 4 s only in autumn and winter. The seasonal distribution of T in the Yellow Sea also shows a decreasing trend from south to north, and the seasonal average of T in autumn and winter in the coastal area off the Yangtze River estuary can reach 6 s; (3) The EOF decomposition results of the  $H_s$  anomaly field show that the first mode indicates the obvious seasonal characteristics of the wave changes, the second mode reflects the effect of seasonal changes of a monsoon on  $H_s$ , and the third mode may represent the effect of the change in terrain on the change in  $H_s$ ; and (4) Results of the statistical analysis of the representative points show that the usual wave direction of the whole Bohai Sea area is SSE–SE and the strong wave direction is mainly N and SSE.

(本文编辑: 赵卫红)