

# 渤海湾中部波浪特征分析

祁祥礼<sup>1</sup>, 郑向阳<sup>2\*</sup>, 谌业良<sup>1</sup>

(1. 天津水运工程勘察设计院 天津市水运工程测绘技术重点实验室, 天津 300456;  
2. 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003)

**摘 要:** 文章利用渤海湾中部一测波站一年的波浪观测资料, 分析该处波浪的特征, 包括波高、波周期、波向的年统计特征, 季节变化规律, 不同级别的波浪出现频率等。研究发现此位置处出现较高波浪的频率较低, 较大的波浪多出现于秋季和冬季, 东北向波浪占据优势。文章还利用 ECMWF 全球风场数据分析了大浪与当地风的关系, 发现在大浪期间波高与风速、波向与风向有较强的相关性, 文章利用线性回归定量给出了不同风向风速和有效波高的关系。

**关键词:** 渤海湾; 波浪特征; 季节变化; 风-波浪相关性。

中图分类号: TV 143

文献标识码: A

文章编号: 1005-8443(2018)03-0288-06

渤海湾位于渤海西部, 是一个半封闭海湾, 东西长约 110 Km, 南北长约 90 Km, 在东部与渤海中部海域相连。渤海湾有丰富的油气资源, 西岸是京津冀经济区, 分布着大量的港口、工业区、能源部门。波浪是近海水动力的主要过程, 深入了解某一海区的波浪特征对于保护沿岸基础设施、降低海洋自然灾害有重要的作用。多个海区的波浪观测资料被用于波浪特征分析, 如大连海域<sup>[1]</sup>、台州海域<sup>[2]</sup>、以色列 Ashdod 港<sup>[3]</sup>等。本文利用渤海中部一年的波浪观测数据, 分析此处波浪特征和季节变化规律, 同时探讨大浪期间风与波浪的关系。

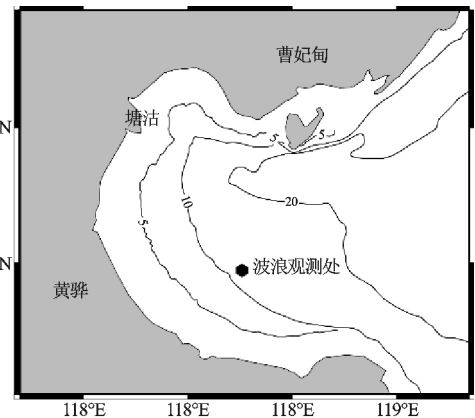


图 1 波浪观测位置示意图

## 1 数据来源

2014 年 3 月到 2015 年 2 月, 在渤海中部(见图 1)放置声学多普勒波浪剖面流速仪(俗称“浪龙”), 观测一年的波浪数据, 包括波高、波向和波周期, 数据时间间隔为 1 h。该位置坐标是 38.471°N, 118.26°E, 水深 13.5 m。为了探讨波浪与当地风的关系, 本文使用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的全球风场数据 ERA-Interim<sup>[4]</sup>。风场数据空间分辨率为 0.125°, 时间间隔为 3 h。

## 2 波浪特征分析

### 2.1 波浪一年内总体特征

2014 年 3 月到 2015 年 2 月 1 a 时间内, 观测位置处最大波高为 5.46 m, 发生在 2014 年 9 月 29 日 17

收稿日期: 2017-06-01; 修回日期: 2017-12-10

基金资助: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目(TKS160216, TKS170106, TKS170223, TKS180405); 天津市科技计划创新平台与人才专项(16PTSJJC00190)

作者简介: 祁祥礼(1986-), 男, 江苏省人, 工程师, 主要从事海洋水文测量与分析研究。

**Biography:** Qi Xiang-li(1986-), male engineer.

\* 通讯作者: 郑向阳(1986-), 男, 山东省人, 博士, 主要从事近岸水动力模型研究。E-mail: xyzheng@yic.ac.cn

点最大波高时波周期为 8.5 s 波向为 29°。最大有效波高 3.36 m 发生在 2014 年 10 月 26 日 11 点 此时波周期为 6.5 s 波向(N 向为 0° 顺时针为正) 为 30°。

图 2 显示了一年内基于有效波高和波向的波浪玫瑰图。常浪向为 E 向 频率为 13%; 次常浪向为 NE 向; NNE 向和 ESE 向也有相对较高的频率 接近 10%。从图 2 可以看出一年内大部分时间波浪来自外海, 并且自外海传入的波浪也比自西向东传播的波高大。该观测点位于渤海湾中部, 西侧为陆地, 东侧面对较为宽阔的渤海中部海区, 外海产生较强的波浪自东向西传入渤海湾, 造成了西向波浪占优的特点。由图 1 可以看出等深线为西北—东南走向, 波浪折射作用使得东北方向的波浪具有较大的频率。

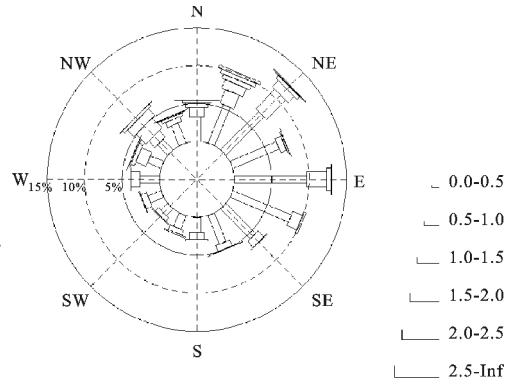


图 2 基于一年有效波高和波向的波浪玫瑰图

Fig. 2 Wave rose diagram of wave height and wave direction over one year

孙连成<sup>[4]</sup>分析渤海湾西部海域一处多年的波浪观测数据, 观测点位于本文观测点西偏北约 50 km, 同样西侧为陆地, 东侧为渤海湾入口, 等深线的走势也较为接近。常浪向与本文上述类似, 常浪向和强浪向都集中在 N 向和 E 向之间。分析结果中 SW 向的波浪出现的频率也较高, 而本研究中发现 NW 向波浪的频率明显高于 SW, 原因是本文的测波处西北方向风区较大, 也与当年特定的气候特征有关。

2.2 波浪季节变化特征

表 1 展示了根据有效波高划分的各级波浪的出现频率, 分级标准取自文献 [6]。在不同季节中, 小于 0.5 米的小浪出现频率均是最高, 而大浪频率在全年出现的频率仅为 2%, 大于 4 m 的巨浪在该地区没有出现。在春季和夏季小浪频率尤其高, 在秋季和冬季出现了频率相对较高的中浪, 大浪仅出现在秋季和冬季。

表 1 全年以及各季度按照有效波高(m)的波浪分级以及各级的出现频率(%)

Tab. 1 Occurrence frequency of different wave height levels in the four seasons and over the whole year

波浪分级	春季 (3~5月)	夏季 (6~8月)	秋季 (9~11月)	冬季 (12~次年2月)	全年
小浪(0.0~0.5)	71.2	81.1	55.3	54.9	65.5
轻浪(0.5~1.25)	25.1	18.5	34.2	29.6	26.9
中浪(1.25~2.5)	3.7	0.4	8.9	15.1	7.1
大浪(2.5~4.0)	0.0	0.0	1.6	0.4	0.5
巨浪(>4.0)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

表 2 全年以及各季度按照有效波周期的波浪分级以及各级的出现频率

Tab. 2 Occurrence frequency of different wave period levels in the four seasons and over the whole year %

波浪分级(s)	春	夏	秋	冬	全年
0~3	39.2	46.0	26.2	32.5	35.9
3~4	39.4	42.7	40.8	30.5	38.3
4~5	17.7	9.6	14.5	24.4	16.5
5~6	3.5	1.7	11.7	10.7	7.0
>6	0.2	0.0	6.8	1.9	2.3

表 2 给出了不同有效波周期的波浪在四季和全年出现的频率。从全年来看, 有效波周期小于 5 s 的波浪占绝对优势, 频率达 90%, 周期高于 6 s 的波浪仅占 2.3%。与有效波高的频率类似, 在秋季和冬季, 长周期波浪出现的频率要远大于春季和夏季。这与秋、冬季的风速较强、持续时间较长、波浪成长时间较长有关系。宫英龙等<sup>[7]</sup>分析了江苏近海的波浪分布特征, 江苏近海与渤海湾西部的风场季节模式类似, 波周期也同样表现出秋冬高、春夏低的特点。

将波浪观测处的有效波高数据和此处风速数据进行月平均, 获得了 2014 年 3 月到 2015 年 2 月期间各

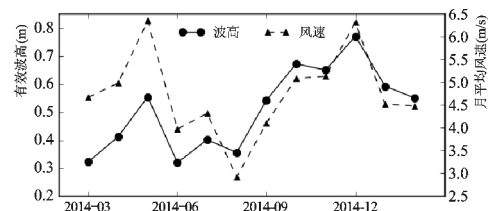


图 3 月平均有效波高的月度变化 (2014-03~2015-02)

Fig. 3 Variations of the month averaged significant wave height ( from March 2014 to February 2015)

月的平均有效波高和平均风速 如图 3 所示。各月的月平均波高有较大差异,最高值出现在 12 月,有效波高为 0.77 m,最低值出现在 6 月,有效波高为 0.32 m。有效波高的年变化总体呈现出春夏低、秋冬高的特点,与月平均风速变化趋势完全一致,说明风速大小直接影响波高的变化。9 月到次年 2 月有效波高平均值大于 0.5 m,3 月到 8 月有效波高大部分时间低于 0.4 m,但 5 月是一个例外,5 月份的平均有效波高为 0.56 m,远高于临近的 4 月和 6 月。

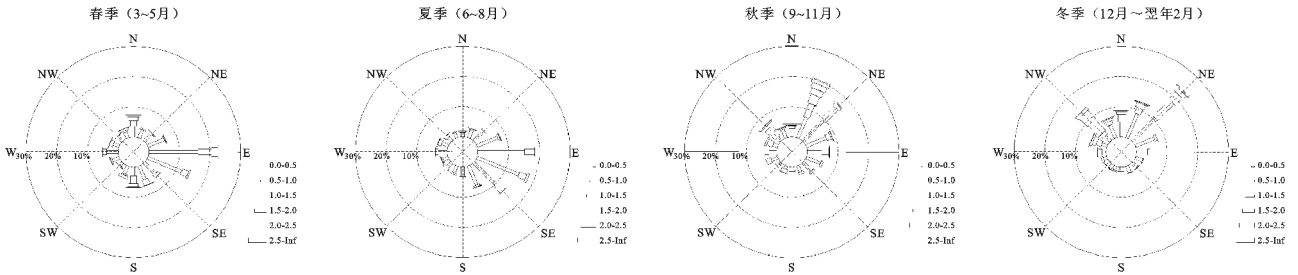


图 4 不同季节波浪玫瑰图

Fig. 4 Wave rose diagram of wave height and wave direction in different seasons

图 4 展示了春、夏、秋、冬四个季节的波浪玫瑰图。波向有较为明显的季节变化,春季(3~5 月)常浪向为 E 向,强浪向为 N 向和 S 向;夏季(6~8 月)E 向和 ESE 向是出现频率最高,最大波高时波向为 ESE 向;而秋季(9~11 月)NNE 向为常浪向,NE 向为次常浪向,冬季(12 月到次年 2 月)NE 向占有较大优势,同时 NW 向的波浪相比于其他季节也显著增多。

### 2.3 大浪(有效波高 2.5 m 以上)期间波浪特征统计

在波浪等级中,有效波高 2.5 m 以上的海浪被称为大浪,大浪对于海上交通、海岸设施等有极大的破坏力,表 3 列出了有效波高大于 2.5 m 的 6 次大浪过程,包括各次事件的起止时间、平均有效波高和波向。从表 3 中可以看出,在观测期中,大浪发生的季节集中在秋季和冬季,此时渤海区域盛行偏北风,风速较其他季节强。大部分的大浪平均方向为 NNE 向,即从渤海湾外向湾内方向传播,只有在 2014 年 11 月 30 日的这一次大浪浪事件中,波向为 WNW 向,波浪由湾内向湾外传播,与其他 5 次大浪过程明显不同。

表 3 观测时段内有效波高大于 2.5 m 的大浪过程

Tab. 3 Large wave event (significant wave height larger than 2.5 m)

起始时间	终止时间	时段内平均有效波高(m)	波向范围(度)
2014-09-29 15:00	2014-09-30 04:00	2.71	25~32
2014-10-12 10:00	2014-10-12 10:00	2.53	4
2014-10-20 21:00	2014-10-21 11:00	2.86	26~31
2014-10-26 10:00	2014-10-26 13:00	3.10	29~31
2014-11-30 23:00	2014-12-01 00:00	2.61	308~313
2015-02-07 09:00	2015-02-07 15:00	2.88	38~42

### 2.4 大浪期间波浪成长与当地风的关系

为了探讨大浪时波浪与风的关系,本文从表 3 中选取了两次典型的大浪过程进行分析,分别是 2014 年 10 月 20 日和 11 月 30 日,代表了东、西两种波向的大浪过程。为了更完整地研究波浪成长过程,将大浪发生的前后各一天也包括在内。风数据来源于 ECMWF 全球风场数据,从 ECMWF 数据中选取最靠近波浪观测点的一个网格点进行分析。

图 5 和图 6 分别表示这两次大浪过程中波高、波向和风速、风向的对比,下面是对这两次大浪过程的分析。

在第一次大浪过程中的 10 月 20 日 6 点左右,风速开始增大,风向由偏南风转向偏北风,波高并没有随着风速的增加而迅速增长,而是有约 8 h 的滞后,直到 10 月 20 日 15 点有效波高才迅速增长,20 点左右有效波高就从不不到 0.5 m 增长到接近 3 m,之后随着风速的减弱,波高也随之减小,在大浪期间有效波高和风速的相关性可达 0.74,具有较强的相关性。从图 5-b 可以看出在大风期间(10 月 20 日 22 时到 22 日 0 时),波向和风向都指向西南方向,具有较高的一致性,但风向与波向并不完全相同,波向在风向的左侧;在风速较小时,波向与风速的相关性不明显,波向一直保持东北方向。

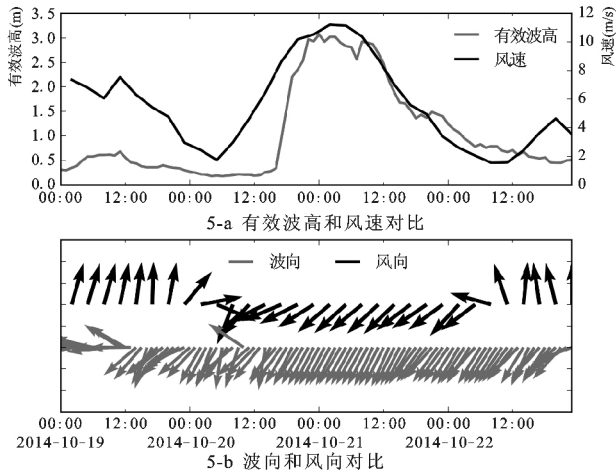


图5 2014-10-21日大浪期间风-浪关系。

Fig. 5 wind-wave during the large wave event on Oct. 21 2014.

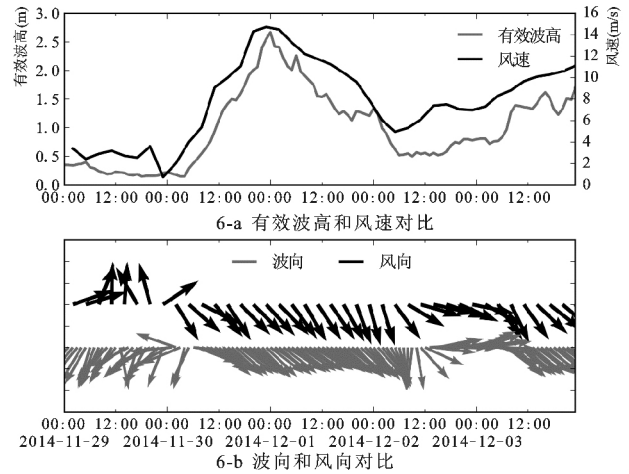


图6 2014-11-30日大浪期间风-浪关系。

Fig. 6 wind-wave during the large wave event on Nov. 30 2014.

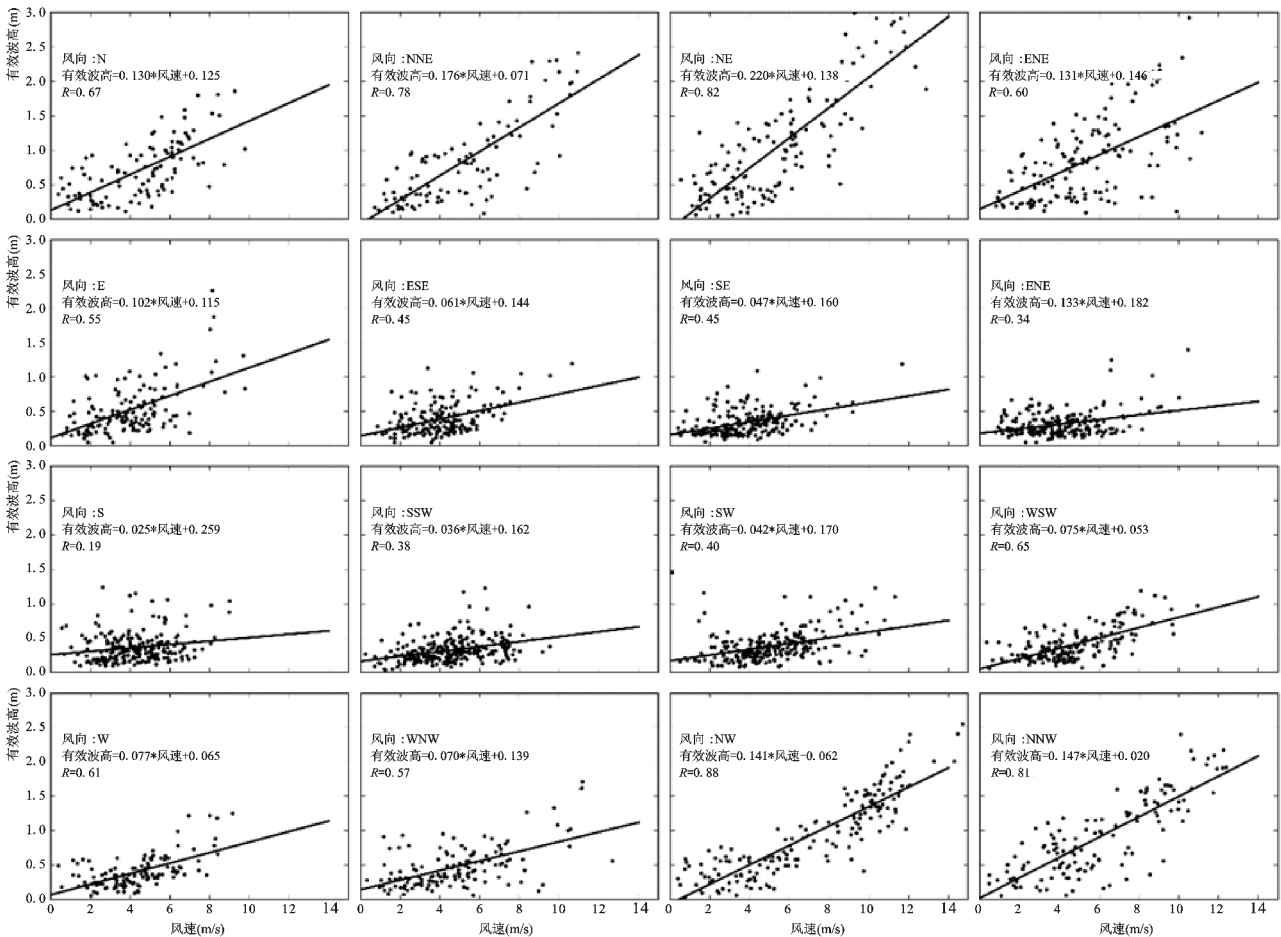


图7 在不同风向下风速 (ECMWF) 和有效波高 (观测) 的关系

注: 散点表示风速和波高数据, 直线表示线性回归结果。

Fig. 7 The relation between wind speed (ECMWF) and significant wave height (observed) in 16 wind directions

在第二次大浪过程中, 波高与风速同样有很高的相关性, 二者相关系数高达 0.91。但在此次事件中, 强风的风向是西北向, 开始于 11 月 30 日 0 点左右, 浪向随之由东北转向西北, 并一直保持到风速减弱到 6 m/s 时, 之后的风速提升到 8 m/s 左右, 浪向也随着风向转到西向和西偏南向。

综合以上两次大风过程中波高和波向的变化, 可以看出在风速较小 (< 6 m/s) 时, 波高也较小, 波向与

当地风向的关系不大,主要受外海传入的波浪影响,为偏东向;当风速逐渐变大时,波高也逐渐增大,波向开始与当地风向趋同,当地风对于波浪成长的作用随着风速的增大而增强。另外,偏东风引起的波高要大于偏西风引起的波高,在事件1中,最大风速为11 m/s,最大有效波高为3 m,而在大浪过程2中,当地风速为15 m/s,所引起的最大有效波高为2.5 m/s,小于事件1中的最大有效波高。这是由于偏东风的风区比偏西风的风区大很多,充分成长后的波高要大,同时这也是强浪向为NNE向的原因。所以此区域的西向强风应该引起特别关注。

### 2.5 波高预测

波浪的成长与风速大小有直接关系,前文的分析可以看出大风期间有效波高与风速有较高的相关性。本节利用2014年3月到2015年2月一年的有效波高观测数据和对应的ECMWF风速和风向数据定量研究风速和有效波高的关系,探讨能否利用预报风场对波高做合理的预报。波浪的成长区域与风区长度和风力大小,在近岸区域,风向影响着风区长度,参照图2波浪玫瑰图中的方向,将风向划分为同样的16个方向,取各风向对应的风速和同一时刻的有效波高数据,利用线性回归,研究在一定风向下风速和有效波高的关系,获得了风速和有效波高的线性关系,如图7所示。在所有16个方向上,有效波高都随着风速的增大而增大。二者的相关性在不同风向上有较大差异,在NNE、NE、NW和NNW向上相关系数超过或者非常接近0.8,在这四个方向上有较高的风速;而偏南向风速与有效波高的相关性较小,偏南向风速大多数情况下都在6 m/s以下,本地风浪的成分相对较少,波高也受外海传入涌浪的影响。从图中可以看出,本海区风速较小时(6 m/s以下),波高多在0.5 m以下,风速较大时,可以根据风向,利用图7中的线性关系式估计有效波高。

## 3 结论

本文基于渤海湾中部某处2014年3月到2015年2月一年的波浪观测数据(波高、波向和波周期)和ECMWF全球模拟风场数据,分析此处的波浪特征。在这一年期间,该点处最大有效波高为3.36 m,最大有效波周期为8.05 s,均发生于秋季。受风场的季节变化影响,波浪特征的季节变化明显,春季和夏季的平均波高小于秋季和冬季,发生大浪的频率也远小于秋季和冬季。在观测位置处,各季节的常浪向有所差别,春季和夏季E向波浪占优势,而秋季和冬季NE和ENE向波浪发生频率更高,与秋冬季节多偏北风有关系。本区的大浪波向也多位于N向和NE向之间,在大浪发生期间,波高和当地风速有较高的相关性,波向和风向也表现出很强的一致性。本文给出了不同风向情况下风速和有效波高的线性关系,可以直接利用预报风场对波高做出合理的预报。

### 参考文献:

- [1]李孟国,肖辉,张义丰.大连海域波浪特征研究[J].水运工程,2013(5):19-25.  
LI M G, XIAO H, ZHANG Y F. Wave characteristics of Dalian sea area[J]. Port & waterway engineering, 2013(5):19-25.
- [2]唐东跃,张沈阳,王璟,等.台州湾近海海域波浪要素特征分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(1):71-75.  
TANG D Y, ZHANG S Y, WANG J, et al. Wave characteristics in coastal area of Taizhou Bay[J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2017, 15(1):71-75.
- [3]赵丽萍,冯卫兵,曹海锦. Ashdod港风浪特性研究[J].水道港口,2017(5):470-476.  
ZHAO L P, FENG W B, CAO H J. Test of energy dissipation and pavements stability in out fall of power plant under the action of wave and current [J]. Journal of waterway and harbor, 2017, 38(5):470-476.
- [4]Berrisford P, Dee D, Poli P, et al. The ERA-interim archive: Version 2.0 ERA Report Series[R]. UK: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2011.
- [5]孙连成.渤海湾西部海域波浪特征分析[J].海洋科学进展,1991(3):50-58.  
SUN L C. Analysis of wave characteristics of the west offshore area of the Bohai Bay[J]. Advances in Marine Science, 1991(3):50-58.
- [6]杨忠良,叶钦,施伟勇.基于AWAC观测在象山海域自然海况条件下波浪特征及波浪能统计分析[C]//国家海洋技术中心.第二届中国海洋可再生能源发展年会暨论坛论文集.广州:国家海洋局,2013.
- [7]宫英龙,张亮亮,范飞.江苏海域波浪分布特征研究[J].水运工程,2014(8):33-40.

GONG Y L, ZHANG L L, FAN F. On distribution characteristics of wave climate in Jiangsu Sea [J]. Port & waterway engineering, 2014( 8) : 33 - 40.

## Analysis of wave characteristic in the middle part of the Bohai Bay

QI Xiang-li<sup>1</sup>, ZHENG Xiang-yang<sup>2\*</sup>, SHEN Ye-liang<sup>1</sup>

( 1. Tianjin Key Laboratory of Surveying and Mapping for Water Transport Engineering, Tianjin Survey and Design Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China; 2. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

**Abstract:** Wave observation data over one year was obtained from a wave gauge deployed in the middle of the Bohai Bay. The data was used to analyze wave characteristic, including yearly characteristic of wave height, wave period and wave direction, seasonal variation and occurrence frequency of different wave levels. It is found that the occurrence frequency of large wave is low in a year. Such occurrence frequency is higher in autumn and winter than that in spring and summer due to the larger wind speed in autumn and winter. The dominant wave direction at this location is NE. The relations between large wave and local wind were also investigated using wave measurement data and wind data provided by ECMWF. It is seen that wave height and wave direction are highly consistent with wind speed and direction of local wind. Linear regression was used to estimate the relation between wind speed and significant wave height in different wind directions.

**Key words:** Bohai Bay; wave characteristic; seasonal variation; wind-wave correlation

( 上接第 263 页)

[5]刘涛,温春鹏. 黄骅港综合港区、散货港区 20 万吨级航道改造提升工程波浪潮流泥沙数学模型试验研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2016.

## Hydrodynamic numerical simulation study on the deepwater channel of Huanghua port

ZUO Zhi-gang

( Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

**Abstract:** The numerical simulation method was used to study the tidal power of the 20,000-ton channel engineering in Huanghua Port, the maximum flow rate and the maximum cross flow after the implementation of the project were analyzed to master the impact of the project implementation on the surrounding sea. The study shows that: (1) Implementation of the scheme did not change the trend of the large-scale ocean currents, and the changes occurred in adjacent waters of the project; (2) After the upgrade of the waterway, the maximum velocity near the entrance of -6 m is 0.92 m/s, the vertical average is 0.86 m/s, and the maximum velocity (vertical average) within the channel is between 0.25 ~ 0.86 m/s, the maximum transverse flow in the channel is located in the northward turning section of the channel, also, there is a large cross flow near the gate of the -6 m.

**Key words:** comprehensive port area of Huanghua port; tidal current; ship channel; numerical simulation