



## 潍坊港海域波浪数值模拟\*

董祥科, 王智峰, 董胜, 吴昊  
(中国海洋大学工程学院, 山东青岛266100)

**摘要:** 采用 WRF 风场模式和 SWAN 海浪模式, 分别进行渤海湾的风场和波浪场后报计算, 并以波浪气象浮标实测数据对风场和波浪场进行验证, 效果良好。以后报结果为样本, 采用 P-III 型拟合方法, 对莱州湾湾口-15 m 等深线处的风场与波浪进行统计分析, 得到 50 a 一遇的设计要素值。运行 MIKE21 SW 模块建立潍坊港海域的波浪数值模型, 进行 50 a 一遇重现期下的波浪浅水传播计算。模拟结果表明, 该模型适用于模拟潍坊港附近海域的波浪传播过程, 计算结果可为港区的码头、沙堤和航道等的设计和建设提供参考。

**关键词:** 潍坊港; 风场; 波浪后报; 波浪计算; 有效波高分布

**中图分类号:** TV139.2; U 61

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2016)06-0018-07

### Numerical simulation of wave in Weifang port

DONG Xiang-ke, WANG Zhi-feng, DONG Sheng, WU Hao

(College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** The WRF wind model and SWAN wave model are used to calculate separately the wind and wave fields of Bohai bay, which are in good agreement with the measured data of a wave buoy. With the sample of the results, the P-III curve is used to analyze the characteristics of wind and wave with a return period of 50 years at -15 m depth contour in Laizhou bay. MIKE21 SW model is used to establish a numerical model of wave for Weifang port and calculate the wave propagation with a return period of 50 years. The results show that the model is suitable to simulate the wave propagation in Weifang port, and can provide a scientific reference to the design and construction of the pier, dike and channel in the port.

**Keywords:** Weifang port; wind field; wave hindcasting; wave calculation; distribution of significant wave height

推算外海波浪要素是港口工程设计中重要的前期工作, 在实际工程设计中, 因缺乏长期波浪观测资料, 通常采用风资料推算工程海域的外海波浪要素, 再进而推算浅水区的设计波浪要素<sup>[1]</sup>。国内外学者分别基于实测资料分析、物理模型试验和波浪数学模型等对近岸波浪计算做了大量的工作。由于实测资料的缺乏及物理模型存在一定的比尺问题, 波浪数学模型, 尤其是第三代海浪

模式如 WAM、WW3、SWAN、MIKE21 SW 等, 因其对波浪生成和耗散物理机制的准确描述, 以传播及高效、经济及可重复利用等优点, 被广泛应用于海洋、近岸的风浪预报、波浪后报和波浪传播等研究中。

在波浪后报及重现期研究方面, Qiao<sup>[2]</sup> 利用 LAGFD 模式对北部湾海域的海面风场和波浪场进行数值计算, 推算了不同重现期的风速和波要素

**收稿日期:** 2016-01-07

\***基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51279186, 51479813, 51509226), 中央高校基本科研业务费专项项目 (201513040)

**作者简介:** 董祥科 (1993—), 男, 在读硕士, 研究方向为港口、海岸工程与海洋环境的相互作用。

分布;李绍武<sup>[3]</sup>和石小翠<sup>[4]</sup>分别运用 SWAN 模型对山东半岛海域进行波浪后报及不同重现期下的设计波浪要素推算。在波浪的传播过程研究方面,李明惺<sup>[5]</sup>应用 WW3 模型进行了台风浪的数值模拟试验研究,较好地模拟了东中国海的台风浪过程;孔令双<sup>[6]</sup>和邱桔斐<sup>[7]</sup>采用 MIKE21 SW 波浪谱模型分别对长江口海域在两个不同台风期间的波浪场进行了模拟计算,与实测值符合良好;谭凤<sup>[8]</sup>基于 WRF-SWAN 模式较好地模拟了韦帕台风过程中海浪的演化和传播;林毅辉<sup>[9]</sup>和王道龙<sup>[10]</sup>采用 SWAN 海浪模式分别对厦门湾和辽东湾进行风浪场的数值模拟;王卫远<sup>[11]</sup>和廖振华<sup>[12]</sup>则借助 MIKE21 SW 模块分别研究了杭州湾和湄洲湾海域的波浪分布特征,结果表明该模块适用于描述波浪的近岸传播。

潍坊港中港区位于莱州湾底部偏西处,其具体地理位置见图 1。整个渤海海域常年受东亚季风所控制,波浪以风浪为主,产生莱州湾水域大浪的主要气象条件是夏季的台风和冬季的寒潮大风。该海域常风向为 SSE 向、强风向为 NE 向、次强风向为 NNE 向;常浪向为 N 向、次浪向为 NNE 向、强浪向为 NNE 向<sup>[13]</sup>。该海域累年平均风速为 4.1 m/s,自秋末至初春盛行 NW—NE 方向的寒潮大风,海面出现大浪,实测最大波高为 3.8 m,将对港口安全造成严重影响,因此推算极端条件下波浪的浅水传播过程对于港区安全和港工建筑物的设计等有着十分重要的意义。

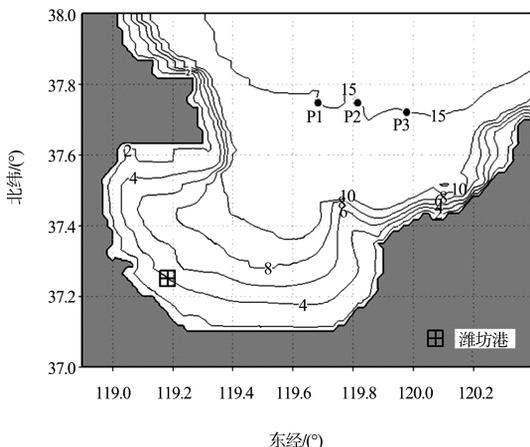


图 1 潍坊港地理位置

本文以潍坊港中港区浅水波浪计算的数学模型试验为例,采用 WRF 风场模式和 SWAN 海浪模式,计算得到了渤海湾 20 a 的海面风场和波浪场。再以后报结果为样本,采用 P-III 型拟合方法,对莱州湾湾口-15 m 等深线处的外海设计风速和波浪要素进行重现期推算。以推算结果为边界条件,利用 MIKE21 SW 模型进行波浪的浅水传播计算,得到了在 50 a 一遇重现期,3 种不同特征水位下的港域波浪分布情况,为潍坊港的码头、沙堤和航道等的设计和建设提供了科学参考。

## 1 风场及波浪场后报

### 1.1 风场模式 WRF

WRF 模式(weather research and forecasting)是由美国大气研究中心(NCAR)、美国大气海洋局(NOAA)等研究部门共同参与开发研究的新一代中尺度大气模式,在全球得到了广泛的研究和应用。WRF 模式是一种完全可压非静力模式,采用 Arakawa C 网格,集数值天气预报、大气模拟及数据同化于一体,能够更好地改善对中尺度天气的模拟和预报<sup>[14]</sup>。

采用 WRF 模式进行风场的模拟计算,其背景场为美国环境预报中心 NCEP 历史再分析天气资料,同时同化了其他各种观测资料。计算区域采用双向网格嵌套技术,见图 2。其中 D1 区域用于模拟影响整个中国东部和北部区域的天气系统,水平分辨率为 30 km,时间步长为 180 s;而 D2 区域则主要模拟渤、黄、东海区域较为精细的海面风场,水平分辨率为 10 km,时间步长为 60 s。模式垂向共分为 34 层,计算得到的风场空间分辨率为  $(1/12)^\circ \times (1/12)^\circ$ ,输出时间间隔为 1 h,足够用于渤海海域的波浪要素推算。

利用波浪气象浮标 W0101 的风速、风向实测值对驱动风场模拟结果进行检验,对比结果见图 3,浮标位置见图 4。结果表明,计算值和实测值吻合较好,WRF 风场模式能较好地表现真实风场状况,并用于波浪后报的模拟计算中。

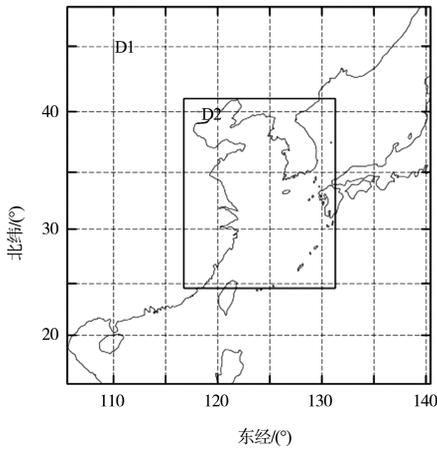


图2 WRF 模式计算区域

### 1.2 海浪模式 SWAN

SWAN (simulating waves nearshore) 是由荷兰 Delft 技术大学研制开发的第 3 代近岸浅海水浪数值计算模式，经过多年的改进，已经逐渐趋于成熟。该模型通过采用波作用量平衡方程，在源项中考虑了能量输入和损耗项（底摩擦、破碎、白浪）、波与波之间非线性相互作用等<sup>[15]</sup>，比较全面合理地描述了风浪的生成及在近岸区的传播演化过程，并在许多浅海数值研究中得到了广泛的运用。

在直角坐标系下，波作用量平衡方程可表示为：

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

式中： $N = E(\sigma, \theta, x, y, t) / \sigma$  为波作用密度谱； $x$ 、 $y$  为地理坐标； $t$  为时间； $\theta$  为传播方向； $\sigma$  为相对频率； $c_x$ 、 $c_y$ 、 $c_\sigma$  和  $c_\theta$  分别表示波能量在地理空间和谱空间上的传播速度； $S$  代表以谱密度表示的源汇项。式(1)左边第 1 项为  $N$  随时间的变化率；第 2 和第 3 项表示  $N$  在空间  $x$ 、 $y$  方向上的传播；第 4 项表示由于流场和水深所引起的  $N$  在  $\sigma$  空间的变化；第 5 项表示  $N$  以传播速度  $c_\theta$  在谱分布空间  $\theta$ （谱分量中垂直于波峰线的方向）上的传播。其中源汇项  $S$  具体描述为：

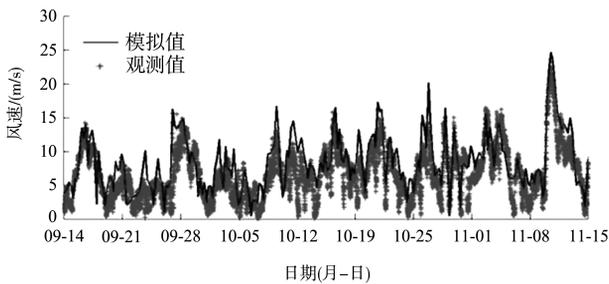
$$S = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (2)$$

式中： $S_{in}$  为风能输入； $S_{nl3}$ 、 $S_{nl4}$  分别为三波和四波相互作用的非线性波能传播； $S_{ds,w}$  为白帽耗散； $S_{ds,b}$  为底摩擦耗散； $S_{ds,br}$  为水深变浅引起的波能破碎耗散。

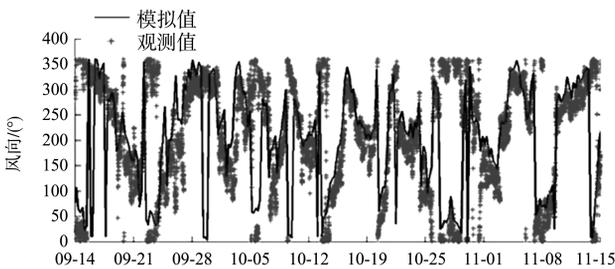
### 1.3 海浪模式的设置及验证

以 WRF 模式计算得到的风场作为驱动场，采用 SWAN 海浪模式进行波浪后报计算。模式采用非稳态二维计算模式，计算网格为球坐标经纬度网格，计算范围为  $(37^\circ N \sim 41^\circ N, 117.5^\circ E \sim 122.5^\circ E)$ ，空间步长为  $(1/12)^\circ \times (1/12)^\circ$ ，时间步长为  $\Delta t = 300 \text{ s}$ ，计算结果 3 h 输出一次。

模式初始谱由本地风速使用 JONSWAP 谱谱型计算得到。在陆地边界上，认为海浪完全耗散；



a) 风速



b) 风向

图3 风速、风向实测值与模拟值对比

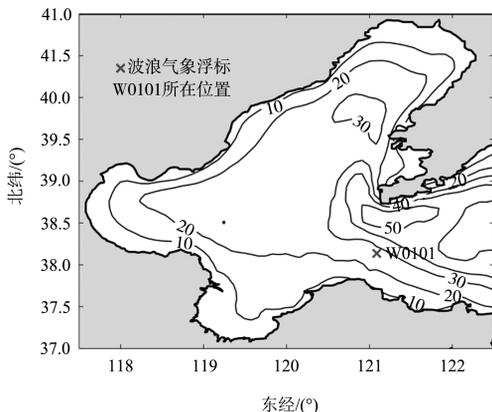


图4 SWAN 计算区域水深分布 (单位: m)

在水边界上,输入波谱根据风速使用 JONSWAP 谱计算得到。区域水深采用 ETOPO2 全球地形数据库 2'×2' 的水深资料和潍坊港附近海域水深资料,水深分布见图 4。

利用波浪气象浮标 W0101 的波浪要素实测值对 SWAN 模式的模拟结果进行检验分析,对比结果见图 5。结果表明,SWAN 模拟得到的波浪要素值与实测值符合良好,其变化趋势与最大值均较为一致,仅在局部有微小差异,这主要是由于水深地形和风场的精确度造成的。

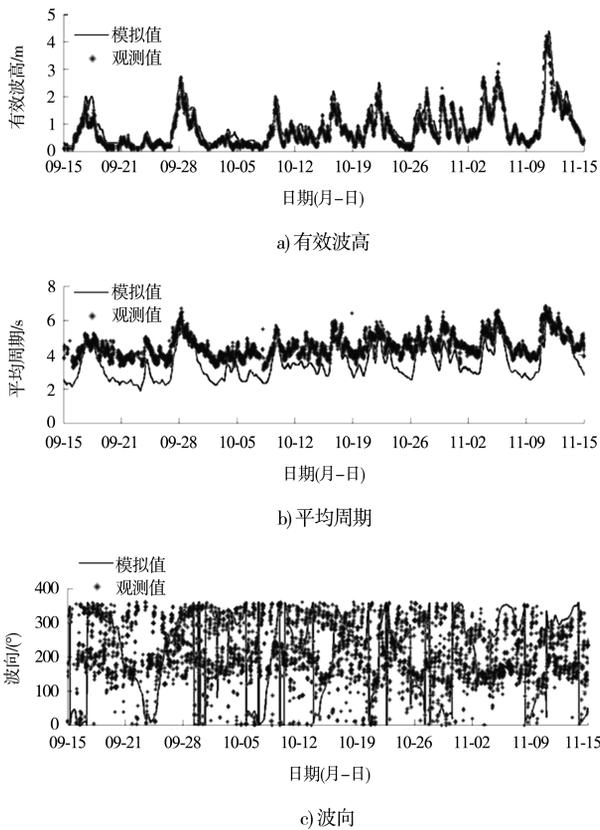


图 5 波浪要素实测值与模拟值对比

## 2 外海设计风速及波浪要素推算

分别以 WRF 和 SWAN 模式计算得到的 20 a 风场与波浪场后报结果为样本,采用 P-III 型拟合方法,对莱州湾湾口-15 m 等深线处的外海设计风速及波浪要素进行重现期推算,得到在 50 a 一遇重现期下的设计风速、有效波高和平均周期(表 1)。表中各要素值由-15 m 等深线处的 P1、P2、P3 共 3 点平均得到,其位置见图 1。

表 1 潍坊港区-15 m 等深线处 50 a 一遇各向设计风速及波浪要素值

方向	设计风速/(m/s)	有效波高/m	平均周期/s
N	25.49	5.24	8.69
NNE	28.18	5.20	8.84
NE	25.90	5.20	8.44
ENE	21.19	2.82	6.20
E	15.01	2.10	5.51

从表 1 可以看出,在 50 a 一遇重现期下,莱州湾湾口的强风向为 NNE 向,最大风速可达到 28.18 m/s;较强浪向为 N-NE 向,有效波高约为 5.2 m,平均周期为 8.44~8.84 s,与文献[16]结果一致,可以此作为边界条件进行近岸的波浪浅水传播计算。

## 3 浅水波浪计算

### 3.1 模型介绍

MIKE21 SW (spectral wave model) 是基于非结构网格或曲线网格的新一代风浪谱模型,能够模拟在近海、海岸地区大范围的风浪和涌浪的生长、衰退以及变形,是国际上成熟、通用的海浪数值计算模式。该模型可以求解准定常和非定常波浪作用平衡方程的全谱公式和方向解耦参数公式,并与 2D/3D 水流模型完全耦合。

该模型考虑的物理现象有风生浪、波-波相互作用、波浪白帽的能量消耗、底摩擦效应、水深变化引发的波浪破碎对能量的消耗、波浪向浅滩的传播、波浪的反射和衍射、波浪生长和衰减过程、波-流相互作用及水深变化引起的干湿区动态变化影响等<sup>[17]</sup>。MIKE21 SW 模型与 SWAN 模型一样,均是基于波作用量平衡方程开发的,其基本方程见 1.2 节。

### 3.2 模型设置

本文采用 MIKE21 SW 波浪谱模型进行潍坊港区附近海域的浅水波浪计算。计算区域见图 6、7,其中计算区域的水深取自海图和实测水深。在港口两侧有沙堤环抱,其顶高程为 1~2 m。液化品泊位的码头前沿与左侧沙堤相连,受风浪的影响较

为严重,新开挖航道工程在港池内水深约为10 m,会对波浪的传播造成一定影响。

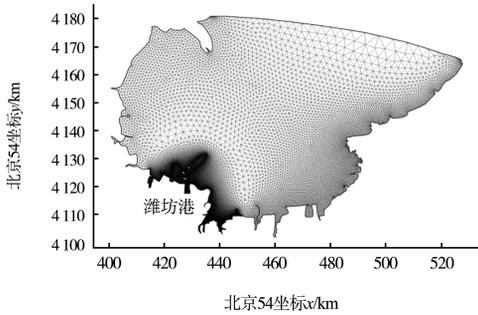


图6 计算区域网格划分

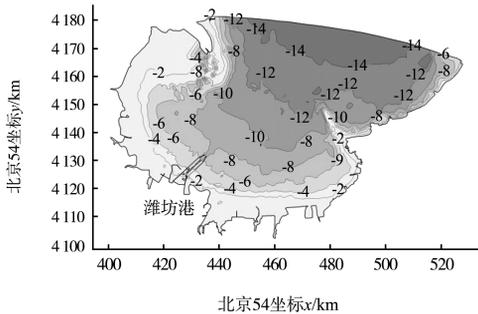


图7 计算区域水深分布(单位:m)

模型以莱州湾湾口-15 m等深线为基础设置开边界,边界条件的各要素值见表1。计算网格采用三角网格,并在港区附近进行了局部加密,网格单元数为65 942个、结点数为34 674个,沙堤处的波浪要素计算采用干湿网格进行。波浪计算采用JONSWAP频谱,  $\cos^m(\theta - \theta_{peak})$  为其方向分布函数,  $\theta$  空间划分为16个,最高和最低截断频率分别为0.04、1.0 Hz,频率个数为10。波浪破碎指标取0.8,白帽耗散系数  $C_{dis}$  取为4.5,其他参数为默认值<sup>[17]</sup>。

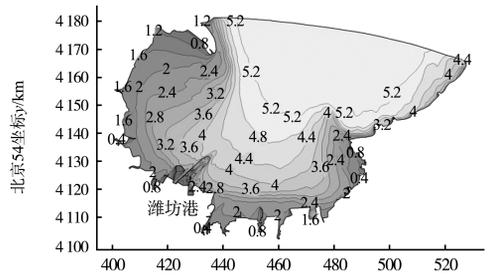
### 3.3 数值模拟结果分析

根据风场和波浪场的后报统计结果,结合该海域的实测水文气象条件,该海域强浪向和常浪向主要集中在N-NE向。因此,在遭遇50 a一遇设计风速情况下,利用MIKE21 SW模拟在不同特征水位条件下上述各个方向的50 a一遇波浪分布情况,为工程设计提供准确合理的设计参考。

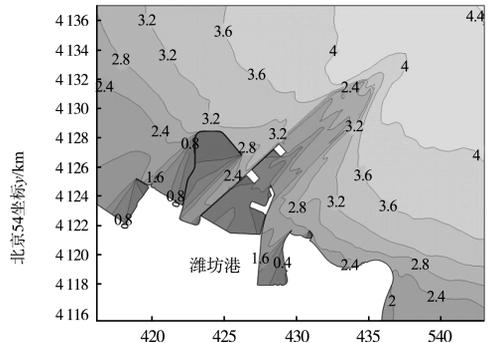
本文仅选取对潍坊港海域影响较大的NNE向

波浪传播情况进行分析,共包括3种特征水位:极端高水位(4.82 m)、设计高水位(2.64 m)、设计低水位(-0.03 m)。计算得到的波浪分布情况见图8~10,计算结果与渤海湾其它海域的设计要素进行对比分析<sup>[18-19]</sup>,结果较为一致。

由图8~10可见,外海波高普遍较大,约为4.4~5.2 m,有效波高从外海到近岸逐渐递减,在航道入口处衰减至2.8~3.6 m。由于底摩擦的不断增大,在近岸区域波能迅速衰减,波高也随之减小,但在港区泊位处,波高仍能达到0.7~2.2 m,会对泊位安全产生较大影响。

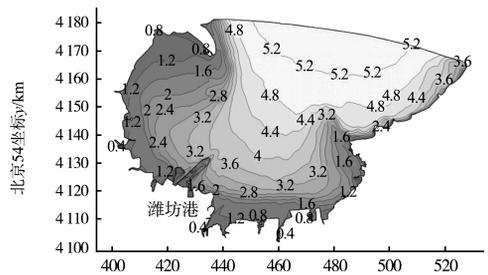


a) 整体



b) 局部

图8 极端高水位下NNE向的有效波高分布(单位:m)



a) 整体

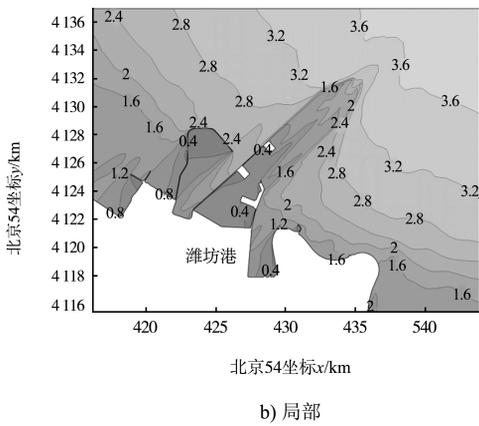


图 9 设计高水位下 NNE 向的有效波高分布 (单位: m)

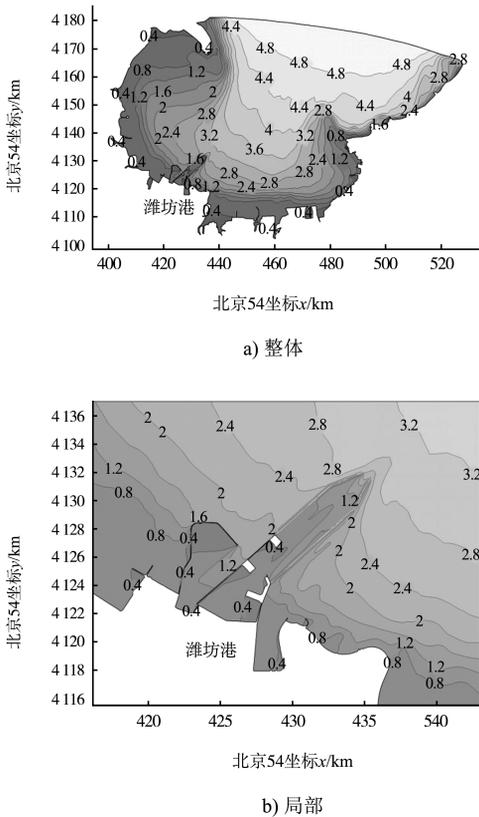


图 10 设计低水位下 NNE 向的有效波高分布 (单位: m)

比较 3 种不同水位下的波高分布情况可知, 波高在外海差别较小, 在港区附近因沙堤存在而存在较大差异。由于港区两侧的沙堤顶高程仅为 1~2 m, 在极端高水位和设计高水位时, 沙堤位于静水位之下, 成为潜堤, 对波高的衰减作用较小, 将发生越浪现象, 形成较大波高, 对港区的泊位安全造成较大影响; 在设计低水位时, 沙堤将露出水面成为出水堤, 阻碍波浪的传播, 且不

会产生越浪, 此时波高值衰减较大, 对港区的泊位安全影响较小。

### 4 结论

本文采用 WRF 风场模式和 SWAN 海浪模式进行了风场和波浪的后报计算及重现期研究, 并运行 MIKE21 SW 模块建立了潍坊港海域的波浪数值模型, 进行极端条件下的波浪浅水传播计算, 得到如下结论:

- 1) 分别采用 WRF 和 SWAN 模式对风场和波浪场进行后报计算, 并与波浪气象浮标的实测值进行对比, 模拟效果良好, 两模型可准确有效地模拟渤海湾的风场和波浪场分布。
- 2) 以后报结果为样本, 对莱州湾湾口-15 m 等深线处的外海波浪要素进行统计分析, 推算了 50 a 一遇重现期下的波浪要素值, 结果准确可信。
- 3) 利用 MIKE21 SW 模型进行近岸海域的浅水波浪计算, 结果表明, 在极端高水位和设计高水位时, 波浪传播至港区泊位处仍有 1.2~2.2 m 波高, 对其安全影响较大; 在设计低水位时, 沙堤露出水面, 有效阻挡了波浪传播, 在泊位处波高较小。

### 参考文献:

[1] 徐宏明. 风对浅水区波浪要素推算结果的影响分析[J]. 水道港口, 1997(4): 42-46.

[2] Qiao F L, Yu W D, Pan Z D. Study on the wind and wave extreme parameters of Tonkin Gulf in the South China sea—the applications of LAGFD numerical model[J]. Journal of Hydrodynamics: Series B, 1997(9): 75-86.

[3] 李绍武, 梁超, 庄茜. SWAN 风浪成长模型在近海设计波浪要素推算中的应用[J]. 港工技术, 2012, 49(2): 5-7.

[4] 石小翠, 范飞, 梁丙臣. 山东半岛设计波要素研究[J]. 水道港口, 2013, 34(5): 376-379.

[5] 李明惺, 侯一绮. 利用 QuikSCAT/NCEP 混合风场及 WAVEWATCH 模拟东中国海风浪场[J]. 海洋科学, 2005, 29(6): 9-12.

[6] 孔令双, 戚定满, 万远扬, 等. 长江口海域波浪场模拟研

究[J].水运工程, 2010(2): 46-49.

[7] 邱桔斐, 马越, 徐新华.长江口外海域波浪场数值模拟[J].水运工程, 2011(10): 11-14.

[8] 谭凤, 张庆河, 庞启秀, 等.基于 WRF-SWAN 模式的韦帕台风波浪场模拟[J].水道港口, 2012, 33(1): 14-18.

[9] 林毅辉, 潘伟然, 张国荣, 等.厦门湾常风浪场数值模拟[J].厦门大学学报: 自然科学版, 2009, 48(2): 298-301.

[10] 王道龙, 华峰, 江志辉.SWAN 近岸海浪模式在辽东湾的应用[J].海洋科学进展, 2010, 28(3): 285-291.

[11] 王卫远, 何倩倩, 杨娟.杭州湾海域 50 年一遇波浪数值模拟研究[J].海洋学研究, 2013, 31(4): 44-48.

[12] 廖振华, 刘青明.湄洲湾海域波浪数值模拟研究[J].中国水运: 下半月, 2014(9): 125-126.

[13] 陈靖, 刘峰, 尹晓斐, 等.潍坊港中港区 3.5 万吨级航道工程对海岸冲淤影响[J].海洋开发与管理, 2015(4): 42-44.

[14] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A description of the advanced research WRF[R].Version 3. USA: Ncar Technical Note, NCAR / TN-475 + STR, 2005: 7-25.

[15] Booij N, Ris R C, Holthuijsen L H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation[J]. Journal of Geophysical Research, 2014, 104: 7 649-7 666.

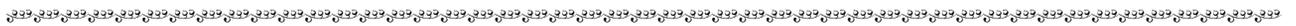
[16] 高斌.渤海海域波浪场的数值计算与特征分析[D].青岛: 中国海洋大学, 2011.

[17] DHI. MIKE 21 spectral wave module scientific documentation[M].Denmark: DHI, 2009.

[18] 王殿志, 张庆河, 时钟.渤海湾风浪场的数值模拟[J].海洋通报, 2004, 23(5): 10-17.

[19] 邓兆青, 周良明, 吴伦宇, 等.渤海重现期波高的数值计算[J].海洋湖沼通报, 2007(S1): 8-14.

( 本文编辑 武亚庆 )



(上接第 17 页)

[3] Ma Y X, Dong G H, Liu S X, et al. Laboratory study of unidirectional focusing waves in intermediate depth water[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 136(1): 78-90.

[4] 柳淑学, 李金宣.多向聚焦破碎波的试验研究[J].水动力学研究与进展, 2007, 22(3): 293-304.

[5] Drazen D. Laboratory studies of nonlinear and breaking surface waves[D].USA: University of California, 2006.

[6] 孙一艳.二维聚焦波浪及其与直立圆柱作用的研究[D].大连: 大连理工大学, 2010.

[7] Gibson R S, Swan C. The evolution of large ocean waves: The role of local and rapid spectral changes[J]. Proceedings of the Royal Society A-Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2007, 463: 21-48.

[8] Li J X, Liu S X, Hong K Y. Numerical study of two-dimensional focusing waves[J]. China Ocean Engineering, 2008, 22(2): 253-266.

[9] Longuet-Higgins M S. Breaking waves in deep or shallow water[C]// Proc 10th Conf on Naval Hydrodynamics. MIT: [s.n.], 1974: 597-605.

[10] Tromans P S, Anatrak A, Hagemeijer P. A new model for the kinematics of large ocean waves application as a design wave [C]// Proceeding of the 1 st International Society of Offshore and Polar Engineers. Edinburgh: [s.n.], 1991: 64-71.

[11] Tian Z, Perlin M, Choi W. Energy dissipation in two-dimensional unsteady plunging breakers and an eddy viscosity model[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 655: 217-257.

( 本文编辑 武亚庆 )