

东海 E3 海域低频涌浪生成机制研究*

裴 晔^{1,2}, 陶爱峰^{*1,2,3}, 张义丰⁴, 李 慧^{2,3}, 颜 晋^{2,3}

(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. 河海大学水文水资源及水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

4. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要: 基于第三代海浪数值模式 WAVEWATCH-III(v 3.14), 在 CCMP 风场驱动下, 对 2009 年平常月份与台风“茉莉”作用期间涌浪场及混合浪场进行了数值模拟, 探讨了东海 E3 海域的涌浪在不同气象条件下的产生机理及其演变特性。结果表明: 平常月份东海 E3 海域的涌浪主要来自东海海域及西北太平洋海域, 当涌浪来自东海海域, 涌浪波高较大, 涌浪波高多在 0.7~2m, 谱峰周期约为 8~10s, 混合浪中涌浪成分较高; 当涌浪来自西北太平洋海域, 涌浪的有效波高多在 0.2~0.7m, 谱峰周期约为 8~10s, 混合浪中涌浪成分较小。台风期间, 东海 E3 海域主要受西北太平洋海域传来的涌浪影响, 涌浪的有效波高及谱峰周期都较平常月份为大, 有效波高主要分布在 0.5~1.8m, 谱峰周期主要分布在 10~18s。

关键词: 涌浪; WAVEWATCH-III; 产生机理; 演变特性

中图分类号: TV139.2+1

文献标志码: A

文章编号: 1003-6482(2016)01-017-08

DOI: 10.13984/j.cnki.cn37-1141.2016.01.003

引言

近年来, 随着我国海洋大开发战略的实施, 对于海洋工程建设及海洋能源的开发利用也在持续进行中。东海海洋航运发达, 海上工程众多, 在海洋工程建设及运营过程中经常会受到涌浪的影响。在东海 E3 海域石油开采过程中, 发现在众多的自然因素当中低频涌浪的存在会导致铺管船舶产生倾斜和摇晃, 使海洋石油平台发生共振破坏, 造成长时间的海上待机, 耗费大量施工成本。当其传播到浅水或近岸时, 波高增大, 波长减小, 常形成猛烈的拍岸浪, 对岸边建筑物破坏性很大^[1-2]。因此, 进行涌浪研究很有必要, 对海上航行、海洋资源开发利用、防止和减少海浪灾害都具有重要的意义^[3-4]。

涌浪是指风停止或削弱、转向以后遗留在海上的或来自于其他海域的波浪。由于涌浪的内在作用机制及与风浪之间的相互作用都很复杂, 因此前人对于涌浪的研究多集中在根据实测资料对涌浪外部表现特征的归纳总结^[5-9]、在实验的基础上对涌浪内部结构的理论推导^[10-14]以及借助数学软件对涌浪场整体特征的数值模拟^[15-17]等方面。对于特定海域的涌浪的生成原因及其运动特性等内在机理研究还很匮乏, 因此, 本研究将采用 WAVEWATCH-III(version 3.14) 海浪模式对东海 E3 海域的海浪进行数值模拟, 并利用该模式的风、涌浪分离技术, 分析东海海域涌浪的生成机理和演变特性。

1 模型介绍及风场选用

1.1 模型介绍

WAVEWATCH-III(version 3.14) 源函数项 S 包含: 风能输入项 S_m 、波一波非线性相互作用 S_{nl} 、白冠耗散项 S_{in} 、在浅水区所需要考虑的底摩擦项, 以及相比之前的版本新加入的线性输入项, 在极浅水

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(41106001, 51137002, 51379071, 51425901); 教育部留学回国人员科研启动基金(教外司留[2012]1707); 国家重点实验室专项经费项目(编号: 20145027512, 20145028412)资助。

第一作者简介: 裴晔(1991-), 女, 江苏盐城, 硕士, 主要从事水波动力学研究。电子邮箱: 1207979194@qq.com

* 通讯作者: 陶爱峰, 博士, 副教授。电子邮箱: aftao@hhu.edu.cn

收稿日期: 2015-06-18

区域考虑的水深诱导的破碎项 S_{db} 和三波相互作用项 S_{tr} , 同时还包含受底地形影响的散射项 S_{sc} 以及用户自定义的源项 S_{xx} , 这样新的源项 S 就表示为:

$$S = S_{in} + S_m + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{db} + S_{tr} + S_{sc} + S_{xx} \quad (1)$$

另外, WAVEWATCH-III(version 3.14)采用波浪谱能量分离 WaveSEP(Wave Spectrum Energy Partitioning)方法实现了风、涌浪的分离,可以在模式输出中直接获取关于风、涌浪的物理量,如有效波高、周期、方向等。其中风浪谱能量分离法是通过引入风浪分数 W (wind sea fraction)来实现风浪(wind sea)和涌浪(swell)的分离计算的:

$$W = E^{-1} E |_{U_P > C} \quad (2)$$

$$U_P = C_{mult} U_{10} \cos(\theta - \theta_w) \quad (3)$$

式中, W 表示风浪分数,即局地波动相速 $C(C = \sigma/K)$ 小于 U_P 的那部分波动能量 $E|_{U_P > C}$ 占波浪谱总能量 E 的比例; U_P 是波动传播方向上的风速分量与波龄因子 C_{mult} 的乘积; U_{10} 表示海面 10m 风速。根据风浪分数 W 值的不同,可将波浪分为纯风浪($W=0$)、纯涌浪($W=0$)或混合浪($0 < W < 1$)。波浪谱能量分离法的一般实现步骤为:谱峰分离、风浪谱峰的确认和合并、相关涌浪谱峰的合并、能量阈值的核检、各分离部分物理量的计算。

1.2 风场选用

对于非台风作用期间,选用 CCMP 风场作为模型的输入风场;对于台风作用期间,以 CCMP 风场为背景风场,用 Myers 台风模型模拟台风风场,并将这两种风场进行合成构造合成风场,合成风场的表达式为:

$$V_C = V_M(1 - e) + eV_Q \quad (4)$$

式中: V_C 是合成风场; V_M 是台风模型风场; V_Q 是 CCMP 背景风场,权重系数 $e = C^4 / (1 + C^4)$, $C = r/nr_0$, 其中 n 取 3。

1.3 模型验证

本文利用收集来的浙江台州 B2(28°40.17'N, 121°46.05'E)测点 2009 年 9 月 5 日~2009 年 10 月 11 日期间的浮标观测数据,通过对该测点的海浪参数模拟值与实测值的比较,验证模型的有效性。对比混合浪有效波高及谱峰周期的模拟值与实测值的变化趋势图,可以直观的看出模拟数据的吻合度,见图 2。从图中来看,无论是有效波高还是谱峰周期,模拟值与实测值均保持了很好的一致性。

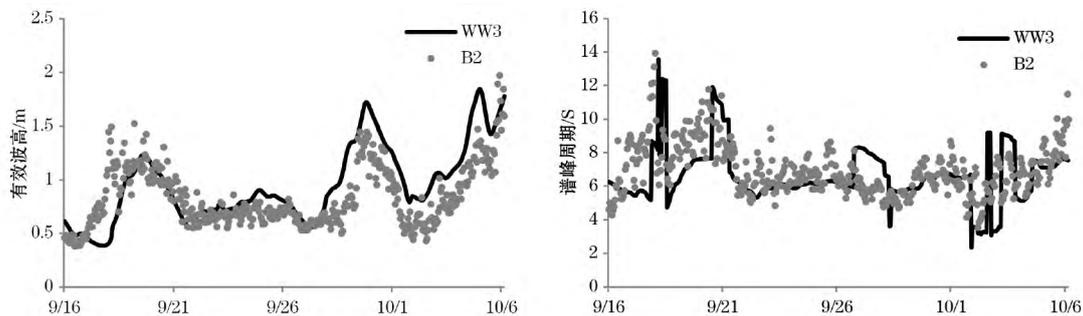


图 1 B2 测点实测值与模拟值对比图

Fig. 1 Comparison between the measured values and simulated values in B2 buoy station

2 数值模拟实验

为了充分考虑西北太平洋对 E3 海域(119°~125°E, 26°~29°N)涌浪的影响,本文数值模拟的空间范围是 100°~160°E, 0°~50°N, 如图 2 所示。模拟的时间段分为平常月份和台风影响期间,其中平常月份的时间段为 2009 年 2 月 1 日至 2009 年 2 月 28 日;台风影响期间的时间段为 2009 年 9 月 16 号 14 时至 2009 年 10 月 11 号 14 时,该段时间内 E3 海域受台风茉莉影响,台风茉莉路径见图 1,台风作用的时间段

为 2009 年 9 月 28 日至 2009 年 10 月 9 日。此次数值模拟中, WW3 模型的主要参数取默认值, 频率空间的计算网格数取 24, 初始频率取 0.0418 Hz。方向分辨率为 15° , 即取 24 个方向, 采用经纬度坐标, 网格分辨率为 $10' \times 10'$, 计算步长为 300 s, 每 1 h 输出一次结果。模型采用的地形数据来自 ETOPO1 全球地形数据集, 该数据的分辨率为 $1' \times 1'$, 包含了大陆的地势起伏和海洋中的水深数据。海岸线数据来自于 GSHHS 全球高分辨率海岸线数据。

3 数值模拟结果分析

3.1 非台风期间

3.1.1 波浪特性分析

图 3 为东海 E3 海域内的点 P ($122^\circ\text{E}, 28^\circ\text{N}$) 在模拟时间范围内的混合浪及涌浪的波高及周期过程线。图 3 表明在 2 月 14 日、2 月 15 日、2 月 24 日 3 d 时间里涌浪波高跟混合浪波高较为接近、涌浪的谱峰周期跟混合浪的谱峰周期基本一致, 这表明在 3 d 的时间里, 混合浪的成分以涌浪为主, 涌浪的特性决定着混合浪的特性。而在 2 月 17 日, 混合浪的有效波高在 3 m 左右, 涌浪的有效波高仅 0.5 m 左右, 混合浪的谱峰周期约在 6~8 s, 涌浪的谱峰周期约为 9~10 s, 可见在 2 月 17 日混合浪的成分以风浪为主, 涌浪所占成分很小, 混合浪的特性由风浪特性决定。综上分析, 在模拟的 2 月 13 日至 2 月 28 日这 16 d 的时间里, 东海 E3 海域大部分时间是以风浪为主, 只有少部分时间是以涌浪为主; 且当混合浪以涌浪为主时, 混合浪的有效波高较小, 涌浪波高较大; 当混合浪以风浪为主时, 容易产生有效波高较大的混合浪, 而相应的涌浪波高较小。

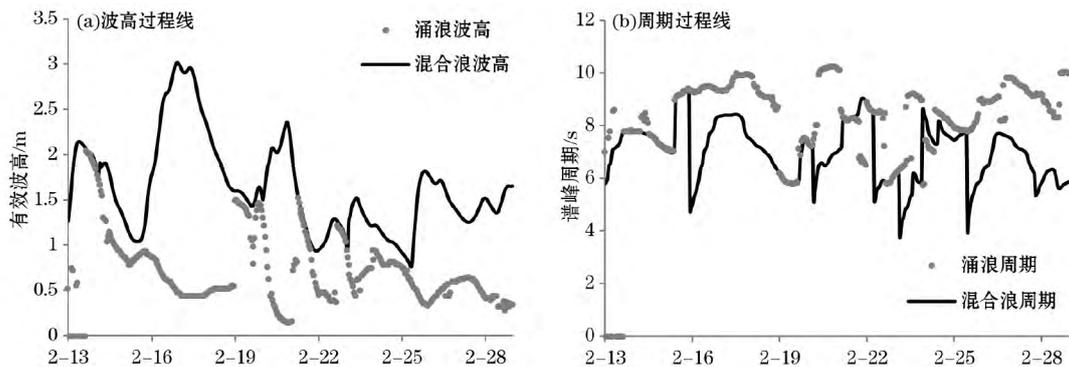


图 3 平常月份东海 E3 海域 P 点波高及周期过程线

Fig. 3 The sea wave height and period process line of the P-point in E3 in the East China Sea during the ordinary month

3.1.2 涌浪产生机理及演变特性分析

为了分析东海涌浪的演变特性, 以及东海涌浪受西北太平洋的影响, 本文选取 $115^\circ\text{E}-145^\circ\text{E}, 15^\circ\text{N}-45^\circ\text{N}$ 范围海域进行分析。

图 4、图 5 分别为 2 月 13 日至 2 月 16 日期间的 3 个时刻的风场图及涌浪场图。由于平常月份的涌浪是由较长时间的定向风场作用产生的, 故所选 3 个时刻的风场均早于对应的涌浪场。图 4(a) 表明 2 月 13 日 8 时整个东海海域受南向风影响, 西北太平洋主要受东向风和南向风影响。东海海域受持续南向风作用, 在 2 月 14 日 02:00, 东海海域产生了南向涌浪, 如图 5(a) 所示, 同时西北太平洋海域的涌浪主要为东向和东北向, 且与东海的南向涌浪不连续, 可见 2 月 14 日 02:00 的涌浪主要是由东海海域持续的南

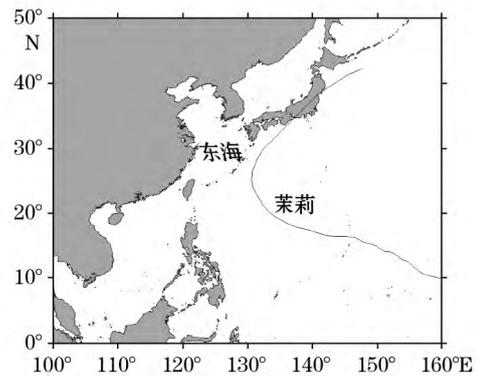


图 2 数值模拟区域

Fig. 2 Numerical simulation area

向风场驱动生成,西北太平洋对该时刻的涌浪生成影响较小。图4(b)表明2月14日20:00,东海海域的南向风转变为北向风,而在北向风场的作用下,南向涌浪显著削弱,如图5(b)所示,在2月15日14:00,南向涌浪的波高变小,同时受西北太平洋东南向涌浪的影响,东海海域的涌浪波向逐渐转为东南向。图4(c)表明,东海的北向风场进一步增强,西北太平洋的东南向风场也进一步增强,从而导致东海海域的北向涌浪消亡,转而受西北太平洋的东南向涌浪影响,如图5(c)所示,在2月16日08:00,东海海域和西北太平洋海域形成了连续的东南向涌浪。综上所述,2月13日东海海域的南向涌浪是由东海的南向风作用产生的,且该时间段内的涌浪波高较大,在1~1.5m之间,且混合浪以涌浪为主;2月16日东海的东南向涌浪源自西北太平洋,涌浪波高较小,主要在0.5m左右,混合浪以风浪为主。

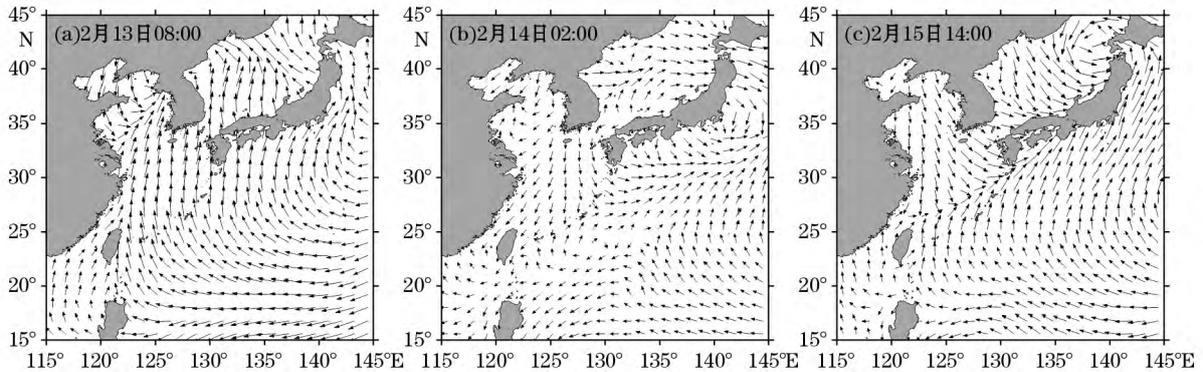


图4 2月13日至2月16日期间的3个时刻的风场图

Fig. 4 The wind field map of three times during the period from February 13th to February 16th.

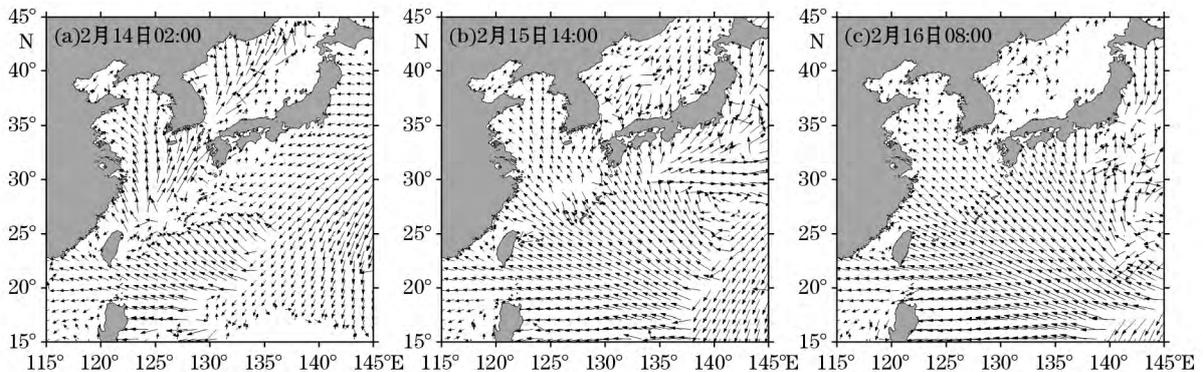


图5 2月13日至2月16日期间的3个时刻的涌浪场图

Fig. 5 The swell field map of three times during the period from February 13th to February 16th.

图6、图7分别为2月20日至2月22日期间的3个时刻的风场图及涌浪场图。图6(a)表明2月20日20:00东海海域受北向风场影响,在北向风场的作用下,东海海域逐渐产生北向涌浪,如图7(a)所示。图6(b)表明2月21日02:00,东海海域北向风场有所减弱,但在其持续驱动作用下,东海海域仍产生北向涌浪如图7(b)所示。图6(c)表明2月21日14:00,东海的北向风场转为南向风场,在南向风场的作用下,东海海域的北向涌浪明显减小,如图7(c)所示。综上所述,2月21日东海北向涌浪主要是由东海海域受北向风场作用产生的,且涌浪波高较大,主要在1~1.5m之间,混合浪以涌浪为主。

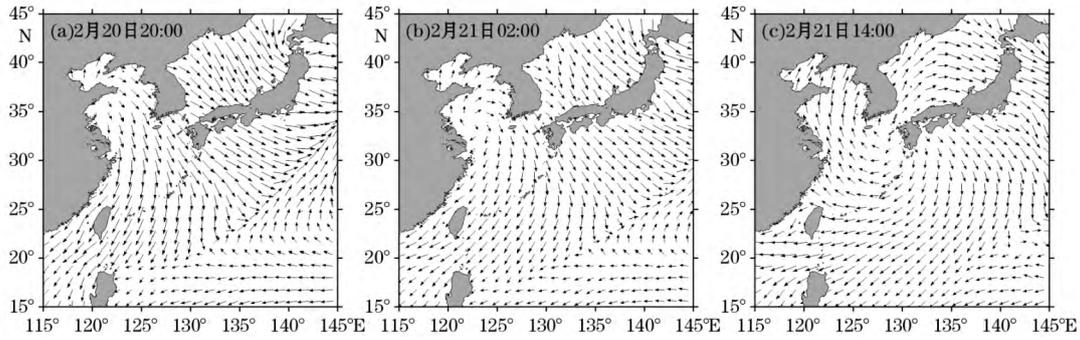


图 6 2 月 20 日至 2 月 22 日期间的 3 个时刻的风场图

Fig. 6 The wind field map of three times during the period from February 20th to February 21th.

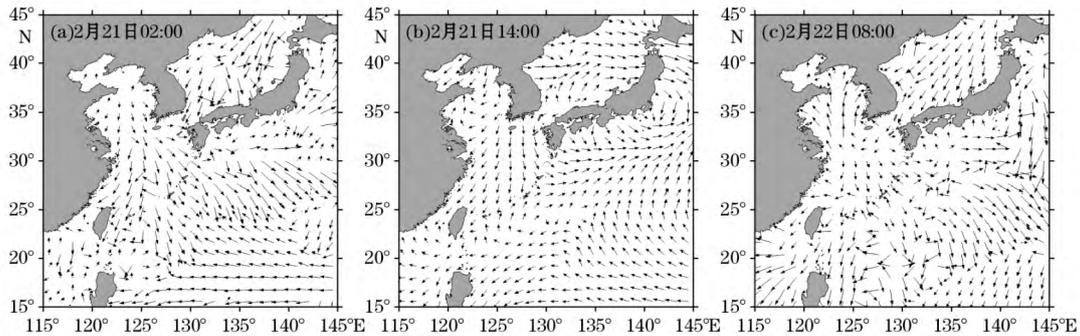


图 7 2 月 21 日至 2 月 22 日期间的 3 个时刻的涌浪场图

Fig. 7 The swell field map of three times during the period from February 20th to February 21th.

3.2 台风期间

3.2.1 波浪特性分析

图 8 为东海 E3 海域内的点 P(122°E, 28°N) 在模拟时间范围内的混合浪及涌浪的波高及周期过程线。台风茉莉生成的时间为 2009 年 9 月 28 日至 2009 年 10 月 9 日, 图 8 表明 9 月 28 日至 10 月 4 日, E3 海域受台风影响较小, 涌浪的谱峰周期较小, 主要分布在 6~10s 范围内。从 10 月 5 日开始受台风影响逐渐增强, 涌浪的谱峰周期逐渐变大。在 10 月 6 日 07:00, E3 区涌浪周期突然增至 17.99s, 涌浪波高 0.7 m, 随后涌浪谱峰周期逐渐减小, 涌浪有效波高先增大后减小, 在 10 月 7 日 8 时涌浪波高达到最大值 1.79m。10 月 5 日至 10 月 7 日, E3 海域受台风影响明显, 此段时间内涌浪有效波高较大, 主要分布在 0.5~1.8m 间, 涌浪谱峰周期较大, 主要分布在 10~18s 间。从 10 月 8 日开始, 受台风影响明显减小, 涌浪谱峰周期为 9s 左右。综上分析, 超强台风对 E3 海域涌浪的影响明显, 使得 E3 区产生了长周期, 波高较大的涌浪, 但 E3 区混合浪仍以风浪为主。

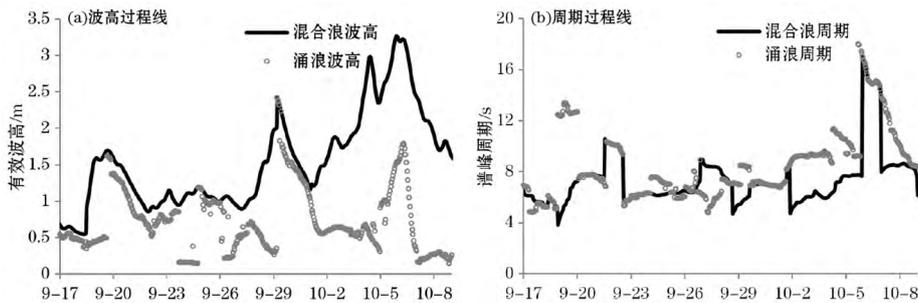


图 8 台风期间东海 E3 海域 P 点波高及周期过程线

Fig. 8 The sea wave height and period process line of the P-point in E3 in the East China Sea during the typhoon

3.2.2 涌浪产生机理及演变特性分析

图 9、图 10、图 11 分别为台风作用期间 3 个时刻的风场图、涌浪场图及能量谱图。图 9(a)、10(a) 表明在 10 月 4 日 20:00, 台风中心距离东海海域较远, 东海海域的涌浪部分为来自东南南部海域的南向涌浪, 部分为来自西北太平洋的东南向涌浪, 台风对东海海域的涌浪影响较小。由图 11(a) 该时刻的能量谱图可以看出, 此时涌浪比较小, 主要以风浪为主。图 9(b)、10(b) 表明在 10 月 6 日 14:00, 台风中心距离东海海域较近, 台风驱动生成的涌浪传至东海海域, 整个东海海域受东南向涌浪影响。由图 11(b) 能量谱图可以看出, 此时东海海域产生了周期较大的涌浪, 但是仍旧以风浪为主。图 9(c)、10(c) 表明在 10 月 8 日 02:00, 台风中心偏离东海海域, 开始影响日本海域, 而随着台风中心的偏离, 台风对东海海域的涌浪影响逐渐消失; 但是随着台风产生的涌浪传播到东海, 东海海域的混合浪变成主要以涌浪为主(见图 11(c))。

综上所述, 在台风生成还未影响东海的时候, 东海主要是以风浪为主的, 台风开始影响东海海域时, 东海虽仍以风浪为主, 但是出现了周期较大的涌浪, 随着台风产生的涌浪逐渐传播到东海, 东海开始以涌浪为主; 由此可见虽然西北太平洋台风茉莉没有经过东海海域, 但其对东海涌浪的影响显著。

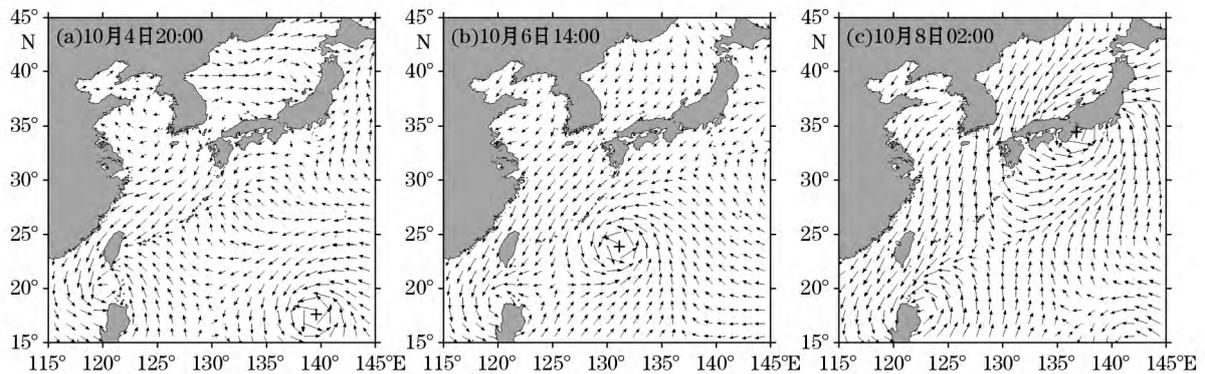


图 9 台风期间的三个时刻的风场图

Fig. 9 The wind field map of three times during the typhoon

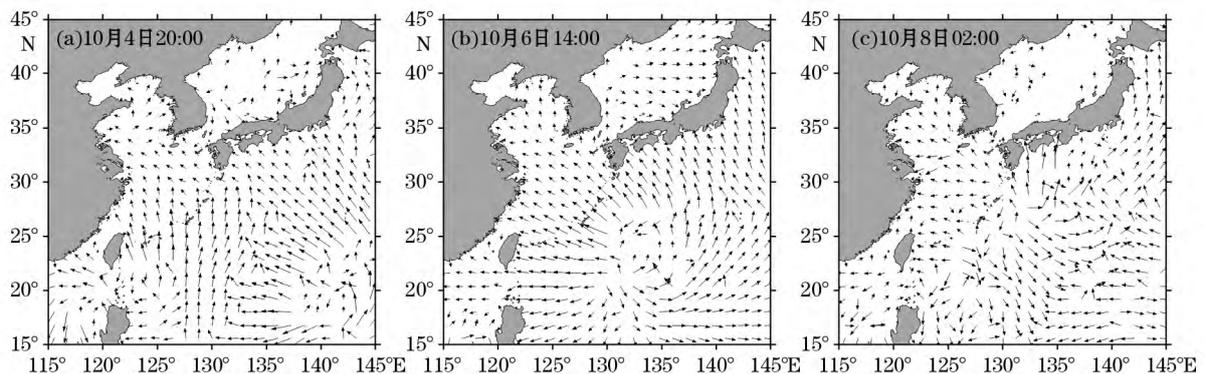


图 10 台风期间的 3 个时刻的涌浪场图

Fig. 10 The swell field map of three times during the typhoon.

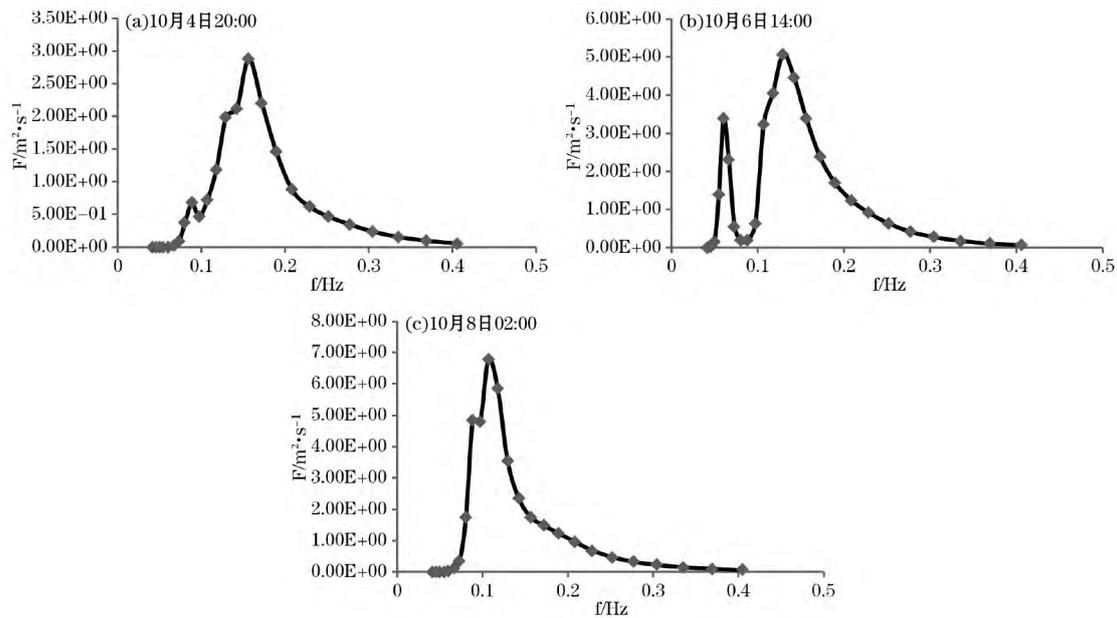


图 11 台风期间的三个时刻的能量谱图

Fig. 11 The energy spectrum of three times during the typhoon

4 结论

本文利用 WAVEWATCH III 模拟了西北太平洋尺度下的平常月份和台风期间的涌浪,并对东海海域的涌浪生成机制进行研究分析,主要结论为:东海 E3 海域的涌浪一方面是由东海海域自身受定向风场作用而产生的,另一方面是西北太平洋的涌浪传播而来。在非台风作用期间,当 E3 区涌浪是东海海域自身受定向风场作用产生时,涌浪波高较大,混合浪中的涌浪成分较高;当 E3 区涌浪来自西北太平洋海域时,涌浪的波高较小,混合浪中风浪成分占优。在西北太平洋台风作用期间,E3 区受台风影响明显,形成长周期波高较大的涌浪。

参考文献

- [1] 纪华盾. 华南沿海四大涌浪区[J]. 珠江水运, 2002, 08: 28-29.
- [2] 刘乐军. 东海灾害地质分区研究的理论与实践[D]. 北京: 中国科学院研究生院海洋研究所, 2005.
- [3] 郁永静. 东海风与浪的时空特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [4] 徐艳清. 东中国海海浪数值模拟及波候统计分析[D]. 北京: 中国科学院研究生院海洋研究所, 2005.
- [5] BRETSCHNEIDER C L. The generation and decay of wind waves in deep water[J]. Transactions, American Geophysical Union, 1952, 33(3): 381-389.
- [6] LONGUET-HIGGINS M S, STEWART R W. Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1960, 8(4): 565-583.
- [7] UNOKI S. An Investigation on the Variations of Sea Level due to Meteorological Disturbances on the Coast of Japanese Islands [J]. Journal of the Oceanographical Society of Japan. 1957, 35(2): 1-10.
- [8] 许为民, 钱志春. 静止台风涌浪计算方法[J]. 东海海洋, 1990, 8(3): 10-16.
- [9] 钱志春, 永田丰. 台风涌浪传播的计算方法[J]. 大气科学, 1993, 17(2): 200-210.
- [10] Phillips O M, Banner M L. Wave breaking in the presence of wind drift and swell[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1974, 66(4): 625-640.
- [11] Donelan M A. The effect of swell on the growth of wind waves[J]. Johns Hopkins APL, Technical Digest, 1987, 8(1): 18-23.
- [12] Mitsuyasu H, Maeda Y. On the contribution of swell to sea surface phenomena(2)[C]// Proceedings of the twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference. Kitakyushu, Japan, 2002: 26-31.
- [13] Cheng Z, Mitsuyasu H. Laboratory studies on the surface drift current induced by wind and swell[J]. Journal of Fluid Mechanics,

1992,243:247-259.

- [14] 黄必桂, 郑桂珍, 丛培秀. 涌浪对风浪能量影响的实验研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2009, 39(3): 381-386.
- [15] 周学群, 杨洪玉. 8719号台风涌浪传播特征分析[J]. 海洋预报, 1990, 7(2): 62-64.
- [16] 韩晓伟, 周林, 游大鸣, 萧中乐. 0801号台风风浪场和涌浪场的数值模拟[J]. 大气科学学报, 2011, 34(5): 597-605.
- [17] 陈晓斌, 周林, 史文丽, 李靖, 陈璇. 台风“梅花”风浪场和涌浪场特征分析[J]. 海洋科学进展, 2013, 31(1): 22-30.

The Generation Mechanisms of Low-Frequency Well in the E3 Sea Area of the East China Sea

PEI Ye^{1,2}, TAO Aifeng^{1,2,3}, ZHANG Yifeng⁴, LI Hui^{2,3}, and YAN Jin^{2,3}

- (1. Stake Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. College of harbor, Costal and offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Key Laboratory of Costal Disaster and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China;
4. Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: Based on the third-generation numerical wave model WAVEWATCH-III(v 3.14), numerical simulation of swell field and mixed wave field driven by CCMP wind field are performed in the case of ordinary months as well as the action period of Typhoon Melor. The mechanism of production of the swell in the E3 sea area of the East China Sea and its evolution characteristics are investigated in different weather conditions. Results indicate that the swell in the E3 sea area is mainly from the East China Sea and the Northwest Pacific Ocean during the ordinary months. By the time the swell coming from the former sea area, the height is relatively larger (0.2-0.7m) with spectral peak period around 8-10s while swell is the major components of the mixed wave. For the case that the swell coming from the latter area, its significant wave height is about 0.2-0.7m with spectral peak period around 8-10s while swell is the minor components. During the period of typhoon, the E3 sea area is influenced by the swell propagating from the Northwest Pacific Ocean, with larger significant wave height and spectral peak period of 0.5-1.8m and 10-18s respectively, compared with the ordinary month situation.

Key words: swell; WAVEWATCH-III; mechanism of production; evolution characteristic