

## 东中国海波浪分布特征研究<sup>\*</sup>

谢冬梅<sup>1</sup>, 陈永平<sup>1,2</sup>, 张长宽<sup>1</sup>

(1. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 以美国国家环境预报中心(NCEP)再分析气象资料作为驱动风场条件, 运用第三代海浪模式WAM的第四版本(WAMC4)在西北太平洋海域建立二级嵌套波浪模型, 利用连云港、冷家沙现场观测波浪资料对模型进行了验证, 检验了该模型在东中国海波浪研究中的适用性。针对东中国海进行了连续60年(1950—2009)的波浪后报模拟, 在此基础上开展了东中国海波浪时空分布特征研究。结果表明: 四季的平均有效波高等值线与岸线形状基本保持一致, 且由南向北逐渐递减; 有效波高分布的季节差异显著, 冬季浪高最大, 其次为秋季, 春季、夏季最小。通过对比分析平均波浪要素和5%累积频率波浪要素的定量关系发现, 在渤海范围内, 5%累积频率有效波高与平均有效波高之比约为2.75, 黄海与东海大部该比值则分别约为2.50和2.35, 而5%累积频率平均周期与平均周期的比值在整个东中国海范围内约为1.45。

**关键词:** 东中国海; WAMC4; 有效波高; 平均周期; 季节分布; 累积频率

中图分类号: TV 139.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)02-0189-08

### On wave distribution of the East China Sea

XIE Dong-mei<sup>1</sup>, CHEN Yong-ping<sup>1,2</sup>, ZHANG Chang-kuan<sup>1</sup>

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The latest version of the third generation spectral wave model, WAMC4, is adopted for the long-term hindcasting of wave climate for the East China Sea. The model is driven by the NCEP reanalysis wind data spanning the period of 1950—2009. A 2-level nested downscaling framework, covering the Northwest Pacific Ocean and the East China Sea is established to simulate both wind and swell waves. The model result is validated against field data at Lianyungang and Lengjiasha. Based on the long-term modelling results, the temporal and spatial wave distributions of the area are obtained. The results suggest that the mean significant wave height decreases significantly from south to north, and its contours are consistent with the coastline. For the seasonal wave distribution, the mean significant wave height is the largest during winter and smallest during spring and summer. Furthermore, by comparing the significant wave field of 5% cumulative probability with mean significant wave field, the quantitative relationship between the two is obtained for different sea areas.

**Keywords:** East China Sea; WAMC4; significant wave height; mean wave period; seasonal distribution; cumulative probability

波浪是重要的海洋动力因素之一, 研究其时空分布特征在加深对海洋动力环境和海气相互作用

收稿日期: 2012-04-26

**\*基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973计划)课题(2010CB429001); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201201045); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室基本科研业务费自主研究项目(2011585812); 国家自然科学基金(面上项目)(51179067)

**作者简介:** 谢冬梅(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事河口海岸及近海工程水动力环境方面研究。

用机理的认识、防灾减灾、海洋能源开发利用等方面具有重要意义。对于东中国海的波浪研究,不少学者基于实测资料分析<sup>[1-4]</sup>或者波浪数学模型<sup>[5-7]</sup>做了大量的工作。在实测资料分析方面,受到海洋观测站台布设以及极端天气过程等限制和影响,基于该方法开展的波浪分布特征研究往往具有区域性,通常无法满足开展大范围、长时间波浪分布特征研究的要求。近年来,波浪数学模型,尤其是第三代海浪模式,由于其对波浪生成、传播和耗散物理机制的准确描述,以及高效、经济、可重复利用等优点,得到了较为广泛的运用。目前,在东中国海开展的波浪模型研究多集中在模型适用性分析,基于模型后报结果的波浪时空分布特征研究鲜有见诸笔端。

WAMC4<sup>[8]</sup>是第三代海浪模式WAM (the Wave Model)<sup>[9]</sup>的第四版本,该模式对于深水 and 中等深度海域的海浪具有较强的模拟能力,被广泛运用于全球以及区域海浪的预报中。该模式对描述二维海浪谱的基本传输方程进行积分,方程中的3个源函数清晰地描述了风能量输入、波一波非线性作用和白浪耗散作用的物理机制。采用WAMC4进行波浪长期预报和后报已经成功运用到多个研究区域,如黑海西部<sup>[10]</sup>、日本海岸<sup>[11]</sup>、朝鲜半岛邻近海域<sup>[12-13]</sup>。WAMC4在我国东南沿海台风浪后报中也得到相关运用<sup>[14-15]</sup>。

本文以美国国家环境预报中心(NCEP)再分析气象资料作为驱动风场条件,采用WAMC4在西北太平洋海域建立二级嵌套波浪模型,对东中国海进行大范围、长时间序列波浪后报,并根据模型后报结果讨论分析东中国海波浪的季节和区域分布特征以及不同累积频率波高以及周期的关系。

## 1 WAMC4模式简介

WAMC4在未对谱形作任何附加假设的情况下,对描述二维海浪谱传播的基本方程进行积分,求解海浪特征参数,其控制方程可表示为:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \phi}(\dot{\phi}F) + \frac{\partial}{\partial \lambda}(\dot{\lambda}F) + \frac{\partial}{\partial \theta}(\dot{\theta}F) = S \quad (1)$$

式中:  $F(f, \theta)$  为二维能谱密度,  $f$  表示频率,  $\theta$  表示谱分布方向,  $\phi$  表示纬度,  $\lambda$  表示经度; 源项  $S$

由3部分组成: 风能输入项  $S_{in}$ 、白浪耗散项  $S_{ds}$  和波波非线性作用项  $S_{nl}$ 。

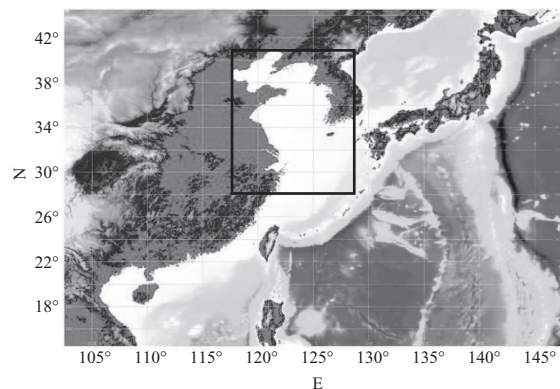
与WAM之前的版本相比, WAMC4进一步完善了模式物理机制和模式结构两方面。在风能输入项中, 采用Jassen准线性理论, 考虑了波生应力对海表面应力的影响, 使得对波成长速率的描述更加真实<sup>[16]</sup>。在白浪耗散项中引入更大的耗散, 使得高频部分的波能守恒更趋合理。在模式结构上, WAMC4具备了嵌套功能, 可进行多重嵌套。

在数值方法上, WAMC4中的源项和传播项采用了不同的积分格式和时间步长: 源项采用隐式积分格式, 而传播项采用一阶迎风通量格式, 且可任意给定风场资料的时间步长。有关WAM模式的具体描述见参考文献[8]。

## 2 模型建立与验证

### 2.1 模型建立

为减小模型开边界对本文研究区域波浪要素的影响, 在西北太平洋海域建立二级嵌套波浪数值计算模型: 第一级网格在经纬度方向上分别覆盖  $14.5^\circ \sim 44.5^\circ \text{N}$  和  $102.5^\circ \sim 147.5^\circ \text{E}$ , 网格分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ; 第二级网格在经纬度方向上分别覆盖  $28.0^\circ \sim 44.0^\circ \text{N}$  和  $117.0^\circ \sim 128.0^\circ \text{E}$ , 网格分辨率为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  (图1)。地形资料采用世界大洋深度数据(GEBCO), 分辨率为  $1/60^\circ \times 1/60^\circ$ 。模型驱动风场采用美国国家环境预报中心(NCEP)再分析气象资料, 该资料在经纬度方向上的分辨率均为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ , 每6 h更新1次。模型在运行过程中, 将输入风场在空间和时间上采用线性插值以获得与模式时空分辨率相适应的风场。模型在表



a) 第一级网格范围

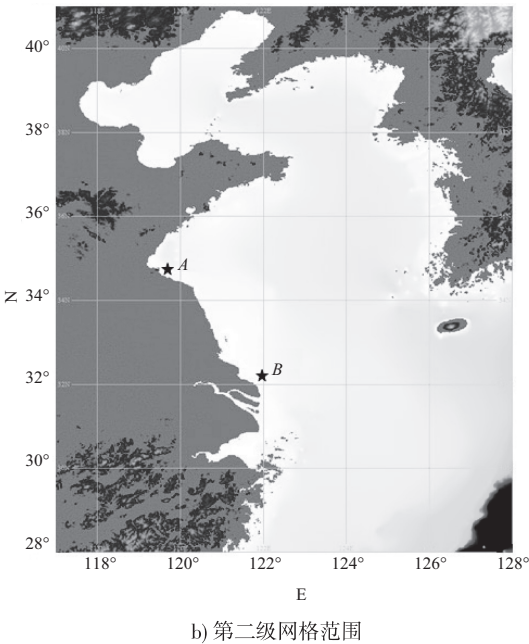


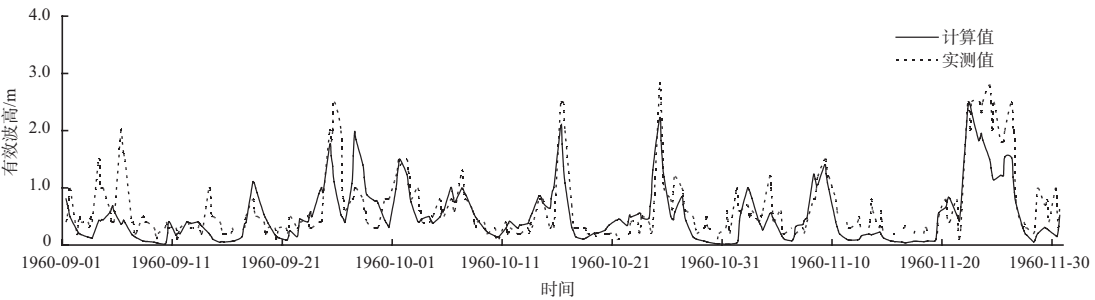
图1 模型范围及验证点示意（A、B分别为连云港和冷家沙波浪验证点）

面风场和波浪边界条件两者的共同驱动下进行长期波浪后报，第二级网格的波浪边界条件由更大尺度的第一级网格计算提供，可保证风浪和涌浪均由近海向海岸方向传播<sup>[17-18]</sup>。

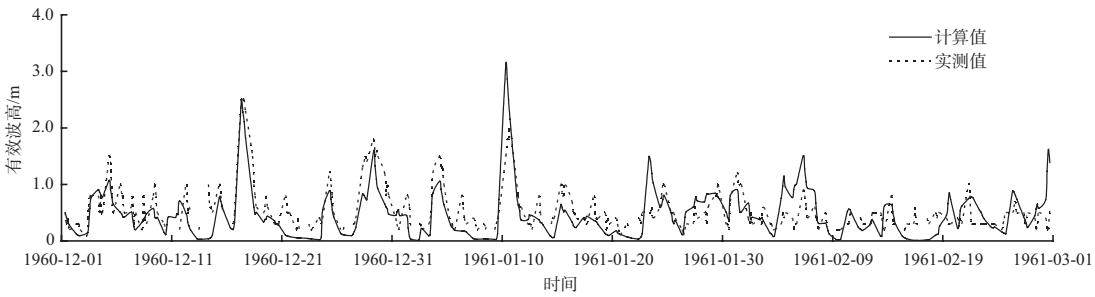
在模型计算参数选取方面，根据WAMC4模式本身特点，传播项和源项采用不同的积分时间步长：第一级网格和第二级网格传播项积分时步长均采用240 s，源项积分时步长采用720 s。

2.2 模型验证

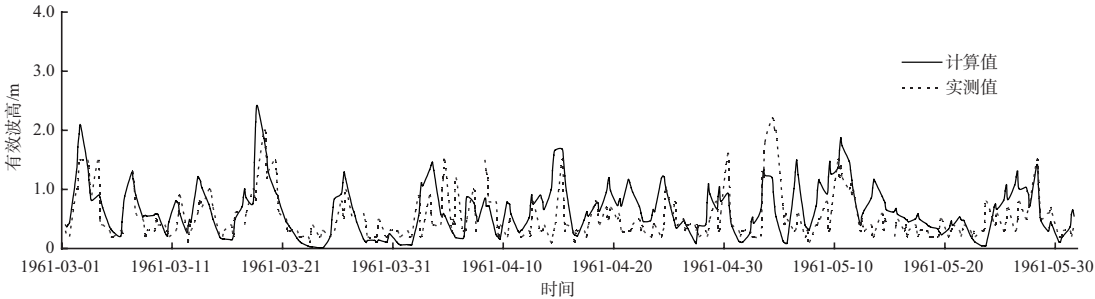
为检验模型的准确性和其在东中国海波浪分布研究中的适用性，分别选取黄海北部海域连云港海洋站（图1中A点，经纬度坐标为119.433°E，34.783°N）1960—1961年连续四季现场观测波浪资料和南部海域冷家沙（图1中B点，经纬度坐标为121.982°E，32.266°N）2008—2009年连续四季现场波浪观测资料与模型结果进行对比分析。图2



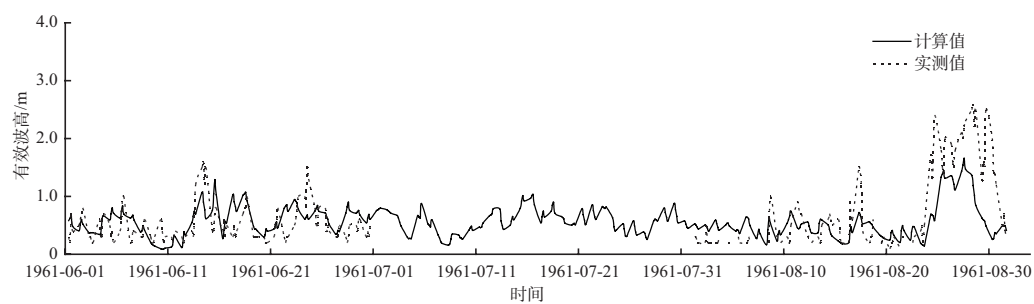
a) 秋季（1960-09—1960-11）



b) 冬季（1960-12—1961-02）

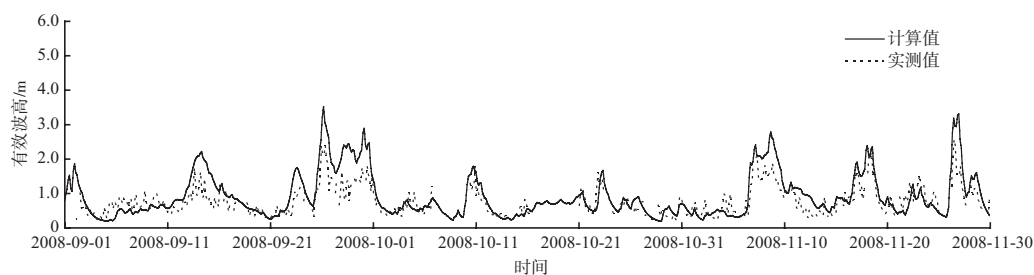


c) 春季（1961-03—1961-05）

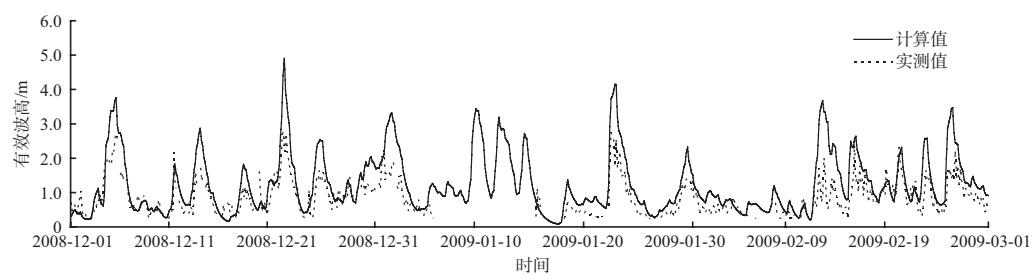


d) 夏季 (1961-06—1961-08)

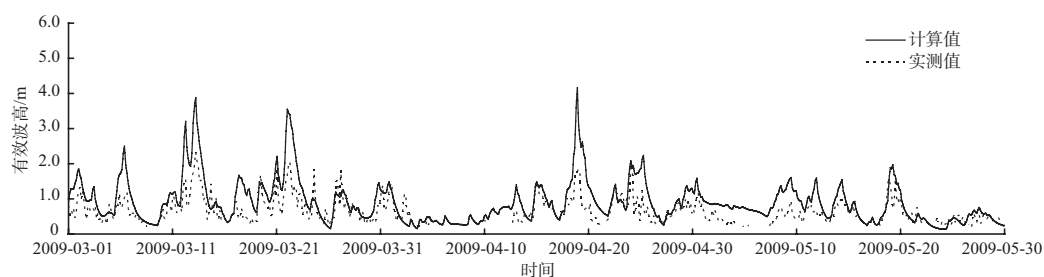
图2 连云港1960—1961年数值模拟与现场观测有效波高比较



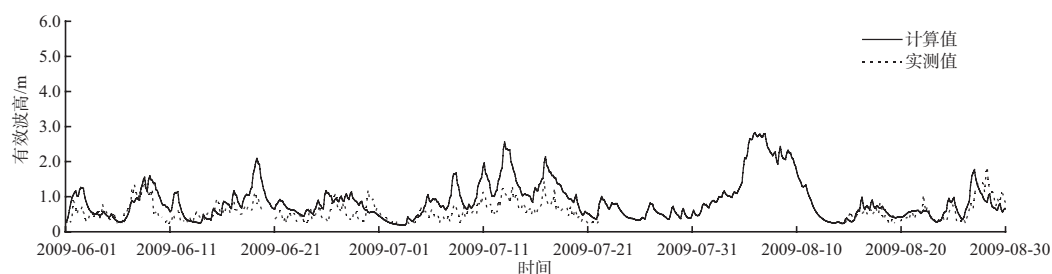
a) 秋季 (2008-09—2008-11)



b) 冬季 (2008-12—2009-02)



c) 春季 (2009-03—2009-05)



d) 夏季 (2009-06—2009-08)

图3 冷家沙2008—2009年数值模拟与现场观测有效波高比较

和图3分别为两验证点处有效波高的比较结果。

从图中可以看出,模拟结果在相位上与观测

值吻合良好,模型较好地反映了波浪发生、成长和消亡的过程。就连云港海洋站验证结果来看,

模型计算结果与实测值整体吻合良好,只在个别极值波高处,计算值较实测值略有偏小。就冷家沙测站验证结果来看,有效波高模拟值整体上较实测值略有偏大,考虑到冷家沙测站靠近岸边位置,水深较浅,仅为5.46 m,且周边地形较为复杂,而WAMC4没有考虑底摩阻效应和局部地形对波浪的掩护作用,因此计算结果在近岸区域较实测值略有偏大是可以理解的。由于本文模型覆盖范围较大,主要集中在对整个东中国海海域波浪分布特征进行全局性探讨,因此WAMC4仍可适用于该项研究。基于以上认识,本文开展了东中国海波浪长时间序列的后报计算,以此分析研究该海域波浪的时空分布特征。

### 3 东中国海波浪分布特征

将美国国家环境预报中心(NCEP)1950—2009年连续60年间再分析气象资料作为驱动风场条件,运行WAMC4模型,对1950—2009年连续60年间模型范围内的波浪进行长时间序列模拟后报。波浪的有效波高和平均周期每3小时输出1次。根据60年间模型后报的有效波高和平均周期,对东中国海波浪的季节和区域分布特征进行整理分析,并结合工程运用实际,比较分析平均波浪要素和5%累积频率波浪要素的分布特征。

#### 3.1 有效波高和平均周期的季平均分布特征

对模型后报的60年间春、夏、秋、冬四季波浪有效波高和平均周期进行整理,绘制东中国海四季平均有效波高和平均周期的分布场分别如图4和图5。

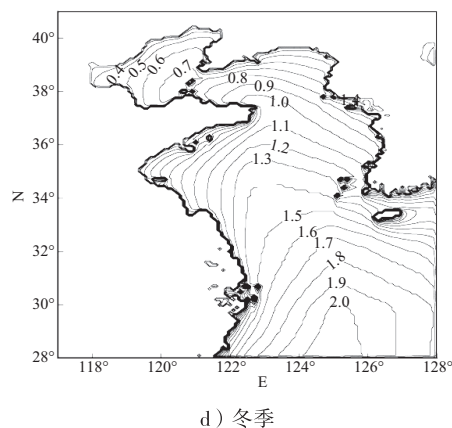
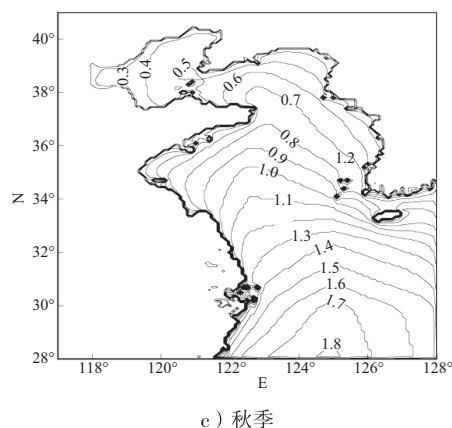
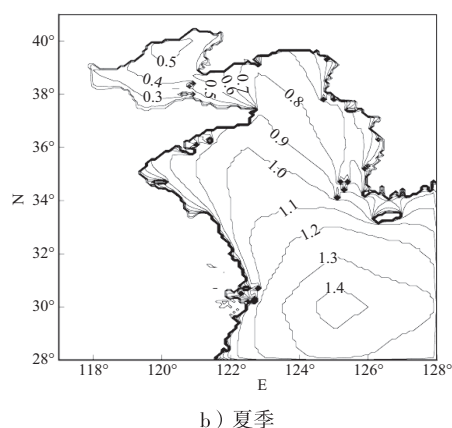
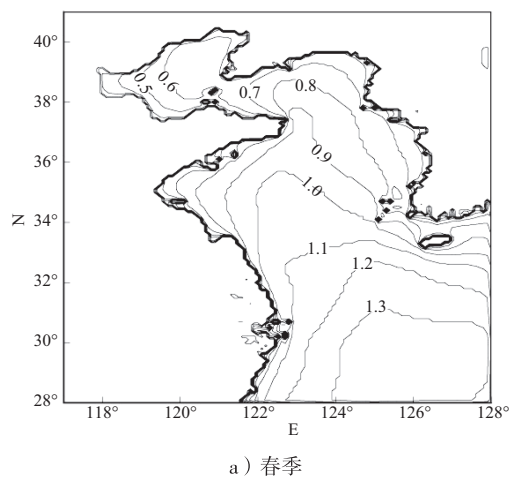
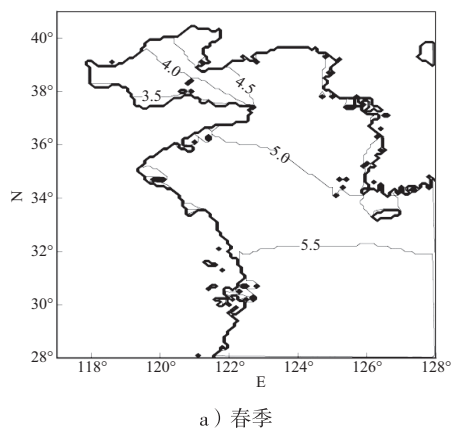


图4 东中国海四季平均有效波高分布(单位:m)



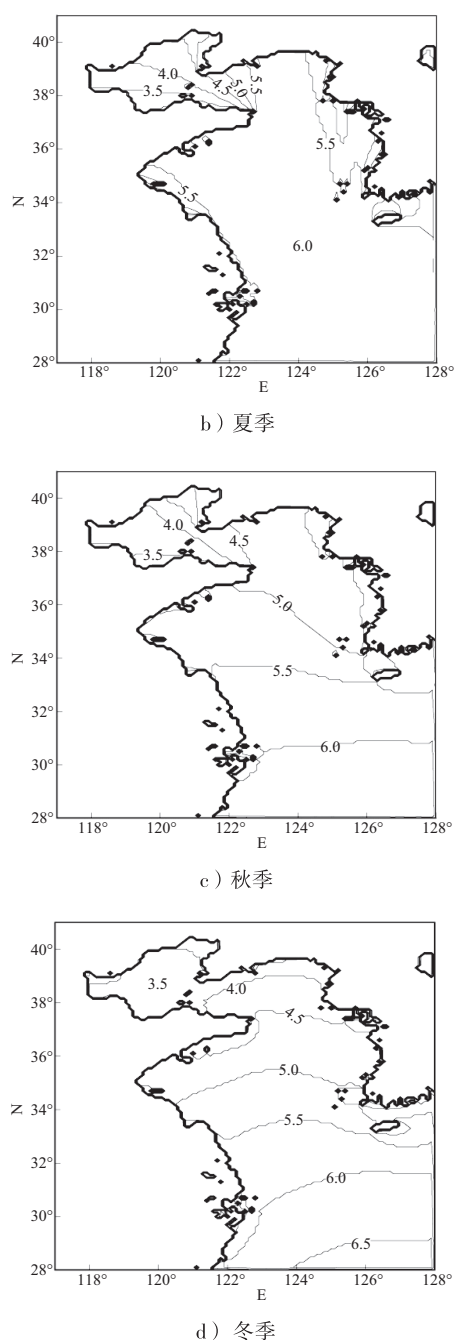


图5 东中国海四季平均波周期分布 (单位: s)

整体上而言,东中国海岸线呈喇叭状,四季的平均有效波高等值线与岸线形状基本保持一致,且由南向北逐渐递减。在同一纬度线上,有效波高在近岸海域较小,离岸则增大。由于东中国海所处的西北太平洋海域是世界最典型的季风气候区,季风的发展和变化过程决定了该海域的波浪变化特征,故平均有效波高分布的季节差异显著,冬季浪高最大,其次为秋季,春季、夏季最小。这与前人的研究结果一致<sup>[1-4]</sup>。

就季节分布而言,春季是研究海域冬季季风向夏季季风转换季节,此时大范围的天气系统活动过程较少,海浪的季节平均有效波高较小。渤海、黄海大部的有效波高不足1 m,东海大部有效波高由北向南逐渐增大,变化范围为1.2~1.4 m。渤海、黄海、东海大部的平均周期分别为3.5~4.5 s, 5~5.5 s和5.5~6 s。

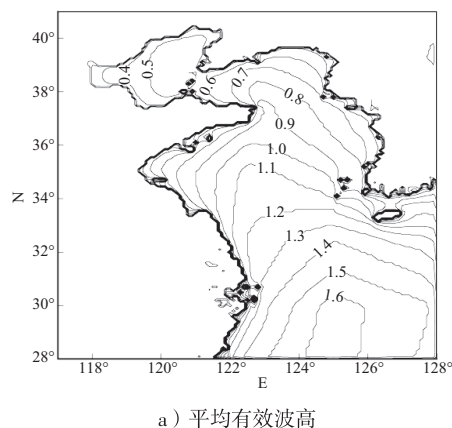
夏季除东海局部海域有效波高大于1.4 m外,有效波高分布规律与春季基本相似。渤海、黄海、东海大部的平均周期分别为3.5~5.5 s, 5.5~6 s和6 s。

秋季波高比夏季明显增大,同一波高等值线覆盖范围向北移动。渤海大部有效波高仍不足1 m,黄海有效波高变化范围为0.8~1.2 m,东海大部有效波高在1.3~1.8 m。平均周期为6 s覆盖的海域范围较夏季有所减小。

受冬季季风影响,冬季的平均有效波高最大。渤海大部有效波高不足1 m,黄海有效波高在1.1~1.4 m,东海部分海域有效波高超过2 m。波浪平均周期也相应增大,渤海、黄海、东海大部的平均周期分别为3.5~4.5 s, 5~5.5 s和5.5~6.5 s。

### 3.2 平均波浪场和5%累积频率波浪场比较分析

根据模型输出的60年间的平均有效波高和平均周期,可推算该海域常年平均波浪场和带一定累积频率概念的特征波浪场,并进行比较分析。图6为60年间东中国海海域的平均有效波高和对应于5%累积频率的有效波高的分布,图7则为该海域内平均周期和对应于5%累积频率的平均周期的分布。



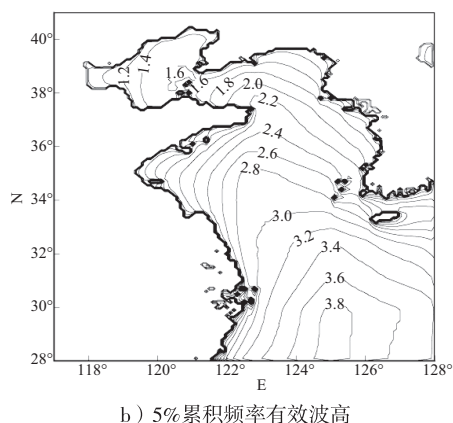
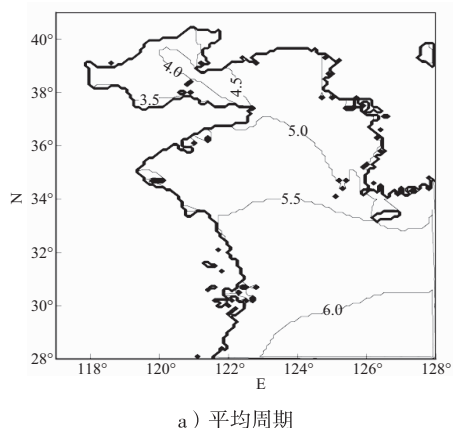
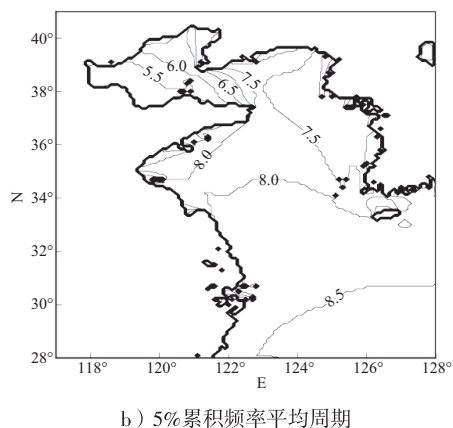


图6 东中国海不同累积频率有效波高分布 (单位: m)



a) 平均周期



b) 5%累积频率平均周期

图7 东中国海不同累积频率平均周期分布 (单位: s)

从有效波高分布图可以看出,东中国海域60年间5%累积频率有效波高与平均有效波高均呈现出由南向北逐渐递减的分布特征,同时受到岸线走向的影响。在渤海范围内,5%累积频率有效波高与平均有效波高之比约为2.75,黄海与东海大部该比值则分别约为2.50和2.35。5%累积频率平均周期与平均周期的比值较相应累积频率有效波高的比值小,在东中国海范围内约为1.45。

#### 4 结语

利用WAMC4模式,在西北太平洋海域建立二级嵌套波浪模型,开展1950—2009年连续60年间模型范围内波浪特征值的长期后报,并根据后报结果进行东中国海域波浪特征值的时空分布特征研究,得到以下主要结论:

1) 东中国海岸线呈喇叭状,该海域平均有效波高等值线与岸线形状基本保持一致,且由南向北逐渐递减;

2) 就季节分布而言,平均有效波高分布的季节差异显著,冬季浪高最大,其次为秋季,春季、夏季最小;

3) 在渤海范围内,5%累积频率有效波高与平均有效波高之比约为2.75,黄海与东海大部该比值则分别约为2.50和2.35;

4) 5%累积频率平均周期与平均周期的比值较相应累积频率有效波高的比值小,在东中国海范围内约为1.45。

由于WAMC4模式对于深水和中等深度海域的海浪具有较强的模拟能力,而在水深较浅的近岸区域的应用则还在探索和完善中,故可用于开展大范围波浪分布特征研究,而在近岸区域则需要与近岸浅水波浪模型,如SWAN模型等开展嵌套模型研究。另一方面,模型风场的精度对于波浪模型后报结果有较为直接的影响,可在模型风场的建立方面开展进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王云天,伊辉延. 东、黄海波浪的统计特征及谱分析[J]. 大连水产学院学报, 1997, 12(3): 33-39.
- [3] 刘金芳,孙立尹. 西北太平洋风场和海浪场特点分析[J]. 海洋预报, 2000, 17(3): 54-62.
- [4] 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.
- [5] 徐艳清,尹宝树,杨德周,等. 东中国海海浪数值模式的研究[J]. 海洋科学, 2005, 29(6): 42-47.
- [6] 梅婵娟,赵栋梁,史剑. 两种海浪模式对中国黄海海域浪高模拟能力的比较[J]. 海洋预报, 2008, 25(2): 92-98.
- [7] 徐福敏,黄云峰,宋志尧. 东中国海至长江口海域的台风浪特性的数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展, 2008, 23(6): 604-611.

- [8] Komen G J, Cavaleri L, Domelan M, et al. Dynamics and Modeling of Ocean Waves[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [9] WAMDI Group. The WAM model—a third generation ocean wave prediction model [J]. Journal of Physical Oceanography, 1988, 18: 1 775–1 810.
- [10] Valchev N, Davidan I, Belberov Z, et al. Hindcasting and assessment of the western Black Sea wind and wave climate[J]. Journal of Environmental Protection and Ecology, 2010, 11(3): 1 001–1 012.
- [11] Hatada Y, Yamaguchi M. Estimation of Long-Term Variability of Wave Climate around the Coastal Areas of Japan[C]//Proceeding of the 28th International Conference on Civil Engineering (ICCE), United Kingdom: 2002.
- [12] Yamaguchi M, Hatada Y. Estimation of Wave Climate and its Long-Term Variability around the Coasts of Korea[C]// Proceedings of The 13th International Offshore and Polar Engineering Conference(ISOPE), USA, 2003.
- [13] Lee D Y, Jun K C. Estimation of design wave height for the waters around the Korean Peninsula[J]. Ocean Science Journal, 2006, 41(4): 245–254.
- [14] Liu Yu, Li Jie, Dai Mingrui, et al. Operational Use of Wave Models in NMEFC[C]//China, the Second Workshop on Ocean Models for the APEC Region (WOM-2). Beijing: OMISAR Project Publication, 1999.
- [15] 王彩欣, 张占海, 王可光. 9914号(Dan)台风浪的后报试验研究[J]. 海洋通报, 2003, 22(1): 9–16.
- [16] Janssen, PAEM. Quasi-linear Theory of wind wave generation applied to wave forecasting[J]. J Phys Oceanogr, 1991, 21:1 631–1 642.
- [17] Pan S, Chen Y P, Wolf J, et al. Modelling of waves in the Irish Sea: Effects of oceanic wave and wind forcing[J]. Ocean Dynamics, 2009, 59(6): 827–836.
- [18] Chen Y P, Pan, Wolf J, et al. Downscaling effects on modelling waves, tides and storm surge[C]// Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering, Shanghai: 2010.

(本文编辑 郭雪珍)

《水运工程》优秀论文评选

## 评委点评:

论文以美国国家环境预报中心(NCEP)再分析气象资料作为驱动风场条件,运用第三代海浪模式WAM的第四版本(WAMC4)在西北太平洋海域建立二级嵌套波浪模型,利用连云港和冷家沙现场观测波浪资料验证了模型在东中国海波浪研究中的适用性,并对东中国海波浪时空分布特征进行探究,获得如下研究成果:四季的平均有效波高等值线与岸线形状基本保持一致,且由南向北递减;有效波高分布的季节差异显著——冬季浪高最大,其次为秋季,春季、夏季最小。在渤海范围内,5%累积频率有效波高与平均有效波高之比约为2.75,黄海与东海大部该比值则分别约为2.50和2.35;5%累积频率平均周期与平均周期的比值在整个东中国海范围内约为1.45。

论文结构合理、方法正确、内容丰富,有一定学术价值和实际参考意义。

2014年12月



## 评委简历:

吴相豪,上海海事大学教授,博士,硕士研究生导师。

从事港口航道与海岸工程领域的教学和科研工作。主持和参与纵向课题10余项;发表学术论文60余篇;合著《碾压混凝土坝安全监控理论及应用》,主编《港口工程钢筋混凝土结构》;获得国家科技进步二等奖1项、省部级科技进步二等奖2项和三等奖1项。