

文章编号:1005-9865(2015)06-112-07

江苏沿海波浪多重嵌套模拟研究

储锡君,徐福敏

(河海大学 海岸灾害及防护教育部重点实验室,港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098)

摘 要:根据 24 年 CCMP 风场资料和江苏沿海 4 个方向(N、NE、E 和 SE)百年一遇风速,构建西北太平洋、东中国海和江苏沿海上述 4 个方向的百年一遇风场。首次建立一个基于第三代海浪模型 SWAN 的自西北太平洋、东中国海至江苏沿海的三重嵌套数值模型,以 AVISO 卫星观测数据和江苏沿海定点实测数据进行验证。以三个计算域 4 个方向百年一遇风场为驱动风场,驱动该多重嵌套模型,高精度数值模拟江苏沿海 4 个方向百年一遇有效波高分布并进行分析。结果表明,江苏沿海辐射沙洲地形对有效波高分布影响显著;E 向百年一遇风场作用下海域有效波高最大,NE 向次之,N 向和 SE 较小。

关键词:CCMP 风场;SWAN 模型;多重嵌套模拟;有效波高分布;江苏沿海

中图分类号:P731.22 文献标志码:A DOI:10.16483/j.issn.1005-9865.2015.06.016

Study on multiple-nested simulation of waves along Jiangsu coast

CHU Xijun, XU Fumin

(Key Laboratory of Coastal Disasters and Defence, Ministry of Education, College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Wind field with a 100-year return period in Northwest Pacific, East China Sea and Jiangsu Coast in four directions of North, Northeast, East and Southeast is built with CCMP wind data of 24 years and wind speed with a 100-year return period along Jiangsu coast in each direction as mentioned above. Based on the third-generation wave model SWAN, a multiple-nested simulation model is built in three levels of nested domains from Northwest Pacific, East China Sea to Jiangsu coast for the first time and verified with AVISO satellite data and measured data at fixed points along Jiangsu coast. Using wind field with a 100-year return period in these three domains in four directions as the driving wind field of this multiple-nested simulation model, the distribution of significant wave height with a 100-year return period along Jiangsu coast can be simulated with high accuracy. It is concluded that the radial sandbanks along Jiangsu coast affect the distribution of significant wave height obviously; significant wave height is generally the largest under the effect of East wind field with a 100-year return period, Northeast the second, North and Southeast the least.

Keywords: CCMP wind field; SWAN model; multiple-nested simulation; distribution of significant wave height; Jiangsu coast

江苏地理位置优越、经济发展迅速,综合实力在全国名列前茅,其海岸线北起苏鲁交界的绣针河口,南抵长江口,全长约 888.95 km^[1],沿海地区自然资源丰富。同时其地理位置和复杂自然条件,沿海地区常受到台风和寒潮的影响,造成重大经济损失,严重威胁人员生命财产安全。确定江苏沿海不同重现期的波浪要素,合理确立海岸工程使用期间可能出现的极值波高,对江苏沿海地区的安全、海岸工程建筑物的设计和建设、防灾减灾具有极其重要作用。

江苏沿海的大浪主要是由极端天气引起的,由于海域缺乏长期连续的波浪实测资料,本研究首次以海浪数值模型多重嵌套模拟方法得到该海域百年一遇波浪要素。研究首次建立一个基于海浪模型 SWAN 的自

收稿日期:2015-01-22

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划(2012BAB03B01)

作者简介:储锡君(1990-),男,浙江宁波人,硕士生,主要从事灾害性海洋动力过程研究。E-mail:chu293546@126.com

西北太平洋、东中国海至江苏沿海的三重嵌套模拟模型并以 AVISO 卫星观测数据和江苏沿海响水站实测数据进行验证。以共计 24 年(1988 年 1 月至 2011 年 12 月)的 CCMP(Cross Calibrated, Multi Platform)风场数据按泊松-耿贝尔复合极值分布推算西北太平洋和东中国海 4 个方向(N、NE、E 和 SE)的百年一遇风场,以江苏沿海上述 4 个方向的百年一遇风速构建江苏沿海的百年一遇风场。以三个海域 4 个方向的百年一遇风场驱动该多重嵌套数值模型模拟江苏沿海的上述 4 个方向百年一遇有效波高分布,并对有效波高分布特征进行分析。

1 西北太平洋至江苏沿海的百年一遇风场分布特征

目前常用的风场有 NCEP 风场、QN(QuickSCAT/NCEP)混合风场和 CCMP 风场等,其中 NCEP 风场的空间分辨率较低($1.875^{\circ} \times 1.905^{\circ}$),QN 混合风场具有较高空间分辨率($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$),但时间序列较短(1999 年 10 月至 2009 年 7 月),CCMP 风场相比则具有分辨率高、时间序列长等优点^[2]。CCMP 风场资料来自美国航空航天局(NASA),数据自 1987 年 7 月至 2011 年 12 月,覆盖全球,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为 6 h。

Atlas^[3]通过实验证实了 CCMP 较其他单个的卫星平台测量的风场数据在精度方面有很大提高,能够满足很多海洋和大气环境应用研究的需要。张鹏等^[4]利用渤海海区一个点位 11 天的风场数据,对 CCMP 的风场数据进行验证,结果表明风场的风速和风向与相应的实测值之间的相关系数分别为 0.89 和 0.91。故 CCMP 风场数据能较好的代表实际风场状况。

本研究使用 24 年(1988 年 1 月至 2011 年 12 月)的 CCMP 风场数据,根据泊松-耿贝尔复合极值分布方法推算西北太平洋至东中国海的 4 个方向(N、NE、E 和 SE)百年一遇风场。

1.1 泊松-耿贝尔复合极值分布

目前常用的分布函数有皮尔逊 III 型累计频率曲线、对数正态概率分布、第一极值分布(耿贝尔分布)和泊松-耿贝尔复合极值分布等。在统计我国沿海台风引起的大浪,常采用泊松-耿贝尔复合极值分布,因为该分布不仅考虑了年极值分布,还考虑了年台风出现的次数,因而比较合理^[5]。

由于每年的台风路径、强度、频率都是随机的,构成离散型分布,而 TC 影响下的最大风速构成连续型分布。由于每年台风出现的频次 n 符合泊松分布,假设台风影响下海域风速服从耿贝尔分布,可推得泊松-耿贝尔复合极值分布的分布函数,并可进一步推算得概率为 P 的大风极值 V_p 为:

$$V_p = \delta + \frac{-\ln[-\ln(1 + \ln P)]}{\alpha} = \delta + \frac{-\ln[-\ln(1 + \frac{1}{\lambda} \ln(1 - \frac{1}{T}))]}{\alpha} \quad (1)$$

式中: $\lambda = \frac{N}{M}$, N 为台风影响总次数, M 为总年数; T 为重现期; 参数 $\alpha = \frac{S_y}{S_x}$, $\delta = \bar{x} - \frac{S_x}{S_y} \bar{y}$, \bar{y} 与 S_y 为只与 n 有关的参数, \bar{x} 和 S_x 为有限样本的均值和均方差。

1.2 西北太平洋和东中国海的百年一遇风场

基于自 1988 年 1 月至 2011 年 12 月共 24 年的 CCMP 风场数据,计算西北太平洋和东中国海每隔 6 小时的风场,并划分为 8 个方位(N、NE、E、SE、S、SW、W 和 NW)。由于本研究主要考虑百年一遇风场作用下江苏沿海大浪,只考虑西北太平洋和东中国海范围内对江苏沿海影响较大的 4 个方向(N、E、NE 和 SE)。

由中国台风网资料统计表明西北太平洋上述 24 年间共计有热带气旋 692 个,根据泊松-耿贝尔复合极值分布,推算得到西北太平洋和东中国海计算域的上述 4 个方向百年一遇风速分布情况,图 1 为西北太平洋和江苏沿海 E 向百年一遇风速等值线分布。

可见西北太平洋百年一遇风速的最大值可达 65 m/s,位于北纬 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 、东经 $152^{\circ} \sim 165^{\circ}$ 范围内;西北太平洋高纬海域百年一遇风速比低纬普遍偏大,靠近赤道时则不足 20 m/s;东中国海百年一遇风速的最大值可达 50 m/s,位于外海北纬 $23.3^{\circ} \sim 28.5^{\circ}$ 、东经 $126^{\circ} \sim 128^{\circ}$ 范围内,百年一遇风速从外海向海岸逐渐减小。计算研究发现其余 3 个方向的西北太平洋和东中国海的百年一遇风场具有与 E 向相似的分布特征。

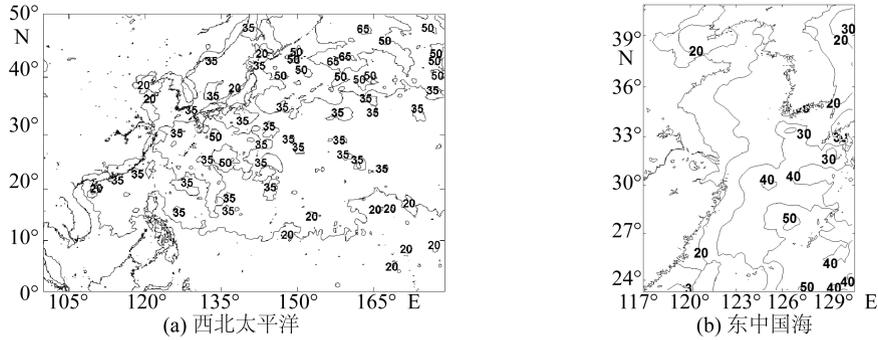


图 1 E 向百年一遇风速等值线分布(单位:m/s)

Fig. 1 The contour distribution of East wind speed with a 100-year return period

1.3 江苏沿海的百年一遇风场

江苏沿海范围内 CCMP 风场网格数据较少,故不采用 CCMP 风场数据推算江苏沿海的百年一遇风场。本研究使用赣榆、西连岛、燕尾岛、射阳、大丰、如东、吕四和启东 8 个测站 1981 年至 1998 年风速实测资料推算出的江苏沿海 N、NE、E 和 SE 向百年一遇风速和西连岛 1974 年至 2003 年风速实测资料推算出的江苏沿海 NE 和 E 向百年一遇风速。表 1 为基于上述资料推算得到的江苏沿海百年一遇风速表。

可见基于 1981—1998 年风速实测资料推求得到的江苏沿海 4 个方向海上百年一遇风速中,SE 向比其它三向明显偏小,E 向最大,接近 40 m/s,NE 向其次;基于 1974—2003 年风速实测资料推求得到的 NE 向和 E 向百年一遇风速均大于 40 m/s,E 向略大些。

表 1 江苏沿海百年一遇风速表

Tab. 1 Wind speed along Jiangsu Coast with a 100-year return period

资料时间范围	百年一遇风速/(m·s ⁻¹)			
	N	NE	E	SE
1981—1998	34.36	37.77	39.05	24.85
1974—2003	/	41.61	43.17	/

2 SWAN 模型简介

海浪数值预报始于 20 世纪 50 年代^[6],数值模拟发展到 20 世纪末已达到比较成熟的阶段,数值模式被广泛应用于模拟海浪的发展过程和规律,形成了以 WAM 模型^[7]、WAVEWATCH 模型^[8]和 SWAN(simulating waves nearshore)模型^[9]为代表的第三代海浪数值模型。Booij 等以波浪线性理论及荷兰、德国的一些现场观测资料进行验证,表明 SWAN 模型对复杂地形下的波浪模拟能力好。Zijlema 等^[10]就 SWAN 模型收敛性及数值计算的准确性作了分析及改进。Gorman 等^[11]利用 SWAN 模型模拟了潮间带河口的波浪生成及传播过程。Rogers 和 Lin 等的研究表明,SWAN 模型能很好地模拟近岸涌浪、风浪和混合浪。

SWAN 海浪模型在国内也得到了广泛研究应用。陈希等^[12]采用 SWAN 模型嵌套方法,对一次台风浪过程进行了模拟。徐福敏等^[13-15]采用 SWAN 模型对不同水深时流场对于波浪传播的影响进行了探讨,并将模型应用于海安湾的浅水波浪数值计算,模拟湾内波高及周期场分布,与观测结果对比验证表明符合良好。张洪生等^[16]基于 CCMP 卫星遥感风场数据,通过将 WAVEWATCH 和 SWAN 模型嵌套的方法,数值模拟了珠江口附近海域的风浪场,定量分析表明数值模型模拟结果良好。

SWAN 是 Delft 大学开发的基于动谱平衡方程的第三代谱波浪数值模型。动谱密度 $N(\sigma, \theta)$ 与能谱密度 $E(\sigma, \theta)$ 的关系为: $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$, σ 为相对波频, θ 为波向。在球坐标系下,动谱平衡方程可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial \lambda} C_{\lambda} N + (\cos \varphi)^{-1} \frac{\partial}{\partial \varphi} C_{\varphi} \cos \varphi N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_{\sigma} N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_{\theta} N = \frac{S}{\sigma} \quad (2)$$

式中:方程左边第一项代表动谱密度 N 随时间的变化率;第 C_λ 、 C_φ 、 C_σ 和 C_θ 分别代表经度 λ 、纬度 φ 、 σ 和 θ 方向上的相应的传播速度; S 代表源项,包括风能输入、波浪间非线性相互作用和损耗项(底摩擦、白浪和水深变浅引起的破碎等)。

SWAN 模型采用全隐式有限差格式,无条件的稳定^[17],具有计算精度高的特点,发展至今已成功应用于河口、近海水域和大尺度海域的海浪预报^[13,15]。

3 西北太平洋至江苏沿海三重嵌套模型验证

本文建立的三重嵌套模型区域自外向内分别:西北太平洋计算域($100^\circ\text{E} \sim 180^\circ\text{E}$, $0^\circ\text{N} \sim 50^\circ\text{N}$),如图 1(a)所示;东中国海计算域($116.9^\circ\text{E} \sim 130.8^\circ\text{E}$, $23.3^\circ\text{N} \sim 40.8^\circ\text{N}$),如图 1(b)所示;江苏沿海计算域($119^\circ10'\text{E} \sim 122^\circ24'\text{E}$, $31^\circ40'\text{N} \sim 35^\circ6'\text{N}$),如图 2 所示。外两层计算域水深数据是将从 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)下载的 $1^\circ \times 1^\circ$ 水深数据插值处理得到,西北太平洋计算域水深插值后的分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,东中国海计算域插值后的分辨率为 $4' \times 4'$ 。江苏沿海水深地形条件复杂,近海存在辐射沙洲群,海域使用海图水深,分辨率为 $1' \times 1'$ 。

西北太平洋计算域模型计算网格的空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$;东中国海模型计算网格分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$;江苏沿海模型计算网格经度方向上的分辨率为 $0.776'$,纬度方向上为 $0.687'$ 。外层计算域为内层提供波浪边界条件。模型采用球形坐标系,计算频率为 $0.04 \sim 1.0 \text{ Hz}$,以 $f_{i+1} = \lambda f_i$ 划分为 20 个频域, λ 为常数;谱方向网格数为 24 个;底摩擦造成的能量损耗采用 Collins 非线性表达式,系数 $C_f = 0.006$;破波参数 $\gamma = 0.73$;其余物理过程如白浪耗散、非线性相互作用等参数采用模型默认值,模型时间步长为 30 分钟。

本研究分别对西北太平洋至东中国海波浪模型和江苏沿海波浪模型进行验证。验证时段自 2011 年 5 月 15 日 0 时至 5 月 24 日 18 时(UTC,世界标准时间),驱动风场为该时段的 CCMP 风场。

3.1 西北太平洋至东中国海波浪模型的验证

AVISO(Archiving Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data)是法国国家空间研究中心开发的卫星观测数据,本研究使用其有效波高观测数据。有效波高观测数据的时间范围为 2009 年 9 月至今,覆盖全球,空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,时间分辨率为 24 小时。图 3(a)为 SWAN 模型数值模拟得到的西北太平洋 2011 年 5 月 20 日 0 时的有效波高分布;图 3(b)为该时刻的 AVISO 卫星观测有效波高分布。

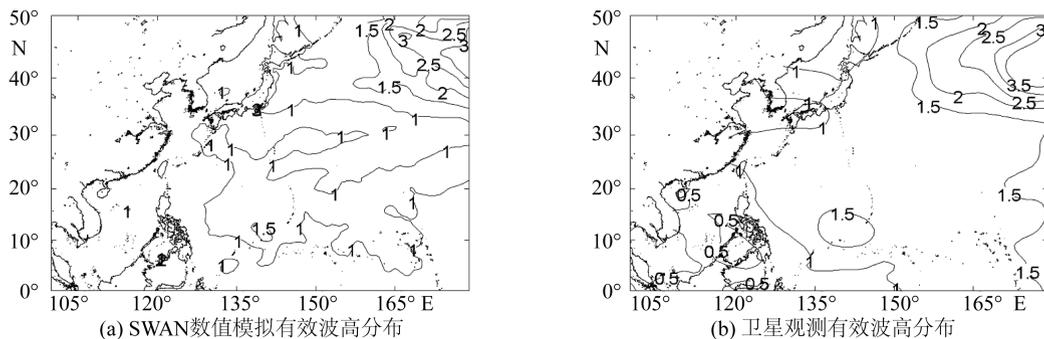


图 3 西北太平洋 5 月 20 日 0 时有效波高分布(单位:m)

Fig. 3 The distribution of significant wave height at Northwest Pacific at zero on May 20th

SWAN 数值模拟结果与卫星观测有效波高数据对比分析,西北太平洋的海域有效波高最大值均位于北纬 $35^\circ \sim 50^\circ$,东经 $160^\circ \sim 180^\circ$ 范围内,等值线分布较为相似,大部分海域的有效波高相近。计算西北太平洋所有网格节点的 SWAN 模拟有效波高与卫星观测数据的均方根误差为 0.44 m ,表明对西北太平洋海浪模型验证良好。计算研究发现东中国海 SWAN 数值模拟的有效波高等值线分布与卫星观测相似,海域有效波高值相近。

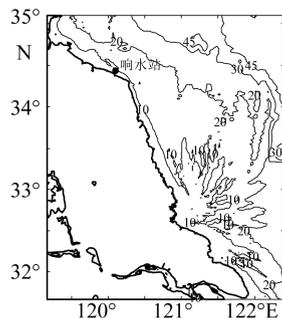


图 2 江苏沿海的水深分布(单位:m)

Fig. 2 The depth distribution of Jiangsu coast

3.2 江苏沿海海浪模型的验证

响水站位于江苏沿海响水县 34.437°N 、 120.1°E ,如图 2 所示。研究使用海图水深插值得到响水站的水深为 8.36 m,测站由河海大学维护,使用波浪浮标遥感系统获取波浪要素。测站数据包括有效波高、平均波周期、波向和最大波高等,时间范围自 2010 年 11 月 1 日至 2012 年 7 月 3 日,分辨率为 1 小时。研究对江苏沿海海浪模型进行验证时,对模型参数选取进行数值模拟研究和分析。将底摩擦系数 C_f 分别取值为 0.006、0.010 和 0.015,SWAN 三重嵌套模型模拟得到响水站在 2011 年 5 月 15 日 0 时至 5 月 24 日 18 时的有效波高,并进行敏感性分析。结果表明当 $C_f = 0.006$ 时,数值模拟有效波高最大值与实测最为接近,故模型底摩擦系数取为 0.006。图 4(a) 为 SWAN 三重嵌套模型模拟得到的响水站在 2011 年 5 月 15 日 0 时至 5 月 24 日 18 时的有效波高与测站实测数据的对比;图 4(b) 为模型模拟得到的该时间范围内的平均波周期与测站实测数据的对比。

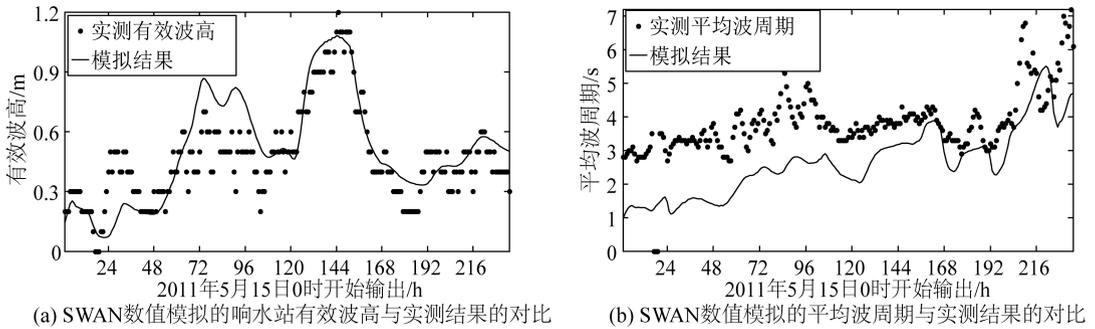


图 4 响水站 SWAN 数值模拟结果与实测结果的对比

Fig. 4 Comparisons of simulated result with the measured data at Xiangshui

可见 SWAN 数值模拟得到的响水站有效波高、平均波周期与实测值变化趋势均相近,两者的有效波高均方根误差为 0.15 m,平均波周期均方根误差为 1.42 s,表明结果吻合较好。

对西北太平洋至江苏沿海的模型验证表明 SWAN 模型三重嵌套进行数值模拟可较好得模拟计算海域的有效波高分布和海浪动态变化过程,证明了 SWAN 三重嵌套数值模拟模型的合理性。

4 多重嵌套方法模拟江苏沿海百年一遇波浪

以第 1 节的三海域的百年一遇风场为驱动风场,基于上述西北太平洋至江苏沿海 SWAN 三重嵌套数值模型,模拟得到江苏沿海 4 个方向(N、NE、E 和 SE)百年一遇有效波高分布。

4.1 江苏沿海百年一遇波浪分布模拟结果

基于 1974—2003 年风速资料推算得到的江苏沿海 E、NE 向百年一遇风速比基于 1981—1998 年风速资料的推算结果偏大(见表 1),模拟得到的江苏沿海外海百年一遇有效波高偏大,近海辐射沙洲有效波高分布则相似。分别作图 5 中(a)-(d)(基于 1981—1998 年风速资料,见表 1)和(e)-(f)(基于 1974—2003 年风速资料,见表 1)。

可见,江苏沿海外海处有效波高等值线较为顺滑,有和岸线平行的趋势,在图 5(d) SE 向百年一遇有效波高分布体现的最为明显。随着波浪向近岸传播,由于底摩擦、浅化破碎等损耗,有效波高迅速减小,北部海域有效波高变化比较平缓,在南部辐射沙洲海域($32.5^{\circ}\sim 33.5^{\circ}\text{N}$)近岸百年一遇有效波高的变化较为复杂,对比江苏沿海的水深分布(见图 2),可明显观察到辐射沙洲处百年一遇有效波高偏小,有效波高分布与水深分布相关性很大。表明辐射沙洲对江苏近岸有效波高分布的影响显著。

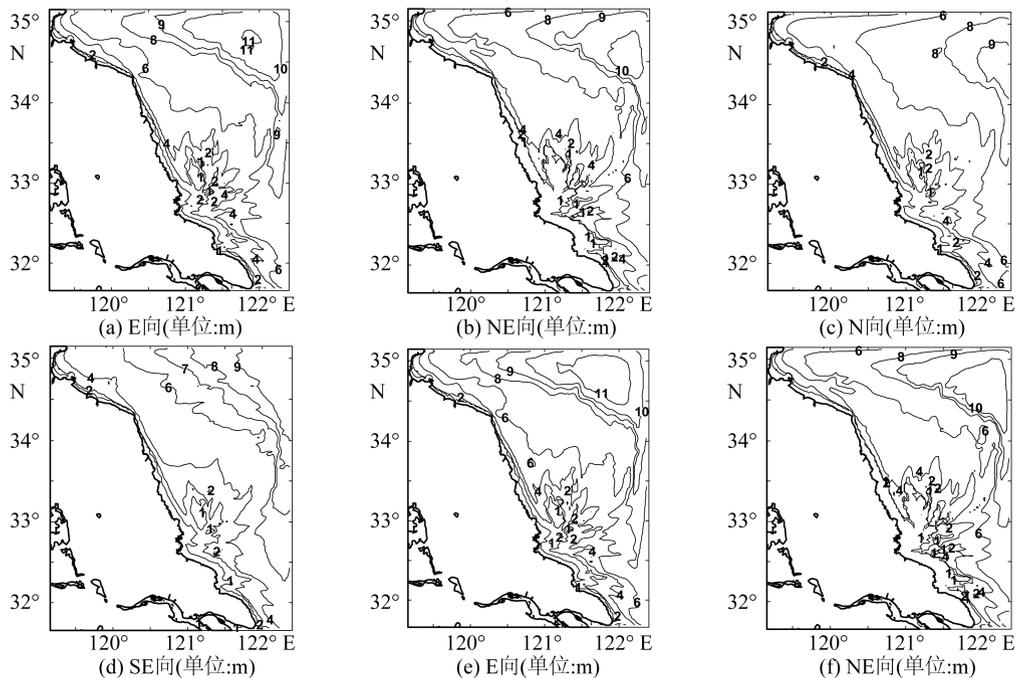


图 5 江苏沿海百年一遇有效波高分布

Fig. 5 The distribution of significant wave height a with 100-year return period along Jiangsu coast

4.2 江苏沿海百年一遇有效波高分布特征

表 2 为 SWAN 多重嵌套模拟得到江苏沿海 4 个方向(N、E、NE 和 SE)的百年一遇有效波高的最大值。

表 2 江苏沿海百年一遇有效波高的最大值

Tab. 2 The maximum significant wave height with a 100-year return period along Jiangsu coast

方向	基于 1981-1998 年风速资料			基于 1974-2003 年风速资料		
	有效波高/m	经度/(°)	纬度/(°)	有效波高/m	经度/(°)	纬度/(°)
N	9.48	122.34	34.40	/	/	/
SE	10.06	122.42	34.75	/	/	/
E	11.09	121.85	34.78	11.75	121.85	34.81
NE	10.23	122.11	34.43	10.63	122.11	34.43

表 2 的江苏沿海各向百年一遇有效波高最大值与谢冬梅等^[1]计算得到江苏外海深水边界点分方向统计百年一遇波高结果相比较为接近。由图 5 和表 2 可见,基于 1981—1998 年风速资料模拟得到的 4 个方向(N、E、NE 和 SE)江苏沿海百年一遇有效波高分布,外海 N 向和 SE 向的有效波高比其它向明显偏小,NE 向偏大,近海 4 个方向的有效波高分布相似;海域 E 向有效波高最大值最大,为 11.09 m,NE 向其次,N 向最小。江苏沿海 N 向百年一遇风速较 SE 明显偏大,但两向百年一遇风场影响下有效波高分布相似,最大值相近,可知若在相同风速条件下,SE 向风作用下产生的江苏沿海的有效波高比 N 向大,对江苏沿海的影响更大。SE 向与 N 向百年一遇风场作用下江苏沿海百年一遇有效波高偏小,对江苏沿海影响也最小,E 向最大,NE 向其次。

5 结 语

本研究首次建立一个基于海浪模型 SWAN 的自西北太平洋、东中国海至江苏沿海的三重嵌套模型,经验证模型的合理性,该模型对江苏沿海重现期波浪的数值模拟提供了一个有效途径。以西北太平洋、东中国海和江苏沿海三个计算域 4 个方向百年一遇风场驱动三重嵌套模型模拟得到江苏沿海百年一遇有效波高分布。研究表明,辐射沙洲对有效波高分布有显著影响,E 向风场作用下的江苏沿海百年一遇有效波高分布最

大,NE 向次之,N 向和 SE 较小。

本研究根据泊松-耿贝尔复合极值分布推算西北太平洋和东中国海 4 个方向百年一遇风速时只统计考虑了台风影响总次数。下一步工作将综合考虑台风与寒潮的影响,推算西北太平洋至江苏沿海 4 个方向不同重现期的风速和多重嵌套模拟江苏沿海不同重现期的有效波高分布。

参考文献:

- [1] 谢冬梅,陈永平,张长宽. 江苏外海深水波要素推算[J]. 海洋工程,2013,31(2):94-99. (XIE Dongmei, CHEN Yongping, ZHANG Changkuan. Calculation of deepwater waves along Jiangsu coast[J]. The Ocean Engineering, 2013, 31(2):94-99. (in Chinese))
- [2] 郑崇伟. 基于 CCMP 风场的近 22 年中国海海表风场特征分析[J]. 气象与减灾研究,2011,34(3):41-46. (ZHENG Congwei. Sea surface wind field analysis the China Sea during the last 22 years with CCMP wind field[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2011, 24(3):41-46. (in Chinese))
- [3] ATLAS R, JOSEPH A, HOFFMAN R N. Application of satellite surface wind data to ocean wind analysis[C]//Processing of the SPIE — The International Society for Optical Engineering. 2008.
- [4] 张鹏,陈晓玲,陆建忠,等. 基于 CCMP 卫星遥感海面风场数据的渤海风浪模拟研究[J]. 海洋通报,2011,30(3):266-271. (ZHANG Peng, CHEN Xiaoling, LU Jianzhong, et al. Research on wave simulation of Bohai Sea based on the CCMP remotely sensed sea winds[J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(3):266-271. (in Chinese))
- [5] 邱大洪. 工程水文学[M]. 北京:人民交通出版社,2011. (QIU Dahong. Engineering hydrology[M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese))
- [6] 赵红军,宋志尧,徐福敏,等. 南中国海台风浪数值模拟研究—以台风“珍珠”为例[J]. 海洋工程,2010,28(3):128-134. (ZHAO Hongjun, SONG Zhiyao, XU Fumin, et al. Numerical simulation of typhoon waves in the South China Sea — a case study of typhoon Chanchu[J]. The Ocean Engineering, 2010, 28(3):128-134. (in Chinese))
- [7] WAMDI Group. The WAM model—a third generation ocean wave prediction model[J]. Journal of Physical Oceanography, 1988, 18:1775-1810.
- [8] TOLMAN. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22[M/OL]. Technical Note 222, NCEP/NOAA/NWS. Washington D C: National Center for Environment Prediction, 2002.
- [9] BOOIJ N, RIS R C, HOLTHUIJSEN L H. A third-generation wave model for coastal regions, Part I: Model description and validation[J]. Journal Geophysical Research, 1999, 104(C4):7649-7666.
- [10] ZIJLEMA M, ANDRE J. van der Weathuysen. On convergence behavior and numerical accuracy in stationary SWAN simulations of nearshore wind wave spectra[J]. Coastal Engineering, 2005,52:237-256.
- [11] GORMAN R M, NEILSON C G. Modeling shallow water wave and transformation in an intertidal estuary[J]. Coastal Engineering, 1999, 36:197-217.
- [12] 陈希,闽绍忠,沙文钰,等. 近岸海浪模式在中国东海台风浪模拟中的应用—数值模拟及物理过程研究[J]. 海洋通报,2003,22(2):9-16. (CHEN Xi, MIN Jinzhong, SHA Wenyu, et al. A simulation of nearshore typhoon waves[J]. Marine Science Bulletin, 2003, 22(2):9-16. (in Chinese))
- [13] 徐福敏,张长宽,茅丽华,等. 一种浅水波浪数值模拟的应用研究[J]. 水动力学研究进展,2000,12(4):429-434. (XU Fumin, ZHANG Changkuan, MAO Lihua, et al. Application of a numerical model for shallow water waves[J]. Journal of Hydrodynamics, 2000, 12(4):429-434. (in Chinese))
- [14] XU Fumin, YAN Yixin, ZHANG Changkuan. Wave numerical model for shallow water[J]. China Ocean Engineering, 2002(2):193-202.
- [15] CAVALERI L, RIZZOLI P M. Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans(1978-2012), 1981, 86(C11):10961-10973.
- [16] 张洪生,辜俊波,王海龙,等. 利用 WAVEWATCH 和 SWAN 嵌套计算珠江口附近海域的风浪场[J]. 热带海洋学报,2013,32(1):8-17. (ZHANG Hongsheng, GU Junbo, WANG Hailong, et al. Simulating wind wave field near the Pearl River Estuary with SWAN nested in WAVEWATCH[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2013, 32(1):8-17. (in Chinese))
- [17] 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. (LI Shaowu, LIANG Chao, ZHUANG Qian. Application of SWAN model in onshore design wave factors calculation[J]. Port Engineering Technology, 2012, 49(2):5-7. (in Chinese))