

文章编号:1005-9865(2017)02-0123-08

寒潮影响下江苏沿海风浪场数值模拟研究

周春建^{1,2}, 徐福敏^{1,2}

(1. 河海大学 海洋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)

摘 要:基于第三代浅水波浪数值预报模型 SWAN, 建立自西北太平洋嵌套至东中国海、江苏沿海的三重嵌套模型, 对 2010 年 12 月 12 日至 15 日江苏沿海寒潮大风引起的风浪过程进行了数值模拟研究。利用西北太平洋和江苏沿海实测数据对模型进行了验证, 结果表明 SWAN 嵌套模型能较好地模拟江苏沿海寒潮风浪场的时空分布。通过响水站实测数据对江苏沿海底摩擦系数进行了率定, 研究表明选取 Collins 拖曳理论中摩擦因数 $C_f = 0.001$ 时, 有效波高模拟误差相对较小。寒潮风浪场的特征分析表明, 有效波高分布与风场分布基本一致, 寒潮风浪在江苏沿海北部影响较为显著, 辐射沙洲附近由于其特殊地形影响相对较小。

关键词:江苏沿海; SWAN 模型; 三重嵌套; 寒潮; 风浪场; 底摩擦

中图分类号: P731.2

文献标志码: A

DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2017.02.017

Research on the numerical simulation of wind wave field affected by a cold wave in Jiangsu coast

ZHOU Chunjian^{1,2}, XU Fumin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coastal Disasters and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the third-generation wave model SWAN, establishing a triple nested mode from the Northwest Pacific to the East China Sea, then to Jiangsu coast, conducting a numerical simulation of wind wave field under the influence of a cold wave during 12 to 15 December 2010 in Jiangsu coast. By comparing the Northwest Pacific and Jiangsu coastal observed data with the SWAN simulation results, it indicates that SWAN nested model can well reproduce temporal and spatial distribution of the wind wave field affected by cold waves in Jiangsu coast. Meanwhile with the Xiangshui observed data, the bottom friction coefficient was calibrated in Jiangsu coastal, our analyses show that Collins coefficient of 0.001 can reduce the frictional dissipation effect. The wind and wave field characteristic analysis indicates that the distribution of significant wave height is basically the same with the wind distribution. The wave effect is significant in the northern coast, whereas due to the special terrain it has little effect in the radial sand ridges area.

Keywords: Jiangsu coast; SWAN model; triple nested; cold wave; wind wave field; bottom friction

寒潮是冬半年影响我国最严重的灾害性天气之一, 其主要的特点是剧烈的降温和大风, 有时伴随着雨、雪。当寒潮影响沿海地区时, 强烈的大风进入海面上会引起巨大的风浪, 严重时可能导致沿海地区水位暴涨, 造成沿岸建筑和船只摧毁, 酿成严重的海洋灾害。统计研究指出, 江苏寒潮平均每年发生 5.1 次^[1], 寒潮大风造成的灾害较为严重, 寒潮型风浪的影响不容忽视^[2]。许多学者对江苏沿海的波浪特性做过大量研究^[3-4], 而寒潮风浪的研究相对较为匮乏, 所以对寒潮影响下江苏沿海风浪场的数值模拟具有一定的研究

收稿日期: 2016-04-23

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAB03B01)

作者简介: 周春建(1991-), 男, 江苏如皋人, 硕士研究生, 从事河口海岸水动力研究。E-mail: chunjian_zhou@hhu.edu.cn

意义。

随着波浪理论研究和计算机技术的迅速发展,通过数值模型研究波浪的传播变化规律成为较为有效的方法,以能量平衡方程为基础的第三代海浪模型 WAM、WAVEWATCHⅢ和 SWAN 已成功应用于不同条件下波浪的模拟和预报。R C Ris 等^[5]全面考虑波浪浅化、折射、反射、耗散、风能输入及波浪非线性效应,开发出适用于河口、湖泊及近岸的浅水波浪模型 SWAN;N Booij 等^[6]利用实测资料对 SWAN 模拟结果进行了验证。SWAN 模型在中国海域也都有广泛的应用,赵红军等^[7]通过建立 SWAN 两重嵌套模型对南中国海台风浪进行了数值模拟研究,结果表明台风浪要素的模拟值与实测数据吻合良好;Ou 等^[8]利用 SWAN 嵌套模式对影响台湾岛海域四类典型台风路径的台风浪进行了数值计算。经过学者不断的研究和改进,SWAN 模型适用于中尺度和近岸风浪、涌浪及混合浪的模拟与预报。

本文以 2010 年 12 月 12 日至 15 日影响江苏沿海的寒潮为例,通过建立 SWAN 三重嵌套模型对寒潮影响下的江苏沿海风浪场进行数值模拟研究,并对模型的底摩擦系数进行率定,利用 SWAN 模型再现了寒潮风浪场的时空分布。

1 SWAN 模型介绍

SWAN(Simulating Waves Nearshore)是由荷兰 Delft 大学开发的第三代浅水波浪数值模型,模型采用动谱平衡方程和线性随机表面重力波理论,数值计算采用全隐式格式,无条件稳定,广泛应用于对海岸、湖泊和河口等地区波浪的数值模拟和预报。

1.1 SWAN 控制方程

SWAN 模型以二维动谱密度表示随机波,动谱密度 $N(\sigma, \theta)$ 为能谱密度 $E(\sigma, \theta)$ 与相对频率 σ 之比。在直角坐标系下,动谱平衡方程表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \tag{1}$$

式中:左边第一项代表作用量密度 N 随时间的变化率。第二项和第三项代表作用量密度 N 在 x 和 y 几何空间的传播(传播速度 C_x 和 C_y)。第四项代表流场和水深变化引起作用量在 σ 空间的频移(传播速度 C_σ)。第五项代表作用量在 θ 空间的传播(传播速度 C_θ)。方程右边的 S 代表能量源汇项,这一项可写成几个不同类型的源项之和:

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \tag{2}$$

式中: S_{in} 代表风能输入项, S_{ds} 代表由白浪、底摩擦、变浅破碎引起的耗散作用, S_{nl} 是四波相互作用和三波相互作用的非线性项。

1.2 源汇项及物理过程

SWAN 模型全面考虑波浪传播的物理过程,并在源汇项中表现出来,包含了波浪研究的最新成果。风能输入项基于两种波浪增长机制:Phillips 的共振机制和 Miles 的不稳定机制,前者考虑波浪随时间线性增长,后者考虑波浪随时间指数增长,模型中风能输入项是线性增长和指数增长之和。非线性相互作用是指共振波分量之间交换能量,使能量重新分配。在深水情况四波相互作用比较重要,通过四波相互作用能量从高频部分转向低频部分。而在浅水情况三波相互作用变得重要,能量通过三波相互作用从低频部分向高频部分转移。

耗散项考虑了三种类型的耗散机制:在深水情况,白浪破碎耗散是主要影响因素,控制着波谱高频部分的饱和程度,SWAN 模型中使用 Hasselmann 的基脉冲模型表示白浪破碎的过程。在浅水中,底摩擦变得重要,底摩擦耗散项包含四种模式:JONSWAP 实验、Collins 拖曳理论、Madsen 涡粘理论和 Ripple 理论。波浪传到浅水破碎区域附近时,水深变浅引起的波浪破碎占主要地位,随机波的最大破碎波高 H_m 与水深 d 的关系为: $H_m = \gamma d$,其中 γ 为破碎系数。

2 SWAN 三重嵌套模型

2010 年 12 月的寒潮大风经渤海湾进入黄海后全面影响江苏沿海,影响范围较为广泛,所以建立自西北太平洋嵌套至东中国海、江苏沿海的 SWAN 三重嵌套模型,对寒潮风浪场进行数值模拟研究。

2.1 计算区域和水深

三个嵌套区域分别为西北太平洋(115°E~150°E,20°N~45°N),计算网格空间分辨率为 $2' \times 2'$;东中国海(117°E~130°E, 23°N~40°N),网格分辨率为 $1' \times 1'$;江苏沿海(119.2°E~122.4°E,31.6°N~35.1°N),网格分辨率为 $0.5' \times 0.5'$,计算区域见图 1(a)。

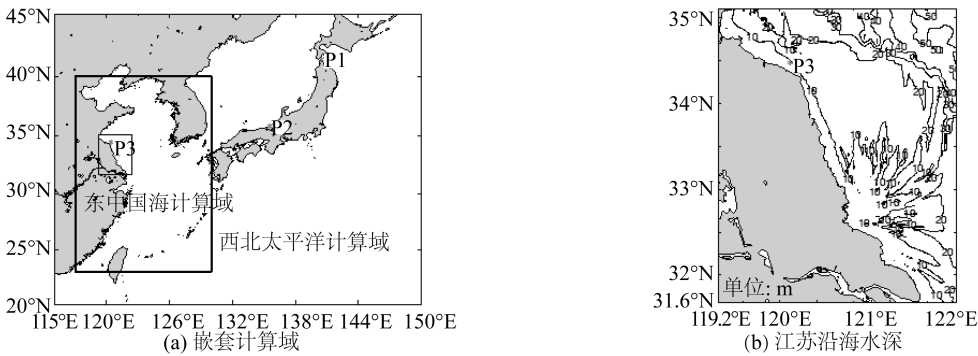


图 1 三重嵌套计算域和江苏沿海水深

Fig. 1 Triple nested computational domain and the water depth in Jiangsu coast

西北太平洋和东中国海水深数据均采用美国国家海洋和大气管理局 NOAA 的 ETOPO1 全球水深数据,分辨率为 $1' \times 1'$ 。由于江苏沿海存在辐射沙洲群,水深条件较为复杂,所以使用分辨率为 $0.5' \times 0.5'$ 的海图水深,见图 1(b)。

2.2 驱动风场

模型采用 CCMP 风场作为驱动风场。CCMP (Cross-Calibrated Multi-Platform) 风场,即多平台交叉校准风场,资料来源于美国航空航天局(NASA),时间分辨率为 6 小时,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。该风场资料具有分辨率高、时间序列长等优点,作为 SWAN 模型驱动风场模拟效果良好^[9]。下载 2010 年 12 月 10 日 0 时至 15 日 18 时的 CCMP 风场,并用线性插值法在空间上插值成分辨率为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$,作为模型驱动风场。

2.3 模型设置

三个计算区域设置相同:模型采用球坐标系; θ 空间(即谱方向分布范围)为 $0 \sim 360^\circ$,步长 36,分辨率为 10° ;谱频率 σ 范围为 $0.04 \sim 1$ Hz,网格数为 40,频率空间呈对数分布。其它源项设置为模型默认值:风能输入考虑了线性增长和指数增长两部分,白浪耗散采用 KOMEN 模式,底摩擦耗散采用 JONSWAP 模式,底摩擦系数 0.038,同时考虑非线性相互作用的影响。

计算时间自 2010 年 12 月 10 日 0 时至 15 日 18 时(UTC 标准时),西北太平洋和东中国海时间步长为 30 min,离散采用 S&L 格式,该格式是具有三阶扩散的二阶迎风格式,适合大尺度的非定常情况,能减小数值耗散;江苏沿海时间步长为 10 min,离散采用一阶 BSBT 格式,该格式适用于小尺度定常与非定常情况,结果与 S&L 格式相差不大,但是减少了计算时间。模型每隔一小时输出模拟结果。

3 模型参数率定与验证

将西北太平洋和江苏沿海的模拟结果与实测数据进行对比,对 SWAN 三重嵌套模型进行验证。西北太平洋计算域的验证资料来源于日本气象厅观测计数据和欧洲中期天气预报中心 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 提供的全球范围有效波高再分析数据。

3.1 模型验证

将西北太平洋计算域模拟结果与计算域内的日本沿海站点松前(P1)和怪岬(P2)波浪实测数据进行对比,P1 点位于 $140.10^\circ\text{E}, 41.31^\circ\text{N}$,水深 49 m,距离岸边 1.3 km,P2 点位于 $135.25^\circ\text{E}, 35.80^\circ\text{N}$,水深 47 m,距离岸边 2.2 km(见图 1)。

由图 2 可知,P1 和 P2 两点有效波高和平均波周期的模拟值与实测值吻合良好,两者变化趋势基本一致。表 1 显示,两站点有效波高模拟值和实测值的均方差相对较小,相关性良好。

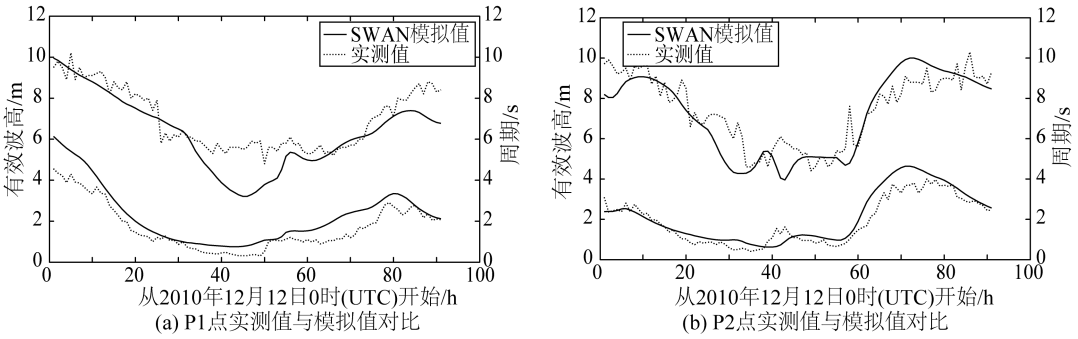


图 2 日本沿海站点实测值和模拟值对比

Fig. 2 Observed data and simulated results comparisons in Japan coast

表 1 P1 和 P2 站点实测值和模拟值误差

Tab. 1 Error of observed and simulated results in the P1 and P2 sites

	P1 站点				P2 站点			
	实测均值	模拟均值	均方差	相关系数	实测均值	模拟均值	均方差	相关系数
有效波高/m	1.68	2.01	0.57	0.96	1.89	2.14	0.48	0.95
周期/s	6.97	6.30	1.04	0.89	7.45	6.60	1.08	0.88

ECMWF 是由欧盟成员国组成的国际性天气预报研究机构,可提供全球网格化风、浪再分析数据产品,有效波高验证数据时间分辨率为 6 h,空间分辨率为 0.25°×0.25°。利用该机构再分析数据对西北太平洋整个区域有效波高模拟值进行验证(见图 3)。由图 3 可知,13 日 18 时西北太平洋整个计算域的有效波高模拟值与再分析数据基本一致,特别是东中国海寒潮引起的风浪分布。对 12 日至 15 日整个研究时段内两者对比验证结果都吻合较好。

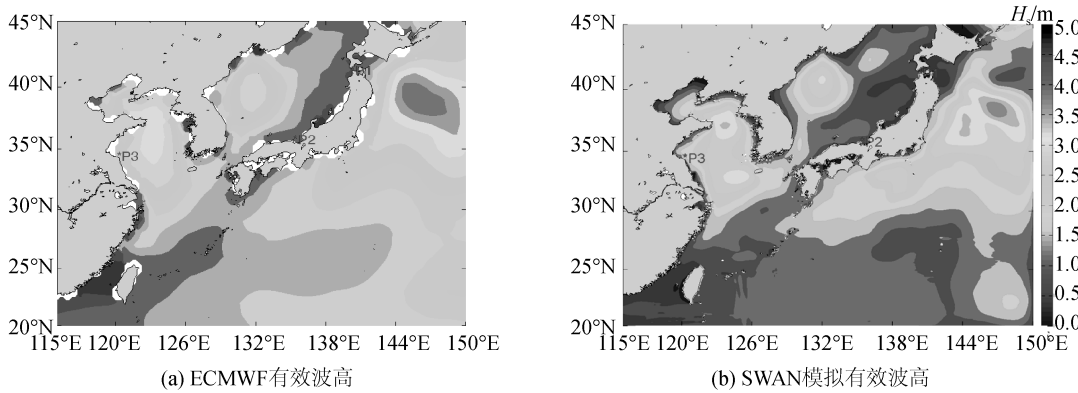


图 3 13 日 18 时西北太平洋有效波高分布

Fig. 3 Significant wave height distribution in the Northwest Pacific at 18:00 on day 13

西北太平洋计算域内实测点和整体验证结果显示,SWAN 模型对西北太平洋大范围计算域模拟结果良好,可以提供东中国海计算域的边界条件,并再通过东中国海的模拟结果提供江苏沿海的边界条件,最后模拟得到江苏沿海的波浪要素。

利用河海大学提供的响水波浪观测数据,对江苏沿海计算域的模拟结果进行验证。响水站点(P3 位于 120.10°E,34.44°N,见图 1)位于江苏沿海,站点水深约 7.6 m,离岸约 8 km。

图 4 和表 2 显示,在寒潮影响江苏沿海时段内,响水站点有效波高模拟值和实测值变化趋势基本一致,模拟值与实测值基本吻合,有效波高的均值相差 0.22 m,均方差为 0.29 m;有效波高最大值的模拟值较实测值偏小,相差大约 0.6 m;平均波周期的变化趋势基本一致,但周期相对偏小。

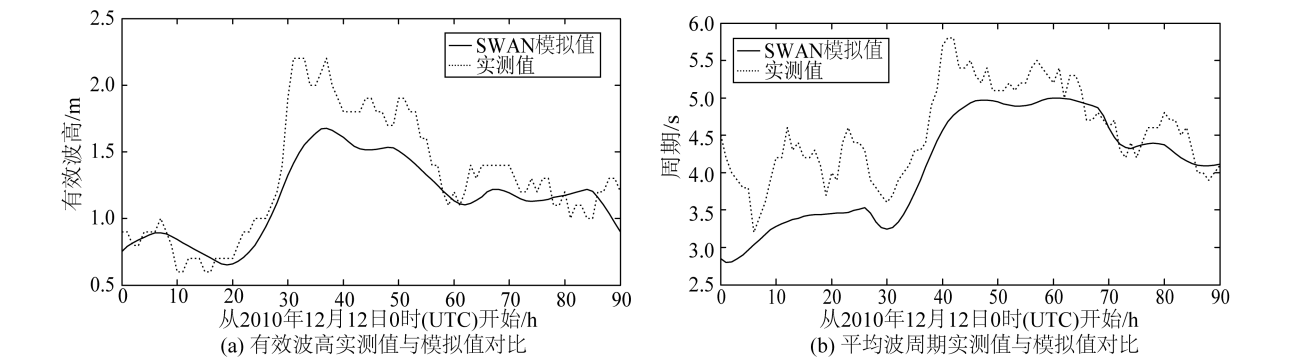


图 4 响水测站实测值和模拟值对比

Fig. 4 Observed data and simulated results comparisons in Xiangshui site

表 2 响水站点实测值和模拟值误差

Tab. 2 Error of observed data and simulated results in Xiangshui site

	实测		模拟		均方差	相关系数
	平均值	最大值	平均值	最大值		
有效波高/m	1.25	2.20	1.03	1.65	0.29	0.96
周期/s	4.55	5.80	3.92	4.81	0.80	0.87

3.2 江苏沿海底摩擦系数的率定

默认参数下 SWAN 模型对江苏沿海响水站点有效波高模拟值相对偏小,特别是最大有效波高。根据以往研究,引起 SWAN 模拟结果偏小主要有两个的因素:驱动风场和物理耗散过程。而相关研究表明 CCMP 风场可以用作 SWAN 模式的驱动风场^[10],所以本文着重研究物理耗散过程对江苏沿海寒潮风浪的影响。

当风浪由深水传播至江苏沿海时,与水底的相互作用物理耗散过程对波浪传播具有较大的影响。表 2 响水站点实测值显示,有效波高最大值为 2.2 m,平均波周期为 4.55 s,因此水深 H 与波长 L 的比值介于 1/20 至 1/2 之间;而最大波高 H_m 与水深 d 的比大约为 0.3,小于波浪破碎系数最小值 0.55,这表明在该站点附近,波浪破碎引起的耗散作用相对较小,而且白浪破碎耗散浅水影响较小,所以底摩擦可能是影响耗散最主要的因素。

SWAN 模型底摩擦耗散项中包含四模式,分别是 JONSWAP 实验、Collins 拖曳理论、Madsen 涡粘理论和 Ripple 理论。底摩擦机制的公式可以表示如下:

$$S_{ds,b} = -C_b \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\sigma, d)$$

(3)

式中: C_b 表示底摩擦系数,主要依赖于底部轨道运动,由 U_{rms} 表示。

Hasselmann 等人^[11]根据 JONSWAP 实验观测结果得到了膨胀条件下底摩擦系数 $C_b = 0.038 \text{ m}^2/\text{s}^3$, Komen 和 Bouws^[12]研究得到的底摩擦系数 $C_b = 0.067 \text{ m}^2/\text{s}^3$,这两个值在模型中都可以使用,默认值为 0.038。Collins 基于任意波场的周期波方程得出耗散率由上述的底摩擦方程来计算^[13],其中 $C_b = C_f g U_{rms}$, $C_f = 0.015$ 。而 1988 年 Madsen 等人^[14]根据上述近似方程进行了推导,定义为 $C_b = f_w \frac{g}{\sqrt{2}} U_{rms}$,式中 f_w 为无量纲的摩擦因数,由 Jonsson 方程来估算,其由底摩擦尺度 K_N 决定, $K_N = 0.05$ 。2011 年由 Smith 等人^[15]提出的以底质和泥沙粒径来计算底部粗糙度确定底摩擦系数,摩擦系数由泥沙的比重 S 和直径 D 确定,默认值 $S = 2.65$, $D = 0.0001 \text{ m}$ 。

根据 SWAN 模型底摩擦耗散项中的四种模式,在模型其它参数与上述相同情况下,选择不同模式其对应的默认值,对江苏沿海风浪场进行模拟,并将结果与实测值进行比较。

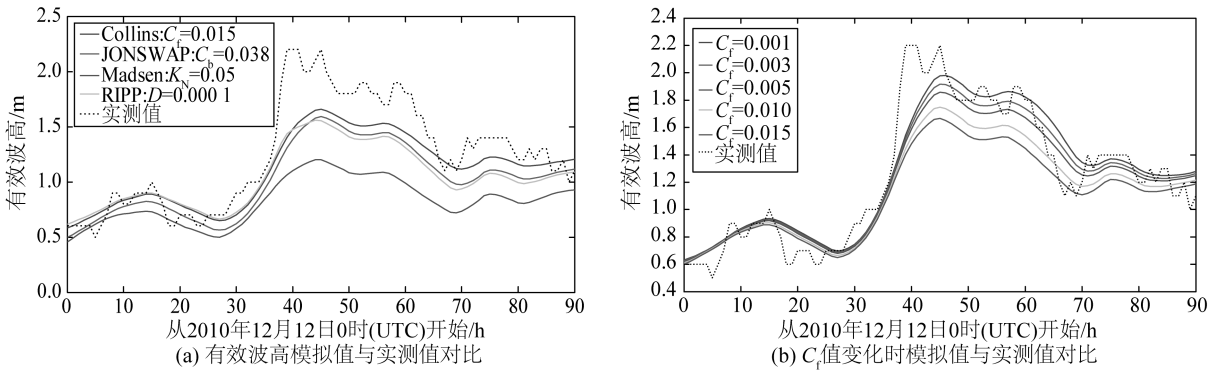


图 5 不同底摩擦设置模拟结果与实测数据对比

Fig. 5 Comparisons between observed data and different bottom friction simulated results

图 5(a) 显示,四种底摩擦机制的模拟结果随时间具有相同的变化趋势,且与实测值基本一致。但与实测值相比,Collins 理论最接近,JONSWAP 模式与 Ripples 理论其次,Madsen 理论模拟结果与实测偏差较大。尽管 Collins 理论与其它模式相比和实测值最为吻合,但是依然存在一定误差,尤其是有效波高峰值,仍需对 Collins 理论中的系数 C_f 进行率定。

表 3 率定后响水站点实测值和模拟值误差

Tab. 3 Error of observed data and calibrated simulated results in Xiangshui site

	实测		模拟		均方差	相关系数
	平均值	最大值	平均值	最大值		
有效波高/m	1.25	2.20	1.11	1.98	0.17	0.94
周期/s	4.55	5.80	4.09	4.99	0.71	0.85

图 5(b) 显示随着 C_f 值减小,波浪的有效波高峰值部分逐渐增大,接近实测值,当 C_f 减小至 0.001 时,其模拟结果与实测值误差相对较小,与实测值基本吻合;表 3 显示当 $C_f = 0.001$ 作为底摩擦系数时,有效波高均方差减小至 0.17 m。

为确定率定后底摩擦系数的适用性,对 2011 年 11 月 28 日至 12 月 1 日另一股影响江苏沿海的寒潮风浪进行数值模拟研究并进行验证。数值模拟方法与上文一致,资料和模型设置也相同,通过建立 SWAN 三重嵌套模型,对江苏沿海寒潮风浪进行模拟,并将模拟结果与响水站实测数据对比。

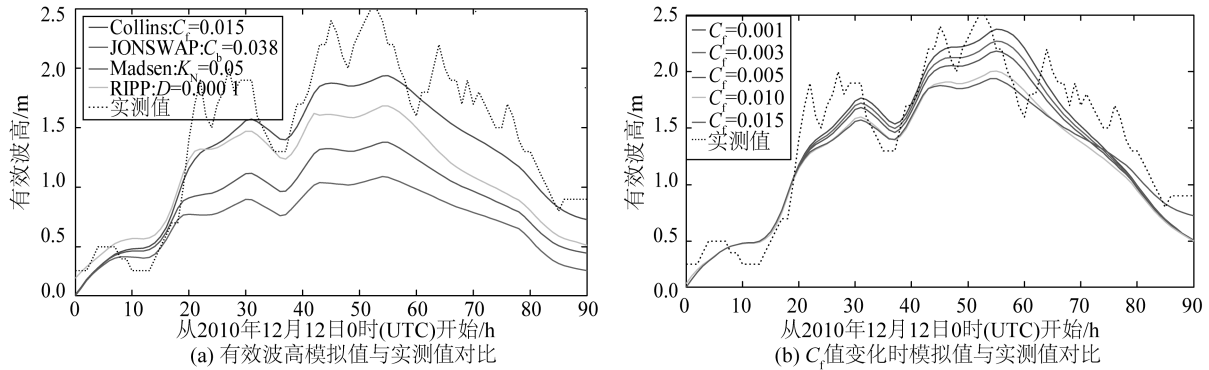


图 6 不同底摩擦设置模拟结果与实测结果对比

Fig. 6 Comparisons between observed data and different bottom friction simulated results

图 6 显示 2011 年这股影响江苏沿海的寒潮,当选取 Collins 拖曳理论中 $C_f = 0.001$ 时,响水站点 SWAN 有效波高的模拟值与实测值基本吻合,误差相对较小。

通过对以上两例影响江苏沿海的寒潮风浪进行数值模拟,并率定和验证底摩擦系数,结果显示在响水站点附近模型选取 Collins 拖曳理论中 $C_f = 0.001$ 时,模拟值与实测值误差相对较小,基本适用于江苏沿海寒潮风浪的模拟。

4 寒潮过程风、浪场特征分析

4.1 寒潮过程风场

2010 年 12 月 12 日至 15 日影响江苏沿海的寒潮,24 小时最低气温下降了 9.5°C ,达到了寒潮的标准^[16]。根据东中国海风场分布图可知,此次寒潮大风沿着 NE 方向在 13 日 0 时经过渤海湾,并带来了平均 14 m/s 以上的大风,最大风速达到 20 m/s 以上,风向为 NE 向,见图 7(a)。而后风场经过山东半岛,受陆地影响,风速减小,并于 14 日 0 时,风向转向 N 偏 W 向,极值风速中心出现在黄海西北部,并开始影响江苏沿海,风向变为 N 向,平均风速 12 m/s 左右,见图 7(b)。

14 日 0 时至 15 日 12 时寒潮风场全面影响江苏沿海,并于 15 日 12 时在江苏沿海东北深水区域 ($123.13^{\circ}\text{E}, 35.98^{\circ}\text{N}$) 附近出现 16.29 m/s 最大风速,沿海造成平均 14 m/s 左右的 NW 向大风,并继续传向东海,见图 7(c),并在 15 日 18 时全面影响台湾周边海域,见图 7(d)。根据此次寒潮风场对江苏沿海影响,底摩擦系数选取 Collins 拖曳理论中 $C_f=0.001$,其它参数与上述设置相同的情况下,对江苏沿海的波浪场进行模拟。

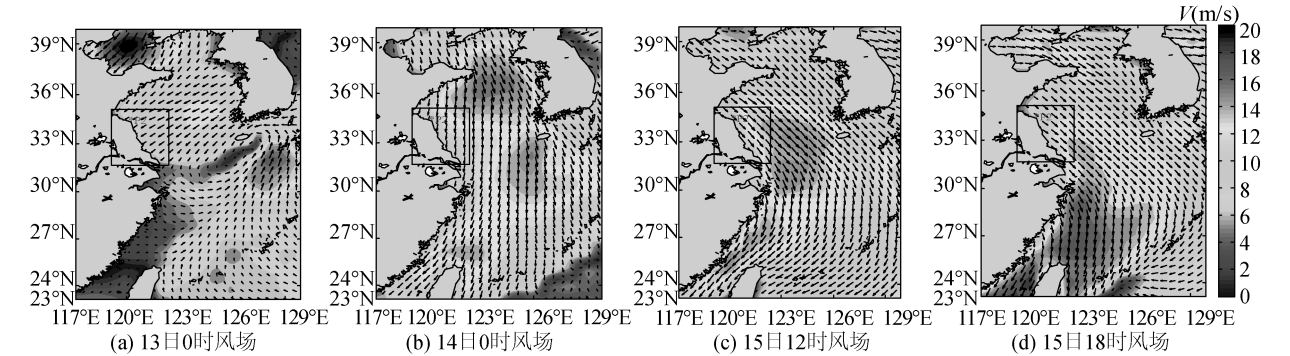


图 7 寒潮过程东中国海风场分布

Fig. 7 Wind distribution in the cold wave process on the East China Sea

4.2 江苏沿海风浪场

根据模拟结果,寒潮大风影响江苏沿海前后有效波高分布如图 8 所示,对比对应风场分布图可以发现: 1)有效波高分布与风场分布基本一致。随着寒潮风场由北向南移动,波高较大区域也随之向南移动,并且波高随风场分布呈现由近岸向深水区递增的变化趋势。2)在近岸海底地形对有效波高也有一定的影响。近岸和辐射沙洲附近有效波高分布基本在 0.5 m 以下,可能的原因是近岸和辐射沙洲水深较小,底摩擦耗散和波浪破碎导致波高迅速减小。3)寒潮风浪的影响江苏沿海北部较为明显,辐射沙洲附近基本没影响。江苏沿海北部寒潮大风引起的风浪能传播至近岸,风速 12 m/s 左右是能造成 2 m 有效波高的风浪,而江苏沿海南部辐射沙洲地附近,由于底摩擦和破碎物理过程的影响,有效波高基本在 1 m 以下。4)此次寒潮影响江苏沿海过程中,最大风速出现在 15 日 12 时,为 16.29 m/s ,对应有效波高为 3.5 m ,出现在离近岸较远的江苏沿海东北部 $30\sim 50\text{ m}$ 水深附近,见图 8(b)。

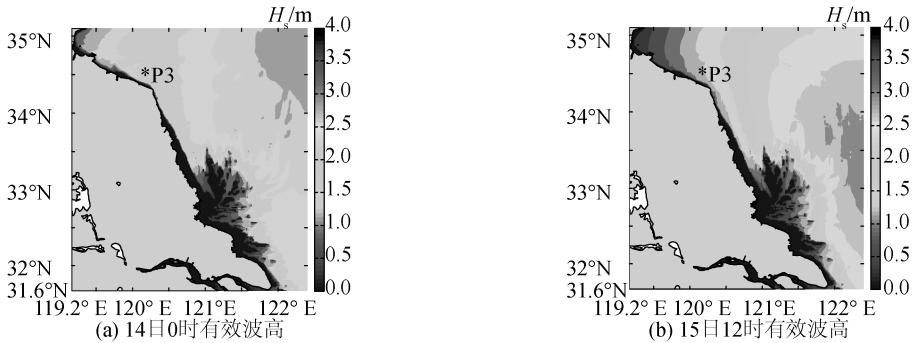


图 8 寒潮过程江苏沿海有效波高分布

Fig. 8 Significant wave height distribution in the cold wave process in Jiangsu coast

5 结 语

通过建立西北太平洋嵌套至东中国海、江苏沿海的 SWAN 三重嵌套模型,对寒潮影响下江苏沿海的风浪场进行了数值模拟研究。西北太平洋和江苏沿海验证结果显示,SWAN 三重嵌套模型能够较好地模拟寒潮大风影响下江苏沿海风浪场的时空分布。

通过江苏沿海响水站实测数据对模型底摩擦系数进行了率定和验证,结果表明江苏沿海底摩擦系数相对较小,选取 Collins 拖曳理论中 $C_f = 0.001$ 模拟值与实测值误差相对较小,较为适用于江苏沿海寒潮风浪的模拟。

对寒潮过程风浪场的特征分析结果显示,有效波高分布与风场分布基本一致,风浪传播至近岸和辐射沙洲时海底地形对波高也有一定影响,寒潮风浪在江苏沿海北部影响显著,辐射沙洲附近影响相对较小。

参考文献:

- [1] 张鹏,韦莹莹,曹乃和,等. 江苏寒潮过程的天气特征及预报指标[C]//第 28 届中国气象学会年会—S3 天气预报灾害天气研究与预报. 2011.(ZHANG Peng, WEI Yingying, CAO Naihe, et al. Jiangsu the weather characteristics and forecast index in process of Jiangsu cold wave[C]//Proceeding of the 28th Annual Meeting of the China Meteorological Association—S3 Weather Forecast for Severe Weather Research and Forecasting. 2011.(in Chinese))
- [2] 曹海峰. 寒潮型风暴潮和寒潮巨浪的影响不容忽视[J]. 海洋预报, 1998, 15(2): 43-46. (CAO Haifeng. Effect of cold storm surge and cold waves can not be ignored[J]. Marine Forecasts, 1998, 15(2): 43-46. (in Chinese))
- [3] 范飞,朱志夏,梁丙臣. 江苏海域波浪数值模拟研究[J]. 海洋湖沼通报, 2014, 3: 22-28. (FAN Fei, ZHU Zhixia, LIANG Bingchen. Numerical simulation of wave climate in Jiangsu sea area[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2014, 3: 22-28. (in Chinese))
- [4] 陈波,蒋昌波,陈汉宝. 江苏如东附近海域风浪场的数值模拟[J]. 水运工程, 2007(1): 20-24. (CHEN Bo, JIANG Changbo, CHEN Hanbao. Numerical simulation of wind waves around rudong sea area in Jiangsu Province[J]. Port & Waterway Engineering, 2007(1): 20-24. (in Chinese))
- [5] RIS R C, HOLTHUIJSEN L H, BOOIJ N. A spectral model for waves in the near shore zone[J]. Coastal Engineering Proceedings, 1994, 1(24): 68-78.
- [6] BOOIJ N, HOLTHUIJSEN L H, RIS R C. The "SWAN" wave model for shallow water[J]. Coastal Engineering Proceedings, 1996, 1(25): 668-676.
- [7] 赵红军,宋志尧,徐福敏,等. 南中国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))
- [8] OU S H, LIAU J M, HSU T W, et al. Simulating typhoon waves by SWAN wave model in coastal waters of Taiwan[J]. Ocean Engineering, 2002, 29(8): 947-971.
- [9] 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))
- [10] 邓波,史剑,蒋国荣,等. 驱动大洋海浪模式的两种海面风场对比分析研究[J]. 海洋预报, 2014, 31(3): 29-36. (DENG Bo, SHI Jian, JIANG Guorong, et al. Comparison between two kinds of sea surface wind field applied in ocean wave simulation [J]. Marine Forecasts, 2014, 31(3): 29-36. (in Chinese))
- [11] KOMEN G J, HASSELMANN K H. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum[J]. Journal of Physical Oceanography, 1984, 14(8): 1 271-1 285.
- [12] BOUWS E, KOMEN G J. On the balance between growth and dissipation in an extreme depth-limited wind-sea in the southern North Sea[J]. Journal of Physical Oceanography, 1983, 13(9): 1 653-1 658.
- [13] COLLINS J I. Prediction of shallow-water spectra[J]. Journal of Geophysical Research, 1972, 77(15): 2 693-2 707.
- [14] MADSEN O S, POON Y K, GRABER H C. Spectral wave attenuation by bottom friction: theory[J]. Coastal Engineering Proceedings, 1988, 1(21): 492-504.
- [15] SMITH G A, BABANIN A V, RIEDEL P, et al. Introduction of a new friction routine into the SWAN model that evaluates roughness due to bedform and sediment size changes[J]. Coastal Engineering, 2011, 58(4): 317-326.
- [16] 雷正翠,钱玮,彭燕,等. 2010 年 12 月常州一次寒潮天气过程分析[C]//江苏省气象学会第七届学术交流会.江苏省气象学会. 2011. (LEI Zhengcui, QIANG Wei, PENG Yan, et al. The analysis of a cold wave weather process in Changzhou on December 2010[C]//Proceeding of the Seventh Meteorological Conference in Jiangsu Province. 2011. (in Chinese))