

近海近岸高精度海浪业务化数值预报系统

李本霞, 吴淑萍, 邢 闯, 韦锋余

(国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘 要:基于第三代海浪模式 WaveWatchIII 和 Swan, 采用四重网格嵌套建立了黄海、南海近海海浪的高精度数值预报系统, 以及青岛第一海水浴场、广西北海银滩浴场、海南三亚亚龙湾海水浴场 3 个示范区近岸定点海浪的精细化数值预报系统。通过后报和预报试验对所建立的数值预报系统进行了系统的检验, 后报波高与实测值吻合较好。准业务化预报试验表明有效波高的预报精度随预报时效的增加而降低, 近海海浪大于 2 m 的平均预报相对误差小于 30%。浴场海浪的平均预报绝对误差为 0.35 m 左右。预报精度可以满足业务化预报的要求。

关键词: WaveWatchIII; Swan; 定点海浪预报

中图分类号: P731 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2010)05-0001-06

1 引言

海浪预报是国内外较早开展的预报项目之一。至今为止, 美国海洋大气管理局(NOAA)采用 WaveWatch III 模式已建立了全球、阿拉斯加和西北大西洋以及美国近岸区域的海浪预报系统, 每天对外发布 120 h 预报; 美国海军数值气象和海洋学研究中心(FNMOC)建立了全球、北大西洋和欧洲预报模式, 发布 72 h 海浪预报。美国海军研究实验室(NRL)开展了近岸海浪数值预报研究, 进行了太平洋涌浪预报, 时效长达 20 天。欧洲中心建立了全球和区域海浪预报模式, 发布 168 h 海浪预报。日本采用自主开发的 MRI 模式建立了近岸和近海两套海浪预报系统。韩国气象厅(KMA)建立了时效为 10 天的全球海浪预报模式。上述国家也开发了特定区域的精细化海浪预报产品。

我国的海浪预报始于 20 世纪 60 年代, 但早期的预报主要采用经验和统计预报相结合的方法。中国海洋大学的文圣常院士等在“七五”、“八五”和“九五”期间, 基于文氏谱理论提出了适应我国

近海和临近大洋的混合型海浪模式—WENM 模式, 并已应用于海洋预报部门的业务化预报工作中; 国家海洋局第一海洋研究所的袁业立院士等以 WAM 模式为基础, 建立了可考虑波流相互作用的 LAGFD-WAM 模式^[1]; 中科院海洋所尹宝树等建立了适合于浅水的 YW-SWP 模式^[2]。国家海洋环境预报中心在“十五”期间, 以国际上第三代海浪数值预报模式 WAM 和 SWAN 为基础, 建立了西北太平洋和中国近海的区域性海浪业务化数值预报预警系统和全球海浪数值预报系统, 预报时效为 72 h。尚未开展近岸海浪的定点预报技术研究, 此外, 近海海浪的预报精度有待提高。本文考虑潮汐水位的动态变化, 采用不同海浪模式和四重网格嵌套建立了我国近海和海水浴场近岸海浪的精细化预报系统。

2 海浪数值模拟系统

2.1 WaveWatchIII 模式简介

WaveWatchIII 模式是美国 NOAA/NCEP 海洋模拟小组在 WAM^[3]以及前人研究的基础上, 新开发

收稿日期: 2010-07-06

基金项目: 交通部港口航道泥沙工程重点实验室开放基金; “十一五”国家科技支撑计划(2006BAC03B01)

作者简介: 李本霞 (1972-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事海浪预报及预报技术研究。E-mail: lbx@nmefc.gov.cn

的一个全谱空间的第三代海浪数值模式。该模式主要用于大尺度空间波浪传播过程，在传播过程中考虑了地形和海流空间变化导致的波浪折射、浅水变形以及线性的波浪传播运动等；模型在波浪的成长和消减的能量变化过程中考虑了风生浪、白浪消减、海底摩擦、波-波非线性能量转移作用等。该模式对WAM模式的控制方程、程序结构、数值和物理的处理方法等作了改进，使得该模式不仅在考虑波流相互作用和风浪物理机制方面更加合理，而且利于采用并行计算技术，从而提高模式的性能和效率。

在球坐标系下，WaveWatchIII模式的控制方程可表述为^[4]：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \dot{\varphi} N \cos \theta + \frac{\partial}{\partial \lambda} \dot{\lambda} N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k} N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}_g N = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

式中， $\dot{\varphi} = \frac{c_g \cos \theta + U_\varphi}{R}$ ， $\dot{\lambda} = \frac{c_g \sin \theta + U_\lambda}{R \cos \varphi}$ ， $\dot{\theta}_g = \dot{\theta} - \frac{c_g \tan \varphi \cos \theta}{R}$ ， N 为波作用密度谱； R 为地球半径； U_λ 和 U_φ 分别是海流在经、纬方向的分量； λ ， φ 分别为经度和纬度； c_g 为群速度； k 为波数； θ 为方向。WWATCH III的源函数项 S 包括能量输入项 S_{in} ，波波非线性相互作用项 S_{nl} 和白浪耗散项 S_{ds} ，以及浅水底摩擦项 S_{bot} 。

控制方程(1)的离散求解采用分步计算法(Fractional Step Method)。

2.2 SWAN模式简介

SWAN模式是由荷兰Delft理工大学Ris, R.C., L.H. Holthuijsen和N. Booij等人总结历年来波浪能量输入、损耗、及转换的研究成果提出并发展起来的，适用于海岸湖泊及河口地区浅水海浪的数值预报。本模式全面合理的考虑了波浪浅化、折射、底摩擦、水深引起的波浪破碎、白浪、风能输入、三波-波和四波-波非线性相互作用等物理过程，可准确合理的模拟潮流、地形、风场环境下的波浪场，适用于风浪、涌浪和混合浪的预报。SWAN不仅能合理预报计算域中波高的变化规律，同时能合理预报计算域中波周期、波长、波陡、波浪行进方向、近底水质点的运动速度、波

能传播方向、能量耗散率及单位水面所受波力等海岸工程所需要的重要的参数。由于应用了近年来最新研究成果，合理计算浅水波浪破碎效应，和其他模式相比，该模式尤其适用于浅水波浪破碎区海浪的计算。

SWAN模式采用基于波能量的平衡方程。在笛卡尔坐标系下，波能量平衡方程可表示为^[5]：

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (2)$$

上式左边第一项为固定点波能量密度 N 随时间的变化率；第二和第三项表示 N 在地理空间 x 、 y 方向上的传播；第四项表示由于流和水深所引起的相对频率的漂移导致 N 在 σ 空间的变化；第五项表示 N 在 θ 空间的转移，亦即水深及流场所引起的折射；方程右边的 S 代表以波谱密度表示的源汇项，包括风能输入、波与波之间非线性相互作用和由于底摩擦、白浪、破碎等引起的能量损耗； C_x 、 C_y 、 C_σ 、 C_θ 分别代表在 x 、 y 、 σ 、 θ 方向的波浪传播速度。

其中，源函数项 $S = S_{wind}(\sigma, \theta) + S_{ds} + S_{nl}$ ，此式右边分别为风输入项、耗散项、波波相互作用项。

SWAN模式采用全隐式有限差分格式对波能量平衡方程进行离散。它无条件稳定。鉴于文章篇幅所限，本文在此不再赘述。

2.3 系统搭建

数值预报系统的搭建包括：计算范围的选取、计算网格水深地形的生成、风场边界的确定、物理参数的比选等。波浪计算范围的大小，须考虑浴场区域波浪的性质，并能反映波浪从产生、传播到消亡的整个过程。本系统采用四重网格嵌套实现从西北太平洋至中国近海至浴场海浪的精细化预报。四重网格的水平分辨率分别为 0.1° 、 $2'$ 、 300 m 和 $20\sim 50\text{ m}$ 。各区域计算范围及相关参数设置见表1。图1给出了整个海浪数值预报系统的结构图。

3 后报检验

所建立的预报系统用于业务化预报前需要经过系统的检验。首先采用再分析风场和浮标资料对所建立的业务化海浪数值预报系统进行了后报

表1 计算参数设置

计算区域	数值模式	范围及空间分辨率	底摩擦系数
西北太平洋	WWatch III	10°~45°N, 105°~155°E 0.1°×0.1°	0.038
黄渤海	SWAN	34°~41°N, 117°E~127°E 2'×2'	0.019
南海	SWAN	16°~26°N, 105°~124°E 2'×2'	0.019
青岛第一海水浴场	SWAN	36.035°~36.06°N, 120.324°~120.344°E 20 m×20 m	0.019
广西北海银滩浴场	SWAN	21.3°~21.49°N, 109.02°~109.2°E 50m×50m	0.019
三亚亚龙湾浴场	SWAN	18.16°~18.245°N, 109.6°~109.7°E 50 m×50 m	0.019

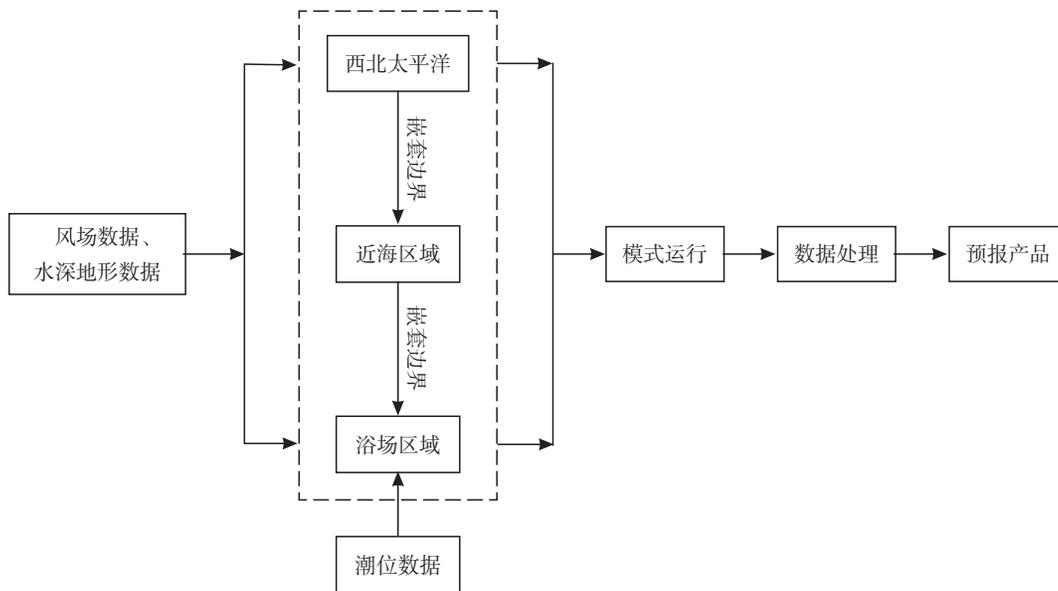


图1 近海近岸海浪数值预报系统结构图

检验。其中风场采用国家海洋环境预报中心基于NOAA再分析风场制作的高分辨率(0.1°×0.1°)分析风场。利用东海浮标进行了2006年12月一个月的后报试验。此外,为了更好地验证所建立的近岸海浪数值预报系统的可靠性和稳定性,采用奥帆赛期间位于胶州湾口外的浮标数据模拟了近两个月的海浪过程。

3.1 2006年12月东海浮标海浪过程的后报模拟

利用再分析风场对国家海洋局东海浮标

(124°E, 29.5°N)2006年12月1日08时~31日22时一个月的海浪连续观测进行了后报模拟。图2为计算波高和观测值的比较。由分析看出,本文建立的高精度数值预报系统较好地模拟了东海海浪的时间变化,后报波高与观测波高的平均绝对误差为0.397 m,相对误差为18.9%。

3.2 2008年8~9月奥帆赛期间青岛近岸海浪过程的后报模拟

由于浴场位置附近无可用的实测资料参考,

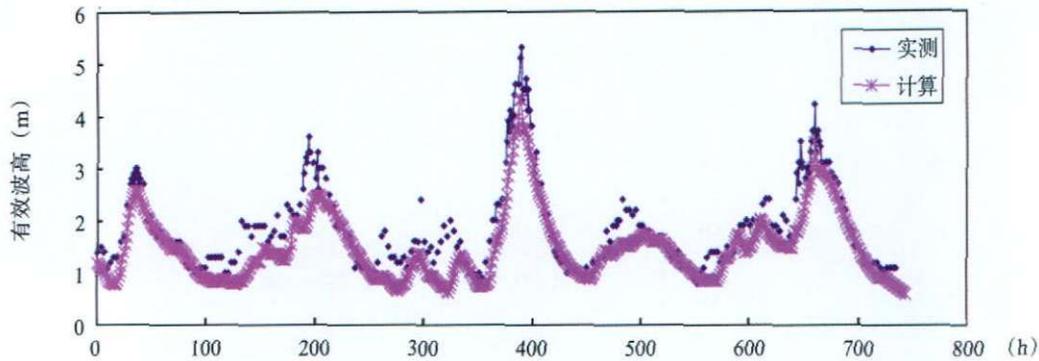


图2 东海浮标后报波高和观测值的比较

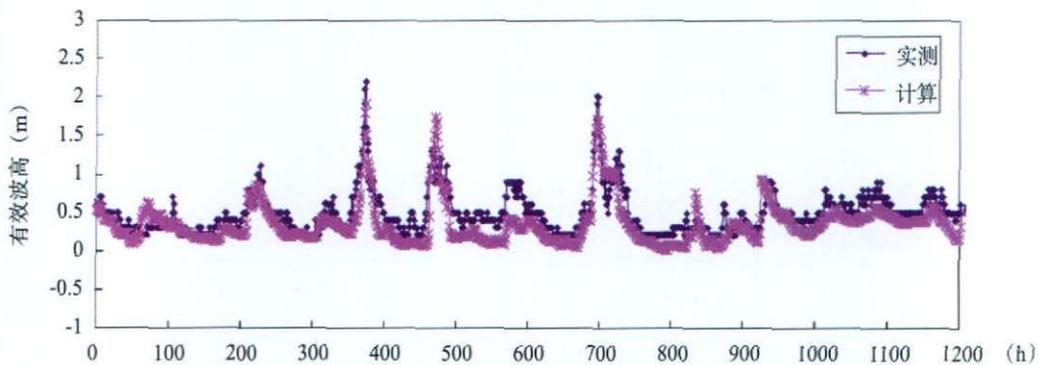


图3 奥帆赛浮标后报波高和观测值的比较

为了更好地验证本预报系统在近岸海浪方面的预报能力,本文还采用位于胶州湾口外(120.41°E, 36.04°N)的奥帆赛浮标数据进行了近2个月(2008年8月2日08时~9月21日08时)的后报检验。风场仍采用国家海洋环境预报中心基于NOAA再分析风场制作的高分辨率分析风场。有效波高计算值和浮标观测值的比较如图3所示。由图可见,模式较好地模拟出了近岸海浪过程的整体演变趋势,后报波高的平均绝对误差为0.172 m,但是相对误差较大,为38.214%。原因是奥帆赛期间没有较强的天气系统影响本海域,浮标测点位置的最大风速为11.7 m/s,平均风速仅为3.15 m/s。实测波高最大值为2.2 m,平均波高为0.484 m,其中95%的样本波高小于1.0 m,所以计算所得相对误差较大,建议此种情况下采用绝对误差来评价后

报结果的好坏。此外,风场数据的相关性较低(相关系数仅为0.612),也导致了后报误差的产生。

4 准业务化预报试验

自2009年7月1日,本文建立的数值预报系统开始业务化试运行,可提供72 h的数值预报结果。本文给出一个预报个例。2009年12月5日,受冷空气与渤海低压的共同影响,渤海、黄海出现了3~4 m的大浪到巨浪区,QF101浮标测得1.5~2 m的有效波高。图4为本次大浪过程的预报结果。可以看出,24 h和48 h的预报均有大浪过程出现,但是24 h的预报精度较高,预报出的最大有效波高为3.5 m,与实况吻合较好,而48 h的预报结果明显偏小。

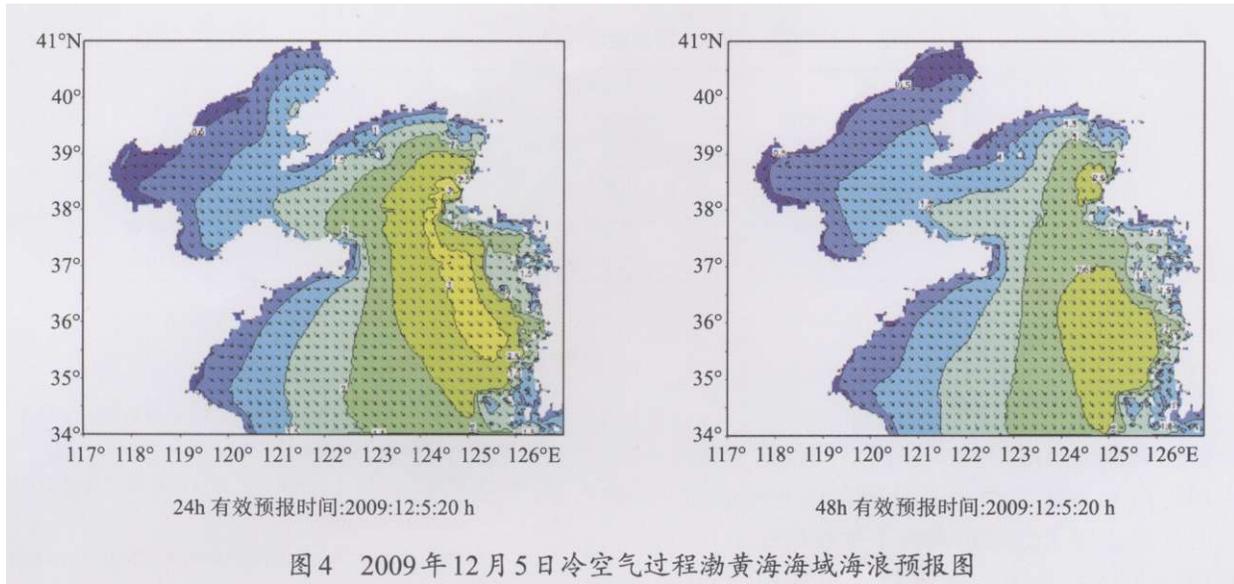


图4 2009年12月5日冷空气过程渤海海域海浪预报图

本系统的预报检验采用了国家海洋局QF101、QF201、QF203、QF205、QF301浮标和小麦岛、闸坡、涠洲海洋站的观测资料，浮标和沿岸站位置见图5。由于海洋站和浴场实测波高大于2 m的样本数不到5%，大部分波高小于1 m，故采用绝对误差评价预报结果的优劣，浮标则用大于等于2 m的波高的相对误差来评价。浴场检验采用场内预报波高的最大值对8月、9月两个月的预报进行了粗略的检验。检验结果见表2~4。可以看出，预报准确度随预报时效的增加而降低。近海大于2 m的浪高预报相对误差为30%左右，相比而言，南海的预报精度最差。海洋站和浴场24 h、48 h、72 h预报波高的平均绝对误差为0.35 m左右，但是亚龙湾浴场的预报误差较大。

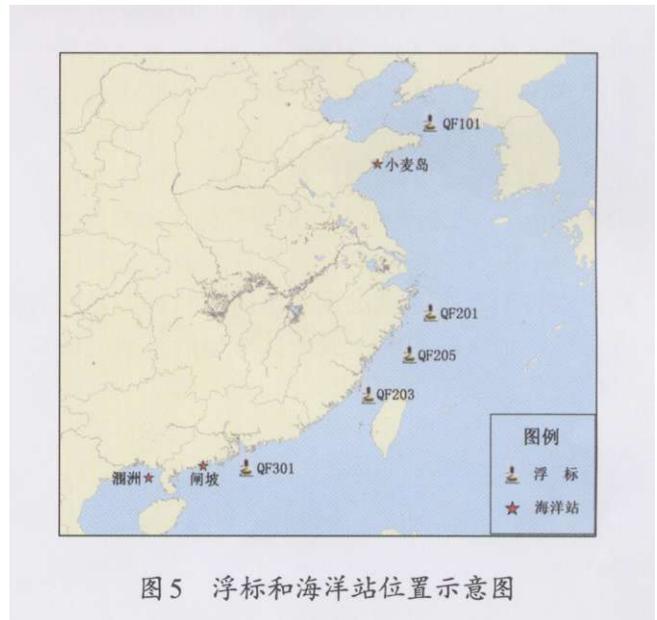


图5 浮标和海洋站位置示意图

表2 预报检验-浮标

预报时效	位置					均值
	QF101	QF201	QF203	QF205	QF301	
24 h	17.886 %	20.139 %	29.513 %	29.487 %	28.071 %	25.02 %
48 h	20.98 %	17.86 %	26.797 %	29.465 %	34.22 %	25.86 %
72 h	21.814 %	22.019 %	30.672 %	30.189 %	35.024 %	29.48 %

表3 预报检验-海洋站

预报时效	位置			均值
	小麦岛海洋站	闸坡海洋站	涠洲海洋站	
24 h	0.312 m	0.286 m	0.317 m	0.305 m
48 h	0.336 m	0.305 m	0.280 m	0.307 m
72 h	0.374 m	0.352 m	0.315 m	0.347 m

表4 预报检验-浴场

预报时效	位置			
	青岛第一海水浴场	三亚亚龙湾海水浴场	北海银滩浴场	均值
24 h	0.271 m	0.579 m	0.211 m	0.354 m
48 h	0.280 m	0.519 m	0.231 m	0.343 m
72 h	0.284 m	0.386 m	0.261 m	0.310 m

5 结论

本文采用不同海浪模式和四重网格嵌套建立了中国近海和浴场海浪的高精度数值预报系统,在国内首次开展了近岸定点海浪的精细化数值预报并应用于浴场海浪的预报。后报模拟结果表明,本文建立的数值预报系统可以再现深水和近岸浅水海浪的时间演变。为期半年的准业务化预报试验表明,近海海浪大于2 m的平均预报相对误差小于30%。浴场海浪的平均预报绝对误差不大于0.35 m。预报精度可以满足业务化预报的要求。

为了提高浴场海浪的预报精度,本文考虑了潮汐水位的动态变化对近岸浪的影响,但是没有考虑风暴增水的影响。此外,对地形复杂的河口区域近岸浪的精细化预报有待于进一步开展。

参考文献:

- [1] 袁业立,潘增弟,华锋等. LAGFD-WAM 海浪数值模式 I 基本物理模型[J]. 海洋学报,1992,14(5):1-7.
- [2] 尹宝树,王涛,范顺庭等. YW-SWP 海浪数值预报模式及其应用[J]. 海洋与湖沼,1994,25(3):350-353.
- [3] The WAMDI Group. The WAM Model-A Third Generation Ocean Wave Prediction Model[J]. Journal of Physical Oceanography.1988,18(12):1775-1809.
- [4] Tolman H L. Testing of WaveWatchIII Version 2.22 in NCEP's NWW3 Ocean Wave Model Suite. Technical Note 214, NOAA/NWS/NCEP/OMP.
- [5] Booij N, Ris R C, Holthuisen L H. A Third-Generation Wave Model for Coastal Regions. Part I: Model Description and Validation[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104(c4): 7649-7666.