

台湾海峡及近岸区域精细化海浪数值预报系统

冯芒, 张文静, 李岩, 史剑, 蔡丹

(解放军理工大学气象学院, 南京, 211101)

摘要: 基于第三代海浪模式, 采用四重嵌套网格, 建立了 WaveWatch III 和 SWAN 嵌套(方案一)和 SWAN 自嵌套(方案二)两套台湾海峡及其近岸区域海浪预报系统。通过对一次台风过程 3 天和 7 天的海浪预报实验, 对两套预报系统作了检验。结果表明, 方案一的 3 天和 7 天的预报误差分别为 14.78 % 和 19.53 %, 方案二的分别为 10.38 % 和 15.85 %。两套系统的预报精度均能达到海浪精细化业务化预报要求。

关键词: WaveWatch III; SWAN; 精细化海浪预报

中图分类号: P731 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-0239(2013)02-0042-07

1 引言

台湾海峡区域呈东北西南走向, 南宽北窄, 形似喇叭, 与海峡的山脉走向一致, 因此狭管效应非常显著, 故海峡风大、浪高、流急, 是我国有名的大风大浪区。因此, 该区域的海浪预报有着非常重要的现实意义。

目前, 国际上先进的第三代海浪预报模式, 以 WAM、WaveWatch III 和 SWAN 为代表^[1]。对于大范围海浪的预报系统往往以 WaveWatch III 为主。例如, NOAA(美国海洋大气管理局)采用 WaveWatch III 海浪模式建立了全球、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, 发布了 120 h 预报; 精细化海浪预报以 WAM 和 SWAN 嵌套或 WaveWatch III 和 SWAN 嵌套为主, 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警系统和全球海浪数值预报系统, 预报时效为 72 h。李本霞等基于 WaveWatch III 和 SWAN, 建立了黄海、南海近海海浪的高精度数值预报系统^[1]。对于近岸海浪的精细化数值预报系统开发主要工作, 集中在网格的生成

和预报模式的选取上^[2-3]。本文采用两种方案以及四重嵌套网格建立台湾海峡及近岸区域海浪的精细化预报系统, 并对 2010 年 10 月份一次台风过程大浪进行预报分析, 将预报结果和浮标站资料进行对比分析, 对两种方案的适用性进行讨论。

2 海浪数值模式简介

2.1 WaveWatch III 模式

该模式适用于大尺度深水海区海浪场的计算, 模式中考虑了地形、海流空间变化导致的波浪折射、浅水波浪变形等; 在波浪的成长和消衰的能量变化过程中, 考虑了风生浪、白浪耗散、底摩擦、波波非线性相互作用等。模式的基本控制方程如下(采用球坐标系形式):

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

$$\text{方程左边, } \varphi = \frac{C_g \cos \theta + U_\phi}{R}, \dot{\lambda} = \frac{C_g \sin \theta + U_\lambda}{R \cos \varphi},$$

$$\dot{\theta}_g = \dot{\theta} - \frac{C_g \tan \varphi \cos \theta}{R} \quad (2)$$

收稿日期: 2012-02-13

基金项目: 国家自然科学基金(41106014); 国家自然科学基金(41076074)

作者简介: 冯芒(1976-), 女, 博士, 主要从事近岸海洋动力学与物理海洋学方面的教学研究工作。E-mail:fengmangqq@163.com

式中, N 为波作用的密度谱, R 为地球半径, U_λ 、 U_ϕ 分别是海流在经向、纬向的分量; 方程右边源函数 S 包括能量输入 S_{in} 、白浪耗散 S_{ds} 、底摩擦项 S_{bot} 、非线性相互作用项 S_{nl} 。模式在时间、空间领域的离散方式, 采用一阶迎风格式, 控制方程的离散求解采用分步计算法, 源函数项的离散方法与 WAM 模式相似, 采用半隐式格式。

2.2 SWAN 模式

该模式适用海岸、湖泊及河口地区波浪数值预报, 模型中全面合理地考虑了波浪浅化、折射、底摩擦、破碎、白浪、风能输入、三相波及四相波非线性效应。模式的基本控制方程如下(笛卡儿坐标形式):

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

方程左边第一项是波动能量的局地变化, 第二项和第三项是波动能量在地理空间的传播, 第四项是水深和流导致的波动频率变化, 第五项是水深和流产生的波浪折射; S 是源汇项, 包括: 风输入波动能量项 S_{in} 、白浪耗散项 $S_{ds,w}$ 、底摩擦耗散项 $S_{ds,b}$ 以及深度诱导破碎项 $S_{ds,br}$ 、三阶、四阶波波相互作用项。SWAN 模式采用全隐式有限差分格式对波作用量平衡方程在五维空间(时间、二维地理空间、频率

空间和方向空间)上进行数值离散, 它无条件稳定, 可以允许较大的时间步长进行计算。

两种模式的具体物理过程的参数化方案和数值求解方法, 参见两种模式的使用手册^[4,5]。

3 预报区域及预报方案

计算区域分为大区(西北太平洋)、中区(中国近海)、小区(台湾周边)、近岸区域, 分别设置四套网格, 大区、中区采用方网格, 网格水平分辨率分别为 0.5° , 10° , 计算范围分别为 (99° — 180°E , 0° — 65°N), (105° — 135°E , 13° — 41°N); 小区、近岸区域采用曲线网格, 网格配置如图 1, 最小分辨率 100 m。利用四套网格的嵌套计算实现西北太平洋到台湾周边及近岸区域的精细化海浪预报。两种计算方案如下:

方案一: 大区、中区用 WaveWatch III 海浪模式, 小区、近岸采用 SWAN 海浪模式

方案二: 大区、中区、小区、近岸均采用 SWAN 海浪模式

为使 WaveWatch III 模式和 SWAN 模式能够有效地嵌套运行, 本文采用高山^[2]移植到 Windows 系统下的 WaveWatch III 模式, 以及对 WaveWatch III 模式和 SWAN 模式嵌套接口的改进(见表 1)。

表 1 WaveWatch III 模式和 SWAN 模式中采用的源函数参数化方案

源函数	WaveWatch III 中参数化的方案选取	SWAN 中参数化方案的选取
风能输入	Komen et al (1984)	Komen et al (1984)
白浪耗散	Hasselmann (1973) 改进形式	Hasselmann (1973) 改进形式
非线性波-波相互作用	四波 Hasselmann et al (1986) 的 DIA 算法三波无	四波 Hasselmann et al (1986) 的 DIA 算法 三波 Eldeberky (1996)
底摩擦耗散	线性 JONSWAP 参数化方案	线性 JONSWAP 参数化方案
深度诱导破碎	无	Eldeberky 和 Battjes (1995)

4 两种方案预报系统的准业务化预报试验

4.1 预报天气过程及资料说明

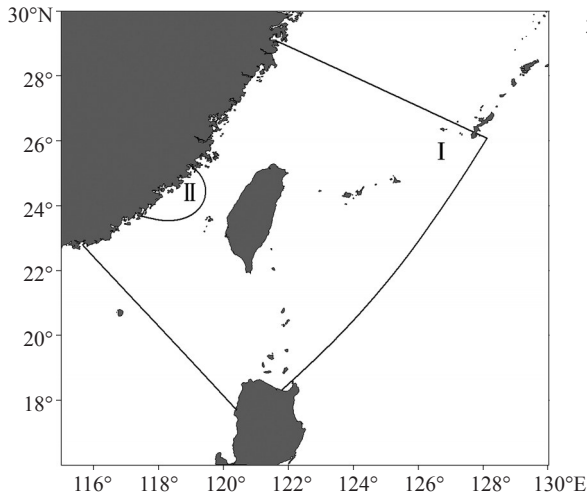
2010 年 10 月 17 日台风“鲇鱼”接近南海到 10 月 23 日在福建漳浦沿海登陆, 是 1949 年以来登陆福建最晚, 强度最强的秋季台风。选取该台风过程

分别做 3 天和 7 天的预报检验, 海面风场使用 NCEP 提供的 $1^\circ \times 1^\circ$ 的海面 10 m 预报风场, 检验资料采用国家海洋局东海分局提供的浮标站资料。

浮标站点分布见图 2。

4.2 台风“鲇鱼”过程台湾海峡区域海浪预报结果检验

利用两种预报方案对 2010 年“鲇鱼”号台风过程台湾海峡区域海浪进行预报。图 3—6 通过 4 个



I 区为台湾周边海域(小区) II 区为厦门附近海域(近岸)

图1 台湾周边海域及厦门附近海域计算范围

浮标站比对了两种方案的3天和7天的预报效果,表2、表3分别给出了两种方案预报的有效波高误差,因本文选取的是台风大浪过程,所以主要分析各站点预报的相对误差,从表中可以看出,方案一,3天、7天的预报误差分别为14.78%和19.53%;方案二,3天、7天的预报误差分别为10.38%和15.85%,两种方案计算结果基本一致,方案二的效果要略优于方案一,两者均能达到海浪业务预报精度,在近岸精细化海浪预报中采用两种方案的预报系统均可满足需求。

4.3 两种方案适用性讨论

文中两套计算方案包括了两种常用的海浪预

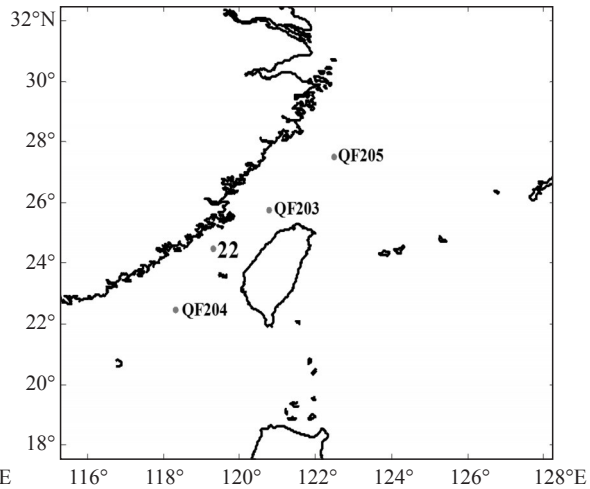


图2 浮标站点分布示意图

报模式 WaveWatch III 和 SWAN。其中 WaveWatch III 海浪模式适用于大范围海浪的预报,SWAN 适用于近海近岸区域海浪的预报,所以目前针对大范围海浪的预报系统往往以 WaveWatch III 模式为主,针对近海、近岸区域的精细化海浪预报以 WAM 或 WaveWatch III 模式和 SWAN 模式配合使用为主^[2-3,6-7],这个工作国内很多学者已进行过验证并用于业务预报,文中不再作论述。也有学者采用 SWAN 自嵌套的方案,但多用于区域范围的海浪模拟^[8-9]。文中方案二采用 SWAN 自嵌套的方式进行海浪预报,其中中国近海、台湾周边以及厦门海域采用 SWAN 模式进行海浪预报是满足该模式的适用范围的,问题的关键在于,SWAN 用于大范围的西北太平洋海域海浪

表2 方案一预报有效波高误差(2010年10月17日—24日)

浮标站	3天浪高小于2 m 预报绝对误差 /m	3天浪高大于2 m 预报相对误差 /%	7天浪高小于2 m 预报绝对误差 /m	7天浪高大于2 m 预报相对误差 /%
22		9.45		19
203	0.16	8.84	0.16	16.6
204		18.21		20.25
205	0.12	22.6	0.12	22.28
平均误差	0.14	14.78	0.14	19.53

表3 方案二预报有效波高误差(2010年10月17日—24日)

浮标站	3天浪高小于2 m 预报绝对误差 /m	3天浪高大于2 m 预报相对误差 /%	7天浪高小于2 m 预报绝对误差 /m	7天浪高大于2 m 预报相对误差 /%
22		9.2		18.58
203	0.15	9.74	0.15	15.84
204		13.56		17.88
205	0.12	9.01	0.12	11.09
平均误差	0.135	10.38	0.135	15.85

注:表中空格为该时段站点没有相应大小的波高。

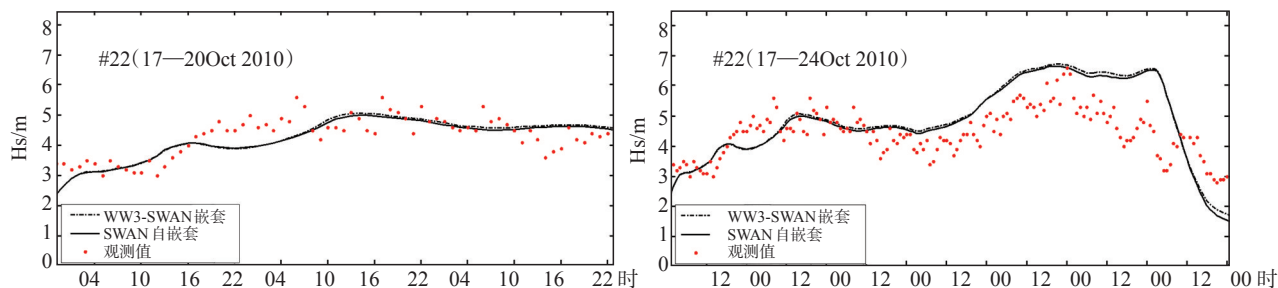


图3 22号浮标站方案一、二3天和7天预报有效波高结果对比

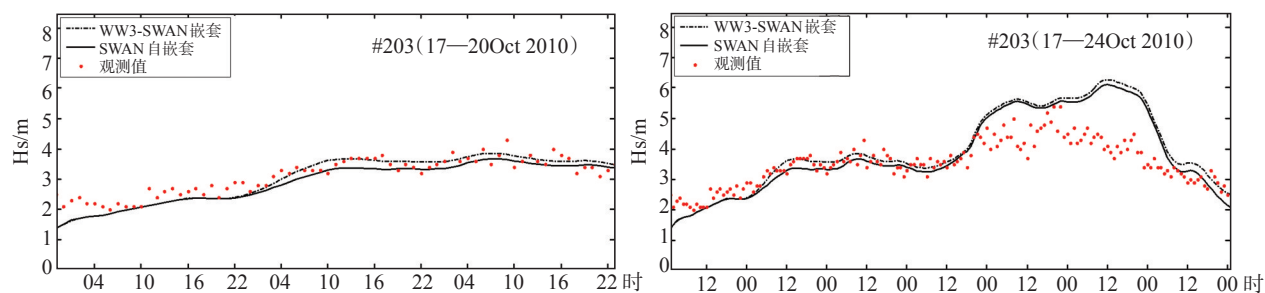


图4 203号浮标站方案一、二3天和7天预报有效波高结果对比

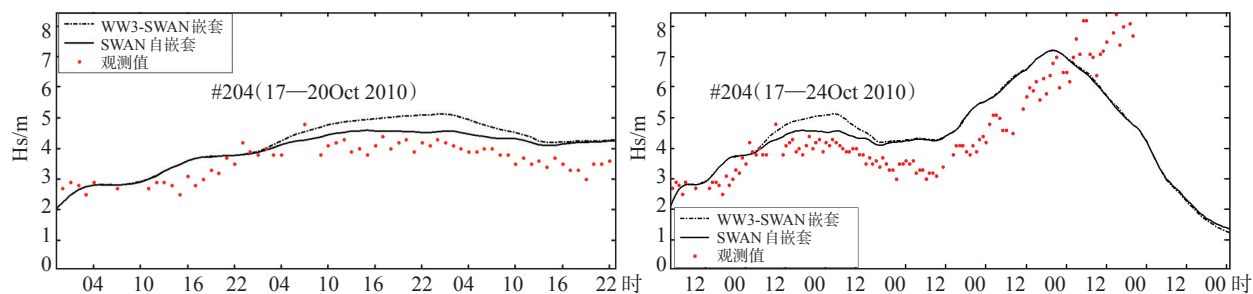


图5 204号浮标站方案一、二3天和7天预报有效波高结果对比

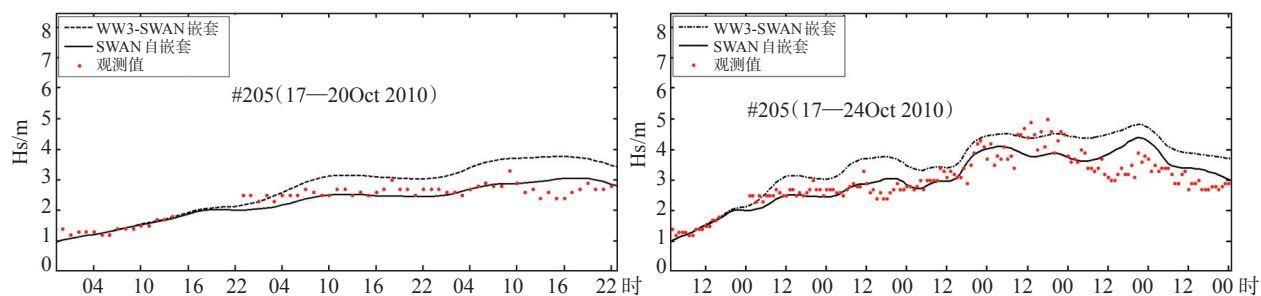


图6 205号浮标站方案一、二3天和7天预报有效波高结果对比

预报是否可行。针对这个问题,进行了对比试验,图7和图8分别是WaveWatchⅢ预报的3天和7天大区海浪场、SWAN模式预报的3天和7天大区海浪场,对比可见,差别主要在两个方面:其一在几个

区域出现了波浪能量异常堆积的情形(图中黑色圈内);其二大区除了几个波浪大值区,SWAN模式预报的波高值偏小外(这应该是两种模式源函数参数化方案不一致引起的),其余区域波浪场相差不

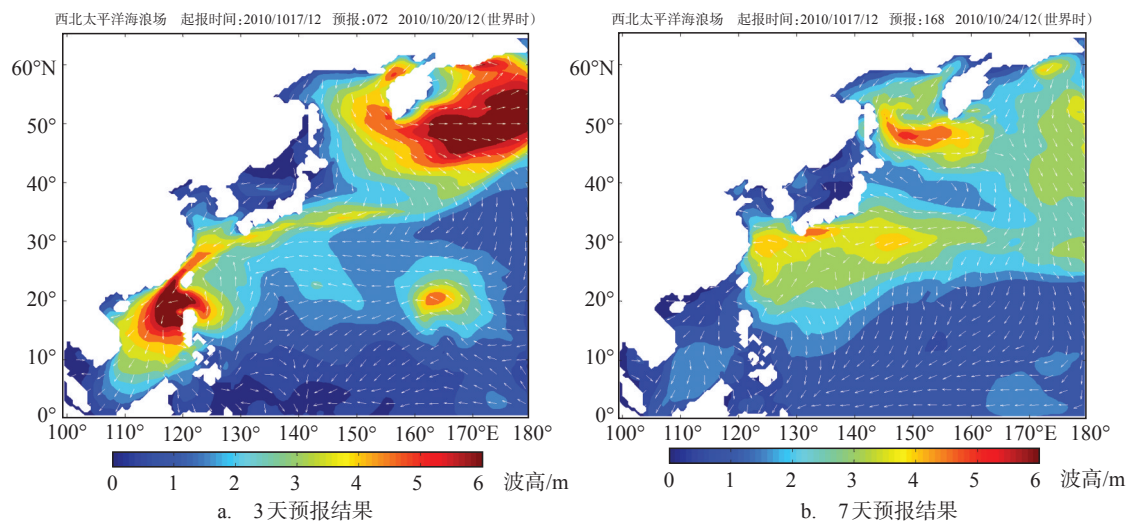


图7 WaveWatchⅢ预报的西北太平洋海浪场

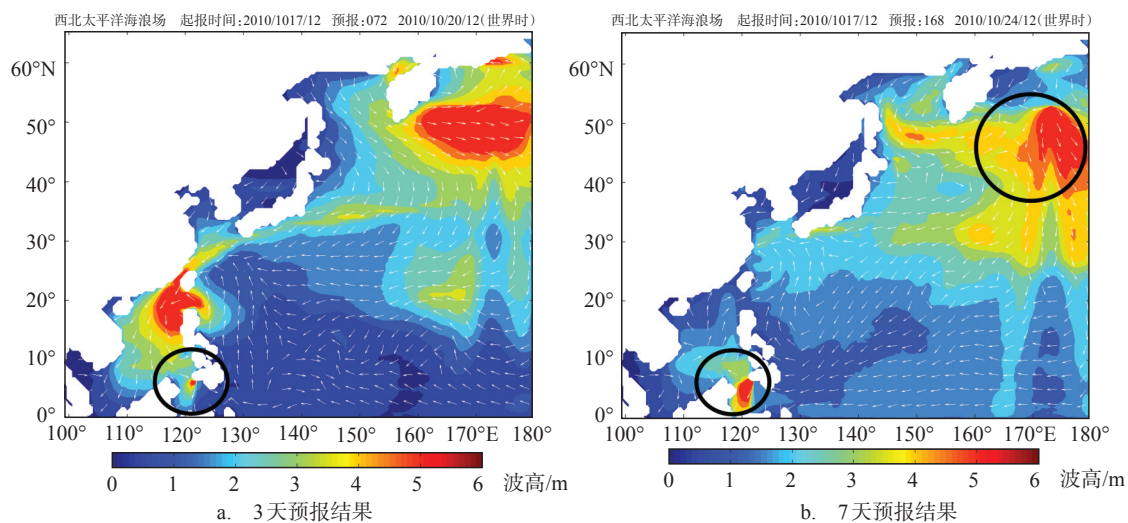


图8 SWAN(考虑REFRACTION项)预报的西北太平洋海浪场

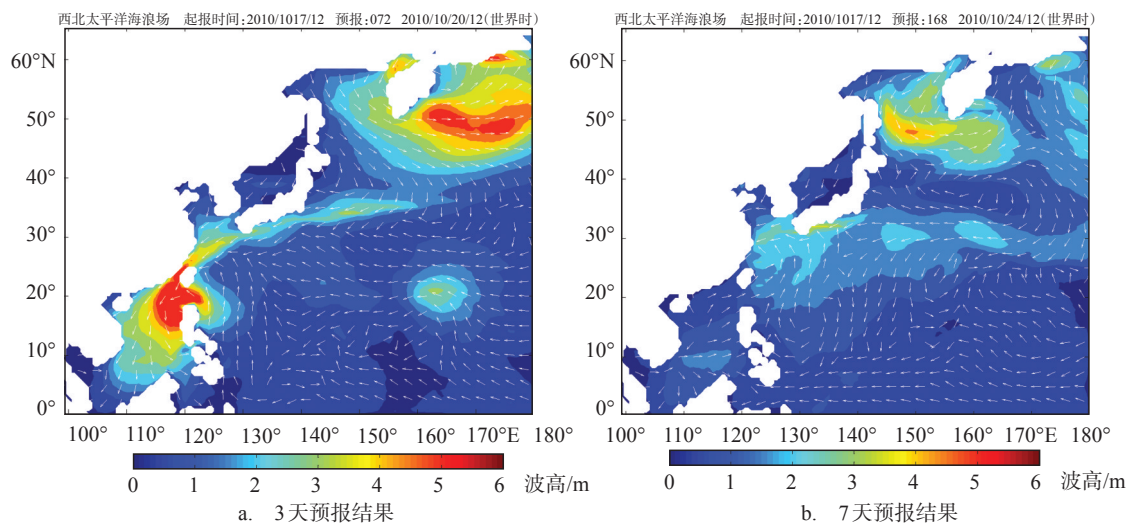


图9 SWAN(不考虑REFRACTION项)的西北太平洋海浪场

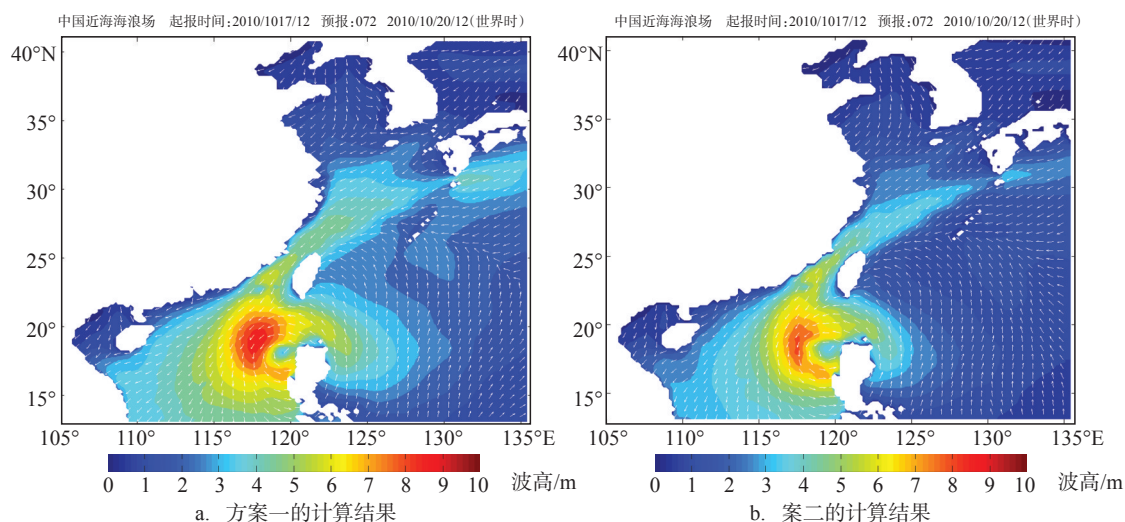


图10 两种方案嵌套一次后中国近海区域海浪场3天预报结果

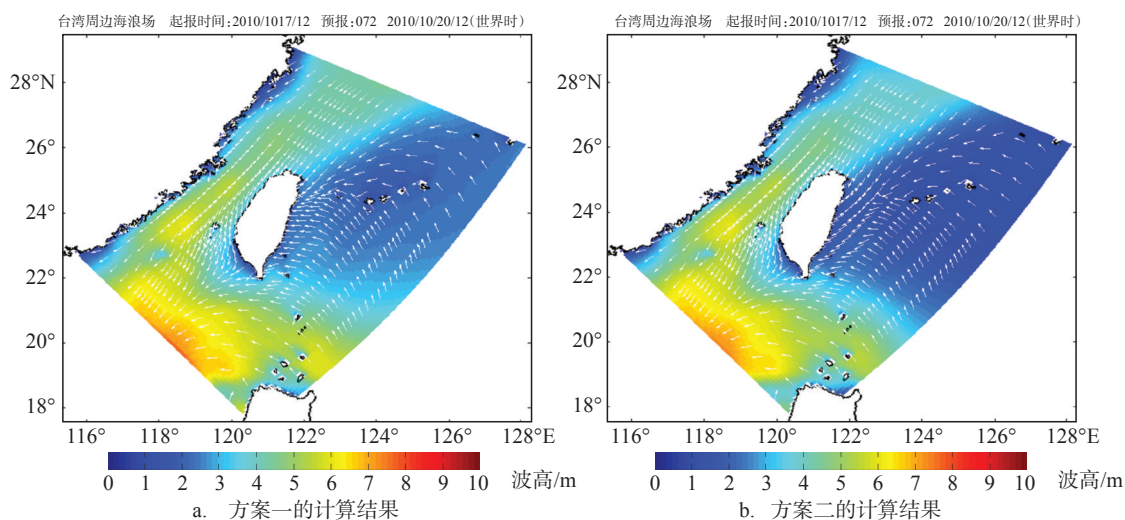


图11 两种方案嵌套两次后台湾周边区域海浪场3天预报结果

大。对于第一个问题,因为大区海浪预报主要是为中区外边界(深水区)提供边界条件,大区采用SWAN模式计算时关闭REFRACTION选项,能有效避免波浪能量异常堆积。图9是SWAN模式关闭REFRACTION项预报的3天和7天大区海浪场。对于第二个问题,这种偏小的现象在第一次、第二次嵌套后逐渐减小,见图10—11,第二次嵌套后计算区域为台湾周边海域。可见,两种方案均能满足台湾海峡及其近岸区域海浪预报的需求。

5 结论

本文建立了台湾海峡及近岸区域精细化海浪

预报系统,系统包括了SWAN模式、WaveWatchⅢ、四重嵌套网格。通过两种不同的嵌套方案对2010年秋季一次台风过程做了海浪预报检验,计算网格分辨率最小20 m,达到精细化海浪预报的需求,海浪预报结果表明,海浪有效波高不小于2 m的情况下,两种方案的平均预报相对误差均小于25%,有效波高大于2 m的情况下,平均预报绝对误差均小于0.5 m,均能满足精细化海浪预报精度。各业务单位可以根据硬件、软件的配置选取合适的业务系统。在系统调试过程中,发现SWAN模式用于大范围海域的海浪预报时,在小尺度地形突变的区域,易出现能量异常堆积的情形,通过选择不同参数化

方案的对比试验,发现SWAN模式用于大范围海域预报海浪场时,关闭REFRACTION选项,能有效的消除计算中的不稳定,而且不影响多重嵌套后的结果。

参考文献:

- [1] 沙文钰,高山,胡克林.大尺度能谱海浪预报模式研究进展及应用[J].海洋预报,2005,22(S):115-121.
- [2] 李本霞,吴淑萍,邢闯,等.近海近岸高精度海浪业务化数值预报系统[J].海洋预报,2010,27(5):1-6.
- [3] 高山,丁平兴,朱首贤.WaveWatch 的操作系统移植及其与SWAN嵌套接口的改进[J].海洋科学进展,2006,24(2):228-237.
- [4] Tolman H L. User manual and system documentation of Wave-Watch III version 3.14[J]. NOAA/ NWS/ NCEP/ MMAB Tech Note, 2009.
- [5] Holthuijsen L H. SWAN Version40.85 user manual[J]. Delft Univ Technol, 2011.
- [6] 闫涛,张宇铭,胡宝全.WaveWatch 和SWAN嵌套模拟台风浪的结果分析[J].海洋湖沼通报,2009,26(4):1-7.
- [7] 沙文钰.风暴潮、浪数值预报[M].海洋出版社,2004.
- [8] 史剑,王璞,钟中,等.两种网格下的SWAN模式对黄渤海海浪模拟比较[J].海洋预报,2011,28(4):48-57.
- [9] 林毅辉,潘伟然,张国荣,等.厦门湾常风浪场数值模拟[J].厦门大学学报(自然科学版)2009,48(2):298-301.

The study of fine-scale precision Wave Forecasting System in the Taiwan Strait

FENG Mang, ZHANG Wen-jing, LI Yan, SHI Jian, ZHANG Yong-chui

(Institute of Meteorology, PLAUST, Nanjing 211101)

Abstract: Based on the third generation wave model with the fourfold nested grids, the two fine-scale precision wave forecasting systems in the Taiwan Strait are established. One is inter-nest between the WaveWatch III and SWAN (case 1) and another one is self-nest of SWAN (case 2). The wave predicting ability is examined by a typhoon process in 3 days and 7 days forecasting. The results show that the relative error of forecasting for 3 days and 7 days in case 1 are 14.78 % and 19.53 %, while in case 2 they are 10.38 % and 15.85 %, respectively. Therefore, both the two systems could satisfy the operational demand.

Key words: WaveWatch III; SWAN; fine-scale precision wave forecasting