

中国海浪能资源分析

闻斌, 薛彦广, 张芳苒, 赵越超

(61741 部队 北京 100094)

摘要:以 10 年 QSCAT/NCEP 混合风场数据为输入,采用 WAVEWATCH-III 波浪模式,对中国海 1999-2009 年的海浪场进行了数值模拟,通过计算得到该海域的波浪能功率密度,对波浪能资源进行综合分析,得出中国海浪能资源的地理分布特征以及各海区的变化情况。

关键词:中国海;波浪能资源;WAVEWATCH-III

中图分类号:P743.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-0239(2013)02-0036-06

1 引言

利用海洋能源,是当今世界能源研究的方向。特别是在能源关系到国家安全,地球矿物能源逐渐枯竭及环境状况日益恶化的形势下,如何有效利用资源丰富、可再生的海洋资源,显得十分重要。海水的波浪运动产生巨大的能量,据估算,世界海洋中的波浪能达 700 亿千瓦,占全部海洋能量的 94%,是各种海洋能中的“首户”。我国陆地海岸线长达 18000 多公里、大小岛屿 6960 多个,波浪能资源十分丰富^[1]。2009 年 3 月,我国首座岸式海洋波浪能发电工业示范电站“汕尾 100 kW”岸式波力发电站的正常运行,标志着我国波浪力发电技术达到实用水平^[2]。

在 WAM 海浪模式的基础上发展起来的 WAVEWATCH-III 模式对控制方程、程序结构、数值和物理的处理方法等做了改进,使得该模式在考虑波-流相互作用和风浪物理机制方面更加合理。WAVEWATCH-III 模式的推出大大提高了波浪数值计算的精度。齐义泉等^[3]以 NOAA/NCEP 再分析风场资料为输入,利用 WAVEWATCH-III 模式模拟了 1996 年南海海域的海面风浪场,通过与 T/P 高度计有效波高资料的对比发现,模式模拟值与之符合较好。IL-JU MOON 等^[4]应用 WAVEWATCH-III 对 1998 年

发生在美国东海岸的飓风 Bonnie 进行了数值后报,通过与 NOAA 的 3 个波浪浮标(FPSN7、B41002 和 B44014)资料的对比发现,后报值与实测值符合非常好。以上实例充分证明了无论对一般过程还是台风过程,WAVEWATCH-III 模式都具有较好的波浪场数值计算能力。

为摸清我国波浪能资源分布状况,给开发利用波浪能提供科学可靠的依据,本文以 1999—2009 年连续 10 年的 QSCAT/NCEP 混合风场数据为输入,利用 WAVEWATCH-III 模式对中国海海浪进行计算,得到了较为精细、长时间序列海浪资料。根据模拟结果对中国海的波浪能资源进行研究,得出中国海浪能资源的地理分布特征及变化情况。

2 数据准备

(1)地形资料:本文使用 ETOPO2v2 全球地形地貌数据(U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center, 2006.2-minute Gridded Global Relief Data)。该数据集所提供的地形分辨率最高达到了 2'×2',本文取用其中的 0.25°×0.25°数据作为模型实际使用的地形资料。

(2)风场资料:模式中使用的风场为 Quick-SCAT/NCEP 混合风场,时间范围从 1999 年 8 月—

2009年7月连续10年。所谓混合风场就是对高分辨率的 QuickSCAT 卫星散射计观测数据(QSCAT)和美国国家环境预报中心(NCEP)的再分析风场数据进行时空混合分析的结果,大体的方法就是保留了 QSCAT 的沿轨风场数据而在其空白区域加入低波 NCEP 分析数据场。该混合风场具有很高的时空分辨率:时间间隔为 6 h,空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,覆盖了全球从 88°S — 88°N 的范围,被广泛用作模拟天气过程的驱动场^[5]。

(3) 卫星高度计资料:本文使用的卫星高度计资料来自美国国家航空航天局(NASA),由美国 and 法国合作于 2001 年 12 月 7 日发射的 Jason-1 卫星及其雷达高度计系统测量所得,测量到的有效波高的精度为 0.5 m 或 10%,该测量数据完全达到了定量观测对测量误差的要求(Chambers 等^[6], 2003)。本文将高度计反演的有效波高用于模拟的资料验证。

3 海浪模拟过程

3.1 海浪模型

海浪的计算采用 WAVEWATCH-III 海浪模式。模式的基本控制方程为^[7]:

$$\frac{DN}{Dt} = \frac{S}{\sigma}$$

S 代表与海浪谱有关的源和汇的总和,在球坐标下可写为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \dot{\phi} N \cos \theta + \frac{\partial}{\partial \lambda} \dot{\lambda} N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k} N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}_g N = \frac{S}{\sigma}$$

$$\dot{\phi} = \frac{c_g \cos \theta + U_\phi}{R}$$

$$\dot{\lambda} = \frac{c_g \sin \theta + U_\lambda}{R \cos \phi}$$

$$\dot{\theta}_g = \dot{\theta} - \frac{c_g \tan \phi \cos \theta}{R}$$

式中, R 是地球半径; U_λ 和 U_ϕ 分别是平均海流在经、纬方向的分量; λ, ϕ 分别为经、纬度。模式源函数项中包括风能量输入项 S_m , 波波非线性相互作用项 S_{nl} 和耗散(白冠)项 S_{ds} , 在浅水区考虑了底摩擦 S_{bot} , 用公式表示为:

$$S = S_m + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot}$$

该模式直接计算波波非线性相互作用, 不对谱形预加任何约束, 而且能够处理风速、风向的骤然变化。模式的数值计算主要采用分步算法。首先考虑水深在时间上的变化以及对应波数网格上的变化, 这样撇开水面变化的影响后, 对余下的片段计算来说, 波数网格就是不变的, 水深也是准稳定的。最后的片段计算则考虑了物理空间上的传播、波数空间上的传播和源函数项。这种分裂格式的使用可以显著提高矢量计算和并行计算的效率。此外, 模式在波数和方向的二维谱空间上计算, 为计算非线性相互作用的经济性考虑, 采用频率分段方法。由频率和频散关系换算出波数在各个格点的值, 从而波数空间的网格是随水深而变化的, 这就克服了由于水深变浅所带来的谱空间分辨率降低的问题。

3.2 模型设置

计算区域为 100° — 130°E , 0° — 42°N , 网格分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。其中东边界为开边界, 南、西、北边界为近似的闭边界。在闭边界处的条件是: 对即将跨过和离开海岸线的波浪, 边界是完全吸收波能的; 在开边界处, 采取和闭边界处相似的边界条件, 传向边界点处的波能在该点被吸收。在频率和方向的二维谱空间上, 设定频率分布从 0.0418 Hz 至 0.41 Hz 共 25 个频段, 波向共 24 个, 分辨率为 15° 。对于初始条件, 本文使用有限风区的 JONSWAP 谱, 谱值由局地风速和风向给出。

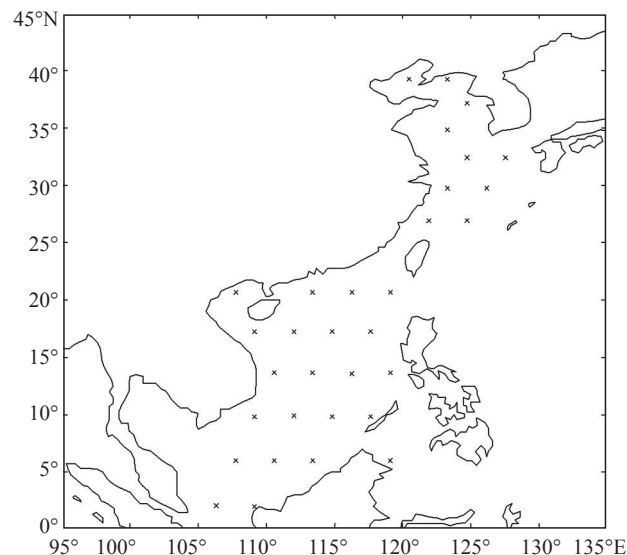


图1 jason-1 卫星轨道交叉点(“x”表示)位置示意图

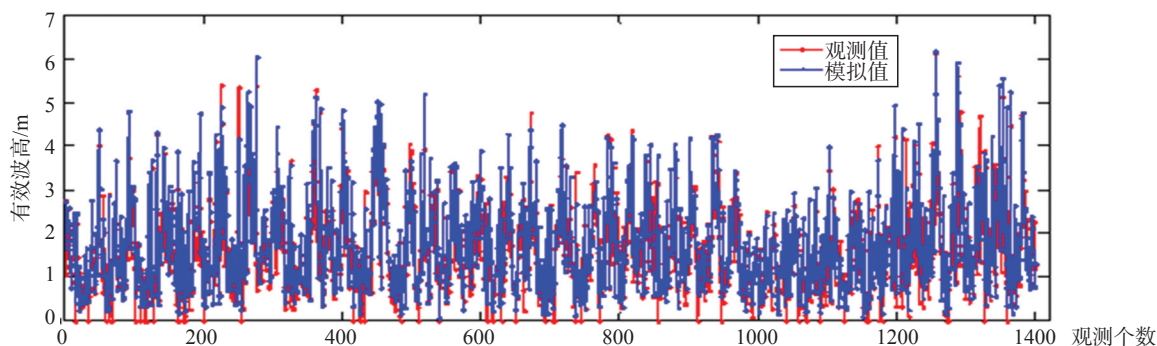


图2 有效波高观测值与模拟值对比序列图

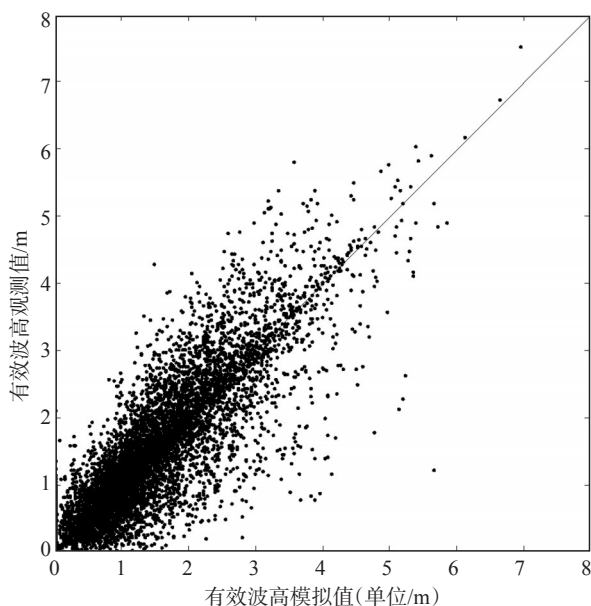


图3 有效波高观测值与模拟值散点分布图

模式采用 OpenMP 并行算法,传播计算步长为 1800 s,源函数的积分时间步长为 600 s。采用网格输出计算结果,时间间隔每 3 h 一次。

3.3 计算结果及验证

为了验证数值模拟结果的准确性,本文使用 Jason-1 卫星高度计 2002—2008 年在中国海 32 个卫星轨道交叉点(位置见图 1)的观测波高,共计 9480 个观测值,对模拟结果按照时间和空间进行提取,得到与交叉点时空相匹配的有效波高模拟值。从有效波高的对比结果看,相关系数为 0.86,平均相对偏差为 0.31 m,模拟的有效波高与观测值基本一致。图 2 为所选取的卫星轨道交叉点上有效波高观测与模拟值的对比序列(为使图直观清楚,这里只选取 1400 个对比点),图 3 为所有观测值与模拟值对比散

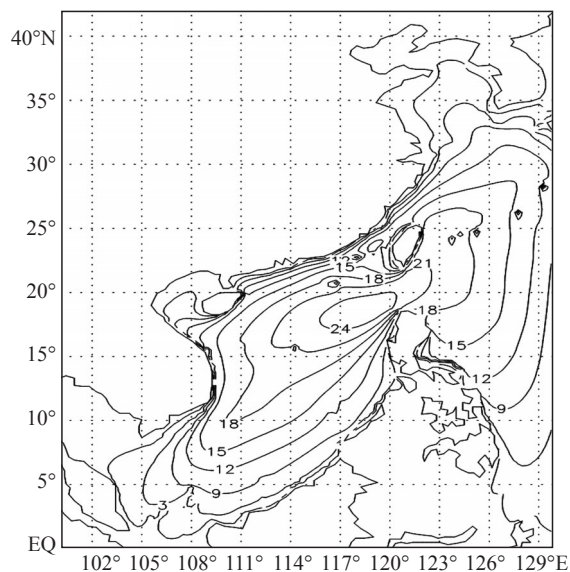


图4 中国海年平均波能功率密度分布(单位kW/m)

点分布图。

4 波浪能资源分析

4.1 波浪能量及功率密度的评估计算方法

波浪能量为波浪运动携带的能量,其中包括波浪运动中水质点以一定速度运动所具有动能和水质点运动离开平衡位置相对于水面的垂直位移所具有的势能,用 E 表示,单位为 J ;波能功率密度是波浪在传播方向上单位时间内通过单位波峰宽度上的能量,用 P 表示,单位为 kW/m 。根据美国 EPRI (Electric Power Research Institute) 的波浪能功率密度算法^[8], $P = \frac{1}{2} H_{1/3}^2 \bar{T}$, 式中, P 为波能功率密度, $H_{1/3}$ 为有效波高, \bar{T} 为平均周期。将模拟的海浪场

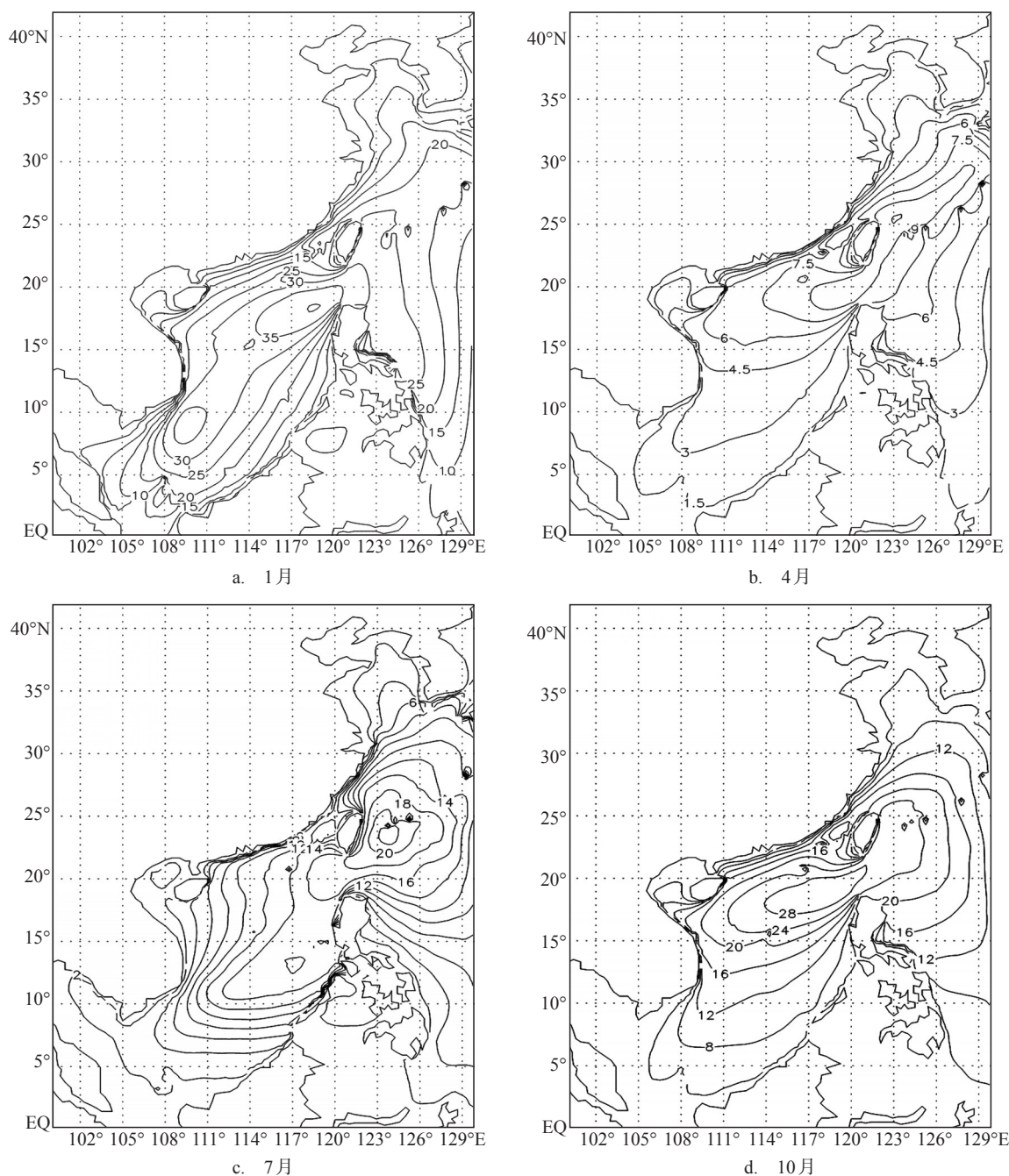


图5 中国海月平均波能功率密度分布(单位/(kW/m))

数据代入波浪能功率密度计算公式,得到中国海1999年8月—2009年7月逐3 h的波浪能功率密度,本文通过对该海域波浪能功率密度进行月平均和年平均,分析中国海各海区的波浪能功率密度的分布情况以及各季节变化特征。

4.2 波浪能资源地理分布特征

图4为中国海年平均波能功率密度分布图,可

可以看出,中国海波能功率密度分布呈南高北低的态势,沿岸低,远海高。其中南海波能资源最为丰富,大部海域波能功率密度都在 10 kW/m 以上,高值区位于南海东北部,可达 24 kW/m 以上,在电能极为匮乏的南沙群岛海域,波能功率密度达到了 15 kW/m 以上;东海的波能资源较为丰富,波能功率密度在 $10\text{—}25 \text{ kW/m}$ 之间;黄海次之,在 $3\text{—}9 \text{ kW/m}$ 之间;

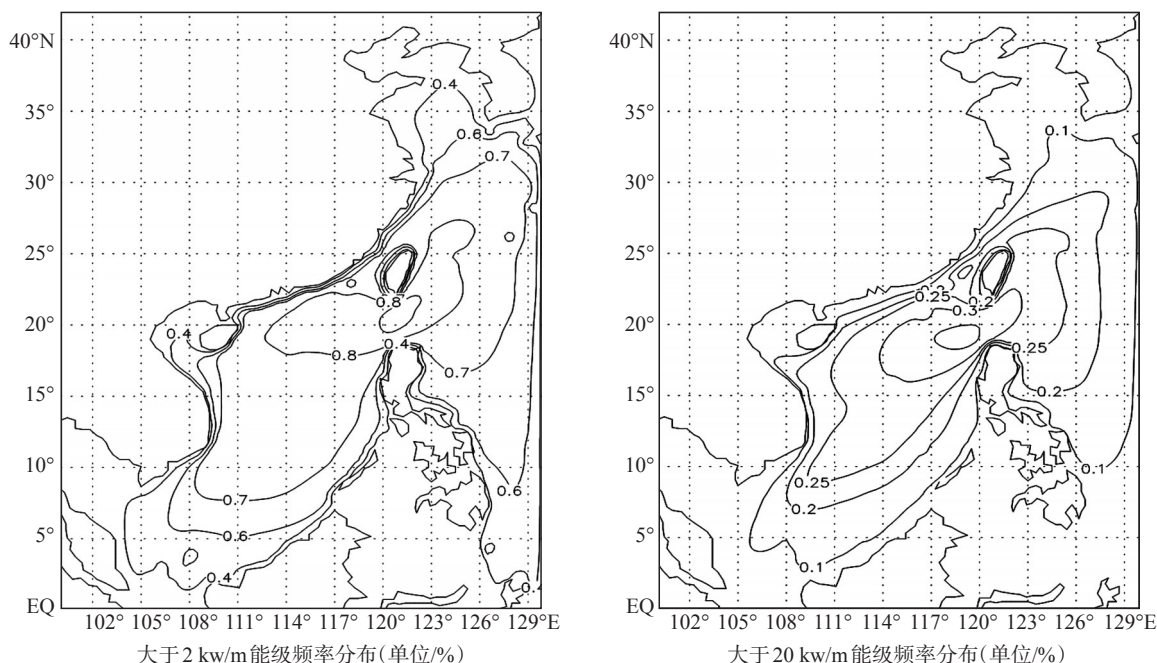


图6 中国海能级频率分布

渤海的波能功率密度最低,在3 kW/m以下。

4.3 波浪能资源季节分布特征

这里以1、4、7、10月份平均波能功率密度分布作为代表(见图5),来研究中国海四季波能分布特征。从图5可看出,冬季(1月),受冷空气影响,中国海海区风高浪急,是波能资源最为丰富的季节,黄海至南海海域大都在10 kW/m以上,南海海区最大可达35 kW/m以上,渤海由于受地理位置和海冰等因素影响,波能功率密度较低;春季(4月),由于风力较弱,整个中国海波能功率密度都在10 kW/m以下,极大值区位于台湾海峡和吕宋海峡,也仅在7—9 kW/m之间,为波能资源最少的季节;夏季(7月),受热带气旋等因素影响,中国海波能功率密度分布特征和其他季节相比明显不同,呈东高西低的态势,极大值区由南海东北部北移至台湾以东海域,最大值可达22 kW/m,东海取代南海成为该季节波能资源最为丰富的海区。秋季(10月),受热带气旋和冷空气共同影响,中国海波能资源仅次于冬季,极大值区回移至南海东北部,可达28 kW/m。总的来说,除春季外,其它三个季节波能资源都较为丰富。

4.4 能级频率

在波浪能资源的开发与利用中,能级频率是衡

量波浪能资源丰富程度的一个重要标准,通常认为波浪能功率密度 >2 kW/m时为可用, >20 kW/m时为富集区。根据上述计算结果对波能功率密度 >2 kW/m和 >20 kW/m出现的频率分别进行了统计,见图6。由图6可看出,南海大部海域2 kW/m以上出现的频率都在70%以上,高值区位于南海东北部,超过80%;东海次之,在60%—80%之间,黄海在35%—50%之间,渤海最低,在30%以下。

根据富集区标准,东海南部至南海大部, >20 kW/m出现的频率较高,在20%以上,为波能资源富集区,我国中北部海域20 kW/m出现的频率较低,在10%以下。

5 结论

(1)中国海波能功率密度分布呈南高北低的态势,近岸低于中部海域。南海波能资源最为丰富,东海次之,渤海最低;

(2)冬季中国海的波能资源最为丰富,秋季次之,春季由于海区风力较弱,是波能资源最少的季节。夏季,中国海波能密度分布特征和其他季节相比明显不同,呈东高西低的态势,极大值区从南海东北部北移至台湾以东海域;

(3)南海大部海域 >2 kW/m(可用)出现的频率

都在70%以上,东海为60%—80%之间,黄海在35%—50%之间,渤海最低,在30%以下。东海南部至南海大部, $>20\text{ kW/m}$ (富集)出现的频率在20%以上,渤海20 kW/m 出现的频率较低,在10%以下。

参考文献:

- [1] 许富祥.海洋波浪能资源估算方法研究进展及展望[C]//中国可再生能源学会海洋学专业委员会第三届学术会讨论会论文集.北京:海洋出版社,2010;227-234.
- [2] 齐义泉,朱伯承,施平等. WWATCH模式模拟南海海浪场的结果分析[J]. 海洋学报, 2003, 25(4):1-9.
- [3] Moon I J, Ginis I, Hara T, et al. Numerical simulation of sea surface directional wave spectra under hurricane wind forcing [J]. Journal of Physical Oceanography, 2003, 33: 1683-1706.
- [4] 李明悳,候一筠. 利用QuickSCAT/NCEP混合风场及WAVEWATCH模拟东中国海风浪场[J]. 海洋科学, 2005, 29 (6): 9-12.
- [5] Chambers D P, Ries J C, Urban T J. Calibration and verification of Jason-1 using along-track residual with TOPEX [J]. Marine Geodesy, 2003, 26(3-4): 305-317.
- [6] Hendrik L.Tolman. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22, [Z]. Technology Note 214, NOAA/NEW/NCEP/OMB, 2002, 133.
- [7] Hagerman G. Guidelines for preliminary estimation of power production by offshore wave energy devices. [EB/OL] .[2003-08-10]. <http://www.epri.com/oceanenergy>.

Numerical simulation of wave energy resources in the China Sea

WEN Bin, XUE Yan-guang, ZHANG Fang-ran, ZHAO Yue-chao

(61741 Army Troop, Beijing 100094 China)

Abstract: Driven by QSCAT/NCEP Blended Ocean Winds, a full-spectral third-generation ocean wind-wave model (WAVEWATCH III) is used to simulate the wave fields in the China sea from August 1999 to July 2009. By analyzing the wave power density calculated from model output, spatial and temporal variation features of wave energy resources were showed in the China Sea.

Key words: China Sea; wave energy resources; WAVEWATCH-III