

基于 WWATCH 模式和高度计数据的 几内亚湾海域海浪的数值计算

李庆红, 张永刚, 张磊, 刘天波

(海军大连舰艇学院 军事海洋系, 辽宁 大连 116018)

摘要: 我国与非洲国家的经济往来和能源合作日益密切, 研究几内亚湾及其附近海域海浪特点对此具有重要意义。将第三代海浪数值模式 WWATCH 模式应用于几内亚湾及其附近海域, 以美国国家环境预报中心 (NCEP) 的再分析风场资料作为模式输入, 对该海域 2004 年的海浪场进行了数值计算。利用计算结果分析了 2004 年 2 月和 8 月几内亚湾及附近海域的海浪特点, 将模式计算的有效波高与 Topex/Poseidon 高度计观测的有效波高进行对比, 结果表明, 模式有效波高的大小和变化趋势与 T/P 高度计有效波高具有良好的一致性, 其中在深海海域计算效果好于浅海海域。

关键词: WWATCH; 海浪; T/P 高度计; 数值计算; 几内亚湾

中图分类号: P71

文献标识码: B

文章编号: 1003 - 2029 (2007) 04-0030-05

几内亚湾位于非洲西海岸外, 大西洋中东部, 西以利比里亚帕尔马斯角为界, 东北以加蓬洛佩斯角为界, 平均水深 2960 m, 最大水深 6363 m, 突出海湾的尼日尔三角洲把海湾分为西部的贝宁湾和东部的邦尼湾。海湾沿岸渔产丰富, 大陆架上富藏石油。该海域北部属赤道低气压带, 又是南北信风的辐合带, 风力微弱, 风向不定; 南部为南半球的东南信风带, 风力相对较大。几内亚湾是通往附近尼日利亚等西非沿岸产油国的必经水域, 目前我国海洋权益的外延不断拓宽, 并且与尼日利亚等西非国家经济往来和能源合作日益密切, 深入研究几内亚湾及其附近海域海浪的分布特征和变化规律对促进我国与非洲尤其是中西非国家之间的友好合作具有重要的意义。

1 引言

海浪作为海洋中的重要运动现象, 对人类的海上活动及近岸活动如航海、军事等领域有着巨大的影响。因此, 海浪的数值模拟和预报有着非常重要的现实意义。目前海浪的数值模拟已被广泛用于认识和分析海浪生成、传播和发展规律, 到上世纪末已经达到比较成熟的阶段。第三代海浪模式 WAM 已被国际上广泛使用, 许多国家将其作为业务化的运行模式发布区域或全球的海浪场预报。近年来,

美国海洋大气局环境预报中心 (NOAA/NCEP) 海浪专家 Tolman 在 WAM 模式的基础上新开发了一个全谱空间的第三代海浪模式 WAVEWATCH III, 简称为 WWATCH^[1], 该模式可进行全球和大洋范围的海浪预报^[2], 其关键技术都与 WAM 模式有所不同, 在控制方程、模式结构、源函数、数值计算方法和物理量参数化方面等都作了改进, 不仅在考虑波流相互作用和风浪物理机制方面更加合理, 而且提高了模式的性能和效率。本文将这一模式应用到大西洋几内亚湾及其附近海域, 计算了该海域的海浪场, 并将计算结果与海上观测结果进行了对比分析。

2 WWATCH 模式的基本原理

2.1 波浪传播方程和源函数

对于海浪的随机变化通常采用能量谱 F 来描述, 它是各相位参数、时间 t 和空间 \vec{x} 的函数, 即 $F(\vec{k}, \sigma, \omega, \vec{x}, t)$ 其中 \vec{k} 为波数矢量, σ, ω 分别为固有频率和绝对频率。在局部线性波动理论的假定下, 相位参数 \vec{k}, σ 和 ω 中只有两个是独立的, WWATCH 模式中采用的波谱是波数波向谱, 即 $F(k, \theta)$; 但在模式的输出中还包含有传统的频率-方向谱 $-F(f, \theta)$, 它们之间可以通过雅可比变换来相互转换^[3]。

在没有流的情况下, 一个波包的能量 (方差) 是一个守恒量; 但海流作为海浪的背景场, 对海浪的传播具有不可忽视的调制作用, 由于流的能量对波浪平均动量传输的作用, 谱分量的能量不再守恒。但海洋动力学中一般认为^[4], 波作用量 $A=E/\sigma$ 是守恒的, 这样 WWATCH 模式以波作用量平衡方程取代 WAM 中使用的能谱传输方程作为模式的

收稿日期: 2007-07-11

基金项目: 总装备部重点资助项目 (2003ZC095Y043)

作者简介: 李庆红 (1978-), 男, 河北沙河人, 博士

张永刚 (1963-), 男, 吉林长春人, 博士后, 教授, 博士生导师。

基本控制方程。在球坐标系下, 波作用量平衡方程如下:

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

其中波作用量密度谱 $N(K, \theta) \equiv F(K, \theta) \sigma$, S 为源函数, 它代表谱 F 源和汇的净效应,

$$\dot{\varphi} = \frac{c_g \cos\theta + U_\varphi}{R}, \quad \dot{\lambda} = \frac{c_g \sin\theta + U_\lambda}{R \cos\varphi},$$

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

R 是地球半径, λ 和 φ 分别为经、纬度, U_φ 和 U_λ 是流速分量, θ 是波动传播方向, 当 $\theta=0$ 时表示波动向正东方向传播。

源函数 S 一般包括三部分, 即风能量输入项 S_{in} , 非线性波波相互作用项 S_{nl} 和耗散项 S_{di} , 此外在浅水情形下还须考虑海底摩擦项 S_{bot} 。因此有 $S = S_{in} + S_{nl} + S_{di} + S_{bot}$ 。

2.2 模式的数值方法

模式的运行由预处理程序、计算主程序和输出程序等流程构成的, 其中预处理程序包括 `ww3_grid`, `ww3_strt` 和 `ww3_prep`, 计算主程序为 `ww3_shel`, 输出程序为 `ww3_outf`, 可以根据需要修改各程序的输入文件 (*.inp 文件) 来完成各计算过程中的参数设置。

从波浪传播方程可知, WWATCH 模式的计算是在波数和方向上的二维谱空间进行的, 为保证浅水区计算的精度, 并考虑到计算复杂性等因素, 模式采用变波数网格, 并在在方向和频率上均采用分段方法。频率分段按照公式 $\sigma_{m+1} = X_0 \sigma_m$ 进行, 其中 σ_m, σ_{m+1} 是相邻的两个频率点, X_0 是相邻频率之比值。这样, 由频率和频散关系就能够换算出波数的各个格点值, 它是水深的函数, 这克服了由于水深变浅带来的谱空间分辨率降低的问题。根据几内亚湾海区的实际情况, 本文中 X_0 取 1.1, 波数空间的分隔数取 25, 第一个频率 σ_0 点取 0.0412 Hz, 最后一个频率点 σ_{24} 为 0.4058 Hz; 方向上平均分成 24 个点, 即 15° 的分辨率。本文的地理空间网格采用了 $1/3^\circ$ (经度) $\times 1/3^\circ$ (纬度) 的分辨率, 计算区域范围为经度 $13.5^\circ\text{W} \sim 13.5^\circ\text{E}$, 纬度 $8.5^\circ\text{S} \sim 8.5^\circ\text{N}$ 。

对平衡方程采用多步积分的方法进行求解。第一步考虑波数随时间的变化以及相应波数网格的变化, 将海平面随时间变化的效应分离, 这样网格就成为恒定量; 在后续的计算步骤中, 水深就是准恒定的, 仅需考虑空间传播、谱内传播和源项。使用这种分裂格式可以提高矢量计算和并行计算的效率。此外, 该模式在不同的积分步骤中, 共使用了四种不同的时间步长, 本文中全局时间、空间传播和谱内传播时间步长均取 300 s, 源项积分时间步长取 150 s。

模式数值计算的结果包括十几种波浪要素值, 输出方式包括场输出、点输出和沿轨道输出三种。本文中设定的输出波浪要素包括有效波高和平均波向; 根据结果分析需要, 在输出方式上采用了场输出和点输出两种。

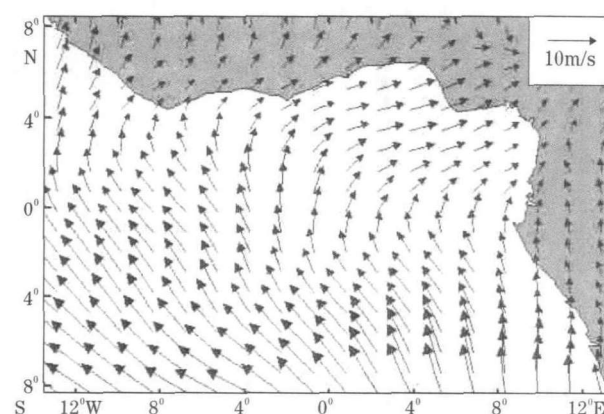
3 海浪场计算结果讨论

在本文的计算中, 风场资料是模式的输入场。由于几内亚湾及附近海区海面风场的现场观测资料很少且不连续,

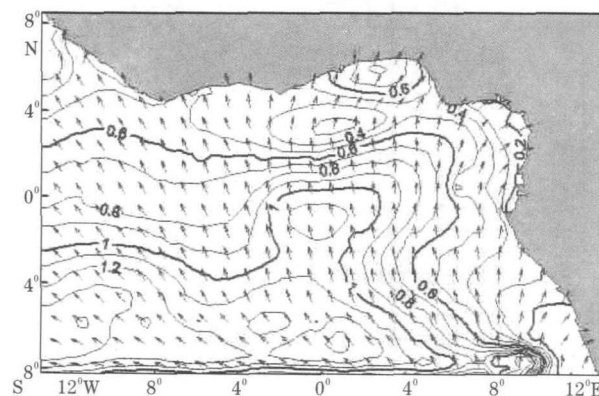
本文参照相关文献的做法^[7], 采用美国国家海洋大气局 (NCEP) 的再分析风场资料作为模式输入, 再分析风场资料为 6h 一次, 空间分辨率为 1.875° (经度) $\times 1.905^\circ$ (纬度), 本文在使用时采用抛物插值法将资料在空间和时间上进行内插以同 WWATCH 模式相一致。几内亚湾海区处于赤道东风带, 一年四季的风场和风浪场具有相似的特点, 这里仅使用 2004 年 2 月和 8 月的计算结果进行讨论。

3.1 2 月份海浪的计算结果

图 1 是 2004 年 2 月 15 日 06 时的 NCEP 再分析风场和海浪的计算结果, 图中标示的波高为有效波高 $H_{1/3}$ 。图 1(a) 是模式输入使用的 NCEP 风场, 从图中可以看出, 赤道以南为东南信风带, 赤道附近和赤道以北一般称之为赤道无风带, 以较弱的偏南风到西南风为主; 该季节风力相对较小, 最大风力出现在经度 0° 、纬度 7°S 附近, 风速也只有 8.7m/s 左右。图 1(b) 是 2 月份波高和波向的计算结果, 可以看出有效波高主要与风速大小、风区长度和离岸距离有关。海区西南部是风速相对较大的区域, 波高值也相对较大, 在经度 12°W , 纬度 7°S 附近的波高最大, 有效波高最大值为 1.35m 。从东部和北部沿岸水域向西南大洋方向波高值逐渐增大, 水深越深, 离岸距离越远, 波高值就越大; 值得注意的是, 在尼日利亚西部和贝宁沿海的贝宁湾附近有一个波高值相对较大的区域。这种波高分布与风区长度是紧密相关的, 在赤道以南海域, 由于常年吹东南信风, 波浪可以充分成长, 但海区东侧是陆地, 西部则是宽



(a) 输入的 NCEP 风场



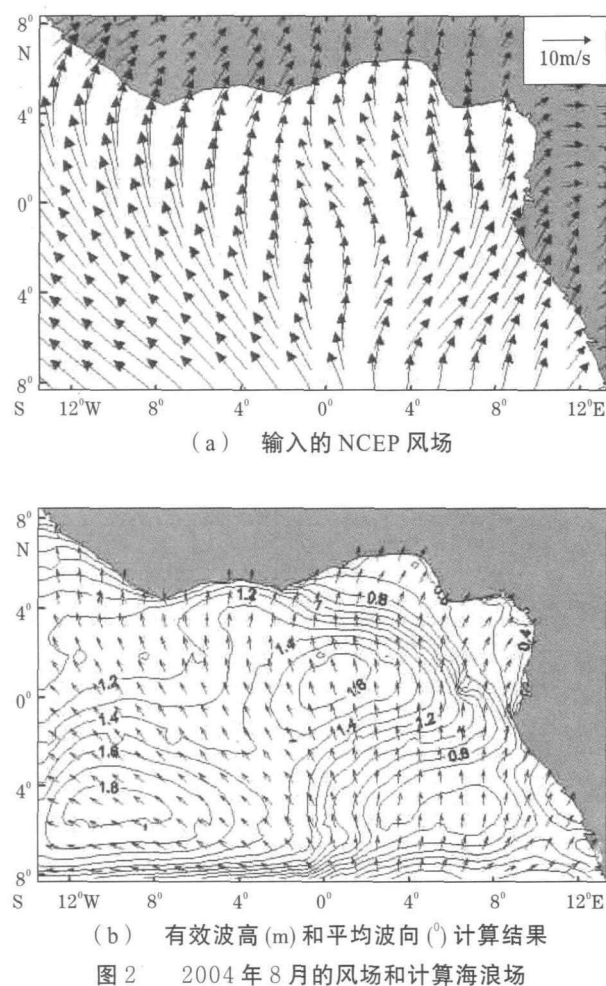
(b) 有效波高 (m) 和平均波向 ($^\circ$) 计算结果

图 1 2004 年 2 月的风场和计算海浪场

阔的洋面，风区长度决定了波高从东到西逐渐增大；赤道以北，由于风向为偏南风，再加上北面海岸的影响，使得等波高线基本上与海岸平行；贝宁湾附近区域波高相对较大的主要原因则是这里的风向多为西南风到偏西风，使得风区长度相对较长。该海区内海浪的平均波向基本都偏向风向的左侧，但偏差不大，赤道以南多为偏东向到东南向，而赤道以北多为东南向或到偏南向；但在近岸海域海浪具有向岸传播的特点。

3.2 8 月份海浪的计算结果

图 2 是 2004 年 8 月 15 日 06 时的 NCEP 再分析风场和海浪的计算结果。图 2 (a) 是 NCEP 风场，图 2 (b) 是本文对有效波高和平均波向的计算结果。8 月份主要仍是东南信风，且是一年中风力较大的月份，海域南部风力大于北部，尤其在海域的西南部风速最大，为 11.5 m/s，东南信风甚至可以越过赤道达到纬度 5°N 附近。波高值普遍比 2 月较大，但分布特点规律与 2 月份相似，有效波高最大值也是出现在海区西南部，达 1.86 m，由此向东向北逐渐变小。波浪传播方向与风向也是十分接近，多为南向或东南向；在近岸海域波浪基本上也都是向岸传播的。几内亚湾及附近海域 2 月份海浪较小而 8 月份较大的特点，相关学者在研究南大西洋的风场和海浪场特点时有过论述^[6]。



从图 1 和图 2 可以看出，2 月和 8 月波高计算结果还有

一个共同的特点就是在模式南部边界处等值线特别密集，事实上边界以南仍是广阔的洋面，波高值在此突然减小显然不符合大洋海浪分布实际情况。究其原因，这是在东南信风的风场下，由于人为划定模式开边界引起的计算结果的边界效应；同时我们也注意到，受边界效应影响的区域并不大，即边界效应并不影响模式的总体计算结果。

4 计算结果验证

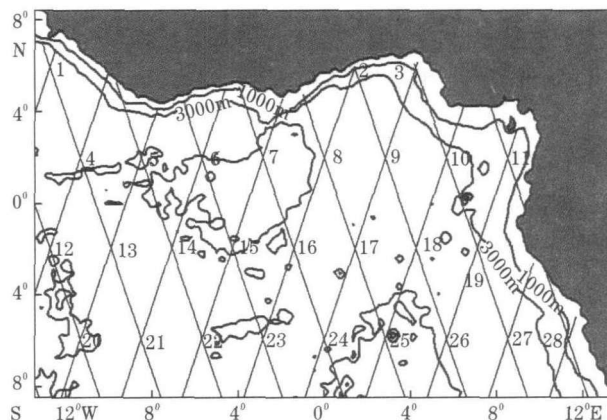


图 3 TOPEX/Poseidon 高度计的轨道分布

由于几内亚湾的波浪浮标实测数据很少，本文采用 TOPEX/Poseidon 高度计所测得的有效波高数据对模式结果进行验证。TOPEX/Poseidon 卫星是美国和法国于 1992 年联合发射的，星上载有一台美国 NASA 的 TOPEX 双频高度计和一台法国 CNES 的 Poseidon 高度计，用于探测大洋环流、海面风速和有效波高等海洋要素，TOPEX/Poseidon 高度计的运行结果表明其在测高方面已经达到相当高的精度。图 3 是 TOPEX/Poseidon 高度计的轨道分布，由于高度计上升轨道和下降轨道交点处的数据量为轨道其它位置的 2 倍，为了更充分地对计算的有效波高进行验证，我们选取轨道交点处的数据对计算结果进行对比和验证。高度计轨道在该海区共有 28 个交点，分别编为 1~28 号，如图 3 所示；其中 1 号、2 号、3 号、10 号、11 号、19 号、27 号、28 号等 8 个交点位于近岸浅水海域，其它 20 个交点位于大洋深水海域，注意这里的浅水和深水都是相对概念。下面以 2004 年为例，将一年的海浪计算结果与全年轨道交点处的高度计有效波高对比进行分析。

4.1 深水区计算结果验证

将深水区的 20 个交点处的计算波高与高度计波高进行对比，计算波高的变化与高度计观测结果基本一致，吻合率较高；计算波高的大小相对于高度计波高在整体上略微偏小，齐义泉^[7]等在用 WWATCH 模式分析南海的海浪特点时也遇到类似情况，并指出在风速极小值附近的误差较大。这里以 6 号和 22 号交点为代表进行分析，图 4 给出了这两个交点处计算值和观测值的对比结果，其中实线表示 2004 年该点处的计算值，而符号“☆”则表示高度计的观测值，从图中可以看出计算波高的大小和变化趋势都是接近真实

情况的。

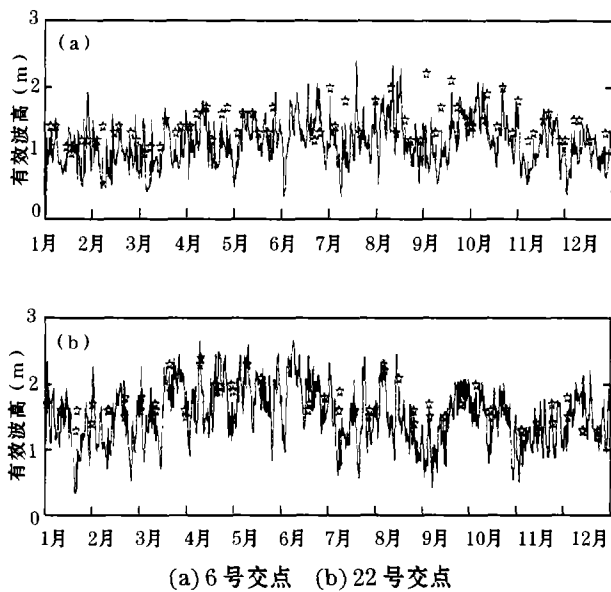


图 4 深水区计算波高(实线)与高度计观测波高(☆)的比较

图 5 给出了二者的散布图，为了定量分析计算结果，本文还计算了每个点处的平均偏差 \bar{d} 、均方根偏差（标准偏差） s 和相关系数 r ，计算公式为

$$\begin{aligned}\bar{d} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_{wi} - h_{TPi}) \\ s &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (h_{wi} - h_{TPi})^2} \\ r &= \frac{\sum_{i=1}^n (h_{wi} - \bar{h}_w)(h_{TPi} - \bar{h}_{TP})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (h_{wi} - \bar{h}_w)^2 \sum_{i=1}^n (h_{TPi} - \bar{h}_{TP})^2}}\end{aligned}$$

式中： h_w 和 h_{TP} 分别为 WWATCH 模式计算的有效波高和 T/P 高度计观测的有效波高； n 为高度计 2004 年在交点处的观测次数。6 号交点和 22 号交点处计算波高值的平均偏差分别是 -0.16m 和 -0.12m ，相对于高度计观测值略微偏小；均方根偏差分别是 0.22m 和 0.19m ，说明计算波高相对于高度计波高的散布并不大；相关系数分别达到 0.83 和 0.86 ，说明二者呈良好的线性关系，变化趋势基本一致。

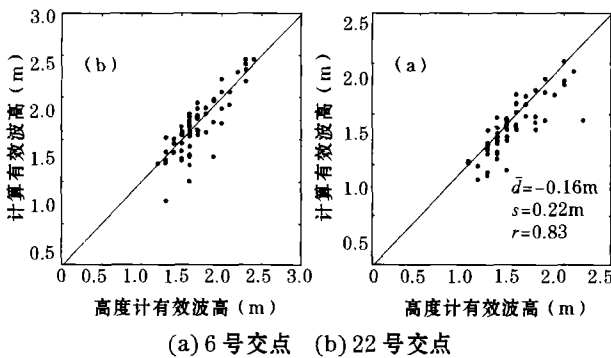


图 5 深水区高度计观测波高与计算波高的散布图

4.2 浅水区计算结果验证

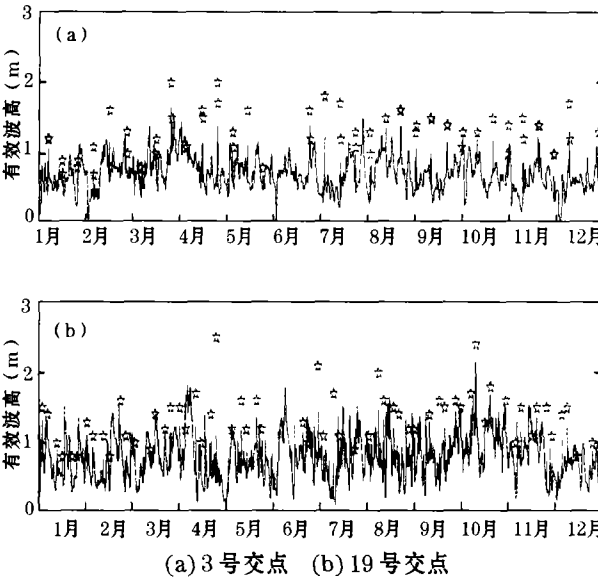


图 6 浅水区计算波高(实线)与高度计观测波高(☆)的比较

将浅水区的 8 个交点处的计算波高与高度计波高进行对比，发现计算波高值总体偏小，预报精度不及深水区；但计算波高和高度计波高的变化趋势大体一致。造成浅水区预报精度偏低的原因很多，如海陆交界处的 NCEP 再分析风速值可能偏小导致风能量输入项偏小、耗散项和底摩擦项过大可能导致计算波高值偏小等。这里以 3 号和 19 号交点为代表进行分析，图 6 给出了计算值和观测值的对比结果，从图中可以看出计算的波高变化趋势虽然与实际情况相符，但其大小明显小于观测值。

图 7 给出了二者的散布图，3 号交点和 19 号交点处计算波高值的平均偏差分别是 -0.26m 和 -0.25m ，均方根偏差分别是 0.36m 和 0.38m ，由于浅水区的实际波高值并不大，大多时候在 $0.7\sim 1.8\text{m}$ 之间，因此这样的平均偏差和均方根偏差还是较大的；相关系数分别达到 0.76 和 0.69 ，二者的相关性也不如深水区高。由此也看出 WWATCH 模式在浅水区的预报精度不够高，解决该问题必须综合考虑浅水区能量耗散和波浪的折射反射等因素，使用更好的浅水模式如 SWAN 模式来实现。

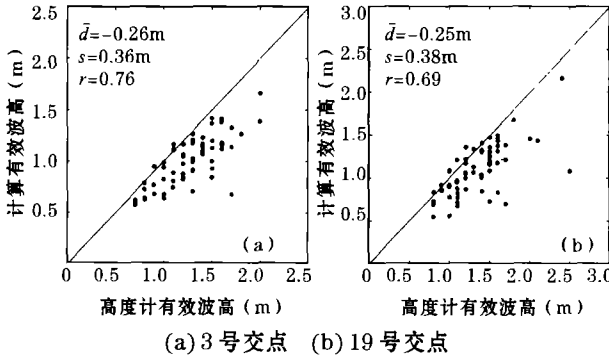


图 7 深水区高度计观测波高与计算波高的散布图

从图 4 和图 6 还可以分析波高的季节变化特征，在深

水区,有效波高在总体上夏季(5~8月)略高于冬季(11月~2月);在浅水区,没有明显的季节变化特征。事实上,该海域北部为赤道无风带,风力较小,风向不定;南部为东南信风带,风向风速虽基本稳定但风力不大,因此波高的分布和变化也不明显。根据图4~图7,还可以看出深水区的波高要大于浅水区,这是由于该海域的地形特点和风场特点使得深水区的风区长度较大,因此波高值也较大,尤其是22号交点更加明显;浅水区则相反,19号交点就是由于风区长度太小造成波高较小的典型情况。

5 结论和思考

本文使用WWATCH模式对尼日利亚附近的几内亚湾海域的海浪进行了数值计算,并对计算结果作了对比验证,得到如下基本结论:

(1)模式计算得到的海浪场,冬季的波高值略小于夏季,分布规律则与夏季相似,在海区西南部的波高值最大,向东向北逐渐减小,其中海区东部靠陆地海域波高最小,这是由该区域的海陆分布特点和风场特点决定的。计算的

波向偏向风向左侧,但偏差不大;在浅水区海浪有向岸传播的趋势。

(2)由于该海域缺少连续的风场实测资料,鉴于Top-ex/Poseidon卫星高度计测量的有效波高数据精度较高,本文将模式计算的有效波高与高度计有效波高进行了对比分析。分析结果表明:深水区的计算结果精度较高,与高度计波高的相关性也较好;浅水区的计算精度较差,与高度计波高的相关性不如深水区。

(3)计算波高的误差主要源于NCEP再分析风场的精度和模式本身的精度两方面。WWATCH模式对水深较浅、地形复杂浅水海域的计算可能有一定局限性,应该在WWATCH模式基础上综合考虑浅水区能量耗散机制和波浪折射反射等问题,或在浅水区使用有效的浅水海浪模式来提高计算精度。

(4)对海浪数值模拟的目的是为了海浪预报,使用NCEP再分析风场资料显然无法达到预报目的,因此必须研究和完善与海浪数值模式相配套的大气模式和风场模式^[9],例如利用中尺度大气模式MM5与WWATCH模式耦合就是一个有益的探索。

参考文献:

- [1] Tolman H L. User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22 [R]. Washington D.C: National Oceanic and Atmospheric Administration, 2002: 1-3.
- [2] 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(sup): 115-121.
- [3] Tolman H L, Booij N. Modeling wind waves using wavenumber-direction spectra and a variable wavenumber grid [R]. Global Atmosphere and Ocean System, 1998, 6: 295-309.
- [4] 余志豪,杨大升,贺海晏,等.地球物理流体动力学[M].北京:气象出版社,1996,113-121.
- [5] 余向军.考虑阵风效应的海浪数值预报模式研究[D].大连:海军大连舰艇学院,2006.
- [6] 刘金芳,黄海仁,张晓慧,等.南大西洋风场和海浪场时空特征分析[J].海洋湖沼通报,2002,3: 1-8.
- [7] 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.
- [8] 许富祥.海浪预报现状与未来[J].海洋预报,2005,22(sup): 172-175.

Numerical Calculation of Sea Wave in the Gulf of Guinea and Neighboring Water Area

LI Qing-hong, ZHANG Yong-gang, ZHANG Lei, LIU Tian-bo

(Dept. of Military Oceanography, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;)

Abstract: Researching the characteristic of sea wave in the Gulf of Guinea and neighboring waters is important for China to carry out energy and economic cooperation with African countries. With reanalysis wind data released by National Centers for Environmental Prediction (NCEP) the third generation wave model WWATCH is used in this sea area and sea wave field in 2004 is calculated by the model. Basing on the result of calculation the characteristics of sea wave field are discussed. The wave height obtained by WWATCH is compared with the significant wave height surveyed by Topex/Poseidon altimeter. It is showed that WWATCH model can exactly simulate the magnitude and change process of wave height in the Gulf of Guinea and neighboring waters, and that the calculating result in deeper waters is better than that in shallower water.

Key words: WWATCH; sea wave; T/P altimeter; numerical calculation; the Guinea Gulf