

东中国海海浪数值模式的研究

徐艳清,^{1,2} 尹宝树,¹ 杨德周,¹ 程明华¹

(1. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为建立适应东中国海的海浪数值模式, 主要基于目前广泛使用的 WAVEWATCH II I 海浪数值模式进行东中国海海域的海浪数值模拟。以 NCEP 和 NCEP 与 QSCAT 的混合风场资料为输入, 模拟了两个时间段的东中国海海域的海面风浪场。选取的两个有实测资料的输出点分别在渤海和东海。从所得结果来看, 使用 NCEP 与 QSCAT 混合风场模拟的东海观测点处的波高和风场的观测值和模拟值符合的较好; 利用 1998 年相应时间段的 NCEP 风场模拟的上述两点结果与实测比较也是可以接受的。研究结果说明, 在目前情况下, 运用 NCEP 与 QSCAT 混合风场建立统一的东中国海海浪数值预报模式是可行的, 同时为东中国海波气候学研究及海洋大气耦合作用研究奠定了模式基础。

关键词: WWATCH 模式; 有效波高; 东中国海; 浮标资料

中图分类号: P772; P731.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2005)06-0042-06

海浪是重要的海洋灾害, 同时在海洋动力环境和海气相互作用等领域的研究具有重要地位。海浪的数值模拟不仅已被广泛用于认识和分析海浪生成、传播和发展规律, 而且还是海浪预报和分析的主要手段和工具, 现在海浪的数值模拟已发展到比较成熟的阶段^[1]。海浪模式的发展按时间先后可分为 3 个时期: 第一代海浪模式中没有独立的非线性相互作用项, 非线性项包含在风能量输入项和耗散(白冠)项里。第二代海浪模式中的非线性相互作用项以参数化方式表达, 例如使用不同的参考谱利用正态分布的频率来分析能量转变。第三代海浪模式开始以波波非线性相互作用方式进行计算, 能量平衡方程的计算不再局限于海浪谱的形状。作者利用美国的 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 中的 MMBA (Marine Modeling and Analysis Branch) 开发的一个全谱空间的第三代海浪数值模式 WAVEWATCH III (以下简称 WWATCH), 分别以 NCEP 与 QSCAT 混合风场和 NCEP 再分析资料的风场作为输入, 模拟了两个时段的东中国海海域的海浪场, 并分别与渤海六号平台观测资料和波浪浮标观测资料作了对比分析。该模式对过去模式的控制方程、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^[1]。

1 模式介绍和设置

1.1 模式的基本原理

对于海浪的随机性, 可以用随机过程的谱理论来进行研究, 这种海浪谱通常称为能量谱, WWATCH 中, 可表示为波数 k 和方向 θ 的函数 $F(k, \theta)$ 。考虑到 $F(k, \theta)$ 随时间和空间的变化, 可记为 $F(k, \theta, x, t)$ 。

作者介绍的 WWATCH 的能量谱基础方程为:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} \quad (1)$$

其中 S_{in} 为风能量输入项, S_{nl} 为波波非线性相互作用项, S_{ds} 为能量耗散(白冠)项, S_{bot} 为底摩擦, 当水深较浅时此项相当重要^[2]。S 代表和海浪谱有关的源和汇的总和。

在不考虑流的情况下, 一个波包的能量是守恒的, 如果考虑流对波浪平均动量传输做的功, 波包能量将不再守恒^[3,4], 但一般认为, 波作用量 $A = E/\sigma$ 是守恒的^[1,5,6], 所以, 模式的控制方程取为如下形式:

收稿日期: 2005-03-03; 修回日期: 2005-03-24

基金项目: 国家十五攻关课题 (2001BA603B-02); 国家杰青海外合作研究基金项目 (40428001)

作者简介: 徐艳清 (1979-), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 从事近海海洋环境研究, 电话: 0532-2898516, E-mail: yanq-xu98@126.com; 尹宝树, 通讯作者, E-mail: bsyin@ms.qdio.ac.cn

$$\frac{DN}{Dt} = \frac{S}{\sigma} \quad (2)$$

这里的 $N(k, \theta) = F(k, \theta)/\sigma$ 是波作用量密度谱, D/Dt 表示求全导数。

1.2 模式设置

出于计算 S_m 的经济性考虑, WWATCH 采用一般第三代海浪数值模式的频率分段方法:

$$\sigma_{m+1} = X_m \sigma_m, \quad m = 1, 2, 3, \dots, n-1 \quad (3)$$

这里 σ 的为固有频率, 其与波数 k 的关系由下式确定

$$\sigma^2 = gk \tanh kd \quad (4)$$

上式中的 g , d 分别为重力加速度和计算点处的水深。(3)中的系数 X_m 由使用者自行调节, 这里取模式的缺省值 1.1, n 为频率空间的计算网格数, 文中取 25, 初始频率 σ_1 取为 0.041 8 Hz。方向 θ 的分辨率取为 15° , 即取 24 个方向。

计算的海区范围为 $24^\circ \sim 41^\circ N$, $117^\circ \sim 131^\circ E$ 。采用经纬度坐标, 模式网格格距为 $10' \times 10'$, 计算时间步长取为 900 秒。

2 模式结果与实测资料的对比分析

2.1 分析资料的选取

进行了两个时段的计算, 输入的风场分别为 NCEP 与 QSCAT 混合风场和 1998 年 5 月的 NCEP 再分析风场, 两者都是一天四次的海面 10 m 高度处的风场, 前者的空间分辨率为 0.5° (经度) $\times 0.5^\circ$ (纬度), 时间范围是 1999 年 9 月至 2000 年 8 月, 后者的空间分辨率为 1.875° (经度) $\times 1.905^\circ$ (纬度), 模式在运行过程中, 将输入风场在空间和时间上采用线性插值以获得与模式时空分辨率相适应的风场。本文采用了网格输出和点输出两种方式, 并将点输出的结果与实测资料进行对比。输出点共两个, 一个在东海(记为点 A), 一个在渤海(记为点 B), 两者的经纬度坐标分别为 A($126.333^\circ E$, $28.167^\circ N$), B($120.660^\circ E$, $39.838^\circ N$), 见图 1, 其中东海观测点的观测资料为波浪浮标资料, 渤海观测点的观测资料来自渤海六号平台的观测, 两点处的测风高度分别是 7.5 m 和 43.6 m。为便于对比分析, 已对模式模拟风速进行了相应的高度转换^[7]。对于 B 点, 还提供了浅海波浪模式 SWAN 的计算结果以便比较分析。下面就不同的输入风场计算结果分别进行分析。

2.2 输入风场为混合风场的模式输出结果分析

本次计算的点输出只有 A 点处的, 故此本小节的以下分析都是针对 A 点的。通过 A 点的模式输出结果与风浪浮标观测结果的比较(图 2), 可以看出模式模拟结果与波浪浮标的观测结果符合的很好, 只有在热带风暴和强热带风暴影响期间模拟值和观测值相

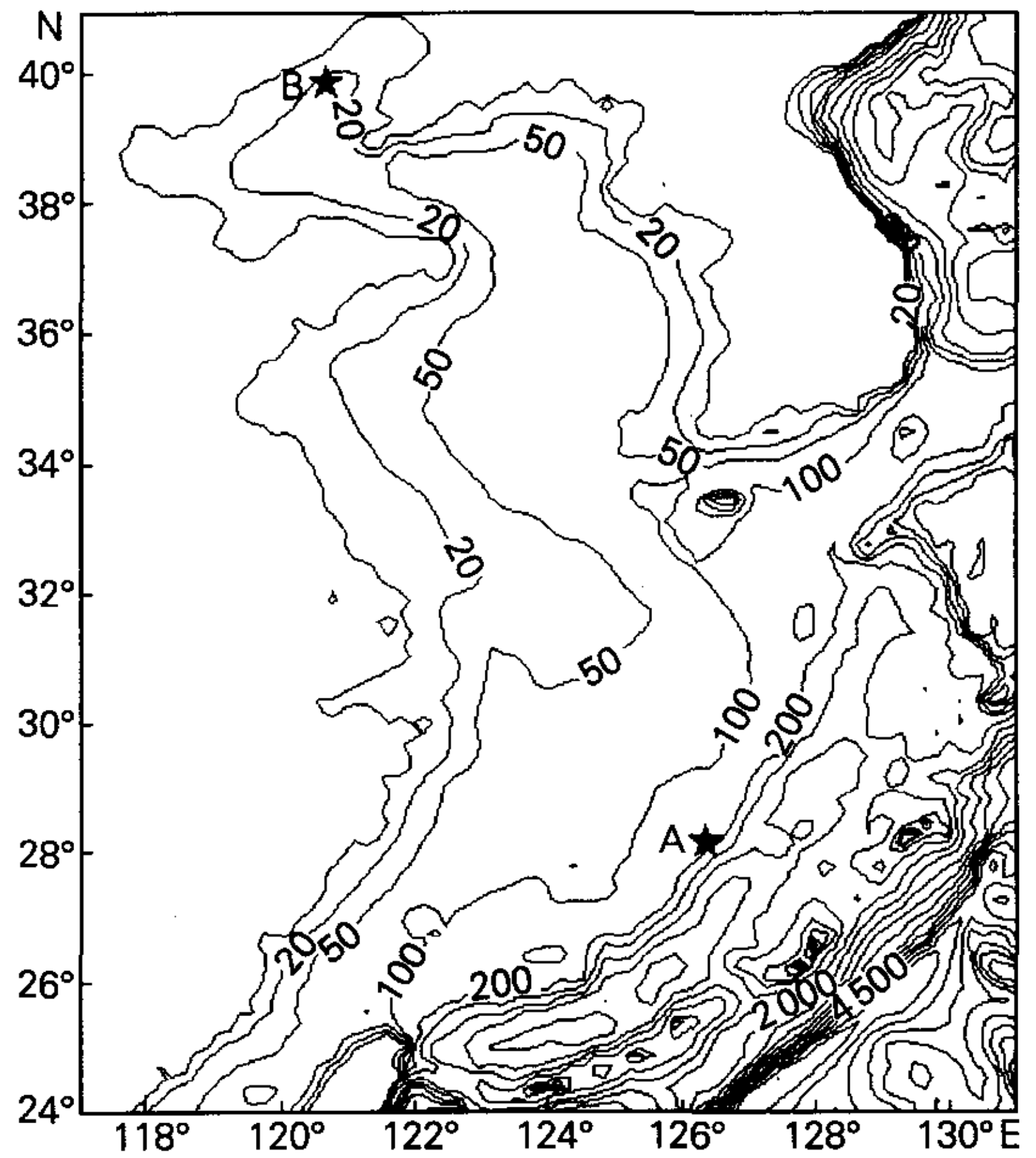


图 1 计算海区水深等值线分布

Fig. 1 Contour map of water depth in the calculation area

★为输出点的位置

the star represents the output position

比明显偏小。

图 3 给出了模式模拟值和波浪浮标观测值的散布图, 还给出了相应的偏差(B)、平均绝对误差(M)、均方根误差(R)和相关系数(C)。由图 3a 可以看出, 除个别点较大程度的偏离对角线, 大多数点都在对角线的附近, 从整体上看, 模式模拟值较浮标观测值有高估的趋势, 得出的正值偏差为 0.10 m。

在本次计算的时间段中, 共出现 3 次热带风暴和强热带风暴。将本次要分析的有效波高样本数据分为两类, 分别对应于除去受热带风暴影响期间的数据之前与之后, 记为样本甲和样本乙, 就这两个样本得到的有效波高的相应统计量见表 1。

表 1 样本甲和样本乙的统计值

Tab. 1 Statistics of sample I and sample II

样本	偏差 (m)	平均绝对误差 (m)	均方根误差 (m)	相关系数
样本甲	0.10	0.40	0.57	0.890
样本乙	0.14	0.36	0.48	0.896

由表 1 可以看出, 偏差增大了 0.04 m, 这是由于从样本甲中扣除的都是低估的数据; 预测的波高的平均绝对误差和均方根误差分别减少了 0.04 m 和 0.09 m, 相关系数虽然变大但增量却极小, 这说明了在包括三

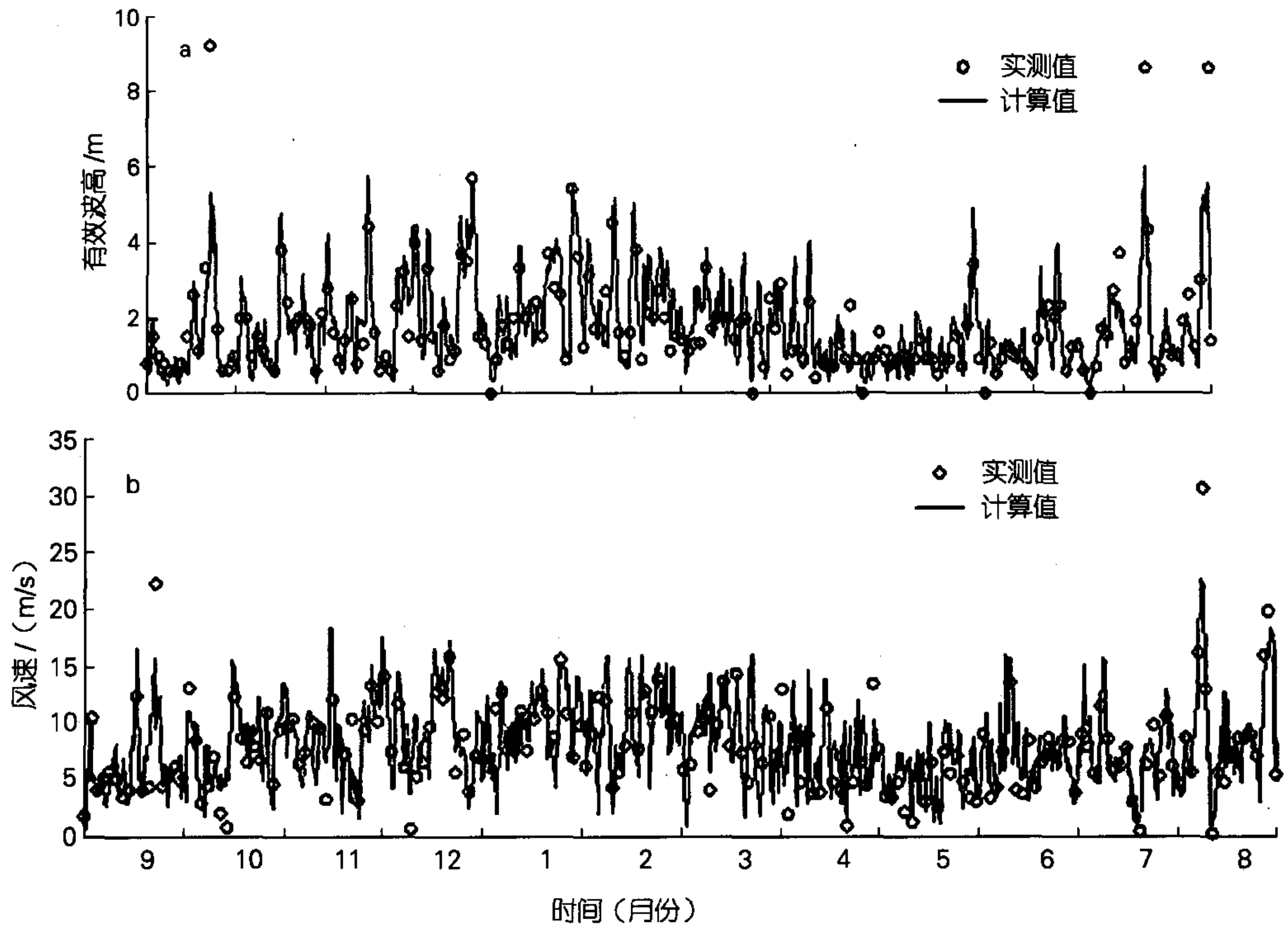


图2 模式结果与波浪浮标观测值的比较

Fig. 2 Comparison between the model and buoy data

- a. WWATCH 有效波高和浮标观测有效波高的比较;
- b. NCEP 与 QSCAT 混合风速和浮标实测风速的比较

- a. Distribution of significant wave height of WWATCH simulation at the given location A compared with that of buoy;
- b. Distribution of NCEP and QSCAT blended wind speed at the given location A compared with that of buoy

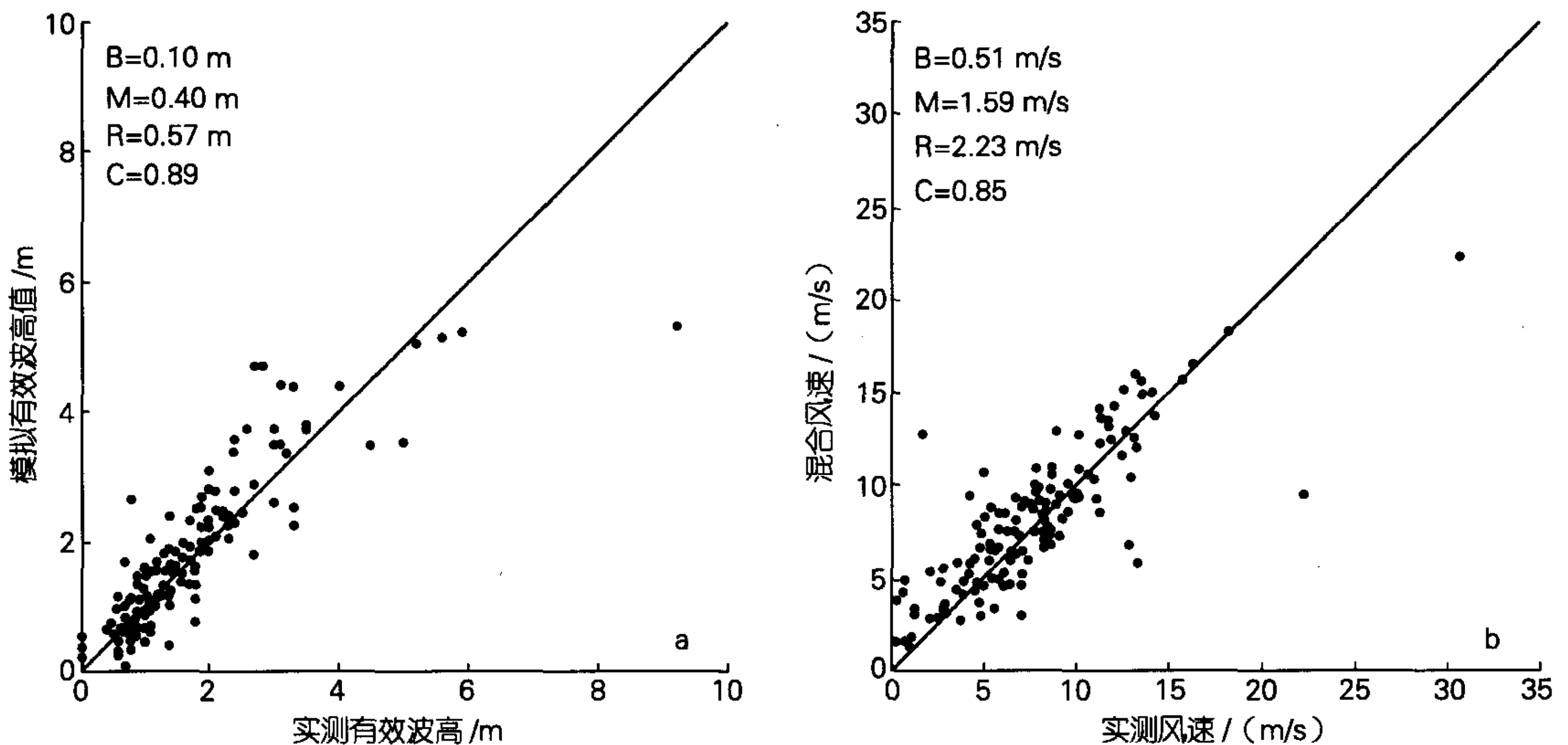


图3 模式结果与浮标观测值的散布

Fig. 3 Scatter maps between the model and buoy data

- a. 有效波高的散布图;b. 风速的散布图

- a. A scatter diagram of significant wave height on situ and that of simulation;
- b. A scatter diagram of wind speed at 10m on situ and that of blended

个热带气旋的样本中,模式的输出对由热带气旋的大风所造成的大的有效波高值有一定的模拟效果,但波高的误差却较大。

表 2 根据一年的模拟结果列出了样本甲的数据在四季的统计概况,四季的相关性差异不大,以冬季的相关系数最大,春季相关性最差。而偏差方面,由于夏秋两季都出现了(强)热带风暴,而风暴期间明显的低估了浪高,从而导致了这两季的偏差为负,而春冬两季则存在高估浪高的现象。平均绝对误差和均方根

表 2 按季节分析的有效波高的统计数据

Tab.2 Statistics of seasonal significant wave height

季 节	偏差 (m)	平均绝对误差 (m)	均方根误差 (m)	相关系数
秋 季	-0.03	0.36	0.59	0.892
冬 季	0.35	0.47	0.59	0.916
春 季	0.10	0.31	0.42	0.862
夏 季	-0.02	0.44	0.66	0.907

误差的最小值都在春季,这是由于该季的实测波高和模拟波高在全年中普遍相对较低,故两者的差值亦相对较小,另一方面,春季的相关性是最差的,而这段时

间的风速普遍偏小,且风场不如冬季的稳定,这说明 WWATCH 对风向多变的低风速风场的适应性可能具有一定的局限性。

2.3 输入风场为 NCEP 再分析风场的模式输出结果分析

本次计算过程中同时计算了 A, B 两点处的波参数,仍就波高和风速进行分析,从图 4 和图 5 可看出,模拟的效果尚可。由图 4a, A 点处的有效波高模拟值较浮标实测值普遍偏小,这和图 4b 中的 NCEP 风速较浮标风速偏低是一致的。点 A 在 NCEP 风场为输入风场的情况下的模拟结果误差偏大,可能与 NCEP 再分析风场的空间分辨率太低有关,另外,可能 NCEP 风场的实测风速和实际风速相比误差较大也是一个原因。依图 4,从 5 月 3 日开始,输入风场在该点处的风速较长时间维持低风速,模式中的海浪始终处于低值状态,需要长时间调整才使新的海浪生成。

对于点 B,还使用了浅海海浪模式 SWAN 的计算结果进行对比。由图 5a,不难看出,WWATCH 和 SWAN 模拟的有效波高较实测波高普遍偏低,在图 5b 中,可以看出这两个模式通过插值计算出的风速值和

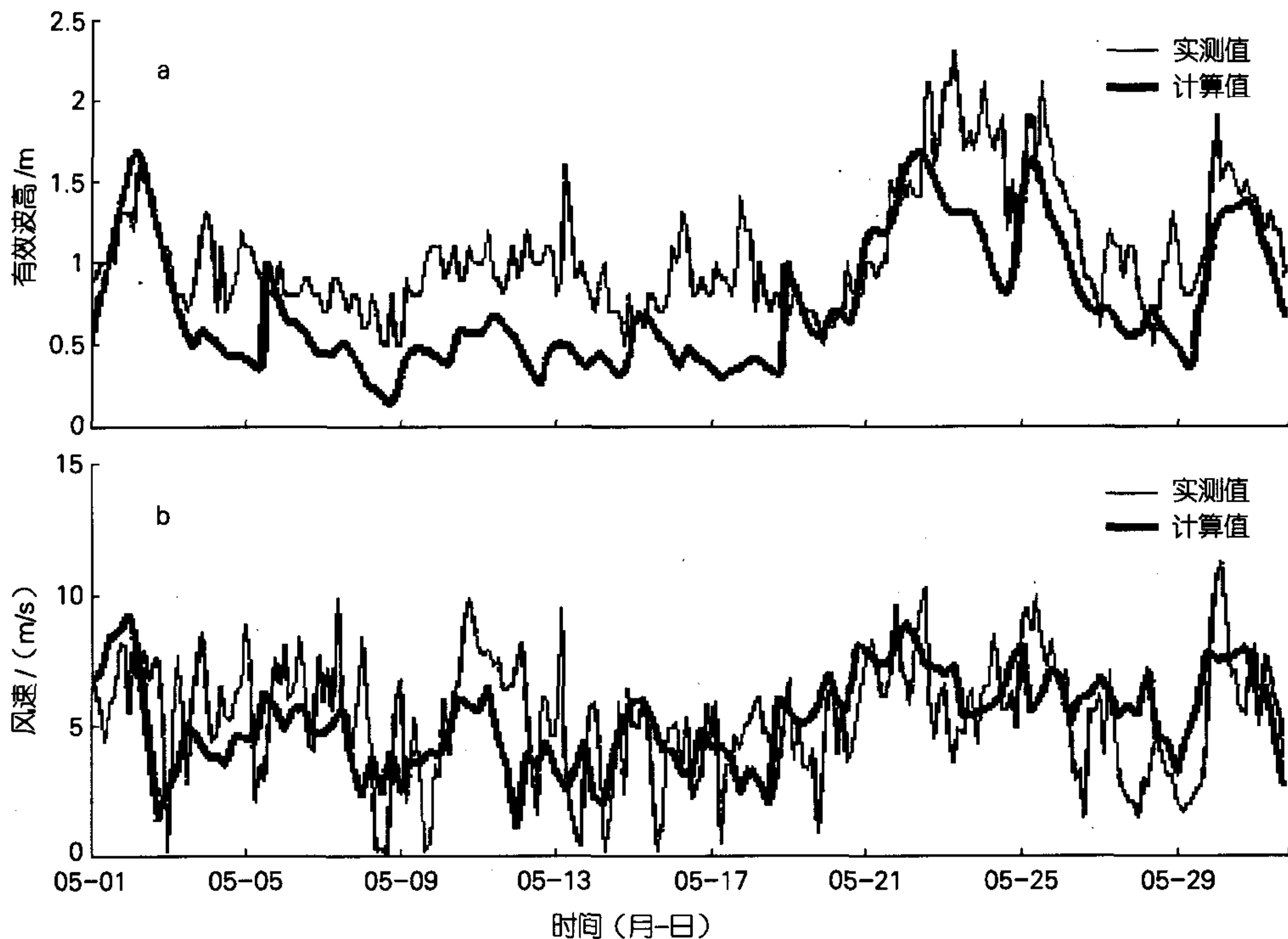


图 4 A 点处模式结果与风浪浮标观测值的比较

Fig. 4 Comparison between the model and buoy data

a. WWATCH 有效波高和浮标观测有效波高的比较; b. NCEP 风速和浮标实测风速的比较

a. Distribution of significant wave height of WWATCH simulation at the given location A compared with that of buoy;

b. Distribution of NCEP wind speed at the given location A compared with that of buoy

平台实测值的比较也偏低,尤其在较高风速时更加明显,这说明了风速的误差是波高模拟误差较高的主要原因。WWATCH 计算的波高序列是振荡的,高值普遍偏高,低值明显偏低,而 SWAN 计算的波高序列则较稳定,无 WWATCH 计算结果那样的振荡现象,总的来说,在本次模拟中,SWAN 的结果较 WWATCH 好,这说明了在浅海区域,当输入风场误差较大时,SWAN 比 WWATCH 的模拟效果好一些,但仍然受风场影响

较大。而图 5a 中的 WWATCH 模拟结果的振荡表明了,在浅海区,模式中海面的能量较容易被消耗,也容易被激活,模式对风场较敏感。

3 结果与讨论

作者利用 WWATCH 模式对东中国海风浪场进行了数值模拟,并与波浪浮标资料、渤海六号平台观测

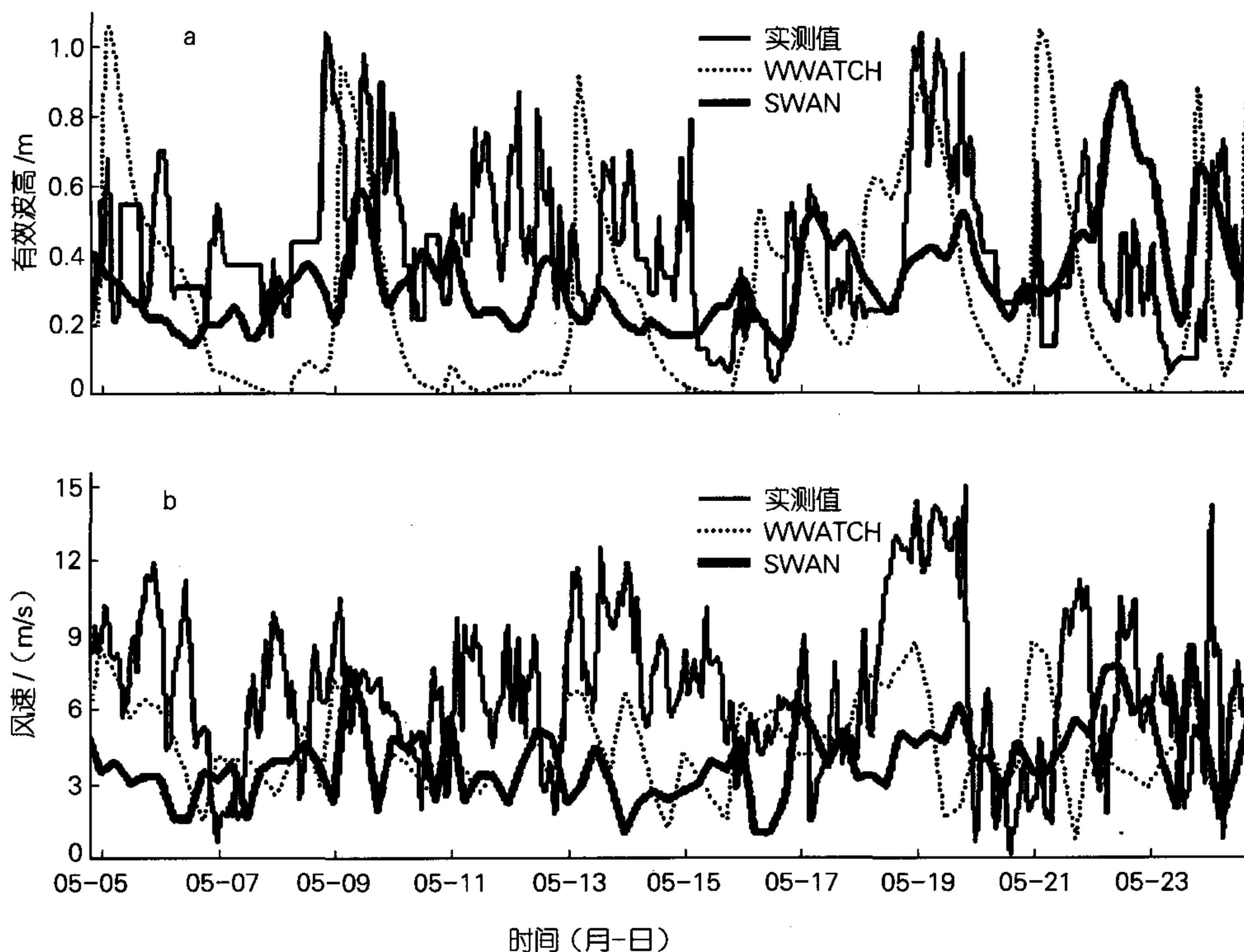


图 5 B 点处模式结果与风浪浮标观测值的比较

Fig. 5 Comparison between the models and buoy data

a. WWATCH 有效波高和浮标观测有效波高的比较; b. NCEP 风速和平台实测风速的比较

a. Distribution of significant wave height of WWATCH simulation at the given location B compared with that of platform;

b. Distribution of NCEP wind speed at the given location B compared with that of platform

资料进行了对比分析。结果显示由于 NCEP 输入风场的空间分辨率偏低以及可能的误差较大,导致了模拟效果不很理想,但尚可接受,而对输入的 NCEP 与 QSCAT 混合风场,由于其较高的分辨率和精度,模拟的结果明显较好。对于渤海点的模拟,即便是浅海海浪数值模式 SWAN 模拟的误差也偏大。可见,风场的改进是提高海浪数值模式预报精度的根本。不过,总的来看,在目前情况下,运用 NCEP 与 QSCAT 混合风场建立统一的东中国海海浪数值预报模式是

可行的,可以为大面积海浪预报提供参考的结果产品。

研究结果进一步显示,冬季的模拟效果最好,其相关系数居四季之首,这与此段时间内的风场较稳定以及风速相对较强有关;至于其他三季,夏秋两季受(强)热带风暴影响,春季风速普遍偏小。在三个热带气旋之间,模式的模拟结果与实测结果也有一定的相关性,而这三种情形下风速均相对较大,因此当风速足够大时,模式模拟出的趋势和实际情况是相符的,可以用于海浪预报的参考。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Johnson H K, Kofoed-Hansen H. Influence of bottom friction on sea surface roughness and its impact on shallow water wind wave modeling[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2000, 30(7): 1 743-1 756.
- [3] Longuet-Higgins M S, Stewart R W. The changes in amplitude of short gravity waves on steady non-uniform currents[J]. *J Fluid Mech*, 1961, 10: 529-549.
- [4] Longuet-Higgins M S and Stewart R W. Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf-beats' [J]. *J Fluid Mech*, 1962, 10: 529-549.
- [5] Whitham G B. A general approach to linear and non-linear dispersive waves using a Lagrangian[J]. *J Fluid Mech*, 1965, 22: 273-283.
- [6] Bretherton F P, Garrett C J R. Wave trains in inhomogeneous moving media[J]. *Proc Roy Soc London*, 1968, A302: 529-554.
- [7] 文圣常, 余宙文. 海浪理论与计算原理[M]. 北京: 科学出版社, 1984. 308-313.

Study of wave numerical model in East China Sea

XU Yan-qing^{1,2}, YIN Bao-shu¹, YANG De-zhou¹, CHENG Ming-hua¹

(1. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Received: Mar., 3, 2005

Key words: WWATCH model; significant wave height; the East China Sea; buoy

Abstract: In this paper we used WAVEWATCH III wave model in the East China Sea to set up a proper numerical wave model. We implemented wind field from single NCEP (National Centers for Environmental Prediction), and combined NCEP and QSCAT wind field in computational domain to simulate wind wave field for two time ranges in East China Sea. The observation spots were distributed in Bohai Sea and the East China Sea, and the WAVEWATCH III gave out corresponding output between two points. The results showed that the wave height from the blended field agreed quite well with the observations, and also an agreement was shown between the results from NCEP simulation in corresponding time range of 1998 and the measurements of the year. This study indicates that it is very practical to set up a proper numerical wave model in the East China Sea and lay a model foundation for researchers to study wave climate and coupled sea and atmosphere in the East China Sea.

(本文编辑: 刘珊珊)