

# 基于 SWAN 模型的东沙岛海域有效波高模拟与分析

谢友鸽<sup>1</sup>, 郭金运<sup>1</sup>, 朱金山<sup>1</sup>, 孔巧丽<sup>1</sup>, 李国伟<sup>2</sup>

(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 威海市海洋环境监测中心, 山东 威海 264209)

**摘要:**基于加密的不规则三角形网格,利用 SWAN 模型分别在开启和关闭底摩擦耗散项下模拟东沙岛海域有效波高,同时将  $0.038 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  和  $0.067 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  两种底摩擦系数模拟的有效波高与 TOPEX/Poseidon 卫星观测值进行对比。结果表明,运用这两种底摩擦系数均能很好地模拟东沙岛海域的有效波高,其中采用底摩擦系数  $0.038 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  模拟效果会更好,精度会更高。采用  $0.038 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  底摩擦系数的底摩擦耗散主要对东沙岛东北部小于 100 m 的水深地区起作用,耗散强度随着水深的变深而减少。

**关键词:**SWAN 模型;底摩擦系数;有效波高;TOPEX/Poseidon

中图分类号: P731

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2016)03-0017-08

## Simulation and Analysis of Significant Wave Height over Seas of Dongsha Island Based on SWAN Model

XIE Youge<sup>1</sup>, GUO Jinyun<sup>1</sup>, ZHU Jinshan<sup>1</sup>, KONG Qiaoli<sup>1</sup>, LI Guowei<sup>2</sup>

(1. College of Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Weihai Marine Environment Monitoring Center, Weihai, Shandong 264209, China)

**Abstract:** Based on encrypted irregular triangular grids, the significant wave heights over seas of Dongsha Island with activated or de-activated bottom friction dissipation were simulated by using the SWAN model. The bottom friction coefficients  $0.038 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  and  $0.067 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  of JONSWAP were adopted respectively. Compared with TOPEX/Poseidon altimetry data, the results show that although the significant wave heights can be well simulated with both the two friction coefficients, the simulated result with the bottom friction coefficient of  $0.038 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  is better than that with the bottom friction coefficient of  $0.067 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ . The bottom friction dissipation with the bottom friction coefficient of  $0.038 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  can give its effects on waves mainly in the northeast area of Dongsha Island with its water depth less than 100 m, and the dissipation intensity becomes weak as the water depth increases.

**Key words:** SWAN model; bottom friction coefficient; significant wave height; TOPEX/Poseidon

海洋面积约占我国领域的 25%, 是我国社会经济发展不可分割的一部分, 其中海浪数值模拟结合海浪实测数据一直是海洋动力学研究和预报海浪的重要工具<sup>[1]</sup>。SWAN 模型是第三代海浪数值模型, 自从发布以来, 在国际上得到了广泛应用, 成为许多学者研究海浪的重要创新手段<sup>[2]</sup>。此波浪模型具有稳定性高、适应性好和精度高等优点, 不仅能较好地模拟海岸区的波浪生成和传播过程, 还能在河口和湖泊区获得理想的

收稿日期: 2015-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41374009); 山东省自然科学基金项目(ZR2013DM009); 国家科技基础性工作专项(2015FY310200)

作者简介: 谢友鸽(1990—), 女, 山东单县人, 硕士研究生, 主要从事海洋大地测量研究。E-mail: 1126396365@qq.com

郭金运(1969—), 男, 山东巨野人, 教授, 博士生导师, 主要从事空间大地测量、海洋大地测量和物理大地测量等研究, 本文通信作者。E-mail: jinyunguo1@126.com

参数波浪估计<sup>[3-4]</sup>。采用基于能量平衡方程的 SWAN 模型,不仅得到了国际上的广泛认可,在中国也得到大量应用。一些学者利用 SWAN 模型对辽东湾海浪进行了模拟,并与浮标实测数据对比分析,表明此波浪模型能够较好地模拟辽东湾近岸水域海浪,同时也分析了在南风过程中,此区域内底摩擦耗散的主要作用范围<sup>[5]</sup>。SWAN 模型中 Phillips 线性增长项、白冠耗散项和风能输入项等都与波浪成长有很大关系,通过对这些影响波浪推算的因素进行探讨并在此基础上做出相应改进,结果显示改进的 SWAN 模型模拟的海浪数值更接近真实值<sup>[6]</sup>,这使得国际上通用的 SWAN 波浪模型在中国海域有更好的适用性。另外,SWAN 模型在原来模型(主要是 WAM 模型)基础上进行了改进,使得自浅水区到深水区的数值模拟的适应性均较好,数值模拟结果更接近于真实波浪<sup>[7]</sup>。

在利用 SWAN 模型进行数值模拟中,底摩擦系数作为一个敏感参数,其数值的合理选取对模拟结果有着直接影响<sup>[8]</sup>。当海浪由较大水深区域向较小水深区域传播时,由于水深变浅,波浪的加速作用使运动阻力增大,海浪的部分能量由于底部摩擦而消耗,通常在数值模拟时需要给定不同的底摩擦系数,但在实际数值模拟中,许多学者将一个区域的底摩擦系数认定为常数<sup>[9]</sup>,因此,某个区域底摩擦系数的合理性对数值模拟结果至关重要。

潮流在经过某较小区域时,由于各种原因(如河口变窄、风速变大等)均会对水底地形产生一定作用,进而影响水底的底摩擦耗散。陈耀登等<sup>[10]</sup>利用涨落潮变化伴随资料同化模型对涌潮河口底摩擦系数进行分析,验证了前人在涌潮河口选取底摩擦系数的合理性。而在 SWAN 模型中主要运用一种摩阻形式,即经验式的 JONSWAP 模式,包括两种不同的底摩擦系数<sup>[11]</sup>。基于此,设置东沙岛附近海域的底摩擦系数是常数,利用分辨率较高的不规则三角形网格对东沙岛海域波高进行模拟,研究两种不同的底摩擦系数在不同水深区域中的影响,结合东沙岛附近海域的水深等值线和模拟结果,定量分析两种底摩擦系数对东沙岛海域波浪的影响程度,进而选出适合东沙岛海域的底摩擦系数,并分别关闭和开启底摩擦耗散项,研究底摩擦耗散对于东沙岛全场海域分布的作用,分析耗散强度与水深的关系。

## 1 SWAN 模型理论

SWAN 模型采用基于 Euler 近似的作用量谱平衡方程,因在流场中,能谱密度不守恒,但能谱密度与相对频率之比是守恒的,即动谱密度是守恒的。在笛卡尔坐标系下,动谱平衡密度<sup>[3]</sup>表示为

$$\frac{\partial}{\partial t}N + \frac{\partial}{\partial x}C_xN + \frac{\partial}{\partial y}C_yN + \frac{\partial}{\partial \sigma}C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta}C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

其中: $N$  是动谱密度,用来描述随机的波浪场;左边第一项是波作用量密度  $N$  在时间上的变化量;第二项和第三项分别代表波作用量密度  $N$  在  $x$  方向和  $y$  方向的变化率;第四项代表由水深和流场变化引起的波作用量密度  $N$  在相对频率  $\sigma$  空间上的传播;第五项代表波作用量密度  $N$  在谱分布方向  $\theta$  上的变化。 $C_x$ 、 $C_y$ 、 $C_\sigma$  和  $C_\theta$  分别代表动谱密度  $N$  在方向  $x$ 、 $y$ 、 $\sigma$  和  $\theta$  上的传播速度,即分别表示为

$$C_x = \frac{dx}{dy} = C_g + U_x = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kd}{sh(2kd)} \right] \frac{\sigma k_x}{k^2} + U_x; \quad (2)$$

$$C_y = \frac{dy}{dx} = C_g + U_y = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kd}{sh(2kd)} \right] \frac{\sigma k_y}{k^2} + U_y; \quad (3)$$

$$C_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial k} \left[ u \cdot \nabla d + \frac{\partial d}{\partial t} \right] - \frac{\partial u}{\partial s} \cdot C_g k; \quad (4)$$

$$C_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[ k \cdot \frac{\partial u}{\partial k} + \frac{\partial u}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} \right]; \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (cg + u) \cdot \nabla_{x,y}; \quad (6)$$

$$\nabla_{x,y} = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right). \quad (7)$$

其中,  $k=(k_x, k_y)$  为波数,  $U=(U_x, U_y)$  为水流速度,  $d$  为水深,  $\frac{\partial}{\partial s}$  代表求  $\sigma$  方向上的方向数,  $\frac{\partial}{\partial m}$  代表求  $\theta$  方向上的方向数, 右边的  $S$  代表以谱密度表示的源汇项

$$S=S_{in}+S_{ds}+S_{nl}。 \quad (8)$$

式(8)中  $S_{in}$  代表风输入项,  $S_{ds}$  代表由白帽、底摩擦、变浅破碎引起的耗散作用,  $S_{nl}$  代表三波相互作用和四波相互作用引起的波能量变化。

当波浪由深水区传入浅水区时, 与水底的相互作用显得非常重要, 其中底摩擦因素对这种能量耗散有很大影响。经验式 JONSWAP 模式的底摩擦公式为

$$S_{ds,b}(\delta, \theta)=-C_{bottom} \frac{\delta^2}{g^2 \sin^2(kd)} E(\delta, \theta)。 \quad (9)$$

其中,  $g$  是重力加速度,  $d$  为水深,  $E(\delta, \theta)$  是能谱密度,  $C_{bottom}$  是底摩擦系数, 深水的判定是水深大于波浪波长的一半, 浅水的判定是水深小于波长的一半。本文选取 2 种底摩擦系数<sup>[12]</sup>, 即  $C_{bottom}=0.038 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  或  $C_{bottom}=0.067 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ , 作为研究东沙岛海域波浪的传播情况。

## 2 数据来源

### 2.1 水深和海岸线资料

东沙岛是自西北向东南延伸的碟形沙岛, 位居北纬  $20^\circ 42'$ , 东经  $116^\circ 43'$ , 东西长约 2 800 m, 南北宽约 700 m, 面积约  $1.80 \text{ km}^2$ 。它是连接亚洲到印度洋、非洲和大洋洲国际航线的枢纽, 具有重要航海意义, 对我国的经济发展起着至关重要的作用。

水深和海岸线数据分别由美国国家地球物理资料中心(NGDC)提供的全球海岸线数据库 ETOPO1 和水深数据库 ETOPO2。海域范围  $112^\circ \text{E} \sim 120^\circ \text{E}$ ,  $18^\circ \text{N} \sim 24^\circ \text{N}$ , 水深数据的分辨率为  $1' \times 1'$ , 通过编程处理从原始数据中提取区域范围  $112^\circ \text{E} \sim 116^\circ \text{E}$ ,  $18^\circ \text{N} \sim 24^\circ \text{N}$  的海岸线。

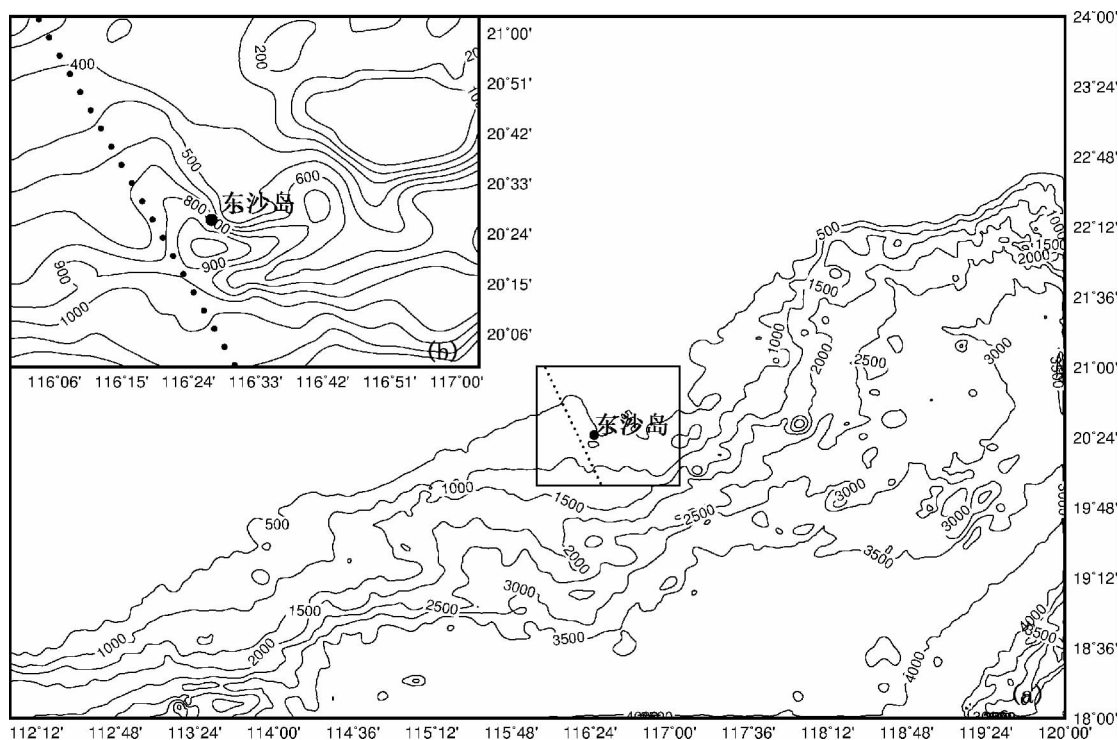
2000 年 12 月, 史剑等<sup>[13]</sup> 基于两种网格的 SWAN 模型对黄渤海海域数值进行模拟, 并将模拟的有效波高与海洋浮标观测数据进行对比, 结果表明, 采用局部加密的三角形网格要比单独使用矩形网格或三角形网格模拟的效果要好, 精度会更高。宗芳伊等<sup>[14]</sup> 基于 SWAN 模型的两种网格对嵊泗海域海浪模拟进行比较研究, 相对于矩形网格, 三角形网格模拟能够进一步提高有效波高数值的准确度并更精确地刻画复杂地形。为了更好地模拟有效波高, 减少波浪传递误差的影响, 对该地区水深数据进行不规则三角形加密, 得到分辨率为  $0.9' \times 0.9'$  的水深数据。

图 1(a) 是海域范围  $112^\circ \text{E} \sim 120^\circ \text{E}$ ,  $18^\circ \text{N} \sim 24^\circ \text{N}$  的水深图。如图 1(a) 所示, 东沙岛海域的东南部分海域水深可达千米, 由西北向东南呈阶梯状, 且水深等值线分布较密集, 水深梯度较大。东沙岛海域的西北大部分海域水深小于 200 m, 海域水深由中央向陆地边界逐渐变浅, 水深梯度较小。

图 1(b) 表示东沙岛附近海域 TOPEX/Poseidon 卫星轨道上的卫星测高点, 其匹配数据点为 20。主要实验区域是  $116^\circ \text{E} \sim 117^\circ \text{E}$ ,  $20^\circ \text{N} \sim 21^\circ \text{N}$  的海域。如图 1(b) 所示, 东沙岛大部分海域水深大于 0 m, 小于 1 000 m, 由西南向东北呈阶梯状, 且水深逐渐变浅, 等值线分布相对较疏, 水深梯度相对较小, 其中等值线的单位为 m。

### 2.2 风场资料

东沙岛海域风场数据是由 NASA(National Aeronautics and Space Administration, 美国国家航天局) 提供的 CCMP(Cross-Calibrated, Multi-Platform) 卫星遥感海面风场数据。CCMP 风场数据具有高时间分辨率、高空间分辨率等优点, 经多名学者研究论证, 其精度能够满足很多海洋和大气环境的应用<sup>[15-16]</sup>。本文选取的区域范围是  $112^\circ \text{E} \sim 120^\circ \text{E}$ ,  $18^\circ \text{N} \sim 24^\circ \text{N}$ , 空间分辨率是  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。时间跨度自 2000 年 7 月 1 号 0 时 0 分 0 秒到 2000 年 7 月 31 号 18 时 0 分 0 秒, 时间分辨率为 6 h, 给出的是距海面 10 m 处风场沿径向向纬向的速度分量。



(a) 整个计算区域; (b) 实验重点区域

图 1 南海局部海域水深分布

Fig. 1 Bathymetric distributions of local areas of the South China Sea

### 2.3 实测有效波高

TOPEX/Poseidon 卫星能够精确测定海面至卫星的距离, 根据返回的波形, 可以测量海面上的有效波高, 同时卫星测高与实测浮标的有效波高达到相同精度<sup>[17-18]</sup>。TOPEX/Poseidon 卫星在很多领域均有广泛应用, 不仅可以监测湖水水位的变化, 也能够探测中国区域向后向散射系数的时空分布<sup>[18-19]</sup>。郭金运等<sup>[20]</sup>利用 TOPEX/Poseidon 卫星测高数据计算了中国台湾东部黑潮的海面高, 并运用卫星测高交叉点的方法计算了海洋地转流速度, 进一步验证了中国台湾 NCOR 的流速。TOPEX/Poseidon 卫星的观测值经常被当作实测值, 可与模拟的有效波高对比<sup>[21]</sup>。

TOPEX/Poseidon 观测数据来源于卫星海洋数据获取、校准和解释中心 AVISO (Archivage, Validation et Interpretation des donnees des Satellites Oceanographiques)。该数据的特点是, TOPEX/Poseidon 卫星沿着相同地面轨迹获取数据, 大约每 10 天重复一次, 重复偏差约在 1 km 之内<sup>[19]</sup>。在研究区域, 主要选取卫星轨道上的数据点作为验证对象 (图 1)。由于 SWAN 模型中计算时间步长和数据输出间隔均设置为 30 min, TOPEX/Poseidon 卫星采集数据时间与模型的计算输出时间存在一定差异, 本文取距离卫星采集数据时间最短的 SWAN 模式计算的结果进行对比分析。模式中有多种形式输出波浪参数的文件, 本文主要选取文本文件的形式输出, 进而进行编程处理并分析结果。

### 3 结果及分析

在 SWAN 模型中, 模型的物理机制设置以及参数的选取对于模拟结果具有很大影响。选用加密的不规则三角形网格进行模拟, 最小频率是 0.046 8 Hz, 最大频率是 1 Hz, 波数空间的分段数为 24, 即 15° 的分辨率。开启或关闭底摩擦耗散, 其他物理机制 (如波浪破碎、三波和四波) 主要采用 SWAN 模型手册<sup>[7]</sup> 中强烈建议的缺省值。为了获得比较可靠的结果, SWAN 模型应提前一定时间进行计算, 使得该时刻的输出值不受初始场的影响, 因此从 2000 年 7 月 26 号开始计算, 到 2000 年 7 月 31 号结束。

开边界对计算结果有很大影响,为了得到更加可靠的模拟有效波高,实验的区域到开边界的距离要足够远。本文把水域的边界全设为开边界,当开边界把波要素传递到实验区域时,由于距离足够远使得开边界波要素对实验区域的波要素没有太大影响,同时为了方便计算,假设开边界没有波浪传入到计算区域内<sup>[7]</sup>。

基于在波浪生成和传播过程中由于底摩擦引起的能量耗散,按照能量耗散的不同将 SWAN 模型模拟的有效波高分成 3 部分,即关闭底摩擦耗散项以及开启底摩擦耗散项(包括底摩擦系数为 0.038 和 0.067 两项)。由于模式的参数化和近似计算使得 SWAN 模式不可能完全准确反演波浪的生成,模拟结果和卫星测高在数值上仍存在显著偏差,如图 2 所示,本文将模拟的有效波高和 TOPEX/Poseidon 卫星测高数据残差值作为纵轴,单位为 m,以与轨迹点上相对应的经度值作为横轴。

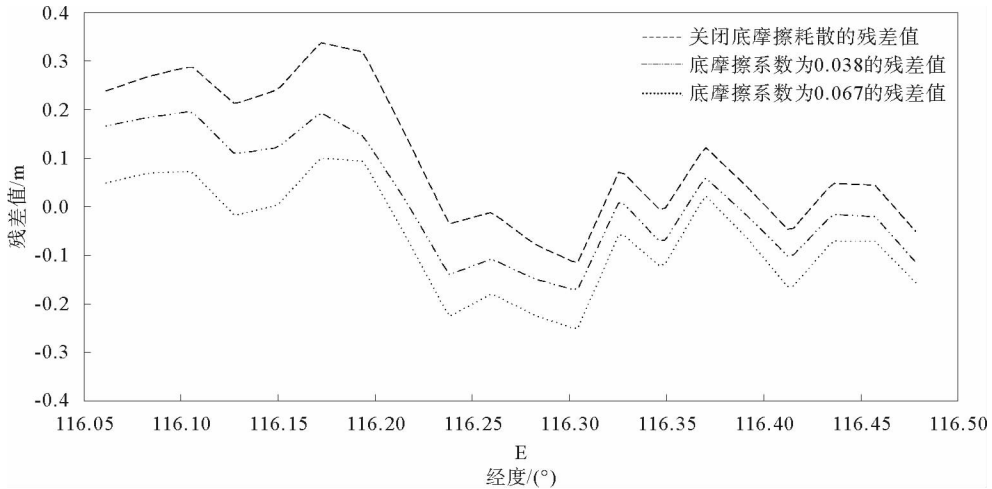


图 2 关闭底摩擦耗散和开启底摩擦耗散模拟的有效波高残差分析

Fig. 2 Residual analysis of significant wave height with activated and de-activated bottom friction dissipation

如图 2 所示,3 个部分的波高残差值在空间上保持着大体一致的变化趋势,并且均在相同空间位置点达到有效波高残差的最大值和最小值,但 3 种有效波高残差值略有差异。总之,在东沙岛海域内关闭和开启底摩擦耗散以及选取不同的底摩擦系数对有效波高的数值具有很大影响,但并不影响波高的变化趋势。

同时,为了定量评估关闭和开启底摩擦耗散在 SWAN 模型中的模拟结果,取模拟值和真实值之间的残差值获取该模拟值的平均值(MEAN)、最大值(MAX)、最小值(MIN)、均方根误差(RMS)和标准差(STD),并把 5 个统计量作为本文中所要分析的模拟标准,其中把均方根误差作为模拟的精度指标,如表 1 所示。

如表 1 所示,基于底摩擦耗散项的不同,SWAN 模型模拟的有效波高存在明显的差异。在相同的物理机制和参数设置下,采用 0.038 的底摩擦系数模拟的精度最高,其次是 0.067 的底摩擦系数,关闭底摩擦耗散项所获得的精度最低。同样的,关闭底摩擦耗散项的有效波高的最大值和最小值之间的最大跨度达 0.455 m,是底摩擦系数为 0.038

表 1 模拟的有效波高与 T/P 数据的残差统计分析

Tab. 1 Statistical analysis of residuals both of simulated data and T/P value

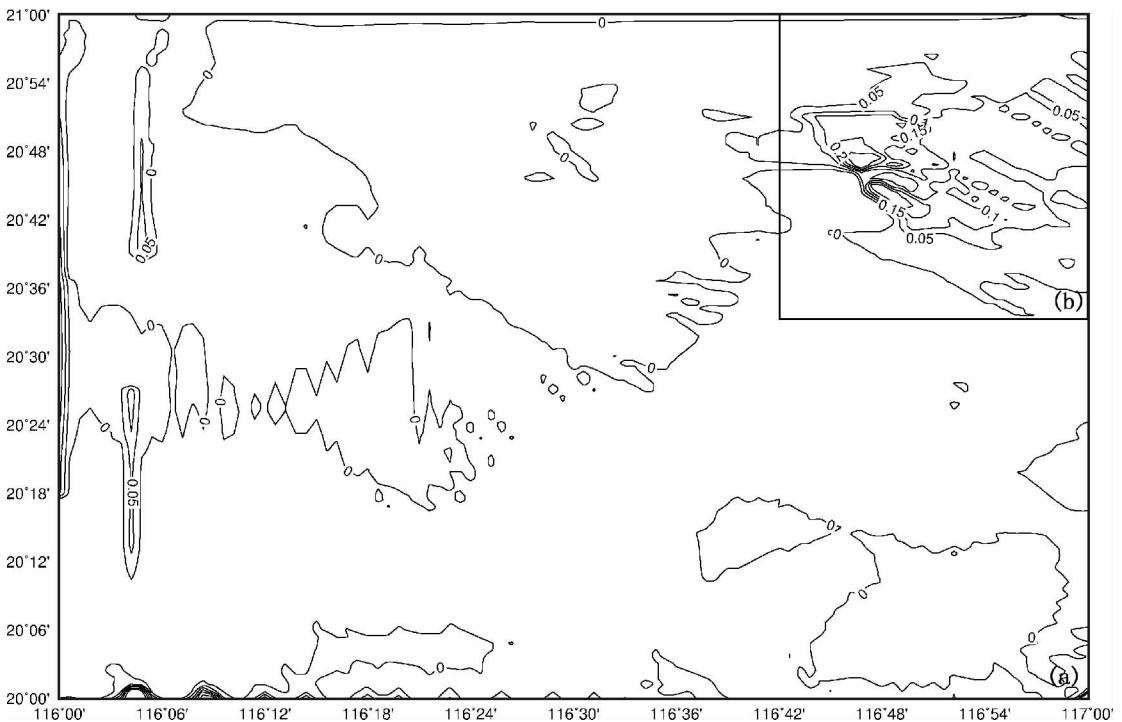
$C_{\text{bottom}}/\text{m}^2\text{s}^{-3}$	MEAN	MAX	MIN	STD	RMS
关闭	0.100	0.337	-0.118	0.142	0.173
0.038	0.013	0.165	-0.119	0.109	0.109
0.067	-0.064	0.099	-0.254	0.110	0.127

的 1.6 倍,是底摩擦系数为 0.067 的 1.3 倍。无论是在模拟的平均值还是标准差方面,底摩擦系数为 0.038 的模拟效果总是最好的。由以上数值分析可知,在东沙岛附近海域,关闭底摩擦耗散所得到的有效波高与 T/P 卫星实测值有一定偏差,模拟效果相对更差。纵观 5 个统计量,开启底摩擦耗散时 0.038  $\text{m}^2\text{s}^{-3}$  底摩擦

系数获得的有效波高较  $0.067 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  更接近实测值。

结合图 2 和表 1 可知,关闭底摩擦耗散较开启底摩擦耗散的波高残差值偏离程度更大。系数为  $C_{\text{bottom}} = 0.038 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  的残差平均值较  $C_{\text{bottom}} = 0.067 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  更接近 0 m,残差值的分布较密集,两种底摩擦系数模拟的有效波高的残差值基本都在  $\pm 0.15 \text{ m}$  附近浮动。说明除底摩擦系数不同外,SWAN 模型所选择的物理机制和参数都合适,模拟结果与卫星测高吻合。从误差分析来看,底摩擦系数为 0.038 的 SWAN 模型模拟的残差值的 5 个统计量都要比底摩擦系数为 0.067 的值略好,进一步验证了前者残差分布的密集性。

从上述分析可知,探讨底摩擦系数为  $0.038 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  的底摩擦耗散对研究东沙岛海域的模拟波高具有重要意义。开启底摩擦系数为  $0.038 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  底摩擦耗散项,其他条件不变,得到该项底摩擦耗散的东沙岛海域的模拟有效波高的全场分布,关闭底摩擦耗散项的 SWAN 模型同样得到该区域内的有效波高的分布,前者模式输出的结果减去后者的数值即为全场有效波高的减值,并对结果进行处理进而分析底摩擦耗散的主要作用区域。如图 3 所示,选取 2000 年 7 月 29 号 05 时 11 分对东沙岛海域进行模拟,图 3(a)所示为 0.038 的系数底摩擦导致的全场波高减值分布图,图 3(b)为波高减值比较明显的东沙岛东北部的局部图,其中等值线的单位为 m。结合图 3(b)减值波高等值线图与图 1(b)水深等值线图可知,0.038 系数的底摩擦耗散导致的有效波高减值主要作用区域是东沙岛海域水深等值线为小于 100 m 的东北地区。而在东沙岛海域的其他部分,波高减值随着水深的变深而减小,经过分析可知,海域水深数值、波浪的波长、波周期以及能量大小都会对底摩擦耗散产生一定影响<sup>[21]</sup>,当水深远远大于波长一半时,海底的相对运动和底边界层的水流摩擦对波高的作用微乎其微,也就是说,在这种情况下,底摩擦系数数值的选取对 SWAN 模型模拟的结果没有太大的影响。



(a) 东沙岛全场; (b) 东沙岛东北部局部

图 3 0.038 的系数底摩擦导致的波高减值分布图

Fig. 3 Distributions of the decreased values in the wave heights caused by bottom friction coefficients 0.038

## 4 结语

本文主要分析 SWAN 模型的底摩擦耗散,SWAN 模型分别在开启和关闭底摩擦耗散时计算了东沙岛海域的波浪场,并且与 TOPEX/Poseidon 卫星实测数据进行对比,同时对开启底摩擦耗散项对于东沙岛海域的影响进行分析。

从卫星轨迹点上的残差分析来看,相对于在东沙岛海域关闭底摩擦耗散项模拟的波浪,SWAN 模型开启底摩擦耗散项模拟的有效波高更加接近实测值。

当开启底摩擦耗散项时,SWAN 模型采用  $C_{\text{bottom}}=0.038 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  和  $C_{\text{bottom}}=0.067 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  底摩擦系数模拟的东沙岛海域的有效波高与卫星实测的有效波高吻合,说明这 2 种默认的底摩擦系数对东沙岛海域的模拟,均能很好反应波浪的变化情况。

从统计量来看,在开启底摩擦耗散的情况下 SWAN 模型模拟结果中,平均值都接近于 0 m,均方根误差和标准差都较小,但底摩擦系数是  $C_{\text{bottom}}=0.038 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  的模拟结果的误差更小。综合这两种情况,东沙岛海域波浪传递过程中,SWAN 模型采用底摩擦系数  $C_{\text{bottom}}=0.038 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  的模拟效果更佳,可以提高模拟精度。

对  $0.038 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$  底摩擦系数下的底摩擦耗散的分析说明,在东沙岛海域,底摩擦起作用的主要区域是水深等值线为小于 100 m 的东沙岛东北地区,随着水深变深,底摩擦起作用的程度变小。

### 参考文献:

- [1]梅婵娟,赵栋梁,史剑.两种海浪模式对中国黄海海域浪高模拟能力的比较[J].海洋预报,2008,25(2):92-98.  
MEI Chanjuan,ZHAO Dongliang,SHI Jian. The analysis of yellow sea wave with WAVEWATCH and SWAN models[J]. Marine Forecasts,2008,25(2):92-98.
- [2]GORMAN R M,NEILSON C G. Modeling shallow water wave generation and transformation in an intertidal estuary[J]. Coastal Engineering,1999,36(3):197-217.
- [3]RIS R C,HOLTHUIJSEN L H,BOOIJ N. A third-generation wave model for coastal region,Part I,Model description and validation[J]. Journal of Geophysical Research,1999,104(4):7649-7666.
- [4]杨德周,尹宝树,徐艳青,等. SWAN 浅水波浪模式在渤海的应用研究:Phillips 线性增长比例系数的改进[J]. 水科学进展,2005,16(5):710-714.  
YANG Dezhou,YIN Baoshu,XU Yanqing,et al. Application of the SWAN wave model to Bohai sea;Improvement of Phillips linear growth term[J]. Advances in Water Science,2005,16(5):710-714.
- [5]王道龙,华锋,江志辉. SWAN 近岸海浪模式在辽东湾的应用[J]. 海洋科学进展,2010,28(3):285-291.  
WANG Daolong,HUA Feng,JIANG Zhihui. Application of coastal wave model SWAN to Liaodong bay[J]. Advances in Marine Science,2010,28(3):285-291.
- [6]贾晓,潘军宁,NICLASEN B. SWAN 模型风能输入项的改进与验证[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(5):585-591.  
JIA Xiao,PAN Junning,NICLASEN B. Improvement and validation of wind energy input in SWAN model[J]. Journal of Hehai University(Natural Sciences),2010,38(5):585-591.
- [7]SWAN Team. Swan user (40.85A)[R]. Delft:Delft University of Technology,2008.
- [8]吕咸青,田纪伟,吴自库. 渤、黄海的底摩擦系数[J]. 力学学报,2003,35(4):465-468.  
LÜ Xianqing,TIAN Jiwei,WU Ziku. The bottom friction coefficients of the Bohai sea and the Huanghai sea[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2003,35(4):465-468.
- [9]赵保仁,方国洪,曹德明. 渤、黄、东海潮汐潮流的数值模拟[J]. 海洋学报,1994,16(5):1-10.  
ZHAO Baoren,FANG Guohong,CAO Deming. Numerical simulations of tide current in Bohai, Huanghai and the East China sea[J]. Acta Oceanologica Sinica,1994,16(5):1-10.
- [10]陈耀登,闵锦忠,高玉芳. 涌潮河口底摩擦系数伴随资料同化研究[J]. 水科学进展,2011,22(3):400-406.  
CHEN Yaodeng,MIN Jinzhong,GAO Yufang. Study of bottom friction coefficient in tidal bore affected estuaries using the adjoint method of data assimilation[J]. Advances in Water Science,2011,22(3):400-406.

- [11] The SWAN Team. SWAN technical documentation[R]. The Netherlands: Delft University of Technology, 2013.
- [12] HASSELMANN K, BARNETT T P, BOUWS E, et al. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North sea Wave Project (JONSWAP)[J]. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 1973, 12(8): 1-95.
- [13] 史剑, 王璞, 钟中, 等. 两种网格下的 SWAN 模式对黄渤海海域模拟比较[J]. 海洋预报, 2011, 28(4): 48-57.  
SHI Jian, WANG Pu, ZHONG Zhong, et al. Comparison of ocean wave simulation with SWAN wave model using two kinds of computational grid in the Bohai sea and the Yellow sea[J]. Marine Forecasts, 2011, 28(4): 48-57.
- [14] 宗芳伊, 魏来, 吴克俭. 基于 SWAN 模式的 2 种网格对嵎泗海域海浪模拟的比较研究[J]. 海洋湖沼通报, 2014(4): 10-18.  
ZONG Fangyi, WEI Lai, WU Kejian. Research on wave simulation comparisons of Shengsi waters based on two kinds of grids using SWAN wave model[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2014(4): 10-18.
- [15] 王慧, 隋伟辉. 基于 CCMP 风场的中国近海 18 个海区海面大风季节变化特征分析[J]. 气象科技, 2013, 41(4): 720-725.  
WANG Hui, SUI Weihui. Seasonal variation analysis of sea surface winds in China sea areas with CCMP wind field data [J]. Meteorological Science and Technology, 2013, 41(4): 720-725.
- [16] 郑崇伟. 基于 CCMP 风场的近 22 年中国海海表风场特征分析[J]. 象与减灾研究, 2011, 34(3): 41-46.  
ZHENG Chongwei. Sea surface wind field analysis in the China sea during the last 22 years with CCMP wind field[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2011, 34(3): 41-46.
- [17] 齐义泉, 施平, 毛庆文. GEOSAT 高度计遥感分析南海北部的海浪特征[J]. 海洋学报, 1998, 20(2): 20-26.  
QI Yiquan, SHI Ping, MAO Qingwen. Characteristics of sea wave over the northern South China sea from GEOSAT altimetric observations[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1998, 20(2): 20-26.
- [18] 郭金运, 杨磊, 刘新, 等. 由 TOPEX/Poseidon 探测的中国区域后向散射系数时空分布[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(4): 677-692.  
GUO Jinyun, YANG Lei, LIU Xin, et al. On temporal-spatial distribution of backscatter coefficients over China determined by TOPEX/Poseidon mission[J]. Science China: Earth Sciences, 2013, 43(4): 677-692.
- [19] 郭金运, 孙佳龙, 常晓涛, 等. TOPEX/Poseidon 卫星监测波斯腾湖水位变化及其与 NINO3 SST 的相关性分析[J]. 测绘学报, 2010, 39(3): 221-226.  
GUO Jinyun, SUN Jialong, CHANG Xiaotao, et al. Water level variation of Bosten lake monitored with TOPEX/Poseidon and its correlation with NINO3 SST[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(3): 221-226.
- [20] 郭金运, 常晓涛, 黄金维, 等. 基于卫星测高交叉点的海洋表面地转流速度[J]. 地球物理学报, 2010, 53(11): 2582-2589.  
GUO Jinyun, CHANG Xiaotao, HUANG Jinwei, et al. Oceanic surface geostrophic velocities determined with satellite altimetry crossover method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(11): 2582-2589.
- [21] 周良知, 吴伦宇, 郭佩芳, 等. 应用 WAVEWATCH-III 模式对南海的波浪场进行数值计算、统计分析和研究[J]. 热带海洋预报, 2007, 26(5): 1-8.  
ZHOU Liangzhi, WU Lunyu, GUO Peifang, et al. Simulation and study of wave in South China Sea using WAVEWATCH-III[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2007, 26(5): 1-8.

(责任编辑: 高丽华)