

深圳香港海域浪潮耦合模型的建立及其应用

姜茜¹, 毛献忠^{1*}

(1. 清华大学 深圳研究生院环境工程与管理研究中心, 广东 深圳 518055)

摘要:以河口海岸海洋模型 ECOM 和第三代海浪模型 SWAN 为基础, 以全球天文潮预报模式 TPXO6.2 和台风参数模型风场及气压场作为驱动, 采用海洋-陆架区-海岸三重嵌套网格, 建立了适用于深圳香港水域天文潮-风暴潮-台风浪耦合模型。以 0814 号台风“黑格比”为算例, 进行了耦合模拟计算, 计算结果显示, 天文潮、风暴潮位和浪高与实测值符合良好, 天文潮的均方根误差小于 0.15 m, 有效波高误差 0.9 m, 风暴高潮位平均误差 0.23 m; 并分析了风暴潮位和波浪的相互影响, 以及深港水域波浪场的分布, 4 m 水深考虑风暴潮位影响有效波高提高 0.40 m, 沿岸波浪增水在 0.20 m 以内。

关键词:耦合模型; 数值模拟; 风暴潮位; 台风浪; 深圳香港海域

中图分类号: P731.3

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2011)01-0056-08

1 引言

深圳香港地区受西北太平洋和南海两大源地热带气旋影响, 是我国受台风影响较为严重的地区之一。风暴潮和台风浪是重要的致灾因素, 特别是当天文大潮遭遇到强台风和超强台风情况下又伴随着大浪, 可能对沿岸地区产生重大灾害, 因此, 开展天文潮-风暴潮-台风浪耦合模型的研究, 对评估台风作用下该地区沿岸灾害风险、以及预警预案具有十分重要的意义。

风暴潮与台风浪的耦合模型, 国内外学者有不少研究。Cheung 等^[1]建立长波与 WAM 耦合模型, 应用到海岸应急管理系统中评估飓风作用下海岸淹没情况; Funakoshi 等^[2]耦合了 ADCIRC 模型和 SWAN 模式研究海浪对风暴潮的影响; Xie 等^[3]耦合了 POM 模式和 SWAN 模式研究飓风 Hugo 风暴潮及其漫滩效应; 尹宝树等^[4]基于改进的 WAM 模式和三维风暴潮潮汐模式, 建立了渤海耦合数值模式。Huang 等^[5]采用 MIKE 模型和天文

潮预报模式 TPXO6.2 建立了天文潮和风暴潮耦合模型, 评估超强台风作用下浙江沿海可能发生的高潮位。

本文采用河口海岸海洋模型 ECOM 和第三代海浪模式 SWAN, 以及全球天文潮预报模式 TPXO6.2, 建立了适用于深圳香港水域海洋-陆架区-海岸三重嵌套网格的天文潮-风暴潮-台风浪耦合模型, 并以 0814 号台风“黑格比”为例, 验证该耦合模型的可行性, 并分析浪潮之间相互影响程度。

2 数值模式

耦合模型中计算模块采用国际上通用的公共模型, 模拟天文潮和风暴潮采用 ECOM 长波模型, 模拟海浪采用 SWAN 模型。以下简述二模型、强迫力以及它们之间的耦合关系。

2.1 ECOM 模式

ECOM (Estuarine and Coastal Ocean Model) 模式是由 Blumberg^[6]开发的 POM 模型发展起来的河口海岸海洋模型, 它适用于描述河口、海岸和海

收稿日期: 2010-06-02; 修订日期: 2010-06-08。

基金项目: 国家教育部回国人员科研启动基金(2007年); 深圳市科技计划项目(2008年)。

作者简介: 姜茜(1985—), 女, 硕士, 主要从事风暴潮台风浪计算模拟。

* 通信作者: 毛献忠, 副教授, 博士, 主要从事环境灾害、海洋海岸河口水动力和环境模拟、计算研究。E-mail: maoxz@sz.tsinghua.edu.cn

洋中天文潮、风暴潮等长波运动。其在笛卡尔坐标系下二维长波运动基本方程组,包括连续方程和动量方程如下:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + F_x + \frac{\tau_x^{\zeta} - \tau_x^b}{H\rho_0} - \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + F_y + \frac{\tau_y^{\zeta} - \tau_y^b}{H\rho_0} - \frac{1}{\rho_0 H} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right), \quad (3)$$

式中, x 轴向东, y 轴向北; $\zeta(x, y, t)$ 为相对平均海平面的潮位; H 为总水深; U, V 分别为垂向平均流速分量; f 为科氏力参数; g 为重力加速度; (F_x, F_y) 为水平方向扩散项; τ^b 为底摩擦力, 由 ECOM 模型提供的湍流流动产生的底摩擦公式计算。 P 为大气压, 由气压模式提供; τ^{ζ} 为海面风应力, 由 ECOM 模型提供的风应力公式计算, 没考虑波浪的影响, 波浪对水表面的影响限于一个波高量级的水表层^[6], 风切应力和气压梯度是风暴潮计算中主要的强迫力。 S_{xx}, S_{xy}, S_{yy} 是 SWAN 模块提供波浪场计算所得的辐射应力分量, 这在近岸区域是重要的驱动力。

初始条件给定平均海平面及冷启动; 边界条件主要有陆边界和水边界, 陆边界上假定法向流量为零, 外海水边界给定静压水位叠加由全球天文潮模型提供的天文潮位。

2.2 SWAN 模式

SWAN 是第三代海浪模式, 用于描述在风场、潮流作用下浪的产生和传播^[7-8]。 SWAN 模型以作用谱密度 $N(\sigma, \theta)$ 守恒为基本控制方程, 在球面坐标下方程为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_{\lambda} N}{\partial \lambda} + \frac{\partial c_{\varphi} N}{\partial \varphi} + \frac{\partial c_{\sigma} N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_{\theta} N}{\partial \theta} = \frac{S_{\text{tot}}}{\sigma}, \quad (4)$$

式中, N 为经度 λ 和纬度 φ 的作用谱密度; σ 表示波浪的频率; θ 代表波向, 以东为起点逆时针为正; c_{λ}, c_{φ} 分别代表波浪在地理空间 (λ, φ) 的传播速度, c_{σ} 和 c_{θ} 表示波浪在谱空间 (σ, θ) 的传播速度, 因此方程(4)左边第 2 至 4 项分别表示作用谱密度在地理空间和谱空间上的变化; S_{tot} 为源项, 表示各种物理过程引起的能量输入与耗散, SWAN 中的 S_{tot} 包括了 6 种物理过程: 风能输入, 非线性波与波之

间的相互作用, 白浪、底摩擦和波浪破碎等引起的波能损耗。

2.3 外部强迫力

外部强迫力主要包括台风引起的表面风剪切应力和气压, 以及外海边界的全球天文潮模型 TPXO6.2^[9] 提供的潮汐条件。

TPXO6.2 由美国俄勒冈州立大学开发, 选用 8 个主要分潮 ($M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, O_1, P_1, Q_1$) 和 2 个长周期分潮 (M_t 和 M_m) 推算全球的潮汐分布, 该模型采用的网格数为 1440×721 , 分辨率为 0.25° 。

在风暴潮和台风浪的模拟中, 台风风场和气压场是主要的驱动力。 给定台风路径和强度, 本文采用修正后的 Rankine 涡参数模型^[10] 计算台风风场分布。 气压模式采用 1954 年 Schloemer 提出的如下公式计算:

$$p = p_c + \Delta p \exp \left[\left(\frac{R_{mc}}{r} \right) \right]. \quad (5)$$

2.4 耦合模型

天文潮和风暴潮耦合模型是构建一个既适用于天文潮汐, 也适用于风暴增水的长波数值模式, 主要通过边界上天文分潮, 和台风引起的强迫力场的输入, 进行风暴潮位的耦合计算来实现。 风暴潮位的耦合计算在宽阔的浅海沿岸, 由于浅水非线性效应的增大, 长波间的相互作用尤为重要。 随着全球天文潮预报精度的提高, 使得直接模拟风暴潮位成为可能。 另一方面, 在浅水区, 由于风暴潮增减水, 使得风暴潮位变化剧烈, 引发浅水区水深变化增大, 风暴潮流增强, 因而浅水区台风浪更为复杂。 因此, 天文潮、风暴潮和台风浪三者耦合计算对于评估沿岸区域在台风作用下的风暴潮位和台风浪十分重要。

天文潮、风暴潮和台风浪模型之间耦合以及在不同地理尺度区域模型的相互关系见图 1, 三重网格表示不同空间尺度计算区域: 海洋、陆架范围和海岸范围。 海洋模型通过 TPOX6.2 模型提供外海天文潮边界和在台风作用下由 ECOM 模型计算风暴潮流运动, 由 SWAN 模型计算台风浪, 在深水区不考虑风暴潮位和浪的相互影响; 陆架和海岸模型描述两潮运动从线性到非线性运动过程, SWAN 模型计算台风浪, 考虑风暴潮位、潮流和波浪的相互影响。 海洋模型在第二重陆架区域模型边界上输出潮位和波谱, 作为嵌套计算的边界条件; 陆架模型在第三重海岸模型边界上输出潮位和波谱, 作为嵌套的

边界条件。通过三重网格模型计算可得到不同地理尺度的风暴潮位和台风浪。

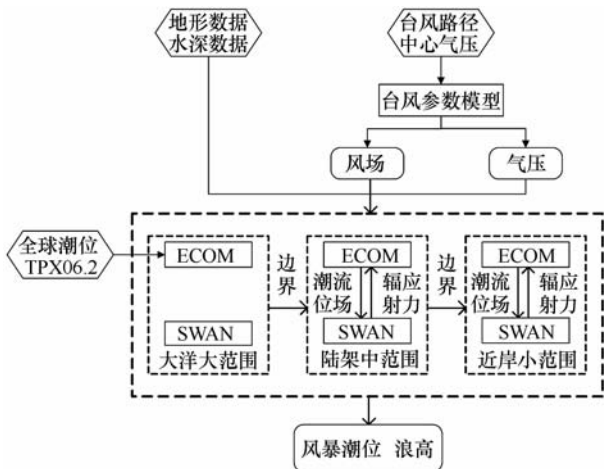


图1 耦合模型结构图

3 模型的建立

深港水域天文潮-风暴潮-台风浪耦合模型计算区域如图2所示。

第一重网格计算域范围为 $15^{\circ} \sim 26^{\circ} \text{N}$, $108^{\circ} \sim 123^{\circ} \text{E}$, 空间步长为 0.05° , 计算域包括台湾岛至菲律宾岛之间的岛链, 将外边界放在岛链外主要考虑到沿岛链会阻挡台风浪能量, 从而减少外边界条件带来误差。另外, 由于海洋深水区潮汐与增水为线性关系, 在计算域的开边界上把逐时推算的天文潮与台风气压降引起的静压增水叠加一起, 共同作为天文潮和风暴潮耦合计算的边界条件。同时, 由于外海边界远离重点研究区域近岸, SWAN 模型处理水边界时, 只允许波浪从边界传出, 不考虑能量从开边界传入。

第二重嵌套模型的范围 $20.3^{\circ} \sim 22.8^{\circ} \text{N}$, $112.75^{\circ} \sim 116.45^{\circ} \text{E}$, 网格空间步长为 $1'$, 外边界设置在陆架区, 以保证风暴潮、天文潮由线性到非线性过度。

第三重嵌套模型的范围 $21.9^{\circ} \sim 22.7^{\circ} \text{N}$, $113.7^{\circ} \sim 114.6^{\circ} \text{E}$, 网格空间步长为 $9''$, 第三重网格主要深港水域, 香港的离岛区和大鹏湾、以及部分珠江口, 见图3。

三重嵌套网格逐步加密, 以保证模型可以描述不同区域的风暴潮和台风浪的特征。

地形数据采用美国 NOAA 的 ETOPO1 提供的全球 $1' \times 1'$ 水深数据, 近岸的地形采用海图资料。

所有的水深数据以平均海平面为基准面。

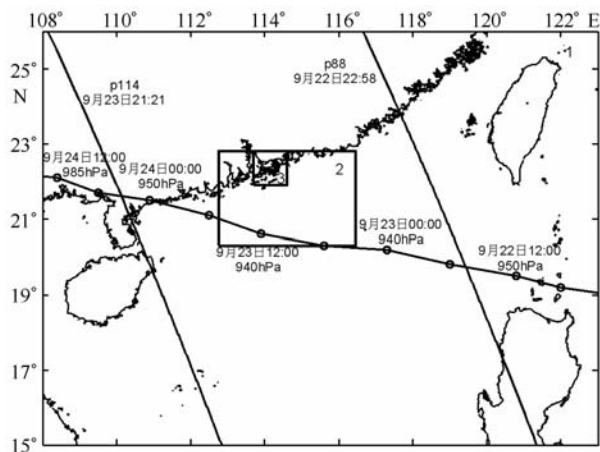


图2 模拟区域网格结构、“黑格比”路径及 Jason 通道

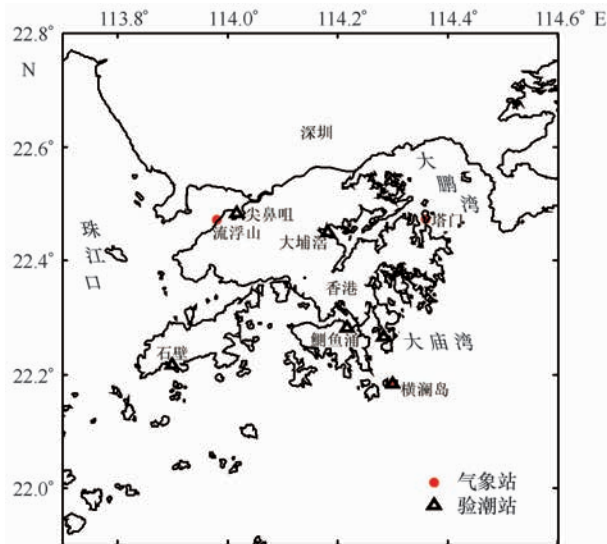


图3 第三重区域范围以及香港气象站与验潮站

4 计算结果分析和讨论

“黑格比”是2008年影响华南沿岸最强的台风, 于9月19日在菲律宾以东的西北太平洋面上形成热带低压, 9月20日增强为强热带风暴, 并向西北偏西方向移动, 强度进一步加强, 22日6:00(全文采用UTC时间)前后增强为强台风, 横穿过巴林塘海峡, 进入南海。9月23日2:00, “黑格比”位于香港东南方约350 km处, 香港天文台发出三号强风信号; 9月23日12:00, “黑格比”距香港约210 km, 天文台发出八号烈风信号。随着“黑格比”移离香港, 天文台于9月24日4:00取消热带气旋警告信号。“黑格比”路径如图2所示。

4.1 计算结果分析

4.1.1 风场验证

香港自动气象站提供每小时一次的风速和风向,气象站位置见图3。通过以下公式^[11]将气象站记录风速转换为模型需要的海平面10 m高度的10 min平均的持续风速:

$$\frac{U_{10}}{U_z} = \frac{\ln[(10 - Z_D)/Z_0]}{\ln[(Z - Z_D)/Z_0]}, \quad (5)$$

式中, U_z 为自动气象站的风速, Z_D 表示风速计周围障碍物的平均高度, Z 表示风速计的距地面的高度, $Z - Z_D$ 则代表风速计实际有效高度, Z_0 为风速等于

零的高度,与地面粗糙度有关。气象站在空旷地方,取 $Z_D=0$, $Z_0=0.03$ m。修正后的气象站风速与参数风模型得到的结果进行比较。

图4和图5分别是流浮山站和横澜岛站风速与风向的模拟值与实测值的对比。横澜岛站远离香港本岛,位置较为空旷,风速受周围环境影响小,实测风速可较好代表台风风场,风速模拟值与实测数据比较吻合很好;而流浮山站位于深圳湾南岸,在内陆,实测风速受陆地影响较大,计算值明显大于实测值。二站点计算风向和实测值吻合较好。计算结果基本反映了台风的风速风向变化过程。

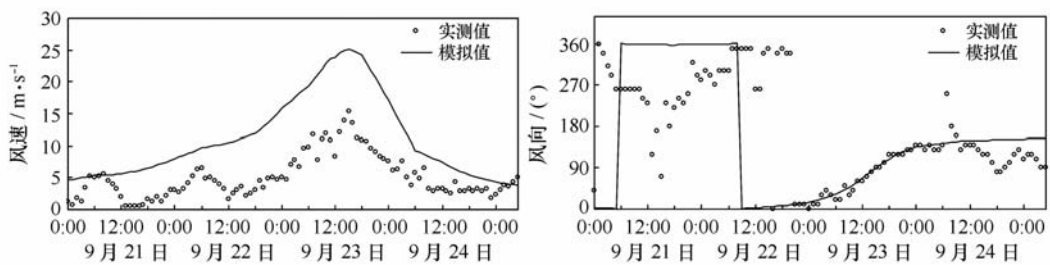


图4 流浮山处风速和风向计算值与实测值的比较

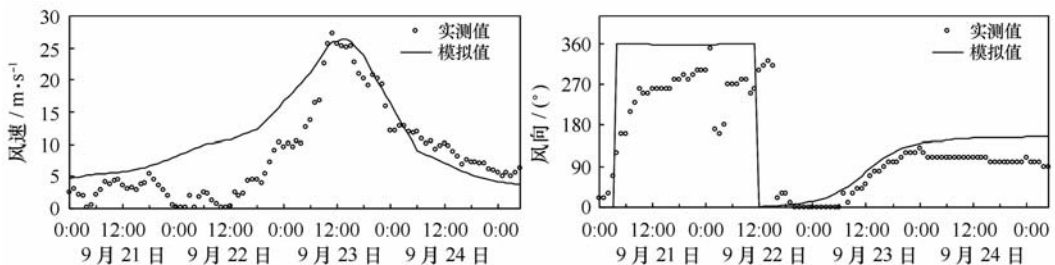


图5 横澜岛处风速和风向计算值与实测值的比较

4.1.2 天文潮验证

在台风产生前没有大气强迫力的条件下,在第一重网格模型的开边界输入全球天文潮预报模型(TPX06.2)计算的包含10个分潮的天文潮波,10个主要分潮基本能够构造出外海深水真实的天文潮过程,潮波在由边界向近岸浅水区传播过程中,非线性数值模型将模拟出潮波的变形,浅水分潮、倍潮及其他因非线性效应派生的分潮均可由本模型自动算出。

天文潮验证采用“黑格比”形成前4 d(9月16—19日)天文潮过程。第三重网格模型深港水域有6个潮汐站(见图3),模拟所得天文潮高、低潮位值与实测值比较见图6。

总体而言,低潮位吻合程度优于高潮位,其中大埔滘站高潮位计算值偏高,该站位于狭长的吐露港顶部,可能是网格步长偏大以及地形数据精度引起的误差,大部分站点最高、最低潮位误差小于20 cm。计算高潮位统计偏差、均方根误差、散度和相关系数分别为0.08 m,0.13 m,0.22和0.90;计算低潮位统计偏差、均方根误差、散度和相关系数分别为0.03 m,0.11 m,0.19和0.87,计算结果与实测值十分吻合。天文潮的准确模拟说明耦合模型可以模拟从大范围到小范围天文潮非线性过程,为耦合模型对风暴潮位的直接模拟提供了条件。

4.1.3 风暴潮位验证

除给定天文潮位外,开边界另外叠加台风气压

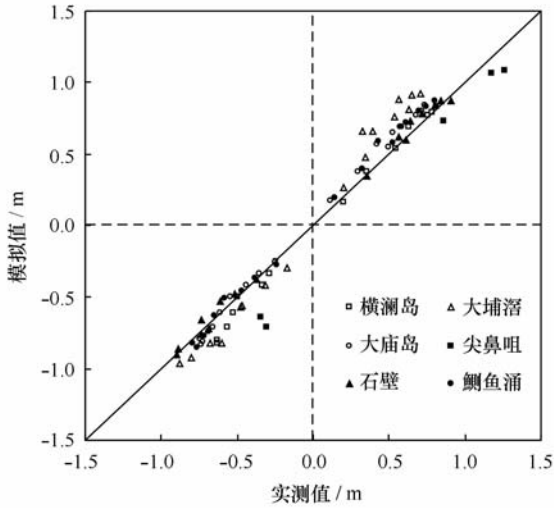


图6 天文潮高、低潮位模拟值与实测值对比

降引起的静压水位,同时输入台风参数模型计算的风应力和气压梯度。ECOM 模型先进行天文潮的计算,使天文潮达到稳定状态后,引入台风。台风的发生时间从2008年9月20日12:00至2008年9月25日6:00。在风暴潮的发生期间,共有3个验潮站测到风暴潮位过程,分别为鲗鱼涌、大埔渚和尖鼻咀。

9月23日12:00起,深圳香港地区普遍吹东北偏东风,在强烈的向岸风影响下,鲗鱼涌站出现了1962年台风“温黛”以来最高的潮位,大埔渚录得1979年8月台风“荷贝”以来最高记录。图7—9给出3个验潮站模拟的风暴潮过程与实测值的比较。从图中可以看到,天文潮与风暴潮耦合模型较好地模拟出了9月23日18:00时在3个测潮站的风暴潮位的过程。鲗鱼涌站位于香港维多利亚港内,计算风暴最高潮位和实测值差0.12 m;大埔渚站位于吐露港内顶部,计算最高风暴潮位低于实测值0.34 m;尖鼻咀站位于深圳湾,最高风暴潮位高于实测值0.58 m,由于该区域受珠江口影响较大,因此误差较大。和实测值比较,3个站位计算风暴潮过程和实测值吻合较好。造成风暴高潮位的误差是多方面的,台风风场和天文潮过程的模拟均有一定误差,风场气压场的模拟精度、网格大小以及地形数据精度也会影响风暴潮位的精度。

4.1.4 海浪验证

美国宇航局(NASA)和法国空间中心(CENS)合作发射了一系列的海洋观测卫星,其目的是测量全球大洋上的有效波高、平均海面 and 风速等,以此推

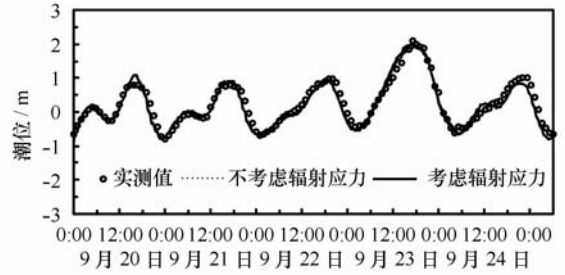


图7 鲗鱼涌站风暴潮位与实测位比较

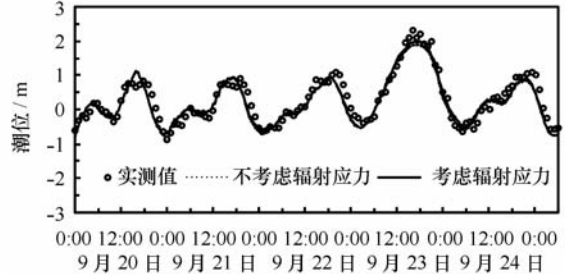


图8 大埔渚站风暴潮位与实测位比较

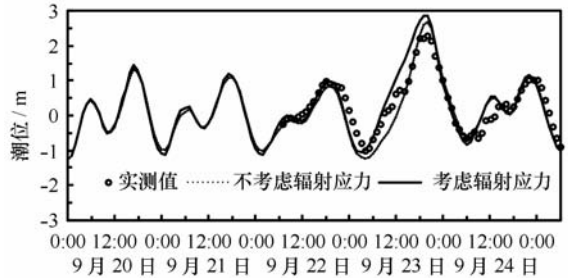


图9 尖鼻咀站风暴潮位与实测位比较

算全球海平面变化情况。Jason-1 卫星于2001年12月7日发射,2002年1月15日开始收集数据,其轨道精度约为2.5 cm。在台风“黑格比”的模拟时间内,Jason-1有2条通道经过模拟区域,分别为通道88和114,其轨道和通过时间见图1。

根据卫星观测点位置和时间,提取相应位置和时间海浪模拟结果,将计算值与高度计的观测值进行对比,见图10。通道88是从9月22日22:58进入计算域,此时台风正处于增强过程,通道离台风中心相对较近,计算所得的有效波高和卫星测量数据吻合很好,计算结果的偏差、均方根误差、散度和相关系数分别为0.29 m,0.90 m,0.16和0.93。而通道114从9月23日21:21开始进入计算域,此时台风已接近登陆,而且台风中心离通道较远,通道114上的波高计算值高于观测值。

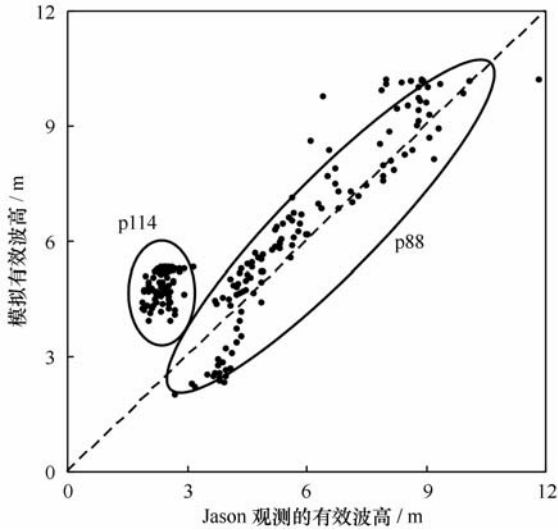


图 10 模拟值与卫星观测值的对比

4.2 结果讨论

4.2.1 风暴潮对海浪的影响

第三重模型范围大部分水深不足 30 m, 风暴潮对波浪有明显的影 响。选择 3 个不同水深检验点, 来分析风暴潮对海浪的影响。a 点位于右侧吐露港内的大埔滘附近, 水深 4 m 左右; b 点处于鲗鱼涌站附近, 水深 10 m 左右; c 点在模型下边界附近, 水深大约 30 m。考虑与不考虑风暴潮影响时, 浪高的变化情况见图 11。

从计算结果看, 如果考虑风暴潮位和潮流的影响, 有效波高变化幅度增大, 在不同水深处, 风暴潮对海浪的影响不同, 水深越小, 风暴潮对海浪的影响越明显。从风暴潮的计算结果看, 9 月 23 日 0:00 开始, 潮位开始上涨, 至 21:00 时, 升到最高潮位, 而后潮位开始下降。a 点考虑风暴潮影响时, 随着潮位的增加, 浪高明显增加, 最大浪高增加了 0.4 m, 增大了 33.1%; 潮位减小时, 浪高也相应降低; b 点由于风暴潮的影响, 最大浪高的出现稍滞后于不考虑风暴潮影响时, 最大浪高相差 0.25 m; c 点水深最大, 考虑风暴潮对浪高的影响相对较小, 最大浪高增大 0.55 m, 由于该处最大浪高高达 6~7 m, 增大了 7.5%, 而最大浪高的出现时间没有明显差距。因此, 在近岸浅水区考虑风暴潮对海浪的影响是十分有必要的。

4.2.2 台风浪对风暴潮位的影响

台风引发的近岸波浪场产生的辐射应力垂直于岸线的分量会产生波浪增水, 而平行于岸线的辐射应力会产生波浪流, 前者会引起风暴潮位更高, 后者会产生很大流动, 是近岸致灾很重要的破坏动力。

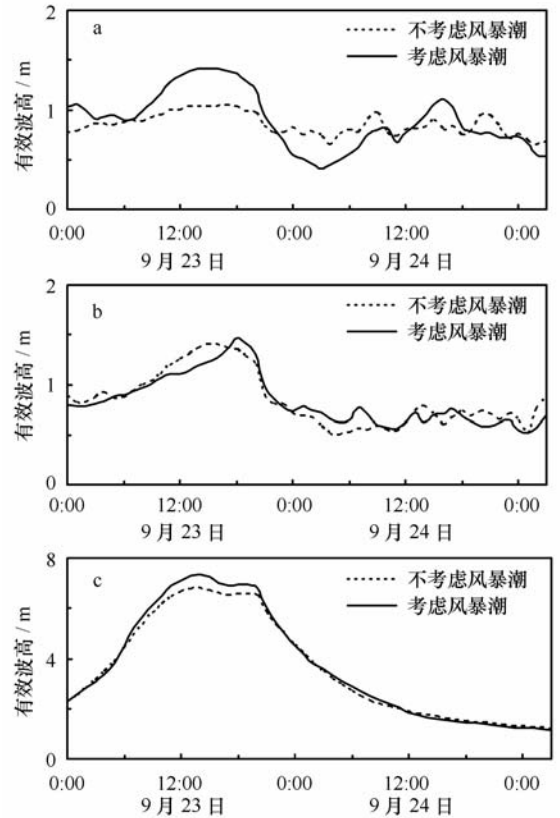


图 11 风暴潮对海浪的影响

在耦合模型中, 如不考虑波浪场产生的辐射应力影响, 则计算所得风暴潮位不包括波浪增水, 计算结果见图 7—9。计算结果显示, 鲗鱼涌站最大波浪增水为 0.12 m, 高潮位波浪增水为 0.08 m; 大埔滘站最大波浪增水为 0.13 m, 高潮位波浪增水为 0.10 m; 尖鼻咀站最大波浪增水为 0.94 m, 高潮位波浪增水为 0.18 m; 深港水域外海波浪增水小于 0.05 m。

由于第三重网格空间步长为 $9''$, 约 270 m, 空间步长较大, 计算所得的波浪增水偏小, 这也许是鲗鱼涌站和大埔滘最高风暴潮位偏小的原因。

4.2.3 深港水域浪高分布

台风发生时, 在近岸造成的风暴潮位是台风危害性的重要指标, 而近岸台风浪和波浪流也是重要的致灾因素。图 12 是“黑格比”在近岸引发最大风暴潮位时刻浪高分布图。香港离岛区、九龙半岛东南部、深圳大鹏半岛、大鹏湾大部分区域, 浪高达到 5~8 m; 其次, 维多利亚港内和大埔区、大鹏湾海滩、珠江口, 浪高在 2~3 m。

4.2.4 风暴潮台风浪的危害

“黑格比”影响深港海域期间恰逢涨潮后期, 受

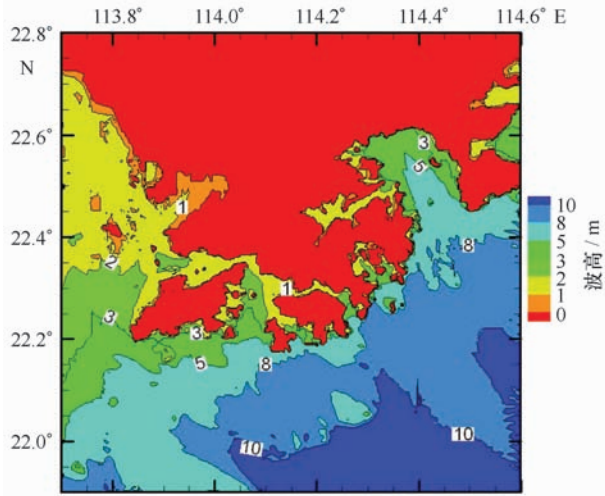


图 12 海浪在深港水域分布

黑格比带来的风暴潮和涨潮的共同影响,该水域出现较高的潮位,如鲗鱼涌测得自 1962 年台风“温黛”之后的最高潮位。根据香港天文台的记录,香港沿岸不少地区遭受水浸。香港离岛区的大屿山、南丫岛、长洲,以及深圳大鹏湾著名的海滩,大梅沙和小梅沙,在“黑格比”期间,由于大浪的影响,海滩严重受损,致使海沙大量流失。所幸的是“黑格比”登陆是农历八月廿四小潮汛后期,如果“黑格比”发生在大潮期高潮位,那么所引发的风暴潮位会更高,台风浪更强,造成的破坏更严重。耦合模型可用于深港

海域遭受强台风和超强台风作用下的风险评估,以及对沿岸防洪工程的设计、台风来临时预警预案具有十分重要的意义。

5 结论

(1)建立了适用于深港海域的天文潮-风暴潮-台风浪耦合模型,采用海洋-陆架区-海岸三重嵌套网格,以全球天文潮预报模式 TPXO6.2 和台风参数模型风场及气压场作为驱动,模拟台风作用下的风暴潮位和台风浪。耦合模型可用于深港海域遭受强台风和超强台风作用下的风险评估,以及对沿岸防洪工程的设计提供科学的依据。

(2)以 0814 号台风“黑格比”为算例,进行了耦合模拟计算。计算结果显示,天文潮、风暴潮位和浪高与实测值符合良好,天文潮的均方根误差小于 0.15 m,有效波高误差 0.9 m,鲗鱼涌和大埔渚站风暴高潮位平均误差 0.23 m。

(3)以 0814 号台风“黑格比”为例,分析了风暴潮位和波浪的相互影响,以及深港水域波浪场的分布,4 m 水深如考虑风暴潮位影响有效波高提高 0.40 m,沿岸波浪增水在 0.20 m 以内。

感谢香港天文台为本研究提供潮位和风速资料。

参考文献:

- [1] CHEUNG K F, PHADKE A C, WEI Y, et al. Modeling of storm-induced coastal flooding for emergency management [J]. *Ocean Modelling*, 2003, 30(1):1353—1386.
- [2] FUNAKOSHI Y, HAGEN S C, BACOPOULOS P. Coupling of hydrodynamic and wave models: case study for Hurricane Floyd(1999) hindcast [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2008, 134(6): 321—335.
- [3] XIE L, LIU H, PENG M. The effect of wave-current interactions on the storm surge and inundation in Charleston Harbor during Hurricane Hugo 1989[J]. *Ocean Modelling*. 2008, 20(3): 252—269.
- [4] 尹宝树, 王涛, 侯一筠, 等. 渤海波浪和潮汐风暴潮相互作用对波浪影响的数值研究[J]. *海洋与湖沼*, 2001, 32(1):109—116.
- [5] HUANG S C, LI Y C, ZHAO X, et al. Numerical investigation of high tide level due to a super typhoon in a coastal region[J]. *China Ocean Engineering*, 2007, 21(3): 471—484.
- [6] BLUMBERG A F. A primer for ECOMSED users manual [R]. HydroQual, Inc, 2002.
- [7] BOOIJ N C, RIS R C, HOLTHUIJSEN L H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation[J]. *J Geophys Res*, 1999, 104(C4): 7649—7666.
- [8] SWAN-scientific and technical documentation [R]. SWAN cycle III version 40.72A, 2008.
- [9] EGBERT G D, EROFEEVA S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2002, 19(2): 183—204.
- [10] PHADKE A C, MARTINO C D, CHEUNG K F, et al. Modeling of tropical cyclone winds and waves for emergency management [J]. *Ocean Engineering*, 2003, 30(4):553—578.
- [11] POWELL M D, HOUSTON S H. Hurricane Andrew's landfall in South Florida: Part I. Standardizing measurements for documentation of surface wind fields[J]. *Weather and Forecasting*, 1996, 11(3): 304—328.

A tide-surge-wave coupled model in Shenzhen and Hong Kong waters and its application

JIANG Qian¹, MAO Xian-zhong¹

(1. *Research Center for Environmental Engineering and Management, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China*)

Abstract: This paper describes a coupling model that simulates storm tide and waves induced by typhoon in Shenzhen and Hong Kong waters. The coupling model is based on the nonlinear long-wave model ECOM and the third wave model SWAN driven by the parametric typhoon model and the global tide model TPXO6.2 for three levels of nested geographic domains, ocean, continental and coastal. No. 0814 typhoon "Hagupit" was chosen for case study to test the coupling model, and the computed results show the good agreement with the observed data for the astronomical tide, significant wave height, and storm tide level. And also the interaction is analyzed between the storm tide and wave, and the distribution of the wave height is given in Shenzhen and Hong Kong waters.

Key words: coupled model; numerical simulation; storm tide; typhoon wave; Shenzhen and Hong Kong waters