

基于海气耦合模式的南中国海北部风暴潮模拟

伍志元^{1,2,3}, 蒋昌波^{1,2*}, 邓斌^{1,2}, 曹永港⁴

1. 长沙理工大学水利工程学院, 长沙 410114;

2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 长沙 410114;

3. School for Marine Science and Technology, University of Massachusetts Dartmouth, New Bedford, MA 02744, USA;

4. 国家海洋局南海调查技术中心, 广州 510300

* 联系人, E-mail: jiangchb@csust.edu.cn

2018-02-22 收稿, 2018-08-20 修回, 2018-08-24 接受, 2018-11-13 网络版发表

国家自然科学基金(51809023, 51839002, 51879015, 51509023, 51809021)、水利部珠江河口动力学及伴生过程调控重点实验室开放研究基金([2018]KJ03)、国家海洋局南海维权技术与应用重点实验室开放基金(SCS1606)和水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室开放基金(2017SS04)资助

摘要 伴随台风产生的大风、暴雨、巨浪、风暴潮形成的台风灾害链对沿岸地区产生巨大影响, 研究台风的形成和运动机理, 减小风暴潮灾害, 具有重要的科学价值和社会意义. 台风影响期间, 大气与海洋之间存在强烈的质量、能量交换, 风场、流场、波浪场等物理场相互作用、相互影响. 基于中尺度大气模式WRF和区域海洋模式ROMS, 构建南中国海地区海气耦合模式, 针对2012年台风“启德”进行数值模拟. 通过观测数据对台风路径和强度进行验证, 结果表明, 建立的WRF-ROMS耦合模式在对台风“启德”影响下的南中国海风暴潮模拟中展现出较高的模拟精度. 通过数值模式计算结果揭示了台风、风暴增水和风生流场的时空分布特征. 台风运动过程中台风动力场、风暴增水及流场在空间上均具有“右偏性”的不对称分布特征, 近岸风暴增水对台风的响应在时间上存在滞后性, 风生流场具有较明显的滞后性特征.

关键词 风暴潮, 数值模拟, 海气耦合, WRF, ROMS, 南中国海

我国位于太平洋西岸的东亚季风区, 是全球发生台风次数最多、级别最大、破坏力最大的地区之一^[1]. 台风对区域内的影响往往并非单一的大风灾害, 同时伴随产生的暴雨、巨浪、风暴潮形成的台风灾害链, 对影响区域造成严重危害^[2], 对海岸侵蚀具有重大威胁^[3]. 因此, 研究台风的形成和运动机理, 准确预报台风影响规律, 减小风暴潮灾害, 为保障国民经济发展和人民生命财产安全有着重要的社会价值.

国内外学者开发了多种风暴潮预报模式. 早在1972年, 美国学者Jelesnianski等人^[4]开发了SPLASH模式, 在此基础上开发了新的SLOSH模式, 在海、

湖、陆等区域的风暴潮模拟中得到了广泛应用^[5,6]. Blumberg和Mellor^[7]开发了POM模式, 用于模拟大尺度海洋、海岸水位及流场变化过程^[8,9]. ECOM模式^[10,11]、ROMS模式^[12,13]、CH3D-IMS模式^[14]、CEST模式^[15]、SELF模式^[16]、Delft3D模式^[17]、ADCIRC模式^[18~20]、FVCOM模式^[21,22]等相继被开发和用于风暴潮的模拟, 取得了很好的成果, 为了解风暴潮动力机制奠定了基础.

在台风影响过程中, 大气与海洋之间存在强烈的质量、能量交换, 两者相互作用^[23], 风场、流场、波浪场等物理场相互影响、相互制约. 大气对海洋产生的强迫作用, 主要包括海表面风应力、压力、热通

引用格式: 伍志元, 蒋昌波, 邓斌, 等. 基于海气耦合模式的南中国海北部风暴潮模拟. 科学通报, 2018, 63: 3494–3504

Wu Z Y, Jiang C B, Deng B, et al. Simulation of the storm surge in the South China Sea based on the coupled sea-air model (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 3494–3504, doi: 10.1360/N972018-00806

量及太阳辐射等;与此同时,海洋上层水体对大气作用发生响应,其响应结果对大气运动产生影响.海洋对大气的作用主要包括两方面:一是海洋表面温度的变化导致海表热通量发生改变,从而影响大气运动;二是海表流场的变化导致大气底部风应力发生改变,从而对大气运动结构产生影响^[24].

因此,若要准确模拟热带气旋的风场过程,大气和海洋的相互作用关系不容忽视,建立海气耦合模型是解决该问题的有效手段.采用中尺度气象模式(如:MM5模式^[25,26]和WRF模式^[27~30]等)为海洋模式提供高精度风场、气压场数据,通过建立耦合模型实现海气界面的数据交换,提高模拟精度.利用MCT耦合器,基于中尺度大气模式WRF和区域海洋模式ROMS^[27,28],本文构建了南中国海WRF-ROMS耦合模式,对实际台风“启德”进行模拟,计算了台风影响下的南中国海大气运动特征和水流运动特征,分析了南中国海北部台风暴潮时空分布特征.

1 数值模拟方法

1.1 WRF大气模式简介

中尺度大气模式WRF是由美国NCAR和NCEP等机构共同研发的新一代中尺度气象模式,可用于模拟全球及区域等不同尺度范围下的气候变化、大气运动及空气质量,也可用于台风、飓风模拟以及海气耦合模拟研究,其应用非常广泛.WRF模式包括ARW和NMM两套不同的动力框架,本文基于WRF模式中的ARW框架开展台风模拟和研究.该模式采用完全可压缩的非静力模式,水平方向采用Arakawa C网格点,垂直方向采用地形跟随质量坐标^[31].

WRF地形跟随的静压垂直坐标 η 定义为

$$\eta = (p_h - p_m) / \mu, \quad (1)$$

其中, $\mu = p_{hs} - p_{ht}$, p_h 为气压的静力平衡分量, p_{hs} 和 p_{ht} 分别为模型底部边界(地面)和顶边界的气压. η 取值范围为 $\eta=0 \sim 1$,模型底边界处为 $\eta=1$,在顶部边界处为 $\eta=0$.这种坐标形式是一种传统的 σ 坐标,广泛地应用于许多静力气象模式中.垂直方向采用地形追随(terrain-following)的静压垂直坐标,非静力通量形式的欧拉方程组如下:

$$\partial_t U + (\nabla \cdot V_u) - \partial_x (p \partial_\eta \varphi) + \partial_\eta (p \partial_x \varphi) = F_u, \quad (2)$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot V_v) - \partial_y (p \partial_\eta \varphi) + \partial_\eta (p \partial_y \varphi) = F_v, \quad (3)$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot V_w) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_w, \quad (4)$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot V_\theta) = F_\theta, \quad (5)$$

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot V) = 0, \quad (6)$$

$$\partial_t \varphi + \mu^{-1} [(\nabla \cdot V_\varphi) - gW] = 0. \quad (7)$$

方程组需满足静力平衡的诊断关系(diagnostic relation)(式8)和气体状态方程(9):

$$\partial_\eta \varphi = -\alpha \mu, \quad (8)$$

$$p = p_0 (R_d \theta / p_0 \alpha)^\gamma, \quad (9)$$

其中, $V = \mu v = \mu(u, v, w)$, $\mu(x, y)$ 代表模型格点 (x, y) 处空气柱的单位面积质量, $\Theta = \mu \theta$, θ 为位温,位势 $\varphi = gz$, p 为大气压强, p_0 取为常数100 kPa,空气比容 $\alpha = 1/\rho$, γ 为干空气中定压比热和定容比热之比,取 $\gamma = c_p/c_v = 1.4$.方程(2)~(5)中,等式右边的 F_u , F_v , F_w 和 F_θ 分别表示由模型物理、紊流掺混、球面投影和地球选择产生的力的源项.

1.2 ROMS海洋模式简介

区域海洋模型ROMS(regional ocean model system)是目前国际上最为先进的海洋模式系统之一.ROMS模式在垂向上采用地形追随的 S 坐标系(stretched terrain following coordinates),能够适当地描述海底地形的影响,且在垂直方向上可以采用非等比例分层的方式,相对于传统模式中采用水深等比例分层的模式而言,采用非等比例分层方法在温跃层和底边界层等层面上可以具有更高的模拟精度.

在水平笛卡尔坐标系(Cartesian coordinates),垂向 σ 坐标系下,ROMS的动量方程如下式所示^[32]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(H_z u)}{\partial t} + \frac{\partial(u H_z u)}{\partial x} + \frac{\partial(v H_z u)}{\partial y} + \frac{\partial(w H_z u)}{\partial s} - f H_z v \\ &= -\frac{H_z}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} - H_z g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial s} \left(\overline{u'w'} - \frac{v}{H_z} \frac{\partial u}{\partial s} \right) - \frac{\partial(H_z S_{xx})}{\partial x} \\ & \quad - \frac{\partial(H_z S_{xy})}{\partial y} + \frac{\partial S_{px}}{\partial s}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(H_z v)}{\partial t} + \frac{\partial(u H_z v)}{\partial x} + \frac{\partial(v H_z v)}{\partial y} + \frac{\partial(w H_z v)}{\partial s} - f H_z u \\ &= -\frac{H_z}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - H_z g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial s} \left(\overline{v'w'} - \frac{v}{H_z} \frac{\partial v}{\partial s} \right) - \frac{\partial(H_z S_{yx})}{\partial x} \\ & \quad - \frac{\partial(H_z S_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial S_{py}}{\partial s}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial s} - \frac{g}{\rho_0} H_z \rho = 0. \quad (12)$$

连续性方程为

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (H_z u)}{\partial x} + \frac{\partial (H_z v)}{\partial y} + \frac{\partial (H_z w)}{\partial s} = 0. \quad (13)$$

对流扩散方程为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (H_z C)}{\partial t} + \frac{\partial (u H_z C)}{\partial x} + \frac{\partial (v H_z C)}{\partial y} + \frac{\partial (w H_z C)}{\partial s} \\ &= -\frac{\partial}{\partial s} \left(\overline{c'w'} - \frac{\nu_\theta}{H_z} \frac{\partial C}{\partial s} \right) + C_{\text{source}}. \end{aligned} \quad (14)$$

海水状态方程:

$$\rho = f(C), \quad (15)$$

式中, u , v 和 w 分别代表 x , y 和 z 三个方向上的流速, 垂向 σ 坐标 $s = (z - \eta)/(h + \eta)$, $-1 < s < 0$.

1.3 MCT耦合器及耦合方法

为了有效模拟台风影响下的海洋动力过程, 本文将中尺度大气模式WRF和区域海洋模式ROMS通过MCT耦合器(the model coupling toolkit)^[33]进行耦合, 综合考虑台风和海洋之间的相互影响, 建立大气-海

洋模型系统, 该模型系统的数据交换示意图见图1.

由图1可知, WRF与ROMS之间为双向耦合, 即通过MCT耦合器将WRF计算得到的海面剪切应力(surface stress)、净热通量(net heat fluxes)、感热通量(sensible heat flux)、潜热通量(latent heat flux)、短波辐射通量(shortwave radiation flux)、长波辐射通量(longwave radiation flux)传递给ROMS; 而海洋模式ROMS将海表温度(sea surface temperature, SST)反馈给大气模式WRF.

耦合模型WRF-ROMS的计算流程如图2所示, 主要包括5个部分: 耦合模型计算主程序Master, 并行程序MPI的初始化, 耦合模式在各个子模式内的

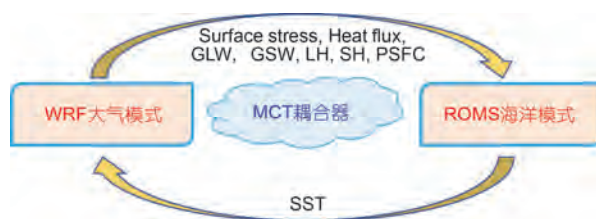


图1 (网络版彩色)大气-海洋耦合机制及数据传递示意图

Figure 1 (Color online) Mechanism of the coupled atmosphere-wave model

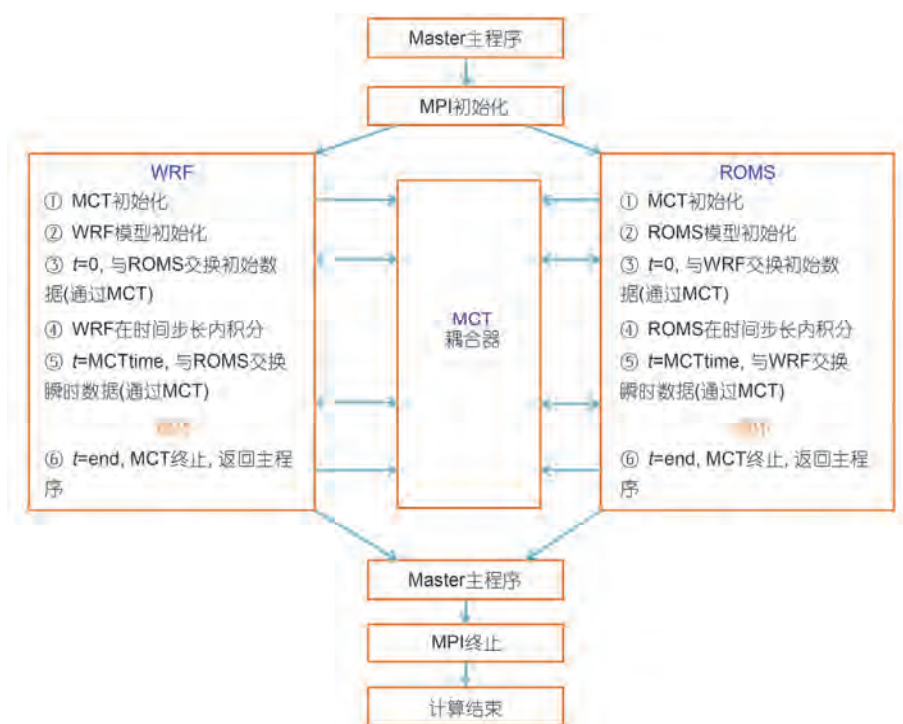


图2 (网络版彩色)WRF-ROMS耦合模式计算流程示意图

Figure 2 (Color online) Flow chart of calculation process of the coupled WRF-ROMS model

MCT初始化,耦合模式的运行,MCT的终止化.在各个子程序内部,在初始时刻 $t=0$,模式获得初始场,并通过MCT耦合器与耦合模式交换初始数据,在各自的时间步长内进行积分求解,当计算时长达到设置的MCT时间步长时,将各自的求解结果通过MCT耦合器与耦合模式进行数据传递和交换,循环往复至计算结束.

2 南中国海海气耦合模型的建立

2.1 算例选取

根据台风的运动轨迹、强度、影响范围、登陆地点,结合实测数据的获取,选择2012年第13号台风“启德”(Kai-tak)作为本文的研究对象.台风“启德”于2012年8月12日晚在菲律宾东部海面形成热带低压,13日08时左右到达台湾东南部($16.9^{\circ}\text{N}, 127.8^{\circ}\text{E}$),并不断加强,中心最大风力达到8级(18 m/s)以上,最低气压998 hPa,同时以 10 km/h 左右的速度向西北方向移动,逐渐向台湾南部沿海靠近,台风移动路径如图S1所示.

2012年8月16日05时在南海北部海面加强为台风,06时其中心位于广东省湛江东南海域($18.7^{\circ}\text{N}, 118.2^{\circ}\text{E}$),中心附近最大风力有12级(33 m/s)以上,中心最低气压为975 hPa.8月17日12时30分前后台风“启德”的中心于在广东省湛江市沿海登陆,登陆时中心附近最大风力13级(38 m/s),中心最低气压为968 hPa.17日21时30分前后台风“启德”在中越边境交界处沿海再次登陆,18日开始减弱并逐渐消散,台风“启德”引起中国南部大部分地区强降雨天气,在广东沿岸形成了明显的风暴增水过程,并造成洪涝等灾害,损失严重.

2.2 计算方案设置

针对台风“启德”,本文在敏感性分析的基础上,确定了WRF模式参数取值如下:水平方向分别采用15和5 km格距的网格进行双向嵌套(图3);垂向分层取为35层;顶部最大压强推荐为2000 Pa;微物理过程采用WSM6参数化方案;积云对流采用Kain-Fritsch方案;边界层采用YSU方案.时间步长取60 s,计算从2012年8月15日00时开始,到2012年8月18日06时止,计算78 h,包括台风“启德”影响南中国海海域的全过程.

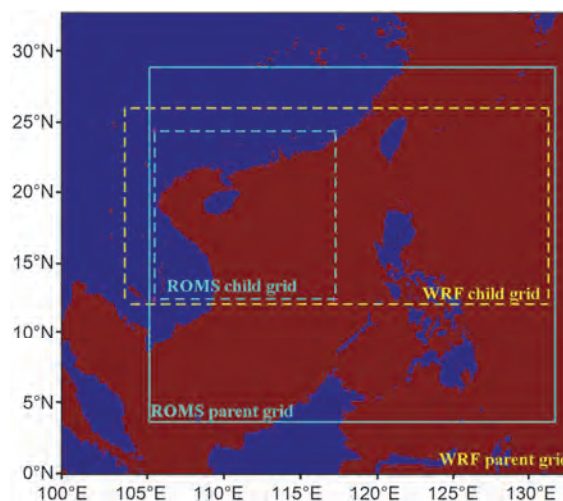


图3 (网络版彩色)WRF-ROMS耦合模型双层嵌套网格

Figure 3 (Color online) Nesting domain of the coupled WRF-ROMS model

大气模型WRF的初边条件均取自NCEP/NCAR的全球预报模型(global forecast system, GFS)提供的历史再分析数据FNL.美国环境预报中心NCEP/NCAR提供的历史再分析数据FNL为全球数据,采用GRIB格式,包含了1000 Pa~10 hPa的26个非均匀分布的气压层与地面层数据,时间范围为1999年8月开始更新至今,该数据时间精度为6 h,即每日包含00时、06时、12时和18时等4个时刻的数据,数据的空间分辨率为 $1.0^{\circ}\times 1.0^{\circ}$.WRF模型设置为大模型每隔180 min输出一次结果,小模型间隔60 min输出结果.

海洋模型ROMS采用双层耦合嵌套网格进行计算,如图3所示,大模型与小模型网格格距大小为1:3,分别为 $9\text{ km}\times 9\text{ km}$, $3\text{ km}\times 3\text{ km}$,大模型包含整个南中国海及附近海域,小模型主要包括南中国海中部海域.双层网格的垂向分层均为16层,垂向坐标拉伸参数 $\text{THETA}_\text{S}=5.0$, $\text{THETA}_\text{B}=0.4$,在表层和底层都进行了加密处理.

根据美国国家海洋大气局(NOAA)下属的国家地球物理数据中心(NGDC)提供的全球高精度的海岸线数据GSHHS,该资料集提供了全球1:250000的海岸线数据.根据该资料获取了近中国海地区的岸线数据,在此基础上得到了本文模型中需要的南中国海海域岸线数据,该资料集是由美国国防制图局(DMA)制作的标准产品,在各类研究中都得到了广泛的应用.

模型所用的水深数据来自NGDC提供的ETOPO1

数据, 该数据的网格分辨率为 $1'$, 覆盖范围为 $90^{\circ}\text{S}\sim 90^{\circ}\text{N}$, $180^{\circ}\text{W}\sim 180^{\circ}\text{E}$, 根据该资料获取了本文模型中需要的南中国海海域水深数据, 如图S2所示. 在ROMS模型中, 如图3所示, 大模型的东、西、南、北4个侧面均设置为开边界条件, 由从俄勒冈州立大学潮汐预报模式(OSU Tidal Inversion Software, OTIS)中的2016近中国海及印度尼西亚海域模块得到的M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1八个主要分潮的调和常数, 根据ROMS模型的网格划分, 将模型中的开边界点的值利用俄勒冈州立大学潮汐预报模式(OSU Tidal Prediction Software, OTPS, <http://volkov.oce.orst.edu/tides/>)进行插值处理, 再通过`t_predic`函数得到水位预报值, 利用得到的水位值作为模式的开边界驱动. 小模型的西侧和北侧两个边界设为闭边界, 南侧和东侧的边界条件由大模型提供.

WRF-ROMS耦合模型从2012年8月15日00时(UTC)开始计算, 到2012年8月18日06时止, 共计78 h, 包括台风“启德”进入南中国海到登陆、离开的整个过程, 计算时间反映了整个风暴增水过程. 大气模型WRF时间步长设为60 s, 海洋模型ROMS双层网格时间步长分别设置为60和20 s; 耦合器MCT同步时间步长设置为600 s.

2.3 模式验证

台风的风场数据主要可以通过诊断分析方法、经验模型方法和数值模拟等方法计算获取. 在MM5, WRF等中尺度大气模式发展成熟之前, 采用诊断分析方法和经验模型方法, 是获取台风风场的主要研究方式. 其中, 采用台风模型或台风模型与数值预报产品相结合的方法来生成台风风场是工程运用最为广泛的方法. 为进一步说明中尺度气象模式WRF模拟得到的台风过程中风场结构及分布的合理性, 针对台风“启德”, 将基于WRF模式计算得到的风场数据与基于数值预报产品得到的风场数据、利用数值预报产品与台风模型合成的风场数据进行对比, 分析中尺度气象模式WRF的优势.

将计算得到的台风路径及气压与观测到的最佳路径、风速及气压进行对比, 分别如图S3~S5所示. 通过收集到的台风“启德”期间测站点的实测风速数据与WRF模拟结果、台风理论模型合成风数据进行对比, 如图S6所示. 从各种风场数据与实测数据的接近程度看, WRF模型能够合理地描述台风“启德”过

程, 相对经验公式和理论模型具有更高的模拟精度, 可为近岸波浪场、风暴潮的模拟提供高精度风速和动力强迫, 为台风浪和风暴潮的模拟提供了基础条件.

3 数值模拟结果分析

3.1 台风风场、气压场模拟结果

图4给出了台风“启德”影响期间, WRF-ROMS实时耦合模拟得到的10 m风速矢量场及气压场历时变化结果, 记录了“启德”从菲律宾北部移动至南中国海区域, 最终在广东登陆的过程中的风场、气压场变化过程.

从图4中可以看出, “启德”在移动到南中国海区域内后, 气旋式风场有显著增强的过程, 并始终维持30 m/s以上的风速, 在广东登陆后, 风场强度急剧衰减. 从风场的空间分布来看, 台风中心右侧的风速明显大于左侧的风速, 即台风风场具有较强的“右偏性”, 这是由于受到科氏力的影响所致.

台风“启德”从菲律宾北部进入南中国海区域后, 在向西北方向移动的过程中, 台风中心气压明显减小, 8月16日06时, 台风中心气压已小于980 hPa. 在台风移动的过程中, 台风中心气压持续降低, 最低小于970 hPa, 此时台风中心到达广东沿海, 台风中心气压在登陆后开始迅速回升. 从图中可以发现, 台风风场中心与气压场中心基本吻合, 路径右侧气压梯度大于左侧, 气压场沿台风路径的分布相对比较对称.

3.2 风暴增水时空分布特征分析

图5给出了WRF-ROMS耦合方案中台风“启德”影响下南中国海北部的风暴增水结果. 从图中可以看出, 自2012年8月16日00时开始, 在台风“启德”影响下, 南中国海北部区域开始产生较明显的增水过程, 并随着台风的发展, 增水水位随之增加, 在珠江口西南沿岸, 最大风暴增水达1.5 m左右. 与前文中风场的空间不对称性分布规律相似, 台风路径右侧增水大于左侧增水, 风暴增水在空间上同样呈现出“右偏性”的不对称性分布特征.

为进一步分析台风“启德”影响下的风暴增水过程, 在台风路径附近及珠江河口附近选取了5个特征位置, 如图6(a)所示, 记录其风暴增水变化过程, 如图6(b)~(f). 图中反映了各特征位置的风暴增水和台风气压随时间的变化曲线. 从图中可以发现, 在深水

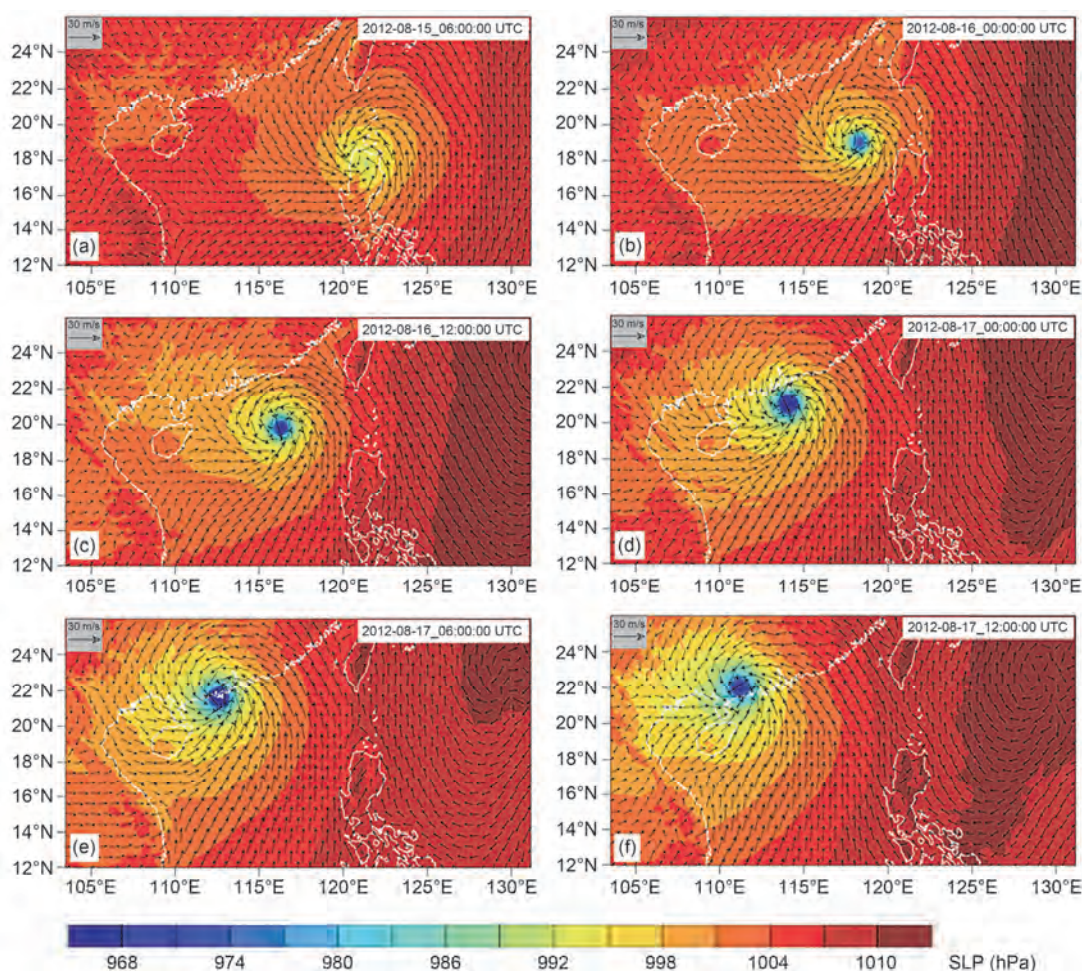


图4 (网络版彩色)WRF-ROMS耦合模式下台风“启德”风场、气压场过程(a)~(f)

Figure 4 (Color online) Simulated wind field and pressure field generated by the typhoon *Kai-tak* based on the coupled model (a)~(f)

区(P3, P4和P5), 各特征位置处的增水极大值时刻与中心气压的极小值时刻基本同步, 没有表现出时间上的滞后性. 而在浅水区(P1和P2), 风暴增水的极大值与气压极值之间存在时间差, 即近岸风暴增水对台风的响应在时间上存在滞后性. 其原因可能是由于在近岸地区, 台风登陆后, 在大风过程的持续影响下, 风暴潮在近岸浅水区形成的风暴增水(近岸壅水)可从台风中持续获取能量, 从而导致增水的持续上升, 因此近岸地区风暴增水过程相对台风气压过程存在滞后.

3.3 流场时空变化分析

台风在海面上方形成强烈的旋转风场, 在海表产生了明显的风生流, 图7给出了台风“启德”影响期间南中国海海水表层流场矢量图. 从图中可以看出,

受台风“启德”影响, 南中国海表层局部水流状态发生了显著变化: 在海洋表面, 台风路径的左侧形成较明显的低流速阻流带(图7(b)~(d)中方框), 流速小于0.2 m/s, 局部流速甚至更小; 在阻流带两侧产生较大的水平流速, 方向相反, 其中右侧流速比左侧约大一倍上, 右侧最大流速达2.0 m/s, 产生于台风右后侧尾部区域, 左侧流速最大处约为0.8 m/s, 局部水流阻流带为分界线向两侧分流, 并在台风中心附近形成一个明显的逆时针环流场.

从图7(a)~(d)中可以发现, 在环形流场的右侧流速明显强于左侧流速, 即风生流场在空间上具有“右偏性”的不对称分布特征. 图7(e)和(f)给出了对应时刻的气压分布, 图中圆点为台风中心位置, 三角形代表风生流场的中心, 从图中可以看出, 流场中心位于台风中心的右后方, 流速最大位置亦位于台风中心位置的右

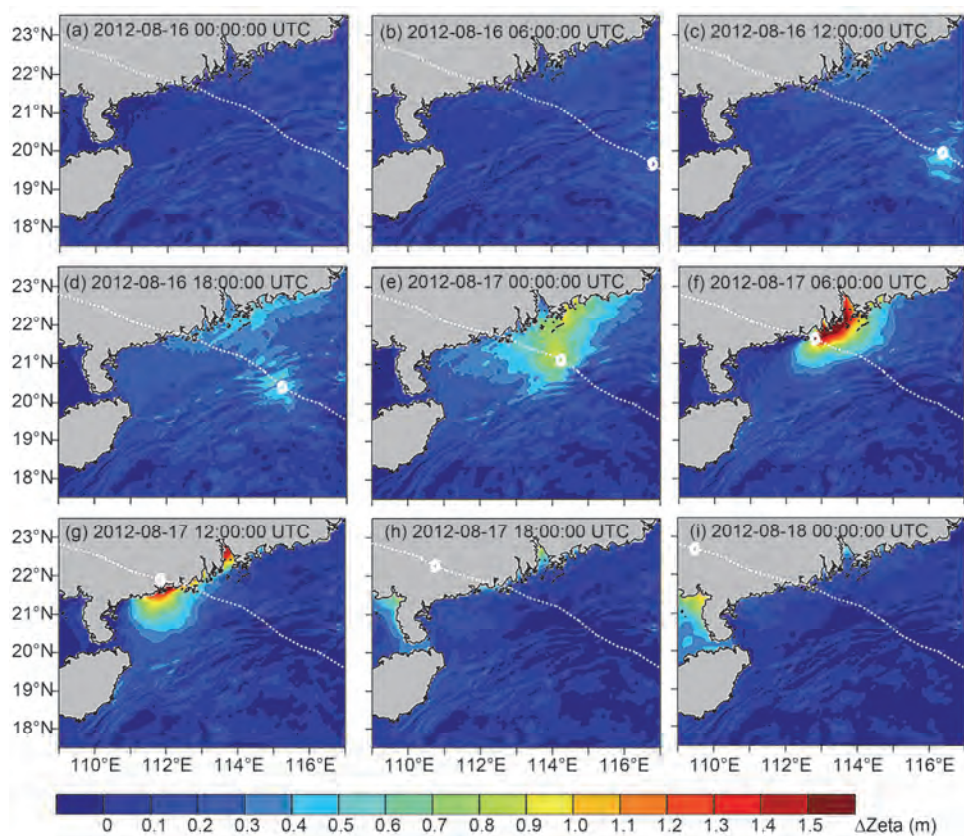


图 5 (网络版彩色)台风“启德”影响下增水过程(a)~(i)(初始时刻: 2012-08-15 00:00:00 UTC)

Figure 5 (Color online) Simulation results of storm surge generated by the typhoon Kai-tak (a)~(i) (start at: 2012-08-15 00:00:00 UTC)

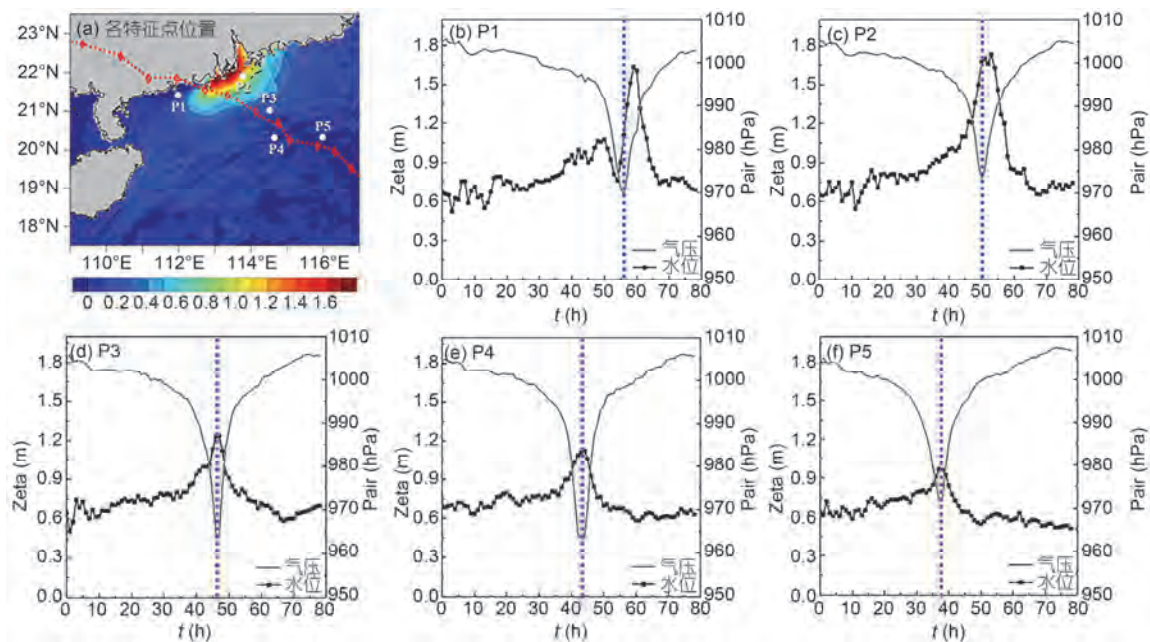


图 6 (网络版彩色)各特征位置水位和气压随时间变化关系. (a) 各特征点位置; (b)~(f) 不同位置的气压、水位曲线(对照时刻: 2012-08-15 00:00:00 UTC)

Figure 6 (Color online) Results of water level and pressure in five selected locations during storm surge. (a) Typhoon track and locations of characteristic points; (b)~(f) storm surge and pressure in each location (start at: 2012-08-15 00:00:00 UTC)

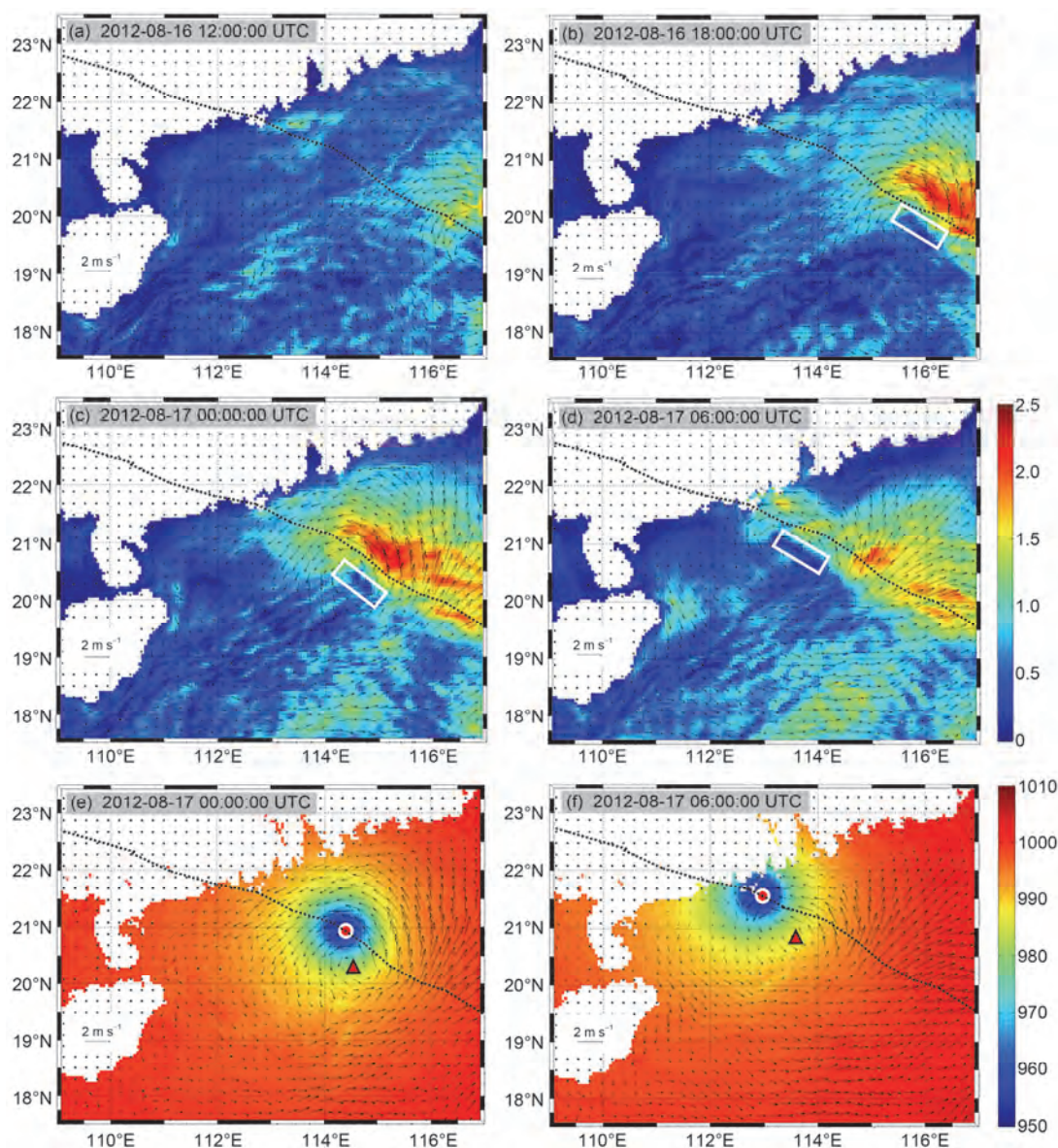


图7 (网络版彩色)台风“启德”影响下水流运动矢量。(a)~(d) 背景色为流速(m/s); (e)~(f) 背景色为气压(hPa)

Figure 7 (Color online) Flow field of wind-driven current caused by Typhoon *Kai-tak*. (a)~(d) Color is current velocity (m/s); (e)~(f) color is sea level pressure (hPa)

后方, 因此, 风生流场在时间上具有较明显的滞后性.

4 结论

利用NGDC的高精度海岸线数据GSHHS和全球地形起伏模型ETOPO1的地形数据, 基于区域海洋模型ROMS建立了南中国海海域潮流模拟数值模型. 基于MCT耦合器, 将中尺度大气模型WRF和区域海洋模型ROMS进行耦合, 建立了南中国海地区大气-海洋耦合模型.

通过MCT耦合器将WRF计算得到的海面剪切应力、净热通量、感热通量、潜热通量、短波辐射通量、长波辐射通量等传递给ROMS; 而海洋模式ROMS将海表温度SST反馈给大气模型WRF, 从而实现大气、海洋模式的实时双向耦合.

基于建立的南中国海WRF-ROMS实时双向耦合模型, 针对台风“启德”, 开展了风暴潮模拟研究, 计算了台风影响下的南中国海大气运动特征和水流运动特征, 对海气相互作用关系进行分析. 由于受科氏

力的影响,台风风场、风暴增水和风生流场在空间上具有较强的“右偏性”不对称分布特征.在深水区的风暴增水对台风的响应没有表现出时间上的滞后性;而近岸风暴增水对台风的响应在时间上存在滞后性,在近岸地区风暴潮预警中应注意防范.风生流场在时间上具有明显的滞后性.

致谢 台风路径、气压、风速等资料来自于中国气象局热带气旋资料中心(<http://tcdata.typhoon.org.cn/>);大气模型WRF的初始边界条件取自美国环境预报中心NCEP/NCAR的全球预报模型提供的历史再分析数据FNL(<https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>);海洋模型调和常数来自Oregon State University的潮汐数据反演模式OTIS(<http://volkov.oce.orst.edu/tides/region.html>);岸线和水深数据均由美国国家地球物理数据中心(NGDC)提供,岸线数据为全球高精度的海岸线数据GSHHS(<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines/>),水深资料为ETOPO1数据(<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/>);美国纽约市立大学Ke Qu博士帮助润色了英文摘要,在此一并致谢.

参考文献

- Liu D, Pang L, Xie B. Typhoon disaster in China: Prediction, prevention, and mitigation. *Nat Hazards*, 2009, 49: 421–436
- Wu Z Y. Coupled atmosphere-wave-ocean model and its application on the simulation in storm surge in the South China Sea (in Chinese). Doctor Dissertation. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2017 [伍志元. 大气-海浪-海洋耦合模型研究及其在南中国海风暴潮模拟中的应用. 博士学位论文. 长沙: 长沙理工大学, 2017]
- Ge Z, Dai Z, Pang W, et al. LIDAR-based detection of the post-typhoon recovery of a meso-macro-tidal beach in the Beibu Gulf, China. *Mar Geol*, 2017, 391: 127–143
- Jelesnianski C P, Chen J, Shaffer W A. SLOSH: Sea, lake, and overland surges from hurricanes. Technical Report, National Weather Service, USA, 1992
- Forbes C, Rhome J, Mattocks C, et al. Predicting the storm surge threat of Hurricane Sandy with the National Weather Service SLOSH model. *J Mar Sci Eng*, 2014, 2: 437–476
- Hu K, Chen Q, Wang H. A numerical study of vegetation impact on reducing storm surge by wetlands in a semi-enclosed estuary. *Coast Eng*, 2015, 95: 66–76
- Blumberg A F, Mellor G L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. AGU Fall Meeting, Three-dimensional coastal ocean models, Washington, USA, 1987. 1–16
- Xie L, Pietrafesa L J, Peng M. Incorporation of a mass-conserving inundation scheme into a three dimensional storm surge model. *J Coastal Res*, 2004: 1209–1223
- Li Y, Peng S, Yan J, et al. On improving storm surge forecasting using an adjoint optimal technique. *Ocean Model*, 2013, 72: 185–197
- Di L T, Colle B A, Georgas N, et al. Verification of a multimodel storm surge ensemble around New York City and Long Island for the cool season. *Weather Forecast*, 2011, 26: 922–939
- Blumberg A F, Georgas N, Yin L, et al. Street-scale modeling of storm surge inundation along the New Jersey Hudson river waterfront. *J Atmos Ocean Tech*, 2015, 32: 1486–1497
- Li M, Zhong L, Boicourt W C, et al. Hurricane-induced storm surges, currents and destratification in a semi-enclosed bay. *Geophys Res Lett*, 2006, 33, doi: 10.1029/2005GL024992
- You S H, Lee W J, Moon K S. Comparison of storm surge/tide predictions between a 2-D operational forecast system, the regional tide/storm surge model (RTSM), and the 3-D regional ocean modeling system (ROMS). *Ocean Dynam*, 2010, 60: 443–459
- Sheng Y P, Alymov V, Paramygin V A. Simulation of storm surge, wave, currents, and inundation in the Outer Banks and Chesapeake Bay during Hurricane Isabel in 2003: The importance of waves. *J Geophys Res-Oceans*, 2010, 115, doi: 10.1029/2009JC005402
- Zhang K, Li Y, Liu H, et al. Transition of the coastal and estuarine storm tide model to an operational storm surge forecast model: A case study of the Florida coast. *Weather Forecast*, 2013, 28: 1019–1037
- Zhang Y, Baptista A M. SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. *Ocean Model*, 2008, 21: 71–96
- Rego J L, Li C. Storm surge propagation in Galveston Bay during hurricane Ike. *J Marine Syst*, 2010, 82: 265–279
- Mattocks C, Forbes C. A real-time, event-triggered storm surge forecasting system for the state of North Carolina. *Ocean Model*, 2008, 25: 95–119

- 19 Zheng L S, Yu X P. Interaction between storm surge and astronomical tide in Hangzhou Bay (in Chinese). *J Basic Sci Eng*, 2013, 21: 107–115 [郑立松, 余锡平. 杭州湾内风暴潮与天文潮的耦合效应. *应用基础与工程科学学报*, 2013, 21: 107–115]
- 20 Sebastian A, Proft J, Dietrich J C, et al. Characterizing hurricane storm surge behavior in Galveston Bay using the SWAN+ADCIRC model. *Coast Eng*, 2014, 88: 171–181
- 21 Weisberg R H, Zheng L. Circulation of Tampa Bay driven by buoyancy, tides, and winds, as simulated using a finite volume coastal ocean model. *J Geophys Res-Oceans*, 2006, 111, doi: 10.1029/2005JC003067
- 22 Rego J L, Li C. Nonlinear terms in storm surge predictions: Effect of tide and shelf geometry with case study from Hurricane Rita. *J Geophys Res-Oceans*, 2010, 115, doi: 10.1029/2009JC005285
- 23 Black P G, D'Asaro E A, Sanford T B, et al. Air-sea exchange in hurricanes: Synthesis of observations from the coupled boundary layer air-sea transfer experiment. *Bull Am Meteorol Soc*, 2007, 88: 357–374
- 24 Liu B, Liu H, Xie L, et al. A Coupled atmosphere-wave-ocean modeling system: Simulation of the intensity of an idealized tropical cyclone. *Mon Weather Rev*, 2010, 139: 132–152
- 25 Wang Z, Zhou L, Li Q, et al. Storm surge along the yellow river delta under directional extreme wind conditions. *J Coastal Res*, 2017, 80: 86–91
- 26 Kim K O, Lee H S, Yamashita T, et al. Wave and storm surge simulations for Hurricane Katrina using coupled process based models. *KSCE J Civ Eng*, 2008, 12: 1–8
- 27 Warner J C, Armstrong B, He R, et al. Development of a coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) modeling system. *Ocean Model*, 2010, 35: 230–244
- 28 Zambon J B, He R, Warner J C. Investigation of hurricane Ivan using the coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) model. *Ocean Dyn*, 2014, 64: 1535–1554
- 29 Pattanayak S, Mohanty U C, Rao A D. Simulation of storm surges in the Bay of Bengal using one-way coupling between NMM-WRF and IITD storm surge model. *Mar Geod*, 2016, 39: 376–400
- 30 Lakshmi D D, Murty P L N, Bhaskaran P K, et al. Performance of WRF-ARW winds on computed storm surge using hydrodynamic model for Phailin and Hudhud cyclones. *Ocean Eng*, 2017, 131: 135–148
- 31 Laprise R. The Euler equations of motion with hydrostatic pressure as an independent variable. *Mon Weather Rev*, 1992, 120: 197–207
- 32 Haidvogel D B, Arango H, Budgell W P, et al. Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the Regional Ocean Modeling System. *J Comput Phys*, 2008, 227: 3595–3624
- 33 Craig A P, Jacob R, Kauffman B, et al. CPL6: The new extensible, high performance parallel coupler for the Community Climate System Model. *Int J High Perform C*, 2005, 19: 309–327

补充材料

- 图 S1 2012 年第 13 号台风“启德”运动轨迹
 图 S2 计算区域水深分布图
 图 S3 基于 WRF 模式得到的台风运动轨迹与最佳路径的对比
 图 S4 基于 WRF 模式得到的台风风速与观测值的对比
 图 S5 基于 WRF 模式得到的海面最低气压与实际值的对比
 图 S6 WRF 模式与不同理论模型、经验公式得到的台风风速的对比

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “基于海气耦合模式的南中国海北部风暴潮模拟”

Simulation of the storm surge in the South China Sea based on the coupled sea-air model

Zhiyuan Wu^{1,2,3}, Changbo Jiang^{1,2*}, Bin Deng^{1,2} & Yonggang Cao⁴

¹ School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

² Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China;

³ School for Marine Science and Technology, University of Massachusetts Dartmouth, New Bedford, MA 02744, USA;

⁴ South China Sea Marine Survey and Technology Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China

* Corresponding author, E-mail: jiangcb@csust.edu.cn

Under global warming and climate change, coastal regions, including China, are increasingly vulnerable to typhoon damages. With typhoon gales, heavy rainfall, and storm surge, typhoons cause great economic losses and casualties to the coastal communities of China every year. Therefore, it is of great academic and social values to study the generation mechanism and movement mode of typhoons. However, accurately predicting the potential storm surge that a typhoon in growing can cause is a very challenging task. During the evolution of typhoons, the ocean-atmosphere (sea-air) interface has strong exchange of mass and energy. At the same time, various physical fields, such as wind, pressure, flow and wave fields interact strongly with each other. To accurately simulate the typhoons and the corresponding storm surge, the air-sea interaction is not to be neglected. Hence, it is very important to establish a reliable prediction model of sea-air coupling. In this paper, we established a fully two-way coupled sea-air model for South China Sea (SCS) by applying the mesoscale atmospheric model named WRF, the regional ocean model named ROMS, and the model coupling toolkit (MCT). In this complicated coupled sea-air model, WRF transfers the sea surface stress, net heat flux, sensible heat flux, latent heat flux, shortwave radiation flux, and longwave radiation flux to ROMS through MCT coupler. In turn, ROMS transfers sea surface temperature (SST) to WRF. By applying the fully coupled WRF-ROMS model, the storm surge induced by *Typhoon Kai-tak*, 2012 in the SCS is simulated and analyzed in detail. The computational capability and reliability of the coupled WRF-ROMS model are well verified by comparing the simulated typhoon track, and corresponding intensity and strength with the observed values in the field. The verification data show that the two-way coupled model has better accuracy and advantage in simulating typhoon dynamics than the one-way coupled model. Subsequently, the validated two-way coupled model is used to systematically study the atmospheric dynamics and the storm surge induced by typhoons in SCS. By analyzing the numerical simulation results, the wind and pressure field, as well as the spatial and temporal distribution characteristics of storm surge and wind-induced current, are obtained. We found that the spatial distribution of the wind, storm surge and flow fields caused by *Typhoon Kai-tak* is asymmetrical. The intensity of the typhoon on the right side of track is stronger than that on the left. Moreover, compared with the temporal evolution of typhoon, there is some delay in the evolution of the storm surge and the wind-induced current in the near shore.

storm surge, numerical simulation, coupled sea-air model, WRF, ROMS, the South China Sea

doi: 10.1360/N972018-00806