第 25 卷第 1 期
2020 年 1 月

气 候 与 环 境 研 究
Climatic and Environmental Research

Vol. 25 No. 1
Jan. 2020

陈飞, 林一骅, 闻斌, 等. 2020. 局地海啸对我国南海影响的数值模拟分析 [J]. 气候与环境研究, 25(1): 32−44. CHEN Fei, LIN Yihua, WEN Bin, et al. 2020. Numerical Simulation Analysis of the Influence of Local Tsunami on South China Sea [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25(1): 32−44. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18083

局地海啸对我国南海影响的数值模拟分析

陈飞[1] 林一骅[2,3] 闻斌[4] 郑沛楠[1] 赵艳玲[1] 薛彦广[4]

1 31010 部队，北京 100081
2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室，北京 100029
3 中国科学院大学地球与行星科学学院，北京 100049
4 61741 部队，北京 100096

摘 要 选取了一组代表性的南海海啸源，并分别使用COMCOT海啸模式，以数值模拟的方法对南海局地海啸源进行了数值模拟，从海啸的传播影响时间、波高和能量分布等角度，分析了如果南海发生地震海啸，不同海啸源将会对我国南海沿岸地区和南海岛礁造成的影响。通过敏感性试验证实，海啸波的强度受地震震级变化影响较大，因此，如果南海发生强震引发局地海啸，不同海啸源将会给我国南海周边及岛礁等不同区域造成严重损害。

关键词 海啸 南海 数值模拟

文章编号 1006-9585(2020)01-0032-13 **中图分类号** P731.25 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18083

Numerical Simulation Analysis of the Influence of Local Tsunami on South China Sea

CHEN Fei[1], LIN Yihua[2,3], WEN Bin[4], ZHENG Peinan[1], ZHAO Yanling[1], and XUE Yanguang[4]

1 *Troops* 31010, *Beijing* 100081
2 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Science*, *Beijing* 100029
3 *College of Earth and Planetary Sciences*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049
4 *Troops* 61741, *Beijing* 100096

Abstract On the basis of the topography and historical seismic information of the South China Sea, many scholars at home, and abroad have investigated the source area of possible earthquakes and tsunamis on the South China Sea. In this study, on the basis of previous research results, the authors analyze the areas that may be a tsunami source, select a group of typical tsunami sources, simulate these tsunami sources with the COMCOT model, and assess the damage to coastal areas and reefs of the South China Sea from in terms of tsunami propagation time, wave height, and energy distribution. The sensitivity test confirmed that the intensity of the tsunami wave is considerably influenced by the magnitude of the earthquake. If a local tsunami is triggered by a strong earthquake, then it will cause considerable damage to different parts of the coastal areas and reefs of the South China Sea.

Keywords Tsunami, South China Sea, Numerical simulation

收稿日期 2018-06-27；**网络预出版日期** 2019-10-08
作者简介 陈飞，男，1984年出生，硕士，工程师，主要从事海洋数值模拟方向的研究。E-mail: placgp001@163.com
通讯作者 林一骅，E-mail: linyh@mail.iap.ac.cn
资助项目 国家自然科学基金41575059
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41575059)

1 引言

极端性灾害对人类威胁极大，地球上每年极端性灾害事件频发(陈洪滨和刁丽军, 2004; 陈洪滨和范学花, 2007, 2008, 2009, 2011, 2012)，其中海啸便是影响滨海地区的海洋性灾害，它主要由海底地震、海底火山爆发、山体滑坡、海岸山崩等原因引发，具有超长波长，它的移速与水深成正比，水深越深传播越快，在深海中时速可达几百千米。当海啸传至近岸浅水区域时，波速随水深减小，受非线性和底摩擦作用，波高迅速增大(陈飞等, 2010)，并形成水墙，水墙有时可达十几米，可以越过堤坝摧毁滨海建筑设施，从而造成灾难性破坏。2004年12月16日的印度洋大海啸，由发生在印尼苏门答腊以北的Mw9.3级海底地震引发，为史上第二强震，这次海啸造成了印度洋周边国家，包括肯尼亚、索马里、毛里求斯、马尔代夫、印度、斯里兰卡、孟加拉国、泰国、印尼等众多印度洋沿岸国家或岛国的重大损失，近29.2万人在这次大灾难中丧生，其中印尼为受灾最严重的国家(褚芹芹, 2011)。2011年3月11日05:46（协调世界时），日本本州岛宫城县以东海域发生M_w9.0级地震，并引发了大规模海啸，冲毁了沿岸建筑，福岛核电站受损造成放射性物质泄漏，引发了邻近各国的恐慌，造成日本近2万人死亡，由于地缘关系，我国也受到一定程度的影响(王培涛等, 2012a, 2012b)。

我国南海处于环太平洋地震活动带，该海域海底地震频率高，且具备引发海啸的水深条件，历史上曾发生过多起海啸事件，如1994发生在民都洛岛近海的7.1级地震海啸，造成了78人死亡，8000栋房屋损毁(Imamura et al., 1995)。由于受到中南半岛、印度尼西亚群岛、菲律宾群岛以及琉球群岛、等一系列半岛和岛屿的阻隔，源自印度洋的越洋海啸对南海的影响很小，发生在太平洋的越洋海啸也仅仅会通过吕宋海峡影响我国南海北部地区(王培涛等, 2012a, 2012b)，但是由于距离较远，海啸波抵达南海时强度一般都较弱(潘文亮等, 2014)，且容易提前监测和预警，因此南海地区应主要考虑源于本地的局地海啸的危险性。

由于南海局地海啸对我国沿海该地区威胁程度较高，对该地区的关注也较多。任叶飞等(2015)以马尼拉海沟俯冲区为潜在震源区，研究了水深数据的数据源差异性以及数据自身误差对于地震海啸数值模拟的敏感性，认为在开阔的外海海域，不同数据源之间的水深数据差异对于海啸数值模拟的影响可忽略；水深数据自身误差对于数值模拟的海啸波幅值的影响不明显，但对于其相位则存在一定的影响，目前开放的海洋水深数据对在开阔的外海海域的海啸传播数值模拟是满足要求的。李智广等(2015)采用海啸数值模拟模型，对可能发生在马尼拉海沟一次Mw9.0级地震活动所引起的海啸过程进行了数值模拟，并研究了该海啸传播到海南岛和北部湾的过程及其特点，分析海啸波对这一地区可能造成的影响。研究表明，马尼拉海沟地震引发海啸，对海南岛东南部沿海影响较大，有成灾的可能性；而对广西壮族自治区南部沿海及北部湾地区的影响较弱，一般不会造成大的灾害。刘桦等(2015)针对南海马尼拉海沟断裂带潜在的海啸风险，建立了该海域的基于多浮标观测反演和数值模拟的海啸预警方法，并提出了一种新的快速预警策略．探讨了海啸波导致地磁场异常的理论预报模型，并针对实际海啸过程给出了地磁场异常的时空分布。2004年印度洋海啸之后，国家海洋环境预报中心(赵联大等, 2015)基于海量数据库和GIS技术，开发了南海定量海啸预警系统，可以对潜在海啸进行快速定量化的预警，并利用GIS软件进行预警结果可视化。

2 南海局地海啸源分析

近年来国内外多名学者先后对南海地区潜在的海啸源进行了研究。如杨马陵和魏柏林(2005)通过对南海海底海水深度、地形地貌、地震断裂规模和断裂构造、地震与海啸的分布及活动、震源机制解等角度的分析，认为南海的西部、北部、中部以及南部都不具备引发地震海啸的基本条件，发生地震海啸的概率较小，但南海东缘台湾省南部至菲律宾西部的马尼拉海沟，是南海最有可能发生地震海啸的潜在区域，由于这里是南海亚板块向菲律宾板块的俯冲地带，强震活动频发，沿马尼拉海沟一线，倾滑型或具倾滑分量的走滑型海底地震占很高的比例。Ren et al.(2010)考虑超过200 m水深作为产生地震海啸的必要条件，通过分析发生在我国近海及周边的地震及海啸历史数据，认为台湾省西南和菲律宾西部巴拉望岛的马尼拉海沟沉降带是最有可能发生地震海啸的源区。美国地质调查局（USGS）

海啸源研究组也指出马尼拉海沟沉降带是南海周边地区最具危险性的潜在海啸源区(Liu et al., 2009)，并给出了6个潜在海啸源及对应的可发生的海底地震的参数信息。上述研究都一致认为南海东缘的马尼拉海沟沉降带一线为主要的海啸源区，且该区域的海底地震以倾滑型为主。目前国内对南海局地海啸的研究主要聚焦在对我国大陆沿岸的影响方面(潘文亮等, 2009; 林法玲, 2012)，但由于沿着马尼拉海沟沉降带的走向，不同的海啸源区具有不同的地震走向角参数，因而不同海啸源发生的海啸其能量主体传播方向不同，对南海的主要影响区域也不同。本文在上述工作的基础上，根据纬度位置、走向角方向的不同，选取了3个具有代表性的潜在的海啸源（见表1），在我国大陆沿岸、西沙、南沙等地分别进行网格嵌套，采用数值模拟的方法综合分析了南海不同能量主体传播方向的海啸对南海沿岸及岛礁等不同区域的影响情况。

3 数值模式介绍和检验

3.1 COMCOT数值模式的介绍

本文采用COMCOT(Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model)模式对海啸过程进行数值模拟。COMCOT是康奈尔大学开发的海啸数值模式。该模式能够以海啸源地震参数作为初始条件，模拟海啸发生的初始波高、传播过程以及近岸浅水效应过程等。COMCOT数值模型的控制方程是基于垂向平均的浅水波方程，采用基于多层网格嵌套的有限差分法进行计算，有线性和非线性两种形式，分别应用于深海和浅海不同的情况。球坐标系线性浅水方程组的具体表达式为

$$\frac{\partial\eta}{\partial t}+\frac{1}{R\cos\phi}\left[\frac{\partial P}{\partial\psi}+\frac{\partial}{\partial\phi}\left(\cos\phi Q\right)\right]=-\frac{\partial h}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t}+\frac{gh}{R\cos\phi}\frac{\partial\eta}{\partial\psi}-fQ=0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{gh}{R}\frac{\partial\eta}{\partial\phi}+fP=0, \quad (3)$$

其中，η表示海洋自由表面的扰动，t为时间，P与Q分别表示x和y方向上的体积通量，ψ与ϕ分别表示经度和纬度，R为地球半径，g为重力加速度，h表示静止状态下的水深，f为科里奥力，线性浅水方程组适用于深海区域的模拟。

球坐标系非线性浅水方程组的表达式为

$$\frac{\partial\eta}{\partial t}+\frac{1}{R\cos\phi}\left[\frac{\partial P}{\partial\psi}+\frac{\partial}{\partial\phi}\left(\cos\phi Q\right)\right]=-\frac{\partial h}{\partial t}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t}+\frac{1}{R\cos\phi}\frac{\partial}{\partial\psi}\left(\frac{P^2}{H}\right)+\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial\phi}\left(\frac{PQ}{H}\right)+\frac{gH}{R\cos\phi}\frac{\partial\eta}{\partial\psi}-fQ+F_x=0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{1}{R\cos\phi}\frac{\partial}{\partial\psi}\left(\frac{PQ}{H}\right)+\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial\phi}\left(\frac{Q^2}{H}\right)+\frac{gh}{R}\frac{\partial\eta}{\partial\phi}+fP+F_y=0, \quad (6)$$

$$H=h+\eta, \quad (7)$$

$$F_x=\frac{gn^2}{H^{7/3}}P\left(P^2+Q^2\right)\ /2, \quad (8)$$

$$F_y=\frac{gn^2}{H^{7/3}}Q\left(P^2+Q^2\right)\ /2, \quad (9)$$

其中，H为总水深；F_x和F_y分别表示x和y方向上的海底摩擦，海底摩擦影响着爬高过程和浅水区传播过程的水动力特性；n是曼宁粗糙系数。在近海地区水深较浅，非线性对流项增强，海底摩擦增大，因此近海嵌套区域宜采用非线性浅水方程组模拟，本文在嵌套子模拟区域，采用了非线性浅水方案。

对于倾滑型地震海啸的数值模拟，地震引发的海啸波的初始场，可以采用基于弹性错移理论的Okada(1985)断层模型来计算生成，COMCOT模式当中包含有Okada模型，该断层模型一共需要输入9个初始参数，分别是破裂面中心纬度、破裂面中心经度、破裂面长度、破

表1 选取的3个海啸源区的地震参数

Table 1 Seismic parameters in three source regions of the tsunami

海啸源编号	震中纬度	震中经度	破裂面长度/km	走向角	倾角
E1	20.2°N	120.5°N	160	10°	10°
E2	16.1°N	119.2°N	170	3°	30°
E3	13.7°N	119.6°N	140	320°	22°

裂面宽度、震源深度、平均滑移量、走向角、倾角和滑移角。

3.2 数值模式对南海局地海啸模拟效果的检验

2006年12月26日20:26（北京时间）我国台湾省南部近海（21.818°N，120.534°E）发生了一次里氏7.2级的海底地震，地震引发了轻微的海啸波。本文使用了任叶飞(2007)的研究中关于本次海啸的算例中的海啸波首波观测值，即地震发生后的3小时5分和3小时16分，南澳和东山两站分别监测到了海啸波首波，波高分别为9.5 cm和3.8 cm。本文中使用COMCOT模式对此次海啸过程进行了模拟。地震参数的选取依据为Harvard CMT地震目录，这场地震的震源深度是19.6 km，破裂面位态参数为strike（走向角）=165°，dip（倾角）=30°，slip（滑移角）=−76°。然后根据公式（12）–（13）(Geller, 1976)计算破裂面的长、宽及平均滑移量分别为L（长）=46.05 km，W（宽）=23.025 km，D（平均滑移量）=2.2256 m。

模拟方案设计为3层嵌套，地形数据采用UCSD的ETOPO1数据集，该数据集可以提供全球范围的1’分辨率的地形数据。第一层网格通过插值方法采用2’分辨率，使用线形球坐标系方程组计算；第二层网格采用0.5’分辨率，使用非线形球坐标系方程组计算；第三层网格采用0.125’分辨率，使用非线形球坐标系方程组计算（见表2）。为便于验证，在第三层嵌套子网格中分别在南澳和东山近海各选取了1个参考点，图1中“+”表示2个参考点所在位置，“×”表示此次模拟的地震海啸的震源位置。

表2 检验模拟方案的设计参数

Table 2 Design parameters of the simulation scheme for verification

网格层次	模拟区间	分辨率	模型选择	参考点位置
第一层	（0°～30°N，100°E～130°E）	2’	球坐标系，线形，不考虑底摩擦	–
第二层	（22.5°N～24.5°N 116.5°N～118.7°E）	0.5’	球坐标系，非线形，考虑底摩擦	–
第三层	（23°N～24°N 117°N～118°E）	0.125’	球坐标系，非线形，考虑底摩擦	（23.3°N，117.18°E）（23.4°N，117.53°E）

第一层网格模拟的时间步长为5 s，模拟从海底地震发生时刻起算，模拟总时长时21600 s（6 h）。图2为模拟的此次海啸过程的海啸波最大波高分布图以及第三层网格1 h间隔的0.2 m海啸波传播时间廓线，由于此次海啸波较小，海啸波的最大波幅大约在十几厘米左右，海啸主要影响台湾岛西南沿岸和福建南部至广东北部沿海，嵌套区域正好处于影响较大区域。通过第三层嵌套网格中每小时间隔的海啸波传播时间廓线，可以看到A、B参考点刚好位于海啸波传播至第3至第4小时的时间廓线之间，与中南澳和东山两站监测到了海啸波时间一致。图3为南澳站附近参考点A在模拟中的水位时间变化曲线，该参考点在海啸发生后第12080 s（3小时21分）时刻模拟到0.119 m的海啸波，与南澳站的观测值相比较，相位存在一定偏差，海啸波幅基本一致，导致相位出现偏差的可能原因一是水深数据自身存在误差，在近岸浅水区域对相位模拟则存在一定的影响，二是因为选取的参考点位置与南澳站实际观测位置存在一定的偏差。图4为东山站附近参考点B在模拟中的水位时间变化曲线，该参考点在海啸发生后第11700 s（3小时15分）时

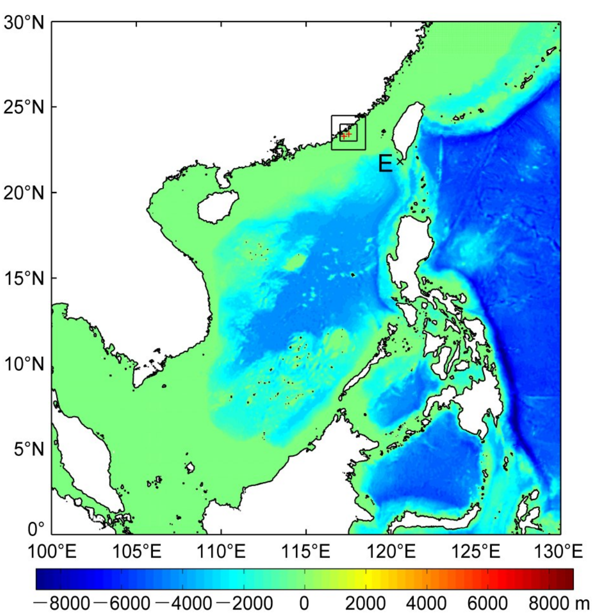

图1 局地海啸验证试验中数值模拟区域（内部矩形为第2、3层嵌套区域，在第3层嵌套网格内部选取了2个参考点，即“+”所标位置，E为海啸源区位置，用“×”表示）

Fig. 1 The numerical simulation area of local tsunami validation test, the inner rectangles denote the nested areas of the second and third layers. Two reference points are located in the third layer nested grid, which is represented by “+,” and E is the position of the tsunami source, which is represented by “×”

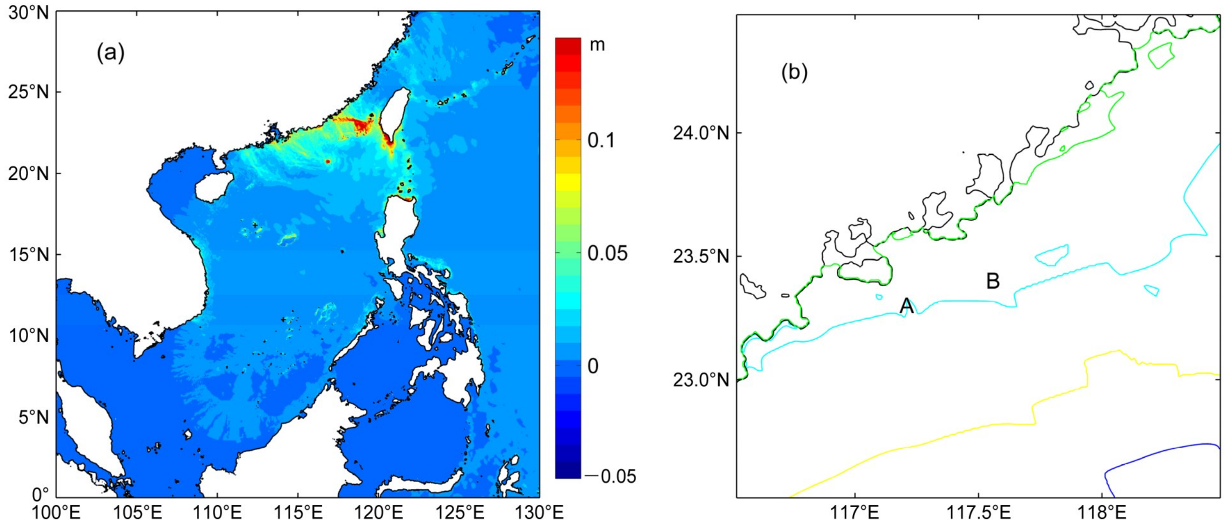

图2　（a）海啸波最大波高分布和（b）第二层网格每小时间隔的海啸波传播时间廓线（浅蓝色线为海啸波传播3 h的廓线，绿色线为海啸波传播4 h的廓线）

Fig. 2　(a) Maximum tsunami wave height distribution and (b) hourly interval tsunami wave propagation time profiles in the second layer embedded area (the wathet lines denote the profile after the tsunami wave propagated for 3 h and the green lines denote the profile after the tsunami wave propagated for 4 h)

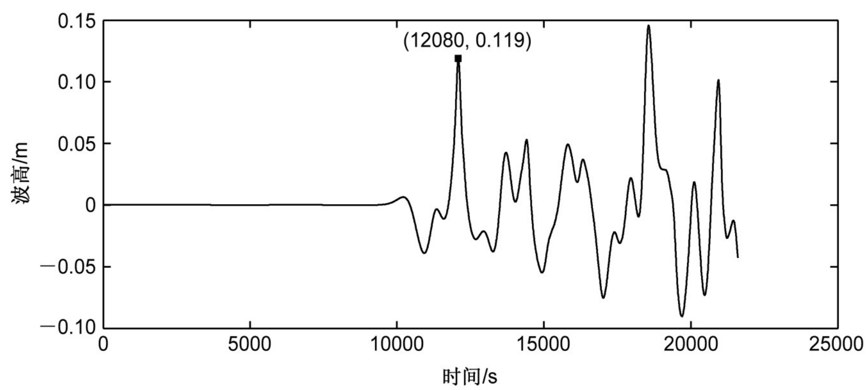

图3　南澳站附近参考点在模拟中的水位时间变化

Fig. 3　Water level time variation curve of the simulation at the reference point near Nanao station

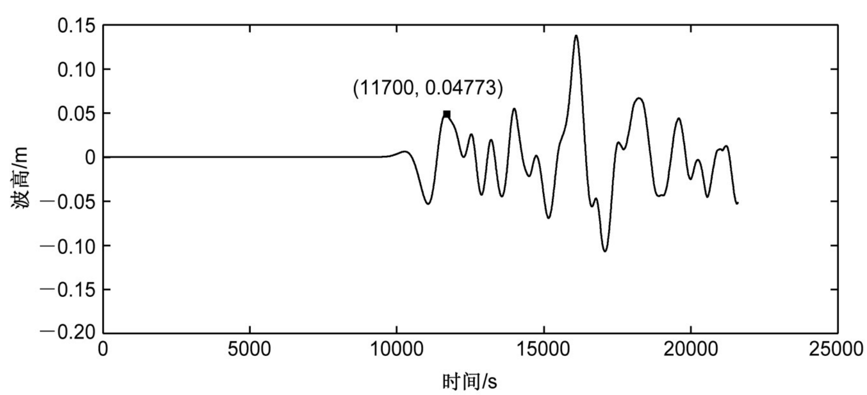

图4　同图3，但为东山站

Fig. 4　Same as Fig. 3, but for Dongshan station

刻模拟到0.048 m的海啸波，与东山站的观测值相比较，相位和海啸波幅都基本一致。总体来说，此次海啸过程的模拟与实况符合较好，说明COMCOT模式能够很好地模拟发生在南海的局地海啸过程，可以应用该模式对南海的潜在海啸源区的假想海啸事件进行影响分析实验。

4 海啸源区相关地震参数的确定及模拟方案设计

美国地质调查局（USGS）海啸源研究组的研究中提出的海啸源地震信息数据中包含了走向角、倾角、震源中心位置以及破裂面长度等信息(Liu et al., 2009)。本文根据纬度位置和走向角，选取了其中3组参数用于数值模拟试验（见表1），但是仅有这些数据是不能够满足COMCOT模式的初始条件要求的，还需要进一步确定另外4个初始参数，即破裂面宽度、震源深度、平均滑移量和滑移角等。滑移角影响海床形变的升降幅度，本次模拟试验应考虑最大影响，在3组数据中滑移角值均取90°，震源深度根据历史地震纪录取经验值15 km，破裂面宽度的获取参考了Wells and Coppersmith(1994)给出的关于地震震级M_w的经验公式为

$$M_w = a + b\lg L\,, \tag{10}$$

$$\lg W = a + bM_w\,, \tag{11}$$

$$M_0 = \mu DLW\,, \tag{12}$$

$$M_w = \frac{2}{3}\lg M_0 - 10.7\,. \tag{13}$$

其中，L为破裂面长度；W为破裂面宽度，取均值35 km；D为平均滑移量；a、b分别为参考系数。平均滑移量的值可通过公式（12）–（13）获取(Geller, 1976; Chu and Zhuang, 2016)。μ为介质的刚性系数，一般取值3×10^{10}～5×10^{10} N/m^{2}之间，M_0为地震矩。这样就得到了其余地震参数的值（见表3），通过这些参数构建海啸波的初始场，可以对海啸的整个发生和传播过程进行模拟。数值模拟区域范围为（0°～30°N）、（100°E～130°E）（见图5），模拟使用了3层嵌套网格（见表4）分别用于精细化模拟大陆近岸以及西沙和南沙的部分区域，地形数据采用UCSD的ETOPO1数据集，该数据集可以提供全球范围的1’分辨率的地形数据。第一层网格通过插值方法采用2’分辨率，使用线形球坐标系方程组计算；第二层网格采用0.5’分辨率，使用非线形球坐标系方程组计算；第三层网格采用0.125’分辨率，使用非线形球坐标系方程组计算。为便于对比分析，在第三层嵌套子网格中分别选取了3个参考点，图5中“+”表示，参考点的位置都距离陆地较近且水深较浅，水深值均接近10 m。图5中的“×”表示用于模拟的3个海啸源的位置，数值模拟分析中将分别对这三个海啸源进行模拟。

表3　通过分析和计算获得的地震参数

Table 3　Seismic parameters obtained by analysis and calculation

海啸源	震级	破裂面宽度/km	滑移角	平均滑移量/m	震源深度/km
E1	8.0447	35	90°	6.68	15
E2	8.0448	35	90°	6.29	15
E3	8.0445	35	90°	7.63	15

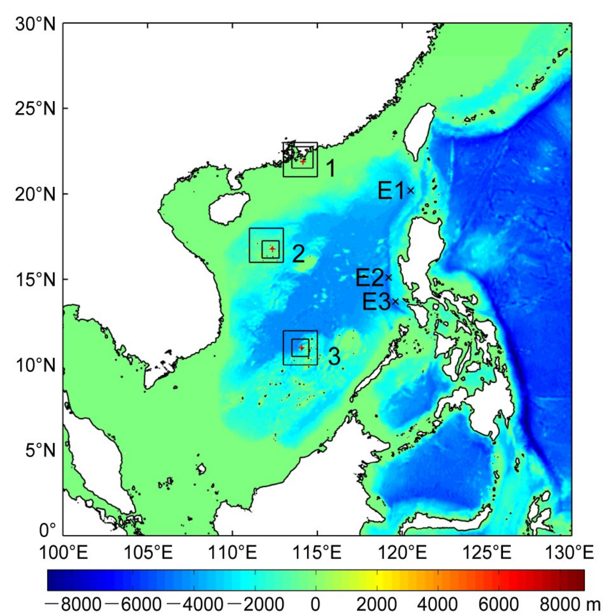

图5　假想海啸过程试验的数值模拟区域（内部矩形为第2、3层嵌套区域，在第三层嵌套网格内部各选取了一个参考点，即“+”所标位置，E1、E2、E3为3个假想海啸源区位置，用“×”表示）

Fig. 5 The numerical simulation area of the hypothetical tsunami process test, the inner rectangles denote the second and third layer nested areas (one reference point is selected within every third layer nested grid, which is represented by “+” and E1, E2, and E3 are the three hypothetical tsunami source areas, which are represented by “×”)

表4 模拟方案设计参数

Table 4 Design parameters of the simulation scheme

网格层次	模拟区间	分辨率	模型选择	参考点编号及位置
第一层	（0°～30°N，100°E～130°E）	2’	球坐标系，线形，不考虑底摩擦	–
第二层	（21°N～23°N，113°E～115°E）	0.5’	球坐标系，非线形，考虑底摩擦	–
第二层	（16°N～18°N，111°E～113°E）	0.5’	球坐标系，非线形，考虑底摩擦	–
第二层	（10°N～12°N，113°E～115°E）	0.5’	球坐标系，非线形，考虑底摩擦	–
第三层	（21.5°N～22.75°N，113.5°E～114.75°E）	0.125’	球坐标系，非线形，考虑底摩擦	1，（22.2500°N，114.40°E）
第三层	（16.25°N～17.25°N，111.75°E～112.75°E）	0.125’	球坐标系，非线形，考虑底摩擦	2，（16.8000°N，112.35°E）
第三层	（10.5°N～11.5°N，113.5°E～114.5°E）	0.125’	球坐标系，非线形，考虑底摩擦	3，（10.9833°N，114.10°E）

5 海啸源区假想海啸过程模拟及影响分析

选取表1、表3中3个海啸源区的地震参数信息，使用相同的模拟区域和参数方案，通过COMCOT模式分别对3个海啸源区可能发生的地震海啸进行数值模拟，模拟时长设定为36000 s，第一层网格时间步长为5 s，具体模拟结果分析如下：

E1海啸源位于吕宋岛的西北方向的马尼拉海沟，距离我国沿岸和台湾省较近，模拟试验结果表明，海啸的能量主体分为西北、东南两个方向（见图6a），一是向我国广东和福建沿海一线传播，部分能量会影响台湾省西南海岸地区，此外海南岛东部沿岸和西沙也有较强的能量传播影响；二是经过吕宋海峡传入外海，可以影响台湾省东部沿海，部分能量可以经过第一岛链，传入东海，由台湾省海峡直接传入东海的能量较少，时间也较慢。海啸波会在1 h之内抵达台湾省西南海岸，1～2 h内抵达西沙和南沙，2～3 h内抵达海南岛东部沿岸和大陆东南沿岸的香港至厦门一带，3～4 h内，整个广东和福建沿岸都将受到海啸波的影响（见图6b）。我国大陆沿岸嵌套区域内最大海啸波波高约在2.0 m左右，西沙附近岛屿嵌套区域内最大海啸波波高约在1.0 m左右，南沙附近岛屿嵌套区域内最大海啸波波高约在0.3 m左右（见图7）。

E2海啸源位于菲律宾以西的马尼拉海沟中段，模拟试验结果表明，海啸的能量传播主体分为东西两个方向，向东直接袭击菲律宾中西部沿海地区，对该地区所受的影响最大；向西越过中沙、西沙等地，抵达越南东海岸大部分地区；由于受到中沙群岛的阻挡，部分能量传播影响海南、广福建沿海直至台湾省等地（见图6c）。海啸波会在1～2 h内影响西沙、南沙以及台湾省，2～3 h内抵达海南岛东部沿岸，3～4 h内影响至整个广东和福建沿岸（见图6d）。我国大陆沿岸嵌套区域内最大海啸波波高约在0.5 m左右，西沙附近岛屿嵌套区域内最大海啸波波高约在1.3 m左右，南沙附近岛屿嵌套区域内最大海啸波波高约在0.8 m左右（见图8）。

E3海啸源位于菲律宾以西的马尼拉海沟南段，模拟试验结果表明，海啸的能量主体分为东北、西南两个方向，东北向直接袭击菲律宾中西部沿海地区；西南向主要影响菲律宾西南部沿海和南沙，少部分能量传播影响至越南东岸、西沙，海南、广东福建沿海和台湾省等地也有一定影响，E3海啸源发生的海啸能量传播主体对于南沙的影响最为显著（见图6e）。海啸波会在1～2 h内影响西沙、南沙、台湾省西南沿海，2～3 h内抵达海南岛东部沿岸，3～4 h内抵达大陆沿岸的香港至厦门一带，4～5 h内，影响整个广东和福建沿岸（见图6f）。我国大陆沿岸嵌套区域内最大海啸波波高约在0.5 m左右，西沙附近岛屿嵌套区域内最大海啸波波高约在1.0 m左右，南沙附近岛屿嵌套区域内最大海啸波波高约在1.5 m左右（见图9）。

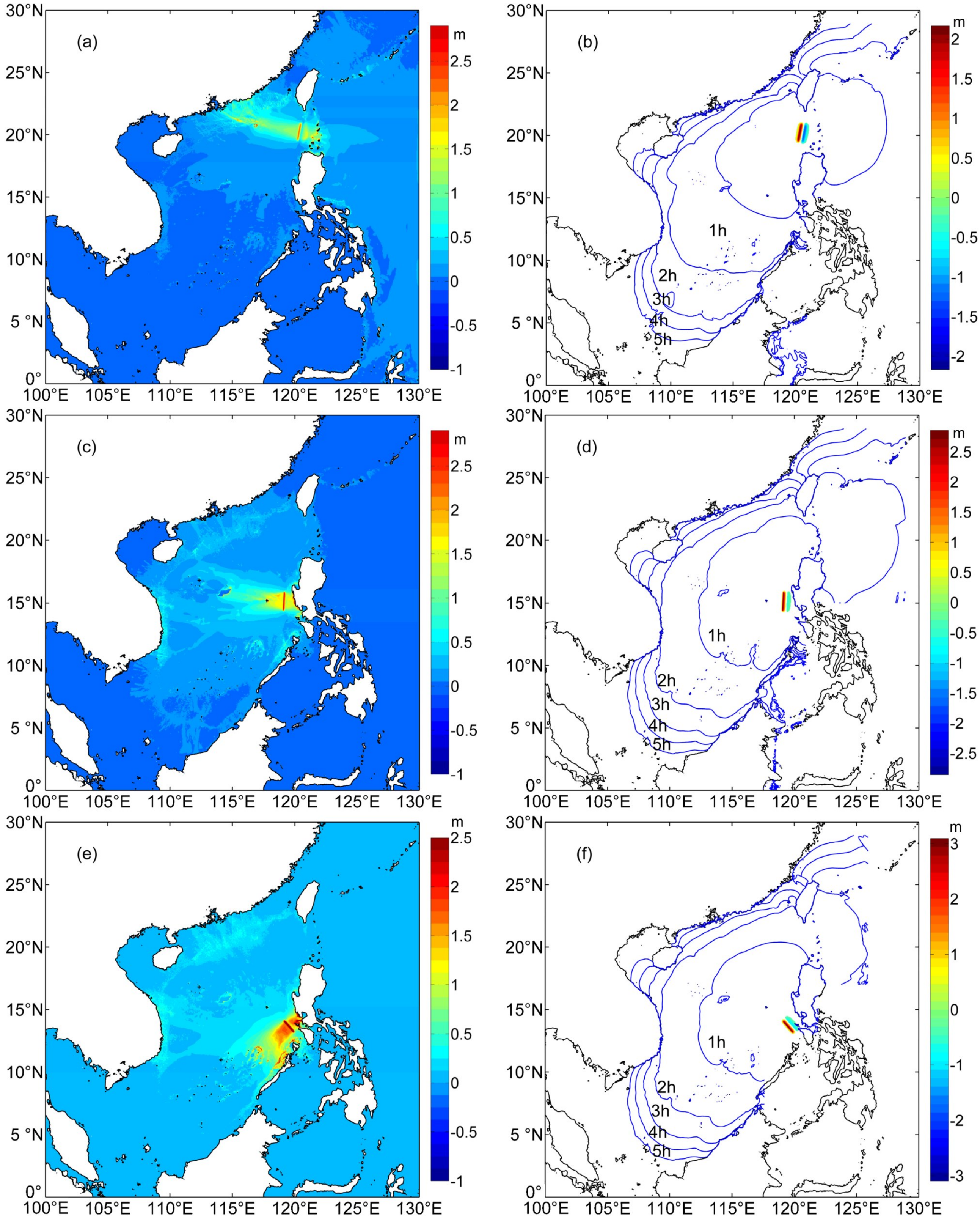

图6　模拟的海啸源区（a）E1、（c）E2、（e）E3的海啸波最大波高分布；（b）、（d）、（f）分别为模拟的E1、E2、E3三个海啸源每小时间隔的海啸波传播时间廓线（蓝线）以及各海啸源对应的海啸波的初始波高（阴影）

Fig. 6　Maximum tsunami wave height distributions of the (a) E1, (c) E2, and (e) E3 tsunami source area; (b), (d), and (f) hourly interval tsunami wave propagation time profiles (blue lines) including the initial wave height (shadings) of tsunami waves of the E1−E3 tsunami source areas

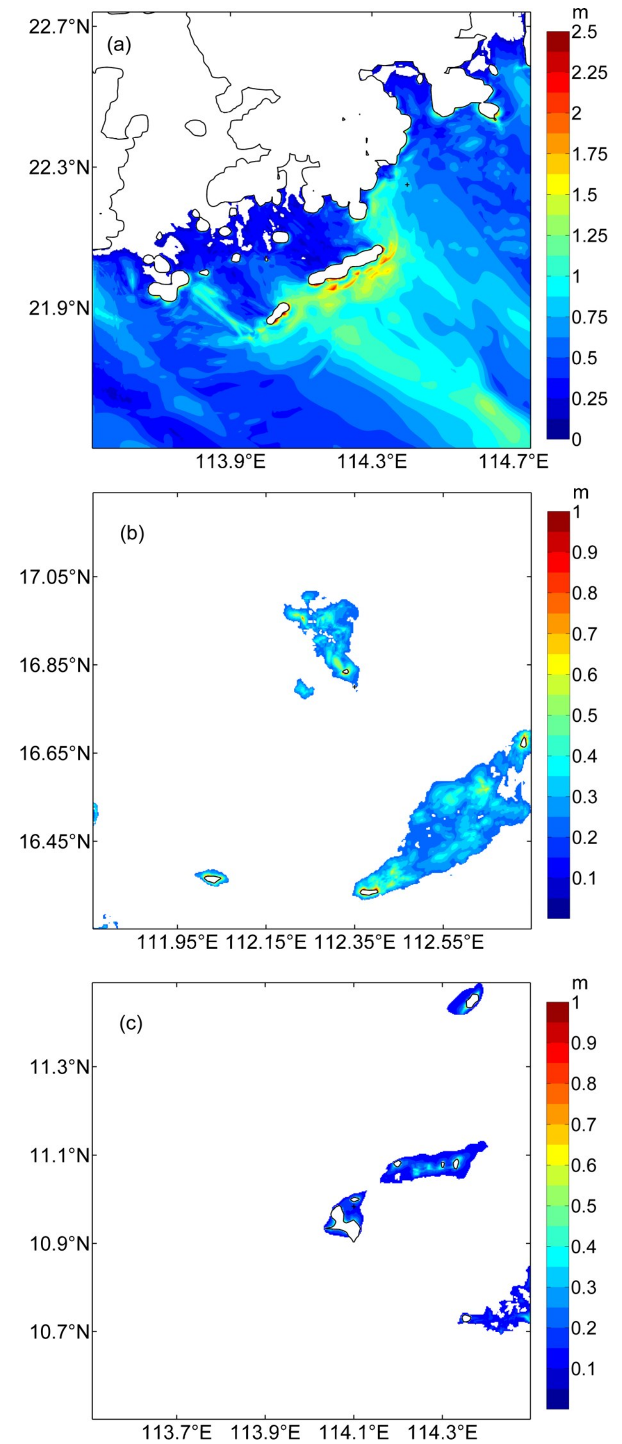

图7 （a）、（b）、（c）分别为海啸源E1模拟中在第三层嵌套网格中的1～3三个子嵌套网格区域内的海啸波最大波高分布

Fig. 7 (a–c) Maximum wave height distributions in the 1–3 subgrid areas of the third layer nest grid in the simulation of the E1 tsunami source area

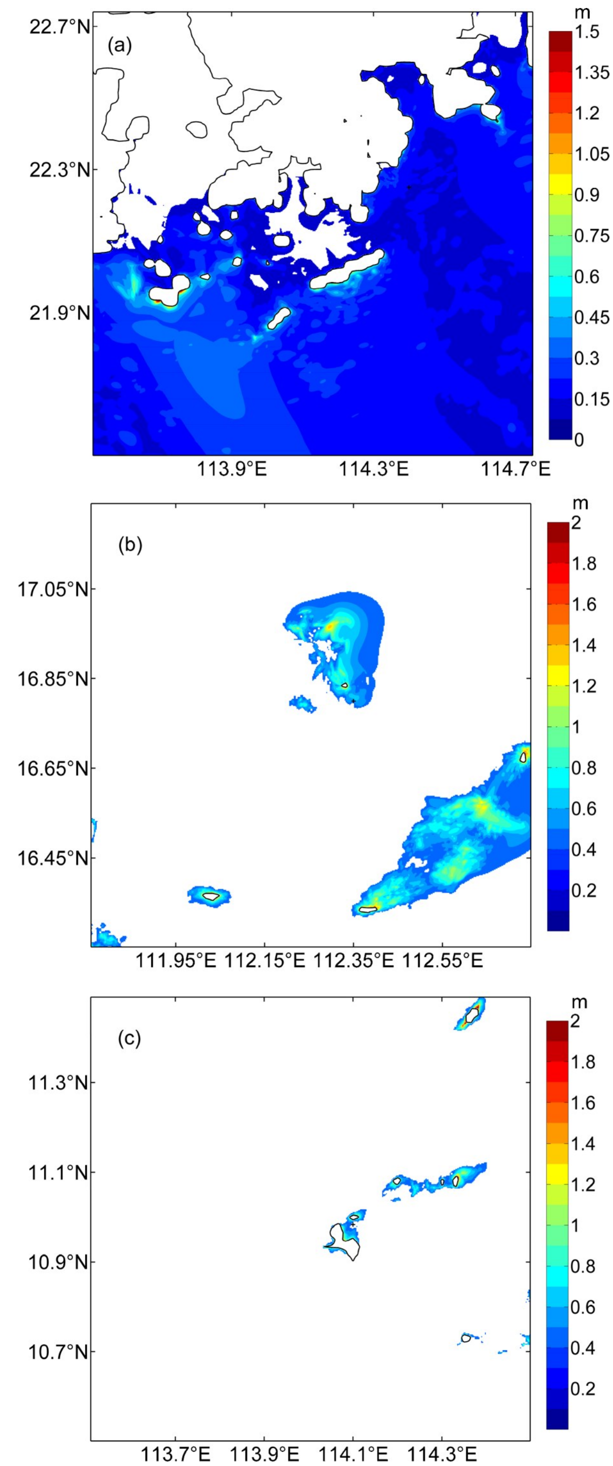

图8 同图7，但为E2

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for E2

6 敏感性分析

上述数值模拟分析均是假设8.0级地震情况下引发的海啸（见表3）。理论上，地震震级越大，地震释放的能量越强，震级增加一级，释放的能量增加为原来的31.6倍，为了分析海啸波的强度受地震震级的影响程度的大小，以及超过8.0级的地震所引发的海啸波波高的增幅，在前述试验的基础

上，考虑其他参数条件不变，将地震震级微调为8.3级，进行敏感性试验，再次对E1～E3三个源区的海啸过程进行模拟。

图10为考虑8.3级地震情况下E1、E2、E3三个源区的海啸波传播过程中的最大波高，能量主体的传播方向都与之前的模拟相似，没有发生明显的变化，但是海啸波的波高都有了大幅度的增加，我国大陆沿岸最大海啸波波高达到了3～4 m（见图

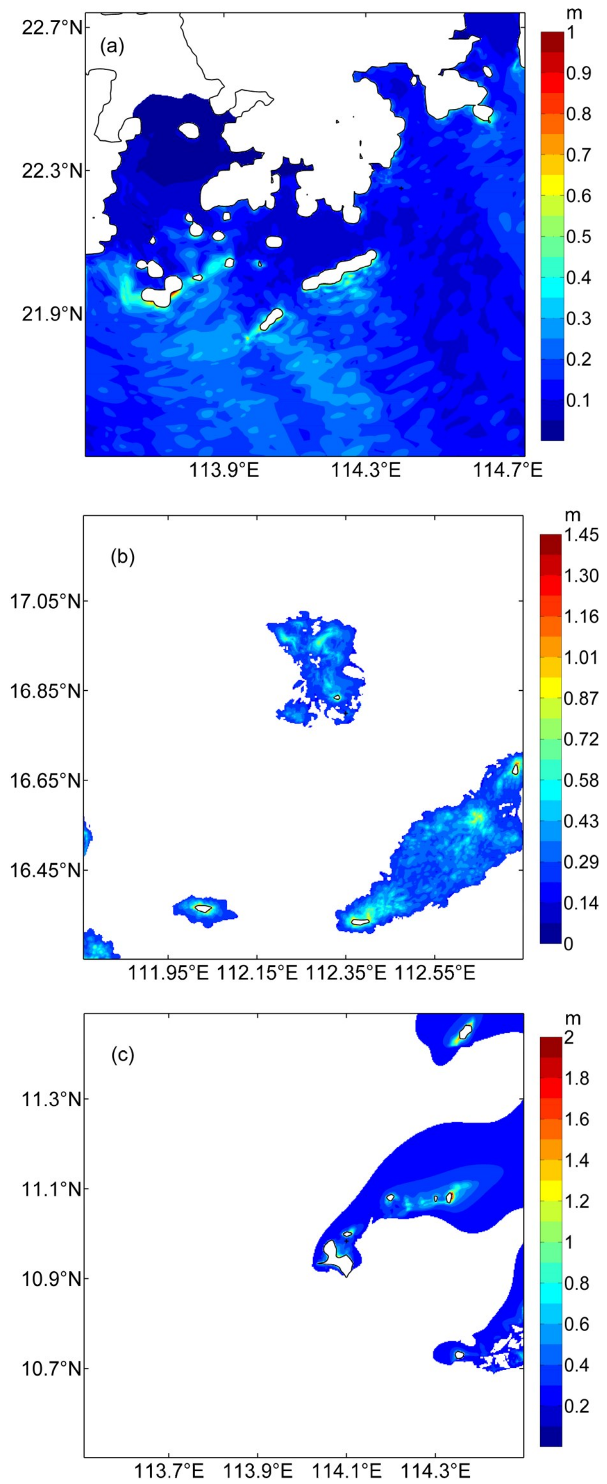

图9　同图7，但为E3

Fig. 9　Same as Fig. 7, but for E3

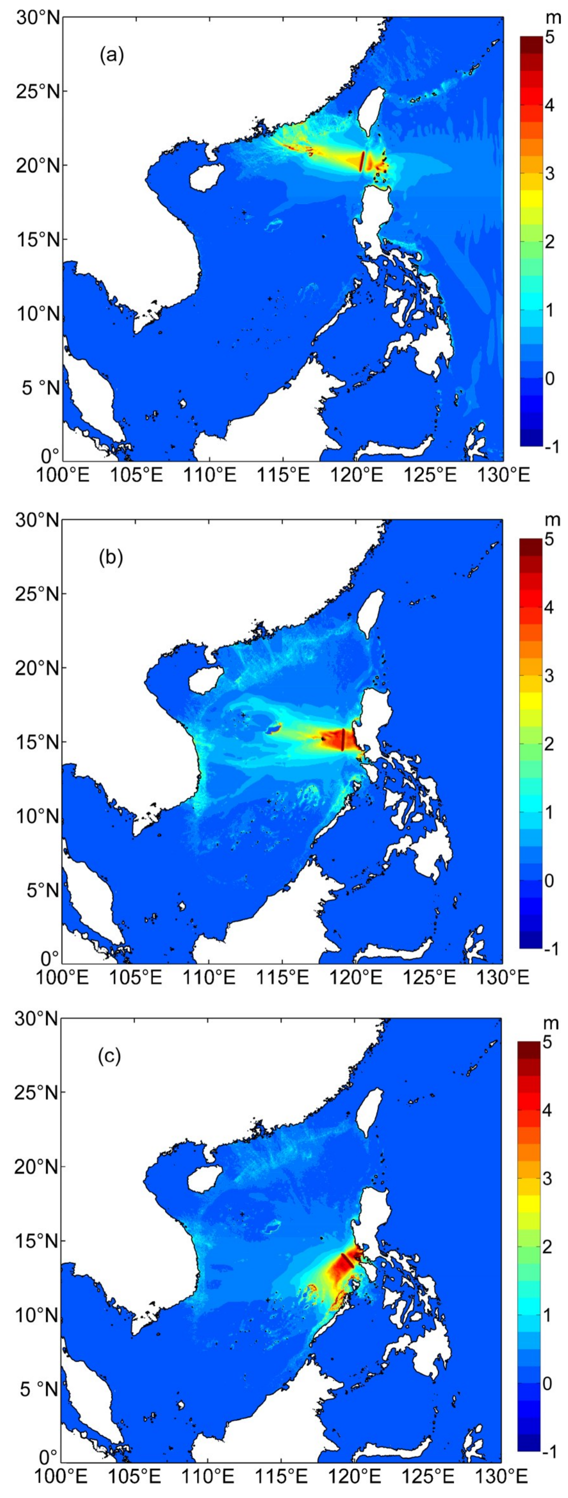

图10　敏感性试验中E1～E3三个源区海啸波最大波高分布

Fig. 10　(a–c) Maximum wave height distribution of tsunami waves in the three source regions, i.e., E1–E3, obtained during the sensitivity test

10a），西沙附近岛屿最大海啸波波高达到2～3 m（如图10b所示），南沙附近岛屿最大海啸波波高达到2～3 m（见图10c）。图11为不同海啸源在第三层嵌套子区域内10 m水深参考点位置处敏感性试验模拟结果与之前模拟结果的水位时间变化曲线对比图，二者水位正负相态随时间变化保持高度一致，但是敏感性试验模拟结果中水位的振幅出现了大幅度的增强，可见，海啸波传播速度与地震震级无关，海啸波波高对于地震震级有较强的敏感性，如果马尼拉海沟海啸源区发生超过8.0级的浅源地震并引发海啸，对我国大陆沿岸和南海岛礁造成的灾害将会显著增强。

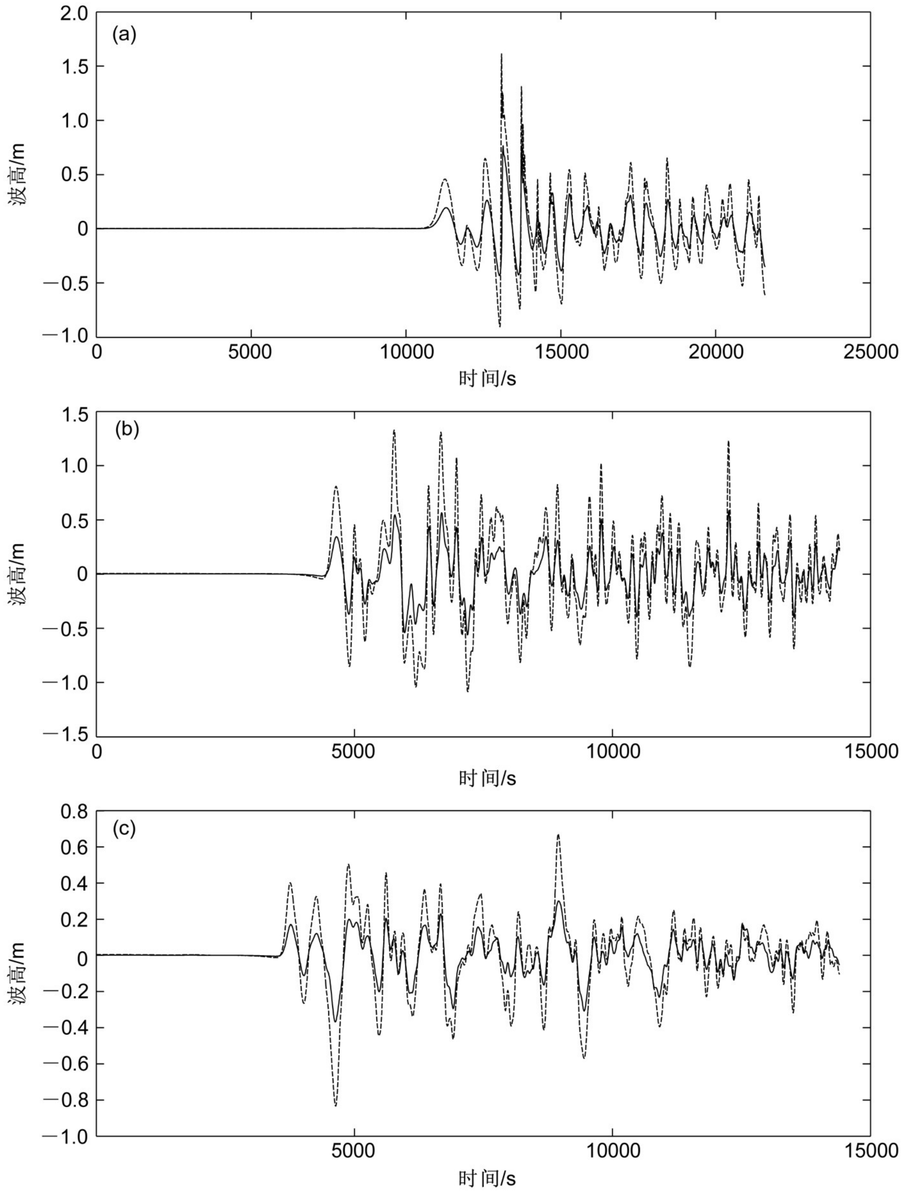

图11 （a）参考点1在E1源区两次模拟中的水位时间变化曲线对比，（b）参考点2在E2源区两次模拟中的水位时间变化曲线对比，（c）参考点3在E3源区两次模拟中的水位时间变化曲线对比。虚线表示敏感性试验（8.3级地震海啸）的模拟结果，实线表示假想海啸过程模拟试验（8.0级地震海啸）的结果

Fig. 11 (a) Comparison of reference point 1 in the water level time variation curves during the two simulation tests of the E1 tsunami source area, (b) comparison of reference point 2 in the water level time variation curves during the two simulation tests of the E2 tsunami source area, and (c) comparison of reference point 3 in the water level time variation curves during the two simulation tests of the E3 tsunami source area.The dotted line indicates the result of the sensitivity test of the 8.3 magnitude earthquake tsunami and the solid line indicates the result of the hypothetical tsunami process simulation test of the 8.0 magnitude earthquake tsunami

7 结论

本文分析了南海可能发生海啸的源区，通过发生在我国台湾省南部近海的一次海底地震引发的南海局地海啸过程对COMCOT海啸模式进行了验证，并利用该模式对南海潜在海啸源区可能发生的海啸进行了模拟，分析了能量传播方向不同的3种海啸源对南海周边及岛礁可能造成的影响。本文使用的水深数据是ETOPO1数据，嵌套子区域使用了插值算法，岛礁的地形存在一定的误差，并且嵌套区域范围较小，不能够达到以点带面的效果，但是并不影响本文对海啸影响情况的分析。结果表明，南海由于潜在海啸源区多，其周边地区和岛礁都存在遭受海啸袭击的风险，南海深水区较广，海啸传播速度快，局地性海啸的能量传播至我国大陆的时间较短，有效的预警时间大约只有3 h，而西沙、南沙等各个岛礁的预警时间则更短，仅有1～2 h，因此提前做好南海沿岸各地和驻人岛礁海啸灾害的危险评估和预警，对于防灾减灾极为关键；敏感性试验表明，海啸的传播速度与地震震级无关，海啸波波高对于地震震级敏感性较强，而南海地区的历史地震信息也表明，南海发生超过8.0级的地震频率是非常高的，因此如果该地区发生强震引发海啸，对我国大陆广东、福建沿岸、台湾省西南沿海、海南岛东部沿以及南海驻人岛礁造成的影响将会是显著的。

参考文献（References）

陈飞, 林一骅, 项杰. 2010. 基于缓变地形的远程海啸传播模拟的改进 [J]. 气候与环境研究, 15(3): 237−245. Chen Fei, Lin Yihua, Xiang Jie. 2010. Improvement of far distant tsunami propagation based on slowly changing topography [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15(3): 237−245. doi: 10.3878/j.issn. 1006-9585.2010.03.03

陈洪滨, 刁丽军. 2004. 2003年的极端天气和气候事件及其他相关事件 [J]. 气候与环境研究, 9(1): 218−223. Chen Hongbin, Diao Lijun. 2004. Some extreme events of weather, climate and related phenomena in 2003 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9(1): 218−223.

陈洪滨, 范学花. 2007. 2006年极端天气和气候事件及其他相关事件 [J]. 气候与环境研究, 12(1): 100−112. Chen Hongbin, Fan Xuehua. 2007. Some extreme events of weather, climate and related phenomena in 2006 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12(1): 100−112.

陈洪滨, 范学花. 2008. 2007年极端天气和气候事件及其他相关事件的概要回顾 [J]. 气候与环境研究, 13(1): 102−112. Chen Hongbin, Fan Xuehua. 2008. Some extreme events of weather, climate and related phenomena in 2007 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13(1): 102−112.

陈洪滨, 范学花. 2009. 2008年极端天气和气候事件及其他相关事件的概要回顾 [J]. 气候与环境研究, 14(3): 329−340. Chen Hongbin, Fan Xuehua. 2009. Some extreme events of weather, climate and related phenomena in 2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14(3): 329−340.

陈洪滨, 范学花. 2011. 2010年极端天气和气候事件及其他相关事件的概要回顾 [J]. 气候与环境研究, 16(6): 789−804. Chen Hongbin, Fan Xuehua. 2011. Some extreme events of weather, climate and related phenomena in 2010 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16(6): 789−804.

陈洪滨, 范学花. 2012. 2011年极端天气和气候事件及其他相关事件的概要回顾 [J]. 气候与环境研究, 17(3): 365−380. Chen Hongbin, Fan Xuehua. 2012. Some extreme events of weather, climate, and related phenomena in 2011 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17(3): 365−380.

Chu Annie, Zhuang Jiancang. 2016. multiple linear regression analyses on the relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement [M]// Rock Anisotropy, Fracture and Earthquake Assessment. Berlin, Boston: De Gruyter. doi:10.1515/9783110432510-005

褚芹芹. 2011. 印尼海啸过程数值模拟研究及其风险评估 [D]. 中国海洋大学, 1−4. Zhu Qinqin. 2011. The numerical simulation study of Indonesia tsunami and its hazard assessment [D] (in Chinese). Chinese Marine University, 1−4.

Geller Robert J. 1976. Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 66(5): 1501−1523.

Imamura F, Synolakis C E, Gica E, et al. 1995. Field survey of the 1994 Mindoro Island, Philippines tsunami [J]. Pure and Applied Geophysics, 144(3): 875−890. doi:10.1007/BF00874399

李智广, 谢顺平, 都金康, 等. 2015. 海南岛及北部湾海域海啸数值模拟与影响分析 [J]. 地球信息科学学报, 17(8): 937−944. Li Zhiguang, Xie Shunping, Du Jinkang, et al. 2015. Numerical simulation and analysis of tsunami impacts on Hainan Island and Beibu Gulf Zone [J]. Journal of Geo-Information Science (in Chinese), 17(8): 937−944.

林法玲. 2012. “3.11”日本地震海啸及南海和琉球群岛假想地震海啸对福建近海影响的数值模拟 [J]. 台湾海峡, 31(4): 565−570. Lin Faling. 2012. Numerical simulation of the effect of the “3.11” Japan earthquake tsunami and the hypothetical earthquake tsunami at South China Sea and the Ryukyu Islands on Fujian offshore area [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait (in Chinese), 31(4): 565−570. doi:10.3969/J.ISSN.1000-8160.2012.04.017

Liu L F, Wang X, Salisbury A J. 2009. Tsunami hazard and early warning system in South China Sea [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 36(1): 0−12.

刘桦, 赵曦, 王本龙, 等. 2015. 海啸数值模拟与南海海啸预警方法 [J]. 力学季刊, 36(3): 351−369. Liu Hua, Zhao Xi, Wang Benlong, et al. 2015. Numerical simulation of tsunami and tsunami warning methods for South China Sea region [J]. Chinese Quarterly of Mechanics (in Chinese), 36(3): 351−369. doi:10.15959/j.cnki.0254-0053.2015.03.001

Okada Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 92 (2): 1018−1040.

潘文亮, 王盛安, 蔡树群. 2009. 南海潜在海啸灾害的模拟 [J]. 热带海洋学报, 28(6): 7−14. Pan Wenliang, Wang Sheng'an, Cai Shuqun. 2009. Simulation of potential tsunami hazards in the South China Sea [J]. Journal of Tropical Oceanography (in Chinese), 28(6): 7−14.

潘文亮, 王盛安, 孙璐, 等. 2014. 2010年智利和2011年日本海啸在华南沿岸的实测海啸波形和特征 [J]. 热带海洋学报, 33(6): 17−23. Pan Wenliang, Wang Shengan, Sun Lu, et al. 2014. Observed waveform and characteristics of the 2010 Chile and 2011 Japan tsunamis near the coast of South China [J]. Journal of Tropical Oceanography (in Chinese), 33(6): 17−23. doi:10.3969/j.issn.1009-5470.2014.06.003

任叶飞. 2007. 基于数值模拟的我国地震海啸危险性分析研究 [D]. 中国地震局工程力学研究所, 90−99. Ren Yefei. 2007. Study on China earthquake tsunami hazard analysis based on numerical simulation [D] (in Chinese). Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 90−99.

Ren Yefei, Wen Ruizhi, Zhou Baofeng, et al. 2010. Deterministic analysis of the tsunami hazard in China [J]. Science of Tsunami Hazards, 29(1): 32−42.

任叶飞, 杨智博, 温瑞智, 等. 2015. 地震海啸数值模拟中海洋水深数据的敏感性研究 [J]. 自然灾害学报, 24(2): 15−22. Ren Yefei, Yang Zhibo, Wen Ruizhi, et al. 2015. Bathymetry data: Sensitivity in the numerical simulation of earthquake tsunami [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 24(2): 15−22. doi: 10.13577/j. jnd. 2015.0203

王培涛, 于福江, 赵联大, 等. 2012a. 2011年3月11日日本地震海啸越洋传播及对中国影响的数值分析 [J]. 地球物理学报, 55(9): 3088−3096. Wang Peitao, Yu Fujiang, Zhao Lianda, et al. 2012a. Numerical analysis of tsunami propagating generated by the Japan Mw9 [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 55(9): 3088−3096. doi:10.6038/issn.0001-5733.2012.09.026

王培涛, 于福江, 赵联大, 等. 2012b. 越洋海啸的数值模拟及其对我国的影响分析 [J]. 海洋学报, 34(2): 39−47. Wang Peitao, Yu Fujiang, Zhao Lianda, et al. 2012b. Numerical simulation of trans-oceanic tsunami and its impact analysis on Chinese coasts [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 34(2): 39−47.

Well D L, Coppersmith K J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupiure area and surface displacement [J]. Bullentin of the Seismological Society of America, 84 (4): 974−1002.

杨马陵, 魏柏林. 2005. 南海海域地震海啸潜在危险的探析 [J]. 灾害学, 20(3): 41−47. Yang Maling, Wei Bailin. 2005. The potential seismic tsunami risk in South China Sea and its surrounding region [J]. Journal of Catastrophology (in Chinese), 20(3): 41−47. doi: 10. 3969/j.issn.1000-811X.2005.03.009

赵联大, 于福江, 滕骏华. 2015. 南海定量海啸预警系统 [J]. 海洋预报, 32(2): 1−6. Zhao Lianda, Yu Fujiang, Teng Junhua. 2015. SCS quantitative tsunami warning system [J]. Marine Forecasts (in Chinese), 32(2): 1−6. doi:10.11737/j.issn.1003-0239.2015.02.001