

任智源, 侯京明, 王培涛, 等. 精细化地震海啸波流实时预警系统研究与应用[J]. 海洋学报, 2019, 41(9): 145–155, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.09.014

Ren Zhiyuan, Hou Jingming, Wang Peitao, et al. Study and application of the refined tsunami real time warning system including tsunamigenic wave and current[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(9): 145–155, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.09.014

# 精细化地震海啸波流实时预警系统研究与应用

任智源<sup>1,2</sup>, 侯京明<sup>1,2</sup>, 王培涛<sup>1,2</sup>, 李涛<sup>1</sup>, 原野<sup>1,2</sup>, 赵联大<sup>1,2</sup>

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 自然资源部海啸预警中心, 北京 100081)

**摘要:** 基于 Okada 模型和非线性浅水波模型, 结合高精度多层嵌套网格针对我国浙江沿海的温州和台州地区建立了越洋-近海-局部的精细化地震海啸波流实时预警系统, 近岸的分辨率为 900 m。该预警系统包括了并行化的数值计算模块, 基于 Python 2D 绘图库的计算结果可视化处理模块, 以及通过 Python 语言将所有经过数值计算的图形与动画产品集成在一个网页上的产品集成模块。一旦地震发生, 该系统可根据地震的震源参数信息在 10 min 内完成数值计算、可视化处理, 以及产品集成。选取 2011 年日本东北 9.0 级地震海啸结合实测数值对该系统进行模拟验证, 进一步应用该系统模拟计算了日本南海海槽和琉球海沟潜在极端海啸的影响规律。结果表明, 该预警系统可有效地提高地震海啸实时预警的时效性和准确度, 为海啸的预警、减灾, 以及辅助决策提供科学依据。

**关键词:** 地震海啸; 预警系统; 精细化预报; 数值模拟

中图分类号: P731.25

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2019)09-0145-11

## 1 引言

近十几年来, 以 2004 年印度洋海啸和 2011 年日本地震海啸为代表的特大地震海啸事件对沿海地区造成了极大的人员伤亡、财产损失和环境破坏。2004 年 12 月 26 日, 印度尼西亚的苏门答腊附近发生了 9.1 级地震海啸袭击了印度、印度尼西亚、马尔代夫、孟加拉国、泰国、斯里兰卡等多个国家, 共造成了超过 20 万人的死亡<sup>[1-2]</sup>。2011 年 3 月 11 日, 日本东北部海域发生了  $M_w=9.0$  级特大地震, 地震引发的海啸共造成近 3 万人死亡或失踪。根据灾后的实地调查, 海啸的最大爬高达到了 40 m<sup>[3]</sup>。此次海啸对我国的沿海也造成了一定影响, 浙江沿海的最大波幅达到 50 cm<sup>[4-5]</sup>。我国位于太平洋板块与亚欧板块相互作用的地震活跃地带, 环太平洋产生的越洋海啸, 以及琉球海沟、马尼拉海沟可以发生的区域海啸, 均对

我国造成潜在的威胁<sup>[6-8]</sup>。因此, 针对重点区域建立准确和快速的地震海啸实时预警系统显得非常迫切和必要。

全球的海啸监测预警系统是在 2004 年印度洋海啸之后得到高度重视并快速发展的。它是基于地震监测信息、海啸的实测波面数据以及数值模拟技术进行海啸预警。我国的海啸预警是从 2006 年开始逐步发展, 目前建立了基于 SeisComP3 软件的全球地震监测系统、60 个海啸浮标与 800 余个潮位站组成的水位实测系统, 以及基于高性能计算机的数值模拟系统<sup>[6]</sup>, 可以开展海啸对我国整体性影响的预警工作。但目前, 针对重点区域的精细化海啸预警研究在国内还属于空白。

地震海啸主要是由于海底地震引起海底地形的大变形进而引起水面的扰动并在海水表面快速传播, 属于浅水长波。因此, 在海啸预警<sup>[9-10]</sup>、数值模

收稿日期: 2018-09-12; 修订日期: 2018-12-11。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1402000); 海洋工程国家重点实验室(上海交通大学)开放课题(1604); 留学人员科技活动项目择优资助。

作者简介: 任智源(1986—), 男, 陕西省西安市人, 博士, 主要从事水动力学的研究。E-mail: zhyren@foxmail.com

拟<sup>[11-12]</sup>, 以及灾害评估<sup>[13-14]</sup>中, 海啸的波高及其演化过程受到了重点关注。但是, Fritz 等<sup>[15]</sup>基于视频数据与雷达技术发现在 2011 年日本海啸过程中产生的流场的最大流速达到 11 m/s。Lynett 等<sup>[16]</sup>通过数值模拟证实由于受到非线性和湍流效应的影响, 由海啸诱发的近岸流场表现出更显著的时间与空间分布的不均一性, 同时给出了海啸诱发流场的风险评估等级标准。尽管采用的非线性浅水方程和 Boussinesq 模型均未考虑湍流模型, 但与实测数据的比较表明它们也可以计算得到较为准确的近岸垂向平均流场。基于数值模拟与实测数据, Arcos 和 LeVeque<sup>[17]</sup>利用非线性浅水波模型计算了 2011 年日本海啸传播至夏威夷附近的流场规律。王培涛等<sup>[18]</sup>进一步基于数值计算得到的流场信息分析了其相应的平面二维的涡度特征(流场的旋度)。Ren 等<sup>[19]</sup>在对南海潜在极端海啸的模拟中发现海啸诱发的流场是伴随海啸波的传播过程, 而最大流速主要集中在近岸区域, 对港口、码头均有可能产生灾害。因此, 在海啸预警中提供海啸波和流场等关键信息, 有助于全面了解海啸灾害和防灾减灾。

目前, 海洋动力灾害的精细化预报的研究与应用主要是针对风暴潮和台风浪, 而地震海啸的精细化预警尚没有涉及。王培涛等<sup>[20]</sup>采用基于非线性浅水波方程和非结构网格的数值模型(ADCIRC)在台湾海峡和福建沿海区域建立了台风风暴潮数值预报模型。刘秋兴等<sup>[21]</sup>将该模型扩展到覆盖中国沿海地区, 利用 128 核的超级计算机可在 28 min 内完成数值计算。罗锋等<sup>[22]</sup>和刘秋兴等<sup>[23]</sup>分别在江苏沿海和浙江温州沿海开展了精细化预报研究。后者采用风暴潮-波浪耦合模型(ADCIRC+SWAN)建立了天文潮-风暴潮-近岸波浪的精细化耦合预报系统。冯芒等<sup>[24]</sup>与潘锡山等<sup>[25]</sup>分别在台湾海峡和江苏沿海建立了海浪的精细化数值预报系统, 可满足海浪的近岸精细化预报要求。这些工作明确了海洋动力灾害的精细化预报的重要意义, 同时对海啸的精细化预警提供了有益的参考。

为了实现对地震海啸的准确和快速预警, 科学认识海啸在生成后的传播过程及对我国近岸重点区域的精细化影响, 本文以温州和台州为研究区域, 基于非线性浅水波模型和多层嵌套网格, 建立了越洋-近岸-局部的精细化地震海啸波流实时预警系统。首先针对 2011 年日本海啸对我国近岸的影响进行验证, 选择合适的网格分辨率; 进一步针对日本南海海槽和琉球海沟, 应用该系统模拟计算潜在极端地震海啸对

温州-台州地区的波-流精细化影响。

## 2 精细化地震海啸实时预警系统的构建

精细化地震海啸实时预警系统包括了地震海啸的数值计算、灾害分级与可视化处理, 以及利用网页集成图形、动画产品得到的预警产品一页通。整个系统组成与流程参见图 1。一旦地震发生, 在得到震中、震级和震源几何特征等基本参数后。首先由 Okada 模型根据震源的特征参数计算得到海底地形的变形, 进而基于瞬时响应假设得到水面初始扰动。基于非线性浅水波模型和多层嵌套网格, 计算得到海啸在生成之后的传播以及对近岸的影响情况。在计算完成后, 利用 Python 程序调用 Matplotlib 绘图库对计算结果进行图形化处理, 包括海啸传播过程中的波面演化与流场演化过程, 全场和近岸的最大波幅分布和最大流速分布, 近场监测点的波面与流场时间序列。再根据海啸灾害等级将不同的测点进行危险性等级分类。最后, 将所有的图形与动画产品集成为一个网页形式, 便于查看与嵌套在公众网站上, 参见图 2。

针对地震激发的海底地形变形, 可采用弹性半空间位错理论。该理论首先由 Steketee<sup>[26]</sup>提出, 并经过许多学者的深入研究, 最后经过 Okada<sup>[27]</sup>的发展, 得到在弹性半空间内断层滑动引起的位错及应变表达式, 并在其后得到不断完善<sup>[28]</sup>。在各向同性的条件下, 根据弹性半空间位错理论, 某一矩形几何面发生滑移引发地表某点的动力响应所产生的位移, 与滑移面的滑动量成正比。比例系数由滑移面的深度、倾角、几何尺寸, 以及该点与滑移面的相对位置确定。根据弹性半空间位错理论, 断层滑移在地表观测点  $(x, y)$  产生的形变  $f(x, y)$  可以表示为

$$f(x, y) = f(L, W, d, \delta, \alpha, \xi_1, \xi_2, U_1, U_2, U_3, x, y), \quad (1)$$

式中, 断层面的走滑、倾滑和张性错动分量分别用  $U_1$ ,  $U_2$  和  $U_3$  表示; 断层的深度为  $d$ ; 长与宽分别为  $L$  和  $W$ ; 走向角为  $\alpha$ ;  $(\xi_1, \xi_2)$  表示滑移面下方区域的平面直角坐标;  $\delta$  表示倾角。

在得到海啸波的初始条件后, 再利用基于非线性浅水方程的数值模型 GeoClaw<sup>[29]</sup>模拟计算海啸的传播过程。非线性浅水方程可表示为

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(Hu)}{\partial t} + \frac{\partial(Hu^2 + 1/2gH^2)}{\partial x} + \frac{\partial(Huv)}{\partial y} = -gH \frac{\partial b}{\partial x} - \tau_x, \quad (3)$$

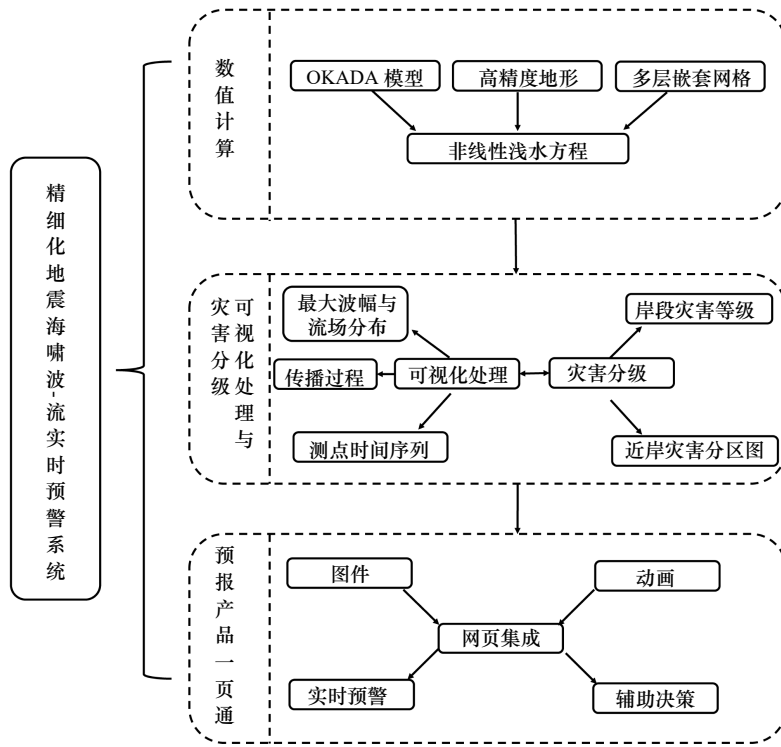


图1 系统组成与预警流程图

Fig. 1 Tsunami warning system and warning flow

**预警产品一页通**

动画演示: [海啸波面](#) [海啸流场](#) [温州地区海啸波面](#) [温州地区海啸流场](#)

海啸传播演化过程:

t = 1 h: [海啸波面](#) [海啸流场](#) [温州地区海啸波面](#) [温州地区海啸流场](#)

t = 2 h: [海啸波面](#) [海啸流场](#) [温州地区海啸波面](#) [温州地区海啸流场](#)

t = 3 h: [海啸波面](#) [海啸流场](#) [温州地区海啸波面](#) [温州地区海啸流场](#)

t = 4 h: [海啸波面](#) [海啸流场](#) [温州地区海啸波面](#) [温州地区海啸流场](#)

t = 5 h: [海啸波面](#) [海啸流场](#) [温州地区海啸波面](#) [温州地区海啸流场](#)

t = 6 h: [海啸波面](#) [海啸流场](#) [温州地区海啸波面](#) [温州地区海啸流场](#)

t = 7 h: [海啸波面](#) [海啸流场](#) [温州地区海啸波面](#) [温州地区海啸流场](#)

t = 8 h: [海啸波面](#) [海啸流场](#) [温州地区海啸波面](#) [温州地区海啸流场](#)

t = 9 h: [海啸波面](#) [海啸流场](#) [温州地区海啸波面](#) [温州地区海啸流场](#)

t = 10 h: [海啸波面](#) [海啸流场](#) [温州地区海啸波面](#) [温州地区海啸流场](#)

时间序列:

大陈: [波面时间序列](#) [流速时间序列](#)

坎门: [波面时间序列](#) [流速时间序列](#)

温州: [波面时间序列](#) [流速时间序列](#)

鳌江: [波面时间序列](#) [流速时间序列](#)

其他结果:

- [最大波幅分布](#)
- [最大流速分布](#)
- [温州地区最大波幅](#)
- [温州地区最大流速](#)

图2 预警产品一页通

Fig. 2 Website of tsunami warning information

$$\frac{\partial(Hv)}{\partial t} + \frac{\partial(Huv)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv^2 + 1/2gH^2)}{\partial y} = -gH \frac{\partial b}{\partial y} - \tau_y, \quad (4)$$

式中,  $H$  为总水深;  $u$  和  $v$  为  $x$  和  $y$  方向的速度分量;  $b$  表示地形。  $\tau_x$  和  $\tau_y$  表示底摩擦项,

$$\tau_x = \frac{gm^2}{H^{7/3}}Hu\sqrt{(Hu)^2 + (Hv)^2}, \quad (5)$$

$$\tau_y = \frac{gm^2}{H^{7/3}}Hv\sqrt{(Hu)^2 + (Hv)^2}, \quad (6)$$

式中,  $m$  为曼宁系数, 表示底边界的粗糙程度。该模型利用了基于 Godunov 格式的有限体积方法进行数值离散, 同时考虑了二阶修正项来减小数值震荡。自适应网格技术是该模型的一个特色, 可以根据海啸波波高进行追踪判断是否对网格进行加密。该方法可以实现海啸波未传播到的区域使用粗网格, 减小计算量, 提高计算效率, 同时也可以用于网格嵌套, 通过网格边界的传递实现海啸的越洋传播和局部高精度数值模拟相结合。该模型已在多个海啸事件中得到验证<sup>[5-6, 12]</sup>。

根据《海啸灾害风险评估和区划技术导则》, 将计算得到的测点的最大波幅和最大流速进行灾害分级, 参见表 1。

为了实现对温州和台州地区的地震海啸精细化预警, 选取的计算区域如图 3 所示。该区域包括了太

表 1 海啸灾害风险等级

Tab. 1 Risk level of tsunami hazard

等级	最大波幅/m	最大流速/m·s <sup>-1</sup>
IV (蓝色)	$H \leq 0.3$	$V \leq 0.5$
III (黄色)	$0.3 < H \leq 1.0$	$0.5 < V \leq 1.0$
II (橙色)	$1.0 < H \leq 3.0$	$1.0 < V \leq 3.0$
I (红色)	$H \geq 3.0$	$V \geq 3.0$

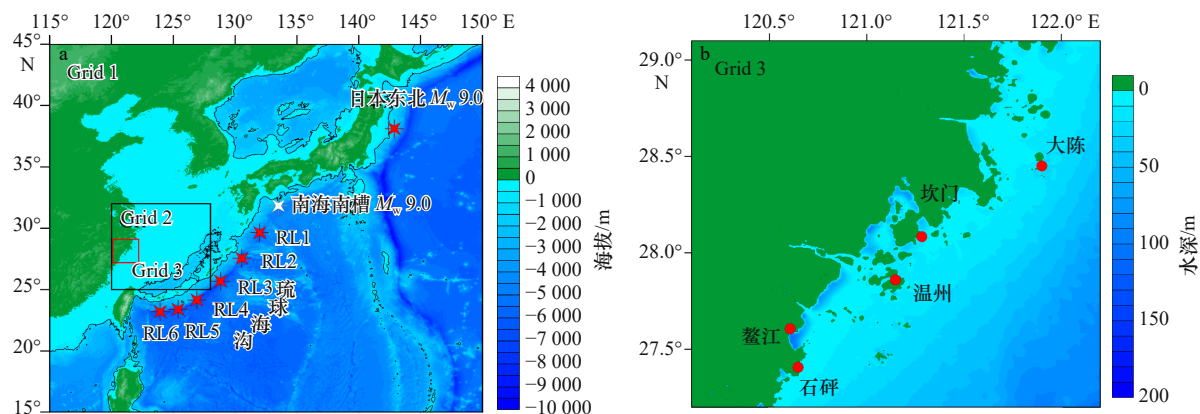


图3 计算区域与地形

Fig. 3 Computational domain and bathymetry

平洋板块、鄂霍次克板块、阿默尔板块、扬子板块、菲律宾板块,以及巽他板块等多个板块的交界区域。因此可以针对西北太平洋地区发生的地震海啸进行预警。第一层网格的计算范围为  $15^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ ,  $115^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ , 地形数据分辨率为  $1'$  (<https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/wcs-client/>); 第二层网格如图 3a 中的黑色线框表示, 计算范围为  $25^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$ ,  $120^{\circ}\sim 128^{\circ}\text{E}$ , 地形数据分辨率为  $1'$ ; 第三层网格如图 3b 所示, 包含了温州和台州的近岸区域, 计算范围为  $27.2^{\circ}\sim 29.1^{\circ}\text{N}$ ,  $120.1^{\circ}\sim 122.2^{\circ}\text{E}$ , 地形数据分辨率为  $0.5'$  (全球地形 SRTM30\_PLUS 数据)。第二层网格覆盖了从水深 2 000 m 到近岸的区域, 可以完全描述海啸从深海到东海大陆架传播过程中的非线性效应。在近岸选择了 5 个潮位站, 如图 3b 红点所示。

### 3 2011 年日本 9.0 级地震海啸的模拟与验证

2011 年日本东北 9.0 级地震海啸是近些年对我国沿海影响较大的一次海啸事件。震中位于宫城县首府仙台市以东的太平洋海域。据日本警察厅统计, 截止到 2011 年 4 月 6 日, 地震与海啸共造成 12 554 人死亡、15 077 人失踪以及 2 866 人受伤, 近 20 万栋建筑受损<sup>[30]</sup>。美国地质调查局 (USGS) 迅速给出了此次地震的 WPhase 矩张量解, 包括走向角、倾角、滑移角, 震源深度以及地震矩  $M_0=3.9\times 10^{22}\text{ N}\cdot\text{m}$ 。本文采用 Shao 等<sup>[31]</sup> 提供了此次地震的一种高精度震源, 该震源被划分为 190 个长宽分别为 25 km 和 20 km 的单元板块, 他们利用 27 个 P 波的波形、23 个 SH 波, 以及 53 个长周期表面波反演得到震源参数。总的地震矩达到  $5.84\times 10^{22}\text{ N}\cdot\text{m}$ 。由于该地震矩比 USGS 的结果大了约 1/3, 因此对其进行一定的修正。利用

Okada 模型计算得到每个单元板块产生的地形变化, 并将他们进行线性叠加得到海底的初始变形。利用该震源模型计算得到的数值结果已经与深海浮标和中国近岸的多个站点的实测数据进行了对比验证<sup>[5]</sup>。

在数值计算中, 计算网格的数量是制约计算时间的主要因素, 而计算网格的数量是由网格分辨率所决定。如果网格分辨率过低, 会降低计算精度, 影响数值预警系统的准确性; 如果网格分辨率较大, 计算耗时较长, 无法满足实时预警的要求。为了解决该预警系统的准确性和时效性问题, 本文选取了 3 套不同的网格分辨率配置, 如表 2 所示。利用 3 套不同的网格进行模拟计算, 与实测的比较结果如图 4 所示。整体来看, 数值计算结果都可以较准确计算得到海啸的到达时间和最大波幅。在石砰的计算结果相对较好, 前 3 个海啸波都可以模拟到, 而在坎门结果相对差一些, 但也基本可以计算得到海啸的首波和次波。以石砰和坎门实测数据中首波的最大波幅为基准, 3 套网格的计算结果在石砰和坎门的误差率分别是 9.4%、0.2%、13.1% 和 13.5%、23.4%、8.4%。网格 1 的整体计算精度最高, 但计算时间也最长, 无法满足海啸实时预警的需求。网格 2 和网格 3 的计算精度相比于网格 1 较低, 但在潮位站的模拟结果与实测结果基本接近, 同时可在 10 min 内完成计算。因此满足海啸实

表 2 计算网格配置

Tab. 2 Grid resolution

	第一层/ 分辨率/( $^{\circ}$ )	第二层/ 分辨率/( $^{\circ}$ )	第三层/ 分辨率/( $^{\circ}$ )	网格数	计算时间/s
网格1	2	1	0.25	138万	4 378
网格2	4	2	0.5	34万	581
网格3	4	2	1	30万	490

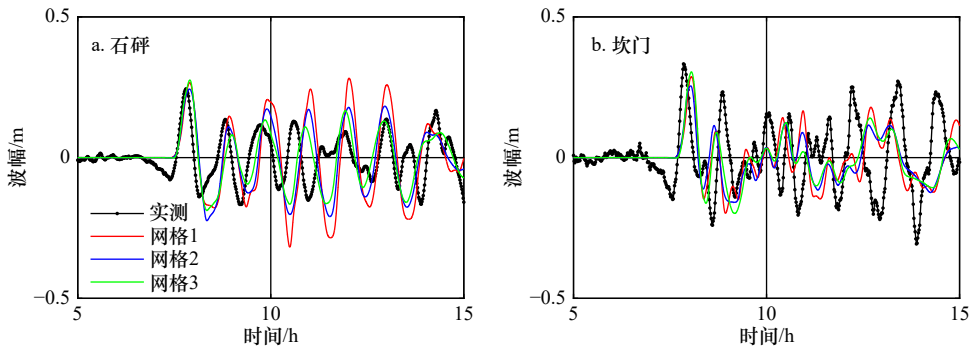


图4 石砰(a)与坎门(b)波面时间序列比较

Fig. 4 Time series of surface elevation at Shiping (a) and Kanmen (b)

时预警的时效性和准确性的要求,在后面的计算中选择网格2进行系统构建。

图5a、图5b分别为第一层网格计算得到的最大波幅和最大流速分布,对应图2产品一页通中的最大波幅分布和最大流速分布。海啸波主要影响日本近岸、太平洋,以及东海、黄海;海啸诱发的流场主要分布在日本近岸,以及东海、黄海的近岸。图6和图7分别是海啸在传播到温州、台州近海的波面与最大波幅分布、流场与最大流速分布。此次海啸在日本

东北海域生成后,在7h左右抵达温州、台州海域,最大波幅在0.5m左右。当海啸传播至近岸时,受复杂地形的影响流场也表现出了复杂多变的情况:由于海啸在近岸的反射,流场也表现出向岸和离岸过程;同时还伴随沿岸流动的过程。海啸在近岸诱发的流场也较大,许多地区超过0.5m/s。整体来看,该系统可以在较短时间内基于震源参数快速、准确地计算得到海啸的整体传播过程和近岸的海啸波与流场影响特征,满足地震海啸的实时预警要求。

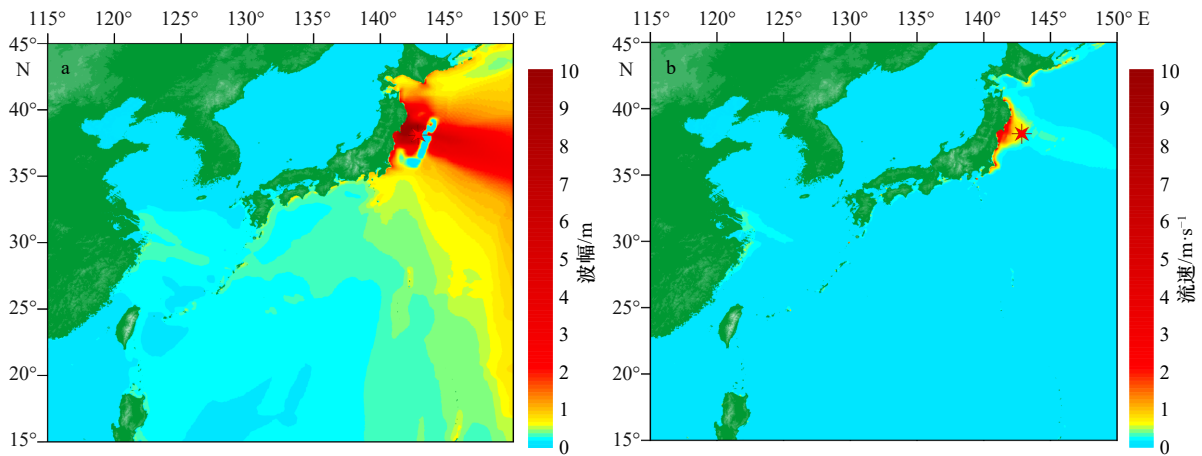


图5 全场最大波幅(a)与最大流速(b)分布

Fig. 5 Distribution of maximum surface elevation (a) and velocities (b)

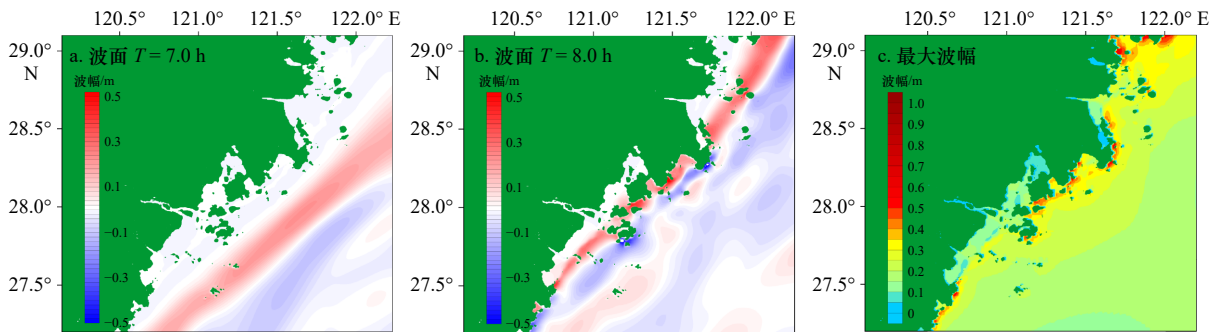


图6 温台地区近岸波面演化(a, b)与最大波幅(c)分布

Fig. 6 Evolution of tsunami amplitude (a, b) and distribution of maximum amplitude (c) near coasts of Wenzhou and Taizhou

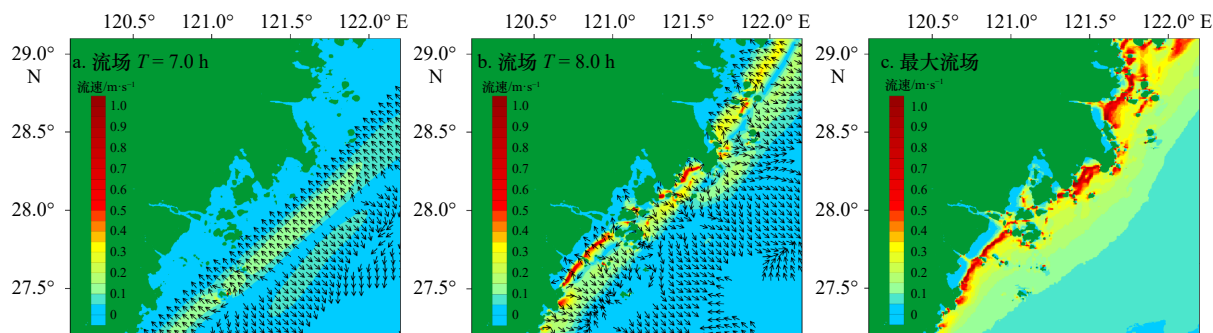


图 7 温台地区近岸流场演化(a, b)与最大流速(c)分布

Fig. 7 Evolution of currents induced by tsunami (a, b) and distribution of maximum velocities (c) near coasts of Wenzhou and Taizhou

## 4 在越洋与区域海啸实时预警中的应用

### 4.1 日本南海海槽 9.0 级地震海啸

日本南海海槽位于太平洋板块、菲律宾板块,以及欧亚板块的边缘交界处,其中菲律宾板块以 43 mm/a 的速度向下俯冲。1707 年,该处曾发生了宝永地震,产生的最大的海啸波达到 10 m<sup>[32]</sup>。在 2011 年日本东北发生 9.0 级地震海啸之后,由于这里的板块活跃性,日本南海海槽的潜在地震海啸再次得到了国际的关注<sup>[33-34]</sup>。国内学者也通过数值模拟,分析了日本南海海槽不同情境的潜在地震海啸对我国的影响<sup>[35-37]</sup>。本文应用该系统在三层计算网格条件下,模拟计算日本南海海槽发生 9.0 级特大地震海啸的传播过程及对温州-台州地区的精细化影响。

图 8a、图 8b 分别为第一层网格计算得到的最大波幅和最大流速分布。由于与 2011 年日本海啸的震中位置不同,日本南海海槽的潜在海啸不需要经过较多的绕射过程即可抵达中国沿海,因此对中国东南沿海的影响更大。海啸诱发的流场主要集中在日本近

岸以及我国近岸,而在深水区域相对较小。图 9 和图 10 分别是海啸在传播到温州和台州近海的波面与最大波幅分布,以及流场与最大流速分布。海啸在 6 h 抵达温州和台州近海,最大波幅超过 1 m。近岸的流场过程也较为复杂多变。在未受到近岸的反射影响前,流向基本满足微小振幅前进波的速度分布特征,即波峰到静水面的流速与波浪前进方向一致,而波谷到静水面的流速与波浪传播方向相反。当受到近岸的反射和复杂地形的影响之后,流场的方向也变的更为复杂。图 11 是基于海啸风险等级的大陈和坎门的波面与流速的时间过程曲线,两处的波幅和流速均达到了橙色风险等级。

### 4.2 琉球海沟 8.8 级地震海啸

琉球海沟位于欧亚板块与菲律宾海板块之间的边界地带,海沟西坡是大陆性质的琉球岛弧,东坡是大洋性质的菲律宾海地壳。一旦这里发生大地震,产生的海啸会直接威胁我国东南沿海。基于高阶完全非线性 Boussinesq 方程,Zhao 等<sup>[38-39]</sup>模拟计算了琉球海沟发生 9.0 级地震海啸对东海和近岸的影响。毛献忠等<sup>[36]</sup>、林法玲<sup>[40]</sup>、温燕林等<sup>[41]</sup>基于浅水波模型分

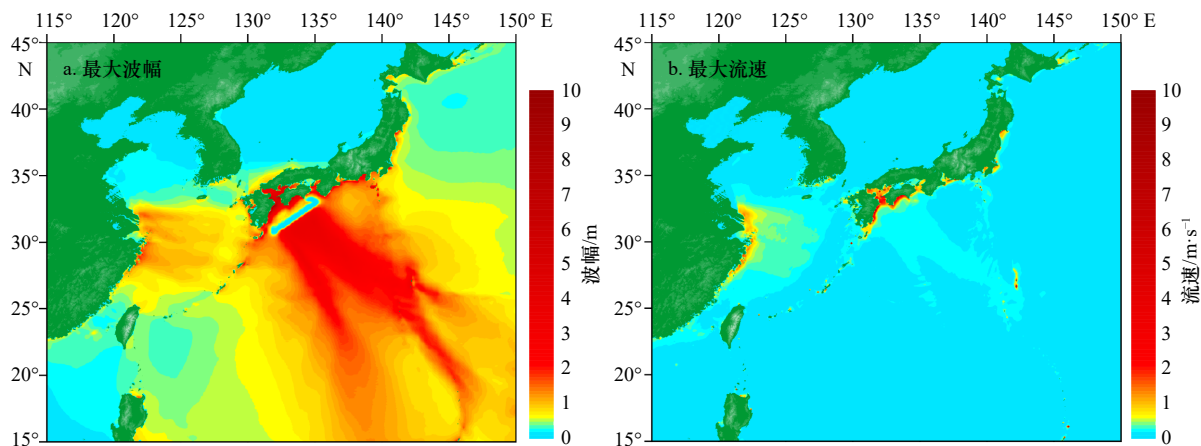


图 8 全场最大波幅(a)与最大流速(b)分布

Fig. 8 Distribution of maximum surface elevation (a) and velocities (b)

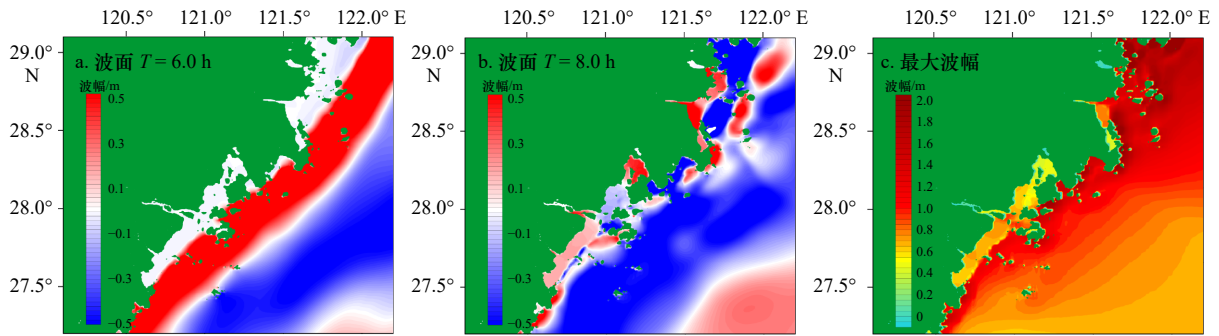


图9 温台地区近岸波面演化(a, b)与最大波幅(c)分布

Fig. 9 Evolution of tsunami amplitude (a, b) and distribution of maximum amplitude (c) near coasts of Wenzhou and Taizhou

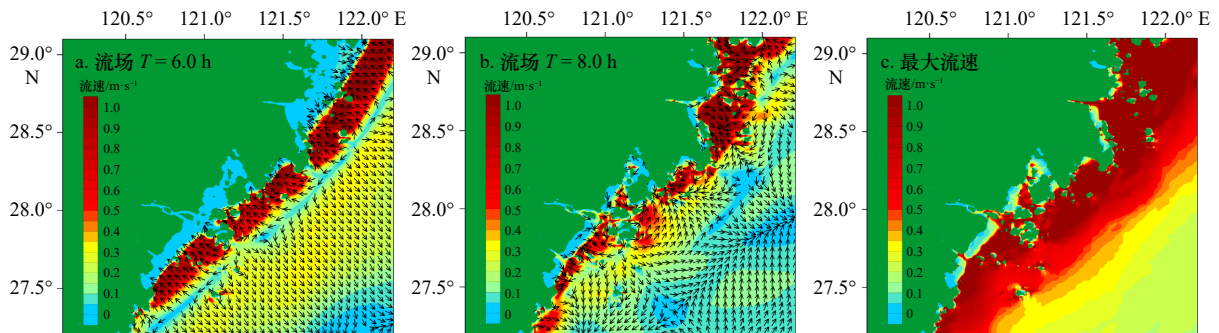


图10 温台地区近岸流场演化(a, b)与最大流速(c)分布

Fig. 10 Evolution of currents induced by tsunami (a, b) and distribution of maximum velocities (c) near coasts of Wenzhou and Taizhou

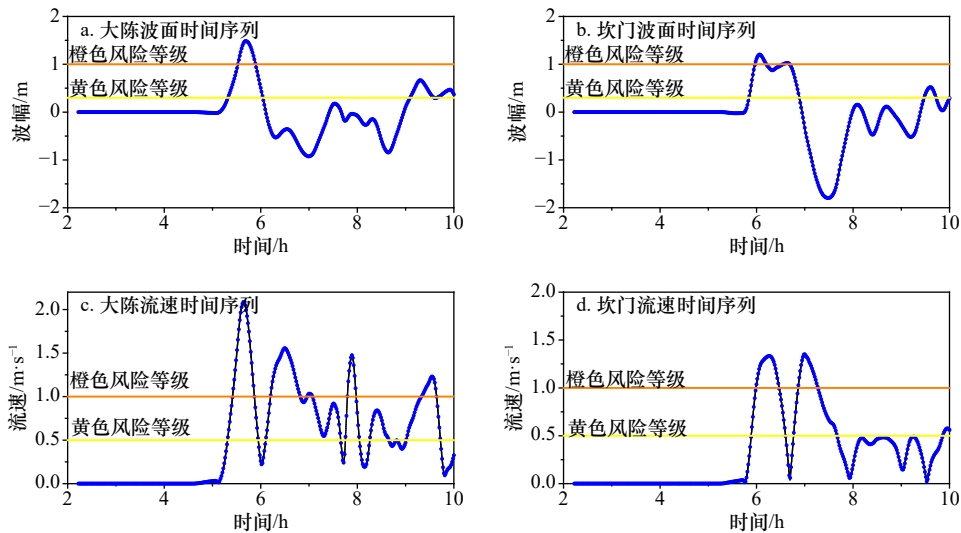


图11 大陈与坎门的波面、流速时间序列

Fig. 11 Time series of surface elevation and speed at Dachen and Kanmen

别计算了琉球海沟发生不同场景的地震海啸对我国的影响。沿着琉球海沟的走向, 本文将其分成了6个断裂带, 如图3所示(RL1–RL6)。假设RL2–RL4共同发生8.8级地震, 利用该系统在10 min完成海啸传播的数值模拟与计算结果的可视化。

图12a、图12b分别为第一层网格计算得到的最大波幅和最大流速分布。由于其走向正对我国东南沿海, 因此产生的海啸对我国东南沿海影响很大。海

啸诱发的流场主要集中在我国近岸, 而在深水区域相对较小。图13和图14分别是海啸在传播到温州、台州近海时的波面与最大波幅分布、流场与最大流速分布。海啸在4 h抵达温州和台州近海, 最大波幅超过1 m, 最大流速超过1 m/s。与日本南海海槽潜在海啸的情况不同, 由于海啸的先导波是波谷, 因此靠近海岸的流场的方向与海啸的传播方向相反; 进而受到近岸的影响, 在温州海域进一步增强。图15是基于

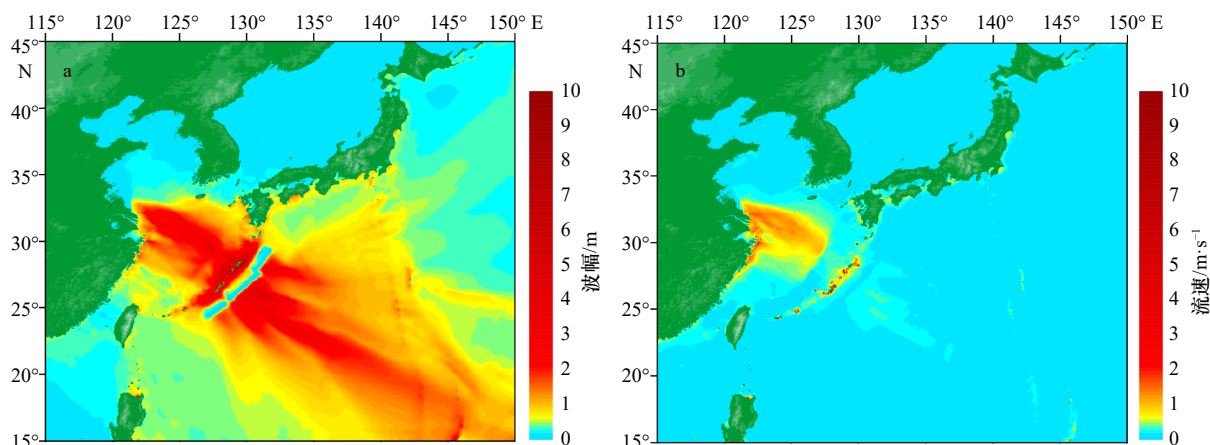


图 12 全场最大波幅(a)与最大流速(b)分布

Fig. 12 Distribution of maximum surface elevation (a) and velocities (b)

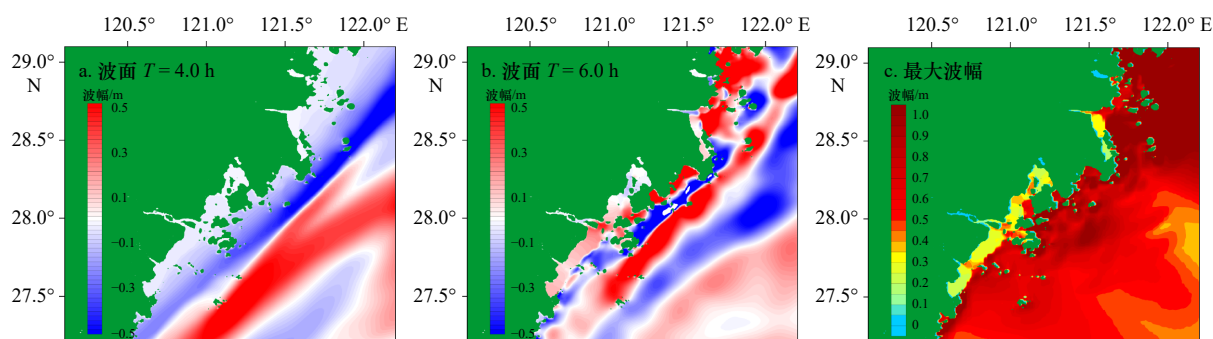


图 13 温台地区近岸波面演化(a, b)与最大波幅(c)分布

Fig. 13 Evolution of tsunami amplitude (a, b) and distribution of maximum amplitude (c) near coasts of Wenzhou and Taizhou

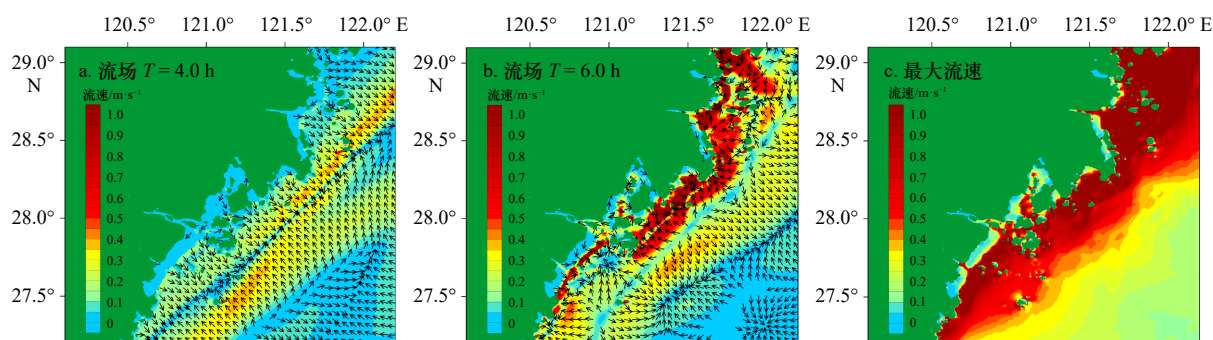


图 14 温台地区近岸流场演化(a, b)与最大流速(c)分布

Fig. 14 Evolution of currents induced by tsunami (a, b) and distribution of maximum velocities (c) near coasts of Wenzhou and Taizhou

海啸风险等级的大陈和坎门的波面与流速的时间序列曲线。大陈的波幅达到橙色风险等级,流速为黄色风险等级;坎门的波幅和流速均达到了橙色风险等级。

## 5 结论与展望

本文主要基于 Okada 模型和非线性浅水波模型,针对我国浙江沿海的温州和台州地区建立了越洋-近海-局部的精细化地震海啸波流实时预警系统,近岸的分辨率为 900 m。该系统通过并行化的数值计算、

自动化的灾害分级和结果可视化,以及图形与动画的网页化集成,可在 10 min 得到地震海啸对近岸影响的精细化预报结果。利用 2011 年日本东北 9.0 级地震海啸在温州、台州的实测数据,对该系统的计算效率与可靠性进行验证。进一步应用该系统模拟计算了日本南海海槽和琉球海沟潜在极端海啸对近岸影响的精细化结果。

目前,该系统仅采用了 4 核的 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-1607 v3 @ 3.10GHz 处理器进行数值计算,可通过提升计算机性能和近岸的计算精度,实现对港

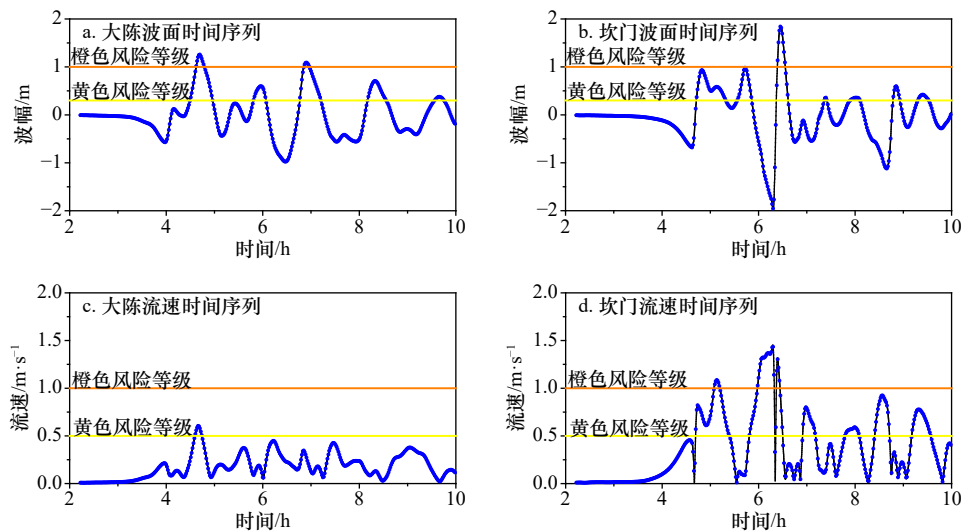


图 15 大陈与坎门的波面、流速时间序列

Fig. 15 Time series of surface elevation and speed at Dachen and Kanmen

口、码头,以及重大海洋工程的精细化预警。在该系统中仅考虑了5个典型的潮位站,可通过在沿岸增加更多测点实现对岸段的精细化预报,且并不增加计算

负荷。总体来说,该系统可有效地实现高效、准确的地震海啸精细化预警,为海啸的预警、减灾,以及辅助决策提供科学依据。

#### 参考文献:

- [1] Løvholt F, Bungum H, Harbitz C B, et al. Earthquake related tsunami hazard along the western coast of Thailand[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2006, 6(6): 979–997.
- [2] Tanioka Y, Yudhicara, Kususose T, et al. Rupture process of the 2004 great Sumatra-Andaman earthquake estimated from tsunami waveforms[J]. *Earth Planets and Space*, 2006, 58(2): 203–209.
- [3] Mori N, Takahashi T, Yasuda T, et al. Survey of 2011 Tohoku earthquake tsunami inundation and run-up[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(7): L00G14.
- [4] 王培涛, 于福江, 赵联大, 等. 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*, 2012, 55(9): 3088–3096.  
Wang Peitao, Yu Fujiang, Zhao Lianda, et al. Numerical analysis of tsunami propagating generated by the Japan  $M_w$ 9.0 earthquake on Mar.11 in 2011 and its impact on China coasts[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(9): 3088–3096.
- [5] Ren Zhiyuan, Wang Benlong, Fan Tingting, et al. Numerical analysis of impacts of 2011 Japan Tohoku tsunami on China coast[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2013, 25(4): 580–590.
- [6] 任智源, 原野, 赵联大, 等. 2016年全球地震海啸监测预警与数值模拟研究[J]. *海洋科学*, 2017, 41(6): 98–110.  
Ren Zhiyuan, Yuan Ye, Zhao Lianda, et al. Monitoring, early warning and numerical study of global tsunamis in 2016[J]. *Marine Sciences*, 2017, 41(6): 98–110.
- [7] 任智源. 南海海啸数值模拟研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.  
Ren Zhiyuan. Numerical simulation of tsunami in South China Sea[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [8] Qiu Qiang, Li Linlin, Hsu Ya-Ju, et al. Revised earthquake sources along Manila trench for tsunami hazard assessment in the South China Sea[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2019, 19(7): 1565–1583.
- [9] Liu P L F, Wang Xiaoming, Salisbury A J. Tsunami hazard and early warning system in South China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 36(1): 2–12.
- [10] Ren Zhiyuan, Liu Hua, Wang Benlong, et al. An investigation on multi-buoy inversion method for Tsunami Warning System in South China Sea[J]. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 2014, 8(3): 1440004.
- [11] Wei Yong, Chamberlin C, Titov V V, et al. Modeling of the 2011 Japan tsunami: lessons for near-field forecast[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2013, 170(6/8): 1309–1331.
- [12] Ren Zhiyuan, Yuan Ye, Wang Peitao, et al. The September 16, 2015  $M_w$ 8.3 Illapel, Chile Earthquake: characteristics of tsunami wave from near-field to far-field[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(5): 73–82.
- [13] Hou Jingming, Li Xiaojuan, Yuan Ye, et al. Tsunami hazard assessment along the Chinese mainland coast from earthquakes in the Taiwan region[J]. *Natural Hazards*, 2016, 81(2): 1269–1281.

- [14] Hou Jingming, Li Xiaojuan, Yuan Ye, et al. Scenario-based tsunami evacuation analysis: a case study of Haimen Town, Taizhou, China[J]. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 2017, 11(3): 1750008.
- [15] Fritz H M, Phillips D A, Okayasu A, et al. The 2011 Japan tsunami current velocity measurements from survivor videos at Kesenuma Bay using LiDAR[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(7): L00G23.
- [16] Lynett P J, Borrero J, Son S, et al. Assessment of the tsunami-induced current hazard[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(6): 2048–2055.
- [17] Arcos M E M, LeVeque R J. Validating velocities in the GeoClaw tsunami model using observations near Hawaii from the 2011 Tohoku tsunami[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2015, 172(3/4): 849–867.
- [18] 王培涛, 闪迪, 王岗, 等. 日本东北 $M_w$ 9.0地震海啸在港池及邻近区域诱发的涡流危险性计算与评估分析[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(11): 4162–4177.  
Wang Peitao, Shan Di, Wang Gang, et al. Modelling and assessment of tsunami-induced vortex flows hazards from the 2011  $M_w$ 9.0 Tohoku-oki earthquake in harbors and adjacent area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(11): 4162–4177.
- [19] Ren Zhiyuan, Zhao Xi, Wang Benlong, et al. Characteristics of wave amplitude and currents in South China Sea induced by a virtual extreme tsunami[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2017, 29(3): 377–392.
- [20] 王培涛, 于福江, 刘秋兴, 等. 福建沿海精细化台风风暴潮集合数值预报技术研究及应用[J]. *海洋预报*, 2010, 27(5): 7–15.  
Wang Peitao, Yu Fujiang, Liu Qiuxing, et al. Study of refined ensemble numerical typhoon surge forecast technology for Fujian coast[J]. *Marine Forecasts*, 2010, 27(5): 7–15.
- [21] 刘秋兴, 董剑希, 于福江, 等. 覆盖中国沿海地区的精细化台风风暴潮模型的研究及适用[J]. *海洋学报*, 2014, 36(11): 30–37.  
Liu Qiuxing, Dong Jianxi, Yu Fujiang, et al. A high-resolution typhoon storm surge forecast model covering the whole China's coastal areas and its application[J]. *Haiyang Xuebao*, 2014, 36(11): 30–37.
- [22] 罗锋, 盛建明, 潘锡山, 等. 江苏沿海精细化风暴潮模式研究与应用[J]. *南京大学学报: 自然科学*, 2014, 50(5): 687–694.  
Luo Feng, Sheng Jianming, Pan Xishan, et al. Studies and applications of refined storm surge model for Jiangsu coast[J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 2014, 50(5): 687–694.
- [23] 刘秋兴, 李明杰, 吴玮, 等. 温州洞头中心渔港精细化浪潮耦合数值预报系统研究[J]. *海洋预报*, 2015, 32(6): 10–18.  
Liu Qiuxing, Li Mingjie, Wu Wei, et al. Studies and applications of coupled wave and storm surge numerical forecast system in Dongtou fishing port[J]. *Marine Forecasts*, 2015, 32(6): 10–18.
- [24] 冯芒, 张文静, 李岩, 等. 台湾海峡及近岸区域精细化海浪数值预报系统[J]. *海洋预报*, 2013, 30(2): 42–48.  
Feng Mang, Zhang Wenjing, Li Yan, et al. The study of fine-scale precision wave forecasting system in the Taiwan Strait[J]. *Marine Forecasts*, 2013, 30(2): 42–48.
- [25] 潘锡山, 盛建明, 韩雪, 等. 江苏辐射沙脊群海域海浪精细化预报模型研究[J]. *淮海工学院学报: 自然科学版*, 2017, 26(3): 85–92.  
Pan Xishan, Sheng Jianming, Han Xue, et al. Fine forecast model on the waves over the radial submarine sand ridges of Jiangsu[J]. *Journal of Huaihai Institute of Technology: Natural Science Edition*, 2017, 26(3): 85–92.
- [26] Steketee J A. On Volterra's dislocations in a semi-infinite elastic medium[J]. *Canadian Journal of Physics*, 1958, 36(2): 192–205.
- [27] Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, 75(4): 1135–1154.
- [28] Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1992, 82(2): 1018–1040.
- [29] LeVeque R J, George D L, Berger M J. Tsunami modelling with adaptively refined finite volume methods[J]. *Acta Numerica*, 2011, 20: 211–289.
- [30] 温瑞智, 任叶飞, 李小军. 日本 $M_w$ 9.0级地震海啸数值模拟与启示[J]. *国际地震动态*, 2011(4): 22–27.  
Wen Ruizhi, Ren Yefei, Li Xiaojun. The tsunami simulation for off the Pacific coast of Tohoku earthquake and disaster mitigation in China[J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2011(4): 22–27.
- [31] Shao Guangfu, Li Xiangyu, Ji Chen, et al. Focal mechanism and slip history of the 2011  $M_w$ 9.1 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, constrained with teleseismic body and surface waves[J]. *Earth, Planets and Space*, 2011, 63(7): 9.
- [32] Furumura T, Imai K, Maeda T. A revised tsunami source model for the 1707 Hiei earthquake and simulation of tsunami inundation of Ryujin Lake, Kyushu, Japan[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2011, 116(B2): B02308.
- [33] Kim K O, Jung K T, Choi B H. Propagation of a tsunami wave generated by an earthquake in the Nankai Trough onto the South Korean coast[J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 65(S1): 278–283.
- [34] Yamada Y, Masui R, Tsuji T. Characteristics of a tsunamigenic megasplay fault in the Nankai Trough[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(17): 4594–4598.
- [35] 温燕林, 赵文舟, 李伟, 等. 日本南海海槽发生罕遇地震情况下我国华东沿海的海啸危险性研究[J]. *地震学报*, 2014, 36(4): 651–661.  
Wen Yanlin, Zhao Wenzhou, Li Wei, et al. Research on the potential tsunami hazard in East China coast under rare earthquake occurred in Nankai Trough, Japan[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2014, 36(4): 651–661.
- [36] 毛献忠, 祝倩, Wei Yong. 浙江沿海潜在区域地震海啸风险分析[J]. *海洋学报*, 2015, 37(3): 37–45.  
Mao Xianzhong, Zhu Qian, Wei Yong. Risk analysis of potential regional earthquake tsunami on the coast of Zhejiang Province[J]. *Haiy-*

- ang Xuebao, 2015, 37(3): 37–45.
- [37] 黄强, 景惠敏, 胡培. 日本南海海沟潜在地震海啸对中国东部沿海影响的数值模拟研究[J]. 海洋科学进展, 2018, 36(2): 206–215.  
Huang Qiang, Jing Huimin, Hu Pei. Numerical study on the impact of potential earthquake along the Nankai Trough on eastern coastal area of China[J]. *Advances in Marine Science*, 2018, 36(2): 206–215.
- [38] Zhao Xi, Liu Hua, Wang Benlong. Evolvement of tsunami waves on the continental shelves with gentle slope in the China seas[J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2013, 3(3): 032005.
- [39] Zhao Xi, Liu Hua, Wang Benlong. Scenarios of local tsunamis in the China Seas by Boussinesq model[J]. *China Ocean Engineering*, 2014, 28(3): 303–316.
- [40] 林法玲. “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, 2012, 31(4): 565–570.  
Lin Faling. 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*, 2012, 31(4): 565–570.
- [41] 温燕林, 于海英, 朱艾斓, 等. 设定琉球海沟发生罕遇地震评估我国东南沿海地区的海啸风险[J]. 地震工程学报, 2016, 38(2): 285–291, 317.  
Wen Yanlin, Yu Haiying, Zhu Ailan, et al. Numerical simulation of risk in the southeast coastal region of China owing to a rare earthquake-induced tsunami in the Ryukyu Trench[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2016, 38(2): 285–291, 317.

## Study and application of the refined tsunami real time warning system including tsunamigenic wave and current

Ren Zhiyuan<sup>1,2</sup>, Hou Jingming<sup>1,2</sup>, Wang Peitao<sup>1,2</sup>, Li Tao<sup>1</sup>, Yuan Ye<sup>1,2</sup>, Zhao Lianda<sup>1,2</sup>

(1. National Marine Environmental Forecast Center, Beijing 100081, China; 2. National Tsunami Warning Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Based on the Okada model, nonlinear shallow water equation, and nested grid with high resolution, a real-time tsunami warning system of transoceanic-offshore-local is built for Wenzhou and Taizhou’s coastal region of Zhejiang Province. The grid resolution of the refined layer is 900 m. The tsunami warning system includes parallel numerical calculation module, visualization module based on Python 2D library (matplotlib), and product integration module which integrates all numerical graphical products on a web page by Python. Once an earthquake occurs, the system could complete the numerical calculation, visualization processing and graphic product integration within 10 minutes. Firstly, the system has been validated by the 2011 Japan tsunami with the magnitude of  $M_w$  9.0. Then, the extreme potential tsunami from Nankai Trough and Okinawa Trough is simulated by the system in terms of tsunami amplitude and currents. The results show that the tsunami warning system can improve the efficiency and accuracy of tsunami early warning in the coastal region, and provide a scientific basis for tsunami early warning, disaster reduction and decision supporting.

**Key words:** earthquake tsunami; tsunami warning system; refined forecast; numerical simulation