

# 地震海啸数值模拟中海洋水深数据的敏感性研究

任叶飞 杨智博 温瑞智 金波

(中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 海洋水深数据是进行海啸数值模拟计算最基础的输入数据之一。目前可供使用的数据源较多, 各种数据源之间的差异性以及数据自身误差是否会对海啸数值模拟产生影响值得关注。以中国南海为研究对象, 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。结果表明, 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。综合而言, 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。

**关键词:** 地震海啸; 数值模拟; 水深数据; 敏感性分析; 南海; 马尼拉海沟

中图分类号: P731.25

文献标志码: A

## Bathymetry data: sensitivity in the numerical simulation of earthquake tsunami

REN Yefei, YANG Zhibo, WEN Ruizhi, JIN Bo

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

**Abstract:** The bathymetry data is one of the key inputs in the numerical simulation of tsunami. At present, multiple sources of bathymetry data are available. It needs to clarify whether the differences among these data sources or the data self-errors have an influence on the tsunami numerical simulation. We study the sensitivity of bathymetry data in the numerical simulation of earthquake tsunami by some case studies in the South China Sea. The results show that the differences between different kinds of bathymetry data have a negligible influence on the tsunami numerical simulation; the errors of bathymetry data itself do not affect the simulated wave amplitudes, but obviously affect the wave phases. In a word, the present opening bathymetry data may satisfy the demand on numerical simulation of tsunami propagation in a broad open sea.

**Key words:** earthquake tsunami; numerical simulation; bathymetry data; sensitivity analysis; the South China Sea; Manila trench

海啸危险性分析方法继承了现有成熟的地震危险性分析方法的步骤和思路, 能够给出某一给定海滨地区将来若干年内一定海啸波高值的超越概率, 其中数值模拟是重要环节<sup>[1-2]</sup>。同地震危险性分析一样, 海啸危险性分析也注重结果的不确定性, 尤其在数值模拟环节<sup>[3]</sup>。研究者往往关注输入参数, 如震源深度、破裂面长度、宽度、滑移量、破裂走向角、倾角、滑移角等对模拟结果的不确定性, 针对这些参数开展敏感性分

收稿日期: 2014-03-10; 修回日期: 2014-05-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278473); 环保部公益性行业科研专项(201209040); 东北亚地震海啸和火山合作研究计划项目(ZRH2014-11)

作者简介: 任叶飞(1983-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事强震地震学及海啸防灾减灾研究。E-mail: renyefei@iem.net.cn

析<sup>[4-7]</sup>。对于海洋水深(bathymetry)数据的敏感性分析工作目前国内外尚属空白。在进行地震海啸数值模拟时,水深作为基础数据一般在开阔海域采用全球公开发布的大网格数据,通常采用卫星雷达采集<sup>[8]</sup>;在近海域采用各自国家不公开的高分辨率小网格数据,通常采用走航式水深测量方法采集<sup>[9]</sup>。由于测量技术和方式的不同,公开发布的全球水深数据拥有多个不同数据源,并且相互间存在差异;另外测量过程也难免存在系统误差。这些差异和误差是否对海啸数值模拟结果产生影响值得我们关注和探讨。

目前,通过数值模拟技术进行海啸防灾减灾的相关研究我国已开展较多。例如,温瑞智等对日本琉球群岛附近的假想海啸进行了数值模拟,分析了对我国东部沿海地区造成的影响<sup>[10]</sup>;温燕林等<sup>[11]</sup>对我国东海可能发生特大地震的极端情况进行了数值模拟,给出了浙江等地区海啸波最大浪高达到 1~2 m 的结论;于福江等<sup>[12]</sup>利用 1994 年发生在台湾海峡的一次地震海啸进行数值模拟,并应用于我国沿海核电站可能最大地震海啸的数值计算中。这些研究仅强调了数值模拟的确定性结果,并没有开展有关参数的敏感性分析。Ren 等<sup>[13]</sup>总结了我国海啸防灾减灾相关研究进展,也未见有这方面的研究成果,仅任鲁川等<sup>[14]</sup>给出发生在马尼拉海沟北段的地震海啸在华南近海区域产生的最大海啸波振幅对震级十分敏感的结论。

本文以南海为研究对象,分析目前常用的三种水深数据的差异性;针对马尼拉海沟的地震潜源进行海啸数值模拟计算,探讨水深数据差异性对于模拟波高的影响;对水深数据进行人为改变以模拟误差的产生,分析水深数据误差对于海啸数值模拟的影响;旨在探讨海洋水深数据对于海啸波高数值模拟的敏感性进而验证其适用性。

## 1 数据源的差异性

### 1.1 数据源

目前较为常用的海洋水深数据主要有 ASTER、GDEM、SRTM、GTOPO30、ACE2、ETOPO、GEBCO 等<sup>[15]</sup>。本文选择了常用的 SRTM、ETOPO、GEBCO 这 3 种数据源作为研究对象,其主要特征介绍如下:

SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 覆盖了地球陆地表面 80% 以上的数字地形数据,目前提供的数据精度可达 90m (3 弧秒),这一精度只针对陆地部分,海洋水深数据仅提供 30 弧秒精度的数据可下载使用;其高程数据的垂直精度达到 16m,其主要是由航天飞机雷达测量而来<sup>[16]</sup>。

GEBCO (The General Bathymetric Chart of the Oceans) 可提供全世界各大洋的水深数据。水深数据来自于质检船(已知测点)的测深,以及通过卫星获取的资料,陆地部分主要来自 SRTM30 的数字海拔模型。目前提供有 1 弧分和 30 弧秒的数据<sup>[17]</sup>。

ETOPO 是由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)下属的国家地球物理数据中心(NGDC)发布的,数据整合 SRTM30 地形、GEBCO 水深、GLOBE 水深、JODC 水深数据等,覆盖整个地球,先后推出了 5 弧分、2 弧分、1 弧分精度的数据<sup>[18]</sup>。

### 1.2 研究区域

选取我国南海  $N11^{\circ} - N26^{\circ}$ ,  $E108^{\circ} - E122^{\circ}$  作为研究区域。主要考虑以下两点因素:(1)南海具备海啸产生条件,其东部的马尼拉海沟断裂带比较活跃,存在发生破坏性海啸的可能性,一旦地震发生 2.5~4 h 内将对我国东南沿海地区造成严重破坏<sup>[19]</sup>;(2)东南沿海地区是我国乃至亚太经济最具活力的地区之一,一旦遭受海啸袭击,对经济、社会的影响非常深远。因而,南海海域是海啸防灾减灾研究的重点关注区域,该区域内进行数值模拟分析工作已广泛开展<sup>[19-23]</sup>。

分别选取该区域内 30 弧秒精度的 SRTM、1 弧分精度的 GEBCO、1 弧分精度的 ETOPO 数据进行分析。为保证数据完整真实,均未对数据进行插值处理,网格大小均保持原始精度。图 1 给出了该区域 SRTM 数据的高程/水深分布情况,大陆架主要分布在北、西、南三面。其中,南部大陆架宽度最宽,北部次之,西部和东部狭窄。南海的水深较深,北、西、南三面靠陆地附近深度较浅外,中部和东部水深大都在 2 000 m 以上。

其他两种数据源的高程/水深分布情况限于篇幅原因这里未给出,从宏观视觉上判断三者未有明显差异。接下来我们对具体数据点进行差异性分析,选取  $N14^{\circ}$ ,  $N16^{\circ}$ ,  $N18^{\circ}$  和  $N20^{\circ}$  共 4 个截断面高程/水深数据进行对比,如图 1 所示。图 2 给出了这 4 个截断面上的 3 种数据源的高程/水深随经度分布情况。水深分布大致在 0~4 000 m 之间,从大陆向外海呈阶梯状下降,存在海岛、暗礁及宽阔的海盆。

从图中可见,不同数据源之间地形起伏趋势一致,浅水区域(水深数据小于 500 m)差异不明显,而在开阔的深海区域存在部分数据差异较大的情况,如在 A-A' 截面 111°E 位置附近 GEBCO 数据浅于 SRTM 和 ETOPO 数据接近 1 000 m,115°E 位置附近 ETOPO 数据深于 GEBCO 和 SRTM 数据超过 1000m。还有在 C-C' 和 D-D' 截面分别出现 SRTM 数据异常“突起”,这有可能是 SRTM 数据精度(30 弧秒)要高于 GEBCO 和 ETOPO 数据(1 弧分)的缘故,该位置或许出现暗礁。由此可见,不同数据源的海洋水深数据还是存在一定的差异性的,是否由此对海啸数值模拟产生影响值得探讨和研究。

### 1.3 设定地震海啸数值模拟

以马尼拉海沟俯冲断层为潜在海啸源,分别采用上述 3 种水深数据在所选区域内进行海啸生成、传播过程的数值模拟计算。比较计算结果以观察水深数据源的差异对海啸波高数值模拟结果的影响程度。

#### 1.3.1 初始条件

由于受欧亚板块向菲律宾板块的俯冲挤压,处于板块边界的马尼拉海沟地震频发。对于其地质构造背景和地震活动性学者们已广泛开展研究<sup>[20, 24-25]</sup>。我国学者也开展了这方面研究,基于历史地震和地质构造背景分析给出了 6 个地震潜源<sup>[26]</sup>。其地理位置分布如图 1 所示,地震构造和活动性参数见表 1。将这 6 个潜源取其震级上限作为 6 个设定地震,分别进行海啸数值模拟计算。

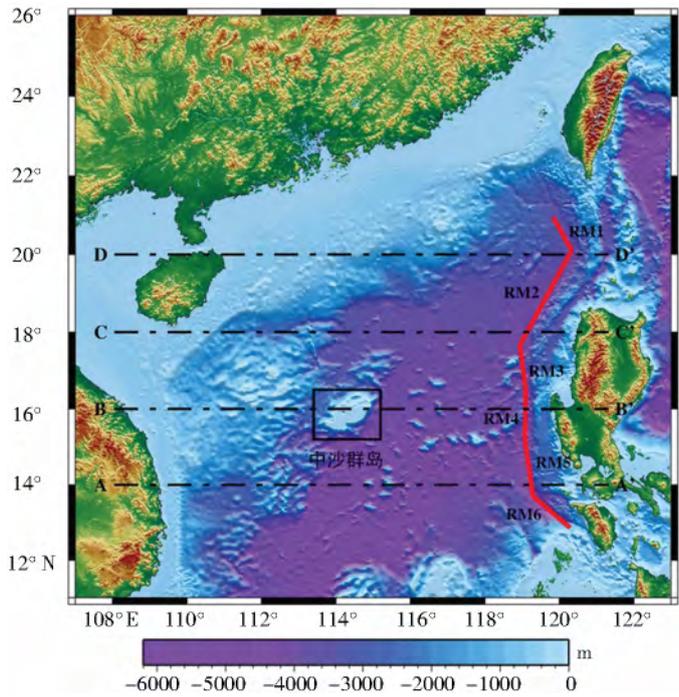


图 1 南海高程/水深分布(SRTM 数据)及马尼拉断层分布(参数见表 1)  
Fig. 1 Topography/Bathymetry (SRTM data) of the South China Sea and subduction faults in Manila Trench

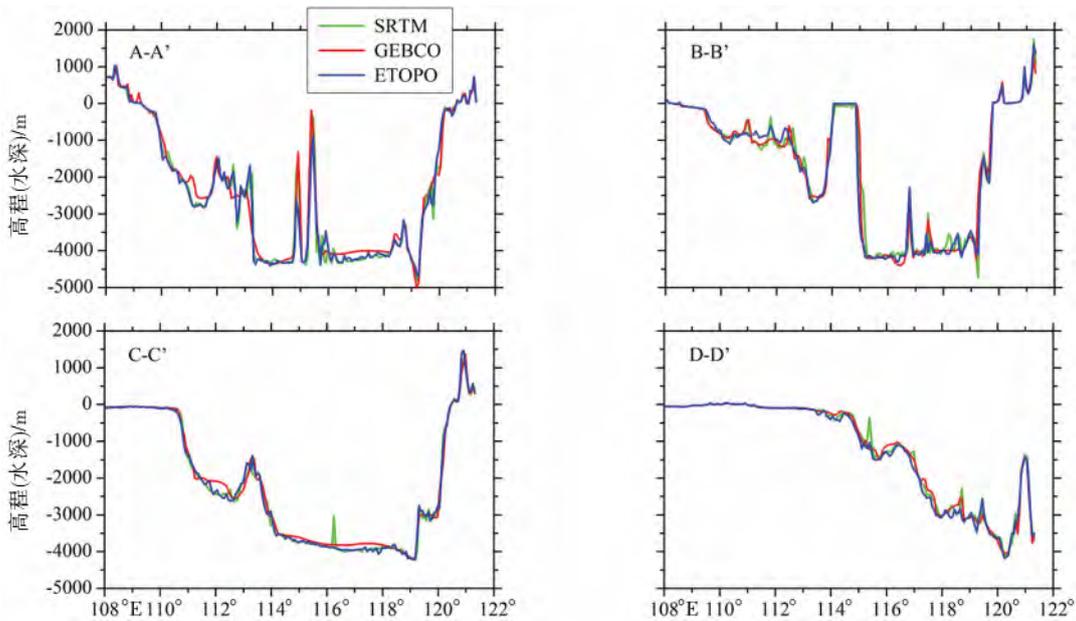


图 2 4 个截断面的不同数据源间的高程/水深数据比较  
Fig. 2 Comparison of topography/bathymetry from different data sources in four latitude sections

#### 1.3.2 数值模拟

采用国际上常用的 COMCOT( Cornell Multi - grid Coupled Tsunami Model) 海啸数值模拟软件模拟海啸的生成和传播过程。由于这里仅考虑不同数据源的海洋水深数据对海啸数值模拟结果的影响,数据精度为 1 弧分或 30 弧秒,因而这里不进行海啸爬高计算,也就不采用嵌套网格,只是在球坐标系下求解线性浅水方

程。图 3 显示了这 6 个设定地震海啸在 3 种水深数据源情况下的模拟结果对比。图中分别给出了上述 4 个截断面的最大波高分布。可以发现,不同水深数据源情况下的模拟结果基本一致,但也存在部分区域差异较大的现象。

表 1 马尼拉海沟断层地震构造和活性性参数

Table 1 Parameters of seismotectonics and seismicity of Manila trench faults

马尼拉断层	走向/(°)	长度/km	深度/km	震级/ $M_w$	宽度/km	倾角/(°)	滑移角/(°)	平均滑移量/m
RM1	350	210	20	8.2	82	14	110	2.94
RM2	29	310	20	8.6	109	20	110	5.3
RM3	3	135	20	7.9	66	20	90	1.89
RM4	351	140	20	7.9	66	20	90	1.89
RM5	353	166	20	8.0	71	30	50	2.19
RM6	308	142	20	7.9	66	30	50	1.89

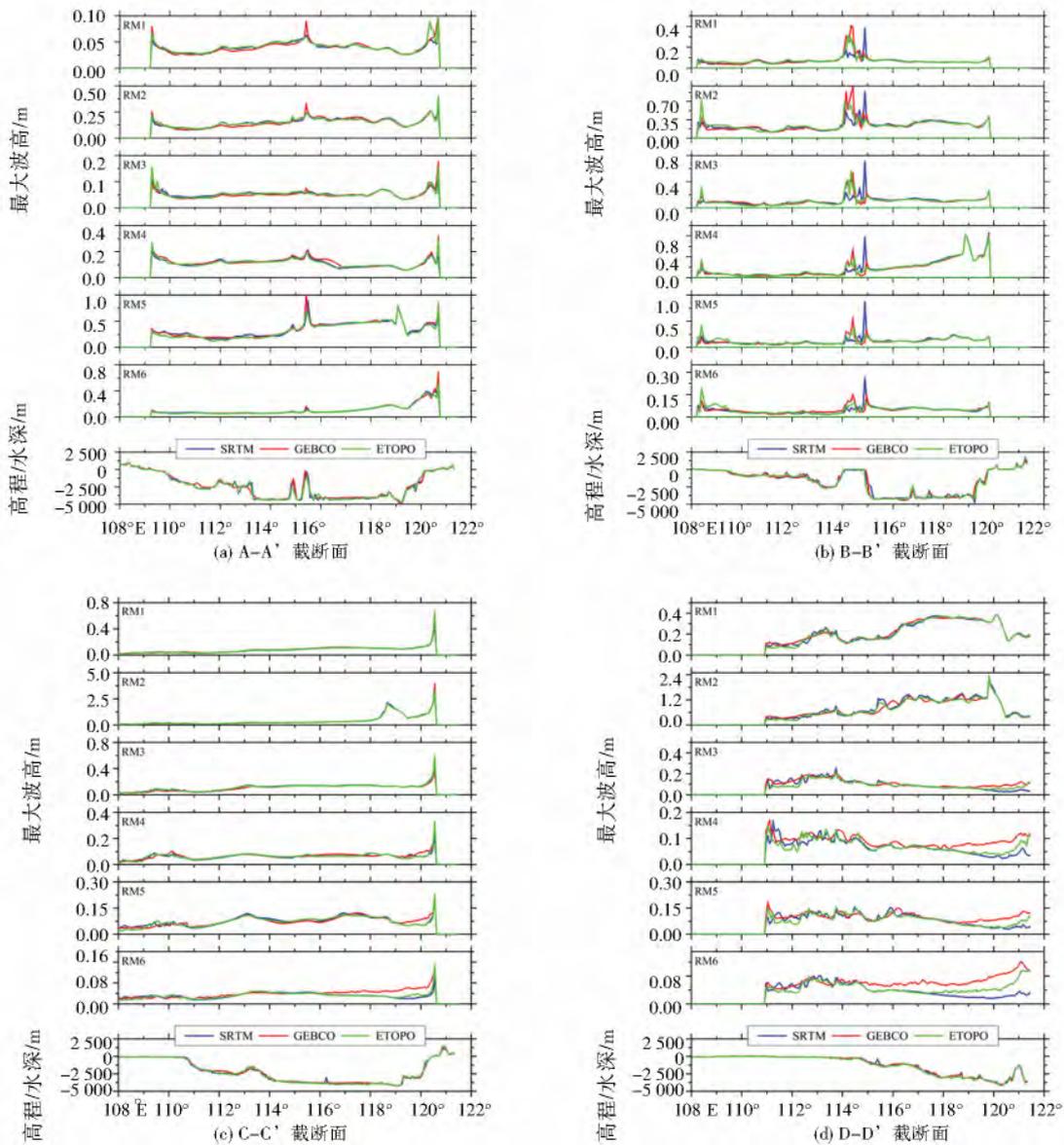


图 3 采用不同海洋水深数据源对马尼拉海沟设定地震海啸进行数值模拟的结果比较

Fig. 3 Comparison of numerical simulation results for set seismic tsunami scenarios in Manila Trench using different bathymetry data  
 对于 A - A' 截断面,即使在前文所述不同数据源水深差异 10 00 m 左右的 111°E 和 115°E 位置附近,模拟结果显示也较一致,值得注意的是它们处于深水区域;不过,在 115.5°E 位置附近,该位置处于浅水区域,尽管水深数据差异不明显,但模拟结果存在一定的差异性。对于 B - B' 截断面,在 114°E - 115°E 区间内,

不论哪个设定地震海啸, 采用 SRTM 水深数据的的模拟结果都与 GEBCO 和 ETOPO 数据的模拟结果存在显著差异, 后两者存在一定的一致性。从图 1 和图 2 可判断这一区域为陆地浅滩(中沙群岛), 水深较浅, 海啸波自深水区至浅水区波长变短、波幅升高。SRTM 数据精度高于其他两种数据, 计算结果更为精确。尽管 C - C' 截面出现 SRTM 数据异常“突起”(图 2 所示), 但模拟结果与采用 GEBCO 和 ETOPO 数据的结果并未出现明显不同。

值得关注的是 D - D' 截面, 在 111°E - 114°E 区间内, 不论哪个设定地震海啸, 3 种数据的模拟结果都存在显著差异性。该区域位于南海大陆架内, 水深较浅(图 1 所示), 并且 3 种水深数据几乎相同(图 2 所示)。因而可以推断深水区域不同数据源的水深差异引起了海啸数值模拟在近海浅水区域波高的差异。需要说明的是, 对于 RM4, RM5 和 RM6 断层引起的海啸, 在 116°E - 122°E 区间内, 3 种数据的模拟结果差异显著。原因是该区域距离这 3 个断层较远且处于侧翼位置, 受波的散射影响较大, 数值模拟结果并不稳定。

综上所述可以认为, 在开阔的深海海域即使不同数据源的水深数据存在显著差异, 对地震海啸数值模拟的波高影响并不大, 然而在近海浅水区域却存在显著影响。

## 2 数据误差的敏感性

不管哪种数据源的水深数据都是通过一定的科学勘测方法获取, 测量过程或多或少存在误差。那么这种误差对海啸数值模拟结果会产生多大影响, 影响程度是否在可接受范围内, 接下来我们将分析探讨。由于这种误差不得而知, 我们将水深数据值进行人为改变以模拟误差产生, 比较误差存在前后的模拟结果以分析对海啸数值模拟产生的影响。基于此研究目的, 选取何种数据源的水深数据都无妨, 这里我们选取精度为 1 弧分的 ETOPO 数据进行分析, 并选取 RM2 地震潜源进行海啸数值模拟计算。

### 2.1 水深数据整体变化

我们假设水深数据存在整体 20% 的误差, 将实际数据值人为增大或减小 20%。对比数据改变前后数值模拟结果, 采用相对变化率的方式进行比较:

$$\delta = \frac{Z_{\max}^i - Z_{\max}^0}{Z_{\max}^0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $\delta$  为相对变化率,  $Z_{\max}^i$  为水深数据改变  $i\%$  后某场点的海啸最大波高,  $Z_{\max}^0$  为水深数据改变前某场点的海啸最大波高。

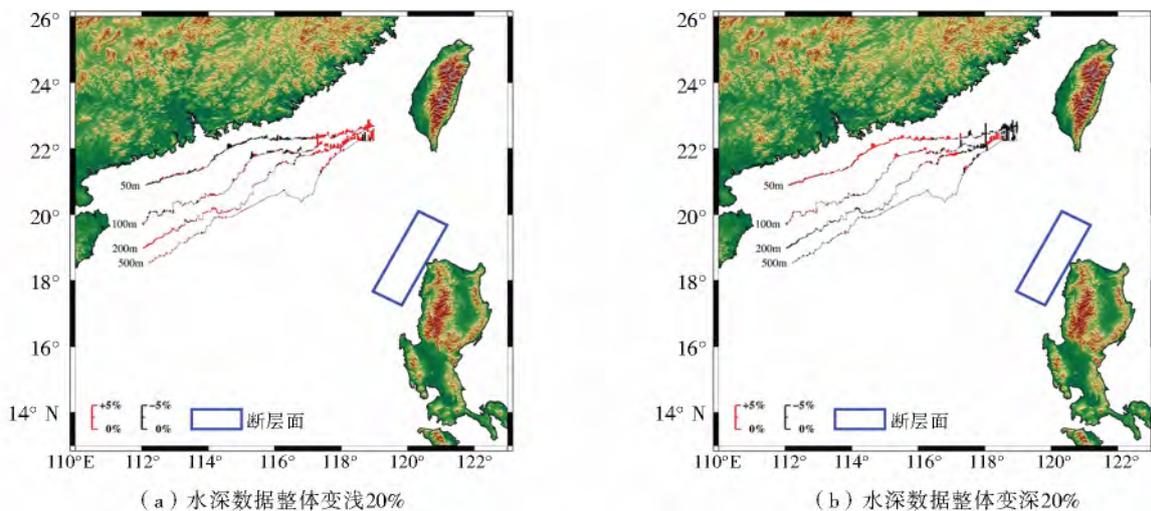


图 4 海洋水深数据整体变浅或变深前后的海啸波高变化情况

Fig. 4 Change of maximum tsunami waves height before and after water depth having overall decrease or increase

图 4 表示水深数据整体变浅或变深 20% 前后数值模拟的海啸最大波高相对变化情况, 分别在水深 50 m, 100 m, 200 m 和 500 m 等深线处表示, 红色线段表示海啸最大波高相对增加, 黑色线段表示相对减小。可以看出, 无论水深变浅还是变深, 海啸最大波高变化都在 5% 以内, 尤其是 200 m 和 500 m 等深线位置几乎没有变化。值得注意的是在台湾海峡入口处波高变化相对明显, 究其原因是在海啸波在海峡入口处产生散射、折射效应, 传播过程复杂, 易产生明显变化。

我们知道,当海啸波向海岸传播时,海水变浅其波长变短、波高变大。然而对于开阔海洋,海水深度(数十 m 至数千 m)远大于海啸波波高(几 cm 至几 m),即使其产生 20% 的变化对于海啸波的波高影响也非常微弱,因而也就产生了图 4 所示结果,但这种变化对于海啸波相位会产生一定的影响。

图 5 为某场点(117.427°E, 22.336°N)在水深数据整体变浅 20% 与不改变情况下模拟得到的海啸波时程。可以发现,波高幅值基本一致,相位差异明显。海啸在深水区传播时其速度  $v$  可近似表示为  $\sqrt{gh}$ , 其中  $g$  为重力加速度  $h$  为海水深度。如果  $h$  整体减小 20%  $v$  就整体变化为原来的  $\sqrt{0.8}$ , 海啸波传播时间也就变化为原来的  $1/\sqrt{0.8} = 1.118$ 。图 5 中我们提取了 2 个波峰位置的传播时间,其变化分别为原来的  $4\ 568/4\ 082 = 1.119$  和  $7\ 636/6\ 832 = 1.118$ , 与理论变化值一致。

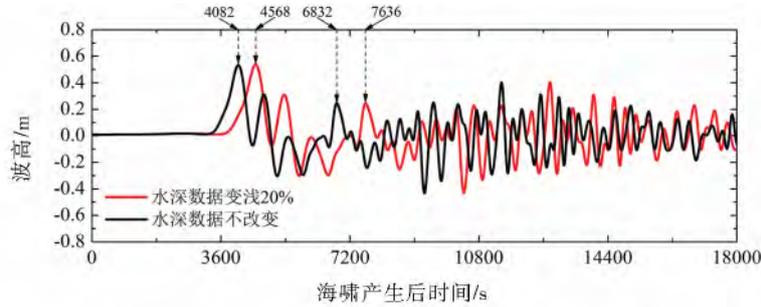


图 5 海洋水深数据整体变浅 20% 前后某场点(117.427°E, 22.336°N) 海啸波高时程比较

Fig. 5 Time history comparison of tsunami wave amplitudes in one site (117.427°E, 22.336°N) before and after the water depth having overall 20% decrease

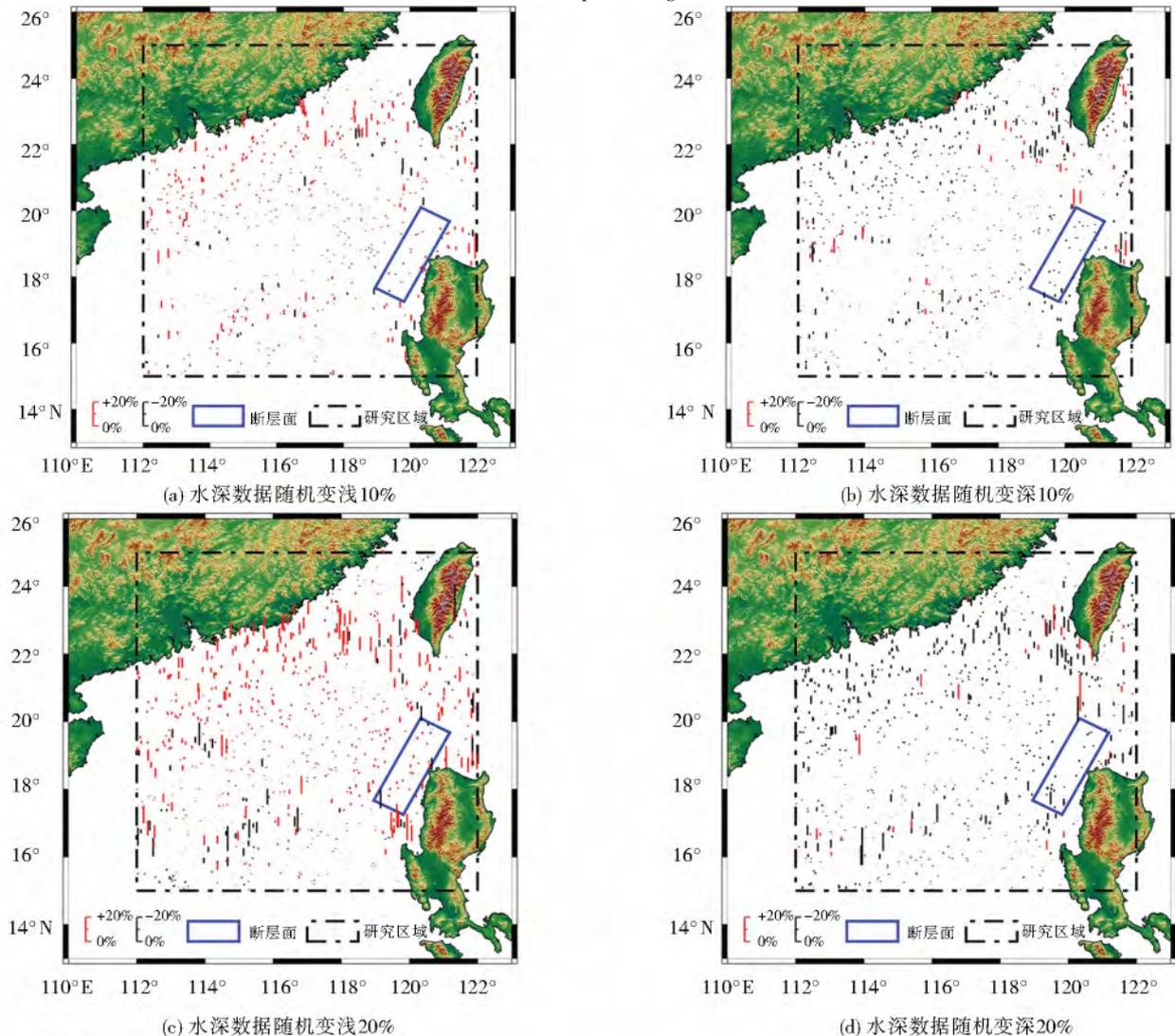


图 6 海洋水深数据随机变浅或变深前后的海啸波高变化情况

Fig. 6 Change of the maximum tsunami waves height before and after the water depth having random decrease or increase

## 2.2 水深数据随机变化

上文对于水深数据的整体改变实际上是对一种极端情况的假设,为了更真实地体现水深数据误差对于海啸数值模拟产生的影响,我们在海啸传播的一定区域范围内均匀选取一定数量的场点,人为改变其海水深度  $\pm 10\%$  和  $\pm 20\%$ ,以模拟水深数据的误差。场地选取原则为空间随机性,数量为区域内网格总数的 0.3% (850 个左右)。依旧对 RM2 地震潜源进行海啸数值模拟计算,采用式(1)计算水深数据改变前后海啸波高的变化率,结果如图 6 所示。

从图中可见,总体上当海水深度变浅时模拟的海啸波高增大,反之相反;海啸波高的变化率随着水深数据变化增大而增大;在中心区域(深海)波高变化几乎可忽略;然而在沿海大陆架或中沙群岛浅滩(见图 1)部分场点的波高变化还比较明显。主要原因是这些场点位于浅水区域,海啸波高受水深影响大,也就解释了这里结果不同于图 4 所示水深数据整体变化情况下的结果。不过,变化率都在 20% 以内,影响程度还是在可接受范围内的,可以说水深数据的误差对于海啸波高的数值模拟并没有很大影响。

## 3 结论

海啸传播波速和波高与海水深度密切相关,在数值模拟过程中,水深数据是一项非常重要的基础输入数据。本文以中国南海为研究对象,以马尼拉海沟俯冲区为潜在震源区,选取常用的 SRTM,ETOPO,GBCO 三种水深数据,开展海洋水深数据对于海啸波高数值模拟的敏感性研究,得到以下结论:

(1) 不同数据源的海洋水深数据总体上保持一致,但仍然在某些场点存在较大差异性。通过实例计算发现,在远海深水区域这种差异性对地震海啸数值模拟的波高影响并不显著;但在近海浅水区域会引起海啸波的相位明显变化。

(2) 在一定区域内人为改变海水深度以模拟误差的产生,海啸数值模拟结果显示这种改变对于外海开阔海域的海啸波幅值几乎没有影响,但会产生明显的相位变化,并通过例证说明了这种相位变化与理论分析较一致;另外还显示这种改变可在沿海大陆架或海岛浅滩区域影响海啸波幅值,但其影响程度却是在可接受范围之内的。

综上所述,在进行海啸数值模拟过程中,选择何种数据源的水深数据对于模拟结果影响甚微,外海开阔海域的水深数据误差对于模拟结果的影响是可以忽略的。在大网格(低精度)计算环境下,海洋水深数据对于海啸波高数值模拟的敏感性是较轻微的,目前开放的水深数据可满足海啸传播数值模拟的需要。

## 参考文献:

- [1] 温瑞智,任叶飞,李小军,等.我国地震海啸危险性概率分析方法[J].华南地震,2011,31(4):1-13.  
WEN Ruizhi,REN Yefei,LI Xiaojun,et al. Probability analysis method of earthquake-induced tsunami risk in China [J]. South China Journal of Seismology,2011,31(4):1-13. (in Chinese)
- [2] 宋昱莹,温瑞智,任叶飞,等.沿海场点地震海啸危险性概率分析[J].地震工程与工程振动,2014,34(增刊):1060-1064.  
SONG Yuying,WEN Rruizhi,REN Yefei,et al. Probabilistic tsunami hazard analysis of Chinese coastal site [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2014,34(S):1060-1064. (in Chinese)
- [3] Geist E L,Parsons T. Probabilistic analysis of tsunami hazards [J]. Natural Hazards,2006,37(3):277-314.
- [4] Titov V V,Mofjeld H O,Gonzalez F I,et al. Offshore forecasting of Hawaiian tsunamis generated in Alaskan-Aleutian Subduction Zone [R]. NOAA Technical Memorandum ERL PMEL-114,Pacific Marine Environmental Laboratory.
- [5] Gica E,Teng M H,Liu P L F,et al. Sensitivity analysis of source parameters for earthquake-generated distant tsunamis [J]. Journal of Waterway,Port,Coastal,and Ocean Engineering,2007,133(6):429-441.
- [6] Okal E A. Seismic parameters controlling far-field tsunami amplitudes: A review [J]. Natural Hazards,1988,1(1):67-96.
- [7] Takaoka K,Ban K,Yamaki S. Possibility for transoceanic tsunami forecast by numerical simulation-Example of 1960 Chilean tsunami by numerical simulation [J]. ITS,2001,7:849-859.
- [8] Rabus B,Eineder M,Roth A,et al. The shuttle radar topography mission-a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2003,57(4):241-262.
- [9] 裴文斌,牛桂芝,曹满. 走航式适航水深测量误差来源及准确度检测[J].水道港口,2004,25(2):112-115.  
PEI Wenbin,NIU Guizhi,CAO Man. Causes of errors of nautical depth measurement in moving and checking of the measuring accuracy [J]. Journal of Waterway and Harbour,2004,25(2):112-125. (in Chinese)

- [10] 温瑞智,任叶飞,周正华. 近场海啸数值模拟初步研究[J]. 防灾减灾工程学报,2007,27: 447-450.  
WEN Ruizhi, REN Yefei, ZHOU Zhenghua. A preliminary study on numerical simulation of tsunami in near field [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27: 447-450. (in Chinese)
- [11] 温燕林,朱元清,宋治平,等. 东海海域潜在地震海啸的数值模拟初步研究[J]. 地震学报,2008,30(5): 456-463.  
WEN Yanlin, ZHU Yuanqing, SONG Zhiping, et al. Preliminary numerical simulation of potential earthquake-induced tsunami in East China Sea [J]. Acta Seismologica Sinica, 2008, 30(5): 456-463. (in Chinese)
- [12] 于福江,叶琳,王喜年,等. 1994年发生在台湾海峡的一次地震海啸的数值模拟[J]. 海洋学报,2001,23(6): 32-39.  
YU Fujiang, YE Lin, WANG Xinian, et al. The simulation of tsunami happened in the Taiwan Strait in 1994 [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(6): 32-39. (in Chinese)
- [13] Ren Yefei, Wen Ruizhi, Song Yuying. Recent progress of tsunami hazard mitigation in China [J]. Episodes, 37(4): 277-283.
- [14] 任鲁川,薛艳,简春林,等. 南海北缘海啸波高对潜在海啸源震级偏差的敏感性[J]. 中国地震,2009,25(2): 186-192.  
REN Luchuan, XUE Yan, JIAN Chunlin, et al. Sensitivity analysis of the effect of the earthquake magnitude in potential tsunami source on the tsunami wave amplitude in the northern area of the South China Sea [J]. Earthquake Research in China, 2009, 25(2): 186-192. (in Chinese)
- [15] 侯京明,高义,李涛. 海洋数值模型常用地形数据概述[J]. 海洋预报,2012,29(6): 44-49.  
HOU Jingming, GAO Yi, LI Tao. Review of topography and bathymetry data used in ocean models [J]. Marine Forecasts, 2012, 29(6): 44-49. (in Chinese)
- [16] U. S. Geological Survey [DB/OL] (2010-09-03) [2015-04-09]. [Http://srtm.usgs.gov](http://srtm.usgs.gov).
- [17] British Oceanographic Data Centre [DB/OL]. (2014-02-07) [2015-04-09] <http://www.gebco.net>
- [18] National Oceanic and Atmospheric Administration [OB/OL]. (2010-09-03) [2015-04-09]. <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global>.
- [19] 潘文亮,王盛安,蔡树群. 南海潜在海啸灾害的模拟[J]. 热带海洋学报,2009,28(6): 7-14.  
PAN Wenliang, WANG Shengan, CAI Shuqun. Simulation of potential tsunami hazards in the South China Sea [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2009, 28(6): 7-14. (in Chinese)
- [20] Liu Y C, Santos A, Wang S M, et al. Tsunami hazards along Chinese coast from potential earthquakes in South China Sea [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2007, 163(1/2/3/4): 233-244.
- [21] Liu P L F, Wang X M, Salisbury A J. Tsunami hazard and early warning system in South China Sea [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 36(1): 2-12.
- [22] Ha D M, Tkalich P, Soon C E, et al. Tsunami propagation scenarios in the South China Sea [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 36(1): 67-73.
- [23] Huang Z H, Wu T R, Tan S K, et al. Tsunami hazard from the subduction Megathrust of the South China Sea: Part II. Hydrodynamic modeling and possible impact on Singapore [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 36(1): 93-97.
- [24] Bautista C B, Bautista M L P, Oike K, et al. A new insight on the geometry of subducting slabs in northern Luzon, Philippines [J]. Tectonophysics, 2001, 339(3): 279-310.
- [25] Megawati K, Shaw F, Si K, et al. Tsunami hazard from the subduction megathrust of the South China Sea: Part I. Source characterization and the resulting tsunami [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 36(1): 13-20.
- [26] 周本刚,何宏林,安艳芬,等. 琉球海沟、马尼拉海沟地震构造背景及震源参数评估报告[R]. 中国地震局地质研究所,中国地震局地球物理研究所,中国地震局地震预测研究所,2011.  
ZHOU Bengang, HE Honglin, AN Yanfen, et al. Report of the evaluation of the seismotectonic background and source parameters in the Ryukyu Trench and Manila Trench [R]. Institute of Geology, Institute of Geophysics, Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, 2011. (in Chinese)