

DOI:10.11737/j.issn.1003-0239.2023.01.003

基于海啸单位源数据库的南中国海区域海啸数值预报方法

李宏伟^{1,2,3}, 孙立宁^{1,2*}, 王宗辰^{1,2}, 徐志国^{1,2,3}, 王培涛^{1,2,3}, 史健宇^{1,2}

(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; 3. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081)

摘要: 基于全球俯冲带板片模型 Slab 2.0 将马尼拉海沟划分为 80 个海啸单位源, 构建了海啸单位源数据库, 建立了基于单位源数据库方法预报海啸的业务化流程。经过与现有海啸数值模型计算结果的比对, 单位源数据库预报的最大海啸波幅平均预报一致性可以达到 88%, 能够满足业务化需求。

关键词: 海啸; 预警; 单位源; Slab 2.0

中图分类号: P731.36 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)01-0021-07

1 引言

21 世纪以来, 海啸灾害频发, 造成了巨大的人员伤亡和经济损失。例如, 2004 年印尼苏门答腊 9.2 级地震海啸和 2011 年日本东北部 9.0 级地震海啸都给当地的居民生活以及经济发展造成了毁灭性的打击。如何快速准确地进行海啸数值预报从而进一步减少其带来的损失, 已成为各沿海国家关注的热点问题。

目前, 根据不同的方法可将定量海啸预报技术分为两种: 准实时海啸数值模拟方法和海啸数据库方法。准实时海啸数值模拟方法可以根据地震的基本参数建立海啸初始场, 模拟海啸传播过程。该方法的优势在于可以对任何地区发生的海底地震进行响应, 然而其计算过程耗时较长。虽然并行计算的应用可以大幅提高计算效率^[1], 但是准实时海啸数值模拟方法的时效性依然较低。海啸数据库方法是基于海啸数值模拟, 预先计算出一些情景对指定输出点的影响, 并将现有地震事件解构为这些情景的加权组合, 从而计算出海啸的数值预报结果。与准实时海啸数值模拟方法相比, 海啸数据库方法具有较强的时效性, 通常可在 1~2 s 内得到

海啸数值预报结果, 更适用于局地海啸预报, 其缺点在于计算数据库的情景参数需要有专业的判断依据。根据数据库情景的内容不同, 海啸数据库方法又可进一步分为海啸情景数据库和海啸单位源数据库^[3]。海啸情景数据库方法是根据预先计算多个不同震级、不同深度的地震场景所产生的海啸波幅“插值”得到当前地震事件所产生海啸波的影响。海啸单位源数据库则是将潜在海啸源区分为若干个大小相等的单位源, 预先计算每个单位源在输出点的海啸时间序列, 基于海啸在深水地区传播满足线性方程的假设, 将地震事件解构为多个海啸单位源的组合, 进而通过线性叠加各个单位源的时间序列得到海啸数值预报结果。与情景数据库方法相比, 海啸单位源数据库方法中地震事件的走向角并不是一个常数, 而是随着潜在震源区域的走向角变化的, 结果更接近真实地震情况。因此, 该方法已经被广泛应用到全球海啸预警工作中。美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 建立了全球俯冲带的海啸单位源数据库并用于海啸淹没预报 (网址: https://nctr.pmel.noaa.gov/ComMIT/docs/gica_2937.pdf)。印尼气象、气候和地球物理局 (Indonesian

收稿日期: 2022-03-16; 修回日期: 2022-04-16。

基金项目: 国家自然科学基金(41806045)。

作者简介: 李宏伟(1984-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事地震海啸预警研究工作。E-mail: lihw@nmefc.cn

*通信作者: 孙立宁(1993-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事海洋灾害预警预报技术研究。E-mail: sunln@nmefc.cn

Agency for Meteorology, Climatology and Geophysics)建立了印度洋内的海啸单位源数据库并用于本国及周边的海啸预警^[2]。此外,由于该方法计算效率较高,也被广泛应用于海啸风险评估研究^[3-4]。

南中国海地处亚欧板块、菲律宾海板块以及印度洋板块的交界处,呈现出复杂的地质构造特征。作为全球著名的俯冲带,该区域内东部的马尼拉海沟被美国地质勘探局(United States Geological Survey)定为全球风险最高的潜在特大地震震源之一。考虑到南中国海周边国家沿岸地区城市密集,人口密度大,社会经济发展水平高,一旦马尼拉海沟周边发生强震并引发大规模海啸,造成的人员伤亡和经济损失将不可估量。鉴于该区域海啸风险巨大,南中国海区域海啸预警中心于2018年成立,主要职责是向南中国海周边国家提供海啸预警信息服务。本文基于最新的全球俯冲带模型及海啸数值模型建立了马尼拉海沟的海啸单位源数据库,与原先NOAA在南中国海区域建立的海啸单位源数据库相比,单位源面积缩小为原来的1/4,数量增加为原来的4倍,更有利于捕捉海啸细节。此外,单位源参数的设定基于目前最先进的俯冲带模型Slab 2.0,更符合真实的构造情况。同时,本文也讨论了该数据库的业务化应用流程,并应用该方法对一系列合成地震的数值预报结果进行分析,以期提升南中国海地区的海啸预警能力。

2 数据与方法

2.1 海啸单位源数据库构建

海啸单位源数据库的构建原理是基于海啸在深海传播满足线性方程的假设,将潜在海啸源区域的地震解构为若干个海啸单位源的组合,进而通过将预先计算好的单位源产生的海啸时间序列线性叠加达到预报海啸波幅的目的。该数据库的构建及应用步骤如下:①基于历史地震海啸事件划分潜在海啸源区域;②将海啸源区域划分为大小相等的多个单位源,基于地质构造信息确定每个单位源的构造参数(包括走向角、倾角、滑动角);③应用海啸数值模型计算这些单位源在输出点的海啸时间序列;④对于发生在潜在海啸源区域的任一地震事

件,根据震级-破裂长度经验公式^[5-6]计算其所覆盖的单位源,将这些单位源所产生的时间序列进行线性叠加并估算该地震在输出点的海啸时间序列。

本文主要研究南中国海的海啸风险,考虑到整个区域的历史海啸主要集中在马尼拉海沟附近^[7],周边海盆内的海啸能量很难传播进来^[8],因此我们选择马尼拉海沟作为本研究的唯一潜在海啸源区域。海啸单位源的划分以及参数选择对预报结果的准确性起着决定性作用。我们基于全球三维俯冲带模型(Slab 2.0)^[9]将马尼拉海沟划分为若干海啸单位源,该俯冲带模型基于历史地震统计分析得到,模型在每个俯冲带都由若干个格点组成,每个格点包含了板块的走向角、倾角、滑动角和深度信息。基于该模型将马尼拉海沟沿俯冲带走向划分为20行,沿俯冲带倾角方向划分为4列(见图1),共计80个单位源,每个单位源长×宽为50 km×25 km,滑移量为1 m。已有研究表明^[3],单位源的大小不仅决定了海啸源拟合的准确性,也会影响到数值模拟的精度和计算效率。鉴于我们的预警以时效性为主,因此划分的单位源比已有的风险评估研究中^[3]所用的单位源略大。

划分出单位源后,需要确定每个单位源的震源深度和震源机制参数。每个单位源的深度设定为该单位源所包含所有格点深度的均值。为了保证单位源的分布紧密,在每一行单位源选取了相同的走向角,该值由第一列单位源中心点对应的走向角确定;同时将单位源所包含的所有格点倾角的均值作为该单位源的倾角。为了得到更保守的预报结果,将滑动角设定为90°。

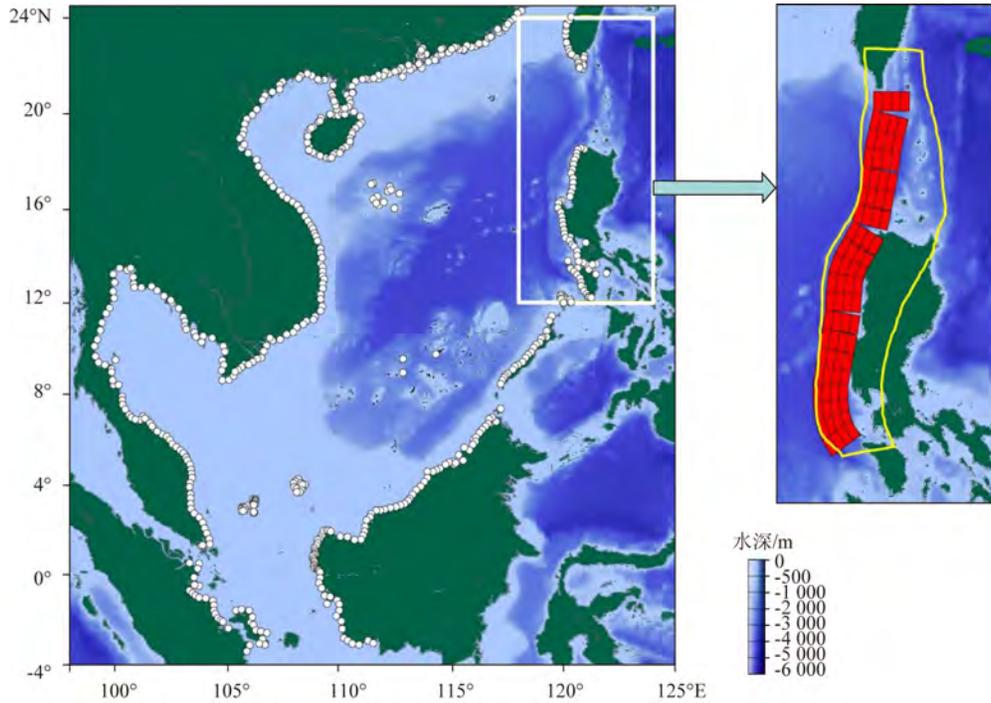
根据前面确定的参数,应用海啸数值模型计算每个单位源在沿岸输出点的海啸时间序列。海啸波在深水中传播时,波幅远小于水深,因此可以忽略非线性效应。海啸波在球坐标系下的方程表达式为:

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

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

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

式中: η 为相对于平均海平面的自由表面位移; ϕ 为



注:黄线为Slab 2.0模型在马尼拉海沟的范围,红色矩形为本研究划分的单位源,白色圆点为本研究中参与分析的沿岸输出点

图1 南中国海区域海底地形及本研究海啸单位源分布

Fig.1 Bathymetry of the SCS and distribution of tsunami unit source identified in this study

纬度; ψ 为经度; R 为地球半径; P 为沿纬度单位宽度的通量; Q 为沿经度单位宽度的通量; f 为科氏力系数; g 为重力加速度; H 为静水水深与海平面位移之和; t 为时间。

基于上述浅水方程搭建了南中国海区域的海啸数值模型。该模型是通过对COMCOT (Cornell Multigrid Coupled Tsunami)海啸数值模型进行GPU (Graphics Processing Unit)加速改进得到的,其准确性已得到验证^[1]。地形水深采用了GEBCO_14 Grid (The General Bathymetric Chart Oceans)数据,部分区域融合了实测水深,空间分辨率为2'。考虑南中国海海盆的半封闭性特征,数值模拟时间设置为15 h,模拟时间步长为30 s。选取距离岸段50~100 m的一系列离岸点作为模型输出点,应用上述模型计算上述单位源在这些输出点的海啸时间序列。海啸数值预报需要近岸点的海啸波幅,然而,当海啸波传播到近岸水域时,波长变短,线性长波方程不再适用。本文应用格林公式计算沿岸输出点(见图1白色圆点)的最大海啸波幅。公式如下:

$$A_c = A_0 (H_0 / H_c)^{1/4} \quad (4)$$

式中: A_0 为离岸点的最大海啸波幅; A_c 为沿岸输出点的最大海啸波幅; H_0 为离岸输出点水深; H_c 为沿岸输出点水深。

2.2 基于海啸单位源数据库的预警流程

在建立了海啸单位源数据库后,需要制定合理的业务化流程才能将其应用到海啸的预警业务中。我们基于海啸单位源数值预报方法的特点制定了业务化流程(见图2)。当系统监测到地震事件发生后,首先需要判断地震的震级是否达到数值预报的阈值,如达到则继续进行下面的步骤。进一步判断震中位置是否落在潜在海啸源区域(马尼拉海沟)范围内,如果是则继续运用该方法,否则调用海啸数值模型进行数值模拟。如果地震基本参数满足上述单位源数值预报方法的要求,则进一步估算地震事件的几何参数(长、宽)以确定所应用的单位源。在实际的海啸预警工作中,几何参数通常是通过震级经验公式估算^[6],本文选取日本气象厅

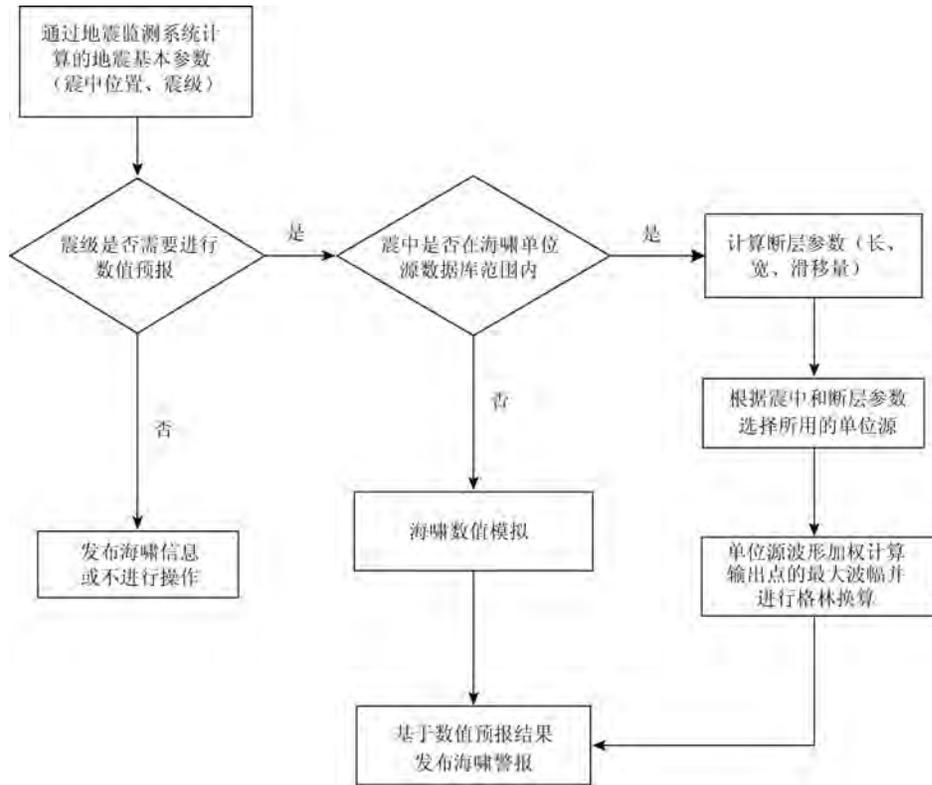


图2 海啸单位源数值预报方法流程图

Fig.2 Flowchart of tsunami unit source forecast method

(Japan Meteorological Agency, JMA)地震海啸预警经验公式确定断层的长度 L 和宽度 W 。公式如下:

$$\log L = 0.5M_w - 1.9$$

$$L = 0.5W \tag{5}$$

式中: M_w 为地震事件的矩震级。

在确定了断层参数后,进一步通过地震矩公式确定地震的平均滑移量 \bar{d} :

$$M = \mu WL\bar{d} \tag{6}$$

式中: μ 为刚性系数,本文取30 GPa。地震矩 M 与震级 M_w 的关系如下:

$$M = 10^{1.5M_w + C} \tag{7}$$

式中: C 为常数,本文取9.0。

根据前面确定的震中位置和几何参数,可以确定地震所覆盖的单位源,并进一步通过将这些单位源时间序列加权相加得到输出点的时间序列,权重大小即为 \bar{d} ,然后即可通过格林公式计算沿岸输出点的最大海啸波幅,并基于沿岸的海啸风险发布海啸预警信息。

3 结果与分析

海啸预警方法的验证是方法应用的重要前提,然而马尼拉海沟周边的历史海啸事件几乎都没有完整的观测数据。为了验证海啸单位源数值预报方法的可行性,我们应用该方法计算假想的地震事件的海啸波幅,并与海啸数值模拟方法的计算结果进行对比。需要说明的是,为了让两种方法的结果更具有可比性,我们设置的模型参数一致。我们以南中国海区域海啸预警中心的预警级别为依据(见表1),对比两种数值方法的预报一致性。

表1 南中国海区域海啸预警中心海啸预警标准
Tab.1 Tsunami warning criterias in the South China Sea Tsunami Advisory Center

最大海啸波幅范围/cm	预警级别
[0,30)	蓝色
[30,100)	黄色
[100,300)	橙色
[300,∞)	红色

我们应用蒙特卡洛算法,在马尼拉海沟周边随机生成1500个地震事件,地震事件的位置随机分布,震级范围为7.6~9.0,以0.1级间隔共划分为15个区间,每个区间的事件为100个。海啸数值模型采用了与构建海啸单位源数据库同样的参数,计算时也应用上述经验公式,震源机制的走向角和倾角根据震中位置在Slab 2.0模型中插值得到,滑动角则设为保守的 90° ,最后应用格林公式将输出点的最大海啸波幅换算为沿岸输出点的最大海啸波幅。我们分别应用两种方法对1500个地震事件进行计算,对比了南中国海周边609个沿岸输出点的预报一致性,预报一致性均值为88%。下面我们从不同角度对结果进行分析。

3.1 不同震级海啸事件预报一致性统计

我们首先统计了两种数值预报方法对每个震级区间100个地震事件所有输出点的平均预报一致性,得到其随震级变化的曲线(见图3)。从图中可以看出,当地震事件震级较小时,两种方法的平均预报一致性较高,这主要是因为海啸波幅整体较小。随着震级的增大,两种方法的预报一致性开始呈近似线性的降低,但在震级达到8.5之前,两种方法的预报一致性仍可以达到85%以上。随着震级的继续增大,预报一致性继续降低,当震级为9.0时达到最低的73%左右。结果说明单位源数值预报方法与海啸数值模拟方法的结果在震级较低时基本一致。

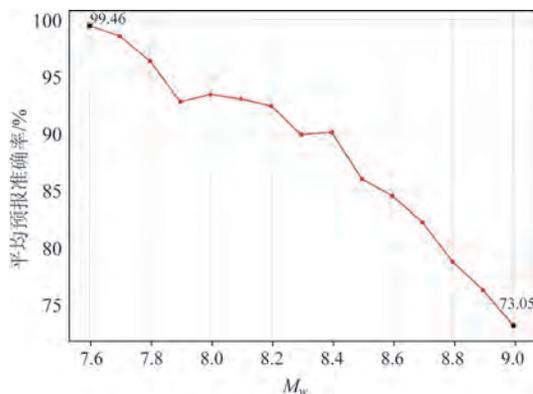


图3 海啸单位源数值预报方法与海啸数值模拟方法平均预报一致性随震级变化曲线

Fig.3 Average forecast consistency between forecast result using tsunami simulation and tsunami unit source forecast method as a function of magnitude

3.2 预报准确率的空间分布

为了探究两种方法预报一致性的空间分布,我们统计了1500个地震事件在每个输出点的预报一致性结果(见图4)。从图中不难看出,两种方法的预报一致性在空间上分布很不均匀。菲律宾西海岸沿岸、我国台湾南部等距离潜在海啸源较远的输出点的预报一致性较低,平均值在70%左右;我国大陆南部沿岸的一致性在80%左右;其他距离海啸源较远的输出点的预报一致性较高,能够达到90%以上。在海啸数值模拟的过程中,海啸初始位移场模型是通过OKADA^[10]提出的弹性位错断层模型计算的,其滑移量分布也是假设为均匀分布的。然而,已有的研究表明,实际地震破裂的滑移量分布对区域海啸数值模拟结果的影响很大^[3,11-12]。海啸单位源的划分本质上相当于将地震事件的滑移量分布精细化,这也是两种数值预报方法在近海啸源输出点预报一致性较低的主要原因。

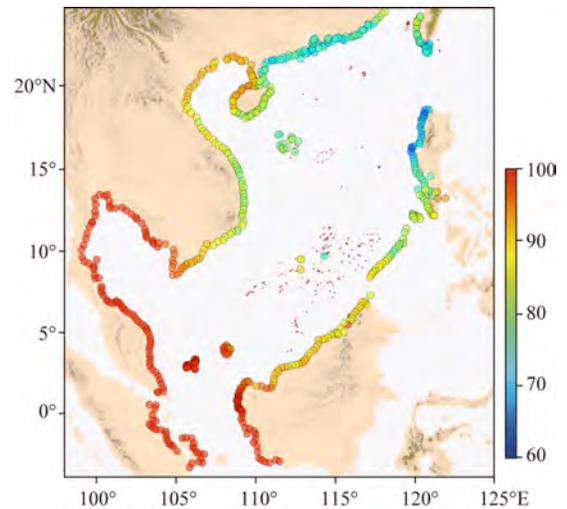


图4 海啸单位源数值预报方法与海啸数值模拟方法平均预报一致性空间分布(单位:%)

Fig.4 Spatial distribution of average forecast consistency between forecast result using tsunami simulation and tsunami unit source forecast method

3.3 预报点海啸波幅最大值对比统计

为了更详细地比较两种方法的预报结果,我们选取了其中一个假想事件进行分析,事件参数见表2。此事件位于马尼拉海沟北部,对我国南部沿海的影响较大。我们应用震级经验公式,估算出此地

震破裂面的长和宽分别为 200 km 和 100 km,因此该事件沿马尼拉海沟走向和倾角方向覆盖的单位源均为 4 列,共计 16 个单位源。根据式(6),可以得出该地震事件的平均滑移量为 6.67 m,将上述 16 个单位源的在不同输出点的海啸时间序列乘以权重 6.67 并叠加即可得到该事件在不同输出点产生的海啸时间序列。我们分别运用两种数值预报方法计算了 4 个输出点的海啸时间序列并进行对比(见图 5)。4 个输出点位置分别对应库里马奥、高雄、香港和岷港。从图中可以看出,两种方法产生

的时间序列在 4 个输出点的首波到达时间上基本一致,因此认为运用海啸单位源数值预报方法可以得到较准确的海啸传播时间。该方法模拟得到的库里马奥和岷港的最大海啸波幅分别约为 0.8 m 和 0.1 m,明显大于数值模拟方法的结果;该方法模拟得到的高雄和香港的最大海啸波幅与数值模拟方法的结果基本一致,分别约为 0.6 m 和 0.7 m。基于上述对比,我们认为应用海啸单位源数值预报方法可以得到与海啸数值模拟方法基本相同的预报结论。

表 2 案例分析假想地震参数

Tab.2 Source parameters of hypothetical earthquake

震中位置	深度/km	震级	长度/km	宽度/km	平均滑移量/m	单位源数
120.51°E, 19.92°N	15	8.4	200	100	6.67	16

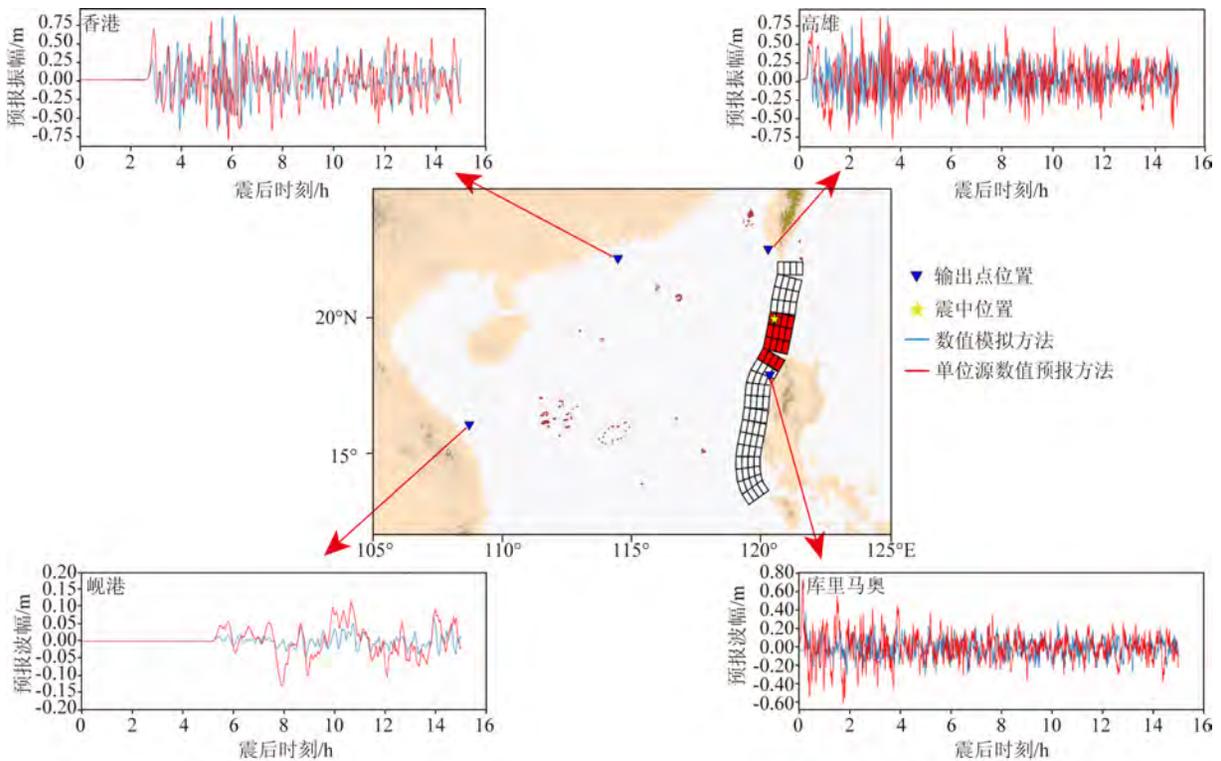


图 5 海啸数值模拟方法和海啸单位源数值预报方法在 4 个城市对应输出点上计算的海啸时间序列对比

Fig.5 Comparison of tsunami time series computed by tsunami numerical simulation and tsunami unit source method at the corresponding output points of the four cities

4 结论与讨论

本文基于全球俯冲带板片模型将马尼拉海沟划分为 80 个海啸单位源,应用海啸数值模型对单位源在沿岸输出点所产生的海啸时间序列进行模拟,

建立了南中国海海啸单位源数据库。进一步建立了基于该数据库的海啸数值预报流程,经过与数值模拟方法的结果进行对比分析,我们认为应用该数据库能够得到与数值模拟方法基本一致的预报结果,且在时效性上得到大幅提升。

通过与1500个假想地震事件的数值预报结果对比,分析了海啸单位源数值预报方法与海啸数值模拟方法的预报一致性。结果表明两种方法的预报一致性随震级的增大而降低,但在震级达到8.5级时,平均准确率仍然能够达到85%左右,因此能够满足业务化应用的需求。与此同时,我们分析比较了不同输出点的数值预报结果,结果表明两种预报方法在马尼拉附近输出点的预报一致性较低,产生这种误差的原因主要是海啸源对近海啸源输出点的影响较大,海啸单位源的构建是随着马尼拉海沟走向变化的,而现有业务化模型则假设海啸源是以震中位置为中心的直线。

南中国海海啸预警中心肩负着对南中国海周边国家发布海啸预警的职责,目前主要应用海啸情景数据库和海啸数值模拟两种方法来进行海啸数值预报。海啸单位源数据库的应用将是对现有业务的重要补充,也为未来基于地震数据反演计算更精确的海啸源,从而得到更准确的海啸数值预报结果打下坚实的基础。

参考文献:

- [1] 王宗辰,原野,王培涛,等. 一个覆盖太平洋区域的地震海啸波幅预报系统及检验[J]. 海洋学报, 2019, 41(2): 1-13.
WANG Z C, YUAN Y, WANG P T, et al. Development and validation of a tsunami amplitude forecast system covering the whole Pacific Ocean[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(2): 1-13.
- [2] ROSHAN A D, SHAH M, PISHARADY A S, et al. Development of an expert system for tsunami warning: a unit source approach [C]/Proceedings of the CANDU Safety Association for Sustainability-2015 (CANSAS-2015). Mumbai, 2015.
- [3] LI L L, SWITZER A D, CHAN C H, et al. How heterogeneous coseismic slip affects regional probabilistic tsunami hazard assessment: a case study in the South China Sea[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2016, 121(8): 6250-6272.
- [4] YUAN Y, LI H W, WEI Y, et al. Probabilistic tsunami hazard assessment (PTHA) for southeast coast of Chinese mainland and Taiwan Island[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2021, 126(2): e2020JB020344.
- [5] BLASER L, KRUGER F, OHRNBERGER M, et al. Scaling relations of earthquake source parameter estimates with special focus on subduction environment[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(6): 2914-2926.
- [6] STRASSER F O, ARANGO M C, BOMMER J J. Scaling of the source dimensions of interface and intraslab subduction-zone earthquakes with moment magnitude[J]. Seismological Research Letters, 2010, 81(6): 941-950.
- [7] LI H W, YUAN Y, XU Z G, et al. The dependency of probabilistic tsunami hazard assessment on magnitude limits of seismic sources in the South China Sea and adjoining basins[J]. Pure and Applied Geophysics, 2017, 174(6): 2351-2370.
- [8] OKAL E A, SYNOLAKIS C E, KALLIGERIS N. Tsunami simulations for regional sources in the South China and adjoining seas[J]. Pure and Applied Geophysics, 2011, 168(6): 1153-1173.
- [9] HAYES G P, MOORE G L, PORTNER D E, et al. Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model[J]. Science, 2018, 362(6410): 58-61.
- [10] 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.
- [11] GEIST E L, PARSONS T. Probabilistic analysis of tsunami hazards[J]. Natural Hazards, 2006, 37(3): 277-314.
- [12] MUELLER C, POWER W, FRASER S, et al. Effects of rupture complexity on local tsunami inundation: implications for probabilistic tsunami hazard assessment by example[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2015, 120(1): 488-502.

Tsunami numerical forecast in the South China Sea based on tsunami unit source database

LI Hongwei^{1,2,3}, SUN Lining^{1,2*}, WANG Zongchen^{1,2}, XU Zhiguo^{1,2,3}, WANG Peitao^{1,2,3}, SHI Jianyu^{1,2}

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China; 2. National Tsunami Warning Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 3. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to improve the tsunami early warning capability in this region, we decompose Manila Trench into 80 tsunami unit sources based on the subduction zone geometry model (Slab 2.0), and construct a tsunami unit source database. Meanwhile, we also establish an operational procedure for tsunami forecast based on the unit source database. By comparing with the results of existing tsunami numerical model, the average forecast consistency of the maximum tsunami amplitude computed by unit source database can reach 88%, which meets the operational needs of tsunami warning.

Key words: tsunami; warning; unit source; Slab 2.0