

南海主要岛礁概率海啸风险评估

赵广生, 牛小静

(清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要:影响地震海啸的震源参数众多且具有很强的不确定性,充分评估海啸风险需要大量的情景模拟。本文基于建立的概率海啸风险模型,采用一种高效的海啸模拟方法,评估了南海主要岛礁的概率海啸风险。通过对历史地震数据的分析,综合考虑震级、震中位置、震源深度的随机性,形成了百万数量级的潜在地震情景集,并通过叠加近似方法实现了大量地震情景引发海啸过程的模拟。该方法将数量庞大的地震海啸情景转化为有限的单位源水位扰动的传播计算,利用单位扰动源的传播演进数据库,计算目标位置的水位波动过程,可以很大程度上降低大规模情景模拟的计算负担。基于大规模情景模拟,结合各情景出现的概率,客观地给出了南海主要岛礁的海啸波高重现期,为海岛防灾减灾提供参考。研究结果表明,大多数目标岛礁处百年一遇的海啸波高不超过 0.4 m。南海内不同位置处的海啸风险有较大差异,东沙群岛附近百年一遇的海啸波高超过 0.6 m,而西沙的永乐群岛和南沙群岛的海啸波高显著低于其他区域。

关键词:概率海啸风险评估;马尼拉海沟;岛礁;南海;防灾减灾

中图分类号:P731.25

文献标志码:A

文章编号:1002-3682(2021)01-0001-09

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2021.01.001

引用格式:ZHAO G S, NIU X J. Probabilistic tsunami risk assessment of main islands and reefs in the South China Sea[J]. Coastal Engineering, 2021, 40(1): 1-9. 赵广生, 牛小静. 南海主要岛礁概率海啸风险评估[J]. 海岸工程, 2021, 40(1): 1-9.

海啸是一种难预测且破坏力极强的海洋灾害。本世纪几场严重的海啸事件,如 2004 年的印度洋海啸、2010 年的智利海啸和 2011 年的日本海啸,都对相关地区造成了毁灭性的灾害。有研究表明南海范围内也曾发生过破坏力极强的海啸事件^[1]。历史上发生在南海内马尼拉海沟地震带的海啸对南海各地区均产生了不同程度的影响^[2]。马尼拉海沟是南海与菲律宾板块的汇聚边界,许多研究表明马尼拉海沟是南海内部最可能产生大型地震海啸的区域^[3-5]。马尼拉海沟两侧的菲律宾海板块正以每年 55~91 mm 的速度向西边的巽他板块俯冲^[6]。虽然在过去的一个世纪里马尼拉海沟几乎没有大地震的记录,但许多科学家认为,马尼拉海沟正在积累应力,这些累计应变可能在马尼拉海沟附近引起 8.8~9.2 级地震^[7],进而在南海海域及其周边大陆沿岸引发灾害性的海啸事件。

南海岛礁包括东沙、西沙、中沙和南沙群岛。各群岛中均有部分岛礁上有人居住,但由于南海岛礁的海拔普遍在 1~5 m,一旦发生大型海啸事件极有可能造成毁灭性的破坏。因此有必要研究南海岛礁面临的海啸威胁。目前对重点海岛的研究还很少, Xie 等^[8]采用确定性的方法评估西沙群岛的海啸危险。确定性分析通常是极端情况下的灾害评估,难以与实际工程应用相结合。概率海啸风险评估(Probabilistic Tsunami Hazard Analysis, PTHA)目标是准确量化风险,根据对象的重要性和敏感性,在实际应用中平衡安全和经济因素。

收稿日期:2020-12-14

资助项目:水沙科学与水利水电工程国家重点实验室自主课题——南海岛礁的概率海啸危险性分析方法和应用(2018-KY-01);国家自然科学基金面上项目——气象海啸的诱发机制及预报方法研究(51779125)

作者简介:赵广生(1996—),男,博士研究生,主要从事海啸风险分析方面研究。E-mail: zhaogs19@mails.tsinghua.edu.cn

*** 通信作者:**牛小静(1981—),女,副教授,主要从事海洋水动力学方面研究。E-mail: nxj@tsinghua.edu.cn

(李 燕 编辑)

影响地震海啸的震源参数众多且具有很强的不确定性,为充分评估这些参数造成的风险需要大量的情景模拟^[9-12]。为了平衡概率海啸风险评估的效率和准确性,本研究提出一种高效的模拟目标位置海啸波高的方法^[13]。基于海啸波在深水区域的线性假设,采用单位源水位扰动产生的波动叠加来给出海啸波过程,将数量庞大的地震海啸情景转化为有限的单位源水位扰动的传播计算,从而很大程度地简化了海啸风险评估所需计算量。本文针对南海岛礁区域海啸风险定量评估缺乏的问题,构建了海啸风险概率的定量评估方法,通过大量潜在海啸情景的计算,给出了南海部分重要岛礁处的灾害曲线,并对南海主要岛礁的海啸风险进行了分析和讨论。

1 评估模型和实施方式

1.1 海啸风险评估的概率模型

概率海啸风险评估的目的是获得超过某一海啸危险度量指标的的概率。危险度量指标取决于待解决的问题,最常用的是最大波高。对于某一目标区域 TP,在一定年限内所有潜在地震造成的海啸波高 H 超过某临界值 h_c 的概率为:

$$p(H \geq h_c | TP) = \sum_{i=1}^N p_i \cdot p(H \geq h_c | E_i), \quad (1)$$

式中, N 为地震带中可能的地震情景总数, p_i 为地震事件 E_i 发生的概率, $p(H \geq h_c | E_i)$ 为一场地震事件 E_i 发生时在目标区域海啸波高超过 h_c 的概率。一般认为单位时间内地震发生的次数满足泊松分布,在已知某 TP 的海啸波高超越概率时,由式(2)可计算出该位置给定海啸波高的年超越概率:

$$P(H \geq h_c | TP) = v_M \cdot p(H \geq h_c | TP), \quad (2)$$

式中, v_M 为地震年平均发生率,通过对历史地震数据的分析获得。

地震发生概率 p_i 的计算需要各震源参数的概率分布。本研究中假设各震源参数独立,通过对历史地震记录的统计分析得到各震源参数的规律。通过对震源参数进行组合,得到潜在海啸情景集。为了充分评估海啸风险,需要对所有可能的海啸情景进行模拟。从图 1 中可以看到,考虑到各震源参数的不确定性,情景的数量可能超过百万量级。通过对大规模情景模拟的结果进行统计分析,得到海啸波高、重现期等海啸风险参数的分布规律。

1.2 海啸传播的高效模拟方法

当充分考虑各震源参数的不确定性时,得到的海啸情景总数可能超过百万量级。在南海这样的大区域内进行百万量级的水动力数值模拟相当费时,通过常规的计算显然不可行。本研究采用一种简化、高效的解决方案,基于海啸波在深海区域的线性假设,将地震诱发的水面扰动与海啸波的传播演进模拟过程分离,通过单位水位扰动产生的波动叠加来给出海啸波过程,利用有限的单位水位扰动波的传播计算实现数量庞大的地震海啸情景分析。

本研究采用经典的 Okada 模型^[14]给出地震发生时造成的水面初始扰动。通常地震发生时,可认为海床表面产生的竖向位移近似等于海表的水面扰动。Okada 理论模型基于半无限空间内的弹性理论,可在已知

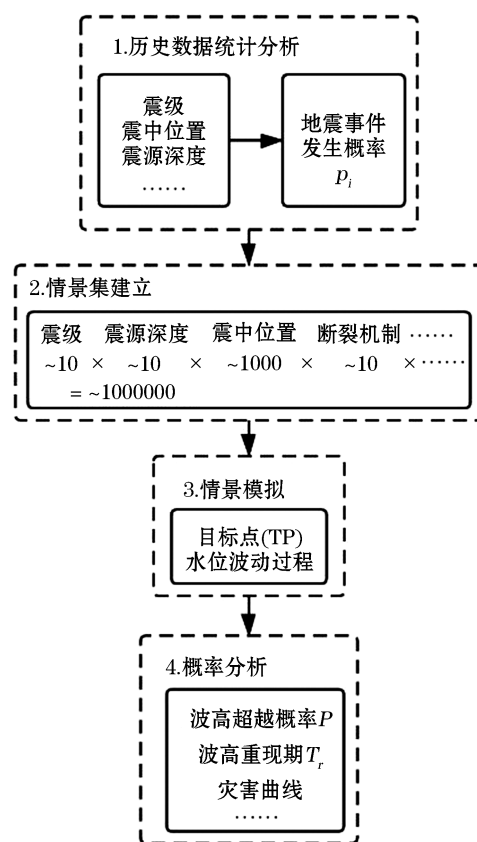


图 1 概率海啸风险评估流程

Fig.1 General process of probabilistic tsunami risk assessment

震源深度、走向角、倾角、滑移角、滑块长度、宽度、滑移量的条件下求得地表垂向位错。其中,滑块长度、宽度、滑移量可根据地震震级进行相应估算^[15]。

初始扰动的传播演进采用海洋水动力模型 FVCOM 来模拟。通过与前人在南海内单场海啸的模拟结果进行对比,验证了构建的南海海啸演进模型的有效性和精确度。在本研究中不直接模拟地震引发的水面初始扰动的传播,替代采用单位扰动传播过程的叠加获取目标点海啸波动过程。海啸波在深水区域满足线性假设,可以将其视为由若干的单位波动叠加而成的过程。本研究中,考虑到大震级地震海啸的初始水位扰动分布较大,马尼拉海沟发生地震海啸时初始水位扰动可能影响到的区域应比震源分布区域大。因此在区域(116°30′~123°30′E,11°00′~23°00′N)均匀布设间隔为 0.1°的单位点源,每个点源上设置相同的高斯分布初始水位作为单位源。高斯分布具有对称和平滑的特性,可以很好地实现复杂初始水位场的叠加逼近。每个单位源的初始水位扰动在南海海域的传播演进过程通过数值模拟计算给出,并建立数据库。随后将单位源上的初始水位以一定的比例系数 c 进行线性叠加,用来近似一场地震海啸的初始水位场。从数据库中获取每个单位源传播到目标区域的水位时间过程,通过对单位源的水位过程按照比例系数 c 线性叠加,即可获得该海啸情景下目标区域的海啸波时间过程,进而分析海啸特征参数。

单位源的布置范围为(116°30′~123°30′E,11°00′~23°00′N),间隔为 0.1°。考虑到发生在陆地范围内的地震不构成海啸威胁,因此对单位源设置进行修正,最终共布设 7 896 个单位源。与全部潜在地震情景数量相比,极大地缩减了计算量。

1.3 线性叠加方法有效性验证

将直接模拟某一地震海啸得到的水位波动序列与采用线性叠加方法得到的水位波动序列进行对比,验证该方法在岛礁处的适用性。

假设两场假想地震海啸事件,震源中心位置在(119°E,16°N),震源深度 10 km,走向角 345°,倾角 30°,滑移角 90°,震级分别为 8 级和 9 级,以西沙永兴岛对应的目标点 TP1 为例,对比 2 种方法的计算结果,如图 2 所示。其中,实线为直接模拟的结果,虚线为线性叠加的结果。

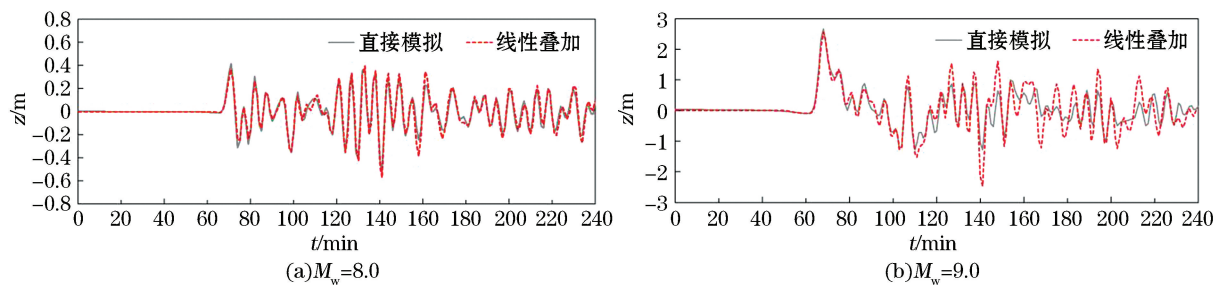


图 2 两种方法的结果对比

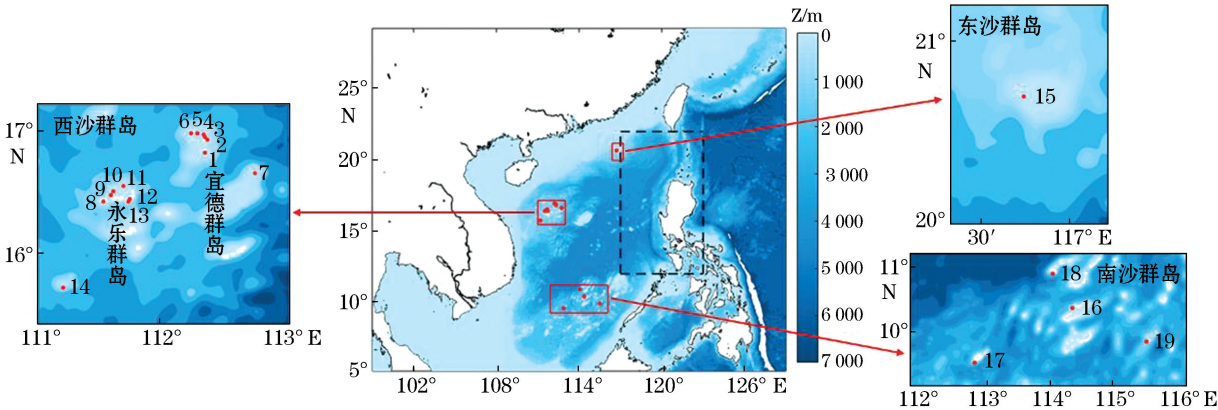
Fig.2 Comparison of the results from the two methods

可以看到,无论是 8 级还是 9 级地震情景中,两条曲线都基本重合。海啸波在深海是典型的浅水波,用线性叠加的方法可以比较准确地获得入射海啸波的水位波动序列。在海啸波的首波到达后,由于岛礁地形的作用,首波之后的水位波动过程是入射海啸波和反射波、折射波等叠加形成的,需要高分辨率的水深地形数据并进行精细的非线性模拟,因此线性叠加的方法可能会产生一定的误差。误差的大小与入射海啸波的大小有关,也与目标点的位置有关。在本研究中,为了避免近岸区域水位波动模拟带来的误差,我们只对各情景中目标点经历的首个大波的波高进行统计分析。采用线性叠加方法计算的 19 个目标点的首波波高模拟误差都在 5% 以内,证明在本研究中线性叠加的方法是有效的。

2 研究区域和地震情景发生概率评估

2.1 计算域与目标点选取

研究选取(99°00′~129°00′E,5°00′~29°00′N)范围内的海域进行建模,包含整个南海海域,如图 3 所示。本研究关注的是南海岛礁处的海啸风险,包括西沙群岛、东沙群岛和南沙群岛中一些正在建设、有人居住或面积较大的岛礁。本研究不考虑海啸波在近岸浅水区域的爬高过程,选取各岛礁周围 100 m 等水深处的点作为目标点(TP),评估岛礁面临的整体海啸风险,如图 3 中红点所示,各目标点的坐标如表 1 所示。



注:1~19 为目标点(TP)

图 3 研究区域和目标点位置

Fig.3 Locations of the study area and the target points

表 1 目标点坐标

Table 1 Coordinates of the target points

位 置	TP	目标岛礁	经 度	纬 度
西沙	1	永兴岛	112°19′48″E	16°49′48″N
	2	南沙洲	112°21′00″E	16°55′48″N
	3	南岛	112°19′48″E	16°57′00″N
	4	北岛	112°19′12″E	16°58′12″N
	5	赵述岛	112°16′12″E	16°58′48″N
	6	西沙洲	112°13′12″E	16°58′48″N
	7	东岛	112°43′48″E	16°40′12″N
	8	金银岛	111°31′12″E	16°27′00″N
	9	甘泉岛	111°34′48″E	16°30′00″N
	10	珊瑚岛	111°48′00″E	16°31′48″N
	11	鸭公岛	111°40′48″E	16°34′12″N
	12	晋卿岛	111°43′48″E	16°28′12″N
	13	琛航岛	111°43′12″E	16°27′00″N
	14	中建岛	111°12′00″E	15°46′48″N

续表 1

位 置	TP	目标岛礁	经 度	纬 度
东沙	15	东沙岛	116°43′12″E	20°42′00″N
	16	太平岛	114°22′12″E	10°22′48″N
	17	永暑岛	112°52′48″E	09°33′00″N
	18	渚碧岛	114°04′12″E	10°54′00″N
	19	美济岛	115°30′00″E	09°52′12″N

2.2 区域震源参数特征

本研究中考虑的潜在震源区为马尼拉海沟区域(117°~123°E,12°~22°N),如图 3 中黑色虚线框所示。参考美国哈佛大学的 GCMT(Global Centroid Moment Tensor Project)和美国地质调查局的 USGS(U.S. Geological Survey)数据库,对该区域历史地震数据进行了统计分析,进而得到各震源参数的概率分布。

采用震级频度概率分布^[16]拟合地震发生概率,根据 USGS 自 1900 年至今的全部地震记录,得到了震级 7.0~9.2 级地震的发生概率。将计算间隔取为 0.1,共划分为 23 个震级情景。震源中心假设为均匀分布在震源区(117°~123°E,12°~22°N)的间隔为 0.1°的震源点,共 60×100=6 000 个震源点。每个震源点上发生地震的概率由历史地震空间分布计算。震源深度、断裂机制等参数假设为相互独立,可通过历史数据统计得到的频率作为相应的发生概率。震源深度 100 km 以上的地震产生的初始海啸波很小,因此考虑 10 到 100 km 深度的地震,取计算间隔为 10 km,得到震源深度的情景数量为 10。对于走向角,历史数据统计得到的走向角分布与地质构造的走向具有一致性。在本研究中将马尼拉海沟沿纬度划分为 4 段,分别是 12°00′~14°30′N,14°30′~17°00′N,17°00′~19°30′N,19°30′~22°00′N。每一段上取历史走向角分布众数的中值作为该区域的走向角。滑移角取为 90°,此时为倾滑型地震,产生地震海啸的风险最大。历史数据统计得到的倾角具有一定的集中性,倾角在一定范围内的变化对初始水位最大值的影响较小。经过文献调研,选取倾角为 30°。

因此,假设各震源参数相互独立,断裂机制的参数视为已知量处理,震级、震源中心、震源深度为主导参数,对所有参数的取值进行排列组合,最终实现完整的 PTHA 所需情景数为 23×6 000×10×1=1 380 000 个。这些海啸情景中目标位置的水位波动过程将通过线性叠加的方法快速获取,而不再需要长时间的模拟计算。

3 主要岛礁海啸风险

3.1 海啸波高重现期

本研究选取了西沙、东沙、南沙群岛共 19 个重要岛礁附近 100 m 等深线处的目标点,其中 TP1~TP7 为西沙群岛中的宣德群岛,TP8~TP14 为西沙群岛中的永乐群岛,TP9 为东沙群岛中的东沙岛,TP16~TP19 位于南沙群岛。通过单位源线性叠加拟合的方法,我们得到了 19 个目标点处在全部 1 380 000 个潜在地震海啸情景中的水位波动过程,并依次统计了 $h_c=0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.3, 1.5, 1.7, 2.0$ m 时的海啸波高重现期。表 2 给出了所有 TP 处重现期为 100 和 200 a 的海啸波高。图 4 分别给出了西沙、东沙、南沙群岛各 TP 处的灾害曲线。

表 2 各目标点不同重现期的海啸波高

Table 2 Tsunami wave heights occurring in different recurrence periods at different target points

TP	目标岛礁	100 a 重现期波高/m	200 a 重现期波高/m
1	永兴岛	0.28	0.53
2	南沙洲	0.34	0.65
3	南岛	0.43	0.77
4	北岛	0.40	0.76
5	赵述岛	0.36	0.71
6	西沙洲	0.42	0.81
7	东岛	0.41	0.82
8	金银岛	0.16	0.35
9	甘泉岛	0.20	0.40
10	珊瑚岛	0.21	0.42
11	鸭公岛	0.23	0.46
12	晋卿岛	0.17	0.37
13	琛航岛	0.15	0.32
14	中建岛	0.18	0.37
15	东沙岛	0.63	1.24
16	太平岛	0.10	0.20
17	永暑岛	0.09	0.15
18	渚碧岛	0.12	0.24
19	美济岛	0.07	0.14

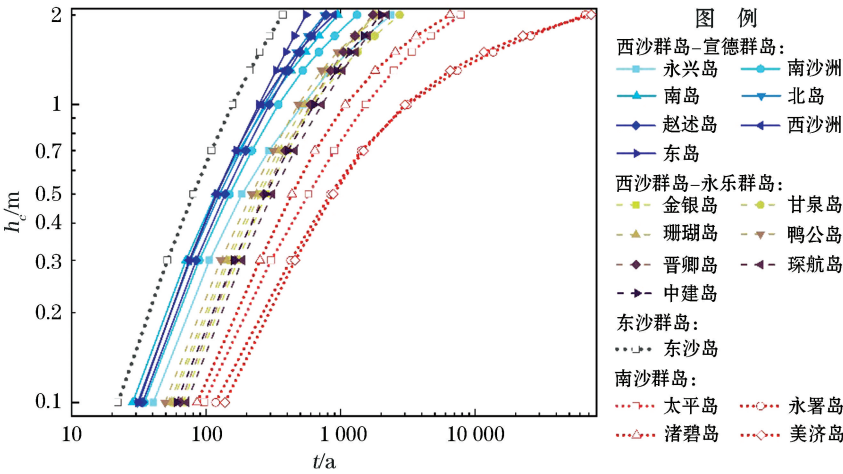


图 4 海啸波高重现期曲线

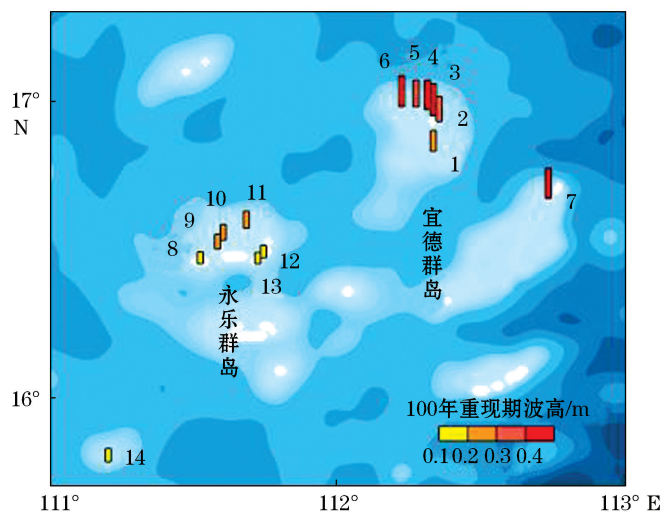
Fig.4 Curve of the recurrence period of tsunami height

3.2 海啸风险评估结果讨论

总体而言,南海岛礁处的海啸风险不高,大部分岛礁百年一遇的海啸波波高均小于 0.5 m,200 年一遇的海啸波波高小于 1 m。虽然一场 9 级地震海啸事件能在所有目标点处产生超过 2 m 的海啸波高,但由于南海地区大震级地震的年平均发生率较低,因此南海岛礁处整体的海啸风险不高。

此外,南海不同位置处的海啸风险有较大差异。在 100 a 重现期的地震海啸情景中,西沙群岛主要岛礁附近的海啸波高在 0.2~0.5 m,东沙群岛主要岛礁附近的海啸波高超过 0.6 m,而南沙群岛主要岛礁附近的海啸波高只有 0.1 m 左右。

东沙群岛位于南海岛礁的最北侧,地处南海北部大陆坡上段。东沙群岛中唯一露出水面的岛礁为东沙岛,周围没有其他岛礁阻隔,直接面向南海盆地和马尼拉海沟。因此,在马尼拉海沟震源区产生的海啸波能直接传播到东沙岛,并使东沙岛成为南海中海啸风险最高的区域之一。海啸的主要传播方向与断层的走向垂直,西沙群岛位于马尼拉海沟震源区大部分潜在海啸的主要传播方向上,但位于西沙群岛和马尼拉海沟之间的中沙群岛有效地阻隔了海啸波的传播,因此西沙群岛的海啸风险比东沙群岛小。同时,从图 5 可以看到西沙群岛中东侧的宣德群岛(TP1~TP7)比西侧的永乐群岛(TP8~TP14)的海啸风险更大。这也是因为宣德群岛阻隔了海啸波的传播,削弱了海啸波波高。南沙群岛位置最南,岛屿礁滩最多,分布范围最广。永暑岛、美济岛、渚碧岛等开发建设过的岛礁均在群岛的中部,其东北侧有大片的暗滩和暗礁,这些地形特征极大地影响了海啸波的传播。同时,南沙群岛不在大部分马尼拉海沟潜在地震海啸的主要传播方向上,因此南沙群岛的海啸风险显著低于其他区域。



注:1~14 为目标点(TP)

图 5 西沙群岛 100 a 重现期波高分布

Fig.5 Distribution of the tsunami wave heights occurring once in 100 years in the Xisha Islands

4 结 语

本文采用一种基于海啸波在深海的线性特性的简化方法,极大程度地简化了概率海啸风险评估所需的计算量和耗时,并将该方法应用于南海,对南海部分重要岛礁处的海啸风险进行了初步的分析。该方法通过在马尼拉海沟震源区域布设单位源,线性拟合任意地震情景产生的初始扰动水位场,并通过相同比例的线性叠加得到目标岛礁周围 100 m 水深处的水位波动序列。

结果表明,南海岛礁整体的海啸风险不高,大多数目标岛礁处百年一遇的海啸波波高不超过 0.4 m。南海内岛礁对海啸波的阻隔作用比较明显,因此直接面向深海的岛礁面临着更大的海啸风险,如东沙的东沙岛、西沙的东岛、南岛、北岛。而西沙的永乐群岛、南沙的部分岛礁以及我国东南沿海地区,由于海啸传播路径上其他岛礁的阻隔作用,其海啸风险远低于其他地区。

需要注意的是,尽管南海岛礁整体的海啸风险不高,但一场 9 级以上大地震海啸仍会在南海岛礁处产生超过 2 m 的海啸波高。此外,本研究中没有考虑海啸在岸边的传播特征,水深 100 m 处 1 m 的波高经过近岸地形的放大和局部的能量聚集,仍可能造成严重灾害。

参考文献 (References):

- [1] SUN L, ZHOU X, HUANG W, et al. Preliminary evidence for a 1000-year-old tsunami in the South China Sea[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1655.
- [2] ZHAO X, JIANG Y P, REN Z Y, et al. Historical tsunami records and potential tsunami scenarios near Haikou coastal region[J]. *Natural Hazards*, 2017, 89(2): 625-645.
- [3] MEGAWATI K, SHAW F, SIEH 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.
- [4] LIU Y, 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(1-4): 233-244.
- [5] REN Y F, WEN R Z, SONG Y Y. Recent progress of tsunami hazard mitigation in China[J]. *Episodes*, 2014, 37(4): 277-283.
- [6] HSU Y J, YU S B, SONG T R A, et al. Plate coupling along the Manila subduction zone between Taiwan and northern Luzon[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 51, 98-108.
- [7] HSU Y J, YU S B, LOVELESS J P, et al. Interseismic deformation and moment deficit along the Manila subduction zone and the Philippine Fault system[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(10): 7639-7665.
- [8] XIE X, CHEN C X, LI L L, et al. Tsunami hazard assessment for atoll islands inside the South China Sea: a case study of the Xisha Archipelago[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2019, 290(1): 20-35.
- [9] GODA K, LI S L, MORI N, et al. Probabilistic tsunami damage assessment considering stochastic source models: application to the 2011 Tohoku earthquake[J]. *Coastal Engineering Journal*, 2018, 57(3): 1550015-1-1550015-38.
- [10] SEPULVEDA I, LIU P L F, GRIGORIU M. Probabilistic tsunami hazard assessment in South China Sea with consideration of uncertain earthquake characteristics[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(1): 658-688.
- [11] MORI N, GODA K, COX D. Recent process in probabilistic tsunami hazard analysis (PTHA) for mega thrust subduction earthquakes. The 2011 Japan earthquake and tsunami: reconstruction and restoration[M]. Springer, Berlin, 2018: 469-485.
- [12] QIU Q, LI L L, HSU Y J, et al. Revised earthquake sources along Manila trench for tsunami hazard assessment in the South China Sea [J]. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 2019, 19(7): 1565-1583.
- [13] ZHANG X X, NIU X J. Probabilistic tsunami hazard assessment and its application to southeast coast of Hainan Island from Manila Trench[J]. *Coastal Engineering*, 2020, 155: 103596. 1-103596.10.
- [14] 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): 1136-1154.
- [15] GELLER R J. Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1976, 66(5): 1501-1523.
- [16] COSENTINO P, FICARRA V, LUZIO D. Truncated exponential frequency-magnitude relationship in earthquake statistics[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1977, 67(6): 1615-1623.

Probabilistic Tsunami Risk Assessment of Main Islands and Reefs in the South China Sea

ZHAO Guang-sheng, NIU Xiao-jing

(*State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084*)

Abstract: The source parameters that affect the scale of seismic tsunami are numerous and have strong uncertainty. Adequate assessment of tsunami risk requires a large number of scenario simulations. Based on the established probabilistic tsunami risk assessment model, the probabilistic tsunami risk at main islands and reefs in the South China Sea is evaluated by using a method for highly efficient simulation of tsunami. Through the analysis of historical earthquake data and by considering comprehensively the randomness of magnitude, epicenter and focal depth, a set of potential seismic scenarios with a million magnitude is formed and the superposition approximation method is used to realize the simulation of tsunami process induced by a large number of seismic scenarios. By using this method, the large numbers of earthquake and tsunami scenarios can be translated into the calculation of propagation of water level disturbance per unit source and the propagation database of the unit disturbance source is used to calculate the water level fluctuation process of the target locations. By this way, the computational burden of the large-scale scenario simulations can be reduced to a great extent. Based on the large-scale scenario simulations and combined with the occurring probability of each scenario, the recurrence period of the wave height of tsunami at the main islands and reefs in the South China Sea is objectively given, thus providing references for the island disaster prevention and mitigation. The research results have indicated that the tsunami wave height occurring once in a century at most of the target islands and reefs is less than 0.4m. The tsunami risk varies greatly at different locations within the South China Sea. Near the Dongsha Islands the tsunami wave height occurring once in a century is higher than 0.6m, whereas at the Yongle Islands of Xisha and the Nansha Islands the tsunami heights are significantly lower than those in other areas.

Key words: Probabilistic tsunami risk assessment (PTRA); Manila Trench; islands and reefs; South China Sea; Disaster prevention and mitigation

Received: December 14, 2020