

中国东南沿海海啸危险性区域性特征

刘也, 任叶飞, 温瑞智, 徐朝阳

(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:近年来我国海啸防灾减灾相关研究工作已逐步展开, 东南沿海地区的海啸危险性已得到充分认识。文中以中国近海局地海啸潜源和马尼拉区域海啸潜源为研究对象, 采用概率海啸危险性分析方法(PTHA), 给出我国东南沿海地区的海啸危险性图。结果显示, 福建省沿海地区海啸危险性最高, 广东省次之, 浙江省和海南省受海啸影响较小。以香港、澳门、厦门、泉州为例计算海啸波高超越概率和重现期, 分析不同海啸潜源对PTHA计算的贡献情况。结果表明, 厦门、泉州的海啸危险性较高, 波高超过1 m的海啸重现期分别为281年和539年, 香港、澳门危险性较低, 波高超过1 m的海啸重现期均超过千年; 马尼拉海啸潜源对香港、澳门、厦门、泉州的影响小于局地海啸潜源, 我国东南沿海的海啸危险性区域化差异明显, 海啸潜源与目标场地的相对位置是影响PTHA结果的重要因素之一。

关键词: 概率海啸危险性分析; 区域性特征; 海啸危险性图; 重现期; 中国东南沿海
中图分类号: P315 **文献标志码:** A

Regional characteristics of the probabilistic tsunami hazard for the southeast coastal area of China

LIU Ye, REN Yefei, WEN Ruizhi, XU Zhaoyang

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

Abstract: Recently a number of studies have been done on tsunami mitigation and prevention in China. As a result, the South China Sea has been generally recognized as a zone of high risk of tsunami. In this paper, we adopted the probabilistic tsunami hazard analysis (PTHA) for the southeast coastal area of China, considering the comprehensive impact of both the local and regional potential tsunami sources. The tsunami hazard map was consequently delineated, which shows that the level of tsunami hazard is relatively highest for the Fujian Province, moderate for the Guangdong Province and lowest for the Zhejiang and Hainan Provinces. Four major cities including Hong Kong, Macao, Xiamen and Quanzhou were taken as typical examples to calculate the probability of tsunami wave height exceeding a given height ($h \geq H$) and the return periods, and analyze the contribution of each tsunami potential source to the PTHA calculations. The results show that the tsunami hazard is serious at Xiamen and Quanzhou where the return periods of tsunami waves exceeding one meter are 281 years and 589 years respectively; the tsunami hazard is slight at Hong Kong and Macao where the return periods are more than 1 000 years. The con-

收稿日期:2018-03-16; 修订日期:2018-06-18

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)

Supported by: Natioanl Natural Science Foundation of China (51278473); Environmental Protection Research Fund for Public Interest (201209040); Northeast Asia (China-Japan-Korea) Cooperative Research Project of Earthquake, Tsunami and Volcano (ZRH2014-11)

作者简介:刘也(1995-),男,硕士研究生,主要从事海啸防灾减灾研究. E-mail: ly324001@hotmail.com

通讯作者:任叶飞(1983-),男,副研究员,博士,主要从事工程地震及海啸防灾减灾相关研究. E-mail: renyefei@iem.net.cn

tribution of Manila potential tsunami source to the PTHA calculation at southeast coastal area of China is greater than each one of eight local sources. The characteristics of tsunami hazard along the southeast coast of China are remarkably regional, dominated by the relative spatial geographical position between the measured site of interest and the potential tsunami source.

Key words: probabilistic tsunami hazard analysis; regional characteristic; tsunami hazard map; return period; southeast coastal of China

引言

2004年苏门答腊南海域发生9.0级地震引发巨大的海啸,袭击了印度尼西亚、斯里兰卡、印度、泰国、马尔代夫等国近海岸的许多城市和乡村,引起巨大的人员伤亡和经济损失。2011年日本东北部太平洋海域发生9.0级地震引发海啸,同样造成巨大的人员伤亡和财产损失,同时还引发了核泄漏事故,造成的生态破坏将延续数十年甚至数百年。经历这两次事件之后,人们对海啸危险性有了更为深刻的认识,越来越多的研究人员参与到海啸相关研究中,极大的提升了全球海啸防灾减灾能力。近年来,我国也逐步开展海啸防灾减灾相关研究。已有结果表明,我国南海近海域具有发生破坏性海啸的地震地质构造条件^[1-2],另外,美国地质调查局(USGS)海啸研究组认为菲律宾西侧的马尼拉海沟发生海啸的风险较高^[3]。马尼拉海沟距我国东南沿海较近,海面开阔,一旦发生海啸将对我国产生巨大影响。

我国东南沿海地区分布着大量的重要基础设施和重大工程,如跨海大桥、核电站、海上钻井平台等。这些设施、工程以及沿岸城镇、村落面临海啸袭击风险,因此有必要对我国东南沿海地区的开展海啸危险性分析。目前相关工作已开展较多,有针对整个沿海地区^[4-6]、也有针对特定场点^[7-8],但未见研究对中国东南沿海不同区域的海啸危险性进行对比分析。

本文针对整个东南沿海地区,综合考虑近海海啸潜源和局地海啸潜源,进行概率海啸危险性分析(PTHA)计算,编制海啸危险性图,对浙江、福建、广东、海南四个沿海省份,以及澳门、香港、厦门、泉州4个重点城市的海啸危险性程度进行对比分析,研究不同海啸潜源对PTHA的不同贡献影响,研究结果可为沿海重大工程选址、城市发展规划提供科学依据,促进东南沿海地区的可持续发展。

1 海啸潜源选取

我国东海、南海大陆架宽阔平缓,周围分布着日本列岛、朝鲜半岛、琉球群岛、印度尼西亚群岛、中南半岛等岛屿,这些岛屿形成天然屏障,越洋海啸传播到中国沿海能量衰减很快,阻挡了来自太平洋和印度洋的越洋海啸传播,所以我国沿海地区受越洋海啸影响较小,本文主要考虑区域海啸和局地海啸对我国沿海地区的影响。根据任叶飞和刘迎春等人的研究^[4-7],对中国东南沿海地区产生影响的海啸潜源有9个,其中包含8个局地海啸潜源和马尼拉区域潜源,如图1所示。张鹏利用我国地震动参数区划图结果以及历史地震数据给出了这9个海啸潜源的构造参数及地震年发生率^[9]。本文在这些已有研究成果的基础上开展东南沿海地区的PTHA计算分析。

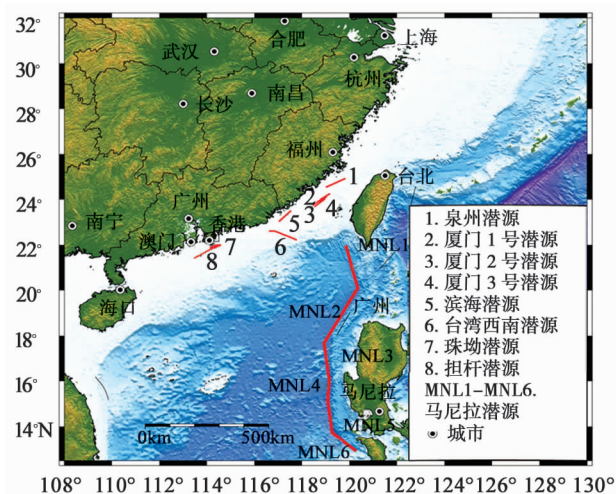


图1 对中国东南沿海有影响的区域海啸潜源和局地海啸潜源

Fig. 1 Local and regional potential tsunami sources affecting the southeast coast of China

2 蒙特卡罗方法制定海啸目录

2.1 震级采样

根据 Cornell^[10] 提出的 PSHA 方法,一定区域内,发生任何一次地震的震级 M 的累计分布函数、概率密度函数分别为:

$$F(M) = \frac{1 - \exp[-\beta(M - M_{\min})]}{1 - \exp[-\beta(M_{\max} - M_{\min})]}, \quad M_{\min} < M < M_{\max} \quad (1)$$

$$f(M) = \frac{\beta \exp[-\beta(M - M_{\min})]}{1 - \exp[-\beta(M_{\max} - M_{\min})]}, \quad M_{\min} < M < M_{\max} \quad (2)$$

其中 M_{\min} 和 M_{\max} 分别为该区域的震级上限和震级下限, $\beta = b \times \ln 10$, b 为该区域内统计的 Gutenberg-Richter (G-R) 关系中的斜率值,本文选取的地震海啸潜源所在区域的震级上限、震级下限、 b 值如前文所述在已有研究中已给出^[9]。

依据式(2)确定每个地震海啸潜源的震级概率密度函数,使用 Monte Carlo 方法对地震海啸目录进行随机采样,使样本的随机数(震级)服从此概率密度函数。对于局地海啸潜源,震级上下限范围较小、规模较小,进行 100 次随机采样;对于区域潜源,震级范围大、规模大,进行 600 次随机采样。

2.2 破裂参数确定

海啸目录中除了包括震级参数,还应包括断层的破裂参数。根据震级大小合理的确定断层破裂参数,对正确反映每次地震引发的海啸规模具有重要意义。对于局地海啸潜源,采用 Wells 和 Coppersmith^[11] 提出的经验公式确定破裂长度 L 、破裂宽度 W 。

平均滑移量的估计采用以下公式^[12]:

$$M_0 = \mu LWD \quad (3)$$

其中 μ 为地壳介质剪切刚度,取 35 GPa。 L 、 W 、 D 分别为破裂长度、宽度、平均滑移量, M_0 可根据矩震级标量公式确定^[13]:

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 10.7 \quad (4)$$

对于马尼拉区域海啸潜源,采用 Papazachos^[14] 提出的经验公式确定破裂长度 L 、破裂宽度 W 、平均滑移量 D 。

根据上文的方法,针对每个海啸潜源制定一个海啸目录,每个局地海啸潜源包含 100 次地震事件,马尼拉区域海啸潜源包含 600 个地震事件。对海啸目录中所有地震事件进行海啸数值模拟,这里采用 Comcot V1.7 程序模拟海啸生成与传播,使用精度为 1 弧分的 ETOPO 水深数据。

3 PTHA 计算

根据 Chio 的统计^[15],海啸波高满足对数正态分布,其概率密度表示如下:

$$f_i(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}h\sigma} \exp\left(-\frac{[\ln(h) - \mu]^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

其中, h 表示海啸波高, μ 和 σ 表示 $\ln(h)$ 的均值和标准差。

针对每个海啸潜源,统计数值模拟结果得到目标场点的海啸最大波高分布,对统计结果进行对数正态分布拟合,得到 μ 和 σ 的值,得到波高分布的概率密度曲线。海啸波高超越 H 的概率为:

$$F_i(h \geq H) = \int_H^{\infty} f_i(h) dh = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_H^{\infty} \exp\left(-\frac{[\ln(h) - \mu]^2}{2\sigma^2}\right) \frac{dh}{h} \quad (6)$$

根据下式计算目标场点由第 i 个海啸潜源引起海啸波高超越 H 的年发生率:

$$v_i(h \geq H) = F_i(h \geq H) \cdot v_i(M_1^i \leq M \leq M_2^i) \quad (7)$$

其中, $v_i(M_1^i \leq M \leq M_2^i)$ 为第 i 个海啸潜源震级在 M_1^i 和 M_2^i 之间的地震年发生率。

当目标场点受 N_T 个海啸潜源产生的海啸影响时,目标场点海啸波高超越 H 的总年发生率为:

$$v_{\text{total}}(h \geq H) = 1 - \prod_{i=1}^{N_T} [1 - v_i(h \geq H)] \quad (8)$$

地震在时间序列上服从泊松分布,因此时间 T 年内目标场点海啸波高超越 H 的概率为:

$$P(h \geq H, t = T) = 1 - \exp(-v_{\text{total}}(h \geq H) \cdot T) \quad (9)$$

根据下式计算每个潜源对总年发生率的贡献率 $\psi_i(h \geq H)$

$$\psi_i(h \geq H) = \frac{v_i(h \geq H) \sum_{j=0}^{N_T-1} \left\{ \sum_{l=1}^{C(N_T-1, J)} \frac{1}{J+1} \prod_{j=1}^J v_{j,l} \prod_{k=1}^{N_T-J-1} (1 - v_{k,l}) \right\}}{v_{\text{total}}(h \geq H)} \quad (10)$$

其中, $C(N_T-1, J)$ 表示除第 i 个海啸潜源以外的 N_T-1 个海啸潜源中任取 J 个不同海啸潜源的数量, $v_{j,l}$ 表示第 l 次取样得到的数量 J 个潜源中第 j 个海啸潜源计算的年发生率, $v_{k,l}$ 表示除 j 和 i 以外的其他海啸潜源计算的年发生率。

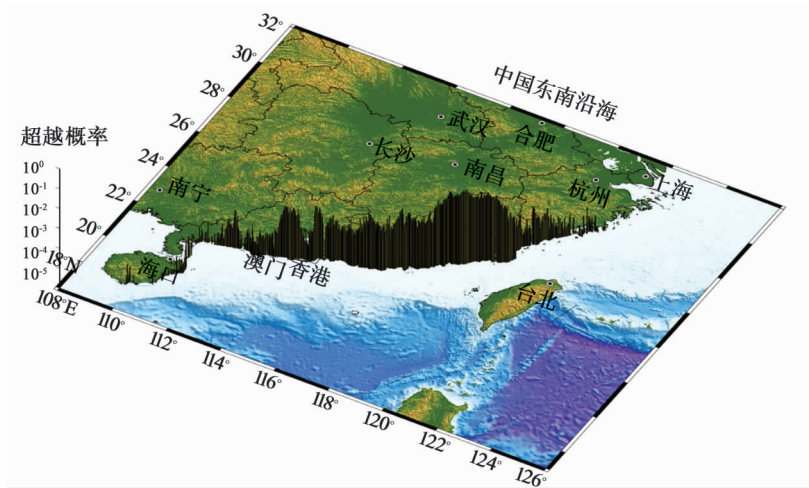


图2 东南沿海100年内海啸波高超越1m概率

Fig. 2 The probabilities of tsunami waves exceeding 1m within 100 years for southeast coast of China

4 区域性特征比较

对中国东南沿海纬度范围 $18^\circ\text{N} \sim 30^\circ\text{N}$ 、经度范围 $110^\circ\text{E} \sim 123^\circ\text{E}$ 内水深为 10 m 处选取 1 038 个场点,根据上述计算流程,对每一个场点进行 PTHA 计算,最终绘制中国东南沿海海啸危险性图,图 2 宏观的显示了中国东南沿海每个场点 100 年内海啸波高超过 1m 的概率。图 3 给出了不同沿海省份和典型城市 100 年内海啸波高超过 1 m 的概率区域性差异比较。

结合图 2 和图 3 可以发现,浙江省和海南省沿海地区在 100 年内遭受海啸波高超过 1 m 的概率很低,几乎为零;广东省沿海地区概率较高,在 1% ~ 10% 之间;福建省沿海地区概率最高,在 10% ~ 40% 之间。造成这种现象的主要原因是:泉州潜源、厦门 1 号潜源、厦门 2 号潜源、厦门 3 号潜源距离福建省沿海地区较近(见图 1),震级上限较高,走向平行于海岸线,通常认为海啸波主要向垂直于断层走向方向传播,导致这四个海啸潜源产生的海啸直接向福建省沿岸方向传播,对相邻的浙江省沿海地区和广东省沿海地区影响较小。广东省沿海地区主要受附近的滨海潜源、台湾西南潜源、担杆潜源和珠坳潜源影响,这四个潜源震级上限较低,地震年发生率较低,且位置较为分散,导致广东省沿海地区受海啸影响较福建省沿海地区小。

图 4 给出了沿海重要城市 100 年内海啸波高超越概率和重现期曲线。厦门 100 年内海啸波高超过 1 m 的概率高达 29.9%,泉州为 16.9%,香港为 4%,澳门为 3.3%,见表 1。泉州、厦门遭受波高超过 1m 的海啸袭击重现期分别为 539 年和 281 年,香港、澳门重现期均超过 1 000 年。无论是从超越概率还是波高重现期角度,厦门、泉州海啸危险性高于香港、澳门。值得注意的是,本文选取的场点位置水深均为 10 m,当海啸波向陆地继续传播,水深变浅,波速减慢,后面的高速海水向前涌,使海啸波高进一步增大,同时考虑到港湾内波浪的汇聚与反射效应,最终抵达陆地的海啸波高将大于场点处海啸波高。

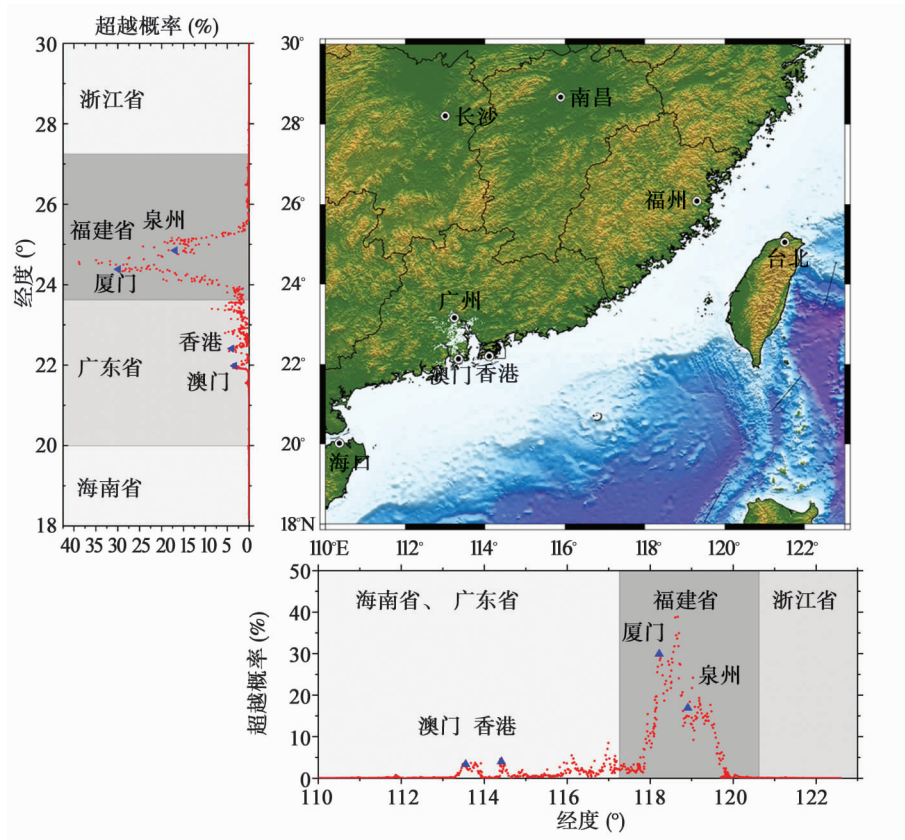


图 3 东南沿海 100 年内海啸波高超越 1 m 的概率区域性差异

Fig. 3 The relationship between the probability of tsunami wave height exceeding 1m within 100 years and latitude and longitude

图 5 给出了沿海重要城市海啸波高超过 1 m 的年发生率计算时各海啸潜源的贡献率,香港、澳门主要受马尼拉海啸潜源、担杆海啸潜源、珠坳海啸潜源的影响;局地海啸潜源对香港、澳门的影响大于马尼拉海啸潜源。产生这种现象的原因是:马尼拉海啸潜源由于地震构造不同被分为 6 段,每一段走向各不相同,当震源位于不同段时产生的海啸传播方向各不相同,虽然马尼拉海啸潜源规模大,震级上限高,但只有马尼拉海啸潜源南端发生破裂时产生海啸才能对中国东南沿海产生影响,珠坳海啸潜源和担杆海啸潜源距离香港澳门很近,潜源走向面向香港、澳门,产生的海啸直接面向香港、澳门传播,产生的衰减很小,因此 PTHA 计算时贡献率相对较高。厦门、泉州主要受厦门 1 号海啸潜源、厦门 2 号海啸潜源、厦门 3 号海啸潜源、泉州海啸潜源影响。由于马尼拉海啸潜源距离厦门、泉州较远,且厦门、泉州位置与马尼拉海啸潜源位置接近平行,产生的海啸能量只有部分向厦门泉州方向传播,导致其几乎不受马尼拉海啸潜源影响。厦门 1 号、2 号和 3 号海啸潜源距厦门更近,泉州潜源距泉州更近,因而厦门 1 号、2 号和 3 号海啸潜源对厦门的贡献率更大,泉州潜源对泉州的贡献率更大。上述分析说明海啸潜源与目标场地的相对位置是影响 PTHA 结果的重要因素之一。

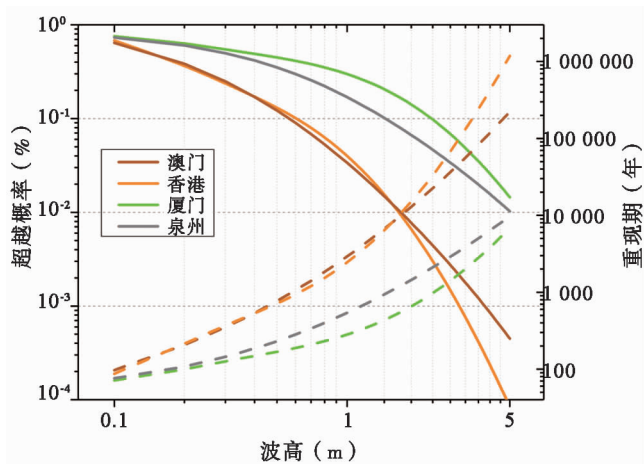


图 4 重要城市 100 年内波高超越概率和重现期

Fig. 4 Probabilities of at least one occurrence of exceedance of tsunami wave height within 100 years and return period at some major cities

表1 重要城市100年内波高超越0.5 m和1.0 m的概率和重现期

Table 1 Probabilities of at least one occurrence within 100 years and return periods of tsunami waves > 0.5 m and 1.0 m at some major cities

城市	$P(h \geq H) (\%)$		$R(h \geq H) (\text{年})$	
	$H=0.5 \text{ m}$	$H=1 \text{ m}$	$H=0.5 \text{ m}$	$H=1 \text{ m}$
香港	13	4	768	2 442
澳门	12	3.3	713	2 913
厦门	44.8	29.9	168	281
泉州	35.2	16.9	230	539

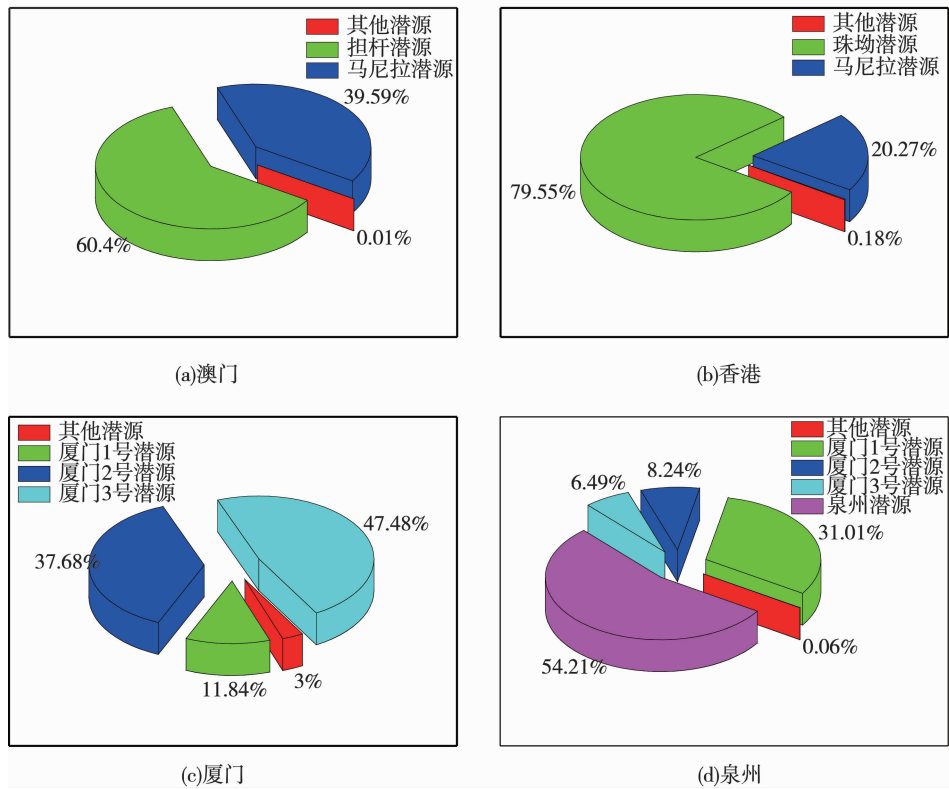


图5 重要城市海啸波高超过1 m的年发生率计算时各潜源的贡献

Fig. 5 The contribution of each potential tsunami source to the calculation of annual probability of tsunami wave height exceeding 1 m at some major cities

5 结论

本文综合考虑中国东南沿海附近的局地海啸潜源与区域海啸潜源,采用蒙特卡洛采样方法制定海啸目录并进行海啸波生成与传播数值模拟,使用 PTHA 方法对东南沿海 1038 个场点进行危险性分析,最终绘制中国东南沿海海啸危险性图,对东南沿海的海啸危险性进行区域性特征分析。得到以下结论:

(1) 福建省沿海地区海啸危险性最高,广东省次之,浙江省和海南省受海啸影响很小。针对沿海重要城市进行 PTHA 分析,发现泉州和厦门的海啸危险性较高,100 年内海啸波高超过 1 m 的概率分别达到 16.9% 和 29.9%,香港和澳门危险性较低。我国东南沿海的海啸危险性区域化差异明显,主要与近海局部海啸潜源的空间分布有关,制定海啸防灾减灾相关措施时针对不同沿海省份应区别对待。

(2) 沿海重要城市香港、澳门、泉州、厦门的 PTHA 分析结果显示,较马尼拉区域海啸源,局地潜源对我国沿海的海啸危险性贡献率相对较大,厦门和泉州主要受泉州、厦门 1 号、厦门 2 号和厦门 3 号海啸潜源影响;香港、澳门受马尼拉区域潜源、担杆和珠坳局地潜源共同影响。这些结果体现了海啸潜源与目标场地的

相对位置是影响 PTHA 结果的重要因素之一。

参考文献:

- [1] 杨马陵,魏柏林.南海海域地震海啸潜在危险的探析[J].灾害学,2005,20(3):41-47.
YANG Maling, WEI Bailin. The potential seismic tsunami risk in South China Sea and its surrounding region[J]. Journal of Catastrophology, 2005, 20(3): 41-47. (in Chinese)
- [2] 张虎男.南海及其周缘的地震活动与区域稳定性评价[J].海洋学报,1995,17(6):81-89.
ZHANG Hunan. Seismic activity and regional stability evaluation in South China Sea and adjacent areas[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1995, 17(6): 81-89. (in Chinese)
- [3] Kirby S H. Tsunami source characterization for western Pacific subduction zones: A preliminary report[R]. Houston: USGS Tsunami Sources Workshop, 2006.
- [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 & Planetary Interiors, 2007, 163(1): 233-244.
- [5] Ren Y, Wen R, Zhang P, et al. Implications of local sources to probabilistic tsunami hazard analysis in south Chinese coastal area[J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2017, 11(01): 1740001.
- [6] 杨智博.中国地震海啸危险性分析[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2015.
YANG Zhibo. Probabilistic tsunami hazard analysis along Chinese coast[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics China Earthquake Administration, 2015. (in Chinese)
- [7] Ren Y, Wen R, Song Y. Recent progress of tsunami hazard mitigation in China[J]. Episodes, 2014, 37(4): 277-283.
- [8] 张鹏,任叶飞,温瑞智,等.广东大亚湾的地震海啸概率危险性评价[J].工业建筑,2016,46(增刊):68-73.
ZHANG Peng, REN Yefei, WEN Ruizhi, et al. Probabilistic tsunami hazard analysis for a site at Daya Bay[J]. Industrial Construction, 2016, 46(S): 68-73. (in Chinese)
- [9] 张鹏.中国东南沿海海啸危险性分析[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2017.
ZHANG Peng. Probabilistic tsunami hazard analysis along Chinese coast[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics China Earthquake Administration, 2017. (in Chinese)
- [10] Cornell C A. Engineering seismic risk analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58(11 Suppl 1): S183-S188.
- [11] Wells D L, Coppersmith K J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(4): 974-1002.
- [12] Aki K. Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964. Part 2. Estimation of earthquake movement, released energy, and stress-strain drop from G wave spectrum[J]. Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. Tokyo, 1966, 44: 73-88.
- [13] Hanks T C, Hiroo K. Moment magnitude scale[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1979, 84(B5): 2348-2350.
- [14] Papazachos B C, Scordilis E M, Panagiotopoulos D G, et al. Global relations between seismic fault parameters and moment magnitude of earthquakes[J]. Bulletin of the Geological Society of Greece, 2004, 36: 1482-1489.
- [15] Choi B H, Pelinovsky E, Ryabov I, et al. Distribution functions of tsunami wave heights[J]. Natural Hazards, 2002, 25(1): 1-21.