

通过 WCEE 跟踪国际海啸研究动态 及我国海啸防灾减灾工作的思考

任叶飞 张 鹏 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, 世界上发生了多次破坏性海啸, 例如 2010 年智利南部 M_w 8.8 级和 2011 年东日本 M_w 9.0 级地震海啸, 引起了巨大人员伤亡和财产损失。海啸防灾减灾研究已成为国际热点课题, 2008 年至今连续 3 届世界地震工程会议(WCEE)上均有大量海啸研究相关文章发表。本文通过调查这 3 届 WCEE 海啸专题最新研究成果, 跟踪国际海啸研究动态; 对目前 2 个研究热点问题, ASCE 7-16 中海啸荷载及影响和概率海啸危险性分析, 进行调研和总结; 从历史海啸目录、海啸数值模拟及应用、海啸预警系统和概率海啸危险性分析 4 个角度对我国海啸研究进展进行综述。最后, 考虑我国目前在海啸灾害研究方面的现状, 结合国际海啸研究动态, 思考我国海啸防灾减灾当前应侧重的几方面工作。

关键词: 世界地震工程会议; 海啸研究动态; 海啸防灾减灾; 海啸危险性分析; ASCE 7-16; 海啸荷载及影响

中图分类号: P315

文献标志码: A

Investigating the international trends on tsunami research and thinking the issues of tsunami mitigation in China through the advances in WCEE

REN Yefei, ZHANG Peng, WEN Ruizhi, XU Zhaoyang

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

Abstract: In recent years, there are several devastating tsunamis occurred in the world, such as the 2010 Iliapel, Chile M_w 8.8 and 2011 Tohoku, Japan M_w 9.0 tsunamis, both which caused great casualties and property losses. Thus, tsunami mitigation has become an international popular issue. From 2008 to now, the World Conference on Earthquake Engineering (WCEE) were held three times, during which a large number of papers related to the tsunami research topics were published. We analyzed the research results of these papers and investigated the international trends on tsunami research. The advances of two hot topics were reviewed and summarized, which are the tsunami loads and effects in ASCE 7-16 and probabilistic tsunami hazard analysis (PTHA). The progress of tsunami research in China were investigated from four aspects, including historical tsunami catalogue, tsunami numerical simulation, tsunami early warning system and PTHA. Finally, some concerning works were suggested to be currently carried out in China, considering the domestic situation and international trend of tsunami research.

Key words: WCEE; tsunami research trend; tsunami disaster prevention and mitigation; PTHA; ASCE 7-16; tsu-

收稿日期: 2017-03-21; 修订日期: 2017-04-19

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); 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项(2014B06)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (51278473); Environmental Protection Research Fund for Public Interest (201209040); Science Foundation of Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration(2014B06)

作者简介: 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研究。E-mail: renyefei@iem.net.cn

nami loads and effects

引言

世界地震工程会议(WCEE)是地震工程届交流最新研究成果、分享技术经验的最好平台之一。第1篇在WCEE上刊登的海啸相关论文是由日本东京大学的高桥龙太郎(Ryutaro Takahasi)在2WCEE上发表,其介绍了1960年智利海啸调查情况^[1]。自此会议之后,几乎每届会议都有最新研究成果发表,原因在于此次会议召开前50天左右,即1960年5月22日,智利发生 M_w 9.5地震海啸,是有历史记载以来最大地震,海啸波及整个太平洋,共造成2000人死亡、3000人受伤、200万人无家可归。即使在日本沿岸也监测到6m波高,造成139人死亡。

自此海啸相关研究受到巨大重视,人们对于海啸的危害有了重新认识,世界各国投入大量人力财力进行海啸防灾减灾相关研究,WCEE为这些学者提供了一个非常好的交流平台,其展示的研究成果是最新、最具前沿性的,体现了该领域内的最新学术动态。因此,本文旨在通过总结近3届WCEE海啸专题研究成果,梳理目前海啸研究国际热点问题,调查最新研究现状,思考我国海啸防灾减灾工作。

我国历史文献常用“海溢”、“潮涌”等词汇来形容海水的异常涨落,这就很难区分这些历史记录是由海啸还是由风暴潮引起。因此,人们也就普遍认为我国过去不曾遭受到破坏性海啸的袭击^[2-5]。尽管近百年来科技的高速发展,用于监测海啸波高的仪器已遍布全球海洋,但我国沿海却没有监测到大的海啸波。海啸防灾减灾相关研究在我国一直受到忽视。这种现状自2004年得以转变,2004年12月26日印度洋苏门答腊地震海啸造成了近30万人死亡和巨大经济损失,促使我国政府及公众对于海啸灾害的高度重视。另外,2011年3月11日日本东北大地震海啸诱发福岛核电站泄漏事故,再次引起了公众对沿海重要设施的关注。

由于国家及各级政府的大力支持,近10年我国在海啸防灾减灾相关方面研究也取得了较多突破性成果,本文从海啸历史目录、数值模型、早期预警以及危险性分析4方面对这些成果进行综述分析,结合国际最新研究进展和动态,综合我国国情,建议我国未来海啸防灾减灾领域应重点开展的几方面工作。

1 WCEE 海啸专题

自14WCEE已连续3届会议设立海啸研究专题,足以说明海啸防灾减灾是目前国际社会的重要热点问题之一。接下来对这3届WCEE海啸研究主要涉及的内容进行数理分析。

1.1 概述

16WCEE会议海啸研究专题共发表论文62篇,数量基本与上届(65篇)持平,依旧远大于以往各届(见图1),说明海啸相关研究在国际上关注度依旧很高。2004年苏门答腊地震海啸产生的巨大破坏影响警示人们应该加强海啸防灾减灾研究,因此2008年召开的14WCEE海啸研究论文数量较以往出现快速增长;尽管日本在地震和海啸的防灾减灾方面有着非常丰富的经验,投入了大量人力物力从地震学、水动力学、计算力学、地球物理学、土木工程学等覆盖各个学科进行全方位研究,针对未来大震灾害也已做好了充分应急准备,然而百密未免一疏,2011年发生如此大规模的地震和海啸完全超出之前预估,尤其海啸波高的严重低估造成了公众疏散不及时而造成大量人员伤亡、福岛核电站防护不足引起核泄漏事故。地震之后,日本政府加大投入,总结经验,扩展研究领域,因而2012年召开的15WCEE海啸研究论文出现井喷式增长。另外,此期间还发生了2009年9月29日萨摩亚群岛8.1级、2010年2月27日智利南部8.8级和2010年10月25日印度尼西亚明打威7.8级地震,引起的海啸分别造成了192人、156人和431人死亡^[6]。不仅仅是日本,世界其他国家也加大投入进行海啸防灾减灾方面的研究,由于这些破坏性海啸的影响非常深远,至2016年16WCEE召开,研究热度依旧没有得到下降,本届论文数量也与15WCEE保持一致。

1.2 14WCEE 国际海啸研究热点

综合分析此次会议的口头及张贴报告、发表论文情况,总结此次会议海啸研究主要涉及以下4方面内容:

(1) 海啸水力实验,研究海啸边缘波效应、海啸波荷载如何作用于钢筋混凝土房屋及桥梁结构、结构上开孔对海啸作用力的减弱效果、海岸红树林对海啸冲击力的减弱作用等。

(2) 海啸危险性评估 2004 苏门答腊地震海啸引起了全世界对海啸灾害的关注,许多国家相继开展了海啸危险性评估,如新西兰、中国、意大利、美国、冰岛、加拿大等。

(3) 海啸避难疏散相关研究,主要是沿海海啸避难建筑的设计准则,海啸避难疏散状况模拟预测。

(4) 海啸相关社会学问题研究,如灾后重建规划、海啸防灾信息宣传、海啸对旅游业的冲击与恢复等。

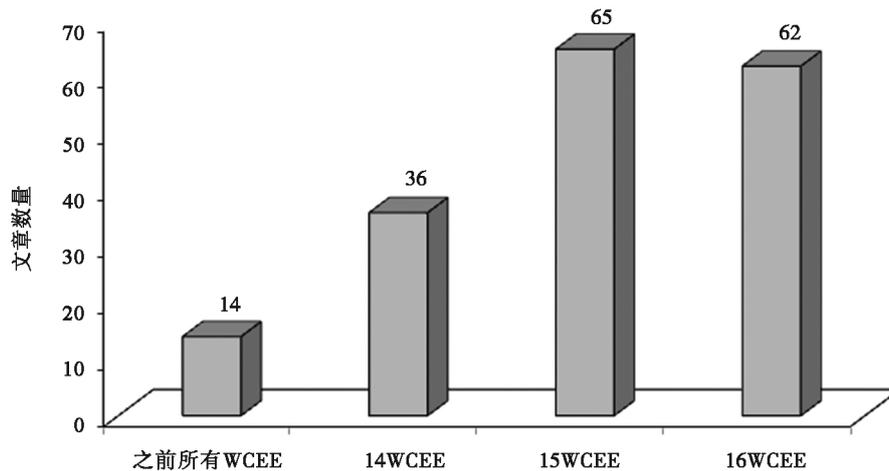


图1 历届 WCEE 有关海啸研究文章数量统计

Fig. 1 Paper numbers published in historical WCEEs

1.3 15WCEE 国际海啸研究热点

15WCEE 会议海啸研究主要涉及以下 6 方面内容:

(1) 海啸荷载(主要包括静水压力、拖曳力、浮力、冲击力、残骸撞击力) 相关研究,主要分为:各种作用力的计算方法研究,沿海建筑物及基础设施在海啸荷载作用下的结构性能分析,考虑海啸荷载的结构设计规范检验、修订与编制,甚至提出了海啸避难建筑基于性能的设计方法。

(2) 2011 东日本地震海啸引起的破坏情况调查,有对钢筋混凝土结构建筑、供水设施、木结构建筑、钢结构建筑、诸如海堤等的岩土工程、诸如桥楼、道路等的基础设施的调查。

(3) 海啸避难疏散相关研究,2011 年东日本大地震海啸的深刻教训促使人们对海啸避难疏散的重视。主要研究设定地区居民的海啸避难疏散状况模拟预测以及从东日本大地震海啸中吸取的相关经验教训。

(4) 海啸危险性评估,2011 年东日本地震海啸的规模和破坏力出乎人们意料,引起了各国开始关注本国的地震海啸危险性,从而相继开展危险性评估,如葡萄牙、秘鲁、法国、土耳其、美国、日本。

(5) 海啸数值模拟,运用震源破裂过程反演结果计算初始位移场,多重网格的海啸传播数值模拟过程中球坐标体系与笛卡尔坐标体系的衔接计算,离散元法模拟海啸爬岸过程。

(6) 其他前沿性研究:海啸烈度新定义、海啸易损性函数、海啸波退潮理论、海啸引起沙土液化机理、地震面波反演与海啸格林函数相结合的海啸预警方法等。

1.4 16WCEE 国际海啸研究热点

16WCEE 会议海啸研究主要涉及以下 6 方面内容:

(1) 概率海啸危险性分析(PTHA)。主要包括海啸潜在源的确认、PTHA 方法改进、震源模型对 PTHA 的影响、PTHA 结果运用于海啸区划编制、PTHA 不确定性分析等。

(2) 建筑结构海啸荷载作用及规范编制。主要围绕海啸引起的荷载类别、荷载在建筑结构的作用分布、荷载的计算方法、规范的编制、有限元数值模拟、荷载实验等。

(3) 海啸疏散模拟与指南建议编制。包括海啸发生时驾驶汽车的疏散方法、人员密集场所的疏散原则、疏散管理与决策系统的研发、疏散风险评估、现有疏散指南的验证与改进等。

(4) 海啸潜在风险评估及早期预警。针对全球各沿海地区开展海啸风险评估、设定地震的海啸传播模拟、对历史大地震进行重现数值模拟以评估海岸风险、利用现代观测仪器进行海啸早期预警等。

(5) 其他前沿性研究。包括海啸引起的结构易损性分析、天文潮与海啸波混合数值模拟、区域性海啸研究综述、新技术应用于灾害调查、海啸水槽实验、大海啸经验总结、海啸后的垃圾存储与处理。

另外,还有 8 篇论文是基于 2011 年东日本大地震引起的海啸为例进行研究分析,可见此次地震尽管时

隔近 6 年,其影响依旧很深远。

1.5 跟踪国际海啸研究动态

对这三届 WCEE 的研究动态进行思考,并作如下评述:

(1) 海啸数值模拟技术基本上趋于成熟。现有常用的数值模型,如 COMCOT、MOST、TUNAMI 已基本满足实践计算的需要。这些模型计算结果的准确性基本取决于基础数据的精度,单纯从计算方法角度提高数值计算的精确性已很难实现。由于概率海啸危险性分析、地震预警、海啸区划图编制对大规模数值计算的需求,并行计算技术已逐步应用于海啸数值模拟过程中。

(2) 海啸荷载是海啸研究领域近 10 年的热点课题。2004 年苏门答腊海啸之后,工程界开始关注这方面研究,最初利用海啸动力水实验、水槽实验研究海啸荷载的作用原理、海啸荷载作用下的结构特性以及海啸荷载的计算方法等;2011 年东日本海啸之后,日本和美国开始研究如何在结构设计规范中合理考虑海啸荷载,ASCE 7-16(也就是 2016 版本的《美国建筑物和其他结构最小设计荷载》)规范中已增加一个新的章节,为沿海结构设计提供如何考虑海啸荷载的具体条款。未来这方面研究依旧是热点,一方面规范的适用性需要实践验证,另一方面其他国家的规范将以此为蓝本进行修订。

(3) 海啸避难疏散相关研究是热点问题。3 届 WCEE 均有很多文章涉及此方面研究。受 2011 年东日本地震海啸的深刻教训,人们对海啸避难疏散愈加重视。海啸避难建筑的规划与设计、沿海海啸避难疏散状况的预测模拟、疏散的管理与决策以及指南编写是重点研究问题。未来这方面研究依旧是热点,主要原因是合理的疏散路线、快速的疏散原则是海啸逃生的最有效手段。我国在这方面研究已逐步开展,例如,Hou 等^[7]假设日本琉球群岛发生 9.0 级地震,对浙江台州椒江区海门街道进行海啸疏散的模拟和演练。

(4) 世界上易受海啸影响的国家基本上都开展了海啸危险性评估,大多采用确定性的方法,给出了定性的评价结果;能给出定量结果的概率性海啸危险性分析(PTHA)方法正逐渐被采用,其结果将被主要用于沿海城市规划与防灾措施决策、海啸荷载规范的编制、沿海重大工程的选址等方面;另外,如何合理考虑 PTHA 的不确定性是未来需要解决的关键问题。

(5) 世界各国越来越关注海啸研究,包括我国在内研究队伍逐渐壮大,并且涉及领域逐渐扩大、相互交叉,不仅仅局限于以前主要涉及的地震学、海洋性和流体动力学,还涉及到结构工程、岩土工程、桥梁工程、社会学、经济学、政策研究、高性能计算等,正逐渐成为一门综合性学科。

2 ASCE 7-16 海啸荷载及影响

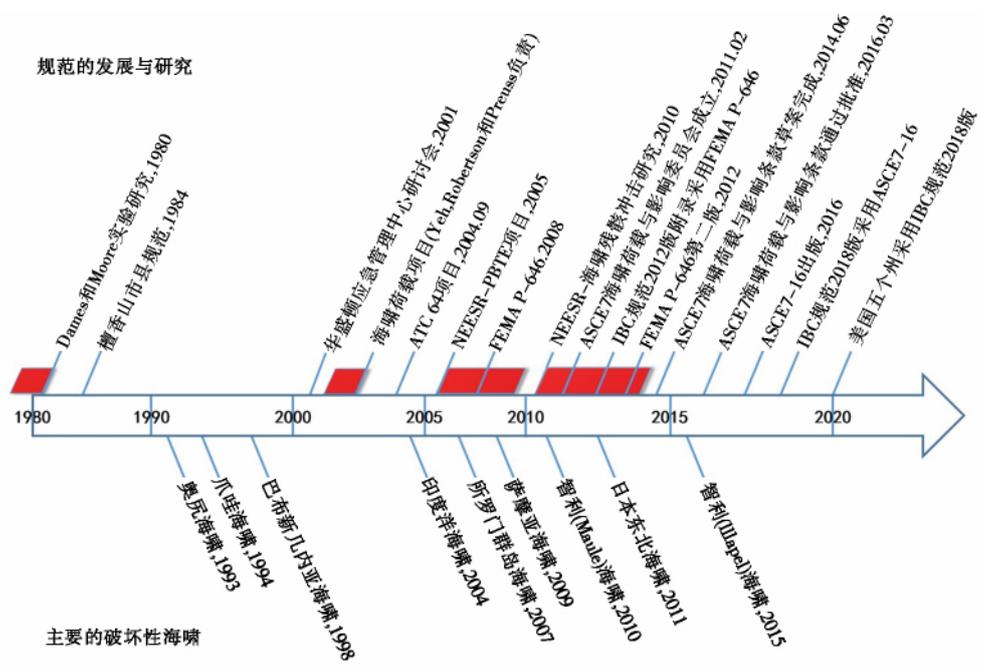


图 2 美国海啸荷载研究历程(根据文献[8]修改)

Fig. 2 History of tsunami code development in the U. S. A

16WCEE 专门设立一个专题针对规范 ASCE 7-16 中海啸荷载及影响进行研讨,这也是此次会议的一个重要亮点,共有 8 个报告汇报了相关内容,包括规范修订的背景介绍、设计标准与加载示例、设计目标可靠性、基础结构设计、发展 2500 年重现期的海啸淹没图等。下面对该规范修订的过程及内容进行整理,以飨读者。

2.1 背景介绍

2010 年智利 8.8 级地震和 2011 年东日本 9.0 级地震造成了沿岸大量建筑物、桥梁及港口设施的严重破坏。不过,仍有部分混凝土及钢结构建筑物仅遭受非结构构件破坏,尤其是严格按照高标准抗震要求设计的结构。事实证明,沿岸建筑在进行结构设计时必须考虑海啸波淹没海岸和高速流动所形成的荷载。

2011 年 2 月,美国土木工程师协会(ASCE)成立一个子委员会——海啸荷载与影响委员会(TLE),由 16 名正式委员和 14 名准委员组成。他们耗费了 4 年半时间修订 ASCE 标准,增加一个新的章节,即第 6 章,海啸荷载及影响,为沿海结构设计提供如何考虑海啸荷载的具体条款。这些设计条款在 2016 版本中已经得到批准,2018 版本的国际建筑规范(International Building Code)也将参考此部分内容。

ASCE 7-16 作为第 1 个加入海啸防御内容的规范,将在美国西海岸五个州(阿拉斯加、华盛顿、俄勒冈州、加利福尼亚州和夏威夷)实施,其计算方法和原理不仅对我国沿海海啸防御有借鉴意义,对于其他海啸风险较高的国家进行规范修订工作具有重要的参考作用。

2.2 美国海啸荷载研究历程^[8]

美国第 1 个也是唯一一个采用海啸设计条款的标准是夏威夷的檀香山市县规范。早期的规范都是基于 1980 年 Dames 和 Moore 关于海啸荷载的实验室研究成果。在经历了日本和东南亚一系列破坏性海啸之后,华盛顿州应急管理中心在 2001 年组织了一个研讨会,联合海啸科学家和结构工程师共同商讨海啸设计条款的发展。这个研讨会最终促成了一个研究项目,由 Yeh、Robertson 和 Preuss 负责研究沿海建筑物考虑海啸荷载的可行性。最终的研究报告作为 ATC 64 项目的基础,发展 FEMA P-646,即海啸垂直疏散结构的设计指南。2004 年印度洋海啸造成的巨大破坏极大的推动了海啸研究,更多的实验室开始进行海啸荷载与影响的研究,其中包括 NEESR-PBTE 项目,发展基于性能的海啸工程,随后还有 NEESR-海啸残骸冲击项目,研究海啸波到岸后水面漂浮物的冲击力。2011 年 2 月由 Martin & Chock 公司的 Gary Chock 领衔的 30 名专家组成海啸荷载与影响委员会(TLE),隶属于 ASCE。一个月之后日本发生 9.0 级地震海啸,该委员会立即深入现场,通过实际震害调查验证已有的实验室结果。2012 年,国际建筑规范(IBC)采用 FEMA P-646 作为其一项附录,用于设计海啸垂直疏散结构和其他海啸淹没区域的重要建筑。借鉴东日本海啸的教训,FEMA 资助 ATC 修订 FEMA P-646,并于 2012 年出版第 2 版。TLE 委员会组织起草的海啸设计条款于 2014 年 6 月投递至 ASCE7 进行评审。经过 8 轮投票、超过 1 000 多条评论,这些条例最终得以通过并作为 ASCE 7 标准 2016 版本的第 6 章。这些内容已获准将被应用于 IBC 的 2018 版本,用于美国西海岸的 5 个州(阿拉斯加、华盛顿、俄勒冈州、加州和夏威夷)。图 2 给出了上述发展的时间进程。

2.3 海啸荷载设计要求

类似抗震要求,该规范根据功能和重要程度,将建筑物分为 4 类^[8]: IV 类,表示所有必要的和关键性的建筑,一旦失效对整个社区形成重大影响,例如医院、应急指挥中心等; III 类,大型常住建筑,一旦倒塌对人的生命安全造成极大风险; II 类,其他绝大多数建筑,例如居民楼、办公楼、仓库等; I 类,非常住建筑,对人类构成极小风险。规范规定海啸设计地区的 III 类和 IV 类建筑和结构在设计时必须考虑海啸荷载影响;对于位于海啸设计区内的 II 类建筑,如果高度足够能够作为应急避难场所,鼓励其设计时考虑海啸荷载影响; I 类建筑则不需要考虑海啸荷载影响。

该规范考虑海啸引起的荷载类型有 4 类: (1) 静水压力、浮力及残留水体的重力荷载; (2) 动水压力和动水抬升力; (3) 水面漂浮残骸冲击力; (4) 基础受冲刷以及受孔压影响土体软化。每种类型都规定了相应的计算方法和步骤^[9]。

2.4 海啸设计区域确定

规范规定只有在海啸设计区内的建筑才考虑海啸荷载的影响,并给出了美国西海岸 5 个州的海啸设计区域^[10],具体步骤如下:

(1) 识别确定对沿海有影响的海啸潜源及潜源构造参数。

(2) 在离海岸等深线 100 m 位置,计算重现期 2500 年的海啸波高,采用 Thio 等^[11]在对美国加州地区进行概率海啸危险性评价时给出的方法。

假定潜源地震在时间上服从泊松分布,那么在一定时间内,给定地震的发生概率是

$$P(A > s) = 1 - e^{-\phi(s)t} \tag{1}$$

其中, s 是震级, t 为时间间隔。某一点海啸波高超过某一个值的概率为:

$$\phi(s) = \sum_{i=1}^{Fault} \left(\iint_{m,r} f(m) (P(A > s | m, r) P(r | m) dm dr) \right)_i \tag{2}$$

其中, $f(m)$ 是震级为 m 的地震发生率, $P(A > s | m, r)$ 是 r 潜源发生震级 m 的地震时,海啸波高高于 s 的概率, $P(r | m)$ 是震级为 m 的地震发生在潜源 r 的概率。

(3) NOAA 预先将全球俯冲带划分为几百个 100 km 长和 50 km 宽的破裂单元,设定平均滑移量为 1 m,通过数值模拟给出了全球海啸模拟波高数据库。针对某沿海场点,对第 2 步 PTHA 结果进行解耦,可获得不同潜源的贡献率。选取其中贡献率较大的潜源,利用最小二乘法,通过改变破裂单元的滑移量,逼近第 2 步求解的 PTHA 波高值与数据库中波高值,反演求解最佳破裂单元组合和滑移量,确定设定地震模型。

(4) 对该设定地震,利用沿岸高精度的数字高程和海洋水深地图数据,进行精细的海啸淹没数值模拟,绘制海啸淹没区,即为海啸设计区(Tsunami Design Zone)。

进行海啸荷载计算时,还需要有陆地上任意场地的水流淹没深度和速度,规范给出了两种计算方法^[8-9,12]:

- 1) 数值方法,类似于获得海啸设计区,利用淹没数值模拟计算给出陆地的二维淹没深度和流速。
- 2) 能量方法,利用海啸爬高和淹没距离(定义如图 3 所示),通过假设陆地为一系列线性的斜面,基于能量原理,计算淹没深度和流速。

两种方法各有优势,能量方法计算方便,模拟方法更加精确,能够获得二维结果,但是需要非常高精度的高程和水深数据。规范规定对于 IV 类建筑,如果采用能量方法计算得到结构所在场地的淹没深度大于 3.66 m(12ft),那么必须采用模拟方法,并且所有海啸设计区内的垂直避难建筑必须采用模拟方法。

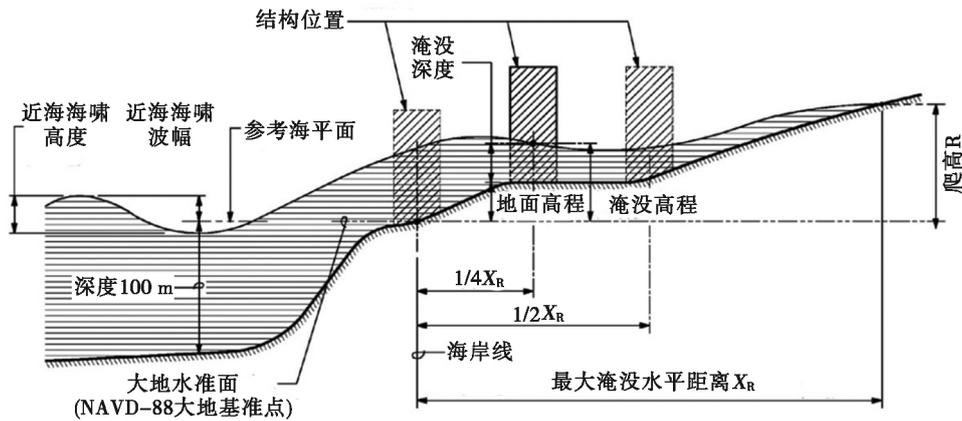


图 3 海啸淹没及爬高示意图(根据文献[12]修改)

Fig. 3 Schematic diagram of tsunami inundation and runup

3 PTHA 研究进展

随着海啸数值模型的成熟以及计算效率的显著提升,目前概率海啸危险性分析(PTHA)相关研究与运用已越来越广泛,未来将是海啸防灾减灾领域的一个重要研究方向。

PTHA 的基本概念和计算步骤源于 1968 年 Cornell^[13] 提出的概率地震危险性分析(PSHA)。Houston^[14] 于 1977 年采用该方法评价了美国西海岸夏威夷群岛地震海啸危险性,之后其他国家包括日本^[15]、意大利^[16]、新西兰^[17] 和秘鲁等^[18] 都开展了此方面工作。2006 年,Geist 和 Parsons^[19] 将 PTHA 的原理和方法进行了系统地总结和改进,基于历史数据和数值模拟技术评估墨西哥阿卡普尔科和美国太平洋西北沿岸卡斯卡底古陆地区的地震海啸危险性。其他新技术也已逐步应用于 PTHA 中,如逻辑树方法^[20] 和贝叶斯方法^[21]。

目前,世界很多区域和国家都已开展 PTHA 工作,图4给出了全球已开展海啸概率危险性分析的沿海区域,下面对各地区的主要工作进行总结。

3.1 印度洋区域

Heidarzadeh 等^[22]对西北部伊朗以及巴基斯坦等沿海区域,首先采用确定性方法,对 Makran 断层区域可能引起的最大震级地震进行海啸危险性评估。沿着 1 000 km 长的 Markran 破裂带模拟 6 次 M_s 8.3 级地震,观察对 Markran 海岸的影响。他们得出最大波高可能在伊朗南部沿岸出现,达到 9.6 m,波高普遍为 4 ~ 9.6 m, Oman 北部沿岸 3 ~ 7 m,南部 1 ~ 5 m, Markran 东部 1 ~ 4.4 m。同时他们又采用概率分析方法,得出伊朗巴基斯坦沿岸海啸波高 5 m 的 50 年超越概率为 17.5%,其南部以及 Oman 波高在 1 ~ 2 m 之间 50 年超越概率为 45%^[23]。David 等^[24]考虑了 Sunda Arc 俯冲带能够影响澳大利亚西海岸的主要断裂带: Sumatra、Java 和 Sumba,计算了不同海啸波高的重现期,结果发现 Java 断裂较其他影响要大, Exmouth 区域沿海危险性最高, Dampier 和 Broome 区域风险较低,西海岸的南部影响最小,并认为如果发生九级以上地震会对该区域产生历史上未有过的海啸灾难。Løvholt 等^[25]对印尼东部以及菲律宾南部的主要海洋断裂带进行对最坏情况模拟,结果表明海岸线大部分会遭受到 2 ~ 4 m 海啸波的袭击, Illana Bay 会达到 3 ~ 5 m 水位,摩洛哥湾水位低于 2 m。同时也计算了苏门答腊-安达曼地震破裂区对泰国西海岸的影响,认为在未来 50 ~ 100 年低于 8.5 级的地震不会产生高于 3 m 的海啸波^[26]。为了构建印度尼西亚的海啸预警系统, Strunz 等^[27]利用 PTHA 方法给出的海啸波高概率,结合人口密度,给出不同的海啸风险等级以支持决策系统。

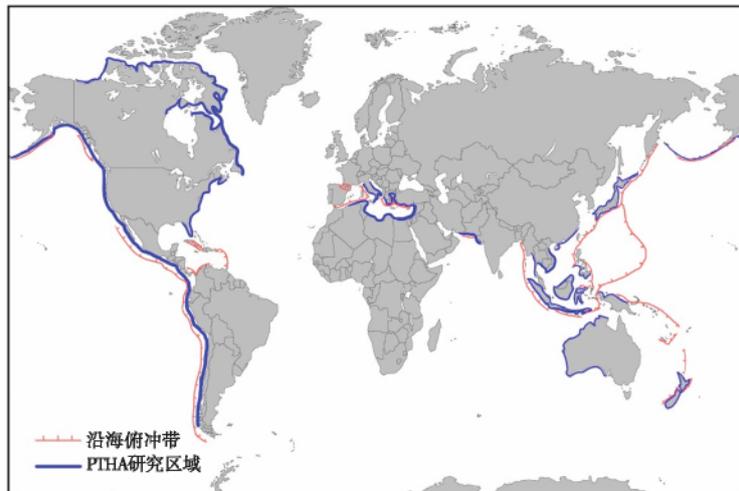


图4 全球已开展海啸危险性分析的沿海区域

Fig. 4 Regions in the world where PTHA has been implemented

3.2 大西洋区域

Geist 和 Parsons^[28]考虑加勒比、巴拿马、委内瑞拉断裂带及近海滑坡对美国东海岸进行海啸危险性分析,得出超越 8.0 级地震所引发的海啸波波高的重现期为 285 年,而 8.5 级的重现期为 800 ~ 1 000 年,局地地震的重现期为 600 ~ 3 000 年。Leonard 等^[29]对加拿大东海岸进行海啸危险性分析,得出海啸波超过 1.5 m 的年发生概率为 1% ~ 15%,遍布加拿大东海岸,重现期为 300 ~ 1 700 年;超越 3 m 的海啸波仅会影响到纽芬兰岛及布雷顿角岛,年发生概率为 1% ~ 5%,重现期为 650 ~ 4 000 年。Zahibo 和 Pelinovsky^[30]针对加勒比海的小安的列斯群岛采用进行海啸危险性的初步分析,基于历史数据给出了巴巴多斯和安提瓜地区的海啸波高年发生率。Grilli 等^[31]评估了美国东海岸由海底滑坡引起的海啸危险性,指出对于百年一遇的海底滑坡,海啸危险性较低,沿海地区的海啸爬高都低于 1 m,而对于 500 年一遇的滑坡,有两个地区的危险性显著升高,纽约长岛出现 3 m 爬高,新泽西沿海出现 4 m 爬高。

3.3 地中海区域

Fokaefs 和 Papadopoulos^[32]根据地中海东部的 Cyprean 和 Levant 断裂对塞浦路斯沿岸进行海啸危险性分析,认为相对于地中海其他地区,塞浦路斯遭受海啸的影响是相对较低的,中等、较强、强烈海啸的平均重现期估计为 30 年、125 年、375 年,50 年中等、较强、强烈海啸出现一次的概率为 0.81、0.34、0.13。Papadopou-

los^[33]认为在科林斯湾大多数海啸是由大于 5.5 级的近海地震产生的,希腊沿岸 50 年至少发生一次海啸烈度大于 2、3、4 的概率分别为 0.851、0.747 和 0.606,重现期分别为 16 年、40 年和 103 年。Sørensen 等^[34]对地中海沿岸,包括意大利、希腊、土耳其、阿尔及利亚、叙利亚等进行海啸波高的概率估计,发现希腊西南部以及埃及北部相比于地中海其他地区,遭受到海啸的危险性较大,5 m 波高 100 年的超越概率接近 10%,1 m 波高 30 年的超越概率约为 15%~20%。Anita 等^[35]采用基于贝叶斯理论的 PTHA 方法评估意大利墨西拿海峡的海啸危险性,给出了多个场地海啸爬高大于 0.5 m 的年发生率。

3.4 太平洋区域

Geist 和 Parsons^[19]系统总结了地震海啸危险性分析方法的原理,并在实例分析中,分别采用历史地震海啸记录及蒙特卡罗方法,评估了墨西哥阿卡普尔科和美国太平洋西北沿岸卡斯卡底古陆地区的地震海啸危险性。Power 等^[36]总结了环太平洋俯冲带可能引发地震海啸的地震潜源,并对新西兰进行海啸危险性分析,发现包括新西兰、智利、秘鲁、加利福尼亚等地的断裂带均会对新西兰有较大影响。给出了沿海主要城市和地区的海啸灾害曲线,即不同海啸波高的复发周期曲线;还给出了沿海 100 年、500 年、2500 年一遇的海啸波高分布。Annaka^[20]采用基于逻辑树的 PTHA 方法,考虑环绕日本的局地潜在海啸源和分布在美国、智利等沿岸的区域海啸源,给出了日本沿海不同海啸波高的年发生率。Thio 等^[37]对东南亚地区进行海啸危险性评价工作,考虑了包括琉球、马尼拉、日本、菲律宾附近断层的影响,给出了菲律宾、印度尼西亚、越南、新加坡、马来西亚等地的危险性图。Liu 等^[38]对中国南部进行了概率海啸危险性分析,认为中国南部包括香港、澳门等沿海区域会受到马尼拉断裂带的威胁,香港、澳门等地 100 年内受到 2 m 海啸波袭击的概率为 10%。Leonard 等^[29]评估加拿大西岸的海啸危险性,发现相比于东岸,西岸遭受到海啸袭击的危险性要明显强于东岸。得出海啸波超过 1.5 m 的年发生概率为 40%~80%,重现期仅为 30~100 年;超越 3 m 的海啸波只会影响到纽芬兰岛及布雷顿角岛,年发生概率为 10%~30%,重现期为 150~560 年。González 等^[39]对美国加利福尼亚沿岸结合概率模型进行了详细的海啸危险性分析工作,给出了 Crescent 市 100 年、500 年一遇的海啸淹没图。Thio 等^[11]对美国西部岸边加利福尼亚州进行海啸危险性分析,阿拉斯加沿岸遭受到海啸袭击的危险性要大于加利福尼亚等西部沿海。Wong 等^[40]考虑近海和远海潜在海啸源,对美国俄勒冈州进行了海啸危险性分析,基于 GIS 技术给出了 100 年和 500 年一遇的洪水淹没图。Orfanogiannaki 和 Papadopoulos^[41]基于历史数据,采用条件概率方法,给出了南美洲西海岸、千岛群岛-勘察加半岛及日本沿海的海啸烈度发生概率。

4 中国海啸研究进展

4.1 2004 年苏门答腊海啸之前

中国地震海啸的研究始于 1976 年唐山大地震之后(震中位于沿海,见图 5)。人们对自然灾害的安全意识大大增强,中国地震与海洋学者开始研究中国的地震海啸问题。1977 年《地震战线》(现今《地震》的前身)上刊发了署名海地的文章“地震海啸”^[42]。文章提出了对我国产生影响的海啸源区以及我国海啸防灾的重点海区。1982 年国家海洋局情报所的李成发表了“地震海啸的研究”一文,指出我国海区不易发生海啸,当时的国家地震局也采纳了这个结论^[43]。而事实上,从 1904 年至 1968 年大约 350 个震级大于 7.0 的地震发生在太平洋西北部,其中 33 个,接近 10% 的地震发生在我国沿海,不过仅仅只有 2 个地震产生了海啸,引起的海啸波高也较低^[44-46]。

1986 年国家地震局组织编写的《地震对策》一书,全面论述了地震海啸的危害、成因机制、产生的条件及中国地震海啸的可能性,并讨论了地震海啸的对策^[47]。1986 年周庆海与夏威夷大学的 William M. Adams 在《Science of Tsunami Hazards》上发表了一篇文章^[44],是我国首次在国际性杂志上发表的关于海啸研究的文章,从历史海啸地震与我国主要地震带的地质、地球物理学特征角度分析,指出我国海域不易发生海啸,但存在发生海啸的可能性。1987 年中国地震局编制了中国海域和邻区海域地震烈度区划图,研究成果表明菲律宾西边海域,主要是马尼拉海沟、巴士海峡海域、台湾岛南边海域和东边海域是发生 IX 度和 IX 度以上地震的海域,即有发生 7 级以上地震可能性的海域,是今后可能发生海啸的海域。1988 年周庆海等通过历史海啸数据,结合我国海区大陆架的地质、地震特征,给出了我国沿海地区海啸危险性的相对水平,台湾东部、大陆架沿岸、渤海沿岸的相对危险程度之比为 16:4:1^[45]。1992 年,郭增建等^[48]在《未来灾害学》一书中对中

国的近海地震海啸作了研究,提出如近岸发生强震就易于发生近海海啸,而近海海啸作为一种新的致灾海啸类型应予以关注。

我国在1983年加入国际海啸警报系统中心,国家海洋局负责我国的海啸预警警报业务。1994年叶琳、王喜年等^[49]说明了我国当时海啸预警的作业方式;20世纪90年代后期,国家海洋局组织开发了太平洋海啸资料数据库、太平洋海啸传播数值预报模式和越洋局部地震海啸数值预报模式,并在广东大亚湾、浙江秦山和三门、江苏连云港、福建惠安5个核电站的环境评价中得到了应用^[50]。90年代国内还陆续发表了其他一些文章^[51-56],主要是对我国沿海发生海啸的可能性进行评价,一些较前沿性的方向基本没有开展,例如海啸预警、海啸数值计算方法等。

在那个年代人们对海啸知识的认知还不够全面,大多数的观点都认为中国沿海发生地震海啸的概率极低。直至2004年12月26日印度洋海啸之后公众才意识到海啸的危害性,新一轮海啸防灾减灾研究在我国迅速开展,取得了较多成果,主要研究集中在以下几方面:

4.2 历史海啸目录

世界上很多国家和地区都已经编译了历史海啸目录,尤其关注大海啸事件的发生与其影响区域。海啸目录可用于分析本地区不同等级的海啸复发周期。中国最早的海啸事件可从古文献中追溯至3000年以前。建立海啸目录需要收集一些基本信息,包括海啸发生位置、时间、地震震级、最大波高、伤亡人数及破坏影响。然而,由于古文献记载并不全面,而且不同文献记载也有所差异,不同的学者采用不同的历史数据编译了不同的海啸目录。

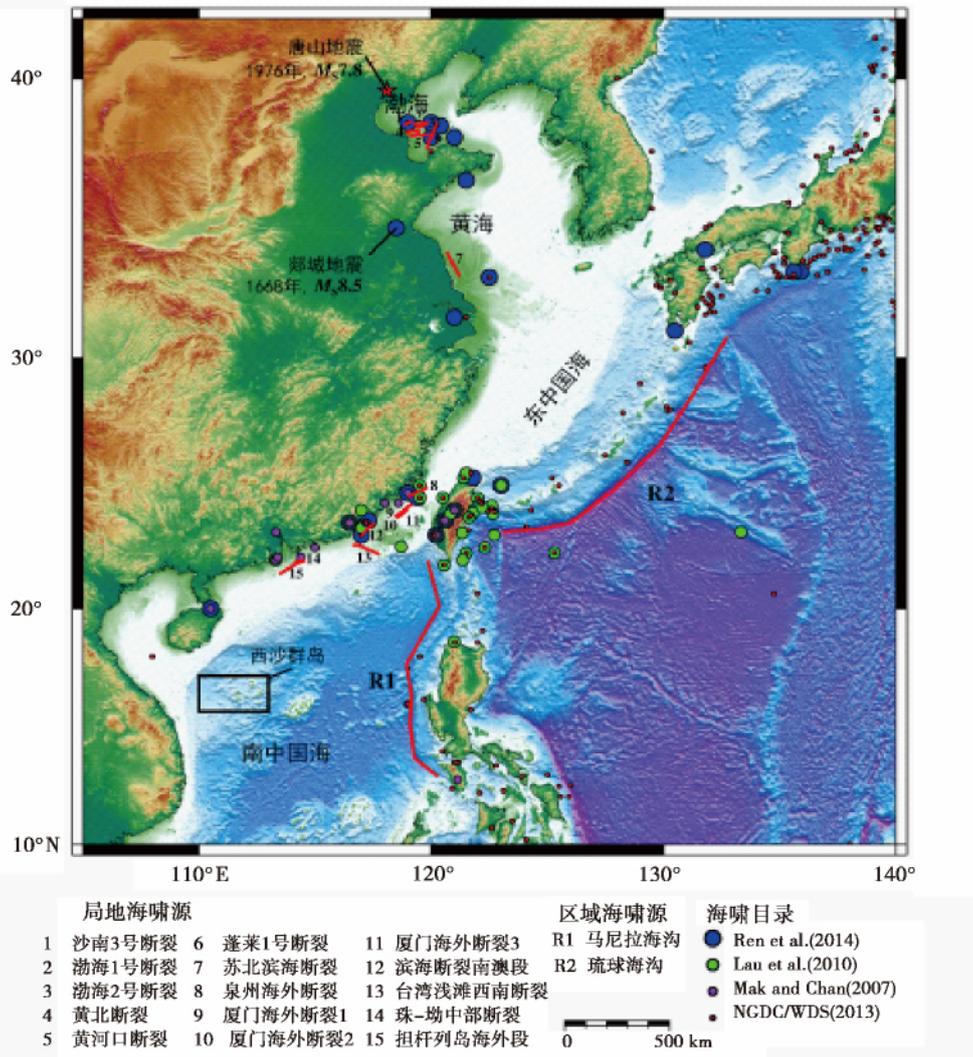


图5 我国历史海啸发生位置以及影响我国沿海的潜在海啸源

Fig. 5 Locations of historical tsunamigenic earthquakes and potential tsunami sources in China

最早的工作由陆人骥于 1984 年收集整理了公元前 47 年至 1978 年我国发生的灾害性海潮历史资料,其中可能为海啸事件的共有 227 个^[57]。然而,Chau 并不认同该观点,认为与地震有关的海啸事件仅 4 个,由气象原因引起的海啸事件仅 1 个,其余 222 个事件的产生原因不明^[3]。Mak 和 Chan 编译了南海的历史海啸事件,认为仅 2 个事件可判断为确信的海啸事件,其他之前虽被视为海啸事件,但都不十分可靠,尽管有些还有大量人员的伤亡报告^[2]。Lau 等^[4]基于已经发布的 15 个全球或区域历史海啸数据库,编译了南中国海东北地区的历史海啸数据库,包含 1076 年至 2009 年发生的 205 个事件。通过可信度分析,识别了 58 个海啸事件,其中 23 个证实为确信的事件、3 个为极可能的、6 个为可能的、18 个为疑似的、8 个为不可信的。上述两个目录仅关注我国南海地区,Ren 等^[5]人编译了我国整个沿海的海啸历史目录。他们对前人已整理的历史海啸事件,联合已出版的《中国历史强震目录(公元前 23 世纪—公元 1911 年)》和《中国近代地震目录(公元 1912 年—1990 年 $M_s \geq 4.7$)》进行重新核定,证实了过去 2000 年共有 25 个由地震引发的海啸事件。不过,尽管地震与海潮发生的时间能够对应,仍然有事件存在争议,例如 1668 年发生的郟城 8.5 级地震(见图 5),震中在陆地,但一些研究表明这次大地震引起的海啸波对朝鲜半岛产生了影响^[57]。

图 5 中列出了上述 3 个海啸目录以及 NGDC/WDC 数据库的事件位置。NGDC/WDC 收录了公元前 2000 年至今全球所有历史海啸事件及海啸爬高记录。可以看出,这几个目录很不一致,未来应考虑由权威研究机构对他们进行集成评估,建立一套统一的、可信的我国历史海啸目录。

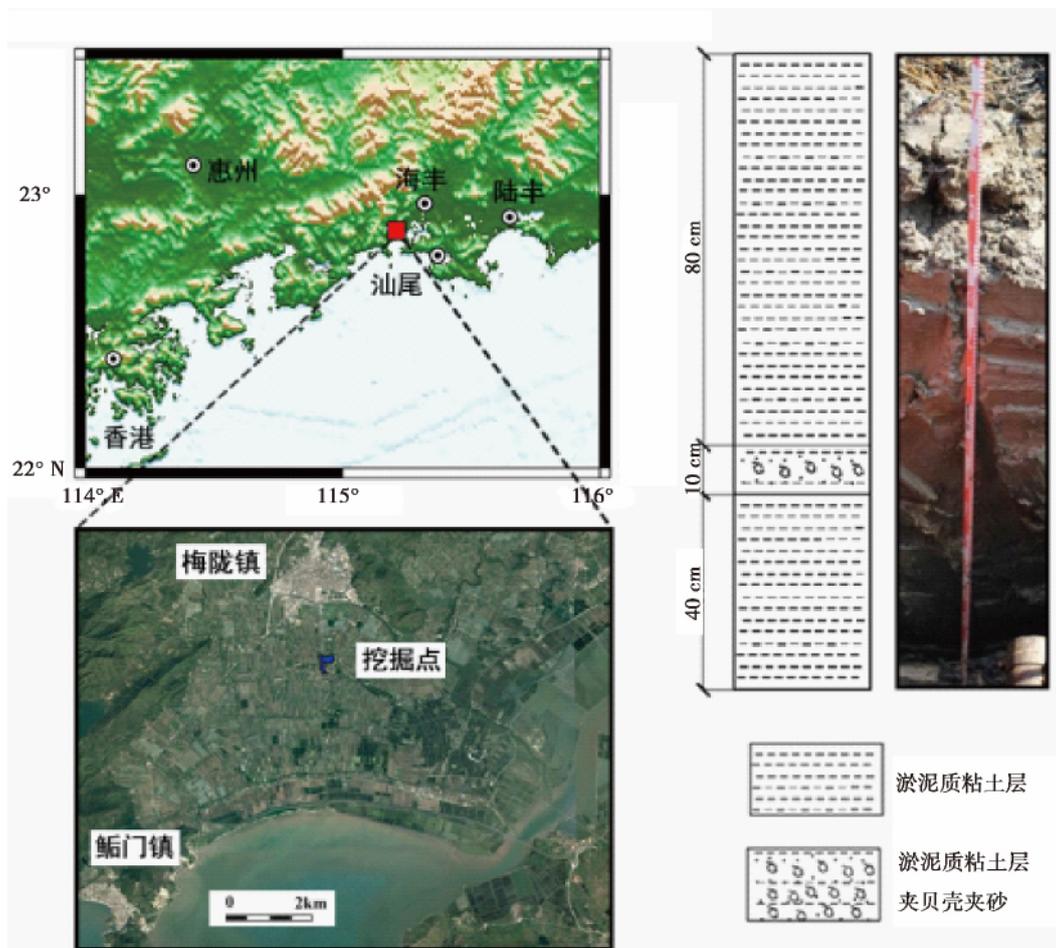


图 6 广东海丰县沿岸疑似海啸沉积物地质剖面

Fig. 6 Geological profile of a coastal site in Haifeng, Guangdong Province where the suspicious tsunami deposit was found

另外,通过古海啸研究也可以识别历史大海啸的发生,对历史海啸目录提供科学佐证。大海啸通常引起大范围的洪水淹没,洪水深入内陆,形成特有的地质沉积特征。近年来,这方面工作在我国也陆续开展。石峰等^[58]为了调查渤海海域历史地震引发海啸的可能性,对烟台、蓬莱、龙口、莱州和潍坊等地海岸进行地质调查,并未发现海啸堆积物。Sun 等^[59]通过调查西沙群岛中东岛的地质沉积物发现,在湖相沉积物中发现有砂层,其地球化学特征表明在 1024 年左右发生了一次突发的沉积事件,另外调查还发现厚厚的珊瑚和贝

壳化石侵入内陆 200 m,足以说明这一年代发生过大的海啸或风暴潮事件,这正好与历史文献中记载的 1076 年发生的海潮事件相对应,这一事件在图 5 所示的 4 个历史海啸目录中都有收录。这一调查结果尽管需要更多的科学证据进行证实,但也提醒人们南中国海的海啸危险性需要得到重视。本文作者曾经协同广东省地震局、中国地震局地质研究所的地质学家对广州沿海进行海啸沉积物现场调查,在海丰县距海岸线约 3.8 km 处,发现淤泥质粘土层中间夹杂着贝壳及细沙(如图 6 所示),需要对这一夹层进行微生物测定以判断其年代和物质属性,判断其是否由海啸波携带上岸。

4.3 海啸数值模拟及应用

国家海洋环境预报中心是国内较早进行海啸模拟计算研究的机构,最早于 1980 年就开始研究海啸数值模型,开发了相应模拟程序,并用于沿海核电场址的海啸危险性评估^[50]。2004 年印度洋海啸发生后,预报中心于次年开发了 CTSU(China Tsunami Model)。这模型采用球坐标下非线性浅水方程作为模型的控制方程,采用蛙跳格式进行数值求解,引入了数值频散效应。模式的空间分辨率为 2',水平网格采用多重嵌套网格技术。该模型已经开发基于 OPENMP 的并行版本,并于 2009 年实现业务化运行^[60]。随着海啸研究的推进,越来越多的学者开始关注海啸模拟原理及计算方法的改进^[61]。

我国多位学者已经利用国际主流的数值模型对我国一些沿海地区进行了海啸危险性分析。潘文亮等^[62]利用 COMCOT 对我国东南海域发生设定地震海啸进行模拟,结果表明当南海发生 8 级地震的时候,在我国东南沿海 20m 水深处产生 0.3~0.5 m 的海啸,当发生 9 级地震时,海啸波高达到 3 m。温燕林等^[63]利用 COMCOT 对冲绳海沟 8.5 级地震进行了海啸模拟,结果显示地震在震中产生海啸波高达 4.3 m,4 h 之后,海啸传到我国浙江省,在近海产生 2.0 m 的海啸波,8 h 后海啸传到上海。Dao 等^[64]利用 TUNAMI-N2-NUS 模型模拟了我国南海多个地震场景,发现最坏情况下,广东省近海海啸波高最高可达 8 m。于福江等^[65]采用 GeoClaw 模拟了 2010 年智利海啸,研究了其对我国沿海的影响。

这些算例很好地表明现有的数值模型能够满足我国海啸防灾减灾研究的需求,但是,我们还是希望我国研究人员能开发出一个拥有我国知识产权的、开放的、精确的海啸数值模型。

4.4 海啸预警系统

自 1994 年我国在南海验潮站监测到海啸开始,建设我国海啸预警系统即被提上日程^[66]。2004 年印度洋大海啸发生后,温瑞智等^[67]建议结合我国现有的地震台网和海啸模拟程序建设我国的海啸预警系统。Liu 等^[68]考虑马尼拉海沟的潜在海啸风险,提出建立南海海啸预警系统的构想。基于海量数据库和 GIS 技术,国家海洋环境预报中心开发了南海定量海啸预警系统,可以对潜在海啸进行快速量化的预警,并利用 GIS 软件进行预警结果可视化。利用该系统对 2006 年台湾南部地震海啸进行模拟预报,预报结果与实测结果基本吻合^[69]。2010 年,广东省地震局依托我国地震台网建立了南海区域海啸预警系统。一旦南海海域发生地震,地震台网监测到的地震数据很快传回监测中心并根据数值模拟结果发布相应海啸预警。这一系统主要面向广东省和海南省^[70]。

2013 年,我国建立第一个也是唯一一个国家级海啸预警中心——中国海啸预警中心(CTEWC)。该中心根据我国地震台网和太平洋海啸预警中心提供的信息,利用 CTSU 模型,可在震后 20 min 内发布海啸预警。海啸发生后,预警中心首先向当地的相关机构发出海啸预警信息,再由地方相关部门向可能受影响的地区发布预警,同时,海啸预警中心网站上也会向公众发布海啸预警信息。

在我国,海啸警报分为 I、II、III 和 IV 四个等级,为了便于警告识别,采用了不同颜色代表各个级别的警报,分别采用了红色、橙色、黄色和蓝色代表相应的警报级别。其中红色代表海啸波高大于 3 m,橙色代表海啸波高为 2.0 m~3.0 m,黄色代表海啸波高为 1.0~2.0 m,蓝色代表海啸波高小于 1.0 m。2010 年智利海啸发生后 0.5 h,我国海啸预警中心发布信息:我国沿海海啸波高大约为 0.2 m,并不会造成灾害。这一数据随后被沿海验潮站证实^[71]。2011 年日本东北大地震发生 20 min 后,我国海啸预警中心发布蓝色预警信息,同时通告海啸最早于 10 h 后抵达上海,波高为 0.5 m,之后位于舟山的验潮站检测到 0.55 m 的海啸波高^[72]。另外,针对小型海啸,预警中心还发布安全信息。2014 年,智利海啸发生后,预警中心发布信息:我国沿海不会受影响。之后,也未在我国沿海监测到海啸波。

中国海啸预警中心正在与美国太平洋环境实验室合作在南中国海建立实时的海啸预警系统。为了监测马尼拉海沟可能发生的诱发海啸的地震并提供海啸预警,国家海洋局在南海部署了两个浮标,如果地震产生海啸,在 15~30 min 内就可以监测到。另外,浮标还可以传输实时的海浪数据^[73]。

国家地震台网有数量众多地震台站,国家海洋局管理着 100 多个海洋环境监测站,并且能够实时传输数据,我们可以通过地震台网、海啸监测网络的联合应用,进一步提高海啸预警的准确性,经过不断改进,相信不久的将来,海啸预警信息也能和地震信息一样,产出和发布能够实现自动化。

4.5 概率海啸危险性分析

随着概率性地震海啸危险性分析方法(PTHA)的逐渐成熟,我国海啸灾害研究工作渐渐从确定性分析过渡到概率性分析,并加入不确定性、敏感性参数影响等方向。PTHA 基本原理源于 PSHA,其基本步骤为^[74]:(1)划分地震带和潜在地震海啸源区;(2)统计地震活动性参数;(3)数值模拟地震海啸随机样本并计算沿岸波高,或统计历史地震海啸波高记录;(4)计算地震海啸波高年累积频率和超越概率。图 7 为 PTHA 和 PSHA 基本步骤对比,其中仅第 3 步两者不相同,PSHA 采用的是地震动衰减关系,而 PTHA 一般采用数值模拟技术。

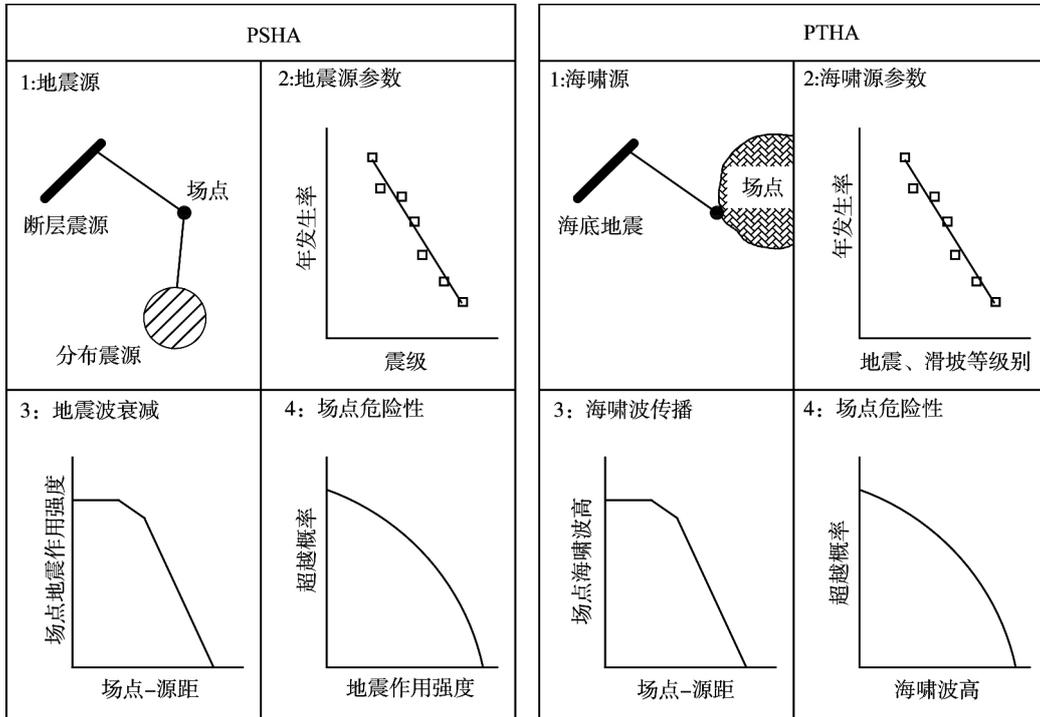


图 7 概率地震危险性分析与概率海啸危险性分析基本步骤对比

Fig. 7 The difference between PSHA and PTHA

2007 年,温瑞智等^[75]最早给出了地震海啸危险性分析方法和步骤,对珠江三角洲地区进行了基于历史地震海啸记录的地震海啸危险性分析。研究结果显示:珠江三角洲遭受 1.0 m 海啸波袭击的年超越概率为 1.5%,遭受 10.0 m 海啸波高的袭击超越概率为 0.4%。刘迎春等^[38]考虑马尼拉海沟发生潜在地震,对中国南海沿岸地区进行地震海啸危险评估。研究结果显示:汕头场点未来 100 年内 2.0 m 海啸波高的超越概率为 13.34%,波高在 1.0 m 至 2.0 m 之间的超越概率为 30.65%;香港场点未来 100 年内 2.0 m 海啸波高的超越概率为 10.12%,波高在 1.0 m 至 2.0 m 之间的超越概率为 17.19%;台南场点未来 100 年 2.0 m 海啸波高的超越为 3.44%,波高在 1.0 m 至

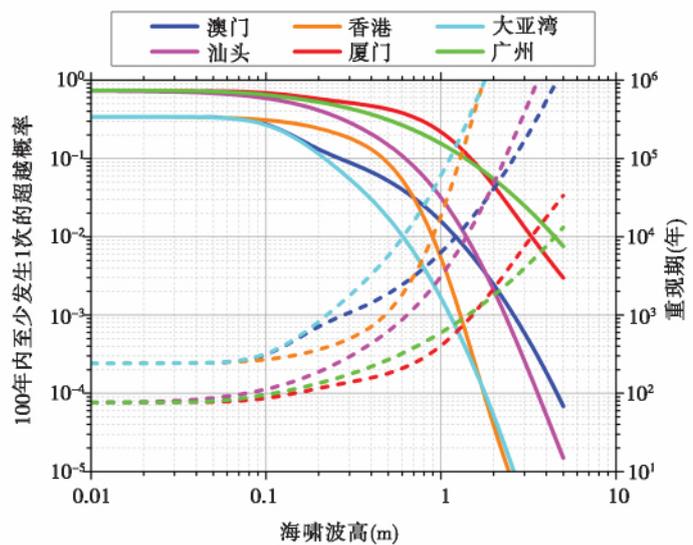


图 8 沿海典型场地的海啸危险性曲线

Fig. 8 Tsunami hazard curves of six typical sites along Chinese coast

2.0 m之间的超越概率为 17.19%。

在方法研究和改进方面 2011 年温瑞智等^[76]借鉴我国已成熟的地震危险性分析方法,给出了我国地震海啸危险性概率分析的思路与方法,并对其关键技术问题进行了分析,为我国全面开展地震海啸减灾工作提供了依据。任鲁川等^[77]在总结基于数值模拟的地震海啸危险性分析的基本步骤上给出一种可以耦合潜源参数不确定性效应的地震海啸危险性分析方法。

具体工作方面, Ren 等^[5]人基于我国历史海啸目录和沿海地质构造背景划分了影响我国沿海地区的 15 个局地潜在海啸源和 2 个区域海啸源,并对沿海某场点进行 PTHA 分析,结果显示其 100 年内海啸波高大于 1 m 的超越概率达到了 70%,大于 2 m 的超越概率为 20%。他们又分析了东南沿海 8 个局地潜在海啸源对沿海的影响,根据我国第五代区划图资料计算了这 8 个潜源的地震活动性参数,选取台湾海峡和珠江三角洲地区的 6 个场点,计算不同海啸波高的发生概率和重现期,如图 8 所示^[78]。结果显示,厦门和泉州地区的海啸危险性较高,其 100 年内发生波高大于 1.0 m 的海啸超越概率接近 20%,如果考虑马尼拉海沟的影响,危险性将更高;大亚湾地区的 1.0 m 海啸波高的重现期需要大致 60 000 年。张鹏等^[79]在对大亚湾地区进行 PTHA 计算时考虑了局地海啸源也考虑马尼拉海沟区域海啸源,结果显示 1.0 m 海啸波高的重现期仅 2 000 年。周期缩短 30 倍,足以表明马尼拉海沟对我国沿海海啸危险性的显著影响。

5 我国海啸防灾减灾工作思考

已有研究结果表明,我国南海近海海域具有发生破坏性海啸的地震地质构造条件^[55,80],历史上这一区域也发生过较大地震,产生的海啸波引起了一定程度的破坏,例如 1604 年 12 月 19 日福建泉州外海发生 7.5 级地震和 1918 年 2 月 13 日广东南澳附近海域发生 7.3 级地震,都有文献记载潮涨潮退和渔船倾覆现象^[2,5];另外,地震海啸的危险性分析结果表明,菲律宾马尼拉海沟发生巨大海啸的风险较高,显著增加了我国东南沿海地区的海啸危险性^[5,38,81]。

我国作为一个滨海大国,拥有大陆和岛屿海岸线 18 000 km 和 14 000 km。沿海分布着一系列重大港口城市,如大连、天津、青岛、上海、厦门、广州、香港、澳门等。另外,许多重大工程,例如核电厂都依海而建。东南沿海或者马尼拉海沟一旦发生大震级地震,形成的海啸波将袭击这一系列的港口城市、海上钻井平台、跨海大桥和核电机组并造成严重破坏,对我国甚至世界经济和社会的影响将不亚于 2011 年日本海啸。因而,考虑到海啸引起灾害的巨大风险性,我国政府应居安思危,增加海啸防灾减灾研究的投入,加快对沿海重大工程场址的地震海啸危险性评估工作,构建完善的海啸防灾减灾机制。

针对我国目前在海啸灾害研究方面的现状,结合国际海啸研究动态,建议当前应侧重以下几方面的工作:

(1) 编制统一的我国历史海啸目录。目前已有 4 个研究团队编制了我国历史海啸目录,结果并不一致。应考虑由权威研究机构对它们进行集成评估,建立一套统一的、可信的我国历史海啸目录。对历史文献记载的沿海海潮灾害,结合历史地震目录,对风暴潮和海啸时间进行区分。历史海啸目录可确定沿海海啸风险性及发生率,并可作为重大工程选址的科学依据。

(2) 我国海啸灾害危险性分析。建立科学的海啸危险性概率分析方法,开展海洋地质构造调查,划分精确的沿海局地潜在海啸源,确定其地震活动性参数。对我国沿海重大工程、重点城市开展地震海啸危险性分析工作,绘制沿海地震海啸危险区或制订海啸灾害区划图,明确我国海啸灾害防御目标。

(3) 完善加强海啸灾害监测、预测警报服务系统。为适应海洋防灾减灾以及海洋资源开发工作的需要,加强地震预警系统和海啸预警系统的技术统一和业务管理,结合地震科学技术,实现我国沿海重要区域的监视观测,客观准确地进行海啸灾害分析、评估,建立功能较齐全的现代化海洋灾害监测、预报警报服务系统。

(4) 加强海啸防灾减灾宣传教育。对可能遭受海洋灾害袭击的地区进行宣传,普及海啸防灾减灾知识,提高海洋防灾减灾应变能力,增强海洋防灾减灾意识。一方面,政府在沿海应设立警示牌,规划合理的疏散路线以及安全的避难场所;另一方面,可通过公众媒体、广播电台、互联网、手机 APP 等平台逐步普及海啸逃生知识,加强安全教育。

(5) 完善海啸防灾减灾法制定。在地震灾害和海洋防灾减灾实践中我国已积累了大量经验,已经制定了一些制度和规范,但有关海啸防灾减灾观念仍然相当淡薄,尤其是沿海地区的整体规划基本没有考虑海啸

防灾问题,要加强法制建设,制定海啸减灾法规,适应我国海洋减灾工作发展需要。

(6) 开展沿海重大工程,例如核电场址的海啸危险性评估。世界上针对核电站开展海啸危险性评估工作的国家仅美国和日本,我国目前正处于核电建设高峰期,已建、在建和拟建的核电站几十座,且大都临海。应重点开展这方面工作,汲取 3.11 日本福岛核电站事故经验,提升海啸防御措施,做好应急管理,防微杜渐。

参考文献:

- [1] Ryutaro T. Report on the Chilean tsunami of 1960 [C]//Proceedings of the 2nd World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo and Kyoto, Japan, 1960: 639–645.
- [2] Mak S and Chan L S. Historical tsunamis in south China [J]. *Natural Hazards*, 2007, 43(1): 147–164.
- [3] Chau K T. Tsunami hazard along coastlines of China: a re-examination of historical data [C]// 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, 2008: 1–10.
- [4] Lau A Y A, Switzer A D, Dominey-Howes D, et al. Written records of historical tsunamis in the northeastern South China Sea—challenges associated with developing a new integrated database [J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2010.
- [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] 温瑞智,任叶飞,潘蓉,等. 海啸词汇 [M]. 北京:地震出版社,2016.
WEN Ruizhi, REN Yefei, PAN Rong, et al. *Tsunami glossary* [M]. Beijing: Seismological Publishing House, 2016. (in Chinese)
- [7] Hou J M, Li X J, Yuan Y, et al. Scenario-based tsunami evacuation analysis: a case study of haimen town, Taizhou, China [J]. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 2016: 1–18.
- [8] Robertson I N, Chock G. Overview and technical background to development of ASCE 7–16 Chapter 6, Tsunami Loads and Effects [C]//Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, 2017, Paper No. 253.
- [9] Chock G, Robertson I N. Tsunami design criteria and load cases of the ASCE 7–16 chapter 6, tsunami loads and effects [C]//Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, 2017, Paper No. 300.
- [10] Wei Y, Thio H K, Titov V, et al. Inundation modeling to create 2 500-year return period tsunami design zone maps for the ASCE 7–16 standard [C]//Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, 2017, Paper No. 450.
- [11] Thio H K, Somerville P, Polet J. Probabilistic tsunami hazard in California, Pacific earthquake engineering research center [R]. PEER Report, 2010: 108.
- [12] Chock G. Tsunami design target reliabilities [C]//Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering. Santiago, 2017, Paper No. 301.
- [13] Cornell C. Engineering seismic risk analysis [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1968, 58(5): 1583–1606.
- [14] Houston R, Carver R D, Markle D G. Tsunami-wave elevation frequency of occurrence for the hawaiian islands [R]. No. WES-TR-H-77–16 Army engineer waterways experiment station vicksburg miss, 1977.
- [15] Rikitake T, Aida I. Tsunami hazard probability in japan [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1988, 78(3): 1268–1278.
- [16] Tinti S. Assessment of tsunami hazard in the Italian Seas [J]. *Natural Hazards*, 1991, 4(2/3): 267–283.
- [17] Berryman K. Review of tsunami hazard and risk in New Zealand [R]. Institute of Geological & Nuclear Sciences client report 2005/104, 2005, 139.
- [18] Kulikov E A, Rabinovich A B, Thomson R E. Estimation of tsunami risk for the coasts of Peru and northern Chile [J]. *Natural Hazards*, 2016, 35(2): 185–209.
- [19] Geist E L, Parsons T. Probabilistic analysis of tsunami hazards [J]. *Natural Hazards*, 2006, 37(3): 277–314.
- [20] Annaka T, Satake T, Sakakiyama T, et al. Logic-tree approach for probabilistic tsunami hazard analysis and its applications to the Japanese coasts [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2007, 164(2): 577–592.
- [21] Grezio A, Marzocchi W, Sandri L, et al. A Bayesian procedure for probabilistic tsunami hazard assessment [J]. *Natural hazards*, 2010, 53(1): 159–174.
- [22] Heidarzadeh M, Pirooz M D, Zaker N H, et al. Evaluating tsunami hazard in the northwestern Indian Ocean [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2008, 165(11): 2045–2058.
- [23] Heidarzadeh M, Kijko A. A probabilistic tsunami hazard assessment for the Makransubduction zone at the northwestern Indian Ocean [J]. *Natural hazards*, 2011, 56(3): 577–593.
- [24] Burbidge D, Cummins P R, Mleczko R, et al. A probabilistic tsunami hazard assessment for Western Australia [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2008, 165(11): 2059–2088.
- [25] Løvholt F, Kühn D, Bungum H, et al. Historical tsunamis and present tsunami hazard in eastern Indonesia and the southern Philippines [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B9): B09310.
- [26] 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 Science*, 2006, 6(6): 979–997.
- [27] Strunz G, Post J, Zosseder K, et al. Tsunami risk assessment in Indonesia [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011(11): 67–82.

- [28] Geist E L, Parsons T. Assessment of source probabilities for potential tsunamis affecting the US Atlantic coast[J]. *Marine Geology*, 2009, 264(1): 98–108.
- [29] Leonard L J, Rogers G C, Mazzotti S. Tsunami hazard assessment of Canada[J]. *Natural Hazards*, 2014, 70(1): 237–274.
- [30] Zahibo N, Pelinovsky E N. Evaluation of tsunami risk in the Lesser Antilles[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2001, 1(4): 221–231.
- [31] Grilli S T, Taylor O D S, Baxter C D P, et al. A probabilistic approach for determining submarine landslide tsunami hazard along the upper east coast of the United States[J]. *Marine Geology*, 2009, 264(1): 74–97.
- [32] Fokaefs A, Papadopoulos G A. Tsunami hazard in the Eastern Mediterranean: strong earthquakes and tsunamis in Cyprus and the Levantine Sea[J]. *Natural Hazards*, 2007, 40(3): 503–526.
- [33] Papadopoulos G A. Tsunami hazard in the eastern mediterranean: strong earthquakes and tsunamis in the corinth gulf, central greece[J]. *Natural Hazards*, 2003, 29(3): 437–464.
- [34] Sørensen M B, Spada M, Babeyko A, et al. Probabilistic tsunami hazard in the Mediterranean Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2012, 117(B1): 605–606.
- [35] Anita G, Sandri L, Marzocchi W, et al. Probabilistic tsunami hazard assessment for Messina Strait Area (Sicily, Italy) [J]. *Natural Hazards*, 2012, 64(1): 329–358.
- [36] Power W. Review of tsunami hazard and risk in New Zealand[R]. Institute of Geological & Nuclear Sciences, 2005.
- [37] Thio H K, Somerville P, Ichinose G. Probabilistic analysis of strong ground motion and tsunami hazards in Southeast Asia[J]. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 2007, 1(02): 119–137.
- [38] 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): 233–244.
- [39] González F I, LeVeque R J, Adams L M, et al. Probabilistic tsunami hazard assessment (PTHA) for crescent city, CA [R]. Final Report for Phase I, University of Washington Department of Applied Mathematics, 2013.
- [40] Wong F L, Geist E L, Venturato A J. Probabilistic tsunami hazard maps and GIS [C]//Proc. 2005 ESRI Internat. User Conf., San Diego, California, 2005: 1–11.
- [41] Orfanogiannaki K, Papadopoulos G A. Conditional probability approach of the assessment of tsunami potential: application in three tsunamigenic regions of the Pacific Ocean[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2007, 164(2): 593–603.
- [42] 海地. 地震海啸[J]. *地震战线*, 1977(4): 6–8.
HAI Di. Earthquake tsunami[J]. *Earthquake*, 1977(4): 6–8. (in Chinese)
- [43] 李成. 地震海啸的研究[J]. *海洋通报*, 1982, 1(2): 16–23.
LI Cheng. Research of earthquake tsunami[J]. *Marine Science Bulletin*, 1982, 1(2): 16–23. (in Chinese)
- [44] Zhou Q H, Adams W M. Tsunamigenic earthquakes in China: 1831 BC to 1980 AD[J]. *Science of Tsunami Hazards*, 1986, 4(3): 131–148.
- [45] Zhou Q H, Adams W M. Tsunami risk analysis for China[J]. *Natural Hazards*, 1988, 1(2): 181–195.
- [46] 王锋, 刘昌森, 章振铨. 中国古籍中的地震海啸记录[J]. *中国地震*, 2005, 21(3): 437–443.
WANG Feng, LIU Changsen, ZHANG Zhenshan. Earthquake Tsunami Record in Chinese Ancient Books[J]. *Earthquake Research in China*, 2005, 21(3): 437–443. (in Chinese)
- [47] 郭增建, 陈鑫连. 地震对策[M]. 北京: 地震出版社, 1986.
GUO Zengjian, CHENG Xinglian. Earthquake countermeasure[M]. Beijing: Seismological Publishing House, 1986. (in Chinese)
- [48] 郭增建, 秦保燕, 李革平. 未来灾害学[M]. 北京: 地震出版社, 1992.
GUO Zengjian, QIN Baoyan, LI Geping. Future disaster[M]. Beijing: Seismological Publishing House, 1992. (in Chinese)
- [49] 叶琳, 王喜年, 包澄澜. 中国的地震海啸及其预警服务[J]. *自然灾害学报*, 1994, 3(1): 100–103.
YE Lin, WANG Xinian, BAO Chenglan. Tsunami in China Seas and its warning service[J]. *Journal of Natural Disasters*, 1994, 3(1): 100–103. (in Chinese)
- [50] 于福江, 叶琳, 王喜年. 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 Fujang, YE Lin, WANG Xinian. The simulation of tsunami happened in the Taiwan Strait in 1994[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(6): 32–39. (in Chinese)
- [51] 高焕臣, 闵庆方. 渤海地震海啸发生的可能性分析[J]. *海洋预报*, 1994, 11(1): 63–66.
GAO Huancheng, MING Qingfang. Analysis of the possibility for the occurrence of the tsunami in Bohai[J]. *Marine Forecasts*, 1994, 11(1): 63–66. (in Chinese)
- [52] 高中和, 李灼华, 季幼庭, 等. 中国大陆沿海地震海啸析疑[J]. *中国地震*, 1992, 8(4): 102–107.
GAO Zhonghe, LI Zhuohua, JI Youting, et al. To dispel doubts on historical earthquake tsunamis along China mainland coast[J]. *Earthquake Research in China*, 1992, 8(4): 102–107. (in Chinese)
- [53] 刘昌森. 地震海啸及其对上海的影响[J]. *上海地质*, 1992, 43(3): 10–18.
LIU Changsen. Seismic sea wave and its impact on Shanghai area[J]. *Shanghai Geology*, 1992, 43(3): 10–18. (in Chinese)
- [54] 卢晓东. 地震海啸对滨海核电厂影响的探讨[J]. *电力勘测*, 1995, 7(3): 57–60.
LU Xiaodong. Influence of tsunami on nuclear power plant[J]. *Electric Power Survey*, 1995, 7(3): 57–60. (in Chinese)

- [55] 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)
- [56] 张兴铭, 包澄澗, 于惠秋. 环太平洋国家和地区海洋减灾状况概览[J]. 中国减灾, 1995, 5(4): 58-60.
ZHANG Xingming, BAO Lancheng, YU Huiqiu. Overview of marine disaster reduction in the circum Pacific countries and regions[J]. Disaster reduction in China, 1995, 5(4): 58-60. (in Chinese)
- [57] 李裕澈, 李德基, 吴锡熏, 等. 1668年中国郟城8.5级巨震在韩半岛的地震影响区及地震海啸[J]. 中国地震, 2003, 19(2): 184-187.
LI Yuche, LI Deji, WU Xixun, et al. The felt area and tsunamis of the 1668 Tancheng great earthquake with M8.5 in the Korean Peninsula[J]. Earthquake Research In China, 2003, 19(2): 184-187. (in Chinese)
- [58] 石峰, 毕丽思, 谭锡斌, 等. 渤海海域历史上发生过地震诱发海啸吗[J]. 地球物理学报, 2012, 55(9): 3097-3104.
SHI Feng, BI Lisi, TAN Xibin, et al. Did earthquake tsunami occur in Bohai Sea in history? [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(9): 3097-3104. (in Chinese)
- [59] Sun L G, Zhou X, Huang W, et al. Preliminary evidence for a 1000-year-old tsunami in the South China Sea[J]. Scientific Reports, 2013, 3(7444): 1655.
- [60] 王培涛, 赵联大, 于福江, 等. 海啸灾害数值预报技术研究现状[J]. 海洋预报, 2011, 28(3): 74-79.
WANG Peitao, ZHAO Lianda, YU Fujiang, et al. Review of the numerical forecasting technology on the tsunami hazards[J]. Marine Forecasts, 2011, 28(3): 74-79. (in Chinese)
- [61] 祝会兵, 于颖, 戴世强. 海啸数值计算研究进展[J]. 水动力学研究与进展, 2006, 21(6): 714-723.
ZHU Huiqing, YU Ying, DAI Shiqiang. The research progress in numerical simulation of tsunami models[J]. Journal of Hydrodynamics, 2006, 21(6): 714-723. (in Chinese)
- [62] 潘文亮, 王盛安, 蔡树群, 等. 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, et al. Simulation of potential tsunami hazards in the South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2009, 28(6): 7-14. (in Chinese)
- [63] 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 Yanling, ZHU Yuanqing, SONG Zhiping, et al. Preliminary numerical simulation of potential earthquake-induced tsunami in East China Sea[J]. Acta Seismologica Sinica, 2008, 21(5): 456-463. (in Chinese)
- [64] Dao M H, Tkalich P, Chan E S, et al. Tsunami propagation scenarios in the South China Sea[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 36(1): 67-73.
- [65] 于福江, 王培涛, 赵联大, 等. 2010年智利地震海啸数值模拟及其对我国沿海的影响分析[J]. 地球物理学报, 2011, 54(4): 918-925.
YU Fujiang, WANG Peitao, ZHAO Lianda, et al. Numerical simulation of 2010 Chile tsunami and its impact on Chinese coasts[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(4): 918-925. (in Chinese)
- [66] 叶琳, 王喜年, 包澄澗. 中国的的海啸及其预警服务[J]. 自然灾害学报, 1994(1): 100-103.
YE Ling, WANG Xinian, BAO Chenglan. Tsunami in China Seas and its warning service[J]. Journal of Natural Disasters, 1994, 3(1): 100-103. (in Chinese)
- [67] 温瑞智, 周正华, 谢礼立. 基于强震台网的我国沿海海啸走时预警[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(2): 20-24.
WEN Ruiqi, ZHOU Zhenghua, XIE Lili. A numerical study on tsunami travel time for China seashore based on strong ground motion network[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(2): 20-24. (in Chinese)
- [68] 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.
- [69] 赵联大, 于福江, 滕骏华. 南海定量海啸预警系统[J]. 海洋预报, 2015, 32(2): 1-6.
ZHAO Lianda, YU Fujiang, TENG Junhua. SCS quantitative tsunami warning system[J]. Marine Forecasts, 2015, 32(2): 1-6. (in Chinese)
- [70] 陈建涛, 叶春明. 建立南海地震海啸监测预警系统的构思[J]. 华南地震, 2010, 30(S1): 145-152.
CHEN Jiantao, YE Chunming. Discussion on the construction of the tsunami monitoring and warning system in the south China Sea[J]. South China Journal of Seismology, 30(z1): 145-152. (in Chinese)
- [71] 于福江, 原野, 赵联大, 等. 2010年2月27日智利8.8级地震海啸对我国影响分析[J]. 科学通报, 2011(3): 239-246.
YU Fujiang, YUAN Ye, ZHAO Lianda, et al. Evaluation of potential hazards from teletsunami in China: Tidal observations of a teletsunami generated by the Chile M_w 8.8 earthquake[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 59(3): 239-246. (in Chinese)
- [72] 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. (in Chinese)
- [73] Zhao L, Yu F, Hou J, et al. The role of tsunami buoy played in tsunami warning and its application in South China Sea[J]. Theoretical and Ap-

- plied Mechanics Letters ,2013 ,3(3) : 23 - 26.
- [74] 宋昱莹,温瑞智,任叶飞,等. 沿海场地地震海啸危险性概率分析[J]. 地震工程与工程振动,2014 ,34(S) : 1060 - 1064.
SONG Yuying ,WEN Ruizhi ,REN Yefei ,et al. Probabilistic tsunami hazard analysis on Chinese coastal site[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics ,2014 ,34(S) : 1060 - 1064. (in Chinese)
- [75] 温瑞智,任叶飞. 我国地震海啸危险性分析方法研究[J]. 世界地震工程,2007 ,23(1) : 6 - 11.
WEN Ruizhi ,REN Yefei. Preliminary study on tsunami hazard analysis in China[J]. World Earthquake Engineering ,2007 ,23(1) : 6 - 11. (in Chinese)
- [76] 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)
- [77] 任鲁川,霍振香,洪明理. 耦合潜源参数不确定性效应的地震海啸危险性分析——原理与方法[J]. 海洋预报,2014 ,31(6) : 7 - 13.
REN Luchuan ,HUO Zhenxiang ,HONG Mingli. Principle and method of the seismic tsunami hazard analysis coupling uncertainty effect of potential source parameters[J]. Marine Forecasts ,2014 ,31(6) : 7 - 13. (in Chinese)
- [78] Ren Y F ,Wen R Z ,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(1) : 1 - 26.
- [79] 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(S) : 68 - 73.
ZHANG Peng ,REN Yefei ,WEN Ruizhi ,et al. Probabilistic tsunami hazard analysis for a site at DayaBay[J]. Industrial Construction ,2016 ,46(S) : 68 - 73. (in Chinese)
- [80] 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 it's surrounding region[J]. Journal of Catastrophology ,2005 ,20(3) : 41 - 47. (in Chinese)
- [81] Li 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 ,121(8) : 6250 - 6272.