

文章编号:1004-4574(2006)03-0001-07

海啸预警系统及我国海啸减灾任务

温瑞智, 公茂盛, 谢礼立

(中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:2004 年 12 月 26 日印度洋海啸引发了新一轮海啸预警系统的研究。简述了地震海啸预警的原理, 分析了海啸数值模拟的一些基本方法, 综述了目前世界上多个国家海啸预警系统的建设情况, 通过对我国海啸灾害研究现状的分析, 明确了我国当前海啸防灾减灾工作的主要任务。

关键词:海啸; 海啸地震; 预警系统; 数值模拟; 防灾减灾

中图分类号: X4; P731.25

文献标识码: A

Development of tsunami warning system and disaster reduction requirements in China

WEN Rui-zhi, GONG Mao-sheng, XIE Li-li

(Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: The tsunami on December 26, 2004 has triggered a new round of tsunami research. In this paper, the principle of tsunami warning system is introduced firstly, then numerical tsunami simulation method, as foundation of tsunami warning system, is also given. The progress of tsunami warning systems in other countries is described. By summarizing the tsunami researches in China, the main tasks on tsunami disaster reduction in China are listed.

Key words: tsunami; tsunamigenic earthquake; warning system; numerical simulation; disaster prevention and reduction

2004 年 12 月 26 日印度洋地震引发的海啸引起了各国对预防海啸灾害的高度重视, 尤其是海啸预警系统的建设。本文通过对现有各国预警系统的综述和数值海啸分析方法的讨论, 致力于探讨我国的海啸预警系统的理论框架, 建设我国的海啸防灾体系, 为减轻海啸灾害造成的人员伤亡和经济损失以及我国沿海城市海啸防灾减灾的中长期规划提供技术支持^[1-5]。

1 海啸预警系统原理

一般来说, 根据海啸的成因, 可将海啸划分为 4 种类型, 即由气象变化引起的风暴潮、火山爆发引起的火山海啸、海底滑坡引起的滑坡海啸和海底地震引起的地震海啸。绝大多数的海啸是由地震引发的, 因此本文所说的海啸主要是指地震海啸。海啸的发生包含 3 项基本条件: (1) 地震必须发生在海底; (2) 地震要有足够的强度, 能导致一定规模的海底移位和错动; (3) 海底的位移和错断在竖向要有一定规模。一般来说, 震

收稿日期: 2005-10-10; 修订日期: 2006-03-20

基金项目: 黑龙江博士后科研启动资金资助项目(1609023)

作者简介: 温瑞智(1968-), 男, 副研究员, 山东招远人, 博士, 主要从事工程地震, 地理信息系统应用等研究。

源在海底下 50 km 以内、里氏震级 6.5 级以上的海底地震才有可能引发大的海啸。发生地震时,由于断层的存在,使得海底发生大面积的陷落或抬起,从而带动海水陷落或抬起,形成的震荡波在海面上不断扩大,以致传播到很远的距离。

在地震发生后很短的时间内,就可以确定该地震的震中位置、震级以及震源深度等参数。地震波的速度比海啸的速度要快很多,地震波纵波的传播速度每秒约为 6 km 左右,即使是传播速度较慢的横波,其波速也可达每秒 3 km。海啸的速度可以近似通过下式计算^[6]:

$$v(x,y) = \sqrt{gh(x,y)} \tag{1}$$

式中: g 为重力加速度; h 为点 (x,y) 所在的海洋深度,假设深度为 4 km,则海啸传播速度约为 200 m/s。海啸波在传播的同时,其波长也随着海底深度的变浅而逐步变短,见图 1。

地震波可以由布置在海底的宽带三分量强震仪测得;在同一地点同时布设高精度、高性能的压力传感器,可以测量频率极低的海啸波。假定地震和海啸同时发生,地震波把海啸远远地甩在了后面,完全可以利用这个时差对海啸做出预报和预警,先进的全球通讯系统可以将海啸的信息实时地传送到海啸可能要到达的国家或地区,使得有可能及时通过警报等措施疏散民众。图 2 中,如果观测点距离地震震中 1 000 km,地震波和海啸波的走时将会一个多小时的时差。如果地震发生后,立即可判断出海啸的发生,而不需要观测点的二次识别,则海啸的预警时间就比较充分;如果地震发生后,观测点监测到海啸,则海啸的预警时间可以由观测点的位置到预警陆地的海啸走时来确定。

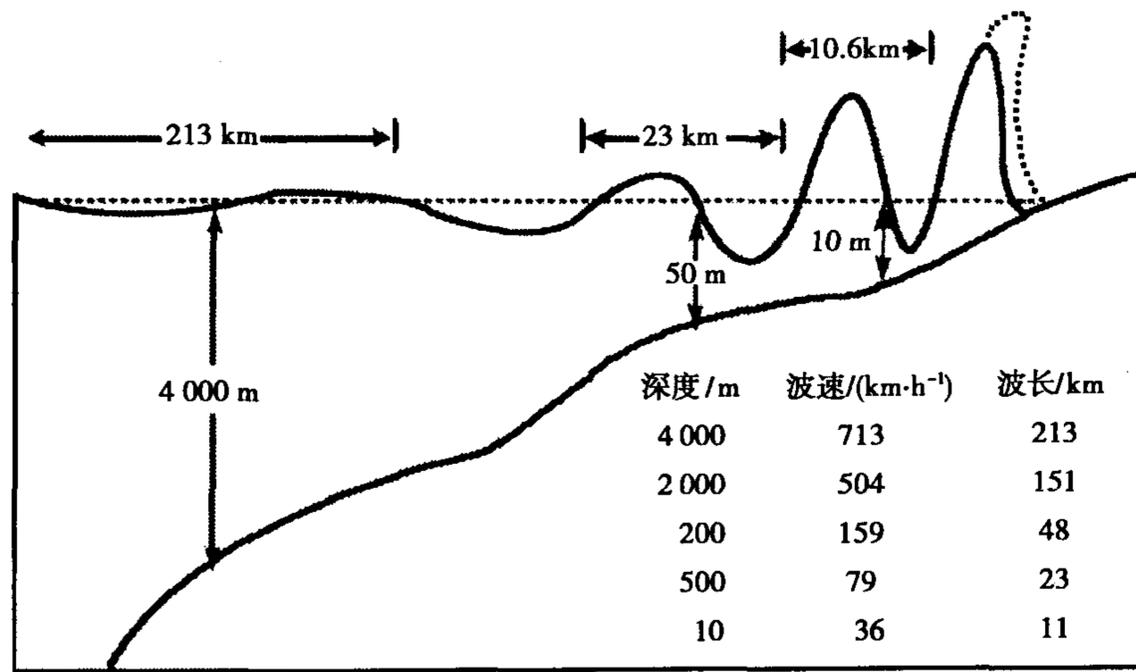


图 1 海啸传播及波长变化示意图

Fig. 1 Sketch of tsunami propagation and wave length change

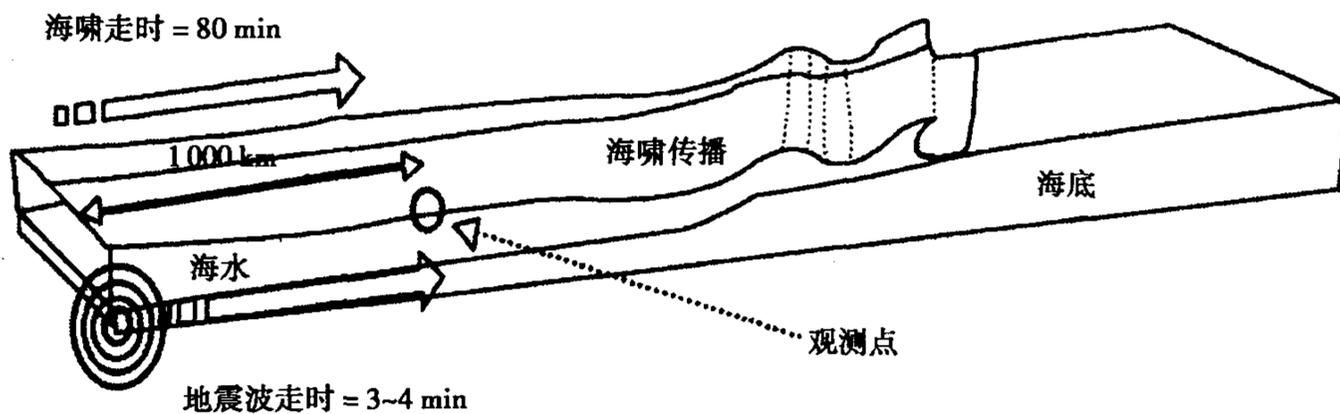


图 2 海啸预警原理

Fig. 2 Principle of tsunami warning system

典型的海啸预警系统主要是由 3 部分组成:(1)陆地预警指挥中心;(2)无线电、卫星通讯系统;(3)布置在海洋深处的海啸监测系统。以上 3 个部分有机的组合,能够实现监测、通讯、预警、服务自动化,做到高速、

实时的海啸监测。如美国海啸预警系统由所属海洋站、舰船、浮标、卫星等自动化仪器实现对海洋灾害资料的自动监测,并通过小孔径地面接收站实时传输到预警中心,各海域定时观测的海洋资料可以在预警中心实时显示,预警中心能及时启动海啸数值模型进行定量的计算,客观地做出海洋灾害的预报预警,然后全球各海域可以通过卫星、舰船收集、处理,实时地获得这些预警资料。

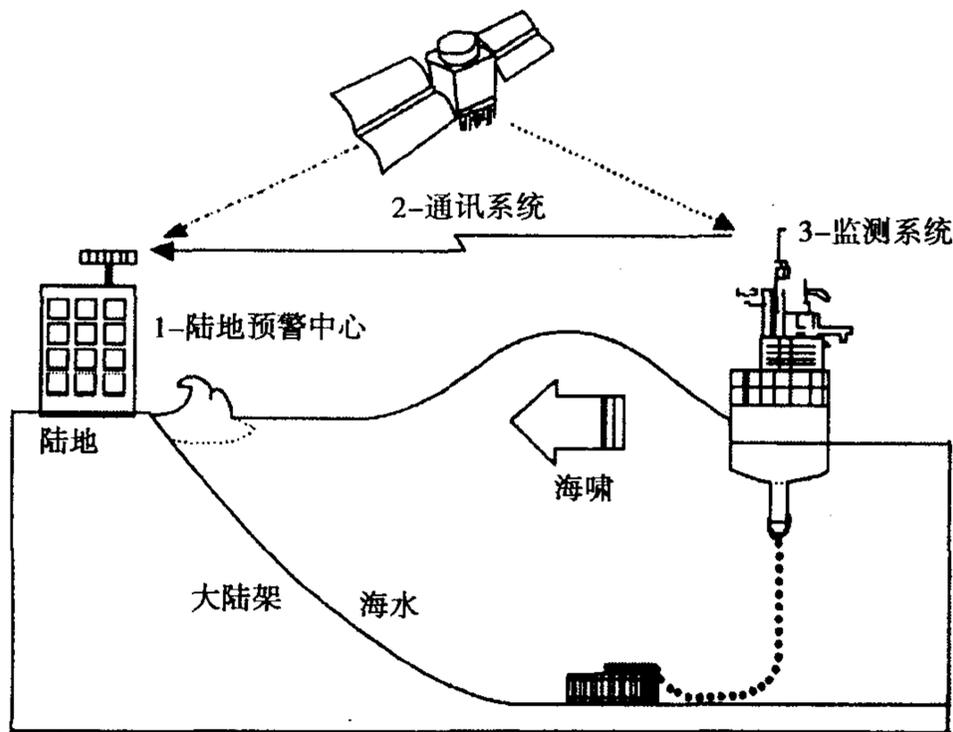


图3 海啸预警系统的组成示意图

Fig.3 Framework of tsunami warning system

2 海啸的数值模拟

在过去的 40 a 里,由于地震学、地震工程等相关学科的发展和计算机速度的迅速提高,使得基于水动力学原理进行海啸数值模拟计算取得了很大的进展^[7,8]。海啸数值模型是目前新一代海啸预警系统建设的基础。

(1) 海啸的发生

海洋板块内断裂的破裂是引发地震海啸的主要原因。海底位错常常采用线弹性位错理论来描述,通过断裂破裂的几何参数和强度计算^[9]。常见的滑动断层地震矩 M_0 可以表示为

$$M_0 = \mu DS \quad (2)$$

式中 μ 是弹性模量; S 是破裂面积; D 是断裂错开位移。

如果已知地震矩,破裂面积和弹性模量则可以计算 D 。通常破裂面可以简化成长宽比为 2 到 8 范围的长方形,当然为了更好地确定错开位移,还需要一些其它参数如震源深度 d ,相对于水平方向的倾角 δ 和滑移角 λ 来描述破裂面积。

一旦有了产生的位错的位移 $\Delta u_j(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$,在各向同性介质中,可以近似计算整个空间内的位移变化场 $u_i(x_1, x_2, x_3)$

$$u_i = \frac{1}{F} \iint_{\Sigma} \Delta u_j \left[\lambda \delta_{jk} \frac{\partial u_i^n}{\partial \xi_n} + \mu \left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) \nu_k \right] d\Sigma \quad (3)$$

式中 δ_{jk} 是 Kronecker 符号, λ 和 μ 是 Lamé 常数, ν_k 为面单元 $d\Sigma$ 其法向夹角的余弦, u_i^j 是作用在 (ξ_1, ξ_2, ξ_3) 的 j 方向力 F 在 (x_1, x_2, x_3) 处产生的第 i 位移分量。地震发生错动的过程是一个很短地冲击过程,可能发生在几秒中之内,海水表面的这种向上的运动可以假设为和海底位移是一致的。目前也有一些复杂的模别模拟海底位移的运动,如从几何形状上考虑断裂的复杂性、滑移的多向性、破裂层厚度可变性等各种因素^[10,11]。

(2) 海啸的数值模拟

美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)目前主要使用南加利福尼亚大学研制的 MOST(Method Of Splitting Tsunami),可以用来计算海啸对阿拉斯加、加利福尼亚、夏威夷、俄勒冈和华盛顿州产生的影响^[12]。COMCOT(Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model)是康奈尔大学

研制的海啸数值模拟软件^[13]。TUNAMI 是日本东北大学研制的模型,其基本原理是基于非线性浅水方程,采用有限差分法^[14]。海啸波长的距离常常会传播几千公里,地球本身的形状以及自转也必须考虑^[15-19]。

$$h_t + \frac{(uh)_\lambda + (vh\cos\phi)_\phi}{R\cos\phi} = 0 \quad (4)$$

$$u_t + \frac{uu_\lambda}{R\cos\phi} + \frac{vu_\phi}{R} + \frac{gh_\lambda}{R\cos\phi} = \frac{gd_\lambda}{R\cos\phi} + fv \quad (5)$$

$$v_t + \frac{uv_\lambda}{R\cos\phi} + \frac{vv_\phi}{R} + \frac{gh_\phi}{R} = \frac{gd_\lambda}{R} - fu \quad (6)$$

式中, λ 和 ϕ 是经度和纬度, $h = h(\lambda, \phi, t) + d(\lambda, \phi, t)$,表示波高和海深之和; u 和 v 经度方向和纬度方向速度; g 是重力加速度; f 是 Coriolis 参数, $f = 2\omega\sin\phi$, ω 为地球自转角频率; R 是地球半径。目前还有一些数值计算模型采用有限单元法。近几年,考虑更高阶的 Boussinesq 类型方程来模拟海啸的非线性和散频的工作已经取得初步成果,康奈尔大学的 CULWAVE (Cornell University Long and Intermediate Wave Modeling Package) 和德拉瓦大学的 FUNWAVE 已经用来进行一些发生海啸的数值模拟^[20,21]。以上的数值方法,通过与实际发生的一些海啸相比较,以及配合相应的一些水动力学实验,表明在给定震源发生条件下可以较精确地模拟海啸的传播,并能较好地模拟海啸的走时和海啸波及地区涌浪大小。

3 国外海啸预警系统

美国 NOAA 主要负责海啸的预警工作,组织有关的海啸监测和科研工作,并负责国家海啸减灾计划 (National Tsunami Hazard Mitigation Program, NTHMP),该计划主要任务是减少海啸带来的人员与财产损失,并减少错误的预警,减少不必要的人员疏散带来的损失,增强公众对海啸预警的信心。在 1992 年 4 月加利福尼亚地震之后,美国进一步认识到近海地震和海啸的危害,1997 年开始对近海地震和海啸观测,并加强相应的宣传教育工作,建立了海啸影响区域编绘中心 (Center for the Tsunami Inundation Mapping Efforts, TIME),为紧急救援和长期规划提供基础参考资料^[22]。作为 NTHMP 的一部分,NOAA 的太平洋海洋环境实验室 (PMEL) 实施了 DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis) 项目,在近海建立了海啸观测站,对美国海岸进行实时海浪观测,同时对有危险的海啸进行速报。目前,美国有 2 个预警中心,太平洋海啸预警中心和西海岸—阿拉斯加海啸预警中心,海啸的预警系统要包括海啸观测系统和实时的数字模拟分析系统,同时能够实现相关海岸的海啸数值模拟分析。预警中心的主要作用是监测定位在太平洋发生潜在的可能引起的海啸的地震,如果地震发生的区域和地震震级符合判断海啸发生准则,就会对相关的地区发布临近海啸灾害预警报;如果布设在海洋的海啸观测仪器也同时观测到海啸,则警报会发布到整个太平洋地区^[23]。印度洋海啸之后,美国政府加强了海啸的监测和预警系统的资助,促使美国联邦地质调查局 (USGS) 与 NOAA 合作,加入 50 多个国家参加的全球观测系统项目 (GEOSS)。

日本气象厅 1941 年开始建立了海啸预警系统。1993 年又一次遭受海啸灾害后,开始研制基于数值预报技术的新一代海啸预警系统。该海啸预警系统包括地震监测网、基于数据库技术的快速预报系统以及基于卫星通讯的海啸预警快速发布系统 3 部分。1999 年,插值数值模式应用到海啸预警系统之中,该系统能够开始发布定量的海啸预报,新的警报包括海啸到达时间和海啸波高^[24]。

俄罗斯在萨哈林地区海啸预警系统由海啸预警中心 (TWC) 和俄罗斯科学院地球物理所的地震台网组成,负责提供实时的海啸预警、应急预案以及有关的科学研究。当震中距离萨哈林 3 000 km 以内时,主要由地震台网负责海啸预警信息;当震中距大于 3 000 km,主要由预警中心发布预警信息。海啸预警信息会同时发送到内政部和区域紧急管理中心,并启动采取相应的措施。

葡萄牙海啸预警系统建在其南部海域,地震仪和海水压力仪放置在海底的地震带附近,两个浮标放置在大西洋萨格里什角西南处。该预警系统以现代化的卫星数据通讯方式和先进的信息实时处理技术为基础,能够提供早期的预警信息,并能在存储介质中保存相关数据以备进一步分析应用^[25]。

意大利建设的由 4 个观测站组成的地中海海啸预警系统也正在建设,其中一个监测站已经完成。

国际海啸预警中心是联合国科教文组织在 1965 年建设的,目前有 27 个成员国家或地区,主要任务是组织国际间的海啸观测、信息交流,1968 年该中心成立了海啸国际预警协调组协调海啸减灾活动。国际海啸

预警系统一般是把参与国家的地震监测网络的各种地震信息全部汇总,然后通过计算机进行分析,判断形成海啸的可能性,其规模和破坏性,在分析基本数据后,系统会迅速向有关成员国传达相关分析结果。一旦海啸形成,该系统分布在海洋上的数个水文监测站还会及时更新海啸信息。目前太平洋海啸预警系统已经比较完善,印度洋、大西洋的海啸预警系统正在建设之中。

4 我国海啸灾害形势分析及预警系统研究现状

本文根据 NOAA 的海啸数据库,通过地理信息系统绘制的全球海啸地震分布图,见图 4。可以看出,世界上近 80% 的海啸发生在太平洋沿岸地区,我国位于太平洋西岸,台湾岛屿及日本海岛屿一带是地震多发地带,尽管我国海区外围有成串的岛屿、暗礁环绕,形成了一道抵抗海啸的天然屏障,但我国也可能是地震海啸袭击的地区。我国东南沿海是我国发展最快的地区,一旦发生海啸国民经济会有较大影响。黄海和东海深度一般 300 ~ 400 m,南海可达到 1 000 m,从海洋的深度看具备发生海啸的条件,黄、东海由于较浅,在浙江和福建沿海海水深度小于 40 m,加之日本群岛、菲律宾群岛的保护,可能性小一些。我国早在公元前 47 年就记载了一次发生在山东莱州湾的海啸,目前历史上记载的相关的近海海啸地震近 20 次,其中部分地震可以定位,见图 5^[26]。

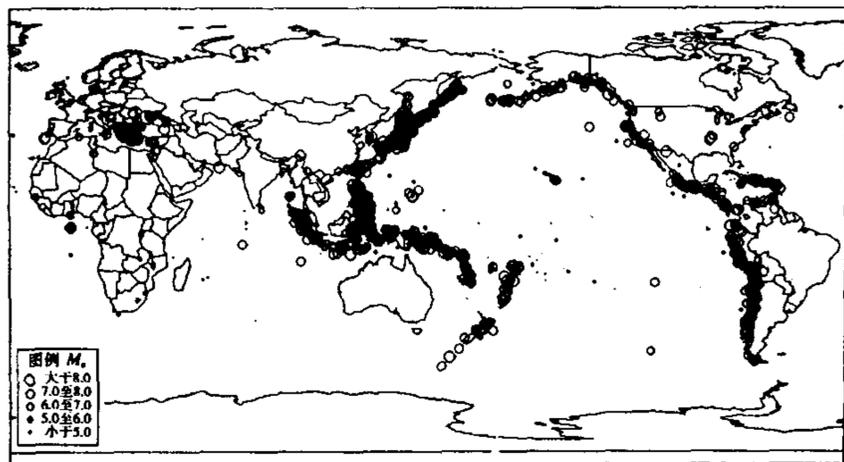


图 4 海啸地震分布(2000 - 2005 年)

Fig. 4 Distribution of tsunamigenic earthquakes (2000 - 2005)

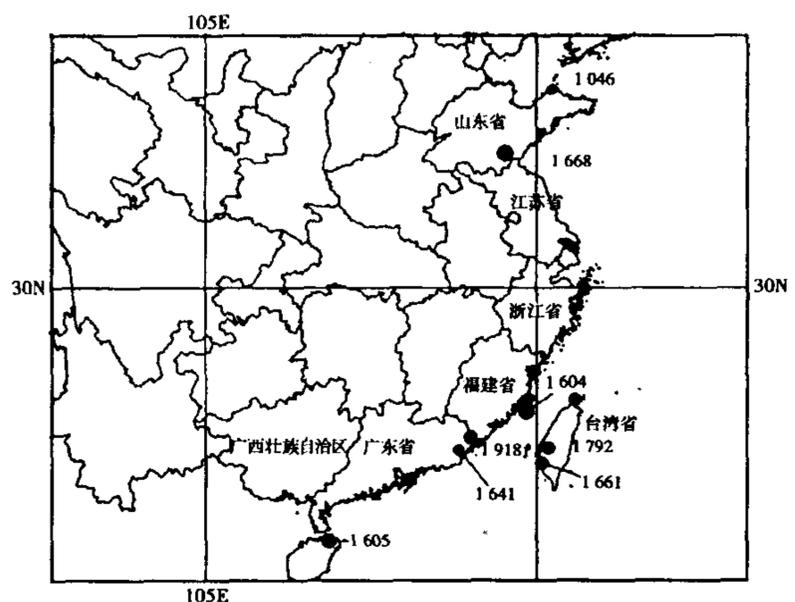


图 5 我国沿海地区部分历史海啸地震分布及发生年代

Fig. 5 Distribution and occurring age of some tsunamigenic earthquakes in coastal area of China

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报业务,主要根据太平洋海啸警报中心发布的有关越洋地震海啸信息,发布我国沿海的海啸预警报。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、近海海啸数值预报模型。该模型在我国一些核电站的环境评价中得到了应用。印度洋大海啸发生后,国家海洋环境预报中心在多年海啸预警技术研究的基础上,进一步开发研制我国海啸传播数值预报模式,正在研制海啸应急自动报警系统^[27-30]。

目前我国针对海啸的研究机构较少,主要是在国家海洋局,中国地震局也正逐步开展相应的工作。我国有关海啸防御相应的规范内容也甚少,在我国《工程场地地震安全性评价技术规范》中仅涉及到对可能产生地震地质灾害场地进行勘察,并要“对可能遭受海啸与湖涌影响的场地,收集历史海啸与湖涌对场地及附近地区的影响”。因此,加速我国的海啸防灾减灾工作是当务之急,幸好印度洋大海啸为我国的中长期规划敲响了警钟,引起了国家相关部门和科研人员的关注。

5 我国海啸灾害亟待解决的问题

当前国际海啸灾害研究的发展趋势是:(1)海啸通讯网的建设,包括卫星等技术的应用;(2)快速海啸灾害的识别,减少假警报;(3)近海海啸预警及减灾;(4)简化、可靠的海啸数值模拟方法;(5)有关海啸法令法

规制定和公众的教育宣传工作;(6)国际海啸信息的交流和协作。

针对我国的特点和研究现状,我国海啸灾害研究现状,当前应侧重以下几方面的工作:

(1) 建立我国海啸灾害数值模拟数据库

传统的方法已远不能满足在海洋环境与灾害信息时空处理的需求,建设与海啸灾害相关的地理信息系统(geographic information system, GIS)数据库,实现模拟海啸灾害状态的时空分布和变化,为灾害预警服务。

(2) 我国海啸灾害危险性分析

建立海啸危险性概率分析方法,进行我国沿海地震海啸危险性分析,绘制沿海地震海啸危险区或制订海啸灾害的区划图,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^[31]。

(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。

(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需要^[32]。

(6) 加强海啸减灾国际合作

海啸的减灾国际间相互合作和技术交流,互通有无,特别是与其他国家海啸预警信息实时的交流是有效的防御海啸灾害的有效手段,并有助于提高我国海啸研究领域在世界的地位。

6 结语

本文从海啸预警系统的基本原理出发,阐述了当前各国预警系统的概况,分析了地震海啸的数值模拟方法,归纳了我国当前的海啸预报与预警、海啸灾害防御的发展方向,为我国做好防御海啸灾害做好准备。

致谢:本文得到了中国地震局工程力学研究所预研究课题经费资助,特此致谢。

参考文献:

- [1] 陈会忠,等. 从印尼苏门答腊地震和海啸看各国地震系统的反应[J]. 国际地震动态,2005,314(2):32-34.
- [2] 王绍玉. 印度洋地震和海啸灾害引发的若干思考[J]. 国际地震动态,2005,313(1):45-48.
- [3] 林均歧. 2004年12月26日印度尼西亚地震海啸灾害考察[J]. 地震工程与工程振动,2005,25(2):30-33.
- [4] 郭迅. 海啸破坏特点与工程预防方法初探[J]. 自然灾害学报,2005,14(1):175-177.
- [5] Lander J F, et al. Two decades of global tsunamis (1982-2002)[J]. Science of Tsunami Hazards,2004,21(1):3-88.
- [6] Thomas P Weissert. Tsunami travel time charts for the Caribbean[J]. Tsunami Hazards, 1990,8(2):67-78.
- [7] 王福军. 计算流体动力学分析—CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [8] 张着顺,崔桂香. 流体力学[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [9] Okada Y. Surface deformation to shear and tensile faults in a half-space[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1985,75(4):1135-1154.
- [10] Mansinha L, Smylie D E. The displacement fields of inclined faults[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,1971,61(2):1433-1440.
- [11] Mark R L, et al. Tsunami hazards associated with the catalina fault in southern California[J]. Earthquake Spectra,2004,20(3):917-950.
- [12] Titov V V, Synolakis C E. Numerical modeling of tidal wave runup[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 1998,124(4):157-171.
- [13] Lynett P, Liu P. A numerical study of submarine landslide generated waves and runups[A]. Proceedings of Royal Society of London[C]. 2002:2885-2910.
- [14] Imamura F, Shuto N, Goto C. Numerical simulations of the transoceanic propagation of tsunamis[A]. Proc. 6th Congress Asian and Pacific Regional Division[C]. IAHR, Japan, 1988:265-272.

- [15] Titov V V, Gonzalez F I. Implementation and testing of the method of splitting tsunami (MOST) model[R]. NOAA Technical Memorandum ERL PMEL-112, 1997.
- [16] John D A. Computational Fluid Dynamics—the Basics with Applications[M]. McGraw Hill, 1995.
- [17] 包澄澜. 海啸灾害及其预警系统[J]. 国际地震动态, 2005, 313(1): 14-18.
- [18] Vijay K A, et al. Simulations of the 26 December 2004 Indian Ocean tsunami using a multi-purpose ocean disaster simulation and prediction model[J]. Current Science, 2005, 88(3): 439-444.
- [19] 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.
- [20] Kennedy A B, et al. Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and runup[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2000, 126: 39-47.
- [21] Shi F Y, et al. A fully nonlinear Boussinesq model in generalized curvilinear coordinates[J]. Coastal Engineering, 2001, 42: 337-358.
- [22] Venturato A J I. NOAA TIME Eastern Strait of Juan de Fuca. 2004[R]. NOAA Technical Memorandum OAR PMEL-127.
- [23] Bernard E N. The U. S. National Tsunami Hazard Mitigation Program Summary[A]. Proceedings of the International Tsunami Symposium[C]. 2001.
- [24] 于福江, 吴玮, 赵联大. 基于数值预报技术的日本新一代海啸预警系统[J]. 国际地震动态, 2005, 313(1): 19-22.
- [25] 刘瑞丰, 等. 葡萄牙破坏性地震和海啸预警系统[J]. 国际地震动态, 313(1): 23-25.
- [26] Zhou Q, William A. Tsunamigenic Earthquakes in China[J]. Science of Tsunami, 1986, 4(3): 131-148.
- [27] 叶琳, 等. 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.
- [28] 王发君. 基于地理信息系统的海啸灾害模型[J]. 大连海事大学学报, 2002, 28(增刊1): 185-187.
- [29] 高中和, 等. 中国大陆沿海地震海啸析疑[J]. 中国地震, 1992, 8(4): 102-107.
- [30] 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.
- [31] 李山有, 等. 中国强震动观测展望[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(2): 1-7.
- [32] 陈虹, 李玉成. 印尼 8.7 级地震海啸灾害及应急救援[J]. 国际地震动态, 2005, 316(4): 22-26.