

中国的海啸灾害危险性及其海啸预警系统

——解读2011年太平洋海啸演习

王培涛¹, 赵联大^{1,2}, 侯京明¹, 范婷婷¹, 高义²

(1.国家海洋环境预报中心,北京 100081;2.国家海洋局海洋灾害预报技术研究
重点实验室,北京 100081)

摘要:新世纪以来频发的海啸灾害引起了国际社会的广泛关注,各滨海国家不仅加大了在海啸预警建设和海啸灾害危险性、海啸基础理论研究方面的投入,更进一步加强了国际社会在应对海啸灾害方面交流与合作。为测试太平洋各国海啸预警系统的有效性以及政府职能部门的应急管理能力,切实提高各国区域和局地海啸的应对水平,促进国家和地区间海啸预警的交流与合作,联合国教科文组织政府间海洋学委员会(IOC/UNESCO)决定2011年11月9—10日,在整个太平洋地区举行一次代号为“Exercise Pacific Wave 11”的海啸演习。此次演习恰逢日本“3.11”大地震海啸发生后的8个月,通过本次演习对督促太平洋各国进一步检验本国的海啸预警系统、评估本国的海啸危险性均有着重要的意义。中国作为IOC和太平洋海啸预警系统的成员国,积极组织实施了我国历史上第一次涉及当地人员疏散的海啸演习。本文将在本次演习所涉及的海啸源评估、海啸数值计算的基础上,应用新的海啸灾害分级标准对我国沿海的海啸危险性和海啸预警系统进行重新评估分析,期望本文的研究将为今后的海啸预警及海啸灾害评估工作提供科学的决策依据标准。

关键词:海啸危险性;预警系统;太平洋海啸演习;数值计算

中图分类号:P731 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-0239(2012)05-0009-08

1 引言

20世纪以来,全球共发生海啸事件524次,其中有70次引发海啸灾难,特别是进入新世纪的12年间,全球共发生灾难性海啸事件11次(Natural Hazards Database of NGDC/NOAA),平均每年一次,远远高于上世纪6年一次的平均水平^[1],海啸防灾减灾形势日趋严峻。在上述海啸事件中,86%是由地震事件引发,5%是由火山活动引起的,4%是由海底滑坡产生的,5%由这些原因的综合过程引起的^[2],因此海啸通常又被称为“地震海啸”。海啸的能量大约为 10^{21} — 10^{24} 尔格,一般为引发其地震能量的0.005%—10%。地震海啸的激发与海水深度、地震强度、震源机制和震源深度等密切

相关^[3-4],而海啸灾害的强弱不仅与激发因素有关,还与海底地形及海岸线的几何形状等因素有关。

由于历史上的灾害性海啸多发生在太平洋沿岸,因此早期国际社会建立的海啸预警机构多集中于此。如果说海啸预警机构的雏形源于1948年美国夏威夷建立的“地震海波警报系统”。那么此后的1960年的智利大海啸和1964年的阿拉斯加大海啸将把该预警机构逐步推向国际社会,扩展到太平洋沿岸国家。1996年政府间海洋学委员会,为了更好地组织协调太平洋沿岸各国海啸信息共享和技术交流又成立了“太平洋海啸警报系统协调组(ICG/ITSU)”,该组织于2005年更名为“太平洋海啸警报系统(ICG/PTWS)”。2004年印度洋大海啸之后,联合国教科文组织政府间海洋学委员会

收稿日期:2012-03-28

基金项目:国家自然科学基金(40676006);海洋公益性行业科研专项(201205034-02)

作者简介:王培涛(1981-),男,助理研究员,主要从事海啸、风暴潮理论及预警报技术研究。E-mail: wpt@nmefc.gov.cn

考虑建立新的海啸预警机制框架，即全球—区域—次区域—国家四级海啸预警系统。由原来仅有的太平洋海啸预警系统区域，扩展到印度洋、地中海和加勒比海地区，建立覆盖全球的海啸预警系统^[5]。全球范围内针对海啸单一灾种的国际间预警与减灾交流合作就此拉开序幕。

2 太平洋海啸演习背景及意义

太平洋海啸演习始于2006年，共进行了过两次，主要检验太平洋海啸预警系统及太平洋国家政府及海啸预警中心的应急反应处置及预警预报能力。此次演习是继2006年和2008年之后，海委会在泛太平洋区域发起的又一次大规模的跨国海啸演习。演习的主要目的是检验太平洋海啸预警系统(PTWS)的海啸信息分发能力，以及各参演国

家的海啸灾害预警系统运行状况和政府应急处置能力，太平洋海啸警报中心还将首次尝试发布最新研制的量化海啸预报产品。与前两次不同是此次演习针对的海啸类型为局地海啸和区域海啸^[6-7]，IOC/UNESCO共在智利北部、厄瓜多尔、中美洲、阿留申群岛、汤加群岛、瓦努阿图、堪察加群岛、琉球海沟、菲律宾海沟和马尼拉海沟等地的附近海域设置了10个假想海啸源(见图1)，11月9—10日，这10个地点将陆续发生9.0级地震，太平洋海啸预警中心(PTWC)、西海岸/阿拉斯加海啸警报中心(WC/ATWC)和西北太平洋海啸咨询中心(NWPTAC)将分别向太平洋沿岸各国发布海啸信息。参演各国在接到上述机构发布的海啸警报后，根据各国事先制定的演习方案开展应急响应工作。此次演习恰逢日本“3.11”地震海啸发

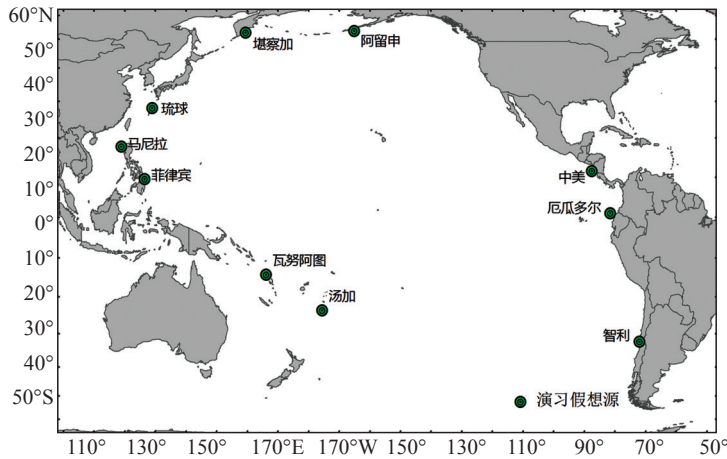


图1 2011年太平洋海啸演习假想海啸源分布(震级均为9.0Mw)

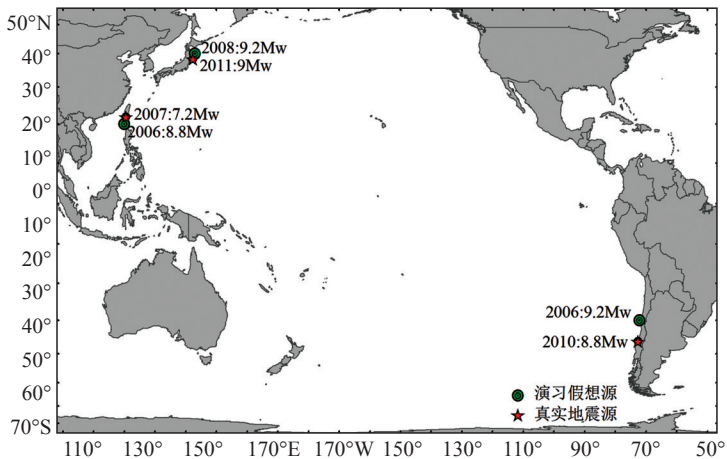


图2 历次海啸演习假想海啸源分布与真实地震分布

生后8个月,通过此次演习对于督促太平洋各国进一步检验各自的海啸预警系统的有效性、评估各国的海啸危险性,有着重要的意义。

特别值得一提的是,2006年泛太平洋海啸演习的目的是测试太平洋沿海国家海啸预警系统应对越洋海啸的反应能力,海啸源设在智利中部(假设震级Mw=9.2)以及马尼拉海沟南段(假设震级Mw=8.8)。2008年泛太平洋海啸演习的目的是测试国家海啸预警辅助决策支持系统的有效性,海啸源设在日本东北部近海(假设震级Mw=9.2)。非常不幸的是在2007—2012年间上述三个位置附近均发生了强烈地震并引发了海啸^[8-9](见图2)。海啸演习中海啸源的设定是根据该地区的地质构造环境、断层发育状况、历史地震发生规律综合判定,具有可靠的科学理论和基础数据支持,所以各国无论从海啸预警与减灾、海啸应急处置、海啸应急疏散演练、国际协同合作、宣传教育等方面

考虑,都应该积极参加海啸演习的各个环节,以应对未来的海啸灾害。

3 演习海啸源选择及数值评估计算

3.1 海啸源选择

我国作为PTWS成员国,承诺参与本次代号为“Exercise Pacific Wave 11”的海啸演习,考虑此次演习的目的及越洋海啸对中国的影响^[10],经综合分析确定10个演习海啸源中对我国威胁最大的是马尼拉海沟、琉球海沟的两个,将其作为本次海啸演习的海啸源进行数值模拟评估,各地方省市海洋部门可针对自己的实际情况组织开展海啸预警和应急避险工作。具体做法是:2011年11月10日08时30分(北京时),在菲律宾以西海域(16.2°N,119.3°E)或者琉球海沟以南(28.0°N,129°E)发生9.0级海底地震(见表1),并引发

表1 “Exercise Pacific Wave 11”海啸源参数

区域	Mw	L	W	D	走向角	倾角	滑动角	Lon	Lat
菲律宾	9.0	400	200	20	330°	45°	90°	126.6°	9.5°
马尼拉	9.0	400	200	20	353°	45°	90°	118.93°	17.67°
琉球	9.0	400	200	20	32°	45°	90°	129.0°	28.0°
智利	9.0	400	200	20	13°	45°	90°	-71.9°	-32.3°
厄瓜多尔	9.0	400	200	20	25°	45°	90°	-81.5°	1.0°
中美洲	9.0	400	200	20	325°	45°	90°	-87.5°	11.5°
阿留申	9.0	400	200	20	245°	45°	90°	-165°	53°
汤加	9.0	400	200	20	48°	45°	90°	-175.5°	-23.6°
堪察加	9.0	400	200	20	230°	45°	90°	159.5°	52.5°
瓦努阿图	9.0	400	200	20	350°	45°	90°	166.2°	-14.3°

特大海啸。

3.2 海啸源数值评估计算

3.2.1 模型介绍

本文选用美国Cornell大学开发COMCOT(Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model)海啸模型作为研究模型。该模型采用的是基于多层网格嵌套的有限差分法。针对海啸波的不同物理特性,模型可以灵活配置所需的坐标系(直角/球面)和控制方程类型(线性/非线性)^[11-15]。本文中深水模块采用球坐标系下线性方程:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} + \left[\frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \phi} (\cos \phi Q) \right] = 0 \quad (1)$$

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

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

浅水模块采用球坐标系下非线性方程:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} + \left[\frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \phi} (\cos \phi Q) \right] = -\frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{g}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\frac{P^2}{H} \right) + \frac{g}{R} \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\frac{PQ}{H} \right) + \frac{gH}{R \cos \phi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - fQ + F_x = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{g}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\frac{PQ}{H} \right) + \frac{g}{R} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{Q^2}{H} \right) + \frac{gH}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \phi} + fP + F_y = 0 \quad (6)$$

式中 η 为相对于平均海平面的自由表面位

移; ϕ 为纬度; Ψ 为经度; R 为地球半径; h 为净水深, $H=h+\eta$ 为总水深; P 为沿经度单位宽度的通量; Q 为沿纬度单位宽度的通量; f 为科氏力系数; g 为重力加速度。 f_x, f_y 分别为经度和纬度方向的底摩擦力。

模型采用交错显示蛙跳格式求解长波方程。波高 η 及流通量 P, Q 在时间和空间上都是交错进行的, 波高及水深定义在网格中心, 体积通量定义在网格边的中点, 因此波高及体积通量的计算是在不同的时间步长上, 利用物理量在空间上的交错方式来计算, 可以增加数值的稳定性。采用蛙跳格式可以利用差分方程的数值频散近似代替波在浅水中传播所带来的物理频散。

3.2.2 评估计算

利用上述海啸数值预报模型对琉球海槽和马尼拉海沟的两个海啸源进行了评估计算。琉球海沟海啸最大波幅分布为: 江苏南部5—8 m, 上海4—7 m, 浙江3—6 m, 福建北部2—4 m, 广东珠江口以东1—2 m; 海啸波4.5 h到达浙江南部、福建北部; 5 h到达浙江北部、广东东部、6—8 h到达宁波、上海沿岸, 9—12 h到达江苏中南部(见图3)。

马尼拉海沟最大海啸波幅分布: 海啸波将于1—15 h内先后到达我国台湾、海南、广东、香港、澳门、福建、广西、浙江、上海、江苏沿海。受其影响, 上述地区沿岸将先后出现1—10 m的海啸波。其中江苏省南部沿岸海啸波高0.5—1.0 m; 上海市沿岸0.5—1.2 m; 浙江省北部沿岸0.5—1.5 m, 南部沿岸1.5—3.0 m; 福建省北部沿

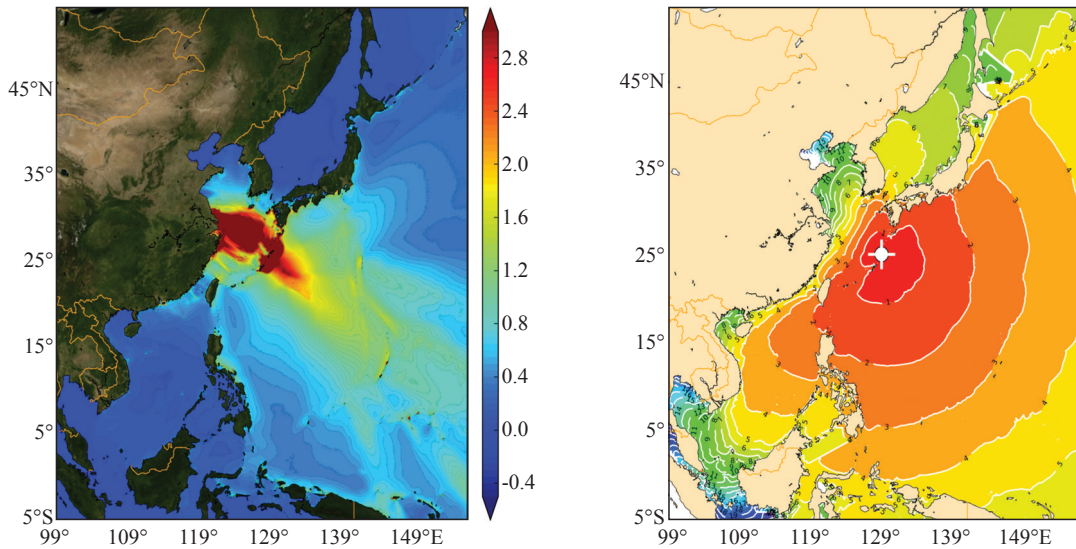


图 3a 琉球海沟海啸源最大海啸波幅分布及海啸波传播时间图

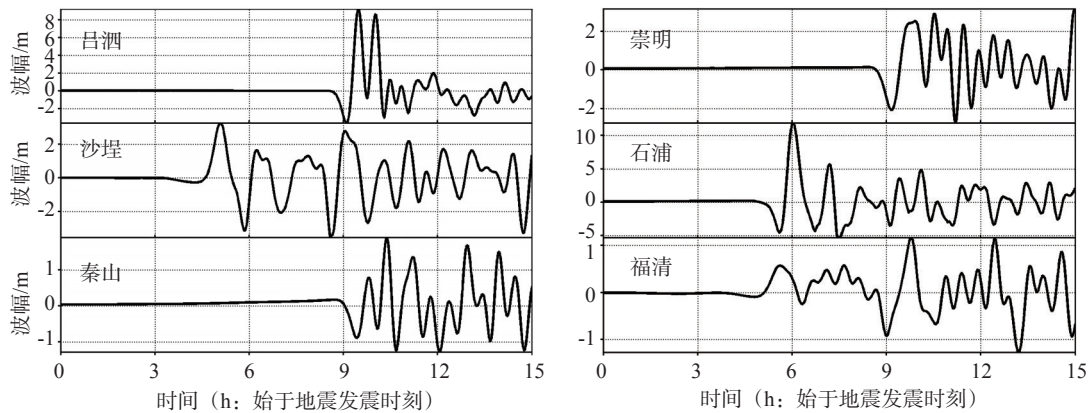


图 3b 琉球海沟海啸源地震海啸在东部沿海各代表站海啸波序列

岸 1.0—2.8 m, 南部沿岸 2.5—5.0 m; 广东省珠江口以东沿岸 3.0—9.0 m, 珠江口沿岸 2.5—8.0 m, 珠江口以西至雷州半岛沿岸 2.5—7.5 m; 海南省东北部沿岸 2.0—6.0 m, 南部沿岸 1.5—5.0 m, 西部沿岸 1.0—2.0 m; 广西壮族自治区沿岸 0.5—1.0 m; 香港沿岸 2.0—7.0 m; 澳门沿岸 3.0—8.0 m; 台湾东南部沿岸 1.5—3.5 m(见图4)。

4 通过海啸演习解读中国的海啸灾害危险性 & 海啸预警系统

4.1 中国的海啸灾害危险性

以往的有关中国海啸危险性的研究成果中不乏一些定性结论^[1,16-17], 最近几年一些学者利用数

值模式对中国部分海区的海啸危险性进行了讨论^[8-10,18-20], 得出一些量化结果。在上述研究成果中均认为马尼拉海沟或者琉球海槽的地震海啸源对我国沿海具有较大威胁, 应给予特别关注。尽管如此, 尚未见对中国沿海海啸危险性按照统一标准进行的等级划分成果, 本文针对上述两个海啸源试图通过统一的等级划分标准对中国沿海海啸危险性进行重新定位与认识。海啸分级标准采用PTWC最新推荐的四级标准, 具体步骤是: 首先计算出每个海啸源在中国沿海所有县/市级行政单元内引发的最大海啸波幅, 通过空间分析法将其最大波幅扩展到每个县/市级行政单元的海岸线上, 从而得出我国沿海海啸危险性等级分布(见图5)。

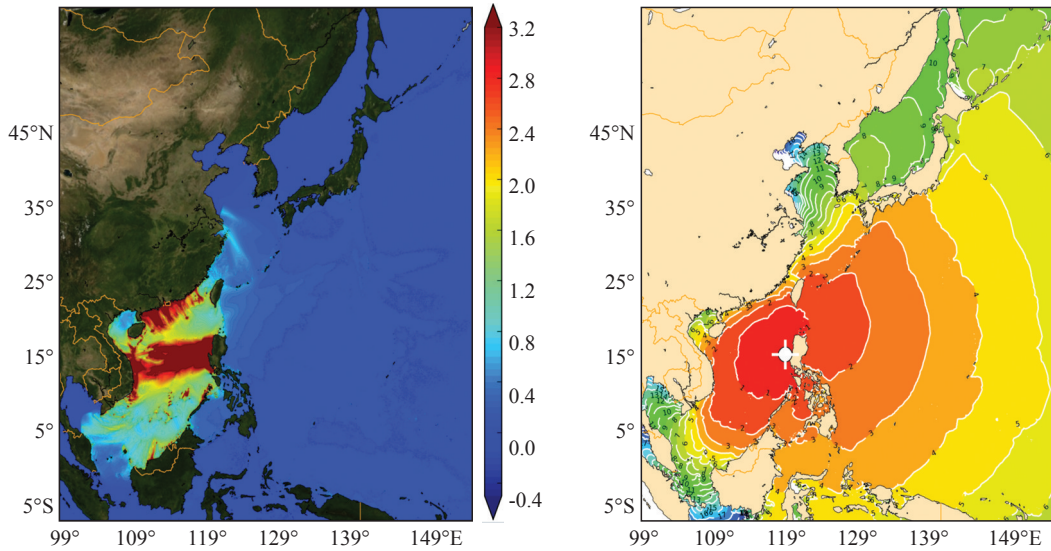


图 4a 马尼拉海沟海啸源最大海啸波幅分布及海啸波传播时间图

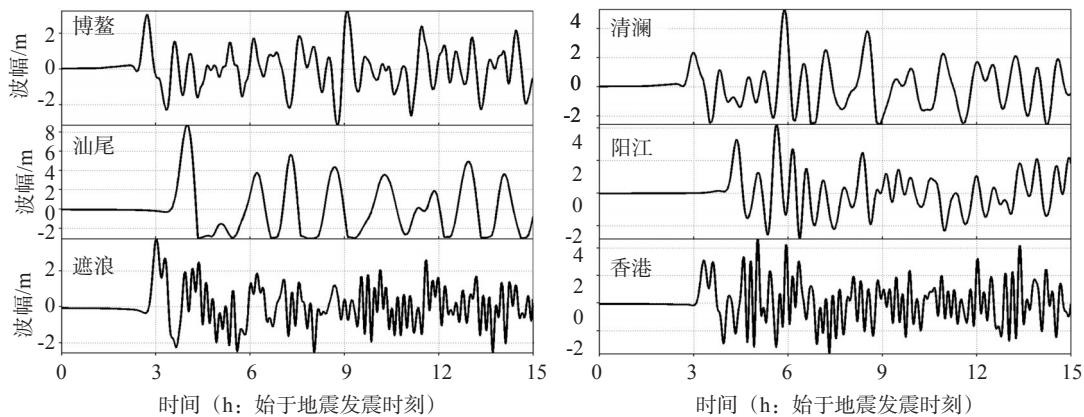


图 4b 琉球海沟海啸源地震海啸在南部沿海各代表站海啸波序列

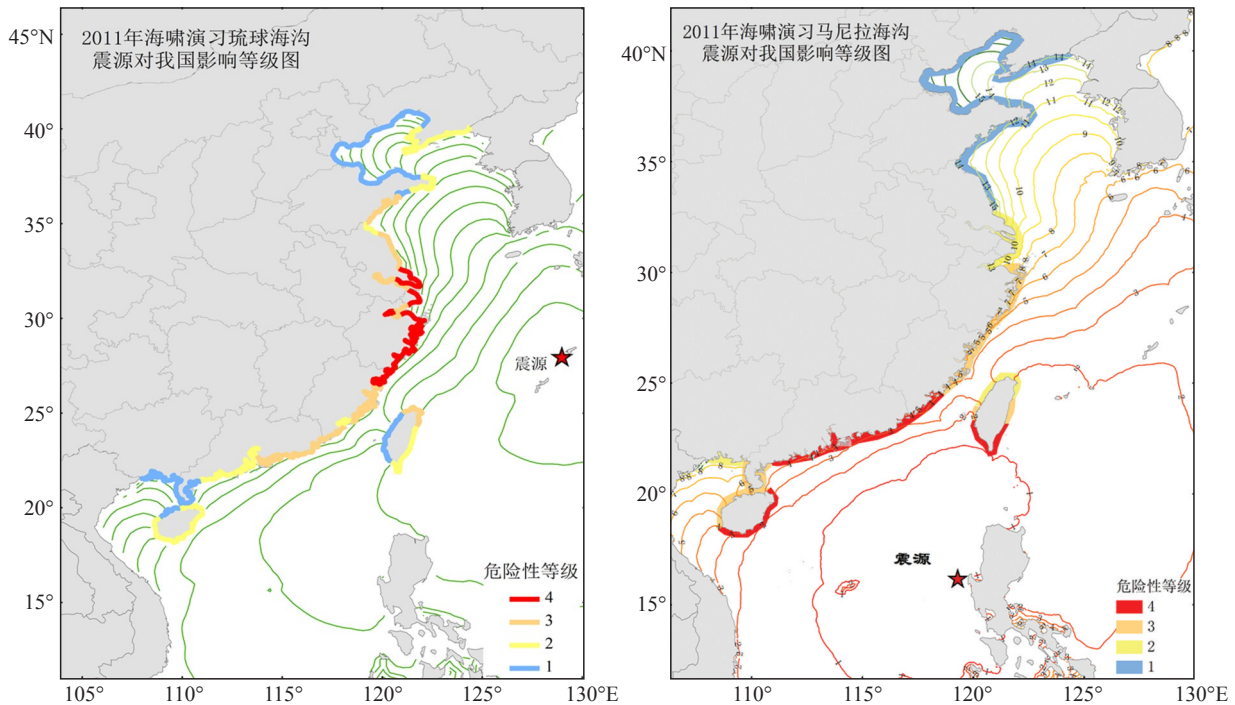


图5 假想海啸源地震海啸危险性等级分布图(图中等值线为海啸传播时间:1h间隔)

从上图可以清楚的看出:琉球海槽海啸源对中国东部沿海特别是长江口、杭州湾、浙江中南部均构成严重威胁;同样,马尼拉海沟海啸源对中国南部沿海地区,特别是福建南部、台湾南部、广东沿海、香港、澳门及海南东部均具有最高等级威胁。

表2 太平洋海啸警报中心(PTWC)最新的分级标准

等级	标准	影响程度
I	$H_t \leq 0.3 \text{ m}$	无影响
II	$0.3 \text{ m} < H_t \leq 1.0 \text{ m}$	近海危险
III	$1.0 \text{ m} < H_t \leq 3.0 \text{ m}$	淹没危险
IV	$3.0 \text{ m} < H_t$	严重淹没危险

4.2 中国的海啸预警系统

目前,由于地震的不可预报性,海啸的预报就更为艰难,只能在地震发生后迅速做出海啸预警。目前所有的海啸预警系统设计原则都是利用地震波、海啸波到达近岸时的时间差,进而进行海啸预警,所以留给海啸预警的时间非常短,特别是区域海啸和局地海啸,预警难度就更大。2004年的印度洋海啸是人类的噩梦,同时也给人类敲响了警钟。一个有效的海啸预警系统对一个

地区应对海啸这种极端灾害是至关重要的。正是基于此,太平洋沿岸各国基本都相继建立了各自的海啸预警系统,也初步具备了应对越洋海啸和区域海啸的能力。我国也在“十一五”期间建立了基于数据库和GIS技术的南海定量海啸预警系统,目前,该系统已经投入业务化运行。当我国东南部近海发生地震海啸时,通过南海定量海啸预警系统输入相关地震参数进行检索和查询。系统会在2 min内完成所有计算结果的计算和输出。此次演习中,该系统的快速、高效运行为海啸预警产品制作、决策服务、人员疏散等环节争取了宝贵的时间、提供了有效的预警信息。同时,国家海洋环境预报中心已经完成了基于实时海啸监测数据的海啸源反演算法研究工作,目前正着手建立基于海啸浮标监测的实时海啸预警系统,未来我国新一代海啸预警系统在预警精度、预警时效等方面将达到国际先进水平。

5 总结与建议

海啸灾害是沿海国家面临的最为严重的自然

①: 慢地震: 非暴力性质的断层滑动事件, 它需要经过数小时或数天释放它们拥有的强大能量, 而不是在数秒到数分钟的时间里释放。

灾害之一。发展和完善海啸预警系统,对于海洋灾害的防灾减灾,具有十分重要的意义。在现有的观测技术水平下对海啸源模型的研究须进一步拓宽思路,探索多源数据在海啸源反演方法中的应用;同时应进一步提高海啸预警系统对“慢地震”^①海啸和滑坡海啸的预报精度;大力发展深海海平面观测技术、建立实时海啸预警系统,以防范未来的海啸风险;这些都将成为今后我国海啸防灾减灾的重点工作。

从海啸危险性等级分布图可以看出:受马尼拉海沟和琉球海沟地震海啸的潜在影响,我国东南沿海均具有较高的海啸危险性等级,特别是长江口、杭州湾、浙江沿海、珠江口、台湾南部、海南东部等均属于最高等级,而这些沿海地区分布着我国绝大部分的港口、核电、石化、仓储、跨海大桥等大型工程。考虑到我国东南沿海地区巨大的人口总量以及在经济发展中的战略地位,一旦发生大海啸,势必对我国的经济发展造成较大影响。因此建议:应尽快开展上述地区的海啸风险评估工作,制定海岸带淹没图和应急疏散图;同时加强海啸科普宣传教育和疏散演练势在必行。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Rhodes B, Tuttle M, Horton B, et al. Paleotsunami research[J]. EOS Trans AGU, 2006, 87(21): 205-209.
- [3] 陈运泰, 杨智娟, 许力生. 海啸、地震海啸与海啸地震[J]. 物理, 2005, 34(12): 864-872.
- [4] Hayir A. The effects of variable speeds of a submarine block slide on near-field tsunami amplitudes[J]. Ocean Engineering, 2003, 30: 2329-2342.
- [5] 刘桦, 赵曦, 王本龙. 海啸预警与海岸带减灾研究进展[A]. 第二十一届全国水动力学研讨会暨第八届全国水动力学学术会议暨两岸船舶与海洋工程水动力学研讨会文集, 成都[C], 2008: 41-47.
- [6] UNESCO/IOC. Exercise Manual of exercise pacific wave 11, Intergovernmental Oceanographic Commission Technical Series No 97, Paris[K]. UNESCO, 2011.
- [7] UNESCO/IOC. OPERATIONAL USERS GUIDE FOR THE PACIFIC TSUNAMI WARNING AND MITIGATION SYSTEM (PTWS), Intergovernmental Oceanographic Commission Technical Series No 87, Paris[K], UNESCO, 2011.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 王培涛, 于福江, 赵联大, 等. 越洋海啸数值模拟及其对我国沿海的影响分析[J]. 海洋学报, 2012, 34(2): 39-47.
- [11] 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.
- [12] Wang X M. USER MANUAL FOR COMCOT VERSION 1.7[K]. Cornell University, 2009.
- [13] Wang X M, Liu P L F. An analysis of 2004 sumatra earthquake fault plane mechanisms and indian ocean tsunamis[J]. J Hydraulic Res, 2006, 44(2): 147-154.
- [14] Wang X M, Liu P L F. Numerical simulations of the 2004 indian ocean tsunamis coastal effects[J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2007, 1(3): 273-297.
- [15] Liu L F, Cho Y S, Yoon S B, et al. Numerical simulations of the 1960 Chilean tsunami propagation and inundation at Hilo, Hawaii[C]. // In Tsunami Progress in Prediction, Disaster Prevention and Warning, edited by Y. Tsuchiya and N. Shut o, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1995: 99-15.
- [16] 陈颢, 陈棋福, 张尉. 中国的海啸灾害[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(2): 1-6.
- [17] 郭彩玲, 王晓峰. 中国东部海域发生海啸的可能性分析[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(1): 7-11.
- [18] 潘文亮, 王盛安, 蔡树群. 南海潜在海啸灾害的数值模拟[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(6): 7-14.
- [19] 李伟, 朱元清, 王本龙, 等. 海啸在冲绳海槽和东海浅水大陆架地形上产生和传播的数值模拟[J]. 地震地磁观测与研究, 2007, 28(5):138-142.
- [20] Liu Y C, Santo S A, Wang S M, et al. Tsunami hazards along Chinese coast from potential earthquakes in South China Sea. Physics of the earth and planetary interiors[J].2007, 163(1-4): 233-244.

The hazards of tsunami disaster and tsunami early warning system of China: an interpretation of 2011 Pacific tsunami exercise

WANG Pei-Tao¹, ZHAO Lian-Da^{1,2}, HOU Jing-Ming¹, FAN Ting-Ting¹, GAO Yi²

(1.National Marine Environment Forecasting Center, Beijing 100081 China; 2.Key Laboratory of Research on Marine Hazards Forecasting,
State Oceanic Administration, Beijing 100081 China)

Abstract: Frequent tsunami disasters have already given rise to extensive attentions of international society since the new century. The coastal countries not only increased investment in the construction of tsunami early warning, tsunami hazard and tsunami foundation theory research, but also further promoted international exchanges and cooperation in response to the tsunami disasters. Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) of UNESCO hold a Pacific-wide tsunami warning and communication exercise on 9 and 10 November 2011, which was code-name 'Exercise Pacific Wave 11'. The purpose of the exercise were mainly to test tsunami early warning system validity of Pacific Country Tsunami Warning Focal Points, to improve the level of response to regional and local tsunamis effectively and promote exchanges and cooperation among national tsunami early warning center. The exercise is held just after eight months of Japan tsunami on 11th March 2011. The exercise has significance for urging Pacific countries to test tsunami warning system and assessing the tsunami risk. As a member of the IOC and the Pacific tsunami warning system, China organized and implemented the first time of tsunami evacuation drills. The aim of this paper is to re-analyze China's tsunami hazard and reappraise China's tsunami early warning system based on 'Exercise Pacific Wave 11' tsunami sources and numerical calculation for regional and local tsunami sources. This study will service as decision basis for tsunami disasters prevention and mitigation.

Key words: tsunami hazard; early warning system; Pacific tsunami exercise; numerical calculation