

海啸可视化仿真及灾害风险评估

解 翠¹, 寻锦锦¹, 周小伟¹, 董军宇¹

(1.中国海洋大学计算机科学与技术系, 山东 青岛 266100)

摘 要: 通过对中国南海潜在海啸事件进行有效地建模和可视化仿真, 模拟多种海啸发生、传播、淹没过程, 并统计海啸淹没的概率、程度和范围等信息。利用 GIS 分析和图像处理技术对研究区域的建筑物/重要设施的位置和功能类型等信息进行提取和分类, 再进行有效的人口分布建模和人员响应能力的易损性估计, 结合地理环境信息和历史灾害记录, 采用改进的风险评估方法, 不仅考虑遭受海啸袭击概率, 还考虑了淹没速度、深度及人口密度和疏散时间等因素, 基于决策树分类判别方法生成海啸风险图, 帮助找出易受灾的危险区进行早期预警, 辅助灾害管理和防灾减灾预案的制定。

关键词: 海啸; 可视化仿真; 风险评估; 人口分布建模

中图分类号: TP.391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 10-2567-07

The Visual Tsunami Simulation and Disaster Risk Assessment

Xie Cui¹, Xun Jinjin¹, Zhou Xiaowei¹, Dong Junyu¹

(1.Computer Science and Technology Department of Ocean University of China, Qingdao, 266100, China)

Abstract: Based on the effectively modeling and visual simulation of the potential tsunami event in the South China Sea, the tsunami generation, propagation, runup and inundation can be visually simulated with multiple scenarios. The inundation probability, the flood inundation area and degree are computed. The location and function of buildings/critical facilities in the study area are extracted and classified by GIS analysis and image processing technology. Then the population distribution is effectively modeled and the vulnerability of people response is estimated for risk assessment combining with the geographical information and the historical disasters record. This improved method considers the inundation probability of tsunami, the flood speed, depth, and other factors such as population density and available evacuation time etc. Finally, the tsunami risk map is generated based on the decision tree classification method, which helps find the high risk areas for early warning and assists in disaster management and disaster prevention and mitigation.

Key words: tsunami; visual simulation; risk assessment; population distribution modeling

引 言¹

海啸常常给人类带来巨大的灾难, 造成对生命

和财产的严重摧残, 如著名的 2004 年印度洋海啸和 2011 年日本的大海啸。从海啸的物理和发生条件分析, 菲律宾西侧的大地震、印度尼西亚巽他海峡的火山喷发以及中国南海的大型海底滑坡, 都可能导致海啸发生, 马尼拉海沟至少有四百多年没有发生强震, 巨大的压力正在累积也增加强震机率[1]。广东、海南、福建、香港和台湾等地区受灾风险大。



作者简介: 解翠 1(1977-), 女, 青岛, 博士, 讲师, 研究方向为可视化、分布交互仿真和虚拟现实; 寻锦锦 1(1990-)女, 济宁, 硕士, 研究方向为可视化仿真;
收稿日期: 2016-07-09 修回日期: xxxx-xx-xx
基金项目: 国家自然科学基金 (61271405, 41576011, 61401413); 中国海洋大学青年基金 (201213016)。

世界各国纷纷开展海啸的预报预警、灾害评估及防灾减灾应急预案的研究。美国于 2004 年就开展了印度洋上的区域性的海啸监测和警报系统的研究；日本花费了 2 亿多美元来布置 300 多个地震传感器并实时通过卫星传输信息到地震中心，以便协调疏散通告和发布地震海啸等相关的应急响应方案。我国在 1983 年加入太平洋海啸预警中心，重点在南海和台湾以东海域布设海啸检测浮标阵列等。目前南中国海沿岸的 9 个国家正共同建设“南中国海海啸预警系统”。由于建立和维护海洋监测站成本高昂，尤其是深水中监测设备的维护更加困难，因而将海啸监测和数值建模及仿真技术有机结合，构建一个有效的海啸灾害预警、灾害评估系统显得尤为关键和重要。

1 国内外相关研究

海啸的研究基础是构建科学有效的海啸数值模型[2]。典型的有美国国家海洋和大气局的 MOST (Method of Splitting Tsunami) 模型、美国康奈尔大学的 COMCOT (Cornell Multi-grid Coupled Tsunami model) 模型[3]、日本东北大学的 TUNAMI 模型、特拉华大学的 FUNWAVE/GEOWAVE 模型、中国国家海洋环境预报中心的 CTSU (China Tsunami Model) 数值模型等，不同的方法有它的适应环境和约束条件，多数的研究是针对建模的准确性、仿真的实时性和可视化等问题；其次，在海啸引发的洪水淹没的数值模拟基础上开展海啸灾害评估的研究[4-6]，如计算海啸波高、淹没范围、爬坡或到达时间及预测海啸人员伤亡等，以便获得足够周全的应急决策；另外也有进行重灾区识别、逃生疏散时间计算或者评估预警过程等的研究[7-8]。

总体来看，当前我国海洋灾害管理和防范体系仍在完善，且近场海啸的预警要比远洋海啸更困难，因此理解海啸的过程、预测和估计潜在海啸的

风险、开发降低海啸易发地区风险的有效策略成为有利的防灾减灾方法。为此本文利用海啸可视化仿真，模拟潜在海啸灾害情形，确定海啸可能侵袭的近海地区的范围和程度，并采用决策树分类方法进行风险评估，以辅助制定防灾减灾预案和降低海啸带来的危害。

2 海啸可视化仿真

我们的可视化仿真和灾害评估系统是基于 Visual Studio2010 和 Google Earth 在 Windows 平台下开发的。涉及到的数据包括：海啸仿真用到历史灾情数据（来自新闻报道）、数字高程数据和水深测量数据（下载自国家基础地理信息中心和美国地质调查局官网）；灾害评估用到人口普查数据（来自政府机构官网）和高分辨率的卫星遥感数据和街景数据（Google Earth）。本文的海啸可视化仿真系统包括：（1）海啸可视化仿真，基于水深和数字高程数据，采用 COMCOT 数值模型，对海啸发生传播和爬坡增水的过程进行 2D/3D 可视化仿真，估计出海啸传播到岸的时间以及预期的最早到达位置和进一步的洪水淹没范围和程度等信息；（2）结合地理信息、人口分布和历史灾情等数据，进行受灾区人口/关键设施及人员应急响应能力的易损性评估，最后生成相应的海啸灾害风险图，以便发布海啸预警信息和辅助制定防灾减灾措施。

本文利用美国 Cornell 大学研发的 COMCOT 数值仿真模型[3]，能较为精确的模拟地震、滑坡等不同原因导致的海啸过程（产生、传播和爬坡增水）。该模型是基于多层嵌套网格的有限差分模型，支持线性浅水波与非线性浅水波两种控制方程以及直角坐标与球坐标两种坐标系的选择，并成功模拟了 2004 年印度洋海啸[3]和 2006 年台湾南部 7.2 级地震产生海啸波的传播情况[9]。

（1）首先是确定仿真的研究区域。我们选择 3

层嵌套网格的研究区域。最外面的第一层网格分辨率 2 分、范围是 $18^{\circ}\sim 33^{\circ}\text{N}$, $113^{\circ}\sim 128^{\circ}\text{E}$, 采用球坐标线性浅水波方程、无底摩擦力; 第二层网格分辨率 1 分、范围 $20^{\circ}\sim 28^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\sim 123^{\circ}\text{E}$, 采用球坐标非线性方程、无底摩擦力; 第三层网格分辨率 6 秒、范围 $23.6^{\circ}\sim 24.5^{\circ}\text{N}$, $117.4^{\circ}\sim 118.4^{\circ}\text{E}$, 采用直角坐标非线性方程、有底摩擦力系数设为 0.002。

(2) 设置引发海啸的相关参数。地震海啸的模拟, 需设置各种可能的震源位置、震级大小和断层模型参数等。以 2006 年 12 月 26 日台湾南部发生的 7.2 级(台湾地震台网测得为里氏 6.7 级)地震引发海啸的模拟为例。依据 Harvard Centroid-Moment-Tensor (CMT) 地震目录, 其 9 个海啸源参数设置如下: 震中经度 120.534°E 、纬度 21.818°N 、震源深度 19.6km、走向角 165° 、滑移角 -76° 、倾角 30° 、断裂面长度 46.05km、断裂面宽度 23.025km、错移量 2.2256m, 这 9 个参数直接影响海啸引发的初始水位和海啸的波高、波长及能量信息。

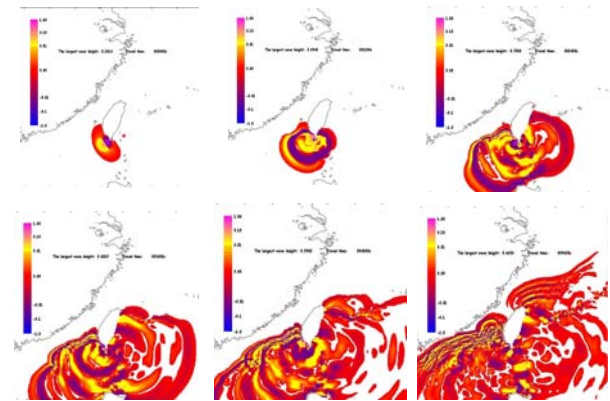


图 1 二维海啸可视化仿真

(3) 模拟海啸过程及结果的可视化。基于 COMCOT 解算可获得每分钟的海啸波高波速等信息, 利用颜色映射和动画技术, 分别给出图 1 和图 2 的 2D 和 3D 海啸波在不同时间的波高分布图。海啸爬坡波高减去当地的地理海拔高度即为某地点的淹

没高度, 淹没高度和预计最早达到时间 (Expected Time of Arrival, ETA) 都被统计下来用于风险评估。

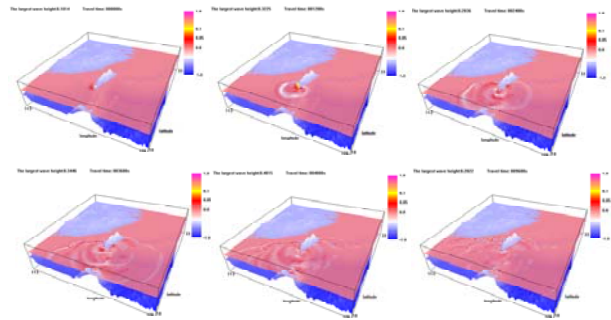


图 2 三维海啸可视化仿真

3 海啸灾害风险评估

3.1 海啸淹没危险分析

(1) 淹没概率的估计。统计不同参数设置下的多次情景模拟时某地点被淹没的频率, 确定出某地点被淹没的概率, 概率高则被淹没的风险也高。

(2) 海啸淹没危险估计。根据 2010 年 12 月国海预字〔2010〕835 号文关于海啸灾害应急响应标准的规定, 波高介于 0.5m-1.0m 是一般预警, 1.0m-2.0m 是中等危险预警, 大于 2m 是大海啸预警。因而, 设定某地点淹没的水深深度大于 0.5m 为淹没状态。统计某地多次仿真的淹没高度的均值, 再结合其淹没概率可初步估计危险性, 淹没概率高且淹没水深也高的地区, 危险越大。提前获得这些信息可有效的辅助制定疏散规划方案。

3.2 易损性评估与分析

易损性评估主要考虑海啸受灾区的人口和重要设施遭受海啸袭击的脆弱程度。人口分布、关键设施的位置和功能以及建筑物的位置和类型等相关信息的可靠性和准确程度直接影响易损性评估结果。

3.2.1 人口分布建模

人口普查数据只是针对某个地区的总体人口的

统计，为了确定该地区内部各街区级别更具体的人口分布情况，我们选取了厦门市范围为 24°28'~24°31'N，118°10'~118°13'E 的一个局部区域图 3（A）为例，介绍我们的人口建模方法。

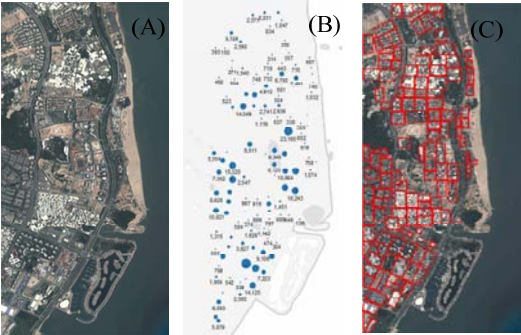


图 3 (A) 研究区域 (B) 为人口分布统计 (C) 关键设施分布图

（1）基于高分辨率遥感数据、街景数据和现场评估和分析，利用 GIS 分析和图像处理技术提取出建筑物的功能（学校、商场等）和属性（位置、建筑物的几何和结构参数），如图 3（C）给出了研究区域的关键设施分布图；（2）然后根据不同建筑物功能类型区的人均面积和建筑总面积，将某地区的人口统计数据根据公式 1 分配指派到各个建筑区域单元（参见公式 1），来估算人口分布（如图 3（B）所示）。（3）结合上下班时段的人员流通情况，建立白天和夜晚两种不同的人口分布模型[4]，这种动态人口估计，更有利于反应人口在不同时间的分布。

$$P_i = C_i \times \frac{Scale \times A}{A_{ave}} \times \frac{H}{H_f} \tag{1}$$

其中： P_i 为某小区人口数量， i 等于 1 和 2 分别表示白天和晚上，小区的平面总面积为 A 和人均占用面积为 A_{ave} （单位都为 m^2 ），小区楼房的使用率为 C_i （单位为%），楼房总高度为 H （m）和楼房的层数为 H_f 。需要说明的是：不同功能类型区的人员正常生存所需的人均面积是不同的，白天和夜晚不同功能类型区楼房的使用率 C_i 也不同（设晚上居民

区的使用率为 100%、白天的使用率为 40%，即有一少半的人在家）（具体设置见表 1）。另外，考虑到我们获得的小区总面积数据 A 不只是楼房的面积，还包括楼房之间的道路、绿化的面积。根据国家《城市居住区规划设计规范》，我们增加了修正因子 $Scale$ （为楼房面积占“小区”总面积的比例），称为“占用率”，单位为百分数（%）：

表 1 人口分布模型参数

功 能 类型 项目	居 民 区 0	学 校 1	商 场 2	公 园 3	医 院 4	宾 馆 5	工 厂 6	办公 场所 7
A_{ave}	32	4	1	9	12	6	20	8
$Scale$	63	40	80	80	80	80	80	80
C_1	50	110	35	60	70	50	100	100
C_2	100	0	0	0	50	80	0	0

从厦门市统计局获悉，2014 年厦门总面积 1573.16 km^2 内常住人口已达到 381 万，人口密度约为 2422/ km^2 ，岛内人口密度更高。根据图 3 所示的地区占厦门总面积的比值及人口分布估算来看，本文估算人口分布跟官方公布数据是基本相符的（如图 3（B）所示），该研究区的总人数估计为 226479 人。值得注意的是：动态人口分布信息估算的准确性会影响受灾人数和灾害程度评估的质量。

3.2.2 建筑物和关键设施的易损性估计

建筑物的种类和分布对于灾害和易损性评估都很重要。如建筑物的位置、高度等信息及建筑物的功能和属性（含结构材料和抗灾等级）直接影响到其灾害危险级别和其易损性估计。对于结构不稳固、抗灾等级低且淹没概率高的建筑物均不选为避难所[4]。关键设施的易损性是和受灾人员的易损性估计密不可分的，某关键设施是否适合作为避难所以及其容纳力大小直接影响到该地区人员的逃生成功率。容纳力 Cap 的估算公式如下：

$$Cap = (w \times A_f \times n) / A_{ave} \tag{2}$$

其中， w 为避难所的可用空间比率， A_f 为楼层

的面积， n 为层数， A_{ave} 是人均占用面积。

3.2.3 响应能力评估与分析

如图 4 所示从监测出海啸发生到发布海啸预警，再到人们收到预警信息并进行反应和开始行动的这一段时间称为响应时间；海啸波从震源位置传播到岸所需的预计到达时间（ETA）为疏散总时间，两者之差就是人们可利用的疏散时间。响应时间长度只能估计，“海啸监测和预警发布”时间受传感器和监测设备性能和数据通信效率及预警机构决策效率的影响，“预警接收”时间受预警信号传输到警报装置的效率影响；“人群响应”时间是指人们收到警报开始进行分析并做出撤离与否的决定时间。疏散时间是指待疏散人员从所在地到避难所的最快撤离路线的选择和时间花费的估计。可见，海啸发生后人员是否能够及时疏散与响应时间有着十分重要的联系，如果人们的响应时间大于 ETA，则意味着人们没有足够的时间撤离到安全区，最有可能遭受海啸袭击，易损性也大。

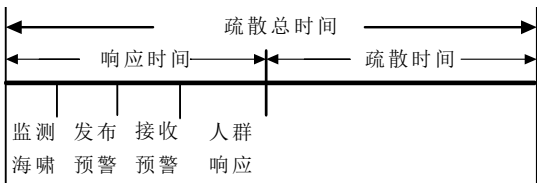


图 4 疏散总时间示意图

利用 COMCOT 模拟台湾南部（21°49'04"N，120°32'02"E）发生的 7.2 级地震的结果显示，福建地区在地震发生大约 10740 秒（约为 179 分钟）海啸波在东山站的解算波高为 3.68cm，这跟《台湾南部近海 7.2 级地震海啸第四号情况通报》的地震发生后 3 小时 16 分东山站监测到了海啸波波高 4cm 基本一致。此次地震造成 3 人死 47 人伤和海底光缆受损，但由于此次海啸引起的最大波高增水在我国沿海很小，因而并没造成淹没灾害。但基于已有的历史地震和灾害数据，我们可以预先模拟更大的地震

海啸并合理估计其风险程度和制定防灾减灾预案。

3.3 海啸综合风险评估

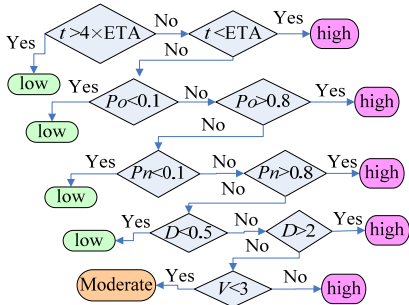


图 5 海啸风险分类决策树

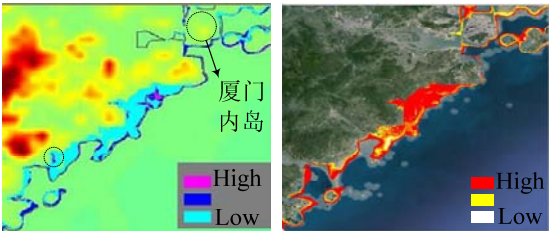


图 6 海啸综合评估风险图。（A）我们的方法；（B）文献[5]的方法

这里风险评估是综合考虑了淹没受灾情况和易损性评估的结果。在淹没危险分析中，我们获得了受灾区域淹没危险状况及其遭受海啸袭击的概率；在易损性评估中，我们考虑人口分布和人员响应能力等因素，由于关键设施相关的抗灾等级、材料结构等信息获取不全，关键设施易损性我们只考虑其淹没受灾程度对人员产生的威胁。具体的风险评估是采用如图 5 所示的决策树分类判断方法实现的。这里的淹没受灾程度除了考虑遭受海啸袭击的概率 Po （[0,1]）外，还考虑了淹没速度 V （单位 m/s）、最大淹没深度 D （单位 m）；易损性综合考虑了人口相对密度 Pn （[0,1]）和疏散所需时间 t （单位 s）及预计最早到达时间（ETA）等因素。所有计算均归一化到[0,1]区间，并基于风险数值高低，采用颜色映射方法生成低、中、高三类风险分布图。我们

修改震源位置、震级和断层模型参数模拟台湾南部发生不同的大地震引发海啸的情形，并生成图 6（A）所示的风险图。

跟已有的基于 GIS 的风险评估方法[5]不同，它们只考虑了淹没深度及人口和土地利用的易损性生成海啸风险图，文献[5]的方法在图 6（B）的中部会出现一大片高风险区，而我们的只用紫色标出了一小片高风险区，经对照和查验高分辨率遥感地图和数字高程数据发现，这里的岸边有一海湾区且周边地势较低，由于浪流的汇聚作用会增加此处的高风险度，但离湾区远的地势高的地点和离岸近的地势低的地点的风险差异在图 6（B）中这一部分未区分出来，可见仅考虑淹没深度容易产生不准确的风险估计。同时，我们的风险图中左下方远离海岸的位置有一处高风险区（椭圆所示），经查验高分辨率遥感地图和数字高程数据发现这里是水库等地势低洼地区，海啸波增水淹没导致的危险会增加是合理的。跟文献[6]的方法相比，我们的方法考虑了更多的影响因素且更加细化了风险评估的量化方法。由于可利用数据的质量、不同的仿真参数和风险因子阈值设置均会影响最终生成的风险图，我们接下来会开展更多实验进一步优化我们的风险评估方法。

海啸风险图提供了沿海地区遭受海啸灾害的整体风险的概况，方便识别具有遭受海啸袭击概率较高的和人员疏散能力较低的高风险区，并优先考虑这些地区的早期预警和疏散规划或规划额外的垂向疏散避难所及制定优先开展紧急救援等措施。

4 结论与展望

本文综合考虑海啸袭击概率、淹没深度和淹没速度等受灾情况以及受灾人口分布、人员响应和疏散时间等因素，采用决策树分类方法实现海啸风险评估，并结合可视化技术展示海啸及灾害的分析结果，为管理者提供了有用的信息来进行应急预案的

制定和实施社区级的海啸风险和逃生知识普及教育。将来的研究主要是：（1）风险评估考虑更多的影响因素，如建筑物结构材料和抗灾等级、避难所的位置及容纳力、土地利用和收入统计数据等，以改进易损性评估和风险评估的模型，并结合更多实验来优化我们的方法；（2）同时要提高人口建模的精度以提升灾情估计精度和灾害管理的有效性。

参考文献：

- [1] 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* (s0031-9201), 2007, 163(1-4):233-244.
- [2] Tkalic P, Dao M H. Tsunami propagation modeling - a sensitivity study[J]. *Natural Hazards & Earth System Sciences* (s1561-8633), 2007, 7(6):741-754.
- [3] Wang X M, P L-F Liu. An analysis of 2004 Sumatra earthquake fault plane mechanisms and Indian Ocean tsunami[J]. *Journal of Hydraulic Research* (s0022-1686), 2006, 44(2): 147-154.
- [4] Freire S, Aubrecht C, Wegscheider S. Advancing tsunami risk assessment by improving spatio-temporal population exposure and evacuation modeling[J]. *Natural Hazards* (s0921-030X), 2013, 68(3):1311-1324.
- [5] Wijesundara W A A P. GIS Based Tsunami Risk Assessment in Weligama, Sri Lanka[J]. *Universal Journal of Geoscience* (s 2331-9593), 2014.
- [6] Strunz G, Post J, Zosseder K, et al. Tsunami risk assessment in Indonesia[J]. *Natural Hazards & Earth System Science* (s1561-8633), 2011, 11(1):67-82.
- [7] González-Riancho P, Aguirre-Ayerbe I, Aniel-Quiroga I, et al. Tsunami evacuation modelling as a tool for risk management: application to the coastal area of El Salvador[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences* (s1561-8633), 2013, 13(12): 3249-3270.
- [8] Dewi, R.S., A-gis Based Approach of Evacuation Model for Tsunami Risk Reduction[J]. *IDRiM Journal* (s2185-8322), 2012, 2(2).
- [9] 潘文亮, 王盛安. COMCOT 数值模式的介绍和应用[J]. *海洋预报*, 2009, 26(3): 45-52.