

文章编号: 1004-4574(2007) 02- 0001- 06

## 中国的海啸灾害

陈 颢<sup>1</sup>, 陈棋福<sup>1</sup>, 张 尉<sup>2, 1</sup>

( 1 中国地震局 地震预测研究所, 北京 100036 2 浙江大学 地球科学系, 浙江 杭州 310027)

摘要: 从海啸的物理和发生条件分析了中国海啸的危险性: 渤海、黄海和东海发生本地海啸的可能性很小; 中国东部沿海受来自太平洋方面海啸的影响也很小; 对中国东南沿海有较大影响的海啸发源地主要在南方, 它们是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。虽然中国的海岸受海啸影响的可能性不大, 但对于浪高 5 m 的 2 级海啸而言, 受到威胁的沿海地区的 GDP 占全国近 1/4。从成灾的角度来看, 小海啸大灾难的情况是有可能的。

关键词: 海啸; 灾害; 海啸等级

中图分类号: X4 P731. 25 文献标识码: A

## Tsunami disaster in China

CHEN Yong<sup>1</sup>, CHEN Qi-fu<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>2, 1</sup>

(1. Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

2. Department of Earth Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract** Tsunami disaster and its risk in China are analyzed from its physical property and occurring conditions. The probability of tsunami taking place in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea is small and tsunami of Pacific Ocean has slight influence upon East coast of China. But tsunami generated southward could influence southeast coast of China widely. The potential sources of tsunami are large earthquakes in western Philippines, volcanic eruptions in Sunda Strait of Indonesia and large submarine landslides in the South China Sea. Although the possibility of tsunami impact on the coast of China are small, the magnitude of  $m = 2$  of tsunami with wave height of 5 meters would threaten the coastal areas that contribute to 25% GDP of the whole China mainland. In the view of hazard, it is possible to have small tsunami accompanied with large disaster.

**Key words** tsunami; disaster; tsunami magnitude

海啸的英文词“Tsunami”来自日文(“tsu”——表示港湾,“nam i”——表示波浪),是港湾中的波的意思。多数海水中的波都是表面波(声波除外)。海水质点运动在海面最大,向下运动越来越小。运动随深度衰减,在很大程度上取决于波长,一般来说,在深度为  $h$  的质点运动幅度  $A(h)$  与海面上的运动幅度  $A_0$  之间存在指数关系:

$$A(h) = A_0 e^{-h/\lambda} \quad (1)$$

式(1)中  $\lambda$  是海水表面运动的波长。在深度  $h$  为 1 个波长处,海水运动的振幅为海面上振幅的  $1/e$  (约为  $1/3$ ), 在 2 个波长深处的振幅为海面振幅的  $1/e^2$  (约为  $1/7$ ), 在 3 个波长深处的振幅为海面振幅的  $1/e^3$  (约

收稿日期: 2007- 01- 16 修订日期: 2007- 03- 10

基金项目: 国家社会公益研究专项项目(2005DIA3J117)

作者简介: 陈颢(1942-),男,中国科学院院士,研究员,主要从事地震学研究。E-mail yongcher@seis.ac.cn

为 1/20)。由此看来,海水运动随深度衰减得非常快,在海面下 3 个波长的深度,运动幅度只有海面上的 1/20,人们常说,海底永远是平静的,就是这个道理。值得注意的是,对于运动随深度衰减来说,波长是一把非常重要的尺子,对小波长(例如几米)的运动,海水的运动基本上局限在海面附近,深处的海水几乎不运动;而对大波长(例如几公里或几十公里)的运动,海面以下的海水几乎都发生了整体性的运动。由此可见在确定海水运动时,波长是一个非常重要的参数。

2004年 12月 26日, Jason 1号测高卫星在印尼苏门答腊  $M_w$  9.3 级地震发生后的 2 h 沿 129 轨道由南向北穿过印度洋,这时苏门答腊  $M_w$  9.3 级地震引发的海啸波正好在印度洋上传播。测高卫星可以测得卫星正下方约 5 km 直径区域的海面的高度变化,精度为厘米级。十分难得的是,在这样凑巧的时间和凑巧的地点,在海啸波上方运行的 Jason 1号测高卫星测量到了海啸波传播时的海面变化<sup>[1]</sup>。发现:海啸波的波长约为 500 km。

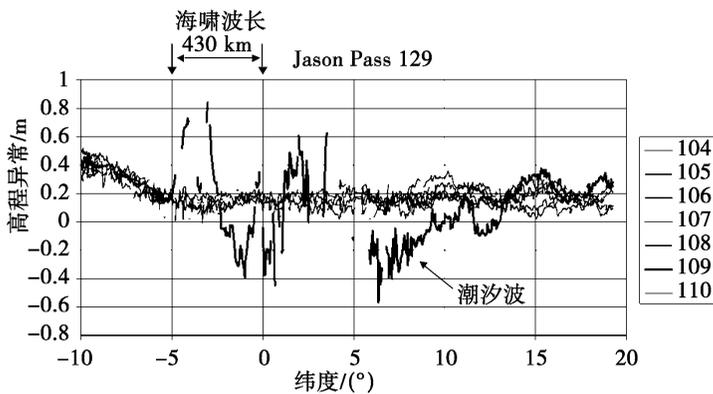


图 1 Jason 1号测高卫星沿着印度洋上空的 129 轨道测出了苏门答腊地震后印度洋海面的高程变化<sup>[1]</sup>。沿轨道飞行的第 104- 108 次是地震发生之前的测量结果。第 109 次测量正好赶上海啸波的传播(地震后约 2 小时),第 110 次是在海啸波已经传播结束时的结果。从第 109 次测量结果可以看出:在 - 5° 到 + 5° 的纬度范围内,海啸波造成的海面高程最大变化约为 0.6 m,海啸波的波长约为 500 km。

Fig. 1 Plot of sea surface height anomalies on pass 129 by Jason - 1 altimeter satellite after Sumatra Earthquake<sup>[1]</sup>. The pass in cycles from 104 to 108 shows the profile of the tsunami wave obtained before the earthquake. Cycle 109 meets with tsunami wave about 2 hours after the earthquake. Cycle 110 gives results when propagation of tsunami wave has finished. It can be seen from results of Cycle 109 that variation of sea surface height caused by tsunami wave is about 0.6 m and tsunami wavelength is about 500 km in the range of - 5° to + 5° latitude.

如用  $H$  代表海水的深度,  $\lambda$  代表波长,当  $\lambda \gg H$  时,这种非常长的波长的重力波在流体力学有专门的名词,叫做浅水波。海啸就是海洋中的浅水波。

浅水波之所以被重视,是因为它有两个非常显著的特点。第一,所有的波动都包含多种频率的震动,不同频率的波动传播速度不同,这叫做色散,因此,传播过程中波的形状会不断地改变。但是,浅水波没有色散,所有频率的波都传播得一样快,传播时形状不会改变;第二,浅水波传播的速度只与海水深度有关,海水越深,传播得越快,如用  $v$  表示浅水波的传播速度,用  $g$  表示重力加速度,则有<sup>[2]</sup>:

$$v = \sqrt{gH} \tag{2}$$

对比海面波浪、风暴潮,海啸最重要的物理特点就是波长长。它不仅比海面波浪、风暴潮的波长要长得多,比海水的深度也要大得多<sup>[3]</sup>。由海啸波速度传播式(2)可见,波长长的波传播得快。以太平洋海水平均深 5 500 m 为例,由(2)式计算得到海啸波速度为 835 km/h。这正是越洋波音 747 飞机的速度。水面波传播速度较慢,风暴潮要快一些,但最快的台风速度也只有 300 km/h 左右,比起海啸还要慢得多。海啸的周期可达 1 h,其波长极长,可达几百公里,在其几百公里的一个波长内,海面波浪很小,风平浪静,对航行的船只影

响很小。一旦海啸接近海岸, 海岸附近海水深度较浅, 由于海啸波的传播速度与海水深度的平方根有关, 其传播速度降低到每小时几十公里, 前进受到阻挡, 就会形成十几米甚至几十米的浪高, 冲向陆地。风暴潮在海面上运动时, 常伴随狂风、暴雨和巨浪, 冲到陆地后仍然保持狂风和暴雨。但海啸波一旦从深海到达岸边, 其全部的巨大能量, 将变为巨大的破坏力量, 摧毁一切可以摧毁的东西, 造成巨大的灾难。

## 1 地震海啸的产生条件

从海啸的物理分析可知, 地震海啸的产生需要满足 3 个条件: 深海、大地震和开阔逐渐变浅的海岸条件<sup>[5-6]</sup>, 下面分别加以说明。

**深海:** 地震释放的能量要变为巨大水体的波动能量, 地震必须发生在深海, 只有在深海海底上面才有巨大的水体。发生在浅海的地震产生不了海啸。

**大地震:** 要产生非常长的波长的海啸波, 必须有一个力源作用在海底, 这个力源的尺度要和海啸波的波长相当, 在它的整体作用下, 才有可能产生海啸。因此, 只有 7 级以上的大地震才能产生海啸灾害, 小地震产生的海啸形不成灾害。太平洋海啸预警中心发布海啸警报的必要条件是: 地震必须发生在深海, 震源深度 < 60 km, 同时地震的震级 > 7.8 级, 这从另一个角度说明了海啸灾害都是深海大地震造成的。值得指出的是: 海洋中经常发生大地震, 但并不是所有的深海大地震都产生海啸, 只有那些海底发生激烈的上下方向位移的地震才产生海啸。

**开阔逐渐变浅的海岸条件:** 海啸要在陆地海岸带造成灾害, 该海岸必须开阔, 具备逐渐变浅的条件。1960 年智利地震海啸和 2004 年印尼地震海啸, 破坏最严重的地方, 大多数都是在海底地形由深逐渐变浅的海湾。有些地方, 距离地震震中很近, 但这些地方附近的海底地形陡峭, 海啸造成的灾害却不大。说明海岸条件对灾害影响的最好例子见图 2 当海啸波在深海快速传播时, 海底地形没有明显变化时, 在一个波长的范围 (500 km) 内, 海啸波造成的海面高程最大变化只有 0.6 m, 也就是说, 整个海面平静如镜, 根本没有任何灾害。

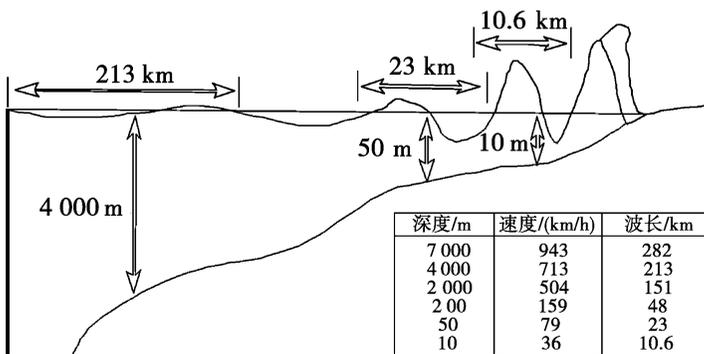


图 2 在深海, 海啸的波长很长, 速度快。当海啸波传播到近岸浅水水域时, 波长变短, 速度减慢<sup>[4]</sup>。海啸波在大洋中传播时, 波高不到 1m, 不会造成灾害, 但进入浅海后, 因海水深度急剧变浅, 前面的海水波速减慢, 后面的高速海水向前涌, 就像无数汽车发生不断的追尾一样, 结果波高急剧增加, 最大波高可达几十米, 这种几层甚至十几层楼高的“水墙”冲向海岸, 仿佛像用剃头刀剃头一样, 扫平岸边的所有房屋、建筑、树木、道路、堤防和人畜等, 留下光秃秃的地面, 破坏力极大。

Fig 2 Tsunami has long wavelength and high speed in deep sea however when it propagates to offshore areas its wavelength is shorten and speed is reduced<sup>[4]</sup>. When tsunami wave propagates in deep oceans its wave height is less than 1m that couldn't cause damage. But when the tsunami reaches shallower coastal waters as the sea depth decreases sharply the front seawater slows down and post seawater surges forward with high velocity as if thousands of cars came into rear-end collision. As a result wave height increases rapidly and the maximal wave height can reach to tens of meters. This high "water wall" rush at seacoast. With its great destructive power, all the houses, buildings, trees, streets, dikes, human and animals are razed to ground. It seems like shaving head clearly by barber knife.

## 2 中国的海啸

中国处于太平洋的西部, 有很长的海岸线, 中国受海啸的影响大不大? 中国的海啸灾害严重不严重?

一般来说, 历史记录为灾害的统计提供了宝贵的资料。中国历史上曾有过海啸的灾害记录, 最严重的一次发生在 1781 年的凤山县 (今高雄市), 史书记载“乾隆四十六年四、五月间, 时甚晴霁, 忽海水暴吼如雷, 巨涌排空, 水涨数十丈, 近村人居被淹……不数刻, 水暴退……”。还有 1867 年台湾基隆北的海中发生 7 级地震引起海啸的记载。历史记录中虽有多次“海水溢”的现象, 但经常把海啸与风暴潮相互混在一起, 历史记录大部分的“海水溢”现象, 多是风暴潮引起的近海海面变化, 而不是海啸。值得指出的是, 1604 年福建泉州海域发生的 7.5 级地震和 1918 年广东南澳近海发生的 7.3 级地震, 都是发生在海洋中的大地震, 但都没有见到海啸的记载。近年来, 许多学者发现, 从历史记录中寻找中国的海啸资料, 并不是一件容易的事情。

下面我们从海啸的物理和产生海啸的条件, 来研究中国的近海产生海啸的可能性。

中国的近海, 渤海平均深度约为 20 m, 黄海平均深度约为 40 m, 东海约为 340 m, 它们的深度都不大, 只有南海平均深度为 1 200 m。因此, 大部分海域地震产生本地海啸的可能性比较小, 只是在南海和东海的个别地方发生特大地震, 才有可能产生海啸<sup>[7]</sup>。

再来看看太平洋地震产生的远洋海啸对中国海岸的影响。亚洲东部有一系列的岛弧, 从北往南有堪察加半岛、千岛群岛、日本列岛、琉球群岛, 直到菲律宾。这一系列的天然岛弧屏蔽了中国的大部分海岸线; 另一方面, 中国的海域大部是浅水大陆架地带, 向外延伸远, 海底地形平缓而开阔, 不象印尼地震海啸影响的许多地区那样, 海底逐渐由深变浅, 中间没有一个平缓的缓冲带。因此, 中国受太平洋方向来的海啸袭击的可能性不大。1960 年智利  $M_w 9.5$  级大地震产生的海啸, 对菲律宾、日本等地造成巨大的灾害, 但传到中国的东海, 在上海附近的吴淞验潮站, 浪高只有 15~20 cm, 没有造成灾害。

由于中国近海产生海啸的可能性很小, 且中国受太平洋方向来的海啸袭击的可能性也不大, 故影响中国的海啸威胁, 主要来自南方。

海啸产生的根本原因是海底在一瞬间突然发生了大量固态物质运动, 造成它上部的海水向外运动。而海底的大量固态物质运动要发生突然运动, 主要可能源自 3 种方式:

- (1) 海底大地震的发生;
- (2) 大型的海底火山喷发;
- (3) 海底大型滑波。

下面具体分析一下可能对中国东南沿海有影响的海啸的发源地。

地震: 由图 4 可见, 中国南方海域容易发生大地震或特大地震的地区集中在菲律宾和印度尼西亚地区。但绝大部分地震震中和中国大陆之间都存在有岛弧, 即使地震产生海啸, 也很难影响中国大陆。惟独菲律宾西侧的地震直接面向中国, 这是第一个可能产生海啸的发源地。

火山: 菲律宾和印度尼西亚是火山极为活跃地区 (见图 5 的三角形所示)。和地震的情况相类似, 绝大多数火山被岛弧隔开, 在岛弧背向中国大陆的一侧。但岛弧链在印度尼西亚的巽他处, 被巽他海峡 (Sunda Strait) 所中断。而巽他海峡是整个岛链火山活动最为激烈的地区, 也是世界上火山最为活动的地区, 如果产生海啸, 海啸波可以无阻挡地传播到中国沿海。

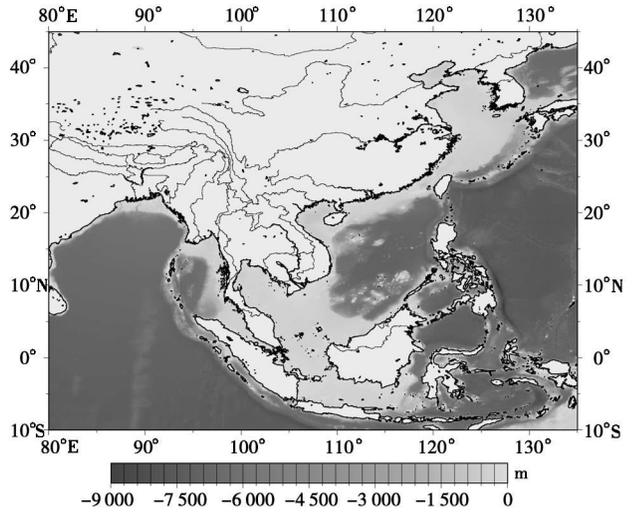


图 3 中国近海海底地形图 (大陆地形未在此图表现)  
Fig 3 Submarine topography of offshore China  
(the topography of continent is not shown in the map)

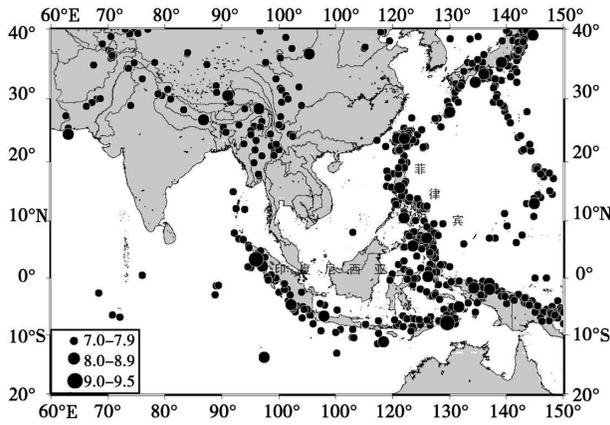


图 4 1900年 1月 1日到 2006年 12月 31日 7级以上的地震事件 (数据引自 Engdahl<sup>[8]</sup>和 IRIS<sup>[9]</sup>)

Fig 4 Distribution of earthquake with magnitude  $M < 7$  from Jan 1, 1900 to Dec 31 2006 ( data from Engdahl<sup>[8]</sup> and IRIS<sup>[9]</sup> )

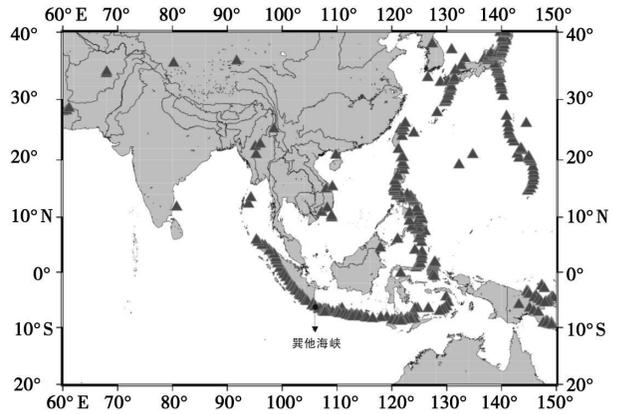


图 5 火山分布图 (数据引自 SF<sup>[10]</sup>)

Fig 5 Distribution of volcanoes ( data from SF<sup>[10]</sup> )

海底滑坡: 仔细观察海底地形图 (图 3), 就会发现, 中国南海海底地形有非常陡峭的起伏, 深处可达几千米, 浅处只有几十米。这个特点当你观察世界海底地图时就会显得格外明显, 这样的地形存在着发生大型海底滑坡的可能性, 是可能影响中国海啸的发源地。

### 3 中国海啸的危害性

海啸的浪高是其最重要的特征。我们经常以在海岸上观测到的海啸浪高的对数作为海啸大小的度量, 叫做海啸的等级 (tsunami magnitude)。如果用  $H$  (单位为  $m$ ) 代表海啸的浪高, 则海啸的等级  $m$  为

$$m = \log_2 H^{[11]} \quad (3)$$

各种不同震级的地震产生的海啸高度见表 1:

表 1 地震震级、海啸等级和海啸浪高的关系

Table 1 Relations of earthquake magnitude tsunami magnitude and tsunami wave height

地震震级	6	6.5	7	7.5	8	8.5	8.75
产生海啸的等级	-2	-1	0	1	2	4	5
可能海啸的最大高度 /m	<< 0.3	0.5-0.7	1.0-1.5	2-3	4-6	16-24	>> 24

应用 GIS 技术和关于人口和 GDP 分布的数据库, 可以按照不同等级的海啸高度, 计算出在不同海啸情况下中国沿海地区 (包括海南岛) 受灾的人口总数及分布, 受灾的 GDP 总量及分布。

我们利用 1:100 万的数字高程地图 (DEM) 和世界银行公布的 2004 年中国各省的 GDP 数值, 并采用世界人口组织公布的 2002 年  $5' \times 5'$  的人口分布作为权重, 计算得到在中国沿海地区海拔 5m (2 级海啸) 区域的 GDP。初步统计表明, 中国沿海海拔 5m 区域内有全国近 1/4 的 GDP 可能遭受海啸的灾害影响。

上述分析表明, 可能影响中国东南沿海的海啸发源地主要有: 菲律宾西侧的地震、巽他海峡的火山和南海的滑波。

虽然中国的海岸受海啸的影响不大, 但中国东部的海岸地区地势较低, 许多地区, 特别是许多经济发达的沿海大城市只高出海平面几米, 受海浪的浪高影响极大。从成灾的角度来看, 小海啸大灾难的情况完全是有可能的, 绝不可以掉以轻心<sup>[12]</sup>。一定要有忧患意识, 做好灾害预防工作。

致谢: 林间博士对本文写作, 提出了许多关键性的建议, 特此感谢。

## 参考文献:

- [ 1 ] Gover J. Jason 1 Detects the 26 December 2004 Tsunami [ J ]. EOS, 2005, 86( 4 ): 37- 38.
- [ 2 ] Stevenson D. Tsunamis and earthquakes - what physics is interesting? [ J ]. Physics Today, 2005, 58( 6 ): 10- 11.
- [ 3 ] Taniguchi Y, Seno T. Detailed analysis of tsunami waveforms generated by the 1946 Aleutian tsunami earthquake [ J ]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2001, 1: 171- 175.
- [ 4 ] NOAA, DC, ITC, LDG. Tsunami - the great waves [ EB/OL ]. [http://www.oesd.noaa.gov/TERK/tsunami/ready\\_education/greatwaves\\_en\\_2002.pdf](http://www.oesd.noaa.gov/TERK/tsunami/ready_education/greatwaves_en_2002.pdf), 2007- 01- 14.
- [ 5 ] 陈颢. 海啸的成因与预警系统 [ J ]. 自然杂志, 2005, 27( 1 ): 4- 7.
- [ 6 ] 陈颢. 海啸的物理 [ J ]. 物理, 2005, 34( 3 ): 171- 175.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] Engdahl E R, Villasenor A. Global seismicity 1900- 1999 [ C ] // Lee W H K, Kanamori H, Jennings P C, et al. International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. Amsterdam: Academic Press, 2002, 665- 690.
- [ 9 ] IRIS. Event Search [ EB/OL ]. <http://www.iris.edu/quakes/eventsrch.htm>, 2007- 02- 3.
- [ 10 ] SI Global Volcano Lists [ EB/OL ]. [http://www.volcano.si.edu/world/find\\_regions.cfm](http://www.volcano.si.edu/world/find_regions.cfm), 2007- 01- 14.
- [ 11 ] Camilleri D H. Tsunami construction risks in the Mediterranean - outlining Malta's Scenario [ J ]. Disaster Prevention and Management, 2006, 15( 1 ): 146- 162.
- [ 12 ] 陈颢, 陈棋福. 印尼地震海啸及其相关的地球物理现象 [ J ]. 地球物理学进展, 2005, 20( 1 ): 112- 117.