

海啸的物理*

陈颢†

(中国地震局地球物理研究所 北京 100081)

摘要 地震海啸的产生是地球表面固体层和流体层相互作用的结果. 文章介绍了这种相互作用的物理过程, 讨论了海啸的大小、能量、传播速度. 指出, 建立早期预警系统是减少海啸灾害的重要措施, 目前的预警系统虚报率很高的问题, 仍需要通过加强地球表层系统相互作用的研究来解决.

关键词 地震, 海啸, 灾害

Earthquake-generated tsunamis : their physics , monitoring and warning

CHEN Yong†

(Institute of Geophysics , China Earthquake Administration , Beijing 100081 , China)

Abstract An earthquake-generated tsunami results from the interaction between the solid layer (lithosphere or crust) and the liquid layer (ocean) near the surface of the Earth. This article introduces the physics of such an interaction , discussing the size , energy , and propagation of earthquake-generated tsunamis. It is pointed out that one of the most important countermeasures for the prevention and mitigation of tsunami disasters is to establish a tsunami early warning system. The present problem that there are too many false alarms should be solved based on the understanding of the inter-layer interaction near the Earth's surface.

Key words earthquake , earthquake generated tsunami , disaster

1 什么是海啸?

海底的地震和火山喷发, 可能引起海水中形成巨大的海浪, 并向外传播, 这就是海啸. 海啸的英文词“Tsunami”来自日文, 是港湾中的波的意思.

海啸的产生需要满足 3 个条件, 缺一不可: 深海、大地震和开阔逐渐变浅的海岸条件, 下面分别加以说明.

(1) 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. 浅海地震产生不了海啸;

(2) 大地震: 海啸的浪高是海啸的最重要的特征. 我们经常用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 (magni-

tude). 如果用 H (单位为 m) 代表海啸的浪高, 则海啸的等级 m 为

$$m = \log_2 H.$$

各种不同震级的地震产生的海啸高度见表 1. 这是从全球近百年资料得到的经验关系. 从表 1 可以看出, 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. 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的位移的地震才产生海啸;

(3) 开阔逐渐变浅的海岸条件: 尽管海啸是由海底的地震和火山喷发引起的, 但海啸的大小并不完全由地震和火山的大小决定. 海啸的大小是由多

* 2005-01-12 收到

† Email yongchen@seis.ac.cn

表1 各种不同震级的地震产生的海啸高度

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

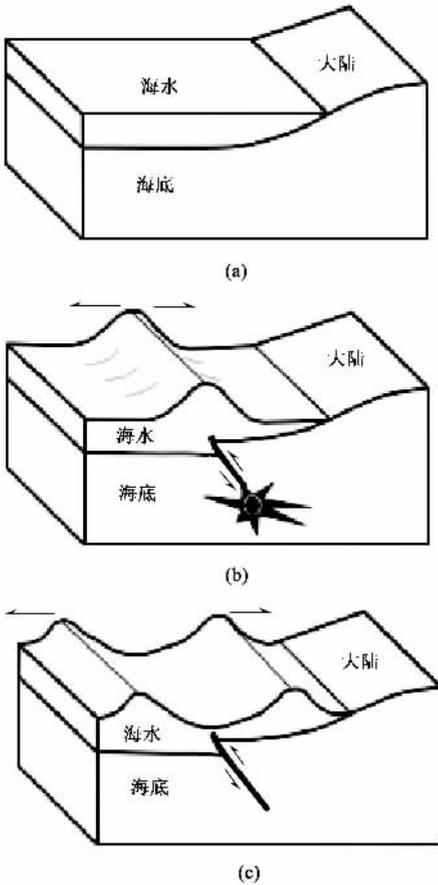


图1 海啸的产生过程 (a)海洋、海水、大陆相对位置 (b)深海发生地震时,海底发生激烈的上下方向的位移,某些部位出现猛然的上升或者下沉,产生了其上方的海水巨大的波动,原生的海啸于是就产生了.海啸与一般的海浪不一样,海浪一般在海面附近起伏,涉及的深度不大,而深海地震引起的海啸则是从深海海底到海面的整个水体的波动,其中包含的能量惊人;(c)地震后几分钟内,原生的海啸分裂成为两个波,一个向深海传播,一个向附近的海岸传播.向海岸传播的海啸,受到岸边的海底地形等影响,在岸边与海底发生相互作用,速度减慢,波长变小,振幅变得很大(可达几十米),在岸边造成很大的破坏

个因素决定的,例如:产生海啸的地震和火山的大小、传播的距离、海岸线的形状和岸边的海底地形等等.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.海啸的产生过程如图1所示.

2 海啸的能量

地震使海底发生激烈的上下方向的位移,某些部位出现猛然的上升或者下沉,使其上方的巨大海水水体产生波动,原生的海啸于是就产生了.我们可以用该水体势能的变化来估计海啸的能量.作为对印尼苏门答腊近海地震海啸能量的保守估计,假定该次地震使震中区 100km 长、10km 宽、2km 厚的水体^[1]抬高了 5m,其势能的变化为

$$E = mgh = 10^{24} \text{ erg} (1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}),$$

我们知道,地震释放的地震波的能量 E 与地震的震级 M 之间有如下关系式:

$$\lg E = 11.8 + 1.5M (E \text{ erg}),$$

印尼苏门答腊近海地震的震级 $M = 8.7$,所以这次地震释放的地震波能量为

$$E = 10^{25} \text{ erg}.$$

对比地震波的能量,海啸的能量相当于地震波的能量十分之一左右.海啸的能量是巨大的,为了说明这一点,我们可以举一个例子.一座 100 万 kW 的发电厂,一年发出的电能为

$$E = 3.15 \times 10^{23} \text{ erg},$$

所以,印尼苏门答腊近海地震产生的海啸能量大约相当于 3 座 100 万 kW 的发电厂一年发电的能量.

3 海啸的速度

当风吹过地上薄薄的一层水时,水面会起波浪.海啸与此有些相同,它与水面波一样,有自己的波长、周期,只不过海啸的激励来自海底地震和火山造成的激烈运动.但是水面波和海啸波两者又很不相同,它的传播速度与水深度的平方根有关.风造成的水面波的周期很短,波长也很小,传播速度慢.但海啸的周期可达 1h,波长可达 700km,这样就决定了海啸有一些非常独特的特点(见图2).

风暴潮也是一种严重的自然灾害.产生于赤道附近的热带风暴潮具有极大的能量.风暴潮经过海洋时,会造成狂风暴雨.尽管风暴潮和海啸都会造成海水的剧烈运动,但两者很不相同.风暴潮是由海面大气运动引起的,而海啸是由海底升降运动造成的,前者主要是海水表面的运动,而后者是海水整体的

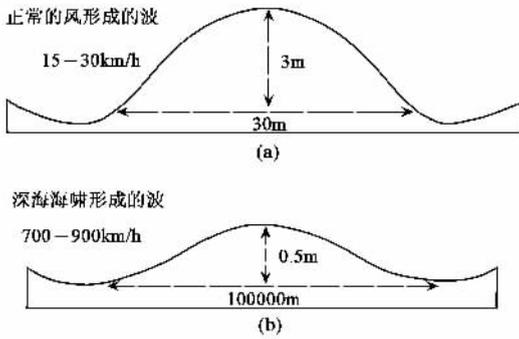


图2 (a)风吹水面造成的水面波波长30m,传播速度15—30km/h (b)深海中海啸波波长几百km,传播速度700—900km/h

运动。

对比风暴潮(水面波)等与海啸,就会发现海啸有3个特点:

(1)海啸传播速度快,每小时可达700—900km,这正是越洋波音747飞机的速度,而水面波传播速度较慢,台风的最快速度也只有350km/h左右,一般的风暴潮速度还要慢许多。

(2)海啸的周期可达1h,其波长极长,可达几百km,在其几百km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,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,伴随着狂风、暴雨和巨浪,冲到陆地后,仍然保持着狂风和暴雨。

(3)这种波长极长、速度极快的海啸波,一旦从深海到达了岸边,前进受到了阻挡,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(见图3)。

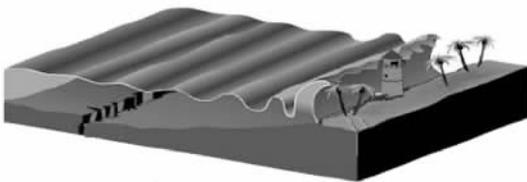


图3 海啸波从深海到达了岸边,前进受到了阻挡,其全部的巨大能量,将变为巨大的破坏力量,摧毁一切可以摧毁的东西,造成巨大的灾难

4 海啸的灾害

地球上三分之二的面积是海洋,海洋中,最大是太平洋,它几乎占地球面积的三分之一。太平洋的周

围是地球上构造运动最活跃的地带,有大量的地震、火山,因此,太平洋是最容易发生海啸的地方,人们对海啸的研究,对海啸灾害的预警系统都集中在太平洋(见图4)。

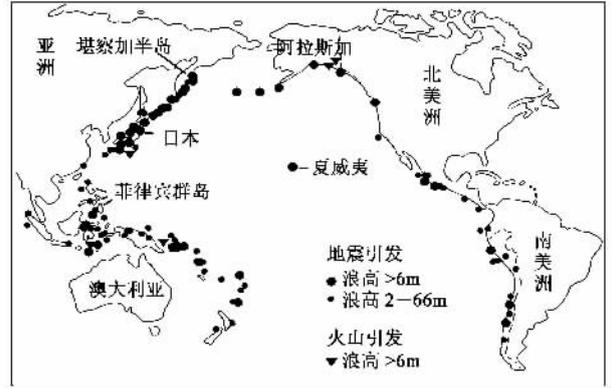


图4 1900—1983年期间,浪高超过2.5m海啸在太平洋的发源地

在人类的灾害史上,海啸从来就是一种巨大的自然灾害。海啸携带着巨大的能量,以极大速度冲向陆地,形成几米甚至几十米的巨浪,在滨海区域的表现形式是海面陡涨,骤然形成“水墙”,伴随着隆隆巨响,瞬时侵入滨海陆地,吞没良田和城镇村庄,然后海水又骤然退去,或先退后涨,有时反复多次,有极其巨大的破坏力。1946年,3700km外的阿拉斯加的阿留申群岛发生地震,海啸传到夏威夷,破坏极大,造成159人死亡。历史记载破坏最大的海啸发生在1755年,葡萄牙近海发生大地震,5m浪高的海啸席卷里斯本,235,000居民中,死亡60,000。这次巨大的海啸4个小时后又袭击了印度的西海岸。

最近的印度洋海啸灾害是出人意料的。印尼苏门答腊附近海域深海大地震的参数是:

发震时刻:2004年12月26日08时58分55秒。

震中坐标:北纬3.9°,东经95.9°(震中处海深千米以上)。

震级:Ms 8.7(中国);Mw9.0(美国)

震中为无人居住的海洋,故地震本身造成的死人不

地震产生的海啸,袭击了几百、几千公里外的不设防的海岸带,人口密集,故灾害严重。这次印度洋地震引发的海啸波及印尼、斯里兰卡、泰国、印度、马来西亚、孟加拉国、缅甸、马尔代夫等国,遇难者总数2周内已超过16万人。

表2 历史上破坏巨大的海啸

日期	发源地	浪高(m)	产生原因	备注
公元前 1600 年	Santorin	?	海底火山喷发	地中海沿岸破坏
1755 年 11 月 1 日	大西洋东部	5—10	地震	摧毁里斯本
1868 年 8 月 13 日	秘鲁—智利	>10	地震	破坏夏威夷、新西兰
1883 年 8 月 27 日	Krakatau	40	海底火山喷发	30000 人死亡
1896 年 6 月 15 日	Honshu	24	地震	26000 人死亡
1933 年 3 月 2 日	Honshu	>20	地震	3000 人死亡
1946 年 4 月 1 日	阿留申群岛	10	地震	159 人死亡, 损失 2,500 万美元
1960 年 5 月 13 日	智利	>10	地震	智利 909 人死亡, 834 人失踪; 日本 120 人死亡
1964 年 3 月 28 日	阿拉斯加	6	地震	加州死 119 人, 损失 1.04 亿美元
1992 年 12 月 2 日	印度尼西亚	26	地震	137 人死亡
1992 年 9 月 2 日	尼加拉瓜	10	地震	170 死亡, 500 受伤, 13000 无家可归

为什么这次地震引起的海啸产生如此巨大的灾害呢?首先,这次印尼苏门答腊附近海域 8.7 级地震,是近 50 年来全世界发生的特大地震,是印度洋地区历史上发生的震级最大的地震,而且符合深海、大地震、断层上下错动等产生海啸的条件^[1],因此,产生了巨大的海啸。

由于印度洋深海大地震不多,历史海啸灾害记载也不多,所以,人们对于海啸灾害的预防不足,也没有建立必要的海啸预警系统。这可能是这次海啸灾害巨大的另一个原因。

5 中国的海啸灾害

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?我们先来看看中国的近海产生海啸的可能性。

中国的近海,渤海平均深度为 20m,黄海 40m,东海 340m,它们的深度都不大,只有南海平均深度为 1,200m。因此,大部分海域地震产生地震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^[4]。

再来看看太平洋产生的地震海啸对中国海岸的影响。亚洲东部有一系列的岛弧,从北往南有勘察加半岛、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,智利发生 8 级大地震,产生地震海啸,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—20cm,没有造成灾害。智利附近地震产生的海啸传到各地所需时间如图 5 所示。这次印尼地震海啸,海南岛的三亚验潮站记录的海啸浪高只有 8cm。

查阅中国的灾害历史记录,有关海啸灾害的记载不多,受灾区域十分有限。历史记录中曾有多次“海水溢”的现象,其中有一次记录的海啸,即 1867 年台湾基隆北的海中发生的 7 级地震引起了海啸。其余大部分的“海水溢”现象,大都是风暴潮引起的近海面变化,而不是海啸。1604 年福建泉州海域发生 7.5 级地震,1918 年广东南澳近海发生 7.3 级地震,都是发生在海洋中的大地震,但都没有产生海啸。全世界发生在海洋中的地震,只有一小部分产生海啸。

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。一定要有忧患意识,做好灾害预防工作。

6 海啸早期预警系统

海啸是向外传播的,因此,知道了海中发生地震的地点,或知道了某处实际测得的海啸的发生地点,则可以利用海啸需要传播时间,及时向其他地方发出海啸警报。例如,智利附近地震产生的海啸向外传播,海啸传到夏威夷需要 12h,传到日本则需要 22h^[5]。

利用海啸从发源地向外传播的道理,1965 年,26 个国家和地区进行合作,在夏威夷建立了太平洋

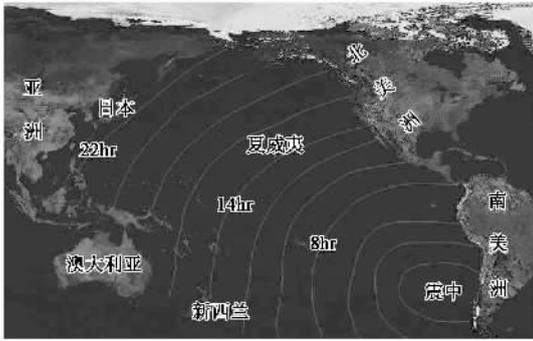


图5 智利附近地震产生的海啸向外传播,传到各地所需的时间。例如,智利地震海啸传到夏威夷需要12h,传到日本则需要22h

海啸警报中心^[6](The Pacific Tsunami Warning Center, PTWC),许多国家还建立了类似的国家海啸警报中心。一旦从地震台和国际地震中心得知海洋中发生地震得消息,PTWC就可以计算出海啸到达太平洋各地得时间,发出警报。中国于1963年参加了太平洋海啸警报中心,对于来自太平洋方面的海啸,我们是有防备的。

值得指出的是,海啸的产生是个复杂的问题,有的地震会造成海啸,而大部分海洋中的地震不产生海啸,因此,经常发生虚报的情况。例如,1948年,檀香山受到了警报,采取了紧急行动,全部居民撤离了沿岸,结果,根本没有海啸发生,为紧急行动付出了

3,000万美元的代价。前几年,在海啸警报中,虚报的比例大约有75%。近几年,随着历史资料的深入分析和数值模拟技术的发展,虚报比例有所下降。

致谢 《物理》编辑部和编委吴忠良同志特邀作者撰写本文,编辑在文字加工中给予诸多帮助,谨表感谢。

参 考 文 献

[1] 印尼地震海底地形变化资料来自美国地质调查局,见 <http://www.usgs.gov>

[2] Tanioka Y , Seno T. Detailed analysis of tsunami waveforms generated by the 1946 Aleutian tsunami earthquake. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 2001 , 1 : 171—175

[3] Tatyana Novikova , Wen Kuo-Liang , Huang Bor-Shouh. Excitation of Surface Waves by a Finite Seismic Source :The Case of Gravity Waves in the Liquid Layer-Elastic Half-Space , *TAO* , March 2001 , Vol. 12 , No. 1 , 1—14

[4] 高焕臣,闵庆方. *海洋预报*, 1994, 11(1) 63 [Gao H C , Min Q F. *Marine Forecasts*, 1994, 11(1) 63 (in Chinese)]

[5] Futoshi Nanayama, Kenji Satake, Ryuta Furukawa *et al.* *Nature* 2003 , 424 7

[6] 太平洋海啸预警中心见 <http://www.prh.noaa.gov/ptwc/>

作者简介 陈颢 地球物理学家,中国地震局科技委主任,中国科学院院士、第三世界科学院院士,中国地震学会理事长。



· 物理新闻和动态 ·

周期性运行的天然反应堆

在一座天然核反应堆燃烧完 20 亿年后,核物理学家测量了这座反应堆的“脉搏”。1956年,位于 Fayetteville 的 Arkansas 大学的核化学家 Paul Kazuo Kuroda 预言在天然铀的沉积物中可能发生链式反应,产生热量,就如同核电站那样。1970年,其他科学家在 Gabon 的 Oklo 铀矿中发现了已燃尽的天然反应堆,证实了他的预言。但是,研究人员仍然不知道这些本来会发生剧烈爆炸的古老的反应堆为什么能缓慢地燃烧 15 万多年。位于 St. Louis 的 Washington 大学的 Alex Meshik 及其同事们对其中一座反应堆中提取的岩石进行了仔细分析。结果表明,反应堆是以循环的启动和停止的方式运行的。岩石样品由磷酸铝包围着的氧化铀的颗粒组成。笼状的磷酸盐晶体含有大量的惰性气体氙,这些气体只能来自核反应。铀原子核分裂成较轻的碎块,这些碎块核发生衰变而产生氙及其他元素。

研究人员精确测定了 6 种氙的同位素的浓度。在这座天然反应堆中,这些同位素的相对浓度与 Meshik 等观测到的连续进行的链式反应不同。可是,科学家们发现,如果假设反应堆是周期性运行的话,便可以解释这种不寻常的相对浓度。氙的某些同位素通过铀核的裂变碎片的快速的放射性衰变产生,而另一些同位素则由慢速衰变产生而出现得较晚。因此,如果磷酸盐晶体只是在反应堆静止和冷却状态时形成的,他们将捕捉到较多的缓慢出现的同位素和较少的快速出现的同位素,因为这些同位素已经扩散掉了。由所测量到的同位素的浓度,研究人员估计反应堆是以每开动 30min 后停止两个半小时的方式循环运行的。这种脉冲式的运行暗示着地下水控制着反应堆。因为水分子会与中子碰撞使之慢化。由于在链式反应中较慢的中子能更有效地使铀核裂变,水将使反应加速而使反应堆升温。最终所产生的热量使水蒸发,使反应停止,直到能积蓄到更多的水。至于反应堆的节奏是否意味着水是由某个间歇泉在供应着,这点还存在着争论。

(树华 编译自 *Phys. Rev. Lett.* , 2004 93 : 182302)