

# 试用地球系统科学观解读 2004 年印度洋地震海啸

吕林素<sup>1,2)</sup>

1) 中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083; 2) 中国地质博物馆,北京 100034

**摘要** 2004年印度洋地震海啸是本世纪初全球发生的最为惨重的自然灾害。这次地震海啸涉及地球的岩石圈、水圈、大气圈和生物圈,甚至还有地外星球和月球的作用,造成能量与物质之间的相互转化与传递,说明地球是一个完整的统一整体。因此,对地震海啸等自然灾害必须采用地球系统科学观进行分析和研究,找出彼此之间的相互关系、形成机制和演化规律,并用信息化、全球化和可持续发展的地球科学观来研究和防御地震海啸。

**关键词** 地球系统科学,地震海啸,印度洋

## The Tentative Application of the Earth Systems Science to the Interpretation of the 2004 Earthquake Tsunami in the Indian Ocean

LÜ Linsu<sup>1,2)</sup>

1) College of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083;

2) Geological Museum of China, Beijing 100034

**Abstract** The Indian Ocean earthquake and tsunami in 2004, the most serious natural disaster occurring at the beginning of the 21st century, involved the actions of lithosphere, hydrosphere, aerosphere, biosphere, and even outside star and moon, and caused the mutual transmission and conversion of energy and material. All this shows that the earth is an integrated system. This paper analyzed the natural disaster such as earthquake and tsunami by means of the Earth Systems Science, identified mutual relations, formation styles and evolutionary regularities, and adopted such geoscience view points as informationization, globalization and sustainable development to study and prevent earthquake and tsunami.

**Key words** Earth Systems Science, earthquake tsunami, Indian Ocean

2004年底,印尼发生了里氏9.0级(可能达9.3级)超级大地震,这是印度洋地区历史上发生的震级最大的地震,也是人类历史上有记录以来第二大地震,随后发生了700年以来的超强规模的地震海啸,造成30万人遇难,超过了有史以来历次大海啸灾难中死亡人数的总和(UNESCO ITSU, 2005)。难道悲剧不能避免吗?

当代地质科学正向地球系统科学化、信息化、全球化和可持续发展观迈进,正以前所未有的魅力,影响着人类的思维方式和生活方式。特别是近年自然

灾害频发,如2004年底的印度洋地震海啸、2005年的几乎毁掉美国新奥尔良的风暴潮和2006年初菲律宾的特大泥石流灾难等。这些严重的天灾人祸给满怀着征服自然、征服地球,甚至征服宇宙雄心的人类上了一课。本文尝试着用“地球系统科学观”来解读2004年印度洋地震海啸这种由于能量与物质之间的转化而导致的各圈层之间相互作用甚至有地外天体共同作用的地质现象,以便使人类更好地认识所赖以生存的环境,更有效地防止和控制可能突发的自然灾害对人类所造成的损害。

本文由中国地质大调查项目(编号:200313000049)资助。

责任编辑:刘志强;收稿日期:2006-12-20;改回日期:2007-02-01。

第一作者简介:吕林素,女,1965年生,副研究员,博士,矿物学岩石学矿床学专业;通讯地址:100034,北京市西城区西四羊肉胡同15号;

电话:010-6201160;E-mail: lulinsu@126.com。

## 1 地球系统科学观

"地球系统科学"(Earth System Science)的概念于20世纪80年代提出,并从传统的地球科学脱胎而来。它随着人类面临的根本生存环境危机即全球变化的严峻挑战而兴起,而完善地球系统科学将是21世纪的地球科学的主攻方向。

所谓地球系统科学,就是将大气圈、水圈、岩石圈、地幔(地核)和生物圈(包括人类)甚至包括太阳系—银河系对地球的作用作为一个地球系统,综合研究组成地球系统各圈层之间甚至包括地外天体之间的相互联系、相互作用,即物理、化学和生物三大基本过程的相互作用以及人与地球环境的相互作用联系起来的复杂的非线性的耦合系统的科学。

地球系统科学研究的范围从地心到地球外层空间;时间尺度从几百年到几百万年。其任务是研究在该系统中发生的动力学过程及演化,全球变化及地球各圈层之间的相互作用,特别是人类活动诱发的全球变化,以揭示地球系统过程的规律,提高人类认识和预测地球系统变化的能力。

印度洋地震海啸是本世纪初全球发生的最为恐怖的自然灾害,震撼了全世界。这次地震海啸涉及地球的四大圈层,即岩石圈、水圈、大气圈和生物圈之间的相互作用,甚至还有月球的作用,造成能量与物质之间的相互转化与传递,说明地球是一个完整的统一整体。因此,地球科学研究要具有全球观。对地震海啸等自然灾害往往存在大量始料不及、非线性的变量间相互作用,必须采用地球系统科学进行分析和研究这种自然灾害,找出彼此之间的相互关系、形成机制和演化规律,才能更好地预测和防御地震海啸这种自然灾害。

## 2 印度洋地震海啸与岩石圈

### 2.1 印度洋大地震基本参数

根据美国地质调查局(USGS)国家地震信息中心(NEIC)及世界数据中心 Denver 地震分中心(WDCS-D)发布的"苏门答腊—安达曼大地震"的参数:发震时刻为2004年12月26日00:58:53(国际标准时间),2004年12月26日07:58:53(当地时间——雅加达与曼谷时间);震中坐标为3.307°N,95.947°E;震级为Mw9.0(USGS根据长周期面波计算的结果);震源深度(地震破裂起始点的深度)约8.9 km(哈佛大学根据快速地震矩张

量解的结果);震源错动方式为低角度逆冲型。即海床8.9 km深处产生的破坏性极强的极浅源地震(图1)。这次大地震由于新破裂带的产生,改变了该地区岩石圈的结构;由于板块的俯冲和位移,永久改变了该地区的海底地貌。因此,可以说这次大地震对该地区的岩石圈产生了深远地影响。

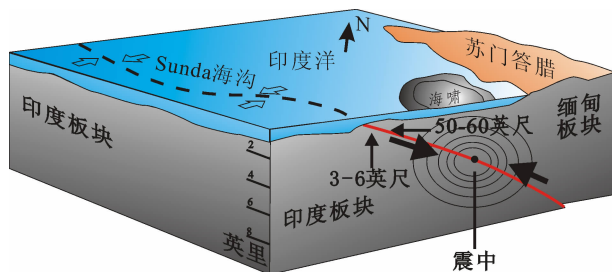


图1 印度洋地震海啸模型示意图(据 USGS,2004)

Fig. 1 The model of the Indian earthquake tsunami in 2004 (from USGS, 2004)

### 2.2 重建印度洋大地震爆发

科学家们重建这次大地震表明,地震断裂破裂刚开始缓慢,在最初40~60 s内为小的滑动和慢的破裂。之后的4 min内,破裂加速达到3 km/s,然后保持在平均2.5 km/s达6 min之久。爆发过后,断层北部的滑动再减慢,大约30 min内位移了7~20 m(Ammon et al., 2005)。这次地震在印度—缅甸微板块俯冲带形成的破裂带宽约160 km、最大位移约20 m、错距约10 m(USGS NEIC, 2004),面积约25万 km<sup>2</sup>(McCloskey et al., 2005)。用全球定位系统(GPS)观察并测得震中洋壳沿着整个1400 km(或1600 km, Lay et al., 2005)的破裂带平均滑动5 m以上(Bilham, 2005),破裂东部的GPS站向西运动,西部的站向东运动,这与该地震的逆冲断层运动的方向一致(Banerjee et al., 2005)。由南向北的整个破裂过程延续了约400~480 s,1400~1600 km长的破裂带用了7~8 min才完成整个破裂的传播,显然这是一个十分复杂的多源破裂过程(IRIS, 2005)。Harvard大学给出的震源机制解是,这次地震P波节面1,走向329°,倾角8°,滑移方向110°;P波节面2,走向129°,倾角83°,滑移方向87°;中间应力轴近于水平,主压应力轴倾角<45°,方向NE—SW;断层两盘几乎相互垂直运动,为典型的低角度逆冲型地震(USGS NEIC, 2004)。

### 2.3 印度洋大地震的强度与震级

这次大地震的强度用常规地表地震测量方法难

以准确估算,以致各国地震网所估算的震级差异较大。如印尼棉兰气象和地理局测得震级为 M8.1 级;中国地震台网测得面波震级为 Ms8.7 级;美国地质调查局测得体波震级或矩震级为 Mw8.9 级,后改为 Mw9.0 级。之后, Park (2005) 用瞬间张量断裂模型 ( $6.5 \times 10^{22} \text{ N} \cdot \text{m}$ ) 计算震级超过 Mw9.15 级; Banerjee 等 (2005) 用 GPS 测量不超过 Mw9.2; Lay 等 (2005) 认为震级介于 Mw 9.1~9.3 之间;但美国一些地震学家如 Stein, Okal 和 Bilham 等 (2005) 重新推算和评估地震的震级应上升至 Mw9.3 级,这是继 1960 年智利 Mw9.5 级地震之后的第二大地震。这次大地震所释放的能量更大,  $\lg E = 11.8 + 1.5 M$ , 则  $E = 10^{25} \text{ erg}$  (陈颢, 2005), 相当于 1 个 1000 亿 t 的炸弹, 或接近全美国 6 个月所用的能量 (Park, 2005; Bilham, 2005), 实际释放的能量可能远远超过以上的数字。没有人能真正预测这次地震的强度和复杂性 (Bilham, 2005)。

## 2.4 印度洋地震引发全球"同震"效应

这次大地震产生的强烈地震波,通过岩石圈引发全球"同震"效应,所导致的同震变形面积超过  $10^7 \text{ km}^2$  (Boschi et al., 2006)。这次大地震发生时伴随着海洋板块物质的突然下沉,导致地球自转加速,日长缩短  $2.68 \mu\text{s/d}$ ,地球扁度也有相应变化;引起地球自转轴摆动,即地球北极向  $145^\circ\text{E}$  方向移动约 2.5 cm (美国宇航局喷气动力学实验室,简称 NASA JPL, 2005)。在同震应力作用下,还引发了一系列不同震级的地震。如 2004 年 12 月 26~29 日,印尼当地共发生了将近 70 次震级 5.0 级以上的余震;安达曼群岛的 Baratang 发生了泥火山喷发;离震中 11000 km 的阿拉斯加 Wrangell 火山引发了一 0.3~1.9 级的震群活动 (USGS, 2005)。GPS 测量还可清楚地检测到最近的同震位于 400 km 以外并有 10 cm 以上的位移以及离震中 3000 km 以外小的同震地壳变形现象 (Vigny et al., 2005)。这次地震使震中附近发生地震的危险性大大增加,这是由于印度洋大地震很可能是与之比邻的巽他海沟俯冲带所触发的,而俯冲带的地震经常是成对甚至成丛发生的 (McCloskey et al., 2005)。2005 年 3 月 28 日果真在该地区发生了 Mw8.6 级的大地震 (Lay et al., 2005)。这次大地震还会导致相邻地区如中国的地震活动性增加,这是由于发生在印度-欧亚板块交汇部位的印度洋大地震,可通过安达曼岛弧和缅甸的 SAGA-ING 断层与我国西南的川滇地

震带紧密相连。这次大地震发生后不到 20 min 云南宾川就发生了 4.6 级地震,15 h 30 min 云南双柏又发生了 5.0 级地震,26 日内云南共发生了 47 次地震,四川也发生了多起小震级地震 (陈颢等, 2005)。表明这次大地震不仅"激活"了我国大陆地区地震的活动性,而且使全球地震活动进入新一轮地震活动周期 (陈学忠, 2005), 如表 1 所示。

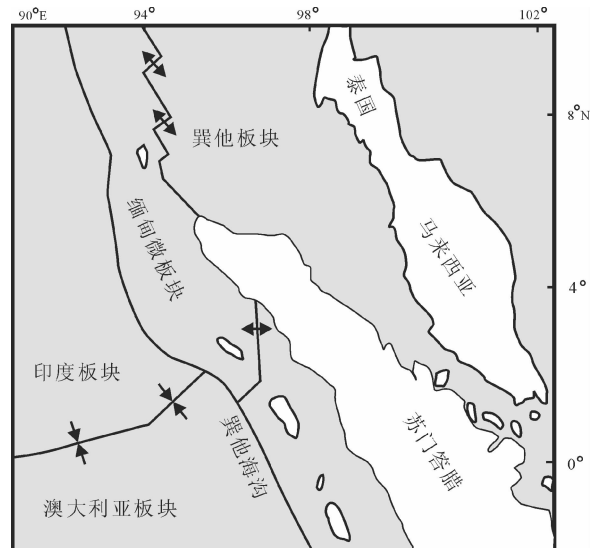


图 2 苏门答腊地区的板块构造 (USGS, 2005)  
Fig. 2 Plate structure of the Sumatra region  
(from USGS, 2005)

## 2.5 印度洋大地震的成因机制

这次地震发生于印度、欧亚和澳大利亚 3 大板块汇聚碰撞区域 (图 2), 其中缅甸微板块两侧的海沟低角度逆冲断层和大苏门答腊走滑断层均为重要的巨型发震断层。印度板块以  $6 \sim 7 \text{ cm/a}$  的速率向  $\text{NNE}23^\circ$  方向运动, 并沿巽他海沟正向俯冲, 还与南亚板块发生斜向聚敛俯冲, 使 3 个板块主体之间发生断裂解耦活动。这次地震正好发生在巽他海沟西侧, 苏门答腊断层的南段, 印度洋海洋板块向缅甸微板块作低角度俯冲的断层上。地震的根本原因是印度洋板块沿着巽他海沟向欧亚板块中的缅甸微板块底下俯冲过程中, 长时间挤压所积累的巨大应变能随着逆断层作用而突然释放, 并同时伴随着海底快速塌陷所致 (马宗晋等, 2005)。而澳大利亚地质学家茨韦坦·西纳迪诺夫斯基 (2005) 则认为, 2004 年 12 月 23 日印度洋南部澳大利亚附近的塔斯马尼亚岛与新西兰附近的麦夸里岛之间发生的 Mw8.1 级地震, 以及 24~26 日在新西兰本土及附近海域连续

表 1 2005~2007 年印尼和我国川滇地区地震一览表

Table 1 Earthquakes in Indonesia and Sichuan and Yunnan of China in 2005~2007

地点	震中坐标	发震时刻(北京时间)	里氏震级
印尼苏门答腊岛北部	北纬 3.1°, 东经 95.4°	2005 年 3 月 31 日 00 时 19 分 40 秒	7.0 级
	北纬 3.6°, 东经 96.28°	2005 年 3 月 29 日 00 时 09 分 35 秒	8.5 级
	北纬 0.6°, 东经 98.5°	2005 年 5 月 14 日 13 时 05 分 16 秒	7.0 级
	北纬 2.1°, 东经 97.0°	2005 年 5 月 19 日 09 时 54 分 53 秒	7.1 级
	北纬 2.1°, 东经 97.2°	2005 年 7 月 5 日 09 时 52 分 05 秒	7.3 级
	北纬 0.1°, 东经 97.2°	2006 年 5 月 16 日 23 时 28 分 25 秒	7.2 级
	北纬 3.8°, 东经 96.1°	2007 年 3 月 1 日 10 时 01 分 00 秒	5.0 级
	北纬 1.1°, 东经 97.45°	2007 年 2 月 18 日 18 时 45 分 22 秒	5.3 级
	北纬 0.5°, 东经 97.3°	2007 年 2 月 15 日 03 时 49 分 54 秒	6.2 级
	北纬 1.6°, 东经 97.15°	2007 年 2 月 12 日 12 时 44 分 08 秒	5.0 级
北纬 1.95°, 东经 98.0°	2007 年 3 月 7 日 18 时 53 分 35 秒	5.9 级	
印尼爪哇地区	南纬 9.4°, 东经 107.4°	2006 年 7 月 17 日 16 时 19 分 31 秒	7.3 级
印尼苏门答腊岛南部	南纬 4.25°, 东经 103.0°	2007 年 2 月 19 日 23 时 13 分 32 秒	5.1 级
	南纬 0.55°, 东经 100.45°	2007 年 3 月 6 日 11 时 49 分 39 秒	6.6 级
印尼哈马黑拉岛	南纬 1.05°, 东经 127.2°	2007 年 2 月 20 日 16 时 04 分 26 秒	6.4 级
	南纬 0.6°, 东经 127.3°	2007 年 2 月 21 日 10 时 19 分 56 秒	5.1 级
	南纬 0.85°, 东经 127.3°	2007 年 2 月 22 日 11 时 20 分 19 秒	5.4 级
	南纬 0.9°, 东经 127.05°	2007 年 2 月 25 日 02 时 53 分 42 秒	5.4 级
	南纬 1.0°, 东经 127.0°	2007 年 3 月 6 日 08 时 09 分 06 秒	5.5 级
	南纬 0.05°, 东经 127.3°	2007 年 3 月 8 日 07 时 27 分 19 秒	5.6 级
印尼松巴哇以南海中	南纬 11.15°, 东经 118.8°	2007 年 2 月 21 日 07 时 12 分 28 秒	5.0 级
	南纬 8.05°, 东经 117.9°	2007 年 3 月 13 日 17 时 05 分 46 秒	5.5 级
云南会泽与四川会东交界	北纬 26.6°, 东经 103.1°	2005 年 8 月 5 日 22 时 14 分 43 秒	5.3 级
云南文山	北纬 23.5°, 东经 104.1°	2005 年 8 月 13 日 12 时 58 分 44 秒	5.3 级
云南墨江	北纬 23.4°, 东经 101.6°	2006 年 1 月 12 日 09 时 05 分 29 秒	5.0 级
云南盐津	北纬 28.0°, 东经 104.2°	2006 年 7 月 22 日 09 时 10 分 23 秒	5.1 级
	北纬 28.0°, 东经 104.2°	2006 年 8 月 25 日 13 时 51 分 43 秒	5.1 级

注:据中国地震信息网的资料综合整理而成。

发生的 4 次地震,这些地震可能是这次大地震的前兆。推测 Mw8.1 级与 Mw9.3 级地震发生在印度—澳大利亚板块的地壳两端,Mw8.1 级地震导致另一端的失衡,引发了印度洋 Mw9.3 级大地震。

### 3 月球引力触发印度洋大地震

印度洋大地震发生于 2004 年 12 月 26 日,这一天恰好是农历冬月十五望月之时。无独有偶,世界历史上最大的智利 Mw9.5 级大地震发生在 1960 年 5 月 22 日,即农历五月初一朔月之时,引发了横扫整个太平洋的特大海啸。作为行星地球处于太阳系中必将受到月球引力的作用。虽然地震是地球内部运动的反映,但当它蓄势待发而未发之时,月球引力所产生的固体潮汐便起了一触即发的作用,使积蓄已久的能量一下子通过地震方式迸发出来。火山与地震密不可分,美国火山专家史蒂夫·奥马拉和

多娜·奥马拉夫妇于 1996 年提出火山的喷发与月球的运行有关系,当月球处于近地点并发生满月之时,火山活动最活跃。据统计,许多大地震常常发生在农历初一、十五月相为朔望之时,因为这个时间前后的月球引力潮汐常常达到最高值。因此,可以推测月球引力也成了印度洋大地震的帮凶,但它到底起了多大作用还有待于研究。

### 4 印度洋地震海啸与水圈

#### 4.1 印度洋地震海啸的特点

这次大海啸具有 5 大特点:①能量巨大,这次大海啸的能量用该水体势能变化来保守估计, $E=mgh=10^{24}$  erg(假定震中区长 100 km,宽 10 km,厚 2 km 的水体,抬高 5 m)(陈颢,2005)。在泰国沿岸曾把一艘 50 t 重的船从海边推到岸上 1.2 km 远之处(NOAA,2005),足见能量之巨大。②级别很高,这

次大海啸到印尼 Nagapattinam 地区浪高达 10~12 m 高,侵袭内陆达 3.0 km(Narayan et al., 2005)。若用经验公式估算海啸等级  $M = \log_2 H$  (其中  $H$  为海啸浪高,单位 m),海啸等级仅相当于 4 级(陈颢等, 2005)。而 K. Abe(2005)计算出这次海啸级别为 9.1 级,仅次于智利 1837 年的 9.3 级与 1960 年的 9.4 级 2 次智利沿海大海啸及阿留申 1846 年的大海啸。③隐蔽性强,这次大海啸波长约 430 km,波幅在大洋中可能不足 1 m(GOWER J, 2005)。海啸隐蔽性为  $I = \lg(\lambda/A)$  (其中  $\lambda$  为海啸波波长,单位 m,  $A$  为海啸波振幅,  $I$  为海啸隐蔽指标),  $I$  愈大,海啸的隐蔽性愈强(晋向平等, 2005)。④速度超快,这次大海啸波以约 750 km/h 的速度向四周传播(GOWER J, 2005),时速快如喷气式飞机。海啸面波的传播速度为  $V = \sqrt{gh}$  ( $V$  为海啸传播速度,  $g$  为重力加速度,  $h$  为水深)。⑤传播极远,这次海啸波从印尼苏门答腊岛经泰国、马来西亚、缅甸、孟加拉、印度、斯里兰卡和马尔代夫等国,最远到达南美西海岸,最终完成了它的全球旅行(NOAA, 2005; 马宗晋等, 2005)。

#### 4.2 地震海啸的定义

海啸(Tsunami),来自日语"津波",原意指港口内的波浪。海啸就是由海底地震、海底火山爆发、海底滑坡、海边山崩或海面冰山坍塌、陨石或彗星坠落海洋、海面气象异常变化、海底核爆炸以及海底"可燃冰"开采导致甲烷泄露爆炸等所引发的具有超大波长和周期的有如"水墙"的破坏性海浪。海啸按诱因可分为地震海啸、火山海啸、滑坡海啸、崩塌海啸、陨石海啸、气象海啸(又称风暴潮)和人工海啸七种,其中地震海啸占 95%。印度洋大海啸是由印度洋大地震引发的,属于地震海啸。而地震海啸按其形成机制又可分为下降型、隆升型和冲击型三种,印度洋地震海啸就属于隆升型。

#### 4.3 地震海啸产生的必要条件

大部分的海啸都产生于深海地震。产生地震海啸必须满足五个条件,即地震强(震级至少大于 5.5 级)、震源浅(震源深度在 50 km 以内)、地震类型为上下错动、海水深(海水深度大于 200 m)和震中靠近海岸。这次地震的震级为 9.3 级,属极强地震;震源深度小仅为 8.9 km,属于极浅源型;地震类型为逆冲型,地震断裂上下盘错距约 20 m;震中处水深超过 1500 m,震中在印度洋苏门答腊附近海域,且

印度洋沿岸的海岸开阔,海岸线的形状和岸边的海底地形等都具备逐渐变浅的条件(USGS NEIC, 2004; 陈颢等, 2005)。虽然陆震与海震没有本质区别,但不能再将海底地震在条件合适的情况下所引发的海啸当作次生灾害来对待,对地震海啸的研究应该引起足够重视,才会避免人间悲剧重演。

#### 4.4 地震海啸的形成机制与形成过程

印度洋地震海啸是由于海底地壳板块之间相互运动,使海底地壳大范围的猛烈隆起,海水也随着隆起区一起抬升,并在隆起区域上方出现大规模的海水积聚,在重力作用下,海水必须保持一个等势面以达到相对平衡,于是海水从波源区向四周扩散,形成汹涌巨浪,在海岸首先表现为异常的涨潮现象。英国地质学家戴维·布思将印度洋地震引发海啸的过程比喻为在海底划动着一支巨大的桨。具体来说,当深海发生地震时,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,地震几分钟后,产生了从深海海底到海面的整个水体的波动,源性海啸就产生了。海啸发生后分裂成两个方向的波,一个是 S 波(横波)向深海传播和另一个是 P 波(纵波)向附近海岸传播。向海岸传播的海啸面波遇到岛屿或沿海大陆架,海水深度骤然变小,受到岸边的海底地形等影响,并与海底相互作用(陈颢等, 2005),速度减慢,波长迅速变短,振幅陡增,隐蔽指标  $I$  骤减,形成高达数十米的海浪而登陆,其突然性往往使沿岸人群猝不及防(图 3)(晋向平等, 2005)。

#### 4.5 印度洋二次大地震结果比较

2004 年 12 月 26 日第一次大地震引发了巨大的海啸,但几乎没有对地面建筑物造成直接破坏;而 2005 年 3 月 28 日发生在第一次大地震震中 ES 约 200 km 处的  $M_w 8.6$  级(震源深度为 30 km)大地震却没有引发海啸,但却使尼亚斯岛地面建筑物遭受了巨大的直接破坏。这两次大地震的空间距离并不远,震源机制几乎相同,震级几乎相当,但所表现出来的破坏结果却完全不同。陈学忠(2005)指出,第一次地震产生的破裂带长达 1400~1600 km,第二次地震的长约 400 km,二者破裂带长度差别极大,使二次地震所产生的地震波的频率具有显著差异,因而对地面建筑物造成破坏程度也明显不同。而 Gahalaut et al. (2006)通过分析 GPS 观测结果提出,第二次地震破裂特征为滑动,因而未造成海啸。但地震海啸的形成机制还有待于进一步研究。

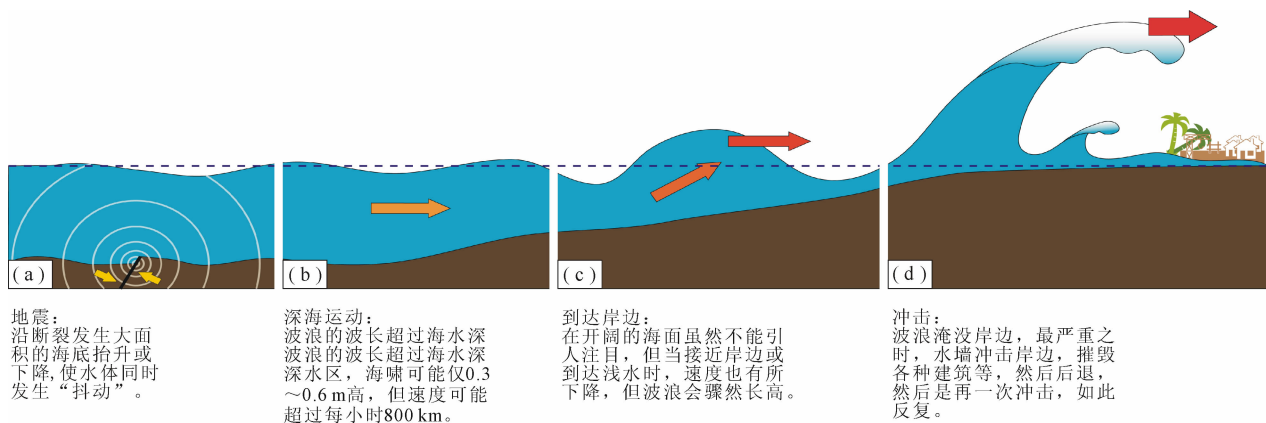


图3 地震海啸的形成过程(据 USGS,2004)

Fig. 3 Process of the earthquake tsunami (from USGS, 2004)

## 5 印度洋地震海啸与生物圈

### 5.1 印度洋海啸对人类造成巨大灾难

印度洋大地震的震中为无人居住的海洋，故地震本身几乎没有造成伤亡。但所引发的海啸却造成305276万人遇难，其中死亡人数最多的4个国家是印尼(228948人)、斯里兰卡(43382人)、印度(16389人)和泰国(8506人)(USGS,2005)。直接经济损失达130亿美元，受灾人数更是难以计数。这次海啸印尼受灾最为严重，死亡人数达24万人之多，定居美国名叫田娜宝的印度尼西亚齐省人，仅她1人就痛失50位亲人，真是人世间一场最惨烈的海啸灾难。

### 5.2 地震海啸前后生物异常现象显著

这次地震海啸前后均有较显著的生物异常现象，只不过没有引起广泛的重视。在海啸发生前，当地渔民惊奇地发现在印尼苏门答腊岛附近的捕鱼量都比平时高出20倍，捕获最多的是鲭鱼。深海鱼绝对不会自行游到海面，但可能会被海啸等异常海洋活动的巨大暗流卷到浅海或海滩。在印度洋海啸袭击了斯里兰卡后，其东南沿海一带遍地是废墟，遇难者的尸体堆积如山。然而，令人惊奇的是没有发现一具动物尸体。这说明动物们早在大难之前就早已自行逃之夭夭了。有专家解释为“动物的第六感觉灵敏，提前逃到地势高的避难所”。实际上动物是靠听觉来预先感知地震和海啸等自然灾害。地震专家称，鲭鱼游到海面 and 鱼量异常大增的现象，是地震海啸的前兆。因此，中国科学家希望通过动物或昆虫在地震发生前的异常行为来预测地震。

### 5.3 生态环境破坏加重海啸损失

环境污染、人为开发对沿海珊瑚礁、湿地和森林造成的破坏，使得海岸缺乏抵御海啸的良性生态环境，沿海居民因此在灾害面前显得特别地软弱无力。珊瑚礁可减弱海啸的杀伤力，是海岸的第一道屏障。被誉为“绿色长城卫士”的红树林是海岸的第二道屏障，可以抵御破坏性海浪对陆地的破坏力。否则，这次海啸就不可能向内陆推进10多公里。这次大海啸席卷的地区珊瑚礁遭受厄运，海岸被海啸严重侵蚀，沿海地区的湿地和树林被摧毁，海啸卷入的海水也污染了淡水资源，不但严重地影响了人类的生存环境，更会影响到动物和植物的生存环境(杨先碧,2005)。生态环境破坏加重海啸损失，助纣为虐人类难脱干系。

## 6 印度洋地震海啸与大气圈

由于化石燃料的现代工业不断向大气层排放温室气体导致了全球变暖，从而使全球海平面逐年上升。如果2004年海平面只有19世纪那样的高度，东南亚特别是印度洋中因全球变暖而濒临沉没的马尔代夫这样的岛国，在这次大海啸中的损失将会大大减小。

## 7 印度洋地震海啸能否预警

### 7.1 地震目前难以预测

印度洋大地震发震前的1~2月到临震时，美国《NOAA》气象卫星遥感发现在震中附近地区的长波辐射类物理量的异变征兆更加显著(刘德富等，

2005)。这次地震发生前后即 2004 年 12 月 24 日 11:30~29 日 19:30 这个时段,远在数千公里(距震中 4170 km)之外的江苏东海的中国大陆科学钻探工程(CCSZ)捕获到地下 5000 m 深处的气体地球化学异常(于德福,2005)。从地球系统科学角度看,分析和研究印度洋大地震前后的异常现象或激发效应,将有助于识别地震前兆、掌握地震震源的物理性质、认识地震的动态和静态激发机制、确定深部流体的地球化学组成、突破重大地震事件的预报难点(发生地域)或强震将在何处发生的短临预测难题(于德福,2005)。美国科学家希望通过岩石受压变形后的形状来预测地震;而日本科学家则利用电脑技术分析地震的活动性。如今,全世界的地球科学家都致力于根据地球系统科学的复杂性理论,基于现代计算科学的地球系统模拟技术,加强研究地震演化规律,以便找到预测地震的途径。

## 7.2 地震海啸可预警

印度洋大海啸灾难的预警和预防的关键在于,如何能预先知晓安达曼海西南至苏门答腊岛西北海中将有特大地震发生(刘德富等,2005)。地震波比海啸波快 16~32 倍,因而首先为人所感知,可以利用这个时间差,发出海啸警报,从而赢得避难和采取紧急措施的宝贵时间。地震波是一种从震源产生通过地壳岩石这种固体介质向四外辐射的弹性波(包括纵波、横波和面波)。其中纵波(又称 P 波)在地壳中传播速度为 5.5~7.0 km/s,最先到达震中;横波(又称 S 波)为 3.2~4.0 km/s,可先后被地震监测设备捕获。而海啸波从诱发地引起海水抖动,然后以水波的形式向外扩散传播,其速度一般为 700~800 km/h,相当于 0.19~0.22 km/s,还会随海水深度的变浅而降低。倘若海底地震发生后,通过地震台网迅速确定震中位置和震级,验潮站加强水位监测监视,计算震源处的海啸强度以及海啸波到达各海岸的时间和产生海啸的大小,从而提供海啸警报(晋向平等,2005)。但以目前的科学水平,很难做到在 1~2 天以前,对海底地震等地壳变动及其引发的海啸做出科学的预测。

## 7.3 建立新一代的全球海啸预警系统

印度洋地震海啸从发震到海啸波到达最近的海岸即印尼班达亚齐地区用了 20 min;2h 后才袭击印度洋北部沿岸泰国、马来西亚、缅甸、孟加拉、印度和斯里兰卡等国,5h 后才袭击岛国马尔代夫。然而,

这次地震海啸受灾国尚未建立海啸预警系统,否则就可充分利用这几十分钟甚至几个小时,就可挽救多少无辜的生命,这是一个没有预警的悲剧。为了减少海啸造成的人员伤亡和经济损失,必须建立一个全球性的预警机制,即建立由地震监测网、海啸数值预报模式以及海啸预警发布系统三部分组成的海啸预警系统。首先,在全球范围的地震海啸多发地带建立高精度的地震监测网络,获取地震信息,快速估算地震参数 P 波,自动而快速地确定震源和震级。其次,建立基于数据库技术的快速的海啸数值模式,通过电脑模拟海啸可能形成的地点及移行方向,准确预报海啸的波高、速度、可能袭击的区域以及预计到达的时间。最后,使用静止卫星发布和接受的海啸警报:①海啸预报开始;②地震强度;③震中和震级;④海啸抵达时的观测及其高度;⑤海啸警报结束。新的海啸预警系统就可在大地震发生 3 min 之内向全球发出可靠的海啸预警信息(于福江等,2005)。

## 8 小结

通过对印度洋地震海啸的综合分析研究,得出以下几点认识:

(1)从地球系统科学角度看,这次印度洋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。印度洋海底岩石圈中的板块碰撞挤压或地壳另一端的大地震以及月球对地壳的固体潮产生或引发了这次大地震。而地震又作用于水圈中的海洋引发了大海啸,将生物圈中的深海动物搅起浮到海面;海啸到达大洋岸边进入大气圈,对沿岸人们的生命以及所生存的环境造成破坏。人类对海岸环境的污染破坏和全球变暖导致海平面上升,以及缺乏海啸预警系统和相关的海啸知识,又加剧了这次地震海啸所造成的灾难。因此,研究印度洋地震海啸,不能再单纯地从地震角度去找原因;反思这次海啸的巨大损害,也不能再单纯从政府或技术角度去剖析。而应该以地球系统科学的观点,结合岩石圈、水圈、生物圈甚至地外星系,去了解、认识、分析和研究它,从而去探索更多的地球奥秘。

(2)充分运用先进的信息化技术防控自然灾害。在 21 世纪的今天,人类已经掌握了海啸预警与预防的有效技术。印度洋海啸首先被太平洋海啸预警中心观测到,但对于印度洋沿岸的发展中国家,海啸灾

害却仍能如此肆虐无忌。若印度洋沿岸诸国能与太平洋海啸预警中心共享信息资源,损失和伤亡就不至于那么严重;另外,利用信息技术,快速确定地震震中和强度、海啸规模和速度,提高预报准确率,也说明地球科学信息化的重要性。这次地震海啸使人们更充分地认识到,不但要尽快建立全球海啸预警系统,还要建立完善灾害预警机制,以便有效地防止悲剧再次发生。

(3)与自然和谐共处实现可持续发展。印度洋世纪大劫难发生之后,引发了人们对预防海啸的思考。从地质学的角度来看,发生地震并引发海啸是自然界的正常现象。然而,这次海啸给人类敲响了警钟,人类不能无休止地扩张地盘追求经济利益,肆无忌惮地滥砍滥伐海岸的守护神红树林、肆意践踏毁坏珊瑚礁、全球变暖使海平面上升、海滩附近修建密集的居住区,破坏了大自然赐予我们抵御海啸的天然屏障,海啸来势更为凶猛,说明可持续发展是人们的生命线。怎样使人类社会可持续发展是全世界共同关心的重大问题,也是人类生存与自然的基本矛盾,更是地球科学面临的严峻挑战。

(4)加强地震和海啸知识的普及。虽然未来地震的发生、火山的喷发以及海啸的爆发是不可避免的,因而建立海啸预警系统是必须的,但如果了解一些地震、火山和海啸知识,并进行海啸应急响应,就可以大大减少损失。这次地震海啸发生时,①搅起深海鱼类游到海面甚至死在海滩上和渔获量异常大增(其中以鲭鱼居多)的现象;②引发海水冒泡和海水异常退潮和涨潮现象,"在海水上升时,涌向一边的河口,退潮时就像被吞进了大海";③海洋中发出令人毛骨悚然的怪叫声;④海水突然变白,在前方出现一道长而明亮的水墙。这些都是地震海啸的宏观前兆。然而,人们缺乏海啸有关防灾的常识,以致被海浪卷走丧生。这次海啸对人类社会的影响也是极其巨大而深远的,30万人的生命毁于一旦,烙在人们心灵深处的阴影却挥之难去,留给全人类的却是无尽的思考和反思。家园可以重建,生命却不会重生。因此,如何普及防灾减灾的知识,是全球性的重要任务。

(5)在全球化的背景下构建统一的灾害防御体系。印度洋地震海啸把全球连在一起,并使人们更清醒地认识到世界只不过是一个"地球村",尤其是在全球化的背景下,"自然灾害无国界",对受害国造

成的灾难,同时也是全人类生存环境的共同灾难。在建立真正的全球海啸预警系统上,发达国家与发展中国家如何共享现代防灾减灾科技成果和信息的交流,并在现有科技手段允许的条件下,如何构建全球性重大灾害监测预警体系,且尽快建立国际社会协调一致的灾害救援体系,共同减轻灾害造成的破坏性影响和损失,这是亟待解决的问题。

(6)海啸无情人有情,全世界都在为印度洋地震海啸中受灾的人伸出了援助之手。2005年1月6日,温家宝总理在印尼召开的"东盟地震和海啸灾后问题"特别会议上强调指出,加强区域合作是应对自然灾害的有效途径,把减灾防灾救灾作为中国与东盟及周边地区的防灾抗灾合作。因此,今后我们的地质工作将进入区域合作和全球合作的新阶段,并面临承担更多国际义务的新形势,以展示一个大国的地位与风范。

**致谢** 本文在撰写过程中得到了冯向阳研究员和刘珺博士的大力支持和帮助,在此表示最诚挚地感谢!

### 参考文献

- 包澄澜. 2005. 海啸灾害及其预警系统. 国际地震动态, 总 313 (1): 16~17.
- 陈洋勤. 2003. 地球系统科学的发展与展望. 地球科学进展, 18 (6): 974~979.
- 陈学忠. 2005. 印尼苏门答腊附近海域再次发生大地震. 国际地震动态, 总 316(4): 18~19.
- 陈颢. 海啸的成因与预警系统. 自然杂志, 27(1): 4~7.
- 陈颢, 陈棋福. 2005. 印尼地震海啸及其相关的地球物理现象. 地球物理学进展, 20(1): 112~117.
- 郭增建. 2005. 地球系统科学提出前我国科学界的某些思维. 灾害学, 20(1): 15~17.
- 晋向平, 孙计军. 2005. 印度洋海啸及其启示. 科技情报开发与经济, 15(9): 171~170.
- 刘德富, 康春丽. 2005. 苏门答腊岛 8.7 级大地震前的辐射异常现象. 国际地震动态, 总 313 (1): 37~39.
- 马寅生, 史大年, 安美建, 等. 2005. 苏门答腊地震对柴达木地方震的触发作用. 地质力学学报, 11(2): 110~116.
- 马宗晋, 叶洪. 2005. 2004 年 12 月 26 日苏门答腊—安达曼大地震构造特征及地震海啸灾害. 地学前缘, 12(1): 281~287.
- 王绍玉. 2005. 印度洋地震和海啸灾害引发的若干思考. 国际地震动态, 总 313(1): 46.
- 杨先碧. 2005. 恶劣环境与海啸狼狈为奸. 世界科学, (2): 30, 37.
- 于德福. 2005. 要重视来自地球深部的信息. 地质勘查导报, (136).
- 于福江, 吴玮, 赵联大. 2005. 基于数值预报技术的日本新一代海啸预警系统. 国际地震动态, 总 313(1): 19~22.
- 袁道先. 1999. 对地球系统科学的几点认识. 高校地质学报, 5(1):



1~6.

## References

- Ammon C J, et al. 2005. Rupture Process of the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake. *Science*, 308 (5725): 1133~1139.
- Banerjee P, et al. 2005. The Size and Duration of the Sumatra-Andaman Earthquake from Far-Field Static Offsets. *Science*, 308 (5725): 1769~1772.
- Bao Chenglan. 2005. Tsunami disaster and its pre-warning system. Recent developments in world seismology, 313 (1): 16~17 (in Chinese).
- Boschi E, Casarotti E, Devotia R, Melini D, Piersanti A, Pietrantonio G, Riguzzi F. 2006. Coseismic deformation induced by the Sumatra earthquake. *Journal of Geodynamics*, 42:52~62.
- Chen Panqin. 2005. Earth system science: progress and prospect. *Advance in earth sciences*, 18(6): 974~979 (in Chinese).
- Chen Yong, Chen Qifu. 2005. Sumatra earthquake tsunami and its related geophysical phenomena. *progress in geophysics*. 20 (1): 112~117(in Chinese).
- Chen Yong. 2005. On the cause of tsunami formation and warning systems. *Chinese Journal of Nature*, 27(1): 4~7 (in Chinese).
- Gahalaut V K, Catherine J K. 2006. Rupture characteristics of 28 March 2005 Sumatra earthquake from GPS measurements and its implication for tsunami generation. *Earth and Planetary Science Letters*, 249: 39~46.
- Guo Zengjian. 2005. Some thoughts in Chinese scientific field before the earth system science proposed. *Journal of catastrophology*. 20(1): 15~17 (in Chinese).
- Jin Xiangping, Sun Jijun. 2005. Tsunami on Indian Ocean and its enlightenment. *Sci/tech information development & economy*, 15(9): 171~170 (in Chinese).
- Lay T, et al. 2005. The Great Sumatra-Andaman Earthquake of 26 December 2004. *Science*, 308(5725): 1127~1133.
- Liu Defu, Kang Chunli. 2005. Radiation anomalism before Sumatra island m8.7 earthquake liu defu and kang chunli. Recent developments in world seismology, 313 (1): 37~39 (in Chinese).
- Ma Yinsheng, Si Danian, An Meijian et al. 2005. Triggering of local earthquakes in the Qaidam basin by the sumatra earthquake. *Journal of geomechanics*, 11(2): 110~116 (in Chinese).
- Ma Zongjin, Ye Hong. 2005. The dec. 26, 2004 Sumatra-Andaman earthquake: tectonic setting and the tsunami disaster. *Earth science frontiers*, 12(1): 281~287 (in Chinese).
- McCloskey J, et al. 2005. Indonesian earthquake: Earthquake risk from co-seismic stress. *Nature*, 434: 291.
- Park J, et al. 2005. Earth's Free Oscillations Excited by the 26 December 2004 Sumatra-Andaman Earthquake. *Science*, 308 (5725): 1139~1144.
- Sidao Ni, Hiroo Kanamori, Don Helmberger. 2005. Seismology: Energy radiation from the Sumatra earthquake. *Nature*, 434: 582.
- Stein S, Okal E A. 2005. Seismology: Speed and size of the Sumatra earthquake. *Nature*, 434: 581~582.
- Vigny C W, Simons J F, Abu S, et al. 2005. Insight into the 2004 Sumatra-Andaman earthquake from GPS measurements in southeast Asia. *Nature*, 436: 201~206.
- Wang Shaoyu. 2005. Speculation aroused by Indian Ocean earthquake and tsunami recent developments in world seismology. 313 (1): 46 (in Chinese).
- Yu Fujiang, Wu Wei, Zhao Lianda. 2005. New generation tsunami warning system based on numerical forecast technology in Japan. Recent developments in world seismology, 313(1): 19~22 (in Chinese).
- Yuan Daoxian. 1999. Remarks on earth system science. *Geological journal of China universities*, 5(1):1~6 (in Chinese).