

地震次声波研究

——以苏门答腊俯冲带上的大地震为例

郑菲^{1,2}, 林春¹, 陈维升³

1. 成都理工大学地球探测与信息技术教育部重点实验室, 成都 610059
2. 成都理工大学工程技术学院, 乐山 614007
3. 北京工业大学地震研究所, 北京 100022

摘要 次声监测方法在灾害监测方面得到了越来越广泛的应用, 特别是在地震监测领域。大震来临之前 1~10 d, 通常都会接收到次声波异常信号, 这种异常信号是由于孕震末期地质体运动引起地表波动而产生的。本文以 2004 年苏门答腊 8.7 级大地震为例, 观测研究其震前接收到的次声波异常信号, 并利用有限元数值模拟方法模拟了次声波异常信号的产生。分析结果表明, 苏门答腊大地震发生之前的孕育末期, 地质体的动力学行为引起了次声波, 次声波的能量主要集中在 10^{-3} Hz 量级上, 研究次声波的异常信号可能为地震预测提供一条有价值的途径。

关键词 苏门答腊地震; 俯冲板块; 次声波; 有限元

中图分类号 P315

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.08.007

Earthquake infrasound method: The case of megathrust earthquakes on the Sumatra subduction zone

ZHENG Fei^{1,2}, LIN Chun¹, CHEN Weisheng³

1. Key Laboratory of Earth Exploration & Information Technology of Ministry of Education, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
2. The Engineering and Technical College, Chengdu University of Technology, Leshan 614007, China
3. Earthquake Research Institute, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China

Abstract Infrasound monitoring method has been widely applied in disaster monitoring, especially in earthquake monitoring. One to 10 days before an earthquake, abnormal infrasound waves can usually be received. However, the formation mechanism of the abnormality remains unclear. This paper takes the Sumatra earthquake in 2004 as an example to study the abnormal infrasound signal received before the earthquake and simulate production of the infrasound through finite element modeling. The interaction between atmosphere and deformation of the earth surface caused by dynamic behavior of geologic bodies in the final stage of earthquake incubation caused the observable infrasound. Infrasound was obtained by numerical simulations. Satisfactory agreement between the observed and the simulated infrasound suggests that the proposed model is reasonable. The results show that the atmosphere before the earthquake may have low-frequency sound, and its frequency was focused on the 10^{-3} Hz order of magnitude. There was a good correlation between earthquake and abnormal infrasound signals. The abnormal infrasound signal may be a valuable way for earthquake prediction.

Keywords Sumatra earthquake; subducting plate; infrasound wave; finite element modeling

收稿日期: 2014-12-30; 修回日期: 2015-03-03

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAK29B00); 北京市教委项目(001000543214550)

作者简介: 郑菲, 博士研究生, 研究方向为地球物理学和地球探测与信息技术, 电子邮箱: 445816672@qq.com; 陈维升(通信作者), 副研究员, 研究方向为地震综合预测, 电子邮箱: chenweisheng@bjut.edu.cn

引用格式: 郑菲, 林春, 陈维升. 地震次声波研究——以苏门答腊俯冲带上的大地震为例[J]. 科技导报, 2015, 33(8): 48-52.

次声是频率小于 20 Hz 的声波,是人耳听不到的声音^[1]。它频率低,衰减小,在传播过程中,遇到障碍可以一绕而过,在空气中可以传播很远的距离,因此适于远距离的观测^[2]。特别是随着 CTBTO 全球次声监测系统的逐步建立,次声在灾害监测方面发挥着越来越重要的作用^[3]。次声的研究可以追溯到 20 世纪 70 年代,巴黎国际噪声专业会议正式确定次声的定义,之后作为一门新兴学科逐渐在各国开展研究^[4]。1980 年,胡心康等^[5]探讨了次声与地震的关系,认为二者之间存在密切的相关性。李均之等^[6]发现,全球范围内 7 级以上的地震,近区 5 级以上的地震,在地震之前 1~10 d 内一般都会观测到次声波的异常信号。次声波异常信号的产生是孕震末期震区地下物质的动力学行所引起的,因此,寻找次声波产生的机理,验证次声波与地震之间的对应关系,对于更好地了解地震的发生、发展,预测地震都具有重要的现实意义^[7]。

2004 年 12 月 26 日印度尼西亚苏门答腊西北近海发生 8.7 级特大地震并引发巨大的海啸,造成的死亡是有记录以来最大的^[8]。印度尼西亚苏门答腊岛及其附近海域,位于印度—澳大利亚板块和欧亚板块交汇处的安达曼弧构造带上,板块相互作用强烈,导致强震多发。

本文以 2004 年苏门答腊俯冲带大地震为例,采用二维有限元数值模拟方法,模拟次声波异常信号的产生。对地震所产生的次声波的特性和产生机制的研究,可以深入地研究和认识地震的特征及规律,为次声波方法预测地震提供更有力的依据。

1 观测方法与数据

1.1 次声信号接收装置

次声信号的接收需要合适的次声传感器,将声学信号转换为电学信号易于处理。采用中国科学院声学研究所研制的 CDH-5 型电容式次声传感器,如图 1 所示,探测灵敏度为 0.01 Pa,频响范围为 0.5~200 s,动态范围 80 dB,可接受 0.01 Pa 的次声信号,稳定性好,寿命长,可长期不间断使用,为监测临震次声提供了有效的保障。次声传感器及其类比线路图见图 2。图 3 为次声传感器的频响特性曲线。



图 1 电容式次声传感器

Fig. 1 Capacitive infrasound sensor

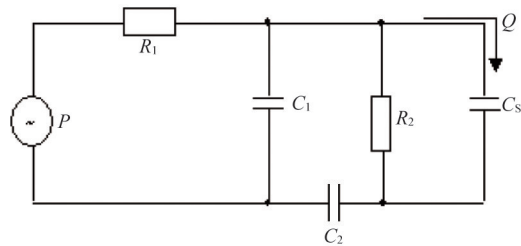


图 2 类比线路

Fig. 2 Analogy circuit diagram

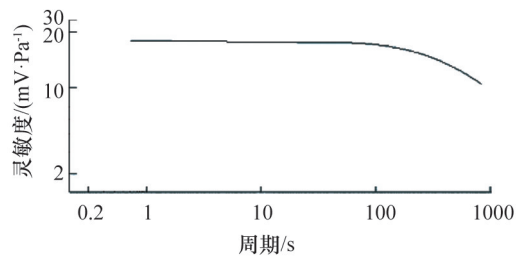


图 3 次声传感器的频响特性曲线

Fig. 3 Frequency response characteristic curve of infrasound sensor

1.2 次声波异常信号

北京工业大学地震研究所经过多年观测,通过对大量次声观测数据统计分析,表明了次声波异常信号与地震之间的相关性^[9]。图 4 为北京工业大学地震研究所的次声传感器于 2004 年 12 月 19 日接收到的声压最大值为 16.8 Pa 的次声波异常信号,随后于 2004 年 12 月 26 日 08:58 分在苏门答腊发生 8.7 级特大地震^[10]。图 4 虚线框图内部分即为信号异常的部分,持续时间将近 350 s。通过对接收到的异常信号进行频谱分析,发现其为频率集中在 $(0\sim 2)\times 10^{-3}$ Hz 量级的低频声能即次声波(图 5)。

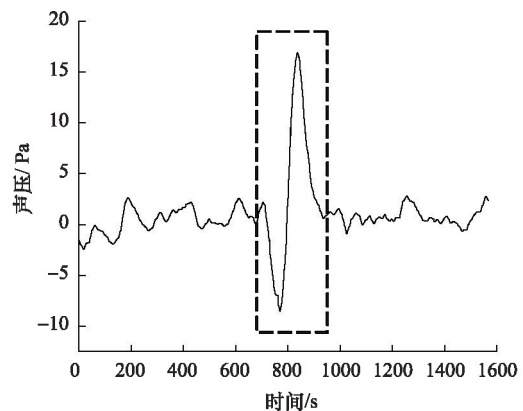


图 4 观测接收到的临震次声波异常信号

Fig. 4 Observed infrasound pressure before the Sumatra earthquake

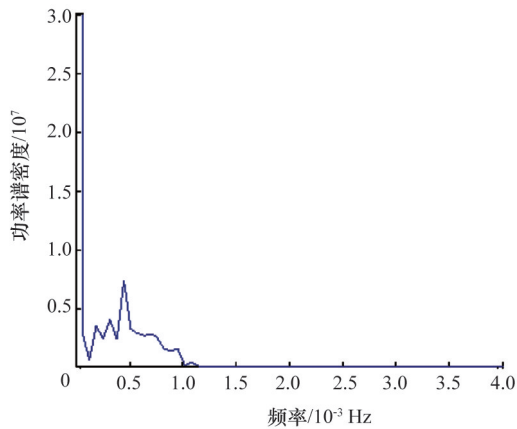


图5 实际接收到的次声波频率

Fig. 5 Frequency spectra of received infrasound signals

2 大气对次声波的吸收

声音在大气层中的衰减主要是由于分子吸收能量、热传导、摩擦以及黏滞效应引起的,相应的吸收系数 ρ 与声波频率 f 的二次方成正比

$$\rho = k \cdot f^2$$

式中, k 为常数。

由于次声波本身的频率很低,所以它在传播过程中大气对其吸收系数就很小,正是由于次声波不容易被吸收的特点使它传播很远的距离。固体和液体对声波的吸收系数还与波的频率成正比,因而对频率很低的次声波吸收很少。

3 大气对流层与地下物质耦合方程

用有限单元将地下物质和大气对流层离散后,在地下物质和对流层界面处,地下物质位移的自由度 U 和大气对流层压力的自由度 P 发生耦合,对应的有限元矩阵方程为

$$M_s \ddot{U} + K_s U = F_s + RP$$

$$M_a \ddot{P} + K_a P = F_a - \rho_a R^T \ddot{U}$$

其中, M_s 为地下物质质量矩阵; \ddot{U} 为节点的位移加速度矢量; K_s 为地下物质刚度矩阵; U 为节点的位移矢量; F_s 为地下物质节点的载荷矢量; R 为耦合矩阵,代表与耦合结构界面上节点相联系的有效表面的面积; P 为大气对流层单元节点的压力矢量; M_a 为大气对流层的质量矩阵; \ddot{P} 为节点压力对时间二阶导数; K_a 为大气对流层的刚度矩阵; F_a 为大气对流层节点载荷矢量; ρ_a 为大气对流层的初始密度;把未知的载荷量放在方程左边并将两方程合并成一个方程,得

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ \rho_a R & M_a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U} \\ \ddot{P} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & -R \\ 0 & K_a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_s \\ F_a \end{Bmatrix}$$

此即为大气对流层-地质体界面处节点位移和压力自由度耦合方程,其可按动力学问题的有限元方法求解和计算。

4 地质背景

印度-澳大利亚板块和欧亚板块的边界带由喜马拉雅碰撞带和印度洋俯冲带组成。该次大地震发生在印度洋俯冲带上。俯冲带属于会聚型的板块边界,是地球上地震活动最为强烈的地带,全球地震能量释放大约有90%都发生在板块俯冲带的附近。俯冲带上的地震分为俯冲板块和上覆板块间的浅源逆冲型地震、上覆板块内部的浅源地震、与俯冲板块相关的中深部地震和大洋板块内部地震4种^[6],2004年12月26日发生在苏门答腊附近的8.7级大地震属于第1种,是板块相对运动的产物,也被称为俯冲型板块边界大地震。

俯冲板块的边缘部分沿着苏门答腊西岸的海沟延伸。印度板块洋底部分与缅甸小板块碰撞并且插入到它的下面(图6)。缅甸小板块位于巽他板块和印度板块之间,巽他板块包含了大部分的东南亚区域,东倾的印度板块下倾深度为300 km左右。平均每年印度板块和缅甸小板块之间都有大约汇聚20 mm,而巨型冲断层是闭锁的,应变不断的积累,积累到一定程度达到并超过断层的摩擦极限时,大地震就发生了。板块边界冲断层类型的地震是迄今为止发生过的最大的地震,板块界面的滑动产生了能量很大的地震波,给其周围造成了巨大的破坏。这种类型的地震一般发生在水下的海沟^[8]。

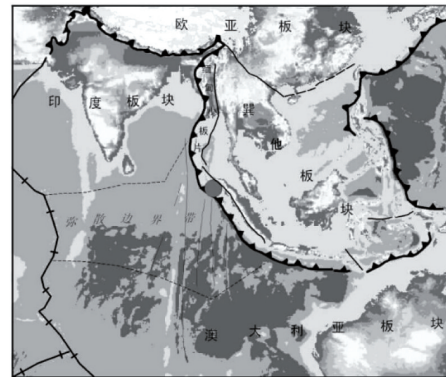


图6 地震区板块构造示意

Fig. 6 Plate structure in earthquake zone

5 次声波数值模拟

本文有限元分析模型是基于沟-弧系统概念的理论模型,苏门答腊-安达曼弧位于巽他海峡以西至安达曼岛以北,以斜向俯冲运动为主。俯冲板块形态可根据地震活动进一步揭示,Guzman等^[11]根据地震活动推测的俯冲板块形态,俯冲角度在浅部很小,随深度逐渐增大。该地区的有限元分析模型如图7所示。图中①为大气对流层;②为上地壳;③为俯冲板块,10 km深处的倾角从15°~20°加深到30°~40°;④为中地壳;⑤为下地壳;⑥为地幔。考虑岩石圈和上地幔物质的非均匀性,区域模型内不同的地质结构选取不同的材料参数。具体参数选择列于表1。

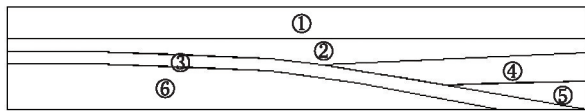


图7 苏门答腊地区结构示意图

Fig. 7 Geological constitution in the Sumatra

表1 模型的材料参数

Table 1 Parameters of materials used in the finite element model

序号	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比
①	1.293		
②	2.6	50	0.3
③	2.89	500	0.37
④	2.95	50	0.3
⑤	3.35	50	0.3
⑥	3.37	100	0.3

所选模型平面尺寸是 330 km×44 km。采用三角形单元离散,有限元网格如图 8 所示,包含 877 个节点和 1592 个单元。由于模型选取的地质体范围较大,而孕震体只对其附近区域影响较大,因此,在有限元分析计算时,模型的左右两侧边界施加水平方向零位移约束,底部边界施加全位移零约束,空气层上部边界设为自由表面。

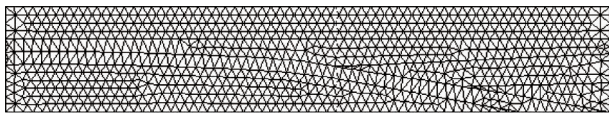


图8 模型网格

Fig. 8 Mesh for 2D finite element model

俯冲板块相对于周围较热的地幔来说,温度比较低,因此它的密度比较大,这就导致俯冲板块具有向下的拉力,也就是重力下沉的作用力。俯冲板块与周围的地幔之间密度差异会引起板块间的拉力,产生了分散的挤压应力和引张应力。俯冲板块的年滑移量大约为 9 cm^[12],但俯冲板块与周围地幔的相对运动比较复杂,考虑到界面间的摩擦力,俯冲板块与地幔两者之间大多数时间处于很缓慢的滑移,并不断的累积能量,当能量累积达到并超过临界极限,便发生突然的相对滑动,也就是孕震末期。对俯冲板块的模拟方法各异,如闭锁单元法^[13]、初始应变法^[14]、用位移代替俯冲板块的推拽力的方法^[15]等。本文采用简化方法,对俯冲板块采用施加水平、垂向加速度模拟其运动,采用二维瞬态有限元分析方法,通过改变加速度模拟滑移的剧烈程度,根据主震持续的时间和释放的能量,分 18 级加载模拟,具体滑动速率见表 2,作用时间总计 400 s,未考虑地质体的自重。

表2 主震持续时间和能量释放关系(滑动速率)

Table 2 Relationship between earthquake duration and energy release

持续时间/s	速度/(km·s ⁻¹)	持续时间/s	速度/(km·s ⁻¹)
0~50	2.3	201~220	0
51~60	0	221~230	10
61~90	4.5	231~270	3.7
91~100	0	271~280	-20
101~110	-10	281~310	10
111~120	12	311~320	0
121~130	0	321~331	-3
131~180	5.5	341~350	10
181~200	3	351~400	2.4

6 结果分析及讨论

6.1 临震次声波的图像

在有限元模拟分析中,考虑了空气与地质体之间的流固耦合作用,由于地下物质的动力学行为引起了地表的运动,地表又与大气对流层相互作用从而在空气中产生了声波信号。图 9 所示为有限元数值模拟计算得到的声压的波动曲线。将有限元模拟结果与实际观测的声波信号(图 4)进行对比,尽管波形还存在一些差异,但是声压、幅值等主要的曲线特征与观测的异常信号曲线都吻合的比较好。



图9 模拟得到的声压信号

Fig. 9 Infrasound pressure by numerical simulation

6.2 临震次声波的频率

大量观测表明,通常情况下,7 级以上的地震震前 2~10 d 都能观测到频率很低的临震次声波,并且不同地区异常信号的频率是不同的^[6]。图 10 为本文数值模拟计算得到的次声异常信号所对应的频率,其主要频率集中在 (0~2)×10⁻³ Hz。模拟结果与观测结果基本一致。

孕震末期地质体的动力学行为引起了次声波的产生,产生的次声波的频率集中在 10⁻³Hz 量级,次声波异常信号与地

震之间存在较好的对应关系,今后将进一步研究次声波在空气中的传播特性,为地震预测提供更有丰富的证据。

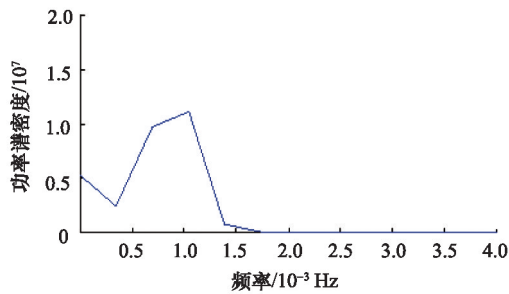


图 10 数值模拟计算出的次声波的频率
Fig. 10 Infrasound frequency spectra by numerical simulation

7 结论

孕震末期地质体的动力学行为引起了次声波的产生,产生的次声波的频率集中在 10^{-3} Hz 量级,次声波异常信号与地震之间存在较好的对应关系,今后将进一步研究次声波在空气中的传播特性,为地震预测提供更有丰富的证据。

参考文献 (References)

- [1] 童娜. 次声的特点及其应用[J]. 声学技术, 2003, 22(3): 199-202.
Tong Na. Features and applications of infrasound[J]. Technical Acoustics, 2003, 22(3): 199-202.
- [2] 郑菲. 临震次声异常产生的机理研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2006.
Zheng Fei. Mechanism model of infrasound abnormality before strong earthquakes[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006.
- [3] Pichon A L, E Blanc, Hauchecome A. Infrasound monitoring for atmospheric studies[M]. New York: Springer, 2010.
- [4] Michael A H. Global monitoring of subaudible sound in Earth's atmosphere [C]. Oceans 2003, San Diego, CA, USA, September 22-26, 2003.
- [5] 胡心康, 石金瑞, 任建国. 大气中一种压力波动与地震关系的初步探索[J]. 地球物理学报, 1980, 23(4): 451-458.
Hu Xinkang, Shi Jinrui, Ren Jianguo. Preliminary study of the relation between a kind of pressure waves in the atmosphere and earthquakes [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1980, 23(4): 451-458.
- [6] Li J Z, Bai Z Q, Chen W S, et al. Strong earthquakes can be predicted: A multidisciplinary method for strong earthquake prediction[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2003, 3: 703-712.
- [7] 秦飞, 郑菲, 李均之, 等. 临震次声异常产生的机理研究[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(1): 104-107.
Qin Fei, Zheng Fei, Li Junzhi, et al. Application of commensurability information system in the earthquake prediction[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33(1): 104-107.
- [8] Stein S, Okal E A, 赵京凤, 等. 2004年苏门答腊地震及印度洋海啸: 实情与成因[J]. 世界地震译丛, 2006(5): 1-9.
Stein S, Okal E A, Zhao Jingfeng, et al. Speed and size of the Sumatra earthquake[J]. Translated World Seismology, 2006(5): 1-9.
- [9] 崔晓燕. 次声异常信号与地震的关系[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
Cui Xiaoyan. Relation between the abnormal infrasound signals and the earthquakes[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010.
- [10] 李均之, 陈维升, 夏雅琴, 等. 在2004年12月26日印尼9级地震前收到特大临震信息[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(4): 1061-1063.
Li Junzhi, Chen Weisheng, Xia Yaqin, et al. Imminent very strong infrasonic wave precursor received before the earthquake of magnitude $M=9.0$, 26th Dec. 2004 of Indonesia[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(4): 1061-1063.
- [11] Guzman-Speziale M, Ni J F. Seismicity and active tectonics of the western Sunda Arc[J]. World and Regional Geology, 1996: 63-84.
- [12] Khan S A, Gudmundsson O, 左玉玲, 等. 苏门答腊-安达曼地震的GPS分析[J]. 世界地震译丛, 2005(1): 9-12.
Khan S A, Gudmundsson O, Zuo Yuling, et al. GPS analyses of the Sumatra-Andaman earthquake[J]. Translated World Seismology, 2005 (1): 9-12.
- [13] Hirahara K. Interplate earthquake fault slip during periodic earthquake cycles in a viscoelastic medium at a subduction zone[J]. Pure and applied geophysics, 2002, 159(10): 2201-2220.
- [14] 高祥林, 罗焕炎, 平原和朗. 日本俯冲带应力产生与传播的数值模拟 [J]. 地震地质, 1994, 16(2): 97-108.
Gao Xianglin, Luo Huanyan, Kazuro Hirahara. Numerical modeling of stress generation and transfer caused by the Japanese subduction zone [J]. Seismology and Geology, 1994, 16(2): 97-108.
- [15] Sato K. Stress and displacement fields in the northeastern Japan Island arc as evaluated with three-dimensional finite element method and their tectonic interpretations[J]. Tohoku Geophysical Journal, 1988, 31 (3/4): 57-99.

(责任编辑 吴晓丽)

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿: www.kjdb.org。