

doi:10.3799/dqkx.2014.163

三峡库区巴东地震(M_s 5.1)成因机制及次声波信号

李献瑞^{1,2},曾佐勋^{2,3,4*},周强⁵,贺赤诚^{2,4},刘江平¹,赵娟^{3,6},潘黎黎^{2,4}

1.中国地质大学地球物理与空间信息学院,湖北武汉 430074

2.华中构造力学中心,湖北武汉 430074

3.中国地质大学教育部长江三峡库区地质灾害研究中心,湖北武汉 430074

4.中国地质大学地球科学学院,湖北武汉 430074

5.成都理工大学工程技术学院,四川乐山 614000

6.中国地质大学机械与电子信息学院,湖北武汉 430074

摘要:2013年12月16日三峡库区巴东发生 M_s 5.1地震。根据 eigen-6c2 模型研究了巴东地区的8-638阶卫星重力异常,结果表明:该地区场源深度为10 km的地壳为局部重力低异常,反映了该处物质密度较周围偏低,形成低密度层。同时,研究了该地区速度结构剖面,结果表明:巴东地区地壳5~9 km及10~15 km深处存在上下两个低速层,上部低速层与水库渗水有关,下部低速层与地幔热流体的上涌有关。低密度层和低速层的确定为韧性流变层的存在提供了证据。巴东地震是地壳深部能量的长期集聚与突发释放,属构造地震。然而,库水下渗引起的上部低速异常降低了断层活动的阈值,震前库水载荷的变化对此次巴东地震的发生起到了触发作用。通过对比次声波和地震波,我们得出次声波仪记录到的异常信号为本地次声波。

关键词:巴东地震;卫星重力异常;深部结构特征;水库触发地震;次声波异常;天然地震。

中图分类号:P315.2

文章编号:1000-2383(2014)12-1793-14

收稿日期:2014-09-12

Seismogenesis of Badong Earthquake (M_s 5.1) in Three Gorges Reservoir Area and Infrasound Anomaly

Li Xianrui^{1,2}, Zeng Zuoxun^{2,3,4*}, Zhou Qiang⁵, He Chicheng^{2,4}, Liu Jiangping¹, Zhao Juan^{3,6}, Pan Lili^{2,4}

1. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Huazhong Tectonomechanical Research Center, Wuhan 430074, China

3. Three Gorges Research Center for Geo-hazard, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

5. The Engineering & Technology College of Chengdu University of Technology, Leshan 614000, China

6. Faculty of Mechanical & Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: On 16 December, 2013, an earthquake of M_s 5.1 occurred in the Badong County, the Three Gorges reservoir area, China. Using the EIGEN-6C2 model, the satellite 8-638 order gravity anomalies in this area were studied. The results show that there is a regional low gravity anomaly beneath Badong area at 10 km, which may imply that rock density this area of is lower than its surroundings. Meanwhile, the profiles of crustal velocity structure of this area indicate the existence of two low-velocity layers at depth of 5~9 km and 10~15 km respectively. We believe that the upper layer is closely related to the reservoir seepage and the lower layer may result from the upwelling of the mantle hydrothermal fluid. The low-density layer and the two low-velocity layers provide an evidence for the existence of a possible ductile layer. The occurrence of Badong earthquake is due to the long-term energy accumulation and abrupt release at the deep crust, thus it is a tectonic earthquake. The low-velocity anomaly in the upper crust caused by reservoir seepage decreased the threshold value of fault activities and the change of water load

基金项目:国家“985”创新平台建设项目“地震及其次生地质灾害研究”;国家自然科学基金重点项目(No. 41230206)。

作者简介:李献瑞(1988—),男,硕士,主要从事天然地震研究.E-mail: lixianrui1988@126.com

* 通讯作者:曾佐勋,E-mail: zuoxun.zeng@126.com

of this reservoir might trigger the Badong earthquake. By comparing the infrasound with seismic waves, we conclude that the infrasound anomalies recorded by the infrasound monitor array are local infrasound.

Key words: Badong earthquake; satellite gravity anomaly; deep structural condition; reservoir-triggered earthquake; infrasound anomaly; earthquake.

0 引言

2013 年 12 月 16 日 13 时 04 分 52.3 秒,三峡库区巴东县东北部发生 $M_s 5.1$ 地震。震中为 110.45°E , 31.10°N ,位于三峡水库巴东蓄水段内,距离三峡大坝仅 61 km,震源深度为 10 km。此次地震为有仪器记录以来,巴东地区发生的震级最大的一次地震。因此,研究其成因机制对巴东地区及三峡水库库段内的地震监测具有重要意义。为此,笔者选择 $108.5^\circ\text{E} \sim 112.0^\circ\text{E}$ 和 $29.0^\circ\text{N} \sim 32.5^\circ\text{N}$ 作为本文的研究范围,从卫星重力异常特征、地壳速度结构、震源机制与活动断层的关系、三峡水库对该地震的影响等方面探讨此次巴东 $M_s 5.1$ 地震成因。最后,分析了巴东地区次声波异常特征及地震与次声波异常之间的联系。

1 巴东地震区域活动构造背景

研究区位于上扬子克拉通内的川东—鄂西褶皱带和中扬子的八面山褶皱带,北接秦岭一大别造山带,东西方向分别以大庸断裂和华蓥山断裂为界,同时位于江南造山带的北缘(图 1a)(Yan *et al.*, 2003)。区内 NE 向和 NWW 向断裂是活动性较强的两组断裂(图 1b),东部、西部现今分别受到以 NE 向和 NNW 向挤压为主的构造应力场作用(杨淑贤等,2005;李细光等,2006)。震区位于黄陵背斜西侧,发育的断裂有 NE 向恩施断裂、建始断裂、高桥断裂,NNNE 向周家山—牛口断裂、新华—水田坝断裂,近 EW 向的城口—房县断裂以及 NNW-NW 向断裂,如远安断裂、雾渡河断裂、仙女山断裂、天阳坪断裂和松园坪断裂。

恩施断裂(F4)主体沿恩施盆地西缘展布,总体走向约 30° 。断裂带分 3 段,主断面倾向 SE,北段倾角约 45° ,中、南段约 80° ,喜山运动晚期以来,断裂带整体以逆冲挤压兼左旋扭动为主(胡道功,1997;汪华斌等,1998;吴树仁等,1999,2000)。建始断裂(F5)总体走向 30° ,倾向 NW,断裂具多期活动,喜山期以来表现为高角度逆冲断层兼左旋走滑性质(胡道功,1997;吴树仁等,1999)。高桥断裂(F8)走向

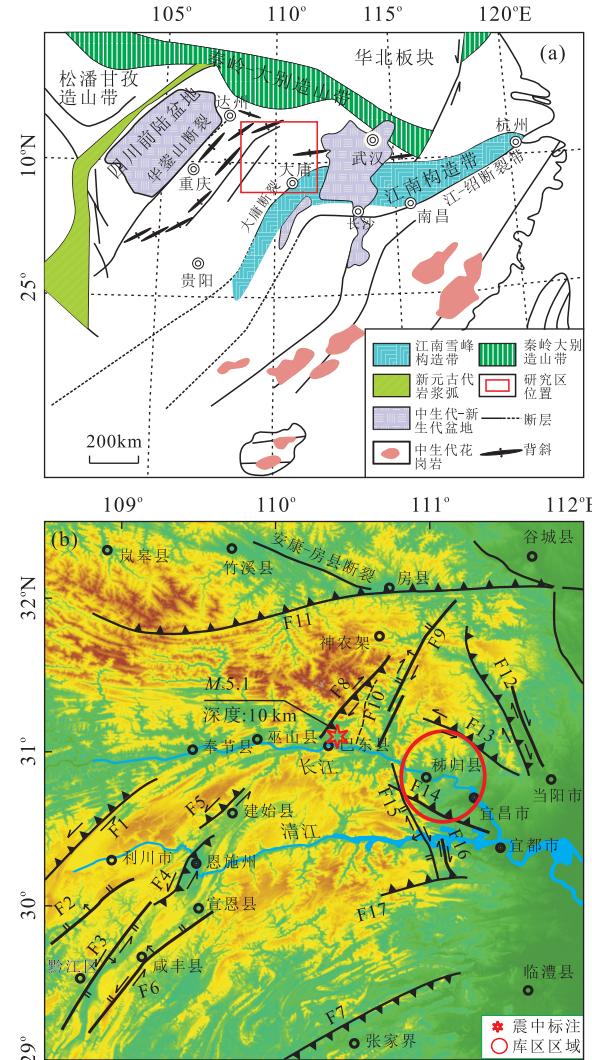


图 1 区域构造位置(a)及地震地质构造(b)

Fig. 1 Regional structure location (a) and its seismo-geological map (b)

F1. 齐岳山断层; F2. 郁江断层带; F3. 黔江断层带; F4. 恩施断裂; F5. 建始断裂; F6. 咸丰断裂; F7. 大庸—保靖断裂; F8. 高桥断裂; F9. 新华—水田坝断层; F10. 周家山—牛口断层; F11. 城口—房县断裂; F12. 远安断裂带; F13. 雾渡河断裂; F14. 天阳坪断裂; F15. 仙女山断裂; F16. 松园坪断层; F17. 渔洋关断裂; a. 改自 Yan *et al.* (2003); b. 修编自 <http://www.eq-igl.ac.cn/admin/upload/files/地震应急20131216J1.pdf>

为 45° ,倾向 SE,倾角约为 60° 。新华—水田坝断裂(F9)走向 NNE,新华段属基底断裂,早期具左旋走滑性质;水田坝段属盖层断裂,断层面西倾,倾角约 70° ,西盘向南运动,断层具张扭性质,第四纪以来活

动性不明显(湖北省地质矿产局,1990;刘世凯等,2009).周家山—牛口断裂(F10)发育于震中东部,断层总体走向 20° ,倾向 300° ,倾角约 70° .此断层为周家山向斜内部的一条横断层,表现为左行平移逆冲活动的特点.喜山期以来为张性正断性质,其最新活动年代测定为晚更新世早期(周乐群和夏金梧,1996).城口—房县断裂(F11)主断面倾向NNW-NNE向,倾角 $20^\circ\sim60^\circ$,主断裂控制着南北两大构造单元的分界,其与大庸断裂均属深部断裂.地球物理资料显示,该断裂带在剖面上呈现铲式断层特征,深部倾角逐渐变缓,中更新世有过明显活动(胡道功,1997).

区内还发育一系列NW向断层,如远安断裂带,雾渡河断裂,仙女山断裂,天阳坪断裂和松园坪断裂.其中远安断裂带(F12)走向NNW,断面东倾,倾角 $50^\circ\sim80^\circ$,表现为右旋走滑兼压性特征,第四纪以来活动性较强(李安然等,1982;李坪和李愿军,2004).雾渡河断裂(F13)走向 320° ,倾向NE,倾角 $45^\circ\sim80^\circ$,最新构造活动表现为左旋逆断性质,而晚更新世以来活动性不明显(李坪和李愿军,2004;潘博等,2012).天阳坪断裂(F14)走向 320° ,倾向SW,倾角 $30^\circ\sim70^\circ$,西接于仙女山断裂,西段倾角较陡,剖面表现为逆冲叠瓦状冲断组合,第四纪以来活动性较弱(吴树仁等,1995).仙女山断裂(F15)走向 $340^\circ\sim355^\circ$,早期表现为逆冲性质,断面向东或西陡倾,深部资料显示该断裂未有越过长江的迹象.断裂最新活动时间为早、中更新世,以右旋走滑兼正断倾滑性质为主(湖北省地质矿产局,1990;胡道功等,1999;李细光等,2006).此断裂东段分支断裂即松园坪断层(F16)走向 350° ,倾向向西,倾角 80° 左右,以右行走滑运动为主(胡道功,1997).其南端发育有近东西向的渔洋关断裂(F17),倾向SSE,倾角较陡,表现为逆冲性质,活动性不明显(汤双立等,2011).

恩施巴东地震震中位置位于高桥断裂与周家山—牛口断裂之间,区域上受控于NE向和NNW向构造应力场的共同作用,且深部结构对本区的构造活动亦有重要影响.

2 巴东地区深部结构

2.1 卫星重力异常特征

地球重力场是地球科学研究与分析中的基本物理场(许厚泽等,2012),它反映了地球表层及内部物质分布状态及其运动形态.我们可以利用重力卫星

来直接观测地球质量分布和迁移等物理量,用以探讨重力变化与地震形成和发展的关系.徐海军等(2012)通过GOCE卫星数据计算中国地区的卫星重力异常,发现大地震通常发生在重力变化剧烈的梯度带上;费琪(2008,2009)利用卫星重力图研究龙门山地区深部构造,并指出卫星重力资料对地震研究的重要意义.

卫星重力测量是利用重力卫星,通过SST(卫星跟踪卫星)和SSG(卫星重力梯度)技术反演和测量全球均匀分布、高精度的地球重力场及其时间变化数据(许厚泽等,2012).重力异常反映理论模型与实际观测结果之间的差异,是地球物质密度分布不均匀和物质空间分布不均匀性的直接反映(徐海军等,2012).不同阶次的卫星重力异常,反映地球内部不同深度扰动场源密度分布的特点(费琪,2008).低阶异常反映深部扰动源,高阶异常反映浅部的扰动源,因此可以根据不同阶次的重力异常特征,分析地球内部不同深度物质密度的结构特征(张健等,1997).

卫星重力异常中使用的阶次与场源深度的关系,可参考Bowin(1983)提供的模型,经过简化和推导,得到重力场球谐函数阶次与场源深度之间的近似关系式:

$$H = \frac{R}{n-1},$$

式中: n 为重力场球谐函数阶次(重力异常阶次), R 为地球半径(取6400 km), H 为场源深度(袁学诚,2005).

我们采用eigen-6c2模型,计算得到研究区内8-638阶卫星布格重力异常.根据上述公式,8-638阶卫星重力异常图反映的是地下 $10\sim914$ km处的物质密度异常,由于不同阶次波长相差悬殊,因此8-638阶卫星重力异常图上明显的局部重力异常主要是高阶谐波或较浅物质产生的异常,低阶异常只作为宽广的背景值存在(袁学诚,2005).所以一般可以认为图2主要反映的是地下10 km处的布格重力异常特征.

研究区内,布格重力异常值在 $-2.368\ 664\ 8\times10$ mGal至 $-1.389\ 717\ 0\times10^2$ mGal之间,由东向西,负异常值呈逐渐增大的趋势,平均 $-9.569\ 294\ 3\times10$ mGal.研究区内存在一条近南北向的重力梯级带,该梯级带北部为NNW走向,中部为SN向,而南部为SW向,总体为一个向东凸起的弧形带;重力梯级带东界以 -70 mGal等值线作为

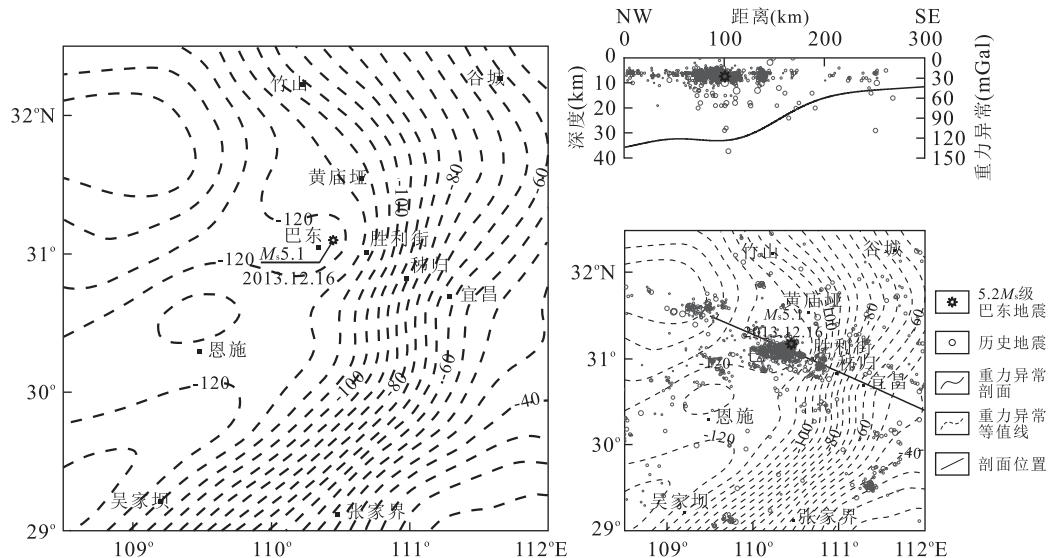


图2 巴东地区8-638阶(10 km)卫星重力异常及历史地震分布

Fig.2 The satellite gravity anomalies of 8-638 order and history earthquakes distribution in Badong

边界,南起自张家界,途经宜昌,达谷城县,西界以—115 mGal等值线为边界,南起自吴家坝,经秭归西部的胜利街,在黄庙垭转至北西向,最后到达竹山县地区。重力梯级带北宽南窄,北部梯级带宽度大致为120 km,南部宽度减小至80 km,最窄处位于秭归—宜昌一线,约为70 km。梯级带以东地区等值线较稀疏,无明显方向性,但在研究区东南角存在相对较高的重力异常值,其梯度较平缓;梯级带西侧异常值在—115~—138 mGal之间,在巴东至巫山地区呈现一个长轴近东西向的楔形局部重力低值带,异常值达—125 mGal。在研究区北西边缘处,其异常达到—138 mGal。

卫星重力异常反应的是地下物质密度的分布特征,8-638阶卫星重力异常反应了地下10 km处的物质密度分布规律。巴东地区的局部重力低异常值在—125 mGal左右,比周围物质,尤其是巴东东部物质引起的重力异常值要低10 mGal左右。我们选择过此次地震震中(110.45°E, 31.10°N),垂直重力梯级带方向做卫星重力异常剖面,可以看到由南东至北西,卫星重力异常呈现阶梯下降;从图幅边界至宜昌,重力异常较平缓,保持在—50 mGal左右;经过宜昌之后,重力异常迅速减小,由—60 mGal迅速减小至胜利街位置处的—120 mGal;巴东地区的重力异常总体较平稳,处在—120 mGal以下,剖面形状上显示为一个平台,但在其内部,平台中心位置重力异常值较周围稍微偏低,显示出一个局部轻微凹陷;过巴东往北西,重力异常继续减小至

—140 mGal,下降平缓。重力异常的平面图和剖面图均反映出了在研究区中东部存在一个重力梯级带,陈学波等(1994)利用人工地震得到该地区的莫霍面埋深,指出本区布格重力异常梯级带主要反映莫霍面斜坡。巴东下部局部重力低异常显示的轻微凹陷,与巴东附近的幔凹位置一致,揭示出该地区下部存在低密度物质,处于一种不稳定状态。

地震空间分布上,我们选用IRIS提供的1975—2008年间研究区内大于2.5级地震以及国家地震台网统一目录提供的2008年以来震级大于M_s1.0的地震,绘制地震平面分布图和剖面图,其中剖面图是选用测线两侧50 km范围内的地震进行投影得到。地震平面分布图显示,研究区内的地震主要位于巴东地区。剖面图显示,地震主要集中在巴东地区的幔凹位置及重力梯度带上,震源深度分布在4~8 km之间,为浅源地震。但在幔凹位置存在一些震源深度超过20 km甚至达到40 km的地震,反映了巴东地区下部可能存在韧性流变层,影响该地区的地震活动。

2.2 由宽频地震仪获得的深部流变结构

为了研究三峡库区的地下速度结构,中国地质大学(武汉)三峡地质灾害中心和地空学院于2011年4—5月在三峡地区布设了流动宽频地震仪台阵,并进行数据采集工作。应用噪声成像方法反演三峡地区的地下速度结构,获得了一条横穿秭归盆地及黄陵背斜的横波速度结构剖面(图3)。

剖面显示,从巴东至土门横波速度在水平方向

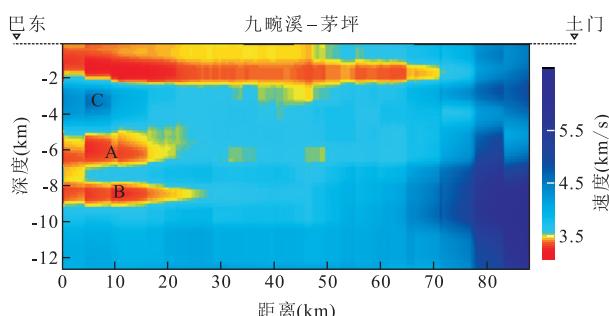


图 3 巴东—茅坪—土门一线速度结构剖面(据周强,2011)

Fig.3 Profile of velocity structure along Badong-Maoping-Tumen

上总体呈现递增的趋势,垂向上随深度增加而增大。在深度 2.0 km 处出现了速度不连续界面,初步认为该界面以上是低速(小于 3.5 km/s)的沉积层,这与该地区的人工测深结果(陈学波等,1994)吻合。另外,沉积层沿剖面向东,逐渐变薄,并在茅坪以东 20.0 km 处圈闭进而过渡到高速区。巴东地区地下 5.0~9.5 km 处出现一个厚约 4.0 km 的低速层(小于 3.5 km/s),向东逐渐变为两个上下独立的层位,厚度均在 1.5 km 左右,总体呈现出一个双层状结构(A 层和 B 层)。同上部的沉积层相比较,下部的低速层具有较高的平均速度,反映两者岩性存在差异。在低速层 A 层之上,存在一个高速层 C。黄陵背斜下部总体的速度较高,盖层中的速度不连续界面在黄陵背斜 4.0 km 处呈现一种下凹形态,且在深度 6.0 km 处,断续出现局部低速层,向西延长可与巴东地区低速层 A 层相连。

由此可知,三峡水库坝址及邻区内上地壳的横向不均匀性表现显著,这种横向不均匀性既存在于秭归盆地、黄陵背斜和其它区域等不同的地质构造

单元之间,同时也存在于同一构造单元中,揭示了地壳浅部存在低速异常区和速度梯度带,为研究三峡现今地下结构提供依据。

2.3 其他地球物理剖面

根据前人研究成果,研究区沉积层以下的地壳可分为上中下 3 层(图 4)。上部沉积盖层埋深界面在黄陵背斜两侧表现为东缓西陡,上地壳底面埋深为 13~16 km,在黄陵背斜处最深,约为 16 km。巫山和土门之下,分别存在一个局部高速层,顶面埋深约为 8 km,厚度较薄约 2 km。剖面显示,上地壳底部存在一低速层,赋存深度范围为 10~15 km,厚约 4~7 km。低速层横截面形态显示为肿缩状,其最大厚度位于黄陵背斜之下,推测其成因可能与黄陵背斜有关。巴东下部低速层顶面埋深在 10 km 左右,厚约 5 km,厚度均匀。中地壳厚度稳定,速度横向变化明显,黄陵背斜之下,中地壳速度较周围偏低。下地壳厚度变化大,在巫山东侧及黄陵背斜之下莫霍面由东向西呈阶梯状下降。

综上所述:研究区内的卫星重力异常特征显示巴东地区存在一个低密度体,历史地震空间分布图表明该区是地震的多发地,而且从获得的速度结构剖面可知巴东地区地壳中存在低速层。这些资料为解释本次恩施巴东地震成因问题提供了重要依据。

3 恩施巴东地震形成机制

3.1 从深部构造看形成机制

不少学者研究壳内及上地幔低速层与地震空间位置和活动性的关系,普遍认为低速层与地震的孕育及发震有密切关系。低速层的成因有多种假说(杨

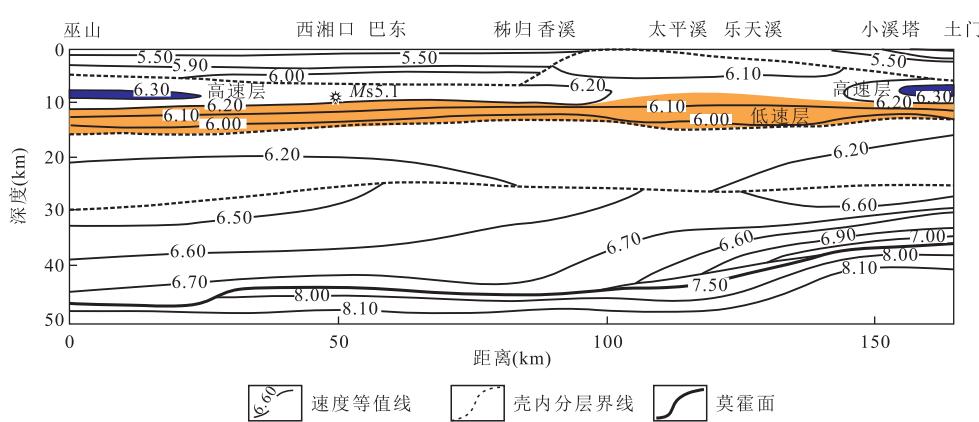


图 4 巫山—土门人工地震测深剖面(修编自陈学波等,1994)

Fig.4 Profile of artificial earthquake sounding along Wushan-Tumen

晓松等,2003),但不存在全球性普遍适用的模式(徐义贤,1995).这些假说都强调低速层是塑性层,易于流动,不易积累应变能(李清河等,1991;夏怀宽等,1992;徐辉龙等,2006),起到应力传递的作用,易于促进壳内层间解耦(李清河等,1991;王伟涛等,2009),属于地壳中的构造滑脱层(李秋生等,2004),弱化层(赖晓玲等,2006).

莫霍面的倾斜代表着一种不稳定状态(李秋生等,2004),能够为所在地的壳内活动,地震孕育及地表活动断裂提供深部动力(夏怀宽等,1992).地震(尤其是中强地震)一般集中分布在地壳厚度发生较大变化的部位或上地幔及莫霍面上隆地区(李清河等,1991;任青芳等,1992;滕吉文,1994;周民都等,1997;赖晓玲等,2006).在前人已做工作的基础上,杨巍然等(2009)提出板内地震的三层次构造模式——软流圈上隆的深部构造,中地壳韧性流变层(低速高导层)同其上下强硬层组成的中部三明治构造和上地壳浅表脆性断裂构造.认为地震过程是深部层次的供能,中部塑性层的聚能和上地壳脆性断层触发三者有机结合的一个过程.

人工地震测深表明太平溪处存在断差3~5 km的莫霍面断点,为古断裂的反映(陈学波等,1994).该断裂切穿下地壳和中地壳,最终埋入上地壳,具有张性正断性质,是幔源物质的通道(Li et al.,2009).野外调查发现,黄陵背斜南部太平溪出露强烈变质的元古宙超镁铁—镁铁质岩,具有地幔岩地球化学特征(彭松柏等,2010),推断该断裂形成于元古宙,并至今对该地区的深部物质运移过程产生重要影响.地幔热流体沿此既存通道上升,后经地质运动,

热流体同地壳内岩石发生相互作用,逐步形成现今低速层;同时向外辐射能量,导致黄陵背斜下部在横向其速度普遍低于周围岩石,等速度线显示一种“下凹上凸”的透镜状.另外,巴东—巫山之间下地壳也存在一正断性质的切入地幔的断裂,客观上为地幔物质上涌提供了通道,影响巴东地区的低速层(图5).

综合卫星重力异常(图2)及地球物理剖面解释(图5),可知研究区莫霍面形态上呈东高西低态势,与卫星重力异常相吻合.巴东地区下部存在一个局部重力低,显示其莫霍面为“下凹型”.位于重力梯级带上的地幔高密度物质向西蠕滑,使地壳深部物质产生东西向的缩短;同时巴东幔凹地区也存在着高密度物质向低密度区蠕滑作用,具体表现为物质由幔凹边缘向凹陷的底部移动.两方面的作用使巴东地区深部呈现一种不稳定状态.

地球深部的动力作用、化学能、热能等以地幔热流体的形式,沿着断裂或裂隙由深部转移至浅部,在中地壳被吸收并储存形成低速层.随着能量的增加,低速层的塑性也得到相应提高,成为地壳内部的强韧性带.由地质运动引起的应变积累,在应力超过韧性流变层上部或边缘的脆性层破裂强度或摩擦极限时,便会引起接触面上方突发脆性破裂,形成地震(曾佐勋等,2013).该区历史地震的震源深度大多位于此低速层之上,证明板内地震三层次构造模型的正确性及广泛适用性.

3.2 震源机制解与活动断层关系

研究区内发育多条断层,整体呈北东向展布,其中与本次地震震中位置较近的断裂有高桥断裂、周

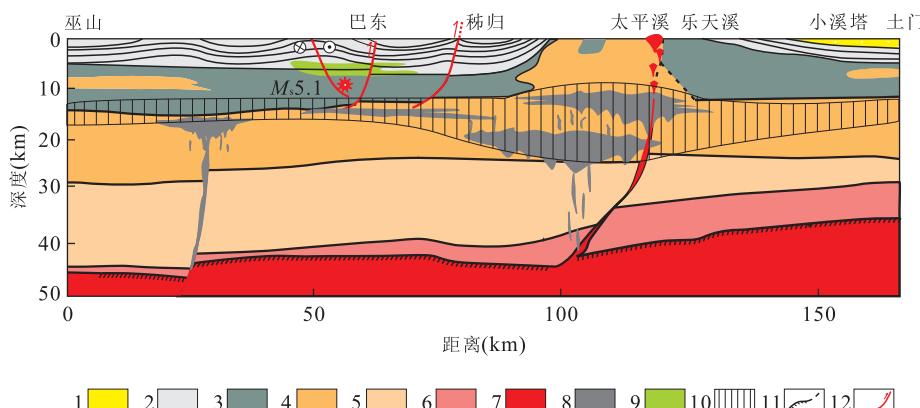


图5 巫山—土门区域综合地球物理剖面解释(部分内容参考陈学波,1994;Li et al.,2009)

Fig.5 Comprehensive geophysical interpretation profile along Wushan-Tumen

1.陆相沉积层;2.海相沉积层;3.基底变质岩花岗岩质;4.闪长质岩;5.辉长质岩;6.壳幔过渡层;7.镁铁质橄榄岩;8.地幔热流体储集体;9.渗水引起的低速异常;10.低速层位置;11.莫霍面及推测部分;12.断层

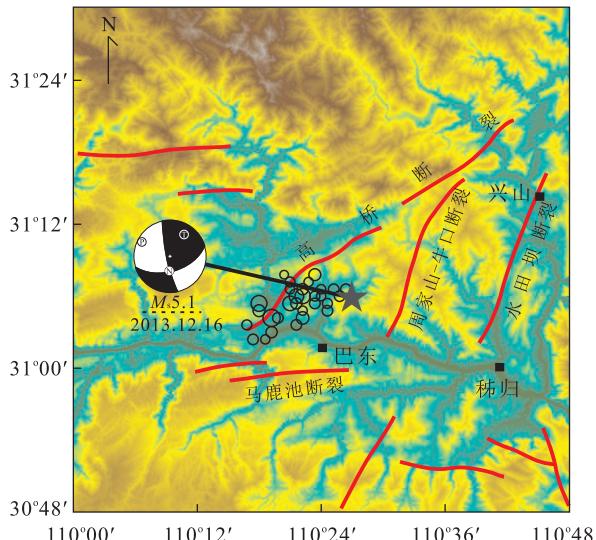


图 6 巴东地震余震分布图及主震震源机制解(<http://www.csi.ac.cn/manage/eqDongTop/aftershock/aftershock.html>)

Fig.6 Distribution of aftershocks and the mainshock's focal mechanism in Badong

家山—牛口断裂、马鹿池断裂和水田坝断裂(图 6).前 3 条断裂合围成一个三角形,而巴东地震即位于其中.巴东地区现今应力场为 NNW 向的挤压环境(刘锁旺等,1983;杨淑贤等,2005),这和本区的弧形对冲推覆构造模式相符合.距离震中位置最近的两条断裂是高桥断裂和周家山—牛口断裂,分别位于此次震中的东西两侧.

高桥断裂位于秭归盆地西北缘,西南起自中坪,向北东经炮台山北、高桥,总体呈 NE 向 $45^\circ \sim 60^\circ$,全长约 40 km,由多条方向相近的分支小断层组成,断面倾向南东,倾角 $50^\circ \sim 65^\circ$.断裂带宽数米至数十米,最宽处为 650 m.垂向上,高桥断裂已深切结晶基底,进入上地壳(夏金梧等,2008;李强等,2010).高桥断裂属第四纪晚更新世活动断裂(孟庆筱,2012),根据水准监测,该断裂现今仍有一定活动性.沿高桥断裂的地震震源深度相对较深,平均深度为 7.1 km,这些地震主要与断裂构造相关,属构造型地震(王秋良等,2013).

周家山—牛口断裂位于秭归盆地西部,距离此次地震震中位置 8.6 km.该断裂在遥感图像上显示为 3 条相连的线性影像带,全长 50 km,走向 NE 向 20° .在该影像带的北段发育有周家山断层,沿走向延伸约 4 km,倾向 $295^\circ \sim 306^\circ$,倾角 $65^\circ \sim 78^\circ$,断层破碎带宽 10~20 m 左右,是一条与深部构造无关的断层(周乐群和夏金梧,1996).虽然周家山—牛口断裂带在地表并不存在与其规模相当的断裂构造,但

深部地球物理资料显示牛口附近存在基底断点,西高东低,断差 1 km,因此不能排除牛口基底断裂的存在(夏金梧等,1996).

本文采用中国地震局地球物理研究所用地震矩张量反演得到的震源机制解(<http://www.cea-igp.ac.cn/upload/Image/mrtp/2687469148.jpg>)来进行解释,具体参数如下表.

从表 1 可知两节面代表的断层性质:节面 I 表示断层具有逆冲分量的右行走滑破裂;节面 II 表示断层具有逆冲分量的左行走滑破裂,其对应的“沙滩球”如图 6.

根据震源机制解,结合上述地质构造背景,选取节面 I (NE 向 73°) 为发震断层面,它与宏观的高桥断裂产状(NE 向 $45^\circ \sim 60^\circ$) 相符合.震源机制解表明,该层面具有逆冲分量的右行走滑特征.此外根据余震分布图(统计截止时间为 2014 年 1 月 6 日 21 时 23 分),余震基本上沿着高桥断裂的走向分布,且震源深度较深,平均 6.6 km.余震分布与震源球上的节面 I 走向一致.在主震以东,沿着周家山—牛口断裂均无余震出现.

如上文所提,高桥断裂是一条基底断裂,该断裂在历史上曾引起过龙会观 M_s 5.1 地震(周乐群和夏金梧,1996),但因为牛口断裂在基底存在断点,因此龙会观 M_s 5.1 地震可能是高桥断裂和周家山—牛口断裂联合作用导致(夏金梧等,1996).巴东地震震源 10 km,位于上地壳中部,且余震呈线性分布,向西逐渐与高桥断裂南段重合,而向东则与高桥断裂的地表位置出现一定角度的偏差,呈与周家山—牛口断裂斜交的趋势.主震以东并无余震活动,可见此次巴东地震与周家山—牛口断裂关系不大,也间接证明高桥断裂为一条切割基底的断裂,其深部可能与周家山—牛口断裂相交.结合此次巴东地震震源位置、震源机制及余震分布,可判定高桥断裂为本次地震的发震断裂.

3.3 巴东地震与三峡水库的关系探讨

巴东库区位于三峡大坝上游 80 km 处,历史强震较少,此次巴东地震为该地区有记录以来发生的震级最大的地震之一(另一个为 1979 年龙会观 M_s 5.1 地震).因此理清此次巴东地震与三峡水库的关系,对三峡大坝的安全评估具有重要指导意义.

水库蓄水后,一方面库水沿一定先存通道渗入地下,降低断层摩擦系数,破坏其临界稳定,起到基本诱发作用(韩晓光和饶扬誉,2004).另一方面库水的重力作用叠加在现有的构造应力场上,恶化断裂

表 1 震源机制结果

Table 1 Result of mechanism solutions of earthquake

节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		N 轴	
Φ_s	δ	λ	Φ_s	δ	λ	A_z	P_1	A_z	P_1	A_z	P_1
73°	56°	170°	168°	82°	34°	296	17°	36°	30°	181°	55°

注: Φ_s 为走向; δ 为倾角; λ 为滑动角; A_z 为方位角; P_1 为倾角。

面的应力条件(欧作畿,2005),触发已处于应力临界状态的发震断层,使地震提前到来。作者认为这两种影响作用,无论单独或共同作用于断层,均能引发水库地震。

最新研究认为,不同时期水库地震活动的主要影响因素是不同的。前期流体渗透导致的岩石孔隙压力增加,使断层面强度降低,当其强度小于断面上的应力时,产生“诱发”地震;后期随着流体渗透引起的孔隙压力变化趋于零,断层面的强度变化也趋于零,库水载荷的增加导致断层面上应力增强,当超过断层面强度时,则形成“触发”地震。即诱发地震主要缘于流体渗透导致的断层面强度“主动”降低,而触发地震主要与库水加载导致的断层面上应力增强有关(蒋海昆等,2014)。表 2 给出了水库诱发地震的一些特征。

三峡水库自 2003 年 6 月蓄水以来,巴东地区成为微震活动地带,形成一个微震集群。其大部分地震位于沉积盖层之内,而盖层主要由灰岩、白云岩、砂岩、页岩组成,是一套弱透水—易透水性的岩石,且砂岩、页岩中裂隙发育,为库水下渗提供条件。另外,该地区存在两条切割基底的断裂—高桥断裂和牛口断裂。高桥断裂出露宽度大,长度长,且为散状导水结构,有利于库水下渗。图 3 中巴东库区下方 5.0~9.5 km 处的横波低速异常代表着包含流体成分的储层结构,是三峡水库蓄水至今,库水沿裂隙或断层下渗的综合作用结果。因此巴东地区的断层强度较低,具备“诱发”地震的构造条件。但三峡水库蓄水时间已有 10 年之久,流体渗透作用已经减弱,推断其断层强度应趋于稳定。

此次巴东 $M_s 5.1$ 地震震中位置据库岸 7 km,震源深度为 10 km,为主震—余震型。与前述水库诱发地震的特征相比(表 2),该地震具有构造地震特征。研究认为,流体诱发中强地震的可能性很小,主要是对处于临界状态的断层系统起到触发的作用。水库区中强地震本质上是在构造应力场下断层活动产生的(蒋海昆等,2014),此过程还受到大地构造环境、深部构造等因素的影响。

三峡水库在 2013 年 11 月 11 日水位达到试验

表 2 水库诱发地震的特征(陈德基等,2008)

Table 2 The characteristics of reservoir-induced earthquake

要素	特征
平面分布	主要集中在库盆和距离库岸边 5 km 范围内,少有超过 10 km 者。
震源深度	震源深度极浅,绝大部分震源深度在 3~5 km 范围内,直至近地表。
震级大小	绝大部分是微震和弱震。
发震时间	主震发震时间和水库蓄水过程相关。
地震趋势	水库诱发地震的频度和强度随着时间的延长呈明显下降趋势
波形频率	具有较高的地震动频率、地面峰值加速度和震中烈度。
地震类型	震型以前震—主震—余震型和群震型居多(陶忠平,2006)。

性的 175 m,35 天后巴东发生 $M_s 5.1$ 地震。水库蓄水导致库区岩石载荷增加,使断面上的应力增强,超过了本已经弱化的断层面强度,继而引发地震。所以,此次巴东地震是在“诱发”地震的地质条件基础上,叠加库水载荷,表现出触发地震的特征。

4 巴东地震次声波异常特征及其意义

频率低于 20 Hz 的声波我们称之为次声波,大量研究表明地震会引起次声波异常,并且被次声波监测仪记录下来。地震次声波是地震波在地球内部传播,进而向地表及大气辐射形成,通常可分为 3 类:本地次声波、震中次声波和绕射次声波,地震次声波的频率远高于震前次声频率(谢金来和谢照华,1996;潘黎黎等,2013;章菲等,2013;赵娟等,2013)。中国地质大学(武汉)三峡库区灾害研究中心安装在三峡库区及巴东库区的次声波监测仪长期监测所在地的次声波异常信号。所使用的仪器为中科院声学研究所研制的 InSAS2008 电容式次声传感器。

本文使用的次声波数据及秭归台的地震波数据来自中国地质大学(武汉)三峡库区灾害研究中心,而恩施台地震波数据则来自地震学研究联合会(IRIS),IRIS 免费提供国际标准数字台站的数据,以方便人们利用这些数据进行科学研究。本文使用软件 SAC 进行信号的处理工作。SAC(Seismic

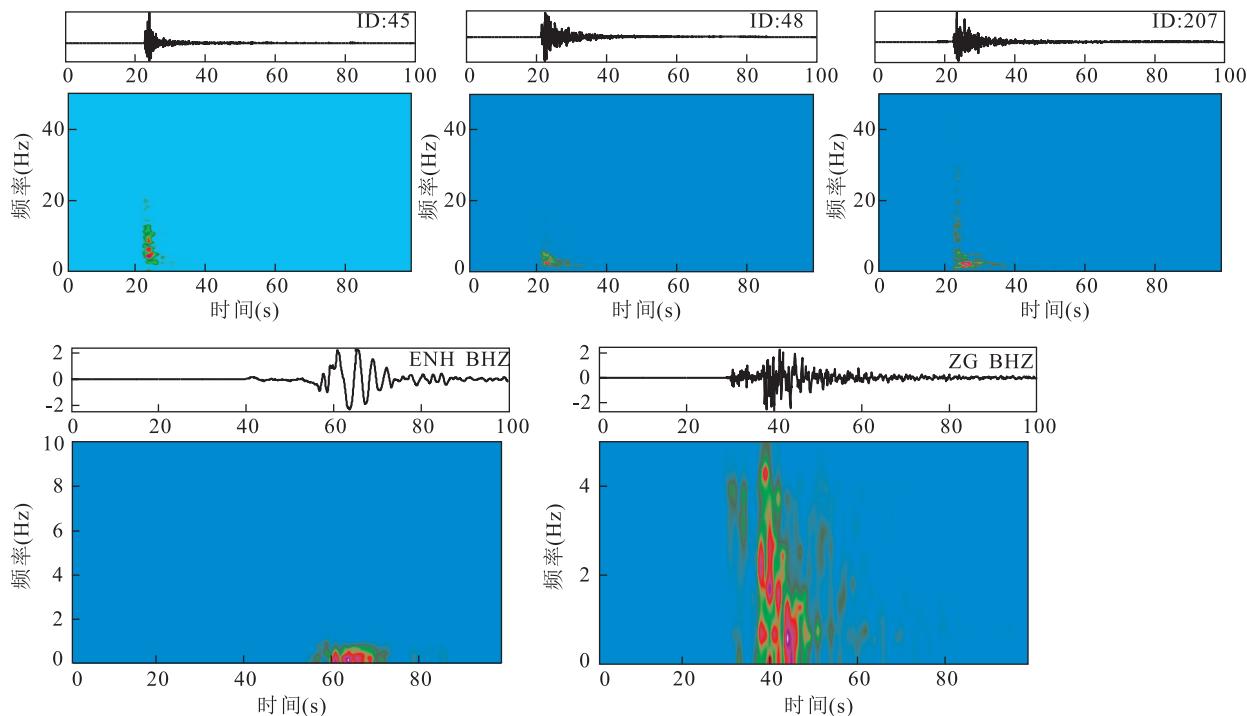


图 7 次声波与地震波的时频分析

Fig.7 Time-frequency analysis for infrasound and seismic waves

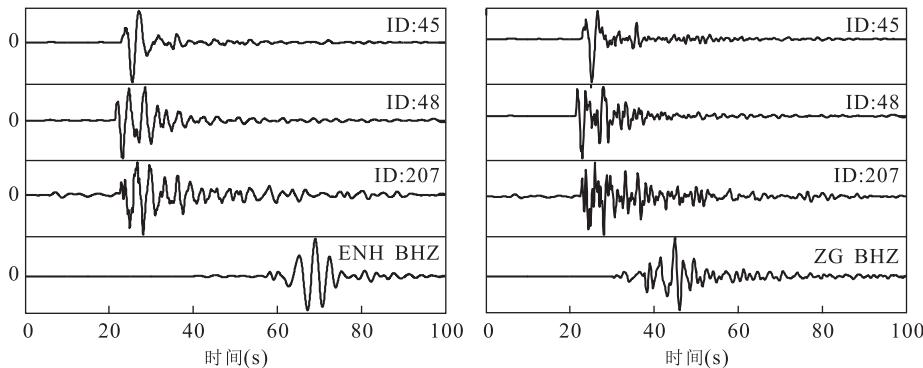


图 8 次声波与地震波(ENH、ZG)滤波后波形

Fig.8 Waveform of infrasound and seismic waves(ENH, ZG) after filtering

Analysis Code)是由美国加州大学 Lawrence Livermore 国家实验室(LLNL)开发研制的用于研究连续信号,特别是时间序列数据的通用程序(朱文林等,1995).本文采用互相关函数法来计算两个信号的相关系数及偏移时间(赵娟等,2013),利用最大熵(MEM)法来进行谱估计.

次声波监测仪采集频率为 100 Hz,对 3 路信号(45 号、48 号和 207 号)进行时频分析(图 7),得到各自的优势频率分别为 4~10 Hz、2~5 Hz、2~3 Hz.恩施台和秭归台地震仪的采集频率分别为 20 Hz 和 10 Hz,将这两个台站记录的地震信号进行

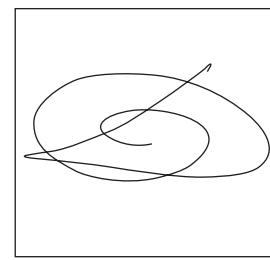


图 9 质点运动轨迹

Fig.9 Moving path of particle

时频分析(图 7),发现其优势频率分别为 0~4 Hz(0.5 Hz 处能量最大)和 0.2~0.4 Hz,这反映了随着

表3 次声波与地震波互相关系数列表

Table 3 Coefficient of association between infrasound and seismic waves

地震台站	45号				48号				207号			
	S(km)	T _s (s)	T _c (s)	C _{or}	S(km)	T _s (s)	T _c (s)	C _{or}	S(km)	T _s (s)	T _c (s)	C _{or}
恩施台(EN)	118.0	42.1	41.7	0.82	112.0	40.0	44.1	0.77	117.0	41.8	42.5	0.72
秭归(ZG)	44.0	16.3	20.9	0.51	49.3	18.2	16.9	0.50	44.0	16.3	18.0	0.38

注:S为次声波监测仪与地震台站的等效距离;T_s为理论到时;T_c为实际到时;C_{or}为互相关系数。

表4 次声台站和地震台站对震中的方位角与震中距

Table 4 Azimuth and distance between stations of infrasound monitor array & seismographs and epicenter

	台站名	方位角	距离(km)
次声波台站	45	247.00°	12.75
	48	228.38°	7.66
	207	241.47°	12.98
地震台站	ENH	225.32°	129.30
	ZG	120.67°	57.54

震中距的增加,地震信号中的高频成分快速衰减。次声波台站距震中非常近(7~13 km),其附近地震波含有丰富的高频成分,因此次声波与地震波耦合生成的本地次声波的高频成分在次声波中占主要地位。

基于以上分析,我们对次声波和地震波进行联合处理,将次声波信号重采样至 20 Hz 和 10 Hz(已经进行预滤波处理,防止信号的高频部分在重采样的结果中产生假频),使其频率分别等于恩施台和秭归台地震波采集频率,以便进行互相关计算。然后以地震波的优势频率(恩施台为 0.2~0.4 Hz,秭归台为 0.2~0.6 Hz)为标准,选用带通滤波器对次声波和地震波同时滤波,得到的波形图如图 8。

在处理恩施台地震波数据时,选择垂直分量和水平分量地震波,截取 65~75 s 时间段,绘制质点运动图(图 9),质点运动轨迹呈椭圆状可知该段时间内波形主要为面波。

恩施地震台距离 45 号次声波监测仪 118 km,通过互相关计算得到两者最大互相关系数为 0.82,对应的时间差为 41.7 s。在滤波频率范围内面波的传播速度 2.8 km/s(秭归台站记录的面波速度为 2.7 km/s),得到理论到时应为 $118.0 \div 2.8 \approx 42.1$ s。可以认为,45 号监测仪采集到的次声波的时间与巴东地震产生的地震面波到达 45 号监测仪所在地的时间是一致的。采用同样的方法,对其他次声波监测仪和地震台站采集的数据进行处理,结果如下表。

通过表 3 可知,到时方面,依据其面波速度传播,理论到时与实际到时相差在 0.4~4.6 s;相关程度方面:地震波与次声波经过滤波后得到的波形相

关系数整体较高,最高达到 0.82,因此可以认为是同一个信号源产生的信号。由于次声传感器对大地震动并不敏感,所记录到的地震次声波应是仪器所在地的地面起伏引起的气压变化,即为本地次声波(赵娟等,2013)。

但也看出,次声波与不同地震台站之间的相关程度不同:次声波与恩施台(ENH)记录的地震波形相关性普遍较高(0.72 以上),而同秭归台(ZG)的相关性则较低(0.38~0.51)。我们给出各类台站同震中的方位及距离(表 4),相关性同方位角有较大关联,恩施台与次声波台站均位于震中的南西向,三者近似在一条直线上,方位角近似,因此面波的传播路径一致。而秭归台(ZG)位于震中的南东向,与次声波仪不在一条直线上,方位角相差很大,其面波传播路径也不同。因此方位角不同,导致面波传播路径不一致,这是导致次声波仪与秭归台(ZG)记录的地震波相关性较低的原因。

5 结论

(1) 卫星重力异常显示,巴东地区深度 10 km 处存在局部重力低异常,反映在该地区的深部物质密度较周围低,是韧性流变层的存在的证据之一。同时,该地区位于重力梯级带上,莫霍面显示东高西低,这种水平方向物质密度的差异导致巴东地区深部不稳定,是该区地壳活动的深部动力之一。

(2) 宽频地震观察资料横波速度和纵波速度剖面显示,巴东及其邻区地下 5~9 km 和 10~15 km 存在低速层。5~9 km 处的低速异常是由地表水沿裂隙和断裂下渗引起的。三峡水库蓄水后,加剧了该处库水下渗作用,客观上促进该低速层的集聚和扩大。10~15 km 低速层是地幔热流体通过基底断裂上涌,小部分沿断裂带上涌至地壳浅部,大部分在上地壳底部储存,构成壳内韧性流变层(体)。

(3) 震源机制解表明高桥断裂是此次巴东地震的控震断裂。结合本次巴东地震的震源深度和余震分布,判定该地震类型为主震余震型,具有构造地震

的特征,是地壳深部能量集聚与释放的表现,符合板内地震三层次构造模式。库水下渗降低了上地壳上部断层活动的阈值,引起断层不稳定,且 2013 年 11 月 11 日的 175 m 试验性蓄水使库区岩石载荷增加,超过已经弱化的断层强度,对巴东 M_s 5.1 地震起到触发作用,即此次地震判断为水库触发地震。

(4) 次声波监测仪记录到的次声波异常为本地次声波,通过对次声波进行时频分析,并将其与地震波进行对比,利用互相关函数计算出面波与次声波异常的到达时差和相关系数,确定次声波异常由本地次声波引起。

致谢:感谢王杰博士对本文提出的宝贵意见及其进行的重要讨论,感谢信丹华为本文的互相关计算提供帮助,感谢郑文衡教授对本文提出的建设性意见。

References

- Bowin, C., 1983. Depth of Principal Mass Anomalies Contributing to the Earth's Geoidal Undulations and Gravity Anomalies. *Marine Geodesy*, 7(1–4): 61–100. doi: 10.1080/15210608309379476
- Chen, D. J., Wang, Y. X., Zeng, X. P., 2008. A Study of Reservoir-Induced Earthquake of Three Gorges Project. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27(8): 1513–1524 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X. B., Chen, B. Y., Zhang, S. W., et al., 1994. Study of Deep Tectonic Characteristics in and around the Dam Region of the Three Gorges Project on the Yangtze River. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Fei, Q., 2008. Characters of Deep Structure for Wenchuan Earthquake. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 5(4): 387–395 (in Chinese with English abstract).
- Fei, Q., 2009. Major Earthquakes by Rheological Diapirism of Crust-Mantle Material—Evidence from Satellite Gravity Data. *Earth Science Frontiers*, 16(3): 282–293 (in Chinese with English abstract).
- Han, X. G., Rao, Y. Y., 2004. Analysis Genesis of Reservoir Induced Microquakes in Badong Reach of Three Gorges. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 24(2): 74–77 (in Chinese with English abstract).
- Hu, D. G., 1997. A Study on Active Faults and Crustal Stability in Qingjiang River Basin (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Hu, D. G., Wu, S. R., Yin, X. L., 1999. Fractal Dimensions of Fault Gouges from the Xianniushan Fault and Its Activity. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(2): 138–141 (in Chinese with English abstract).
- Hubei Geological Bureau., 1990. Regional Geology of Hubei Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Jiang, H. K., Song, J., Jia, R., et al., 2014. On the Major Influencing Factors of Reservoir-Related Seismicity in Different Stages: The Case of the Three Gorges Reservoir. *Earthquake*, 34(1): 13–23 (in Chinese with English abstract).
- Lai, X. L., Sun, Y., Liu, Z., 2006. Study of Deep Seismic Sounding in Strongly Seismic Regions of North China. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 26(1): 55–62 (in Chinese with English abstract).
- Li, A. R., Xu, Y. J., Gu, C. Z., 1982. The New Tectonic Movement of Yuan'an Fault and Its Earthquakes in Central Hubei Province. *Crustal Deformation and Earthquake*, (2): 98–103 (in Chinese).
- Li, P., Li, Y. J., 2004. Study on the Crustal Stability in Three-Gorges Area of the Yangtze River. *Engineering Science*, 6(6): 26–34 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q. H., Guo, J. K., Min, X. Y., et al., 1991. A Preliminary Study on the Relationship between Deep Tectonics and Earthquakes in Tianshui Earthquake Area. *Northwestern Seismological Journal*, 13 (Suppl.): 68–70 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q. S., Peng, S. P., Gao, R., et al., 2004. Deep Tectonic Background of the 8.1 Ms Earthquake in the East Kunlun. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(1): 11–16 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q., Zhao, X., Cai, J. A., et al., 2010. Study on Tectonic Environment of Deep Crust and Seismogenesis of Earthquakes beneath Main Three Gorges Reservoir Area. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 30(5): 1–7, 14 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q., Zhao, X., Cai, J., et al., 2009. P-Wave Velocity Structure of Upper and Middle Crust beneath the Three Gorges Reservoir Dam and Adjacent Regions. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 52(4): 567–578.
- Li, X. G., Yao, Y. S., Zeng, Z. X., et al., 2006. Analysis of the Formation System of the Present Tectonic Stress Field in the Head Area of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Geomechanics*, 12(2): 174–181 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. K., Tu, G. M., Sun, Y. Z., 2009. The Research of Structural Feature and Mathematical Force Model and Activity of Shuitianba Fault in the Three Gorges Region. *Resources Environment & Engineering*, 23(S2): 19–27 (in Chinese).

- Liu, S. W., Gan, J. S., Xue, H. J., 1983. Tectonic Stress Field and Seismicity in the Three Gorges Region on the Changjiang River. *Seismology and Geology*, 5(1): 29—41 (in Chinese with English abstract).
- Meng, Q. X., 2012. Stability Analysis of Huangtupo Landslide in Three Gorges Reservoir Area under the Action of Scenario Earthquake (Dissertation). Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Ou, Z. J., 2005. Study of Water Reservoir Induced Earthquakes. *Yunnan Water Power*, 21(3): 18—21 (in Chinese with English abstract).
- Pan, B., Chu, Q. Z., Zhang, C. H., et al., 2012. Research on Tectonic Characteristics and Latest Activity of Wuduhe Fault in Three Gorges Area. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 32(Suppl.): 5—9 (in Chinese with English abstract).
- Pan, L. L., Zeng, Z. X., Wang, J., 2013. Precursory Abnormal Infrasonic Signals Predating the Lushan Earthquake (M_s 7.0) and Yushu Earthquake (M_s 5.2). *Earth Science Frontiers*, 20(6): 73—79 (in Chinese with English abstract).
- Peng, S. B., Li, C. N., Kusky, T. M., et al., 2010. Discovery and Its Tectonic Significance of the Proterozoic Miaowan Ophiolites in the Southern Huangling Anticline, Western Hubei, China. *Geological Bulletin of China*, 29(1): 8—20 (in Chinese with English abstract).
- Ren, Q. F., Zhang, C. K., Zhao, J. R., et al., 1992. Characteristics of Crustal Structures in Heze Region. *North China Earthquake Sciences*, 10(3): 45—52 (in Chinese with English abstract).
- Tang, S. L., Yan, D. P., Wang, C. L., et al., 2011. Deformational Process from Thick-Skinned to Thin-Skinned Thrust in Xuefeng Mountain, South China: Evidence from Sangzhi-Anhua Tectonic Section. *Geoscience*, 25(1): 22—30 (in Chinese with English abstract).
- Tao, Z. P., 2006. The Basic Characteristics of Reservoir-Induced Seismicity and Engineering Measures. *Yunnan Water Power*, 22(4): 19—21 (in Chinese).
- Teng, J. W., 1994. The Seismic Study of Lithospheric Physics in China. *Acta Geophysica Sinica*, 37(Suppl.): 140—159 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. B., Wu, S. R., Lü, Y. F., et al., 1998. The Engineering Evaluation of The Enshi Fault Activity in Western Hubei Province. *Seismology and Geology*, 20(3): 214—218 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q. L., Zhang, L. F., Liao, W. L., et al., 2013. Fault Tectonics and Seismic Activity Characteristics of Three Gorges Reservoir. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 33(5): 29—33 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W. T., Ni, S. D., Luo, Y., et al., 2009. Precise Determination on Depth of Wen'an Earthquake and Its Relation to Huabei Crust LVZ. In: Chinese Geophysical Society, ed., *The Chinese Geophysical Press of University of Science and Technology of China*. Hefei (in Chinese).
- Wu, S. R., Chen, Q. X., Mei, Y. T., et al., 1995. Research on The Meso-Cenozoic Tectonic Stress Field in Qingjiang River, Western Hubei Province. *Acta Geoscientia Sinica*, (2): 135—151 (in Chinese).
- Wu, S. R., Hu, D. G., Xu, R. C., et al., 2000. Segment Structure and Dynamic Analysis of the Enshi Fault in the Western Hubei Province. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 30(3): 221—225, 233 (in Chinese with English abstract).
- Wu, S. R., Wu, G. G., Hu, D. G., et al., 1999. Segmentation and Fractal Dimension of the NE-Trending Active Fault Population in the Upper Reaches of the Qingjiang River, Western Hubei. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(2): 142—149 (in Chinese with English abstract).
- Xia, H. K., Lu, Z. X., Niu, X., et al., 1992. The Seismic (active) Area's Deep and Shallow Tectonic, Composition and Their Relationship with Earthquakes in Chaoyang-Yixian. *Acta Seismologica Sinica*, 14(2): 180—186 (in Chinese).
- Xia, J. W., Li, C. A., Zeng, X. P., et al., 2008. Study on Characteristics and Seismic Activity of Gaoqiao Fault in Head Area of Three Gorges Reservoir. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 28(2): 8—15 (in Chinese with English abstract).
- Xia, J. W., Zhou, L. Q., Liu, S. K., 1996. The Main Characteristics of Fault and Its Activity in Zigui Basin, Western Hubei Province. *Hydrogeology and Engineering Geology*, (1): 10—14 (in Chinese with English abstract).
- Xie, J. L., Xie, Z. H., 1996. Infrasound Waves Caused by Earthquake on 12 July 1993 in Japan. *Acta Acustica*, 21(1): 55—61 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H. J., Zhang, Y. Z., Duan, H. R., et al., 2012. Gravity Anomaly Detected by GOCE Satellite in China. *Progress in Geophysics*, 27(2): 404—408 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H. L., Qiu, X. L., Zhao, M. H., et al., 2006. The Characteristics of Crustal Structure and Earthquake Source in Epicentral Region of Nan'ao Earthquake ($M = 7.5$), North-Eastern South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 51(SII): 83—91 (in Chinese).
- Xu, H. Z., Lu, Y., Zhong, M., et al., 2012. Satellite Gravity and

- Its Application in Monitoring Geophysical Environment Change. *Scientia Sinica Terrae*, 42(6): 843—853 (in Chinese).
- Xu, Y.X., 1995. Review of the Mechanism of the High Conduction Layers in Middle to Lower Continental Crust. *Geological Science and Technology Information*, 14(3): 15—22 (in Chinese with English abstract).
- Yan, D.P., Zhou, M., Song, H., et al., 2003. Origin and Tectonic Significance of a Mesozoic Multi-Layer Overthrust System within the Yangtze Block (South China). *Tectonophysics*, 361(3—4): 239—254. doi: 10.1016/S0040-1951(02)00646-7
- Yang, S.X., Gao, S.J., Cai, Y.J., et al., 2005. Study on Stress Field Zoning in Three Gorges and Its Adjacent Area since Neotectonic Age. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 25(4): 42—45 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W.R., Zeng, Z.X., Li, D.W., et al., 2009. Three-Level Tectonic Model for Intraplate Earthquakes. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 206—217 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X.S., Ma, J., Zhang, X.J., 2003. Summarization of Genesis of Low-Velocity Layer in Continental Crust. *Geological Science and Technology Information*, 22(2): 35—41 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, X.C., 2005. 3D Lithospheric Structure of Western China and Its Enlightenment on Petroleum Prospecting. *Geology in China*, 32(1): 1—12 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Z.X., Sibgatulin, V.G., Song, S., et al., 2013. Imminent Prediction and Rheology Tectonics for Nima Earthquake (M_s 5.2). *Earth Science Frontiers*, 20(6): 149—155 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, F., Yang, Q.S., Xia, Y.Q., et al., 2013. Infrasound: A New Frontier in Monitoring Earthquakes. *Earth Science Frontiers*, 20(6): 94—101 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J., Zhou, G.F., Xu, Z.X., 1997. The Relativity of Hydrocarbon Resources and the Satellite Gravity Anomaly in Tarim Basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 22(6): 643—647 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J., Zeng, Z.X., Guo, Q., et al., 2013. Signal Analysis on Infrasound and Gravity Waves Received before and after the Lushan Earthquake. *Earth Science Frontiers*, 20(6): 36—41 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, L.Q., Xia, J.W., 1996. Research on the Geologic Background of Longhuiguan Mid-Strong Earthquake in the Reservoir Area of the Three Gorges Project. *Hubei Geology*, 10(1): 120—125 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, M.D., Zhao, H.Y., Ma, Q.Z., et al., 1997. The Relationship between Crust Structure and Earthquakes in the Northeast Verge of Qinghai-Xizang Plateau and Its Neighborhood. *Northwestern Seismological Journal*, 19(1): 59—64, 69 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Q., 2011. Analysis of Velocity Structure of Upper Crust in Three Gorges Reservoir Area (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W.L., Yao, L.P., Du, A.L., et al., 1995. Digital Seismic Waveform Analysis. Surveying and Mapping Press, Beijing (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 陈德基,汪雍熙,曾新平,2008.三峡工程水库诱发地震问题研究.岩石力学与工程学报,27(8):1513—1524.
- 陈学波,陈步云,张四维,等,1994.长江三峡工程坝区及外围深部构造特征研究.北京:地震出版社.
- 费琪,2008.汶川大地震的深部构造特征.工程地球物理学报,5(4):387—395.
- 费琪,2009.壳幔物质流变的底辟作用孕育大地震——卫星重力资料的证据.地学前缘,16(3):282—293.
- 蒋海昆,宋金,贾若,等,2014.不同时期水库地震活动主要影响因素讨论——以三峡库区微震活动为例.地震,34(1):13—23.
- 韩晓光,饶扬誉,2004.长江三峡水库巴东库段地震成因分析.大地测量与地球动力学,24(2):74—77.
- 胡道功,1997.清江流域活动断裂与地壳稳定性研究(博士学位论文).北京:中国地质科学院.
- 胡道功,吴树仁,殷秀兰,1999.仙女山断裂带断层泥分维值与断裂活动研究.地球学报,20(2):138—141.
- 湖北省地质矿产局,1990.湖北省区域地质志.北京:地质出版社.
- 赖晓玲,孙译,刘志,2006.华北强震区地震测深研究.大地测量与地球动力学,26(1):55—62.
- 李安然,徐永键,古成志,1982.鄂中远安断裂带的新构造活动与地震,地壳形变与地震,(2):98—103.
- 李坪,李愿军,2004.长江三峡坝区地壳稳定性研究.中国工程科学,6(6):26—34.
- 李强,赵旭,蔡晋安,等,2010.三峡水库库首区地壳深部构造环境与地震成因研究.大地测量与地球动力学,30(5):1—7,14.
- 李清河,郭建康,闵祥仪,等,1991.天水地震区深部构造与地震关系初步探讨.西北地震学报,13(S1):68—70.
- 李秋生,彭苏萍,高锐,等,2004.东昆仑大地震的深部构造背景

- 景.地球学报, 25(1):11—16.
- 李细光, 姚运生, 曾佐勋, 等, 2006.三峡库首区现今构造应力场的形成机制分析.地质力学学报, 12(2):174—181.
- 刘世凯, 涂光美, 孙云志, 2009.三峡水库断裂构造特征及数力模型与活动性研究.资源环境与工程, 23(S2): 19—27.
- 刘锁旺, 甘家思, 薛宏交, 1983.长江三峡地区的构造应力场与地震活动.地震地质, 5(1):29—41.
- 孟庆筱, 2012.设定地震作用下三峡库区黄土坡滑坡稳定性分析(硕士学位论文).武汉:中国地震局地震研究所.
- 欧作畿, 2005.水库诱发地震的研究.云南水力发电, 21(3): 18—21.
- 潘博, 楚全芝, 张长厚, 等, 2012.三峡地区雾渡河断裂构造特征及最新活动性研究.大地测量与地球动力学, 32 (S1):5—9.
- 潘黎黎, 曾佐勋, 王杰, 2013.芦山地震(M_s 7.0)及玉树地震(M_s 5.2)震前次声波异常信号分析.地学前缘, 20(6): 73—79.
- 彭松柏, 李昌年, Kusky, T.M., 等, 2010.鄂西黄陵背斜南部元古宙庙湾蛇绿岩的发现及其构造意义.地质通报, 29 (1):8—20.
- 任青芳, 张成科, 赵金仁, 等, 1992.菏泽地区地壳结构特征与地震.华北地震科学, 10(3):45—52.
- 汤双立, 颜丹平, 汪昌亮, 等, 2011.华南雪峰山薄皮—厚皮构造转换过程:来自桑植—安化剖面的证据.现代地质, 25(1):22—30.
- 陶忠平, 2006.水库诱发地震的基本特点及工程防范措施.云南水力发电, 22(4):19—21.
- 滕吉文, 1994.中国岩石层物理的地震学研究.地球物理学报, 37(S1):140—159.
- 汪华斌, 吴树仁, 吕贻峰, 等, 1998.湖北西部恩施断裂活动性评价.地震地质, 20(3):22—27.
- 王秋良, 张丽芬, 廖武林, 等, 2013.三峡库首区断裂构造与地震活动特征.大地测量与地球动力学, 33(5):29—33.
- 王伟涛, 倪四道, 罗艳, 等, 2009.文安地震深度的精确测定及其同华北地壳低速层的关系.见:中国地球物理学会编,中国地球物理学会第二十五届年会论文集, 合肥:中国科学技术大学出版社.
- 吴树仁, 陈庆宣, 梅应堂, 等, 1995.鄂西清江流域中新生代区域构造应力场研究.地球学报, (2):135—151.
- 吴树仁, 胡道功, 徐瑞春, 等, 2000.鄂西恩施断裂分段结构及动力学探讨.长春科技大学学报, 30(3): 221—225, 233.
- 吴树仁, 吴淦国, 胡道功, 等, 1999.鄂西清江上游NE向活动断层束分段分形特征.地球学报, 20(2):142—149.
- 夏怀宽, 卢造勋, 牛雪, 等, 1992.朝阳—义县地震区的深浅部构造、组成及其与地震的关系.地震学报, 14(2): 180—186.
- 夏金梧, 李长安, 曾新平, 等, 2008.三峡工程库首区高桥断裂特征与地震活动性研究.大地测量与地球动力学, 28 (2):8—15.
- 夏金梧, 周乐群, 刘世凯, 1996.鄂西秭归盆地及外缘主要断裂特征及活动性研究.水文地质工程地质, (1): 10—14.
- 谢金来, 谢照华, 1996.1993年7月12日日本北海道地震次声波.声学学报, 21(1):55—61.
- 徐海军, 张永志, 段虎荣, 等, 2012.GOCE卫星监测的中国区域重力异常.地球物理学进展, 27(2):404—408.
- 徐辉龙, 丘学林, 赵明辉, 等, 2006.南海东北部南澳大地震(M_s =7.5)震中区的地壳结构特征与震源构造.科学通报, 51(S3):83—91.
- 徐义贤, 1995.中下地壳高导层成因研究综述.地质科技情报, 14(3):15—22.
- 许厚泽, 陆洋, 钟敏, 等, 2012.卫星重力测量及其在地球物理环境变化监测中的应用.中国科学:地球科学, 42(6): 843—853.
- 杨淑贤, 高士钧, 蔡永建, 等, 2005.三峡及邻区新构造期以来应力场分区研究.大地测量与地球动力学, 25(4): 42—45.
- 杨巍然, 曾佐勋, 李德威, 等, 2009.板内地震过程的三层次构造模式.地学前缘, 16(1):206—217.
- 杨晓松, 马瑾, 张先进, 2003.大陆壳内低速层成因综述.地质科技情报, 22(2):35—41.
- 袁学诚, 2005.论中国西部岩石圈三维结构及其对寻找油气资源的启示.中国地质, 32(1):1—12.
- 曾佐勋, Sibgatulin, V.G., 宋松, 等, 2013.尼玛地震(M_s 5.2)临震预测和流变构造.地学前缘, 20(6):149—155.
- 张健, 周国藩, 徐忠祥, 1997.塔里木盆地卫星重力异常与油气资源的相关性研究.地球科学——中国地质大学学报, 22(6):643—647.
- 章菲, 杨庆生, 夏雅琴, 等, 2013.次声:监测地震的新领域.地学前缘, 20(6):94—101.
- 赵娟, 曾佐勋, 郭泉, 等, 2013.芦山地震前后次声波及重力波信号分析.地学前缘, 20(6):36—41.
- 周乐群, 夏金梧, 1996.长江三峡工程库区龙会观中强地震地质背景研究.湖北地质, 10(1):120—125.
- 周民都, 赵和云, 马钦忠, 等, 1997.青藏高原东北缘及其邻区的地壳结构与地震关系初探.西北地震学报, 19(1): 59—64, 69.
- 周强, 2011.三峡库区上地壳速度结构分析(硕士学位论文).武汉:中国地质大学(武汉).
- 朱文林, 姚立平, 杜安陆, 等, 1995.数字地震波形分析.北京:测绘出版社.