

三峡库区上地壳横波速度结构

李小勇^{1,2},朱培民^{1,2},周 强³,彭松柏^{4,5},刘江平^{2,5},刘 娇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.地球内部多尺度成像湖北省重点实验室,湖北武汉 430074

3.成都理工大学工程技术学院,四川乐山 614000

4.中国地质大学地球科学学院,湖北武汉 430074

5.教育部长江三峡库区地质灾害研究中心,湖北武汉 430074

摘要:为了更好地了解三峡库区的稳定性,利用三峡库区的流动宽频地震仪台阵于2011年4~5月期间观测的背景噪声数据,采用互相关方法提取了瑞利面波的格林函数,用多重滤波方法获得了瑞利面波的群速度频散曲线。利用走时层析成像方法获得了0.5~10.0 s周期的纯路径频散曲线,进而反演获得了沿巴东—茅坪—土门方向的横波速度结构剖面,揭示了三峡地区上地壳的速度变化情况。研究表明:(1)研究区地下速度结构与地质构造关系密切,速度剖面上很好地反映了一个以黄陵背斜核部为中心的背斜构造;(2)九畹溪及其周边区域下方较快的速度变化可能与对应的区域断裂构造、地震活动性密切相关;(3)三斗坪地区上地壳表现为高速,表明三峡坝区处于构造稳定区域。

关键词:横波速度;三峡;背景噪声;坝区稳定性;天然地震。

中图分类号:P315.2

文章编号:1000-2383(2014)12-1842-09

收稿日期:2014-04-05

S-Wave Velocity Structure of Upper Crust in Three Gorges Reservoir Region of the Yangtze River

Li Xiaoyong^{1,2}, Zhu Peimin^{1,2}, Zhou Qiang³, Peng Songbai^{4,5}, Liu Jiangping^{2,5}, Liu Jiao⁴

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

2. Hubei Subsurface Multi-scale Imaging Lab, Wuhan 430074, China

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

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

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

Abstract: In order to make a better understanding of the stability of the Three Gorges Reservoir region, the profile of S-wave velocity structure along Badong-Maoping-Tumen is presented using the ambient noise data observed at 10 stations from mobile broadband seismic array which is located at Three Gorges Reservoir region. All of available vertical component time series during April and May, 2011 have been cross-correlated to estimate the empirical Green functions. Group velocity dispersion curves were measured by applying multiple filtering technique. Using these dispersion curves, we obtain high resolution pure-path dispersions at 0.5–10 s periods. The S-wave velocity structure, which was reconstructed by inverting the pure-path dispersions, reveals the velocity variations of upper crust at Three Gorges Reservoir region. Main conclusions are as follows. (1) The velocity variations in the study region have a close relationship with the geological structure and the velocity profile suggests an anticline unit which core area is Huangling block. (2) The relative fast velocity variations beneath Jiuwanxi and its surrounding areas may correspond to the geological structure and earthquake activity there. (3) The high velocity of the upper crust in Sandouping indicates that the reservoir dam of Three Gorges is located at a tectonic stable region.

Key words: S-wave velocity; Three Gorges; ambient noise; reservoir dam stability; earthquake.

基金项目:国家自然科学基金(Nos.91014002,41174049)。

作者简介:李小勇(1987—),男,博士在读,主要从事地震数据处理解释、层析成像、地质构造方面的研究.E-mail:lixiaoyong2011@hotmail.com

0 引言

长江三峡区域东起江汉平原西缘,西至川东丘陵,南起雪峰山、武陵山地,北至东秦岭、伏牛山一带(图 1).东西长约 580 km,南北宽约 550 km,全区面积约 31.9 万 km².区域构造以城口—房县—襄樊深断裂为界,北部属秦岭褶皱系,南部为扬子准地台(袁登维等,1996).本文的研究区域—三峡库区位于 30°N~31.5°N、110°E~112°E 之间,地处扬子克拉通东北部,区内主要由黄陵背斜和秭归盆地两大构造地质单元组成.秭归盆地浅部主要由侏罗纪的砂泥岩组成,北为高桥断裂,东南为九畹溪断裂,盆地内部分布有牛口断裂和水田坝断裂.黄陵背斜核部主要由前南华纪变质杂岩、侵入花岗岩和闪长岩组成(彭松柏等,2010),西南为九畹溪断裂,东南为天阳坪断裂,东北为远安断裂,西北为新华断裂和兴山—马良坪断裂(李强等,2011).区内地震活动主要分布于九畹溪和仙女山断裂带、黄陵背斜东南角和秭归盆地内部(图 1),基本特征是强度低、震源浅(陈学波,1994;张毅等,2012).

地球物理研究表明:三峡库区各地质单元地震波速度结构各不相同(严尊国和薛军蓉,1988;李强等,2009,2011;Zhang *et al.*, 2009),且地质单元内部横向速度结构差异也很明显(谭周地和薄景山,1991;李强等,2009).秭归盆地内部,地壳厚度约为 42 km,平均纵波速度较低,为 4.0~4.5 km/s(Mei *et al.*, 2013),具有以下基本特征:(1)0~5 km 深度范围内,秭归盆地不同深度处的低速异常分布范围不同,其中还有小范围的可能代表沉积基底的高速异常分布,表明沉积层厚度不均匀;(2)秭归盆地的低速异常分布受构造控制(李强等,2009,2011).黄陵背斜内部,主要表现为高速异常,纵波速度值在 6.1~6.5 km/s 之间(陈学波,1994;廖武林等,2007;李强等,2009,2011;Mei *et al.*, 2013).黄陵背斜与秭归盆地之间的九畹溪断裂和仙女山断裂在深度为 2 km 和 5 km 的速度剖面中整体上呈南北向低速异常(李强等,2011;Mei *et al.*, 2013),莫霍面在仙女山断裂处显著加深(陈步云和高文海,1986).黄陵背斜以东的江汉盆地,地壳厚度约为 30 km,基底纵波速度较高,在 6.20~6.70 km/s 之间,平均为

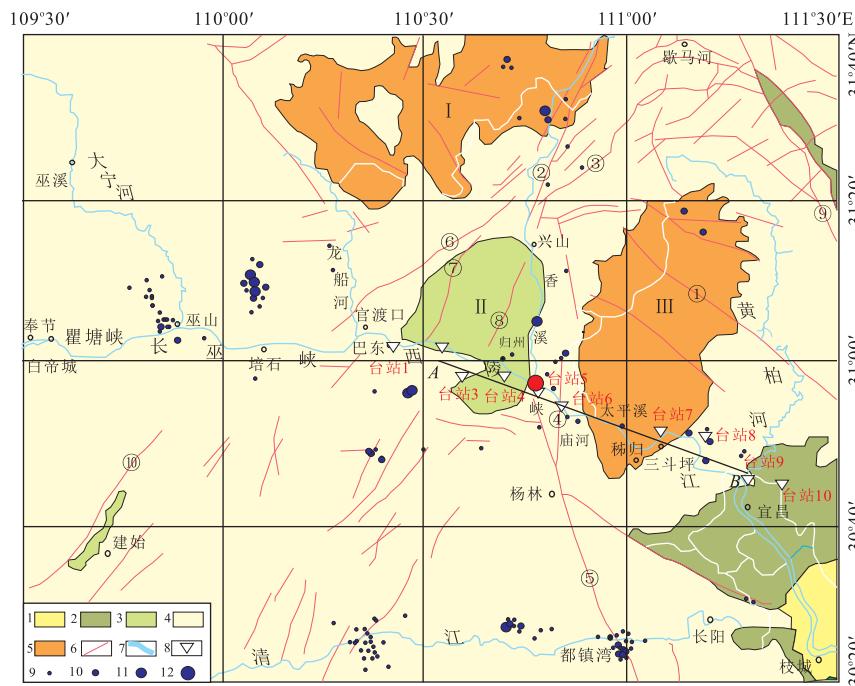


图 1 三峡地区地质构造和地震台站分布(据李强等,2011 修改)

Fig.1 Three Gorges Region and distribution of broadband seismic stations

①雾渡河断裂;②新华断裂;③兴山—马良平断裂;④九畹溪断裂;⑤仙女山断裂;⑥高桥断裂;⑦牛口断裂;⑧水田坝断裂;⑨远安断裂带;⑩建始断裂;⑪天阳坪断裂;I. 神农架地块;II. 秭归盆地;III. 黄陵背斜;1. 第四系;2. 白垩系—第三系;3. 侏罗系;4. 三叠系—震旦系;5. 前震旦系;6. 断裂;7. 河流;8. 宽频地震台站,台站旁边标注了台站编号(表 1);9~12 为三峡大坝蓄水前两年半(2001 年 1 月到 2003 年 6 月)震级分别为 M_s0~0.9、1.0~1.9、2.0~2.0 和大于 3.0 的地震震中位置.图中黑色实线为图 7 中横波速度剖面所在位置.红色实心圆圈为秭归 2014 年 3 月 27 日 M_s4.3 级和 3 月 30 日 M_s4.7 地震震中的位置

6.45 km/s(陈学波, 1994; Zhang *et al.*, 2009).

以上研究为笔者了解三峡库区地壳结构和坝区稳定性情况提供了重要信息。但是这些研究有的分辨率太低, 有的研究范围太小, 地球物理测线比较稀疏, 对深入了解该区地质结构带来了一定的困难。因此, 进行精细的高分辨率地震速度结构研究很有必要。

背景噪声作为近十年才兴起的估算地球内部速度结构的方法, 已经在很多方面得到了应用, 并取得了很好的效果(Bensen *et al.*, 2007; Lin *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2010)。利用布置在三峡库区的由 10 套甚宽频带地震仪组成的流动观测台阵(图 1), 在 2011 年 4~5 月期间进行了观测, 获得了三分量的背景噪声数据。利用多重滤波方法(周青云等, 2006; Bensen *et al.*, 2007)测量了 0.5~10.0 s 周期的瑞利面波群速度频散曲线(部分群速度频散曲线周期范围为 0.5~15.0 s), 并利用面波层析成像方法获得了 0.5~10.0 s 周期的较高分辨率的纯路径频散曲线。通过反演, 获得了巴东—茅坪—土门一线的横波速度结构剖面, 这为长江沿岸上地壳的地质结构研究以及三峡坝区的稳定性分析提供了新的数据。

1 数据及方法

2011 年 4 月, 中国地质大学(武汉)三峡地质灾害中心在三峡地区布设了 10 套甚宽频三分量地震仪, 分布在长江沿线(图 1, 表 1)。每套地震仪包括 Trillium120 速度计和 Taurus 微型地震记录仪各一个。笔者主要使用了 2011 年 4~5 月份采集的垂直分量的地震记录来研究长江三峡地区的上地壳速度结构, 这些数据的采样频率为 20 Hz。本文所用的背景噪声数据预处理方法, 主要基于 Bensen *et al.*

(2007) 和 Lin *et al.*(2007) 的工作, 并进行了一些小的改进。

1.1 单台数据预处理和互相关计算

笔者均以 d 为时间单位进行单台数据的预处理和台站间地震记录的互相关计算。首先, 对采集的记录进行了去趋势、去均值和去仪器响应处理, 得到了背景噪声地震记录。随后, 对所获得的数据进行了去地震信号处理。考虑到本次研究使用的数据较少, 选择了手动拾取地震信号的方法, 并取得了较好的效果。

笔者对预处理之后的数据进行了互相关计算, 然后对互相关结果进行了带通滤波处理, 所选择的频带范围为 0.03~4.00 Hz, 主要目的是去除不需要的频率成分。图 2 为部分台站互相关的结果。对互相关结果中正的、负的分量以及对称分量叠加结果的信噪比进行了比较, 取其中信噪比较高的作为最终的结果。

1.2 质量控制和频散曲线的测量

通常在进行频散曲线测量工作之前, 需要计算互相关波形数据的信噪比。信噪比的计算方法请参见 Bensen *et al.*(2007) 和房立华等(2009)。选择高信噪比的互相关波形数据进行频散曲线的测量可以提高之后层析成像结果的可靠性。Yang *et al.*(2007)指出, 当信噪比大于 7 时, 就可以得到连续可靠的瑞利面波频散曲线。本文最终从获得的 45 个互相关结果中选择了信噪比大于 7 的 35 个互相关地震记录。

文中采用多重滤波方法(周青云等, 2006; Bensen *et al.*, 2007)提取了 0.5~10.0 s 周期的瑞利面波频散曲线(部分群速度频散曲线的周期范围为 0.5~15.0 s), 图 3 为从台站 9 和台站 3 互相关地震记录中提取群速度频散曲线的示意图。从图中可以看出, 提取的频散曲线比较连续、合理, 可以用于之后的层

表 1 宽频地震仪布置情况

Table 1 Location of broadband seismographs

台站编号	仪器编号	坐标经纬度	高程(m)	观测时间(年月日)	台站位置
1	219	110.44°E, 31.02°N	414	20110422—20110519	巴东
2	214	110.55°E, 31.01°N	276	20110422—20110517	秭归台子湾
3	216	110.60°E, 30.95°N	172	20110422—20110520	秭归马家坝
4	224	110.74°E, 30.94°N	159	20110421—20110513	郭家坝
5	223	110.83°E, 30.88°N	378	20110421—20110520	九畹溪
6	218	110.93°E, 30.85°N	411	20110421—20110521	茅坪
7	227	111.08°E, 30.85°N	120	20110424—20110521	三斗坪
8	222	111.20°E, 30.84°N	599	20110424—20110522	兆吉坪
9	226	111.30°E, 30.73°N	120	20110420—20110521	葛洲坝
10	213	111.43°E, 30.68°N	69	20110420—20110518	土门

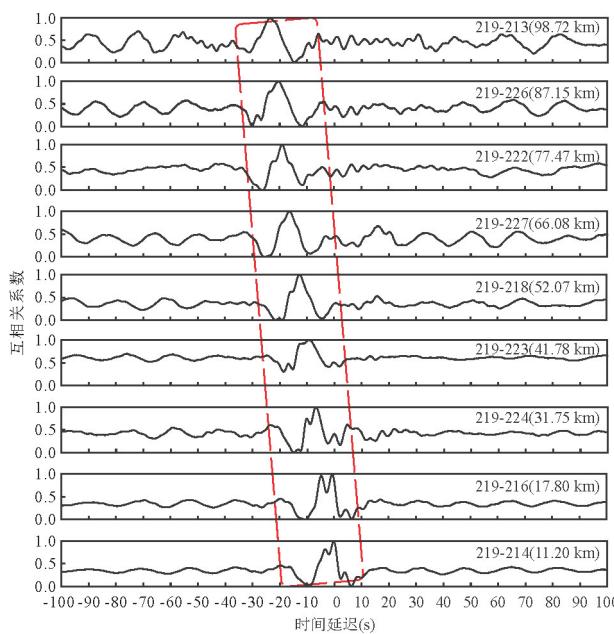


图 2 部分台站地震记录垂向分量的互相关结果

Fig.2 An example of cross-correlation record

图中对纵坐标对应的互相关结果进行了归一化处理,图的右上角标注了进行互相关的台站对及相应的台站间距

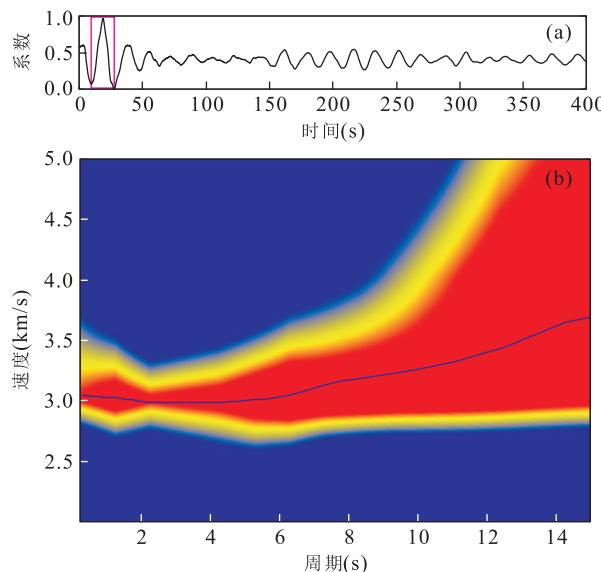


图 3 利用多重滤波方法进行瑞利面波群速度频散曲线提取

Fig.3 An example of dispersion measurement using multiple filter method

a. 台站 9 和台站 3 的互相关波形记录,站台 9 和站台 3, 距离 = 69.46 km, 时间 = 27 d, 信噪比 = 16.39; b. 群速度频散时频图, 蓝线代表提取的频散曲线

析成像中。

1.3 面波层析成像

本研究采用 Rawlinson 博士的 FMST (fast marching surface tomography) 程序包进行面波走

时层析成像,该程序包在正演过程中采用波前快速推进方法计算走时 (Rawlinson and Sambridge, 2005), 在反演过程中利用子空间方法修改模型 (Kennett *et al.*, 1988). 尽管每一步反演都假设局部线性,但迭代的正演和反演计算过程保证了速度与走时之间的非线性关系。

通过检测板测试,成像时在 0.5~5.0 s 和 6~10 s 周期分别将研究区沿测线方向划分为 32 km × 16 km 和 32 km × 19 km 的网格(图 4a~4d). 获得瑞利面波混合路径频散曲线之后,利用 FMST 软件包计算得到了 0.5~10.0 s 周期的瑞利面波群速度图像(图 5),进而得到了纯路径频散曲线. 图 4e~4h 为不同周期面波层析成像的走时残差,由图可见,走时残差大部分在 1 s 以内,误差是可以接受的。

在利用走时层析成像方法计算面波纯路径频散曲线时,初始模型的面波速度设为 3.0 km/s,这是结合现有体波成像资料(李强等, 2011)和本文成像结果给定的。

1.4 一维横波速度结构反演

理论研究表明,瑞利面波频散函数对横波速度的敏感性很强,而对纵波速度、密度的敏感性较弱(朱介寿, 1988). 因此,在利用瑞利面波频散曲线进行横波速度结构反演时,仅考虑了横波速度和层厚度这两组参数. 反演过程中的密度参数,根据 Gardner 公式(Gardner *et al.*, 1974)确定与约束; 纵波速度根据纵波和横波的经验关系来约束,这里取 $V_p = 1.73V_s$, 其中 V_p 为纵波速度, V_s 为横波速度, 单位均为 km/s.

横波速度结构反演的基本思想是:以频散曲线作为输入数据,并假设地壳是水平均匀层状介质,结合当地地质、地球物理资料及频散曲线确定初始模型并添加约束(Xia *et al.*, 1999),利用阻尼最小二乘反演方法进行反演,使实测频散曲线和理论频散曲线达到最佳拟合,以获得横波速度结构。

图 6 为利用群速度图像中提取的纯路径频散曲线进行一维速度结构反演的结果. 在反演的过程中,综合主动源体波地震调查结果(陈学波, 1994)和提取的纯路径频散曲线,初始模型速度范围设为 2.8~3.6 km/s, 并让其随着深度递增. 由图可以看出,观测值和模型反演结果吻合得很好,结果是可信的. 图 7 是所有一维速度结构反演后组合得到的长江沿线巴东—茅坪—土门横波速度结构剖面图。

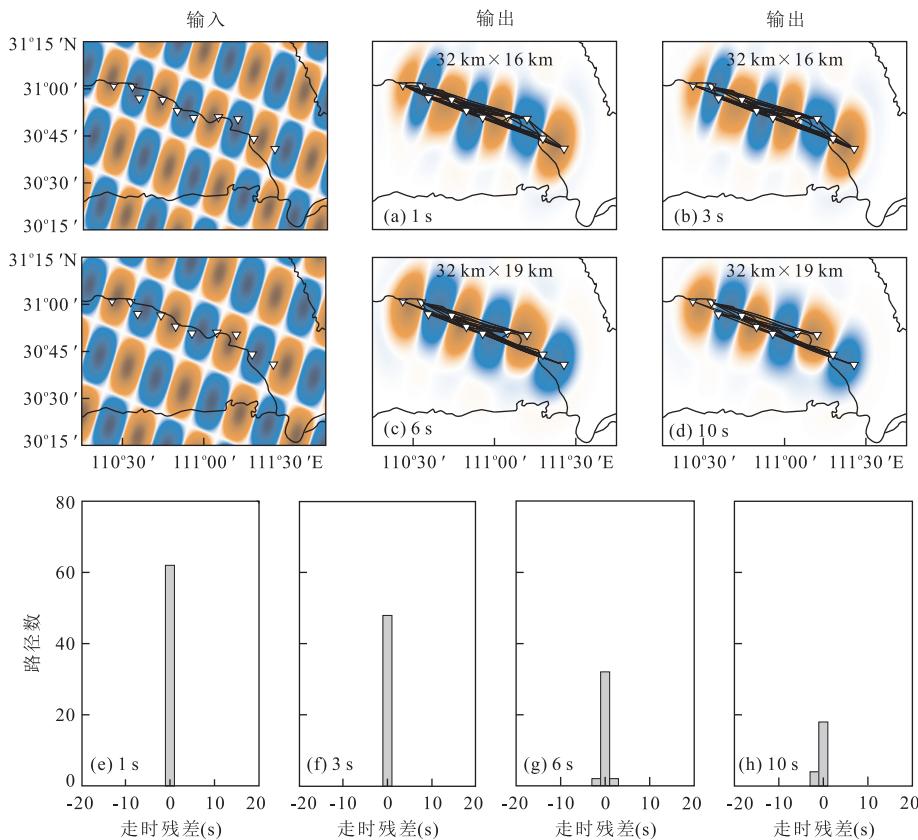


图4 不同周期的分辨率测试结果(a~d)及层析成像走时残差(e~h)

Fig.4 Resolution results (a~d) and travel time misfits (e~h) maps at different periods

图a~图f中“△”为宽频地震台站,黑色实线为射线路径

2 结果与讨论

2.1 反演结果

2.1.1 不同周期的瑞利面波群速度成像分析

图5a是周期为1 s的群速度图像,主要反映0~2 km深度(1/3波长勘探深度)范围的横向速度变化情况,速度范围为2.75~3.29 km/s。速度分布整体表现为中间高,两边低。高速主要集中在茅坪和三斗坪,速度范围为3.1~3.3 km/s;低速主要集中在太子湾、马家坝、郭家坝和土门,速度范围为2.3~2.7 km/s。

图5b是周期为3 s的群速度图像,主要反映3~4 km深度范围的横向速度变化情况,速度范围为2.66~3.24 km/s。速度分布特征与图5a类似。

图5c是周期为6 s的群速度图像,主要反映6~7 km深度范围的横向速度变化情况,速度范围为2.70~3.31 km/s。速度分布特征和图5a类似。

图5d是周期为10 s的群速度图像,主要反映10~12 km深度范围的横向速度变化情况,速度范围为2.90~3.53 km/s。高速主要集中在三斗坪、兆

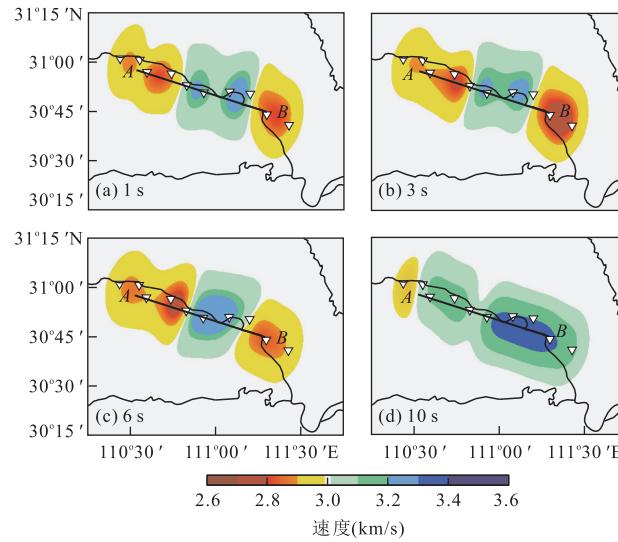


图5 1 s、3 s、6 s、10 s 周期的群速度

Fig.5 Group velocity maps at periods of 1(a), 3(b), 6

(c) and 10(d) seconds

图中“▽”代表台站,黑色粗线为图7中横波速度剖面所在位置

吉坪和葛洲坝区域,速度范围为3.20~3.50 km/s。

2.1.2 横波速度结构剖面 巴东—茅坪—土门—

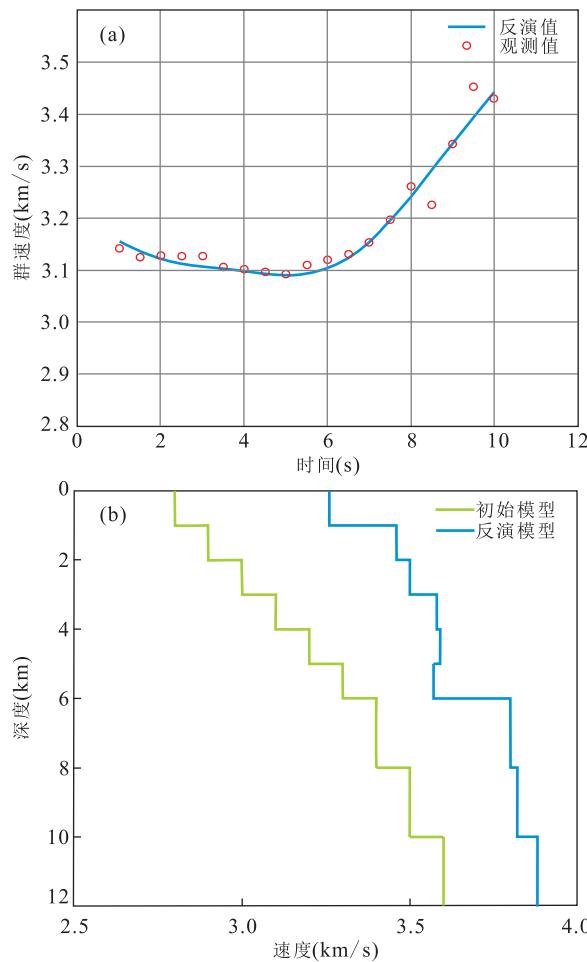


图 6 三峡地区纯路径频散曲线的一维速度结构反演

Fig. 6 One dimensional velocity structure inversion of the pure path dispersion curves in Three Gorges Region
a. 实测频散曲线和反演频散曲线拟合情况; b. 反演获得的横波速度结构

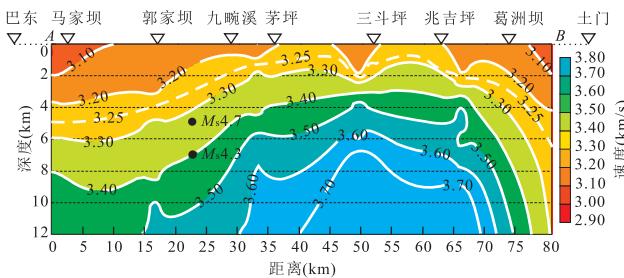


图 7 巴东—茅坪—土门一线横波速度结构剖面

Fig. 7 The S-wave velocity profile along Badong, Maoping and Tumen

右边色柱标志横波速度.“ ∇ ”为研究所使用宽频地震台站在剖面上的投影,上方标注了台站的位置.白色虚线为低速区的底界面.“●”为秭归 2014 年 3 月 27 日 $M_s 4.3$ 和 3 月 30 日 $M_s 4.7$ 地震震中的位置

线的横波速度结构剖面(图 7)很好地反映了一个以黄陵背斜为核部,西部倾角缓、东部倾角陡的背斜构

造,这和前人的研究成果是一致的(Mei et al., 2013).为了方便分析,把剖面大致分成深度 0~6 km 和 6~12 km 上、下两个区域.在 0~6 km 深度范围内,横波速度纵向上随深度增加而升高,纵向上从中间向两边逐步降低,黄陵背斜及其周边区域(茅坪—三斗坪—兆吉坪)速度最高,速度范围为 3.20~3.60 km/s;秭归盆地(马家坝—九畹溪)和江汉盆地(葛洲坝)速度较低,速度范围分别为 3.10~3.40 km/s 和 3.20~3.30 km/s;6~12 km 深度范围内,整个区域速度均较高,秭归盆地、黄陵背斜和江汉盆地的速度范围分别为 3.30~3.50 km/s、3.60~3.80 km/s 和 3.30~3.60 km/s.

2.2 速度结构分析

整体上看,巴东—茅坪—土门一线横波速度结构很好地反映了一个以黄陵背斜核部隆起区为中心的背斜构造.该区域速度值(下面分析中如果没有特殊说明,均指横波速度),纵向上随深度增加而升高(图 7),纵向上秭归盆地和江汉盆地速度相对较低,黄陵背斜核部地区速度较高(图 5, 图 7).秭归盆地的沉积层厚度极不均匀.按照李强等(2011)划分沉积基底界面的方式,将横波速度值 3.25 km/s 作为沉积基底的速度下限(图 7)(下文分析中将 3.25 km/s 以上称为高速,3.25 km/s 以下称为低速),可得秭归盆地区的沉积层厚度在 3.50~5.00 km 之间,且沉积厚度从西向东逐步递减,这和李强等(2009, 2011)的研究成果相差不大.黄陵背斜区域,低速区延伸深度为 1~2 km,与前人(李强等, 2009)研究也是吻合的.

九畹溪及其周边地区下方速度变化较快.在本区存在九畹溪断裂和仙女山断裂,并在此区交汇,该区历史上地震分布较多.近期,该区发生过 2 次地震,分别为 2014 年 3 月 27 日 $M_s 4.3$ 和 3 月 30 日 $M_s 4.7$ 地震(图 7).地球物理调查揭示,该区域具有以下特征:(1)仙女山断裂深度可达 10 km,存在不连续错断或者突变的莫霍面(刘绍府等, 1984; 陈步云和高文海, 1986);(2)重力异常变化较快(王石任等, 1992; 张毅等, 2012);(3)温泉较多,均分布在仙女山断裂及其延长线上(刘传正和谭周地, 1989),显示热物质沿着断裂上升至地表,可能与幔源物质有关(李强等, 2011).基于此,笔者认为该区域的断裂构造、地震活动性和速度变化有一定的相关性,可能的解释是:莫霍面的突变或者倾斜为幔源物质的上涌提供了通道和动力(夏怀宽等, 1992),在壳幔相互作用下,幔源物质沿着莫霍错断不连续或突变面上

涌,在遇到深断裂时,会沿着断裂运移,通过与断裂带附近的物质相互作用,改变断裂带附近的应力状态和岩石密度、速度等物性,为地震的孕育创造了环境。当然,库水渗透也可以改变断层区的强度、摩擦系数和局部应力状态等,促进地震的发生。笔者更倾向于认为,该区域的地震是基底断裂活动的结果,库水渗透在该区域地震的孕育过程中扮演催化剂的角色。

兆吉坪—葛洲坝区域位于江汉盆地西部边缘、黄陵背斜和江汉盆地的过渡区域,速度变化较快,这也得到地震折射/宽角反射数据的支持(Zhang et al., 2009)。该区域位于重力梯度带内(王石任等,1992),且密度反演结果也显示,该区域位于高密度与低密度异常变化转换带内(张毅等,2012)。这些物性特征可能与地表沉积和地下岩石物性有关。与九畹溪相比,该区域也存在不连续错断的莫霍面(张毅等,2012)。有趣的是,该区域(横波速度剖面所在位置)附近并没有发现基底断裂,也没有关于地幔物质上涌的证据。该区域历史上也发生过地震,但地质条件与九畹溪相比有较大不同,故地震成因机制可能不同,有待深入研究。

位于秭归盆地东南部的马家坝—郭家坝—九畹溪速度值范围为3.1~3.5 km/s,整体上比黄陵背斜低(图5,图7),这与陈学波(1994)、李强等(2009,2011)和Mei et al.(2013)的结果基本一致。黄陵背斜南部主要由前南华纪的变质杂岩和花岗岩组成,岩石固结程度较好,密度高;秭归盆地主要分布侏罗纪的砂泥岩,东南角和东北角构造变形特别强烈(马宗晋,1964),其岩石固结程度较差,密度较低。从物性上讲,变质杂岩和花岗岩比砂泥岩的横波速度要高,因此,作者推测该区域上地壳速度的整体偏低可能与该区域的岩性相关。

九畹溪—三斗坪区段位于长江主河道周边,区域涉及黄陵背斜及其西边的秭归盆地与黄陵背斜的过渡区,该区域0~1 km深度范围内主要为低速,比李强等(2009)研究的长江及其支流附近区域0~2 km深度内纵波低速区的延伸深度小。产生横波低速可能的原因是:(1)长江沿岸及支流岩性主要为碳酸盐岩,岩溶发育,且黄陵背斜结晶岩体受多次构造运动,裂隙发育,浅层透水性好(李强等,2011);(2)库水渗透促进了该区域的上地壳上部的物理化学反应,改变了岩石物性,使表层岩石固结程度、速度和密度降低。

茅坪—三斗坪—兆吉坪一线横穿黄陵背斜,该

区2~12 km深度的速度范围为3.30~3.80 km/s,是研究区速度最高的区域,说明三峡大坝处于构造稳定区,这与李同录(1991)和张众服(1996)的认识是一致的。

3 结论

为了研究三峡库区的地下速度结构及三峡坝区的稳定性,笔者在三峡地区进行了近两个月的数据采集工作,并应用地震背景噪声成像方法进行了地下速度结构反演,获得了三峡地区巴东—茅坪—土门一线的地下横波速度结构剖面,其主要结论如下:

(1)对获得的10个台站的背景噪声数据进行了互相关计算,通过筛选获得了35条合格的频散曲线,用于群速度成像,并获得了一条从巴东、茅坪到土门的较高质量的横波速度剖面,为该区的地质结构分析和三峡地区稳定性分析增加了新的数据基础。

(2)研究区地下速度结构和断裂构造关系密切。反演获得的横波速度剖面很好地反映了一个以黄陵背斜核部为中心的背斜构造。秭归盆地和江汉盆地速度较低;黄陵背斜速度较高,三峡大坝所处三斗坪地区的基底表现为高速,表明其处于构造稳定区。

(3)九畹溪下方较快的速度变化可能对应于区域断裂构造,并与地震活动性密切相关,而长江主河道及其支流附近区域的纵横波低速异常可能和库水渗透有关。

致谢:感谢编辑和审稿老师对本文提出的建设性的意见。本文在面波层析成像过程中使用了Rawlinson博士的FMST程序包,在此表示感谢;作者向参与三峡地区数据采集的老师和同学表示感谢;本文从完成到结束,得到了罗银河教授,赵娜博士和顾元博士在数据处理和反演方面的耐心指导,并得到了邓浩博士在地质解释方面的帮助,在这里我表示衷心的感谢;此外,中国地质大学(武汉)三峡库区地质灾害研究中心和地球物理与空间信息学院的领导和老师为我提供了项目支持与帮助,使得本篇文章得以顺利完成,对此表示诚挚的谢意。

References

- Bensen, G. D., Ritzwoller, M. H., Barmin, M. P., et al., 2007. Processing Seismic Ambient Noise Data to Obtain Reliable Broad-Band Surface Wave Dispersion Measurements. *Geophysical Journal International*, 169 (3):

- 1239—1260.doi:10.1111/j.1365—246X.2007.03374.x
- Chen, B.Y., Gao, W.H., 1986. A Preliminary Investigation for Crustal Velocity-Layer Structure Using Explosion Seismic Profile from the Jiajiawan to the Shayuan, Hubei. *Crustal Deformation and Earthquake*, 6(1): 65—74 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X.B., 1994. Characteristics of Deep Structure of Three Gorges and Its Adjacent Area. Seismological Press, Beijing, 50—63 (in Chinese).
- Fang, L.H., Wu, J.P., Lü, Z.Y., 2009. Rayleigh Wave Group Velocity Tomography from Ambient Seismic Noise in North China. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(3): 663—671 (in Chinese with English abstract).
- Gardner, G. H., Gardner, L. W., Greory, A. R., 1974. Formation Velocity and Density: The Diagnostic Basics for Stratigraphic Traps. *Geophysics*, 39(6): 770—780. doi: 10.1190/1.1440465
- Kennett, B. L. N., Sambridge, M. S., Williamson, P. R., 1988. Subspace Methods for Large Inverse Problems with Multiple Parameter Classes. *Geophysics*, 94(2): 237—247. doi:10.1111/j.1365—246X.1988.tb05898.x
- Li, H.Y., Bernardi, F., Michelini, A., 2010. Surface Wave Dispersion Measurements from Ambient Seismic Noise Analysis in Italy. *Geophysical Journal International*, 180(3): 1242—1252. doi:10.1111/j.1365—246X.2009.04476.x
- Li, Q., Zhao, X., Cai, J.A., et al., 2009. P-wave Velocity Structure of Upper and Middle Crust beneath the Three Gorges Reservoir Dam and Adjacent Region. *Science in China (Ser.D)*, 39(4): 427—436 (in Chinese).
- Li, Q., Zhao, X., Cai, J. A., et al., 2011. S-Wave Velocity Structure of Upper and Middle Crust beneath the Three Gorges Reservoir Dam and Adjacent Region. *Acta Seismologica Sinica*, 33(1): 39—50 (in Chinese with English abstract).
- Li, T.L., 1991. Evaluation of the Regional Crust Stability in the Three Gorge Areas of the Yangtze River. *Journal of Xi'an College of Geology*, 13(3): 48—58 (in Chinese with English abstract).
- Liao, W., L., Yao, Y.S., Ding, Z.F., et al., 2007. Tomographic Imagery of P Wave Velocity Structure in Three Gorges Region. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 27(3): 80—84 (in Chinese with English abstract).
- Lin, F.Q., Ritzwoller, M. H., Townend, J., et al., 2007. Ambient Noise Rayleigh Wave Tomography of New Zealand. *Geophysical Journal International*, 170(2): 649—666. doi:10.1111/j.1246X.2007.03414.x
- Liu, C.Z., Tan, Z.D., 1989. Study on Earthquake Induced Environment and Engineering Geology in Three Gorges Region. *Earthquake Proceedings on Three Gorges Project*. Science Press, Beijing, 427—442 (in Chinese).
- Liu, S.F., Liu, S.W., Jia, M.Y., et al., 1984. The Deep Gravitational Field and Its Geological Explanation over Hubei Province and Vicinal Regions. *Crustal Deformation and Earthquake*, 4(4): 357—364 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Z. J., 1964. Mechanics Analysis of Mesozoic Geological Structure in the West of Hubei Province. *Scientia Geologica Sinica*, (1): 76—90 (in Chinese).
- Mei, B., Xu, Y., Zhang, Y., 2013. P- and S-Velocity Structure beneath the Three Gorges Region (Central China) from Local Earthquake Tomography. *Geophysical Journal International*, 193(2): 1035—1049. doi: 10.1093/gji/ggt047
- 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).
- Rawlinson, N., Sambridge, M., 2005. The Fast Marching Method: An Effective Tool for Tomographic Imaging and Tracking Multiple Phases in Complex Layered Media. *Exploration Geophysics*, 36(4): 341—350. doi: 10.1071/EG05341
- Tan, Z.D., Bo, J.S., 1991. Assessment of Crustal Stability and Predictions of Reservoir-Induced Earthquake in Reservoir Head Region of Three Gorges Project on Yangtze River. Geological Publishing House, Beijing, 10—21 (in Chinese).
- Wang, S.R., Zhu, S.L., Li, R.C., 1992. Three Dimensional Inversion of Gravity Anomalies in the Region of Three Gorges, the Yangtze River. *Acta Geophysica Sinica*, 35(1): 69—76 (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 Its Relationship with Earthquakes in Chaoyang-Yixian. *Acta Seismologica Sinica*, 14(2): 180—186 (in Chinese).
- Xia, J.H., Miller, R.D., Park, C.B., 1999. Estimation of Near-Surface Shear-Wave Velocity by Inversion of Rayleigh Wave. *Geophysics*, 64(3): 691—700. doi: 10.1190/1.1444578
- Yan, Z.G., Xue, J.R., 1988. Study of Regional Crust Structure by Imaginary Wave Velocity in Three Gorges Region of Yangtze River. *South China Seismological Journal*, 8(3): 1—8 (in Chinese with English abstract).

- Yang, Y.J., Ritzwoller, M. H., Levshin, A. L., 2007. Ambient Noise Rayleigh Wave Tomography across Europe. *Geophysical Journal International*, 168(1): 259–274. doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03203.x
- Yuan, D.W., Mei, Y.T., Qin, X.L., et al., 1996. Crustal Stability Study in and around the Dam Region of Three Gorges Project. China University of Geosciences Press, Wuhan, 11–17 (in Chinese).
- Zhang, Z.J., Bai, Z.M., Walter, M., et al., 2009. Crustal Structure across the Three Gorges Area of Yangtze Platform, Central, from Seismic Refraction/Wide-Angle Reflection Data. *Tectonophysics*, 475 (3–4): 423–437. doi: 10.1016/j.tecto.2009.05.022
- Zhang, Y., Chen, C., Liang, Q., et al., 2012. Density Structure of Upper and Middle Crust in Three Gorges Reservoir Area. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37 (Suppl.): 213–222 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z.F., 1996. Crust Deformation Monitoring and Analysis of Crust Stability in the Yangtze Gorges Area. *Crustal Deformation and Earthquake*, 16 (4): 48–53 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Q.Y., He, Y.F., Jin, P., et al., 2006. Using MFT Obtain Rayleigh-Wave Dispersion Curve. *Northwestern Seismological Journal*, 28 (1): 46–50 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, J.S., 1988. The Calculation Method in Seismology. Seismological Press, Beijing, 473–476 (in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 陈步云,高文海,1986.贾家湾—沙园剖面地壳结构的初步研究.地壳形变与地震,6(1):65–74.
- 陈学波,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,50–63.
- 房立华,吴建平,吕作勇,2009.华北地区基于噪声的瑞利面波群速度层析成像.地球物理学报,52(3):663–671.
- 李强,赵旭,蔡晋安,等,2009.三峡水库坝址及邻区中上地壳P波速度结构.中国科学,39(4):427–436.
- 李强,赵旭,蔡晋安,等,2011.三峡水库坝址及邻区中上地壳S波速度结构.地震学报,33(1):39–50.
- 李同录,1991.长江三峡地区区域地壳稳定性评价.西安地质学院学报,13(3):48–58.
- 廖武林,姚运生,丁志峰,等,2007.三峡地区P波速度层析成像研究.大地测量与地球动力学,27(3):80–84.
- 刘传正,谭周地,1989.长江三峡库首区诱发地震的环境工程地质研究.长江三峡工程地震专题论文集.北京:科学出版社,427–442.
- 刘绍府,刘锁旺,贾民育,1984.湖北和邻区深部重力场及其地质解释.地壳变形与地震,4(4):357–364.
- 马宗晋,1964.鄂西中生代地质构造的力学分析.地质科学, (1):76–90.
- 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.
- 谭周地,薄景山,1991.长江三峡工程库首区地壳稳定性评价与水库诱发地震预测.北京:地质出版社,10–21.
- 王石任,朱思林,李蓉川,1992.长江三峡地区三维重力反演研究.地球物理学报,35(1):69–76.
- 夏怀宽,卢造勋,刘雪等,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.
- 严尊国,薛军蓉,1988.利用虚波速度研究长江三峡地区地壳结构.华南地震,8(3):1–8.
- 袁登维,梅应堂,秦兴黎,等,1996.长江三峡工程坝区及外围地壳稳定性研究.武汉:中国地质大学出版社,11–17.
- 张毅,陈超,梁青,等,2012.三峡地区中上地壳密度结构.地球科学—中国地质大学学报,37(增刊1):213–222.
- 张众服,1996.三峡地区地形变监测与区域地壳稳定性分析.地壳形变与地震,16(4):48–53.
- 周青云,何永峰,靳平,等,2006.利用多重滤波方法提取面波频散曲线.西北地震学报,28(1):46–50.
- 朱介寿,1988.地震学中的计算方法.北京:地震出版社,473–476.