

吴海波, 王杰, 杜承宸, 申学林, 陈俊华. 2016. 三峡库区上地壳 S 波衰减成像研究. 地震学报, 38(2): 188-198. doi: 10.11939/jass.2016.02.004.

Wu H B, Wang J, Du C C, Shen X L, Chen J H. 2016. Tomography of the S wave attenuation in the upper crust of Three Gorges Reservoir region. *Acta Seismologica Sinica*, 38(2): 188-198. doi:10.11939/jass.2016.02.004.

三峡库区上地壳 S 波衰减成像研究^{*}

吴海波^{1,2),*} 王杰^{1,2)} 杜承宸^{1,2)}

申学林^{1,2)} 陈俊华^{1,2)}

1) 中国武汉 430071 中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室)

2) 中国武汉 430071 湖北省地震局

摘要 利用三峡数字地震台网 2009 年 1 月—2015 年 2 月记录的 1300 多次 $M_L > 1.5$ 小震事件 6000 多条射线的 S 波数据, 利用 S 波衰减层析成像技术获得了三峡库区秭归—巴东段上地壳 Q_s 成像分布图。结果显示, 三峡库区上地壳 Q_s 值存在明显的横向不均匀性, 沿水库近岸区主要为 Q_s 高值区, 外围 NE, NW, SW 和 SE 等 4 个方向上均存在 Q_s 低值异常区, 这是由于这些异常区位于不同地层转换带, 岩层较易破碎, 易于库水渗流所致。在巫山—秭归段剖面上, 本文 Q_s 成像结果与人工地震测深剖面上基底至上地壳底部之间岩层的 Q 值变化形态基本一致, 前者均值比后者低, 反映了上地壳深部介质对地震波衰减特性的影响。2013 年巴东 $M_S 5.1$ 震群活动和 2014 年秭归 $M_S 4.5, M_S 4.7$ 震群活动均分布在 Q_s 高值与低值过渡区, 这种区域的地下介质位于“软”、“硬”转换带上, 岩层易破碎, 应力和能量易集聚, Q 值易受水的渗透引起变化, 从而降低发震断层抗剪切强度而诱发地震。

关键词 Q 值 衰减系数 Q_s 值成像 人工测深剖面

doi:10.11939/jass.2016.02.004 中图分类号: P315.3⁺1 文献标志码: A

Tomography of the S wave attenuation in the upper crust of Three Gorges Reservoir region

Wu Haibo^{1,2),*} Wang Jie^{1,2)} Du Chengchen^{1,2)}

Shen Xuelin^{1,2)} Chen Junhua^{1,2)}

1) Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China

2) Earthquake Administration of Hubei Province, Wuhan 430071, China

Abstract: A 2-D S-wave Q_s values of the upper crust of Zigui-Badong segment beneath the Three Gorges Reservoir region are estimated by means of S wave attenuation tomography based on more than 6 000 S wave-rays of 1 300 small seismic events with $M_L > 1.5$ recorded by digital seismic network of Three Gorges from January 2009 to February 2015. The results show that Q_s exhibits

* 基金项目 中国地震局地震科技星火计划项目(XH14035YSX)和中国地震局测震台网青年骨干培养专项(20150418)共同资助。

收稿日期 2015-08-17 收到初稿, 2015-11-15 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: wuhaiobo7777@163.com



a significantly lateral heterogeneity distribution in Three Gorges Reservoir region, with high Q_s value mainly in the nearby riversides and low Q_s value in the surrounding area in the northeast, northwest, southwest and southeast directions. Particularly, the low Q_s value is closely related to seepage of reservoir water due to the conversion and fragment of rock stratum. The variation of Q_s value in this paper is in accord with Q value of rock stratum from rock-base-ment to the bottom of the upper crust from the Wushan-Zigui deep seismic sounding (DSS) profile, which reflects that the deep media of upper crust have influence on the seismic wave attenuation. The $M_s5.1$ Badong earthquake swarm in 2013 and the $M_s4.5$, $M_s4.7$ Zigui earthquake swarms in 2014 were basically converged to transitional edge regions of high and low Q_s values. That is because that, the physical property of the crustal medium is located on the weak-soft transitional region, strain energy is prone to accumulate, and Q_s value also decreases due to the permeation of the water, furthermore, the shear strength of the seismogenic fault is reduced so as to induce earthquakes.

Key words: Q value; attenuation coefficient; Q_s tomography; deep seismic sounding (DSS) profile

引言

在反映地下岩层介质性质的众多物理参数中,品质因子 Q 直接反映了地下介质对地震波能量的吸收、衰减和散射程度。一般认为, Q 值主要由岩石的微观性质,如岩石裂纹密度、分布和孔隙流体等确定,宏观上与地壳断层、岩浆和低速层分布等有关(陈颙等,2009)。采用数字地震波形衰减计算 Q 值是比较实用有效的方法之一,通常使用远台长周期 S 波和 Lg 波或者近台短周期 S 波计算 Q 值。前者适用于较大区域背景的成像分析,但其容易受到地震波振幅不确定性的影响,如散射、多重路径叠加、波型转换和震源辐射形态等,同时也受到区域观测资料数量和台站密度等的限制(胡家富等,1999; 洪学海等,2003);后者主要适用于小范围精细结构的衰减研究。

三峡库区一直是地震学研究的热点地区之一。早在 1988 年,国家地震局就已开展了长江三峡坝区及外围人工地震测深工程项目,利用人工地震资料计算了奉节—观音垱近 EW 向测线剖面上地壳介质的 Q 值,分析了地壳内各层介质的衰减特征(陈学波等,1994)。受当时条件所限,陈学波等(1994)仅研究了该剖面上地壳介质的衰减规律,并未进行区域二维衰减成像分析。2003 年三峡水库蓄水后诱发了大量浅表微小地震活动,特别是 2008 年底水库水位首次达到 175 m 左右,库区周边仍持续大量小震活动。据统计,2009 年 1 月—2015 年 2 月底共发生的 $M_l > 1.0$ 地震超过 3000 次,三峡水库诱发地震监测台网(以下简称三峡台网)共记录到 2 万多条清晰可靠的波形数据。为了数据分析的可靠性,本文首先对此期间记录的 1300 多次 $M_l > 1.5$ 小震进行双差精定位;然后选取震中距小于 80 km 的波形数据,对库区进行 S 波衰减层析成像反演,分析 Q_s 成像分布特征,并与 20 世纪 80 年代人工地震测深结果进行比较,分析这两个时期库区上地壳介质的衰减变化特征;最后讨论区域地质构造、岩层岩性和水文地质对 Q_s 分布的影响。

1 三峡水库及台网概况

长江三峡水库位于长江中游,水库主体位于湖北秭归县和巴东县境内,坝高 179 m,是全国库容量最大的水库之一。库区内发育了一系列断裂,包括 NNE 向的高桥断裂、周家山—牛口断裂,NNW 向的仙女山断裂、水田坝断裂以及近 NS 向的九畹溪断裂,基本构成了库区构造的主体构架。2013 年 12 月 16 日巴东 $M_s 5.1$ 地震和 2014 年 3 月 27 日秭归 $M_s 4.5$,3 月 30 日秭归 $M_s 4.7$ 地震就分别发生在周家山—牛口断裂和仙女山断裂附近。

三峡台网初期于 2001 年正式运行,由 24 个子台站和八河口数据中心构成;2011 年进行二期改造后,减少为 22 个子台站,如图 1 所示。台站较均匀地分布在水库南北两岸,分别配备了 19 台 JCV-104 型短周期地震仪、3 台 FSS-3 型宽频带地震仪和 24 位数据采集器。记录波形采样率为 100 Hz,由 GPS 统一授时,十多年来三峡台网的观测数据一直连续、稳定可靠。

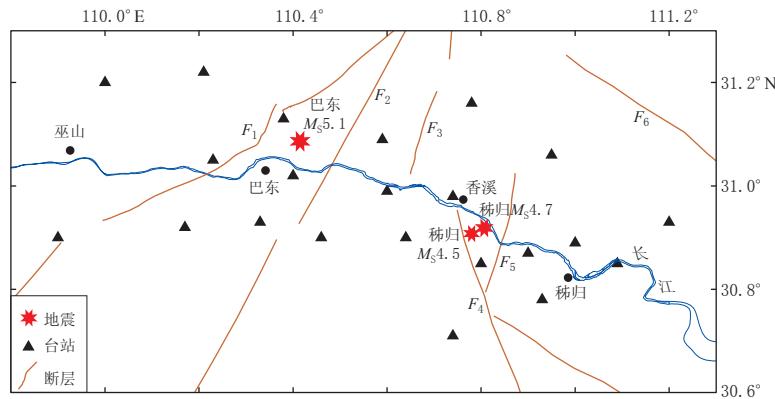


图 1 三峡库区断层及台站分布图

F_1 : 高桥断裂; F_2 : 周家山—牛口断裂; F_3 : 水田坝断裂; F_4 : 仙女山断裂;
 F_5 : 九畹溪断裂; F_6 : 雾渡河断裂

Fig. 1 Distribution of faults and stations in Three Gorges Reservoir region
 F_1 : Gaoqiao fault; F_2 : Zhoujiashan–Niukou fault; F_3 : Shuitianba fault;
 F_4 : Xiannuoshan fault; F_5 : Jiuwanxi fault; F_6 : Wuduhe fault

2 原理与数据预处理

2.1 原理

根据近台记录波形 S 波衰减结构反演的基本原理(Sherbaum, 1990; Haberland, Rietbrock, 2001; 黄玉龙等, 2003; 苏有锦等, 2006; 周龙泉等, 2009),台站 j 对地震事件 i 的记录波形振幅谱可表示为

$$A_{ij}(f) = S_i(f) \cdot I_j(f) \cdot R_j(f) \cdot G_{ij}(r) \cdot B_{ij}(f), \quad (1)$$

式中: $S_i(f)$ 为震源谱, $I_j(f)$ 为仪器响应, $R_j(f)$ 为场地响应, $G_{ij}(r)$ 为路径 r 的几何扩散系数, $B_{ij}(f)$ 为衰减谱。如果已知 $S_i(f)$, $I_j(f)$, $R_j(f)$ 和 $G_{ij}(r)$, 则可通过波形振幅谱 $A_{ij}(f)$ 反演得到衰减谱 $B_{ij}(f)$ 。

震源谱可采用布伦 ω^{-2} 理论震源模型(Brune, 1970),即 $S_i(f) = \omega_0 f_c^2 / (f_c^2 + f^2)$, 式中 ω_0 为零频极限谱,为稳定值, f_c 为拐角频率。仪器响应可根据仪器响应参数直接扣除,场

地响应假定近似为 1. 由于全部波形资料均为 80 km 以内的直达体波, 故几何扩散系数可直接使用 $G_{ij}(r)=r^{-b}$ 模式, 式中 b 与频率 f 无关, 通常为 1. 沿射线路径的衰减谱可表示为 $B_{ij}(f)=\exp(-\pi f R v^{-1} Q^{-1})=\exp(-\pi f t_{ij}^*)$, 从而

$$t_{ij}^* = \int_0^R Q^{-1}(s) v^{-1}(s) ds, \quad (2)$$

式中, t_{ij}^* 为衰减系数, R 为路径, Q 为品质因子, v 为波速. 将式(2)代入式(1), 可得

$$A_{ij}(f) = \omega_0 \frac{f_c^2}{f_c^2 + f^2} r^{-b} \exp(-\pi f t_{ij}^*). \quad (3)$$

可以看到, 式(3)中有 3 个未知参数, 其中: ω_0 和 f_c 仅与震源有关, 可通过每次事件多台位移谱拟合得到; 每个震源到各个台站的衰减系数 t_{ij}^* 可通过 $A_{ij}(f)$ 反演得到. 这样 Q 值便可根据式(2)进行 S 波衰减层析成像确定.

2.2 波形数据预处理

在波形资料处理中, 通过“S 波窗”数据位移谱反演震源至台站间的衰减因子 t_{ij}^* . “S 波窗”为从 S 波开始至其能量衰减 90% 之间的时间段, 窗长与直达 P 波、S 波的时差 T_{S-P} 呈线性关系, 经大量数据拟合得到的关系式为 $T_{Sw}=0.3756+1.0839T_{S-P}$. 为了进行噪声分析, 取 P 波前 2.56 s 数据为“噪声窗”, 窗内数据采用 256 个数据点平移和 128 个数据点重叠的方式求得位移谱, 并使用信噪比大于 2 的波形进行后续分析处理. 由于三峡台网子台站配备的主要为 JCV-104 型短周期地震计, 故需把速度观测谱转换为位移谱, 最终得到了 1—15 Hz 的位移谱. 图 2 给出了 2014 年 6 月 2 日秭归 $M_L 2.1$ 地震 ZJS 台水平向记录波形及其位移谱.

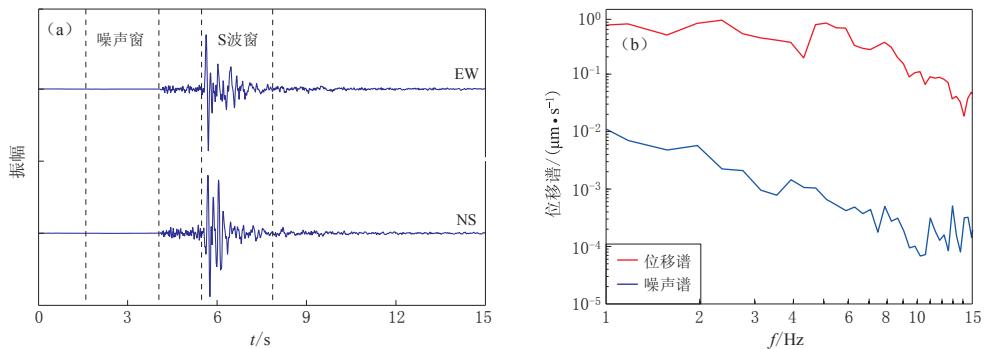


图 2 2014 年 6 月 2 日秭归 $M_L 2.1$ 地震 ZJS 台水平向记录波形(a)及其位移谱(b)

Fig. 2 The horizontal waveform (a) of Zigui $M_L 2.1$ earthquake on June 2, 2014 recorded by the station ZJS and its displacement spectra (b)

对于式(3), 假定事件 i 有 j 个台站记录, 且每次事件具有唯一的震源参数 ω_0 和 f_c , 这些参数可通过该事件多台位移谱拟合求得, 从而在式(3)反演中降低了解的非唯一性. 由图 2 可以看出, 在消除噪声、仪器响应和几何扩散等影响后, 不同台站观测位移谱主要受到不同路径衰减的影响.

计算衰减系数后, 可通过式(2)反演 Q 值. 与速度层析成像方法类似, 假定地壳为横波速度均匀的二维介质, 则 t^* 主要受 Q_s 的影响. 将地壳离散化为二维网格, 依据通过每个网格的平均射线数, 调整网格大小, 确定合适的分辨率. 以地壳平均 Q_s 值建立初始模型,

采用射线追踪伪弯曲法, 经 10 次迭代计算, 得到最终的 Q_s 值。反演过程中, 以震源距代替震中距以消除深度的影响。

3 三峡库区 Q_s 值成像

3.1 数据及反演结果稳定性分析

本文使用 2009 年 1 月—2015 年 2 月经双差精定位后的 1067 次地震波形资料, 震级为 $M_L 1.5$ — 4.0 , 震源深度为 3—11 km, 如图 3 所示。将每条射线波形数据位移谱代入式(3),

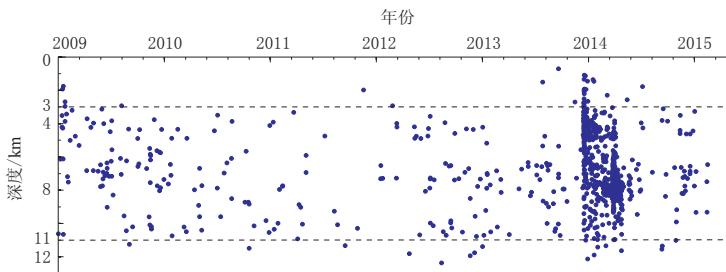


图 3 震源深度剖面图

Fig. 3 The focal depth profile

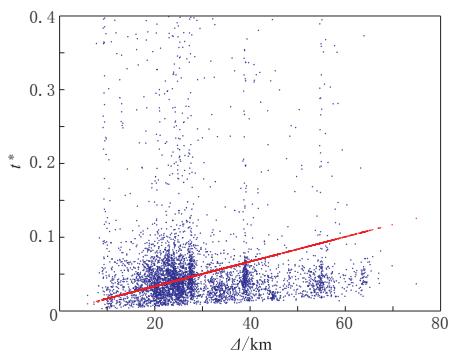


图 4 t^* 与震中距 Δ 的线性拟合曲线

Fig. 4 Linear fitness between t^* and epicentral distance Δ

采用遗传算法反演得到了 6 091 条 t^* 数据。初始计算时假定区域介质 Q_s 值均匀, 则 t^* 与震中距 Δ 呈线性关系, 利用线性最小二乘法拟合得到了 t^* 与震中距 Δ 的关系曲线, 如图 4 所示。反演得到的研究区平均 Q_s 值为 180, 该结果与陈学波等(1994)基于人工地震测深数据所得到的测线剖面上地壳平均 Q 值差异不大。同时, 对所得到的 t^* 数据进行筛选, 舍弃观测值与拟合值残差大于一倍均方差的数据。据此, 从 6 091 条 t^* 数据中选取 4 120 条用于 Q_s 值成像, 其射线分布如图 5 所示。

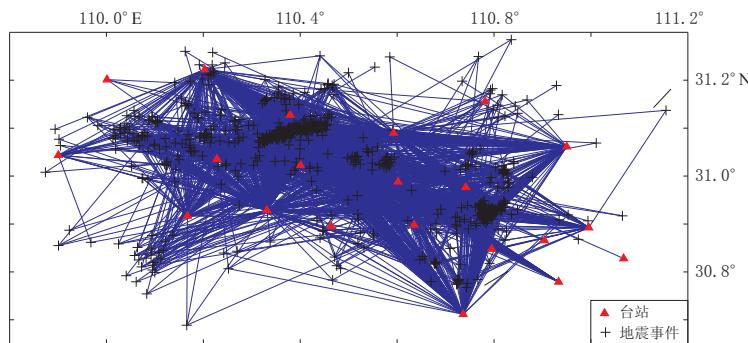


图 5 三峡库区秭归—巴东段地震射线分布

Fig. 5 Distribution of seismic raypaths in Zigui-Badong section of the Three Gorges Reservoir region, where the red triangles represent stations, the crosses represent earthquakes

经大量的 S 波数据走时计算,三峡库区上地壳 S 波平均初始速度为 3.19 km/s,与李强等(2011)计算反演的同层 S 波速度基本一致,初始 Q_s 值为 180. 以该值为初始条件,经 10 次迭代反演后, t^* 的均方根残差由迭代前的 0.0291 降至 0.0229, 反演前后残差 δt^* 随震中距 Δ 的分布如图 6 所示。

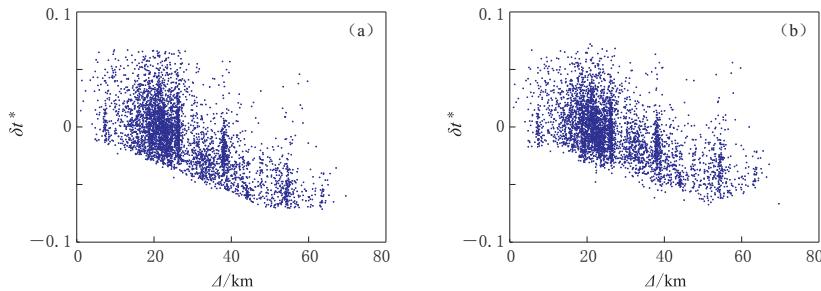


图 6 反演前(a)、后(b)残差 δt^* 随震中距 Δ 的分布图

Fig. 6 Residuals δt^* versus epicentral distance Δ before (a) and after inversion (b)

为了选取合适的网格大小,经反复试验,最终采用 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 网格,多数网格内穿过的射线数超过 100 条,因此该反演结果能较真实地反映大部分地区地下介质的衰减特征。图 7 给出了检验板分辨率试验结果。可以看出,三峡库区沿江两岸约 20 km 范围内的地震事件和台站较多,射线密集,分辨率高;其它边缘地区的地震事件少、台站少,分辨率较低。因此本文只对分辨率较好的区域进行成像研究,即秭归和巴东沿江两岸地区,范围约为(110.0°E — 111.0°E , 30.7°N — 31.2°N)。

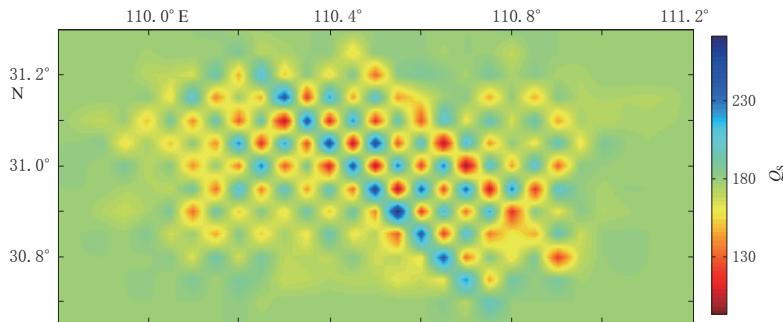


图 7 检验板分辨率试验结果

Fig. 7 The results of checkerboard resolution test

3.2 Q_s 值成像结果

本研究主要使用 2009 年 1 月—2015 年 2 月 $M_L > 1.5$ 地震的精定位数据,震源深度主要分布在 3—11 km(图 3),因此,本文成像结果集中反映了三峡库区秭归和巴东段上地壳 Q_s 值的分布特征。

图 8 给出了三峡库区 Q_s 值的分布图。可以看出, Q_s 值的横向分布明显不均匀,反映出不同区域 S 波衰减存在很大差异。总体上,沿长江三峡近岸两侧以 Q_s 高值为主,特别是秭归西部水库近岸存在明显的 Q_s 高值区,在库区四周地震波射线覆盖范围内存在一些 Q_s 低值区,分别分布在 NW, NE, SE 和 SW 等 4 个方向,主要包括 NW1, NW2, NE1,

NE2, NE3, SW 和 SE 等低值区(图 8). 高桥断裂穿越 NW2 低值区, 周家山—牛口断裂东西两边存在 NW2 和 NE3 低值区, 仙女山断裂附近存在 SE 低值区, 九畹溪断裂附近存在 NE1 和 NE2 低值区. 在上述 Q_s 低值区外围也存在低值区, 如 NW1 和 SW 低值区西边的低值区, 但地震波射线未覆盖或很少穿越这些区域, 反演结果的可靠性不高, 故不予以分析讨论.

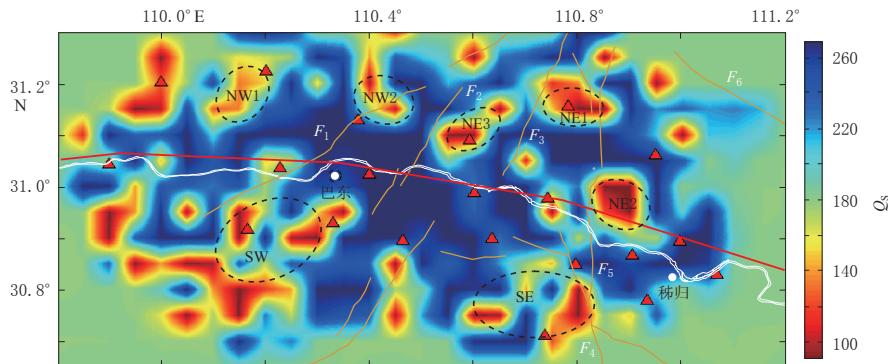


图 8 三峡库区上地壳 S 波 Q_s 值分布图

三角形为台站, 红线为剖面测线 I, 椭圆为 Q_s 低值区, 白线为长江三峡, 棕线为断裂

Fig. 8 Distribution of Q_s values in the upper crust of Three Gorges Reservoir region
Red triangles represent stations, red line represents the profile I, ellipses represent
the areas with low Q_s value, white line represents Three Gorges of the
Yangtze River, brown lines represent faults

4 区域库水渗透和地质构造对介质 Q_s 值的影响

4.1 Q_s 值成像结果与蓄水前人工测深剖面 Q 值的比较

地壳岩石中孔隙、孔隙率、结构面及孔隙中充满的液、气、固体含量等对地震波衰减均有明显的影响. 随着岩石中黏土含量、孔隙率和渗透率的增加, 地震波衰减增大(李亚林等, 2001; 安勇等, 2006; 陈颤等, 2009); 当含水量达到一定程度时, Q 值基本不变或略微增加, 并随着围压的增加而增大(施行觉等, 1995).

陈蜀俊等(2005)研究显示, 自 2003 年三峡水库首期蓄水以来, 水库蓄水已引起库首区

表 1 三峡库区人工测深剖面不同段的
平均 Q 值与 Q_s 值比较

Table 1 Comparison of average Q value with Q_s
value for the different segments on the deep
seismic sounding (DSS) profile in Three
Gorges Reservoir region

距剖面西端 (奉节)距离/km	Q 值		Q_s 值
	基底 以上	基底至上 地壳底部	
25—60	110	308	160—220
60—90	65	345	240—260
90—100	93	345	240—260
100—150	74	291	120—200
平均 Q 值	85	322	约 180

重力场、渗流场、形变场和构造应力场的明显变化, 这意味着水库蓄水可能也会对区域地下介质 Q 值产生影响. 早在 1988 年国家地震局就曾实施了长江三峡坝区及外围人工地震测深工程项目, 利用人工测深数据对测线 I(奉节—观音垱)剖面进行了地震波衰减分析, 并计算了不同段和不同地层的 Q 值(陈学波等, 1994). 本文 Q_s 层析成像经度范围(109.8°E—111.1°E)正好位于该剖面西端(奉节)以东 25—150 km 范围内. 表 1 给出

了该段基底以上以及基底至上地壳底部不同段的Q值以及本研究沿该测线的 Q_s 值反演结果。研究区的平均 Q_s 值约为180,该值介于上地壳两层岩层平均Q值之间。由于本研究中地震事件震源深度主要分布在3—11 km,集中在基底层下部,射线同时穿越了上地壳两层介质,所以平均 Q_s 值180是上地壳两层介质 Q_s 值的综合反映。另外,沿剖面自西向东分为3段:巴东以西段、巴东—香溪段和香溪以东—秭归段,其中巴东—香溪段的 Q_s 值最高且较稳定,香溪以东—秭归段 Q_s 值最低,该特征与表1中基底至上地壳底部的特征基本一致,反映了本文反演结果受上地壳深部介质衰减特性的影响更明显。

由于蓄水前三峡库区地震很少,仅从测线I剖面的Q值并不能反映库区蓄水前的总体特征,而且测线I基本沿长江沿岸布设,其Q值反映了长江近岸区地下介质的地震波衰减规律,而近岸区岩层经长江江水长久渗透,含水已达饱和,因此对Q值的影响并不明显。但是,水库蓄水后对近岸区浅表层或周边渗流的影响更明显,这在 Q_s 值成像结果中也有所反映,图8中水库周围的4个 Q_s 低值区可能与库水长期渗流有一定关系。

4.2 区域地质构造对 Q_s 值的影响分析

地壳构造差异、岩层破碎度和不同性质的岩性也会对Q值产生影响,腾吉文等(2004)和陈颤等(2009)研究认为岩石的衰减受岩性影响,由于孔隙和构造面等差异,沉积岩层中地震波的衰减远大于岩浆岩和变质岩。地质构造上,三峡库区位于八面山褶皱带东北端,主体构造受黄陵背斜、秭归向斜和神农架穹窿等控制。从测线I地质剖面分析,三峡库区上地壳大部分被沉积盖层所覆盖,仅东部黄陵隆起段结晶基底基岩出露,巫山—秭归向斜东缘香溪段上地壳盖层均匀稳定,主要为三叠系和侏罗系海相沉积岩层,基底及以下为变质岩或花岗岩,该区 Q_s 值偏高但非常稳定。图8中的 Q_s 低值异常区均处于地层转换比较复杂的区域,从三峡库区地质构造图(图9)可以看出:NE向3个 Q_s 低值异常区位于秭归向斜与黄陵背斜的转折地带;NW向的NW1和NW2低值区位于神农架穹窿南缘;SW低值区位于八面山褶皱带边缘,岩层岩性复杂;SE低值区位于黄陵背斜西南边界带上。这些区域岩体较易破碎,库水易渗流,从而使介质 Q_s 值降低。

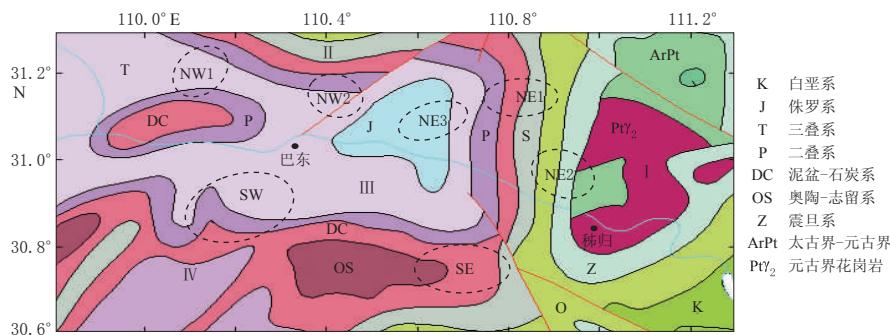


图9 三峡库区地质构造简图(引自黄崇轲等,2002)

I: 黄陵背斜; II: 神农架穹窿; III: 秭归向斜; IV: 八面山褶皱区

Fig. 9 Sketch map showing geological tectonic of Three Gorges Reservoir region (after Huang *et al.*, 2002)

I: Huangling anticline; II: Shennongjia dome; III: Zigui syncline; IV: Bamianshan fold area

从 Q_s 成像结果与区域地震活动分布关系角度分析,2013年巴东 M_s 5.1地震震群位于水库以北高桥断裂与周家山—牛口断裂之间,在NW1低值区以南、NW2低值区以西,为

明显的 Q_s 高值与低值过渡区。2014 年秭归 $M_s 4.5$, $M_s 4.7$ 地震震群在仙女山断裂北端与九畹溪断裂之间, 位于 SE 与 NE2 低值区之间, 为明显的 Q_s 高值与低值过渡区。2000 年云南姚安 $M_s 6.5$ 地震大多数余震分布在 Q 高值与低值过渡区(张杰卿等, 2009); 2003 年大姚地震的两个主震位于 Q 低值边缘过渡区(王伟君等, 2007); 紫坪铺水库地区 Q_s 成像结果也显示库区震群活动基本都位于 Q_s 高值与低值过渡区(王惠琳等, 2012)。本文结果与前人的研究结果是一致的。 Q 值在一定程度上反映了区域岩性软硬程度, Q 高值与低值过渡区正好位于软硬转换带上, 岩层更易破碎, 更容易受水的渗透而引起 Q 值的变化, 同时也降低断层抗剪切强度从而诱发地震。

5 讨论与结论

通过对本文所得三峡库区 Q_s 成像结果以及与人工测深剖面 Q 值结果的比较, 并结合库区岩层岩性和地质构造, 得到结论如下:

1) 三峡水库库区上地壳 Q_s 值存在明显的横向不均匀性, 沿水库近岸区主要为 Q_s 高值区, 而其周边区域存在一些较明显的 Q_s 低值区, 分布在水库四周 NE, NW, SW 和 SE 等方向上。这些低值异常区多位于地层转换复杂区, 岩层较易破碎, 易于库水渗流, 从而导致介质 Q_s 值降低。

2) 将本文 Q_s 成像结果与沿测线 I 人工地震测深剖面上的 Q 值进行比较可知, 沿巫山—秭归段剖面上的 Q 值与基底至上地壳底部之间岩层的 Q_s 值成像结果变化形态基本一致, 前者的平均 Q 值比后者更低, 反映了上地壳深部介质对地震波衰减特性的影响。由于本研究 Q_s 值集中反映的是 11 km 以上岩层内的地震波衰减, 包含盖层和部分基底以下岩层, 故该值低于基底下层而明显高于上部盖层的 Q_s 值。

3) 2013 年巴东 $M_s 5.1$ 震群活动和 2014 年秭归 $M_s 4.5$, $M_s 4.7$ 震群活动均分布在 Q_s 高值与低值过渡区。这种区域地下介质处于“软”、“硬”转换带上, 岩层更易破碎, 更容易受库水的影响而引起 Q 值的变化, 同时这些脆弱部位抗剪切强度低, 应力容易集中从而诱发地震。

4) 本文反演得到的三峡库区上地壳平均 S 波速度与李强等(2011)的反演结果一致, 但本文并未考虑 Q_s 值与频率的关系。周龙泉等(2009)和王惠琳等(2012)的研究指出, 未考虑频率相关时, 使用的初始 Q_s 值比考虑频率相关时的初始 Q_s 值略高, 即对反演结果数值会产生影响, 但其二维成像分布变化特征不会改变, 因此仍能以此来分析地下介质的分布特征。

周龙泉研究员提供了相关软件, 审稿专家对本文提出了宝贵意见, 作者在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 安勇, 牟永光, 方朝亮. 2006. 沉积岩的速度、衰减与岩石物理性质间的关系[J]. 石油地球物理勘探, 41(2): 188–192.
 An Y, Mu Y G, Fang C L. 2006. Relationship between attenuation, velocity of sedimentary rocks and petrophysical property[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 41(2): 188–192 (in Chinese).
 陈蜀俊, 姚运生, 曾佐勋. 2005. 三峡水库蓄水对库区孕震环境及潜在震源影响研究[J]. 大地测量与地球动力学, 25(3): 116–120.

- Chen S J, Yao Y S, Zeng Z X. 2005. Effect of impounding on seismogenic environment and potential focus in head region of Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **25**(3): 116–120 (in Chinese).
- 陈学波, 陈步云, 张四维, 王椿镛, 李清河. 1994. 长江三峡工程坝区及外围深部构造特征研究[M]. 北京: 地震出版社: 116–127.
- Chen X B, Chen B Y, Zhang S W, Wang C Y, Li Q H. 1994. *The Research on Characteristics of the Deep Tectonics in Three Gorges and Nearby Area*[M]. Beijing: Seismological Press: 116–127 (in Chinese).
- 陈颙, 黄庭芳, 刘恩儒. 2009. 岩石物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社: 64–77.
- Chen Y, Huang T F, Liu E R. 2009. *Rock Physics*[M]. Hefei: China Science and Technology University Press: 64–77 (in Chinese).
- 洪学海, 朱介寿, 曹家敏, 许卓群. 2003. 中国大陆地壳上地幔S波品质因子三维层析成像[J]. 地球物理学报, **46**(5): 642–651.
- Hong X H, Zhu J S, Cao J M, Xu Z Q. 2003. Tomography of the 3-D S-wave quality factor of the crust and upper mantle in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **46**(5): 642–651 (in Chinese).
- 胡家富, 段永康, 胡毅力. 1999. 利用面波测定台间衰减系数[J]. 西北地震研究, **19**(2): 172–179.
- Hu J F, Duan Y K, Hu Y L. 1999. Measurement of interstation attenuation coefficients from surface wave[J]. *Northwest Seismological Journal*, **19**(2): 172–179 (in Chinese).
- 黄崇轲, 叶天竺, 陈克强, 邬宽廉, 季晓燕, 高振家, 钱大都, 田玉莹, 何永祥, 张庆合, 曹邦功, 李龙, 邵和明, 王友勤, 杨明桂, 张忠伟, 姚冬生, 郑建康. 2002. 中华人民共和国地质图1:2500000[M]. 北京: 中国地图出版社: 1.
- Huang C K, Ye T Z, Chen K Q, Wu K L, Ji X Y, Gao Z J, Qian D D, Tian Y Y, He Y X, Zhang Q H, Cao B G, Li L, Shao H M, Wang Y Q, Yang M G, Zhang Z W, Yao D S, Zheng J K. 2002. *Geological Map of People's Republic of China 1:2500000*[M]. Beijing: Sinomaps Press: 1 (in Chinese).
- 黄玉龙, 郑斯华, 刘杰, 赵兴权, 康英. 2003. 广东地区地震动衰减和场地响应的研究[J]. 地球物理学报, **46**(1): 54–61.
- Huang Y L, Zheng S H, Liu J, Zhao X Q, Kang Y. 2003. Attenuation of ground motion and site response in Guangdong region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **46**(1): 54–61 (in Chinese).
- 李强, 赵旭, 蔡晋安, 刘瑞丰. 2011. 三峡水库坝址及邻区中上地壳S波速度结构[J]. 地震学报, **33**(1): 39–50.
- Li Q, Zhao X, Cai J A, Liu R F. 2011. S-wave velocity structure of upper and middle crust beneath the Three Gorges Reservoir dam and adjacent region[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **33**(1): 39–50 (in Chinese).
- 李亚林, 贺振华, 黄德济, 单钰铭, 陈晓超, 周阿波. 2001. 岩石孔渗特性与地震波衰减、传播速度的相互关系[J]. 天然气工业, **21**(4): 7–11.
- Li Y L, He Z H, Huang D J, Shan Y M, Chen X C, Zhou A B. 2001. Relation between rock porosity permeability property and seismic wave attenuation and propagation velocity[J]. *Natural Gas Industry*, **21**(4): 7–11 (in Chinese).
- 施行觉, 徐果明, 靳平, 卢振刚, 刘文忠. 1995. 岩石的含水饱和度对纵、横波速及衰减影响的试验研究[J]. 地球物理学报, **38**(增刊1): 281–287.
- Shi X J, Xu G M, Jin P, Lu Z G, Liu W Z. 1995. The laboratory study of influence of water saturation on rock's velocity and attenuation[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **38**(Suppl 1): 281–287 (in Chinese).
- 苏有锦, 刘杰, 郑斯华, 刘丽芳, 付虹, 徐彦. 2006. 云南地区S波非弹性衰减Q值研究[J]. 地震学报, **28**(2): 206–212.
- Su Y J, Liu J, Zheng S H, Liu L F, Fu H, Xu Y. 2006. Q value of anelastic S-wave attenuation in Yunnan region[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **28**(2): 206–212 (in Chinese).
- 腾吉文, 张中杰, 白武明. 2004. 岩石圈物理学[M]. 北京: 科学出版社: 35–47.
- Teng J W, Zhang Z J, Bai W M. 2004. *Lithosphere Physics*[M]. Beijing: Science Press: 35–47 (in Chinese).
- 王惠琳, 张晓东, 周龙泉, 徐晓枫, 杨志高, 卢显, 李智荣. 2012. 紫坪铺水库区域地壳Qs成像及其与渗透关系研究[J]. 地球物理学报, **55**(2): 526–537.
- Wang H L, Zhang X D, Zhou L Q, Xu X F, Yang Z G, Lu X, Li Z R. 2012. Study on the relationship between fluid

- infiltration and Q_S tomography of the crust in Zipingpu reservoir area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(2): 526–537 (in Chinese).
- 王伟君, 陈凌, 陈棋福, 刘杰. 2007. 2003年大姚地震震中区的速度和衰减结构[J]. 地球物理学报, **50**(3): 770–779.
- Wang W J, Chen L, Chen Q F, Liu J. 2007. Velocity and attenuation structures in the focal area of 2003 Dayao earthquakes[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **50**(3): 770–779 (in Chinese).
- 张杰卿, 刘杰, 周龙泉. 2009. 2000年云南姚安地震余震区的速度和衰减结构层析成像分析[J]. 地震, **29**(3): 126–135.
- Zhang J Q, Liu J, Zhou L Q. 2009. Tomography and analysis of velocity and attenuation structure for the 2000 Yaoan aftershock area in Yunnan[J]. *Earthquake*, **29**(3): 126–135 (in Chinese).
- 周龙泉, 刘杰, 苏有锦, 马宏生, 周俊杰. 2009. 利用S波高频衰减参数对云南地区地壳Q值成像[J]. 地球物理学报, **52**(6): 1500–1507.
- Zhou L Q, Liu J, Su Y J, Ma H S, Zhou J J. 2009. Tomography for Q of Yunnan region from high-frequency attenuation of S wave[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(6): 1500–1507 (in Chinese).
- Brune J N. 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **75**(26): 4997–5009.
- Haberland C, Rietbrock A. 2001. Attenuation tomography in the western central Andes: A detailed insight into the structure of a magmatic arc[J]. *J Geophys Res*, **106**(B6): 11151–11167.
- Sherbaum F. 1990. Combined inversion for the three-dimensional Q structure and source parameters using microearthquake spectra[J]. *J Geophys Res*, **95**(B8): 12423–12438.