

王惠琳, 张晓东, 周龙泉等. 紫坪铺水库区域地壳 Q_s 成像及其与渗透关系研究. 地球物理学报, 2012, 55(2): 526-537, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.02.015.

Wang H L, Zhang X D, Zhou L Q, et al. Study on the relationship between fluid infiltration and Q_s tomography of the crust in Zipingpu Reservoir Area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(2): 526-537, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.02.015.

紫坪铺水库区域地壳 Q_s 成像及其与渗透关系研究

王惠琳^{1,3}, 张晓东², 周龙泉², 徐晓枫³, 杨志高², 卢 显², 李智蓉^{1,4}

1 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

2 中国地震台网中心, 北京 100045

3 海南省地震局, 海口 570203

4 云南省地震局, 昆明 650224

摘 要 利用衰减结构层析成像方法尝试对紫坪铺水库区域地壳 Q_s 进行成像, 获得该区浅层地壳静态及蓄水前、后的 Q_s 变化特征, 结合实验研究成果、岩体岩性、断裂构造、水文地质条件探讨库水的渗透作用及其对地壳介质的影响, 对研究区内地震活动类型及发震成因的介质物性变化进行了讨论. 研究结果表明: 紫坪铺水库区域地壳 Q_s 横向不均匀变化显著, 库区周边近似存在低 Q_s 值环形区域, 主要包括水库东北、东南、西南、西北及库区中段五个区域. 其中, 水库东北、库区中段、西南低 Q_s 区域与库水渗透关系密切, 初步认为库水可能沿着通济场断裂中段和两端的岩石破碎带及节理、裂隙发育地区向地下渗透, 使岩石孔隙中充满流体, 内摩擦增大, 地震波大大衰减, 从而导致 Q_s 值大幅下降. 同时, 在西南区诱发了水库小震群, 在东北区和东南区诱发了部分水库小震群. 另外, 紫坪铺水库区域东北、东南、西南三个小震群基本位于高 Q_s 值(低衰减)和低 Q_s 值(高衰减)过渡区域, 可能由于低 Q_s 区地震波衰减大, 不易积累能量, 而高、低 Q_s 值的过渡区域, 介质介于“软”、“硬”之间, 有可能积累应变能, 孕育地震. 当高、低 Q_s 过渡区域岩石裂纹饱含水或部分含水后, 水对裂纹边界起潮湿和润滑作用, 降低了发震断层的抗剪强度, 使滑动容易产生, 从而诱发地震.

关键词 衰减成像, Q_s , 流体渗透, 紫坪铺水库

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.02.015

中图分类号 P315

收稿日期 2010-12-13, 2012-01-11 收修定稿

Study on the relationship between fluid infiltration and Q_s tomography of the crust in Zipingpu Reservoir Area

WANG Hui-Lin^{1,3}, ZHANG Xiao-Dong², ZHOU Long-Quan², XU Xiao-Feng³,
YANG Zhi-Gao², LU Xian², LI Zhi-Rong^{1,4}

1 Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

2 China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

3 Earthquake Administration of Hainan Province, Haikou 570203, China

4 Seismological Bureau of Yunnan Province, Kunming, 650224, China

Abstract The crustal Q_s values are imaged in Zipingpu Reservoir Area to obtain shallow crustal characteristics of Q_s variation before and after the impoundment of water through two-dimensional seismic attenuation tomography. The infiltration of reservoir water and its impact on the crust are investigated with experimental findings, rocks lithology, faults, hydrological and geological

基金项目 地震行业科研专项(200808036)和国家科技支撑计划(2008BAC38B03)共同资助.

作者简介 王惠琳, 女, 1982年生, 硕士, 2011年毕业于中国地震局地震预测研究所, 主要从事地震预测、地震层析成像研究.

E-mail: huilin95@163.com

conditions. Simultaneously, we discussed the type of seismic activity and physical variety of medium about the cause of earthquake occurrence in the area. The results show that there is a significant lateral heterogeneity in Q_s distribution in Zipingpu Reservoir Area. Approximately, there are low Q_s value annular regions surrounding the reservoir, namely, the Q_s values are low on the northeast, southeast, southwest, northwest sides and in the middle part of the reservoir. Particularly, the Q_s values variation are most closely related to fluid infiltration in the middle part and on the northeast, southwest sides of the reservoir. We consider that the reservoir water infiltrates through from the middle part and two sides of the rock fracture zones, joints and fractured regions of the Tongjichang faults, filling with fluid in the rock pores, increasing the internal friction, causing significant attenuation of seismic waves, resulting in a substantial decline in the value of Q_s , inducing small earthquake swarms on the southwest and partly on northeast and southeast sides. The small earthquake swarms in northeast, southeast and southwest regions are basically converged to transitional edge regions of high and low Q_s values. This is perhaps a result of accumulation of strain energy in weak and soft zones. After full or partial filling of water in rock cracks, there are wet and lubricating effect on the crack boundary in the high and low Q_s transition region, reducing the shear strength of seismogenic faults, inducing earthquakes.

Keywords Attenuation tomography, Q_s , Fluid infiltration, Zipingpu Reservoir

1 引言

Q 值是描述地球介质特性的重要参数之一, 根据陈颢等^[1]研究发现, 地震波衰减主要取决于岩石的微观性质—诸如岩石内部裂纹的密度、分布、构造以及孔隙流体的相互作用等。王大兴等^[2]认为对于横波, 岩石孔隙流体的黏滞运动引起的能量耗散是造成能量衰减的主要因素。刘建华等^[3]对地震波衰减的物理机制研究认为造成地壳介质中地震波衰减的主要原因是地壳内存在大量裂隙, 裂隙中饱含水或部分含水, 地震波传播时引起裂隙中的流体运动, 从而造成地震波的衰减。因此, 通过研究反映地震波衰减的 Q 值, 我们可进一步了解和解释地球内部介质的特性、结构及其变化等。

20 世纪 60 年代, 国外开始系统利用天然地震资料研究 Q 值的机制与确定 Q 值的方法。Sato 等^[4] (1958) 研究了面波振幅衰减, Anderson 等^[5] (1964) 通过长周期面波对地球平均 Q 值进行了研究。近年来随着地震层析成像技术的广泛应用, 许多学者将层析成像方法应用于 Q 值的研究, 即衰减层析成像方法。Haydar 等^[6] (1990) 研究了 New Madrid 地震带及其周边上地壳三维 Q 值结构, 发现在地震带活断层区域衰减很大, 岩石中是否饱含流体决定了断层是否为活动断层。Hansen 等^[7] (2004) 利用衰减层

析成像方法反演了夏威夷 Kilauea 火山东裂谷带的体波衰减结构。丛连理等^[8] (2002) 研究了中国大陆及邻区 Lg 尾波的 Q 值分布。洪学海等^[9] (2003) 研究了中国大陆地壳上地幔 S 波 Q 值三维成像。Pei 等、马宏生等、汪素云等^[10-13] 利用 M_L 振幅研究地壳横波 Q 值, 研究了华北、川滇地区以及中国大陆不同构造区的衰减特征。周龙泉等、张杰卿等^[14-15] (2009) 对云南地区和姚安余震区地壳 Q_s 值进行了成像研究, 发现云南地区的高大地热流点基本位于低 Q 值区域。

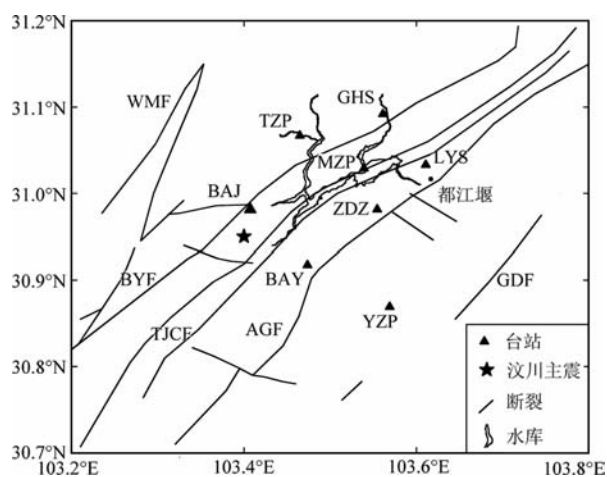
2008 年汶川 $M_s 8.0$ 级地震后, 距其最近的紫坪铺水库成为了众多学者的研究热点, 对紫坪铺水库地区的地震精定位、地震活动和震源参数、小震震源机制、水库的地表水体对断层应力、地震活动的影响等^[16-19] 多方面进行了研究, 张永久等、周连庆等^[20-21] 也分别利用 Atkinson 方法和 Sato 模型计算了紫坪铺库区与频率相关的平均 $Q_s = 47.8$ 和尾波平均 $Q_c = 21.6$, 从总体上给出了紫坪铺库区的地震波衰减特征。若要研究紫坪铺水库蓄水后水的渗透作用对该区域地壳介质的影响, 则需要研究更为精细的 Q_s 分布及其变化特征。因此, 本文对 2004 年 8 月 16 日至 2008 年 5 月 11 日的双差精定位后的地震 S 波形资料进行分析, 利用 S 波衰减层析成像方法反演紫坪铺水库区域静态和蓄水前、后的 Q_s 成像特征, 并结合实验研究成果、岩体岩性、断裂构造及

水文地质调查结果,探讨了该区可能存在的良好渗透条件及其对 Q_c 值的影响,同时对研究区内地震活动类型及发震成因的介质物性变化进行了讨论.

2 紫坪铺水库及台网概况

紫坪铺水库位于四川省都江堰市区西北方向 9 km 处的岷江上游麻溪乡,距成都市约 60 km,2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s 8.0$ 级大地震微观震中距离水库最近处仅 6 km 左右.紫坪铺水库为大(一)型工程,最大坝高 156 m,总库容 $11.12 \times 10^8 \text{ m}^3$.2001 年 3 月 29 日正式动工兴建,2005 年 9 月 30 日下闸蓄水,2006 年 12 月竣工.大坝为混凝土面板堆石坝,是国内仅有的几座同类型高坝之一.紫坪铺水库位于龙门山造山带的中南段,横跨造山带自西向东发育的汶川—茂县(WMF)、北川—映秀(BYF)、安县—灌县(AGF)和广元—大邑(GDF)4 条主干断裂和通济场次级断裂(TJCF),控制了紫坪铺水库区域的基本构造格架(图 1).其中,通济场断裂直接穿越库区,即位于北川—映秀与安县—灌县断裂之间的两条次级断裂.它们是通济场断裂在平面上的两条分支,在深部最终汇聚到通济场断裂的主滑脱面上^[22].

紫坪铺水库数字遥测地震台网于 2004 年 8 月试运行,2005 年 6 月通过验收.台网由 8 个数字遥测地震台组成,即灵隐寺(LYS)、钻洞子(ZDZ)、白岩(BAY)、八角(BAJ)、桃子坪(TZP)、桂花树(GHS)、



WMF: 汶川—茂县断裂; BYF: 北川—映秀断裂; TJCF: 通济场断裂; AGF: 安县—灌县断裂; GDF: 广元—大邑断裂. WMF: Wenchuan-Maoxian fault; BYF: Beichuan-Yingxiu fault; TJCF: Tongjichang faults; AGF: Anxian-Guanxian fault; GDF: Guangyuan-Dayi fault.

图 1 紫坪铺水库台网及断裂分布

Fig. 1 Distribution of faults and seismic stations in Zipingpu Reservoir Area

庙子坪(MZP)和成都区域数字台网中的油榨坪台(YZP). 台站大致均匀地分布在库区周边,平均台距为 10 km 左右(图 1). 台站使用 JC-V104 型短周期地震计,频带宽度为 1~40 Hz,配备 EDAS-24L 型 24 位数据采集器,数据采用超短波段的单工数字无线传输与 DDN 公用数据网接力传输、中心统一记录的方式.观测系统动态范围优于 100 dB,采样率每秒 100 点.采用了 GPS 统一授时和定位系统,数据采集的时间服务精度优于 1 ms^[20].

3 方法原理

台站地震仪记录到的数字地震波形包含地震震源、地震波传播路径及台站的场地响应特征等信息,而地震波传播路径对其能量的衰减包括随距离变化的几何衰减和介质的非弹性衰减(用 Q 值来度量).在第 j 个台站观测到第 i 个事件的振幅谱可写成^[23-24]:

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

其中, f 为频率, $S_i(f)$ 为震源谱, $I_j(f)$ 为仪器响应, $R_j(f)$ 为场地响应, $G_{ij}(r)$ 为沿路径 r 的几何扩散因子, $B_{ij}(f)$ 为衰减谱.采用 Brune 类型的 ω^2 震源模式表示震源谱^[25-26], 即:

$$S_i(f) = \Omega_0 \frac{f_c^2}{f_c^2 + f^2}, \quad (2)$$

上式中, Ω_0 为长周期的振幅谱,为稳态值, f_c 为拐角频率.由于本文采用的是直达 S 波地震波形数据,最大震中距为 49 km,因此采用 Atkinson 和 Mereu^[27-29] 提出的地震波在全空间传播时的理论几何衰减函数,即

$$G_{ij}(r) = r^{-b_1}, \quad (3)$$

其中, r 为震源距,系数 b_1 与频率无关.沿整个射线路径的衰减谱可表示为^[14,30]

$$B_{ij}(f) = \exp(-\pi f t_{ij} Q_{ij}^{-1}) = \exp(-\pi f t_{ij}^*), \quad (4)$$

式中, t_{ij} 为第 i 个地震到第 j 台的射线走时, Q_{ij} 为品质因子, t_{ij}^* 为沿整个射线路径的衰减算子.由于紫坪铺区域台站都建在基岩上,本文假定台站场地响应为接近 1 的常数,并扣除仪器响应后,方程(1)就可以写成

$$A_{ij}(f) = \Omega_0 \frac{f_c^2}{(f_c^2 + f^2)} G(r) \exp(-\pi f t_{ij}^*), \quad (5)$$

此外, t_{ij}^* 衰减算子可以写成 $1/(Q(s) \cdot v(s))$ 沿震源 i 到台站 j 的射线路径的投影^[14,31-32], 即

$$t_{ij}^* = \int_{\text{path}} \frac{1}{Q(s) \cdot v(s)} ds, \quad (6)$$

上式中 v 为 S 波速度, ds 为射线路径单元。

利用(5)式对单条观测谱进行拟合时,由于式中存在 Ω_0 、 f_c 和 t_{ij}^* 算子 3 个未知变量,故存在解的非惟一性。但由于 Ω_0 和 f_c 只与震源有关,因此对同一震源采用多台观测谱进行拟合,可以减少未知变量 Ω 数量。为了限制解的非惟一性,常采用 Levenberg-Marquardt 或迭代阻尼最小二乘 (iterative damped least-squares) 法进行谱反演。对于多台记录的波形联合进行谱反演,可得到同一震源到各个台站的路径衰减 t^* 。然后,根据(6)式采用衰减层析成像方法就可以确定出 Q 了。

3.1 观测资料预处理

地震波衰减层析成像以地震波形资料为基础,

需要截取 S 波时间窗进行谱反演,获得震源到台站的 t^* 衰减算子。“S 窗”定义为从 S 波开始到包括 S 波总能量 90% 的时间段^[14,28-29,33],文中采用的地震数据“S 窗”只包含了直达 S 波。为了进行信噪比分析,截取 P 波初动前的 256 个采样点作为“噪声窗”^[7,14](图 2a)。截取后的“S 窗”和“噪声窗”采用平移窗谱法进行傅里叶变换,获得稳定的观测振幅谱和噪声谱。信噪比(SNR)分析时,本文分别对 SNR=1、2、3 的成像结果进行了对比,最终选取 SNR>2 的波形进行处理。由于紫坪铺区域台网的地震计为速度计,因此在预处理过程中应将速度振幅谱转换为位移振幅谱。本文分析了 1~15 Hz 的 S 波谱,且有 10 Hz 以上连续频带宽(图 2b)。图 2 给出了 2008 年 2 月 15 日灵隐寺台(LYS) 1.4 级地震的 S 波两个水平分量波形及其合成位移谱。

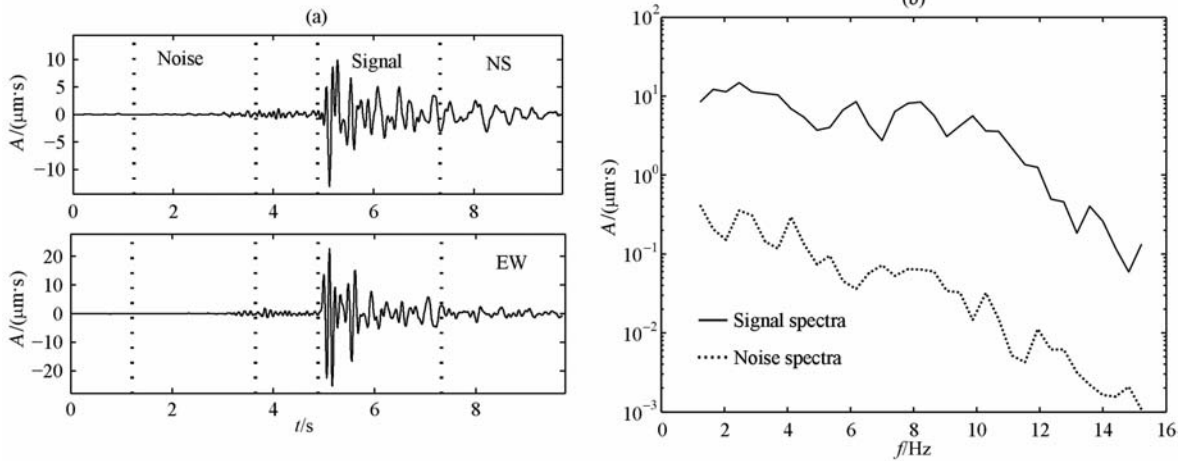


图 2 波形及合成位移谱

Fig. 2 Waveform and synthetic displacement spectra

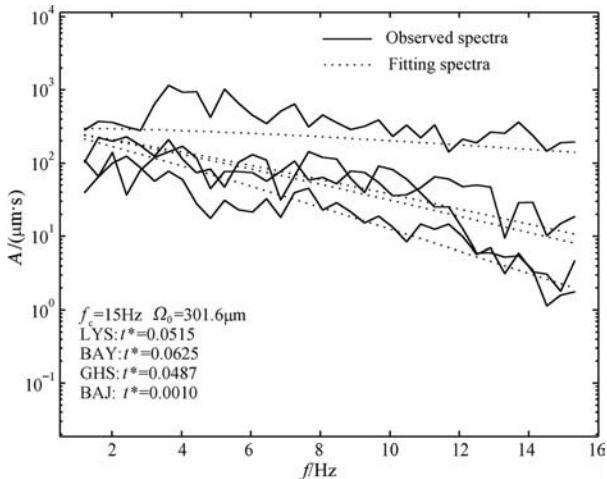


图 3 地震在不同台站的观测位移谱和拟合谱

Fig. 3 Observation and fitness spectra of earthquake at different station

根据(5)式,多台记录谱联合反演方法^[14]是假设一个地震被 N 台记录,共需反演 $N+2$ 个未知变量,即 Ω_0 、 f_c 和 t_1^* 、 t_2^* 、 \dots 、 t_N^* ,比单台观测谱反演少反演了 $2N-2$ 个变量,从而降低了解的非惟一性。假定有 M 个频率点,那么第 i 台观测谱在第 j 个频率点的值可表示为 $A_i^{\text{obs}}(f_j)$,理论振幅谱为 $A_i^{\text{cal}}(f_j)$,采用遗传算法反演 $N+2$ 个未知量,使多台观测谱和理论谱之间在不同频率点的残差之和最小,即使残差 $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \lg |A_i^{\text{obs}}(f_j) - A_i^{\text{cal}}(f_j)|$ 最小时找到全局最优解。如图 3 所示,消除噪声和几何扩散影响后,不同台站位移谱衰减主要受不同路径的 Q_s 值影响。

3.2 二维 Q_s 成像

获得 t^* 衰减算子后,采用类似速度层析成像的

方法就可以反演得到 Q_s 值了^[12-14,23-24]. 首先, 挑选出符合条件的 t^* 衰减算子, 根据网格平均射线数确定合适的网格大小, 进行检测板分辨率试验, 根据检测板分辨率试验结果反复调整网格大小, 最终确定出合适的分辨率. 然后, 通过计算地壳平均 Q_s 值作为初始输入模型, 采用射线追踪伪弯曲方法, 并进行 10 次迭代计算, 最终获得 Q_s 值. 为了去除震源深度影响, 利用 t^* 反演 Q_s 值的过程中, 采用震源距代替震中距.

4 紫坪铺水库区域 S 波 Q 值成像

4.1 静态 S 波 Q 值成像

4.1.1 数据及解的稳定性分析

采用 2004-8-16—2008-5-11 紫坪铺水库区域 8

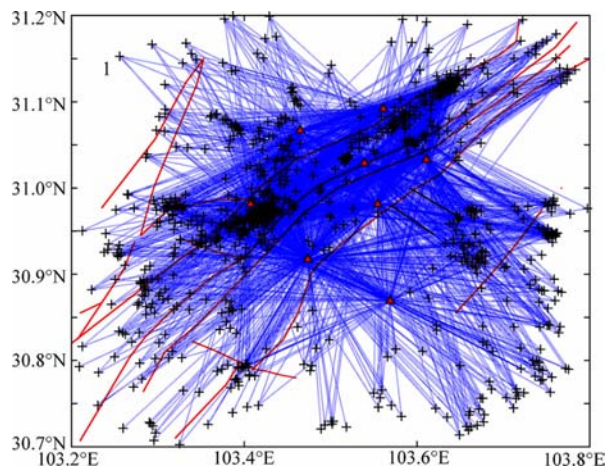


图 4 紫坪铺水库地区台站(三角)、事件(+)及射线分布
Fig. 4 Distribution of stations(triangle), earthquakes(+) and raypaths in Zipingpu reservoir area

个地震台记录的精定位后的 1340 个地震 S 波资料进行 Q_s 成像, 震级范围为 $M_L 0.1 \sim 3.7$, 震源深度为 1~15 km. 利用遗传算法反演得到 6580 条 t^* 数据, 进一步挑选出一倍均方差内的 t^* 数据共 4184 条, 相应的射线分布见图 4. 利用挑选后的 t^* 数据, 将紫坪铺水库地区(30.7°~31.2°N, 103.2°~103.8°E)的地壳在平面上划分为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 的均匀网格进行 Q_s 反演, 平均网格射线数为 179 条, 有利于降低解的非唯一性.

反演前计算了紫坪铺水库区域的 S 波初始平均速度为 $v_s = 3.2$ km/s, 初始平均 $Q_0 = 90$, 并将二者作为反演的初始输入模型. 经过 10 次迭代反演后, t^* 的均方根(RMS)残差由 0.0359 降到 0.0328. 如图 5 为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 网格的检测板分辨率试验结果^[14], 结果显示, 紫坪铺水库地区越靠近库区地震

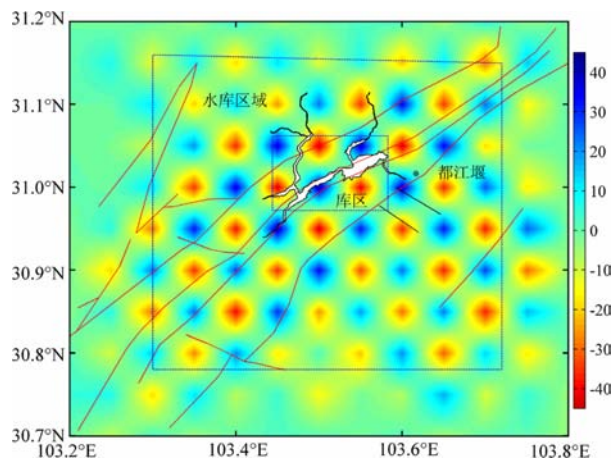


图 5 网格检测板分辨率试验结果
Fig. 5 Checkerboard resolution tests

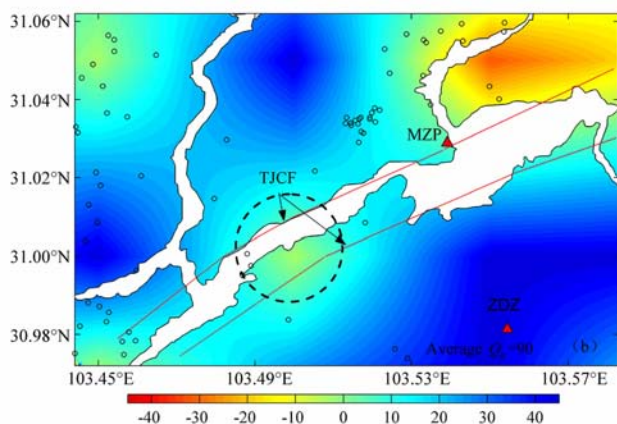
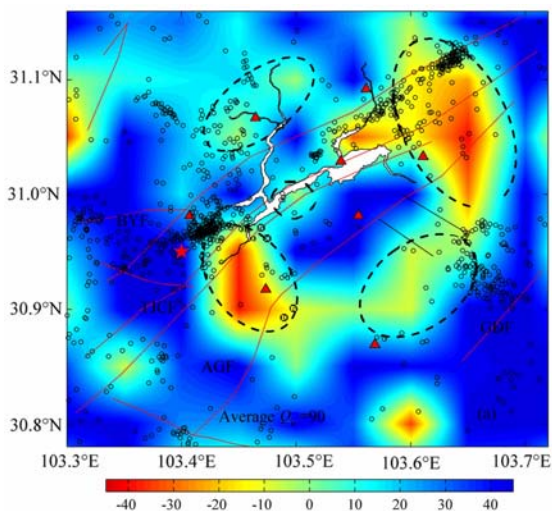


图 6 研究区(a)和库区(b) Q_s 成像(三角为台站, 五角星为汶川主震, 空心圆为地震)
Fig. 6 Distribution of Q_s in the study area (a) and reservoir area (b) (Triangles represent stations, five-pointed star represents the main Wenchuan earthquake, open circles represent earthquakes)

射线覆盖越密集,分辨效果越好,边缘区域分辨效果相对较差。为此,本文只对反演效果较好的区域(图 5 中蓝色虚线框内区域)进行 Q_s 值成像,较大的矩形框为水库区域($30.78^{\circ}\sim 31.16^{\circ}\text{N}$, $103.30^{\circ}\sim 103.72^{\circ}\text{E}$,以下简称研究区),较小矩形框为库区($30.972^{\circ}\sim 31.062^{\circ}\text{N}$, $103.444^{\circ}\sim 103.583^{\circ}\text{E}$)。

4.1.2 Q_s 成像结果及分析

图 6(a、b)为研究区和库区的 Q_s 成像图。由于所采用的地震震源深度主要集中在 $4\sim 10\text{ km}$,占地震总数的 83% ,因此,成像结果主要反映了紫坪铺水库区域浅层地壳($4\sim 10\text{ km}$)的 Q_s 特征。

如图 6a 可见,研究区 S 波衰减横向不均匀变化显著,库区周边近似存在一个低 Q_s 值环形区域,主要包括水库东北、东南、西南、西北、库区中段五个区域。其中,东北和西南低 Q_s 区域范围较大,数值相对较低,直接与库岸相毗邻,均位于北川—映秀、安县—灌县两条主干断裂带之间,并被通济场次级断裂带穿过。水库东南、西北低 Q_s 区数值相对东北、西南区稍高,无明显断裂带通过。从地震活动分布看,离库岸 $1\sim 10\text{ km}$ 范围内的高、低 Q_s 交界区域存在水库东北、东南、西南三个明显的小震群,均位于断裂带附近。图 6b 为放大后的库区 Q_s 成像图,图中可见,库区被通济场次级断裂带通过,大部分区域 Q_s 较高,而库区中段区域较周围区域 Q_s 偏低。库体覆盖区域地震活动较少,几乎为空白。

4.2 蓄水前、后 S 波 Q 值成像

4.2.1 蓄水前、后的资料情况及分辨率测试

为了研究紫坪铺水库蓄水对该区地壳介质的影响,分别对紫坪铺水库区域蓄水前(2004-8-16—2005-9-30)和蓄水后(2005-9-30—2008-5-11)的 Q_s 进行成像。图 7 为紫坪铺水库水位图,2005 年 9 月 30 日下闸蓄水,蓄水前水位低于死水位 817.0 m ,蓄

水后水位均位于死水位之上,最高时为 875.18 m 。蓄水前、后的射线及检测板分辨率试验结果见图 8、图 9。蓄水前地震资料时间跨度相对较短,平均网格射线数为 53 条,检测板分辨试验结果显示 $0.05^{\circ}\times 0.05^{\circ}$ 的网格划分可分辨出离库岸和断裂带较近的大部分区域(图 8),10 次迭代反演后 t^* 均方根(RMS)残差由 0.0366 降为 0.0320 。蓄水后时间跨度相对较长,地震射线相对较多(图 9),平均网格射线数达到 126 条,10 次迭代反演后 t^* 均方根(RMS)残差由 0.0358 降为 0.0325 。为使静态、蓄水前及蓄水后的 Q_s 成像结果具有可比性,将蓄水前、后的 Q_s 反演初始输入模型平均 v_s 和平均 Q_0 归算为统一值,均采用静态 Q_s 成像的计算结果,即 $v_s = 3.2\text{ km/s}$, $Q_0 = 90$ 。

4.2.2 蓄水前、后 Q_s 成像结果及分析

如图 10 所示,研究区蓄水前和蓄水后的 Q_s 值、地震活动分布变化显著。水库东北低 Q_s 区蓄水后 Q_s 值大部分区域下降,范围向南延伸,离库岸 $1\sim 7\text{ km}$ 范围内小震活动有所抑制,只在离库岸 $7\sim 10\text{ km}$ 的北川—映秀断裂带附近的高、低 Q_s 过渡区域出现小震群;水库西南低 Q_s 区蓄水后 Q_s 数值大幅下降,范围扩大,且在北川—映秀断裂与通济场次级断裂之间的高、低 Q_s 过渡区域出现明显的小震群;水库东南低 Q_s 区数值变化不大,向东偏移,与东北低 Q_s 区相连接,在广元—大邑断裂附近的高、低 Q_s 过渡区域也出现明显的小震群;水库西北低 Q_s 区蓄水前 Q_s 数值较低,蓄水后数值升高,且在岷江东侧出现小范围低 Q_s 值区域。

如图 11 所示,蓄水前、后库区大部分区域 Q_s 较高,值得注意的是库区中段区域(图中虚线圆)蓄水后从高 Q_s 转变为低 Q_s ,库区地震活动蓄水前、后均较为平静。

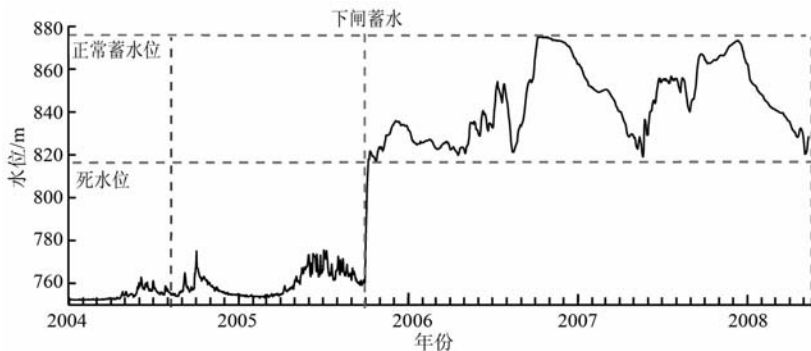


图 7 水位图(左起第一条和第三条虚竖线分别为本文数据起始和结束时间)

Fig. 7 Hydrograph (The first and third imaginary vertical lines from left to right represent the start and end time of this paper data)

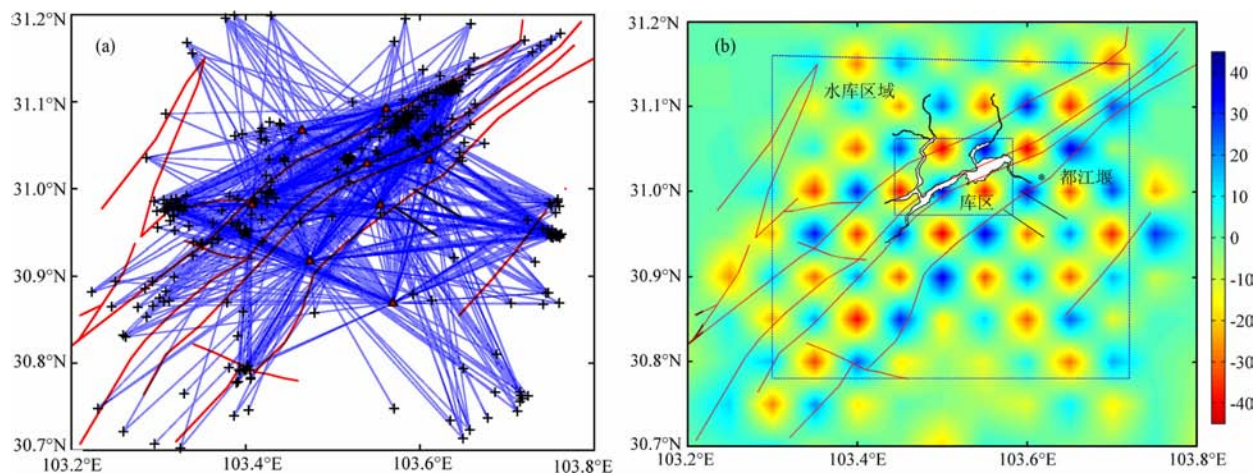


图 8 蓄水前地震射线分布(a)及检测板分辨率试验结果(b)(三角为台站,十字为地震)

Fig. 8 Checkerboard resolution tests (b) and distribution of ray path (a) in Zipingpu Reservoir Area before water storage (Triangles represent stations, cross represents earthquake)

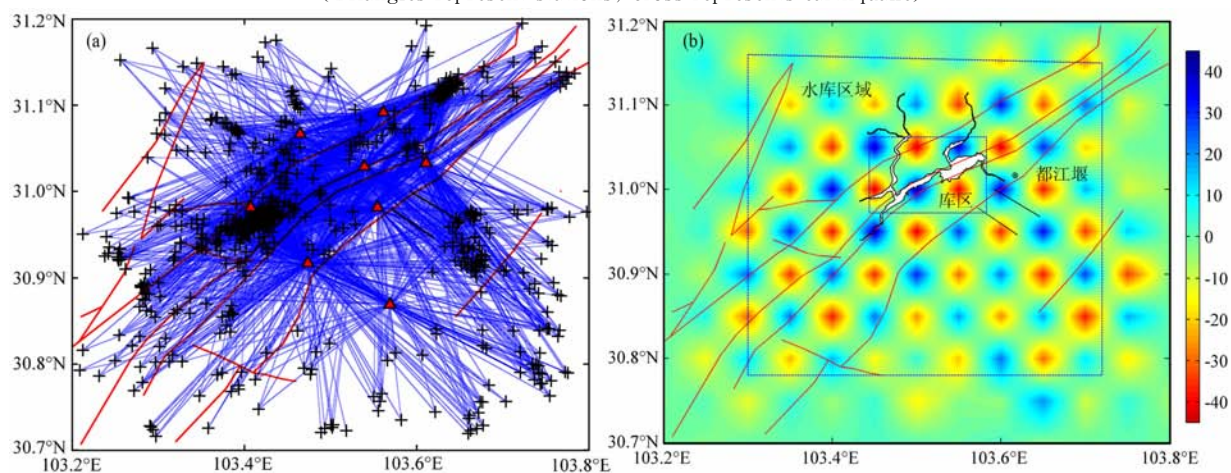


图 9 蓄水后地震射线分布(a)及检测板分辨率试验结果(b)(三角为台站,十字为地震)

Fig. 9 Checkerboard resolution tests (b) and distribution of ray path (a) in Zipingpu Reservoir Area after water storage (Triangles represent stations, cross represents earthquake)

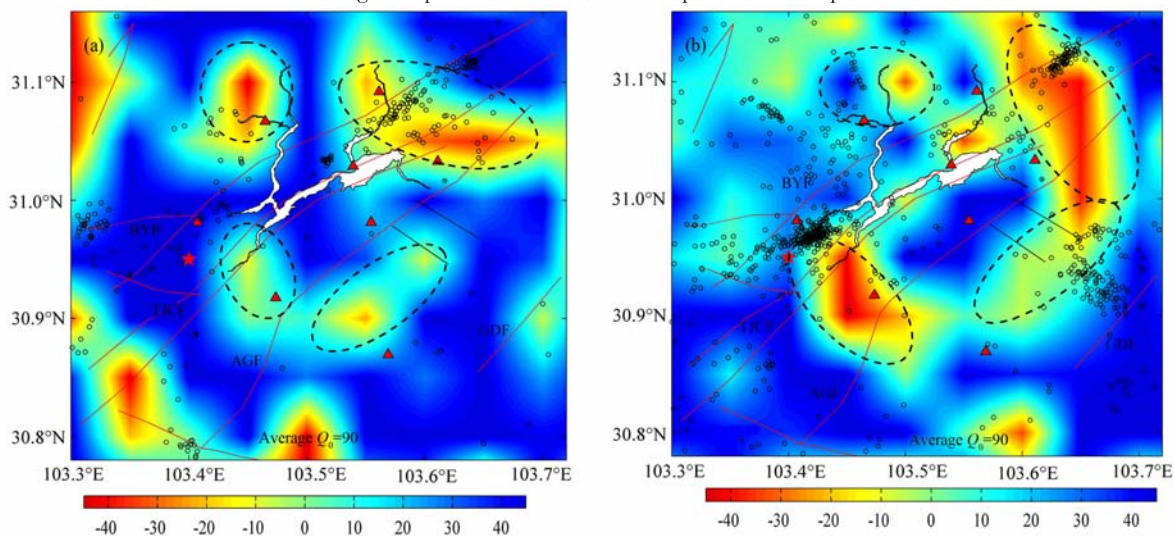


图 10 蓄水前(a)、后(b)研究区 Q_s 成像(三角为台站,五角星为汶川主震,空心圆为地震)

Fig. 10 Distribution of Q_s in the study area before (a) and after (b) water storage (Triangles represent stations, Five-pointed star represents the main Wenchuan earthquake, open circles represent earthquakes)

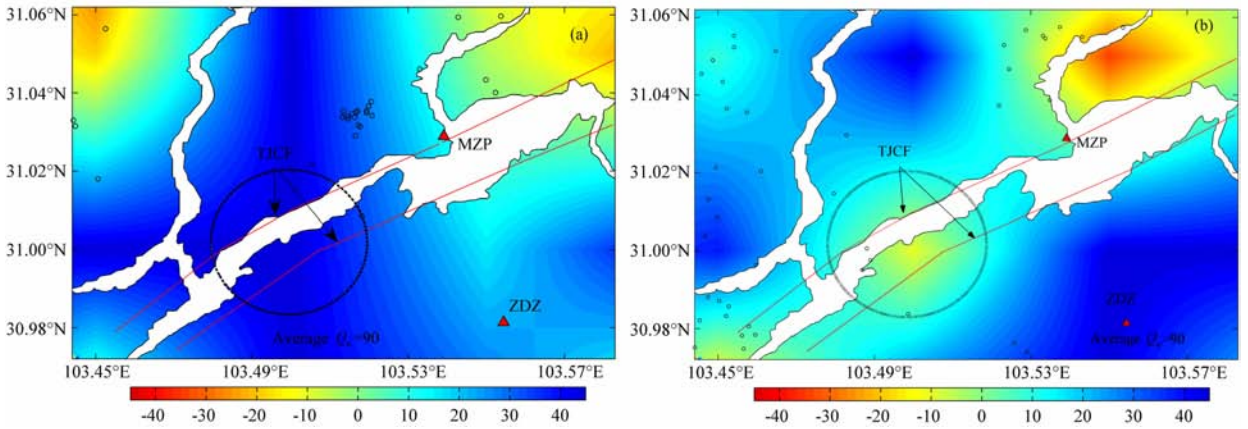


图 11 蓄水前(a)、后(b)库区 Q_s 成像(三角为台站,空心圆为地震)

Fig. 11 Distribution of Q_s in the crust beneath reservoir area before (a) and after (b) water storage (Triangles represent stations, open circles represent earthquakes)

5 库水渗透作用对紫坪铺水库地壳介质的影响分析

5.1 实验研究成果、岩体岩性、断裂构造及水文地质条件分析

Q 值反映了地震波能量的衰减,与地壳介质的非弹性和非均匀性密切相关.实验研究发现,地壳中岩石的破碎程度和岩石中的孔隙、结构面及孔隙中充满的流体、气体、黏土含量都对岩石中波的衰减(Q 值大小)有重要影响.安勇等^[34]发现岩石的衰减受岩性的影响,孔隙率较大的岩石衰减大于孔隙率小的岩石.陈颢等^[1]发现岩浆岩和变质岩中的孔隙、结构面等远小于沉积岩,因此岩浆岩和变质岩的衰减远比沉积岩小,而含有大量孔隙和结构面,特别是未完全固结的沉积岩,波的衰减比致实的岩浆岩高 5~7 个数量级^[1].李亚林等^[35]发现横波衰减随着渗透率的增加而减小.滕吉文等^[36]发现裂缝中含水的饱和岩石的 Q 值低于干燥岩石.施行觉等^[37]发现 Q 值首先随饱和度的增加明显下降,当饱和度增加到某值时, Q 值随饱和度的增加基本不变或略有上升.刘斌等^[38]发现 Q 值随围压的升高而增加.综上所述,沉积岩的衰减大于岩浆岩和变质岩, Q 值随着岩石中的黏土含量、孔隙率、渗透率增加而减小,随着含水饱和度增加一开始减小,当饱和度达到某值时基本不变或略有上升,随着围压的升高而增加.

紫坪铺水库地区盖层主要发育两大沉积岩层序列,即震旦系一中三叠统海相碎屑岩及碳酸盐岩序列和上三叠统一第四系陆相碎屑岩序列^[22].根据紫坪铺水库地下水类型(图12)^[39]可知,水库东北低 Q_s

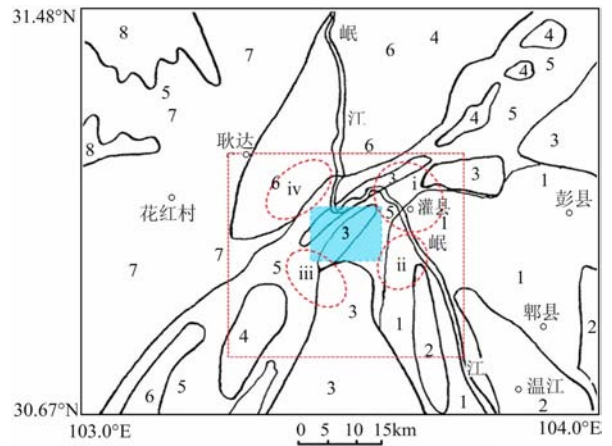


图 12 紫坪铺水库地下水类型(王云基,2001)^[39]

红色虚线矩形为本文研究区,蓝色阴影为库区,红色虚线椭圆为低 Q_s 区: i 东北区; ii 东南区; iii 西南区; iv 西北区. 1. 冲积、洪积层孔隙潜水段; 2. 冰水堆积层孔隙潜水段; 3. 碎屑岩(红层)裂隙孔隙水段; 4. 碳酸盐岩裂隙溶水段; 5. 碳酸盐岩夹碎屑岩溶裂隙水及碎屑岩裂隙层间水段; 6. 岩浆岩裂隙水段; 7. 变质岩裂隙水段; 8. 冰缘融冻裂隙水段.

Fig. 12 Groundwater type of Zipingpu Reservoir Area (Wang Y G, 2001)^[39]

Red dashed rectangle represents the study area. Blue shaded areas on behalf of the reservoir region. Red dashed oval area on behalf of low- Q_s zone: i Northeast; ii Southeast; iii Southwest; iv Northwest. 1. Alluvial, fluvial pore diving section; 2. Accumulation of pore ice diving section; 3. Clastic rocks (red beds) fractured section of the pore water; 4. Carbonate fissure water soluble section; 5. Gap carbonate clastic karst fissure water and interlayer water clastic fissure segment; 6. Magmatic fissures water segment; 7. Metamorphic rock fissure water segment; 8. Periglacial freeze-thaw fracture water segment.

区为碎屑岩(红层)、碳酸盐岩夹碎屑岩及冲积、洪积层覆盖; 东南低 Q_s 区为冲积、洪积层、冰水堆积层覆

盖;西南低 Q_s 区为碎屑岩(红层)、碳酸盐岩夹碎屑岩覆盖;西北低 Q_s 区为岩浆岩、变质岩和少部分碳酸盐岩夹碎屑岩覆盖;库区为碎屑岩(红层)、碳酸盐岩夹碎屑岩覆盖。由此可见,研究区岩性除了西北部分区域为渗透性差的岩浆岩和变质岩外,大部分区域岩性均为渗透性较好的沉积岩。其中,水库东北、库区和西南区域岩性均为碎屑岩(红层)、碳酸盐岩夹碎屑岩,渗透条件相对较好;西北大部分区域为岩浆岩和变质岩,渗透条件相对较差。

此外,断裂的构造活动性也是控制岩石渗透性的另一重要因素,李明诚等、赵密福等^[40-41]认为,无论是张性正断层,还是压性逆断层,只要它们处在活动中,就具有通道性。如图 1 所示,研究区内的北川—映秀断裂为全新世活动断裂,通济场断裂、安县—灌县断裂为晚更新世活动断裂,广元—大邑断裂在较近时期也可能仍在持续活动。据地表露头调查,北川—映秀、通济场和安县—灌县断裂带地层构造变形相对强烈,断裂带劈理化、碎裂化程度高,胶结差,羽状裂隙发育^[39,42]。通济场断裂在研究区内分支复合频繁,将龙门山中央推覆体前缘切成薄的透镜状及长条状断片。野外调查还发现,在都江堰的两河口、白沙一带,断裂带附近各断裂普遍具有明显的破碎带,岩石的角砾化、透镜状及劈理化显著,反映了较浅层次的脆性变形特征^[22]。可见,紫坪铺水库区域各类含水岩层(组)的空间展布和地下水贮存条件,明显受到地质构造的制约。

根据王云基^[39]水文地质条件调查发现,紫坪铺库区地层出露较齐全,岩石破碎,有石灰岩层构成的飞来峰,并发育有喀斯特。基岩由于构造、风化、溶蚀等作用裂隙发育,地表坡残积、崩坡积、冰碛等松散堆积层分布广泛,植被茂密,杂草丛生;平原河流密集分布,砂卵砾石层被切割,为充沛的大气降水、丰富的地表径流提供了渗透条件。

综上所述,紫坪铺水库东北、库区中段、西南低 Q_s 区域主要为渗透性较好的碳酸盐岩、碎屑岩及二者的夹杂体所覆盖,且位于北川—映秀、安县—灌县活动断裂带之间,通济场活动断裂带之上,为库水的渗透提供了良好的地质条件;东南低 Q_s 区为冲积、洪积层、冰水堆积层覆盖,无明显断裂带通过,渗透条件其次;西北低 Q_s 区部分区域岩性为岩浆岩和变质岩,渗透条件相对较差。

5.2 低 Q_s 区与渗透性关系讨论

根据紫坪铺水库区域岩体岩性、断裂构造、水文地质条件分析表明,紫坪铺水库区域总体具有良好

的库水渗透条件。

水库东北、库区中段、西南低 Q_s 区主要为孔隙率大、渗透性好的碳酸盐岩、碎屑岩及二者夹杂体覆盖,且位于北川—映秀、安县—灌县两大活动断裂带之间,被通济场活动断裂穿过,岩石破碎程度高,节理、裂隙发育,渗透条件相对较好。紫坪铺水库蓄水后,库水可能沿着通济场断裂中段和两端的节理、破碎带向地下渗透,使岩石孔隙中充满流体,内摩擦增大,地震波大大衰减,从而导致 Q_s 值大幅下降。同时,蓄水后水库西南区出现的小震群时、空、强明显受水库蓄水影响,周斌^[22],卢显等^[16]研究认为水库西南小震群属于“快速响应型”水库地震。东北区蓄水前离库岸 1~10 km 的小震群震源深度大多在 8 km 左右,可能与原地断层活动有关,蓄水后抑制了离库岸 1~3 km 内的小震,而离库岸 7~10 km 的小震群震源深度在 5 km 左右,可能与水库蓄水有关。库区大部分区域蓄水前、后地震活动平静,一方面可能说明库区岩体稳定性较好,另一方面蓄水后可能库体对地壳介质存在一定的压实作用,水体荷载作用增大,岩体稳定性增加,在区域范围内抑制了断层活动。因此,我们初步认为水库东北、库区中段、西南低 Q_s 区域与库水渗透密切相关。

水库东南低 Q_s 区主要为冲积、洪积、冰水堆积层覆盖,无明显的断裂带通过,蓄水后低 Q_s 区向东迁移,小震活动显著增强。蓄水后出现的东南区震群,包括了汶川地震前 2008 年 2 月的都江堰小震群,大部分小震震源深度在 10 km 以上,少部分在 5 km 左右,其中,2008 年 2 月 14 日 M_L 3.3 和 M_L 3.7 两次较大地震的震源深度分别为 15 km 和 16 km。卢显等^[16]研究认为蓄水后出现的东南区小震群与水库蓄水关系不大,周斌^[22]则认为其属于“滞后响应型”水库地震。郭永刚等^[43]认为水库地震震源深度较浅,一般不超过 10 km。因此,本文初步认为东南区小震群可能构造地震和水库地震兼而有之,其地震活动性较为复杂。

水库西北低 Q_s 区蓄水后 Q_s 升高,但在岷江东侧出现新的低 Q_s 区。这可能的一种解释是,西北近库区岩性为渗透性较好的碳酸盐岩夹碎屑岩,远库区为渗透性差的岩浆岩和变质岩。当水库蓄水后,库水沿着渗透性好的碳酸盐岩和碎屑岩渗透,而后受到介质较密实的岩浆岩、变质岩的阻挡,当岩石含水饱和度增加到某值时, Q_s 值随着饱和度和围压的增加而升高,同时库水继续向岷江东侧的碳酸盐岩和碎屑岩区域扩散,形成了新的低 Q_s 区。

5.3 小震发震成因的介质物性变化讨论

水库东北、东南、西南的三个小震群基本位于高 Q_s 值(低衰减)、低 Q_s 值(高衰减)过渡区域,这与前人衰减层析成像的结果一致^[7,15,44]。如 2004 年 Hansen 等^[7]的研究结果显示夏威夷火山观测台网记录到的地震(7~9 km)位于高、低 Q 值过渡区域。王伟君等^[44]对云南大姚地震的研究结果发现两个主震均发生在低 Q_s 边缘区域内。张杰卿等^[15]对云南姚安地震的研究结果发现姚安 6.5 级地震余震大部分均发生在高、低 Q_s 值的过渡区域内。 Q 值直接反映了介质的软、硬程度,不均匀性质。低 Q_s 区内地震波衰减大,不易积累能量,而高、低 Q_s 值的过渡区域,介质介于“软”、“硬”之间,有可能积累应变能,孕育地震。当高、低 Q_s 过渡区域岩石裂纹饱含水或部分含水后,水对裂纹边界起潮湿和润滑作用^[36],降低了发震断层的抗剪强度,使滑动容易产生,从而诱发地震。

6 结果与讨论

紫坪铺水库区域 Q_s 成像结果及分析显示,该区 Q_s 分布及其变化与水库蓄水有密切相关性,初步可得如下结论:

(1)紫坪铺水库区域浅层地壳 Q_s 横向不均匀变化显著,库区周边近似存在低 Q_s 值环形区域,主要包括水库东北、东南、西南、西北、库区中段五个区域。其中,水库东北、库区中段、西南低 Q_s 区域为渗透性较好的沉积岩覆盖,且位于北川—映秀、安县—灌县两条主干断裂带之间,被通济场次级断裂带穿过,岩石破碎程度高、裂隙较为发育,具备良好的库水渗透条件。本文初步认为水库东北、库区中段、西南低 Q_s 区与库水渗透关系密切,库水可能沿着通济场断裂中段和两端的岩石破碎带及节理、裂隙发育地区向地下渗透,使岩石孔隙中充满流体,内摩擦增大,地震波大大衰减,从而导致 Q_s 值大幅下降。同时在西南区诱发了水库小震群,在东北区和东南区诱发了部分水库小震群,库体覆盖区蓄水前、后地震较为平静,可能岩体稳定性较好。蓄水后,水体载荷作用增大,岩体稳定性增加,在区域范围内抑制了断层活动。

(2)紫坪铺水库区域东北、东南、西南三个小震群基本位于高 Q_s 值(低衰减)和低 Q_s 值(高衰减)过渡区域,可能由于低 Q_s 区内地震波衰减大,不易积累能量,而高、低 Q_s 值的过渡区域,介质介于“软”、

“硬”之间,有可能积累应变能,孕育地震。当高、低 Q_s 过渡区域岩石裂纹饱含水或部分含水后,水对裂纹边界起潮湿和润滑作用,降低了发震断层的抗剪强度,使滑动容易产生,从而诱发地震。

(3)本文反演的 Q_s 与频率无关,初始平均 Q_s 值比频率相关的反演结果略高^[20-21]。假设与频率无关虽会影响 Q_s 值的数值大小,但其分布不会改变。因此,依然可以用来分析介质的物性分布特征^[12-14,45]。

(4)目前 Q 值层析成像还处于探索阶段,而真实的地下介质结构较为复杂,需结合其他地球物理参数进一步深入研究,尚能明确结论。

致谢 感谢四川省地震局提供数据资料,感谢刘杰研究员对论文的指导,感谢张永久研究员、张致伟硕士的帮助,感谢审稿专家对本文提出许多很好的建议和意见。

参考文献(References)

- [1] 陈颢, 黄庭芳, 刘恩儒. 岩石物理学. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
Chen Y, Huang T F, Liu E R. Rock Physics (in Chinese). Hefei: China Science and Technology University Press, 2009.
- [2] 王大兴, 辛可锋, 李幼铭等. 地层条件下砂岩含水饱和度对波速及衰减影响的实验研究. 地球物理学报, 2006, 49(3): 908-914.
Wang D X, Xin K F, Li Y M, et al. An experimental study of influence of water saturation on velocity and attenuation in sandstone under stratum conditions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(3): 908-914.
- [3] 刘建华, 胥颐, 郝天珧. 地震波衰减的物理机制研究. 地球物理学进展, 2004, 19(1): 1-7.
Liu J H, Xu Y, Hao T Y. Study on physical mechanism of the seismic wave attenuation. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2004, 19(1): 1-7.
- [4] Sato Y. Attenuation, dispersion, and the wave guide of the G wave. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1958, 48(3): 231-251.
- [5] Anderson D L, Archambeau C B. The anelasticity of the earth. *J. Geophys. Res.*, 1964, 69(10): 2071-2084.
- [6] Haydar J, Al-Shukri H K, Mitchell B J. Three-dimensional attenuation structure in and around the new Madrid seismic zone. *Bull. Seism. Soc. Ain.*, 1990, 80(3): 615-632.
- [7] Hansen S, Thurber C, Mandernach M, et al. Seismic velocity and attenuation structure of the east rift zone and south flank of Kilauea volcano, Hawaii. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004, 94(4): 1430-1440.
- [8] 丛连理, 胡家富, 傅竹武等. 中国大陆及邻近地区 Lg 尾波的 Q 值分布. 中国科学(D辑), 2002, 32(8): 617-624.
Cong L L, Hu J F, Fu Z W, et al. Distribution Lg coda Q -value in China and its neighboring regions. *Science in China*

- (Series D) (in Chinese), 2002, 32(8): 617-624.
- [9] 洪学海, 朱介寿, 曹家敏等. 中国大陆地壳上地幔 S 波品质因子三维层析成像. 地球物理学报, 2003, 46(5): 642-651.
Hong X H, Zhu J S, Cao J M, et al. Tomography of the 3-D S-wave quality factor of the crust and upper mantle in China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, 46(5): 642-651.
- [10] Pei S P, Zhan J M, Rowe C A, et al. M_L amplitude tomography in North China. *Bull. Seismo. Soc. Am.*, 2006, 96(4A): 1560-1566.
- [11] 马宏生, 汪素云, 裴顺平等. 川滇及周边地区地壳横波衰减的成像研究. 地球物理学报, 2007, 50(2): 465-471.
Ma H S, Wang S Y, Pei S P, et al. Q_0 tomography of S wave attenuation in Sichuan-yunnan and adjacent regions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(2): 465-471.
- [12] 汪素云, 裴顺平, 许忠淮等. 利用 M_L 振幅研究地壳横波 Q 值 I: 不同构造区的衰减特征. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1740-1747.
Wang S Y, Pei S P, Xu Z H, et al. Crustal S-wave Q estimated from M_L amplitude I: attenuation in different tectonic regions of China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(6): 1740-1747.
- [13] 汪素云, 裴顺平, Thomas M H 等. 利用 M_L 振幅研究地壳横波 Q 值 II: Q 横向变化特征. 地球物理学报, 2008, 51(1): 133-139.
Wang S Y, Pei S P, Thomas M H. Crustal S-wave Q estimated from M_L amplitude II: Q lateral variation in China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(1): 133-139.
- [14] 周龙泉, 刘杰, 苏有锦等. 利用 S 波高频衰减参数对云南地区地壳 Q 值成像. 地球物理学报, 2009, 52(2): 1500-1507.
Zhou L Q, Liu J, Su Y J, et al. Tomography for Q of Yunnan region from high-frequency attenuation of S wave. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(6): 1500-1507.
- [15] 张杰卿, 刘杰, 周龙泉. 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. 地震, 2009, 29(3): 126-135.
Zhang J Q, Liu J, Zhou L Q. Tomography and analysis of velocity and attenuation structure for the 2000 Yao'an aftershock area in Yunnan. *Earthquake* (in Chinese), 2009, 29(3): 126-135.
- [16] 卢显, 张晓东, 周龙泉等. 紫坪铺水库库区地震精定位研究及分析. 地震, 2010, 30(2): 10-19.
Lu X, Zhang X D, Zhou L Q, et al. Accurate relocation and analysis of earthquakes in the Zipingpu reservoir area, Sichuan, China. *Earthquake* (in Chinese), 2010, 30(2): 10-19.
- [17] 张致伟, 程万正, 张永久等. 汶川 8.0 级地震前紫坪铺水库小震活动及震源参数研究. 中国地震, 2009, 25(4): 367-376.
Zhang Z W, Cheng W Z, Zhang Y J, et al. Research on seismicity and source parameters of small earthquakes in the Zipingpu dam before Wenchuan M_s 8.0 earthquake. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 2009, 25(4): 367-376.
- [18] 胡先明, 张永久, 谢蓉华等. 紫坪铺水库区小地震震源机制研究. 地震地质, 2009, 31(4): 676-685.
Hu X M, Zhang Y J, Xie R H, et al. Research on focal mechanism of small earthquakes in Zipingpu Reservoir Area. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2009, 31(4): 676-685.
- [19] 雷兴林, 马胜利, 闻学泽等. 地表水体对断层应力与地震时空分布影响的综合分析——以紫坪铺水库为例. 地震地质, 2008, 30(4): 1047-1064.
Lei X L, Ma S L, Wen X Z, et al. Integrated analysis of stress and regional seismicity by surface loading—A case study of Zipingpu Reservoir. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, 30(4): 1047-1064.
- [20] 张永久, 赵翠萍. 紫坪铺水库库区介质衰减、台站响应和震源参数研究. 地震地质, 2009, 31(4): 664-675.
Zhang Y J, Zhao C P. Study of attenuation characteristics, site response and seismic source parameters of the Zipingpu Reservoir Region. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2009, 31(4): 664-675.
- [21] 周连庆, 赵翠萍, 陈章立. 紫坪铺水库地区尾波 Q_c 值研究. 地震, 2009, 29(4): 44-51.
Zhou L Q, Zhao C P, Chen Z L. Coda wave Q_c values in the Zipingpu reservoir area, Sichuan Province. *Earthquake* (in Chinese), 2009, 29(4): 44-51.
- [22] 周斌. 水库诱发地震时空演化特征及其动态响应机制研究——以紫坪铺水库为例[博士论文]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2010.
Zhou B. Evolution characteristics of reservoir-induced seismicity in space-time and its dynamic response mechanism—A case study of the Zipingpu Reservoir (in Chinese) [Ph. D. thesis]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2010.
- [23] Sherbaum F. Combined inversion for the three-dimensional Q structure and source parameters using microearthquake spectra. *J. Geophys. Res.*, 1990, 95(B8): 12423-12438.
- [24] Haberland C, Rietbrock A. Attenuation tomography in the western central Andes: A detailed insight into the structure of a magmatic arc. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(B6): 11151-11167.
- [25] Brune J N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 1970, 75(26): 4997-5009.
- [26] Hanks T C, Wyss M. The use of body-wave spectra in the determination of seismic-source parameters. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1972, 62(2): 561-589.
- [27] Atkinson G M, Mereu R F. The shape of ground motion attenuation curves in southeastern Canada. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1992, 82(5): 2014-2031.
- [28] 黄玉龙, 郑斯华, 刘杰等. 广东地区地震动衰减和场地响应的研究. 地球物理学报, 2003, 46(1): 54-61.
Huang Y L, Zheng S H, Liu J, et al. Attenuation of ground

- motion and site response in Guangdong region. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2003, 46(1): 54-61.
- [29] 苏有锦, 刘杰, 郑斯华等. 云南地区 S 波非弹性衰减 Q 值研究. *地震学报*, 2006, 28(2): 206-212.
Su Y J, Liu J, Zheng S H, et al. Q value of anelastic S-wave attenuation in Yunnan region. *Acta Seismologica Sinica (in Chinese)*, 2006, 28(2): 206-212.
- [30] Sherbaum F. Combined inversion for the three-dimensional Q structure and source parameters using microearthquake spectra. *J. Geophys. Res.*, 1990, 95(B8): 12423-12438.
- [31] Cormier V F. The effect of attenuation on seismic body waves. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1982, 72(6B): 169-200.
- [32] Wittlinger G H, Haessler H, Granet M. Three-dimensional inversion of Q_p from low magnitude earthquakes analysis. *Ann. Geophys.*, 1983, 1(6): 427-438.
- [33] 刘杰, 郑斯华, 黄玉龙. 利用遗传算法反演非弹性衰减系数、震源参数和场地响应. *地震学报*, 2003, 25(2): 211-218.
Liu J, Zheng S H, Huang Y L. The inversion of non-elasticity coefficient, source parameters, site response using Genetic algorithms. *Acta Seismologica Sinica (in Chinese)*, 2003, 25(2): 211-218.
- [34] 安勇, 牟永光, 方朝亮. 沉积岩的速度、衰减与岩石物理性质间的关系. *石油地球物理学报*, 2006, 41(2): 188-192.
An Y, Mu Y G, Fang C L. Relationship between attenuation, velocity of sedimentary rocks and petrophysical property. *Oil Geophysical Prospecting (in Chinese)*, 2006, 41(2): 188-192.
- [35] 李亚林, 贺振华, 黄德济等. 岩石孔渗特性与地震波衰减、传播速度的相互关系. *天然气工业*, 2001, 21(4): 7-11.
Li Y L, He Z H, Huang D J, et al. Relation between rock porosity-permeability property and seismic wave attenuation and propagation velocity. *Natural Gas Industry (in Chinese)*, 2001, 21(4): 7-11.
- [36] 滕吉文, 张中杰, 白武明. 岩石圈物理学. 北京: 科学出版社, 2004.
Teng J W, Zhang Z J, Bai W M. *Lithosphere physics (in Chinese)*. Beijing: Science Press, 2004.
- [37] 施行觉, 徐果明, 靳平等. 岩石的含水饱和度对纵、横波速及衰减影响的实验研究. *地球物理学报*, 1995, 38(1): 281-287.
Shi X J, Xu G M, Jin P, et al. The laboratory study of influence of water saturation on rock's velocity and attenuation. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 1995, 38(1): 281-287.
- [38] 刘斌, Kern H, Popp T. 不同围压下孔隙度不同的干燥及水饱和岩样中的纵横波速度及衰减. *地球物理学报*, 1998, 41(4): 537-546.
Liu B, Kern H, Popp T. Velocities and attenuation of P-and S-waves in dry and wet rocks with different porosities under different confining pressures. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 1998, 41(4): 537-546.
- [39] 王云基. 四川紫坪铺水库区水文地质与工程地质条件研究. *四川地震*, 2001, (2): 6-13.
Wang Y J. Hydro-geologic and engineering-geologic conditions of Zipingpureservoir area, Sichuan. *Earthquake Research in Sichuan (in Chinese)*, 2001, (2): 6-13.
- [40] 李明诚, 孙大明. 地流体、封隔体和含油气系统与油气运移的关系. *石油大学学报: 自然科学版*, 2000, 24(4): 29-33.
Li M C, Sun D M. Relationship of geofluid, compartment and petroleum system with hydrocarbons migration. *Journal of the University of Petroleum, China (in Chinese)*, 2000, 24(4): 29-33.
- [41] 赵密福. 断层封闭性研究现状. *新疆石油地质*, 2004, 25(3): 333-336.
Zhao M F. A review on fault seal study. *Xinjiang Petroleum Geology (in Chinese)*, 2004, 25(3): 333-336.
- [42] 刘树根, 田小彬, 李智武等. 龙门山中段构造特征与汶川地震. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2008, 35(4): 388-397.
Liu S G, Tian X B, Li Z W, et al. Structural features of the central Longmen Mountains and the Wenchuan earthquake in Sichuan, China. *Journal of Chengdu university of Technology: Science & Technology Edition (in Chinese)*, 2008, 35(4): 388-397.
- [43] 郭永刚, 常廷改, 苏克忠. 汶川 8.0 级特大地震与紫坪铺水库蓄水关系的讨论. *震灾防御技术*, 2008, 3(3): 259-265.
Guo Y G, Chang T G, Su K Z. Discussion on relation between water recharge of Ziping reservoir and Wenchuan M_s8.0 Earthquake. *Technology for Earthquake Disaster Prevention (in Chinese)*, 2008, 3(3): 259-265.
- [44] 王伟君, 陈凌, 陈棋福等. 2003 年大姚地震震中区的速度和衰减结构. *地球物理学报*, 2007, 50(3): 116-125.
Wang W J, Chen L, Chen Q F, et al. Velocity and attenuation structures in the focal area of 2003 Dayao earthquakes. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2007, 50(3): 116-125.
- [45] Eberhart-Phillips D, Chadwick M. Three-dimensional attenuation model of the shallow Hikurangi subduction zone in the Raukumara Peninsula, New Zealand. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107: 2033, doi: 10.1029/2000JB000046.