

注水诱发地震的谱振幅相关系数及视应力研究^{*}

张致伟¹, 乔慧珍¹, 吴 朋¹, 官 悦¹, 赵小艳²

(1. 四川省地震局, 四川 成都 610041; 2. 云南省地震局, 云南 昆明 650224)

摘要: 以四川自贡和长宁两个注水地区为例, 基于区域测震台网记录的数字地震波形资料和观测报告, 分析注水诱发地震的谱振幅相关系数特征及其与当地加压注水数据的关系, 并结合表征绝对应力水平的视应力综合分析研究自贡和长宁地区的应力状态。结果表明, 自贡和长宁地区注水诱发地震的谱振幅相关系数均在高值波动, 其均值分别为 0.89 和 0.90, 且变化过程与加压注水数据具有很好的相关性。分析认为加压注水对局部区域应力场产生扰动影响, 使地下浅层裂隙呈优势取向排列, 引发的中小地震震源机制表现出较好的相似性, 但其视应力结果显示研究区域的应力水平并不高。

关键词: 注水诱发地震; Q 值; 场地响应; 谱振幅相关系数; 视应力

中图分类号: P315.727

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)01-0042-09

0 引言

地震是地壳构造应力积累超过了岩层的受力极限, 应变能快速释放, 断裂带破裂失稳的结果, 大地震的发生必然受到构造应力场的制约, 而震源机制是研究构造应力场的基础资料, 不同阶段的震源机制解在一定程度上反映了大震孕育过程中构造应力场的变化。国内外诸多学者研究认为基于震源机制解反演应力场的时空变化能够捕捉到强震前的震兆信息, 震源机制一致性参数是判断强震危险性的一个有用判据 (Michael *et al.*, 1990; Hauksson, 1994; Wiemer *et al.*, 2002; 陈颢, 1978; 刁桂苓等, 1994; 程万正等, 2006b; 刁桂苓等, 2011)。

震源机制一致性参数虽然物理含义明确, 但由于受地震台网布局和小震波形信噪比的制约, 往往难以给出比较精确的小震震源机制解。鉴于上述问题, Lund 和 Böðvarsson (2002) 提出了采用微震体波谱振幅相关系数来研究地震序列震源机制是否相似的问题。国内学者随后也将该方法运用于强震震例研究中 (朱航等, 2006; 崔子健等, 2012), 并取得了较好的成果。研究表明强震前的小震群序列与一般性小震群序列相比, 谱振幅相关系数接近于 1.0, 说明震源区应力场增强,

震源机制相似性更为显著。且谱振幅相关系数的测定和分析, 只需地震序列周围若干数字地震台站即可, 具有一定的可操作性。

四川东南部存在多处采盐、采气及废水回注井, 地震活动普遍表现为强度低、频次高、持续时间长的特征, 且与当地加压注水及采气 (卤) 等工业活动具有很好的相关性 (阮祥等, 2008; 张致伟等, 2012)。本文选取四川自贡和长宁两个注水地区作为研究区域, 基于测震台网记录的数字地震波形资料和观测报告, 分析注水诱发地震的谱振幅相关系数特征及其与当地加压注水数据的关系, 并结合表征绝对应力水平的视应力综合分析研究区域的应力高低。

1 资料和方法

1.1 研究区地震活动概况

本文以自贡和长宁两个注水地区为例 (图 1a 中圆形区域)。2000 年以来研究区域 $M_L \geq 2.0$ 地震时序图 (图 1b) 显示, 自贡地区在 2000 ~ 2008 年地震活动较弱, 未发生 $M_L \geq 3.0$ 地震, 2009 年 1 月上旬该区小震活动明显增强, 并于 2009 年 2 月 16 日、5 月 22 日先后发生了 $M_L 4.4$ 和 $M_L 4.2$ 地震, 且在 2011、2012 年又发生了两次比较显著的 4 级地震震群活动 (图 1 中圆形区域 b), 张致伟等 (2012) 研

^{*} 收稿日期: 2014-01-04.

基金项目: 地震科技星火计划项目 (XH14045Y)、中国地震局监测预报司震情跟踪青年课题 (2013020102) 联合资助。

究表明该区地震活动主要受当地废水回注井的注水压力调控。长宁地区在 2000 ~ 2006 年 3 月地震活动同样呈现相对较弱状态, 2006 年 4 月以来该区域地震活动频次和强度明显升高, 并于 2008 年 2 月 1 日发生了 $M_L 4.8$ 地震, 随后该区域地震频次略有下降

(图 1c), 但 $M_L \geq 4.0$ 地震依然持续发生, 并于 2013 年 4 月 25 日发生了 $M_L 5.2$ 地震 (图 1a 中圆形区域 c), 阮祥等 (2008) 指出对该区域的地震活动阮祥等 (2008) 研究表明该区域的地震活动主要受长宁双河盐矿注 (出) 水量的影响。

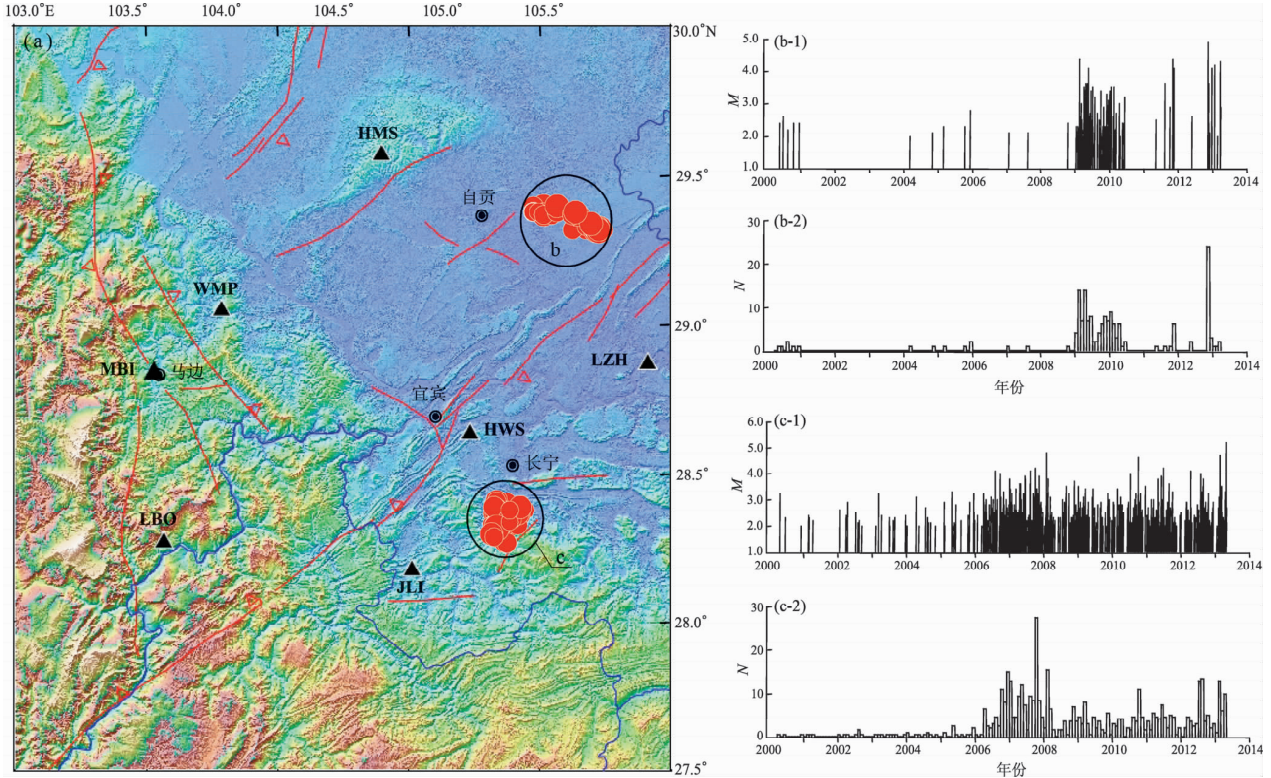


图 1 2000 年以来自贡、长宁地区注水诱发地震时空分布特征

(a) 研究区域; 自贡 (b)、长宁 (c) 地区 $M_L \geq 2.0$ 地震 $M-T$ 、 $N-T$ 图

Fig. 1 Spatial and temporal distribution characteristic of water injection induced earthquakes in Zigong and Changning areas

(a) study area; $M-T$ 、 $N-T$ graph of $M_L \geq 2.0$ earthquakes in Zigong (b) and Changning (c) areas since 2000

1.2 谱振幅相关系数测定方法

地震波能量在传播过程中不但随着传播距离出现几何扩散, 还受到传播路径上介质的吸收和散射等影响, 在到达台站接收仪器前地表下方浅层的介质也会对地震波产生影响, 因此观测得到的地震数据是震源激发的信息经过上述各种过程的产物。在频率域, 台站 j 记录到的地震 i 的观测位移谱 $U_{ij}(f)$ 可表示为

$$U_{ij}(f) = [S'_i(f)\phi_{ij}P_{ij}(f)L'_j(f) + N_j(f)]I_j(f)\text{Sur}_j \quad (1)$$

式中, $S'_i(f)$ 为地震 i 的震源谱; ϕ_{ij} 为地震 i 的震源

辐射图型因子; $P_{ij}(f)$ 为传播路径效应, 包括地震波的几何扩散和非弹性衰减; $L'_j(f)$ 为第 j 个台站的局部场地效应; $N'_j(f)$ 为第 j 个台站附近的地面运动噪声; $I'_j(f)$ 为第 j 个台站仪器响应; Sur_j 为台站附近地表自由表面效应。

根据 Brune 模型 (1970), $S'_i(f)$ 可表示为

$$S'_i(f) = \frac{\Omega'_{0i}}{1 + (f/f_c)^2} \quad (2)$$

式中, Ω'_{0i} 为地震 i 的震源谱低频渐近线值, 即零频极限值; f_c 为低频渐近线与高频渐近线交点处的频率, 称为拐角频率。

定义谱振幅 Ω_{0ij} 为台站 j 记录到的地震 i 的包含

辐射图型因子的震源谱零频极限值, 可表示为

$$\Omega_{0ij} = \Omega'_{0i} \phi_{ij}. \quad (3)$$

式 (1) 中的 $P_{ij}(f)$ 可表示为

$$P_{ij}(f) = G_{ij} e^{-\pi R_{ij} f / v Q(f)}. \quad (4)$$

式中, G_{ij} 为几何扩散因子; R_{ij} 为震源距; $Q(f)$ 为介质的品质因子; v 为地震波 P 波或 S 波传播速度。

从地震记录中扣除噪声和仪器响应, 并令 $L_j(f) = L'_j(f) \text{Sur}_j$ (L_j 称为广义的台站场地效应), 地震 i 在台站 j 的地面运动位移谱 $U_{ij}(f)$ 为

$$U_{ij}(f) = S'_i(f) \phi_{ij} P_{ij}(f) L_j(f). \quad (5)$$

可见, 若台站 j 记录的两次地震 x 、 y 震源位置足够接近, 即其间距比震源距 R_{ij} 小得多, 且震源机制 (辐射图型因子) 相同, 则台站 j 记录的这两次地震的地面运动位移谱 $U_{xj}(f)$ 与 $U_{yj}(f)$ 的相对大小只与这两次地震的 Ω'_0 相对大小相关; 若震源机制不同, 则还应与这两次地震震源机制的差异有关。反过来说, 当由地震记录来反演谱振幅时, 若这两次地震震源机制相同, 则反演得到的 Ω_{0xj} 与 Ω_{0yj} 的相对大小只与 Ω'_{0x} 和 Ω'_{0y} 的相对大小有关; 如果震源机制不同, 则与震源机制有关。因此可由台站的地震记录反演地震 x 、 y 的振幅谱 Ω_{0xj} 与 Ω_{0yj} , 通过计算其相关系数 r_{xy} 来描述震源机制是否相似的问题, 若震源机制相似, 谱振幅相关系数 r_{xy} 应较大, 接近 1; 若震源机制不相似, 则相关系数较小。地震 x 和 y 的谱振幅相关系数 r_{xy} 可表示为 (Lund, Bödvarsson, 2002)

$$r_{xy} = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^5 (x_{jl} - \bar{x})(y_{jl} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^5 (x_{jl} - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^5 (y_{jl} - \bar{y})^2}}. \quad (6)$$

式中, x_{jl} 、 y_{jl} 分别表示台站 j 记录的地震 x 、 y 的 l 分量波形资料所反演得到的谱振幅 Ω_{0xj} 与 Ω_{0yj} 的对数值; \bar{x} 、 \bar{y} 分别为 x_{jl} 与 y_{jl} 的平均值; n 为使用的台站数目; l 取值为 1 到 5, 依次为垂向和径向 P 波, 垂向、径向和切向 S 波。

本研究考虑到持续地震震源机制是否相似是

针对多数地震而言的, 因此采用崔子健等 (2012) 提出的计算方法, 将地震按发生时间顺序排列, 地震 m 与前面 $m-1$ 个地震为一组, 计算组内每两个地震的 r_{xy} , 得出 $N = m(m-1)/2$ 个相关系数 r_{xy} , 对 r_{xy} 求算数平均值, 其结果代表了地震 m 时刻的组内谱振幅的相关程度, 以步长为 1 进行滑动, 计算每个组内的谱振幅相关系数的算数平均值, 最后可以得到随时间变化的谱振幅相关系数。

2 谱振幅相关系数结果分析

2.1 场地响应和区域 Q 值反演

地震仪器记录到的地震波形资料包含震源信息、传播路径及台站场地响应等, 要想获得趋于更真实的震源参数, 必须对观测信号做地震波的几何扩散、非弹性衰减以及台站场地响应校正 (刘杰等, 2003)。基于 2009-1-1 ~ 2012-12-31 四川东南地区 20 次 $M_L \geq 3.5$ 地震波形资料及观测报告, 结合 Atkinson 和 Mereu (1992), Moya 等 (2000) 提出的方法, 反演获得了川东南地区 P、S 波 Q 值和 7 个测震台站的场地响应。

Q 值是描述地球介质特性的主要参数, 与地质构造、地震活动性及地域热流有密切的关系 (周连庆等, 2008)。Atkinson 方法是考虑频率依赖的 Q 模型, 通常用频率的幂函数, 即 $Q(f) = Q_0 f^\eta$ 的形式来拟合 Q 值与频率 f 的关系, 参数 η 反映了 Q 值对频率的依赖程度。图 2 给出了川东南地区 P、S 波 Q 值随频率的变化及其拟合曲线, P 波 $Q = 53.8f^{0.879}$, S 波 $Q = 101.9f^{1.025}$, 与阮祥等 (2008) 基于早期资料计算获得长宁地区的尾波 Q 值比较一致, 而与川西北地区的 Q 值结果 (乔慧珍等, 2006) 差别较大, 表明 Q 值具有地区差异特征。

图 3 给出了川东南地区 7 个测震台站的场地响应结果, 图中蓝线是由每个地震记录得到的台站场地响应, 红线则是该台站场地响应的平均值。台站场地响应总体表现为高频衰减特征, JLI、MBI、LBO 和 LZH 台在 1~4 Hz 的放大倍数在 1~2 之间, 而其余台站的放大效应都大于 2。台站场地响应形态之所以存在差异, 主要受台基、周边地形等因素的影响。台站场地响应的计算不仅对研究区台站场地选点有一定的参考意义, 而且也为进一步计算谱振幅相关系数奠定基础。

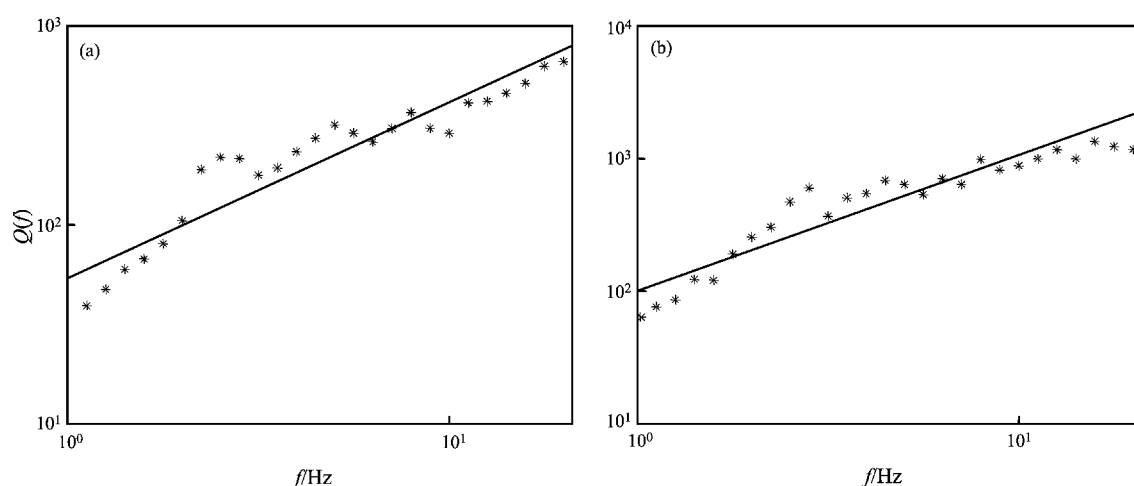


图 2 四川东南地区 P 波 (a)、S 波 (b) 的 Q 值随频率 f 的变化及其拟合曲线

Fig. 2 Q -value variation of P (a) and S (b) waves with frequency f and their fitted curve in the southeast area of Sichuan

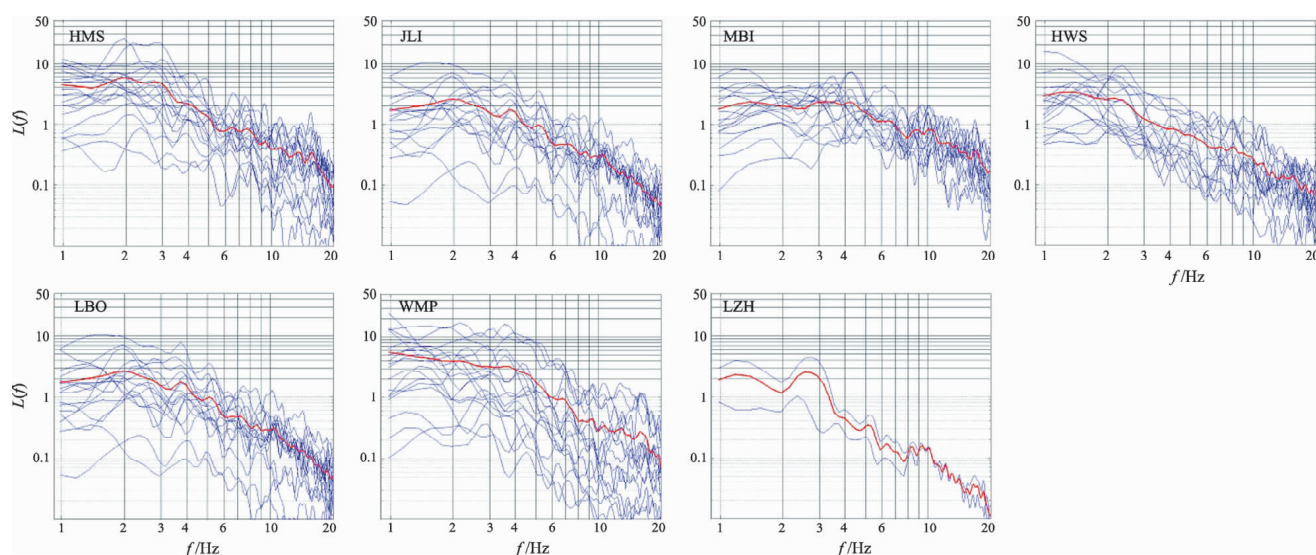


图 3 川东南地区 7 个台站的场地响应结果

Fig. 3 Site responses results of 7 stations in the southeast area of Sichuan

2.2 注水诱发地震的谱振幅相关系数

在获得川东南地区 P、S 波的 Q 值及台站场地响应的基础上, 以自贡和长宁两个注水地区为例, 采用上述方法研究注水诱发地震的谱振幅相关系数特征及其与当地加压注水数据的关系。

选自贡地区 2009-1-1 ~ 2013-4-30 共 32 次 $M_L \geq 3.0$ 地震, 基于马边 (MBI)、汉王山 (HWS)、花马寺 (HMS)、五马坪 (WMP) 和泸州台 (LZH) 记录的地震波资料和观测报告, 计算获得该区域地震谱振幅相关系数在 0.84 ~ 0.92 之间波动, 其平均值为 0.89。结合研究区地震活动

及注水井的加压数据, 将研究时段分为两个阶段进行分析 (图 4a), 第一阶段为 2009-1 ~ 2010-7, 该时段注水压力持续升高, 地震活动显著, 谱振幅相关系数由 0.84 逐渐上升至 0.92, 呈现随加压数据的升高而增大的特征; 第二阶段为 2010-8 ~ 2013-4, 该时段注水井停止加压, 地震活动明显减弱, 谱振幅相关系数也有逐渐降低的趋势。

选取长宁地区 2006-1-1 ~ 2013-4-30 共 88 次 $M_L \geq 3.0$ 地震, 基于马边 (MBI)、雷波 (LBO)、花马寺 (HMS)、五马坪 (WMP) 和泸州台 (LZH) 记录的地震波资料和观测报告计算获

得了谱振幅相关系数, 该区域地震相关系数总体上在 0.87~0.97 之间波动, 其平均值为 0.90。结合研究区地震活动及盐矿注(出)水量数据, 同样将研究时段分为两个阶段(图 4b), 第一阶段为 2006-4~2007-11, 相比前期注(出)水量, 该时段内注水量大幅增加, 但出水量的增加并不明显, 造成注水量和出水量之差大幅上升, 小震活

动明显增强, 相应的谱振幅相关系数也在高值(0.90~0.97)波动, 而且在注(出)水量差值变化最大时相关系数出现了明显的阶跃; 第二阶段为 2007-12~2013-4, 该时段注水量和出水量相当, 且有逐渐下降的趋势, 但地震活动依然持续, 谱振幅相关系数随着注(出)水量的下降也有所降低, 但仍然大于 0.87, 且比较稳定。

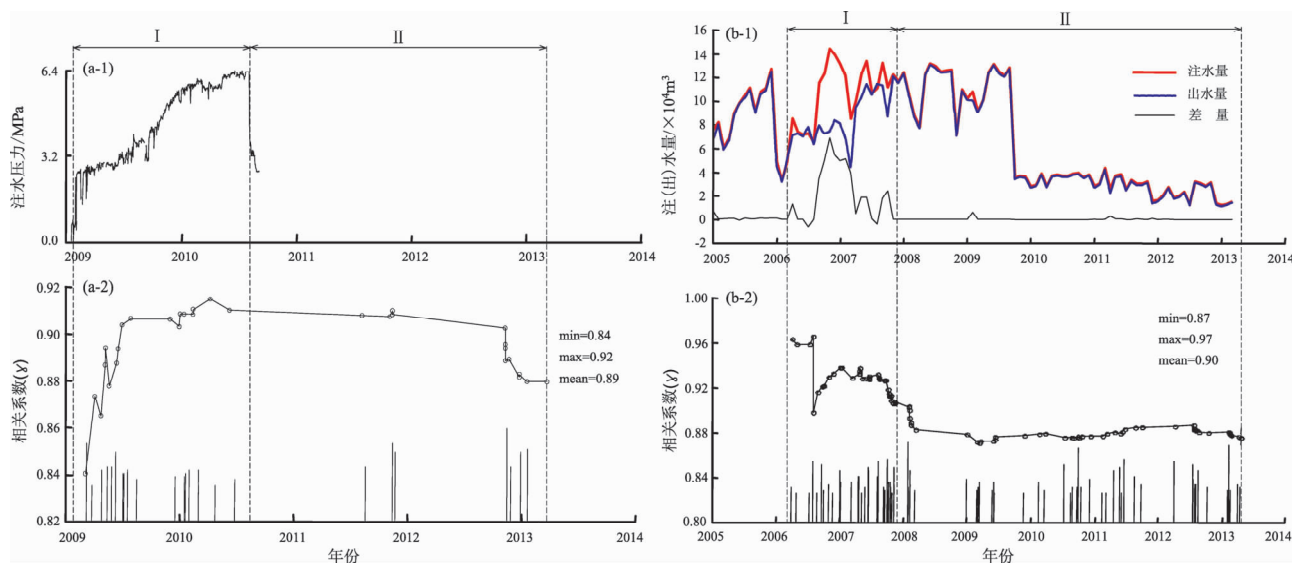


图 4 自贡(a)、长宁(b)地区加压注水数据与谱振幅相关系数对比图

(时间分段: 自贡: I: 2009-01~2010-07; II: 2010-08~2013-04; 长宁: I: 2006-04~2007-11;

II: 2007-12~2013-04; min、max 和 mean 分别表示谱振幅相关系数最小值、最大值和平均值)

(a-1): 加压数据; (b-1): 注(出)水量及其差值; (a-2), (b-2): 谱振幅相关系数

(曲线) 和参与相关系数计算的地震 $M-T$ 图(竖线)

Fig. 4 The comparison diagram between pressurized water injection data and correlation coefficient of spectral amplitude in Zigong (a) and Changning (b) areas

(time slicing: I is from 2009-01 to 2010-07 in Zigong area; II is from 2010-08 to 2013-04; I is from 2006-04 to 2007-11

II is from 2007-12 to 2013-04 in Changning area; min, max and mean represent minimum value, maximum value and mean value of spectral amplitude correlation coefficient respectively)

(a-1): pressure data; (b-1): water injection (yield) rate and difference value; (a-2), (b-2): the correlation coefficient of spectral amplitude (curve) and the $M-T$ graph (long string) of earthquakes

which are used to calculate the correlation coefficient

综上所述, 自贡和长宁地区注水诱发地震的谱振幅相关系数均在高值波动, 其均值分别为 0.89 和 0.90, 且变化过程与加压注水数据具有很好的相关性。Seeber 和 Armbruster (2000) 认为地震可作为应力变化的标志, 虽然小地震对总的变形贡献很小, 但它们在空间、时间和运动上的分布对应力变化非常敏感。影响地壳力学状态的各种现象, 包括诸如断层蠕动或岩浆注入的自然现象, 如水库蓄水或油田注水的大型工程活动。自

贡和长宁地区的介质因加压注水、采盐等工业活动已发生了变化, 注水对局部区域应力场产生扰动影响, 使地下浅层裂隙呈优势取向排列, 引发的中小地震震源机制表现出较好的相似性, 体现在较高的谱振幅相关系数上。

3 地震视应力结果分析

地震视应力是在有关震源介质的均匀弹性、

地震破裂的脆性性质假定下 (Kanamori, Anderson, 1975; Kanamori, 1977; Wu, 2001), 可由地震波信息获得的、与区域平均应力呈正比的物理量。对一个地区中引起地震滑动的应力水平进行区域平均, 则可作为当地绝对应力水平的一个间接估计 (吴忠良等, 2002)。

地震视应力 σ_{app} 被定义为单位地震矩辐射出的地震波能量与震源区介质的剪切模型的积 (Wyss, Brune, 1968), 即

$$\sigma_{app} = \mu \frac{E_s}{M_0} \quad (7)$$

式中, E_s 为地震波辐射能量; M_0 为地震矩; μ 为震源区介质剪切模量, 通常取 $\mu = 3.5 \times 10^{11} \text{ dyn/cm}^2$ 。

基于 Brune (1970) 圆盘模型, 地震震源谱可由震源谱的低频水平 Ω'_{oi} 和拐角频率 f_c 表示 (式 (2))。而地震波辐射能量 E_s 和地震矩 M_0 分别表示为

$$E_s = \pi \rho \beta \Omega'^2_{oi} (2\pi f_c)^3, \quad (8)$$

$$M_0 = 4\pi \rho \beta^3 \Omega'_{oi} / R_{\theta\phi}. \quad (9)$$

式中, β 为 S 波波速, 取 $\beta = 3.5 \text{ km/s}$; ρ 为介质密度, 取 $\rho = 2.71 \text{ g/cm}^3$; $R_{\theta\phi}$ 为辐射图型因子, 取 S 波的均方根辐射图型因子 $\sqrt{2/5} \approx 0.63$ 。

计算过程中, 一般选取区域地震台网震中距 $\leq 200 \text{ km}$ 的台站记录的具有较高信噪比的宽频带数字化地震波形资料, 利用 S 波频带范围在 $1.0 \sim 20 \text{ Hz}$ 的波形计算震源谱, 在获得地震波辐射能量和地震矩的基础上, 再由 (7) 式逐台求取地震视应力, 最终取各台计算结果的平均值作为相应地震的视应力。

自贡和长宁地区注水诱发地震的谱振幅相关系数较高, 可能反映了中小地震震源机制具有很好的相似性, 为了配合谱振幅相关系数分析研究区域的应力水平, 基于上述方法计算获得了 2000 ~ 2013 年川东南地区 $M_L \geq 3.0$ 地震的视应力结果。图 5 分别给出了获得地震视应力的 $M_L \geq 3.0$ 地震及其视应力空间分布图, 由图 5a 可见, 3 级地震空间分布比较分散, $M_L \geq 4.0$ 地震则主要集中在四川自贡、长宁、重庆荣昌和云南东北地区。视应力相对高值区均在发生 4 级地震的地区, 唯独四川自贡和长宁 4 级地震集中区 (圆圈) 的视应力较低 (图 5b), 表明川东南局部地区地震视应力存在差异, 自贡和长宁地区的应力水平相对偏低。

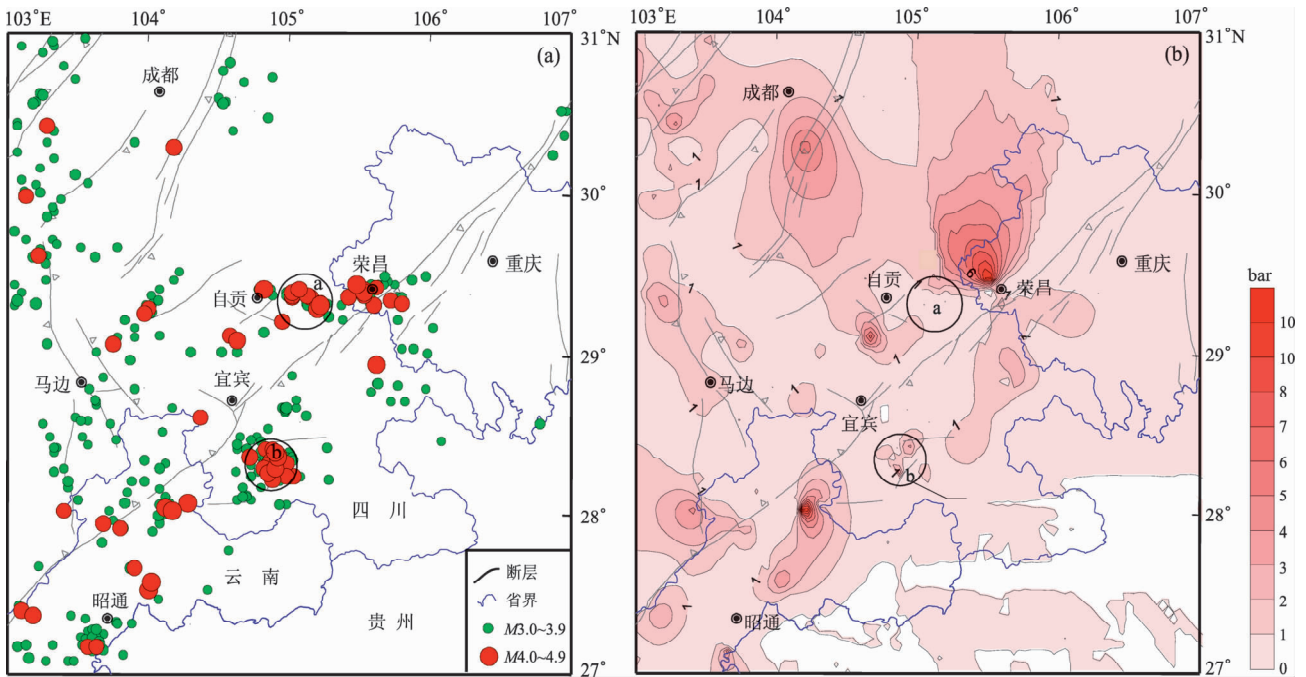


图 5 川东南地区 $M_L \geq 3.0$ 地震 (a) 及其视应力值空间分布 (b)

Fig. 5 Epicenter distribution of $M_L \geq 3.0$ earthquakes (a) and spatial distribution of apparent stress (b) in the southeast area of Sichuan

为了进一步研究自贡和长宁注水地区地震视应力的特征,图6给出了自贡、长宁及川东南地区 $M_L \geq 3.5$ 地震的视应力对比图。由图可见,川东南地区地震视应力总体呈现随震级增大而增大的特征,但与程万正等(2006a)给出的四川其它地区视应力相比,川东南地区同等震级的地震视应力相对偏低。自贡地区不同震级档的地震视应力均在川东南地震视应力拟合线下方,长宁地区不同震级档的地震视应力分布在拟合线附近,与川东南其它区域地震视应力相比,自贡和长宁地区同等震级的地震视应力相对偏低。地壳介质应力水平有随深度增加而变大的特征(丁健民,高莉青,1981;李方全,祁英男,1988),自贡和长宁地区小震精定位均显示其震源深度较浅(阮祥等,2008;张致伟等,2013),可作为研究区域应力水平较低的佐证。

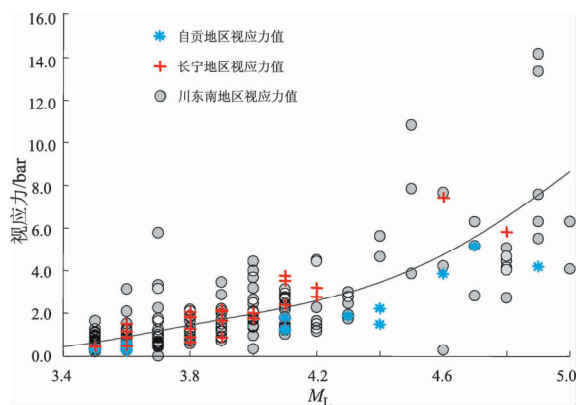


图6 自贡、长宁及川东南地区 $M_L \geq 3.5$ 地震视应力与震级分布

Fig. 6 The distribution of apparent stress and magnitude of $M_L \geq 3.5$ earthquakes in Zigong, Changning and the southeast area of Sichuan

结合自贡和长宁地区地震活动及加压、注水数据,分析研究区域地震视应力在不同阶段的变化特征(图7)。自贡地区除发生在第II时段内的14、15和17日 $M_L \geq 4.5$ 地震视应力比较显著外,加压时段(I)与停止加压时段(II)内同等震级档的地震视应力相当(图7a);长宁地区与上述现象相似,除第II时段内的13和17日 $M_L \geq 4.5$ 地震外,整个时段内同等震级的地震视应力相差不大(图7b)。可见自贡和长宁地区地震视应力同样依赖于震级大小,加压注水等工业活动对该地区的地震视应力影响不大。

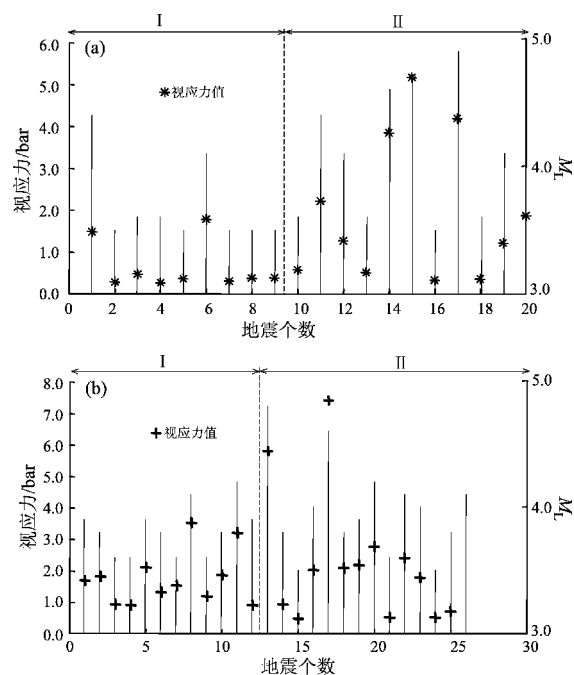


图7 自贡(a)、长宁(b)地区 $M_L \geq 3.5$ 地震视应力在不同阶段的变化(实竖线:地震震级;虚竖线:分段间隔;分段时间:同图4)

Fig. 7 The apparent stress change of $M_L \geq 3.5$ earthquakes at different stages in Zigong (a) and Changning (b) areas (real vertical lines: earthquake magnitude; virtual vertical lines: section gap; time slicing is the same as Fig. 4)

4 结论与讨论

本文以四川自贡和长宁两个注水地区为例,基于区域台网记录的数字地震波形资料和观测报告,分析注水诱发地震的谱振幅相关系数特征及其与当地加压注水数据的关系,并结合表征绝对应力水平的视应力综合分析研究区域的应力高低。

自贡和长宁地区注水诱发地震的谱振幅相关系数均在高值波动,且变化过程与加压注水数据具有很好的相关性。自贡地区地震谱振幅相关系数在0.84~0.92之间波动,其平均值为0.89,在注水压力持续升高的背景下,谱振幅相关系数呈现随加压数据的升高而增大的特征;长宁地区地震谱振幅相关系数在0.87~0.97之间波动,其平均值为0.90,在注水量和出水量之差大幅上升时段,相应的谱振幅相关系数也维持在高值。而在研究区域注(出)水量相当或停止加压时,谱振幅相关系数也有相应降低,但依然在高值波动。

分析认为加压注水对局部区域应力场产生扰动影响,使地下浅层裂隙呈优势取向排列,引发的中小地震震源机制表现出较好的相似性,从而表现为较高的谱振幅相关系数。

川东南地区地震视应力存在局部区域差异,自贡和长宁地区同等震级的地震视应力与其它区域结果相比相对偏低,可能反映了上述区域的应力水平相对偏低,研究区域的地震视应力具有随震级增大而增大的特征,加压注水等工业活动对所在区域地震视应力影响不大。

自贡和长宁两个注水地区地震的谱振幅相关系数整体偏高,反映了中小地震震源机制具有很好的相似性,而视应力结果显示研究区域的应力水平并不高,且历史上该区域的地震活动水平也不高。崔子健等(2012)研究发现强震前的小震群同样具有较高的谱振幅相关系数,其反映了大震孕育过程中震源区介质应力水平增强。注水地区及其它强震孕育区虽然谱振幅相关系数具有相同的特征,但其孕震机理不同,局部区域应力水平也就存在差异。

鉴于小震震源机制不易求解,理论上谱振幅相关系数能够反映震源机制的相似性。但小震活动具有随机性,其受局部应力场及局部构造等因素的影响,应结合表征应力水平的参数进行综合判定。

本项工作得到了中国地震局“地震分析预测研究青年工作组”的大力支持;中国地震台网中心周龙泉博士和四川省地震局程万正研究员给予了重要指导和有益讨论;中国地震局预测研究所崔子健和云南省地震局郭成栋在程序上给予了帮助和指导,在此一并致谢!

参考文献:

陈颙. 1978. 用震源机制一致性作为描述地震活动性的新参数[J]. 地球物理学报, 21(2): 146-159.

程万正, 陈学忠, 乔慧珍. 2006a. 四川地震辐射能量和视应力的研究[J]. 地球物理学进展, 21(3): 692-699.

程万正, 阮祥, 张永久. 2006b. 川滇次级地块震源机制类型与一致性参数[J]. 地震学报, 28(6): 561-573.

崔子健, 李志雄, 陈章立, 等. 2012. 判别小震群序列类型的新方法研究——谱振幅相关分析法[J]. 地球物理学报, 55(5): 1718-1724.

刁桂苓, 徐锡伟, 陈于高, 等. 2011. 汶川 $M_w 7.9$ 和集集 $M_w 7.6$ 地震前应力场转换现象及其可能的前兆意义[J]. 地球物理学报, 54

(1): 128-136.

刁桂苓, 于利民, 李钦祖. 1994. 强震前后震源区应力场变化一例[J]. 地震学报, 16(1): 64-69.

丁健民, 高莉青. 1981. 地壳水平应力与垂直应力随深度的变化[J]. 地震, 2: 46-48.

李方全, 祁英男. 1988. 地壳应力随深度的变化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 7(4): 301-309.

刘杰, 郑斯华, 黄玉龙, 等. 2003. 利用遗传算法反演非弹性衰减系数、震源参数和场地响应[J]. 地震学报, 25(2): 211-218.

乔慧珍, 张永久, 程万正, 等. 2006. 川西北地区介质衰减特征研究[J]. 地震地磁观测与研究, 27(4): 1-7.

阮祥, 程万正, 张永久, 等. 2008. 四川长宁盐矿井注水诱发地震研究[J]. 中国地震, 24(3): 226-234.

吴忠良, 黄静, 林碧苍. 2002. 中国西部地震视应力的分布[J]. 地震学报, 24(3): 293-301.

张致伟, 程万正, 梁明剑, 等. 2012. 四川自贡—隆昌地区注水诱发地震研究[J]. 地球物理学报, 55(5): 1635-1645.

张致伟, 程万正, 吴朋, 等. 2013. 自贡—隆昌地区地震重新定位及P波速度结构研究[J]. 中国地震, 29(1): 37-47.

周连庆, 赵翠萍, 修济刚, 等. 2008. 利用天然地震研究地壳Q值的方法和进展[J]. 国际地震动态, (2): 1-11.

朱航, 刘杰, 陈天长. 2006. 采用体波谱振幅相关系数方法研究地震序列的震源机制变化过程[J]. 地震, 26(2): 1-11.

Atkinson G. M., Mereu R. F. . 1992. The Shape of Ground Motion Attenuation Curves in Southeastern Canada[J]. Bull. Seism. Soc. Amer. , 82(5): 2014-2031.

Brune J. N. . 1970. Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes [J]. J. Geophys. Res. , 75 (26): 4997-5009.

Hauksson E. . 1994. State of Stress from Focal Mechanisms before and after the 1992 Landers Earthquake Sequence[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 84(3): 917-934.

Kanamori H. , Anderson D. L. . 1975. Theoretical Basis of Some Empirical Relations in Seismology [J]. Bull. Seism. Soc. Am. , 65 (5): 1073-1095.

Kanamori H. . 1977. The Energy Release in Great Earthquakes [J]. J. Geophys. Res. , 82(20): 2981-2987.

Lund B. , Böðvarsson R. . 2002. Correlation of Microearthquake Body-wave Spectral Amplitudes[J]. Bull. Seism. Soc. Am. , 92(6): 2419-2433.

Michael A. J. , Ellsworth W. L. , Oppenheimer D. H. . 1990. Coseismic Stress Changes Induced by the 1989 Loma Prieta, California Earthquake[J]. Geophys. Res. Lett. , 17(9): 1441-1444.

Moya C. A. , Aguirre J. , Irikura K. . 2000. Inversion of Source Parameters and Site Effects from Strong Ground Motion Records using Genetic Algorithms[J]. Bull. Seism. Soc. Amer. , 90(4): 977-992.

Seeber L. , Armbruster J. G. . 2000. Earthquakes as Beacons of Stress Change[J]. Nature, 407(6800): 69-72.

Wiemer S. , Gerstenberger M. , Hauksson E. . 2002. Properties of the Aftershock Sequence of the 1999 $M_w 7.1$ Hector Mine earthquake: Implications for Aftershock Hazard[J]. Bull. Seism. S. Am. , 92 (4): 1227-1240.

Wu Z. L. . 2001. Scaling of Apparent Stress from Broadband Radiated Energy Catalogue and Seismic Moment Catalogue and its Focal Mechanism Dependence[J]. *Earth. Planets. Space.* ,53:943 – 948.

Wyss M. ,Brune J. N. . 1968. Seismic Moment, Stress, and Source Dimensions for Earthquakes in the California-Nevada Region [J]. *J. Geophys. Res.* ,73(14) :4681 – 4694.

Study on Correlation Coefficient of Spectral Amplitude and Apparent Stress of Water Injection Induced Earthquake

ZHANG Zhi-wei¹, QIAO Hui-zhen¹, WU Peng¹, GONG Yue¹, ZHAO Xiao-yan²

(1. *Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, Sichuan, China*)

(2. *Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China*)

Abstract

Taking Zigong and Changning which are both water injection areas in Sichuan as the study regions, based on digital seismic waveform recorded by regional seismic network and observation report, we analyze the characteristic of correlation coefficient of spectral amplitude of water injection induced earthquake and the relationship between correlation coefficient and water injection data. Then combining the apparent stress which represents the absolute stress level, we analyze the stress intensity of the two study regions. The result shows that the correlation coefficients of spectral amplitude of water injection induced earthquakes both fluctuate at high value and the average values are 0.89 and 0.90 in Zigong and Changning areas respectively, and the changing process of correlation coefficient has a good correlation with water injection data. The pressurized water injection has the disturbance influence on stress field in local region, thus the fractures of underground shallow layer arrange in predominant direction, and the focal mechanisms of water injection induced small-moderate earthquakes shows good similarity, however, the apparent stress results indicate that the stress is lower in the study region.

Key words: water injection induced earthquake; Q value; site response; correlation coefficient of spectral amplitude; apparent stress