

陈丽娟、陈继锋、龚丽文等,2017,2017年8月8日四川九寨沟 M_s 7.0地震前甘肃南部地区视应力变化,中国地震,33(4), 521~531。

2017年8月8日四川九寨沟 M_s 7.0地震前 甘肃南部地区视应力变化

陈丽娟¹⁾ 陈继锋²⁾ 龚丽文¹⁾ 陈学忠³⁾

1)重庆市地震局,重庆市渝北区红黄路339号 401147

2)甘肃省地震局,兰州 730000

3)中国地震局地球物理研究所,北京 100081

摘要 利用甘肃省区域台网提供的地震波形资料,计算甘肃南部地区2010年1月~2017年8月 $M_L \geq 2.0$ 地震的视应力,分析九寨沟地震前甘南地区视应力的时空演化特征,所得结果如下:① $M_L 2.6 \sim 3.1$ 、 $M_L 2.0 \sim 2.5$ 震级段地震视应力的空间分布具有较好的一致性,九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前,距震中较近的川甘交界地区的舟曲、文县等地呈现出较为集中的视应力高值异常;② $M_L 2.0 \sim 2.5$ 、 $M_L 2.6 \sim 3.1$ 地震的视应力在大区域范围内随时间的变化趋势有一定差异, $M_L 2.6 \sim 3.1$ 地震视应力变化更为明显,在较大区域范围内表现为震前显著升高,而 $M_L 2.0 \sim 2.5$ 地震视应力则在震前一两年内开始下降;③随着区域划分范围向震中靠近, $M_L 2.0 \sim 2.5$ 、 $M_L 2.6 \sim 3.1$ 地震视应力的变化逐渐趋于一致,至震中附近时,2个震级段视应力均表现为“震前几年长时间升高—临震前几个月下降”的同步变化。

关键词: 九寨沟 $M_s 7.0$ 地震 甘南地区 视应力

[文章编号] 1001-4683(2017)04-0521-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

2017年8月8日21时19分四川省阿坝州九寨沟县发生 $M_s 7.0$ 地震。该地震发生在东昆仑断裂带的东端,震中位于川西北倒三角形断块东部区域。该区由其南东侧的龙门山NE向活动断裂带、北侧西秦岭近EW向构造带的南缘活动断裂带及近SN向岷山隆起断裂带的岷江断裂、虎牙断裂等活动断裂带组合,构成了由西向东逐渐收敛的平卧“A”形活动构造体系。在强大的近EW向构造应力场的驱动下,该区由西向东沿两侧边界活动断裂向东强力楔入,而相对稳定的西秦岭东缘形成阻挡,于武都、文县-平武、青川形成构造急剧收口带,使得甘东南地区应力逐年累积,在该区沿 $104^\circ E$ 线附近形成近SN向展布的强震活动带,强震沿该带有规律的南、北往返迁移,重复发生(蒋良文等,2005)。

地震是构造应力积累的结果,仅由地震资料较难得到应力的具体大小,但在一些合理假定的

[收稿日期] 2017-09-11; [修定日期] 2017-10-31

[项目类别] 重庆市地震局科研项目“用背景噪声和天然地震反演三峡库区岩石圈速度结构”资助

[作者简介] 陈丽娟,女,1988年生,助理工程师,主要从事地震监测、数字地震学工作。E-mail: 517133638@qq.com

前提下,由地震资料可得到对于应力大小的某种有物理意义的估计,如视应力(Wyss et al, 1968)。通过地震波形计算得到地震能量和地震矩,二者的比值乘以剪切模量即为视应力。地震学中,一般用视应力作为应力水平的下限估计(吴忠良,2001)。张彬等(2007)利用中强地震资料计算中国大陆地震的视应力空间分布,得到的应力场特征与 GPS 给出的中国最大剪应变场西强东弱的特征一致。易志刚(2007)等通过对 1970 年以来中国大陆 7 级以上强震的震例总结发现,地震视应力异常区的变化与迁移可能是构造大区应力、应变场中显著应力变化区变化与迁移的反映,可用于强震发生地区的预测。刘红桂等(2006、2007)发现,视应力对于云南发生的地震具有较好的预测意义,当中小地震的视应力值超过某个临界值时,即可作为预测该区未来中强震的参考指标。

已有震例表明,强震前视应力的变化较为复杂,视应力的时间变化特征可分为 2 种形态,一是大部分地震前视应力随时间升高,中强震发生在升高的变化过程中,如 1999 年 11 月 29 日岫岩 M_s 5.4 地震及其 5.1 级最大强余震前视应力均有明显升高(王琼等,2005);2006 年 7 月 4 日河北文安 M_s 5.1 地震前,视应力随时间有明显的升高变化过程,并出现相对高值集中区(陈学忠等,2007、2011);1970~1975 年的地震视应变场研究结果表明,地震视应变总体上逐年增加,松潘-平武地震就发生在地震视应变异常区(张彬等,2007);新疆巴楚-伽师 M_s 6.8、乌什 M_s 6.3 强震前视应力均表现出震前低视应力—主震前的逐渐上升—震后逐渐恢复的变化过程(孙燕萍等,2007);2012 年 5 月 28 日唐山 M_s 4.8 地震前,视应力表现出震前趋势性上升,震时达到峰值,震后趋势性下降(李赫等,2014);2013 年吉林前郭地震 M_s 5.8 地震前, M_s 3.0~3.9 震级段视应力存在明显上升过程(康建红等,2016)。二是震前上升—下降的变化形态,即部分中强震前视应力有长时间上升过程,但在临震前有所下降,如 2007 年云南普洱 M_s 6.4 地震前,滇西南地区视应力出现明显升高—下降过程(李艳娥等,2012);2008 年汶川 M_s 8.0 地震前,震区的视应力显示出清晰的上升—下降过程,但在临震前有一定幅度的上升(李艳娥等,2012)。

视应力高值异常区与地震震中的关系则表明,中强震一般发生在高值区域或高值与低值的交界处。首都圈中强地震前多次出现显著的视应力高值异常,地震多发生在视应力高值异常区域附近(岳晓媛等,2016)。天津及邻区中小地震视应力的分析结果表明,视应力高值与低值的过渡区可能是中强地震过渡的有利条件(许可等,2016)。三峡库区巴东地震前,不同震级段视应力在震中区附近的 2 条断裂带同时出现高值,几次显著的地震均发生在视应力上升过程中(戴苗等,2017)。

2013 年 7 月 22 日距此次九寨沟 M_s 7.0 地震以北约 150km 处发生过岷县漳县 M_s 6.6 地震,岷县漳县地震前甘南地区视应力随时间升高且震中附近有高值异常,岷县漳县地震 1 年后甘南地区视应力没有下降,并在甘肃文县附近出现高值异常(陈丽娟等,2015)。本文计算了甘肃南部地区地震的波形数据,分析了九寨沟地震前视应力的时空演化,旨在提取该区强震前视应力的异常特征。

1 资料

利用甘肃区域地震台网地震数字波形资料,计算 2010 年 1 月~2017 年 8 月 $M_L \geq 2.0$ 地震的波谱参数,选取长达近 8 年的数据是为了得到该区域视应力的长期背景值,以利于进一

步的数据对比分析。图 1 为地震震中、台站、该区断层的分布图,因 2013 年 7 月 22 日甘肃岷县漳县曾发生 $M_s6.6$ 地震,为排除岷县漳县地震余震的影响,数据分析以 2014 年 1 月为时间界线划分。在近震源条件下,选用震中距小于 200km 的台站的数据,选取信噪比较高的波形计算视应力。

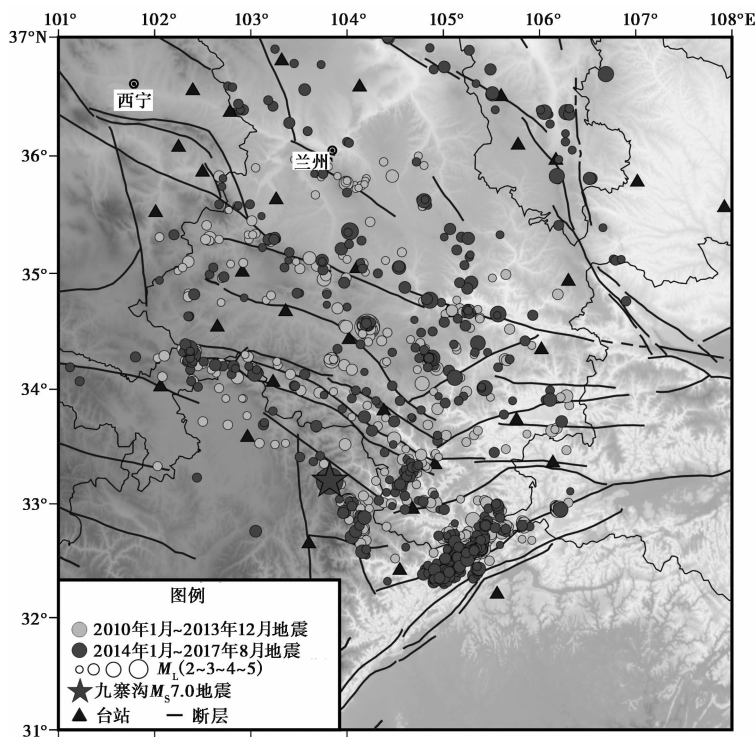


图 1 研究区域地震及台站分布概况

2 视应力计算方法

将波形数据进行傅氏变换得到观测谱,通过仪器响应、几何扩散校正和介质衰减校正等,即可得到震源谱。对中小地震,震源谱符合 Brune 圆盘模型 (Brune, 1970),震源谱可表示为

$$\Omega(f) = \frac{\Omega_0}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \quad (1)$$

式中, Ω_0 为震源谱零频极限值; f 为频率; f_c 为拐角频率。给定 Ω_0 和 f_c 即可确定震源谱,具体方法可参考陈学忠等 (2007) 文献。

地震矩 M_0 可以根据下式求得 (Brune, 1970)。

$$M_0 = \frac{4\pi\rho v^3 \Omega_0 d}{\mathcal{R}} \quad (2)$$

其中, ρ 为地壳介质密度 (可取 $2.71\text{mg}/\text{cm}^3$); v 为波速 (S 波取 $3.5\text{km}/\text{s}$); d 为震源距; Ω_0 为

震源谱零频极限值; \mathcal{R} 为辐射因子, 可用其均方根代替 (S 波为 0.63) (Aki et al, 1980)。

地震辐射能量 E_s 可由对速度谱的平方积分求得 (Andrews, 1986)

$$E_s = 8\pi\rho v \int_0^{\infty} V(f)^2 df \quad (3)$$

地震计的频带宽度有限, 而地震能量则分布在一个很宽的频率范围内, 尤其是中小地震含有较多的高频成分, 有限的频带宽度可能会导致地震辐射能量的低估, 所以, 在计算过程中应考虑低频、高频补偿 (Snoke, 1987)。

得到地震矩 M_0 和地震辐射能量 E_s , 即可计算得到地震视应力 (Wyss, 1970)

$$\sigma_{\text{app}} = \mu \frac{E_s}{M_0} \quad (4)$$

其中, μ 为剪切模量 (对于地壳介质, μ 取 $3 \times 10^4 \text{ MPa}$)。

对某次地震, 一般有多个台站记录到波形资料, 根据上述方法分别求得每个台站的震源力学参数, 再由各台站的值求平均得到多台平均值。为了消除个别台站的异常高值对平均值的影响, 在计算多台平均值时采用 Archuleta 等 (1982) 的方法, 具体如下

$$x = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln x_i\right) \quad (5)$$

$$\Delta x = \exp\left[\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\ln x_i - \ln x)^2}\right] \quad (6)$$

式中, x_i 为各台站的波谱参数; N 为台站数; Δx 为各误差因子, 其意义为当 x 以对数坐标作图时的标准差。

3 标度关系

图 2 为研究区内各参数的标度关系。由图 2 可见, 地震辐射能量、地震矩均随震级的增加而增加, 相关系数较高, 均大于 0.9; 拐角频率随震级的增加而减小, 相关系数约为 0.5, 表明二者的相关性相对较差; 视应力随震级的增加而增大, 相关系数为 0.75, 拟合较好。由于视应力与震级间存在一定的相关关系, 所以, 分析视应力的时空演化特征时需消除震级对视应力的影响。本文采取分震级段的方法, 即分 $M_L 2.0 \sim 2.5$ 、 $M_L 2.6 \sim 3.1$ 两个震级段来研究该区域视应力的时空演化特征。

4 视应力时空变化特征

4.1 视应力随时间的变化

由于各个区域构造存在差异, 各区的应力大小也不相同, 而视应力能够间接反映地下应力, 因此, 视应力在各区的大小亦不尽相同。所以, 在分析视应力的变化时不能给定一个准确的临界值来界定视应力的高低, 只能从时间序列上去提取视应力的相对变化。

为了对视应力的时间变化进行更为详细的分析, 将研究区域划分为 A、B、C、D 等 4 个小区域 (图 3), 其中, A 区域为九寨沟地震震中附近的小区域; D 区域作为龙门山断裂北段汶川地震余震区域单独划分; A、B、C 区域则是按照区域从小到大的顺序划分。划分区域的目的在于对各区域的视应力进行时间分析, 讨论由地震震中到区域大范围内视应力随时间的

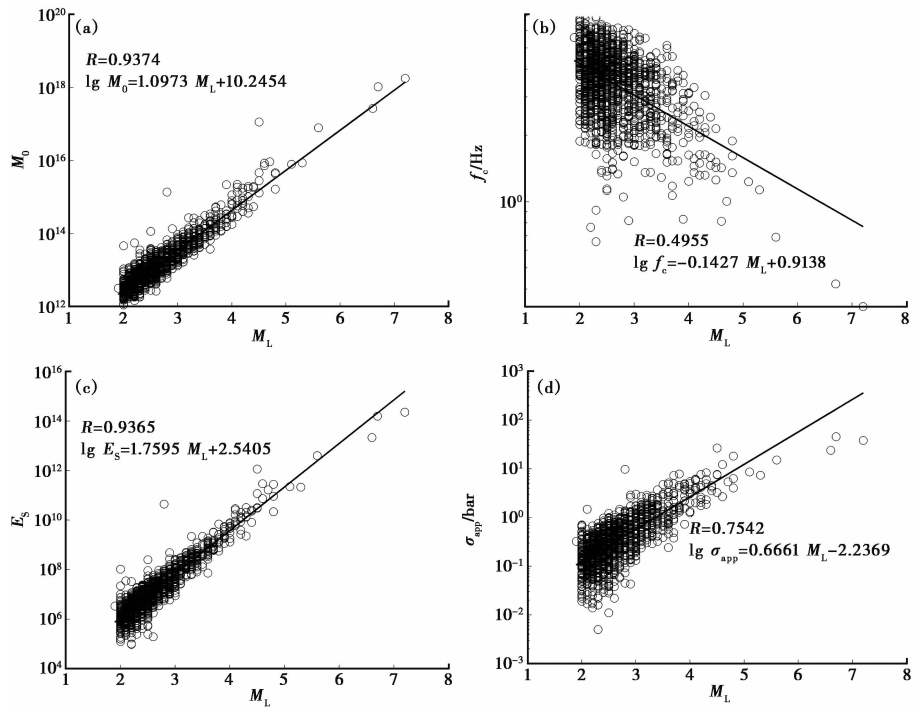


图 2 研究区内各参数的标度关系

(a) 震级与地震矩; (b) 震级与拐角频率; (c) 震级与地震辐射能量; (d) 震级与视应力

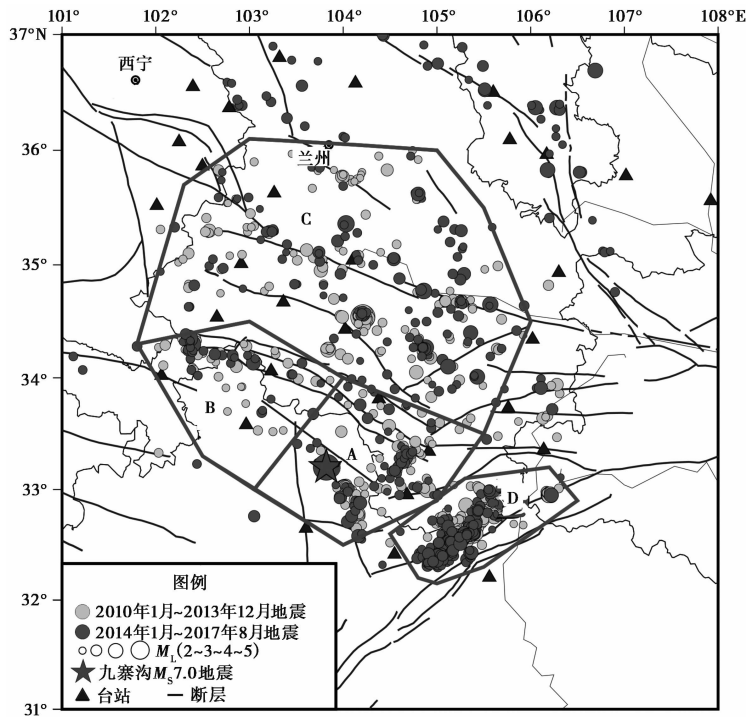


图 3 研究区域的划分

变化形态差异,旨在提取出异常较明显的区域。

在进行时间分析时,采取分震级段来消除震级对视应力的影响,各区域可分别得到 $M_L 2.6 \sim 3.1$ 、 $M_L 2.0 \sim 2.5$ 地震的视应力随时间的变化(图4)。由图4可见, $M_L 2.6 \sim 3.1$ 地震的视应力约为 $M_L 2.0 \sim 2.5$ 地震的2倍,在各个研究区域内,不同震级段的视应力随时间的变化趋势大体一致,但某些时间段略有差异。

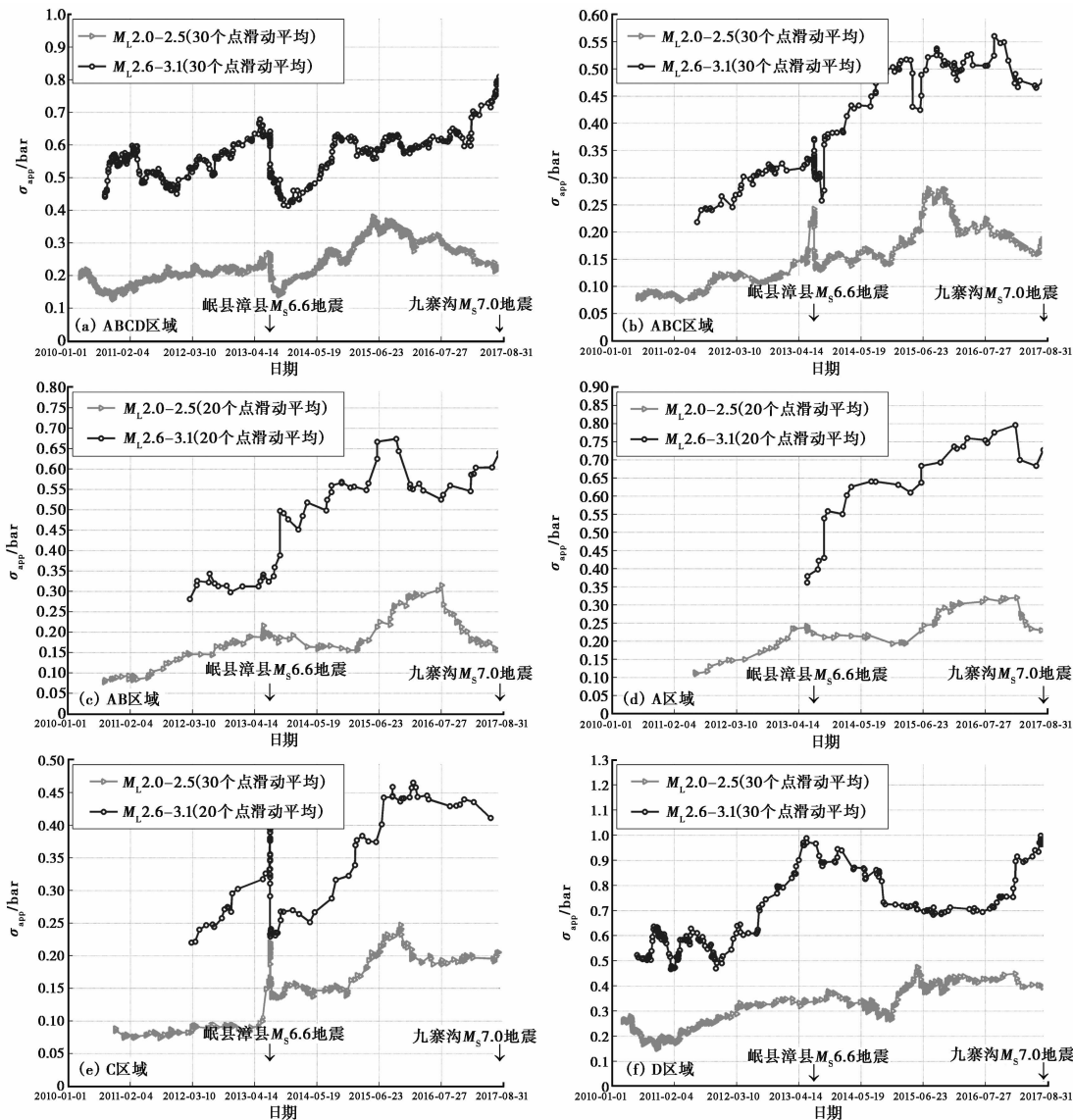


图4 各区域分震级段视应力随时间的变化特征

图5为震中附近区域(图3中A区)研究时段内的 $M-t$ 图。由图5可见,2个震级段的地震在时间上非均匀分布,且 $M_L 2.6 \sim 3.1$ 地震明显少于 $M_L 2.0 \sim 2.5$ 地震。统计结果显示,该区研究时段内 $M_L 2.6 \sim 3.1$ 地震共计86个, $M_L 2.0 \sim 2.5$ 地震共计47个。不同震级段地震的非均

匀分布及数量上的差异导致不同震级段的视应力随时间的变化存在差异,但从图 4 可知,各区域内 2 个震级段地震视应力随时间的变化趋势大体一致,但在某些时间段有不同之处。

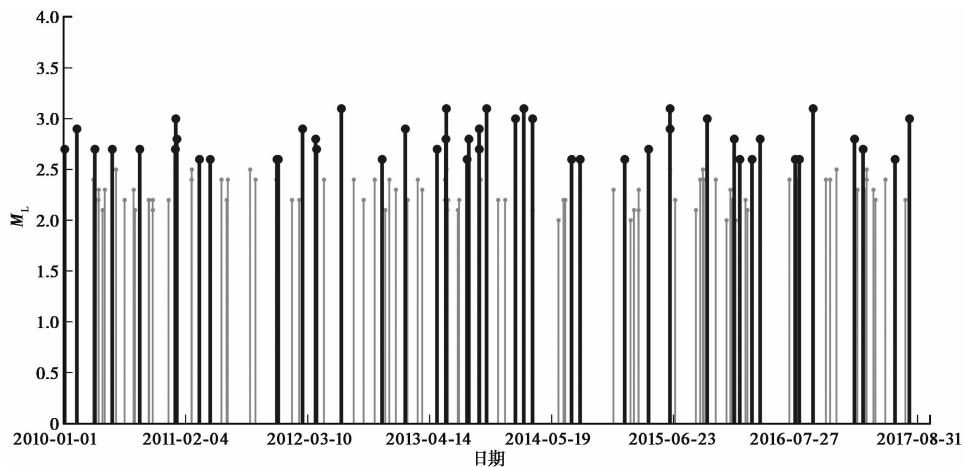


图 5 震中附近区域(图 3 中 A 区)的 $M-t$ 图
浅色细火柴棒为 $M_L 2.0 \sim 2.5$ 地震;深色粗火柴棒为 $M_L 2.6 \sim 3.1$ 地震

对比图 4(c)、(d)可见,加上 B 区域之后的 A、B 区域与 A 区域的变化趋势基本一致,但 A 区域 2 个震级段视应力的变化趋势十分同步。A 区域 $M_L 2.6 \sim 3.1$ 地震视应力至 2017 年 3 月升高为 0.8bar,为 2013 年底 0.4bar 的 2 倍。 $M_L 2.0 \sim 2.5$ 地震视应力也在 2017 年 3 月升至最高值 0.3bar,2017 年 3 月之后, $M_L 2.0 \sim 2.5$ 、 $M_L 2.6 \sim 3.1$ 地震视应力同步出现快速下降变化,2017 年 8 月 8 日发生九寨沟地震。综上,九寨沟地震前,震中附近区域(图 3 中 A 区),2 个震级段视应力的变化趋势十分同步,均呈现出“震前长时间升高—震前几个月快速下降”的变化趋势。

图 4(e)为 C 区视应力随时间的变化,该区为研究区域的北段,该区 $M_L 2.0 \sim 2.5$ 、 $M_L 2.6 \sim 3.1$ 地震视应力随时间的变化也较为同步,均在岷县漳县地震后快速上升,至 2015 年底达到最高值,之后略有下降,但仍为 2013 年 1 月以前视应力的 2 倍,并保持高值至九寨沟地震发生前。

综合分析,由图 4(a)~4(f)各个区域视应力随时间的变化可见,九寨沟地震前,整个甘肃南部大范围地区(图 3 中 A、B、C、D 区) $M_L 2.6 \sim 3.1$ 地震视应力有明显的升高;随着区域范围向震中缩小(A、B、C、D 区>A、B、C 区>A、B 区>A 区),九寨沟地震震中附近地区(图 3 中 A 区) $M_L 2.0 \sim 2.5$ 、 $M_L 2.6 \sim 3.1$ 地震视应力有十分同步的“升高—下降”变化;龙门山断裂带北段余震区(图 3 中 D 区)视应力明显高于甘南其他地区,但该区 $M_L 2.6 \sim 3.1$ 地震视应力在岷县漳县地震、九寨沟地震前也均有明显的快速升高变化。

由图 4 各区域视应力随时间的变化可知,2013 年岷县漳县地震和 2017 年九寨沟地震前,研究区域大范围内视应力均升高,各个区域由于构造差异,其应力集中方式以及应力大小均不同,因此,视应力的异常变化也存在差异,而震中附近区域应力的积累则表现出较为同步的变化。由图 4 可见,岷县漳县地震前各区域视应力升高,该地震后视应力并没有逐渐调整恢复至正常水平,而是继续上升,在视应力升至最高水平后发生了九寨沟地震。说明甘

南地区在强大的近 EW 向构造应力作用下一直处于应力积累状态,岷县漳县地震、九寨沟地震均是整个应力累积过程中发生的地震,该区附近历史上也曾多发强震。甘川交界地区是东昆仑构造带、龙门山构造带及秦岭构造带的交界地区,形成了复杂的构造结(任治坤等,2005),在青藏高原的近东西向挤压下,该区未来的地震危险性仍值得关注。

4.2 视应力的空间分布

较强地震前震源区一般存在视应力高值异常,汶川地震前主震破裂所处的龙门山断裂带中-北段的视应力明显高于南西段(易桂喜等,2011),芦山地震前震中天全-宝兴段视应力较高(易桂喜等,2013)。本文计算得到了此次九寨沟地震前的视应力空间分布,以发现高值异常区与震中位置间的关系。

为避免 2013 年 7 月 22 日岷县漳县 $M_s6.6$ 地震余震的影响,取 2014 年 1 月~2017 年 8 月的数据,以 $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ 为空间窗, 0.1° 为滑动步长,对视应力进行空间扫描,得到视应力的空间分布(图 6),图 6 中的空白部分为无值区域。

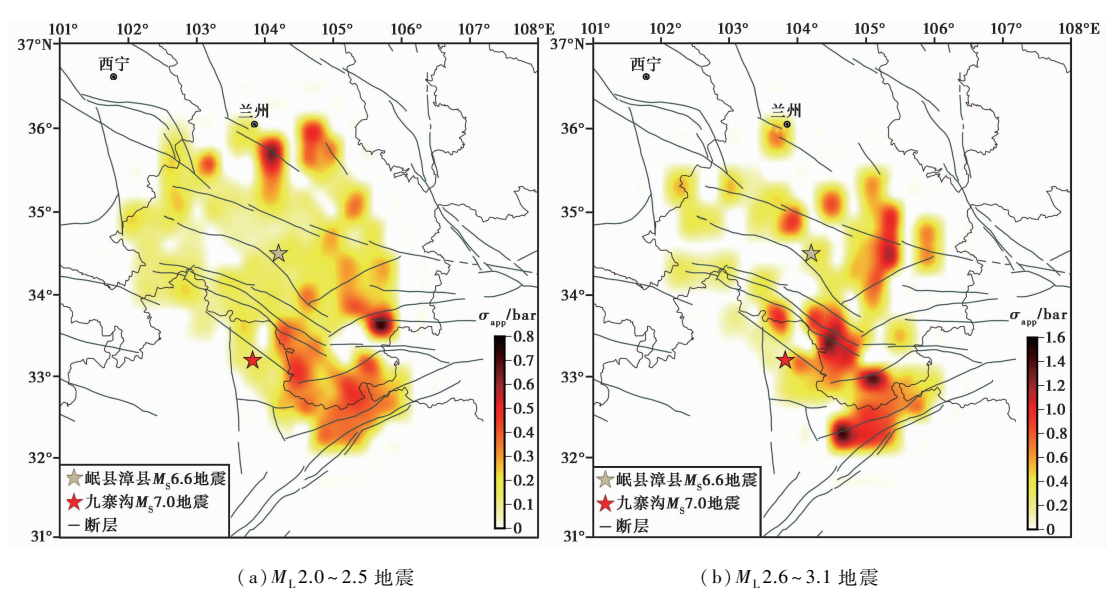


图 6 2014 年 1 月~2017 年 8 月研究区域内地震视应力的空间分布

由图 6 可见, $M_L2.6\sim3.1$ 地震视应力明显大于 $M_L2.0\sim2.5$ 地震,这是因震级与视应力间有一定的相关性所致。但是,2 个不同震级段视应力的空间分布具有较好的一致性,高值视应力主要集中分布在甘肃南部与四川交界地区。2017 年 8 月 8 日九寨沟 $M_s7.0$ 地震前,九寨沟地震震中附近川甘交界地区的舟曲、文县、青川、平武等地呈现出较为集中的视应力高值异常,青川、平武地区(即图 3 中的 D 区域)由图 4(f) D 区域视应力随时间的变化可知,该区视应力明显高于甘南其他地区,该区为汶川地震余震区,受余震影响,该区的视应力背景值一直较高。剔除汶川地震余震区后,高值异常区为舟曲、文县等地,九寨沟地震的震中并未在高值异常区内,而是位于高值异常区的西侧附近。九寨沟地震发生在该应力集中区域的边缘,说明由于相对稳定的西秦岭东缘的阻挡作用,高值异常区并没有破裂,但其边缘薄弱区发生错动,导致此次九寨沟地震的发生。高值异常区未来是否存在强震危险,还需继续

跟踪研究九寨沟地震后该区的视应力。

5 结论与讨论

通过对甘肃南部区域 2010 年 1 月 1 日~2017 年 8 月 $M_L \geq 2.0$ 地震视应力的计算,得到该区域视应力的空间分布及各个区域视应力随时间的变化特征,所得结论如下。

(1) 视应力空间分布显示, $M_L 2.6 \sim 3.1$ 、 $M_L 2.0 \sim 2.5$ 两个震级段地震视应力的空间分布具有较好的一致性, 2017 年 8 月 8 日九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前, 距震中较近的川甘交界地区的舟曲、文县等地呈现出较为集中的视应力高值异常。

(2) $M_L 2.0 \sim 2.5$ 、 $M_L 2.6 \sim 3.1$ 地震视应力在较大区域范围内随时间的变化趋势有一定差异, $M_L 2.6 \sim 3.1$ 地震视应力在各区域的变化更为明显, 在较大区域范围内表现为震前升高; 而 $M_L 2.0 \sim 2.5$ 地震视应力则在震前一两年内开始下降。

(3) 随着区域范围向震中缩小, $M_L 2.0 \sim 2.5$ 、 $M_L 2.6 \sim 3.1$ 地震视应力随时间的变化逐渐趋于同步, 当区域缩小到震中附近地区时, 2 个震级段地震视应力变化大体一致, 表现为“震前几年长时间升高—临震前几个月下降”的同步变化。

甘南地区的视应力分析表明, 2013 年岷县漳县 $M_s 6.6$ 地震前视应力有升高变化, 该地震发生后视应力并没有调整恢复到背景水平, 而是升至更高水平, 直至 2017 年九寨沟 $M_s 7.0$ 地震的发生。这说明研究区域内一直在累积应力, 应力累积过程中先后发生了岷县漳县 $M_s 6.6$ 地震和九寨沟 $M_s 7.0$ 地震。九寨沟地震前, 甘南各个研究区内视应力均有不同程度的上升, 说明整个甘南地区的应力均有所累积, 随着区域范围向震中缩小, 2 个震级段地震视应力随时间的变化逐渐趋于同步, 震中附近地区 2 个震级段地震视应力均表现为“震前几年长时间升高—临震前几个月下降”的同步变化。震前几年视应力的升高表明, 区域内应力长时间累积; 临震前短时间内视应力的下降变化表明, 断层介质在构造应力挤压作用下发生小的破碎, 临震前应力有所释放, 随后断层发生错动产生强震。岷县漳县 $M_s 6.6$ 地震后视应力高值异常集中分布在甘川交界的舟曲、文县一带, 九寨沟地震发生于高值异常区的边缘地带, 而高值异常区内并没有发生破裂, 边缘薄弱区发生的错动导致了此次九寨沟地震的发生, 本文研究结果表明, 视应力升高的异常变化可作为该区中强震的预测参考指标。

参考文献

- 陈丽娟、李艳娥、杨立明等, 2015, 2013 年 7 月 22 日岷县 $M_s 6.6$ 地震前后视应力研究, 地震, **35**(4), 30~42。
- 陈学忠、李艳娥、郭祥云, 2011, 河北文安 $M_s 5.1$ 地震前首都圈及邻区震源动力学参数时空变化特征, 地震, **31**(4), 15~25。
- 陈学忠、李艳娥, 2007, 2006 年 7 月 4 日河北文安 $M_s 5.1$ 地震前震中周围地区小震视应力随时间的变化, 中国地震, **23**(4), 327~336。
- 戴苗、吴桂桔、刘坚等, 2017, 三峡库区巴东地震前后视应力变化特征, 地震地质, **39**(4), 837~852。
- 蒋良文、王士天、王运生等, 2005, 川西北断块东部区域活动构造体系及其对地震活动的控制作用, 成都理工大学学报(自然科学版), **32**(4), 340~344。
- 康建红、张洪艳、张宇等, 2016, 2013 年吉林前郭强震群序列地震视应力变化特征, 地震地磁观测与研究, **37**(1), 1~7。
- 李赫、刘双庆、刘文兵等, 2014, 唐山 4.8 级地震前后视应力变化研究, 地震工程学报, **36**(4), 1019~1025。
- 李艳娥、陈学忠、付虹, 2012, 2007 年云南洱海 $M_s 6.4$ 地震前滇西南地区震源动力学参数时空变化特征, 地震, **32**(1), 28~39。
- 李艳娥、陈学忠、王恒信, 2012, 汶川 8.0 级地震前四川地区地震视应力时空变化特征, 地震, **32**(4), 113~122。

- 刘红桂、刘杰、丁页岭等,2006,地震视应力在云南地震序列中的前兆特征,地震学报,28(5),462~471。
- 刘红桂、王培玲、杨彩霞等,2007,地震视应力在地震预测中的应用,地震学报,29(4),437~445。
- 任治坤、田勤俭、陈立泽,2005,南北地震带中段地震构造遥感解译,地震,25(4),127~132。
- 孙燕萍、史勇军,2007,新疆两次强震前后地震视应力变化,地震地磁观测与研究,28(4),20~28。
- 王琼、陈学忠、王林瑛,2005,岫岩地震序列视应力变化及其预测意义,地震,25(2),91~97。
- 吴忠良,2001,由宽频带辐射能量目录和地震矩目录给出的视应力及其地震学意义,中国地震,17(1),8~15。
- 许可、李晔、郭巍等,2016,天津及邻区中小地震视应力的特征分析,中国科技成果,17(12),10~13。
- 易桂喜、闻学泽、辛华等,2011,2008年汶川 M_s 8.0地震前龙门山-岷山构造带的地震活动性参数与地震视应力分布,地球物理学报,54(6),1490~1500。
- 易桂喜、闻学泽、辛华等,2013,龙门山断裂带南段应力状态与强震危险性研究,地球物理学报,56(4),1112~1120。
- 易志刚、宋荣、杨选辉等,2007,地震视应力在中国大陆西部强震趋势预测中的应用,地震,27(4),110~120。
- 岳晓媛、武安绪、冯刚等,2016,首都圈中强震前后视应力时空演化过程研究,地震,36(2),119~131。
- 张彬、杨选辉、易志刚,2007,松潘-平武地震前地震视应变场的时空演化,西北地震学报,29(3),235~239。
- 张彬、杨选辉,2007,中国大陆地震视应力空间分布研究,大地测量与地球动力学,27(5),26~30。
- Aki K, Richards P G, 1980, Quantitative seismology, theory and methods, San Francisco: W H Freeman and Co.
- Andews D J, 1986, Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size, In: Das S, Boatwright J, Scholz C H, Earthquake source mechanics, Washington D C AGU, 259~267.
- Archuleta R J, Cranswick E, Muller C, et al, 1982, Source parameters of the 1980 Mammoth Lakes, California, earthquakes sequence, J Geophys Res, 87(B6), 4595~4607.
- Brune J N, 1970, Tectonic stress and the spectra of seismic waves from earthquakes, J Geophys Res, 75, 4997~5009.
- Snoke J A, 1987, Stable determination of (Brune) stress drops, Bull Seism Soc Am, 77(2), 530~538.
- Wyss M, Brune J N, 1968, Seismic moment, stress, and source dimensions for earthquakes in the California-Nevada region, J Geophys Res, 73(14), 4681~4694.
- Wyss M, 1970, Apparent stresses of earthquakes on ridges compared to apparent stresses of earthquakes in trenches, Geophys J R astr Soc, 19, 479~478.

The apparent stress variation in southern Gansu before the Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake in Sichuan on August 8, 2017

Chen Lijuan¹⁾ Chen Jifeng²⁾ Gong liwen¹⁾ Chen Xuezhong³⁾

1) Earthquake Administration of Chongqing Municipality, Chongqing 401147, China

2) Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, China

3) Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China

Abstract Based on the waveform data observed by the Regional Digital Seismic Network of Gansu Province, we calculated the apparent stress of the $M_L \geq 2.0$ earthquakes in the southern Gansu from January 2010 to August 2017, and obtained the temporal-spatial variations of apparent stress. Results show that the distribution of apparent stress with $M_L 2.0 \sim 2.5$ and $M_L 2.6 \sim 3.1$ was consistent, both concentrating in the border region of Sichuan and Gansu before the Jiuzhaigou earthquake. The change trend of apparent stress over time with $M_L 2.0 \sim 2.5$ and $M_L 2.6 \sim 3.1$ was different within the large area: The apparent stress with $M_L 2.6 \sim 3.1$ was more apparent and increased significantly before the Jiuzhaigou earthquake, while the apparent stress with $M_L 2.0 \sim 2.5$ declined one or two year before. The spatial variation of apparent stress with $M_L 2.0 \sim 2.5$ and $M_L 2.6 \sim 3.1$ became more similar when the study area was closer to the epicenter, the apparent stress kept increasing a few years before the earthquake and suddenly declined a few months before the earthquake.

Key words: Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake; Southern Gansu area; Apparent stress