

程万正、张永久、阮祥, 2011, 汶川 8.0 级地震前区域应力场动态的研究, 中国地震, 27(3), 215 ~ 225。

汶川 8.0 级地震前区域应力场动态研究

程万正 张永久 阮祥 乔慧珍 张致伟

四川省地震局, 成都市人民南路 3 段 29 号 610041

摘要 利用成都、昆明遥测数字地震波形记录资料, 研究大量小震震源机制解和视应力值, 分析了区域应力场动态和视应力值的时-空分布。给出川青地块平均应力场方位的时间变化。川青地块平均主应力场的方位在汶川 8.0 级地震前出现明显扰动, 同时, 地块力轴张量的倾角变化也很明显。得出 2006 ~ 2007 年川青块体逆冲型地震比例偏高, 汶川 8.0 级地震前区域中小地震震源错动类型发生变化的结果, 与区域地形变的结果是一致的。根据地震波形全波段计算辐射能量, 求得的视应力 σ_{app} 值揭示区域视应力值的微动态起伏过程与区域主压应力场方位的转折类似, 可用于地块蕴震物理过程的探索。从汶川 8.0 级地震前的中短期视应力 σ_{app} 值的空间分布看, 震中所在的龙门山断裂带是低应力分布区, 而相对高视应力则分布在外围地区。这些图像可能揭示了汶川 8.0 级地震前中短期发震构造附近呈现的闭锁现象。

关键词: 区域应力场动态 视应力分布 汶川 8.0 级地震 孕震物理过程

[文章编号] 1001-4683(2011)03-0215-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

前苏联学者 Sadosky 等人(1972、1974)在研究加尔姆地区地震的震源机制时, 发现该地区在中强地震前 1.5 ~ 2.0 年时间内小震的 P 轴取向由紊乱趋于一致; 在震前 2 个月左右或稍长时间内, P 轴发生 90° 转向, 且转向后的 P 轴方向与未来主震 P 轴方向一致。许忠淮等(1979)、华祥文(1980)等给出 1976 年唐山 7.8 级地震前数年震中附近区域内小震的主压应力轴方向与区域应力场、未来大震的主压应力轴方向相同的研究结果。1976 年松潘 7.2 级地震前孕震区应力 P 轴发生了由近 EW 向到近 SN 向的转向(成尔林等, 1982); 阚荣举等(1983)给出 1976 年龙陵 7.3、7.4 级地震前孕震区的应力 P 轴经历了由 NNE 向到 NNW 向的转向过程。1976 年天津宁河 6.9 级强震前 3 个月主应力轴方位发生变化, 呈现紊乱一定向一偏转的变化, 偏转约 40°(赵根模等, 1984)。

程万正等(1990)研究了马边地区大量小震震源机制解并提出地震动态应力场的概念。马瑾等(1995)把应力场分为基本应力场和扰动应力场, 即把区域应力作用下不同构造部位附近的应力场称为基本应力场, 由不同原因引起的应力变化量称为扰动场, 扰动场是叠加在基本场上的增量场。考虑到复杂构造的基本应力场也是复杂的, 其中包含了由构造和介质

[收稿日期] 2009-06-10

[项目类别] 本研究由国家自然科学基金(41090290)项目资助

[作者简介] 程万正, 男, 1950 年 1 月生, 1976 年毕业于长春地质学院石油物探专业, 研究员。主要从事地震学和地震预报的研究。E-mail: cwzsudz@163.com

引起的很多不均一性,而它们的增量场中若扣除了这些不均一性引起的复杂性,会突出由断层扩展、弱化前后的差异变化。

王绍晋等(2001)分析了川滇地区8次7级大震前5年内发生在大震孕震区和震源区内的中强震震源机制解时空分布。结果表明,最早的中强震发生在大震震源区或其附近,其发震应力场与区域构造应力场一致。之后有多次中强震发生在距大震震源区较远的大震孕震区内,它们的发震应力场往往经历了与区域构造应力场和大震应力场一致与不一致的多次交替变化。大震前最后1个中强震也发生在距大震震源区较近的地方,其发震应力场与大震发震应力场明显不一致,偏转了 $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 或更多,大多数也与区域构造应力场不一致,有的中强震发震断裂破裂特征与大震不一致。王凯英等(2003)指出,1996年前后川滇地区发生一次应力转向事件,与1996年丽江7.0级地震相关联。万永革(2008)用美国南加州地区的震源机制资料,研究了以1992年Landers $M_w 7.3$ 和1999年Hector Mine $M_w 7.1$ 地震10年内地震震源机制相对主震震源机制平均空间旋转角的变化。结果表明,两个地震前均有小震震源机制趋于主震机制的现象。震前小震震源机制与主震震源机制的平均空间旋转角约在大震前半年开始减小,搜索平均空间旋转角降低的最优半径分别为250km和100km。

可见,区域应力场动态变化一直处于被探究之中,它是了解和研究蕴震场物理意义的一种手段。本文基于近年川滇地区区域数字地震波形记录研究给出的大量小震震源机制解,特别是区域应力场以及视应力值的时空分布,分析探讨蕴震应力场的某些变化信息或迹象。对汶川8.0级地震前的动态应力场与视应力给出了一些研究结果,以期用于对其它地震特征的分析研究。

1 震前震源机制解与区域应力场动态

1.1 资料和分析方法

国内外常用的测定震源机制参数方法是利用 \bar{P} 波初动符号求解,但这种方法要求样本地震需被很多台站记录到,如果观测台站稀少或不均匀,则误差较大。因此,一般来说,对于中强以上地震,一般利用 \bar{P} 波初动或运用矩张量方法求震源机制解。但是,由于大量中小地震仅能被有限数量的台站记录到,而这些记录的数量对采用 \bar{P} 波初动计算地震的震源机制解是不够的。为此,Snook等(1984)、梁尚鸿等(1984)提出利用垂直分量的(SV/P)的振幅比,结合部分台站清晰的初动符号计算中小地震的震源机制解。基本原理是利用区域地震台网 \bar{P} 、 \bar{S} 波垂直分量振幅比资料测定小震震源机制。考虑层状介质中一点源位错模型,由计算综合地震图得到 P 、 S 波各自的最大振幅,通过其最大振幅比值与观测资料拟合的方式来确定震源机制解。具体做法是:利用区内速度结构研究成果,确定分层速度模型;选用近台地震记录(震中距 $\Delta \leq 150\text{km}$),避免出现 P_n 和 \bar{P} 震相混淆的情况;台站数目一般要求6个以上,以保证解的稳定性;注意剔除 P_n 震相;记录振幅要求大于1.0mm,而且不能限幅,这对于数字化地震记录是较容易达到的。胡新亮等(2004)用格点尝试法和 \bar{P} 、 \bar{S} 垂直向振幅比方法分别测定小震震源机制解,比较发现二者基本一致,证明了该方法的可靠性。

应用该方法,使用成都、昆明遥测数字地震台网记录波形资料,先后对川滇地区中小地震震源机制解进行研究并给出结果,包括2000~2008年四川及邻区中小地震震源机制解,以及这期间中强地震序列的震源机制解(程万正等,2006a、2009;张永久等2006、2007;张致

伟等,2009)。之前,利用模拟数字记录给出 1994 ~ 1999 年该区域中小地震震源机制解(程万正等,2003a)。这些资料都是研究川滇地区构造应力场状态的宝贵资料。

根据这些资料,采用力轴张量计算方法(钟继茂等,2006),通过计算区域平均力轴张量和震源参数的一致性的计算程序(程万正等,2006),计算了川滇地区平均力轴张量或平均应力场,分析了各年的平均应力场与多年平均应力场的变化,同时分析震源错动类型的分布及变化过程。

1.2 震前区域应力场动态的研究结果

根据川青地块,包括龙门山构造带以及川北地区(不含鲜水河构造带)的资料,求出小震震源机制解(图 1)。其中包括 2000 年到 2008 年地震震源机制解的结果。

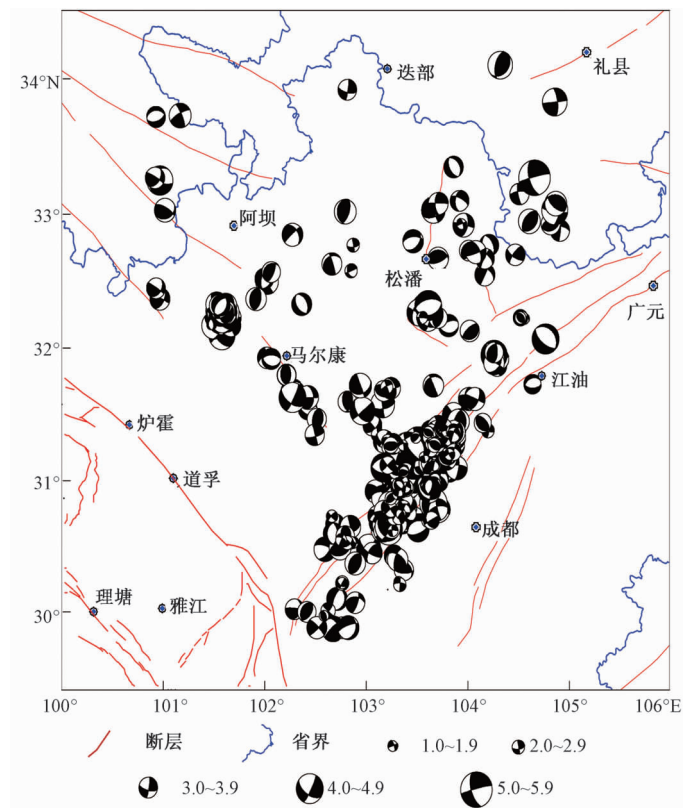


图 1 2000 ~ 2008 年川青地块小震震源机制解分布

研究得出了区域应力场扰动情况(图 2(a)),求得川青地块 2000 年 1 月至 2008 年 4 月平均应力张量方向为 300° , 呈 NNW 向。仅在 2000、2007 年川青地块应力场扰动显著。川青地块平均应力场方向在 2000 年是 240° , 2006 ~ 2007 年是 357° , 平均应力方向接近 SN 向扰动。区内 2000 年发生姚安 6.5 级地震,2007 年发生普洱 6.4 级地震。而这一期间,即 2004 年 12 月 26 日印尼苏门答腊发生 9.0 级地震,余震向北扩展 1300km;2005 年 3 月 29 日再次发生 8.7 级地震,余震向南扩展 700km。川青地块平均应力场方向的扰动也可能与大区域巨大地震发生前后地块应力场的状态变化有关,即 2006 ~ 2007 年地块平均应力场

方向的扰动有较大的变化,这与 GPS 资料揭示的地块位移场所显示的状态变化是一致的,青藏和川滇地块的东向运动从 2004 年以来明显增强,而北向运动从 2006 年以来明显增强(江在森等,2009)。

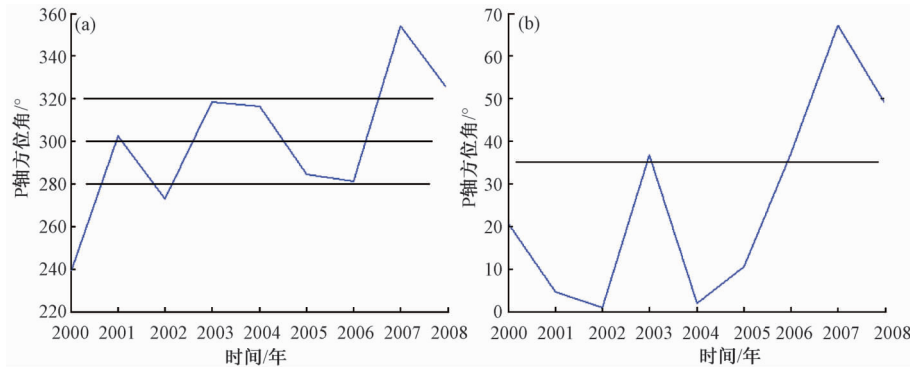


图2 龙门山构造带及川北地区年度平均主应力场方向与倾角的变化

另外,求取川青地块平均应力场方向的同时,求得年度力轴张量的倾角在 $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 内变化,说明地块主应力轴向接近水平,否则斜向作用力会更明显。分析图 2(b)发现,2007 年川青地块平均主压应力轴向也在发生变化,即呈现明显地从水平向斜向作用力变化。这一现象与地块应力场方位出现较大的扰动现象的时间是一致的。

1.3 震前区域地震错动类型的研究结果

程方正等(2006a)定义各地震震源机制解给出的应力轴与区域平均应力张量的差值 $\bar{\theta}$ 为区域震源机制解的一致性参数。川滇地区小震震源机制给出的一致性参数 $\bar{\theta}$ 其时间变化在 2003 年前后和 2007 年前后出现低值。这种变化也在一定程度上佐证了巨大地震前的应力场异常变化。尤其对川滇次级地块的中小地震的震源机制解资料的分析结果显示,在平常走滑型地震经常发生的背景中,一段时间逆冲型地震增加或集中出现后则有强地震发生,至少雅江地块、滇中地块等近 12 年来的资料印证了一点,因而可视为客观存在的一种未被揭示的异常现象。川滇地区地块间相互动力作用显著,出现这种情况可能不是一种意外。也许会有人提出,川青地块、川中地块也出现了逆冲型地震增加的阵发性现象,这应作何解释呢?笔者已在相关研究中指出(程方正等,2006a),那也显示一种地块在运动方向明显动力增强的现象,只不过未达到发生强震的临界点。当时的研究资料止于 2005 年。

之后,作者继续这项研究工作。所计算的震源机制解结果显示,2006 ~ 2007 年川青块体逆冲型地震比例继续偏高,在这种应力场背景下发生了 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震(图 3)。图 3 中纵轴表示在此时段该地块内地震震源断层错动类型是逆冲型的所占的比例数。总体而言,川滇地区发生地震多数是走滑型。

2001 年 2 月四川雅江 6.0 级地震地震后至 2004 年 12 月 26 日印尼苏门答腊 9.0 级地震前,川青块体逆冲型地震比例并没有出现显著变化,而 2005 ~ 2007 年却呈现为显著增加的迹象。在区域应力场发生急剧变动的时段,区域中小地震震源错动类型也有变化,逆冲型地震显著增加。这种增加趋势说明原有地块的微破裂机制发生了一定程度的变化,逆冲型

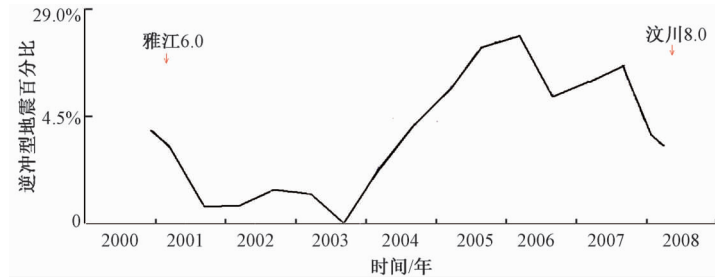


图3 川青地块地震震源断层逆冲型比例随时间变化曲线

微破裂类型增加可能呈现地块应力水平的增加或改变。这与上节区域主压应力场的微动态分析结果所呈现的显著偏转是一致的,这也与 GPS 资料揭示的龙门山断裂带两侧地块相对运动的状态变化是一致的。龙门山断裂带两侧地块相对运动,其垂直断裂带的地壳缩短速度趋势是 1999~2001 年低(-0.51mm/a),2001~2004 年最高(-2.32mm/a),2004~2007 年有所减少(1.35mm/a) (江在森等,2009),显然地块相对运动的变化状态呈现大尺度的地壳运动与动力环境的变化,也在一定程度上揭示地块的相对挤压程度。垂向龙门山断裂带地壳缩短速度大,挤压程度亦大,产生逆冲型微破裂的可能性也会增加。

2 震前区域视应力的时-空变化

2.1 视应力计算方法

地震视应力在 20 世纪 60 年代就被引入到地震学 (Aki, 1966; Wyss et al, 1968; Wyss, 1970a, 1970b)。视应力值 $\sigma_{\text{app}} = \eta\bar{\sigma}$, 定义为地震效率和平均应力的乘积。式中, $\bar{\sigma}$ 为平均应力, η 为地震效率。由于 $\eta \leq 1$, 所以视应力 σ_{app} 是平均应力 $\bar{\sigma}$ 的下限。视应力同静态应力降相结合, 为不同区域应力状态提供了有用的信息 (Kanamori, 2001)。Chen 等 (2003) 提出了视应力值的具体计算方法。利用遥测数字地震台网的波形记录资料, 选取距震中 300km 范围内的测震台资料参与计算。首先进行数据预处理, 包括带通滤波, 快速富氏变换, 扣除仪器幅频特性等。经反变换, 回到时间域, 给出数字波形时间序列。选取所有方向的整个 P 波和 S 波段数据, 按地震大小和远近不同取时窗, 窗长以 Pg 波或 Sg 波开始到衰减至大于 2 倍噪声为准。对波段再进行快速富氏变换到频率域, 在频率域内进行积分, 即得到速度和地动位移的功率谱积分 S_v 和 S_d 。

对各台 3 个方向同一波段记录, 计算得到零频极限值

$$\Omega_0^2 = 2S_d(S_d/S_v)^{1/2}$$

并取

$$\Omega_0 = (\Omega_{\text{OZ}}^2 + \Omega_{\text{ONS}}^2 + \Omega_{\text{OEW}}^2)^{1/2}$$

计算地震矩

$$M_0 = 4\pi\rho\beta^3\Omega_0 / \sqrt{2/5}$$

式中 $\sqrt{2/5}$ 为 S 波得均方根辐射图型因子。并取

$$M_0 = (M_{\text{OZ}}^2 + M_{\text{ONS}}^2 + M_{\text{OEW}}^2)^{1/2}$$

式中, $\Omega_{\text{OZ}}, \Omega_{\text{ONS}}, \Omega_{\text{OEW}}, M_{\text{OZ}}, M_{\text{ONS}}, M_{\text{OEW}}$ 分别表示垂直向、SN 向、EW 向记录计算得到的零频极

限值和地震矩。

计算各台 P 波和 S 波段的地震波辐射能量 $E_s = 4\pi\rho\beta S_v$, 并将 P 波和 S 波段的能量相加得到总的辐射能量。

计算视应力 $\sigma_{app} = \mu(E_s/M_0)$, 式中 μ 为震源区介质的剪切模量。视应力也可以表示为 $\sigma_{app} = E_s/AD_s$, 式中 AD_s 为断层面平均错距, A 为断层面面积。即在断层面积一定的情况下, 视应力表示为断层面单位错动所释放的地震波能量。地震越大, 震源断层错动的辐射能越大, 因此, 视应力值与震级正相关。其强依赖性是对震时动态破裂应力的刻画, 而非地下岩体静态应力的测定。

2.2 震前区域视应力值的时间分布

根据遥测数字地震台网记录的波形资料, 计算四川地区 2000 年 5 月到 2008 年 5 月 4 日, 即汶川 8.0 级地震前 622 个 $M_L \geq 3.0$ 的地震全波段地震的辐射能量值, 从而求得视应力 σ_{app} 值。因为这些值不是等时间间隔的, 按照先后顺序作时间序列分布(图 4)。总体看来, 区域中小地震视应力值大多数为 0.1 ~ 10bar。

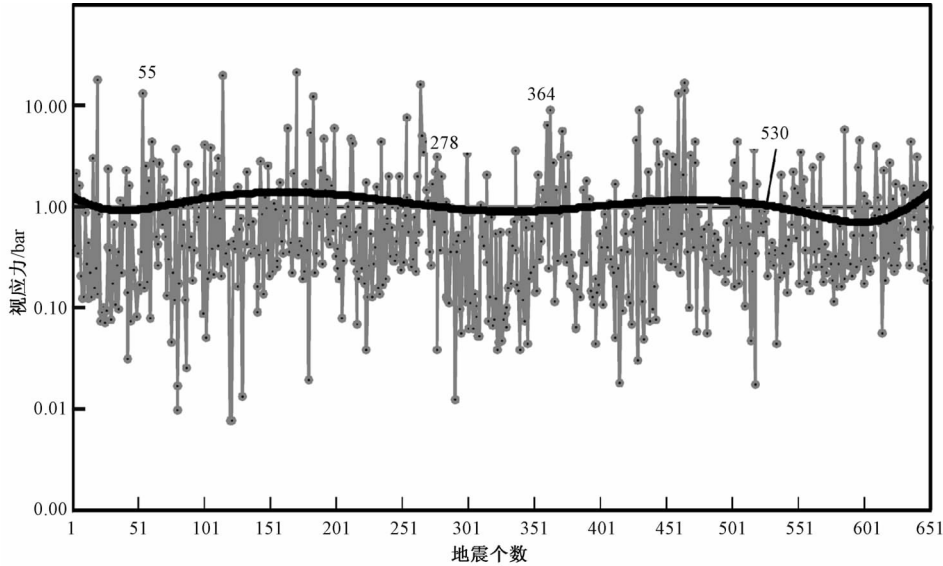


图 4 2000 年 5 月 ~ 2008 年 5 月 4 日四川地区视应力值的时间序列

分析视应力值随时间变化曲线。以 6 阶多项式计算视应力值的拟合趋势线, 结果显示为图 4 中稳定的拟合趋势线呈现起伏状态。以大于或小于 1bar 的时段为标准, 则第 55 数据点为 2001 年 6 月 23 日, 即重庆荣昌 $M_L 4.9$ 地震波记录计算结果, 为视应力值拟合趋势线开始增加的时间; 至第 278 数据点, 即 2004 年 9 月 1 日云南昭通 $M_L 4.2$ 地震波记录计算结果止, 区域视应力拟合趋势线处于相对较高的时段。这一期间在四川周边地区发生多次 6 级地震和系列中等地震。

然后至第 364 点, 即 2005 年 8 月 5 日东川 5.0 级地震波记录计算值前这一时间段, 区域视应力拟合趋势线处于相对较低的时段。这一时段四川地区没有发生强地震, 呈现较弱的地震活动水平。而这一时段发生了 2004 年 12 月 26 日印尼苏门答腊发生 9.0 级地震和

2005 年 3 月 29 日 8.7 级地震。

至第 530 数据点,即 2007 年 4 月 27 日松潘 M_L 4.3 地震波记录计算值前,区域视应力拟合趋势线又处于相对较高的时段,虽然这一时段仅发生系列中等强度的地震。

之后,至 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震发生前,区域视应力拟合趋势线一直处于相对较低的时段。

可见在同样分析时段,区域视应力值的微动态起伏过程呈现与前节区域主压应力场方位转折的大致类似的过程。

2.3 震前区域视应力值的空间分布

同时研究了四川地区近年来 σ_{app} 值的空间分布。方法是将计算得到的大量地震的 σ_{app} 值在一定空间领域内作平均,从而绘出等值线图 5。

分析了震前 2002 年 6 月~2004 年 8 月的数字地震记录,分析了 224 个地震的辐射能量 E_s 、视应力 σ_{app} 值,用这些值绘出等值线图(图 5(a))。研究表明视应力 σ_{app} 值的相对高值区分布在 2 个地区,一个分布在四川北部的川甘交界一带,大致位置在 $32.5^\circ \sim 34^\circ N$ 、 $103^\circ \sim 105^\circ E$ 的范围,另一个分布在四川南部的川滇交界一带。而其它地区视应力 σ_{app} 值的分布相对均匀(程万正等,2006b)。这显示了四川北部的川甘交界一带具潜在地震危险性。

继而分析了 2004 年 9 月~2008 年 5 月 4 日 398 个 $M_L \geq 3.0$ 地震的辐射能量 E_s 、视应力 σ_{app} 值并绘出等值线图(图 5(b))。视应力 σ_{app} 值的相对高值区分布在川甘交界、川滇交界及川藏交界一带,而龙门山构造带,特别是其中南段为低值分布区,即可认定为弱活动区域。视应力 σ_{app} 值的这种空间分布图像呈现了汶川 8.0 级地震前 1~3 年的异常现象,即震中所在的断裂带及附近地区成为低应力分布区或弱活动地区,而外围地区则呈现相对高应力分布或中等地震活动地区。分析认为,给出的视应力 σ_{app} 值的这种异常空间分布图显示汶川 8.0 级地震前中短期发震构造附近呈现的闭锁现象。

3 结语

3.1 区域应力的扰动

区域应力场的长期稳定性与所处地球岩石圈结构、地块稳定运动或作用背景相联系。而区域应力场的变化,一般取决于动力源大小和方向的变化,也与地块间移动和转动引起相互作用力的改变有关。因此这并不排除“暂态”的区域应力扰动,如大震前后应力集中或松弛,应力重新分布造成的短期变化(程万正等,2006a)。

本文根据川青地块求出的大量小震震源机制解,给出地块平均应力场方位的时间变化。川青地块平均主应力场的方位在汶川 8.0 级前出现明显扰动。这与 GPS 资料揭示的地块位移场所显示的状态变化是一致的。同时,地块力轴张量的倾角变化也明显,即从水平向斜向作用力变化。这一现象与地块应力场方位出现较大的扰动现象的时间是一致的。

汶川 8.0 级地震前笔者提出川青地块、川中地块也出现了逆冲型地震增加的阵发性现象(程万正等,2006a)。继后,2006~2007 年川青块体逆冲型地震比例偏高。汶川 8.0 级地震前,区域中小地震震源错动类型发生变化,逆冲型地震显著增加。其增加的趋势说明原有

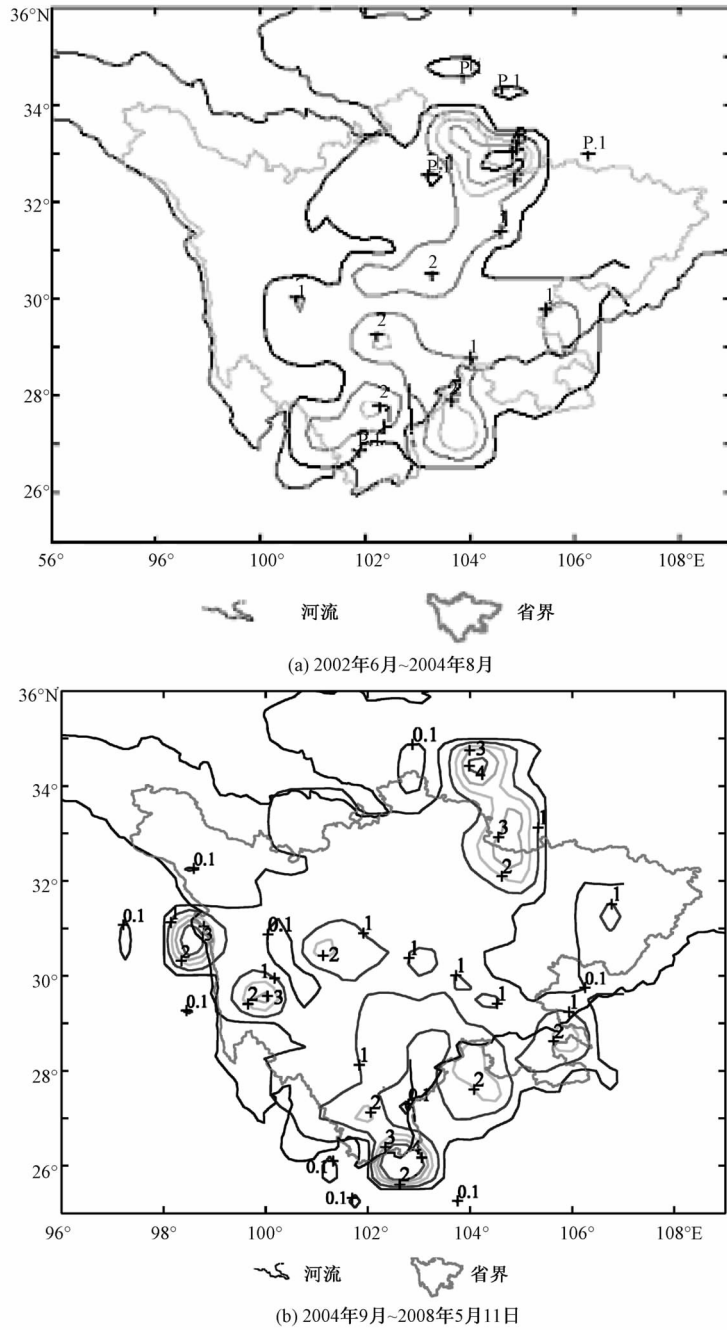


图5 四川地区视应力的等值线分布图

地块的微破裂机制发生了一定程度的变化。逆冲型微破裂类型增加可能预示地块应力水平的增加或改变,这与地块应力场的微动态分析结果所展示的变化是一致的,这也与GPS资料揭示的垂直龙门山断裂带的地壳缩短速度在1999~2001年低、2001~2004年高、2004~2007年减低的变化过程大体一致,故在一定程度上揭示区域应力扰动的存在。垂向龙门山断

裂带地壳缩短速度大,挤压程度亦大,产生逆冲型微破裂类型的可能性会增加。断裂两侧地块相对运动的速率的变化反映了大尺度的地壳运动与动力环境的变化。

触发地震的应力扰动只能引发地震应力的微小幅度变化(Rydelek et al,1999)。地震作为应力变化的标志,相对小的应力变化就能触发或抑止地震。虽然小地震对总的变形贡献很小,但它们的空间、时间分布对应力变化非常敏感,这提供了监测应力变化的独特的机会(Seeber et al,2000)。

3.2 区域视应力的分布

根据地震波形全波段计算的辐射能量,求得区域中小地震视应力 σ_{app} 值,以视应力值 σ_{app} 的拟合趋势线起伏形态,将其分为高视应力值时段与低视应力值时段。因为视应力值与动态破裂应力相关,即与震级正相关,故与区域地震活动性强弱有关。通过研究,揭示区域视应力值的微动态起伏过程与区域主压应力场方位等参数的扰动,有助于对地块蕴震物理过程的探究。

对汶川 8.0 级地震前的中期(1~3 年)视应力 σ_{app} 值的空间分布进行考察发现,震中所在的龙门山断裂带是低应力分布区,而相对高视应力分布在外围地区。这些图像可能显示汶川 8.0 级地震前中短期发震构造附近呈现的闭锁现象。

上述研究结果部分是在汶川 8.0 级地震前给出的,如发现川青地块逆冲型地震类型增加现象,高视应力 σ_{app} 值的空间分布区等。汶川 8.0 级地震后继续开展了这方面工作,对这些现象与未来大震的关系得到了更为清晰的认识。尽管如此,如何探索大区域的蕴震物理场状态,并用于中短期地震活动性分析,仍是今后有待深入研究的课题。

致谢:感谢中国地震局地球物理研究所陈学忠研究员、河北省地震局刁桂苓研究员的帮助。

参考文献

- 程万正、李桂芳、席敦礼,1990,马边地区地震动态应力场,四川地震,(3),26~31。
- 程万正、李桂芳、乔惠珍等,2002,四川汶川 5.7 级震群子序列的震源参数变化,中国地震,18(2),203~213。
- 程万正、刁桂苓、吕弋培等,2003a,川滇地块的震源力学机制、运动速率和活动方式,地震地质,25(1),71~86。
- 程万正、陈天长、魏娅玲等,2003b,2001 年四川雅江 6 级地震的前震与余震震源参数的变化,地震学报,25(4),351~360。
- 程万正、陈天长、乔惠珍,2003,荣昌 5.2 级地震序列的震源参数及震区应力状态,地震,23(3),79~88。
- 程万正、张永久、阮祥,2006a,川滇次级地块震源机制解类型与一致性参数,地震学报,28(6),561~573。
- 程万正、陈学忠、乔惠珍等,2006b,四川地震辐射能量和视应力的研究,地球物理学进展,21(3),692~699。
- 程万正、阮祥、张致伟,2009,汶川 8.0 级地震序列及震型判定,29(1),15~25。
- 成尔林、李桂芳、陈和川等,1982,1976 年四川省松潘—平武 7.2 级地震前后主压应力轴的方向特征,地震学报,4(2),15~19。
- 阚荣举、刘祖荫、王绍晋等,1983,龙陵地区大震前后平均应力轴取向的时间变化,地球物理学报,26(6),38~41。
- 胡新亮、刁桂苓、马瑾等,2004,利用数字地震记录的,振幅比资料测定小震震源机制解的可靠性分析,地震地质,26(2),347~353。
- 华祥文,1980,唐山强震前后北京、天津周围地区应力场的变化过程,地震学报,2(2),33~37。
- 江在森、方颖、武艳强等,2009,汶川 8.0 级地震前区域地壳运动与变形动态过程,地球物理学报,52(2),505~518。
- 梁尚鸿、李幼铭、束沛镒等,1984,利用区域地震台网、振幅比资料测定小震震源参数,地球物理学报,27(3),247~257。
- 马瑾、刘力强、马胜利等,1995,复杂构造应力扰动场与发震构造识别问题的研究,地震地质,7(4),372~382。
- 阮祥、程万正,2008,云南鲁甸 3 次 $M_s \geq 5.0$ 地震破裂参数的研究,地震学报,30(1),97~102。

- 万永革,2008,美国 Landers 地震和 Hector Mine 地震前震源机制与主震机制一致现象的研究,中国地震,24(3),216~225。
- 王绍晋、付虹、卫爱民等,2001,川滇地区 7 级大震前中强震震源机制变化,地震研究,24(2),88~108。
- 王凯英、马瑾、顾国华等,2003,1996 年川滇地区发生的一次应力转向事件,地学前缘,10(特刊),233~239。
- 许忠淮、刘玉芳、张郅珍,1979,京津唐张地区地震应力场的方向特征,地震学报,1(2),13~18。
- 钟继茂、程万正,2006,由多个地震震源机制解求川滇地区平均应力场,地震学报,28(4),337~346。
- 赵根模、褚宝龙、郭瑞芝,1984,宁河 6.9 级强震前小震主 = 应力轴取向的变化,地震学报,6(4),414~424。
- 张永久、彭立国、程万正,2006,马尔康地震序列震源参数研究,中国地震,22(1),85~93。
- 张永久、程万正,2007,用 P、S 波速度振幅比求小震机制解的可行性研究,中国地震,23(4),366~374。
- 张致伟、程万正、阮祥等,2009,汶川 8.0 级地震前龙门山断裂带的地震活动性和构造应力场特征,地震学报,31(2),117~127。
- Aki, K. 1966. Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964, estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from G wave spectrum, Bulletin of the Earthquake Research Institute, 44, 23~88.
- Chen, X. Z., Wang, X. P., Wang, L. Y., et al, 2003. possibility of earlier judgement on seismic tendency after strong earthquakes upon their apparent stresses, Recent Developments in World Seismology. Serial, 295(7), 1~5.
- Kanamori H. and Heaton T. H., 2001, Microscopic and macroscopic physics of earthquakes, GeoComplexity and the Physics of Earthquakes, 147~163.
- Kanamori H., 2001. Energy budget of earthquakes and seismic efficiency. Earthquake Thermodynamics and Phase Transformations in the Earth's Interior, 76, 293~305.
- Rydelek, P. A., and Sacks, I. S. 1999, Large earthquake occurrence affected by small stress changes, Bull Seism Soc Am. 89(3), 822~828.
- Snoke J. A., Munsey J. W., Teague A. C., et al. 1984, A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data, Earthquake Notes, 55(3), 121~128.
- Sadovsky, M. A. 1972, The processes preceding strong earthquakes in some regions of Middle Asian, Tectonophysics, 14(3/4), 116~125.
- Sadovsky M. A. Nersesov I L, 1974, Ferecasts of earthquakes on the basis of complex geophysical features, Tectonophysics, 23(3), 135~142.
- Seeber L, Armbruster J G., 2000, Earthquakes as beacons of stress change, Nature, 407, 69~72.
- Wyss, M. and Brune, J. N., 1968, Seismic moment, stress, and source dimensions for earthquakes in the California-Nevada region, J. Geophys. Res., 73, 4681~4694.
- Wyss, M., 1970a, Apparent stresses of earthquakes on ridges compared to apparent stresses of earthquakes in trenches. Geophys, J. R. astr. Soc., 19, 479~484.
- Wyss, M., 1970b, Stress estimates for South American shallow and deep earthquakes, J. Geophys. Res., 75(8), 1529~1544.

Research on regional stress field dynamics before the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake

Cheng Wanzheng Zhang Yongjiu Ruan Xiang Qiao Huizhen Zhang Zhiwei

Earthquake Prediction Institute, Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

Abstract This article uses the telemetry digital seismic waveform data from Chengdu and Kunming to study the focal mechanism solutions and the apparent stress values of a large number of small earthquakes, and analyzes the regional stress field dynamics and the spatio-temporal distribution of apparent stress values. The temporal variation of the average stress field azimuth in Sichuan-Qinghai block is given. The average principal stress field azimuth of Sichuan-Qinghai block had obvious disturbances before the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake. This may be related to status change of block stress field between the Sumatra $M_s9.0$ earthquake on December 26, 2004 in Indonesia and the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake in 2008. The ratio of thrust-type earthquake in the Sichuan-Qinghai block was high from 2006 to 2007. The variations of the earthquake dislocation type of regional moderate and small earthquakes before the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake are consistent with the state change of block displacement field revealed by GPS data, and also identical with analysis results of crustal shortening velocity change which is vertical to Longmenshan fault zone. The apparent stress value is determined on the basis of the whole band of the seismic waveform to calculate radiation energy. The fluctuation shape of the fitting trend of the apparent stress line is related to strong and weak of regional seismicity. It reveals that the micro-dynamic fluctuation process of regional stress value is similar to the azimuth transition of regional principal compressive stress field, which can be used to grope for pregnant physical process. The higher value areas of apparent stress are the possible areas of potential seismic risk. It can be seen from the spatial distribution of the medium-and short-term apparent stress before the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake that the Longmenshan fault zone is low stress distribution area, and the relatively high apparent stress is in peripheral area. These images may show the lock phenomenon near the medium and short Wenchuan $M_s8.0$ earthquake, for example, the focal parameter consistency of the sub-blocks in Sichuan and Yunnan Provinces changed with time, the thrust-type earthquakes in Sichuan-Qinghai block continually increased, the spatial distribution areas of the high apparent stress were discovered, and so on. The authors' continuous work in this aspect after the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake may further reveal the relationship between these phenomena and future great earthquake.

Key words: Regional stress field dynamics Apparent stress distribution The Wenchuan $M_s8.0$ earthquake Pregnant physical process