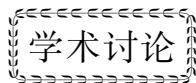


文章编号: 0253-3782(2007)04-0437-09



# 地震视应力在地震预测中的应用<sup>\*</sup>

刘红桂<sup>1,2,3),\*</sup> 王培玲<sup>4)</sup> 杨彩霞<sup>2)</sup> 徐 戈<sup>2)</sup>  
孙业军<sup>2)</sup> 陈章立<sup>3)</sup> 郑斯华<sup>3)</sup>

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国南京 210014 江苏省地震局

3) 中国北京 100036 中国地震局地震预测研究所

4) 中国西宁 810001 青海省地震局

**摘要** 选取 1999 年 7 月—2005 年 4 月云南省数字地震台网记录到的中小地震数字化波形资料, 在假设中小地震震源位移谱符合  $\omega^2$  模型的基础上, 利用震源位移谱低频水平与拐角频率计算得到了 1 020 次中小地震的视应力值。研究发现, 在云南地区, 地震视应力具有较好的预测意义, 中小地震的视应力值超过 0.9 MPa, 可以作为预测该地区未来可能发生中强地震的一个参考指标, 其相应的地震预报能力评分  $R$  值具有较高的置信度。

**关键词** 视应力 地震预报能力评分  $\omega^2$  模型 置信度

**中图分类号:** P315.75    **文献标识码:** A

## 引言

地震预测研究是以科学的观测为基础, 通过认识地震发生的规律及其本质来能动地进行地震三要素(时间、地点和震级)预测的探索过程。自 20 世纪 70 年代以来, 国内外许多地震学者从不同的学科与不同的时空尺度, 多方面地探索过预测中强地震的方法, 迄今已获得了许多重要的成果。20 世纪 80 年代以来, 随着数字地震学的发展, 地震视应力的研究取得了一些进展。Choy 和 Boatwright(1995)根据美国国家地震信息中心(NEIC)的宽频带辐射能量测定结果和哈佛矩心矩张量(CMT)测定结果, 讨论了全球地震视应力的分布, 得到全球地震视应力的平均值为 0.5 MPa。吴忠良等(2002)根据与 Choy 和 Boatwright(1995)类似的方法和资料来源计算了中国大陆地震的视应力分布, 发现中国大陆地震的视应力略高于全球平均水平, 而青藏高原东缘的视应力则比其邻近地区高一倍以上; 研究还发现地震视应力的水平与地震能量释放的总体水平有一定的相关性。Newman 和 Okal(1998)认为, 可以将地震视应力作为海啸地震的一个判据。Pulido 和 Irikura(2000)根据震源破裂过程的数字地震成像的结果, 通过地震能量和视应力的时间变化, 估计了决定地震

\* 国家自然科学基金项目(40574016)、地震联合基金项目(104047)、江苏省社会发展科技计划项目(BS2005069)联合资助。中国地震局地球物理研究所论著 07AC1016。

2006-12-07 收到初稿, 2007-04-20 决定采用修改稿。

◆ 通讯作者。e-mail: hgliu88@163.com

破裂性质的动力学参数。秦嘉政和钱晓东(2006)利用地面运动峰值速度与地震波能量之间的经验关系式,计算了云南地区2002年6月—2003年7月的中小地震视应力值,认为地震视应力可能具有预测地震危险性的意义。黄福明和易志刚(2000)利用地震能量、地震矩与震级的经验关系式,计算了中国M4.5以上地震的视应变值,发现在1~5 a左右的时间范围内,地震视应变异常区与强震事件发生地区存在着相当好的对应关系。刘红桂等(2006)通过研究云南地区4次地震序列中的中小地震视应力所表现出来的特征后,发现这4次地震序列的视应力均表现出了很好的前兆特征,即序列强余震( $M \geq 5.0$ )发生之前序列中会有视应力大于1.0 MPa的中小地震发生。这对于判断云南地区地震序列的发展趋势具有很好的意义。

本文利用数字化地震波形资料,计算了云南地区一段时间内中小地震的地震视应力值,通过分析研究,得到了一些有意义的结果。这些结果也许不仅对于提高云南地区中强地震的预测水平有所裨益,而且也许对于研究中国大陆中强地震的预测方法亦有所启示。

## 1 计算方法

一般而言,对于某个地震事件的第 $j$ 个台站记录,可以用下式表示:

$$A_j(f) = S(f)I_j(f)P_jE_j(f)G_j(f) \quad (1)$$

式中, $A_j(f)$ 为频率 $f$ 处的观测振幅谱, $S(f)$ 为地震事件的震源振幅谱, $I_j(f)$ 为台站的仪器响应, $P_j$ 为传播介质的几何扩散, $E_j(f)$ 为介质的非弹性衰减, $G_j(f)$ 为台站的场地响应。通过剔除台站场地响应、台站仪器响应以及介质的路径效应,即可得到相应的振幅谱。

Chael(1987)的研究表明,中小地震的震源位移谱很好地符合Brune的 $\omega^2$ 模型(Brune, 1970),而与 $\omega^3$ 模型偏差很大。根据Brune的 $\omega^2$ 模型,地震事件的震源位移振幅谱可由震源谱的低频水平 $\Omega_0$ 和拐角频率 $f_c$ 表示,即

$$S(f) = \frac{\Omega_0}{1 + (f/f_c)^2} \quad (2)$$

因此,中小地震的视应力值可以通过其震源位移谱低频水平 $\Omega_0$ 与拐角频率 $f_c$ 来计算。具体的数学表达式为(刘红桂等, 2006)

$$\sigma_{app} = \frac{2\mu R_{\phi}\Omega_0(\pi f_c)^3}{\beta^2} \quad (3)$$

式中, $\sigma_{app}$ 为地震视应力; $\beta$ 为S波速度,根据何正勤等(2004)对云南地区地壳中上部横波速度结构的研究结果,本文计算时取 $\beta = 3.5$  km/s; $\mu$ 为震源区介质剪切模量,实际计算时取 $\mu = 3.0 \times 10^4$  MPa(Choy, Boatwright, 1995); $R_{\phi}$ 为S波的辐射图型因子,实际计算时取 $R_{\phi} = \sqrt{2/5}$ (Andrews, 1986)。

各台站的场地响应、云南地区的介质路径效应均采用作者以前的结果(刘红桂等, 2006)。对于每一条地震记录,通过剔除台站的场地响应、介质的几何扩散效应以及介质的非弹性衰减后,即可得到其相应的校正位移谱。然后,计算每次地震的震源位移谱低频水平 $\Omega_0$ 和拐角频率 $f_c$ 。这两个参数的计算应该采用遗传算法来反演,这样可以显著地减少人为因素对计算结果的可靠性影响(Moya *et al.*, 2000)。最后根据式(3)计算中小地震的视应力值(刘红桂等, 2006)。

## 2 资料选取

本文选取 1999 年 7 月—2005 年 4 月云南省数字地震台网记录到的中小地震数字化波形资料, 地震波形数据的采样时间为 0.02 s。通过对数字化波形资料进行分析研究, 本文选取了 1 020 次中小地震。台站位置与各地震的震中分布见图 1。地震波形资料选取的原则是: 第一要求每一次地震至少有 3 个以上台站的波形记录; 第二要求每条地震波形记录均应具有较高的信噪比, 典型波形记录见图 2。计算中使用的数据是每条波形记录中的 S 波数据。图 3 为两次典型地震的震源位移谱拟合曲线。

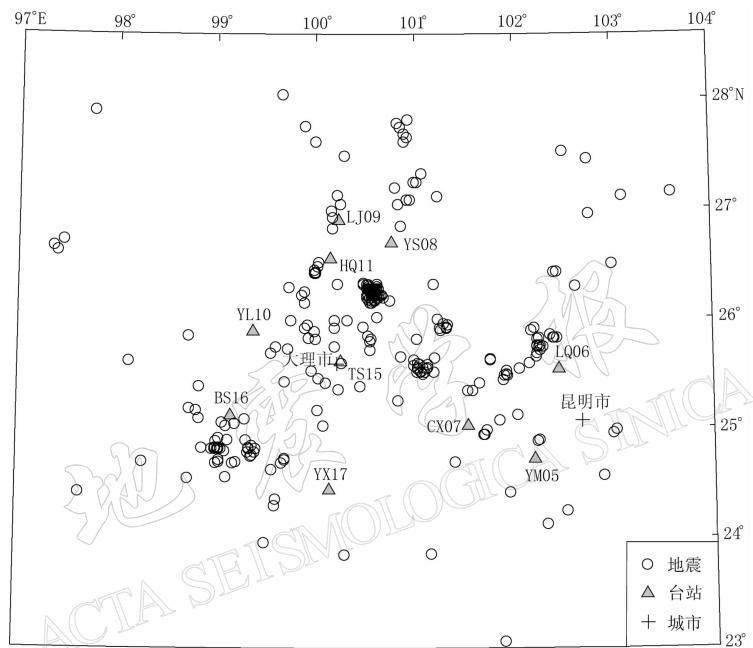


图 1 台站位置与地震震中分布

S 波数据的截取方法(Atkinson, Mereu, 1992): 为了保证所选取的资料包含剪切波所有重要的震相信息, 对于每一条速度记录, 选取资料时均以可辨识的首个 S 波到时为起点, 所取资料窗长应包括整个 S 波能量的 90%。为了获得稳定可靠的傅里叶谱估计, 计算时采用延迟窗技术(Chael, 1987), 把整个资料窗分成若干个小段, 每一小段数据为 256 个点, 并以 128 个点为滑动窗长, 在每段数据的两端加入 5% 边瓣的汉宁窗, 然后进行快速傅里叶变换。为了剔除噪声的影响, 取 P 波到时之前的 256 个数据点作为背景噪声信息, 同样在两端加入 5% 边瓣的汉宁窗, 并进行快速傅里叶变换, 在频域中由信号谱减去噪声谱从而得到 S 波的谱信息。对于每一条速度波形记录, 其每个分向(NS, EW, UD)的位移谱为(刘红桂等, 2004)

$$A_0(f) = \frac{1}{2\pi f} \left\{ \left[ \sum_i V_i^2(f) \right] T / (nt) \right\}^{1/2} \quad (4)$$

式中,  $A_0(f)$  为相应的位移谱,  $V_i(f)$  为某一分向资料的第  $i$  小段速度谱,  $T$  为资料窗长度,  $t$  为第  $i$  小段资料的长度,  $n$  为整个资料窗内小段资料的个数。

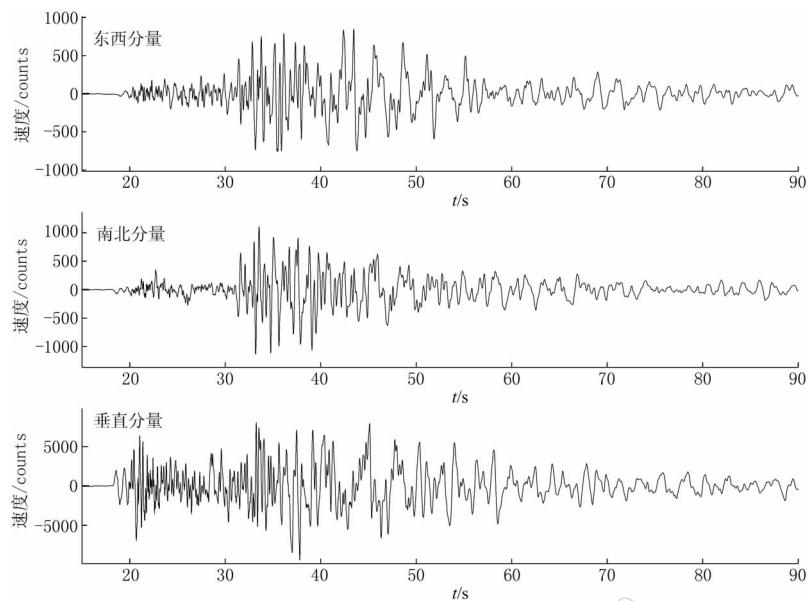


图 2 2003 年 7 月 22 日 8 时 9 分 38.1 秒  $M_L 4.3$  地震 YS08 台站速度记录  
(时间轴以发震时刻为起始点)

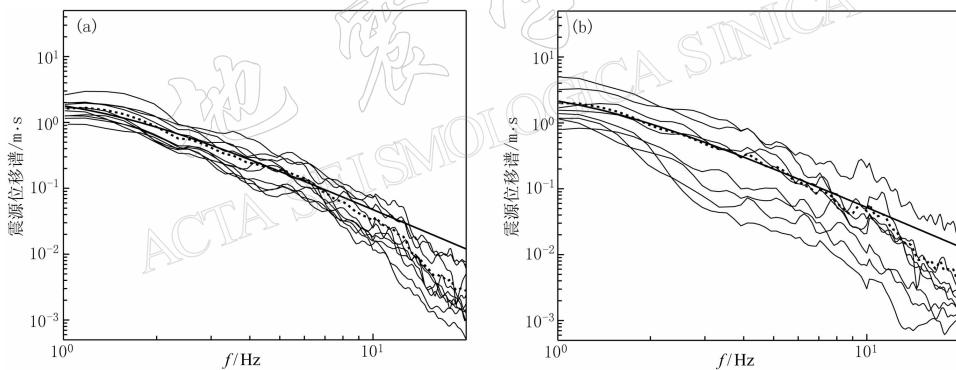


图 3 地震震源位移谱拟合曲线(图中细线为单台结果, 虚线为平均值, 粗实线为  $\omega^2$  模型理论曲线)

(a) 2000 年 1 月 15 日 8 时 20 分 15.6 秒  $M_L 4.7$  地震; (b) 2003 年 7 月 22 日 8 时 9 分 38.1 秒  $M_L 4.3$  地震

本文实际计算时采用水平向的位移谱(由 NS 向位移谱  $NS_j(f)$  及 EW 向位移谱  $EW_j(f)$  组成), 即式(1)中的观测位移谱应为

$$A_j(f) = \sqrt{(NS_j(f))^2 + (EW_j(f))^2} \quad (5)$$

### 3 计算结果

根据前述的计算方法, 本文得到了云南地区 1999 年 7 月—2005 年 4 月共 1 020 次中小地震的视应力值。由于篇幅有限, 各次地震的视应力值在此不具体列出, 可以参考图 4 的视应力图。

云南地区于 1999 年 7 月—2005 年 4 月共发生了 16 次中强地震(包括  $M \geq 5.0$  的强余震)。中小地震视应力值与中强地震的时间关系见图 4。从图 4 可以看出, 在云南地区, 视

应力值超过 0.9 MPa 的中小地震发生后, 该地区发生中强地震的可能性很大。为了更好地研究中小地震视应力值对未来可能发生的中强地震的时空特性的预测意义, 表 1 列出了视应力值超过 0.9 MPa 的中小地震与后续中强地震的震中间距与发震时间间隔。通过分析表 1 所列数据可以得到:

1) 在云南地区, 当视应力值超过 0.9 MPa 的中小地震发生后, 3 个月内发生中强地震(包括  $M \geq 5.0$  的强余震)的几率为 75%; 6 个月内发生中强地震(包括  $M \geq 5.0$  的强余震)的几率为 93.75%。

2) 在云南地区, 当视应力值超过 0.9 MPa 的中小地震发生后, 以该地震震中为中心, 半径 100 km 范围、3 个月内发生中强地震(包括  $M \geq 5.0$  的强余震)的几率为 37.5%; 半径 250 km 范围、6 个月内发生中强地震(包括  $M \geq 5.0$  的强余震)的几率为 62.5%。

表 1 云南地区视应力值超过 0.9 MPa 的中小地震与后续中强地震的震中间距与发震时间间隔

序号	视应力值超过 0.9 MPa 的中小地震			后续中强地震			震中间距 /km	后续中强地震 迟后时间
	年-月-日	时:分:秒	$M_L$	年-月-日	地点	震级 $M$		
1	1999-07-31	17:38:32.9	2.5	2000-01-15	姚安	5.9	188	5.5 月
2	2000-01-15	06:23:30.2	4.3	2000-01-15	姚安	6.5	11	1 小时
				2000-01-27	丘北弥勒	5.5	307	12 天
3	2000-06-08	20:21:10.2	5.0	2000-08-21	武定县	5.1	490	2.5 月
				2000-10-06	腾冲县	5.8	249	4 月
4	2001-01-05	01:41:15.1	3.2	2001-04-10	施甸	5.2	77	3 月
5	2001-04-10	10:50:17.8	4.1	2001-04-10	施甸	5.2	0	23 分钟
6	2001-04-11	08:52:26.2	3.7	2001-04-12	施甸—龙陵	5.9	4	1 天
7	2001-04-12	19:32:12.2	4.2	2001-05-24	宁南—盐源	5.8	358	1.4 月
				2001-06-08	施甸	5.3	2	2 月
				2001-07-10	楚雄	5.3	237	6 月
				2001-10-27	永胜—宾川	6.0	219	9.5 月
8	2001-04-14	08:59:24.1	4.3	2001-05-24	宁南—盐源	5.8	358	1.4 月
				2001-06-08	施甸	5.3	2	2 月
				2001-07-10	楚雄	5.3	237	6 月
				2001-10-27	永胜—宾川	6.0	219	9.5 月
9	2001-04-19	08:38:50.3	4.3	2001-05-24	宁南—盐源	5.8	358	1.4 月
				2001-06-08	施甸	5.3	2	2 月
				2001-07-10	楚雄	5.3	237	6 月
				2001-10-27	永胜—宾川	6.0	219	9.5 月
10	2001-04-28	09:01:07.3	4.0	2001-05-24	宁南—盐源	5.8	358	1.4 月
				2001-06-08	施甸	5.3	2	2 月
				2001-07-10	楚雄	5.3	237	6 月
				2001-10-27	永胜—宾川	6.0	219	9.5 月
11	2001-10-10	05:10:37.8	4.1	2001-10-27	永胜—宾川	6.0	221	0.6 月
12	2001-10-11	01:45:08.1	4.2	2001-10-27	永胜—宾川	6.0	219	0.6 月
13	2002-04-10	14:30:17.6	4.6	2003-07-21	大姚	6.2	216	15 月
14	2003-07-22	08:09:38.1	4.3	2003-10-16	大姚	6.1	10	2.8 月
				2003-11-15	昭通—鲁甸	5.1	277	3.8 月
15	2004-09-28	03:27:36.9	4.3	2004-10-19	保山	5.0	21	21 天
16	2005-01-07	23:50:07.9	4.8	2005-01-26	思茅	5.0	343	0.6 月

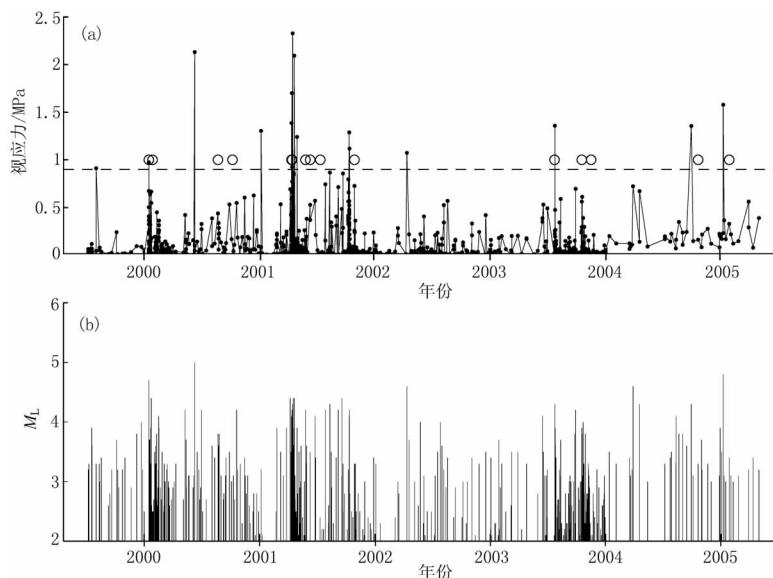


图 4 中小地震视应力值与中强地震时间关系图

(a) 中小地震视应力值, 小圆圈为中强地震发震时间; (b) 中小地震的震级-时间关系图

3) 在云南地区, 当视应力值超过 0.9 MPa 的中小地震发生后, 在距离该地震震中较远的地方(一般指超过 250 km)6 个月内发生中强地震的几率为 31.25%; 3 个月内发生中强地震的几率为 25%。

#### 4 预报效能检验

在地震前兆及其预报地震的物理基础尚不清楚的情况下, 对地震前兆及经验性预报方法必须进行严格的统计检验。为了衡量地震预测水平和检验地震预报效能, 目前多使用  $R$  评分的办法(许绍燮, 1989)来衡量地震预报的实际效能。对地震前兆预报方法和短期预报而言, 一般  $R$  值可用下述公式简述:

$$R = \frac{\text{报对的地震次数}}{\text{应预报的地震总次数}} - \frac{\text{预报占用时间}}{\text{预报研究时间}} \quad (6)$$

$R$  值表示为扣除了占时率的报准率, 即为扣除了随机概率的预报成功率。检验的另一个问题是要求对  $R$  值作出置信度的统计, 如预报实效次数少, 则必须有较大的  $R$  值才能保证有足够的信度。

从表 1 可以看出, 如果以视应力值超过 0.9 MPa 的中小地震的发生, 作为预测未来可能发生中强地震的指标, 那么, 从其时间预测意义来说, 当以 3 个月为预测时限时,  $R=0.707$ ; 当以 6 个月为预测时限时,  $R=0.852$ 。可见, 这个指标的  $R$  值明显大于相应的 97.5% 置信水平的  $R$  值, 说明所求得的  $R$  值具有相当高的置信度。由此可见, 在云南地区, 把中小地震的地震视应力值超过 0.9 MPa 作为一个预测指标, 来预测未来可能发生的中强地震的发震时间, 具有很好的中短乃至短临预测意义。

但是, 人们不仅关心未来可能发生的中强地震的发震时间, 而且更关心其发生的区域。根据表 1 的统计, 如果以 3 个月为预测时限, 以距离视应力值超过 0.9 MPa 的中小地

震震中 100 km 为预测区域界限, 则  $R=0.332$ ; 如果以 6 个月为预测时限, 以距离视应力值超过 0.9 MPa 的中小地震震中 250 km 为预测区域界限, 则  $R=0.539$ . 两种预测结果所得到的  $R$  值也明显大于相应的 97.5% 置信水平的  $R$  值, 说明所求得的  $R$  值同样具有相当高的置信度. 因此, 在云南地区, 把中小地震的地震视应力值超过 0.9 MPa 作为一个预测指标, 不仅对预测未来可能发生的中强地震的发震时间, 而且对预测未来可能发生的中强地震的发生区域均具有很好的预测意义.

## 5 讨论

地震视应力是对引起地震滑动平均应力水平的一种估计, 也是对当地绝对应力水平的一种估计. 苏生瑞等(2002)认为, 我国西部地区存在着两个不同级别的现代构造应力场: 一个是印度洋板块与欧亚板块碰撞作用而产生的大区域的一级应力场; 另一个是受大型走滑断裂活动的影响所产生的二级应力场. 很显然, 二级应力场来源于两大板块碰撞所产生的二级应力场. 这两个级次的应力场在我国西部地区局部地段有它们的一致性, 如滇西南川滇断块的西侧外围地区, 但更多的地区二者之间则表现出不一致性. 总的来说, 我国西部地区特别是云南地区的应力场是复杂多变的. 引起地应力场复杂多变的因素很多, 其中活动断层的作用是其中最主要的因素之一. 活动断层实际上就是现今地应力场中应力集中程度较高的断裂带, 同时它的持续活动又将导致其附近地区应力进一步重新分布, 所以在活断层或活动断块的特定部位, 往往形成很高的局部构造应力集中区. 郭增建和秦保燕(1991)指出, 在区域应力场的作用下, 那些整体强度相对低的介质即应力调整单元将先发生蠕滑、塑性变形、流体运移和中小地震. 这样, 在中强地震发生之前, 调整单元会首先出现前兆, 这就是所谓的区域场前兆. 当接近临震时, 粘滑断层段应力积累单元产生预滑, 以及处于局部构造应力集中区的断层可能会产生闭锁, 被锁住的断层在发震前也可能伴有预滑, 从而出现震源场前兆. 在预滑发生时, 在一些局部地区可能出现凹凸体破坏而发生前震. 对于完整脆性介质作为应力积累单元的情况, 在临震时, 由于预滑的剪应力很大, 因之变形也相应增大. 由于剪切面上某些地方强度不均匀, 则可能会出现小破坏而形成前震. 在积累单元端部, 因有应力集中, 也可能出现前震. 张国民等(1993)设计的一个数值计算模型显示, 某些高应力集中区的应力释放后, 会引起应力的快速调整并使其它地区的应力水平快速增长而发生地震, 使得发生地震的震源区没有(应力)前兆出现, 即出现无异常有地震的情形. 云南地区发生地震视应力值超过 0.9 MPa 的中小地震, 其实就是应力场前兆异常的表现. 在云南地区, 发生地震视应力值超过 0.9 MPa 的中小地震, 有些是区域场前兆的表现, 有些是震源场前兆的表现. 那些具有区域场前兆性质的中小地震发生后, 云南地区的区域构造应力场快速调整, 因此在远离该地震震中的其它地区发生了中强地震(譬如本文计算结果中的第三种情况). 这一现象可以从张国民等(1993)的计算结论得到解释. 那些具有震源场前兆性质的中小地震, 实际上也就是一种前震, 是高构造应力集中区产生预滑的结果(譬如本文计算结果中的第一、第二种情况). 郭增建和秦保燕(1991)的组合模式理论可以解释这一现象.

刘红桂等(2006)在研究云南地区地震序列的视应力前兆特征时, 认为发生视应力值超过 1.0 MPa 的中小地震, 可以作为判断该地区地震序列是否可能发生强余震的一个标志. 秦嘉政和钱晓东(2006)利用地面运动峰值速度与地震波能量之间的关系式, 计算了云南地

区 2002 年 6 月—2003 年 7 月的中小地震视应力值, 发现高视应力集中区主要分布在 2003 年 7 月 21 日和 10 月 16 日大姚地区 M6.2 和 M6.1 级两次破坏性强震的周边地区, 其余地区则显示出较低的视应力水平。同时, 发现这两次强震之前云南地区出现了高视应力的变化时段。他们认为, 视应力在空间分布上存在着明显的非均匀性, 高视应力集中区与中小地震活动频繁地区相关。本文的结果与上述的这些研究结论均是吻合的。“十五”期间, 我国有关专家在研究了西南地区的地震活动性特征后, 提出用“显著地震”来进行地震危险性预测(中国地震局监测预报司, 2005)。其提出的“显著地震”的定义是指一定范围(通常 200~500 km)内、短期(通常 1~2 周到 1~2 个月)内发生的相对于当时某一地区地震活动水平能引起地震预报人员注意的小震群、地震序列或 4~5 级地震。文章清理并总结了“显著地震”活动对川滇地区中强地震短期预测的规则。但是, 在实际地震活动观测中, 引起人们注意的中小地震活动是很多的, 也是经常有的, 特别是在川滇地区。但如何识别显著地震活动显然是应用于地震预测的关键。结合前人的研究及本文的结果, 我们也可以把视应力值超过 0.9 MPa 的中小地震定义为显著地震。这种定义不仅可以揭示地震视应力在中强地震孕育过程中所蕴涵的预测信息, 从而量化地震视应力在中强地震短期预测中的识别标准, 而且相对于前人所提出的“显著地震”而言, 更加便于识别和具有可操作性。

## 6 结论

- 1) 在云南地区, 可以把中小地震的地震视应力值大于 0.9 MPa 作为预测未来可能发生中强地震的一个预测指标。
- 2) 在云南地区, 利用视应力这个指标来预测未来可能发生的中强地震时, 可以视应力值大于 0.9 MPa 的中小地震震中 100 km 范围为危险区的区域界限, 相应的等待时间为 3 个月; 以视应力值大于 0.9 MPa 的中小地震震中 250 km 范围为危险区的区域界限, 其等待时间为 6 个月。
- 3) 在云南地区, 视应力值大于 0.9 MPa 的中小地震出现后, 未来可能发生的中强地震也可能会在该中小地震震中 250 km 以外的其它地方发生。

云南省地震局苏有锦博士提供了云南省地震台网记录到的数字波形资料, 在此谨表谢意!

## 参 考 文 献

- 郭增建, 秦保燕. 1991. 地震成因和地震预报[M]. 北京: 地震出版社; 46-80.
- 何正勤, 叶太兰, 苏伟. 2004. 云南地区地壳中上部横波速度结构研究[J]. 地球物理学报, 47(5): 838-844.
- 黄福明, 易志刚. 2000. 地震视应变场的演化与强震发生地区的关系[J]. 地震学报, 22(6): 577-587.
- 刘红桂, 缪发军, 吴晶. 2004. 场地响应、震源参数与介质衰减的同时反演[J]. 地震, 24(4): 27-36.
- 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[J]. 地震学报, 28(5): 462-471.
- 秦嘉政, 钱晓东. 2006. 云南地区地震视应力的时间和空间分布研究[J]. 地震学报, 28(3): 221-229.
- 苏生瑞, 黄润秋, 王士天. 2002. 断裂构造对地应力场的影响及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社; 33-52.
- 吴忠良, 黄静, 林碧苍. 2002. 中国西部地震视应力的空间分布[J]. 地震学报, 24(3): 293-301.
- 许绍燮. 1989. 地震预报能力评分[G]//国家地震局科技监测司编. 地震预报方法实用化研究论文集. 北京: 学术期刊出版社; 586-590.
- 张国民, 耿鲁明, 石耀霖. 1993. 中国大陆强震轮回活动的计算机模型研究[J]. 中国地震, 9(1): 20-32.

- 中国地震局监测预报司. 2005. 西南地区强地震短期前兆特征和预测方法研究[M]. 北京: 地震出版社: 33-35.
- Andrews D J. 1986. Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size[J]. *Geophysical Monographs*, **37**(6): 259-267.
- Atkinson G M, Mereu R F. 1992. The shape of ground motion attenuation curves in southeastern Canada[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **82**(5): 2 014-2 031.
- Brune J N. 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake[J]. *J Geophys Res*, **75**: 4 997-5 009.
- Chael E P. 1987. Spectral scaling of earthquakes in the Miramichi region of New Brunswick[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **77**: 347-365.
- Choy G L, Boatwright J L. 1995. Global patterns of radiated seismic energy and apparent stress[J]. *J Geophys Res*, **100**: 18 205-18 228.
- 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.
- Newman A V, Okal E A. 1998. Teleseismic estimates of radiated seismic energy: The  $E/M_0$  discriminant for Tsunami earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **103**: 26 885-26 898.
- Pulido N, Irikura K. 2000. Estimation of dynamic rupture parameters from the radiated seismic energy and apparent stress[J]. *Geophys Res Lett*, **27**: 3 945-3 948.

## APPLICATION OF APPARENT STRESS IN EARTHQUAKE PREDICTION

Liu Honggui<sup>1,2,3)</sup> Wang Peiling<sup>4)</sup> Yang Caixia<sup>2)</sup> Xu Ge<sup>2)</sup>  
Sun Yejun<sup>2)</sup> Chen Zhangli<sup>3)</sup> Zheng Sihua<sup>3)</sup>

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China

3) Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

4) Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining 810001, China

**Abstract:** On the basis of the assumption that  $\omega^2$  model accords with source displacement spectra of moderate-small shocks, we calculate the apparent stress values of 1 020 moderate-small shocks recorded by the Digital Seismic Network of Yunnan Province by using the low-frequency flat level and corner frequencies. The results show that the apparent stress is of good significance in earthquake prediction. The moderate-small shock with apparent stress larger than 0.9 MPa can be used as a referential index to predict moderate-strong earthquakes in Yunnan area. And its relevant predictability evaluation ( $R$  value) has a high confidence level.

**Key words:** apparent stress; predictability evaluation;  $\omega^2$  model; confidence level