

杨明芝、马禾青, 2011, 汶川 8.0 级地震前龙门山断裂带能量场变化, 27(3), 260~267。

汶川 8.0 级地震前龙门山断裂带 能量场变化

杨明芝 马禾青

宁夏回族自治区地震局, 银川市北京东路 244 号 750001

摘要 在大地震的孕育和发生过程中, 沿断裂带的应力-应变状态与断裂带周围微震活动有着密切的关系。震前沿构造断裂带附近地震活动的能量释放更能反映地震孕育的动态过程。本文采用自然正交函数展开方法, 讨论了 2008 年汶川 8.0 级地震前沿龙门山断裂带地震活动能量场的时间变化。结果表明, 在汶川 8.0 级地震前, 沿龙门山断裂带能量场的几个主要特征值对应的典型场的时间因子出现非常明显的短期上升变化, 可能是该次地震短期异常信息。通过对比分析 1976 年唐山地震等震例认为, 研究沿活动断裂带地震活动能量场的时间变化, 可以对地震中长期判断有较大危险性的活动断裂区进行有目的的重点监测和预测。

关键词: 龙门山断裂带 能量场 自然正交函数展开 时间因子异常 汶川 8.0 级地震
[文章编号] 1001-4683(2011)03-0260-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地震的孕育和发生是震源附近区域能量的积累和释放的过程。关于地震孕育过程的能量积累(滕春凯等, 1991)、地壳应变能量积累率的分布(荆燕等, 2009)、地震波辐射能量的定量计算(秦嘉政等, 2002)、地震释放能量与区域应力场的依赖性(陈培善等, 1993)、能量聚集与地震前兆场的关系(郑熙铭等, 1998)等方面已经开展了一定的工作。地震释放能量是地震活动的基本要素, 不但反映了一个区域地震活动的强弱, 而且也可能在一定程度上包含有大地震孕育过程的变化信息。研究地震活动能量的时、空变化特点, 是研究地震活动规律、探索地震预测方法的一个重要方面。

在气候统计方法中, 常采用正交函数簇(例如切比雪夫多项式、勒让德多项式等)展开方法, 分析气象场的基本结构特征及其变化的统计规律(马开玉等, 1993), 而计算机技术广泛应用以后, 更多地采用基于矩阵分解理论的自然正交函数展开来研究气象要素场。作者 2004 年曾首次将此方法用于宁夏地区的地震活动研究(杨明芝等, 2004)。罗国富等(2005)采用同样的方法研究了云南地区地震活动能量场的时空分布特征。2008 年汶川发生 8.0 级大地震, 作者引用自然正交函数(或称经验正交函数)展开方法, 通过对震中周围一个矩形区域网格化的方法, 分析了汶川 8.0 级地震前地震活动能量场的变化^①。结果表明, 在汶川 8.0 级地震前能量场的几个主要特征值对应的特征向量(典型场)的时间权重因

[收稿日期] 2011-01-04

[作者简介] 杨明芝, 男, 1944 年生, 研究员, 主要从事地震预测研究

子出现非常突出的上升或下降异常变化,可能是汶川 8.0 级地震的前兆信息。

将地震活动释放能量看作随机场,用正交函数展开方法,分解为一系列典型场的叠加,这些典型场是由地震活动能量要素场本身的相关特征所确定,它们反映了能量要素场的基本结构特征。从物理意义上,不同典型场分别代表不同类型的能量距平分布(取能量距平资料作为能量要素场)。通过研究主要典型场的时间变化来提取大震前的变化信息,作者认为是一种值得进一步探讨的地震活动性预测方法。

在大地震的孕育和发生过程中,沿断裂带的应变积累和应力发生变化。断裂带的应力-应变状态与断裂带周围微震活动有密切关系,从而引起断裂带一些特殊部位微震活动分布和状态发生变化,即沿断裂带地震释放能量的大小和空间分布也会发生改变,导致能量场本身的结构变化。因此,震前沿构造断裂带附近的地震活动(能量释放)更能反映地震孕育的动态过程。本文在以往工作的基础上,沿龙门山断裂带选取若干能量观测网格,应用自然正交函数展开方法,分析断裂带上网格区域的地震能量动态变化,探讨汶川 8.0 级地震前龙门山断裂带地震能量场的变化特征,寻找可能的地震前兆信息。

1 龙门山断裂带及地震活动

汶川 8.0 级地震发生在龙门山逆冲推覆断裂带上。由于青藏高原向东推挤和四川盆地的阻挡作用,川西高原发生长期缓慢变形,积累应变。龙门山断裂带由于受到刚性的四川盆地的阻挡,是应力、应变的积累区,即孕震的闭锁单元。断裂带活动与微震的分布有着密切的关系。由于闭锁区周围应力高度集中,沿构造断裂带附近地震能量释放可能包含有大地震孕育过程的变化信息。图 1 是汶川 8.0 级地震前震中周围区域地震能量分布情况。图中显示,自 1970 年 1 月有台网观测至 1994 年 12 月,地震能量在龙门山断裂带西侧、鲜水河断裂带和岷江断裂带附近形成高释放带或局部高能量释放区(图 1(a))。但是 1995 年 1 月以后,这种能量分布图像发生变化。除在岷江断裂带附近存在局部高能量释放区外,沿整个龙门山断裂带周围地震活动出现了 10 余年的相对平静状态,能量释放水平较低(图 1(b))。

2 典型场时间因子的变化

为了研究汶川 8.0 级地震前沿断裂带构造能量场的变化,选取沿龙门山断裂带 8 个能量场的观测网格(图 2),网格取 $1.0^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。可以认为每一个网格相当于一个能量观测点,其网格中心坐标列于表 1。

表 1 汶川 8.0 级地震能量观测网格中心坐标

网格编号	1	2	3	4	5	6	7	8
经度($^{\circ}$ E)	101.6	102.3	102.9	103.5	104.1	104.8	105.5	106.2
纬度($^{\circ}$ N)	29.5	30.0	30.5	31.0	31.5	32.0	32.5	33.0

使用中国地震台网中心提供的 china2 地震目录资料,资料时段取 1995 年 1 月 ~ 2008 年 3 月,震级范围取 $M_L = 2.8 \sim 5.4$,应用自然正交函数展开方法对网格区域地震观测资料进行能量分析。具体计算步骤是:

将网格一定时间间隔(取 $\Delta t = 1/4$ 年)的地震能量作为观测值,于是 n 个网格点的 m 个

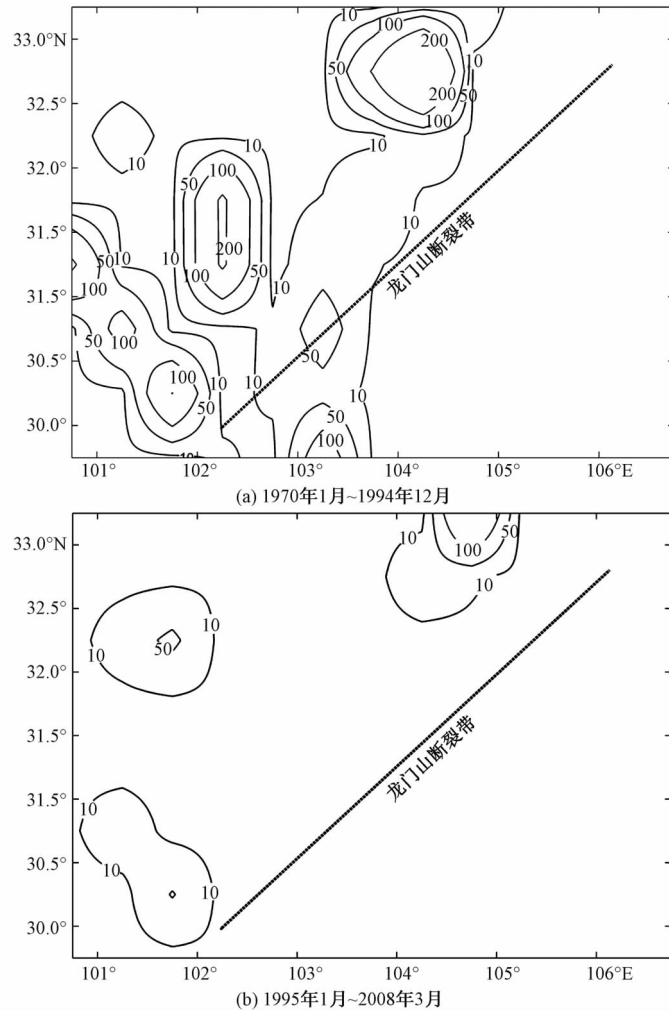


图 1 能量等值线图(图中数字为能量(×10¹⁰J))

时间段观测到的地震能量用矩阵表示

$$F = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & \Lambda & F_{1n} \\ F_{21} & F_{22} & \Lambda & F_{2n} \\ \Lambda & & & \\ F_{m1} & F_{m2} & \Lambda & F_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 F_{ij} 表示地震能量在第 i 个网格($i=1,2,\Lambda,n$)的第 j 个时间段($j=1,2,\Lambda,m$)的观测值或距平值(在研究地震预测问题中,为了突出场的变化部分, F_{ij} 取能量距平值)。把 F_{ij} 分解成正交的空间函数与正交的时间函数乘积之和,即

$$F_{ij} = \sum_{k=1}^n X_{ik} T_{kj} \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \Lambda, m \\ j = 1, 2, \Lambda, n \end{matrix} \quad (2)$$

式中 X_{ik} 是空间函数,不随时间变化; T_{kj} 为时间函数,不随空间而变化。将(2)式表示为矩阵

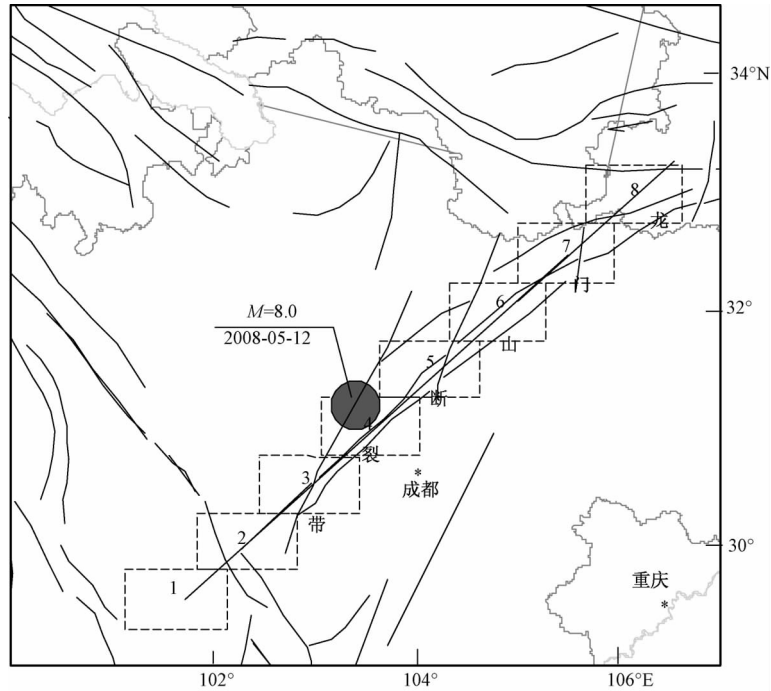


图2 汶川 8.0 级地震震中周围断裂带构造及地震能量观测网格

形式,即 $F = TX$ 。通过求解协方差矩阵 $R = F'F$,得到矩阵 R 的特征值 $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 和相应的特征向量(或称典型场) $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。而

$$T_i = FX_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

T_i 为第 i 个特征向量的时间因子(权重系数)。矩阵 R 是对称矩阵,所有特征值为正实数。将特征值按从大到小顺序排列,较大的特征值所对应的特征向量 X_i (以下称主要典型场)在原始场 F 中占有较大的比例。当取前 l 个特征值所对应的典型场拟合能量场时,拟合精度为

$$r = \sum_{p=1}^l \lambda_p / \sum_{p=1}^n \lambda_p$$

时间因子反映了典型场的时间变化,以下重点研究其变化特征。对图 2 给定的网格区域的地震活动能量进行展开计算,原始场 F 分解为 8 个正交的典型场,表 2 给出前 3 个典型场对应的特征值,表 3 为前 3 个典型场的数值。取前 3 个典型场时,展开精度为 0.9997,已经能相当精确地描述能量场的特性,而其中第一个典型场所占比例为 99.15%,它与原始场具有最大的相似性。

时间因子反映了典型场的时间变化。表 4 是前 3 个典型场时间因子的计算结果,图 3 是这 3 个时间因子的变化曲线。由表 4 和图 3 可以看出,时间因子在一般情况下保持在基值附近,说明沿断裂带附近地震活动较平稳。但在汶川 8.0 级地震前,第 1、第 2 个典

表 2 龙门山断裂带地震能量场特征值及拟合精度

拟合精度 γ (%)	前 3 个典型场的特征值 $\lambda_i (\times 10^{23})$		
	1	2	3
99.97	2.0243	0.0067	0.0056

型场的时间因子 T_1 、 T_2 于 2008 年 1~3 月出现突升变化, 分别达到 4.4311×10^{11} 和 4.3188×10^{10} 的高值; 第 3 个典型场的时间因子在震前 2007 年 1~3 月突升至 1.9014×10^{10} 的高值, 然后 2007 年 7~9 月再次出现 1.2684×10^{10} 的高值变化。

汶川 8.0 级地震前, 能量场前 3 个主要典型场的时间因子发生显著的异常变化, 其特点表现为, 时间因子自 1995 年以来长期维持在基值附近小幅摆动, 而临震前几个月出

表 3 1995 年 1 月~2008 年 3 月龙门山断裂带地震活动能量场的前 3 个典型场

网格编号	X_1	X_2	X_3
1	-0.0969	-0.0179	-0.0158
2	-0.9952	-0.0044	0.0028
3	0.0012	-0.0466	-0.0660
4	-0.0074	-0.0347	-0.0114
5	-0.0063	0.9968	0.0480
6	0.0016	-0.0518	0.9965
7	0.0000	-0.0000	0.0000
8	0.0001	-0.0021	-0.0020

表 4 前 3 个典型场的时间因子

时间	$T_1 (\times 10^{11})$	$T_2 (\times 10^{10})$	$T_3 (\times 10^{10})$	时间	$T_1 (\times 10^{11})$	$T_2 (\times 10^{10})$	$T_3 (\times 10^{10})$
1995 年 01~03 月	-0.0880	-0.1066	-0.0829	2001 年 10~12 月	-0.0873	-0.0733	-0.0810
1995 年 04~06 月	-0.0891	-0.1066	0.0030	2002 年 01~03 月	-0.0789	-0.1066	-0.0825
1995 年 07~09 月	-0.0880	-0.1066	-0.0417	2002 年 04~06 月	-0.0917	-0.1066	-0.0718
1995 年 10~12 月	-0.0890	-0.1066	-0.0827	2002 年 07~09 月	-0.0686	-0.1066	-0.0637
1996 年 01~03 月	-0.0873	-0.1066	-0.0821	2002 年 10~12 月	-0.0879	-0.1066	-0.0885
1996 年 04~06 月	-0.0876	-0.1066	-0.0831	2003 年 01~03 月	-0.0890	-0.0982	-0.0524
1996 年 07~09 月	-0.0892	-0.1066	-0.0631	2003 年 04~06 月	-0.0881	-0.1066	-0.0816
1996 年 10~12 月	-0.0863	-0.1066	-0.0823	2003 年 07~09 月	-0.0880	-0.0798	-0.0836
1997 年 01~03 月	-0.0890	-0.0882	-0.0827	2003 年 10~12 月	-0.0866	0.2179	-0.0815
1997 年 04~06 月	-0.0875	-0.1066	0.0435	2004 年 01~03 月	-0.0608	-0.0942	-0.0625
1997 年 07~09 月	-0.0871	-0.0665	-0.0810	2004 年 04~06 月	-0.0895	-0.0758	-0.0753
1997 年 10~12 月	-0.0890	-0.1066	-0.0812	2004 年 07~09 月	-0.0904	-0.0882	0.2608
1998 年 01~03 月	-0.0878	-0.1066	-0.0788	2004 年 10~12 月	-0.0832	-0.1066	-0.0846
1998 年 04~06 月	-0.0890	-0.0794	-0.0822	2005 年 01~03 月	-0.0889	-0.1066	-0.0830
1998 年 07~09 月	-0.0902	-0.1066	-0.0140	2005 年 04~06 月	-0.0567	0.0314	-0.0820
1998 年 10~12 月	-0.0660	-0.0942	-0.0429	2005 年 07~09 月	-0.0833	-0.0794	-0.0839
1999 年 01~03 月	-0.0892	-0.0882	-0.0807	2005 年 10~12 月	-0.0892	0.0538	-0.0812
1999 年 04~06 月	-0.0889	-0.0942	-0.0829	2006 年 01~03 月	-0.0831	-0.0614	-0.0826
1999 年 07~09 月	-0.0871	-0.1066	-0.0803	2006 年 04~06 月	-0.0889	-0.1066	-0.0829
1999 年 10~12 月	-0.0890	-0.0982	-0.0573	2006 年 07~09 月	-0.0895	-0.0982	-0.0758
2000 年 01~03 月	-0.0890	-0.1066	-0.0824	2006 年 10~12 月	-0.0810	-0.1066	-0.0788
2000 年 04~06 月	-0.0849	-0.1066	-0.0825	2007 年 01~03 月	-0.0894	-0.1066	1.9014√
2000 年 07~09 月	-0.0890	-0.1066	-0.0825	2007 年 04~06 月	-0.0891	-0.0698	-0.0821
2000 年 10~12 月	-0.0790	-0.0982	-0.0812	2007 年 07~09 月	-0.0748	-0.1066	1.2684√
2001 年 01~03 月	-0.0889	0.0588	-0.0825	2007 年 10~12 月	-0.0890	-0.0898	-0.0826
2001 年 04~06 月	-0.0890	-0.0794	-0.0827	2008 年 01~03 月	4.4311√	4.3188√	0.0692
2001 年 07~09 月	-0.0743	-0.1066	-0.0470				

注:√表示异常点

现大幅度单点式上升变化, 可能与汶川 8.0 级地震有关。实际上, 展开的 8 个典型场的时间因子在震前均不同程度地出现异常上升或下降变化(限于篇幅没有给出), 说明能量场展开是一种能够提取震前断裂带周围地震活动异常信息的有效分析方法。

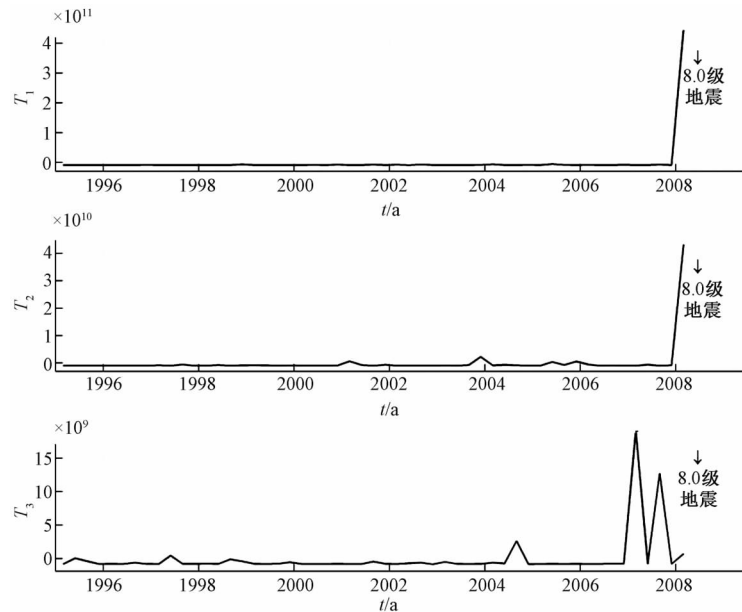


图3 汶川 8.0 级地震前沿龙门山断裂带能量场前 3 个典型场时间因子的变化曲线
(1995 年 1 月 ~ 2008 年 3 月, $2.8 \leq M_L \leq 5.4$)

3 讨论

(1) 自然正交函数展开不是用事先给定的正交函数簇去逼近能量场,而是根据实际地震能量观测资料本身的结构来确定基函数的形式,故能更好地反映地震能量场的基本结构特征,而每一个典型场(特征向量)代表了不同类型的能量距平分布图像(取能量距平资料作为能量要素场),更具有反映地震活动的意义。由于自然正交函数展开收敛快,将地震能量分解为自然正交分量之和的意义就在于从大量的观测资料中按相关矩阵的特征值大小,依次把具有大变率的典型场挑选出来,重点研究几个主要典型场的特征,寻找与大地震关系显著的异常变化。

(2) 本文应用自然正交函数展开方法,研究了汶川 8.0 级地震前沿龙门山断裂带附近地震活动能量场的变化。结果表明,在汶川 8.0 级地震前,沿龙门山断裂带地震能量场前 3 个主要典型场的时间因子(或权重系数)大约在震前 3 ~ 5 个月出现明显的异常突升或突降变化,表现出突出的短期异常特征。异常具有两个明显特点:①时间因子异常变幅大,形态尖锐突出;②震前多个主要典型场共同出现异常。这些异常变化可能是汶川 8.0 级地震的短期前兆信息,说明断裂带附近地震活动状态确实发生了变化,而这种活动状态的变化仅仅通过常规分析则不易觉察,但通过能量场分析可将不易觉察的变化信息提取出来,这样做十分有意义。

我们曾在以往工作中(杨明芝等,2011)选取了一个矩形区域范围进行网格化,应用自然正交函数展开方法,研究了汶川 8.0 级地震前区域地震活动能量场问题。但自然正交函数展开并不要求所描述的空间场的各观测点(本问题中的网格)分布一定规则均匀,这为研

究沿断裂带地震活动能量场提供了方便。我们可以根据区域构造特点,选择合适的观测网格密度和网格布局,使其尽可能反映地震构造活动的主要特征。从地震预测的角度出发,由于沿活动断裂带地震活动分布和状态变化更敏感,沿断裂带选取研究区域范围,可能更能反映地震孕育的变化信息。因此,从震情监视的角度考虑,研究沿断裂带附近区域能量场,更有利于短期震情跟踪,可以对中长期有较大危险性的活动断裂区域进行有目的的重点监测和预测。

(3)作者对我国发生的几次7级以上大地震的能量场作了分析,发现能量场时间因子在震前均有明显异常变化。例如1976年唐山7.8级地震前,震中周围区域或沿唐山地震发震构造的能量场时间因子也出现类似汶川8.0级地震前的异常情况。图4是沿唐山地震发震构造走向方向等间隔选取的7个能量观测网格点(表5),按时间间隔 $\Delta t = 1/4$ 年,进行正交函数展开的前3个典型场时间因子的变化曲线。这3个典型场的叠加占总场的99.95%(其中第1个典型场约占总场的60.5%,第2个典型场约占总场的38.5%,第3个典型场约占总场的0.95%),足以反映能量场的主要特征。由图4看出,震前的异常变化是很明显的。第1个典型场的时间因子在1974年10~12月出现突升变化;第2个典型场和第3个典型场的时间因子在震前1~3个月,即1976年4~6月出现突升变化。

表5 唐山地震能量观测网格中心坐标

网格编号	1	2	3	4	5	6	7
经度(°E)	116.4	117.1	117.9	118.7	119.5	120.4	121.2
纬度(°N)	38.4	38.9	39.4	39.9	40.4	40.9	41.4

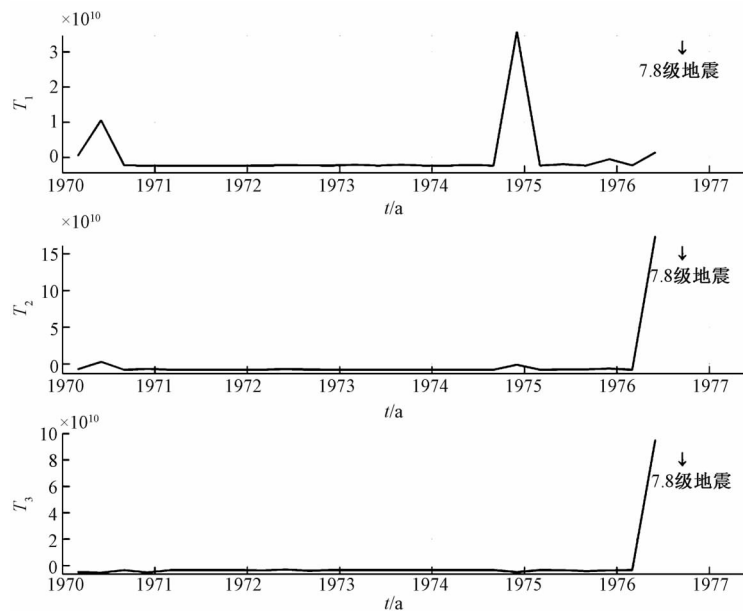


图4 1976年唐山7.8级前3个典型场时间因子变化曲线
(1970年1月~1976年6月, $2.8 \leq M_L \leq 5.4$)

另外,几次地震前时间因子异常均表现为多个主要典型场共同出现的特点。由于地震活动是随机发生的,在一些无震地区进行能量场分析,也会发现个别典型场时间因子出现突

跳变化,但这种变化并不具有多场共同出现的特征,与汶川 8.0 级或唐山 7.8 级地震前的异常变化完全不同。

因此,作者认为应用自然正交函数展开方法提取大震前的地震活动异常信息有一定效果。

参考文献

- 陈培善、S J Duda,1993,地震辐射能对环境应力场的依赖性,地震学报,15(2),146~152。
荆燕、李宏、熊玉珍等,2009,利用地震矩张量与 GPS 资料推算中国大陆现今地壳运动能量分布特征,高校地质学报,15(1),108~114。
罗国富、杨明芝,2005,云南地区地震活动能量场的时空分布特征,中国地震,21(3),332~340。
马开玉、丁裕国、屠其璞等,1993,气候统计原理与方法,277~288,北京:气象出版社。
秦嘉政、钱晓东、叶建庆等,2002,用峰值速度估算姚安地震序列的地震能量,地震学报,24(1),98~102。
滕春凯、白武明、王新华,1991,流变介质中亚临界扩展前地震孕育过程的能量积累,地球物理学报,13(1),32~41。
杨明芝、赵卫明,2004,宁夏及邻近地区地震活动能量场的统计分析,地震学报,26(5),516~522。
杨明芝、马禾青,2012,汶川 8.0 级地震区域地震能量场分析,地球物理学进展(待刊)。
郑熙铭、肖家鑫、林家述,1998,地震前兆场的演化和能量非线性聚集的关系,中国地震,14(1),74~80。

Variation of energy field of Longmenshan fault zone before the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake

Yang Mingzhi Ma Heqing

Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, China

Abstract During a large earthquake's gestating and occurring process, the stress-strain state along the fault zone has the close relation with the weak seismicity around the fault zone. The seismicity's energy release near the fault zone structure before a earthquake can reflect better the dynamic process of a earthquake's gestating. Thus, in this paper, the method of natural perpendicular function development has been adopted to discuss the time variation about the energy field of the seismic activity along the Longmenshan fault zone before the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake, 2008. The results have showed that, before the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake, the time factors of the typical field corresponding to several key eigenvalues of the energy field along the Longmenshan fault zone demonstrated a very clear short-term rising, probably as the short-term anomaly message for this earthquake. By analyzing contrastively earthquake examples such as Tangshan earthquake of 1976, the authors believe that studying the time variation of energy field of the seismic activity along the active fault zone can help conduct the intentional and intensive monitor and forecast on the active fault region where is relatively dangerous based on earthquake med- and long-term decision.

Key words: Longmenshan fault zone Energy field Natural perpendicular function development Time factor anomaly Wenchuan $M_s8.0$ earthquake