

2010年青海玉树7.1级地震能量场研究*

马禾青, 杨明芝

(宁夏回族自治区地震局, 宁夏 银川 750001)

摘要:采用自然正交函数展开方法, 分析了2010年4月14日青海玉树7.1级地震前震中周围区域和沿玉树断裂带地震能量场的时间变化。结果表明, 青海玉树7.1级地震发生在高能量释放的背景上。震中周围区域几个主要典型场的时间因子以平稳变化为主要特征, 但在地震发生前, 主要典型场的时间因子出现明显的中短期异常变化, 异常以尖点突跳为主要特点。第一个典型场的时间因子在震前3年出现大幅度异常, 表现出相对于背景场能量增高的释放图像; 其余典型场异常则表现出突出的短临异常特征, 出现在震前1~3月, 表现为大幅度短期异常变化。可能表明地震活动结构的变化出现得较早, 而临震时场的变化主要表现为扰动。沿玉树断裂带主要典型场时间因子异常均出现在震前2~3年, 可能表明孕震区场的异常变化也会较早出现。典型场时间因子异常特征与以往关于能量场方面开展的工作所得结果类似。

关键词:能量场; 自然正交函数; 时间因子异常; 玉树7.1级地震

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2012)04-0485-06

0 引言

地震的孕育和发生是震源附近区域能量积累和释放的过程。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, Duda, 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。式(1)是估计地震释放能量的统计表达式, 也是本文计算地震释放能量的依据。研究地震活动能量的时、空变化特点, 是研究地震活动规律、探索地震预报的一个重要方面。

$$\lg E = 4.8 + 1.5M_s. \quad (1)$$

杨明芝和赵卫明(2004)提出将地震活动能量作为随机场, 采用自然正交函数(或称经验正交函数)展开方法进行分析, 讨论了宁夏地区中

强地震与能量场的关系, 取得了一些初步结果。罗国富和杨明芝(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。杨明芝和马禾青(2011, 2012), 罗国富等(2011, a, b)针对汶川8.0级地震、滇西北至滇南的地震活动能量场进行相关研究。笔者主要针对2010年4月14日青海玉树7.1级地震开展了能量场研究。

自然正交函数展开方法的基本要点是: 将区域地震释放能量按等间隔网格 ΔS 和等时间间隔 Δt 进行离散化, 作为随机场各个不同空间点和不同时刻的观测现实 E_{ij} (其中 $i=1, 2, \dots, n$ 为空间网格数, $j=1, 2, \dots, m$ 为时间点数)。如果选择能量矩平值为能量场要素, 以矩阵形式表示能量场, 即

$$E = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & \cdots & E_{1n} \\ E_{21} & E_{22} & \cdots & E_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{m1} & E_{m2} & \cdots & E_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

将场函数 E_{ij} 看成正交的空间函数与正交的时间函数乘积之和。由矩阵分解求得 n 个特征值 λ_k 和相应的 n 个特征向量 x_k ($k=1, 2, \dots, n$)。并求得时间因子

* 收稿日期: 2012-02-08.

基金项目: 中国地震局震情跟踪合同制定向工作重点任务“甘陕宁交界地震重点危险区强震危险性深入跟踪(2010010111)”项目资助。

$$\vec{T}_k = E\vec{x}_k, \quad k = 1, 2, \cdots n. \tag{3}$$

(3) 式代表了能量场的时间变化特征。事实上，自然正交函数展开收敛很快，只需要少数几个特征向量（典型场）就可使拟合达到相当高的精度。将前几个特征值所对应的特征向量称为主要典型场。由 l 个主要典型场拟合能量场的精度为

$$r = \frac{\sum_{k=1}^l \lambda_k}{\sum_{k=1}^n \lambda_k}. \tag{4}$$

1 区域能量场的时间变化

选择以震中为中心 $3^\circ \times 3^\circ$ 的研究区域，将区域划分为等间隔网格 ΔS 进行能量统计。考虑到研究区域中小地震分布很不均匀，位于统计区 ΔS 内的地震数目有限，甚至有些网格区域内可能没有地震分布，为此选取 $\Delta S = 10^\circ \times 10^\circ$ 作为能量统计的网格区域大小，并以 0.5° 作为滑动步长，等时

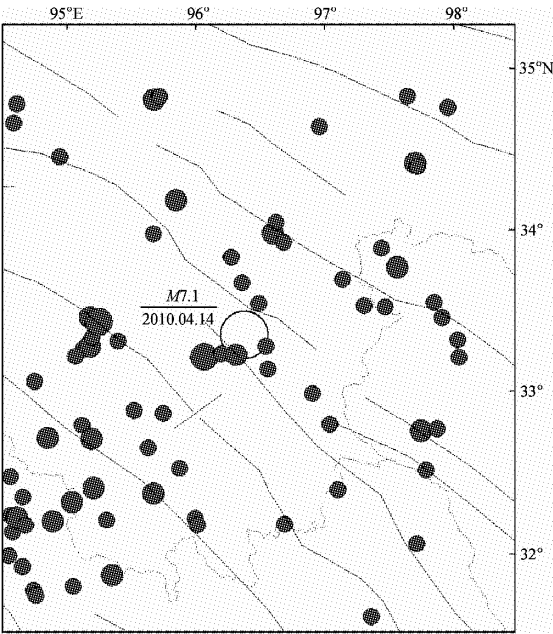


图1 青海玉树7.1级地震前区域地震分布
(1995年1月至2010年3月, $3.0 \leq M_L \leq 5.4$)
Fig.1 Regional earthquake distribution before
Yushu M7.1 earthquake in Qinghai
(from Jan. , 1995 to Mar. , 2010, $3.0 \leq M_L \leq 5.4$)

间间隔 Δt 统计各网格区域能量。时间段取1995年1月至2010年3月，时间间隔 $\Delta t = 1/4$ a。本文使用的地震资料取自中国地震台网中心编辑的 China2 目录，考虑到研究时段区域地震台网的监测能力，取震级下限为 $M_L 3.0$ （赵永海等，2010）。

图2是研究区能量场等值线图。图中显示1995年1月至2010年3月青海玉树7.1级地震前，在震中区西侧存在一个能量的高释放区，最大能量释放达 200×10^{10} J，青海玉树7.1级地震便发生在这一高能量释放的背景上。

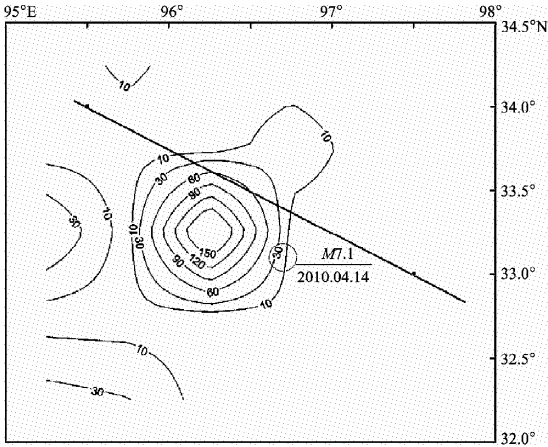


图2 1995年1月至2010年3月区域能量场等值线图（单位： $\times 10^{10}$ J）
Fig.2 Contour of regional energy field from Jan. , 1995 to Mar. , 2010 (unit: $\times 10^{10}$ J)

按前述能量场方法对区域能量进行统计（能量单位取 10^{10} J），得到一个能量场的 (20×61) 阶矩阵。对其进行自然正交函数展开，可分解得到61个相互正交的特征向量和相应的时间因子序列，其中前6个典型场的特征值列于表1。第一个典型场的特征值 $\lambda_1 = 1.8549 \times 10^5$ ，占总场的98.24%，是场的主要部分，其余典型场占总场的比例约为1.8%。图3是震前区域能量场前6个典型场时间因子变化曲线。从图中可以看出，第一个典型场时间因子 T_1 长期维持在基值0附近，约在震前3年，即2007年1~3月的点值出现大幅度上升变化，说明在此期间以第一个典型场为代表的地震活动结构发生了较大变化；在地震前，第三、第四、第五和第六个典型场时间因子 T_3 、 T_4 、 T_5 和 T_6 ，即2010年1~3月的点值，发生了突降或突升变化，显示出非常明显的短期异常特征。

表 1 2010 年 4 月 14 日青海玉树 7.1 级地震能量场特征值 ($n=20$)
Tab. 1 Energy field eigenvalues of Yushu $M7.1$ earthquake in Qinghai on Apr. 14, 2010

前 6 个典型场 x_i	1	2	3	4	5	6
特征值 λ_i ($\times 10^5$)	1.854 9	0.016 3	0.012 0	0.004 0	0.000 7	0.000 1

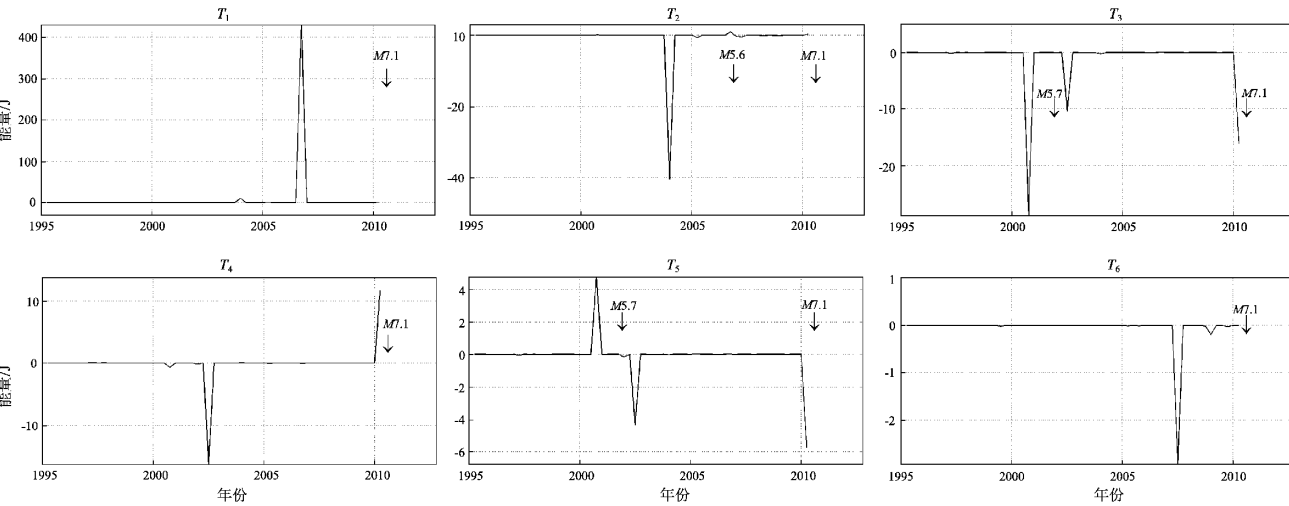


图 3 2010 年 4 月 14 日青海玉树 7.1 级地震前能量场前 6 个典型场时间因子变化曲线
Fig. 3 The time factors change curves of the first 6 typical fields before energy field of Yushu $M7.1$ earthquake in Qinghai on Apr. 14, 2010

第二个典型场时间因子 T_2 的点值在 2003 年 10 ~ 12 月出现过低值下降, 可能是地震活动早期异常显示; 另外, 统计区内 2001 年 7 月和 2006 年 7 月在青海玉树 7.1 级地震震中附近分别发生过 5.7 级和 5.6 级地震, 在此期间一些典型场时间因子的变化应与此有关。

图 4 给出的是其中 4 个异常典型场的等值线图。其中第一个典型场等值线 X_1 , 反映震中西侧一个局部能量正距平区的空间图像, 即相对于背景场能量增高的释放图像, 这是青海玉树 7.1 级地震前能量场最主要的变化部分。第三、第四和第五个典型场 X_3 、 X_4 和 X_5 反映了区域几个局部能量负、正距平的异常空间图像, 虽然它们仅占总场的很小部分 (约不到 1%), 但在地震前出现大幅度短期异常变化。

2 沿地震断裂能量场的时间变化

甘孜—玉树断裂走向为北西西—北西, 倾向呈波状陡立, 绝大部分展布于高原藏族牧区, 局部为无人区。该断裂从青海治多县那王草曲塘, 经当江、玉树、邓柯、玉隆, 至四川甘孜县城南

拖坝, 全长约 500 km。该断裂带是广义的鲜水河断裂带向西北延伸的部分, 也是青藏高原川滇菱形块体向东挤出的北部边界。甘孜—玉树断裂带活动强烈, 历史上正式记载的破坏性地震有 4 次, 其中 1738 年 6½ 级地震、1979 年 6.2 级地震和 2002 年 6.1 级地震均发生在玉树段及其以西的当江段, 1896 年 7 级地震发生在玉树段以东的邓柯段。此次青海玉树 7.1 级地震是该断裂带上发生的又一次 7 级地震。

为了研究震前沿断裂带构造能量场的变化, 笔者选取沿断裂带 7 个能量场的观测网格, 网格中心坐标列于表 2。网格取 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$, 并假设每一个网格内的地震能量相当于一个观测点的能量值。

表 2 观测网格中心坐标
Tab. 2 Center coordinates of the observed grid

网格编号	1	2	3	4	5	6	7
$\lambda_E/ (^\circ)$	95.5	96.0	96.5	97.0	97.5	98.0	98.5
$\varphi_N/ (^\circ)$	34.0	33.8	33.5	33.2	33.0	32.7	32.5

对表 2 给定的网格区域的地震活动能量进行展开计算, 原始场 E 分解为 7 个正交的典型场, 取前 3 个典型场时 (表 3), 展开精度为 0.999 9, 已

经能够相当精确地描述能量场的特性。其中第一个典型场所占的比例为 99.13%，与原始场有最大的相似性。计算结果表明，青海玉树 7.1 级地震

前，第一和第三个典型场时间因子 T_1 和 T_3 分别在震前 2~3 年出现突升或突降异常变化。图 5 是这两个典型场时间因子的变化曲线。

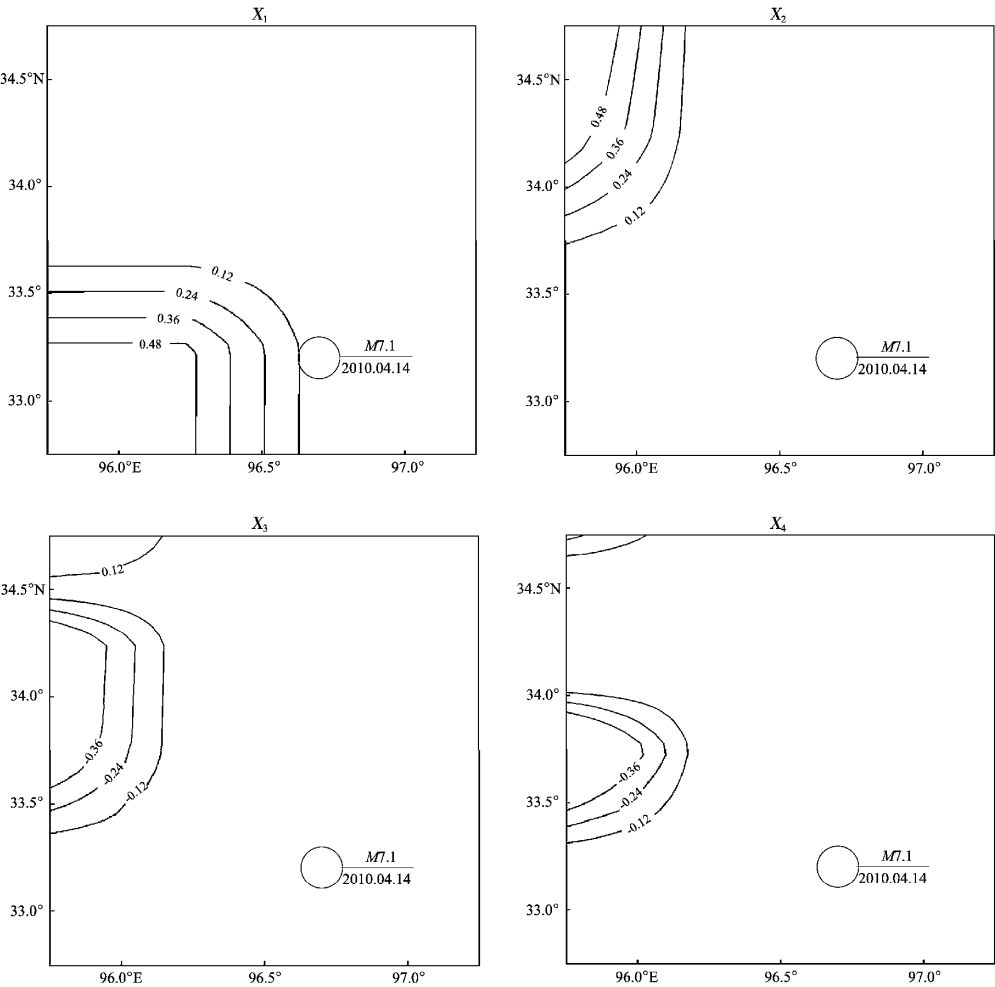


图 4 异常典型场等值线图

Fig. 4 Contour of the abnormal type fields

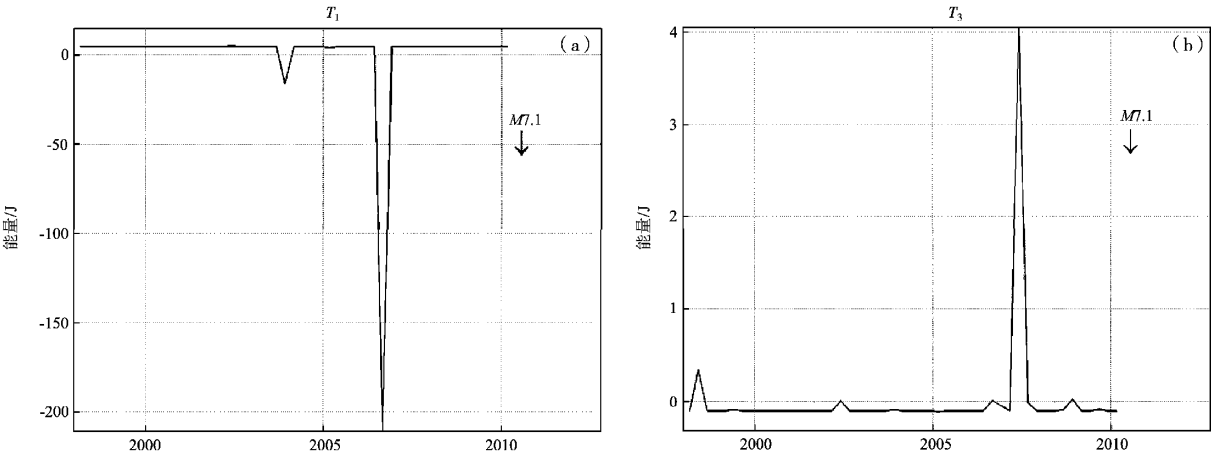


图 5 地震前沿断裂带典型场 T_1 (a) 和 T_3 (b) 时间因子变化曲线

Fig. 5 The time factors change curves T_1 (a) and T_3 (b) of the typical fields along the fault zone before the earthquake

表 3 2010 年玉树 7.1 级地震
沿断裂带能量场特征值

Tab. 3 Energy field eigenvalues along the fault zone of Yushu M7.1 earthquake in Qinghai in 2010

前 3 个典型场	1	2	3
特征值 λ_i ($\times 10^4$)	4.585 3	0.038 6	0.001 7

3 讨论

(1) 本文的研究工作表明，青海玉树 7.1 级地震发生在高能量释放的背景上。震中周围区域几个主要典型场的时间因子以平稳变化为主要特征，但在青海玉树 7.1 级地震前，主要典型场的时间因子出现明显的中短期异常变化，异常以尖点突跳为主要特点。场的主要部分异常出现较早，约出现在震前 3 年，表现出相对于背景场能量增高的释放图像；其余部分异常则表现出突出的短临异常特征，出现在震前 1~3 月，表现为大幅度短期异常变化。可能表明地震活动结构的变化出现得较早，而临震时场的变化主要表现为扰动。沿玉树断裂带主要典型场时间因子异常均出现在震前 2~3 年，可能表明孕震区场的异常变化也会较早出现。

(2) 杨明芝和马禾青（2011，2012）曾详细研究了 2008 年汶川 8.0 级地震前区域能量场的异常变化，并对 2008 年汶川 8.0 级地震和 1976 年唐山 7.8 级地震沿地震破裂带能量场时间因子的异常进行了专门讨论。结果表明，震前能量场时间因子出现突跳式上升或下降的异常变化，与本文的分析结果相一致。分析 2010 年 4 月 14 日青海玉树 7.1 级地震能量场的时间变化，可以得到，时间因子异常呈现出类似的单点突跳式上升或下降异常形态特征，这可能是由于地震发生过程是一个随机脉冲过程，地震能量是阶跃式变化而具有的特点。异常出现时间主要在震前 1~3 年，表现出异常的中短期特点。其中重要的是震前 1~3 月出现短期异常。因此可以将时间因子异常作为大地震的中短期或短临预测指标。

(3) 区域范围和时间段的选取对于场结构的影响十分重要，所取研究区域的空间范围应当是与构造活动大致相同的区域。由于能量场的结构是由区域构造运动特性所决定，并反映区域地震

活动的基本图像，在我们的工作中，大体上是以主震震中为中心，选取长、宽为 $3^{\circ} \sim 4^{\circ}$ 的区域范围为研究区。另外，平均场在一定程度上影响协方差矩阵 R 的结构，从而影响场函数展开结果和典型场的形式。当延长或缩短资料的时间，协方差矩阵 R 会发生变化，如果地震活动是平稳随机过程，即序列是平稳的，时间起点对结果的影响不大，但如果地震活动是非平稳的，则对计算结果的影响很大。因此，选择适当的研究区域和时间段是在区域地震趋势分析中值得认真探讨的问题。

(4) 从地震预测的角度考虑，在地震发生前如何找到一个合适的监视区域研究能量场的变化十分困难。为此，笔者试图通过研究区域和断裂带附近地震能量场相结合的方法，寻找预测地区。例如，以中期或年度地震危险区为重点，对重点监视区及重点区内的主要活动断裂应用能量场方法进行追踪监测，可能是地震跟踪的一种方法。

参考文献：

陈培善, Duda S J. 1993. 地震辐射能对环境应力场的依赖性[J]. 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[J]. 高校地质学报, 15(1): 108-114.

罗国富, 屠鸿为, 马禾青, 等. 2011a. 滇西北至滇南强震危险区地震活动能量场分析[J]. 地震研究, 34(4): 285-291.

罗国富, 杨明芝, 马禾青, 等. 2011b. 汶川 8.0 级地震前地震活动能量场中短期异常[J]. 地震, 31(3): 135-142.

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[J]. 中国地震, 21(3): 332-340.

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[J]. 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[J]. 地球物理学报, 13(1): 32-41.

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[J]. 中国地震, 27(3): 260-267.

杨明芝, 马禾青. 2012. 汶川 8.0 级地震区域地震能量场分析[J]. 地球物理学进展, 27(3): 872-877.

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[J]. 地震学报, 26(5): 516-522.

赵永海, 陈永花, 陈冬柏. 2010. 青海数字遥测台网地震监测能力评估[J]. 高原地震, 22(1): 30-33.

郑熙铭, 肖家鑫, 林家骥. 1998. 地震前兆场的演化和能量非线性聚集的关系[J]. 中国地震, 14(1): 74-80.

Research on the Energy Field about Yushu $M7.1$ Earthquake in Qinghai in 2010

MA He-qing, YANG Ming-zhi

(*Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, Ningxia, China*)

Abstract

Using the method of natural orthogonal function expansion, we analyzed the temporal variations of the seismic energy fields around the epicenter and along the Yushu Fault zone before Yushu $M7.1$ Earthquake, Qinghai on Apr. 14 in 2010. The results showed that Yushu $M7.1$ earthquake in Qinghai occurred on the background of high energy release. The time factors of several primary typical fields around the epicenter mainly varied smoothly. However, in the main typical fields, these factors appeared abruptly in a short-and medium-term before the main shock, and curves of the factors were mainly featured by cusps and steps. The curve of time factors in the first typical field increased greatly in 3 years before the main shock, which showed that the energy release relative to energy increasing of the background field. And the curve of time factors in the rest typical fields showed the short-term anomaly in 1 – 3 months before the main shock. It was probably indicated that the changes of the seismic activity structure appeared early, but the changes of the fields mainly showed disturbance before the impending earthquake. The anomaly of time factor in primary typical fields along Yushu Fault Zone all appeared in 2 – 3 years before the main shock, which probably represented that the anomaly of the earthquake preparation area fields also appeared early. The abnormal features of the time factors of the typical fields were similar to the results about the energy fields in the former work.

Key words: energy field; natural orthogonal function; time factor anomaly; Yushu $M7.1$ Earthquake in Qinghai