

高悦, 安张辉, 范莹莹, 刘君, 王建军. 2017. 自然时间域中的地震序列参数分析. 地震学报, **39**(4): 593–603. doi:10.11939/jass.2017.04.013.
Gao Y, An Z H, Fan Y Y, Liu J, Wang J J. 2017. Order parameter analysis of seismicity in natural time domain. *Acta Seismologica Sinica*, **39**(4): 593–603. doi:10.11939/jass.2017.04.013.

自然时间域中的地震序列参数分析*

高悦^{1,2)} 安张辉^{1,2),*} 范莹莹^{1,2)} 刘君^{1,2)} 王建军^{1,2)}

1) 中国兰州 730000 中国地震局兰州地震研究所

2) 中国兰州 730000 甘肃省地震局

摘要 自然时间 χ 是 Varotsos 等于 2001 年提出的一种新的时间域, 其将复杂系统的时间序列在自然时间域中进行分析, 能够有效地提取有用信号并提高相关结果的准确性, 从而更容易获得复杂系统的动态特征. 文中对自然时间法进行了简单介绍, 选取中国地震台网中心 1978—2014 年地震目录中震级排序前 30 的震例, 计算每次地震的归一化能量在自然时间域中的方差 κ_1 及其变异系数 β , 并将方差 κ_1 作为序列参数, 利用变异系数 β 对序列参数 κ_1 进行定性分析, 并在此基础上, 对序列参数 κ_1 进行定量分析. 研究表明: 30 次震例中有 21 次震例的地震序列参数 κ_1 自震前半小时至几个月开始持续在 0.07 上下波动, 并在主震发生前迅速下降至 0 值附近. 此外, 还简单讨论了定量分析中时间窗口的选择以及分析结果中可能出现的特殊情况. 本文的研究结果对我国地震事件的回溯性研究及地震预测研究具有一定的指导意义.

关键词 自然时间法 序列参数 时间窗口 变异系数

doi:10.11939/jass.2017.04.013

中图分类号: P315.08

文献标志码: A

Order parameter analysis of seismicity in natural time domain

Gao Yue^{1,2)} An Zhanghui^{1,2),*} Fan Yingying^{1,2)} Liu Jun^{1,2)} Wang Jianjun^{1,2)}

1) Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China

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

Abstract: The natural time χ is a new time domain introduced by Varotsos *et al* in 2001. Novel dynamical features of time series in complex systems can emerge upon self analysis in natural time, which conforms to the desire to extract useful signal information and reduce uncertainty effectively. In this study, we first introduce the natural time method and then select top 30 earthquakes from the catalogue of China Earthquake Networks Center from 1978 to 2014, after that calculate the variance κ_1 and the coefficient of variation β of the normalized energy released from each earthquake in natural time domain. Taking κ_1 as the order parameter, we qualitatively analyse κ_1 by making use of β , and further quantita-

* 基金项目 国家自然科学基金(41374080)、地震科技星火计划(XH16037)和甘肃省科技计划(145RJZA030)共同资助.

收稿日期 2017-02-21 收到初稿, 2017-06-16 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: anzhanghui5@gsdzt.gov.cn



tively analyse κ_1 on that basis afterwards. The results show that the order parameter κ_1 nearly equals to 0.07 from half an hour to months before the main shock and abruptly decreases toward zero when the main shock happens. Furthermore, we simply discuss the way to select time window in quantitative analysis and some special cases in analysis results. Hence, it seems that the results have a guiding significance for earthquake events retrospective study and earthquake prediction study.

Key words: natural time method; order parameter; time window; coefficient of variation

引言

目前学术界普遍认为科学研究中最大的挑战是时间而并非空间 (Varotsos *et al*, 2011a). Varotsos 等(2001)提出的自然时间域, 是时间模型的一种新观点. 该观点认为时间是不连续的, 并在形式上区别于由实数集组成的一维连续模型的传统时间域. 将复杂系统的时间序列放在自然时间域中进行分析, 能尽可能提高分析过程的准确率, 同时提取有用信号. 利用自然时间域还可以研究复杂系统的动态变化过程, 判断系统何时进入临界阶段, 其方法为: 在自然时间域中计算出时间序列的归一化功率谱 $\Pi(\omega)$, 当自然角频率 ω 趋近于 0 时, 对 $\Pi(\omega)$ 作泰勒展开, 得到 $\Pi(\omega) \approx 1 - \kappa_1 \omega^2$, 当复杂系统接近临界点时, 系数 κ_1 恰好等于自然时间序列的方差, 这一特征可用于判断复杂系统是否接近临界点.

地震作为一种临界现象, 在时间、空间和震级上具有复杂的联系 (Holliday *et al*, 2006). Sarlis 等(2008)和 Varotsos 等(2001, 2011a, 2005)发现在主震发生前的数小时至数月, 与主震位于同一构造带的地区或力学性质与主震所在区域相似的构造单元, 其地震活动会进入临界阶段, 序列参数 κ_1 持续在 0.07 附近小幅波动, 并在主震发生时迅速减小至 0 值附近. 另外, κ_1 的变异系数 β 可以反映 κ_1 的波动性, $\beta \equiv \sigma(\kappa_1) / \mu(\kappa_1)$, $\sigma(\kappa_1)$ 为 κ_1 的标准差, $\mu(\kappa_1)$ 为 κ_1 的均值, 且 β 曲线在震前存在一个极小值, 该值在主震发生时迅速上升 (Varotsos *et al*, 2013), 这些特征对于缩短地震预报窗口有很大的利用价值.

自然时间分析法提出至今, 时间仍较短, 国内外与此相关的研究成果也较少. Varotsos 等(2001)于 1995 年 4 月 18 日希腊 $M_L 6.6$ 地震前, 观测到 κ_1 持续在 0.07 上下小幅波动, 在主震发生时迅速减小至 0 值左右 (Varotsos *et al*, 2005); Sarlis 等(2008)和 Varotsos 等(2013)对日本地区 ($25^\circ\text{N} - 46^\circ\text{N}$, $125^\circ\text{E} - 148^\circ\text{E}$) 1984—2011 年所有 $M_w \geq 3.5$ 地震序列进行了自然时间分析, 结果显示, 所有 $M_w \geq 7.6$ 地震在震前几天至几个月内, κ_1 的变异系数 β 均出现明显的极小值.

本文对自然时间法是否适用于我国的实际情况进行初步地探索性研究. 首先对自然时间方法进行了简单的介绍, 之后选取地震目录 (中国地震台网中心, 2016) 中发生在中国大陆及周边地区震级排序前 30 的地震, 对这些震例的地震序列参数从定性分析和定量分析两个方面进行了研究.

1 方法简介

在自然时间域中, 连续事件的时间间隔被忽略, 仅考虑其发生的顺序和能量. 对于一

个包含 N 次地震事件的时间序列, 将第 k 次地震发生时的自然时间定义为 χ_k , $\chi_k = k/N$ (Varotsos *et al*, 2011b). 令第 k 次地震释放的能量为 Q_k , $Q_k \propto 10^{cM}$, M 为地震震级, c 为常数, $c \approx 1.5$, p_k 为 Q_k 的归一化值, $p_k = Q_k / \sum_{n=1}^N Q_n$. 将主震发生前震中附近区域内地震活动进入临界阶段的时刻设为自然时间的 0 时刻, 由此得到一组由 N 次连续地震事件组成的时间序列, 图 1 给出了将时间序列转换到自然时间域的示意图, 以 1992 年 5 月 17 日菲律宾 $M_s 7.0$ 地震前震中附近 ($4^\circ \times 4^\circ$) 发生的地震事件为例.

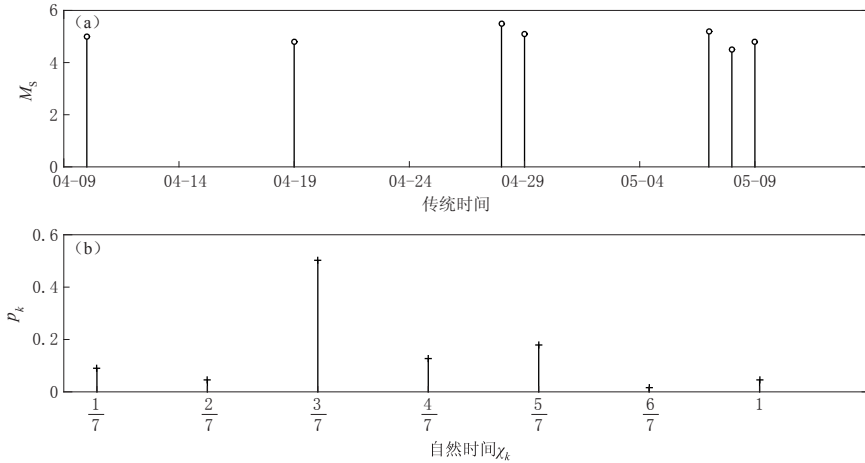


图 1 传统时间域中的地震时间序列 (a) 转化到自然时间域 (b) 的示意图

Fig. 1 A series of seismic events in conventional time domain (a) reading into the natural time domain (b)

对于连续函数 $\Phi(\omega)$ (Varotsos *et al*, 2001)

$$\Phi(\omega) = \frac{\sum_{k=1}^N Q_k \exp\left(i\omega \frac{k}{N}\right)}{\sum_{k=1}^N Q_k} = \sum_{k=1}^N p_k \exp\left(i\omega \frac{k}{N}\right), \quad (1)$$

式中: ω 为自然时间域中的角频率, $\omega = 2\pi\varphi$; φ 为自然时间域中的频率, 记作自然频率.

计算连续函数 $\Phi(\omega)$ 的归一化功率谱 $\Pi(\omega)$, 得到

$$\Pi(\omega) = |\Phi(\omega)|^2 = \left| \sum_{k=1}^N p_k \exp\left(i\omega \frac{k}{N}\right) \right|^2, \quad (2)$$

该函数不可与离散傅里叶变换混淆, 因该式中的 ω 为连续变量. 当 ω 接近 0 时, 将归一化功率谱 $\Pi(\omega)$ 作泰勒展开如下:

$$\Pi(\omega) = 1 - \kappa_1 \omega^2 + \kappa_2 \omega^4 + \kappa_3 \omega^6 + \kappa_4 \omega^8 + \dots, \quad (3)$$

式中 $\kappa_1 = -(1/2)(d^2\Pi(\omega)/d\omega^2)|_{\omega=0}$. 再将 $\Pi(\omega)$ 对 ω 求二阶偏导数, 得到

$$\frac{d^2\Pi(\omega)}{d\omega^2} = \Phi^*(\omega) \frac{d^2\Phi(\omega)}{d\omega^2} + \Phi(\omega) \frac{d^2\Phi^*(\omega)}{d\omega^2} + 2 \frac{d\Phi(\omega)}{d\omega} \frac{d\Phi^*(\omega)}{d\omega}, \quad (4)$$

式中 $\Phi^*(\omega)$ 为 $\Phi(\omega)$ 的共轭复数. 由式(1)可知 $\Phi(0) = 1$, 故

$$\kappa_1 = -\frac{1}{2} \left[-\sum_{k=1}^N p_k \chi_k^2 - \sum_{k=1}^N p_k \chi_k^2 + 2 \left(\sum_{k=1}^N p_k \chi_k \right)^2 \right] = \langle \chi^2 \rangle - \langle \chi \rangle^2, \quad (5)$$

式中 $\langle \chi^n \rangle = \sum_{k=1}^N p_k \chi_k^n$, 由此可知, κ_1 等于自然时间域的方差.

地震的发生是一种临界现象, 主震前当震中附近区域内的地震活动进入临界阶段后, 根据临界理论, Varotsos 等(2001, 2002a, b)得到了系统进入临界阶段后的归一化功率谱

$$\Pi(\omega) = \frac{18 - 6\cos\omega}{5\omega^2} - \frac{12\sin\omega}{5\omega^3}, \quad (6)$$

将上式在 $\omega=0$ 处作泰勒展开, 得到 $\Pi(\omega) \approx 1 - 0.07\omega^2$. 由式(3)可知, $\kappa_1 = 0.07$, 也就是说, 当主震前震中附近区域内的地震活动进入临界阶段后, 地震序列参数 $\kappa_1 = 0.07$.

2 计算过程及结果分析

2.1 地震序列参数波动分析

先利用变异系数 β 对序列参数 κ_1 进入临界阶段后的波动进行定性分析. 选取近年来我国及周边地区的地震目录(中国地震台网中心, 2016), 并按震级大小选取排序前 30 的震例, 所选取震例如表 1 所示.

分析过程主要包含以下步骤: 首先, 在地震目录中选取主震前一定时间范围内震中附近发生的 M 个连续地震事件作为分析所用的地震序列; 其次, 设定一个滑动时间窗口 W , 从 W 中选取第 n 次到 $n+5$ 次地震($n=1, 2, \dots, M-5$), 并分别计算其 κ_1 值. 因至少需要 6 次连续地震事件才能得到一个可靠的 κ_1 值(Sarlis *et al.*, 2013), 令 $\chi_k = k/6$, 归一化能量 $p_k = Q_k / \sum_{n=1}^6 Q_n$ ($k=1, 2, \dots, 6$). 之后从 W 中选取 7, 8, \dots , W 次连续地震事件组成子序列, 重复上述 κ_1 的计算过程; 最后得到 $(W-4)(W-5)/2$ 个 κ_1 值, 求这些 κ_1 的均值和标准差. 令变异系数 $\beta \equiv \sigma(\kappa_1) / \mu(\kappa_1)$, 则该 β 值便对应滑动时间窗口所包含的最后一次地震. 在地震序列上滑动时间窗口计算变异系数 β , 每滑动过一次事件, 得到一个 β 值, 最后得到所有地震对应的 β 值(Sarlis *et al.*, 2013), β 值的个数用 I 表示.

地震序列所在区域的选取原则是, 所选取地震须与主震位于同一构造带或力学性质相似的构造单元, 以保证能量关联. 首先, 选取一个以震中为中心且尽量覆盖其所在地质构造带的矩形区域; 其次, 根据主震前数小时至数月周围地震活动会进入临界阶段(Varotsos, Lazaridou, 1991)的特征及所选取的地震序列中的地震次数来确定该地震序列的时间范围. 通过对表 1 中的 30 个震例进行分析, 时间范围确定为震前 1—6 个月; 选择好恰当的时间范围后, 将得到的矩形区域中的地震序列进行再次筛选, 删除与主震没有能量关联的震例, 得到用于 κ_1 波动分析的地震序列. 因为得到一个可靠的 κ_1 值至少需要 6 次连续地震事件, 因此在分析中设置时间窗口 $W=10$, 计算由不同长度(6—10 次事件)子序列得到的 κ_1 的均值和标准差, 最后得到整个地震序列的变异系数 β . 地震序列参数波动分析结果如图 2 所示. 图中所示时间为根据表 1 中的国际时间转换而得的北京时间.

30 次震例中有 8 次地震在震前半小时至 1 个月内变异系数 β 出现一次极小值, 并在主震发生时迅速上升(图 2a); 对于图 2b 中的震例, 由于所选区域内前震较少, 因此得到的 β 值较少, 使得 β 曲线不具有波动性, 无法说明进入临界阶段后 κ_1 是否在 0.07 上下波动, 需

表 1 本文用于自然时间分析的震例
Table1 Earthquake events used for natural time analysis in this study

震例 序号	发震时刻		北纬/ $^{\circ}$	东经/ $^{\circ}$	深度/km	M_s
	年-月-日	时:分				
1	2008-05-12	06:27	31.01	103.42	14	8.2
2	2001-11-14	09:26	35.92	90.53	11	8.2
3	2001-01-26	03:16	23.48	70.45	10	8.1
4	2005-10-08	03:50	34.42	73.66	26	7.9
5	2009-08-10	19:55	14.22	92.78	25	7.7
6	2004-12-26	04:21	6.94	92.80	40	7.7
7	2003-09-27	11:33	50.02	87.87	16	7.7
8	1990-07-16	07:26	15.72	121.20	24	7.7
9	2011-03-24	13:55	20.70	99.85	20	7.6
10	2010-06-12	19:26	7.85	91.91	31	7.6
11	2005-07-24	15:42	7.83	92.19	19	7.6
12	1998-05-03	23:30	22.72	125.29	15	7.6
13	2012-08-31	12:47	10.77	126.76	31	7.5
14	2008-03-20	22:32	35.64	81.54	21	7.5
15	2001-12-18	04:02	23.92	122.95	27	7.5
16	1992-08-19	02:04	42.18	73.59	27	7.5
17	2006-12-26	12:26	21.86	120.60	10	7.4
18	2002-03-31	06:52	24.22	122.22	31	7.4
19	1999-09-20	17:47	23.97	120.75	5	7.4
20	1997-11-08	10:02	35.26	87.33	34	7.4
21	1995-04-21	00:34	11.95	125.62	31	7.4
22	1992-05-17	10:15	7.25	126.76	32	7.4
23	1991-01-05	14:57	23.61	95.91	18	7.4
24	1990-06-14	07:40	11.77	121.91	18	7.4
25	1988-11-06	13:03	22.92	99.79	13	7.4
26	2014-02-12	09:19	36.14	82.51	10	7.3
27	2010-04-13	23:49	33.22	96.59	14	7.3
28	2010-02-26	20:31	25.86	128.65	25	7.3
29	2005-03-20	01:53	33.70	130.38	21	7.3
30	1995-07-11	21:46	21.96	99.16	13	7.3

结合下文中的 κ_1 进行定量分析验证; 对于图 2c 给出的震例 11, 17, 18 和 19, 由于所选区域内地震数目较多, 造成 β 曲线波动较大, 因此无法判断哪个极小值对应临界阶段; 将此 4 次震例的时间窗口 W 改为 20 进行计算, 得出的 β 曲线具有极小值, 并在主震发生时迅速上升(图 2d); 有 5 次震例的 β 曲线存在几个大致相等的极小值, 或在地震发生前曲线并未迅速上升(图 2e), 需结合下文中的 κ_1 来定量分析解释; 另外因震例 2, 3, 20, 23, 24, 27 筛选出的地震序列的长度小于时间窗口 $W=10$, 故无法进行计算. Varotsos 等(2013)和 Sarlis 等(2008)对日本地区 κ_1 的波动分析以及 Ramires-Rojas 等(2011)对墨西哥地区 κ_1 的波动分析, 均是在整个日本或墨西哥大范围内选取地震序列, 样本数量足够得出可靠的结果, 但是青藏高原及其周边大地构造单元的分布远比日本和墨西哥复杂, 对于上述 6 个震例, 若通过增加时空范围来获得更多的地震, 势必会使选取的地震序列中混入与主震不在同一构造带、无能量关联的地震, 导致结果不可靠.

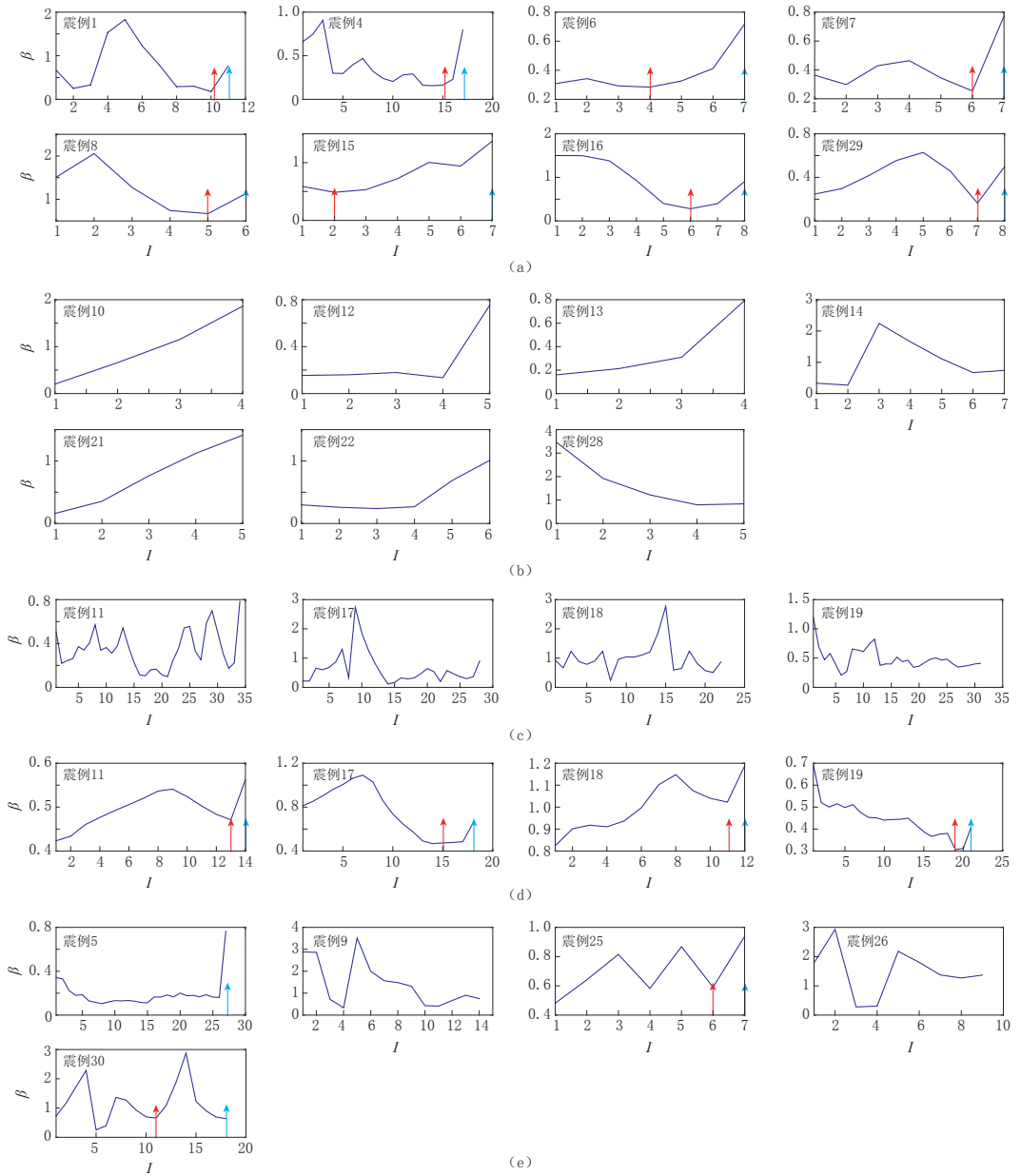


图 2 自然时间域中地震序列参数 κ_1 的变系数 β 在主震前的变化情况

红色箭头表示 β 出现极小值的时刻, 蓝色箭头表示主震发生的时刻。(a) 正常情况下 β 曲线形态; (b) 所选区域内主震前地震数目较少, 使曲线不具有波动形态; (c) 所选区域内主震前地震数目较多, 使得曲线波动性较大; (d) 对图(c)中 4 次震例使用时间窗口 $W=20$ 的计算结果; (e) 曲线具有两个纵坐标接近的极小值, 无法作出判断

Fig. 2 The coefficient of variation β of order parameter κ_1 evolves before the main shock in natural time domain

The red and blue arrows represent the moment minimum β occurred and the mainshock happened, respectively. (a) Normal β curves; (b) The cases that β curves have no wave shape due to lack of earthquakes before the main shock; (c) The cases that β curves fluctuate greatly because of too many earthquakes before the main shock; (d) The results of cases in Fig. (c) by using the time window $W=20$; (e) The cases that β curves show two approximate minimum values, making it hard to judge

2.2 地震序列参数定量分析

利用主震前震中附近的地震活动进入临界阶段后 κ_1 值持续在 0.07 上下波动这一性质, 对 κ_1 进行定量分析. 对表 1 所列 30 次震例, 利用波动分析中所选取的地震序列, 设定一个适当的时间窗口 ($6 \leq W \leq 40$), 将时间窗口在选取的地震序列上连续滑动, 计算每次滑动后的 κ_1 .

在地震序列参数定量分析中, 时间窗口是变化的. 表 2 给出了序列参数定量分析中 κ_1 异常明显的几次震例及其在选取地震序列过程中所用到的参数.

表 2 序列参数定量分析中所选取的参数

Table 2 Parameters used in quantitative analysis of the order parameter

震例序号	X/月	L	W	K	震例序号	X/月	L	W	K
1	3	20	10	11	15	4	16	7	10
2	5	9	6	4	16	4	17	10	8
4	2	26	19	8	17	4	37	25	13
5	2	36	24	13	18	4	31	20	12
6	1	16	10	7	19	4	40	28	13
8	6	15	6	10	22	4	15	6	10
10	4	18	6	13	25	4	16	9	8
11	5	43	33	11	28	4	14	6	9
12	4	14	8	7	29	4	17	6	12
13	4	13	6	8	30	5	27	18	10
14	2	16	6	11					

注: X 为地震序列的时长, W 为时间窗口长度, L 为选取的震前地震序列长度, K 为计算出的 κ_1 的个数, 且 $K=L-W+1$.

由表 2 可知, 对每次地震进行自然时间分析后得到的 κ_1 个数 K, 除 2 号震例, 即 2001 年 11 月 14 日昆仑山 $M_S 8.2$ 地震因震前 5 个月符合条件的地震较少, $L=9$, 时间窗口 W 的最小值为 6, 故 K 值偏小, $K=4$ 之外, 其它地震的 K 值均在 10 ± 3 的范围内. 这也为地震序列进行自然时间分析时 W 值的选择设置了条件, 也为准确地选取适当的时间窗口, 得到可靠的地震序列参数提供基础.

经过分析看出, 30 次地震中有 21 次震例在震前几小时至几个月 κ_1 在 0.07 上下波动, 至主震发生时, κ_1 急剧降至 0 值附近, 分析结果如图 3 所示, κ_1 开始在 0.07 上下波动的时间与主震发生的时间列于表 3. 图 3 中发生在海域的地震, 所选取地震序列沿地质构造分布较规则, 自然时间分析结果比陆地上发生的地震, 特别是青藏高原和帕米尔高原等地质结构复杂地区发生的地震, 更加符合理论值. 例如, 震例 5 (2009 年 8 月 11 日安达曼群岛 $M_S 7.7$ 地震), 震例 6 (2004 年 12 月 26 日苏门答腊—安达曼 $M_S 7.7$ 地震) 及震例 11 (2010 年 7 月 24 日印度尼科巴群岛 $M_S 7.6$ 地震), 均发生在印度洋板块与缅甸微板块交界处, 自然时间分析结果显示 κ_1 均持续在 0.07 上下小幅波动.

图 3 中 κ_1 值在 0.07 附近开始波动的时刻与图 2a 中相应震例 β 极小值出现的时刻具有较好的对应关系 (震例 7, 29 除外); 此外, 震例 7 的 β 虽出现极小值, 但定量分析显示 κ_1 值的变化并不符合理论规律 (图 4); 震例 29 的 β 极小值对应的 κ_1 虽然在 0 附近波动, 但其变化具有理论规律 (图 3). 图 2d 中, 震例 11, 17, 18, 19 的 β 的极小值出现的时刻与图 3 中 κ_1 值在 0.07 附近开始波动的时刻也存在对应关系. 需要注意的是, 这里所说的对应关

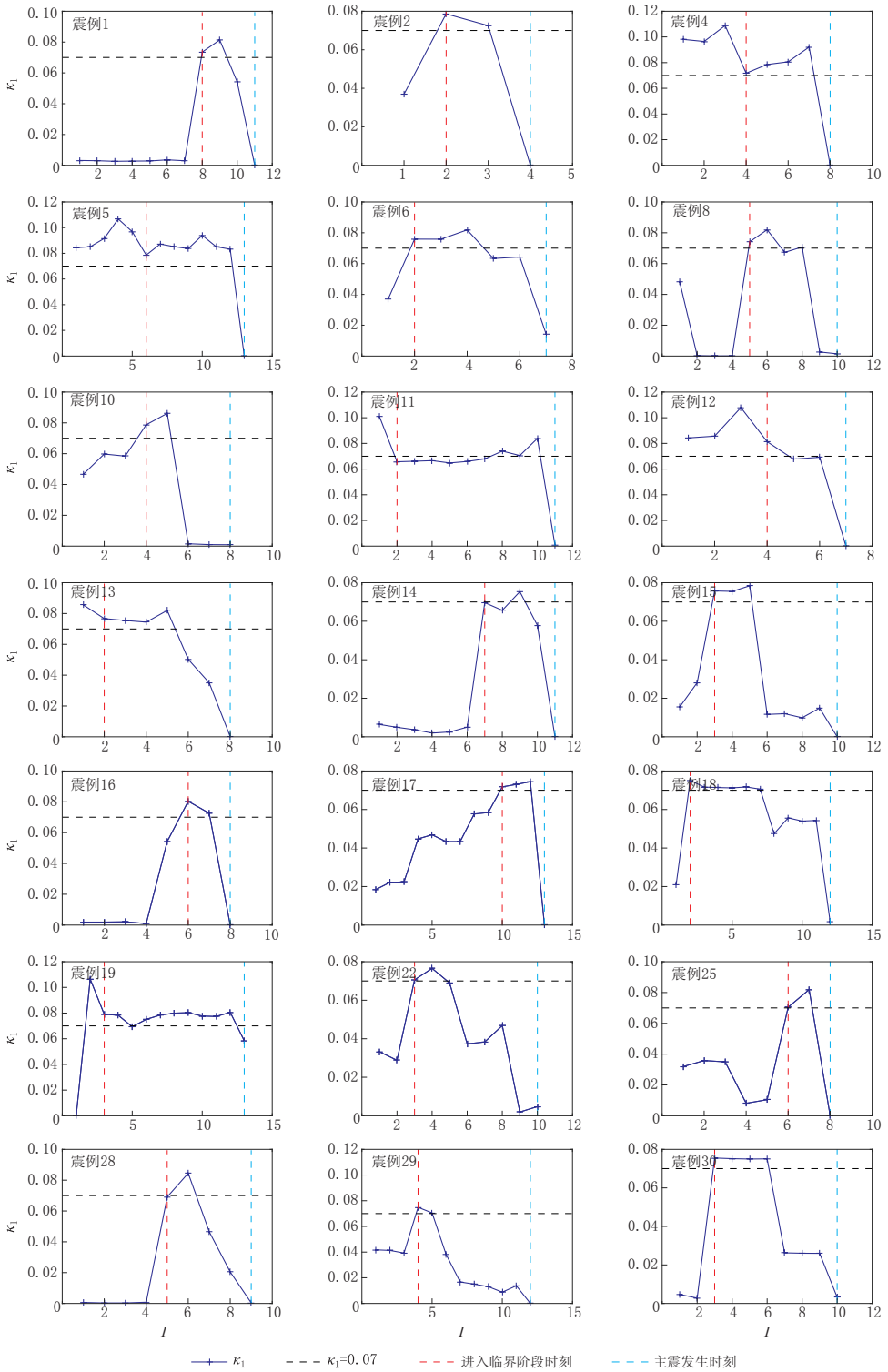


图 3 自然时间域中地震发生前序参数 κ_1 的变化

Fig. 3 Evolution of the order parameter κ_1 before the main shock in natural time domain

表 3 序列参数定量分析中 κ_1 异常的变化符合理论规律的 21 次震例及 κ_1 开始在 0.07 上下波动的时间

Table 3 21 cases that abnormal variations of κ_1 curves are in accordance with theory in quantitative analysis and the time when κ_1 fluctuates above and below 0.07

震例 序号	发震时刻 年-月-日	κ_1 波动起始时间 年-月-日	M_S	震例 序号	发震时刻 年-月-日	κ_1 波动起始时间 年-月-日	M_S
1	2008-05-12	2008-04-11	8.2	14	2008-03-21	2008-02-08	7.5
2	2001-11-14	2001-09-05	8.2	15	2001-12-18	2001-11-25	7.5
4	2005-10-08	2005-10-02	7.9	16	1992-08-19	1992-08-14	7.5
5	2009-08-11	2009-07-27	7.7	17	2006-12-26	2006-12-14	7.4
6	2004-12-26 (12;21)	2004-12-26 (12;02)	7.7	18	2002-03-31	2002-02-12	7.4
8	1990-07-16	1990-05-27	7.7	19	1999-09-21	1999-08-07	7.4
10	2010-06-13	2010-05-11	7.6	22	1992-05-17	1992-04-28	7.4
11	2005-07-24	2005-05-21	7.6	25	1988-11-06	1988-10-22	7.4
12	1998-05-04	1998-04-21	7.6	28	2010-02-27	2010-01-07	7.3
13	2012-08-31	2012-07-04	7.5	29	2005-03-20	2004-12-14	7.3
				30	1995-07-12	1995-06-30	7.3

系,并非指图 2 中 β 极小值出现的时刻与图 3 中 κ_1 值在 0.07 附近开始波动的时刻相同,因为只有当波动分析中的时间窗口完全覆盖持续在 0.07 附近波动的几个 κ_1 值时, β 才会出现极小值,所以图 2 中 β 异常出现的时刻会比图 3 中 κ_1 在 0.07 附近开始波动的时刻晚几天至一个月.例如,图 2d 中震例 11 的 β 极小值出现的时刻为 2005 年 7 月 17 日,正好是时间窗口 $W=10$ 滑动到主震前的一次地震,所覆盖的 10 次地震对应的 κ_1 值在 0.07 附近持续平稳波动,因此 β 会出现极小值.图 2 中与图 3 有良好异常对应的震例,其 β 极小值的发生时刻(红色箭头)和主震发生时刻(蓝色箭头)已在图 2 中标出.

图 3 中 κ_1 的震前变化可以解释图 2e 中几个震例的特殊 β 曲线形态:图 3 中震例 5 的 κ_1 在 0.07 附近的波动较为平稳,因此其在图 2e 中的 β 曲线呈现持续谷底状态;震例 25 的第二个 β 极小值对应 κ_1 的持续平稳状态;震例 30 的第二个 β 极小值对应 κ_1 的持续平稳状

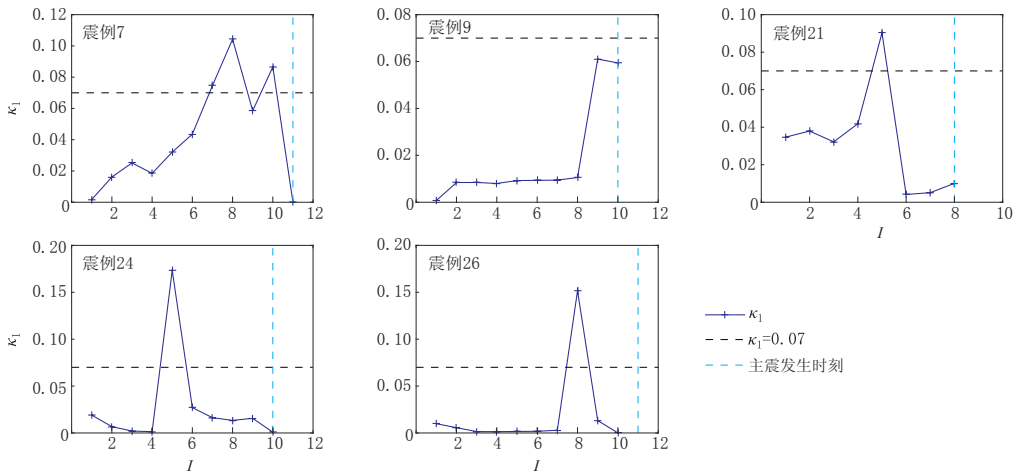


图 4 定量分析结果中 κ_1 的变化与理论规律不符的震例

Fig. 4 The cases that abnormal variations of κ_1 curves are not consistent to theory in quantitative analysis

态,主震发生前 β 曲线未迅速上升的原因为,对应主震的 κ_1 值与前几个 κ_1 值较为接近;对于图2e中的震例9和26,在定量分析中其序列参数 κ_1 的变化与理论规律不符,如图4所示.图2b中除震例21外,震例10,12,13,14,22和28,其 β 曲线均无明显波动,原因是所选区域内地震数量较少,但由图3可知这些震例发生前 κ_1 具有与理论相符的异常.

震例3,7,9,20,21,23,24,26和27的 κ_1 的变化与理论规律不符,原因有以下几点:

①震前所选区域内地震数量较少,在选取震例3,20,23,27的震前地震序列时,无法保证在时间窗口 $W \geq 6$ 的情况下进行自然时间分析,震例3震前所选区域内无符合条件的地震,其余3例在选取范围内获得的地震序列分布如图5所示,由于地震数量较少无法计算地震序列参数,故图3中无相应变化曲线;②对于震例9,21和24,主震前震中附近区域发生了规模相当的地震,即双震型地震,其主震与各自余震之间相互作用非常复杂,自然时间法无法处理该类型地震, κ_1 的变化如图4所示;③对于震例7和26中 κ_1 的变化与理论规律不符的情况,目前只能理解为青藏高原和帕米尔高原复杂地形及地质构造所致, κ_1 的变化如图4所示.

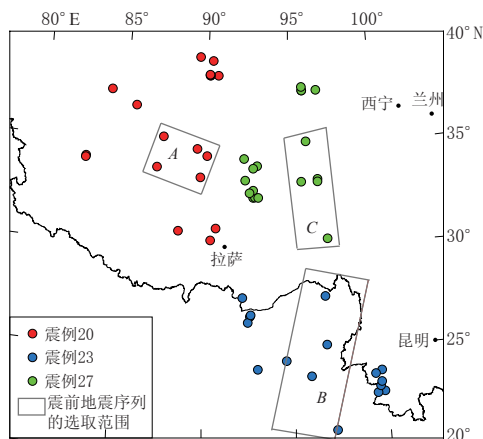


图5 震例20,23,27发生前震中附近区域地震分布图

Fig. 5 Earthquake distribution map near the epicenter before each main shock for earthquake events of 20, 23 and 27

将自然时间法运用到地震监测工作中,沿地质构造带选取目标监测区域,根据区域内记录到的地震次数,确定合适的时间窗口,对 κ_1 进行自然时间分析,当 κ_1 持续在0.07附近波动,则标志着该区域的地震活动进入到了临界阶段.另外,根据Varotsos和Alexopoulos(1984)及Varotsos等(1993,2001)的实验结果,地震电信号的发生标志着震中区域的地震活动进入临界阶段,可将 κ_1 开始持续在0.07附近波动的时刻与地震电信号发生的时刻相互验证,提高地震监测的准确性.在后续的工作中,将开展相应地区地电场观测数据的分析研究,通过地震电信号对本文相关结果进行验证,将是今后研究工作的重点.

3 讨论与结论

本文尝试通过自然时间方法,对发生在中国及周边地区震级排序前30的震例的地震序列参数 κ_1 的变异系数 β 进行了波动性分析,并对 κ_1 进行了定量分析;此外,还对 κ_1 定量分析中时间窗口的选择以及分析结果中出现的特殊情况进行了解释.

本文分析的30次震例中有21次从震前几小时至几个月开始, κ_1 具有持续在0.07附近上下波动,并在主震发生前迅速下降至0附近的特点.这与Varotsos等的理论推导以及在日本和希腊等地开展研究获得的结果一致,不仅证明了自然时间方法分析地震序列参数的正确性,也证明了自然时间方法的普遍适用性.另外,发生在海域的地震,地震事件沿地质构造带规则分布,在利用自然时间法对 κ_1 进行分析的过程中所选取的地震与主震的能量关联更紧密,因此分析结果相比于陆地上一些地质构造复杂地区的结果更加符合理论值.

利用自然时间域对 κ_1 进行分析, 具有分析过程简单、数据来源方便、结果简洁明了的优点; 但由于该方法发展时间尚短, 基础理论和具体分析过程还有待改善. 若能提高结果准确度并排除干扰因素, 特别是能够开展地电场观测资料的相关分析, 将为地震回溯性检验研究及地震预测研究提供一种重要方法.

雅典大学 Varotsos 教授和 Sarlis 教授对本文的写作给予了指导, 审稿专家提出了有益的建议, 作者在此一并表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- 中国地震台网中心. 2016. 国家台网大震速报目录[EB/OL]. [2016-08-31]. <http://www.csndmc.ac.cn/newweb/data.htm>.
- China Earthquake Networks Center. 2016. National networks of quick report catalogue for large earthquakes[EB/OL]. [2016-08-31]. <http://www.csndmc.ac.cn/newweb/data.htm> (in Chinese).
- Holliday J R, Rundle J B, Turcotte D L, Klein W, Tiampo K F, Donnellan A. 2006. Space-time clustering and correlations of major earthquakes[J]. *Phys Rev Lett*, **97**(23): 238501.
- Ramirez-Rojas A, Telesca L, Angulo-Brown F. 2011. Entropy of geoelectrical time series in the natural time domain[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **11**(1): 219–225.
- Sarlis N V, Skorda E S, Lazaridou M S, Varotsos P A. 2008. Investigation of seismicity after the initiation of a seismic electric signal activity until the main shock[J]. *Proc Japan Acad B*, **84**(8): 331–343.
- Sarlis N V, Skorda E S, Varotsos P A, Nagao T, Kamogawa M, Tanaka H K, Uyeda S. 2013. Minimum of the order parameter fluctuations of seismicity before major earthquakes in Japan[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, **110**(34): 13734–13738.
- Varotsos P A, Alexopoulos K. 1984. Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, I[J]. *Tectonophysics*, **110**(1/2): 73–98.
- Varotsos P A, Lazaridou M. 1991. Latest aspects of earthquake prediction in Greece based on seismic electric signals[J]. *Tectonophysics*, **188**(3/4): 321–347.
- Varotsos P A, Alexopoulos K, Lazaridou M. 1993. Latest aspects of earthquake prediction in Greece based on seismic electric signals, II[J]. *Tectonophysics*, **224**(1/2/3): 1–37.
- Varotsos P A, Sarlis N V, Skorda E S. 2001. Spatio-temporal complexity aspects on the interrelation between seismic electric signals and seismicity[J]. *Pract Athens Acad*, **76**: 294–321.
- Varotsos P A, Sarlis N V, Skorda E S. 2002a. Long-range correlations in the electric signals that precede rupture[J]. *Phys Rev E*, **66**: 011902.
- Varotsos P A, Sarlis N V, Skorda E S. 2002b. Seismic electric signals and seismicity: On a tentative interrelation between their spectral content[J]. *Acta Geophys Pol*, **50**: 337.
- Varotsos P A, Sarlis N V, Tanaka H K, Skorda E S. 2005. Similarity of fluctuations in correlated systems: The case of seismicity[J]. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*, **72**: 041103.
- Varotsos P A, Sarlis N V, Skorda E S. 2011a. *Natural Time Analysis: The New View of Time*[M]. Berlin: Springer: 119–138.
- Varotsos P A, Sarlis N V, Skorda E S, Uyeda S, Kamogawa M. 2011b. Natural time analysis of critical phenomena[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, **108**(28): 11361–11364.
- Varotsos P A, Sarlis N V, Skorda E S, Lazaridou M S. 2013. Seismic electric signals: An additional fact showing their physical interconnection with seismicity[J]. *Tectonophysics*, **589**: 116–125.