

文章编号: 0253-3782(2007)03-0250-08

“区域-时间-长度”算法中特征参数的估计及应用^{*}

荣代潞^{*} 李亚荣

(中国兰州 730000 中国地震局兰州地震研究所)

摘要 根据地震前震源及周围地区出现的空区的时空特征, 提出了一种估计“区域-时间-长度”算法中特征参数(特征距离和特征时间)的方法, 并介绍了 2006 年一些学者提出的用相关系数估计特征参数的方法。用这两种方法研究了近年来发生在中国大陆西北和西南地区的 4 次中强地震前的地震活动异常特征。结果表明, 本文提出的估计特征参数的方法是一种具有物理意义、使用简单的方法, 对中国大陆西北和西南地区的 4 次中强震的应用都有较好的效果。

关键词 RTL 算法 特征距离 特征时间

中图分类号: P315.0 **文献标识码:** A

引言

Sobolev 和 Tyupkin(1997)提出的区域-时间-长度算法(简称 RTL 算法)在研究中强地震, 特别是大震前的地震活动平静和活跃的前兆特征方面, 得到了广泛的应用(Giovambattista, Tyupkin, 2000; Huang *et al.*, 2001, 2002; 蒋海昆等, 2004; 刘虹, 苏有锦, 2006)。以往的研究表明, 对所研究的震例都不同程度地检测到了地震前的地震平静和活动异常现象。

在 RTL 算法中, 有两个重要的特征参数, 即特征距离和特征时间。而以往的研究中都采用经验的方法确定, 这在某种程度上带有一定的主观性。本文提出一种估计 RTL 算法中两个特征参数的方法。在此基础上, 研究近期发生在中国大陆西北和西南地区 4 次中强地震的地震活动前兆特征。

1 RTL 算法

所谓 RTL 算法是在所关注的时空点(x, y, z, t)构造一个 R , T 和 L 函数:

$$R(x, y, z, t) = \left[\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{r_i}{r_0}\right) \right] - R_{bg}(x, y, z, t) \quad (1)$$

$$T(x, y, z, t) = \left[\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{t-t_i}{t_0}\right) \right] - T_{bg}(x, y, z, t) \quad (2)$$

* 国家自然科学基金(40574026)和地震科学联合基金(D07024)资助。兰州地震研究所论著编号: LC20070009。

2006-09-28 收到初稿, 2007-03-16 决定采用修改稿。

† 通讯作者。e-mail: rongdl@gssb.gov.cn

$$L(x, y, z, t) = \left[\sum_{i=1}^n \left(-\frac{l_i}{r_i} \right) \right] - L_{bg}(x, y, z, t) \quad (3)$$

$$V_{RTL}(x, y, z, t) = R(x, y, z, t) \cdot T(x, y, z, t) \cdot L(x, y, z, t) \quad (4)$$

式中, $R(x, y, z, t)$, $T(x, y, z, t)$ 和 $L(x, y, z, t)$ 分别为震中距函数、时间函数和破裂尺度函数。 $R_{bg}(x, y, z, t)$, $T_{bg}(x, y, z, t)$ 和 $L_{bg}(x, y, z, t)$ 分别是它们的背景值, 即在所选的整个计算 RTL 函数的时段内对 R , T , L 作线性回归后的线性趋势。 l_i 和 t_i 是第 i 次地震的破裂尺度和发生时间, r_i 是第 i 次地震到所关注的点的距离。 $V_{RTL}(x, y, z, t)$ 即为 RTL 函数。从上面的式(1)、(2)和(3)看出, 破裂尺度的权重比震中距和时间的权重要小。蒋海昆等(2004)考虑了在震前地震强度或能量的显著变化, 将式(3)改为指数形式, 强化了破裂尺度的影响

$$L(x, y, z, t) = \left[\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{l_i}{r_i}\right) \right] - L_{bg}(x, y, z, t) \quad (5)$$

并将式(4)归一化

$$V_{RTL}(x, y, z, t) = \frac{R(x, y, z, t)}{R(x, y, z, t)_{max}} \cdot \frac{T(x, y, z, t)}{T(x, y, z, t)_{max}} \cdot \frac{L(x, y, z, t)}{L(x, y, z, t)_{max}} \quad (6)$$

这使得 V_{RTL} 函数在 $[-1, 1]$ 之间变化, 其期望为 0。 V_{RTL} 大于或小于 0 分别表示地震活动在背景活动水平上的增强或平静。

在实际计算时, 引入如下约束条件:

$$M_i \geq M_{min} \quad (7)$$

$$r_i \leq R_{max} = 2r_0 \quad (8)$$

$$t_i \leq T_{max} = 2t_0 \quad (9)$$

$$d_i \leq d_0 \quad (10)$$

式中, M_{min} 为震级下限, 它与所用地震目录的完备性有关, 一般用古登堡公式确定。 M_i 为第 i 次地震的震级, d_i 是其震源深度, d_0 为截止深度, 一般选取所用目录的所有深度的地震。 r_0 和 t_0 分别为特征距离和特征时间。

从式(1)~(3)和式(8)、式(9)中可以看出, 特征参数 r_0 和 t_0 对所计算的 R , T 和 L 函数值有直接的影响, 而且决定了被计算的地震的范围及时间, 从而影响最终的 $V_{RTL}(x, y, z, t)$ 函数值。由此可以看到这两个参数在 RTL 算法中的重要性。对于 r_0 和 t_0 的选取, 以往的学者通常是综合考虑中强地震的破裂尺度和定位精度, 经验性地人为“规定”, 然后在一定范围内进行试算决定, 这在一定程度上带有主观性。

2 决定特征参数的方法

鉴于 RTL 算法中特征参数的重要性, Chen 和 Wu(2006)提出一种采用分别求取一组 r_0 和 t_0 相关系数的方法, 来决定这两个特征参数并应用在台湾集集地震中。这种方法在数学上使得用所求得的 r_0 和 t_0 可以得到比较稳定的 RTL 函数图象。

事实上, 大震和中强地震之前震源及附近地区的地震活动异常(包括平静和增强)现象早已受到人们的关注。关于地震平静, 一个为大家所熟知的是关于地震之前出现地震活动“空区”的现象。所谓“空区”实际上就是主震之前出现的地震活动异常平静的地区, 目前中强地震前存在空区的现象已经得到了普遍的认同。Mogi(1997)提出了两种地震空区的概

念,本文所说的空区是指中强地震前所出现的弱震活动空区.

许多研究者发现,空区的大小(尺度)和空区出现的时间与未来发生的主震的大小有一定的关系. 韩渭宾和席敦礼(1984)综合考虑了空间和时间两种因素,用 $R-t$ 图的方法来研究主震前出现的空区特征. 所谓 $R-t$ 图是以所研究范围的最大地震为原点,从尽可能早的时间起,计算一定范围内弱震到原点的距离 R ,然后以时间为横轴作图,即得到 $R-t$ 图. 如果在 $R-t$ 图上靠近横轴的地方出现缺震区,就说明相应时段震中附近出现弱震活动相对平静期. 由所得到的 $R-t$ 图可以估计空区出现的时间段以及空区的最大空间尺度.

韩渭宾和席敦礼(1984)从所研究的 10 个震例得到的空区尺度和出现时间与主震震级的经验关系如下:

$$M = 5.50 \lg R_{\max} - 2.33 \pm 1.32 \quad (11)$$

$$M = 2.98 \lg T + 2.94 \pm 1.06 \quad (12)$$

式中, R_{\max} 是空区的最大尺度,单位为 km; T 是空区出现的时间,单位为月. 上面两式分别在显著水平 0.10 和 0.01 的情况下被认为是线性相关的.

既然空区和 RTL 算法中研究的地震活动平静异常是基于同样物理基础的现象,这提示我们可以尝试将空区的尺度和出现时间当作 RTL 算法中的特征距离和特征时间,具体表示如下:

$$M_s = 5.50 \lg r_0 - 2.33 \quad (13)$$

$$M_s = 2.98 \lg t_0 + 2.94 \quad (14)$$

应当指出的是,首先,我们用表征地震活动平静的空区的时空尺度作为特征时间和特征距离来检测大震之前出现的地震平静. 所谓“地震平静”是在大震来临之前地震活动水平整体降低,低于背景活动水平. 这种现象是由于这一段时期能量积累大于释放. 平静时间越长平静范围越大;能量积累得越多,未来可能的地震也越大. Hainzl 等(1999)在地震孕育和发生的一维滑块模型的基础上提出改良后的二维滑块模型. 此二维滑块模型不仅能模拟出更符合现实的断层系统,并且可以成功模拟出各种地震现象,例如地震平静、前震、余震等. Hainzl 等(2000)又利用此模型证实地震平静现象可以作为大地震来临之前的指标. 因此,相对于背景地震活动的地震平静是中强地震前一种十分重要的前兆现象. 由于 RTL 算法中的地震平静和地震活动增强是相对于背景地震活动而言,所以也能检测出所研究的区域高于背景地震活动的异常(如果存在的话). 其次,由于上述关系是通过一定数量的震例研究得出的经验关系,而且不同地区所得到的这种经验关系也有一定的差异,所以由此得到的特征距离和特征时间都有一定的变化范围,并且应当在所研究的区域进行验证.

3 4 次地震的地震活动前兆特征

为了进行对比,我们分别用求相关系数的方法及用式(13)、式(14)计算的特征距离和特征时间方法,研究了近期发生在中国大陆西北和西南地区的 4 次中强地震前的地震活动异常特征,并与用相关系数方法求得的特征参数的结果进行了比较.

1) 资料. 选择表 1 所列 4 次地震进行详细研究.

利用中国地震局地震预测研究所公布的全国地震目录,以所研究的地震震中位置为中

表 1 地震参数

日期 年-月-日	发震时刻 时:分:秒	震 中 位 置		M_s	地 点
		$\varphi_N/(\circ)$	$\lambda_E/(\circ)$		
2000-09-12	08:27:31	35.56	99.64	6.4	青海兴海
2003-07-21	23:16:30	25.95	101.24	6.2	云南大姚
2002-12-14	21:27:29	39.82	97.33	5.9	甘肃玉门
2003-10-25	20:41:36	38.35	100.93	6.1	甘肃山丹

心,选取边长为 4° 的正方形区域、主震前5年的地震资料。地震目录的完备性通过古登堡公式

$$\lg N = a - bM \quad (15)$$

对所选取的目录进行检验,以确定震级下限。从图1可以看出,对于兴海6.4级地震、大姚6.2级地震、玉门5.9级地震的震级下限可选为2.0级,山丹6.1级地震的震级下限可选为1.5级。

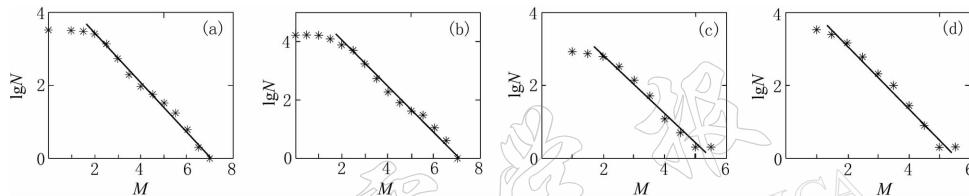


图 1 所选时空范围地震的震级-频度曲线

(a) 兴海 6.4 级地震; (b) 大姚 6.2 级地震; (c) 玉门 5.9 级地震; (d) 山丹 6.1 级地震

在所选取的时空范围内,如果在所研究的地震之前有较大的地震发生,这些地震的余震将会影响地震活动的背景值,从而对地震活动的异常特征产生干扰。余震的删除十分复杂,任雪梅(2005)在诸多方法的基础上发展了一种定量删除余震的方法。本文采用这种方法来消除所选时空范围的地震资料中 $M_s \geq 5.0$ 地震的余震。

2) 关于破裂长度。地震的破裂长度与地震的震级有关。本文利用郭增建和秦保燕(1991)的公式

$$M = 3.3 + 2.1 \lg L (\text{km}) \quad (16)$$

计算地震的破裂长度

$$L = 10^{0.48M-1.57} (\text{km}) \quad (17)$$

3) RTL 计算及结果。Chen 和 Wu(2006)用相关系数方法求取两个特征参数,所采取的方法是:对于一个给定的特征距离 r_0 ,将特征时间 t_0 在可能的范围内以一定的步长变化。分别求取每一个组合的 RTL 函数,然后求取各个 RTL 函数组合的相关系数,它们的平均值即为这一个给定的特征距离的相关系数。使特征距离在一定的范围以一定的步长变化,用上面同样的方法求得每一个特征距离的相关系数。最后选取相关系数最大的特征距离为实际计算 RTL 函数时的特征距离。同样可以求得相关系数最大的特征时间。

对于本文所研究的 4 次地震,按照上面的方法求得特征距离和特征时间的相关系数变化,如图 2 所示。从图中相关系数最大值可以得到对应的特征距离和特征时间。对于相关系数有一定范围的地震,则在计算 RTL 函数时在此范围内由试验确定。同时,由式(13)和式(14)分别求得特征距离和特征时间(表 2)。

表 2 用两种方法求得的特征参数

地震	M_S	相关系数最大位置		按照式(13)和式(14)计算的特征参数	
		r_0/km	t_0/d	r_0/km	t_0/d
兴海	6.4	62	840	42	507
大姚	6.2	77	630	36	372
玉门	5.9	30	330~1 000	31.4	295
山丹	6.1	20, 50~80	450, 630	34.1	345

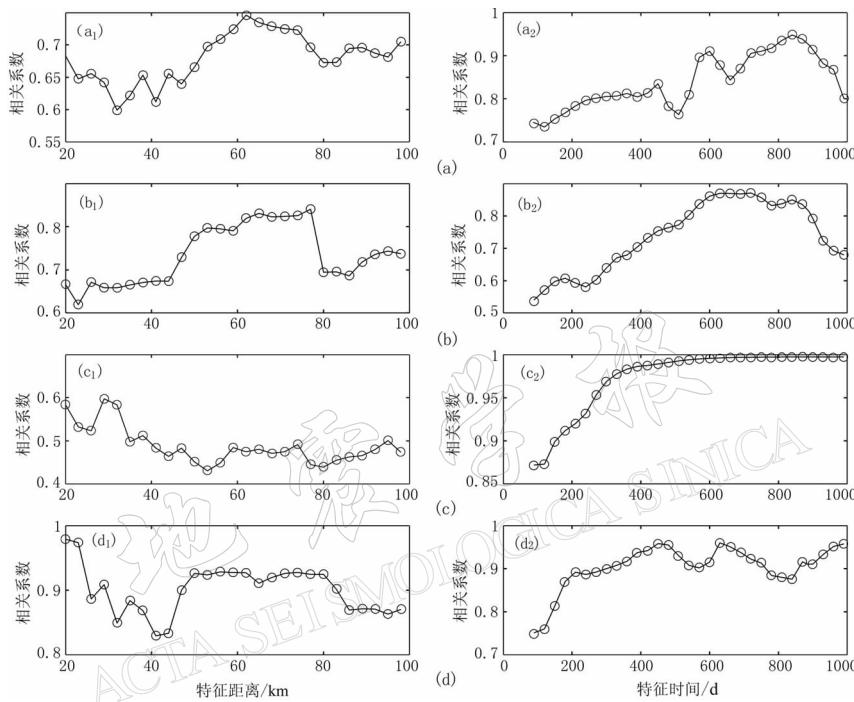


图 2 用相关系数方法求得的特征参数

(a) 兴海 6.4 级地震; (b) 大姚 6.2 级地震; (c) 玉门 5.9 级地震;
 (d) 山丹 6.1 级地震. ($a_1 \sim d_1$) 为特征距离; ($a_2 \sim d_2$) 为特征时间

分别用这两组特征参数计算 RTL 函数值的时间变化曲线, 如图 3 所示.

4 讨论和结论

1) 本文用两种方法估计了 RTL 算法中的特征参数: 一种是用 Chen 和 Wu(2006)求相关系数的方法; 另一种是本文提出的基于空区的时空特征, 用式(13)和式(14)计算得出的特征距离和特征时间的方法. 应当看到, Chen 和 Wu 的求相关系数的方法仅对台湾集集地震一次震例应用, 得到了好的效果. 从本文的 4 次地震来看, 有的地震(如兴海 6.4 级地震)效果较好, 有些地震(如玉门 5.9 和山丹 6.1 级地震)不能得到唯一的相关系数最大的位置, 有的地震得到明显不合理的大值位置(如山丹 6.1 级得到最大值位置 20 km 的特征距离). 在这些情况下计算 RTL 函数时仍然要对特征参数进行试验确定, 这给实际使用这种相关系数方法带来困难.

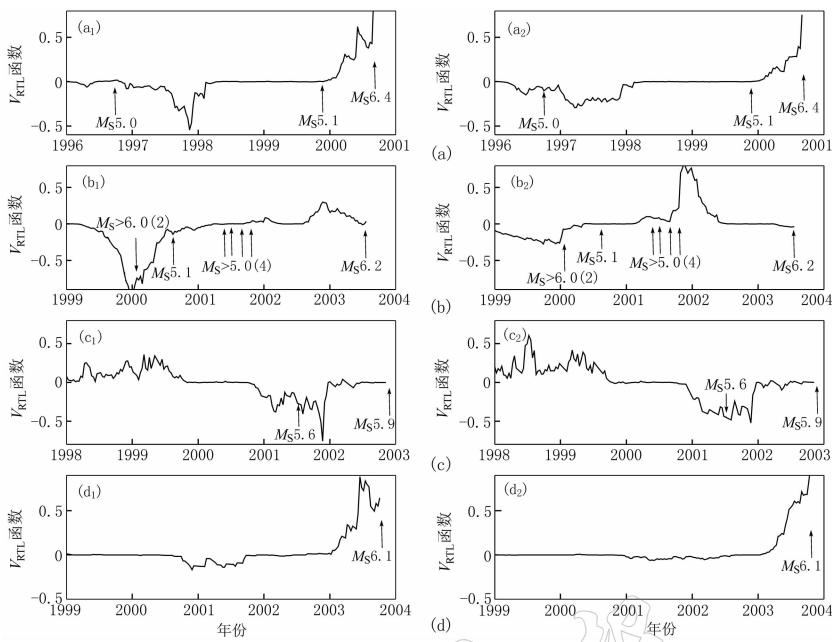


图 3 4 次地震的 RTL 函数

(a) 兴海 6.4 级地震; (b) 大姚 6.2 级地震; (c) 玉门 5.9 级地震; (d) 山丹 6.1 级地震
 $(a_1 \sim d_1)$ 为用式(13)和式(14)计算的特征参数; $(a_2 \sim b_2)$ 为用相关系数方法得到的特征参数
 (图中竖线指向表示主震前在所研究的范围发生的中强地震)

2) 对照图 3 中的计算结果可以看出, 两种方法均能得到大致相同变化的 RTL 函数曲线。但是我们也看到, 本文提出的基于空区的时空特征用式(13)和式(14)计算得出特征距离和特征时间的结果要好于前者, 它所表示的地震平静和活跃的幅度相对要大。对于大姚地震, 由于用相关系数方法得到的特征距离较大(77 km), 因此有较大范围的地震被计算, 地震活动水平在 2000 年前后表现出较高的水平。如前所述, 作为地震可能的前兆, 地震平静相对高地震活动要可靠一些。这是由于在 RTL 运算过程中, 负 RTL 值(低地震活动)除了地震资料短缺可能会导致外, 不受其它因素控制产生; 而高 RTL 值(地震活动高水平异常)则容易受背景值、余震、群发地震, 甚至于较大中强地震发生的影响而产生。

3) 消除余震对计算结果有较大影响, 特别是对于像云南地区这样中强地震频发的地区。例如对于大姚 6.2 级地震, 消除余震前后的 RTL 函数如图 4 所示。

对比图 4a, b 可以看到, 在所研究的区域 2001 年 5 级以上地震的频发导致了较高的地震活动水平, 而消除余震后在 RTL 函数图象上得到了抑制。

4) 我们利用 RTL 算法研究中强地震前的地震活动异常特征的目的, 在于将这种方法应用于一个地区的大震预测中, 也就是要对所关心的地区进行扫描搜索。如果应用求相关系数的方法来估计两个特征参数, 则对每一个计算区域都要进行大量的计算。而且根据 Chen 和 Wu(2006)的结果, 相关系数最大时可能得出不合理的特征参数, 这种情况下就要求人为识别确定。所以, 这种方法用在实际预测中是比较困难的。本文提出的估计 RTL 算法中两个特征参数的方法不但有较好的物理基础, 而且简单易行, 便于在实际预测中应用。在实际应用时, 对于需要检测的区域首先设定一个起始检测震级(如 $M=5.0$), 用式

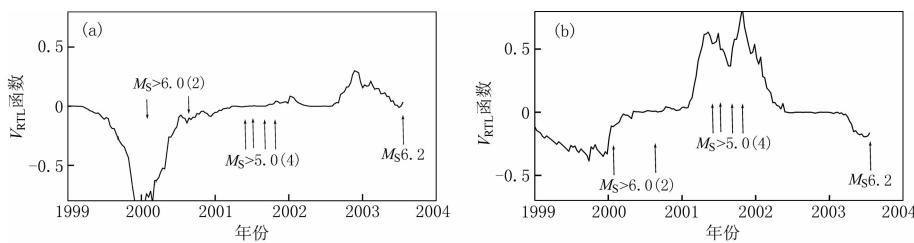


图 4 大姚 6.2 级地震消除余震前后的 RTL 函数. (a) 消除余震; (b) 未消除余震
(图中竖线指向表示主震前在所研究的范围发生的中强地震)

(13) 和式(14)计算特征距离和特征时间,用 RTL 算法对所关心的空间进行扫描,这样判定出的危险区即为可能发生该震级(如 $M=5.0$)地震的区域;然后可以对较大震级(如 $M=6.0, 7.0$ 等)进行同样的检测,这样就可以得出可能发生不同震级的地震的危险区域,供地震预测时参考.

5) 用 RTL 算法对中国大陆 4 次 6 级左右的地震(包括西北和西南地区)的研究结果表明,在所研究的地震前都出现了典型的地震活动平静—活跃—发震的前兆异常,这为用这种方法进行地震预测提供了震例.

6) 应当指出,本文提出的估计 RTL 算法中两个特征参数的方法,是建立在空区的时空特征研究的基础上的.由于空区的时空尺度与主震震级的关系存在很大的不确定性和地区差异,本文提出的这种方法还需要更多震例的验证和改进.

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: 177-178.
- 韩渭宾, 席敦礼. 1984. 四川地区强震前弱震空区的变化特征[J]. 地震学报, 6(1): 8-21.
- 蒋海昆, 侯海峰, 周焕鹏, 等. 2004. “区域-时间-长度算法”及其在华北中强地震中短期前兆特征研究中的应用[J]. 地震学报, 26(2): 151-161.
- 刘虹, 苏有锦. 2006. 区域-时间-长度算法在云南地区的应用研究[J]. 地震研究, 29(1): 25-29.
- 任雪梅. 2005. 西北地区东部 5 级以上地震余震删除研究[D]. [学位论文]. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所: 17-22.
- Chen Chienchih, Wu Yixuan. 2006. An improved region-time-length algorithm applied to the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake[J]. *Geophys J Int*, 166: 1 144-1 147.
- Giovambattista D R, Tyupkin Y S. 2000. Spatial and temporal distribution of seismicity before the Umbria-Marche September 26, 1997 earthquakes[J]. *J Seismology*, 4: 589-598.
- Hainzl S, Zoller G, Kurths J. 1999. Similar power laws for foreshock and aftershock sequences in a spring-block model for earthquakes[J]. *J Geophys Res*, 104: 7 243-7 254.
- Hainzl S, Zoller G, Kurths J. 2000. Seismic quiescence as an indicator for large earthquakes in a system of self-organized criticality[J]. *Geophys Res Lett*, 27: 597-600.
- Huang Q, Sobolev G A, Nagao T. 2001. Characteristics of the seismic quiescence and activation patterns before the $M=7.2$ Kobe earthquake, January 17, 1995[J]. *Tectonophysics*, 337: 99-116.
- Huang Q, Oncel A O, Sobolev G A. 2002. Precursory seismicity changes associated with the $M_w=7.4$ 1999 August 17 Izmit (Turkey) earthquake[J]. *Geophys J Int*, 151: 235-242.
- Mogi K. 1979. Two Kinds of seismic gap[J]. *Pure Appl Geophys*, 117(6): 1 176-1 186.
- Sobolev G A, Tyupkin Y S. 1997. Low-seismicity precursors of large earthquakes in Kamchatka[J]. *Volc Seism*, 18: 433-446.

ESTIMATION OF CHARACTERISTIC PARAMETERS IN REGION-TIME-LENGTH ALGORITHM AND ITS APPLICATION

Rong Dailu Li Yarong

(Earthquake Institute of Lanzhou, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China)

Abstract: On the basis of gap's temporal-spatial characteristics in and around source area before an earthquake, we propose a method to estimate characteristic parameters (characteristic distance and time) in the region-time-length (RTL) algorithm and introduce the method of correlation coefficient developed by some authors in 2006 to determine the characteristic parameters. The anomalous seismic activities before four moderately strong earthquakes occurred in the northwestern and southwestern China in recent years are studied by the two methods. The results show that the method to estimate characteristic parameters advanced in this paper is a simple one, which possesses a physical meaning and is well applicable to the four moderately strong earthquakes studied.

Key words: RTL algorithm; characteristic distance; characteristic time