

# 青藏块体东北缘6次中强地震前地震相关长度增长现象

荣代潞, 李亚荣

中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000

**摘要:** 为研究大震前地震空间相关长度的变化特征, 分析了青藏块体东北缘6次中强地震前的地震活动的时空演变. 在计算空间相关长度过程中, 采用长轴与孕震区主要断裂走向一致的椭圆形空间窗, 并设计了优化程序. 比较椭圆形和圆形空间窗的结果, 表明对所研究的6次中强地震前都观测到了增长的地震空间相关长度. 椭圆形空间窗的结果比圆形的结果更好, 相关长度增长幅度较大, 曲率参数值较小. 利用3种合成地震目录对结果进行了显著性检验. 3种随机数据的检验结果都否定了零假设, 表明观察到的模型不是由随机数据干扰造成的, 这一观点的置信水平被证实为99%以上. 最后得出主震震级与临界区的尺度(等效半径)关系为  $\log R_c \sim 0.46(\pm 0.02)M$ , 与理论值符合得较好.

**关键词:** 相关长度; 空间窗; 显著性检验; 青藏块体东北缘; 中强地震.

中图分类号: P631.4

文章编号: 1000-2383(2009)04-0673-09

收稿日期: 2008-10-26

## Growing Correlation Length Prior to Moderate Strong Earthquakes in the Boundaries along the Northeast Margin of Tibet Block

RONG Dai-lu, LI Ya-rong

Lanzhou Institute of Seismology, Chinese Earthquake Administration, Lanzhou 730000

**Abstract:** For studying the characteristics of seismic correlation length before great earthquakes, the temporal-spatial change of seismicity prior to 6 moderate strong earthquakes ( $M_L > 5.5$ ) in the boundaries along the northeast margin of Tibet block have been analyzed. We use ellipse, whose long axis is coincident with the strike of main fault belt in the source area, as the spatial window to analyze growing correlation length prior to main-shock and design the corresponding optimization procedure. Comparison between the results from elliptical and circular spatial windows shows that the growing correlation length prior to 6 moderate strong earthquakes studied have been observed in both two spatial windows. The results from ellipse are better than that from circular, and the growth ranges of correlation length in former are larger than those in later yet the smaller curvature parameter values of  $C$  are obtained in elliptical spatial windows. Three types of random synthetic catalog are used to test the significance of the results. The results reject the null hypothesis for three types of random synthetic catalog and show that the observed patterns are not consequences of random fluctuations. That theory is found to be of above 99% confidence levels. The scaling relation we found,  $\log R_c \sim 0.46M$  between the main-shock magnitude  $M$  and the equivalent radius  $R_c$  of the critical region is in good agreement with theoretical values.

**Key words:** correlation length; spatial window; significance test; the northeast margin of Tibet block; moderate-sized earthquake.

地震孕育和发生具有自组织临界性特征. 在大地震的孕育过程中, 应力从较小到较大规模的重新分布建立了一种长程相关性. 如果在地壳中裂隙的一端由于应力的集中发生一次地震, 那么应力可以直接传递到另一端. 在远离临界点的地方, 由于地壳中裂隙随机分布, 所以震中的分布也大致是随机的.

如果孕震系统接近临界点, 随机分布的裂隙可以发展成为较长的裂隙, 使较远的应力转移成为可能, 小的破裂可以越过障碍发展成为大地震. 因此, 在高度相关的应力场中, 很可能触发远距离的地震. 当达到临界程度时, 该系统可以保持接近这种状态. 根据这个理论, 正在孕育大震的地区具有加速地震释放

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40574026); 科技部专项(No. 2006BAC01B03-04).

作者简介: 荣代潞(1945-), 男, 研究员, 从事地球物理和地震学研究, E-mail: rongdl@qssb.gov.cn

的特征(Sykes and Jaume, 1990). 地震释放的加速是由空间相关长度的增长造成的. 直接检测大地震之前空间相关长度的增长是一种从观测的地震活动中检测临界点特征的独立方法.

如果一种系统接近临界点, 根据幂次律, 相关长度  $\xi$  应增长(Bruce and Wallace, 1992):

$$\xi(t) \sim (t_f - t)^{-k}, \quad (1)$$

式(1)中  $k$  为正数,  $t_f$  是系统破裂(地震发生)的时间. 从地震目录中估算相关长度  $\xi$  的方法是用 Frohlich and Davis(1990)引进的单链群分析方法(Single-link cluster analysis, SLC). 单链群分析法可以在全局和局部区域的不同层次上定义群或分立事件之间的特征尺度. 因此, 可以从数学上表达事件之间或事件组之间的相互关系. 并且单链群分析的结果形成一种线性的链接, 它对地震这种常常沿线性构造(例如大断裂)发生的现象是一种很好的分析方法. 对于某一区域分布的一定数目的地震, 它们之间的距离(震中距)的特征尺度即所谓空间相关长度. 为了得到相关长度的时间演化进程, 使用滑动时间窗方法. 这样就可得到主震发生前一段时间内相关长度随时间的演化过程. 如果这种演化进程在主震发生前有加速增长的现象, 可以用(1)式进行幂次律拟合.

Zöller *et al.* (2001)对加州 1952 年以来发生的所有  $M \geq 6.5$  地震作了系统分析, 在多数情况下观测到了增长的相关长度. 他选择半径为  $R$  的圆形区域为空间窗. 考虑到在大面积相关的应力场中, 孕震区域内断层的存在使较远的应力转移成为可能. 本文选取长轴与震源区主要断层走向一致的椭圆形为空间窗, 并对其进行了优化, 以便对相关长度增长进行最佳观测. 为便于对比, 仍然使用 Zöller *et al.* (2001)的方法(使用单链群分析方法计算空间相关长度, 并使用同样的方法用合成目录进行显著性检验). 以近年来发生在青藏块体东北缘的 6 次中强地震为例, 分别使用椭圆形和圆形的空间窗对比研究地震前相关长度变化的特征.

## 1 计算参数和优化程序

(1)空间窗的选取. 孕震区的物理系统大小直接与空间的相关长度有关. 通常在孕震区分布有活动断裂, 地壳中增长的应力主要在断裂带及其附近区域进行转移传递. 根据地震发生时地壳中的背景应

力场不同, 地震的震源机制大致可以分为三种类型, 即走滑型、正断层型和逆冲型, 以及这三种类型结合的方式. 其中以走滑型为主的地震主震发生前的应力增强过程中发生的地震可以沿断裂带分布很远的距离. 根据研究(崔效锋等, 2005), 中国及邻区震源机制解的类型主要以走滑型和逆冲型为主, 其中走滑型震源机制解最多. 发生在中国大陆 6 级以上的地震大多以走滑型为主. 因此, 地震的相关长度沿断裂带比其他方向相对要大. 所以在这种情况下, 沿断裂带选取一定区域的空间窗来计算空间相关长度应该更合理一些. 对于逆冲性和正断层为主的地震, 可能选取圆形的空间窗合适一些.

对于走滑型为主的地震, 选择中心位于主震的椭圆形区域, 其长轴方向与该区的主要断裂走向一致. 在优化过程中, 椭圆形的长轴(平行于断裂)取值  $a_1 \sim a_m$ , 步长  $\Delta a$ . 短轴(垂直于断裂)取值  $b_1 \sim b_n$ , 步长  $\Delta b$ . 通常  $a_m > b_n$ , 总的组合  $N = m \times n$  个椭圆形. 对于这  $N$  个椭圆形分别计算相关长度.

孕震区的物理系统大小与主震震级有关, 也就是与主震的破裂尺度有关. 针对不同地区已经有许多震级和破裂尺度之间的经验关系, 郭增建等(1973)得出适合中国大陆西部的经验关系:  $M = 3.3 + 2.1 \log L(\text{km})$ . 对于 6 级地震,  $L \approx 20 \text{ km}$ . 因此, 我们取  $a_1 = 10 \text{ km}$ ,  $a_m = 300 \text{ km}$ , 步长  $\Delta a = 5 \text{ km}$ ,  $m = 59$ ;  $b_1 = 5 \text{ km}$ ,  $b_n = 100 \text{ km}$ , 步长  $\Delta b = 5 \text{ km}$ ,  $n = 20$ . 总共有  $N = 1180$  个椭圆形区域.

为了对比, 同时用圆形的空间窗实行优化程序. 圆形空间窗中心位于主震震中, 半径由  $10 \sim 200 \text{ km}$ , 步长  $5 \text{ km}$ , 共 39 个圆, 分别计算相关长度.

(2)时间窗的选取. 对主震前计算出来的相关长度用(1)式在区间  $t_0 \sim t_f$  进行幂次律拟合, 这里  $t_0$  是一个自由参数, 由于相关长度增长只有在主震发生前一段时间(通常是数年)才能观测得到, 我们取  $t_0$  为主震前 4 年的时间.

(3)优化程序. 对于某一次地震, 在选定的空间窗区域内计算相关长度并进行幂次律拟合, 同时进行线性拟合. 定义一个曲率参数:

$$C = \frac{(RMS)_{\text{powerlaw}}}{(RMS)_{\text{linear}}}, \quad (2)$$

这里  $(RMS)_{\text{powerlaw}}$  为根据(1)式进行幂次率拟合的均方根差,  $(RMS)_{\text{linear}}$  为相同资料进行线性拟合的均方根差. 当相关长度可以用幂次率拟合时,  $C$  值小, 相反, 如果相关长度未发生幂次率形式的加速增长,  $C$  值接近 1. 对所有的  $N$  个椭圆形计算  $C$  值. 为了减

少空间窗的自由参数, 我们将椭圆形面积作为一个圆的面积, 其半径为空间窗的等效半径  $R_e$ . 这样可以画出曲率参数  $C$  和区域尺寸 ( $R_e$ ) 的函数图. 注意在所选取的椭圆形空间窗中, 有面积相等但是包含地震数不同, 因而  $C$  值不同的情况, 此时取其中较小的  $C$  值为这个面积下的  $C$  值. 空间窗的最优半径对应最小的  $C$  值, 此时的空间窗的大小即为临界区域.

在得到  $C$  值最小的椭圆形临界区后, 对椭圆的长轴方位角进行了进一步的优化. 方法是首先选取与主震附近主要断裂走向大致一致的长轴方向, 得到最小  $C$  值的临界区, 然后以此为基础, 进行  $\pm 20^\circ$  的旋转, 步长  $5^\circ$ , 以确认所得到的  $C$  值为最小. 如果在一个新的方位角得到更小的  $C$  值, 就以这个方位角为基础, 重复上面对椭圆的大小进行优化的程序, 直到得到最小的  $C$  值为止.

(4) 起始震级. 起始震级的选取对结果有一定的影响. 我们对所用的地震目录用古登堡公式 (Gutenberg and Richter, 1956) 进行完备性检验, 得到所用资料的截止震级. 为资料可靠, 取稍大于其截止震级作为起始震级.

## 2 资料

在此项研究中, 我们分析了青藏块体东北缘  $93^\circ \sim 107^\circ \text{E}$ ,  $35^\circ \sim 42^\circ \text{N}$  之间的地震活动, 研究自 1980 年到 2003 年发生的 6 次  $M_L > 5.5$  级的地震前空间相关长度的变化. 数据取自甘肃省地震局出版的地震目录, 该地震目录自 1970 年至现在, 研究区域和 6 次地震分布示于图 1.

在图 1 中, 我们加进了所统计区域的主要活断层分布 (Gaudemer *et al.*, 1995; Lasserre *et al.*, 2001; 刘百箴等, 2008). 图中所示断裂带为青藏高原东北缘分布的祁连山活动断裂带, 总体走向 NW-SE. 我们所研究的 6 次中等强度地震基本上分布在这个断裂带上. 为保证数据的完整性, 我们所作的分析限制在 1980—2003 年以来发生的 6 次  $M_L > 5.5$  级主震. 震中分布如图 1 中星号所示, 这 6 次地震的参数列于表 1, 图 2 所示为该区域 1980—2003 年的地震 ( $M_L > 2.5$ ) 分布.

地震目录完备性检验. 根据古登堡公式, 在所研究的范围内 ( $93^\circ \text{E} \sim 107^\circ \text{E}$ ,  $35^\circ \text{N} \sim 42^\circ \text{N}$ ) 震级—频度分布如图 3 所示. 可以看出, 其截止震级为 2.0

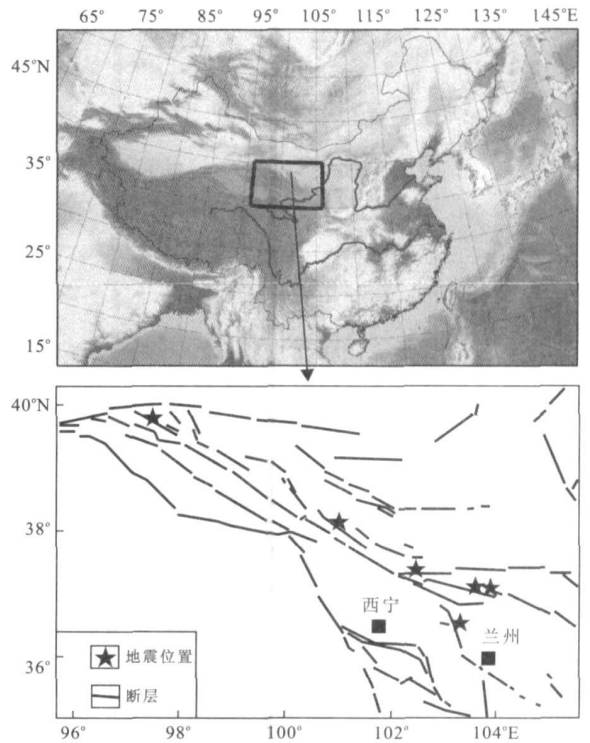


图 1 研究区位置, 所研究的 6 次地震的震中分布以及研究区断层分布

Fig. 1 The location of the study area relative to Tibet block, the faults in the area and epicenter distribution of the earthquakes studied

级. 我们在相关长度分析中取  $M=2.5$  为起始震级.

## 3 各次地震的临界区域和相关长度计算结果

图 4 是各次地震的临界区域大小, 分别表示了椭圆形和圆形两种情况. 在图 4 中, 断层分布与图 1 中相同. 图 5 是各次地震前相关长度的变化, (1) 为椭圆形临界区域; (2) 为圆形临界区域. 在图 5 中,  $R_e$  和  $R$  分别为椭圆形和圆形区域的等效半径和半径,  $C$  为曲率参数,  $k$  为幂次率拟合  $\xi(t) \sim (t_f - t)^{-k}$  中的指数值, 这些参数列于表 1 中. 作为一个例子, 图 6 表示对 1990 年景泰 6.2 级地震决定椭圆形和圆形临界区域半径的最小曲率参数  $C$  的优化过程.

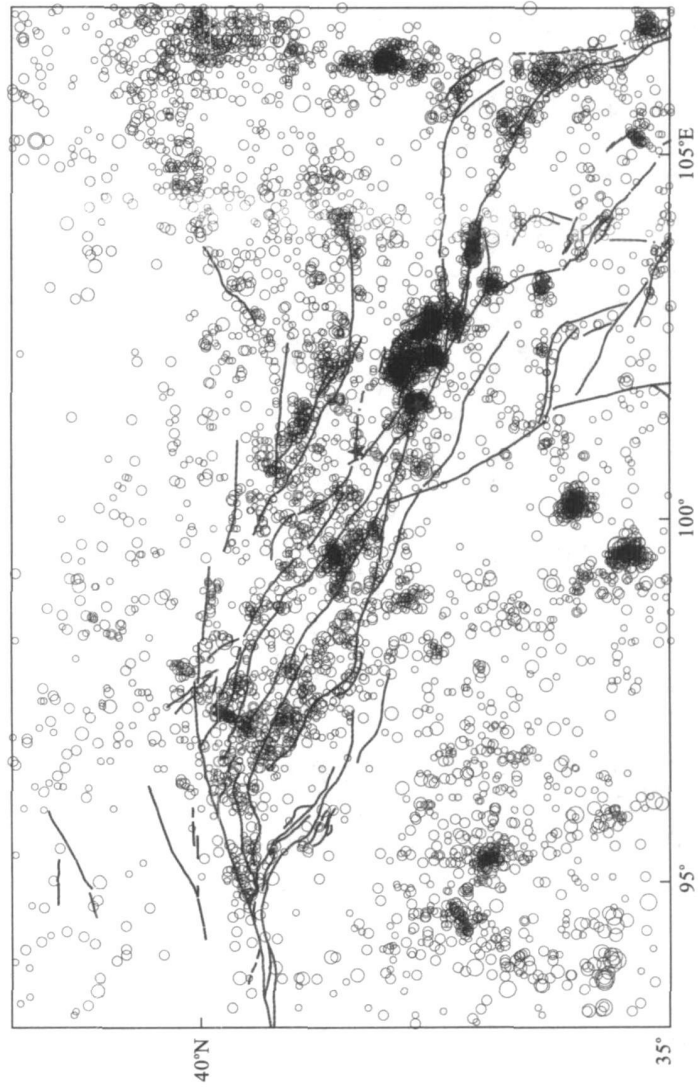
## 4 对合成地震目录的统计检验

我们使用的优化程序根据真实的地震目录的时空分布鉴别出在主震前的相关长度增长. 问题是这

表1 研究的6次地震的参数和分析结果

Table 1 The parameters of 6 earthquakes studied and the results analyzed

宏观位置	震中位置	$M_L$	发震日期	$R_c$ (km)		C		k		目录置信水平类型1 (%)	目录置信水平类型2 (%)	目录置信水平类型3 (%)
				椭圆	圆	椭圆	圆	椭圆	圆			
门源	101°34'E 37°42'N	6.4	1986-08-26	135	140	0.53	0.77	0.09	0.07	18.1	17.3	14.5
景泰	103°35'E 37°07'N	6.2	1990-10-20	91	84	0.46	0.74	0.04	0.01	16.2	14.5	9.5
永登	103°15'E 36°22'N	5.8	1995-07-22	71	72	0.59	0.63	0.01	0.01	20.5	18.4	16.8
景泰	103°55'E 37°08'N	5.9	2000-06-06	90	96	0.40	0.72	0.05	0.04	13.2	12.8	8.9
玉门	97°19'E 39°49'N	5.8	2002-12-14	63	56	0.54	0.70	0.03	0.02	19.3	18.2	14.9
山丹	100°56'E 38°21'N	6.1	2003-10-25	101	110	0.60	0.95	0.03	0.01	22.6	20.7	18.3
累积概率平均值 $\bar{P}(C)$						18.32				16.98		13.82
拒绝零假设(观测到的模型能够在随机目录中发生)的置信水平(%)						99.7				99.8		99.9

图2 研究区域内地震分布(1980—2003年,  $M_L \geq 2.5$ )  
Fig. 2 Earthquake distribution in the study area from 1980 to 2003,  $M_L \geq 2.5$

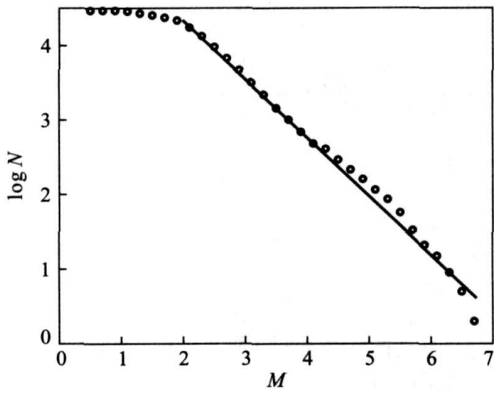


图 3 所用目录的震级-频度图(研究区 1980—2003 年)  
Fig. 3 The magnitude-frequency plot for catalog from 1980 to 2003 in the area studied

种优化程序在其他随机地震目录中是否也能检测出这样一种增长. 也就是说, 在所研究的地震前观测到的相关长度增长是否简单地是由于我们的程序中数据选择和数据拟合所产生的结果? 使用合成的地震目录可以估算源于程序本身的假模型产生的结果的概率.

Zöller *et al.* (2001) 根据 Epstein and Lomnitz (1966) 提出的随机地震模型得出合成地震目录, 这

种合成目录在时间上与泊松过程对应, 并附有余震活动, 震中与震级分布与实际的地震目录相同.

Hardebeck *et al.* (2008) 设计了 4 种合成目录, 用来测试大震前加速矩释放假说: (1) 随机地震目录; (2) 随机时间/真实位置目录; (3) ETAS (epidemic-type aftershock sequence—“传染型”余震序列模型) 合成地震目录—根据古登堡—里克特公式随机选择每一个地震的震级; (4) ETAS 合成地震目录—从真实目录的震级表中随机选择震级. 第三和第四类合成目录模拟 ETAS, 它包含时空地震群集. 背景地震活动的时间随机选择, 使用变化的空间 (0.5 度网格) 的背景地震活动率.

应当指出, 不少作者根据实际地震活动特征的研究, 提出地震活动的理论模型. 例如, Ogata (1989) 提出的 ETAS 模型等. 建立这些理论地震活动模型的目的就是尽可能真实地模拟实际地震活动. 因此, 根据这些模型生成的合成地震目录应当十分接近真实的目录, 可以期望这些目录所表示的地震活动包含实际地震活动的特征 (例如, 大震前加速矩释放特征, 相关长度增长特征等).

根据这些目录所做的一些特征检验不能对零假设否定, 应是预料之中的事. 例如, Hardebeck *et al.*

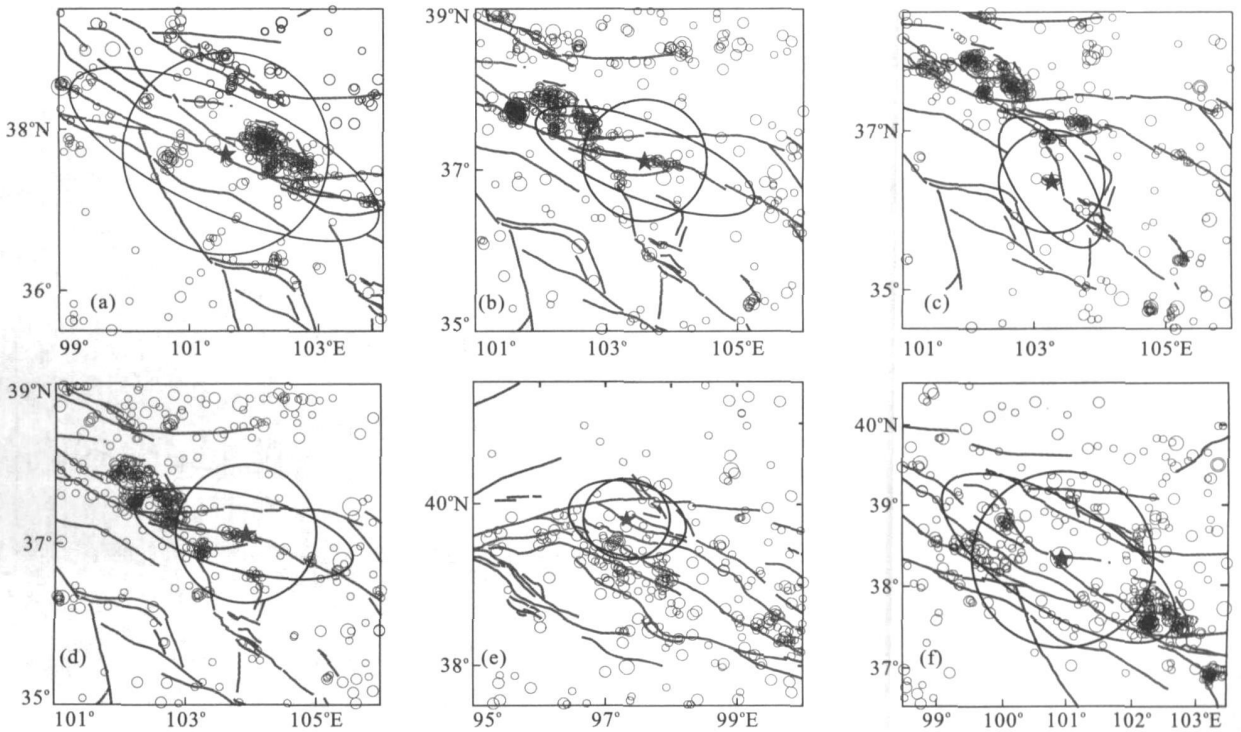


图 4 所研究的 6 次地震的临界区域(椭圆形和圆形)

Fig. 4 Critical regions (ellipse and circular) for 6 earthquakes

a. 门源地震 ( $M_L=6.4$ ); b. 景泰地震 ( $M_L=6.2$ ); c. 永登地震 ( $M_L=5.8$ ); d. 景泰地震 ( $M_L=5.9$ ); e. 玉门地震 ( $M_L=5.8$ ); f. 山丹地震 ( $M_L=6.1$ )

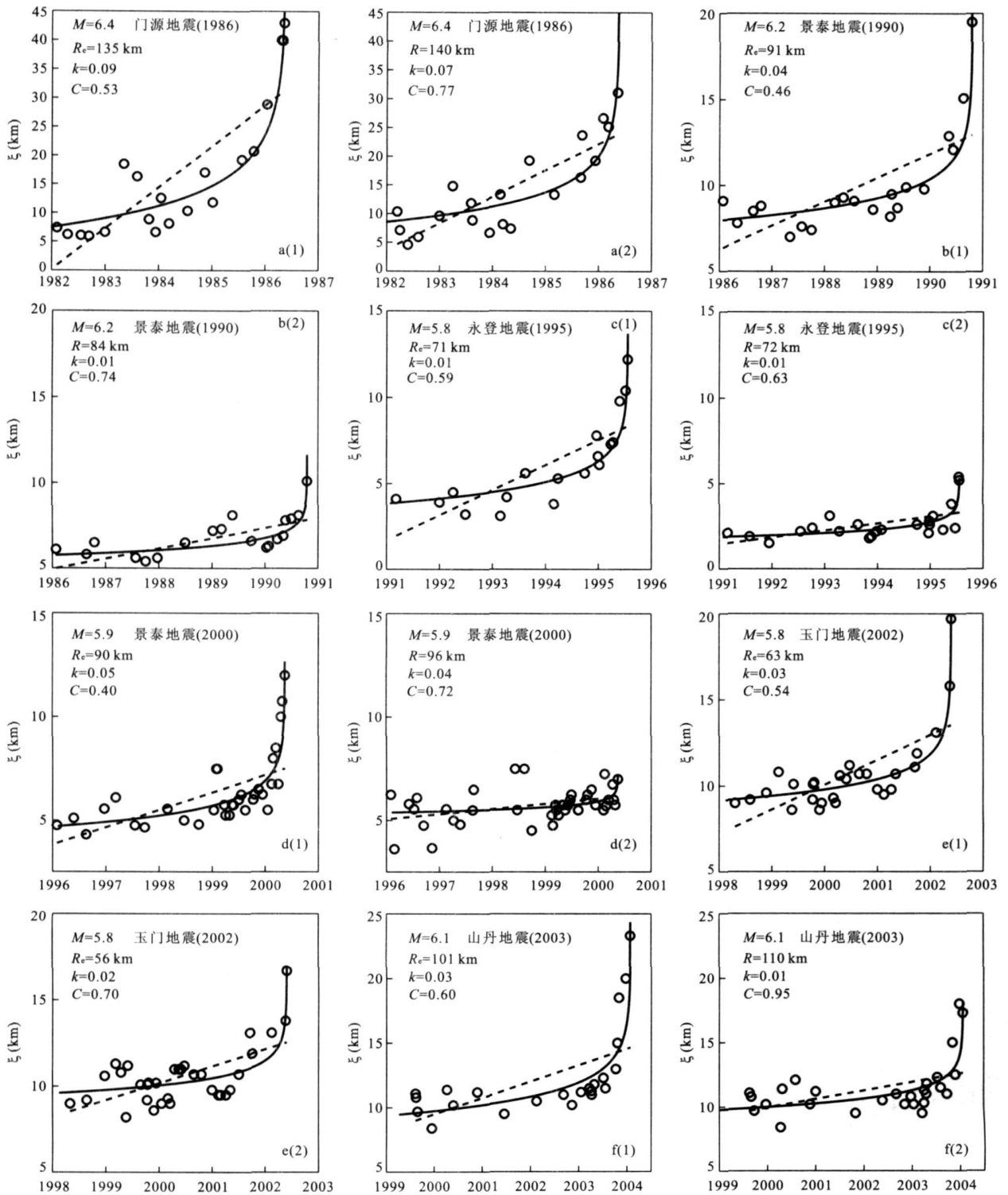


图 5 6 次地震前相关长度的时间进程

Fig.5 Time evolution of correlation length for 6 earthquakes

(1) 椭圆临界区; (2) 圆形临界区; 实线表示幂次率拟合曲线; 虚直线表示线性拟合直线

(2008) 设计的 4 种合成目录中, 在两种 ETAS 目录中和实际目录中同样检测到加速矩释放现象. 加速矩释放的频率和强度在实际目录和合成目录中是不

能区分的. 这些研究结果提示我们, 对于零假设的检验(即: 在所研究的地震观测到的相关长度增长简单地是由于我们的程序中数据选择和数据拟合所产生

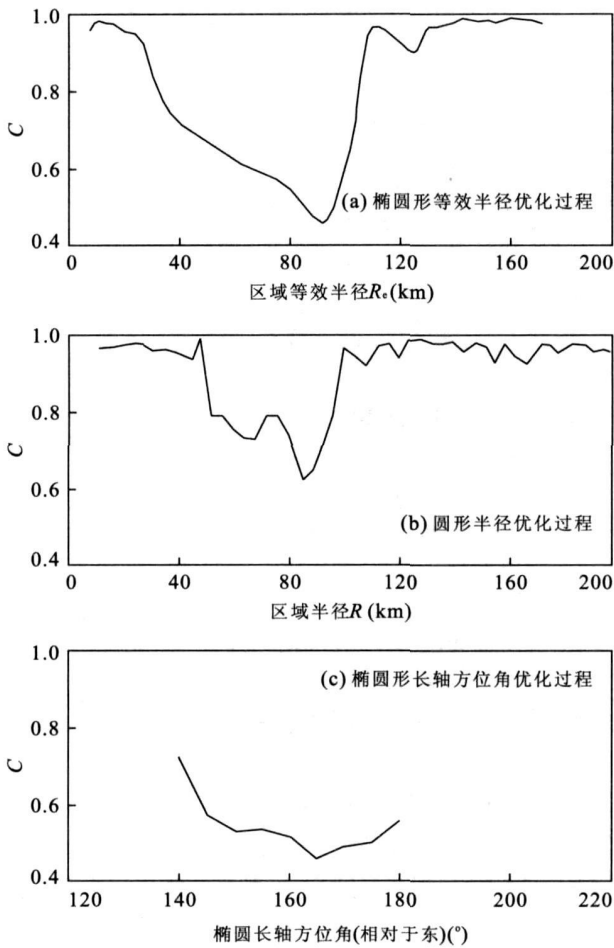


图 6 景泰 6.2 级地震空间窗等效半径  $R_e$  (椭圆)、半径  $R$  (圆) 和椭圆长轴方位角的优化过程

Fig. 6 The optimization process of  $R_e$  (for ellipse),  $R$  (for circular), and azimuth angle (for long axis of ellipse) of Jingtai earthquake (1990-10-20,  $M_L = 6.2$ )

的结果), 应当在完全随机产生的地震目录中进行.

上面提到的 Hardebeck *et al.* (2008) 设计的随机地震目录由纯粹的随机地震活动组成. 每一个目录中的地震数目与真实的目录相同. 合成事件的位置和时间从真实目录中时空范围选择. 震级从真实目录的震级分布随机选择. 这个方法产生的合成目录与真实目录的数目和震级分布相同, 但是不产生真实的空间或时间的群集行为. 正如 Zöller *et al.* (2001) 指出, 这种空间和时间随机的合成地震目录显然不适用此项研究, 因为实际地震目录中不均匀分布的震中可能造成对零假设的错误否定. 主震前较大地震的余震序列的逐步停止也可以导致相关长度的增加.

所以, 本研究采用以下 3 种合成目录: (1) Zöller

*et al.* (2001) 根据 Epstein and Lomnitz (1966) 提出的随机地震模型得出的合成地震目录; (2) 随机时间/真实位置目录, 其中包含与真实目录相同的空间群集, 使用真实的地震位置, 合成的地震时间和震级从真实目录中随机选择. 这个方法产生与真实目录相同的数量、震级分布和空间模式, 但是不包含真实的时间群集; (3) 真实时间/随机位置目录, 其中包含与真实目录相同的时间群集, 合成的地震位置和震级从真实目录中随机选择. 这个方法产生与真实目录相同的数量、震级分布和时间模式, 但是不包含真实的空间群集.

我们仍然应用 Zöller *et al.* (2001) 的方法进行显著性检验, 即: 将优化程序应用于每个类型的合成目录, 得出排除程序本身产生的相关长度增长的结果的概率. 针对所研究的 6 次地震的空间和时间范围, 我们采取如下步骤:

(1) 以所研究的每一个主震为中心的  $5^\circ \times 5^\circ$  的空间范围, 时间范围为主震前 4 年到主震发生时为止, 震级范围  $M \geq 2.5$ , 分别生成上面提到的用于本研究的 3 种合成目录, 即: 根据 Epstein and Lomnitz (1966) 提出的随机地震模型得出的合成地震目录; 随机时间/真实位置目录; 真实时间/随机位置目录. 每一个模型生成 1 000 个合成地震目录.

(2) 在每一个合成目录中, 对每一个所研究的震级为  $M$  的地震应用优化程序. 从得出的 1 000 个  $C$  值中, 计算合成目录中发现曲率参数小于或等于某一  $C$  值的累积概率  $P$ , 然后我们得到在随机地震目录中, 对于给定震级  $M$  的基于 1 000 个目录的曲率参数小于或等于  $C$  的累积概率分布. 对于一个主震, 用优化程序在真实地震目录中得到曲率参数为  $C$ , 可以得到其对应的  $P(C)$ , 从而得到否定零假设 (相关长度的幂指数增长属于偶然发生) 的置信水平, 然后可以得到 6 次地震  $P$  值的平均值  $\bar{P}(C)$ . 通过简单的数学运算, 可以得到观测到的模型可在随机目录中发生的零假设可以被否定的置信水平. 对于 6 次地震的结果列于表 1.

从表 1 可以看出, 观测到的模型可在 3 种随机目录中发生的零假设可以分别以 99.7%, 99.8% 和 99.9% 的置信水平被否定. 作为一个例子, 对于 1990 年景泰 6.2 级地震生成的 3 种合成目录的累积概率分布曲线示于图 7 中.

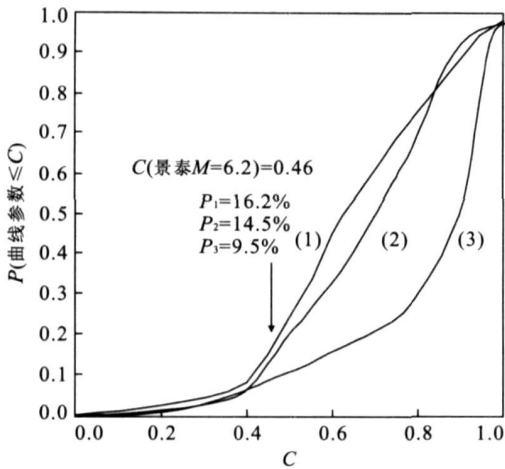


图 7 在 3 种类型的合成地震目录中, 基于每种 1000 个目录的曲率参数小于或等于  $C$  的累积概率曲线

Fig. 7 Probability distribution to find a curvature parameter smaller than or equal to in three types of random earthquake catalog based on 1000 catalogs one type for Jingtai 6.2 magnitude earthquake,  $C=0.46$ , corresponding to 3 types of synthetic catalogs the probabilities are  $P=16.2\%$ ,  $14.5\%$ ,  $9.5\%$ . (1), (2) and (3) respectively represent 3 types of synthetic catalogs

## 5 结论和讨论

(1) 本文主要在 Zöller *et al.* (2001) 工作的基础上提出了一种在研究主震前地震空间相关长度变化特征分析中选择空间窗的方法. 我们采用了长轴与震源区主要断裂大致一致的椭圆形空间窗, 并设计了相应的优化程序. 从上面的结果可以看出, 所研究的青藏块体东北缘地区从 1980—2003 年发生的 6 次中等强度地震 ( $M_L > 5.5$ ) 前, 用椭圆形和圆形空间窗都不同程度地观测到了相关长度增长的现象. 用椭圆形空间窗的结果优于用圆形空间窗的结果, 前者的相关长度增长幅度大于后者, 曲率参数  $C$  值小于后者; (2) Zöller *et al.* (2001) 对所研究的地震均采用圆形的临界区, 得到临界区半径  $R$  与主震震级  $M$  的关系可以用  $\log R \sim (0.7 \pm 0.15)M$  拟合. 由于我们采用了椭圆形的临界区, 我们计算出其面积后换算成等效的圆形面积的半径  $R_e$ , 一并列于表 1 中. 我们观测到了临界区的等效半径  $R_e$  与所研究的地震震级  $M$  的关系, 其结果可以用关系式:

$$\log R_e \sim 0.46(\pm 0.02)M. \quad (3)$$

拟合, 如图 8 中直线所示. 按照 Bowman *et al.* (1998) 的观点, 如果假设  $\log E \sim 1.5M$  (Kanamori and Anderson, 1975), 可以得出  $E \sim R^{2.1 \pm 0.45}$ . 对于大地震,  $E \sim R^2$ , 从而  $\log R \sim 0.75M$ . 对于小地震,

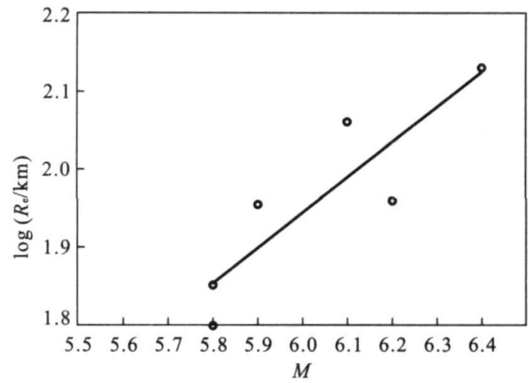


图 8 所研究的 6 次地震的临界区域的等效半径  $R_e$  和主震震级的函数关系 (拟合的直线的斜率为 0.46)

Fig. 8 Equivalent radius  $R_e$  of the critical region as a function of mainshock magnitude for the earthquakes studied

$E \sim R^3$ , 从而  $\log R \sim 0.50M$ . 我们研究的 6 次地震的震级较小 (5.8~6.4), 但是从这一较小震级段的结果与理论上的结果基本符合.

(3) 用 3 种合成目录对结果进行了统计检验. 表明随机生成的 3 种合成目录都对零假设得出否定的结果. 观测到的模型不是由随机干扰造成的, 这一观点的置信水平被证实为 99% 以上. 作者认为, 对于零假设的检验 (即: 在所研究的地震前观测到的相关长度增长简单地是由于我们的程序中数据选择和数据拟合所产生的结果), 应当在完全随机产生的地震目录中进行.

## References

- Bowman, D. D., Oullion, G., Sammis, C. G., et al., 1998. An observational test of the critical earthquake concept. *J. Geophys. Res.*, 103(B10): 24359—24372.
- Bruce, A., Wallace, D., 1992. Critical point phenomena: Universal physics at large length scales. In: Davis, P., ed., *The new physics*. Cambridge Univ. Press, New York, 236—267.
- Cui, X. F., Xie, F. R., Zhao, J. T., 2005. The regional characteristics of focal mechanism solutions in China and its adjacent areas. *Seismology and Geology*, 27(2): 298—307 (in Chinese with English abstract).
- Epstein, B., Lomnitz, C., 1966. A model for the occurrence of large earthquakes. *Nature*, 211(5052): 954—956.
- Frohlich, C., Davis, S. D., 1990. Single-link cluster analysis as a method to evaluate spatial and temporal properties of earthquake catalogues. *Geophys. J. Int.*, 100(1): 19—32.



- Gaudemer, Y., Tapponnier, P., Meyer, B., et al., 1995. Partitioning crustal slip between linked, active faults in the eastern Qilian Shan, and evidence for a major seismic gap, the “Tianzhu gap”, on the western Haiyuan fault, Gansu (China). *Geophys. J. Int.*, 120(3): 599–645.
- Guo, Z. J., Qin, B. Y., Xu, W. Y., et al., 1973. Preliminary study on a model for the development of the focus of an earthquake. *Acta Geophysica Sinica*, 16: 43–48 (in Chinese with English abstract).
- Gutenberg, B., Richter, C. F., 1956. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration (Second paper). *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 46, 105–145.
- Hardebeck, J. L., Felzer, K. R., Michael, A. J., 2008. Improved tests reveal that the accelerating moment release hypothesis is statistically insignificant. *J. Geophys. Res.*, 113, B08310, doi: 10.1029/2007JB005410.
- Kanamori, H., Anderson, D. L., 1975. Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 65, 1073–1095.
- Lasserre, C., Bukchin, B., Bernard, P., et al., 2001. Source parameters and tectonic origin of the 1996 June 1 Tianzhu ( $M_w = 5.2$ ) and 1995 July 21 Yongden ( $M_w = 5.6$ ) earthquakes near the Haiyuan fault (Gansu, China). *Geophys. J. Int.*, 144(1): 206–220.
- Liu, B. C., Cao, J. J., Yuan, D. Y., et al., 2008. Quantitative

data of active faults within the active tectonic block in North Qinghai-Xizang plateau. *Seismology and Geology*, 30(1): 161–175 (in Chinese with English abstract).

- Ogata, Y., 1989. Statistical model for standard seismicity and detection of anomalies by residual analysis. *Tectonophysics*, 169(1–3): 159–174.
- Sykes, L. R., Jaume, S. C., 1990. Seismic activity on neighbouring faults as a long-term precursor to large earthquakes in the San Francisco Bay area. *Nature*, 348(6302): 595–599.
- Zöller, G., Hainzl, S., Kurths, J., 2001. Observation of growing correlation length as an indicator for critical point behavior prior to large earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 106(B2): 2167–2175.

### 附中文参考文献

- 崔效锋, 谢富仁, 赵建涛, 2005. 中国及邻区震源机制解的分区特征. *地震地质*, 27(2): 298–307.
- 郭增建, 秦保燕, 徐文耀, 等, 1973. 震源孕育模式的初步讨论. *地球物理学报*, 16: 43–48.
- 刘百箴, 曹娟娟, 袁道阳, 等, 2008. 青藏高原北部活动地块内部的活断层定量资料. *地震地质*, 30(1): 161–175.