

文章编号: 0253-3782(2004)05-0509-07

# 甘肃及邻近地区几次中强地震前地震 空间相关长度增长的研究<sup>\*</sup>

荣代潞 李亚荣 刘旭宙

(中国兰州 730000 中国地震局地震预测研究所兰州基地)

**摘要** 用单键群分析方法, 研究了甘肃及邻区发生的几次中强地震前的空间相关长度增长的现象。结合震源区不同的情况, 分别选取了圆形和沿断层带分布的平行四边形空间窗, 结果表明, 所研究的几次中强地震前都观察到相关长度增长的现象。

**关键词** 中强地震 相关长度 单键群方法 甘肃

**中图分类号:** P315.5      **文献标识码:** A

## 引言

目前对于中强地震的预报, 特别是短期预报是建立在地震前的前兆分析的基础上的。在多种类型的前兆中, 地震活动性方面的前兆指标被认为是最具有物理意义, 因而也是较为可靠的一种。如何在大震前的地震活动中找到可以用于预测的定量指标, 是人们关注研究的重要问题之一。

1990 年, Frohlich 和 Davis (1990) 将单键群分析方法 (single-link cluster analysis, SLC) 用于地震目录的分析研究中。单键群分析法在其它诸多领域已有大量的应用 (如社会科学、分类学、天文学等)。这种方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, 单键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。国内一些研究者用这种方法研究地震活动性特征与地质构造的关系 (周蕙兰等, 1997), 研究某一地区地震活动的特征 (高原等, 2000)。Zoller 等 (2001) 用此方法研究了美国加州北纬  $32^{\circ} \sim 40^{\circ}$  之间 1952 年以来发生的 9 次  $M \geq 6.5$  地震前地震活动相关长度的增长现象。从他们的研究结果可以看出, 这一现象有可能作为一个地区中强地震前地震活动性方面的预测指标。而且, 原则上这一方法可以用于任何有数年观测记录的地区。本文在这个方法的基础上考虑震源区的断层分布情况作了一些改进, 研究了近 17 年来发生在甘肃及邻近地区的数次 6 级左右地震前的地震活动空间相关长度增长的现象, 以便今后能将这种方法应用到这一地区的中强地震预测中。

\* 地震科学联合基金重点项目(95-07-436)资助。兰州地震研究所论著编号 LC20040036。  
2003-04-07 收到初稿, 2003-10-20 收到修改稿, 2003-11-01 决定采用。

## 1 原理和方法概述

构造地震的发生是地壳中应力集中的结果。一个地区的中等地震的分布反映了这一地区区域应力场的实际状态。在较大地震的孕育过程中，震源及附近地区区域应力场从较小到较大规模重新分布，使应力场集中的范围逐渐扩大，这样应力可以在震源区的较大范围内转移和传递。特别是应力的较大范围集中可以使地壳中原来大致随机分布的裂隙或较小断层贯通。如果一次地震发生在裂隙或断层的一端，由此产生的应力调整可以很容易地转移到另一端。这意味着一次地震可以触发较远距离的另一次地震，从而使这一地区的地震活动建立一种长程关联性。这是孕震系统作为自组织临界系统的一种特征。

所谓相关长度可看作是一定时段中，一定的空间范围的地震之间的特征距离或震群尺度。按照地震的自组织临界系统的观点，如果系统接近临界点，那么将出现以幂次律为特征的长程相互作用。这时中等地震的相关长度  $\xi$  应增长，可用下式表示(Bruce, Wallace, 1989)：

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

式中， $t_f$  为中强地震的发震时间，即震源系统达到临界点的时间； $k$  为一正数，决定于相关长度增长的速率。

相关长度  $\xi(t)$  可用单键群分析方法来估算。关于单键群分析的具体方法，Frohlich 和 Davis(1990)有详细的论述。概括地说，如果选定一个地区分布有  $N$  次地震，我们可以首先将每次地震与其空间分布最邻近的地震相连构成一个小震群。然后每一个小震群与其最近的震群相连。如此循环下去，直到  $N$  次地震用  $N-1$  个键相连在一起。这里键长即是两次地震的震中距(这里仅考虑二维情况)。

这样，我们可以得到一个由  $(N-1)$  个键长组成的序列。需要假设一定的条件来定义这  $N$  次地震的相关长度，即确定哪一个键长为能代表这  $N$  次地震之间的空间距离的特征长度。我们认为，Zoller 等(2001)用键长小于等于  $\xi$  的概率为 0.5 的条件来定义相关长度  $\xi$  是合理的。

为了得到相关长度的时间演化进程，使用滑动时间窗方法。在选定的空间范围内，以在主震发生前一段时间(一般是数年)的地震序列为基础，以一定数目的地震作为时间窗。用上面所说的单键群分析方法计算这个时间窗内的地震的相关长度。然后，以一定的步长使这个时间窗移动，重复上面计算相关长度的步骤。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。

## 2 资料和数据处理

我们用全国地震目录作为基本数据，分析研究从 1986 年 8 月 26 日门源 6.4 级地震开始，发生在甘肃及邻近地区的 6 次 6 级左右地震前的空间相关长度的时间进程。

### 2.1 空间区域的选取

孕震区的物理系统大小直接与空间的相关长度有关。在选取求相关长度的空间区域时，需要考虑不同的情况。

第一种情况，即根据地震发生的裂隙串通理论，随着应力场的增强，介质中原来随机分布的裂纹逐渐串通形成较大规模的裂纹。这样应力集中就可以在裂纹两端进行较大距离

的传递，形成地震发生的远程关联，使相关长度增大。当裂纹的长度达到临界长度时，大破裂（主震）就发生了。在这种情形下，应力场在主震震源区周围较大范围内集中，因此可以选取以主震震中为中心的一个圆形区域为计算相关长度的空间窗。

我们必须考虑的另一种情况是，在孕震区有深大的活动断裂分布。也就是说，应力主要在断裂带及其附近区域进行转移传递。因此，主震发生前的应力增强过程中发生的地震主要沿断裂带分布，地震的相关长度沿断裂带要比其它方向相对要大。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是更合理一些。

应当看到，有时这两种情况并不是完全分开的。对某些地震，这两种空间窗对结果的影响不大。若震源区距离大的断裂不太远，则有可能在震源区周围和沿断裂带都可以观察到相关长度增长的现象。在我们下面的结果中，1995年7月22日永登5.8级地震就是一个例子。但对于另一些地震，不同的空间窗可能得到不同的结果。例如，对于2002年12月14日玉门5.9级地震就是一个例子。

关于空间窗的大小，原则上地震震级越大，孕震区域就越大，空间窗的面积也越大。但是空间窗的大小与震级的关系是很复杂的。作为第一步的研究，在我们的工作中，空间窗的大小是根据试验决定的，即选取空间窗的面积由小到大，取刚好能反映空间相关长度增长时的空间窗为最后结果。

## 2.2 时间窗的选取

从统计学的意义上考虑，这里的“时间窗”是广义的。用包含相同数量的地震的时间段作为时间窗，而不是固定时间窗的长度，根据所选区域内地震的数量，我们选取10~20次地震作为计算相关长度的时间窗，每一个滑动步长的时间窗包含2~4次地震。这里没有固定时间窗的长度，因为如果用固定的严格意义上的时间窗，就会造成时间窗内的地震数目不相等，由此得到的相关长度是基于不同的地震次数基础上，因此从统计意义上说，它们之间就缺乏可比性。此外，由于我们是选取孕震区及附近不太大的区域为统计区，重点是研究相关长度变化的时间进程，所以选取10~20个作为计算相关长度的地震样本个数是可以满足统计的要求的。根据Zoller等(2001)和我们在研究中的经验，时间窗内地震次数在一定范围内变动对相关长度的影响不是很大。

这里要说明的是，针对每一次中强地震，我们是选取震前数年的地震作为序列进行计算，不包括这次地震本身。在计算程序中作了技术处理，使之计算到主震的前一次地震为止。

## 2.3 起始震级

起始震级的选取对结果有一定的影响。选取的原则，一是不能太低，因为震级越小其随机性较大，与区域应力场的关系不太密切；二是要考虑到在所研究的地区有一定数量的地震用于计算和统计。因为我们所研究的几次地震属于中等强度，因此部分地震的起始震级选为3.0级，部分选为2.5级。

## 2.4 幂次律拟合

在计算出了某一区域的地震空间相关长度的时间演化进程 $\xi(t)$ 后，我们用 $\xi(t) \sim (t_f - t)^{-k}$ 来拟合所得出的结果，即令

$$\xi(t) = a + b(t_f - t)^{-k} \quad (2)$$

用最小二乘非线性最优化方法在 $t_0 \sim t_f$ 时间段进行拟合，得到参数 $a$ 、 $b$ 和 $k$ 。 $t_f$ 是主震发

生时间。起始时间  $t_0$  的选择是根据主震前较长时间段的资料计算而定，一般是选取主震前一段时间（一般是数年）开始计算，选取相关长度开始增长的时间或附近为起始时间  $t_0$ 。 $t_0$  的选择同时考虑了能使上述拟合达到最佳效果。

### 3 结果

我们编制了计算相关长度的单键群分析方法的计算机处理程序和最小二乘法进行非线性幂次律拟合的程序，对甘肃及邻近地区发生的几次中强地震前的相关长度增长的现象进行了研究。所研究的地震、选取的参数如表 1 所示。图 1 为这 6 次地震的震中分布图，图 2 是计算中所选的每次地震的空间窗形状和大小，图 3 是这 6 次地震的计算结果和相应的幂次律拟合曲线。

表 1 所研究的甘肃及邻近地区 6 次地震和选取的参数

序号	宏观位置	震 中 位 置		震级	发震时间 年-月-日	空间窗形状	起始震级
		$\lambda_E$	$\varphi_N$				
1	青海门源	101°34'	37°42'	6.4	1986-08-26	平行四边形	3.0
2	甘肃景泰	103°35'	37°07'	6.2	1990-10-20	圆形	2.5
3	甘肃永登	103°15'	36°22'	5.8	1995-07-22	圆形	2.5
4	甘肃天祝	102°45'	37°17'	5.4	1996-06-01	平行四边形	2.5
5	甘肃景泰	103°55'	37°08'	5.9	2000-06-06	圆形	2.5
6	甘肃玉门	97°19'	39°49'	5.9	2002-12-14	平行四边形	2.5

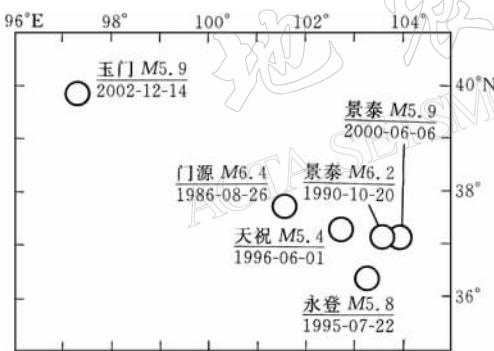


图 1 所研究的 1986 年 8 月 26 日以来  
甘肃及邻区 6 次中强震震中分布图

我们选取以震中为中心的圆形空间窗（图 4a），得到的结果如图 4b 所示。

从这个结果中，基本上看不出相关长度的变化趋势。但如果我们将选取沿昌马—祁连断裂带的平行四边形空间窗（图 2f），计算结果则显示了相关长度增长的现象（图 3f）。这是因为中强地震前空间相关长度增长的现象是建立在合理的物理机制上的。因此，这一现象有较好的物理基础，应当是客观存在的。由于构造环境不同，在较大断裂带上或附近，应力主要沿断裂带集中，因而震前地震相关长度增长主要沿断裂带表现出来。另一方面我们也

在图 2 中，我们加进了所统计区域的断层分布<sup>①</sup>，目的是更好地理解所选区域与断层分布的关系。在图 3 中， $t_0$  为横坐标起算时间，选择的方法如前所述。 $t_f$  为主震发震时间，系从  $t_0$  起算的天数。 $k$  为幂次率拟合  $\xi(t)=a+b(t_f-t)^{-k}$  中的指数值。

如前所述，我们根据震源区的不同情况，分别选取了以震中为中心的圆形和沿断层带分布的平行四边形区域作为空间窗。这两种选取方法考虑了孕震区的不同情况，在某些情况下可以得出更好的结果。例如，对于 2002 年 12 月 14 日玉门 5.9 级地震，如果

① 刘百篪. 祁连山活动地块运动状态及其边界断裂系构造转换关系研究. 国家重点基础研究发展规划项目 (G199804070104).

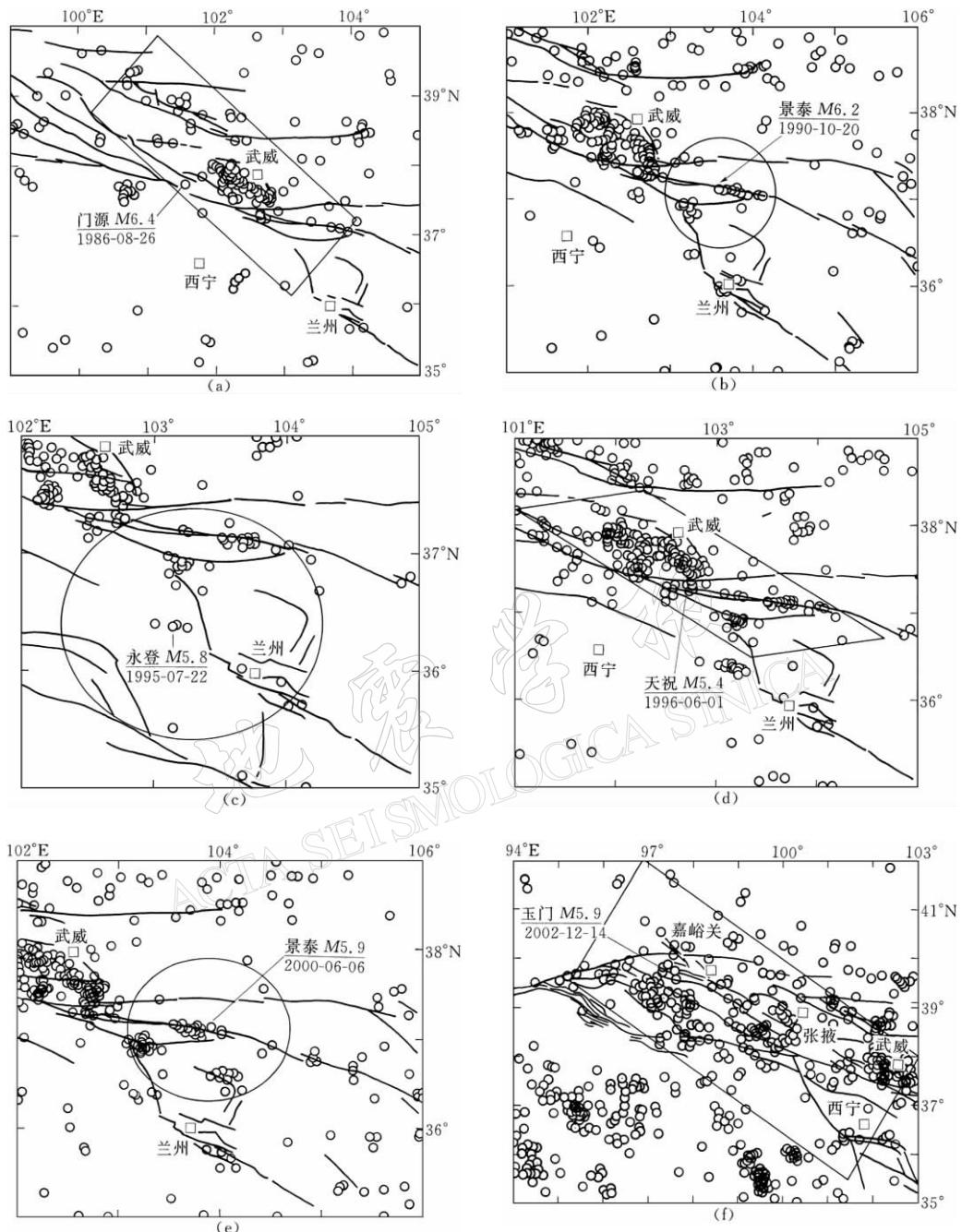


图 2 各次地震所选的空间窗形状和大小

(a) 门源 6.4 级地震(1983-01-01~1986-08-26); (b) 景泰 6.2 级地震(1988-01-01~1990-10-20);  
 (c) 永登 5.8 级地震(1993-01-01~1995-07-22); (d) 天祝 5.4 级地震(1993-01-01~1996-06-01);

(e) 景泰 5.9 级地震(1997-01-01~2000-06-06); (f) 玉门 5.9 级地震(2000-01-01~2002-12-14)

(括弧内为使用的地震目录的起止时间)

看到,如果地震发生在断裂带附近,也有可能在断裂带上和在震中周围都可以观察到相关长度增长。例如,对于1995年7月22日永登5.8级和1996年6月1日天祝5.4级两次地

震,从永登地震的圆形空间窗和天祝地震的平行四边形空间窗,都可以观察到永登地震前相关长度增长现象(图3c, d).

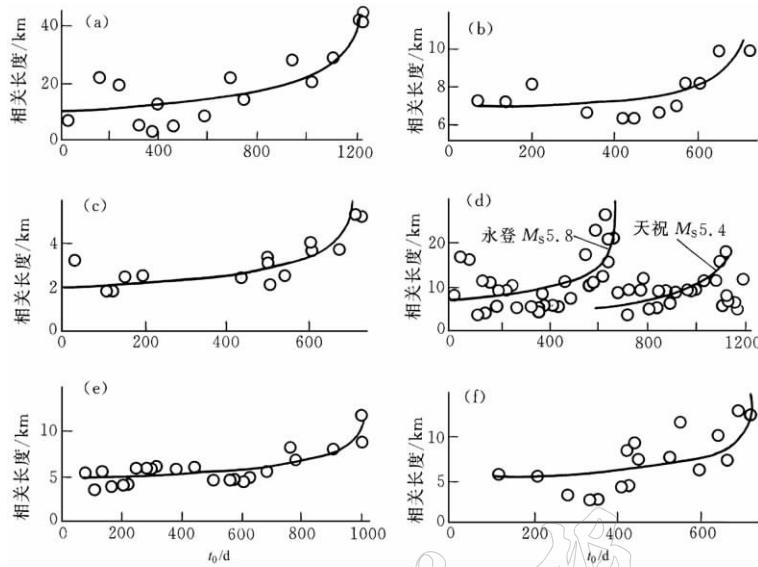


图3 6次地震前相关长度计算结果

(a) 门源 6.4 级地震( $t_0$ : 1983-04-04,  $t_f=1214$  天,  $k=0.19$ ); (b) 景泰 6.2 级地震( $t_0$ : 1988-10-29,  $t_f=721$  天,  $k=0.40$ ); (c) 永登 5.8 级地震( $t_0$ : 1993-07-18,  $t_f=734$  天,  $k=0.17$ ); (d) 天祝 5.4 级地震( $t_0$ : 1993-03-01,  $t_f=1188$  天,  $k=0.07$ ); (e) 景泰 5.9 级地震( $t_0$ : 1997-08-08,  $t_f=1002$  天,  $k=0.09$ ); (f) 玉门 5.9 级地震( $t_0$ : 2000-12-15,  $t_f=719$  天,  $k=0.03$ )

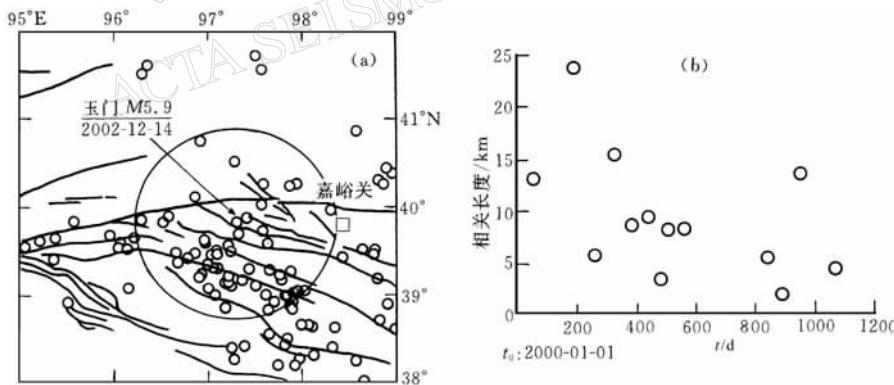


图4 对玉门 5.9 级地震选择圆形空间窗处理的结果  
(a) 空间窗范围; (b) 由圆形空间窗得到的相关长度时间进程

## 4 讨论和结论

1) 从上述结果可以看出,甘肃及邻近地区从1986年以来发生的6次中强地震前,都不同程度地观测到了相关长度增长的现象.

2) 本文只是对甘肃及邻近地区近年来发生的6次中强地震作为震例进行了研究,以检验这种方法是否可以用于青藏块体东北缘这样的构造复杂和活动强烈的地区. 由于中国大

陆不同区域地质和构造的巨大差异以及地震的复杂性，还需要针对不同地区、不同震例加以研究。

3) 下一步的工作应当在研究更多震例的基础上，对如何用这种方法进行中强地震发震地点和发震时间以及震级进行预测加以研究。特别是影响空间窗大小和形状选取的因素很复杂，本研究是根据试验确定的。进一步的工作需要研究震级与空间窗大小的关系，这也就可以用这种方法预报未来地震的震级提供参考，以便将这种方法用于今后的实际预测中。

### 参 考 文 献

- 高原, 周蕙兰, 马延路. 2000. 川滇地区地震活动单键群分析[J]. 中国地震, **16**(1): 86~91
- 周惠兰, 刘振, 高原. 1997. 单键群方法与昆仑山-阿尔金弧形构造顶部地震时空群集特征[J]. 中国地震, **13**(3): 197~206
- Bruce A, Wallace D. 1989. Critical point phenomena: universal physics at large length scales[A]. In: Dawis P ed. *New Physics*[C]. New York: Cambridge Univ Press, 236~267
- Frohlich C, Davis D. 1990. Single-link cluster analysis as a method to evaluate spatial and temporal properties of earthquake catalogues[J]. *Geophys J Int*, **100**: 19~32
- Zoller G, Hainzl S, Kurths J. 2001. Observation of growing correlation length as an indicator for critical point behavior prior to large earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **106**(2): 2 167~2 175

## STUDY ON GROWING CORRELATION LENGTH PRIOR TO THE EARTHQUAKES OCCURRED IN GANSU PROVINCE AND ITS NEARBY AREA

Rong Dailu Li Yarong Liu Xuzhou

(Lanzhou Base of Center for Analysis and Prediction, China Earthquake  
Administration, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The growing correlation length prior to the moderate-great earthquakes occurred in Gansu Province and its nearby area since 1986 has been studied using the method of single-link cluster analysis (SLC). According to different conditions in the source area, the circular spatial window centered in the epicenter and the parallelogrammic spatial window along the fault belt have been selected. The results show that the phenomena of growing correlation length have been observed before the earthquakes studied in the paper.

**Key words:** moderate-great earthquake; correlation length; single-link cluster analysis; Gansu