

大震前复杂震源系统的非线性阶段和大震预报(一)

秦保燕

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文应用现代统计物理学中相态突变前系统内出现的非平稳态现象于地震预报的研究中,得到了大震孕育时间 T 、弹性应变时段 T_1 与非线性时段 T_2 之比分别稳定在5和4附近。此比值与震源破裂方式、介质强度差异、构造运动速度差异无关,因而可作为浅源大震发生的临界指数。同时它还具有普适数特性,对不同地区的地震均适用。利用此比值常数以及由测震学指标所确定的 T_1 和求得的 T_2 可以进行确定性的中长期地震预报。另外本文还得到了孕震时间 T 与震级之间的两个统计式,它们分别对应于构造运动速度不同的地区。

$$M_1 = 4.2 + 1.5 \log T \quad (1)$$

$$M_2 = 5.8 + 1.2 \log T \quad (2)$$

(1)式应用于构造运动速度高的地区,(2)式应用于构造运动速度一般的地区,式中的 T 以年为单位。利用上述两式可以进行粗略的地震长期预报。

一. 前 言

现代统计物理学的研究表明,突变事件发生前的一个共性特征是系统内出现涨落加剧,即出现大大偏离原来平均状态的非平稳态现象^[1、2、3]。这一共性特征对突然事件的预测具有重大意义。受这一学说的启发,作者对岩石的破裂实验以及大地震前震源区及其附近出现的测震学现象进行了回顾性研究。发现非平稳态现象在大地震发生前普遍存在,它的产生与复杂震源区介质由弹性应变进入非线性阶段有关。由于测震学指标最能真实地反映震源复杂系统的非线性过程和非平稳态现象,本文着重用测震学资料对我国近年来发生的七级以上大震前的非线性阶段和所伴随的非平稳态现象进行研究,以探讨地震预报的新途径。

二、岩石在大破裂错动前的非线性应变及其所伴随的非平稳态现象

在国内外,不少地震工作者做过模拟地震发生的岩石破裂错动实验。这些实验可分为两类,一类是完整介质的破裂实验;另一类是粘滑实验。从现代统计物理学的观点去理解这些

实验结果，可以发现实验结果对预测最后大破裂事件有重要价值。下面对完整介质的破裂错动和纯净断面（即断层面上无粉末或其他充填物）发生粘滑事件前所出现的重要现象进行一些初步分析。由于这类实验很多，结果又极为类似，下面仅对个别实验加以说明。

1. 完整介质的破裂实验

美国地震学家肖尔茨 (C.H.Scholz, 1972) 用完整介质所作的破裂实验的结果^[4] (图1) 表明，在差应力达到破坏应力的 $\frac{2}{3}$ 时，小震的频次出现非稳态增加，同时应力应变曲线的非线性也加大。

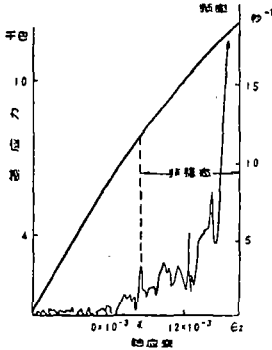


图1 三轴压力下花岗岩微破裂的频率以及应力与应变的关系 (围压为4千巴)
Fig.1 The frequency of micro-crack of granite under 3-axis pressure and the relation between stress and strain (The confining pressure is 4000 bar)

2. 具有纯净断裂面或断层泥比较薄时断层面的摩擦滑动

斯脱斯凯 (R.M.Stesky, 1975) 在做了完整介质破裂实验后，对断裂了的岩石再加载直到发生粘滑，实验结果如图2所示^[4]。由图可见，在接近屈服应力时，声发射频次非平稳性急剧升高。它们出现在应力—应变曲线的非线性阶段。

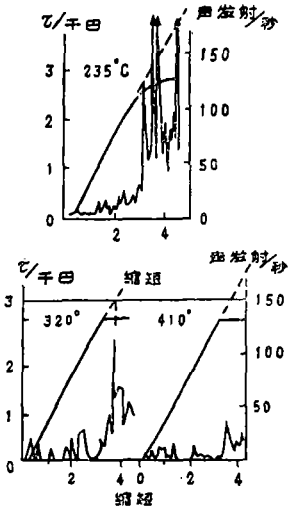


图2 2千巴围压下韦斯特里花岗岩断裂试件摩擦滑动时的声发射率和剪切应变 (垂直箭头为粘滑)
Fig.4 The shear strain and acoustic emission during the frictional slip of the fracture of granite (The confining pressure is 2000 bar)

3. b值的实验

肖尔茨用5种围压进行破裂实验，并得到声发射事件的平均b值曲线随着临近破坏应力而出现非线性减小的结果，如图3所示^[4]。由图3还可以看出，随着b值曲线的弯曲，b值与平均b值曲线的偏离度加大。作者认为这种偏离度加大反映了介质应变非线性所伴随的非平稳态现象。

实验结果表明，不管是完整介质还是非完整介质（存在断面），它们在破裂错动前

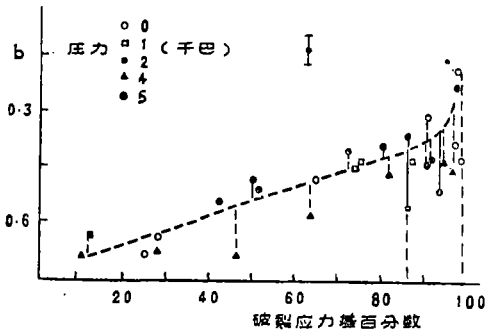


图3 在接近破裂应力时b值曲线的弯曲
 Fig.3 The curvature of b value line when stress approaches to the fracture stress

和粘滑事件发生前都存在非线性阶段。这种非线性阶段伴随声发射事件呈非平稳态增长。因此可以认为介质的非线性变形是非平稳态现象之源，因而是地震预报的重要指标。这一点也符合现代统计物理学中的普遍概念。

三、大震前震源区附近的非线性阶段及所伴随的非稳态现象

在地壳浅部大多数大震的发震机制属于粘滑，少数属于完整介质破坏。把实验结果与大震前震源及震源附近地区出现的前兆现象进行对比研究，可以找到大震前复杂震源系统的非线性阶段和所伴随的非平稳态现象。下面分别以测震学指标加以论述。

1. 大地震前复杂震源系统的非线性阶段测震学指标

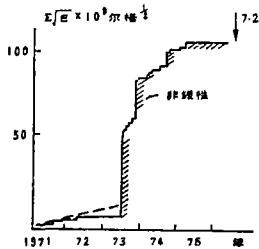


图4 1976年松潘地震前的应变释放曲线
 (北纬31.5°—33.5°, 东经103°—106°)
 Fig.4 The strain relief curve before Songpan earthquake in 1976

作者初步找到三个指标：(1)蠕变曲线的加速；(2)地震频次的骤增；(3)b值曲线向低值弯曲。这三种非线性指标，以蠕变曲线加速最容易判别，因为加速的拐点很容易判别。例如1976年松潘地震蠕变曲线的加速拐点为1973年5月8日南坪5.2级地震。其它地震的蠕变曲线也很类似，这里不再一一列举。

2. 大地震前的非平稳态现象

对于复杂震源系统来说，大地震前的非平稳态现象在临近地震前表现得最为明显，

下面列举一些现象来说明。

(1) 小震的密集、平静（仅举临近地震前震源区小震活动方面的震例）

a. 1962年3月19日河源6.2级地震 地震前2月3日小震活动频次达500次（此日为朔日），持续活动到3月2日，小震活动转入低潮直到主震发生。明显地表现了密集、平静的特征。这就是统计物理学中所说的相态突变前的涨落加剧（偏离平均态），密集是偏离平均态，平静也是偏离平均态。

b. 1966年3月8日邢台6.8级地震 地震前从2月28日起开始有3级地震活动，此后震级逐步上升，直至地震发生。仔细分析邢台地震前的前震系列，可以发现从1966年1月至3月小震活动有明显的密集、平静现象，且有多次起伏，如图5所示。此外3月6日以后的

小震序列也有很明显的密集、平静现象及多次起伏，如图6所示。

其它大震前也有类似情况，作者认为这就是大地震破裂错动前非平稳态的表现。

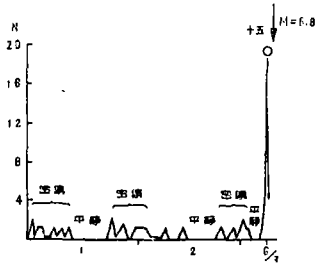


图5 邢台地震前小震日频次的密集平静现象

Fig. 5 The crowded calm phenomenon of minor shock prior to Xingtai earthquake (the daily frequency)

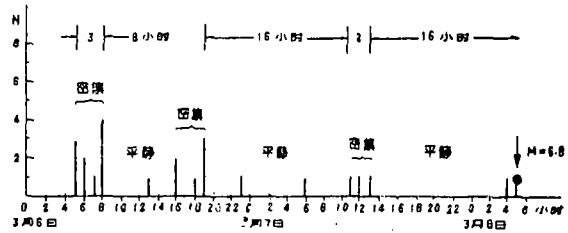


图6 邢台地震前2天内的小震密集平静现象

Fig. 6 The crowded calm phenomenon of minor shock within two days prior to Xingtai earthquake

(2) 地震频次与平均b值曲线的偏离加大

前述肖尔茨的实验表明，在接近大破坏应力时b值曲线向低值弯曲，这就是说这时的b值与平均b值曲线之间的偏离度增大。

以邢台地震为例，统计时段取震前2个月，震级间隔为0.5，得到如图7所示的b值曲线。从图7可见，1号点和2号点大大偏离b值曲线。按b值曲线，在4.0—4.4级范围内的地震频次为1.4次，而实际发生7次。按b值曲线不应发生5.0—5.4级地震（应为负3次），而实际发生1次。从现代统计物理学观点考虑，这种偏离是大震前非平稳态的表现。

此外，仔细分析大震前波速异常图和振幅比异常图可以发现，在地震发生前波速比和振幅比出现大幅度摆动现象。这种现象也应当视为大震前非平稳态的表现。

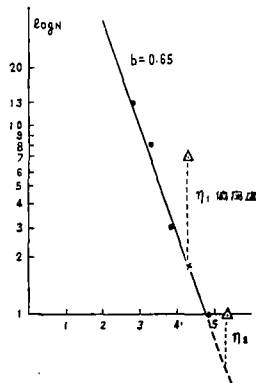


图7 邢台地震前的b值(1966.1—3.7)

Fig. 7 The b value before Xingtai earthquake

四、大震前的非线性阶段和中长期预报

大地震前积累巨大应力的震源区、调整应力的震源端部及附近地区，远程关联的震源外围地区以及震源的顶部和底部构成了一个复杂系统。然而不管它如何复杂，其孕震过程主要是在力场或热力场作用下形成的。因此只需研究复杂震源系统总的应力应变就可以了，而应力应变曲线可以从地震能量蠕变曲线得到间接的反映。由于应力达到非线性阶段是复杂震源系统走向失稳的重要阶段，因此作者着重研究线性阶段（弹性应变积累阶段）、

整个孕震阶段与非线性阶段之间的比值关系，以便寻找大地震发生的共性特征。下面根据中国大震实例进行讨论。

1. 中国大地震前的非线性阶段

根据中国大震的实例，复杂震源系统的非线性阶段主要表现为震源以及端部附近地震活动性的加强，即在地震蠕变曲线上出现明显的加速。表1给出中国某些大震前非线性阶段的具体数据。由表1可以看到，非线性阶段开始的时间很容易从蠕变曲线上判断出来，此外还可以从中强地震在平静背景上突然活动来加以判别。

中国大震前的非线性阶段 表1

大地震日期	地名	震级	非线性阶段开始时间	活动地点	M	非线性阶段持续时间
1. 1920.12.16	海原	8.5	1888.11.2	景泰	6 ¹ / ₄	32年零1个月
2. 1923.3.24	道孚	7 ¹ / ₄	1919.5.29	炉霍	6 ¹ / ₄	3年零9个月
3. 1927.5.23	古浪	8	1893.6.1	西宁	5 ¹ / ₂	34年
4. 1955.4.14	康定	7.5	1948.5.1	马边	5 ¹ / ₂	7年
5. 1970.1.5	通海	7.7	1966.2.5	东川	6 ¹ / ₂	4年
6. 1973.2.6	炉霍	7.6	1967.8.30	甘孜	6 ³ / ₄	5年6个月
7. 1974.5.11	永善	7.1	1971.8.16	马边	5.8	2年零9个月
8. 1975.2.4	海城	7.3	1967.6.8	长山群岛东	4 ³ / ₄	7年6个月
9. 1976.5.29	龙陵	7.4	1973.6.1	腾冲	4.9	3年
10. 1976.7.28	唐山	7.8	1970.5.25	丰南	5.0	6年2月
11. 1976.8.16	松潘	7.2	1973.5.8	南坪	5.2	3年3月
12. 1654.7.21	天水	7.5	1631.7	西和	5.0	23年

根据表1中的非线性时段 T_2 ，可粗略地得到震级M与 T_2 之间的统计关系式：

$$M = 6.5 + 1.3 \log T_2 \quad (1)$$

式中 T_2 以年为单位，(1)式所相应的直线如图8所示。此式表明，非线性时段越长，未来地震的震级愈大，由(1)式可进行粗略的中长期预报。

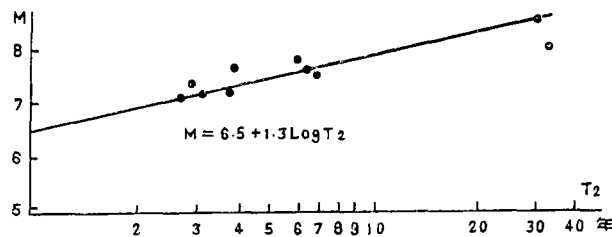


图8 非线性时段与震级的相关曲线

Fig. 8 The related curve of the non-linear intervals (T_2) and magnitudes (M)

此外从表1还可以看出，不同时期和不同地区相同强度地震前非线性阶段的持续时间有一定差异。这可能与不同地区介质强度和构造运动速度存在差异有关。

2. 介质的线性应变阶段与非线性应变阶段的关系

虽然不同地区、不同时期的地震的非线性阶段持续时间有差异，然而对于不同的复杂震源系统来说，当系统受力后介质的弹性应变阶段愈长，其塑性应变的时间也相对变长。如系

统的岩石强度较高或加力速度慢的地区，其线性时段 T_1 和非线性时段 T_2 都长，反之都短。这样 T_1 和 T_2 之间可能存在某种特定关系。基于这一想法，作者对表 1 中 12 个地震的 T_1 和 T_2 之间的比例关系作了进一步研究，结果列于表 2。由表 2 的统计结果可粗略地得到比例常数 C_1 和 C_2 ：

$$C_1 = \frac{T}{T_2} = \frac{T_1 + T_2}{T_2} = 5 \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{T_1}{T_2} = 4 \quad (3)$$

(2) 式或表 2 中的 T 为震源区及其附近地区由应力开始积累到发震的总时间（早、中期表现为地震空区）。这一结果表明比例常数 C_1 和 C_2 实际上消除了复杂系统个性特征，而突出了共性特征。

不同震级的 T 、 T_2 、 T/T_2 统计表

表 2

主震日期	地名	震级	震中区最早一次地震	地名	M	T 空区持续时间	T_2	T/T_2
1 1920.12.16	海原	8.5	1748.11.21	固原北	5 1/2	172年1月	32年1月	5.4
2 1923.3.24	道孚	7 1/4	1904.8.30	道孚	6	18年7月	3年10月	4.9
3 1927.5.23	古浪	8	1765.5.1	临洮	5 1/4	162年	34年	4.8
4 1955.4.14	康定	7.5	1919.8.26	甘孜	6 1/4	35年8月	6年11月	5.2
5 1970.1.5	通海	7.7	1950.2.3	勐海	6 1/2	20年	4	5.0
6 1973.2.6	炉霍	7.6	1944.10.14	道孚	5	28年4月	6年5月	5.2
7 1974.5.11	永善	7.1	1959.11.13	马边	5	14年6月	2年9月	5.3
8 1975.2.4	海城	7.3	1940.8.5	熊岳	5 3/4	34年6月	7年8月	4.5
9 1976.5.29	龙陵	7.4	1961.6.12	腾冲	5.8	15年	3年	5.0
10 1976.7.28	唐山	7.8	1945.9.23	滦县	6 1/4	30年10月	6年2月	5.0
11 1976.8.16	松潘	7.2	1960.11.9	漳腊	6 3/4	15年9月	3年3月	4.9
12 1654.7.21	天水	7.5	1542.11.19	武山	5	111年6月	23	4.9

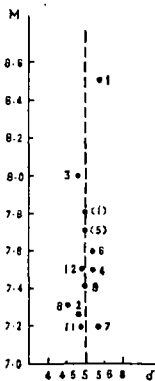


图 9 总的空区时间与地震能量加速释放段时间之比

Fig. 9 The ratio between T , the gap intervals and T_2 , the acceleration intervals of energy relief of earthquake

因此， $C_1 = 5$ 是标志岩石破坏的一个临界指数。这一指数的稳定性表明，大地震的发生也存在类似于现代统计物理学中突变事件前得到的普适常数。这个值在现代统计物理学中已经发现，对于许多性质迥然不同的体系其临界行为却非常相似，临界指数几乎完全一样。卡丹诺夫曾指出各种物理体系可以分成若干个普适类，每个普适类的临界特性完全一样。本文所得到的比值 C_1 是地震研究中首次得到的普适数。它与现代统计物理学中得到的一类普适数是类似的。实际上“5”在自然界中也普遍存在，可以认为 5 实际上是自然界中存在的普适常数。此外，从现代统计物理学的观点来理解，这个值实际上是分数维和自相似的又一种表现形式，即尽管

震级不同，介质强度有差异，甚至构造运动速度也不同，但孕震时间 T 、弹性应变时段 T_1 与非线性时段 T_2 之比几乎接近常数。

短临地震预报。关于这个问题，作者将在下一篇文章中作详细的论述。

参 考 文 献

- [1] 于淦、郝柏林，相变和临界现象，科学出版社，1984。
- [2] 李如生，非平衡态热力学和耗散结构，清华大学出版社，1986。
- [3] 彭志忠，准晶体分数维结构的发现及其在自然观方面的意义，地球，№4，1986。
- [4] B.N.米亚奇金，W.F.布雷斯等，地震理论与实验译文集，国家地震局地球物理研究所第三研究室译，地震出版社，1979。
- [5] 国家地震局，中国地震简目，地震出版社，1977。
- [6] 国家地震局分析预报中心，中国地震前兆图集，地震出版社，1984。

THE NON-LINEAR PERIOD OF COMPLEX FOCUS PRIOR TO LARGE EARTHQUAKES AND THE PREDICTION OF EARTHQUAKES

Qin Baoyan

(Lanzhou Seismological Institute, State Seismological Bureau China)

Abstract

This paper applies the non-stationary phenomenon coming out within the system before the sudden change of phase state in modern statistical physics to the study of earthquake prediction. It is obtained that the ratio between T , the preparation time of large earthquakes, T_1 , the interval of elastic strain and T_2 , the non-linear strain interval, which is respectively set around 5 and 4. This ratio has nothing to do with the way of focus fracture, the difference of medium strength and the difference of tectonic movement rate. So it can be used as the critical index of shallow earthquakes, and it is of the properties of universal constant, available for the earthquakes in different areas. By means of this ratio and T_1 , T_2 , determined by seismometry, the mid long-term forecasting of earthquakes can be done. In addition, two formulas between T , the preparation time of earthquake and magnitude are also obtained, which respectively correspond to the different areas with the different rate of tectonic motion.

$$M_1 = 4.2 + 1.5 \log T \quad (1)$$

$$M_2 = 5.8 + 1.2 \log T \quad (2)$$

Formula (1) can be used in the areas where the rate of tectonic motion is high, and (2) used in the common areas. In the above formulas, T is in the unit of year. These two formulas can contribute to the preliminary long-term prediction of earthquakes,