

研究短文

用临界点理论讨论应变能加速释放现象 和孕震区尺度

彭克银¹⁾ 尹祥础^{1),2)} 和 锐³⁾

1) (中国地震局分析预报中心,北京 100036)

2) (中国科学院力学研究所非线性开放实验室,北京 100080)

3) (新疆维吾尔自治区地震局,乌鲁木齐 830011)

关键词: 临界点理论 应变能加速释放 孕震区尺度

[中图分类号] P315 [文献标识码] A

20 世纪 80 年代后期,地震的临界现象研究成为地震学界的热点之一。Hirata 等(1987)通过大量实验和观测结果得出结论:接近破裂的岩石与铁磁模型的二阶相变具有本质上的联系。岩石中的应力参数类似于铁磁相变中的温度参数,即低应力状态时,微裂纹随机产生且微裂纹之间关联程度较低;当应力达到岩石的破裂强度时,裂纹相互关联,裂纹大小呈幂率(分形)分布。根据临界点理论,地震孕育过程是一种临界现象(Vere-Jones, 1977; Sornette, et al., 1990; 1995; Rundle, et al., 1999; Jaume, et al., 1999),但地壳并不总是处于临界状态。随着一次大地震的发生,应变能大量释放,孕震体便会偏离临界状态;此后,在构造应力作用下孕震系统逐渐积累能量,从而再次接近临界状态,直至发生下一次地震。如此循环往复,地壳总是处于接近和偏离临界状态的演化过程之中。

强震发生前,震中附近地区应变能加速释放是一种较为普遍的现象。我国地震学家在长期预报实践中早已将它作为强震发生的主要前兆之一(刘蒲雄, 1982)。Bowman 等(1998)通过对美国的 11 次地震进行研究,发现累积应变能在时间上呈幂率分布,符合临界理论的标度率,进而认为强震前应变能加速释放现象是孕震区接近或进入临界状态的表现形式。

另一方面,地震学界对孕震区的尺度一直没有形成一致的认识。我国地震学家通过多年的实践与探索,认为孕震区尺度比地震的实际破裂范围要大得多,而多数西方学者基于传统力学对地震破裂过程的认识,对此持不同看法。

[收稿日期] 2002-11-21; [修定日期] 2002-09-17。

[项目类别] 国家自然科学基金项目(10232050);“十五”国家科技攻关项目(2001BA601B02-01-05-01)。

[作者简介] 彭克银,男,生于 1964 年,湖北嘉鱼人。副研究员,2000 年获博士学位。主要从事地震活动性研究。

本文将通过对发生在中国大陆地区的部分地震的研究,讨论应变能加速释放与临界现象的关系,并根据临界区域的大小讨论地震的震级与孕震区尺度的关系。

1 应变能加速释放现象

强震前应变能加速释放现象较为普遍。通过筛选,本文对震前应变能有明显加速释放现象的不同震级的9次地震进行了研究。9次地震的有关参数见表1。

采用 Bufo 等(1993;1994)的公式进行拟合

$$(t) = A + B(t_c - t)^m \quad (1)$$

式中 (t) 为累积贝尼奥夫应变; t_c 是主震发生的时间; B 为一常数; A 代表 t_c 时刻的累积贝尼奥夫应变,即整个孕震过程的贝尼奥夫应变总量; m 为幂指数。挑选震前震中周围一定范围的地震,计算震前各时刻的累积贝尼奥夫应变。 t 时刻的累积贝尼奥夫应变定义为

$$(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} E_i(t)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

其中 E_i 表示第 i 个地震释放的能量; $N(t)$ 表示 t 时刻以前该区域发生的地震个数。地震释放的能量由以下公式求得

$$\log_{10} E = 4.8 + 1.5M \quad (3)$$

式中 M 为震级,单位为 M_S 。

拟合结果见图1。由图1可见,上述地震的应变能释放能较好地服从幂率分布。其孕震过程的时间尺度随震级的不同而变化,大致从几年至几十年不等。可用临界点理论解释这一现象。对一次大地震的孕育过程而言,在初始阶段,孕震系统并非处于临界状态,地震活动处于低水平状态。随着力学状态的不断演化,孕震系统接近并进入临界状态。这一过程中,通常情况下孕震区中地震活动的频度和强度不断增加,应变能释放加速,并呈幂率分布,直至强震发生。此后,随着能量的大释放,系统偏离临界状态。周而复始,地震在时间序列上形成平静-活跃交替的特征。

2 孕震区尺度讨论

强震发生前,孕震系统在时间上表现为应变能加速释放,在空间上则表现为区域地震活动增强和中等地震活动增加。根据临界点理论,大地震前的区域地震活动增强现象可以解释为系统在趋近临界状态的过程中区域应力场的相关长度逐渐增大所致(Wei, 2000)。在一次大地震孕育过程的初期阶段,孕震系统各部分之间的相互作用主要发生在相邻单元,因而应力场的相关长度较小,应力分布不均匀。此时,因局部应力集中而产生的破裂尺度较小,且在时间和空间上表现为随机分布,系统难以发生大地震。但这种局部破裂对整个孕震系统的应力场起着调整作用,不断地平滑局部应力场,使孕震系统中尺度较小的邻近部分因应

表1 本文研究的9次地震参数

时间 (年-月-日)	震中坐标		震中地名	震级
	经度(°)	纬度(°)		
1973-12-31	38.4	116.8	河北河间	5.3
1975-06-04	35.9	79.7	新疆和田	6.1
1976-07-28	39.4	118.0	河北唐山	7.8
1976-08-16	32.6	104.1	四川松潘	7.2
1989-10-18	39.9	113.9	山西大同	5.7
1990-04-26	36.0	100.3	青海共和	7.0
1995-10-24	25.9	102.2	云南武定	6.5
1997-11-08	35.2	87.3	西藏玛尼	7.5
2000-01-15	25.5	101.1	云南姚安	6.5

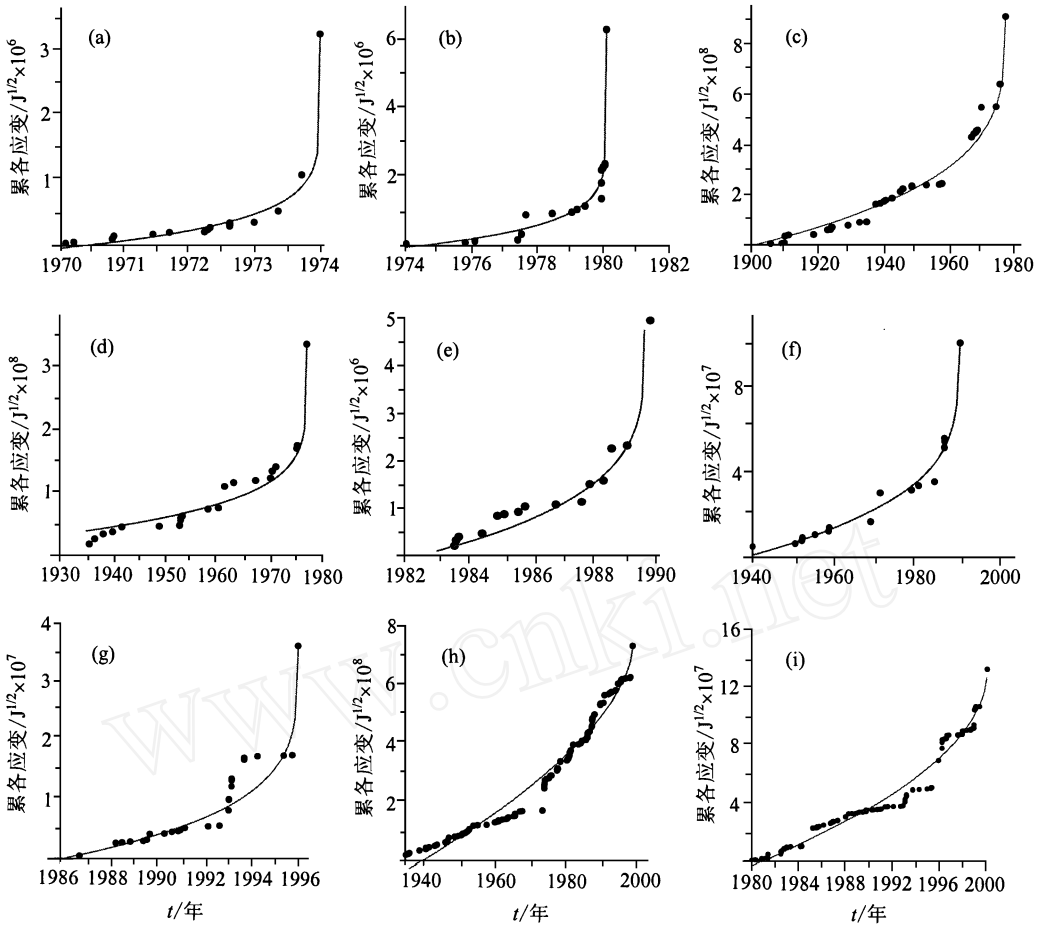


图 1 地震应变能释放的幂率拟合曲线

(a) 1973 年 12 月 31 日,河间,5.3;(b) 1975 年 6 月 4 日,和田,6.1;(c) 1976 年 7 月 28 日,唐山,7.8;(d) 1976 年 8 月 16 日,松潘,7.2;(e) 1989 年 10 月 18 日,大同,5.7;(f) 1990 年 4 月 26 日,共和,7.0;(g) 1995 年 10 月 24 日,武定,6.5;(h) 1997 年 11 月 8 日,玛尼,7.5;(i) 2000 年 1 月 15 日,姚安,6.5

力状态的不断接近而形成较大单元(相当于岩石破裂实验中的微裂纹合并阶段)。进一步演化的结果是:整个系统的应力相关长度逐渐增大,系统中某一单元可以对相距较远的其它单元产生影响。其后果是系统越来越敏感,一部分介质破裂发生的地震,可影响到整个孕震系统,并激发系统其他区域发生中地震。随着上述过程的不断进行,应力相关长度逐渐增大到整个区域,孕震系统中较大地震发生的频率逐渐增加,系统不断接近并最终进入临界状态,直至大地震的最后发生。由此有理由认为,系统临界区域的大小即是孕震区的尺度。

显然,挑选不同范围的地震,其拟合结果将有所不同。如范围太小,则部分参与孕震过程的地震被遗漏;反之,如范围过大,则部分孕震系统以外的地震将参与拟合,这都将会影响拟合结果。比较不同范围的拟合误差,可得到最佳拟合效果。考虑到不同的范围其拟合的样本数不同,拟合误差不具有可比性,我们选择线性拟合作为参照,对同一范围同时进行幂率拟合和线性拟合。线性拟合用下式进行

$$(t) = A + B(t_c - t) \tag{4}$$

式中各项参数的含义同(1)式。定义参数

$$C = \frac{\text{幂率拟合均方差}}{\text{线性拟合均方差}} \tag{5}$$

其含义是：C 值越小，表明应变释放越接近幂率分布而偏离线性分布。反之，则接近线性分布而偏离幂率分布。

对同一地震取不同尺度的区域重复上述操作。为方便起见，本文选择以强震震中为圆心，不同半径的圆形区域进行拟合，得到不同的 C 值。

图 2 为表 1 中发生在中国大陆的 9 次地震的不同区域半径所对应的 C 值变化曲线。从图中可看出，多数情况下，随着区域半径 R 的逐渐增大，C 值逐步减小，达到最小值后，又逐渐上升。

这一过程实际上反映出：当 R 较小时，所选择的区域小于地震的临界区域，此时地震的

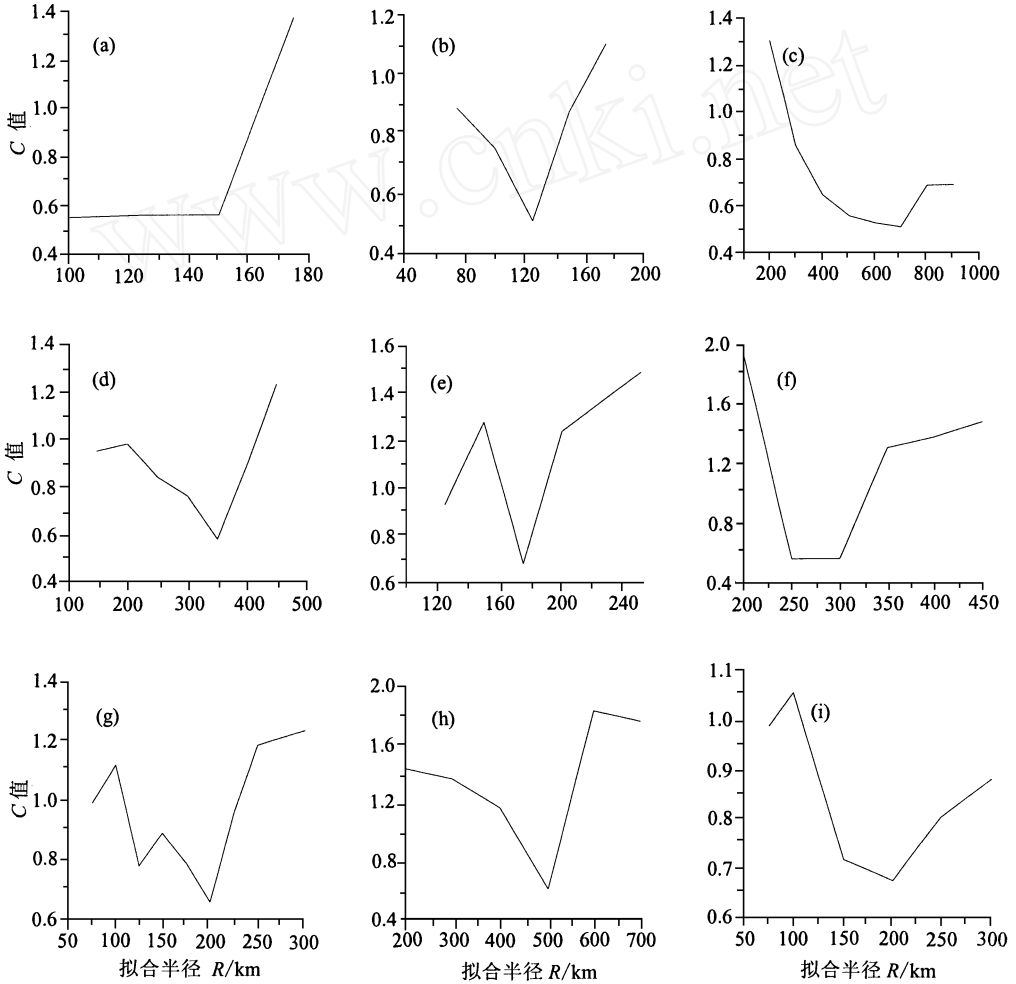


图 2 地震应变能释放幂率拟合的 C 值随拟合半径变化曲线(分图名同图 1)

应变释放不能很好地符合幂率分布, 幂率拟合误差接近甚至超过线性误差, C 值较大; 随着 R 值逐渐增大并达到地震的临界尺度时, 幂率关系能最好地拟合地震的应变释放, 使 C 值逐渐减小并达到最小值; 此后, 随着 R 的进一步增大, 因拟合区域超过地震的临界尺度, 一些孕震系统以外的信息被包括进来, 并对幂率拟合产生影响, 致使 C 值增大。因而最小 C 值所对应的区域即是孕震系统的最优临界区域, 可认为是孕震区的范围。

为研究地震的震级与孕震区尺度的关系, 将图 2 中每个地震最小 C 值所对应的区域半径与相应地震的震级标于图 3 中。从图 3 可以看出, 地震的震级越大, 所对应的临界区域的半径越大, 临界区域半径 R 的对数与地震的震级具有明显的线性关系。

其拟合结果为

$$\log R = 0.29M + 0.49 \quad (6)$$

这一结果与我国地震专家长期积累的经验是一致的。

3 结论

通过上述分析, 得到以下结论:

- (1) 震前震中周围地区应变能加速释放现象, 可以用临界点理论进行解释;
- (2) 通过对孕震系统的最优拟合, 可以估计孕震区的尺度。震级越大, 孕震区范围越大, 孕震区半径的对数与地震的震级呈线性关系。

参考文献

- 刘蒲雄, 1982, 强震前地震活动增强特征, 地震, 2(2), 5~7.
- Bowman D. D., Ouillon G., Sammis C. G., et al, 1998, An observational test of the critical earthquake concept. *Journal of Geophysical Research*, 103(B10), 24, 359~372.
- Bufe, C. G., Varnes D. J., 1993, Predictive modeling of seismic cycle of the greater San Francisco Bay region, *J. Geophys. Res.*, 98, 9871~9883.
- Bufe, C. G., Nishenko S. P., Varnes D. J., 1994, Seismicity trends and potential for large earthquakes in the Alaska-Aleutian region, *Pure and Appl. Geophys.*, 142, 83~99.
- Hirata, T., Satoh, T., and Ito, K., 1987, Fractal structure of spatial distribution of microfracturing in rock, *Geophys. Roy. Astron. Soc.*, 90, 369~374.
- Jaume, S. C., Sykes L. R., 1999, Evolving towards a critical point: a review of accelerating seismic moment/energy release prior to large and great earthquakes, *Pure and Appl. Geophys.*, 155, 279~306.
- Rundle J. B., Klein, W., Goss S., 1999, A physical basis for statistical patterns in complex earthquake populations: models, predictions and tests. *Pure and Appl. Geophys.* 155, 575~607.
- Sornette, A., Sornette, D., 1990, Earthquake rupture as a critical point: Consequences for telluric precursors, *Tectonophysics*, 179, 327~334.

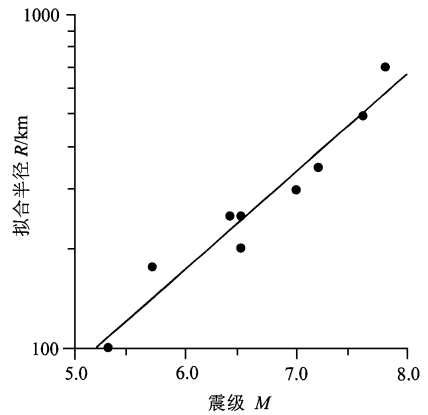


图 3 最小 C 值所对应的区域半径与震级的关系

- Sornette, D. , Sammis, C. G, 1995 ,Complex critical exponents from renormalization group theory of earthquake prediction ,J. Phys. I. France ,5 ,607 ~ 619.
- Vere-Jonse ,1977 ,Statical theory of crack progation ,Math. Ged. ,9 ,455 ~ 481.
- Wei , Y.J. ,Xia ,M. F. ,Ke ,F.J. et al ,2000 ,Evolution Induced Catastrophe and its predictability , Pure and Appl. Geophys ,157 ,1945 ~ 1957.

Accelerating Strain Release and Earthquake Genesis Scaling Exponents from Critical Point Hypothesis

Peng Keyin¹⁾ Yin Xiangchu^{1),2)} He Rui³⁾

¹⁾ (Center for Analysis and Prediction , CSB , Beijing 100036 , China)

²⁾ (State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics , Chinese Academy of Science , Beijing 100080 , China)

³⁾ (Seismological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region , Urumqi 830011 , China)

Key words : Critical point hypothesis Accelerating strain release Earthquake genesis scaling