

加卸载响应比与应变能加速释放的临界现象讨论^{*}

彭克银¹, 尹祥础^{1,2}

(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)

摘要:对发生在中国大陆地区的 8 次地震, 用不同的区域半径分别进行应变能释放的幂率拟合和加卸载响应比计算, 发现最佳幂率拟合的区域半径与加卸载响应比最大值所对应的区域半径的对数与地震的震级呈线性关系, 且两者具有很好的一致性, 因而认为两者之间可能具有相同的物理机制, 是孕震系统进入临界状态的不同表现形式。

关键词:临界点理论; 应变能加速释放; 加卸载响应比; 孕震区

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3274(2004)03-0008-07

引言

20 世纪 80 年代后期, 地震的临界点现象成为地震学界讨论的热点之一。有关研究表明, 地震的孕育过程是一种临界现象^[1~5], 并认为地壳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, 孕震体偏离临界状态。此后在构造应力作用下逐渐积累能量, 从而再次接近临界状态, 发生下一次地震。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。长期观测发现, 强震前震中附近区域由于中等地震活动增强, 应变能加速释放现象较为普遍, 我国地震学家在长期预测实践中早已将它作为强震发生的主要前兆之一^[6]。临界点理论认为, 应变能加速释放现象可能是由区域应力场的长程关联引起的, 应力场的关联长度反映了孕震区的尺度^[7]。Bowman 等^[8]通过对发生在美国的 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, 从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。

在临界状态, 外界的触发因素将起重要作用。较小的附加应力, 如日月引潮力便足以触发孕震区的地震, 尤其是中小地震的发生。加卸载响应比理论即是利用这一原理, 对强震进行中期预测, 并在实践中取得较好的效果^[9~13]。由于应变能加速释放和加卸载响应比反映的都是孕震区进入临界状态的表现, 因而两者间可能具有相似的物理机制。本文将通

* 收稿日期: 2003-09-04; 修改回日期: 2003-12-01

基金项目: 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(1964-), 男, 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等研究。

过部分震例的研究, 讨论两者间的联系。

1 应变能加速释放的幂率拟合

强震前应变能加速释放并在时间上呈幂率分布, 被认为是孕震系统接近临界状态的表现形式之一。本文将对发生在中国大陆地区的 8 次震前应变能有明显加速释放现象的不同震级地震进行幂率拟合, 研究其临界区域尺度与震级的关系。

采用 Bufe 等^{[14],[15]}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 为某一常数, 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

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

式中, E_i 表示第 i 个的地震释放的能量, $N(t)$ 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:

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

拟合结果表明, 上述地震的应变能释放能较好地服从幂率分布。

从上述的拟合过程不难发现, 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, 这些都将无疑会影响拟合结果。比较不同范围的拟合误差, 可得到最佳拟合效果。但不同的范围, 拟合的样本数不同, 其拟合误差不具有可比性。为此, 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:

$$(t) = A + B(t_c - t) \quad (4)$$

式中各项参数的含义同式(1)。定义参数

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

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 1 为上述 8 次地震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, 当区域半径 R 较小时, 所选区域小于地震的临界区域, 此时地震的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; 随着半径 R 逐渐增大并达到地震的临界尺度, 此时幂率关系能最好地拟合地震的应变释放, 因而 C 值达到最小值。此后半径 R 进一步增大, 由于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, 必然对幂率拟合产生影响, 其结果是 C 值增大。因而最小 C 值所对应的区域即是孕震系统的临界区域, 可认为是孕震区的范围。

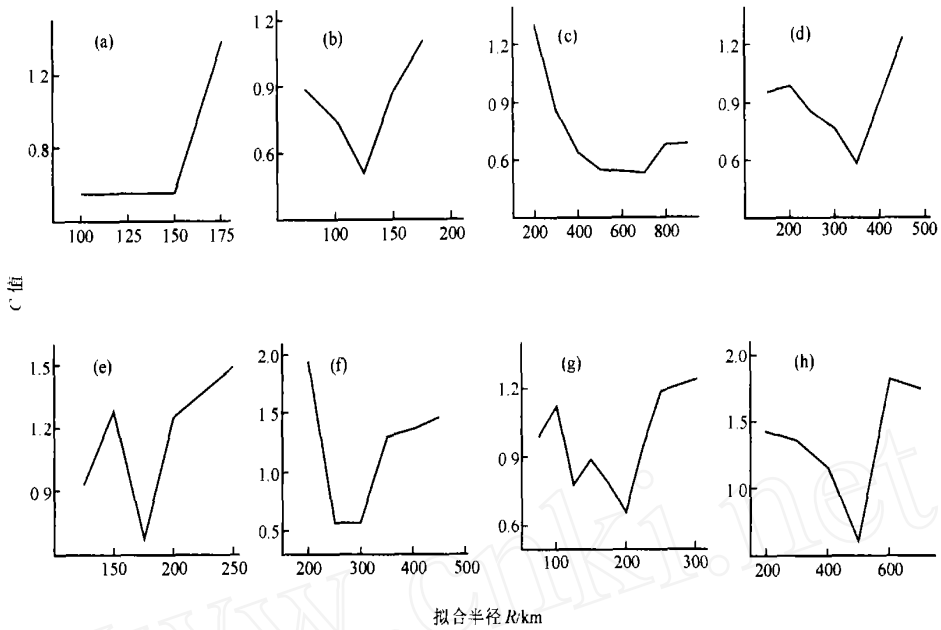


图 1 地震应变能释放幂率拟合的 C 值随拟合半径变化曲线

(a) 1973 年 12 月 31 日河北河间 5.3 级地震; (b) 1980 年 2 月 10 日内蒙古博克图 5.6 级地震; (c) 1976 年 7 月 28 日河北唐山 7.8 级地震; (d) 1976 年 8 月 16 日四川松潘 7.3 级地震; (e) 1989 年 10 月 18 日山西大同 5.7 级地震; (f) 1990 年 4 月 26 日青海共和 7.0 级地震; (g) 1995 年 10 月 24 日云南武定 6.5 级地震; (h) 1997 年 11 月 8 日西藏玛尼 7.5 级地震

为研究地震的震级与孕震区尺度的关系，将图 1 中每个地震最小 C 值所对应的区域半径 R 与相应地震的震级标于图 2 中。从图 2 可以看出，半径 R 的对数与震级具有明显的线性关系。

2 加卸载响应比的临界区域讨论

加卸载响应比理论自 20 世纪 80 年代提出以来，在地震预报实践中得到比较广泛的应用和研究。加卸载响应比理论的基本思路是：地震的孕育和发生为一个非线性失稳过程，当系统处于稳定状态时，加载与卸载的响应相同；当系统临近失稳时，加载与卸载的响应不同，即加载响应远大于卸载响应，因而加载响应与卸载响应的比值反映了系统趋近失稳的程度。把日月引潮力引起的地壳内应力的周期性变化作为对所研究地块的加、卸载手段，并可采用多种实际观测量作为响应变量计算加卸载响应比，以加卸载响应比的变化作为判断一定地区发生地震危险性的定量依据。本文以地震的应变能作为响应变量计算加卸载响应比。

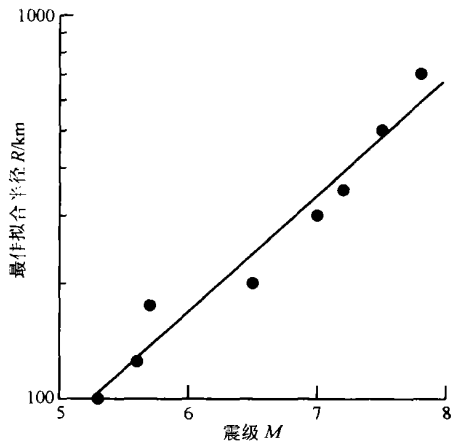


图 2 最小 C 值所对应的区域半径与震级的关系

根据以往的研究，选取震中周围不同大小的区域，计算的加卸载响应比值不同，其最

大值所对应的区域尺度可能与未来发生强震的震级大小有关^[16]。为此, 笔者对上述 8 次地震做了进一步的研究。

研究中, 对同一地震以震中为圆心, 取不同半径进行加卸载响应比计算。由于不同区域所包含的中小地震个数不同, 而不同地震个数所得结果的信度不同, 难以直接比较。庄建仓等^[17]对加卸载响应比进行数值模拟计算, 得出不同模型下加卸载响应比的随机分布和置信区间。本文据此先将不同半径所计算的加卸载响应比值归算到 95% 的置信度, 即计算 Y_{\max}/Y_c , 然后进行对比分析。

图 3 为上述 8 次地震的 Y_{\max}/Y_c 随半径变化的曲线。由图可见, 其变化有一共同特征, 先上升到最大值, 然后下降。

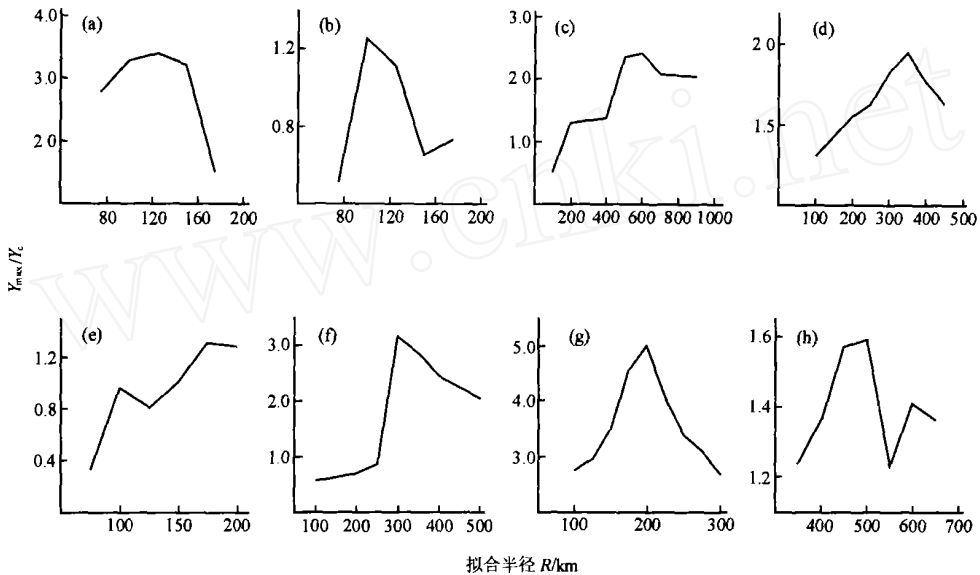


图 3 加卸载响应比峰值随区域半径变化曲线

- (a) 1973 年 12 月 31 日河北河间 5.3 级地震; (b) 1980 年 2 月 10 日内蒙古博克图 5.6 级地震; (c) 1976 年 7 月 28 日河北唐山 7.8 级地震; (d) 1976 年 8 月 16 日四川松潘 7.2 级地震; (e) 1989 年 10 月 18 日山西大同 5.7 级地震; (f) 1990 年 4 月 26 日青海共和 7.0 级地震; (g) 1995 年 10 月 24 日云南武定 6.5 级地震; (h) 1997 年 11 月 8 日西藏玛尼 7.5 级地震

将图 3 中每个地震最大 Y_{\max}/Y_c 所对应的区域半径 R 与相应地震的震级标于图 4 中, 发现地震的震级越大所对应的区域半径越大, 且半径 R 的对数与震级具有明显的线性关系。

3 应变能加速释放与加卸载响应比的对比分析

由以上分析, 应变能加速释放的最佳拟合半径及加卸载响应比峰值所对应的半径, 与地震的震级之间有相似之处, 即半径都随震级的增大而增大, 且半径的对数与震级呈明显的线性关系。为进一步研究两者之间的关系, 将同一地震所对应的区域半径进行对比分析 (表 1)。结果显示, 两者所反映的最佳区域半径与强震震级的关系具有很好的一致性, 表明两者之间可能存在相同的物理机制, 是孕震系统进入临界状态的不同表现形式。文献^[17]

表 1 幂率拟合最优半径与加卸载响应比峰值半径对照表

地震	1973-12-31 河间 5.3 级	1980-02-10 博克图 5.6 级	1976-07-28 唐山 7.8 级	1976-08-16 权潘 7.3 级	1989-10-18 大同 5.7 级	1990-04-26 共和 7.0 级	1995-10-24 武定 6.5 级	1997-11-08 玛尼 7.5 级
幂率拟合 最优半径/km	100	125	700	350	175	300	200	500
加卸载响应比 峰值半径/km	125	100	600	350	175	300	200	500

通过数值模拟研究,曾对此做过较深入的分析。

4 讨论与结论

根据临界点理论,地震孕育过程的初期阶段系统处于低应力状态,孕震介质各部分之间的力学性质差异较大,相互作用主要发生在相邻部分,因而应力场的相关长度较小,表现为局部应力分布不均匀。此时由于局部的应力集中而产生较小尺度的破裂,且破裂的产生在时间和空间上表现为随机分布,难以形成大震级的地震。这种局部破裂的不断发生,对应力场起着调整作用,即不断地平滑局部应力场,使孕震系统相邻各部分的差异逐渐缩小,原来较小的邻近部分由于应力场的不断平滑,在力学性质上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。其演化的结果是整个系统的应力相关长度增大。随着上述过程的不断进行,系统的应力相关长度增大,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。

这一过程在地震活动图像上表现为,强震前震源区周围的地震活动明显增强,应变能出现加速释放现象,并在整个孕震区呈幂率分布。

当孕震系统接近或进入临界状态时,系统的敏感程度增大,此时外界的触发因素将起重要作用。较小的附加应力便足以触发孕震区的地震,尤其是中小地震的发生,用加卸载响应比方法可检测系统的稳定程度。

本文应用上述二种方法对部分震例的研究表明,当研究区域尺度偏离孕震区域尺度时,由于缺失系统的部分信息或包含了系统以外的部分信息,偏差愈大,其反映的孕震系统的临界特征愈不明显。只有当研究区域的尺度接近孕震区域尺度时,才能充分反映孕震系统临界状态的部分特征。

此外,对比分析表明,上述二种研究方法的最佳拟合半径具有很好的一致性,表明两者之间可能有着共同的物理机制,最佳拟合半径可认为是孕震区的尺度,应变能加速释放现象和加卸载响应比异常从不同的角度反映了强震发生前孕震系统的异常特征,是孕震系统进入临界状态的不同表现形式。

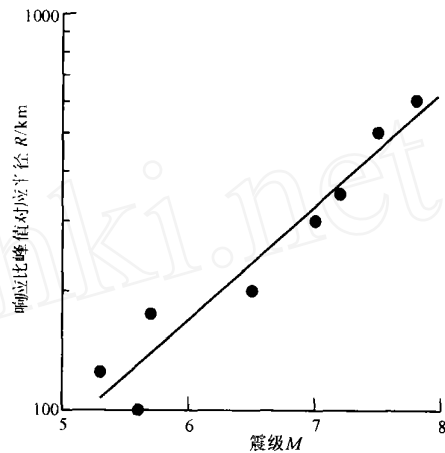


图 4 加卸载响应比峰值所对应的区域半径与地震震级的关系

参考文献:

- [1] Vere-Jonse. Statical theory of crack progation[J]. *Math Ged*, 1977, 9: 455-481.
- [2] Sornette A, Sornette D. Earthquake rupture as a critical point: Consequences for telluric precursors[J]. *Tectonophysics*, 1990, 179: 327-334.
- [3] Sornette D, Sammis C G. Complex critical exponents from renormalization group theory of earthquake prediction[J]. *J Phys France*, 1995, 5: 607-619.
- [4] Rundle J, Klein W, Gross S. A physical basis for statistical patterns in complex earthquake populations: models, predictions and tests[J]. *Pure and Appl Geophys*, 1999, 155: 575-607.
- [5] Jaume S C, Sykes L R. Evolving towards a critical point: a review of accelerating seismic moment/ energy release prior to large and great earthquakes[J]. *Pure and Appl Geophys*, 1999, 155: 279-306.
- [6] 刘蒲雄. 强震前地震活动增强特征[J]. *地震预报研究*, 1989, 2: 190-194.
- [7] Sykes L R, Jaume S. Seismic activity on neighboring faults as a long-term precursor to large earthquakes in the San Francisco Bay area[J]. *Nature*, 1990, 348: 595-599.
- [8] Bowman D D, Ouillon G, Sammis C G, *et al.* An observational test of the critical earthquake concept [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(B10, 24), 359-372.
- [9] 尹祥础, 尹灿. 非线性系统的失稳前兆与地震预报[J]. *中国科学*, 1991, 5: 512-518.
- [10] 尹祥础, 陈学忠, 宋治平, 等. 加卸载响应比理论(LURR)一种新的地震预报方法[J]. *地球物理学报*, 1994, 37(6): 767-775.
- [11] YIN Xiang-chu, CHEN Xue-zhong, SONG Zhi-ping, *et al.* A new approach to earthquake prediction—the Load-Unload Response Ratio (LURR) theory[J]. *Pure Appl Geophys*, 1995, 145: 701-715.
- [12] YIN Xiang-chu, WANG Yu-cang, PENG Ke-yin, *et al.* Development of a new approach to earthquake prediction: Load/ Unload Response Ratio (LURR) theory[J]. *Pure Appl Geophys*, 2000, 157: 1923-1941.
- [13] YIN Xiang-chu, PETER Mora, PENG Ke-yin, *et al.* Load-Unload Response Ratio and Accelerating Moment/ Energy Release Critical Region Scaling and Earthquake Prediction[J]. *Pure and Appl Geophys*, 2002, 159: 2511-2523.
- [14] Bufo C G, Varnes D J. Predictive modeling of seismic cycle of the greater San Francisco Bay region[J]. *Geophys Res*, 1993, 98: 9871-9883.
- [15] Bufo C G, Nishenko S P, Varnes D J. Seismicity trends and potential for large earthquakes in the Alaska Aleutian region[J]. *Pure and Appl Geophys*, 1994, 142: 83-99.
- [16] 王海涛. 加卸载响应比理论在地震预报中的应用综合研究[D]. 北京: 国家地震局地球物理所, 1999, 45-48.
- [17] 庄建仓, 尹祥础. 加卸载响应比在 Poisson 模型下的随机分布[J]. *中国地震*, 1999, 15(2): 128-138.
- [18] PETER Mora, WANG Yu-cang, YIN Can, *et al.* Simulation of the Loading-Unloading response ratio and critical sensitivity in the lattice solid model[J]. *Pure and Appl Geophys*, 2002, 159: 2525-2536.

Critical point hypothesis study on Load-Unload Response Ratio and accelerating release of strain energy

PENG Ke-yin¹, YIN Xiang-chu^{1, 2}

(1. Center for Analysis and Prediction, CEA, Beijing 100036; 2. Open Laboratory of Nonlinear Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract : Both LURR- (Load-Unload Response Ratio) anomalies and best-fit power-law function of ARSE (accelerating release of strain energy) are computed using data for a range of distances from the epicenters of 8 earthquakes occurred in the mainland of China. The result shows that there is a linear relation between the logarithm of either the critical region radius (R) for ARSE or the region radius (R) for optimal LURR and the magnitude of the events. A strong correlation is evident between the ARSE and LURR critical region size suggesting that these two observations have a common physical mechanism. It means that the seismogenic system closes to critical status.

Key words : Critical point hypothesis; Accelerating release; Load-Unload Response Ratio; Seismogenic zone