

地震临界区域尺度与地震预测^①

余怀忠, 张小涛, 张永仙

(中国地震台网中心, 北京 100045)

摘要:地震临界区域尺度的界定对于地震前兆研究有着重要意义。通过加卸载响应比(LURR)及震前矩张量加速释放(AMR)两种模型对地震临界区域尺度进行了分析。采用不同半径区域内地震事件的 Benioff 应变分别计算 LURR 和 AMR 时间序列,震前引起时间序列异常变化最明显的半径尺度所定义的区域就是最佳地震临界区域。华北地区 $M > 5$ 震例研究结果显示两种模型所得到的最佳地震临界区域具有明显的一致性,最佳临界区域半径与主震震级之间统计的线性关系斜率约为 0.34~0.36。研究表明通过不同预测模型可以较为定量的评价地震临界区域尺度,从而为地震预测研究提供依据。

关键词: 临界区域; 加卸载响应比; 矩张量加速释放; 地震预测

中图分类号: P315.75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2013)03-0641-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.03.0641

Scale of Critical Seismogenic Region and Earthquake Prediction

YU Huai-zhong, ZHANG Xiao-tao, ZHANG Yong-xian

(China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

Abstract: The size selection of the critical seismogenic region prior to an earthquake has great influence on seismic hazard evaluation. By adopting an appropriate critical region, we can reduce the occurrence of false alarms and enhance the critical sensitivity of the precursory anomalies. In this study, we examine the optimal critical region scale using the load/unload response ratio (LURR) and accelerating moment release (AMR) methods. These two methods are intuitively reasonable. Prior to the occurrence of large or great earthquakes, the AMR phenomenon is usually observed. A simple power-law time-to-failure equation derived from damage mechanics can be used to model the observed seismicity. This hypothesis is an outgrowth of efforts to characterize large earthquakes as a critical phenomenon. The LURR is a short-to-intermediate-term earthquake prediction method based on measuring the ratio between Benioff strains released during the time periods of loading and unloading, corresponding to the Coulomb Failure Stress change induced by Earth tides on optimally oriented faults. Prior to the occurrence of large earthquakes ($M > 6.0$), anomalous increases in the time series of LURR within a time frame of months to years has often been observed.

A circular region is usually adopted as the spatial window in the LURR and AMR practices, allowing us to link these two unrelated subjects to investigate the optimal critical region prior to a large earthquake. In this study, the optimal critical region scale for LURR evaluation is determined by computing the anomaly within various-sized regions centered at the epicenter of the in-

① 收稿日期:2012-10-30

基金项目:地震科技星火计划项目(XH12058);中美国际科技合作项目(2010DFB20190)

作者简介:余怀忠(1985-),男(汉族),主要从事地震卫星应用研究。E-mail:yuhz750216@sina.com

coming large event to reach the maximum LURR precursory anomalies. For the AMR method, the calculation of the optimal critical region includes the following steps: The Benioff strain of earthquakes within each circular region is fitted to a power-law time-to-failure function and to a straight line; we then compute a curvature parameter as the ratio of the residuals to the power-law fit to the residuals of the linear fit; and the critically seismogenic region is finally defined as the circular region that minimizes the curvature parameter. Retrospective testing on 36 $M > 5$ earthquakes occurring in North China during the last 40 years show remarkable enhancement of the LURR precursory anomalies with the optimal critical regions. From these statistics, we found that the optimal critical regions derived from both methods are consistent with each other: The slopes of the linear relationship between the radii of the optimal critical regions and the magnitude of the detection earthquakes for LURR and AMR are 0.34 and 0.36, respectively. The results show that by combining different earthquake prediction methods, we can quantitatively assess critical seismogenic region scale and therefore provide information and constraints about the approaching criticality of the system.

Key words: critical region; load/unload response ratio (LURR); accelerating moment release (AMT); earthquake prediction

0 引言

近年来,国际上将现代统计物理的理论和方法应用于地震和地震预测问题的研究取得长足进展,已成为物理学和地震学之间的一个活跃的交叉领域^[1]。然而地震发生的物理成因虽然早已认识,地震预报却始终是世界性难题,原因在于灾害性地震通常发生在地壳内数公里至数十公里深处,与地震孕育过程相关的介质性质、力学状态和动态演化均很难观测到,难以掌握其规律用于地震预报。一个地震活动强烈的地区通常存在一系列规模不等、力学性质不同的活动断裂带的强烈构造活动,使得地震活动存在明显的不均匀性,复发过程不具有良好的准周期性,也不存在“强度可预报性”或“时间可预报性”模型所预期的性质。由地震观测所得到的资料,诸如地震的空间分布和时间变化等,似乎难以作为地震预报提供必要的约束^[2]。

事实上地震活动性变化通常是由地壳的构造应力水平决定,大量研究发现中等级地震的活跃性直接与随后发生的大地震震级相关^[3-6],即地震活动性的改变反映了地壳介质的构造应力积累过程。从统计力学的观点来看,孕震区域的演化过程在时间上经历了一个由线性向非线性的变化;在空间上经历了由均匀向局部的变化;内部裂隙经历了由小到大、由少到多的变化;而在整体力学状态上将由稳定状态向不稳定状态变化。Ben-Zion等^[7-8]提出,从演化特征来看地震属于一种“间歇性临界现象”,因此地震具有可预报性^[9-11]。

在地震预测研究中,一个重要问题是如何恰当的选择地震临界区域,这在很大程度上制约了预报的结果。刘蒲雄^[12]曾对70年代发生在我国大陆的10次7级以上地震进行了研究,发现大地震发生前几年中等地震活动性增强现象是相当普遍的,其增强的范围可以远达距离地震中心位置数百公里;Keilis-Borok和Soloviev^[13]从地震矩释放加速及其他许多前兆性地震活动模式研究中得到临界区域尺度相当于目标地震断层尺度1:5的比例;而Press和Allen^[14]通过研究长程相关更认为前兆相关范围能达到地震线性尺度的100倍;Bowman等^[15]则更为量化的提出曲率参数 C (幂律拟合均方差与线性拟合均方差之比),并以强震震中为圆心,利用不同半径范围内的地震活动来计算参数 C ,对于参数 C 为最小并且指数小于0.8的圆型区域被认为是主震的临界区域。

此外,Yin等^[16-17]利用加卸载响应比时间序列演化对地震临界区域进行了定义;Rundle等^[18-20]则把统计物理方法应用于地震活动性图像的分析,并宣称可以对加州的地震做出比较好的预测。他们尝试使用综合考虑地震活动“增强”与“平静”的地震活动图像算法,针对各种活动构造区域进行中长期地震危险性概率估算。围绕这一问题,还有研究者^[21-23]提出可以根据震前地震断层间相互作用的库仑应力触发关系,确定地震临界区域,看来比较好地解决了统计区域的选择问题。然而,这些方法尽管在一定程度上能够确定大地震发生前的区域应力及

地震活动性变化,但是在实际地震预测中对临界区域尺度的估计尚不能达成统一的评价指标。

不同的地震预测模型,在空间区域及时间区域的选择上应该存在一致性,都与地震的能量释放密切相关^[24-25]。在本文中,我们尝试使用加卸载响应比(LURR)及震前矩张量加速释放(AMR)两种模型,通过华北地区近 40 年来的 $M>5$ 震例对地震临界区域尺度进行统计研究。

1 加卸载响应比理论(LURR)

加卸载响应比是近年来关于震源区地壳介质破坏演化规律性认识的重要发现^[16-17,24-26]。其基本思路借鉴了系统论的方法,通过系统与外部的联系来了解系统的性态,简而言之,即研究系统的输入信号与输出信号之间的关系,或者说研究系统对输入信号的响应,达到了解系统性态的目的。在过去的 20 年中,加卸载响应比方法的研究已经取得了很大发展,并被广泛应用于地震中短期预测实践^[27-31]。研究发现在大地震发生之前数月甚至数年间,加卸载响应比时间序列通常会发生明显的异常增加^[16-17],这一现象可以被用作为地震发生的重要前兆规律^[17,24]。

在地震预测实践时,一定时间窗和空间窗内释放的地震能量通常被作为响应量。加载和卸载过程可根据日月潮汐力在地震破裂面上引起的库仑破坏应力 CFS 进行判断^[32-33], $CFS > 0$ 为加载, $CFS < 0$ 则为卸载。这样,加卸载响应比可以定义为加载阶段和卸载阶段能量释放之比:

$$Y_m = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N+} E_i^m\right)_+}{\left(\sum_{i=1}^{N-} E_i^m\right)_-} \quad (1)$$

这里 E_i 表示第 i 个小地震所释放的能量, $m = 0, 1/2$, 或 1 。当 $m = 0$ 时, E^m 就是地震事件数;而当 $m = 1/2$ 时, E^m 表示 Benioff 应变。为了避免地震数目太少造成加卸载响应比时间序列的强烈波动,计算时间窗内通常包含了多个加、卸载循环过程。当孕震区介质处于稳定状态时, LURR 在 1 附近波动,而当地震迫近时,比值会发生明显的变化。

2 矩张量加速释放模型(AMR)

近年来一系列研究表明通常在大地震发生之前地震活动性会出现明显的变化^[34], Bufo 和 Varnes^[35] 从损伤力学模型提出一个简单幂律时间—破裂模型可以用来描述这种震前地震活动性变化,他们

研究发现 1989 年美国加州 $M=7.0$ Loma Prieta 地震发生前的地震活动可以用下式的幂律关系拟合:

$$\epsilon_p(t) = A + B(t_c - t)^z \quad (2)$$

其中, t_c 表示地震发生的时间, z 大约为 0.3, 能量释放积累过程可以表示为

$$\epsilon(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} E_i(t) \quad (3)$$

式中, E_i 表示第 i 个地震事件的能量释放, $N(t)$ 为 t 时刻的地震事件数。Sammis 和 Smith^[36] 在研究地壳状态的间歇性临界状态时也对这一规律有过类似的发现。按照这一假设大地震可以被看作是一种临界现象,地壳并不一直处于临界状态,当一次大地震发生之后,该地区的地壳将远离临界状态。然后,随着构造应力的逐步增加,地壳介质的相关尺度逐渐增大,该地区的地壳又逐步趋向临界点,而最终地壳介质的相关尺度大小势必与地震发生的震级密切相关。

3 震例分析

运用上述两种模型我们对华北地区近 30 年来的 $M>5$ 地震进行了研究,其中强余震采用 Supperseis 软件去除^[37-39]。统计的震例总数为 36。最佳地震临界区域按照如下方法计算:围绕地震震中位置,选取不同半径大小的圆形区域内地震事件的 Benioff 应变分别计算 LURR 和 AMR 时间序列,以确定各模型的最佳地震临界区域。

LURR 时间序列按照文献^[17]的定义计算。所需的震源机制解由 Harvard CMT 下载得到。为了统计的客观性,我们只对能得到 Harvard CMT 的地震进行统计,震例总数 15 个,其中 11 个震例在震前观测到明显的异常。如图 1 所示,我们给出 2 个震例计算结果,计算的时间窗为 1 年,滑动时间窗为 1 个月。从图中可以看到半径不同对应时间序列存在较为明显的差异。震前异常变化最明显的时间序列(如黑色实线所示)所对应的圆形区域就是最佳地震临界区域。

11 个震例所得临界区域半径与震级的关系(图 2)可以近似拟合为

$$\lg R = 0.337M + 0.133 \quad (4)$$

AMR 序列及最佳临界区域按照 Bowman 等^[15]的方法计算,即分别采用幂律(式 2)和线性两种方法拟合,并计算两种拟合结果的均方差之比 R , 比值最小的圆型区域被认为是主震的最佳临界区域。若比值 R 越接近 1, 则表明能量释放越接近线性过

程,即能量释放没有出现明显的加速;如果比值 R 小于 1 的程度较大,则表明能量释放过程更接近幂律拟合。在所选择的 36 个震例中,我们在 26 个地

震发生前观测到如图 3 所示的能量加速释放过程,拟合得到指数平均值: ≈ 0.45 ,这与 Ben-Zion 和 Lyakhovsky^[8] 研究的结果类似。

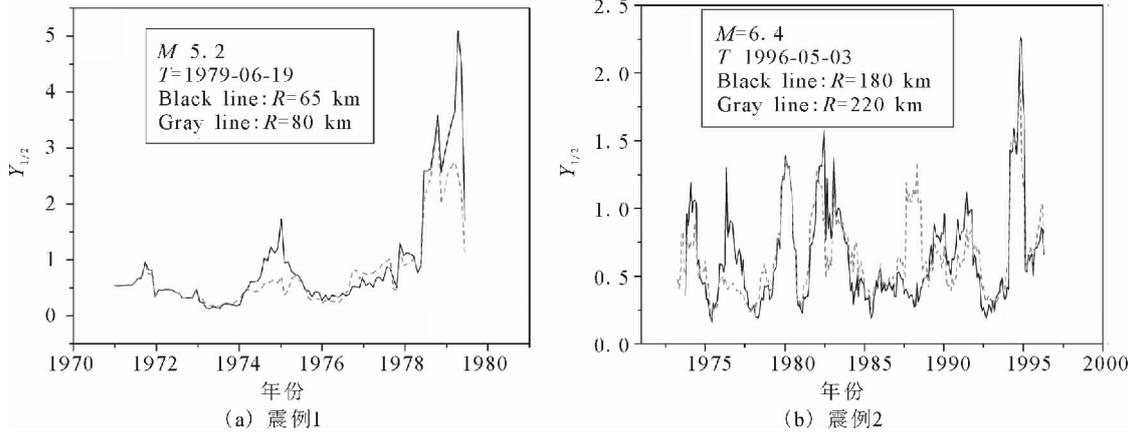


图 1 LURR 时间序列演化示例图(实线和虚线分别对应不同半径尺度区域的计算结果)

Fig. 1 Examples of the LURR time series(The black and gray lines denote LURR time series derived from the circular regions with different radius)

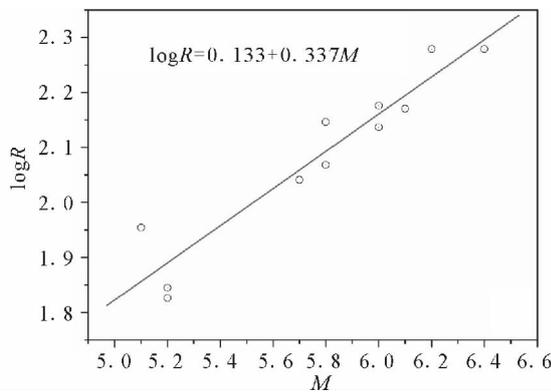


图 2 LURR 最佳临界区域半径与震级的关系
Fig. 2 The relationship between radius of the optimal critical region and magnitude of the detection earthquakes for the LURR method

26 个震例所得临界区域半径与震级的关系(图 4)可以近似拟合为

$$\lg R = 0.36M + 0.004 \quad (5)$$

从式(4)和(5)结果可以看到,LURR 和 AER 两种模型所得临界区域半径 R 与主震震级之间统计线性关系斜率分别为 0.34 和 0.36,具有明显的一致性。

4 讨论和结论

加卸载响应比(LURR)和矩张量加速释放(AMR)分别反映了灾变发生前临界敏感性的增大以及相关尺度的增加。本文的研究表明,华北地区大部分 $M > 5$ 地震发生前都能观测到比较明显的

LURR 和 AMR 异常,把二者相结合,一起用作为灾变发生的前兆研究,将可能对地震等灾变做出更为准确的预测分析。

LURR 是一种中短期地震预测方法,在大部分强震发生前都能观测到 LURR 时间序列出现明显异常。LURR 是依据潮汐力对地震的触发作用计算的,对一个断层而言,如果其周围区域具有较高的库仑应力积累,地震就更容易在这些区域内发生,加卸载响应比的异常变化会更为明显。本文所研究的震例就是这样的情况,震前加卸载响应比的异常变化充分表现出其周围区域的应力积累情况。正因为所选择的最佳地震临界区域是为了研究地震断层上的目标地震而特别设定的区域。那些发生在该区域以外地震事件并没有被纳入加卸载响应比的计算(这些区域应力变化对地震触发的贡献可能并不明显),因而加卸载响应比时间序列变化应该最明显。故此选择响应比值最大的区域为最佳地震临界区域。

强震前的 AMR 现象已在全球范围不同地区被不同的地震学家所验证过。Turcotte 等^[40] 利用纤维束模型,对材料的能量释放过程进行了研究,在常载荷条件下得到指数 $\approx 1/3$; Ben-Zion 和 Lyakhovsky^[8] 利用地震数据对 \approx 值的变化范围进行了总结,得到 \approx 的变化范围为 0.1~0.55; Rundle 等^[18], Bowman 等^[15], Sornette 和 Sammis^[41] 等人对指数 \approx 的研究也得到了类似的结论。在我们的研究中,平均 $Z = 0.45$,这与文献[8]研究

的结果类似。Bowman 等^[15]通过用幂次率拟合与线性拟合的误差最小给出了一种确定临界区域尺度的最佳估计方法。他们发现二者的比值 r 一般在 0.4~0.6 之间,并指出临界区域半径与主震震级之间通常为统计的线性关系斜率约为 0.44。我们

对华北地区的地震研究结果整体结论是一致的,但斜率要略低,约为 0.34 和 0.36 之间,这在一定程度上也反映出构造的差异,为华北地区地震预测研究提供了参考。

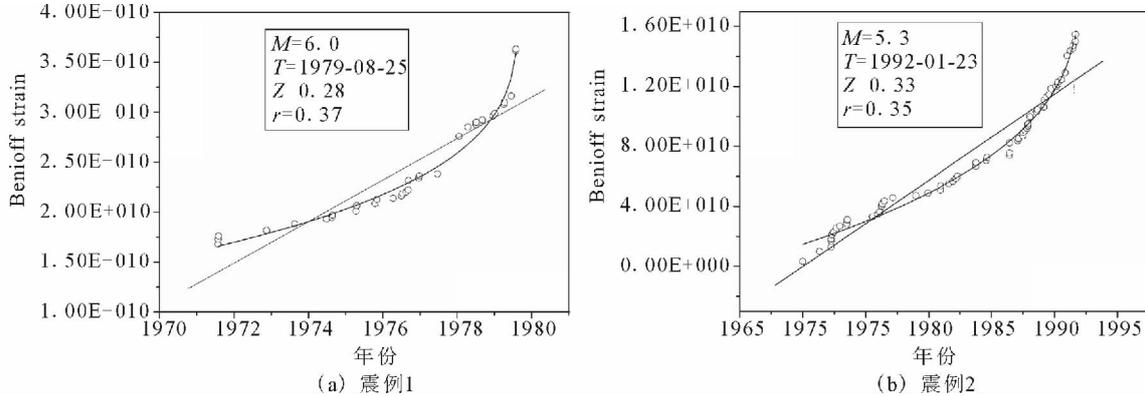


图 3 地震发生前的能量释放过程及幂律和线性拟合结果示例(“o”表示 Benioff 应变累积释放过程,曲线和直线分别表示幂律和线性拟合结果, M :震级, Z :指数, r :均方差之比)

Fig. 3 Examples of the cumulative Benioff strain and its power-law time-to-failure and linear fits (“o” represents Benioff strain time series, Curve and straight line denote respectively the power-law and linear fits. M : magnitude, z : exponent, r : the ratio of the residuals to the power-law fit to the residuals of the linear fit)

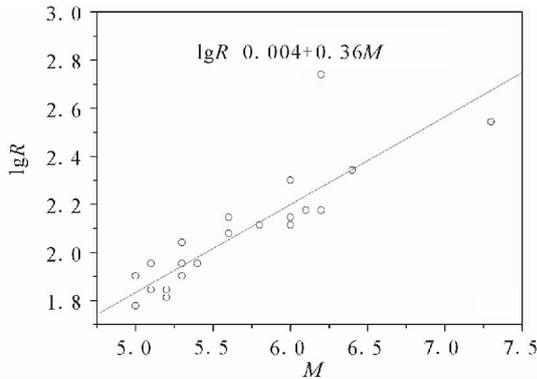


图 4 AER 最佳临界区域半径与震级的关系
Fig. 4 The relationship between radius of the optimal critical region and magnitude of the detection earthquakes for the AMR method

参考文献 (References)

[1] 董蕾,杨立明. 汶川大震前数字地震仪位移脉动低频异常现象研究[J]. 西北地震学报,2012,34(3): 268-273.
Dong L, Yang L M. Research on Low-frequency Anomalies of Microtremor Displacement Recorded by Digital Seismograph before the Wenchuan Earthquake[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34 (3): 268-273. (in Chinese)

[2] 余怀忠,程佳,张小涛,等. 多方法联合分析未来地震发生趋势[J]. 西北地震学报,2012,34(1): 1-9.
Yu H Z, Chen J, Zhang X T. Multi-method Linked to Study Future Seismic Tendency [J]. Northwestern Seismological

Journal, 2012, 34 (1): 1-9. (in Chinese)

[3] Sykes L R, Nishenko S P. Probabilities of Occurrence of Large plate Rupturing Earthquakes for the San Andreas, San Jacinto, and Imperial Faults[J]. J. G. R., 1984, 89: 5905-5927.

[4] K Mogi. Study of Elastic Shocks Caused by the Fracture of Heterogeneous Materials and its Relation to Earthquake Phenomena[J]. Bulletin of Earthquake Research Institute, 1962, 40: 125.

[5] Kelleher J, Savino J. Distribution of Seismicity before Large Strike-slip and Thrust-type Earthquakes[J]. J. G. R., 1975, 80: 260-271

[6] Ellsworth W L, Lindh A G., Prescott W H, et al. The 1906 San Francisco Earthquake and the Seismic Cycle, in Earthquake Prediction: An International Review. Eds. Simpson, D. W., and Rechar [M]. Washington, D. C. : P. G., AGU, 1981: 126-140

[7] Ben-Zion Y, Sammis C G. Characterization of Fault Zones[J]. Pure Appl. Geophys., 2003, 160: 677-715.

[8] Ben-Zion Y, Lyakhovskiy V. Accelerated Seismic Release and Related Aspects of Seismicity Patterns on Earthquake Faults [J]. Pure Appl. Geophys., 2002, 159: 2385-2412.

[9] Romachkova L L, Kossobokov V G, Panza G F, et al. Intermediate-term Predictions of Earthquakes in Italy, Algorithm M8[J]. Pure Appl. Geophys., 1998,152: 37-55.

[10] Keilis-Borok V I, Shebalin P N. Special Issue—Dynamics of Lithosphere and Earthquake Prediction [J]. Phys. Earth. Planet. Inter., 1999, 111: 179-327.

[11] Keilis-Borok V I, Ismail-Zadeh A, Kossobokov V, et al. Non-linear Dynamics of the Lithosphere and Intermediate-

- term Earthquake Prediction [J]. *Tectonophysics*, 2001, 338: 247-260.
- [12] 刘蒲雄. 大震前地震活动性的增强特征 [J]. *地震*, 1982, 2: 255-262.
- Liu P X. The Enhancement Features of Seismic Activity before Large Earthquakes [J]. *Earthquake*, 1982, 2: 255-262. (in Chinese)
- [13] Keilis-Borok V I, Soloviev A A. Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction [J]. Springer—Verlag, Heidelberg, 2003, 355: 136-149.
- [14] Press F, Allen C. Pattern of Seismic Release in the Southern California Region [J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100: 6421-6430.
- [15] Bowman D D, Ouillon G, Sammis C G, et al. An Observation Test of the Critical Earthquake Concept [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103, 24: 359-372.
- [16] Yin X C, Chen X Z, Song Z P, et al. A New Approach to Earthquake Prediction—The Load/Unload Response Ratio (LURR) Theory [J]. *Pure Appl. Geophys.*, 1995, 145: 701-715.
- [17] Yin X C, Wang Y C, Peng K Y, et al. Development of a New Approach to Earthquake Prediction—Load/unload Response Ratio (LURR) Theory [J]. *Pure Appl. Geophys.*, 2000, 157: 2365-2383.
- [18] Rundle J B, Iain W, Tiampo K, et al. Linear pattern Dynamics in Nonlinear Threshold Systems [J]. *Phys. Rev.*, 2000, E61: 2418-2431.
- [19] Rundle J B, D L Turcotte, R Shcherbakov, et al. Statistical Physics Approach to Understanding the Multiscale Dynamics of Earthquake Fault Systems [J]. *Rev. Geophys.*, 2003, 41 (4): 1019, doi:10.1029/2003RG000135.
- [20] Tiampo K F, Rundle J B, McGinnis S A, et al. Pattern Dynamics and Forecast Methods in Seismically Active Regions [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2002, 159 (10): 2429-2467.
- [21] Bowman D D, King G C P. Accelerating Seismicity and Stress Accumulation before Large Earthquakes [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, 28 (21): 4039-4042.
- [22] King G C P, Cocco M. Fault Interaction by Elastic Stress Changes: New Clues from Earthquake Sequences [J]. *Adv. Geophys.*, 2001, 44: 1-38.
- [23] Yu H Z, Shen Z K, Zhu Q Y, et al. Increasing Critical Sensitivity of the Load/Unload Response Ratio before Large Earthquakes with Identified Stress Accumulation Pattern [J]. *Tectonophysics*, 2006, 428 (1-4): 87-94.
- [24] Yin X C, Mora P, Peng K Y, et al. Load—Unload Response Ratio and Accelerating Moment/Energy Release Critical Region Scaling and Earthquake Prediction [J]. *Pure Appl. Geophys.*, 2002, 159: 2511-2523.
- [25] Yin X C, Yu H Z, Kukshenko V, et al. Load—Unload Response Ratio (LURR), Accelerating Energy release (AER) and State Vector Evolution as Precursors to Failure of Rock Specimens [J]. *Pure Appl. Geophys.*, 2004, 161: 2405-2436.
- [26] Yin X C, Zhang L P, Zhang H H, et al. LURR's Twenty Years and Its Perspective [J]. *Pure Appl. Geophys.*, 2006, 163: 2317-2341.
- [27] 陈棋福, 尹祥础, 马丽. 加卸载响应比的自然概率分布 [J]. *中国地震*, 1996, 12(3): 270-273.
- Chen Q F, Yin X C, Ma L. The Natural Probability Distribution of Load/unload Response Ratio [J]. *Chinese Earthquake Research*, 1996, 12(3): 270-273. (in Chinese)
- [28] 李佐唐. 门源 6.4 级地前后加卸载响应比的异常变化 [J]. *西北地震学报*, 1997, 18(4): 47-50.
- Li Z T. Abnormal variation of the Load/unload Response Ratio before and after the Menyuan $M_s 6.4$ Earthquake [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 1997, 18(4): 47-50. (in Chinese)
- [29] 张昭栋, 王秀芹, 董守德. 加卸载响应比在体应变固体潮中的应用 [J]. *地震*, 1999, 19(3): 217-222.
- Zhang S D, Wang X Q, Dong S D. Application of response ratio of Load and unload to Bulk strain earthtide [J]. *Earthquake*, 1999, 19(3): 217-222. (in Chinese)
- [30] 常克贵, 高立新, 张建业, 等. 加卸载响应比理论在包头西 $M_s 6.4$ 地震预报中的应用 [J]. *西北地震学报*, 1999, 21(4): 350-355.
- Chang K, Gao L X, Zhang J Y. Application of the Load-unload Response Ratio Theory to Prediction the Baotou $M_s 6.4$ Earthquake [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 1999, 21 (4): 350-55. (in Chinese)
- [31] 任隽, 陈运平, 潘纪顺, 等. 海南岛及其近海中强地震前加卸载响应比的变化特征 [J]. *西北地震学报*, 2002, 27(1): 71-4.
- Ren J, Chen Y P, Pan J S, et al. Variational Characteristics of Load/Unload Response Ratio in Hainan Island and Its Adjacent Area before Moderate-strong Earthquakes [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2002, 27(1): 71-4. (in Chinese)
- [32] Cochran E S, Vidale J E, Tanaka S. Earthquake Tides can Trigger Shallow Thrust Fault Earthquakes [J]. *Science*, 2004, 306: 164-166.
- [33] Tanaka S, Ohtake M, Sato H. Tidal triggering of Earthquakes in Japan Related to the Regional Tectonic Stress [J]. *Earth Planets Space*, 2004, 56(5): 511-515.
- [34] Jaume S C, Sykes L R. Evolution toward A Critical Point: A Review of Accelerating Seismic Moment/energy Release Prior to Large Great Earthquakes [J]. *Pure. Appl. Geophys.*, 1999, 155: 279-06.
- [35] Bufe C G, D J Varnes. Predictive Modelling of the Seismic Cycle of the Greater San Francisco Bay Region [J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98: 9871-883.

- 桥段浅部活动特征的地震探测[J]. 物探与化探, 2005, 29(6): 503-505.
- MA Wen-tao, TANG Wen-bang, XU Xi-wei, et al. Seismic Exploration of Shallow Deformation along Lishuiqiao Section of Huangzhuang—Gaoliying Active Fault in Bering Urban Area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, 29(6): 503-505. (in Chinese)
- [10] 李晓妮, 冯希杰, 任隽, 等. 临潼—长安断裂第四纪活动性勘探[J]. 西北地震学报, 2012, 34(4): 398-404.
- LI Xiao-ni, FENG Xi-jie, REN Jun, et al. Exploration on Lintong—Chang'an Fault for Its Activities since Quaternary Period [J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(4): 398-404. (in Chinese)
- [11] 卢育霞, 王振明, 王兰民, 等. 兰州盆地活断层的高分辨率浅层地震勘探技术[J]. 西北地震学报, 2008, 30(4): 344-353.
- LU Yu-xia, WANG Zhen-ming, WANG Lan-min, et al. High-resolution Shallow Seismic Prospecting Techniques for Active Fault Investigation in Lanzhou Basin [J]. Northwestern Seismological Journal, 2008, 30(4): 344-353. (in Chinese)
- [12] 付兆辉, 秦伟军. 断陷盆地陡坡带高精度地震勘探技术应用[J]. 西北地震学报, 2012, 34(2): 114-120.
- FU Zhao-hui, QIN Wei-jun. High-precision Seismic Exploration Techniques and Application on the Abrupt Slope Belt of Faulted Basin [J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(2): 114-120. (in Chinese)

(上接 646 页)

- [36] Sammis C G, Smith S W. Seismic Cycles and the Evolution of stress Correlation in Cellular Automation Models of Finite Fault Networks [J]. Pure Appl. Geophys., 1999, 155: 307-34.
- [37] Reasenber P A. Second-order Moment of Central California Seismicity 1969 — 1982 [J]. J. Geophys. Res., 1985, 90: 5479-495.
- [38] Keilis-Borok V I, L Knopoff. Bursts of Aftershock of Strong Earthquakes [J]. Nature, 1980, 283 (P5744): 259-63.
- [39] 陈凌, 刘杰, 陈颢, 等. 地震活动性分析中余震的删除 [J]. 地球物理学报, 1998, 41(增刊): 244-52.
- CHEN L, LIU J, CHEN Y, et al. Aftershock Deletion in Seismicity Analysis [J]. Chinese J. Geophys., 1998, 41(S1): 244-52. (in Chinese)
- [40] Turcotte D L, W I, Newman, R Shcherbakov. Micro-and Macro-copic Models of Rock Fracture [J]. Geophys. J. Int., 2002, 152: 718-28.
- [41] Sornette D, C G Sammis. Complex Critical Exponents from Renormalization Group Theory of Earthquakes; Implications for Earthquake Predictions [J]. J. Phys. I., 1995, 5: 607-619.