

# 美国西部地区加卸载响应比的时空扫描及其地震趋势研究\*

张晖辉<sup>1</sup>, 尹祥础<sup>1,2</sup>, 梁乃刚<sup>1</sup>, 颜玉定<sup>3</sup>

(1. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080; 2. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036; 3. 广东省地震局, 广东 广州 510070)

**摘要:**加卸载响应比理论是近年来提出的地震预报新方法, 在中国大陆地区的实际地震预测中取得了较好的效果。为了研究加卸载响应比理论是否适用于不同地质条件的地震, 是否具有普适性, 选择了典型的美国圣安德烈斯断层带及其周围地区的地震作为研究对象, 计算分析了美国西部地区加卸载响应比的变化情况, 并对该地区未来的地震趋势进行了研究。

**关键词:**加卸载响应比(LURR); 时空扫描; 地震趋势; 美国西部地区

**中图分类号:**P315.75      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-3274(2005)03-0020-07

## 引言

地震的孕育过程是极其复杂的, 其物理实质在于震源区介质的损伤、失稳和破坏。我国学者尹祥础在地震力学、断裂力学、损伤力学、非线性科学等学科的基础上提出了加卸载响应比理论<sup>[1-3]</sup>。该理论不仅可以进行地震预测, 还可能用于预测其他的地质灾害(滑坡、矿震、岩爆、水库地震等)。经过多年的地震预测实践, 加卸载响应比理论得到了比较广泛的应用和研究, 并不断取得新的进展。应用加卸载响应比作为地震前兆, 用已发生的上百例地震资料进行检验, 80%以上的震例效果很好<sup>[1-4]</sup>。

美国西部地区地处环太平洋, 环太平洋地震带是地球上地震活动最为强烈的地带, 全世界约 80% 的地震都集中在这条地震带上。美国西部地区与中国大陆地区的地质结构有很大的差异, 中国大陆地区的大部分地震属于典型的板内地震, 而美国西部地区著名的圣安德烈斯断层是典型的板间大断层, 圣安德列斯断层上的地震则是典型的板间地震。对于中国大陆地区的地震, 由于资料比较熟悉, 所以预测的成功率较高, 2004 年中国大陆地区发生的  $M_L = 5.0$  地震, 除资料不全不能计算加卸载响应比的地震外, 其余的地震 87% 都发生在高加卸载响应比的地区<sup>[5]</sup>。而对于美国西部地区的地震, 尹祥础等<sup>[6]</sup>研究了美国南加

\* 收稿日期: 2005-01-07; 修改回日期: 2005-03-23

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2004CB418406); 国家自然科学基金(NSFC19732060); 中科院知识创新工程(INF105-SCE-02-02); 地震科学联合基金项目(305016); 国家“973”项目(2002CB412706)

作者简介: 张晖辉(1975-), 女, 河北抚宁人, 2002 年在读博士研究生, 主要从事地震力学、地震预测等研究。

州地区 1980~1994 年中强度地震前加卸载响应比的变化情况, 在所研究的地震前加卸载响应比均出现了明显的异常变化。张永仙等<sup>[7]</sup>将美国南加利福尼亚州分成 11 个区域, 利用该地区的断层机制解和应力场等数据, 对发生在该地区 1980~2001 年  $M \geq 6.5$  地震进行了研究, 结果表明该地区  $M \geq 6.5$  地震前 1~2 年时间内加卸载响应比出现了异常变化, 这与我国大陆地区地震前加卸载响应比的时间尺度是相同的。从这些有限的结果推断, 加卸载响应比理论不仅适用于中国大陆地区的地震, 也可能适用于其他不同地质结构地区的地震。而且, 美国西部地区地震台网的密度大, 地震目录的记录情况较好, 资料比较丰富, 适合用加卸载响应比理论进行计算。

因此, 笔者对美国西部地区进行了加卸载响应比的空间扫描, 以期进一步研究加卸载响应比理论对不同构造区域的普适性。

## 1 加卸载响应比(LURR)的计算方法

### 1.1 加卸载响应比的定义

加卸载响应比理论的主要思路是, 系统在稳定状态时加载响应与卸载响应的比值与非稳定状态时的加载响应与卸载响应的比值是完全不同的。

加卸载响应比  $Y$  值是一个能够定量地反映非线性系统趋近失稳程度的参数, 可以将其定义为<sup>[8]</sup>

$$Y = \frac{X_+}{X_-} \quad (1)$$

式中, 正号表示加载阶段, 减号表示卸载阶段。响应率  $X$  值可定义为

$$X = \lim_{P \rightarrow 0} \frac{R}{P} \quad (2)$$

式中,  $R$  和  $P$  表示载荷为  $P$  时, 载荷  $P$  和响应  $R$  所对应的增量。

根据加卸载响应比的思想, 当系统处于稳定或线性状态时, 加卸载响应比的值接近于 1。而当系统处于非稳定状态或非线性状态时, 加卸载响应比的值大于 1。

### 1.2 加载和卸载的确定

笔者所研究的对象是整个孕震区, 其线尺度可达几百甚至上千公里。对这样巨大的系统进行加卸载, 显然不是目前人力所能及的。好在大自然正好为此提供了这样的条件, 就是日、月运行产生的引潮力。引潮力使地球内部各处的应力不断周期性变化, 也就是永不停息地对地球进行加卸载。在前人研究成果的基础上, 笔者编写的程序能计算出地壳内部任一点在任一时刻由引潮力引起的应力张量。

根据大量实验研究, 在利用加卸载响应比进行地震预测实践时, 加载阶段和卸载阶段由地球固体潮引起的库仑应力(有效剪

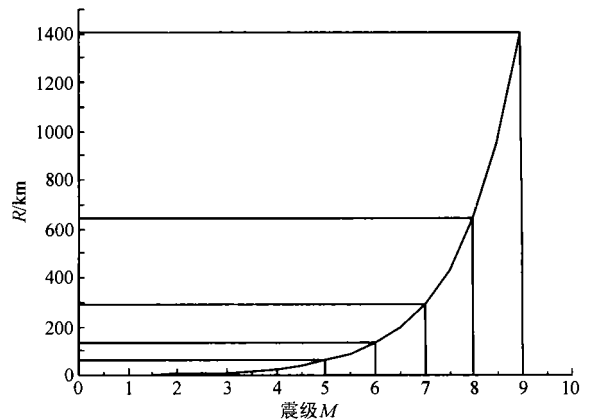


图 1 不同震级地震与空间尺度(半径  $R$ )之间的关系

应力)的增加和减少来确定<sup>[9]</sup>。根据库仑准则,断层面的库仑应力(有效剪应力)为

$$CFS = \tau + f \sigma_n \quad (3)$$

式中,  $f$ ,  $\tau$  和  $\sigma_n$  分别代表断层面的内摩擦系数、剪应力和正应力。  $CFS > 0$  时判断为加载,反之,  $CFS < 0$  时判断为卸载<sup>[10], [11]</sup>。

### 1.3 响应量的选择

在实际计算中,取地震能量作为响应,定义加卸载响应比  $Y$  为

$$Y_m = \frac{\left( \sum_{i=1}^{N^+} E_i^m \right)_+}{\left( \sum_{i=1}^{N^-} E_i^m \right)_-} \quad (4)$$

式中,  $E$  为地震的能量,“+”代表加载,“-”代表卸载。 $m$  可以取为 0, 1/3, 1/2, 2/3 或 1。当  $m = 1$  时,  $E^m$  表示能量;当  $m = 1/3$  或  $m = 2/3$  时,  $E^m$  表示孕震区域的线性尺度和面尺度;当  $m = 1/2$  时,  $E^m$  表示 Benioff 应变;当  $m = 0$  时,  $Y$  值相当于  $N^+ / N^-$ , 而  $N^+$  和  $N^-$  分别代表加载和卸载过程中出现的地震数量。

大量地震震例的研究表明<sup>[12], [13]</sup>, 在地震平静期,加卸载响应比在 1 附近波动,而在大地震前夕,加卸载响应比明显升高至远大于 1,在最高值开始回落之后,大地震发生。大地震前加卸载响应比升高的现象可能用于地震的中期预报。

### 1.4 LURR 的空间尺度

加卸载响应比的空间尺度就是使加卸载响应比值最高的临界区半径的尺度。根据以往的震例研究和地震预测实践表明,区域尺度的选择对加卸载响应比的计算结果有很大的影响。对一定震级的地震,所选区域的尺度在一定范围内变化对加卸载响应比的结果影响不大,当超出这一范围后,其对加卸载响应比的结果影响很大。

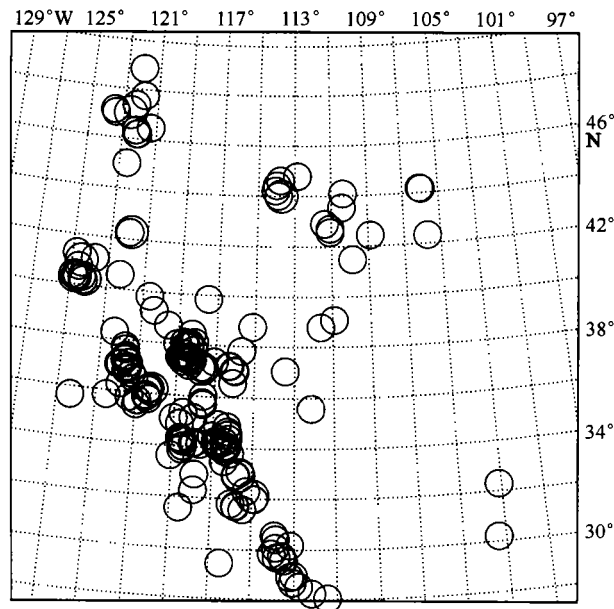


图 2 美国西部地区的区域划分及 1980 年以来  $M \geq 5.0$  的地震分布

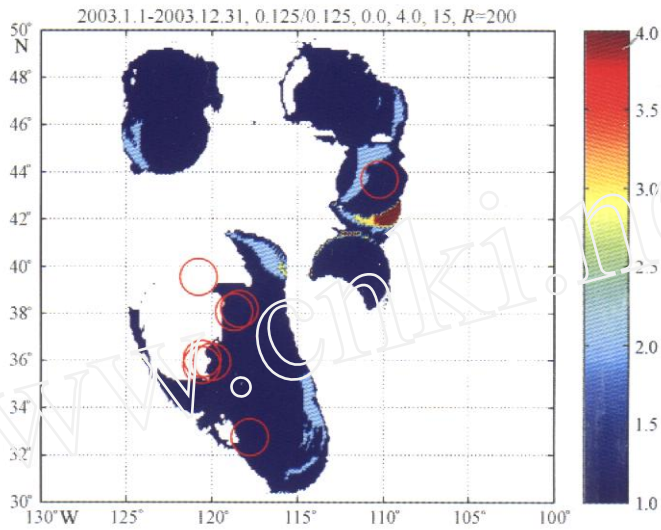


图 3 美国西部地区 2003 年 LURR 的异常区域及 2004 年发生在该地区  $M \geq 5.0$  的地震分布图

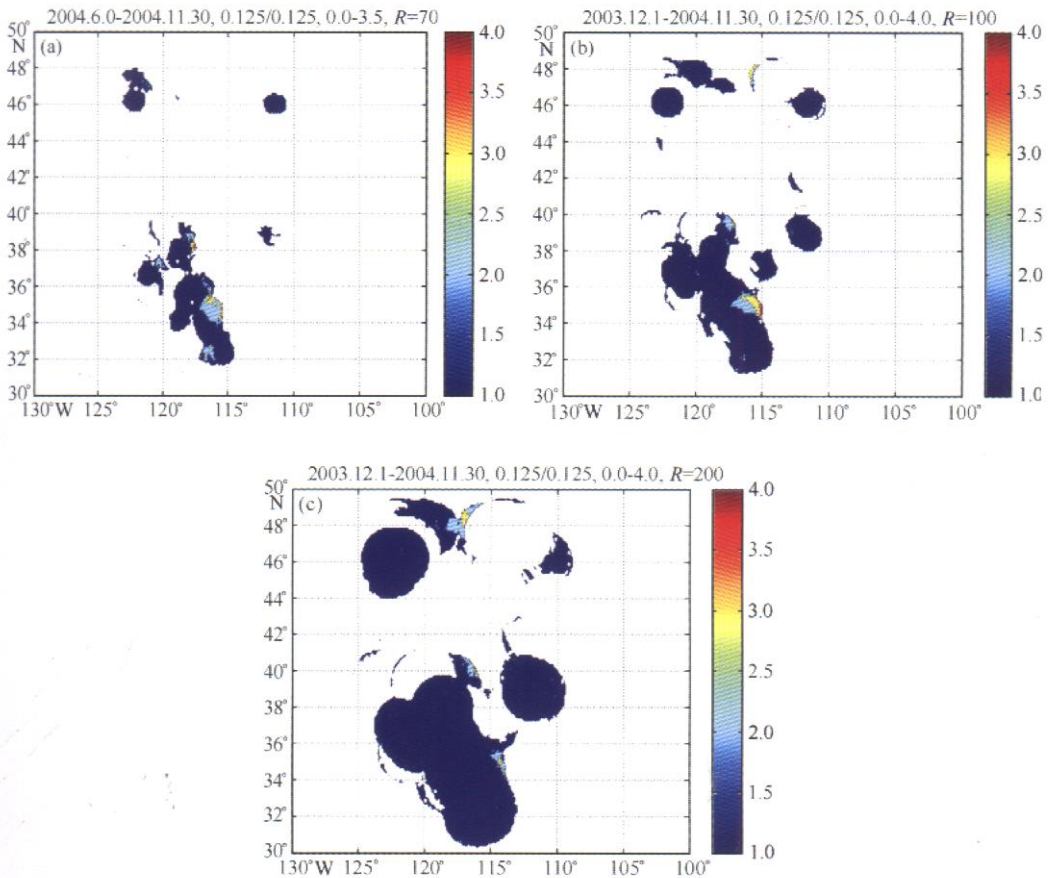


图 4 美国西部地区不同半径加卸载响应比的空间扫描

(a)  $R = 70$  km; (b)  $R = 100$  km; (c)  $R = 200$  km

根据大量的震例研究,尹祥础等<sup>[14]、[15]</sup>研究了不同震级地震及空间尺度(半径  $R$ ) 之间的关系为

$$\log R(\text{km}) = 0.087 + 0.34M \quad (5)$$

式(5)可以明显地用图 1 表示。这一结果与地震临界点理论所确定的临界区是一致的<sup>[16~18]</sup>。

## 2 美国西部地区 LURR 的空间扫描

将美国西部地区按照  $2^\circ \times 2^\circ$  进行区域划分,如图 2 所示。根据震源机制解确定出每个小区内的主断层参数,再根据日、月引潮力所引起的库仑应力变化判断出每个地震是处于加载阶段还是卸载阶段。然后,根据加卸载响应比的空间尺度(半径为  $R$  的圆形区域)、不同的时间计算,以一定的滑动步长进行加卸载响应比的空间扫描。在进行空间扫描时,选取确定的半径为  $R$  的圆形区域为空间窗,首先将纬度固定,沿着经度方向扫描,计算所选定圆形区域内部加卸载响应比的值,然后再沿经度方向扫描。

图 3 是 2003 年 1 月 1 日至 12 月 31 日 LURR 异常区分布图,叠加上 2004 年 1 月 1 日至 12 月 31 日发生的  $M \geq 5.0$  地震的分布图(图中的圆圈代表  $M \geq 5.0$  的地震)。异常区分布图是笔者于 2004 年 1 月在中国科学院计算机网络信息中心深腾 6800 超级计算机上计算得到的。在这些 LURR 异常区内,2004 年发生中强度地震的概率很大。由图 3 可看出 LURR 的预测效果非常显著,大部分地震都发生在 LURR 的异常区域。因此,在此基础上,利用 2004 年的资料对该地区进行 LURR 的空间扫描。

笔者采用半径为  $R = 70 \text{ km}, 100 \text{ km}, 200 \text{ km}$  进行加卸载响应比的空间扫描,图 4 为 3 种空间尺度的 LURR 扫描结果,图中的阴影部分为加卸载响应比的异常区。在加卸载响应比异常区内部,尤其是加卸载响应比远大于 1 的地区,未来 1~2 年的地震趋势如下:

(1) 2005 年 7 月 31 日前,图 4(a) 所示的加卸载响应比异常区内将要发生 5 级左右的地震;

(2) 2005 年 12 月 31 日前,图 4(b) 所示的加卸载响应比异常区内将要发生 5.5 级左右的地震;

(3) 2006 年 12 月 31 日前,图 4(c) 所示的加卸载响应比异常区内将要发生 6 级左右的地震。

根据空间扫描结果,在  $33^\circ \sim 36^\circ \text{N}$ ,  $115^\circ \sim 118^\circ \text{W}$  的矩形区域内,笔者又进行了加卸载响应比时间扫描(图 5),结果表明,该区域内部的加卸载响应比值达到峰值后已经出现回落,说明该地区在今年内(2005 年 12 月 31 日以前)可能发生 6.0 级左右的地震。

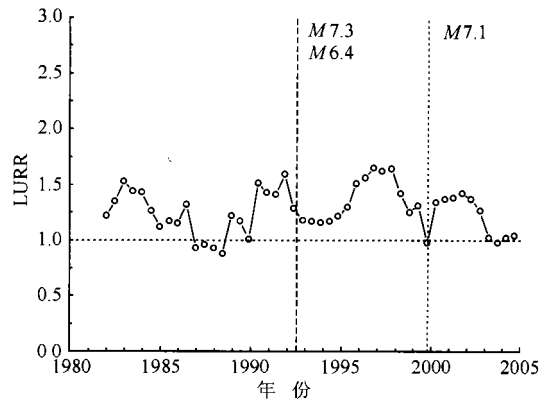


图 5 矩形区域  $33^\circ \sim 36^\circ \text{N}$ ,  $115^\circ \sim 118^\circ \text{W}$  内部 LURR 的时程变化曲线

参数解来源于哈佛大学的 CMT Catalog Search 网站, 在此表示感谢。

### 参考文献:

- [1] 尹祥础, 尹灿. 非线性系统的失稳前兆与地震预测[J]. 中国科学, 1991, 21(5): 512-518.
- [2] Yin Xiangchu, Chen Xuezhong, Song Zhiping. The load/unload response ratio (LURR) theory and its application to earthquake prediction[J]. Journal of Earthquake Prediction Research, 1994, 3(3): 325-333.
- [3] XiangChu Yin, XueZhong Cheng, YuCang Wang, *et al.* Development of a new approach to earthquake prediction: load/unload response ratio (LURR) theory[J]. Pure Appl Geophys, 2000, 157(11-12): 2365-2383
- [4] 宋治平, 尹祥础, 陈学忠. 加卸载响应比的时空演化特征及其对地震三要素的预测意义[J]. 地震学报, 1996, 18(2): 179-186.
- [5] 尹祥础, 张晖辉, 彭克银, 等. 多时空尺度加卸载响应比扫描——2005年中国大陆地震趋势[A]. 中国地震局监测司. 中国地震趋势预测研究(2005年度)[C]. 北京: 地震出版社, 2004. 16-27.
- [6] Yin Xiangchu, Chen Xuezhong, Song Zhiping, *et al.* A new approach to earthquake prediction —— the load/unload response ratio (LURR) Theory[J]. Pageoph, 1995, 145(3/4): 701-715.
- [7] Yongxian Zhang, Xiangchu Yin, Keyin Peng. Study on spatial and temporal variation of lurr in southern california and its implication for earthquake tendency in this region[A]. 3rd ACES (APEC Cooperation for Earthquake Simulation) Workshop in Maui[C]. Hawaii 5-10 May 2003.
- [8] 尹祥础. 地震预测新途径的探索[J]. 中国地震, 1987, 3: 1-7.
- [9] 尹祥础. 固体力学[M]. 北京: 地震出版社, 1985.
- [10] Harris R A. Introduction to Special Section: Stress Triggers, Stress Shadows, and Implication for Seismic Hazard[J]. J Geophys Res, 1998, 103: 24347-24358.
- [11] Reserberg P A, Simpson R W. Response of regional seismicity to the static stress change produced by the loma preita earthquake[J]. Science, 1992, 255: 1687-1690.
- [12] Lockner D A, Byerlee J D, Kuksenko V, *et al.* Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite[J]. Nature, 1991, 350(7): 39-42.
- [13] Lockner D A. The role of emission in the study of rock failure[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr. 1993, 30(7): 883-899.
- [14] Yin X C, Mora P, Peng K, *et al.* Load-unload response ratio and accelerating moment/energy release critical region scaling and earthquake prediction[J]. Pageoph, 2002, 159(9): 2511-2523.
- [15] Xiang-chu Yin, Keyin Peng, Huaizhong Yu, *et al.* Scaling of LURR Critical Region, 3<sup>rd</sup> ACES Workshop, May 5-10, 2002, Island of Maui, Hawaii[M]. U S A, Also 3<sup>rd</sup> ACES workshop Proceedings, GOPRINT, Brisbane, 2003.
- [16] Bowman D D, Ouillon G, Sammis C G, *et al.* An observational test of the critical earthquake concept[J]. J Geophys Res, 1998, 103: 24359-24372.
- [17] Bufe C G, Varnes D J, Predictive modeling of the seismic cycle of the greater San Francisco Bay region[J]. J Geophys Res, 1993, 98(B6): 9871-9883.
- [18] 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 Appl Geophys, 1999, 155: 279-306.

## The tempo-spatial scanning of Load/ Unload response Ratio in Western America and study of its seismic tendency

ZHANG Hui-hui<sup>1</sup>, YIN Xiang-chu<sup>1,2</sup>, LIANG Nai-gang<sup>1</sup>, YAN Yu-ding<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory for Non-linear Mechanics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080;

2. Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036; 3. Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou, 510070, China)

**Abstract :** The seismogenic process of an earthquake is very complicated. However, from the viewpoint of damage mechanics, the preparation process for an earthquake is the deformation and damage process of the seismogenic media. A new parameter called Load/ Unload Response Ratio (LURR) has been proposed as a measure of this process.

In earthquake prediction LURR is typically defined as the ratio of released Benioff strain during loading cycles compared to that during unloading ones induced by the Earth tides. High LURR values (significantly larger than unity) indicate that a region is prepared for strong earthquakes. Retrospective examination of over hundred earthquake cases indicates that for more than 80 % of the examined ones, a peak value of LURR will appear before the main shock. The peak value is much higher than 1. In previous years a series of successful intermediate-term predictions have been reported for strong earthquakes in China and other countries using the LURR parameter.

The LURR theory is a new approach to earthquake prediction. Besides seismic energy and many other geophysical parameters concerning the seismogenic process such as Coda Q, ratio of velocities level of groundwater, crust deformation and tilt, geomagnetism parameters et al. could also be the response to define LURR.

On the other hand LURR could be applied not only to natural earthquake prediction but also to forecasting other geological disaster such as reservoir-induced earthquakes, mine earthquake, rock-burst, landslide, volcano eruption, etc.

Many strong earthquakes occurred in China's mainland have been predicted beforehand in term of LURR. But the geological setting in Western America is different from that in china's mainland. In order to investigate the application of LURR to different tectonic settings, the spatial scanning of LOAD/ Unload Response Ration in Western America (30 ~ 50 N, 100 ~ 130 W) has been conducted. According to the results, we predicted that :

(1) Earthquakes with magnitude around 5 will probably occur in the LURR anomaly regions showed in figure 4a, especially in the regions where the LURR is larger than 1.5 before July 31, 2005.

(2) Earthquakes with magnitude around 5.5 will probably occur in the LURR anomaly regions showed in 4b, especially in the region where the LURR is larger than 1.5 before Dec. 31, 2005.

(3) Earthquakes with magnitude around 6.5 will probably occur in the LURR anomaly regions showed in figure 4c, especially in the region where the LURR is larger than 1.5 before Dec. 31, 2006.

Especially in the rectangle zone of 33 ~ 36 N, 115 ~ 118 W earthquakes with magnitude around 6.0 or even larger will probably occur before Dec. 31, 2005 or a little later.

**Key words :** Load/ Unload Response Ratio (LURR); Tempo-spatial scanning; Seismic tendency; Western America