

# 新疆中强地震前加卸载响应比 时空演化特征分析与检验<sup>①</sup>

温少妍<sup>1,2</sup>, 唐兰兰<sup>1</sup>, 刘月<sup>3</sup>, 刘建明<sup>1</sup>,  
张琳琳<sup>1</sup>, 李金<sup>1</sup>, 尼鲁帕尔·买买吐孙<sup>1</sup>, 单新建<sup>2</sup>

(1. 新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国地震局地质研究所, 北京 100029;  
3. 中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室, 北京 100190)

**摘要:**加卸载响应比是一种刻画震源区介质损伤程度的物理学参数,它通过随时间的变化来反映地震孕育的过程来进行地震预测。通过对 1990—1999 年新疆地区部分中强地震前加卸载响应比时空演化特征进行分析,并基于该理论得到孕震积分的概念应用于震例中。结果表明:中强震震前在震中附近可能存在多个高加卸载响应比值区,它们大致围成椭圆状或环状,地震通常发生在异常高值波动或减弱的过程中;异常峰值至发震时间比理论时间要短,这可能表明新疆地区构造活动剧烈,孕震周期较短。

**关键词:**加卸载响应比;孕震积分;中强地震;时空演化

中图分类号:P315.75

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2016)01-0065-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2016.01.0065

## Test and Analysis of the Spatio-temporal Evolution of the Load/Unload Response Ratio before Moderate Earthquakes in Xinjiang

WEN Shao-yan<sup>1,2</sup>, TANG Lan-lan<sup>1</sup>, LIU Yue<sup>3</sup>, LIU Jian-ming<sup>1</sup>,  
ZHANG Lin-lin<sup>1</sup>, LI Jin<sup>1</sup>, Nilupar Tursun<sup>1</sup>, SHAN Xin-jian<sup>2</sup>

(1. Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China;

2. Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China;

3. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The load/unload response ratio (LURR) aims to identify a physical parameter, which reflects the damaging process in the seismogenic zone, and to use this parameter to predict an earthquake. In the seismically quiet period, the LURR value fluctuates around 1. Nevertheless, when the rock is close to failure or just before a strong earthquake, the value rises significantly, and it is much larger than 1. The LURR probably decreases sharply and quickly before the main shock. Therefore, the anomalous increase in the LURR time series covering a time interval of months to years may be efficiently used in earthquake prediction. In the present study, the spatio-temporal evolution of LURR is analyzed before moderate earthquakes from 1990 to 1999. Based on the LURR theory, the seismogenic integral is deduced, which is applied to predict the earthquakes during the studies interval. The results show that high Y values are observed with an elliptical or circular spatial distribution around the epicenter before the main earthquake. In addi-

① 收稿日期:2015-03-31

基金项目:国家科技平台地震科学数据共享项目(DS-2014-06)

作者简介:温少妍(1985-),女,工程师,在读博士,主要从事 InSAR 技术及其在地震科学中的应用研究。

E-mail:wenshaoyan999@163.com。

tion, earthquakes usually occurred during periods of abnormally high fluctuations. In retrospective historical earthquake studies, the future earthquakes are usually located in the abnormal zones or at the edge abnormal areas. However, there is a significant difference in terms of the starting time, and the amplitude and area of abnormality are different because of the different magnitude and seismogenic zone. An obvious anomaly, with a probability of approximately 78.8%, is observed within 200 km from the epicenter before moderately strong events. In addition, compared with the theoretical time, the statistical time from the peak to the earthquake is shorter, which may indicate that the tectonic activities in Xinjiang are intensive, the pregnant period is short, and the rate of the shear strain is large.

**Key words:** LURR; seismogenic integral; moderate earthquake; spatio-temporal evolution

## 0 引言

新疆地震活动具有频度高,强度大,震源浅,成带分布等特征。1985年乌恰7.4级地震是现代新疆地震灾害事件中最严重的一次,造成67人死亡,1500多间房屋倒塌,经济损失超过亿元。

地震灾害给人类和社会带来巨大的损失,人类一直在探索各种方法减轻地震灾害,地震预测就是其中重要一环,尤其是地震中短期预报成为地震工作者的重要研究方向之一。地震预测的加卸载响应比(LURR, Load/Unload Response Ratio)理论自上世纪80年代提出以来,就被国内外学者应用到中强地震中期预测中,并做了大量的研究工作,不仅在中国大陆地区强震预测实践中得到广泛的应用和研究,而且在美国、日本等国家开展的强震预测研究中也不断取得新的进展<sup>[1-6]</sup>。LURR应用于地震预测实践取得了一定的预测效果,成功预测了一些国内外中强震,特别是1994年1月17日美国Northridge地震和1996年9月11日日本关东地震,使其受到国际地震界的重视<sup>[7-9]</sup>。

中强震的成功预测显示出加卸载响应比方法是具有一定预测能力的地震预测方法,其实质在于通过能够刻画震源区介质损伤程度的物理参数来反映地震孕育的进程,从而预测地震。本文利用加卸载响应比及其孕震积分方法,对1990—1999年新疆地区5级以上地震前的小震加卸载响应比时空演化特征进行系统研究,以期探索新疆地区中强地震的预测方法提供技术支撑。

## 1 加卸载响应比理论

地震是在极其复杂的地质结构中孕育发生的,它是高度非线性的、极为复杂的物理过程,其物理实质就是震源区介质在力的作用下发生变形损伤、演化直至失稳,并伴随着能量的快速释放过程,这一过

程主要是力学过程<sup>[10]</sup>。地震预测中的力学问题与传统力学问题又有所差异。在地震孕育过程中,地壳介质的本构方程、损伤演化过程、边界条件及初始条件等是未知的或部分未知的,我们所掌握的是某些物理量的变化。针对传统力学方法在解决地震预测问题上遇到的困难,尹祥础<sup>[11]</sup>提出了一个定量表征地震孕育过程的参数——加卸载响应比。

从岩石力学的本构曲线可以看出(图1),当介质处于弹性变形的可逆阶段,加载与卸载响应一致;当介质处于损伤阶段,加载响应率大于卸载响应率。这种差异反映了材料的损伤劣化程度,可以定量地刻画介质所处的应力状态以及介质的损伤演化过程。加卸载响应比理论的出发点正是基于对震源区介质损伤程度的刻画。

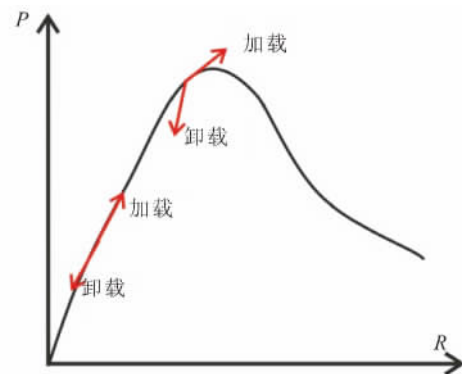


图1 岩石材料的本构曲线

Fig. 1 The constitutive curve of rock material

对系统进行加载和卸载,令 $X_+$ 和 $X_-$ 分别代表加载与卸载时段的响应率,则加卸载响应比 $Y$ 定义为

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

当介质处于弹性变形阶段, $X_+ = X_- = C$ ,因而 $Y = 1$ ;到了损伤阶段, $X_+ > X_-$ , $Y > 1$ ;当介质临近

破坏时,  $Y$  值越来越大, 达到其峰值。

取不同物理量作为响应,  $X$  的表达式不同。本文取地震能量作为响应, 则加卸载响应比  $Y_m$  表示为:

$$Y_m = \frac{\left( \sum_{i=1}^{N^+} E_i^m \right)_+}{\left( \sum_{i=1}^{N^-} E_i^m \right)_-} \quad (2)$$

式中:  $E$  表示地震能量, “+”和“-”分别表示加载和卸载。  $m$  为 0~1 之间的常数,  $m=1$  时,  $E_i^m$  表示能量;  $m=1/2$  时,  $E_i^m$  即为地学中熟知的贝尼奥夫应变;  $m=1/3$  或  $2/3$  时,  $E_i^m$  则表示孕震区域的线尺度和面尺度;  $m=0$  时,  $E_i^m$  即地震频次。  $N^+$  和  $N^-$  分别为研究时段加载和卸载的地震数量。本文中  $m$  取  $1/2$ 。

## 2 震例检验

### 2.1 历史震例的 LURR 时空特征分析

岩石实验、历史震例分析、数值模拟以及损伤流变模型等方面的研究显示<sup>[12-13]</sup>, 在地震平静期, 加卸载响应比在 1 附近波动, 而在岩石接近破裂或大震前夕, 加卸载响应比  $Y$  值明显升高远大于 1, 在主震发生前, 加卸载响应比会迅速下降。因此, 大震前加卸载响应比升高的现象对地震中期预报具有一定的效能。

本研究选取 1970 年以来的新疆地震目录, 该目录含 0 级以上地震。目标地震震级为  $M_s 5.0 \sim 8.9$  (图 2), 计算过程中避免目标地震引起计算值的大幅扰动, 目录震级范围  $M_s 0 \sim 4.0$ 。将新疆地区按照  $2^\circ \times 2^\circ$  划分区域, 采用时空扫描方法, 即设定固定的计算时间窗口, 半径为  $R$  的圆形区域为空间窗, 纬度固定, 以一定的滑动步长沿精度方向进行空间扫描, 针对每一个空间点计算圆形区内加卸载响应比的值。首先根据网格内发生的主要强震的震源机制解确定出该网格的主断层基本参数, 然后根据日、月引潮力所引起的库仑应力变化判断地震是处于加载阶段还是卸载阶段。本文空间扫描半径  $R=200$  km 的圆形区, 扫描步长为  $0.25^\circ$ ; 时间窗长为 18 个月, 时间滑动步长为 1 个月。考虑到区域内地震样本数目对结果稳定性的影响, 每个窗口内地震个数至少为 20 个。篇幅所限, 文中仅给出空间扫描的部分结果。

从加卸载响应比异常区域时空演化图可以看出, 1991 年 4 月—1992 年 9 月未来震中附近出现环

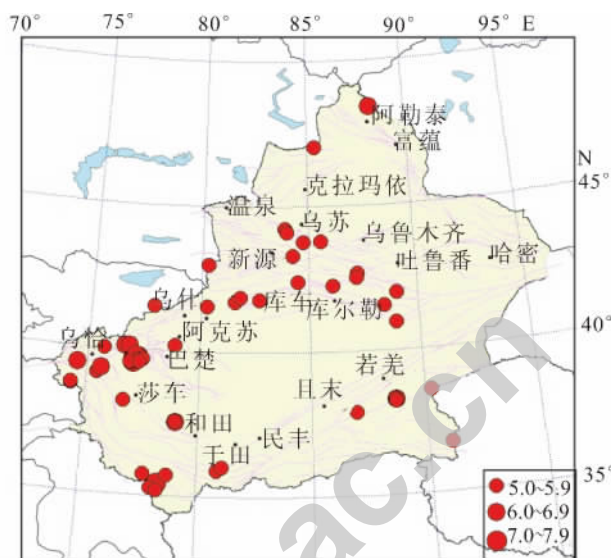


图 2 新疆境内 1990—1999 年 5 级以上地震空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of  $M_s \geq 5$  earthquakes during 1990—1999 in Xinjiang

状高  $Y$  值异常, 伴随着地震的孕育发展过程。环状区域西北侧的异常逐渐减弱, 而东北侧异常高值区不断向震中靠近, 形成近似椭圆形的异常区。1993 年 4 月喀喇昆仑山 5.0 级地震发生在异常区边缘; 5.0 级地震后异常区没有减弱的趋势, 反而继续发展且幅度上有所增强。此外, 5.0 级地震前形成的呈环状分布的异常区域再次出现, 1993 年 12 月喀什 6.2 级地震发生在环状区两个高  $Y$  值之间。

总之, 3 次地震前 LURR 空间分布特征大体表现为: 震前在震中附近可能存在多个高  $Y$  值区, 并大致围成椭圆状或环状, 地震通常发生在异常高值波动或逐渐减弱的过程中, 发震地点通常为异常区内或边缘地区, 但异常出现的时间、幅度和面积因震级和地区的不同而存在差异。LURR 算法在历史震例回顾检验应用中的统计结果显示, 33 组中强地震活动中有 26 组地震前震中 200 km 范围内出现较为明显的异常, 5.0~5.9 级地震、6.0~6.9 级地震异常峰值到发震的平均时间分别为 6 个月、16 个月, 这与张晖辉等<sup>[14]</sup> 利用中国大陆 5 级以上地震 LURR 峰值特征时间统计得到公式所计算的平均理论时间 9 个月、18 个月相比要短。此外, 还表明异常区峰值的位置距未来震中的最小距离因震级和地区的不同而不同。

### 2.2 典型震例的孕震积分时间序列分析

虽然加卸载响应比在地震预测实践中取得了一定的成果, 但预测效果仍不够理想, 原因在于只考察一个时间窗的 LURR 的空间扫描结果不足以判定

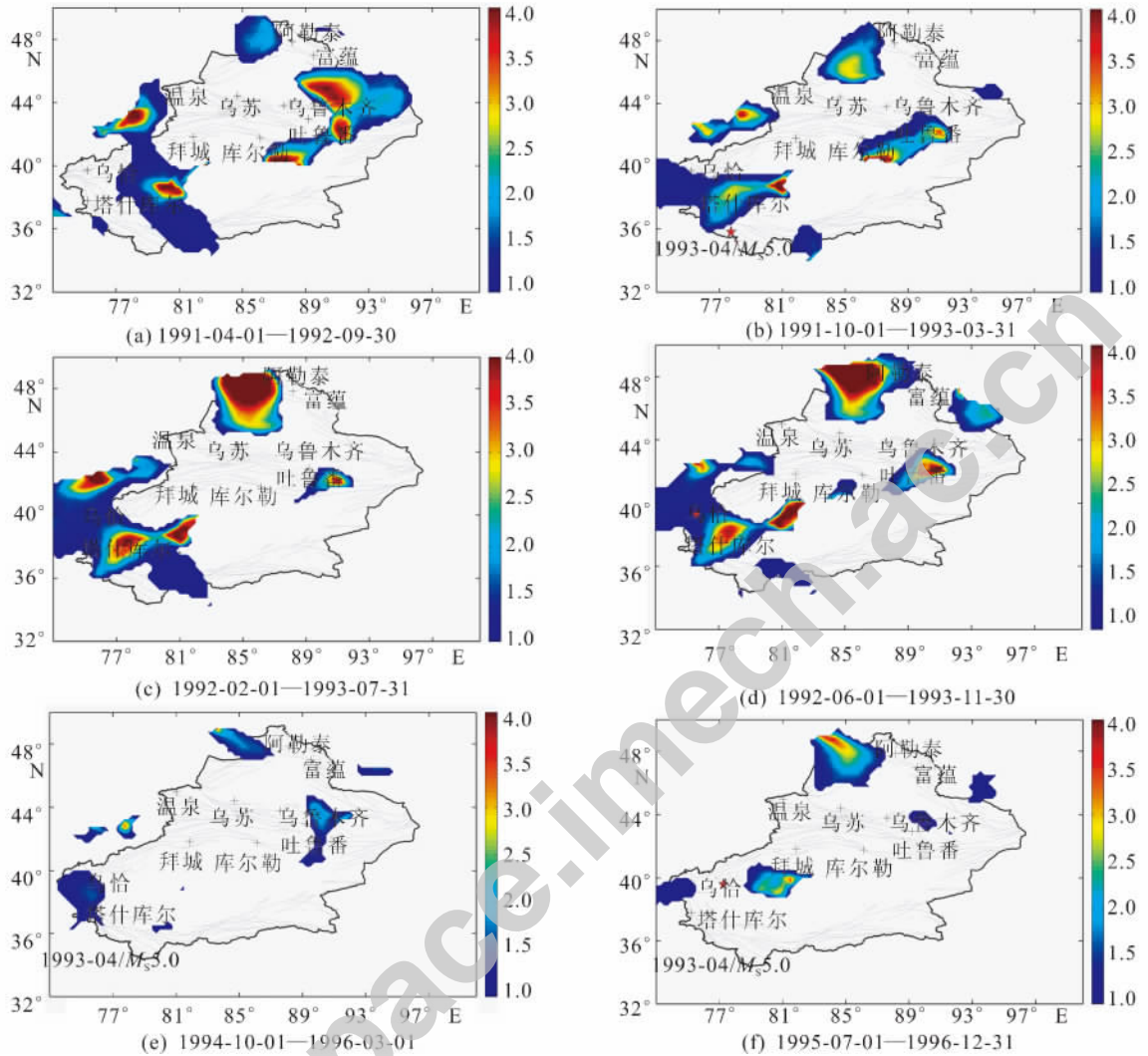


图3 加卸载响应比异常区域演化过程

Fig.3 The evolution of LURR abnormal region

未来的地震趋势。为了更直观地了解研究区异常幅度及面积的动态变化,对未来地震的发震时间做出研判,尹祥础<sup>[10]</sup>提出加卸载响应比孕震积分  $I_{PP}$  的概念,即  $I_{PP} = \sum Y \times \text{面积}(\text{单位 km}^2)$ , 综合表征了孕震区的大小和程度,从而在时间尺度上提高了LURR方法的预测效能。本文对1990—1999年新疆境内5级地震进行孕震积分时序曲线特征分析,通过历史震例回顾检验,证明孕震积分方法在中强震预测中的有效性。

(1) 1990年1月12日策勒5.1级地震

策勒5.1级地震发生在阿尔金断裂带南段端部,断错类型为左旋走滑逆断型。从孕震积分时序曲线图(图4)可以看出,在地震孕育初期,即1986—1988年6月时段内孕震积分值  $I$  一直处于均值线下的0值附近,从1988年7月开始  $I_{PP}$  值开始升高,1988年12月达到峰值,其后  $I_{PP}$  值迅速下降但仍

高值区域波动变化,在主震发生之前,1989年4月  $I_{PP}$  值再次上升到另一峰值,然后在下降过程中发生地震,异常持续时间约1.5年。

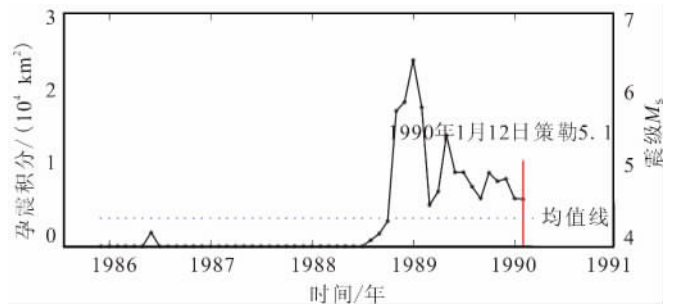


图4 策勒5.1级地震前孕震积分时序曲线图

Fig.4 The time sequence curve of earthquake integral before Cele  $M_S5.1$  earthquake

(2) 1993年、1994年喀什6.2、5.8级双震

1993年12月1日喀什6.2级、1994年1月12



日喀什 5.8 级地震发生在肯别尔特断裂带,断错类型为逆冲兼右旋走滑型。孕震积分  $I_{PP}$  值时序曲线图(图 5)显示,1989 年 10 月至 1991 年 11 月孕震积分  $I_{PP}$  一直处于均值线下波动变化,之后  $I_{PP}$  值波动上升,1993 年 7 月到达峰值,快速下降过程中发生喀什双震。峰值到发震时间间隔为 5 个月,远小于尹祥础通过统计方法得到的发震时间与震级( $M \geq 5$ )的函数关系式<sup>[11]</sup>,这可能是由于新疆地区构造活动剧烈,孕震周期短,剪切应变率较大<sup>[15]</sup>。



图 5 喀什双震前孕震积分时序曲线图

Fig. 5 The time sequence curve of earthquake integral before the two earthquakes in Kashgar

### (3) 1997 年、1998 年伽师强震群

新疆伽师强震群始于 1997 年 1 月 21 日  $M_s 6.0$  地震,截止到 1999 年 3 月 25 日,连续发生 19 次 5 级以上地震。同一地区短期内连续发生如此多的强震引来了国内外地震学者的广泛关注。我们计算了此次震群前加卸载响应比孕震积分,从图 6 可以看出,1993 年喀什双震后孕震积分  $I_{PP}$  逐渐下降至均值线以下,1994 年 10 月至 1995 年 6 月在均值线下平稳变化,1995 年 7 月  $I_{PP}$  值突然快速上升,而后  $I_{PP}$  在高值波动变化,1996 年 2 月达到峰值后  $I_{PP}$  迅速下降。异常持续时间约 1.5 年,在异常恢复至均值线以下发生伽师强震群。震群前异常的波动变化

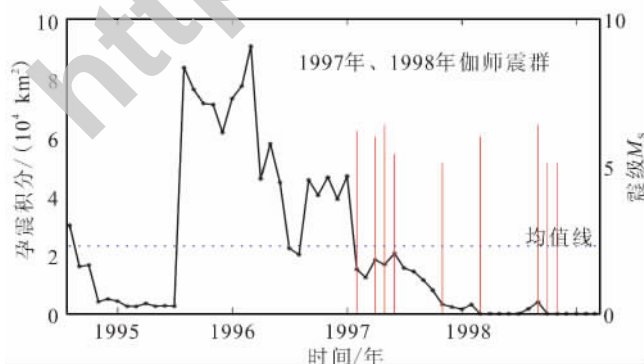


图 6 伽师震群前孕震积分时序曲线图

Fig. 6 The time sequence curve of earthquake integral before Jiashi earthquake swarm

可能与强震的孕育过程中构造应力不断调整密切相关。

## 3 结论

本研究对 1990—1999 年新疆地区部分中强地震前加卸载响应比时空演化特征进行分析,基于该理论得到孕震积分的概念,并应用于喀什双震、伽师震群等典型震例,通过震例回顾检验,可以得到以下结论:

(1) 中强震震前在震中附近可能存在多个高  $Y$  值区,并大致围成椭圆状或环状,地震通常发生在异常高值波动或减弱的过程中,发震地点通常为异常区内或边缘地区,但异常出现的时间、幅度和面积因震级和地区的不同而存在差异。

(2) 历史震例回顾定量统计结果显示,中强地震活动前震中 200 km 范围内出现较为明显的异常概率约为 78.8%,在震前 3 年内加卸载响应比出现明显的异常,表明加卸载响应比具有较好的预测效能。研究发现,异常峰值至发震时间比理论时间要短,这可能表明新疆地区构造活动剧烈,孕震周期短,剪切应变率较大。

(3) 地震孕育的影响区域可能与地质构造有关,在不同地质构造区域内相同量级地震的影响范围不同,因此对于具体构造区域的扫描尺度等值得进行进一步研究。

(4) 在研究中发现,一些地震前加卸载响应比和孕震积分未出现异常变化,这可能与地震目录的完整性和地震孕育过程的差异性有关。但作为一种新的地震预测方法,仍有很多问题需要进一步探索,例如最优时空扫描尺度、扫描窗形状等,这从侧面也反映出地震预测的复杂性。

致谢:此次工作是在新疆地震局加卸载响应比推进小组工作期间完成,得到了尹祥础研究员和王海涛研究员的悉心指导,在此表示衷心地感谢!计算加卸载响应比程序由尹祥础课题组提供。

## 参考文献(References)

- [1] 陈学忠,尹祥础,宋治平. 云南普洱地区 6 级以上地震前的  $Y$  值异常特征[J]. 地震研究, 1996, 19(4): 352-356.  
CHEN Xue-zhong, YIN Xiang-chu, SONG Zhi-ping. Anomalous Features of  $Y$  Values before  $M \geq 6$  Earthquakes Happened in Yunnan's Puer Area[J]. Journal of Seismological Research, 1996, 19(4): 352-356. (in Chinese)
- [2] 张永仙,彭克银,尹祥础,等. 加卸载响应比方法在首都圈地区地震预测中的研究与应用[J]. 地震, 2004, 24(增刊): 53-60.

- ZHANG Yong-xian, PENG Ke-yin, YIN Xiang-chu, et al. Study of LURR and Its Application to Earthquake Prediction in China Capital Circle Area[J]. Earthquake, 2004, 24(Supp): 53-60. (in Chinese)
- [3] 张浪平, 尹祥础, 梁乃刚. 加卸载响应比在伊朗地区地震活动性研究中的应用[J]. 中国地震, 2006, 24(4): 356-363.  
ZHANG Liang-ping, YIN Xiang-chu, LIANG Nai-gang. Application of Load/Unload Response in Study of Seismicity in the Region of Iran[J]. Earthquake Research in China, 2006, 24(4): 356-363. (in Chinese)
- [4] 余怀忠, 程佳, 万永革. 加卸载响应比震前应力积累模式研究[J]. 地震学报, 2010, 32(5): 517-528.  
YU Huai-zhong, CHENG Jia, WAN Yong-ge. Load/Unload Response Ratio and Stress Accumulation Model before Large Earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 2010, 32(5): 517-528. (in Chinese)
- [5] 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, 2005, 27(1): 71-74.  
REN Juan, CHEN Yun-ping, PAN Ji-shun, et al. Variational Characteristics of Load/Unload Response Ratio in Hainan Island and Its Adjacent Area before Moderate-strong Earthquakes[J]. Northwestern Seismological Journal, 2005, 27(1): 71-74. (in Chinese)
- [6] 余怀忠, 张小涛, 张永仙. 地震临界区域尺度与地震预测[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 641-663.  
YU Huai-zhong, ZHANG Xiao-tao, ZHANG Yong-xian. Scale of Critical Seismogenic Region and Earthquake Prediction[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 641-663. (in Chinese)
- [7] Yin X C, Chen X Z, Song Z P. A New Approach to Earthquake Prediction—the Load/Unload Response Ratio(LURR) Theory[J]. Pure and Applied Geophysics, 1995, 145(3/4): 701-715.
- [8] Yin X C, Chen X Z, Wang Y C. Development of a New Approach to Earthquake Prediction: Load/Unload Response Ratio(LURR) Theory[J]. Pure and Applied Geophysics, 2000, 157(11-12): 2356-2383.
- [9] Yin X C, Mora P, Peng K Y. Load/Unload Response Ratio and Accelerating Moment/Energy Release Critical Region Scaling and Earthquake Prediction[J]. Pure and Applied Geophysics, 2002, 159(9): 2511-2523.
- [10] 尹祥础. 地震预报的新途径——加卸载响应比理论[J]. 力学与实践, 2004, 26(6): 1-7.  
YIN Xiang-chu. A New Approach to Earthquake Prediction——Load/Unload Response Ratio Theory[J]. Mechanics in Engineering, 2004, 26(6): 1-7. (in Chinese)
- [11] 尹祥础. 地震预测新途径的探索[J]. 中国地震, 1987(3): 1-7.  
YIN Xiang-chu. A New Approach to Earthquake Prediction [J]. Earthquake Research in China, 1987(3): 1-7. (in Chinese)
- [12] Yin X C, Zhang L P, Zhang Y X, et al. The Peak Point of LURR and its Significance[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2010, 22(12): 1549-1558.
- [13] Yin Xiang C, Zhang L P, Zhang H H, et al. LURR's Twenty Years and Its Perspective[J]. Pure and Applied Geophysics, 2006, 163(11): 2317-2341.
- [14] 张晖辉, 尹祥础, 梁乃刚. 中国大陆地区中强地震前加卸载响应比时间尺度的统计研究[J]. 中国地震, 2005, 21(4): 486-495.  
ZHANG Hui-hui, YIN Xiang-chu, LIANG Nai-gang. Statistics Study of LURR Anomaly Temporal Scale before Moderately Strong Earthquakes on the Chinese Mainland[J]. Earthquake research in China, 2005, 21(4): 486-495.
- [15] 尹祥础, 刘月, 聂宁明, 等. 加卸载响应比与量纲分析相结合——地震预测的新探索[J]. 科研信息化技术与应用, 2012, 3(2): 75-83.  
YIN Xiang-chu, LIU Yue, NIE Ning-ming, et al. Dimension Analysis Combined with Load/Unload Response Ratio——A New Exploration for Earthquake Prediction [J]. E-science Technology and Application, 2012, 3(2): 75-83. (in Chinese)