

张清秀, 倪小寅, 袁丽文, 等. 台湾地区强震前加卸载响应比特征[J]. 华南地震, 2014, 34 (3):18-23. [ZHANG Qingxiu, NI Xiaoyin, Yuan Liwen, et al. The Feature of Load-unload Response Ratio in Taiwan[J]. South china journal of seismology, 2014, 34(3):18-23.]

台湾地区强震前加卸载响应比特征

张清秀, 倪小寅, 袁丽文, 陈莹, 程庆斌

(福建省地震局, 福州 35003)

摘要: 对台湾地区加卸载响应比沿时间进程的发展趋势进行分析, 结果显示: 台湾 $M_s \geq 7.0$ 级地震前加卸载响应比可能出现高值异常或小幅度的突升现象; 超过 50% 的 7 级强震前, 加卸载响应比出现趋势上升异常, 未来地震震级与趋势异常上升幅度、异常持续时间之间呈线性正相关, 即异常持续时间越长, 其上升的异常幅度也越大, 未来地震的震级也越大。出现趋势上升异常的地震震中均处在北纬 24° 以南的台湾东带区域。

关键词: 地震预测; 地震危险性分析; 加卸载响应比

中图分类号: P315.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2014) 03-0018-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2014.03.004

The Feature of Load-unload Response Ratio in Taiwan

ZHANG Qingxiu, NI Xiaoyin, YUAN Liwen, CHEN Ying, CHEN Qingbin

(Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, China)

Abstract: This paper analyzes the time trend of load-unload response ratio in Taiwan. The results show that the load-unload response ratio would present abnormal high values or small jumps before the earthquakes with $M_s \geq 7.0$ in Taiwan; before over 50 percents of these earthquakes occurred, the load-unload response ratio showed abnormal rise, the anomalous amplitude and duration was linear positive correlation with the magnitude of the following earthquake, which means that the longer the abnormality continues, the larger the anomalous amplitude, and the stronger the following earthquake. All the earthquakes, which have abnormal rises before, happened in south of 24° north latitude of east Taiwan.

Key words: Earthquake Prediction; Seismic hazard analysis; Load-unload response ratio

0 引言

加卸载响应比理论是尹祥础等根据震源区介质的破坏即非线性失稳这一自然现象, 在断裂力学、损伤力学等研究成果的基础上建立起来的一种地震预报方法, 它可以从宏观上定量地刻画孕震区

岩石的损伤演化过程, 也就是地震的孕震过程^[1-6]。该理论在地震预报中得到广泛应用, 取得了较好的成效。尹祥础等^[2]和张晖晖等^[6]用已发生的上百例地震资料进行检验, 证明加卸载响应比方法映震效果良好: 多数震例表明在地震孕育初期, 加卸载响应比值 γ 接近 1.0 附近波动, 而在强震来临

收稿日期: 2014-05-21

作者简介: 张清秀 (1972-), 女, 高级工程师, 主要从事地震前兆监测与研究

E-mail: yd036@163.com.

的时候,加卸载响应比值会升高,然后升高到最大值(明显大于1.0),在主震发生的前夕,加卸载响应比会迅速下降;他们还对中国大陆地区选择了7个地震活动性比较低、相对稳定区域(在考察的时间段内没有发生4级以上地震),分析了其加卸载响应比 y 值20余年的变化,这7个区域的 y 值在整个时间段都保持在1.0附近波动;在对美国西部地区和伊朗地区进行加卸载响应比研究中,也取得了相一致的结论^[7-8];张浪平等^[9]将加卸载响应比应用到汶川余震序列的分析中,结果表明震后响应比值比较低,且地震序列中的强余震($M \geq 5.0$)发生前加卸载响应比值呈现明显升高异常,大都表现为峰值出现之后发生强余震。

台湾位于环太平洋地震带上,处于菲律宾海及欧亚大陆两个板块相接处,是强震活动较活跃地区。另外,台湾地区的强震活动对福建及沿海有较大影响,据统计,台湾7级强震前后1年左右福建及邻区发生4.5级以上地震的概率为80%,因此关注台湾7级强震亦可作为福建及邻区中强地震发生的可能性的参考依据之一。本文依据加卸载响应比理论,以地震能量作为响应因子计算台湾地区加卸载响应比,研究该区强震前加卸载响应比异常特征,为该区强震预测提供一种依据。

1 加卸载响应比

加卸载响应比理论的主要思路^[1-9]是将地震的孕育和发生看成是地球内部岩石非线性失稳破裂的过程,孕震系统在稳定状态时加载响应与卸载响应的比值和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。设当系统载荷的改变为 ΔP 时,其响应的增量为 ΔR ,此时系统对载荷响应率为

$$X = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta P} \quad (1)$$

用 X_+ 和 X_- 分别表示加载时段和卸载时段的响应率,则加卸载响应比 y 定义为:

$$y = \frac{X_+}{X_-} \quad (2)$$

从震源的本构关系出发,当震源介质处于稳定状态(低应力水平)时,地下介质处在弹性变形阶段,此时加载和卸载过程是可逆的,即加载和卸载的响应相同,则 $X_+ = X_-$,响应比 y 接近1;当震源介质处于失稳状态(高应力水平)时,地下介质处在损伤和破裂过程,此时加载和卸载过程是

不可逆的,加载响应率大于卸载响应率,此状态下 $X_+ > X_-$,响应比 y 大于1。因而加卸载响应比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,其值的大小反映了震源介质趋近失稳的程度,从而可以作为判断一个地区地震危险性的依据。

以固体起潮力的周期变化作为加卸载手段,以研究区域的地震能量作为响应因子,取适当的区域范围、地震目录、时间窗、滑动步长,计算加卸载响应比值:

$$y = \frac{\left(\sum_{i=1}^N E_i^m \right)_+}{\left(\sum_{i=1}^K E_i^m \right)_-} \quad (3)$$

式(3)中 N 为加载的地震个数, K 为卸载的地震个数, E 为地震的能量,“+”代表加载,“-”代表卸载, m 取 $1/2$,即以本尼奥夫应变能作为响应因子^[11-12]。根据各参数不同取值范围分别计算的 y 值与历史地震对应结果确定最优的地震震级范围、时间窗、滑动步长。

2 研究区域和资料的选取

在许多参考文献中,都是以微观震中为中心,选取一定的范围作为研究对象来计算某个区域的加卸载响应比,这种方法是在地震发生后按实际震中来选取研究的区域范围,只能作为震例总结进行研究,对未来地震的预测的实用性不大。本文以台湾地区为研究对象(图1),以台湾岛走向长轴550 km、短轴350 km范围计算台湾区域加卸载响应比值 y ;由于台湾强震多发生在东部地区,因此再将研究范围缩小到台湾东带,按台湾岛走向,根据邓起东老师的中国断层图,沿北东-南西走向的宜兰-犁山断裂、凤山断裂以东长轴550 km,短轴200 km范围,计算台湾东带加卸载响应比值 y' 。

本文选用福建地震台网记录到的目录进行分析。根据震级频度关系对地震目录进行完整性分析,选择地震台网所能监测到的较为完整的震级下限(3.2级)作为参与计算的地震目录震级下限;前人研究发现,部分与目标地震震级接近的地震参与计算易引起 y 值畸变,震级上限与预测的目标地震的震级之间要有一定空间。本文研究的目标震级为 $M_s \geq 7.0$ 级,根据不同震级上限取值的计算结果按照映震的最佳效果选择震级上限为5.0,因此参与加卸载响应比计算的地震目录范围为3.2~5.0。

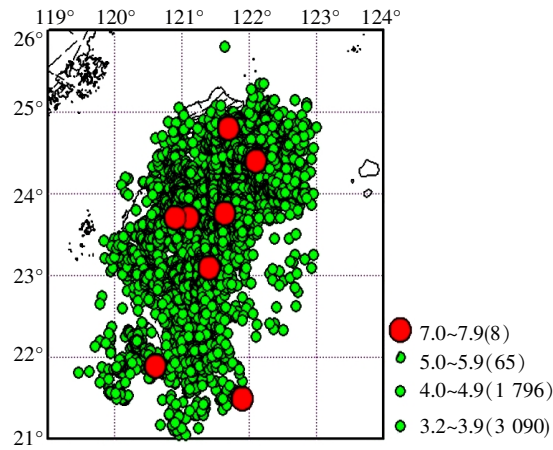


图 1 台湾地区震中分布图
Fig.1 The distribution map of epicenters in Taiwan

尝试以不同的窗长和滑动步长计算加卸载响应比值,经过分析对比认为选择以 1 年为窗长、1 个月为步长计算结果最优

根据上述方法选取的参数,计算加卸载响应比值。根据其时序曲线,研究加卸载响应比值的特征及与震中距、震级、异常时间之间的定量关系。

3 加卸载响应比分析

台湾位于欧亚大陆板块与菲律宾海板块相互碰撞带上,属于典型的板块碰撞所产生之大陆边缘岛屿,每年约有 15 000~18 000 个大大小小的地

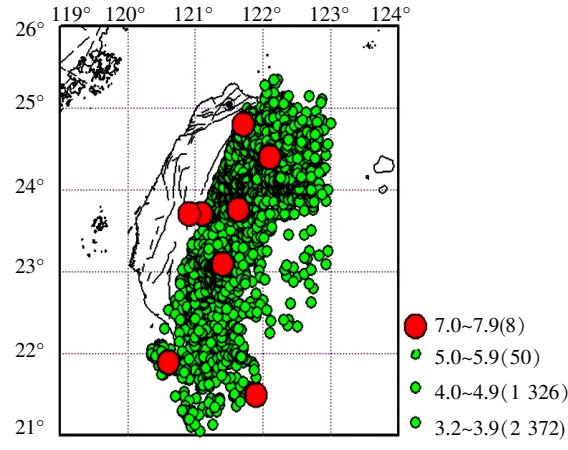


图 2 台湾东带震中分布图
Fig.2 The distribution map of epicentres in east Taiwan

震在此发生,该区内不同位置的地震形成的机制与板块构造有关。菲律宾海板块上吕宋岛弧的北端和欧亚大陆板块与台湾东部相撞,是世界上少见的“弧陆碰撞”点^[13],因此台湾尤其是台湾东部地震活动非常活跃。1989 年 1 月 1 日至 2013 年 12 月 31 日,台湾共发生 $M_s \geq 7.0$ 级地震 8 次,全部震中都位于台湾东部地区(表 1)。

选取台湾地区和台湾东带 1989 年 1 月 1 日至 2013 年 12 月 31 日福建地震台网记录到的 3.2~5.0 级地震,以 1 年为窗长,1 个月为滑动步长,分别计算两个区域的加卸载响应比 y 和 y' ,如图 3。

表 1 台湾及近海强震目录表
Table 1 Earthquake catalogue of Taiwan and its offshore sea

序号	发震时间	震 中 位 置			震级
		经度/(°)	纬度/(°)	参考地点	
1	1990-12-14	121.8	24.1	花莲以东	7.0
2	1994-06-05	121.7	24.8	宜兰以北	7.0
3	1996-09-06	121.9	21.5	兰屿南	7.1
4	1999-09-21	121.1	23.7	南投	7.6
5	1999-09-21	120.9	23.7	南投	7.0
6	2002-03-31	122.1	24.4	宜兰海外	7.5
7	2003-12-10	121.4	23.1	台东近海	7.0
8	2006-12-26	120.6	21.9	恒春海域	7.2

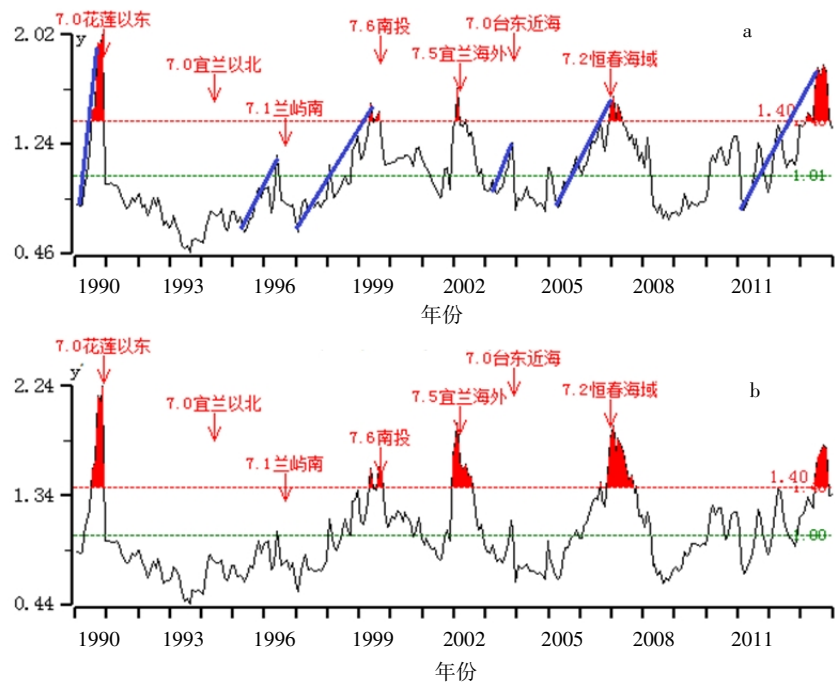
如图 3 所示,台湾地区和台湾东带所计算的加卸载响应比值随时间进程的发展趋势、与历史地震的对应情况都非常相似,仅仅是台湾东带的异常响应比值更高些,这说明台湾地区的加卸载响应比值受台湾东带地震的影响较大,这与台湾的强震主要分布在台湾东带相一致。下面以台湾地区计算的加卸载响应比值为例,从两个方面分

析加卸载响应比的特征。

3.1 加卸载响应比高值异常分析

根据历史地震的映震情况,选择 $y \geq 1.4$ 为高值异常,如图 3,异常目录见表 2。

1990 年 1 月至 2013 年 12 月台湾地区加卸载响应比共出现 5 组异常,异常时间达 26 个月,占



(a.台湾地区;b.台湾东带)

图3 加卸载响应比时序曲线

Fig.3 The time curve of load-unload response ratio

表2 台湾地区加卸载响应比异常目录

Table 2 Anomalies catalogue of load-unload response ratio in Taiwan

发震时间	震级	异常时间	异常开始至发震间隔/月	异常持续时间/月	异常最大值时间至发震间隔/月	异常结束至发震间隔/月
1990-12-14	7.0	1990-07~1990-11	6	5	1	1
1999-09-21	7.6	1999-0.5~1999-08	5	4	4	1
2002-03-31	7.5	2002-01~2002-02	3	2	1	1
2006-12-26	7.2	2006-08	5	6	震后	未结束
		2006-12~2007-04				
?	?	2013-03~2013-11	?	9	?	?

全时段的 9.02%，按前人研究结论认为，该比例的异常可信度较高^[14]。其中有 4 组异常对应到 $M_s \geq 7.0$ 级地震，这 4 组异常持续时间在 2~6 个月，属短期前兆异常；异常最大值出现时间即地震成核时间到发震时间间隔在 1~4 个月(2006 年 12 月 26 日南海 7.2 级地震最高值出现在震后 1 个月)；异常的幅度和持续时间与震级之间未见显著的关系。另一组异常出现在 2013 年 3 月至 2013 年 11 月，异常持续了 9 个月，为 1990 年以来持续最长的一组异常，异常最大值出现在 2013 年 9 月，推断在 2014 年初或稍长一段时间该区存在发生 $M_s \geq 7.0$ 级地震的可能。

1990 年 1 月至 2013 年 12 月台湾地区共发生 $M_s \geq 7.0$ 级地震 7 组(8 次)，其中 4 组(5 个)地震

震前出现加卸载响应比高值异常,漏报率为 42.9%。1994 年 6 月 5 宜兰北 7.0 级、1996 年 9 月 6 日兰屿南 7.1 级和 2003 年 12 月 10 日台东近海 7.0 级 3 次地震前，虽然 y 值未超出 1.4，但地震前也出现了较地震平静时段的小幅度高值(如图 3)。出现高值异常的地震空间分布图见图 4。

以上分析结果认为，台湾地区发生 $M_s \geq 7.0$ 级地震前，加卸载响应比不一定会出现超出 1.4 的高值异常；但是，一旦该区的加卸载响应比出现高值异常，或出现小幅度的突升现象，就应该警惕该区发生强震的可能。

3.2 加卸载响应比趋势异常分析

如图 3 所示，在 7 次 $M_s \geq 7.0$ 级地震前，有 5

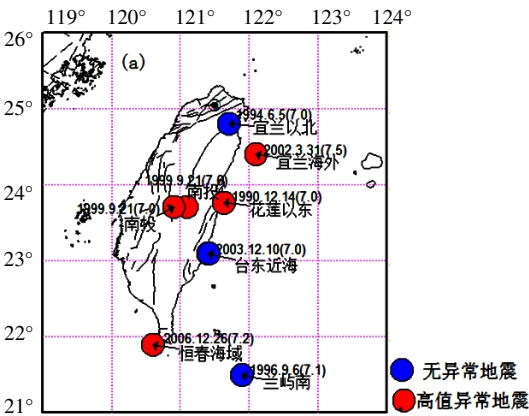


图 4 高值异常地震空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of earthquakes with high abnormal values

次地震前出现了加卸载响应比趋势上升异常，占全部地震的 71.4%，且这 5 次地震的震中均处在北纬 24°以南的台湾东带区域(见图 5)，趋势异常目录见表 3。

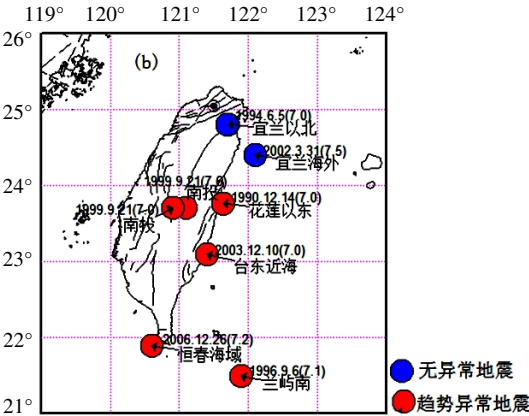


图 5 趋势异常地震空间分布图

Fig.5 Spatial distribution of earthquakes with abnormal trend

3.2.1 趋势异常持续时间与震级的关系

图 6 为根据表 3 绘制的加卸载响应比趋势异常持续时间 ΔT 与地震震级 M_s 之间的关系图。图上可以看出，趋势异常持续时间与地震震级之间

表 3 加卸载响应比趋势异常目录

Table 3 Catalogue of trend anomalies of load-unload response ratio

序号	异常时间	异常持续时间 ΔT /月	上升幅度 A	对应地震 M_s
1	1990-3~1990-11	9	1.221	1990 年 12 月 14 日花莲以东 7.0 级
2	1995-05~1996-05	13	0.547	1996 年 9 月 6 日兰屿南 7.1 级
3	1997-01~1999-05	28	0.92	1999 年 9 月 21 日南投 7.6 级、7.1 级
4	2003-05~2003-11	7	0.361	2003 年 12 月 10 日台东近海 7.0 级
5	2005-04~2006-08	18	0.636	2006 年 12 月 26 日恒春海域 7.2 级
6	2011-03~2013-11	31	1.042	?

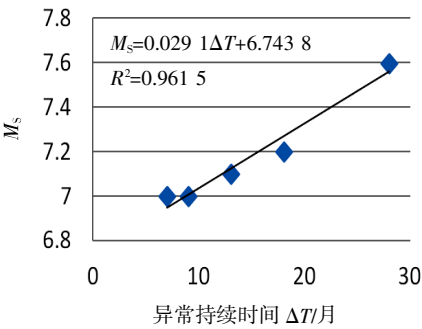


图 6 趋势异常持续时间与震级关系曲线

Fig.6 Curve of relationship between time duration of anomaly and magnitude

呈线性关系，关系式为 $M_s = 0.029 \Delta T + 6.743 8$ ，相关系数为 0.961 5，标准误差为 0.069，属于显著相关。根据这个关系式，计算出 2011 年 3 月至 2013 年 11 月的异常（异常持续时间为 31 个月）对应的震级(按 2 倍标准误差计算)约为 7.5~7.7 级。

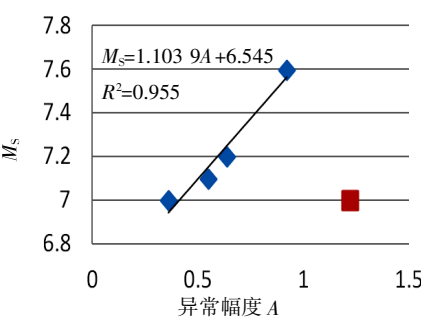


图 7 趋势异常幅度与震级关系曲线

Fig.7 Curve of relationship between anomalous amplitude and magnitude

3.2.2 趋势上升异常幅度与震级的关系

图 7 为根据表 3 绘制的加卸载响应比趋势异常上升幅度 A 与地震震级 M_s 之间的关系图。图上可以看出，除 1990 年 12 月 14 日花莲以东 7.0 级地震外，趋势上升异常幅度与地震震级之间呈线

性关系, 关系式为 $M_s = 1.103\ 9\ A + 6.545$, 相关系数为 0.955, 标准误差为 0.069, 属于显著相关。根据这个关系式, 计算出 2011 年 3 月至 2013 年 11 月的异常幅度所对应的震级(按 2 倍标准误差计算) 约为 7.6~7.8 级。

3.3.3 复相关分析

除 1990 年 12 月 14 日花莲以东 $M_s 7.0$ 级地震外, 其余几个地震前出现的趋势上升异常可见, 异常持续时间越长, 其上升的异常幅度也越大, 未来地震的震级也越大。根据表 3 计算地震震级 M_s 与加卸载响应比趋势异常持续时间 ΔT 和上升幅度 A 之间的关系式为 $M_s = 6.63 + 0.012\ 3\ \Delta T + 0.645\ A$, 信度为 95% 的复相关系数 $R = 0.977\ 7$, 标准误差为 0.095, 为显著相关。根据这个关系式, 计算出 2011 年 3 月至 2013 年 11 月的异常所对应的震级(按 2 倍标准误差计算) 约为 7.5~7.9 级。

3.2.4 地震震中分析

如图 4 所示, 出现趋势上升异常的地震震中均处在北纬 24° 以南的台湾东带区域, 而北纬 24° 以北的 2 个强震前却未出现类似异常, 这可能与所处区域的板块运动方式不同有关。台湾花莲(北纬 24°) 附近是菲律宾海板块上吕宋岛弧的北端和欧亚大陆板块在台湾东部的碰撞点, 以此为界, 板块的聚合作用使得北部地区菲律宾海板块隐没到欧亚板块之下, 南部地区欧亚板块则向东隐没到菲律宾海板块之下^[13]。可能是因为不同区域板块运行方式的不同致使各区地震形成的机制不同, 使得地震前产生的异常也不同。

结合以上分析结果, 认为 2011 年 3 月至 11 月的出现的加卸载响应比趋势异常所对应的震级约为 7.5~7.9 级, 地震震中可能处在北纬 24° 以南台湾东带区域。

4 结论

本文依据加卸载响应比理论, 以地震能量作为响应因子计算台湾地区加卸载响应比, 研究该区强震前加卸载响应比异常特征, 为该区强震预测提供一种依据。研究得出结论如下:

(1) 多数台湾 $M_s \geq 7.0$ 级地震前, 加卸载响应比出现 4~6 个月的短期高值异常, 地震成核时间到发震时间间隔在 1~4 个月, 但异常的幅度和持续时间与震级之间未见显著的关系。分析结果认为, 一旦该区的加卸载响应比出现高值异常或小幅度的突升现象, 就应该警惕该区发生强震的可能。

(2) 多数台湾 $M_s \geq 7.0$ 级地震前, 加卸载响应比出现趋势上升异常, 未来地震震级与趋势异常上升幅度、异常持续时间之间呈线性正相关, 即异常持续时间越长, 其上升的异常幅度也越大, 未来地震的震级也越大。出现趋势上升异常的地震震中均处在北纬 24° 以南的台湾东带区域。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 尹祥础, 张浪平, 张晖晖, 等. 加卸载响应比 20 年及其展望[J]. 国际地震动态, 2008 (4): 1-17.
- [3] 尹祥础, 张晖晖. 加卸载响应比的新进展[J]. 国际地震动态, 2005 (5): 98-102.
- [4] 蒋骏, 李胜乐, 张雁滨, 等. 地震前兆信息处理与软件系统[M]. 北京:地震出版社, 1999.
- [5] 尹祥础, 张浪平, 张永仙, 等. 汶川 8 级地震加卸载响应比的大尺度异常[J]. 地震, 2009, 29 (1): 53-59.
- [6] 张晖晖, 尹祥础, 梁乃刚, 等. 中国大陆地区中强地震前加卸载响应比异常时间尺度的统计研究[J]. 中国地震, 2005, 25 (4): 486-495.
- [7] 张晖晖, 尹祥础, 梁乃刚, 等. 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[J]. 地震, 2005, 25 (3): 20-26.
- [8] 张浪平, 尹祥础, 梁乃刚, 等. 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, 22 (4): 356-363.
- [9] 张浪平, 尹祥础, 庄建仓, 等. 汶川余震序列的加卸载响应比分析[J]. 地震, 2009, 29 (1): 60-67.
- [10] 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.
- [11] 李佐唐, 何少林, 许健生, 等. 祁连山地震带两次中强地震前的加卸载响应比异常[J]. 地震研究, 2001, 24 (3): 197-201.
- [12] 罗杰. 赣粤闽交界及邻区近年中强地震加卸载响应比特征研究[J]. 华南地震, 2008, 28 (1): 85-91.
- [13] 刘昭民. 台湾之地质构造与地震活动[J]. 中国地震, 1990, 7 (9): 15-17.
- [14] 王海涛, 彭克银, 庄建仓, 等. 样本条件对加卸载响应比计算结果的影响分析[J]. 地震, 1999, 19 (3): 223-229.