

# 海南岛及其近海中强地震前加卸载 响应比的变化特征

任 隽<sup>1</sup>, 陈运平<sup>2</sup>, 潘纪顺<sup>3</sup>, 沈繁奎<sup>2</sup>, 符 干<sup>2</sup>

(1. 陕西省地震局, 陕西 西安 710068; 2. 海南省地震局, 海南 海口 570203;  
3. 中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450002)

**摘要:**将海南岛及其近海的地震应变能作为响应因子,对该地区的中强以上的地震在震前的加卸载响应比异常特征进行了分析和研究,认为地震前的加卸载响应比异常是该地区中期或者短期的前兆异常,为该地区中短期地震监测和预报提供了一种手段。

**关键词:**加卸载响应比; 地震预报; 海南岛

中图分类号: P315.75

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2005)01-0071-04

## Variational Characteristics of Load/Unload Response Ratio in Hainan Island and Its Adjacent Area before Moderate—strong Earthquakes

REN Jun<sup>1</sup>, CHEN Yun-ping<sup>2</sup>, PAN Ji-shun<sup>3</sup>, SHEN Fan-luan<sup>2</sup>, FU Gan<sup>2</sup>

(1. Seismological Bureau of Shaanxi Province, Xi'an, Shaanxi, 710068, China;

2. Seismological Bureau of Hainan Province, Haikou, Hainan 570203, China;

3. Center of Geophysical Prospection, CSB, Zhengzhou, Henan 450002, China)

**Abstract:** Using the seismic strain energy as the response factor, the anomalous characteristics of Load/Unload Response Ratio before moderate—strong earthquakes in Hainan Island and its adjacent area are analysed. The research result indicates that the high anomaly of LURR is a kind of medium—term and short—term precursor before moderate—strong earthquake in this region. It could be a new method for earthquake prediction.

**Key words:** Load/Unload response ratio; Earthquake prediction; Hainan Island

### 0 前言

加卸载响应比理论是尹祥础在 1987 年提出来的,之后在我国的地震预报实践中得到了广泛的应用和发展<sup>[1-5]</sup>。该理论认为地震的孕育和发生是由于岩石系统的非线性失稳造成的。将岩石受压过程中的应力  $P$  和相应的某响应参数  $R$  的变化之比  $\Delta R/\Delta P$  定义为响应率,则在系统稳定时,响应率为某一常数,当系统失稳时,其值明显增加。施行觉等人用纵波速度作为响应参数,在实验和理论上分析了岩石的破裂行为,得到了很好的结果<sup>[6]</sup>。作为预报地震时的响应参数,一般是具有地震前兆意义的实际观测资料,如地形变、地倾斜、体应变、重力及地

下水位,甚至是与地震的发生相关的地磁参量均可以作为  $R$  值。其中在地震预报实践中用得最多的是地震能量。地震能量相当于室内实验中的声发射,它直接携带了震源处的孕震信息,且是目前条件下容易得到的资料。本文利用海南岛及其近海的地震应变能作为响应因子,研究了中强以上地震的加卸载响应比异常特征,为本地区地震监测预报提供一种可能的手段。

### 1 海南岛及其近海地震资料和地震活动情况

收稿日期: 2004-05-27

基金项目: 地震联合基金重点课题(9507431)

作者简介: 任隽(1971—),男(汉族),陕西铜川人,工程师,现主要从事地震监测、预报等工作。

海南岛及其邻近地区处在欧亚板块的东南缘,受到菲律宾板块、印度板块运动和南海海盆扩张的联合控制与影响,构造活动、火山活动和地震活动都很强烈。海南岛及其近海( $18^{\circ}\sim 22^{\circ}\text{N}$ ,  $108^{\circ}\sim 112^{\circ}\text{E}$ )大体上相当于琼雷地震区,是东南沿海地震带的一个组成部分,历史上曾发生过 1605 年琼山  $7\frac{1}{2}$  级大地震,近期有 1995 年元旦前后的北部湾 6.1、6.2 级地震。海南岛自 1969 年 12 月万宁—陵水东南海域 5.1 级、5.2 级地震之后开始有了第一个地震观测台—陵水台,之后陆续建起了一些地震台站:那大台、琼中台、文昌台、定安台和海口台,另外在海南岛北部还有广东省的湛江台和阳江台。然而,只有 1976 年琼中基准地震台建成投入使用后,海南岛及其近海的观测能力才真正提高到了新的水平,基本上能监测到海南岛  $M_L 2.0$  以上的地震,对  $M_L 2.5$  以上的地震不会遗漏。因此,我们的资料分析起始于 1977 年。自 1977 年以来,本区域共发生过中等以上的地震 11 次(不含余震和双震)。地震的基本情况见表 1。属于双震型的地震,发生时间就选取第一个地震发生的时间。

表 1 海南岛及近海地震情况一览表

组号	发震日期	震中位置			震级 $M_s$
		北纬	东经	参考地名	
1	1980-07-24	$21^{\circ}43'$	$111^{\circ}31'$	阳江	4.0
2	1981-06-23	$20^{\circ}30'$	$108^{\circ}30'$	北部湾	4.2
3	1982-01-25	$18^{\circ}32'$	$109^{\circ}23'$	三亚	4.0
4	1986-01-28	$21^{\circ}42'$	$111^{\circ}48'$	阳江	5.0
5	1987-02-25	$21^{\circ}44'$	$111^{\circ}47'$	阳江	4.6
6	1988-11-05	$20^{\circ}29'$	$108^{\circ}17'$	北部湾	4.8
	1988-11-10	$21^{\circ}17'$	$108^{\circ}36'$		5.0
7	1992-05-26	$18^{\circ}48'$	$108^{\circ}36'$	东方近海	4.0
8	1994-12-31	$20^{\circ}26'$	$109^{\circ}21'$	北部湾	6.1
	1995-01-10	$20^{\circ}22'$	$109^{\circ}32'$		6.2
	1995-06-05	$18^{\circ}42'$	$108^{\circ}36'$		东方近海
10	1999-05-17	$18^{\circ}30'$	$110^{\circ}25'$	万宁近海	4.9
11	2001-04-22	$21^{\circ}50'$	$111^{\circ}44'$	阳江	4.2

## 2 加卸载响应比及其计算

加卸载响应比的定义为

$$Y = (\Delta R_+ / \Delta P_+) / (\Delta R_- / \Delta P_-) \quad (1)$$

式中,  $\Delta P_+$ 、 $\Delta P_-$  为加载(卸载)增量;  $\Delta R_+$ 、 $\Delta R_-$  为相应的参数响应。若  $Y \approx 1$ , 则表示系统处于稳定状态; 若  $Y > 1$ , 则表示系统趋向于失稳。

用能量作为响应参数, 其加卸载响应比的计算公式为<sup>[2]</sup>

$$Y = \left( \sum_{i=1}^{N_+} E_i^m \right)_+ / \left( \sum_{i=1}^{N_-} E_i^m \right)_- \quad (2)$$

式中,  $E$  为地震能量;  $N_+$  ( $N_-$ ) 为加载(卸载)条件下

发生的地震个数;  $m$  为某个常数, 其不同取值分别代表不同的地震学含义,  $m$  值增大,  $Y$  值的敏感性增大; 而  $m$  值减小, 则  $Y$  值的稳定性增大。有许多的震例研究表明, 取贝尼奥夫应变能作为响应参数(即  $m$  取 0.5) 时,  $Y$  值的异常变化对应地震的综合效果较好。因此, 在本文中  $m$  取 0.5。

利用式(2)计算加卸载响应比时, 以固体潮在发震断层面上所引起的有效剪应力的增量  $\Delta\tau_c$  作为判断加卸载的标准,  $\Delta\tau_c > 0$  为加载时段,  $\Delta\tau_c < 0$  为卸载时段。而要计算有效剪应力, 就要确定所发生地震的断层面走向、倾角和滑动方向。但是, 如果在地震发生之后才根据该地震的震源机制解来确定地震断层参数, 以此计算地震发生之前的加卸载响应比并判断是否存在异常, 就失去了地震预报的意义。而且这种做法只局限于计算某一断层带上的情况。

对于一个大的区域而言, 在地震发生之前如何确定地震断层面产状, 从而对未来地震做出预报呢? 一般的做法是通过在研究区内以前发生过大地震的震源机制解, 并结合震源区的地震地质结构给出的。近来又有利用构造应力场资料来计算某一研究区域加卸载响应比的方法<sup>[4]</sup>。然而, 利用历史地震的震源机制解资料误差较大, 而且这些地震的震源机制解一般来说是各不相同的, 应用起来有些不便。利用构造应力场资料计算加卸载响应比具有很大的优点, 对应力比较复杂的地区能提高精度, 但计算也比较烦琐。本文应用一种简单的方法, 就是根据所研究区域的地震地质条件, 结合本地区大的构造应力场方向, 来确定一条假想的地震断层面。由于响应参量是多个地震统计的结果, 因此在总体构造应力场方向确定的情况下, 这个方法计算的加卸载响应比结果误差不会很大。

海南岛构造受南海海盆扩张的控制。南海是扩张的弧后盆地, 扩张轴的走向近东西, 海区形成一系列走向 EW—NEE 的隆起、拗陷及其之间右旋扭动的断裂, 并逐渐波及北侧的大陆。在琼雷地区, 则形成一系列近东西向的深大断裂, 并使琼雷断陷形成巨大的裂谷断陷带。本地区主要有 EW 向、NE 向和 NW 向三组断裂, 其中 EW 向断裂是本地区主要的控震断裂<sup>[7]</sup>。EW 走向的王五一文教断裂带是本地区最大的一条断裂带, 也是本地区两个主要的地质构造单元—琼雷断陷带和琼中南拱断隆起区的分界线。因此, 从本地区的地震地质结构出发, 我们选择 EW 向作为分析加卸载的假想地震断层走向。

我们把海南岛及其近海的地震目录  $M_L 2.0$  以

上的地震按时间顺序排列,以每 20 个为一组,以 2 个月为窗长、1 个月为滑动步长,以固体潮引潮力的周期性变化作为对所研究地块的加载、卸载手段,计算加卸载响应比。

### 3 海南岛及其近海地震前加卸载响应比的变化特征

对于  $b \geq 0.7$  的模拟地震序列,当分组个数  $N \geq 20$  时,出现  $Y \geq 2.0$  的自然概率在 15% 以下,而  $Y \geq 6.0$  的自然概率不超过 1%;对于  $N=20$  和  $N=25$  时, $Y$  的自然概率分布十分接近<sup>[8]</sup>。因此,我们选取  $Y \geq 2.0$  为可能的地震前兆异常。加卸载响应比异常和地震对应的情况结果如图 1 所示。计算结果表明,在上述 11 个震例中,除了 1999 年万宁近海 4.9 级地震外,其余 10 个在震前出现了加卸载响应比异常(表 2)。

表 2 加卸载响应比异常统计表

组号	震级 / $M_s$	异常最大值时到发震的时间/d	异常结束到发震的时间/d	异常次数	异常最大值	异常持续时间/d
1	4.0	254	245	2	2.7	11
2	4.2	181	181	1	2.3	1
3	4.0	143	未结束	4	3.7	35
4	5.0	156	156	3	5.2	94
5	4.6	139	未结束	5	3.7	136
6	4.8, 5.0	558	502	13	13.1	271
7	4.0	135	117	3	3.3	18
8	6.1, 6.2	77	28	7	10.2	167
9	4.8	73	35	3	10.1	120
10	4.2	206	181	1	3.6	1

如表 2 所示,异常次数、异常最大值和异常持续时间基本上随着震级的增大而增大的。异常最大值时到发震的时间间隔,除了两个较大的地震时间

间隔较短、1988 年北部湾地震时间间隔比较长外,其余地震的时间间隔在 135~206 d 之间,平均 160 d。时间间隔与发生地震的强度没有显著的关系(图 2a)。

从图 1 和表 2 可见,加卸载响应比在 9 个中等级以上地震的震例中有明显的高值变化,变化幅度和时间范围存在着差别。地震有时发生在峰值之后 3~4 个月,最短的也要在峰值过后 2 个月才发生,最迟的则超过 1 年时间。异常持续时间与地震大小也有关系,以 4.5 级为界,大于 4.5 级的地震异常持续时间较长,在 94 d 到 271 d 之间,平均为 157.6 d;而小于 4.5 级的地震异常持续时间较短,平均为 13.2 d(图 2b)。

我们再看变化的幅度。北部湾 6.1、6.2 级地震以及两次 5 级左右的较大地震在震前均出现较高的数值,其中北部湾地震前响应比达到 10.2,东方近海 4.8 级地震前响应比为 10.1,阳江 5.0 级地震前响应比为 5.2。其余的 4 级地震前的响应比均不超过 5.0(图 2c)。至于加卸载响应比的异常幅度与震级之间是否存在正比关系,现在的样本数还不够多,难以做出判断,但总体而言,响应比越大,之后发生的地震震级就可能越大。

总的来说,在本文所研究的 11 组震例的 82% 在震前加卸载响应比都存在高值异常变化,我们认为这种变化反映了地震的孕育过程亦即非线性系统的失稳过程,并且震前出现高值变化的时间范围在某种程度上是有一定的规律可循的。

如果我们把地震前加卸载响应比的异常变化进程与其他地震前兆异常变化进行对比分析,能够对地震前加卸载响应比在地震孕育的不同阶段的变化

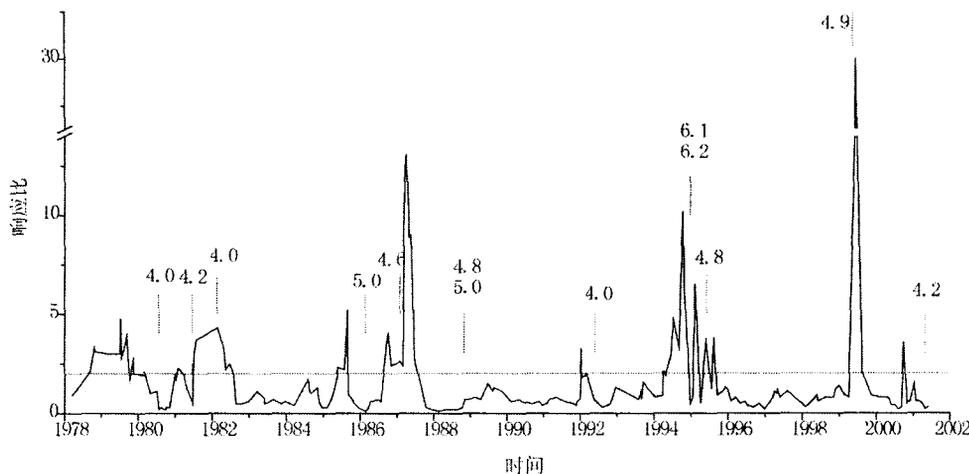


图 1 海南岛及其近海 11 个震例与加卸载响应比的对应关系

Fig. 1 Corresponding relationship between the eleven earthquakes in Hainan and Load/Unload Response Ratio.

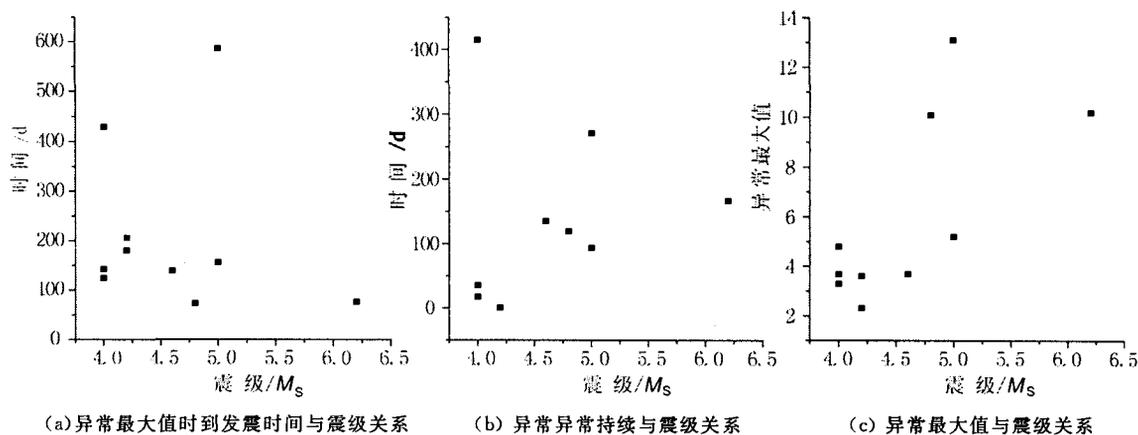


图2 加卸载响应比异常特征

Fig. 2 Relationship between the characteristics of Load/Unload Response Ratio abnormality and seismic magnitudes.

特征与孕育机制间的对应关系的认识有一定的帮助。

#### 4 讨论

(1)借助于海南岛及其近海的加卸载响应比异常次数、异常最大值和异常持续时间,可对本地区中期和短期的中等或者中强地震的发生时间和大小的判断提供帮助。结合其它地震趋势分析手段和前兆异常,可以判断本地区的中期或者短期的地震趋势。

(2)有些地震出现了“震后效应”——即比较大的地震发生之后出现加卸载响应比异常增加的现象,而有些地震则没有这种现象。我们在实际预报实践中应该注意这种情况,不要把它当成地震前兆。王海涛等人也注意到这种现象,并建议给予剔除或者把地震震级减低再进行计算<sup>[9]</sup>。

(3)加载和卸载的计算是加卸载响应比理论计算的一个难点。通常该理论应用于预测时需要预先知道该地震的断层面方向。我们把该理论推广应用于一个地区时,采用构造分析的方法,用该地区最大的断裂带作为地震断层平面进行计算。这种做法有可能会产生一些误差,这种误差是否在一个合理的范围内,还需要进一步的讨论。

(4)在地震预报实践中,最理想的模式是地震在加卸载响应比异常结束之后才发生地震。在总结的地震震例中,有两例地震在加卸载响应比异常还没有结束就已经发生地震了。这时候就很难判断地震

的发生时间。

#### 【参考文献】

- [1] 尹祥础. 地震预测新途径的探索[J]. 中国地震, 1987, 3(1): 1-7.
- [2] 尹祥础, 尹灿. 非线性系统失稳的前兆与地震预报[J]. 中国科学(B), 1991, 21(5): 512-518.
- [3] 尹祥础. 加卸载响应比——一种新的地震预报方法[J]. 地球物理学报, 1994, 37(6): 767-775.
- [4] 彭克银, 尹祥础, 王海涛, 等. 基于构造应力场资料的加卸载响应比方法研究[J]. 中国地震, 2000, 16(2): 190-196.
- [5] 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.
- [6] 施行觉, 许和明, 万永中, 等. 模拟引潮力作用下的岩石破裂特征——加卸载响应比理论的实验研究之一[J]. 地球物理学报, 1994, 37(5): 633-637.
- [7] 陈运平, 席道瑛, 樊星. 利用分形理论分析海南岛的活动断裂[J]. 地震研究, 2002, 22(4): 351-355.
- [8] 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): 269-274.
- [9] 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.
- [10] 任隽, 朱元清, 秦浩文. 上海地震台阵标定及结果分析[J]. 西北地震学报, 2002, 24(4): 325-329.
- [11] 任隽, 朱元清, 潘纪顺, 等. 上海地震台阵与台网的定位级视慢度研究[J]. 地震研究, 2002, 25(4): 335-340.
- [12] 赵翠萍, 王海涛. 计算条件对 Hurst 指数稳定性影响分析[J]. 西北地震学报, 2002, 24(1): 34-42.
- [13] 郭增建, 韩延本, 吴瑾冰. 太阳活动与 2001 年昆仑山口西 8.1 级大震的相关性讨论[J]. 西北地震学报, 2003, 25(1): 8-11.