

## 综述与评述

# 加卸载响应比 20 年及其展望<sup>\*</sup>

尹祥础<sup>1,2)</sup>, 张浪平<sup>2)</sup>, 张晖辉<sup>2)</sup>, 尹 灿<sup>3)</sup>, 王裕仓<sup>2,3)</sup>, 张永仙<sup>2,4)</sup>  
彭克银<sup>2,4)</sup>, 王海涛<sup>2,5)</sup>, 宋治平<sup>2,6)</sup>, 余怀忠<sup>2)</sup>, 庄建仓<sup>2,7)</sup>

- 1) 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036
- 2) 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
- 3) 澳大利亚昆士兰大学地球科学计算中心
- 4) 中国地震局台网中心, 北京 100036
- 5) 中国地震局新疆地震局, 乌鲁木齐 830011
- 6) 中国地震局上海地震局, 上海 200062
- 7) 美国加州大学洛杉矶分校地球与空间科学系

**摘 要** 地震孕育过程是一个非线性、不可逆的过程, 震源区介质的加载响应不同于卸载响应, 这种加载响应与卸载响应的差别可以定量地刻画地震的孕育过程。基于这个物理概念, 提出了一个新的参数——加卸载响应比, 作为一类地震前兆, 用来定量预测强震的发生。在本文中, 首先简单回顾了加卸载响应比的发展历史, 然后详细介绍了地震震例检验、数值计算、实验研究、地震预测精度、可信度等方面的内容, 最后对加卸载响应比的前景进行了展望。

**关键词** 加卸载响应比; 地震预测; 数值计算; 实验研究

**中图分类号** P315.75 **文献标识码** A

## 引言

20 年前, 也就是 1984 年, 本文第一作者在美国圣路易斯大学做访问教授, 与 Otto Nuttli 教授一起合作, 当时, 加卸载响应比思想像闪电一样出现在作者脑中。Otto Nuttli 教授对加卸载响应比表现出了极大的兴趣, 并且鼓励我们为之努力以取得最大成就。现在 Otto Nuttli 教授已经去世多年, 我们对他深切怀念。

从物理或力学的角度看, 地震孕育过程

的物理实质就是震源区介质的损伤、破坏或失稳, 并伴随着能量的快速释放的过程, 因此地震孕育过程确切地说就是震源区介质的损伤演化过程。

从细观力学角度看, 地质材料 (岩石) 的损伤过程极其复杂<sup>[1-4]</sup>。岩石中存在着大量不同尺寸、不同形状、不同方向且没有规则的缺陷 (裂纹, 接口, 缺陷, 孔洞)。损伤过程主要包括裂纹的产生、扩展、交互影响、联接、串级等等, 这是一个远离平衡态的非线性不可逆过程。经过数十年的深入研究, 很多基本的问题仍然没有得到解决, 这也是地震预测困难的根本原因。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2008-03-24。

从宏观的角度看,材料的应力应变曲线是对材料力学行为的全面描述,图1是典型的地质材料(岩石)的应力应变曲线。一般情况下,图1中用纵坐标表示载荷 $P$ (代替应力),横坐标表示对应于载荷 $P$ 的广义响应 $R$ (代替应变)。如果单调加载,材料将会依次经历弹性、损伤、破坏或失稳等阶段。弹性阶段最本质的特征就是可逆性,也就是加载路径与卸载路径是可逆的,换句话说就是弹性阶段的加载模量与卸载模量是相等的;与弹性阶段相反,损伤阶段是一个不可逆的过程,加载响应与卸载响应不相同,或者说是加载模量不同于卸载模量。这种加载与卸载的差别就能揭示材料由于损伤导致的弱化。

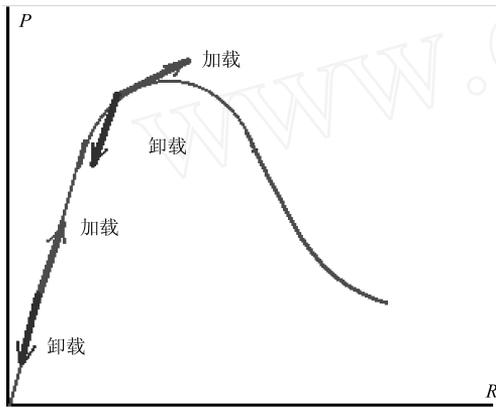


图1 岩石材料的本构曲线

为了定量地刻画加载响应与卸载响应的差别,定义了下面两个基本量:

第一个是响应量 $X$ ,将其定义为:

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

其中 $P$ 和 $R$ 分别表示载荷 $P$ 和响应 $R$ 的增量。

另一个是加卸载响应比 $Y$ ,将其定义为:

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

这里的 $X_+$ 和 $X_-$ 分别表示加载响应量与卸载

响应量。

很明显,当介质处于弹性阶段时, $X_+ = X_-$ ,因此加卸载响应比值 $Y = 1$ ;到了损伤阶段,由于 $X_+ > X_-$ ,就有 $Y > 1$ ,而且随着损伤的增加, $Y$ 值也会增加。当介质临近破坏时, $Y$ 值越来越大,达到其峰值。因此加卸载响应比值 $Y$ 就可以定量地刻画震源区介质的损伤程度,也就是说加卸载响应比可以作为地震发生的一种前兆现象。

在连续介质损伤力学中,介质的损伤程度可以用损伤变量 $d$ 来衡量。无论是用标量,还是高阶张量的形式,有很多种 $d$ 的定义方式<sup>[3]</sup>。一种直接的方法就是用有效刚度张量的相对变化来定义 $d$ 。为了简单,根据Lemaitre的定义<sup>[5]</sup>,损伤变量 $d$ 可以定义为:

$$d = (E_0 - E) / E_0 \quad (3)$$

其中模量 $E_0$ 表示单轴拉伸或压缩下材料的初始弹性模量, $E$ 表示受损后的弹性模量。

事实上,模量的折减是由于材料中出现了缺陷(裂纹,接口,缺陷,孔洞)。很多科学家对弹性模量与裂纹间的关系进行了研究,ODA认为柔度张量 $M$ (与刚度张量互逆,且有 $M_{ijkl} = M_{ikjl} = M_{klij}$ )的变化可以表示为<sup>[6]</sup>:

$$M_{ijkl} - M_{ijkl}^0 = \left( \frac{1}{4} \right) \left( \delta_{ij} F_{kl} + \delta_{kl} F_{ij} + \delta_{ik} F_{jl} + \delta_{jl} F_{ik} \right) \quad (4)$$

其中 $M_{ijkl}^0$ 表示介质没有损伤时的柔度张量, $M_{ijkl}$ 表示损伤介质的柔度张量, $\delta_{ij}$ 是克罗内克尔符号, $F_{ij}$ 是组构张量的分量,可以定义为:

$$F_{ij} = \frac{N}{V} \int_0^a D(n_k, a) n_i n_j d a \quad (5)$$

其中 $a$ 是裂纹的尺寸, $D$ 是裂纹的密度分布函数, $n$ 表示单位法向矢量, $d$ 表示球面微元。

很明显,在目前认识的水平下,组构张量的计算是非常复杂的,而要得到计算 $F_{ij}$ 的足够数据更加困难。通过释放的能量,可以将尺寸为 $a$ 的裂纹的形成与地震断层的形成对应起来<sup>[7]</sup>。因此在地震学中可以用地震能

量, 在实验中用声发射能量来定义加卸载响应比  $Y$ , 如下:

$$Y = \frac{\left[ \sum_{i=1}^{N^+} E_{ij}^m \right]_+}{\left[ \sum_{i=1}^{N^-} E_{ij}^m \right]_-} \quad (6)$$

其中  $E$  表示释放的地震能量, 可以根据 Gutenberg-Richter 公式进行计算<sup>[7]</sup>, 符号“+”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  $m=1/2$  时,  $E^m$  表示 Benioff 应变; 当  $m$  为 1/3 或 2/3 时,  $E^m$  分别表示孕震区域的线尺度和面尺度; 当  $m=0$  时,  $Y$  值相当于  $N_+/N_-$ , 而  $N_+$  和  $N_-$  分别表示在加载和卸载过程中的地震数量。在本文中,  $m$  取为 1/2。

用加卸载响应比方法来预测地震, 需要解决几个基本问题。首先是如何对尺度为上百公里甚至是上千公里的地壳板块进行加载和卸载。方法之一就是利用固体潮对地壳进行加载和卸载, 地壳中的潮汐应力是由月亮和太阳引力产生的连续变化的应力。如何计算地壳中由潮汐引起的应力, 在前人的基础上, 我们进行了改进和发展<sup>[8-16]</sup>。

第二个问题是如何判断加载与卸载。我们采用库仑破坏准则, 根据库仑破裂应力 (CFS) 的增加、减少来判断加卸载情况<sup>[17-19]</sup>。

$$CFS = \sigma_n + f \tau_n \quad (7)$$

其中  $f$  表示内摩擦系数,  $\sigma_n$  表示正应力 (拉应力为正),  $\tau_n$  表示剪应力,  $n$  表示库仑破裂应力达到最大值的断层面的法线方向。

$CFS$  表示库仑破裂应力 (CFS) 的增量。如果  $CFS > 0$ , 那就是加载,  $CFS < 0$  就意味着卸载。

众所周知, 地壳应力  $\sigma_{ij}$  包含构造应力  $\sigma_{ij}^c$  和潮汐应力  $\sigma_{ij}^t$ 。由于构造应力  $\sigma_{ij}^c$  的量级 ( $10^6 - 10^8$  Pa) 远远高于潮汐应力  $\sigma_{ij}^t$  的量级 ( $10^3 - 10^4$  Pa), 因此可以认为地壳应力的主

方向和构造应力的主方向相同。然而, 由于潮汐应力的变化量远远大于构造应力的变化量<sup>[20]</sup>, 因此库仑破裂应力的增量 (CFS) 主要是由于固体潮引起的。地壳的弹性变形可以通过对 6 个一阶偏微分方程求解得到。继承、发展 MOLODENSKY-TAKEUCHI 的工作, 采用龙格-库塔数值计算方法, 可以计算出任何截面上的潮汐应力分量。这样在法线方向为  $n$  的断层面的正应力和剪应力就可以通过应力张量的坐标转换得到, 然后根据式 (7) 就可以很容易的计算出库仑破裂应力 (CFS)。

## 1 震例检验

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效果良好<sup>[15, 16]</sup>。80% 以上的震例表明在地震孕育初期, 加卸载响应比值  $Y$  在 1 附近波动, 而在强震来临的时候, 加卸载响应比值会升高, 然后  $Y$  升高到最大值 (明显大于 1), 在主震发生的前夕, 加卸载响应比会迅速下降 (如图 4, 5)。同时, 我们在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 (1970 年 ~ 1992 年) 的变化; 这 7 个区域的  $Y$  值, 整个时间段都保持在 1 附近波动<sup>[15]</sup>。这些结果都表明加卸载响应比可以用来作为强震发生的一个前兆。

计算加卸载响应比的演化需要知道很多参数, 比如断层面的走向角、倾角、滑动角, 时间窗、空间窗的形状与大小等等。不幸的是由于很多原因, 比如人员流动、计算机病毒攻击、缺乏经验等, 在早期的研究中, 对参数的记录并不完整, 因此, 有时无法重复先前的一些计算结果。考虑到上面的情况, 我们采取了两个方法来解决这个问题:

(1) 对每一条  $Y(t)$  曲线, 自动记录所有参数。

(2) 基于统计研究<sup>[21-23]</sup>, 按图 2 设置扫描半径 (圆形扫描区域) 与目标震级之间的比例关系。

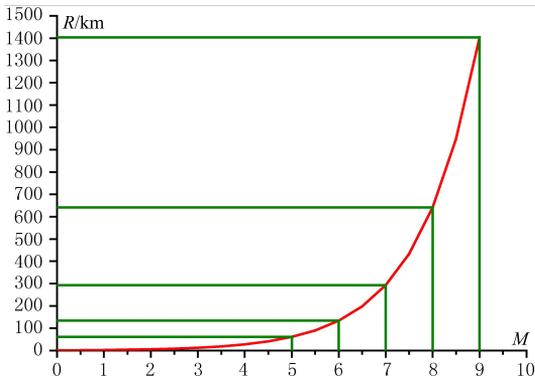


图 2 扫描空间尺度 (半径  $R$ ) 与震级之间的关系

通常我们选择圆形区域作为计算加卸载响应比的空间窗, 也有一些情况, 震中分布明显不是圆形区域, 就选择其他形式的空间窗, 如图 3。

图 4 给出的是美国南加州 6 级以上地震的加卸载响应比演化曲线, 图 5 给出的是中国大陆地区 7 级以上地震的加卸载响应比演化曲线。

大家都知道, 美国南加州、中国大陆、日本的地质构造是明显不同的, 但加卸载响应比演化曲线非常相似, 这表明加卸载响应比作为强震发生的前兆可适用于不同的地质构造。

有一个问题值得关注: 很多科学家研究

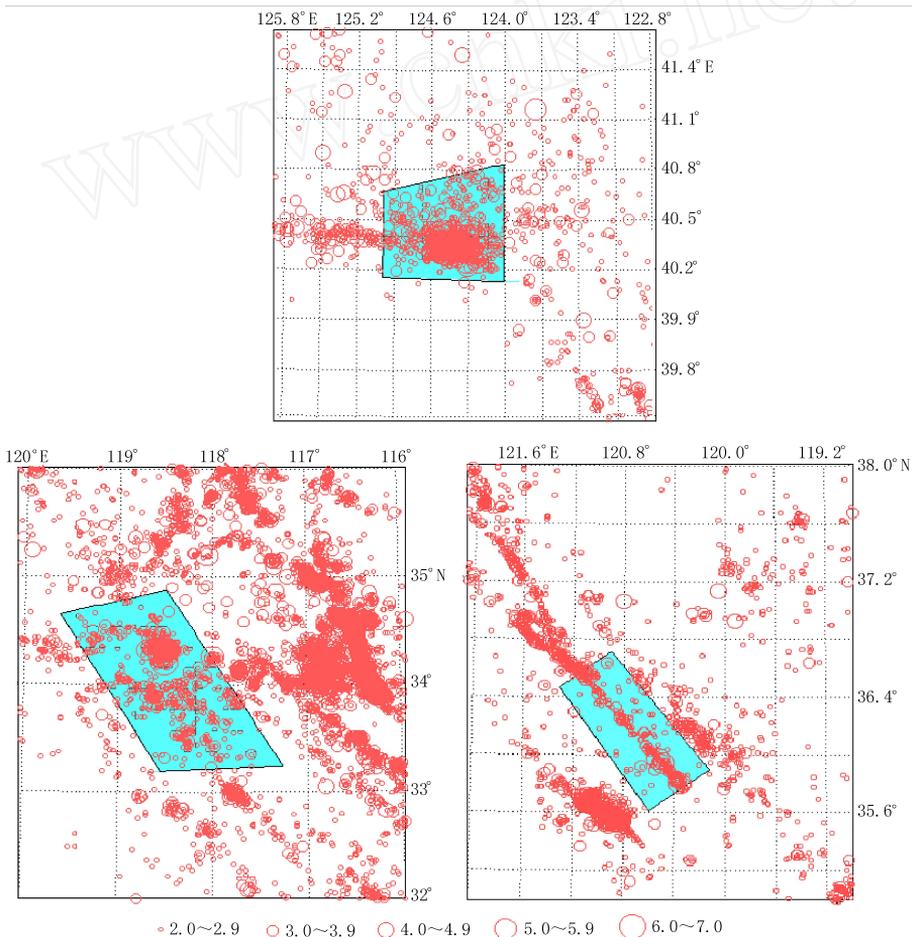


图 3 在计算某些地震的加卸载响应比时所用的空间窗

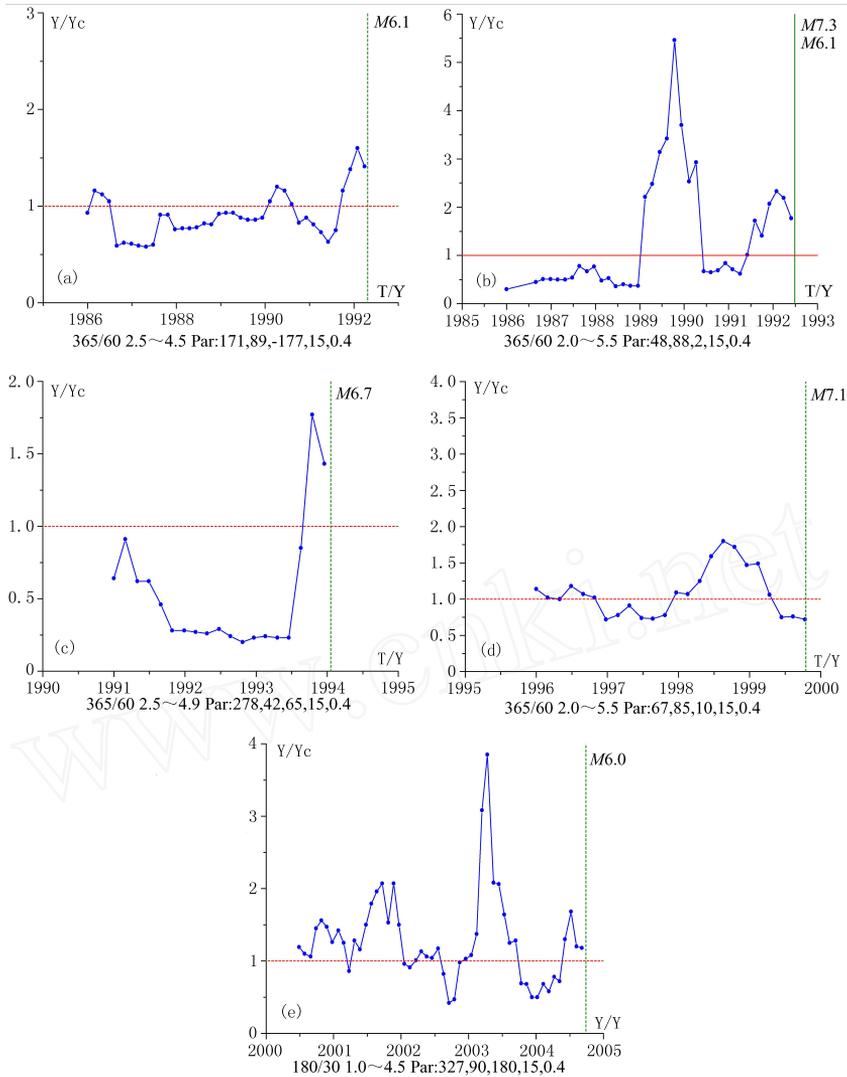


图 4 美国南加州的 6 级以上地震的加卸载响应比演化曲线

(a) 1992-04-23 (33. 96N, - 116. 32W),  $R=150$ ; (b) 1992-06-28 (34. 20N, - 116. 44W); (c) 1994-01-17 (34. 21N, - 118. 54E); (d) 1999-10-16 (34. 59N, - 116. 27E),  $R=320$ ; (e) 2004-09-28 (35. 81, - 120. 365. 9)

过固体潮对地震的触发效应，发现地震的发生与固体潮的一致性并不好<sup>[20, 24 - 25]</sup>。而在我们的研究中，在强震发生之前，加卸载响应比值会比 1 大很多，这意味着强震的发生与固体潮对应的比较好。

根据临界点理论，地壳并不是一直处于临界状态<sup>[26 - 31]</sup>。大地震的发生势必会消耗部分孕育过程中积累的能量，同时也会伴随应力下降，并且使地壳从一个临界状态转变

为相对稳定的状态。因此在地震孕育早期（大地震发生后相当长的一段时间），地壳构造应力水平比较低，通常这个时期的加卸载响应比  $Y$  值接近于 1 (此时地震发生与固体潮对应很差)，随后，构造应力驱动着地壳达到临界状态。在构造应力和能量累积的过程中，该区域的地壳介质严重损伤，地壳介质将对外界任何微小的扰动（例如潮汐应力）都很敏感。这个阶段加卸载响应比的值

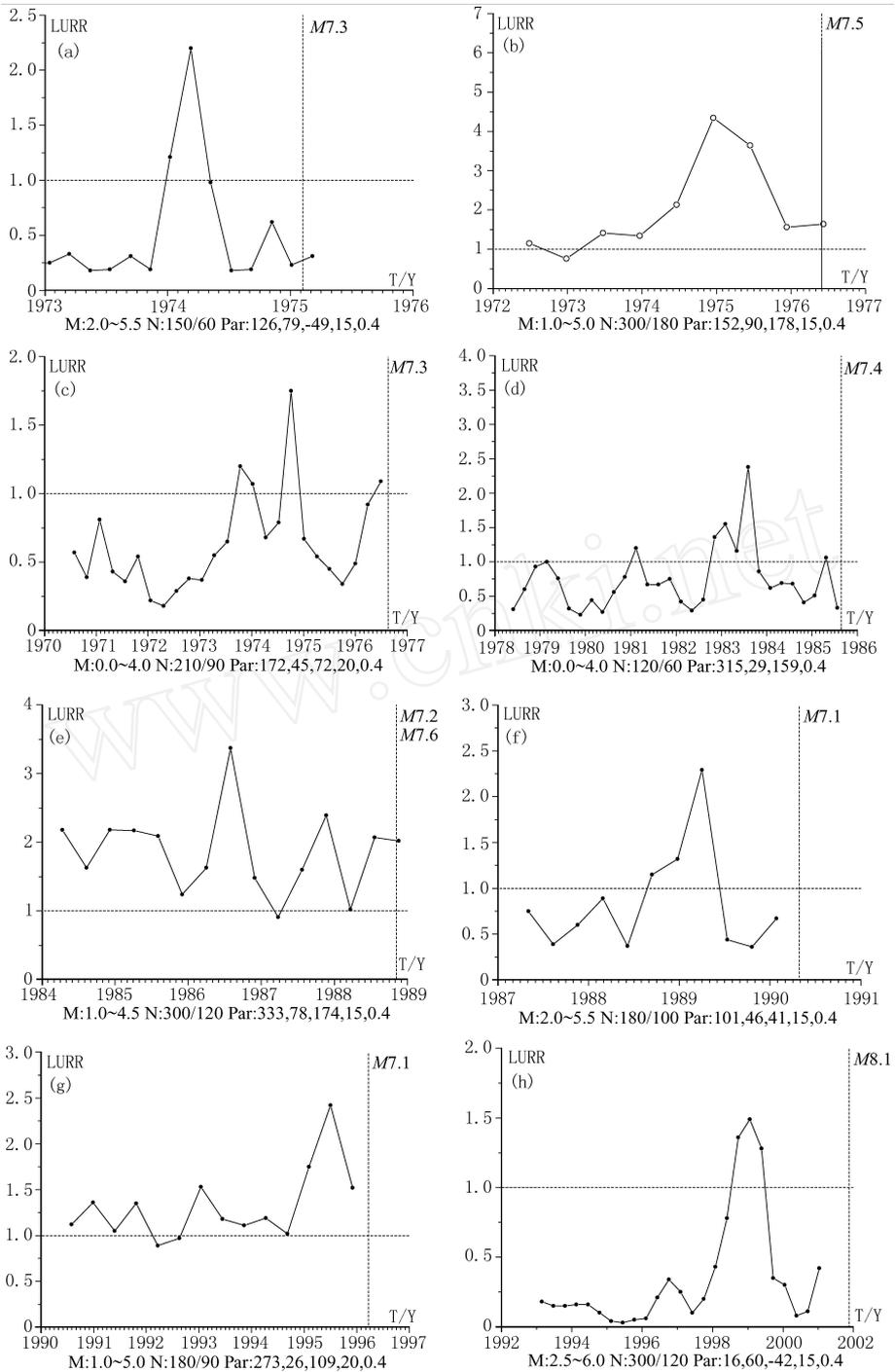


图 5 中国大陆地区 7 级以上地震震前的加卸载响应比演化曲线

- (a) 海城地震 (1975-02-04); (b) 龙陵地震 (1976-05-29); (c) 松潘地震 (1976-08-23); (d) 乌恰地震 (1985-08-23); (e) 澜沧地震 (1988-11-06); (f) 共和地震 (1990-04-26); (g) 伽师地震 (1996-03-19); (h) 昆仑山地震 (2001-11-14)

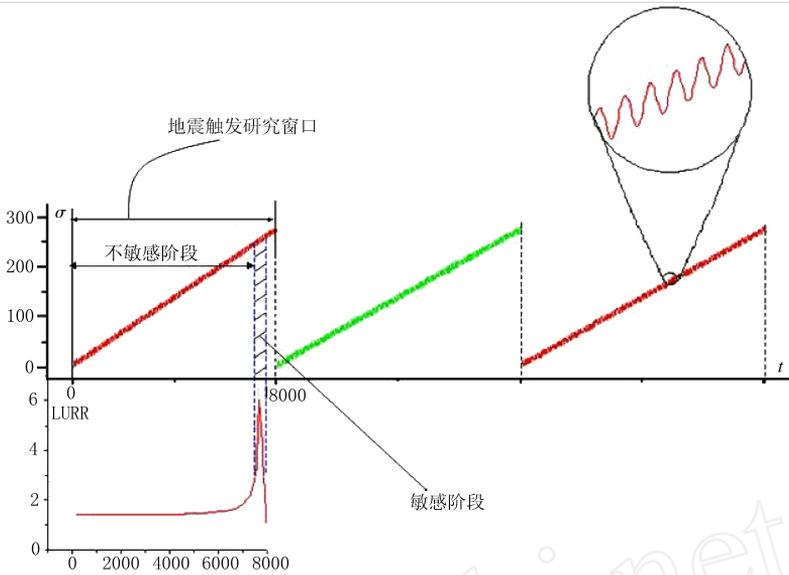


图 6 地震与潮汐应力的相关性和加卸载响应比之间的关系示意图

大于 1, 图 6 是这个过程的示意图。因为高响应比值 (明显大于 1) 的区域仅是孕震区域 (震中周围的区域), 而且持续的时间也很短 (是指强震发生前很短的持续时间, 这个“短”是指相对于两个强发生的时间间隔来说的), 而关于潮汐对地震触发效应的研究包括的时间段都都非常长, 这个时间段可能跟地震发生的周期差不多; 空间上包括的区域也很大, 通常比孕震区域大很多。这样地震发生与固体潮之间没有明显的一致性就很自然了。换句话说, 敏感时间段只占整个时间窗非常小的一段, 敏感空间域也只是整个区域很小的一部分, 而大部分科学家用整个时间窗和空间窗来研究潮汐触发地震这类问题。

### 2 数值模拟

最近几年有很多关于加卸载响应比的数值模拟<sup>[32-37]</sup>。固体点阵模型、有限元模型<sup>[38]</sup>、链网模型<sup>[39]</sup>等都用来模拟非均匀脆性介质的损伤演化与破坏, 同时也用来计算介质宏观破坏前加卸载响应比的演化情况, 这种宏观破坏类似于自然界的强震。

图 7 是 MORA 等在文章中给出的结果<sup>[32]</sup>。模拟结果表明加卸载响应比的值会随着载荷的增加而升高, 然后升高到峰值, 在主破裂发生之前, 加卸载响应比值急剧下降。这些结果与震例检验中的加卸载响应比的演化是非常一致的, 这些结果也证明了加卸载响应比作为灾变前兆的正确性。文章得出这样的结论: “结果表明加卸载响应比为灾变破坏提供了一种好的前兆, 同时也激发人们对其物理机制进行深一步的研究。这些结果给地震预测研究的前景带来了鼓舞, 也为用先进的数值模型来探索地震的物理机理带来了希望”。

最近的一篇文章<sup>[36]</sup>, 对加卸载响应比进行了统计研究并得出如下结论: “统计研究证实了 MORA 的结果具有很强的统计性”。

### 3 关于加卸载响应比的实验研究

关于加卸载响应比的实验研究也有很多<sup>[40-43]</sup>。施行觉等<sup>[41]</sup>在上世纪 90 年代初, 就完成了岩石破坏过程中加卸载响应比演化的实验研究, 实验结果与理论预测完全一

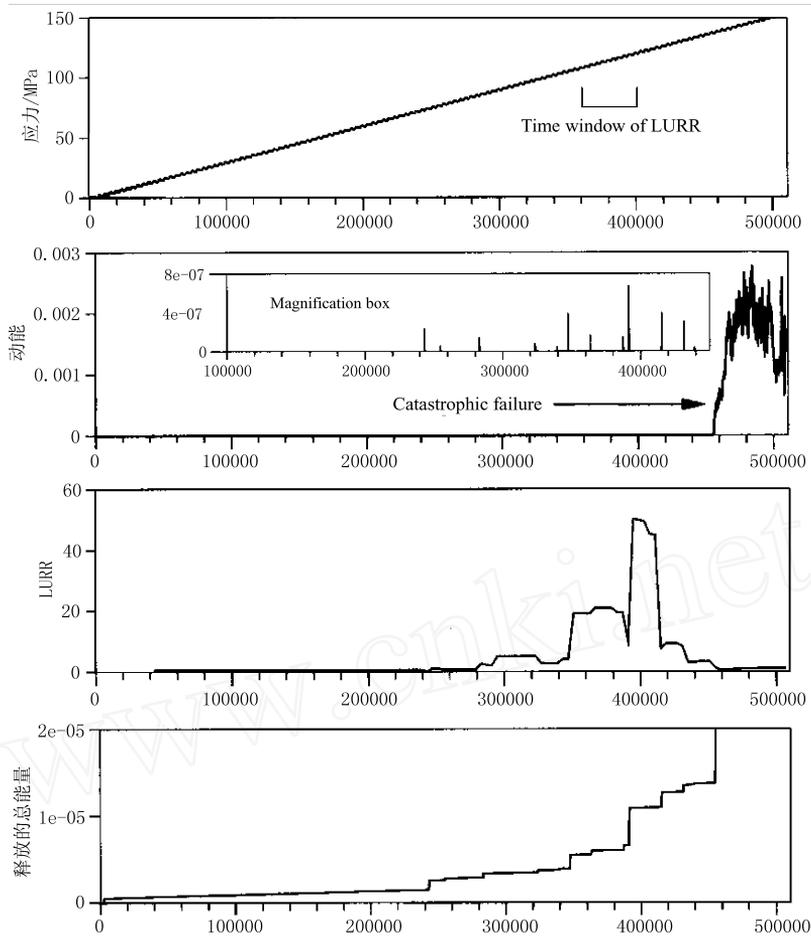


图 7 用 SLM 模型模拟的 LURR 变化规律

致，当应力比较小的时候，加卸载响应比值接近 1，然后超过弹性阶段，响应比的值升高，而且在破裂发生之前响应比的值升高非常明显。

在岩石力学实验中，采用声发射 (AE) 监控，这样就有可能监测到岩石试样中裂纹的生长，可以观察试样的损伤演化、临界状态的来临。声发射研究与地震学具有很大的相似性或者有很多相同的部分，两者都涉及到应力波的产生、传播，虽然两者具有不同的几何尺寸和不同的频率范围。基于这些认识，我们通过国际合作的方式 (有中国，俄罗斯，澳大利亚，日本的科研人员参加了实验)，分别在 2001 年、2003 年完成了大、中

尺度的岩石破坏声发射实验。这些实验的情况和部分成果曾经在一些文章中介绍过<sup>[41, 43-44]</sup>。

岩石试样是长方体，几何尺寸见图 8，试件长度达 105 厘米，包括四种岩石 (花岗岩、片麻岩，砂岩、大理石)。

对试件采用双向加载，轴向应力为  $\sigma_1$ ，侧向应力为  $\sigma_2$ ，而另一个主应力  $\sigma_3$  为 0，这样就有：

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 = 0$$

换句话说，这是一个三向应力状态，在这种应力状态下，大部分试件是剪切破坏。

为了模拟日月引起的固体潮应力，在试件上施加了一个常加载率的轴向压应力，用

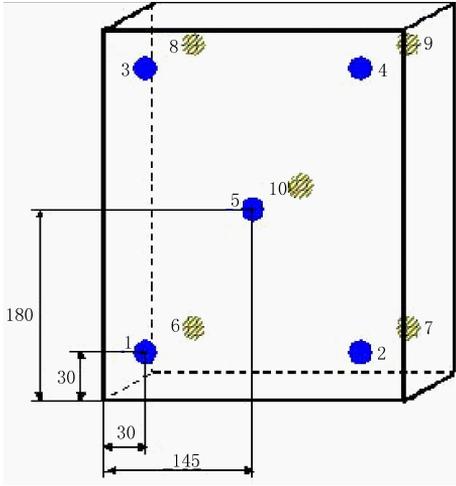


图 8 试样的几何尺寸,声发射探头的分布

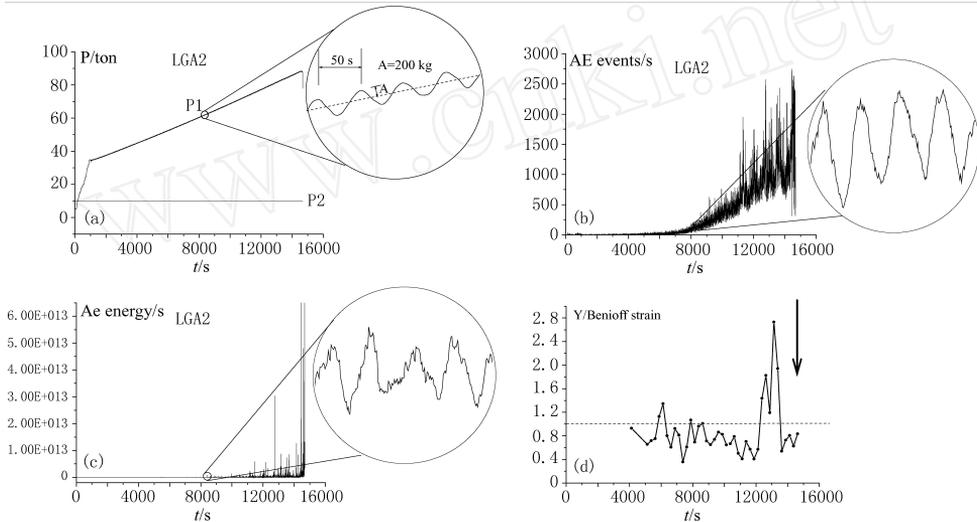


图 9 (a)实验中典型的加载历史;(b)声发射率;(c)声发射能量率;(d)加卸载响应比的演化

自身的演化规律,对外界扰动不再敏感,所以加卸载响应比会在地震发生前夕或者是岩石试样灾变破坏之前迅速下降。

一些科研人员对与加卸载响应比相关的临界敏感性现象进行了研究<sup>[4, 48]</sup>。非均匀脆性介质的损伤破坏过程的数值模拟也表明在灾变发生之前敏感性也会出现一个峰值,这种现象跟加卸载响应比的演化是相同的(见文献[49]中图 2c、3a)。

#### 4 地震预测

加卸载响应比方法很容易在理论上被人

来模拟构造应力,再叠加一个微小的扰动应力,用来模拟固体潮应力。加载过程与实验结果见图 9。根据实验数据计算出加卸载响应比,响应比值从 1 附近开始升高,逐渐达到峰值,然后在宏观破裂发生之前迅速下降。实验结果与地震预测曲线符合的很好。

这里将讨论我们关注的另一个问题:为什么在地震发生前加卸载响应比值会迅速下降呢?

根据我们的了解,加卸载响应比的峰值揭示的是岩石试件宏观裂纹的形成<sup>[45, 38]</sup>或者地震成核的开始<sup>[46, 47]</sup>,峰值以后,系统就进入“自驱动”的状态,那就是说它开始遵循

接受,同时实验研究和数值模拟也证明了它的正确性,震例检验的效果也是令人满意的。加卸载响应比理论的最终目标是地震预测实践。从 1993 年到 1998 年,用加卸载响应比方法进行地震预测的统计结果在文献中的表 1 中列出<sup>[16]</sup>。在预测的 18 个震例中,12 个震例是预测准确的,6 个没有预测准确(预测的地震没有发生),没有漏报的地震(强震发生了但没有做出预测)。成功的震例包括 1994 年的北岭地震和关西地震(1996-09-11,  $M_s$  6.6, 35.5°N, 140.9°E)<sup>[49]</sup>。

用加卸载响应比方法进行地震预测的效果越来越好,这一点是非常令人鼓舞的。近年来,尤其是从2003年到2005年,我们用加卸载响应比方法进行中期地震预测取得较大的突破。图10是2003年年底计算出来的

中国大陆地区加卸载响应比异常区域的分布图,在这些区域,次年(2004年)发生5级以上的可能性非常大。这个结果发表在“中国大陆强震趋势研究2004年度”,中国地震局地震分析预测中心出版,282-285页<sup>[5]</sup>,这

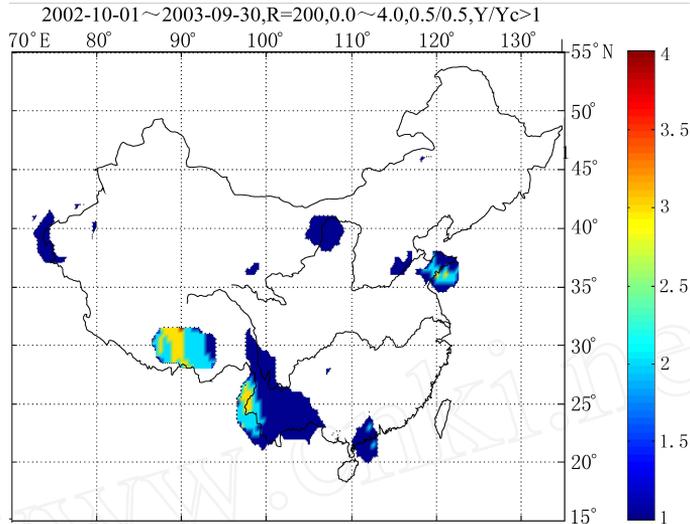


图10 2003年中国大陆地区加卸载响应比异常区域  
(次年 - 2004年 5级以上地震很可能发生在这些区域)

本书是北京地震出版社2003年年底出版的。图11是2004年发生在中国大陆地区5级以上地震的震中分布图,其中的红色实线圆圈表示发生在地震数据充足可以计算加卸载响应比值的地区的5级以上地震(总共17个),绿色虚线圆圈表示发生在由于地震资料不足不能计算加卸载响应比值的地区的5级以上地震(总共16个)。按照地震界中的约定和习惯,发生在资料匮乏地区的地震在统计上可以忽略,因此17个中的15个(88%的比例)地震落在了加卸载响应比的异常区域内。2005年13个5级以上地震中的12个(92%的比例)发生在加卸载响应比的异常区域(图11)<sup>[41]</sup>。唯一漏报的是九江地震,震级5.7(2005年11月26日),没有发生在加卸载响应比异常区域,而落在地震资料匮乏的区域<sup>[43]</sup>。

值得一提的是2005年10月8日发生的

震级为7.8级的巴基斯坦地震的预测情况。我们是从2003年开始研究欧亚地震带(30°-50°N, 30°-90°E)的地震趋势的。研究结果发表在期刊“力学与实践”<sup>[41]</sup>和“超级计算通讯”,后者是由中国科学院计算机网络信息中心主办的一个刊物,2005年10月8日发生的巴基斯坦地震准确地落在高响应比区域(图12)。

最近对美国西部地区(30°~50°N, 100°~130°W)进行了加卸载响应比的空间扫描(图13),图中给出了这个地区2003年(2003年1月1日~2003年12月31日)的加卸载响应比异常区域,还有2004年发生在该地区的5级以上地震的震中分布图(红色圆圈)。所有这些5级以上地震都落在加卸载响应比异常区域内。

图14给出的是用不同的空间窗进行空间扫描得到的加卸载响应比异常区域分布

图<sup>[23]</sup>。

我们得到的加卸载响应比进行空间扫描的两个定标关系：孕震区域的空间尺度（圆形区域的半径  $R$ ）由未来发生地震的震级来确定（图 2）<sup>[21, 22]</sup>：

$$\text{Log } R \text{ (km)} = 0.087 + 0.34M \quad (8)$$

加卸载响应比曲线的峰值与地震发生时刻之

间的时间（月）也由地震震级来确定<sup>[23]</sup>：

$$T \text{ (month)} = 60(1 - 2.3 \times 10^{-0.08M}) \quad (9)$$

根据这些定标关系式（8）、（9），对高响应比值的区域进行如下的地震趋势预测：

（1）图 14(a)所示的加卸载响应比异常区内可能在 2005 年 7 月 31 日之前发生 5.0 级左右的地震。

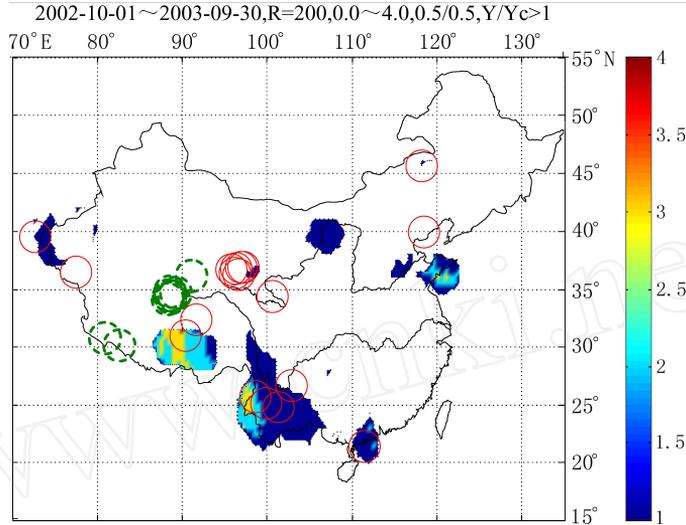


图 11 2004 年中国大陆地区 5 级以上地震震中分布图，其中的红色实线圆圈表示发生在地震数据充足可以计算加卸载响应比值的地区的地震，绿色虚线圆圈表示发生在由于地震资料匮乏不能计算加卸载响应比值的地区的地震

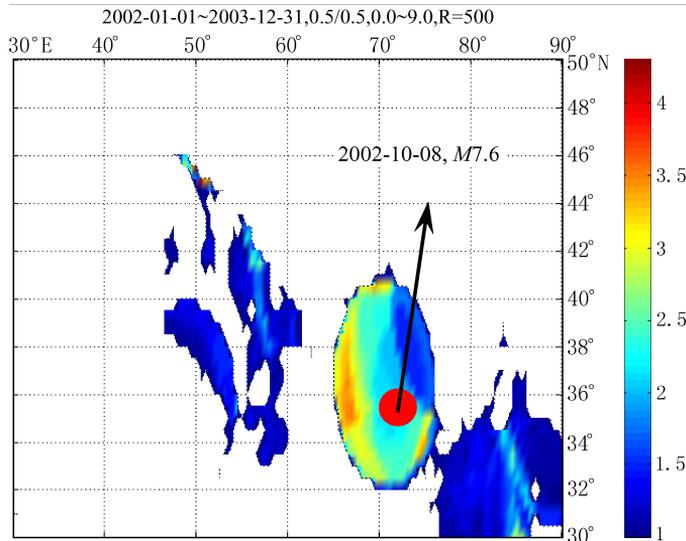


图 12 欧亚地震带的加卸载响应比空间扫描结果

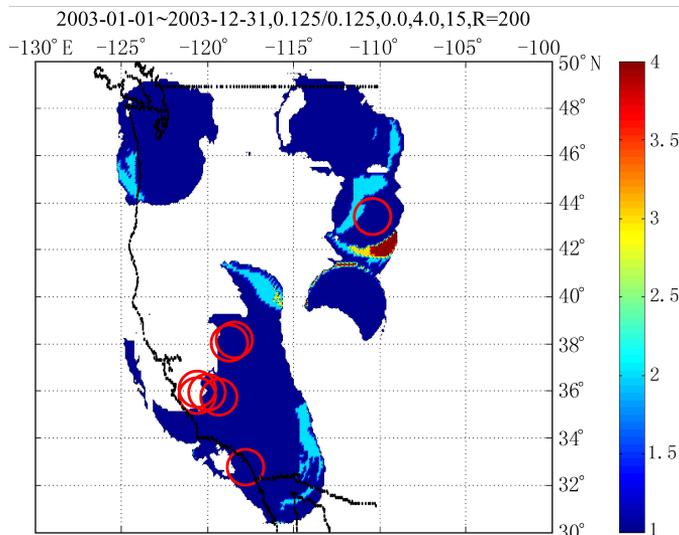


图 13 美国西部地区的加卸载响应比异常区域,实线圆圈表示 5 级以上地震

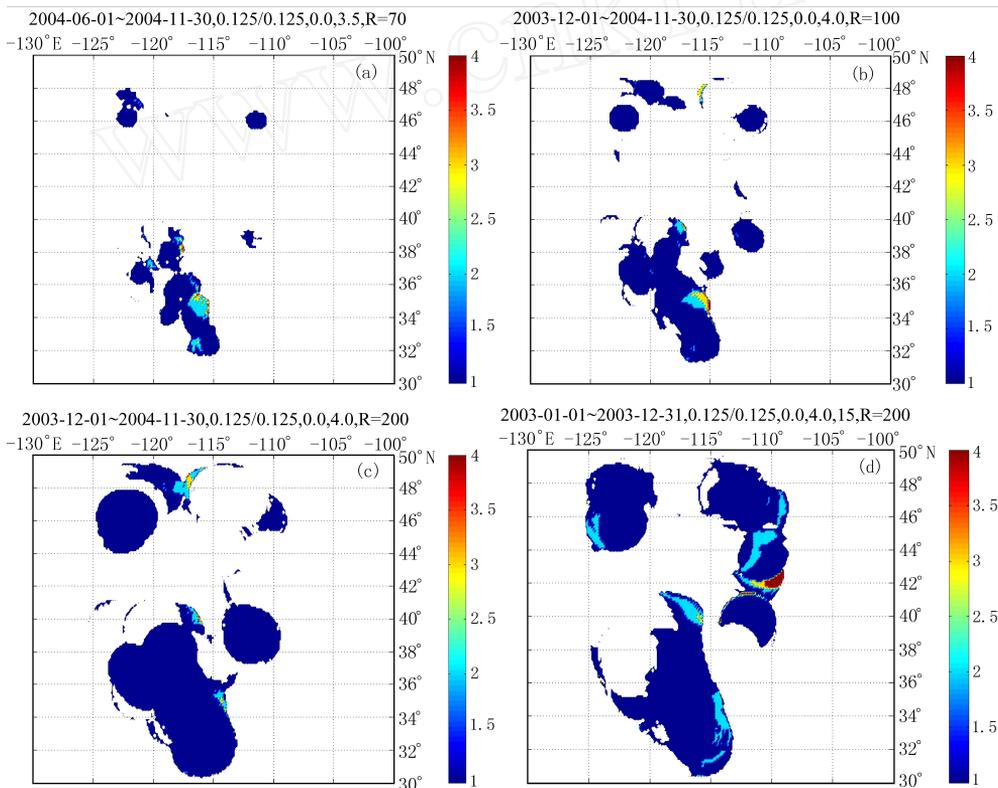


图 14 美国西部地区不同时间窗、空间窗的加卸载响应比异常区域

(a)  $R = 70$  km; (b)  $R = 100$  km; (c)  $R = 200$  km; (d)  $R = 200$  km 时间窗不同

(2) 图 14(b)所示的加卸载响应比异常区内可能在 2005 年 12 月 31 日之前发生 5.5

级左右的地震。

(3) 图 14(c)所示的加卸载响应比异常

区内可能在 2006 年 12 月 31 日之前发生 6.5 级左右的地震。

(4) 图 14(d)所示的加卸载响应比异常区内可能在 2005 年 12 月 31 日之前发生 6.0 级左右的地震。

### 5 加卸载响应比的随机分布

地震孕育和发生的过程不仅受确定的动力学规律控制，也会受到一些随机的或无规律的因素影响。为了判断在特定的可信度条件下 (即 0.90, 0.95, 0.99)，响应比值  $Y$  达到多高就可能发生地震，我们研究了随机因素对加卸载响应比的影响 (ZHUANG and YN, 1999)。

用泊松模型来描述地震数。假设一个地区的地震发生遵循下面的基本假设：

(1) 地震的发生服从参数为  $\lambda$  的泊松过程，发生在时间间隔  $[0, T]$  的地震数目是一个期望值为  $\lambda T$  的泊松分布，即：

$$\Pr\{N = n\} = \frac{(\lambda T)^n}{n!} e^{-\lambda T} \quad (10)$$

(2) 震级分布遵循 Gutenberg-Richter 规律，即以指数分布为概率密度函数。

(3) 地震发生在加载段和卸载段的概率相等，均为 1/2。

基于上面的假设，计算加卸载响应比值分布和可信度的计算格式如下：

(1) 对每一个时间间隔 (单位时间间隔)，分别计算服从参数为  $\lambda/2$  的泊松分布的两个随机变量  $P, Q$ ，其中  $\lambda$  为地震发生率。 $P, Q$  分别表示单位时间间隔内加载地震数和卸载地震数。

(2) 根据所给的  $b$  值，分别计算加载地震  $P$  的震级和卸载地震  $Q$  的震级。

(3) 计算加卸载响应比  $Y$  的值。

(4) 重复步骤 1—3 一百万次，并画出  $Y$  值的柱状图，该图表示的就是加卸载响应比的概率密度函数 (p. d. f.)，图 15 给出的就是  $b=1, \lambda T=40, m=1/2$  时的结果。

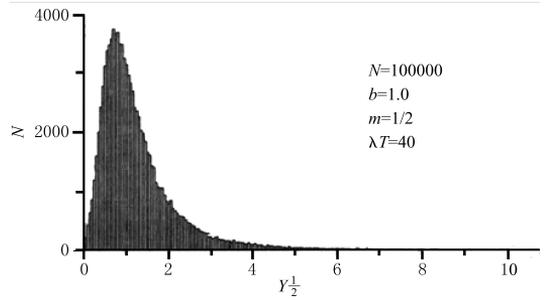


图 15 给定条件下  $Y$  的随机分布

(5) 分别从加卸载响应比的概率密度函数中找出可信度为 0.90, 0.95, 0.9 的可信度带。计算结果见图 16。举个例子，取地震发生率  $\lambda = 50, b = 1, m = 1/2$ ，可信度为 95%，判断响应比是否异常的值就是 2.4，这数值用  $Y_c$  表示，若响应比值大于等于  $Y_c$ ，就表示异常。

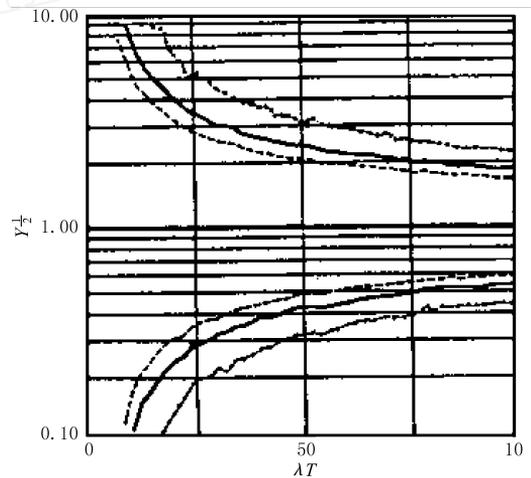


图 16 根据泊松模型计算的加卸载响应比  $Y$  的可信度和地震发生率的关系

结果表明加卸载响应比值是由泊松模型中的事件发生率  $\lambda$  和参数  $S (S = b/m, \text{其中 } b \text{ 是 Gutenberg-Richter 规律中的参数, } m \text{ 是式 (6) 中的幂指数})$  控制的， $\lambda$  和  $S$  的值越大， $Y$  值就越稳定，或者说越集中在 1 附近。

今后就用参数  $Y/Y_c$  代替  $Y$  来判断加卸载响应比值是否异常。当  $Y/Y_c > 1$  时就认为加卸载响应比值异常。 $Y/Y_c$  的值越大，则该

区域在该时间窗内发生强震的可能性越大。

## 6 展望

经过 20 年的发展, 加卸载响应比已经成为地震预测领域一种很有前景的方法, 并且还有很大的发展和提升空间<sup>[52, 43]</sup>。

加卸载响应比是一个能表征强震临近的参数, 是地震预测的新方法。不仅如此, 加卸载响应比还可以用来预测水库地震<sup>[53]</sup>, 矿震<sup>[54]</sup>, 滑坡<sup>[55, 56]</sup>, 以及其它临界现象和损伤演化的预测, 以至于对大型工程结构的健康检测。

## 致谢

作者衷心感谢国家重点基础研究发展规划项目 No. 2004CB418406, 004DKA50740,

2002CB412706, 国家自然科学基金委项目 No. 10232050, No. 10572140, 中国科学院计算机网络信息中心超级计算中心项目 (NF105-SCE-2-02)以及中国地震联合基金 (305016) 的资助。

作者非常感谢很多老师, 朋友, 同事, 领导和研究生们的支持、鼓励和帮助。他们有钱学森, 郑哲敏, 秦馨菱, 白以龙, 梅世蓉, 陈章立, 夏蒙芬, 梁乃刚, 柯孚久, 迟学斌, 李洁, 沈正康, Keiiti Aki, Leon Knopoff, Mora Peter, Bernard Minster, Dave Jacksen, Takuo Ma-ryama,

(作者电子信箱, 尹祥础: xcyin@public.bta.net.cn, 译者电子信箱, 张浪平: zhanglp@inn.mech.ac.cn)

## 参考文献

- [1] Meakin P. Model for material failure and deformation. *Science*, 1991, 252: 226-234
- [2] Bai Y L, Lu C S, Ke F J, et al. Evolution Induced Catastrophe. *Phys Lett*, 1994, A185: 196-201
- [3] Krajcinovic D. *Damage Mechanics*. Elsevier, Amsterdam, 1996
- [4] Xia M F, Wei Y J, Ke F J and Bai Y L. Critical sensitivity and trans-scale fluctuations in catastrophe rupture. *Pure Appl Geophys*, 2002, 159(10): 2491-2509
- [5] Lamaitre J. Formulation and identification of damage kinetic constitutive equations, in "Continuum damage mechanics" (edited by Krajcinovic D.), Springer-Verlag, Wien, New York, 1987
- [6] Oda M. A Method for Evaluating the Effect of Crack Geometry on the Mechanical Behavior of Cracked Rock. *Mass Mech Mater*, 1983, 2: 163-171
- [7] Kanamor IH and Anderson D L. Theoretical Basis of Some Empirical Relation in Seismology. *Bull Seism. Soc. Am*, 1975, 65: 1073-1096
- [8] Melchier P. *The Tide of the Planet Earth*. Pergamon Press, New York, 1978
- [9] Yin X C. A New Approach to Earthquake Prediction. *Earthquake Research in China*, 1987, 3: 1-7 (in Chinese with English abstract)
- [10] Yin X C and Yin C. The Precursor of Instability for Nonlinear System and Its Application to Earthquake Prediction. *Science in China*, 1991, 34: 977-986
- [11] Yin X C. A New Approach to Earthquake Prediction. (*Russia's Nature*), 1993, 1: 21-27 (in Russian)
- [12] Yin X C, Yin C and Chen X Z. The Precursor of Instability for Nonlinear System and Its Application to Earthquake Prediction—the Load-Unload Response Ratio Theory. In: *Non-linear Dynamics and Predictability of Geophysical Phenomena* (eds Newman, W. I., Gabre-lov, A., and Turcotte, D. L.), *Geophysical Monograph*, 1994, 83, UGG Volume 18: 55-60

- [13] Yin X C, Chen X Z, Song Z P and Yin C. The Load-Unload Response Ratio Theory and its Application to Earthquake Prediction. *Journal of Earthquake Prediction Research*, 1994, 3: 325-333
- [14] Maruyama T. Earthquake Prediction in China. *Zisin*, 1993, 19(5): 68-76 (in Japanese)
- [15] Yin X C, Chen X Z, Song Z P, Yin C. A New Approach to Earthquake Prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) Theory. *Pure Appl Geophys*, 1995, 145: 701-715
- [16] 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. *Pure Appl Geophys*, 2000, 157: 2365-2383
- [17] Harris R A. Introduction to Special Section: Stress Triggers, Stress Shadows, and Implication for Seismic Hazard. *J. Geophys Res*, 1998, 103: 24347-24358
- [18] Reasenberg G R A and Simpson R W. Response of Regional Seismicity to the Static Stress Change Produced by the Loma Prieta Earthquake. *Science*, 1992, 255: 1687-1690
- [19] Harris R A. Earthquake stress triggers, stress shadows, and seismic hazard. *Current Science*, 2000, 79: 1215-1225
- [20] Vidali J E, Agnew D C, Johnston M J S, et al. Absence of Earthquake Correlation with Earth Tides: An Indication of high Preseismic Fault Stress Rate. *J. Geophys Res*, 1998, 103: 24567-24572
- [21] 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, *Pure Appl Geophys*, 2002, 159: 2511-2524
- [22] Yin X C, Peng K Y, Yu H Z, et al. Scaling of LURR Critical Region. 3rd ACES Workshop, May 5-10, 2002, Island of Maui, Hawaii, U. S. A.
- [23] Zhang H H, Yin Xiangchu and Liang Naigang. The spatial variation of LURR and seismic tendency in western United States. *Earthquake Research in China*, 2005, 19(3): 338-345
- [24] KNOPOFF L. Earth Tide as a Triggering Mechanism for Earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1964, 54: 1865-1870
- [25] Enter D. Tidal Triggering of Earthquakes and Volcanic Events, in (W LHELM, H., et al. ed.,) *Tidal Phenomena*, Springer-Verlag, 1997: 293-309
- [26] Somette A and Somette D. Earthquake rupture as a critical point: Consequences for telluric precursors. *Tectonophysics*, 1990, 179: 327-334
- [27] Somette D and Sammis C G. Complex critical exponents from renormalization group theory of earthquake prediction. *J. Phys. I France*, 1995, 5: 607-619
- [28] Huang Y, Saleur H, Sammis C G, et al. Precursor, Aftershocks, Criticality and Self-organization Criticality. *Europhys Lett* 1998, 41: 43-48
- [29] Jaume S C and Sykes L R. Evolving towards a critical point: a review of accelerating seismic moment/energy release prior to large and great earthquakes. *Pure Appl Geophys*, 1999, 155: 279-306
- [30] Mora P, Place D, Abe S, et al. Lattice solid simulation of the physics of fault zones and earthquakes: the model, results and directions, in: *Geocomplexity and the Physics of Earthquakes* (Eds Rundle, J. B., Turcotte, D. L. & Klein, W., AGU, Washington), 2000: 105-125
- [31] Rundle J B, et al. Precursor Seismic activation and Critical-point Phenomena, *Pure appl Geophys*, 2000, 157: 2165-2182
- [32] Mora P, YWANG, C YN, et al. Simulation of Load-unload Response Ratio and Critical Sensitivity in the Lattice Solid Model. *Pure Appl Geophys*, 2002, 159: 2525-2536
- [33] Wang Y C, Yin X C and Wang H T. The Simulation of Rock Experiment on Load/Unload Response for Earthquake Prediction. *Earthquake Research in China*, 1998, 14(2): 126-130
- [34] Wang Y C, Yin X C and Wang H T. Numerical Simulation on Load/Unload Response Ratio (LURR) Theory.

- ACTA Geophysica Sinica, 1999, 42: 669-676
- [35] Wang Y C, Yin X C, Ke F J, et al Simulation of Rock Failure and Earthquake Process on Mesoscopic Scale Pure Appl Geophys, 2000, 157: 1905-1928
- [36] Wang Y C, Mora P, Yin C, et al Statistical Testes of Load-Unbad Re-sponse Ratio Signals by lattice Solid Model: Implication to Tidal Triggering and Earthquake Pre-diction Pure Appl Geophys, 2004, 161: 1829-1839
- [37] Wang Y C. Simulation of earthquake process and studies on predictability. Post-Doctor Report, Institute of Mechanics, CAS, 2000000 (in Chinese)
- [38] Rong F. Multiscale Simulation of damage Evolution in Heterogeneous Brittle Media PhD thesis of the Graduate School, China Academy Science, 2006
- [39] Liang N, Liu Q, Li J, et al A Chains Network Model Simulating Meso-Mechanics Behavior and Micro Damage Evolution of In Situ Reinforced Ceramics In: Advanced in Engineering Plasticity & Its Applications, (eds Abe, T and Tsuta, T) (Pergamon, Amsterdan) 1996: 141-146
- [40] Shi X, Xu H, Wan Y, et al The Rock Fracture under Simulated Tide Force-Laboratory Study on the Loading and Unloading Response Ratio (LURR) Theory ACTA GEOPHYSICA SINICA, 1994, 37: 631-636
- [41] Yin X C, Zhang H H, Yu H Z, et al Prediction of seismic tendency of Chinese mainland in 2004 in terms of LURR. In book "The research on seismic tendency of China in 2005", 282-285, (edited by Center for Analysis and Prediction, CSB), Seismological Press, Beijing, 2004 (in Chinese)
- [42] YYu H Z Experimental research on precursors of brittle heterogeneous media and earth-quake prediction methods PhD Thesis, Institute of Mechanics, CAS, 2004 (in Chinese)
- [43] Zhang H H. Prediction of Catastrophic failure in Heterogeneous Brittle Media-Study and practice of Load/Unload Response Ratio (LURR). PhD thesis, Graduate School, CAS, 2006
- [44] . . . (Xiang-chu YN). , , , 67, No. 6. 2003, 877-881 (in Russian)
- [45] Jaeger J C and Cook N G W. Fundamentals of Rock Mechanics Chapman and Hall, London, 1976
- [46] Ohnaka M and Kuwahara Y. Characteristic features of local breakdown near a crack-tip in the transition zone from nucleation to unstable rupture during stick-slip shear failure Tectonophysics, 1990, 175: 197-220
- [47] Dieterich J H. Earthquake nucleation on faults with rate- and state-dependent strength Tectonophysics, 1992, 211: 115-134
- [48] Zhang X H, Xu X H, Xia M F, et al Critical sensitivity in driven nonlin-ear threshold systems Pure Appl Geophys, 2004, 161: 1931-1944
- [49] Yin X C, Song Z P and Wang Y C. The Temporal Variation of LURR in Kanto and Other Regions in Japan and Its Application to Earthquake Prediction Earthquake Research in China, 1996, 10: 381-385
- [50] Yin X C, Zhang H H, Yu H Z, et al Prediction of seismic tendency of Chinese mainland in 2004 in terms of LURR, in book "The research on seismic tendency of China in 2004". (edited by Center for Analysis and Prediction, CSB), 2003, 282-285, Seismological Press, Beijing, 2003 (in Chinese)
- [51] Zhuang J C and Yin X C. Random Distribution of the Load/Unbad Response Ratio (LURR) Under Assump-tions of Poisson Model Earthquake Research in China, 1999, 15: 128-138
- [52] Yicn C. Exploring the Underlying Mechanism of Load/Unbad Response Ratio Theory and Its Application to Earthquake Prediction PhD Thesis, The University of Queensland, Australia, 2005
- [53] Chen X Z and Yin X C. Application of LURR Theory to the Earthquake Prediction for Reservoir-Induced Earth- quakes Earthquake Research in China, 1995, 11: 361-367

- [54] 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 Pure Appl Geophys, 2004, 161: No 11 ~ 12, 2405-2416
- [55] Xu Q and Huang R Q. Investigation on precursor of slope instability in term of LURR. Chinese Journal of Geological Disasters, 1995, 6(2) (in Chinese)
- [56] Jiang T. The Analysis of landslide in terms of Load/Unload Response Ratio. PhD Thesis, Institute of Geology, Chinese Seismological Bureau (in Chinese), 2004  
(译自: LURR's Twenty Years and its Perspective, Pure and Applied Geophysics Vol 163, pp. 2317-2341, 2006. 张浪平译, 尹祥础校)

www.cnki.net