

地震预测与地震控制¹⁾尹祥础²⁾

(中科院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

(中国地震局地震预测研究所, 北京 100036)

摘要 从力学角度看, 地震的孕育过程实质上是孕震区介质的损伤演化过程. 但解决与地震有关力学问题与工程中的力学问题有许多不同之处. 基于此提出了加卸载响应比作为一种地震预测的新途径. 本文简述了加卸载响应比的基本概念、实际应用及几个最新的结果. 进而讨论了地震控制问题. 地震控制的实质是地壳内应变能释放方式的控制, 探讨了当今科技水平条件下可能用于控制地震的几种方法. 从我们进行的文献调研及预研究看, 地震控制问题不是高不可攀, 无从下手的.

关键词 地震预测, 地震控制, 加卸载响应比

大地震是一种极其惨烈的自然灾害, 它常常导致巨大的人员伤亡及经济损失, 因而被认为是群害之首. 人类采取各种措施以减轻地震灾害, 其中地震预测是重要的一环. 长期以来, 人们梦寐以求地渴望能预测地震. 但地震预测至今仍是世界性的科学难题.

钱学森先生在 1995 年给我的信中地指出: “正确地解决地震学的理论是个力学应用问题”. 笔者在多年的实践中越来越深切地体会到这一点. 地震孕育过程的物理实质就是震源区内介质的变形、损伤并导致失稳的过程, 所以地震的孕育过程就是震源区介质的损伤演化破坏过程. 这一过程主要是力学过程. 抓住这一点就抓住了问题的本质.

但是, 我们在研究地震预测时遇到的问题和通常的力学问题有所不同. 通常力学问题的解决需要知道其本构关系、边界条件、初始条件以及历史背景(流变介质). 但是在地震孕育过程中它们却是未知的或者不完全知道的. 我们知道的只是地壳中某些物理量的变化. 根据这一思路我们提出了一个定量地表征地震的孕育过程的参数—加卸载响应比.

众所周知, 本构曲线从宏观上比较全面地刻划了材料受力后全过程的力学性能. 如果使材料的受力单调增加, 材料将分别经历弹性变形、损伤、失稳等过程. 弹性变形的最本质特征为其可逆性, 即加载过程和卸载过程是可逆的, 因而其加载响应率和卸载响应率相同. 损伤过程的本质特征与弹性过程相反, 具有不可逆性. 反映在本构曲线上, 其加载响应率大于卸载响应率, 这种差异反映了材料的损伤或劣化. 加卸载响应比理论的出发点即基于此. 图 1 中, 设载荷增量为 ΔP , 相应的响应的增量为 ΔR , 定义响应率 X 为

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

¹⁾ 本文得到 NSFC(编号: 19732060), 中国科学院计算机网络信息中心超级计算中心(INF105-SCE-2-02) 及国家 973 项目(编号: 2002CB412706) 的资助

²⁾ Email: xcyin@public.bta.net.cn

对系统进行周期性加载和卸载，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

$$Y = \frac{X_+}{X_-} \tag{2}$$

对于弹性变形， $X_+ = X_- = C$ ，因而 $Y = 1$ 。而对于损伤过程， $X_+ > X_-$ ， $Y > 1$ ；当系统失稳时， $Y \rightarrow \infty$ 。

从上述定义不难看出，加卸载响应比 Y 值可以定量地刻划非线性系统或逼近失稳的程度。地震及许多其它地质灾害，如滑坡、岩爆及火山喷发等均为一定尺度岩体的失稳现象，因此加卸载响应比理论为地质灾害的预测开辟了一条新的途径。

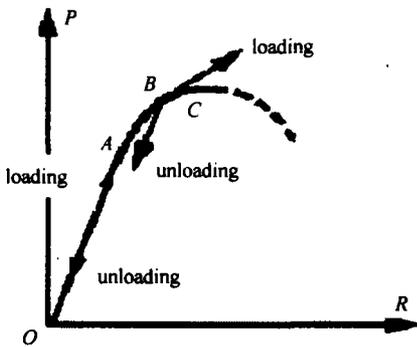


图1 加卸载响应比概念与地质材料本构曲线

从损伤力学的角度来说，地震孕育过程是指震源区介质的损伤演化过程。在损伤力学中，损伤过程可以用损伤变量 D 来定量地刻划。定义损伤变量 D 的方法有多种，最直接的一种，是选用弹性模量 M 的变化率来定义损伤变量 D ， M 为一四阶张量。但对于简单的应力状态，常选用某一标量弹性模量的变化率定义损伤变量 D ，例如 Lemaitre 定义 D 为

$$D = \frac{E_0 - E}{E_0} = 1 - \frac{E}{E_0} \tag{3}$$

式中 E_0 为初始状态（未受损伤）的模量， E 为受损伤的模量。材料未受损伤时， $E = E_0$ ， $D = 0$ ；材料完全破坏时， $E = 0$ ， $D = 1$ 。

由 Y 的定义 (1, 2)

$$Y = \frac{X_+}{X_-} = \frac{\Delta\epsilon_+}{\Delta\sigma_+} / \frac{\Delta\epsilon_-}{\Delta\sigma_-} = \frac{E_-}{E_+}$$

考虑到材料在卸载时的模量一般都近似等于初始模量，即 $E_- = E_0$ ，而 $E_+ = E$ ，于是有

$$D = 1 - \frac{E}{E_0} = 1 - \frac{1}{Y} \tag{4}$$

当 $Y = 1$ 时， $D = 0$ ，说明材料未受损伤，处于稳定状态；当 $Y \rightarrow \infty$ 时， $D = 1$ ，说明材料完全损伤。

多数情况下，当 $D = D_c < 1$ 时，材料已破坏， D_c 称为临界损伤变量。由式 (4) 可进一步导出

$$Y_c = \frac{1}{1 - D_c} \tag{5}$$

式 (4) 和式 (5) 说明加卸载响应比 Y 与损伤变量 D 之间存在着密切的关系。由于本构关系（或本构曲线）是从宏观上反映材料的受力过程，从式 (2) 的定义及式 (4) 和式 (5) 的推导过程，可以清楚地看出，加卸载响应比 Y 值可以从宏观上定量地刻划孕震区岩石的损伤演化过程，也就是地震的孕育过程。

具体应用加卸载响应比进行地震预测，还必须解决如下 3 个问题：

(1) 如何进行加载和卸载. 我们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. 好在大自然正好为我们提供了这样的条件, 这就是日、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地变化, 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, 我们编写的程序能准确计算地壳内部任一点在任一时刻由引潮力引起的应力张量.

(2) 判别加载与卸载的准则. 根据大量实验研究, 库仑准则是最适宜的. 根据库仑准则, 断层面的库仑应力 (有效剪应力) 为

$$CFS = \tau_n + f\sigma_n \quad (6)$$

其中, f, τ_n 和 σ_n 分别代表断层面的内摩擦系数、剪应力和正应力. $\Delta CFS > 0$ 时判断为加载, 反之, $\Delta CFS < 0$ 时判断为卸载.

(3) 如何选择响应量. 从固体力学的观点出发, 首先会想到采用应变作为响应. 但是震源处于地下深处 (几公里至几百公里), 人们至今还难以准确测量该处的应变及其它物理参数. 其实即使在室内实验中, 对破坏源处的情况进行观测也是一大难题. 近年来在岩石力学实验研究方面的巨大进展之一是声发射 (AE) 技术的提高与应用. AE 的突出优点在于: ①它是直接来自材料内部破坏时发出的信息; ②可以不用损坏试件, 不必停顿实验就可连续观测到材料内部的破坏过程, 并已用于测定材料的断裂韧度等. 地震学中的地震事件也是一种 AE, 测量地震事件的时、空、强是地震学中最成熟的部分, 地震目录也是最容易得到的资料. 因此, 我们仿照岩石力学实验中的做法, 取地震能量作为响应, 定义加卸载响应比 Y 为

$$Y_m = \left(\sum_{i=1}^{N^+} E_i^m \right)_+ / \left(\sum_{i=1}^{N^-} E_i^m \right)_- \quad (7)$$

式中 E 为地震能量, “+”和“-”分别代表加载和卸载, m 为一个 $0 \sim 1$ 之间的常数, $m = 1$ 时, E_i^m 是该次地震的能量; $m = 1/2$ 时, E_i^m 即为地震学熟知的贝尼奥夫应变; $m = 1/3$ 及 $2/3$ 时, E_i^m 分别代表震源体的线尺度和面尺度; $m = 0$ 时, E_i^m 即地震频次. N^+ 和 N^- 分别为所研究时段加载和卸载地震的总数.

式 (7) 与式 (2) 在形式上是不同的. 目前我们还难以选择震源区的宏观物理参量计算加卸载响应比, 因而以 (7) 式作为替代. 显然, (7) 式为一微观统计量, 以下我们将从细观损伤力学的角度对其物理含义进行解释.

连续介质损伤力学是一种唯象理论, 损伤因子 D 的引入带有一定的经验性. 这类定义无唯一性, 更未与损伤机制挂钩. 近年来, 细观损伤力学为此应运而生, 其任务之一是研究材料的细观损伤 (例如裂纹) 与材料宏观力学性质之间的关系. 它涉及众多裂纹组成的裂纹系的相互作用, 这个问题在断裂力学中尚未彻底解决. 借助于统计力学中的某些方法, 陆续发展了自恰方法、广义自恰方法、微分方法、Mori-Tanaka 方法等. 实际上脆性材料模量的减小是由于裂纹的产生, 因而许多科学家致力于研究材料模量与裂纹的关系. 按 Oda 的工作, 定义材料的柔性模量为

$$\varepsilon_{ij} = M_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (8)$$

则材料的损伤因子 D 定义为柔性模量的变化:

$$M_{ijkl} - M_{ijkl}^0 = (\Delta/4)(\delta_{il}F_{jk} + \delta_{jl}F_{ik} + \delta_{jk}F_{il} + \delta_{ik}F_{jl}) \quad (9)$$

其中, M_{ijkl}^0 表示材料未损伤时的柔度张量, M_{ijkl} 表示材料损伤后的柔度张量, δ_{il} 是 Kronecker 函数, Δ 是应变的函数. F_{ij} 为组构张量, 它是定量地描述裂纹的一种工具, 其定义如下

$$F_{ij} = \frac{\pi N}{V} \int_0^\infty \int_\Omega a^3 D(n_k, a) n_i n_j d\Omega da \quad (10)$$

其中 D 为裂纹分布密度函数, n 表示裂纹法线, Ω 表示球面方位角.

组构张量 F_{ij} 的计算十分复杂, 更加困难的是如何得到计算它的全部参数 (即全部裂纹的大小、位置、形状等). 但是它表明材料模量与裂纹的解析关系.

综上所述, 利用介质对于加载与卸载的差异响应来度量介质损伤的程度或状态, 定义介质对加载的响应率与对卸载的响应率的比值为加卸载响应比 (load-unload response ratio, LURR)^[1~3]. 当介质处于未损伤状态 (理想弹性状态) 时 $LURR = 1$; 当介质发生损伤后 $LURR > 1$, 随着损伤程度的增大, $LURR$ 也增大, 所以 $LURR$ 可以看成是这种特殊条件下的可测量的损伤变量.

同时我们进行了多次岩石破坏的声发射实验研究. 声发射是研究脆性材料损伤演化的良好工具, 它能够连续、实时、无损地监测脆性物体微裂纹的产生与扩展时所发射的应力波, 从而反演出岩石试件内每一个损伤 (微裂纹) 发生的时间、地点、强度、方向、及裂纹面间的相对位移, 这是声发射方法独有的优势. 实验中采用中尺度试件 (360 mm × 300 mm × 20 mm). 为了模拟了地下岩石的复杂受力过程, 采用双向压缩加载方式, 从而得到三向应力状态. 轴向采用循环载荷, 以模拟潮汐力对地球进行的加载和卸载 (图 2).

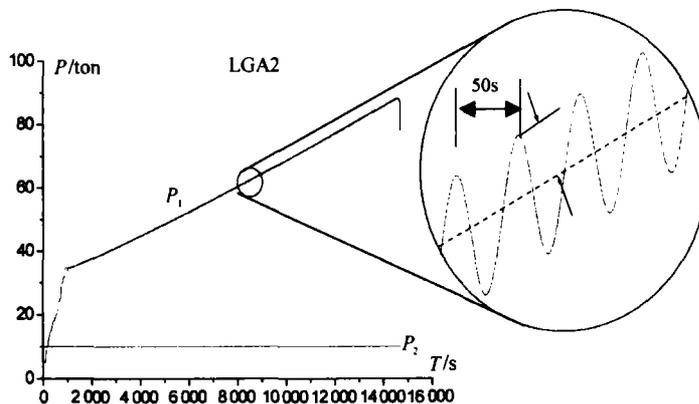


图 2 岩石破坏声发射实验加载过程

实验过程中, 记录到大量的声发射事件 (达上百万个), 包括这些事件的发生地点、发生时间、能量、波幅、上升时间、波形等. 实验结果进一步证实了加卸载响应比 (LURR) (图 3): 在低应力下加卸载响应比 (LURR) 在 1 上下波动, 在试件破坏前夕加卸载响应比急剧升高.

澳大利亚的科学家用数值模拟方法也证实了加卸载响应比 (LURR)^[11].

利用它作为地震前兆. 用已发生的上百例地震资料, 对这一设想进行检验, 80% 以上的震例效果很好^[4,5]. 图 4 是一个典型的例子.

进而将加卸载响应比用于地震预测也取得了较好的效果, 不仅成功地预测过一些国内的地震 (中期预测), 还成功地预测过一些国外的地震 (美国, 日本, 土耳其等)^[8,11~13].

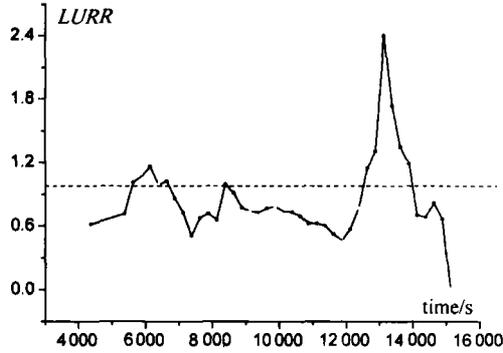
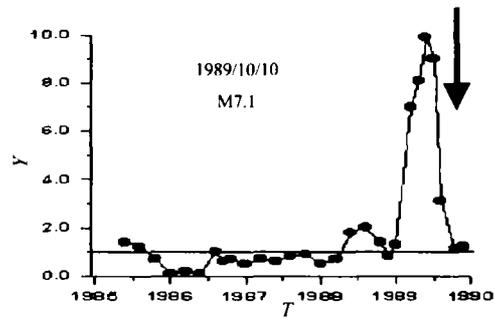
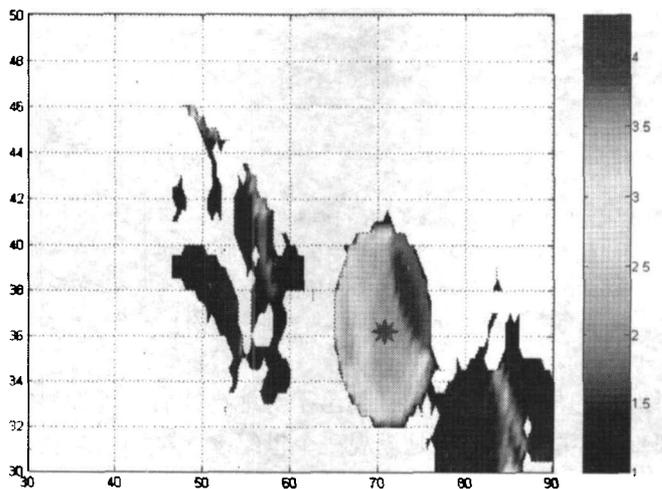


图3 花岗岩的 LURR 随时间的变化曲线

图4 1989年美国 Loma Prieta 地震前
加卸载响应比的变化

例 1 2003 年 3 月 20 日海湾战争开始以后, 美英联军对伊拉克进行了大规模的轰炸, 这会诱发伊拉克及邻近地区发生破坏性地震吗? 2003 年 4 月 5 日, 我们撰写了短文“猛烈轰炸会诱发伊拉克地震吗?”(此文分别发表在两种内部刊物上: 尹祥础, 张晖辉, 余怀忠, 2003, 猛烈轰炸会诱发伊拉克地震吗? 震情研究, 2003, No.2, 96-99, 及尹祥础, 张晖辉, 余怀忠, 2003, 加卸载响应比计算程序的新进展, 超级计算通讯, 创刊号, PP10-11). 从加卸载响应比理论的角度对此进行了初步的分析研究. 根据研究结果, 我们预测: “在以 33.5°N , 43.5°E 为圆心, 半径为 600 km 的区域内 (包括伊拉克及其邻国地区), 目前 LURR 远大于 1, 说明其地壳正处于不稳定状态, 对外界干扰敏感, 猛烈的轰炸可能导致破坏性地震的发生, 时间大致在几个月至 1~2 年内”. 2003 年 5 月 1 日, 在我们预测区域 - 土耳其宾格尔发生里氏 M6.4 地震, 死亡一百多人. 上述结果还曾在中科院力学所“创新论坛”(4 月 15 日) 及中科院研究生院 (4 月 17 日) 进行过学术交流.

例 2 2004 年 3 月我们作出了 2002 年至 2003 年欧亚地震带的 LURR 时空扫描结果 (图 5).



2002.1.1~2003.12.31, 0.5/0.5, 0.0~9.0, $R=200$, $Y/Y > 1$

图5 2002.1 ~ 2003.12 期间欧亚地震带的 LURR 空间扫描异常区

据此我们预测：“图中阿富汗及其邻国的加卸载响应比持续为高值，所以该地区未来 1-2 年内发生大地震的可能性很大”。有关结果发表在 2004 年 3 月出版的“超级计算通讯”Vol 2, No.1 上。2004 年 4 月 6 日就在预测区内 (HINDU KUSH REGION, AFGHA, $Lat = 36.59^\circ$, $Lon = 70.85^\circ$) 发生 6.8 级强烈地震。在预测区内还可能再发生强烈地震。

例 3 图 6 为 2003 年初所作的中国大陆的 LURR 空间扫描， Y 大于 2 的区域为地震危险区，红色圆为 2003 年内实际发生的地震，由图可知：大多数危险区或其边缘均发生了破坏性地震 (两个沿海区域是因为海潮原因造成的虚假的 LURR 危险区，我们正在着手解决这个问题)。另外还有几个地震发生在危险区外，即所谓漏报地震。经过具体分析，主要原因是该区域内地震观测数据质量欠佳所致。

加卸载响应比方法还可用于水库地震的预测和矿山地震的预测^[14,15] 以及其它地质灾害的预测以至于大型工程结构的健康检测。

从更积极、更根本的意义上讲：控制地震应该是人类在这一领域里追求的更加崇高的目标。人类一旦能够控制地震，才能够真正摆脱对地震的被动局面，从根本上防震减灾。控制地震就是按照人们的意愿，使用特殊的方法改变地震的孕育发生进程，从而阻止灾难性地震的发生，例如，使大地震化为一系列小地震，使快地震化为慢地震，或者使其在别的地点或时间发生地震，从而在更加积极的意义上，起到预防地震灾害、造福人类的目的。

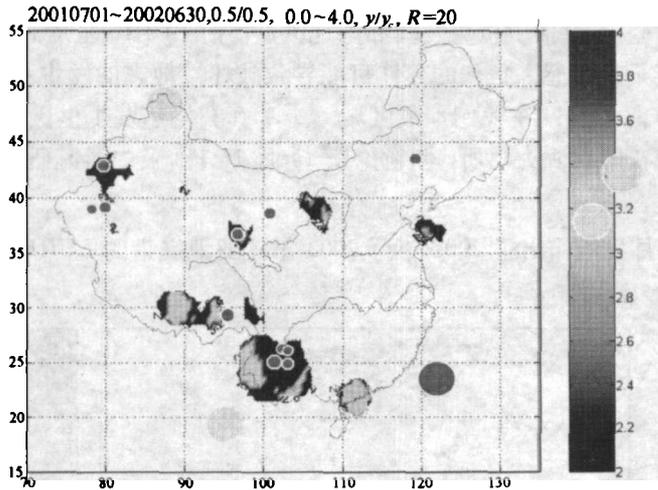


图 6 2002 年中国大陆 LURR 扫描图
 红色圆表示 2003 年发生的中国大陆的中强地震
 紫色圆表示 2003 年发生在我国台湾及其附近地区的地震
 黄色圆为 2003 年发生在我国周边地区 (境外) 的七级以上大地震

尽管人们至今对地震的规律了解不够，甚至于对地震怀着一种神秘的畏惧感，对这一目标大多数科学家望而却步，不敢涉及。但是纵观一个世纪来人类的科学技术进步，控制地震今天已不是完全高不可攀、无从下手的课题，而是经过努力可能逐步接近的目标。

地球是一个巨大的能量储存系统，从每年地壳中以地震形式所释放出的巨大能量可见一斑 (地球每年放出的地震波能量平均约为 10^{25} 尔格，相当于上万个广岛原子弹释放的能量)。地球 (主要指地壳) 由极不均匀的复杂介质所组成，所以其中的能量分布在时、空域中也是极不均匀

的, 研究能量在地壳中的分布、转移及释放, 以及如何用人工方法—核爆炸、常规爆炸、可控震源、注水, 电磁能等, 影响地壳内的能量分布、演化及其释放, 是关键的科学问题。

更具体说, 主要包含两方面的问题:

一方面, 地震控制归根到底是以小能量改变(触发)大能量。这首先取决于该处地壳的状态, 只有当其处于接近失稳状态, 对外界的作用非常敏感时, 才易于改变(触发)。因此地壳状态的判定是关键问题之一。我们提出的加卸载响应比方法, 和借鉴统计物理的概念而移植于地震学的态矢量方法^[16]以及近年来实验中得到的声发射率与载荷的相关性均有助于这种判定。

另一方面, 各种人工方法(核爆炸、常规爆炸、可控震源、注水, 电磁能等)如何影响能量的释放尤其是其释放方式, 以及其有效性是最核心的问题。例如动态载荷(脉冲波及周期波)对断层的作用(入射角、波幅等)和准静态应力变化对地震的触发。

我们对此作过一些预研究, 表明是可以有所作为的。

致谢 郑哲敏先生是我就读清华大学—中国科学院力学研究所合办的第一届工程力学研究班时的老师。之后我分配在中国科学院力学研究所, 又在郑先生的指导下从事研究工作多年, 郑先生的许多教诲至今记忆犹新, 例如他谆谆教导我们研究问题的关键是搞清其物理机理, 怎样把实验研究与理论研究结合起来等。当时我兼任中国科技大学近代力学系连续介质力学固体力学的讲课, 我编写的讲义, 郑先生自始至终均仔细审阅, 给与了许多具体的指导, 使我终身难忘。在我转到地震界工作后, 仍然受到郑先生的指导、关心和鼓励。值此郑哲敏老师八十华诞之际, 谨以此文恭祝郑先生健康长寿。

参 考 文 献

- 1 尹祥础. 地震预测新途径的探索. 中国地震, 1987, 3(1): 1~7
- 2 尹祥础, 尹灿. 非线性系统的失稳前兆与地震预测. 中国科学, 1991, 5: 512~518
- 3 Иин Ксянчу (Yin Xiang-Chu). Новый Подход к Прогнозу Землетрясений, *Природа*, 1993, 1: 21~27
- 4 Xiang-Chu Yin, Can Yin, Xue-Zhong Chen. The Precursor of Instability for Nonlinear System and Its Application to Earthquake Prediction—the load-Unload Response Ratio (LURR) Theory. In: Naman W I, Gabrelov A M, eds. Non-linear dynamics and predictability of geophysical phenomena, AGU Geophysical Monograph, 83, 1994. 55~60
- 5 Xiang-chu Yin, Xue-zhong Chen, Zhi-ping Song, Can Yin. A New Approach to Earthquake Prediction-The Load/Unload Response Ratio (LURR) Theory. *Pure and applied Geophysics*, 1995, 145(3/4): 701~715
- 6 施行觉等. 模拟引潮力作用下的岩石破裂特征—加卸载响应比理论实验研究之一. 地球物理学报, 1994, 37: 633~637
- 7 王海涛, 彭克银, 张永仙, 王裕仓, 尹祥础. 新疆伽师强震群过程中加卸载响应比变化特征. 科学通报, 1998, 1109~1111
- 8 Xiang-chu Yin, Yucang Wang, Keyin Pang, yi-long Bai, Hai-tao Wang and Xun-fei Yin. Development of a new approach to earthquake prediction—load/unload response ratio (lurr) theory. *Pure Appl Geophys*, 2000, 157: 2365~2383
- 9 Yin X C, Mora P, Peng K Y, Wang Y C, Weatherly D. Load-unload response ratio and accelerating moment/energy release, critical region scaling and earthquake prediction. *Pure Appl Geophys*, 2002, 159: 2511~2524
- 10 Yin X C, Mora P, Peng K Y, Wang Y C, Weatherly D. Load-unload Response Ratio and Accelerating Moment/Energy Release, Critical Region Scaling and Earthquake Prediction. *Pure Appl Geophys*, 2002, 159: 2511~2524
- 11 Mora P, Wang Y, Yin C, Place D, Yin X C. Simulation of Load-unload Response Ratio and Critical Sensitivity in the Lattice Solid Model. *Pure Appl Geophys*, 2002, 159: 2525~2536
- 12 Куксенко Б С, Иин Ксян-Чу (Yin Xiang-Chu). Влияние слабых механических воздействий наповедение очага разрушения. *Известия Академии Наук Серия Физическая*, 2003, 67(6с): 877~881
- 13 Yin Xiang-chu, Huai-zhong Yu, Victor Kukshenko, Zhao-yong Xu, Zhishen Wu, Min Li, Keyin Peng. Surgey

- elizarov and qi li, 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(11/12):
- 14 陈学忠, 尹祥础. 水库地震主震前加卸载响应比的变化特征. *中国地震*, 1995, 11(4): 361~367, Application of LURR Theory to the Earthquake Prediction for Reservoir-Induced Earthquakes, *Earthquake Research in China*
 - 15 尹祥础, 尹迅飞, 余怀忠, 张晖辉. 加卸载响应比理论用于矿震预测的初步研究. *地震*, 2004, 1
 - 16 尹祥础, 余怀忠, 张永仙, 颜玉定. 态矢量 —— 分析地震活动性的一种新方法. *中国地震*, 2005, 20(1), 73~79