

加卸载响应比 —— 地震预测与力学的交叉*

尹祥础^{1,2} 刘月^{1,†}

¹ 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

² 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

摘要 地震预测是世界性科学难题. 地震现象虽然复杂其物理实质倒是明确: 地震就是地壳块体的快速剪切脆断. 相应地, 地震的孕育过程就是震源区介质的损伤、演化, 并最终导致破坏的过程, 这一过程主要是力学过程. 抓住这一点就抓住了问题的物理本质. 但是, 在研究地震预测时遇到的力学问题和通常的(工程)力学问题有所不同. 根据地震问题的特点, 紧扣地震孕育过程的物理本质, 提出了加卸载响应比这一地震预测新思路.

文中介绍了加卸载响应比理论的基本科学问题, 包括如何对地壳加载/卸载, 如何选择适当的地球物理参数作为响应量, 以及怎样定义加卸载响应比. 用实验研究、数值模拟和理论分析 3 种基础研究手段, 揭示了地震孕育过程中加卸载响应比共同的演化规律: 孕震初期加卸载响应比在 1 附近涨落, 之后上升至峰值点, 地震不在峰值点发生, 而是在下降过程中发生. 从峰值点到地震发生这段滞后时间称为 T_2 , T_2 和震级有关. 为了预测地震, 必须在全国范围内作加卸载响应比的时空扫描. 在时空扫描基础上, 结合量纲分析, 更多地考虑当地的地球物理条件, 拟定了全面预测未来地震的时、空、强的思路. 回顾了用这种思路进行地震预测实践的历程.

关键词 加卸载响应比, 地震预测, 峰值点, 量纲分析

中图分类号: P315.6 **文献标识码:** A **DOI:** 10.6052/1000-0992-13-075

1 引言

大地震常常导致重大的人员伤亡和经济损失, 甚至使整座城市瞬间化为废墟. 1556 年(明代嘉靖三十四年)陕西省华县附近(北纬 34.5 度, 东经 109.7 度)发生的大地震($M \geq 8$), 就使 83 万人命丧黄泉. 大地震还常常引起海啸、

火灾、瘟疫等可怕的次生灾害: 2011 年 3 月 11 日的东日本大地震($M9$, 指里氏 9 级, 下同)引起的巨大海啸, 席卷日本东海岸, 其危害可能超过地震的直接影响, 而由此引发的核事故, 甚至会累及子孙后代和周边邻国; 1906 年的旧金山大地震引发的大火, 整座城市陷入一片火海, 使

收稿日期: 2013-03-03, 修回日期: 2013-10-28

* 国家自然科学基金(1900102201, 10232050, 10721202, 11021262), 国家重点基础研究发展规划项目(2004 CB418406), 中国科学院“十一五”信息化专项“超级计算环境建设与应用”(INFO-115-B01)和中国科学院非线性力学国家重点实验室开放基金资助项目.

† E-mail: liuyue@lnm.imech.ac.cn

引用格式: 尹祥础, 刘月. 加卸载响应比 —— 地震预测与力学的交叉. 力学进展, 2013, 43(6): 555-580 (Yin X C, Liu Y. Load-unload response ratio—An interplay between earthquake prediction and mechanics. *Advances in Mechanics*, 2013, 43(6): 555-580)

灾情雪上加霜. 正因为如此, 大不列颠百科全书称地震为群灾之首.

地震也是一种复杂的自然现象. 由于地震发生在地下深处, 加上它的突发性 (一旦发生突如其来, 使人猝不及防) 和剧烈性 (一个大地震的能量相当于千百个原子弹), 预测地震, 减轻地震灾害, 就成为人类梦寐以求的期盼. 为此, 长期以来, 不少国际组织、政府部门, 精心组织、周密规划; 众多科学家殚精竭虑、呕心沥血, 但时至今日仍收效甚微, 许多基本问题悬而未决, 成为世界性科学难题.

要对任何现象进行预测, 都必须对其机理和过程有规律性的认识. 地震预测也是如此. 钱学森先生在给笔者的信中指出: “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 (钱学森 2007, 2008, 尹祥础 2012). 地震现象虽然复杂, 其物理实质是地壳块体的快速剪切脆断, 并释放能量的过程. 相应地, 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. 这一过程主要是力学过程. 抓住这一点就抓住了问题的物理本质, 从而可能找到解决这个世界难题的钥匙.

但是, 我们在研究地震预测时遇到的力学问题和通常的 (工程) 力学问题有所不同. 通常力学问题的解决需要知道: 本构关系及损伤演化律、边界条件、初始条件以及某些力学量的变化历史 (如流变介质)……, 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. 众所周知, 应力应变曲线从宏观上刻画了材料受全过程中的基本特性. 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 (破坏) 等过程. 弹性变形的最本质特征为可逆性, 即加载过程和卸载过程是可逆的, 因而其加载响应率 (模量) 和卸载响应率 (模量) 相同. 损伤过程的本质特征与弹性过程相反, 具有不可

逆性. 反映在应力-应变曲线上, 其加载时的变形模量小于卸载时的变形模量, 这种差异反映了材料的损伤或力学性质劣化的程度 (图 1).

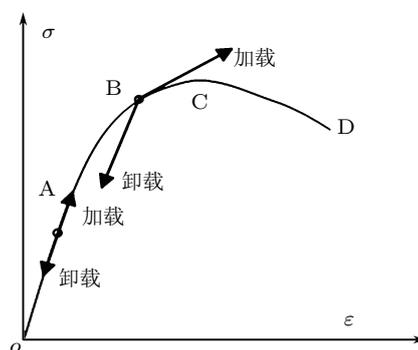


图 1 岩石的应力-应变曲线

到目前为止, 人类能测量到的只是地壳中某些物理量当前的变化. 如何从这些物理量当前的变化来判定某一地块的损伤演化, 从而表征该地块的地震孕育过程? 就成为解决地震预测的新课题. 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 (load-unload response ratio—LURR)(尹祥础 1987, 2004, ИИН 1993, Yin, Chen et al. 1994, 1995, Yin, Yin et al. 1994, Yin X C et al. 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2009, 2013, Mora et al. 2002, Куксенко et al. 2003, Peng et al. 2006, 王海涛 1999, Wang et al. 2000, 余怀忠 2004, Yin 2005, Zhang H H et al. 2006, 张晖辉 2006, 张浪平 2009).

2 加卸载响应比理论的基本科学问题

应用加卸载响应比理论于地震预测, 首先要解决下列问题:

2.1 如何加载卸载?

我们研究的对象是包含整个孕震区的某一地壳块体, 其线尺度可达几百公里甚至上千公里. 对这样巨大的“庞然大物”进行加载、卸载, 显然不是目前人力所能及的. 好在大自然

为我们提供了这样的条件, 这就是日、月运行产生的引潮力. 月球和太阳对地球的引力不但可以引起地球表面流体的潮汐 (如海潮、大气潮), 还能引起地球固体部分的周期性变形, 这就是固体潮. 固体潮由峰到谷的最大应变变化幅度大约是 0.5×10^{-7} 量级. 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载与卸载. 采用国际上广泛认可的 PREM 地球模型 (Dziewonski & Anderson 1981). 该模型将地球模拟为几十层壳体的组合, 每层的弹性模量、密度等各不相同. 日、月、地球按天体力学规律运行, 日、月以外有引力作用于地球的每一点, 使地球内产生一个潮汐应力场. 我们根据天体力学和弹性力学编写了计算程序, 能准确计算地壳内部任一点 (经度、纬度、深度), 在任一时刻由日、月引潮力引起的潮汐应力张量 (尹灿 1990, Yin 2005).

2.2 如何选择适当的地球物理参数作为响应量

当今, 我国地震界 (国际地震界也大致相同) 已能够测量很多地球物理参数, 他们可以大致分为 3 类:

(1) 由地震台网测得的地震资料. 包括已发生地震的时、空、强 (时间、地点、震级) 和各种波形数据.

(2) 由地面前兆台网测得的各种前兆资料. 种类繁多, 如地形变 (包括大地测量、跨断层和深井测量等), 地应力, 地下水 (水位、水温、水化学成分等), 地磁, 地电, 重力等.

(3) 由空间技术测得的各种前兆资料, 如 GPS (全球定位系统)、InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar- 合成孔径雷达干涉成像) 等. 这些技术大都是测量地表的变形和其他参数. 其主要特点是能够测量较大范围内的场上的参数.

上述各种参量都可能在某一侧面反映地震孕育的进程, 因而都可作为“响应”, 用于研究

LURR. 效果如何, 只有通过实践来检验. 事实上, 国内外众多同行进行了广泛的探索与研究, 发表的论文已逾百篇 (不包括作者所在的课题组发表的论文, 请参看网页 <http://www.doc88.com/p-36717273437.html>). 此网页列出了国内外科学家利用加卸载响应比研究各种科学问题发表的论文目录. 以下是其中的一小部分: Chen et al. 2012, 陈建民等 1994, 施行觉 1994, 许强 1995, 常克贵等 1999, 张昭栋等 1999, Trotta & Tullis 2006, 许昭永等 2002, Yin & Mora 2004, 2006, 姜彤 2004, 姜彤等 2004, 贺可强等 2004, 任隽等 2005, 邵宜莲 2012, Zhang, Chen et al. 2006, Yu et al. 2006, 张文杰等 2005, Zhang, He et al. 2012). 从这些结果看, 用不同的前兆资料研究 LURR, 各有千秋. 因为不同的前兆资料反映的是不同时空范围的地震孕育进程. 例如, 地下水位的 LURR 峰值, 可能出现在地震发生前十几天, 具有短期前兆的特征 (张昭栋等 1999, 陈建民等 1994).

本课题组则着重采用地震资料研究 LURR, 这主要是考虑到:

(1) 地震是造成地壳损伤的主要因素. 根据细观损伤力学, 材料的损伤演化主要由损伤场和应力场的交互作用所控制. 所以, 它是决定地震孕育的直接因素.

(2) 地震也是最容易获得的资料, 而且资料覆盖的时空域都比较大.

2.3 如何定义 LURR

回到图 1, 图 1 为岩石材料典型的应力-应变曲线 (Jaeger & Cook 1979), 只是为了以后便于推广到更普遍的情况 (用应变以外的物理量作为响应), 将纵坐标改为载荷 P , 替代应力 σ , 横坐标改为 R , 替代应变 ε .

设 ΔP 和 ΔR 表示载荷 P 和响应 R 的增量, 定义响应率 X 为

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

如果回到应力-应变曲线, 响应率 X 就是变形模量的倒数. 令 X_+ 和 X_- 分别代表加载与卸载阶段的响应率, 正号对应于加载阶段, 负号对应于卸载阶段. 加卸载响应比 Y 定义为

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

在加载初期 (OA 段), 岩石试件处于弹性阶段. 这个过程是可逆的, 加载过程和卸载过程的响应率是相同的, OA 段的斜率即为岩石的弹性模量. 随着载荷的进一步增加, 岩石试件内部出现损伤 (裂纹), 应力-应变关系偏离直线, 这个过程是不可逆的, 加载过程和卸载过程的响应率是不同的. C 点表示岩石在一定条件下所能承受的最大载荷, CD 段对应岩石的破坏过程.

很明显, 在弹性阶段, $X_+ = X_-$, $Y = 1$; 出现损伤之后, $X_+ > X_-$, $Y > 1$. 可以看出, 随着载荷的增大, 材料损伤程度加剧, Y 值将会增大至显著地大于 1.

从上述定义不难看出, 加卸载响应比 Y 值可以定量地刻画岩体的损伤程度. 地震及许多其他地质灾害, 如滑坡、岩爆及火山喷发等均为不同尺度岩体的失稳现象, 因此加卸载响应比理论可能为地震和其他地质灾害的预测开辟出一条新的途径.

在 LURR 提出的初期 (20 世纪 80 年代), 根据物理上的考虑, 将地震能量作为响应, 定义加卸载响应比 Y 为

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

式中, E 为地震辐射的地震波能量 (Kanamori & Anderson 1975), “ E_+ ” 表示加载时段内发生的地震所辐射的地震波能量, “ E_- ” 表示卸载时段内发生的地震所辐射的地震波能量. m 可以取

为 $0 \sim 1$ 之间的任意值. 当 $m = 1$ 时, E^m 表示地震能量; 当 $m = 1/2$ 时, E^m 表示 Benioff 应变 (Frank & Benioff 1973); 当 $m = 0$ 时, Y 值相当于 N_+/N_- , N_+ 和 N_- 分别代表加载和卸载过程中发生的地震的个数.

式 (3) 所定义的 LURR 称之为 Y_E (式 4),

$$Y_E = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N_+} E_i^m \right)_+}{\left(\sum_{i=1}^{N_-} E_i^m \right)_-} \quad (4)$$

下标 E 表示用地震能量定义的 LURR. Y_E 在之后的研究和预测实践中, 效果不错 (尹祥础 1987, 2004, Иин 1993, Yin, Chen et al. 1994, 1995, Yin, Yin et al. 1994, Yin X C et al. 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2009, 2013, Mora et al. 2002, Куксенко et al. 2003, Peng et al. 2006, 王海涛, 1999, Wang et al. 2000, 余怀忠 2004, Yin 2005, Zhang H H et al. 2006, 张晖辉 2006, 张浪平 2009), 因而一直沿用至今.

近来, 我们对 LURR 的定义进行了再研究. 截取一块边长为 100 km 数量级的矩形地块为研究对象. 众所周知, 地壳是一个壳体, 其曲率半径约为 6 430 km, 远大于该地块的边长, 因此可以将此地块简化为平板. 如果在该地块中发生多个地震, 形成多条断层, 地块必将受到损伤. 在损伤力学 (Kachanov 1980, 1986, Krajcinovic 1996, 余寿文 1997) 中, 用损伤变量 D 作为损伤的度量. 对于不同的作者, D 可以有不同的定义. 但是, 从损伤力学的创始人 Kachanov 起, 大多数损伤力学大师们都认为: 通过受损材料的刚度折减来定义 D 是比较合理的办法. 这样就转化成平板中裂纹系引起的刚度变化的力学模型. 近年来, 陆续发展了自洽方法、广义自洽方法、组构张量、Mori-Tanaka 方法等 (杨卫 1995, Oda 1983, Laws & Brockenbrough 1987, Anthony 2009). 但是都没有给出显式的 (explicit) 解析结果. 为了以后应用的方便, 需要一个显式

的解析解. 我们暂不考虑裂纹间的相互作用, 将单条裂纹的影响求出, 然后把各条裂纹的作用相加, 得到一个解析解, 用于研究地震对地壳块体损伤的一般规律, 以及 LURR 和地震间的关系. 裂纹间的相互作用, 下面还将进一步讨论.

Walsh 和 Jaeger 等 (Walsh 1965a, 1965b, 1965c, Jaeger & Cook 1979) 对含有任意可滑动方向的闭合裂纹的平板受单轴压时的刚度问题做了研究. 平板长宽分别为 a, b , 含有长为 $2c$, 与力的作用线夹角为 φ 的闭合裂纹 (图 2), 其有效杨氏模量 E_1 与固有杨氏模量 (无裂纹时的杨氏模量) E_0 之间的比值为 (Jaeger & Cook 1979, Walsh 1965a, 1965b, 1965c)

$$\frac{E_1}{E_0} = \left[1 + \pi c^2 \cos^2 \varphi \frac{(\mu^2 + 1)^{1/2} - \mu}{2(\mu^2 + 1)^{1/2} S} \right]^{-1} \quad (5)$$

式中, $S = ab$ 代表平板的面积; μ 为摩擦系数, 文中均取 0.6 (下同).

对于包含有大量方向随机, 长度为 $2c_i$ 的闭合裂缝的平板, 其杨氏模量 E 与固有杨氏模量 E_0 之间的关系为 (Walsh 1965a, 1965b, 1965c)

$$\frac{E}{E_0} = \left\{ 1 + \sum_{i=1}^N \frac{2\pi c_i^2}{15S} \left[\frac{2 + 3\mu^2 + 2\mu^4}{(\mu^2 + 1)^{3/2}} - 2\mu \right] \right\}^{-1} \quad (6)$$

N 为裂纹总数.

地震属于典型的剪切破裂, 研究地块的剪切模量的折减更为重要. 根据包含有闭合裂缝物体的有效体积模量和固有体积模量相等的假定有

$$(1 - 2\nu_1)/E_1 = 1/3K = (1 - 2\nu_0)/E_0 \quad (7)$$

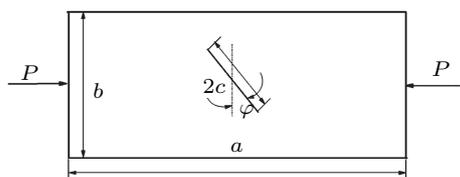


图 2 含裂纹矩形平板 (裂纹与力的夹角为 φ)

又根据杨氏模量与剪切模量之间的关系 $G = E/(2(1 + \mu))$, 可以得到地块有效剪切模量 G 和固有剪切模量 G_0 之间的关系为

$$G_0/G = 1 + 0.114L^2/S \quad (8)$$

令

$$L^2/S = \delta \quad (9)$$

断层长度 L 和地震的震级相关, 地震学家根据大量实际数据总结出如下有名的经验公式 (Mark 2010, 宇津德治 1990)

$$\lg L = 0.5M_s - 1.8 \quad (10)$$

式中, L 的单位为 km, M_s 表示面波震级.

由式 (10) 可知: 一个 $M_s = 5$ 的地震对应的断层长度 $L \approx 5$ km (在地震预测中, 一般用 $M_s \leq 5$ 级的小地震去预测更大的地震), 若研究对象的尺度是 100 km 量级, 那么 $S = 1 \times 10^4 \text{ km}^2$, 则 $\delta \approx 5 \times 10^{-4} \ll 1$, 所以 δ 为小量.

因此, 地块的损伤 D 可以由剪切模量的折减来度量

$$D = 1 - \frac{G_N}{G_0} = 0.114 \sum_{i=1}^N \delta_i \quad (11)$$

如果选择损伤 D 作为 LURR 的响应 (以 Y_D 表示), 则

$$Y_D = \frac{D_+}{D_-} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N_+} 10^{M_{si}} \right)_+}{\left(\sum_{i=1}^{N_-} 10^{M_{si}} \right)_-} \quad (12)$$

根据地震学中有名的古登堡关系 (宇津德治 1990)

$$\lg E = 4.8 + 1.5M_s \quad (13)$$

式 (4) 可以写为

$$Y_E = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N_+} 10^{1.5mM_{si}} \right)_+}{\left(\sum_{i=1}^{N_-} 10^{1.5mM_{si}} \right)_-} \quad (14)$$

比较式 (12) 和 (14), 显然 Y_D 与 Y_E 有相似的表达式, 若令式 (14) 中的 $m = 2/3$, 则 Y_D 与 Y_E 完全相同. 即使取 $m = 1/2$ (这是最常用的), Y_D 与 $Y_{E,m=1/2}$ 在表达式上差异不大. 更重要的是二者的实际扫描结果, 只有极小的差异, 甚至难以察觉 (刘月等 2013). 这说明之前的定义 ($Y_{E,m=1/2}$) 虽然是人为规定的, 却是有理论支撑的, 在长期的实践中也证明是可行的.

3 加卸载响应比的时空扫描

要用式 (4) 计算加卸载响应比, 首先要确定所研究的地域和时段, 称之为空间窗和时间窗, 例如以 (40°N, 117.5°E) 为圆心, 半径为 100 km 圆形地域和从 2012 年 1 月 1 日至 2013 年 3 月 31 日为期 15 个月的时间窗. 根据资料 (地震目录) 可以确定在该时、空窗内发生的 N 个地震的发生地点 (震源的经度、纬度和深度) 和时间. 通过程序判定每个地震发生在加载时段或卸载时段, 再代入式 (4), 计算出该地块在该时段的加卸载响应比 Y_E 的值. 如果 $Y_E > 1$, 则称为加卸载响应比异常, 意味着该地块的介质在该时段处于损伤阶段或孕震阶段. Y_E 的值越大, 则损伤越严重, 地震的孕育进程越进入后期. 反之, 如果 $Y_E \leq 1$, 则意味着该地块的介质损伤很小, 尚未进入孕震阶段.

在进行回顾性 (retrospective) 的震例研究时, 常将空间域和时间窗的窗长固定, 然后滑动时间窗, 得到一系列不同时间窗所对应的 Y_E 的值. 图 3 所示为 1980~1994 年间发生在美国南加州的 $M6-M7$ 强震前 LURR 的变化, 也称之为该地区的 LURR 时程曲线. 由图可见, 在孕震前期, Y_E 的值在水平线 $Y_E = 1$ 上下涨落, 然后迅速上升至峰值点 (显著大于 1), 并且在下降过程中发生地震 (图中箭头表示地震, 下同). 我们对数百例中外地震进行了回顾性检验, 90% 以上都符合这种规律 (Иин 1993, Yin & Chen et al 1994, 1995, Yin & Yin et al 1994), 初步验证了

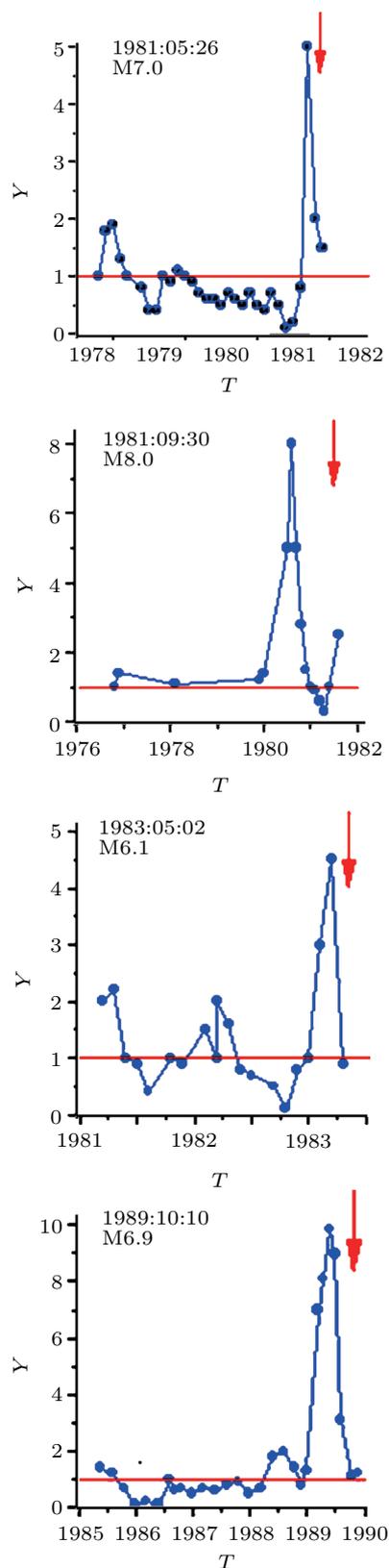


图 3 1980~1994 年间发生在美国南加州的强震前 LURR 的变化

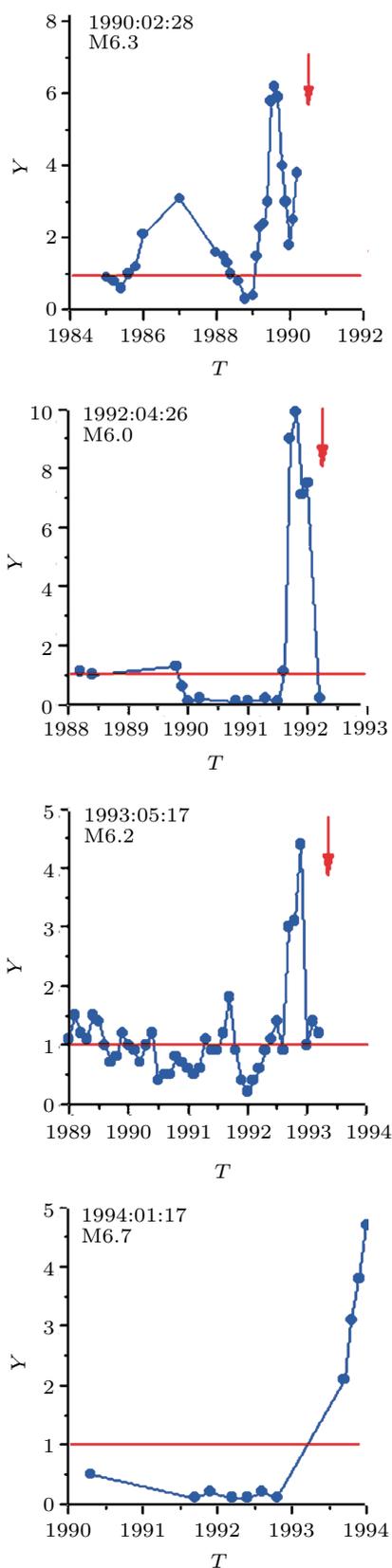


图 3 1980-1994 年间发生在美国南加州的强震前 LURR 的变化 (续)

加卸载响应比这一思路。

把 LURR 用于地震预测时, 由于事先不知道未来地震发生的地点, 所以必须采用空间扫描. 通常采用圆形、矩形或多边形域为空间窗. 以圆形域为例, 先确定圆心 (x_i, y_i) 、半径 R 和时间窗 $[t_b; t_e]$. 其中 t_b 代表时间起点; t_e 代表时间终点. 选出该时、空窗内发生的地震, 计算 LURR 的值 Y_E , 并且将 Y_E 赋值在圆心 (x_i, y_i) 上. 继而再将圆心移至 $(x_i + \Delta x_i, y_i)$, Δx 称为扫描步长 (根据我们的经验, Δx 取 0.25° 比较合适), 然后计算出新的圆形域的 Y_E 的值, 同样将其值赋值在圆心 $(x_i + \Delta x_i, y_i)$ 上. 同理, 对 y_i 按同样的扫描步长进行扫描, 就可得到所研究区域内, 在时间窗 $[t_b; t_e]$ 的 Y_E 的空间分布. 图 4 是中国大陆 t_e 为 2009 年 2 月 28 日这个时间窗内的加卸载响应比的空间分布图. 图中右侧的色标表示图中各点 Y_E 的值. 图 4 中色标的范围是 $0 \sim 4$ ($Y_E \geq 4$ 均标为 4), 即标出了所有能计算出 Y_E 的点. 图中的空白处, 表明以这些点为圆心的圆形域在该时间窗内发生的地震少于 20 个. 如果地震数目太少, 计算出的 Y_E 的值波动太大, 所包含的信息量太少, 容易出现虚假的异常. 所以, 在计算程序中规定: 地震数小于 20 时, 不输出结果. 空间域的形状和大小以及时间域的长短应该根据具体情况决定. 但为了便于比较, 规定用圆形域; 半径分别采用 50, 100, 200, 300, 500 km. 最常用的是 100, 200, 300 km, 尤其是 200 km. 对应于半径 100, 200, 300 km, 时间窗分别用 15, 18 和 24 个月. 由图 4(a) 可知: 圆形域半径 $R = 100$ km, 时间窗窗长 $T_w (T_w = T_e - T_b)$ 为 15 个月的条件下, 白色区域的面积大致占中国大陆面积的 50%; 由图 4(b) 可知: $R = 200$ km, 时间窗窗长 T_w 为 18 个月, 白色区域的面积大致占中国大陆面积的 10%; 由图 4(c) 可知: $R = 300$ km, 时间窗窗长 T_w 为 24 个月, 白色区域的面积大致占中国大陆面积的 1%. 图 4(d)、4(e)、4(f) 分别与

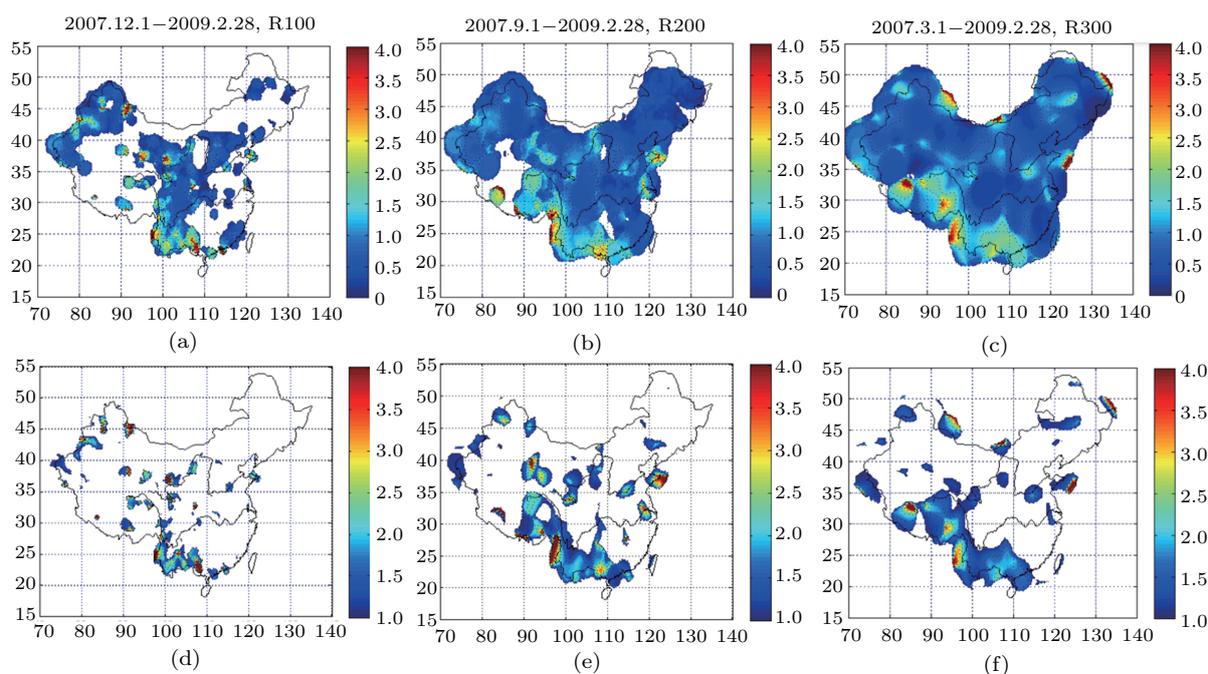


图4 时间窗终点为2009年2月28日中国大陆的加卸载响应比空间分布图,其空间窗为圆形域,半径分别为(从左至右) $R = 100, 200, 300$ km

图4(a)、4(b)、4(c)的参数完全相同,只是其色标改为1~4,即图中只画出 $Y_E > 1$, (即LURR异常)的点。

将不同时间窗的LURR空间扫描结果汇集在一起,便于研究该区域LURR的时空演变,进而对未来的地震趋势做出预测。图5是海城地震前几年中国大陆的LURR分布的汇集,每两月一张(实际工作中每月1张,为节省篇幅,本文略去一半图片)。排列的时序是从左到右,从上到下。由图5可见,在1971年10月(指时间窗的终止点 t_e 下同),海城地震的震中(40.7°N, 122.8°E,在图5左上角图中用箭头指向的红色小圆点)处刚刚开始出现LURR异常。之后LURR异常区逐渐扩大,异常区中某些部分 Y_E 的值也在增高;到1972年10月达到高峰。再后LURR异常的程度逐渐减弱,当然,也有起伏,但总的趋势是减弱,并在此过程中发生海城地震。由本例可知,LURR的时空演化能够比较清晰地刻画地震的孕育过程。二十多年来,每月一次,用不同的参数(圆形空间域半径 $R = 50,$

100, 200, 300, 500 km及其他参数,如时间窗窗长等)对整个中国大陆做LURR扫描,从不间断。在此过程中,不断体会和探究发生在不同区域的不同大小地震前LURR的演变情况,试图探索一些规律性的认识。

与此同时,进行了一系列基础研究,以便在可控的条件下探索地震前LURR的演化规律。

4 基础研究

依托中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室(LNM)的科研优势和国家自然科学基金委员会的支持(两期重点项目),作者进行了大量有关LURR的基础研究,包括实验研究,理论分析和数值模拟。

4.1 实验研究

除了在LNM的实验以外,还组织了两次国际合作,参加的人员包括俄罗斯科学院Ioffe物理技术研究所,澳大利亚昆斯兰大学,日本茨城大学和国内北京大学,中国地震局地球物理研

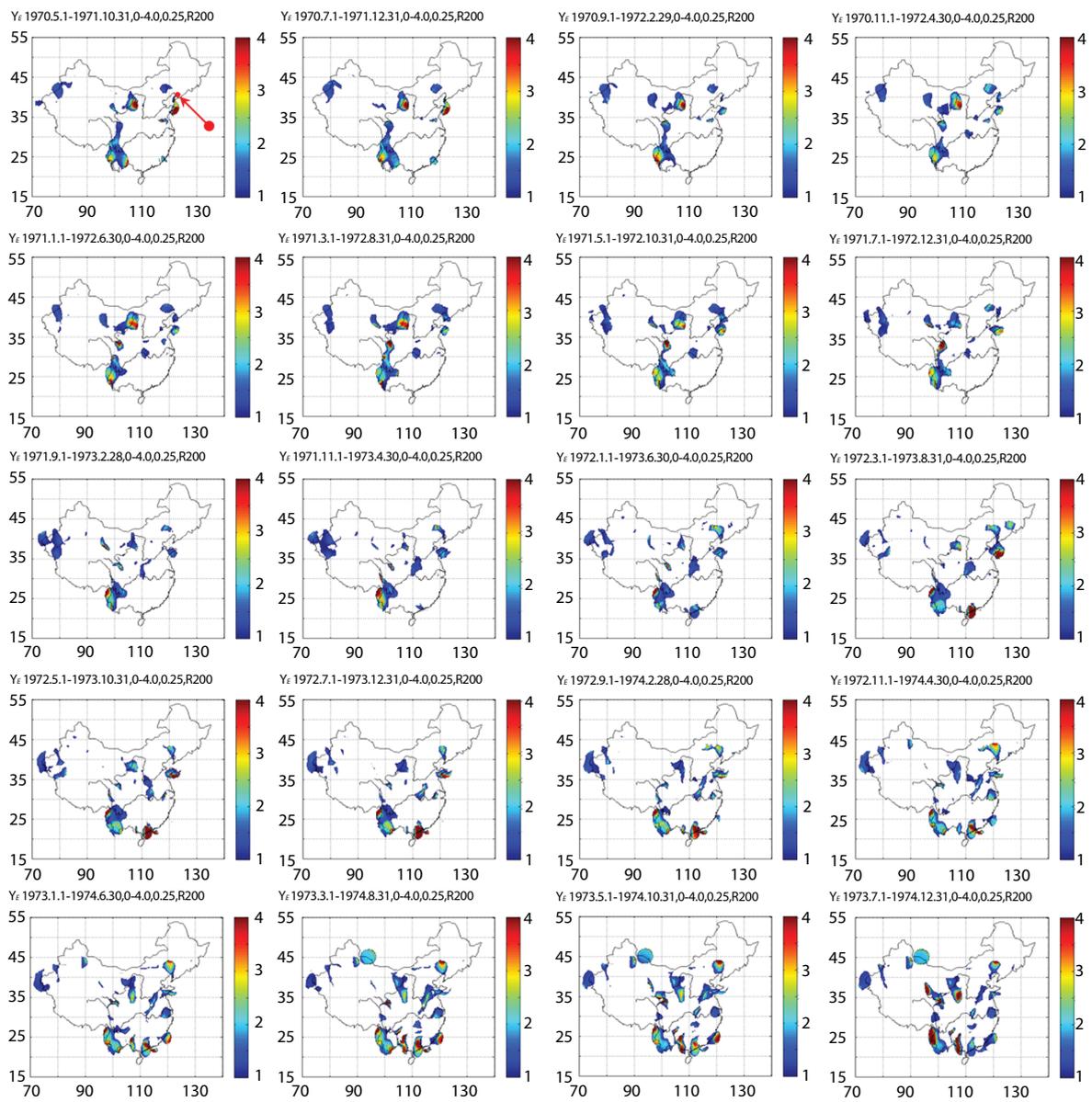


图 5 海城地震前, 中国大陆的 LURR 空间分布图 (每两月一张)

究所和云南省地震局的专家。

实验以岩石试件的声发射为主。岩石受力变形时, 在岩体内发生突然的微断裂, 向四周辐射弹性波, 这就是岩石力学实验的声发射 (Acoustic Emission, 简称 AE) 现象。众所周知, 地震也是地壳中岩石破裂时, 向周围发射地震波 (弹性波)。所以声发射和地震在物理实质上是相同至少是相似的。因此, 在实验室 (小尺度) 进行岩石声发射的研究, 对了解天然地震 (大尺

度) 的孕育过程和地震预报有重要意义 (胜山邦久 1996)。此外, 在岩石破裂实验中运用声发射技术具有如下的显著优点:

(1) 是一种动态无损检测技术, 声发射信号来源于缺陷本身, 因而声发射技术具有实时、在线的特性。

(2) 是一种整体检测技术。通过按一定阵列布置多个传感器, 声发射仪就可获得试件内部声源 (微断裂) 的多种信息, 如微断裂的位置, 大

小, 方位, 能量, 甚至地震矩张量.

我们的实验着重研究岩石在变形及破坏过程中 LURR 的演化规律. 试件采用多种岩石材料 (大理岩、砂岩和花岗岩) 的长方形试件 (图 6). 为了模拟地下岩石的受力状态, 实验中实现了双向压缩加载方式, 使之得到三轴应力状态, 即 $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3 = 0$.

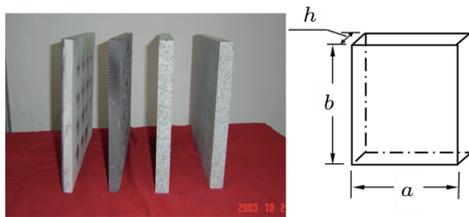


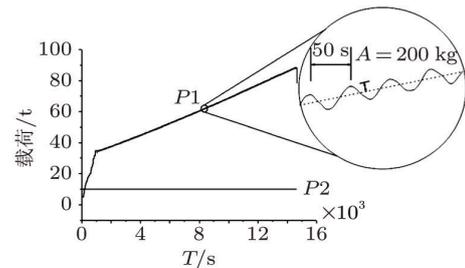
图 6 岩石试件及其示意图

为了模拟地球内部的构造应力和日月引潮力对地球的加载和卸载作用, 实验中一方面对岩石试件以一定加载速率进行加载, 以模拟构造应力的作用; 另一方面又同时作用一个正弦扰动应力, 以模拟日月引潮力对地球的加载卸载作用 (图 7(a)). 其中 P_2 为侧向载荷, 在整个加载过程中保持不变; P_1 为轴向载荷, 先线性加载到一定值, 然后开始循环扰动, 直至最后试件破坏. 轴向载荷 P_1 遵循以下表达式

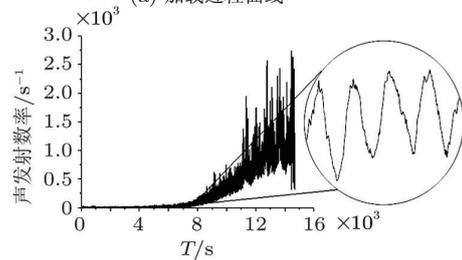
$$P_1 = kt + A \sin \frac{2\pi}{T}t \quad (15)$$

式中, 第 1 项用于模拟构造应力对地球的作用, t 为加载时间; k 为加载速率; 第 2 项用于模拟日月引潮力对地球的作用, A 和 T 为周期扰动应力的振幅和周期, 用于模拟日月引潮力对地球的作用.

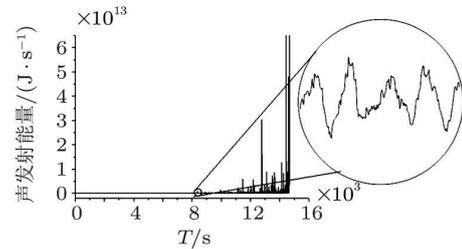
先后用不同材料, 不同尺寸, 不同加载时间曲线的 800 多块试件做了实验, 其中最大的试件尺寸达 1.05 m (为了提高声发射的相对定位精度) (Куксєнкo et al. 2003, Yin et al. 2004, 余怀忠 2004, 许向红 2005, 张晖辉 2006). 限于



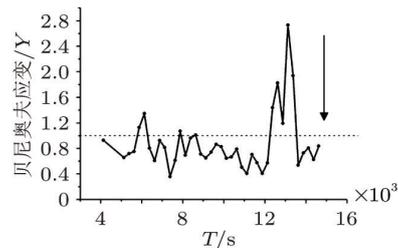
(a) 加载过程曲线



(b) 声发射事件率的时间序列



(c) 声发射能量率的时间序列



(d) LURR 的演化 (箭头表示试件破坏)

图 7 花岗岩试件 G_2 实验结果

篇幅, 下面只展示花岗岩试件 G_2 的声发射记录 (图 7), 其中图 7(b) 为声发射事件率 (单位时间的声发射个数) 的时间序列; 图 7(c) 为声发射能量率的时间序列, 而图 7(d) 则为 LURR (Y_E) 随时间的演化. 在实验前期, Y_E 在 1 上下波动, 在试件发生灾变破坏 (图中箭头所示) 前夕, Y_E 急剧增大, 至峰值点 (显著大于 1) 后下降, 但 Y_E 不是发生在峰值点, 而是在峰值点之后. 这段滞后时间称为 T_2 , 它在地震预测时间

中有极其重要的作用. 图 7 所揭示的规律, 对于不同材料, 不同尺寸, 不同加载时间曲线的试件都适用, 具有相当的普适性. 这是对 LURR 理论强有力的支持.

4.2 数值模拟

数值模拟与理论分析和实验研究一起, 组成科学研究的 3 根支柱. 我们用离散元、有限元等多种方法, 模拟地震孕育和岩石破坏实验过程中 LURR 的演化规律.

澳大利亚昆士兰大学 P. Mora 教授及其团队发展的固体点阵模型 — LSM (Lattice Solid Model) 模型. 在模拟地震问题上取得一系列重要成果.

固体点阵模型把研究对象离散成一系列紧密堆积在一起的小球 (如图 8 所示). 这些小球形粒子排成三角形点阵, 它们是模型中的最小单位, 即不可破坏的部分. 粒子的尺度可以从包含大量分子原子的岩石晶粒到较大的一些地质块体, 也就是从细观到宏观尺度.

在固体点阵模型中, 相邻粒子之间的相互作用不仅是径向力, 还包括切向力和扭矩. 这在力学模型上等价于两粒子之间同时连接了 3 种弹簧, 如图 9 所示. 其中, K_r 为抗拉压刚度, K_s 为抗剪切刚度, K_m 为抗扭转刚度.

Peter Mora 等人与作者合作, 利用二维固体点阵模型模拟了单轴压缩破坏的加卸载响应

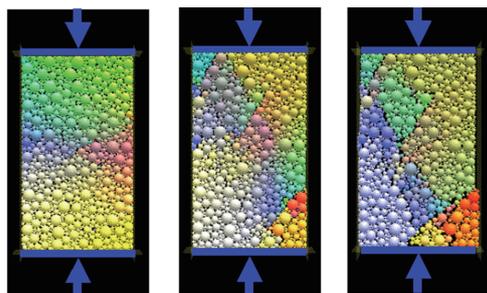


图 8 LSM (Lattice Solid Model) 模型

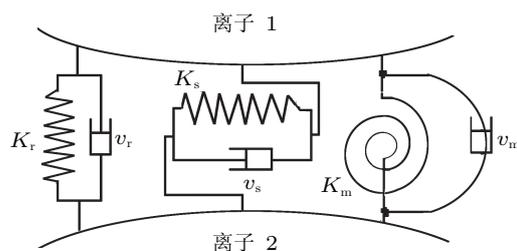


图 9 两个粒子之间的 3 种相互作用

比情况 (Mora et al. 2002). 分别研究了力控制和位移控制两种情况. 图 10 为力控制条件下应力和加卸载响应比随时间步的变化曲线. 位移控制条件下加卸载响应比随时间的变化也大致相同. 结果表明: 在试件宏观破坏之前出现了加卸载响应比的异常增高及回落, 也即在灾变前出现峰值点. 这与大地震和岩石实验试件破坏前观察到的加卸载响应比变化趋势是一致的. Mora 等 (Mora et al 2002) 认为:“模拟结果说明了加卸载响应比理论的正确性”, “加卸载响应比用于地震预测展示了令人鼓舞的前景”.

我们还用链网模型进行了 LURR 的数值模拟. 基于物质颗粒间的键合力理论, 提出了 2-D 与 3-D 链网模型. 由于损伤的物理本质是上述键合力的丧失, 链网模型用于模拟材料的损伤演化过程及结构破坏临界状态的行为特征.

最初提出链网模型是基于对原位增强陶瓷材料和晶须增强陶瓷材料细观结构的研究 (梁乃刚 1997). 在原位增强陶瓷中, 将长颗粒与基

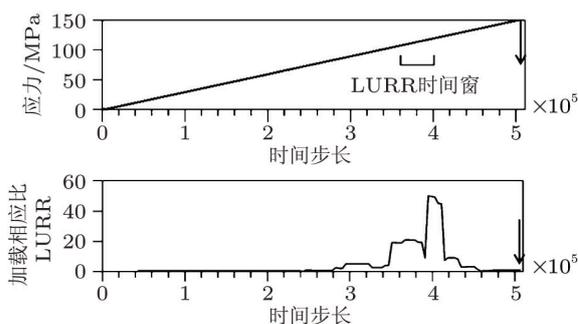


图 10 力控制时应力 (上) 和加卸载响应比 (下) 随时间步的变化

体分别抽象为链杆单元与节点, 构成链网模型. 于是, 模型的载荷位移曲线可模拟实际材料的宏观力学行为, 而链杆的弹性变形与断裂可以反映材料的细观损伤演化. 随着研究的深入, 发现链网模型实际上可以用来模拟一般的非均匀材料, 研究其细观损伤演化和宏观力学行为. 因此, 在最初链网模型的基础上发展了随机非均匀材料模型和多尺度链网模型.

链网模型具有如下优点:

(1) 模型切实按照细观力学研究问题的方法, 提出了一个宏观小、微观大的链杆单元的概念, 将链杆单元做为连接微观和宏观两个尺度的桥梁, 能够体现微观集团的平均化思想和宏观尺度上各单元存在的差异.

(2) 链网模型有实在的物理背景. 模型本来就是从原位增强陶瓷材料的细观结构抽象出来的, 并且能体现一般非均匀材料的细观结构.

(3) 链网模型具有较好的可操作性, 有利于研究复杂问题, 有利于考虑微裂纹、夹杂、颗粒和纤维等问题, 也可以采用多重尺度的方法, 进行大规模的计算.

(4) 基于所建立的一维材料失效准则, 链网模型与边界元、有限元方法相比更适用于模拟大量裂纹相互作用下材料的损伤演化过程.

链网模型经过多年的发展, 不断取得新的进展. 徐和钦 (1999) 开发了链网数模软件来模拟非均质材料的损伤破坏以及对强韧化机理展开了研究. 刘晓宇 (2001) 将二维链网推广到三维, 并将其应用到短纤维增强复合材料的行为预测中. 王裕仓 (2000) 将链网模型进行改造, 将原有的链网程序发展为一个具有 6 个方向承载机制的连续模型, 并将其应用到地震孕育过程中的宏-细观力学模拟, 对材料损伤破坏的普遍特征进行了研究.

将链网模型用于模拟地震孕育过程中 LURR 的演化规律, 必须进行两方面的改进 (张浪平 2009): 一是将受拉应力状态改为受压 (图

11); 二是加载方式, 在单调加载的基础上, 叠加上短周期的挠动, 如图 12 所示.

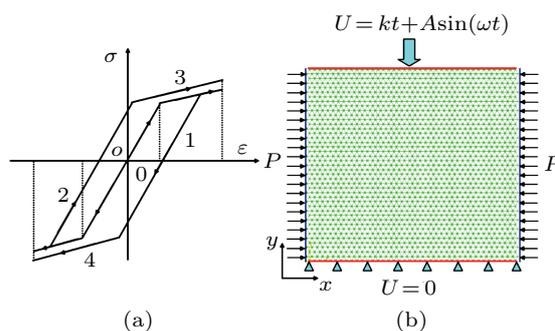


图 11 线性强化的应力应变关系 (a)、试件的载荷条件 (b)

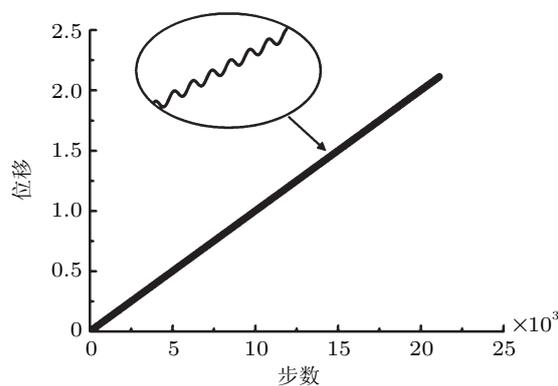
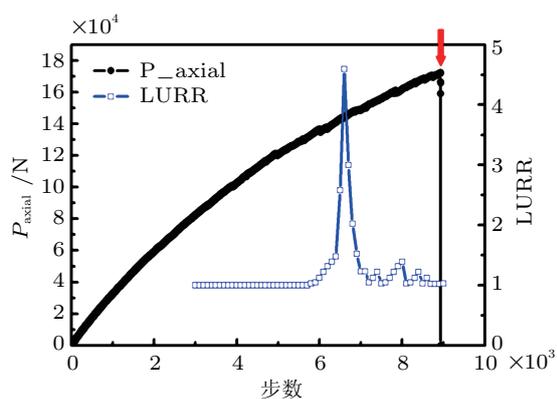


图 12 压缩过程采用位移加载曲线

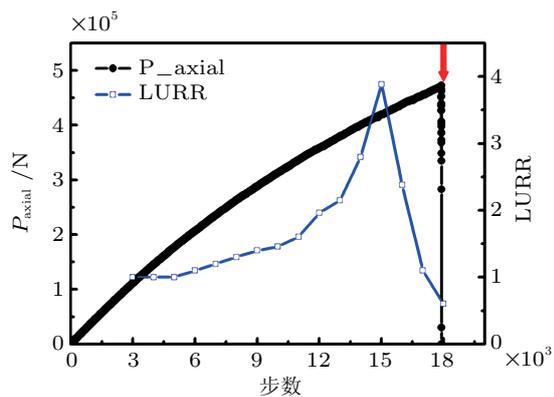
图 13 是利用链网模型模拟的地震孕育过程中加卸载响应比的变化情况. 模拟结果表明加卸载响应比的值随着载荷的增加而升高, 然后升高到峰值, 在主断裂发生之前, 加卸载响应比值又出现急剧下落. 和固体点阵模型的模拟结果、岩石实验结果与地震资料分析结果互相印证. 用 Weibull 分布 (Weibull 1951) 做为链杆强度的随机分布函数, 来模拟孕震条件下非均匀脆性介质 (比如岩石) 的损伤-破裂过程,

$$h(\varepsilon_c) = m\varepsilon_c^{m-1} \exp(-\varepsilon_c^m) \quad (16)$$

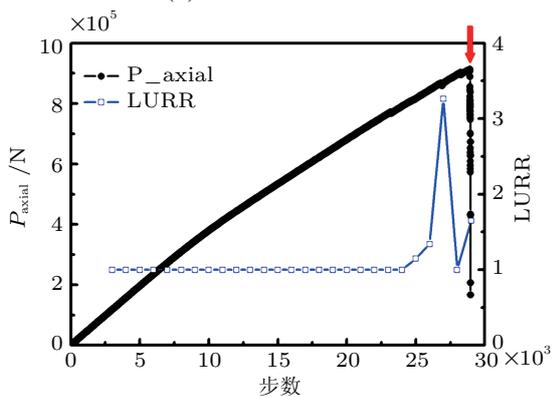
式中, m 为 Weibull 指数, m 取值越大, 介质的均匀性程度越高. 图中自上至下 Weibull 指数



(a) Weibull 指数 $m = 0.5$



(b) Weibull 指数 $m = 1.0$



(c) Weibull 指数 $m = 4.0$

图 13 不同 Weibull 指数材料在压缩条件下的载荷位移曲线和 LURR 曲线 (箭头表示试件破裂)

m 分别为 0.5, 1.0 和 4.0. 从图 13 可以看出, Weibull 指数越大, 也就是介质的均匀性程度越高, 加卸载响应比出现峰值的时间与试件发生宏观破裂的时间越接近. 为了更定量地探讨加卸载响应比峰值出现的时间与介质均匀性程度的关系, 进行归一化处理. 记试件发生宏观破裂

的时间为 T_b , 加卸载响应比出现峰值的时间为 T_p , 峰值时间 T_p 与破裂时间 T_b 之间的时间长度记为 T_2 . 就可以得出 T_2/T_b 与 Weibull 指数 m 的关系, 图 13~ 图 14.

由上面的分析可以看出, 加卸载响应比出现峰值到试件发生最后的破裂之间的时间长度比 T_2/T_b 与介质的均匀性程度有着很大的关系: 均匀性程度越高, T_2/T_b 的值越小, 这就表明均匀性程度越高的介质, 破裂的发生也越剧烈. 这部分工作将为提高地震预测的时间精度提供一定的线索.

图 15 给出了破裂链杆数目随位移的变化曲线, 轴向位移较小的时候, 试件内破裂杆数量增加比较缓慢. 随着位移的增加, 破裂杆增加的速率加快, 在整体破裂发生之前有一个明显的拐角. 拐角放大后如图中椭圆, 可以看出即使

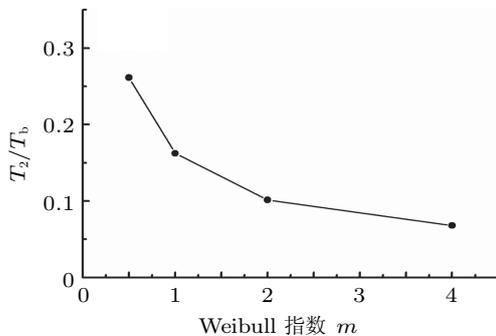


图 14 T_2/T_b 与 Weibull 指数 m 的关系曲线

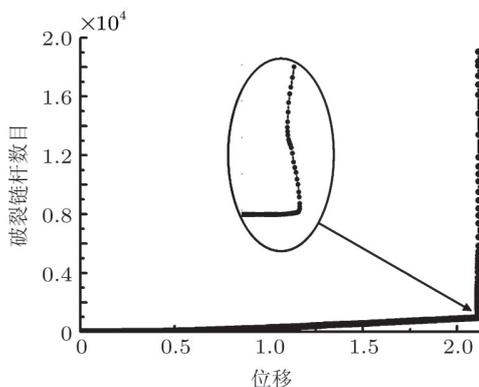


图 15 压缩条件下样本的损伤演化曲线 (椭圆为拐角放大图)

位移减少, 破裂杆数量也会继续增加, 这就意味着系统进入了自驱动模式. 外界的载荷发生改变已经不能影响系统内部链杆发生破裂, 也就是说进入自驱动模式以后, “加载” 与 “卸载” 对系统损伤的增加就不再有多大影响, 所以加载段与卸载段由于损伤导致的能量释放也就大致相当了, 这就解释了加卸载响应比的急剧回落也为实现地震短临预测开辟了道路.

4.3 损伤力学分析

既然地震孕育过程的物理实质在于孕震区介质的损伤过程, Kachanov (1980, 1986) 开创的损伤力学, 顺理成章地成为研究地震孕育问题的有效工具 (Krajcinovic 1996, 余寿文等 1997). 尤其是中国科学院力学研究所 LNM 白以龙课题组用统计细观损伤力学研究介质灾变 (地震) 方面的工作 (Bai et al 1993, 1994, 2005, 夏蒙芬等 1995, 1997, 白以龙等 2006), 所采用的基于细观描写的模型, 虽远比实际系统简单, 却有利于分析破坏过程的主要特征和基本机理, 加深对破坏过程本质的理解, 从而提出了 EIC(演化诱致突变)、样本个性、临界敏感性等一系列新概念.

我们也仿效类似的手法, 对 LURR 进行了一些分析, 并得到一些有趣的结果.

4.3.1 加卸载响应比 (LURR) 与损伤变量 (D)

对于简单应力状态, 比如单轴拉伸或压缩, 加卸载响应比 (LURR) 与损伤变量 (D) 之间存在着如下关系:

引入真实应力与名义应力之间的关系 (Kachanov 1980, 1986, Krajcinovic 1996, 余寿文等 1997):

$$\sigma_n = \sigma_a(1 - D) \quad (17)$$

$$d\sigma_n = (1 - D)d\sigma_a - \sigma_a dD \quad (18)$$

式中, σ_n 为名义应力, σ_a 为真实应力, D 为损伤变量.

假设介质在卸载过程中, 损伤不会增加也不会减少, 也就是卸载过程中 $dD = 0$, 从而有

$$\left. \begin{aligned} d\sigma_{n(+)} &= (1 - D)d\sigma_{a(+)} - \sigma_a dD \\ d\sigma_{n(-)} &= (1 - D)d\sigma_{a(-)} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中, “+” 表示加载, “-” 表示卸载. 并有

$$\left. \begin{aligned} d\sigma_{a(+)} &= E_0 d\varepsilon_{(+)} \\ d\sigma_{a(-)} &= E_0 d\varepsilon_{(-)} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中, E_0 为介质的初始弹性模量.

根据式 (1), (19) 和 (20) 就可以分别得到加载响应量与卸载响应量

$$\left. \begin{aligned} X_+ &= \left[E_0(1 - D) - \frac{\sigma_a dD}{d\varepsilon_{(+)}} \right]^{-1} \\ X_- &= [E_0(1 - D)]^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

再由加卸载响应比的定义式 (2) 可得到

$$Y = \left(1 - \frac{\varepsilon}{1 - D} \frac{dD}{d\varepsilon_{(+)}} \right)^{-1} \quad (22)$$

介质强度服从 Weibull 分布, 那么损伤函数就可以表示为

$$D(\varepsilon) = \int_0^\varepsilon h(\varepsilon_c) d\varepsilon_c = 1 - e^{-\varepsilon^m} \quad (23)$$

进而得到

$$Y = \frac{1}{m(\varepsilon_F^m - \varepsilon^m)} \quad (24)$$

式中, ε_F 为在破坏点的应变值, 且有

$$\varepsilon_F = \left(\frac{1}{m} \right)^{1/m} \quad (25)$$

将 ε_F 代入式 (24) 就得到破坏点对应的损伤和 LURR 为

$$D_F = 1 - e^{-(1/m)} \quad (26)$$

$$Y = \frac{1}{1 + m \ln(1 - D(\varepsilon))} \quad (27)$$

式 (27) 给出了加卸载响应比与损伤变量之间的关系. 当 Weibull 指数 $m = 1, 2, 4, 8$ 时, D/D_F 与 Y 的关系曲线见图 16.

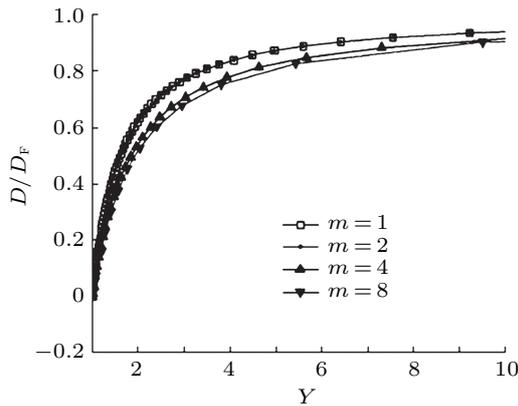


图 16 D/D_F 与 Y 的关系曲线图

式 (27) 和图 16 表明, 对于所研究的模型而言, 加卸载响应比 Y 和损伤变量 D 之间存在明确的对应关系.

4.3.2 Lyakhovsky 的损伤力学模型

Lyakhovsky 等 (Lyakhovsky et al. 1997a, b) 提出的损伤力学模型在地球科学中得到重视. 按照 Lyakhovsky 的损伤力学模型, 弹性势能定义为

$$U = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\lambda}{2} I_1^2 + \mu I_2 - \gamma I_1 \sqrt{I_2} \right) \quad (28)$$

其中, λ 和 μ 为通常的拉梅系数, γ 为本模型所特有的材料参数, I_1 和 I_2 为应变张量的第 1 不变量和第 2 不变量, $I_1 = \varepsilon_{kk}$, $I_2 = \varepsilon_{ij}\varepsilon_{ij}$.

对应变求导可得到应力张量为

$$\sigma_{ij} = \left(\lambda - \gamma \frac{\sqrt{I_2}}{I_1} \right) I_1 \delta_{ij} + \left(2\mu - \gamma \frac{I_1}{\sqrt{I_2}} \right) \varepsilon_{ij} \quad (29)$$

引入新参量 $\xi = I_1/\sqrt{I_2}$, 应变张量可表为

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\xi \sigma_{ij} - (\lambda \xi - \gamma) I_1 \delta_{ij}}{(2\mu - \gamma \xi) \xi} \quad (30)$$

损伤程度可由损伤变量 D ($0 < D < 1$) 来表示, 没有出现损伤时, $D = 0$; 完全破坏之后 $D = 1$. 常数 λ , μ 和 γ 可分别由损伤变量 D 表示为

$$\lambda = \lambda_0, \quad \mu = \mu_0 + D\mu_r, \quad \gamma = D\gamma_r \quad (31)$$

式中,

$$\left. \begin{aligned} \gamma_r &= 0.5\xi_0 \left(\frac{3\lambda_0 + 2\mu_0}{3 - \xi_0^2} + \lambda_0 \right) + \\ &\left\{ \left[0.5\xi_0 \left(\frac{3\lambda_0 + 2\mu_0}{3 - \xi_0^2} + \lambda_0 \right) \right]^2 + \right. \\ &\left. 2\mu_0 \frac{3\lambda_0 + 2\mu_0}{3 - \xi_0^2} \right\}^{-1/2} \quad (32) \\ \mu_r &= \xi_0 \gamma_r \end{aligned} \right\}$$

损伤变量 D 可由下式确定

$$\frac{dD}{dt} = \begin{cases} c_d I_2 (\xi - \xi_0), & \xi \geq \xi_0 \\ c_1 \exp\left(\frac{D}{c_2}\right) I_2 (\xi - \xi_0), & \xi \leq \xi_0 \end{cases} \quad (33)$$

ξ_0 由下式决定

$$\xi_0 = -\sqrt{3} \left[2q^2 \left(\frac{\lambda_0}{\mu_0} + \frac{2}{3} \right)^2 + 1 \right]^{-1/2} \quad (34)$$

其中, c_d , c_1 , c_2 , q , λ_0 , μ_0 可由实验测定. 根据我们的实验 (Куксенко & Иин 1993, Yin, Yu et al. 2004, 余怀忠 2004, Yu et al. 2006, 张晖辉 2006), 取各项参数为: $\xi_0 = -1.2$, $\lambda_0 = 2.88 \times 10^4$ MPa, $\mu_0 = 1.92 \times 10^4$ MPa, $c_d = 40$, $c_1 = 1.0 \times 10^{-10}$, $c_2 = 8.0 \times 10^{-2}$. 把轴向应变作为响应 R , 按照式 (2) 可以将其定义如下

$$Y = \frac{\Delta(\varepsilon_1)_+}{\Delta(\varepsilon_1)_-} \quad (35)$$

在给定加载条件及加载历史后, 可用数值方法求解上述方程组, 得到其损伤演化过程及在此过程中的能量释放和 LURR 的演化 (余怀忠 2004), 如图 17 所示. 它和岩石力学实验, 数值模拟及由地震资料得到的地震 (或试件破坏) 前 LURR 的演化规律互相印证. 因此, 我们锁定某一地区, 并追踪其 LURR 的演化, 当峰值点出现后, 地震就即将来临. 这对地震预测有极其重要的意义.

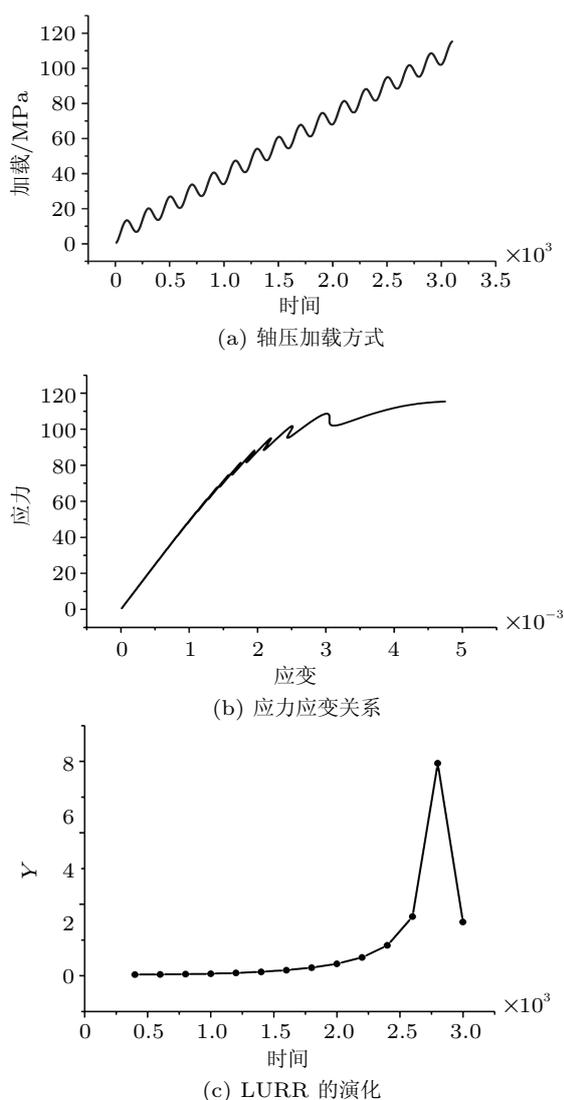


图 17 Lyakhovsky 模型的计算结果, 参数由实验结果确定

5 量纲分析的应用

总结我们的研究结果: 地震并不在峰值点处发生, 而是滞后一段时间. 令 T_2 表示这段滞后时间 (从 LURR 异常开始到峰值点的时段称为 T_1). 不少人对 T_2 进行过研究 (刘桂萍等 1994, 尹祥础等 1994, 王海涛 1999, 张晖辉等 2005, 张晖辉 2006), 发现 T_2 和地震震级有关, 震级越大, T_2 越长. 在张晖辉等 (2005) 的文献中统计了中国大陆的 30 个 $M \geq 5$ 的地震, 得

到如下的统计结果

$$T_2 = 60(1 - 2.3 \times 10^{-0.08M}) \quad (36)$$

T_2 的单位为月. 为使读者有一个清晰的数量概念, 对于常用的震级的 T_2 列表如下

表 1 T_2 和震级的统计关系

震级 (M_s)	T /月	T_1 /月	T_2 /月
5	9	4	5 ± 2
6	22	8	14 ± 4
7	33	11	22 ± 6
8	42	14	28 ± 8
9	49	15	34 ± 10

所以峰值点非常重要. 峰值点出现后, 未来的地震就“指日可待”了.

但是我们的预测实践表明: 实际的 T_2 (称为 T_{2a}) 和理论上的 T_2 (称为 T_{2p} , 由式 (36) 计算得到的) 常常有所偏离, 而且这种偏离与地域相关, 例如发生在新疆的地震, 其 T_{2a} 常常小于 T_{2p} . 这提醒我们, 要提高预测精度, 必须结合地域性, 即考虑不同地域的不同条件 (具体为该地域的有关地球物理参数). 这促使我们, 想到量纲分析方法 (Sedov 1959, 谈庆明 2007). “量纲分析在科学和技术的各个分支的基础理论和实际问题中得到广泛的应用, 它是分析和研究问题的有力手段和方法, 是探讨科学规律, 解决科学和工程问题的有效工具” (Sedov 1959, 谈庆明 2007). 但是, 在地球科学中运用量纲分析, 常常遇到数据采集的困难. 例如, 对地震问题, 首先想到的会是地壳介质力学性能的有关参数, 如断裂韧性、强度、弹性模量等. 但是要得到全国各地地下深度处的上述参数是很困难的. 所以我们改而采用有关的地球物理参数.

5.1 发震地点的预测

未来的强震将发生在加卸载响应比的异常区内, 这已由过去的多次地震预测实践一再证实 (参看 6.1).

5.2 震级的预测

从能量平衡这一基本物理概念出发, 考虑到资料获得的可能性, 我们选取了如下变量: $E_w, I_{pp}, \dot{\gamma}, h$. 未来的地震震级和它们有关.

E_w 为某一地区地震活动性的定量表征. E_w 等于该地区长时期 (T) 里发生的所有地震所辐射的地震波能量总和, 除以时间 T 和其面积, 单位是 $J/(km^2 \cdot s)$. 从能量平衡的角度看, 它也和该地区长时间里, 由于构造运动积累的能量 (应变能) 大体相同. 我们用 1900~2009 年这 110 年的地震目录, 计算了地震波辐射的总能量, 再除以时间 (110 年) 和面积就得到中国大陆各地单位时间和面积释放的平均地震波能量 E_w (刘月等 2012, Yin et al. 2013). 中国大陆各地 E_w 的分布见图 18.

首先定义面积分 I_t 为

$$I_t = \iint_{Y \geq 1} Y dx dy = \bar{Y} A \quad (37)$$

I_t 是随时间变化的, 它是在时间窗 ($t_0 \sim t$) 内, 孕震区的面积 A 和 LURR 的平均值 \bar{Y} 的乘积, 综合地表征了孕震区的大小和程度, 所以有时称之为孕震积分, 单位是 km^2 . I_{pp} 是 I_t 的最大值. 图 19 是汶川地震 (2008, M_8) 异常区的 I_t 变化和地震时序图 (地震界通常称为 $M-T$ 图,

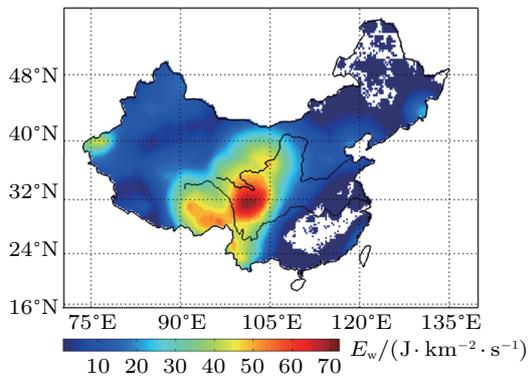


图 18 中国大陆各地平均地震波能量 E_w 的分布图

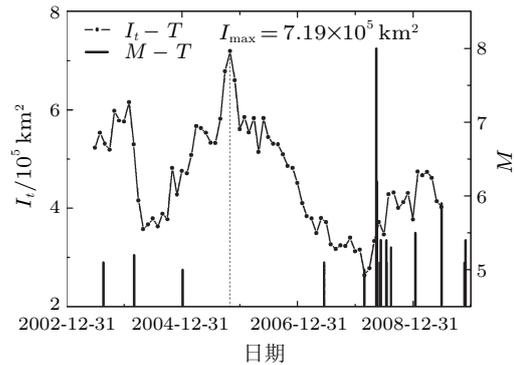


图 19 汶川地震 (2008) 异常区的 I_t 和地震时序

竖线表示在该时发生的地震, 竖线高度表示地震的震级).

$\dot{\gamma}$ 为某一地区的剪切应变率, 单位是 10^{-9} rad/a. 表征该地区的构造运动的剪应力加载率 (两者只差一个弹性常数, 但应变率便于测量), 是由 GPS 测量得到的结果 (沈正康等 2003).

h 为孕震区的厚度, 单位 km. 令 V 表示孕震区的体积, 则 $V = Ah$, A 是孕震区的面积.

根据以上参数有如下量纲分析 (E_s 是未来地震的能量)

$$[E_s] = [E_w]^{\alpha_1} \cdot [I_{pp}]^{\alpha_2} \cdot [h]^{\alpha_3} \cdot [\dot{\gamma}]^{\alpha_4}$$

本文选取时间 (T), 长度 (L) 和力 (F) 作为基本量纲, 上式写成量纲的形式为: $[F \cdot L] = [F \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}]^{\alpha_1} \cdot [L^2]^{\alpha_2} \cdot [L]^{\alpha_3} \cdot [T^{-1}]^{\alpha_4}$

令 $\beta = h/\sqrt{A}$, 最后得到

$$\frac{E_s \cdot \dot{\gamma}}{E_w \cdot I_{pp}} \propto \beta^{2/3} \quad (38)$$

显然式 (38) 两边都是无量纲量, 由此得到无量数 π_1

$$\pi_1 = \frac{E_s \cdot \dot{\gamma}}{E_w \cdot I_{pp}} \quad (39)$$

若引入

$$E_d = \frac{E_w \cdot I_{pp}}{\dot{\gamma}} \quad (40)$$

则令

$$\pi_1 = \frac{E_s}{E_d} \quad (41)$$

根据地震学的知识推定: β 与震级 M 有关, 即 π_1 是震级 M 的函数, $\pi_1 = f(M)$. 通过 MATLAB 拟合 (见图 20, 图中 $R^2 = 0.96$, R^2 是拟合曲线中自变量和因变量的相关系数, 越接近 1 说明自变量和因变量越相关, 曲线拟合得越好).

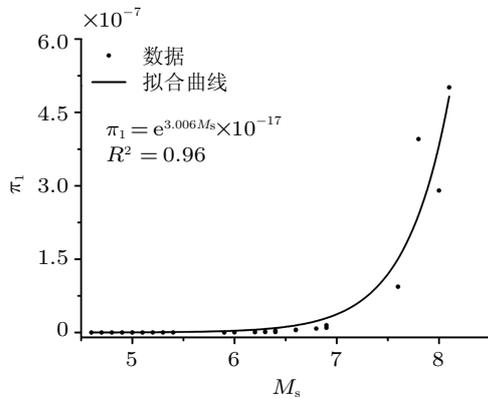


图 20 π_1 与震级的关系

最后得到数学关系式

$$\pi_1 = e^{3.006M_s} \times 10^{-17} \quad (42)$$

由上式反推出的震级记为 M_{s1}

$$M_{s1} = 5.14 \lg E_d - 112.08 \quad (43)$$

把经过数据处理后的结果记为 M_{sp}

$$M_{sp} = M_{s1} \pm 0.1 \times M_{s1} \quad (44)$$

上式中误差项的系数 0.1 是经过数据处理后 (钱伟长 1993) 确定的. M_{sp} 即为未来发生地震震级的预测值 (下标 p 表示预测). 根据预测地区的位置可确定 $E_w, \dot{\gamma}$, 对该地区连续追踪其 I_t 得到最大值即 I_{pp} . 由式 (40), 可求得 E_d . 再由式 (44) 可求得预测的震级 M_{sp} .

5.3 发震时间预测

I_t 的峰值点 I_{pp} 对应的时间记为 T_{pp} , 峰值点与地震发生的时间间隔记为 T_2 . 显然与时间相关的量是 T_2 和剪切应变率 $\dot{\gamma}$. 通过量纲分析

得到无量纲数 π_2

$$\pi_2 = T_2 \dot{\gamma} \quad (45)$$

滞后时间 T_2 也与发震震级、当地的平均地震波能量和 I_{pp} 相关, 令 π_1 与 π_2 相乘可以得到新的无量纲数 π_3

$$\pi_3 = \pi_1 \pi_2 \quad (46)$$

π_3 是 π_1 和 π_2 的函数, 也是震级的函数, 即 $\pi_3 = f(\pi_1, \pi_2) = f(M)$, 通过数据拟合可以得到 π_3 与震级的关系, $R^2 = 0.94$, 见图 21

π_3 与震级的关系为

$$\pi_3 = 7 \times 10^{-27} \times e^{3.524M_s} \quad (47)$$

由上式反推出的滞后时间记为 T_{21}

$$T_{21} = \frac{8.5E_d \times 10^{0.03M_s} \times 10^{-30.8}}{\dot{\gamma}} \quad (48)$$

把经过数据处理后的结果记为 T_{2p}

$$T_{2p} = T_{21} \pm bT_{21} \quad (49)$$

b 是数据处理后的误差项系数, 若预测未来地震发生的震级在 4.5 ~ 5.5 内, $b = 0.1$ (钱伟长 1993); 震级在 5.6 ~ 6.5 内, $b = 0.27$; 若震级大于等于 6.6 则 $b = 0.3$. T_{2p} 的单位是月, 代表预测未来地震的发生时间和峰值点时间 T_{pp} 之间的时间间隔.

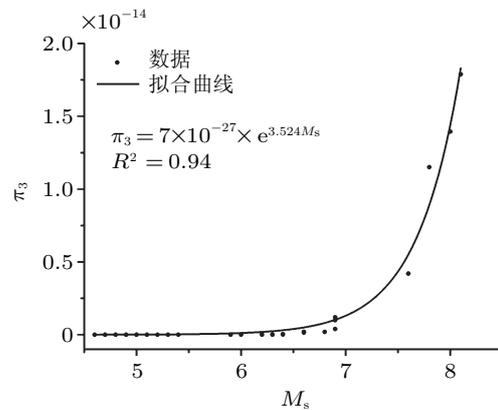


图 21 π_3 与震级之间的关系

这样, 根据 LURR 的时空扫描, 就可能全面地预测未来地震的时、空、强三要素。

6 地震预测实践

我们深知, 地震预测这个科学难题的艰难性和严肃性, 因此, 在很长一段时间里, 只限于理论研究, 而对地震预测实践不敢问津。我们也深知, 任何地震预测的思想、理论、方法, 最终要接受实践的检验而且也必须在实践中逐步发展、提高、完善。所以地震系统有一个“边研究, 边实践”的方针。根据这一方针, 我们抱着尝试、谨慎、小心的心情开始了地震预测的实践。起初, 预测失败和成功都兼而有之, 随着对强震前 LURR 的演化规律认识的深化, 加上标度率 (scaling law)、地震的概率问题研究以及预测经验的积累, 使我们的地震预测实践与时俱进, 不断提高, 从而取得一些进展。

6.1 预测未来强震的地点比较成功

中国地震局地震预测研究所在“中国大陆强震趋势预测研究 (2009 年度)”一书的“震情研究汇总报告”中写道“以落在加卸载响应比区内的与中国大陆监测能力较高地区内发生的 5.0 级地震数之比, 作为预测效果检验指标, 2004~2007 年连续 4 年里, 平均检验指标为 95%。

2008 年发生的中强地震事件, 在加卸载响应比扫描中大部分都有明确的反应, 10 个地震中, 6 个发生在响应比大于 1 的区域, 而 4 个不在异常区的地震, 两个在仲巴, 两个在改则, 都在西藏, 都是监测能力很差的地方……说明加卸载响应比与地震位置有较好的对应性。(这是中国地震局地震预测研究所的评价, 不是作者个人意见)

6.2 关于汶川地震

(1) 做出了较好的中期预测: 尹祥础等 (2005) 在 2005 年底发表的论文中, 明确指出: “该条带 (指四川龙门山断裂带, 参考 2006 年底的 LURR 空间扫描图) 长期 LURR 异常”, “未

来 18 个月内 (从 2006 年 8 月起算)”。从 2006 年 8 月起算, 18 个月, 已是 2008 年 3 月了。

(2) 震后第 10 天, 做出了正确的地震序列判断 (主-余震型), 深受好评。

(3) 正确地对一次强余震做出了正式预测 (填卡)(全球关于汶川地震余震的预测, 只有 4 张预报卡正确)。

(4) “临门一脚” 失误, 未作出短期预报。

6.3 正确预测新疆哈密地区地震

将 LURR 和量纲分析结合后的第一次地震预测是: 预测新疆哈密地区, 将在 2012 年 3 月~7 月, 发生 $M_{sp} = 5.5 \pm 0.5$ 地震 (刘月等 2012, Yin et al 2013)。实际上, 在该地区的哈密市, 2012 年 2 月 10 日发生 5.3 级地震。预测的地点, 震级均正确, 发震时间只差 19 天。这表明用 LURR 方法全面预测地震的时、空、强是可能的。

6.4 一个重要预测 — 大西南超大地震

从 21 世纪初开始, 在我国西南出现大范围的 LURR 异常, 持续存在并有所发展。我们在多次会议上提出: 这意味着, 一个超大地震正在孕育。并得到中国地震局地震预测研究所的重视, 中国地震局地震预测研究所在“中国大陆强震趋势预测研究 (2009 年度)”一书的“总论”中写道: “根据 LURR 的时空演化, 中国大陆大西南 (指从广西, 云南, 西藏和青海, 四川) 正在孕育一个超大地震, 超大地震指 8 级以上地震”。之后, 我们继续深化研究, 结合量纲分析, 初步预测这一超大地震的震级 (可能超过 8 级) 和发震时间 (从 201x 年下半年至 201x 年)。这一预测受到中国地震局领导的重视。

6.5 国外地震的预测

用 LURR 方法对国外 (美, 日, 澳大利亚, 伊朗) 及台湾 (邵宜莲 2012) 的地震预测也进行过研究和尝试, 而且取得了较好的结果 (Hosono et

al. 1996, 王裕仓等 1998, 宋治平 2000, Zhang et al. 2004, 2006, 2013).

7 结束语

除上述内容外, 还研究了 LURR 的标度律 (scaling law)(彭克银 2000, 彭克银等 2003, Peng et al. 2006) 和概率问题 (王海涛 1999), 庄建仓 1999, 陈棋福等 1996). 由于篇幅原因, 只得割爱.

地震预测之所以是世界性科学难题, 在于其复杂性. “固体破坏的物理本质, 是从原子键的断开, 到宏观固体的分离的全面展示. 正因为如此, 它跨越了从原子间距 (A) 到宏观工件 (mm-m) 之间 10^7-10^{10} 的跨度, 因此, 其间的复杂性, 可与湍流相比. 以至, 钱学森把它列入连基本概念还不清楚的一类问题”(白以龙 1997). 而地震涉及的宏观尺度大至几百到上千千米, 在此 10^{16} 的空间跨度和从几年到数千年的漫长的演化过程中, 不同尺度遵循不同的物理规律, 所以地震是典型的多尺度, 多物理问题. 震源区介质处于高温高压下, 又有多种流体与其相互作用, 还有多种天文因素也可能参与. 这涉及许多新的力学问题, 例如介质损伤的愈合问题, 各种缺陷 (如断层) 的动、静态相互作用, 加卸载波的传播 (袁帅 2011)……. 因此, LURR 只是一个非常简单的模型.

加卸载响应比从提出至今, 虽然已将近 30 个年头 (尹祥础 1987, Yin et al. 2006). 但是还有很多问题有待解决或改善, 也从另一个角度说明它还有很大的发展空间.

例如, 在 2.2 节中曾谈及: 数目众多的前兆资料从不同的侧面, 不同的时空域刻画了地震的孕育过程. 本文作者集中力量研究以地震资料为“响应”的加卸载响应比, 无暇顾及以前兆资料为“响应”的加卸载响应比. 尽管如此, 国内外许多科学家, 利用他们掌握的资料和熟悉的专业, “自发地”用前兆资料为“响应”, 研究各

种问题的加卸载响应比, 所发表的论文竟逾百篇 (<http://www.doc88.com/p-36717273437.html>). 这些论文所采用的加卸载判据, 各不相同; 计算程序, 数据格式的通用性也不够理想. 这些因素影响了其预测效果和推广. 2013 年来, 我们集中力量, 研究了统一的加卸载判据和计算程序. 推广之后, 很可能为加卸载响应比的研究与应用开创新的局面.

到目前为止, 我们的地震预测实践主要是中期地震预测 (几个月到几年). 但我们一直在思考与探索短期地震预测 (几周至几月)(袁帅 2011), 结果表明, 加卸载响应比方法在短期地震预测方面, 是可能有所作为的, 尤其是加卸载波的研究和应用 (袁帅 2011).

加卸载响应比不仅可能用于天然地震的预测, 在滑坡、水库地震、矿震, 以及大型工程结构的健康检测方面 (张浪平 2009, 2010, 2012) 也显示了良好的前景.

致谢

感谢《力学进展》樊菁主编邀约, 撰写此文. 在成文和研究过程中, 得到郑哲敏、白以龙、梁乃刚、洪友士、何国威、夏蒙芬、柯孚久、魏悦广、魏宇杰等先生的帮助, 感谢非线性力学国家重点实验室开放基金的长期资助. 在此致以深切的谢意.

参考文献

- Anthony P C. 2009. Numerical analysis of possible correlation between fracture and the effective stiffness in a brittle solid material. [Mater Thesis]. Boston: Tufts University.
- 白以龙. 1997. 非线性力学及其应用. 科学中国人, 11: 45-47. (Bai Y L. 1997. Nonlinear mechanics and its applications. *Scientific Chinese*, 11: 45-47 (in Chinese))
- Bai Y L, Lu C S, Ke F J, Xia M F. 1994. Evolution induced catastrophe. *Physics Letters A*, 185: 196-200.
- Bai Y L, Wang H Y, Xia M F, Ke F J. 2005. Statistical somechanics of solid, linking coupled multiple space and

- time scales. *Applied Mechanics Reviews*, 58: 372-388.
- 白以龙, 汪海英, 夏蒙芬, 柯孚久. 2006. 固体的统计细观力学 — 连接多个耦合的时空尺度. *力学进展*, 36: 286-305 (Bai Y L, Wang H Y, Xia M F, Ke F J. 2006. Statistical mesomechanics of solid, linking coupled multiple space and time scales. *Advances in Mechanics*, 36: 286-305 (in Chinese))
- Bai Y L, Xia M F, Ke F J, Lu C S, Ling Z. 1993. Analysis and simulation of evolution induced catastrophe. *Chinese Physics Letters*, 10: 155-158.
- 陈建民, 张昭栋, 杨林章, 石荣会, 张继红. 1994. 地下水位固体潮响应比的地震异常. *地震*, 1: 73-78 (Chen J M, Zhang Z D, Yang L Z, Shi R H, Zhang J H. 1994. Study on variation of aquifer rock parameters by water level response to earth tide. *Earthquake*, 1: 73-78 (in Chinese))
- 陈棋福, 尹祥础, 马丽. 1996. 加卸载响应比的自然概率分布. *中国地震*, 12: 269-274 (Chen Q F, Yin X C, Ma L. The natural probability distribution of load-unload response ratio. 1996. *Earthquake Research in China*, 12: 269-274 (in Chinese))
- Chen W G, He K Q, Zhang J. 2012. The theory of unload-load response ratio and its application in debris landslide forecast. *Applied Mechanics and Materials*, 166-169: 2735-2739
- 常克贵, 高立新, 张建业, 曹井泉. 1999. 加卸载响应比理论在包头西 Ms 6.4 地震预报中的应用. *西北地震学报*, 21: 350-355 (Chang K G, Gao L X, Zhang J Y, Cao J Q. 1999. Application of the load-unload response ratio theory to predicting the Baotou Ms 6.4 earthquake. *Northwestern Seismological Journal*, 21: 350-355 (in Chinese))
- Dziewonski A M, Anderson D L. 1981. Preliminary reference earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25: 297-356.
- Frank P, Benioff V H. 1973. *Biographical Memoirs*. Washington: National Academy of Sciences.
- 贺可强, 周敦云, 王思敬. 2004. 降雨型堆积层滑坡的加卸载响应比特征及其预测作用与意义. *岩石力学与工程学报*, 23: 2665-2670 (He K Q, Zhou D Y, Wang S J. 2004. Features of load-unload response ratio and its significance in predication of colluvial landslide induced by rainfall. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23: 2665-2670 (in Chinese))
- Hosono K, Yin X C, Song Z P. 1996. Did the visitor (the 1995 Hyugoken -nambu Earthquake) come along with the ominous signs? *Japans Seismological Annual Meeting*. Japan:
- Jaeger J C, Cook N G W. 1979. *Fundamentals of Rock Mechanics (Third Edition)*. London: Chapman and Hall.
- 姜彤, 马莎, 许兵, 马瑾. 2004. 边坡在地震作用下的加卸载响应规律研究. *岩石力学与工程学报*, 23: 3803-3807 (Jiang T, Ma S, Xu B, Ma J. 2004. Study on laws of load-unload response of slope under seismic load. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23: 3803-3807 (in Chinese))
- 姜彤. 2004. 边坡在地震力作用下的加卸载响应比规律与非线性稳定分析. [博士论文]. 北京: 中国地震局地质研究所 (Jiang T. 2004. Load-unload responses of slope under seismic load and nonlinear stability analysis. [Ph.D Thesis]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration (in Chinese))
- Kachanov L M. 1980. Continuum model of medium with cracks. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 106: 1039-1051.
- Kachanov L M. 1986. *Introduction to Continuum Damage Mechanics*. New York: Springer.
- Kanamori H, Anderson D L. 1975. Theoretical basis of some empirical relation in seismology. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65: 1073-1096.
- Krajcinovic D. 1996. *Damage Mechanics*. Online : Elsevier.
- Куксенко В С, Инн Ксян чу (Yin X C). 2003. Влияние Слабых Механических Воздействий Наповедение Очага Разрушения. *Известия Академии Наук Серия Физическая*, 67: 877-881 (Kucashenko V S, Yin X C. 2003. Impact of slight action to crack initiation. *Bulletin of Russia Science Academy, Geophysics series*, 67: 877-881 (in Russian))
- Laws N, Brockenbrough J R. 1987. The effect of micro-cracks systems on the loss of stiffness of brittle solids. *International Journal of Solids and Structures*, 23: 1247-1268.
- 梁乃刚, 刘庆杰, 李静, 宋海涛. 1997. 链网模型与 Si₃N₄ 陶瓷材料宏观细观力学行为模拟. *力学学报*, 29: 182-188 (Liang N G, Liu Q J, Li J, Song H T. 1997. A chain-network model simulating macromechanical behavior and micro damage evolution of Si₃N₄ ceramics. *Acta Mechanica Sinica*, 29: 182-188 (in Chinese))
- 刘桂萍, 马丽, 尹祥础. 1994. 首都圈地区中等地震前加卸载响应比特征的研究. *地震*, 14: 34-39 (Liu G P, Ma L, Yin X C. 1994. Research on the variational features of the response ratio in capital circle area. *Earthquake*, 14: 34-39 (in Chinese))
- 刘晓宇. 2001. 三维链网模型及短纤维增强复合材料行为预测. [博士论文]. 北京: 中国科学院力学研究所

- (Liu X Y. 2001. 3-D network model and mechanical behavior simulation of short-fiber reinforced composites. [Ph.D Thesis]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science (in Chinese))
- 刘月, 尹祥础, 袁帅, 张浪平. 2012. 量纲分析应用于地震预测的探索. 地球物理学报, 55: 3043-3050 (Liu Y, Yin X C, Yuan S, Zhang L P. 2012. Exploration study of dimension analysis applying to earthquake prediction. *Chinese Journal of Geophysics*, 55: 3043-3050 (in Chinese))
- 刘月, 尹祥础. 2013. 地震导致的地壳块体损伤的平板模型和加卸载响应比新定义. 地学前缘, 20: 67-72 (Liu Y, Yin X C. 2013. Plate model of crust block's damage induced by earthquake and the new definition for LURR. *Earth Science Frontiers*, 20: 67-72)
- Lyakhovsky V, Ben-Zion, Y, Agnon A. 1997a. Distributed damage, faulting, and friction. *Journal of Geophysical Research*, 102: 27635-27649.
- Lyakhovsky V, Reches Z, Weinberger R, Scott T E. 1997b. Nonlinear elastic behavior of damaged rocks. *Geophysical Journal International*, 130: 157-166.
- Mark L. 2010. Earthquake fault scaling: Self-consistent relating of rupture length, width, average displacement, and moment release. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100: 1971-1988.
- Mora P, Wang Y C, Yin C, Place D et al. 2002. Simulation of load-unload response ratio and critical sensitivity in the lattice solid model. *Pure and Applied of Geophysics*, 159: 2525-2536.
- Oda M. 1983. A method for evaluating the effect of crack geometry on the mechanical behavior of cracked rock mass. *Mechanics of Materials*, 2: 163-171.
- 彭克银. 2000. 加卸载响应比理论若干问题的深入研究及其三维数值模拟. [博士论文]. 北京: 中国地震局地球物理研究所 (Peng K Y. 2000. A deep study on some problems of load/unload response ratio theory and its 3-D simulation. [Ph.D Thesis]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration (in Chinese))
- 彭克银, 尹祥础, 和锐. 2003. 用临界点理论讨论应变能加速释放现象和孕震区尺度. 中国地震, 2003, 19: 425-430 (Peng K Y, Yin X C, He R. 2003. Accelerating strain release and earthquake genesis scaling exponents from critical point hypothesis. *Earthquake Research in China*, 2003, 19: 425-430 (in Chinese))
- Peng K Y, Yin X C, Zhang L P. 2006. A statistical investigation of earthquake predictions using LURR. *Pure and Applied of Geophysics*, 163: 2353-2362.
- 钱伟长. 1993. 应用数学. 安徽: 科学技术出版社. (Qian W C. 1993, Applied Mathematics. Anhui: Science and Technology Press(in Chinese))
- 钱学森. 2007. 钱学森书信. 北京: 国防工业出版社 (Qian X S. 2007. Qian Xuesen Letters, Beijing: National Defence Industry Press (in Chinese))
- 钱学森. 2008. 钱学森书信选. 北京: 国防工业出版社 (Qian X S. 2008. Selected Qian Xuesen letters, Beijing: National Defence Industry Press (in Chinese))
- 任隽, 陈运平, 潘纪顺, 沈繁鑫, 符干. 2005. 海南岛及其近海中强地震前加卸载响应比的变化特征. 西北地震学报, 27: 71-74 (Ren J, Chen Y P, Pan J S, Shen F L, Fu G. 2005. Variational characteristics of Load/Unload Response Ratio in Hainan island and its adjacent area before moderate-strong earthquakes. *Northwestern Seismological Journal*, 27: 71-74 (in Chinese))
- Sedov L I. 1959. Similarity and Dimensional Methods in Mechanics. London: Academic Press.
- 邵宜莲. 2012. 利用 LURR 方法探讨台湾 1994 年后大地震之前兆现象. [硕士论文]. 台湾: 中央大学
- 沈正康, 王敏, 甘卫军, 张祖胜. 2003. 中国大陆现今构造应变率场及其动力学成因研究. 地学前缘, 10: 93-100 (Shen Z K, Wang M, Gan W J, Zhang Z S. 2003. Contemporary tectonic strain rate field of Chinese continent and its geodynamic implications. *Earth Science Frontiers*, 10: 93-100 (in Chinese))
- 勝山邦久. 1996. 声发射技术的应用 (中译本). 北京: 冶金工业出版社 (Katsuyama K. 1996. Application of Acoustic Emission Technique (Chinese version), Beijing: Metallurgical Industry Press (in Chinese))
- 施行觉, 许和明, 万永中, 卢振刚. 1994. 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. 地球物理学报. 37: 633-637 (Shi X J, Xu H M, Wan Y Z, Lu Z G. 1994. The characteristic of rock fracture under simulated tide force: laboratory study on the theory of loading and unloading response ratio. *Acta Geophysica Sinica*, 37: 633-637 (in Chinese))
- 宋治平, 尹祥础, 王裕仓, 徐平, 薛艳. 2000. 美国加州地区地震前加卸载响应比的时空演化特征及预测意义. 地震学报, 22: 588-595 (Song Z P, Yin X. C, Wang Y C, Xu P, Xue Y. 2000. The tempo-spatial evolution before earthquake in USA and its implications. *Acta Seismologica Sinica*, 22: 588-595(in Chinese))
- 谈庆明. 2007. 量纲分析. 合肥: 中国科学技术大学出版社 (Tan Q M. 2007. Dimensional Analysis. Hefei: Press of University of Science and Technology of China(in Chinese))
- Trotta J E, Tullis T E. 2006. An independent assess-

- ment of the load/unload response ratio (LURR) proposed method of earthquake prediction. *Pure and Applied Geophysics*, 163: 2375-2388.
- USGS. 2010. Earthquakes and Plate Tectonics (2009). USGS earthquake hazards program. Retrieved June 03, 2010. http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/plate-tectonics/rift_man.php
- Walsh J B. 1965a. The effect of cracks on the compressibility of rock. *Journal of Geophysical Research*, 70: 381-389.
- Walsh J B. 1965c. The effect of cracks in rock on Poisson's ratio. *Journal of Geophysical Research*, 70: 5249-57.
- Walsh J. B. 1965b. The effect of cracks in the uniaxial elastic compression of rocks. *Journal of Geophysical Research*, 70: 399-411.
- 王海涛. 1999. 加卸载响应比理论在地震预报中的应用综合研究. [博士学位论文]. 北京: 中国地震局地球物理研究所. (Wang H T. 1999. Comprehensive study of LURR theory in application of earthquake prediction. [Ph.D Thesis]. Beijing: Institute of Geophysics, Chinese Earthquake Administration (in Chinese))
- 王裕仓, 宋志平, 細野耕司, 尹祥础. 1998. 日本兵库南部地震和关东地区强震前正负地震的演变特征及其对地震预测的意义. *地震学报*, 20: 29-35 (Wang Y C, Song Z P, Hosono, Yin X C. 1998. The Hyugokenambu earthquake and the evolution feature of loading /unloading earthquakes before strong earthquake in Japan Kanto region, and its implications to earthquake prediction. *Acta Seismologica Sinica*, 20: 29-35 (in Chinese))
- Wang Y C, Yin X C, Ke F J, Xia M F, Peng K Y. 2000. Numerical simulation of rock failure and earthquake process on mesoscopic scale. *Pure and Applied Geophysics*, 157: 1905-1928.
- 王裕仓. 2000. 地震过程的数值模拟及可预测性研究. [博士后工作报告]. 北京: 中国科学院力学研究所 (Wang Y C. 2000. Numerical simulation of earthquake process and predictability of earthquake. [Post-doctoral Report]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science (in Chinese))
- Weibull, B. 1951. A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of Applied Mechanics*, 18: 293-297.
- 夏蒙焚, 韩闻生, 柯孚久, 白以龙. 1995. 统计细观损伤力学和损伤演化诱致突变 (I). *力学进展*, 25: 1-40 (Xia M F, Han W S, Ke F J, Bai Y L. 1995. Statistical mesoscopic damage mechanics and damage evolution induced catastrophe (I). *Advances in Mechanics*, 25: 1-40 (in Chinese))
- 夏蒙焚, 柯孚久, 白以龙. 1997. 固体破坏的损伤演化诱致突变现象. *物理*, 26: 140-146 (Xia M F, Ke F J, Bai Y L. 1997. (Damage evolution of solid destruction induced catastrophe phenomenon. *Physics*, 26: 140-146 (in Chinese))
- 徐和钦. 1999. 非均匀材料损伤破坏的数值模拟软件开发及强韧化机理研究. [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院力学研究所 (Xu H Q. 1999. Software development of damage evolution of heterogeneous materials and investigation for reinforcing mechanism. [Master Thesis]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science (in Chinese))
- 许强, 黄润秋. 1995. 用加卸载响应比理论探讨斜坡失稳前兆. *中国地质灾害与防治学报*, 6: 25-31. (Xu Q, Huang R Q. 1995. Studies on the precursor of slope instability applying to the load-unload response ratio theory. *Chinese Journal of Geological Disasters*, 6: 25-31. (in Chinese))
- 许向红. 2005. 岩石的细观非均匀性对其宏观变形、损伤和灾变的影响. [博士学位论文]. 北京: 中国科学院力学研究所. (Xu X H. 2005. Effect of mesoscopic heterogeneity on macroscopic deformation, damage and catastrophic failure of rock. [Ph.D Thesis]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science (in Chinese))
- 许昭永, 杨润海, 王彬, 赵晋明, 王赞赞, 梅世蓉. 2002. 负坡段加卸载响应比的物理意义及预测效能. *地震学报*, 24: 42-49 (Xu Z Y, Yang R H, Wang B, Zhao J M, Wang Y Y, Mei S R. 2002. Physical meaning and prediction efficiency of the load/unload response ratio of rocks in the strain-weakening phase before failure. *Acta Seismologica Sinica*, 24: 42-49 (in Chinese))
- 杨卫. 1995. 宏微观断裂力学. 北京: 国防工业出版社 (Yang W. 1995. Macro and Micro Fracture Mechanics. Beijing: National Defence Industry Press (in Chinese))
- 尹灿. 1990. 潮汐应力与地震预报. [硕士学位论文]. 北京: 中国地震局地球物理研究所 (Yin C. 1990. Study on tidal stress and earthquake prediction. [Master Thesis]. Beijing: Institute of Geophysics, Chinese Academy of Science (in Chinese))
- Yin C. 2005. Exploring the underlying mechanism of load/unload response ratio theory and its application to earthquake prediction. [Ph.D Thesis]. Australia: University of Queensland.
- Yin C, Mora P. 2004. Some preliminary thoughts about the LURR Phenomenon. In: Proceedings of the 4th ACES Workshop. Beijing, China. 85-87, July, 2004.
- Yin C, Mora P. 2006. Stress reorientation and LURR: Implication for earthquake prediction using LURR. *Pure and Applied Geophysics*, 163: 2363-2375.

- 尹祥础. 1987. 地震预测新途径的探索. 中国地震 3: 1-7 (Yin X C. 1987. The new approach of earthquake prediction. *Earthquake Research in China*, 3: 1-7 (in Chinese))
- Иин Ксянь чу. 1993. Новый Подходк Прогногу З емлетрясений ПРИРОДА. 1: 20-27 (Yin X C. 1993. A New Approach to Earthquake Prediction. *PRERODA (Russia's "Nature")*, 1: 21-27 (in Russian))
- 尹祥础. 2004. 地震预报的新途径—从加卸载响应比理论. 力学与实践, 26: 1-7 (Yin X C. 2004. A new approach to earthquake prediction-Load/Unload Response Ratio(LURR) theory. *Mechanics in Engineering*, 26: 1-7 (in Chinese))
- 尹祥础. 2012. 在钱学森工程科学思想指引下, 创建新的地震预测理论—加卸载响应比. 见: 钱学森先生诞辰 100 周年纪念文集, 北京: 科学出版社, 157-160
- 尹祥础, 陈学忠, 宋治平, 尹灿. 1994. 加卸载响应比理论: 一种新的地震预报方法. 地球物理学报, 37: 767-775 (Yin X C, Chen X Z, Song Z P, Yin C. 1994. The load-unload response ratio theory: A new approach to earthquake prediction. *Chinese Journal of Geophysics*, 37: 767-775 (in Chinese))
- Yin X C, Chen X Z, Song Z P, Yin C. 1994. The load-unload response ratio theory and its application to earthquake prediction. *Journal of Earthquake Prediction Research*, 3: 325-333.
- Yin X C, Chen X Z, Song Z P, Yin C. 1995. A new approach to earthquake prediction-the load/unload response ratio (LURR) theory. *Pure and Applied Geophysics*, 145: 701-715.
- Yin X C, Liu Y, Mora P, Yuan S, Zhang L P. 2013. New progress in LURR-integrating with the dimensional method. *Pure and Applied Geophysics*, 170: 229-236.
- Yin X C, Mora P, Peng K Y, Wang Y C, Weatherley D. 2002. Load-unload response ratio and accelerating moment/energy release, critical region scaling and earthquake prediction. *Pure and Applied Geophysics*, 159: 2511-2524.
- Yin X C, Wang Y C, Pang K Y, Bai Y L, Wang H T, Yin X F. 2000. Development of a new approach to earthquake prediction: load/unload response ratio (LURR) theory. *Pure and Applied Geophysics*, 157: 2365-2383.
- Yin X C, Yin C, Chen X Z. 1994. The precursor of instability for nonlinear system and its application to earthquake prediction-the load-unload response ratio theory. *Non-linear Dynamics and Predictability of Geophysical Phenomena*, 55-60.
- Yin X C, Yu H Z, Kukshenko V, Xu Z Y, Wu Z S, Li M, Peng K Y, Elizarov S, Li Q. 2004. Load-unload response ratio (LURR), accelerating moment/energy release (AM/ER) and state vector as precursors to failure of rock specimens. In: *Computational Earthquake Science Part II*. Springer: Birkhäuser Basel, 2405-2416.
- 尹祥础, 张晖辉, 张浪平. 2005. 从加卸载响应比的变化预测中国大陆地震趋势. 见: 中国地震趋势预测研究 (2006 年度), 中国地震局地震预测研究所编, 北京: 地震出版社, 92-96 (Yin X C, Zhang H H, Zhang L P. 2005. According the evolution of LURR to predict the earthquake trend for Chinese mainland. In: *Research in Earthquake Trend for China*, edited by Institute of Earthquake Science China Earthquake Administration, Beijing: Seismological Press, 92-96 (in Chinese))
- Yin X C, Zhang L P, Zhang H H, Yin C, Wang Y C, Zhang Y X, Peng K Y, Wang H T, Song Z P, Yu H Z, et al. 2006. LURR's twenty years and its perspective. *Pure and Applied Geophysics*, 163: 2317-2341.
- Yin X C, Zhang L P, Zhang Y X, Peng K Y, Wang H T, Song Z P, Yu H Z, Zhang H H, Yin C, Wang Y C. 2008. The newest developments of load-unload response ratio (LURR). *Pure and Applied Geophysics*, 165: 711-722.
- Yin X C, Zhang L P, Zhang Y X, Peng K Y, Wang H T, Song Z P, Zhang X T, Yuan S. 2009. The peak point of LURR and its significance. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 22: 1549-1558.
- 余怀忠. 2004. 非均匀脆性介质破坏前兆与地震预测理论的实验研究. [博士论文]. 北京: 中国科学院力学研究所 (Yu H Z. 2004. Experimental research on precursors of brittle heterogeneous media and earthquake prediction methods. [PhD Thesis]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science (in Chinese))
- Yu H Z, Shen Z K, Wan Y G, Zhu Q Y. 2006. Increasing critical sensitivity of the load/unload response Ratio before large earthquakes with identified stress accumulation pattern. *Tectonophysics*, 428: 87-94.
- 余寿文, 冯西桥. 1997. 损伤力学. 北京: 清华大学出版社.
- 宇津德治. 1990. 地震事典 (中译本). 北京: 地震出版社.
- 袁帅. 2011. 加卸载响应比应用于短期地震预测的探索. [硕士论文]. 北京: 中国科学院力学研究所 (Yuan S. 2011. The exploration of load-unload response ratio in short-term earthquake prediction. [Master Thesis]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science (in Chinese))
- 张晖辉. 2006. 非均匀脆性介质的灾变预测—加卸载响应比理论的研究与实践. [博士论文]. 北京: 中

- 中国科学院力学研究所 (Zhang H H. 2006. Catastrophic failure prediction of heterogeneous brittle media: study and practice of load/unload response ratio theory. [Ph.D Thesis]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science (in Chinese))
- 张晖辉, 尹祥础, 梁乃刚. 2005. 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. 中国地震, 21: 486-495 (Zhang H H, Yin X C, Liang N G. 2005. Statistic study of LURR anomaly temporal scale before moderately strong earthquakes on the Chinese mainland. *Earthquake Research in China*, 21: 486-495 (in Chinese))
- Zhang H H, Yin X C, Liang N G, Yu H Z, Li S Y, Wang Y C, Yin C, Kukshenko V, Tomiline N, Elizarov S. 2006. Acoustic emission experiments of rock failure under load simulating the hypocenter condition. *Pure and Applied Geophysics*, 163: 2389-2406.
- Zhang J, He K Q, Wang S Q, Wang W. 2012. The application of ULRR-rainfall coupled in forecast prediction on Debris Landslide. *Advanced Materials Research*, 446-449: 3023-3026
- 张浪平. 2009. 孕震条件下介质的损伤演化与地震预测研究. [博士论文]. 北京: 中国科学院力学研究所 (Zhang L P. 2009. Study on damage of heterogeneous brittle media in seismogenic conditions and earthquake prediction. [Ph.D Thesis]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science (in Chinese))
- 张浪平, 余怀忠, 尹祥础, 梁乃刚. 2010. 加卸载响应比方法在结构灾变预测中的应用. 工程力学, 27: 228-235 (Zhang L P, Yu H Z, Yin X C, Liang N G. 2010. Application of the load/unload response ratio method in catastrophic failure prediction of structures. *Engineering Mechanics*, 27: 228-235 (in Chinese))
- Zhang L P, Yu H Z, Yin X C. 2012. Failure potential evaluation in engineering experiments using load/unload response ratio method. *Pure and Applied Geophysics*, 170: 237-245.
- 张文杰, 陈云敏, 贺可强. 2005. 加卸载响应比理论应用于堆积层滑坡预报. 自然灾害学报, 14: 79-83 (Zhang W J, Chen Y M, He K Q. 2005. Application of loading/unloading response ratio theory to prediction of accumulative landslide. *Journal of Natural Disasters*, 14: 79-83 (in Chinese))
- Zhang W J, Chen Y M, Zhan L T. 2006. Loading/unloading response ratio (LURR) theory applied in predicting deep-seated landslides triggering. *Engineering Geology*, 82: 234-240.
- Zhang Y X, Liu Y, Yin X C, Rundle J. 2013. SE06-A018 spatial and temporal variation of LURR before the Mexico M 7.2. In: 2010 Earthquake and Its Implication to Earthquake Forecast. Asia Oceania Geosciences Society 10th Annual Meeting, Brisbane.
- Zhang Y X, Yin X C, Peng K Y. 2004. Spatial and temporal variation of LURR and its implication for the tendency of earthquake occurrence in southern California, *Pure and Applied Geophysics*, 161: 2359-2367.
- Zhang Y X, Yin X C, Peng K Y, Wang H T, Zheng J C, Wu Y J, Zhang L P. 2006. LURR and the San Simeon M6.5 earthquake in 2003 and the seismic tendency in CA. *Pure and Applied Geophysics*, 163: 2343-2351.
- 张昭栋, 刘庆国. 1999. 1989年大同6.1级地震前后地下水位固体潮加卸载响应比的变化. 西北地震学报, 21: 356-362 (Zhang Z D, Liu G Q. 1999. Variation of loading and unloading response ratio of ground water level to earth tides before and after the Datong Ms6.1 earthquake in 1989. *Northwestern Seismological Journal*, 21: 356-362 (in Chinese))
- 中国地震局地震预测研究所. 2008. 震情研究汇总报告. 见: 中国大陆强震趋势预测研究 (2009年度), 中国地震局地震预测研究所编, 北京: 地震出版社, 3-92 (Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration. 2008. General report. In: Research on Strong Earthquake Trend Tendency in Chinese Mainland in 2009, edited by Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing: Seismological Press, 3-92 (in Chinese))
- 庄建仓. 1999. 几种随机模型下加卸载响应比的随机分布研究. [硕士论文]. 北京: 中国地震局地震预测研究所 (Zhuang J C. 1999. Study on random distribution of load-unload response ratio with several statistical models. [Master Thesis]. Beijing: Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration (in Chinese))

(责任编辑: 魏宇杰)

Load-unload response ratio — An interplay between earthquake prediction and mechanics*

YIN Xiangchu^{1,2} LIU Yue^{1,†}

¹ State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

² Institute of Earthquake Science, Chinese Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract Earthquake prediction is a scientific challenge to the world's scientists. Being a complex natural phenomenon, earthquake has a quite clear physical nature, that is, a rapid shear fracture in the crust. Accordingly, earthquake preparation is the damage evolution process for the crust media, which eventually leads to catastrophic fracture. This is mainly a mechanical process. Considering this point and grasping the physical nature of seismogenical process, we have put forward a new approach to earthquake prediction in terms of Load-Unload Response Ratio (LURR) (Yin 1987, Yin 2006).

In the present paper, we introduces the basic scientific problems, including how to load and unload the crust block, how to select proper geophysical parameters as response, and how to define LURR. Based on experiments, numerical simulations and damage mechanics analysis, the universal feature of LURR evolution before a strong earthquake has been revealed. More precisely, LURR fluctuates around 1 at the initial stage of preparation process, and then climbs to an anomalously high value (peak-point). Earthquake does not occur at this time. Instead, there is a delay time duration denoted as T_2 , which is related to the magnitude of the event. In order to predict earthquake in China, we propose to conduct countrywide spatial-temporal scanning of LURR, then to integrate with dimensional analysis so as to include more geophysical conditions into consideration. In this way, we have drawn up an approach to predict comprehensively the location, magnitude and occurrence time of forthcoming strong earthquakes. Finally, the practice of earthquake prediction with LURR has been retrospected.

Keywords LURR, earthquake prediction, peak point, dimensional analysis



尹祥础, 男, 1958年毕业于清华大学第一届工程力学研究班, 1984年在美国圣路易大学作访问学者, 多次赴昆士兰大学等参加合作研究. 中国地震局地震预测研究所研究员, 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室特聘研究员, 中国地震局地球物理研究所博士生导师, 中国科学院研究生院兼职教授, 《地震学报》, 《中国地震》, 《地震》, 及《超级计算通讯》编委, ACES (APEC Cooperation Earthquake Simulation) ISB 中国理事, 第4届 ACES workshop 主席, 中国地震预测咨询委员会委员. 享受国务院政府特殊津贴, 两次主持国家自然科学基金委员会重点项目 (脆性介质损伤累积统计和破坏预测非线性演化理论和非均匀脆性介质破坏的共性特征, 前兆与地震预测). 新的地震预报理论 — 加卸载响应比理论的奠基人. 已发表学术论文一百多篇, 专著2部. 主要研究领域: 地震力学, 地震预报理论.

* The project was supported by key project of National Natural Science Foundation (1900102201, 102205), the National Natural Science Foundation innovation group project (10721202, 11021262), the National Key Basic Research Development Program (2004 CB418406), Chinese Academy of Sciences "11th five-year plan" Special Super Computing Environment Construction and Application of Information Technology (INFO - 115 - B01) and the open fund of State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics

† E-mail: liuyue@lnm.imech.ac.cn