

加卸载响应比的新进展*

尹祥础^{1), 2), 3)} 张晖辉²⁾

- 1) 中国地震局地震预测研究所, 北京, 100080
- 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, 100036
- 3) 中国地震局地球物理研究所, 北京, 100084

摘 要 本文对此作简要介绍。主要有下三方面: 预测效果好: 2004 年发生在中国大陆有资料地区的 M_L 5 级地震共 17 次, 其中 15 次落入用加卸载响应比方法于 2003 年底预测的区域内。通过大量基础研究 (包括数值模拟, 岩石力学实验及统计细观损伤力学研究), 使加卸载响应比理论 (LURR) 建立在一个比较牢靠的科学基础上。LURR 有很大的潜力和发展空间。未来的发展空间, 除预测天然地震外, 还可能对矿震、水库地震、滑坡等自然灾害, 甚至其它自然系统以致社会系统的灾变作出预测。

关键词 加卸载响应比 (LURR); 地震预测; 水库地震; 矿山地震; 滑坡

中图分类号 P315.75 **文献标识码** A

中国的地震预报事业已经走过了近半个世纪的路程, 积累了丰富的经验与教训, 取得了丰硕的成果。重要成就之一是: 中国的科学家们创造了一系列有关地震预测的新理论、新思想、新方法。表现在会商会上, 方法很多, 各显神通。这本是好事。但有时, 各种结果彼此不协调, 甚至相矛盾, 变得难以取舍, 甚至无所适从。建议中国地震局下力气组织力量, 把目前的方法认真、仔细、系统地清理一遍, 去粗取精, 去伪存真, 选择出一批真正好的方法, 加以支持, 继续提高, 使之成为更有效的地震预测方法, 提高我国的防震抗灾能力。

本文对加卸载响应比 (LURR)^[1~7] 的新进展作一个简要的介绍。概括地说加卸载响应比 (LURR) 有三方面的优势:

1 预测效果较好

经过不断的努力加卸载响应比 (LURR) 的预测效果越来越好。以 2004 年的中国大陆的地震预测为例^[8], 图 1 是我们在中国科学院计算机网络信息中心超级计算中心深腾 6 800 超级计算上计算得到的 2003 年的 LURR 异常区和 2004 年 1 月 1 日至 2004 年 11 月 16 日发生在中国大陆地区的地震分布图。2003 年的 LURR 异常区图发表在: 中国地震局分析预报中心编, 中国地震趋势预测研究 (2004 年度) 一书的 282-285 页^[8] (地震出版社 2003 年出版)。

2004 年, 发生在全部中国大陆的 M_L 5.0 的地震共有 33 个, 其中 16 个地震处于无监测能力的地区, 按惯例不予统计。其他 17 个中有 2 个漏报, 15 个在预测区内, 占 88%。2005 年至本文脱稿时 (2005 年 4 月 16 日) 止, 中国大陆共发生 M_L 5 级地震 6 次,

* 收稿日期: 2005-04-18。

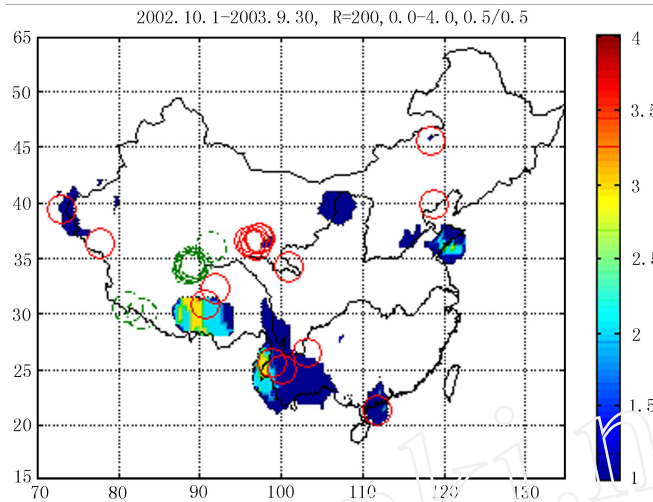


图 1 2004年发生在中国大陆地区的地震

有监测能力的地区内震级大于 5 级的地震； 无监测能力的地区内震级大于 5 级的地震

都发生在 LURR 的预测区内。这一成果来之不易，包含许多人近 20 年的不懈努力。除了经验的积累、计算能力的提高、国际合作的促进等许多因素以外，最重要的是通过大量基础研究，使加卸载响应比理论 (LURR) 建立在一个比较牢靠的科学基础上。

2 科学基础比较扎实

加卸载响应比除了从一开始提出时就有清楚的物理概念和力学基础之外，多年来通过大量基础研究，有比较扎实的科学基础。现简单扼要地介绍如下：

2.1 数值模拟

除了我们自己的工作之外，澳大利亚昆士兰大学的 P. Mora 教授等用他们创立的在世界上享有声誉的 Solid Latrice Model (SLM)，在超大型计算上进行了一系列的模拟^[9~11]，图 2 是数值模拟的一个典型结果。这些结果一再证实 LURR 的正确性，其结果发表在著名的杂志 PAGEOPH 上^[9]。P. Mora 教授等在论文中说：“当没有强地震发生时，号 LURR 在 1 附近涨落，但在大地震发生前，好 LURR 显著升高。这表明 LURR 是一

个判定趋近强地震的定量参数”。

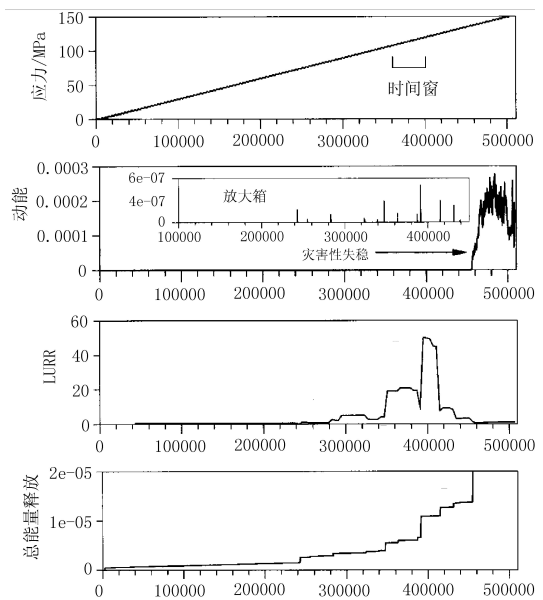


图 2 用 SLM 模型模拟的 LURR 变化规律

2.2 实验方面

我们在中国科学院非线性力学国家重点实验室进行了一系列岩石力学实验，在此基础上，又组织俄罗斯 (科学院)、澳大利亚和日本的科学家进行了两次大规模的岩石力学声发射实验^[12~15]，为了模拟地下岩石的应

力状态及破坏形式，试件采用双向压缩加载方式 ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 0$)，使之得到三向应力状态，同时，为了模拟日月引潮力对地球的加载和卸载作用，轴向压力在常数加载率的作用下，叠加上循环载荷。实验所用试件，最大尺寸达 1.05 m。大量实验结果又再次证实了 LURR 的预测能力。主要结果见图 3。

行了模拟，对非均匀脆性介质破坏的共性特征与前兆进行了比较系统、深入的研究。尤其是提出了临界敏感性概念，以解释大地震前夕的 LURR 下降现象^[16, 17]。

通过这些广泛而系统的基础研究，给 LURR 打下了坚实的科学基础。

4 LURR 还有很大的潜力和发展空间

LURR 是一个内含很宽阔的框架，可以容纳极多的资料，可以取多种地球物理参数作为“响应”，我们自已限于人力、物力，主要取地震的能量作为响应。但这几年来，有几十位地震工作者用不同的资料，利用 LURR 进行了地震预测的研究 (限于篇幅，恕不列出)。这些研究有些已经取得了较好的结果，但由于大都是自发地进行，没有足够的经费支持，不可能进行系统的研究，所以还有很大的潜力。如果能够有计划地给与支持，再将以各种参数为响应的 LURR 综合起来，其预测精度可能再上一个台阶。

LURR 潜力表现在：它不仅能作为一种地震预测的方法，它还可能用于水库地震^[18]、矿山地震^[19]、滑坡^[20, 21]，甚至其它自然系统以致社会系统灾变的预测，还有望用于大型工程的健康检测。

致谢 本文得到国家重点基础研究发展规划项目 (2004 CB418406)、国家自然科学基金委员会重点项目 (NSFC19732060)、国家地震网络计算应用节点建设项目 004DKA50740、中国地震联合基金 (305016) 与中国科学院知识创新工程信息化建设重大专项“超级计算环境建设与应用”(NF105-SCE-2-02)的资助。

(作者电子信箱，尹祥础：yin@lmm.imech.ac.cn; 张晖辉：zhanghh@lmm.imech.ac.cn)

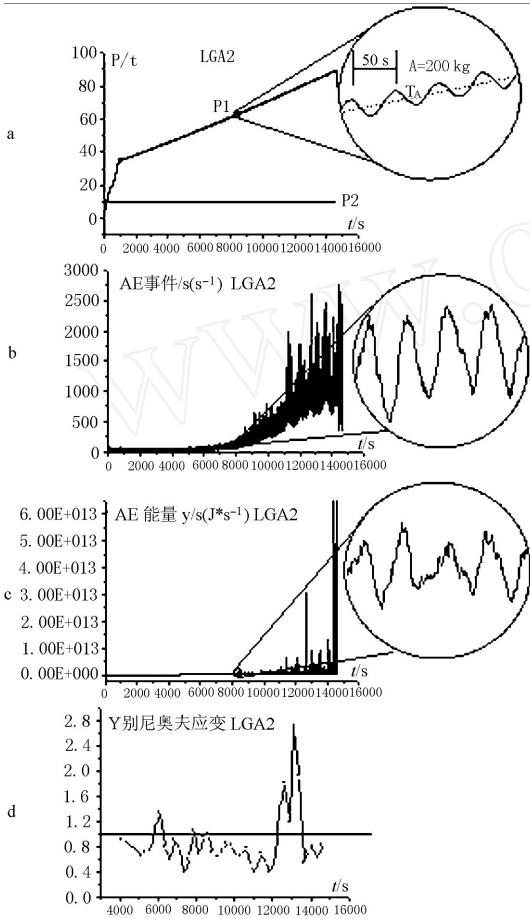


图 3 岩石力学声发射实验

a: 花岗岩试件 LGA2 的载荷-时间曲线; b: 花岗岩试件 LGA2 单位时间声发射事件数的时间序列; c: 花岗岩试件 LGA2 单位时间声发射能量的时间序列; d: 花岗岩试件的 LURR 变化曲线

2.3 统计细观力学

用统计细观力学对 LURR 的基本规律进

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报. 中国科学 D 辑, 1991, 5: 512-518
- [3] , , . A New Approach to Earthquake Prediction PRERODA, 1993(1): 21-27 (In Russian)
- [4] Yin Xiang-Chu, Yin Can and Chen Xue-Zhong 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, W. I Nanan, Gabrelov, A M and Turcotte D L). AGU Geophysical Monograph, 1994, 83: 55-60
- [5] Yin Xiang-chu, Chen Xue-zhong, Song Zhi-ping, *et al* A New Approach to Earthquake Prediction—The Load/Unload Response Ratio (LURR) Theory Pure and Appl Geophys, 1995, 145(3/4): 701-715
- [6] Yin Xiang-chu, Wang Yu-cang, Pang Ke-yin, *et al* Development of a New Approach to Earthquake Prediction—— Load/unload Response Ratio (LURR) Theory. Pure Appl Geophys, 2000, 157: 2 365-2 383
- [7] Yin X C, P Mora, 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: 2 511-2 524
- [8] 尹祥础, 张晖辉, 余怀忠, 等. 加卸载响应比理论的新进展及其对中国大陆未来地震趋势的预测. 见: 中国地震局分析预报中心编, 中国地震趋势预测研究 (2004 年度). 北京: 地震出版社, 2003, 282-285
- [9] Mora P, Y Wang, C Yin, *et al* Simulation of Load-unload Response Ratio and Critical Sensitivity in the Lattice, Solid Model, Pure Appl Geophys, 2002, 159: 2 525-2 536
- [10] Wang Yucang, Peter Mora, Can Yin and David Place. Statistical Testes of Load-Unload Response Ratio Signals by lattice Solid Model: Implication to Tidal Triggering and Earthquake Prediction Pure Appl Geophys, 2004, 161: 1 829-1 839
- [11] Wang Yucang, Yin Xiangchu, Ke Fu-jiu, *et al* Numerical Simulation of Rock Failure and Earthquake Process on Mesoscopic Scale Pure Appl Geophys, 2000, 157: 1 905-1 928
- [12] Yin Xiang-chu, Yu Huai-zhong, Victor Kukshenko, *et al* Accelerating Energy Release (AER) and State Vector Evolution as Precursors to Failure of Rock Specimens Pure Appl Geophys, 2004, 161: 2 405-2 416
- [13] , , , . , . 67, No 6 . 877-881 (中文译文见: 国际地震动态, 2005(3): 20-23)
- [14] 余怀忠, 尹祥础, 夏蒙芬, 等. 加卸载响应比 (LURR) 理论的实验研究. 中国地震, 2003, 19(1): 58-66
- [15] 张晖辉, 余怀忠, 尹祥础. 循环荷载下大试件岩石破坏声发射实验——岩石破坏前兆的研究. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3 621-3 628
- [16] Wei Y J, M F Xia, F J Ke, *et al* Evolution Induced Catastrophe and Its Predictability. Pure Appl Geophys, 2000, 157: 1 945-1 957
- [17] Xia M F, Y J Wei, F J Ke, *et al* Critical Sensitivity and Trans-Scale Fluctuations in Catastrophic Rupture Pure Appl Geophys, 2002, 159: 2 491-2 510
- [18] 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
- [19] 尹祥础, 尹迅飞, 余怀忠, 等. 加卸载响应比理论用于矿震预测的初步研究. 地震, 2004(24): 25-29
- [20] 许强, 黄润秋. 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, 1995, 6(2): 25-31

[21] 姜彤. 边坡在地震作用下的加卸载响应规律. 中国地震局地质所博士学位论文, 2004

New Development of the Load-Unload Response Ratio (LURR) Theory

Yin Xiangchu^{1), 2), 3)} and Zhang Huhui²⁾

- 1) Institute of Earthquake Prediction, CEA, Beijing, 100036, China,
E-mail: yin@lm.imech.ac.cn; zhanghh@lm.imech.ac.cn
- 2) State Key Laboratory of Non Linear Mechanics, Institute of Mechanics,
CAS, Beijing, 100080, China
- 3) Institute of Geophysics, CEA, Beijing, 100081, China

Abstract In the present paper the strengths of the Load-Unload Response Ratio Model (LURR) has been elucidated briefly as below: The results of earthquake prediction practice are quite well. For example, there were 17 earthquakes with magnitude $M_L \geq 5$ occurred in regions where the observed data are good enough to calculate LURR. Of the 17 earthquakes, 15 events (a percentage of 88%) fallen into the anomaly LURR regions according to the data in 2003. In terms of many basic researches, including numerical simulation, laboratory study of rock mechanics and statistical meso-damage mechanics, put the LURR on a solid scientific foundation. LURR still has great potential and developing room of applications, besides prediction for natural earthquakes, it could serve as a predictor for reservoir induced earthquakes, mining earthquakes, landslide, catastrophe of other natural even non-natural systems.

Key words Load-Unload Response Ratio Model (LURR); earthquake prediction; reservoir induced earthquakes; mining earthquakes; landslide