

汶川 8 级地震前加卸载响应比 的大尺度异常*

尹祥础^{1,2}, 张浪平², 张永仙^{2,3}, 彭克银^{2,3}, 王海涛^{2,4}
宋治平^{2,5}, 李文军¹, 张晓涛³, 袁 帅^{2,6}

(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 100190; 3. 中国地震台网中心, 北京 100045; 4. 新疆
维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011; 5. 上海市地震局,
上海 200062; 6. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:孕震初期加卸载响应比(LURR)通常在 1 左右涨落, 然后逐渐上升至峰值点。但强地震并不在峰值点上发生, 而要滞后一段时间(T_2)。 T_2 与震级有关, 震级越大, T_2 越长。对于 8 级地震, T_2 的计算值为 28 ± 8 个月, 汶川 8 级地震实际的 T_2 是 23 个月。对于大地震, T_2 很长, 峰值点后 LURR 通常迅速下降, 在大地震前夕 LURR 常常降得很低, 而预测的地震又迟迟没有发生, 这种情况下很容易误导人们怀疑, 甚至放弃原来的预测, 殊不知, 这时大地震正在迫近。这正是汶川 8 级地震给予人们血的教训。大地震不仅孕育时间长, 孕震区面积也很大。大地震的前兆在时空上都是大尺度。基于这种认识, 根据 LURR 的演化, 中国大陆西南地区可能正在孕育一个特大地震。

关键词:汶川 8 级地震; 加卸载响应比; 地震前兆; 大时空观

中图分类号: P315.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3274(2009)01-0053-07

引言

加卸载响应比(Load-Unload Response Ratio, 以下简称 LURR)是 20 世纪 80 年代提出的地震预测新思路^[1~3]。20 多年来, 在理论分析、数值模拟、实验研究等方面, 做了大量研究^[4~10]。以这些研究成果为基础, 使得 LURR 的预测效果不断提高。尤其是在中国大陆的年度预测方面取得了较好的结果。2004—2007 年发生在中国大陆 $M_L \geq 5$ 的地震, 平均 92% 的地震发生在先一年年底预测的 LURR 的异常区内^[11~14](发生在资料缺乏, 不能计算 LURR 的区域内的地震, 未统计在内), 如表 1 所示。

由表 1 可知, LURR 在 2004—2007 年的年度预测效果相当好。这再一次表明: LURR

* 收稿日期: 2008-10-06; 修改回日期: 2008-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(10721202)

作者简介: 尹祥础(1935-), 男, 江西永新人, 研究员, 博士生导师, 主要从事地震力学、地震预测等研究。

能科学地刻划一个地区孕震状态。对于汶川 8 级地震这样的特大地震，LURR 也必然有所反应。事实上，笔者在 2005 年、2006 年两年年底的 LURR 空间扫描中都发现该区域的 LURR 出现异常^[12, 13]，在 2006 年年底的研究报告中，明确地指出^[13]：“该条带（指四川龙门山断裂带，参考 2006 年年底的 LURR 空间扫描图）长期 LURR 异常”，“未来 18 个月内（从 2006 年 8 月起算）可能发生 $M5.0 \sim 6.0$ 地震”。从 2006 年 8 月起算，18 个月，已是 2008 年 3 月了。当然，预测的震级偏低。而更大的失误在于，在 2007 年底时笔者没有再坚持这一预测。这正是本文要着重探讨的问题。

表 1 2004—2007 年发生在中国大陆 M 5 地震总数和发生在 LURR 异常区内的 M 5 地震总数

年份	当年发生的 M 5 地震总数	发生在 LURR 异常区内的 M 5 地震总数	百分比 (%)
2004	17	15	88
2005	13	12	92
2006	9	8	89
2007	12	12	100

发生在资料缺乏，不能计算 LURR 的区域内的地震，未统计在内。

图 1 是用不同的研究方法得到的 LURR 随时间的变化规律：图 1(a) 是用地震资料得到的 Loma Preita 地震前的 LURR 变化曲线^[8]；图 1(b) 是岩石破裂声发射实验的结果^[9]；图 1(c) 则是损伤力学的解析结果^[19]。这是近年来加卸载响应比的重要研究成果。其中，特别值得提出的是峰值点的研究成果。它能更加科学、系统地观察某一地区的孕震过程，提高了预测的可靠性和精度。从以年为时间尺度，提高到以月为时间尺度进行地震预测。

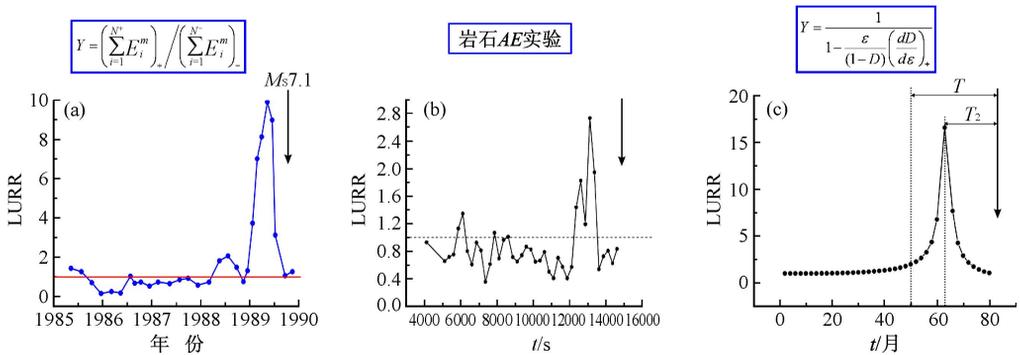


图 1 不同研究方法得到的 LURR 峰值点

(a) Loma Preita 地震 ($M_s 7.1$, 1989-10-17, in California, USA) 前的 LURR 变化；

(b) Benioff 应变的 LURR 曲线；(c) 以 D 为响应的 LURRR 曲线

从图 1 可知：地震或岩石力学实验时试件的大破裂，并不发生在 LURR 的峰值点，而是在 LURR 的峰值点之后，或者说 LURR 的峰值点超前于地震的发生。令超前的时间为 T_2 ，根据文献^[11 ~ 14]的研究， T_2 与震级有关，如式 1 (单位为月) 所示。

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

而整个的异常期为

$$T = 80(1 - 2.5 \times 10^{-0.09M}) \tag{2}$$

$$T = T_1 + T_2$$

T 、 T_1 和 T_2 的意义示于图 2。为醒目起见，表 2 中列出了不同震级对应的 T_2 。由表 2 可知，对于大地震 T_2 是一个相当长的时间，例如对于 8 级地震， T_2 长达 28 ± 8 个月（即 20 ~ 36 个月）。LURR 达到峰值后快速下降，至地震发生前 LURR 的异常反而很微弱，有时甚至完全消失。在地震预测实践中，遇到这种情况很容易发生误判。因为异常持续了几年，预测的地震迟迟不来，异常的程度又逐渐减弱，以致于消失，很容易误认为事情已经过去。殊不知这时大地震却非常逼近，这次汶川 8 级大地震的情况正是如此。

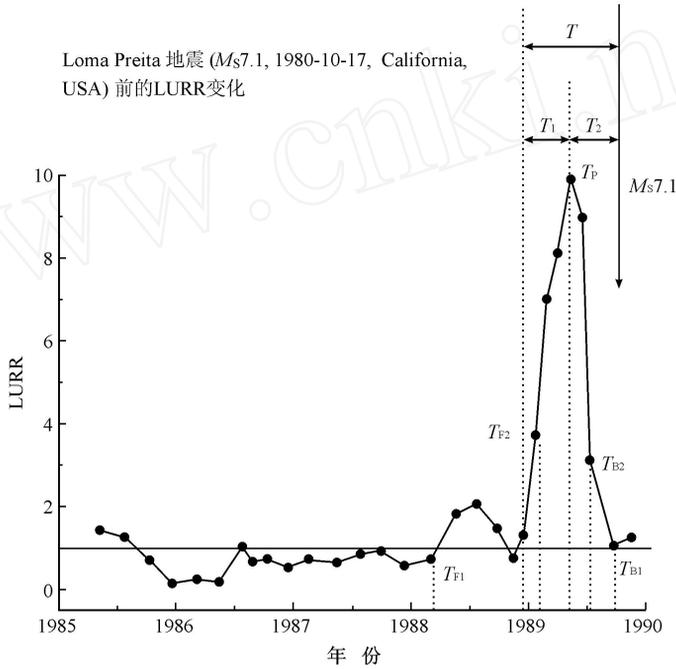


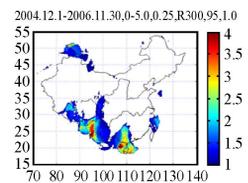
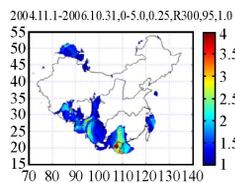
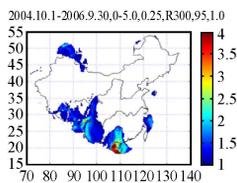
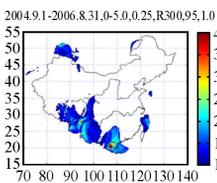
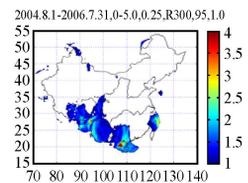
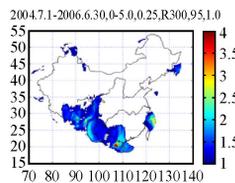
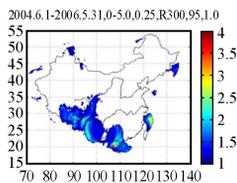
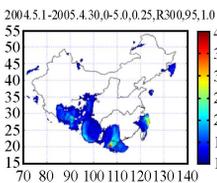
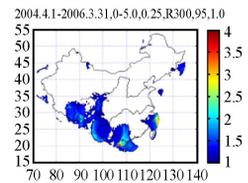
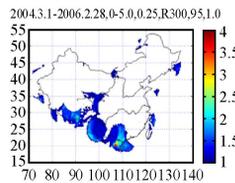
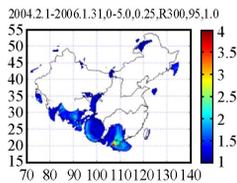
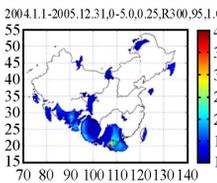
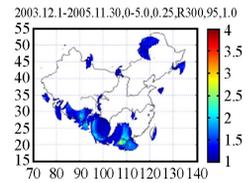
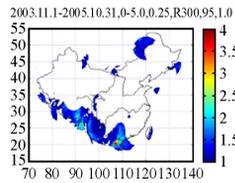
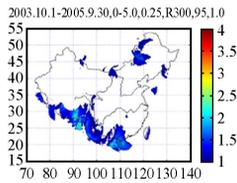
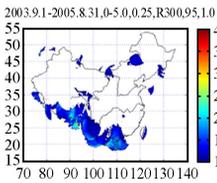
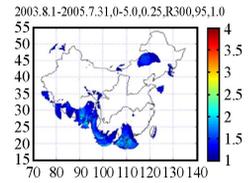
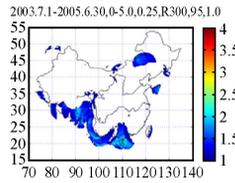
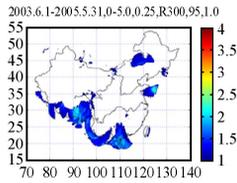
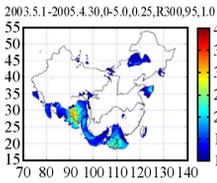
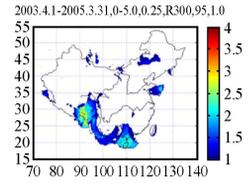
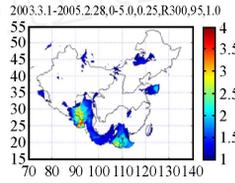
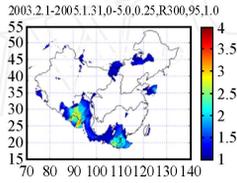
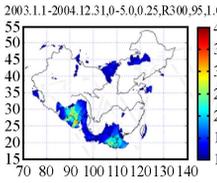
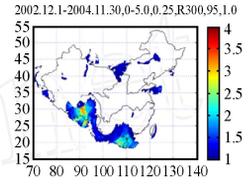
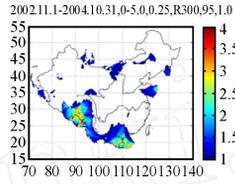
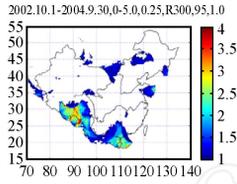
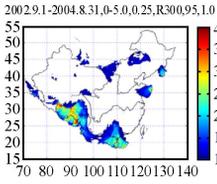
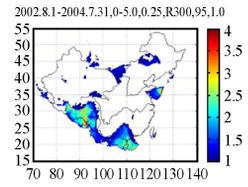
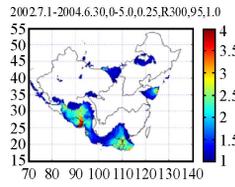
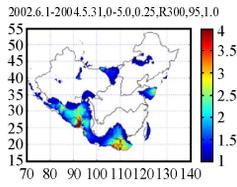
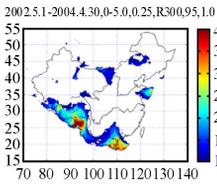
图 2 T 、 T_1 和 T_2 的意义

表 2 不同震级对应的空间扫描半径 (R)、LURR 异常持续时间 (T) 和 LURR 峰值点超前地震发生的时间 (T_2)

震级	R / km	T / 月	T_2 / 月
5	100	9	5 ± 2
6	200	22	14 ± 4
7	300	33	22 ± 6
8	600	38	28 ± 8
9	1400	49	34 ± 10

反思汶川 8 级地震的预测，还应该包括 LURR 的空间尺度。虽然笔者很早就研究过这个问题^[20, 21]，认识到预测不同大小的地震，要用不同大小的空间尺度。对于 $M \geq 7$ 的地震，其扫描半径 R 要大于 300 km (表 2)，对于 9 级特大地震， R 甚至达 1000 km 以上。多年来，一直用多个 R 值 (70 km, 100 km, 200 km, 300 km, 400 km ..) 作空间扫描。例如 2004 年发表的

论文标题就是“多时空尺度加卸载响应比扫描预测 2005 年度中国大陆地震趋势”^[12]。但是，由于中国大陆近年来很少发生 $M \geq 7$ 的地震，笔者只注意 5 级、6 级地震，所以虽然用了多个 R 值作 LURR 的空间扫描，但把主要注意力放在 $R = 200$ km 上。汶川地震高达 8 级，其 LURR 异常在 $R = 300$ km 的扫描中才更加明显、完整地显示。



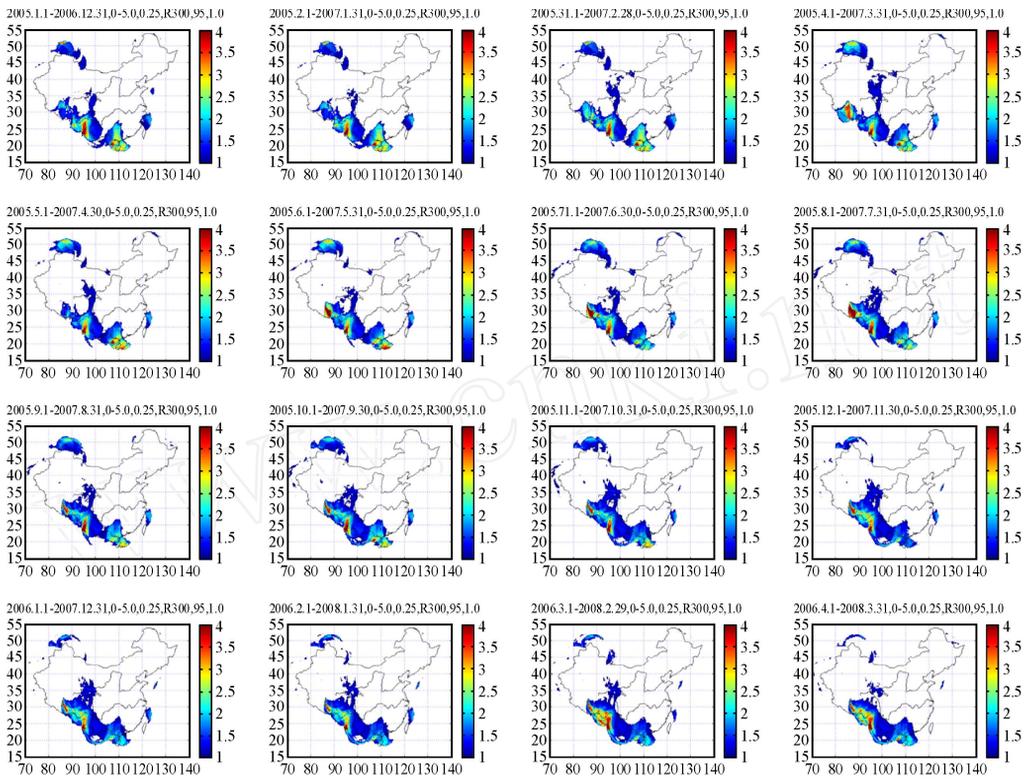


图 3 不同时段(2004 年 5 月至 2008 年 3 月)以 300 km 为半径的空间窗对中国大陆的 LURR 异常空间扫描

现在再去审视以往的结果，图 3 是用半径为 300 km 的空间窗，对中国大陆进行 LURR 扫描的结果，每月一次，从左到右，从上至下，一共 48 个月，即 4 年。第 1 张(左上角)是 2002 年 5 月至 2004 年 4 月(时间窗为 2 年，以下都只提时间窗的终点时间)，最后一张(第 48 张)是 2008 年 3 月。在 2004 年 12 月龙门山断裂带尚未出现 LURR 异常。从 2005 年 1 月才开始出现轻微的 LURR 异常(值得指出，这恰恰在 2004 年 12 月 26 日印尼苏门答腊 9 级大地震之后，笔者认为这不只是一种时间上的巧合，但其间的关系有待进一步研究)，至 2006 年 2 月达到峰值点。按表 2 推算，对于 8 级地震 $T_2 = 28 \pm 8$ 个月，据此地震应该在 2008 年 6 月前后发生，地震实际在 2008 年 5 月 12 日发生。也就是说，LURR 异常持续了 3 年多(40 个月)，LURR 峰值点超前地震发生 27 个月，即在地震发生前 27 个月时 LURR 异常的程度最显著，而在地震发生前夕(2008 年 3 月)LURR 异常的程度反而接近消失。

所以，预测大地震必须用大视野，即大的时空观。对 LURR 来说，空间窗的尺度必须足够大(表 2)，而时间上更要注意 LURR 异常的峰值点后，要过很长的时间(表 2)大地震才发生。在大地震前夕，LURR 异常常常降得很低，很容易被忽视，而放松了监测。对 LURR 异常如此，对其他地震前兆是否也如此？与有关专业的专家讨论时，多有同感。

汶川 8 级地震使笔者对大地震前 LURR 异常的变化规律有了更深入的认识，为今后大地震的预测提供了科学基础。概括为一句话，即大地震孕育的大时空观。从这样的认识

出发,笔者认识到,一个超大地震正在中国大陆大西南地区孕育(图3)。大西南地区指从广东西部、广西、云南、西藏、青海、四川南部,超大地震指8级以上地震。这个孕震区区域之大,时间之久(最大线尺度近2000 km,孕震时间已有好几年,但其孕震区连成一片是从2007年8月左右开始的)是笔者以前没有遇到过的。预测特大地震正面对一系列挑战,首先是地震的能量释放方式,它可能以8级以上特大地震方式,也可能以多次强震(5~8级)的方式释放能量。其次是如何进一步收窄它的时空域,这将是今后的艰巨研究课题。

本文得到国家自然科学基金委员会创新研究群体项目(NSFC10721202)、国家地震网络计算应用节点建设项目(2005DKA64003)与国家重点基础研究发展规划项目(2004CB418406)的资助。本项目的计算是在中国科学院超级计算中心完成的。本文中所用的地震目录来自中国地震台网中心。

参考文献:

- [1] YIN Xiang-chu, Zheng Tian-yu. A rheological model for the process of preparation of an earthquake [J]. *Scientia Sinica*, 1991, 26: 285-296.
- [2] 尹祥础. 地震预测新途径的探索[J]. *中国地震*, 1987, 3(1): 1-7.
- [3] YIN Xiang-chu, YIN Can. The precursor of instability for nonlinear systems and its application to earthquake prediction[J]. *Science in China*, 1991, 34: 977-986.
- [4] YIN Xiang-chu. A New Approach to Earthquake Prediction[J]. *PRERODA (Russia's "Nature")*, 1993, (1): 21-27 (In Russian).
- [5] YIN Xiang-Chu, YIN Can, CHEN Xue-zhong. 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"[J]. (eds, W. I. Naman, Gabrelov, A. M., and Turcotte, D. L.), *AGU Geophysical Monograph*, 1994, 83: 55-60.
- [6] YIN Xiang-chu, CHEN Xue-zhong, SONG Zhi-ping, et al. A New Approach to Earthquake Prediction—The Load/ Unload Response Ratio (LURR) Theory[J]. *PAGEOPH*, 1995, 145, (3/4): 701-715.
- [7] YIN Xiang-chu, CHEN Xue-zhong, SONG Zhi-ping, et al. A New Approach to Earthquake Prediction—The Load/ Unload Response Ratio (LURR) Theory[J]. *PAGEOPH*, 1995, 145, (3/4): 701-715.
- [8] 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[J]. *Pure Appl Geophys*, 2000, 157: 2365-2383.
- [9] YIN Xiang-chu, YU Huai-zhong, VICTOR Kukshenko, et al. Load-Unload Response Ratio (LURR), Accelerating Energy release (AER) and State Vector evolution as precursors to failure of rock specimens[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2004, 161(11-12): 2405-2416.
- [10] Yin X C, Zhang L P, Zhang H H, et al. LURR's Twenty Years and Its Perspective[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2006, 163(11-12): 2317-2341.
- [11] 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[A]. *中国地震趋势预测研究(2004年度)*[C]. 北京: 地震出版社, 2003. 282-285.
- [12] 尹祥础, 张晖辉, 余怀忠, 等. 多时空尺度加卸载响应比扫描预测 2005年度中国大陆地震趋势[A]. *中国地震趋势预测研究(2005年度)*. 北京: 地震出版社, 2004. 285-291.
- [13] 尹祥础, 张晖辉, 张浪平, 等. 从加卸载响应比的变化预测中国大陆地震趋势[A]. *中国大陆强震趋势预测研究(2006年度)*[C]. 北京: 地震出版社, 2005. 92-96.

- [14] 尹祥础, 张浪平, 张永仙, 等. 从加卸载响应比的时空演化预测中国大陆 2007 年地震趋势的初步研究[A]. 中国大陆强震趋势预测研究(2007 年度)[C]. 北京: 地震出版社, 2006.
- [15] 张晖辉, 尹祥础, 梁乃刚. 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[J]. 中国地震, 2005, 21: 486-495.
- [16] 张晖辉. 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[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
- [17] YIN Xiang-chu, ZHANG Lang-ping, ZHANG Yong-xian, et al. The Newest Developments of Load-Unload Response Ratio (LURR) [J]. PAGEOPH, 2008, 165: 711-722.
- [18] Yin et al. The peak point of LURR and its significance, 6th ACES Workshop May 11-16, 2008, Cairns, Australia.
- [19] 余怀忠, 尹祥础, 梁乃刚. 利用损伤力学模型研究地震前兆现象[J]. 地球物理学进展, 2004, 19 (2): 404-413.
- [20] 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[J]. Pure Appl Geophys, 2002, 159: 2511-2524.
- [21] 彭克银, 尹祥础, 和锐. 用临界点理论讨论应变能加速释放现象和孕震区尺度[J]. 中国地震, 2003, 19: 425-430.

Large Scale LURR Anomaly before Wenchuan Earthquake

YIN Xiang-chu^{1,2}, ZHANG Lang-ping², ZHANG Yong-xian^{2,3}, PANG Ke-yin^{2,3}
WANG Hai-tao^{2,4}, SONG Zhi-ping^{2,5}, YUAN Shuai^{2,6}

(1. Institute of Earthquake Science, CEA, Beijing 100036, China; 2. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics (LNM), Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China; 3. China Earthquake Network Center, CEA, Beijing 100036, China; 4. Xinjiang Earthquake Bureau, CEA, Urumchi 830011, China; 5. Shanghai Earthquake Bureau, CEA, Shanghai 200062, China; 6. Graduate School, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract: The Load-Unload Response Ratio (LURR) value fluctuates around 1.0 during the early stage of the seismogenic process and then gradually reaches its peak point (PP), but strong earthquakes do not onset at that time and will occur sometime later. This lag time (T_2) depends on magnitude of the impending earthquake. The larger the magnitude, the longer the lag time T_2 will be. For a large earthquake like $M8$, the anticipated T_2 is 28 ± 8 months and the real T_2 for Wenchuan earthquake was 23 months. After the peak point, LURR decreases sharply and T_2 lasts a long time. Therefore at the eve of a large event LURR would be very low, but the predicted earthquake has not happened yet. In such a case, it is easy to doubt and even give up a correct prediction. That was the blood lesson to us from Wenchuan earthquake. A large earthquake should prepare not only for a long time, but also in a vast region. In one word, the LURR anomaly (and also the other precursors perhaps) of a large earthquake will be revealed in large temporal and spatial scales. Based on this insight we predict that a super large earthquake is prepared in south-western China.

Key words: Wenchuan $M8.0$ earthquake; LURR; Earthquake precursor; Large Scale Phenomena