

“泛西南”地区加卸载响应比异常及 大震活动预测与追踪^{*}

尹祥础^{1,2}, 刘 月¹, 张浪平¹, 李文军¹, 袁 帅⁴, 张小涛³

(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. 长安大学岩土力学研究所, 陕西 西安 710064)

摘要: 21 世纪初, 在中国西南及周边地区(本文称为“泛西南”)开始出现大面积的加卸载响应比(以下简称 LURR)异常, 根据 LURR 异常演化, 我们于 2008 年首次提出该地区正在孕育着“超大地震”。追踪研究结果显示, 孕震积分 I_t 于 2012 年 7 月达到峰值。根据 LURR 与量纲分析方法结合得到的预测地震时空强的新方法, 我们预测: 2015 年 7 月前后(±25 月), 在“泛西南”地区将发生 8 级左右“超大地震”。我们在 2014 年参加的两次会议上交流了这一预测结果, 2015 年 4 月 25 日尼泊尔 $M_s 8.1$ 强震发生在预测范围内。尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震后, “泛西南”地区的加卸载响应比大尺度异常不仅没有消退, 反而更加增强。 I_t 于 2015 年 7 月达到新峰值, 超过了尼泊尔地震前的水平, 因此, “泛西南”地区可能仍面临非常严重的地震灾害。

关键词: 大地震预测; 加卸载响应比; 量纲分析; 孕震积分; “泛西南”地区; 尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震
中图分类号: P315.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-3274(2017)04-0037-13

引言

从 21 世纪初开始, 在中国西南地区及其周边, 开始出现大范围的加卸载响应比(Load-Unload Response Ratio, 以下简称 LURR)异常现象^[1]。该地区包括西藏、云南、贵州、四川、青海、广东、广西、湖南以及它们和周边邻国(巴基斯坦、印度、尼泊尔、缅甸等国)的接壤部分。其中西藏、云南、贵州及四川在地理学中称为西南区域, 但这个地区远远超出了西南区域。为了行文方便, 我们称之为“泛西南”地区。

基于“泛西南”地区的 LURR 演化, 我们对其地震危险性进行了连续的追踪研究。为了和同行专家交流、切磋, 在 20 多次国内外学术会议上报告过研究成果(见文末附录)。其中, 最早一次是在 2008 年 11 月中国地震局地震预测研究所的震情年终会商会上, 最后是在 2014 年 8 月全国超算应用大会(SCA2014)和中国地震预测咨询委员会 2014 年 11 月年

* 收稿日期: 2016-10-19; 修改回日期: 2017-07-10

基金项目: 地震预测研究所基本科研业务费专项(2015IES010204)资助

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

终会议上。我们在这两次会上提出：在 2015 年 7 月前后(±25 月)，将在“泛西南”地区发生 $M_s 8.6 \pm 0.7$ 超大地震。2015 年 4 月 25 日的尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震发生在这个区域，时空强三要素都符合。

令我们惊奇的是：2015 年 4 月 25 日尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震后，“泛西南”地区的加卸载响应比异常不仅没有消退，反而明显增强。定量地表现为：孕震积分不仅没有减小，反而仍在升高。这表明该区域地壳所积累的能量在继续增大，意味着地震危险性不降反升。由此预测：该地区可能面临严峻的地震灾害，也就是说，虽然已经发生了 $M_s 8.1$ 地震，但和 $M_s 8.1$ 震级相当，甚至更大的事件仍可能发生。为此我们进行了力所能及的探索，文中将给出多年的跟踪分析结果，望与同行切磋并供有关方面参考。

1 LURR 简介

本文的主要研究工具是 LURR，为了便于对 LURR 不够了解的读者阅读本文，首先对 LURR 作一简要描述。

1.1 基本思路

加卸载响应比是我们在 20 世纪 80 年代提出的用来度量地壳介质损伤程度的物理量，并作为地震预测的工具^[2~19]。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。钱学森先生指出：“正确地解决地震学的理论是一个力学应用问题”。我们在多年的实践中越来越深切地体会到这一点^[20~22]。地震现象虽然复杂，其物理实质却是明确的，其为地壳块体的快速剪切断裂并释放能量的过程。相应地，地震孕育过程的物理实质是震源区内介质的变形、损伤并导致失稳的过程。从地震力学的观点看，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。

众所周知，应力-应变曲线从宏观上刻画了材料受力全过程中的基本力学特性。如果使材料受力单调增加，材料将分别经历弹性变形、损伤、失稳(破坏)等过程。弹性变形的本质特征是可逆性，即加载过程和卸载过程是可逆的，因而其加载响应率(变形模量)和卸载响应率(变形模量)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，加载时的变形模量和卸载时的变形模量不同(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能下降的程度(图 1)。

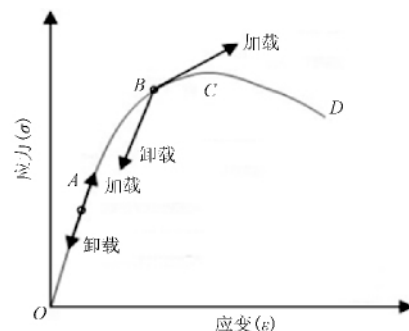


图 1 岩石的应力应变曲线

到目前为止，人类还很难测得地壳块体完整的应力-应变曲线。我们能测量到的只是地壳中某些物理量当前的变化。但如果能得到地壳介质在加载和卸载时的力学响应，就可能由此判定该地块的损伤演化程度，从而表征地震孕育过程。根据这一思路我们提出了一个定量地表征地震孕育进程的参数——加卸载响应比(LURR)^[2, 3, 9, 11, 18, 19, 22]。

实际上，到目前为止，测量地块的应力和应变都比较困难，所以测量加载和卸载时的变形模量也同样困难，因此我们用地块在加、卸载时其他物理参数(响应)的差别来代替加

卸载时变形模量的差别，称之为加卸载响应比。最先想到的是用地震波能量作为响应^[23, 24]，定义加卸载响应比的值(以 Y 表示)为

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

式(1)中， E 为地震时辐射的地震波能量，“ 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 $0 \sim 1$ 之间的任意值。当 $m=1$ 时， E^m 表示地震波能量；当 $m=1/2$ 时， E^m 表示 Benioff 应变；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个数。

1.2 地震前的 LURR 演化和峰值点

经过我们团队 30 多年的努力，在理论分析，数值模拟及岩石实验等方面作了大量研究^[2~19]。最重要的成果之一是地震前的 LURR 演化律和峰值点。不同研究方法得到共同的结果，即地震前加卸载响应比(LURR)的演化律：孕震初期，LURR 在 1 附近涨落，继而上升并达到峰值点(时间间隔记为 T_1)，但地震并不在此时发生，而是在经过时间 T_2 (称为滞后时间)后才发生，所以地震发生在 LURR 的下降阶段，把 LURR 开始出现异常至地震发生的时间间隔称为 T ， $T=T_1+T_2$ 。如图 2 所示。

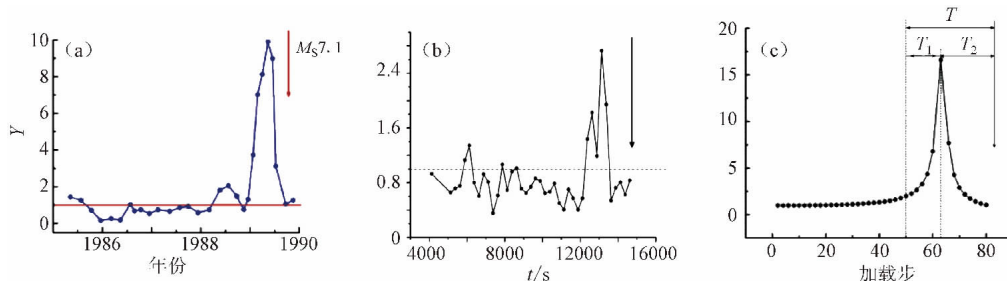


图 2 不同研究手段得到的 LURR 峰值点超前地震发生的现象

(a) Loma Preita 地震($M_S 7.1$, 1989-10-17, 美国加利福尼亚州)前的 LURR 变化；(b) 基于岩石声发射实验的 LURR 演化；(c) 损伤变量 D 为响应的加卸载响应比演化^[23]

加卸载响应比(LURR)的演化律揭示了地震孕育的演化规律，这既是重要的理论成果，又是地震预测实践时的判断依据。根据大量实际数据拟合，滞后时间 T_2 和震级相关^[25]，即

$$T_2 = 60(1 - 2.3 \times 10^{-0.08M}) \quad (2)$$

式中， T_2 的单位为月， M 为震级。为使读者有一个量的概念，表 1 中列出了不同震级对应的 T_2 。由表 1 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(2~3 年)。峰值点出现后，地震的发生就“指日可待”了。

随后的地震预测实践表明，根据式(2)预测发震时间是基本可靠的，但在有些地区，有时会出现较小的

表 1 不同震级对应的 LURR 滞后时间(T_2)和异常持续时间(T)

震级	T /月	T_2 /月
5	9	5 ± 2
6	22	14 ± 5
7	33	22 ± 9
8	38	28 ± 12
9	49	34 ± 14

系统偏差。这意味着： T_2 不仅和震级有关，还和当地的地球物理条件、地质构造等参数有关。这启示我们，应该将量纲分析方法引入地震预测。此外，式(2)中 T_2 和震级 M 密切相关。而当时，我们只是根据 LURR 异常区的大小和异常的程度凭经验估计震级 M ，要更加准确地确定震级 M 也需要引入量纲分析方法。

1.3 量纲分析方法和 LURR 的结合

量纲分析方法在工程科学中得到广泛的应用^[26~28]，其能够巧妙地将一个物理问题或现象中众多的物理参数间的关系揭示出来，表达为少数无量纲量之间的关系。但在地震预测中至今还鲜有人问津，原因之一是难以选择合适的物理参数。例如，从基本的物理概念出发，地震和地壳介质的力学性质(如强度，弹性模量，断裂韧性等)密切相关。如果要预测中国范围内的地震，需要知道中国各地地下深处(例如地下 10 km 处)介质的强度、弹性模量、断裂韧性等参数。在当下，这是难以解决的。经过多次尝试和研究，我们选择了 5 个参数，分别为 I_{pp} 、 E_s 、 E_w 、 $\dot{\gamma}$ 及 T_2 ^[15, 16, 18, 19]，3 个基本量纲(长度 L ，时间 T 和质量 M_m)进行分析。

(1) I_{pp} ：孕震积分 I_t 的峰值，单位 km^2 ，量纲 $[I_{pp}] = [L^2]$ 。 I_t 定义为加卸载响应比 Y 与异常区面积的积分，或记为 I_t ^[15, 16, 18, 19, 28]，

$$I_t = \iint_{Y>1} Y dx dy = \bar{Y} \times A \quad (3)$$

式(3)中， A 为 LURR 异常区的面积， \bar{Y} 为异常区 A 内 LURR 的平均值，其综合地刻画了 LURR 异常的广度和异常程度。所以 I_t 是一个定量地刻画 LURR 异常程度的参数。 I_t 随时间变化，当 I_t 达到极值时，称为峰值点(用 pp—peak-point 表示)(有多个极值点时，取其最大值点为峰值点)。峰值点的孕震积分的值用 I_{pp} 表示。

(2) 地震波能量 E_s ，单位 J，量纲 $[E_s] = [M_m L^2]$ 。

(3) E_w ：平均地震波能量密度，为量化的地震活动性参数，单位 $J/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ，量纲 $[E_w] = [M_m T^{-1}]$ 。

(4) $\dot{\gamma}$ ：当地的剪应变率(可根据 GPS 测量结果得到)^[29]，单位 $10^{-9}/\text{a}$ ，量纲为 $[\dot{\gamma}] = [T^{-1}]$ ；

(5) 延迟时间 T_2 ：峰值点至地震发生的时间间隔，量纲 $[T_2] = [T]$ 。

根据 π 定理^[26~28]，上述参数可以组成如下无量纲数，即

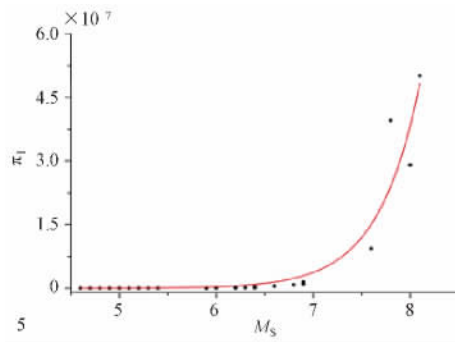
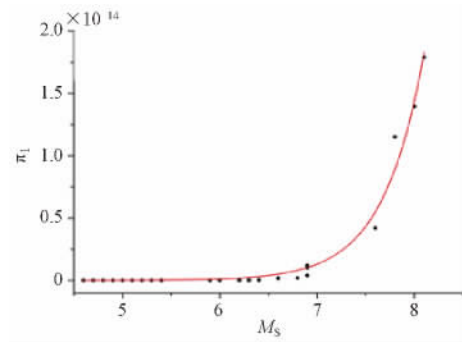
$$\pi_1 = \frac{E_s \cdot \dot{\gamma}}{E_w \cdot I_{pp}} \quad (4)$$

$$\pi_2 = T_2 \cdot \dot{\gamma} \quad (5)$$

$$\pi_3 = \pi_1 \cdot \pi_2 \quad (6)$$

其中，(4)式中 E_s 为预测事件的地震波能量。

根据中国大陆 34 个中强以上地震的实际地震资料得到的无量纲量与震级关系如图 3 和图 4 所示，横坐标是预测地震的震级 M_s 。图 3 和图 4 的拟合相关系数分别高达 $R=0.98$ 和 $R=0.97$ ，说明规律性很好。

图 3 π_1 与震级 M_S 之间的关系图 4 π_3 与震级 M_S 的关系

根据图 3 和图 4 数据拟合的结果可以得到,

$$M_S = (5.14 \lg E_d - 112) \times (1 \pm 0.1) \quad (7)$$

其中, $E_d = \frac{E_w \cdot I_{pp}}{\gamma}$, 单位为 J.

滞后时间 T_2 的预测值为

$$T_2 = \left\{ \frac{8.5 \times (E_d/E_0) \times 10^{0.03M_S/M_0} \times 10^{-30.8}}{\gamma} \right\} \times (1 \pm b), \quad (b \approx 0.1 - 0.3) \quad (8)$$

预测的地震发生时间为 T_p ,

$$T_p = T_{pp} + T_2 \quad (9)$$

其中, T_{pp} 是峰值点 I_{pp} 所对应的时间。

根据以上方法可以完整地预测地震的三要素: 地点、震级和时间。我们将上述方法用于已有震例的回顾性检验, 效果较好^[15, 16, 18, 19], 继而应用到实际预测^[15, 16, 18, 19]。先后预测了 2012 年 2 月 10 日新疆哈密 $M_S 5.3$ 地震, 2013 年吉林松原震群及内蒙古自治区阿拉善盟阿拉善左旗 2015 年 4 月 15 日 $M_S 5.8$ 地震等 3 次事件, 预测结果与实际观测的对应情况很好。虽然, 从统计的角度讲, 3 次事件太少, 但 3 次事件全部成功终究也非易事。另外, 这 3 次事件都是中强地震, 震级的跨度较窄。对于大地震, 甚至超大地震, 其预测效能有待实践检验。而“泛西南”地区的 LURR 大尺度时空异常, 恰可通过 LURR 和量纲分析相结合的方法进行尝试性分析, 我们探索着预测了这次超大地震, 在下一节予以较详细介绍。

2 2015 年尼泊尔 $M_S 8.1$ 地震前 LURR 异常及追踪研究

中国大陆地区在几个典型的不同的时间窗的 LURR 异常区分布如图 5 所示, 可以看出: 在 20 世纪 70 年代初(图 5a), LURR 的异常区还比较分散; 而在时间窗 1999-04-01~2000-09-30(图 5b), 即 21 世纪初, 在“泛西南”地区, 开始出现大范围的 LURR 异常。在此后的十多年时间里(包括汶川大地震前后), 这片异常区虽然有所起伏, 但总的趋势是 LURR 异常日益加剧(图 5c~p)^[16, 19], 其量化指标是孕震积分增大(见后文和图 6)。这意味着, 一个(群)超大地震正在该区域孕育。

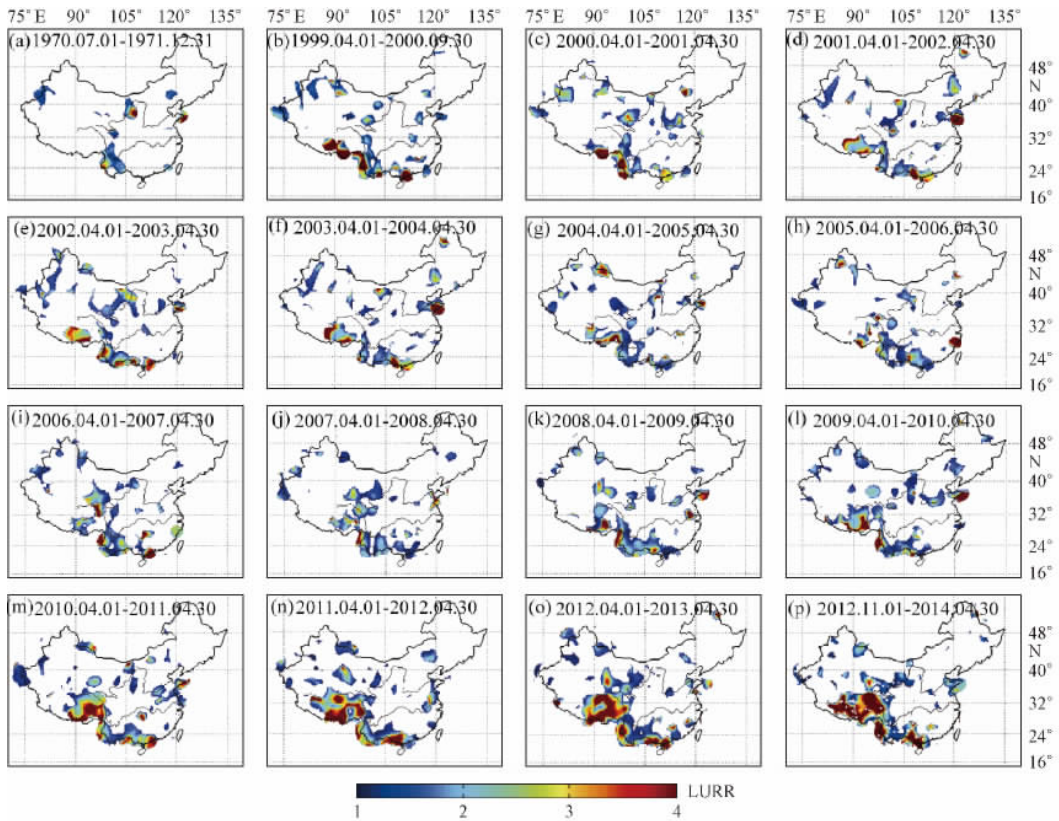


图 5 中国大陆不同时间窗的 LURR 异常分布

虽然从 21 世纪初我们就发现和开始追踪“泛西南”地区的 LURR 异常，但首次在会议上提出，是在 2008 年中国地震局地震预测研究所的年终地震会商会上。尹祥础，张浪平，李文军，袁帅及张晓涛在题为“如何预测大地震的思考——地震前兆的大时空观和加卸载响应比的标度律”的报告中首次提出：“根据中国大陆 LURR 的时空演化，一个超大地震正在“泛西南”（当时称为大西南，以后改称“泛西南”）孕育，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）^[1]。事实上，该区域内，今年已经开始有强震连发的苗头（四川，云南，西藏……）。”随后，相应的论文发表在中国地震局地震预测研究所编辑的论文集《中国大陆强震趋势预测研究（2009 年度）》中^[1]。

还要说明的是：同书中，在中国地震局地震预测研究所 2009 年度中国大陆强震趋势预测研究总报告中（文献[1]P1~90），全文引用了上述内容（文献[1]P18）。

2012 年 5 月 29 日本文第一作者尹祥础向中国地震局领导和有关部门领导汇报了“泛西南超大地震”的预测，得到重视和支持。中国地震局监测预报司和科技司，分别召集专门会议，听取本文第一作者尹祥础关于“泛西南超大地震”的预测报告，并进行了讨论。按照中国地震局有关领导的指示，我们一直在追踪、研究、探讨这个地震灾害链。为了和同行专家交流、求教，先后 20 多次在国内外学术会议上交流我们的研究成果。其中包括中国地震局地震预测研究所召开的年终地震会商、中国地震预测咨询委员会的年度学术研讨会、有关省局的咨询会以及国内外有关专业的学术研讨会等，详见附录。此外，还发表了多篇

论文，讨论“泛西南”地区的地震形势^[1, 16, 18, 19, 30]。

在上述会议中，No. 12(中国地震咨询委员会年终咨询会，2014/11)和 No. 20(SCA 2014, 2014/8, 青海，西宁)是最后两次会议。在会议上我们提交的结果是相同的。图 6 为 SCA 2014 西宁会上的关于泛西南地震预测的一张 PPT 截图。

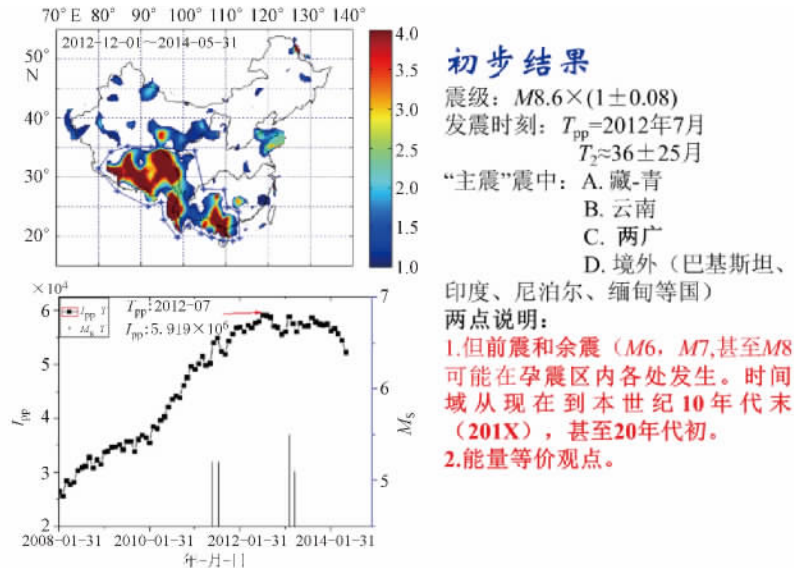


图 6 在 SCA2014 会上报告的 PPT 中关于“泛西南”地区地震预测截图

报告中我们明确地指出：该区域内，将在 2015 年 7 月左右(±25 月)发生 $M_s 7.9 \sim 9.3$ 地震。2015 年 4 月 25 日在 LURR 的异常区内(28.2°N, 84.7°E)发生 $M_s 8.1$ 大地震(图 6 和图 7)，震中在中—尼边界的尼泊尔一侧，其余震区分布在中国—尼泊尔两国境内(图 7)。该地震的时、空、强三要素都落入我们预测的范围内。

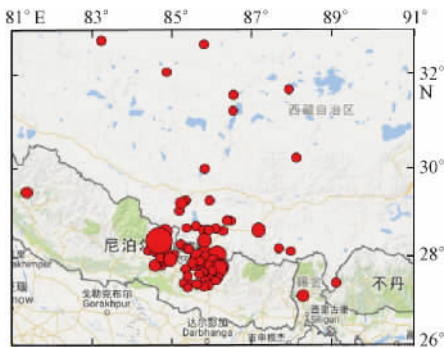


图 7 尼泊尔地震及余震分布(截至 2015/5/12)

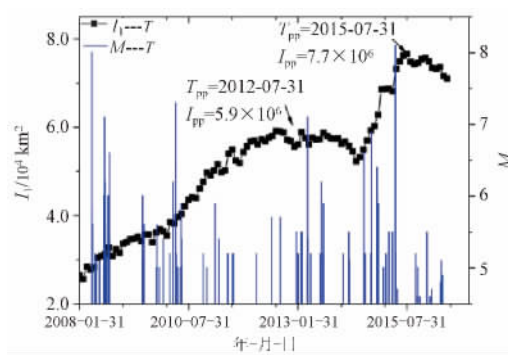


图 8 “泛西南”地区的孕震积分随时间的变化

3 尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震后“泛西南”地区的地震形势追踪

尼泊尔地震后，“泛西南”地区的加卸载响应比大尺度异常不仅没有消退，反而明显增强，其孕震积分随时间的变化如图 8 所示。震例研究表明大多数地震发生在在 I_t 达到峰值后的下降过程中。但尼泊尔 $M_s 8.1$ 地震发生在孕震积分 I_t 的上升过程中，且震后 I_t 继续

上升,并于 2015-07-31 形成新的峰值,达到 $I_{pp}=7.7\times 10^6\text{ km}^2$,超过尼泊尔 $M_S8.1$ 地震前的峰值水平($I_{pp}=5.9\times 10^6\text{ km}^2$)。

根据式(7)~(9),结合新的峰值数据,得到未来将在“泛西南”地区发生 $M_S8.8\pm 0.9$ ($M_S7.9\sim 9.7$)的强震, $T_2\approx 36\pm 18$ 月,即发震时间 T_p 为 2018/7 \pm 18月。未来地震的预测震级,可达 $M_S8.8$ 。这是一个惊人的结果。当然,这里的震级是能量等价意义上的震级,即整个“泛西南”地区所发生的所有地震的能量之和折合成的震级。无论如何,这表明该区域地壳所积累的能量仍然在增大,也意味着该地区的地震危险性仍在上升,虽然已经发生了 $M_S8.1$ 地震,但强度和 $M_S8.1$ 可比较甚至更大的地震事件可能将要来临。

在以上分析结果中,我们将“泛西南”地区作为一个整体进行研究。这样做有利于把握整体,但该地区毕竟太大(最大线尺度超过 3000 km),无论从研究的细化,还是从减灾的实际操作,都有必要“分而研之”。于是,我们换了一种思路进行探索,仔细研读“泛西南”地区的 LURR 分布(图 6),不难发现,高 LURR(图中紫红色)有 3 片,从东向西分别为: A 区:粤、桂、琼、贵(及附近海域); B 区:川滇、藏东及缅甸与中国接壤区域; C 区:藏、青及中国和尼泊尔、印度、巴基斯坦、不丹等国的接壤区域。下面分别对这 3 个区域分别进行研究。

3.1 粤、桂、琼、贵、湘(及附近海域)LURR 异常分析

对如图 9 所示的红色曲线围成的区域进行分析,该区域包含广州、深圳等一线城市和港、澳地区,是中国经济发达和人口稠密地区。如果在该区发生大地震(甚至只是中强地震),都将引起严重的灾害。该区域的孕震积分随时间的变化如图 9(b)所示:自 2007 年下半年, I_t 总体呈上升趋势,于 2015 年 6 月达到峰值, $I_{pp}=1.94\times 10^6\text{ km}^2$,之后回落。

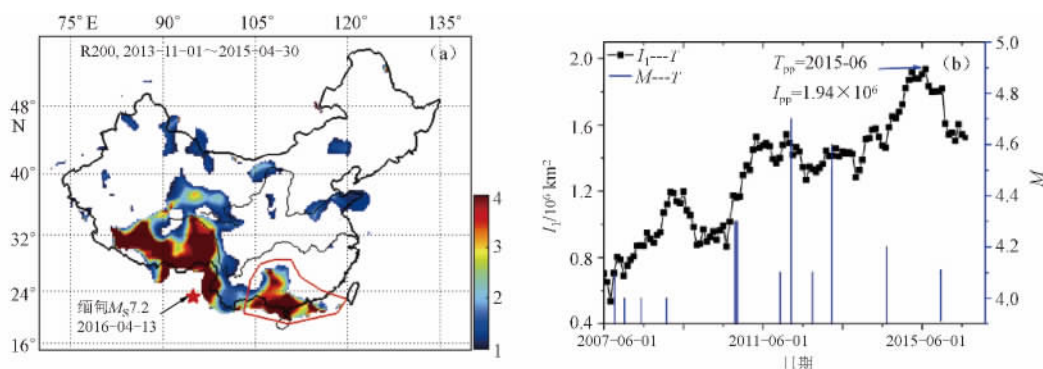


图 9 A 区的研究区域(红色折线所包含的区域)(a)和孕震积分 I_t 随时间的变化(b)

按照 LURR 与量纲分析结合的研究结果,得到未来地震的可能震级为 $M_S7.4\pm 0.7$ ($M_S6.7\sim 8.1$), $T_2\approx 36\pm 18$ 月,发震时间 T_p 为 2018 年 2 月 \pm 18 月,即 2016/8 至 2019/8。2016 年 7 月 31 日在广西梧州市苍梧县发生 5.4 级地震,震级虽不算大,却是该地区自 1970 年以来最大的地震,不是寻常事件,有可能是我们预测的大事件的前奏。

3.2 川滇、藏东及缅甸与中国接壤区域 LURR 异常分析

图 10(a)所示的红色曲线围成的不规则区域包含了川滇、藏东及缅甸与中国接壤区域,相应的孕震积分随时间的变化如图 10(b)所示。自 2010 年下半年, I_t 总体呈上升趋势,于 2013 年 5 月达到峰值, $I_{pp}=1.39\times 10^6\text{ km}^2$,之后虽略有下降,仍在较高水平波动。经过分

析得到, 该区域未来可能发生强震震级为 $M_s 7.5 \pm 0.8$ ($M_s 6.7 \sim 8.3$), $T_2 \approx 47 \pm 24$ 月, 发震时间 $T_p = 2017/4 \pm 24$ 月, 即可能的发震时间为 2015 年 4 月至 2019 年 4 月。

2016 年 4 月 13 日缅甸发生 $M_s 7.2$ 地震, 震中 $23.14^\circ N, 94.87^\circ E$, 发震震级和时间均在以上分析范围内, 发震地点在 LURR 异常区的边缘。由于震中位于两国边界的缅甸一侧, 我们没有缅甸的地震资料, 难以做出肯定的判断, 这里只做尝试性的探讨。该地震发生于孕震积分的峰值之后, 震后 B 区的 I_t 值仍处于较高水平。2016 年 7 月, 在缅甸 $M_s 7.2$ 地震震中的东侧(更靠近中国)又发生了一个震群, 最大震级达 4.8, 2017 年 3 月 27 日云南漾濞发生 $M_s 5.1$ 地震。这表明 B 区发生强震的危险性较高, 所以不能放松对该区域的监测和追踪。

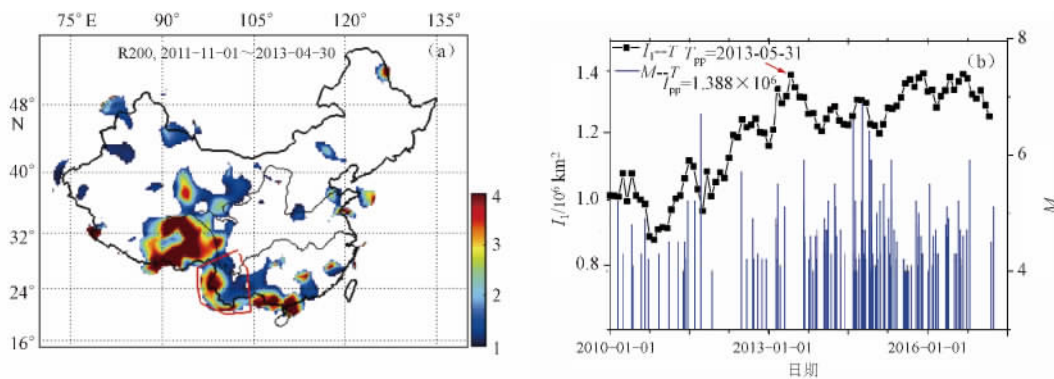


图 10 B 区的研究区域(图中红色曲线包含区域)(a)和孕震积分 I_t 随时间的变化(b)

3.3 西藏、青海及周边接壤区域 LURR 异常分析

图 11(a)所示的红色曲线围成的不规则区域包含西藏、青海及周边接壤地区, 该区域的孕震积分随时间的变化如图 11(b)所示。自 2011 年下半年至尼泊尔强震发生前, I_t 分别于 2012 年 7 月和 2014 年 4 月出现峰值, 前者有 6 级以上地震与之对应, 后者对应了尼泊尔 $M_s 8.1$ 强震。在 I_t 曲线上升过程中发生了尼泊尔强震, 震后 I_t 值持续上升, 并于 2016 年 1 月达到新的高值, $I_{pp} = 4.35 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。根据公式(7)~(9)得到未来可能发生的强震震级为 $M_s 8.0 \pm 0.8$ ($M_s 7.2 \sim 8.8$), 滞后时间 $T_2 \approx 37 \pm 19$ 月, 发震时间 T_p 为 2019/2 \pm 19 月, 即 2017-7~2020-9。

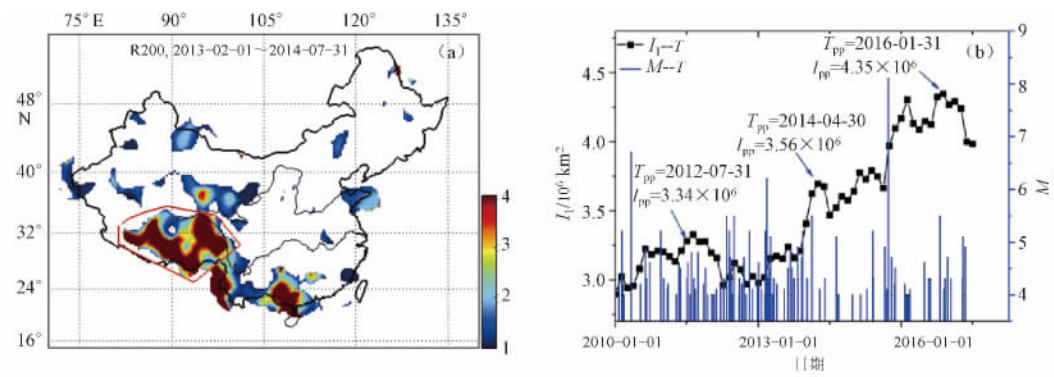


图 11 选取的研究区域(红色曲线包含的区域)(a)和孕震积分 I_t 随时间的变化(b)

4 结语

大地震的发生是小概率事件,人类对其认识还很有限。我们预测超大地震缺乏经验,以上的结果在细节上肯定存在不确定性。但无论是将“泛西南”地区作为一个整体,还是分成3个子区域进行研究,未来的地震危险性都非常高,值得有关方面重视。我们也将尽力追踪该区域LURR的演化,力求做出更为可靠的预测。

LURR方法和量纲分析的结合,形成了预测大地震的时、空、强的“路线图”,提高了LURR的预测效能,有可能成为一种应用前景较好的预测方法。在这个“路线图”中,预测地震发生地点“空”是第一步。因为在应用量纲分析方法时,首先需要判定未来地震发生的地点,然后确定该地区的有关地球物理参数,进而预测未来地震的震级和发震时间。在预测中强地震时,由于其异常区尺度小于强震的异常尺度,根据LURR的异常区确定未来地震发生的地点时,不确定性较小。但是,对于大地震(例如8级地震),LURR的异常区尺度长达上千公里,甚至更大。在如此大的区域内,不同地区物理量的数值差别可能很大,继而增大了预测震级和发震时间的不确定性。另外,预测的空间尺度太大,也给防震减灾措施的实施带来困难,所以进一步缩小危险区的范围是当前面临的迫切问题。本文中“泛西南”地区分成3个子区域分别研究,这只是一种尝试,能不能分,怎样分,在理论和实践应用都值得讨论。文中的初步结果,只是抛砖引玉,我们恳切地期待同行的交流。

根据最近研究,LURR的微分增量的时空分布有可能提供一条新路,我们将继续进行探索,结果将在另文中讨论。另外,还应该和其它方法结合起来。例如白以龙和其团队创立的临界幂律奇异性方法^[19],这是一个有理论基础的方法。此外,余怀忠等的探索也非常有意义^[31],他们将PI(Pattern Informatics)^[32, 33],LURR,SV(State Vector)^[10]and AMR(Accelerating Moment Release)^[34]结合起来。其中PI方法的优势在于为未来地震的地点提供较可靠的信息。未来地震往往发生在PI方法的“热点”(hotspots)处^[31],这恰恰是LURR所需要的。所以,PI和LURR相结合,刚好可以优势互补。

本研究得到中国地震局地震预测研究所,中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室(LNM),中国科学院计算机网络信息中心超算中心和国家自然科学基金会(1900102201,10232050,10721202,11021262),科技部973课题(项目名称:活动地块边界带的动力过程与强震预测,课题名称:区域强震活动演化的物理模型和预测模型试验)和中国地震局基本科研业务费专项“2015IES010204”的支持。有关计算在中国科学院计算机网络信息中心超算中心完成。

参考文献:

- [1] 中国地震局地震预测研究所编. 中国大陆强震趋势预测研究—2009年度[M]. 2008, 144-150.
- [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] 尹祥础, 尹灿. 非线性系统的失稳前兆与地震预报[J]. 中国科学, 1991, 21(5): 512-518.
- [4] Xiang-chu YIN, Новый Подход к Прогнозу Землетрясений[J]. ПРИРОДА, 1993, 1: 20-27. A New Approach to Earthquake Prediction[J]. PRERODA (Russia's "Nature"), 1993, 1: 21-27 (In Russian).

- [5] Yin X C, Chen X Z, Song Z P, et al. The Load-Unload Response Ratio theory and its application to earthquake prediction [J]. *Journal of Earthquake Prediction Research*, 1994, 3: 325-333.
- [6] Yin X C, Yin C, Chen X Z. The Precursor of instability for nonlinear system and its application to earthquake prediction—the load-unload response ratio theory[J]. *Nonlinear Dynamics and Predictability of Geophysical Phenomena*, 1994, 55-60.
- [7] Yin X C, Chen X Z, Song Z P, et al. A new approach to earthquake prediction—the load/unload response ratio (LURR) theory[J]. *Pure and applied Geophysics*, 1995, 145(3-4): 701-715.
- [8] Mora P, Wang Y C, Yin C, et al. Simulation of Load-unload response ratio and critical sensitivity in the lattice solid model[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2002, 159: 2525-2536.
- [9] 尹祥础. 地震预报的新途径—加卸载响应比理论[J]. *力学与实践*, 2004, 26: 1-7.
- [10] Yin X C, Yu H Z, 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.
- [11] Yin C. Exploring the underlying mechanism of load/unload response ratio theory and its application to earthquake prediction[PhD Thesis]. The University of Queensland, Australia, 2005.
- [12] Trotta J E, Tullis T E. An independent assessment of the load/unload response ratio (LURR) proposed method of earthquake prediction[M]//*Computational Earthquake Physics: Simulations, Analysis and Infrastructure*, Part II. Birkhäuser Basel, 2006, 2375-2387.
- [13] 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.
- [14] Yin X C, Zhang L P, Zhang Y X, et al. The peak point of LURR and its significance [J]. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2010, 22(12): 1549-1558.
- [15] Liu Y, Mora P, et al. New progress in LURR—integrating with the dimensional method [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2011, 170: 229-236.
- [16] 刘月, 尹祥础, 袁帅, 等. 量纲分析应用于地震预测的探索[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(9): 3043-3050.
- [17] 邵宜莲. 利用 LURR 方法探讨台湾 1994 年後大地震之前兆现象[Master's Thesis]. 國立中央大學地球物理研究所硕士论文, 2012.
- [18] 尹祥础, 刘月. 加卸载响应比—地震预测与力学的交叉[J]. *力学进展*, 2013, 43(6): 555-580.
- [19] 尹祥础. 加卸载响应比理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [20] 钱学森. 钱学森书信[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [21] 钱学森. 钱学森书信选[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [22] 尹祥础. 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[M]. 见:《钱学森先生诞辰 100 周年纪念文集》, 北京: 科学出版社, 2012, 157-160.
- [23] 张浪平. 孕震条件下介质的损伤演化与地震预测研究[D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2009.
- [24] 刘月. 加卸载响应比在地震预测中若干问题研究[D]. 中国科学院大学研究生院博士学位论文, 2014.
- [25] 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.
- [26] Sedov L I. Similarity and dimensional methods in mechanics[M]. London: Academic Press, 1959.
- [27] 郑哲敏. 中国机械工程手册(第二版)[M]. 机械工业出版社, 1997.
- [28] 谈庆明. 量纲分析[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2007.

- [29] 沈正康, 王敏, 甘卫军, 等. 中国大陆现今构造应变率场及其动力学成因研究[J]. 地学前缘, 2003, 10(S): 93-100.
- [30] Yin X C, Liu Y, Zhang L P. Load-unload response ratio and its new progress, in “imaging, modeling and assimilation in seismology”, edited by Yong-gang Li, Walter De Gruyter GmbH & Co. KG, Berlin/Boston, 219-244, 2012.
- [31] Yu H Z, Zhou F R, Zhu Q Y, et al. Development of a combination approach for seismic hazard evaluation [J]. Pure and Applied Geophysics, 2016, 173(1): 221-233.
- [32] Rundle J B, Klein W, Tiampo K, et al. Linear pattern dynamics in nonlinear threshold systems [J]. Physical Review E, 2000, 61(3): 2418.
- [33] Rundle J B, Klein W, Tiampo K, et al. Precursory seismic Activation and Critical - point Phenomena[J]. Pure and Applied Geophysics, 2000, 157(11-12): 2165-2182.
- [34] Jaume S C, Sykes L R. Evolution toward a critical point: a review of accelerating seismic moment/energy release prior to large great earthquakes[J]. Pure and Applied Geophysics, 1999, 155 (2-4): 279-305.

附录:

我们在多次国内外学术会议上交流过我们的研究成果。其中包括在一系列中国地震局地震预测研究所召开的地震会商会、中国地震预测咨询委员会的年度学术研讨会、有关省局的咨询会以及国内外有关专业的学术研讨会。列举如下:

1. 中国地震局地震预测研究所年终会商会, 2008/11. X
2. 中国地震局地震预测研究所年终会商会, 2009/11. X
3. 中国地震局地震预测研究所年终会商会, 2011/11. X
4. 中国地震咨询委员会年终咨询会, 2009/11. N
5. 中国地震咨询委员会年终咨询会, 2010/11. N
6. 中国地震咨询委员会年终咨询会, 2011/11. N
7. 中国地震咨询委员会年终咨询会, 2012/11. N
8. 中国地震咨询委员会年终咨询会, 2013/11. N
9. 中国地震咨询委员会年终咨询会, 2014/11. N
10. 科技部 973 结题验收会(项目名称: 活动地块边界带的动力过程与强震预测, 课题名称: 区域强震活动演化的物理模型和预测模型试验), 北京, 2010/12.
11. 台北中央大学地球物理学院专题报告会, 中国, 台湾, 桃园, 2010/12. N
12. The 7th ACES Workshop, (ACES—APEC Cooperation for Earthquake Simulation), 日本, 北海道, 小樽, 2010/10. (ACES Workshop 是国际地震界的主要学术会议系列, 列入 ISTEP. 本文第一作者在会议报告中指出: “A super-large earthquake with $M = 8$ is preparing in the Pan southern-western China”)
13. 新疆强震形势研讨会, 2011/09 X
14. 广东省地震局专题讨论会, 2009/02, 广东, 广州. N
15. 云南省地震局专题讨论会, 2013/5, 云南, 昆明. N
16. SCA 2011 (SCA—the conference on Super-Computing Applications of Chinese Academy of Sciences), 2011/8, 青岛. N
17. SCA 2014, 2014/8, 青海, 西宁. N
18. LNM(中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室), 创新群体向 NSFC 的课题汇报会, 辽宁, 丹东 2012/5 N
19. LNM 创新群体向 NSFC 的课题汇报会, 云南, 腾冲 2013/5. N

20. 中国地震局地质研究所马瑾院士团队专题讨论会 2012/2X

注：凡标有字母 N，表示在该次报告中所预测的地点中包括尼泊尔；凡标有字母 X，表示在该次报告中所预测的地点中包括喜马拉雅地震带。

LURR Anomaly, Prediction and Tracking of Large Earthquakes in the Pan-southwestern Region

YIN Xiang-chu^{1,2}, LIU Yue¹, ZHANG lang-ping¹,
LI Wen-jun¹, YUAN Shuai⁴, ZHANG Xiao-tao³

(1. Institute of Earthquake forecasting, CEA, Beijing 100036, China; 2. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China; 3. China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China; 4. Institute of Rock and Soil Mechanics, Changan University, Xi'an 710064, China)

Abstract: At the beginning of the 21st century, a large scale of LURR anomaly emerged in Southwestern China and its surrounding area (called “Pan south-western” in this paper). The ensuing continuous study showed that this anomaly was not only degrading, but intensifying (increasing of seismogenic integral). According to the evolution of LURR anomaly, we first pointed out that a “super-large earthquake” was preparing in the region at a meeting in 2008. The tracking study showed the seismogenic integral of LURR, denoted as I_t , was peaked in July, 2012. According to the improved method obtained by LURR combining with dimensional analysis, we predicted that an earthquake of $M > 8$ would occur in the “Pan south-western China” during the time of July 2015 minus or plus 25 months, and the prediction was reported at two meetings in 2014. The 25th April 2015 Nepal $M_s 8.1$ earthquake occurred in the range of the prediction. After the strong event, the degree of LURR anomaly in the “Pan south-western China” was increasing instead of dropping. I_t has reached a new high value, which is greater than the peak value before the Nepal $M_s 8.1$. It implies that the region is probably about to face a very serious earthquake risk.

Key words: Load-Unload Response Ratio(LURR); Earthquake Prediction and tracking; The “Pan-Southwestern China