

尼鲁帕尔·买买吐孙、王海涛、张永仙等,2017,2017年8月9日精河6.6级地震前LURR异常时空演化特征,中国地震,33(4),712~720。

2017年8月9日精河6.6级地震前 LURR异常时空演化特征

尼鲁帕尔·买买吐孙¹⁾ 王海涛¹⁾ 张永仙²⁾
刘月³⁾ 唐兰兰¹⁾ 魏芸芸¹⁾

1)新疆维吾尔自治区地震局,乌鲁木齐市新市区科学二街338号 830011

2)中国地震台网中心,北京 100045

3)中国地震局地震预测研究所,北京 100036

摘要 基于加卸载响应比理论,对2017年8月9日新疆精河6.6级地震前加卸载响应比时空演化特征和异常区的孕震积分时程曲线进行分析。结果表明,在精河6.6级地震前,研究区出现了明显的加卸载响应比高值异常区域,异常区呈现环状特征;而且,异常区域随时间逐渐向震源附近迁移,异常演化过程中异常区域内部和周围发生了6次5级以上地震,其中,2次6级地震发生在异常高值减弱过程中,异常峰值到发震的时间分别为11、22个月,大于以往研究的理论发震时间,这可能是受构造应力区域性特征影响的缘故。

关键词: 加卸载响应比 孕震积分 时空演化 精河6.6级地震

[文章编号] 1001-4683(2017)04-0712-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

20世纪80年代,尹祥础(1987)提出了加卸载响应比(Load-Unload Response Ratio, LURR)理论,它是根据介质不同变形阶段的力学特性,通过加载、卸载响应量的差别反映介质损伤程度的理论。加卸载响应比理论可以定量描述介质的损伤程度,刻画介质的损伤进程。在地震预测方面,日月运行产生的引潮力为地球提供了天然的加卸载源,据此可以非常明确地判断地震发生时处于加载阶段还是卸载阶段。已有的一系列理论分析、实验研究、数值模拟、震例分析和统计研究等工作,在一定程度上验证了该理论用于各种灾变预测的可行性(庄建仓,1999;王海涛,1999)。加卸载响应比理论的物理基础明确,是物理含义十分清晰的地震预测研究方法,已在中国大陆、美国、日本、澳大利亚和其它地区的地震预测研究中不断取得新的进展(尹祥础等,1996;张永仙等,2004;余怀忠等,2010;张浪平等,2010)。前人对国内外上百个中强以上地震前加卸载响应比变化规律进行了震例分析和统计检验,并提

[收稿日期] 2017-10-31; [修定日期] 2017-11-17

[项目类别] 新疆地震科学基金课题(201602、201702)资助

[作者简介] 尼鲁帕尔·买买吐孙,女,1986年生,工程师,硕士,主要从事数字地震学和地震预测方面的工作。

E-mail: nilupar86@163.com

取了相应的异常指标,结果表明,80%以上的地震震前出现明显的异常变化(尹祥础等,1991;宋治平等,1996;王海涛等,1998)。

天山位于新疆的中部,由西段乌兹别克斯坦境内的费尔干纳盆地向东延伸到中国的吐鲁番盆地,呈楔状分布,EW向绵延2500km,宽为300~400km,平均海拔2500m(熊小松等,2011)。天山构造经历了极其复杂的演变过程,这最早可追溯到中晚元古代,该时期是天山地震构造运动最为强烈的时期(邓起东等,2000)。天山地震带从新生代开始复活,主要表现为大规模地壳缩短和褶皱冲断推翻构造的广泛发育(李锦轶等,2006)。天山的地震活动具有强度大、频度高且不均匀分布的特点(高国英等,1993)。2016年11月25日阿克陶6.7级地震后,新疆境内5级以上地震活动水平较高,共发生6次5级以上地震,其中,2017年8月9日精河6.6级、9月16日库车5.7级地震均发生在天山地震带。本文利用加卸载响应比理论,对精河6.6级地震前孕震区加卸载响应比时空演化特征和孕震积分时序进程进行分析,总结其震前异常演化特征。

1 加卸载响应比(LURR)的计算

1.1 加卸载响应比(LURR)理论

地震是在复杂的地质构造环境中孕育和发生的,地震孕育过程的实质为地球内部震源区介质不断损伤,最后导致失稳和突发破裂并释放能量的过程(傅承义等,1985)。地震孕育过程中,由于震源区介质不均匀特性、损伤演化过程、临界条件等是未知或部分未知的,因此,我们通过各种观测手段只能了解某些物理量的变化。针对如何利用现有物理量的变化提取地震孕育过程中具有物理含义信息的问题,尹祥础(1987)提出了加卸载响应比理论来定量描述震源区的损伤程度。从岩石材料的本构关系曲线(图1)(Jaeger et al,1979)可以看出,当介质处于弹性阶段,介质的变形是可逆的,加载响应率和卸载响应率一致;当介质处于损伤阶段,加载响应率大于卸载响应率。这种差异可以定量地描述介质所处的应力状态以及损伤演化过程,从而反映介质的损伤程度,加卸载响应比理论的出发点就是定量地刻画介质损伤程度(尹祥础等,1991)。

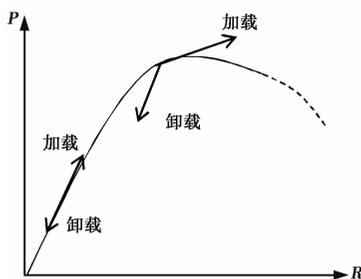


图1 岩石材料的本构关系曲线
P和R分别对应系统的载荷和响应

如图1所示,假设P和R分别为一个非线性系统的载荷和响应(尹祥础,1987),响应率X则可以表示为

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

其中, ΔP 、 ΔR 分别为载荷 P 、响应 R 的增量。如果回到应力-应变曲线, 响应率 X 即为变形模量的倒数。令 X_+ 、 X_- 分别为加载、卸载阶段的响应率, 加卸载响应比通常可以定义为

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

其中, “+”表示加载过程; “-”表示卸载过程; X 为响应率。

当系统处于稳定状态时, $X_+ \approx X_-$, $Y \approx 1$; 当系统接近失稳破坏时, $X_+ > X_-$, $Y > 1$; 当介质越接近破坏时, Y 值越大, 达到峰值。因此, 加卸载响应比的时间序列直接反映了非线性系统稳定状态的变化。当选取响应的物理量不同时, X 的表达式也不相同。地震预测研究实践中, 以一定时间窗和空间窗内释放的地震能量作为响应量, 可以根据日月潮汐力在发震断层破裂面上引起的库仑应力变化来判断加载、卸载过程, 定义加卸载响应比 Y 为(尹祥础等, 1996)

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

式中, E 为能量, 这里 E_i 表示第 i 个小地震所释放的地震波能量。 m 可以取为 $0 \sim 1$ 之间的任意值, 当 $m=0$ 时, E_i^m 为地震频次; 当 $m=1/3$ 时, E_i^m 为地震孕震区域线尺度; 当 $m=2/3$ 时, E_i^m 为地震孕震区域面尺度; 当 $m=1/2$ 时, E_i^m 为地震学中的贝尼奥夫应; 当 $m=1$ 时, E_i^m 为能量。 N_+ 和 N_- 分别为加载、卸载时段的地震数。本文中, m 为 $1/2$, E_i^m 为加载、卸载期间贝尼奥夫应变。当库仑破裂应力的增量为正时, 则定义该时期为加载时期, 此间发生的地震为加载地震; 当库仑破裂应力的增量为负时, 则定义为卸载时期, 此间发生的地震为卸载地震(张永仙等, 2004)。

岩石实验、历史震例统计、数值模拟以及损伤流变模型等研究结果表明(王海涛等, 1998; 尹祥础等, 2004; 张晖辉等, 2005), 在地震活动平静期, 加卸载响应比在 1 附近波动, 而在岩石受挤压、应力增强或者大地震孕震过程中, 加卸载响应比明显或远大于 1, 且在主震发生前迅速下降, 随后即发生地震, 因此, 加卸载响应比升高对地震预测研究具有重要意义。加卸载响应比演化的特征时间可以用 2 个参数来表示, 一个是从加卸载响应比值 $Y > 1$ 开始, 一直持续到发震的时间间隔 T , 也就是加卸载响应比的总异常时间 T , 也可以理解为地震孕育的总时间; 另一个是从加卸载响应比的峰值点到地震发生的时间间隔 T_2 , T_2 常称为滞后时间(图 2)(尹祥础等, 2009)。图 2 以 1989 年 10 月美国加利福尼亚州 Loma Priete $M7.0$ 地震前加卸载响应比的变化为例, 说明 T 和 T_2 的意义。表 1(尹祥础等, 2009) 给出了不同震级对应的异常持续时间 T 与峰值到发震的时间间隔 T_2 间的关系。由表 1 可见, 震级越大, 异常持续的时间越长, 即大地震的孕震期越长。

1.2 新疆精河 6.6 级地震

据中国地震台网测定, 2017 年 8 月 9 日 7 时 27 分, 新疆博尔塔拉州精河县发生 $M_s 6.6$ 地震, 震中位于 44.27°N 、 82.89°E , 震源深度 11km。精河 6.6 级地震震区位于北天山地区,

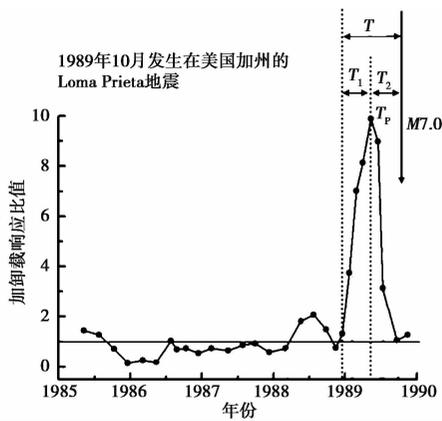


图 2 T 、 T_1 和 T_2 的意义 (据尹祥础等(2009))

T_1 为异常开始时间; T_p 为异常峰值点的时间

表 1 不同震级对应的 LURR 异常持续时间 (T) 和 LURR 峰值点超前地震发生的时间 (T_2) (据尹祥础等(2009))

震级	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	$34 \pm 10?$

2011 年以来新疆地区中强地震活动呈现“时间上连续,空间上多带分布”的活动特征,主体活跃区为北天山地区。自 2015 年以来,天山中西段发生了 6 次 5 级以上地震(表 2),其中,6 级地震 2 次,分别为 2016 年 12 月 8 日呼图壁 6.2 级、2017 年 8 月 9 日精河 6.6 级地震(图 3)。

表 2 2015 年 1 月~2017 年 9 月研究区发生的 $M \geq 5.0$ 地震参数

序号	发震时刻 (年-月-日 T 时:分:秒)	北纬/(°)	东经/(°)	深度/km	震级 M_s	震中所在地
1	2015-02-22 T 14:42:56	44.10	85.70	4	5.0	沙湾县
2	2016-01-14 T 05:18:14	42.19	84.12	5	5.3	轮台县
3	2016-02-11 T 21:10:58	43.55	82.55	8	5.0	新源县
4	2016-12-08 T 13:15:03	43.83	86.35	6	6.2	呼图壁县
5	2017-08-09 T 07:27:52	44.27	82.89	11	6.6	精河县
6	2017-09-16 T 18:11:32	42.11	83.43	6	5.7	库车县

距精河 6.6 级地震震中 200km 范围内,1900 年以来发生过 10 次 6 级以上地震,最大震级地震为 1944 年 3 月 10 日新源县 7.2 级地震,其震中距此次精河地震震中 95km。精河 6.6 级地震发生在北天山西段的库松木契克山前断层东末端,该断裂东起基普克一带,向西经扫子木图沿库松木契克山前及北缘延伸至赛里木湖,总体呈 $290^\circ \sim 300^\circ$ 方向延伸,长约 160km,断面南倾,倾角 $40^\circ \sim 60^\circ$,性质以逆冲为主,兼右旋走滑,平面上断层呈略向北突出的弧形(邓启东等,2000)。

1.3 资料选取

本文研究所用的目录为新疆地震快报目录(已进行了删除余震处理),该目录包括 1970 年以来 0 级以上的地震。本文研究的目标震级大于 $M_s 5.0$,计算过程中为了避免目标大地震对计算值的大幅干扰,计算目录震级范围为 $M_s 1.0 \sim 4.0$ 。将新疆地区划分为 $2^\circ \times 2^\circ$ 的区域进行时空扫描,即设定固定的计算时间窗口,以半径为 R 的圆形区域作为空间窗,纬度固定,再以一定的滑动步长沿经度方向进行空间扫描,针对每一个空间点计算圆形区域内加卸载响

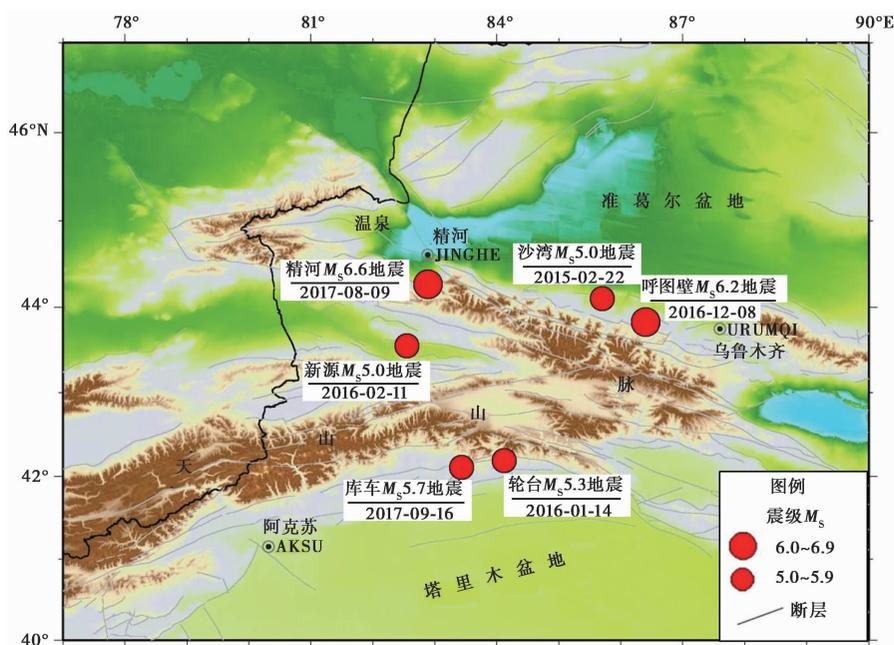


图 3 2015 年 1 月~2017 年 9 月研究区发生的 $M \geq 5.0$ 地震震中分布

应比,然后再沿着纬度方向进行扫描(唐兰兰等,2014;刘月,2014;尼鲁帕尔·买买吐孙等,2017)。

由于不同的扫描半径 R 所包含的地震个数不同,而不同的地震个数所得结果的信度不同。据尹祥础(2015)的研究,1 个震级为 5 级(或 6、7 级)的地震,其孕震区的空间尺度约为 90km(或 170、330km),当预测震级为 5 级(或 6、7 级)时,其时空扫描的空间区域尺度可以选用 100km(或 200、300km)

$$\lg R = 0.087 + 0.34M \tag{4}$$

式中, R 为从加卸载响应比的角度确定的孕震区的空间尺度; M 为预测震级。因此,本文可根据式(4)确定孕震区的扫描半径。

本文研究区范围为 $40^\circ \sim 50^\circ\text{N}$ 、 $75^\circ \sim 88^\circ\text{E}$,空间扫描半径 R 为 200km,滑动步长为 0.25° 的圆形区域;以 15 个月为时间窗、30 天为滑动步长进行时间扫描。扫描过程中圆形区域内地震数目太少,容易引起虚假异常,因此,计算过程中每个窗口内地震数至少应为 20 个。篇幅所限,本文仅给出了 2014 年 10 月~2017 年 8 月间的部分时空扫描结果(图 2)。

2 LURR 异常时空演化特征分析

图 4 为北天山西段 LURR 异常时空演化图像。由图 4 可见,2014 年 10 月前,研究区(图 4 红色圈内)无明显 LURR 异常,其边缘的乌什地区出现小面积异常。从 2014 年 11 月开始,伊犁盆地以北温泉-乌苏地区出现较大面积的异常,2015 年 1 月后异常幅度和面积逐渐增大,伊犁盆地两侧异常区连成一片,2 月 11 日异常区边缘发生沙湾 5.0 级地震;7 月后异常区面积收缩,但温泉以北地区异常幅度增强,至 2015 年 12 月异常幅度达到峰值,其后

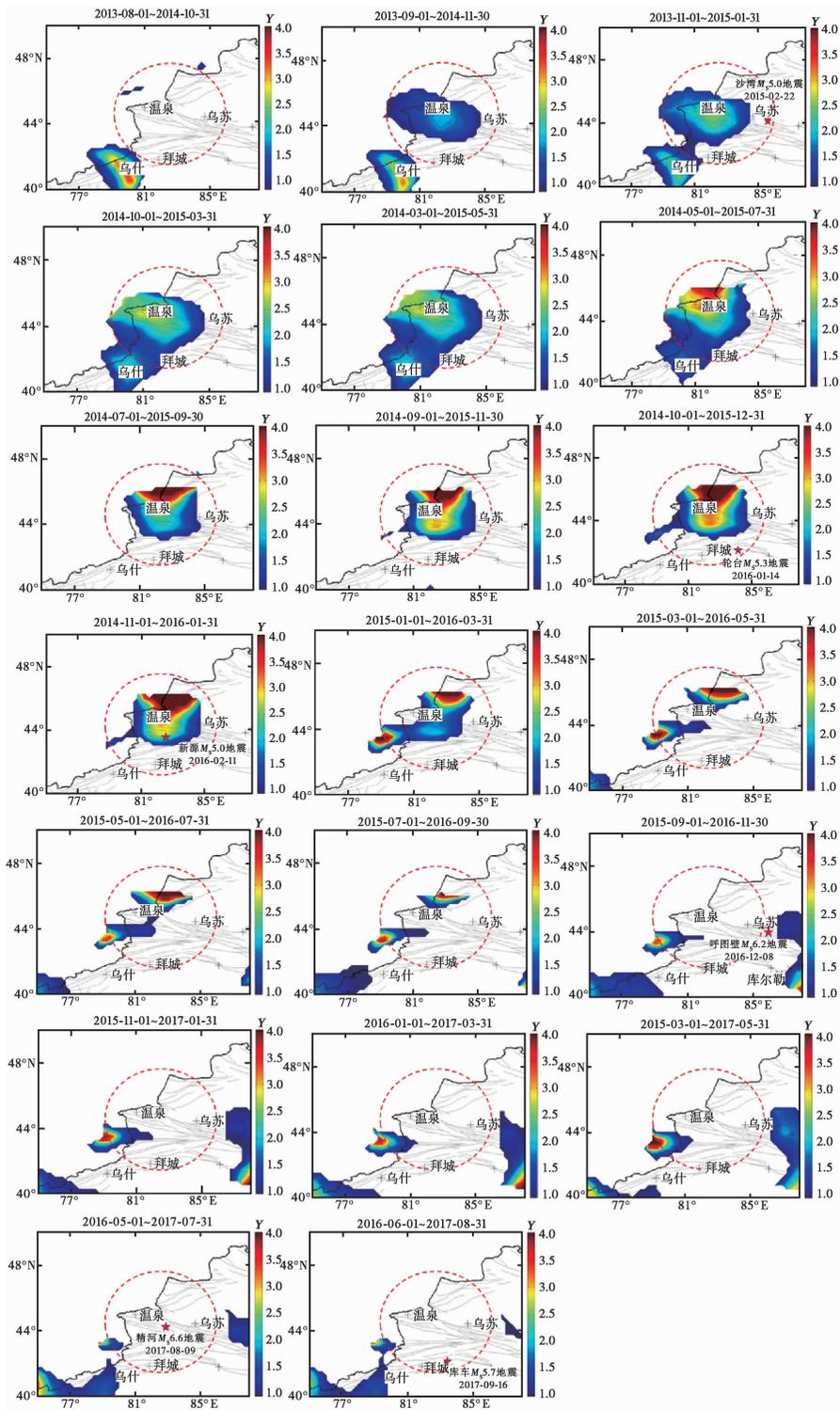


图 4 北天山西段 LURR 异常时空演化图像

五角星为震中；灰色线为断层线

2016年1月14日在异常区南部边缘发生轮台5.3级地震,2月11日异常区内部发生新源5.0级地震。2016年3月后研究区的异常逐渐减弱,5月后伊犁盆地地区的异常基本消失,在温泉以北的区域和境外出现2片小面积异常,异常继续减弱,至2016年10月境内异常基本消失,12月8日异常区东边发生呼图壁6.2级地震;至2017年7月境外的小面积异常消失,随后异常区接连发生了8月9日精河6.6级、9月17日库车5.7级地震。

加卸载响应比时空扫描分析方法,在地震预测实践中得到了较好的应用。为了更直观地了解研究区异常幅度及异常面积的动态变化,Yin等(2011)提出孕震积分 I_{pp} (单位为 km^2)的概念

$$I_{pp} = \sum Y \times \text{面积} \quad (5)$$

孕震积分反映了孕震区的大小和异常程度,从而在时间上可以更直观地观察异常的发展,提高了LURR方法的预测效能。

图5为2013年8月~2017年8月研究区的孕震积分时序曲线。由图5可见,2013年8月~2014年8月,该区孕震积分曲线波动很小,9~10月孕震积分很低;2014年11月之后研究区的孕震积分出现高值,孕震积分高值波动的过程中先后发生了2015年2月22日沙湾5.0级、2016年1月14日轮台5.3级、2016年2月11日新源5.0级等地震,2016年2月后,孕震积分逐渐下降,2017年6月基本回到背景状态后接连发生了2017年8月9日精河6.6级、9月17日库车5.7级地震。由图4可见,精河6.6级地震前,2014年11月~2016年4月研究区内孕震积分曲线异常持续了18个月,高值波动过程中发生了3次5级地震;从2015年11月孕震积分峰值时间到精河6.6级地震发生,特征时间为22个月,其间发生了3次5.5级以上地震。

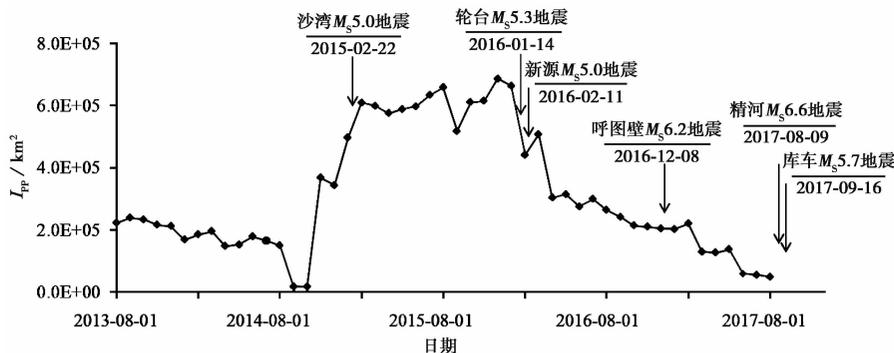


图5 研究区(图3红色圈内)孕震积分时序曲线

张晖辉等(2005)利用中国大陆5级以上地震LURR峰值特征得到LURR异常峰值点时间至发震时间的关系式,结果显示,5.0~5.9级、6.0~6.9级地震的 T_2 分别为9、18个月。温少妍等(2016)研究了新疆中强地震前加卸载响应比时空演化特征,结果表明,新疆中强以上地震(5.0~5.9级、6.0~6.9级地震)LURR峰值到发震时间的间隔平均为5、18个月。本文研究时段内共发生了6次5级以上地震,从时间进程来看,2015年11月达到峰值,12个月之后发生2016年12月8日呼图壁6.2级地震,22个月之后发生2017年8月9日精河6.6级地震,因此,本文计算得到的滞后时间 T_2 比前人的长一些。尹祥础等(2009)指出,预测大地震

必须用大视野,即大的时空观,空间尺度要足够大,时间持续上要注意LURR异常的峰值后要过很长时间大地震才发生(表1)。本文研究的区域地处塔里木盆地、准葛尔盆地和哈萨克斯坦地块之间,构造活动剧烈,地震活动性强,4年时间内发生了6次5级以上地震(含2次6级地震)。本文分析认为,呼图壁6.2级地震的异常与精河6.6级地震的异常交叠在一起,2次大地震异常的重叠导致较长的异常持续时间。因此,本文计算结果与前人统计结果间存在差异也是合理的,这可能与研究区域统计尺度或构造活动差异等有关。

3 结论与讨论

本文首先介绍了加卸载响应比的基本思路、计算方法及精河6.6级地震发震背景,简要介绍了天山中西段的地震活动特征;然后,分析了精河6.6级地震前LURR异常时空演化过程和孕震积分时序曲线特征。本文研究时段内,震中附近和所在构造带上出现多个高值异常区,并呈现环状特征,异常区域随时间逐渐向震源附近迁移,异常演化过程中异常区域内部和周围发生了6次5级以上地震,其中,2次6级地震发生在异常高值减弱过程中,异常峰值到发震时间分别为11、22个月,大于以往研究的理论发震时间,这可能是受构造应力区域性特征影响和2次6级地震异常叠加的缘故。

本文研究区内发生的2次6级地震,都是孕震积分达到峰值后在转折下降过程中发生的,这与张晖辉等(2005)、张浪平等(2010)研究中国大陆、美国等地得到的中强地震前LURR的异常统计结果一致,表明孕震积分和加卸载响应比一样,可以从时间尺度上描述一个地区的地震危险性(唐兰兰等,2014)。另外,孕震积分可以更直观地描述区域LURR异常值和异常面积的起伏变化,将LURR空间异常演化以时间进程曲线形式表示,有助于对未来地震发震时间的研判。由于中强地震孕震环境不同,LURR异常持续时间、幅度和异常面积均存在差异,因此,对于不同构造区域的扫描尺度需要具体分析。

参考文献

- 邓起东、冯先岳、张培震等,2000,天山活动构造,北京:地震出版社。
- 傅承义、陈运泰、祈贵仲,1985,地球物理学基础,北京:科学出版社。
- 高国英、王季达,1993,天山地震带及乌恰交汇区强震活动特征,内陆地震,7(3),271~278。
- 李锦轶、王克卓、李亚萍等,2006,天山山脉地貌特征、地壳组成与地质演化,5(8),895~909。
- 刘月,2014,加卸载响应比在地震预测中的若干问题研究,博士学位论文,北京:中国地震局地震预测研究所。
- 尼鲁帕尔·买买吐孙、王海涛、刘月等,2017,阿克陶6.7级地震前LURR异常演化特征分析,内陆地震,31(2),138~144。
- 宋治平、尹祥础、陈学忠,1996,加卸载响应比的时空演化特征及其对地震三要素的预测意义,地震学报,18(2),179~186。
- 唐兰兰、刘月、刘建明等,2014,新疆地区2000~2012年加卸载响应比时空演化特征分析,中国地震,30(3),442~453。
- 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。
- 王海涛、彭克银、张永仙等,1998,新疆伽师强震群过程中加卸载响应比变化特征,科学通报,43(10),1109~1111。
- 温少妍、唐兰兰、刘月等,2016,新疆中强地震前加卸载响应比时空演化特征分析与检验,地震工程学报,38(1),65~70。
- 熊小松、高锐、李秋生等,2011,天山造山带的深部结构,地球物理学进展,26(6),1906~1914。
- 尹祥础,1987,地震预测新途径的探索,中国地震,3(1),1~7。
- 尹祥础,2004,地震预报的新途径——加卸载响应比理论,力学与实践,26(6),1~7。
- 尹祥础,2015,加卸载响应比理论及其应用,北京:科学出版社。
- 尹祥础、陈学忠、宋治平等,1996,关东等地区加卸载响应比的时间变化及其预测意义,中国地震,12(3),331~335。
- 尹祥础、尹灿,1991,非线性系统的失稳前兆与地震预测,中国科学,5,512~518。

- 尹祥础、张浪平、张永仙等,2009,汶川 8 级地震前加卸载响应比的大尺度异常,地震,29(1),53~59。
- 余怀忠、程佳、万永革,2010,加卸载响应比震前应力积累模式研究,地震学报,32(5),517~528。
- 张晖辉、尹祥础、梁乃刚等,2005,模拟引潮力作用下岩石破坏前兆的实验研究——加卸载响应比(LURR)理论和能量加速释放(AER),岩石力学与工程学报,24(17),3172~3179。
- 张浪平、余怀忠、尹祥础等,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(3),228~235。
- 张永仙、彭克银、尹祥础等,2004,加卸载响应比方法在首都圈地区地震预测中的研究与应用,地震,24(增刊),53~60。
- 庄建仓,1999,几种随机模型下加卸载响应比的随机分布研究,硕士学位论文,北京:中国地震局地震预测研究所。
- Jaeger J C, Cook N G W, 1979, Fundamentals of rock mechanics, 3rd ed, London: Chapman and Hall.
- Yin X C, Liu Y, Mora P, et al, 2011, New progress in LURR-integrating with the dimensional, method, Pure Appl Geophys, 170, 229~236.

Study on spatial-temporal evolution of LURR abnormality before the Jinghe $M_s6.6$ earthquake

Nilupaer · Maimaitusun¹⁾ Wang Haitao¹⁾ Zhang Yongxian²⁾ Liu Yue³⁾
Tang Lanlan¹⁾ Wei Yunyun¹⁾

1) Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

3) Institute of earthquake forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract The load/unload response ratio (LURR) theory is a promising method for predicting earthquakes by characterizing the extent of damage in the focal area. Based on the load/unload response ratio theory, the spatial-temporal evolution characteristics of LURR abnormality before the Jinghe $M_s6.6$ earthquake occurred on August 9, 2016 were analyzed, and the seismogenic integral of the abnormal area was analyzed. The results show that there are a few LURR abnormal areas in the studied area before the Jinghe $M_s6.6$ earthquake, and the anomaly area is annular or flaky. With the abnormal development, abnormal areas migrate near the source. During the process of abnormal evolution, 6 earthquakes with $M \geq 5.0$ occurred within and around the anomalous area, of which 2 earthquakes with $M \geq 6.0$ occurred in the process of abnormal high value weakening, and the characteristic time T_2 from abnormal peak value to the main shock are 11 months and 22 months, which are greater than the theoretical occurrence time of the earthquake. This shows that the tectonic activity in the study area is intense, and the seismicity of the area is very active.

Key words: Jinghe $M_s6.6$ earthquake; LURR; Spatial-temporal evolution; Seismogenic integral