

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。

新疆地区 2000~2012 年加卸载响应比 时空演化特征分析

唐兰兰¹⁾ 刘月²⁾ 刘建明¹⁾ 温少妍¹⁾ 李金¹⁾
尼鲁帕尔·买买吐孙¹⁾

1) 新疆维吾尔自治区地震局,乌鲁木齐市新市区科学2街338号 830011
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 100080

摘要 对新疆地区进行了加卸载响应比的时空扫描计算,考察了研究区 2000~2012 年期间加卸载响应比异常区域的时空演化特征,利用孕震积分定量统计了新疆地区 5 级以上地震与 LURR 的时空关系;并用 2011~2012 年的扫描结果与次年实际发生的 5 级以上地震进行对比,发现绝大部分的中强地震都发生在前 1 年的预测区域内。基于加卸载响应比的时空扫描结果,分别对 2011~2012 年发生的 4 个 6 级地震进行了孕震积分时程曲线分析,结果显示,实际地震发生之前几个月孕震积分均会达到峰值,并在高值波动过程中或高值回落后震。

关键词: 加卸载响应比(LURR) 孕震积分 时空扫描 新疆地区

[文章编号] 1001-4683(2014)03-0442-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

1987 年尹祥础(1987)提出了一个能够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,简称 LURR)。加卸载响应比方法(LURR)在中国大陆及美国、日本、澳大利亚等地区被用于强震预测的研究,是目前比较流行的地震预测方法之一,该方法具有扎实的物理基础且在地震预测实践中取得了一些令人鼓舞的效果。

前人曾利用加卸载响应比作为地震前兆判定指标,对上百例中强地震前加卸载响应比变化规律进行震例检验,结果表明 80% 以上的检验效果良好(尹祥础等,1991; Yin et al, 1994、2000; 宋治平等,1996; 张永仙等,2004; 余怀忠等,2010) 实验研究和数值模拟也证实了加卸载响应比方法的有效性(Mora et al 2002; Wang et al, 1999、2004; Yin et al 2004; 张晖辉等 2004)。该方法在地震预测实践中也取得了较好的效果(Yin et al, 1995、2000、2002; 王海涛等,1998、1999; 尹祥础等,1996、2009)。此外,加卸载响应比也可应用于预测其它的地质灾害,如矿震、滑坡、水库地震、岩爆等。

[收稿日期] 2013-06-24; [修定日期] 2014-08-04

[项目类别] 地震科技星火计划项目(xh13027)资助

[作者简介] 唐兰兰,女,1981年生,工程师,主要从事数字地震学和地震综合预报方法的研究。

E-mail: tllfeg1981@163.com

新疆地处欧亚大陆腹地,地质构造复杂,现今地质构造表现为盆山耦合的构造格局,该区历史中强地震频繁,特别是 2011 年 6 月以来中强地震频发,至 2012 年 12 月共计发生 M_s 5.0 以上地震 18 次,其中 M_s 6.0 以上地震 4 次,这些地震在时间上呈连发状态,空间上显示多带分布,强度呈逐步增强态势。本文利用加卸载响应比理论,对 2000 年以来发生在新疆地区的 40 余次 $M_s \geq 5.0$ 地震前的小震加卸载响应比时间和空间演化特征进行了系统研究,以期对探索新疆地区中强有感地震的有效预测方法提供助益。

1 加卸载响应比(LURR)的计算方法

1.1 LURR 的基本思路

地震是一种发生在脆性介质中的临界现象或灾变事件。从力学的角度看:地震孕育的实质是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。这既是一个典型又是一个特殊的力学问题,由于震源介质处于高温高压环境,加之介质的不均匀性以及本构方程、边界条件大都未知,因而从力学(物理)上得到地球内部介质的破坏机理,进而精确地预测介质内的灾变过程尚存巨大障碍,这也正是地震预测难度巨大的科学根源。

针对介质的突发破裂或失稳,传统的力学方法是建立力学方程组,并在给定的定解条件下求解。用传统的力学方法解决这类灾变的预测问题,在现阶段遇到一系列难题。以地震为例,要用传统的力学方法解决这类问题,就需要知道孕震区(在地下几千~几十千米甚至更深处)介质的本构方程、损伤演化规律、介质的各种物理力学性质以及大小断层的分布、板块间的作用力、地壳与地幔的耦合等等。但是,对上述这些问题,我们目前还不够了解,甚至很不了解。我们知道的只是地壳中某些物理参量的变化。所以,我们的思路转向如何从这些“变化”中提取地震孕育过程的信息。根据这一思路,尹祥础(1987)提出了一个定量地表征地震孕育过程的参数——加卸载响应比(Load/Unload Response Ratio,简称 LURR)。

众所周知,应力-应变曲线从宏观上比较全面地刻划了材料受力后全过程的力学性能。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、失稳等过程。弹性变形的最本质特征为其可逆性,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。而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,其加载响应率与卸载响应率不同。这种差异反映了材料的损伤或劣化的程度,对于地震而言,它定量地表征地震的孕育过程,加卸载响应比理论的出发点即基于此。

1.2 加卸载响应比值的计算

根据加卸载响应比理论,加卸载响应比为系统对加载和卸载的响应率之比,即

$$Y = X_+ / X_-$$

式中 X_+ 和 X_- 分别是加载和卸载期间的响应率。根据加卸载响应比思想,当系统处于稳定或线性状态时,加卸载响应比的值接近于 1 ($Y \approx 1$)。而当系统处于非稳定状态或非线性的状态时,加卸载响应比的值大于 1 ($Y > 1$) (尹祥础,1987; 尹祥础等,1991)。LURR 可以定量地描述介质的损伤程度,从而也可以刻画地震的孕育过程。

我们研究的对象是整个孕震区,其线性尺度可达几百甚至上千千米。对这样巨大的系统进行加卸载试验,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。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卸载。在前人研究成果的基础上,尹祥础等人编写的程序能准确计算地壳内部任一点在任一时刻由引潮力引起的应力张量。

从固体力学的观点出发,首先会想到采用应变作为响应。但是震源处于地下深处(数千千米~数百千米),人们至今还难以准确测量该处的应变及其它物理参数。即使在室内实验中,对破坏源处的情况进行观测也是一大难题。近年来在岩石力学实验研究方面的巨大进展之一是对声发射(AE)技术研究的不断深化与应用。AE技术的突出优点在于:①对象是直接来自材料内部破坏时发出的信息;②可以不用损坏试件,不必停顿实验就可连续观测到材料内部的破坏过程。AE技术已可用于测定材料的断裂韧度等,并正得到越来越广泛的应用。地震学中的地震事件实质上也是一种声发射,而且测量地震事件的时、空、强是地震学观测技术中最成熟的部分,地震目录也是最容易得到的资料。因此,我们仿照岩石力学实验中的做法,取地震能量作为响应,定义加卸载响应比 Y 为(尹祥础等,1991; Yin et al., 1995)

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

式中 E 为释放的地震波的能量,“+”代表加载,“-”代表卸载。 m 可以取为0, 1/3, 1/2, 2/3或1。当 $m=1$ 时, E 表示能量;当 $m=1/3$ 和 $m=2/3$ 时, E 分别表示孕震区域的线性尺度和面尺度;当 $m=1/2$ 时, E 表示Benioff应变;当 $m=0$ 时, Y 值相当于 N^+/N^- ,而 N^+ 和 N^- 分别代表加载和卸载过程中出现的地震数量。在本文中, m 取为1/2,也就是说加卸载响应比 Y 值为加载和卸载期间的Benioff应变的比值。

2 震例回溯及异常特征提取

本研究用地震目录来自新疆1970年以来地震目录,该目录含0级以上地震目录。根据上述地震目录,对2000年1月~2012年12月新疆境内发生的48次 $M_s 5.0$ 以上地震(不包含余震)进行了统计,最大地震为2001年11月14日昆仑山口西 $M_s 8.1$ 地震。这些地震的时间分布特征示于图1,空间分布示于图2。

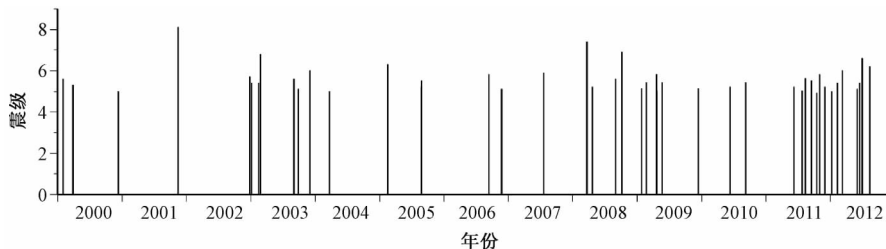


图1 新疆境内2000年1月~2012年12月 $M_s 5.0$ 以上地震时间分布

本研究采用的是时空扫描方法,将新疆地区按照 $2^\circ \times 2^\circ$ 进行区域划分,首先根据每个网格内发生的主要强震的震源机制解确定出该网格的主断层参数,再根据日、月引潮力所引起的库仑应力的变化判断出每个地震是处于加载阶段还是卸载阶段。在每一个固定的计算

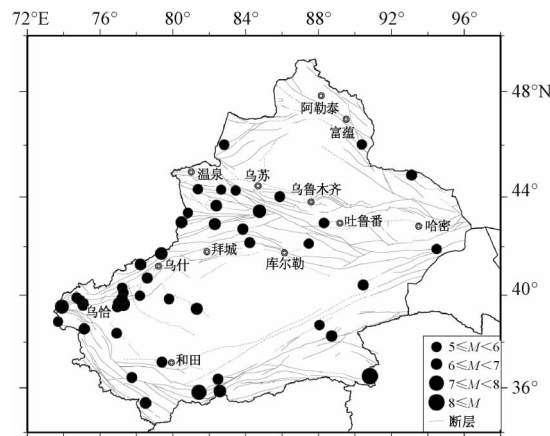


图2 新疆境内 2000 年 1 月 ~ 2012 年 12 月 $M_s \geq 5.0$ 以上地震空间分布

时间窗内, 根据加卸载响应比的空间尺度(半径为 R 的圆形区域)以一定的滑动步长进行加卸载响应比的空间扫描。在进行空间扫描时, 选取半径为 R 的圆形区域为空间窗, 首先将纬度固定, 再沿着经度方向扫描, 针对每一个空间点, 计算该圆形区域内加卸载响应比的值, 然后再沿纬度方向扫描。本文所用的空间扫描步长为 0.25° , 扫描为半径为 200km 的圆形区域, 时间窗长为 18 个月, 时间滑动步长为 1 个月。考虑到计算区间地震样本数对计算结果的影响, 每个窗口内的地震个数须大于或等于 20 个。再考虑到这些预测目标地震的震级为 $M_s 5.0 \sim 8.9$, 因此计算所用目录震级限制在 $M_s 4.0$ 以下, 避免目标地震引起的计算值的大幅扰动。限于文章篇幅, 在文中仅给出 2011 年 1 月 ~ 2012 年 12 月期间部分扫描结果。

由图 3 可以看出, 在加卸载响应比异常区内及异常区边缘, 次年发生中强以上地震的概率很大。2011 ~ 2012 年发生了 18 次 $M_s 5.0$ 以上地震, 都发生在加卸载响应比可计算区域, 为了定量统计加卸载响应比异常区与地震的对应关系, 我们将半径为 200km 的空间扫描结果与 2011 年 6 月 ~ 2012 年 12 月发生的 18 次 5 级以上地震情况进行了对照, 即对地震前 1 年半径 200km 范围内最大异常值与地震的最小距离进行了量化的统计, 结果列于表 1 中。统计结果显示, 这 18 次 5 级以上地震中有 16 次地震前 1 年震中半径 200km 范围内有较明显的异常显示, 表明加卸载响应比方法预测效果良好。

已有的岩石实验研究和历史震例的统计研究显示(张浪平, 2010b; 张晖辉等, 2005), 当处于地震平静期时, 加卸载响应比值在 1 附近波动, 而在岩石破裂或者地震发生之前, 加卸载响应比都会出现异常明显的升高及回落, 并在峰值过后急剧回落, 地震或岩石破裂随之发生, 从而表明加卸载响应比峰值异常具有良好的灾变前兆意义。地震或岩石力学实验时试件的损伤, 并不发生在 LURR 的峰值点, 而是在 LURR 的峰值点之后。有关峰值点的这一研究发现是近年来加卸载响应比研究的重要成果之一, 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, 可使研究从以年为时间尺度提高到以月为时间尺度进行地震预测(尹祥础等, 2009)。在进行震例回溯性检验时发现, LURR 峰值异常的特征时间(LURR 峰值出现到地震发生的时间间隔)尺度与地震震级存在着某种联系, 而且其峰值异常的特征时间在地震预测的时间方面有着非常重要的意义。张晖辉等(2005)利用中国

大陆的 30 多个 5 级以上震例的 LURR 时序演化对 LURR 峰值特征时间进行了统计研究,其研究表明, LURR 峰值特征时间(T_2) 跟地震震级(M) 具有如下关系

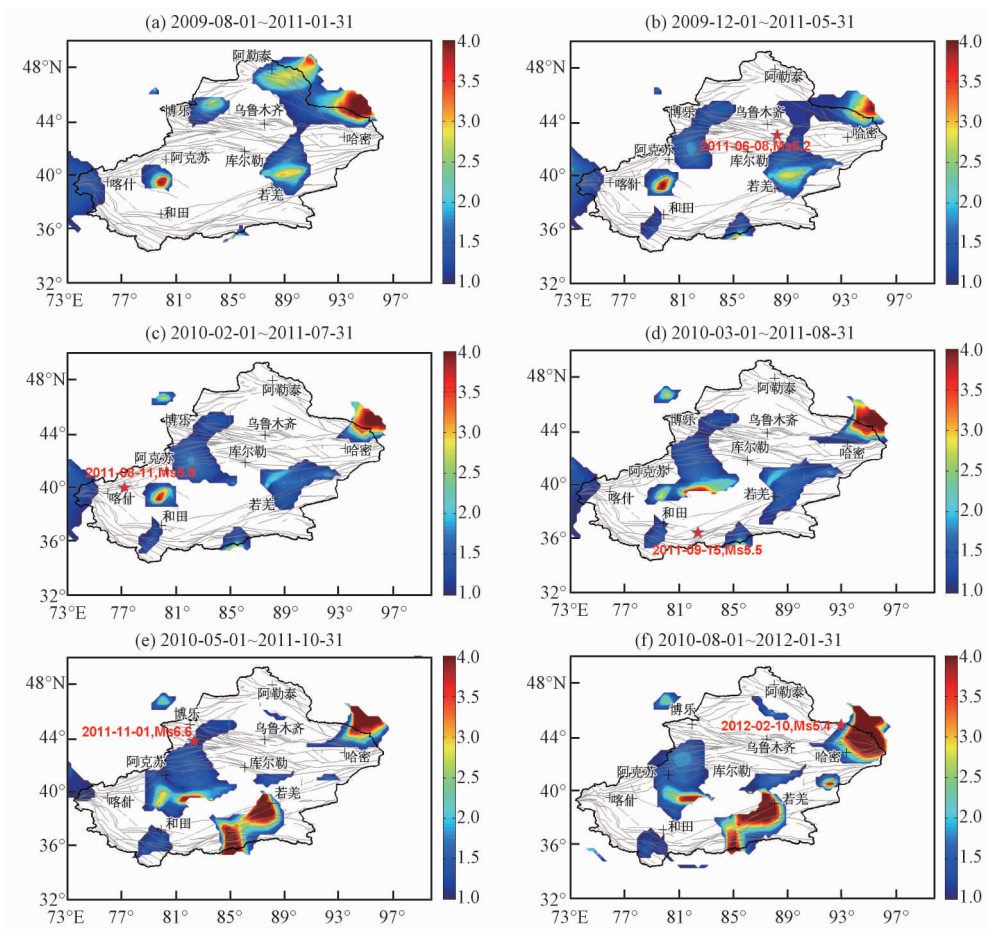
$$T_2 = 60(1 - 2.3 \times 10^{-0.08M}) \quad (2)$$

预测某地区未来地震的发震时刻,就必须研究整个孕震期间加卸载响应比的演化过程,只考察一个时间窗的加卸载响应比的空间扫描结果,不足以判定未来的地震活动趋势。为了更加直观地了解研究区内某个区域异常值及异常面积的起伏变化,以期更好地对未来地震的发震时刻做出研判,本文引用了“孕震积分”这个参量,该参量的值能更直观地刻画某个特定的区域内加卸载响应比值及异常区域面积的动态演化过程,并从时间的角度能更好地提高 LURR 方法的预测效能。

由前文可知,本文采用时空扫描空间步长为 0.25° ,扫描半径为 200km 的圆形区域,因此可知每个格网的边长为 0.25° ,且每隔 0.25° 就有一个 Y 值,故以目标地震为圆心,其震中在半径为 200km 范围内的孕震积分 D 可表述为

$$D = \sum_{i=1}^n 0.25 \times 0.25 \times 111.111 \times 111.111 \times Y_i \quad (3)$$

(3) 式必须满足计算的每个格点与目标地震的距离均小于 200km,且 Y 值需大于 1μ



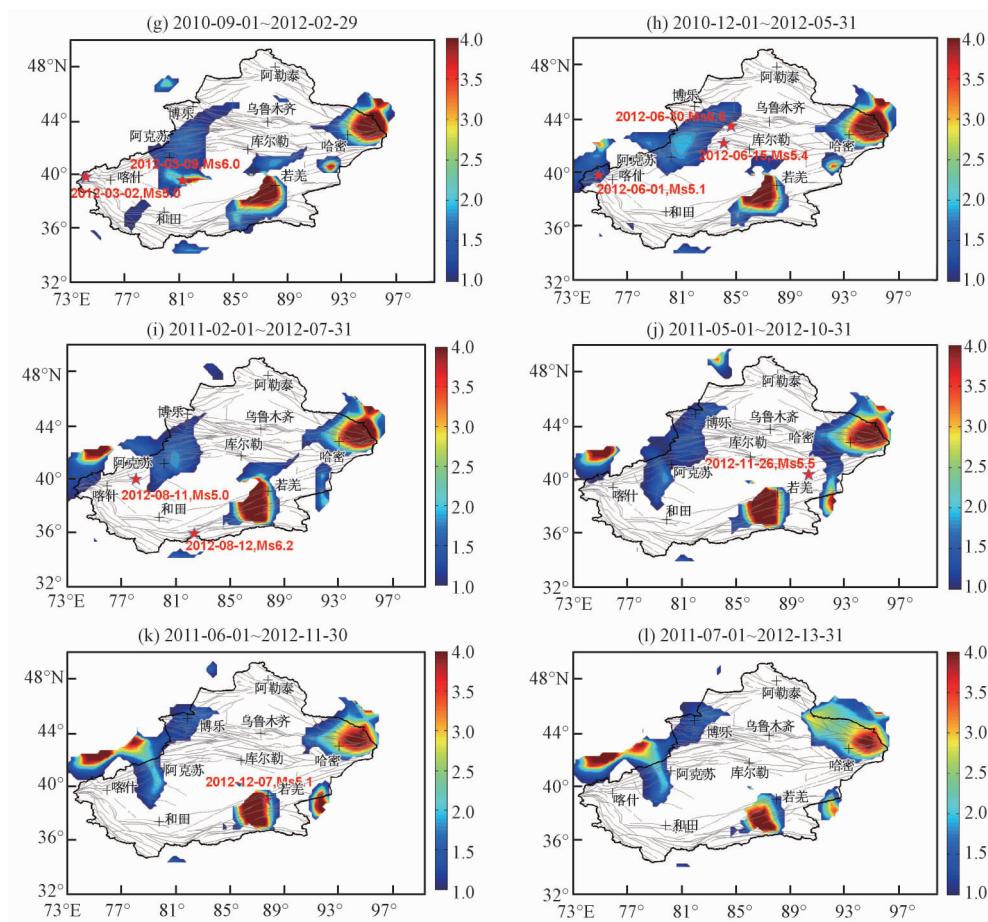


图3 新疆地区加卸载响应比异常区域发展演化过程 图上方标注的时间为扫描时间窗
图中五角星为相应时间窗次月发生的地震, 色标表示加卸载响应比 Y 值的大小; 灰色折线为断裂

代表 200km 范围内 $Y > 1$ 的格点个数, 即仅将异常区域面积与 Y 值进行积分, 式中的 111.111 是将以度为单位的距离换算为千米后的值。由于本文时空扫描计算时间步长为 1 个月, 因此每个月都可以计算得到震中周围 200km 范围内的孕震积分值, 以此便可得到某个地震的孕震积分时序曲线。

研究中我们利用孕震积分对震前出现较明显异常显示的 2000 年 1 月 ~ 2012 年 12 月的 40 个 5 级以上地震的 T_1 (异常出现至峰值点时间) 和 T_2 (峰值点至发震时间) 进行了量化的统计, 文中仅将 2011 年 6 月 ~ 2012 年 12 月的统计结果列于表 1 中。统计结果显示 5 级地震 T_1 平均为 18.9 个月, T_2 平均为 8.5 个月, 6 级地震 T_1 平均为 28.9 个月, T_2 平均为 12.3 个月。对于大地震 T_2 是一个相当长的时间, 如 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震 T_2 为 28 个月, 2008 年 3 月 21 日于田 7.3 级地震 T_2 为 18 个月。尹祥础等 (2009) 的研究结果认为, T_2 与震级有关, 既震级越大, T_2 越长, 对于 8 级地震的计算值为 28 ± 8 个月, 汶川 8 级地震实际的 T_2 是 23 个月。我们的研究结果与尹祥础等 (2009) 的结果较为一致, 震级与 T_2 之间呈现明显的正相关关系。根据式 (2) 计算出新疆地区 5 级地震的理论 T_2 为 5 个月, 6 级地

表 1 用 $R=200\text{km}$ 进行时空扫描的预测结果统计

时间 年-月-日	北纬 ($^{\circ}$)	东经 ($^{\circ}$)	震级 M_s	深度 (km)	半径 $R=200\text{km}$		T_1 (月)	T_2 (月)
					预测效果	最小距离(km)		
2011-06-08	42.96	88.31	5.2	7	yes	159	16	11
2011-07-25	46.02	90.39	5.0	8	yes	172	23	7
2011-08-11	39.85	77.21	5.8	10	non	-	-	-
2011-09-15	36.38	82.48	5.5	10	yes	140	32	14
2011-10-16	44.28	82.65	5.0	6	yes	127	21	16
2011-11-01	43.65	82.38	6.0	9	yes	183	23	6
2011-12-01	38.38	76.92	5.2	14	non	-	-	-
2012-01-08	42.13	87.47	5.0	9	yes	141	23	8
2012-02-10	44.85	93.12	5.4	7	yes	80	40	14
2012-03-02	39.70	74.15	5.0	11	yes	129	16	18
2012-03-09	39.42	81.32	6.0	14	yes	59	14	3
2012-06-01	39.78	74.93	5.0	10	yes	99	5	0
2012-06-15	42.17	84.23	5.4	10	yes	164	14	11
2012-06-30	43.43	84.77	6.6	7	yes	168	29	1
2012-08-11	39.97	78.18	5.2	8	yes	172	31	10
2012-08-12	35.85	82.58	6.2	50	yes	193	44	9
2012-11-26	40.42	90.45	5.5	11	yes	152	33	24
2012-12-07	38.73	88.05	5.1	8	yes	95	15	4

注: 预测效果栏中的 yes 表示该地震发生在加卸载响应比异常区域边缘或其孕震区域内, non 表示地震未发生在加卸载响应比异常区域; 最小距离表示该地震震中位置离加卸载响应比异常区域中心点的最小距离, 若最小距离小于等于扫描半径 R , 则说明该地震发生在异常区域或其孕震区域内

震的理论 T_2 为 14 个月, 将本研究震例回溯得到的结果与利用张晖辉等(2005)理论公式计算得到的结果对比来看, 新疆较全国的 6 级地震的 T_2 稍短, 而新疆的 5 级地震的 T_2 时间较全国的长 3.5 个月。目前的地震预测实际工作中, 主要利用式(2)来预测未来地震的可能发震时间。然而地震孕育的过程是十分复杂的, 预测实践证明 T_2 不仅与地震震级有关, 而且很大程度取决于孕震区的地质情况(尹祥础等, 2009), 这可能正是新疆的统计结果与全国的统计值具有一定差异性的原因。

根据我们得到的 2000 年 1 月~2012 年 12 月 156 幅新疆地区 LURR 空间演化图和 48 次地震的孕震积分时程曲线, 再结合上述统计结果, 总体看来, 新疆地区 $M_s 5.0$ 以上地震前加卸载响应比异常的时空特征为:

(1) 48 组地震中有 40 组震前出现较明显异常, 异常起始时间一般在震前 5~20 个月, 其中 22 次的异常出现在震前 20 个月内。2001 年昆仑山口西 8.1 级地震异常出现的时间为震前 28 个月。

(2) 大多数异常在震前消逝, 但个别异常在地震后仍会持续一段时间。

(3) 异常峰值一般出现在震前 1~10 个月。40 组中有 24 次的峰值出现在震前 10 个月内, 其中 17 次的峰值出现在震前 6 个月内。 T_1 和 T_2 的统计结果显示震级与 T_2 之间呈现明显的正相关关系, 5 级地震 T_2 平均为 8.5 个月, 6 级地震 T_2 平均为 12.3 个月。

(4) 地震一般发生在异常区峰值点边缘, 随着地震的临近异常逐渐向震中位置迁移。也有较大地震前未出现明显异常区, 这可能和该区域台网的地震监测能力有关, 因为地震目

录完整性较差的情况下对于计算结果会有一定影响。2012 年 6 月 30 日新源-和静 6.6 级地震前的 2010 年 1 月异常开始在震中的西北部出现,之后逐渐向震中靠近且异常幅度逐渐增大,而后出现起伏波动变化,该地震发生在异常区的边缘。

3 4 次 6 级地震的孕震积分时程曲线分析

2011 年 6 月以来,新疆地区 5 级以上地震异常活跃,2011 年 6 月~2012 年 12 月,境内发生了 18 次 5 级以上地震,其中包括 4 次 6 级地震,最大地震为 2012 年 6 月 30 日新源-和静交界 6.6 级地震。这组 5、6 级地震在时间上呈连发状态、空间上显示多带分布、强度出现逐步增强态势,其中构造相对稳定的塔里木盆地内部 2012 年 3 月 9 日发生了洛浦 6.0 级地震。下面基于前文第 2 节中 LURR 的时空扫描结果,选取 2011 年以来发生的 4 个 6 级地震的孕震积分时程曲线逐一进行分析。

3.1 2012 年 3 月 9 日洛浦 $M_s 6.0$ 地震

2012 年 3 月 9 日洛浦县 6.0 级地震发生在塔里木盆地腹地,震中距阿瓦提县城约 150km、距和田洛浦县 270km,发震构造为图木舒克隐伏断裂,断裂长 250km。

由图 3(g) 可见,洛浦 6.0 级地震前震中附近存在大面积的 LURR 异常,且该地震就发生在异常区内;由表 1 的统计结果显示,该地震前异常中心点距震中约 59km。为了考察该地震前 LURR 异常随时间的演化特征,利用式(1) 计算了该地震的孕震积分时序曲线。计算参数为:时间范围 2006 年 3 月 1 日~2013 年 3 月 31 日,时间窗 18 个月,滑移时间步长 30 天,以震中为圆心取圆形计算区域,半径 R 为 200km。震源机制解中走向为 258° 、滑动角为 47° 、倾角为 71° 、深度为 14km,摩擦系数为 0.4,震级范围 0~4.0。计算结果示于图 4。从图 4 中可以看出,在地震孕育早期,即在该地震发生前的 2006 年 3 月~2009 年 4 月期间,孕震积分一直处于均值线下零值附近波动,从 2009 年 5 月开始,孕震积分处于不断上升过程中,于 2009 年 10 月达到峰值后至发震前一直处于高值波动状态,并在震前约 3 个月的时候,孕震积分再次达到峰值,然后迅速回落,继而发生此次地震。震后震源区附近的孕震积分再次下降至均值线以下,处在零值附近波动,可能预示该区域在未来一段时间会处于相对平静的状态。

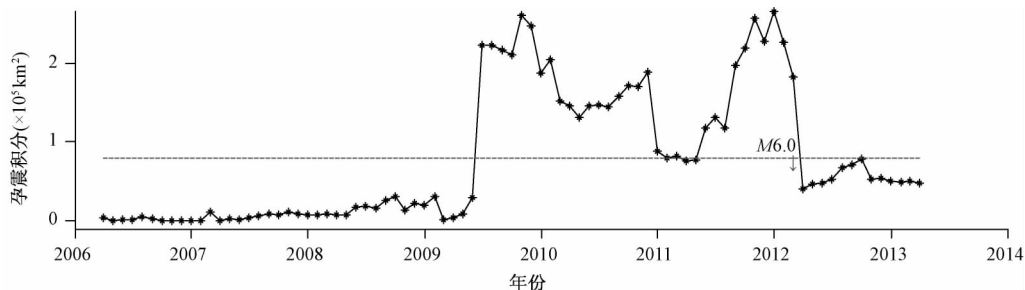


图 4 2012 年 3 月 9 日洛浦 $M_s 6.0$ 地震孕震积分时程曲线虚线为孕震积分均值线

3.2 2011 年 11 月 1 日尼勒克-巩留 $M_s 6.0$ 地震与 2012 年 6 月 30 日新源-和静 $M_s 6.6$ 地震

新疆北天山地区为中强震多发区,1900 年以来曾发生过 3 次 7 级和多次 6 级地震,但

自1973年精河6.0级地震后,该地区经历了长达38年的6级地震平静,直到发生2011年尼勒克-巩留6.0级地震,之后的2012年6月30日该区域再次发生了新源-和静6.6级地震。2011年11月1日尼勒克-巩留6.0地震距新源74km、距精河123km,发震构造为阿吾拉勒山南缘断裂,断裂性质为逆冲型。2012年6月30日新源-和静6.6级地震距新源约125km、距和静177km,震中位于NW向喀什河右旋走滑断裂带附近。

由图3(e)可见,尼勒克-巩留6.0级地震前震中附近存在大面积的LURR异常,该地震位于异常区边缘,表1的统计结果显示,该地震前异常中心点位置距震中约183km。图3(h)显示,新源-和静6.6级地震前震中附近存在大面积的LURR异常,该地震位于异常区边缘,表1的统计结果显示,该地震前异常中心点位置距震中约168km。为了考察这2次6级地震前LURR异常随时间的演化过程,利用式(1)计算了孕震积分时序曲线。因2次6级地震相距约190km,故以200km为半径进行扫描,计算所用到的大部分地震是重叠的,为此仅选取新源-和静6.6级地震为中心进行时程曲线计算,2次地震都位于半径为200km的圆形计算区内。计算参数为:时间范围2006年6月1日~2013年3月31日,时间窗18个月,滑移时间步长30天,以新源-和静6.6级地震为中心取圆形计算区域,半径 R 为200km,震源机制解中走向为 38° ,滑动角为 22° ,倾角为 62° ,深度为7km,摩擦系数为0.4,震级范围0~4.0。计算结果见图5。由图5可见,2006年6月~2007年12月孕震积分一直处于高值波动状态,且出现2次峰值过程,回落到均值线附近后的7个月发生了2008年8月30日轮台5.6级地震,该地震距新源-和静6.6级地震约108km。轮台5.6级地震后至2009年12月孕震积分一直处于均值线以下,从2010年1月开始逐渐上升,至2010年6月孕震积分达到第一次峰值,至尼勒克-巩留6.0级地震前一直处于高值波动状态,震后3个月迅速回落至均值线以下,之后孕震积分再次于2012年5月上升至峰值,且此次异常幅度明显大于尼勒克-巩留6.0级地震前的异常幅度,1个月后随即发生了新源-和静6.6级地震,从图5中还可以观察到震源区孕震积分在新源-和静6.6级地震后回落至零值附近波动。

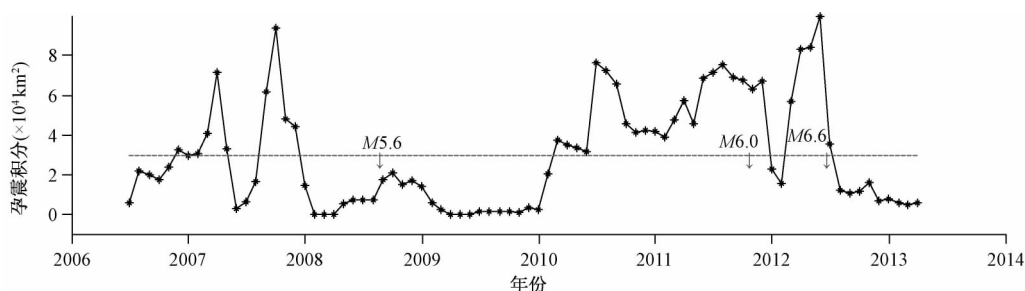


图5 2012年6月30日新源-和静 M_s 6.6地震孕震积分时程曲线虚线为孕震积分均值线

3.3 2012年8月12日于田 M_s 6.2地震

2012年8月12日于田6.2级地震震中距于田县城约130km,距离和田市区约268km,发震构造为阿尔金断裂,断错性质为左旋走滑逆断型,断裂长度约1600km。

由图3(i)可见,于田6.2级地震前震中附近异常不显著,但是在阿尔金断裂带的中段存在一个高值异常区,表1的统计结果显示该地震前高值异常区中心点位置距震中约192km。对该地震进行时程曲线分析的计算参数为:时间范围2007年1月1日~2013年4

月 30 日,时间窗 18 个月,滑移时间步长 30 天,取震中为圆心的圆形计算区域,半径 R 为 200km,震源机制解中走向为 221° ,滑动角为 23° ,倾角为 74° ,深度为 50km,摩擦系数为 0.4,震级范围 0~4.0。计算结果见图 6。由图 6 可见 2007 年 1 月~2009 年 1 月研究区孕震积分一直在零值线附近波动,2009 年 2 月~2010 年 8 月研究区孕震积分持续了 18 个月的高值波动状态,而后又持续了约 12 个月的低值状态,2011 年 12 月第 2 次达到峰值后在回落过程中发生了 2012 年 8 月 12 日的于田 $M_s 6.2$ 级地震。图 6 还显示,在此次地震之后,该区域孕震积分下降至均值线以下,处在零值附近波动,可能预示该区域在未来一段时间会处于相对平静的状态。

以上 4 个 6 级地震都是在孕震积分达到峰值后的几个月内或高值波动过程中发生了地震,这与尹祥础等(1996)、张晖辉等(2005)、张浪平等(2010a、2010b)在中国大陆和日本、美国等地得到的结果相一致,表明孕震积分和加卸载比 Y 值一样,是一个可以定量地描述一个地区地壳稳定程度的参数。另外由于孕震积分融合了 LURR 异常面积在其中,因此比单纯的 LURR 能更加直观地反映研究区内某个区域异常值及异常面积的起伏变化,更好地对未来地震的发震时刻做出研判。它将震前 LURR 空间异常演化过程以时间进程曲线的方式更清晰地呈现出来,更加方便研究者定量化地统计 LURR 异常时间演化特征与地震之间的对应关系。本文第 2 节即是利用了孕震积分时程曲线对 2000~2012 年发生的 48 组 5 级以上地震的峰值异常的特征时间进行了定量化的统计分析。

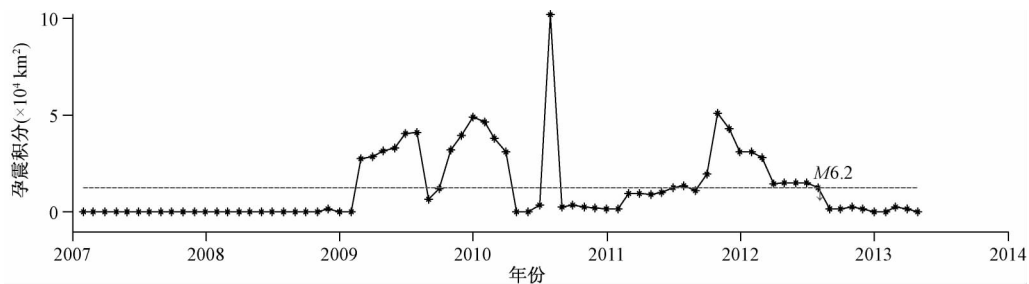


图 6 2012 年 8 月 12 日于田 $M_s 6.2$ 地震孕震积分时程曲线虚线为孕震积分均值线

4 结论

本文首先介绍了加卸载响应比的基本思路与计算方法,对 2000 年以来的 5 级以上地震的 LURR 时空演化特征与地震的关系进行了定量化统计,其次考察了新疆地区 2011~2012 年的 4 次 6 级地震的孕震积分时序特征曲线及加卸载响应比时空扫描演化特征,研究分析认为:

(1) 对新疆地区 2011~2012 年的 4 个 6 级地震进行了孕震积分时程曲线分析,结果显示实际地震发生之前几个月孕震积分均会达到峰值,其中 3 次地震是在高值回落后迅速发震,1 次地震是在高值波动过程中发震。还通过考察孕震积分的时间进程曲线,对该地区未来地震活动趋势进行了预测。孕震积分在强震前后显示出的演化特征与之前的研究者对加卸载响应比时程曲线研究结果较为一致。

(2) 对新疆地区加卸载响应比时空演化特征与中强以上地震的对应关系进行了定量统

计结果显示,加卸载响应比异常区内及异常区边缘,次年发生中强以上地震的概率较高。对比加卸载响应比异常区域与随后1年的实际地震情况后,发现2000~2012年的48组5级以上地震中有40组震前出现较明显异常。

(3)对48组地震中40组震前出现较明显异常的 T_1 和 T_2 的统计结果显示,震级与 T_2 之间呈现明显的正相关关系,统计结果与张晖辉等(2005)的结果存在一定差异,可能与孕震区的地质构造的差异有关,不同构造背景由于区域应力场的不同,孕震时间必然具有一定的差异性。

致谢:本研究得到尹祥础教授、王海涛研究员的悉心指导,特此致谢!

参考文献

- 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。
- 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。
- 王海涛、彭克银、庄建仓等,1999,样本条件对加卸载响应比计算结果的影响分析,地震,19(3),223~229。
- 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、尹灿,1991,非线性系统的失稳前兆与地震预测,中国科学,21(5),512~518。
- 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),331~334。
- 尹祥础、张浪平,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、颜玉定、余怀忠等,2004,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,23(21),3621~3628。
- 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、李志雄、邵志刚等,2010a,中国大陆活动地块边界带强震趋势研究,地震,30(3),53~63。
- 张浪平、余怀忠、尹祥础等,2010b,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),53~60。
- Mora P, Wang Y C, Yin C, 2002, Simulation of the Load-Unload Response Ratio and critical sensitivity in the lattice solid model, Pure and Applied Geophysics, 159(10), 2525~2536。
- Wang Y C, Yin X CH and Wang H T, 1999, Numerical Simulation on Load/Unload Response Ratio(LURR) Theory, ACTA Geophysica Sinica, 42(5), 669~676。
- Wang Y C, Mora P, Yin C, 2004, Statistical tests of Load-Unload Response Ratio signals by lattice solid model: Implication to tidal triggering and earthquake prediction, Pure and Applied Geophysics, 161(9), 1829~1839。
- Yin X C, Chen X Z, Song Z P, 1994, The Load/Unload Response Ratio(LURR) theory and its application to earthquake prediction. Journal of Earthquake Prediction Research, 3(3), 325~333。
- Yin X C, Chen X Z, Song Z P, 1995, A new approach to earthquake prediction—the Load/Unload Response Ratio(LURR) theory. Pure and Applied Geophysics, 145(3~4), 701~715。
- Yin X C, Chen X Z, W Y, 2000, Development of a new approach to earthquake prediction: Load/Unload Response Ratio(LURR) theory, Pure and Applied Geophysics, 157(11~12), 2365~2383。
- Yin X C, Mora P, Peng K Y, 2002, Load/Unload Response Ratio and Accelerating Moment/Energy Release critical region scaling and earthquake prediction, Pure and Applied Geophysics, 159(9), 2511~2523。
- Yin X C, Yu H Z, Victor K, 2004, Load-Unload Response Ratio(LURR), Accelerating Energy Release(AER) and state vector evolution as precursors to failure of rock specimens, Pure and Applied Geophysics, 161(11~12), 2405~2416。

Study on the tempo-spatial evolution of LURR in the Xinjiang region in 2000 ~ 2012

Tang Lanlan¹⁾ Liu Yue²⁾ Liu Jianming¹⁾ Wen Shaoyan¹⁾ Li Jin¹⁾ Nilupar Tursun¹⁾

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

2) State Key Laborator of Nonlinear Mechanics , Institute of Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100190 , China

Abstract The tempo-spatial scanning of Load/Unload Response Ratio in the Xinjiang region was conducted , and the evolutionary characteristics of tempo-spatial of LURR abnormal regions in 2000 ~ 2012 , and the statistics of the quantitative relations between earthquakes and tempo-spatial evolution of LURR were researched on the basis of integral of LURR. The scanning results during 2011 ~ 2012 and the $M_s \geq 5.0$ earthquakes happened in the second year were compared. The result shows that most of moderately strong earthquakes happened in the predicted region preceding year. The variation of integral of LURR against time for four earthquakes with $M_s \geq 6.0$ in the Xinjiang region in 2011 ~ 2012 has been calculated respectively. The result shows that integral of LURR will reach peak value several months before the earthquakes , and earthquakes will happen during the course of high value fluctuation or fall back.

Key words: LURR Integral of LURR Tempo-spatial scanning The Xinjiang region