

加卸载响应比孕震积分在新疆地震 预测中的综合应用研究^{*}

刘建明¹, 刘 月², 唐兰兰¹, 李志海¹, 温少妍¹, 张琳琳¹, 罗 矩¹

(1. 新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 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 100190)

摘要: 本文首先利用加卸载响应比孕震积分, 对 2001 年以来新疆境内南天山西段和喀什—乌恰交汇区发生的 4 次 $M_s \geq 6.0$ 地震, 进行了震例检验。结果显示, 孕震初期孕震积分在背景值附近波动, 变化平缓。随着孕震程度的加剧, 孕震积分不断增加至峰值点, 快速回落过程中或恢复后发震。我们还将加卸载响应比孕震积分初步应用到南天山西段的部分定点形变资料中, 对比分析了哈拉峻台、乌恰台钻孔倾斜以及乌什水管仪、伸缩仪和体应变趋势日均值与以台站为中心, 250 km 为半径的加卸载响应比孕震积分时序图。结果表明, ① 哈拉峻台和乌恰台区域内构造应力场应力处于不断加载的过程, 引起了定点形变资料速率的大幅度、不稳定变化; ② 当构造应力场上的应力处于缓慢不断加载的过程时, 会引起定点形变测项速率方向发生改变, 表现形式为趋势异常; ③ 目前, 南天山西段构造应力场应力水平处于不断加载的过程。

关键词: 加卸载响应比; 孕震积分; 构造应力场; 定点形变; 新疆地区

中图分类号: P315.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-3274(2014)02-0089-09

引言

地震孕育的物理实质是孕震区介质损伤、破坏以及失稳的演化过程。加卸载响应比的基本思路正是通过刻画震源区介质的损伤程度来反映地震孕育的过程, 从而预测地震。加卸载响应比提出至今近 30 年, 在理论分析、数值模拟和实验研究等方面做了大量基础研究, 被广泛地应用到测震、形变、地下水、地磁、矿山以及水库等方面^[1~8], 并在中强地震预测研究方面取得了较好的效果, 为地震预测提供了一条新途径。

虽然加卸载响应比在地震预测实践中取得了一定的效果, 但是结果仍不尽如人意, 究其主要原因是, 在实际地震预测中没有考虑当地的地球物理条件。因此, 2011 年尹祥础课题组综合考虑当地的地球物理情况, 例如剪应变率和平均地震波能量等因素对地震的影响, 尝试将量纲分析与 LURR 相结合^[9, 10], 预测未来地震发生的时间、地点和强度。在量

* 收稿日期: 2013-08-16; 修改回日期: 2013-11-27

基金项目: 2013 年度震情跟踪合同制定向工作任务(2013020107)和新疆地震科学基金(201201)联合资助

作者简介: 刘建明(1984-), 女, 新疆阿勒泰人, 工程师, 主要从事地震活动性和地震预测等研究。

纲分析与加卸载响应比相结合中,提出了加卸载响应比孕震积分(简称孕震积分)——反映孕震区的大小和程度。本研究首先拟采用加卸载响应比孕震积分,对2001年以来新疆境内南天山西段地区和喀什—乌恰交汇区发生的4次 $M_s \geq 6.0$ 地震进行震例检验,总结其演化规律。然后,针对2012年4月以来新疆境内南天山西段地区哈拉峻台和乌恰台钻孔倾斜出现的大速率巨幅变化,结合加卸载响应比孕震积分,分析区域构造应力场应力状态,为南天山西段地区震情提供一定的参考依据。

1 加卸载响应比理论概述

正确认识地震孕育的物理过程及在孕育过程中地壳岩石物理性质和力学状态的变化,是实现地震预测的基础。传统力学问题的解决需要知道本构关系、边界条件、初始条件以及某些力学量的变化历史(如流变)。但是,在地震孕育的物理过程中,这些条件都知之甚少或者完全未知,知道的仅是通过地震台网监测或者实验测试手段得到的某些物理量的变化。那么,如何从“物理量的变化”提取介质损伤程度的信息?根据这一思路,尹祥础提出了定量表征非线性系统不稳定程度的新参数——加卸载响应比(LURR)。

从宏观角度来看,材料的本构曲线比较全面地刻划了材料受力后的全过程力学行为。由图1所示,纵坐标为载荷 P ;横坐标为对应于载荷 P 的响应 R ,它可以是位移、应变及与之相关的各种力学量或非力学量^[11]。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。其中,弹性变形的本质特征为其可逆性,即加载过程和卸载过程是可逆的。相反,损伤过程的本质特征具有不可逆性,即加载过程和卸载过程是不可逆的。

为了定量地刻画加载响应与卸载响应的差别,定义了两个基本物理量:响应率和加卸载响应比^[12]。设载荷增量为 ΔP ,相应的响应增量为 ΔR ,响应率 X 定义为

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

对系统进行加载和卸载,令 X_+ 和 X_- 分别代表加载与卸载时段的响应率,进而引入定量地描述孕震区介质稳定程度的参数——加卸载响应比 Y ,即

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

显然,介质处于弹性阶段时, $X_+ = X_-$, $Y = 1$;损伤过程, $X_+ > X_-$, $Y > 1$,而且随着损伤的增加, Y 值也会随着升高;当介质邻近失稳点时, Y 值达到最高值。因此,加卸载响应比 Y 可以定量地刻画介质的损伤程度。

在地震预测中,加卸载响应比利用日、月运行产生的引潮力变化,判断地壳介质处于加载还是卸载;同时根据Coulomb准则,通过有效剪应力 τ_c 的增减判定加卸载,若 $\tau_c > 0$,

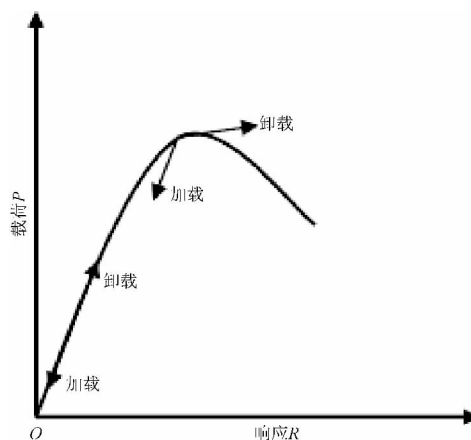


图1 岩石材料的本构曲线

判定为加载,若 $\tau_e < 0$, 判定为卸载;另外,以一定时间窗和空间窗内释放的地震能量 E 作为响应量^[13]。具体来讲,加卸载响应比 Y 定义为

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

式中, E 为地震能量; m 为一个 $0 \sim 1$ 之间的常数, $m=1$ 时, E_i^m 是该次地震的能量; $m=1/2$ 时, E_i^m 为地学中熟知的贝尼奥夫应变; $m=1/3$ 及 $2/3$ 时, E_i^m 分别代表震源体的线尺度和面尺度,一般选取 $m=1/2$ 。“+”表示加载,“-”表示卸载, N^+ 表示加载时段地震的总数, N^- 表示卸载时段地震的总数。

加卸载响应比 Y 典型的演化规律为:在孕震初期, Y 值在 1 附近波动,变化平缓,随着孕震程度的加剧, Y 值不断增加至峰值,在高值恢复过程中或恢复后发震^[5]。在对震例进行全面检验中,结果是令人满意的:在对中国大陆 70 年代以来 $M \geq 7$ 地震的检验中,10 次地震中有 9 次地震在主震前, Y 值均明显地上升^[12];北京地区,1996—2003 年间,12 次中等地震($4 \leq M < 5$)中,有 11 次地震在震前有显著地 Y 值升高现象^[14];2004 年发生在中国大陆有资料地区的 $M_L \geq 5$ 地震共 17 次,其中有 15 次地震落入用加卸载响应比方法于 2003 年年底的预测区域内^[12];在中国大陆 7 个地壳稳定活动性低的区域,23 年间,每个区域均是 $Y \approx 1$,有力地说明加卸载响应比 Y 具有较强的预报地震的能力^[15]。2008 年汶川地震后,用加卸载响应比方法对余震序列进行了分析,结果表明序列中的强余震($M \geq 5.0$)前加卸载响应比都会出现明显异常^[16],显示出了良好的短临预测能力。

2 加卸载响应比孕震积分

虽然加卸载响应比在地震预测实践中取得了一定的成效,但是预测效果仍不尽如人意,究其主要原因是,在实际地震预测中没有考虑当地的地球物理条件。2011 年,尹祥础课题组综合考虑当地的地球物理情况,例如剪应变率和平均地震波能量等因素对地震的影响,尝试将量纲分析与 LURR 相结合,预测未来地震发生的时间、地点和强度。在对汶川地震、河南周口地震进行了震例验证中^[9,10],地震三要素均得到了较好的验证。同时,对新疆哈密地区进行了地震三要素的预测,时间证明,预测的地点和震级完全正确,发震时间仅相差 19 天^[9]。

在加卸载响应比空间扫描图形中,可见大面积 Y 值略高于 1 和小面积 Y 值远高于 1 的孕震区。对于此种情况,有可能后者的危险程度要远高于前者,由此引入了加卸载响应比孕震积分。定义面积分 $I_{(v)}$ 为

$$I_{(v)} = \iint_{Y \geq 1} Y dx dy = \bar{Y} \times A \quad (4)$$

式中, $I_{(v)}$ 是随时间变化的,它是孕震区的面积 A 和 LURR 的平均值 \bar{Y} 的乘积,综合地表征孕震区的大小和程度,称之为孕震积分^[9,10],能更加直观地刻划某个特定区域内加卸载响应比值及异常区域应力加载程度的动态变化特征,单位为 km^2 。

加卸载响应比孕震积分的应用,可按地质构造划分若干固定区域,求其孕震积分时序值;也可以震中为圆心,设定某一固定值为半径得出区域内孕震积分时序值;还可以按发

震构造选取固定区域, 求其孕震积分时序值等很多方法。

3 加卸载响应比孕震积分对已有震例的验证

2001 年以来新疆境内南天山西段地区和喀什—乌恰交汇区先后发生了 4 次 $M_S \geq 6.0$ 地震, 分别为 2003 年 2 月 24 日伽师 6.8 级、2005 年 2 月 15 日乌什 6.3 级、2008 年 10 月 5 日乌恰双震和 2012 年 3 月 9 日洛浦 6.0 级地震。本文拟利用加卸载响应比孕震积分对 4 次地震进行震例检验, 总结加卸载响应比孕震积分演化规律。

加卸载响应比计算参数为扫描半径 200 km, 经纬度移动步长 0.25° , 时间窗长 18 个月, 步长 1 个月。加卸载响应比孕震积分根据式(4)计算得到, 参数设定以震中为圆心, 250 km 为半径, 时间窗长 6 个月, 时间步长 1 个月。

3.1 伽师地震

2003 年 2 月 24 日伽师发生了 6.8 级地震, 震中位置为 39.62°N , 77.27°E 。图 2 给出了震中 250 km 范围内加卸载响应比孕震积分, 可见自 1999 年 9 月孕震积分开始升高, 至 2003 年 2 月一直处于高值不断波动的状态(应力处于不断调整的状态), 在达到第三个峰值时发生了 2003 年 2 月 24 日伽师 $M_S 6.8$ 地震。

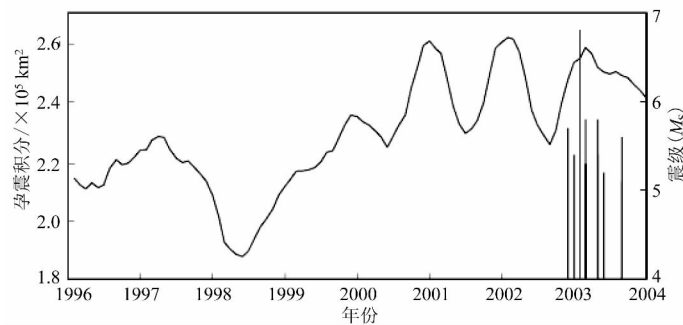


图 2 2003 年 2 月 24 日伽师地震孕震积分及 $M_S \geq 5$ 地震时序

3.2 乌什地震

2005 年 2 月 15 日乌什发生了 6.3 级地震, 震中位置为 41.72°N , 79.37°E 。图 3 给出了震中 250 km 范围内的加卸载响应比孕震积分, 可见自 2000 年 1 月孕震积分开始升高, 至 2001 年 3 月达到峰值, 恢复至正常背景值之后, 发生了 2003 年 12 月 1 日昭苏 6.0 级地震和 2005 年 2 月 15 日乌什 $M_S 6.3$ 地震。

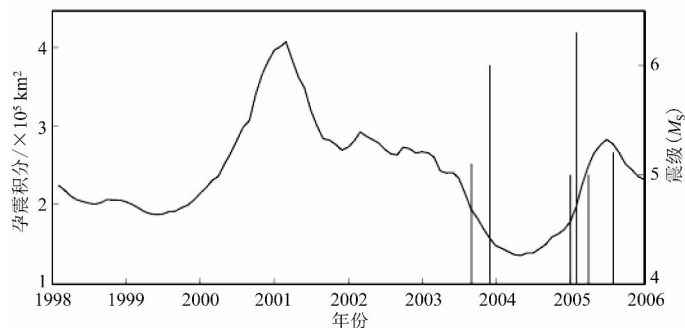


图 3 2005 年 2 月 15 日乌什地震孕震积分及 $M_S \geq 5$ 地震时序

3.3 乌恰地震

2008年10月5日乌恰发生了6.8级和6.5级双震，震中位置分别为39.46°N, 74.04°E和39.42°N, 73.37°E。图4给出了震中250 km范围内的加卸载响应比孕震积分，可见自2001年7月孕震积分开始升高，至2003年3月达到峰值，恢复至正常背景值之后，发生了2008年10月5日乌恰双震。

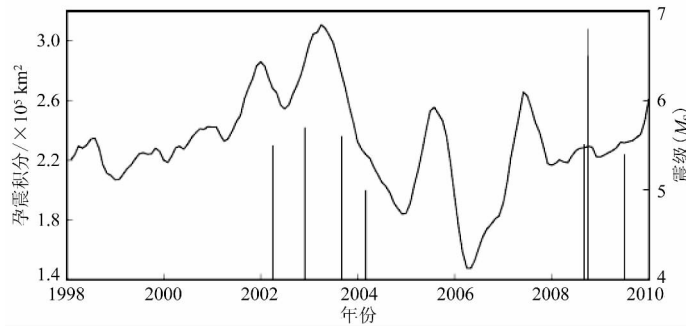


图4 2008年10月5日乌恰地震孕震积分及 $M_s \geq 5$ 地震时序

3.4 洛浦地震

2012年3月9日洛浦发生了6.0级地震，震中位置为39.42°N, 81.32°E。图5给出了震中250 km范围内的加卸载响应比孕震积分，可见自2009年1日孕震积分开始升高，至2011年8月达到峰值，在恢复至正常背景值发生了2012年3月9日洛浦6.0级地震。

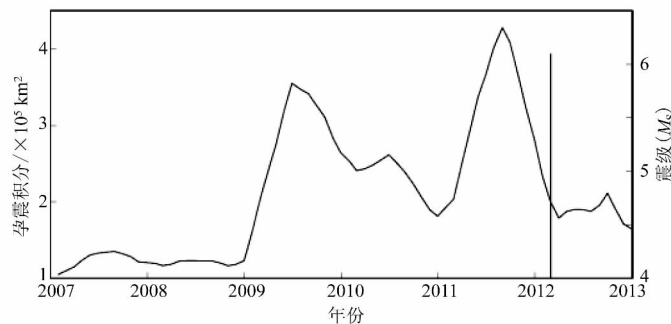


图5 2012年3月9日洛浦地震孕震积分及 $M_s \geq 5$ 地震时序

对新疆境内南天山西段地区和喀什—乌恰交汇区，2001年以来发生的4次 $M_s \geq 6.0$ 地震进行了震例检验。结果显示，在孕震初期，加卸载响应比孕震积分在背景值附近波动，变化平缓。随着孕震程度的加剧，孕震积分不断增加至峰值点，快速回落过程中或恢复后发震。

4 加卸载响应比孕震积分在定点形变资料中的初步应用研究

2012年4月以来，哈拉峻台和乌恰台钻孔倾斜先后出现大速率的巨幅变化，时间上存在准同步性，震情形势严峻、复杂。目前，前兆定点形变资料运用在地震预测中，多用时序图进行趋势、中期、短期和短临的异常来预测地震。加卸载响应比孕震积分反映的是区域构造应力场的应力状态，那么与前兆定点形变资料之间有着怎样的关系？

4.1 南天山西段地区定点形变台站的选取

目前,南天山西段地区有 6 个定点形变台站(图 6),若计算所有台站的孕震积分,考虑到计算加卸载响应比孕震积分会涉及过多的相交区域,所以选取相距较远的哈拉峻台、乌恰台和乌什台计算区域内孕震积分,反映所属区域内构造应力场的应力状态。

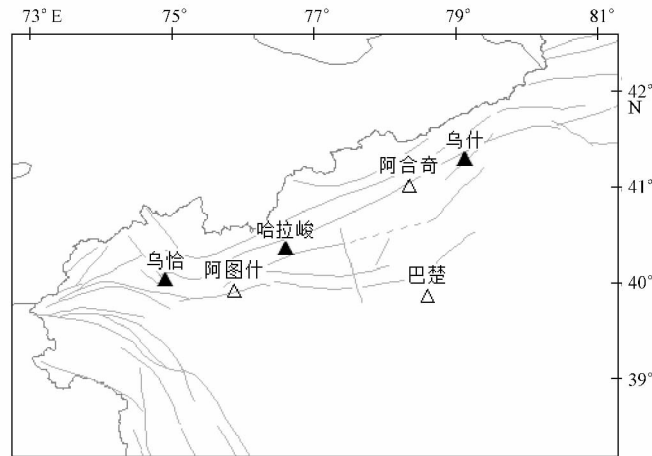


图 6 南天山西段地区前兆定点形变台站

(▲) 参与计算台站 △ 未参与计算台站 \ 断裂

4.2 以台站为中心计算加卸载响应比孕震积分

以哈拉峻台、乌恰台和乌什台为中心,250 km 为半径,作为所属台站的研究区域。首先,计算加卸载响应比。计算参数为扫描半径 200 km,经纬度移动步长 0.25° ,时间窗长 18 个月,时间步长 1 个月。其次,根据式(4)计算台站 250 km 范围内的加卸载响应比孕震积分。计算参数以台站为中心,250 km 为半径,时间窗长 6 个月,时间步长 1 个月。最后,将各个台站的孕震积分时序图,同定点形变台站测项的日均值时序图进行相关性分析图 7~图 10,数据截止日期为 2013 年 6 月 30 日。

图 7~图 10 显示:① 哈拉峻台加卸载响应比孕震积分,自 2011 年 12 月以来出现不断上升的趋势,表明研究区域内应力处于不断加载的过程。随后即 2012 年 5 月,该台钻孔倾斜两分量均出现了大速率变化,NS 分量 S 倾 $55''$ 、EW 分量 E 倾 $5.8''$;② 2013 年 3~6 月,乌恰台加卸载响应比孕震积分处于快速上升的趋势,之后小幅波动。该台钻孔倾斜两分量在 2013 年 8 月 17~25 日表现速率上的巨幅变化,NS 分量 S 倾 $1.3''$ 、EW 分量 W 倾 $11.2''$,之后恢复正常速率。综合分析,加卸载响应比孕震积分同钻孔倾斜出现的大速率异常变化在时间、曲线表现形态均一致,反映出 2011 年 12 月以来,研究区域内构造应力场处于应力不断加载的过程。

乌什台加卸载响应比孕震积分,自 2010 年 5 月起处于缓慢上升的趋势。在 2011 年初,乌什台水管仪、伸缩仪和体应变均相继出现了趋势转折现象(图 9,图 10)。分析认为:当构造应力场上的应力不断缓慢增强时,可能会引起定点形变测项的速率方向发生变化^[17],表现形式为趋势异常。

综上所述,研究区域内构造应力场应力加载存在着由乌什—哈拉峻—乌恰的时间先后,随后定点形变资料表现为同孕震积分曲线类似的形态。分析认为,目前南天山西段地

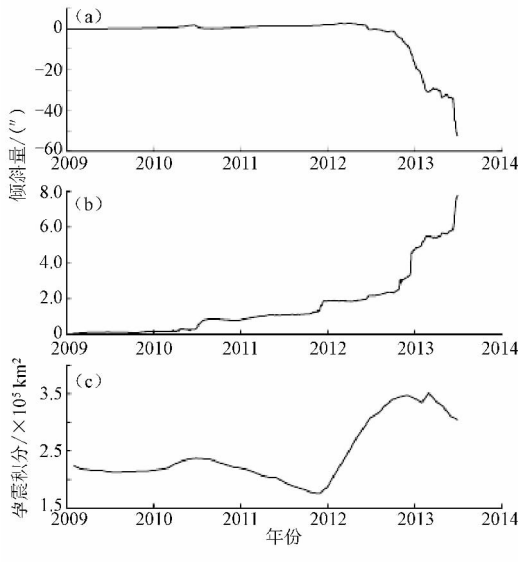


图 7 哈拉峻钻孔倾斜两分量
日均值与孕震积分时序

(a) NS 分量；(b) EW 分量；(c) 哈拉峻
台站周围 250 km 加卸载响应比孕震积分

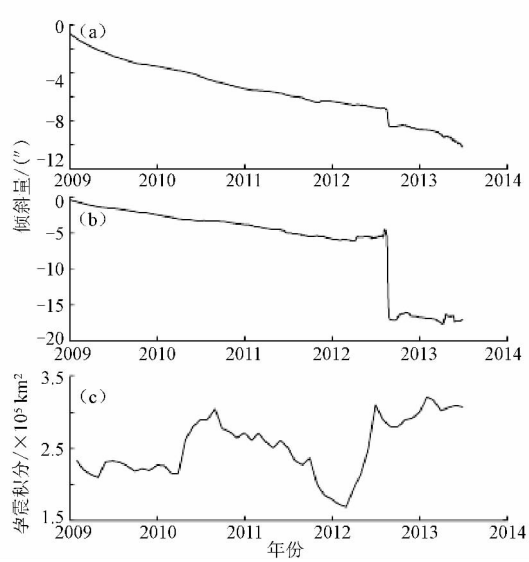


图 8 乌恰钻孔倾斜两分量
日均值与孕震积分时序

(a) NS 分量；(b) EW 分量；(c) 乌恰台站
周围 250 km 加卸载响应比孕震积分

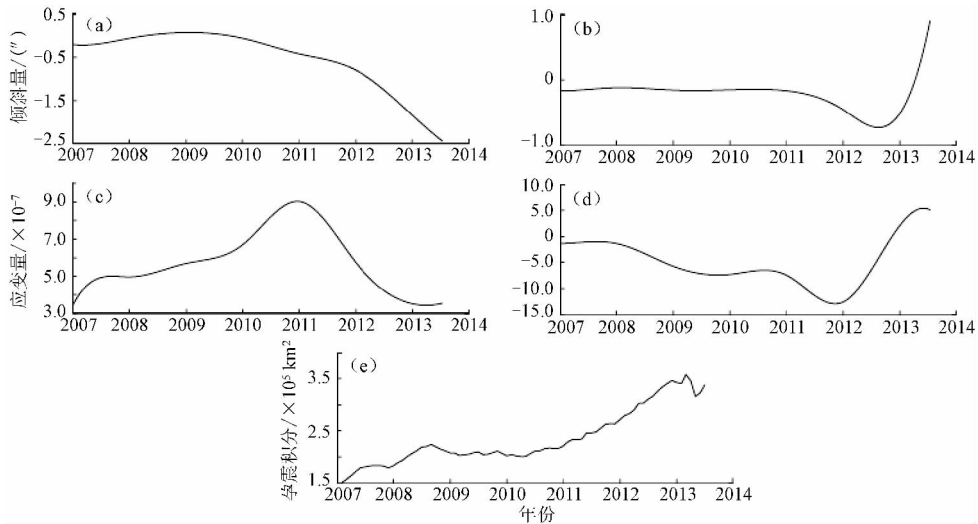


图 9 乌什水管仪、伸缩仪两分量趋势线与孕震积分时序

(a) 乌什水管仪 NS 分量趋势线；(b) 乌什水管仪 EW 分量趋势线；(c) 乌什伸缩仪 NS 分量
趋势线(d) 乌什伸缩仪 EW 分量趋势线；(e) 乌什台站周围 250 km 加卸载响应比孕震积分

区构造应力场应力水平处于不断加载的过程，将来或稍长一段时间内该区存在发生 6 级地震的可能。

5 结论与讨论

本文利用加卸载响应比孕震积分对新疆境内南天山西段地区和喀什—乌恰交汇区 2001

年以来发生的 $M_s \geq 6.0$ 的地震进行了震例检验,并将其初步应用到南天山西段地区的定点形变资料中,得出如下结论:

(1) 在孕震初期,加卸载响应比孕震积分在背景值附近波动,变化平缓,随着孕震程度的加剧,孕震积分不断增加至峰值点,快速回落过程中或恢复后发生地震。

(2) 加卸载响应比孕震积分能够反映区域内构造应力场的应力状态。2012 年以来,哈拉峻台和乌恰台钻孔倾斜表现的速率不稳定变化,均出现在相应台站的孕震积分高值后。分析表明,该区域内构造应力场应力状态发生了一定的变化,并引起了定点形变资料速率的巨幅、不稳定变化。

(3) 当构造应力场上的应力处于缓慢不断加载的过程时,会引起前兆定点形变测项速率方向发生改变,表现形式为趋势异常。

(4) 加卸载响应比孕震积分表现时间要早于定点形变台站资料所表现的时间,可能与加卸载响应比选用研究区域内发生的地震的能量 E 作为响应有关,因为地震携带了震源处的孕震信息。

加卸载响应比推进小组在工作期间,得到了尹祥础研究员和王海涛研究员的悉心指导,在此表示衷心感谢。计算加卸载响应比程序由尹祥础课题组提供。

参考文献:

- [1] 王海涛,彭克银,张永仙,等. 新疆伽师强震群过程中加卸载响应比变化特征[J]. 科学通报, 1998, 43(10): 1109-1111.
- [2] 王海涛,彭克银,庄建仓,等. 样本条件对加卸载响应比计算结果的影响分析[J]. 地震, 1999, 19(3): 223-229.
- [3] 陈学忠,尹祥础. 水库地震主震前加卸载响应比的变化特征[J]. 中国地震, 1995, 11(4): 361-367.
- [4] 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[J]. 地震, 2004, 24(1): 25-30.
- [5] 张浪平,余怀忠,尹祥础. 加卸载响应比方法在结构灾变预测中的应用[J]. 工程力学, 2010, 27(3): 228-235.
- [6] 李树华,陈燕. 云南地区地磁加卸载响应比短临异常特征[J]. 地震研究, 2003, 26(增刊): 133-139.
- [7] 兰双双,迟宝明. 汶川地震前地下水固体潮加卸载响应比异常分析[J]. 地震研究, 2011, 34(3): 271-277.
- [8] 杨林章,何世海,郗钦文. 用潮汐体应变加卸载响应比研究岩石弹性性质的变化[J]. 中国地震, 1994, 10(增刊): 90-94.
- [9] 尹祥础,刘月,聂宁明,等. 加卸载响应比与量纲分析相结合——地震预测的新探索[J]. 科研信息化技术与应用, 2012, 3(2): 75-83.

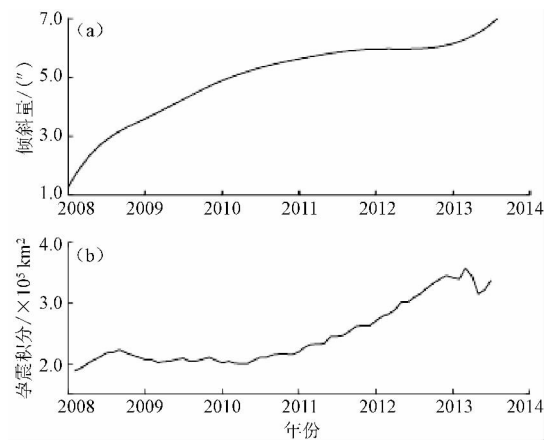


图 10 乌什体应变趋势线与孕震积分时序

(a) 乌什体应变趋势线; (b) 乌什台站周围
250 km 加卸载响应比孕震积分

- [10] 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.
- [11] 尹祥础. 固体力学[M]. 北京: 地震出版社, 2011.
- [12] 尹祥础, 陈学忠, 宋治平, 等. 加卸载响应比——一种新的地震预报方法[J]. 地球物理学报, 1994, 37(6): 767-775.
- [13] 尹祥础. 地震预报的新探索——加卸载响应比理论[J]. 力学与实践, 2004, 26(6): 1-7.
- [14] 刘桂萍, 马丽, 尹祥础. 首都圈地区中等地震前响应比特征的研究[J]. 地震, 1994, (6): 34-39.
- [15] 尹祥础, 张晖辉. 加卸载响应比的新进展[J]. 国际地震动态, 2005, 317(5): 98: 102.
- [16] 张浪平, 尹祥础, 庄建仓, 等. 汶川余震序列的加卸载响应比分析[J]. 地震, 2009, 29(1): 60-67.
- [17] 梅世蓉, 冯德益. 中国地震预报概论[M]. 北京: 地震出版社, 1993.

Application of Load/Unload Response Ratio Seismogenic Integral in Earthquake Prediction in Xinjiang

LIU Jian-ming¹, LIU Yue², TANG Lan-lan¹, LI Zhi-hai¹

WEN Shao-yan¹, ZHANG Lin-lin¹, LUO Ju¹

(1. Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China;

2. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100190, China)

Abstract: Firstly, testing on the four earthquake cases ($M_s \geq 6.0$) from 2001 to 2012 occurred successively in the western part of southern Tianshan mountain and Kashi-Wuqia area of Xinjiang for using the Load/Unload Response Ratio Seismogenic Integral. The results showed that the seismogenic integral fluctuated around the background change smoothly in early seismogenic stage. With the intensification of stress and seismogenic integral increasing to the peak point, earthquakes occurred during the rapid decline or after the resumption. Then, we apply the Load/Unload Response Ratio Seismogenic Integral to the fixed site deformation data. Contrasting and analyzing the Load/Unload Response Ratio Seismogenic Integral with 250 km radius surrounding Machang, Halajun, Wuqia and Kashi stations in the western part of southern Tianshan mountain, as well as the sequence chart of Seismogenic Integral on the affiliated stations. The result indicated that (1) the tectonic stress field in Machang, Halajun and Wuqia station region is in a process of continuous load currently, which gives rise to the huge and unsteady change in the datum rate of fixed-point deformation; (2) the measurement rate direction of precursory permanent deformation changes when the stress on tectonic stress field is in constant load slowly, their manifestations are trend anomaly; (3) Currently, the tectonic stress field stress level regions in the western part of the southern Tianshan is the process of continuous loading.

Key words: Load/Unload Response Ratio; Seismogenic Integral; Tectonic stress field; Stress load; Fixed site deformation