

张磊,岳冲,宋程,等. 2025. 地应变加卸载响应比方法在天津地区的应用[J]. 地震研究, 48(2): 229–236, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0024.

Zhang L, Yue C, Song C, et al. 2025. Application of the Load/Unload Response Ratio method to the calculation of ground strain in Tianjin[J]. *Journal of Seismological Research*, 48(2): 229–236, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0024.

地应变加卸载响应比方法在天津地区的应用^{*}

张磊¹, 岳冲^{2♣}, 宋程¹, 余怀忠²

(1. 天津市地震局, 天津 300201; 2. 中国地震台网中心, 北京 100045)

摘要: 从岩石的应力和应变的本构关系出发, 利用基于库仑应力触发模型的加卸载响应比计算方法, 计算了天津蓟县洞体应变和小辛庄洞体应变的加卸载响应比值, 并依据孕震尺度与震级关系选取震例, 结合伸缩应变原始观测数据的趋势性变化特征和天津及周边地区 b 值扫描结果开展了综合分析。结果表明: ① 2020 年河北古冶 $M_s 5.1$ 地震前小辛庄洞体应变两分量出现了明显的拉张应变加速、震后减弱现象, 加卸载响应比值在该时段内同样出现了先增大后减小的异常变化; ② 2018—2019 年天津小辛庄周边区域出现了明显的低 b 值异常区, 且上述结果在时、空上呈现出较好的一致性。

关键词: 洞体应变; 加卸载响应比; b 值; 天津

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2025)02-0229-08

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0024

0 引言

我国是一个地震灾害严重的国家, 地震活动具有频度高、强度大、震源浅、分布广的特点, 整体上呈现西强东弱的特点。地震现象虽然复杂, 但其物理实质就是地壳块体快速剪切脆断、并释放能量的过程(尹祥础, 2015)。加卸载响应比(Load/Unload Response Ratio, LURR)是20世纪80年代提出的一个定量的、表征地震孕育进程的参数(尹祥础, 2004), 该方法是在断层力学、损伤力学、非线性科学等研究基础上提出的地震预测新方法。很多学者利用该方法开展了与地震预测相关的研究, 如宋治平等(1996)从时空演化的角度研究了 $M_s \geq 6.0$ 地震前 LURR 值的演化特征, 发现震前 2~5 年普遍出现 LURR 高值异常,

先以离散形式分布在震中外围, 之后随着时间推移向震中汇集, 在震前数月至1年集中出现在震中附近地区; 王海涛等(1998)将加卸载响应比方法应用于1997年1月21日伽师地震序列研究中, 发现序列中 $M_s \geq 5.0$ 地震前均出了高值异常, 并将该方法应用到中强地震后地震序列的早期判断中; 岳冲等(2020)通过库仑应力触发模型的加卸载响应比计算方法研究发现, 2017年九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前震中附近 300 km 范围内多个应变观测台站出现 LURR 值异常, 震前9个月陆续出现“集中—增强—减弱”的时空演化特征, LURR 值异常集中发生在震前正应力增强区内(Yue et al, 2022); 许延军等(2022)研究祁连山构造带冷龙岭断裂带西段 $M_s \geq 6.0$ 地震 LURR 值特征发现, 1986年8月26日门源 $M_s 6.5$ 地震、2016年1月21日门源 $M_s 6.4$ 地震和2022年1月8日门源 $M_s 6.9$

^{*} 收稿日期: 2024-05-24.

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U2039205); 天津市地震局重点科研项目(zd202402).

第一作者简介: 张磊(1982-), 高级工程师, 主要从事地壳形变监测与预测相关研究.

E-mail: zhanglei-qd@126.com.

♣通信作者简介: 岳冲(1989-), 副研究员, 主要从事地壳形变监测与数值模拟研究.

E-mail: dacongylue@126.com.

地震前均出现了明显的 $LURR$ 值短期异常; Yu 等 (2022) 研究发现在 2020 年 6 月 26 日于田 $M_s 6.4$ 地震前震中附近和田台地电场数据出现了明显的 $LURR$ 高值异常, 这一结果与利用震中周边 300 km 范围内小震 Benioff 应变计算得到的 $LURR$ 值结果相关性很好。上述研究结果表明, 多数 $M_s \geq 5.0$ 、尤其是 $M_s \geq 6.0$ 地震前存在 $LURR$ 高值异常, 在震前数月至数年呈现出向震中汇集、增强的时空迁移特征。

蓟县地震台 (以下简称“蓟县台”) 是天津地区唯一的定点形变观测台站, 目前有 2 个定点形变观测山洞, 分别位于台站院内和台站东约 4.5 km 处的小辛庄, 两山洞内同时安装有 SS-Y 型洞体应变仪 (以下分别简称为“蓟县洞体应变”和“小辛庄洞体应变”)。洞体应变仪是一种精密测量两点之间水平距离相对变化的仪器, 用于观测地壳水平应变和固体潮水平分量的变化, 为研究地壳弹性变化提供了重要的数据, 同时也为地震预报研究提供了重要的观测手段。两个观测台站观测条件较好, 满足中国地震局地震活动前兆观测的要求, 观测数据连续性好, 观测值与理论固体潮具有较好的一致性, 为后续震前异常的研究提供较好的数据参考。本文从岩石的应力和应变的本构关系出发, 利用库仑应力触发模型的加卸载响应比计算方法, 计算蓟县洞体应变、小辛庄洞体应变的 $LURR$ 值, 分析相近台址应变观测数据的 $LURR$ 值变化特征, 结合原始观测数据的趋势变化特征和天津及周边地区 b 值时空演化特征, 综合分析讨论地应变加卸载响应比方法在天津地区的应用结果。

1 研究背景

1.1 观测台站概况

蓟县台地质构造上位于燕山山脉与华北平原的接触部位, 蓟县山前断裂的下盘, 东距 1976 年唐山 $M_s 7.8$ 地震震中约 75 km。台站附近断裂构造较为复杂, 存在一系列基岩老断裂和褶皱。2017 年以来蓟县台周边 200 km 范围共发生 $M_s \geq 4.0$ 地震 4 次, 其中最大地震为 2020 年 7 月 12 日古冶 $M_s 5.1$ 地震 (图 1)。

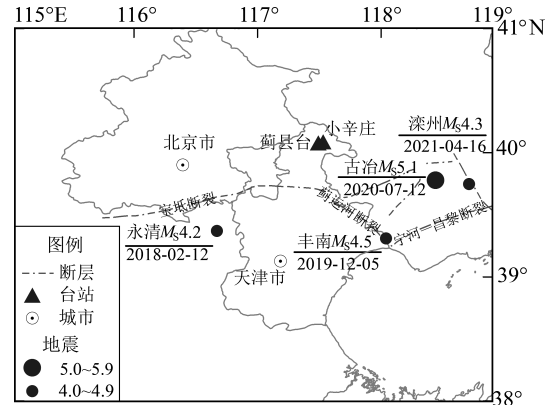


图 1 蓟县台周边构造及 $M_s \geq 4.0$ 地震空间分布

Fig. 1 Distribution of structures and $M_s \geq 4.0$ earthquakes around Jixian seismic station

蓟县台山洞于 2010 年开凿, 全长约 426 m, 覆盖层厚度为 40 ~ 70 m, 山洞截面宽约 3 m, 高约 3.5 m, 洞体采用锚固喷浆技术, 洞壁被水泥喷浆完全覆盖。蓟县洞体应变仪于 2017 年 6 月安装完成, 共有 NS、EW 和 NE 三条基线, 方位角分别为 0° 、 90° 和 45° , 基线长分别为 44.34 m、46.77 m 和 44.63 m。

小辛庄山洞工作区进深为 260 m, 覆盖厚度约为 80 m, 山洞截面宽约 2.5 m, 高约 3.5 m, 洞壁无被覆 (曾做过高压喷浆), 偶有碎石掉落, 雨季渗漏滴水, 山洞年温差小于 1.0°C , 日温差小于 0.1°C , 相对湿度达 98%。山洞洞体的岩性主要为蓟县系雾迷山组白云岩, 山洞周围的岩性则为中元古界未变质的蓟县系雾迷山组和蓟县系杨庄组地层 (白云岩、泥质白云岩、燧石白云岩、沥青质白云岩和叠层石等) (雷生学等, 2021)。小辛庄洞体应变仪于 2017 年 2 月完成改造, 共有 NS、EW 两条基线, 方位角分别为 324.87° 和 59.94° , 基线长分别为 39.1 m 和 39.0 m。

1.2 震例选取

尹祥础 (2015) 研究表明, 从地震前的地震矩/能量加速释放角度确定的孕震区的空间尺度与从加卸载响应比角度确定的孕震区空间尺度, 二者高度一致。本文采用的孕震区空间尺度 R 与震级对应关系 (彭克银等, 2003) 可表示为:

$$\lg R = 0.29M_s + 0.49 \quad (1)$$

由式 (1) 可知, $M_s 4.5$ 、 $M_s 5.0$ 、 $M_s 6.0$ 和 $M_s 7.0$

地震的孕震区空间尺度分别约为60、90、170 和 330 km。本文统计了2017 年以来天津蓟县台周边 200 km 范围内的 $M_s \geq 4.0$ 地震，见表1。依据式 (1) 可知，仅有2020 年7月12 日河北古冶 $M_s 5.1$ 地震的震中距满足孕震尺度与震级对应关系。因此，本文重点分析古冶 $M_s 5.1$ 地震前蓟县洞体应变和小辛庄洞体应变观测及 $LURR$ 时序曲线变化。

表1 2017 年以来天津蓟县台周边 200 km 范围内 $M_s \geq 4.0$ 地震基本信息

Tab.1 $M_s \geq 4.0$ earthquakes within 200 km around Jixian seismic station since 2017

序号	发震日期	发震地点	M_s	震中距/km	震中位置
1	2018-02-12	河北永清	4.2	107	(39.37°N, 116.67°E)
2	2019-12-05	河北丰南	4.5	98	(39.31°N, 118.04°E)
3	2020-07-12	河北古冶	5.1	87	(39.78°N, 118.44°E)
4	2021-04-16	河北滦州	4.3	110	(39.75°N, 118.71°E)

2 研究方法

2.1 $LURR$ 方法

$LURR$ 是一个能够较为定量地反映非线性系统趋近失稳程度的参数，将其定义为：

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

式中： X_+ 为加载时的响应率； X_- 为卸载时的响应率。

图2 的应力-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，如果材料受力单调增加，材料将分别经历弹性形变、损伤、失稳（破坏）等过程（尹祥础，2004，2015）。弹性变形阶段，最本质的特征是可逆性，加载过程和卸载过程的响应率相同，即 $X_+ = X_-$ ，则 $Y=1$ 。损伤过程的本质特征是不可逆性，出现损伤后 $X_+ > X_-$ ， $Y>1$ 。随着载荷增大，材料损伤程度加剧， Y 值将增大至显著大于1。当系统失稳时， $Y \rightarrow \infty$ 。加载和卸载过程可根据日月引潮力引起的库仑破坏应力在地震破裂面上的变化 ΔCFS （余怀忠，2006）进行判断， $\Delta CFS > 0$ 为加载， $\Delta CFS < 0$ 则为卸载。

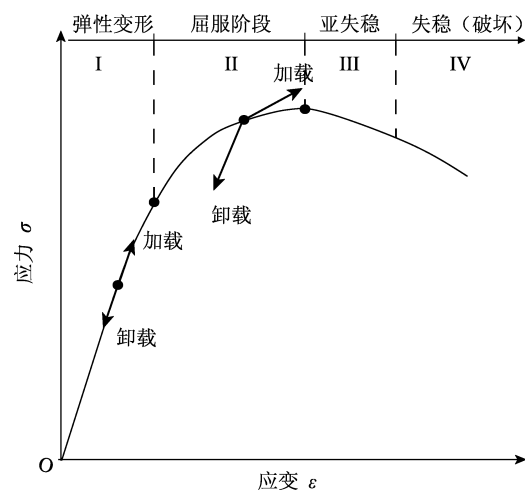


图2 岩石应力-应变曲线（岳冲等，2020）

Fig.2 Stress-strain curve of rock (Yue et al., 2020)

已有震例研究表明， $LURR$ 值在地震预测中呈现出明显的峰值点规律，即孕震初期， Y 大都在1 上下波动，随后逐渐上升至峰值，但地震不在峰值点发生，而是在 T_2 后发生， T_2 为峰值点至发震时刻的这段时间，称为延迟时间。岩石力学实验中也证明了 $LURR$ 值的峰值点规律（尹祥础，2015）， $LURR$ 值出现峰值到试件发生最后破裂之间的延迟时间 T_2 与介质的均匀程度有很大关系；均匀程度越高的介质，破裂的发生时间可能比预期来的更早。彭克银等（2003）研究发现， $LURR$ 时程曲线在峰值点出现后13 个月发生了1973 年12月31 日河北河间 $M_s 5.3$ 地震，峰值点出现之后8 个月发生了1980 年2月10 日内蒙古博克图 $M_s 5.6$ 地震，峰值点出现后28 个月发生了1989 年10月18 日山西大同 $M_s 5.7$ 地震。可见，不同地区、不同地震 T_2 差异较大。

2.2 b 值计算

Gutenberg 和 Richter（1950）在研究全球地震活动时得出震级-频度关系式，即 $G-R$ 公式：

$$\lg N = a - bM \quad (3)$$

式中： N 为地震个数； M 为震级； b 值即为直线的斜率， b 值作为地震活动性研究中应用中较多的一个参数，其大小能够反映区域应力积累状态，一般认为 b 值与区域环境应力的大小呈反比，即低 b 值反映更高的应力积累（刘子璇等，2019；姜佳佳，冯建刚，2021）。

3 研究结果

3.1 洞体应变观测

自 2017 年仪器布设以来, 蓟县洞体应变三分量数据呈拉张变化趋势, 年变形态较好, 在 2020 年河北古冶 $M_s5.1$ 地震前未出现显著的速率变化 (图 3a)。

小辛庄洞体应变 NS 和 EW 分量在 2016 年前后由加速压缩变化转为缓慢拉张变化, 在 2017 年仪器更新前呈现弱压缩变化趋势, 2017 年 2 月至 2018 年 1 月仪器观测较为稳定, 两分量延续之前

缓慢拉张的变化趋势, 2017 年 12 月开始出现加速拉张变化, 2018—2019 年上半年拉张加速现象显著, 拉张变化于 2019 年下半年开始减弱, 直至 2020 年 7 月发生古冶 $M_s5.1$ 地震 (图 3b)。地震后洞体应变 NS 分量逐渐转为压缩变化, 而 EW 分量变化较为平稳。观测期间, 受强降雨影响, 2018 年 7—8 月小辛庄伸缩应变两分量均出现了快速压缩变化, 但降雨并未改变伸缩应变的趋势性变化特征。因此, 从原始观测数据可以看到古冶 $M_s5.1$ 地震前, 小辛庄洞体应变两分量出现了明显的拉张加速变化现象, 地震后拉张变化开始减弱, 呈现 1 次 $M_s5.0$ 地震前后应变的变化过程。

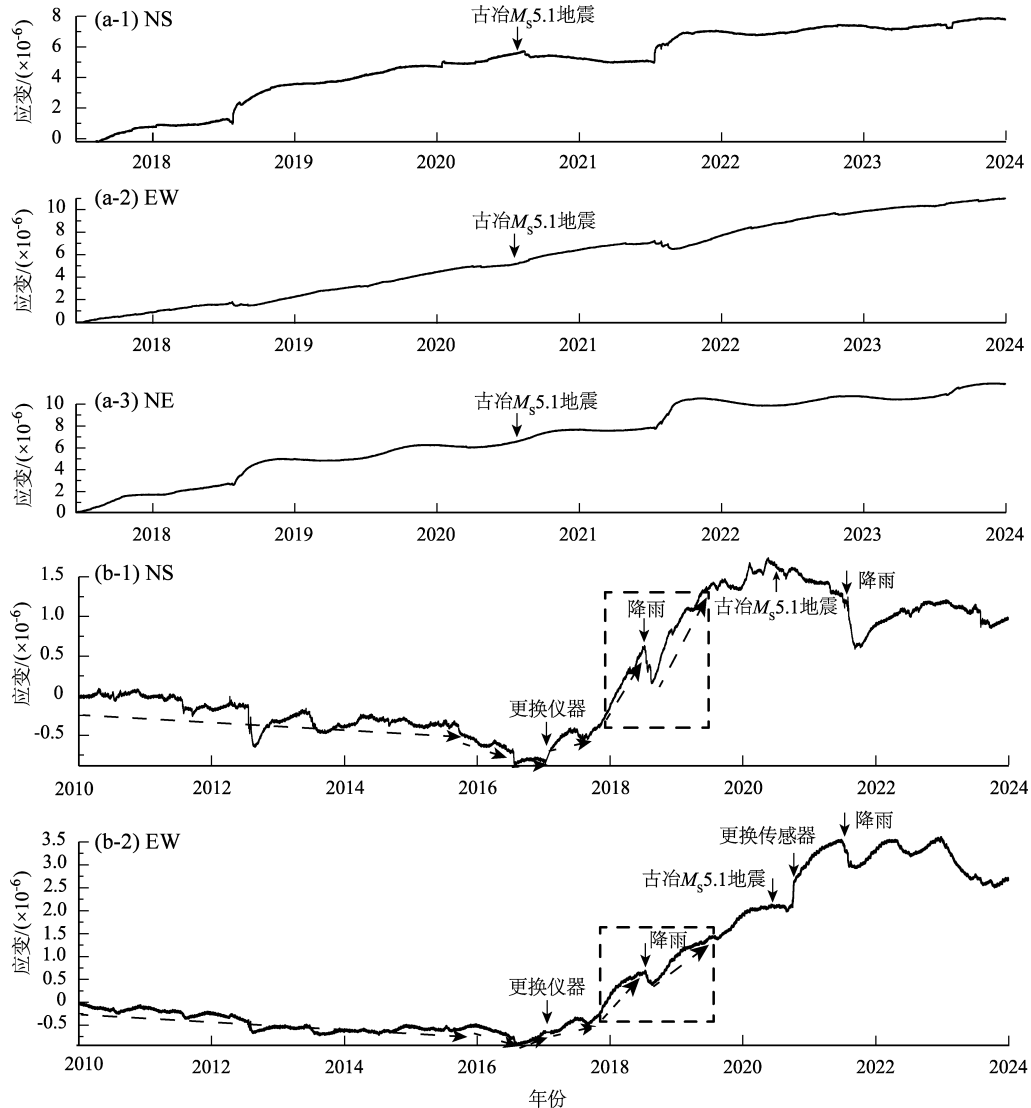


图 3 蓟县洞体应变 (a) 和小辛庄洞体应变 (b) 的各分量观测时序曲线

Fig. 3 Time series of the cave strain at Jixian seismic station (a), and the cave strain on Xiaoxinzhuang monitoring spot (b)

3.2 洞体应变 $LURR$ 值变化

徐志国等 (2021) 研究表明, 2020 年古冶 $M_s 5.1$ 地震发震断层走向为 233° , 倾角为 69° , 滑动角为 -176° , 震源深度为 11 km。根据古冶地震的震源参数, 取窗长为 30 天、步长为 15 天, 摩擦系数 0.4, 分别计算了蓟县和小辛庄洞体应变的 $LURR$ 值 (Yu *et al.*, 2016, 2020)。

蓟县洞体应变三分量 $LURR$ 值计算结果显示: 在观测初期 (2017 年 7 月—2018 年 1 月) 存在 $LURR$ 值大于 1.0 现象, 随后均在 1.0 附近波动, 古冶 $M_s 5.1$ 地震前并未再次出现 $LURR$ 值增大现象, 分析认为该计算结果主要受起始数据计算不稳定的影响, 震前并未捕捉到相关异常信息。小辛庄洞体应变 NS 和 EW 分量 $LURR$ 值计算结果显示: NS 分量 $LURR$ 值在 2018 年 1 月前在 0.97 附近波动, 在 2018 年 1 月后出现波动先减小后增大的异常现象, 于 2018 年 2 月达到峰值 1.34, 随后开始减小, 并于 2019 年 2 月减小至 1.01 后开始在 1.0 附近波动变化。EW 分量 $LURR$ 值在 2017 年 11 月前在 0.97 附近波动, 2017 年 11 月后出现波动先

减小后增大的异常现象, 2018 年 1 月达到峰值 1.24, 随后开始减小, 2019 年 6 月减小至 1.01 后在 1.0 附近波动变化。尽管小辛庄洞体应变两分量 $LURR$ 值异常出现时间存在 3 个月左右的差异, 但均在 2018—2019 年出现 $LURR$ 增大的异常过程, 异常结束后于 2020 年在台站东南方向发生了古冶 $M_s 5.1$ 地震, 整个异常演化过程与岳冲等 (2020) 利用基于应变的加卸载响应比方法计算得到的 $LURR$ “增强—峰值—减弱—发震” 的过程是一致的。该 $LURR$ 值异常变化过程与洞体应变观测到的加速拉张应变变化过程吻合, 表明该时段内存在显著的应力增强引起的岩石损伤过程, 岩石损伤变形引起的对固体潮加载与卸载响应率的差异被洞体应变仪器记录到, 并被加卸载响应比方法识别。Yue 等 (2022) 基于断层虚位错模型计算 2017 年九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前断层应力结果显示, 震前 $LURR$ 值异常集中位于断层正应力增强区内, 垂直于断层方向的拉张应力作用有利于裂隙扩展, 该结果与本文小辛庄洞体应变两分量震前加速拉张现象一致。

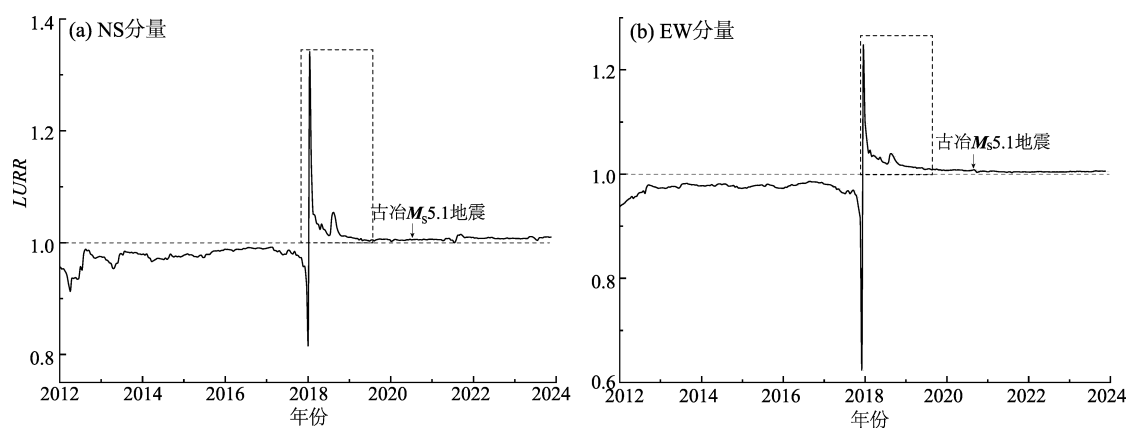


图4 小辛庄洞体应变 $LURR$ 值时序曲线

Fig. 4 $LURR$ time series of the cave strain on Xiaoxin Zhuang monitoring spot

3.3 b 值综合分析

古冶 $M_s 5.1$ 地震震中距离蓟县台 87 km, 处于孕震区空间尺度的极限距离上。为验证小辛庄洞体应变观测记录到的 2018—2019 年的加速拉张变化以及利用基于应变的加卸载响应比方法计算的震前 $LURR$ 值异常变化与古冶 $M_s 5.1$ 地震关系, 本文利用华北地区小震目录计算天津及周边地区震前 b 值分布, 进一步讨论区域断层应力变化与上述

异常关系。

计算数据为华北地区小震目录 (来源于中国地震台网中心), 计算时间为 2015 年 1 月 1 日—2020 年 7 月 11 日, b 值计算单元半径取 40 km, 搜索距离设置为 5 km, 最小完备震级为 $M_L 1.0$, 最小计算震级为 $M_L 0.0$ 。利用最大似然法计算各网点的 b 值, 扫描结果如图 5 所示。

从图 5 可见, 在小辛庄西部京津冀交界区和其

4 结论

本文从岩石的应力和应变的本构关系出发,利用基于库仑应力触发模型的加卸载响应比计算方法,计算了天津蓟县洞体应变和小辛庄洞体应变的 $LURR$ 值,并结合伸缩应变原始观测值的趋势性变化特征和天津及周边地区 b 值扫描结果开展综合分析,结果表明:

(1) 从原始数据上看,小辛庄洞体应变 NS、EW 分量在 2020 年古冶 $M_s5.1$ 地震前出现了明显的拉张应变加速、震后减弱现象,呈现出一次 $M_s5.0$ 地震前后应变变化过程。虽然 2018 年 7—8 月存在强降雨引起的快速压缩变化,但伸缩应变原有的拉张趋势变化速率并未改变。

(2) 2018—2019 年小辛庄伸缩应变 NS、EW 分量在 2020 年古冶 $M_s5.1$ 地震前均出现了明显的 $LURR$ 值增大异常,整个异常演化符合以往利用基于应变的加卸载响应比方法计算得到的 $LURR$ 值“增强—峰值—减弱—发震”的过程,并且这一异常变化过程与小辛庄洞体应变观测到的加速拉张应变变化过程在时间上具有一致性。

(3) b 值计算结果显示,2018 年和 2019 年在天津小辛庄周边地区出现了明显的低 b 值变化区域,这一结果与小辛庄洞体应变 $LURR$ 值结果所反映的区域应力状态增强变化在时、空上具有较为明显的一致性,并且与断层失稳、破裂前 b 值降低、加卸载响应比“增强—峰值—减弱”的岩石实验结果相符合。

蓟县台山洞和小辛庄山洞相距 4.5 km,在古冶 $M_s5.1$ 地震前,仅小辛庄洞体应变两分量出现了明显的 $LURR$ 值增大异常变化,蓟县台洞体应变 $LURR$ 值未见明显异常变化,这可能与地下介质均匀程度、基线布设方向等多种因素有关。另外,地应变加卸载响应比计算方法将地球物理观测中应变类观测与地震活动性参数建立起了联系,有利于在天津地区震情跟踪工作中开展相关的综合应用研究。

参考文献:

姜佳佳,冯建刚. 2021. 2017 年九寨沟 7.0 级地震前应力状态及 b 值

异常特征研究[J]. 地震工程学报,43(3):574–582.

Jiang J J, Feng J G. 2021. Stress state and b -value anomalies before the Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake in 2017[J]. China Earthquake Engineering Journal, 43(3):574–582. (in Chinese)

雷生学,刘建波,闫伟,等. 2021. 岩体完整性对载荷干扰定量分析的影响——以天津小辛庄应变为例[J]. 地震地质,43(6):1600–1613.

Lei S X, Liu J B, Yan W, et al. 2021. Influence of rock integrity on quantitative analysis of external load disturbance: A case study of Xiaoxinzhuan strain, Tianjin[J]. Seismology and Geology, 43(6):1600–1613. (in Chinese)

刘子璇,冯建刚,张苏平. 2019. 地震 b 值研究进展综述[J]. 高原地震,31(4):9–13.

Liu Z X, Feng J G, Zhang S P. 2019. The progress on b -value of earthquake[J]. Plateau Earthquake Research, 31(4):9–13. (in Chinese)

彭克银,尹祥础,和锐. 2003. 用临界点理论讨论应变能加速释放现象与孕震区尺度[J]. 中国地震,19(4):425–430.

Peng K Y, Yin X C, He R. 2003. Acceleration strain release and earthquake genesis scaling exponents from critical point hypothesis[J]. Earthquake Research in China, 19(4):425–430. (in Chinese)

宋治平,尹祥础,陈学忠. 1996. 加卸载响应比的时空演变特征及其对地震三要素的预测意义[J]. 地震学报,18(2):179–186.

Song Z P, Yin X C, Chen X Z. 1996. Spatial-temporal evolution characteristics of Load-Unload Response Ratio and its prediction significance for the three elements of earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 18(2):179–186. (in Chinese)

王海涛,彭克云,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[J]. 科学通报,43(10):1109–1112.

Wang H T, Peng K Y, Zhang Y X, et al. 1998. The variation characteristics of Load-Unload Response Ratio during Jiashi strong earthquake swarm in Xinjiang[J]. Chinese Science Bulletin, 43(10):1109–1112. (in Chinese)

解孟雨,孟令媛. 2021. 川东南长宁地区地震活动及 b 值演化特征[J]. 中国地震,37(2):494–507.

Xie M Y, Meng L Y. 2021. Seismicity and evolution characteristics of b -values of Changning area in southeastern region of Sichuan Basin[J]. Earthquake Research in China, 37(2):494–507. (in Chinese)

徐志国,梁姗姗,郭铁龙,等. 2021. 2020 年 7 月 12 日唐山古冶 $M_s5.1$ 地震震源参数[J]. 地震地磁观测与研究,42(3):25–33.

Xu Z G, Liang S S, Guo T L, et al. 2021. Source parameters of Guye $M_s5.1$ earthquake in Tangshan on July 12, 2020[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 42(3):25–33. (in Chinese)

许延军,张学辉,曹勇,等. 2022. 门源 6.9 级地震前地应变加卸载组响应比异常分析[J]. 地震工程学报,44(3):707–712.

Xu Y J, Zhang X H, Cao Y, et al. 2022. Load/Unload Response Ratio a-

- nomalies of strain before the Menyuan $M_s 6.9$ earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 44(3):707–712. (in Chinese)
- 尹祥础. 2004. 地震预报的新途径——加卸载响应比理论[J]. 力学与实践, 26(6):1–7.
- Yin X C. 2004. A new approach to earthquake prediction – Load/Unload Response Ratio (*LURR*) theory [J]. Mechanics in Engineering, 26(6):1–7. (in Chinese)
- 尹祥础. 2015. 加卸载响应比理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社.
- Yin X C. 2015. Theory and application of Load – Unload Response Ratio [M]. Beijing: Science Press.
- 余怀忠. 2006. 地震前兆物理模型与地震预测初步研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- Yu H Z. 2006. Preliminary studies on mechanical models of earthquake precursors and earthquake prediction[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration.
- 岳冲, 牛安福, 余怀忠, 等. 2020. 九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前地应变 *LURR* 异常演化特征[J]. 中国地震, 36(2):267–275.
- Yue C, Niu A F, Yu H Z, *et al.* 2020. Evolutionary characteristics of ground strain *LURR* anomaly before Jiuzhaigou $M_s 7.0$ earthquake [J]. Earthquake Research in China, 36(2):267–275. (in Chinese)
- Gutenberg B, Richter C F. 1950. Seismicity of the Earth and associated phenomena[J]. Tellus, 2(1):68–68
- Yu C, Wang S Y, Yu H Z. 2022. Study of the electromechanical coupling process before the 2020 $M_s 6.4$ Yutian, China earthquake[J]. Scientific Reports, 12(1):17622.
- Yu H Z, Yu C, Ma Z, *et al.* 2020. Temporal and spatial evolution of Load/Unload Response Ratio before the $M 7.0$ Jiuzhaigou earthquake of Aug. 8, 2017 in Sichuan Province[J]. Pure and Applied Geophysics, 177(16):321–331.
- Yu H Z, Zhou F R, Zhu Q Y, *et al.* 2016. Development of a combination approach for seismic hazard evaluation[J]. Pure and Applied Geophysics, 173(1):221–233.
- Yue C, Ji P, Wang Y L, *et al.* 2022. Evolution characteristics and mechanism of the Load/Unload Response Ratio based on strain observation before the Jiuzhaigou $M_s 7.0$ earthquake[J]. Frontier in Earth Science, 10:1–10.

Application of the Load/Unload Response Ratio Method to the Calculation of Ground Strain in Tianjin

ZHANG Lei¹, YUE Chong², SONG Cheng¹, YU Huaizhong²

(1. Tianjin Earthquake Agency, Tianjin 300201, China)

(2. China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

Abstract

According to the stress – strain constitutive relationship of rock, the Load/Unload Response Ratio (*LURR*) method based on the Coulomb stress triggering model is used to calculate *LURR* values of the cave strain observed at Jixian seismic station and on Xiaoxinzhuang monitoring spot in Tianjin city. Earthquake cases are selected according to the relationship between the seismogenic range and the magnitude. Variation trend of the observational strain data is analyzed and *b* – values in Tianjin city and its vicinity are calculated. Results indicate that before the Guye $M_s 5.1$ earthquake in Hebei province, the tension strain in NS and EW component on Xiaoxinzhuang spot sped up, then slowed down after the Guye earthquake. In the meantime, *LURR* values of the strain on Xiaoxinzhuang spot and its surrounding areas increased, and then decreased. In addition, there was obviously a low *b* – value region around Xiaoxinzhuang spot from 2018 to 2019. All these precursory anomalies were consistent in time and space.

Keywords: cave strain; Load/Unload Response Ratio; *b* – value; Tianjin city