

刘月, 田勤俭, 张永仙等. 2023. 于田地区强震前加卸载响应比异常及强震复发间隔. 地球物理学报, 66(2): 616-625. doi: 10.6038/cjg2022P0733.

Liu Y, Tian Q J, Zhang Y X, et al. 2023. Load-unload response ratio anomalies before the Yutian strong earthquakes and its earthquake recurrence interval estimation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 66(2): 616-625. doi: 10.6038/cjg2022P0733.

于田地区强震前加卸载响应比异常及强震复发间隔

刘月¹, 田勤俭², 张永仙¹, 王辉¹, 尹祥础^{1,3}

¹ 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

² 中国地震灾害防御中心, 北京 100029

³ 中国科学院力学研究所, 北京 100190

摘要 21 世纪以来, 于田地区发生了 4 次 $M_s \geq 6.0$ 地震, 包括两次 $M_s 7.3$ 地震, 引起广泛关注. 我们基于加卸载响应比方法 (Load-Unload Response Ratio, LURR), 以地震目录 (来自中国地震台网中心) 为资料, 对 2008—2020 年于田地区 4 次强震进行分析. 结果显示, 4 次地震前, 均在震源区及附近检测到 LURR 异常, 且震前 LURR 异常空间分布随时间的变化过程类似. 强震发生滞后于 LURR 异常峰值: 2008 年 $M_s 7.3$ 、2014 年 $M_s 7.3$ 及 2020 年 $M_s 6.4$ 地震, 滞后于 LURR 异常峰值 1~2 a; 2012 年 $M_s 6.2$ 地震发生于 LURR 异常峰值后半年. 相邻的民丰地区, 1924 年发生了 $M_s 7.3$ 和 $M_s 7.2$ 地震, 于田—民丰地区强震较为活跃. 我们基于地震导致的地壳介质损伤的平板模型, 探索于田及周边地区的强震复发特征. 得到于田—民丰地区长期的损伤—愈合速率为 $3.86 \times 10^{-4}/a$. 基于单次 $M 7.5$ 地震造成的损伤, 估算这一区域 7.5 级左右地震的复发间隔约 50 a. 本文对于田地区强震前介质特征的变化, 及区域强震复发间隔提出新的认识.

关键词 于田地震; 加卸载响应比; 阿尔金断裂带; 平板模型; 损伤演化

doi: 10.6038/cjg2022P0733

中图分类号 P315

收稿日期 2021-10-04, 2022-03-25 收修定稿

Load-unload response ratio anomalies before the Yutian strong earthquakes and its earthquake recurrence interval estimation

LIU Yue¹, TIAN QinJian², ZHANG YongXian¹, WANG Hui¹, YIN XiangChu^{1,3}

¹ Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

² China Earthquake Disaster Prevention Center, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

³ Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract Four $M_s \geq 6.0$ earthquakes struck Yutian area in Xinjiang in the 21st century, including two strong earthquakes with magnitude of $M_s 7.3$, arising great concern. Based on the Load-Unload Response Ratio (LURR) method, we studied the LURR abnormal characteristics before the four $M_s \geq 6.0$ earthquakes in Yutian by using the earthquake catalog provided by China earthquake Network Center. The results showed that LURR anomalies with similar features of changes were detected before the four earthquakes. Peak value of LURR anomalies were observed prior to the earthquake occurrences: the 2008 $M_s 7.3$, 2014 $M_s 7.3$ and 2020 $M_s 6.4$ earthquakes occurred 1~2 years following the LURR anomaly peaks; the 2012 $M_s 6.2$ event was half a year after the LURR anomaly peak. In 1924, two earthquakes with magnitude of $M_s 7.3$ and $M_s 7.2$ occurred in

基金项目 国家重点研发计划(2018YFE0109700), 国家自然科学基金(U2039207 和 41704093), 国家重点研发计划(2022YFC3003500), 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项(2019CSES0105)资助.

第一作者简介 刘月, 女, 副研究员, 主要从事地震活动和地震破裂数值模拟研究. E-mail: liuyue@cea.ies.ac.cn

Minfeng adjacent to Yutian, indicating that seismicity in Yutian-Minfeng region was active. By introducing the plate model which could estimate the damage of crust media caused by earthquakes, we explored the recurrences of strong earthquakes in Yutian and its surrounding areas. The cumulative damage for Yutian and surroundings was deduced, with a rate of $3.86 \times 10^{-4}/a$. An earthquake with magnitude of about 7.5 had a recurrence interval of about 50 years, estimated from the damage caused by one single $M_S7.5$ event. This study provided us some scientific accumulation for the understanding of the characteristics of the medium around the seismogenic zone and the earthquake occurrence for Yutian region.

Keywords Yutian earthquakes; Load-Unload Response Ratio (LURR); Altun fault zone; Plate model; Damage evolution

0 引言

自 21 世纪以来,于田地区相继发生了 4 次强震,2008 年 3 月 21 日 $M_S7.3$ 、2012 年 8 月 12 日 $M_S6.2$ 、2014 年 2 月 12 日 $M_S7.3$ 及 2020 年 6 月 26 日 $M_S6.4$ 地震. 这些地震的震中位置虽相距较近,但发震断层不同(图 1),震源机制类型也不相同(据

全球矩张量解(Global Centroid-Moment Tensors, GCMT)). 地震位于阿尔金断裂带西南段尾端的张性构造区(徐锡伟等, 2011; 任俊杰等, 2014),即阿尔金断裂、康西瓦断裂和东昆仑断裂等大型走滑活动断裂带的交汇部位,断层发育比较复杂,存在不同性质的次级断裂(徐锡伟等, 2011; 吴传勇等, 2014; 李海兵等, 2015). 在短时间内,于田地区发生一系列强震,引起学者的广泛关注.

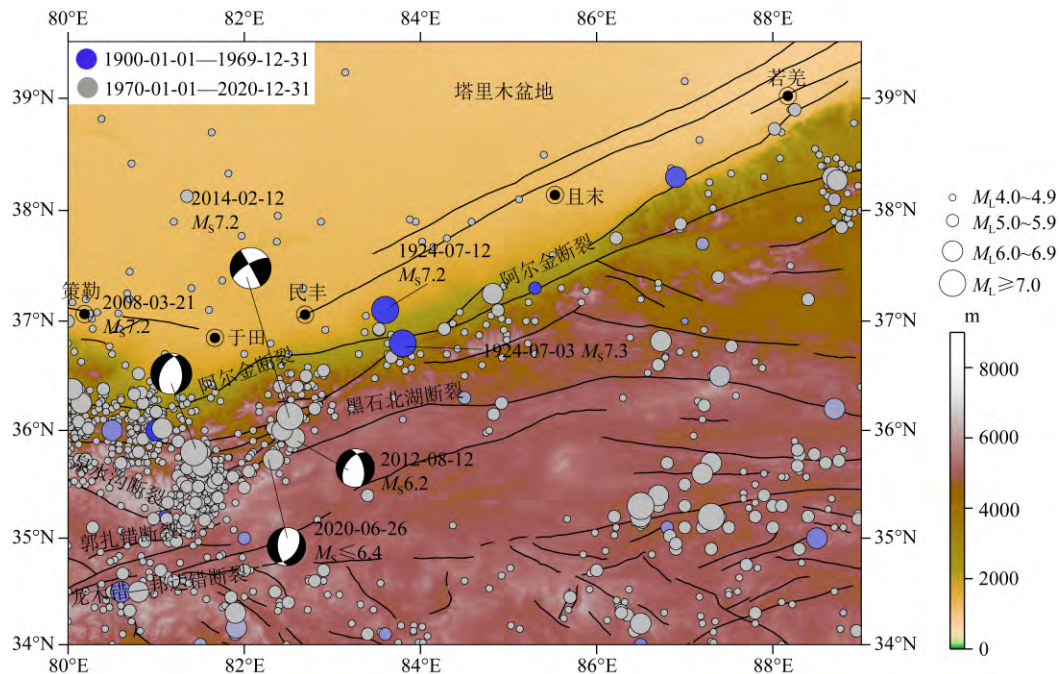


图 1 于田及周边地区地震分布(2000-01-01—2020-12-31, $M_L \geq 4$)

黑色沙滩球代表 4 次强震的震源机制解,根据 GCMT (全球矩张量解)的震源参数绘制.

Fig. 1 Epicenter map of seismicity of $M_L \geq 4.0$ in Yutian and its surrounding regions during the period of 2000-01-01—2020-12-31

Black beach balls denote the focal mechanism solutions of the four strong earthquakes and are drawn according to the focal mechanism of the GCMT (Global Centroid-Moment Tensors).

2008 年于田地震造成的震后应力场变化,可能促进了后续强震的发生(任俊杰等, 2014; 王辉等,

2016). 2014 年 $M_S7.3$ 地震发生在 2008 年于田地震引起的库仑应力增强区内(Li et al., 2015; 王辉

等, 2016). 2020 年 $M_s 6.4$ 地震位于 2008 年和 2014 年于田 $M_s 7.3$ 地震之间, 处于 2014 年强震引起的库仑应力增强区 (Li et al., 2015; 王辉等, 2016), 且该区域发生 6.0 级以上地震的概率上升 (刘博研等, 2015). 因此, 2020 年 $M_s 6.4$ 地震被触发的可能性较大 (Jia et al., 2021). 有学者 (宋春燕等, 2015; 宋治平等, 2020; 于晨等, 2020; 余怀忠等, 2020; 朱治国等, 2020) 从地震活动、地磁、形变等不同方面开展研究, 发现震前存在中短期异常. 这些研究有助于理解于田地区强震发生的力学成因和地球物理场变化. 为进一步了解该地区强震的孕育演化进程及震前异常特征, 加卸载响应比方法 (Load-Unload Response Ratio, LURR) (尹祥础, 1987; 尹祥础等, 1994) 是较好的研究手段.

加卸载响应比可以反映地壳介质的孕震进程, 进一步判断地震发生危险性. 通过对中国大陆、美国、澳大利亚、伊朗等数百震例的研究显示, 震前 0.5~3 a 检测到 LURR 异常空间分布与震源区位置相关, 异常峰值与未来地震发生时间相关 (Wang et al., 2004; 张晖辉等, 2005; Yin et al., 2006, 2013; Zhang and Zhuang, 2011; 尹祥础, 2015; Liu and Yin, 2018; Yu et al., 2020). 于晨等 (2020) 和余怀忠等 (2020) 从地震预测指标检验的角度, 于 2020 年 $M_s 6.4$ 地震前检测到 LURR 异常, 但未对 LURR 时空异常变化特征及其与前三次强震的关联进行分析. 本文将基于 LURR 方法进一步分析于田地区强震前的 LURR 异常特征.

在距于田强震不足 200 km 的民丰地区, 发生了 1924 年民丰东 $M_s 7.3$ 和 $M_s 7.2$ 地震, 发震构造均属于阿尔金断裂带西南段. 分析于田—民丰地区的强震复发间隔, 对认识这一区域的强震活动和地震危险性具有重要意义. 因此, 我们把前人 (Walsh, 1965; Jaeger and Cook, 1979) 关于裂纹对介质刚度影响的研究引入到地学中, 建立地壳块体的平板模型 (刘月和尹祥础, 2013; 刘月, 2014), 分析于田及周边地区由于地震导致的介质损伤, 进一步探索区域强震复发间隔.

1 研究方法

1.1 加卸载响应比的定义

材料的应力-应变曲线描述了材料的力学行为, 反映了介质经历弹性、塑性、损伤, 以致破坏的全过程. 当材料处于弹性阶段时, 变形具有可逆性, 随着

外力的卸载, 变形可以完全恢复, 即加载路径与卸载路径可逆, 弹性模量在加载阶段和卸载阶段相同; 随着不断加载, 介质进入塑性状态, 即使外力完全卸载, 仍会产生残余变形, 加载路径与卸载路径不可逆, 加载阶段的弹性模量小于卸载阶段, 介质内部产生了损伤. 因此, 对于岩石等脆性介质 (图 2), 通过加载与卸载过程物理性质的差别, 可以定量反映介质的损伤弱化现象.

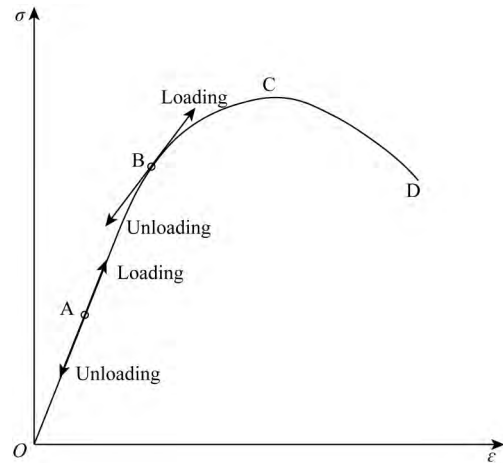


图 2 岩石的应力-应变曲线

Fig. 2 The stress-strain curve of rocks

基于介质行为的以上本质特征, 尹祥础等提出了加卸载响应比理论 (尹祥础, 1987; 尹祥础等, 1994), 通过物理量在加载过程与卸载过程的比值反映加卸载阶段的差别, 定量刻画地壳介质的损伤. 定义响应量为 X ,

$$X = \lim_{\Delta\sigma \rightarrow 0} \frac{\Delta\epsilon}{\Delta\sigma}, \quad (1)$$

其中, $\Delta\sigma$ 和 $\Delta\epsilon$ 分别表示应力和响应的增量. 加卸载响应比值 Y 表示为

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

下标“+”和“-”分别表示加载和卸载. 当介质处于弹性变形时, $X_+ = X_-$, 加卸载响应比值 $Y = 1$; 随着外力不断加载, 发生塑性变形, 产生损伤后, $X_+ > X_-$, 则 $Y > 1$, 随着损伤不断增加, X_+ 与 X_- 的差别不断增大, Y 值也会随之增加. 因此, 加卸载响应比 Y 可以定量刻画岩石等脆性介质临近破坏的程度.

1.2 对地壳介质加卸载的判断及响应量的选取

对于地壳介质, 日、月运行产生的引潮力对地球内部各点产生周期性的应力变化, 既有加载也有卸载. 因此, 将潮汐应力 (Vidale et al., 1998) 视为地壳介质的加卸载方式, 计算得到任一时刻任一点的

潮汐应力(尹灿, 1990; 吴庆鹏, 2000; Yu et al., 2020). 采用库仑破坏准则, 根据潮汐应力引起的断层面上库仑应力变化的增加和减少, 判断加载和卸载,

$$CFS = \tau_n + f\sigma_n, \quad (3)$$

其中, f, τ_n, σ_n 分别代表内摩擦系数、剪应力和正应力(拉应力为正). n 表示库仑破裂应力达到最大值的断层面的法线方向. ΔCFS 表示库仑破裂应力的变化量, 若 $\Delta CFS > 0$, 表示加载, 反之, 则表示卸载. 这里, 潮汐应力对地壳介质起到加载和卸载的作用, 而不是作为地震触发的因素.

研究地壳介质的损伤, 响应量的选取非常关键, 考虑到地震目录较容易获取、覆盖范围广, 而且地震是孕震区介质损伤的直接表征. 因此, 我们使用地震目录作为研究资料. 若地震发生时, 潮汐应力对研究区的控制断层面产生的库仑应力增量 $\Delta CFS > 0$, 则地震发生在加载时段, 若 $\Delta CFS < 0$, 地震发生在卸载时段(尹祥础, 2015; Yu et al., 2020). 以地震波能量 E 及其相关量作为响应量, 加卸载响应比值 Y 为:

$$Y = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N_+} E_i^m \right)_+}{\left(\sum_{j=1}^{N_-} E_j^m \right)_-}, \quad (4)$$

式中, 下标“+”和“-”分别表示加载和卸载. m 可以取 $0 \sim 1$ 之间的任意值. 当 $m=1$ 时, 响应量为 E , 表示地震波能量; 当 $m=1/2$ 时, 响应量为 $E^{1/2}$, 表示 Benioff 应变; 当 $m=0$ 时, 响应量为地震数目, 即加载与卸载过程中的地震个数 N_+ 和 N_- . 若令地震数目为响应参量, 无法体现震级的差异, 略显不足; 若以地震波能量作为响应量, 受其函数表达形式的影响, 会使 Y 值的变化梯度较大; 若以 Benioff 应变作为响应量, 是对地震波能量进行开平方, 不会改变 $Y > 1$ 或 $Y < 1$ 的实质, 且各点的 Y 值变化较为平稳. 因此, 长期的研究中, 多采用 $m=0.5$.

理论上, 当介质处于弹性状态时, $Y \leq 1$; 随着不断加载, 受力增强, 介质进入塑性变形阶段, 产生损伤, $Y > 1$. 在震例研究中, 地震发生前数年, 加卸载响应比值 Y 在 1 附近波动, 随着发震时间的临近, Y 值不断升高, 到达峰值后下降. 地震往往不在加卸载响应比异常峰值时发生, 而是滞后一段时间(数月或数年不等). 这也在数值研究中得到证实, 加卸载响应比值达到峰值的时间, 先于介质达到承载强度, 但非常接近(刘月, 2014).

1.3 加卸载响应比孕震积分 I_t

为了衡量某一空间域内加卸载响应比异常 ($Y > 1$) 水平, 我们采用孕震积分 I_t (刘月等, 2012) 表征 t 时刻 LURR 的空间异常程度:

$$I_t = \iint_{Y>1} Y dx dy = \bar{Y} \times A, \quad (5)$$

其中, A 是 LURR 异常区的面积, \bar{Y} 是异常区 A 内 LURR 的平均值. I_t 综合反映了孕震区介质损伤演化的时间进程. I_t 曲线的峰值点, 可能代表了介质宏观力学行为由稳定向不稳定的转变(刘月, 2014).

1.4 地壳介质损伤的平板模型

我们将前人(Walsh, 1965; Jaeger and Cook, 1979)关于裂纹对介质刚度影响的研究引入到地学中. 地球表面尺度为 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ 数量级的区域(隔离体), 相对曲率半径约 6430 km 而言, 可略去其曲率, 简化为一块平板(Timoshenko and Woinowsky-Krieger, 1959). 每发生一次地震, 在地壳中形成一条裂纹, 对地壳介质产生损伤, 裂纹尺度与震级关系服从如下的经验公式(Leonard, 2012):

$$\lg L = 0.5M_s - 1.8, \quad (6)$$

L 代表破裂的断层长度(km), M_s 为面波震级.

对于单位体积包含有大量方向随机、长度为 $2c_i$ 的可滑动闭合裂缝的平板, 考虑裂纹闭合时摩擦力的影响, 其有效杨氏模量 E 与固有杨氏模量 E_0 之间的关系为(Walsh, 1965; Jaeger and Cook, 1979):

$$\frac{E}{E_0} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^N \frac{2\pi c_i^2}{15S} \left[\frac{2 + 3\mu^2 + 2\mu^4}{(\mu^2 + 1)^{3/2}} - 2\mu \right]}, \quad (7)$$

N 为裂纹数目, S 代表平板的面积, μ 为摩擦系数(文中取 0.6).

我们基于以上裂纹对平板弹性的影响, 考虑受压状态下, 多条方向任意、可滑动的裂纹(由于地下很多断层位置尚不清楚, 暂不考虑断层之间的相互作用)对介质性质的影响, 即地震对地壳介质弹性状态的改变(刘月和尹祥础, 2013; 刘月, 2014). 地震属于典型的剪切破裂, 研究介质剪切模量的变化显得尤为重要. 根据杨氏模量与剪切模量之间的关系 $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, 令 $\nu_0 = 0.25$, 结合公式(7), 得到有效剪切模量 G 和固有剪切模量 G_0 之间的关系为:

$$\frac{G_0}{G} = 1 + 0.114 \sum_{i=1}^N \frac{L_i^2}{S}, \quad (8)$$

由公式(6)可知一个 5 级地震对应的断层长度 $L = 5 \text{ km}$, 相对于线尺度是百公里量级, 则 $\frac{L^2}{S} \ll 1$, 为一小量, 记作 δ . 根据损伤力学(Krajcinovic, 1996), 结

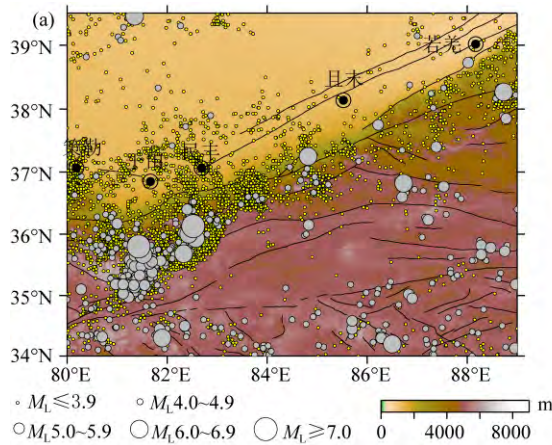
合公式(8),通过剪切模量的变化得到 $N(\geq 1)$ 个地震对平板区域(隔离的研究区)造成的损伤 D 为:

$$D = 1 - \frac{G}{G_0} = 0.114 \sum_{i=1}^N \delta_i. \quad (9)$$

2 资料分析和震前 LURR 时空异常

2.1 资料分析和计算参数设置

加卸载响应比计算以地震目录(来自中国地震



台网中心)为研究资料,研究区域 80°E — 89°E , 34°N — 39.50°N , 2000 年至 2020 年期间的地震分布如图 3a 所示,主要集中在阿尔金断裂带和巴颜喀拉地块. $M_L \geq 7.0$ 地震有 2 个, $M_L 6.0 \sim 6.9$ 地震有 10 个, $M_L \geq 4.0$ 地震有 512 个, $M_L < 4.0$ 地震有 6925 个.

判断地震发生于加载时段还是卸载时段,首先需要设置空间区域的滑动方向.我们对研究区以 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 划分网格(如图 4),共分为 15 个区域,每个区域的断层滑动参数如表 1 所示(尹祥础, 2015).

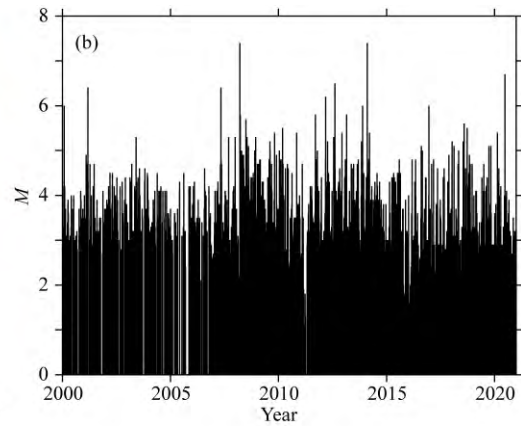


图 3 2000 年以来研究区所有事件的震中分布(a)和 M - T 图(b)

Fig. 3 Epicenter map of all records in the study region since 2000 (a) and M - T (b)

我们以 Benioff 应变作为加载和卸载响应量,计算空间范围内 LURR 值随时间的演化.需要确定参与计算的震级范围、空间扫描半径、资料的时间范围等.选取小震级事件,考虑到每次地震都是地下介质损伤的直接体现,所有记录到的 $M_L \leq 4.0$ 事件均参与计算.对研究区以 $0.25^{\circ}\text{E} \times 0.25^{\circ}\text{N}$ 的尺度进行滑动.令扫描半径 $R = 100$ km,计算资料的时间窗长为 15 个月,滑动步长 1 个月.即以 (x_0, y_0) 点为圆心,使用半径 100 km 范围内,时间窗长为 15 个月的地震目录进行计算,将计算结果赋值到 (x_0, y_0) 点,该点的 LURR 值反映了周边 100 km 范围内的介质信息.以计算资料的结束时间标记结果,例如参与计算的地震目录时段为 2008-01-01—2009-03-31,计算结果的时间记为 2009-03-31.

2.2 2008—2014 年强震前 LURR 异常

于田 4 次地震前,我们均在震源区附近检测到 LURR 异常,且异常区随时间的变化特征类似.限于篇幅,这里不一一列举,对于前三次地震,仅展示具有代表性的 LURR 空间异常分布结果(图 5).以距今最近的 2020 年于田 $M_S 6.4$ 地震为例,给出震前 LURR 空间异常随时间的变化过程(图 6—8).

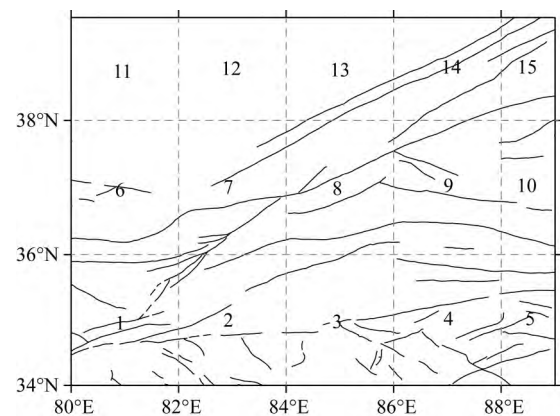


图 4 研究区的网格划分

Fig. 4 Grid division of the study region

表 1 图 4 区域中用来计算地震加载与卸载的断层滑动参数设置

Table 1 Fault parameters for calculating earthquakes occurred in load/unload stage in the study region shown in Fig. 4

| 区域编号 | 走向 ($^{\circ}$) | 倾角 ($^{\circ}$) | 滑动角 ($^{\circ}$) | 深度 (km) |
|-------|-------------------|-------------------|--------------------|---------|
| 1—5 | 248 | 66 | -49 | 11 |
| 6—10 | 291 | 53 | 126 | 33 |
| 11—15 | 275 | 43 | 120 | 21 |

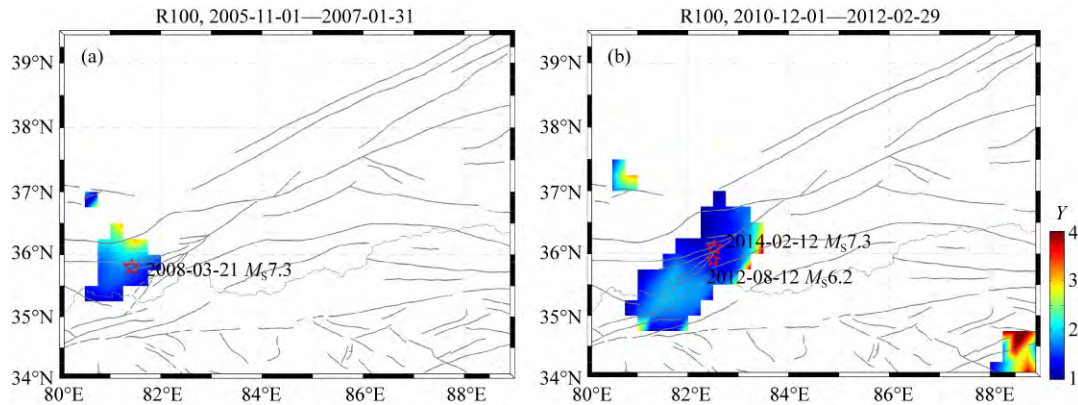


图 5 (a) 2008 年于田 $M_s7.3$ 地震前 LURR 异常空间分布; (b) 2012 年 $M_s6.2$ 和 2014 年 $M_s7.3$ 地震前 LURR 异常空间分布
Fig. 5 (a) LURR anomalies before the 2008 Yutian $M_s7.3$ earthquake; (b) LURR anomalies before the 2012 $M_s6.2$ and 2014 $M_s7.3$ earthquakes

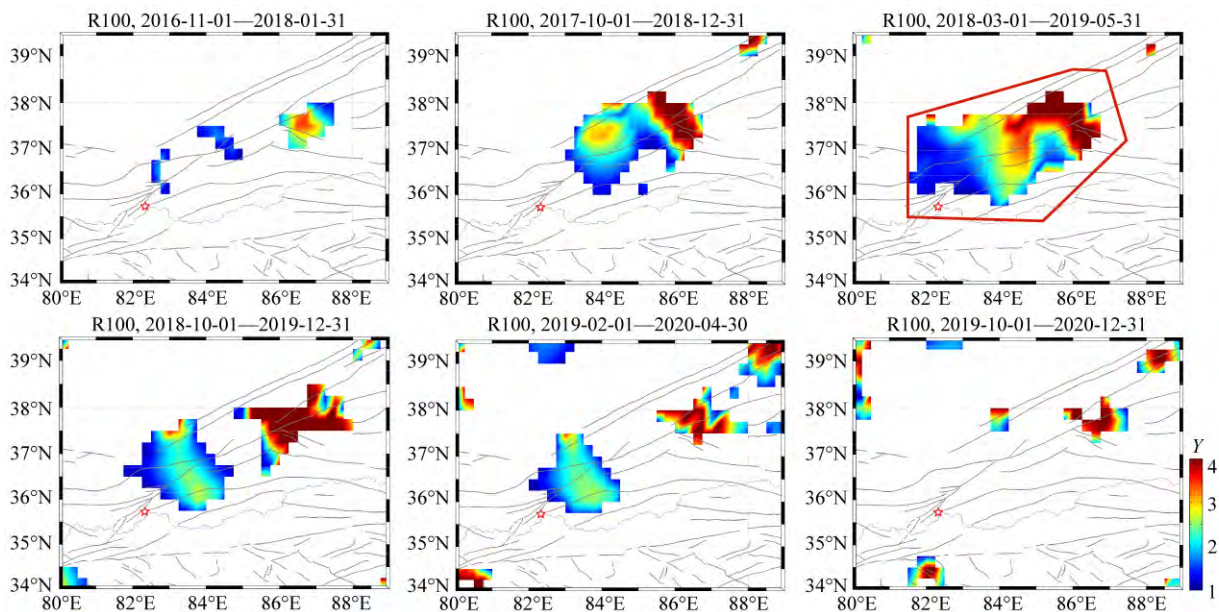


图 6 2020 年 $M_s6.4$ 地震前 LURR 空间异常分布随时间的变化

红色不规则区域表示与地震相关的 LURR 异常区范围。

Fig. 6 Space-time variations of LURR anomalies before the 2020 Yutian $M_s6.4$ earthquake

The LURR anomaly region associated with the earthquake is circled by the red polygon.

2008 年于田 $M_s7.3$ 地震前, LURR 异常区覆盖震中, 如 2007 年 1 月结果所示(图 5a), 主要分布于阿什库勒盆地和周围断层。2012 年 $M_s6.2$ 和 2014 年 $M_s7.3$ 地震前, 如 2012 年 2 月结果所示(图 5b), LURR 异常位于震中周边及震中西南侧, 分布在 $81^\circ\text{E}-83.5^\circ\text{E}, 35^\circ\text{N}-36.75^\circ\text{N}$ 内, 呈北东向, 覆盖了震源区及贡嘎错断裂和硝尔库勒盆地。

2.3 2020 年于田 $M_s6.4$ 地震前 LURR 异常

计算参数与 2.2 节保持一致, 给出了 2018 年 1 月至 2020 年 12 月 LURR 值 $Y>1$ 的空间分布。结果显示, 在震源区及附近检测到 LURR 异常: 2018 年初, 在震中北东方向, 沿阿尔金断裂带开始出现小

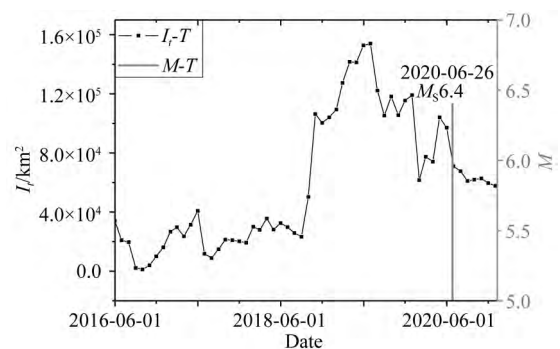


图 7 LURR 孕震积分 I_t 随时间的变化 (2017-01-01—2020-12-31)

Fig. 7 Variations of I_t (integral of LURR) from 1 January 2017 to 31 December 2020

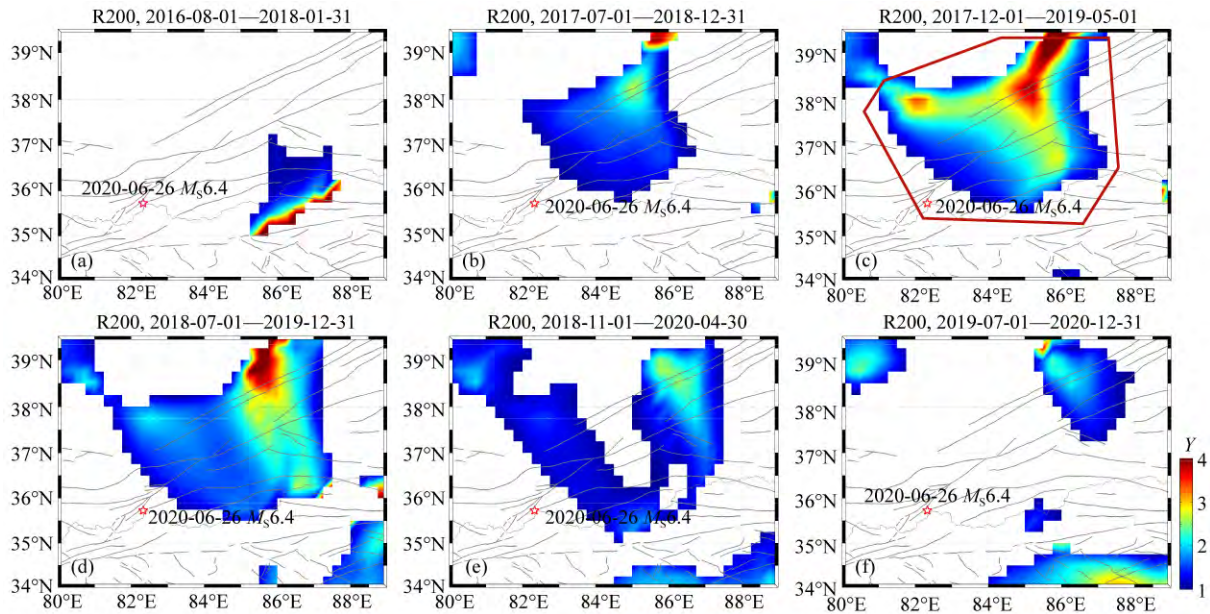


图 8 2020 年 $M_s 6.4$ 地震前 LURR 空间异常分布随时间的变化. 扫描半径 $R=200$ km

Fig. 8 Space-time variations of LURR anomalies before the 2020 Yutian $M_s 6.4$ earthquake, with scanning radius $R=200$ km

范围的 LURR 异常 (图 6a), 随着时间推移, 这个区域逐渐扩大 (图 6b), 集中在 $82^{\circ}\text{E}-84.75^{\circ}\text{E}, 35.75^{\circ}\text{N}-38^{\circ}\text{N}$ 内 (图 6c, 红色不规则曲线所示区域). 随着发震时间的接近, $Y>1$ 的空间范围不断缩小 (图 6d), 异常程度减弱. 临震前数月, 异常主要集中在震中北东向 150 km 范围内 (图 6e), 地震后震中周边异常基本消失 (图 6f). 孕震积分 I_t 曲线直观地体现了加卸载响应比异常程度由弱至强, 再减弱的过程 (图 7), I_t 曲线于 2019 年 6 月达到峰值点, 即 LURR 异常程度此时达到最大, 1 a 后发生了于田 6.4 级地震.

2020 年于田 $M 6.4$ 地震与 2008 年和 2014 年 $M 7.3$ 地震前的 LURR 异常变化过程类似: 异常区在震中周边出现后, 随着时间的推移, 空间范围不断增大, 异常程度增加, 达到顶峰后, 空间范围不断缩小. 不同的是, 2014 年之前的 LURR 值 $Y>1$ 的区域, 分布在震中西南侧及震中周边, 之后沿阿尔金断裂带不断向东发展, 2018 年之后, 主要位于于田—民丰—且末一带.

为考察扫描半径对分析结果的影响, 令 $R=200$ km, 计算资料的时间窗长为 18 个月. 列出了 2018 年 1 月至 2021 年 12 月期间具有代表性的结果. 便于对照, 每幅图的计算资料截止日期与 $R=100$ km 的相同. 结果如图 8 所示, 2018 年初开始, 异常范围由小变大, 异常程度于 2019 年年中达到最强, 之后

减弱, 在异常峰值后 1 a 发生地震. 这一变化特征与 $R=100$ km 的结果一致. 可见, 不同扫描半径得到的 LURR 异常均能反映地震前, 震源区介质的损伤信息. 在实际应用中, 我们通常结合不同半径的结果共同分析.

3 区域强震复发间隔估计

地震是地壳介质释放累积应变能的重要形式, 也会对介质产生损伤, 对于一个给定的区域, 震级越大, 破裂尺度越大, 造成的损伤就越大. 通过长期的地震记录, 基于 1.4 节的平板破裂损伤模型, 我们可以得到一个区域的损伤增长变化趋势.

据历史记载, 在距于田强震约 200 km 的民丰地区曾发生两次 7.0 级以上强震, 1924 年 7 月 3 日 $M 7.3$ 和 1924 年 7 月 12 日 $M 7.2$. 于田—民丰地区位于阿尔金断裂带西南段, 自 1900 年以来发生了 2 组共 4 次 7.0 级以上强震. 该地区的强震复发间隔到底多长? 对认识这一地区的强震活动特征有重要影响.

将于田—民丰地区简化为平板模型 (图 9a, 区域 ABCD), 自 1900 年该地区 4 级以上地震的 $M-T$ 分布如图 9b 所示. 根据公式 (9) 得到 1900 年以来, 这一地区 (面积 $S \approx 5.26 \times 10^4 \text{ km}^2$) 的累积损伤变化 (图 9c), 为了简便分析, 考虑损伤的线性变化趋势,

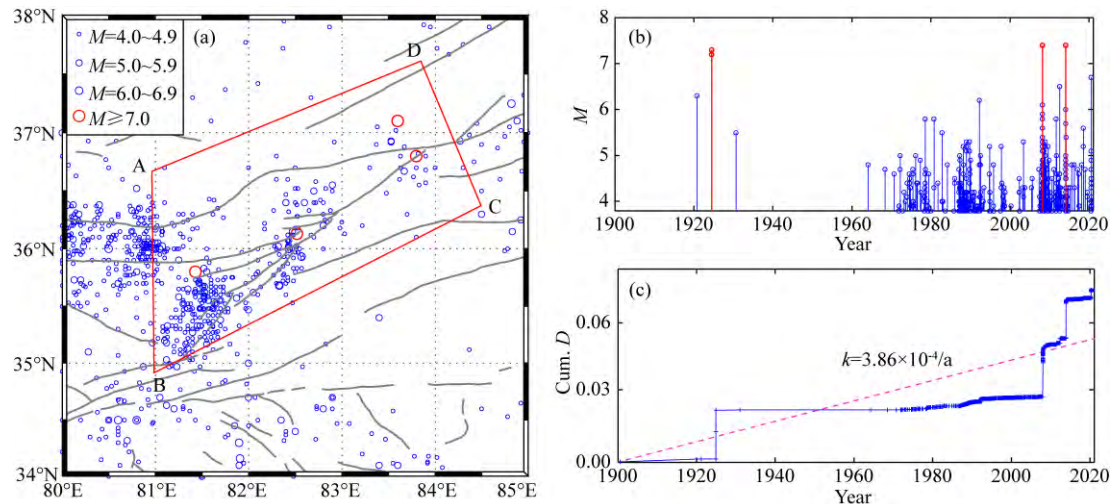


图9 (a) 1900年以来于田及周边地区的4级以上地震分布;(b) $M-T$ 图;(c)累积的损伤 D 随时间的变化

Fig. 9 Epicenter map of seismicity of $M \geq 4.0$ in Yutian and its surrounding regions since 1900;

(b) $M-T$; (c) Variations of cumulative damage D

得到如下关系:

$$D(t) - D_0 = 3.86 \times 10^{-4} t, \quad (10)$$

D_0 表示 1900 年之前的损伤值, t 表示时间, 该区域的平均损伤率为 $k = 3.86 \times 10^{-4}/a$.

我们知道, 材料的损伤变化范围是 $0 \leq D \leq 1$. 按照以上关系, 损伤随时间单调增加, 只要时间足够长, 甚至会大于 1, 这与实际不符. 地球经历了漫长的历史, 仍然稳定运行. 某一地区即使发生强震, 过后仍会愈合. 从漫长的历史来看, 长时期的损伤和愈合会达到平衡, 所以根据现有记录推测于田及周边地区长时期的平均损伤和愈合速率均为 $3.86 \times 10^{-4}/a$. 受地震记录条件的影响, 这是该地区发生损伤的近似估计.

根据震级-破裂尺度的经验关系(公式(6)), 单次 7.0 级、7.3 级、7.5 级地震造成的破裂长度 L 分别约为 50 km、70 km 及 90 km, 对区域地壳介质(平板模型)产生的损伤分别为 0.005、0.01、0.018. 我们知道在一次 7.5 级左右强震的复发间隔内, 会发生一系列震级小于 7.5 的事件, 若忽略它们的影响, 按照 $3.86 \times 10^{-4}/a$ 的损伤速率估算, 需要的时间分别约为 13 a、26 a 和 47 a. 研究区在 1960 年以前, 没有记录到 5 级以下地震, 地震记录显然是不完整的. 强震前一系列小震级事件的影响或许是不可忽略的, 这在另文中将进一步分析.

4 总结与讨论

我们基于加卸载响应比方法, 研究 2008—2020

年于田 4 次强震前的加卸载响应比异常 ($Y > 1$) 分布, 了解地震前震源区介质的损伤演化进程. 结果显示, 4 次强震前, 均在震源区附近检测到 LURR 异常, 且于震前 0.5~2 a 异常程度达到最大, 这与先前震例研究得到的结论一致. 2008 年 $M_S 7.3$ 地震前约 1 a, LURR 异常空间范围达到最大, 位于阿什库勒盆地并覆盖震中; 2012 年 2 月, LURR 异常再次达到峰值, 异常区沿断裂带覆盖了 2012 年 $M_S 6.2$ 和 2014 年 $M_S 7.3$ 地震的震中以及西南侧地区; 2020 年 $M_S 6.4$ 地震前约 1 a, LURR 空间异常最集中, 主要位于阿尔金断裂带西南段和黑石北湖断裂, 涵盖了于田—民丰—且末等地. 2020 年于田 $M_S 6.4$ 地震震中看似位于 LURR 异常区的边缘, 实际上代表了震中及周边地区的异常. 这是由于赋值点 (x_0, y_0) 涵盖了周边 100 km (计算半径 R) 范围内的信息.

2007 年至 2020 年, LURR 高值区 ($Y > 1$) 呈现由西向东的迁移, 由阿什库勒盆地、硝尔库勒盆地, 沿断裂带向于田—民丰—且末发展. 这体现了高损伤区向东迁移和应力持续积累的过程. 学者(宋春燕等, 2015; Li et al., 2015; 王辉等, 2016)研究认为: 2008 年于田地震造成局部构造解锁, 周边断层应力重新分配, 使高应力区沿断裂向东北方向扩展; 2014 年于田地震导致硝尔库勒盆地边缘构造解锁, 促进了阿尔金断裂的左旋错动, 造成了东侧区域的应力加载, 进而对后续地震发生起到促进作用. 我们的研究结果解释了于田地区强震的孕育演化进程, 且与以上研究结论相印证.

1900 年以来于田及周边地区发生了 4 次 7.0

级以上强震,1924年民丰东 $M_S7.2$ 、 $M_S7.3$,2008年和2014年两次 $M_S7.3$ 地震.我们从裂纹对介质刚度影响的角度,基于受压条件下介质损伤的平板模型,使用1900年以来的地震记录,分析于田和周边地区(包括民丰地区)的累积损伤,得到该地区近120年的损伤增长速率,进一步基于单次 $M7.5$ 地震造成的损伤,估算该区域7.5级左右强震的复发间隔,约47 a.任俊杰等(2014)根据特征地震的复发模式,估算于田7.3级地震的复发周期为300~400 a.二者差别较大,主要由于研究思路和研究对象的不同.本文研究的是区域强震复发间隔,不同于特征地震复发.文中结果受地震记录完整性及使用资料时长的影响:1960年以前,没有记录到5级以下地震,欠缺的事件较多;1900年至2020年,这121年的地震记录不足以代表该地区的地震发生规律,但是目前无法得到更长时间的地震资料.而且本文得到的7.5级左右地震复发间隔,仅考虑单次强震事件,未考虑强震复发间隔内的其他事件,这些事件的影响可能是不可忽略的.在未来研究中,还需要考虑震级与地震数目的关系,以及地震发生的随机性等.本研究将有助于提高我们对2021年于田 $M_S6.4$ 地震孕育特征的认识.

致谢 北京大学蔡永恩教授、中国地震局地震预测研究所吕晓健研究员和李文巧副研究员对本研究提出了重要建议,文中使用的地震目录来自中国地震台网中心,部分计算是在中国科学院超级计算中心和地震局地震预测研究所信息中心的集群系统完成,审稿专家对本文提出了宝贵的修改意见和建议,作者在此一并表示感谢.

References

- Jaeger J C, Cook N G W. 1979. *Fundamentals of Rock Mechanics*. 3rd ed. London: Chapman and Hall, 329-337.
- Jia K, Zhou S Y, Zhuang J C, et al. 2021. Stress transfer along the western boundary of the bayan har block on the Tibet Plateau from the 2008 to 2020 Yutian Earthquake sequence in China. *Geophysical Research Letters*, 48(15): e2021GL094125.
- Krajcinovic D. 1996. *Damage Mechanics*. New York: Elsevier, 1-33.
- Leonard M. 2012. Earthquake fault scaling: self-consistent relating of rupture length, width, average displacement, and moment release. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(6): 2797.
- Li H B, Pan J W, Sun Z M, et al. 2015. Seismogenic structure and surface rupture characteristics of the 2014 $M_S7.3$ Yutian earthquake. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 89(1): 180-194.
- Li Y J, Chen L W, Liu S F, et al. 2015. Coseismic coulomb stress changes caused by the $M_W6.9$ Yutian earthquake in 2014 and its correlation to the 2008 $M_W7.2$ Yutian earthquake. *Journal of Asian Earth Sciences*, 105: 468-475.
- Liu B Y, Shi B P, Lei J S. 2015. Effects of the 2008 and 2014 Yutian earthquake on seismic probabilities of adjacent faults. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 58(2): 463-473, doi: 10.6038/cjg20150210.
- Liu Y, Yin X C, Yuan S, et al. 2012. Exploration study of dimension analysis applying to earthquake prediction. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 55(9): 3043-3050, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.022.
- Liu Y, Yin X C. 2013. A plate model for the damage of a crustal block induced by earthquake and the new definition for the load/unload response ratio. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 20(6): 67-72.
- Liu Y. 2014. Study of several issues concerning Load-Unload Response Ratio in earthquake prediction [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences.
- Liu Y, Yin X C. 2018. A dimensional analysis method for improved Load-Unload Response Ratio. *Pure and Applied Geophysics*, 175(2): 633-645.
- Ren J J, Wang X G, Cheng J. 2014. Preliminary analysis of seismogenic fault and geodynamic background of 2014 Yutian $M_S7.3$ earthquake. *Technology for Earthquake Disaster Prevention* (in Chinese), 9(1): 74-82.
- Song C Y, Ma J, Ran H M, et al. 2015. Discussion on seismogenic structures and seismic activity process before the Yutian $M_S7.3$ earthquake on February 12, 2014, Xinjiang. *Seismology and Geology* (in Chinese), 37(3): 780-791.
- Song Z P, Xue Y, Ma Y W, et al. 2020. Review of anomalies and prediction procedure of 2020 Yutian $M_S6.4$ earthquake in Xinjiang, China. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 36(3): 407-416.
- Timoshenko S, Woinowsky-Krieger S. 1959. *Theory of Plates and Shells*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1-3.
- Vidale J E, Agnew D C, Johnston M J S, et al. 1998. Absence of earthquake correlation with Earth tides: an indication of high preseismic fault stress rate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B10): 24567-24572.
- Walsh J B. 1965. The effect of cracks on the uniaxial elastic compression of rocks. *Journal of Geophysical Research*, 70(2): 399-411.
- Wang H, Cao J L, Hong S Y, et al. 2016. Viscoelastic stress transfer between 2008 and 2014 Yutian $M7$ earthquakes, Xinjiang. *Seismology and Geology* (in Chinese), 38(3): 646-659.
- Wang Y C, Yin C, Mora P, et al. 2004. Spatio-temporal scanning and statistical test of the Accelerating Moment Release (AMR) model using Australian earthquake data. *Pure and Applied Geophysics*, 161(11-12): 2281-2293.
- Wu C Y, Zhang Z Q, Zhao C P, et al. 2014. 2014 Yutian $M_S7.3$ earthquake: structural response of the Bayankala tectonic-block

- to eastward extrusion. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 57(10): 3226-3237, doi: 10.6038/cjg20141011.
- Wu Q P. 2000. Numerical calculation of the tidal stress field inside the homogeneous spherical elastical earth model. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 36(3): 398-404.
- Xu X W, Tan X B, Wu G D, et al. 2011. Surface rupture features of the 2008 Yutian $M_s 7.3$ earthquake and its tectonic nature. *Seismology and Geology* (in Chinese), 33(2): 462-471.
- Yin C. 1990. Study on tidal stress and earthquake prediction [Master's thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration.
- Yin X C. 1987. The new approach of earthquake prediction. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 3(1): 1-7.
- Yin X C, Chen X Z, Song Z P, et al. 1994. The load-unload response ratio theory: a new approach to earthquake prediction. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 37(6): 767-775.
- Yin X C, Zhang L P, Zhang H H, et al. 2006. LURR's twenty years and its perspective. *Pure and Applied Geophysics*, 163(11-12): 2317-2341.
- Yin X C, Liu Y, Mora P, et al. 2013. New progress in LURR-Integrating with the dimensional method. *Pure and Applied Geophysics*, 170(1-2): 229-236.
- Yin X C. 2015. Load-Unload Response Ratio Theory and Its Application (in Chinese). Beijing: Science Press.
- Yu C, Wang S Y, Yuan Z Y, et al. 2020. LURR to Benioff strain and geoelectric field before Yutian $M_s 6.4$ earthquake of June 26, 2020. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 36(3): 417-426.
- Yu H Z, Yu C, Ma Z, et al. 2020. Temporal and spatial evolution of Load/Unload Response Ratio before the $M7.0$ Jiuzhaigou earthquake of Aug. 8, 2017 in Sichuan province. *Pure and Applied Geophysics*, 177(1): 321-331.
- Yu H Z, Yu C, Zhang X T. 2020. Study on multiple seismic parameter anomalies before Yutian $M_s 6.4$ earthquake on June 26th, 2020. *Inland Earthquake* (in Chinese), 34(3): 207-214.
- Zhang H H, Yin X C, Liang N G. 2005. Statistic study of LURR anomaly temporal scale before moderately strong earthquakes on the Chinese mainland. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 21(4): 486-495.
- Zhang L P, Zhuang J C. 2011. An improved version of the Load/Unload Response Ratio method for forecasting strong aftershocks. *Tectonophysics*, 509(3-4): 191-197.
- Zhu Z G, Liu L, Ding Y, et al. 2020. Characteristics on crustal deformation before Yutian $M_s 6.4$ earthquake on June 22th, 2020. *Inland Earthquake* (in Chinese), 34(3): 267-273.
- 李海兵, 潘家伟, 孙知明等. 2015. 2014 年于田 $M_s 7.3$ 地震地表破裂特征及其发震构造. *地质学报*, 89(1): 180-194.
- 刘博研, 史保平, 雷建设. 2015. 2008 年和 2014 年于田地震对周边断层发震概率的影响. *地球物理学报*, 58(2): 463-473, doi: 10.6038/cjg20150210.
- 刘月, 尹祥础, 袁帅等. 2012. 量纲分析应用于地震预测的探索. *地球物理学报*, 55(9): 3043-3050, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.022.
- 刘月, 尹祥础. 2013. 地震导致地壳块体损伤的平板模型和加卸载响应比新定义. *地学前缘*, 20(6): 67-72.
- 刘月. 2014. 加卸载响应比在地震预测中的若干问题研究[博士论文]. 北京: 中国科学院力学研究所.
- 任俊杰, 王信国, 程佳. 2014. 2014 年于田 7.3 级地震的发震构造及动力学背景的初步分析. *防灾减灾技术*, 9(1): 74-82.
- 宋春燕, 马瑾, 冉慧敏等. 2015. 2014 年新疆于田 7.3 级地震发震构造和震前地震活动过程讨论. *地震地质*, 37(3): 780-791.
- 宋治平, 薛艳, 马亚伟等. 2020. 2020 年 6 月 26 日新疆于田 6.4 级地震前中期和短期预测依据与启示. *中国地震*, 36(3): 407-416.
- 王辉, 曹建玲, 洪顺英等. 2016. 2008 年和 2014 年 2 次新疆于田 $M7$ 地震之间的黏弹性应力转移. *地震地质*, 38(3): 646-659.
- 吴传勇, 张竹琪, 赵翠萍等. 2014. 2014 年新疆于田 $M_s 7.3$ 级地震: 巴颜喀喇地块侧向挤出的构造响应. *地球物理学报*, 57(10): 3226-3237, doi: 10.6038/cjg20141011.
- 吴庆鹏. 2000. 均匀弹性地球模型内部固体潮应力场的数值计算. *北京大学学报(自然科学版)*, 36(3): 398-404.
- 徐锡伟, 谭锡斌, 吴国栋等. 2011. 2008 年于田 $M_s 7.3$ 地震地表破裂带特征及其构造属性讨论. *地震地质*, 33(2): 462-471.
- 尹灿. 1990. 潮汐应力与地震预报[硕士论文]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- 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, 陈学忠, 宋治平等. 1994. 加卸载响应比——一种新的地震预报方法. *地球物理学报*, 37(6): 767-775.
- 尹祥础. 2015. 加卸载响应比理论及其应用. 北京: 科学出版社.
- 于晨, 王淑艳, 苑争一等. 2020. 2020 年 6 月 26 日于田 $M_s 6.4$ 地震前 Benioff 应变和地电场加卸载响应比异常研究. *中国地震*, 36(3): 417-426.
- 余怀忠, 于晨, 张小涛. 2020. 2020 年 6 月 26 日于田 $M_s 6.4$ 地震前的多重地震参数异常研究. *内陆地震*, 34(3): 207-214.
- 张晖辉, 尹祥础, 梁乃刚. 2005. 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. *中国地震*, 21(4): 486-495.
- 朱治国, 刘雷, 丁宇等. 2020. 2020 年 6 月 26 日于田 $M_s 6.4$ 地震前地壳形变特征研究. *内陆地震*, 34(3): 267-273.

(本文编辑 何燕)