

杨文,余怀忠,张小涛. 2025. 新疆地区6级以上地震前 Benioff 应变比特征研究[J]. 地震研究, 48(2): 264–271, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0028.

Yang W, Yu H Z, Zhang X T. 2025. Research on the features of the Benioff strain ratio in Xinjiang region before earthquakes above $M_s 6.0$ [J]. *Journal of Seismological Research*, 48(2): 264–271, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0028.

新疆地区6级以上地震前 Benioff 应变比特征研究^{*}

杨文, 余怀忠^{*}, 张小涛

(中国地震台网中心, 北京 100045)

摘要: 强震发生前, 震中附近地区普遍存在应变能加速释放现象, 预示孕震区接近或进入临界状态。以 Benioff 应变作为响应量, 计算不同时间段的 Benioff 应变比, 可作为表征应变能释放快慢的参数, 其异常演化反映了地震成核过程中介质的高应力状态。利用中国地震台网地震目录, 首先对新疆地区最小完备性震级进行分析。在此基础上, 计算 2000—2023 年新疆地区 6 级以上地震前 1 年内每月前后 90 天的 Benioff 应变比, 并以 2016 年阿克陶 6.7 级地震和呼图壁 6.2 级地震为例, 对两次地震前的 Benioff 应变比时空演化特征进行分析。结果显示: 18 组 6 级地震中有 14 组地震在震前 1 年内在震中附近出现高值异常, 通过预测效果检验, 表明 Benioff 应变比高值异常对新疆地区 6 级地震具有一定中短期预测意义。在 2016 年阿克陶 6.7 级地震和呼图壁 6.2 级地震前 1 年内孕震区应变比均表现为“逐渐升高—快速降低—稳定波动”的特征, 可能与断层失稳成核过程有关。

关键词: Benioff 应变比; 新疆地区; 最小完备性震级; 地震预测

中图分类号: P315.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2025)02-0264-08

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0028

0 引言

地震孕育是一个极为复杂的过程。强震发生前, 震中附近地区普遍存在的应变能加速释放现象, 预示孕震区接近或进入临界状态(彭克银等, 2003)。基于加卸载响应比(LURR)理论的研究表明, 地震的孕育过程可能与岩石圈非均匀脆性介质的特定加载阶段有关(Yu *et al.*, 2022)。理论上, 较大的地震发生前, 由于地壳介质处于较高应力状态, 小的变形或应力扰动就可能导致微破裂的产生, 能够观测到 LURR 的高值异常变化(Yin *et al.*, 2008; Yu *et al.*, 2020)。以往震例研究显示, 震前 0.5~3 年 LURR 异常空间分布与震源

区位置相关, 异常峰值与未来地震的发生时间相关(尹祥础, 2015; Yu *et al.*, 2020)。与 LURR 计算中以小震释放的能量作为响应量相似, 应变比参数能够表征应变能释放的快慢, 其异常演化反映了地震成核过程中介质的高应力状态, 具有一定的实用性和可操作性, 目前已尝试应用于中国地震台网中心年度会商中。

为了更好地将应变比参数应用于地震预测研究, 本文首先对 2000—2023 年新疆地区地震目录的最小完备性进行分析, 并对其进行除丛处理。在此基础上, 计算新疆地区 6 级以上地震前孕震区的应变比随时间的变化以及空间分布情况, 总结强震前时空分布特征, 为该地区强震危险性判定提供参考。

^{*} 收稿日期: 2024-06-18.

基金项目: 中国地震科技星火计划(XH23046YA); 国家自然科学基金联合基金(U2039205); 国家重点研发计划(2018YFE0109700).

第一作者简介: 杨文(1986-), 高级工程师, 主要从事地震活动性和数字地震学工作.

E-mail: longjing456@126.com.

通信作者简介: 余怀忠(1975-), 研究员, 主要从事地震孕育机理和预测理论研究. E-mail: yuhz750216@sina.com.

1 新疆及其邻区构造背景

新疆地区位于欧亚板块中南部,其南面是印度板块与欧亚板块碰撞所形成的世界屋脊——青藏高原,北部是西伯利亚块体及其向南挤压所形成的蒙古弧形构造带。由于印度板块向北推挤、欧亚板块向南挤压,致使新疆地区形成了盆山结合的地貌景观。依据板块构造带的分布,新疆地区自北向南可划分为4大板块。新疆地区构造复杂,新构造活动强烈,是强烈活动的大陆地震区。1900年以来新疆地区共发生7级以上地震18次,最大为1902年8月22日新疆阿图什8.3级地震;2000年以来共发生6级以上地震19次,其中7级以上地震4次,最大为2001年11月14日昆仑山口西8.1级地震(图1)。2024年1月23日新疆乌什发生7.1级地震,该地震打破了新疆地区近10年的7级地震平静,表明新疆地区进入新的强震活跃时段,该地区的地震危险性尤其引人关注。

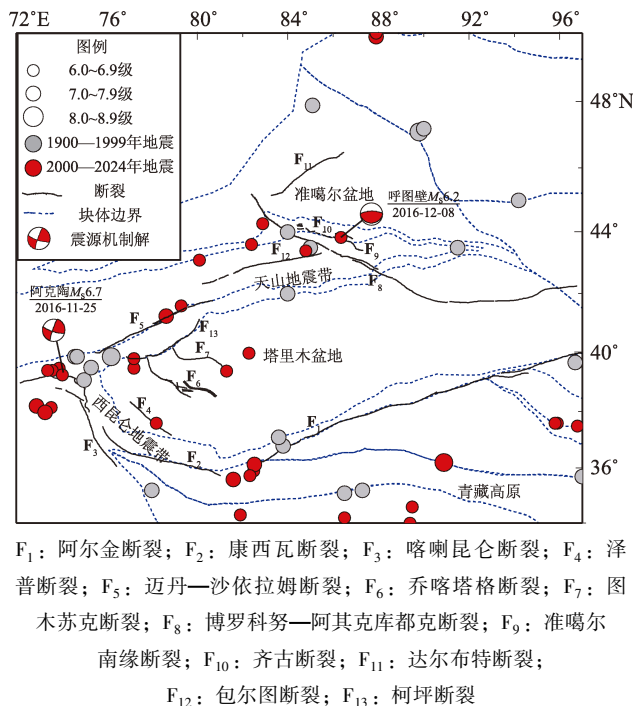


图1 新疆及其邻区构造背景和地震分布

Fig. 1 Tectonic background and the distribution of historical earthquakes in Xinjiang and its adjacent region

2 数据和方法

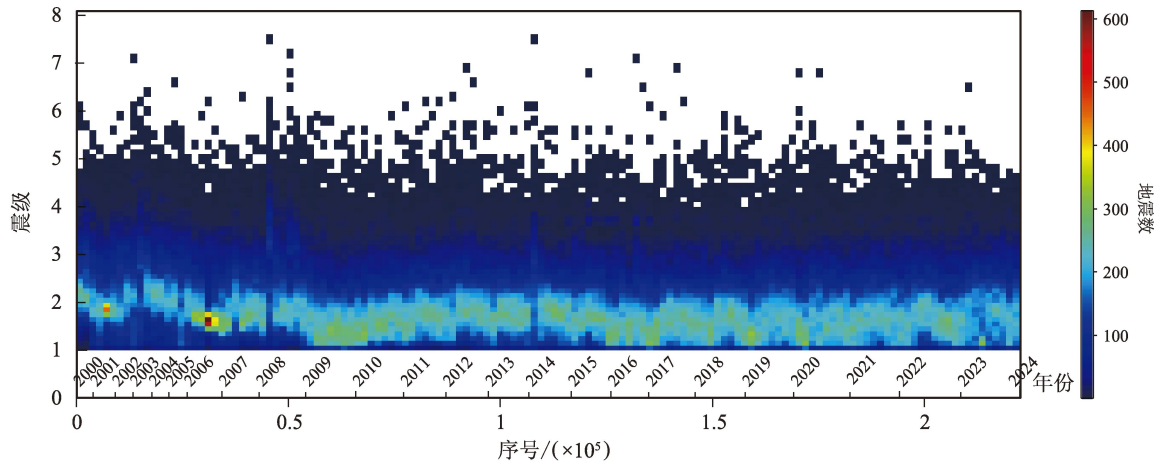
2.1 资料 and 最小完整性震级选取

本文使用了中国地震台网中心提供的2000—2023年新疆及其邻区的统一正式小震目录^①,震级为地方震震级 M_L 。为了获得完备的地震目录,本文首先采用震级—序号法(Ogata *et al.*, 1991)定性地探讨研究区内最小完整性震级 M_c 随时间的变化。这种方法不仅可以避免由于主震发生后余震较为密集、难以按时间分析余震监测能力变化的问题,而且可以根据地震监测能力变化的分段性和不连续性,得到地震记录信噪比以及人为因素所引起的监测能力变化(蒋长胜等, 2013)。新疆地区完备性分析结果如图2a所示,图中横坐标为地震发生先后顺序,横坐标上方为不等间隔的地震发生时间。

本文还使用了“最大曲率”MAXC方法和拟合度分别为90%、95%的GFT方法(Wiemer, Wyss, 2000)来定量评估新疆地区 M_c 随时间的变化。MAXC方法中 M_c 根据震级—频度分布曲线的一阶导数的最大值对应的震级来确定,而GFT方法中 M_c 则是通过搜索对应给定的实际和理论震级频度分布下的拟合度百分比来确定。本文计算中使用1600个地震事件作为窗口选取数据并进行滑动计算,结果如图2b所示,图中采用90%和95%的拟合度GFT方法,分别表示为GFT-95%和GFT-90%。从图2a、b对比可以看出,两种方法的计算结果一致性较好,2009年之后新疆地区监测能力得到显著提升, $M_c \leq M_L 2.0$,期间在短时间存在一定的波动,可能是由大地震发生所导致(Iwata, 2008)。空间上,2000年以后新疆地区 M_c 分布具有明显的不均匀性,根据孔祥艳等(2016)的研究结果,天山地震带 M_c 值较小,大部分地区 $M_c \leq M_L 2.0$;西昆仑地震带 M_c 值较高,多数地区 M_c 在 $M_L 3.0$ 左右,个别地区 M_c 在 $M_L 1.0$ 左右。

根据上述最小完备性震级分析,2000—2023年新疆地区大部分区域 $M_L \geq 3.0$ 地震较为完整,所以本文选取 $M_L \geq 3.0$ 地震目录进行研究分析,

① <https://data.earthquake.cn/>.



(a) 使用震级-序号方法给出的地震密度分布

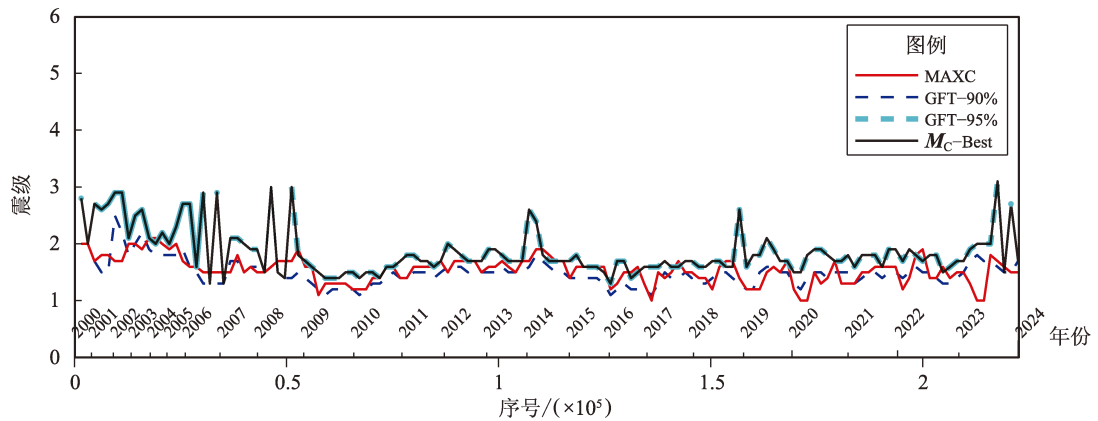
(b) 使用多统计方法定量分析给出的最小完整性震级 M_c 随时间变化

图 2 2000—2023 年新疆地区地震目录的完备性分析

Fig. 2 Analysis of the earthquake - catalogue completeness in Xinjiang during 2000 - 2023

采用扩散链法 (李闽峰, 2002) 对选取的地震目录进行除丛处理, 为防止强震影响, 后续计算中不考虑 6 级以上地震。

2.2 应变比计算方法

应变作为地块中与构造应力、地震过程联系最密切的一个物理量 (马宏生等, 2002), 具有可靠的物理基础。本文以地震释放能量的 1/2 次方, 即 Benioff 应变 (Benioff, 1951) 作为响应量, 计算每月首日前后 n 天的应变比。本文按照 $2^\circ \times 2^\circ$ 大小在经纬度方向分别划分网格, 计算每个网格点 200 km 范围内 Benioff 应变比, 且保证每个日期前后 n 天每个网格点范围内至少有 3 个地震, Benioff 应变比计算方法参考杨文等 (2014) 的结果:

$$S_r = \frac{\sum \sqrt{E_j}}{\sum \sqrt{E_i}} \quad (1)$$

式中: \sqrt{E} 为 Benioff 应变; $\sqrt{E_i}$ 表示每个月首日前 n 天第 i 次地震的应变释放量; $\sqrt{E_j}$ 表示每个月首日后 n 天第 j 次地震的应变释放量。 \sqrt{E} 根据能量-震级经验公式 $\lg E = 4.8 + 1.5 M_s$ 计算得到, 震级转换采用经验公式 $M_s = 1.13 M_L - 1.08$ (汪素云, 俞言祥, 2009)。

本文以 1 个月为步长, 计算每个月首日前后 90 d 的 Benioff 应变比。每个网格点的应变比参数取以 10 为底的对数, 利用插值方法获得 2000—2023 年新疆地区 6 级以上地震前每个月 $\lg S_r$ 的空间分布。如果 $\lg S_r < 0$, 说明该区域应变能释放减速; 如果 $\lg S_r > 0$, 说明该区域应变能释放加速; 如果 $\lg S_r = 1$, 说明该区域应变能释放无变化。为了获得新疆地区 6 级以上地震孕震区内的 Benioff 应变比变化特征, 以 6 级地震震中为中心, 计算震前不同时间段孕震半径 R 范围内的 Benioff 应变比。

孕震半径 R 参考彭克银等（2003）拟合的经验公式获得：

$$\lg R = 0.29M + 0.49$$

(2)

3 震例分析

2000—2023 年新疆地区共发生 19 次 6 级以上地震，本文将 2008 年 10 月 5 日乌恰 6.8、6.3 级震群视为一组地震，对这 18 组 6 级震例前的 Benioff 应变比异常的时空演化特征进行分析。根据震例分析，以 $\lg Sr \geq 0.6$ 作为阈值，新疆地区 18 组 6 级地震中有 14 组地震在震前 1 年内在震中附近出现高值异常，占比为 77.78%。根据马宏生等（2004）提出的空间 R 值计算方法对 Benioff 应变比异常的预测效果进行检验， R 值为 0.74， R_0 值为 0.25， $R \geq R_0$ ，因此 Benioff 高值异常对未来 1 年内 6 级地震具有预测意义。

2000—2023 年新疆地区出现 Benioff 应变比异常的 6 级以上地震的异常特点以及异常开始时间和结束时间见表 1，其异常起止时间如图 3 所示。由表 1 可见，总体上，Benioff 应变比异常范围、异常开始时间和结束时间与对应地震震级无直接的相

关性。从图 3 可见，Benioff 应变比异常出现的优势时间为震前 9 ~ 12 个月（共 9 组，占比为 64%），而异常结束的优势时段为 0 ~ 6 个月（共 9 组，占比为 64%）。震前存在异常反复出现的情况，如 2008 年 3 月 21 日于田 7.3 级地震、2012 年 6 月 30 日和静 6.6 级地震和 2012 年 8 月 12 日于田 6.2 级地震之前。1 年内未出现高值异常的震例分别为 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级地震、2008 年 10 月 5 日乌恰 6.8 级震群、2017 年 8 月 9 日精河 6.6 级地震和 2020 年 6 月 26 日于田 6.4 级地震。

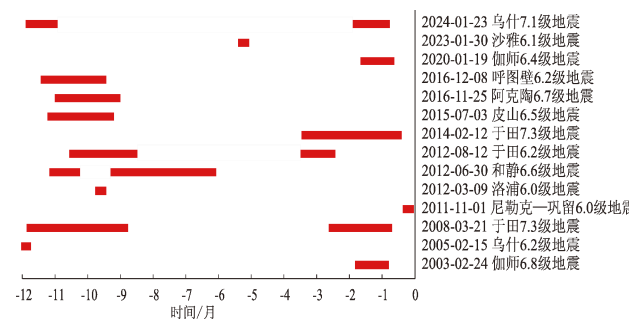


图3 新疆地区6级地震前 Benioff 应变比异常起止时间

Fig. 3 The beginning and ending time of the Benioff strain ratio anomalies before the $M_s \geq 6.0$ earthquakes in Xinjiang

表 1 2000—2023 年新疆地区出现 Benioff 应变比异常的 6 级以上地震
Tab. 1 Benioff strain ratio anomalies before the earthquakes above $M_s 6.0$ in Xinjiang during 2000 – 2023

序号	日期	震中位置		M_s	发震地点	异常特点	异常开始日期	异常结束日期
		$\varphi_N / (^\circ)$	$\lambda_E / (^\circ)$					
1	2003-02-24	39.50	77.20	6.8	伽师	逐渐向震中扩大	2002-12-31	2003-01-31
2	2005-02-15	41.60	79.30	6.2	乌什	范围小，无扩展	2004-02-29	2004-02-29
3	2008-03-21	35.60	81.60	7.3	于田	逐渐缩小	2007-03-31	2008-02-29
4	2011-11-01	43.60	82.40	6.0	尼勒克—巩留	震中位于异常边缘	2011-10-31	2011-10-31
5	2012-03-09	39.40	81.30	6.0	洛浦	震中位于异常边缘	2011-05-31	2011-05-31
6	2012-06-30	43.40	84.80	6.6	和静	在震中周边反复出现，由东向西迁移	2011-07-31	2011-12-31
7	2012-08-12	35.90	82.50	6.2	于田	在震中周边反复出现	2011-09-30	2012-05-31
8	2014-02-12	36.13	82.52	7.3	于田	震中异常不明显，两侧显著	2013-10-31	2014-01-31
9	2015-07-03	37.60	78.20	6.5	皮山	震中异常不明显，西南侧显著	2014-07-31	2014-09-30
10	2016-11-25	39.27	74.04	6.7	阿克陶	震中异常明显，且逐渐扩大	2015-12-31	2016-02-29
11	2016-12-08	43.83	86.35	6.2	呼图壁	震中异常明显，且逐渐扩大	2015-12-31	2016-02-29
12	2020-01-19	39.83	77.21	6.4	伽师	震中异常不明显，东侧显著	2019-11-30	2019-12-31
13	2023-01-30	40.01	82.29	6.1	沙雅	震中异常不明显，西侧显著	2022-08-31	2022-08-31
14	2024-01-23	41.26	78.63	7.1	乌什	在震中周边反复出现	2023-01-31	2023-12-31

以 2016 年 11 月 25 日阿克陶 6.7 级地震和 2016 年 12 月 8 日呼图壁 6.2 级地震为例, 对这两次地震前的 Benioff 应变比时空演化特征进行分析。这两次地震均位于天山地震带, 该地震带发育一系列与山体近乎平行的逆断层-褶皱带, 在山体内部发育一系列 NW 向右旋走滑断层和 NEE 向左旋走滑断裂 (吴传勇, 2016)。2016 年阿克陶 6.7 级地震震中位于木吉盆地北缘断裂附近, 该断裂

总体走向 NWW, 长度约 120 km (尼鲁帕尔·买买吐孙等, 2017)。根据 USGS 的结果, 阿克陶 6.7 级地震震源机制解断层节面 I 走向 199° 、倾角 84° 、滑动角 14° , 节面 II 走向 107° 、倾角 76° 、滑动角 174° , 为一次右旋走滑错动地震事件; 呼图壁 6.2 级地震位于齐古断裂和准噶尔南缘断裂附近 (杨文等, 2018), 震源机制解断层节面 I 走向 80° 、倾角 19° 、滑动角 81° , 节面 II 走向 269° 、

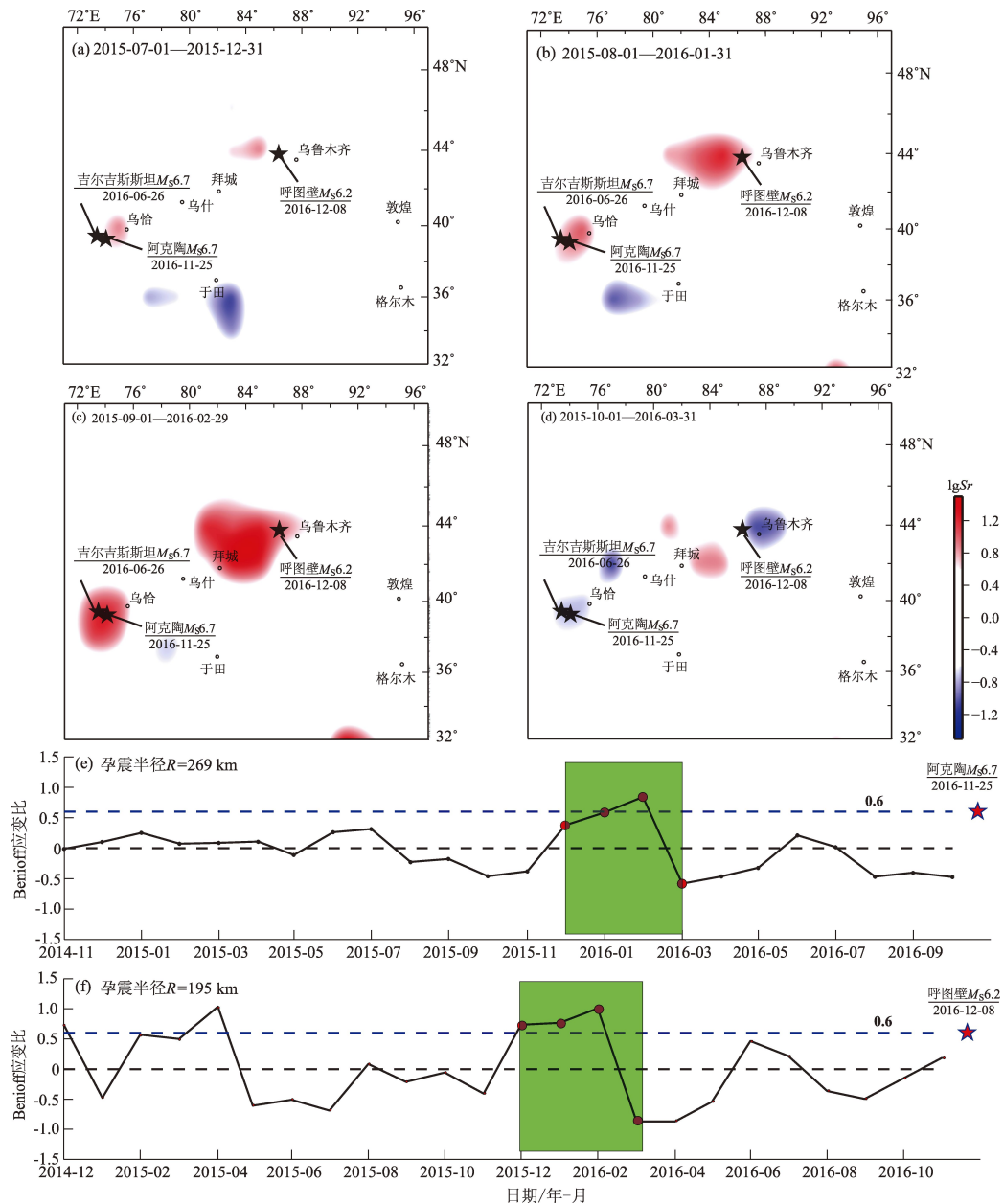


图 4 2016 年阿克陶 6.7 级地震和呼图壁 6.2 级地震之前 Benioff 应变比异常时空演化过程 (a~d) 和震前 2 年 Benioff 应变比时序曲线 (e~f)

Fig. 4 The spatio-temporal evolution (a-d) and the time history (e-f) of Benioff strain ratio before the Aketao $M_s 6.7$ earthquake and the Hutubi $M_s 6.2$ earthquake in 2016

倾角 71° 、滑动角 93° , 为一次逆冲型地震事件。2016 年 6 月 26 日在吉尔吉斯斯坦发生 6.7 级地震, 该地震位于阿克陶 6.7 级地震西侧, 两次地震震中相距约 58 km。2016 年阿克陶 6.7 级地震之前, 新疆境内处于 5 级地震显著平静状态, 该地震打破了新疆境内 288 天的 5 级地震显著平静, 随后新疆地区 6 级地震开始一丛活跃。

图 4a~d 为 2016 年阿克陶地震和呼图壁地震 Benioff 应变比异常时空演化过程。从图中可以看出, 2015 年 12 月在这两次地震震中附近开始出现应变比高值异常区, 随后这两个高值区域逐渐向外同步扩展, 至 2016 年 2 月该高值异常区范围达到最大, 2016 年 3 月, 两次地震震中附近的高值异常区消失, 并转为低值异常, 异常消失 3 个月后首先在高值区内部发生吉尔吉斯斯坦 6.7 级地震, 之后 5~6 个月又分别发生阿克陶 6.7 级地震和呼图壁 6.2 级地震, 这两次地震均位于 2016 年 2 月的高值异常区内。

以每个时间段内最后的时间节点绘制 2016 年阿克陶地震和呼图壁地震前 2 年孕震半径范围内 Benioff 应变比的时序曲线, 如图 4e、f 所示, 图 4a、b、c、d 所示 4 个时段对应图 4e、f 阴影区域。从图中可以看出, 阿克陶 6.7 级地震孕震区的应变比在 2015 年 12 月前一直处于稳定波动的状态, 于 2015 年 12 月开始逐渐升高, 2016 年 2 月超过阈值, 并于 2016 年 3 月发生突降, 随后几个月稳定波动, 直至地震发生。呼图壁 6.2 级地震前, 应变比异常出现类似的特征, 即在 2015 年 12 月开始逐渐升高, 2016 年 2 月超过阈值, 并于 2016 年 3 月发生突降, 随后应变比在零线附近波动, 直至地震发生。与阿克陶地震前 Benioff 应变比变化所不同的是, 在 2015 年 12 月之前, 呼图壁孕震区的应变比在 2015 年 4 月也曾达到阈值, 而后快速下降, 之后几个月稳定波动。这表明同一构造带不同区域强震孕育过程存在关联性, 同时也存在一定的差异性。

根据实验室失稳模拟成核过程研究 (马瑾等, 2012; 马瑾, 郭彦双, 2014), 失稳前, 由于断层不同部位相互作用, 断层各部位的独立活动开始逐渐变化为协同化活动。断层活动协同化过程一般包括 3 个阶段, 即应变释放点产生、释放点的扩展和增多以及释放段之间相互连接。2016 年阿克

陶 6.7 级地震和呼图壁 6.2 级地震的应变比特征可能与断层失稳成核过程的 3 个阶段有关。

4 结论

本文在对新疆地区地震目录最小完备性震级分析的基础上, 回溯了 2000—2023 年新疆地区 6 级以上地震前 Benioff 应变比的时空演化过程, 并以 2016 年阿克陶 6.7 级地震和呼图壁 6.2 级地震为例, 分析其 Benioff 应变比时空演化特征, 主要得出以下结论:

(1) 18 组 6 级以上地震中, 有 14 组地震前 1 年内在震中附近出现 Benioff 应变比高值异常。通过空间 R 值计算方法对高值异常进行预测效果检验, 得到 $R \geq R_0$, 可见, Benioff 应变比高值异常对后续 1 年内新疆地区 6 级地震具有一定的预测意义。

(2) 2016 年阿克陶 6.7 级地震和呼图壁 6.2 级地震前几个月孕震区应变比变化较为一致, 均表现为“逐渐升高—快速降低—稳定波动”的特征, 即逐渐升高并达到阈值, 然后快速降低, 最后稳定波动直至发震, 这与强震前 LURR 异常变化特征较为类似。

连续的 Benioff 应变比空间分布变化, 能够指示应力增强或者减弱区域的空间演化特征, 进而反映成核过程中介质的高应力状态变化。根据新疆地区 6 级以上地震的震例总结, Benioff 应变比是一种简便易用、切实可行的地震学活动性参数, 适用于中短期强震预测。值得注意的是, Benioff 应变比参数的计算与网格大小、孕震半径、最小完备性震级等因素的选取有关, 在不同构造区中需要对相应参数进行调整。

参考文献:

- 蒋长胜, 吴忠良, 庄建仓. 2013. 地震的“序列归属”问题与 ETAS 模型—以唐山序列为例[J]. 地球物理学报, 56(9): 2971–2981.
- Jiang C S, Wu Z L, Zhuang J C. 2013. ETAS model applied to the Earthquake – Sequence Association (ESA) problem: the Tangshan sequence[J]. Chinese Journal of Geophysics, 56(9): 2971–2981. (in Chinese)
- 孔祥艳, 张盛峰, 刘建明, 等. 2016. 新疆地区地震目录最小完整性震级[J]. 地震地磁观测与研究, 37(4): 39–43.

- Kong X Y, Zhang S F, Liu J M, *et al.* 2016. Minimum magnitude of completeness for earthquake catalogues in Xinjiang region [J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 37(4): 39–43. (in Chinese)
- 李闽峰. 2002. 震害预测快速服务平台的模型与方法及一些相关理论的研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- Li M F. 2002. Study on models and approaches and some associated theories of rapid internet service of earthquake loss estimation [D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 马宏生, 刘杰, 吴昊, 等. 2004. 基于 R 值评分的年度地震预报能力评价[J]. *地震*, 24(2): 31–37.
- Ma H S, Liu J, Wu H, *et al.* 2004. Scientific evaluation of annual earthquake prediction efficiency based on R -value [J]. *Earthquake*, 24(2): 31–37. (in Chinese)
- 马宏生, 刘杰, 张国民, 等. 2002. 用应变积累释放模型研究中国大陆地块分区地震活动[J]. *地震学报*, 24(6): 569–578.
- Ma H S, Liu J, Zhang G M, *et al.* 2002. The Seismicity research in the subregions of Chinese mainland using strain accumulating and releasing model [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 24(6): 569–578. (in Chinese)
- 马瑾, Sherman S I, 郭彦双. 2012. 地震前亚失稳应力状态的识别——以 5° 拐折断层变形温度场演化的实验为例[J]. *中国科学: 地球科学*, 42(5): 633–645.
- Ma J, Sherman S I, Guo Y S. 2012. Identification of meta-instable stress state based on experimental study of evolution of the temperature field during stick-slip instability on a 5° bending fault [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 42(5): 633–645. (in Chinese)
- 马瑾, 郭彦双. 2014. 失稳前断层加速协同化的实验室证据和地震实例[J]. *地震地质*, 36(3): 547–561.
- Ma J, Guo Y S. 2014. Accelerated synergism prior to fault instability: evidence from laboratory experiments and an earthquake case [J]. *Seismology and Geology*, 36(3): 547–561. (in Chinese)
- 尼鲁帕尔·买买吐孙, 王海涛, 刘月, 等. 2017. 阿克陶 $M_s 6.7$ 地震前 LURR 异常演化特征分析[J]. *内陆地震*, 31(2): 138–144.
- Nilupaer M, Wang H T, Liu Y, *et al.* 2017. Study on tempo-special evolution of LURR abnormality before Aketao earthquake [J]. *Inland earthquake*, 31(2): 138–144. (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和孕震区尺度[J]. *中国地震*, 19(4): 111–116.
- Peng K Y, Yin X C, He R. 2003. Accelerating strain release and earthquake genesis scaling exponents from critical point hypothesis [J]. *Earthquake Research in China*, 19(4): 111–116. (in Chinese)
- 汪素云, 俞言祥. 2009. 震级转换关系及其对地震活动性参数的影响研究[J]. *震灾防御技术*, 4(2): 141–149.
- Wang S Y, Yu Y X. 2009. Research on empirical relationship of earthquake magnitude scales and its influence on seismicity parameters [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 4(2): 141–149. (in Chinese)
- 吴传勇. 2016. 西南天山北东东走向断裂的晚第四纪活动特征及在天山构造变形中的作用[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- Wu C Y. 2016. Late Quaternary activity of the East-northeastern trending faults in the southwestern Tianshan and their role in the tectonic deformation of the Tianshan Mountains [D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 杨文, 程佳, 姚琪, 等. 2018. 2016 年新疆呼图壁 6.2 级地震发震构造初步研究[J]. *地震地质*, 40(5): 1100–1114.
- Yang W, Cheng J, Yao Q, *et al.* 2018. The preliminary study on the seismogenic structure of the Hutubi $M_s 6.2$ earthquake [J]. *Seismology and Geology*, 40(5): 1100–1114. (in Chinese)
- 杨文, 周龙泉, 刘杰, 等. 2014. 新疆于田两次 7.3 级地震之后南北地震带 Benioff 应变比分布特征研究[J]. *中国地震*, 30(2): 219–225.
- Yang W, Zhou L Q, Liu J, *et al.* 2014. Research on the distribution features of the Benioff strain ratio in the North South Seismic Belt after the two Yutian $M_s 7.3$ earthquakes [J]. *Earthquake Research in China*, 30(2): 219–225. (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. Load-Unload Response Ratio theory and its application [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- Benioff H. 1951. Earthquake and rock creep [J]. *Bull Seism Soc Am*, 41(1): 31–62.
- Iwata T. 2008. Low detection capability of global earthquakes after the occurrence of large earthquakes: investigation of the Harvard CMT catalogue [J]. *Geophys J Int*, 174(3): 849–856.
- Ogata Y, Imoto M, Katsura K. 1991. 3-D spatial variation of b values of magnitude-frequency distribution beneath the Kanto district, Japan [J]. *Geophysical Journal International*, 104(1): 135–146.
- Wiemer S, Wyss M. 2000. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the Western United States, and Japan [J]. *Bull Seim Soc Am*, 90(4): 859–869.
- Yin X C, Zhang L P, Zhang Y X, *et al.* 2008. The newest developments of Load-Unload Response Ratio (LURR) [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 165(3): 711–722.
- 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(1): 321–331.

Research on the Features of the Benioff Strain Ratio in Xinjiang Region before Earthquakes above $M_s6.0$

YANG Wen, YU Huaizhong, ZHANG Xiaotao
(China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

Abstract

Before a strong earthquake occurs, the accelerated release of strain energy is common in the area near the epicenter, indicating that the seismogenic area is approaching or entering a critical state. Taking the Benioff strain as the response quantity, the Benioff strain ratio at different periods is calculated, which can be used as a parameter to characterize the speed of strain energy release, and its abnormal evolution reflects the high-stress state of the intermediate substance during seismic nucleation. The minimum complete magnitude is analyzed based on the earthquake catalog provided by the China Earthquake Networks Center, then the 90-day Benioff strain ratio before and after each month is calculated one year before the M_s6 earthquakes in Xinjiang since the year 2000. The results show that 14 of the 18 groups of earthquakes were located in the high-value anomaly region within one year. This passes the prediction effect test, indicating that the high-value anomaly of the Benioff strain ratio had significance for the medium- and short-term prediction of M_s6 earthquakes in Xinjiang region. One year before the Aketao $M_s6.7$ earthquake and the Hutubi $M_s6.2$ earthquake in 2016, the strain ratio in the seismogenic zone increased gradually, then decreased rapidly, and kept fluctuating stably. This may be related to the unstable nucleation of the fault.

Keywords: Benioff strain ratio; Xinjiang region; minimum complete magnitude; earthquake prediction