2021年玛多 $M_s7.4$ 地震导致的周边地区库仑应力加载及地震活动性变化

冯雅杉, 熊熊*, 单斌, 刘成利

中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 武汉 430074

* 通讯作者, E-mail: xxiong@cug.edu.cn

收稿日期: 2021-07-08; 收修改稿日期: 2021-12-17; 接受日期: 2022-01-05; 网络版发表日期: 2022-03-03

国家重点研发计划重点专项项目(编号: 2017YFC1500305)和国家自然科学基金项目(批准号: 41731072、41574095)资助

摘要 2021年5月22日在青海玛多县附近发生 $M_s7.4$ 地震, 由于其所在的巴颜喀拉块体地震活动非常强烈, 因此有必要对玛多地震对周边区域地震危险性的影响进行深入研究. 文章基于库仑破裂准则, 计算了玛多地震在周边区域及主要断层上引起的同震库仑应力变化; 并结合断层构造应力加载速率, 评估了库仑应力变化对断层应力积累过程的影响. 进一步, 通过对地震目录除丛, 得到反映构造作用加载的背景地震目录. 同时, 以断层滑移速率为约束, 确定与断层性质相关的参数. 在此基础上, 结合库仑应力变化和速率-状态摩擦本构关系, 计算了未来十年研究区的地震发生率分布. 结果显示, 玛多地震提升了清水河断裂西北段(最大0.02MPa)、昆仑山口-江错断裂两侧(最大0.01MPa)和玛多-甘德断裂西北段(平均~0.09MPa)的应力积累水平, 未来这些地区地震活动性可能显著增强, 地震危险性增加; 昆仑山口-江错断裂东端至玛沁-玛曲地震空区的库仑应力明显增强(最大0.67MPa), 其地震危险性尤其值得关注; 鄂拉山南端、东昆仑断裂玛多以西段和达日断裂西北段的地震危险性因库仑应力卸载而降低. 总体上, 研究区未来十年发生6级以上地震的概率约为59%, 相比于震前提高了约一倍.

关键词 玛多地震, 库仑应力变化, 断层滑移速率, 地震发生率, 速率-状态摩擦本构律

1 引言

据中国地震台网测定, 北京时间2021年5月22日凌晨2点4分29秒, 在青海省果洛州玛多县附近(98.34°E, 34.59°N)发生 $M_s7.4$ 地震(下称“玛多地震”), 震源深度17km. 震后一周余震的精定位结果(王未来等, 2021)显示, 玛多地震的发震断层为东昆仑断裂西南约一百公里处的昆仑山口-江错断裂(图1), 是一个发生在大

陆块体内部的地震.

从历史上看, 巴颜喀拉块体的地震活动非常强烈, 沿其边界发生过一系列破坏性强震(图1), 如1879年武都 $M8$ 地震、1923年炉霍-道孚 $M7\frac{1}{4}$ 地震、1933年叠溪 $M8\frac{1}{2}$ 地震、1955年康定折多塘 $M7\frac{1}{2}$ 地震、1973年炉霍 $M7\frac{1}{4}$ 地震、1976年松潘的两次 $M7\frac{1}{4}$ 级地震等(周荣军等, 1997; 邓绍辉, 2012; Shan等, 2015). 近年来, 该区地震活动呈增强态势, 相继发生了2008年 $M_w7.9$ 汶川

中文引用格式: 冯雅杉, 熊熊, 单斌, 刘成利. 2022. 2021年玛多 $M_s7.4$ 地震导致的周边地区库仑应力加载及地震活动性变化. 中国科学: 地球科学, 52(6): 1100–1112, doi: [10.1360/SSTe-2021-0201](https://doi.org/10.1360/SSTe-2021-0201)

英文引用格式: Feng Y, Xiong X, Shan B, Liu C. 2022. Coulomb stress changes due to the 2021 $M_s7.4$ Maduo Earthquake and expected seismicity rate changes in the surroundings. Science China Earth Sciences, 65(4): 675–686, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9882-8>

图 1 巴颜喀拉块体及周边区域地质构造和历史地震分布

红色五角星表示2021年 $M_s7.4$ 玛多地震震中位置, 白色五角星表示历史地震(2008年之前 $M7$ 以上, 2008年之后 $M_w6.5$ 以上), 根据震中所在区域用不同底色标示发震时间和震级. 红色虚线是东昆仑断裂上的玛沁-玛曲地震空区

地震、2010年 $M_w6.9$ 玉树地震、2013年 $M_w6.6$ 芦山地震和2017年 $M_w6.5$ 九寨沟地震以及于田地区的三次中强震(2008年 $M_w7.1$ 、2014年 $M_w6.9$ 、2020年 $M_w6.3$). 并且, 巴颜喀拉块体内部次级断裂往往有较强的晚第四纪活动特征, 其活动性甚至超过了一些主干边界断裂, 具有强震孕震能力(李辉, 2016). 因此, 巴颜喀拉块体及边界的地震活动性和危险性广受关注.

巴颜喀拉块体北边界的东昆仑断裂是中国大陆一条主要的地震断裂, 1937年花石峡 $M7\frac{1}{2}$ 地震、1963年都兰 $M7$ 地震和2001年 $M_w7.9$ 昆仑山口西地震(在图1所示范围西侧)等几次历史强震导致其不同区段相继破裂, 而东段的玛沁-玛曲段(图1)为地震空区(Wen等, 2007; Shan等, 2015), 其地震危险性备受重视. 玛多地震是继2008年汶川地震后中国大陆发生的震级最大的地震, 破裂长度超过100km(李志才等, 2021; 王未来等,

2021). 地震破裂周边分布多条块体内部和边界断层, 并逼近玛沁-玛曲地震空区段. 因此, 研究玛多地震对周边主要断层应力积累及地震活动性的影响对该区地震危险性评估具有重要的参考价值.

研究表明, 地震间相互作用和影响是通过地震应力传输和地震触发机制实现的(Stein等, 1997; Toda等, 2005). 地震位错造成周边地球连续介质产生应变, 进而导致应力发生变化(King等, 1994). 应力增强相当于断层额外负荷的加载, 促进地震的发生; 反之, 应力减弱相当于断层负荷部分卸载, 迟滞地震的发生, 降低地震发生的可能性. 地震触发机制在主震对余震(Deng和Sykes, 1997; Cattania等, 2015)和对后续中强震的触发(King等, 1994; Stein等, 1997; Barka, 1999; Nanjo, 2020), 以及强震迁移机制(Xiong等, 2010; Steacy等, 2014; Wang等, 2017; Pope和Mooney, 2020)等方面取

得了一系列成功范例, 被广泛应用于地震危险性研究. 而将库仑应力变化与速率-状态摩擦本构律(Dieterich, 1994)结合, 则可基于应力触发机制定量预测地震发生率. 根据该模型, 断层在受到应力扰动后, 在未来某时刻 t 的地震发生率 $R(t)$ 可定量表示为(Dieterich, 1994; Catalli等, 2008)

$$R(t) = \frac{r}{\left[\exp\left(-\frac{\Delta\text{CFS}}{A\sigma}\right) - 1\right]\exp\left(-\frac{t}{t_a}\right) + 1}, \quad (1)$$

式中, r 为背景地震发生率, ΔCFS 为主震引起的同震库仑应力变化, t_a 为断层上的余震衰减时间; $A\sigma$ 为与断层本构性质相关的参数, 控制着断层对应力扰动的响应(Cocco等, 2010). 这一模型广泛应用于不同震例的研究(Toda等, 2008; Catalli等, 2008; Cocco等, 2010; Woessner等, 2011; Pollitz和Cattania, 2017; Jia, 2021). 在采用该模型进行地震发生率预测时, 首先需要对 r 、 t_a 和 $A\sigma$ 等参数取值, 但这些参数的不确定程度较大, 取值的主观性较强, 影响了结果的稳健性. 因此, 如何约束相关参数的取值、获得更为可靠的结果是目前该研究领域面临的一项挑战(Cocco等, 2010; Cattania等, 2018; Mancini等, 2019).

近年来, 针对巴颜喀拉周缘强震引起库仑应力变化及其对周边地区地震危险性的影响开展了很多研究, 结果显示强震对余震和后续中强震(例如, 宋金和蒋海昆, 2011; 赵立波等, 2016; Jia, 2021)具有明显的触发作用. 而东昆仑断裂的地震触发和强震迁移研究(Xiong等, 2010; Shan等, 2015)表明, 先发大地震对该区后续地震的发生具有明显的促进作用. 本文基于地震应力触发机制, 从两个方面研究玛多地震对周边地区地震活动性的影响. 首先, 我们计算玛多地震导致的周边主要断层上的应力变化, 结合构造加载信息,

估算玛多地震对这些断层上地震的促进或迟滞时间. 其次, 对地震目录进行除丛处理以获得更为可靠的背景地震发生率分布, 采用断层滑移速率来约束与断层本构性质有关的 t_a 和 $A\sigma$ 参数, 提高取值的可靠性. 在此基础上, 结合 ΔCFS 和速率-状态摩擦本构律, 对玛多地震周边地区未来十年地震发生率的空间分布进行定量预测. 一方面为该区地震危险性评估提供依据, 另一方面, 作为参考, 供日后的回溯性研究检验.

2 方法与数据

本文研究区域为 $96^\circ\sim 101^\circ$, $32.5^\circ\text{N}\sim 36.5^\circ\text{N}$. 我们将研究区域划分为 $0.1^\circ\times 0.1^\circ$ 的网格, 计算每个网格点上的库仑应力变化, 并预测未来地震发生率.

2.1 同震库仑应力变化

根据库仑破裂准则, 断层面上库仑应力变化 ΔCFS 表示为

$$\Delta\text{CFS} = \Delta\tau_s + \mu' \Delta\sigma_n, \quad (2)$$

式中, $\Delta\tau_s$ 为断层面上剪应力变化(与断层滑动方向相同时为正值), $\Delta\sigma_n$ 为断层面上正应力变化(张应力方向为正值), μ' 为等效摩擦系数, 一般在0.2~0.8之间取值(Parsons等, 1999), 本文取0.4. 我们也选取其他摩擦系数检验其对 ΔCFS 计算结果的影响.

基于弹性位错理论, 可以计算出由静态地震滑移所引起的应力变化(Okada, 1992), 将其投影到特定的方向(接收断层)上即可得到相应的正应力和剪应力变化. 我们依据地震成像结果(Jia等, 2019)构建分层地球模型(表1), 采用PSGRN/PSCMP软件(Wang等, 2006)计算玛多地震导致的应力变化. 为了更准确地反映区域

表1 研究区分层地球模型

	深度(km)	P波速度(km s ⁻¹)	S波速度(km s ⁻¹)	密度(kg m ⁻³)
1	0~4	5.2	2.9	2400
2	4~19.7	5.8	3.4	2600
3	19.7~27.2	6.0	3.5	2700
4	27.2~35.2	6.1	3.6	2700
5	35.2~44.7	6.3	3.7	2800
6	44.7~58.2	6.5	3.8	3000
7	58.2~	8.0	4.6	3400

断层的性质, 我们从HimaTibetMap1.0(Taylor和Yin, 2009)中采样了断层位置和走向, 参考历史地震的震源机制解确定断层的倾角和滑动角(表2). 对于断层之间区域的网格点, 则取其距离最近的断层参数作为该网格点的接收断层参数(网络版附图1, <http://earthcn.scichina.com>). 由于研究区的地震震源深度多在10km左右(<http://data.earthquake.cn>), 且走滑型地震导致的断层破裂面近场区域以外的 ΔCFS 随深度变化不大(参见

3.2.2节)(Lin和Stein, 2004; Xiong等, 2010), 因此, 我们选用10km深度计算 ΔCFS .

为验证 ΔCFS 计算结果的可靠性, 我们在3.2.2节对不同的摩擦系数、地球分层模型和计算深度的选取对结果的影响进行了参数的敏感性实验.

2.2 背景地震发生率

我们采用中国地震台网公布的2009年1月1日至

表 2 研究区的主要断层参数^{a)}

	断层名称	起点	终点	走向(°)	倾角(°)	滑动角(°)	滑移速率 (mm a ⁻¹)	t_a (a)	$A\sigma$ (bar)
1	青海-南山断裂A	100.17°E, 36.39°N	99.84°E, 36.48°N	289	70	128	1.5	32.6	0.05~0.07
2	青海-南山断裂B	100.71°E, 36.40°N	100.17°E, 36.39°N	269	70	128	1.5	32.6	0.05~0.09
3	青海-南山断裂C	100.92°E, 36.33°N	100.71°E, 36.40°N	293	70	128	1.5	32.6	0.04~0.05
4	鄂拉山断裂	99.42°E, 35.28°N	99.04°E, 36.46°N	345	89	180	1.1	42.1	0.06~0.09
5	东昆仑断裂西段	96.71°E, 35.67°N	96.04°E, 35.74°N	278	89	0	10	6.8	0.07~0.10
6	东昆仑断裂中段A	98.10°E, 35.46°N	96.71°E, 35.67°N	281	89	0	5	12.1	0.07~0.12
7	东昆仑断裂中段B	99.29°E, 34.94°N	98.10°E, 35.46°N	298	89	0	5	12.1	0.07~0.12
8	东昆仑断裂中段C	99.68°E, 34.65°N	99.29°E, 34.94°N	312	89	0	5	12.1	0.05~0.07
9	东昆仑断裂东段A	100.49°E, 34.34°N	99.68°E, 34.65°N	295	89	0	4	14.5	0.06~0.10
10	东昆仑断裂东段B	100.98°E, 34.27°N	100.49°E, 34.34°N	280	89	0	3	18.4	0.05~0.07
11	玛多-甘德断裂A	99.18°E, 34.47°N	98.78°E, 35.15°N	334	80	0	3.5	16.2	0.06~0.10
12	玛多-甘德断裂B	100.61°E, 33.12°N	99.18°E, 34.47°N	319	80	0	3.5	16.2	0.07~0.12
13	达日断裂A	98.89°E, 33.96°N	98.03°E, 34.30°N	199	80	-12	0.4	18.4	0.05~0.07
14	达日断裂B	99.68°E, 33.25°N	98.92°E, 33.84°N	313	80	-12	0.4	18.4	0.05~0.07
15	达日断裂C	100.71°E, 32.55°N	99.73°E, 33.24°N	310	80	-12	0.4	18.4	0.05~0.07
16	清水河断裂A	97.11°E, 34.05°N	96.82°E, 34.45°N	329	89	0	0.4	97.1	0.04~0.05
17	清水河断裂B	98.62°E, 33.11°N	97.11°E, 34.05°N	307	89	0	0.4	97.1	0.05~0.08
18	清水河断裂C	99.30°E, 32.52°N	98.62°E, 33.11°N	316	89	0	0.4	97.1	0.04~0.07
19	甘孜-玉树断裂A	97.29°E, 32.75°N	96.24°E, 33.34°N	304	88	23	8	8.2	0.06~0.14
20	甘孜-玉树断裂B	97.86°E, 32.52°N	97.29°E, 32.75°N	296	88	23	2	25.7	0.04~0.08
21	军功断裂A	101.16°E, 34.81°N	100.66°E, 34.73°N	259	70	128	1.5	32.6	0.05~0.09
22	军功断裂B	100.66°E, 34.73°N	100.20°E, 34.51°N	240	70	128	1.5	32.6	0.05~0.09
23	昆仑山口-江错断裂A	97.88°E, 34.74°N	97.45°E, 34.77°N	275	80	-9	1	45.6	0.03~0.05
24	昆仑山口-江错断裂B	98.99°E, 34.50°N	97.88°E, 34.74°N	285	80	2	1	45.6	0.05~0.08
25	昆仑山口-江错断裂C	99.95°E, 34.54°N	98.99°E, 34.50°N	267	80	18	1	45.6	0.01~0.05

a) 断层的名称参考简慧子等(2020)(青海-南山断裂、鄂拉山断裂)、熊仁伟(2010)(玛多-甘德断裂、军功断裂)、王未来等(2021)(昆仑山口-江错断裂)、梁明剑等(2020)(达日断裂)和江国焰(2013)(清水河断裂、甘孜-玉树断裂). 断层走向根据文献中提取的断层起点、终点位置确定, 位置参考HimaTibetMap(Taylor和Yin, 2009)(青海-南山断裂、鄂拉山断裂、玛多-甘德地震、军功断裂、甘孜-玉树断裂)和梁明剑等(2020)(达日断裂)以及玛多地震余震分布(昆仑山口-江错断裂). 倾角和滑动角参考附近大地震的震源机制解(青海-南山断裂据1990年4月26日共和地震、军功断裂据1990年4月26日共和地震、达日断裂据2020年12月23日发生在达日附近的地震、甘孜-玉树断裂据2010年4月14日玉树地震)和主震破裂模型(昆仑山口-江错断裂), 如果没有震源机制解, 则倾角设为89°(走滑断裂), 滑动角设为0°. 断层的滑移速率参考Zheng等(2017)(青海-南山断裂、军功断裂)、Yuan等(2011)(鄂拉山断裂)、Diao等(2019)(东昆仑断裂、昆仑山口-江错断裂、达日断裂)、熊仁伟(2010)(玛多-甘德断裂)、吴中海等(2014)(清水河断裂)、吴继文等(2017)(甘孜-玉树断裂). 1bar=10⁵Pa

2021年4月30日的地震目录来计算背景地震发生率 r 。由于地震目录中的地震集群(clusters)会造成局部的地震发生率高值区,而这些地震往往是突发应力扰动作用的结果,不能反映稳定的构造应力加载,不作为背景地震活动,所以我们通过对地震目录除丛(van Stiphout等, 2012),获得反映真实构造应力加载的背景地震发生率。考虑到可用的地震目录事件数量较少,我们采用对地震事件数量要求不高的基于最邻近事件距离(nearest neighbor distance)来区分丛集地震和背景地震的除丛方法(Zaliapin和Ben-Zion, 2013)。该方法对每个事件 j ,定义它与更早发生的事件 i 之间的距离为

$$\eta_{ij} = \begin{cases} t_{ij}(r_{ij})^{d_f} 10^{-bm_i}, & t_{ij} > 0 \\ \infty, & t_{ij} \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $t_{ij}=t_j-t_i$, r_{ij} 为两个事件的空间距离, m_i 为事件 i 的震级; d_f 为震源的维度,通常取为1.5; 参数 b 一般取Gutenberg-Richter关系中的 b 值(Zaliapin和Ben-Zion, 2020), 本文通过拟合,确定 $b=0.7$ 。下一步,找出最小的 η_{ij} 作为事件 j 的最邻近事件距离,并将 η_{ij} 分解为时间要素 T_{ij} 和空间要素 R_{ij} :

$$\begin{aligned} T_{ij} &= t_{ij} 10^{-qbm_i}, \\ R_{ij} &= (r_{ij})^{d_f} 10^{-(1-q)bm_i}. \end{aligned} \quad (4)$$

由此,根据 η_{ij} 分布图或 T_{ij} - R_{ij} 分布图的双峰分布特征,即可对丛集地震和背景地震进行区分。基于平滑算法(Frankel, 1995),以15km为平滑半径,本文采用除丛后的地震目录计算得到研究区中每个网格点的背景地震发生率 r 。

2.3 t_a 和 $A\sigma$ 的确定

t_a 和 $A\sigma$ 通常是基于经验对整个研究区域赋值(如Harris和Simpson, 1998; Toda等, 2008),新的发展则是基于最大似然函数拟合观测地震目录获得最佳取值(如Cattania和Khalid, 2016; Jia, 2021),并对区域赋值。考虑到研究区不同断层的运动状态有较大差异,统一的赋值可能会导致区域性的赋值过高或过低,所以我们利用断层的滑移速率(表2)对 t_a 和 $A\sigma$ 进行约束,尽可能减小取值的主观性,并得到空间变化的 t_a 和 $A\sigma$ 分布。其中 t_a 的计算基于其与断层滑移速率的负相关关系(Toda和Stein, 2018):

$$t_a = 45.55SR^{-0.826}, \quad (5)$$

式中, SR 表示断层滑移速率(slip rate)。

而 $A\sigma$ 又与 t_a 有如下关系:

$$A\sigma = t_a \dot{\epsilon}, \quad (6)$$

式中, $\dot{\epsilon}$ 为断层的应力加载速率,可利用断层滑移速率由deep slip模型计算而得(Savage, 1983; Toda等, 1998; Lorenzo-Martin等, 2006; Heidbach和Ben-Avraham, 2007; Shan等, 2015)。其模型构建思想为,在地球分层模型中,上地壳为闭锁的孕震层,地壳之下为稳定的滑移层,其滑移速率为断层滑移速率,而中下地壳则为稳定滑移层和闭锁层之间的过渡层(Stein等, 1997),中下地壳中的滑移速率自上而下由0逐渐递增到断层滑移速率。我们基于区域地球分层模型(表1),在18~100km深度范围内构建模拟构造应力加载的位错源,其中18~58km为过渡层,58~100km为稳定滑移层。然后,根据弹性位错理论(Okada, 1992),计算深部滑移对闭锁层的应力加载作用。我们计算了10km处的应力加载速率,和玛多地震同震 ΔCFS 的计算深度保持一致。每个网格点的 t_a 和 $A\sigma$ 值同样取距离最近断层的 t_a 和 $A\sigma$ 值(表2)。

3 结果

3.1 同震破裂模型

玛多地震发生后,美国地质调查局(USGS)(<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000e54r/finite-fault>)和张勇等(<http://geophy.pku.edu.cn/xw/353687.htm>)给出了初步的同震破裂模型,其走向与后来的余震精定位(王未来等, 2021)给出的结果存在差异(见附图2)。我们依据余震精定位结果(王未来等, 2021),确定断层走向,并将发震断层分为3段,基于有限断层反演方法(Ji等, 2002),利用远场体波数据反演了同震破裂模型(图2)。结果显示,地震破裂以左旋走滑为主,呈双向破裂。破裂主要集中在20km以上,最大滑动量约5.8m,在震中附近以及东西两侧有明显的地表破裂(图2)。破裂分布特征与张勇等的反演结果近似。

3.2 玛多地震引起的同震库仑应力变化

3.2.1 周边断层上的同震库仑应力变化

基于前述地球分层模型、反演的滑移分布和表2

图 2 利用远场体波数据反演得到的玛多地震的同震破裂模型

红色五角星为震源位置, 白色箭头指示滑动角方向和滑动量大小, 白色实线为破裂起始时间(s)等值线

所示的接收断层参数, 我们计算了玛多地震导致的同震 Δ CFS(图3a)。同时, 我们基于deep slip模型, 根据断层滑移速率计算了断层构造应力的加载速率(图3b), 将 Δ CFS转算为对断层上地震发生提前或迟滞的时间(图3c)。下面我们结合这两方面的计算结果, 分析玛多地震对周边断层地震危险性的影响。

研究表明, 0.01MPa的 Δ CFS能够有效地影响后续的地震活动性, 通常被设定为应力触发的阈值(Harris和Simpson, 1998)。研究区中, 应力增强幅度在0.01MPa以上的区域包括昆仑山口-江错断裂(发震断层)两端、东昆仑断裂中段、玛多-甘德断裂西北段和清水河断裂西北段。

东昆仑断裂中段库仑应力加载幅值较大(最大达 ~ 0.10 MPa)(图3a), 相当于一百年左右的应力积累(图3c)。该断层段在1937年 $M7\frac{1}{2}$ 花石峡地震中发生破裂(如图3a中黑色粗线段所示)(Shan等, 2015), 并且历史地震造成该段0.50MPa以上的库仑应力卸载(Xiong等, 2010), 因此, 玛多地震造成的库仑应力增加不足以克服历史地震在该段造成的应力影区效应, 该区段的地震危险性不高。值得注意的是, 应力增强区紧邻玛沁-玛曲地震空区(图3a中红色虚线)的西端, 可能对该空区段的破裂起到促进作用。

清水河断裂西北段和玛多-甘德断裂西北段同样受到应力加载, 其中清水河断裂西北段上最大库仑应力变化约为0.02MPa, 由于断层滑移速率较小(吴中海等, 2014; Diao等, 2019), 应力加载较慢, 其上 Δ CFS加载相当于一百年以上的应力积累。玛多-甘德断裂整体上处于应力加载区, 西北段应力加载幅值较大(平均0.09MPa), 东南段相对较小(平均0.02MPa), 相当于西北段一百年以上、东南段二十年左右的构造应力

加载。

库仑应力影区主要分布在玛多地震破裂面的西北和东南广大区域, 应力卸载在0.01MPa以上的区域主要有鄂拉山断裂南端、东昆仑断裂玛多以西段、达日断裂。其中达日断裂西北段的最大应力卸载达0.08MPa, 由于其滑移速率较小($\sim 1\text{mm a}^{-1}$)(Diao等, 2019), 因此, 应力卸载效应较为显著, 结果表明玛多地震对达日断裂上的地震发生有至少100年的迟滞作用。东昆仑断裂玛多以西段在1937年花石峡地震中已经破裂, 玛多地震又导致其上应力卸载达0.03MPa以上, 地震迟滞时间约50年, 地震危险性不高。鄂拉山南端应力下降较小(~ 0.01 MPa), 玛多地震对其影响不显著。

3.2.2 不确定性分析

Δ CFS的计算结果可能受接收断层摩擦系数和地球分层模型等参数选取不确定性的影响, 因此有必要检验各参数不同取值下结果的稳健性。

我们首先考察不同摩擦系数的取值对结果的影响。摩擦系数通常取值在0.2~0.8, 对逆冲型地震取值偏高, 而走滑型地震偏低(Xiong等, 2010), 本文取中间值0.4。在关于摩擦系数的测试中, 我们分别取摩擦系数为0.2和0.6, 来考察其对 Δ CFS的影响。结果表明(附图3), 不同摩擦系数取值下的 Δ CFS的空间分布基本一致, 局部地区或断层的局部区段幅值略有变化, 但是不影响对触发关系的判定。最大幅值差异在距发震断层最近的玛多-甘德断裂西北段, 约 ± 0.01 MPa, 相当于几十年的构造应力积累, 远小于大陆内部地震上千年的地震复发周期, 甚至其不确定度。

近年来, 随着地球内部结构成像技术的发展, 地球

(a) 玛多地震在周边区域引起的同震库仑应力变化。红色五角星表示玛多地震震中位置, 绿色圆圈为3级以上的余震(<https://news.ceic.ac.cn>), 震源机制解来自Global CMT(Ekström等, 2012)。白色五角星标注了研究区发生过的较大的历史地震, 黑色加粗直线标示历史地震大致破裂范围(Shan等, 2015; 王铭锋等, 2021)。红色虚线为玛沁-玛曲地震空区(同图1)。对于发震断层昆仑山口-江错断裂, 黑色实线取自HimaTibetMap1.0(Taylor和Yin, 2009), 白色实线为根据余震分布确定的破裂, 虚线为其东端破裂可能的延伸。底图为地形(下同)。(b) 研究区断层的构造应力加载速率。(c) 玛多地震同震库仑应力变化相当于构造应力积累的时间, 单位为年(a), 暖色表示加载, 冷色表示卸载。

结构模型日益精化, 因此不同的地球分层模型对破裂模型反演和 ΔCFS 计算等的影响日益受到关注. 就 ΔCFS 计算而言, 不同的地球分层模型可能会导致其确定的拉梅参数的差异(Wang等, 2006). 与我们采用的分层模型(Jia等, 2019)不同, 有研究表明, 研究区内部在20km以下可能存在低速层(Bao等, 2020). 因此, 我们基于Bao等(2020)构建地球分层模型(附表1), 以检验不同模型对 ΔCFS 的影响. 结果表明, ΔCFS 无论是空间分布还是幅值大小均没有明显变化, 最大差异出现在玛多-甘德断裂西北段上(附图4), 约0.002MPa, 远小于普遍认为的地震触发阈值0.01MPa(Harris和Simpson, 1998).

总体上, 选取不同的摩擦系数取值或不同的地球分层模型, ΔCFS 的结果都是稳健的.

此外, 本文关于 ΔCFS 的讨论是基于10km深度的分布, 因此有必要考察 ΔCFS 随深度的变化. 附图5a展示了15km深度的 ΔCFS 分布. 由图可见, 两个深度上 ΔCFS 在空间分布特征和幅值大小上基本一致, ΔCFS 随深度的显著变化主要出现在破裂面及近场区域. 为了更清晰地显示不同区域 ΔCFS 随深度变化的细节, 我们在发震断层和东昆仑断裂上各取一个垂直于断层的剖面, 显示 ΔCFS 随深度的分布(附图5b和5c). 由附图5b可见, 破裂面及近场 ΔCFS 随深度的分布形态较复杂, 在Landers地震的研究中也观察到这种现象(Catalli和Chan, 2012). 需要说明的是, 断层破裂面及近场区域的 ΔCFS 强烈依赖滑移模型. 尽管不同滑移模型的主要特征是一致的, 但在细节上存在多解性. 并且, 滑移模型的平滑假设无法描述真实破裂的非光滑结构(Marsan, 2006; Helmstetter和Shaw, 2006). 由于破裂面及近场 ΔCFS 的不确定性, 在地震危险性分析中, 往往更关注破裂面以外的区域. 由附图5b可见, 随着与破裂面距离的增大, 这种 ΔCFS 随深度变化的现象迅速衰退, 仅~20km后, 变化就趋缓. 由附图5a和c可见, 在破裂面及近场区域以外本文所关注的区域和断层上, ΔCFS 随深度的变化不大. 所以, 取10km深度上的 ΔCFS 结果是有代表性的.

3.3 玛多地震周边地区未来十年的地震活动性

图4a显示了中国地震台网2009年1月1日至2021年4月30日所记录的地震事件, 我们采用ZMAP7(Wiemer, 2001)分析最小完备震级 M_c 随时间的变化(图4a1). 由图4a1可见, 该时间段的 M_c 均在1.5以下, 且在2010年以

后完备震级明显降低, 表明该地震目录对于 $M1.5$ 以上的地震是完备的. 我们选取 $M1.5$ 以上的地震事件, 计算最近邻事件距离并绘制 $\log T$ - $\log R$ 图, 其分布呈明显的双峰特征(图4a2). 通过拟合混合高斯模型(Zaliapin和Ben-Zion, 2016), 取直线 $\log T + \log R = -1.8$ 为分界线, 将地震事件分为距其他事件较远的一类(直线上方)和较近的一类(直线下方), 较远的即为背景地震, 而较近的为丛集地震. 我们去掉丛集地震, 得到真实反映构造应力加载的地震目录, 计算获得背景发生率(图4b).

基于同震库仑应力变化(图3a)和除丛后的背景地震发生率分布(图4b), 我们计算了未来十年研究区可能的地震发生率分布. 如图5所示, 玛多-甘德断裂西北段、东昆仑断裂中段、昆仑山口-江错断裂西侧以及清水河断裂西段四个区域显示出较高的地震发生率. 其中, 玛多-甘德断裂西北段、东昆仑断裂中段和昆仑山口-江错断裂的背景地震发生率较低, 但因为 ΔCFS 增强明显, 所以受玛多地震的触发作用, 预计未来地震活动性会有较大提升. 清水河断裂2009~2021年的背景地震较为活跃, 因此在西北段库仑应力加载的放大作用下, 今后可能地震活动性较强.

对整个研究区域而言, 若设 b 值为0.7(根据背景地震目录估算), 则玛多地震发生前十年内的6级以上地震发生该概率(probability)为32%($P = 1 - \exp(-R)$, R 为地震数量(Toda等, 2008)). 由于玛多地震导致的应力加载, 未来十年发生6级以上地震的概率提高到59%; 如果时间跨度再放长到未来三十年, 则发生6级以上地震的概率约为79%, 发生7级以上地震的概率为27%. 就断层来看(附图6), 玛多-甘德断裂上十年的6级以上地震发生概率由震前的0.5%上升至6.2%, 昆仑山口-江错断裂由0.6%上升至18.2%, 清水河断裂由3.6%上升至15.7%, 东昆仑断裂地震空区段由2.7%上升至20.2%. 需要说明的是, 文中 $M_c=1.5$ 是针对整个研究区域的, 事实上, M_c 的空间分布通常是不均匀的. 我们采用ZMAP7(Wiemer, 2001)计算了的 M_c 空间分布, 结果显示(附图7), 在昆仑山口-江错断裂及其附近, M_c 较高, 最高约为2, 这可能由该区台站分布较为稀疏所致(<https://data.earthquake.cn/datascyle/datascyle/upload-file/tydzml.jpg>). 如取 $M_c=2$, 就玛多地震之后6级以上地震发生概率变化而言, 对玛多-甘德断裂(0.6%到10.4%)、清水河断裂(3.5%到13.7%)和东昆仑断裂地震空区(2.8%到21.1%)的计算结果影响不大, 而对发震

图4 研究区背景地震发生率

(a)中国地震台网正式目录2009-01~2021-04记录的 $M1.5$ 以上的事件, (a1)和(a2)分别为完备震级 M_c 随时间的变化图, 和用于区分背景地震和丛集地震的 $\log T$ - $\log R$ 分布图. (b)为除丛后获得的背景地震事件. 图中橘红色的深浅代表地震发生率的高低

断裂昆仑山口-江错断裂(0.9%~25.2%)影响相对较为明显. 但是, 如前所述, 破裂面近场 ΔCFS 的计算结果不确定度较大, 不是本文关注的重点. 因此, 除此区域外, 本文的结果是稳健的.

4 讨论

基于以上结果, 我们对玛多地震以及相关问题进行初步探讨.

(1) 玛多地震破裂向东发展的地震危险性. 东昆仑断裂上的玛沁-玛曲段是大家普遍关注的地震空区. 研究表明, 玛沁段上的地震复发周期约为600年左右(李陈侠等, 2011), 而距离上一次地震已过去500年左右, 之前的历史地震造成的库仑应力变化又已相当于160

年左右的构造应力加载, 因此该地震空区可能处于逼近破裂的状态(Shan等, 2015). 本文计算结果显示, 玛多地震在玛沁-玛曲空区段上引起的库仑应力加载较小, 最大不超过0.005MPa. 但是, 玛多地震破裂模型和余震分布均表明破裂在东端发生小角度折转, 向东昆仑断裂的玛沁段发展(图3a), 库仑应力沿此方向的加载也比较显著(最大0.67MPa). 因此, 如果破裂向东方向上存在一条隐伏断裂, 该区的地震危险性将显著提升. 若隐伏断层如玛多-甘德断裂一样贯穿至东昆仑断裂, 该隐伏断层的破裂无疑将对东昆仑断裂地震空区的断层错动产生诱发作用. 即使隐伏断层没有贯穿至东昆仑断裂, 从力学上分析, 其破裂将显著增强东昆仑断裂上的库仑应力, 与玛多地震导致的应力加载叠加, 进一步促进东昆仑断裂区段的地震活动性. 所以,

图 5 研究区域未来十年的地震发生率

图中橘红色的深浅代表预测地震发生率的高低, 色标与图4相同。蓝色线段为根据玛多地震余震分布(王未来等, 2021)确定的破裂带分布, 虚线部分为其东侧的延伸

玛多地震东端的地震危险性需要格外关注, 对该区深部结构的详细探测和地表变形的连续高精度监测无疑有助于我们更客观准确地评价该区的地震危险性。

(2) 关于块体内部地震活动。众所周知, 块体边界地震远多于块体内部, 它提供了更多的地震样本, 使我们有机会进行深入研究。所以, 长期以来, 人们更多地专注于块体边界地震。尽管有研究表明, 巴颜喀拉块体内部次级断裂的活动性甚至超过了一些主干边界断裂(李辉, 2016), 但与块体边界地震相比, 块体内部地震的危险性仍然被低估了。就板块尺度而言, 板间地壳变形多在每年几十乃至上百毫米, 这使得板间地震孕震周期比较短, 地震样本数量相对比较多。反观大陆, 其内部变形多在毫米量级, 甚至更小。这导致大陆内部地震的孕震周期更为漫长, 地震样本数更少。同时, 大陆内部断层数量大、结构复杂, 甚至有很多没有探明的隐伏断层, 这使得大陆内部地震的研究更具挑战性。就目前而言, 对中国大陆构造块体内部断裂的精细探测还十分薄弱, 对主、次级断层和断裂系各断层运动状态和形变分配图像的准确了解也非常匮乏, 这些问

题在很大程度上影响了我们对地震危险性的研究和认识。从地震应力研究的角度来看, 无论是对断层上构造应力加载速率的估算, 还是计算未来地震发生率时用到的 t_a 和 $A\sigma$ 参数, 都依赖于对断层结构、性质的了解和对断层滑移速率的精确确定, 而目前对大陆内部断裂的成像和对微小形变的监测能力还远不能满足研究的需要。因此, 对大陆内部块体及断层的精细结构成像和高精度、高分辨率的形变监测是一项必要而紧迫的工作。

5 结论

本文计算了玛多地震在周边区域引起的同震库仑应力变化, 结合震前背景地震发生率的空间分布, 定量计算了研究区未来的地震发生率, 基于研究结果和讨论, 主要得到了以下结论和认识。

(1) 玛多地震在清水河断裂西北段和玛多-甘德断裂西北段引起的同震库仑应力变化相当于一百年以上的应力积累, 这两个区域的地震危险性值得关注。位于

影区的鄂拉山断裂南端、东昆仑断裂玛多以西段和达日断裂西北段因应力卸载, 使地震的发生迟滞几十到上百年, 地震危险性下降。

(2) 昆仑山口-江错断裂上玛多地震破裂带东西两侧的库仑应力显著增强, 若其东端的破裂继续延伸至东昆仑断裂, 则可能对玛沁-玛曲地震空区段的破裂起促进作用, 该区域的地震危险性应格外关注。

(3) 研究区未来十年发生6级以上地震的概率约为59%, 比震前提高了约一倍, 其中玛多-甘德断裂西北段、东昆仑断裂近玛沁段、昆仑山口-江错断裂西侧以及清水河断裂西段未来可能有较活跃的地震活动。

(4) 玛多地震及1947年达日地震的发生表明巴颜喀拉块体内部断层同样具有孕育破坏性强震的能力。本文研究结果和前人的研究表明, 巴颜喀拉块体的地震触发过程和断层相互作用非常复杂, 断层形变的精确测定和块体及断层的精细结构成像将有助于更客观、准确地评价巴颜喀拉块体的地震危险性。

致谢 本文背景地震目录来源于中国地震台网中心和国家地震科学数据中心(<http://data.earthquake.cn>), 主震震源机制解来源于Global CMT(<https://www.globalcmt.org/>), 研究区域在玛多地震震后的地震目录来源于中国地震台网(<https://news.ceic.ac.cn>); 地图图件采用GMT软件绘制, 在此一并致谢。 责任编辑和审稿专家对本文提出了很多建设性建议, 极大地帮助我们完善了论文内容, 加强了论文的学术严谨性, 特此感谢。

参考文献

邓绍辉. 2012. 鲜水河断裂带上的历史地震. 文史杂志, (2): 68–72

简慧子, 王丽凤, 任治坤, 龚文瑜, 李彦川, 刘金瑞. 2020. 基于GPS速度场研究鄂拉山断裂现今滑动速率和闭锁状态. 地球物理学报, 63: 1127–1142

江国焰. 2013. 利用库仑破裂准则评估活动断层地震危险性. 博士学位论文. 武汉: 武汉大学. 1–143

李陈侠, 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 陈桂华, 杨虎, 安艳芬, 高翔. 2011. 东昆仑断裂带中东部地震破裂分段性与走滑运动分解作用. 中国科学: 地球科学, 41: 1295–1310

李辉. 2016. 青藏高原东北缘达日断裂中段晚第四纪活动性研究. 硕士学位论文. 成都: 成都理工大学. 1–43

李志才, 丁开华, 张鹏, 温扬茂, 赵利江, 陈建峰. 2021. GNSS观测的2021年青海玛多地震($M_w7.4$)同震形变及其滑动分布. 武汉大学学报(信息科学版), 46: 1489–1497

梁明剑, 杨耀, 杜方, 宫悦, 孙玮, 赵敏, 何强. 2020. 青海达日断裂中段晚第四纪活动性与1947年 $M7\frac{1}{4}$ 地震地表破裂带再研究. 地震地质, 42: 703–714

宋金, 蒋海昆. 2011. 2010年4月14日玉树 $M_s7.1$ 地震对余震的触发研究. 中国地震, 27: 396–402

王铭锋, 李一琼, 俞言祥. 2021. 实际地形对2010年玉树 $M_s7.1$ 地震动力学破裂过程及地震动特征的影响. 地震学报, 43: 57–72

王未来, 房立华, 吴建平, 屠泓为, 陈立艺, 来贵娟, 张龙. 2021. 2021年青海玛多 $M_s7.4$ 地震序列精定位研究. 中国科学: 地球科学, 51: 1193–1202

吴继文, 黄学猛, 谢富仁. 2017. 甘孜-玉树断裂当江段晚第四纪滑动速率. 地球物理学报, 60: 3872–3888

吴中海, 周春景, 冯卉, 张克旗, 李家存, 叶培盛, 李跃华, 田婷婷. 2014. 青海玉树地区活动断裂与地震. 地质通报, 33: 419–469

熊仁伟. 2010. 玛多-甘德断裂活动性研究. 硕士学位论文. 北京: 中国地震局地震预测研究所

赵立波, 赵连锋, 谢小碧, 曹俊兴, 姚振兴. 2016. 2014年2月12日新疆于田 $M_w7.0$ 地震源区静态库仑应力变化和地震活动率. 地球物理学, 59: 3732–3743

周荣军, 闻学泽, 蔡长星, 马声浩. 1997. 甘孜-玉树断裂带的近代地震与未来地震趋势估计. 地震地质, 19: 115–124

Bao X, Song X, Eaton D W, Xu Y, Chen H. 2020. Episodic lithospheric deformation in eastern Tibet inferred from seismic anisotropy. *Geophys Res Lett*, 47: e85721

Barka A. 1999. The 17 August 1999 Izmit earthquake. *Science*, 285: 1858–1859

Catalli F, Chan C H. 2012. New insights into the application of the Coulomb model in real-time. *Geophys J Int*, 188: 583–599

Catalli F, Cocco M, Console R, Chiaraluce L. 2008. Modeling seismicity rate changes during the 1997 Umbria-Marche sequence (central Italy) through a rate- and state-dependent model. *J Geophys Res*, 113: B11301

Cattania C, Hainzl S, Wang L, Enescu B, Roth F. 2015. Aftershock triggering by postseismic stresses: A study based on Coulomb rate-and-state models. *J Geophys Res-Solid Earth*, 120: 2388–2407

Cattania C, Khalid F. 2016. A parallel code to calculate rate-state seismicity evolution induced by time dependent, heterogeneous Coulomb stress changes. *Comput Geosci*, 94: 48–55

Cattania C, Werner M J, Marzocchi W, Hainzl S, Rhoades D, Gerstenberger M, Liukis M, Savran W, Christophersen A, Helmstetter A, Jimenez A, Steacy S, Jordan T H. 2018. The forecasting skill of physics-based seismicity models during the 2010–2012 Canterbury, New Zealand, earthquake sequence. *Seismol Res Lett*, 89: 1238–1250

Cocco M, Hainzl S, Catalli F, Enescu B, Lombardi A M, Woessner J. 2010. Sensitivity study of forecasted aftershock seismicity based on

- Coulomb stress calculation and rate- and state-dependent frictional response. *J Geophys Res*, 115: B05307
- Deng J, Sykes L R. 1997. Stress evolution in southern California and triggering of moderate-, small-, and micro-size earthquakes. *J Geophys Res*, 102: 24411–24435
- Diao F, Xiong X, Wang R, Walter T R, Wang Y, Wang K. 2019. Slip rate variation along the Kunlun fault (Tibet): Results from new GPS observations and a viscoelastic earthquake-cycle deformation model. *Geophys Res Lett*, 46: 2524–2533
- Dieterich J. 1994. A constitutive law for rate of earthquake production and its application to earthquake clustering. *J Geophys Res*, 99: 2601–2618
- Ekström G, Nettles M, Dziewoński A M. 2012. The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Phys Earth Planet Inter*, 200–201: 1–9
- Frankel A. 1995. Mapping seismic hazard in the central and eastern United States. *Seismol Res Lett*, 66: 8–21
- Harris R A, Simpson R W. 1998. Suppression of large earthquakes by stress shadows: A comparison of Coulomb and rate-and-state failure. *J Geophys Res*, 103: 24439–24451
- Heidbach O, Ben-Avraham Z. 2007. Stress evolution and seismic hazard of the Dead Sea fault system. *Earth Planet Sci Lett*, 257: 299–312
- Helmstetter A, Shaw B E. 2006. Relation between stress heterogeneity and aftershock rate in the rate-and-state model. *J Geophys Res*, 111: B07304
- Ji C, Wald D J, Helmberger D V. 2002. Source description of the 1999 Hector Mine, California, earthquake, part I: Wavelet domain inversion theory and resolution analysis. *Bull Seismol Soc Am*, 92: 1192–1207
- Jia K. 2021. Modeling the spatiotemporal seismicity patterns of the Longmen Shan Fault Zone based on the Coulomb rate and state model. *Seismol Res Lett*, 92: 275–286
- Jia S, Guo W, Mooney W D, Wang F, Duan Y, Zhao J, Lin J, Liu Z. 2019. Crustal structure of the middle segment of the Qilian fold belt and the coupling mechanism of its associated basin and range system. *Tectonophysics*, 770: 128154
- King G C, Stein R S, Lin J. 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bull Seismol Soc Am*, 84: 935–953
- Lin J, Stein R S. 2004. Stress triggering in thrust and subduction earthquakes and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip faults. *J Geophys Res*, 109: B02303
- Lorenzo-Martín F, Roth F, Wang R. 2006. Elastic and inelastic triggering of earthquakes in the North Anatolian Fault zone. *Tectonophysics*, 424: 271–289
- Mancini S, Segou M, Werner M J, Cattania C. 2019. Improving physics-based aftershock forecasts during the 2016–2017 Central Italy Earthquake Cascade. *J Geophys Res-Solid Earth*, 124: 8626–8643
- Marsan D. 2006. Can coseismic stress variability suppress seismicity shadows? Insights from a rate-and-state friction model. *J Geophys Res*, 111: B06305
- Nanjo K Z. 2020. Were changes in stress state responsible for the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes? *Nat Commun*, 11: 3082
- Okada Y. 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull Seismol Soc Am*, 82: 1018–1040
- Parsons T, Stein R S, Simpson R W, Reasenber P A. 1999. Stress sensitivity of fault seismicity: A comparison between limited-offset oblique and major strike-slip faults. *J Geophys Res*, 104: 20183–20202
- Pollitz F F, Cattania C. 2017. Connecting crustal seismicity and earthquake-driven stress evolution in Southern California. *J Geophys Res-Solid Earth*, 122: 6473–6490
- Pope N, Mooney W D. 2020. Coulomb stress models for the 2019 Ridgecrest, California earthquake sequence. *Tectonophysics*, 791: 228555
- Savage J C. 1983. A dislocation model of strain accumulation and release at a subduction zone. *J Geophys Res*, 88: 4984–4996
- Shan B, Xiong X, Wang R, Zheng Y, Yadav R B S. 2015. Stress evolution and seismic hazard on the Maqin-Maqu segment of East Kunlun Fault zone from co-, post- and interseismic stress changes. *Geophys J Int*, 200: 244–253
- Steacy S, Jiménez A, Holden C. 2014. Stress triggering and the Canterbury earthquake sequence. *Geophys J Int*, 196: 473–480
- Stein R S, Barka A A, Dieterich J H. 1997. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophys J Int*, 128: 594–604
- Taylor M, Yin A. 2009. Active structures of the Himalayan-Tibetan orogen and their relationships to earthquake distribution, contemporary strain field, and Cenozoic volcanism. *Geosphere*, 5: 199–214
- Toda S, Lin J, Meghraoui M, Stein R S. 2008. 12 May 2008 $M=7.9$ Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicity rate on three major fault systems. *Geophys Res Lett*, 35: L17305
- Toda S, Stein R S, Reasenber P A, Dieterich J H, Yoshida A. 1998. Stress transferred by the 1995 $M_w=6.9$ Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities. *J Geophys Res*, 103: 24543–24565
- Toda S, Stein R S, Richards-Dinger K, Bozkurt S B. 2005. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer. *J Geophys Res*, 110: B05S16

- Toda S, Stein R S. 2018. Why aftershock duration matters for probabilistic seismic hazard assessment. *Bull Seismol Soc Am*, 108: 1414–1426
- van Stiphout T, Zhuang J, Marsan D. 2012. Seismicity declustering. Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis, 10, doi: 10.5078/corssa-52382934
- Wang J, Xu C, Freymueller J T, Li Z. 2017. Probing Coulomb stress triggering effects for a $M_w > 6.0$ earthquake sequence from 1997 to 2014 along the periphery of the Bayan Har block on the Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 694: 249–267
- Wang R, Lorenzo-Martín F, Roth F. 2006. PSGRN/PSCMP—A new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory. *Comput Geosci*, 32: 527–541
- Wen X, Yi G, Xu X. 2007. Background and precursory seismicities along and surrounding the Kunlun fault before the $M_s 8.1$, 2001, Kokoxili earthquake, China. *J Asian Earth Sci*, 30: 63–72
- Wiemer S. 2001. A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismol Res Lett*, 72: 373–382
- Woessner J, Hainzl S, Marzocchi W, Werner M J, Lombardi A M, Catalli F, Enescu B, Cocco M, Gerstenberger M C, Wiemer S. 2011. A retrospective comparative forecast test on the 1992 Landers sequence. *J Geophys Res*, 116: B05305
- Xiong X, Shan B, Zheng Y, Wang R. 2010. Stress transfer and its implication for earthquake hazard on the Kunlun Fault, Tibet. *Tectonophysics*, 482: 216–225
- Yuan D Y, Champagnac J D, Ge W P, Molnar P, Zhang P Z, Zheng W J, Zhang H P, Liu X W. 2011. Late Quaternary right-lateral slip rates of faults adjacent to the lake Qinghai, northeastern margin of the Tibetan Plateau. *Geol Soc Am Bull*, 123: 2016–2030
- Zaliapin I, Ben-Zion Y. 2013. Earthquake clusters in southern California I: Identification and stability. *J Geophys Res-Solid Earth*, 118: 2847–2864
- Zaliapin I, Ben-Zion Y. 2016. A global classification and characterization of earthquake clusters. *Geophys J Int*, 207: 608–634
- Zaliapin I, Ben-Zion Y. 2020. Earthquake declustering using the nearest-neighbor approach in space-time-magnitude domain. *J Geophys Res-Solid Earth*, 125: e2018JB017120
- Zheng G, Wang H, Wright T J, Lou Y, Zhang R, Zhang W, Shi C, Huang J, Wei N. 2017. Crustal deformation in the India-Eurasia collision zone from 25 years of GPS measurements. *J Geophys Res-Solid Earth*, 122: 9290–9312

(责任编辑: 姚华建)