基于GPS资料约束的2021年玛多地震发震断层的滑动速率

朱亚戈, 刁法启*, 付誉超, 刘成利, 熊熊

中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 地球内部多尺度成像湖北省重点实验室, 武汉 430074

* 通讯作者, E-mail: fqdiao@cug.edu.cn

收稿日期: 2021-06-07; 收修改稿日期: 2021-06-19; 接受日期: 2021-06-22; 网络版发表日期: 2021-06-24

国家重点研发计划项目(编号: 2017YFC1500501、2017YFC1500305)和国家自然科学基金项目(批准号: 41674023、41304017)资助

摘要 地震学和大地测量学观测结果显示, 玛多 $M_w7.4$ 地震发生在巴颜喀拉块体主边界内侧的一条次级断裂上, 而不是发生在昆仑主断裂上, 其孕震机理引发广泛关注. 断层的滑动速率是描述其运动学特征的关键参数, 也能为地震危险性评估提供定量的依据. 但是由于缺少观测资料, 此次玛多地震发震断裂的滑动速率还缺乏定量研究. 文章以横跨发震区的震间GPS观测为约束, 考虑发震断裂和昆仑主断裂的共同作用, 估算了发震断裂的滑动速率. 结果显示, 玛多地震发震断层的现今滑动速率为 $(1.2\pm0.8)\text{mm a}^{-1}$, 昆仑断裂托索湖段的滑动速率为 $(5.4\pm0.3)\text{mm a}^{-1}$. 结合现有震源破裂模型给出的平均滑动量, 我们推算发震断层上的地震复发周期为 1800_{-700}^{+3700} 年(1100~5500年). 基于前人研究和本文结果, 推测昆仑断裂的滑动速率可能从托索湖段至尾端逐渐减小, 发震断裂及其近平行的次级断层和昆仑主断裂共同分担了两侧块体之间的相对运动.

关键词 玛多地震, 断层滑动速率, 大地测量观测, 昆仑断裂, 地震危险性

1 引言

据中国地震台网测定, 北京时间2021年5月22日02时04分在我国青海省果洛州玛多县附近发生 $M_w7.4$ 级地震(以下简称玛多地震), 震中位置为(98.34°E, 34.59°N), 震源深度17km. 这次地震是我国自2008年汶川地震以来发生的震级最大的一次地震, 据中国地震台网中心统计, 截止5月30日08时, 共记录到余震2979次, 对当地建筑和道路造成了严重破坏.

昆仑断裂是青藏高原东北缘一条大型左旋走滑断

裂, 东西走向近2000km, 在中西段以约 1cm a^{-1} 的滑动速率吸收了北侧柴达木块体和南侧巴颜喀拉块体的相对运动(Van der Woerd等, 2002; Kirby等, 2007; 李陈侠等, 2011), 在青藏高原向东挤出逃逸过程中发挥着重要的作用(Tapponnier和Molnar, 1976; Tapponnier等, 2001; 张培震等, 2003). 近年来, 昆仑断裂南侧的巴颜喀拉块体周缘断裂活动剧烈, 强震频繁发生(如2001年 $M_w7.8$ 昆仑地震、2008年 $M_w7.8$ 汶川地震、2010年 $M_w6.9$ 玉树地震、2013年 $M_w6.6$ 芦山地震以及2017年 $M_w6.5$ 九寨沟地震), 此次玛多地震也是在这种区域构

中文引用格式: 朱亚戈, 刁法启, 付誉超, 刘成利, 熊熊. 2021. 基于GPS资料约束的2021年玛多地震发震断层的滑动速率. 中国科学: 地球科学, 51(10): 1788–1795, doi: [10.1360/SSTe-2021-0156](https://doi.org/10.1360/SSTe-2021-0156)

英文引用格式: Zhu Y, Diao F, Fu Y, Liu C, Xiong X. 2021. Slip rate of the seismogenic fault of the 2021 Maduo earthquake in western China inferred from GPS observations. Science China Earth Sciences, 64(8): 1363–1370, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9808-0>

造背景下孕育发生的(图1). 玛多地震发生在东昆仑断裂带东段南侧约85km的一条近东西走向的断裂上(图1), 位于玛多-甘德断裂和昆仑山口-江错断裂附近, 周边次级断裂交错, 地质情况相对复杂(邓起东等, 2003). 根据余震的空间展布情况, 王未来等(2021)初步判断此次地震的主要发震断层为昆仑山口-江错断裂. GCMT(Global Centroid Moment Tensor)提供的震源机制解和同震破裂过程反演结果(<http://geophy.pku.edu.cn/xw/353687.htm>)都表明, 该断裂显示出明显的高角度左旋走滑运动特征. 参考余震分布和InSAR干涉图中的位移间断面, 我们推测断层的走向角约285°, 与昆仑断裂近似平行(邓起东等, 2003; 李陈侠等, 2011).

断层的运动学参数对深入理解构造运动和孕震过程有重要意义, 也能为地震危险性评估提供定量的证据(Burchfiel等, 2008; Zhang等, 2010). 地震地质研究结果显示东昆仑断裂自西向东保持均匀的滑动速率($\sim 1\text{cm a}^{-1}$), 但在最东段快速衰减(Kirby等, 2007). 在总结前人工作的基础上, 大地测量学研究结果显示东昆仑断裂的滑动速率可能自托索湖段开始向东逐渐衰减(Diao等, 2019). 由于上次大地震的离逝时间较长, 东昆仑断裂带玛沁-玛曲段的地震危险性近年来引起了

大家的广泛关注(Xiong等, 2010; 李陈侠等, 2011; Wen等, 2007). 然而, 由于构造活动较弱, 且相关研究不多, 昆仑主断裂南侧的次级断裂并未引起大家的注意, 但玛多地震的发生使我们不得不重新审视这一次级断裂的构造运动.

本文利用研究团队积累的跨断层密集GPS速度剖面, 同时考虑玛多地震发震断裂和昆仑断裂两条走滑断层的作用, 研究了该区域的震间变形模式, 估算了两条断层的滑动速率. 基于得到的结果, 进一步讨论了发震区域的地震危险性和断层滑动速率显示的构造意义.

2 GPS观测数据

从2005年开始, 我们研究团队在昆仑断裂托索湖段加密布设了13个GPS测点, 与陆态网测点联合构成了一条横跨发震断层区域的密集 GPS观测剖面(图1). 加密布设的测点在2005~2010年间进行了三次观测, 得到了本研究区目前最完备的震间地表GPS变形速率, 也是该区域内为数不多的大地测量观测资料, 为研究玛多地震发震断裂的滑动速率提供了宝贵的资料.

图1 玛多地震发震区域的构造背景

左上角插图表示研究区域(红色虚线方框)相对于青藏高原的位置. 红色五角星表示玛多地震的震中, 黑色五角星表示巴颜喀拉块体历史地震的震中. 红色震源球表示玛多地震的震源机制解(GCMT), 黑色震源球表示历史地震的震源机制解(Shan等, 2015; Diao等, 2019). 主图中, 绿色箭头表示相对于亚欧板块的水平向GPS速度, 置信区间95%. 黄色圆点表示玛多地震的余震(中国地震台网), 白色方块表示区域内主要城镇的位置. 黑色粗线表示主要活动断裂, 红色粗线表示发震断裂, 灰线表示次级断裂

根据前期处理的GPS速度剖面结果(Diao等, 2019), 这组数据共包含27个GPS观测站, 陆态网测站的观测范围为1999~2015年. 剖面中每个测点都至少观测了三期, 每次观测都超过三天. 同时, 为了最大程度上减小季节性影响, 所有野外观测任务都是在一年中相同时间段进行的. 因此, 野外观测获得了高精度的GPS数据, 这些数据经过一系列处理后得到了一条水平向的速度剖面.

为了获得震间期稳态的地壳速度场, 我们根据前人的研究基础, 扣除了昆仑断裂上历史地震震后黏弹效应可能造成的影响(Diao等, 2019). 我们将这些扣除震后效应的速度投影到平行于断层走向的方向, 获得了平行于断层的速度分量及其跨断层的梯度变化, 结果展现出从西南至东北逐渐减小的明显特征(图2). 因此, 在垂直断层走向上的高密度GPS观测数据可以为我们估算断层的滑动速率提供可靠的约束.

3 模型和方法

基于弹性回跳理论(Reid, 1910), 断层两侧块体以一稳定的滑动速率相对运动, 但在震间阶段, 断层上的某一区域处于闭锁状态, 应变在断层附近积累, 造成断层两侧地表发生缓慢变形. 为了描述跨断层形变与断层运动参数(断层滑动速率和闭锁深度)之间的关系, Savage和Burford(1973)基于弹性位错理论, 提出了一个震间变形模型. 在这个模型中, 平行于断层的速度

(v)可以用断层的滑动速率(V)、闭锁深度(D)和垂直于断层的距离(x)来表示:

$$v(x) = \frac{V}{\pi} \arctan\left(\frac{x}{D}\right). \quad (1)$$

在当前的情况下, 我们同时考虑玛多地震发震断裂和昆仑断裂的作用. 根据余震震源深度剖面(王未来等, 2021)、InSAR干涉图的位移间断面以及先前的野外地质调查结果(李陈侠等, 2011), 这两条断层均显示出高角度左旋走滑运动特征, 适用于等式(1)的震间变形模型. 根据线弹性地震位错理论, 我们将两条断层的作用线性叠加, 此时, 平行于断层的速度(v)可以用下式表示:

$$v(x) = \frac{V_1}{\pi} \arctan\left(\frac{x}{D_1}\right) + \frac{V_2}{\pi} \arctan\left(\frac{x-L}{D_2}\right), \quad (2)$$

其中, V_1 是发震断裂的滑动速率, V_2 是昆仑断裂托索湖段的滑动速率, D_1 是发震断层的闭锁深度, D_2 是昆仑断裂托索湖段的闭锁深度, L 是两条断层之间的距离. 初步测试发现, 地表变形数据对闭锁深度不敏感, 所以我们将两条断层闭锁深度的取值都固定, 且这两个闭锁深度的取值与该区域脆性上地壳的厚度(Laske等, 2013; Bao等, 2020)有较好的一致性. 参考玛多地震同震破裂反演结果(<http://geophy.pku.edu.cn/xw/353687.htm>), 我们将 D_1 固定到20 km. 参照Diao等(2019)的研究结果, 我们将 D_2 固定到20km. 因此, 我们模拟的速度取决于这两条断层的滑动速率(V_1 和 V_2), 下文我们将

图2 最佳模拟速度的拟合结果

红色曲线表示最佳模型给出的模拟速度, 灰色条带表示不确定度区间, 白色圆点表示带有误差棒的观测速度. F1表示发震断裂的位置, F2表示昆仑断裂托索湖段的位置.

进一步测试和讨论这几个参数对模拟结果的影响。

考虑到模型参数和观测数据之间的非线性关系, 我们采用网格搜索法来确定 V_1 和 V_2 的最佳取值, 通过调节这两个参数的取值来寻找模拟的速度(V_{model})和观测的速度(V_{obs})之间拟合残差的最小值, 以达到最佳的数据拟合效果(Diao等, 2018). 构建的目标函数如下式所示:

$$F(V_1, V_2) = \sqrt{\sum_{j=1}^N \sigma_j^{-2} [V_{\text{obs},j} - V_{\text{model},j}(V_1, V_2)]^2 / N}, \quad (3)$$

式(3)中, j 是GPS观测速度的索引, σ 是观测速度的误差. 此外, 我们还进一步用蒙特卡洛法(Monte Carlo)从统计学的角度估计了模型参数估值的不确定度. 首先, 我们以观测误差作为标准差随机生成了1000组高斯噪声; 然后, 将这1000组高斯噪声叠加到观测速度上, 得到了1000组带有扰动的观测速度; 第三, 基于这些带有扰动的数据, 重复上述网格搜索1000次, 每次都会得到一组最优参数取值; 最后, 统计并分析了这1000次搜索结果, 以此确定参数的不确定度.

4 结果和讨论

4.1 结果和敏感度测试

如图3所示, V_1 和 V_2 的最佳取值分别估计为 (1.2 ± 0.8) 和 $(5.4 \pm 0.3) \text{ mm a}^{-1}$. 我们估算出玛多地震发震断层的滑动速率在 $0.4 \sim 2 \text{ mm a}^{-1}$ 之间, 估算出的 V_2 小于Van der Woerd等(2002)给出的野外地质考察结果 $(11.5 \pm 2.0) \text{ mm a}^{-1}$, 但与Guo等(2007)的研究结果 $(6.5 \pm 1.1) \text{ mm a}^{-1}$ 接近. 此外, 我们得到的 V_2 与Diao等(2019)仅考虑昆仑主断裂得到的托索湖段的滑动速率非常接近.

我们的最佳模型可以很好地解释GPS观测数据(图2), GPS测点沿断层走向的近东向运动速度从南至北发生了两次梯度变化. 跨过玛多地震发震断层时, 速度减小不明显, 这是因为发震断层的滑动速率比较小, 其产生的地表变形速率小. 而跨过昆仑断裂时, 速度呈现明显的梯度变化, 对应于较大的断层滑动速率.

基于网格搜索得到的最佳模型, 我们分别测试了观测数据对每个模型参数的敏感度(图4). 为简单起见, 每次单独测试一个参数, 并将其他参数固定到估计出的最优值. 在一个合理的取值范围内改变目标参数, 然后对比相应的模拟结果和观测数据之间的拟合程

度. 如图4a和4b, 当我们改变 V_1 和 V_2 的取值时, 模拟的地表速度与观测值之间会产生显著的差异, 说明观测数据对断层的滑动速率比较敏感. 而当我们把闭锁深度 D_1 和 D_2 分别固定到10和30km时, 模拟结果只产生了微弱的变化(图4c和4d), 说明观测数据对断层的闭锁深度不敏感, 根据先验信息固定 D_1 和 D_2 是可取的.

4.2 区域地震危险性讨论

中国大陆约80~90%的强震发生在活动构造带上(张培震等, 2003; 邓起东等, 2003). 巴颜喀拉块体作为强震活动的主体地区, 其边界带上近几十年来强震频繁, 造成了巨大的生命财产损失. 因此, 这一区域的地震危险性一直是大家研究的热点. 然而, 大家关注的焦点往往放在块体边界的主要断裂上(如东昆仑断裂玛沁-玛曲段), 而对块体边界附近的次级断裂研究不多. 块体主边界滑动速率相对较大, 能量积累较快, 且大部分断裂有较好的地质和大地测量观测约束. 而次级断裂往往滑动速率较小, 能量积累较慢, 对应的变形速率甚至超过了目前观测能力的极限, 研究难度大, 往往在研究中被忽视. 目前, 弹性回跳理论可以很好地解释板块边界大地震的复发周期(Liu等, 2011), 特别是大型俯冲带地震, 我们可以利用断层闭锁形态来圈定未来地震可能发震区域及可能的震级. 然而, 在大陆内部, 断层分布相对复杂, 在块体边缘往往是多条断层共同作用, 参与应变的分配和累积. 这些断裂滑动速率一般较低, 使得很难利用大地测量资料获取其精确的闭锁状态, 比如2008年汶川地震和2021年玛多地震. 这些地震的发生使我们认识到, 断层滑动速率相对缓慢的地区也有可能孕育、发生大地震, 只不过需要更长的能量积累周期(Zhang等, 2010; Zhang, 2013).

本研究中, 基于跨断层震间GPS观测数据得到的发震断层的滑动速率(V_1)在 $0.4 \sim 2 \text{ mm a}^{-1}$ 之间, 结合现有震源破裂模型给出的平均滑动量(S) (<http://geophy.pku.edu.cn/xw/353687.htm>), 利用 $T=S/V_1$ (Shen等, 2009), 我们可以推算该断层上的地震复发周期(T)为 1800_{-700}^{+3700} 年(1100~5500年), 这一结果明显大于地质学结果给出的昆仑断裂中西段约500~600年的复发周期(Li等, 2005; Guo等, 2006; 李陈侠等, 2011), 也大于玛沁-玛曲段约1000年的复发周期(李陈侠等, 2011). 此

图3 网格搜索结果

(a) 目标函数值变化(V_1 vs. V_2), 五角星表示参数的最佳取值; (b)和(c) 基于蒙特卡罗法得到的 V_1 和 V_2 的统计分布

图4 模型参数的敏感度测试

每次测试只改变目标参数的取值, 固定其他参数, 对比相应的模拟结果和观测数据之间的拟合程度. 目标参数分别为(a) V_1 , (b) V_2 , (c) D_1 和(d) D_2

次玛多地震发生在巴颜喀拉块体主边界内侧的一条次级断裂上, 而不是发生在作为主边界的昆仑断裂上. 参考横跨玛多地震震源区的电性结构剖面(詹艳等, 2021), 发震断裂和昆仑主断裂有相似的孕震构造, 都位于下部高导层和上部高阻体的交接部位. 孕震区域所在的脆性上地壳比下方脆-韧性过渡带更利于积累弹性应变, 孕育强震(詹艳等, 2021). 相比于昆仑主断裂, 发震断层的滑动速率相对较低, 应变积累较慢, 导

致该断层上的地震复发周期较长, 但仍具有孕育大地震的可能性. 因此, 在相似的地质构造背景下, 缓慢积累能量的次级断层也可能存在发生较大地震的风险. 玛多地震的发生提醒我们, 今后不仅要关注板块内部主要断裂带的地震危险性, 活跃程度较弱的次级断裂也不容忽视, 需要加强对这些断层地震危险性的评估和研究.

已有研究表明, 昆仑断裂玛沁-玛曲段上次大地震

离逝时间较长, 已处于地震周期的晚期, 也是近百年来区域强震造成的库仑应力显著增强区(Xiong等, 2010; 李陈侠等, 2011; Wen等, 2007; Shan等, 2015). 因此, 该区域的地震危险性一直是大家关注的重点. 本次玛多地震造成的库仑应力变化计算结果显示, 玛沁-玛曲段大部分都处于应力增强区, 进一步提高了该区域的地震危险性(Li等, 2021). 此外, 玛沁-玛曲段周边发育着交错分布的次级断裂(如阿万仓断裂), 这些活跃的次级断裂以缓慢的滑动速率积累应变(李陈侠等, 2011), 同样存在地震危险性. 因此, 昆仑断裂玛沁-玛曲段及其周边次级断裂需要持续重点关注.

4.3 断层滑动速率的构造意义

昆仑断裂是青藏高原东北部一条近东西走向的大型左旋走滑断裂, 在青藏高原物质东向挤出过程中发挥重要作用(Tapponnier等, 2001). 前人研究发现, 昆仑

断裂上的滑动速率自西向东是变化的(Kirby等, 2007; 李陈侠等, 2011; Diao等, 2019), 但是其如何变化以及这种变化产生的机制还存在争议. Kirby等(2007)认为昆仑断裂的滑动速率在最东段150km快速衰减, 转换为块体内部的变形, 造成了地壳的局部增厚. Duvall和Clark (2010)认为昆仑断裂上减小的滑动速率不是转移到青藏高原东部, 而是转移到其北侧的海原断裂上, 使得两者中间的块体发生了地壳缩短增厚和旋转. 李陈侠等(2011)根据野外地质调查的结果, 推测昆仑断裂东段减小的滑动速率一部分被分解到了次级断裂上, 另一部分在尾端构造转换的作用下, 转换为地壳缩短增厚. 然而, 这几种假设并不矛盾, 可能共同作用(Kirby等, 2007; Diao等, 2019).

考虑黏弹效应的影响, Diao等(2019)采用GPS观测研究了昆仑断裂托索湖段的滑动速率, 发现这一段断层的现今滑动速率仅为 $(5.5 \pm 0.7) \text{ mm a}^{-1}$, 进而提出昆

图5 考虑发震断层附近次级断裂的影响

F3表示达日断裂的位置, V_3 是达日断裂的滑动速率. (a)~(c)分别代表3D目标函数值变化在 $(V_1 \text{ vs. } V_2)$, $(V_2 \text{ vs. } V_3)$, $(V_1 \text{ vs. } V_3)$ 方向上的切片; (d)考虑达日断裂作用得到的最佳模拟速度的拟合结果

仑断裂的滑动速率可能从托索湖段至尾端逐渐减小, 而不是仅在最东段150km内快速下降. 本文我们进一步考虑了南侧次级断裂的影响, 得到的昆仑断裂托索湖段的滑动速率与之相近, 支持这一观点. 造成滑动速率衰减的原因可能与断层的走向变化有关, 其走滑运动转换为玛沁-玛曲段附近的挤压构造. 另一个原因是, 托索湖段南侧一系列平行的次级断裂, 如玛多地震发震断裂和玛多-甘德断裂等共同分担了主断裂的滑动, 造成了主断裂滑动速率的衰减, 本次玛多地震的发生就是次级断裂滑动分解的最直接证据. 需要说明的是, 玛多地震发震断层附近发育着数条近平行分布的次级断裂, 我们得到的发震断层的滑动速率可能不完全是—条断裂上的滑动速率, 而是由这些小断裂共同作用的结果.

考虑到发震断层区域其他平行次级断层的共同作用, 我们在现有模型的基础上增加发震断裂南侧约50km处的达日断裂, 该断裂在1947年发生过一次 $M7.7$ 级的地震, 是一条晚第四纪活动的左旋走滑断裂(梁明剑等, 2020). 如图5a~5c, 我们同时考虑发震断裂、昆仑断裂和达日断裂三条走滑断层的作用, 重新进行网格搜索, 估算出三条断层滑动速率的最佳取值分别为 1.1 、 5.4 和 0.1 mm a^{-1} . 相比于之前只考虑发震断裂和昆仑断裂的结果, 数据拟合程度并没有明显改善(图5d), 说明目前的数据尚不足以分辨发震断层附近的其他断层的滑动情况. 但需要说明的是, 考虑了增加断层的作用后, 估算出的发震断裂滑动速率小于之前的估值, 显然这是因为更多的断裂参与了应变的分配. 因此, 忽略其他次级断层的影响, 可能会一定程度上高估发震断层的滑动速率, 进而低估发震断层上的地震复发周期.

5 结论

基于跨断层的震间GPS速度剖面, 我们研究了2021年 $M_w 7.4$ 级玛多地震发震断层和昆仑断裂托索湖段的滑动速率. 推算出玛多地震发震断裂的滑动速率为 $(1.2 \pm 0.8) \text{ mm a}^{-1}$, 昆仑断裂托索湖段的滑动速率为 $(5.4 \pm 0.3) \text{ mm a}^{-1}$, 结合现有震源破裂模型给出的平均滑动量, 估计发震断裂的地震复发周期为 1800^{+3700}_{-700} 年(1100~5500年). 基于本文结果, 并结合先前研究分析,

我们推测昆仑断裂可能从托索湖段到尾端滑动速率逐渐减小, 发震断裂及其附近的平行次级断层和昆仑主断裂共同分担了断层两侧块体之间的相对运动.

致谢 感谢责任编辑和两位评审专家提出的宝贵修改意见. 文中采用的余震数据来自中国地震台网中心, 地震破裂模型由北京大学张勇研究员提供, 图件采用GMT软件绘制(Wessel和Smith, 1998), 在此一并致谢.

参考文献

- 邓超东, 张培震, 冉勇康, 杨晓平, 闵伟, 陈立春. 2003. 中国活动构造与地震活动. 地质前缘, 10: 66–73
- 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
- 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 $M7.3/4$ 地震地表破裂带再研究. 地震地质, 3: 703–714
- 王未来, 房立华, 吴建平, 屠泓, 陈立艺, 来贵娟, 张龙. 2021. 2021年青海玛多 $M_s 7.4$ 地震序列精定位研究. 中国科学: 地球科学, 51: 1193–1202
- 张培震, 邓超东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 闵伟, 毛凤英, 王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学D辑: 地球科学, 33(增刊): 12–20
- 詹艳, 梁明剑, 孙翔宇, 黄飞鹏, 赵凌强, 宫悦, 韩静, 李陈侠, 张培震, 张会平. 2021. 2021年5月22日青海玛多 $M_s 7.4$ 地震深部环境及发震构造模式. 地球物理学报, 64: 2232–2252
- Burchfiel B C, Royden L H, van der Hilst R D, Hager B H, Chen Z, King R W, Li C, Lü J, Yao H, Kirby E. 2008. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China. *Gsa Today*, 18: 4–11
- 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: e2019GL085721
- Duvall A R, Clark M K. 2010. Dissipation of fast strike-slip faulting within and beyond northeastern Tibet. *Geology*, 38: 223–226
- Diao F, Wang R, Wang Y, Xiong X, Walter T R. 2018. Fault behavior and lower crustal rheology inferred from the first seven years of postseismic GPS data after the 2008 Wenchuan earthquake. *Earth Planet Sci Lett*, 495: 202–212
- 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

- Guo J, Lin A, Maruyama T, Zheng J, Sun G. 2006. New constraints on recent large earthquakes along the Xidatan-Dongdadan segment of the Kunlun fault, western China. *Bull Seismol Soc Am*, 96: 48–58
- Guo J, Lin A, Sun G, Zheng J. 2007. Surface ruptures associated with the 1937 $M_{7.5}$ Tuosuo Lake and the 1963 $M_{7.0}$ Alake Lake Earthquakes and the paleoseismicity along the Tuosuo Lake segment of the Kunlun Fault, Northern Tibet. *Bull Seismol Soc Am*, 97: 474–496
- Kirby E, Harkins N, Wang E, Shi X, Fan C, Burbank D. 2007. Slip rate gradients along the eastern Kunlun fault. *Tectonics*, 26: TC2010
- Laske G, Masters G, Ma Z, Pasyanos M. 2013. Update on CRUST1.0—A 1-degree global model of Earth's crust. *Geophys Res Abstracts*, 15: Abstract EGU2013-2658
- Li H, Van der Woerd J, Tapponnier P, Klinger Y, Qi X, Yang J, Zhu Y. 2005. Slip rate on the Kunlun fault at Hongshui Gou, and recurrence time of great events comparable to the 14/11/2001, $M_w \sim 7.9$ Kokoxili earthquake. *Earth Planet Sci Lett*, 237: 285–299
- Liu M, Stein S, Wang H. 2011. 2000 years of migrating earthquakes in North China: How earthquakes in midcontinents differ from those at plate boundaries. *Lithosphere*, 3: 128–132
- Li Y, Huang L, Ding R, Yang S, Liu L, Zhang S, Liu H. 2021. Coulomb stress changes associated with the $M_{7.3}$ Maduo earthquake and implications for seismic hazards. *Natural Hazards Research*, doi: 10.1016/j.nhres.2021.06.003
- Reid H F. 1910. The mechanics of the earthquake in the California earthquake of 18 April 1906. Report, Carnegie Institute, Washington DC, 2
- 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
- Savage J C, Burford R O. 1973. Geodetic determination of relative plate motion in central California. *J Geophys Res*, 78: 832–845
- Shen Z K, Sun J, Zhang P, Wan Y, Wang M, Bürgmann R, Zeng Y, Gan W, Liao H, Wang Q. 2009. Slip maxima at fault junctions and rupturing of barriers during the 2008 Wenchuan earthquake. *Nat Geosci*, 2: 718–724
- Tapponnier P, Molnar P. 1976. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics. *Nature*, 264: 319–324
- Tapponnier P, Xu Z, Roger F, Meyer B, Arnaud N, Wittlinger G, Yang J. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 294: 1671–1677
- Van der Woerd J, Tapponnier P, Ryerson F J, Meriaux A S, Meyer B, Gaudemer Y, Finkel R C, Caffee M W, Guoguang Z, Zhiqin X. 2002. Uniform postglacial slip-rate along the central 600 km of the Kunlun Fault (Tibet), from ^{26}Al , ^{10}Be , and ^{14}C dating of riser offsets, and climatic origin of the regional morphology. *Geophys J Int*, 148: 356–388
- Wen X, Yi G, Xu X. 2007. Background and precursory seismicities along and surrounding the Kunlun fault before the $M_{8.1}$, 2001, Kokoxili earthquake, China. *J Asian Earth Sci*, 30: 63–72
- Wessel P, Smith W H F. 1998. New, improved version of generic mapping tools released. *Eos Trans AGU*, 79: 579
- 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
- Zhang P Z, Wen X Z, Shen Z K, Chen J H. 2010. Oblique, high-angle, listric-reverse faulting and associated development of strain: The Wenchuan earthquake of May 12, 2008, Sichuan, China. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 38: 353–382
- Zhang P Z. 2013. Beware of slowly slipping faults. *Nat Geosci*, 6: 323–324

(责任编辑: 姚华建)