西南天山柯坪-克敏断裂系统的变形与应力变化有限元模拟

王子韬, 张怀*, 孟秋, 石耀霖

中国科学院大学, 中国科学院计算地球动力学重点实验室, 北京 100049

* 通讯作者, E-mail: h Zhang@ucas.ac.cn

收稿日期: 2021-08-03; 收修改稿日期: 2021-10-26; 接受日期: 2021-11-29; 网络版发表日期: 2022-02-24

国家杰出青年科学基金项目(编号: 41725017)和国家重点研发计划项目(编号: 2020YFA0713401)资助

摘要 受印度-欧亚板块碰撞中远场效应的影响, 天山造山带在新生代发生构造活化, 构造变形强烈且大震频发。由于受南、北两侧刚性克拉通型块体的阻挡, 天山两侧山前发育有一系列前陆褶皱-逆冲断裂带, 并不断向两侧盆地扩展; 同时, 造山带内部的古老断裂发生再次激活。逆冲推覆构造引起的变形占天山总汇聚聚变量的一半以上, 是天山地区强震发生的主要活动构造。因此, 对天山造山带逆冲推覆构造的数值模拟研究有十分重要的意义。文章选取西南天山西段的典型剖面, 从南向北涵盖柯坪、迈丹、那拉提和克敏断裂, 并试图将以上断裂带作为一个整体的断裂系统, 考虑真实地形数据、断层产状和GPS观测数据, 建立二维平面应变黏弹性有限元模型, 计算模型位移场与应力场, 同时计算该断裂系统的短期累积变形场, 以及相应各断层库仑应力变化速率。研究结果表明, 西南天山中南段是变形量的集中区域, 北部的克敏断裂变形量相对较少。同时, 综合历史地震信息并根据四条断裂带库仑应力变化, 文章对系列断裂带上未来地震活动性进行定性分析。研究结果表明柯坪断裂、迈丹断裂和那拉提断裂未来发生强震的可能性较高, 而克敏断裂短期内发生地震的可能性偏小。

关键词 天山造山带, 黏弹性有限元, 库仑应力变化, 地震活动性

1 引言

天山造山带位于欧亚大陆中心区域, 中亚造山带的西南部, 是远离板块边界的陆内造山带(张培震等, 1996; Xia等, 2014; 吴传勇, 2016)。天山造山带北邻准噶尔盆地, 南邻塔里木盆地, 从中国西北部延伸至哈萨克斯坦和吉尔吉斯斯坦境内, 全长3000多公里, 是世界上最年轻、海拔最高的造山带之一(Zhao等, 2003;

Gao等, 2009; Lin等, 2009; Charvet等, 2011)。Zhao等(2003)研究表明, 天山造山带是一个密度、速度相对较低, 但部分电阻率较高的块体。受欧亚-印度板块碰撞的远场效应影响, 天山造山带构造变形强烈、大震频发(Molnar和Tapponnier, 1975; Tapponnier和Molnar, 1979; Hendrix等, 1994; Yin等, 1998; 吴传勇, 2016)。如分别发生在南、北天山地震带的1906年玛纳斯M7.7地震(Wang等, 2004)和1997年的伽师强震群(周仕勇

中文引用格式: 王子韬, 张怀, 孟秋, 石耀霖. 2022. 西南天山柯坪-克敏断裂系统的变形与应力变化有限元模拟. 中国科学: 地球科学, 52(6): 1170–1180, doi: 10.1360/SSTe-2021-0231

英文引用格式: Wang Z, Zhang H, Meng Q, Shi Y. 2022. Finite element simulation of deformation and stress changes of Kalpin-Kemin fault system in the Southwest Tianshan Orogenic Belt. Science China Earth Sciences, 65(5): 863–873, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9875-y>

等, 2006), 以及发生在西南天山内部的1911年克敏 $M_s 8.2$ 地震(Deev和Korzhenkov, 2016; Arrowsmith等, 2017).

天山造山带在新生代期间, 受强烈挤压和隆升的构造变形影响, 形成了典型的陆内复活型造山带(冯先岳, 1985; Avouac等, 1993; Hendrix等, 1994; 张培震等, 1996). 天山造山带山体两侧受南北双向逆冲造成的地壳缩短影响, 发育有一系列褶皱-逆冲断裂带, 是天山地区强震发生的主要活动构造(张培震等, 1996). 这些断裂带在天山造山带的新生代构造变形中发挥重要作用. 现今天山地区变形主要受这些断裂带构成的逆冲推覆构造控制, 逆冲推覆构造多数为以逆冲断裂-褶皱为特征的薄皮推覆构造, 其引起的形变量占天山总汇聚形变量的一半以上(Avouac等, 1993; 张培震等, 1996; Yin等, 1998; Allen等, 1999; Burchfiel等, 1999; 邓起东等, 2000; 杨少敏等, 2008).

由于西南天山在新生代后不断向塔里木盆地扩张, 天山和塔里木盆地之间产生了西南天山前陆推覆构造, 其中柯坪塔格推覆构造是重要的组成部分(Yin等, 1998; Allen等, 1999; Burchfiel等, 1999; 邓起东等, 2000; 曲国胜等, 2003; 杨晓平等, 2006). 柯坪塔格推覆构造前缘为柯坪断裂(KPF, Kalpin Fault), 新生代以来活动极为强烈, 历史上曾发生10次6~6.9级地震, 且震源深度在5~10km左右(贾佳, 2019), 因而柯坪塔格推覆构造的发育演化及构造变形与区域性强震发生关系备受研究者关注(田勤俭等, 2006; 徐锡伟等, 2006; 冉永康等, 2006; 闵伟等, 2006; 徐良鑫等, 2011; 李安等, 2011). 此外, 与天山地区其他推覆构造变形模式不同, 柯坪塔格推覆构造的根部断裂——迈丹断裂(MDF, Maidan Fault)自晚第四纪起构造活动也十分强烈(吴传勇等, 2014), 同样具有不亚于新生褶皱的构造变形(吴传勇, 2016). 研究表明该断裂带具有明显的左旋走滑兼逆冲的运动特征(贾启超, 2015; 吴传勇, 2016), 断裂带的运动可能是由于柯坪块体吸收帕米尔高原斜向俯冲和塔里木盆地顺时针转动产生的能量所引发(贾佳, 2019). 那拉提断裂(NLTF, Nalati Fault)是天山内部一条NEE向的大型左旋走滑逆断裂, 在晚第四纪活动性较强, 属于天山内重要的发震构造之一. 克敏断裂(KMF, Kemin Fault)位于西南天山最北端, 是天山造山带与哈萨克地台的分界断裂(Delvaux等, 2001), 主要发育于Kungey山脉内部(Selander等, 2012), 全长约为

810km, 是一条大型左旋兼逆冲断裂带, 晚第四纪以来构造活动强烈(钱青等, 2007; Jolivet等, 2010).

王子韬等(2020)关于天山造山带及邻区孕震应力场特征的文章中显示, 位于西南天山北端的克敏断裂东西段(在本文中为KMF)的应变能积累较快, 但其库仑应力变化为负值. 原文研究认为KMF的正应力和剪应力的增加均使断裂带上的应变能增加, 但可能受断裂带正应力和剪应力综合效应的影响, 断裂带上正应力的增大对断层活动的抑制效应超过剪应力对断层活动性的促进效应, 使得断裂带库仑应力变化整体为负, 故模拟结果得出KMF的地震活动性减小, 地震危险性降低. 但由于KMF位于构造变形极为强烈的西南天山地区, 不能排除未来发生强震的可能. 因此本文将对KMF库仑应力进行进一步的探究和讨论.

根据上述讨论, KMF存在应变能增大、库仑应力减小的情况, 本文猜想可能与西南天山地区复杂构造环境和断裂系统构造有关. 前人研究也表明, 不同断层上发生的地震活动并非相互独立, 地震孕育不仅受构造加载的作用, 还会受到邻近断层上发生地震的同震和震后应力变化的影响(King等, 1994; Freed, 2005; 孙云强和罗纲, 2018). 周仕勇等(2006)模拟证实了断层间的相互作用或应力传递能产生震群活动的猜测. 张竹琪等(2008)研究表明1997年新疆伽师强震群的形成过程受到了断层间相互作用的重要影响. 因此对区域地震活动性的研究, 往往需要将整个区域重要断层看作一个或多个断裂系统进行研究. 目前针对KPF、MDF、NLTF和KMF所组成的断裂系统的研究相对较少, 但由于西南天山地区地震活动频发、构造变形强烈, 因此对西南天山柯坪-克敏断裂系统进行更加深入的研究工作尤为重要. 本文利用二维垂直平面应变有限元模型尝试探究西南天山挤压推覆构造变形和断层系统位移及应力的变化, 并尝试定量给出断层库仑应力变化值, 分析各条断层地震活动性的变化.

2 研究方法

本文选择西南天山西段及邻区的一条地质剖面(80°E, 40°N)至(77°E, 44°N), 该剖面主要含有柯坪塔格推覆构造中的KPF、MDF和NLTF、KMF, 剖面所经过的地块由南到北分别为塔里木地块、天山造山带以及哈萨克地台(图1a). 其中各断裂带的基本产状如表1

所示。

本文基于自主编写的有限元程序, 根据实际地形和莫霍面建立了二维平面应变有限元模型, 其中模型地表由SRTM30卫星地形数据插值得到, 下地壳与地幔之间的莫霍面深度来自Crust1.0模型(Laske等, 2013)。在该模型中, 断裂带采用横观各向同性弹性介质, 本构方程为平面应变横观各向同性弹性方程(公式(1)); 地壳采用各向同性弹性介质, 本构方程为平面应变各向同性弹性方程(公式(2)); 地幔采用平面应变各向同性Maxwell黏弹性介质, 本构方程如公式(3)。各层介质材料参数与厚度设置主要参考前人研究成果(Wang等, 2004; 雷显权, 2009; 孙玉军等, 2013), 材料参数详情见表2。本文对模型的边界条件设置如下: 模型右侧及底面法向固定、切向自由。模型左侧利用1999~2015年欧亚参考系下平均GPS速度场数据(Zheng等, 2017)线性插值给出两侧速度差, 形成不断向右侧挤压的状态, 以模拟真实GPS加载作用下两侧地块对天山造山带的挤压作用。模型整体采用结构化四边形网格剖分, 共剖分为120071个节点、119200个单元。本文以1年为时间步长, 计算总时长为100年。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \cdot (1-\nu) & \Delta \cdot \nu & 0 \\ \Delta \cdot \nu & \Delta \cdot (1-\nu) & 0 \\ 0 & 0 & G_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

式中, $\Delta = \frac{E}{(1-\nu)-2\nu^2}$, E 为杨氏模量, G_2 为横观各向同性剪切模量, ν 为泊松比。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-\nu^2}{E} & -\frac{\nu(1+\nu)}{E} & 0 \\ -\frac{\nu(1+\nu)}{E} & \frac{1-\nu^2}{E} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1+\nu}{E} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}. \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} \dot{\sigma}_{11} \\ \dot{\sigma}_{22} \\ \dot{\sigma}_{12} \end{Bmatrix} + \frac{E}{2\eta(1+\nu)} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 1-2\nu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\varepsilon}_{11} \\ \dot{\varepsilon}_{22} \\ \dot{\varepsilon}_{12} \end{Bmatrix} + \frac{E^2}{6\eta(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

3 模拟结果

经过100年的数值模拟计算, 我们可以得到剖面模型位移场和应力场结果。第100年位移场计算结果如图2所示(网络版附录(<http://earthcn.scichina.com>)中给出了第80步的位移结果图), 剖面模型水平位移均为正值, 表示整个剖面均处于压缩状态, 受GPS加载作用影响, 剖面模型两侧100年压缩位移约为1.29m。随着塔里木地块和哈萨克地台的不断挤压, 研究剖面水平方向位移不断增大, 即天山造山带近南北方向位移不断增大, 且在不同深度地层GPS运动速率一致的假设下, 不同深度水平位移也较为一致。其次, 模型垂直位移整体为正值, 即研究剖面不同深度介质均向上抬升, 尤以海拔较高的山脉地区-天山造山带最为明显, 100年内研究剖面的最大隆升值可达0.15m。隆升量可能与各地层介质材料参数有关, 受实际地形的影响, 同时与断层软弱带的存在也有一定的关系。

在100年的计算时长内, 水平和垂直应力场模拟结果发生了明显变化, 第100年应力计算结果如图3(网络版附录中给出了第80步的应力结果图), 其中正值表示拉张应力。随着计算时间的增加, 应力差异分化明显。由图3a可知, 水平应力均为负值, 表示剖面均受到挤压应力作用。同时, 水平应力状态与各地层材料参数有明显关系, 呈现出分层现象。在地表位置处, 水平应力计算结果显示应力与地表地形存在一定联系, 海拔较高的地形往往具有更高的水平应力值。图3b为垂直应力场计算结果, 垂直应力场大部分区域为暖色, 代表多数区域垂直应力场为正值, 受到拉张应力, 这与垂直位移体现的隆升现象相一致。在断层及其附近区域应力值的正负往往相反, 尤以KMF最为明显。这可能与断层易于剪切滑动的性质和附近地层介质材料参数差异有关。剪切应力计算结果如图3c所示, 剪切应力在断层附近表现明显。

公式(4)给出的库仑应力变化理论(Stein和Lisowski, 1983; 石耀霖, 2001)被多数学者应用在研究区域断裂带危险性问题(King等, 1994; Kilb等, 2002; Cheng等, 2019)。本文将断裂带水平方向和垂直方向的应力计算结果经过坐标转化得到断层面上正应力与剪应力结果, 并通过公式(4)计算不同断裂带在不同时间节点的库仑应力变化值(ΔCFS),

$$\Delta CFS = \Delta \tau + \mu' \Delta \sigma_n, \quad (4)$$

图 1 天山造山带及邻区地质背景及剖面地形图

(a)中红色实线为所选地质剖面; 彩色点为历史地震信息(数据来源: Li等(2019)和中国地震台网, 其中古地震信息数据有部分缺失); 蓝色箭头为研究区1999~2015年欧亚参考系下平均GPS速度场数据(Zheng等, 2017); 黑色粗箭头表示天山造山带及邻区主压应力方向(吴传勇, 2016; 鲍子文和高原, 2017); 黑色实线为研究区主要断层, 其中本文研究对象为KPF、MDF、NLTF和KMF, 已在图中标出; 左上角小图显示了研究区在中国大陆的位置。(b)是(a)中地质剖面由南到北地形高程图, 其中蓝色实线为实际地表高程起伏曲线, 黑色实线为断层系统的几何简单示意图。(c)为剖面模型材料参数设置示意图, 对不同地块和地幔介质本文设置了不同材料参数, 其中上下地壳为各向同性弹性介质, 断层带为横观各向同性弹性介质, 地幔为黏弹性材料介质)

表 1 各断裂带几何特征

断裂带	走向	倾角	倾向	有效摩擦系数	参考文献
柯坪断裂(KPF)	67.5°	50°	NW倾	0.4	陈建波, 2008
迈丹断裂(MDF)	45°	70°	NW倾	0.4	吴传勇, 2016
那拉提断裂(NLTF)	67.5°	55°	NW倾	0.5	李志海等, 2014
克敏断裂(KMF)	255°	75°	S倾	0.5	吴传勇, 2016

表 2 各断裂带材料参数

序号	名称	杨氏模量(Pa)	泊松比	剪切模量(Pa)	黏度(Pa s)
1	柯坪断裂(KPF)	7.31×10^{10}	0.25	1.46×10^{10}	
2	迈丹断裂(MDF)	7.31×10^{10}	0.25	1.46×10^{10}	
3	那拉提断裂(NLTF)	7.31×10^{10}	0.25	1.46×10^{10}	
4	克敏断裂(KMF)	7.31×10^{10}	0.25	1.46×10^{10}	
5	塔里木盆地上地壳	7.98×10^{10}	0.25	3.192×10^{10}	
6	塔里木盆地下地壳	1.10×10^{11}	0.25	4.40×10^{10}	
7	西南天山上地壳	7.20×10^{10}	0.27	2.835×10^{10}	
8	西南天山下地壳	1.09×10^{11}	0.27	4.291×10^{10}	
9	哈萨克地台上地壳	1.30×10^{11}	0.25	5.200×10^{10}	
10	哈萨克地台下地壳	2.00×10^{11}	0.25	8.000×10^{10}	
11	地幔	1.38×10^{11}	0.33	5.188×10^{10}	1×10^{21}

图 2 第100步水平位移(a)和垂直位移(b)的模拟结果
位移单位: m

其中 $\Delta\tau$ 为断层面上剪应力沿滑动方向的变化量, $\Delta\sigma_n$ 为断层面上法向正应力变化, 且以拉为正, μ' 为断层面上的有效摩擦系数. 根据Parsons等(1999)研究可知, 通常情况下, 对于滑动速率较小的逆冲断层, 摩擦系数取

0.6~0.8; 对于滑动速率较大的正断层和走滑断层, 摩擦系数取0.2~0.4. 累积滑移量相对较小的断裂带具有较高的有效摩擦系数(庞亚瑾等, 2019). 本研究所涉及的四条断裂带均具有逆冲兼走滑的性质, 此外西南天

图3 第100步水平应力(a)、垂直应力(b)和剪应力(c)模拟结果
应力单位: Pa

山GPS位移场呈现出南大北小的位移状态(杨少敏等, 2008; 李杰, 2012), KPF和MDF近期地震活动性较其他两条断层活跃. 因此综合考虑, 本文将KPF和MDF有效摩擦系数设定为较小的0.4, NLTF和KMF有效摩擦系数设定为0.5.

在本研究中, 对KPF、MDF、NLTF和KMF进行正应力、剪应力以及库仑应力变化的计算, 得到各个断裂带上正应力、剪应力和库仑应力变化值并绘制出相关云图(图4), 从而估计GPS加载作用对不同断层地震危险性的影响. 从图4a可以看出, 在两侧地块挤压作用的影响下, 各个断裂带上的正应力均为负值, 其中KMF增长速度最快, MDF和NLTF次之, KPF增长速度最慢. 基于上述分析, 猜想这可能与断裂带的倾角相关, 倾角越大, 断裂带上受挤压作用产生的压力越大. 从图4b可知四条断裂带上剪应力的变化速度, 由于断裂带倾向的不同, KPF、MDF、NLTF与KMF上的剪应力虽符号不同, 但随时间增加数值均逐渐增大. 由此可知, 在GPS的加载作用下, 水平位移不断增大, 应力也在不断积累. 四条断层上的正应力均呈挤压状态, 且数值不断增大. 这表明四条断层的应变能正在逐渐

积累增大. 同时从图4c中可以看出, KPF、MDF和NLTF的库仑应力变化值均为正值, 表示库仑应力均增大, 但KMF为负, 即库仑应力减小.

本文绘制了四条断裂带中间深度点库仑应力变化(ΔCFS)曲线(图5), 从库仑应力的变化曲线可以看出, KPF、MDF和NLTF的库仑应力变化为正, 且随时间逐渐增大, 表明这三条断层发生地震的可能性不断提高; 但是KMF库仑应力变化为负且随时间不断降低, 这表明KMF发生地震的可能性较低. 这之前二维平面应力模型计算得出的KMF应力虽然逐渐增大, 但是库仑应力却逐渐减小的结果相一致. 通过四条不同断裂带的比较, 本文考虑这一现象可能与断层产状有关, 断层倾向的不同和其附近构造差异可能是导致KMF库仑应力异常的原因.

同时, 对西南天山造山带近南北走向构造变形进行研究, 分析了柯坪-克敏断裂系统中断层薄弱带的存在对研究区域地貌演化和地下各层介质的影响. 为了更好的观察构造变形, 本文计算了断层系统导致的剖面模型构造差异变形场, 并将该变形场进行适量放大——约25万倍(图6a), 绘制了零海拔这一水平面处的

图4 断裂带第100步的正应力(a)、剪应力(b)和库仑应力(c)变化模拟结果

KPF, 柯坪断裂; MDF, 迈丹断裂; NLTF, 那拉提断裂; KMF, 克敏断裂

图5 断裂带库仑应力变化随时间演变曲线

KPF, 柯坪断裂; MDF, 迈丹断裂; NLTF, 那拉提断裂; KMF, 克敏断裂

垂直位移变化曲线, 如图6b. 从图6a中可以看出, 整个剖面受到挤压作用, 各个逆冲断层发生了明显的逆冲运动, 使得地表产生隆升, 特别是在柯坪塔格推覆构造区域, 推覆构造的三条逆冲断裂带均为北侧向上隆升, 南侧向下插入, 产生了明显的推覆变形运动, 这与实际地质构造相同(贾佳, 2019). MDF与NLTF北侧隆

升抬起, 南侧斜向下插, 这与两个断层具有逆冲运动特征的观测结果相一致(吴传勇等, 2013, 2014). 由图6b可知, 由于断层软弱带存在带来的位移差跟地层介质的材料属性有关, 断裂带两侧均产生显著差异. 整个剖面的地形呈现出哈萨克地台抬升量较少, 天山造山带抬升量最大, 塔里木盆地抬升介于二者之间的地形变化, 这与实际地质资料也较为一致(雷显权, 2009; 李杰, 2012).

4 讨论

根据历史地震记录资料可知, MDF在近百年内共发生三次6级以上强震, 分别为1969年乌什北 M_s 6.5地震、1987年乌什东北 M_s 6.4地震(杨志荣, 1987; 魏若平, 1989)以及2005年乌什 M_s 6.3地震(潘振生等, 2008),

图 6 剖面模型形变图(a)与零海拔抬升速率图(b)

2019年乌什 $M_s5.0$ 地震为最近一次发生在该断裂带上的强震(孙昭杰和李金, 2019; 贾佳, 2019). 虽然目前为止该断裂地震活动性较弱, 但通过野外地质调查可知, 大量古地震遗迹沿MDF发生, 且沈军等人研究认为该断裂带具备发生7级大震的构造条件(Shen等, 2001; 沈军等, 2008). 同时, 吴传勇等(2013)研究发现从晚更新世末期到全新世早期, NLTF曾发生多次强震事件, 据冯先岳(1997)统计可知, 自有记录以来该断裂带5级以上古地震共发生7次, 其中较近一次大震记录为发生在NLTF与其他两条断裂带交界处的2012年新源、和静 $M_s6.6$ 地震(魏芸芸和聂晓红, 2012). 因此持续关注MDF与NLTF未来地震活动性的强弱则尤为重要. 位于天山造山带最北端的KMF历史上曾发生过两次8级以上强震, 分别是1889年Chilik(奇利克) $M_s8.3$ 地震(Molnar和Deng, 1984; Crosby等, 2007)和1911年克敏 $M_s8.2$ 地震(Molnar和Deng, 1984; Delvaux等, 2001; Arrowsmith等, 2017). 之后根据地震记录显示并未有地震在KMF发生.

本文对研究区域的历史地震进行统计分析, 图7为研究区域内有历史记载的古地震和2012年以来地震的统计结果. 可以看出, 地震明显集中于天山造山带南侧的KPF、MDF和NLTF, 最北端的KMF自2012年有地震记录以来未发生地震. 历史地震记录资料显示, KMF

图 7 剖面附近四条断裂带地震统计图

四条断裂带从左到右依次为: 柯坪断裂(KPF)、迈丹断裂(MDF)、那拉提断裂(NLTF)、克敏断裂(KMF). 其中黄色柱形图为2012年后地震统计数据, 数据由中国地震台网中心提供; 深蓝色柱形图为2012年前地震统计数据, 数据根据文献等历史地震记录资料收集

最近一次地震为1911年1月3日的 $M_s8.2$ 级强震(吴传勇, 2016), 这也间接表明KMF地震活动性不高或正在逐步降低.

从本文库仑应力计算结果来看, 对于KPF、MDF和NLTF而言, 库仑应力逐渐增大, 其地震活动性可能正逐渐增大, 未来发生地震的可能性较高, 需持续关注. 同时考虑MDF具备发生7级强震的构造条件(Shen等, 2001; 沈军等, 2008), 因此未来该断裂地震危险性相对较高, 需高度注意. 而北侧的KMF库仑应力在逐渐降低, 所以表明该断裂地震活动性可能逐渐减弱, 未来短期内发生地震的可能性较小. 此外, 考虑地震

的发生具有周期性, 强震原地发生的周期较长, 通常情况下在几百年甚至上千年及更长(Deng和Liao, 1996; 闵伟等, 2000; 张培震等, 2003), 由于目前为止尚未有研究表明KMF的复发周期, 且不能排除未来KMF附近产生新断层发生地震的情况, 所以未来KMF的地震活动性分析需综合考虑不同因素, 不确定性较大, 应持续关注。

图6a的累积变形场揭示, 天山造山带内部的MDF与NLTF的断层活化吸收了现今主要的构造变形, 其中NLTF的变形略强于MDF。MDF作为南天山南部山前带的边界转换断裂, 连接着北部天山内部的厚皮构造和南部塔里木盆地北部的薄皮构造。该构造转换带发生明显的变形集中, 变形经此断裂传递到了塔里木盆地内部, 形成KPF。整体而言, 变形量主要分布在西南天山中南段, 北部KMF变形量较少, 即变形量向南部塔里木盆地传播比向北部哈萨克地台传播更为容易。因此, 西南天山南段变形更为活跃, 这与南段较高的地震活动性相一致。

5 结论

本文通过建立西南天山地区含四条断裂带的剖面平面应变有限元模型, 研究了GPS位移变形、断层构造和应力应变对区域地震危险性的影响。结果表明, 受南北两侧刚性塔里木地块与哈萨克地台不断挤压作用的影响, 研究剖面水平方向挤压变形逐渐增大, 垂直方向呈现隆升状态。随着剖面模型应变的增大, 应力也在逐渐增大且产生应力集中现象, 同时出现应力分层现象, 这可能与地层介质的材料参数有关。由于断层软弱带的存在, 逆冲推覆薄皮构造特征运动表现明显, 柯坪塔格推覆构造与不受侵蚀因素影响的理论地表形态变化结果一致。不同地块的隆升速率产生了差异, 其中天山造山带隆升速度最快, 塔里木盆地次之, 材料最硬的哈萨克地台隆升速率最慢, 这也与实际观测结果相符。

通过对柯坪-克敏断裂系统库仑应力和地震活动性的计算分析, 并结合断裂带的历史地震信息, 对该断裂系统未来地震活动性进行分析讨论。研究结果表明, KPF、MDF和NLTF的库仑应力随时间持续增大, 表明未来发生地震可能性较高, 应持续关注; 位于天山造山带最北侧的KMF库仑应力减小, 地震活动性减低减弱,

表明其短时间内发生地震的可能性较小。模拟结果与前人研究结果和实际地震资料较为一致。由于KMF历史上曾发生两次八级以上大震, 但目前尚未有研究确定该断裂大震的复发周期, 因此本研究结果仅表明短期内KMF地震活动性较弱, 但由于应变能的持续增大, 不能排除KMF附近产生新断层的可能性, 对于该断裂未来长期地震活动性预测, 还需要进行更加深入的研究和考察。

参考文献

- 鲍子文, 高原. 2017. 天山构造带及邻区地壳各向异性. 地球物理学报, 60: 1359–1375
- 陈建波. 2008. 新疆地震构造特征研究. 硕士学位论文. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所
- 邓起东, 冯先岳, 张培震, 徐锡伟, 杨晓平, 彭斯震, 李军. 2000. 天山活动构造. 北京: 地震出版社
- 冯先岳. 1985. 论新疆地震地质特征. 地震地质, 7: 76–87
- 冯先岳. 1997. 新疆古地震. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社
- 贾佳. 2019. 柯坪塔格推覆体及邻区构造运动与危险性分析. 硕士学位论文. 乌鲁木齐: 新疆大学
- 贾启超. 2015. 迈丹断裂阿合奇段晚第四纪活动特征与地震危险性分析. 硕士学位论文. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所
- 雷显权. 2009. 天山地区现今地壳运动变形及动力学数值模拟. 硕士学位论文. 长沙: 中南大学
- 李安, 冉勇康, 徐良鑫, 刘华国, 李彦宝. 2011. 西南天山东柯坪推覆系古地震初步研究. 地震地质, 33: 752–764
- 李杰. 2012. 天山及邻区现今地震构造环境与强震危险性的GPS研究. 博士学位论文. 武汉: 中国地质大学
- 李志海, 郑勇, 谢祖军, 刘建明, 上官文明, 单斌. 2014. 2012年6月30日新疆新源-和静 $M_{6.6}$ 地震发震构造初步研究. 地球物理学报, 57: 449–458
- 闵伟, 宋方敏, 韩竹军, 徐锡伟. 2006. 柯坪塔格断裂西段古地震初步研究. 地震地质, 28: 76–86
- 闵伟, 张培震, 邓起东. 2000. 区域古地震复发行行为的初步研究. 地震学报, 22: 163–170
- 潘振生, 刘辉, 祝军, 徐衍刚, 徐向宏. 2008. 2005年新疆乌什6.3级地震前异常特征分析. 高原地震, 20: 31–37
- 庞亚瑾, 程惠红, 董培育, 石耀霖. 2019. 天山北部强震活动对区域应力扰动的分析——以2012年伊犁 $M_{6.6}$ 地震和2017年精河 $M_{6.6}$ 地震为例. 地震, 39: 127–137
- 钱青, 徐守礼, 何国琦, Reiner K, 熊贤明, 龙灵利, 高俊. 2007. 那拉提山北缘寒武纪玄武岩的元素地球化学特征及构造意义. 岩石学报, 23: 1708–1720
- 曲国胜, 李亦纲, 陈杰, 宁宝坤, 李岩峰, 李军, 尹军平. 2003. 柯坪塔

- 格推覆构造几何学、运动学及其构造演化. 地学前缘, 10(特刊): 142–152
- 冉勇康, 杨晓平, 程建武, 徐锡伟, 陈立春. 2006. 西南天山柯坪推覆构造柯坪塔格山前逆断裂东段晚第四纪的古地震. 地震地质, 28: 245–257
- 沈军, 吴传勇, 陈建波. 2008. 新疆主要逆断层-褶皱构造区基本地震构造特征与潜在震源划分问题. 震灾防御技术, 3: 101–110
- 石耀霖. 2001. 关于应力触发和应力影概念在地震预报中应用的一些思考. 地震, 21: 1–7
- 孙玉军, 董树文, 范桃园, 张怀, 石耀霖. 2013. 中国大陆及邻区岩石圈三维流变结构. 地球物理学报, 56: 2936–2946
- 孙云强, 罗纲. 2018. 青藏高原东北缘地震时空迁移的有限元数值模拟. 地球物理学报, 61: 2246–2264
- 孙昭杰, 李金. 2019. 2019年10月27日乌什 $M_s5.0$ 和 $M_s4.5$ 地震震源机制解. 内陆地震, 33: 378–384
- 田勤俭, 丁国瑜, 郝平. 2006. 南天山及塔里木北缘构造带西段地震构造研究. 地震地质, 28: 213–223
- 王子韬, 程惠红, 董培育, 庞亚瑾, 张怀, 石耀霖. 2020. 天山造山带及邻区孕震应力场及断裂带活动性特征的数值实验分析. 地球物理学报, 63: 113–125
- 魏若平. 1989. 乌什地震系列和地震序列的特征. 内陆地震, 3: 275–280
- 魏芸芸, 聂晓红. 2012. 新疆新源、和静交界 $M_s6.6$ 地震前部分地震学异常及序列特征. 内陆地震, 26: 337–346
- 吴传勇, 吴国栋, 陈建波, 阿里木江·亚力昆, 常想德, 李帅. 2013. 天山内部那拉提断裂晚第四纪活动速率. 内陆地震, 27: 97–105
- 吴传勇, 阿里木江, 戴训也, 吴国栋, 陈建波. 2014. 西南天山迈丹断裂东段晚第四纪活动的发现及构造意义. 地震地质, 36: 976–976
- 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. 博士学位论文. 北京: 中国地震局地质研究所
- 徐良鑫, 冉勇康, 刘华国, 李安. 2011. 柯坪塔格山前层状地貌面与晚第四纪逆断层变形——以三岔口北西山前断错地貌为例. 地震地质, 33: 777–788
- 徐锡伟, 张先康, 冉勇康, 崔效锋, 马文涛, 沈军, 杨晓平, 韩竹军, 宋方敏, 张兰凤. 2006. 南天山地区巴楚-伽师地震($M_s6.8$)发震构造初步研究. 地震地质, 28: 161–178
- 杨少敏, 李杰, 王琪. 2008. GPS研究天山现今变形与断层活动. 中国科学D辑: 地球科学, 38: 872–880
- 杨晓平, 冉勇康, 宋方敏, 徐锡伟, 程建武, 闵伟, 韩竹军, 陈立春. 2006. 西南天山柯坪逆冲推覆构造带的地壳缩短分析. 地震地质, 28: 194–204
- 杨志荣. 1987. 1987年1月24日新疆乌什6.4级地震前兆异常及其预报. 中国地震, 3: 8–14
- 张培震, 邓起东, 杨晓平, 彭斯震, 徐锡伟, 冯先岳. 1996. 天山的晚新生代构造变形及其地球动力学问题. 中国地震, 12: 127–140
- 张培震, 闵伟, 邓起东, 毛凤英. 2003. 海原活动断裂带的古地震与强震复发规律. 中国科学D辑: 地球科学, 33: 705–713
- 张竹琪, 陈永顺, 林间. 2008. 1997年伽师震群中相邻正断层和走滑断层之间相互应力作用. 中国科学D辑: 地球科学, 38: 334–342
- 周仕勇, 姜明明, Russell R. 2006. 1997年新疆伽师强震群发展过程中发震断层间相互作用的影响. 地球物理学报, 49: 1102–1109
- Allen M B, Vincent S J, Wheeler P J. 1999. Late Cenozoic tectonics of the Kepingtage thrust zone: Interactions of the Tien Shan and Tarim Basin, northwest China. *Tectonics*, 18: 639–654
- Arrowsmith J R, Crosby C J, Korzhnikov A M, Mamurov E, Povolotskaya I, Guralnik B, Landgraf A. 2017. Surface rupture of the 1911 Kebin (Chon-Kemin) earthquake, Northern Tien Shan, Kyrgyzstan. In: Landgraf A, Kuebler S, Hintersberger E, Stein S, eds. Seismicity, Fault Rupture and Earthquake Hazards in Slowly Deforming Regions. Geological Society, London, Special Publication. 432(AGU Fall Meeting Abstracts)
- Avouac J P, Tapponnier P, Bai M, You H, Wang G. 1993. Active thrusting and folding along the northern Tien Shan and Late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan. *J Geophys Res*, 98: 6755–6804
- Burchfiel B C, Brown E T, Deng Q D, Feng X Y, Li J, Molnar P, Shi J B, Wu Z M, You H C. 1999. Crustal shortening on the margins of the Tien Shan, Xinjiang, China. *Int Geol Rev*, 41: 665–700
- Charvet J, Shu L S, Laurent-Charvet S, Wang B, Faure M, Cluzel D, Chen Y, De Jong K. 2011. Palaeozoic tectonic evolution of the Tianshan belt, NW China. *Sci China Earth Sci*, 54: 166–184
- Cheng H, Zhang B, Huang L, Zhang H, Shi Y. 2019. Calculating coseismic deformation and stress changes in a heterogeneous ellipsoid earth model. *Geophys J Int*, 216: 851–858
- Crosby C J, Arrowsmith J R, Korzhnikov A M, Guralnik B, Povolotskaya I E. 2007. The hunt for surface rupture from the 1889 $M_s8.3$ Chilik Earthquake, Northern Tien Shan, Kyrgyzstan and Kazakhstan. AGU Fall Meeting Abstracts, Fall Meeting 2007, abstract id. T23D-1635
- Deev E V, Korzhnikov A M. 2016. Paleoseismological studies in the epicentral area of the 1911 Kemin earthquake (northern Tien Shan). *Rus Geol Geophys*, 57: 337–343
- Delvaux D, Abdrakhmatov K E, Lemzin I N, Strom A L. 2001. Landslides and surface breaks of the 1911 $M_s8.2$ Kemin earthquake, Kyrgyzstan. *Russ Geol Geophys*, 42: 1583–1592
- Deng Q D, Liao Y H. 1996. Paleoseismology along the range-front fault of Helan Mountains, north central China. *J Geophys Res*, 101: 5873–5893
- Freed A M. 2005. Earthquake triggering by static, dynamic, and postseismic stress transfer. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 33: 335–367
- Gao J, Long L, Klemd R, Qian Q, Liu D, Xiong X, Su W, Liu W, Wang

- Y, Yang F. 2009. Tectonic evolution of the South Tianshan orogen and adjacent regions, NW China: Geochemical and age constraints of granitoid rocks. *Int J Earth Sci-Geol Rund*, 98: 1221–1238
- Hendrix M S, Dumitru T A, Graham S A. 1994. Late Oligocene-early Miocene unroofing in the Chinese Tian Shan: An early effect of the India-Asia collision. *Geology*, 22: 487
- Jolivet M, Dominguez S, Charreau J, Chen J, Li Y A, Wang Q C. 2010. Mesozoic and Cenozoic tectonic history of the central Chinese Tian Shan: Reactivated tectonic structures and active deformation. *Tectonics*, 29: TC6019
- King G, Stein R S, Jian L. 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bull Seismol Soc Amer*, 78: 935–953
- Kilb D, Gomberg J, Bodin P. 2002. Aftershock triggering by complete Coulomb stress changes. *J Geophys Res*, 107: ESE 2-1–ESE 2-14
- Laske G, Masters G, Ma Z T, Pasyanos M. 2013. Update on CRUST1.0—A 1-degree global model of Earth's crust. EGU General Assembly Conference Abstracts
- Li Y J, Liu M, Li Y H, Chen L W. 2019. Active crustal deformation in southeastern Tibetan Plateau: The kinematics and dynamics. *Earth Planet Sci Lett*, 523: 115708
- Lin W, Faure M, Shi Y, Wang Q, Li Z. 2009. Palaeozoic tectonics of the south-western Chinese Tianshan: New insights from a structural study of the high-pressure/low-temperature metamorphic belt. *Int J Earth Sci-Geol Rund*, 98: 1259–1274
- Molnar P, Deng Q D. 1984. Faulting associated with large earthquakes and the average rate of deformation in central and eastern Asia. *J Geophys Res*, 89: 6203–6227
- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision: Features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India-Eurasia collision. *Science*, 189: 419–426
- 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
- Selander J, Oskin M, Ormukov C, Abdrakhmatov K. 2012. Inherited strike-slip faults as an origin for basement-cored uplifts: Example of the Kungey and Zailiskey ranges, northern Tian Shan. *Tectonics*, 31: TC4026
- Shen J, Wang Y, Zhao R, Li J, Burbank D, Share K. 2001. Surveying of the deformed terraces and crust shortening rate in the northwestern Tarim Basin. *Chin Sci Bull*, 46: 1043–1046
- Stein R S, Lisowski M. 1983. The 1979 Homestead Valley earthquake sequence, California: Control of aftershocks and postseismic deformation. *J Geophys Res*, 88: 6477–6490
- Tapponnier P, Molnar P. 1979. Active faulting and cenozoic tectonics of the Tien Shan, Mongolia, and Baykal Regions. *J Geophys Res*, 84: 3425–3459
- Wang C Y, Yang Z E, Luo H, Mooney W D. 2004. Crustal structure of the northern margin of the eastern Tien Shan, China, and its tectonic implications for the 1906 M7.7 Manas earthquake. *Earth Planet Sci Lett*, 223: 187–202
- Xia B, Zhang L, Xia Y, Bader T. 2014. The tectonic evolution of the Tianshan Orogenic Belt: Evidence from U-Pb dating of detrital zircons from the Chinese southwestern Tianshan accretionary mélange. *Gondwana Res*, 25: 1627–1643
- Yin A, Nie S, Craig P, Harrison T M, Ryerson F J, Qian X L, Yang G. 1998. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tian Shan. *Tectonics*, 17: 1–27
- Zhao J M, Liu G D, Lu Z X, Zhang X K, Zhao G Z. 2003. Lithospheric structure and dynamic processes of the Tianshan orogenic belt and the Junggar basin. *Tectonophysics*, 376: 199–239
- 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: 刘丽军)