引文格式:蔡剑锋,温扬茂,郭倩,等.西南天山造山带现今地壳构造变形有限元模拟[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(2):316-326.DOI:10.13203/j.whugis20240043

Citation: CAI Jianfeng, WEN Yangmao, GUO Qian, et al. Finite Element Simulation of Present Tectonic Deformation of the Crust in the Southwest Tianshan Orogenic Belt[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(2):316-326. DOI:10.13203/j.whugis20240043

西南天山造山带现今地壳构造变形有限元模拟

蔡剑锋[1] 温扬茂[1,2,3] 郭 倩[1] 王宇飞[1] 许才军[1,2,3]

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

3 自然资源部地球物理大地测量重点实验室,湖北 武汉,430079

摘 要:作为世界上最年轻的复活型内陆造山带,天山现今构造变形复杂剧烈,地震活动频繁,是研究内陆造山过程及其动力学机理的天然实验室。以GPS观测的地壳水平运动速率为约束,充分考虑区域内主要活动断裂,结合岩石圈分层结构参数,建立了西南天山及其相邻区域的三维弹性-粘弹性有限元模型,模拟计算了研究区域内的地表形变场、区域主应变率、主要活动断层的应力积累速率及库仑应力变化率。结果表明,天山区域应力场以南北向挤压为主,西南天山造山带内部平均应变率为3.5×10^{-8}/a;柯坪断裂、迈丹断裂和那拉提断裂均具有较大的应力积累速率,未来发生强震的可能性较高,其中柯坪断裂西段的库仑应力变化率最大,高达1.5 kPa/a。通过设置不同块体独立推挤的数值模拟实验,分析了帕米尔高原和塔里木盆地在西南天山构造演化中所扮演的角色:在帕米尔高原与塔里木盆地交界以东,天山区域主要受到塔里木盆地推挤与帕米尔高原向东挤出的共同作用;而在交界以西,主要受到帕米尔高原的北向推挤作用,塔里木盆地作用有限。模拟结果定量地给出了天山主要断裂的应力积累模式,揭示了西南天山汇聚变形可能的动力学机制,为该地区未来地震危险性评估提供了有力支撑。

关键词:天山造山带;有限元模拟;GPS速度场;地壳形变;库仑应力变化

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-05-04

DOI:10.13203/j.whugis20240043 **文章编号**:1671-8860(2026)02-0316-11

Finite Element Simulation of Present Tectonic Deformation of the Crust in the Southwest Tianshan Orogenic Belt

CAI Jianfeng[1] *WEN Yangmao*[1,2,3] *GUO Qian*[1] *WANG Yufei*[1] *XU Caijun*[1,2,3]

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan 430079, China

3 Key Laboratory of Geophysical Geodesy, Ministry of Natural Resources, Wuhan 430079, China

Abstract: **Objectives**: As the youngest intra-land Cenozoic resurrected orogenic belt, the Tianshan region exhibits intricate tectonic deformation and frequent seismic activities, rendering it as a natural laboratory for investigating continental dynamics. Since the Cenozoic, the tectonic deformation of the Tianshan region has been closely associated with the collision between the Indian and Eurasian plates and the subsequent compressional processes. However, how the compressive stresses generated at the plate boundary are transmitted to the Tianshan remains controversial, and the specific roles played by the Pamir Plateau and the Tarim Basin in the deformation of the Tianshan region have yet to be clearly elucidated. Numerical simulations are arrived out to obtain stress accumulation patterns of major faults in the Tianshan region. By conducting numerical simulation experiments with individually loaded blocks, we aim to analyze the respective roles of the Pamir Plateau and the Tarim Basin in the tectonic evolution of the Southwest Tianshan. **Methods**: We construct a three-dimensional elastic-viscoelastic finite element model of the Southwest Tianshan by incor-

基金项目:国家自然科学基金(42374003,42074007,41974004)。

第一作者:蔡剑锋,博士生,主要从事大地测量学与地球动力学研究。jianfengcai@whu.edu.cn

通信作者:温扬茂,博士,教授。ymwen@sgg.whu.edu.cn

porating GPS observations as a constraint and considering the prominent active faults and layered lithospheric structure. Based on the finite element model, we simulate the crustal deformation field, the principal strain rate within the region, as well as stress accumulation rates of major active faults and their corresponding Coulomb stress change rates. **Results**: The simulated crustal deformation field shows good agreement with GPS observations, with the root mean square error of 1.5 mm/a for the east-west component and 3.2 mm/a for the north-south component. Overall, deformation of the study region is dominated by north-south shortening, with the largest deformation occurring in the Pamir Plateau, reaching approximately 20 mm/a. Deformation within the Tianshan region gradually decreases from south to north and is ultimately reduced to 2-5 mm/a due to the mechanical impediment of the Northern Kazakh Platform and the Junggar Basin. The simulation results indicate that the stress field in the Tianshan orogenic belt is dominated by the principal compressive stress in north-south direction, and the average strain rate inside the Southwest Tianshan orogenic belt is 3.5×10^{-8}/a. The Keping, Maidan, and Nalati faults exhibit high rates of stress accumulation, indicating a significant likelihood of future strong earthquakes. Notably, the western section of the Keping fault demonstrates the most rapid increase in Coulomb stress, reaching up to 1.5 kPa/a. The results of individually thrusting experiments reveal that the tectonic deformation of the Tianshan region to the east of the junction between the Tarim Basin and the Pamir Plateau is primarily influenced by a combined extrusion force exerted by these two blocks. The Tianshan orogenic belt to the west of the junction is predominantly influenced by the extrusion of the Pamir Plateau, while the Tarim Basin plays a limited role. **Conclusions**: Through numerical simulations, we quantitatively derive the stress accumulation patterns of the major faults in the Tianshan region and reveal the potential dynamic mechanism underlying convergent deformation in the Southwest Tianshan. It can provide robust support for future seismic risk assessment of this area.

Key words: Tianshan orogenic belt; finite element simulation; GPS velocity field; crustal deformation; Coulomb stress change

天山山脉位于欧亚大陆中部,东起中国新疆维吾尔自治区,西至中亚哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦等国家,造山带全长约 2 500 km,宽度为 250～350 km,平均海拔为 4 000 m,最高峰海拔高达 7 443 m,是世界上最大的内陆造山带之一[1-3](见图 1(a))。自新生代以来,受欧亚板块与印度板块强烈碰撞与持续挤压的远程效应的影响,天山重新开始活动,并再次强烈隆升,形成复活造山带[4-6]。在南北部块体的双向阻挡推挤作用下,天山造山带两侧发育有一系列的褶皱-逆冲断裂带,其变形量占天山总汇聚形变的一半以上[7-8],其中南部与塔里木盆地交界的柯坪推覆构造地震活动频繁,近年来发生多次 6 级以上地震[9-10]。天山造山带与塔里木盆地的边界为迈丹断裂(见图 1(b)),自晚第四纪以来构造活动强烈,2024 年 1 月 23 日该断裂上发生了 Mw 7.0 地震,表明该断裂现今仍具有较强的活动性[11]。除山体两侧的逆冲推覆构造外,天山内部也吸收了相当一部分的构造形变,例如位于天山中部的那拉提断裂,GPS 观测显示其具有较快的地壳缩短率及左旋走滑速率[12]。强烈的构造变形使得天山区域内的断层具有较高的活动性,研究断层应变积累的空间分布特征、获取断层的应变积累速率对西南天山区域的地震危险性评估具有重要作用。

新生代以来,天山的构造变形与印度板块和欧亚板块的碰撞及其之后的推挤作用有着密切的关系,但板块边界产生的挤压应力如何传递至天山仍存在争议,在天山变形过程中帕米尔高原和塔里木盆地所起到的具体作用尚不明确。部分研究认为,印度板块和欧亚板块的碰撞挤压主要被青藏高原的地壳增厚和东向挤出所分解吸收,剩余能量穿过稳定的塔里木盆地从而引起天山强烈变形的可能较小,由此推断帕米尔高原的北向推挤力是导致天山变形的主要驱动力[13]。另一种观点则认为,塔里木块体的顺时针旋转在天山构造变形中起主导作用[7,14-15]。由于观测的地壳形变场是多个块体构造活动共同作用的结果,因此很难直接从整体的观测中区分不同块体所起到的作用。随着数值计算方法的不断发展及计算资源的普及,数值模拟逐渐成为解决地学问题的一种重要方法[16-19],通过设置不同的初始条件,数值模拟可以得到对应构造背景下的地壳形变场,从而帮助厘清不同块体在当今天山构造变形中所起的作用,明确现今天山构造变形的动力学机制。

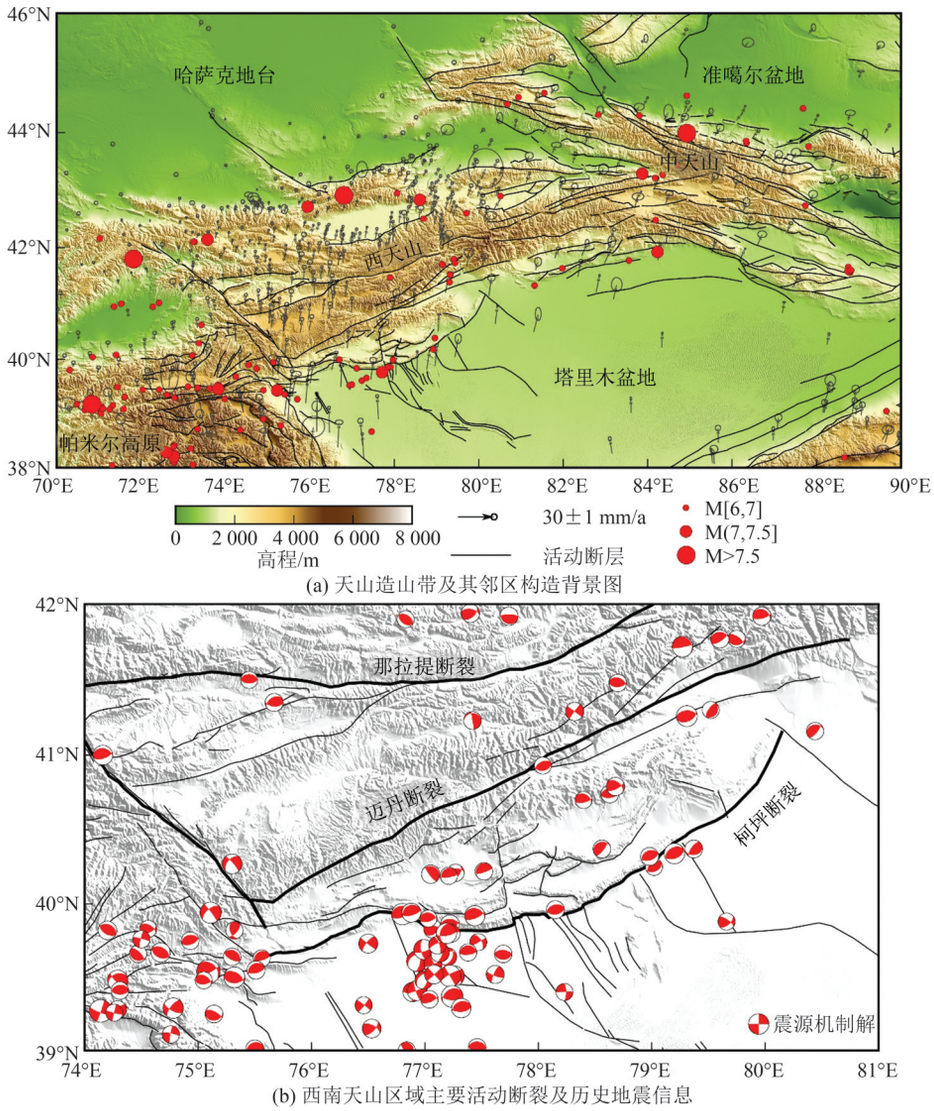


图1 天山地区构造背景及历史地震信息[20]

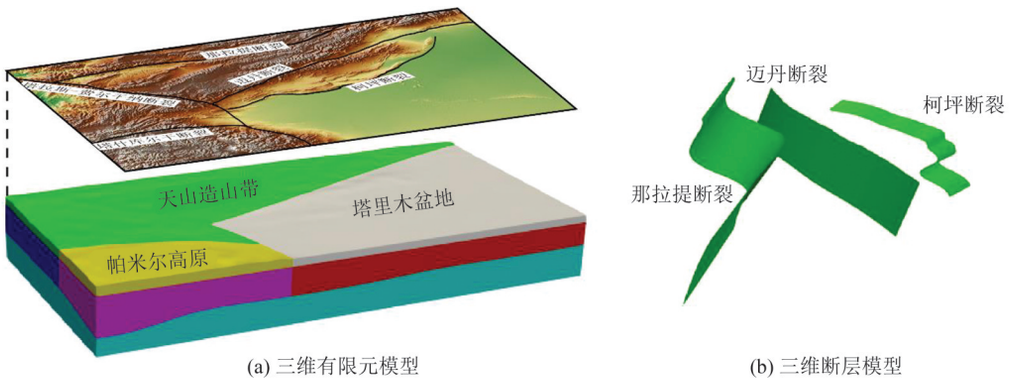
Fig. 1 Tectonic Setting and Historical Earthquake Information of the Tianshan Region[20]

本文基于活动块体划分并充分考虑西南天山区域的主要活动断裂,结合岩石圈分层结构参数,以GPS观测得到的区域地壳水平运动速率为主要约束,构建西南天山区域的三维弹性-粘弹性有限元模型,通过数值模拟的方式探究西南天山断层系统的应变积累模式,定量地给出了断层应力的变化率,为未来区域地震活动性与地震危险性的评估提供依据。通过对比模型在帕米尔和塔里木块体的单独挤压和共同作用下的变形特征,明确帕米尔高原和塔里木盆地的构造推挤在西南天山现今构造变形中所扮演的角色。

1 三维弹性-粘弹性模型设置

1.1 三维弹性-粘弹性模型建立

本文选取西南天山及其相邻区域(72.5°E~81.5°E,38°N~42.5°N)为主要研究区域,建立了三维有限元模型[21]。结合区域地质构造背景,将模型划分为3个构造单元:天山造山带、塔里木盆地和帕米尔高原(见图2(a))。模型纵向深度为80 km,划分为上地壳、中下地壳和地幔,莫霍面深度由Crust 1.0插值得到[22],其中上地壳设置为弹性,中下地壳与地幔设置为粘弹性,图2(a)中不同颜色块体表示不同的构造单元及其分层。各层介质的材料参数以及黏度主要参考前人地震层析成像的研究成果[23-24],具体参数如表1所示,总体来看,塔里木盆地相较于天山造山带和帕米尔高原具有更强的刚性。模型地表由SRTM3地形数据降采样得到,并根据断层地表迹线以固定倾角向下延拓的方式构建了三维断层模型(见图2(b)),包括西南天山区域3条主要活动断裂:柯坪推覆构造的前缘断裂——柯坪断裂、



(a) 三维有限元模型　　(b) 三维断层模型

图 2　三维有限元模型

Fig. 2　Three-Dimensional Finite Element Model

表 1　模型所用分层介质的属性

Table 1　Properties of the Layered Medium Used in the Proposed Model

块体	横波波速/(m·s^{-1})	纵波波速/(m·s^{-1})	密度/(kg·m^{-3})	黏度/(Pa·s)
天山上地壳	3 520	6 000	2 720	5×10^{20}
天山中下地壳	3 750	6 450	2 820	
塔里木盆地上地壳	3 550	6 100	2 740	1×10^{22}
塔里木盆地中下地壳	3 820	6 600	2 865	
帕米尔高原上地壳	3 450	6 000	2 700	5×10^{20}
帕米尔高原中下地壳	3 650	6 320	2 800	
地幔	4 340	8 250	3 390	5×10^{22}

天山造山带与塔里木盆地边界的迈丹断裂以及天山造山带内部的那拉提断裂。各条断层的倾角参考了前人研究[18,25-26],其中柯坪断裂的倾角为 30°,最深处可达上地壳底部,迈丹断裂和那拉提断裂的倾角分别为 70°和 55°,最深处可达下地壳底部。

模型地表设置为自由表面,4 条垂直边界与底边界的边界条件均使用狄利克雷边界条件,其中底边界在垂向上固定不动,在水平方向上自由滑动;4 条垂直边界在垂向上不设置约束使其自由滑动,在水平方向上使用 GPS 观测值进行约束。使用 Shen 等[27]提出的空间离散大地测量数据最优插值方法,将 1999—2015 年欧亚参考系下平均 GPS 速度场数据[28]插值到模型边界节点上,作为模型边界的速度约束(见图 3),由于缺乏进一步的数据约束,设置边界速度不随深度发生变化[16,18]。模型使用四面体单元进行网格划分,断层面的网格长度设置为 1 km,模型其余部分网格长度为 5 km,模型总计包含 563 110 个节点与 3 259 586 个四面体单元。

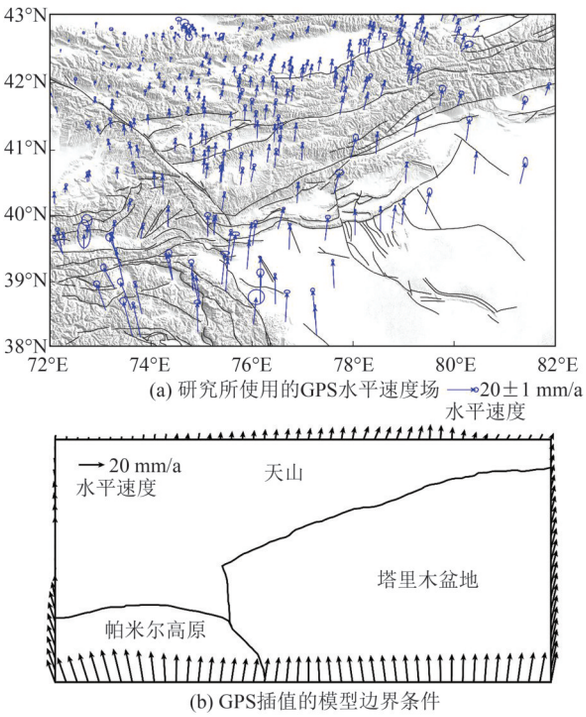
1.2　块体独立推挤实验

为了明确塔里木盆地和帕米尔高原在天山现今构造变形中的作用,设置了塔里木盆地与帕米尔高原分别独立推挤天山的数值模拟实验。在块体独立推挤实验中,模型的北部边界在南北向上固定且不产生滑动,等效北部哈萨克地台和准噶尔盆地的阻挡效果,在东西向与垂向上自由滑动且不设置约束。在帕米尔高原独立推挤的数值模拟实验中,根据 GPS 数据插值得到的速度场设置模型中帕米尔高原所在边界的边界条件,剩余边界在所有方向上均自由滑动(见图 4(a)),即模型剩余节点的运动完全由帕米尔高原边界的推挤所驱动。而在塔里木盆地独立推挤的数值模拟实验中,塔里木块体边界使用 GPS 数据插值的速度场约束,其余边界均自由滑动(见图 4(b))。通过两个块体独立推挤所得到的地表速度场与真实的 GPS 观测值对比,推断帕米尔高原与塔里木盆地在现今天山构造变形中的作用范围。

2　数值模拟结果

2.1　地壳形变特征与区域主应变率

研究区域的模型计算速度与实际 GPS 观测值对比如图 5 所示,整体来看模拟结果与实际 GPS 观测值吻合基本较好,东西向分量的均方根误差(root mean square error, RMSE)为 1.5 mm/a,南北向分量的 RMSE 为 3.2 mm/a。子图为观测值与模拟值残差的统计直方图,在东方向与北方向



(a) 研究所使用的GPS水平速度场

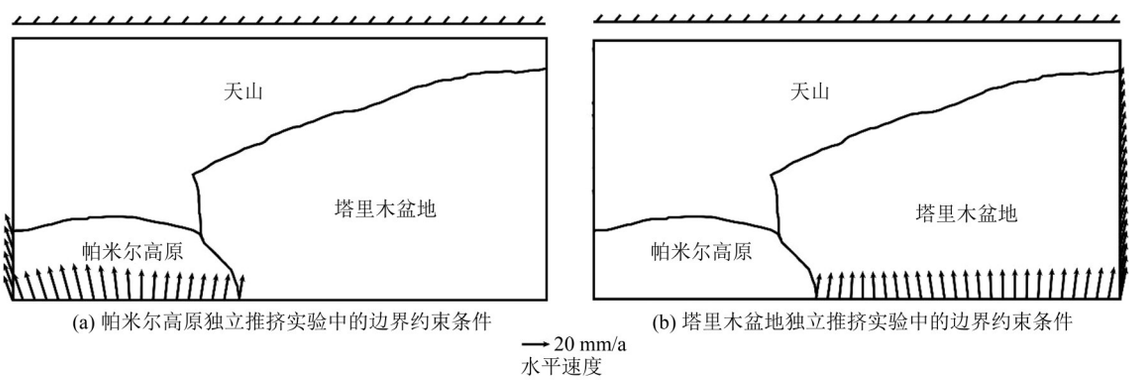
(b) GPS插值的模型边界条件

图3 模型所使用的GPS速度场与运动学边界约束

Fig. 3 GPS Velocity Field and Kinematic Boundary Constraints Used in the Model

上的结果均呈正态分布。计算得到的地壳形变特征与GPS观测的一致,整体以南北向形变为主,形变量最大的区域位于帕米尔高原,最大约20 mm/a。天山内部形变由南向北逐渐减小,最终在北部哈萨克地台和准噶尔盆地的阻挡下减小至2~5 mm/a。模拟与观测误差较大的区域主要位于帕米尔高原与塔里木盆地交界处附近,前人研究表明,帕米尔高原地区下地壳可能存在与上地壳不同的水平流动速度[29],而研究所使用的模型在深度上速度是一致的,可能是导致误差较大的原因。

模拟计算得到的研究区域内水平主应变速率如图6所示,研究区域整体上以南北向的压缩和东西向的拉张为主,其中主压应变要远大于主拉应变。天山山体内部以近南北向挤压为主,与天山地区现今南北向的地壳缩短增厚的构造变形一致,天山山脉内部的断层主要为北东东走向,这种应变会在断层上产生逆冲以及左旋走滑的剪切分量。具体来看,西南天山的平均压缩应变率在3.5×10^{-8}/a左右,最大压缩应变率在与塔里木盆地交界处可达6.3×10^{-8}/a,而到东部逐渐减小到2.4×10^{-8}/a左右。帕米尔高原的应变速率最高,平均压缩应变率可达7.0×10^{-8}/a,方向与天山区域相比更偏北北西走向。南部的塔里木盆地由于其具有较强的刚性,区域主应变率为1.0×10^{-8}/a,远小于天山区域和帕米尔高原。整体来看,研究区域的主应变率呈现西强东弱的趋势。



(a) 帕米尔高原独立推挤实验中的边界约束条件

(b) 塔里木盆地独立推挤实验中的边界约束条件

图4 块体独立推挤数值模拟实验中所使用的边界约束条件

Fig. 4 Boundary Constraint Conditions Used in the Numerical Simulation Experiments of Independent Block Extrusion

2.2 断层应力积累速率

区域主应变率主要表现地壳整体的应变分布特征,定量地给出断层上的应力积累速率能够更好地为地震危险性评估提供依据。西南天山区域3条主要断层的剪切应力变化率如图7(a)所示,柯坪断裂的剪切应力积累主要集中在断层的西部以及中部,其中西部剪切应力变化速率最高,可达1.5 kPa/a,中部的剪切应力变化速率在1 kPa/a左右;迈丹断裂剪切应力变化同样呈现西高东低的趋势,西部变化率最大可达1.8 kPa/a,东部逐渐减小到0.9 kPa/a,与天山造山带内部水平主应变率变化趋势一致(见图6);那拉提断裂除东端以外整体剪切应力变化率均较高,平均大小约1.6 kPa/a。图7(b)为3条断层的正应力变化率,其中负值表示正应力为压缩方向。在帕米尔高原和塔里木盆地的挤压作用下,各个断裂带的正应力变化均为负值,即为压缩方向。柯坪断裂的平均正应力变化率约0.5 kPa/a,而那拉提断裂和迈丹断裂的平均正应力变化率都高达2 kPa/a左右。

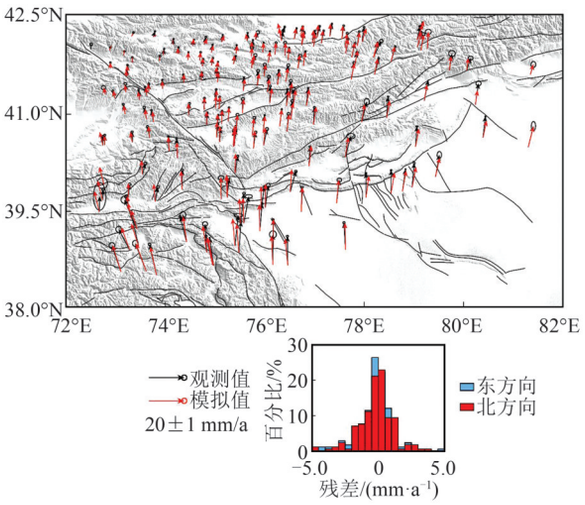


图 5　研究区域的模型计算速度与实际 GPS 观测值对比

Fig. 5　Comparison Between Calculated Velocities from Model and Actual GPS Observed Values in the Study Area

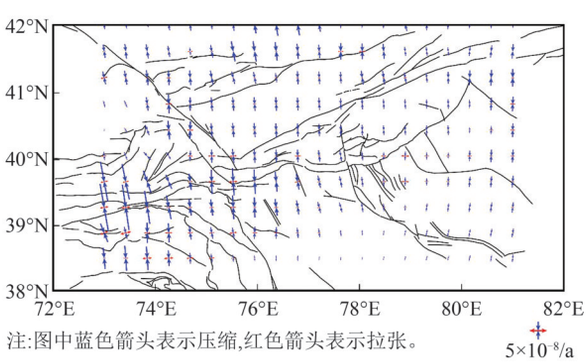


图 6　模拟计算得到的研究区域内水平主应变速率

Fig. 6　Horizontal Principal Strain Rate Derived from Numerical Simulation in the Study Area

2.3　块体独立推挤下的地壳形变特征

帕米尔高原独立推挤实验结果如图 8 所示。由图 8(a)可知,在帕米尔高原与塔里木盆地交界处以西,模拟值与观测值在运动方向和速度大小上均有较好的对应。由图 8(b)可知,在帕米尔高原与塔里木盆地交界处以西,模拟结果与观测结果也有较好的拟合,二者大部分站点的残差小于 3 mm/a,角度差基本在 10°以内;而在交界处以东,模拟值逐渐减小,角度逐渐转为东向(见图 8(a)),表明帕米尔高原的推挤对天山造山带产生了向东挤出的作用。

塔里木盆地独立推挤实验结果如图 9 所示。由图 9(a)可知,在塔里木盆地独立推挤的数值模拟实验中,由于在靠近塔里木块体边界处存在较强的数据约束,模拟值仅在此处与观测值有较好的吻合,剩余区域模拟值相较于实际观测均偏西北。由图 9(b)可知,在柯坪推覆体的北部,模拟与观测存在约 30°的角度差与 6~8 mm/a 的残差,

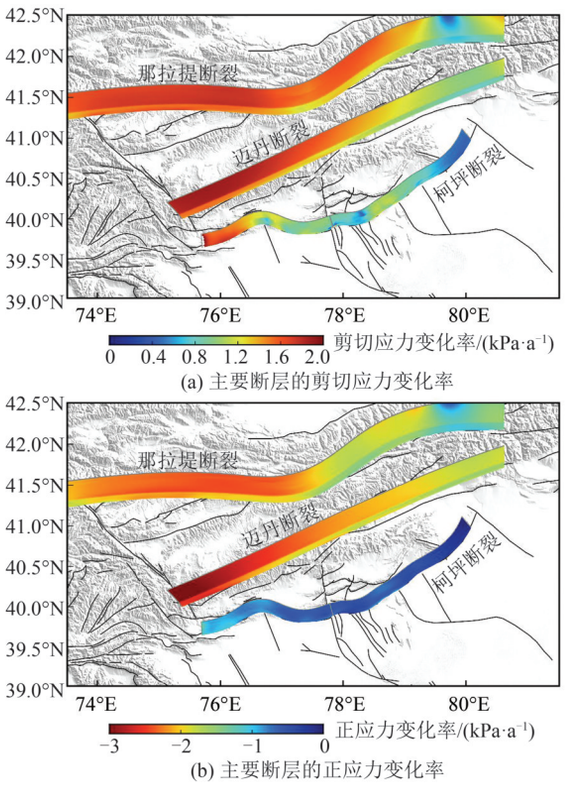


图 7　研究区域 3 条断层的剪切应力和正应力变化率

Fig. 7　Variation Rates of Shear Stress and Normal Stress on Three Faults in the Study Area

二者角度差向西逐渐增大,在模型的西边界达到 60°~80°。塔里木盆地边界的推挤在模型的西边界区域产生了较大的西向分量(见图 9(a)),但实际观测该处以南北向运动为主,西向分量较小。

3　讨论

3.1　区域地震危险性

1900 年以来,西南天山已发生 4 次 7 级以上地震,6 级以上地震活动的时间间隔平均为 2 a,地震活动十分频繁[30]。本文基于 GPS 观测,使用有限元模型模拟的方式获得了西南天山区域 3 条主要活动断层的应力积累的空间分布模式。相较于模拟直接得到的断层面的正应力与剪切应力,库仑应力能够更直观地表征断层破裂的趋势[31]。基于模拟得到的正应力与剪切应力计算 3 条断层上的库仑应力变化率 ΔC,计算公式为:

$$\Delta C = \Delta\tau + \mu'\Delta\sigma_n \tag{1}$$

式中,$\Delta\tau$ 为剪切应力变化率;μ' 为断层面有效摩擦系数,3 条断层的有效摩擦系数均假设为 0.4[26,32-33];$\Delta\sigma_n$ 为正应力变化率。3 条断层的库伦应力变化率如图 10 所示,整体上库仑应力均呈现增加的趋势,表明西南天山区域整体具有较高的

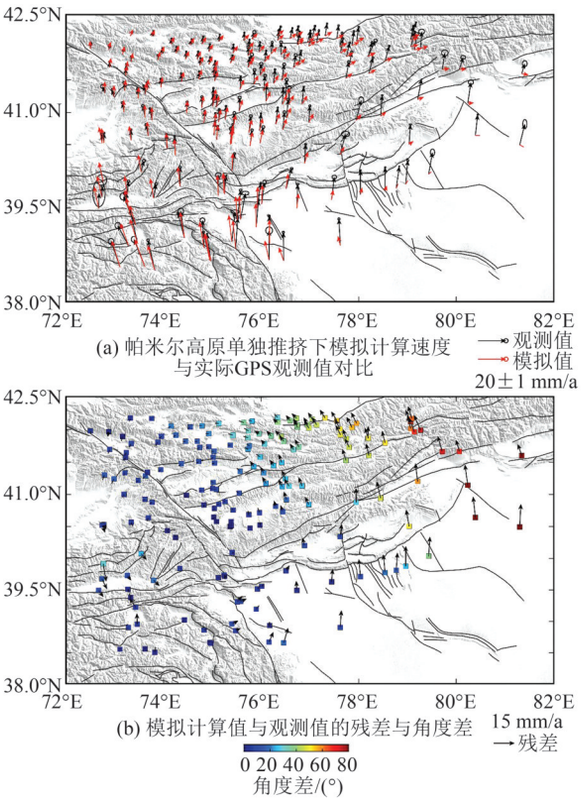


图8 帕米尔高原独立推挤实验结果

Fig. 8 Experimental Results of Independent Thrusting on the Pamir Plateau

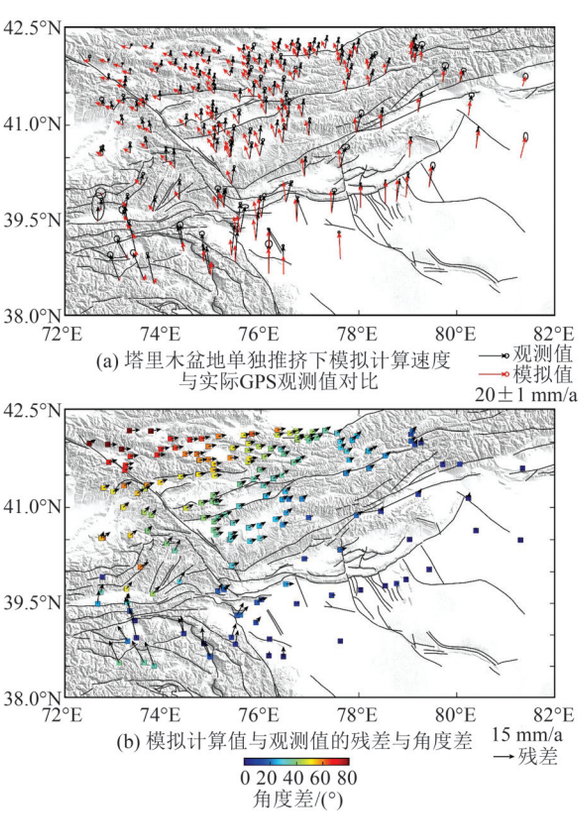


图9 塔里木盆地独立推挤实验结果

Fig. 9 Experimental Results of Independent Thrusting on the Tarim Basin

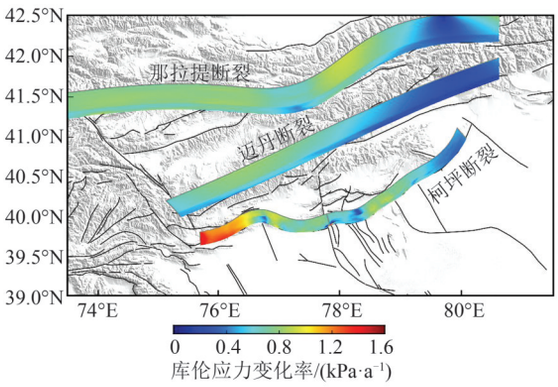


图10 3条断层的库仑应力变化率

Fig. 10 Coulomb Stress Change Rates of Three Faults

地震危险性,且库仑应力变化率表现为西强东弱,这与模拟得到的天山造山带内部主应变率的变化趋势一致。

新生代以来,西南天山不断地向南推覆扩展,形成了柯坪推覆体,这种山前薄皮推覆构造吸收了天山相当一部分的南北地壳缩短量[7,12,34]。GPS观测数据表明柯坪推覆体的地壳缩短速率为1.45~3.70 mm/a,该形变量占据天山整体汇聚形变量的1/3以上,柯坪断裂作为柯坪推覆体的前缘断裂,承担了该区域大部分的形变[35]。以柯坪推覆体中部的皮羌断裂为界,东西柯坪存在明显的差异性形变,西柯坪相比东柯坪具有更大的地壳缩短速率,这种沿走向的形变速率差异被与褶皱垂直的皮羌断裂以左旋走滑的形式吸收释放[35]。模拟结果表明,柯坪推覆体南部的塔里木盆地推挤速率在东西向上的差异以及断层本身走向的变化是造成这种差异性形变的主要原因,这种差异性形变在断层能量积累上表现为柯坪断裂西部具有更高的应力积累速率。柯坪断裂的西端库仑应力变化率最大,高达1.5 kPa/a,中部的库仑应力变化率为0.8~1.0 kPa/a,是西南天山区域库仑应力变化率最大的断层。这种应力积累速率差异也与该地区的历史地震情况相吻合,西柯坪历史上地震频发,2020年曾发生伽师Mw 6.0地震[9],1996—2003年间,在伽师附近发生了12次6级地震[10]。由图1(b)可以看出,西柯坪地震数量远大于东柯坪,因此,柯坪断裂的西段具有更高的地震危险性。

天山造山带与塔里木盆地边界的迈丹断裂自晚第四纪以来有明显的活动迹象,地质调查结果显示,该断层具有1.19±0.25 mm/a的地壳缩短率以及1.56±0.64 mm/a的左旋走滑速率[26]。模拟得到的迈丹断裂西部库仑应力变化率为

0.8 kPa/a,库仑应力变化率向东部逐渐减小。2024年1月23日,迈丹断裂东部发生7.1级地震,此次地震的断层运动特征为逆冲兼具左旋走滑[11],与该处的构造变形一致,发生地震的断层区段及其附近区域自1969年以来还发生过多次6级以上地震。虽然模拟得到的发震断层段的库仑应力变化率为0.2 kPa/a,比迈丹断裂西部的小,但发震断层段剪切应力变化率仍有1.0 kPa/a左右,断层积累能量的速率并不低,因此能够发生较大的地震。近50年来该发震断层段发生的多次6~7级地震使该处积累的应力得到了一定的释放,而迈丹断裂的中部到西部存在约200 km的大地震破裂空段,模拟显示该段具有更高的库仑应力变化率,且地质调查结果发现该段有多次古地震发生的特征,具备发生7.0级以上地震的构造条件[26,36],因此未来发生强震的危险性较高。

那拉提断裂除东端外整体库仑应力变化率均较高,尤其在中部断层拐折处,库仑应力变化率可达0.9 kPa/a。那拉提断裂最近一次较严重的地震为2012年的Ms 6.6新源地震[37],该断层西部附近于1992年还曾发生Ms 7.3 Suusamyr地震[38],历史地震事件也表明该区域具有发生较大地震的风险。GPS观测结果显示,那拉提断裂承担了天山内部1.3~2.9 mm/a的左旋走滑分量以及1.7~2.2 mm/a的地壳缩短量[12],是调节天山内部构造变形的重要断裂。从库仑应力计算结果来看,那拉提断裂整体上库仑应力呈现不断增加的趋势,未来发生强震的可能性较高,应持续关注。

总体来看,西南天山区域主要断裂带中,柯坪断裂的西段和中段、迈丹断裂的西段以及那拉提断裂的中段的库仑应力变化率均较大,未来强震发生的可能性较高。其中柯坪断裂剪切应力的变化率虽然小于迈丹断裂与那拉提断裂,但其西段具有研究区域内最高的库仑应力变化率,这主要是因为柯坪断裂为低倾角断层,倾角越小越不利于正应力的积累。这种较低的正应力表明断层强度较弱,因此断层更容易发生破裂,但其断层强度较低也可能使断层潜在最大震级地震的上限较低[39],这也与柯坪断裂附近6级左右地震频发的情况相符合。

3.2　天山构造变形的动力学机制

天山构造变形的主要驱动力来源于欧亚板块和印度板块的碰撞挤压,但其具体的构造变形过程和动力学机制一直存在争议。AVOUAC等[7]根据古地磁模型计算结果,推断塔里木盆地的顺时针旋转是天山地壳隆升的主要动力源。张培震等[13]则认为帕米尔高原强烈的北向推挤是天山构造变形的驱动力,虽然塔里木盆地的顺时针旋转对天山构造变形也有影响,但帕米尔高原的推挤起主要作用。地震层析成像研究揭示的天山地区深部岩石圈的陆内俯冲过程也表明,帕米尔高原和塔里木盆地均在天山现今构造变形中起到了重要作用[40-41]。因此,天山地区的构造变形是帕米尔高原和塔里木盆地推挤的共同结果已成为学界的共识,但究竟二者谁起到主导作用以及具体的作用范围仍不清楚。目前对于二者推挤的动力学过程的研究大多处于定性分析的阶段,本文通过数值模拟对塔里木盆地和帕米尔高原的模型边界分别施加基于GPS观测的运动学边界条件约束,得到了两个块体独立推挤下天山的地壳形变场,明确了二者的作用范围以及在天山变形中起到的作用。

在帕米尔高原独立推挤的数值模拟实验中,在帕米尔高原与塔里木盆地交界以西,模拟结果与观测数据具有较好的一致性(见图8(a))。帕米尔高原与塔里木盆地交界以西的85个GPS台站中,帕米尔高原与塔里木盆地整体推挤实验所得到的RMSE为2.6 mm/a,而帕米尔块体独立推挤实验所得到的RMSE为2.9 mm/a,二者相差不大,即在帕米尔高原独立推挤下就能较好地还原该区域的地壳形变特征,这表明帕米尔高原的推挤在天山的构造变形中起主要作用。

在塔里木盆地的独立推挤下,模拟得到的地壳形变场与GPS观测仅在具有运动学约束的模型边界附近具有较好的拟合,而其余部分均有较大的残差(见图9(a))。研究区域中帕米尔高原与塔里木盆地交界以东,模拟值与观测值的残差分布(见图9(b))与帕米尔高原独立推挤数值实验中得到的该区域的地壳形变场基本一致,表明该区域塔里木盆地独立推挤产生的地壳形变只有与帕米尔高原推挤产生的东向挤出相结合才能与观测有更好的拟合,因此推测研究区域中部与东部受到塔里木盆地的推挤与帕米尔高原东向挤出的共同作用。以块体整体推挤实验结果为参考,使用研究区域的东北部、位于天山内部的39个站点数据计算塔里木盆地和帕米尔高原推挤的贡献权重。结果表明,塔里木盆地推挤在北方向上的平均贡献权重为72.4%,帕米尔高原在北方向上的平均贡献权重为29.1%。而在东方向上,塔里木

盆地推挤的平均贡献权重为-106.2%,即推挤在东西向上所产生的形变与实际形变方向相反,帕米尔高原推挤的平均贡献权重为208.7%。

块体独立推挤实验与整体推挤实验的对比结果表明,帕米尔高原与塔里木盆地对于天山构造变形的作用范围可以分为两个区域,在帕米尔高原与塔里木盆地交界以西(即75°E以西),帕米尔高原的北向推挤在天山变形中起主导作用;而在交界以东,天山构造变形是帕米尔高原北向推挤和塔里木盆地顺时针旋转共同作用的结果,其中塔里木盆地的顺时针旋转是天山南北向变形的主要驱动力,而帕米尔高原的推挤主要起到东向挤出的作用。本文所得到的帕米尔高原和塔里木盆地推挤对天山变形的作用范围,与牛之俊等[42]通过分析天山地壳缩短速率变化的方式所得到的划分结果一致,但牛之俊等[42]在75°E以东的地区仅强调了塔里木盆地顺时针旋转的作用,而本文数值模拟实验的结果表明帕米尔高原在该区域产生的东向挤出也起到了重要作用。

4 结 语

本文基于天山地区的地质构造背景,以GPS观测为约束,建立了三维弹性-粘弹性有限元模型,计算得到了西南天山造山带及邻近区域的地壳形变、主应变率和3条主要活动断层的应力变化率,所得结论如下:

1)西南天山地区整体应力场以南北向挤压为主,与天山构造变形整体以压缩变形为主的情况相吻合,天山内部平均应变率为3.5×10^{-8}/a。

2)柯坪断裂的西段与中段、迈丹断裂的西段以及那拉提断裂的中段属于库仑应力增加的高值区,在未来发生强震的可能性较高。其中柯坪断裂的西段库仑应力增长最快,高达1.5 kPa/a。

3)帕米尔高原与塔里木盆地独立推挤的数值模拟实验结果表明,西南天山的中部与东部受到塔里木盆地推挤与帕米尔高原向东挤出的共同作用,而西部主要受帕米尔高原的北向推挤作用,塔里木盆地作用有限。

参 考 文 献

[1] ALLEN M B, VINCENT S J, WHEELER P J. Late Cenozoic Tectonics of the Kepingtage Thrust Zone: Interactions of the Tien Shan and Tarim Basin, Northwest China[J]. *Tectonics*, 1999, 18(4): 639-654.

[2] XIAO W J, SONG D F, WINDLEY B F, et al. Accretionary Processes and Metallogenesis of the Central Asian Orogenic Belt: Advances and Perspectives[J]. *Science China Earth Sciences*, 2020, 63(3): 329-361.

[3] 孔祥艳, 吴建平, 房立华, 等. 利用面波频散和接收函数联合反演中国境内天山及邻区的地壳上地幔速度结构[J]. 地震地质, 2020, 42(4): 844-865.
KONG Xiangyan, WU Jianping, FANG Lihua, et al. Joint Inversion of Surface Wave Dispersion and Receiver Functions for Crustal and Uppermost Mantle Structure Beneath Chinese Tienshan and Its Adjacent Areas[J]. *Seismology and Geology*, 2020, 42(4): 844-865.

[4] MOLNAR P, TAPPONNIER P. 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[J]. *Science*, 1975, 189(4201): 419-426.

[5] TAPPONNIER P, MOLNAR P. Active Faulting and Tectonics in China[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977, 82(20): 2905-2930.

[6] 张志斌, 梁晓峰, 周贝贝, 等. 北天山中段地壳三维速度结构与地震重定位[J]. 地震地质, 2021, 43(5):1292-1310.
ZHANG Zhibin, LIANG Xiaofeng, ZHOU Beibei, et al. Three-Dimensional Seismic Velocity Structure of the Middle Part of North Tianshan Mountains, Xinjiang Based on Seismic Relocation and Local Seismic Tomography[J]. *Seismology and Geology*, 2021, 43(5):1292-1310 .

[7] AVOUAC J P, TAPPONNIER P, BAI M, et al. Active Thrusting and Folding Along the Northern Tien Shan and Late Cenozoic Rotation of the Tarim Relative to Dzungaria and Kazakhstan[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1993, 98(B4): 6755-6804.

[8] FU B H, LIN A M, KANO K I, et al. Quaternary Folding of the Eastern Tian Shan, Northwest China[J]. *Tectonophysics*, 2003, 369(1/2): 79-101.

[9] YAO Y, WEN S Y, LI T, et al. The 2020 Mw 6.0 Jiashi Earthquake: A Fold Earthquake Event in the Southern Tian Shan, Northwest China[J]. *Seismological Research Letters*, 2021, 92(2A): 859-869.

[10] 朱爽, 郭南男, 庞亚瑾. 西南天山柯坪冲断带断层形变特征及地震危险性[J]. 地震地质, 2025, 47(2):448-462.
ZHU Shuang, GUO Nannan, PANG Yajin. Study on Fault Deformation Characteristics and Seismic Hazard in the Keping Thrust Belt[J]. *Seismology*

and Geology, 2025, 47(2):448-462.

[11] 能懿菡, 韩炳权, 刘振江, 等. InSAR观测揭示的2024年新疆乌什Mw 7.0地震地表形变及发震断层模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(2): 368-376.
NAI Yihan, HAN Bingquan, LIU Zhenjiang, et al. Coseismic Surface Displacement and Source Model of the 2024 Mw 7.0 Wushi(Xinjiang, China) Earthquake Revealed by InSAR Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(2): 368-376.

[12] WU C Y, ZHANG P Z, ZHANG Z Q, et al. Slip Partitioning and Crustal Deformation Patterns in the Tianshan Orogenic Belt Derived from GPS Measurements and Their Tectonic Implications[J]. *Earth-Science Reviews*, 2023, 238: 104362.

[13] 张培震, 邓起东, 杨晓平, 等. 天山的晚新生代构造变形及其地球动力学问题[J]. 中国地震, 1996, 12(2): 127-140.
ZHANG Peizhen, DENG Qidong, YANG Xiaoping, et al. Late Cenozoic Tectonic Deformation and Mechanism Along the Tianshan Mountain, Northwestern China[J]. *Earthquake Research in China*, 1996, 12(2): 127-140.

[14] MOLNAR P, GHOSE S. Seismic Moments of Major Earthquakes and the Rate of Shortening Across the Tien Shan[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(16): 2377-2380.

[15] 党亚民, 陈俊勇, 张燕平. 新疆地区现今地壳运动[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(S1): 133-136.
DANG Yamin, CHEN Junyong, ZHANG Yanping. Present-Day Crustal Deformation in Xinjiang[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 28(S1): 133-136.

[16] LEI X Q, CHEN Y P, ZHAO J M, et al. Modelling of Current Crustal Tectonic Deformation in the Chinese Tianshan Orogenic Belt Constrained by GPS Observations[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2010, 7(4): 431-442.

[17] 瞿伟, 王运生, 徐超, 等. 渭河盆地构造应力场有限元数值模拟[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(12): 1749-1755.
QU Wei, WANG Yunsheng, XU Chao, et al. Tectonic Stress Field of the Weihe Basin Using the Finite Element Method[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(12): 1749-1755.

[18] 王子韬, 张怀, 孟秋, 等. 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[J]. 中国科学:地球科学, 2022, 52(6): 1170-1180.
WANG Zitao, ZHANG Huai, MENG Qiu, et al. Finite Element Simulation of Deformation and Stress Change of Keping-Kemin Fault System in Southwest Tianshan Mountains[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2022, 52(6): 1170-1180.

[19] 陈宇, 陈鑫垄, 索之辉, 等. 卫星观测约束下的地下燃空区时空演化数值模拟研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(8): 1527-1541.
CHEN Yu, CHEN Xinlong, SUO Zhihui, et al. Numerical Simulation Research on the Spatiotemporal Evolution of Underground Combustion-Affected Areas Constrained by Satellite Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(8): 1527-1541.

[20] EKSTRÖM G, NETTLES M, DZIEWOŃSKI A M. The Global CMT Project 2004—2010: Centroid-Moment Tensors for 13, 017 Earthquakes[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2012, 200/201: 1-9.

[21] AAGAARD B T, KNEPLEY M G, WILLIAMS C A. A Domain Decomposition Approach to Implementing Fault Slip in Finite-Element Models of Quasi-Static and Dynamic Crustal Deformation[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(6): 3059-3079.

[22] LASKE G, MASTERS G, MA Z T, et al. CRUST1.0: An Updated Global Model of Earth's Crust[J]. *Geophysical Research Abstracts*, 2012, 14: EGU2012-3743-1.

[23] WANG C Y, YANG Z E, LUO H, et al. Crustal Structure of the Northern Margin of the Eastern Tien Shan, China, and Its Tectonic Implications for the 1906 M~7.7 Manas Earthquake[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 223(1/2): 187-202.

[24] 孙玉军, 董树文, 范桃园, 等. 中国大陆及邻区岩石圈三维流变结构[J]. 地球物理学报, 2013, 56(9): 2936-2946.
SUN Yujun, DONG Shuwen, FAN Taoyuan, et al. 3D Rheological Structure of the Continental Lithosphere Beneath China and Adjacent Regions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(9): 2936-2946.

[25] LÜ L X, LI T, CHEN Z X, et al. Active Structural Geometries and Their Correlation with Moderate (M 5.5~7.0) Earthquakes in the Jiashi-Keping Region, Tian Shan Southwestern Front[J]. *Tectonics*, 2021, 40(12): e2021TC006760.

[26] WU C Y, ZHENG W J, ZHANG P Z, et al. Oblique Thrust of the Maidan Fault and Late Quaternary Tectonic Deformation in the Southwestern Tian

Shan, Northwestern China[J]. *Tectonics*, 2019, 38(8): 2625-2645.

[27] SHEN Z K, WANG M, ZENG Y H, et al. Optimal Interpolation of Spatially Discretized Geodetic Data[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, 105(4): 2117-2127.

[28] ZHENG G, WANG H, WRIGHT T J, et al. Crustal Deformation in the India-Eurasia Collision Zone from 25 Years of GPS Measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(11): 9290-9312.

[29] 董培育, 胡才博, 石耀霖. 青藏高原及周边区域地表长期变形数值模拟[J]. 地震地质, 2016, 38(2): 410-422.
DONG Peiyu, HU Caibo, SHI Yaolin. Numerical Simulation of Long-Term Deformation of Tibetan Plateau and Surrounding Area[J]. *Seismology and Geology*, 2016, 38(2): 410-422.

[30] SLOAN R A, JACKSON J A, MCKENZIE D, et al. Earthquake Depth Distributions in Central Asia, and Their Relations with Lithosphere Thickness, Shortening and Extension[J]. *Geophysical Journal International*, 2011, 185(1): 1-29.

[31] STEIN R S, LISOWSKI M. The 1979 Homestead Valley Earthquake Sequence, California: Control of Aftershocks and Postseismic Deformation[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1983, 88(B8): 6477-6490.

[32] HE Y Q, WANG T, FANG L H, et al. The 2020 Mw 6.0 Jiashi Earthquake: Coinvolvement of Thin-Skinned Thrusting and Basement Shortening in Shaping the Keping-Tage Fold-and-Thrust Belt in Southwestern Tian Shan[J]. *Seismological Research Letters*, 2022, 93(2A): 680-692.

[33] 杨九元, 温扬茂, 许才军, 等. InSAR观测揭示的2024年1月新疆乌什Ms 7.1地震同震形变及滑动分布[J]. 地球物理学报, 2025, 68(7): 2532-2543.
YANG Jiuyuan, WEN Yangmao, XU Caijun, et al. Coseismic Deformation and Slip Distribution of the January 2024 Xinjiang Wushi Ms 7.1 Earthquake Revealed by InSAR Observations[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2025, 68(7): 2532-2543.

[34] YIN A, NIE S, CRAIG P, et al. Late Cenozoic Tectonic Evolution of the Southern Chinese Tian Shan[J]. *Tectonics*, 1998, 17(1): 1-27.

[35] LI J, YAO Y, LI R, et al. Present-Day Strike-Slip Faulting and Thrusting of the Kepingtage Fold-and-Thrust Belt in Southern Tianshan: Constraints from GPS Observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(11): e2022GL099105.

[36] 沈军, 吴传勇, 陈建波. 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[J]. 震灾防御技术, 2008, 3(2): 101-110.
SHEN Jun, WU Chuanyong, CHEN Jianbo. Basic Features of the Major Thrust Fault-Fold Tectonics and Determination of Potential Earthquake Source in Xinjiang[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2008, 3(2): 101-110.

[37] 李志海, 郑勇, 谢祖军, 等. 2012年6月30日新疆新源-和静M_S 6.6地震发震构造初步研究[J]. 地球物理学报, 2014, 57(2): 449-458.
LI Zhihai, ZHENG Yong, XIE Zujun, et al. A Preliminary Study of Seismogenic Structure for the Xinyuan-Hejing, Xinjiang M_S 6.6 Earthquake of June 30, 2012[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(2): 449-458.

[38] MELLORS R J, VERNON F L, PAVLIS G L, et al. The Ms=7.3 1992 Suusamyr, Kyrgyzstan, Earthquake: 1. Constraints on Fault Geometry and Source Parameters Based on Aftershocks and Body-Wave Modeling[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1997, 87(1): 11-22.

[39] NEELY J S, STEIN S. Why Do Continental Normal Fault Earthquakes Have Smaller Maximum Magnitudes[J]. *Tectonophysics*, 2021, 809: 228854.

[40] LEI J S, ZHAO D P. Teleseismic P-Wave Tomography and the Upper Mantle Structure of the Central Tien Shan Orogenic Belt[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2007, 162(3/4): 165-185.

[41] SIPPL C, SCHURR B, TYMPEL J, et al. Deep Burial of Asian Continental Crust Beneath the Pamir Imaged with Local Earthquake Tomography[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 384: 165-177.

[42] 牛之俊, 游新兆, 杨少敏. 利用GPS分析天山现今地壳形变特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(2): 1-9.
NIU Zhijun, YOU Xinzhao, YANG Shaomin. Analysis of Contemporary Crustal Deformation Characteristics with GPS Data of Tianshan Mountain[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2007, 27(2): 1-9.