

孙明志, 谭凯, 鲁小飞, 等. 2022. 天山地区现今地壳形变及构造应力的三维数值模拟[J]. 地震研究, 45(4): 535-542, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0052.

Sun M Z, Tan K, Lu X F, et al. 2022. Three-dimensional numerical simulation of the present crustal deformation and the tectonic stress field in the Tianshan region [J]. *Journal of Seismological Research*, 45(4): 535-542, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0052.

## 天山地区现今地壳形变及构造应力的三维数值模拟\*

孙明志, 谭凯<sup>✉</sup>, 鲁小飞, 张彩虹, 李琦, 刘志军

(中国地震局地震大地测量重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 根据天山地区活动断裂带分布和区域流变结构等资料, 建立该地区弹性均匀分层、黏弹性均匀分层、黏弹性非均匀分层三维有限元块体运动断层位错模型。利用 GPS 观测结果作为边界约束, 附加断裂闭锁深度和滑移速率约束, 模拟计算天山地区的地壳形变场及构造应力场, 定量分析其大小、分布形态及特征, 探讨天山地区地壳运动变形的运动学机制。结果表明: 运用这 3 种模型模拟得到的地表速度场均与实测 GPS 结果吻合较好, 并且最符合实际情况的黏弹性非均匀分层模型得到了最优的模拟结果。与改变模型纵向介质分层厚度相比, 黏弹性效应对模拟地表速度场结果的影响更为显著, 黏弹性模型提高了对震间地表形变的拟合程度。计算结果表明, 天山地区从西向东、从南到北汇聚速率呈递减态势。同时, 研究区上地壳模拟应力场以近 N-S 向水平挤压应力为特征, 与天山地区地壳整体以水平缩短和垂向隆升的实际情况相一致。

**关键词:** 天山; 地壳形变; 应力场; 有限元数值模拟

**中图分类号:** P313.725 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2022)04-0535-08

doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0052

### 0 引言

天山山系绵延于中亚腹地, 全长达 2 500 km, 南北宽 250~400 km, 是世界上最大、最活跃的陆内造山带(邓起东等, 2000; Vinnik *et al.*, 2002)。新生代以来, 在印度与欧亚板块的碰撞及两侧盆地楔入背景下, 天山山体复活隆升, 两侧盆地凹陷, 发生了强烈的地壳变形, 发育了一系列断裂带, 控制了一系列强震(Molnar, Tapponnier, 1975; 张培震等, 1996)。研究天山地区的地壳形变与应力分布特征, 对理解该地区构造变形的运动学机制及地震成因, 分析未来潜在地震危险性有重要的科学意义。

大量学者利用 GPS 等大地测量资料, 采用插值方法、弹性位错模型等对天山地区的构造运动特征进行了研究, 得到了一系列十分有价值的研究成果(王琪等, 2000; 牛之俊等, 2007; 王晓强等, 2007; 杨少敏等, 2008; 王伟等, 2014)。随着计算机技术和数值计算理论的发展, 数值模拟逐渐成为研究地学问题的重要手段。与传统研究方法相比, 数值模拟体现出一定的计算优势。有限元数值模拟以较为客观的模型架构和各种地质、地震及大地测量资料为基础, 可以兼顾整个区域横向及纵向上物质的非均匀性, 由此可以得到更为准确、细致的构造运动特征(刘峡, 2007)。

近年来不少学者对天山地区的构造变形特征进行了数值模拟研究, 如 Qiu 等(2009)利用有

\* 收稿日期: 2021-12-14.

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1503605)资助.

第一作者简介: 孙明志(1997-), 硕士研究生在读, 主要从事 GNSS 数据和有限元数值模拟的地壳形变研究.

E-mail: mz\_sun@126.com.

✉ 通讯作者简介: 谭凯(1972-), 研究员, 主要从事 GNSS 数据处理与地壳形变研究. E-mail: whgpstan@163.com.

限元模拟西南天山与帕米尔—西昆仑之间的汇聚趋势, 得出了汇聚边界向北、向东南延伸的结论, 但其模型没有考虑断裂的影响; 雷显权等 (2011) 采用非连续接触分析方法模拟天山地区的地壳运动变形, 发现地壳运动速度由西向东、由南向北逐渐减小, 然而其建立的天山中段二维弹性薄片模型, 不能考虑复杂介质分布情况, 在空间上具有一定的局限性; 王子韬等 (2020) 通过有限元计算了天山区域主要断裂带弹性应变能密度增加速率及应力积累速率, 发现天山的断层和地震活动性主要受控于近南北向的主压应力, 其建立的二维平面弹性模型将断层处理为连续变形的软弱带, 不能很好地体现断裂带的滑动特征。

物理模型与地球实际情况的符合程度和精细化程度可能会帮助我们提高对地壳运动和地震活动的了解。因此, 本文纳入天山地区主要活动断裂, 根据天山地区的地块构造、活动断裂带分布和流变结构等资料, 建立了 1 种弹性模型和 2 种黏弹性模型, 共 3 种不同的三维块体运动断层位错模型。在 GPS 地壳运动观测结果的约束下, 附加断层滑动速率和闭锁深度约束, 使用有限元程序 Pylith (Aagaard *et al.*, 2017) 模拟天山地区的地壳运动变形, 讨论岩石圈纵向分层和黏弹性效应对模拟地表速度场结果的影响, 计算获得研究区地壳速度场及应力场, 并分析其量值大小、分布形态及特征。

## 1 三维有限元模型的建立

### 1.1 几何模型构建

考虑到天山地区的 GPS 测点分布及地震活动性 (图 1), 将研究区选取为 ( $75^{\circ} \sim 94^{\circ}\text{E}$ ,  $38^{\circ} \sim 47^{\circ}\text{N}$ ), 包含了中国境内天山及境外天山的一部分, 区域面积约为  $1\,565\,124\text{ km}^2$ 。大陆板块内部以块体运动为特征 (邓起东等, 2002)。本文参考张培震等 (2003) 对西域活动地块区的划分, 将研究区划分为塔里木、天山和准噶尔 3 个活动块体。由一系列断裂耦合成的南天山山前断裂带和北天山山前断裂带为研究区内的重要活动构造带, 作为划分块体的边界带。

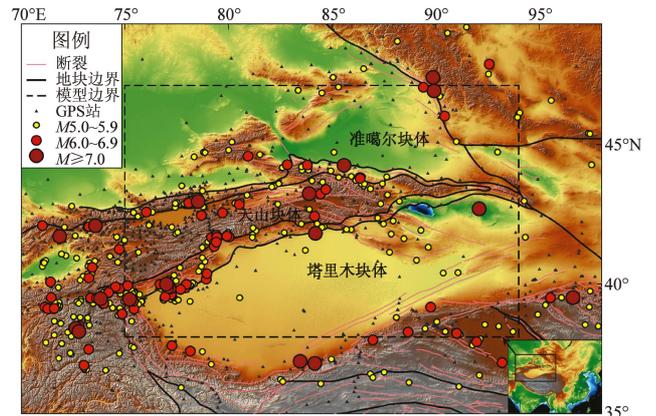


图 1 天山地区 GPS 测点分布与  $M \geq 5.0$  地震活动特征  
Fig. 1 Distribution of GPS stations and regional seismicity ( $M \geq 5.0$ ) in Tianshan region

模型厚度取为 80 km, 将纵向上分为上地壳、中地壳、下地壳和岩石圈上地幔 4 层介质, 以构建均匀分层模型和非均匀分层模型。均匀分层模型 4 层介质的厚度均为 20 km, 非均匀分层模型每层厚度依据全球地壳模型 Crust 1.0 (Laske *et al.*, 2012), 由每个块体内的不同单元的各层厚度取均值确定。由于纳入模型的断裂的倾角均较大 (冯先岳, 1986), 故将其作一定简化, 固定为  $70^{\circ}$ 。另外, 研究区的面积并不太大, 可以将研究区域的表面作为平面处理。将关键点经纬度坐标投影转换成笛卡尔坐标后使用 Coreform Trellis 软件建立几何模型并进行网格划分, 网格划分时断层面网格网边长设为 5 km, 剩余部分按照距断层面的距离以 1.07 的渐变梯度进行划分。均匀分层模型包含 985 052 个四面体单元, 177 174 个节点; 非均匀分层模型包含 1 121 486 个四面体单元, 201 561 个节点。图 2 展示了三维非均匀分层模型的几何图形及网格划分。

### 1.2 模型约束条件与物性参数

GPS 观测得到的天山地区现今地壳运动结果, 可为有限元模型提供可靠的运动学边界条件约束。Wang 和 Shen (2020) 收集和处理了多个来源的数据, 并整合以往研究中的速度解, 得到了统一参考框架下的中国大陆及周边区域 GPS 观测结果, 这些数据精度较高、密度较大, 还给出了中国境外天山西部的 GPS 速度结果。因此, 本文采用这些可靠且丰富的数据作为模型的边界条件。首先,

选取靠近边界且不处于断层处的 GPS 测点，将其 GPS 速度值赋给离站点最近的模型地表侧边界节点。然后，对已获得速度值的节点进行插值，并规定边界速度不随深度改变，进而获取剩余所有

侧面节点的速度值（图 3）。对于模型底面，规定其在垂向上的位移为零，水平向不作约束。最终，有限元模型上表面为自由表面，侧面在水平向上由 GPS 观测结果约束而在垂向上自由，下表面在垂向上固定而在水平向上自由。

考虑到断层活动在地壳运动变形过程中起到至关重要的作用（郑勇等，2007），除边界约束外，还需要对模型中的断层进行约束。Pyolith 软件通过自动创建“内聚单元”实现断层两侧顶点的相对运动，从而控制断层滑动，由此可以创建包含断层的不连续体模型。参考牛之俊等（2007）和刘代芹等（2016）给出的南、北天山断裂带的闭锁深度及滑动速率结果，经过网格搜索法实验，计算地表 GPS 站速度模拟值与观测值间的加权均方根误差，最终确定南天山断裂带的闭锁深度为 17 km，左旋走滑速率约束为 2.8 mm/a，85°E 以西区域挤压速率约束为 8.8 mm/a，85°E 以东区域挤压速率约束为 3.5 mm/a；北天山断裂带的闭锁深度确定为 16 km，左旋走滑速率约束为 2.1 mm/a，挤压速率约束为 3.3 mm/a。

Maxwell 流变包含与时间无关的弹性行为和与时间有关的黏性行为。Pyolith 软件由介质密度  $\rho$ 、横波速度  $V_s$  和纵波速度  $V_p$  定义弹性，由黏滞系数定义黏性。Crust 1.0 为分辨率  $1^\circ \times 1^\circ$  的全球地壳模型，将全球划分为 64 800 个单元，垂向上分为 9 层，每层均给出 P 波和 S 波速度以及密度  $\rho$  参数。石耀霖和曹建玲（2008）对实验室流变实验结果应用于估算岩石圈等效黏滞系数中的多种影响因素进行了讨论，并以温度和应变速率的研究成果为基础，对中国大陆地壳和上地幔等效黏滞系数做出了较为详细的估计。本文参考这些结果，确定研究区介质的物性参数。考虑到中地壳及下地壳的黏滞系数随深度增加而减小，在确定介质分界处及底面深度处的黏滞系数后，规定其余深度黏滞系数由此进行线性插值得到，以尽量实现与真实情况的吻合。表 1 展示了非均匀分层模型的物性参数。

至此，通过建立的几何模型、给定的约束条件和物性参数，经有限元数值计算后，即可得到模拟结果。模型通过指定运动学上的边界条件和断层滑动速率模拟应力绝对状态下的扰动，因此忽略了重力的影响。

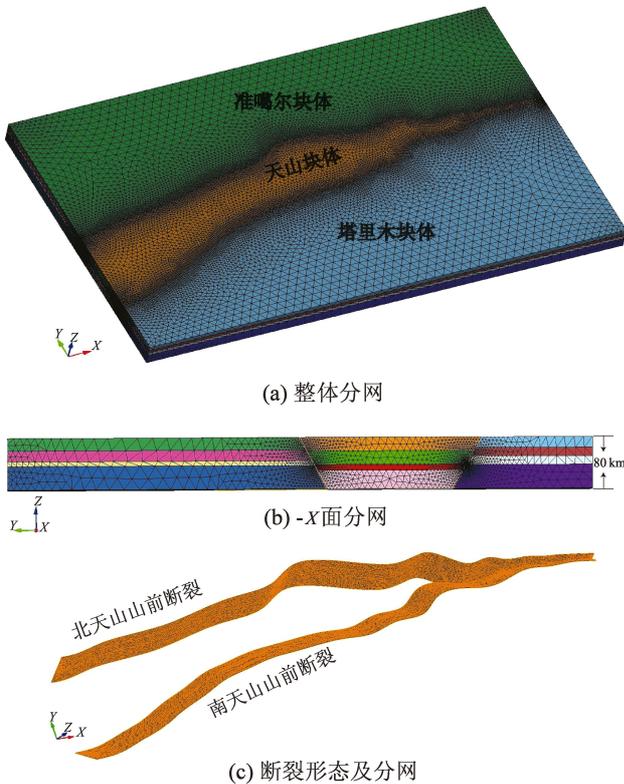


图 2 三维非均匀分层模型的几何图形及网格划分  
Fig. 2 Geometric figure and grid partition of three-dimensional nonuniform layered model

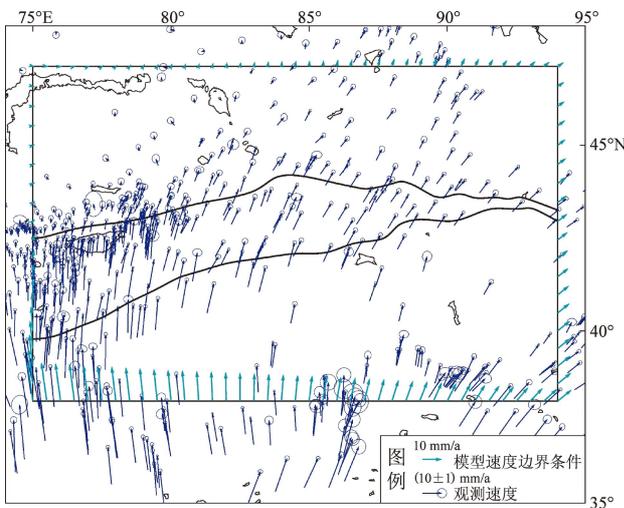


图 3 天山地区有限元模型边界条件  
Fig. 3 The boundary conditions of the finite element model in Tianshan region

表 1 非均匀分层模型的物性参数

Tab. 1 Physical parameters of the nonuniform layered model

区域	分层	厚度/km	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$V_S/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_P/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	分界处黏滞系数/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$
准噶尔块体	上地壳	19.38	2 740	3.55	6.1	$4.1 \times 10^{22}$
	中地壳	16.83	2 780	3.65	6.3	$8.0 \times 10^{21}$
	下地壳	7.34	2 950	3.99	7	$9.25 \times 10^{20}$
	上地幔顶部	36.45	3 380	4.55	8.21	$9.8 \times 10^{19} \text{①}$
天山块体	上地壳	21.15	2 740	3.55	6.1	$4.0 \times 10^{22}$
	中地壳	21.02	2 780	3.65	6.3	$1.0 \times 10^{21}$
	下地壳	9.17	2 950	3.99	7	$7.5 \times 10^{20}$
	上地幔顶部	28.66	3 360	4.53	8.17	$1.0 \times 10^{20} \text{①}$
塔里木块体	上地壳	16.78	2 760	3.6	6.2	$4.2 \times 10^{22}$
	中地壳	13.14	2 810	3.7	6.4	$2.1 \times 10^{22}$
	下地壳	13.14	2 910	3.9	6.8	$1.9 \times 10^{21}$
	上地幔顶部	36.94	3 390	4.57	8.25	$5.0 \times 10^{20} \text{①}$

注：表中①为块体底部（-80 km）处的黏滞系数。

## 2 模拟速度场结果及其特征

为研究岩石圈流变物质黏弹性效应对地表形变的影响，本文给均匀分层几何模型分别赋予弹性参数和黏弹性参数，建立均匀分层弹性模型（M1）和均匀分层黏弹性模型（M2）。两种模型唯一的区别为弹性模型将整个域视为弹性，黏弹性模型将上地壳视为弹性，中、下地壳和上地幔视为黏弹性。黏弹性模型与弹性模型对应的弹性参数相同。另外，为非均匀分层几何模型赋予黏弹性参数，建立非均匀分层黏弹性模型（M3），以讨论纵向介质分层对地表形变的影响。最后，根据表 1 设置的黏滞系数，估计出黏弹性介质的最大弛豫时间。3 种模型的数值计算采用 500 a 为 1 个时间步，经过 100 个时间步的计算，最终得到 5 万年后的地壳形变计算结果。

首先，由最后 1 个时间步的模型计算结果计算震间速度场。然后，从模拟速度场结果中提取模型所含地表中 424 个 GPS 站的速度值，与实际观测的 GPS 数据进行比较，结果见表 2。在 3 种模型中，超过 95% 的站点速度模拟结果与观测结果差异在 4 mm/a 以内，速度方位模拟结果与观测结果差异在 20° 以内，且都基本服从正态分布。由此可见，3 种模型均能较好地模拟出地表速度场，非均

匀分层模型的模拟结果略优于均匀分层的模拟结果，说明介质厚度的改变对本文模拟地表速度场的影响并不大。此外，相较于纯弹性模型，黏弹性模型得到了更优的模拟结果。下面仅对拟合地表速度场效果最优的非均匀分层黏弹性模型（以下简称 M3 模型）的模拟结果展开分析。

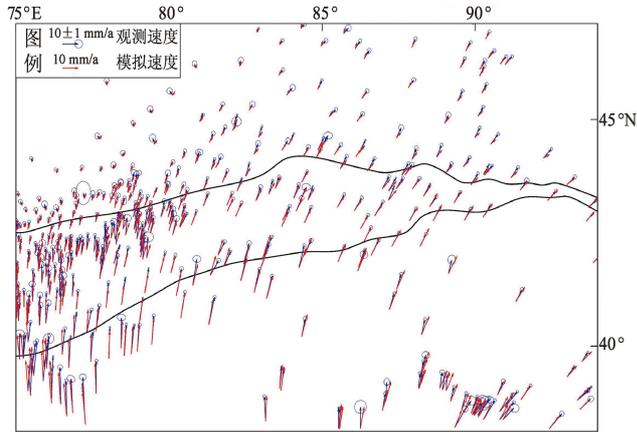
表 2 3 种地表 GPS 站模型模拟速度与观测速度对比

Tab. 2 Comparison between simulation results and observation results of GPS stations

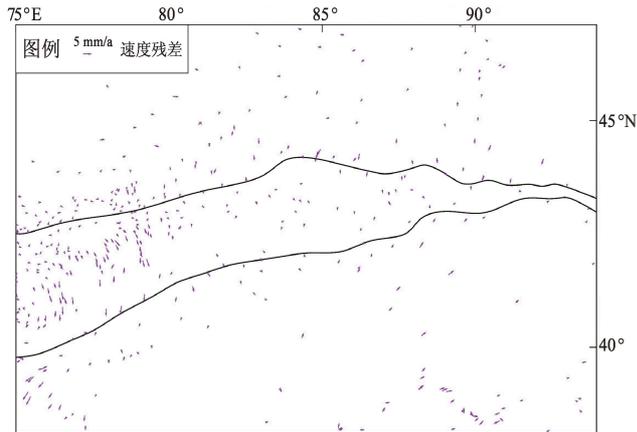
模型	速度平均误差/ $(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	速度方位平均误差/ $(^\circ)$
M1	1.786	6.85
M2	1.380	5.69
M3	1.249	5.11

从使用 M3 模型得到的 GPS 站点震间速度场与实测速度场的对比图（图 4a）及速度残差图（图 4b）可以看出，两者符合程度较好。图 4c 是使用 M3 模型给出的地表速度场。从大小来看，天山地区形变速率呈现由南向北、由西向东逐渐减小的态势。这是因为该区域从南向北、从西向东逐渐远离碰撞板块边界，板块的推挤效应逐步减弱。研究区运动速率最大位于模型西南角，即帕米尔—西昆仑弧形断裂以南区域，达 20 mm/a。在模型所含区域内，南天山汇聚速率为 12~15 mm/a，中天山汇聚速率为 6~9 mm/a，北天山汇聚速率为 4

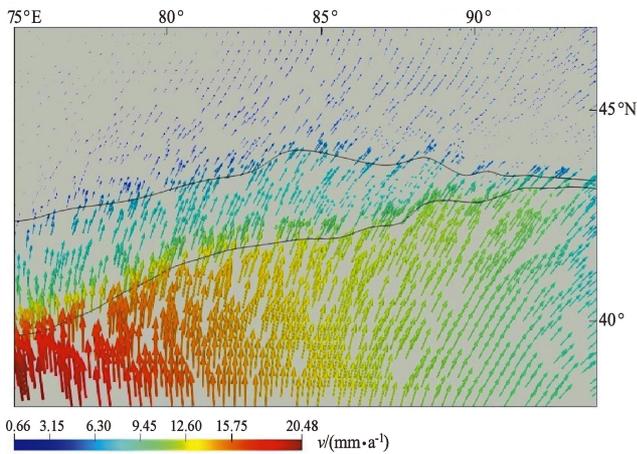
~5 mm/a。从方向来看，由研究区西南部的 NNW 向逐渐向东、向北过渡到 NNE 及 NE 向，从塔里木地区到准噶尔地区速度由顺时针方向转为逆时针方向，验证了塔里木地块的顺时针旋转运动。



(a) GPS 站模拟速度与观测速度对比图



(b) GPS 站速度残差图



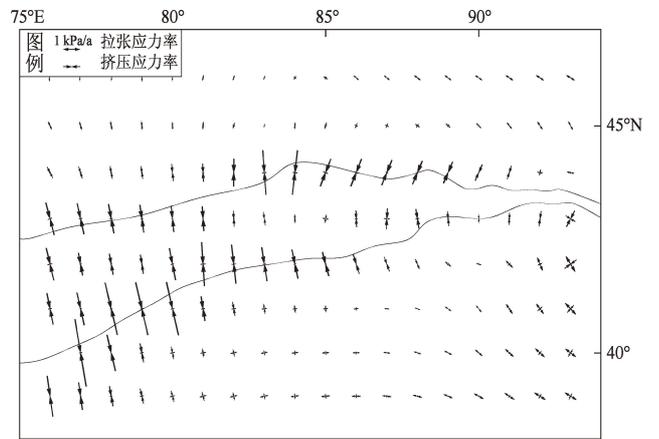
(c) 模拟地表速度场

图 4 天山地区使用 M3 模型模拟速度场  
Fig. 4 Simulation results of velocity field by using M3 model

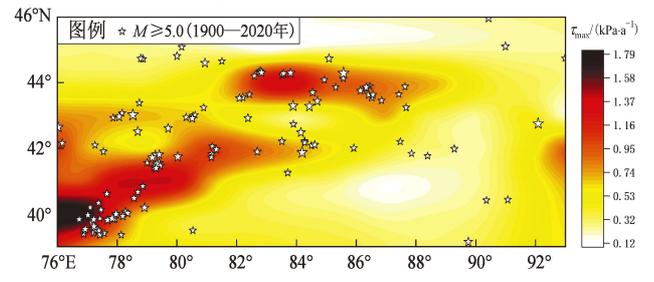
### 3 模拟应力率场结果及其特征

现今构造应力场是现今地壳变形和构造运动的动力因素，是地震活动的内在直接原因之一（邓起东等，2000）。模拟得出的应力实际上是应力的平均年增量，即应力率，它反映了现今天山地区应力场的基本特征。由 1900—2020 年天山地区的地震目录可知，该地区大部分地震的震源深度在 10~20 km。为研究天山地区地壳内部的应力状态，本文提取地表以下 15 km 的应力模拟结果，计算水平最大、最小主应力率。图 5 为天山地区地下 15 km 的水平方向主应力率图和最大剪应力率云图。

从图 5a 可以看出，研究区大部分区域的主压应力率大于主拉应力率。天山两侧褶皱带的主压应力率大于天山内部主压应力率，且呈现与山脉走向相正交的特征，与 Chen 等（2005）的研究结论相似。主压应力率较大的地区集中分布在天山



(a) 水平方向主应力率



(b) 最大剪应力率云图

图 5 天山地区地下 15 km 截面模拟应力率场  
Fig. 5 Results of simulated stress rate field with -15 km cross section

褶皱带上, 主压应力率最大的区域为南天山与帕米尔高原相接区, 达 4.780 kPa/a, 此区域也是发生过几次强震的地震活跃区, 其未来地震危险性值得重点关注。天山西段 ( $75^{\circ} \sim 84^{\circ}\text{E}$ ) 平均主压应力率为 1.896 kPa/a, 天山东段 ( $85^{\circ} \sim 94^{\circ}\text{E}$ ) 平均主压应力率为 1.478 kPa/a。另外, 塔里木地块和准噶尔地块作为较稳定块体, 其应力率大致均匀分布且明显小于天山的应力率, 平均主压应力率分别为 0.471 kPa/a、0.235 kPa/a。图 5b 中的五角星代表发生于 1900—2020 年、震源深度介于 10 ~ 20 km、 $M \geq 5$  地震, 由此可以看出, 最大剪应力率大的地区发震次数多, 地震活动性强, 如南、北天山西段, 最大剪应力率较大, 地震频发; 最大剪应力率小的地区地震少发, 如南、北天山东段, 塔里木和准噶尔, 最大剪应力率小, 发震的次数少。

研究区主压应力方向大多近 N-S 向, 绝大部分最大、最小主应力接近水平。南天山从东到西主压应力总体方向为 NNW 向, 主压应力轴集中在  $\text{NNW}15^{\circ} \sim \text{NNE}10^{\circ}$ , 与李杰等 (2012) 根据 GPS 结果计算的南天山主压应变轴方向相符。北天山从东到西主压应力方向从 NNE 向过渡为 NNW 向, 主压应力轴集中在  $\text{NNW}16^{\circ} \sim \text{NNE}26^{\circ}$ 。

## 4 讨论

本文使用 3 种模型对地表速度场进行拟合, 结果表明, 使用 M3 模型计算得到的天山地区震间速度场与 GPS 观测结果有较好的一致性, 说明本文建立的有限元模型是合理的, 模拟结果是可靠的。此外, 非均匀分层模型的模拟结果优于均匀分层模型模拟结果, 并且黏弹性模型提高了对震间地壳形变的拟合程度, 这与前人 (王辉等, 2007; Li *et al.*, 2015) 得出的实验结果相一致。王辉等 (2007) 建立了川滇地区均匀分层和不均匀分层模型, 探讨莫霍面起伏对模拟速度场结果的影响, 结果表明不均匀分层模型的结果较均匀分层模型的结果有局部改善, 但总体改进不多。Li 等 (2015) 使用有限元模型来研究黏弹性对震间形变的控制作用, 结果证实岩石圈流变物质的黏弹性

效应对震间地表形变场有很大的影响。

具体来看, 天山地区速度场从南向北、由西到东逐渐减小, 运动速率最大达 20 mm/a, 位于模型西南角。在模型所含区域内, 南天山汇聚速率为 12 ~ 15 mm/a, 中天山汇聚速率为 6 ~ 9 mm/a, 北天山汇聚速率为 4 ~ 5 mm/a, 这与牛之俊等 (2007) 利用 GPS 数据得出的天山地壳缩短速率相近。塔里木地块速度场方向顺时针旋转, 准噶尔地块速度场方向逆时针旋转。本文模拟得到的天山地区现今构造应力场以近南北向水平挤压应力为主, 与龙海英等 (2007) 利用震源机制解给出的解释一致。研究区主压应力率从南到北呈现不均匀分布特征, 主要分布在天山南北两侧褶皱带, 最大值处于南天山与帕米尔高原及西昆仑交界地带。主压应力率场成近 N-S 向分布。天山西段 ( $75^{\circ} \sim 84^{\circ}\text{E}$ ) 平均主压应力率较大。塔里木地块和准噶尔地块作为较稳定块体, 其应力率大致均匀分布且明显小于天山的应力率。

本文模拟得到的研究区地壳形变速度场和应力分布结果显示, 挤压速率在天山内部较为均匀, 而在跨越断裂带时快速减小, 表明断裂带起到了吸收形变的重要作用, 最大剪应力结果也表明在这些区域积累了大量能量, 这些现象与该区域的地震活动分布呈现出很好的一致性。因此, 南、北天山山前断裂带的蠕滑对天山地区现今形变场和应力场起到一定的调整作用, 天山地区地壳的缩短变形主要发生的天山南北两侧褶皱带, 这影响了天山的地震活动性分布。

欧亚板块与印度板块之间的碰撞挤压是引起天山现今构造变形的直接原因。本文的模型受代表帕米尔高原推挤和塔里木顺时针旋转的运动学边界条件的约束, 两者共同给天山地区提供了西强东弱的推挤作用力。本文模拟得到了与前人研究结果一致的由西到东的差异性构造运动特征。因此, 天山地区的现今构造变形特征是帕米尔高原向北推挤和塔里木块体顺时针旋转运动共同作用的结果, 但两者谁起到主导作用, 还需进一步探讨。

## 5 结论

本文通过建立 3 种不同的三维有限元模型, 以

GPS 观测结果为边界约束,对断层附加滑移速率及闭锁深度进行约束,获取了天山地区的形变场及应力场,所得结论如下:

(1) 模型纵向分层的不同对模拟地表速度场结果的影响并不大,而考虑黏弹性效应可以提高对震间地壳形变的拟合程度。

(2) 主压应力率最大的地区是南天山与帕米尔高原及西昆仑交界地带,南、北天山西段的主压应力率也较大,这些地区未来的地震危险性值得重点关注。天山地区主压应力场方向近 N-S 向,呈现出以近南北向水平挤压应力为主的特征。

(3) 南、北天山山前断裂带的蠕滑对天山地区现今形变场和应力场起到一定的调整作用。天山地区地壳的缩短变形主要发生在天山南北两侧褶皱带,这影响了天山地区的地震活动性分布。

#### 参考文献:

- 邓起东,冯先岳,张培震,等. 2000. 天山活动构造[M]. 北京:地震出版社.
- 邓起东,张培震,冉勇康,等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学:地球科学,32(12):1020-1030.
- 冯先岳. 1986. 天山的活动断层[J]. 中国地震,2(2):86-91.
- 雷显权,陈运平,赵炯洋. 2011. 天山现今地壳变形的非连续接触模型模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版),42(9):2754-2762.
- 李杰,王琪,王晓强,等. 2012. 南天山—帕米尔现代地壳形变特征与应变场分布[J]. 大地测量与地球动力学,32(1):1-4.
- 刘代芹,Liu M,王海涛,等. 2016. 天山地震带境内外主要断层滑动速率和地震矩亏损分布特征研究[J]. 地球物理学报,59(5):1647-1660.
- 刘峡. 2007. 华北地区现今地壳运动及形变动力学数值模拟[D]. 合肥:中国科学技术大学.
- 龙海英,聂晓红,高国英. 2007. 新疆天山地区与川滇地区中强地震震源机制解对比分析[J]. 地震研究,30(3):229-234.
- 牛之俊,游新兆,杨少敏. 2007. 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,27(2):1-9.
- 石耀霖,曹建玲. 2008. 中国大陆岩石圈等效粘滞系数的计算和讨论[J]. 地学前缘,15(3):82-95.
- 王辉,曹建玲,张怀,等. 2007. 川滇地区下地壳流动对上地壳运动变形影响的数值模拟[J]. 地震学报,29(6):581-591.
- 王琪,丁国瑜,乔学军,等. 2000. 天山现今地壳快速缩短与南北地块的相对运动[J]. 科学通报,45(14):1543-1547.
- 王伟,杨少敏,谭凯,等. 2014. 用 GPS 分析天山现今地壳形变与应变率场[J]. 大地测量与地球动力学,34(3):75-80.
- 王晓强,李杰,Zubovich A,等. 2007. 利用 GPS 形变资料研究天山及邻近地区地壳水平位移与应变特征[J]. 地震学报,29(1):31-37.
- 王子韬,程惠红,董培育,等. 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[J]. 地球物理学报,63(11):4037-4049.
- 杨少敏,李杰,王琪. 2008. GPS 研究天山现今变形与断层活动[J]. 中国科学:地球科学,38(7):872-880.
- 张培震,邓起东,杨晓平,等. 1996. 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,12(2):23-36.
- 张培震,邓起东,张国民,等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学:地球科学,33(S1):12-20.
- 郑勇,陈颢,傅容珊,等. 2007. 应用非连续性模型模拟断层活动对青藏高原应力应变场的影响[J]. 地球物理学报,50(5):1398-1408.
- Aagaard B, Knepley M, Williams C. 2017. PyLith v2. 2. 1 [EP/OL]. [2021-12-14]. Computational Infrastructure for Geodynamics, doi:10.5281/zenodo.886600.
- Chen Y P, Wang L S, Mi N, et al. 2005. Shear wave splitting observations in the Chinese Tianshan orogenic belt [J]. Geophysical Research Letters,32(7):doi:10.1029/2004GL021686.
- Laske G, Masters G, Ma Z, et al. 2012. CRUST1.0: An updated global model of Earth's crust [J]. Geophys Res Abs,14(3):EGU2012-3743-1.
- Li S, Moreno M, Bedford J, et al. 2015. Revisiting viscoelastic effects on interseismic deformation and locking degree: A case study of the Peru-North Chile subduction zone [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth,120(6):4522-4538.
- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision [J]. Science,189:419-426.
- Qiu Z L, Li H B, Pei J L. 2009. Digital simulation on convergence tendency between Southwest Tianshan and Pamirs - West Kunlun Systems and its significance [J]. Journal of Earth Science, 20(2):417-429.
- Vinnik L P, Roecker S, Kosarev G L, et al. 2002. Crustal structure and dynamics of the Tien Shan [J]. Geophysical Research Letters, 29(22):2047.
- Wang M, Shen Z K. 2020. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125(2), doi:10.1029/2019JB018774.

## Three – dimensional Numerical Simulation of the Present Crustal Deformation and the Tectonic Stress Field in the Tianshan Region

SUN Mingzhi, TAN Kai, LU Xiaofei, ZHANG Caihong, LI Qi, LIU Zhijun

(*Key Laboratory of Earthquake Geodesy, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, Hubei, China*)

### Abstract

In the Tianshan region, the tectonic environment is complex, active fault zones are widely distributed, and earthquakes occur frequently. Based on the data of active fault zones distribution and regional rheological structures in the Tianshan region, three three – dimensional finite element models of elastic uniform delamination, viscoelastic uniform delamination and viscoelastic non – uniform delamination are established. Using GPS observations as boundary constraints and additional fault locking depth and slip rate constraints, the crustal deformation field and the tectonic stress field in the Tianshan region are simulated and calculated. The two fields' size, distribution and characteristics are quantitatively analyzed, and the kinematic mechanism of crustal movement and deformation in the Tianshan region is discussed. The results show that the surface velocity fields simulated by the three models are in good agreement with the measured GPS results, and the optimal simulation results are obtained by the viscoelastic inhomogeneous stratified model which is most consistent with the actual situation. Changing the longitudinal medium delamination thickness of the model can influence the simulated surface velocity field, but the viscoelastic effect influences more significantly on the simulated surface velocity field, and the viscoelastic model improves the fitting degree of interseismic surface deformation. In addition, the calculation shows that the convergence rate in the Tianshan region decreases from west to east and from south to north. At the same time, the simulated stress field of the upper crust in the study area is characterized by horizontal compressional stress near N – S direction, which is consistent with the actual situation of horizontal shortening and vertical uplift of the crust as a whole in the Tianshan region.

**Keywords:** the Tianshan region; crustal deformation; stress field; finite element numerical simulation