

李瑞,李杰,刘代芹,等,2021. 柯坪块体周缘主要断裂闭锁程度与滑动亏损速率的分布特征. 中国地震,37(4):868~877.

柯坪块体周缘主要断裂闭锁程度 与滑动亏损速率的分布特征

李瑞^{1,2)} 李杰^{1,2)} 刘代芹²⁾ 苏力坦·玉散^{1,2)} 李桂荣^{1,2)}
孙小旭²⁾ 艾力夏提·玉山²⁾

1) 中国地震局乌鲁木齐中亚地震研究所, 乌鲁木齐 830011

2) 新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐 830011

摘要 利用西南天山山前柯坪块体周缘的多期中国大陆构造环境监测网络区域站及新疆维吾尔自治区地震局在该区域加密布设的多个 GPS 站点数据, 基于负位错反演原理, 采用 Defnode 软件反演, 得到柯坪、皮羌和迈丹 3 条主要断裂的闭锁程度和滑动亏损速率分布特征。模拟结果与实测值总体一致, 但略有细微差异, GPS 点位密集处残差在 1mm/a 左右, 柯坪断裂在深度 20km 以内处于完全闭锁, 20~40km 之间处于部分蠕滑, 40km 以下处于完全蠕滑; 皮羌断裂全段在深度 15km 以内处于完全闭锁, 15~30km 之间处于部分蠕滑, 30km 以下处于完全蠕滑, 滑动亏损速率介于 0~2mm/a; 迈丹断裂闭锁系数与滑动亏损速率分布特征相对复杂, 完全闭锁深度从西南端的 35km 逐渐递减至东北端的 10km 左右。上述研究结果为分析评估 3 条断裂的地震危险性提供了观测约束, 对认识该地区的地震孕育背景及地震危险性研究提供参考依据。

关键词: 柯坪块体 陆态网络 Defnode 闭锁系数 滑动亏损速率

[文章编号] 1001-4683(2021)04-0868-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

新生代以来, 受印度板块持续向北推挤及欧亚板块强烈碰撞作用的远程效应影响, 天山受到强烈挤压而再次隆升, 活跃的地质构造背景使其成为地震孕育与发生的“温床”, 成为国内外地球动力学研究的热点区域(Molnar et al, 1975; 张培震等, 1996)。天山地区的构造演化特征研究始于 20 世纪 70 年代末(Tapponnier et al, 1979), GPS、InSAR 等大地测量技术的发展为天山地区的地壳运动特征研究提供了技术手段。西南天山地区地壳缩短率高达 10~20mm/a, 具备 6 级以上地震的构造条件和能量积累水平(王琪等, 2000; 沈军等, 2001), 该区多次发生 6 级以上中强地震, 如 1902 年阿图什 8 级强震、1998 年伽师 6 级强震群、2008 年乌恰 6.8 级地震等。在天山隆升过程中, 塔里木盆地与准噶尔盆地接壤地带形成了多个褶皱体为主的区域, 如博格达弧形推覆构造、柯坪逆冲推覆构造、库车推覆构造等。

[收稿日期] 2020-06-30 [修定日期] 2021-01-05

[项目类别] 地震科技星火计划(XH20069Y、XH18054)、国家自然科学基金(41874015)共同资助

[作者简介] 李瑞, 男, 1991 年生, 工程师, 主要从事 GPS 在地壳形变监测中的应用研究。E-mail: 646909820@qq.com
李杰, 通讯作者, 男, 1975 年生, 研究员, 主要从事大地测量及地壳形变研究。E-mail: lijiej@sohu.com

柯坪块体位于塔里木盆地西北缘与西南天山的接壤地带,块体内部形成了多排近 EW 走向、平行展布的推覆体,具体表现为地球表面隆起的间距 10~15km、长 70~200km 的低山地貌特征。该地区地壳运动活跃、变形幅度强烈,一直以来为年度强震危险区之一。块体内部断裂发育,有多排逆冲型为主的 NEE 向断裂,由南向北主要有柯坪断裂、萨尔干塔格断裂、奥兹格格它乌塔格断裂等,其中以柯坪断裂规模最大、发育最长。值得注意的是,在众多近 EW 走向为主的断裂中还发育有一条近 SN 走向的断裂——皮羌断裂,其将柯坪块体分为东、西两部分,各主要断裂详细位置见图 1。

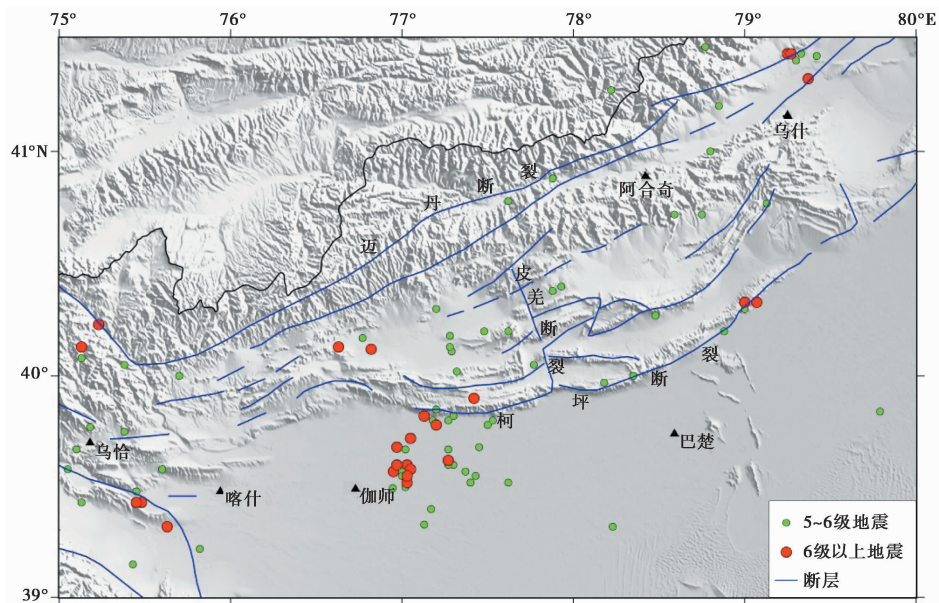


图 1 1970 年以来柯坪块体 5 级以上地震的空间分布

国内学者针对柯坪块体做了大量相关的研究工作。唐兰兰等(2013)在研究柯坪块体地震重复性时,发现皮羌断裂以西的地区地震频次及地震强度明显高于东侧区域,很可能是受到区域应力加载作用产生地震频发的现象。曲国胜等(2003)通过大量野外地质考察得到了柯坪块体各个断裂带的详细信息。杨晓平等(2006)发现柯坪块体西侧的地壳缩短量比东侧大 5km,并且计算得到了地质时间尺度下的地壳缩短速率为 15.4~17.3mm/a。李安(2013)、闵伟等(2006)采用探槽开挖、年代测定、陡坎测量等方法和技术手段,对柯坪块体古地震事件、断层滑动速率等进行了研究。而以 GPS 为技术手段专门针对柯坪块体的相关大地测量研究成果屈指可数,对于柯坪块体主要断裂带现今以来断层闭锁情况、滑动亏损速率等研究依然处于空白状态。因此,本文主要借助柯坪块体周缘的中国大陆构造环境监测网络(以下简称陆态网络)区域站及新疆维吾尔自治区地震局在该地区加密布设观测的多期 GPS 数据,基于负位错反演原理计算得到柯坪块体主要断裂的断层闭锁情况及滑动亏损速率分布特征,以期认识区域活动构造的运动学和动力学特征提供参考。

1 反演方法原理介绍

本文基于 Defnode 负位错反演程序进行计算。Defnode 是在 Linux 系统下开发运行的一套计算块体间断层旋转、应变、闭锁程度的负位错反演 Fortran 语言程序,反演计算原理为,假定块体内部点位的运动为包含该点位在内的块体的刚性运动和块体边界断层耦合作用而引起的地表形变之和,程序可以利用 GPS、水准数据进行反演计算,在此基础上改进 Defnode 程序为 TDefnode,保留了原震间形变反演的模块 (McCaffrey, 2009),同时引入了连续 GPS 时间序列及 InSAR LOS 形变数据,得到了国内外研究人员的广泛使用。

反演模型采用 GPS 速度场为约束,通过模拟退火算法或网格搜索法来约束和限制块体的旋转和滑动断层闭锁情况,所用公式如下 (McCaffrey, 2002; Zhao et al, 2020; 赵静, 2012)

$$V_i(X) = \sum_{b=1}^B H(X \in \Delta b) [{}_R\Omega_b] \times X \cdot \vec{i} - \sum_{k=1}^F \sum_{n=1}^{N^k} \sum_{j=1}^2 \varphi_{nkG_j}(X, X_{nk}) [{}_h\Omega_f \times X_{nk}] \cdot \vec{j} \quad (1)$$

其中,前半部分代表块体旋转,用块体旋转极计算出块体上所有节点刚性运动速率,后半部分则代表了断层闭锁产生的影响。

为了表征断层闭锁强度,Defnode 中定义了一个纯动力学无量纲值 ϕ ,来表示断层闭锁情况,McCaffrey (2005) 定义 ϕ 的公式为

$$\phi(\Sigma) = \Sigma^{-1} \int_{\Sigma} [1 - V_c(s)/V(s)] ds \quad (2)$$

其中, V 代表断层长期的滑动速率, V_c 代表短期的滑动速率, Σ 代表断层面上的网格区域, s 代表断层面上的区域网格面积。进而可以计算出一个 ϕ 值,其物理意义具体表述为:当 $\phi = 1$ 时,表示断层完全锁定不能自由滑动;当 $\phi = 0$ 时,表示断层为完全蠕滑状态。通常 ϕ 为介于 0 和 1 之间的一个数值,表示断层处于部分蠕滑状态。

在反演过程中,通常会对参数精度进行评定以确定模型结果好坏。Defnode 通过如下计算公式来进行评定

$$x_n^2 = [\sum_{i=1, n} (r_i/f\sigma_i)^2] / dof \quad (3)$$

其中, n 代表观测数据总量, r_i 为数据残差, σ_i 为数据标准差, dof 为自由度, f 为数据误差权重因子。在反演过程中,通过使用模拟退火方法或者网格搜索方法,不断改变 f 值的大小,寻求恰当的值,尽可能的使 $x_n^2 \approx 1$ 。

2 模型构建与精度评价

2.1 数据处理

陆态网络是由中国地震局、总参测绘导航局、中国科学院、国家测绘地理信息局、中国气象局和教育部等多部委联合实施的国家重大科技基础设施项目,旨在获取中国大陆地壳运动特征并开展地震危险区监视,同时兼顾测绘科学、气象预报等其他应用领域。尽管覆盖绝大部分国土面积,但是在地震频次多、强度大的西部地区,其点位分布仍然稀疏且不均匀,无法满足局部精细的地壳运动研究的需要。因此,为弥补这一缺陷,在陆态网络区域站基础上,新疆维吾尔自治区地震局近些年在西南天山、帕米尔高原、柯坪块体等地壳运动活跃的地区大范围加密布站观测,为本文研究提供了详实的数据。

数据处理则采用高精度开源免费软件 GAMIT/GLOBK 进行基线平差计算,数据详细解

算流程众多文献中已有详细阐述,本文不再赘述。值得注意的是,在平差过程中需要通过 eq.name 文件中相关参数设置扣除地震引发的同震形变信息,计算得到 ITRF2014 框架下的时间序列,通过坐标时间序列分析得到 ITRF2014 框架下的速度场,进一步通过 cvframe 命令转换得到相对于欧亚大陆参考框架下的速度场来进行后期反演计算工作。受篇幅限制,图 2 展示了部分流动站点去掉线性趋势的时间序列,解算精度总体在 1mm 左右。

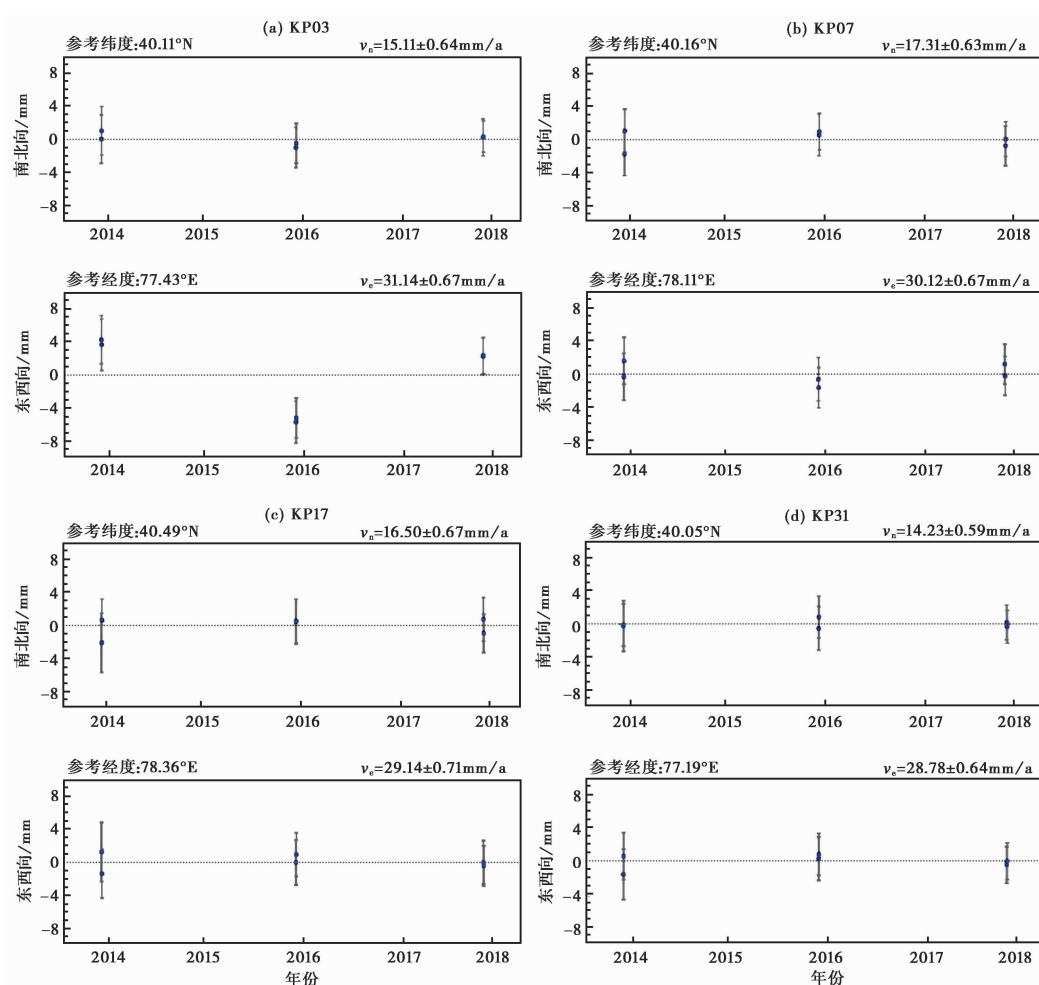


图 2 部分去掉线性趋势的流动站点 GPS 时间序列
(a) KP03 测站; (b) KP07 测站; (c) KP17 测站; (d) KP31 测站

2.2 模型构建

根据反演步骤,需要根据研究区域的地质构造特征对块体进行简单的模型划分。柯坪块体北以迈丹-喀拉克断裂与南天山为界,南以柯坪断裂与塔里木盆地为界。为简化模型参数设置,将地质上的东柯坪塔格断裂和西柯坪塔格断裂合并为柯坪断裂,忽略了块体内部其他细小断裂,并假定块体处于均匀应变状态。因此,本文主要考虑山前的柯坪断裂、皮羌断裂和迈丹断裂,将柯坪块体划分为 A、B 两部分,南侧塔里木盆地编为 C 块体,北侧天山编

为 D 块体。考虑到塔里木盆地中 GPS 点位密度不足、分布稀疏的客观情况,在块体划分时,为了尽可能多地纳入塔里木盆地内的 GPS 点,整个块体划分如图 3 所示。为研究伽师及邻区地壳结构特征,以及伽师 1997—1998 年 6 级强震群的成因,刘启元等(2000)在伽师邻近区域 $1.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ 范围了布设了流动地震台阵,发现塔里木盆地地壳厚度在 40~52km,而柯坪块体地壳厚度则增加至 60~76km,故本文设定反演深度为 65km。另外,还需进一步了解断层属性,为简化断层模型,同样对断层倾角进行了简化处理,在查阅相关文献基础上,总结了各断裂属性特征,见表 1。节点设置前,先按照每隔 10km 的等深距离进行了试算,以确定每条断层完全闭锁深度、部分闭锁和完全蠕滑的大致分界面,然后根据不同断层、不同闭锁深度确定了不等深度的节点设置方案。断层最终节点设置详细信息如下:柯坪断裂沿走向设置节点 17 个,沿断层倾角方向设置 11 条等深线,共设置节点 187 个;皮羌断裂沿走向设置节点 17 个,沿断层倾角方向设置 12 条等深线,共设置节点 204 个;迈丹断裂沿走向设置节点 14 个,沿着断层倾角方向设置 12 条等深线,共设置节点 168 个。

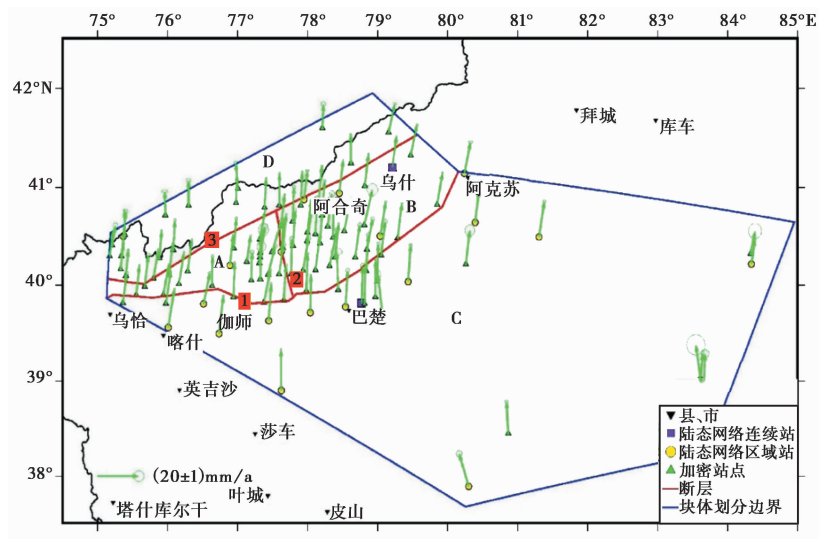


图 3 研究区块体模型划分
1: 柯坪断裂; 2: 皮羌断裂; 3: 迈丹断裂

表 1 研究区主要活动断裂属性特征

断裂	倾角/(°)	走向	节点个数	断裂长度/km	参考文献
皮羌	85	NW	204	70	张庆莲等,2012
柯坪	62	NEE	187	300	曲国胜等,2003; 刘一鸣等,1975
迈丹	60	NEE	168	400	吴传勇等,2014

2.3 反演结果评价

为确定模型反演拟合效果,分别将反演得到的相应速度场模拟值和原始观测值进行比较(图 4),并绘制速度场模拟值的残差分布,如图 5 所示。结果显示,此次反演计算得到的模拟值与实测值整体上较为吻合,除塔里木盆地东南方向上远离柯坪断裂带的少数几个 GPS

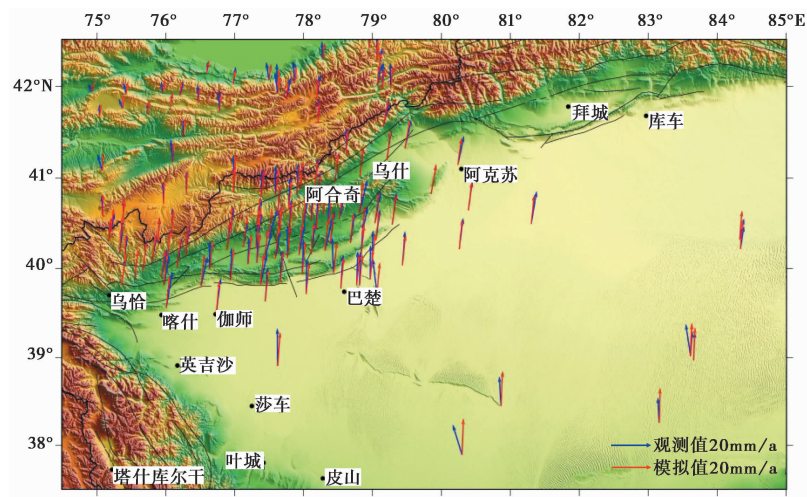


图 4 GPS 测站速度场观测值与模拟值对比

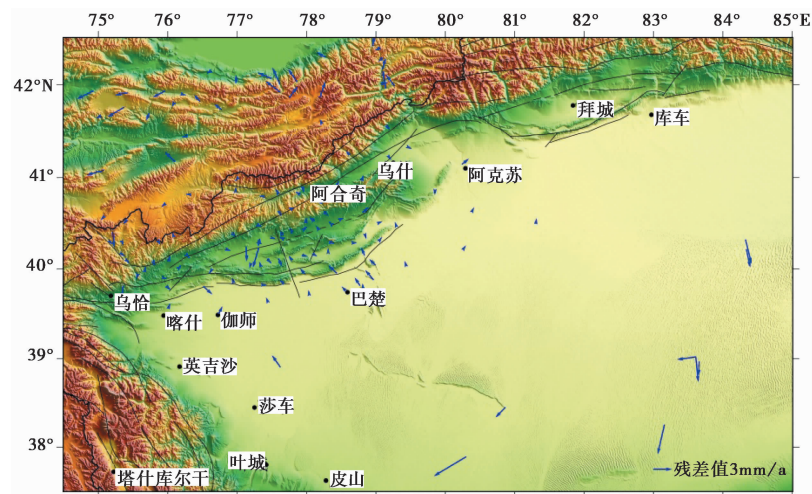


图 5 GPS 测站速度场残差分布

站点反演残差略大于 3mm/a ,大部分站点反演残差值均在 $1\sim 2\text{mm/a}$,点位密集的柯坪块体地区反演残差值在 1mm/a 以内,此外 3 条断裂反演计算的卡方值均在 1mm/a 左右,说明此次反演计算结果真实可信。

3 断裂闭锁程度与滑动亏损速率的分布特征

3.1 断裂闭锁程度

从断层闭锁反演结果(图 6)来看,NEE 走向的柯坪断裂全段在深度 20km 以内处于完全闭锁状态,在 $20\sim 40\text{km}$ 之间处于部分闭锁状态, 40km 以下处于完全蠕滑状态。SN 走向的皮羌断裂在深度 10km 以内处于完全闭锁状态,在 $10\sim 30\text{km}$ 之间处于部分闭锁状态, 30km 以下处于完全蠕滑状态,闭锁深度与杨少敏等(2008)给出的皮羌断层闭锁深度接近 35km

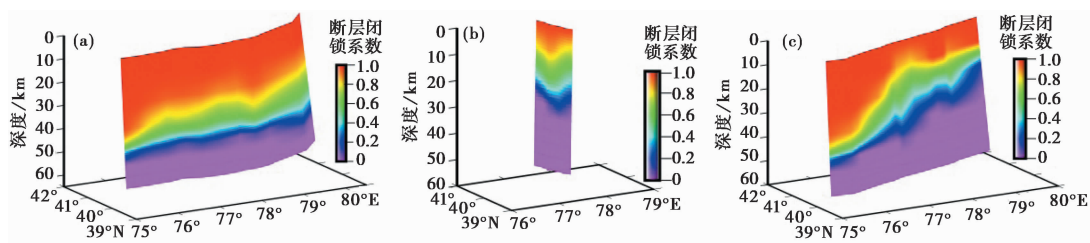


图6 柯坪块体各主要断层闭锁程度
(a)柯坪断裂; (b)皮羌断裂; (c)迈丹断裂

的结论有细微差异。迈丹断裂闭锁情况复杂,存在明显的分段现象,断层从西南端到东北端断层闭锁深度逐渐递减,自35km逐渐递减至10km以内,反映了迈丹断裂相对复杂的地质构造特征。

3.2 断裂滑动亏损速率的分布特征

由于塔里木盆地内GPS点位少、间距大,反演计算得到的滑动亏损速率很可能受此影响,反演效果欠佳,因此仅展示皮羌和迈丹2条断裂滑动亏损速率分布特征(图7)。从反演结果来看,滑动亏损速率特征与闭锁系数分布特征相似,这种相似的现象与闫欢欢(2017)、李宁等(2019)的反演结果一致。皮羌断裂滑动亏损速率介于0~2mm/a之间,0~15km处的亏损速率较大,约为1mm/a以上;在15~30km处的滑动亏损速率小于1mm/a;30km以下滑动亏损速率基本为0。迈丹断裂滑动亏损速率稍大,介于0~3mm/a之间;其中西南端滑动亏损速率介于2~3mm/a之间,深度也逐渐由35km过渡至20km左右。迈丹断裂西南端(75°~76°)滑动亏损速率深度明显低,很可能受到大型右旋走滑断裂——塔拉斯-费尔干纳断裂带深部构造的影响。

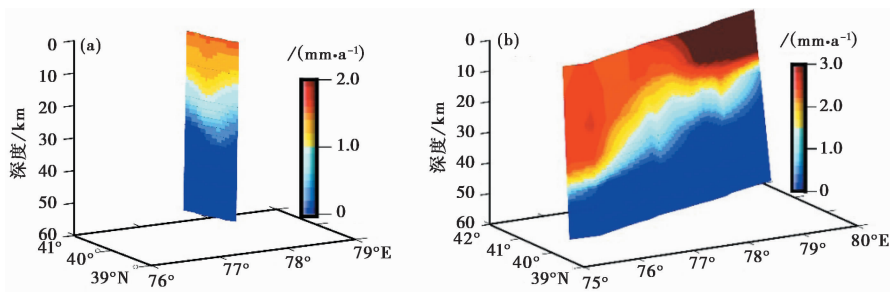


图7 柯坪块体各主要断裂带滑动亏损速率
(a)皮羌断裂; (b)迈丹断裂

4 讨论

(1) 运用 Defnode 负位错反演程序进行断层闭锁与滑动亏损速率研究已在国内外得到广泛使用,并取得了一定的研究成果,而目前专门针对柯坪块体相关的大地测量研究成果屈指可数,利用该方法针对柯坪、皮羌和迈丹3条断裂的相关研究成果仍是空白。因此,本文利用柯坪块体周缘的陆态网络区域站及新疆维吾尔自治区地震局加密布设观测的GPS数

据,估算了柯坪、皮羌和迈丹 3 条断裂的闭锁程度和滑动亏损速率,为分析评估 3 条断裂的地震危险性提供了观测约束,在一定程度上丰富了该地区基于 GPS 技术的大地测量研究成果。从反演结果来看,观测值与模拟值较为一致,除少数几个远离断裂的残差值在 3mm/a 左右外,GPS 点位密集处的计算残差值在 1mm/a 左右,反演效果真实可信。

(2) 天山地区的中强地震主要发生在山体两侧的前陆逆冲推覆构造带上,地震实际上是在区域构造应力作用下,断裂带上应变逐渐积累达到极值后导致突发失稳的结果(张培震等,2013)。根据断层亚失稳判定方法来看,柯坪断裂 Benioff 应变积累能量水平能满足 6.8 级地震的发生(宋春燕,2017)。通常情况下断层闭锁程度越高,也更容易产生应变积累,如果应变未通过断层蠕滑运动或者地震的方式得到释放,那么闭锁程度越高,滑动亏损速率也越大。反演结果表明,柯坪断裂全段闭锁深度在 20km 以内,在 20~40km 之间处于部分闭锁状态,40km 以下处于完全蠕滑状态。SN 走向的皮羌断裂闭锁深度则在 10km 以内,在 10~30km 之间处于部分闭锁状态,30km 以下处于完全蠕滑状态。利用 USGS 给出的 1970 年以来 4 级以上地震目录,筛选了柯坪、皮羌 2 条断裂 10km 范围内的地震事件,统计结果表明,断裂处于部分蠕滑状态深度以内的地震事件占比分别为 88% 和 71%。2020 年伽师 $M_s 6.4$ 地震的震源深度为 14.4km,余震序列定位统计发现优势破裂深度主要在中地壳内,73% 的余震均集中发生在 10~20km(冉慧敏等,2020),与本文柯坪断裂完全闭锁深度相一致,也进一步说明断层闭锁程度越高的地方发生地震的可能性也更大。

(3) 迈丹断裂是柯坪块体与西南天山山前的根部断裂,第四纪以来的活动性依然很强,作为由多条次级断裂组成的复杂断裂带,其最大宽度达 17km,该断裂历史上发生的强震致使垂直位错量达 2m(吴传勇等,2014),对于这种由多条次级断裂组成的断裂,在断层模型设置上无疑困难重重,不能真实反映断裂真实的走向特征。迈丹断裂以南为低角度的逆掩柯坪塔格逆冲薄皮推覆构造,以北则是高角度逆冲的厚皮构造,控制了该地区的地形地貌和沉积构造(陈杰等,2001)。关于迈丹断裂的性质,随着时间的推移也存在不同的认识,陈杰等(2001)认为该断裂自晚更新世以来垂直运动明显,野外考察断裂两侧无明显的左旋错动,认为迈丹断裂是一条逆冲为主的断层;郭建明(2002)则认为,迈丹断裂阿合奇段为 NEE 走向的活动性不是很强的左行走滑断裂;贾启超(2015)通过遥感解译、探槽开挖、阶地测量等多种手段,表明迈丹断裂是一条逆冲走滑型断裂。迈丹断裂西南端与塔拉斯-费尔干纳断裂相连接,作为一条横切天山的大型右旋走滑断裂,右旋量值在 60~250km,构造变形强烈,是调节挤压应变、控制天山隆升的重要构造单元(杨少敏等,2008)。因此,相对地处构造环境简单的柯坪断裂及皮羌断裂,反演计算揭示的迈丹断裂断层闭锁系数与滑动亏损速率分布特征也更为复杂,西南端闭锁深度较深的原因也很可能受到塔拉斯-费尔干纳断裂深部构造的综合影响。

5 主要结论

本文以陆态网络区域站及新疆维吾尔自治区地震局加密的 GPS 数据为基础,利用 Defnode 负位错反演程序计算得到了柯坪、皮羌和迈丹 3 条断裂的闭锁及滑动亏损速率分布特征。取得的主要结论如下:柯坪断裂在深度 20km 以内处于完全闭锁状态,20~40km 之间处于部分蠕滑状态,40km 以下处于完全蠕滑状态;皮羌断裂全段在深度 15km 以内处于完

全闭锁状态,15~30km之间处于部分蠕滑状态,30km以下处于完全蠕滑状态,滑动亏损速率介于0~2mm/a;迈丹断裂闭锁系数与滑动亏损速率分布特征相对复杂,西南端完全闭锁深度从35km逐渐递减至东北端的10km左右,究其原因,一方面可能是相比柯坪和皮羌断裂,迈丹断裂本身为一条大型复杂断裂带,地质构造环境复杂,另一方面是因为其西南端很可能受到塔拉斯-费尔干纳断裂带深部构造的综合影响。

致谢: 中国地震局乌鲁木齐中亚地震研究所及新疆地球物理观测中心同事长年累月辛苦的野外观测工作,为本文提供了详实宝贵的数据;部分数据来源于中国大陆构造监测网络项目;在反演计算过程中得到了中国地震台网中心赵静、中国地震局地震研究所王伟的指导帮助和建设性意见,在此一并表示感谢。

参考文献

- 陈杰,丁国瑜,Burbank D W,等,2001. 中国西南天山山前的晚新生代构造与地震活动. 中国地震,17(2):134~155.
- 郭建明,2002. 南天山活动构造与遥感图像特征研究. 硕士学位论文. 兰州:中国科学院兰州地质研究所,1~44.
- 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,1~87.
- 李安,2013. 西南天山柯坪推覆系晚更新世古地震及其分段性地貌响应. 博士学位论文. 北京:中国地震局地质研究所,1~116.
- 李宁,康帅,朱良玉,2019. 基于GPS资料研究红河断裂带现今闭锁程度与地震危险性. 大地测量与地球动力学,39(7):700~705.
- 刘启元,陈九辉,李顺成,等,2000. 新疆伽师强震群区三维地壳上地幔S波速度结构及其地震成因的探讨. 地球物理学报,43(3):356~365.
- 刘一鸣,姚虹,周海南,1975. 新疆柯坪断裂带地震活动的特征及趋势分析. 地球物理学报,18(1):39~51.
- 闵伟,宋方敏,韩竹军,等,2006. 柯坪塔格断裂西段古地震初步研究. 地震地质,28(2):234~244.
- 曲国胜,李亦纲,陈杰,等,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(增刊):142~152.
- 冉慧敏,上官文明,刘东亚,2020. 2020年1月19日新疆伽师 M_s 6.4地震及余震序列定位研究. 内陆地震,34(1):56~62.
- 沈军,赵瑞斌,李军,等,2001. 塔里木盆地西北缘河流阶地变形测量与地壳缩短速率. 科学通报,46(4):334~338.
- 宋春燕,2017. 断裂失稳阶段及失稳部位特征的初步研究——以南天山西段和汶川地震为例. 博士学位论文. 北京:中国地震局地质研究所,1~90.
- 唐兰兰,孔祥艳,龙锋,等,2013. 柯坪塔格断裂带重复地震识别及其时空特征分析. 地震学报,35(3):328~340.
- 王琪,丁国瑜,乔学军,等,2000. 用GPS研究南天山(伽师)地区现今地壳变形. 地震学报,22(3):263~270.
- 吴传勇,阿里木江,戴训也,等,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(4):976~990.
- 闫欢欢,2017. 滇中主要断裂带地壳形变及断层运动特征的GPS研究. 硕士学位论文. 武汉:中国地震局地震研究所,1~40.
- 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),38(7):872~880.
- 杨晓平,冉勇康,宋方敏,等,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(2):194~204.
- 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. 中国地震,12(2):127~140.
- 张培震,邓起东,张竹琪,等,2013. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程. 中国科学:地球科学,43(10):1607~1620.
- 张庆莲,侯贵廷,潘文庆,等,2012. 皮羌走滑断裂控制构造裂缝发育的力学机制模拟. 地质力学学报,18(2):110~119.
- 赵静,2012. 块体模型与负位错模型分析川滇地区块体应变与断裂带变形特征. 硕士学位论文. 北京:中国地震局地震预测研究所,1~59.
- McCaffrey R,2002. Crustal Block Rotations and Plate Coupling. Plate Boundary Zones,101~122.
- McCaffrey R,2005. Block kinematics of the Pacific-North America plate boundary in the southwestern United States from inversion

- of GPS, seismological, and geologic data. *J Geophys Res*, **110**(B7):B07401.
- McCaffrey R, 2009. Time-dependent inversion of three-component continuous GPS for steady and transient sources in northern Cascadia. *Geophys Res Lett*, **36**(7):L07304.
- Molnar P, Tapponnier P, 1975. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. *Science*, **189**(4201):419~426.
- Tapponnier P, Molnar P, 1979. Active faulting and Cenozoic tectonics of the Tien Shan, Mongolia, and Baykal regions. *J Geophys Res*, **84**(B7):3425~3459.
- Zhao J, Ren J W, Liu J, et al, 2020. Coupling fraction and relocking process of the Longmenshan Fault Zone following the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake, *Journal of Geodynamics*, **137**(2020):101730.

Distribution Characteristics of Locking Fraction and Slip Deficit Rate along Main Faults around Keping Block

Li Rui^{1,2)} Li Jie^{1,2)} Liu Daiqin²⁾ Sulitan·Yusan^{1,2)} Li Guirong^{1,2)}
Sun Xiaoxu²⁾ Ailixiati·Yushan²⁾

1) Urumqi Institute of Seismology in Central Asia, China Earthquake Administration, Urumqi 830011, China

2) Earthquake Agency of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China

Abstract Using multi-period GSP observation data from “Crustal Movement Observation Network of China” and from GPS stations installed by the earthquake agency of Xnjiang Uygur Autonomous Region in the Keping block area located in the southwest Tianshan mountain, we calculated and obtained the distribution characteristics of locking fraction and slip deficit rate of the three major faults of Keping, Piqiang and Maidan around the Keping block by applying inversion calculation software—Defnode based on the principle of negative dislocation inversion. The calculated result by the inversion software is consistent with the actual observed data with the residual error about 1mm in the places with dense GPS sites. The results shows that keping fault has a stable change in fault locking, with a complete locking depth within 20km, a partial fault locking between 20km and 40km, and a fully creeping state below 40km. The Piqiang Fault has a fault locking depth of less than 10km, a partial locking state between 10km and 30km, and a fully creeping state below 30km, in which the slip deficit rate is between 0 and 2mm/a. The fault locking situation of the Maidan fault is complicated, in which the fault locking depth gradually decreases from the southwest segment to the northeast end, and gradually decreases from 35km to less than 10km.

Keywords: Keping Block; CMONOC; Defnode; Locking Fraction; Slip Deficit Rate