

基于 GPS 资料分析阿尔金断裂的 闭锁程度及地震危险性*

刘 雷, 赵宁远, 王 阳

(中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 采用 1991—2015 年 GPS 速度场数据, 分析了阿尔金断裂现今滑动速率特征; 利用 Tdefnode 负位错反演程序计算了阿尔金断裂的闭锁程度分布及滑动亏损速率分布; 结合小震分布特征, 对阿尔金断裂地震危险性进行了研究。结果表明: 阿尔金断裂西段、中段和东段的走滑速率分别为 7.1 mm/a, 7.8 mm/a, 5.0 mm/a, 在与北西向断裂交汇区域速率减小最快; 断裂闭锁程度较高区域集中在断裂中东段, 断裂中段亏损速率为 6~8 mm/a, 到东段亏损速率增加到 10 mm/a; 结合震源深度剖面认为断裂中东段是一个地震空段, 地震危险性较高, 未来应该加强关注。

关键词: 阿尔金断裂; Tdefnode 负位错反演; 闭锁程度; 地震危险性

中图分类号: P315.725

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2018)03-0407-08

0 引言

阿尔金断裂作为青藏高原的北部边界, 将塔里木盆地与柴达木盆地分隔开来, 并切割了青藏高原北部的不同构造单元, 控制高原北部的几何学特征及基本的构造格架 (李海兵, 2001)。断裂从西昆仑一直延伸到祁连山, 全长达 1 800 km, 断裂走向以 NEE 向为主, 断层性质以左旋走滑为主, 兼有逆冲作用, 是我国最大的走滑断层及最活跃的构造断裂之一。研究发现, 晚更新世到全新世时期阿尔金断裂发生过 5 次古地震, 平均复发周期为 800 年左右 (柏美祥, 1992)。据记载, 1900 年以来断裂上发生过 1924 年新疆民丰 7.3 级双震、1932 年甘肃昌马 7.6 级地震、2008 年新疆于田 7.3 级地震 (马玉虎, 马辉青, 2014), 所以该断裂具有发生大地震的孕育背景。近些年, 许多学者认为阿尔金断裂的形成与青藏高原的隆升及地壳缩短有关 (许志琴等, 1999a, b; 熊熊等, 2006)。徐锡伟等 (2003) 利用 SPOT 影像分析了阿尔金断裂晚第四纪走滑速率及构造转换特征; 李海兵等 (2006) 提出阿尔金断裂存在多期活动, 并分析了断裂的演化及与青藏高原隆升的过程; 马玉虎和马辉青 (2014) 根据地震活动

性分析了阿尔金断裂在青海段具有强震危险性; 李煜航等 (2015a, b) 利用 GPS 数据反演得到断裂现今的滑动速率。

虽然前人对阿尔金断裂的形成、构造背景和运动学特征等方面进行了详细的研究, 但还有一些问题有待解决。如研究阿尔金断裂与斜交断裂的相关性特征, 以及通过对断裂闭锁程度及滑动亏损速率进行研究来反映断裂的地震危险性, 还有沿断裂分布的小震与断裂运动之间的关系等。本文基于这些问题, 利用 1991—2015 年 GPS 数据 (Zheng *et al.*, 2017), 计算阿尔金断裂西段、中段和东段的跨断层 GPS 速度剖面 and 区域主应变率场, 分析断裂的运动特征, 再利用 Tdefnode 负位错反演程序计算断裂的闭锁程度及滑动亏损速率, 判别断裂的强震危险区, 最后结合小震的分布情况来分析断裂高闭锁区与地震分布的特征。

1 GPS 运动特征

为了研究阿尔金断裂现今速度场和应变场特征, 笔者使用 Zheng 等 (2017) 计算的 1991—2015 年 GPS 数据。从研究区 GPS 速度场上可以看出 (图 1), 在阿尔金断裂的西段, 断裂南北两侧

* 收稿日期: 2018-05-02.

基金项目: 国家自然科学基金——基于三维地壳形变研究黄河断裂灵武段现今活动状态 (41604015)、中国地震局地震科技星火计划——基于 InSAR 的东昆仑断裂玛沁玛曲段地震危险性分析 (XH17059) 和国家科技基础性工作专项《中国大陆现代垂直形变图集的编制与资料整编》(2015FY210400) 联合资助。

GPS 速度场方向发生变化, 南侧为 NNE 向, 到北侧变为 NNW 向或 N 向, 断裂中段速度场方向基本为 NNE 向, 断裂东段速度场方向主要以 WE 向为主, 并且速率也相对减少。另外, GPS 速度场在断裂南侧比北侧速率大, 利用最小二乘法 (张希等, 1998) 计算研究区的主应变率分布 (图 1) 可以看出, 在断裂南侧主应变率大, 北侧较小; 断裂东

段以 NE 向主压应变为主, 中段和西段以 NE 向主压应变为主, 还具有 NW 向张应变。断裂中段、西段的主应变率比东段大, 说明断裂自西向东挤压作用和走滑作用逐渐减弱, 断裂南侧受到较大的北东向挤压作用, 地表形变主要发生在南侧, 而在北侧由于受到塔里木稳定块体的阻挡, 地表形变量较少。

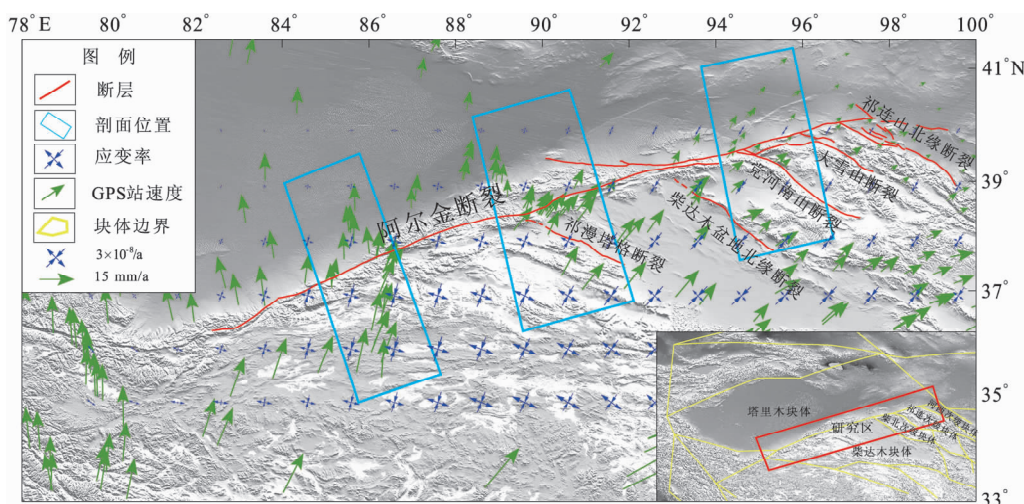


图 1 研究区 GPS 速度场及构造图

Fig. 1 Tectonics and GPS velocity field in the study area

分析断层的 GPS 速度剖面可直观地反映断层两侧块体的差异运动和断层的应变积累状态 (刘晓霞等, 2017)。在阿尔金断裂上选取 3 个 GPS 跨断层速度剖面 (西段、中段、东段), 绘制跨断层 GPS 站速度剖面, 如图 2 所示。由图可见, 断裂以左旋走滑作用为主, 兼有少量逆冲作用, 其西段左旋走滑速率为 7.1 mm/a (图 2a), 逆冲滑动速率为 3.3 mm/a (图 2b); 断裂中段左旋走滑速率为 7.8 mm/a (图 2c), 逆冲滑动速率为 1.8 mm/a (图 2d); 断裂东段左旋走滑速率为 5.0 mm/a (图 2e), 逆冲滑动速率为 1.4 mm/a (图 2f)。断裂中段走滑速率最大, 西段相对较小, 东段速率减小最多。在垂直断层方向上, 断裂西段的挤压作用最大, 由西向东逐渐减小。断裂西段挤压作用大可能是因为受到了南部印度板块向北俯冲挤压、北部塔里木稳定块体的阻碍以及西昆仑断裂逆冲挤压的共同作用。

2 断层闭锁程度及滑动亏损速率分析

2.1 模型原理及设置

本文利用 Tdefnode 负位错反演程序计算断层的

闭锁程度及滑动亏损速率 (McCaffrey *et al*, 2007), 该程序假定块体内部点的运动为块体旋转、块体内部整体均匀应变及块体边界由于断层闭锁产生滑动亏损而引起的地表弹性变形之和, 如式 (1) 所示。模型参数拟合的好坏可由式 (2) 表征:

$$\bar{V}_{sf} = \bar{V}_{br} + \bar{V}_{is} + \bar{V}_{fs} \quad (1)$$

式中: \bar{V}_{sf} 表示实测地表速度; \bar{V}_{br} 为块体旋转引起的速度; \bar{V}_{is} 为块体内部应变引起的速度; \bar{V}_{fs} 为断层闭锁负位错效应引起的速度。

$$\chi_n^2 = [\sum (r_i/f\sigma_i)^2]/dof \quad (2)$$

式中: n 为观测数据的数量; dof 为自由度 (所有观测数据数量 - 自由参数数量); r_i 为观测数据残差; σ_i 为数据标准差; f 为数据误差权重因子; 一般 GPS 水平速度场数据误差的 f 取值范围为 1 ~ 5 (Mao *et al*, 1999)。

在反演阿尔金断裂的闭锁程度过程中, 主要选择了断裂附近的塔里木、柴达木、柴北次级、祁连次级和河西次级 5 个块体。将塔里木块体设置

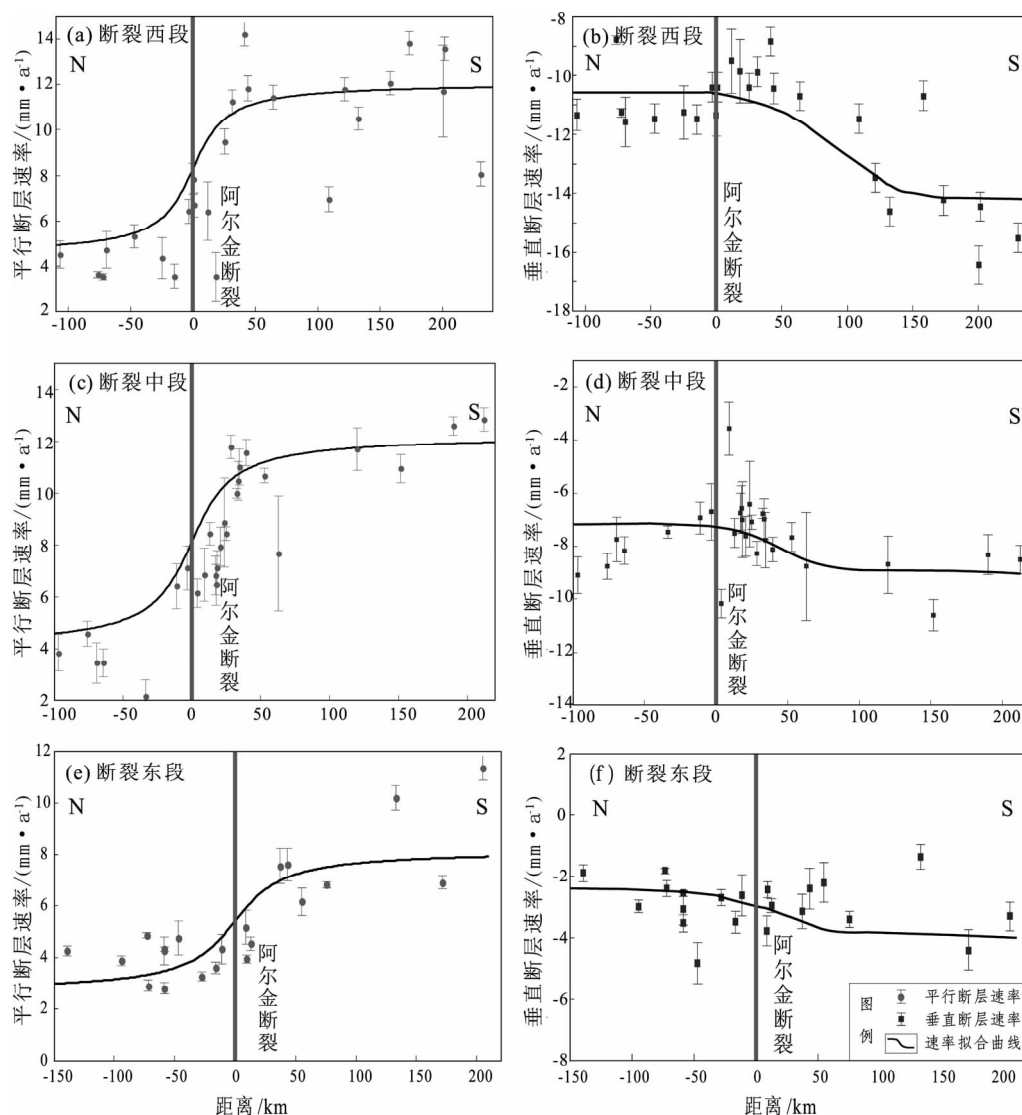


图2 阿尔金断裂跨断层 GPS 速度场剖面

Fig. 2 GPS velocity profile crossing the Altyn Tagh fault

为刚性块体, 其他块体设置为内部均匀应变, 块体的划分参考李煜航等 (2015b) 的块体划分方法。GPS 速度场约束方面, 利用 Zheng 等 (2017) 提供的 1991—2015 年 GPS 数据。反演断层设置中, 在断层走向上, 塔里木块体和柴达木块体相交部分的阿尔金断裂中西段设置了 16 个节点, 每个节点之间距离为 55~60 km。阿尔金断裂东段设置了 24 个节点, 各节点之间的距离为 20 km。在垂直方向上设置了 7 个节点, 距离依次为 0.1, 5, 10, 15, 20, 25 以及 30 km, 断层倾向 SSE, 倾角统一设置为 80°, 模型的格林函数设置为 4×4 (走向与深度方向都为 4 km), 进而计算相邻节点之间断层网格区域的闭锁程度。

在反演阿尔金断裂闭锁程度的过程中, 以

$\chi_n^2 \approx 1$ 为标准寻求最佳模型, 首先删除块体内部与周围测点运动趋势、大小明显不同的点, 删除后最终有 212 个 GPS 测点参与反演, 再经过多次测试, 调整各项参数, 最终得到最佳模型 (李宁等, 2017)。当 GPS 速度场误差权重因子 $f = 4.2$ 时, $\chi_n^2 = 0.98$ (观测值个数为 424, 自由度为 332)。为了更好地说明模型择优和拟合效果, 图 3a 给出了最优模型的拟合残差分布, 从图中可以看出, 只有少部分在块体边界的测站的 GPS 速度残差值较大, 大部分块体内部及断裂附近的测站速度残差较小, 在误差范围 2 mm/a 之内, 速度残差在东西方向 (图 3b) 和南北方向 (图 3c) 上分布都符合高斯正态分布, 说明模型有效并且拟合结果较好。

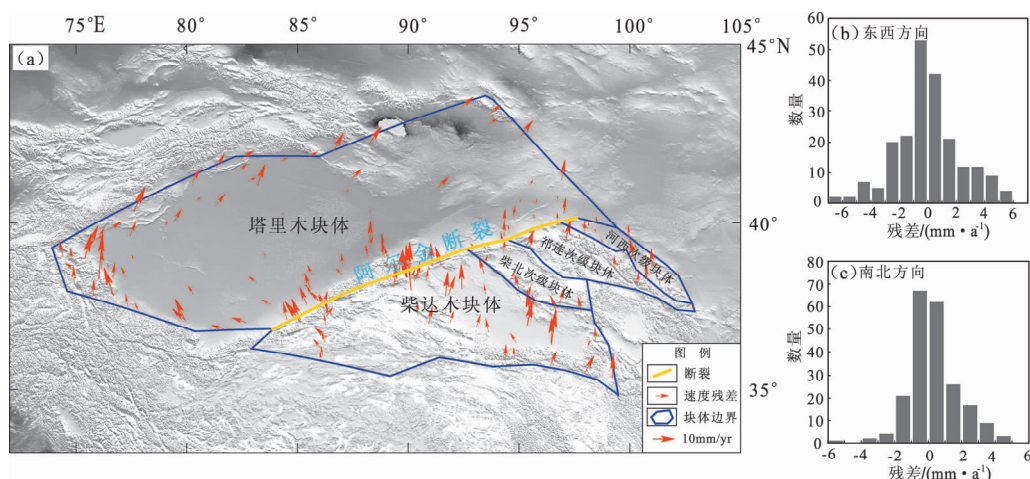


图3 最优模型的速度残差分布图 (a) 和速度残差统计柱状图 (b, c)

Fig. 3 Residual of velocities of the optimal models (a) and statistical histograms of the velocity residuals (b, c)

2.2 断层闭锁程度与滑动亏损速率

通过最佳模型拟合结果, 得到阿尔金断裂闭锁程度分布图 (图4), 通过图4可以看出, 在断裂西段深部基本不闭锁, 而在断裂中段 (91°E) 以东的大部分区域, 呈现较高的闭锁程度, 闭锁深度在断裂西段地表存在浅闭锁, 闭锁深度不足2 km, 到了断裂中段和东段, 闭锁深度达到了25 km, 总体呈现出由西向东, 闭锁深度由浅变深的特征, 这说明断裂东段比西段地震危险性大。另外, 阿尔金断裂与北西向断裂相交的地方, 都发现存在高的闭锁程度及闭锁深度, 以及较高的应力积累, 例如祁曼塔格断裂、柴达木盆地北缘断裂、祁连山北缘断裂等, 说明阿尔金断

裂的闭锁区域有可能与这些北西向斜交的构造活动相关。

由于断层处于闭锁状态, 滑动速率的亏损以应变能的方式积累在断层附近, 所以用滑动亏损速率可以表示断层两盘滑动量转化为应变能的快慢 (李宁等, 2018)。根据反演模型得到了阿尔金断裂滑动亏损速率分布图 (图5), 从图5可以看出, 滑动亏损分布图像与闭锁程度分布图变化基本一致: 断裂的西段滑动亏损速率低, 断裂顶部亏损速率在4~6 mm/a; 断裂中段亏损速率开始增大, 在祁曼塔格断裂与柴北断裂之间亏损速率为6~8 mm/a, 而在柴北断裂至大雪山断裂之间, 亏损速率维持在6~7 mm/a, 没有明显的

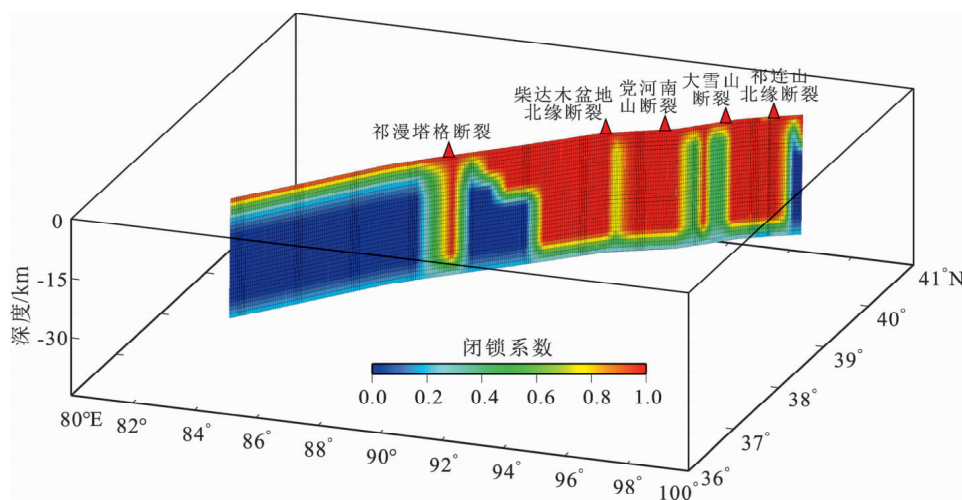


图4 阿尔金断裂闭锁程度分布图

Fig. 4 Locking degree distributions of the Altyn Tagh fault

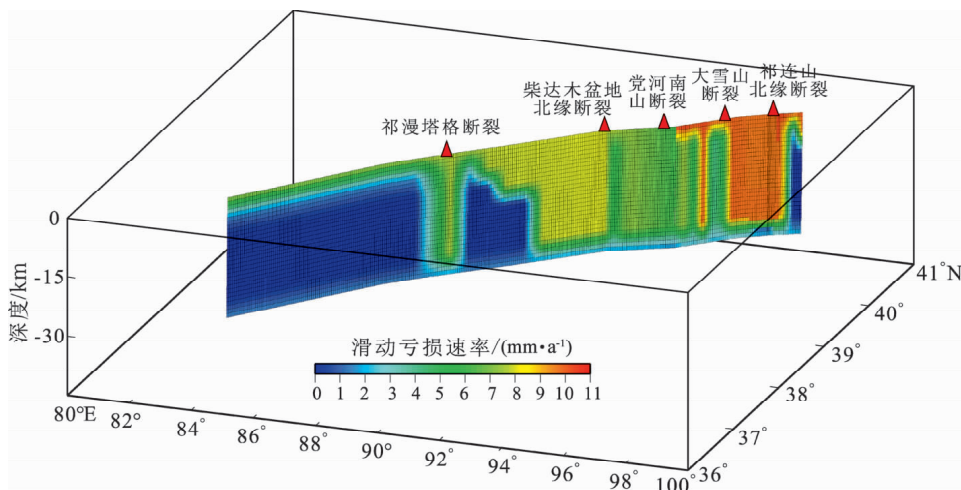


图 5 阿尔金断裂滑动亏损速率分布图

Fig. 5 Slip deficit rate distributions of the Altyn Tagh fault

增大；在断裂东段的大雪山至祁连山北缘断裂之间，亏损速率明显增加，达到 10 mm/a。在阿尔金断裂与北西向活动断裂斜交的部位，都存在较大的滑动亏损速率，说明断层在交汇处快速的积累应变能。

3 小震分布特征

为了研究阿尔金断裂现今活动构造与小震之间关系，分析断裂未来发生强震的地震危险性，利用中国地震局地球物理研究所房立华提供的小震重新定位目录，将 1970 以来发生在阿尔金断裂两侧 25 km 内的地震进行了筛选。剔除震级小于 1.0 级，震源深度小于 1 km 的地震，将结果绘制到震源深度剖面上（图 6）。由

图 6 可以看出，阿尔金断裂震源深度最深为 35 km 左右，震源深度变化较大，小震主要呈条带状分布，在阿尔金断裂与祁曼塔格断裂和祁连山北缘断裂的交汇区域，表现为小震分布密集，且震源深度较大。另外，在与祁曼塔格断裂交汇区域，分布有许多 4.0 级以上的地震，说明在各断裂的交汇部位，构造活动强烈，地震活动性较强，容易发生强震。分析阿尔金断裂震源深度剖面 4.0 级以上地震的空间分布，可知在断裂中东段存在一个地震空段，小震分布稀少，空段内未发生过超过 4.0 级的地震。被 $M \geq 4.0$ 地震围成的地震空段空间尺度约为 400 km，西边界为祁曼塔格断裂交汇处，东边界为大雪山断裂交汇处，深度为 10 ~ 30 km，未来在这个区域有发生强震的可能。

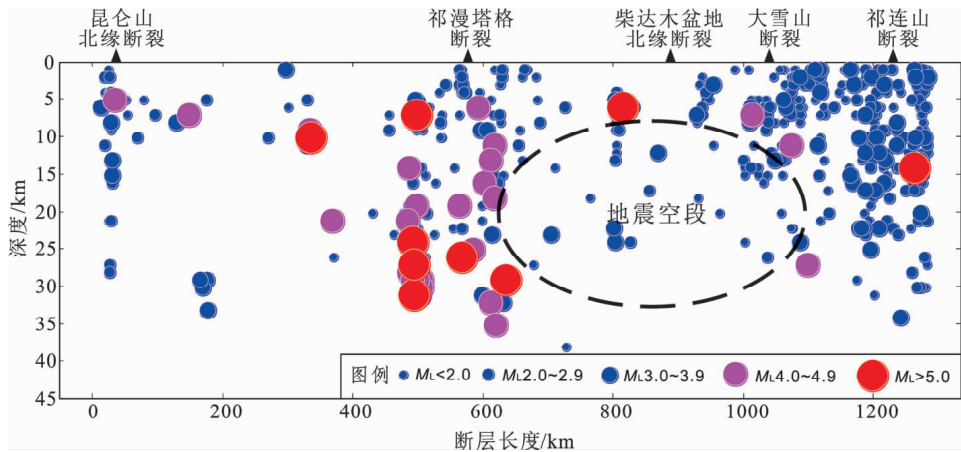


图 6 阿尔金断裂震源深度剖面图

Fig. 6 Profiles of focal depth along the Altyn Tagh fault

根据陆远忠等 (1983) 对我国大陆上所有资料较完整的 6.0 级以上地震的震例的研究结果, 提出 6.0 级以上地震前背景空段的围空长轴 (L) 与未来主震震级之间的经验关系:

$$M_s = 3.39 \lg L_{\text{背}} - 1.48 \pm 0.41 \quad (3)$$

将阿尔金断裂中东段出现的背景空段长轴 $L = 400$ 代入式 (3), 计算得到未来可能发生的主震震级 M_s 为 (7.34 ± 0.41) , 虽然是背景空段, 不是孕震空段, 但在未来也应该对该区域加强关注。

4 讨论

4.1 阿尔金断裂走滑速率减小原因分析

阿尔金断裂 GPS 跨断层速度剖面显示 (图 2), 在断裂北侧区域的运动速率为 $4 \sim 5 \text{ mm/a}$; 而南侧区域的运动速率由西向东逐渐减小, 说明断裂北侧速率较为一致。北侧区域受塔里木块体的影响, 形成一个整体在运动, 没有构造活动的影响, 而南侧速率变化的差异, 可能是由于南侧构造复杂 (季灵运等, 2015), 根据构造样式, 与阿尔金断裂相交的 NW 向的多条断裂分布在阿尔金断裂中段到东段之间, 而阿尔金断裂走滑速率的快速降低也是在断裂中段到东段内, 并且 NW 向的这几条断裂基本都是逆冲型断裂, 主应变率特征也显示 NW 向的断裂具有挤压作用。李海兵 (2001) 提出在阿尔金断裂与分支逆冲断裂交汇的地区, 其走滑速率有明显的突变。

笔者认为阿尔金断裂受到青藏块体北东向的挤压作用以及北部塔里木块体的阻碍后向东运动形成左旋走滑断裂, 断裂在向东运动的过程中由于受到了祁曼塔格断裂、祁连山北缘断裂等北西向逆冲断裂的阻挡作用, 将一部分的走滑速率分解到了这些逆冲断裂上, 减少了阿尔金断裂的走滑速率。徐锡伟等 (2003) 提出阿尔金断裂向东走滑速率降低是三联点附近构造转换的结果, 而 NW 向断裂交汇区域就是三联点的位置。由此可知, 阿尔金断裂走滑速率的降低与相交的 NW 向断裂有关。

4.2 阿尔金断裂的地震危险性

活动断裂在闭锁后, 受到应力作用不断积累能量, 当超过自身稳定极限后, 发生地震并释放能量。所以分析断裂的闭锁程度可以很好地判断

断裂的地震危险性。

根据阿尔金断裂闭锁程度分布的结果 (图 4), 笔者发现在断裂的中东段有较强的闭锁系数, 并且在与北西向的断裂交汇区域也存在较高的闭锁, 断裂走滑速率也在这些断裂附近有明显的减小, 说明阿尔金断裂在向东走滑的过程中遇到了北西向的逆冲断裂后, 受到阻碍作用, 在交汇部位更容易积累应力。

通过小震剖面图 (图 6) 也可以看出, 在断裂的交汇部位, 如祁曼塔格断裂、大雪山断裂、祁连山北缘断裂的小震分布较多, 说明这些区域经常发生闭锁。另外, 依据地震空段划分原则, 笔者在断裂中东段圈了一个地震空段, 位于柴北断裂交汇处, 避开了祁曼塔格断裂、大雪山断裂和祁连山北缘断裂交汇部位, 因为这些地方小震频发, 也伴随有较大的地震发生, 断裂闭锁的能量也随之释放, 处于应力调整阶段。在断裂西段没有圈定空区是因为在小震剖面上没有形成地震分布围控, 且断裂西段的闭锁程度也相对较弱, 故笔者认为阿尔金中东段是未来可能发震的区域。

4.3 阿尔金断裂长期滑动速率分析

阿尔金断裂的长期滑动速率一直是人们研究的重点, 许多学者利用地质资料计算该断裂长期滑动速率。Peltzer 等 (1989) 估算出全新世以来阿尔金断裂带中段和东段的走滑速率分别为 30 和 20 mm/a 。陈正乐等 (2001) 推断阿尔金断裂中段晚新生代的平均滑动速率为 $16 \sim 20 \text{ mm/a}$ 。张岳桥等 (2001) 给出阿尔金断裂晚新生代的平均滑移速率: 西段、中段和东段分别为 $12 \sim 25 \text{ mm/a}$, $8 \sim 20 \text{ mm/a}$ 和 $6 \sim 13 \text{ mm/a}$ 。虢顺民和向宏发 (1998) 认为阿尔金断裂带渐新世以来的走滑速率基本一致, 为 $5 \sim 7 \text{ mm/a}$, 但得到的滑动速率的变化范围较大。谢富仁和刘光勋 (1989) 分析阿尔金断裂构造应力场, 提出在早更新世以前, 断裂以逆冲分量为, 走滑分量较小, 在早更新世后期以来, 受印度板块继续挤压作用, 最大主应力方向变为 NE—SW, 断裂左旋速率明显增加, 所以阿尔金断裂在不同时期滑动速率有所差异。大多数研究显示全新世以来断裂滑动速率为 $20 \sim 30 \text{ mm/a}$ (Peltzer *et al.*, 1989; Meriaux *et al.*, 2003, 2005)。

笔者利用 1991—2015 年 GPS 数据, 通过 Tdef-node 负位错反演程序计算了阿尔金断裂的长期滑

动速率8~11 mm/a,与Shen等(2001)提出的阿尔金断裂中段和东段的滑移速率小于11 mm/a的结果基本一致,而与地质资料计算出来的长期滑动速率相比较小。由于地质学结果反映的是断裂在地质时间尺度下的综合效应,而GPS结果体现的则是现今断裂的活动状态,如果2类结果在误差容许的范围内均是精确的,其差异又真实存在,那么这个差异就可能暗示了阿尔金断裂的左旋滑移速率呈急剧减小的趋势(熊熊等,2006)。GPS资料得到的长期滑动速率的减少,可能是断裂现今处于应力积累状态,地震危险性较大;也可能是现今构造活动性的变化,例如东昆仑断裂活动性增强,吸收了部分来自青藏块体的挤压作用,或者由于青藏高原地壳缩短增厚吸收了部分的应力,导致了断裂滑动速率减小。

5 结论

本文利用1991—2015年GPS速度场数据,分析了阿尔金断裂各段的现今走滑速率,采用Tdefnode程序反演了断裂的闭锁程度及滑动亏损速率,结合小震分布情况对断裂的地震危险性进行分析,取得如下认识:

(1) 根据GPS跨断层速度剖面的结果,断裂西段、中段和东段的走滑速率分别为7.1 mm/a, 7.8 mm/a, 5.0 mm/a,断裂向东速率逐渐变小,在与北西向断裂交汇区域减小最快。

(2) 阿尔金断裂西段闭锁程度弱,中东段闭锁程度较高,对应的滑动亏损速率变化一致,中段亏损速率为6~8 mm/a,到祁连山北缘断裂附近亏损速率增加到10 mm/a,断裂中东段的地震危险性较大。

(3) 地震剖面显示在祁曼塔格断裂和祁连山北缘断裂附近小震密集,震源深度大,并在断裂中东段圈定出一个地震空段,地震危险性较高,未来可能发生地震的震级 M_s 为(7.34±0.41),应该加强对地震空区的持续关注。

感谢中国地震局地球物理研究所房立华研究员提供小震重新定位目录。

参考文献:

柏美祥. 1992. 阿尔金活动断裂带的运动学和动力学特征[J]. 新疆地质, 10(1): 57-61.

- 陈正乐,张岳桥,陈宣华,等. 2001. 阿尔金断裂中段晚新生代走滑过程的沉积响应[J]. 中国科学:地球科学, 31(增刊1): 90-96.
- 魏顺民,向宏发. 1998. 阿尔金构造系渐新世—中新世以来断裂左旋位错时空分布规律研究[J]. 地震地质, 20(1): 9-18.
- 季灵运,刘立伟,郝明. 2015. 利用InSAR技术研究滇西南镇康—永德地区现今地壳形变特征[J]. 地震研究, 38(1): 84-89.
- 李海兵,杨经绥,许志琴,等. 2006. 阿尔金断裂带对青藏高原北部生长、隆升的制约[J]. 地学前缘, 13(4): 59-79.
- 李海兵. 2001. 阿尔金断裂带的形成时代及其走滑作用对青藏高原北部隆升的贡献[D]. 北京:中国地质科学院.
- 李宁,赵强,李金. 2017. 基于InSAR形变观测反演2015年皮山 $M_s 6.5$ 地震滑动分布[J]. 地震, 37(2): 67-76.
- 李宁,朱良玉,刘雷. 2018. 丽江—小金河断裂带现今闭锁程度与地震危险性分析[J]. 地震研究, 40(2): 89-95.
- 李煜航,崔笃信,郝明. 2015a. 利用GPS数据反演青藏高原东北缘主要活动断裂滑动速率[J]. 地球科学——中国地质大学学报, (10): 1767-1780.
- 李煜航,王庆良,崔笃信,等. 2015b. 利用GPS数据反演阿尔金断裂现今滑动速率[J]. 地震地质, 37(3): 869-879.
- 刘晓霞,江在森,冯蔚. 2017. 2016年熊本 $M_w 7.1$ 地震前GPS形变特征分析[J]. 地震研究, 40(3): 458-464.
- 陆远忠,王伟,沈建文. 1983. 地震空区与逼近地震(续)[J]. 地震学报, 5(2): 129-144.
- 马玉虎,马辉青. 2014. 阿尔金断裂带中东部地震活动特征及危险性讨论[J]. 高原地质, 26(2): 1-6.
- 谢富仁,刘光勋. 1989. 阿尔金断裂带中段区域新构造应力场分析[J]. 中国地震, 5(3): 26-36.
- 熊熊,王继业,滕吉文. 2006. 阿尔金断裂不同时间尺度下的滑移速度及构造意义[J]. 地质科技情报, 26(3): 21-28.
- 徐锡伟, Tapponnier P, van J, et al. 2003. 阿尔金断裂带晚第四纪左旋走滑速率及其构造运动转换模式讨论[J]. 中国科学:地球科学, 33(10): 967-974.
- 许志琴,杨经绥. 1999a. 大陆俯冲作用及青藏高原周缘造山带的崛起[J]. 地学前缘, 6(3): 139-151.
- 许志琴,杨经绥,张建新,等. 1999b. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制[J]. 地质学报, 73(3): 193-205.
- 张希,江在森,张四新. 1998. 借助最小二乘配置整体解算地壳视应变场[J]. 地壳形变与地震, 18(2): 57-62.
- 张岳桥,陈正乐,杨农. 2001. 阿尔金断裂晚新生代左旋走滑位错的地质新证据[J]. 现代地质, 15(1): 8-12.
- Mao A L, Harrison C G A, Dixon T H. 1999. Noise in GPS coordinate time series [J]. Journal of Geophysical Research, 104 (B2): 2797-2816.
- Mccaffrey R, Qamar A I, King R W, et al. 2007. Fault locking, block rotation and crustal deformation in the Pacific Northwest [J]. Geophys J Int, 169 (3): 1315 - 1340, doi: 10.1111/j.1365 - 246X.2007.03371.x.
- Mériaux A S, Tapponnier P, Ryerson F J, et al. 2003. Post - Glacial Slip - Rate on the Aksay Segment of the Northern Altyn Tagh Fault, Derived from Cosmogenic Radionuclide Dating of Mor - phological Offset Features [J]. Geophys Res Abstracts, 5:08062.
- Mériaux A S, Tapponnier P, Ryerson F J, et al. 2005. The Aksay segment

- of the northern Altyn Tagh Fault; Tectonic geomorphology, landscape evolution, and Holocene slip rate[J]. *J Geophys Res*, 110(B4): 229–246.
- Peltzer G, Tapponnier P, Armijo R. 1989. Magnitude of Late – Quaternary Left – Lateral Displacements along the North Edge of Tibet[J]. *Science*, 246(4935): 1285–1289.
- Shen Z K, Wang M, Li Y X, *et al.* 2001. Crustal deformation along the Altyn Tagh Fault system, western China, from GPS[J]. *J Geophys Res*, 106(12): 30607–30621.
- Zheng G, Wang H, Tim J W, *et al.* 2017. Crustal Deformation in the India – Eurasia Collision Zone From 25 Years of GPS Measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(11).

Analysis of Locking and Seismic Risk of the Altyn Tagh Fault based on GPS Data

LIU Lei, ZHAO Ningyuan, WANG Yang

(The Second Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, Shanxi, China)

Abstract

By using the GPS velocity field during 1991 ~ 2015, we analyze the slip rate of the Altyn Tagh fault, and then we invert the fault locking and slip deficit of the Altyn Tagh fault by negative dislocation inversion with Tdefnode code. Moreover, combining with the distribution characteristics of small earthquakes, we analyze the seismic risk of the Altyn Tagh fault. The results show that the slip rate of the western segment is 7.1 mm/a, the middle segment is 7.8 mm/a, and the eastern segment is 5.0 mm/a. The slip rate decreases in the intersection with NW faults. The middle – eastern segments of the fault is completely locked. And the slip deficit rate of the middle segment is about 7 ~ 8 mm/a, and increased to 10 mm/a in the eastern segment. Combining with the hypocentral depth profile, we speculate the middle – eastern segments is a seismic gap, and have a strong seismic risk. Therefore, we should pay more attention to it.

Keywords: the Altyn Tagh fault; negative dislocation inversion with Tdefnode; fault locking degree; seismic risk