

阿尔金断裂不同时间尺度下的滑移速率及构造意义

熊 熊^{1,2}, 王继业^{1,3}, 滕吉文²

(1. 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100101; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要:阿尔金断裂是亚洲大陆最大、也是最活跃的走滑断层之一。一般认为, 印度板块与欧亚大陆间的汇聚通过地壳增厚与沿阿尔金等主要深大断裂的侧向滑移 2 种机制被青藏高原造山带的地壳形变所吸收。由于这 2 种机制所预测的阿尔金断裂的左旋滑移速率相差甚巨, 因此, 阿尔金断裂的滑移速率成为判断 2 种机制相对重要性的重要依据。采用地质学、大地测量学及数值模拟方法对阿尔金断裂滑移的研究结果表明, 阿尔金断裂的滑移速率呈长期减小的趋势; 青藏高原经历了由块体的侧向挤出向地壳增厚的转变过程; 阿尔金断裂在不同地质时间尺度下的滑移速率尚需精确确定; 单纯将阿尔金断裂滑移速率的大小作为判断青藏高原构造模式的依据也是应该受到质疑的。

关键词:阿尔金断裂; 滑移速率; 构造意义; 时间尺度

中图分类号: P542.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-7849(2006)03-0021-08

阿尔金断裂地处青藏高原北缘, 由西昆仑至祁连山, 绵延超过 1 600 km^[1], 勾勒出青藏高原的北部边界(图 1)。研究表明, 阿尔金断裂经历了巨大的左旋走滑运动, 是地球上最大的走滑断层和亚洲大陆滑移速率最快、最活跃的构造断裂之一^[2]。

地质研究表明, 自印度板块与欧亚大陆在约 50 Ma 发生碰撞以来, 至少有 1 400 km 的南北向地壳缩短被喜马拉雅—青藏高原造山带所吸收^[1-2]。有 2 种主要的机制用以解释这种地壳缩短及其被吸收

的过程, 即地壳岩石圈的增厚和青藏高原地壳块体沿阿尔金等主要深大断裂的侧向运动, 前者常被称为“动力学模式”或“地壳增厚假说”^[3-4], 后者则被称为“运动学模式”或“大陆逃逸假说”^[5-9]。毫无疑问, 在青藏高原造山带的演化过程中这 2 种作用一定都存在, 大家普遍感兴趣的是这 2 种过程在调节青藏高原地壳缩短作用中各自所占的权重。

2 种过程所预测的阿尔金断裂的滑移速率相差甚大, 按“大陆逃逸假说”, 大陆变形是以沿巨大断裂

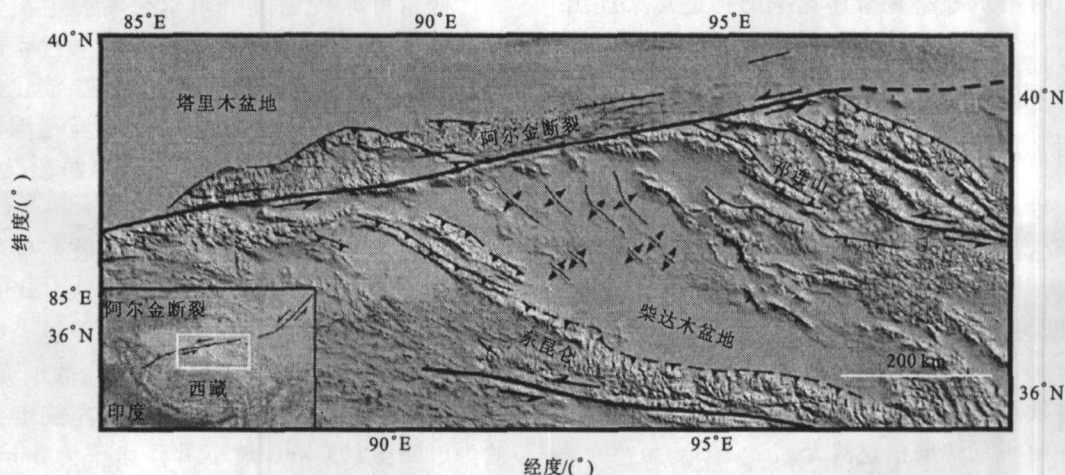


图1 阿尔金断裂位置示意图

Fig.1 Sketch showing the Altyn Tagh Fault (ATF)

收稿日期: 2005-02-23

编辑: 黄秉艳

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40274037; 40474028); 中国科学院创新重要方向项目(kzcx3-sw-153)

作者简介: 熊 熊(1965—), 男, 研究员, 主要从事地球动力学研究。

的走滑运动和块体的横向滑移为主要形式进行的,青藏高原东部和华南块体相对于稳定的西伯利亚的向东挤出运动应占印度和欧亚板块汇聚速率的 50% 以上^[5-9]。那么,作为青藏高原北边界的阿尔金断裂的左旋滑移速率应该在 20 ~ 30 mm/a 间。而根据“地壳增厚假说”,大陆变形以地壳的缩短和增厚为主要特征,青藏高原东部和华南块体相对于稳定的西伯利亚的向东挤出运动的速率不会超过印度和欧亚大陆汇聚速率的 20%,相应地,阿尔金断裂的左旋滑移速率应不超过 10 mm/a^[3-4,10]。由于阿尔金断裂左旋滑移速率的大小已成为判断青藏高原地壳块体侧向运动在青藏高原动力演化过程中所占权重大小的一个重要的间接定量依据^[2-11],因此,长期以来,对阿尔金断裂走滑的开始年代、位错量及滑移速率的研究已吸引了全球地学家的广泛关注,成为青藏高原造山带构造演化动力学研究中的一个热点问题。

通常采用地质学、地震学和大地测量学方法来确定断裂的滑移速率。地震学方法主要通过地震矩张量资料来反演断裂的运动学参数^[12],其结果的精度和可靠性受矩张量、断裂形变带空间尺度及时域范围等诸多因素的制约。由于在阿尔金断裂及周边地区记录到的历史地震数量非常有限,其研究程度不高,因此,对阿尔金断裂滑移速率的认识主要来自地质学和大地测量学研究。

笔者拟综合地质学、大地测量学及数值模拟等方法确定阿尔金断裂在不同时间尺度下的滑移速率,并试图对阿尔金断裂滑移速率的构造意义提出新的认识。

1 基于地质学研究确定的阿尔金断裂的滑移速率

近 50 年来,前人对阿尔金断裂进行了较系统的地质学研究,在此期间,对阿尔金主断裂进行了多次的卫片解析^[11]、地质调查和野外踏勘^[13-22],目前关于阿尔金断裂滑移速率的认识也主要来自地质学的研究成果。但是,关于阿尔金断裂左旋走滑的启动年代、位错量及滑移速率的大小等问题尚存在很大的争议,各种研究结果相差甚大。

Peltzer 等^[11]利用沿阿尔金断裂走向长近 2 000 km 上的 18 个站点的 SPOT 卫星图像(其监测精度为每年 1 mm),解读了全新世(约 1 万 a)以来的断层位错量,在假设阿尔金地区大量冲积扇的沉积与晚后冰期的结束有关的前提下,推测阿尔金断裂自全新世以来的滑移速率约为 20 ~ 30 mm/a,滑移速率在断层的不同区段而有所不同,在西段和中段的

部分区段,滑移速率约为 (12 ± 2) mm/a,而在中段的另一部分区段和东北段,滑移速率约为 30 mm/a。陈正乐等^[16]通过对阿尔金断裂中段晚新生代盆地的沉积特征和构造变形过程的野外观测及室内分析,建立了阿尔金断裂中段晚新生代的沉积序列。通过新近纪沉积体错移和盆地形成与演化过程的复原分析,陈正乐等确定阿尔金断裂自新近纪以来积累了 80 ~ 100 km 的左旋走滑位移量,而新近纪地质体错动关系及区域地质调查资料显示该左旋位移发生于约 5 Ma,由此推断阿尔金断裂中段晚新生代的平均左旋滑移速率为 16 ~ 20 mm/a,这个估计值与 Peltzer 等^[11]的结果比较接近。Yue 等^[2]根据 Xorkol 盆地到祁连山之间野外地质考察结果的分析,确定阿尔金断裂东段和中段的左旋走滑位移量为 (375 ± 25) km,相应地,其新生代平均滑移速率约为 12 ~ 16 mm/a。Meriaux 等^[18]通过对阿尔金断裂东段 Aksay (39°N, 94°E) 附近冲积扇和河成阶地进行的 ¹⁴C、¹⁰Be 和 ²⁶Al 放射性元素测年获得千年尺度的断层位移量及滑移速率,他们确定的平均滑移速率约为 (20.3 ± 1.1) mm/a。根据不同点的卫片解译滑移速率的相近结果、放射性元素和放射性碳测年结果的一致性、地表侵位和古气象地质时代标定的吻合性,Meriaux 等认为地质长时间尺度下的滑移速率是可信的。这些较大滑移速率的估计暗示阿尔金断裂的左旋走滑吸收了相当部分的印度—欧亚板块的汇聚,显然,也支持青藏高原的地壳缩短主要由高原块体沿断层向东运动所吸收的观点。

张岳桥等^[17]通过沿阿尔金断裂中段发育的上新世走滑盆地的沉积历史、构造变形过程的野外观测和分析以及对索尔库里盆地形成、演化过程中沉积环境的复原分析,给出了一个较宽范围的阿尔金断裂晚新生代的平均滑移速率:西段为 12 ~ 25 mm/a,中段为 8 ~ 20 mm/a,东段为 6 ~ 13 mm/a。

Meyer 等^[14,19]对阿尔金断裂最东端的一个分支进行了地质考察,运用剖面平衡法并考虑侵蚀和沉积过程中的物质守恒,估算了位于昆仑断层和阿拉善地块之间的青藏高原晚新生代的地壳缩短量,推算出在全新世沿 N70°E 方向的左旋走滑位移量约为 (156 ± 40) km,最小滑移速率为 4 mm/a。向宏发等^[20]根据航片、卫片分析和地质考察结果,将阿尔金东部从阿克塞西红崖子乡东经肃北至红留下口长约 150 km 的构造区域内第四纪以来的水系位错进行了分级,并测定了其形成年龄,进而给出各时段断裂的滑移速率,推算出在这个区域阿尔金断裂的滑移速率介于 4.7 ~ 6.7 mm/a 间,平均值为 6.0 mm/a。Zhang 等^[21]对阿尔金断裂西段 (86°E ~ 92°

E)采集的榴辉岩进行了 Sm-Nd 和 U-Pb 测年研究,得到榴辉岩的变质年代为早古生代(约 500 Ma),并推断阿尔金断裂的走滑位移量为 350~400 km。据此推断,自早古生代以来,阿尔金断裂西段的平均滑移速率为 0.7~0.8 mm/a。他们确定的滑移速率偏低的原因主要是由于地质测年得到的阿尔金断裂左旋走滑启动的年代(古生代)过于久远。国家地震局^[22]实施了沿整条阿尔金断裂进行地质考察的项目,根据地质填图和水平错断地貌特征的¹⁴C 测年结果,在几千年到几万年的时间尺度下,确定出阿尔金断裂在第四纪的最小滑移速率约为 5 mm/a。这个结果被认为是由地质学确定的阿尔金断裂滑移速率的下限估计值。显然,这些关于阿尔金断裂滑移速率的地质学估计与上面的研究结果存在很大的差异,其差值高达一个数量级。

理论上,活跃断层的滑移速率由位错量除以发生滑移的时间来确定的^[23],因此,滑移速率的精度就取决于位错量的确定和地质测年结果的精度。需要注意的是,关于沿阿尔金断裂主走滑断裂走滑幅度位错量的估计通常是通过穿过断裂带的挤入点^[24]和古地理重建来确定^[25]。在沿阿尔金断裂总左行走滑位移量的估计和推算中使用的一些位移标记是广泛的构造特征(深层岩带、缝合带),而对它们的边缘则缺少空间定义,表现出很大的不确定性^[1]。此外,关于阿尔金断裂的初始发生时间,现有的结论相差非常大,如元古宙^[26]、早古生代^[27]、华力西期^[28]、侏罗纪^[29]以及晚白垩纪^[30]、新生代^[31-32]等。如果位移标记形成于古生代,而确定地质特征的位移是发生在古生代、中生代还是新生代印度板块—欧亚板块碰撞期间却是不确定的^[1],因此,在位移量和走滑持续时间这两个方面,目前都还存在着较大的不确定性,这也许就是造成阿尔金断裂滑移速率的地质学估计结果之间相差较大的原因。Yin 等^[33]试图通过沿阿尔金断裂东段进行的详细地质填图来约束阿尔金断裂的走滑位移量及其形成年代。他们在若羌的东面揭示出可以约束东部阿尔金断裂整体滑动一小部分的一个挤入点,这个挤入点由一对反倾斜、相向移动的新生代逆冲断裂所确定,由此推测在该区域新生代的逆冲作用发生于晚始新世—渐新世(约 40~32 Ma),与下盘前陆盆地沉积同时形成,并推算出自早渐新世以来沿阿尔金断裂东段的左行走滑位移量为(280±30) km,平均滑移速率为 7~9 mm/a。

2 基于大地测量学数值模拟方法确定的阿尔金断裂的滑移速率

除地质学和地震学方法外,关于阿尔金断裂滑

移速率的另一类重要结果来自大地测量学研究。大地测量学方法最重要的意义在于提供了一类独立的观测信息,以填补地质学研究在现今几年时间尺度下的观测空白,且无论是在时间还是在位移量的测定上,以 GPS 为代表的现代大地测量技术都具有地质学和地震学方法无可比拟的高精度^[34]。

目前在阿尔金地区已经进行了一些 GPS 观测^[35-37]。Bendick 等^[35]在断裂中段 86°E~92°E 范围内实施了沿一条测线的跨断裂观测,得出该段的左旋滑移速率为(9±5) mm/a,该值仅为多数地质学结果的 1/2~1/3。由于在观测期间,在观测段内没有发生震级大于 7 级的地震,因此,可以认为这个滑移速率未受干扰,代表了现今比较稳定断裂的运动状态。尹光华等^[37]在阿尔金断裂中部乌尊硝段测得的最大滑移速率为(9±5) mm/a。Shen 等^[36]根据 1993~1997 年在阿尔金断裂邻近地区的 GPS 观测以及 1998 年中国—加州大学洛杉矶分校的联合考察结果,给出了断裂周边地区 25 个测点的 GPS 速度。由于 Shen 等的结果对阿尔金断裂西段南部块体缺乏 GPS 观测,因此无法确定断裂西段的滑移速率,且对断裂东段的北部块体同样缺乏 GPS 观测,以 Chen 等^[38]的部分 GPS 测点结果作为补充,Shen 等推断阿尔金断裂中段和东段的滑移速率小于 11 mm/a。由于 Shen 等^[36]和 Chen 等^[38]分别给出的断裂东段南部块体的 GPS 速度存在一定的差异,Shen 等推断的滑移速率可能存在一些偏差,但这个结果至少圈定了断裂在这一段上滑移速率的上限^[36]。

由于这些 GPS 观测主要集中于阿尔金断裂的局部地区,而相对长约 1 600 km 的阿尔金断裂,局部的结果难以说明整个断裂的整体运动状态。正因为此,Wallace 等^[39]于 2002 年在 Bendick 等^[35]测线以西 300 km 处布设了一条长约 60 km 的 GPS 测线,他们的观测数据验证了 Bendick 等^[35]的结果。

尽管通过这些 GPS 测量可以了解阿尔金断裂局部地区现今的滑移速率,但由于受经费投入及实际观测条件的限制,对整条断裂实施 GPS 测量至少在相当时期内还是一个遥远的目标,因此,目前只能借助现有 GPS 观测约束下的数值方法^[40-44]来了解整条断裂的滑移速率^[45]。

数值模拟的主要思路是假设研究区内所有站点的速度或位移之间存在内在的力学联系,并被一定的力学模型所控制。因此,如果能够通过建立力学模型、利用现有的 GPS 观测作为约束条件、通过模拟手段确定这种控制地壳运动与变形的力学模式,

就可利用得到的模型来预测其他未被 GPS 观测覆盖区域的速度场或位移场,以及沿整条断裂连续分布的速度场和滑移速率。笔者将整个青藏高原及邻近区域作为研究区,分两步实施模拟: 模型边界上的 GPS 速度值作为边界条件引入,而不对模型内部施加任何大地测量先验信息,以保证模拟结果的相对独立性。将模拟结果与内部点的 GPS 速度值进行比对,调整模型力学参数,以达到预测值与观测值的最佳拟合; 将阿尔金断裂附近的 GPS 测点中受区域构造因素影响的 3 个点 BNST、YUTI 和 LOBU(图 2)以及模型内部其他区域所有的 GPS 速度值引入,作为内部约束条件,进一步精化模型,而阿

尔金断裂附近其他点的 GPS 速度仍作为比对条件。显然,如果模拟值与观测值达到可接受的吻合程度,就可以充分利用此模型来预测阿尔金断裂及周边地区连续的速度场分布。笔者以模型预测值与 GPS 观测值之间的标准偏差来衡量其吻合程度,得到阿尔金断裂周边地区 34 个 GPS 站点上模拟值与观测值的标准偏差 σ_N 和 σ_E 分别为 2.3、2.8 mm/a,这与 GPS 结果南北向和东西向 1 σ 不确定度(2.2 mm/a 和 2.4 mm/a^[34])相当(图 2)。据此,笔者认为该模型很好地描述和刻画了实际地壳运动场,可用来预测阿尔金断裂上及周边区域未被 GPS 测量覆盖地区的速度场。

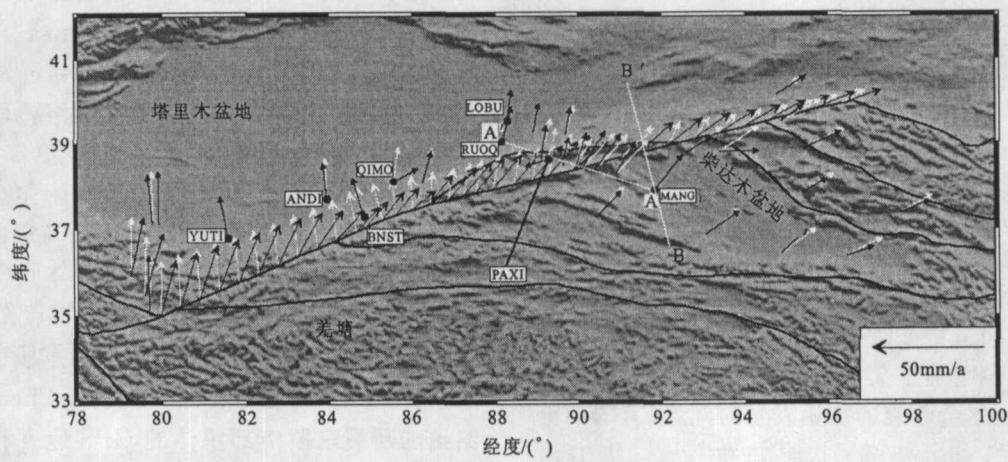


图 2 沿阿尔金断裂的速度分布

Fig.2 Velocities along the ATF

黑色和白色箭头分别表示数值模拟得到的阿尔金断裂南、北边界上的运动速度;黑色和白色三角箭头分别表示阿尔金地区 GPS 测量速度和模拟预测速度。A-A^[35]和 B-B^[36]分别为跨阿尔金断裂的 2 条 GPS 测线

将获得的断层两侧的速度沿断层走向投影,并计算其差值,即可获得沿断层分布的滑移速率。计算所得的阿尔金断裂平均滑移速率为(7.4 ±1) mm/a,其沿断层分布的细节示于图 3。由图 3 可见,阿尔金断裂西端的滑移速率较低(5 mm/a),沿断层走向向东,滑移速率迅速增大,在距西端约 390 km 左右的西段达到最大值(约 9.4 mm/a);在中段塔里木、柴达木和羌塘 3 个块体的结合部,滑移速率减小并伴随小尺度的变化,此变化应该与此处复杂的地壳运动形式(图 2)以及 3 个块体物性力学参数的差异有关,中段的滑移速率较平缓,数值约保持在 8 mm/a 左右;继续向东,滑移速率逐渐减小,在东端减小为 5 mm/a。

需要注意的是,由于我们的模拟是基于 GPS 资料作为约束的,因此,和 GPS 观测应属同一类时间

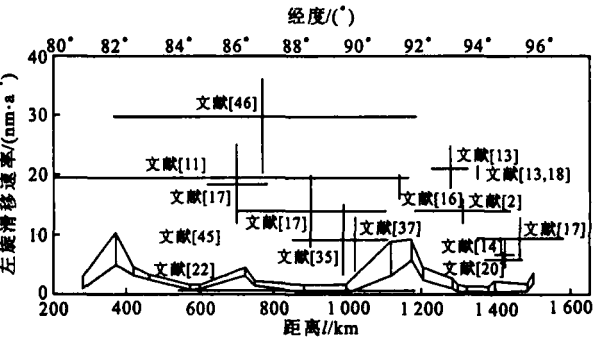


图 3 各类研究确定的阿尔金断裂的左旋滑移速率

Fig.3 Left-lateral slip-rate of the ATF determined by various studies

下横坐标为距阿尔金断裂西端的距离,图中竖线段表示滑移速率的范围;横线段表示确定的滑移速率在阿尔金断裂上的区段

尺度(为 10 a 左右)的大地测量学证据。

3 阿尔金断裂不同时间尺度下滑移速率的构造意义

为了便于比较,将阿尔金断裂左旋滑移速率的研究结果示于图 3。由图 3 可见,地质学方法确定的阿尔金断裂的滑移速率从每年小于数毫米到大于 3 cm,其变化范围高达一个数量级。如前所述,这种较大的变化范围主要源于滑移量的确定及发生滑移时代的地质测年结果的不确定性。例如, Hetzel 等^[23]根据对青藏高原北缘一系列逆冲断层的新的测年结果,将发生滑移运动的年代从约 2 万 a 前提前到 4~17 万 a 前,相应地,滑移速率减小了一个数量级。但是,尽管尚存在较大争议,多数地质学结果均显示至少在百万年的时间尺度下,阿尔金断裂的滑移速率为 20~30 mm/a。它表明青藏高原在地质时间尺度下的构造过程是以块体的侧向逃逸为主,地壳的增厚仅是次要过程。

另一方面,大地测量观测^[35-37]、数值模拟结果^[45]均与地质学结果存在巨大差异,而正是这一大至一个数量级的差异才引发了目前关于青藏高原构造模式的激烈争论。许多研究者以此为依据重新审视和研究了青藏高原动力学演化模型^[10,35,47],认为 GPS 测定的滑移速率支持地壳增厚的所谓“动力学模式”预测的结果,而与“大陆逃逸假说”预测的滑移速率相去甚远,据此认为现今的 GPS 观测不支持“大陆逃逸假说”的观点。

显然,如果这一差异是错误的,无疑暗示,或地质学结果偏大、或大地测量学结果偏小、或两者均有偏差。导致大地测量学结果偏小一个可能的原因是断裂处于地震间歇期,其浅部处于锁闭状态,因此地表测量无法真实反映断裂的运动状态。但是,无论是 GPS 测量还是笔者的模拟结果,其跨度均超过数百公里,较低的滑移速率难以用近断裂的锁闭状态来解释。实际上,阿尔金断裂周边地区近百年来没有发生过大地震^[36],因此可基本排除地震后形变对观测所带来的影响,认为 GPS 观测结果描述的是断裂稳定的运动状态。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,如果两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,断裂的活动性正在逐渐减弱。导致这种滑移速率减小和断裂活动性减弱的可能机制是阿尔金断裂周边的其他断裂,如昆仑断裂发生构

造活化,部分地吸收了高原块体的侧向运动,使阿尔金断裂的滑移速率相应减小。但是, van del Woerd 等^[48]的研究结果显示,至少在过去 4 万 a 内,昆仑断裂长期保持着相对稳定的滑移速率(约 11.5 mm/a),且无论是地质学证据,还是大地测量学证据都未显示出昆仑断裂的活化过程。另一种解释是高原块体的顺时针转动减慢了,但同样地,也没有独立的地质学和大地测量学证据证明这个过程。

尽管阿尔金断裂滑移速率减小的动力学机制仍然是困惑地学界的一个谜,但是,如果 2 种构造模式的力学前提及阿尔金等深大断裂滑移速率与高原构造模式之间的对应关系成立,那么,还是可以根据地质学和大地测量学得到的滑移结果推断青藏高原的构造经历了 2 个阶段,即从块体侧向逃逸到地壳缩短增厚。由于地质学结果之间尚存在较大差异,因此很难界定这种构造模式转换的确切时代。根据 Peltzer 等^[11]的全新世滑移速率为 20~30 mm/a 的结果,可以推断在过去数千至一万年左右的时间尺度内,阿尔金断裂的滑移速率减小了一个数量级,青藏高原的构造模式相应地发生了巨变。但是,却很难想象一种动力学机制能在如此短的时间尺度内驱动青藏高原的构造模式发生如此巨大的转变。最新的一项研究表明^[49],阿尔金断裂的滑移速率在早中新世前至早中新世后大约 10 Ma 时间尺度内由约 20 mm/a 减小至不到 10 mm/a,显然,10 万 a 的时间尺度对理解青藏高原构造模式的转变可能更好接受一些,但是,对于控制这种构造模式和断裂滑移速率减小的机制目前仍不清楚。

4 思考与讨论

4.1 结果的差异性和时间尺度问题

GPS 等空间技术的出现和在地壳运动变形监测中的应用不仅使传统大地测量学的面貌发生了根本的改变,而且极大地促进了其他相关学科研究的发展,如对阿尔金断裂现今滑移速率的确定就导致了对传统“大陆逃逸假说”的挑战。但是,需要注意的是, GPS 等大地测量资料和结果在构造学中的作用常常被不适当地夸大,而其本身内在的约束和限制却往往被忽视。

就时间尺度而言,地质学结果反映的是数千至百万年时间尺度下断裂运动的一个平均效应,而 GPS 测量体现的则是大约 10 a 时间尺度下的变化,是漫长地质演化中“现今”这一个瞬间的状态。如果没有足够的证据证明青藏高原和阿尔金断裂的运动形式在至少 45 Ma 内是均匀的、无变化的,因此由

GPS 证据反推青藏高原在地质时期的构造历史是十分危险的。事实上,已经有很多研究表明青藏高原及阿尔金断裂的演化过程是非均匀的、分阶段的^[50-51],甚至包含突发的剧烈过程和阶段性轮回式构造过程。另外,由于所反映的时间尺度不同,GPS 和地质学方法获得的地壳形变结果体现的力学背景也是不同的。地质学结果体现的是地壳介质在力的作用下发生的永久不可恢复的塑性形变,而 GPS 等大地测量手段测得的形变则包含了永久不可恢复的塑性形变和在地震后可恢复的弹性形变^[52]。因此,2 种形变不同的力学背景决定了在资料采用上的权重及力学模型的选取。在空间尺度上,GPS 结果反映的仅仅是地表的形变过程,如果断层浅层处于锁闭状态,GPS 测得的位移则偏小,但当发生地震而导致断层错动时,GPS 观测结果则偏大。因此,由于受到时间和空间尺度上的限制,用 GPS 测量结果进行长时间尺度下地球动力学过程的推断必须置于一定的、确切的前提之下,不结合其他观测证据而将 GPS 结果与地质学结果进行简单比对是草率和冒险的。

就阿尔金断裂的滑移速率以及它对青藏高原构造演化 2 种模式假说的构造意义而言,应该说地质学的结果更能从本质上说明问题,因为青藏高原是诸多块体经历至少 45 Ma 演化的结果,阿尔金断裂的走滑运动也进行了至少上百万年的时间。因此,考察阿尔金断裂对青藏高原演化的构造意义,至少要了解断裂在印度板块与欧亚大陆碰撞之后 45 Ma 内的长期构造运动,而这并不是几年的 GPS 观测就能简单概括的。

但是,作为现今高精度的地表运动位移的测量结果,GPS 观测补充了从一个侧面认识青藏高原及阿尔金断裂现今运动状态的约束,由此,可以有限度地讨论青藏高原演化的一些动力学过程。例如,阿尔金断裂的现今地壳运动远非其构造历史上那么强烈,其左旋走滑活动呈逐渐减弱的趋势。尽管无法排除青藏高原块体沿巨型断裂的侧向运动在青藏高原构造历史上的重要作用,基于 GPS 的测量结果,至少能得到这样的结论,即在现今的构造框架下,“大陆逃逸模式”并不对青藏高原的地壳形变和运动产生重要的、甚至是控制性的作用,得到 GPS 测量及模拟结果支持的地壳增厚模式可能是青藏高原现今构造的主要格局。

4.2 阿尔金断裂滑移速率与青藏高原构造模式的关系

最近的一些研究引导我们向更深层次上思考。如前所述,由于“地壳增厚假说”和“大陆逃逸假说”

分别预测了阿尔金等深大断裂的滑移速率,因此,阿尔金断裂的滑移速率成为推断青藏高原构造模式的重要依据。可是,在作这种推断前,常常忽略了“侧向滑移”或“大陆逃逸”模式是基于刚性块体这一力学前提的事实,这一力学前提暗示被断裂分离的刚性块体在产生运动的同时,块体内部并不发生形变,也不吸收地壳的缩短。但是,这一力学前提并没有得到很严谨的论证。如果青藏高原内部各块体并不满足刚性条件,其内部必然发生形变而部分地吸收地壳缩短,那么即使阿尔金断裂的滑移速率较小,青藏高原的构造过程仍然可能由“大陆逃逸”构造模式控制。事实上,已有一些研究表明,青藏高原地壳缩短部分地被显著的块体内部变形^[53]或一系列共轭断层错动^[54]所吸收。地球物理学的研究结果^[55,56]表明,青藏高原一些块体,如羌塘块体,其岩层的强度非常低,黏滞系数仅相当于地幔介质的黏滞度(约 10^{21} Pa·s)。尽管这些有限的研究尚不足以令我们抛弃“大陆逃逸”模式的力学前提,但这些研究至少可以表明,仅仅由几条断层的滑移速率来简单推断高原的构造模式是危险的,对青藏高原及其阿尔金深大断裂^[57]的地壳、岩层物理力学性质的深入研究是探索青藏高原构造演化历史必不可少的认识基础之一。

5 结 语

通过分析地质学、大地测量学等学科关于阿尔金断裂滑移速率的研究结果,提出了阿尔金断裂滑移速率存在长期减慢趋势的观点,并认为青藏高原的构造演化经历了从大陆逃逸到地壳增厚的两阶段过程。需要指出的是,笔者的推论或结论是基于如下前提:阿尔金断裂的滑移速率为 20~30 mm/a;GPS 和数值模拟结果反映的是目前阿尔金断裂稳定的运动状态;由阿尔金断裂滑移速率推断青藏高原构造模式的前提和方式是近似合理的。但是,正如文中所述,这些前提目前远未明确,也处在争论之中。因此,笔者所得到的结论可能仅是在目前资料积累和认知水平下的一个阶段性认识。

要得到阿尔金断裂滑移速率和青藏高原构造模式在约 50 Ma 时间尺度下的详尽演变过程,至少需要开展以下几个方面的研究工作,如对阿尔金断裂在各地质时期滑移速率的精确确定、阿尔金断裂和青藏高原主要块体在岩石圈尺度下物理力学性质的确定等。

参考文献:

- [1] Yin A, Harrison T M. Geological Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2000, 28:

- 211 - 80.
- [2] Yue Y J, Ritts B D, Graham S A. Initiation and Long-Term Slip History of the Altyn Tagh Fault [J]. *International Geology Review*, 2001, 43: 1 087 - 1 093.
- [3] Houseman G, England P. Finite Strain Calculations of Continental Collision: 1. Methods and General Results for Convergent Zones [J]. *J. Geophys. Res.*, 1986, 91: 3 651 - 3 663.
- [4] Houseman G, England P. Crustal Thickening Versus Lateral Expulsion in the Indian-Asian Continental Collision [J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98(B7): 12 233 - 12 249.
- [5] Avouac J P, Tapponnier P. Kinematic Model of Active Deformation in Central Asia [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, 20: 895 - 898.
- [6] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of Continental Collision [J]. *Science*, 1975, 189: 419 - 426.
- [7] Tapponnier P, Molnar P. Active Faulting and Tectonics of China [J]. *J. Geophys. Res.*, 1977, 82: 2 905 - 2 930.
- [8] Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. Oblique Stepwise Rise and Growth of the Tibetan Plateau [J]. *Science*, 2001, 294: 1 671 - 1 677.
- [9] Tapponnier P, Peltzer G, Le Drian A Y, et al. Propagating Extrusion Tectonics in Asia: New Insights from Simple Experiments with Plasticine [J]. *Geology*, 1982, 10: 611 - 616.
- [10] 王琪, 张培震, 牛之俊, 等. 中国大陆现今地壳运动和构造变形 [J]. 中国科学(D 辑), 2001, 31(7): 529 - 536.
- [11] Peltzer G, Tapponnier P, Armijo R. Magnitude of Late-Quaternary Left-Lateral Displacements along the North Edge of Tibet [J]. *Science*, 1989, 246: 1 285 - 1 289.
- [12] 王卫东, 李少睿. 利用地震矩张量反演阿尔金断裂带现今运动学特征 [J]. 地震地质, 1999, 21(2): 171 - 175.
- [13] Meriaux A, Tapponnier P, Ryerson F J, et al. Large-Scale Strain Patterns, Great Earthquake Breaks, and Late Pleistocene Slip-Rate along the Altyn Tagh Fault (China) [J]. *EOS* (Fall Meet. Suppl.), 1998, 79: 400.
- [14] Meyer B, Tapponnier P, Guaderner Y, et al. Rate of Left Lateral Movement along the Easternmost Segment of the Altyn Tagh Fault, East of 96°E (China) [J]. *Geophys. J. Int.*, 1996, 124: 29 - 44.
- [15] Molnar P, Burchfiel B C, Zhao Z, et al. Geologic Evolution of Northern Tibet: Results of an Expedition to Ulugh Muztagh [J]. *Science*, 1987, 235: 299 - 305.
- [16] 陈正乐, 张岳桥, 陈宣华, 等. 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(D 辑), 2001, 31(增刊): 90 - 96.
- [17] 张岳桥, 陈正乐, 杨农. 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, 2001, 15(1): 8 - 12.
- [18] Meriaux A-S, Tapponnier P, Ryerson F J, et al. Post-Glacial Slip-Rate on the Aksay Segment of the Northern Altyn Tagh Fault, Derived from Cosmogenic Radionuclide Dating of Morphological Offset Features [J]. *Geophys. Res. Abstracts*, 2003, 5: 08062.
- [19] Meyer B, Tapponnier P, Bourjot L, et al. Crustal Thickening in Gansu-Qinghai, Lithospheric Mantle Subduction, and Oblique, Strike-Slip Controlled Growth of the Tibet Plateau [J]. *Geophys. J. Int.*, 1998, 135: 1 - 47.
- [20] 向宏发, 魏顺民, 张晚霞, 等. 阿尔金断裂带东段第四纪以来的水系位错与滑动速率 [J]. 地震地质, 2000, 22(2): 129 - 138.
- [21] Zhang J X, Zhang Z M, Xu Z Q, et al. Petrology and Geochronology of Eclogites from the Western Segment of the Altyn Tagh, Northwestern China [J]. *Lithos*, 2001, 56: 187 - 206.
- [22] 《阿尔金活动断裂带》课题组. 阿尔金活动断裂带 [M]. 北京: 地震出版社, 1992: 1 - 305.
- [23] Hetzel R, Niedermann S, Tao M X, et al. Low Slip Rates and Long-Term Preservation of Geomorphic Features in Central Asia [J]. *Nature*, 2002, 417: 428 - 432.
- [24] Sylvester A G. Strike-Slip Fault [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1988, 100: 1 666 - 1 703.
- [25] Powell R E. Balanced Palinspastic Reconstruction of Pre-Late Cenozoic Paleogeology, Southern California: Geologic and Kinematic Constraints on Evolution of the San Andreas Fault System [C]. Powell R E, Weldon II R J, Matti J C. *The San Andreas Fault System: Displacement, Palinspastic Reconstruction, and Geologic Evolution*. Geol. Soc. Am. Memoir, 1993, 178: 1 - 106.
- [26] 陈国达, 郭令智, 张伯声, 等. 中国大地构造问题 [M]. 北京: 科学出版社, 1965.
- [27] 张治洮. 阿尔金断裂的地质特征 [C]. 佚名. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊(9). 北京: 地质出版社, 1985: 20 - 32.
- [28] 崔军文, 唐哲民, 邓晋福. 阿尔金断裂系 [M]. 北京: 地质出版社, 1999: 22 - 215.
- [29] Arnaud N, Delville N, Montel J M, et al. Paleozoic to Cenozoic Deformation along the Altyn Tagh Fault in the Altun Shan Massif Area, Eastern Qilian Shan, NE Tibet, China [C]. Anon. *American Geophysical Union Annual Meeting Abstract*, F1018, 1999.
- [30] 刘永江, 叶慧文, 葛肖虹, 等. 阿尔金断裂变形岩激光微区 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄 [J]. 科学通报, 2000, 45(19): 2 101 - 2 104.
- [31] 葛肖虹, 段吉业, 刘先文, 等. 中国西北的大地构造 [R]. 中国科学院岩石圈构造与动力学开放研究实验室年报. 1995: 9 - 11.
- [32] 葛肖虹, 刘永江, 任收麦, 等. 对阿尔金断裂科学问题的再认识 [J]. 地质科学, 2001, 36(3): 319 - 325.
- [33] Yin A, Wang X F, Cowgill E, et al. Preliminary Results from A Collaborative Geological Investigation of Altyn Ragh Fault, North Tibet [C]. Anon. *14th HKT Workshop* (Abstract Volume). Germany: Kloster Ettal, 1999: 185 - 186.
- [34] Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J T, et al. Present-Day Crustal Deformation in China Constrained by Global Positioning System Measurements [J]. *Science*, 2001, 294: 574 - 577.
- [35] Bendick R, Bilham R, Freymueller J T, et al. Geodetic Evidence for a Low Slip Rate in the Altyn Tagh Fault System [J]. *Nature*, 2000, 404: 69 - 72.
- [36] Shen Z K, Wang M, Li Y X. Crustal Deformation along the Altyn Tagh Fault System, Western China, from GPS [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(B12): 30 607 - 30 621.
- [37] 尹光华, 蒋靖祥, 朱令人, 等. 阿尔金断裂乌尊硝段的现今活动速率 [J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(3): 52 - 55.
- [38] Chen Z, Burchfiel B C, Liu Y, et al. Global Positioning System Measurements from Eastern Tibet and Their Implications for India/Eurasia Intercontinental Deformation [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105(B7): 16 215 - 16 227.

- [39] Wallace K, Yin G H, Bilham R. Inescapable Slow Slip on the Altyn Tagh Fault [J]. *Geophys. Res. Letts.*, 2004, 31 (9): L09613.
- [40] Jackson J, Haines A J, Holt W E. The Accommodation of Arabia-Eurasia Plate Convergence in Iran [J]. *J. Geophys. Res.*, 1995, 100:15 205 - 15 219.
- [41] 任金卫. 利用 GPS 观测结果反演中国大陆及邻区现代构造变形运动[J]. *地球物理学报*, 2002, 45(增刊): 123 - 135.
- [42] Bird P. Thin-Plate and Thin-Shell Finite-Element Programs for Forward Dynamic Modeling of Plate Deformation and Faulting [J]. *Computers & Geosciences*, 1999, 25:383 - 394.
- [43] Peltzer G, Saucier F. Present-Day Kinematics of Asia Derived from Geological Fault Rates [J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101 (B12): 27 943 - 27 956.
- [44] Flesh L M, Haines A J, Holt W E. Dynamics of the India-Eurasia Collision Zone [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106 (B8): 16 435 - 16 460.
- [45] Xiong X, Park P H, Zheng Y, et al. Present-Day Slip-Rate of Altyn Tagh Fault: Numerical Result Constrained by GPS Data [J]. *Earth Planets Space*, 2003, 55:509 - 514.
- [46] 陈文彬, 戴华光, 徐锡伟, 等. 阿尔金南缘断裂安南坝段滑动量的初步研究[J]. *西北地震学报*, 2000, 22(4): 424 - 428.
- [47] 张培震, 王琪, 马宗晋. 青藏高原现今构造变形特征与 GPS 速度场[J]. *地学前缘*, 2002, 9(2): 442 - 450.
- [48] van der Woerd, Meriaux J A, Klinger Y, et al. The 14 November 2001 Mw = 7.8 Kokoxili Earthquake in Northern Tibet (Qinghai Province, China) [J]. *Seismol. Res. Lett.*, 2002, 73: 125 - 135.
- [49] Yue Y, Ritts B D, Graham S A, et al. Slowing Extrusion Tectonics: Lowered Estimate of Post-Early Miocene Slip Rate for the Altyn Tagh Fault [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 217:111 - 122.
- [50] 周勇, 潘裕生. 茫崖—肃北段阿尔金断裂右旋走滑运动的确定[J]. *地质科学*, 1998, 33(1): 9 - 16.
- [51] 周勇, 潘裕生. 阿尔金断裂早期走滑运动方向及其活动时间探讨[J]. *地质论评*, 1999, 45(1): 1 - 9.
- [52] Liu M, Yang Y, Stein S. Crustal Shortening in the Andes: Why Do GPS Rates Differ from Geological Rates? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, 27(18): 3 005 - 3 008.
- [53] Chen Q Z, Freymueller J T, Wang Q, et al. A Deforming Block Model for the Present-Day Tectonics of Tibet [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109 (B01403), doi:10.1029/2002JB002151.
- [54] Taylor M, Yin A, Ryerson F J, et al. Conjugate Strike-Slip Faulting along the Bangong-Nujiang Suture Zone Accommodates Coeval East-West Extension and North-South Shortening in the Interior of the Tibetan Plateau [J]. *Tectonics*, 2003, 22 (4), 1044, doi:10.1029/2002TC001361.
- [55] Flesh L M, Haines A J, Holt W E. Dynamics of the India-Eurasia Collision Zone [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106 (B8): 16 435 - 16 460.
- [56] 安美建, 石耀霖, 李方全. 用遗传有限单元反演法研究东亚部分地区现今构造应力场的力源和影响因素[J]. *地震学报*, 1998, 20(3): 225 - 231.
- [57] Wittlinger G, Tapponnier P, Poupinet G, et al. Tomographic Evidence for Localized Lithospheric Shear along the Altyn Tagh Fault [J]. *Science*, 1998, 282:74 - 76.

Slip Rate of the Altyn Tagh Fault under Various Time-Scales and Its Tectonic Implications

XIONG Xiong^{1,2}, WANG Ji-ye^{1,3}, TENG Ji-wen²

(1. Institute of Geodesy and Geophysics, CAS, Wuhan 430077, China;

2. Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100101, China;

3. Graduate School, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract: The Altyn Tagh fault (ATF) is the largest, and one of the most active sliding faults in Asia. The paper suggests that the convergence between the India and Eurasia plates is absorbed by the crustal deformation of the Tibetan orogene by two processes: distributed crustal deformation and lateral sliding along large faults. Since the estimates of the ATF slip-rate by these two competing mechanisms are quite different, the ATF slip-rate becomes an important criterion for determining the relative importance of these two mechanisms. Based on an integrated review on geological, geodetic evidence and numerical results of the slip-rate of the Altyn Tagh fault, a secular decreasing of the slip-rate of ATF is suggested, and a transition of tectonic mode of the Tibetan Plateau from block extrusion to crustal thickening is proposed. It should also be noted that the slip-rate of ATF under geological scale needs more precise determination and that the identification of tectonic mode of the Tibetan Plateau can be doubtful if it is made only by the ATF slip-rate alone.

Key words: Altyn Tagh fault; slip-rate; tectonic implication; time-scale