

阿尔金断裂研究进展及其左旋走滑成因机制 和发育模式探讨

肖坤泽^{1,2}, 童亨茂^{1,2*}, 许晓科^{1,2}, 崔浩^{1,2}

(1. 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249)

摘要: 阿尔金断裂作为青藏高原的西北部边界, 因其与青藏高原隆升密切相关以及现今仍持续活动的显著特征, 已成为全球范围内备受关注的一条走滑断裂带。尽管目前在许多方面已取得重要进展和共识, 但对该断裂成因机制及诸多关键特征(如走滑位移量、快速走滑时间等)的理解仍存在较大争议。本文在系统回顾阿尔金断裂主要研究成果的基础上, 重点总结和梳理了新生代以来断层的变形特征、演化历史、快速走滑时间、走滑位移量、断裂形成机制及其发育模式等方面的最新研究进展。进一步基于广义断层理论对相关争议问题进行深入探讨, 并结合与阿尔金断裂活动密切相关的柴达木盆地、东昆仑山及祁连山构造变形历史的研究成果, 提出了关于阿尔金断裂带新生代左旋走滑成因机制的新认识及其与周缘构造耦合的新发育模式。此外, 通过砂箱物理模拟实验对新认识进行了验证。本文推测, 阿尔金断裂新生代的活动可能与印度板块-欧亚板块的两阶段碰撞过程密切相关。所提出的新认识和新模式不仅能够较为统一地阐释阿尔金断裂左旋走滑与其南侧沿线发育的不同构造单元之间的构造耦合关系。这些新认识也有望为阿尔金断裂周缘构造特征的研究以及青藏高原北缘变形格局的解析提供有益的启示和指导。

关键词: 阿尔金断裂; 研究进展; 成因机制; 发育模式; 模拟实验

中图分类号: P542; P548 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1552(2025)06-1324-025

0 引言

阿尔金断裂(Altyn Tagh fault)作为青藏高原的西北边界, 是一条总体呈 NEE 走向的巨型岩石圈走滑断裂带, 贯穿东昆仑山、阿尔金山直至祁连山。自 Molnar and Tapponnier (1975)以及 Tapponnier and Molnar (1977)通过遥感影像识别技术首次识别并解释该断裂以来, 因其显著的现今活动特征和独特的地理位置, 已成为全球范围内备受关注的一条走滑断裂带

(Molnar and Tapponnier, 1975; Tapponnier and Molnar, 1977; Yin and Harrison, 2000; Yin et al., 2002; Cowgill et al., 2004)。经过近半个世纪的持续探索与深入研究, 已取得丰富且重要的成果, 并逐步形成了一些共识, 然而, 关于该断裂的诸多认识仍存在较大争议。

由于阿尔金断裂新生代以来的构造变形、与印度板块和欧亚板块的碰撞历史以及青藏高原的隆升密切相关, 并且在其沿线发育一系列与阿尔金断裂紧密相关的新生代含油气盆地(如柴达木盆地)和造

收稿日期: 2024-10-10; 改回日期: 2025-03-13; 网络首发日期: 2025-07-29

项目资助: 国家自然科学基金项目(41272160)资助。

第一作者简介: 肖坤泽(1995-), 男, 博士研究生, 地质学专业。E-mail: x_kunze@163.com

通信作者: 童亨茂(1967-), 男, 教授, 主要从事盆地构造解析、物理模拟实验等方面的研究。E-mail: tonghm@cup.edu.cn

山带(如东昆仑山和祁连山),这使得阿尔金断裂新生代以来的构造变形受到学术界和石油界的广泛关注(Yin and Harrison, 2000; Yin et al., 2002; Yin et al., 2008; 吴磊等, 2012, 2023; Wu et al., 2012a; Dai et al., 2017; Wang et al., 2020; Li et al., 2021a)。目前,学者们围绕阿尔金断裂新生代以来左旋走滑的活动历史(Yue and Liou, 1999; Yin et al., 2002; Cowgill et al., 2003; Wu et al., 2012b; Li et al., 2021a)、走滑位移量的分布特征(Ritts and Biffi, 2000; Chen et al., 2004; Yue et al., 2005; Cheng et al., 2016)、左旋走滑的成因机制及其生长模式(Yin et al., 2002; Cowgill et al., 2003; Wu et al., 2012a; Cheng et al., 2016; Li et al., 2018)等方面开展大量研究。这些研究表明,阿尔金断裂带在新生代之前为一条规模较大的岩石圈薄弱带(后期则为一条先存构造),并在新生代以来经历显著的左旋走滑以及中新世(中-中新世)以来的多次快速走滑事件。此外,在阿尔金断裂带发育模式的研究方面,已逐渐认识到阿尔金断裂的形成与其南部沿线构造单元存在密切关联(Métivier et al., 1998; Chen et al., 2002; Yin et al., 2002; Cowgill et al., 2003)。

目前对阿尔金断裂新生代以来的形成机制、走滑位移量的分布特征,以及其与南缘主要构造单元之间的构造耦合关系的认识仍存在一些不足和分歧。主要原因在于前人的研究多基于阿尔金断裂不同段落的构造特征(Cowgill et al., 2003; Ritts et al., 2004; Yue et al., 2004; 李海兵等, 2006; Wu et al., 2012a),推测整条阿尔金断裂的演化历史、形成机制、走滑位移量及其发育模式,导致对阿尔金断裂走滑位移量分布特征缺乏科学系统的解释。大多数研究较少考虑阿尔金断裂新生代左旋走滑与周缘造山带和盆地挤压变形之间的构造耦合关系,这可能将阿尔金断裂的走滑活动与周缘造山带、盆地及相关断裂的演化割裂开来。此外,前人的研究(Yin and Harrison, 2000; Cowgill et al., 2003; 罗浩等, 2020; 谢皓等, 2022)主要基于均匀介质下的 Anderson 断层模式(Anderson, 1905)进行指导,很少明确考虑先存构造对后期走滑活动及周缘构造变形(如隆升)的影响,显然具有一定的局限性,这也是导致阿尔金断裂成因机制和发育模式存在较大争议的主要原因。现有的左旋走滑成因机制和发育模式似乎仍难以对阿尔金断裂的新生代活动历史及其周缘主要构造单元(盆地和造山带)的构造特征耦合提供较为合理的解释。

因此,本文在梳理和分析阿尔金断裂带已有研究成果的基础上,重点回顾与总结新生代以来断裂

的活动历史、快速走滑的时间、走滑位移量及其发育模式等核心问题,并基于广义断层理论(先存构造条件下的断层作用模式)(Tong and Yin, 2011; Tong et al., 2014a, 2014b; 童亨茂, 2015)对相关争议进行探讨。在此基础上,结合柴达木盆地、东昆仑山及祁连山的构造变形历史,提出一种新认识:阿尔金断裂新生代的左旋走滑活动是在挤压构造背景下,为调节不同区域的挤压位移量,先存构造复活所形成的被动走滑断层。同时,进一步提出了阿尔金断裂带新生代以来左旋走滑与周缘构造耦合的发育新模式及其可能的动力学机制。这些认识不仅能够较为科学合理地解释阿尔金断裂带新生代以来沿线变形特征的差异,尤其是走滑位移量的差异分布特征,还为理解阿尔金断裂左旋走滑与其南侧沿线发育的不同构造单元之间的构造耦合关系提供了新的视角。此外,通过砂箱物理模拟实验对该认识进行验证。最后,基于上述新认识与新模式,对阿尔金断裂与周缘构造之间的关联性以及未来研究方向提出一些见解和建议。

1 地质概况

阿尔金断裂带(Altyn Tagh fault zone)是我国西部一条长达 1600 km 且现今仍在活动的 NEE 向巨型岩石圈走滑断裂带(图 1、2)。该断裂西南端起始于新疆与西藏交界处的拉竹龙附近,与龙木措-郭扎措断裂及甜水海断裂系相连,向东北方向延伸至阿拉善地块南缘的合黎山-龙首山一带,与祁连山断裂系统相接(图 2)(Yin and Harrison, 2000; 崔军文等, 2002; Yin et al., 2002; 肖安成等, 2013)。阿尔金断裂带主要由

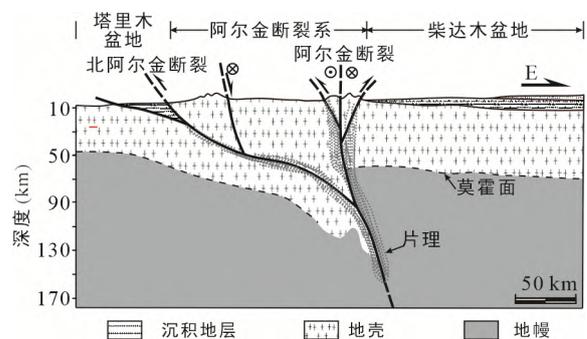
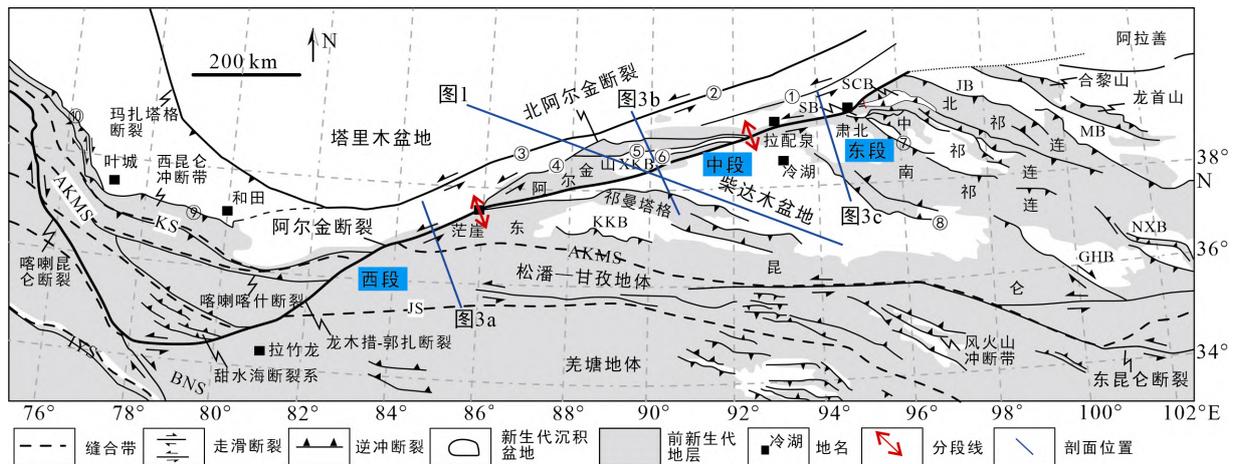


图1 横切阿尔金断裂的构造剖面图(剖面特征为野外地质和地震层析成像模拟结果;据 Wittlinger et al., 1998 修改)

Fig.1 Tectonic cross-section across the Altyn Tagh fault (based on geological observations and seismic tomogram simulation results)



断裂: ①. 三危山断裂; ②. 若羌-米兰断裂; ③. 车尔臣河断裂; ④. 北阿尔金断裂; ⑤. 金雁山断裂; ⑥. 索尔库里断裂; ⑦. 党河南山断裂; ⑧. 柴达木北缘断裂; ⑨. 铁克里克断裂; ⑩. 阿尔塔什断裂。新生代沉积盆地: JB. 酒泉盆地; MB. 民乐盆地; SCB. 石包城盆地; SB. 肃北盆地; XKB. 索尔库里盆地; GHB. 共和盆地; NXB. 宁夏盆地; KKB. 库木库里盆地。主要缝合带: IYS. 印度-雅鲁藏布江缝合带; BNS. 班公湖-怒江缝合带; JS. 金沙江缝合带; AKMS. 阿尼玛卿-昆仑-玛扎塔格缝合带; KS. 库地缝合带。

图 2 青藏高原北部构造简图(据 Yin et al., 2002 修改)

Fig.2 Sketch tectonic map of the northern Tibetan Plateau

两条断裂带组成,分别为南侧的阿尔金断裂和北侧的北阿尔金断裂,其中北阿尔金断裂为分支断裂,在深部与阿尔金断裂汇合。目前普遍认为南侧的阿尔金断裂是该断裂带的主体部分(图 1、2)(崔军文等, 2002; Yin et al., 2002; Dai et al., 2017)。

阿尔金断裂是一条大型构造带,将北部较为坚硬的塔里木盆地与南部更易变形的青藏高原分隔开来(图 2)。该断裂以南的区域为印度-欧亚板块的碰撞作用的响应,是构造变形活跃的重要场所。沿断裂带走向,发育一系列与阿尔金断裂活动密切相关的新生代沉积盆地、造山带以及伴生的次级断裂(Yin and Harrison, 2000; Yin et al., 2008; Wu et al., 2012b),这些地质单元为深入研究阿尔金断裂提供丰富的数据支持。

为深入探讨不同区域的构造活动及变形特征,综合前人对断裂带沿线各区域变形特征的研究成果(陈正乐等, 2001; 吴磊等, 2012; Gao et al., 2022),大致以茫崖(约 86°E)和拉配泉(约 92°E)为界,将该断裂划分为西段、中段和东段(图 2)。其中,西段沿线主要发育有东昆仑造山带、库木库里盆地、祁漫塔格造山带以及相关断裂;中段则以柴达木盆地及其相关断裂为主;东段主要包括祁连山(南祁连、中祁连和北祁连)造山带、酒泉盆地、民乐盆地、合黎山和龙首山造山带以及相关断裂(图 2)。

2 阿尔金断裂研究进展

自阿尔金断裂带被识别以来,其独特的地质特

征与构造活动方式使其迅速成为全球关注的焦点。经过近半个世纪的研究,关于该断裂的探索已取得诸多重要进展与共识(Yin et al., 2002; Cowgill et al., 2003)。依据断裂的变形特征、演化历史、动力学机制及其与周边构造单元的成因联系,大致将其演化划分为前新生代和新生代两个主要阶段。由于该断裂新生代以来的构造变形与印度-欧亚板块碰撞及青藏高原隆升密切相关,其新生代以来的变形历史已成为当前研究的核心热点问题。当然,前新生代发育的断裂将作为先存构造,对新生代的构造活动起到重要的控制作用(Meyer et al., 1998; Yin et al., 2002; Tong and Yin, 2011; Tong et al., 2014a)。

本研究首先回顾阿尔金断裂带的变形特征、断裂发育的起始时间及初始形成模式,并着重总结与探讨新生代以来的演化历史、快速走滑的时间及其位移量,特别是新生代以来左旋走滑的发育模式等研究热点。

2.1 构造变形特征

阿尔金断裂是阿尔金断裂系中规模最大的活动断裂。基于现代地形图和地球物理勘探结果,阿尔金断裂带在平面上呈现出 NEE 向延伸趋势,表现为一条笔直且线性的构造特征。然而,局部区域其走向出现拐弯,其中四个区域的拐弯角度较大,并形成受阻弯曲带(Restraining Bend),导致局部范围内的隆升较高,形成相对海拔较高的高点(图 2; Cowgill et al., 2004; 吴磊, 2011)。

横切阿尔金断裂的地形剖面表明,该断裂带总

体表现为一条近直立的左旋走滑断裂。尽管断裂带附近的地形和高程在不同区域存在一定差异,但整体上呈现出向北东方向高程逐渐降低的趋势(图3;吴磊,2011)。此外,也有研究指出,断裂带两侧的海拔高程差较大,且同样表现出向北东方向逐渐减小的特点(肖安成等,2013)。这表明断裂带在不同区域的构造变形强度存在差异,具有明显的分段性特征。

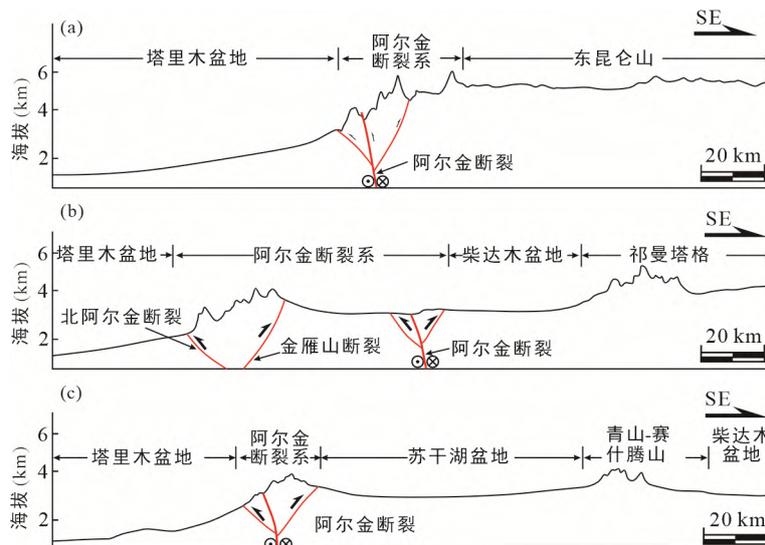
柴达木盆地作为阿尔金断裂南部沿线规模最大的新生代沉积盆地,完好地保存中-新生代以来的沉积地层(图4),并展现出显著的油气开发潜力。近年来,随着油气勘探与开发的不断深入,目前已积累大量的三维地震数据、钻井资料及地质调查成果(肖安成等,2013; Zhao et al., 2016; 吴磊等, 2023),为阿尔金断裂的相关研究提供丰富的实际依据。

基于柴达木盆地范围内的地震反射资料以及横切阿尔金断裂的地质剖面(图5;肖安成等,2013; Zhao et al., 2016; 吴磊等, 2023)发现,阿尔金断裂在深部总体呈直立陡倾状态,向上延伸并切穿上覆的所有地层,在不同区域与近EW向的次级逆冲断裂相连,共同构成典型的花状构造。在断裂带控制的区域内,绝大多数新生代地层已被剥蚀殆尽,呈现出显著的剥蚀和上超特征,反映断裂在左旋走滑过程中伴随

隆升作用,但不同区域的隆升高度存在差异,体现构造变形强度的区域性差异。此外,沿断裂带走向,柴达木盆地新生代地层的沉积分布、沉积厚度以及内部断层发育特征等方面也表现出明显的区域差异。值得注意的是,在阿尔金断裂向盆地方向的范围内,发育的逆冲断层大多倾向阿尔金断裂方向(NW方向),推测这些断层在深部可能与阿尔金断裂带相连,进一步表明阿尔金断裂的活动与柴达木盆地的形成和演化息息相关。

2.2 断裂的起源时间和初始形成模式

现今阿尔金断裂的构造变形特征是多期构造活动叠加的产物(Yue and Liou, 1999; Yin et al., 2002),其起源时间与初始形成模式研究对于揭示断裂带的活动历史具有重要意义。学者们通过多种研究方法和手段已取得丰富成果(表1)。其中,多数学者认为其起源于古生代(具体时间仍存在争议)(Zhang et al., 2001; Wang et al., 2005; Liu et al., 2015; 吴才来等, 2016),或中生代(陈文等, 2000; 葛肖虹等, 2002; Arnaud et al., 2003; 任收麦等, 2004; 李海兵等, 2007; 刘永江等, 2007; 龚正等, 2013),也有少数学者认为其起源于前古生代(周勇和潘裕生, 1998)。关于其初始形成模式,主要存在韧性剪切带、俯冲-碰撞带、缝合带等不同观点(表1)。



阿尔金断裂 DEM 地形剖面图(a-c), 地形剖面中的断裂名称据 Yin et al., 2002; 吴磊, 2011; DEM 数据来自美国太空总署(NASA)和国防测绘局(NIMA)联合测量的全球 90 m 地形数据 SRTM, 下载地址: <http://srtm.csi.cgiar.org>。

图3 阿尔金断裂带系地形特征及主要断裂剖面特征(剖面位置见图2)

Fig.3 Topographic characteristics of the Altyn Tagh fault system and principal fractures of representative sections

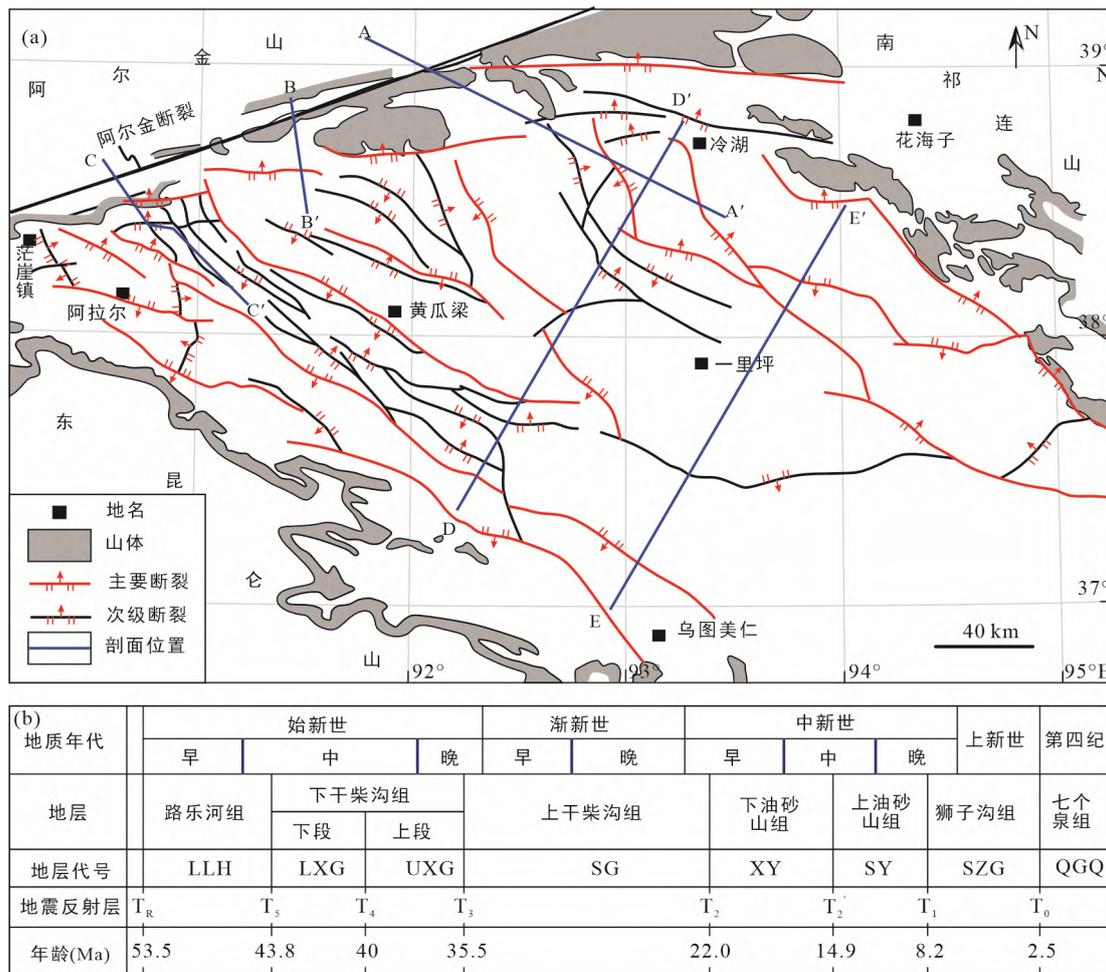


图 4 柴达木盆地地震 T_4 反射层(下干柴沟组上段底)断裂体系图(a; 据肖安成等, 2013 修改)和新生代综合地层表(b; 据肖安成等, 2013 修改)

Fig.4 Fault system projected on the seismic reflecting layer T_4 (bottom of the Upper Xiaganchaigou Formation) (a) and Cenozoic stratigraphy (b) of the Qaidam Basin

尽管关于阿尔金山断裂带的具体起源时间和初始形成模式仍存在诸多争议, 但普遍认为它在新生代之前便已存在, 表现为一条规模较大的岩石圈薄弱带(后期作为先存构造发挥作用)(表 1)。此外, 部分学者基于阿尔金山断裂的形成演化历史及其断裂发育特征, 将新生代之前的阿尔金山断裂称为古阿尔金山断裂, 并认为现今的阿尔金山断裂主要形成于新生代以来(陈正乐, 2002; Arnaud et al., 2003; Wang et al., 2005; 李海兵等, 2006; 龚正等, 2013)。为更清晰地区分阿尔金山断裂带在不同地质时期的构造特征与演化阶段, 本文沿用该划分方式。

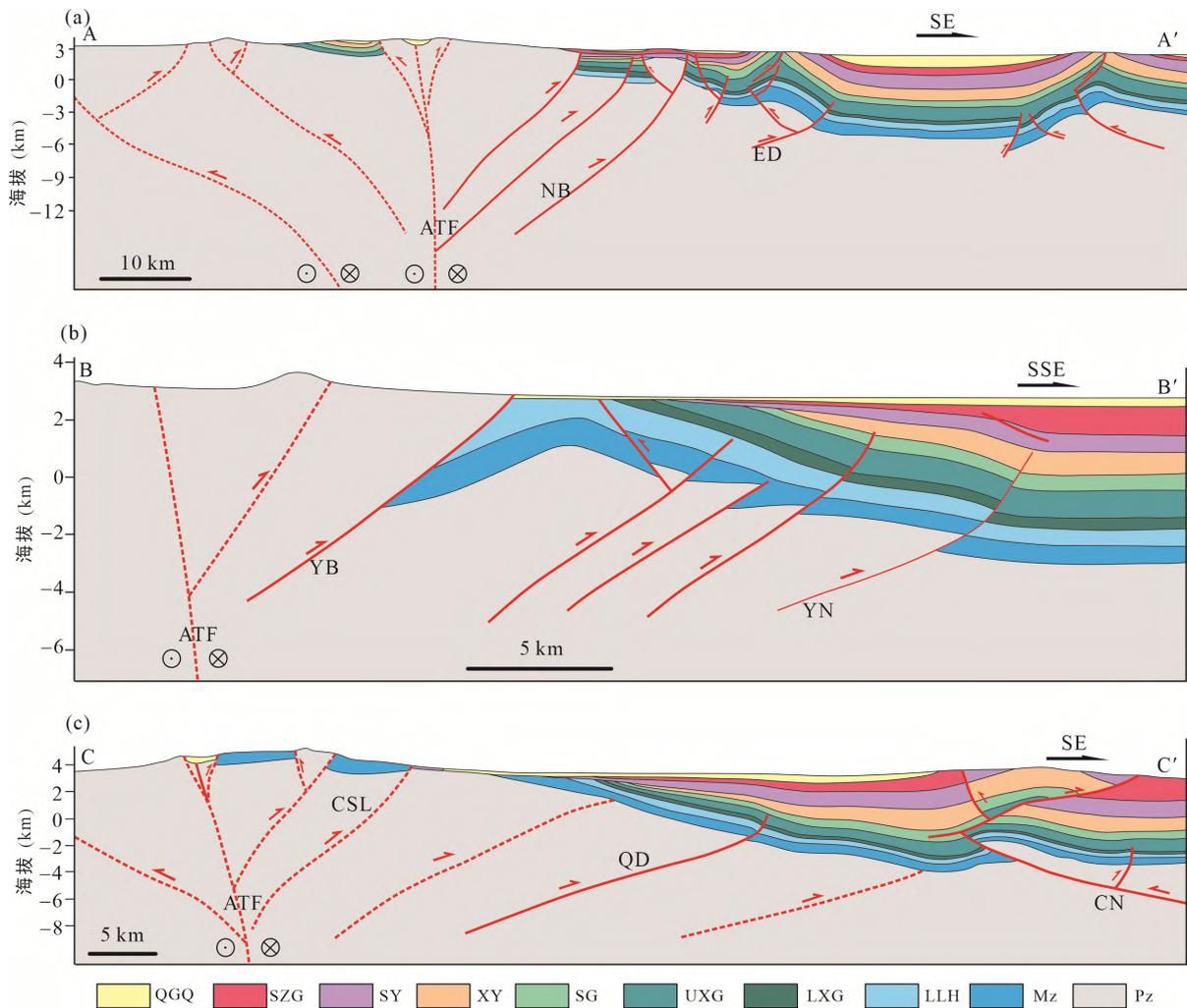
2.3 新生代以来演化历史及快速走滑的时间

阿尔金山断裂新生代以来的演化历史与青藏高原的隆升过程以及印度板块和欧亚板块的碰撞历史紧密相关(Yin et al., 2002), 这使得该断裂在新生代以

来的演化历程成为当前国内外学者研究的重点课题。

关于阿尔金山断裂的新生代活动历史, 众多学者以断裂带的某一段或者根据其沿线中某区域(如造山带或盆地)为研究目标, 采用不同的研究方法(主要包括同位素测年、构造解析、热年代学、古地磁学等)厘定或者推测阿尔金山断裂带新生代以来的演化历史及其活动性质, 目前已取得一些重要的进展和共识, 但也存在着许多不同的观点(表 2), 尤其在阿尔金山断裂新生代以来左旋走滑的起始时间、演化阶段的划分、不同阶段的活动性质以及大规模(快速)走滑的时间等方面争议较大。这些争议不仅体现出阿尔金山断裂带的复杂性, 也反映该方面研究的重要性。

尽管关于阿尔金山断裂的构造演化和走滑性质仍存在争议, 但其作为一条新生代以来以左旋走滑为主的巨型断裂带, 已获得广泛认可(表 2)。



ATF. 阿尔金断裂; CSL. 采石岭断裂; NB. 牛北断裂; ED. 鄂东断裂; YB. 月北断裂; YN. 月南新裂; QD. 七东断裂; CN. 柴南断裂; ED. 鄂东断裂; 红色虚线为推测的断层。剖面位置和图中代号分别见图 4a 和 4b。

图 5 横切阿尔金断裂至柴达木盆地内部的地质剖面(据 Zhao et al., 2016 修改)

Fig.5 Geologic sections orthogonal across the Altyn Tagh fault and the interior of the Qaidam Basin

表 1 阿尔金断裂起源时间、初始形成模式及其走滑位移量简要归纳表

Table 1 Summary of times of initiation, initial formation patterns, and strike-slip displacements of the Altyn Tagh fault

参考文献	起源时间	初始形成模式	走滑位移量(km)
郑剑东(1991, 2001)	晚古生代	韧性剪切带	
蔡学林等(1992)	白垩纪	韧性剪切带	550(大位移)
国家地震局《阿尔金活动断裂带》课题组(1992)	古生代	俯冲带	75(小位移)
周勇和潘裕生(1998)	新元古代早期(>870 Ma)	韧性剪切带	
车自成等(1998)	中奥陶世晚期	俯冲-碰撞带	350~400(中等位移)
崔军文(1999)	中奥陶世晚期	古裂陷槽或古洋盆	400左右(中等位移)
葛肖虹和刘俊来(1999); 葛肖虹等(2002)	晚白垩纪	韧性剪切带	350~400(中等位移)
Sobel and Arnaud (1999)	古生代(435±20 Ma)	缝合带	350~400(中等位移)
许志琴等(1999)	加里东期后	古裂陷槽或古洋盆	400左右(中等位移)
陈文等(2000)	晚白垩世	韧性剪切带	
刘永江等(2000, 2001)	晚白垩世	韧性剪切带	
李海兵等(2001, 2006, 2007)	三叠纪(印支期)	韧性剪切带	900~1000(大位移)
Zhang et al. (2001)	早古生代	俯冲带	350~400(中等位移)

续表 1:

参考文献	起源时间	初始形成模式	走滑位移量(km)
Arnaud et al. (2003)	中生代	韧性剪切带	
任收麦等(2004)	晚白垩世	韧性剪切带	
Wang et al. (2005)	450~420 Ma	缝合带	
刘永江等(2007)	早侏罗世末-中侏罗世	韧性剪切带	
陈柏林等(2002, 2010)	早古生代晚期	韧性剪切带	400左右(中等位移)
龚正等(2013)	164.3~178.4 Ma(晚三叠纪)	韧性剪切带	
Liu et al. (2015)	早古生代	俯冲-碰撞带	
吴才来等(2014, 2016)	早古生代(早奥陶纪)	俯冲-碰撞带	

表 2 阿尔金断裂新生代演化历史及其活动特征研究成果

Table 2 Summary of research results on Cenozoic evolutionary history and activity characteristics of the Altyn Tagh fault

参考文献	地质年代							
	古新世	始新世	渐新世	中新世	上新世	更新世	全新世	
国家地震局《阿尔金活动断裂带》课题组(1992)						强烈走滑	继续走滑, 走滑速率大	
蔡学林等(1992)	强烈左旋					逆冲左旋	强烈的左旋-逆冲	
葛肖虹等(1998)	左旋开始并持续至今							
崔军文等(2002)	逆冲-左行				伸展-左行			
Yue and Liou (1999)			开始活动	持续活动				
刘永江等(2001, 2007)			地表开始走滑		大规模左滑			
Yin and Harrison (2000); Yin et al. (2002)		开始活动	持续活动		断裂系统基本形成		持续走滑	
Cowgill et al. (2003)		开始走滑	持续走滑		强烈走滑		持续走滑	
陈正乐(2002); Chen et al. (2004)			正左旋走滑开始		快速左旋张扭		大规模左旋走滑	
Chen et al. (2002)					快速走滑	走滑-逆冲		
李海兵等(2006)	初始走滑		走滑向东北扩展			走滑向东北延伸、走向旋转		两侧扩展
Wu et al. (2012a, 2012b); 肖安成等(2013)			基底开始走滑			大规模的左滑运动		
Cheng et al. (2016)		左旋走滑		大规模的左旋走滑				
Li et al. (2018)				初始走滑	大规模左旋走滑			
Zhang et al. (2018)				弱走滑(隆升为主)	快速走滑	广泛而强烈的隆升		
罗浩等(2020)		开始走滑		大规模走滑	开始大规模的隆起			
Li et al. (2021)		弱走滑断裂		快速走滑	弱走滑			
谢皓等(2022)		大幅度走滑			隆升	走滑活动加强		
Bai et al. (2023)				大规模左旋走滑	走滑活动减弱			

近十年来,随着测年方法的改进与精度的提升,以及阿尔金断裂周缘地区高精度三维地震资料的覆盖和相关盆地数据(如柴达木盆地)的支持,阿尔金断裂演化历史的研究取得显著进展。尽管目前仍存在诸多问题和争议,但基于上述研究成果,大体可以将阿尔金断裂新生代的走滑活动划分为两个主要阶段:始新世时期的初始走滑阶段(Yin et al., 2002; Cowgill et al., 2003; Cheng et al., 2016; 罗浩等, 2020)和中新世(中-中新世)以来的快速走滑阶段(Cowgill

et al., 2003; Wu et al., 2012b; Li et al., 2018; Zhang et al., 2018; Li et al., 2021a; Bai et al., 2023)。

2.4 新生代左旋走滑位移量

走滑位移量是衡量走滑断层活动特征最重要的参数之一,对古构造恢复具有重要意义。近年来,随着走滑位移量研究技术的不断进步以及研究方法的多样化,这一领域已成为走滑断层研究中的热点和核心方向。

研究表明,阿尔金断裂具有多期次、不同性质

的活动历史(Yin and Harrison, 2000; Yin et al., 2002; Cowgill et al., 2003)。目前, 针对该断裂在不同活动时期的走滑位移量已开展详细研究, 其成果大致可归纳为三个方面: 前新生代以来的总位移量、新生代以来的总走滑位移量以及新生代某一特定时间段的走滑位移量。其中, 关于前新生代以来走滑位移量的研究结果总体可分为大位移量(>400 km)、中等位移量(300~400 km)以及小位移量(<300 km)三种观点, 其中中等位移量的观点较为普遍, 占据主流地位(表1)。

研究阿尔金断裂新生代以来的走滑位移量, 对于深入理解印度-欧亚大陆碰撞过程以及青藏高原内部物质水平运动的规模具有重要的科学价值, 这也成为阿尔金断裂研究中的热点与重点问题。大多数学者(Tapponnier et al., 1982; Yue and Liou, 1999; Meng et al., 2001; Yin et al., 2002; Cowgill et al., 2003; Yue et al., 2005; Cheng et al., 2016; 谢成龙等, 2020)利用多种类型的地质标志物(如地层、岩浆岩、缝合带、变质带及地貌标志等), 对阿尔金断裂的某些段

落或沿线特定区域的走滑位移量进行综合对比分析, 从而计算或推测出该断裂某一段的走滑位移量, 或将所得结果视为整个断裂带的走滑位移量(表3)。尽管这些研究为阿尔金断裂带的走滑位移量提供丰富的见解和测量数据, 但在具体数值上仍存在显著差异。

并非所有走滑断层在其走向上的走滑位移量均保持一致(肖坤泽和童亨茂, 2020)。许多学者将局部区域测量所得的走滑位移量视为阿尔金断裂的整体走滑位移量, 这种处理方式不可避免地带来了一定的局限性。

阿尔金断裂的走滑位移量在不同区域表现出显著差异。为深入探讨阿尔金断裂沿线走滑位移量的分布特征, 首先依据前人对走滑位移量测量位置的统计结果, 根据不同选取位置将所得数据划分为西段、中段和东段三个区域; 随后对各段落的走滑位移量研究结果进行综合分析并绘制图表(图6)。结果表明, 走滑位移量沿断裂带走向自南西向东北方向逐渐减小。然而, 由于不同学者在统计时间范围、测量技术以及方法选择上存在差异, 部分位移量观测

表3 阿尔金断裂新生代以来的左旋走滑位移量简要归纳表

Table 3 Summary of sinistral strike-slip displacements of the Altyn Tagh fault since the Cenozoic

走滑开始时间	研究方法	目标位置	走滑位移量(km)	文献来源
中中新世	地质标志物(岩浆岩)	西段1(昆仑山)	500~700	Tapponnier et al. (1982); Peltzer and Tapponnier (1988)
早渐新世	地质标志物(山脉)和地质分析	西段2(祁门塔格-昆仑)	550	Yin and Harrison (2000)
渐新世	地质标志物(岩石矿物)	西段3(昆仑山)	475±70	Cowgill et al. (2003)
新生代	盆地分析	中段1(索尔库里盆地)	约320	郭召杰等(1998)
渐新世	地质标志物(侵入岩体)与地质分析	中段2(柴达木盆地)	375	Ritts and Biffi (2000); Ritts et al. (2004)
新近纪	地质标志物(沉积物)	中段3(索尔库里盆地)	80~100	张岳桥等(2001)
晚中新世	地质标志物(岩石矿物)	中段4(索尔库里盆地)	80~100	陈正乐等(2001); Chen et al. (2004)
晚渐新世-早中新世	地质标志物(侵入岩体)	中段5(索尔库里盆地)	375±25	Yue et al. (2001)
渐新世	地质标志物(侵入岩体)	中段6(柴达木盆地)	350~400	Meng et al. (2001)
渐新世末期	古地磁	中段7(柴达木盆地)	500±130	Chen et al. (2002)
早始新世	地质标志物(岩石矿物)与古地磁	中段8(柴达木盆地)	470±70	Yin et al. (2002)
早中新世	地质标志物(沉积物)	中段9(索尔库里盆地)	165	Yue et al. (2004)
渐新世	地质标志物(岩石矿物)	中段10(索尔库里盆地)	360±40	Yue et al. (2005)
早中始新世	地质标志物(岩石矿物)	中段11(柴西北缘)	360±40	Cheng et al. (2015, 2016)
51 Ma之后	地质标志物(岩石矿物)	中段12(吐拉盆地)	500	谢成龙等(2020)
中中新世	地质标志物(沉积岩层)	东段1(肃北地区)	69~90	Wang (1997)
早渐新世以来	地质标志物(山脉)和地质分析	东段2(祁连山)	280±30	Yin and Harrison (2000)
始新世晚期	地质标志物(构造带)	全段	600~750	葛肖虹等(1998)
渐新世	地质标志物(构造带)	全段	225~375	魏顺民和向宏发(1998)
渐新世	地质标志物(造山带)	全段	400±50	Yue and Liou (1999)
40~35 Ma	地质标志物(车尔臣河)	全段	150~400	Ding et al. (2004)

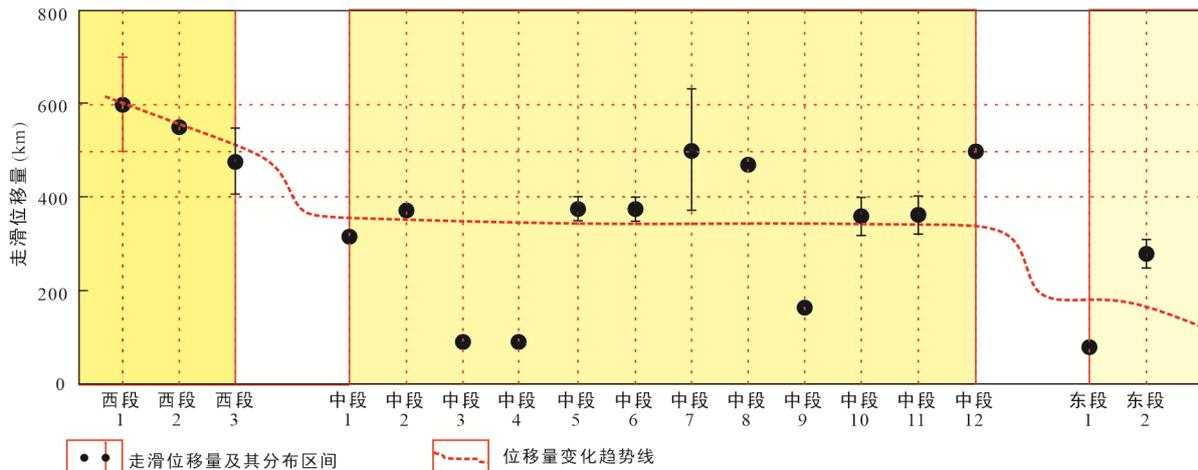


图 6 阿尔金断裂新生代以来不同区域左旋走滑位移量分布趋势(各段走滑位移量见表 3)

Fig.6 Distribution of sinistral strike-slip displacements in different segments of the Altyn Tagh fault since the Cenozoic

结果与上述规律存在一定出入。此外,目前技术条件和数据积累尚不足以实现对走滑断层位移量的精确测量。尽管如此,值得注意的是,本文得出的走滑位移量递减特征与前人研究成果高度一致(Yin and Harrison, 2000; Zhang et al., 2001; 徐锡伟等, 2003; 任收麦等, 2004; 李海兵等, 2007), 这为阿尔金断裂带走滑位移量分布规律的认识提供了进一步的支持。

总体而言,针对阿尔金断裂新生代以来的总走滑位移量以及特定时间段内的走滑位移量估算,相关研究已取得显著进展,部分结论可作为强有力的支持证据。然而,通过综合分析现有研究成果可以发现,沿阿尔金断裂走向的不同区域,甚至在同一区域内不同学者所得结果仍存在差异,而在不同区域间的结果差异尤为显著。造成这一现象的可能原因包括:①某些走滑断层(如复式变换断层)在不同段落的走滑位移量本身并不一致(童亨茂, 2015; 肖坤泽和童亨茂, 2020); ②不同学者在研究方法和研究对象的选择上存在差异; ③当前的研究方法和技术水平尚难以实现对走滑位移量的精确测定。

目前对阿尔金断裂左旋走滑成因机制的理解仍不够全面,这使得对不同区域走滑位移量分布差异的原因难以给出较为合理的解释。

3 新生代左旋走滑成因机制及发育模式探讨

3.1 已有的发育模式

阿尔金断裂新生代以来的左旋走滑活动已得到学术界的普遍认可(Tapponnier and Molnar, 1977;

Yin et al., 2002), 然而,关于其新生代左旋走滑的成因机制以及与周缘构造之间的构造耦合关系,目前仍存在较大争议。

阿尔金断裂带新生代以来的发育模式始终是地质学研究中的热点与颇具挑战性的科学问题。截至目前,众多学者已开展大量研究工作,并提出多种不同的观点。这些观点大致可归纳为两大主要类别(表 4)。第一类观点集中探讨阿尔金断裂自身的发育模式,进一步细分为:①阿尔金断裂先隆升后走滑(图 7)(Wu et al., 2012a; 吴磊等, 2013; Li et al., 2018; Zhang et al., 2018)、②先走滑后隆升(Ritts et al., 2004; Yue et al., 2004; 谢皓等, 2022)以及③走滑与隆升同步进行(任收麦等, 2004)三种不同模式。第二类观点则关注阿尔金断裂与其南部沿线构造单元耦合的发育模式,其可划分为三种模式:①由南西北向东北方向延伸发育(图 8)(Meyer et al., 1998; Tapponnier et al., 2001; Chen et al., 2002; Yin et al., 2002; Cowgill et al., 2003)、②由中间向两端逐步发育(崔军文等, 2002; 李海兵等, 2006)以及③断裂贯通后伴随周缘构造变形的走滑活动(王根厚等, 2001; Cheng et al., 2016; 罗浩等, 2020)。

目前的研究表明,新生代以来,阿尔金断裂及其沿线发育的造山带或盆地经历了多期复杂的构造变形,这无疑增加对该区域构造变形研究的难度。关于阿尔金断裂左旋走滑的成因机制及其生长模式,以往的研究主要聚焦于阿尔金断裂某一段的变形特征(Cowgill et al., 2003; Ritts et al., 2004; Yue et al., 2004; Wu et al., 2012a), 或者依据沿断裂带发育的造山带或盆地中的部分地质现象(Meyer et al., 1998; Yin et al., 2002; 吴磊等, 2013; Zhang et al., 2018; 罗浩

等, 2020)推测阿尔金断裂的发育模式。这些方法可能会无意中导致将阿尔金断裂的走滑活动与周缘造山带、盆地及相关断裂的演化过程割裂开来。此外, 许多研究和分析主要基于均匀介质条件下的 Anderson 断层模式(Anderson, 1905), 较少考虑先存构造对后期走滑及周缘构造变形(如隆升)的影响, 或者未能充分解释先存构造如何作用于后期变形, 这显然存在一定局限性。因此, 对阿尔金断裂的认识仍存在较大争议和分歧, 尤其是在其新生代左旋走滑的成因机制和发育模式方面。近年来, 随着对走滑断层理论研究的不断深入(肖坤泽和童亨茂, 2020)以及对区域构造特征解剖和认识的提升, 发现现有的生长模式难以合理解释一些关键地质现象和证据。

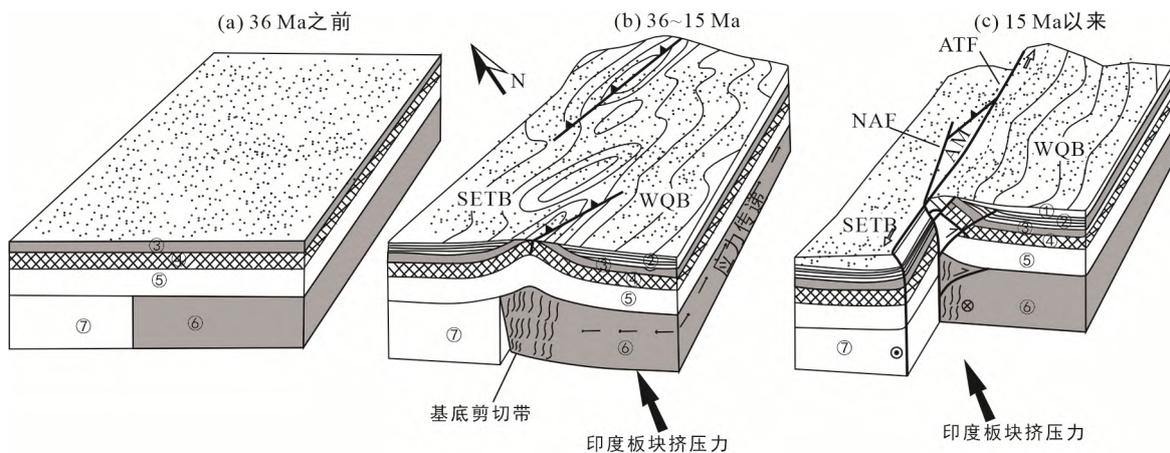
3.2 左旋走滑成因机制及发育模式新认识

从地球尺度分析, 任何大型走滑断层、逆冲断层以及正断层的发育均非孤立进行, 它们之间通常会发育转换或变换断层, 这些断层在不同构造单元

之间起到重要的调节作用(Yin and Harrison, 2000; 王根厚等, 2001; Cowgill et al., 2003; 肖坤泽和童亨茂, 2020)。基于广义断层理论(先存构造条件下的断层作用模式)(Tong and Yin, 2011; Tong et al., 2014a, 2014b; 童亨茂, 2015), 对阿尔金断裂构造特征进行深入剖析, 并结合新生代以来印度-欧亚板块碰撞挤压的构造背景(Dewey et al., 1988; Royden, 1996; Yin and Harrison, 2000; Zhou and Su, 2019), 认为阿尔金断裂新生代以来的左旋走滑活动形成于挤压构造背景下。为调节该断裂周边不同构造单元(如造山带和盆地)之间的差异挤压变形, 导致古阿尔金断裂带这一大型先存构造复活, 表现为左旋走滑特征。阿尔金断裂的左旋走滑活动与青藏高原北部盆地和造山带的发育密切相关, 二者属于同一构造背景下整体协调变形的结果, 其中阿尔金断裂是一条为调节差异挤压变形而形成的大型被动走滑断层(变换断层)(肖坤泽和童亨茂, 2020)。

表 4 阿尔金断裂新生代以来的发育模式简要归纳表
Table 4 Summary of developmental patterns of the Altyn Tagh fault since the Cenozoic

生长模式类型	参考文献	
聚焦于阿尔金断裂本身的发育模式	先走滑后隆升 先隆后走滑 走滑与隆升同步进行	Yue and Liou (1999); Yue et al. (2004); Ritts et al. (2004); 谢皓等(2022) Wu et al. (2012b); 吴磊等(2013); Li et al. (2018); Zhang et al. (2018) 任收麦等(2004)
阿尔金断裂与其南部沿线构造单元耦合的发育模式	由西南向北东方向延伸发育 由中间向两端延伸发育 断裂先贯通再伴随着周缘构造变形的走滑	丁国瑜(1989); Meyer et al. (1998); Métivier et al. (1998); Tapponnier et al. (2001); Chen et al. (2002); Yin and Harrison (2000); Yin et al. (2002); Cowgill et al. (2003); 徐锡伟等(2003) 崔军文等(2002); 李海兵等(2006) 王根厚等(2001); Cheng et al. (2016); 罗浩等(2020)



ATF. 阿尔金断裂; AM. 现今阿尔金山; NAF. 阿尔金北断裂; SETB. 塔东南盆地; WMQB. 柴达木盆地西缘。①和②. 约 36 Ma 以后沉积地层; ③. 中生界和新生代早期沉积地层; ④. 古生代地层和元古界基底; ⑤. 上地壳; ⑥. 青藏高原中下地壳; ⑦. 塔里木盆地中下地壳。注意各层厚度仅为示意性。

图 7 阿尔金断裂新生代演化模式(据 Wu et al., 2012b 修改)

Fig.7 Cenozoic evolutionary pattern of the Altyn Tagh fault

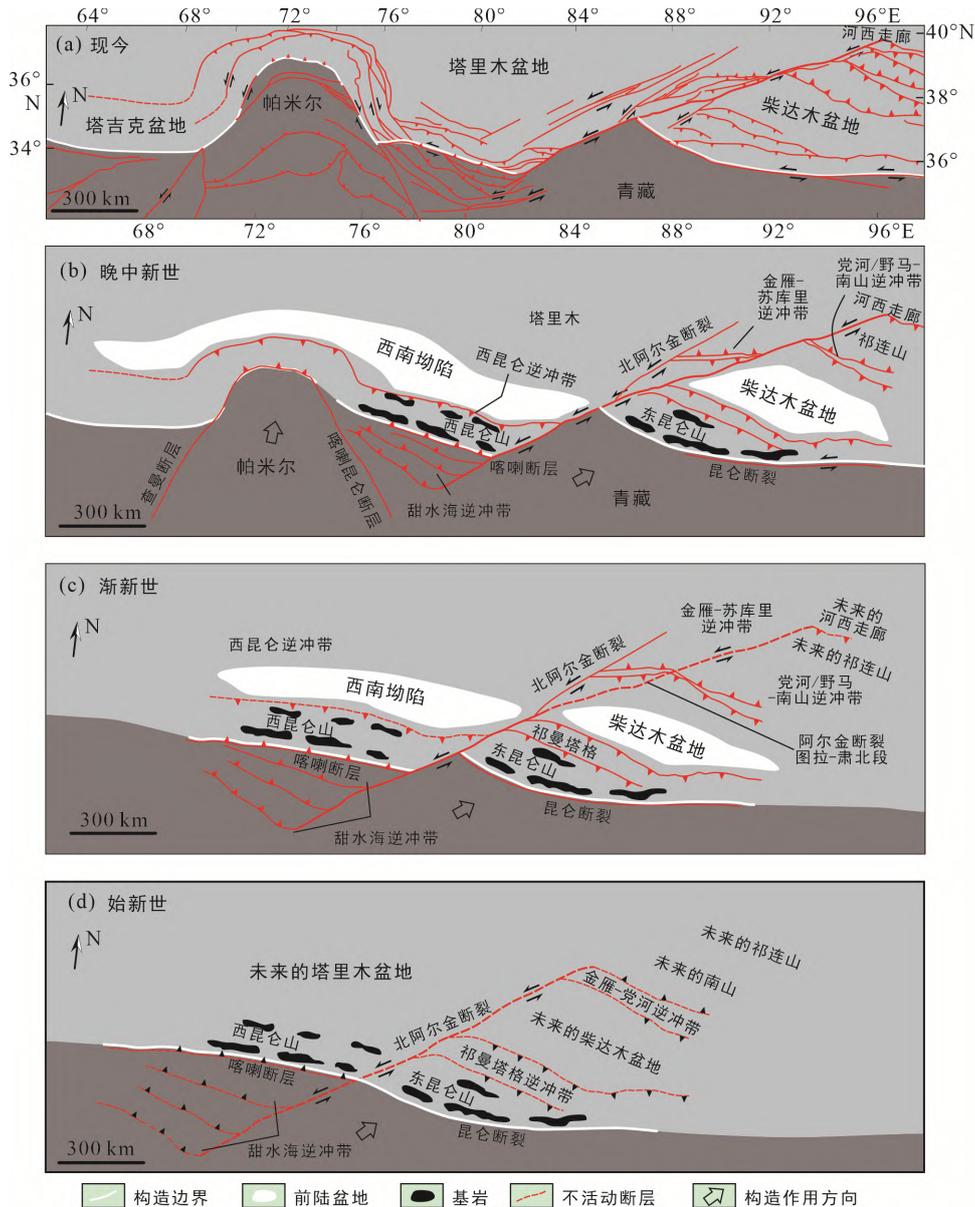


图 8 阿尔金断裂及其周缘构造带新生代演化历史(据 Cowgill et al., 2003 修改)

Fig.8 Cenozoic evolutionary history of the Altyn Tagh fault and its surrounding tectonic belts

为深入研究阿尔金断裂新生代以来左旋走滑的成因机制及其生长模式, 本文结合与阿尔金断裂活动密切相关的构造单元(如柴达木盆地、东昆仑山和祁连山造山带)的构造变形历史, 进行系统分析。

3.2.1 柴达木盆地的变形历史

柴达木盆地作为阿尔金断裂南部以及青藏高原北部最大的沉积盆地, 其内部沉积巨厚且较连续的新生代地层, 较好地记录盆地新生代以来的变形历史, 是研究新生代以来阿尔金断裂活动历史的理想场所。然而, 由于柴达木盆地地层横向相变迅速, 不同剖面间的地层年代对比存在较大困难, 加之缺乏可供放射性同位素绝对定年的火成岩(如火山灰)夹

层发育, 导致不同年代学研究之间仍存在显著差异。目前, 关于柴达木盆地始新统路乐河组底界年龄的认识尚存分歧, 主要分为两种观点: 一种认为沉积始于始新世(~54 Ma)(Zhou et al., 2006; Ji et al., 2017; 吴磊等, 2023), 另一种则认为始于渐新世(30~26 Ma)(Wang et al., 2022; 吴磊等, 2023)。结合印度-欧亚大陆在古新世已开始发生碰撞挤压(Roy, 1976; Yin et al., 2002; Wang et al., 2008; van Hinsbergen et al., 2012), 以及东昆仑山(Jolivet et al., 2001; Yin et al., 2002; Liu et al., 2017; Wang et al., 2017b; Staisch et al., 2020; Cheng et al., 2021)和祁连山(Jolivet et al., 2001; Yin et al., 2002; Clark et al., 2010; Zhuang et al., 2011; Qi et al., 2016; Li et al., 2020)在该时期均发生

明显隆升的研究成果, 推测柴达木盆地可能在始新世时期经历挤压变形, 并认为该时期地层开始沉积。鉴于路乐河组沉积期仍存在争议, 本文将从地质年龄的角度对柴达木盆地的演化历史进行总结与分析。

阿尔金断裂左旋走滑成因机制的新认识可以发现, 其左旋走滑与所调节的柴达木盆地的挤压位移量密切相关, 即柴达木盆地的收缩历史同样反映阿尔金断裂的左旋走滑历史。本文基于柴达木盆地的地震资料以及前人研究成果(Zhou et al., 2006; Wang et al., 2012; Mao et al., 2016; Wei et al., 2016; Cheng et al., 2021), 在柴达木盆地的东西两侧各选取一条 NE-SW 走向的剖面, 进行地质剖面平衡恢复。结果表明, 柴达木盆地整体经历两期强烈的挤压变形(图 9)。第一阶段大致发生在始新世时期(53.5~35.5 Ma), 随后在 35.5~22.0 Ma 期间, 变形活动较弱, 盆地总体处于相对稳定的沉积状态。第二阶段自 22.0 Ma 至今, 期间经历多期显著的收缩变形(14.9 Ma、8.2 Ma 和 2.5 Ma)。

3.2.2 造山带隆升历史

新生代以来, 在印度-欧亚板块碰撞作用的影响下, 东昆仑山和祁连山在古生代-中生代造山带(缝合带)的基础上经历复活与隆升(Meyer et al., 1998; Yin and Harrison, 2000; Jolivet et al., 2001; Tapponnier et al., 2001)。这一过程与阿尔金断裂再活动的动力学机制相同, 三者之间表现出显著的构造耦合关系。因此, 深入研究东昆仑山和祁连山新生代以来

的隆升与剥露历史, 对于揭示阿尔金断裂带的活动演化历史具有重要的科学意义。

前人通过沉积学、低温热年代学、活动断裂分析以及地球物理观测等多种方法, 对东昆仑山和祁连山新生代以来的隆升历史进行广泛研究(Yin and Harrison, 2000; Yin et al., 2002; Fang et al., 2005b, 2007; Clark et al., 2010; Duvall et al., 2013)。在此基础上, 结合柴达木盆地的演化历史以及印度-欧亚大陆碰撞挤压的研究成果, 可将东昆仑山新生代以来的隆升过程大致划分为两个主要的变形阶段(图 10a)。第一阶段为始新世(50~35 Ma)(Jolivet et al., 2001; Clark et al., 2010; Wang et al., 2016; Liu et al., 2017; Wang et al., 2017a; Staisch et al., 2020; Wu et al., 2020; Cheng et al., 2021); 第二阶段为渐新世中期以来(约 28 Ma 至今)(Fang et al., 2005a; Wang et al., 2017b; McRivette et al., 2019; Staisch et al., 2020; Wu et al., 2020; Li et al., 2021b)。在第二阶段的持续隆升过程中, 还记录了多次快速隆升事件, 分别发生在约 25 Ma、约 8 Ma 以及第四纪(约 2.5 Ma 以来)(图 10a)。祁连山的新生代隆升历史同样可划分为两个显著的变形阶段(图 10b)。第一阶段为始新世(50~35 Ma)(Jolivet et al., 2001; Yin et al., 2002; Clark et al., 2010; Li et al., 2020), 第二阶段为中新世以来(约 18 Ma 至今)(Fang et al., 2005b; Zheng et al., 2017; Pang et al., 2019; Yu et al., 2019; Li et al., 2020; Li et al., 2021b)。在第二阶段的持续隆升过程中, 存在中-中新世(约 15 Ma)、晚中新世(约 8 Ma)以及第四纪(约 2.5 Ma 以来)三次快速隆升事件(图 10b)。

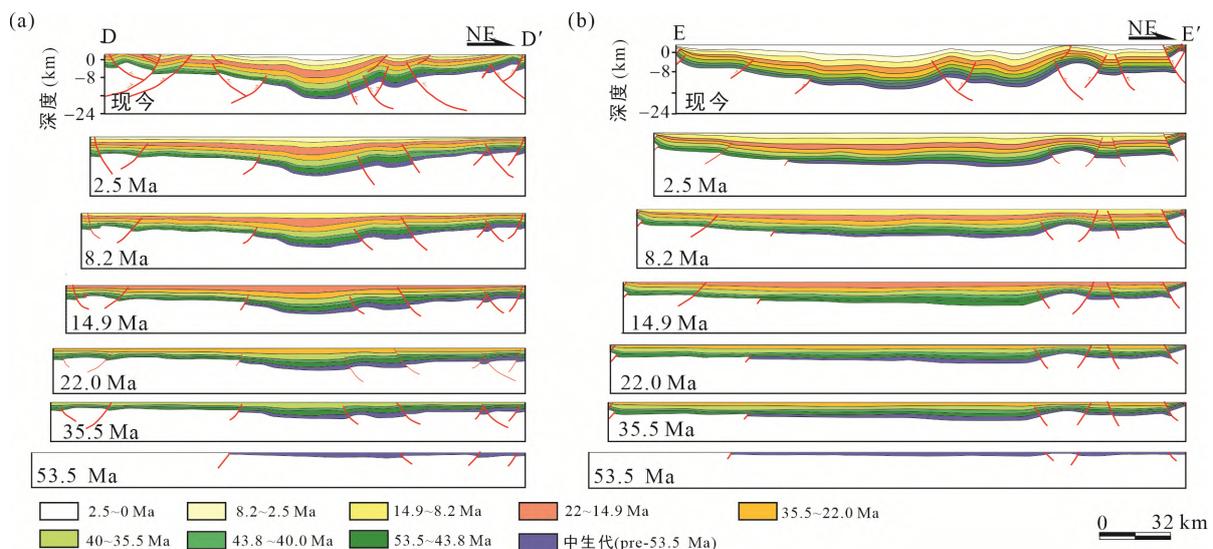


图9 柴达木盆地 NE 走向地质剖面平衡恢复图(地层单位如图 4b 所示, 剖面位置见图 4a; 据 Zhou et al., 2006; Wei et al., 2016 修改)

Fig.9 Balance restoration of the NE-trending geologic sections in the Qaidam Basin

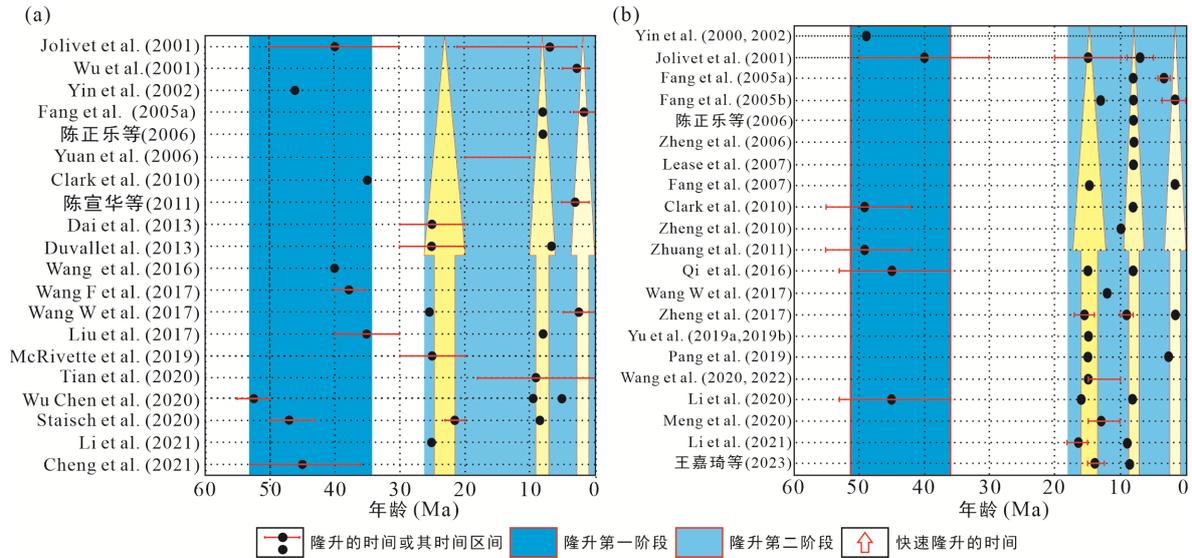


图 10 东昆仑山(a)和祁连山(b)新生代以来的隆起和快速剥露历史

Fig.10 Uplift and rapid exhumation history of the East Kunlun Mountains (a) and Qilian Mountains (b) since the Cenozoic

3.2.3 阿尔金断裂左旋走滑发育新模式

基于上述对阿尔金断裂新生代走滑活动特征、成因机制、柴达木盆地的变形历史,以及东昆仑山和祁连山构造隆升时间研究成果的综合分析,以广义断层理论为指导(Tong and Yin, 2011; Tong et al., 2014a, 2014b; 童亨茂, 2015),进一步提出阿尔金断裂新生代左旋走滑的活动历史及其与周缘构造单元的构造耦合发育新模式(图 11a~e)。总体上可划分为以下两个主要的变形阶段。

第一阶段,即始新世时期,东昆仑山与祁连山开始发生显著隆升,柴达木盆地也经历明显的挤压变形,并开始接受沉积,表明印度板块的挤压应力已传递至祁连山地区。此时,先存的古阿尔金断裂基本全面复活,并向东北方向延伸至祁连山区域。作为一条变换断层(左旋走滑断层),阿尔金断裂发挥传递和调节挤压位移的作用,将南部碰撞作用引发的挤压变形从东昆仑山逐渐向祁连山北部传递。同时,阿尔金断裂的走滑位移量自东昆仑山→柴达木盆地→祁连山向北东东方向逐渐减小($D_1^1 > D_1^2 > D_1^3$, 图 11b、f)。

第二阶段(约 25 Ma 以来),东昆仑山和祁连山均经历了持续的挤压与隆升过程,但两者均表现出多次不同程度的快速隆升历史。因此,这一阶段可进一步划分为三个子阶段。①晚渐新世-中新世(25~10 Ma)(图 11c):晚渐新世-早中新世(25~20 Ma)东昆仑山开始发生快速隆升,而祁连山对挤压作用的响应相对滞后,直至中中新世(15~10 Ma)才开始出现快速隆升,与此同时柴达木盆地也表现出显著

的挤压变形。这表明此时印度-欧亚板块碰撞挤压的构造作用已传递至祁连山地区,其挤压量主要由东昆仑山、柴达木盆地和祁连山所吸收。在此期间,阿尔金断裂为调节三者之间的挤压位移量,发生了大规模且快速的左旋走滑活动,全段的走滑位移量显著增加(D_1^1 、 D_1^2 和 D_1^3 分别增大至 D_2^1 、 D_2^2 和 D_2^3),且增长量自西向东逐渐减小,走滑位移量的分布也呈现类似趋势(图 11c、f)。此外,也有研究表明,此期间东昆仑断裂同样发生了左旋走滑活动(Jolivet et al., 2003; Dai et al., 2013; Duvall et al., 2013; Staisch et al., 2020)。②晚中新世(约 8 Ma)(图 11d):东昆仑山和祁连山均快速隆升,柴达木盆地也出现了较为强烈的构造变形。这些断裂整段均表现出显著的左旋走滑活动,其传递的挤压位移量在西侧最大,并向东逐渐减小;该时期阿尔金断裂的走滑位移量增长量也呈现出类似趋势(图 11f)。③第四纪(2.8 Ma/2.5 Ma 至今)(图 11e):东昆仑山和祁连山再次经历更为强烈的隆升,同时柴达木盆地的挤压变形也显著增强,反映了第四纪以来挤压作用的进一步加强。为调节这些挤压变形,阿尔金断裂的左旋走滑活动明显增强(图 11e、f)。

因此,阿尔金断裂在新生代的左旋走滑活动是在挤压构造作用下,为调节断裂南侧的挤压位移量,导致先存构造复活并进一步发育的结果。该断裂在新生代的活动大致可分为两个主要阶段:第一阶段发生在始新世,在挤压作用的影响下,不同区域(如盆地和造山带)经历不同程度的构造变形。为调节这些挤压变形,断裂带开始出现左旋走滑活动,并初

步形成断裂带的雏形。第二阶段自约 25 Ma 以来, 在印度-欧亚板块碰撞挤压的作用下, 断裂再次发生显著的左旋走滑。在此期间, 为适应盆地和造山带多次快速挤压变形, 阿尔金断裂也经历多次快速走滑活动, 具体表现为中-中新世(15 Ma 以来)的加速、晚中新世(8 Ma)的再次加速, 以及第四纪以来(2.8 Ma/2.5 Ma 以来)走滑活动逐渐达到高峰。由于不同段落不同时期调节的挤压位移量存在差异, 沿阿尔金断裂带各段的活动强度(速率)有所不同, 整体呈现出沿北东方向递减的趋势。此外, 由于印度-欧亚板块碰撞挤压方向与古阿尔金断裂走向之间存在约 23°的夹角, 导致左旋走滑过程中, 阿尔金断裂沿线山脉也伴随着差异性的隆升。

该发育模式不仅为青藏高原的隆升机制及应力传递方式、走滑断层活动与周边构造之间的耦合关

系提供新的视角, 而且在挤压构造背景下, 针对不同先存构造条件下断层复活的变形特征及位移量分配方式提出新的见解。为进一步验证这一新认识, 本研究将采用物理模拟实验的方法进行模拟分析。

3.2.4 物理模拟实验的验证

物理模拟实验是研究构造变形成因机制的有效方法, 并在断裂的形成与演化方面取得诸多重要进展(McClay, 1990; 周建勋和周建生, 2006; 童亨茂等, 2008; Dooley and Schreurs, 2012)。

为深入验证和探讨阿尔金断裂新生代以来的成因机制与发育模式, 本研究基于阿尔金断裂及其周缘构造特征的解析与新认识(Yin et al., 2002; Cowgill et al., 2003; Wu et al., 2012b; 肖安成等, 2013), 得出挤压方向与古阿尔金断裂走向之间的夹角约为 23°。结合东昆仑山(中段)约 300 km 挤压位移量(表 3, 图 6),

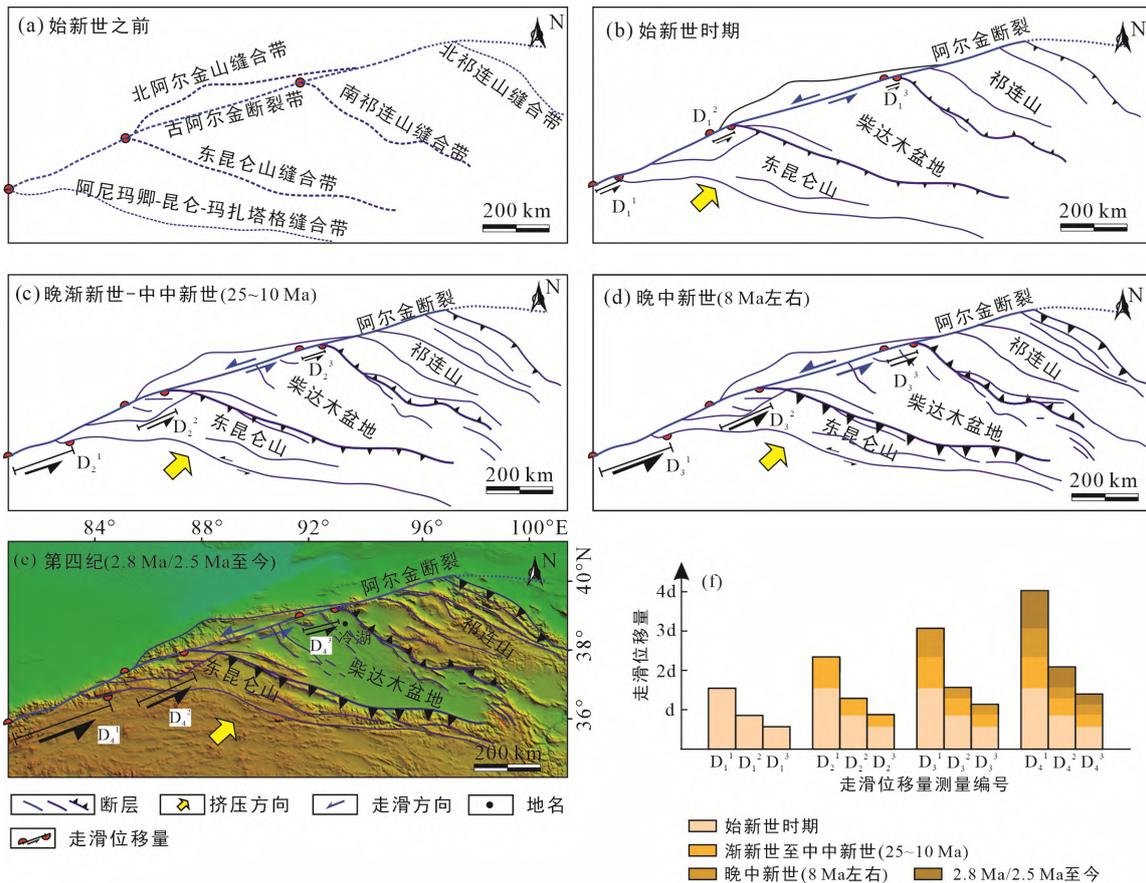


图 e 中断裂解释据 Yin and Harrison (2000); Yin et al. (2002); Cowgill et al. (2003), 图 11e 的底图为 DEM 地形剖面图, DEM 数据来自美国太空总署(NASA)和国防测绘局(NIMA)联合测量的全球 90 m 地形数据 SRTM, 下载地址: <http://srtm.csi.cgiar.org>。图(a~e)中黑色箭头反映走滑位移量的相对大小, 三角形的大小反映了逆冲断层变形的相对强弱。由于缺乏详细的走滑位移量分布数据, 走滑位移量的分布仅为表明走滑过程中的变化和相对大小, 逆冲断层的详细演化尚不清楚, 图中只是简单地显示逆冲断层的发育过程。图 f 中 d 表示走滑位移量值表相对大小, 无具体值含义。

图 11 阿尔金断裂及其周缘构造带单元新生代的发育模式(a~e)和阿尔金断裂在不同阶段的走滑位移量分布柱形图(f)
Fig.11 Cenozoic development patterns of the Altyn Tagh fault and its peripheral tectonic units (a~e) and histograms of distribution of strike-slip displacements of the Altyn Tagh fault at different stages (f)

推测模型的缩短量与缩短率。最后,依据基底先存构造对断层形成演化的控制规律(童亨茂, 2003; 童亨茂等, 2009a, 2009b; Tong et al., 2014a), 以及物理模拟实验的相似理论, 设计出相应的模型(包括边界条件与基底先存构造, 图 12)。其中, 模型与实际地质体的相似比例约为 2.5×10^{-7} 。

模型基底由单层和双层橡皮布构成, 将橡皮基底与两侧挡板相连后预拉伸(从 56 cm 拉伸至 80 cm), 随后在其上方放置刚性块体(聚苯塑料块和薄板)。其中, 单层和双层橡皮布分别用于模拟变形较强(东昆仑山和祁连山)和较弱的区域(柴达木盆地), 而刚性块体则模拟不变形区域(阿尔金造山带和塔里木盆地)(图 12)。该方法目前已被广泛应用于模拟实际地质中变形极弱或不变形的先存构造(如隆起区)(童亨茂, 2003)。实验材料选用相似性较好的松散干石英砂, 模型中铺设厚度为 3.0 cm。待铺设完成后, 在其上部铺设多条蓝色标志线。模型采用单侧挤压方式, 基于研究成果(表 3, 图 6)及多次试验, 确定模型挤压分为两个阶段及其对应的位移量: 第一阶段速度 $v_1=0.25$ cm/min, 位移量 $D_1=3$ cm; 第二阶段速度 $v_2=0.5$ cm/min, 位移量 $D_2=7$ cm, 总缩短率为 12.5%。

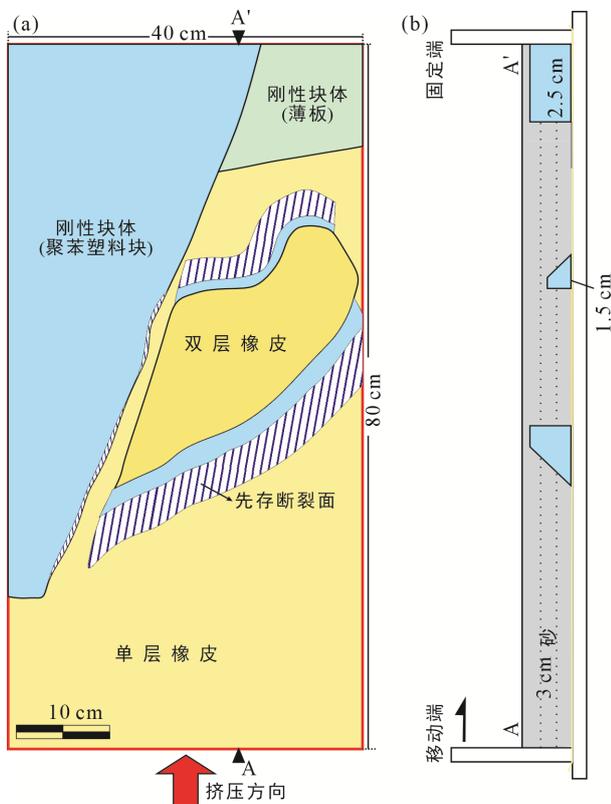


图 12 阿尔金断裂物理模拟实验模型平面(a)、剖面(b)装置图

Fig.12 Setup of plan view (a) and section (b) of the analogue modelling of the Altyn Tagh fault

所有实验均进行了两次重复实验, 并获得相似的实验结果。

在挤压作用下, 基底先存构造区域首先复活并形成断裂(断层 F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_4 , 属于先存构造复活断层)(图 13a、b)。其中, F_1 断层在早期表现为 NEE 方向延伸且整段发育的左旋走滑。该断层的形成是为了调节其南侧区域的挤压(逆冲)位移, 从而导致先存构造发生左旋走滑。随着挤压作用的持续, 在 F_1 断层南侧早期发育的逆冲断层(F_2 、 F_3 和 F_4)规模逐渐扩大。在 F_2 断层附近以及 F_3 ~ F_5 逆冲断层所夹持的区域持续隆升, 同时发育了一系列新断层(先存构造次级断层和库仑断层)(图 13c、d)。在此过程中, F_1 断层的规模和走滑位移量也随之增大, 沿断裂带伴随不同程度的隆起及一系列次级断裂(如 R 剪切等)的发育。通过标志线的错动可以观察到, 走滑位移量自南西向北东方向逐渐减小, 直至消失(图 13、14a)。此外, F_2 断层在早期以逆冲为主, 后期可见其伴随有左旋走滑特征(图 13)。

依据逆冲断层发育的位置以及标志线 5~6 和 17~18 处走滑位移量显著减小的特征, 大致可以标志线 6 和 18 为界, 将 F_1 断层划分为三段: 左段(1~5)、中段(6~17)和右段(18~23)。结合阿尔金断裂在不同挤压阶段下各段落平均走滑位移量分布图(图 14b)可知, 随着挤压作用的增强, 各段的走滑位移量均有所增加, 并呈现出自左向右逐渐减小的趋势。此外, 在不同挤压阶段, 各段落平均走滑位移量的增长幅度同样表现出自左向右递减的特征。

实验模拟的最终结果($s=12.5\%$)(图 15a)与模拟区域实际地质特征(图 15b)整体上展现出良好的相似性, 总体上再现了目标区域内与阿尔金断裂及其南侧主要构造单元(东昆仑山、柴达木盆地和祁连山)相关的若干基本特征。在模拟实验结果中, 发育出一条大规模的、总体呈 NEE 走向的左旋走滑断层 F_1 (阿尔金断裂), 同时出现了一条与柴达木盆地北部边界断层相对应的 F_3 , 以及在祁连山边界和内部发育的一系列逆冲断层(如 F_4 和 F_5)。沿该断裂走向, 在不同区域表现出差异性的隆升现象, 其走滑位移量分布呈现向 NEE 方向逐渐减小的趋势, 并表现出一定的分段性。其中, 左段(1~5)、中段(6~17)和右段(18~23)分别对应东昆仑山、柴达木盆地和祁连山。为协调这三个区域的挤压位移量, 阿尔金断裂表现出不同程度的复活, 具有不同的走滑位移量。左段的走滑位移量反映了东昆仑山、柴达木盆地和祁连

山总挤压量的调节结果, 等比例换算约为 281.2 km; 中段用于调节柴达木盆地和祁连山的挤压量, 约为 210 km; 右段则主要用于调节祁连山的挤压量, 约为 96.8 km(图 14b)。这些结果大体上也体现了这三个区域挤压变形的差异性(图 14b、15)。这些现象与上述关于阿尔金断裂的认识一致。

由于本次模拟聚焦于较大尺度范围, 因此在模型设计中忽略诸多规模较小的先存构造, 以及规模较小的盆地和逆冲断层。此外, 鉴于本实验的主要目的在于探讨阿尔金断裂左旋走滑的成因机制, 并

未实施同沉积和切片处理, 这可能导致一些断裂发育的细节特征及盆地内部的构造特性未能充分展现。总体而言, 该模拟实验较好地再现了阿尔金断裂及其南部主要构造带的典型特征, 较为系统地揭示阿尔金断裂左旋走滑的成因机制, 表明该断裂的左旋走滑活动是在印度板块-欧亚板块碰撞挤压作用下, 为调节其南侧的挤压位移量, 由作为先存构造的古阿尔金断裂带复活并进一步发育而成, 其中走滑位移量自西向东逐渐减小的趋势是挤压应变分配的结果。

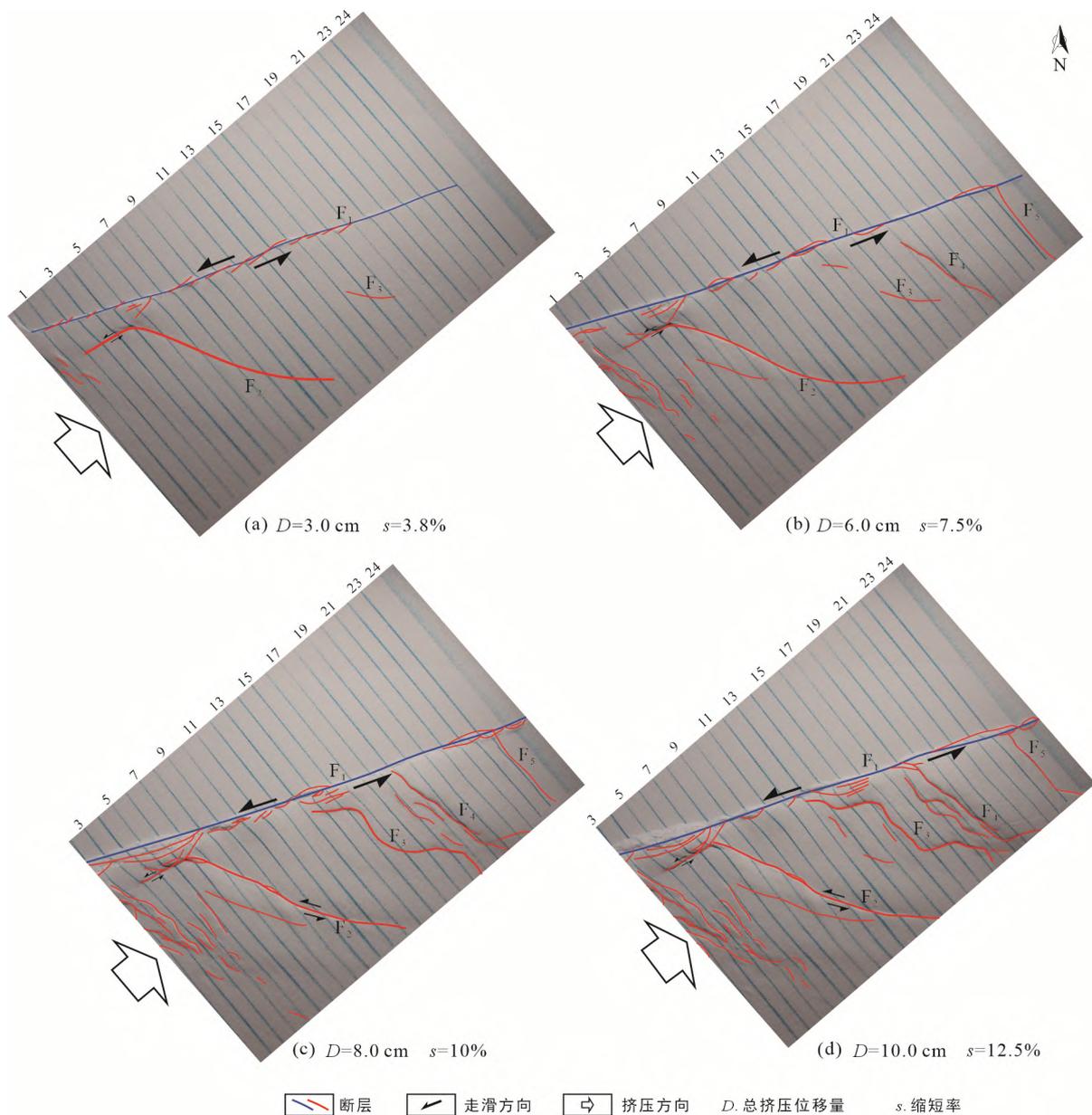


图 13 阿尔金断裂构造变形演化平面图

Fig.13 Plan view of structural deformation evolution of the Altyn Tagh fault

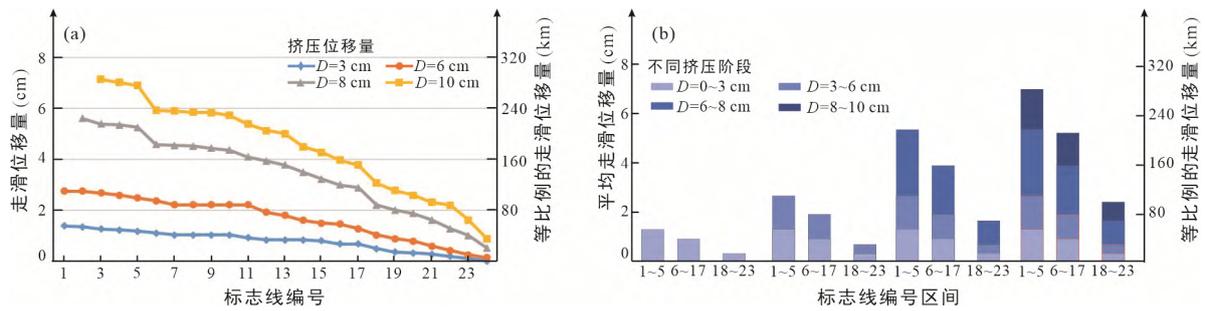


图 14 阿尔金断裂在实验中不同挤压量下的走滑位移量分布及其对应的等比例的实际走滑位移量(a)以及在实验中不同挤压阶段下不同段落平均走滑位移量分布及其对应的等比例的实际走滑位移量图(b)

Fig.14 Distribution of strike-slip displacements and their corresponding equal-scaled natural strike-slip displacements for the Altyn Tagh fault at different shortening stages in the experiment (a) and diagram of average strike-slip displacements and their corresponding equal-scaled natural strike-slip displacements for different segments at different shortening stages in the experiment (b)

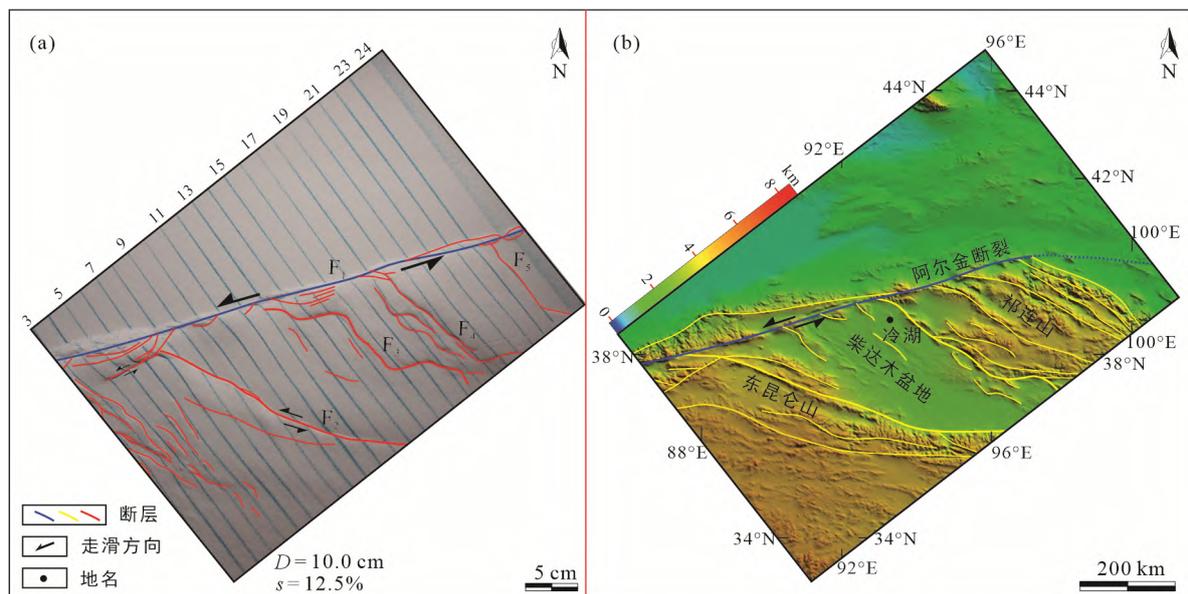


图 15b 的底图为 DEM 地形剖面图, DEM 数据来自美国太空总署(NASA)和国防测绘局(NIMA)联合测量的全球 90 m 地形数据 SRTM, 下载地址: <http://srtm.csi.cgiar.org>.

图 15 实验最终结果(a)与实际地质(b)对比图

Fig.15 Comparison between the experiment results (a) and the natural example (b)

4 讨论

4.1 动力学来源

青藏高原的新生代隆升被认为是印度-欧亚大陆碰撞挤压的结果。尽管关于印度-欧亚大陆碰撞的两阶段模式及碰撞时间仍存在一些争议,但这种两阶段碰撞模型可以较为合理地解释青藏高原新生代以来的主要构造变形特征(Roy, 1976; van Hinsbergen et al., 2012, 2019; Yang et al., 2015; Ma et al., 2016; Xiao et al., 2017; Zhou and Su, 2019)。在约 55~50 Ma 期间, 青藏-喜马拉雅微大陆与拉萨地块沿着印度

河-雅鲁藏布江缝合带发生碰撞。在此时期的挤压作用下, 应力逐渐向北传递, 导致东昆仑山和祁连山区域的缝合带(先存构造)相继复活并隆升, 同时古阿尔金断裂也重新活动, 左旋走滑开始。第二阶段为 35~30 Ma 以来, 印度-欧亚大陆在青藏-喜马拉雅南侧发生实质性的印度-亚洲碰撞。这一持续的碰撞挤压作用导致渐新世以来青藏高原北部强烈的构造变形。根据目前关于青藏高原北部构造变形的研究成果, 在碰撞挤压过程中, 不同时期的构造作用强度可能存在一定差异(Zhou and Su, 2019)。虽然两个碰撞阶段的时间与青藏高原北部构造变形的时间存在约 5~10 Ma 的差距, 但这与数值模拟结果一致, 即

印度-亚洲碰撞的构造响应在初始碰撞后的 5 Ma 内开始显现(Royden, 1996; Beaumont et al., 2004), 并且构造应力的传递过程需要一定的时间(Zhou and Su, 2019)。

总体而言, 印度-欧亚大陆两阶段的碰撞模式为青藏高原北部阿尔金断裂及其南部沿线新生代以来所呈现的分阶段构造活动提供一种较为合理的动力学解释。在这两次主要碰撞及持续汇聚作用下, 先存构造发生不同程度的复活, 阿尔金断裂始终表现为左旋走滑, 而东昆仑山和祁连山在不同阶段经历不同程度的隆升。这些观点与多数学者的共识一致, 即青藏高原的隆升主要受亚洲板块内部地壳的分散式缩短和增厚所主导(Meyer et al., 1998; Tapponnier et al., 2001)。

4.2 新认识对周缘构造变形和未来研究的启示

目前, 关于阿尔金断裂新生代以来的演化历史、活动特征以及走滑位移量等方面仍存在较大争议(Yue and Liou, 1999; Yin and Harrison, 2000; Yin et al., 2002; Wu et al., 2012b; Dai et al., 2017)。造成分歧的原因有: ①在构造变形复杂的区域(具有显著的非均质性), 应用经典的断层理论(适用于均匀介质)来解析构造变形机制难免引发诸多争议; ②未能较为合理且系统地考虑先存构造对后期变形的控制作用, 以及先存构造对挤压应变分配的影响。

基于对阿尔金断裂研究进展的总结与梳理, 以及本文提出的阿尔金断裂新生代左旋走滑成因机制的新认识和生长新模式, 可以认识到, 阿尔金断裂是在挤压应力作用下, 由于先存构造复活而形成的被动走滑断层(变换断层)。该断裂的主要功能是传递和调节不同区域的挤压位移量, 从而引发走滑活动, 并不控制其沿线盆地(如柴达木盆地)的发育。这表明, 该断裂的走滑活动及其走滑位移量与其所调节的不同区域的挤压位移量之间存在着良好的耦合关系, 二者的发育能够相互匹配并进行推断。此外, 由于不同区域吸收的挤压位移量存在差异, 导致阿尔金断裂的发育呈现出显著的分段活动特征。沿阿尔金断裂走向, 不同段落的走滑活动历史及走滑位移量均有所不同, 但表现出高度的规律性。

未来针对阿尔金断裂的走滑活动特征及其走滑位移量等方面的研究, 可基于其成因机制与分段特征, 从其所调节的挤压位移量入手, 通过系统分析该断裂南侧沿线不同区域的缩短量, 从而为阿尔金断裂走滑位移量的分布特征研究提供更为系统的支持。此外, 对于阿尔金断裂不同区域的走滑活动历

史及走滑位移量的研究, 建议结合分段性特征, 在不同位置采用多学科、多尺度以及定量化的方法开展研究, 以获取更多且更加精确的结果与认识。同时, 应将所得结果与新认识同该断裂沿线不同构造单元进行综合分析, 从而取得更为系统的阿尔金断裂及其与周缘构造单元之间构造耦合关系的研究成果, 并为不同构造单元的缩短量研究提供依据, 进而为青藏高原的隆升机制、印度-欧亚板块的碰撞历史以及恢复各时期的古构造格架研究提供重要支撑。

5 结 论

(1) 阿尔金断裂作为全球范围内备受关注的一条走滑断裂带, 已取得丰富的研究成果并形成诸多共识。然而, 在许多方面仍存在较大争议, 特别是在新生代以来断裂的演化历史、走滑位移量的分布以及左旋走滑的成因机制与发育模式等方面。此外, 目前对左旋走滑成因机制和发育模式的认识, 尚难以对阿尔金断裂的新生代活动历史及其周缘主要构造单元(盆地和造山带)的变形特征耦合关系作出较为合理的解释。

(2) 阿尔金断裂在新生代的左旋走滑活动, 是在挤压构造作用下, 为调节不同区域的挤压位移量而使先存构造复活所形成, 属于被动走滑断层。该断裂在新生代的活动总体可分为两个主要阶段: 第一阶段为始新世时期的初始走滑; 第二阶段为约 25 Ma 以来的再次走滑, 其间经历了多次快速走滑事件, 分别发生在中中新世(15 Ma)、晚中新世(8 Ma)以及上新世晚期以来(2.8 Ma/2.5 Ma 以来), 其中最后一期走滑活动达到高峰。左旋走滑的成因机制新认识得到了砂箱模拟实验的良好验证。印度-欧亚大陆两阶段的碰撞可能为其提供动力学来源。

(3) 左旋走滑成因机制的新认识与新模式能够较为合理地解释阿尔金断裂的变形特征及走滑位移量分布的差异, 同时为阿尔金断裂左旋走滑与其沿线南侧发育的不同构造单元之间的构造耦合关系提供了新的视角。

致谢: 感谢东北石油大学断裂控藏重点实验室提供的物理模拟实验平台以及相关人员对文中模拟实验方面提供的帮助。感谢中国地质科学院地质力学研究所陈正乐研究员和另一位匿名审稿专家对文章提出的建设性意见, 让作者受益匪浅。

参考文献(References):

- 蔡学林, 魏显贵, 刘援朝. 1992. 阿尔金山走滑断裂构造样式. 成都地质学院学报, 19(1): 8-17.
- 车自成, 刘良, 刘洪福, 罗金海. 1998. 阿尔金断裂系的组成及相关中生代含油气盆地的成因特征. 中国区域地质, 17(4): 377-384.
- 陈柏林, 陈宣华, 王小凤, 杨风, 桑少杰, 陈正乐, 王克卓, 王亚非, 杨屹, 李学智. 2002. 阿尔金北缘地区韧性剪切带型金矿床构造控矿解析. 地质学报, 76(2): 235-243.
- 陈柏林, 崔玲玲, 白彦飞, 王世新, 陈正乐, 李学智, 祁万修, 刘荣. 2010. 阿尔金断裂走滑位移的确定——来自阿尔金山东段构造成矿带的新证据. 岩石学报, 26(11): 3387-3396.
- 陈文, 葛肖虹, 叶慧文, 刘新宇, 刘永江, 张思红. 2000. 用激光微区 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年技术测定阿尔金断裂系多期活动的时代. 质谱学报, 21(S1): 189-190.
- 陈正乐. 2002. 阿尔金断裂带中段新生代走滑历史研究——盆地沉积和山脉隆升证据. 北京: 中国地质科学院博士学位论文.
- 陈正乐, 张岳桥, 陈宣华, 王小凤, Ramon A S, Zack W B. 2001. 阿尔金断裂中段晚新生代走滑过程的沉积响应. 中国科学(D辑), 31(S1): 90-96.
- 崔军文. 1999. 阿尔金断裂系. 北京: 地质出版社.
- 崔军文, 张晓卫, 李朋武. 2002. 阿尔金断裂: 几何学、性质和生长方式. 地球学报, 23(6): 509-516.
- 丁国瑜. 1989. 第四纪断层上断裂活动的群集及迁移现象. 第四纪研究, 9(1): 36-47.
- 葛肖虹, 刘俊来. 1999. 北祁连造山带的形成与背景. 地学前缘, 6(4): 223-230.
- 葛肖虹, 刘永江, 任收麦. 2002. 青藏高原隆升动力学与阿尔金断裂. 中国地质, 29(4): 346-350.
- 葛肖虹, 张梅生, 刘永江, 叶慧文, 石采东. 1998. 阿尔金断裂研究的科学问题与研究思路. 现代地质, 12(3): 2-5, 7-8.
- 龚正, 李海兵, 孙志明, 刘栋梁, 潘家伟, 韩亮, 吴蝉. 2013. 阿尔金断裂带中侏罗世走滑活动及其断裂规模的探讨——来自软沉积物变形的证据. 岩石学报, 29(6): 2233-2250.
- 郭召杰, 张志诚, 王建君. 1998. 阿尔金山北缘蛇绿岩带的Sm-Nd等时线年龄及其大地构造意义. 科学通报, 43(18): 1981-1984.
- 国家地震局《阿尔金活动断裂带》课题组. 1992. 阿尔金活动断裂带. 北京: 地震出版社.
- 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. 地震地质, 20(1): 9-18.
- 李海兵, 许志琴, 杨经绥, 戚学祥, Tapponnier P. 2007. 阿尔金断裂带最大累积走滑位移量900km? 地质通报, 26(10): 1288-1298.
- 李海兵, 杨经绥, 许志琴, 孙志明, Tapponnier P, Woerd J V D, Meriaux A S. 2006. 阿尔金断裂带对青藏高原北部生长、隆升的制约. 地学前缘, 13(4): 59-79.
- 李海兵, 杨经绥, 许志琴, 吴才来, 万渝生, 史仁灯, Liou J G, Tapponnier P, Ireland T R. 2001. 阿尔金断裂带印支期走滑活动的地质及年代学证据. 科学通报, 46(16): 1333-1338.
- 刘永江, Neubauer F, 葛肖虹, Genser J, 袁四化, 李伟民, 巩庆林, 陈元忠. 2007. 阿尔金断裂带年代学和阿尔金山隆升. 地质科学, 42(1): 134-146, 188.
- 刘永江, 葛肖虹, 叶慧文, 刘俊来, Franz N, Genser J, 潘宏勋, 任收麦. 2001. 晚中生代以来阿尔金断裂的走滑模式. 地球学报, 22(1): 23-28.
- 刘永江, 叶慧文, 葛肖虹, 陈文, 刘俊来, 任收麦, 潘宏勋. 2000. 阿尔金断裂变形岩激光微区 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄. 科学通报, 45(19): 2101-2104.
- 罗浩, 徐锡伟, 刘小利, 白鸾羲, 王启欣, 李梦妮, 刘少卓. 2020. 阿尔金断裂东段的构造转换模式. 地质学报, 94(3): 692-706.
- 任收麦, 葛肖虹, 刘永江, 常丽华, 吴光大, 袁四化. 2004. 晚白垩世以来沿阿尔金断裂带的阶段性走滑隆升. 地质通报, 23(S2): 926-932.
- 童亨茂. 2003. 渤海湾盆地张巨河复杂断块区平面砂箱模拟实验及其启示. 地质论评, 49(3): 305-310.
- 童亨茂. 2015. 广义断层模式. 地质论评, 61(S1): 712-713.
- 童亨茂, 孟令箭, 蔡东升, 吴永平, 李绪深, 刘明全. 2009a. 裂陷盆地断层的形成和演化——目标砂箱模拟实验与认识. 地质学报, 83(6): 759-774.
- 童亨茂, 宓荣三, 于天才, 刘宝鸿, 孟令箭, 杨景勇. 2008. 渤海湾盆地辽河西部凹陷的走滑构造作用. 地质学报, 82(8): 1017-1026.
- 童亨茂, 聂金英, 孟令箭, 张红波, 李晓宁. 2009b. 基底先存构造对裂陷盆地断层形成和演化的控制作用规律. 地学前缘, 16(4): 97-104.
- 王根厚, 李明, 冉书明, 王小牛. 2001. 转换断层及其地质意义——以阿尔金转换断层为例. 成都理工学院学报, 28(2): 183-186.
- 吴才来, 郜源红, 雷敏, 秦海鹏, 刘春花, 李名则, Frost B R, Wooden J L. 2014. 南阿尔金茫崖地区花岗岩类锆石SHRIMP U-Pb定年、Lu-Hf同位素特征及岩石成因.

- 岩石学报, 30(8): 2297–2323.
- 吴才来, 雷敏, 吴迪, 张昕, 陈红杰, 李天啸. 2016. 南阿尔金古生代花岗岩U-Pb定年及岩浆活动对造山带构造演化的响应. 地质学报, 90(9): 2276–2315.
- 吴磊. 2011. 阿尔金断裂中段新生代活动过程及盆地响应. 杭州: 浙江大学博士学位论文.
- 吴磊, 巩庆霖, 覃素华. 2013. 阿尔金断裂新生代大规模走滑起始时间的厘定. 岩石学报, 29(8): 2837–2850.
- 吴磊, 肖安成, 汪立群, 毛黎光, 王亮, 董有浦, 徐波. 2012. 阿尔金断裂中段南侧东西向隆起的形成及对阿尔金山新生代隆升机制的启示. 中国科学: 地球科学, 42(12): 1863–1876.
- 吴磊, 杨惠童, 张永庶, 张军勇, 魏岩岩, 黄凯, 曹冯威, 葛梦佳, 叶雨晖, 陈琰, 唐建超, 林秀斌, 肖安成, 陈汉林, 杨树锋. 2023. 新生代柴达木盆地与周缘造山带的构造耦合. 地质学报, 97(9): 2939–2955.
- 肖安成, 吴磊, 李洪革, 汪立群. 2013. 阿尔金断裂新生代活动方式及其与柴达木盆地的耦合分析. 岩石学报, 29(8): 2826–2836.
- 肖坤泽, 童亨茂. 2020. 走滑断层研究进展及启示. 地质力学学报, 26(2): 151–166.
- 谢成龙, 孟栋材, 王大华, 徐佑德, 王力, 常森, 荆翰林, 刘传泽. 2020. 吐拉盆地锆石U-Pb年代学: 对成岩年龄、源区特征及阿尔金新生代走滑的制约. 大地构造与成矿学, 44(4): 783–813.
- 谢皓, 刘彩彩, 张会平, 詹艳, 赵旭东. 2022. 新生代阿尔金断裂带的演化: 来自沿线盆地沉积记录的启示. 岩石学报, 38(4): 1107–1125.
- 徐锡伟, Tapponnier P, Woerd J V D, Ryerson F J, 王峰, 郑荣章, 陈文彬, 马文涛, 于贵华, 陈桂华, Meriaux A S. 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. 中国科学: 地球科学, 33(10): 967–974.
- 许志琴, 杨经绥, 张建新, 姜枚, 李海兵, 崔军文. 1999. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制. 地质学报, 73(3): 193–205.
- 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. 现代地质, 15(1): 8–12.
- 郑剑东. 1991. 阿尔金山大地构造及其演化. 现代地质, 5(4): 347–354.
- 郑剑东. 2001. 阿尔金断裂带开合演化//中蒙中生代伸展构造现场研讨会论文摘要及野外地质考察路线指南. 26.
- 周建勋, 周建生. 2006. 渤海湾盆地新生代构造变形机制: 物理模拟和讨论. 中国科学: 地球科学, 36(6): 507–519.
- 周勇, 潘裕生. 1998. 茫崖-肃北段阿尔金断裂右旋走滑运动的确定. 地质科学, 33(1): 9–16.
- Anderson E M. 1905. The dynamics of faulting. *Transactions of the Edinburgh Geological Society*, 8(3): 387–402.
- Arnaud N, Tapponnier P, Roger F, Brunel M, Scharer U, Chen W, Xu Z Q. 2003. Evidence for Mesozoic shear along the western Kunlun and Altyn-Tagh fault, northern Tibet (China). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B1), 2053.
- Bai L, Fu L, Guan P, Zhang D W. 2023. Two-stage evolution of the Altyn Tagh fault system during the Tertiary: Constraints from heavy mineral chemistry in sediments of the northwestern Qaidam Basin, western China. *Minerals*, 13(8), 1076.
- Beaumont C, Jamieson R A, Nguyen M H, Medvedev S. 2004. Crustal channel flows: 1. Numerical models with applications to the tectonics of the Himalayan-Tibetan orogen. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B6), B06406.
- Chen Y, Gilder S, Halim N, Cogné J P, Courtillot V. 2002. New paleomagnetic constraints on central Asian kinematics: Displacement along the Altyn Tagh fault and rotation of the Qaidam Basin. *Tectonics*, 21(5): 6–1–6–19.
- Chen Z L, Wang X F, Yin A, Chen B L, Chen X H. 2004. Cenozoic left-slip motion along the central Altyn Tagh fault as inferred from the sedimentary record. *International Geology Review*, 46(9): 839–856.
- Cheng F, Guo Z J, Jenkins H S, Fu S T, Cheng X. 2015. Initial rupture and displacement on the Altyn Tagh fault, northern Tibetan Plateau: Constraints based on residual Mesozoic to Cenozoic strata in the western Qaidam Basin. *Geosphere*, 11(3): 921–942.
- Cheng F, Jolivet M, Fu S T, Zhang C H, Zhang Q Q, Guo Z J. 2016. Large-scale displacement along the Altyn Tagh Fault (North Tibet) since its Eocene initiation: Insight from detrital zircon U-Pb geochronology and subsurface data. *Tectonophysics*, 677–678: 261–279.
- Cheng F, Jolivet M, Guo Z J, Wang L, Zhang C H, Li X Z. 2021. Cenozoic evolution of the Qaidam basin and implications for the growth of the northern Tibetan Plateau: A review. *Earth-Science Reviews*, 220, 103730.
- Clark M K, Farley K A, Zheng D W, Wang Z C, Duvall A R. 2010. Early Cenozoic faulting of the northern Tibetan Plateau margin from apatite (U-Th)/He ages. *Earth and Planetary Science Letters*, 296(1–2): 78–88.
- Cowgill E, Arrowsmith J R, Yin A, Wang X F, Chen Z L. 2004. The Akato Tagh bend along the Altyn Tagh fault,

- northwest Tibet 2: Active deformation and the importance of transpression and strain hardening within the Altyn Tagh system. *Geological Society of America Bulletin*, 116(11–12): 1443–1464.
- Cowgill E, Yin A, Harrison T M, Wang X F. 2003. Reconstruction of the Altyn Tagh fault based on U-Pb geochronology: Role of back thrusts, mantle sutures, and heterogeneous crustal strength in forming the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B7), 2346.
- Dai J G, Wang C S, Hourigan J, Santosh M. 2013. Multi-stage tectono-magmatic events of the Eastern Kunlun Range, northern Tibet: Insights from U-Pb geochronology and (U-Th)/He thermochronology. *Tectonophysics*, 599: 97–106.
- Dai S, Dai W, Zhao Z B, Luo J H, Qiang L, Ma X, Zhang X W, Xu J J. 2017. Timing, displacement and growth pattern of the Altyn Tagh fault: A review. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 91(2): 669–687.
- Dewey J F, Shackleton R M, Chang C, Sun Y Y. 1988. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 327(1594): 379–413.
- Ding G Y, Chen J, Tian Q J, Shen X H, Xing C Q, Wei K B. 2004. Active faults and magnitudes of left-lateral displacement along the northern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 380(3–4): 243–260.
- Dooley T P, Schreurs G. 2012. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results. *Tectonophysics*, 574–575: 1–71.
- Duvall A R, Clark M K, Kirby E, Farley K A, Craddock W H, Li C Y, Yuan D Y. 2013. Low-temperature thermochronometry along the Kunlun and Haiyuan faults, NE Tibetan Plateau: Evidence for kinematic change during late-stage orogenesis. *Tectonics*, 32(5): 1190–1211.
- Fang X M, Yan M D, van der Voo R, Rea D K, Song C H, Parés J M, Gao J P, Nie J S, Dai S. 2005a. Late Cenozoic deformation and uplift of the NE Tibetan Plateau: Evidence from high-resolution magnetostratigraphy of the Guide basin, Qinghai Province, China. *Geological Society of America Bulletin*, 117(9), 1208.
- Fang X M, Zhang W L, Meng Q Q, Gao J P, Wang X M, King J, Song C H, Dai S, Miao Y F. 2007. High-resolution magnetostratigraphy of the Neogene Huaitoutala section in the eastern Qaidam Basin on the NE Tibetan Plateau, Qinghai Province, China and its implication on tectonic uplift of the NE Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 258(1–2): 293–306.
- Fang X M, Zhao Z J, Li J J, Yan M D, Pan B T, Song C H, Dai S. 2005b. Magnetostratigraphy of the late Cenozoic Laojunmiao anticline in the northern Qilian Mountains and its implications for the northern Tibetan Plateau uplift. *Science in China (Series D)*, 48(7): 1040–1051.
- Gao S B, Cowgill E, Wu L, Lin X B, Cheng X G, Yang R, Soares C, Ketcham R A, An K X, Gong J F. 2022. From left slip to transpression: Cenozoic tectonic evolution of the North Altyn Fault, NW margin of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 41(3), e2021TC006962.
- Ji J L, Zhang K X, Clift P D, Zhuang G S, Song B W, Ke X, Xu Y D. 2017. High-resolution magnetostratigraphic study of the Paleogene-Neogene strata in the Northern Qaidam Basin: Implications for the growth of the Northeastern Tibetan Plateau. *Gondwana Research*, 46: 141–155.
- Jolivet M, Brunel M, Seward D, Xu Z, Yang J, Malavieille J, Roger F, Leyreloup A, Arnaud N, Wu C. 2003. Neogene extension and volcanism in the Kunlun Fault Zone, northern Tibet: New constraints on the age of the Kunlun Fault. *Tectonics*, 22(5), 1052.
- Jolivet M, Brunel M, Seward D, Xu Z, Yang J, Roger F, Tapponnier P, Malavieille J, Arnaud N, Wu C. 2001. Mesozoic and Cenozoic tectonics of the northern edge of the Tibetan Plateau: Fission-track constraints. *Tectonophysics*, 343(1–2): 111–134.
- Li B, Zuza A V, Chen X H, Hu D G, Shao Z G, Qi B S, Wang Z Z, Levy D A, Xiong X S. 2020. Cenozoic multi-phase deformation in the Qilian Shan and out-of-sequence development of the northern Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 782–783, 228423.
- Li B S, Yan M D, Zhang W L, Fang X M, Yang Y P, Zhang D W, Guan C, Bao J. 2021a. Two-stage strike-slip faulting of the Altyn Tagh Fault revealed by magnetic fabrics in the Qaidam Basin. *Tectonophysics*, 821, 229142.
- Li C P, Zheng D W, Zhou R J, Yu J X, Wang Y Z, Pang J Z, Wang Y, Hao Y Q, Li Y J. 2021b. Late Oligocene tectonic uplift of the east Kunlun Shan: Expansion of the northeastern Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 48(3), e2020GL091281.
- Li L L, Wu C D, Yu X J. 2018. Cenozoic evolution of the Altyn Tagh and East Kunlun fault zones inferred from detrital garnet, tourmaline and rutile in southwestern Qaidam Basin (Northern Tibetan Plateau). *Basin Research*, 30(1): 35–58.

- Liu D L, Li H B, Sun Z M, Pan J W, Wang M, Wang H, Marie-LuceChevalier. 2017. AFT dating constrains the Cenozoic uplift of the Qimen Tagh Mountains, Northeast Tibetan Plateau, comparison with LA-ICPMS Zircon U-Pb ages. *Gondwana Research*, 41: 438–450.
- Liu L, Kang L, Cao Y T, Yang W Q. 2015. Early Paleozoic granitic magmatism related to the processes from subduction to collision in South Altyn, NW China. *Science China: Earth Sciences*, 58(9): 1513–1522.
- Ma Y M, Yang T S, Bian W W, Jin J J, Zhang S H, Wu H C, Li H Y. 2016. Early Cretaceous paleomagnetic and geochronologic results from the Tethyan Himalaya: Insights into the Neotethyan paleogeography and the India-Asia collision. *Scientific Reports*, 6, 21605.
- Mao L G, Xiao A C, Zhang H W, Wu Z K, Wang L Q, Shen Y, Wu L. 2016. Structural deformation pattern within the NW Qaidam Basin in the Cenozoic era and its tectonic implications. *Tectonophysics*, 687: 78–93.
- McClay K R. 1990. Extensional fault systems in sedimentary basins: A review of analogue model studies. *Marine and Petroleum Geology*, 7(3): 206–233.
- McRivette M W, Yin A, Chen X H, Gehrels G E. 2019. Cenozoic basin evolution of the central Tibetan Plateau as constrained by U-Pb detrital zircon geochronology, sandstone petrology, and fission-track thermochronology. *Tectonophysics*, 751: 150–179.
- Meng Q R, Hu J M, Yang F Z. 2001. Timing and magnitude of displacement on the Altyn Tagh fault: Constraints from stratigraphic correlation of adjoining Tarim and Qaidam basins, NW China. *Terra Nova*, 13(2): 86–91.
- Métivier F, Gaudemer Y, Tapponnier P, Meyer B. 1998. Northeastward growth of the Tibet plateau deduced from balanced reconstruction of two depositional areas: The Qaidam and Hexi Corridor basins, China. *Tectonics*, 17(6): 823–842.
- Meyer B, Tapponnier P, Bourjot L, Métivier F, Gaudemer Y, Peltzer G, Guo S M, Chen Z T. 1998. Crustal thickening in Gansu-Qinghai, lithospheric mantle subduction, and oblique, strike-slip controlled growth of the Tibet plateau. *Geophysical Journal International*, 135(1): 1–47.
- Molnar P, Tapponnier P. 1975. 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. *Science*, 189(4201): 419–426.
- Pang J Z, Yu J X, Zheng D W, Wang W T, Ma Y, Wang Y Z, Li C P, Li Y J, Wang Y. 2019. Neogene expansion of the Qilian Shan, North Tibet: Implications for the dynamic evolution of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 38(3): 1018–1032.
- Peltzer G, Tapponnier P. 1988. Formation and evolution of strike-slip faults, rifts, and basins during the India-Asia collision: An experimental approach. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 93(B12): 15085–15117.
- Qi B S, Hu D G, Yang X X, Zhang Y L, Tan C X, Zhang P, Feng C J. 2016. Apatite fission track evidence for the Cretaceous-Cenozoic cooling history of the Qilian Shan (NW China) and for stepwise northeastward growth of the northeastern Tibetan Plateau since early Eocene. *Journal of Asian Earth Sciences*, 124: 28–41.
- Ritts B D, Biffi U. 2000. Magnitude of post-Middle Jurassic (Bajocian) displacement on the central Altyn Tagh fault system, northwest China. *Geological Society of America Bulletin*, 112(1): 61–74.
- Ritts B D, Yue Y J, Graham S A. 2004. Oligocene-Miocene tectonics and sedimentation along the Altyn Tagh Fault, Northern Tibetan Plateau: Analysis of the Xorkol, Subei, and Aksay Basins. *The Journal of Geology*, 112(2): 207–229.
- Roy S S. 1976. A possible Himalayan microcontinent. *Nature*, 263(5573): 117–120.
- Royden L. 1996. Coupling and decoupling of crust and mantle in convergent orogens: Implications for strain partitioning in the crust. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B8): 17679–17705.
- Sobel E R, Arnaud N. 1999. A possible Middle Paleozoic suture in the Altyn Tagh, NW China. *Tectonics*, 18(1): 64–74.
- Staisch L M, Niemi N A, Clark M K, Chang H. 2020. The Cenozoic evolution of crustal shortening and left-lateral shear in the Central East Kunlun Shan: Implications for the uplift history of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 39(9), e2020TC006065.
- Tapponnier P, Molnar P. 1977. Active faulting and tectonics in China. *Journal of Geophysical Research*, 82(20): 2905–2930.
- Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y, Armijo R, Cobbold P. 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10(12), 611.
- Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, Meyer B, Arnaud N, Wittlinger G, Yang J S. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 294(5547): 1671–1677.
- Tong H M, Koyi H, Huang S, Zhao H T. 2014a. The effect of

- multiple pre-existing weaknesses on formation and evolution of faults in extended sandbox models. *Tectonophysics*, 626: 197–212.
- Tong H M, Wang J J, Zhao H T, Li B, Hao H W, Wang M Y. 2014b. Mohr space and its application to the activation prediction of pre-existing weakness. *Science China: Earth Sciences*, 57(7): 1595–1604.
- Tong H M, Yin A. 2011. Reactivation tendency analysis: A theory for predicting the temporal evolution of preexisting weakness under uniform stress state. *Tectonophysics*, 503(3–4): 195–200.
- van Hinsbergen D J J, Lippert P C, Dupont-Nivet G, McQuarrie N, Doubrovine P V, Spakman W, Torsvik T H. 2012. Greater India Basin hypothesis and a two-stage Cenozoic collision between India and Asia. *Proceedings of the National Academy of Science*, 109(20): 7659–7664.
- van Hinsbergen D J J, Lippert P C, Li S H, Huang W T, Advokaat E L, Spakman W. 2019. Reconstructing Greater India: Paleogeographic, kinematic, and geodynamic perspectives. *Tectonophysics*, 760: 69–94.
- Wang C S, Zhao X X, Liu Z F, Lippert P C, Graham S A, Coe R S, Yi H S, Zhu L D, Liu S, Li Y L. 2008. Constraints on the early uplift history of the Tibetan Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(13): 4987–4992.
- Wang E. 1997. Displacement and timing along the northern strand of the Altyn Tagh fault zone, Northern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 150: 55–64.
- Wang F, Feng H L, Shi W B, Zhang W B, Wu L, Yang L K, Wang Y Z, Zhang Z G, Zhu R X. 2016. Relief history and denudation evolution of the northern Tibet margin: Constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and (U-Th)/He dating and implications for far-field effect of rising plateau. *Tectonophysics*, 675: 196–208.
- Wang F, Shi W B, Zhang W B, Wu L, Yang L K, Wang Y Z, Zhu R X. 2017a. Differential growth of the northern Tibetan margin: Evidence for oblique stepwise rise of the Tibetan Plateau. *Scientific Reports*, 7, 41164.
- Wang W T, Zhang P Z, Garzzone C N, Liu C C, Zhang Z Q, Pang J Z, Wang Y Z, Zheng D W, Zheng W J, Zhang H P. 2022. Pulsed rise and growth of the Tibetan Plateau to its northern margin since ca. 30 Ma. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(8), e2120364119.
- Wang W T, Zheng D W, Li C P, Wang Y, Zhang Z Q, Pang J Z, Wang Y, Yu J X, Wang Y Z, Zheng W J, Zhang H P, Zhang P Z. 2020. Cenozoic exhumation of the Qilian Shan in the Northeastern Tibetan Plateau: Evidence from low-temperature thermochronology. *Tectonics*, 39(4), e2019TC005705.
- Wang W T, Zheng W J, Zhang P Z, Li Q, Kirby E, Yuan D Y, Zheng D W, Liu C C, Wang Z C, Zhang H P, Pang J Z. 2017b. Expansion of the Tibetan Plateau during the Neogene. *Nature Communications*, 8, 15887.
- Wang Y, Zhang X M, Erchie Wang, Zhang J F, Qi Li, Sun G H. 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronological evidence for formation and Mesozoic evolution of the northern-central segment of the Altyn Tagh fault system in the northern Tibetan Plateau. *Geological Society of America Bulletin*, 117(9–10), 1336.
- Wang Y D, Zheng J J, Zhang W L, Li S Y, Liu X W, Yang X, Liu Y H. 2012. Cenozoic uplift of the Tibetan Plateau: Evidence from the tectonic-sedimentary evolution of the western Qaidam Basin. *Geoscience Frontiers*, 3(2): 175–187.
- Wei Y Y, Xiao A C, Wu L, Mao L G, Zhao H F, Shen Y, Wang L Q. 2016. Temporal and spatial patterns of Cenozoic deformation across the Qaidam basin, northern Tibetan Plateau. *Terra Nova*, 28(6): 409–418.
- Wittlinger G, Tapponnier P, Poupinet G, Mei J, Danian S, Herquel G, Masson F. 1998. Tomographic evidence for localized lithospheric shear along the Altyn Tagh fault. *Science*, 282(5386): 74–76.
- Wu C, Li J, Zuza A V, Liu C F, Liu W C, Chen X H, Jiang T, Li B. 2020. Cenozoic cooling history and fluvial terrace development of the western domain of the Eastern Kunlun Range, northern Tibet. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 560, 109971.
- Wu L, Xiao A C, Wang L Q, Mao L G, Wang L, Dong Y P, Xu B. 2012a. EW-trending uplifts along the southern side of the central segment of the Altyn Tagh Fault, NW China: Insight into the rising mechanism of the Altyn Mountain during the Cenozoic. *Science China: Earth Sciences*, 55(6): 926–939.
- Wu L, Xiao A C, Yang S F, Wang L Q, Mao L G, Wang L, Dong Y P, Xu B. 2012b. Two-stage evolution of the Altyn Tagh fault during the Cenozoic: New insight from provenance analysis of a geological section in NW Qaidam Basin, NW China. *Terra Nova*, 24(5): 387–395.
- Wu Y Q, Cui Z J, Liu G N, Ge D K, Yin J R, Xu Q H, Pang Q Q. 2001. Quaternary geomorphological evolution of the Kunlun Pass area and uplift of the Qinghai-Xizang (Tibet)

- Plateau. *Geomorphology*, 36(3–4): 203–216.
- Xiao W J, Ao S J, Yang L, Han C M, Wan B, Zhang J E, Zhang Z Y, Li R, Chen Z Y, Song S H. 2017. Anatomy of composition and nature of plate convergence: Insights for alternative thoughts for terminal India-Eurasia collision. *Science China: Earth Sciences*, 60(6): 1015–1039.
- Yang T S, Ma Y M, Bian W W, Jin J J, Zhang S H, Wu H C, Li H Y, Yang Z Y, Ding J K. 2015. Paleomagnetic results from the Early Cretaceous Lakang formation lavas: Constraints on the paleolatitude of the Tethyan Himalaya and the India-Asia collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 428: 120–133.
- Yin A, Dang Y Q, Wang L C, Jiang W M, Zhou S P, Chen X H, Gehrels G E, McRivette M W. 2008. Cenozoic tectonic evolution of Qaidam basin and its surrounding regions (Part 1): The southern Qilian Shan-Nan Shan thrust belt and northern Qaidam basin. *Geological Society of America Bulletin*, 120(7–8): 813–846.
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211–280.
- Yin A, Rumelhart P E, Butler R, Cowgill E, Harrison T M, Foster D A, Ingersoll R V, Zhang Q, Zhou X Q, Wang X F, Hanson A, Raza A. 2002. Tectonic history of the Altyn Tagh fault system in northern Tibet inferred from Cenozoic sedimentation. *Geological Society of America Bulletin*, 114(10): 1257–1295.
- Yu J X, Pang J Z, Wang Y Z, Zheng D W, Liu C C, Wang W T, Li Y J, Li C P, Xiao L. 2019. Mid-Miocene uplift of the northern Qilian Shan as a result of the northward growth of the northern Tibetan Plateau. *Geosphere*, 15(2): 423–432.
- Yue Y J, Graham S A, Ritts B D, Wooden J L. 2005. Detrital zircon provenance evidence for large-scale extrusion along the Altyn Tagh fault. *Tectonophysics*, 406(3–4): 165–178.
- Yue Y J, Liou J G. 1999. Two-stage evolution model for the Altyn Tagh fault, China. *Geology*, 27(3), 227.
- Yue Y J, Ritts B D, Graham S A, Wooden J L, Gehrels G E, Zhang Z C. 2004. Slowing extrusion tectonics: Lowered estimate of post-Early Miocene slip rate for the Altyn Tagh fault. *Earth and Planetary Science Letters*, 217(1–2): 111–122.
- Yue Y J, Ritts B D, Graham S A. 2001. Initiation and long-term slip history of the Altyn Tagh fault. *International Geology Review*, 43(12): 1087–1093.
- Zhang J X, Zhang Z M, Xu Z Q, Yang J S, Cui J W. 2001. Petrology and geochronology of eclogites from the western segment of the Altyn Tagh, northwestern China. *Lithos*, 56(2–3): 187–206.
- Zhang T, Fang X M, Wang Y D, Song C H, Zhang W L, Yan M D, Han W X, Zhang D W. 2018. Late Cenozoic tectonic activity of the Altyn Tagh range: Constraints from sedimentary records from the Western Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 737: 40–56.
- Zhao H F, Wei Y Y, Shen Y, Xiao A C, Mao L G, Wang L Q, Guan J Y, Wu L. 2016. Cenozoic tilting history of the south slope of the Altyn Tagh as revealed by seismic profiling: Implications for the kinematics of the Altyn Tagh fault bounding the northern margin of the Tibetan Plateau. *Geosphere*, 12(3): 884–899.
- Zheng D W, Wang W T, Wan J L, Yuan D Y, Liu C R, Zheng W J, Zhang H P, Pang J Z, Zhang P Z. 2017. Progressive northward growth of the northern Qilian Shan-Hexi Corridor (northeastern Tibet) during the Cenozoic. *Lithosphere*, 9(3): 408–416.
- Zhou J X, Su H. 2019. Site and timing of substantial India-Asia collision inferred from crustal volume budget. *Tectonics*, 38(7): 2275–2290.
- Zhou J X, Xu F Y, Wang T C, Cao A F, Yin C M. 2006. Cenozoic deformation history of the Qaidam basin, NW China: Results from cross-section restoration and implications for Qinghai-Tibet Plateau tectonics. *Earth and Planetary Science Letters*, 243(1–2): 195–210.
- Zhuang G, Hourigan J K, Ritts B D, Kent-Corson M L. 2011. Cenozoic multiple-phase tectonic evolution of the northern Tibetan Plateau: Constraints from sedimentary records from Qaidam basin, Hexi Corridor, and Subei basin, northwest China. *American Journal of Science*, 311(2): 116–152.

Advances in Research on the Altyn Tagh Fault: Its Sinistral Strike-slip Mechanism and Developmental Patterns

XIAO Kunze^{1,2}, TONG Hengmao^{1,2*}, XU Xiaoke^{1,2}, CUI Hao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. College of Geoscience, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: As the northwestern boundary of the Tibetan Plateau, the Altyn Tagh fault has become one of the world's most prominent strike-slip fault zones due to its critical role in the uplift of the Tibetan Plateau and its ongoing activity. Despite considerable research progress and a general consensus in many areas, key aspects of the fault's evolution, such as the magnitude of strike-slip displacement and the timing of the initiation of rapid strike-slip, remain highly controversial. This article provides a comprehensive review of primary research on the Altyn Tagh fault, synthesizing recent advances in understanding its deformation features, evolutionary history, timing of rapid strike-slip activity, and total strike-slip displacements since the Cenozoic era. Furthermore, we apply general fault theory to address these debates and integrate insights from the structural deformation history of the Qaidam Basin, the East Kunlun Mountains, and the Qilian Mountains—regions closely linked to the Altyn Tagh fault. Based on this synthesis, we propose a new interpretation of the sinistral strike-slip mechanism and a novel model of tectonic coupling with adjacent domains for the Cenozoic Altyn Tagh fault. Analog modeling was utilized to validate these interpretations. It is suggested that the Cenozoic activity of the Altyn Tagh fault may be linked to a two-stage Indian-Eurasian collision. The proposed model not only offers a more robust scientific explanation for the varying deformation characteristics along the fault and the uneven distribution of slip displacement but also systematically elucidates the tectonic coupling relationship between the sinistral strike-slip of the Altyn Tagh fault and the diverse tectonic units along its southern margin. These new perspectives are expected to provide valuable insights and guidance for future research on the tectonic evolution of the Altyn Tagh fault and the deformation patterns of the northern margin of the Tibetan Plateau.

Keywords: Altyn Tagh fault; research advances; mechanism; development pattern; analog modeling