南西天山晚新生代沉积序列磁组构特征及其构造意义

陈新伟^{1,2,3)},陈汉林^{2,3)},林秀斌^{2,3)},程晓敢^{2,3)},聂梅¹⁾

1) 构造成矿成藏国土资源部重点实验室,地球科学学院,成都理工大学,成都,610059;

2) 地球科学学院,浙江大学,杭州,310027;3) 含油气盆地构造研究中心,教育部,杭州,310027

内容提要:喀什凹陷西部位于塔里木盆地、帕米尔构造带和南西天山构造带的交接处,在新生代以来接受了大量来自于南天山和帕米尔的沉积物,并记录了新生代以来南西天山构造抬升的信息。本文选择了位于南西天山山前的铁热克萨孜晚新生代剖面开展磁组构研究。铁热克萨孜剖面晚新生代沉积序列自下而上为一套整体上粒度逐渐变粗的陆相沉积,由河流湖泊相逐渐变为扇三角洲相,并最终变为冲积扇相和洪积扇相。岩石磁学结果的分析表明剖面晚新生代沉积序列中的主要磁性矿物为赤铁矿,仅在帕卡布拉克组下部为以磁铁矿为主。磁组构结果表明该剖面的磁组构为早期的同沉积弱变形磁组构,指示了当时构造应力的方向和变化。在22.1Ma以来南西天山山前晚新生代磁组构所反映的构造应力整体上为 N-S向挤压,这与帕米尔和南天山的南北向持续汇聚作用相一致。在安居安组和西域组时期,应力方向由 N-S向挤压变为 NNE-SSW 向挤压,这一变化可能是由塔拉斯-费尔干纳断裂的活动所导致的。塔拉斯-费尔干纳断裂(Talas-Fergana Fault, TFF)的右行走滑活动可能吸收了南西天山晚新生代的部分应变量,使得南西天山山前的构造应变量相对 TFF 以东的南天山山前地区要更小,使得 TFF 以东的晚新生代山前冲断带活动相对 TFF 以西地区更为发育和活跃。

关键词:南西天山;喀什凹陷;塔拉斯-费尔干纳断裂;晚新生代;磁组构

印度板块和亚洲板块在约 55 Ma 的碰撞 (Rowley et al., 1996)及其后续的持续性汇聚作用 对整个中亚地区和中国西部的造山作用、区域变形、 地壳圈层结构和构造-沉积-气候演化都产生了极其 重要的影响。受这一作用影响,青藏高原西北缘的 帕米尔构造带在新生代以来发生了强烈的向北推进 并伴随着大规模的地壳增厚和剥露事件(Burtman et al., 1993; Sobel et al., 2013; Rutte et al., 2017)。塔里木盆地发生北向俯冲,塔里木盆地和帕 米尔以北的天山构造带也在新生代发生了强烈的隆 升和陆内变形作用,吸收了印度板块和亚洲板块约 40% 的 聚 合 量 (Avouac et al., 1993; Abdrakhmatov et al., 1996; Reigber et al., 2001; Chen Jie et al., 2007),形成了一条长约 2500 km, 高 7000 多米的陆内造山带(Sobel et al., 2006; Charreau et al., 2011),东西向分隔了塔里木盆地 和准噶尔盆地。这一过程中,帕米尔与南天山互相 汇聚,导致了帕米尔的弧形逆冲带与南天山冲断系 统的交错叠置(Qian Junfeng et al., 2011),并向塔 里木盆地提供了大量的剥蚀物源,在塔西南地区沉 积了超过 10 km 厚的新生代沉积(Wang Qimei et al., 1992; Sobel et al., 1997)。这些新生代沉积 物携带了周缘构造带变形过程、沉积响应和气候环 境变化的信息。帕米尔与南天山对接带的东段是帕 米尔构造带、南天山造山带和塔里木盆地的交接处, 发育了大规模的塔拉斯—费尔干纳右行断裂带 (Talas-Fergana Fault, TFF),构造情况复杂(图 1)。对这一地区新生代沉积序列的研究有助于加深

引用本文:陈新伟,陈汉林,林秀斌,程晓敢,聂梅. 2020. 南西天山晚新生代沉积序列磁组构特征及其构造意义. 地质学报,94(6):1675 ~1688, doi: 10.19762/j. cnki. dizhixuebao. 2020082. Chen Xinwei, Chen Hanlin, Lin Xiubin, Cheng Xiaogan, Nie Mei. 2020. Anisotropy of magnetic fabrics of the Late Cenozoic sedimentary succession in the southern West Tianshan Mountain and their tectonic implications. Acta Geologica Sinica, 94(6): 1675~1688.

注:本文为国家自然科学基金(编号:41702205 和 41720104003)和国家科技重大专项(编号:2017ZX05008-001,2016ZX05003-001 和 2016ZX05007-002)资助的成果。

收稿日期:2020-03-27;改回日期:2020-05-04;网络发表日期:2020-05-20;责任编辑:黄敏。

作者简介:陈新伟,男,1989年生。博士,研究员。构造地质学专业。通讯地址:610059,成都理工大学地球科学学院构造成矿成藏国土资源部重点实验室;Email:3070601287@163.com。通讯作者:陈汉林,男,1964年生。教授,博士生导师,主要从事造山带与盆地构造变形分析与构造建模工作。Email:hlchen@zju.edu.cn。



图 1 南西天山及邻区大地构造单元图

(据 Heermance et al., 2007; Xiao Wenjiao et al., 2013; Chen Xinwei et al., 2015; Loury et al., 2015 修改) Fig. 1 Geotectonic units of the southern West Tianshan Mountain and adjacent area (modified after Heermance et al., 2007; Xiao Wenjiao et al., 2013; Chen Xinwei et al., 2015; Loury et al., 2015)

我们对环青藏高原造山带地区盆山耦合过程和机制 的认识和印度板块和亚洲板块汇聚作用远场效应的 理解。

沉积岩的古地磁学研究可以用来构建年龄框 架,反映气候变化和物源方向,并探讨区域应力场的 变化(Wu Haibin et al., 1998; Sun Jimin et al., 1995, 2006)(图1)。近些年来,前人已经在南天山 山前地区进行了大量的磁性地层学工作以建立晚新 生代年龄框架(Charreau et al., 2005; Huang Baochun et al., 2006; Heermance et al., 2007; Chen Xinwei et al., 2015; Yang Wei et al., 2015)。在此基础上, Zhang Zhiliang et al. (2013)在 南天山中段库车地区的磁组构研究表明中新世时期 研究区的构造应力以南北向挤压为主,逐渐由 NEE-SWW 向变为 NNW-SSE 向,指示南天山西部 隆升速度要快于东部。Huang Baochun et al. (2006)在同一地区的研究表明沉积序列的磁组构参 数在约16 Ma发生了显著变化,反映岩石遭受了到 弱变形。南天山西段喀什地区的新生代沉积岩磁组 构研究(Qiao Qingqing et al., 2016)反映研究区自 约 12.4 Ma 开始受到南北向挤压应力的影响。帕 米尔东北缘阿尔塔什剖面和盖孜剖面的古地磁研究 (Bosboom et al., 2014)表明这一地区在渐新世时 期发生了顺时针旋转,而在早中新世开始逐渐变为 径向逆冲。在帕米尔与南天山对接带地区,Tang Zhihua et al. (2015)对库克拜剖面晚渐新世-早中新 世地层开展的古地磁研究表明这一地区在约 26 Ma 发生了 N-S 向应力的增强和逆时针的旋转。前人 研究主要集中在 TFF 以东的地区,而对构造情况更 为复杂的 TFF 以西的对接带地区古地磁研究还较 为匮乏,这阻碍了我们对帕米尔构造带、南天山造山 带和塔里木盆地晚新生代以来相互作用、构造变形 和区域应力时空规律的认识。

本文通过对南西天山山前铁热克萨孜剖面出露 较为连续的晚新生代沉积序列开展磁组构研究,并 结合前人研究成果分析其地质意义,试图探讨研究 区在晚新生代构造变形过程中所受的应力变化,为 进一步揭示南西天山的晚新生代构造过程提供 依据。

1 区域地质背景

天山造山带是由古天山洋的一系列岛弧和微陆 块在古生代经历的复杂的拼贴和汇聚作用而形成的 (Windley et al., 1990; Allen et al., 1991; Shu Liangshu et al., 2003)。在晚新生代以来,天山受 到印度板块和亚洲板块持续汇聚作用的远场效应的 影响而发生了再活化造山作用,在山前地区发育了 显著的冲断带(Burchfiel et al., 1991; Avouac et al., 1993; Sobel et al., 2006; Jolivet et al., 2010)。对于现今 TFF 以东的天山西段,前人以 Terksey 缝合带及吉尔吉斯南天山缝合带为界线, 将天山划分为北天山、中天山和南天山(Burtman, 2006, 2010; Charvet et al., 2007; Wang Bo et al., 2007, 2008; Xiao Wenjiao et al., 2013; Loury et al., 2015),而将塔拉斯—费尔干纳断裂带以西 的天山部分称为西天山(Burov and Molnar, 1998; Sobel, 1999; Sobel et al., 2013)(图 1)。

铁热克萨孜剖面位于西天山南侧的山前地区, 距乌恰县城以西约 60 km 处(图 2)。前人在喀什凹 陷以北测得的新生代古流水向为从北往南,表明该 剖面的沉积物源主要来自于南天山(Chen Jie et al., 2002; Heermance et al., 2007; Scharer et al., 2004)。剖面整体上为倾向 NNW 的单斜,被一 条垂直于地层走向的季节性河流切割、侵蚀,连续地 出露了新生代的沉积序列(39°50′N,74°35′E~ 39°48′N,74°31′E)(Chen Xinwei.,2016)。采样剖



图 2 南西天山山前地质简图(a)(据新疆维吾尔自治区地质矿产局(1978)修改) 和铁热克萨孜剖面实测剖面图(b)(据 Chen Xinwei et al., 2015 修改)

Fig. 2 Simplified geological map of the foreland area of the southern West Tianshan Mountain (a) (Modiöed after BGMRXUAR (1978)) and the measured Tierekesazi Section (b) (modified after Chen Xinwei et al., 2015) 面自下到上出露了古近系喀什群,中新统乌恰群(克 孜洛依组(E_3 - N_1k)、安居安组(N_1a)和帕卡布拉克 组(N_1p)),上新统阿图什组(N_2a)和第四系西域组 地层(Q_1x)(图 2)(Jia Chengzao et al., 2004; Liu Dan et al., 2012; Yang Wei et al., 2014; Chen Xinwei et al., 2015)。

铁热克萨孜剖面古近系喀什群(0~755.6 m) 整体上为浅海相沉积,主要由石膏层、红褐色或灰绿 色膏泥岩与粉砂岩互层和(介壳)灰岩组成,含有丰 富的介壳类、介形虫和藻类化石(Chen Xinwei et al., 2015)。中新统乌恰群可分为克孜洛依组、安 居安组和帕卡布拉克组,相互间为整合接触。克孜 洛依组厚152m,与下伏的古近纪喀什群呈平行不整 合接触。该组底部为一套缓坡曲流河相河道砂体叠 置,发育大量低角度板状交错层理,砂体底部可见小 砾石层;中部为厚层红褐色滨浅湖相泥岩与中层红 褐色膏泥岩;上部为咸化湖泊相泥岩夹逐渐变厚的 石膏层。安居安组厚 515m,整体上为滨浅湖相泥岩 与河流相砂岩互层,以泥岩为主,整体上自下往上, 砂岩逐渐变多变厚。帕卡布拉克组厚 1780m,底部 以席状砂岩泥岩互层为主,往上见大量河道砂体叠 置,发育大量沉积构造。该组中部开始出现大型河 道叠置与含砾砂岩互层的组合。上部为砂泥岩互 层,可见顺层石膏脉发育。上新统阿图什组厚 540m,与下伏帕卡布拉克组整合接触,整体上以(含 砾)砂岩、砾岩和少量泥岩互层为特征,砾石磨圆一 般,分选较差,砾石成分为泥砾、石英砾、灰绿色砂 岩,粒径 0.5~8cm,顶部明显变大,可达 40cm,磨 圆、分选变差并呈颗粒支撑。第四系西域组与下伏 阿图什组为整合接触,在剖面上出露厚度为 575 m, 未见顶,整体上为冲积扇相巨厚深紫色砾岩,砾岩间 夹一些侧向尖灭的透镜状砂体。砾石为次圆-圆状; 主要成分为石英砂岩,并含有少量变质岩和火成岩, 砾径最大可达1m。

2 样品采集和测试

本文对铁热克萨孜剖面的新近纪和第四纪沉积 序列(756.6~3824.8 m)进行了古地磁采样。采样 的起始点与结束点 GPS 坐标分别为 39°50′N,74° 35′E 和 39°48′N,74°31′E。使用手持式汽油钻机在 新鲜露头上采集砂岩样品,得到直径为 2.5cm 的圆 柱状样品并测量记录每个样品的定向与采样地层的 产状以用于后续的坐标系校正。受剖面露头的出露 情况和岩性影响,部分地层采样密度不高。对于剖 面中的向斜和背斜造成地层重复的部分,本研究通 过追踪两翼地层跳过。在浙江大学古地磁实验室将 样品切割至直径 25 mm,高 22 mm 的标准样,共得 到 1180 个标准样(克孜洛依组 58 个,安居安组 341 个,帕卡布拉克组 665 个,阿图什组 105 个,西域组 11 个)用于磁化率各向异性测试。本文选取了 6 个 代表性样品进行 κT 曲线测试,通过将代表性样品 在氩气环境下从室温逐渐加热到 700℃再冷却至室 温,同时测量磁化率,可以得到磁化率随温度变化的 曲线,可以用于判断样品的携磁矿物类别(Zhang Zhiliang et al., 2013)。样品测试在浙江大学古地 磁实验室完成,使用捷克 AGICO 生产的 MFK1-A 全自动卡帕桥磁化率仪,其灵敏度为 2×10⁻⁸(SI) (Zhang Zhiliang et al., 2013)。

3 测试结果分析

3.1 岩石磁学结果分析

不同的磁性矿物在加热和冷却过程中其磁化率 会随温度的变化表现出不同的特征(Zhang Zhiliang et al., 2013)。由于大部分样品的加热与冷却磁化 率曲线数值差异巨大,这里用另外的坐标轴来表现 升温曲线的变化(图 3 中粗箭头所示)。除了帕卡布 拉克组下部的 365-3 外的样外,其他样品在加热与 冷却过程中均表现出明显的不可逆性,且样品升温 过程中的磁化率要远远小于冷却过程中的磁化率, 这说明样品中的携磁矿物在加热和冷却过程中发生 了相变。这些样品的磁化率都在 680℃附近降到最 低,表明了赤铁矿的存在。由于磁铁矿的磁化率要 远远大于赤铁矿,常常掩盖赤铁矿的变化特征(L Zhengyu et al., 2010),说明这些样品的携磁矿物 主要为赤铁矿且含有少量磁铁矿。而样品 365-3 的 磁化率变化随升温和冷却的曲线表现出可逆的特 征,在575℃左右表现出明显的下降,说明该样品的 携磁矿物主要为磁铁矿。

Chen Xinwei et al. (2015)对铁热克萨孜剖面 的代表性样品进行了等温剩磁测试(图 4),表明大 部分的样品的矫顽力都在 250 mT 以上,表现出赤 铁矿的典型特征。只有帕卡布拉克组下部的样品 329-3 矫顽力值为 82mT,表明它的携磁矿物主要为 磁铁矿。结合样品的 *кT* 曲线特征,表明该剖面样 品的携磁矿物主要为赤铁矿和磁铁矿,大部分样品 的携磁矿物都是以赤铁矿为主,仅有少量样品是以 磁铁矿为主。





3.2 磁组构结果分析

对铁热克萨孜剖面晚新生代剖面的 1180 个标 准样(克孜洛依组 58 个,安居安组 341 个,帕卡布拉 克组 665 个,阿图什组 105 个,西域组 11 个)进行了 磁化率各向异性测试并获得其磁组构特征参数。样 品的磁组构特征用磁化率椭球体最大、中间与最小 3 个主轴(K1、K2、K3)的量值来表现。常用的磁组 构参数有:体积磁化率(K_m)(Nagata, 1961)、修正 各向异性度(P_j)(Jelinek, 1981)、形状因子(T) (Tarling et al., 1993)、磁化率椭球的扁率(E)、磁 面理(F)(Staceye et al., 1960)、磁线理(L)(Balsley et al., 1960)。

如图 5,6 和表 1 所示,铁热克萨孜剖面的晚新 生代磁组构 K3 的倾角>75°,与水平面接近垂直, K1 轴具有较为明显的东西向优选方向,且在不同 的地层中表现出对趾的现象。Flinn 图解和 *T*-*P*_j图 解中,大多数样品磁面理均大于磁线理,磁化率椭球 体中压扁状多于拉长状。形状因子 *T* 值在剖面上 并无太大变化,而 *P*_j值(1.003~1.489)和 *K*_m(32.3 ~921.9 μSI)从老到新表现出较为相似的变化特 征,在安居安组时期发生了剧烈的上升,随后开始逐 渐下降,并在西域组时期再次剧烈上升(图 7)。

对于没有受到后期构造应力影响的磁组构,它 们所保留的磁组构开始发育于沉积物沉积时,终止 于岩石固结成岩之后,它们反映了在岩石成型时期 的区域构造应力情况或是水流情况(Tarling et al., 1993)。但在长期的地质演化过程中,岩石在形成过 程中形成的沉积磁组构往往会被后期的构造变形所 改造,此时观察到的磁组构可能是原生的沉积磁组 构与后期构造成因的磁组构的叠加。原生的沉积磁



图 4 南西天山代表性样品的等温剩磁获得曲线(右图)和回场退磁曲线(左图)(Chen Xinwei et al., 2015) Fig. 4 Diagrams of isothermal remanent magnetization acquisition (right diagram) and back field demagnetization curves of remanence (left diagram) for representative samples southern West Tianshan Mountain (Chen Xinwei et al., 2015)

组构磁面理基本与层面平行,其 K1 轴与古水流向 平行(Liu Chenguang et al., 2019)。由表 1 可见, 虽然剖面晚新生代样品磁组构 K3 与水平面接近垂 直,K1 轴具有较为明显的优选方向,具有与原生沉 积磁组构类似的特征,但是 K1 轴的平均方向在不 同的地层中表现出对趾的现象,东西向的定向也与 区域的地质背景不符,和主要物源区(南西天山)的 方向垂直,而 K3 轴的分布呈椭圆状(图 5,6),这表 明该剖面的原生沉积磁组构可能已经被构造变形所 改造。

磁组构参数中, P_j值可以反映沉积物中磁性矿 物颗粒的取向或定向排列程度, 受控于沉积动力学 强弱和沉积环境的稳定性, 也可以反映构造变形强 度(Hrouda, 1982)。沉积岩的 P_j值一般小于 1.1 (Sagnotti et al., 1999)。剖面样品 P_j范围在 1.003 ~1.489 之间, 远远超出了沉积岩的范围, 并且在安 居安组发生了显著的上升(图 7)。形状因子 T 值主 要受沉积过程中碎屑颗粒的定向选择控制,当0 < T<1时,磁化率椭球体为扁圆形,当-1<T<0时,磁 化率椭球体为扁长形(Charreau et al., 2009)。从 T-P;图上来看,整个剖面所有层位样品的 T 值都以 >0 为主,反映了扁圆形的磁化率椭球体在整个剖 面上占大多数。而从形状因子的时间序列变化来看 (图 7),T 值在-1 和 1 之间频繁波动,并无非常明显 的趋势性,这可能是由于剖面在晚新生代时期受到 了弱挤压应力的影响,还不足以使得整个剖面的所 有磁化率椭球体的形状定向都发生非常剧烈的变 化。在整个剖面上样品的 Km整体较低,仅在帕卡 布拉克组下段表现出剧烈的上升,最高可达 921.9 μ SI(图 7)。 K_m 的大小受磁性矿物的种类和含量所 控制。Km随时间的变化曲线仅在帕卡布拉克组下 段表现出剧烈的上升,可能是由于帕卡布拉克组下 段的样品磁性矿物以磁铁矿为主,其他层位的磁性 矿物主要为赤铁矿(图 3,4)。磁铁矿的体积磁化率

表 1 南西天山铁热克萨孜剖面晚新生代地层磁组构参数 Table 1 Magnetic fabrics parameters of the Late Cenozoic Tierekesazi Section southern West Tianshan Mountain

		磁组构参数(平均值)									
地层	数量										
		$K_{\rm m}(\mu { m SI})$	F	L	P_{j}	K1		K2		<i>K</i> 3	
						D	Ι	D	Ι	D	Ι
西域组	11	183	1.042	1.016	1.062	299.5	12.6	208.1	6.1	92.8	75.9
阿图什组	105	83.5	1.012	1.007	1.019	98.9	1.4	189.2	9.4	0.3	80.5
帕卡布拉克组中上部	357	128	1.014	1.010	1.025	274.9	2.3	184.8	2.1	52.8	86.9
帕卡布拉克组下部	308	270	1.064	1.031	1.098	93.9	3.5	184.1	3.2	86.9	85.3
安居安组	341	272	1.096	1.057	1.159	299.5	2.8	208.8	13.2	41.4	76.5
克孜洛依组	58	98.6	1.025	1.019	1.046	98.8	1.4	188.8	0.6	303.0	88.5



图 5 南西天山铁热克萨孜剖面地层柱状图及克孜洛依组、安居安组和帕卡布拉克组下部倾斜校正后 AMS 的下半球 等面积图、Flinn 图解和 *T-P*;图解(据 Chen Xinwei et al., 2015 修改)

Fig. 5 Stratigraphic column of the Tierekesazi Section and the equal area projections of the bedding-corrected AMS diagrams (lower hemisphere), Flinn diagrams and T- P_j diagrams of the Keziluoyi, Anjuan and lower Pakabulake Formations southern West Tianshan Mountain (modified after Chen Xinwei et al., 2015)

L—灰岩;M—泥岩;Q/S—石英砂岩;C—砾岩

L—limestone; M—mudstone; Q/S—quartz sandstone; C—conglomerate

是赤铁矿的几千倍,当磁铁矿的含量较高时,就会导 致体积磁化率的迅速上升,这也与岩石磁学结果表 明的帕卡布拉克组下段磁性矿物以磁铁矿为主,而 其他层位是以赤铁矿为主非常吻合。

综上所述,本文认为铁热克萨孜剖面的晚新生 代磁组构数据受到了构造作用的影响,代表了早期 的同沉积弱变形磁组构,可能指示了当时构造应力 的方向和变化(Gilder et al., 2001; Sun Jimin et al., 2005)。结合 Flinn 图解和 T-P;图解中压扁状 磁化率椭球体远远多于拉长状磁化率椭球体,表明 剖面的晚新生代磁组构主要受到挤压构造应力场所 控制。相似的晚新生代磁组构参数变化特征也在南 天山前的其他剖面有所报道(Huang Baochun et al., 2006; Charreau et al., 2009; Tang Zihua et al., 2012, 2015)。

4 讨论

在构造变形过程中,构造应力场的最大主压应 力方向与 K1 轴近垂直(Jia Dong et al., 2007)。铁 热克萨孜剖面的晚新生代沉积序列磁组构反映的应 力方向大致为 N-S向,仅在安居安组和西域组时期 约为 208°,发生了小幅度的变化(图 5,6),这与晚新



图 6 南西天山铁热克萨孜剖面地层柱状图及帕卡布拉克组中上部、阿图什组和西域组倾斜校正后 AMS 的下半球 等面积图、Flinn 图解和 T-P_j图解(据 Chen Xinwei et al., 2015 修改)

Fig. 6 Stratigraphic column of the Tierekesazi Section and the equal area projections of the bedding-corrected AMS diagrams (lower hemisphere), Flinn diagrams and $T-P_j$ diagrams of the middle and upper Pakabulake, Atushi and Xiyu Formations southern West Tianshan Mountain (modified after Chen Xinwei et al., 2015)

L一灰岩;M一泥岩;Q/S一石英砂岩;C一砾岩

L—limestone; M—mudstone; Q/S—quartz sandstone; C—conglomerate

生代时期的南天山的再活化造山运动及其与帕米尔 的南北向汇聚作用的构造背景具有很好的一致性 (Chen Xinwei et al., 2015, 2019; Qiao Qingqing et al., 2017; Sobel et al., 1997; Yang Wei et al., 2015)。

铁热克萨孜剖面早中新世克孜洛依组的时间范 围为>22.1~20.4Ma(Chen et al., 2015)。该组构 造磁组构主要来自于底部的河道砂体样品,反映的 应力方向为188.8°(表1),整体上为N-S向(图5)。 在这一时期剖面的沉积填充表现出从古近纪的海相 喀什群到中新世的陆相乌恰群的转变,并伴随着沉 积速率的上升和沉积物粒度的变粗。同时在南天山 前的大量热年代学工作都指示了渐新世-中新世交 界的快速剥露作用:库车地区($25 \sim 17$ Ma)(Du Zhili et al., 2007; Yang Shufeng et al., 2003; Wang et al., 2009),柯坪地区($23 \sim 20$ Ma)(Chang et al., 2012; ZhangYao, 2019)和南天山西部地区 ($24 \sim 22$ Ma)(Chen Zhengle et al., 2008; De Grave et al., 2012; Sobel et al., 1997; Sobel et al., 2006)。南天山山前的库车冲断带和喀什冲断 带在这一时期也发生了构造变形事件(Wang Xin et al., 2002; Yin et al., 1998)。由于造山带抬升、山



图 7 南西天山铁热克萨孜剖面磁组构参数,形状因子(T),修正磁化率各向异性(P_i),

平均磁化率(K_m)随时间的变化(据 Chen Xinwei et al., 2015 修改)

Fig. 7 AMS parameters, shape parameter (T), corrected AMS degree (P_i) and mean magnetic susceptibility

 $(K_{\rm m})$ southern West Tianshan Mountain (modified after Chen Xinwei et al. , 2015)

L-灰岩;M-泥岩;Q/S-石英砂岩;C-砾岩

L-limestone; M-mudstone; Q/S-quartz sandstone; C-conglomerate

前冲断带发育、盆地沉积变化和磁组构数据的一致性,本文认为克孜洛依组的磁组构反映了这一时期的南天山初始抬升背景下的南北向挤压应力。

在安居安组时期(20.4~17.1Ma)(Chen Xinwei et al., 2015),样品 P_j值表现出剧烈的上升

(图 7), 剖面沉积从克孜洛依组上部的咸化湖相变 为河流相, 表现出水动力的增强, 这可能反映了这一 时期在持续性的南北向应力下的构造应力突然有所 增强并且方向发生了变化, 同时构造磁组构反映的 应力方向为 208.8°(表 1), 相较于克孜洛依组时期 从 N-S 向变为 NNW-SSE 向(图 5)。这一结果支持 Yang Weiet al. (2013)在研究区附近的乌鲁克恰提 剖面的热年代学结果,认为约 18 Ma 的快速剥露事 件可能反映了研究区剖面东北侧右行走滑的 TFF 的一次活动,导致了区域应力方向的变化。TFF 断 裂的右行走滑运动在晚石炭纪就已发生,到现今为 止共造成了约 200 km 的右行走滑量(Rolland et al., 2013),该断裂南端的马尾状断裂划分了南天 山和南西天山(Burov et al., 1998)。该断裂在新生 代的右行走滑可能吸收了几十 km 的南西天山逆冲 量,使得南西天山的山前冲断带相较于 TFF 以东的 地区(如喀什冲断带、柯坪冲断带和库车冲断带)更 不发育(Chen Xinwei et al., 2015)。

在帕卡布拉克组至阿图什组时期(17.1~2.6 Ma),磁组构反映的构造应力为 N-S 向,这可能反映 了晚新生代南天山和帕米尔持续汇聚作用下(Sobel et al., 2013; Chen Xinwei et al., 2019)的区域应 力特征。到第四纪,剖面上发育了巨厚层状的深灰 色西域组砾岩,此时样品的 Pi值有所上升,同时磁 组构反映的构造应力方向再次变为 208.1°,这可能 与研究区西域组砾岩所代表的大规模构造活动有 关。构造构造应力方向的变化表明 TFF 可能也在 这一段时间发生了活动。巨厚的西域砾岩在晚新生 代的南天山山前大规模出露(Charreau et al., 2009),在喀什凹陷的底界年龄为14~0.6 Ma,呈堆 积楔状体与下伏晚新生代地层呈不整合接触,具有 强烈的穿时特征(Chen Jie et al., 2002, 2007; Heermance et al., 2007; Liu Dongliang et al., 2017; Qiao Qingqing et al., 2016)。而在南西天山 的西域组砾岩其底界年龄为 2.6~1.0 Ma,下伏地 层为上新世阿图什组,不整合现象不明显(Chen Xinwei et al., 2015; Qiao Qingqing et al., 2017; Wang Xin et al., 2014),其穿时性明显减弱,这可 能是由于 TFF 的右行走滑吸收了部分的帕米尔和 南天山汇聚过程中南西天山的构造应变量,使得南 西天山山前的构造活动规模要小于 TFF 以西的南 天山山前地区。通过古地震和 GPS 测量得到的 TFF 在晚第四纪以来的右行走滑速率为 2.2~6.3 mm/yr(Rizza et al., 2019), 如果该走滑速率在 14Ma 以来保持不变,则其走滑量可达到约 30.8~ 88.2 km。再根据 TFF 约 125°的平均走向,可估算 出该断层的右行走滑在 14 Ma 以来造成了断裂以 东的南天山部分比断裂以西的南西天山部分多遭受 了约17.7~50.6 km 的南北向缩短量的差异,与现

今观测到的南天山和南西天山山前冲断带缩短量的 差异较为一致(Chen et al., 2015)。这一南北向缩 短量的差异体现为南天山山前发育良好的多排喀什 冲断带和南西天山山前整体规模较小的逆冲断层。 在喀什地区,西域砾岩作为喀什冲断带多次逆冲向 南扩展的产物,其底界年龄反映了喀什冲断带的生 长期次,从中中新世一直至今,具有强烈的穿时性 (Heermance et al., 2007);而在山前冲断带发育较 弱的南西天山地区则其穿时性减弱。综上所述,我 们认为 TFF 晚新生代以来的右行活动可能导致了 南西天山区域应力场的变化及其与断裂以东的南天 山地区的差异,但是关于该断裂的晚新生代活动与 区域应力变化之间的关系与机制还需要更加深入的 研究。

5 结论

(1)南西天山山前铁热克萨孜剖面的晚新生代 沉积的磁性矿物主要为赤铁矿,仅在帕卡布拉克组 下部主要为磁铁矿。

(2)通过铁热克萨孜剖面的实例分析,表明该剖 面的磁组构为早期的同沉积弱变形磁组构,指示了 当时构造应力的方向和变化。南西天山山前地区在 22.1Ma以来区域构造应力整体上为 N-S 向挤压, 与帕米尔和南天山的南北向持续汇聚作用相一致。 在安居安组和西域组时期,应力方向变为 NNE-SSW 向挤压,这可能反映了 TFF 的活动。

(3) TFF 的右行走滑活动可能吸收了南西天山 晚新生代的部分应变量,使得山前构造活动规模相 对 TFF 以东的南天山山前地区要更弱。

致谢:本研究由国家自然科学基金(编号: 41702205和41720104003)和国家科技重大专项 (编号:2017ZX05008-001,2016ZX05003-001和 2016ZX05007-002)所资助,特别感谢中国科学院地 质与地球物理研究所张志亮博士后在讨论中给予的 宝贵意见。

References

- Abdrakhmatov K Y, Aldazhanov S A, Hager B H, Hamburger M W, Herring T A, Kalabaev K B, Makarov V I, Molnar P, Panasyuk S V, Prilepin M T, Reilinger R E, Sadybakasov I S, Souter B J, Trapeznikov Y A, Tsurkov V Y, Zubovich A V. 1996. Relatively recent construction of the Tien Shan inferred from GPS measurements of present-day crustal deformation rates. Nature, 384: 450~453.
- Allen M B, Windley B F, Chi Z, Zhao Z Y, Wang G R. 1991. Basin evolution within and adjacent to the Tien Shan Range. Journal of the Geological Society, 148: 369~378.
- Avouca J P, Tapponnier P. 1993. Kinematic model of active

deformation in central Asia. Geophysical Research Letters, 20: $895{\sim}898.$

- Balsley J R, Buddington A F. 1960. Magnetic susceptibility anisotropy and fabric of some Adirondack granites and orthogneisses. American Journal of Science, 258:6~20.
- Bosboom R, Dupont-Nivet G, Grothe A, Brinkhuis H, Villa G, Mandic O, Stoica M, Kouwenhoven T, Huang W, Yang Wei, Guo Zhaojie. 2014. Timing, cause and impact of the late Eocene stepwise sea retreat from the Tarim Basin (west China). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 403: 101~118.
- Burov E B, Molnar P. 1998. Gravity anomalies over the Ferghana Valley (central Asia) and intracontinental deformation. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 103:18137~18152.
- Burchfiel B C, Royden L H. 1991. Tectonic of Asia 50 years after the death of Emile Argand. Eclogae Geologicae Helvetiae, 84: 599~629.
- Burtman B S. 2006. The Tien Shan Early Paleozoic tectonics and geodynamics. Russian Journal of Earth Sciences, 8(3): 1~23.
- Burtman V S. 2010. Tien Shan, Pamir, and Tibet: History and geodynamics of phanerozoic oceanic basins. Geotectonics, 44 (5): 388~404.
- Burtman V S, Molnar P. 1993. Geological and geophysical evidence for deep subduction of continental crust beneath the Pamir. Special Paper of the Geology Society of America, 281, 76.
- Chang Jian, Qiu Nansheng, Li Jiawei. 2012. Tectono-thermal evolution of the northwestern edge of the Tarim Basin in China: Constraints from apatite (U-Th)/He thermochronology. Journal of Asian Earth Sciences, 61: 187~198.
- Charreau J, Chen Y, Gilder S, Dominguez S, Avouac J, Sen S, Sun D, Li Y, Wang W. 2005. Magnetostratigraphy and rock magnetism of the Neogene Kuitun He section (northwest China): implications for Late Cenozoic uplift of the Tianshan mountains. Earth and Planetary Science Letters, 230(1-2): 177 ~192.
- Charreau J, Gumiaux C, Avouac J. Augier R, Chen Y, Barrier L, Gilder S, Dominguez, S, Charles N, Wang Q. 2009. The Neogene Xiyu Formation, a diachronous prograding gravel wedge at front of the Tianshan: Climatic and tectonic implications. Earth and Planetary Science Letters, 287: 298 ~310.
- Charreau J, Blard P H, Puchol N, Avouac J P, Lallier-Vergès E, Bourlès D, Braucher R, Gallaud A, Finkel R, Jolivet M, Chen Y, Roy P. 2011. Paleo-erosion rates in Central Asia since 9Ma. A transient increase at the onset of Quaternary glaciations? Earth and Planetary Science Letters, 304(1-2), 85~92.
- Charvet J, Shu Liangshu, Laurent-Charvet S. 2007. Paleozoic structural and geodynamic evolution of eastern Tianshan (NW China): welding of the Tarim and Junggar plates. Episodes, 30: 162~186.
- Chen Jie, Burbank D W, Scharer K M, Sobel E, Yin J, Rubin C and Zhao R. 2002. Magnetochronology of the Upper Cenozoic strata in the Southwestern Chinese Tian Shan: rates of Pleistocene folding and thrusting. Earth and Planetary Science Letters, 195: 113~130.
- Chen Jie, Heermance R, Burbank D W, Scharer K M, Miao J and Wang C. 2007. Quantification of growth and lateral propagation of the Kashi anticline, southwest Chinese Tian Shan. Journal of Geophysical Research, 112(B3).
- Chen Xinwei, Chen Hanlin, Cheng Xiaogan, Shen Zhongyue, Lin Xiubin. 2015. Sedimentology and magnetostratigraphy of the Tierekesazi Cenozoic section in the foreland region of south West Tian Shan in Western China. Tectonophysics, 654: 156~ 172.
- Chen Xinwei, Chen Hanlin, Lin Xiubin, Cheng Xiaogan, Yang Rong, Ding Weiwei, Gong Junfeng, Wu Lei, Zhang Fengqi, Chen Shenqiang, Zhang Yao, Yan Jiakai. 2018. Arcuate Pamir in the Paleogene? Insights from a review of stratigraphy and sedimentology of the basin fills in the foreland of NE Chinese

Pamir, western Tarim Basin: Earth-Science Reviews, 180: $1\!\sim\!16.$

- Chen Xinwei, Chen Hanlin, Sobel E R, Lin Xiubin, Cheng Xiaogan, Yan Jiakai, Yang Shaomei. 2019. Convergence of the Pamir and the South Tian Shan in the late Cenozoic: Insights from provenance analysis in the Wuheshalu section at the convergence area. Lithosphere, 11: 507~523.
- De Grave J, Glorie S, Ryabinin A, Zhimulev F, Buslov M M, Izmer A, Elburg M, Vanhaecke F, Van den Haute P. 2012. Late Palaeozoic and Meso-Cenozoic tectonic evolution of the southern Kyrgyz Tien Shan: Constraints from multi-method thermochronology in the Trans-Alai, Turkestan-Alai segment and the southeastern Ferghana Basin. Journal of Asian Earth Sciences, 44: 149~168.
- Du Zhili, Wang Qingchen, Zhou Xuehui. 2007. Mesozoic and Cenozoic uplifting history of the Kuqa-South Tian shan Basin-Mountain System from the evidence of apatite fission track analysis. Acta Petrologica et Mineralogica, 26(5): 399~408.
- Gilder S, Chen Y, Sevket S. 2001. Oligo-Miocene magnetostratigraphy and rock magnetism of the Xishuigou section, Subei (Gansu Province, western China) and implications for shallowinclinations in central Asia. Journal of Geophysical Research, 106: 30505~30521.
- Heermance R V, Chen J, Burbank D W, Wang C. 2007. Chronology and tectonic controls of Late Tertiary deposition in the southwestern Tian Shan foreland, NW China. Basin Research, 19(4): 599~632.
- Hrouda F. 1982. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. Geophysical Surveys, 5: 37~82.
- Huang Baochun, Piper J, Peng S, Liu T, Li Z, Wang Q, Zhu R. 2006. Magnetostratigraphic study of the Kuche Depression, Tarim Basin, and Cenozoic uplift of the Tian Shan Range, Western China. Earth and Planetary Science Letters, 251 (3-4): 346~364.
- Jelinek V. 1981. Characterization of the magnetic fabric of rocks. Tectonophysics, 79:T63~T67.
- Jia Chenzao, Zhang Shiben, Wu Shaozu. 2004. Stratigraphy of the Tarim Basin and Adjacent Areas. vol. II. Science Press, Beijing, (in Chinese).
- Jolivet M, Dominguez S, Charreau J, Chen Y, Li Y, Wang Q. 2010. Mesozoic and Cenozoic tectonic history of the central Chinese Tian Shan: Reactivated tectonic structures and active deformation. Tectonics, 29(6): TC6019.
- Li Zhenyu, Huang Baochun, Fang Xiaosi, Zhang Chunxia. 2010. Magnetostratigraphic study and its geological significance of the dinosaur egg-bearing section in Xixia Basin, Central China. Chinese Journal of Geophysics, 53(4):847~887 (in Chinese with English Abstract).
- Liu Chenguang, Sun Zhiming, Li Haibing, Cao Yong, Ye Xiaozhou, Wu Bailing, Cao Xinwei, Li Chenglong, Pei Junling. Anistropy of magnetic susceptibility study of the Jurassic rocks in the Qamdo Area, eastern Tibet, and its tectonic implications. Acta Geologica Sinica, 93(10): 2477 ~ 2485(in Chinese with English abstract).
- Liu Dan, Chen Hanlin, Lin Xiubin, Wyrwoll K-H, Batt G E, Chen Xiaogan, Li Kang, Wang Fang. 2012. Three episodes of the tectonism in western South Tian Shan during Late Cenozoic: evidence from gravel counting in Wulukeqiati sedimentary succession. Acta Petrologica Sinica, 28: 2414 ~ 2422 (in Chinese with English abstract).
- Liu Dongliang, Li Haibing, Sun Zhiming, Cao Yong, Wang Leizhen, Pan Jiawei, Han Liang, Ye Xiaozhou. 2017. Cenozoic episodic uplift and kinematic evolution between the Pamir andSouthwestern Tien Shan. Tectonophysics, 712~713:438 ~454.
- Loury Y, Rolland S, Guillot A V, Mikolaichuk P, Lanari O, Bruguier O, Bosch D. 2005. Crustal-scale structure of South Tien Shan: implications for subduction polarity and Cenozoic reactivation. In: Brunet, M.-F., McCann, T. & Sobel, E.

R. (eds), Geological Evolution of Central Asian Basins and the Western Tien Shan Range Geological Society, London, Special Publications, 427.

Nagta T. 1961. Rock Magnetism, 2nd ed. Maruzen, Tokyo.

- Qian Junfeng, Xiao Ancheng, Yang Shufeng, Li Ping, Qiu Yushuang, Meng Lifeng, Wu Lei, Wang, Liang. 2011. Structural Contact Relationship Between Southern Tien Shan and Pamir Thrust Belts. Bulletin of Science and Technology, 27: 523~530 (in Chinese with English abstract).
- Qiao Qingqing, Huang Baochun, Piper JD A, Deng T, Liu C. 2016. Neogene magnetostratigraphy and rock magnetic study of the Kashi Depression, NW China: Implications to neotectonics in the SW Tianshan Mountains. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121: 1280~1296.
- Qiao Qingqing, Huang Baochun, Biggin A J, Piper, J D A. 2017. Late Cenozoic evolution in the Pamir-Tian Shan convergence: New chronological constraints from the magnetostratigraphic record of the southwestern Tianshan foreland basin (Ulugqat area). Tectonophysics, 717: 51~64.
- Reigber C, Michel G W, Galas R, Angermann D, Klotz J, Chen J Y, Papschev A, Arslanov R, Tzurkov V E, Ishanov M C. 2001. New space geodetic constraints on the distribution of deformation in Central Asia. Earth and Planetary Science Letters, 191: 157~165.
- Rizza M, Abdrakhmatov K, Walker R, Braucher R, Guillou V, Carr A S, Campbell G, McKenzie D, Jackson J, Aumaître G, Bourlès D L, Keddadouche K. 2019. Rate of Slip From Multiple Quaternary Dating Methods and Paleoseismic Investigations Along the Talas-Fergana Fault: Tectonic Implications for the Tien Shan Range. Tectonics, 38: 2477 ~2505.
- Rolland Y, Alexeiev D V, Kröner A, Corsini M, Loury C, Monié P. 2013. Late Palaeozoic to Mesozoic kinematic history of the Talas-Ferghana strike-slip fault (Kyrgyz West Tianshan) as revealed by 40Ar/39Ar dating of syn-kinematic white mica. Journal of Asian Earth Sciences, 67~68: 76~92.
- Rowley D B. 1996. Age of initiation of collision between India and Asia: A review of stratigraphic data. Earth and Planetary Science Letters. 145: 1~13.
- Rutte D, Ratschbacher L, Khan J, St BnerK, Hacker B R, Stearns M A, Enkelmann E, Jonckheere R, Pf Nder J R A, Sperner B, Tichomirowa M. 2017. Building the Pamir-Tibetan Plateau-Crustal stacking, extensional collapse, and lateral extrusion in the Central Pamir: 2. Timing and rates. Tectonics, 36: 385 ~419.
- Sagnotti L, Winkler A, Montone P, Bella LD, Frepoli A. 1999. Magnetic fabric anisotropy of Plio-Pleistocene sediments from the Adriatic margin of theNorthern Apennines (Italy): implications for the time-space evolution of the stress field. Tectonophysics, 311:139~153.
- Scharer K M, Burbank D W, Chen J, Weldon R J, Rubin C, Zhao R, Shen J. 2004. Detachment folding in the Southwestern Tian Shan-Tarim foreland, China: shortening estimates and rates. Journal of Structural Geology, 26(11): 2119~2137.
- Shu Liangshu, Lu Huafu, Yin Donghao, Wang Bo. 2003. Paleozoic accretion-collision events and kinematics of ductile deformation in the Central-Southern Tianshan belt. Journal of Nanjing University (Natural Science), 39(1): 17~30(in Chinese with English abstract).
- Sobel E R. 1999. Basin analysis of the Jurassic-Lower Cretaceous southwest Tarim basin, northwest China. GSA Bulletin, 111 (5): 709~724.
- Sobel E, Chen Jie, Heermance R. 2006. Late Oligocene-Early Miocene initiation of shortening in the Southwestern Chinese Tian Shan: Implications for Neogene shortening rate variations. Earth and Planetary Science Letters, 247(1-2): 70~81.
- Sobel E R, Chen Jie, Schoenbohm L M, Thiede R, Stockli D F, Sudo M, Strecker M R. 2013. Oceanic-style subduction controls late Cenozoic deformation of the Northern Pamir

orogen. Earth and Planetary Science Letters, 363: 204~218.

- Sobel E R, Dumitru. 1997. Thrusting and exhumation around the margins of the western Tarim basin during the India-Asia collision. Journal of Geophysical Research, 102 (B3): 5043 \sim 5063.
- Stacey F D, Joplin G, Lindsay J. 1960 Magnetic anisotropy and fabric of some foliated rocks from SE Australia. Pure and Applied Geophysics, $47:30 \sim 40$.
- Sun Jimin, Ding Zhongli, Liu Dongsheng, Yuan Baoyin, Guo Zhengtang. 1995. Primary application ofmagnetic susceptibility measurement of loess and paleosols forreconstruction of winter monsoon direction. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 40 (21):1976~1978.
- Sun Jimin, Zhu Rixiang, An Zhisheng. 2005. Tectonic uplift in the northernTibetan Plateau since 13. 7 Ma ago inferred from molassesdeposits along the Altyn Tagh Fault, Earth and Planetary Science Letters, 235: 641~653.
- Tang Zihua, Dong Xinxin, Wang Xu, Ding Zhongli. 2015. Oligocene-Miocene magnetostratigraphy and magnetic anisotropy of the Baxbulak section from the Pamir-Tian Shan convergence zone. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, v. 16: 3575~3592.
- Tang Zihua, Huang Baochun, Dong Xinxin, Ji Junliang, Ding Zhongli. 2012. Anisotropy of magnetic susceptibility of the Jingou River section: Implications for lateCenozoic uplift of the Tian Shan. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 13: Q03022.
- Tarling D H, Hrouda F. 1993. The magnetic Anistropy of Rocks. Chapman & Hall, London.
- Wang Bo, Shu Liangshu, Cluzel D, Faure M, Charvet J. 2007. Geochemical constraints on Carboniferous volcanic rocks of the Yili Block (Xinjiang, NW China): implication for the tectonic evolution of Western Tianshan. Journal of Asian Earth Sciences, 29: 148~159.
- Wang Bo, Faure M, Shu Liangshu, Cluzel D, Charvet J, De Jong K, Chen Y. 2008. Paleozoic tectonic evolution of the Yili Block, western Chinese Tianshan. Bulletin De La Societe Geologique De France, 179: 483~490.
- Wang Qimei, Nishidai T, Coward M P. 1992. The Tarim Basin, NW China: formation and aspects of petroleum geology. Journal of Petroleum Geology, v. 15: 5~34.
- Wang Qingchen, Li Shuangjiang, Du Zhili. 2009. Differential uplift of the Chinese Tianshan since theCretaceous: constraints from sedimentary petrography and apatite fission-trackdating. International Journal of Earth Science, 98: 1341~1363.
- Wang Xin, Jia Chenzao, Yang Shufeng, Aurelia HF, John S. 2002. The time of deformation on theKuqa fold-and-thrust belt in the Southern Tianshan-based in he Kuqa River aera. Acta Geologica Sinica, 76: $55 \sim 63$ (in Chinese with English abstract).
- Wang Xin, Sun Donghuai, Chen Fahu, Wang Fei, Li Baofeng, Popov S V, Wu Sheng, Zhang Yuebao, Li Zaijun. 2014. Cenozoic paleo-environmental evolution of the Pamir-Tien Shan convergence zone. Journal of Asian Earth Sciences, 80: 84 \sim 100.
- Windley B F, Allen M B, Zhang C, Zhao Z, Wang G. 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic redeformation of the Chinese Tien Shan Range, central Asia. Geology, 18(2): 128.
- Wu Haibin, Chen Fahu, Wang Jianmin, Cao Jixiu, Zhang Yutian. 1998. A study on the relationship between magnetic anisotropy of modern eolian sediments and wind direction. Chinese Journal of Geophysics (Acta Geophysica Sinica) (in Chinese), 41(6): 811~817.
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Allen M B, Han C. 2013. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage. Gondwana Research, 23(4): 1316 ~1341.
- Yang Wei, Dupont-Nivet G, Jolivet M, Guo Z, Bougeois L, Bosboom R, Zhang Z, Zhu B, Heilbronn G. 2015. Magnetostratigraphic record of the early evolution of the

southwestern Tian Shan foreland basin (Ulugqat area), interactions with Pamir indentation and India-Asia collision. Tectonophysics, 644-645: $122 \sim 137$.

- Yang Wei, Jolivet M, Dupont-Nivet G, Guo Z. 2014. Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution of southwestern Tian Shan: Evidence from detrital zircon U/Pb and apatite fission track ages of the Ulugqat area, Northwest China. Gondwana Research, 26 (3-4): 986~1008.
- Yang Shufeng, Chen Hanlin, Cheng Xiaogan, Xiao Ancheng, Zhou Yuzhang, Lu Huafu, Jia Chenzao, Weiguoqi. 2003. Cenozoic uplift and unroofing of South Tien Shan. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 39: 1 ~ 8 (in Chinese with English abstract).
- Yin A, Nie S, Craig P, Harrison T M, Ryerson F J, Qian X L, Yang G. 1998. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tien Shan. Tectonics, 17 (1): 1~27.
- Zhang Yao. 2019. Geometry, kinematics and deformation mechanism of the Keping fold-thrst belt in the South Tian Shan, NW China. [Doctoral dissertation]: Zhejiang University.
- Zhang Zhiliang, Shen Zhongyue, Wang Xin, Tang Pengcheng, Yu Yangli, Zhao Bo, Pan Xiaoqing, Shi Linquan. 2013. Characteristics of magnetic fabrics and paleocurrent directions of Cenozoic sediments in the Kelasu River, Kuqa Depression. Chinese Journal of Geophysics, 56(2): 567-578 (in Chinese with English abstract).

参考文献

- 陈正乐,李丽,刘健,宫红良,蒋荣宝,李胜祥,郑恩玖,韩效忠, 李细根,王成,王国荣,王果,鲁克改.2008.西天山隆升-剥露 过程初步研究.岩石学报,(04):625~636.
- 杜治利,王清晨,周学慧. 2007.中新生代库车-南天山盆山系统隆 升历史的裂变径迹证据. 岩石矿物学杂志,26(5):399~408.
- 贾承造,张师本,吴绍祖. 2004. 塔里木盆地及周边地层(下卷). 北 京:科学出版社,384~397.
- 贾东,陈竹新,罗良,胡潜伟,贾秋鹏,李一泉.2007. 断层相关褶 皱的磁组构与有限应变:川西岷江冲断构造的实例分析.自然 科学进展,17:188~195.

- 李震宇,黄宝春,方小思,张春霞.西峡盆地含恐龙蛋化石剖面磁性 地层学结果及其构造地质意义.地球物理学报,2010,53(4): 874~887.
- 刘晨光,孙知明,李海兵,曹勇,叶小舟,吴百灵,曹新文,李成龙, 裴军令. 2019.藏东昌都地区侏罗纪岩石磁组构研究及其构造 意义.地质学报,93:2477~2485.
- 刘聃, 陈汉林, 林秀斌, Karl-Heinz W, Geoffrey E B, 程晓敢, 李 康, 王芳. 2012. 南天山西部山前新生代晚期三期构造活动:来 自乌鲁克恰提剖面砾石统计的证据. 岩石学报,(08); 2414 ~2422.
- 钱俊锋,肖安成,杨树锋,李平,邱玉双,孟立丰,吴磊,王亮. 2011. 南天山冲断带与帕米尔冲断带构造接触关系探讨.科技 通报,27:523~530.
- 舒良树, 卢华复, 印栋豪, 王博. 2003. 中、南天山古生代增生一碰 撞事件和变形运动学研究. 南京大学学报:自然科学版, 39 (1):17~30.
- 孙继敏,丁仲礼,刘东生,袁宝印,郭正堂.1995,黄土与古土壤磁组 构测定在重建冬季风风向上的初步应用.科学通报,1995,40 (21):1976~1978.
- 汪新, 贾承造, 杨树锋, Aurelia H F, Suppe J. 2002. 南天山库车冲 断褶皱带构造变形时间——以库车河地区为例. 地质学报, 76 (1): 55~63.
- 吴海斌,陈发虎,王建民,曹继秀,张宇田.1998.现代风成沉积物磁 化率各向异性与风向关系的研究.地球物理学报,41(6):811 ~817.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局.1978.西北区域地层表新疆维吾尔 自治区分册.北京:地质出版社,348-384.
- 杨树锋,陈汉林,程晓敢,肖安成,周宇章,卢华复,贾承造,魏国 齐. 2003.南天山新生代隆升和去顶作用过程.南京大学学报: 自然科学版,39(1):1~8.
- 张耀. 2019. 南天山山前柯坪冲断带变形的几何学、运动学与机制研究. 博士论文:浙江大学.
- 张志亮,沈忠悦,汪新,唐鹏程,余养里,赵博,潘小青,石林权. 2013,库车坳陷克拉苏河新生代沉积岩磁组构特征与古流向分析.地球物理学报,56(2):567~578.

Anisotropy of magnetic fabrics of the Late Cenozoic sedimentary succession in the southern West Tianshan Mountain and their tectonic implications

CHEN Xinwei^{1,2,3)}, CHEN Hanlin $^{*\,2,3)}$, LIN Xiubin $^{2,3)}$, CHENG Xiaogan $^{2,3)}$, NIE Mei¹⁾

 Key Laboratory of Tectonic Controls on Mineralization and Hydrocarbon Accumulation of Ministry of Land and Resource, School of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059;
 School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, 310027;

3) Research Center for Structures in Oil- and Gas-Bearing Basins, Ministry of Education, Hangzhou, 310027 * Corresponding author: hlchen@zju.edu.cn

Abstract

The western part of Kashi Depression lies in the conjunction area of the Tarim Basin, the Pamir Syntax, and the south West Tian Shan. The thick sediments accumulated in this depression were derived from and preserve a record of late Cenozoic tectonic uplift of the south West Tian Shan. This paper presents results of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) analysis of the late Cenozoic Tierekesaz section in the foreland of the south West Tian Shan. The late Cenozoic successions of the Tierekesaz section are continental sediments with a general upward increase in particle size and show a progressive change from fluvial-lacustrine facies to fan delta facies, alluvial fan facies and diluvial fan facies. Rock magnetic results of the late Cenozoic successions indicate that the magnetic minerals are mainly hematite, except for the lower Pakabulake Formation, which is dominated by magnetite. Results of the late Cenozoic AMS suggest a syn-sedimentary fabric with weak-deformation. Since 22.1 Ma directions of tectonic strain in the foreland of the south West Tian Shan are mainly N-S directed compressional stress, which is consistent with the continuous convergence of the Pamir and the south West Tian Shan in the late Cenozoic. At the time of deposition of the Anjuan Formation and the Xiyu Formation, directions of compressional strain changed from N-S directed to NNE-SSW directed, likely reflecting the activities of the Talas-Fergana fault. Right slip of the Talas-Fergana fault (TFF) might absorb part of the deformation amount of the south West Tian Shan in the late Cenozoic, leading to smaller deformation in the foreland of the southern West Tian Shan than in the foreland area of the South Tian Shan in the east of the TFF. As a result, late Cenozoic foreland thrustings in the area east of the TFF were more active and better developed than in the foreland area west of the TFF.

Key words: southern West Tianshan Mountain; Kashi depression; Talas Fergana fault; Late Cenozoic; Magnetic fabrics