

东昆仑南缘韧性剪切带变形特征及其形成时代的限定

冯李强¹, 顾雪祥¹, 章永梅¹, 何格¹, 康继组²

FENG Liqiang¹, GU XueXiang¹, ZHANG Yongmei¹, HE Ge¹, KANG Jizu²

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 青海省地质调查院, 青海 西宁 810012

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Qinghai Geological Survey Institute, Xining 810012, Qinghai, China

摘要:中生代巴彦喀拉-松潘甘孜地体向东昆仑地体斜向俯冲,在东昆仑南缘形成一条巨型的韧性剪切带。剪切带中发育的旋转碎斑、书斜构造、解理阶步、云母鱼、S-C组构、不对称褶皱、雁列脉等宏观构造,显示剪切带兼具右行和左行的特征,且右行早于左行剪切,但总体以左行剪切为主。对西大滩糜棱岩化花岗岩和小南川未变形花岗岩进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb测年,西大滩岩体侵位于 199.3 ± 2.2 Ma,小南川岩体形成于 196.4 ± 1.3 Ma。西大滩与小南川岩体中的锆石为典型的岩浆锆石,其年龄代表了岩体侵位的时代。鉴于2个岩体的变形程度完全不同,东昆仑南缘在199~196Ma之间发生了左行韧性剪切。

关键词:韧性剪切带;构造变形;LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄;东昆仑南缘

中图分类号:P542;P597+.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2017)06-0987-14

Feng L Q, Gu X X, Zhang Y M, He G, Kang J Z. Age and structural deformation of ductile shear zones on the southern margin of the East Kunlun Mountains. Geological Bulletin of China, 2017, 36(6):987-1000

Abstract: As a result of oblique subduction of the Bayan Har-Songpan-Garze terrane toward the East Kunlun terrane in Mesozoic, a major ductile shear zone formed along the southern margin of the East Kunlun terrane. Ductile deformation phenomena observed in the ductile shear zones, such as porphyroclasts, porphyroclastic structure, cleavage-step, mica fish, S-C fabric, asymmetrical folds and echelon veins, implying both dextral and sinistral shear characteristics. The dextral shear is earlier than the sinistral shear. However, the sinistral shear is the dominant feature in these ductile shear zones. LA-ICP-MS U-Pb dating of zircons from the mylonitization granite in Xidatan and the undeformed granite in Xiaonanchuan yielded ages of 199.3 ± 2.2 Ma and 196.4 ± 1.3 Ma, respectively. Zircons dated here are typically formed via magma crystallization, which means that their ages could represent the emplacement time of the two plutons. The deformation degree of the two pluton, which is completely different from each other, indicates that the southern margin of the East Kunlun left-lateral ductile shear zone should have formed in 199~196Ma.

Key words: ductile shear zone; structural deformation; LA-ICP-MS zircon U-Pb age; South margin of the East Kunlun Mountains

东昆仑地体和巴彦喀拉-松潘甘孜地体之间的汇聚边界是一条位于东昆仑南缘的大型转换挤压构造带^[1]。该带东段(阿尼玛卿段)以发育典型的蛇绿岩和蛇绿混杂堆积为特征,西段(西大

滩-东大滩段)为长达1000km的由1~2km宽的花岗质糜棱岩、糜棱岩化片麻岩、千糜岩及强应变的片岩类岩石组成的大型东昆仑左行走滑韧性剪切带^[1-4]。通过对韧性剪切带几何学、运动学和

收稿日期:2016-06-24;修订日期:2016-11-08

资助项目:青海省地质勘查基金项目《青海省昆仑河地区金多金属矿整装勘查区找矿部署研究》(编号:2016020003ky003)和国家自然科学基金项目《新疆西天山吐拉苏浅成低温热液-斑岩型金成矿系统物质与时空结构研究》(批准号:41572062)、《内蒙古哈达门沟-柳坝沟金矿床交代作用与金铜成矿关系研究》(批准号:41302064)

作者简介:冯李强(1991-),男,硕士研究生,地质工程专业。E-mail:fengliqiang_yes@126.com

通讯作者:顾雪祥(1963-),男,博士,教授,博士生导师,从事矿床学与矿床地球化学研究。E-mail:xuexiang_gu@cugb.edu.cn

动力学的研究,可以揭示陆块间俯冲拼合及后造山伸展减薄的形成机制,因此该左行走滑韧性剪切带对于认识东昆仑地区晚古生代—早中生代的构造演化具有重要意义。前人对韧性剪切带的形成机制和同构造花岗岩侵位机制进行了研究,但对于剪切带的形成时代尚存争议。目前已有的年龄数据显示,该剪切带可能形成于三叠纪^[1,5-6]、早侏罗世^[7]及晚侏罗世—早白垩世^[8]。本文通过对该左行走滑剪切带北侧西大滩糜棱岩化花岗岩和小南川未变形花岗岩的岩石学、显微构造地质学、锆石U-Pb年龄等的研究,探讨东昆仑南缘大型韧性剪切带的变形特征、运动学及动力学,为东昆仑韧性剪切带的形成时间提供新的年龄数据。

1 地质概况

东昆南断裂是分割东昆南构造带与巴彦喀拉—松潘甘孜地体的一条区域性构造变形带(图1-a),其北侧是以早古生代碰撞造山带为基底的东昆仑三叠纪弧前增生楔的斜坡相沉积,南侧为长条形

狭窄三叠系巨厚的巴彦喀拉群复理石沉积岩系^[9]。研究区位于东昆仑南缘西大滩—东大滩段,出露地层主要为中—新元古界万保沟群大理岩、碎屑岩和火山岩,奥陶系纳赤台群大理岩、碎屑岩和火山岩,中二叠统马尔争组火山岩,下一中三叠统洪水川组碎屑岩及下一中三叠统昌马河组碎屑岩。此外还零星分布下寒武统沙松乌拉组、下一中三叠统闹仓竖沟组、中三叠统希里可特组及上三叠统八宝山组。除东昆南断裂外,区内还分布有多条呈NWW向和NW向展布的次级断裂构造(图1-b)。野外地质调查表明,区内韧性剪切带发育,除西大滩—东大滩段的主剪切带外,还可见一系列次级韧性剪切带,卷入到剪切带中的地层和岩体发生了强烈变形,形成构造片岩和糜棱岩。岩浆岩在研究区内分布广泛,主要出露于昆南断裂北侧和昆仑河沿岸。岩体于志留纪、早泥盆世及晚三叠世—早侏罗世呈岩株或岩枝侵位于万保沟群、纳赤台群中,岩性为辉长岩、闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩等。

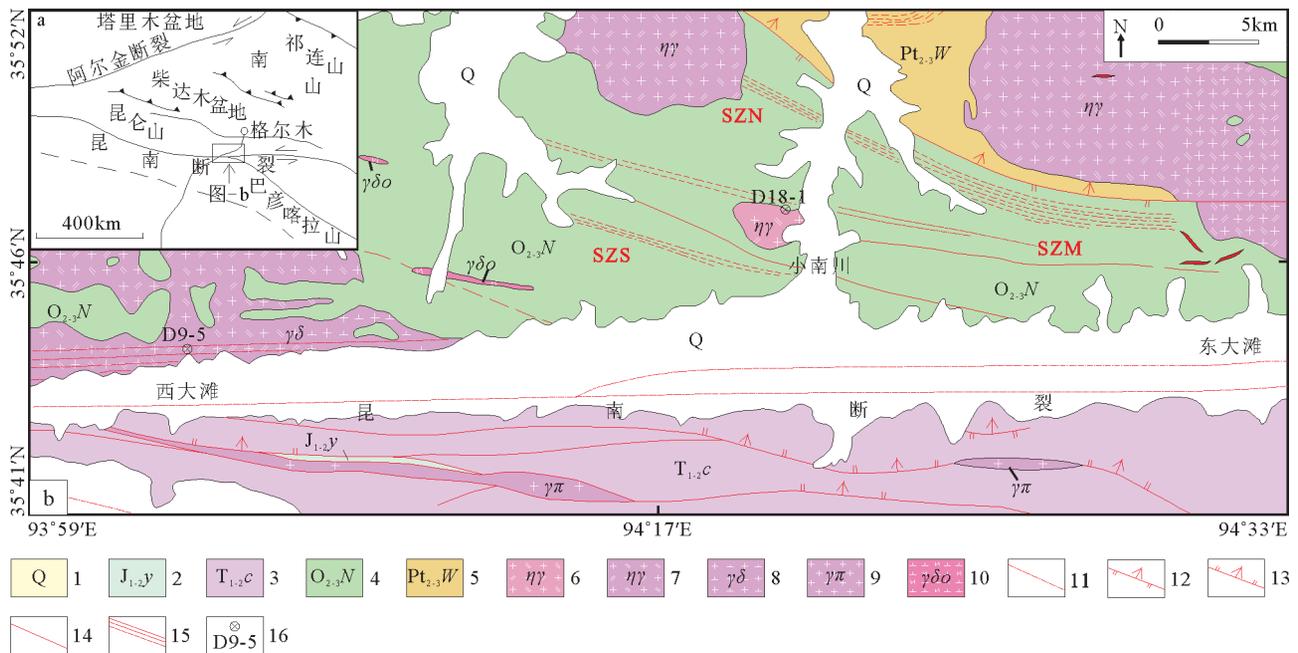


图1 东昆仑西大滩—小南川—东大滩地区地质简图

(图a据参考文献[1],图b据参考文献①修改)

Fig. 1 Schematic geological map of Xidatan-Xiaonanchuan-Dongdatan area in the East Kunlun Mountains

- 1—第四系;2—下—中侏罗统羊曲组;3—下—中三叠统昌马河组;4—中—上奥陶统纳赤台群;5—中—新元古界万保沟群;6—侏罗纪二长花岗岩;7—三叠统二长花岗岩;8—三叠统花岗闪长岩;9—三叠统花岗斑岩;
- 10—志留纪英云闪长岩;11—实测及隐伏构造或地层分区边界;12—逆断层;13—正断层;14—性质不明断层;15—韧性剪切带;16—采样点及样品编号;SZN—北剪切带;SZM—中剪切带;SZS—南剪切带

2 韧性剪切带的构造特征

2.1 宏观特征

中生代巴彦喀拉地块与东昆仑发生斜向碰撞,在东、西大滩形成了EW向韧性剪切带及两侧伴生的挤压褶皱断裂带^[1],小南川韧性剪切带是该左行剪切带的分支构造之一。小南川韧性剪切带从北至南可分为北剪切带、中剪切带和南剪切带3条剪切带(编号分别为SZN、SZM、SZS),这3条剪切带在空间上呈NWW—SEE向展布,长度最短10km,最长可达上百千米,整体宽2km以上,单条剪切带宽几十米到几百米(图1)。卷入其中的地层主要为奥陶系纳赤台群火山岩、碎屑岩及大理岩,岩石发生强烈劈理化,局部形成糜棱岩(图版I-a~d)。劈理总体走向70°~100°,南剪切带(SZS)中劈理北倾,其余2条剪切带中劈理南倾,倾角主要为40°~60°。糜棱岩中旋转碎斑发育,碎斑粒度由南向北,随着与东昆仑断裂距离的增加而增大(图版I-e~g)。

西大滩岩体是位于东昆仑南断裂北侧的呈带状分布的复式岩体,岩性主要为花岗岩和花岗闪长岩,花岗岩侵位于花岗闪长岩中。受剪切带影响,该岩体发生了明显的变形,岩石中暗色矿物呈定向排列,斜长石发生变质重结晶,形成眼球状构造(图版I-h),由南向北变形程度逐渐减弱,反映剪切强度向北逐渐减弱。岩石中片麻理近EW走向,缓北倾,倾角30°~50°。朱红等^[9]对西大滩岩体进行的研究显示,岩体在形成过程中伴随着强烈的剪切作用,为东昆仑南缘左行剪切带中侵位的同构造花岗岩。小南川岩体侵位于剪切带SZM中,岩性为花岗岩,无明显变形(图版I-i),表明该岩体形成于东昆仑左行韧性剪切带之后。

2.2 宏观运动学特征

小南川韧性剪切带中发育大量的旋转碎斑系、S-C组构、书斜构造、不对称褶皱及雁列张裂脉等构造。这些指向构造中既存在指示右行走滑的,也有指示左行走滑的,但以左行走滑标志为主。

(1)旋转碎斑系:为糜棱岩中较常见的指向构造之一,是在韧性基质剪切流动的影响下,碎斑及其周缘较弱的动态重结晶的集合体或细碎粒发生旋转,并改变其形状,形成不对称的楔形尾部的碎斑系。根据结晶拖尾的形态,可分为“ σ ”型和“ δ ”型2类。在变形的岩石中,不对称旋转碎斑系是判

别剪切带运动方向的可靠标志^[10]。小南川韧性剪切带中旋转碎斑系发育,成分主要为石英、花岗岩及大理岩。主要为指示左行剪切的“ σ ”型碎斑,少数指示右行剪切(图版II-a~c)。

(2)S-C组构:是普遍发育于韧性剪切带中的构造组合形式,由先存的糜棱面理(S面理)和稍晚形成的剪切面理(C面理)组成,S面理与C面理的锐夹角指示剪切方向。小南川韧性剪切带中可见2组以锐角相交的劈理,锐夹角指示左行剪切(图版II-d、e)。

(3)书斜构造:糜棱岩中能干性较强的碎斑在剪切作用下,产生破裂并旋转,使每个碎片向剪切方向倾斜,其破裂面与剪切带锐夹角指示剪切带的运动方向。在小南川韧性剪切带中书斜构造发育,石英或花岗岩碎斑在剪切作用下发生破裂,形成书斜构造,破裂面与剪切带的锐夹角指示右行剪切(图版II-f、g)。

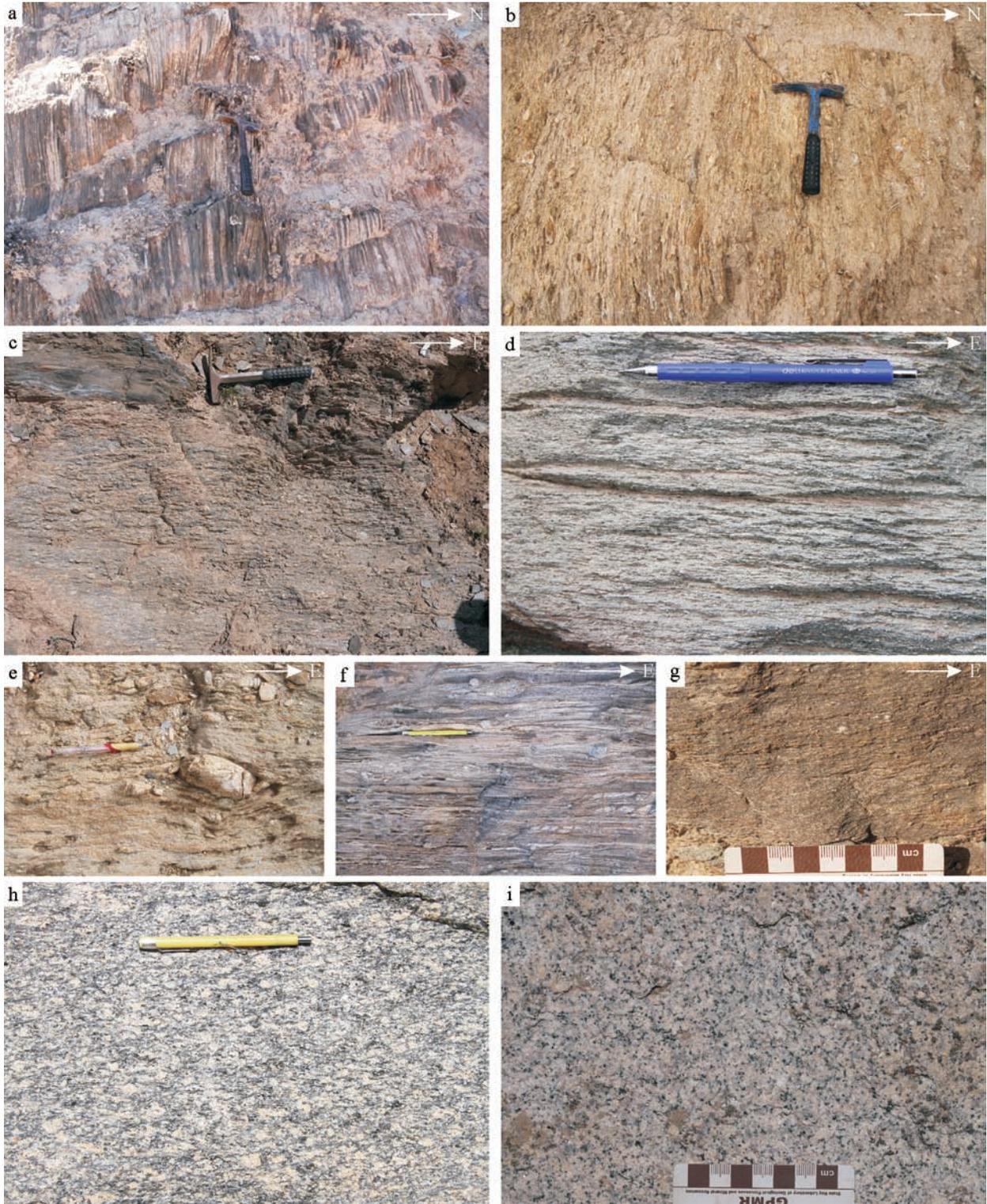
(4)不对称褶皱:作为常见的指向标志之一,是指两翼不等长褶皱的中面与轴面互不垂直,以轴面为标志面,褶皱两翼不呈镜像对称的褶皱,褶皱的倒向代表剪切方向。卷入剪切带中的纳赤台群可见大量不对称褶皱,表现为劈理发生弯曲,形成缓倾的长翼和倒转的短翼,同时可见石英脉揉皱形成的不对称褶皱。根据这些不对称褶皱的倒向,识别出右行和左行2期剪切作用(图版II-h、i),其中剪切带SZN中多见指示右行剪切的不对称褶皱,剪切带SZS中则以反映左行剪切的不对称褶皱居多。

(5)雁列张裂脉:在韧性剪切带中较常见,是判断剪切带运动方向的标志之一^[11-12]。在纳赤台群灰绿色凝灰岩中可见右行左列与左行右列2种形式的雁列脉,这些张裂脉大多被石英填充(图版II-j)。小南川韧性剪切带中可见右行石英张裂脉透镜体化,且石英脉两侧可见指示左行剪切的不对称褶皱(图版II-k)。另外,在这2次不同剪切作用下,一些右行张裂脉发育左行拖尾(图版II-l)。

2.3 微观运动学特征

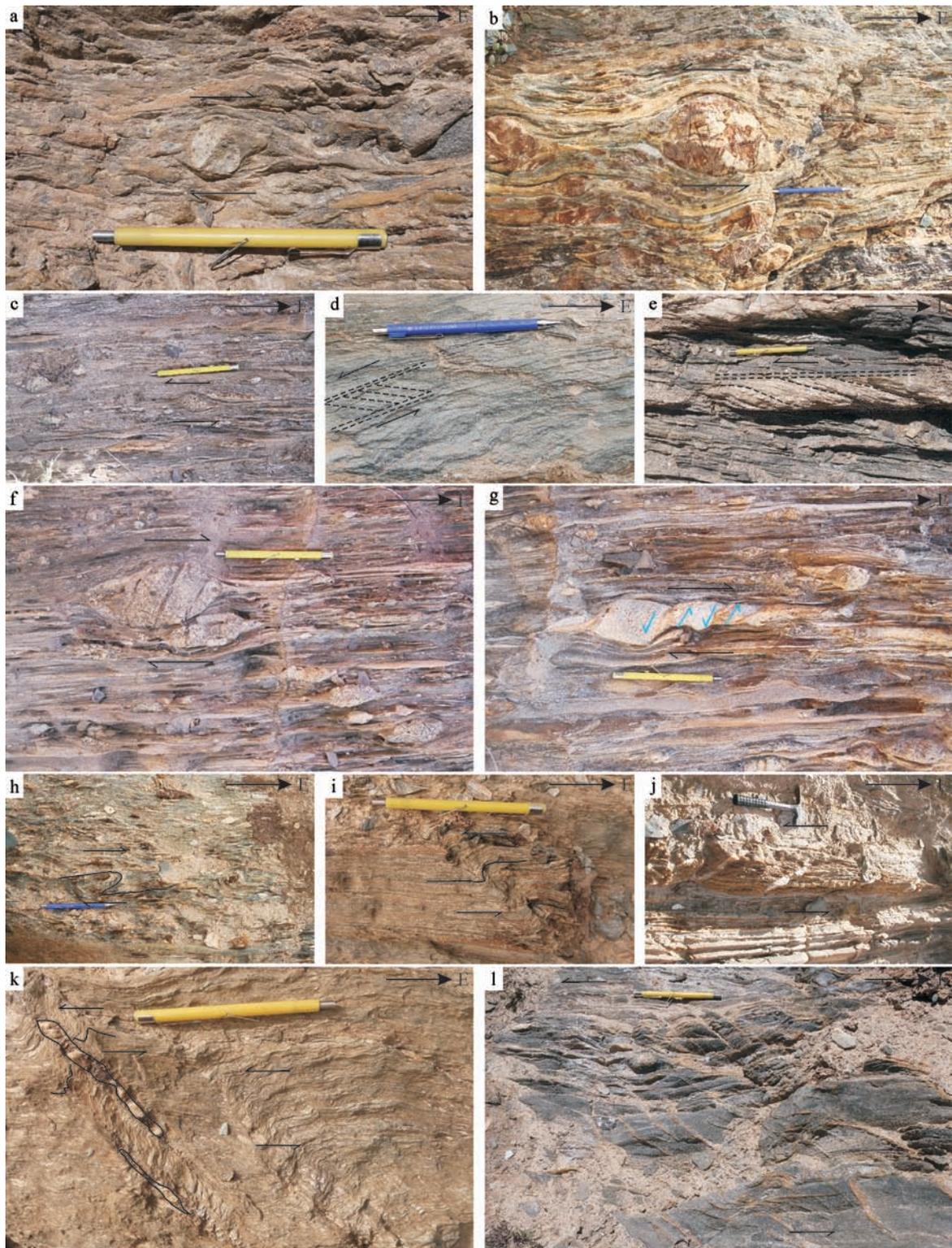
在应力作用下,岩石不仅表现出宏观变形特征,微观组构也表现出十分丰富的变形迹象^[13]。通过对剪切带内糜棱岩的XZ定向薄片进行显微镜下观察,可见波状消光、动态重结晶、亚颗粒、变形纹、机械双晶、不对称旋转碎斑、云母鱼、解理阶步等现象。

图版 I Plate I



a.剪切带中劈理发育,形成构造片岩;b.北剪切带(SZN)中的糜棱岩;c.中剪切带(SZM)中的糜棱岩;d.南剪切带(SZS)中的糜棱岩;e.北剪切带中的碎斑,粒度较大;f.中剪切带中的碎斑,粒度比北剪切带中碎斑小;g.南剪切带中的碎斑,粒度变细;h.西大滩糜棱岩化花岗岩,可见明显的眼球状构造;i.小南川未变形花岗岩

图版 II Plate II



a.不对称旋转碎斑指示右行剪切;b.c.不对称旋转碎斑指示左行剪切;d.e.S-C结构指示左行剪切;f.g.书斜构造,指示右行剪切;h.不对称褶皱和旋转碎斑指示右行剪切;i.不对称褶皱指示左行剪切;j.左行剪切形成的雁列脉;k.右行剪切形成的石英脉受左行剪切影响发生透镜体化,并在两侧形成不对称褶皱;l.右行剪切形成的雁列脉在左行剪切作用下发生拖尾

(1)波状消光、变形纹:在西大滩、小南川两地的糜棱岩中可见大量石英的波状消光(图版Ⅲ-a),转动载物台时消光影呈扇形或不规则状连续扫过石英颗粒,部分长石也可见波状消光(图版Ⅲ-b)。少量石英可见变形纹,发育于晶体内部,且不切穿颗粒,正交偏光镜下可见类似聚片双晶的相间消光的亮线纹(图版Ⅲ-c)。

(2)动态重结晶、亚颗粒:研究区糜棱岩定向薄片可见大量动态重结晶与亚颗粒(图版Ⅲ-d)。在塑性变形过程中,石英由于位错在颗粒内分成许多消光位有微弱差异的、有规则界线的消光区,形成亚颗粒。亚颗粒进一步发生旋转重结晶、颗粒边界迁移重结晶形成动态重结晶。在这一过程中,新晶粒度逐渐增大,形成边界呈不规则状的重结晶颗粒。

(3)机械双晶:西大滩糜棱岩化花岗闪长岩中可见斜长石机械双晶(图版Ⅲ-e),双晶纹较细密,表现断续,宽度和长度也有所改变,各条纹的厚度不相同,是双晶滑移形成的。

(4)晶内张裂隙、显微布丁、强形态组构:部分斜长石中可见晶内张裂隙(图版Ⅲ-f),张裂隙起源于斜长石晶体内部,并且消失于晶体颗粒内部,是晶体颗粒在脆-韧性转变条件下变形的结果^[14]。小南川剪切带SZM中可见针状角闪石沿长轴方向被拉断而形成的显微布丁现象(图版Ⅲ-g),也可见角闪石沿解理发生滑移形成的强形态组构(图版Ⅲ-h)。

(5)不对称旋转碎斑:小南川3条韧性剪切带中均可见大量旋转碎斑,残斑主要为斜长石,石英、云母、绿泥石等构成基质,碎斑主要呈“ σ ”型。根据残斑尾部形态,判别出左行和右行2个方向的剪切作用(图版Ⅳ-a~c)。

(6)云母鱼:偶见于南剪切带中(SZS)。云母片在变形过程中破碎成几个小颗粒,并形成“ σ ”型拖尾,其不对称性指示右行剪切(图版Ⅳ-d)。

(7)云母解理阶段:西大滩糜棱岩化花岗闪长岩和小南川剪切带中、南剪切带(SZM、SZS)糜棱岩中,可见黑云母沿(001)面错开呈阶梯状排列(图版Ⅳ-e~g),解理破裂面之间的相对运动方向与剪切运动方向相反^[15]。剪裂面与面理的交角指示存在左行和右行2期不同方向的剪切作用。

(8)不对称褶皱:在小南川3条韧性剪切带中不

对称褶皱十分发育,在显微镜下可见云母呈定向排列,并与多晶石英条带同时弯曲形成不对称褶皱,其倒向指示左行剪切(图版Ⅳ-h)。

宏观运动学标志表明,小南川韧性剪切带经历了右行和左行2次剪切作用。根据透镜体化右行张裂石英脉两侧形成的左行不对称褶皱和右行张裂脉发生左行拖尾这些现象判断,2次剪切作用右行在前、左行在后,先成的构造被后期左行剪切所改造。由于应力随着与昆南断裂距离的增加而减弱,由南往北先成构造被改造的程度逐渐降低,因而北剪切带中可见较多指示右行剪切的构造,中、南剪切带则较少。

3 剪切带形成时代的限定

3.1 样品采集与测试

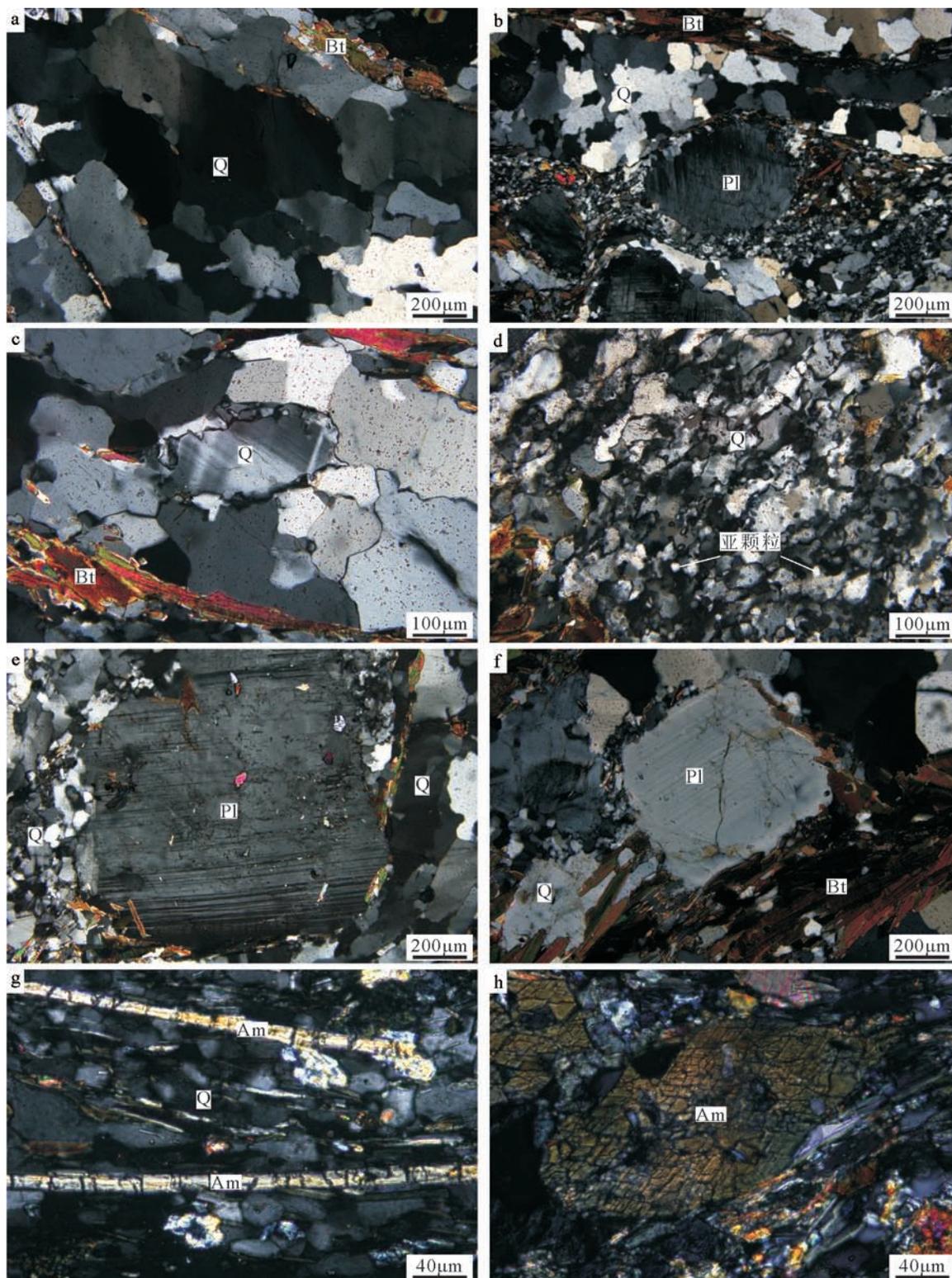
为了确定昆南左行韧性剪切带的形成时代,对卷入该剪切带中的剪切期花岗岩——西大滩糜棱岩化花岗岩、剪切后花岗岩——小南川未变形花岗岩,进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素测定,样品分别采自西大滩糜棱岩化花岗岩和小南川未变形花岗岩(图1-b)。

锆石单矿物分选工作由河北省廊坊诚信地质服务公司完成,制靶、阴极发光(CL)图像拍摄在经纬地科地质服务有限责任公司完成。LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素测定在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室矿床地球化学微区分析室完成,激光剥蚀系统为美国产的Geolas 193准分子固体进样系统,ICP-MS设备为美国Thermo Fisher X series II型四级杆等离子质谱仪。测试过程中,激光束斑直径为32 μm ,频率为6Hz,采用氦气作为载气,氩气作为补偿气。采用美国国家标准参考物质NIST610对仪器进行最佳化,并将其作为微量元素含量测定的外标。标准锆石91500^[16-17]作为定年外标,标准锆石MUD TANK作为监控样品。在样品测试过程中每测定5个样品点测定2次标准锆石91500,每个样品的信号采集时间为100s,其中前20s为背景信号采集时间,样品信号采集时间为50s。用ICPMSDataCal^[18]程序对测得的原始数据进行处理,加权平均计算和U-Pb谐和图绘制采用3.0版Isoplot程序^[19]完成。

3.2 测试结果

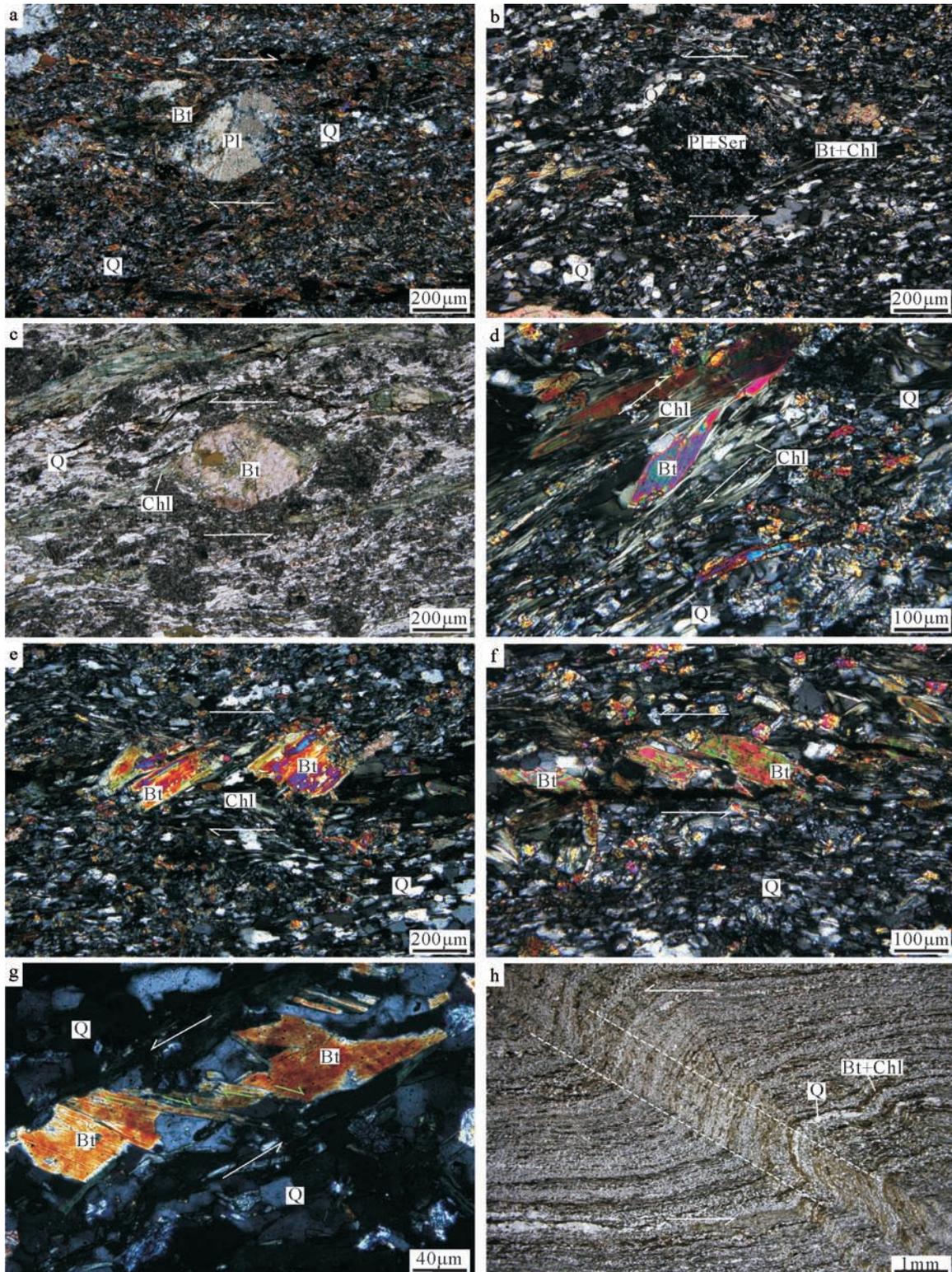
西大滩糜棱岩化花岗岩与小南川未变形花岗

图版 III Plate III



a.石英波状消光(+);b.斜长石波状消光(+);c.石英中发育的变形纹(+);d.亚颗粒旋转形成动态重结晶(+);e.斜长石中的机械双晶(+);f.石英晶体内的张裂隙(+);g.角闪石在应力作用下被扯断形成显微布丁(+);h.角闪石沿解理发生滑移形成的强形态结构;Am—角闪石;Bt—黑云母;Pl—斜长石;Q—石英

图版IV Plate IV



a.不对称旋转碎斑,指示右行剪切(+);b,c.不对称旋转碎斑,指示左行剪切(+);d.云母鱼,指示右行剪切(+);e.黑云母解理阶步,指示右行剪切(+);f,g.黑云母解理阶步,指示左行剪切(+);h.不对称褶皱,指示左行剪切(-);Bt—黑云母;Chl—绿泥石;Pl—斜长石;Q—石英;Ser—绢云母

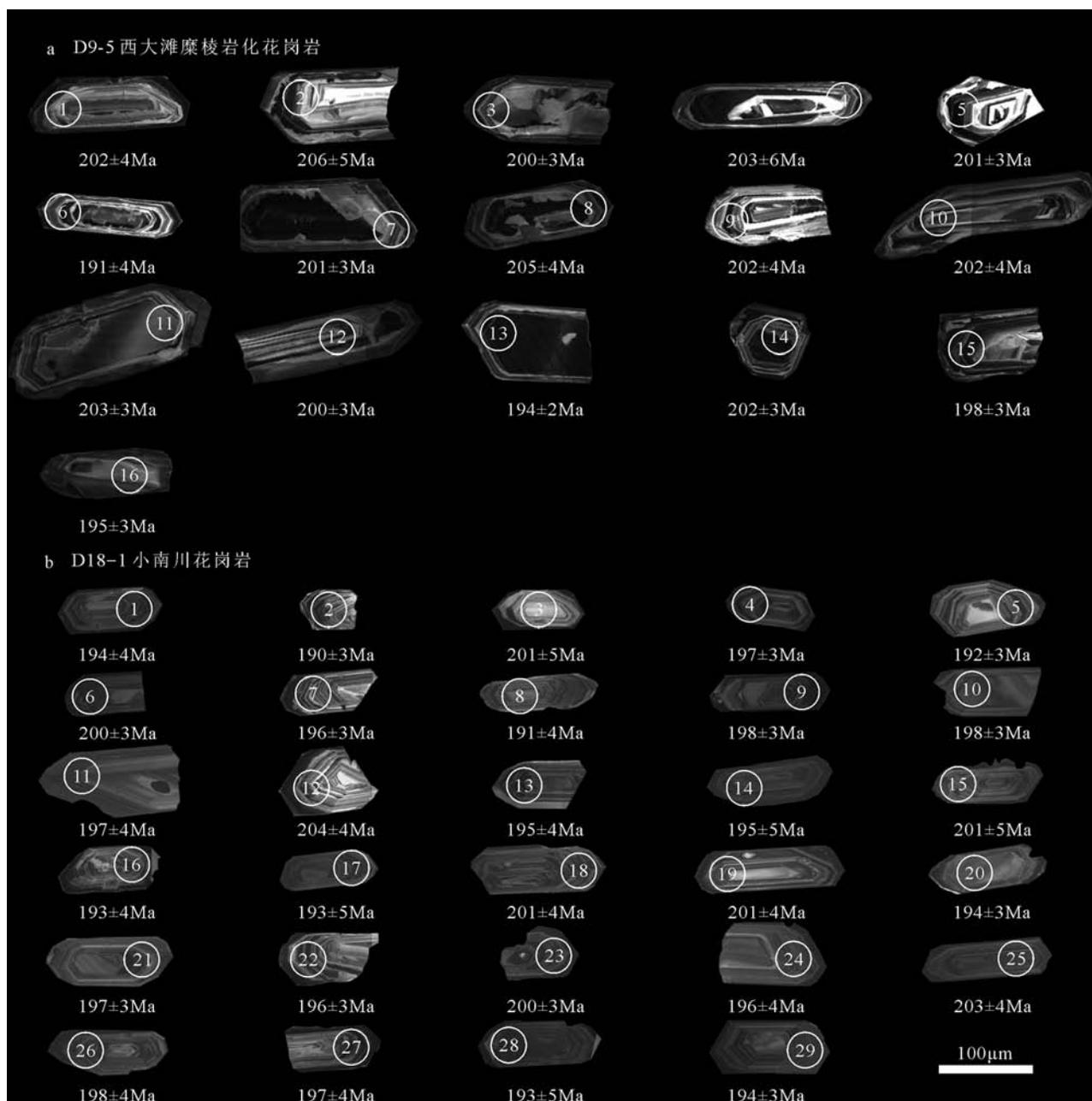


图2 西大滩糜棱岩化花岗岩(a)与小南川花岗岩(b)中锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 2 Zircon CL images of mylonitization granite in Xidatan (a) and undeformed granite in Xiaonanchuan(b)

岩中锆石阴极发光图像见图2。西大滩花岗岩中锆石呈无色透明,为自形-半自形长柱状,长100~300 μm,长宽比为2:1~4:1。小南川花岗岩中锆石呈无色透明,晶形较好,呈自形-半自形长柱状,长100~200 μm,长宽比为1:1~4:1。两岩体的阴极发光图像中均可见均匀的岩浆振荡环带(图2)。

LA-ICP-MS锆石U-Th-Pb同位素分析结果见表1。西大滩糜棱岩化花岗岩与小南川花岗岩样品中锆石的Th、U含量分别为 $188 \times 10^{-6} \sim 1732 \times 10^{-6}$ 、 $762 \times 10^{-6} \sim 4471 \times 10^{-6}$ 和 $186 \times 10^{-6} \sim 1228 \times 10^{-6}$ 、 $258 \times 10^{-6} \sim 2608 \times 10^{-6}$, Th/U值分别为0.25~0.96和0.23~0.72,表明2件样品中的锆石均为典型的岩浆锆

表1 西大滩糜棱岩化花岗岩与小南川未变形花岗岩LA-ICP-MS 锆石U-Th-Pb同位素数据
 Table1 U-Th-Pb isotope data of zircons from the mylonitized granite in Xidatan area
 and the undeformed granite in Xiaonanchuan area measured by LA-ICP-MS

测点	元素含量/ 10^{-6}				同位素比值						年龄/Ma			
	Pb	Th	U	Th/U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ
D9-5 西大滩糜棱岩化花岗岩														
1	41	668	969	0.690	0.0318	0.00058	0.226	0.014	0.0513	0.0034	202	4	207	12
2	16	202	428	0.472	0.0324	0.00074	0.218	0.017	0.0492	0.0043	206	5	200	15
3	170	1732	4471	0.387	0.0315	0.00054	0.229	0.015	0.0518	0.0034	200	3	210	12
4	39	765	904	0.847	0.0320	0.00096	0.234	0.015	0.0529	0.0034	203	6	213	13
5	36	329	973	0.338	0.0316	0.00048	0.211	0.011	0.0480	0.0025	201	3	195	9
6	80	887	2133	0.416	0.0300	0.00059	0.216	0.012	0.0521	0.0030	191	4	199	10
7	135	891	3636	0.245	0.0316	0.00047	0.219	0.009	0.0491	0.0020	201	3	201	8
8	108	843	2957	0.285	0.0323	0.00065	0.221	0.009	0.0493	0.0021	205	4	203	8
9	37	732	880	0.831	0.0318	0.00055	0.212	0.015	0.0476	0.0034	202	4	195	12
10	43	1021	972	1.050	0.0322	0.00058	0.22	0.012	0.0498	0.0028	204	4	204	10
11	28	188	762	0.247	0.0320	0.00054	0.210	0.015	0.0471	0.0034	203	3	194	12
12	39	812	914	0.888	0.0315	0.00047	0.225	0.014	0.0512	0.0034	200	3	206	12
13	128	1290	3461	0.373	0.0316	0.00049	0.221	0.009	0.0513	0.0020	194	2	203	12
14	48	684	1204	0.569	0.0318	0.00049	0.213	0.012	0.0477	0.0027	202	3	196	10
15	59	650	1533	0.424	0.0312	0.00046	0.215	0.012	0.0490	0.0028	198	3	198	10
16	57	1263	1336	0.945	0.0306	0.00046	0.223	0.013	0.0518	0.0031	195	3	204	10
D18-1 小南川花岗岩														
1	38	411	993	0.414	0.0305	0.00062	0.201	0.018	0.0479	0.0043	194	4	186	16
2	36	358	979	0.365	0.0300	0.00054	0.197	0.016	0.0476	0.0038	190	3	183	14
3	11	186	258	0.723	0.0317	0.00081	0.221	0.017	0.0532	0.0046	201	5	203	14
4	38	433	971	0.446	0.0310	0.00051	0.226	0.013	0.0525	0.0029	197	3	207	11
5	35	440	888	0.495	0.0303	0.00046	0.214	0.014	0.0514	0.0033	192	3	197	11
6	31	483	738	0.654	0.0315	0.00047	0.226	0.014	0.0521	0.0033	200	3	207	12
7	30	332	754	0.441	0.0309	0.00046	0.213	0.012	0.0498	0.0029	196	3	196	10
8	24	307	609	0.504	0.0301	0.00060	0.204	0.013	0.0494	0.0039	191	4	189	11
9	32	334	836	0.399	0.0311	0.00053	0.224	0.013	0.0513	0.0028	198	3	205	10
10	33	693	734	0.944	0.0312	0.00054	0.227	0.015	0.0518	0.0035	198	3	208	12
11	30	212	791	0.268	0.0310	0.00056	0.213	0.014	0.0491	0.0035	197	4	196	12
12	35	319	879	0.363	0.0321	0.00064	0.211	0.016	0.0476	0.0036	204	4	195	13
13	38	487	991	0.492	0.0306	0.00057	0.200	0.012	0.0471	0.0030	195	4	185	10
14	29	321	776	0.414	0.0307	0.00075	0.201	0.016	0.0471	0.0039	195	5	186	14
15	29	282	757	0.373	0.0316	0.00084	0.208	0.017	0.0480	0.0041	201	5	192	14
16	41	379	1088	0.348	0.0303	0.00056	0.211	0.014	0.0503	0.0033	193	4	195	12
17	47	592	1254	0.472	0.0304	0.00083	0.212	0.015	0.0502	0.0033	193	5	195	12
18	41	439	1093	0.402	0.0317	0.00069	0.210	0.023	0.0472	0.0050	201	4	194	20

续表 1

测点	元素含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
	Pb	Th	U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ
D18-1 小南川花岗岩														
19	31	464	770	0.603	0.0316	0.00060	0.215	0.012	0.0486	0.0029	201	4	198	10
20	32	468	823	0.569	0.0306	0.00051	0.208	0.013	0.0483	0.0031	194	3	192	11
21	43	266	1150	0.232	0.0310	0.00046	0.221	0.012	0.0503	0.0029	197	3	203	10
22	41	448	1074	0.417	0.0308	0.00044	0.222	0.010	0.0511	0.0025	196	3	204	9
23	53	620	1362	0.455	0.0316	0.00048	0.228	0.012	0.0515	0.0027	200	3	209	10
24	34	357	898	0.397	0.0309	0.00058	0.217	0.013	0.0509	0.0033	196	4	200	11
25	41	717	1033	0.694	0.0320	0.00071	0.212	0.014	0.0475	0.0033	203	4	195	12
26	36	478	913	0.523	0.0311	0.00068	0.226	0.015	0.523	0.0035	198	4	207	12
27	99	1228	2608	0.471	0.0310	0.00057	0.224	0.011	0.0517	0.0025	197	4	205	9
28	30	329	825	0.398	0.0304	0.00072	0.227	0.016	0.0532	0.0042	193	5	203	9
29	41	483	1052	0.460	0.0306	0.00047	0.200	0.011	0.0474	0.0027	194	3	185	9

石。西大滩花岗岩 16 颗锆石的测年数据在 U-Pb 谐和图中落于谐和线上及其附近(图 3-a), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $199.3 \pm 2.2\text{Ma}$ (MSWD=1.5), 表明西大滩糜棱岩化花岗岩侵位于早侏罗世。小南川花岗岩 29 颗锆石的数据在 U-Pb 谐和图中落于谐和线上及其附近(图 3-b), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $196.4 \pm 1.3\text{Ma}$ (MSWD=1.5), 指示该岩体侵位于早侏罗世。

4 讨论

4.1 东昆仑韧性剪切带性质及期次划分

巴彦喀拉-松甘地体与东昆仑地体之间的斜向碰撞,致使昆中、昆南等几条东西向巨型断裂发生左旋压扭性活动,并在两侧形成了大量 NW 向的具有韧性变形作用的线性构造^[20]。许志琴等^[11,21]认为,东昆仑断裂带两侧发育的 NW-SE 向的雁行状印支褶皱束、面理、拉伸线理、不对称应变和石英组构表明断裂带为左行走滑;张紫程等^[7]认为,东昆仑断裂带北侧雁行状排列的断裂和同构造花岗岩指示了断裂带的左行走滑性质;李小兵等^[22-23]通过对东昆中哈图沟-清水泉-沟里韧性剪切带中石英 c 轴组构和宏微观构造特征的分析,认为东昆中构造带在加里东晚期、海西晚期-印支期和燕山早期及之后分别经历了逆冲兼左行走滑、逆冲兼右行走滑和脆韧性-韧性的左行走滑剪切作用。本次在小南川

韧性剪切带中发现的 S-C 组构、雁列脉、旋转碎斑、书斜构造、不对称褶皱、解理阶步、云母鱼等宏微观指向标志,指示小南川地区存在右行与左行 2 期不同运动方向的剪切作用。据前文分析可知,右行剪切发生于左行剪切之前。顾雪祥等(未刊资料)在小南川北侧昆仑河附近厘定了一条形成于 433~426Ma 的右行走滑韧性剪切带,小南川韧性剪切带中指示右行剪切作用的指向标志可能是由该晚志留世的右行韧性剪切形成的。由于左行剪切发生较晚,小南川韧性剪切带中早期形成的指示右行的指向标志多被改造,且越靠近昆南断裂改造越强烈,因此剪切带总体指示左行剪切的运动学特征。

4.2 东昆仑韧性剪切带形成时代及构造意义

韧性剪切带形成于地壳 15km 以下的深度,与造山作用的深部过程密切相关^[24]。韧性逆冲型和滑脱型剪切带的形成及演化一般在大洋(盆)俯冲增生和弧陆-陆陆碰撞造山过程的中下地壳收缩阶段;伸展型韧性剪切带主要形成于地壳伸展减薄的后造山阶段;走滑型韧性剪切带常与地体之间的斜向汇聚和碰撞有成因联系^[25]。东昆仑造山带是一个具有复杂演化历史的多旋回复合造山带。已有的研究资料表明,东昆仑至少经历了早古生代和晚古生代-早中生代 2 个旋回^[26-32]。目前认为东昆仑古特提斯洋盆在晚石炭世开启^[31,33],此后不断扩张。晚二叠世时,古特提斯洋向北俯冲。该阶段形成活动

大陆边缘型火成岩,指示当时东昆仑处于类似于安第斯型活动大陆边缘构造环境^[34-35]。中三叠世时洋壳俯冲消减接近尾声,中三叠世晚期东昆仑地区进入大规模全面碰撞的主造山阶段^[36-37]。巴彦喀拉地块与东昆仑地区之间发生斜向碰撞,在地体汇聚带南缘形成1~2km宽的由糜棱岩组成的断裂带,该断裂带具有左行走滑应变特征,并发育印支期以来的同构造花岗岩^[1,38-40]。晚三叠世时,东昆仑地区处于碰撞后伸展环境,可能发生了岩石圈拆沉作用^[37,41-42]。西大滩—东大滩、小南川等地区韧性剪切带的形成是对东昆仑地区晚古生代—早中生代碰撞造山事件的响应。

柴耀楚等^[43]对西大滩岩体进行了同位素年龄研究,黑云母花岗岩全岩Rb-Sr年龄为236.8Ma,片麻状黑云母花岗岩为170Ma,但Rb-Sr体系封闭温度较低,故Rb-Sr年龄值偏低。李海兵等^[6]对阿尔金断裂活动时同构造深熔作用的新生矿物(角闪石)的SHRIMP U-Pb和⁴⁰Ar-³⁹Ar年代学研究表明,阿尔金断裂走滑活动时代为222.6±2.9~243.7±6.8Ma,该年龄与东昆仑左行走滑断裂形成的时间一致。罗照华等^[44]对石灰沟外滩岩体进行了⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄测试,结果显示,糜棱岩化的角闪辉长岩形成于印支期(坪年龄为226.4±0.4Ma,等时线年龄为222.2±3.3Ma)。陈文等^[45]通过单颗粒锆石蒸发-沉积法获得了230Ma的西大滩岩体形成年龄

(2个锆石年龄分别为229±6Ma、228±5Ma),利用⁴⁰Ar-³⁹Ar阶段升温法和激光微区⁴⁰Ar-³⁹Ar测年法,在高温阶段获得了145.3±0.6Ma的坪年龄,在2个低温阶段分别得到107.0Ma和106.2Ma的年龄值,并认为在150~140Ma和110~100Ma发生了韧性剪切作用。Liu等^[8]通过对万保沟群和纳赤台群中白云母的⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄测试,认为沿着西大滩断裂的韧性变形发生在103.5±2.0~171.8±3.0Ma之间。吴珍汉等^[46]通过锆石离子探针U-Pb同位素测年和黑云母K-Ar、Ar-Ar同位素测年,获得了204.1±2.6Ma的岩浆结晶时代和134.±2.0~145.3±0.6Ma的韧性剪切变形时代。张紫程等^[7]对格尔木南一带左行韧性剪切带中的同构造花岗岩进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb测年,获得了早侏罗世的年龄(196Ma、195Ma)。本次通过对西大滩韧性剪切带中糜棱岩化花岗岩与小南川韧性剪切带中未变形花岗岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄研究,分别获得了199.3±2.2Ma和196.4±1.3Ma的岩体形成年龄,表明东昆仑南缘左行韧性带在199~196Ma之间活动,该年龄与张紫程等^[7]获得的早侏罗世年龄一致。对于K-Ar、Rb-Sr和部分Ar-Ar年龄,由于同位素体系易受后期构造运动的影响而被破坏,导致这些年龄记录的是一次构造热事件,而非剪切带的形成年龄。相对于Ar(K)-Ar同位素测年,锆石U-Pb测年精度更高,因此本文对于以上K-Ar、Ar-Ar年龄是

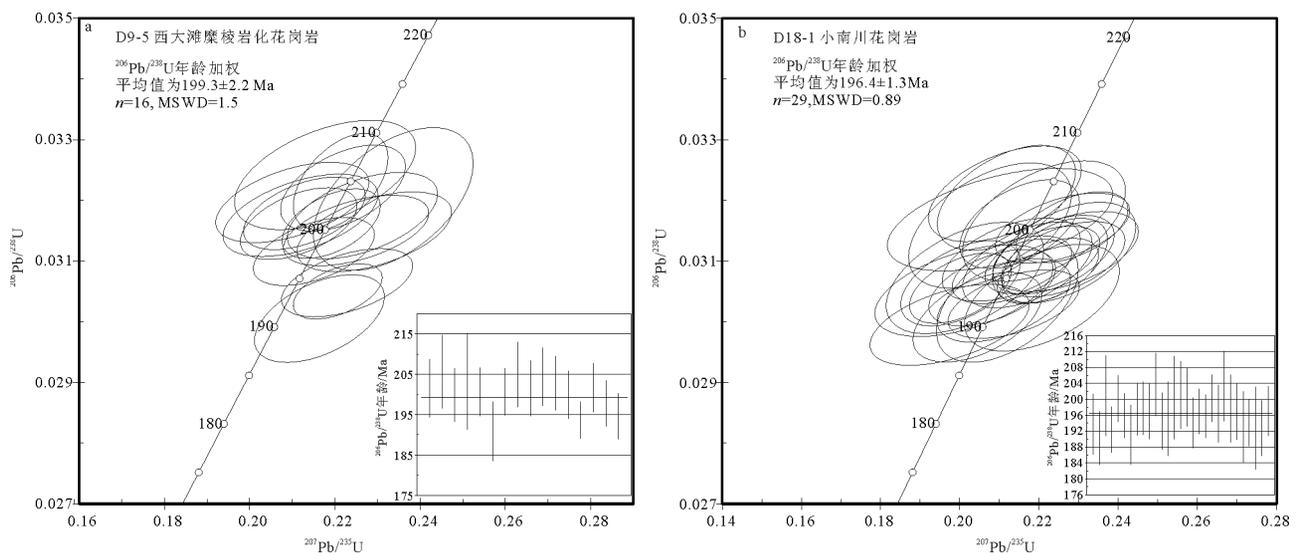


图3 西大滩糜棱岩化花岗岩(a)与小南川花岗岩(b)U-Pb谐和图
Fig. 3 U-Pb concordia diagrams of mylonitization granites in Xidatan(a)
and undeformed granite in Xiaonanchuan(b)

否反映剪切带的形成时代持怀疑态度。综合以上年龄数据,笔者认为,东昆仑南缘韧性剪切带形成于早侏罗世。文中所列的由Ar(K)-Ar同位素测试获得的晚侏罗世一早白垩世年龄数据反映的是后期构造热事件。该构造热事件可能与晚侏罗世一早白垩世拉萨地体沿班公湖缝合带向欧亚大陆南缘削减、拼贴有关。

5 结论

(1)小南川韧性剪切带为西大滩-东大滩EW向左行韧性剪切带的分支构造,由3条近EW向的韧性剪切带组成,由南向北剪切带中碎斑粒度逐渐增大,反映应力向北逐渐减弱。3条剪切带中发育的S-C组构、旋转碎斑、书斜构造、不对称褶皱、雁列脉、云母鱼等指向构造指示,存在右行和左行2期剪切作用,且右行剪切早于左行剪切,先成的构造被后期左行剪切改造,因而在剪切带中的指向构造以左行为主。

(2)东昆仑南缘左行韧性剪切带的形成与中生代古特提斯洋壳闭合密切相关。西大滩和小南川韧性剪切带中剪切期与剪切后花岗岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素年龄研究表明,东昆仑南缘在199~196Ma之间发生了强烈的剪切作用。综合分析认为,东昆仑南缘左行韧性剪切带形成于早侏罗世,与巴彦喀拉-松甘地体和东昆仑地体之间的碰撞有关。

致谢:野外工作得到中国地质大学(北京)唐新舒博士及申浩、武若晨、徐劲驰硕士的大力帮助,写作过程中澳大利亚莫纳什大学地球大气环境学院邢延路博士提供了宝贵意见和建议,在此深表感谢。

参考文献

- [1]许志琴,李海兵,杨经绥,等.东昆仑南缘大型转换挤压构造带和斜向俯冲作用[J].地质学报,2001,75(2):156-164.
- [2]李海兵,许志琴,陈文.东昆仑地区三叠纪以来的构造变形及缩短机制[C]//第三届全国青年地质工作者学术讨论会文集.武汉:中国地质大学出版社,1995.
- [3]许志琴,李海兵,杨经绥.造山的高原——青藏高原巨型造山拼贴体和造山类型[J].地学前缘,2006,13(4):1-17.
- [4]许志琴,李海兵,唐哲民,等.大型走滑断裂对青藏高原地体构架的改造[J].岩石学报,2011,27(11):3157-3170.
- [5]姜春发,杨经绥,冯秉贵,等.昆仑开合构造[M].北京:地质出版社,1992.
- [6]李海兵,杨经绥,许志琴,等.阿尔金断裂印支期走滑活动的地质及年代学证据[J].科学通报,2001,46(16):1333-1338.
- [7]张紫程,张绪教,高万里,等.东昆仑左行走滑韧性剪切带形成时代的锆石U-Pb年龄证据[J].地质力学学报,2010,16(1):51-58.
- [8]Liu Y J, Johann G, Franz N, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ mineral ages from basement rocks in the Eastern Kunlun Mountains, NW China, and their tectonic implications[J]. Tectonophysics, 2005, 398: 199-224.
- [9]朱红,崔军文,武长得,等.东昆仑西大滩混合岩带的基本特征及其成因初探[J].中国地质科学院院报,1990,21:77-86.
- [10]陈虹,胡健民,武国利.韧性剪切带糜棱岩中不对称旋转碎斑系剪切指向模拟实验研究现状及其问题[J].地质通报,2009,28(4):439-455.
- [11]Ramsay J G. Shear zone geometry: A review[J]. Journal of Structural Geology, 1989, 2(1/2): 83-99.
- [12]Olson J E, Pollard D D. The initiation and growth of an echelon veins[J]. Journal of Structural Geology, 1991, 13(5): 595-608.
- [13]胡玲,刘俊来,纪沫,等.变形显微构造识别手册[M].北京:地质出版社,2009.
- [14]刘俊来,岛田充彦.实验变形岩石低温破裂作用的微观机制[J].地质科学,1999,34(2):242-250.
- [15]Lin A. Ductile deformation of biotite in foliated cataclases, Iida-Matsukawa Fault gouge formed during seismic faulting, central Japan[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 1997, 15(4/5): 407-411.
- [16]Weidenbeck M, Alle P, Corfu F, et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analysis[J]. Geostandards Newsletter, 1995, 19(1): 1-23.
- [17]Wiedenbeck M, Hancher J M, Peck W H, et al. Further characterisation of the 91500 zircon crystal[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2004, 28(1): 9-39.
- [18]Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 2008, 257(1/2): 34-43.
- [19]Ludwing K R. Users manual for Isoplot/Ex rev. 2.49[J]. Berkeley Geochronology Centre Special Publication, 2001, 1: 56.
- [20]范丽琨,蔡岩萍,梁海川,等.东昆仑地质构造及地球动力学演化特征[J].地质调查与研究,2009,33(3):181-186.
- [21]许志琴,杨经绥,李海兵,等.造山的高原——青藏高原的地体拼合和碰撞动力学[M].北京:地质出版社,2007: 1-458.
- [22]李小兵,裴先治,刘成军,等.东昆仑东段东昆中构造带韧性剪切作用及其地质意义[J].中国地质,2014,41(2):419-436.
- [23]李小兵,裴先治,陈有炘,等.东昆仑造山带东段哈图沟-清水泉-沟里韧性剪切带塑性变形及其动力学条件研究[J].大地构造与成矿学,2015,39(2):208-230.
- [24]蔡志慧,许志琴,何碧竹,等.东天山-北山造山带中大型韧性剪切带属性及形成演化时限与过程[J].岩石学报,2012,28(6):1875-1895.
- [25]许志琴,张建新,徐惠芬.中国主要大陆山链韧性剪切带及动力学[M].北京:地质出版社,1996:1-294.
- [26]姜春发,冯秉贵,杨经绥,等.昆仑地质构造轮廓[J].中国地质科学院地质研究所所刊,1986,15(2):70-80.

- [27]郑建康.东昆仑区域构造的发展演化[J].青海地质,1992,(1):15-25.
- [28]古凤宝.东昆仑地质特征及晚古生代—早中生代构造演化[J].青海地质,1994,(1):4-14.
- [29]潘裕声,周伟明,许荣华,等.昆仑山早古生代地质特征与演化[J].中国科学(D辑),1996,26(4):302-307.
- [30]殷鸿福,张克信.东昆仑造山带的一些特点[J].地球科学—中国地质大学学报,1997,22(4):339-342.
- [31]杨经绥,许志琴,李海兵,等.东昆仑阿尼玛卿地区古特提斯火山作用和板块构造体系[J].岩石矿物学杂志,2005,24(5):369-380.
- [32]李荣社,计文化,赵振明,等.昆仑早古生代造山带研究进展[J].地质通报,2007,26(4):373-382.
- [33]莫宣学,罗照华,邓晋福,等.东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J].高校地质学报,2007,13(3):403-414.
- [34]郭正府,邓晋福,许志琴,等.青藏东昆仑晚古生代末—中生代中酸性火成岩与陆内造山过程[J].现代地质,1998,12(3):51-59.
- [35]罗照华,邓晋福,曹永清,等.青海省东昆仑地区晚古生代—早中生代火山活动与区域构造演化[J].现代地质,1999,13(1):51-56.
- [36]李瑞保,裴先治,李佐臣,等.东昆仑东段晚古生代—中生代若干不整合面特征及其对重大构造事件的响应[J].地学前缘,2012,19(5):244-254.
- [37]罗明非,莫宣学,喻学惠,等.东昆仑香日德地区晚三叠世花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、岩石成因和构造意义[J].岩石学报,2014,30(11):3229-3241.
- [38]Li H B, Xu Z Q, Chen W. Deformational features and tectonic evolution of the south Kunlun strike-slip shear zone, East Kunlun mountains[J]. Acta Geoscientia Sinica, 1996, (Special Issue): 16-21.
- [39]Li H B, Xu Z Q, Chen W. Southern margin strike-slip fault zone of East Kunlun mountains: an important consequence of intracontinental deformation[J]. Continental Dynamics, 1996, 1(2): 146-155.
- [40]Yang J S, Shi R D, Wu C L, et al. Dur'ngoi ophiolite in the east Kunlun, northeast Tibetan plateau: evidence for Paleotethyan suture in northwest China[J]. Journal of Earth Science, 20(2): 303-331.
- [41]湛宏伟,罗照华,莫宣学,等.东昆仑造山带三叠纪岩浆混合成因花岗岩的岩浆底侵作用机制[J].中国地质,2005,32(3):386-395.
- [42]陈国超,裴先治,李瑞保,等.东昆仑造山带晚三叠世岩浆混合作用:以勒冈希里克特花岗闪长岩体为例[J].中国地质,2013,40(4):1044-1065.
- [43]柴耀楚,冯秉贵,杨经绥.东昆仑中段东西大滩花岗岩带的基本特征及其成因的探讨[J].青藏高原地质文集,1984,(2):79-90.
- [44]罗照华,柯珊,曹永清,等.东昆仑印支晚期幔源岩浆活动[J].地质通报,2002,21(6):292-297.
- [45]陈文,郭彦如,崔彬,等.东昆仑西大滩岩系变质和变形时间的同位素年代学研究[J].地质论评,2002,48(增刊):103-109.
- [46]吴珍汐,胡道功,宋彪,等.昆仑山南部西大滩盆地花岗岩的年龄与热历史[J].地质学报,2005,79(5):628-636.
- ①中国地质大学(武汉)地质调查研究院. 1:250000 不冻泉幅区域地质调查报告. 2006.