

喀喇昆仑断裂的变形特征及构造演化

李海兵^{1,3} Franck Valli² 许志琴¹ 杨经绥¹ Paul Tapponnier³
Robin Lacassin³ 陈松永¹ 戚学祥¹ Marie-Luce Chevalier³

(1. 中国地质科学院地质研究所, 国土资源部大陆动力学重点实验室, 北京 100037;
2. 香港大学地球科学系, 中国 香港; 3. Institut de Physique du Globe de Paris, 75252 Paris, France)

摘要: 喀喇昆仑断裂的变形特征、形成时代、构造演化以及它的构造意义一直存在着争议。在喀喇昆仑断裂东南段阿伊拉日居山地区, 沿断裂出露具右旋剪切应变的糜棱岩和糜棱岩化片麻岩-花岗岩, 显微构造研究表明其存在高温右旋剪切变形特征, 并伴随淡色同构造花岗岩的产生, 同构造结晶锆石所记录的 U-Pb 同位素年龄, 暗示了喀喇昆仑断裂的形成时代在 23~25 Ma 以前, 其连续变形作用持续到~12 Ma, 之后伴随阿伊拉日居山的快速隆升以及噶尔盆地开始形成。综合分析表明喀喇昆仑断裂生长过程可能是由南东向北西扩展的过程, 是印度板块与欧亚大陆持续碰撞的结果。断裂的累积位移量至少为 280 km, 其长期平均滑移速率约为 11 mm/a。通过块体间运动学分析, 表明在~23~25 Ma 以后青藏高原物质以约 16.2 mm/a 的速率向~N108°方向挤出。

关键词: 韧性剪切带; 同构造花岗岩; 累积位移量; 滑移速率; 喀喇昆仑断裂; 青藏高原

中图分类号: P542⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2006)02-0239-17

印度板块在约 50 Ma 以前与欧亚大陆碰撞以来向北移动了约 2500 km^[1-6], 使得欧亚大陆发生了巨大的变形, 无疑青藏高原内部的大型走滑断裂起着重要作用。青藏高原沿主要走滑断裂向东的挤出从 20 世纪 80 年代就开始被注意, 并作为“大陆逃逸”地球动力学模型的重要依据而被提出^[1, 4, 7-9]。认为在印度板块的推挤下, 北以阿尔金断裂为界、南以喀喇昆仑—嘉黎断裂为界的青藏高原内部以刚性块体的形式向东“逃逸”, 而且“逃逸”量至少占欧亚和印度板块相对运动的 50%以上^[9-11]。然而, 它受这些大型走滑断裂带的活动时代、累积走滑位移量以及由此而决定的走滑速率的制约。青藏高原北部的自然边界—阿尔金断裂是一条岩石圈断裂, 它最早的形成时代可能是在三叠纪^[12], 自行成以来产生了至少 400 km 的累积位移量^[13-17]。那么, 沿青藏高原西南部、喜马拉雅山脉北部的北西—南东走向的喀喇昆仑断裂 (右旋走滑) 的变形特征又怎样呢? 它的形成时代、规模、累积位移量以及滑移速率已成为目前研究喀喇昆仑断裂带的热点。

喀喇昆仑断裂位于青藏高原西南边缘, 在卫星影像上可以清楚看到有一狭窄的北西—南东向负地形 (图 1), 长约 1200 km, 从布伦口、塔什库尔干、红其拉甫, 经班公山、扎西

岗、门士至冈仁波齐 (神山) 一带 (图 2), 活动构造痕迹显著, 并在多处有温泉出露, 显示出大型断裂特征^[18-22]。由于帕米尔是印度板块与欧亚大陆碰撞变形强烈地带而成为国内外地质学家研究大陆及造山带变形构造的热点地区, 过去人们对帕米尔地质研究程度较高, 而东部地区工作相对薄弱。但从 90 年代以来, 这里的研究工作得到广泛开展^[18-20, 22-26], 对喀喇昆仑构造带的研究获得了大量成果。尽管在这一地区已取得了一定进展, 但仍有许多问题没有得到解决, 并且在以下 4 个方面存在争论和分歧。

一是喀喇昆仑断裂最初的活动时代。Matte et al.^[27]认为自 11 Ma 以来喀喇昆仑断裂发生了右旋剪切; Searle et al.^[28]所取得的同构造花岗岩 SHRIM PU-Pb 年龄为 (18.0±0.6) Ma, 认为该年龄为断裂最早的活动时代; Murphy et al.^[29-30]认为断裂带的活动时代为 13 Ma; Zhou et al.^[31]认为在 (6.88±0.36) Ma 至 (8.75±0.25) Ma 期间喀喇昆仑断裂发生了强烈走滑变形, 其初始活动时间应在 6.8 Ma 之前; Lacassin et al.^[32]及 Valli^[33]获得同构造淡色花岗岩 (糜棱岩化片麻岩) 的年龄为 23~25 Ma, 并认为是喀喇昆仑断裂的最早活动时代; Phillips et al.^[34]获得沿喀喇昆仑断裂带的韧性剪切带中同构造淡色花岗

收稿日期: 2006-03-05; 改回日期: 2006-03-13

基金项目: 国土资源部科技青藏高原专项课题 (2001010201) 及国家自然科学基金项目 (40272096) 资助。

作者简介: 李海兵, 男, 1966 年生, 博士, 研究员, 主要从事变形构造地质学及活动构造地质学的研究工作; E-mail: lihaibing@ccsd.org.cn。

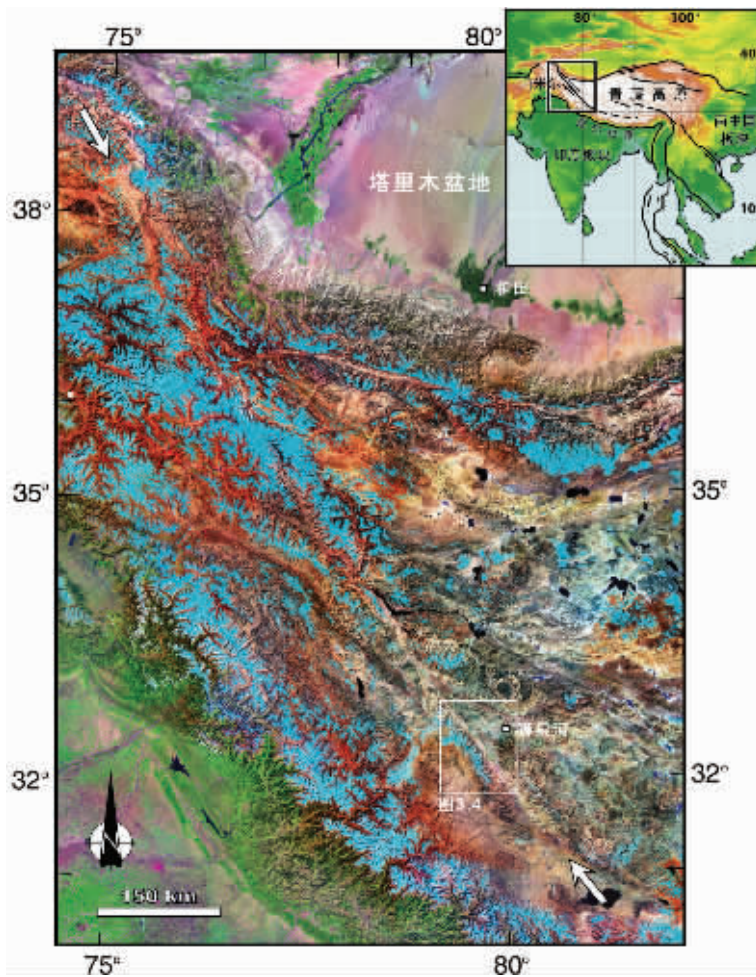


图1 青藏高原西部 Landsat7 卫星影像图

白色箭头所示喀喇昆仑断裂位置;图中蓝色影像为常年积雪和冰川;右上角为亚洲构造格架图,内插方框为所示卫星影像图的位置

Fig.1 Satellite image (Landsat 7) of the western Qinghai-Tibet Plateau

The white arrow indicates location of the KF;the blue image shows permanent snow and glaciers;the top right corner shows the Asian tectonic framework and the insert square indicates the location of the satellite image

岩脉的年龄为 $(15.68 \pm 0.52)\text{Ma}$ 至 $(13.73 \pm 0.28)\text{Ma}$, 表明了该年龄为断裂带最早的活动时代。

二是累积位移量。不同学者通过断裂两侧不同标志物进行对比估算断裂的累积位移量,因此获得了不同的结果,如~1 000 km^[33];~300 km^[27];≥250 km^[22,26];~200 km^[34]; >115 km^[35,36]; 120~150 km^[37,38]; 85~150 km^[19,28]; 40~150 km^[32]; 66 km^[29,30]。这些位移量肯定不都代表其最大量,但有的可能代表着不同时期以来的累积位移量,有的估算存在着较大的分歧。

三是滑移速率。虽然众所周知,喀喇昆仑断裂是一条平

行于喜马拉雅山脉(西部)的大型活动(走滑)断裂,但相比于青藏高原内部的其他大型走滑断裂(如东昆仑断裂、海原断裂和阿尔金断裂)来说,对它的滑移速率知之甚少。前人用不同的方法所取得的更新世和晚更新世以来的走滑速率差别较大,如:~30 mm/a^[9,27,35]; 1.6~8 mm/a^[28]; ~6 mm/a^[29]; $4 \pm 1 \text{ mm/a}$ ^[30,39]; $11 \pm 4 \text{ mm/a}$ ^[40]; $10 \pm 3 \text{ mm/a}$ ^[22]; 2.7~10.2 mm/a^[32]; 最近, Chevalier et al^[25]根据冰碛物表面暴露年龄(¹⁰Be)及其位移量得到的滑移速率为 $10.7 \pm 0.7 \text{ mm/a}$ 。

四是构造意义。对于大规模几何学、构造演化以及断裂

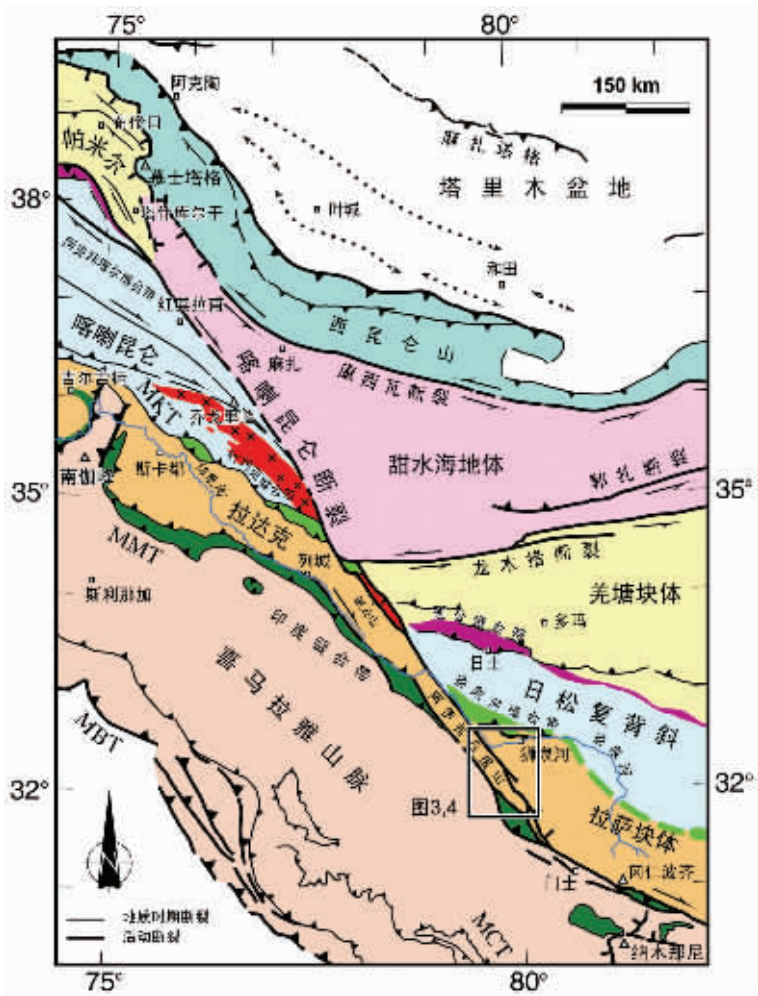


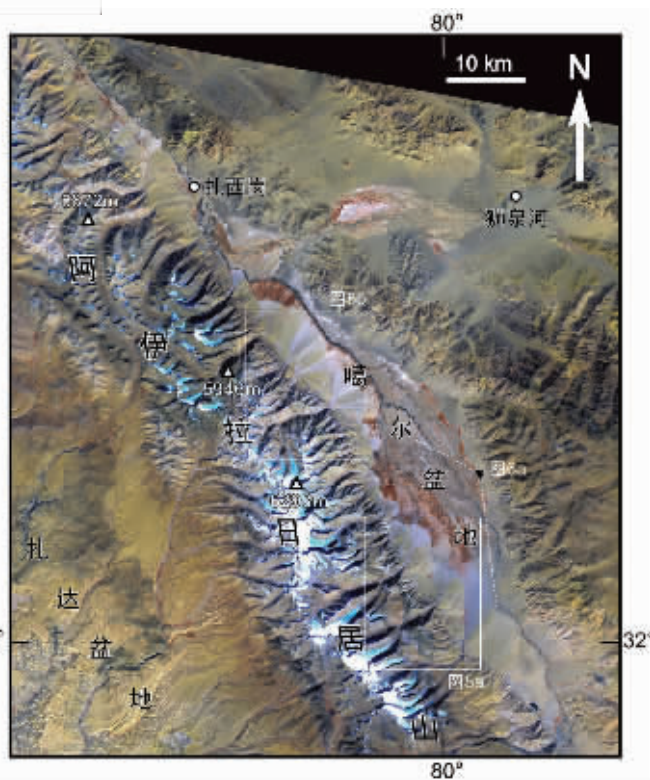
图 2 喀喇昆仑断裂及其邻区构造略图(断裂据 Landsat 7 卫星影像图及文献[11,22]) 紫色、绿色和深绿色区域为蛇绿岩缝合带^[2]; 红色区域为始新世以后的花岗岩浆带(据本文研究及文献[18,19,22,26,28,32])

Fig.2 Tectonic sketch map of the KF and adjacent areas (faults from the satellite image (Landsat 7) and references [11,22])

Purple, green and dark-green domains represent the ophiolitic suture zones^[2]; the red domain represents the post-Eocene granitic magmatic belt (mapped from this study and references [18,19,22,26,28,32])

图 3 狮泉河地区 Landsat 7 卫星影像图 喀喇昆仑断裂清晰地表现为线性负地形特征 位置见图 2, 方框为图 5a、b 位置

Fig.3 Satellite image (Landsat 7) of the Shiquanhe area The KF is clearly shown as the linear negative landform. For the location, see Fig.2. The squares indicate the location of Fig. 5a and 5b



作用的解释也是差异很大的。一些学者推断,由于印度板块和青藏高原持续的斜向挤压,使得右旋作用积累,从而形成了高原沿雅鲁藏布—嘉黎断裂一线向东的大规模挤出^[34,41]。相反的,Searle et al^[19]认为喀喇昆仑断裂的滑移速率只有 1.6~8 mm/a,Phillips et al^[23]也同样认为喀喇昆仑断裂的滑移速率为 2.7 mm/a,不存在大规模的青藏高原物质向东挤出。Murphy et al^[29-30]认为喀喇昆仑断裂向东的延伸并不通过冈仁波齐(神山),而是普兰北部的纳木那尼(Gurla Mandatha)拆离作用吸收了所有右旋滑移量形成它南部的尖端,不存在大规模的向东挤出作用。

笔者是在喀喇昆仑断裂带的拉达克—喀喇昆仑山脉东南段阿伊拉日居山地区(图 3~4)经过 3 年的野外工作,以及详细的岩石学和变形构造研究,并结合前人的同位素年代学的研究,提出新的证据和认识来帮助了解这一断裂带的变形特征和构造演化。

1 喀喇昆仑断裂的变形构造和运动学特征

1.1 喀喇昆仑断裂及韧性剪切带

在喀喇昆仑断裂带的东南段阿伊拉日居山地区(扎西岗至老噶尔一带)(图 3~4),地貌上的断裂特征尤为显著(图 3)。喀喇昆仑断裂沿阿伊拉日居山东北边缘线状分布,并发育噶尔(拉分)盆地(图 4),喀喇昆仑(活动)断裂沿着噶尔盆地的西部边缘斜向切割了第四纪冲积扇和冰碛物(图 5-a,6),并呈现为强烈的右旋走滑特征(图 6-d),断裂面 NE 倾、近直立。在野外,阿伊拉日居山与其北部盆地的线性断裂关系以及一些断裂三角面、大规模线性山前塌陷(图 5-b,6)一目了然。通过野外剖面(图 7)观察,在靠近盆地一侧的山体中花岗质糜棱岩以及糜棱岩化片麻岩较为发育,叶理面产状总体为走向 N140°~150°,倾向 NE、倾角 40°~70°,拉伸线理近水平,岩石中的 S/C 组构、碎斑旋转应变等均指示了右旋剪切指向(图 8),表现出右旋韧性走滑剪切带的基本特征。脆性的活动走滑断裂位于韧性走滑断裂带的北东侧(图 6-c,7)。

1.2 走滑剪切过程中伴随的隆升作用

通过对穿越喀喇昆仑断裂带的几条剖面(图 4,7)的观察研究,发现均存在一套绿片岩相花岗质糜棱岩以及糜棱岩化片麻岩,这套绿片岩相花岗质糜棱岩厚 30~50 m,具有强烈的旋转应变、近水平的拉伸线理,指示着右旋剪切指向(图 8),并存在后期脆性伸展变形(图 8-h),可能反映了韧性走滑剪切过程中后期伴随的隆升作用。另外,发现有沿山脉走向的“似长条状穹隆”(图 7 中剖面 4),山体以淡色花岗岩为主,山体东北侧发育(淡色)花岗质糜棱岩,并且在山的边缘出现一系列向北东陡倾的正断裂,靠近糜棱岩的正断裂为前全新世变形,而向北东稍远离的正断裂为全新世变形,并普遍带有不同程度的走滑分量。同时,在喀喇昆仑断裂的西南侧具有近平行于走滑断裂的逆冲断裂(图 4)。这种走滑、逆冲、伸

展的关系,反映出喀喇昆仑断裂带走滑变形过程中伴随的隆升作用。

2 同构造花岗岩——高温变形作用

判断一个花岗岩是构造前、同构造还是构造变形以后形成的花岗岩,依据它们不同的变形特征。一般来说,剪切前的花岗岩特征为:从远离到靠近断裂(剪切带),其应变梯度表现为从无变形到强烈变形;剪切后的花岗岩的特征是:花岗岩或岩脉切割糜棱岩化组构特征以及内部无变形。同构造花岗岩的特征一般较难具体确定,它没有一个统一的标准^[42-43],但可以肯定的是同构造花岗岩在空间和时间上完全受到断裂带(剪切带)的控制,并且沿糜棱组构出现熔融物质,以及顺着糜棱面理组构或横穿切割糜棱面理组构的花岗岩脉均存在着不同程度的一致剪切应变。研究表明阿伊拉日居山地区存在同构造花岗岩的变形特征。

2.1 野外变形特征

在野外观察到糜棱岩化片麻岩以及淡色花岗质片麻岩的面理产状与绿片岩相花岗质糜棱岩的产状一致(图 8),拉伸线理近水平(图 8-b),显著的 C/S 构造反映出强烈的右旋剪切指向(图 8-d,e),在远离山脉前端的区域,以淡色矿物质为主要成分的熔融物质贯穿于(糜棱岩化)片麻岩中(图 8-a),有顺着片麻理和横穿切割片麻理组构的(图 9),有的并成为(糜棱岩化)片麻岩的内部分层(图 9),但均呈现出不同程度的、与糜棱岩化片麻岩一致的右旋剪切应变(图 9),强烈的剪切纹理与周围的片麻岩平行(图 9)。在同一地区,经常可以观察到几组淡色矿物质为主要成分的熔融物质组成的纹理,很明显是强烈剪切过程中不同阶段的变形纹理。尽管还观察到一些混合岩化作用,但是这些淡色矿物质纹理的主要岩石来源很可能是位于西南方的熔融母岩体,并且由混合岩形成了山脉的核心(图 4),这表明强烈的右旋剪切过程中伴随着熔融作用的产生,这种淡色花岗岩的形成时代反映了喀喇昆仑断裂带的活动时代,其变形构造反映了高温变形的右旋剪切特征。

2.2 显微构造特征

在薄片下,同样出现指示高温变形作用的显微构造特征。长石斑晶周围边界上普遍出现细小的长石重结晶颗粒,组成典型的长石核-幔构造(图 10-a,c),这种构造是在应变分配和可能的挤压作用不均衡的条件下形成^[44-45],并且通常认为是大于 500 °C 条件下的变形^[46-49]。尤其是在高应力部位钾长石斑晶周围边界上生长动态蠕英石构造(图 10-c,d),这暗示在中、高温条件下(≥ 500 °C)的空间位错攀移^[46-47,49,53]。另外,长石明显的波状消光、膝折带等塑性变形(图 10-b)也表明了高于 400 °C 的变形特征^[54-58]。长石斑晶的脆性变形——“多米诺”骨牌构造(图 8-f),以及局部的波状消光指示长石的后期低温(~300 °C)条件下的变形特征^[49,59-60]。石英的动态重结晶作用通过亚颗粒旋转或颗粒边界移动产生(图 10-e,f),这些结构都是中、高温(400 °C~700 °C)条件下的典型变形结

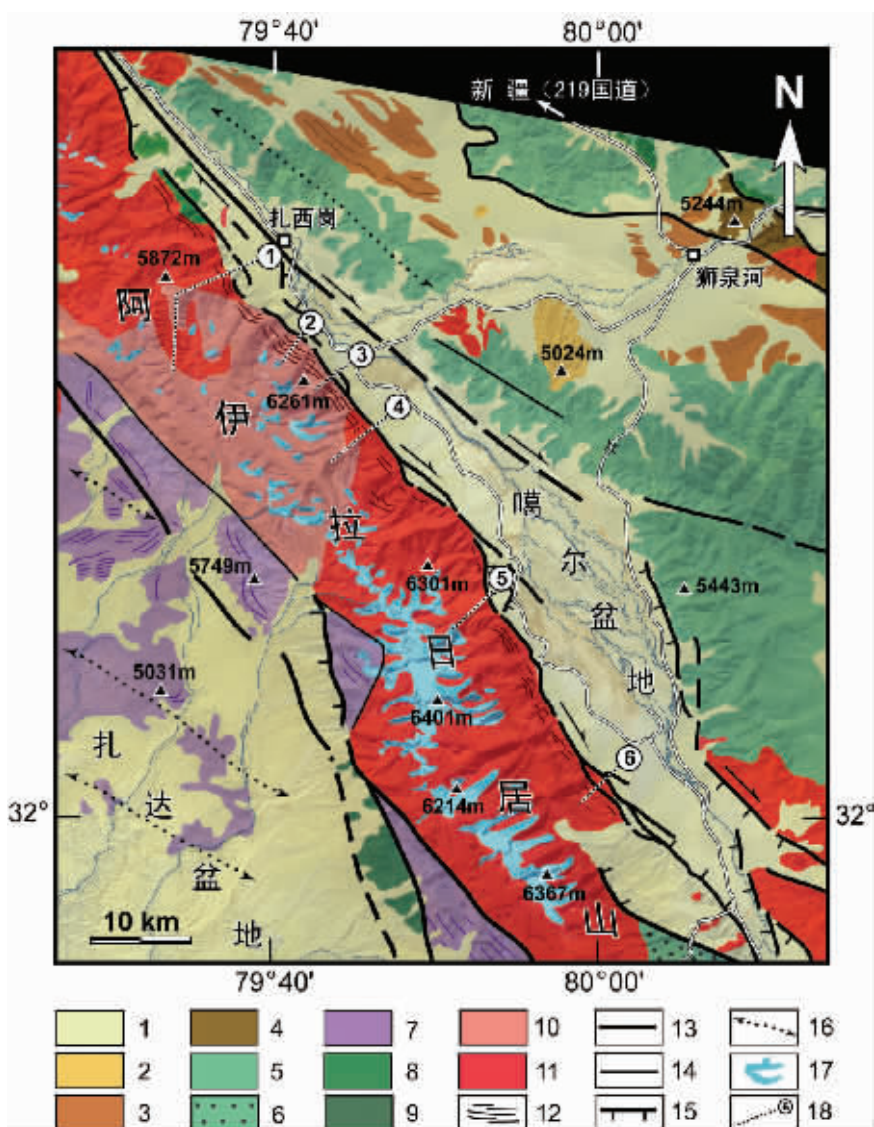


图 4 狮泉河地区地质图(据野外考察和卫星影像解译)

浅色阴影为地形轮廓;1—第四纪沉积物;2—煤系砂岩、砾岩;3—新近纪淡红色陆相砾岩和砂岩;4—二叠纪砂岩、板岩和砾岩,含灰岩夹层;
 5—含火山岩的大陆和浅海沉积;6—绿片岩相杂砂岩(可能相当于白垩纪日喀则复理石沉积);7—未分的古生代—中生代地层;
 8—由蛇纹岩—辉橄岩—放射虫硅质岩和二叠—三叠纪灰岩组成的走滑构造块体;9—蛇绿岩;10—混合岩和片麻岩;11—花岗岩(有时具叶理);
 12—层理和劈理或叶理;13—活动断裂;14—其他断裂;15—具正滑分量的断裂;16—背斜褶皱轴;17—冰川;18—剖面位置

Fig.4 Geological map of the Shiquanhe area(drawn from field surveys and satellite image interpretation of Landsat 7, Spot, SRTM)
 The light shaded area denotes the outline of topography;1—Quaternary deposits;2—Coal-bearing sandstones and conglomerates;3—Neogene nonmarine conglomerates and sandstones, light red;4—Permian shale, sandstone and conglomerate with limestone;5—Continental and shallow marine deposits intercalated with volcanic rocks;6—Greenschist-facies graywacke, possibly equivalent to the Cretaceous Xigazê flysch;7—Undifferentiated Paleozoic—Mesozoic strata;8—Tectonic strike-slip mélange composed of serpentinite, harzburgite, radiolarian chert, and Permian—Triassic limestone;
 9—Ophiolite;10—Migmatite and gneiss;11—Granites (sometimes foliated);12—Bedding, cleavage or magmatic foliation;13—Active faults;
 14—Other faults;15—Fault with normal-slip component;16—Anticlinal axis;17—Glaciers;18—Section location

构。另一方面,石英颗粒的波状消光表明后期为低温(<300℃)变形^[9]。沿剪切面发育不对称的“云母鱼”以及沿云母鱼中的剪切边缘有细小的重结晶云母,表明了此时的变形机制为大于250℃条件下的剪切机制^[6],另外,云母的膝折反映出后期极低温变形(<250℃)。从上述所有显微构造来看,其变形机制为从高温(>500℃)到低温(<250℃)的连续右旋剪切机制,后期极低温变形作用与伴随的正滑作用有关。

该区域花岗岩的空间产出受喀喇昆仑断裂带的控制,其规模比较大,可初步认为喀喇昆仑断裂右行走滑过程中早期曾产生局部的拉张环境,以至于有足够的空间使得花岗岩侵位。这种同构造的淡色花岗岩出露不仅表明了喀喇昆仑(右行走滑)断裂带是在挤压环境下产生的,同时出现局部的拉张环境也反映了走滑过程中伴随有(强烈的)隆升运动。

3 喀喇昆仑断裂的累积位移量及滑移速率

准确估算喀喇昆仑断裂总位移量是不容易的,它的困难在于很难准确地找到断裂两侧可对比的标志物以及喀喇昆仑断裂本身多处的分支和复杂性。一些学者已作了对比和估算,但仍存在较大争议。

大比例尺的 Landsat 7 卫星影像图(图 1)和地形图上,可清晰地看到一条河流被喀喇昆仑断裂右行错开,这条河流在印度境内称为印度河,在中国称为狮泉河(图 2),该河流被右行错开约 120 km(图 11),它能否代表断裂带的最大累积位移量显然值得怀疑,因为没有证据证明这条河流是在喀喇昆仑断裂形成之前就已存在,相反地可能是第四纪冰期后的产物,但是至少说明最小累积位移量应大于 120 km。

两个老于雅鲁藏布缝合带的中生代蛇绿岩带(班公湖蛇绿岩带和狮泉河蛇绿岩带)可能是较清楚的对比参照物(图 1, 11)。众所周知的班公湖—怒江缝合带形成于晚侏罗世—早白垩世,它被喀喇昆仑断裂带清晰地切割,似乎与帕米尔的阿克拜塔尔(Rushan-Pshart)缝合带可对比,这样至少具有 400 km 的位移量(图 11)。

较年轻的狮泉河蛇绿岩带^[2]在青藏高原向东的连续性较差,但是它包括有橄榄岩、辉长岩、硅质岩以及由碎屑灰岩、熔岩和钙碱系列的火山岩组成的杂岩体,是一个典型的活动边缘组分。它被喀喇昆仑断裂切割,在断裂西南侧的拉达克山西南段的什约克(Shyok)蛇绿岩带,其延伸方向和影像特征(图 1)与狮泉河蛇绿岩带基本一致,如此对比存在着 150 km 或 200 km^[6,3]的最小位移量^[6],在大比例尺的 Landsat 7 卫星影像图上,可看到拉达克山西南段什约克蛇绿岩带被剪切成布丁状(图 1)。因此,由于什约克—狮泉河蛇绿岩带存在着剪切布丁化的作用,它们在断裂两侧的对比如存在的最小位移量为~280 km(图 11)。

综合分析,喀喇昆仑断裂累积位移量至少为 280 km 是一个相对可信数据。那么,如果认为喀喇昆仑断裂形成时代为 23~25 Ma,那么,它的长期平均滑移速率约为 11.7±

0.5 mm/a。印度河—狮泉河被喀喇昆仑断裂错移 120 km,可以认为是第四纪以来最小累积位移量,而大约从 12 Ma 开始反映的快速冷却^[22,26]过程可能是一个强烈走滑并伴随隆升过程的开始,如果认为 120 km 的位移量是从 12 Ma 以来形成的,其长期平均滑移速率至少为 10 mm/a。综合 280 km 位移量所得到的滑移速率来平均,喀喇昆仑断裂的长期平均滑移速率为~11 mm/a。

Lacassin et al^[22]所估算的滑移速率为 10±3 mm/a。Chevalier et al^[25]在阿伊拉日居山地区的活动构造研究中,利用废弃的冰碛扇形体地表石英的宇宙射线核素(¹⁰Be)测年,获得了不同时代冰碛扇形体被废弃的时代,其中年轻的冰碛扇形体(图 5 中 M1)被废弃的平均年龄为(21±0.1) ka,较老的冰碛扇形体(图 5 中 M2)被废弃的平均年龄为(140±5.5) ka。那么参照冰碛扇形体被错移的位移量,它们的滑移速率分别为 10.5±0.5 mm/a 和 10.9±0.6 mm/a,其平均滑移速率为 10.7±0.7 mm/a,这个速率与笔者估算的长期平均走滑速率 11 mm/a 以及 Banerjee et al^[40]所估算的滑移速率 11±4 mm/a 基本一致,但是,该速率大约是 Brown et al^[39]利用相同的测年技术(¹⁰Be)所获得滑移速率(4±1 mm/a)的 3 倍。因此,~11 mm/a 的滑移速率可代表喀喇昆仑断裂长期平均走滑速率。

4 讨论与结论

4.1 喀喇昆仑断裂的形成时代及活动历史

高温的右旋剪切变形伴随熔融作用的产生,同构造熔融型淡色花岗岩的形成时代直接反映了早期喀喇昆仑断裂带的活动时代。由于早期为高温(>500℃)剪切作用,而白云母、黑云母的 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 体系的封闭温度为 390±45℃和 320±40℃^[6],因此,同构造生长的云母矿物的 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 法同位素定年所得到的年龄为断裂带中变形岩石的冷却年龄。所以,利用同构造淡色花岗岩、糜棱岩化片麻岩及糜棱岩中的同构造生长锆石 U-Pb 同位素年代学研究,来制约喀喇昆仑断裂带右旋走滑作用的活动时代更为准确,尤其是对断裂带形成时代的制约。

在喀喇昆仑断裂带东南段阿伊拉日居山地区,Valli^[26]对受剪切作用影响和改造的岩石中的锆石进行了 U-Pb 同位素年代学研究,其结果表明新生结晶锆石或再生锆石所记录的时代为 23~25 Ma,反映了右旋剪切走滑过程中构造变形作用的时段。因此,喀喇昆仑断裂的形成时代至少在 23~25 Ma 以前,并且发生高温右旋剪切变形并伴随淡色的同构造花岗岩的产生。由于糜棱岩的快速冷却时代约为~12 Ma^[22,26],喀喇昆仑断裂的连续变形作用至少持续到~12 Ma,之后伴随阿伊拉日居山的快速隆升以及噶尔盆地开始形成。

目前,对喀喇昆仑断裂活动时代的研究有着不同的结论,但是这些不同的时代分布在断裂带的不同位置上(图 12),可能反映了早期断裂的分段性以及断裂生长的演化过

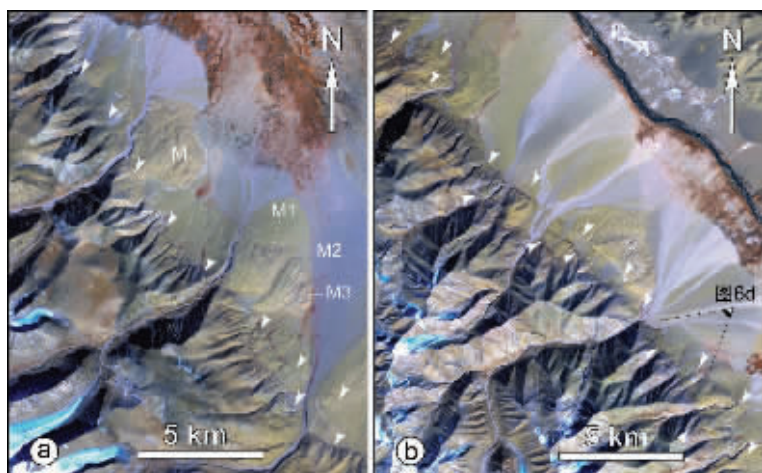


图 5 老噶尔地区 Landsat 7 卫星影像图
 白色箭头所示喀喇昆仑断裂;a 图中可见喀喇昆仑
 断裂切割了 3 个被废弃的由冰绩物所组成的扇形
 体(M1, M2, M3);b 图中可见清晰的正断裂
 Fig.5 Satellite image (Landsat 7) of the Gar area
 The white arrow indicates location of the KF.
 Three abandoned fans composed of moraines
 (M1, M2, M3) offset by the KF as shown in (a);
 Normal faults are clearly shown in (b)

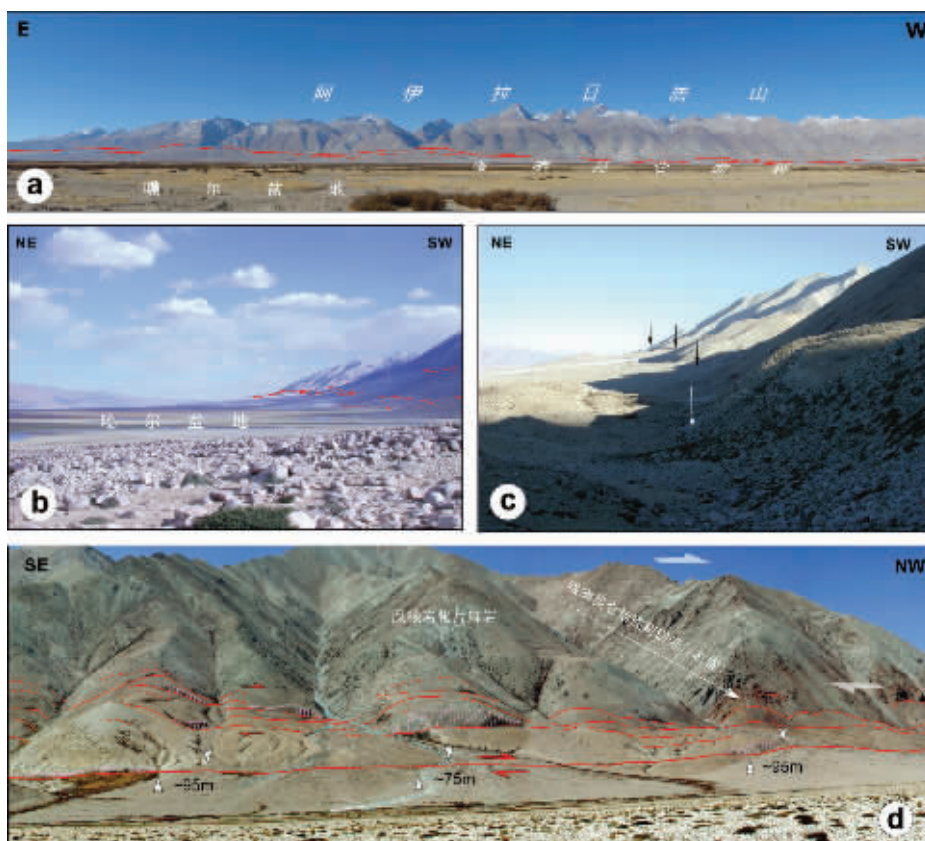


图 6 喀喇昆仑断裂的野外景观

- a—老噶尔地区的喀喇昆仑断裂特征,线性的阿伊拉日居山与噶尔拉分盆地的关系,箭头朝向 SW;b—从扎西岗向 SE 方向观看的喀喇昆仑断裂 (右侧山根位置)及其谷地;c—喀喇昆仑断裂带中的正断裂景观,箭头朝向 SE;
- d—西岗东南侧喀喇昆仑断裂特征,山前的红线示活动断裂,它切割了冲积扇和冲沟,断裂两侧的白色箭头指示被错断的位移

Fig.6 Field view of the KF

- a—View, looking southwest, relationship between the linear Ayila Ri'gyü Range and Gar pull-apart basin in the Gar area;b—View, looking southeast from Zhaxigang, of the KF and its valley;c—View, looking southwest, of the normal faults of the KF;d—View, looking southwest at the southeast side of Zhaxigang, of the KF and the red arrows indicate the active fault which cut the alluvial fan and gullies, and the blue lines show perturbed drainages.
 The white arrow at both sides of the fault indicates the displacement

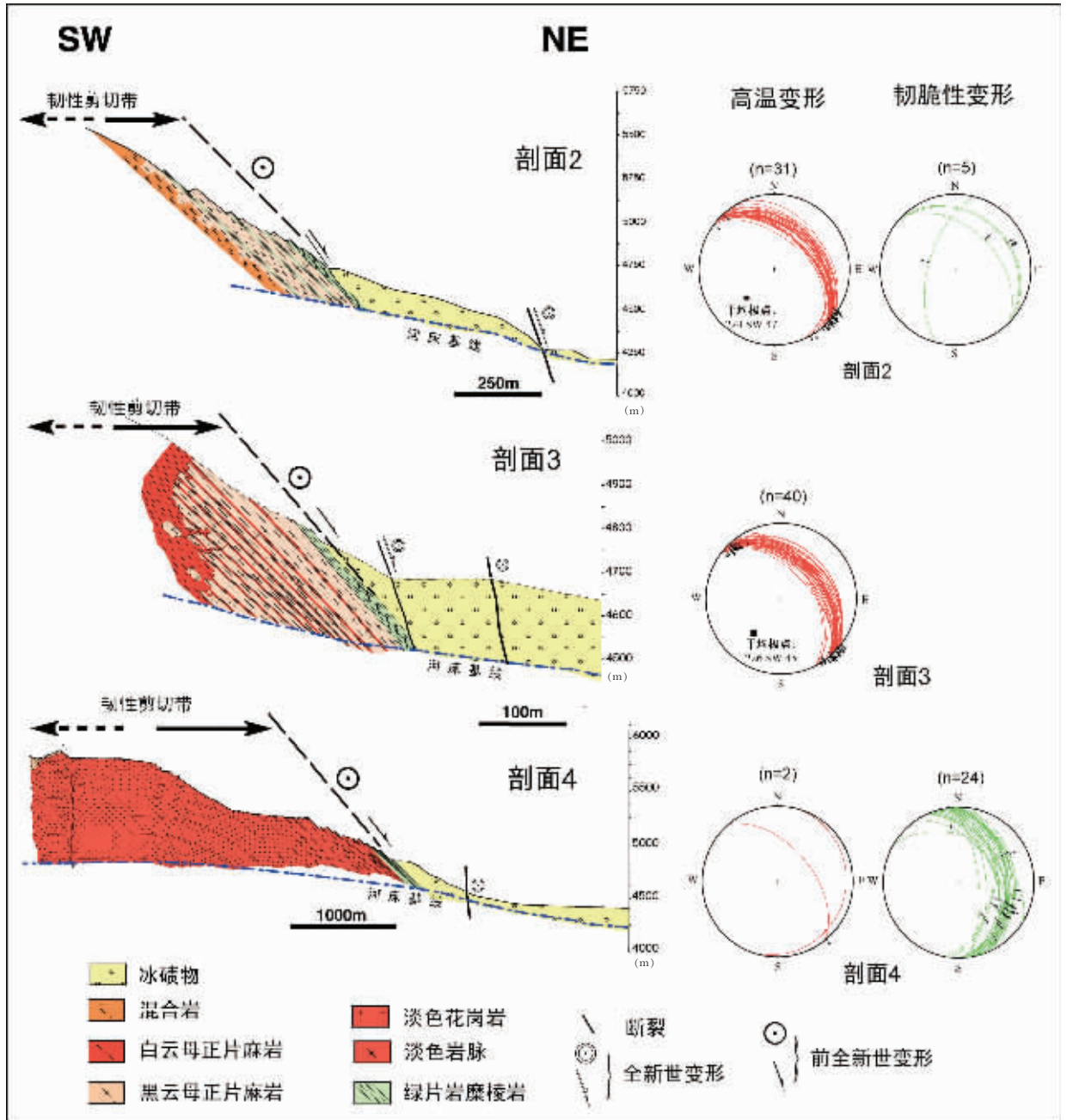


图7 横切阿伊拉日居山北东侧的喀喇昆仑断裂带的构造剖面

具体位置见图4中的②③④剖面。右侧是叶理面及拉伸线理赤平投影图(下半球投影), 其中左、右列代表着角闪岩相和绿片岩相变形特征

Fig.7 Tectonic sections of the KF across the northeastern flank of the Ayila Ri'gyü Range

For the section location, see sections ②, ③ and ④ in Fig. 4. On the right side are stereographic projections (lower hemisphere) of foliations (great circles) and stretching lineations (arrows). The left and right columns represent the deformation features of amphibolite facies and greenschist facies respectively

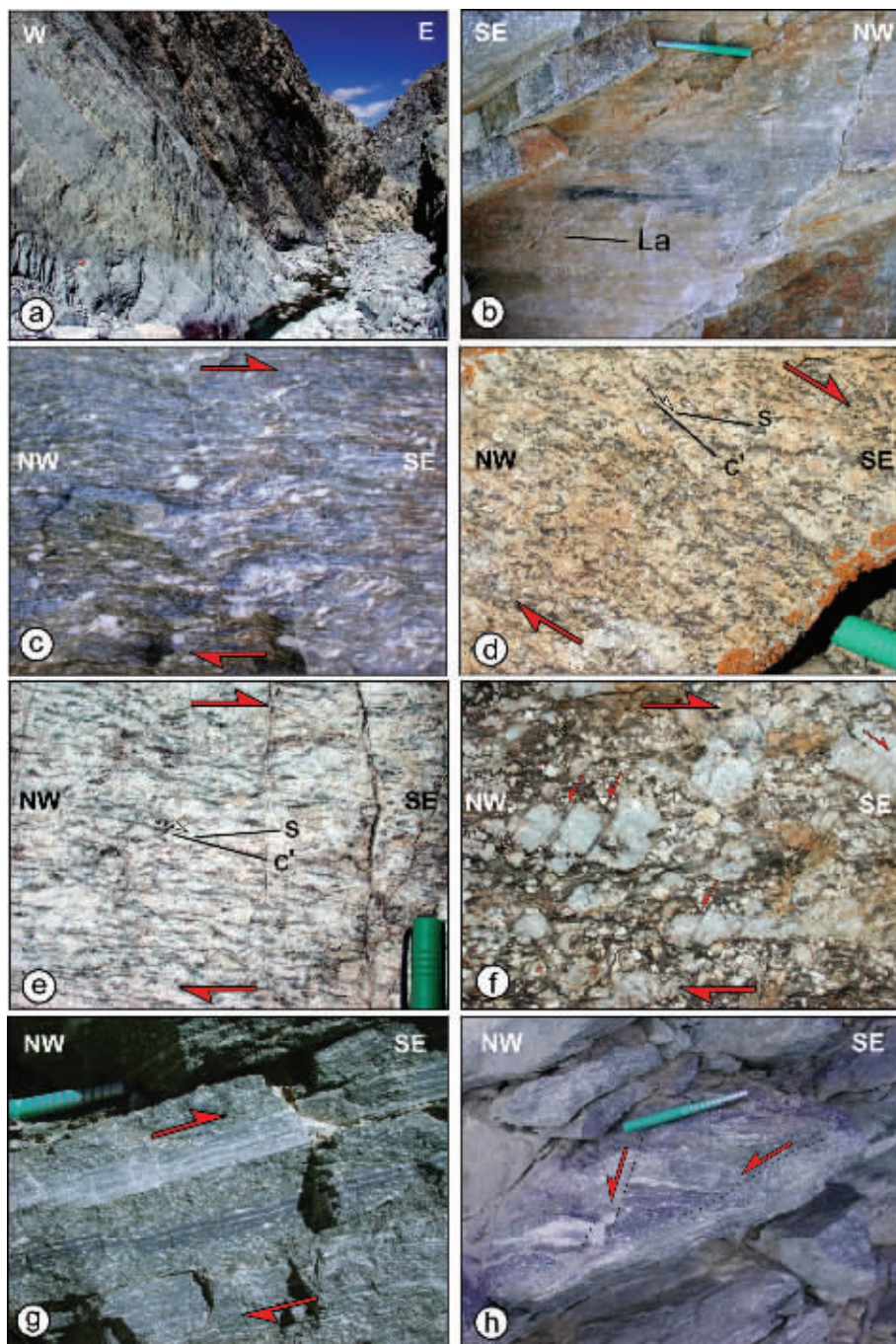


图 8 阿伊拉日居山地区喀喇昆仑韧性剪切带中的变形特征

a—淡色脉体及纹理组成清晰的较陡的叶理面;b—叶理面上近水平的拉伸线理;c—糜棱岩化片麻岩中的 σ 型旋转应变,指示右旋剪切指向;d,e—淡色花岗岩及淡色花岗质片麻岩中的S/C组构反映出右旋剪切特征;f—受剪切作用影响的淡色花岗岩中“多米诺骨牌”构造,指示右旋剪切特征;g—绿片岩相糜棱岩特征;h—糜棱岩化片麻岩中出现的后期脆(-韧脆)性正断裂

Fig.8 Characteristics of deformation along the Karakoram ductile shear zone in the Ayila Ri'gyü Range

a—Steep foliation planes in biotite gneisses;sheared leucocratic veins, which are parallel to the foliation, intrude gneisses;b—Subhorizontal stretching lineation made up of stretched feldspar, quartz and mica on steep foliation planes in gneisses;c— σ -type rotational strain in mylonitized gneisses;d, e—Dextral shear features reflected by S/C fabrics in leucogranite and leucogranitic gneiss;f—“Domino” microstructures showing dextral shearing in sheared leucogranite;g—Deformation features of greenschist-facies mylonite;h—Late-stage brittle (ductile-brittle) normal fault in mylonitized sheared gneisses

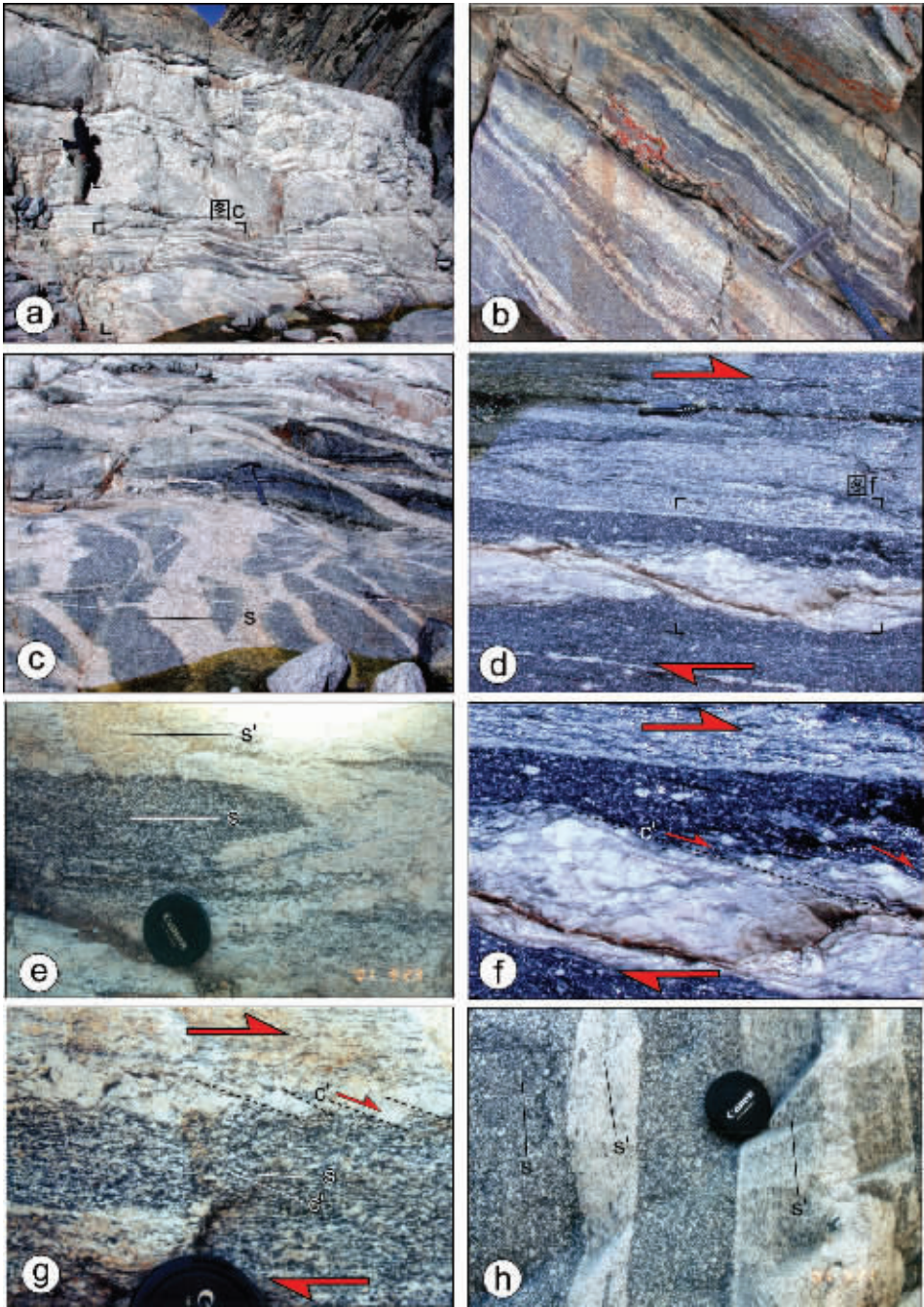


图9 喀喇昆仑断裂带中同构造熔融变形特征

a—同构造淡色熔融物质脉体,其脉体有平行和横穿切割片麻理组构,局部见图9-c;b—受剪切的混合岩化片麻岩;
c—贯入到黑云母片麻岩中的同构造淡色熔融物质脉体所反映出不同变形阶段;d—具右旋剪切特征的淡色熔融物质脉体和片麻岩,局部见图9-f;e—淡色熔融物质脉体褶皱,脉体内、外面理一致;f,g—淡色熔融物质脉体具有 σ 型旋转应变构造和S/C组构,它们反映了右旋剪切特征;
h—淡色熔融物质脉体内部面理(s')平行于脉体外面理(s)

Fig.9 Characteristics of synkinematic molten material deformation in the KF

a—Synkinematic leucocratic molten material veins, parallel or across gneissic fabric, locally as shown in Fig.9-c; b—Sheared migmatitic gneisses;
c—Different deformation stages reflected by synkinematic leucocratic molten material veins injecting biotite gneisses; d—Dextrally sheared leucocratic veins and gneisses; e—Folding of the leucocratic veins with the same foliations in the veins and its outside; f, g—Leucocratic veins with σ -type microstructures and C/S fabric indicate dextral shearing in gneisses; h—Inside foliation (s') of leucocratic veins parallel to its outside foliation (s)

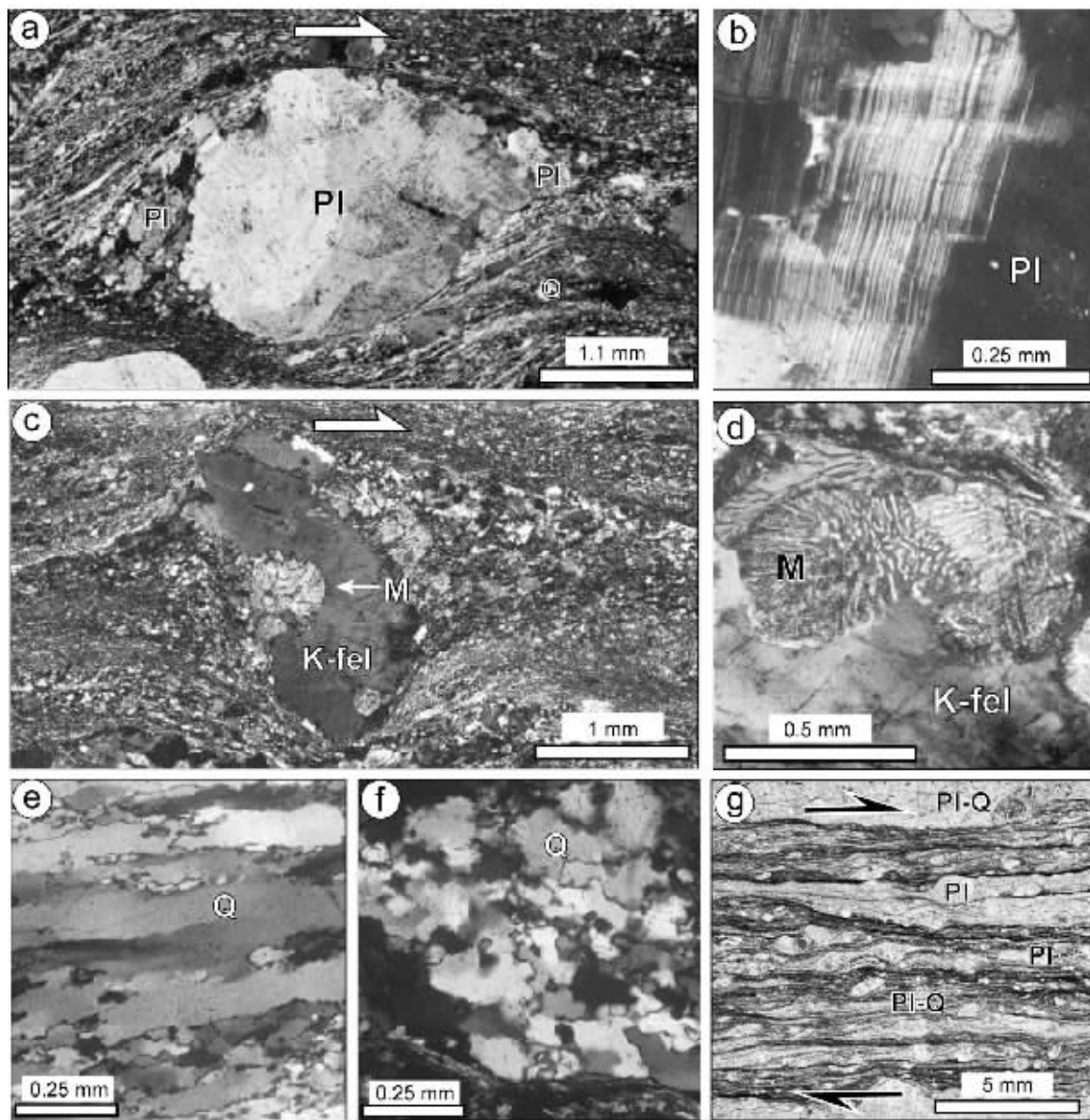


图 10 喀喇昆仑韧性剪切带中的显微构造特征

a—不对称的 σ 型长石斑晶旋转应变及动态重结晶颗粒, 指示右旋剪切指向; b—斜长石(Pl)颗粒内的膝折带; c—不对称的 σ 型长石斑晶旋转应变结构及长石边部生长的动态蠕英石(M, 白色箭头所示); d—钾长石(K-fel)中发育较好的动态蠕英石(M); e—较大的缎带状石英(Q)颗粒由亚颗粒旋转而产生的小的石英动态重结晶颗粒组成; f—不规则的石英动态重结晶颗粒通过颗粒边界移动产生; g—薄片中的浅色花岗质片麻岩变形构造特征, 指示右旋剪切指向

Fig.10 Characteristics of microstructures of the Karakorum ductile shear zone

a—Asymmetric rotated strain of σ -type feldspar phenocrysts and dynamically recrystallized grains, indicating dextral shear sense; b—Kink bands inside plagioclase grains; c—Asymmetric rotated strain structure of σ -type feldspar phenocrysts and dynamic myrmekite (M, indicated by white arrow) formed on feldspar edges; d—Well-developed dynamic myrmekite in a K-feldspar (K-fel) grain; e—Large ribboned quartz (Q) grains composed of small dynamically recrystallized grains formed by subgrain rotation; f—Dynamically recrystallized quartz grains with irregular grain boundaries formed in response to grain boundary migration; g—Characteristics of deformation of leucogranitic gneisses in thin section, indicating a dextral shear sense

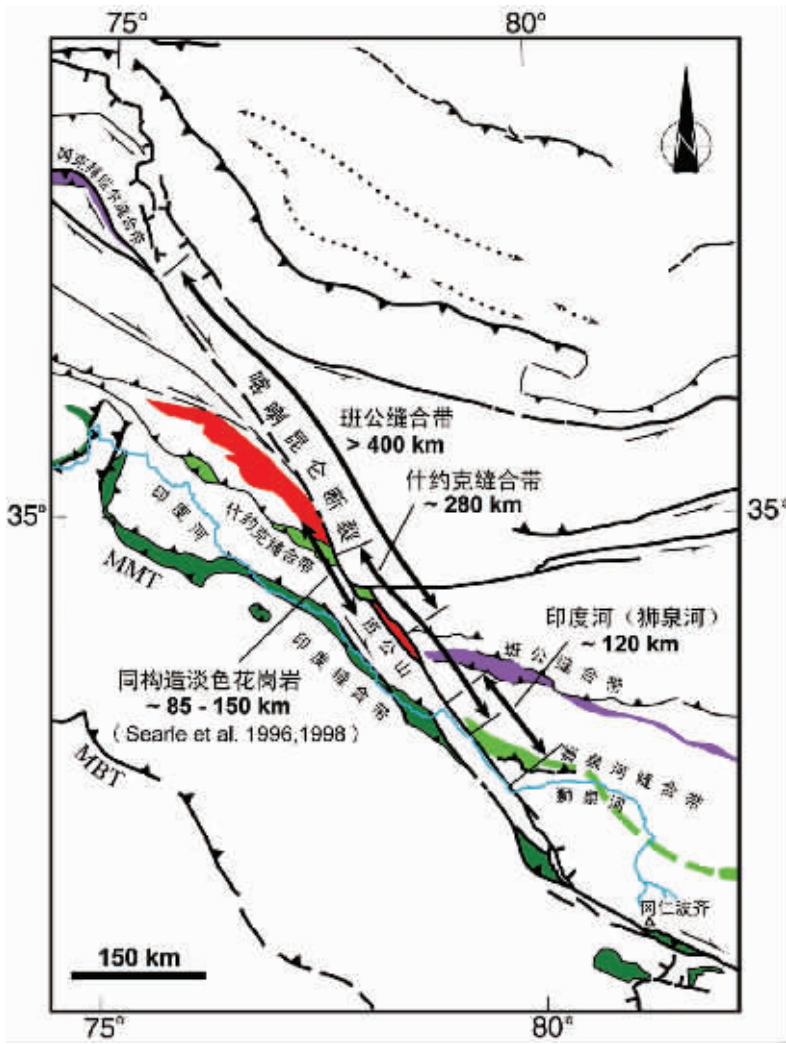


图 11 喀喇昆仑断裂两侧可对标的标志物及估算的不同累积位移量(本文研究及参考文献[22])

Fig.11 Different estimated cumulative displacement amounts on both sides of the KF(after this research and Reference[22])

程。从不同年龄的分布特征来看,喀喇昆仑断裂的总体生长过程可能是由南东向北西扩展的过程,具体演化为:首先在阿伊拉日居山地区,由于印度板块与欧亚大陆斜向的碰撞挤压,形成转换挤压构造带(EW向或ESE—WNW向展布),在~23~25 Ma前形成最早的喀喇昆仑断裂(此时规模较小,近ESE—WNW向展布),由于高温剪切作用的存在,形成了同构造淡色花岗岩,另外,在其西北部有20~26 Ma的淡色花岗岩(Baltoro花岗岩)的侵入;随着印度板块与欧亚大陆的继续挤压,原先形成的断裂走向发生顺时针偏转,并在随后的

20~13 Ma期间断裂从阿伊拉日居山地区向北西快速扩展至布伦口地区(长700~800 km),布伦口地区的岩浆活动时代为~20~18 Ma^[69],断裂切割了Baltoro花岗岩体,形成了同构造淡色花岗岩(班公山花岗岩)。同时断裂也向南东方向扩展至冈仁波齐一带(长200~300 km),形成巨型的喀喇昆仑断裂(图12)。12 Ma以后,印度板块与欧亚大陆继续挤压,挤压应力方向与喀喇昆仑断裂间的夹角变小(<45°),使原先的喀喇昆仑断裂由转换挤压带转变为转换伸展带,因此,喀喇昆仑断裂右旋走滑过程中伴随产生大规模的正断裂,噶尔盆地开始

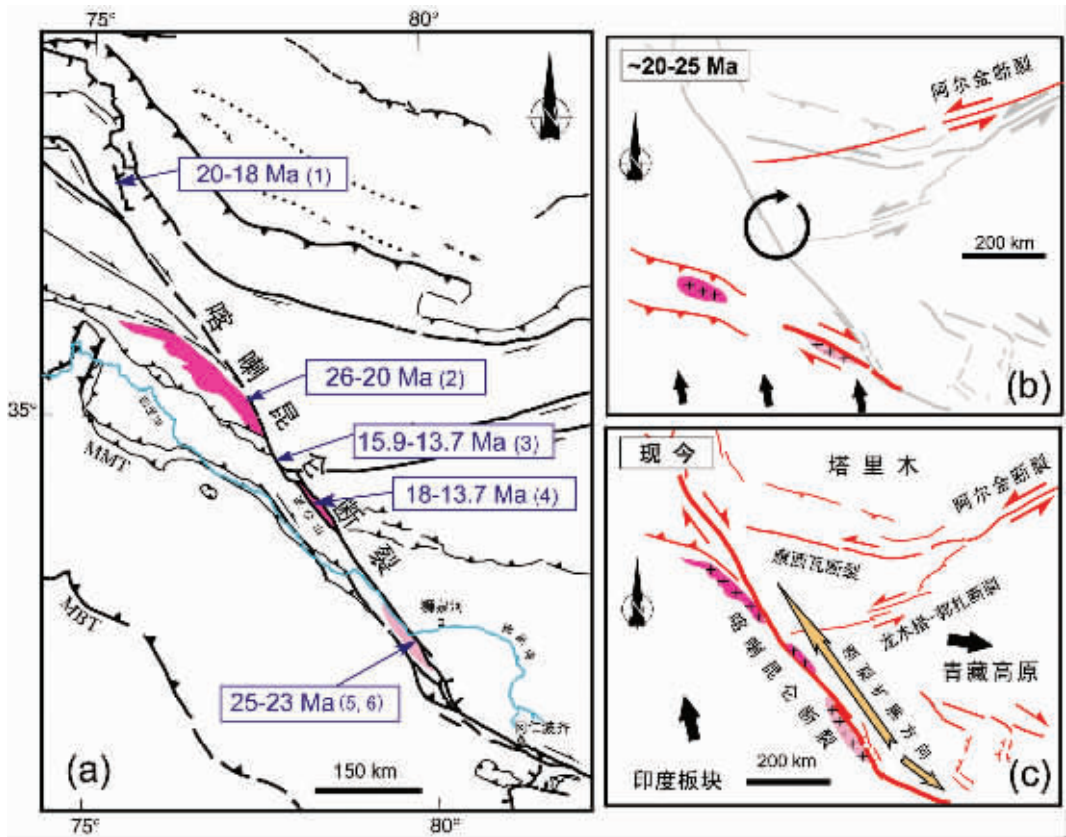


图 12 沿喀喇昆仑断裂分布的有关始新世以来岩浆活动的同位素年龄 (年龄(1)据参考文献[65],(2)据[37],(3)据[32],(4)据[28],(5)据[22],(6)据[26]) (a)及断裂演化示意 (b,c)图

Fig.12 Isotope ages^[22,26,28,32,37,65] of the post-Eocene magmatism along the KF in western Tibet (a) Diagram showing the evolution of the Karakoram fault (b), (c)

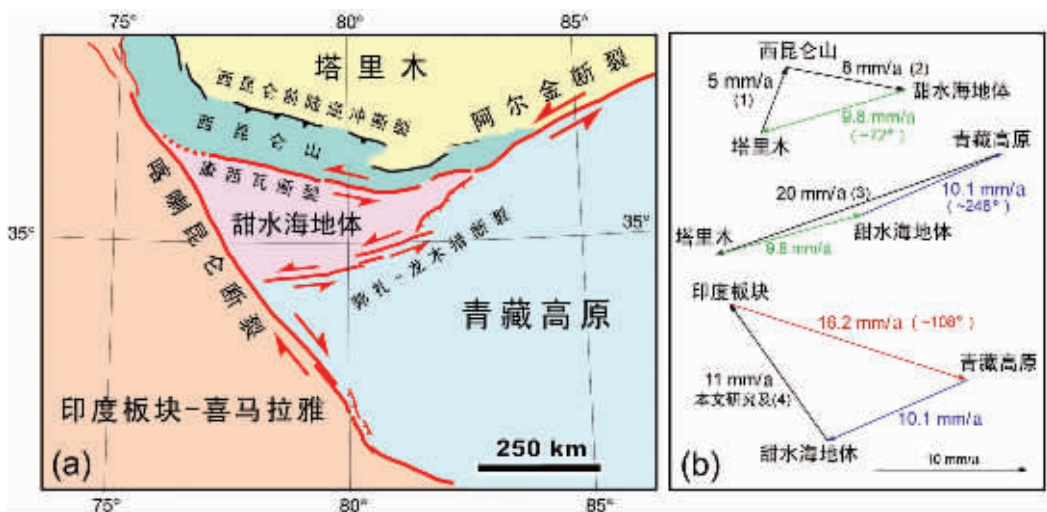


图 13 青藏高原西部 3 个大陆之间的刚性块体运动学分析

a—青藏高原西部块体边界与断裂关系;b—块体间运动矢量分析(图中速率(1)据参考文献[66];(2)据参考文献[67];(3)据参考文献[68];(4)据参考文献[25])

Fig.13 Kinematic analysis of rigid blocks between three continents on the western Qinghai-Tibet Plateau

(a) Geometry and kinematics of the boundaries of four microplates on the western Qinghai-Tibet Plateau;

(b) Kinematic vector analysis between blocks (velocities in the figure based on references [66] (1) and [67] (2);[68] (3);[25] (4))

形成,同时,强烈的隆升作用使阿伊拉日居山开始快速崛起。

4.2 青藏高原西部巨型走滑断裂的滑移速率及块体的运动学分析

喀喇昆仑断裂形成以来,其累积走滑位移量至少在280 km以上,第四纪以来最小累积位移量120 km以上,长期的平均滑移速率为11 mm/a。该结论表明从印度板块与欧亚大陆碰撞后,青藏高原西部23~25 Ma以来产生大规模右旋走滑,使得高原西部物质沿喀喇昆仑断裂这一滑移线向东大规模的挤出,而挤出速率需要通过断裂几何学进行刚性块体运动学分析。高原西部3条主要走滑断裂(喀喇昆仑断裂、阿尔金断裂西段的康西瓦断裂以及龙木措—郭扎断裂,)分隔着印度(—喜马拉雅)板块、甜水海地体、西昆仑—塔里木块体及青藏高原(主体)(图13),其中块体间的相互运动及其速率是研究青藏高原西部变形过程的关键。

西昆仑逆冲到塔里木块体之上吸收了约5 mm/a的近南北向的挤压变形作用^[6],这个速率可以近似代表西昆仑相对于塔里木的运动速率,晚第四纪以来康西瓦断裂的滑移速率为6.5~10 mm/a^[6],平均速率约为8 mm/a,它可代表甜水海地体相对于西昆仑的运动速率,通过它们的矢量计算,可得到塔里木与甜水海地体间的相对运动速率约为9.8 mm/a,运动方向N72°左右(图13-b,绿色箭头),另外阿尔金断裂西段的平均滑移速率约为20 mm/a^[6],代表的是青藏高原与塔里木间的相互运动速率,经矢量计算可知青藏高原与甜水海地体间的相对运动速率约为10.1 mm/a,运动方向约N248°左右(图13-b,蓝色箭头),由于研究得出喀喇昆仑断裂的长期滑移速率约为11 mm/a,那么,最后通过矢量计算得出:青藏高原以约16.2 mm/a的速率向~N108°方向挤出(图13-b,红色箭头),它代表高原西部物质向东的挤出速率,并且在23~25 Ma或更晚才存在向东的大规模挤出作用。

参考文献(References):

- [1] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision[J]. *Science*, 1975, 189:419~426.
- [2] Patriat P, Achache J. India Eurasia collision chronology has implications for crustal shortening and driving mechanism of plates[J]. *Nature*, 1984, 311:615~62.
- [3] Besse J, Courtillot V, Pozzi J P, et al. Paleomagnetic estimates of crustal shortening in the Himalayan thrusts and Zangbo suture [J]. *Nature*, 1984, 311:621~626.
- [4] Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia [A]. In: Coward M P, Ries A C (eds.). *Collision Tectonics* [C]. Geological Society Special Publication 1986, 19, pp. 115~157.
- [5] Besse J, Courtillot V. Paleomagnetic maps of the continents bordering the Indian Ocean since the Early Jurassic, [J]. *Geophys. Res.*, 1988, 93:11791~11808.
- [6] Le Pichon X, Fournier M, Jolivet L. Kinematics, topography and extrusion in the India-Eurasia collision [J]. *Tectonics*, 1992, 11:

- 1085~1098.
- [7] Molnar P, Tapponnier P. Active tectonics of Tibet [J]. *J. Geophys. Res.*, 1978, 83:5361~5375.
- [8] Tapponnier P, Molnar P. Active faulting and tectonics in China [J]. *J. Geophys. Res.*, 1977, 82:2905~2930.
- [9] Avouac J P, Tapponnier P. Kinematic model of active deformation in central Asia [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, 20 (10):895~898.
- [10] Peltzer G, Saucier F. Present-day kinematics of Asia derived from geologic fault rates [J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101:27. 943 ~27.956.
- [11] Tapponnier P, Xu Zhiqin, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau [J]. *Science*, 2001, 294:1671~1677.
- [12] 李海兵, 杨经绥, 许志琴, 等. 阿尔金断裂带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.
- Li Haibing, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, et al. Geological & chronological evidences of Indo-chinese strike-slip movement in the Altyn Tagh fault zone [J]. *Chinese Science Bulletin*. 2002, 47 (1):27~32.
- [13] 潘桂棠, 焦淑萍, 徐耀荣, 等. 阿尔金山新生代构造及造山性质 [A], 见: 青藏高原地质论文集(15) [C]. 北京:地质出版社, 1984. 113~119.
- Pan Guitang, Jiao Shupei, Xu Yaorong, et al. The Cenozoic tectonics and its orogeny in Altun [A]. In: *Contribution to the Geology of the Qinghai-Xizang (Tibet) plateau (15)* [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1984, 113~119. (in Chinese with English abstract).
- [14] Yue Y, Liou JG. Two-stage evolution model for the Altya Tagh fault, China [J]. *Geology*, 1999, 27:227~230.
- [15] 许志琴, 杨经绥, 张建新, 等. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制 [J]. *地质学报*, 1999, 73(3):193~205.
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Zhang Jianxin, et al. A comparison between the tectonic units on the two sides of the Altun sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1999, 73(3): 193~205. (in Chinese with English abstract)
- [16] 葛肖虹, 刘俊来. 北祁连造山带的形成与背景 [J]. *地学前缘*, 1999, 6(4): 223~229.
- Ge Xiaohong, Liu Junlai. Formation and tectonic background of the northern Qilian orogenic belt [J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(4): 223~229. (in Chinese with English abstract)
- [17] Ritts B D, Biffi U. Magnitude of post-middle Jurassic (Bajocian) displacement on the central Altyn Tagh fault system, Northwest China [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 2000, 112(1): 61~74.
- [18] Searle M P. *Geology and Tectonics of the Karakoram Mountains, Map 2538* [M]. John Wiley and Sons, Chichester. 1991.
- [19] Searle M P. Geological evidence against large-scale pre-Holocene offsets along the Karakoram fault; implications for the limited extrusion of the Tibetan Plateau [J]. *Tectonics*, 1996, 15: 171~186.
- [20] 尹集祥, 边千韬. 喀喇昆仑山—西昆仑山及邻区地质图 [M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- Yin jixiang, Bian Qiantao. *Geological Map of the Karakoram—Kunlun and Adjacent Areas* [M]. Beijing: Science Press, 1995.

- [21] Zhang Q S, Li B Y, Wang F B, et al. A discussion on the up lifting of the Karakorum - Kunlun mountains and its impact on environmental changes[A]. In: Abstracts of International Symposium on the Karakorum and Kunlun Mountains[C]. 1992, 95.
- [22] Lacassin R, Valli F, Arnaud N, et al. Large-scale geometry, offset and kinematic evolution of the Karakorum fault, Tibet [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2004, 219: 255~269.
- [23] 潘裕生. 喀喇昆仑山-昆仑山地区地质演化[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 94~186.
Pan Yusheng. Geological Evolution of the Karakoram and Kunlun Mountains[M]. Beijing: Science Press, 2000. 94~186.
- [24] 周勇, 许荣华, 阎月华, 等. 喀喇昆仑断裂带磁组构特征及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2000, 16(1):134~144.
Zhou Yong, Xu Ronghua, Yan Yuehua, et al. Characteristics of magnetic fabrics of the Karakoram fault belt and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16 (1) :134~144. (in Chinese with English abstract)
- [25] Chevalier M L, Ryerson F J, Tapponnier P, et al. Slip-rate measurements on the Karakorum fault may imply secular variations in fault motion[J]. *Science*, 2005, 307: 411~414.
- [26] Valli Franck, Décrochements lithosphériques dans L'Ouest du plateau du Tibet: Géométrie, age, décalages cumulés et vitesse de glissement long-terme sur la Faille du Karakorum[D]. Parsé;thesis, Université Paris, 2005.
- [27] Matte P, Tapponnier P, Arnaud N, et al. Tectonics of Western Tibet, between the Tarim and the Indus[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1996, 142:311~330.
- [28] Searle M P, Weinberg R F, Dunlap W J. Transpressional tectonics along the Karakoram fault zone, northern Ladakh: constraints on Tibetan extrusion[A]. In: Holdsworth R E, et al (eds.). Continental Transpressional and Transtensional Tectonics[C]. *Geol. Soc. London Spec. Pub.* 1998. 135, 307~326.
- [29] Murphy M A, Yin An, Kapp P, et al. Southward propagation of the Karakoram fault system, southwest Tibet: Timing and magnitude of slip[J]. *Geology*, 2000, 28:451~454.
- [30] Murphy M A, Yin An, Kapp P, et al. Structural evolution of the Gurla Mandatha detachment system, southwest Tibet: implications for the eastward extent of the Karakoram fault system[J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 2002, 114:428~447.
- [31] Zhou Y, Xu R H, Yan Y H, et al. Dating of the Karakorum Strike-slip Fault[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(1):10~18.
- [32] Phillips R J, Parrish R, R, Searle M P. Age constraints on ductile deformation and long-term slip rates along the Karakoram fault zone, Ladakh[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2004, 226:305~319.
- [33] Peltzer G, Tapponnier P. Formation and evolution of strike-slip faults, rifts and basins during the India-Asia collision: an experimental approach[J]. *J. Geophys. Res.*, 1988, 93:15,085~15,177.
- [34] Ratschbacher L, Frisch W, Herrman U, et al. Distributed deformation in southern and western Tibet during and after the India-Asia collision: An experimental approach[J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99: 19917~19945.
- [35] Liu Qing, Paléoclimates et contraintes chronologiques sur les mouvements récents dans l'ouest du Tibet: failles du Karakorum et de Longmu Co - Gozha Co, lacs en pull-apart de Longmu Co et de Sumxi Co., PhD, Université Paris 7, 1993.
- [36] Gaudemer Y, Tapponnier P, Turcotte D L. River offsets across active strike-slip faults, Ann[J]. *Tect.* 1989, 3:55~76.
- [37] Parrish R R, Tirrul R. U-Pb age of the Baltoro granite, northwest Himalaya, and implications for zircon inheritance and monazite U-Pb systematics[J]. *Geology*. 1989, 17:1076~1079.
- [38] Searle M P, Crawford M B, Rex A J. Field Relations, Geochemistry, Origin and Emplacement of the Baltoro Granite, Central Karakoram Trans[M]. Royal Society, Edinburgh, Earth sciences, 1992, 83:519~538.
- [39] Brown E T, Bendick R, Bourlés D L, et al. Slip rates on the Karakoram fault, Ladakh, India, determined using cosmic ray exposure dating of debris flows and moraines[J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107:ESE7-1-ESE7-13.
- [40] Banerjee P, Burgmann R. Convergence across the northwest Himalaya from GPS measurement[J]. *Geophys. Res. Lett.* 2002, 29, art.no. 1652.
- [41] Armijo R, Tapponnier P, Tonglin H. Late Cenozoic right-lateral strike-slip faulting in southern Tibet[J]. *J. Geophys. Res.*, 1989, 94: 2787~2838.
- [42] Paterson S R, Vernon R H, Tobisch O T. A review of criteria for the identification of magmatic and tectonic foliations in granitoids [J]. *Journal of Structural Geology*, 1989, 11:349~363.
- [43] Vernon R H. Review of microstructural evidence of magmatic and solid-state flow[J]. *Electronic Geosciences*, 2000, 5:2.
- [44] Stünitz H. Syndeformational recrystallization - dynamic or compositionally induced? [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1998, 131, 219~236.
- [45] White S. Tectonic deformation and recrystallisation of oligoclase[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1975, 50:287~304.
- [46] Gapais D. Les Orthogneiss: Structures, mécanismes de déformation et analyse cinématique, Mem[J]. *Doc. CAESS*, 1989, 28, 1~366.
- [47] Gapais D. Shear structures within deformed granites: mechanical and thermal indications[J]. *Geology*, 1989, 17:1144~1147.
- [48] Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, et al. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina[J]. *Tectonophysics*, 1995, 251:3~84.
- [49] Passchier C W, Trouw R A J. *Microtectonics* [M]. Berlin Springer-Verlag.
- [50] Gates A E, Glover L. Alleghanian tectono-thermal evolution of the dextral transcurrent hylas zone, Virginia Piedmont, USA [J]. *J. Struct. Geol.*, 1989, 11:407~419.
- [51] Simpson C, Wintsch R P. Evidence for deformation-induced K-feldspar replacement by myrmekite [J]. *J. Metam. Geol.*, 1989, 7: 261~275.
- [52] Tsurumi J, Hosonuma H, Kanagawa K. Strain localization due to a positive feedback of deformation and myrmekite-forming reaction

- in granite and aplite mylonites along the Hatagawa Shear Zone of NE Japan[J]. *J. Struct. Geol.*, 2003, 25:557~574.
- [53] Tullis T E, Yund R A. Diffusion creep in feldspar aggregates: experimental evidence[J]. *J. Struct. Geol.*, 1991, 13:987~1000.
- [54] Gower J W, Simpson C. Phase boundary mobility in naturally deformed, high-grade quartzofeldspathic rocks: evidence for diffusional creep[J]. *J. Struct. Geol.*, 1992, 14 (3):301~313.
- [55] Jensen L N, Starkey J. Plagioclase microfabrics in a ductile shear zone from the Jotun Nappe, Norway[J]. *J. Struct. Geol.*, 1985, 7 (5):527~539.
- [56] Ji S, Mainprice D. Recrystallization and fabric development in plagioclase[J]. *J. Geol.*, 1990, 98:65~79.
- [57] Olsen T S, Kohlstedt D L. Natural deformation and recrystallisation of some intermediate plagioclase feldspars[J]. *Tectonophysics*, 1985, 111:107~131.
- [58] Olesen N O. Plagioclase fabric development in a high-grade shear zone, Jotunheimen, Norway[J]. *Tectonophysics*, 1987, 142:291~308.
- [59] Passchier C W. Mylonitic deformation in the Saint Barthélemy Massif, French Pyrenees, with emphasis on the genetic relationship between ultramylonite and pseudotachylyte [J]. *GUA Pap. Geol. Ser.*, 1982, 1(16):1~173.
- [60] Tullis Y E, Yund R A. Transition from cataclastic flow to dislocation creep of feldspar: mechanisms and microstructures[J]. *Geology*, 1987, 15:606~609.
- [61] Stesky R M. Mechanisms of high temperature frictional sliding in Westerly granite[J]. *Can. J. Earth Sci.*, 1978, 15:361~375.
- [62] Dunlap W J, Wysoczanski R. Thermal evidence for early Cretaceous metamorphism in the Shyok suture zone and age of the Khardung volcanic rocks, Ladakh, India[J]. *J. Asian Earth Sci.*, 2002, 20:481~490.
- [63] Kapp P, Murphy M A, Yin A, et al. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of western Tibet[J]. *Tectonics*, 2003;22, 3.1~3.21.
- [64] Leloup P H, Arnaud N, Lacassin R, et al. New constraints on the structure, thermochronology and timing of the Ailao Shan - Red River shear zone[J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(B4):6657~6671.
- [65] Arnaud N. Apports de la thermochronologie $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sur feldspath potassique à la connaissance de la tectonique cénozoïque d'Asie, Ph-D thesis[M]. Université Clermont-Ferrand, 1992.
- [66] Avouac J P, Peltzer G. Active tectonics in southern Xinjiang, China: Analysis of terrace riser and normal fault scarp degradation along the Hotan-Qira fault system[J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98:21, 773~21,807.
- [67] Ding Guoyu, Jie Chen, Qinjian Tian, et al. Active faults and magnitudes of left-lateral displacement along the northern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonophysics*, 2004, 380:243~260.
- [68] Meriaux A-S, Ryerson F J, Tapponnier P, et al. Rapid slip along the central Altyn Tagh Fault: Morphochronologic evidence from Cherchen He and Sulamu Tagh[J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109, B06401, doi:10.1029 / 2003JB002558.

Deformation and tectonic evolution of the Karakorum fault, western Tibet

LI Hai-bing^{1,3}, Franck Valli², XU Zhi-qin¹, YANG Jing-sui¹, Paul Tapponnier², Robin Lacassin², CHEN Song-yong¹, QI Xue-xiang¹, Marie-Luce Chevalier²

(1. Key Laboratory of Continental Dynamics, MLR, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Department of Earth Sciences, University of Hong Kong, Hong Kong S.A.R. China;

3. Institut de Physique du Globe de Paris, 75252 Paris, France)

Abstract: The deformation features, age, tectonic evolution and tectonic role of the Karakorum fault (KF) have long been controversial. In the Ayila Ri'gyü area in the southeastern segment of the KF, dextral sheared mylonite and mylonitized gneiss-granite are exposed along the fault. Microstructural study indicates high-temperature, dextral shear features, accompanied by the generation of synkinematic leucogranite. The U-Pb ages recorded by synkinematic crystalline zircons imply that the KF formed at least before 23–25 Ma and its continuous deformation at least continued to ~12 Ma, when the deformation was accompanied by rapid uplift of the Ayila Ri'gyü Range and initiation of the Gar basin. Integrated analysis indicates that the growth process of the KF might be a process of northwest-directed propagation and the result of continuous India-Eurasia collision. The cumulative displacement amount is at least 280 km along the fault, and an average long-term slip rate is ~11 mm/a on the fault. Rigid block kinematic analysis suggests that material of the Qinghai-Tibet Plateau was extruded toward ~108°N at a rate of 16.2 mm/a after ~23–25 Ma.

Key words: ductile shear zone; synkinematic granite; cumulative offset; slip rate; Karakorum fault; Qinghai-Tibet Plateau

About the first author: LI Hai-bing, male, born in 1966, senior researcher of the Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, mainly engages in the study of structural geology and active tectonics; E-mail: lihaibing@ccsd.org.cn.