

阿尔金断裂两侧构造单元的对比 及岩石圈剪切机制

许志琴 杨经绥 张建新 姜 枚 李海兵 崔军文

(中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037)

内容提要 中亚最大的阿尔金走滑断裂系构成了青藏高原的北部边界,阿尔金北缘断裂及阿尔金左行走滑断裂(阿尔金主断裂)所夹持的阿尔金地体自北往南由敦煌地块、北阿尔金加里东俯冲杂岩带、中阿尔金地块及南阿尔金加里东俯冲—碰撞杂岩带组成,研究表明这些单元分别与阿尔金主断裂带东侧的阿拉善地块、北祁连俯冲杂岩带、中—南祁连地块及柴达木北缘加里东俯冲—碰撞杂岩带相对比。特别通过南阿尔金与柴达木北缘榴辉岩带的详细对比,发现它们具有相似的地质背景、产状、矿物组合、岩石地球化学、原岩特征、温度压力条件、退变质作用和围岩特征以及非常接近的峰期变质时代(500~503 Ma 和 495 Ma),可能构成了中国又一条被巨型走滑断裂所切割的高压—超高压变质带(?),并为阿尔金断裂带左行走滑 400 km 的确定提供了科学依据。天然地震探测剖面显示阿尔金主断裂由近直立低速低密度的物质组成,与低角度向南倾的阿尔金北缘断裂之间夹持由高速高密度组成的阿尔金地体。阿尔金北缘断裂与阿尔金主断裂在 80 km 深度处交汇,并继续向南陡倾下插到 150 km,反映出塔里木地块向南陆内俯冲于阿尔金山及柴达木盆地之下。代表上地幔物质剪流动矢量的高强度各向异性,显示了剪切作用可抵达上地幔,阿尔金断裂的岩石圈剪切作用可能与塔里木地块往南俯冲有关。

关键词 左行走滑 俯冲—碰撞杂岩带 构造单元对比 岩石圈剪切断裂 陆内俯冲

阿尔金断裂带位于青藏高原北部边缘,为亚洲大陆内部巨型的 NEE 向断裂体系,它以具有巨大左行走滑位移和非常醒目的线性特征而引起中外地质学家的注目,断裂的东北端切割祁连造山带及阿拉善地块,西南端插入昆仑造山带,把塔里木地块和柴达木地块分隔开来,一些重要的构造线(如高压变质岩和蛇绿岩等)至阿尔金断裂带均突然终止,或被改变方向。其动力学意义可与中国东部的郯庐断裂系以及美国西部的圣安德列斯断裂相媲美。不少学者将之纳入青藏高原隆升及演化的统一地球动力学体系,并认为阿尔金断裂的研究是解决青藏高原隆升和动力学问题的关键所在^[1~4]。

然而,长期以来,人们的注意力主要集中在对阿尔金断裂的巨型走滑断裂系的研究^[2, 5~12],而对阿尔金断裂系所夹持的古地质体的研究涉及较少,尤其是很少把它们与相邻的构造单元特别是祁连造山带联系起来。近年来,一些学者开始注意到对阿尔金断裂系所夹持的蛇绿岩、高压变质岩及前寒武纪基底变质岩的研究^[13~20];少数学者已开始注意到阿尔金断裂系两侧地质体的相似性,并进行初步的对比^[21~25]。葛肖虹等^[24, 25]根据区域对比认为:柴达木盆

注:本文为原地质矿产部“九五”重点基金项目(编号 9501106)、国家自然科学基金重点项目(编号 49732027)和国家“973”项目成果。

本文 1999 年 6 月收到,7 月改回,任希飞编辑。

地(地块)对应于南塔里木盆地(地块);祁连山对应于塔里木中部(其中北祁连对应于满加尔拗陷,中祁连对应于塔中隆起);北塔里木地块对应于阿拉善地块。根据几年来我们对阿尔金和祁连山进行的地质及地球物理研究,认为阿尔金断裂带不仅仅是一个巨型断裂系,也是一个经历过多期复杂地质演化历史,由不同层次、不同时期和形成于不同构造环境地质体所组成的造山带,并与相邻造山带有着密不可分的关系。在阿尔金山中,存在近EW向(NWW—SEE)和NEE—SWW两个方向的构造线。前者主要由一些古老地质体所组成,如蛇绿岩、俯冲杂岩、中深变质岩石等,记录了阿尔金主断裂活动之前的地质演化历史,与祁连山及柴达木北缘可以对比;而后者切割了前者,与阿尔金左行走滑活动有关。横穿阿尔金山的地震探测也显示,阿尔金断裂带的深部物质主要由两部分所组成,一部分为低速低密度的物质,其上地幔具有NEE向各向异性;另一部分为被低速低密度物质所围绕的由高速高密度物质所组成的阿尔金地体,具有近EW向的各向异性。本文通过对阿尔金山与祁连山及柴达木北缘的构造单元对比,特别是最近分别在南阿尔金和柴达木北缘所发现的榴辉岩的详细对比,来确定阿尔金断裂可能的最大走滑量;结合深部地震探测,探讨现今阿尔金断裂带的特征、性质及形成机制。

1 阿尔金地体的基本组成及与祁连山—柴达木北缘的对比

阿尔金地体主要是指阿尔金北缘逆冲断裂和阿尔金南缘走滑断裂(即阿尔金主断裂)之间的地区,它主要由不同时代的近EW向分布的古地质体所组成(图1),并与两侧的边界断裂有一定的交角。这些古地质体从北向南包括:

(1) 敦煌地块 分布在阿尔金构造带东北边缘(北塔里木南缘),主要由Ar—Pt₁敦煌群和米兰群角闪岩相—麻粒岩相的变质杂岩所组成,其形成时代为2460~2789 Ma^[14, 25, 27],这套岩石被认为是塔里木地块古老变质基底的一部分。

(2) 北阿尔金俯冲杂岩带 主要分布在红柳沟—拉配泉一带,与北部的太古代米兰群和南部的中新元古代岩石为断层接触。由浅变质的火山岩、火山碎屑岩及碎屑岩所组成,并伴生具蛇绿岩特征的超基性岩(蛇纹岩)、辉长岩和基性熔岩^[28],并在红柳沟发现有代表洋脊扩张的基性岩墙群,在拉配泉等地还具有保存较好的枕状玄武岩。这些岩石的变质程度以浅变质的低绿片岩相—绿片岩相为主,局部地段发现有含蓝闪石的绿片岩^①及高压泥质岩的存在^[13, 29]。变基性火山岩中的角闪岩的Ar—Ar测定获得457 Ma的年龄^②。

(3) 中阿尔金地块 主要由古元古界(?)阿尔金群及中、新元古界的长城系,蓟县系,青白口系和震旦系所组成。阿尔金群长期以来被认为是以角闪岩相为主的变质杂岩,并作为塔里木变质基底的一部分^[25]。中新元古代的岩石主要由浅变质的稳定的大陆边缘环境的碎屑岩、碳酸盐岩所组成,夹少量火山岩,与北部的北阿尔金俯冲杂岩带为断层接触关系。其中碳酸盐岩中含有叠层石化石,并作为其时代的主要依据。

(4) 西南阿尔金俯冲—碰撞杂岩带 近年来在阿尔金的西南部原定为阿尔金群中发现有高压榴辉岩^[15, 18]及具有孔兹岩系特征的麻粒岩相岩石,初步确定其变质峰期时代为450~500 Ma^[18, 19]。因此,在阿尔金构造带的南侧可能存在一条加里东期的俯冲—碰撞杂岩带,这些榴辉岩及麻粒岩相岩石可能就是其山根岩石的出露部分。

① 青海省地质局, 1:20万俄博梁地质报告, 1991.

② 张建新, 阿尔金构造带西段加里东期山根的初步研究, 中国地质科学院博士论文, 1998.

以上4个不同时代构造单元由近EW向的剪切带(断裂)为边界,新生代以来重新活动,显示出活动构造特征。

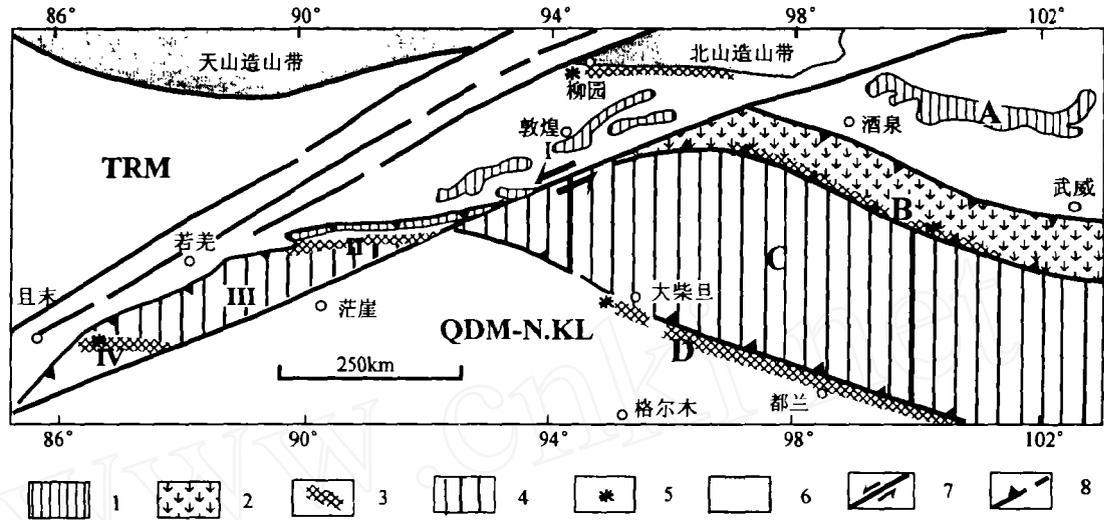


图1 阿尔金地体与祁连—柴达木北缘构造单元对比图

(原始资料据文献[15,18,27,32,33])

Fig.1 Map showing the tectonic units comparison between Altun terrane and Qilian-northern Qaidam

(original data from references [15,18,27,32,33])

1—前寒武纪变质基底; 2—加里东期火山岛弧带; 3—俯冲及碰撞杂岩带; 4—中—南阿尔金及中祁连地块; 5—榴辉岩; 6—相邻造山带; 7—左行走滑断裂; 8—逆冲断裂; I—敦煌地块; II—北阿尔金俯冲杂岩带; III—中阿尔金地块; IV—南阿尔金俯冲—碰撞杂岩带; A—阿拉善地块; B—北祁连俯冲杂岩带; C—中南祁连地块; D—柴达木北缘俯冲—碰撞杂岩带; TRM—塔里木地块; QDM—N. KL—柴达木—昆北地块

1—Precambrian metamorphic basement; 2—Caledonian volcanic island arc zone; 3—subduction and collision complex zone; 4—central Altun and central Qilian block; 5—eclogite; 6—adjacent orogenic belt; 7—sinistral strike-slip fault; 8—thrust fault; I—Dunhuang block; II—northern Altun subduction complex zone; III—central Altun block; IV—southern Altun subduction collision complex zone; A—Alxa block; B—northern Qilian subduction complex zone; C—central-southern Qilian block; D—northern Qaidam subduction-collisional complex zone; TRM—Tarim massif; QDM—N. KL—Qaidam—northern Kunlun massif

阿尔金地体中的这4个地质单元可分别与阿尔金断裂东侧的阿拉善地块、北祁连俯冲杂岩带、中南祁连地块及柴达木北缘俯冲—碰撞杂岩带对比(表1)。

阿拉善地块主要由阿拉善群和龙首山群所组成,为一套中深变质的变沉积岩及变火山岩,其岩石组合与敦煌地块非常相似,这套岩石被年龄为1719 Ma的花岗岩侵入,显示其时代应为古元古代^[30]。

北祁连俯冲杂岩带主要由蛇绿岩、蛇绿混杂岩和高压蓝片岩所组成,蛇绿岩的时代为早寒武世—奥陶纪,一些学者认为还可能有代表早期裂谷作用的新元古代的蛇绿岩^[31];高压蓝片岩的时代为440~460 Ma^[32~34]。

中南祁连地块,主要由前寒武纪变质基底岩石所组成,古元古代岩石被称之为煌源群、化隆群等,由角闪岩相为主的变质岩石所组成;中新元古代岩石被称之为党河群(相当于长城系)

和托莱南山群(相当于蓟县—青白口系),由浅变质的碳酸盐岩、碎屑岩夹火山岩所组成^[35]。

表1 阿尔金山和祁连山及邻区构造单元对比

Table 1 The comparison of tectonic units between Altun, Qilian and adjacent area

祁连山及邻区	阿尔金山
阿拉善地块	敦煌地块
阿拉善地块南大陆边缘	不明显
北祁连加里东火山岛弧带	?
北祁连俯冲杂岩带	北阿尔金俯冲杂岩带
祁连地块	阿尔金地块
柴达木北缘俯冲—杂岩带	南阿尔金俯冲—碰撞杂岩带

最近,在柴达木盆地北缘,在原定为古元古界达肯达坂群中发现有榴辉岩和石榴橄榄岩^[36,37],本文的研究显示其榴辉岩的时代为加里东期,因此,它们组成了柴达木北缘加里东俯冲—碰撞杂岩带,可能为加里东造山带山根岩石。

这些不同时代和性质的构造单元呈 NWW 向分布,与阿尔金山中不同构造单元的边界相似,主要以韧性剪切带及断层为边界,它们在新生代又重新活动。

2 南阿尔金及柴达木北缘俯冲—碰撞杂岩带的对比

——又一条被巨型走滑断裂切割的高压—超高压变质带(?)

在中国东部的郯庐断裂两侧,分布有著名的大别—苏鲁高压—超高压变质带,构成世界上最大规模的高压—超高压变质带,并被许多学者作为郯庐断裂巨大左行位移的证据之一^[38]。近年来,在中国西北部的阿尔金山南部及柴达木盆地的北缘,也先后发现有分布在长英质片麻岩中的榴辉岩^[35,36],它们位于亚洲大陆最大的走滑断裂——阿尔金断裂的两侧。研究表明这两处的榴辉岩在野外产状、围岩特征、岩石及矿物组合、形成的 *PT* 条件、地球化学及原岩特征以及它们的形成时代均非常相似。因此,我们认为阿尔金榴辉岩和柴达木北缘榴辉岩可能同为加里东期陆壳俯冲及碰撞造山作用的产物,很可能是继大别—苏鲁高压—超高压变质带之后,在中国发现的又一条被巨型走滑断裂所切割的高压—超高压变质带(?)。

2.1 阿尔金南段榴辉岩的基本特征及形成时代

2.1.1 榴辉岩的地质背景及产状

阿尔金南段的榴辉岩分布在且末的江杂勒萨依沟—玉石矿沟一带^[18],呈透镜状或布丁状产于原认为是古元古界阿尔金群的片麻岩之中^[26],其透镜体的长轴与片麻岩的片麻理走向一致。这些片麻岩主要包括含石榴石的长英质片麻岩、含石榴石的斜长角闪片麻岩等,片麻理的走向为 $90^{\circ}\sim 120^{\circ}$,总体上显示出角闪岩相的矿物组合,局部也可能达到高角闪岩相甚至麻粒岩相^[1],还没有发现有高压矿物组合的残留。

2.1.2 榴辉岩的矿物学及岩石学特征

榴辉岩总体上呈等粒状,具有弱的拉伸线理和叶理,主要由绿辉石和石榴石定向排列所组成。峰期榴辉岩相的矿物组合为石榴石+绿辉石+金红石+多硅白云母+石英,电子探针成

[1] 张建新. 阿尔金构造带西段加里东期山根的初步研究. 中国地质科学院博士论文, 1998.

分析显示绿辉石的硬玉分子含量为 30~36 mol%;大部分榴辉岩的石榴石较细(0.5~1.0 mm),成分较均匀,不显示明显的成分环带,其端元分子为:Prp28~34,Alm35~42,Grs27~32,Sps0.8~1.3(本文出现的英文矿物代号均引自 R. Kretz, 1983^[40]),而少部分榴辉岩的石榴石颗粒较粗(>3 mm),且具有明显的成分环带,其端元分子为:Prp17~40,Alm30~53,Grs22~31,Sps0.8~4.5。从核部到边部,MgO、CaO 升高,MnO、FeO 降低,显示出进变质生长环带的特征^[41,42]。在最边部,石榴石 MgO、CaO 又有所减小,MnO 和 FeO 则有升高的趋势,显示出退变质过程中形成的扩散环带特征。多硅白云母的硅原子数为 3.49(基于 11 个氧原子)。

榴辉岩显示出明显的减压结构:一些绿辉石边部以形成低 Na 的单斜辉石(Jd 为 15~20%

(mol))和奥长石($An=10\sim 20$)组成的蠕虫状后成合晶为特征;多硅白云母的边部形成黑云母和奥长石($An=10\sim 20$)组成的后成合晶。石榴石的边部则多被角闪石和斜长石组成的次生边或冠状体所围绕。金红石则大多具有钛铁矿边。

稀土元素的球粒陨石标准化配分模式主要以轻稀土平坦和略富集为特征,没有明显的 Eu 异常或略具正异常。显示具有“E”或“T”型 MORB(过渡型洋脊拉斑玄武岩)的特征(图 2(a))。少数样品显示出轻稀土亏损的特征。榴辉岩全岩的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}=0.1686$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512704$, $\epsilon_{\text{Nd}}(500\text{ Ma})=3.2$, $\epsilon_{\text{Nd}}(0)=1.19$,为亏损地幔来源,可能受到地壳物质的轻度混染。

2.1.3 形成的温压条件

利用 Grt-Cpx 地质温度计,再根据 $Ab=Jd+Qtz$ 的变质反应压力计,估算其榴辉岩峰期的 $t=731\sim 811\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P>1.5\text{ GPa}$ 。如果利用的 Grt-Omp-Phe 压力计和 Grt-Omp 温度计^[43]和 GeO-Calc 程序^[44],得到的温压条件为 $t=860\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=3.0\text{ GPa}$ (图 3(a)),这种温压条件已在柯石英的稳定范围内,但到目前为止,还没有发现有柯石英的存在。在减压过程中,还经历了麻粒岩相($P=1.1\sim 1.4\text{ GPa}$, $t=750\text{ }^{\circ}\text{C}$)及角闪岩相($P=0.63\sim 0.95\text{ GPa}$, $t=619\sim 738\text{ }^{\circ}\text{C}$)的变质

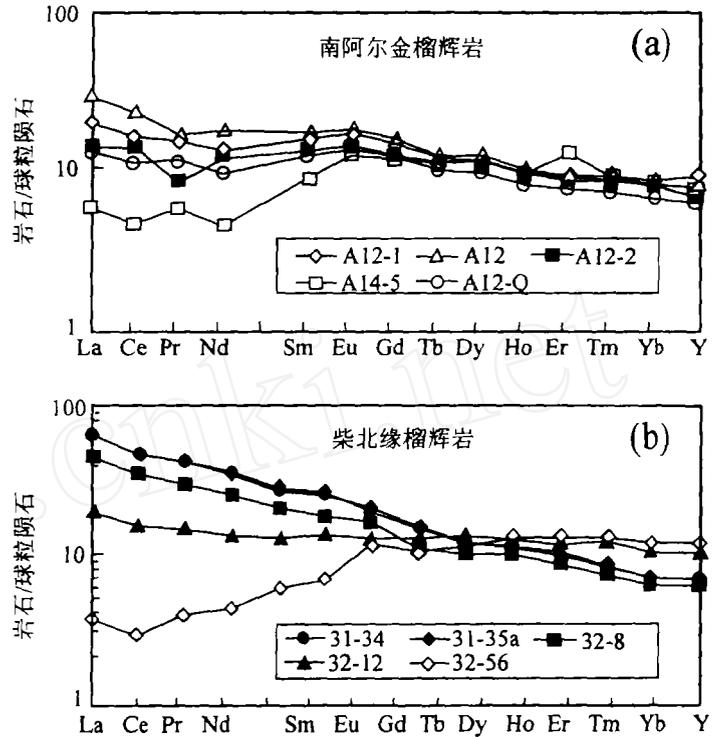


图2 南阿尔金(a)及柴达木北缘(b)榴辉岩的稀土元素球粒陨石标准化图

Fig. 2 The chondrite-normalized REE distribution pattern for the eclogites from southern Altun(a) and northern Qaidam (b)

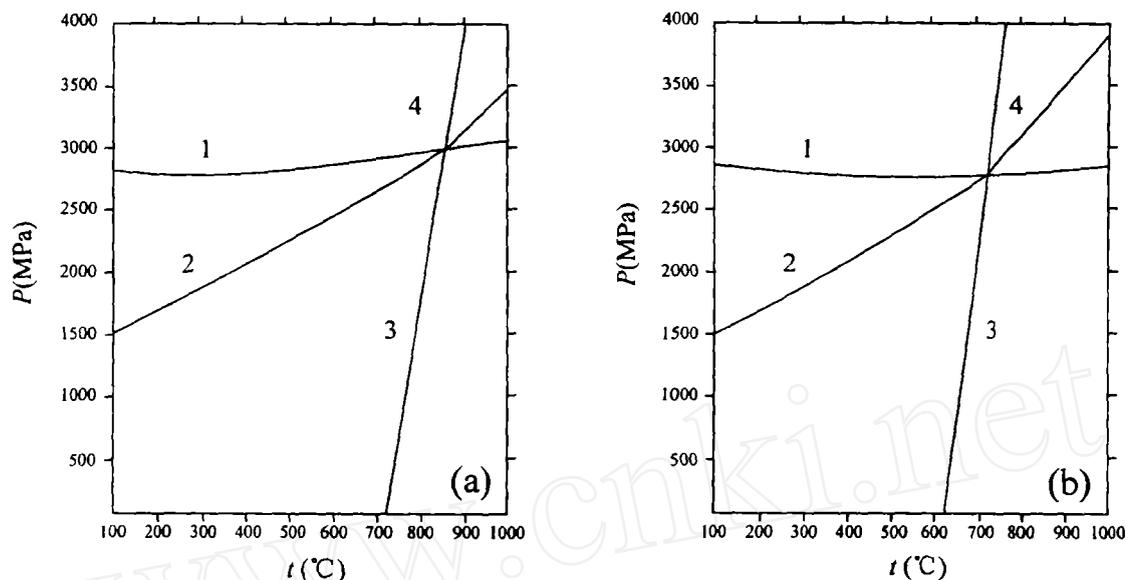


图3 南阿尔金(a)及柴达木北缘(b)榴辉岩峰期的 $P-t$ 条件

Fig. 3 The $P-t$ diagram showing peak metamorphic condition for southern Altun(a) and northern Qaidam

1, 2, 3, 4 分别代表单变反应曲线 (1, 2, 3 and 4 represent univariant reaction lines);

1: $3\text{Al-Cel} + 2\text{Gr} + \text{Prp} = 3\text{Ms} + 6\text{Di}$; 2: $\text{Alm} + 3\text{Al-Cel} + 2\text{Grt} = \text{Ms} + 3\text{Hed} + 6\text{Di}$; 3: $3\text{Di} + \text{Alm} = 3\text{Hed} + \text{Prp}$;

4: $2\text{Alm} + 3\text{Al-Cel} + 2\text{Gr} = \text{Prp} + 3\text{Ms} + 6\text{Hed}$

Al-Cel: 铝绿磷石, 其它矿物缩写据 R. Kretz, 1983^[36]

Al-Cel: Aluminium-Celedonite, other abbreviations for minerals after Kretz(1983)^[36]

作用, 构成顺时针 Pt 轨迹^[1]。

2.1.4 榴辉岩的形成时代

选择新鲜退变质较弱的榴辉岩分别进行 Sm-Nd 全岩-矿物等时线和锆石的 U-Pb 年代学测定, 其中测得全岩-石榴石-绿辉石的 Sm-Nd 等时线年龄为 $500 \pm 10 \text{ Ma}$; 4 组锆石 U-Pb 同位素测定获得的表面年龄很好地落在一致线上, 并得出其权重平均值为 $503.9 \pm 5.3 \text{ Ma}$ ^[18] (图 4(a))。两种方法获得的基本一致的年龄数据反映了榴辉岩的峰期变质时代。

除了榴辉岩外, 在榴辉岩出露的南侧 30 km 的吐拉一带还发现由富铝片麻岩和夹于片麻岩中的石榴角闪二辉麻粒岩所组成的孔兹岩系, 其中石榴角闪二辉麻粒岩中保留有早期高压麻粒岩的特征^[1], 其 U-Pb 和 Ar-Ar 同位素测定显示其峰期变质时代为 $447 \sim 462 \text{ Ma}$ ^[19], 与榴辉岩一起构成了代表加里东山根的俯冲-碰撞杂岩带。

2.2 柴达木北缘榴辉岩的基本特征及形成时代

2.2.1 柴达木北缘榴辉岩的地质背景及产状

柴达木北缘榴辉岩发现于柴达木盆地北缘大柴旦镇西北的鱼卡河附近, 1m 到数十米大小不等的榴辉岩块体呈透镜状分布于达肯大坂群 ($Pt_1(?)$) 的含石榴石的片麻岩(片岩)之

[1] 张建新. 阿尔金构造带西段加里东期山根的初步研究. 中国地质科学院博士论文, 1998.

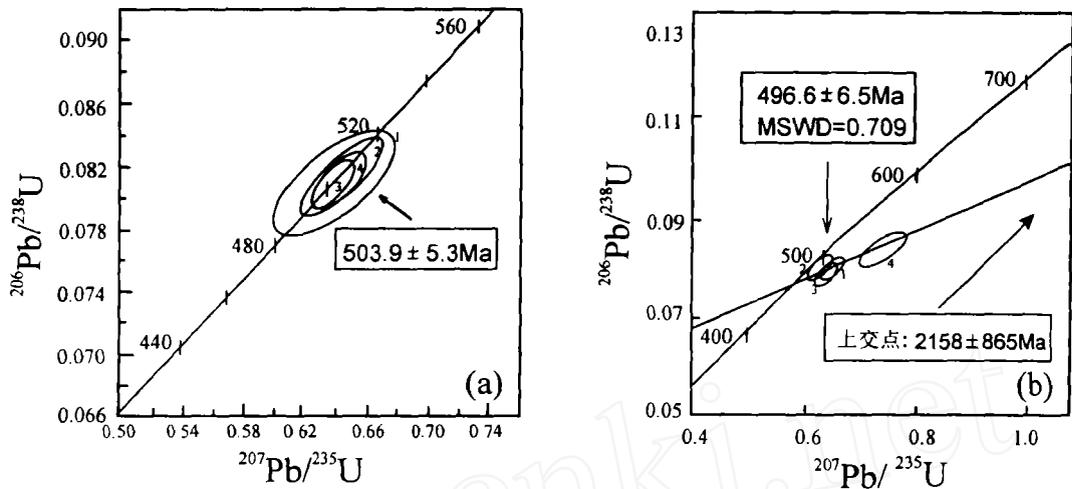


图 4 南阿尔金(a)及柴达木北缘(b)榴辉岩的锆石 U-Pb 测定结果

Fig. 4 U-Pb analytical results of zircons for eclogites of southern Altun(a) and northern Qaidam(b)

中^[37]。榴辉岩透镜体的长轴平行于 NWW—SEE 走向的片麻理(片岩)围岩。围岩主要有含石榴石的花岗质片麻岩、斜长角闪质片麻岩、含石墨的片麻岩及石榴白云母石英片岩等,还没有发现高压矿物组合,它们长期以来被归为古元古代的达肯大坂群,作为柴达木地块的变质基底岩石^[35],但缺少同位素证据。

2.2.2 岩石学及矿物学特征

保存较好的榴辉岩总体上呈等粒状,部分榴辉岩显示出由多硅白云母和绿辉石定向分布所组成的叶理和拉伸线理。峰期榴辉岩相的矿物组合为石榴石+绿辉石+金红石+多硅白云母+石英+黝帘石,具有少量退变质作用形成的角闪石和斜长石。绿辉石的硬玉分子含量为 38 mol%~41 mol%;多硅白云母的硅原子数为 3.35~3.49(基于 11 个氧原子)。一些榴辉岩中的石榴石成分变化较大,其端元组分为:Prp10~32,Alm39~56,Grs22~36,Sps0.6~9,具有明显的成分环带,从石榴石的核部到边部,MgO 增加,CaO 在略有增加后明显降低,而 MnO 和 FeO 则明显减小。这些特征显示出进变质生长环带的特征。在最边部的狭窄范围内,石榴石的 MgO 和 CaO 又有减小的趋势,MnO 和 FeO 则有升高的趋势,是退变质过程中形成的扩散环带。总体上,虽然与阿尔金榴辉岩中石榴石的成分环带有所区别,但它们都具有进变质生长环带和最边部很窄范围的退变质扩散环带,显示它们在形成过程中具有类似热动力条件。

榴辉岩具有明显的减压结构,在绿辉石边部形成低 Na 的单斜辉石和斜长石组成的蠕虫状或毛发状后合成晶为特征;石榴石的边部则多被角闪石和斜长石组成的次生边或冠状体所围绕。金红石则大多具有钛铁矿的退变边。

与南阿尔金榴辉岩相似,柴达木北缘榴辉岩的稀土元素的球粒陨石标准化配分模式主要以轻稀土平坦、略富集和中度富集为特征,没有明显的 Eu 异常。显示具有“E”或“T”型 MORB(过渡型洋脊拉斑玄武岩)的特征,LREE 中度富集的稀土特征可能与榴辉岩的原岩受到地壳物质的混染有关。少数样品显示出轻稀土亏损的特征(图 2(b))。榴辉岩全岩的¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd=0.1687,¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.512677, $\epsilon_{Nd}(500\text{ Ma})=2.6$, $\epsilon_{Nd}(0)=0.65$,为亏损地幔来源,但可能受

到地壳物质的混染。

2.2.3 形成的温压条件

杨经绥等^[37]根据 Grt-Cpx 地质温度计和 $Ab=Jd+Qtz$ 的变质反应压力计,估算其榴辉岩峰期的 $t=722\pm 123\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=2.2\text{ GPa}$ 。我们进一步利用的 Grt-Omp-Phe 压力计和 Grt-Omp 温度计^[43]和 Ge0-Calc 程序^[44],得到的温压条件为 $t=730\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=2.8\text{ GPa}$ (图 3(b))。这种温压条件与分布在同一套达肯达坂群片麻岩中的石榴石橄榄岩的峰期变质温度相似^[36],已进入柯石英的稳定范围,但到目前为止,还没有发现有确切柯石英的存在。虽然李怀坤等^[45]等报道了柴达木北缘榴辉岩中发现有柯石英,但从文中的照片和拉曼谱线来看,所确定柯石英的 521 峰值只是背景值。对其退变质的 $P-t$ 条件还未估算,但从与阿尔金榴辉岩类似的减压结构和退变质矿物组合来看,应具有与阿尔金榴辉岩相似的退变条件和 $P-t$ 轨迹。

2.2.4 峰期及折返年龄

选择保持较好的榴辉岩分别进行锆石的 U-Pb 和同位素 Ar-Ar 同位素测定,测定结果见表 1 和图 4(b)和图 5。从榴辉岩中选出的 1、2、3 号锆石具有较好的多晶面发育,表现出变质锆石的特征,其测定结果显示 t_{206}, t_{207} 表面年龄在误差范围内一致,并大致落在一致线上,并得出 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄统计权重平均值为 $494.6\pm 18\text{ Ma}$,代表峰期榴辉岩相变质的年龄。4 号锆石点远离一致线,得到古元古代的上交点年龄,可能与原岩受到古元古代地壳的混染有关,这与稀土元素和 Nd 同位素的结果一致。

同样样品榴辉岩的多硅白云母被分选出用于 $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$ 年代学测定。测定结果获得的坪年龄为 $466.7\pm 1.2\text{ Ma}$,等时线年龄为 465.94 Ma ,此年龄值代表了榴辉岩在折返过程中的冷却年龄。

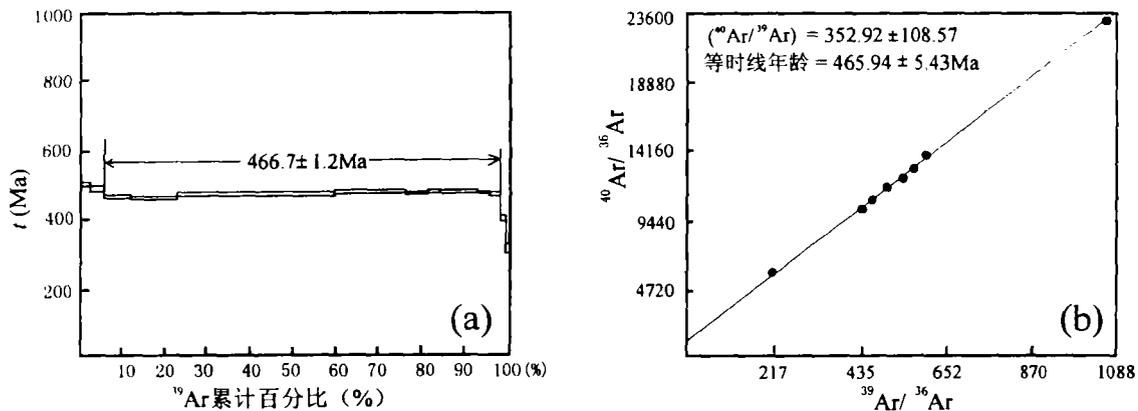


图 5 柴达木北缘榴辉岩多硅白云母的年龄谱(a)及等时线(b)

Fig. 5 The age spectra(a) and isochron diagram(b) of phengite from eclogite of northern Qaidam

除榴辉岩外,柴达木北缘还具有石榴橄榄岩、石榴辉石岩(高压麻粒岩?)等,虽然还缺少年代学证据,但从它们的岩石学特征及产出状态来看,是与榴辉岩一起构成了加里东期山根的俯冲-碰撞杂岩带。

2.3 南阿尔金—柴达木北缘加里东期俯冲—碰撞杂岩带——阿尔金左行平移 400 km 的证据

由于榴辉岩特殊的产出环境,把它与邻区所出露的榴辉岩进行对比将具有重要的区域构造意义。就目前的资料,阿尔金构造带及邻区有4处发现有榴辉岩,除南阿尔金以外,其它3处分别是柴达木北缘大柴旦、北山柳园和北祁连中段^[27,32,37]。北祁连的榴辉岩与高压蓝片岩和具有洋壳残片性质的蛇绿岩伴生,其形成温压为 $t=340\pm 10\text{C}$, $P=0.8\pm 0.1\text{GPa}$ ^[32],这是典型的 Franciscan 型的“冷”榴辉岩^[46],显然与本文所讨论的榴辉岩不同。而柴达木北缘大柴旦榴辉岩和北山柳园的榴辉岩则与阿尔金西段的榴辉岩相似,它们均产在长英质片麻岩围岩中,其围岩均被定为是古元古代的、以角闪岩相变质作用为特征的岩石,其形成温度都大致在 $700\sim 800\text{C}$ 之间,压力大于 1.5GPa ^[27,37]。北山柳园的榴辉岩地质体分布在阿尔金主断层东段北侧的北山地区,敦煌地块的北侧,与阿尔金西段榴辉岩处于阿尔金主断裂同一侧,且相隔甚远,因此,很难把它与阿尔金南段的榴辉岩地质体联系起来,其区域构造意义有待于进一步的研究。柴达木北缘大柴旦榴辉岩地质体分布在阿尔金主断裂的东侧,通过以上分别对它们的讨论,可以看出这两处的榴辉岩的地质背景、产状、矿物组合、岩石地球化学及原岩特征、形成温压条件、退变质作用、围岩特征以及形成时代等均非常相似。因此,我们认为,阿尔金西段的榴辉岩和柴达木北缘的榴辉岩可能同为加里东期的大陆俯冲及陆—陆碰撞造山作用的产物,形成同一条俯冲—碰撞杂岩带,后来被阿尔金断裂的左行平移作用所切割,构成了继被郯庐断裂所切割的大别—苏鲁高压—超高压变质带后,在中国发现的又一条被巨型走滑断裂所切割的高压—超高压变质带(?)。如按它们现在产状及分布特征,结合阿尔金及柴达木北缘—祁连地区其它地质体的对比研究,估计阿尔金断裂的位移大约在 400 km 左右。

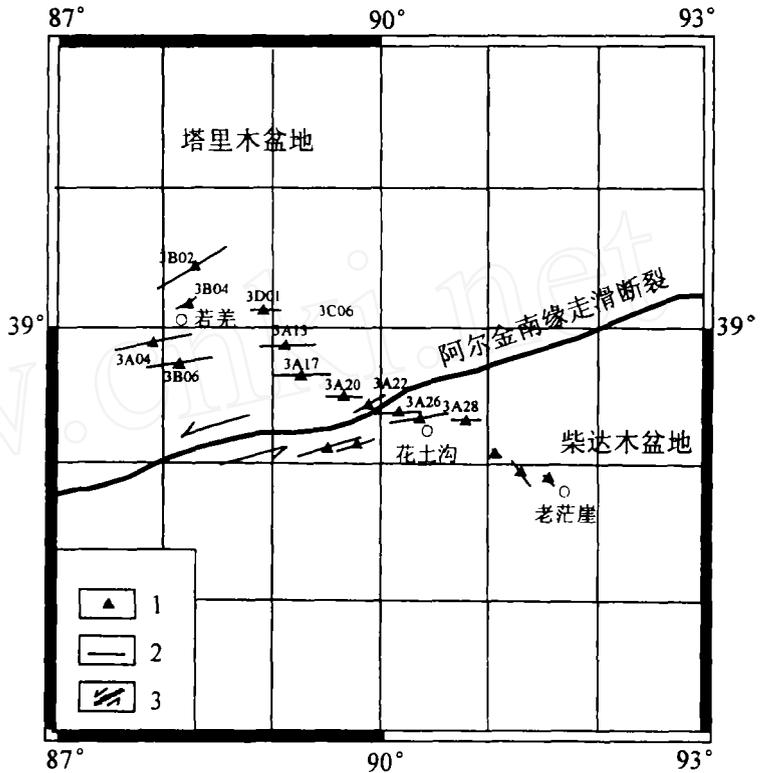


图6 横穿阿尔金山的SKS波各相异性图

Fig. 6 The anisotropy of SKS wave across the Altun Mountains

1—三分量台站; 2—SKS波各相异性的方向和强度

(线段的长度代表强度的大小); 3—走滑断裂

1—3-component stations; 2—the direction and magnitude of anisotropy
(the length of bars represents the magnitude of anisotropy); 3—strike-slip fault

难把它与阿尔金南段的榴辉岩地质体联系起来,其区域构造意义有待于进一步的研究。柴达木北缘大柴旦榴辉岩地质体分布在阿尔金主断裂的东侧,通过以上分别对它们的讨论,可以看出这两处的榴辉岩的地质背景、产状、矿物组合、岩石地球化学及原岩特征、形成温压条件、退变质作用、围岩特征以及形成时代等均非常相似。因此,我们认为,阿尔金西段的榴辉岩和柴达木北缘的榴辉岩可能同为加里东期的大陆俯冲及陆—陆碰撞造山作用的产物,形成同一条俯冲—碰撞杂岩带,后来被阿尔金断裂的左行平移作用所切割,构成了继被郯庐断裂所切割的大别—苏鲁高压—超高压变质带后,在中国发现的又一条被巨型走滑断裂所切割的高压—超高压变质带(?)。如按它们现在产状及分布特征,结合阿尔金及柴达木北缘—祁连地区其它地质体的对比研究,估计阿尔金断裂的位移大约在 400 km 左右。

3 岩石圈剪切断裂及陆内俯冲作用

阿尔金走滑断裂带在平面上由一系列平行断裂组成,主断裂位于南侧,在地表宽 6~15 km,长 1600 km,总体为直线型,SW 端呈弧形^[7]。阿尔金主断裂具明显的走滑性质,现代水系的被切割及沿主断裂大量地震活动显示其是一条至今仍在活动的走滑断裂。以走滑断裂为中心,出现两侧反向逆冲、在阿尔金断裂带北西侧为阿尔金北缘逆冲断裂,其后部发育同倾向的正断层,使山体明显垂向挤出。

最近中法乌图美仁—茫崖—若羌天然地震探测剖面提示了阿尔金主断裂是一条近直立的岩石圈断裂,延深达 100~140 km^[47]。阿尔金主断层的深部在地球物理场上显示宽为 40 km 的低速带,由低速低密度物质组成,反映阿尔金主断层的深部可能为韧性的糜棱岩所组成,深部的韧性剪切加热使该剖面上的 100 km 深度的等温面上拱至 70 km 深处^[48],表示可能存在部分熔融作用。代表上地幔物质剪切流动矢量的 SKS 波各向异性强度大,且与断裂带的 NEE—SWW 向一致(图 6),反映了该断裂带可延至上地幔,并在深部同样发生了剪切位移。

天然地震探测还显示阿尔金山与塔里木盆地为界的阿尔金北缘逆冲断裂由向 SE 方向倾斜的低速层所组成,在 20 km 深度左右宽度为 5 km,它以 30°倾角向南东下插到 80 km 深处,并与近直立的深达岩石圈地幔的阿尔金南缘走滑断裂(即阿尔金主断裂)交汇,在此深度其低速层的宽度增加到 15 km。阿尔金北缘逆冲断裂与阿尔金主断裂交汇后,继续向南陡倾下插到 150 km^[48],反映出塔里木地块向南陆内俯冲于阿尔金山及柴达木盆地之下。近 EW 向的各相异性矢量代表俯冲过程中上地幔物质的滑移方向。

由两条边界断裂所控制的以古地质体为特征的阿尔金地体在深部呈现宽 100 km,深 50 km 的高密度、高波速体,被低速低密度物质所围绕。

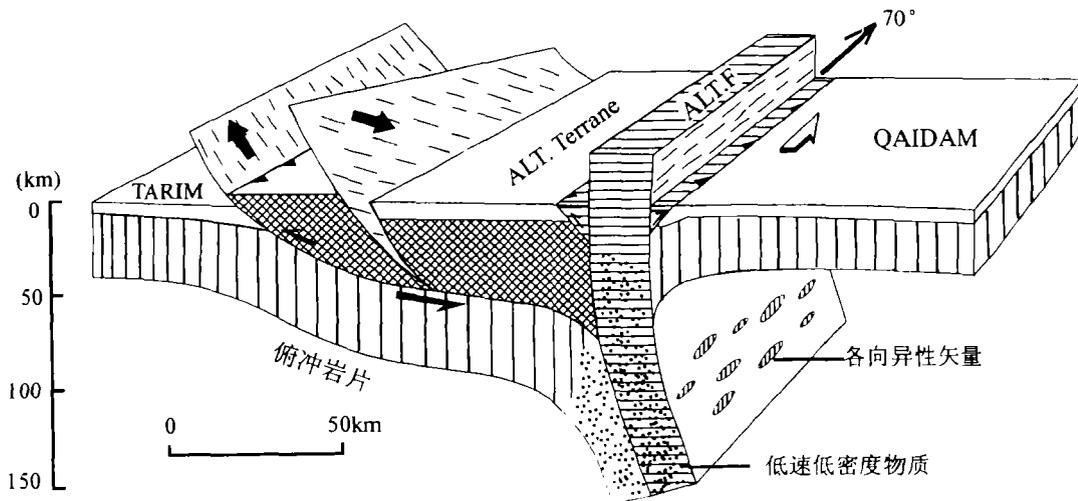


图 7 阿尔金断裂带的构造模式

Fig. 7 Tectonic model of the Altun fault belt

TARIM—塔里木地块; ALT. Terrane—阿尔金地体; ALT. F—阿尔金主断裂; QAIDAM—柴达木地块
TARIM—Tarim block; ALT. Terrane—Altun terrane; ALT. F—Altun main fault; QAIDAM—Qaidam block

综合阿尔金的深部探测资料,结合其地表地质特征,得到图7所示的反映阿尔金现今性质及特征的模式,可以看出,阿尔金断裂带主要由阿尔金走滑主断裂和阿尔金北缘逆冲断裂及两者所夹的阿尔金楔形体(阿尔金地体)所组成。塔里木地块沿阿尔金北缘逆冲断裂陆内斜向俯冲于阿尔金之下,并在深部与阿尔金主断裂会合并继续以陡角度向南俯冲于柴达木盆地之下。

4 初步结论

(1) 根据阿尔金主断裂两侧构造单元,特别是高压—超高压俯冲—碰撞杂岩带(?)的对比,获得阿尔金断裂左行平移400 km的证据。

(2) 阿尔金断裂为岩石圈剪切断裂,剪切作用可抵达上地幔,并伴随局部熔融作用,阿尔金岩石圈剪切作用可能与塔里木地块向南的俯冲作用有关。

(3) 笔者曾提出青藏高原周缘内向陆内俯冲作用的动力学模式^[49,50],在青藏高原北部得到进一步的验证。

参加野外工作的还有张泽明,吴才来,陈文,史仁灯等。肖序常院士仔细审阅了全文,并提出了宝贵意见。天津地质矿产研究所李惠民研究员在年代学研究方面给予很大的帮助及支持,中科院地质所王清晨研究员提供了GeO-Calc程序,特此感谢!

参 考 文 献

- 1 Tapponnier P, Molnar P. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics. *Nature*, 1976, 264: 319~324.
- 2 Peltzer G, Tapponnier P. Formation and evolution of strike-slip faults, rifts, and basins during the India-Asia collision: An experimental approach. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93(12):15085~15117.
- 3 Avouac J P, Peltzer G. Kinematic model of active deformation in central Asia. from these de Doctorat de L'Universite Paris, VI., 1995.
- 4 许志琴,崔军文,张建新. 大陆山链的变形构造动力学. 北京:冶金工业出版社, 1996.
- 5 郑剑东. 阿尔金断裂带的几何学研究. *中国区域地质*, 1991, 36: 54~59.
- 6 崔军文,邓晋福,唐哲民. 青藏高原北缘变形构造动力学的一些新认识. *中国地质科学院院报*, 1994, 29: 145~146.
- 7 国家地震局“阿尔金活动断裂带”课题组. 阿尔金活动断裂带. 北京:地震出版社, 1992.
- 8 丁国瑜. 阿尔金断裂的古地震与分段. *第四纪研究*, 1995, 2: 97~106.
- 9 Zhou D, Graham S A. Extrusion of the Altyn Tagh wedge: A kinematic model for the Altyn Tagh and palinspastic reconstruction of north China. *Geology*, 1996, 24(5): 427~430.
- 10 Wang E Q. Displacement and timing along the northern strand of the Altyn Tagh fault zone, northern Tibet. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1997, 150: 55~64.
- 11 张建新,许志琴,崔军文. 一个韧性转换挤压带的变形分解作用——以阿尔金断裂带东段为例. *地质论评*, 1998, 44(4): 348~356.
- 12 周勇,潘裕生. 阿尔金断裂早期走滑运动方向及其活动时间探讨. *地质论评*, 1999, 45(1): 1~9.
- 13 车自成,刘良,刘洪福. 阿尔金地区高压变质泥质岩石的发现及其产出环境. *科学通报*, 1995, 40(14): 1298~1300.
- 14 车自成,孙勇. 阿尔金麻粒岩相杂岩的时代及塔里木盆地的基底. *中国区域地质*, 1996, 15(1): 51~57.
- 15 刘良,车自成,罗金海等. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及地质意义. *科学通报*, 1996, 41(14): 1485~1488.
- 16 刘良,车自成,王焰等. 阿尔金茫崖地区早古生代蛇绿岩的Sm-Nd等时线年龄证据. *科学通报*, 1998, 43(8): 880~883.
- 17 郭召杰,张志诚,王建军. 阿尔金北缘蛇绿岩的Sm-Nd等时线年龄及其大地构造意义. *科学通报*, 1998, 43(18): 1981~1984.
- 18 张建新,张泽明,许志琴,杨经绥,崔军文. 阿尔金构造带西段榴辉岩的Sm-Nd及U-Pb年龄——阿尔金中加里东期山根存在的证据. *科学通报*, 1999, 44(10): 1109~1112.
- 19 张建新,张泽明,许志琴,杨经绥,崔军文. 阿尔金西段孔兹岩系的发现及岩石学、同位素年代学初步研究. *中国科学 D 辑*, 1999, 29(3): 245~251.
- 20 Sobel E R, Arnaud N. A possible middle Paleozoic suture in the Altyn Tagh, NW China. *Tectonics*, 1999, 18(1): 64~74.
- 21 葛肖虹,段吉业,李才等. 阿尔金断裂与西北大地构造格局的新认识. 见:肖庆辉等主编. *地球科学进展*. 武汉:中国地质

- 大学出版社,1996,9~18.
- 22 车自成,良,刘洪福,罗金海.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,1998,17(4):377~384.
- 23 崔军文,唐哲民,邓晋福,岳永军,孟令顺,余钦范等.阿尔金断褶系.北京:地质出版社,1999.
- 24 葛肖虹,张梅生,刘永江.阿尔金断裂研究的科学问题与研究思路.现代地质,1998,12(3):295~301.
- 25 葛肖虹,刘俊来.北祁连山带的形成与背景.地学前缘,1999,6(4):223~230.
- 26 新疆维吾尔自治区地质矿产局.新疆维吾尔自治区区域地质志.北京:地质出版社,1993.
- 27 梅华林,于海峰等.甘肃北山地区首次发现榴辉岩和古元古花岗质岩石.科学通报,1988,43(19):2103~2111.
- 28 潘桂棠,焦淑沛,徐耀荣,王培生,向天秀.阿尔金山新生代构造及造山性质.见:青藏高原地质文集(15).北京:地质出版社,1984.113~119.
- 29 刘良,车自成,王焰,罗金海,陈丹玲.阿尔金高压变质带的特征及其构造意义.岩石学报,1999,15(1):57~64.
- 30 刘雪亚,王荃.龙首山古裂谷带及河西走廊的大地构造.中国地质科学院院报.1998,27~28:1~14.
- 31 夏林圻,夏祖春,徐学义.北祁连山的构造—火山—岩浆演化动力学.西北地质,1995,16:1~28.
- 32 Wu H Q, Feng Y M, Song S G. Metamorphism and deformation of blueschist belt and their tectonic implications, North Qilian Mountains. J. Metamorphic Geol., 1993, 11: 523~526.
- 33 许志琴,徐惠芬,张建新等.北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩地体及动力学.地质学报,1994,(1):1~14.
- 34 张建新,许志琴,陈文等.北祁连中段俯冲增生杂岩/火山弧的时代探讨.岩石矿物学杂志,1997,(2):112~119.
- 35 青海省地质矿产局.青海省区域地质志.北京:地质出版社,1991.
- 36 杨建军,朱红,邓晋福,周天祯,赖绍聪.柴达木北缘石榴石橄榄岩的发现及其意义.岩石矿物学杂志,1994,13(2):97~105.
- 37 杨经绥,许志琴,李海兵等.柴北缘地区榴辉岩的发现及潜在的地质意义.科学通报,1998,43(14).
- 38 Xu J, Zhu G, Tong W, Cui K, Liu Q. Formation and evolution of the Tancheng—Lujiang wrench fault system; a major shear system to the northwest of the Pacific Ocean; Tectonophysics, 1987. 134: 273~310.
- 39 Wang X, Liou J G. The large displacement of the Tanlu fault; evidence from the distribution of coesite-bearing eclogite belt in eastern China; EOS, Trans. Am. Geophys. Union, 1989. 70: 1312~1313.
- 40 Kretz R. Symbols for rock-forming minerals. Am. Mineral., 1983, 68: 277~279.
- 41 Jamtveit B. Metamorphic evolution of the Eiksunddal eclogite complex, Western Norway, and some tectonic implications. Contrib. Mineral. Petrol., 1987. 95: 82~99.
- 42 O'Brien P J. Garnet zoning and reaction textures in overprinted eclogites, Bonemian Massif, European Variscides: A record of their thermal history during exhumation. Lithos, 1997, 41: 119~133.
- 43 Caswell D A, O'Brien P J, Wilson R N, Zhai M. Thermobarometry of the phengite-bearing eclogites in the Dabie Mountains of the central China. Journal of Metamorphic Geology, 1997, 15(2): 239~252.
- 44 Brown T H, Berman R G, Perkins E H. Ge0-Calc; Software package for calculation and display of pressure-temperature-composition phase diagrams using an IBM or compatible personal computer. Computer Geosci., 1988, 14: 279~289.
- 45 李怀坤,陆松年,赵凤清,于海峰.柴达木盆地北缘鱼卡河柯石英榴辉岩的确定及其意义.现代地质,1999,13(1):43~50.
- 46 Ernst W G, Liou J G, Hacker B R. Petrotectonic significance of high- and ultrahigh-pressure metamorphic belts; inferences for subduction zone histories. International Geology Review, 1994, 36: 213~237.
- 47 姜枚,许志琴,薛光琦,史大年.青海茫崖—新疆若羌地震探测剖面及其深部构造的研究.地质学报,1999,73(2):153~161.
- 48 Wittlinger G, Tapponnier P, Poupinet G, Jiang M, Shi T N, Herquel G, Masson F. Tomographic evidence for localized lithospheric shear along the Altun fault. Science, 1998, 282: 74~76.
- 49 许志琴,杨经绥,姜枚,李海兵.大陆俯冲作用及青藏高原周缘造山带的崛起.地学前缘,1999(3):139~151.
- 50 Xu Z Z, Jiang M, Yang J S. et al. Mantle diapir inward intracontinental subduction; A discuss on the mechanism of uplift of the Qinghai—Tibet plateau. Geological Society of America, Special Paper 328, 1999, 19~31.

A Comparison between the Tectonic Units on the Two Sides of the Altun Sinistral Strike-slip Fault and the Mechanism of Lithospheric Shearing

Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Zhang Jianxin, Jiang Mei, Li Haibing and Cui Junwen

(*Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*)

Abstract

The Altun strike-slip fault is the largest strike-slip fault in Asia and defines the northern boundary of the Qinghai-Tibet Plateau. The Altun terrane, bounded by the north Altun thrust fault and the Altun strike-slip fault on the south, consists of Dunhuang massif, northern Altun Caledonian subduction complex, central Altun massif and southern Altun subduction-collision complex from north to south. Our studies indicate that these tectonic units correspond to the Alxa block, northern Qilian subduction complex, central Qilian block and northern Qaidam subduction-collision zone respectively on the two sides of the Altun strike-slip fault. Especially, the eclogites in the southern Altun and northern Qaidam show strong similarities in geological setting, occurrence, mineral assemblage, geochemical and protolith feature, *P-t* condition of formation, retrograde metamorphism, associated country rock and almost consistent metamorphic age. This suggests the HP-UHP(?) metamorphic zone displaced by a large strike-slip fault be similar to the case of the Dabie-Sulu HP-UHP metamorphic zone which was truncated by the Tanlu sinistral strike-slip fault, and the offsets along the Altun sinistral strike-slip fault is about 400 km.

A seismic tomographic section across the Altun Mountains, established by the natural earthquake experiment, indicates a steep low-velocity anomaly beneath and along the Altun strike-slip fault, and a high-velocity anomaly (implying dense material) beneath the Altun terrane located between the southern Altun strike-slip fault and the northern gently-dipping thrust fault. The two faults may meet at a depth of 80 km, then continue to underthrust steeply southward to 150 km, suggesting that Tarim block has been underthrust southward beneath the Altun Mountains and the Qaidam block. The large magnitude of anisotropy represents the existence of shearing of upper mantle along Altun strike-slip fault, while the lithospheric shearing may be attributed to the southward subduction of the Tarim block.

Key words: sinistral strike-slip; subduction-collision complex; comparison between tectonic units; lithospheric shearing fault; intracontinental subduction

作者简介

许志琴,女,1941年生。现任中国地质科学院地质研究所研究员、中国科学院院士,长期从事青藏高原及大陆造山带的研究。通讯地址:100037,北京百万庄26号,中国地质科学院地质研究所。