

doi: 10.12029/gc20210111

高万里, 王宗秀, 李磊磊, 钱涛, 崔明明. 2021. 青藏高原东北缘宗务隆韧性剪切带⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学及对印支期造山时限的制约[J]. 中国地质, 48(1): 149–160.

Gao Wanli, Wang Zongxiu, Li Leilei, Qian Tao, Cui Mingming. 2021. ⁴⁰Ar/³⁹Ar laser dating of the Zongwulong ductile shear zone in northeastern Tibetan Plateau: Constraints on the time of Indosinian orogeny[J]. Geology in China, 48(1): 149–160(in Chinese with English abstract).

青藏高原东北缘宗务隆韧性剪切带 ⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学及对印支期造山时限的制约

高万里, 王宗秀, 李磊磊, 钱涛, 崔明明

(1. 中国地质科学院地质力学研究所 中国地质科学院页岩油气评价重点实验室, 北京 100081)

摘要:青藏高原东北缘的宗务隆构造带位于柴达木地块与南祁连地块之间, 位置极为重要, 其中发育的韧性剪切带变形特征和形成时代对于理解该构造带的构造属性具有重要的制约意义。详细的野外构造解析, 显微构造解析与年代学研究表明, 宗务隆剪切带发育走向 NWW–SEE 向糜棱面理, 其上发育 NWW–SEE 向缓倾的拉伸线理, 指示该剪切带逆冲–走滑剪切的特征。宏观尺度上可见由于剪切作用形成的不对称褶皱、旋转碎斑、构造透镜体及褶皱理等变形形迹; 显微镜下可观察到云母鱼、S–C 组构、σ 型残斑及石英动态重结晶、拔丝构造等变形现象, 指示该韧性剪切变形的温度在 300–400°C。对剪切带同构造变形的白云母和黑云母进行了 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素年代学分析, 2 个样品的坪年龄分别为 (245.8±1.7)Ma、(238.5±2.6)Ma, 指示了该剪切带变形发生在早–中三叠世期间。结合对区域地质、岩石学等资料的综合分析, 该期韧性剪切带年龄代表了宗务隆构造带印支期造山作用的时间, 这期造山活动可能与宗务隆有限洋盆闭合后, 南祁连地块与欧龙布鲁克地块的斜向碰撞有关。

关键词: 青藏高原; 宗务隆构造带; 二叠纪; 韧性剪切带; ⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素年代学; 地质调查工程

中图分类号: P574; P611 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2021)01–0149–12

⁴⁰Ar/³⁹Ar laser dating of the Zongwulong ductile shear zone in northeastern Tibetan Plateau : Constraints on the time of Indosinian orogeny

GAO Wanli, WANG Zongxiu, LI Leilei, QIAN Tao, CUI Mingming

(Key Lab of Shale Oil and Gas Geological Survey, Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The Zongwulong tectonic belt (ZTB) is located between the northern Qaidam tectonic belt and the south Qilian orogenic belt and contains Late Paleozoic and Early–Middle Triassic strata. Structural features and geochronology of the Zongwulong ductile shear zone have key implications for the tectonic property of the ZTB. This study integrated field structure, microscopic structure and ⁴⁰Ar/³⁹Ar laser probe analysis. The shear zone strikes ~NEE–SWW and dips at a high angle, with a NWW–SEE trending and W–E stretching lineation, indicating the shear zone as a thrust–slip shear ductile shear. The asymmetric folds, rotating porphyroclast,

收稿日期: 2018–05–21; 改回日期: 2019–11–30

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20189614、1212011121068) 和国家自然科学基金项目 (41702204) 联合资助。

作者简介: 高万里, 男, 1985 年生, 助理研究员, 主要从事区域构造和岩石大地构造方面研究; E-mail: gwanli851202@163.com。

structural lens and crenulation cleavage can be seen in the field. Mica fish, S-C fabrics, σ type quartz porphyroblasts and quartz wire drawing structure can also be observed under the microscope, indicating that the strike-slip related ductile deformation and mylonitization occurred under low-grade greenschist facies conditions at temperatures of 300°C–400°C. The highly deformed mylonite schist yielded $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages (245.8±1.7)Ma and (238.5±2.6)Ma for muscovite and biotite, respectively, indicating that the shear deformation occurred during the Early–Mid Triassic. Combined with a comprehensive analysis of regional geology and petrology, the authors hold that the age of ductile shear deformation represents the time of Indosinian orogeny in the ZTB. The orogenic activity was probably related to the oblique collision between the South Qilian block and the Oulongbuluke block after the closure of the ocean basin.

Key words: Tibetan Plateau; the Zongwulong tectonic belt; Triassic; ductile shear zone; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotope chronology; geological survey engineering

About the first author: GAO Wanli, male, born in 1985, assistant researcher, mainly engaged in the research of geotectonics and petrogenesis; gwanli851202@163.com.

Fund support: Supported by the project of China Geology Survey (No.DD20189614, No.1212011121068) and the National Natural Science Foundation of China (No.41702204).

1 引言

青藏高原东北缘的宗务隆(又称中务农)构造带地处柴达木盆地东北,西北与达肯达坂相连,东

南和青海南山相接,以北西-南东方向延伸千里,是一发育在柴达木地块北缘构造带(柴北缘构造带)与南祁连造山带之间,呈北西西向延展的线状构造带(郭安林等,2009)(图1),其构造位置极为重要。

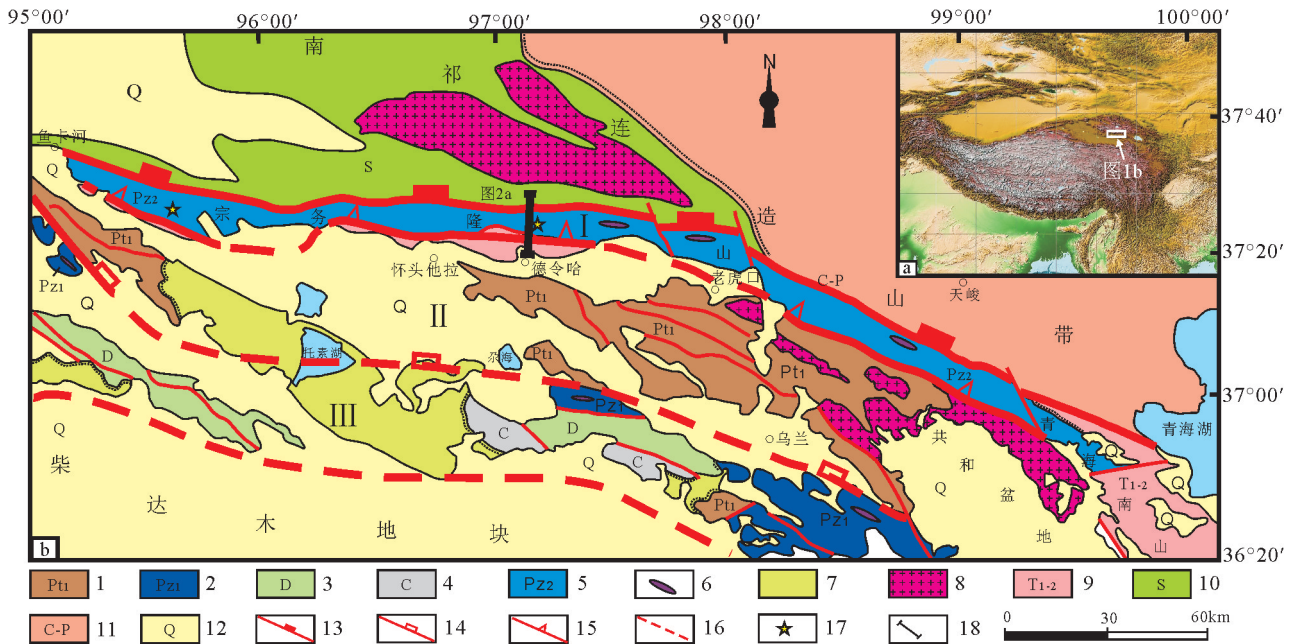


图1 柴达木盆地北缘大地构造简图(据郭安林等,2009修改)

I—宗务隆构造带; II—欧龙布鲁克微地块; III—柴北缘加里东构造带; 1—前寒武中深变质岩系; 2—早古生代蛇绿构造混杂岩; 3—泥盆纪磨拉石建造; 4—石炭纪碳酸盐建造; 5—晚古生代蛇绿构造混杂岩; 6—蛇绿岩构造岩片; 7—中生代陆相碎屑岩建造; 8—花岗岩; 9—早中三叠世复理石建造; 10—志留纪类复理石建造; 11—石炭—二叠纪滨浅海碎屑岩—碳酸盐建造; 12—第四系; 13—中生代早期俯冲碰撞带; 14—早古生代晚期俯冲碰撞带; 15—推覆构造; 16—柴北缘地球物理断裂; 17— $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 样品取样点; 18—剖面图位置

Fig.1 Geological sketch map of Northern Qaidam basin (modified from Guo Anlin et al.,2009)

I—Zongwulong tectonic belt; II—Oulongbuluke micro-block; III—Northern Qaidam Caledonian tectonic belt; 1—Precambrian metamorphic basement; 2—Early Paleozoic ophiolite melange; 3—Devonian molasse formation; 4—Carboniferous carbonate formation; 5—Late Paleozoic ophiolite melange; 6—Ophiolite schist; 7—Mesozoic–Cenozoic continental clastic formation; 8—Granites; 9—Early–middle Triassic flysch formation; 10—Silurian Class–flysch formation; 11—Carboniferous–Permian clastic–carbonate formation; 12—Quaternary; 13—Early Mesozoic subduction zones; 14—Late early–Paleozoic subduction zones; 15—Nappe structure; 16—Northern Qaidam geophysical fault; 17—Samples of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$; 18—The location of section

已有的研究揭示,宗务隆构造带所在的柴北缘地区先后经历了古元古代大陆地壳生成阶段(孟繁聪等,2005),新元古代罗迪尼亚超大陆汇聚阶段(郝国杰等,2004;孟繁聪等,2005)、全集群代表的罗迪尼亚裂解,以及早古生代的洋壳俯冲发育和加里东运动阶段的碰撞造山与大陆深俯冲(王惠初等,2003;宋述光等,2004)。加里东造山运动结束之后,柴北缘地区进入了新的构造旋回,其最显著发育的地区在宗务隆构造带,但是宗务隆构造带的性质尚存在争议。有学者认为,宗务隆构造带内的岩石-地层组合是在以泥盆系牦牛山组磨拉石沉积标志加里东造山运动结束之后,在柴北缘构造带与南祁连造山带共同构筑的加里东基底之上发育的裂隙槽(张雪婷,2007),并将该构造带归属南祁连地块或者柴达木地块(潘桂棠等,2002;郝国杰等,2004)。也有学者认为,该构造带是独立发育的印支期造山带(郭安林等,2009;彭渊等,2016),经历了晚泥盆一早石炭世陆内裂谷,晚石炭世有限洋盆,二叠纪洋壳俯冲,到三叠纪陆-陆碰撞的完整过程(王毅智等,2001;邱士东等,2015;王苏里和周立发,2016;吴才来等,2016)。但是,关于三叠纪陆陆碰撞的时限一直没有确切的构造年代学约束。为此,本次研究从构造变形角度入手,针对宗务隆构造带上广泛发育的韧性剪切带进行研究,通过野外构造解析,显微构造分析和同位素年代学方法,确定宗务隆构造带的运动学特征和变形年代,为区域构造演化提供新的佐证。

2 区域构造背景及岩石组合特征

宗务隆构造带所在的柴北缘地区位于青藏高原的东北部(图1a),大地构造位置上处在北部的祁连地块和南部的柴达木地块之间,其西部以阿尔金断裂为界与塔里木地块分割。从南向北依次可以划分为柴北缘加里东构造带、欧龙布鲁克微陆块和宗务隆构造带(图1b)。柴北缘加里东构造带记录了完整的从早期洋壳俯冲到晚期陆壳俯冲的造山演化过程,在经历了大陆深俯冲作用后形成了一条早古生代的高压-超高压变质带(Chen et al., 2009; Zhang et al., 2013);欧龙布鲁克微陆块被认为是具有古元古代基底的大陆残片,主要由德令哈杂岩、达肯达坂群和中元古代带万洞沟群等组成,顶部为

新元古代全吉群角度不整合覆盖(陆松年等,2002;郝国杰等,2004);宗务隆构造带主体由晚古生代宗务隆山群和早一中三叠世郡子河群组成,还包括少量的印支期花岗岩和岛弧火山岩(郭安林等,2009),其北部以青海湖南缘断裂为界与南祁连地块造山带相连,南部以宗务隆南缘断裂为界与欧龙布鲁克微陆块相连。宗务隆山群是宗务隆构造带内的主要岩石地层单位,以狭长条带状分布在柴达木盆地东北缘的宗务隆山一带,包括土尔根大坂组和果可山组两个岩组,均受后期构造热事件的影响,发生了显著的变质、变形作用。其中土尔根大坂组岩性组合为片理化石英砂岩,变质的火山岩和糜棱岩化的大理岩;果可山组主要为变质的砂岩,板岩、千枚岩,结晶灰岩、火山岩和变质程度较强的片岩和混合岩,早一中三叠世郡子河群属于浅海相碎屑岩和碳酸盐岩沉积岩建造,顶部为晚三叠世隆务河群不整合覆盖,隆务河群总体以粗碎屑岩为主,夹少量的灰岩层,属典型的陆相沉积地层。

3 宗务隆构造带韧性剪切变形特征

3.1 韧性剪切带的宏观特征

宗务隆韧性剪切带规模巨大,从柴达木山一直延伸到天俊南山,由西向东,从NW走向转成近EW走向,剪切带断续延伸300 km,宽度5~10 km不等。其中剪切带主体发育在宗务隆山群(C_{3zh})岩石组合之中,以德令哈北部的柏树山剖面为例,剪切带向南逆冲推覆到白垩纪地层(K_{1q})或者元古宙达肯达坂群变质基底之上(Pt),向北逆冲到志留系类复理石建造的砂板岩之上(图2a)。宗务隆山群(C_{3zh})由南向北主要由糜棱岩化石英片岩、糜棱岩化大理岩、绢云片岩和片理化火山岩等组成,不同岩石单元以构造岩片形式向南逆冲推覆(图2b),靠近构造带南部剪切变形较强,石英片岩和大理岩在剪切作用下均呈现糜棱岩化特征,野外宏观上可以看到一系列显著的韧性剪切变形的现象。

3.1.1 拉伸线理

拉伸线理代表剪切运动方向,主要为矿物拉伸线理,由绢云母、绿泥石矿物集合体及粒状矿物或其集合体的拉长定向排列构成。宗务隆剪切带自西部的柴达木山至东部的天俊南山地区均可见到矿物的拉伸线理发育,拉伸线理角度缓倾(图3a、b),倾伏向

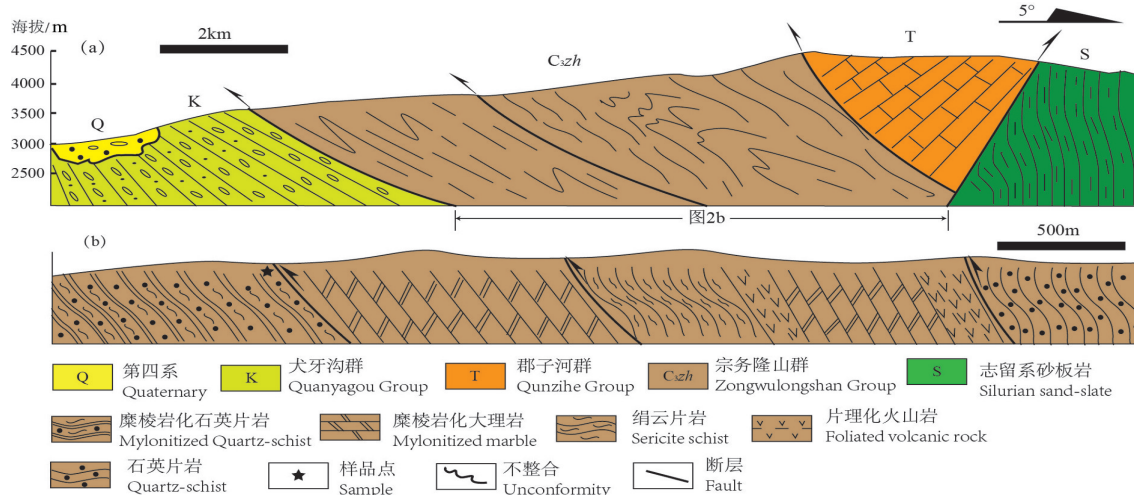


图2 宗务隆构造带构造剖面(剖面位置如图1所示)

a—德令哈北柏树山构造剖面;b—宗务隆山群(C_zh)剪切变形剖面

Fig.2 Structural section of Zongwulong tectonic belt(The position of the section is shown in Fig. 1)
a—The Baishushan structural section in northern Delha;b—The Zongwulongshan Group (C_zh) shear deformation section

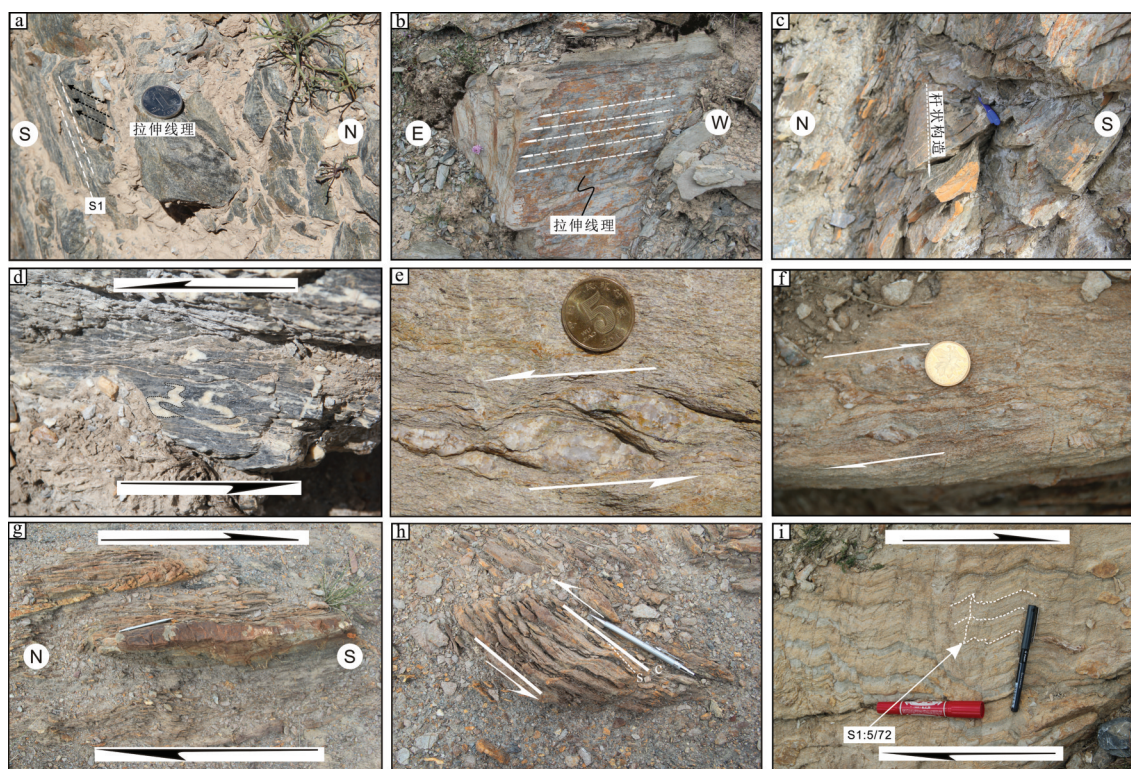


图3 宗务隆韧性剪切带野外变形现象

a—宗务隆山群石英片岩中黑云母矿物拉伸线理;b—宗务隆山绢云片岩中的绢云母拉伸线理;c—石英杆状构造;d—糜棱岩化大理岩中方解石脉的不对称褶皱;e—石英残斑;f—石英剪切残斑;g—“大理岩”构造透镜体;h—变火山岩中构造透镜体中的S-C构造;i—褶皱理

Fig.3 Deformation photo of Zongwulong tectonic belt in the field

a—The biotite mineral stretching line of Quartz schist in Zongwulongshan Group;b—The sericite stretching line of sericite schist in Zongwulongshan Group;c—Quartz rod-shaped structure;d—Asymmetric folds of calcite veins in mylonite marble;e—Quartz residue;f—Quartz shear residue;g—“Marble” structure lens;h—S-C structure in tectonic lenses in metamorphic volcanic rocks;i—Fold cleavage

NNE或者近EW方向,倾伏角15°~25°,代表了最大拉伸方向,指示了逆冲-走滑剪切的特征。

3.1.2 不对称褶皱

宗务隆韧性剪切带中不对称褶皱现象普遍存在。是由先期面理、成分层或变质分异条带的再褶皱或递进褶皱变形而成。随着剪切变形的增强,褶皱幅度加大,在强烈褶皱作用下形成了杆状构造(图3c)和不对称褶皱(图3d)。同时,该褶皱多为“AB”型褶皱,褶皱枢纽和杆状构造的枢纽方向与剪切方向斜交。

3.1.3 旋转碎斑

旋转碎斑是韧性剪切带中常见的变形形迹,在糜棱岩韧性剪切流动过程中,刚性的碎斑及其周缘较弱的动态重结晶集合体或者细碎粒发生旋转而形成的。在宗务隆山群糜棱化石英片岩中野外均可见到似σ型旋转碎斑构造(图3e、f)。刚性的石英在剪切变形中旋转,带动周围的绿泥石片岩从而形成了不对称的楔性尾部,所引起的尖端延伸方向指示剪切方向为左行。

3.1.4 构造透镜体

宗务隆山群中的变火山岩在韧性剪切变形中,多处出现了较强硬的大理岩剪切透镜体(图3g),其边缘强烈糜棱岩化。在递进剪切作用下,透镜体内部产生破裂并发生了旋转,形成多个透镜体,沿S-C组构面分布(图3h),并向剪切方向倾斜,形成了类似多米诺骨牌的构造,产生破裂面与剪切带呈大约30°的锐夹角,指示剪切方向为左行。

3.1.5 褶劈理

褶劈理是在先存鳞片变晶结构的板岩、千枚岩及云母片岩中的一组切过先存流劈理的差异性滑动面。滑动面中矿物具有新的定向排列。宗务隆韧性剪切带在糜棱岩化的石英片岩常见此种构造,先存的石英沿滑动面重新定向,根据褶劈理枢纽和轴面倾斜方向,指示该韧性剪切为右行剪切(图3i)。

3.2 韧性剪切带的显微构造

宗务隆韧性剪切带内发生了强烈糜棱岩化,长石、石英、云母和角闪石等矿物显微镜下均显示出塑性变形、动态重结晶等构造特征,多具有碎斑结构及糜棱结构(图4a~d)。

3.2.1 云母鱼

云母鱼现象主要发育于宗务隆群地层内的长

英质糜棱岩和石英片岩等岩石中。先存的长石、石英和云母等矿物,在剪切作用过程中,随着变形作用的持续,云母发生了滑移、分离并且旋转,从而形成了不对称的云母鱼(图4a)。而云母鱼两端的尾部主要由强烈剪切作用形成的细粒层状硅酸盐矿物和长石组成,细碎屑的尾部将相邻的云母鱼连接在一起,形成台阶状结构。这种尾部代表强剪切应变的微剪切带,组成了C面理,与先存的S面理形成大约30°的锐夹角,指示剪切方向左行(图4a)。因此,利用剪切带白云母或者黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar同位素测年,可以确定韧性剪切带的活动时间。

3.2.2 石英波状消光及动态重结晶

在宗务隆糜棱岩中,石英晶粒常呈现出波状消光及条带状消光(图4b、c),而且伴随韧性剪切的加强,石英发生动态重结晶,动态重结晶后的石英多呈拔丝拉长状,以发育矩形多晶石英细长变形条带为特征(图4c、d)。石英碎斑的原始边界一般被破坏而成弯曲状、锯齿状或缝合线状,呈现出动态不稳定状态。反映出强烈的韧性剪切变形(胡玲, 2009)。

3.2.3 S-C组构

S-C组构是韧性剪切带中常见的一种变形现象,S面理是先于C面理的挤压面理,C面理是形成稍晚的剪切面理。在宗务隆韧性剪切带中,早期形成的S面理被晚期的剪切面理C面理置换,残余碎斑尚存在S面理的痕迹,根据其S面理和C面理的夹角分析,属左行剪切(图4a、c)。

3.2.4 σ型碎斑

σ型碎斑是矿物碎斑两侧的结晶拖尾呈楔形,指示运动方向。在宗务隆剪切带的糜棱化石英片岩多见这种构造,在剪切变形过程中,基质和石英碎斑均发生了重结晶,重结晶后的石英颗粒呈现σ型碎斑,指示左行剪切(图4a、d)。

3.3 韧性剪切带的运动方向

宗务隆韧性剪切带变形现象极为丰富,野外从西向东对剪切变形露头点开展了详细的糜棱面理和矿物拉伸线理的测量,结果显示,剪切带糜棱面理整体NWW—EW走向,倾向为NEE,局部见倾向SWW,倾角在48°~78°。矿物拉伸线理NWW—SEE方向缓倾,倾角在10°~30°(图5)。结合野外及镜下的变形组构的分析,判明该剪切带为由北东东向南

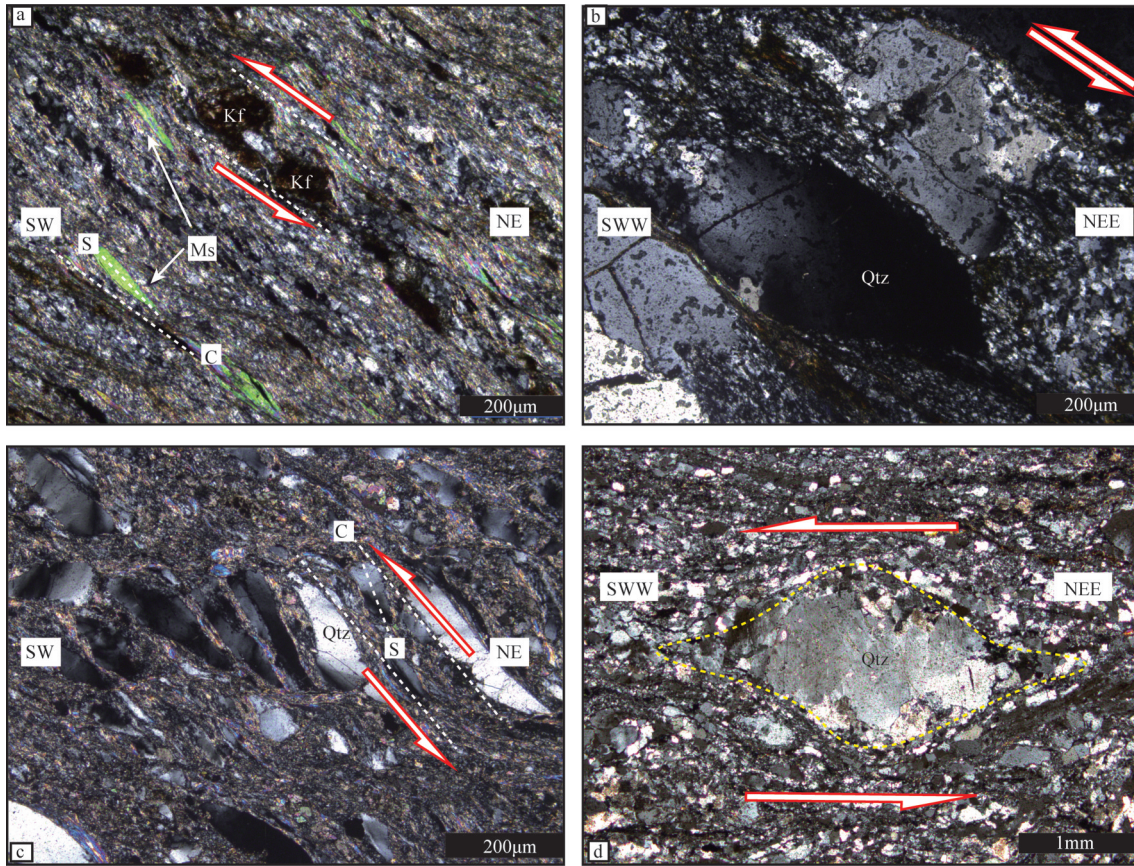


图4 显微镜下XZ面上韧性变形特征

a—云母鱼构造及长石碎斑;b—石英碎斑及波状消光;c—石英旋转碎斑及S-C组构;d—石英旋转碎斑

Fig.4 Ductile deformation photo under the microscope

a—Mica fish structure and feldspar plaque;b—Quartz fragment and wavy extinction;c—Quartz rotating fragment and S-C fabric;d—Quartz rotating fragment

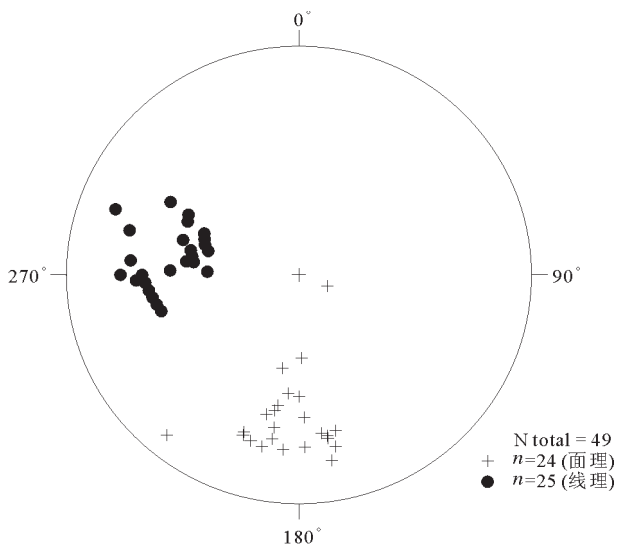


图5 宗务隆剪切带面理和拉伸线理赤平投影图 (下半球投影)

Fig.5 Stereograms of foliation and Lineation in Zongwulong shear zone (Lower hemisphere projection)

西西的逆冲-走滑型剪切。

4 Ar-Ar测年方法及定年结果

4.1 样品特征

本次研究选取柏树山和大煤沟宗务隆山群糜棱岩化石英片岩中的同构造白云母和黑云母进行⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学分析,确定韧性变形的时代。白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar测年的样品(图4a)位于柏树山宗务隆山群糜棱岩化石英片岩中,采样点位置坐标为:37°20'29.5"N,95°34'37.7"E(图1),黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar测年的样品取自大煤沟北部宗务隆山群,岩石为糜棱岩化石英片岩。两采样点的糜棱岩化石英片岩内,剪切面理和拉伸线理发育,镜下分析显示,白云母和黑云母显著定向,并形成云母鱼构造(图4a),表明云母为韧性剪切变形同期产物。根据长石-石英-云母矿物变形特征分析(胡玲,2009),韧性剪切变形的温度在300~400℃,达到了

白云母和黑云母的封闭温度(300~350°C),其变形冷却时代可以近似代表韧性变形的时代。

4.2 测试方法

本次宗务隆韧性剪切带糜棱岩中2个云母样品的⁴⁰Ar/³⁹Ar分析是在中国地质科学院地质研究所大陆动力学重点实验室进行的。首先选纯的矿物(纯度>99%)用超声波清洗,清洗后的样品被封进石英瓶中送核反应堆中接受中子照射。照射工作是在中国原子能科学研究所的“游泳池堆”中进行的,使用B4孔道,中子流密度约为 $2.65 \times 10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ S}^{-1}$ 。照射总时间为1444 min,积分中子通量为 $2.30 \times 10^{18} \text{ n cm}^{-2}$;同期接受中子照射的还有用做监控样的标准样:ZBH-25黑云母标样,其标准年龄为(132.7±1.2) Ma,K含量为7.6%。

样品的阶段升温加热使用石墨炉,每一个阶段

加热30 min,净化30 min。质谱分析是在多接收稀有气体质谱仪Helix MC上进行的,每个峰值均采集20组数据。所有的数据在回归到时间零点值后再进行质量歧视校正、大气氩校正、空白校正和干扰元素同位素校正。中子照射过程中所产生的干扰同位素校正系数通过分析照射过的K₂SO₄和CaF₂来获得,其值为:(³⁶Ar/³⁷Ar)_{ca}=0.0002389,(⁴⁰Ar/³⁹Ar)_k=0.004782,(³⁹Ar/³⁷Ar)_{ca}=0.000806。³⁷Ar经过放射性衰变校正;⁴⁰K衰变常数 $\lambda = 5.543 \times 10^{-10}$ 年;用ISOPLOT程序计算坪年龄及正、反等时线(Ludwig, 2001)。坪年龄误差以1 s给出。详细实验流程见文献(陈文等,2006;张彦等,2006)。

4.3 测试结果

取自宗务隆山群韧性剪切带的2个样品,单矿物⁴⁰Ar/³⁹Ar阶段加热法得出的年龄谱如表1和图6

表1 样品CD15-006-1白云母和样品CD15-043-7黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar阶段升温加热分析结果

Table 1 The muscovite (sample CD15-006-1) and biotite (sample CD15-043-7) ⁴⁰Ar/³⁹Ar stage heating analysis result

	T/°C	(⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁶ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁷ Ar/ ³⁹ Ar) _m	(³⁸ Ar/ ³⁹ Ar) _m	F	³⁹ Ar(Cum.)/%	Age/Ma	±1σ/Ma
CD15-006-1 白云母									
1	800	44.0921	0.0264	0	0.0177	36.2979	0.61	245.6	2.5
2	850	41.9612	0.0074	0	0.0133	39.7632	5.5	267.4	2.5
3	880	39.6864	0.0055	0	0.0124	38.0636	8.9	256.7	2.4
4	920	38.4118	0.0037	0	0.0119	37.302	13.56	251.9	2.4
5	960	37.56	0.0032	0	0.0127	36.6089	26.89	247.6	2.3
6	990	36.7671	0.0013	0	0.0122	36.3667	44.23	246	2.3
7	1020	36.9534	0.002	0	0.0123	36.349	51.88	245.9	2.3
8	1070	37.1032	0.0025	0	0.0126	36.3607	61.04	246	2.3
9	1120	37.138	0.0026	0	0.0125	36.3752	73.89	246.1	2.3
10	1170	36.6441	0.0012	0	0.0123	36.2953	99.29	245.6	2.3
11	1220	52.0098	0.0564	0	0.0177	35.3515	99.73	239.6	2.9
12	1400	53.8303	0.0573	0	0.0144	36.8888	100	249.3	3.3
CD15-043-7 黑云母									
1	700	665.5298	2.1842	0	0.0481	20.0959	0.18	137	15
2	800	181.0263	0.5179	0	0.1127	27.69	4.31	188.5	1.9
3	840	78.942	0.1525	0	0.0415	33.8808	6.32	226	2.2
4	880	56.9208	0.0723	0	0.025	35.5482	19.95	236.4	2.2
5	920	45.3526	0.0309	0	0.0198	36.2291	28.29	240.7	2.3
6	950	41.0561	0.0175	0	0.0161	35.8903	36.7	238.5	2.2
7	980	42.0041	0.0249	0	0.0193	34.6291	40.84	230.7	2.2
8	1070	38.7955	0.0181	0	0.0168	33.4517	48.27	223.3	2.1
9	1110	36.5915	0.0104	0	0.0147	33.5247	62.99	223.8	2.1
10	1150	37.049	0.0052	0	0.0137	35.5207	77.92	236.2	2.2
11	1200	37.2012	0.0036	0	0.0133	36.1313	94.34	240	2.2
12	1250	37.8151	0.0033	0	0.0122	36.8225	99.55	244.3	2.3
13	1400	47.2597	0.03	0	0.0131	38.3808	100	254	3.1

注:样品CD15-006-1总气体年龄为247.8 Ma,样品量为14.10 mg,照射参数J=0.004018;样品CD15-043-7总气体年龄为232.6 Ma,样品量为14.53 mg,照射参数J=0.003939;下标m代表样品中测定的同位素比值;F=⁴⁰Ar*/³⁹Ar,表示放射成因⁴⁰Ar和³⁹Ar的比值;³⁷Aro表示经过放射性衰变校正后的³⁷Ar量。

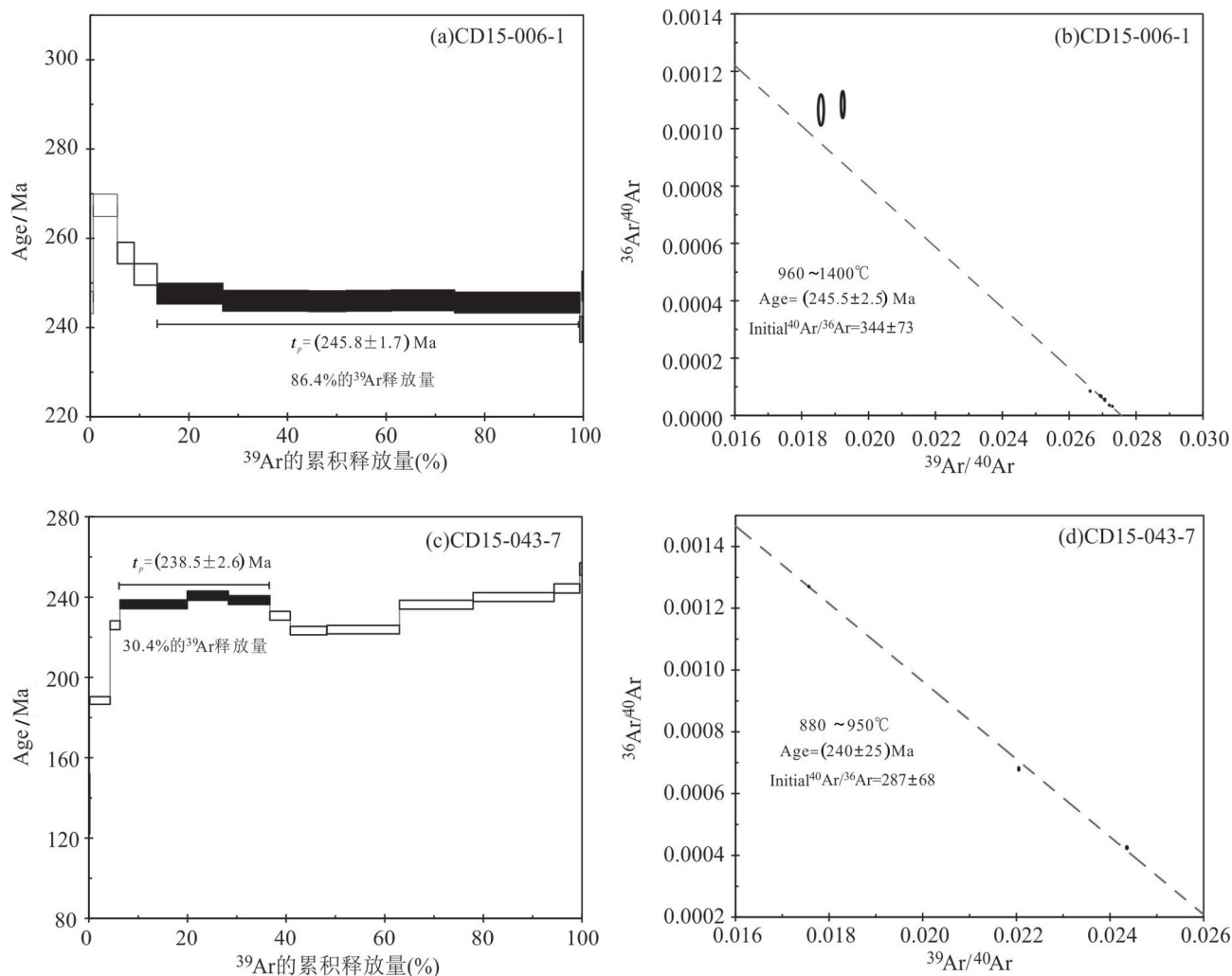


图6 宗务隆构造带糜棱片岩云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学

a—柏树山北宗务隆山群糜棱片岩白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄;b—柏树山北宗务隆山群糜棱片岩白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 反等时线年龄;c—大煤沟北宗务隆山群石英片岩黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄;d—大煤沟北宗务隆山群石英片岩黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 反等时线年龄

Fig.6 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data for biotites and muscovites for mylonitic gneisses from the ZTB

a—The muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau age of mylonite schist in Zongwulong mountain Group from northern Baishushan;b—The muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ anti-isometric age of mylonite schist in Zongwulongshan Group from northern Baishushan;c—The biotite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ plateau age of mylonite schist in Zongwulongshan Group from northern Dameigou;d—The biotite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ anti-isometric age of mylonite schist in Zongwulongshan Group from northern Dameigou

所示:

CD15-006-1号样品的白云母测试结果显示,其总气体平均年龄为247.8 Ma,在第1到12加热段之间给出了较为平稳的表面年龄(246~267.4 Ma),其中960~1400℃的8个温度阶段组成一个有效的坪年龄,其年龄为(245.8±1.7)Ma,对应了86.4%的 ^{39}Ar 释放量(图6a)。相应的反等时线年龄为(245.5±2.5)Ma(图6b),二者极其接近。其反等时线的初始 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值为344±73,高于标准大气中的Ar值(295.5),存在过多的过剩Ar,MSWD值较大可能与

过剩Ar的存在有关,其坪年龄可近似代表剪切带中白云母的形成年龄。

CD15-043-7号样品的黑云母测试结果显示,12个温度阶段的表面年龄差别较大(表1),平稳的表面年龄在加热至3到12段表现为226~254 Ma,12个温度阶段组成一个扰动飞年龄谱(图6c)。样品的总气体年龄为232.6 Ma,880~950℃的3个温度阶段组成一个有效的坪年龄(238.5±2)Ma,对应了30.4%的 ^{39}Ar 释放量(图6c),反等时线年龄为(240±25)Ma(图6d),初始 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值为287±68,略低于

标准大气中的Ar值,存在少量的Ar遗失,MSWD值较大,可能与Ar的遗失有关,其坪年龄可近似地代表剪切带中黑云母形成的年龄。

5 讨论

5.1 剪切运动时代

根据⁴⁰Ar/³⁹Ar同位素测年原理(Mcdougall and Harrison, 1999),坪年龄是矿物冷却至相应封闭温度时记录的封闭温度年龄,同变形期新生矿物的变形温度接近此封闭温度时,矿物坪年龄代表了该矿物生成时的构造事件的时间(Zhu et al., 2005)。长石、石英是最基本的造岩矿物之一,二者的变形特征与温度条件密切相关,具有很好的阶段性(Stipp et al., 2002; Passchier and Trouw, 2005)。可以根据长石、石英特定的变形现象来大致推断其变形时的温压条件(胡玲, 2009)。镜下显微构造显示,样品中部分石英具有塑性变形的特征,呈拉长定向排列,长石呈脆性、韧-脆性变形,黑云母呈定向排列的特征,这些矿物特征表明样品的变形温度在300~400°C (Passchier and Trouw, 2005)。这与黑云母的⁴⁰Ar/³⁹Ar体系的封闭温度(320±40)°C (Harrison et al., 1985; Hames and Bowring, 1994)基本一致,这一温度区间也近似于白云母的封闭温度350~450°C (胡玲, 2009)。因此,本次研究采自宗务隆韧性变形带中的2个样品变形黑云母和白云母具有接近的坪年龄(245.8±1.7)Ma、(238.5±2.6)Ma,意味着在早一中三叠世期间存在一次比较显著构造运动,达到了黑云母和白云母的封闭温度,因此变形矿物的坪年龄可代表宗务隆韧性剪切期构造活动的时间。同时,古近纪乐河组碎屑岩云母⁴⁰Ar/³⁹Ar记录了一个晚二叠一早三叠世的年龄范围(刘永江等, 2012),表明云母矿物的同位素时钟在经历过早一中三叠世的重置后,没有再次被后期的构造热事件所影响,因此云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄记录的是最后一期受构造热事件扰动的年龄。

逆冲型剪切带的形成及演化一般在大洋俯冲增生和弧-陆、陆-陆碰撞造山过程的中下地壳收缩阶段,逆冲-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(许志琴, 1997)。宗务隆韧性剪切带野外构造面理与线理的统计分析,镜下矿物的变形特征显示,韧性剪切变形以NEE向

SWW方向的逆冲-走滑型剪切为主,指示柴达木地块与南祁连陆块间可能发生了斜向碰撞。韧性剪切同变形期云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄记录了祁连地块向柴达木地块斜向碰撞发生在早一中三叠世时期。

5.2 构造动力学过程

大量古地理资料研究证实,晚泥盆世开始,柴达木地区普遍因拉张而发生裂陷,形成一系列狭长状的地堑式断陷盆地或海槽(杨超等, 2010)。宗务隆山中段有泥盆纪鱼北沟群浅海相碳酸盐岩建造及碎屑岩出露,产丰富珊瑚化石,并可与古特提斯洋化石群对比,反映从晚泥盆世宗务隆裂陷槽开始形成(青海省地质矿产局, 1991)。随后早石炭世宗务隆裂陷槽不断扩张,规模不断扩大,在晚石炭世(318 Ma)可能出现宗务隆有限洋盆(图7a),在宗务隆东段青海湖南山一带形成天峻南山蛇绿岩(王毅智等, 2001),这与东昆仑构造带阿尼玛卿山一带形成的晚古生代大洋基本保持一致(杨经绥等, 2004),指示宗务隆小洋盆可能属于古特提斯洋在北部的分支(许伟等, 2011)。早二叠世,区域构造应力场开始由早期的拉张向挤压过渡,晚二叠世时期,区域挤压应力增强(张玉等, 2017),柴达木区域以东的天峻南山向南至兴海-苦海一带的古特提斯洋在中二叠世具有向西俯冲的迹象(杨超等, 2010),在宗务隆地区,以天峻南山蛇绿岩构造岩片为代表的小洋盆在此时也开始向南俯冲消减(图7b),伴随这次俯冲消减活动,构造带内沉积的地层发生了一系列的变质-变形作用,伴随同期的岩浆活动(彭渊等, 2016; 王苏里和周立发, 2016; 吴才来等, 2016; 笄梁超等, 2017)。天峻南山以西,构造带内广泛出露蚀变的中酸性火山岩,包括安山岩、英安岩和流纹岩,这些火山岩为俯冲作用形成的弧火山岩(郭安林等, 2009)。到早一中三叠世时期,随着洋盆俯冲消减的结束,南祁连陆块和柴达木地块沿着宗务隆构造带发生碰撞造山作用(图7c),碰撞作用也导致区域上石炭纪宗务隆山群发生低绿片岩相变质-变形作用,在碰撞造山应力集中的局部地区,达到绿片岩相变质,并形成了延伸300 km的韧性剪切带。

6 结论

(1)通过对宗务隆韧性剪切带的宏观构造解

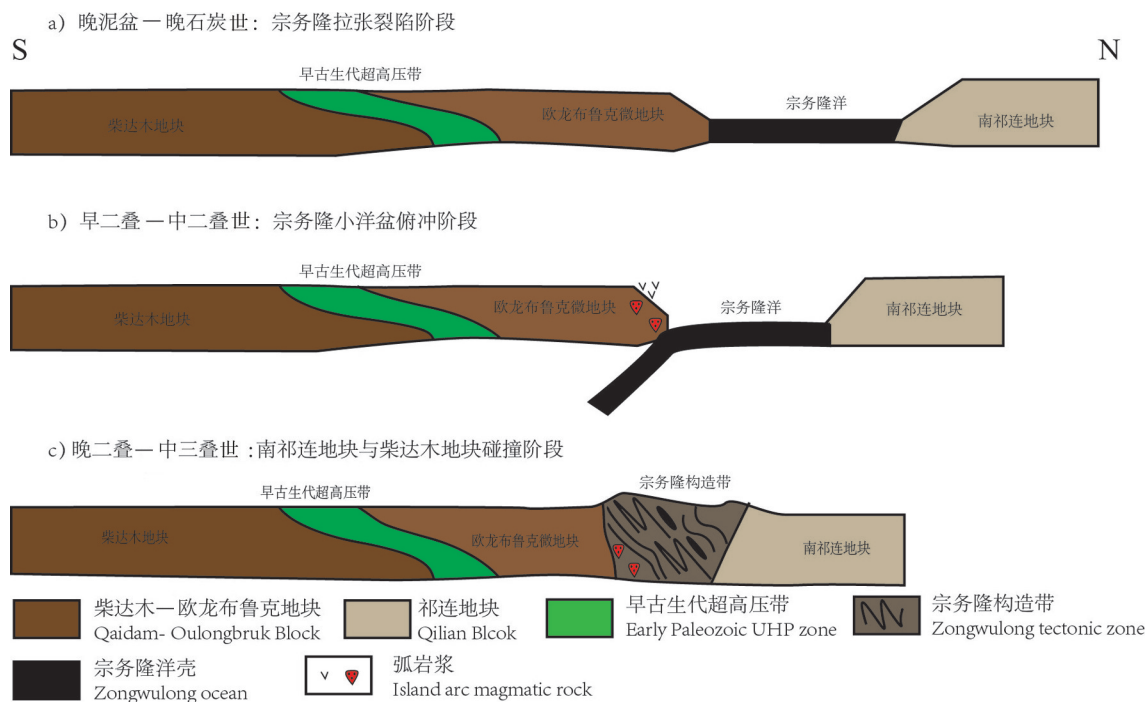


图7 柴北缘晚古生代—中生代构造演化模型

a—晚泥盆至晚石炭世，柴北缘陆陆碰撞造山后进入地壳伸展阶段，宗务隆地区出现陆内裂谷，局部拉张裂陷强烈地区出现以大洋蛇绿岩型为代表的小洋盆；b—早—中二叠世，宗务隆有限洋盆开始朝柴达木地壳下俯冲，洋盆逐渐闭合；c—晚二叠至中三叠世，随着宗务隆有限洋盆的闭合，南祁连地块与柴达木地块发生陆陆碰撞作用

Fig.7 Late Paleozoic—Mesozoic tectonic evolution model in Northern Qaidam Basin

a—From Late Devonian to Late Carboniferous, the crustal extension occurs in northern Qaidam after early Paleozoic collision orogeny, which led to the occurrence of an intracontinental rift in Zongwulong and a small ocean basin represented by the MORB-type appeared in locally strongly extending zone; b—In the Early—Middle Permian the Zongwulong finite ocean basin began to subduct under the Qaidam block, and the ocean basin was gradually closed; c—From Late Permian to Middle Triassic, the collision occurred between southern Qilian block and Qaidam block with the closure of the Zongwulong finite ocean basin

析，显微构造分析，构造线理和面理的统计分析，确定宗务隆剪切带为挤压环境下的韧性变形的产物，剪切类型为逆冲—走滑型剪切。

(2)对宗务隆剪切带中糜棱岩化石英片岩中的同构造变形白云母和黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年获得坪年龄分别为 $(245.8\pm 1.7)\text{Ma}$ 、 $(238.5\pm 2.6)\text{Ma}$ ，指示该剪切变形发生在早—中三叠世期间进一步证实了宗务隆构造带在印支期存在显著的构造活动。

(3)结合区域地质资料的综合分析，宗务隆韧性剪切带可能是由柴达木地块和南祁连地块印支期碰撞所形成的一条韧性剪切带，其走滑—逆冲剪切变形特征暗示柴达木地块和南祁连地块发生了斜向碰撞作用。

致谢：野外工作中得到了青海石油勘探开发研究院周苏平高级工程师的帮助； $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学的实验与分析得到了中国地质科学院地质研究所陈

文研究员的帮助；成文过程中与西北大学孙娇鹏博士进行了有益的探讨，在此一并致谢。

Reference

- Chen Nengsong, Gong Songlin, Sun Min, Li Xiaoyan, Xia Xiaoping, Wang Qinyan, Wu Fuyuan, Xu Ping, 2009. Precambrian evolution of the Quanji Block, northeastern margin of Tibet: Insights from zircon U—Pb and Lu—Hf isotope compositions[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35(3/4): 367—376.
- Chen Wen, Zhan Yan, Zhang Yueqiao, Jin Guishan, Wang Qingli, 2006. Late Cenozoic episodic uplifting in southeastern part of the Tibetan plateau—evidence from Ar—Ar thermochronology[J]. *Acta Petrologia Sinica*, 22(4): 867—872 (in chinese with English abstract).
- Da Liangchao, Niu Manlan, Li Xiucui, Han Yu, Wu Qi, Yan Zhen, Zhao Qiqi. 2017. Tectonic deformation characteristics of the L tectonites in Erlangdong area at the northern margin of Qaidam Basin and its geological significance [J]. *Chinese Journal of*

- Geology, 52(4): 1038–1057(in Chinese with English abstract).
- Guo Anlin, Zhang Guowei, Qiang Juan, Sun Yangui, Li Guang, Yao Anping. 2009. Indosinian Zongwulong orogenic belt on the northeastern margin of the Qinghai–Tibet plateau [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1):1–12 (in Chinese with English abstract).
- Hames W E, Bowring S A.1994. An empirical evaluation of the argon diffusion geometry in muscovite[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 124(1/4): 161–169.
- Hao Guojie, Lu Songnian, Wang Huichu, Xin Houtian, Li Huaikun.2004. The Pre–Devonian tectonic framework in the northern margin of Qaidam basin and geological evolution of Olongbuluck palaeo–block[J]. *Earth Science Frontiers*,11(3):115–122(in Chinese with English abstract).
- Harrison T M, Duncan I, Mcdougall I. 1985. Diffusion of ⁴⁰Ar in biotite: Temperature, pressure and compositional effects[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49(11): 2461–2468.
- Liu Yongjian, Franz Neubauer, Li Weimin, Hohann Genser, Li Wei. 2012. Tectono–thermal events of the Northern Qaidam margin–southern Qilian area, western China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(5): 1317–1329 (in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian, Wang Huichu, Li Huaikun, Yuan Guibang, Xin Houtian, Zheng Jiankang. 2002. Redefinition of the “Dakendaban Group” on the northern margin of the Qaidam basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(1):19–23(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2001. User's manual for Isoplot/Ex (rev. 2.49): A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[R]. Berkeley Geochronology Centre, Special Publication, 1a, 55.
- Mcdougall I, Harrison T M. 1999. *Geochronology and Thermochronology by the ⁴⁰Ar/³⁹Ar Method*[M]. Oxford University Press: 34–59.
- Meng Fanchong, Zhang Jianxin, Yang Jingsui. 2005. Tectono–thermal event of post–HP/UHP metamorphism in the Xitieshan area of the North Qaidam Mountains, western China: Isotopic and geochemical evidence of granite and gneiss[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 45–56(in Chinese with English abstract)
- Pan Guitang, Li Xingzhen, Wang Liquan, Chen Zhiliang. 2002. Preliminary division of tectonic units of the Qinghai–Tibet Plateau and its adjacent regions[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(11): 701–707(in Chinese with English abstract)
- Passchier C W, Trouw R A J. 2005. *Microtectonics*[M]. Springer Berlin Heidelberg.
- Peng Yuan, Ma Yinsheng, Liu Chenglin, Li Zongxing, Sun Jiaopeng, Shao Pengcheng. 2016. Geological characteristics and tectonic significance of the Indosinian granodiorites from the Zongwulong tectonic belt in North Qaidam[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(2): 206–221(in Chinese with English abstract).
- Qiu Shidong, Gu Pingyang, Pang Xinyu, Dong Zengchan, Zha Xianfeng, Zha Fangyong, Chen Ruiming, Zhuang Yujun. 2015. Zircon MC–LA–ICP–MS U–Pb dating, geochemistry and geological significance of gneissic quartz diorite in Northern Lenghu, Qinghai[J]. *Geological Review*, 61(4):948–960 (in Chinese with English abstract).
- Song Shuguang, Zhang Lifei, Niu Yaoling, Song Biao, Liu Dunyi. 2004. Early Paleozoic plate–tectonic evolution and deep continental subduction on the northern margin of the Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 23(9): 918–925 (in Chinese with English abstract).
- Stipp M, Stünitz H, Heilbronner R, Schmid S M, 2002. The eastern Tonale fault zone: A ‘natural laboratory’ for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700°C[J]. *Journal of Structural Geology*, 24(12): 1861–1884.
- Wang Huichu, Lu Songnian, Yuan Guibang, Xin Houtian, Zhang Baohua, Wang Qinghai, Tian Qi. 2003. Tectonic setting and age of the “Tanjianshan Group” on the northern margin of the Qaidam basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 22(7):487–493 (in Chinese with English abstract).
- Wang Suli, Zhou Lifa, 2016. LA–ICP–MS zircon U–Pb dating, geochemistry and tectonic implication of the bojite in the Zongwulong Mountain[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 46(5): 716–724 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yizhi, Bai Yongshan, 2001. Geological characteristics of Tianjunnanshan ophiolite in Qinghai and its forming environment[J]. *Geology of Qinghai*, 1: 29–35(in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Lei Min, Wu Di, Li Tianxiao. 2016. Zircon SHRIMP dating and genesis of granites in Wulan area of Northern Qaidam[J]. *Acta Geoscientica Sinica* 37(4): 493–516 (in Chinese with English abstract).
- Xu Wei, Sun Zhiming, Pei Junling, Pan Jiawei, Li Haibing, Li Aozhu, Zhao Yue, Ren Xiaojuan. 2011. New Late Permian paleomagnetic results from Qaidam block and tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3479–3486(in Chinese with English abstract).
- Yang Chao, Chen Qinghua, Wang Guanmin, Pang Xiaojun, Ma Tingting. 2010. Sedimentary and tectonic evolution of Qaidam areas in Late Paleozoic[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 34(5): 38–43 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Wang Xibin, Shi Rendeng, Xu Zhiqin, Wu Cailai. 2004. The Dur'ngoi ophiolite in East Kunlun, northern Qinghai–Tibet Plateau: A fragment of paleo–Tethyan oceanic crust[J]. *Geology in China*, 31(3): 225–239 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guibin, Zhang Lifei, Christy Andrew G. 2013. From oceanic subduction to continental collision: An overview of HP–UHP metamorphic rocks in the North Qaidam UHP belt, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 63: 98–111.
- Zhang Yan, Chen Wen, Chen Kelong, Liu Xinyu. 2006. Study on the

- Ar-Ar age spectrum of diagenetic I/S and the mechanism of ^{39}Ar recoil loss—Examples from the clay minerals of P-T boundary in Changxing, Zhejiang Province[J]. Geological Review, 52(4): 556–561(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yu, Pei Xianzhi, Li Ruibao, Liu Chenjun, Chen Youxin, Li Zuo Chen, Wang Xin, Hu Chenguang, Yan Quanzhi, Peng Sizhong, Chen Guochao. 2017. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry of the Alasimu gabbro in eastern section of East Kunlun Mountains and the closing time of Paleoocean basin[J]. Geology in China, 44(3): 526–540(in Chinese with English abstract).
- Zhu Guang, Wang Yongsheng, Liu Guosheng, Niu Manlan, Xie Chenglong, Li Changcheng. 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of strike-slip motion on the Tan-Lu fault zone, East China[J]. Journal of Structural Geology, 27(8): 1379–1398.
- ### 附中文参考文献
- 陈文, 张彦, 张岳桥, 金贵善, 王清利. 2006. 青藏高原东南缘晚新生代幕式抬升作用的 Ar-Ar 热年代学证据[J]. 岩石学报, 22(4): 867–872.
- 笮梁超, 牛漫兰, 李秀财, 韩雨, 吴齐, 闫臻, 赵齐. 2017. 柴北缘二郎洞地区 L 构造岩变形特征及其地质意义[J]. 地质科学, 52(4): 1038–1057.
- 郭安林, 张国伟, 强娟, 孙延贵, 李广, 姚安平. 2009. 青藏高原东北缘印支期宗务隆造山带[J]. 岩石学报, 25(1): 1–12.
- 郝国杰, 陆松年, 王惠初, 辛后田, 李怀坤. 2004. 柴达木盆地北缘前泥盆纪构造格架及欧龙布鲁克古陆块地质演化[J]. 地学前缘, 11(3): 115–122.
- 胡玲. 2009. 变形显微构造识别手册[M]. 北京: 地质出版社.
- 刘永江, Franz Neubauer, 李伟民, Johann Genser, 李伟. 2012. 柴北缘—南祁连地区构造热事件[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(5): 1317–1329.
- 陆松年, 王惠初, 李怀坤, 袁桂邦, 辛后田, 郑健康. 2002. 柴达木盆地北缘“达肯大坂群”的再厘定[J]. 地质通报, 21(1): 19–23.
- 孟繁聪, 张建新, 杨经绥. 2005. 柴北缘锡铁山早古生代 HP/UHP 变质作用后的构造热事件——花岗岩和片麻岩的同位素与岩石地球化学证据[J]. 岩石学报, 21(1): 45–56.
- 潘桂棠, 李兴振, 王立全, 丁俊, 陈智梁. 2002. 青藏高原及邻区大地构造单元初步划分[J]. 地质通报, 21(11): 701–707.
- 彭渊, 马寅生, 刘成林, 李宗星, 孙娇鹏, 邵鹏程. 2016. 柴北缘宗务隆构造带印支期花岗岩闪长岩地质特征及其构造意义[J]. 地学前缘, 23(2): 206–221.
- 青海省地质矿产局. 1991. 青海省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1–662.
- 邱士东, 辜平阳, 庞新愉, 董增产, 查显峰, 查方勇, 陈锐明, 庄玉军. 2015. 青海冷湖北片麻状石英闪长岩的 MC-LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. 地质论评, 61(4): 948–960.
- 宋述光, 张立飞, Niu Y., 宋彪, 刘墩一. 2004. 青藏高原北缘早古生代板块构造演化和大陆深俯冲[J]. 地质通报, 23(9): 918–925.
- 王惠初, 陆松年, 袁桂邦, 辛后田, 张宝华, 王青海, 田琪. 2003. 柴达木盆地北缘滩间山群的构造属性及形成时代[J]. 地质通报, 22(7): 487–493.
- 王苏里, 周立发. 2016. 宗务隆山角闪辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及其地质意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 46(5): 716–724.
- 王毅拜, 拜永山, 陆海莲. 2001. 青海天峻南山蛇绿岩的地质特征及其形成环境[J]. 青海地质, (1): 29–35.
- 吴才来, 雷敏, 吴迪, 李天啸. 2016. 柴北缘乌兰地区花岗岩锆石 SHRIMP 定年及其成因[J]. 地球学报, 37(4): 493–516.
- 许伟, 孙知明, 裴军令, 潘家伟, 李海兵, 李傲竹, 赵越, 任晓娟. 2011. 青藏高原北部柴达木块体晚二叠世古地磁结果及其构造意义[J]. 岩石学报, 27(11): 3479–3486.
- 许志琴. 1997. 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.
- 杨超, 陈清华, 王冠民, 庞小军, 马婷婷. 2010. 柴达木地区晚古生代沉积构造演化[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 34(5): 38–43.
- 杨经绥, 王希斌, 史仁灯, 许志琴, 吴才来. 2004. 青藏高原北部东昆仑南缘德尔尼蛇绿岩: 一个被肢解了的古特提斯洋壳[J]. 中国地质, 31(3): 225–239.
- 张雪婷. 2007. 青海省区域地质概论[M]. 北京: 地质出版社.
- 张彦, 陈文, 陈克龙, 刘新宇. 2006. 成岩混层(I/S)Ar-Ar 年龄谱型及 ^{39}Ar 核反冲丢失机理研究——以浙江长兴地区 P-T 界线粘土岩为例[J]. 地质论评, 52(4): 556–561.
- 张玉, 裴先治, 李瑞保, 刘成军, 陈有炘, 李佐臣, 王兴, 胡晨光, 颜全治, 彭思钟. 2017. 东昆仑东段阿拉思木辉长岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及洋盆闭合时限界定[J]. 中国地质, 44(3): 526–540.