

柴北缘锡铁山韧性剪切带的基本特征及其形成时代

付建刚^{1,2}, 梁新权^{1*}, 王策¹, 蒋英¹, 周云³,
潘传楚⁴, 杨永强⁵, 王泽利⁶, 钟永生⁷

(1.中国科学院 广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 2.中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 3.桂林理工大学 地球科学学院, 广西 桂林 541004; 4.中国科学院广州地球化学研究所 长沙矿产勘查中心, 湖南 长沙 410013; 5.中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083; 6.山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266510; 7.西部矿业股份有限公司锡铁山分公司, 青海 锡铁山 816203)

摘要: 在柴北缘锡铁山地区元古宇达肯大坂群与奥陶系滩涧山群之间发育一条呈 NW 向展布的基底韧性剪切带。本文对该韧性剪切带中的宏观构造(鞘褶皱、不对称褶皱、塑性流变组构、S-C 组构、旋转碎斑系、构造透镜体、粘滞型石香肠构造)和糜棱岩微观构造(云母鱼构造、压力影构造、动态重结晶、雪球状旋转构造、波状消光和云母扭折)特征作了详细的研究。对锡铁山基底韧性剪切带中花岗质糜棱岩进行白云母 Ar-Ar 同位素测年, 获得坪年龄为 398 ± 4 Ma, 等时线年龄为 399 ± 4 Ma, 二者基本一致, 代表了锡铁山基底韧性剪切带的形成时间。综合上述特征判断, 锡铁山韧性剪切带是一条由元古宇达肯大坂群向 SW 斜向逆冲所形成的右行逆冲韧性剪切带, 该韧性剪切带与早古生代柴达木地块向 NE 斜向俯冲碰撞造山作用有关, 并可能导致了超高压变质体折返到浅部地壳层次。同样, 该韧性剪切带的存在, 也对锡铁山铅锌矿起到了十分重要的后期构造控制作用。

关键词: 韧性剪切带; 白云母; Ar-Ar 测年; 右行走滑逆冲; 构造意义; 锡铁山; 柴北缘

中图分类号: P542; P597 文献标志码: A 文章编号: 1001-1552(2016)01-0014-015

柴达木盆地北部边缘(简称柴北缘)构造带是青藏高原北部一条十分重要的构造边界, 带内以发育海相火山岩、蛇绿岩套以及超高压变质岩而备受地质工作者的关注(赖绍聪等, 1996; 杨经绥等, 1998; 张建新等, 2000, 2002, 2003, 2004; 郝国杰等, 2001; 史仁灯等, 2003; 王惠初等, 2003; 张贵宾等, 2005; Zhang et al., 2005, 2006)。其中海相火山岩为一套呈 NW 向展布的早古生代浅变质岩, 称为奥陶系滩涧山群, 断续分布在都兰、锡铁山、绿梁山和赛什腾山等地(青海省地层表编写小组, 1980)。分布于锡铁

山地区的滩涧山群赋含我国大型铅锌矿床——锡铁山铅锌矿床, 成为整个柴北缘地区的重点研究对象(邬介人等, 1987; 冯佐海等, 1997; 邓吉牛, 1999; 孟繁聪等, 2003; 李峰等, 2007; 王莉娟等, 2008; 冯志兴等, 2010; 吴冠斌等, 2010; 孙华山等, 2012)。锡铁山早古生代滩涧山群变火山岩沉积碎屑岩经历了后期强烈的构造变形和变质作用, 从而为该地区的地质研究工作带来更多难题。前人虽对该地区做了大量的地质研究工作, 但主要集中在岩石矿物(张聪等, 2009)、地层学(邬介人等, 1987; 李峰等, 2006)、

收稿日期: 2014-01-22; 改回日期: 2014-08-07

项目资助: 国家自然科学基金(41173066)和西部矿业股份有限公司科研项目联合资助。

第一作者简介: 付建刚(1987-), 男, 博士, 构造地质学专业。Email: fujiangang@gig.ac.cn

通信作者: 梁新权(1964-), 男, 研究员, 主要从事构造、沉积、地球化学研究。Email: liangxq@gig.ac.cn

地球化学(孟繁聪等, 2003, 2005a, 2005b; 高晓峰等, 2011)以及锆石年代学(赵风清等, 2003; 李峰等, 2007; Zhang et al, 2009; Zhang et al, 2012)等方面, 对该地区构造变形研究较少(赖绍聪等, 1993; 郭进京, 2000; 汪劲草等, 2000), 到目前为止, 还没有人对锡铁山地区韧性剪切带做过专门的研究。而该区韧性剪切带的存在, 对锡铁山铅锌矿床产生了明显的后期构造改造作用; 同时, 该韧性剪切带的形成时代和构造背景, 是构建整个柴北缘早古生代陆陆碰撞造山框架的主要依据。因此, 本文通过广泛发育于锡铁山地区韧性剪切带中多种典型的宏观、微观构造, 分析该地区韧性剪切带的几何学、运动学特征; 同时利用激光阶段加热法, 对韧性剪切带内高应变区中的花

岗质糜棱岩进行白云母 Ar-Ar 同位素测年, 从而确定该区基底韧性剪切带的形成时代, 并讨论了该韧性剪切带形成的构造背景及其对锡铁山矿床的后期改造作用, 从而为进一步研究锡铁山矿床和整个柴北缘构造带的大地构造演化提供新的证据。

1 地质背景

柴北缘发育着一条 NW-SE 向展布的大型韧性剪切带, 北起苏干湖-鱼卡-大柴旦-托素湖, 南以柴达木盆地为界, 包括赛什腾山、绿梁山、锡铁山、阿木尼克山、茶卡南山等, 全长约 600 km (赖绍聪等, 1993)(图 1)。

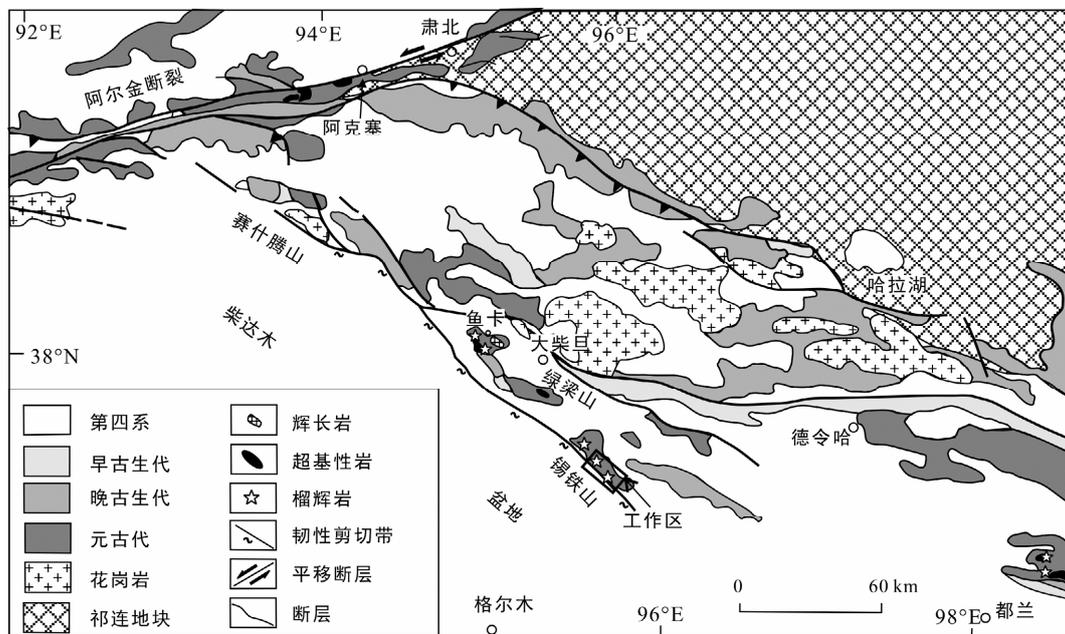


图 1 柴北缘区域地质简图(据 Zhang et al., 2005)

Fig.1 Simplified geological map of the North Qaidam

锡铁山地区位于柴北缘构造带的中部, 矿区出露地层由老到新依次为: 元古宇达肯大坂群; 奥陶系滩涧山群的海相火山碎屑-沉积岩系; 晚泥盆世磨拉石沉积建造的复成分砾岩; 石炭纪砂岩以及第四纪沉积物(青海第五地质队, 1988)。元古宇达肯大坂群构成了锡铁山地区的基底, 进一步可划分为三套岩石组合, 即变质的表壳岩系、角闪岩岩组和花岗质片麻岩。变质的表壳岩相当于前人建立的沙柳河岩群或鱼卡河岩群(张建新等, 2002; 王惠初等, 2006), 主要为石榴云母长石片麻岩、石英云母片岩、石榴(蓝晶)白云片岩、(含榴)二云片岩、黑云变粒岩、含榴黑云角闪片岩、大理岩。角闪岩岩组以斜长角

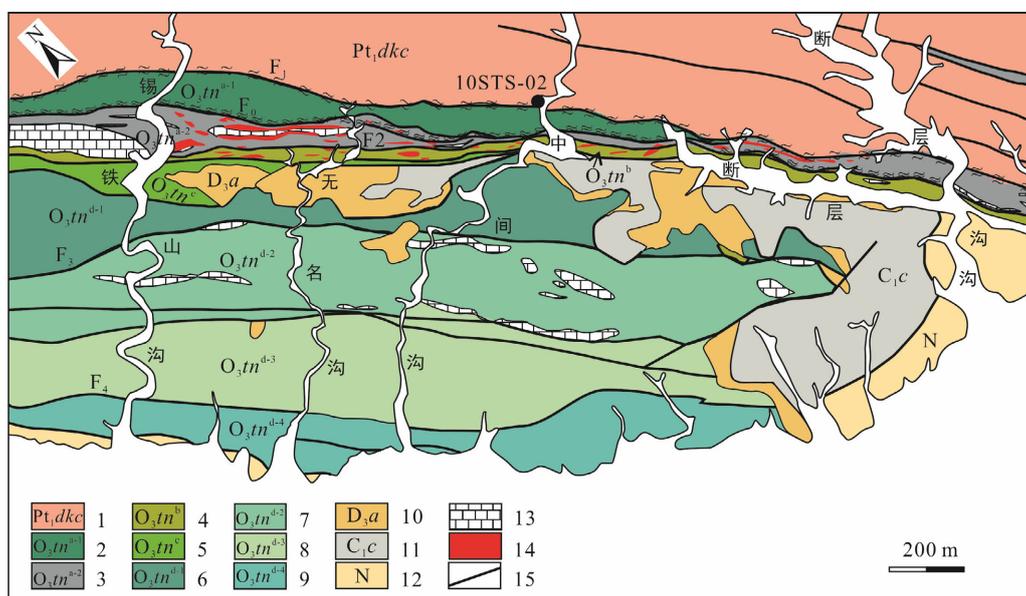
闪岩为主, 规模较小, 以构造透镜体呈“孤岛”状分布在表壳岩系中。花岗片麻岩具片麻状或眼球构造, 成分上为黑云母和二云母、含或不含石榴子石的变质花岗闪长岩、英云闪长岩或奥长花岗岩以及花岗岩等。滩涧山群为矿区主要的赋矿围岩, 主要由中基性变火山岩、沉积碎屑岩、碳酸盐岩组成, 从北东向南西进一步划分为四个组: 下部火山-沉积岩组(O_3tn^a , 又称 a 岩性组), 包括: 下部基性和酸性火山岩互层段(O_3tn^{a-1})和上部正常沉积岩段(O_3tn^{a-2} , 主要赋矿层位), 底部 a-1 段中流纹斑岩的锆石 U-Pb 年龄为 455 Ma(梁新权等, 2012), 表明锡铁山滩涧山群形成于中晚奥陶世; 中基性火山碎屑岩组

(O_3tn^b , 又称 b 岩性组), 为次要含矿层; 紫红色砾岩组(O_3tn^c , 又称 c 岩性组), 本次研究中对该组进行碎屑锆石 U-Pb 定年, 获得最小峰值年龄为 430 Ma (梁新权等, 2012), 推测其形成时代可能为早志留世;

上部中基性火山岩组(O_3tn^d , 又称 d 岩性组), 包括下部中基性火山碎屑岩段(O_3tn^{d-1})、正常碎屑沉积岩段(O_3tn^{d-2})、上部中基性火山碎屑岩段(O_3tn^{d-3})和顶部基性熔岩段(O_3tn^{d-4})(邬介人等, 1987; 张德全等, 2005; 李峰等, 2007)。

矿区遭受后期强烈的构造变形作用, 以发育多条规模不等的韧性剪切带为主要特征, 并分别被后期脆性断层叠加和改造。从北东向南西, 韧性剪切带在达肯大坂群与滩涧山群底部接触带、 O_3tn^{a-1} 与

O_3tn^{a-2} 、 O_3tn^{a-2} 与 O_3tn^b 、 O_3tn^{d-1} 与 O_3tn^{d-2} 、 O_3tn^{d-3} 与 O_3tn^{d-4} 以及其内部不同岩性之间均有不同程度的发育, 韧性剪切变形强度依次减弱, 分别被后期脆性断层 F_1 、 F_0 、 F_2 、 F_3 、 F_4 叠加改造(图 2)。这些剪切带出露在中间沟-断层沟, 往西延伸到无名沟、锡铁山沟, 甚至黄羊沟一带, 一般呈 NW-SE 向平行分布, 与片理走向基本一致(图 3), 可能为同一构造事件的产物。其中以分布于达肯大坂群和滩涧山群底部的韧性剪切带(简称基底韧性剪切带)规模最大, 韧性剪切变形最强, 带内岩石发生了强烈的糜棱岩化, 应该是该地区韧性剪切变形的中心带, 在该地区占据主导地位, 且被后期脆性断层 F_1 叠加改造。



1. 元古宇达肯大坂群; 2. 基性与酸性火山碎屑岩; 3. 热水沉积和正常沉积岩; 4. 中性火山碎屑岩; 5. 紫红色碎屑岩; 6. 基性火山碎屑岩; 7. 正常沉积岩; 8. 基性火山碎屑岩; 9. 基性熔岩; 10. 泥盆系阿木尼克组, 杂色砂岩及碎屑岩; 11. 石炭系城墙沟组; 12. 新近系上干柴沟组; 13. 大理岩; 14. 铅锌矿体; 15. 断层。

图 2 锡铁山地区地质简图

Fig.2 Simplified geological map of the Xitieshan area

2 韧性剪切带的特征

2.1 韧性剪切带的宏观特征

韧性剪切带是岩石在塑性状态下发生连续变形的狭窄高剪切应变带, 以发育强烈密集的面理带为特色, 通常产于变形变质岩区(朱志澄, 1999), 如新疆东天山地区塔水河韧性剪切带(马华东等, 2008)、新疆哈密库姆塔格沙垄北段韧性剪切带(魏刚锋等, 2007)、滇西主高黎贡韧性剪切带(吴小奇等, 2006)和煎茶岭韧性剪切带(聂江涛等, 2010)等。锡铁山基底韧性剪切带位于早古生代滩涧山群和元古宙基底

达肯大坂群之间, 是区域上柴北缘大型韧性剪切带在锡铁山地区的出露部分(赖绍聪等, 1993), 该剪切带北西起黄羊沟, 向南东经锡铁山沟、无名沟、中间沟延伸到断层沟(图 2), 呈 NW 向展布, 长达 10 km 以上, 宽度从 5~500 m 不等, 在无名沟一带最大, 宽度与 O_3tn^{a-1} 相当, 往两侧(NW 和 SE)逐渐变窄。该剪切带在锡铁山沟表现明显, 由花岗质、角闪质糜棱岩系列组成, 是一条明显发生退变质作用的动力变质变形带。带内达肯大坂群和滩涧山群均遭受了强烈糜棱岩化的韧性剪切变形, 广泛发育条带状长英质糜棱岩和中基性糜棱岩, 该糜棱岩具有以下

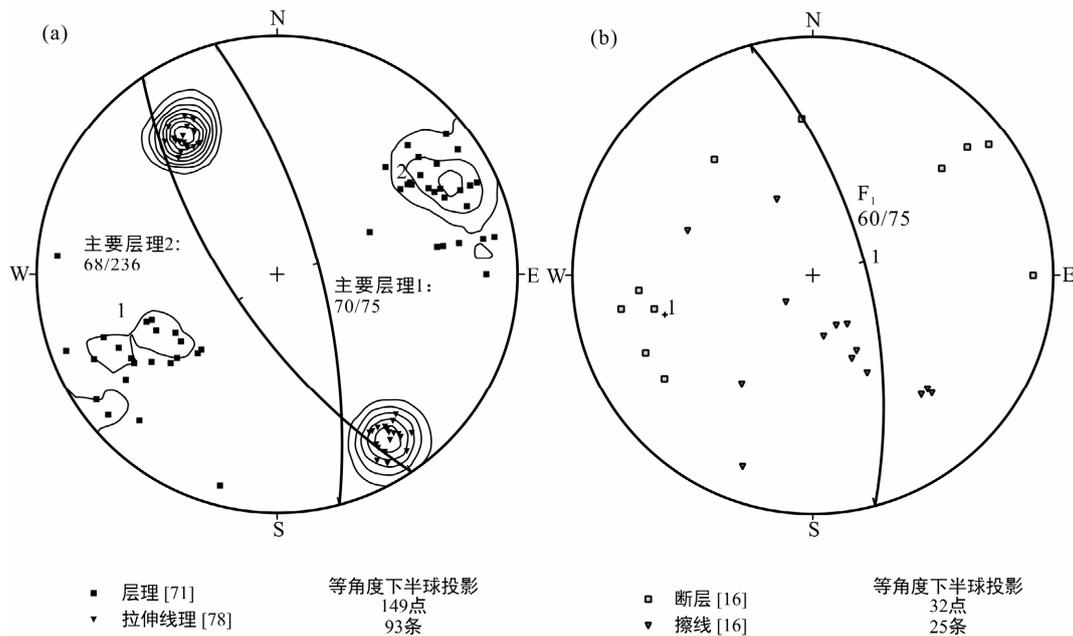


图 3 锡铁山矿区地层层理和韧性剪切带中拉伸线理的下半球赤平投影图(a), 和锡铁山矿区基底韧性剪切带和矿区其余相对较大的断层以及对应擦线的下半球赤平投影图(b)(其中基底韧性剪切带被后期脆性断层 F_1 所叠加)

Fig.3 Stereogram of the foliation and lineation of the ductile shear zone in the Xitishan area (a), and stereogram of the basal ductile shear deformation and other relatively big faults, and their striation in the Xitishan mining area (b)

四个特征: (1) 与原岩相比, 粒度明显减小; (2) 面理及线理极为发育(图 4a); (3) 发育在狭窄的强应变带, 强应变带位于滩涧山群底部 a-1 组和老地层达肯大坂群交界处; (4) 至少有一种造岩矿物发生了明显的塑性变形(如丝带构造和核幔构造)(朱志澄, 1999)。滩涧山群底部 a 组靠近韧性剪切变形中心, 下部 a-1 段变火山岩呈长扁透镜体出露, 带内灰绿色石英斜长片岩、绿泥片岩、绿帘片岩、石英绢云母片岩皆属糜棱岩、超糜棱岩和千糜岩, 向上 a-2 段中灰黑色、黑绿色绿泥石石英绢云母片岩、含炭绢云母石英片岩、白色薄-厚层大理岩、青灰色条带状大理岩等也发生强烈糜棱岩化, 甚至细颈化或透镜化。向南西远离韧性剪切变形中心, 变形整体依次较弱, 呈现窗棂构造, 中-小型紧闭直立褶皱, 斜歪褶皱、不对称褶皱等等。从达肯大坂岩群到滩涧山群底部 a 组, 岩石的糜棱面理产状是变化的, 时而倾向 NE($45^{\circ}\sim 65^{\circ}$), 时而倾向 SW($220^{\circ}\sim 245^{\circ}$), 但从区域上看, 主变形带呈 NW-SE 向分布, 高角度($75^{\circ}\sim 90^{\circ}$)倾向 NE; 同样, 剪切带中的矿物拉伸线理或生长线理呈现类似倒转背形的波状变化特征, 整体倾向 NW, 侧伏角大约 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$, 局部发育近水平方向、倾向 SE 的拉伸线理, 侧伏角在 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ (图 3)。

2.1.1 拉伸线理与鞘褶皱

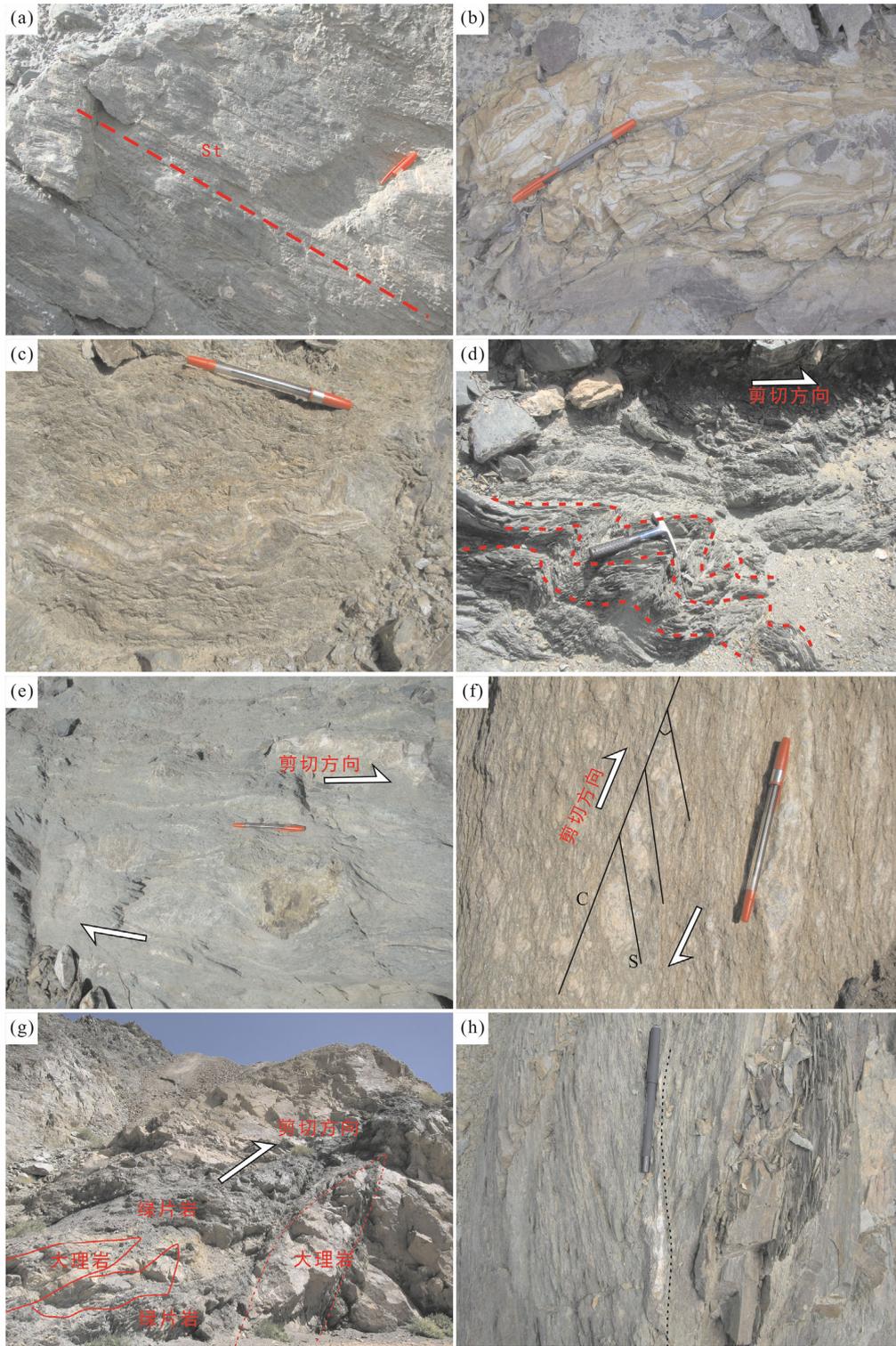
拉伸线理代表剪切运动方向, 主要为矿物拉伸线理, 由绢云母、绿泥石矿物集合体及粒状矿物或其集合体的拉长定向排列构成。鞘褶皱是一种特殊的 A 型褶皱, 拉伸线理与褶皱大致平行, 呈扁圆状或者舌状, 沿着剪切方向可以拉伸很长。锡铁山地区发育的鞘褶皱(图 4b)和拉伸线理基本平行, 图中显示的为鞘褶皱 YZ 断面, 呈现眼球状和豆荚状的特征, 同心层状清晰明显。鞘褶皱枢纽方向指向 SE, 与拉伸线理一致, 倾伏向 150° , 侧伏角在 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 左右, 代表了最大拉伸方向。

2.1.2 塑性流变组构

锡铁山韧性剪切带糜棱岩中常发育有塑性流变(图 4c), 流变体多为长英质、硅质的变质分异条带, 形态多变, 十分复杂, 无法判别其剪切方向。

2.1.3 不对称褶皱

锡铁山韧性剪切带中发育有小尺度露头的不对称褶皱(图 4d), 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。随着剪切变形的增加褶皱幅度加大, 形成了缓倾斜的长翼和倒转短翼的不对称褶皱, 由长翼到短翼的方向, 代表了褶皱倒向, 从而判定剪切方向为右行(图 4d)。同时, 该褶皱属于 B 型褶皱, 枢纽与剪切方向垂直。



(a) 韧性剪切带中面理与线理(St), 面理产状 $55^{\circ} \sim 80^{\circ}$, 线理倾向 NW, 侧伏角 30° , 指示右行走滑逆冲(SW 方向拍摄), 锡铁山沟沟底; (b) 鞘褶皱, 照片显示的平面为 ZY 面, 垂直向里即平行 X 轴, 指示剪切拉长, 中间沟; (c) 石英绿泥片麻岩或糜棱岩与浅色脉体(石英脉)塑性变形, 中间沟; (d) 绿泥片麻岩中的不对称褶皱, 指示剪切方向为右行, 锡铁山沟; (e) 大理岩呈旋转透镜体分布于绿泥片麻岩或糜棱岩中, σ 型, 指示剪切方向为右行, 锡铁山沟; (f) 花岗质糜棱岩中的 S-C 结构, 靠近 F₁ 大断层, 指示剪切方向为右行, 中间沟达肯大坂群; (g) 大理岩呈透镜体沿 S-C 组构面分布(一个与 C 面一致, 另一个则 C 面斜交, 沿 S 面分布), 显示右行走滑, 锡铁山沟; (h) 绿泥片麻岩或糜棱岩中浅色脉体(石英脉)呈粘滞型石香肠构造, 锡铁山沟。

图 4 锡铁山韧性剪切带中宏观构造特征

Fig.4 Macroscopic structural characteristics of the ductile shear zone in the Xitietieshan area

2.1.4 旋转碎斑系

旋转碎斑是韧性剪切带中常见的构造组合,是在糜棱岩韧性基质剪切流动过程中,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。在锡铁山滩涧山群和达肯大坂群地层中,野外均可见到似 σ 型旋转碎斑构造(图 4e)。刚性的大理岩在剪切变形中旋转,带动周围的绿泥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右行。

2.1.5 S-C 组构

韧性剪切带中常发育两类面理:剪切带内面理(S)和糜棱岩面理(C)。锡铁山地区达肯大坂群中糜棱岩化的长英质片麻岩,随着韧性剪切的增加,早期的面理和变质分异条带转化为宏观的 C 面理,它与剪切带边界平行为一组连续的剪切滑劈理,主要由层状硅酸盐矿物及拉长的粒状矿物定向排列而成。而糜棱岩中长石颗粒定向排列,形成了 S 面理(图 4f),并与 C 面理呈小角度锐夹角,大约 30° 左右,指示剪切方向为右行。

2.1.6 构造透镜体

锡铁山滩涧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 4g),其边缘强烈糜棱岩化,大小不等的构造透镜体沿着剪切方向呈叠加式展布。在递进剪切作用下,透镜体内部产生破裂并发生了旋转,生成多个透镜体,沿 S-C 组构面分布,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,指示剪切方向为右行。

2.1.7 粘滞型石香肠构造

锡铁山石香肠构造中的香肠体在韧性剪切作用下,相对于糜棱岩面理发生了小角度的旋转,并被剪切拉长,形成了不对称的透镜体,透镜体之间常表现为错而未断的特征(图 4h),是强硬层在高塑性条件下的剪切变形结果。

2.2 韧性剪切带的显微构造特征

锡铁山基底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发生了明显的塑性变形(图 5a~f)。显微构造均显示出塑性变形、动态重结晶等构造特征,多具有碎斑结构及糜棱结构,碎斑主要为斜长石或透长石和石英。宏观上能观察到的构造现象在镜下基本都可以看到。下面主要介绍一些宏观上观察不到或不太明显的显微构造特征。

2.2.1 压力影

压力影构造是由岩石中相对刚性的物体及其两

侧在变形中发育的同构造纤维状结晶矿物组成,纤维的生长方向随变形过程中最大拉伸轴的方向而变化,可分为单斜对称压力影(图 5g)和对称性压力影(图 5h)。锡铁山滩涧山群糜棱岩在韧性剪切变形中,相对刚性的碎斑两侧的结晶纤维呈现出单斜对称的形状,压力影构造中矿物结晶纤维生长的方向指示剪切方向为右行(图 5g)。

2.2.2 角闪石或云母鱼构造

角闪石或云母鱼构造主要发育于锡铁山老地层的长英质糜棱岩、花岗闪长质糜棱岩和角闪石绿泥石糜棱岩等岩石中。先存的角闪石和云母等矿物,在剪切作用过程中,形成了与剪切方向相反的微型犁式正断层(图 5i)。随着变形作用的持续,角闪石和云母发生了滑移、分离并且旋转,从而形成了不对称的云母鱼(图 5a)或角闪石鱼(图 5j)。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小剪切带,组成了 C 面理,和 S-C 面理相同,形成大约 30° 的锐夹角,指示剪切方向为右行(图 5j)。同样,根据不对称角闪石鱼和云母鱼上反向的微型正断层判断,剪切方向为右行(图 5a, i, j)。

2.2.3 雪球状旋转构造

锡铁山糜棱岩中刚性的碎斑在韧性剪切过程中发生了旋转,带动了周边基质一起旋转滚动,形成了一种类似雪球状的构造(图 5k)。斑晶主要以长石为主,基质中长石、石英、云母均呈细碎粒,大部分石英呈现出拔丝状条带。雪球状构造整体呈现出明显的旋转特征,指示剪切方向为右行。

2.2.4 动态重结晶

随着韧性变形中的重结晶程度增高,糜棱岩中细小的颗粒或者是多晶集合体重新结晶而长大,使糜棱岩转变为各种结晶片岩。而动态重结晶是变形或产生位错的颗粒在同期韧性剪切过程中,为消除形变及位错引起的不平衡,使变形晶体恢复到未变形状态而产生的一种动态恢复过程。在锡铁山的糜棱岩中,基质和碎斑均发生了重结晶,镜下可见动态重结晶颗粒多呈拔丝拉长状,以发育矩形多晶石英细长变形条带为特征(图 5l)。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。

2.2.5 波状消光和云母扭折

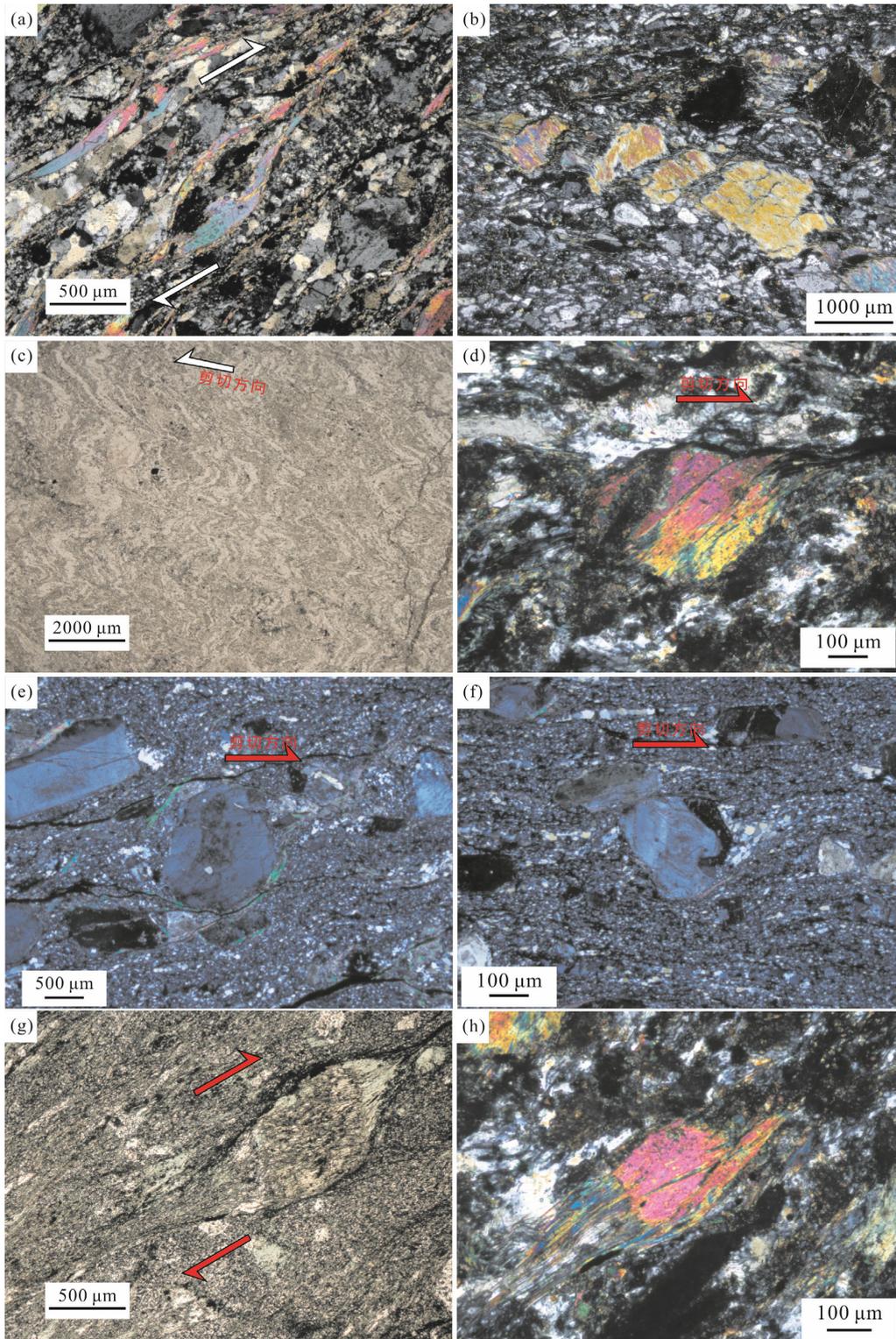
在锡铁山花岗质糜棱岩中,石英晶粒常呈现出波状消光及条带状消光(图 5m),反映出强烈的韧性剪切变形。云母则主要是剪切过程中形成的重结晶

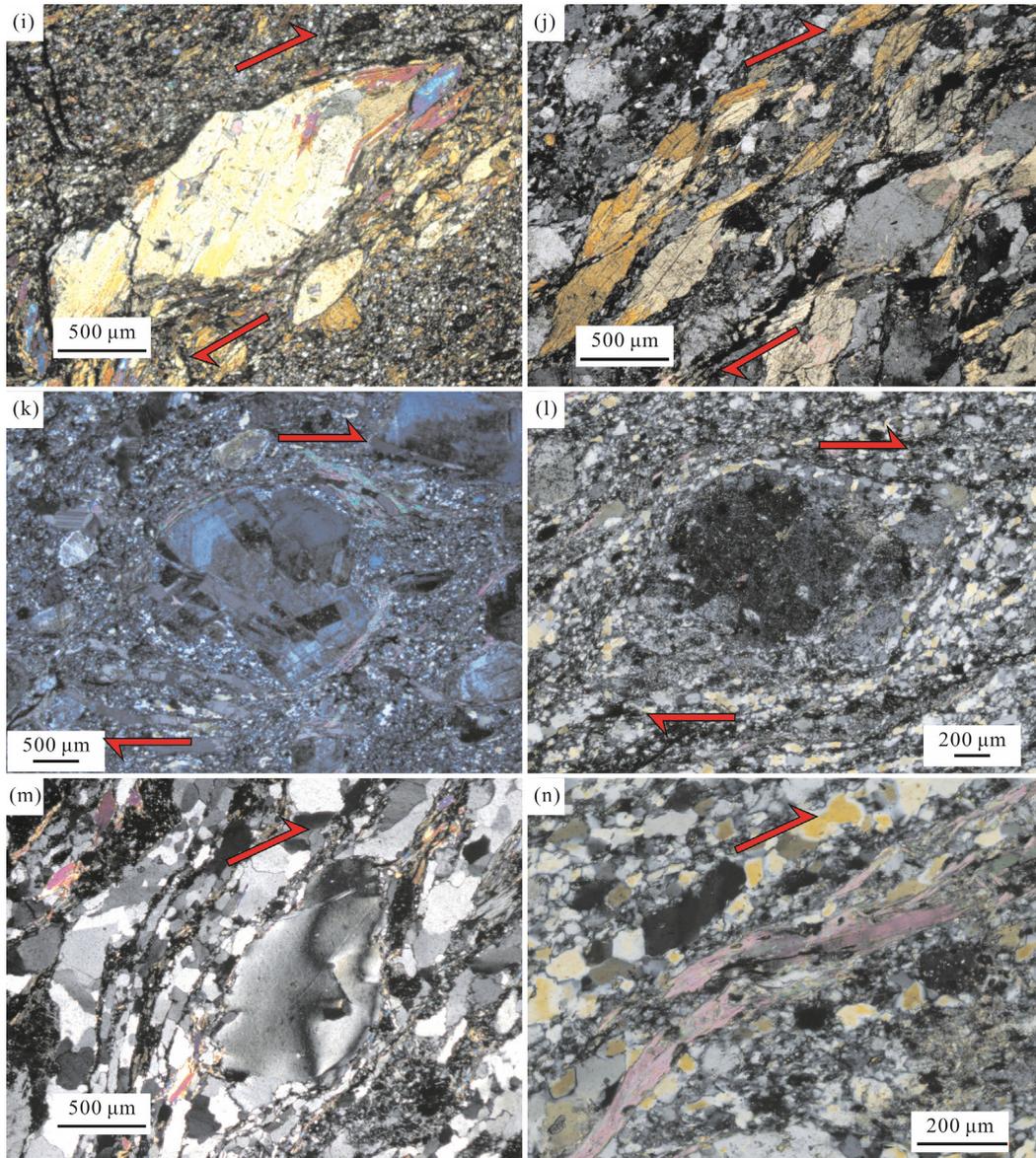
矿物, 常常发生扭折, 解理弯曲, 多呈 S 型展布(图 5n)。因此, 利用剪切带白云母或者黑云母 Ar-Ar 同位素测年, 可以确定韧性剪切带的活动时间(黄瀚霄等, 2012; 杨富全等, 2013)。

2.3 韧性剪切带的运动方向

锡铁山韧性剪切带整体走向 NW, 倾向为 NE,

局部见倾向 SW, 与区域上柴北缘大型韧性剪切带的产出基本一致(图 1)(赖绍聪等, 1993)。从锡铁山地区整体上看, 韧性剪切带产状基本稳定, 剪切面理为 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}/75^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 。糜棱岩中的矿物拉伸线理或生长线理呈现出波状变化特征, 整体倾向 NW, 侧伏角约 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ (图 4a), 局部发育近水平的, 倾向 SE 的拉





(a) 锡铁山沟花岗质糜棱岩, 云母显示右行的 S-C 结构; (b) 中间沟角闪石绿泥石片岩或糜棱岩中的石香肠构造, 角闪石斑晶明显被剪切拉断和旋转, 形成类似香肠构造; (c) 锡铁山沟绿泥石片岩或糜棱岩中局部一组密集的微型剪切带。剪切带之间的岩石发生了似断非断的剪切变形, 显示不对称显微褶皱; (d) 中间沟角闪石绿泥石片岩或糜棱岩中云母矿物显示 σ 型旋转; (e) 锡铁山沟流纹斑岩中石英呈 σ 型旋转, 右行; (f) 锡铁山沟流纹斑岩的石英呈 δ 型旋转, 右行; (g) 锡铁山沟长石绿泥石片岩的单斜对称压力影构造, 右行; (h) 中间沟角闪石绿泥石片岩的对称压力影构造; (i) 锡铁山沟角闪石绿片岩或糜棱岩中角闪石矿物被剪切变形成一系列显微透镜体, 呈 σ 型旋转, 右行; (j) 中间沟花岗闪长质糜棱岩中角闪石矿物剪切变形成 S-C 结构, 类似“云母鱼”, 右行; (k) 锡铁山沟底流纹斑岩的透长石呈雪球状旋转构造, 右行; (l) 锡铁山沟底长英质糜棱岩的长石斑晶的动态重结晶构造, 右行; (m) 石英波状消光和条带状消光, 右行; (n) 锡铁山沟底长英质糜棱岩的云母的扭折, 右行。

图 5 锡铁山韧性剪切带中微观构造特征

Fig.5 Microscopic structural characteristics of the ductile shear zone in the Xitietshan area

伸线理, 侧伏角在 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ (图 3)。同时在垂直面理和线理的截面(YZ)上以及后期 F_1 断层面上, 均发现有挤压逆冲的变形现象(许志琴等, 2003)。结合 S-C 结构(图 4f, 图 5a)、不对称褶皱(图 4d)、 δ 型和 σ 型旋转碎斑系(图 4e, 图 5d、e、f)、角闪石和云母鱼构造(图 4a、5i、5j)、不对称的压力影构造(图 5g)等特征, 说明锡铁山基底韧性剪切带为一右行走滑挤压逆冲的剪切带。随着区域上

达肯大坂群中高压变质体在浅部地壳的折返(大约在 $400\sim 406$ Ma)以及锡铁山倒转背斜的变化, 锡铁山超高压变质体开始了斜向挤出, 表明区域上祁连微板块相对于柴达木微板块右行运动。综合上述特征, 判断锡铁山基底韧性剪切带的运动方向为北东向南西的斜向右行走滑逆冲剪切, 也就是矿区北东盘达肯大坂群向南西斜向逆冲于滩涧山群之上。

3 韧性剪切带中白云母 Ar-Ar 测年研究

3.1 样品特征

本文用于白云母 Ar-Ar 测年的花岗质糜棱岩样品(10STS-02)位于锡铁山中间沟地区与滩涧山群过渡的达肯大坂群中的花岗质片麻岩带, 采样点位置坐标为 N37°20'29.5", E95°34'37.7"(图 2)。本次研究过程中同时对该花岗质片麻岩带进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 获得了新元古代 915 Ma 的年龄(梁新权等, 2012)。该花岗质片麻岩带在后期遭受了强烈的韧性变形, 从而形成了花岗质糜棱岩。

花岗质糜棱岩呈灰白色-灰红色, 中粗粒似斑状花岗质结构, 主要呈片麻状构造、眼球状构造, 片麻理和矿物拉伸线理发育。主要组成矿物为钾长石(30%~35%)、斜长石(20%~25%)、石英(15%~20%)、白云母(10%~15%)和黑云母(5%), 副矿物有锆石、石榴子石、榍石、矽线石。其中钾长石, 呈肉红色, 斑晶较大, 10~15 mm, 受后期强烈剪切变形影响, 长石发生旋转, 呈书斜状或眼球状分布(图 4f)。石英, 无色, 它形粒状, 粒度 2~3 mm, 波状消光明显, 许多重结晶的细小石英颗粒, 与微斜长石、黑云母等矿物定向排列, 反映岩石遭受了明显的韧性变形作用, 石英被强烈拉长(图 4h)。白云母, 呈鳞片状, 片径 2~8 mm, 在剪切过程中发生了重结晶, 常常发生扭折, 多呈 S 型展布。

3.2 测试方法

白云母 Ar-Ar 定年分析是在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室 GVI5400[®]质谱仪上完成。通过对样品进行粉碎、过筛、手工淘洗、重液分离、磁力分选和实体显微镜检查等工序获取白云母单矿物, 并对其选纯(纯度>99%)和超声波清洗。

中子通量监测标准样品采用北京房山花岗闪长岩黑云母 ZBH-2506, 其年龄为 132.5 Ma。标样用激光全熔进行质谱 Ar 同位素组成分析, 得到 J 值。然后根据 J 值变化曲线的函数关系和样品的位置计算出每个样品的 J 值。干扰同位素的校正因子为 $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}}=8.984\times 10^{-4}$, $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}}=2.673\times 10^{-4}$, $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}}=5.97\times 10^{-3}$ 。

为了准确扣除系统本底对样品的影响, 实验过程中以本底分析为开始和结束, 且白云母每做 5 个阶段样品分析间插做 1 个本底分析。数据处理时, 用每个本底值扣除其前后各 2~3 个阶段样品分析中本

底的贡献。本底分析的实验流程与样品分析完全一致(包括纯化、扩散转移和质谱分析等过程, 以及各个过程所占用的时间)。

3.3 测试结果

锡铁山花岗质糜棱岩样品 10STS-02 白云母 Ar-Ar 激光加热过程共分为 20 个阶段, 分析结果见表 1。采用专业软件 ArArCALC(v.2.4)进行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄计算和作图(Koppers, 2002)。16 个激光阶段组成一个平坦的年龄坪(图 6a), 坪年龄为 398 ± 4 Ma, 对应的 $^{36}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 反等时线年龄为 399 ± 4 Ma (图 6b), 坪年龄和反等时线年龄在误差范围内接近一致, 代表韧性剪切带的形成时间。

4 讨论

4.1 韧性剪切带的形成时代

早在 20 世纪 70 年代, 前人利用 K-Ar 法对发育于柴北缘达肯大坂群内部韧性剪切带中的黑云母做了同位素年龄测定, 获得年龄最大值为 402 Ma (林坤等, 1978), 该年龄代表变晶黑云母的形成年龄, 后来的学者将其解释为柴北缘大型韧性剪切带的形成时间(赖绍聪等, 1993)。随后, 许志琴等(2003)对锡铁山地区东北部达肯大坂群中的花岗质片麻岩进行白云母 Ar-Ar 测年, 获得坪年龄和等时线年龄基本一致, 分别为 405.7 Ma 和 404.7 Ma, 并认为是超高压变质岩体在浅部的后期折返年龄, 该年龄同样也是达肯大坂群中韧性剪切带的活动年龄。本文针对锡铁山滩涧山群与达肯大坂群过渡带中的花岗质糜棱岩进行了白云母 Ar-Ar 同位素测年, 获得了坪年龄和等时线年龄分别为 398 Ma 和 399 Ma, 二者基本接近一致, 该年龄应是花岗质糜棱岩中白云母的重结晶年龄。另一方面, 该地区温压变质轨迹研究表明在 400 Ma 左右, 超高压变质体折返至浅部(约 10 km)(Xu et al., 2006), 对应的变质变形温度为 400 左右(Zhang et al., 2005, 2009), 而白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 体系的封闭温度(T_c)大约在 405~425 左右(Harrison et al., 2009), 变形时温度条件与同位素封闭温度相近, 因此, 白云母 Ar-Ar 年龄代表了锡铁山基底韧性剪切带的形成时间。

4.2 韧性剪切带形成的动力学背景

韧性剪切带通常形成于地壳以下的深度, 与深部造山作用过程的简单剪切机制密切相关。无论是

表 1 样品 10STS-02 中白云母 Ar-Ar 定年结果
Table 1 Results of Ar-Ar dating of muscovite from the sample 10STS-02

| 阶段 | 激光能量 | ³⁶ Ar _a | ³⁷ Ar _{Ca} | ³⁸ Ar _{Cl} | ³⁹ Ar _K | ⁴⁰ Ar _r | Age (Ma) | 2σ | ⁴⁰ Ar _r (%) | ³⁹ Ar _K (%) |
|----|--------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------|----|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 4.50% | 0.000157 | 0.000001 | 0.000003 | 0.01054 | 0.220777 | 398 | 2 | 82.6 | 0.95 |
| 2 | 4.80% | 0.00018 | 0.000001 | 0.000006 | 0.013343 | 0.273815 | 391 | 2 | 83.7 | 1.2 |
| 3 | 5.10% | 0.000028 | 0.000004 | 0.000003 | 0.005332 | 0.113992 | 405 | 2 | 93.1 | 0.48 |
| 4 | 5.50% | 0.000117 | 0.000001 | 0.000005 | 0.021896 | 0.452725 | 393 | 2 | 92.9 | 1.97 |
| 5 | 5.80% | 0.000066 | 0.000006 | 0.000004 | 0.013769 | 0.288596 | 398 | 2 | 93.7 | 1.24 |
| 6 | 6.10% | 0.000079 | 0.000003 | 0.000004 | 0.020457 | 0.426536 | 396 | 2 | 94.8 | 1.84 |
| 7 | 6.50% | 0.000091 | 0.000006 | 0.000003 | 0.024739 | 0.511572 | 394 | 2 | 95 | 2.23 |
| 8 | 6.80% | 0.000083 | 0.000006 | 0.000005 | 0.027442 | 0.569831 | 395 | 2 | 95.8 | 2.47 |
| 9 | 7.30% | 0.000101 | 0.000005 | 0.000014 | 0.042632 | 0.884273 | 395 | 2 | 96.7 | 3.84 |
| 10 | 7.60% | 0.000111 | 0.000005 | 0.000004 | 0.045158 | 0.945407 | 398 | 2 | 96.6 | 4.07 |
| 11 | 7.90% | 0.000097 | 0.000004 | 0.000002 | 0.044558 | 0.932221 | 398 | 1 | 97 | 4.01 |
| 12 | 8.50% | 0.00009 | 0.000009 | 0.000001 | 0.053292 | 1.116415 | 398 | 1 | 97.7 | 4.8 |
| 13 | 9.00% | 0.000123 | 0.000001 | 0.000015 | 0.063557 | 1.333222 | 399 | 1 | 97.3 | 5.73 |
| 14 | 9.60% | 0.000107 | 0.000002 | 0.000008 | 0.050478 | 1.057574 | 398 | 1 | 97.1 | 4.55 |
| 15 | 10.60% | 0.000199 | 0.000012 | 0.000002 | 0.136184 | 2.854032 | 398 | 1 | 98 | 12.27 |
| 16 | 11.60% | 0.000225 | 0.000012 | 0.000014 | 0.136182 | 2.854894 | 398 | 1 | 97.7 | 12.27 |
| 17 | 13.60% | 0.000226 | 0.000012 | 0.000021 | 0.151486 | 3.177371 | 399 | 1 | 97.9 | 13.65 |
| 18 | 14.60% | 0.000159 | 0.000033 | 0.000036 | 0.114802 | 2.413756 | 399 | 1 | 98.1 | 10.34 |
| 19 | 15.60% | 0.000102 | 0.000008 | 0.000002 | 0.089138 | 1.875358 | 400 | 1 | 98.4 | 8.03 |
| 20 | 17.60% | 0.000047 | 0.000013 | 0.000006 | 0.044851 | 0.94534 | 400 | 1 | 98.5 | 4.04 |

注: Ar 同位素单位为 mV, 电子倍增器灵敏度为 $1.64 \times 10^{-15} \text{ mol/mV}$, $J=0.0117877$ 。

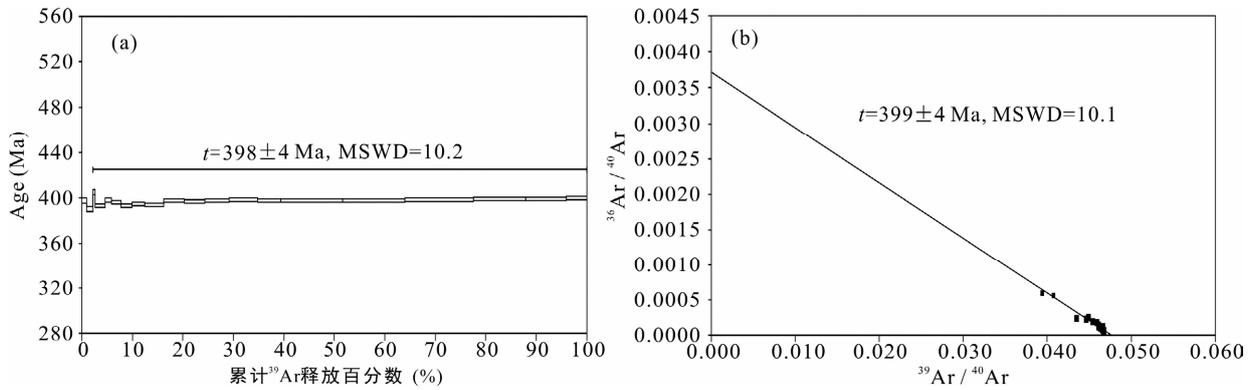
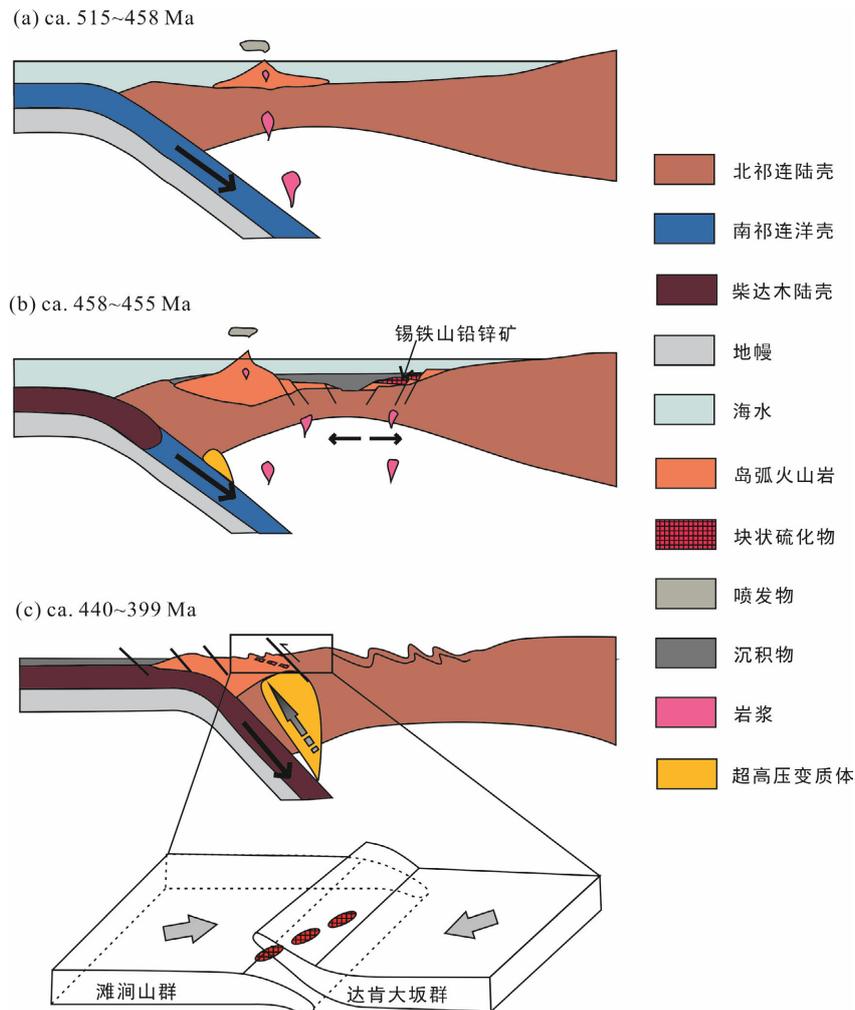


图 6 白云母 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄谱(a)和等时线(b)
Fig.6 ⁴⁰Ar/³⁹Ar age spectrum (a) and isochron (b) of muscovite

洋-陆壳俯冲, 还是陆-陆碰撞, 在其板块聚合带, 都将表现为构造变形的高应变带韧性。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(许志琴等, 1996)。

研究表明, 柴北缘在早古生代加里东期经历了多期复杂的俯冲-折返-碰撞造山事件(史仁灯等, 2003, 2004; 孟繁聪等, 2005; Shi et al., 2006; Xu et

al., 2006; 宋述光等, 2007, 2009; 孟繁聪和张建新, 2008; Chen et al., 2012; 张贵宾等, 2012)。晚寒武世-早奥陶世南祁连洋盆向北东俯冲于北祁连地体之下, 形成了岛弧火山岩(图 7a); 中-晚奥陶世柴达木地块随着南祁连洋壳的俯冲而发生了大陆的深俯冲及超高压变质作用, 同时弧后盆地开始扩张, 形成了大型锡铁山铅锌矿床(图 7b); 晚奥陶世-志留纪伴随着正向深俯冲向斜向深俯冲的转变, 超高压变质片岩开始了全面的折返, 随后祁连地块自北东至南西斜



(a) 晚寒武世—早奥陶世, 南祁连洋壳向北东俯冲在北祁连地体之下, 岛弧火山岩形成; (b) 中—晚奥陶世, 继洋壳俯冲之后的陆壳持续俯冲, 弧后盆地开始扩张, 形成了锡铁山铅锌矿, 超高压变质体开始折返; (c) 超高压变质体在斜向挤压机制下全面折返, 形成了锡铁山基底右行挤压逆冲的韧性剪切带, 并对锡铁山铅锌矿体产生了强烈的构造改造作用。

图 7 柴北缘锡铁山地区基底韧性剪切带形成的动力学背景(据郭进京, 2000; 许志琴等, 2003)

Fig.7 Geodynamic background of the ductile shear zone at the Xitieshan area, North Qaidam

向逆冲在柴达木地块之上, 在柴北缘则形成了陆陆碰撞造山带, 晚志留世—中泥盆世为加里东期碰撞造山运动的末期(图 7c)。一系列的碰撞造山事件是形成柴北缘大型韧性剪切带的主要原因。前人对韧性剪切带进行黑云母 K-Ar 法、白云母 Ar-Ar 法同位素测年, 获得年龄为 402~406 Ma (林坤等, 1978; 许志琴等, 2003)。结合我们本次研究获得锡铁山地区韧性剪切带的形成时间为 399 Ma, 该年龄与超高压变质体后期折返年龄在误差范围内一致, 表明柴北缘韧性剪切带的形成时代在 400 Ma 左右, 是加里东期陆陆碰撞造山末期的产物。柴达木地块向北东斜向俯冲碰撞是柴北缘韧性剪切带形成的主要机制。同时, 此韧性剪切带也促使超高压变质体折返到地壳浅部。

4.3 韧性剪切带对矿床的后期改造

柴北缘锡铁山滩涧山群的形成时代从 514~440 Ma(吴才来等, 2001; 赵风清等, 2003), 基本上在晚寒武世—奥陶纪范围内。本次研究中获得锡铁山韧性剪切带中白云母 Ar-Ar 年龄为 399 Ma, 属于早泥盆世, 明显要晚于滩涧山群火山—沉积岩组合的形成时代。同时在野外考察中发现, 位于滩涧山群中部的紫红色碎屑岩组(原滩涧山群 c 岩性组)经历了较弱的韧性剪切变形, 而其上覆泥盆纪地层具磨拉石建造的阿木尼克组中基本没有见到明显的韧性剪切变形, 说明该韧性剪切带是加里东期碰撞造山作用的产物。矿区含矿层位于滩涧山群的中下部, 靠近韧性剪切带, 在加里东期碰撞造山过程中, 伴随着柴达木地块与祁连地块斜向碰

撞, 达肯大坂群向 SW 逆冲到滩涧山群之上, 分布于韧性剪切带内的含矿层(a, b 组), 遭受了强烈的挤压剪切作用, 片理化发育程度极高, 变质程度较深。在滩涧山群中上部地层中(d 组), 远离韧性剪切带, 片理发育较差, 但仍发育强烈的褶皱变形。锡铁山铅锌矿的主体是以沉积岩为容矿围岩的喷流沉积(SEDEX)型矿床(张德全等, 2005; 王莉娟等, 2009), 矿体主要呈薄层状或似层状夹于围岩大理岩、炭质板岩及绿泥片岩岩性段中, 分别对应于大理岩型矿体、过渡型矿体以及片岩型矿体三类。在后期的韧性剪切变形中, 含矿层经变质变形分解为强变形绿片岩相的韧性剪切带和弱变形相的大理岩构造透镜体, 而大理岩构造透镜体的两端属于压缩变形分量最大的构造域(汪劲草等, 2000)。强弱不同的构造变形域, 导致了矿体规模、形态及类型的差异, 在强变形带内, 构造置换作用较为彻底, 均一化程度高, 大理岩和矿体被剪切拉伸, 其产状与新生的糜棱岩面理基本一致。强变形域内的片岩型矿体和大理岩被强烈剪切拉伸变薄, 矿体厚度小、不连续、品位低、矿体形态简单、产状较稳定。而在弱变形域内, 构造置换作用较弱, 均一化程度低, 受原控矿构造控制的矿体形态保存较好。因此, 弱变形域内的大理岩型矿体厚度大、连续性好、品位高、矿体形态相对复杂、产状不甚稳定。结合野外观察及矿区深部勘探资料, 发现矿区大理岩均以一系列大小不等、相互重叠的构造透镜体形式出现, 而锡铁山铅锌矿床的主体, 经后期韧性剪切带的改造之后, 主要以透镜状或似层状产于大理岩构造透镜体的张裂构造中, 以及其与绿片岩接触的虚脱构造中。

5 结 论

(1) 锡铁山基底韧性剪切带中白云母 Ar-Ar 测年获得坪年龄为 398 ± 4 Ma, 等时线年龄为 399 ± 4 Ma, 二者基本一致, 代表了该韧性剪切带的形成时代。

(2) 锡铁山韧性剪切带是由达肯大坂群向南西斜向逆冲所形成的一条右行逆冲韧性剪切带。

(3) 锡铁山韧性剪切带是柴达木地块和祁连地块之间斜向碰撞作用晚期的产物, 其活动促使了超高压变质体折返到地壳浅部。

(4) 锡铁山韧性剪切带对锡铁山铅锌矿起到了十分重要的后期构造控制作用, 矿体主要位于大理岩和炭质石英绿泥片岩的构造虚脱处。

致谢: 野外工作得到了西部矿业股份有限公司和湖南省有色地质勘查局二一七队领导和技术专家的帮助, 吉林大学刘正宏教授和中国地质科学院地质研究所张建新研究员在对本文审阅和修改过程中提出了建设性的修改意见, 在此一并表示衷心的感谢。

参考文献(References):

- 邓吉牛. 1999. 青海锡铁山矿区褶皱构造及其找矿预测. 岩土工程界, 8(5): 283-288.
- 冯志兴, 孙华山, 吴冠斌, 王玉奇. 2010. 青海锡铁山铅锌矿床类型刍议. 地质论评, 56(4): 501-512.
- 冯佐海, 李少游, 陈儒庆. 1997. 青海锡铁山铅锌矿构造控矿型式与特征. 大地构造与成矿学, 21(2): 167-172.
- 高晓峰, 校培喜, 贾群子. 2011. 滩涧山群的重新厘定——来自柴达木盆地周缘玄武岩年代学和地球化学证据. 地质学报, 85(9): 1452-1463.
- 郭进京. 2000. 柴北缘锡铁山地区滩涧山群构造变形分析. 前寒武纪研究进展, 23(3): 147-152.
- 郝国杰, 陆松年, 李怀坤, 郑建康. 2001. 柴北缘沙柳河榴辉岩岩石学及年代学初步研究. 前寒武纪研究进展, 24(3): 154-162.
- 黄瀚霄, 李光明, 董随亮, 石洪召, 刘波, 张智林. 2012. 西藏弄如日金矿床蚀变绢云母⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄及其地质意义. 大地构造与成矿学, 36(4): 607-612.
- 赖绍聪, 邓晋福, 杨建军, 周天祯, 赵海玲, 罗照华, 刘厚祥. 1993. 柴达木北缘大型韧性剪切带构造特征. 河北地质学院学报, 16(6): 578-587.
- 赖绍聪, 邓晋福, 赵海玲. 1996. 柴达木北缘奥陶纪火山作用与构造机制. 西安工程学院学报, 18(3): 8-14.
- 李峰, 吴志亮, 李保珠, 汪林峰. 2006. 柴达木盆地北缘滩涧山群新厘定. 西北地质科学, 39(3): 83-91.
- 李峰, 吴志亮, 李保珠. 2007. 柴达木北缘滩涧山群时代及其地质意义. 大地构造与成矿学, 31(2): 226-233.
- 梁新权, 潘传楚, 付建刚, 蒋英, 周云, 王策. 2012. 中国科学院广州地球化学研究所科研报告: 锡铁山铅锌矿中间沟-断层沟矿段构造-沉积与成矿关系研究及其找矿靶区厘定.
- 林坤, 尹家衡, 张俊太. 1978. 青海省地质科学研究所研究报告: 青海省柴达木盆地北缘超基性岩及以铬为主的成矿特征与找矿方向的研究.
- 马华东, 贺卫东, 涂其军, 陈静, 曹福根, 任燕. 2008. 新疆东天山地区塔水河韧性剪切带特征. 大地构造与成矿学, 32(1): 1-10.
- 孟繁聪, 张建新, 杨经绥, 许志琴. 2003. 柴北缘锡铁山榴辉岩的地球化学特征. 岩石学报, 19(3): 435-442.

- 孟繁聪, 张建新, 杨经绥. 2005a. 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. 岩石学报, 21(1): 45-56.
- 孟繁聪, 张建新, 杨经绥. 2005b. 俯冲的大陆岛弧——柴北缘片麻岩的地球化学和同位素证据. 地质学报, 79(1): 46-55.
- 孟繁聪, 张建新. 2008. 柴北缘绿梁山早古生代花岗岩浆作用与高温变质作用的同时性. 岩石学报, 24(7): 1585-1594.
- 聂江涛, 魏刚锋, 姜修道, 李赛赛, 任金彬, 任华. 2010. 煎茶岭韧性剪切带的厘定及其地质意义. 大地构造与成矿学, 34(1): 1-19.
- 青海省地层表编写小组. 1980. 西北地区区域地层表(青海省分册). 北京: 地质出版社: 227.
- 青海第五地质队. 1988. 青海省锡铁山铅锌矿床地质特征及成矿规律研究.
- 史仁灯, 杨经绥, 吴才来, Tsuyoshi I, Takafumi H. 2004. 柴达木北缘超高压变质带中的岛弧火山岩. 地质学报, 78(1): 52-64.
- 史仁灯, 杨经绥, 吴才来. 2003. 柴北缘早古生代岛弧火山岩中埃达克质英安岩的发现及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 22(3): 229-236.
- 宋述光, 牛耀龄, 张立飞, 张贵宾. 2009. 大陆造山运动: 从大洋俯冲到大陆俯冲、碰撞、折返的时限——以北祁连山、柴北缘为例. 岩石学报, 25(9): 2067-2077.
- 宋述光, 张立飞, 牛耀龄, 张贵宾. 2007. 大陆碰撞造山带的两类橄榄岩——以柴北缘超高压变质带为例. 地学前缘, 14(2): 129-138.
- 孙华山, 赵立军, 吴冠斌, 宁灼陶, 陈巧妹, 姜楚灵. 2012. 锡铁山块状硫化物铅锌矿床成矿构造环境及矿区南部找矿潜力: 来自滩间山群火山岩岩石化学、地球化学证据. 岩石学报, 28(2): 652-664.
- 汪劲草, 黄永平, 傅锐. 2000. 对青海锡铁山矿区几个关键地质问题的认识. 矿产与地质, 14(1): 11-15.
- 王惠初, 李怀坤, 陆松年, 袁桂邦, 辛后田柴. 2006. 北缘鱼卡地区达肯大坂岩群的地质特征与构造环境. 地质调查与研究, 29(4): 253-262.
- 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. 地质通报, 22(7): 487-493.
- 王莉娟, 彭志刚, 祝新友, 邓吉牛, 王玉往, 朱和平. 2009. 青海省锡铁山Sedex型铅锌矿床成矿流体来源及演化: 流体包裹体及同位素地球化学证据. 岩石学报, 25(11): 3007-3015.
- 王莉娟, 祝新友, 王京斌, 邓吉牛, 王玉往, 朱和平. 2008. 青海锡铁山铅锌矿床喷流沉积系统(SEDEX)成矿流体研究. 岩石学报, 24(10): 2433-2440.
- 魏刚锋, 聂江涛, 辛红刚, 李赛赛, 张洪瑞, 杜志刚, 李新光. 2007. 新疆哈密库姆塔格沙垄北段韧性剪切带特征及其地质意义. 大地构造与成矿学, 31(1): 21-30.
- 邬介人, 任秉琛, 张莓, 高栋丞, 赵统, 张汉文, 宋志高, 张群力. 1987. 青海锡铁山块状硫化物矿床的类型及地质特征. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, (20): 1-70.
- 吴才来, 杨经绥, Wooden J, 李海兵, 孟繁聪. 2001. 柴达木山花岗岩锆石SHRIMP定年. 科学通报, 46(20): 1743-1747.
- 吴冠斌, 孙华山, 冯志兴, 樊俊昌, 陆建培, 王玉奇. 2010. 锡铁山铅锌矿床成矿构造背景. 地球化学, 39(3): 229-239.
- 吴小奇, 刘德良, 李振生, 杨强. 2006. 滇西主高黎贡韧性剪切带糜棱岩形成时限的初探. 大地构造与成矿学, 30(2): 136-141.
- 许志琴, 杨经绥, 吴才来, 李海兵, 张建新, 戚学祥, 宋述光, 万渝生, 陈文, 邱海峻. 2003. 柴达木北缘超高压变质带形成与折返的时限及机制. 地质学报, 77(2): 163-176.
- 许志琴, 张建新, 徐惠芬. 1996. 中国主要大陆山链韧性剪切带及动力学. 北京: 地质出版社: 294.
- 杨富全, 秦纪华, 刘锋, 张志欣, 刘振江, 耿新霞, 柴凤梅, 高文娟. 2013. 新疆准噶尔北缘玉勒肯哈腊苏铜(钼)矿区韧性剪切变形时代——来自白云母和黑云母Ar-Ar年龄的约束. 大地构造与成矿学, 37(1): 1-10.
- 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 吴才来, 崔军文, 张建新, 陈文. 1998. 我国西部柴北缘地区发现榴辉岩. 科学通报, 43(14): 1544-1549.
- 张聪, 张立飞, 张贵宾, 宋述光. 2009. 柴北缘锡铁山一带榴辉岩的岩石学特征及其退变PT轨迹. 岩石学报, 25(9): 2247-2259.
- 张德全, 王富春, 李大新, 丰成友, 余宏全, 李进文. 2005. 柴北缘地区的两类块状硫化物矿床——锡铁山式SEDEX型铅锌矿床. 矿床地质, 25(5): 471-480.
- 张贵宾, 宋述光, 张立飞, 牛耀龄, 舒桂明. 2005. 柴北缘超高压变质带沙柳河蛇绿岩型地幔橄榄岩及其意义. 岩石学报, 21(4): 1049-1058.
- 张贵宾, 张立飞, 宋述光. 2012. 柴北缘超高压变质带: 从大洋到大陆的深俯冲过程. 高校地质学报, 18(1): 28-40.
- 张建新, 孟繁聪, 杨经绥. 2004. 柴北缘西段榴辉岩相的变质泥质岩: 榴辉岩与围岩原地关系的证据. 中国

- 科学(D辑), 34(9): 825–834.
- 张建新, 万渝生, 孟繁聪, 杨经绥, 许志琴. 2003. 柴北缘夹榴辉岩的片麻岩(片岩)地球化学、Sm-Nd和U-Pb同位素研究——深俯冲的前寒武纪变质基底? 岩石学报, 19(3): 443–451.
- 张建新, 杨经绥, 许志琴, 万渝生, 孟繁聪, 李海兵, 史仁灯, 宋述光. 2002. 中国西北柴北缘两种不同类型榴辉岩. 地质学报, 76(3): 431.
- 张建新, 杨经绥, 许志琴, 张泽明, 陈文, 李海兵. 2000. 柴北缘榴辉岩的峰期和退变质年龄: 来自U-Pb及Ar-Ar同位素测定的证据. 地球化学, 29(3): 217–222.
- 赵风清, 郭进京, 李怀坤. 2003. 青海锡铁山地区滩间山群的地质特征及同位素年代学. 地质通报, 22(1): 28–31.
- 朱志澄. 1999. 构造地质学. 武汉: 中国地质大学出版社: 1–262.
- Chen D L, Liu L, Sun Y, Sun W D, Zhu X H, Liu X M and Guo C L. 2012. Felsic veins within UHP eclogite at Xitieshan in North Qaidam, NW China: Partial melting during exhumation. *Lithos*, 126-139: 187–200.
- Harrison T M, Célérier J, Aikman A B, Hermann J and Heizler M T. 2009. Diffusion of ^{40}Ar in muscovite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73: 1039–1051.
- Koppers A A P. 2002. ArArCALC-software for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age calculations. *Computers & Geosciences*, 28(5): 605–619.
- Shi R D, Yang J S, Wu C L, Iizukab T and Takafumi H. 2006. Island arc volcanic rocks in the North Qaidam UHP belt, northern Tibet plateau: Evidence for ocean-continent subduction preceding continent-continent subduction. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28: 151–159.
- Xu Z Q, Yang J S, Wu C L, Li H B, Zhang J X, Qi X X, Song S G and Qiu H J. 2006. Timing and mechanism of formation and exhumation of the Northern Qaidam ultrahigh-pressure metamorphic belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28: 160–173.
- Zhang C, Roermund H V, Zhang L F and Spiers C. 2012. A polyphase metamorphic evolution for the Xitieshan paragneiss of the North Qaidam UHP metamorphic belt, western China: In-situ EMP monazite- and U-Pb zircon SHRIMP dating. *Lithos*, 136-139: 27–45.
- Zhang J X, Mattinson C G, Meng F C, Yang H J and Wan Y S. 2009. U-Pb geochronology of paragneisses and metabasite in the Xitieshan area, North Qaidam Mountains, western China: Constraints on the exhumation of HP/UHP metamorphic rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35: 245–258.
- Zhang J X, Yang J S, Mattinson C G, Xu Z Q, Meng F C and Shi R D. 2005. Two contrasting eclogite cooling histories, North Qaidam HP/UHP terrane, western China: Petrological and isotopic constraints. *Lithos*, 84: 51–76.
- Zhang J X, Yang J S, Meng F C, Wan Y S, Li H M and Wu C L. 2006. U-Pb isotopic studies of eclogites and their host gneisses in the Xitieshan area of the North Qaidam mountains, western China: New evidence for an early Paleozoic HP-UHP metamorphic belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28: 143–150.

Characteristics and Muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Age of Ductile Shear Zone in the Xitieshan Area, North Qaidam

FU Jiangang^{1,2}, LIANG Xinquan^{1*}, WANG Ce¹, JIANG Ying¹, ZHOU Yun³, PAN Chuanchu⁴, YANG Yongqiang⁵, WANG Zeli⁶ and ZHONG Yongsheng⁷

(1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China; 3. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 4. Changsha Mineral Exploration Center, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410013, Hunan, China; 5. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 6. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, Shandong, China; 7. Xitieshan Branch, Western Mining Co. Ltd., Xitieshan 816203, Qinghai, China)

Abstract: A north-west trending ductile shear zone was recognized in between the Proterozoic Dakendaban Group and the Ordovician lower Tanjianshan Group in the Xitieshan area, North Qaidam. This paper illustrates various macroscopic structures including sheath fold, asymmetrical fold, plastic flow fabric, S-C fabric, rotating mortar system, tectonic lens, and viscous boudinage structure, as well as the microscopic structures including mica fish structure, pressure shadow structure, dynamic recrystallization, snowball shape tectonic rotation, wavy extinction and kinking mica. These structural data indicate that the ductile shear zone in the Xitieshan area is dextral transpressional ductile shear zone with southwest ward thrust of the Proterozoic Dakendaban Group. Ar-Ar dating of muscovite from the granitic mylonite of the Xitieshan base ductile shear zone yielded Ar-Ar plateau age of 398 Ma and inverse isochron age of 399 Ma, respectively, showing that the ductile shear zone formed in Late Silurian. Combined structural and dating results, we suggest that this ductile shear zone is related to the northeastward oblique subduction of the Qaidam block during Early Paleozoic, which might have led to the exhumation of the ultrahigh pressure metamorphic rocks to the shallow crust. The ductile shear zone might also have played a very important rule in controlling the mineralization of the Xitieshan lead-zinc deposits.

Keywords: ductile shear zone; muscovite; Ar-Ar dating; dextral thrust; structural significance; Xitieshan; North Qaidam