新疆阿尔泰萨尔朔克金多金属矿区岩浆活动—剪切变形时限

——锆石U-Pb和绢云母$^{40}Ar/^{39}Ar$测年证据

杨成栋,杨富全,吴玉峰

中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京,100037

内容提要: 萨尔朔克金多金属矿位于新疆阿尔泰南缘阿舍勒盆地,矿体赋存于沿火山通道充填的潜火山岩(流纹斑岩)中,矿化类型较为多样,主要呈浸染状、脉状和细脉状产出,矿床的形成与潜火山热液密切相关。该矿区外围广泛发育无明显矿化的流纹斑岩,且普遍发育韧性剪切变形现象,流纹斑岩和韧性剪切变形的时限都不明确,严重制约着外围找矿勘查工作的进展。本文在详细的野外地质调查和室内镜下鉴定的基础上,应用LA-ICP-MS锆石U-Pb和绢云母$^{40}Ar/^{39}Ar$测年方法对外围的流纹斑岩和韧性剪切带中的糜棱岩进行了年代学研究。获得无明显矿化的流纹斑岩的年龄为371.3±1.2 Ma,结合课题组对矿化流纹斑岩的年代学研究成果,表明流纹斑岩形成于382~371 Ma之间,但主成矿作用只发生在中泥盆世晚期,371 Ma可能代表了阿舍勒组最晚期岩浆侵入活动事件,但没有伴随矿化作用。绢云母在糜棱岩中沿剪切面理分布,属于韧性剪切变形的新生矿物,其坪年龄为254.4±1.8 Ma,与等时线年龄(254.0±3.7 Ma)在误差范围内一致,代表了新生绢云母的形成年龄,暗示该韧性剪切带形成时间为晚二叠世末期,为额尔齐斯区域大规模剪切—走滑活动之后的局部剪切活动;该韧性剪切作用只对矿化进行了改造,并没有富集成矿。

关键词: 锆石U-Pb定年;绢云母$^{40}Ar/^{39}Ar$测年;阿舍勒盆地;萨尔朔克;新疆

阿尔泰造山带呈北西—南东向横贯于中国、俄罗斯、哈萨克斯坦、蒙古四国,是世界上著名的火山成因块状硫化物(VMS)铜多金属成矿带之一(Daukeev et al., 2004; Franklin et al., 2005; Yakubchuk et al., 2005; 杨富全等, 2006),其形成过程和演化特征一直是国内外学者的研究热点。在哈萨克斯坦矿区阿尔泰已发现十几个大型和超大型矿床,如尼古拉耶夫(Nikoraevskaya)大型铜锌矿、马列耶夫(Maleyevskoye)大型铜锌矿、列宁诺戈尔斯克(Leninogorskoye)超大型铅锌铜多金属矿、孜良诺夫斯克(Zyryanovskoye)超大型铅锌多金属矿等(涂光炽, 1999; 戴自希等, 2001; Daukeev et al., 2004; 何国琦和朱永峰, 2006)。新疆阿尔泰南缘是哈萨克斯坦阿尔泰的东延部分,地质构造复杂,以中—晚古生代为主的各时代岩浆活动频繁,与火山作用有关的铜、铅锌、铁、金矿主要分布于由西向东的四个火山—沉积盆地中,即阿舍勒、冲乎尔、克兰和麦兹盆地。已发现的矿床有阿舍勒大型铜锌矿(叶庆同等, 1997; Wang Denghong et al., 1998; 王登红等, 2002)、可可塔勒大型铅锌矿(王京彬等, 1998; Wang Jingbin et al., 2003)和铁米尔特中型铅锌矿等(耿新霞等, 2010; Xu Jiuhua et al., 2011)。

阿舍勒盆地位于中国和哈萨克斯坦边境附近,除阿舍勒大型铜锌矿外,还发现了萨尔朔克中型与潜火山热液有关的金多金属矿、喀英德小型与石英霏细斑岩有关的铜矿以及桦树沟小型与火山热液有关的铜矿等。阿舍勒铜锌矿是阿舍勒盆地最大的矿床,前人对其进行了详细的研究,取得了重要成果(陈毓川等, 1996; 王登红, 1996; 叶庆同等, 1997; 王登红等, 2002; 牛贺才等, 2006; 万博和张连昌, 2006; Yuan Chao et al., 2007; 高珍权等, 2010; Wan Bo et al., 2010; 杨富全等, 2013a)。

相比之下,后发现的萨尔朔克多金属矿的研究工作则显得十分薄弱。

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41272103)和"十二五"国家科技支撑计划项目(编号:2011BAB06B03-02)的成果。
收稿日期:2015-05-24;改回日期:2016-04-08;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2016.03.008
作者简介:杨成栋,男,1987年生。博士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: ycd.198747@163.com。通讯作者:杨富全,男,1968年生。博士,研究员,博士生导师。主要从事矿床地质、地球化学研究。Email:fuquanyang@163.com。

萨尔朔克金多金属矿位于阿舍勒铜锌矿北北东向约 5.6 km。1993～1995 年新疆地质矿产勘查开发局物化探大队开展了《快德弄—萨尔朔克一带 1∶2 万综合物化探普查》,发现了金化探异常,1996～1999 年新疆地质调查院开展了《萨尔朔克金矿普查》工作。2008 年,新疆地质矿产勘查开发局第二区调大队完成了详查工作,在深部又发现了铜铅锌矿体。截止到 2010 年底,控制金(金属量 7.6 t)和锌(金属量 122×10^4 t)达到中型规模,铜(金属量 4.1×10^4 t)、铅(金属量 2.5×10^4 t)、银(金属量 106 t)为小型[1]。由于该矿近年来才取得突破,矿床的研究工作刚刚起步,研究基础较为薄弱。王小兵和高保明(2001)、王小兵和张少丽(2001)对矿床地质特征、成矿物质来源及成因类型进行了初步探讨。Yang Fuquan 等(2014)对矿区内与成矿作用密切有关的流纹斑岩和穿切矿体的辉绿岩年龄开展了定年工作,限定其成矿时代为中泥盆世晚期,但未对矿区外围无明显矿化的流纹斑岩开展研究工作;另外,矿区和外围断裂构造发育,韧性剪切作用强烈,且剪切作用对矿体进行了改造,其形成时代也尚不明确,这些都制约着外围找矿工作的继续开展,也制约着矿床模型的构建。

本文在深入细致的野外地质调查和室内镜下鉴定的基础上,以矿区外围的流纹斑岩和韧性剪切中新生的绢云母为研究对象,通过对锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 和绢云母的 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 开展测年工作,限定了矿区外围无明显矿化的流纹斑岩的形成时代和韧性剪切带的活动时代,对比矿区内已经获得的成岩成矿年代学数据,探讨火山活动与成矿作用时限,构建萨尔朔克金多金属矿的成岩成矿年代谱系图。

1 区域成矿背景

新疆北部阿尔泰南缘大地构造位置处于西伯利亚板块及与哈萨克斯坦—准噶尔板块碰撞对接的构造部位。阿尔泰造山带是由一系列大陆块体、岛弧和增生杂岩构成的增生型造山带,是中亚造山带的重要组成部分(Sengor et al., 1993; Xiao Wenjiao et al., 2008),经历了古生代地壳双向增生和中新生代陆内造山作用(肖序常等, 1992;何国琦等, 1994),发育有大量古生代火山岩、花岗岩类侵入岩及少量基性—超基性侵入岩。

阿舍勒盆地出露地层主要有下泥盆统康布铁堡组(D_1k)、下—中泥盆统托克萨雷组($D_{1-2}t$)、中泥盆统阿勒泰组(D_2a)、中泥盆统阿舍勒组(D_2as)、上泥盆统齐也组(D_3q)、和下石炭统红山嘴组(C_1h)(图 1)。康布铁堡组主要由中酸性火山岩、火山碎屑岩、碎屑岩夹碳酸盐岩等组成,为一套中深变质的海相酸性火山岩—陆源碎屑沉积岩建造。托克萨雷组为海相陆源碎屑岩夹硅质岩、碳酸盐岩。阿勒泰组由浅海相变质碎屑岩夹碳酸盐岩以及少量基性、酸性火山岩组成,部分地段发育较厚的枕状玄武岩等,在不同地段呈现出从绿片岩相到角闪岩相的不同变质程度。阿舍勒组为海相中酸性、基性火山岩、火山碎屑岩、火山碎屑沉积岩夹碳酸盐岩,主要岩性有凝灰岩、角砾凝灰岩、含集块角砾凝灰岩、玄武岩、英安岩、流纹岩、沉凝灰岩、粉砂岩、凝灰质粉砂岩、千枚岩夹玄武岩、灰岩透镜体,是阿舍勒盆地主要的含矿层位。齐也组为一套浅海—半深海相中—中基性火山岩、火山碎屑岩、火山碎屑沉积岩建造。下石炭统红山嘴组为滨—浅海相火山岩—碎屑沉积岩夹碳酸盐岩。

区域大断裂为玛尔卡库里断裂,是琼库尔—阿巴宫褶皱带与额尔齐斯褶皱带的分界断裂。该断裂西延进入哈萨克斯坦玛尔卡库里湖一带,继续向北西延伸进入俄罗斯境内。玛尔卡库里大断裂总体走向北西—南东向,断层面倾向北西,平面上呈舒缓的反“S”型斜贯阿舍勒盆地,是切穿地壳的深大断裂。

阿舍勒盆地及周边侵入岩十分发育,岩性以中酸性、酸性为主。岩石类型主要为辉长岩、辉长闪长岩、(石英)闪长岩、石英辉长闪长(玢)岩、英云闪长(斑)岩。主要岩体为盆地东部的哈巴河岩体和阿舍勒岩体以及西部的别列则克河岩体群。哈巴河岩体中似斑状英云闪长岩年龄为 386 Ma(柴凤梅等, 2013)、细中粒英云闪长岩年龄为 375 Ma(柴凤梅等, 2013)、花岗闪长岩年龄为 388 Ma 和 389 Ma(Cai Keda et al., 2011)、侵入哈巴河岩体的辉绿岩脉年龄为 375 Ma(Cai Keda et al., 2010)。阿舍勒花岗闪长岩体年龄为 318 Ma(Yuan Chao et al., 2007)。

2 矿床地质特征

2.1 矿区地层

萨尔朔克金多金属矿隶属哈巴县,矿区主要出露中泥盆统阿舍勒组、上泥盆统齐也组和少量第四系(图 2)。

阿舍勒组为一套中酸性火山碎屑岩和火山熔岩建造,可划分为 2 个岩性段,第一岩性段主要为沉凝灰岩、凝灰质粉砂岩、火山灰凝灰岩、沉含角砾凝灰

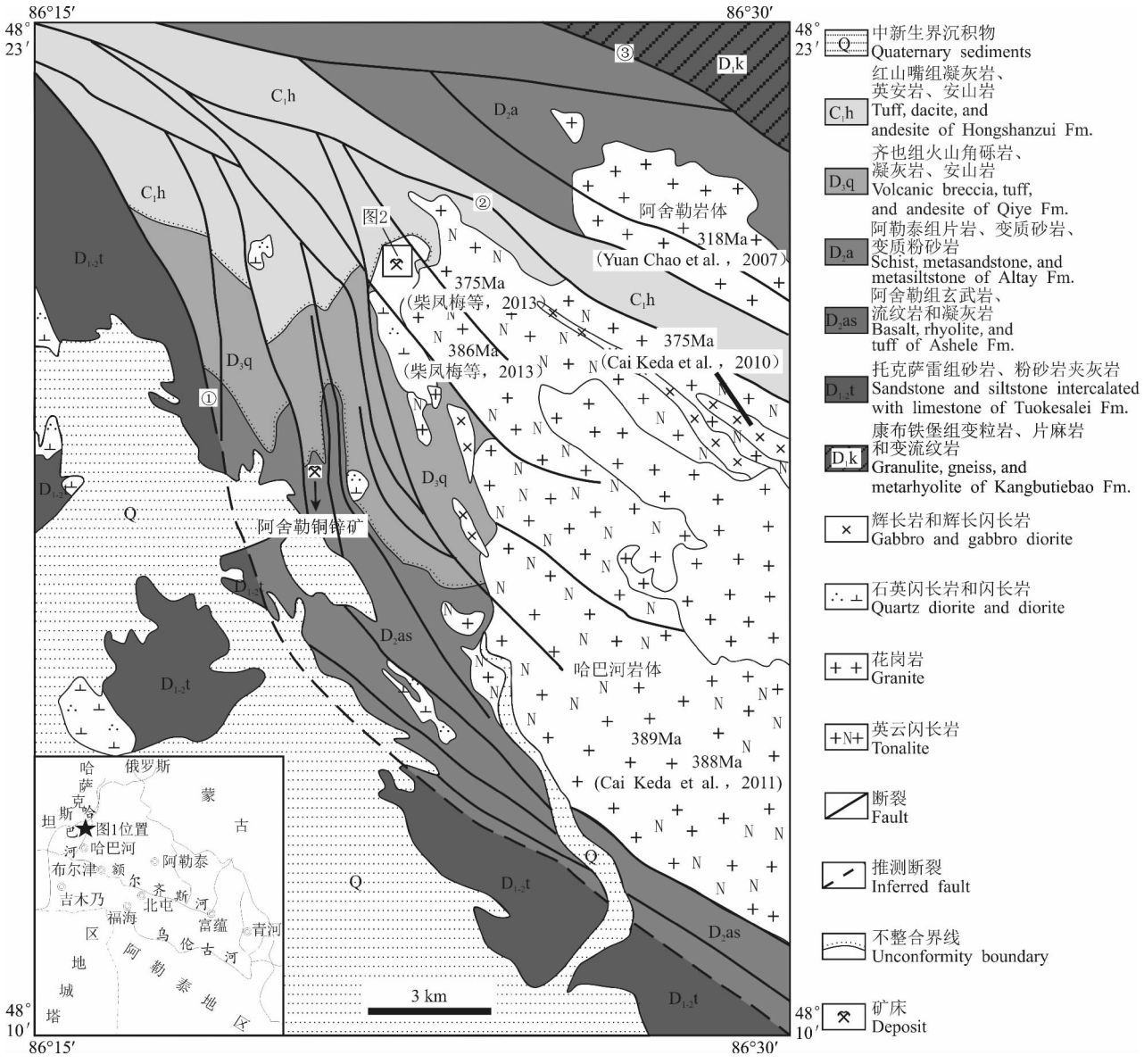


图 1 阿舍勒盆地地质略图(据新疆地质矿产勘查开发局第四地质大队, 2010 年)

断裂:①—玛尔卡库里深大断裂;②—别斯萨拉大断裂;③—加曼哈巴大断裂

Fig. 1 Geological sketch map of the Ashele Basin (modified after No. 4 Geological Team of the Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 2010)

Fault: ① Maerkakuli large Fault; ② Biesisala large Fault; ③ Jiamanhaba large Fault

岩,发育有小型平行层理、沙纹层理、波痕、包卷层理。第二岩性段分布于矿区外,为一套流纹—英安质火山碎屑岩建造,主要岩性有角砾凝灰岩、火山角砾岩、集块岩、晶屑凝灰岩、英安岩、安山岩及灰岩透镜体。该段岩石总体具片理化、弱糜棱岩化构造变质作用。

矿区仅出露齐也组第二段,与上覆下石炭统红山嘴组为断层接触,与下伏阿舍勒组呈角度不整合或断层接触。岩性为火山角砾岩、(含角砾)凝灰岩、集块岩、凝灰砂岩、沉凝灰岩,该段上部为(辉石)安山岩、英安岩,该段下部的沉火山碎屑岩中粒序层理、平行层理普遍发育,可见不完全的鲍马序列,应属火山浊流沉积产物。

2.2　侵入岩及断裂

矿区潜火山岩及岩脉广泛分布,主要有流纹斑岩、英安斑岩、潜玄武岩、辉绿岩、辉绿玢岩、石英霏细斑岩、石英闪长岩及闪长玢岩等,其中流纹斑岩规模最大,侵入阿舍勒组第二岩性段,为萨尔朔克矿床

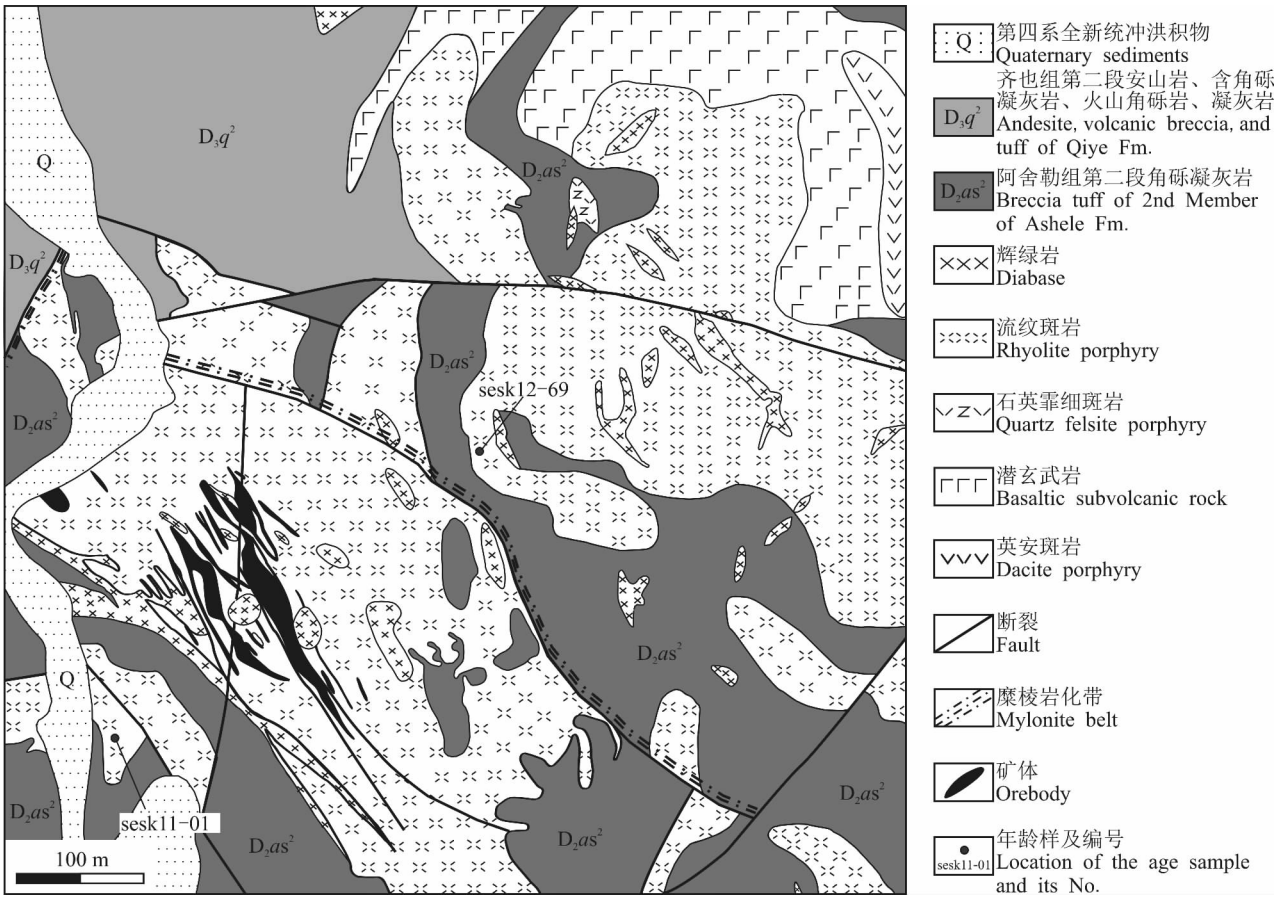


图 2 萨尔朔克金多金属矿区地质略图(据新疆地质矿产勘查开发局第二区域地质调查大队, 2011)

Fig. 2 Geological sketch map of the Sarsuk polymetallic gold deposit (modified after No. 2 Regional Geological Surveying Party of the Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 2011)

的直接容矿岩石。辉绿岩和辉绿玢岩,多呈脉状、不规则状、近椭圆状侵入于地层及流纹斑岩中,规模一般较小,多沿断裂及裂隙分布。辉绿岩和辉绿玢岩脉切穿矿体。

矿区构造发育,总体构造方向为北西向。矿区发育有北西向、近南北向、近东西向及北东向四组断裂,常形成较宽的片理化带及糜棱岩化带。北西向断裂为区域上的大断裂,具有一定规模,形成时代早,往往是区内重要的控矿构造。其余断裂规模较小、延伸较短、形成时代较晚,对区内矿化有一定的改造作用。

2.3 矿体及矿石特征

矿化蚀变带长约 400 m,宽 50 ~ 120 m,区内共圈出 22 条金多金属矿体,其中 15 条为地表金铜矿体,7 条为隐伏矿体。矿体主要产于黄铁绢英岩化流纹斑岩体中及附近。其中 L1、L5、L6、L13 号矿体规模较大,长 156 ~ 291 m,平均厚 7.17 ~ 11.68 m,延深 262 ~ 365 m。矿体呈脉状、透镜状、不规则状,分枝、复合现象明显(图 3),其余矿体较小,侧列于主矿体两侧。

地表金矿体呈不规则脉状、透镜状,具有沿走向分叉变薄、复合膨胀的特征。矿体向深部变化更趋复杂,总体上,矿体向深部延伸较稳定,厚度变厚、规模变大趋势明显,矿体连续性增强,矿体从东南向西北连续性增强、厚度变大特征也较明显。纵向上矿种呈现由地表金矿化为主向下变为以金铜—铜铅锌多金属为主的变化趋势,矿体品位明显变富;横向上,由东南向西北,矿种由金—金铜—铅锌铜变化规律明显,矿体产状由陡变缓趋势明显,矿体变富趋势明显。

矿化类型复杂,金铜铅锌矿化主要为浸染状、脉状、细脉状,与硅化有关,具有后生热液作用成矿特征。局部在阿舍勒组火山沉积岩系中可见条带状、条纹状和块状构造,具有同生沉积作用特征的铜锌

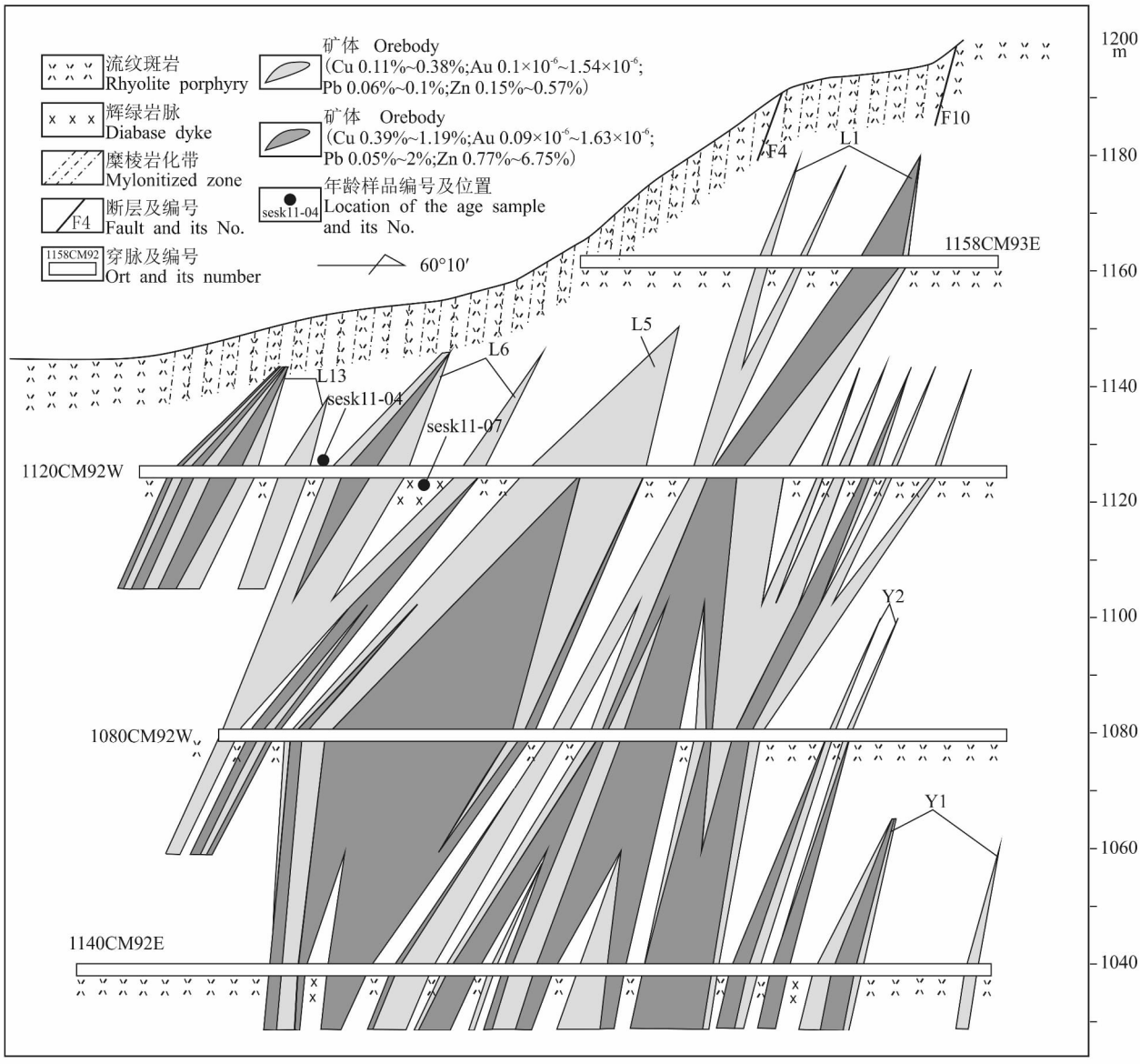


图 3 萨尔朔克 92 号勘探线剖面图(据新疆地质矿产勘查开发局第二区域地质调查大队, 2011)

Fig. 3 Cross-section of No. 92 prospecting line of the Sarsuk polymetallic gold deposit (modified after No. 2 Regional Geological Surveying Party of the Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 2011)

矿化。矿石类型按成矿元素可分为金矿石、金铜矿石、铜矿石、铜锌矿石、铅锌矿石和铜铅锌矿石。矿石构造主要有块状构造(图 4a)、条带状构造(图 4b)、条纹状构造(图 4c)、斑杂状构造、浸染状构造(图 4d)、网脉状构造(图 4e)、细脉状构造(图 4f),矿石结构有自形—半自形晶粒结构、它形晶粒结构、压碎结构(图 4g)、反应边结构、填隙结构(图 4h)、固溶体分离结构(图 4i)、鳞片粒状变晶结构等。矿石中金属矿物主要是黄铜矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、自然金,少量磁黄铁矿、蓝辉铜矿、辉铜矿、辉钼矿、毒砂、斑铜矿。非金属矿物主要有石英、斜长石、绢云母、绿泥石、白云母、方解石、次闪石等。矿石中金平均品位为 $1.24\times10^{-6}\sim14.5\times10^{-6}$,铜平均品位 0.37%~2.2%,铅平均品位 0.21%~2.12%,锌平均品位 0.91%~11.19%[1]。

2.4　围岩及蚀变

流纹斑岩是矿体的直接围岩,普遍具面状的黄铁绢英岩化蚀变。热液蚀变形成的矿物主要有石

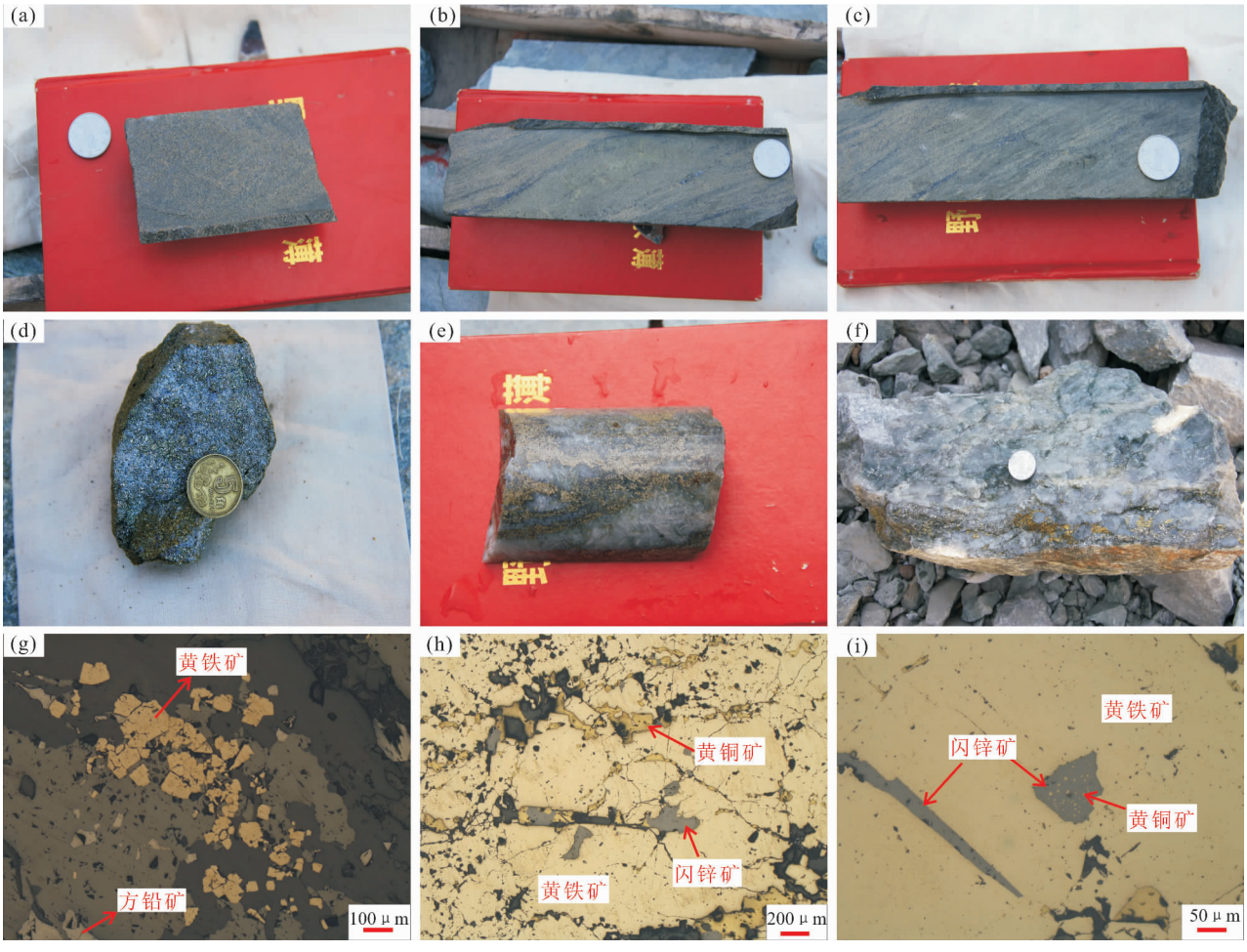


图 4 萨尔朔克矿床矿石特征

Fig. 4 Characteristics of ores in the Sarsuk polymetallic gold deposit

(a) 致密块状黄铁矿闪锌矿矿石;(b) 条带状黄铜矿闪锌矿黄铁矿矿石;(c) 条纹状黄铁矿方铅矿闪锌矿矿石;(d) 稠密浸染状黄铁矿黄铜矿矿石;(e) 网脉状黄铁矿闪锌矿矿石;(f) 含金黄铁矿黄铜矿石英脉,黄铁矿黄铜矿呈细脉状;(g) 黄铁矿的压碎结构;(h) 黄铁矿中呈填隙结构的黄铜矿、闪锌矿;(i) 闪锌矿在黄铁矿中呈填隙结构,黄铜矿在闪锌矿中呈乳滴状固溶体分离结构

(a) Pyrite + sphalerite ore with dense massive structure; (b) chalcopyrite + sphalerite + pyrite ore with banded structure; (c) pyrite + galena + sphalerite ore with ribboned structure; (d) pyrite + chalcopyrite ore with dense disseminated structure; (e) pyrite + sphalerite ore with stockwork structure; (f) gold-bearing pyrite + chalcopyrite quartz vein, pyrite and chalcopyrite were veinlets; (g) cataclastic texture of pyrite; (h) interstitial texture of chalcopyrite and sphalerite in pyrite; (i) interstitial texture of sphalerite in pytite, droplet-like exsolution of chalcopyrite in sphalerite

英、黄铁矿、绢云母、绿泥石、高岭石、绿帘石、碳酸盐,少量石榴子石和磁铁矿,其中硅化、绢云母化和黄铁矿化与矿化关系密切,绿帘石和绿泥石分布于中基性火山岩、流纹斑岩和辉绿岩内。

2.5 成矿阶段

萨尔朔克金多金属矿具有多期成矿的特点,根据矿体特征、矿脉穿插关系、矿物共生组合、生成顺序及矿石组构等特征,矿床在形成过程中分为五期:早期为火山喷流沉积期,形成致密块状黄铁矿、块状黄铁矿闪锌矿矿石,局部见条带状、条纹状黄铁矿闪锌矿矿石,该期还形成了重晶石。第二期为主成矿期,酸性岩浆沿火山口侵位,潜火山热液在流纹斑岩中形成浸染状、细脉、网脉状的多金属矿化,主要形成金矿体、铜金矿体、铜铅锌矿体,为矿区最主要的成矿期,以脉状为特征与火山喷流沉积期形成的块状矿石相区别。第三期为与辉绿岩侵入有关的矿化,辉绿岩明显切穿流纹斑岩和矿体,主要对早期的矿化起破坏作用,局部伴有铜矿化。在辉绿岩与铜铅锌矿体接触带的辉绿岩中发育自形粒度较大的黄铁矿与细脉状浸染状黄铜矿脉,可见方铅矿脉穿切黄铁矿绿泥石化辉绿岩。第四期为剪切变形期,辉绿岩侵入后又发生了韧性剪切变形作用,在矿区十

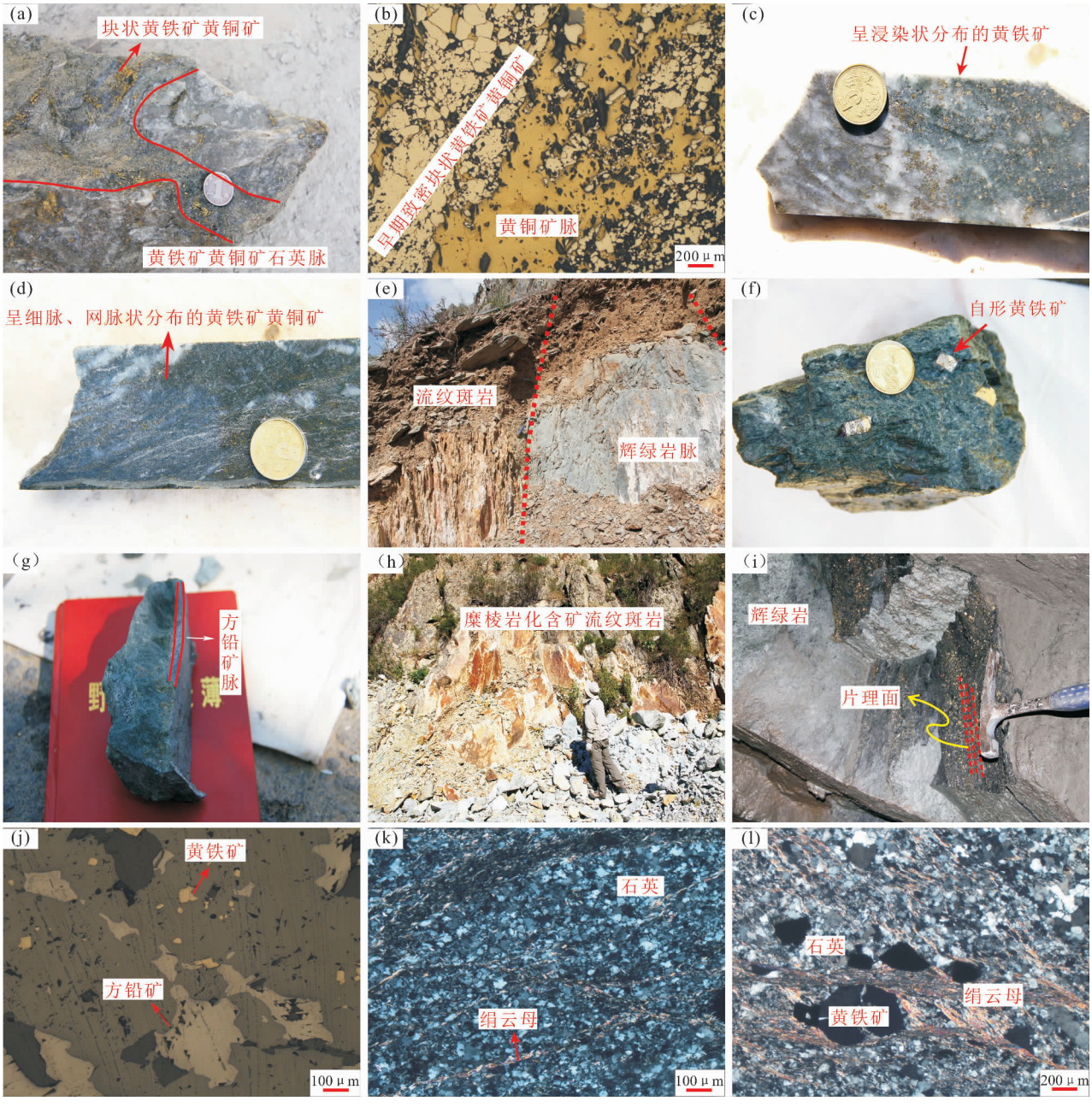


图 5 萨尔朔克矿床矿脉穿插关系及韧性剪切变形特征

Fig. 5 Characteristics of ore veins interpenetration and ductile shearing deformation in the Sarsuk polymetallic gold deposit

(a) 黄铜矿黄铁矿石英脉穿切块状黄铁矿黄铜矿;(b) 黄铜矿脉穿切早期致密块状黄铁矿黄铜矿;(c) 黄铁矿浸染状分布于硅化流纹斑岩中;(d) 黄铜矿黄铁矿细脉、网脉状分布于硅化流纹斑岩中;(e) 辉绿岩侵入流纹斑岩,发育剪切变形;(f) 辉绿岩中的自形黄铁矿;(g) 方铅矿脉穿切黄铁矿化绿泥石化辉绿岩;(h) 糜棱岩化含矿流纹斑岩;(i) 黄铁矿黄铜矿分布于片理化辉绿岩中;(j) 流纹斑岩中方铅矿被定向拉长;(k) 绢云石英蚀变岩中石英亚晶粒旋转重结晶为新晶集合体,绢云母呈线痕状分布;(l) 含黄铁矿流纹斑岩中的黄铁矿压力影,阴影部分为石英 + 绢云母

(a) Chalcopyrite + pyrite quartz vein cut across massive pyrite + chalcopyrite; (b) chalcopyrite vein cut across early dense massive pyrite + chalcopyrite; (c) disseminated pyrite was distributed in the silicified rhyolite porphyry; (d) chalcopyrite + pyrite veinlets and stockworks were distributed in the silicified rhyolite porphyry; (e) diabase dyke invaded rhyolite porphyry, the shear deformation was developed; (f) euhedral pyrite in diabase dyke; (g) galena vein cut across chlorite pyrite diabase dyke; (h) mylonitized ore-bearing rhyolite porphyry; (i) pyrite and chalcopyrite were distributed in schistose diabase dyke; (j) galena was elongated directionally in rhyolite porphyry; (k) subgrain rotation recrystallization of quartz in sericite + quartz altered rock, sericite was distributed linearly; (l) pyrite pressure shadows in pyrite-bearing rhyolite porphyry, the shadows are quartz + sericite

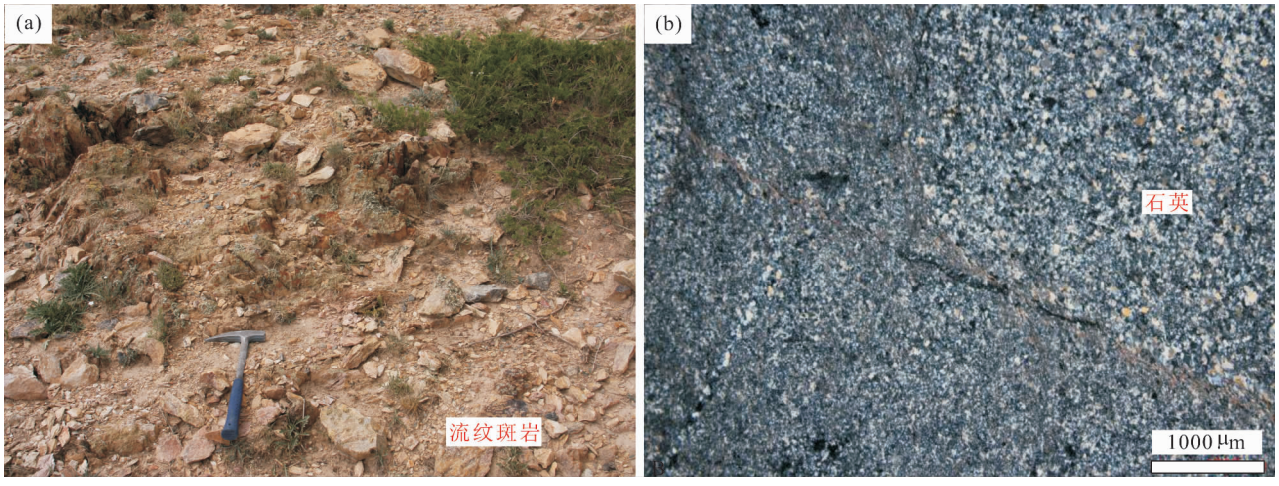


图 6 萨尔朔克金多金属矿锆石定年样品特征（a）流纹斑岩野外露头;（b）流纹斑岩镜下特征

Fig. 6 Characteristics of the zircon age samples in the Sarsuk polymetallic gold deposit

(a) Field outcrop of rhyolite porphyry; (b) characteristics of rhyolite porphyry in the optical microscopy

分普遍,含矿流纹斑岩、矿体、辉绿岩脉均强烈片理化、糜棱岩化。见黄铁矿石英形成压力影,黄铜矿拉长定向排列,辉绿岩受到强韧性剪切变形,厚度明显变薄。片理化、糜棱岩化十分强烈部位发育黄铁矿、黄铜矿。第五期为氧化期,在地表矿体及浅部矿体中形成氧化矿物,如黄铁矿氧化成褐铁矿,黄铜矿氧化成孔雀石,少数黄铜矿氧化分解再经还原作用而成的次生辉铜矿,另有黄钾铁钒、高岭石等。

3 锆石 LA-ICP-MS 定年

3.1 样品特征

本次工作主要对萨尔朔克金多金属矿区外围 1 件无明显矿化的流纹斑岩进行了年龄测定。样品 sesk12-69 采样点坐标为 N48°20′17″,E86°22′25″,位置见图 2。样品描述如下:

新鲜面为灰白色,风化面肉红色(图 6a),块状构造、定向构造,交代结构。岩石由斑晶和基质组成。斑晶为石英和少量斜长石(5% ±):石英为主,他形粒状,定向分布,大小为 0.05 ~0.5 mm,具波状消光。斜长石具轻微高岭石化;基质为石英(60% ~85%)、绢云母(5% ~35%)、少量绿泥石、绿帘石(0% ~5%),基质中的石英也呈他形粒状,断续条纹状定向分布(图 6b),大小一般 0.02 ~0.35 mm,具波状消光。绢云母呈显微鳞片状,大小一般 < 0.05 mm,呈断续线纹状定向分布。绿帘石、绿泥石少,绿帘石呈柱粒状。

3.2 测试方法

采集用于锆石 LA-ICP-MS 年代学测试的流纹斑岩样品约 20 ~30 kg,首先用水将样品表面清洗并晾干、粉碎至 80 目,然后经过用水粗淘、强磁分选、电磁分选和用酒精细淘之后,在实体显微镜下手工挑选出锆石。锆石分选工作在河北省廊坊区域地质调查所实验室完成。

在实体显微镜下挑选裂隙相对少、表面尽量洁净、透明度相对较高的锆石制作环氧树脂样品靶,经过打磨和抛光后,拍摄锆石反射光和透射光、阴极荧光(CL)图像。锆石样品靶的制作和锆石阴极发光照相在北京锆年领航科技有限公司完成。

锆石 U-Pb 定年在天津地质矿产研究所同位素实验室完成,利用 Thermo Fisher 公司制造的 Neptune 型激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICP MS)进行微区原位 U-Pb 同位素测定。与等离子体质谱仪配套的进样设备激光器为美国 ESI 公司生产的 UP193-FX ArF 准分子激光器,激光波长 193 nm,脉冲宽度 5 ns。锆石定年激光剥蚀所用斑束直径为 35 μm,激光能量密度约为 10 ~11 J/cm^2,频率为 8 ~10 Hz,激光剥蚀物质以 He 为载气送入 Neptune 的电感耦合等离子体。锆石中的 U、Pb 在 8000℃以上的高温等离子体中发生离子化,利用动态变焦扩大色散可以同时接收质量数相差很大的 U-Pb 同位素,从而进行锆石微区 U-Pb 同位素原位同时测定。LA-MC-ICP MS 激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式,锆石 U-Pb 定年采用 TEMORA 和 GJ-1 作为外部锆石年龄标准进行 U-Pb 同位素分馏校正(Black et al., 2003; Jackson et al., 2004)。采用中

表 1 新疆阿尔泰萨尔朔克金多金属矿流纹斑岩样品(sesk12-69)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb data of zircons from the rhyolite porphyry(sesk12-69) in Sarsuk polymetallic gold deposit, Altay, Xinjiang

测点编号	元素含量($\times10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度(%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	
sesk12-69-1	24	117	256	0.69	0.0566	0.0015	0.4617	0.0122	0.0592	0.0004	476	58	385	10	370	3	104
sesk12-69-2	103	65	1273	0.81	0.0550	0.0005	0.4477	0.0044	0.0591	0.0004	411	20	376	4	370	2	102
sesk12-69-3	35	135	464	0.89	0.0565	0.0013	0.4593	0.0104	0.0589	0.0004	473	49	384	9	369	3	104
sesk12-69-4	53	104	518	0.67	0.0621	0.0011	0.5401	0.0132	0.0631	0.0005	677	39	438	11	394	3	111
sesk12-69-5	50	123	682	1.01	0.0579	0.0007	0.5117	0.0069	0.0641	0.0005	527	28	420	6	400	3	105
sesk12-69-6	83	121	914	0.74	0.0597	0.0007	0.4912	0.0057	0.0596	0.0004	595	24	406	5	373	3	109
sesk12-69-7	87	91	1092	0.85	0.0564	0.0005	0.4610	0.0042	0.0593	0.0004	468	18	385	3	371	3	104
sesk12-69-8	72	163	1158	1.17	0.0548	0.0008	0.4514	0.0073	0.0597	0.0004	405	33	378	6	374	3	101
sesk12-69-9	53	132	517	0.63	0.0572	0.0008	0.4675	0.0064	0.0593	0.0004	500	29	389	5	371	3	105
sesk12-69-10	83	170	1251	1.06	0.0568	0.0005	0.4639	0.0043	0.0593	0.0004	482	19	387	4	371	3	104
sesk12-69-11	99	375	1168	0.78	0.0562	0.0009	0.4593	0.0076	0.0593	0.0004	459	34	384	6	371	3	104
sesk12-69-12	36	169	492	0.90	0.0574	0.0009	0.4688	0.0080	0.0593	0.0004	506	35	390	7	371	3	105
sesk12-69-13	59	143	538	0.66	0.0568	0.0013	0.5016	0.0128	0.0640	0.0005	484	49	413	11	400	3	103
sesk12-69-14	121	113	1414	0.77	0.0553	0.0004	0.4565	0.0041	0.0598	0.0004	425	18	382	3	375	3	102
sesk12-69-15	23	85	388	1.38	0.0583	0.0013	0.5155	0.0120	0.0642	0.0004	539	48	422	10	401	3	105
sesk12-69-16	147	121	2344	1.14	0.0566	0.0004	0.4631	0.0039	0.0594	0.0004	476	17	386	3	372	3	104
sesk12-69-17	44	37	538	0.85	0.0560	0.0008	0.4583	0.0067	0.0593	0.0004	454	33	383	6	371	3	103
sesk12-69-18	99	206	1151	0.78	0.0567	0.0006	0.4635	0.0048	0.0592	0.0004	481	22	387	4	371	3	104
sesk12-69-19	74	123	899	0.83	0.0562	0.0005	0.4596	0.0041	0.0593	0.0004	460	18	384	3	371	3	104
sesk12-69-20	88	74	1054	0.81	0.0571	0.0005	0.4669	0.0041	0.0593	0.0004	496	18	389	3	371	3	105
sesk12-69-21	77	107	1000	0.87	0.0564	0.0005	0.4599	0.0043	0.0591	0.0004	468	19	384	4	370	3	104
sesk12-69-22	144	33	2793	1.40	0.0614	0.0005	0.4985	0.0042	0.0588	0.0004	655	16	411	3	369	2	111
sesk12-69-23	88	69	1489	1.32	0.0607	0.0009	0.5367	0.0097	0.0641	0.0005	629	33	436	8	401	3	109

表 1 萨尔朔克金多金属矿流纹斑岩样品(sesk12-69)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb data of zircons from the rhyolite porphyry(sesk12-69) in Sarsuk polymetallic gold deposit.

测点编号	元素含量($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度(%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	
sesk12-69-1	24	117	256	0.69	0.0566	0.0015	0.4617	0.0122	0.0592	0.0004	476	58	385	10	370	3	104
sesk12-69-2	103	65	1273	0.81	0.0550	0.0005	0.4477	0.0044	0.0591	0.0004	411	20	376	4	370	2	102
sesk12-69-3	35	135	464	0.89	0.0565	0.0013	0.4593	0.0104	0.0589	0.0004	473	49	384	9	369	3	104
sesk12-69-4	53	104	518	0.67	0.0621	0.0011	0.5401	0.0132	0.0631	0.0005	677	39	438	11	394	3	111
sesk12-69-5	50	123	682	1.01	0.0579	0.0007	0.5117	0.0069	0.0641	0.0005	527	28	420	6	400	3	105
sesk12-69-6	83	121	914	0.74	0.0597	0.0007	0.4912	0.0057	0.0596	0.0004	595	24	406	5	373	3	109
sesk12-69-7	87	91	1092	0.85	0.0564	0.0005	0.4610	0.0042	0.0593	0.0004	468	18	385	3	371	3	104
sesk12-69-8	72	163	1158	1.17	0.0548	0.0008	0.4514	0.0073	0.0597	0.0004	405	33	378	6	374	3	101
sesk12-69-9	53	132	517	0.63	0.0572	0.0008	0.4675	0.0064	0.0593	0.0004	500	29	389	5	371	3	105
sesk12-69-10	83	170	1251	1.06	0.0568	0.0005	0.4639	0.0043	0.0593	0.0004	482	19	387	4	371	3	104
sesk12-69-11	99	375	1168	0.78	0.0562	0.0009	0.4593	0.0076	0.0593	0.0004	459	34	384	6	371	3	104
sesk12-69-12	36	169	492	0.90	0.0574	0.0009	0.4688	0.0080	0.0593	0.0004	506	35	390	7	371	3	105
sesk12-69-13	59	143	538	0.66	0.0568	0.0013	0.5016	0.0128	0.0640	0.0005	484	49	413	11	400	3	103
sesk12-69-14	121	113	1414	0.77	0.0553	0.0004	0.4565	0.0041	0.0598	0.0004	425	18	382	3	375	3	102
sesk12-69-15	23	85	388	1.38	0.0583	0.0013	0.5155	0.0120	0.0642	0.0004	539	48	422	10	401	3	105
sesk12-69-16	147	121	2344	1.14	0.0566	0.0004	0.4631	0.0039	0.0594	0.0004	476	17	386	3	372	3	104
sesk12-69-17	44	37	538	0.85	0.0560	0.0008	0.4583	0.0067	0.0593	0.0004	454	33	383	6	371	3	103
sesk12-69-18	99	206	1151	0.78	0.0567	0.0006	0.4635	0.0048	0.0592	0.0004	481	22	387	4	371	3	104
sesk12-69-19	74	123	899	0.83	0.0562	0.0005	0.4596	0.0041	0.0593	0.0004	460	18	384	3	371	3	104
sesk12-69-20	88	74	1054	0.81	0.0571	0.0005	0.4669	0.0041	0.0593	0.0004	496	18	389	3	371	3	105
sesk12-69-21	77	107	1000	0.87	0.0564	0.0005	0.4599	0.0043	0.0591	0.0004	468	19	384	4	370	3	104
sesk12-69-22	144	33	2793	1.40	0.0614	0.0005	0.4985	0.0042	0.0588	0.0004	655	16	411	3	369	2	111
sesk12-69-23	88	69	1489	1.32	0.0607	0.0009	0.5367	0.0097	0.0641	0.0005	629	33	436	8	401	3	109

国地质大学刘勇胜博士研发的 ICP MS Data Cal 程序(Liu Yongsheng et al., 2009)和 Ludwig KR 的 Isoplot 程序(Ludwig, 2003)进行数据处理,采用 Tom Andersen 的方法进行普通铅校正(Andersen, 2002)。利用 NIST612 玻璃标样作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。详细实验测试过程可参见李怀坤等(2010)。

3.3 定年结果

对锆石成因类型的准确判断是正确理解锆石 U-Pb 年龄意义的关键。锆石的成因类型需要结合形态学、地球化学和微区的特征来综合判别(李长民, 2009)。流纹斑岩中锆石形态多为半自形晶的短柱和长柱状,少数自形和不规则状,长变化于 50 ~ 130 μm,宽介于 20 ~ 80 μm。锆石中的 Th/U 值可以指示锆石的成因,岩浆锆石的 Th/U 值一般大于 0.1,而变质锆石的 Th/U 值一般小于 0.1(Belousova et al., 2002)。流纹斑岩样品锆石的 U、Th 含量变化较大(表 1),U 介于 256×10^{-6} ~ 2793×10^{-6},Th 介于 33×10^{-6} ~ 375×10^{-6},Th/U 值介于 0.63 ~ 1.40 之间,大于 0.1,表明了锆石为岩浆成因。在阴极发光图像中,振荡环带结构相对不发育,有少量锆石发育较好的振荡环带结构(图 7)。

流纹斑岩(sesk12-69)23 颗锆石 U-Pb 同位素数

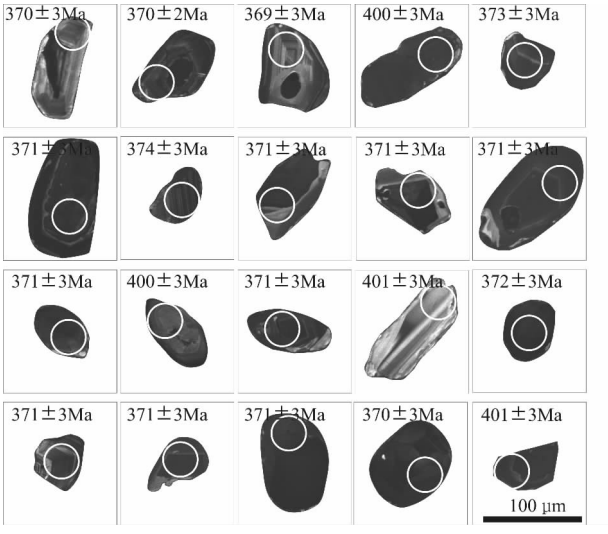


图 7 萨尔朔克金多金属矿床流纹斑岩样品(sesk12-69)代表性锆石 CL 图像

Fig. 7 Cathodoluminescence images of representative zircons from the rhyolite porphyry (sesk12-69) in Sarsuk polymetallic gold deposit

据点列于表 1,年龄分成两组,其中一组 18 颗锆石在误差范围内有较一致的 $n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$ 和 $n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$ 值,在谐和图上基本上成群集中分布在谐和线上及附近一个较小的范围内(图 8a、b),$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$ 年龄介于 369 ±2 ~375 ±3 Ma,其加权平均值为 371.3 ±1.2 Ma(MSWD = 0.35),该组年龄可代表流纹斑岩形成年龄。另一组 5 颗锆石基本上成群分布在谐和线附近(图 8a、c),$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$ 年龄介于 394 ±3 ~401 ±3 Ma,其加权平均值为 399.6 ±2.6 Ma(MSWD = 0.71),该组年龄可能代表捕获锆石的年龄。

4 绢云母$^{40}Ar/^{39}Ar$定年

4.1 样品特征

绢云母(sesk12-32)采自矿区 1120 中段的糜棱岩,坐标为 N48°20′02″,E86°21′58″。岩石具块状构造,粒状变晶结构,由石英、绢云母、少量绿泥石组成。石英呈近等轴粒状—它形粒状,大小以 0.02 ~0.1 mm 为主,少量 0.1 ~1.2 mm,镶嵌状分布,具波状消光。绢云母、绿泥石呈显微鳞片状,一般 <0.05 mm,呈线纹状定向分布(图 9a),绢云母主要沿糜棱面理分布。不透明矿物呈片状、方形,大小为 0.02 ~0.2 mm,呈线纹状定向分布(图 9c)。岩内见次生石英填充的裂隙(图 9b),并可见少量石英残斑(图 9d)。

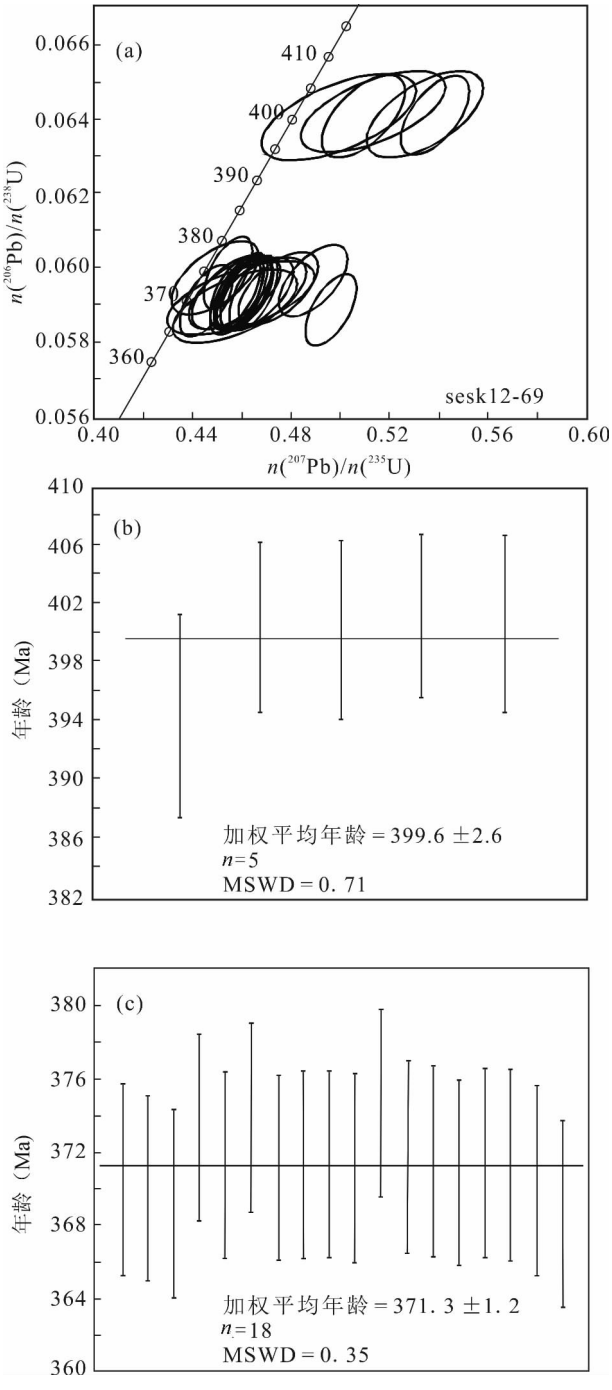


图 8 萨尔朔克金多金属矿流纹斑岩样品(sesk12-69)锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 8 Zircon LA-ICP-MS U-Pb age of the rhyolite porphyry (sesk12-69) in Sarsuk polymetallic gold deposit

4.2 测试方法

将绢云母化糜棱岩粉碎至 20 目,经双目镜挑选纯度大于 98% 的绢云母样品,经超声波洗涤,去除表面附着杂质。$^{40}Ar/^{39}Ar$同位素年龄测定在中国地质科学院地质研究所氩—氩实验室进行,质谱测定

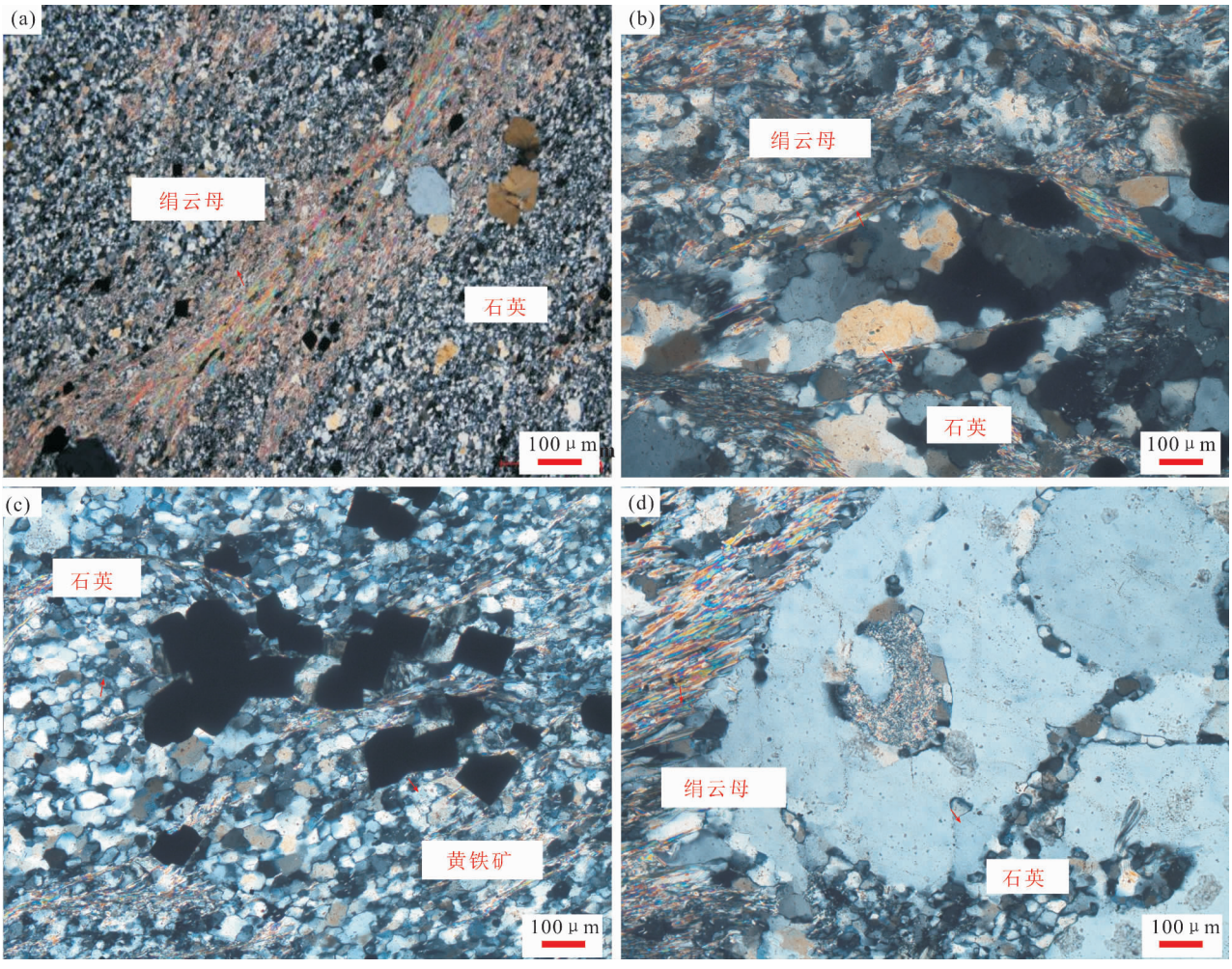


图 9 萨尔朔克金多金属矿绢云母样品镜下特征(+)

Fig. 9 Characteristics of the sericite sample in the Sarsuk polymetallic gold deposit in the optical microscopy (+)

(a) 绢云母呈线纹状定向分布;(b) 次生石英填充裂隙;(c) 黄铁矿呈方形定向分布;(d) 石英残斑

(a) Sericite was distributed linearly and directionally; (b) secondary quartz filled the fractures; (c) square pyrite was distributed directionally; (d) quartz porphyroclast

用 GV Helix MC。绢云母单矿物用超声波清洗。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。照射工作在中国原子能科学研究院的"游泳池堆"中进行,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 K_2SO_4 和 CaF_2 来获得,其值为:$[n(^{36}Ar)/n(^{37}Ar_o)]_{Ca} = 0.0002389$,$[n(^{40}Ar)/n(^{39}Ar)]_K = 0.004782$,$[n(^{39}Ar)/n(^{37}Ar_o)]_{Ca} = 0.000806$。$^{37}Ar$ 经过放射性衰变校正;^{40}K 衰变常数 $\lambda = 5.543 \times 10^{-10} a^{-1}$;用 ISOPLOT 程序(Ludwig, v2.49, 2001)计算坪年龄及等时线。坪年龄误差以 2σ 给出。详细实验流程见有关文章(陈文等, 2006; 张彦等, 2006)。

4.3 定年结果

$^{40}Ar/^{39}Ar$ 阶段升温年龄分析结果见表 2,相应的年龄谱及等时线年龄见图 10 。样品 sesk12-32 总气体年龄为 256.3 Ma。820℃ ~ 1020℃ 的 7 个温度阶段构成的坪年龄为 254.4 ± 1.8 Ma (2σ),对应 77.8% 的 ^{39}Ar 释放量。相应的 $n(^{39}Ar)/n(^{36}Ar)$—

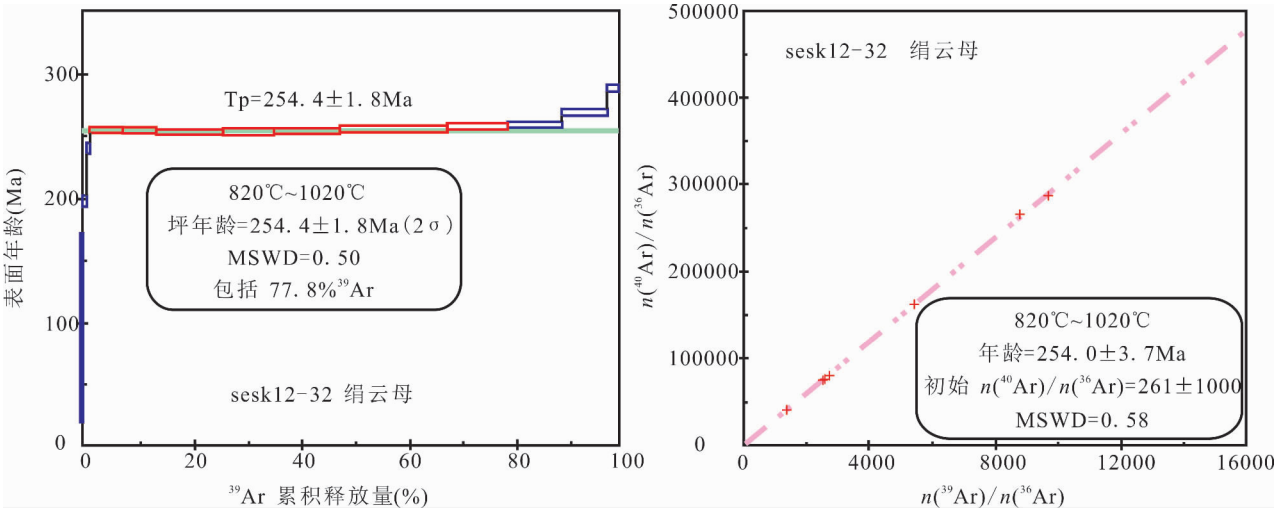


图 10 萨尔朔克金多金属矿床绢云母$^{40}Ar/^{39}Ar$年龄谱及等时线图

Fig. 10 $^{40}Ar/^{39}Ar$ spectra and isochron ages of sericite from the Sarsuk polymetallic gold deposit

$n(^{40}Ar)/n(^{36}Ar)$等时线年龄(t_i) = 254.0 ± 3.7 Ma, MSWD = 0.58, $n(^{39}Ar)/n(^{40}Ar)$—$n(^{36}Ar)/n(^{40}Ar)$等时线年龄(t_i) = 251.1 ± 5.8 Ma, MSWD = 11.8。坪年龄、等时线年龄和反等时线年龄在误差范围内一致。

5 讨论

5.1 萨尔朔克潜火山岩活动事件与成矿

根据前人资料与野外地质特征,萨尔朔克金多金属矿体主要产于黄铁绢英岩化流纹斑岩体中,矿化类型复杂,主要有浸染状、脉状、细脉—网脉状,主要与硅化有关,主成矿期具有后生热液活动特征,其流纹斑岩为沿火山通道充填的潜火山岩,故成因类型厘定为与潜火山热液有关的矿床。

潜火山岩与侵入岩不同,侵入岩还要经过相当长时间岩浆才完全结晶、固结,所以侵入岩的锆石年龄值仅代表侵位年龄而不完全等于岩体形成的年龄值,但潜火山岩中锆石年龄值基本代表成岩年龄值,具有较高的定年有效性。因此,含矿流纹斑岩的形成时代可以代表主成矿时代。我们课题组曾获得 2

表 2 萨尔朔克金多金属矿区绢云母$^{40}Ar/^{39}Ar$阶段升温加热分析结果

Table 2 Analytical result of $^{40}Ar/^{39}Ar$ ages of sericite from the Sarsuk polymetallic gold deposit

sesk12-32 绢云母 样重 = 30.88 mg J = 0.005045

t(℃)	$\left[\frac{n(^{40}Ar)}{n(^{39}Ar)}\right]_m$	$\left[\frac{n(^{36}Ar)}{n(^{39}Ar)}\right]_m$	$\left[\frac{n(^{37}Ar)}{n(^{39}Ar)}\right]_m$	$\left[\frac{n(^{38}Ar)}{n(^{39}Ar)}\right]_m$	$n(^{40}Ar)$(%)	F	^{39}Ar(×10^{-14}mol)	^{39}Ar(累积)(%)	年龄(Ma)	
									测值	±1σ
600	44.4670	0.1804	246.9973	0.0477	19.44	10.7913	0.01	0.05	96	77
700	24.6083	0.0091	11.5137	0.0154	92.33	22.9332	0.19	0.87	197.5	4.1
760	28.5293	0.0045	10.8612	0.0126	97.97	28.1973	0.13	1.46	239.9	4.4
820	30.1604	0.0013	2.4281	0.0133	99.28	30.0032	1.37	7.45	254.3	2.4
850	30.1054	0.0006	1.0405	0.0127	99.61	30.0122	1.45	13.76	254.3	2.4
880	29.8556	0.0005	0.7076	0.0127	99.63	29.7608	2.86	26.26	252.4	2.4
910	29.8306	0.0005	1.5014	0.0126	99.88	29.8314	2.15	35.66	252.9	2.4
940	30.0251	0.0006	0.8916	0.0126	99.60	29.9262	2.81	47.93	253.7	2.4
980	30.2166	0.0003	0.6227	0.0127	99.80	30.1725	4.56	67.86	255.6	2.4
1020	30.4123	0.0003	0.8695	0.0127	99.87	30.3952	2.60	79.23	257.4	2.4
1070	30.7225	0.0008	0.8656	0.0127	99.45	30.5735	2.31	89.31	258.8	2.4
1120	32.0109	0.0010	0.9917	0.0125	99.28	31.8067	1.92	97.69	268.5	2.5
1400	45.3654	0.0394	5.5229	0.0191	75.18	34.2569	0.53	100.00	287.6	2.8

注:表中下标 m 代表样品中测定的同位素比值;$F = n(^{40}Ar*)/n(^{39}Ar)$,放射性成因$^{40}Ar^*$与$^{39}Ar$比值

件矿化流纹斑岩的锆石 U-Pb 年龄(382 ±2 Ma 和 382.8 ±1.7 Ma)和 1 件切穿流纹斑岩和矿体的辉绿岩脉年龄(381.7 ±1.8 Ma)(Yang Fuquan et al., 2014),采样位置见图 2、3,2 件含矿流纹斑岩的年龄值一致,辉绿岩脉年龄略晚于含矿流纹斑岩,这三件年龄值将萨尔朔克成矿时间限定为 382 Ma 左右,与阿舍勒铜锌矿床相比,晚于其 1 号主矿体喷流沉积作用时间(388 ~ 387 Ma)6 ~ 5 Ma(杨富全等, 2013a)。关于泥盆纪时限的划分,国内与国际地层表存在较大的差距,按照最新的国际年代地层表(2015 版)的划分方案,早泥盆世为 419 ~ 393 Ma,中泥盆世为 393 ~ 382 Ma,晚泥盆世为 382 ~ 358 Ma,因此,萨尔朔克为中泥盆世晚期成矿。

本文获得矿区外围 1 件无明显矿化的流纹斑岩的年龄为 371.3 ±1.2 Ma,结合上面 2 个含矿流纹斑岩的年龄值,表明萨尔朔克矿区的流纹斑岩形成于 371 ~ 382 Ma 之间,与阿舍勒盆地内的流纹岩(375 ±3 Ma)(Wan Bo et al., 2011)具有相同的形成年龄,同属中泥盆世晚期—晚泥盆世早期岩浆活动的产物。与流纹斑岩有关的主成矿作用只发生在中泥盆世晚期 382 Ma 左右,在 371 Ma 左右仍有残余岩浆侵位到近海底形成流纹斑岩,但没有伴随矿化作用。同时结合前人以及我们课题组对阿舍勒组时代的研究(陈毓川等, 1996;王登红, 1996;李华芹等, 1998;张良臣等, 2003;刘德权等, 2005;牛贺才等, 2006;杨富全等, 2013a),推测 371 Ma 是阿舍勒组火山岩系形成的最晚期。

另外,本次流纹斑岩(sesk12-69)中较老的一组年龄为 399.6 ±2.6 Ma,与阿舍勒矿区英安岩年龄(402 Ma 左右,Wu Yufeng et al., 2015)在误差范围内一致,推测这组锆石是流纹质岩浆上升过程中捕获阿舍勒组早期英安岩中的锆石。

5.2　剪切变形时间

额尔齐斯断裂带是中亚造山带中的一条重要深大断裂(Sengor et al., 1993; Cunningham et al., 1996; Badarch et al., 2002),纵穿阿尔泰造山带南缘,是西伯利亚板块与哈萨克斯坦板块的分界带(陈宣华等, 2011)。带内岩石糜棱岩化强烈,线理、面理、S—C 组构、σ 型和 δ 型旋转碎斑系、压力影、眼球状、石香肠、矿物拉长状、透镜状、石英拔丝发育,是以压扁变形为主的左行韧性剪切变形(Allen et al., 1995; Laurent-Charvet et al., 2002, 2003; 周刚等, 2007;Zhang Chuanlin et al., 2012)。前人曾对额尔齐斯断裂带变形时间做过大量年代学工作(杨新岳等, 1994;程忠富和芮行健, 1996; Laurent-Charvet et al., 2003; 闫升好等, 2004;刘飞等, 2013;杨富全等, 2013b),主要集中在 261 ~ 297 Ma。萨尔朔克金多金属矿和阿舍勒铜锌矿均毗邻额尔齐斯断裂带。额尔齐斯断裂带的北部玛尔卡库里具有反“S”左行走滑断裂的构造特征,为额尔齐斯深大断裂的次级断裂。萨尔朔克矿区位于玛尔卡库里反“S”型构造带南北向与北西向构造线的转折端附近,阿舍勒铜锌矿区位于玛尔卡库里反“S”型近南北向断裂带东侧。无论是野外地质观察,还是室内显微构造分析,两个矿区均显示出脆韧性剪切变形的特点。

本次用于$^{40}Ar/^{39}Ar$年龄测定的绢云母沿剪切面理分布,同时绢云母及次生石英颗粒充填早期破碎的黄铁矿及石英斑晶内部,表明它们属于韧性剪切变形过程的新生矿物,其形成时代可以代表矿区韧性剪切变形带形成的时代,绢云母的坪年龄为 254.4 ±1.8 Ma,限定了萨尔朔克金多金属矿区韧性剪切变形作用发生在晚二叠世末期。我们课题组获得阿舍勒铜锌矿区绢云母的坪年龄为 251.2 ±1.6 Ma,限定了阿舍勒铜锌矿区韧性剪切变形作用发生在晚二叠世末期(吴玉峰等, 2015)。两个矿区剪切变形的时间相近且晚于额尔齐斯断裂带变形时间,表明该时期为额尔齐斯区域大规模剪切—走滑活动之后的局部剪切活动,该活动规模小,构造层次较浅,主要对火山岩系和矿体起变形和破坏作用,两个矿区野外均未发现经过剪切变形有成矿物质再富集的现象。

5.3　萨尔朔克矿区成岩成矿年代谱系

在本文及我们课题组的年代学研究基础上,可以建立萨尔朔克金多金属矿成岩成矿年代谱系图(图 11):

泥盆纪古亚洲洋板块与西伯利亚板块的阿尔泰古陆块间的俯冲增生作用加剧,在阿尔泰古陆块上导致了一系列的地壳伸展作用,形成多个断陷盆地。早—晚泥盆世期间(403 ~ 371 Ma),伴随着活动陆缘的发育在阿舍勒盆地发生洋内俯冲作用,形成了阿舍勒洋内岛弧。大洋板块的俯冲作用导致地幔楔部分熔融,形成阿舍勒组拉斑玄武岩、高镁玄武岩和高镁英安岩(牛贺才等, 2006)。中泥盆世晚期(382 Ma 左右)粘稠的残余岩浆侵位到海底的破火山口洼地,形成喷出穹隆及其下部的潜流纹岩。脉冲式火山作用驱使热液穿过穹隆和潜火山岩,硫和金属物质被萃取到热液中,含矿流体向上运移到达海底,

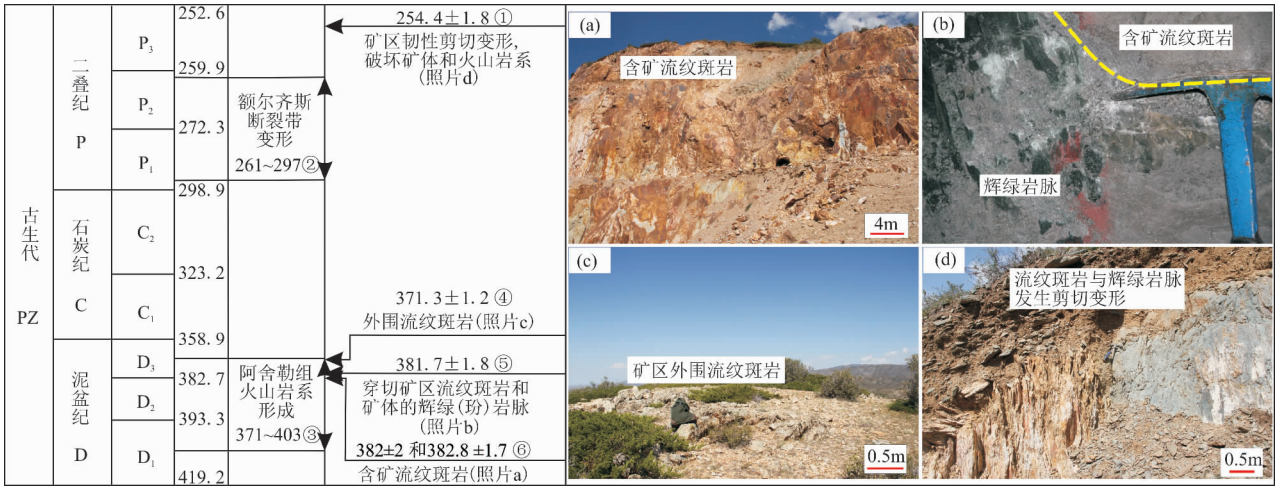


图 11 萨尔朔克金多金属矿成岩成矿年代谱系图

Fig. 11 Geochronology pedigree graph of diagenesis and mineralization in the Sarsuk polymetallic gold deposit

① 据本文数据；② 据杨新岳等，1994；程忠富和芮行健，1996；Laurent-Charvet et al.，2003；闫升好等，2004；刘飞等，2013；杨富全等，2013b；③ 据杨富全等，2013a；④ 据本文数据；⑤⑥ 据 Yang Fuquan et al.，2014

① After this paper; ② after Yang Xinyue et al., 1994; Cheng Zhongfu and Rui Xingjian, 1996; Laurent-Charvet et al., 2003; Yan Shenghao et al., 2004; Liu Fei et al., 2013; Yang Fuquan et al., 2013b; ③ afterYang Fuquan et al., , 2013a; ④ after this paper; ⑤⑥ after Yang Fuquan et al., 2014

在火山穹窿的斜坡和洼地形成少量层状铜锌矿化，同时含矿流体在流纹斑岩中形成浸染状、细脉、网脉状的多金属矿化（Au—Cu—Pb—Zn）。之后（381.8 Ma）辉绿岩脉侵入到火山岩系、流纹斑岩和矿体中，对矿体起破坏作用，尽管辉绿岩脉中有少量铜矿化，但不具有经济价值。371 Ma 是阿舍勒组形成的最晚期，残余岩浆侵位到近海底，形成流纹斑岩，但没有伴随矿化作用。在额尔齐斯区域大规模剪切—走滑活动（297 ~ 261 Ma）之后，矿区发生局部剪切活动（254.4 ± 1.8 Ma），该活动规模小，构造层次浅，目前还没有发现新的矿化或中泥盆世形成的多金属矿体大规模成矿元素活化、迁移和再富集的现象。

6 结论

（1）矿区外围无明显矿化的流纹斑岩的年龄为 371.3 ± 1.2 Ma，结合课题组在矿区的年代学研究成果，表明流纹斑岩形成于 382 ~ 371 Ma 之间，但主成矿作用只发生在中泥盆世晚期，371 Ma 左右仍有残余岩浆侵位到近海底，但没有伴随矿化作用。

（2）矿区普遍发育剪切变形构造，对矿区糜棱岩中的绢云母进行 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 测年表明，韧性剪切活动发生在 254.4 ± 1.8 Ma，与课题组在阿舍勒铜锌矿床的绢云母测年结果（251.2 ± 1.6 Ma）相近，表明该时期为额尔齐斯区域大规模剪切—走滑活动之后的局部剪切活动，对火山岩系和矿体起变形和破坏作用。

致谢：野外期间得到新疆鑫旺矿业有限公司、新疆地质矿产勘查开发局第四地质大队等单位领导和技术人员的大力支持和帮助，在此一并致以衷心的感谢。

注 释 / Note

❶ 王华星，何建喜，张为，周晓飞，吴敬新，谢宗仁，姚磊. 2011. 新疆哈巴河县萨尔朔克金多金属矿资源储量核实报告. 1 ~ 124（内部资料）.

参 考 文 献 / References

（The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract）

柴凤梅，欧阳刘进，董连慧，杨富全，刘锋，张志欣，李强. 2013. 新疆阿舍勒铜锌矿区英云闪长岩年代学及地球化学. 岩石矿物学杂志，31(1)：41 ~ 52.

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. 岩石学报，22(4)：867 ~ 872.

陈宣华，杨农，叶宝莹，王志宏，陈正乐. 2011. 中亚成矿域多核成矿系统西准噶尔成矿带构造体系特征及其对成矿作用的控制. 大地构造与成矿学，35(3)：325 ~ 338.

陈毓川，叶庆同，冯京，牟传林，周良仁，王全明，黄光昭，庄道泽，任秉琛. 1996. 阿舍勒铜锌成矿带成矿条件和成矿预测. 北京：地质出版社：1 ~ 330.

程忠富,芮行健. 1996. 哈巴河县赛都金矿成矿特征探讨. 新疆地质,14(3):247 ~ 254.

戴自希,白冶,吴初国,古方,朱明玉,尚修治. 2001. 中国西部和毗邻国家铜金找矿潜力的对比研究. 北京:地震出版社:1 ~ 201.

高珍权,方维萱,胡瑞忠,李文铅. 2010. 新疆阿舍勒铜矿英安—玄武—安山质火山岩的地球化学特征与构造背景. 矿床地质,29(2):218 ~ 228.

耿新霞,杨富全,杨建民,郭正林,郭旭吉,黄承科,刘锋,柴凤梅,张志欣. 2010. 新疆阿尔泰铁木尔特铅锌矿床稳定同位素组成特征. 矿床地质,29(6):1088 ~ 1100.

何国琦,李茂松,刘德权,唐延龄,周汝洪. 1994. 中国新疆古生代地壳演化及成矿. 乌鲁木齐:新疆人民出版社:1 ~ 437.

何国琦,朱永峰. 2006. 中国新疆及其邻区地质矿产对比研究. 中国地质,33(3):451 ~ 460.

李华芹,谢才富,常海亮,蔡红,朱家平,周肃. 1998. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学. 北京:地质出版社:1 ~ 264.

李怀坤,朱士兴,相振群,苏文博,陆松年,周红英,耿建珍,李生,杨锋杰. 2010. 北京延庆高于庄组凝灰岩的锆石 U-Pb 定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束. 岩石学报,26(7):2131 ~ 2140.

李长民. 2009. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述. 地质调查与研究,33(3):161 ~ 174.

刘德权,唐延龄,周汝洪. 2005. 中国新疆铜矿床和镍矿床. 北京:地质出版社:1 ~ 360.

刘飞,王镇远,林伟,陈科,姜琳,王清晨. 2013. 中国阿尔泰造山带南缘额尔齐斯断裂带的构造变形及意义. 岩石学报,29(5):1811 ~ 1824.

牛贺才,于学元,许继峰,单强,陈繁荣,张海祥,郑作平. 2006. 中国新疆阿尔泰晚古生代火山作用及成矿. 北京:地质出版社:1 ~ 184.

涂光炽. 1999. 初议中亚成矿域. 地质科学,34(4):398 ~ 399.

万博,张连昌. 2006. 新疆阿尔泰南缘泥盆纪多金属成矿带 Sr—Nd—Pb 同位素地球化学与构造背景探讨. 岩石学报,22(1):145 ~ 152.

王登红,陈毓川,徐志刚,李天德,傅旭杰. 2002. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律. 北京:原子能出版社:1 ~ 493.

王登红. 1996. 新疆阿舍勒火山岩型块状硫化物铜矿硫、铅同位素地球化学. 地球化学,25(6):582 ~ 590.

王京彬,秦克章,吴志亮,胡剑辉,邓吉牛. 1998. 阿尔泰山南缘火山喷流沉积型铅锌矿床. 北京:地质出版社:1 ~ 210.

王小兵,高保明. 2001. 新疆萨尔朔克金矿稀土元素地球化学特征. 新疆地质,19(3):185 ~ 188.

王小兵,张少丽. 2001. 新疆哈巴河萨尔朔克金矿地质特征及成因初探. 新疆地质,19(2):130 ~ 132.

吴玉峰,杨富全,刘峰,周明,陈红琦. 2015. 新疆阿舍勒铜锌矿区脆韧性剪切带中绢云母$^{40}Ar/^{39}Ar$年代学及其地质意义. 地球学报,36(1):121 ~ 126.

肖序常,汤耀庆,冯益民,朱宝清,李锦轶,赵民. 1992. 新疆北部及邻区大地构造. 北京:地质出版社: 1 ~ 169.

闫升好,陈文,王义天,张招崇,陈柏林. 2004. 新疆额尔齐斯金成矿带的$^{40}Ar/^{39}Ar$年龄及其地质意义. 地质学报,78(4):500 ~ 506.

杨富全,李凤鸣,秦纪华,郑开平,刘锋. 2013a. 新疆阿舍勒铜锌矿区(潜)火山岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 矿床地质,32(5):869 ~ 883.

杨富全,毛景文,郑建民,徐林刚,刘德权,赵财胜,叶会寿. 2006. 哈萨克斯坦阿尔泰巨型成矿带的地质特征和成矿模型. 地质学报,80(7):963 ~ 983.

杨富全,秦纪华,刘锋,张志欣,刘振江,耿新霞,柴凤梅,高文娟. 2013b. 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.

杨新岳,李志纯,谢国源. 1994. 新疆阿尔泰造山带南缘萨勒巴斯推覆体的变形和变质作用. 地球科学,19(1):461 ~ 470.

叶庆同,傅旭杰,张晓华. 1997. 阿舍勒铜锌块状硫化物矿床地质特征和成因. 矿床地质,16(2):97 ~ 106.

张良臣,刘德权,王有标,李庆昌,李博权,周汝洪,邹天人,唐延龄,王京彬,吴乃元,赵殿甲,杜佩轩. 2003. 中国新疆优势金属矿产成矿规律. 北京:地质出版社:1 ~ 405.

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. 地质论评,52(4):556 ~ 561.

周刚,张招崇,王新昆,王祥,罗世宾,何斌,张小林. 2007. 新疆玛因鄂博断裂带中花岗质糜棱岩锆石 U-Pb SHRIMP 和黑云母^{40}Ar-^{39}Ar年龄及意义. 地质学报,81(3):358 ~ 369.

Allen M B, Sengor A M C, Natalin B A. 1995. Junggar, Turfan and Alakol basins as Late Permian to Early Triassic extensional structures in a sinistral shear zone in the Altaid orogenic collage, Central Asia. Journal of the Geological Society, 152(2): 327 ~ 338.

Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report 204Pb. Chemical Geology, 192: 59 ~ 79.

Badarch G, Cunningham W D, Windley B F. 2002. A new terrane subdivision for Mongolia: Implications for the Phanerozoic crustal growth of central Asia. Journal of Asian Earth Sciences, 21(1): 87 ~ 110.

Belousova E A, Griffin W L, O Reilly S Y, Fisher N I. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. Contributions to Mineralogy and Petrology, 143: 602 ~ 622.

Black L P, Kamo S L, Allen C M, Aleinikoff J N, Davis D W, Kosch R J, Foudoulis C. 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. Chemical Geology, 200: 155 ~ 170.

Cai Keda, Sun Min, Yuan Chao, Zhao Guochun, Xiao Wenjiao, Long Xiaoping, Wu Fuyuan. 2010. Geochronological and geochemical study of mafic dykes from the northwest Chinese Altai: Implications for petrogenesis and tectonic evolution. Gondwana Research, 18: 638 ~ 652.

Cai Keda, Sun Min, Yuan Chao, Zhao Guochun, Xiao Wenjiao, Long Xiaoping, Wu Fuyuan. 2011. Prolonged magmatism, juvenile nature and tectonic evolution of the Chinese Altai, NW China: Evidence from zircon U-Pb and Hf isotopic study of Paleozoic granitoids. Journal of Asian Earth Sciences, 42: 949 ~ 968.

Chai Fengmei, Ouyang Liujin, Dong Lianhui, Yang Fuquan, Liu Feng, Zhang Zhixin, Li Qiang. 2013&. Geochronology and genesis of tonalities from the Ashele Cu—Zn deposit on the southern margin of Altay, Xinjiang. Acta Petrologica Et Mineralogica, 31(1): 41 ~ 52.

Chen Wen, Zhang Yan, Zhang Yueqiao, Jin Guishan, Wang Qingli. 2006&. Late Cenozoic episodic uplifting in southeastern part of the Tibetan plateau——evidence from Ar-Ar thermochronology. Acta Petrologica Sinica, 22(4): 867 ~ 872.

Chen Xuanhua, Yang Nong, Ye Baoying, Wang Zhihong, Chen Zhengle. 2011&. Tectonic system and its control on metallogenesis in western Junggar as part of the Central Asia Multi-Core Metallogenic System. Geotectonica Et Metallogenia, 35(3): 325 ~ 338.

Chen Yuchuan, Ye Qingtong, Feng Jing, Mou Chuanlin, Zhou

Liangren, Wang Quanming, Huang Guangzhao, Zhuang Daoze, Ren Bingchen. 1996&. Ore-forming conditions and metallogenic prognosis of the Ashele copper—zinc metallogenic belt, Xinjiang, China. Beijing: Geological Publishing House: 1 ~330.

Cheng Zhongfu, Rui Xingjian. 1996&. Minerogenetic characteristics of Saidu gold deposit in Habahe country. Xinjiang Geology, 14(3): 247 ~254.

Cunningham W D, Windley B F, Dorjnamjaa D, Badamgarov G. 1996. A structural transect across the Mongolian western Altai: Active transpressional mountain building in Central Asia. Tectonics, 15 (1): 142 ~156.

Dai Zixi, Bai Ye, Wu Chuguo, Gu Fang, Zhu Mingyu, Shang Xiuzhi. 2001#. The gold and copper mineralization in western China and its adjacent regions. Beijing: Seismological Press: 1 ~201.

Daukeev S Z, Uzhkenov B S, Bespaev K A, Miroshnichenko L A, Mazurov A K, Sayduakasov M A. 2004. Atlas of mineral deposit models of the republic of Kazakhstan. Almaty: Printing House "Center for geoinformation of the Military Forces of the Republic of Kazakhstan": 1 ~141.

Franklin J M, Gibson H L, Jonasson I R, Galley A G. 2005. Volcanogenic massive sulfide deposits. Economic Geology, 100th Anniversary: 523 ~560.

Gao Zhenquan, Fang Weixuan, Hu Ruizhong, Li Wenqian. 2010&. Tectonic setting and geochemical characteristics of dacite andesite—basalt volcanic rocks in Ashele copper deposit, Xin jiang. Mineral Deposits, 29(2): 218 ~228.

Geng Xinxia, Yang Fuquan, Yang Jianmin, Guo Zhenglin, Guo Xuji, Huang Chengke, Liu Feng, Chai Fengmei, Zhang Zhixin. 2010&. Stable isotope characteristics of Tiemurte Pb—Zn deposit in Altay, Xinjiang. Mineral Deposits, 29(6): 1088 ~1100.

He Guoqi, Li Maosong, Liu Dequan, Tang Yanling, Zhou Ruhong. 1994#. Paleozoic crustal evolution and mineralization in Xinjiang, China. Ulumuqi: Xinjiang People's Publishing House: 1 ~437.

He Guoqi, Zhu Yongfeng. 2006&. Comparative study of the geology and mineral resources in Xinjiang and its adjacent regions, China. Geology in China, 33(3): 451 ~460.

Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, Belousova E A. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. Chemical Geology, 211: 47 ~69.

Laurent-Charvet S, Charvet J, Monie P, Shu L S. 2003. Late Paleozoic strike-slip shear zones in eastern central Asia (NW China): new structural and geochronological data. Tectonics, 22(2): 1 ~24.

Laurent-Charvet S, Charvet J, Shu L S, Ma R S, Lu H F. 2002. Palaeozoic late collisional strike-slip deformations in Tianshan and Altay, eastern Xinjiang, NW China. Terra Nova, 14(4): 249 ~256.

Li Changmin. 2009&. A review on the minerageny and situ microanalytical dating techniques of zircons. Geological Survey and Research, 33(3): 161 ~174.

Li Huaikun, Zhu Shixing, Xiang Zhenqun, Su Wenbo, Lu Songnian, Zhou Hongying, Geng Jianzhen, Li Sheng, Yang Fengjie. 2010&. Ziron U-Pb dating on tuffbed from Gaoyuzhuang Formation in Yanqing, Beijing: Further constraints on the new subdivision of the Mesoproterozoic stratigraphy in the northern North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 26(7): 2131 ~2140.

Li Huaqin, Xie Caifu, Chang Hailiang, Cai Hong, Zhu Jiaping, Zhou Su. 1998&. Study on metallogenetic chronology of nonferrous and precious metallic ore deposits in north Xinjiang, China. Beijing: Geological Publishing House: 1 ~264.

Liu Dequan, Tang Yanling, Zhou Ruhong. 2005&. The copper deposit and nickel deposit in Xinjiang, China. Beijing: Geological Publishing House: 1 ~360. Liu Fei, Wang Zhenyuan, Lin Wei, Chen Ke, Jiang Lin, Wang Qingchen. 2013&. Structure deformation and tectonic significance of Erqis fault zone in the southern margin of Chinese Altay. Acta Petrologica Sinica, 29(5): 1811 ~1824.

Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Changgui, Zong Keqing, Wang Dongbing. 2009. Continental and oceanic crust recycling-induced melt—peridotite in teractions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. Journal of Petrology, 51(1 ~2): 537 ~571.

Ludwig K R. 2003. User's manua l for Isoplot /Ex, version 3.0// A geochronological toolkit for microsoft excel: Berkeley Geochronology Center Special Publication. No 4: 1 ~70.

Niu Hecai, Yu Xueyuan, Xu Jifeng, Shan Qiang, Chen Fanrong, Zhang Haixiang, Zheng Zuoping. 2006&. Late Paleozoic volcanism and associated metallogenesis in the Altay area, Xinjiang, China. Beijing: Geological Publishing House: 1 ~184.

Sengor A M C, Natalin B A, Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. Nature, 364(22): 299 ~307.

Tu Guangzhi. 1999&. On the Certral Asia Metallogenic Province. Scienti Ageologica Sinica, 34(4): 397 ~404.

Wan Bo, Zhang Lianchang, Xiang Peng. 2010. The Ashele VMS-type Cu—Zn Deposit in Xinjiang, NW China Formed in a Rifted Arc Setting. Resource Geology, 60(2): 150 ~164.

Wan Bo, Zhang Lianchang. 2006&. Sr—Nd—Pb isotope geochemistry and tectonic setting of Devonian polymetallic metallogenic belt on the Southern margin of Altaid, Xingjing. Acta Petrologica Sinica, 22 (1): 145 ~152.

Wan Bo, Xiao Wenjiao, Zhang Lianchang, Windley Brian F, Han Chunming, Quinn Cameron D. 2011. Contrasting styles of mineralization in the Chinese Altai and East Junggar, NW China: Implications for the accretionary history of the southern Altaids. Journal of the Geological Society, 68: 1311 ~1321.

Wang Denghong, Chen Yuchuan, Mao Jingwen. 1998. The Ashele deposit: a recently discovered volcanogenic massive sulfide Cu—Zn deposit in Xinbjiang, China. Resource Geology, 48(1): 31 ~42.

Wang Denghong, Chen Yuchuan, Xu Zhigang, Li Tiande, Fu Xujie. 2002#. Minerogenetic series and regularity of mineralization in the Altai Metallogenetic Province, China. Beijing: Atomic Press: 1 ~493.

Wang Denghong. 1996&. Sulfur and lead isotopic geochemistry of the Ashele volcanogenic massive sulfide deposit, Xinjiang, China. Geochimica, 25(6): 582 ~590.

Wang Jingbin, Wang Yuwang, Wang Shulai, Ding Rufu. 2003. The Koktal Pb—Zn massive sulfide deposit. In: Mao Jingwen, Goldfarb R J, Seltmann R, Wang Denghong, Xiao Wenjiao, Hart C. Eds. Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan. Proceedings Volume of the International Symposium of the IGCP-473 project in Urumqi and Guidebook of the Field Excursion in Xinjiang, China: August 9 ~21, 2003. Centre for Russian and Central Asian Mineral Studies, Natural History Museum, London: 169 ~180.

Wang Jingbin, Qin Kezhang, Wu Zhiliang, Hu Jianhui, Deng Jiniu.

1998&. Volcanic—exhalative—sedimentary lead—zinc deposits in the southern margin of the Altai, Xinjiang. Beijing: Geological Publishing House: 1 ~ 210.

Wang Xiaobing, Gao Baoming. 2001&. Ree characteristics of the Saersoc gold deposit in Xinjiang. Xinjiang Geology, 19(3): 185 ~ 188.

Wang Xiaobing, Zhang Shaoli. 2001&. Geological charcteristic and preliminary study on genesis of Saersuoc gold deposit. Xinjiang Geology, 19(2): 130 ~ 132.

Wu Yufeng, Yang Fuquan, Liu Feng, Geng Xinxia, Li Qiang, Zheng Jiahao. 2015. Petrogenesis and tectonic settings of volcanic rocks of the Ashele Cu—Zn deposit in southern Altay, Xinjiang, Northwest China: Insights from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Sr—Nd isotopes, Journal of Asian Earth Sciences, 112: 60 ~ 73.

Wu Yufeng, Yang Fuquan, Liu Feng, Zhou Ming, Chen Hongqi. 2015&. ^{40}Ar-^{39}Ar dating of sericite from the brittle ductile shear zone in the Ashele Cu—Zn ore district, Xinjiang. Acta Geoscientica Sinica, 36(1): 121 ~ 126.

Xiao Wenjiao, Han Chunming, Yuan Chao, Sun Min, Lin Shoufa, Chen Hanlin, Li Zilong, Li Jiliang, Sun Shu. 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia. Journal of Asian Earth Sciences, 32: 102 ~ 117.

Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Feng Yimin, Zhu Baoqing, Li Jinyi, Zhao Min. 1992&. Tectonic evolution of the northern Xinjiang and its adjacent regions. Beijing: Geological Publishing House: 1 ~ 169.

Xu Jiuhua, Craig J R Hart, Wang Linlin, Chu Haixiang, Lin Longhua, Wei Xiaofeng. 2011. Carbonic fluid overprints in volcanogenic massive sulfide deposits: Examples from the Kelan volcanosedimentary basin, Altaides, China. Economic Geology, 106: 145 ~ 158.

Yakubchuk A S, Shatov V V, Kirwin D, Edwards A, Tomurtogoo O, Badarch G, Buryak VA. 2005. Gold and base metal metallogeny of the Central Asian Orogenic Supercollage. Economic Geology, 100th Anniversary: 1035 ~ 1068.

Yan Shenghao, Chen Wen, Wang Yitian, Zhang Zhaochong, Chen Bolin. 2004&. $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating and its significance of the Ertix gold metallogenic belt in the Altay Orogen, Xinjiang. Acta Geologica Sinica, 78(4): 500 ~ 506.

Yang Fuquan, Li Fengming, Qin Jihua, Zheng Kaiping, Liu Feng. 2013a&. LA-MC-ICP-MS U-Pb dating of zircons from volcanic rocks and subvolcanic intrusions in Ashele Cu—Zn ore deposit, Xinjiang, and its geological implications. Mineral Deposits, 32(5): 869 ~ 883.

Yang Fuquan, Liu Feng, Li Qiang, Geng Xinxia. 2014. In situ LA-MC-ICP-MS U-Pb geochronology of igneous rocks in the Ashele Basin, Altay orogenic belt, northwest China: Constraints on the timing of polymetallic copper mineralization. Journal of Asian Earth Sciences, 79: 477 ~ 496.

Yang Fuquan, Mao Jingwen, Zheng Jianmin, Xu Lingang, Liu Dequan, Zhao Caisheng, Ye Huishou. 2006&. Geological characteristics and metallogenic model of the Altai large metallogenic belt in Kazakhstan. Acta Geologica Sinica, 80(7): 963 ~ 983.

Yang Fuquan, Qin Jihua, Liu Feng, Zhang Zhixin, Liu Zhenjiang, Geng Xinxia, Chai Fengmei, Gao Wenjuan. 2013b&. Ar-Ar dating of the ductile shear zones in the Yulekenhalasu Cu—(Mo) ore deposit. Geotectonica Et Metallogenia, 37(1): 1 ~ 10.

Yang Xinyue, Li Zhichun, Xie Guoyuan. 1994&. Deformation and metamorphism of Salebasi nappe in Southern piedmont of Altay Orogenic Belt, Xinjiang, China. Earth Science——Journal of China University of Geosciences, 19(4): 461 ~ 470.

Ye Qingtong, Fu Xujie, Zhang Xiaohua. 1997&. Geological characteristics and genesis of the Ashele copper—zinc massive sulfide deposit, Xinjiang. Mineral Deposits, 16(2): 97 ~ 106.

Yuan Chao, Sun Min, Xiao Wenjiao, Li Xianhua, Chen Hanlin, Lin Shoufa, Xia Xiaoping, Long Xiaoping. 2007. Accretionary orogenesis of the Chinese Altai: Insights from Paleozoic granitoids. Chemical Geology, 242: 22 ~ 39.

Zhang Chuanlin, Santosh M, Zou Haibo, Xu Yigang, Zhou Gang, Dong Yongguan, Ding Rufu, Wang Hongyan. 2012. Revisiting the "Irtish tectonic belt": Implications for the Paleozoic tectonic evolution of the Altai orogen. Journal of Asian Earth Sciences, 52: 117 ~ 133.

Zhang Liangchen, Liu Dequan, Wang Youbiao, Li Qingchang, Li Boquan, Zhou Ruhong, Zou Tianren, Tang Yanling, Wang Jingbin, Wu Naiyuan, Zhao Dianjia, Du Peixuan. 2003&. Metallogenic regularity of the advantage of metal mineral resources in the Xinjiang. Beijing: Geological Publishing House: 1 ~ 405.

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. Geological Review, 52(4): 556 ~ 561.

Zhou Gang, Zhang Zhaochong, Wang Xinkun, Wang Xiang, Luo Shibin, He Bin, Zhang Xiaolin. 2007&. Zircon U-Pb SHRIMP and ^{40}Ar-^{39}Ar dating of the granitic mylonite in the Mayinebo fault belt of North Xinjiang and its geological significance . Acta Geologica Sinica, 81(3): 358 ~ 369.

Timing of Magmatic Activity—Shearing Deformation from the Sarsuk Polymetallic Gold Deposit on the Southern Margin of Altay, Xinjiang: Constraints from Zircon U-Pb and Sericite $^{40}Ar/^{39}Ar$ Datings

YANG Chengdong, YANG Fuquan, WU Yufeng

Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Land and Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China

Objectives: The Sarsuk polymetallic gold deposit is located at the Ashele Basin on the southern margin of Chinese Altay. The orebodies of the deposit are hosted by rhyolite porphyry which is a subvolcanic intrusion within

a volcanic conduit. A major breakthrough of exploration was made in recent years, but received little research yet. The timing of mineralization was limited to the latest Middle Devonian (382 Ma). But the ages of barren rhyolite porphyry and subsequent ductile deformation remain elusive, which restricts the progress of peripheral prospecting work. Based on detailed field work and microscopic investigation, we carried out geochronological studies of one rhyolite porphyry sample in the periphery and one mylonite sample in deformation band.

Methods: Approximately 70 ~ 85 kg of barren rhyolite porphyry was sampled for zircon U-Pb geochronological. Zircon separation was undertaken at the Laboratory of the Langfang Institute of Regional Geological Survey, Hebei Province, China. Zircon sample mounting and preparation, and CL imaging were undertaken at the Beijing Zircon Dating Science and Technology Co. Ltd, China. Zircon U-Pb dating was performed at the Isotope Laboratory of the Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, China, using laser ablation-multicollector inductively coupled-plasma mass spectrometry (LA-MC-ICP-MS) and a Thermo Fisher Scientific Neptune instrument with an ESI UP193-FX ArF excimer laser. A laser wavelength of 193 nm and a pulse width of 5 ns were used during analysis, with a spot beam diameter of 35 m, a laser energy density of 10 ~ 11 J/cm2, a frequency of 8 ~ 10 Hz, and using He as a carrier gas.

^{40}Ar-^{39}Ar dating was performed on the sericite of the mylonite, which is a newly forming mineral that occurred in the shear surface. The sericite sample was crushed to 20 mesh and chips of sericite were hand-picked under a binocular microscope. They were further purified by ultrasonic cleaning and their purities may reach over 99%. $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating was undertaken at the Geochronology Laboratory, Institute of Geology, CAGS, Beijing, using a GV Helix MC mass spectrometer.

Results: LA-ICP-MS U-Pb zircon dating of barren rhyolite porphyry is 371.3 ± 1.2 Ma. Combined with previous studies of the ore-bearing rhyolite porphyry, our study proposes the rhyolite porphyry formed between 382 ~ 371 Ma, the sericite of the mylonite yielded ^{40}Ar-^{39}Ar isochron age of 254.0 ± 3.7 Ma and plateau age of 254.4 ± 1.8 Ma. The isochron age overlaps the plateau age within error, which reflects the ductile shearing deformation in the ore district took place at the end of the Late Permian.

Conclusions: The main metallogenic stage is the latest Middle Devonian, 371 Ma may represent the latest age of Ashele magmatic intrusion, which was not accompanied by mineralization. The age of ductile shearing deformation in the Sarsuk polymetallic gold deposit is later than the main ductile shearing deformation age of Irtysh sinistral strike-slip region fault belt, the ductile shearing deformation partially reformed the mineralization.

Keywords: U-Pb zircon dating; $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of sericite; Ashele Basin; Sarsuk; Xinjiang

Acknowledgements: This research was jointly supported by the National Natural Science Foundation of China Program (41272103) and the National Key Technologies R&D Program (Grant No. 2011BAB06B03-02). We thank the leaders and technicians of Xinjiang Xinwang Mining Co. Ltd and No. 4 Geological Team of the Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development for field work assistance.

First author: YANG Chengdong, male, born in 1987, a Ph. D candidate in Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences. Email: ycd.198747@163.com.

Corresponding author: YANG Fuquan, male, born in 1968, research fellow. Mainly engaged in geochemistry and deposit geology. Email: fuquanyang@163.com.

Manuscript received on: 2015-05-24; Accepted on: 2016-04-08; Edited by: ZHANG Yuxu.

Doi: 10.16509/j.georeview.2016.03.008

作者注:638 页 3.1 节第 2 自然段印刷纸质版上的内容有误,请以此文件的相应内容为准。——2016 年 5 月 20 日