

新疆萨热阔布金矿黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄及矿床成因启示*

郑 义^{1 2 3}, 李登峰², 张 莉², 陈华勇²

- (1. 中山大学地球科学与地质工程学院, 广东 广州 510275;
2. 中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640;
3. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275)

摘 要: 新疆萨热阔布金矿位于阿尔泰造山带南缘克兰盆地内, 矿体呈脉状产于康布铁堡组火山岩地层中。为准确厘定其成矿时代, 对矿区含矿石英脉中的云母进行了年龄测定, 1 件黑云母样品的⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄为 (213.5 ± 2.3) Ma, 相应的等时线年龄为 (212.4 ± 2.2) Ma, 反等时线年龄为 (212.5 ± 2.2) Ma, 与坪年龄在误差范围内一致。据此, 萨热阔布金矿成矿作用发生于约 213 Ma, 成矿年龄晚于成岩年龄 (~400 Ma) 约 180 Ma。因此, 萨热阔布金矿为后生矿床。成矿年龄略晚于区域变质作用 (~250 Ma) 约 37 Ma, 推测成矿与阿尔泰造山带碰撞造山作用有关。结合矿床地质特征和流体包裹体特征, 认为萨热阔布金矿为碰撞造山体制下形成的造山型金矿。

关键词: 黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄; 萨热阔布金矿; 造山型金矿; 阿尔泰造山带

中图分类号: TP391. 4 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579 (2014) 06-0010-09

Biotite ⁴⁰Ar/³⁹Ar Geochronology Constraint on the Genesis of the Sarekuobu Gold Deposit, Xinjiang

ZHENG Yi^{1 2}, LI Dengfeng, ZHANG Li², CHEN Huayong²

- (1. School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
3. Guangdong Provincial Key Lab of Geological Processes and Mineral Resource Survey, Guangzhou, 510275, China)

Abstract: The genesis of polymetallic deposits in southern Altay, NW China has been disputed between a syngenetic seafloor hydrothermal process and an epigenetic orogenic-type mineralization. The Sarekuobu gold deposit occurs as NW-trending veins in the Devonian Kelan volcanic-sedimentary basin of the Altay orogenic belt. To constrain the metallogenic age, biotite ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronological analysis was carried out in this paper. One biotite sample separated from the gold-bearing lodes yielded ⁴⁰Ar/³⁹Ar isotopic plateau age of (213.5 ± 2.3) Ma, representing the mineralization age of gold-polymetallic sulfides. By summarizing the available isotopic ages and geochemistry data, a significant collision event and related metallogeny during the Triassic in the Altay Orogen is recognized. In combination with the characteristics of ore geology and fluid inclusion geochemistry, the Sarekuobu gold deposit can be determined as an epigenetic orogenic-type gold deposit.

Key words: ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology; the Sarekuobu gold deposit; orogenic gold deposit; the Altay Orogen; China

* 收稿日期: 2014-08-10

基金项目: 国家 973 资助项目 (2014CB440802); 中山大学青年教师起步计划资助项目 (32110-3321400)

作者简介: 郑义 (1984 年生), 男; 研究方向: 矿床成因研究; E-mail: zhengy43@mail.sysu.edu.cn

造山型金矿是一类极具工业价值的矿床, 受矿业界和学术界广泛关注。学者们共识其基本特征为: 变质地体中受构造控制的脉状后生金矿床, 在时间和空间上与造山作用有关^[1-4]。以比较矿床学为指导^[5], 陈衍景^[6]将造山型金矿的概念进行了拓展, 系统总结了造山型矿床的识别标志, 包括: 产于增生型造山带的俯冲增生楔变质地体和碰撞型造山带内部^[2,6]; 矿体常呈脉状产于剪切带等断裂构造中; 成矿流体系统以富含CO₂的变质流体为主; 成矿深度变化于5~20 km; 成矿作用发生挤压向伸展转换体制; 具有三阶段性; 后生成矿, 成矿时间滞后于区域变质作用时间等。

中亚造山带被共识为增生型造山带, 经历了长期复杂的洋壳俯消减和陆壳增生, 于晚石炭世-三叠纪初发生碰撞造山^[7-12]。按照现今的造山-成矿理论^[3], 中亚造山带有利于发育增生体制和碰撞体制的造山型金矿。但是, 作为中亚造山带最具代表性的北疆地区, 仅有赛都, 多拉纳萨依和萨热阔布金矿等少数几个造山型金矿被报道。最新研究表明, 铁木尔特铅锌矿和乌拉斯沟铜矿都表现出了明显的造山型矿床的特征^[13-16], 甚至可可塔勒铅锌矿也表现出了受造山型成矿事件叠加的明显特征^[17]。因此, 开展北疆地区代表性的造山型金矿典型矿床解剖显得尤为紧迫, 不但具有重要的理论意义, 而且对北疆地区的找矿部署工作带来积极意义。

新疆萨热阔布金矿床位于阿尔泰山造山带南缘阿巴宫多金属成矿带(图1)。该矿床发现于20世纪80年代, 平均品位3.86 g/t, 为中型金矿。前人对萨热阔布金矿床地质特征、围岩蚀变特征以及流体包裹体和矿床地球化学特征进行了大量研究, 但对其成因争议较大, 已有观点包括: 火山喷流沉积改造型^[18], 构造蚀变岩型^[19], 断裂变质岩型^[20], 造山型^[21-23]。

前述各种成因观点可归为两类: 共生(火山喷流沉积有关)和后生(构造变质热液相关); 前者成岩成矿近同时, 而后者成矿晚于成岩时代。显然, 研究萨热阔布金矿床的成矿时代, 并与成岩时代相比较, 有助于解决萨热阔布金矿床成矿时代和成因问题。基于上述, 本文对1个多金属硫化物-石英脉中云母样品进行⁴⁰Ar/³⁹Ar定年, 以期厘定萨热阔布成矿时代, 探讨萨热阔布金矿成因类型及成矿的大地构造背景。

1 区域地质背景

萨热阔布金矿床位于阿尔泰山造山带南缘克兰火山-沉积盆地内。该盆地被共识为西伯利亚板块阿尔泰山南缘晚古生代活动陆缘的弧后拉张盆地^[14,24-27], 区内主要出露地层包括中上志留统库鲁姆提组、下泥盆统康布铁堡组、中泥盆统阿尔泰镇组。库鲁姆提组为一套混合岩、片麻岩夹变质砂岩、片岩组合, 与上覆的康布铁堡组呈断层接触; 康布铁堡组为一套海相中酸性火山岩-火山碎屑岩、陆源碎屑沉积岩-碳酸盐岩建造; 阿勒泰镇组为一套变质粉砂岩、变质砂岩、云母石英片岩和千枚岩组合。上述地层单元之间多为断层接触(图1), 发生多期次变质和岩浆侵入活动, 区域变质程度达到中级绿片岩相, 特征变质矿物组合为黑云母-绿泥石-绿帘石-阳起石±角闪石。区内岩浆岩主要形成于泥盆纪和石炭纪, 也包括一些奥陶纪、二叠纪、三叠纪和少量侏罗纪中酸性侵入岩。

克兰盆地及其主构造均呈NW-SE向, 以阿勒泰复式向斜为主体, 轴长50 km, 轴面倾向NE, 倾角50°~70°, NE翼倒转, SW翼正常。向斜核部主要发育中泥盆统阿勒泰镇组, 向两翼依次为康布铁堡组和库鲁姆提组。次级褶皱轴线走向与主构造线一致, 以紧闭的线性褶皱为主, NE翼多数次级褶皱发生倒转。盆地内NW向断裂构造发育, 且多沿不同地层单元之间的边界发育, 显示对地层发育的控制作用。例如, 克因宫断裂和红墩断裂构成志留系与泥盆系的边界, 阿巴宫断裂和阿勒泰断裂为康布铁堡组与阿勒泰镇组的边界(图1)。尤其重要的是, 断裂构造还控制了矿床的空间分布。例如, 阿巴宫断裂控制着大东沟铅锌矿、乌拉斯沟铜矿、恰夏铜矿、萨热阔布金矿和铁木尔特铅锌铜矿等(图1)。

2 矿床地质特征

赋矿地层康布铁堡组为一套变质级别达绿片岩相的纹质晶屑凝灰岩、火山碎屑岩夹碳酸岩建造, 厚度约500~1500 m, 由下而上, 可分为3个岩性段。萨热阔布金矿床赋矿层位为康布铁堡组上亚组第二岩性段(D₁k₂²)(图2)。主矿体位于第二岩性段大理岩及其上下盘的绿泥石黑云母石英片岩、铁锰质大理岩和变钙质砂岩中, 直接容矿围岩为铁锰质大理岩和绿泥石黑云母石英片岩(图3)。

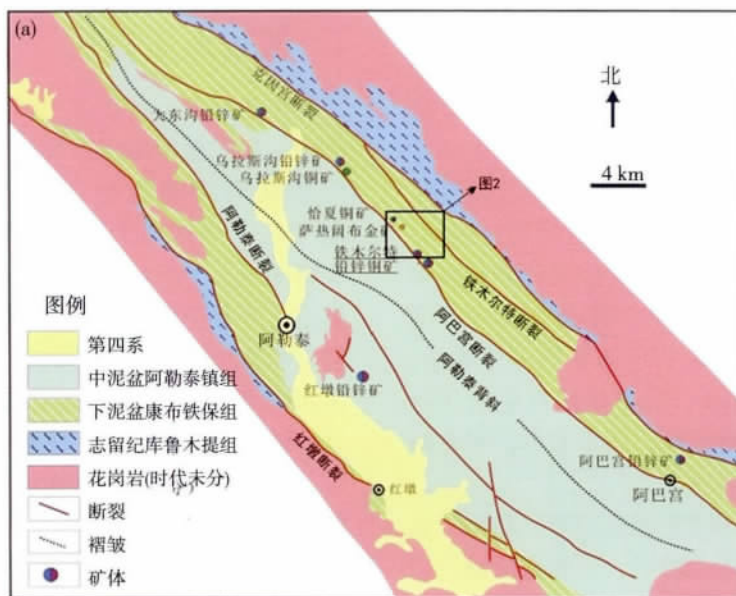


图 1 阿巴宫多金属成矿带地质图

Fig. 1 Geological map of the Abagong ore belt
(据新疆有色 706 队, 2000 修改)

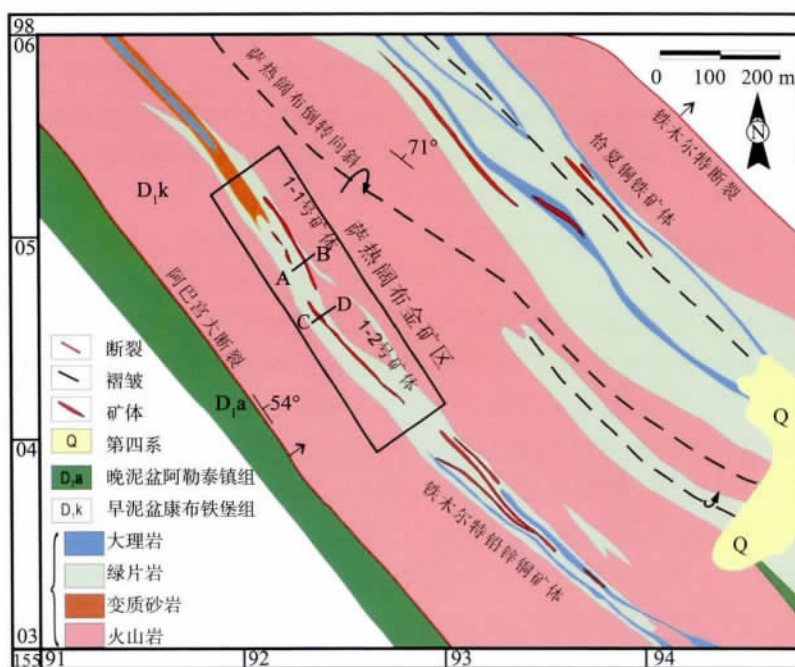


图 2 萨热阔布矿区地质图

Fig. 2 Geological map of the Sarekoubuo gold mining area
(据新疆有色 706 队, 2000 修改)

矿区内褶皱构造比较复杂, 萨热阔布复式向斜横贯矿区, 北翼有恰夏复式背斜, 另有规模不等的褶皱遍布矿区。区内断裂多分布于康布铁堡组第二岩性段内, 沿铁锰钙质岩层与变流纹质晶屑凝灰岩的接触界面等处发育。

萨热阔布金矿 4 个矿体 (1-1 号, 1-2 号, 2 号和 3 号) 占了总储量的 95% 以上。其中, 1-1 号和 1-2 号矿体自 1996 年以来被开发利用。近年来的深部勘探证实 2 号和 3 号矿体展现出良好的勘探前景。

1-1 号矿体是整个萨热阔布金矿最大的金矿体, 位于 1 号成矿带的中心部位, 同时也属于北东向萨热阔布倒转复向斜的南翼。该矿体长约 462 m, 宽约 1.85 ~ 3.32 m, 平均品位约为 3.68 g/t。该矿体的产状基本与阿巴宫大断裂及铁木尔特断裂的产状一致, 倾向 45° ~ 55°, 倾角 71° ~ 80°。1-2 号矿体是萨热阔布第二大矿体, 长约 120 m, 宽 1.51 ~ 3.01 m, 平均品位约为 4.28 g/t, 倾向 40° ~ 50°, 倾角 76° ~ 79°。

矿区内出露的岩性包括流纹质凝灰岩, 绿片岩和大理岩等, 普遍遭受中绿片岩相变质作用影响, 标志性变质矿物组合为绢云母-绿帘石-绿泥石-角闪石。矿区地质图和勘探线剖面图上显示, 矿体与侵入岩没有直接关系 (图 2, 3)。

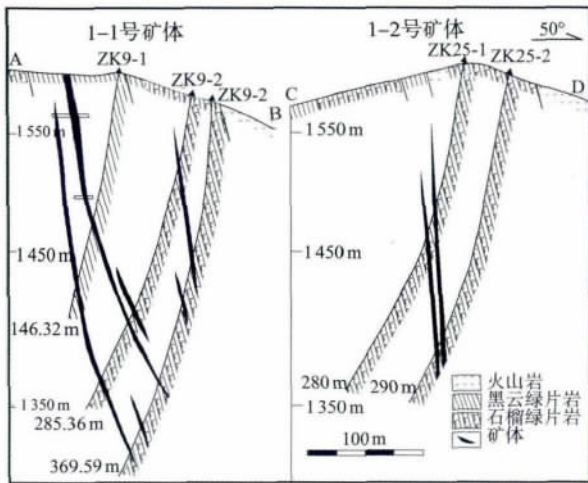


图 3 萨热阔布金矿 1-1 和 1-2 号矿体剖面图
Fig. 3 Geological profiles of Nos. 1-1 and 1-2 orebodies, the Sarekuobu gold deposit (据新疆有色 706 队, 2000 修改)

矿区内褶皱及相应的逆断层记录了主要的变形事件, 同时这些变形空间也为富金石英脉的沉淀提供了良好的空间。从早到晚, 至少有个三个阶段的含金或富金石英脉被识别出来^[23]。早阶段主要由一些乙肠状的脉体组成, 发生强烈的构造变形, 角砾化, 糜棱岩化和脆性-韧脆性变形的重结晶。单独的脉体长约几十厘米, 厚度变化系数较大, 但主要与围岩的变形片理产状接近。该种脉体内黄铁矿等硫化物的含量约为 40% 以内。第二阶段脉体充填于早阶段石英脉的裂隙中, 未发生明显变形, 表明未遭受应力作用, 可能形成于伸展背景。平硐下可观察到很多脉体相互叠加穿插的现象, 显示网脉状构造。这种类型的脉体长度可达数十米, 脉宽 0.05 ~ 1 m。许多这种类型的脉体充填于雁列结构

的张裂隙中, 宽度可达数米, 其内硫化物 (主要为黄铁矿, 磁黄铁矿和黄铜矿) 比例可达 5% ~ 15%。同时, 该阶段还出现大量条带状石英脉, 局部夹围岩角砾或团块, 指示该阶段沸腾作用强烈。第三阶段主要矿物组成包括黄铁矿-萤石-石英脉, 穿插了上面两个阶段的石英脉。这种脉体长约数十厘米, 1 ~ 10 cm 厚。同时, 这种脉体中含有大量的肉眼或放大镜下可观察到的明金。

除了脉状构造外, 许多条带状, 块状和浸染状构造也可以被识别出来。条带状矿石主要采自钻孔样, 含有超过 50% 的黄铁矿和少量磁铁矿。块状矿石中硫化物可达 60% 以上, 被一些蚀变矿物包裹, 包括黑云母, 绿泥石和绿帘石等。

围岩蚀变包括硅化, 绿泥石化, 绿帘石化, 碳酸盐化和萤石化以及强烈的硫化物化。石英脉与围岩之间的接触界限截然, 蚀变带外围也发育一些石英团块和石英脉。硅化开始于第一阶段, 贯穿整个成矿过程。绢云母化, 绿泥石化和绿帘石化, 主要以绢云母-黑云母-绿帘石-绿泥石-硫化物-石榴石组合为代表, 叠加在第二阶段之上。萤石化, 以紫色为标志性特征, 同时也是第三阶段脉体的主要标志。

3 黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学研究

3.1 样品特征及研究方法

用于云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 研究的样品分别采自 1-1 号矿体, 为中阶段黑云母-多金属硫化物-含金石英脉型矿石中的片状黑云母, 采样位置与样品描述见图 4。云母作为限定成矿年龄矿物时, 必须符合以下 3 个条件^[15]: ①云母与硫化物共生, 即云母与共生硫化物同时形成; ②形成后, 遭受的后期构造热事件的温度低于云母的封闭温度; ③过剩氩的含量可以忽略不计。本次样品符合上述条件, 可以作为限定热液矿床成矿年代的理想矿物。

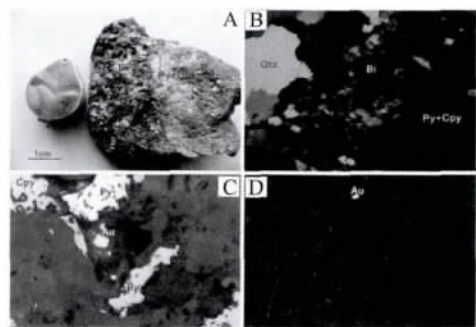


图 4 含矿云母石英脉中云母及其镜下照片
Fig. 4 Photograph and microphotograph of micas and free gold

3.2 测试方法

为确定云母类型和化学成分,电子探针成分分析在中国科学院广州地球化学研究所电子探针实验室进行,分析仪器为 JEOL JXA-8100 电子探针仪,分析流程及实验参数见^[28]。

将样品粉碎至 20 目,双目镜下挑选出纯度 > 98% 的云母样品。经过超声波洗涤去除云母表面附着的杂质。⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素年代分析在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学和年代学实验室进行。仪器设备为英国 GV Instruments 5400 质谱计和深圳光大 COHERENT-50W 二氧化碳激光器。GV Instruments 5400 质谱计和 COHERENT-50W 二氧化碳激光器具体的分析技术规格见 Qiu and Wijbrans^[29]。实验过程中用作中子通量监测的标样是中国周口店黑云母标样 ZBH-25, 年龄 132 Ma。用于⁴⁰Ar/³⁹Ar 中子活化测定年龄的样品,用铝箔包裹后,与用于标样 ZBH-25 一起封入石英玻璃瓶中,置于中国原子能科学研究所的 49-2 核反应堆 B8 孔道内进行中子照射,中子通量为 $(6.0 \sim 6.5) \times 10^{12} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。K 和 Ca 的干扰氩的修正因子分别为 $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 8.984 \times 10^{-4}$, $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 2.673 \times 10^{-4}$ 和 $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 5.97 \times 10^{-3}$ 。高温阀规格为长 210 mm, 半径 28 mm, 最高温为 1 200 °C 左右。碎裂和纯化在 150 °C 下进行大约 10 h, 外部大约为 250 °C。本底值分别为 ³⁶Ar = (0.002 ~ 0.004) mV, ³⁷Ar = (0.000 2 ~ 0.000 6) mV, ³⁸Ar = (0.000 4 ~ 0.001 5) mV, ³⁹Ar = (0.002 5 ~ 0.005 1) mV 和 ⁴⁰Ar = (0.51 ~ 1.3) mV。释气分别在管道中净化 5 ~ 8 min, 分别在室温和 450 °C 左右。⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年结果的计算和投点采用 ArArCALC 计算软件^[30]。

3.3 实验结果

萨热阔布金矿床硫化物石英脉中云母的电子探针化学成分分析及计算的分子式见表 1。本次测定

的云母样品 SL-04 的分子式分别为 $(\text{K}_{1.06}\text{Na}_{0.02}\text{Ca}_{0.01})_{1.09}(\text{Fe}_{1.40}\text{Mg}_{1.19}, \text{Al}_{0.26}\text{Ti}_{0.06})_{2.91}[(\text{Si}_{2.83}\text{Al}_{1.17})_{4.00}\text{O}_{10.00}](\text{OH}_{1.99}, \text{Cl}_{0.01})_{2.00}$, 以 Fe 和 Mg 为主, 并且 $n(\text{Mg}) : n(\text{Fe}) < 2.00$, 可以判断为黑云母样品。

⁴⁰Ar/³⁹Ar 阶段激光剥蚀分析结果见于表 2, 相应的表观年龄谱、等时线和反等时线年龄见图 5。⁴⁰Ar/³⁹Ar 表观坪年龄决定于: ① > 75% 的连续气体分解; ② 至少 8 个阶段。本次测定 SL-04 黑云母样品 19 个阶段, 所测样品的总气体年龄为 (215.42 ± 2.06) Ma, 在第 7 到第 19 阶段构成的坪年龄为 (213.54 ± 2.29) Ma (MSWD = 15.51), 对应了 > 80% 的³⁹Ar 释放量, 相应的³⁹Ar/³⁶Ar - ⁴⁰Ar/³⁶Ar 等时线年龄为 (212.38 ± 2.16) Ma (MSWD = 5.18), ⁴⁰Ar/³⁶Ar 初始值为 331.6 ± 16.4 ; ³⁶Ar/⁴⁰Ar - ³⁹Ar/⁴⁰Ar 反等时线年龄为 (212.47 ± 2.16) Ma (MSWD = 5.17), ⁴⁰Ar/³⁶Ar 初始值为 (330.6 ± 16.4) Ma。

单矿物年龄纪录的是温度冷却到该矿物对气体氩 (⁴⁰Ar*) 封闭温度以来经历的时间, 即所测矿物的冷却年龄, 它可以是矿物的结晶年龄, 也可以是矿物被变形改造或 (⁴⁰Ar*) 重新积累时热事件的时间。由于等时线和反等时线的构筑不需要假设非放射性成因⁴⁰Ar/³⁶Ar 初始值为 295.5, 等时线年龄和反等时线年龄并没有因过剩氩的存在而改变, 并可以有效识别过剩 Ar 的存在。从样品的拟合结果可以看出, ⁴⁰Ar/³⁶Ar 初始值明显高于现代大气氩的比值 (295.5), 指示有明显过剩氩存在。因此, 实际年龄应不早于本文测得的 213 Ma。本文中, 由于对等时线年龄和反等时线年龄进行了系统的回归校正, 过剩氩对样品真实年龄的影响很小。因此, 所求的等时线年龄和反等时线年龄为可信的矿物形成年龄。

表 1 萨热阔布金矿云母电子探针分析结果及分子式
Table 1 Electron probe analysis and calculated Molecular Formula

样品号	Na ₂ O	FeO	MgO	K ₂ O	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	Cl	Total
SL-04	0.15%	21.31%	10.21%	10.56%	36.15%	0.04%	15.47%	0.15%	0.96%	0.05%	95.03%
样品号	分子式										矿物种类
SL-04	$(\text{K}_{1.06}\text{Na}_{0.02}\text{Ca}_{0.01})_{1.09}(\text{Fe}_{1.40}\text{Mg}_{1.19}, \text{Al}_{0.26}\text{Ti}_{0.06})_{2.91}[(\text{Si}_{2.83}\text{Al}_{1.17})_{4.00}\text{O}_{10.00}](\text{OH}_{1.99}, \text{Cl}_{0.01})_{2.00}$										黑云母

表 2 黑云母³⁹Ar/⁴⁰Ar 阶段激光剥蚀定年分析结果
Table 2 ³⁹Ar/⁴⁰Ar stepwise laser ablation dating results of biotite

实验编号	³⁶ Ar (a)	³⁷ Ar (ca)	³⁸ Ar (cl)	³⁹ Ar (k)	⁴⁰ Ar (r)	Age(Ma) ± 2σ	⁴⁰ Ar/%	³⁹ Ar/%
10G2166B	0.000 409	0.000 398	0.000 007	0.002 454	0.098 901	225.30 ± 4.47	44.98	0.84
10G2166C	0.000 549	0.000 412	0.000 014	0.007 553	0.307 660	227.60 ± 2.11	65.46	2.58
10G2166D	0.001 402	0.001 385	0.000 029	0.014 206	0.573 150	225.56 ± 2.67	58.04	4.86
10G2166E	0.001 606	0.000 806	0.000 026	0.012 989	0.518 720	223.41 ± 3.25	52.23	4.44
10G2166G	0.000 541	0.000 286	0.000 031	0.016 747	0.650 083	217.52 ± 1.21	80.26	5.73
10G2166H	0.000 333	0.000 164	0.000 039	0.022 175	0.852 478	215.54 ± 0.91	89.65	7.58
10G2166I	0.000 370	0.000 179	0.000 064	0.038 779	1.488 829	215.27 ± 0.89	93.16	13.26
10G2166J	0.000 144	0.000 051	0.000 047	0.029 447	1.123 857	214.06 ± 0.84	96.34	10.07
10G2166L	0.000 039	0.000 027	0.000 028	0.018 195	0.691 707	213.28 ± 0.85	98.36	6.22
10G2166M	0.000 061	0.000 044	0.000 060	0.036 290	1.368 414	211.64 ± 0.82	98.69	12.41
10G2166N	0.000 048	0.000 009	0.000 040	0.025 414	0.959 063	211.80 ± 0.81	98.54	8.69
10G2166O	0.000 030	0.000 005	0.000 020	0.013 207	0.500 510	212.65 ± 0.85	98.25	4.52
10G2166Q	0.000 058	0.000 030	0.000 047	0.028 357	1.083 292	214.26 ± 0.83	98.43	9.69
10G2166R	0.000 032	0.000 061	0.000 024	0.015 428	0.582 806	212.00 ± 0.85	98.42	5.27
10G2166S	0.000 005	0.000 000	0.000 003	0.002 011	0.074 726	208.71 ± 1.22	97.90	0.69
10G2166T	0.000 017	0.000 007	0.000 014	0.009 119	0.357 052	219.30 ± 0.88	98.63	3.12
10G2166U	0.000 010	0.000 014	0.000 000	0.000 137	0.007 593	302.66 ± 9.55	72.90	0.05

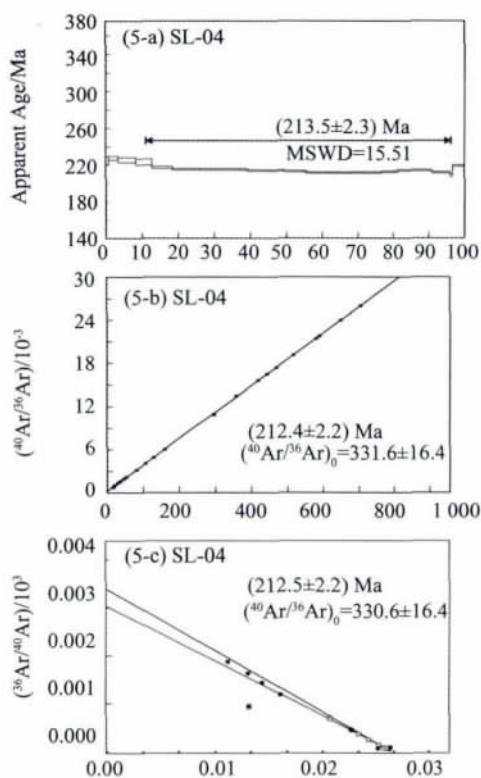


图 5 黑云母³⁹Ar/⁴⁰Ar 阶段激光剥蚀“年龄谱”(a)与“等时线”(b)
Fig. 5 ³⁹Ar/⁴⁰Ar stepwise laser ablation data of biotite; a-Spectre age; b-Normal isochrons

4 讨 论

4.1 成矿时代

萨热阔布金矿中, 中阶段多金属硫化物石英脉共生的云母充填于早期黄铁矿-石英裂隙中, 并未表现出明显的变形痕迹和后期构造-热事件的影响(图 4)。前人研究表明, 与云母共生的石英中所含流体包裹体的均一温度为 230 ~ 374 °C^[23], 低于黑云母的结晶封闭温度 350 ~ 400 °C^[31]。因此, 黑云母可以作为确定成矿年龄的理想矿物。本文获得一个云母样品(SL-04)的⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄分别为(213.5 ± 2.3) Ma, 相应的³⁹Ar/³⁶Ar - ⁴⁰Ar/³⁶Ar 等时线年龄分别为(212.4 ± 2.2) Ma, 反等时线年龄为(212.5 ± 2.2) Ma, 与坪年龄在误差范围内一致。表观坪年龄、等时线年龄和反等时线年龄接近, 可代表黑云母形成的可信年龄。因此, 萨热阔布金矿的成矿年龄为 212 Ma, 即三叠纪。

4.2 矿床成因类型

成岩成矿年龄虽然不是确定矿床成因类型的主要依据, 但可作为检验矿床成因类型正确与否的试金石。不同类型的矿床与矿区地质事件或地质体的相对时间顺序不同。例如, 热水沉积型矿床(VMS 型或 SEDEX 型)为同生矿床, 其成矿时间与赋矿

围岩地层时代一致; 侵入体有关的岩浆热液型矿床 (斑岩型或矽卡岩型) 成矿年龄同期或稍晚于成矿岩体; 造山型矿床为后生矿床, 成矿与造山作用有关, 成矿时间同步或滞后于区域大规模变形变质作用^[32-35]。

萨热阔布金矿的成因争论可归结为同生矿床 (热水沉积型矿床^[18]) 和后生矿床 (造山型矿床^[20-21, 23]) 之争。赋矿地层康布铁堡组的形成年龄为约 400 Ma^[36-37], 而成矿年龄为 212 Ma; 成矿年龄晚于赋矿地层约 180 Ma, 可排除同生热水沉积型矿床的可能性。事实上, 区域内额尔齐斯大断裂活动时间为 (246 ± 18) Ma, 可代表区域大规模造山有关的变质变形时间^[38-39]; 徐学纯等^[39] 获得该区变质岩中独居石的变质年龄为 280 ~ 240 Ma, 认为区域峰期变质年龄为二叠纪 - 早三叠世。萨热阔布金矿成矿时间约为 212 Ma, 尾随峰期区域变质作用, 表明该矿床可能与区域变质作用有关。

考虑到萨热阔布金矿床受阿巴宫断裂次级断裂和相关的韧性剪切带控制, 矿体呈脉状产出; 流体包裹体具有中温、低盐度、富 CO₂ 等特征^[23], 与热水沉积型矿床相差甚远, 却与造山型矿床完全吻合^[40], 因此本文认为萨热阔布金矿属造山型金矿床。

4.3 成岩成矿构造背景

不同成因类型的矿床倾向于发育于不同的大地构造背景^[1-2, 41]。例如, VMS/SEDEX 等类型的矿床发育在拉张背景, 如洋中脊、弧后盆地或大陆边缘裂谷^[32-33]; 斑岩型和浅成低温型矿床发育在洋陆俯冲背景^[34-35] 或陆陆碰撞背景^[42-44]; 造山型金矿发育在碰撞型或增生型造山带^[1-2, 6]。因此, 矿床成因类型可作为判断大地构造背景的探针^[41]。那么, 萨热阔布金矿形成于何种背景呢?

前人研究表明, 阿尔泰造山带于晚古生代发育大量的具有岛弧特征的火山岩、基性侵入岩及相应的洋壳残片^[45-48]; 同时也发育大量的同造山花岗岩^[49-54], 如冲乎尔盆地北岩体、阿舍勒岩体、库尔提岩体、蒙库岩体、希勒克特哈腊苏岩体、喀腊萨依岩体等, 表明该时期为洋陆俯冲背景, 陆壳增生强烈^[55]。赋矿围岩康布铁堡组火山岩同期于该期陆壳增生事件。

晚石炭世 - 早三叠世, 阿尔泰地区发生强烈的弧陆或陆陆碰撞造山运动^[8, 10-11], 诱发了大规模的变质变形作用, 导致地层发生变质脱挥发分作用, 形成向上运移的富 CO₂ 的变质流体^[56-57], 变质流体沸腾并与浅成流体混合导致成矿物质沉淀,

最终导致了萨热阔布金矿形成。

因此, 尽管可能经历了泥盆纪大陆增生阶段的成矿物质预富集, 但萨热阔布金矿矿体总体属于三叠纪碰撞造山体制形成的造山型脉状金矿床。

5 结 论

1) 1 件含金石英脉中的黑云母的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄为 (213.5 ± 2.3) Ma, 代表了萨热阔布金矿的成矿时代。

2) 萨热阔布金矿为后生矿床, 成矿稍滞后于区域峰期变质作用, 成因类型为造山型金矿床。

3) 萨热阔布金矿成矿构造背景为三叠纪碰撞造山体制。

致谢: 研究工作在陈衍景教授指导下完成, 野外工作得到国家 305 项目办公室和新疆有色局 706 队的大力支持, Ar-Ar 测试得到广州地化所邱华宁研究员和蒲志平高工指导在此表示感谢!

参考文献:

- [1] GROVES D I, GOLDFARB R J, GEBRE-MARIAM M, et al. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types [J]. *Ore Geology Reviews*, 1998, 13: 7-27.
- [2] KERRICH R, GOLDFARB R J, GROVES D I, et al. The characteristics, origins and geodynamics settings of supergiant gold metallogenic provinces [J]. *Science in China: Series D*, 2000, 43 (supp): 1-68.
- [3] 陈衍景. 中国西北地区中亚型造山 - 成矿作用的研究意义和进展 [J]. *高校地质学报*, 2000, 6 (1): 17-22.
- [4] 范宏瑞, 谢奕汉, 翟明国, 等. 豫陕小秦岭脉状金矿床三期流体运移成矿作用 [J]. *岩石学报*, 2003, 19 (2): 260-266.
- [5] 涂光炽, 李朝阳. 浅议比较矿床学 [J]. *地球化学*, 2006, 35: 1-5.
- [6] 陈衍景, 富士谷. 豫西金矿成矿规律 [M]. 北京: 地震出版社, 1992: 1-234.
- [7] SENGOR A M C, NATALIN B A. Paleotectonics of Asia: Fragments of synthesis [M]. // YIN A, HARRISON T M, eds. *The tectonic evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 480-640.
- [8] 陈衍景. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力 [J]. *中国地质*, 2006, 33: 1181-1196.
- [9] CHEN Y J, CHEN H Y, ZAW K, et al. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: an overview [J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 31:

- 139 - 169.
- [10] XIAO W J , KUSKY T. Geodynamic processes and metallogenesis of the Central Asia and related orogenic belts [J]. *Gondwana Research*, 2009, 16: 167 - 169.
- [11] XIAO W J , WINDLEY B F , HAO J. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of Central Asian orogenic belt [J]. *Tectonics*, 2003, 22: 1069 - 1080.
- [12] 肖文交, 舒良树, 高俊, 等. 中亚造山带大陆动力学过程与成矿作用 [J]. *新疆地质*, 2008, 26(1): 4 - 7.
- [13] XU J H , CRAIG H , WANG L L , et al. Carbonic fluid overprints in volcanogenic massive sulfide deposits: examples from the Kelan volcano sedimentary basin, Altaids, China [J]. *Economic Geology*, 2011, 106: 145 - 158.
- [14] ZHANG L , ZHENG Y , CHEN Y J. Ore geology and fluid inclusion geochemistry of the Tiemurt Pb-Zn-Cu deposit, Altay, Xinjiang, China: a case study of orogenic-type Pb-Zn systems [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 49: 69 - 79.
- [15] ZHENG Y , ZHANG L , CHEN Y J , et al. Geology, fluid inclusion geochemistry, and ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of the Wulasigou Cu deposit, and their implications for ore genesis, Altay, Xinjiang, China [J]. *Ore Geol Rev*, 2012, 49: 128 - 140.
- [16] 徐九华, 阴元军, 刘泽群, 等. 阿尔泰山南缘下泥盆统地层中的脉状铜金矿化和流体特征 [J]. *矿物学报*, 2009 (增刊): 264 - 265.
- [17] ZHENG Y , ZHANG L , CHEN Y J , et al. Metamorphosed Pb-Zn-(Ag) ores of the Keketale VMS deposit, NW China: Evidence from ore textures, fluid inclusions, geochronology and pyrite compositions [J]. *Ore Geol Rev*, 2013, 54: 167 - 180.
- [18] 丁汝福, 王京彬, 马忠美, 等. 新疆萨热阔布火山喷流沉积改造型金矿地球化学特征 [J]. *地质与勘探*, 2001, 37(3): 11 - 15.
- [19] 闫新军, 陈维民. 铁米尔特-恰夏-萨热阔布多金属金矿床系列矿床地质地球化学研究 [J]. *矿床与地质*, 2001, 85(15): 366 - 370.
- [20] 尹意求, 李嘉兴. 一种与断裂变质作用有关的新类型金矿床——新疆阿勒泰市萨热阔布金矿床 [J]. *矿产与地质*, 2004, 18(1): 8 - 12.
- [21] 徐九华, 谢玉玲, 丁汝福, 等. CO₂-CH₄ 流体与金成矿作用: 以阿尔泰山南缘和穆龙套金矿为例 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(8): 2026 - 2032.
- [22] 郑义, 张莉, 郭正林. 新疆铁木尔特铅锌铜矿床锆石 U-Pb 和黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学及其矿床成因意义 [J]. *岩石学报*, 2013, 29(1): 191 - 204.
- [23] 秦雅静, 张莉, 郑义, 等. 新疆萨热阔布金矿床流体包裹体研究及矿床成因 [J]. *大地构造与成矿*, 2012, 36(2): 227 - 239.
- [24] CHEN Y J , PIRAJNO F , WU G , et al. Epithermal deposits in North Xinjiang, NW China [J]. *Int J Earth Sci*, 2012, 101: 889 - 917.
- [25] 万博, 张连昌. 新疆阿尔泰山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 [J]. *岩石学报*, 2006, 22: 145 - 152.
- [26] WAN B , ZHANG L C , XIAO W J. Geological and geochemical characteristics and ore genesis of Keketale Pb-Zn deposit, Southern Altay Metallogenic Belt, NW China [J]. *Ore Geology Review*, 2010a, 37: 114 - 126.
- [27] WAN B , ZHANG L C , XIANG P. The Ashele VMS-type Cu-Zn deposit in Xinjiang, NW China formed in a rifted arc setting [J]. *Resource Geology*, 2010b, 60: 150 - 164.
- [28] HUANG X L , XU Y G , LUO C H , et al. Exsolution lamellae in a clinopyroxene megacryst aggregate from Cenozoic Basalt, Leizhou Peninsula, South China: Petrography and chemical evolution [J]. *Contrib Mineral Petrol* 2007, 154: 691 - 705.
- [29] QIU H N , WIJBRANS J R. The Paleozoic metamorphic history of the Central Orogenic Belt of China from ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of eclogite garnet fluid inclusions [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 268: 501 - 514.
- [30] KOPPERS A A P. ArArCALC—software for ⁴⁰Ar/³⁹Ar age calculations [J]. *Computers and Geosciences*, 2002, 28: 605 - 619.
- [31] 朱炳泉. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化 [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1 - 330.
- [32] DAVID L , DOONALD S , KAREN K. Sediment-hosted lead-zinc deposits: A global perspective [C]. *Economic Geology 100th Anniversary Volume 2005*: 561 - 607.
- [33] FRANKLIN J M , GIBSON H L. Jonasson and Galley AG. volcanogenic massive sulfide deposit [C]. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 2005: 523 - 560.
- [34] RICHARDS J P. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation [J]. *Economic Geology*, 2003, 98: 1515 - 1533.
- [35] SILLITOE R H. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposit [J]. *Economic Geology*, 1972, 67: 184 - 197.
- [36] CHAI F M , MAO J W , DONG L H , et al. Geochronology of metarhyolites from the kangbutiebao formation in the Kelang basin, Altay Mountains, Xinjiang: Implica-

- tions for the tectonic evolution and metallogeny [J]. *Gondwana Research*, 2009, 16: 189 - 200.
- [37] 单强, 曾乔松, 李宁波, 等. 新疆阿尔泰山南缘康布铁堡组钾 - 钠质流纹岩锆石 U-Pb 年龄和地球化学 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(7): 2132 - 2144.
- [38] WAN B, XIAO W J, ZHANG L C, et al. Iron mineralization associated with a major strike-slip shear zone: Radiometric and oxygen isotope evidence from the Mengku deposit, NW China [J]. *Ore Geol Rev*, 2012, 44: 136 - 147.
- [39] 徐学纯, 郑常青, 赵庆英. 阿尔泰山西造山带区域变质作用类型与地壳演化 [J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2005, 23(1): 7 - 11.
- [40] 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, 等. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(9): 2085 - 2108.
- [41] 陈衍景, 肖文交, 张进江. 成矿系统: 地球动力学的有效探针 [J]. *中国地质*, 2008, 35(6): 1059 - 1073.
- [42] CHEN Y J, WANG Y. Fluid inclusion study of the Tangjiaping Mo deposit, Dabie Shan, Henan Province: implications for the nature of the porphyry systems of post-collisional tectonic settings [J]. *International Geology Reviews*, 2011, 53(5/6): 635 - 655.
- [43] LI N, CHEN Y J, PIRAJNO F, et al. Timing of the Yuchiling giant porphyry Mo system, eastern Qinling, central China, and implications for ore genesis [J / OL]. *Mineralium Deposita*, 2012a, DOI: 10.1007/s00126-012-0441-4.
- [44] LI N, CHEN Y J, ULRICH T, et al. Fluid inclusion study of the wunugetu Cu-Mo deposit, Inner Mongolia, China [J]. *Mineralium Deposita*, 2012b, 47: 467 - 482.
- [45] 单强, 牛贺才, 于学元, 等. 新疆北部阿尔泰山南缘晚古生代高钾高硅熔结凝灰岩的地球化学、岩浆成因及构造背景 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(7): 1721 - 1729.
- [46] 牛贺才, 许继峰, 于学元, 等. 新疆阿尔泰山富镁火山岩系的发现及其地质意义 [J]. *科学通报*, 1999, 109: 1002 - 1004.
- [47] 牛贺才, 于学元, 许继峰, 等. 中国新疆阿尔泰山晚古生代火山作用及成矿 [M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1 - 184.
- [48] 陈汉林, 杨树锋, 厉子龙, 等. 阿尔泰山南缘基性杂岩的形成背景及其动力学含义 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(1): 127 - 134.
- [49] WANG T, HONG D W, JAHN B M, et al. Timing, petrogenesis, and setting of paleozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen [J]. *Journal of Geology*, 2006, 114(6): 735 - 751.
- [50] 张海祥, 牛贺才, TERADA K. 新疆北部阿尔泰山地区库尔提蛇绿岩中斜长花岗岩的 SHRIMP 年代学研究 [J]. *科学通报*, 2003, 48(12): 1350 - 1354.
- [51] 曾乔松, 陈广浩, 王核, 等. 阿尔泰山冲乎尔盆地花岗质岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其构造意义 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(8): 1921 - 1932.
- [52] YUAN C, SUN M, XIAO W J, et al. Accretionary orogenesis of the Chinese Altai: Insights from Paleozoic granitoids [J]. *Chemical Geology*, 2007, 242: 22 - 39.
- [53] 童英, 王涛, 洪大卫, 等. 阿尔泰山带西段同造山铁列克花岗岩体锆石 U-Pb 年龄及其构造意义 [J]. *地球学报*, 2005, 26(增刊): 74 - 77.
- [54] 杨富全, 毛景文, 闫升好, 等. 新疆阿尔泰山蒙库同造山斜长花岗岩年代学、地球化学及其地质意义 [J]. *地质学报*, 2008, 82(4): 485 - 499.
- [55] 王京彬, 秦克章, 吴志亮, 等. 阿尔泰山南缘火山喷流沉积型铅锌矿床 [M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1 - 210.
- [56] XU J H, DING R F, XIE Y L, et al. Pure CO₂ fluid of Sarekuobu gold deposit in southern of Altai mountains [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(4): 380 - 386.
- [57] XU J H, DING R F, WEI X F, et al. The source of hydrothermal fluids for Sarekoubu gold deposit in the southern Altai Mountains in Xinjiang, China: Evidence from fluid inclusions and geochemistry [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32: 247 - 258.