

青海东昆仑阿斯哈金矿床含金黄铁矿微量元素地球化学特征及其地质意义*

岳维好^{1,2}, 周家喜^{3,4**}

(1 昆明学院 信息工程学院, 云南 昆明 650214; 2 云南省高校数据治理与智能决策重点实验室, 云南 昆明 650214; 3 云南大学 地球科学学院, 云南 昆明 650500; 4 云南省高校关键矿产成矿学重点实验室, 云南 昆明 650500)

摘 要 阿斯哈金矿床是青海东昆仑造山带东段金矿床的典型代表。金矿体主要赋存于闪长岩和花岗闪长岩体的构造破碎带内,受 NNE 向和 NNW 向-NW 向断裂构造控制。与金矿化密切相关的蚀变类型为黄铁矿化、硅化、绢云母化和黄铜矿化。矿石矿物主要为黄铁矿,其次是黄铜矿、方铅矿、毒砂、自然金和银金矿。据矿脉穿插关系、矿石矿物共生组合和结构构造特征,将成矿期划分为 3 个阶段:石英-黄铁矿-毒砂阶段(I)、石英-多金属硫化物阶段(II)、和石英-碳酸盐阶段(III),其中 II 阶段为主成矿阶段。前人研究表明黄铁矿的微量(含稀土)元素含量可以反映成矿流体与成矿物质来源的特征,本次采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)技术对阿斯哈金矿主成矿期的主要载金矿物黄铁矿进行研究。ICP-MS 测试结果显示:黄铁矿相对富集少量高场强元素(如 Y、U、Zr、Hf)外,其他元素均有不同程度的亏损,其 Hf/Sm、Th/La 和 Nb/La 比值(除个别样品外)普遍<1,表明矿床成矿流体可能是以富 Cl 的成矿热液为主。黄铁矿 Co/Ni 比值(1.39~6.61,平均为 2.57)显示矿床为热液成因。黄铁矿 Y/Ho 比值(26.10~35.76,平均为 30.57)与现代海水及海底热液明显不同,略较赋矿围岩闪长岩和花岗斑岩的 Y/Ho 比值(26.97~29.25,平均为 28.12)范围宽,暗示除赋矿围岩外,可能还有其它源区。阿斯哈金矿床含金黄铁矿稀土元素总量较低($\Sigma\text{REE}=4.83\times10^{-6}\sim64.30\times10^{-6}$,平均为 19.60×10^{-6}),LREE/HREE 比值平均为 6.62,(La/Yb)_N值平均为 8.11,为轻稀土元素富集型,其配分与赋矿围岩闪长岩和花岗斑岩相似,而与矿区地层金水口群变质岩不同,暗示该矿床成矿物质来自赋矿围岩。Eu 负异常明显($\delta\text{Eu}=0.49\sim0.92$,平均为 0.68),Ce 异常不显著($\delta\text{Ce}=0.73\sim1.00$,平均为 1.02),与赋矿围岩相似,进一步表明该矿床与中酸性围岩的内在成因关系。综合研究认为,阿斯哈金矿床属于与中酸性岩浆作用有关的浅成热液脉状型金矿床,并可能受到造山作用影响。

关键词 地球化学;微量元素;稀土元素;黄铁矿;成矿物质来源;阿斯哈金矿床;青海东昆仑

中图分类号:P618.51;P595

文献标识码:A

Trace element characteristics of gold-bearing pyrite from Asiha gold deposit in East Kunlun, Qinghai Province and their geological significance

YUE WeiHao^{1,2} and ZHOU JiaXi^{3,4}

(1 College of Information Engineering, Kunming University, Kunming 650214, Yunnan, China; 2 Key Laboratory of Data Governance and Intelligent Decision in Universities of Yunnan Province, Kunming 650214, Yunnan, China; 3 School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, Yunnan, China; 4 Key Laboratory of Critical Minerals Metallogeny in Universities of Yunnan Province, Kunming 650500, Yunnan, China)

Abstract

The Asiha gold deposit is a typical representative of the gold deposit in the eastern section of the East Kunlun orogenic belt from Qinghai Province. The orebodies mainly occur in the structural fracture zone of diorite and

* 本文得到云南省地方本科高校基础研究联合专项资金项目(编号:202101BA070001-077)、云南省教育厅科学研究基金项目(编号:2021J0706)和昆明学院引进人才科研启动项目(编号:YJL2003)联合资助

第一作者简介 岳维好,男,1978年生,博士,高级工程师,从事矿床学教学和研究工作。Email: 137053132@qq.com

** 通讯作者 周家喜,男,1982年生,博士,教授,从事战略性关键矿产资源成矿理论与找矿预测研究。Email: zhoujiaxi@ynu.edu.cn

收稿日期 2021-08-13;改回日期 2021-12-16。孟秋熠编辑。

granodiorite, and are controlled by NNE-trending and NNW-NW-trending fault structures. Alteration types closely related to gold mineralization includes pyritization, silicification, sericitization and chalcopyrite. The ore minerals are mainly pyrite, followed by chalcopyrite, galena, arsenopyrite, native gold and electrum. According to the interspersed relationship of ore veins, mineral association and structural characteristics, the mineralization stages are divided into the quartz-pyrite-arsenopyrite stage (I), the quartz-polysulfide stage (II) and the quartz-carbonate stage (III). The stage II is the main ore-forming stage. Previous studies had verified that characteristics of ore-forming fluid can be reflected by trace elements (including REE) patterns contained in pyrite minerals. Trace element compositions of pyrites from the Asiha gold deposit was measured by ICP-MS in our study. ICP-MS test result shows that all elements in the pyrites have different extent depleted except the high field-strength element (HFSE) such as Y, U, Zr, Hf and its Hf/Sm, Th/La and Nb/La values of pyrite are all less than 1 except for individual samples, indicating the ore-forming fluid may be dominated by Cl-enriched. The Co/Ni ratios of pyrite (1.39~6.61, average 2.57) indicates that the deposit is hydrothermal origin. The Y/Ho ratios of pyrite (26.10~35.76, average 30.57) are significantly different from modern seawater and seafloor hydrothermal fluids. It is slightly wider than the Y/Ho ratios of host rock (26.97~29.25, average 28.12), suggesting that the ore-forming fluid might come from other source areas besides the host rocks. The total REE (ΣREE) of gold-bearing pyrite is relatively lower ($\Sigma\text{REE}=4.83\times 10^{-6}\sim 64.30\times 10^{-6}$, average 19.60×10^{-6}). The LREE/HREE ratio (6.62) and the $(\text{La}/\text{Yb})_N$ ratio (8.11) indicate that the gold-bearing pyrite belongs to the LREE-rich type. REE characteristics are similar to those of host rocks (diorite and granitic-porphyry), suggesting that the ore-forming material of the deposit comes from the host rocks. Eu negative anomalies are obvious ($\delta\text{Eu}=0.49\sim 0.92$, average 0.68) but Ce anomalies are not significant ($\delta\text{Ce}=0.73\sim 1.00$, average 1.02). These characteristics are similar to host rocks, but differ from the metamorphic rocks of Jinshuikou Group in the mining area. It further indicates the inherent genetic relationship between the deposit and the intermediate-acid wall rocks. The Asiha gold deposit was epithermal gold deposit related to intermediate-acid magmatism, and might have affected by orogenic process.

Key words: geochemistry, trace elements, REE, pyrite, source of ore-forming material, Asiha gold deposit, East Kunlun of Qinghai Province

阿斯哈金矿床位于青海东昆仑造山带东段沟里地区,已发现10条矿带20条金矿体,探明Au资源储量超过20 t,品位3.15~9.94 g/t,是东昆仑造山带内具有代表性的金矿床之一。自2011年发现该矿床以来,许多学者对其开展了较为系统的成矿地质背景、矿床地质地球化学、成矿流体性质及来源、成矿物理化学条件、赋矿围岩闪长岩和花岗斑岩年代学和岩石地球化学研究(李碧乐等, 2012a; 2012b; 祁月清等, 2012; 沈鑫, 2012; 岳维好, 2013; 查道函, 2013; 李金超, 2014; 岳维好等, 2017; 2019; 蔺吉庆等, 2020)。然而,对该矿床成因认识还存在争议,例如,李碧乐等(2012b)和沈鑫(2012)认为,该矿床成矿流体为幔源流体,晚期有大气水混入,成矿物质主要来自地幔(矿区内的煌斑岩可能提供了成矿物质),并在上升过程中萃取部分所流经地层和岩石中成矿物质,属造山型金矿;岳维好等(2017)认为矿区222.1 Ma的花岗斑岩与阿斯哈金矿床具有内在成因联系,该矿床

很可能属于与斑岩有关的浅成热液型;蔺吉庆等(2020)认为矿区华力西晚期中-酸性岩浆提供了金矿源,岩浆侵入提供了热源,属产于张性构造破碎带的中-低温岩浆热液构造蚀变岩型金矿床。

微量(包括稀土)元素广泛被用于研究热液矿床成因(Mills et al., 1995; Bau et al., 1997; Zhou et al., 2011; Sheard et al., 2012)。黄铁矿是阿斯哈金矿床中最为重要的载金矿物之一(岳维好, 2013),以往研究认为,黄铁矿中的微量元素组成能够反映成矿流体来源与演化(Mills et al., 1995; Bau et al., 1997)。本文试图通过详细研究阿斯哈金矿床含金黄铁矿的微量元素地球化学特征,以期理解该成因提供更加丰富的地球化学信息。

1 区域地质背景

东昆仑造山带从北向南依次展布着昆北、昆中

及昆南3条主断裂,总体均呈近EW向展布,这3条断裂将东昆仑造山带划分为东昆北、东昆中及东昆南3个构造带(姜春发等, 1992; 2000)(图1a)。昆北断裂带长约700 km,西至新疆,东多被第四系覆盖;昆中断裂和昆南断裂分别是昆中缝合带和昆南缝合带的主断裂,延伸1000 km以上,北倾,上陡下缓,为较强的地震带和重力、磁力的梯度带。东昆仑造山带为复合造山带,具有多岛洋、软碰撞和多旋回造山等特征(殷鸿福等, 1997; 1998),具有复杂

的地球动力学演化历史。

东昆仑地区地层时代范围跨度较大,区域差异明显。自元古宙至第四系,除震旦系、寒武系、志留系外,基本均有出露,其中尤以元古宙、石炭系和二叠系相对广泛。东昆北和东昆中构造带主要出露大面积前寒武纪金水口群白沙河组,变质基底岩系,而东昆南构造带基底岩系相对年轻,为角闪岩相变质的苦海杂岩和万宝沟群。

东昆仑造山带岩浆活动频繁,前寒武纪、加里东

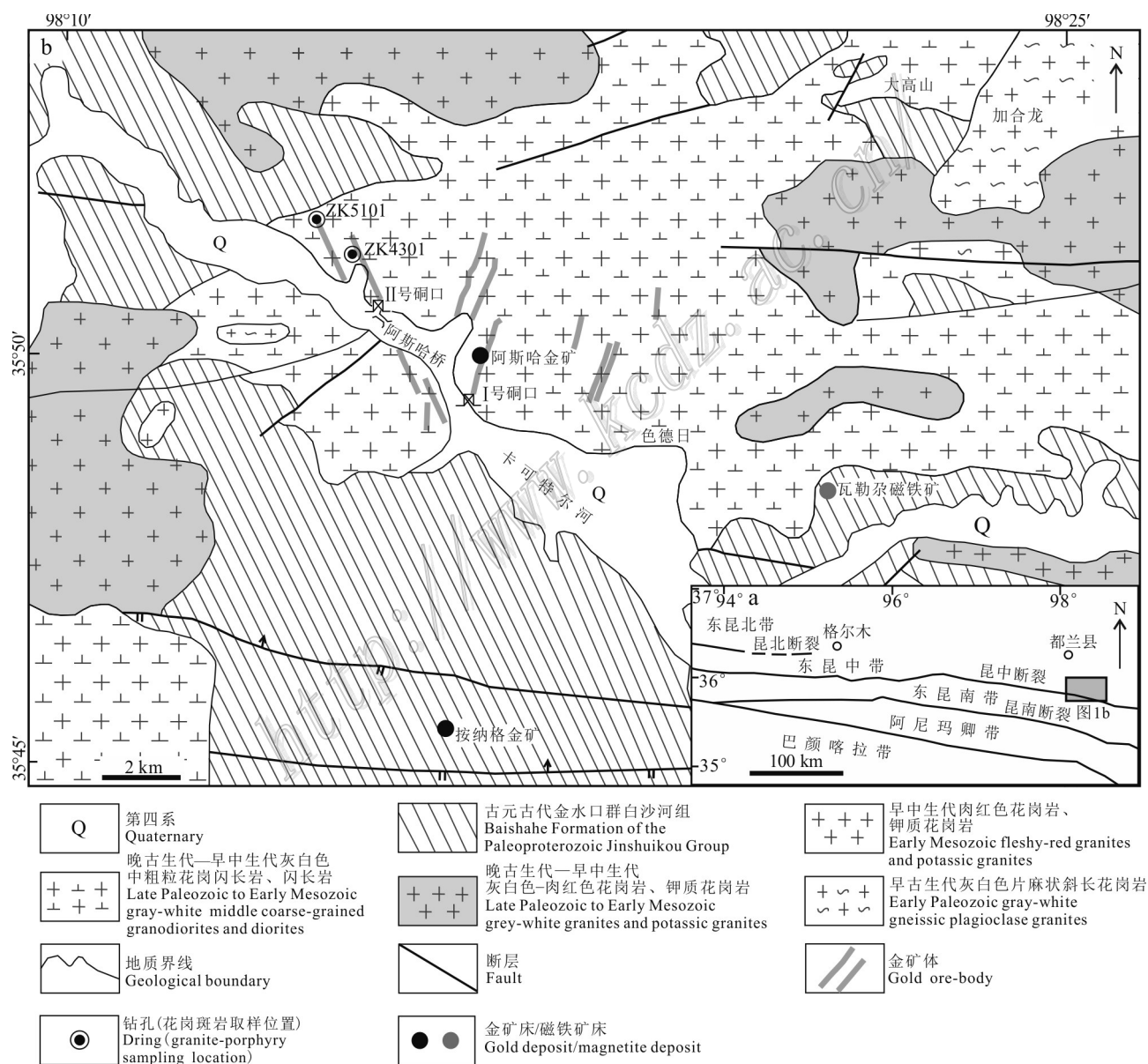


图1 东昆仑构造分区(a)及阿斯哈金矿床地质简图(b)(据青海省地质局, 1973;李碧乐等, 2012a修改)

Fig.1 Tectonic setting of the eastern Kunlun (a) and geologic sketch map of the Asiha gold deposit (b) (modified after Qinghai provincial geological bureau, 1973; Li et al., 2012a)

期、华力西期、印支期均有不同规模的岩浆活动,其中以华力西晚期—印支期岩浆活动占主体地位,具有多旋回构造-岩浆活动特点,为一多期叠加的陆缘、陆内岩浆弧(姜春发等, 1992; 2000; 莫宣学, 2007)。

2 矿床地质特征

阿斯哈金矿床位于昆中构造带的东段,紧邻昆中大断裂(图1a)。矿区内地层简单,仅出露有古元古界金水口群白沙河组。矿区东南和西北部为灰黑色-灰绿色黑云母斜长片麻岩,中南部局部出露大理岩夹浅粒岩。矿区内构造主要为断裂构造,近东西向断裂及不同等级的次级断裂分布全区。矿区内侵入岩分布广泛,主要为印支期形成的花岗闪长岩-闪长岩岩基和以岩株状产出的黑云母花岗岩(李碧乐等, 2012a)。

2.1 矿体特征与围岩蚀变

矿区处于东昆中花岗岩-变质杂岩带的东段,区内主体构造凌乱,近东西向断裂及不同等级的次级断裂分布全区。断裂构造按其展布方向主要可分为NNE向和NNW向(图1b),多为压扭性或压性断裂,具多期活动特点。控制矿区主矿体Au I的为NNE向断裂,野外表现为左旋张扭特征,发育张性角砾和网脉状矿化,可见左行斜列透镜体。该断裂走向 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$,倾角 $70^{\circ}\sim 85^{\circ}$,长600~2400 m。控制矿区主矿体Au II的为NNW-NW向断裂,为右旋压扭特征,见右行斜列的含金石英脉扁透镜体。该断裂走向 $315^{\circ}\sim 325^{\circ}$,倾角 $50^{\circ}\sim 80^{\circ}$,长1400~3000 m,断裂带沿走向宽窄不一,宽1~45 m不等,带内普遍发育硅质岩、蚀变闪长岩、断层角砾岩及断层泥,可见硅化、碳酸盐化、高岭土化和黄铁矿化等。金矿体产于闪长岩和花岗闪长岩体的构造破碎带内(图1b),呈2组相互平行的矿脉(体)群产出,至目前为止,已经发现10条含金构造破碎蚀变带和20条金矿体,并且还发现了1条铜矿体,金矿体多呈条带状、脉状、细脉状、透镜状产出,倾向多为SE至NE向,倾角一般在 75° 左右。其中,产于I号脉的Au I-1和II号脉的Au II-1矿体为矿区主矿体。Au I-1矿体长310 m,厚2.39 m,金平均品位 7.34×10^{-6} 。Au II-1矿体长1040 m,宽0.80~3.5 m,平均厚度1.63 m,金平均品位 5.37×10^{-6} 。

金矿石类型按照氧化程度可以分为氧化矿石(地表以下0~40 m范围)和原生矿石(地表40 m以

下)。氧化矿矿石矿物由褐铁矿及孔雀石等组成并可见细粒、细脉状和星点状黄铁矿;原生矿矿石矿物为黄铁矿、黄铜矿及方铅矿,黄铁矿呈细粒他形晶或粗粒自形晶分布。脉石矿物均为硅质岩、长石、方解石、少量绢云母及绿泥石。原生矿石又可细分为蚀变岩型和(少量)石英脉型(岳维好, 2013)。

矿石成分复杂,矿石矿物主要有黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、毒砂、自然金和银金矿(图2a~i),另外还有少量的辉铅铋矿、辉铋银铅矿、辉银铅矿、硫锑铅矿;脉石矿物主要有石英、黑云母、绢云母、绿泥石、绿帘石、长石和方解石(李碧乐等, 2012b)。

矿石以粗粒状结构、溶蚀交代结构、残余结构、镶边结构、胶状结构为主,其次为压碎结构、包含结构、自形-半自形晶结构等,构造主要为块状、蜂窝状及多孔状构造,其次为浸染状、皮壳状、土状构造等。

矿区围岩蚀变十分强烈,广泛发育于矿区内构造蚀变带内,类型复杂,具多期叠加和较明显分带的特点。蚀变类型主要有硅化、绢云母化、黄铁矿化、绿泥石化、碳酸岩化(方解石化)、绢云岩化、黄铜矿化、高岭土化等。矿区有中酸性岩浆活动,深部有花岗斑岩脉侵入。

2.2 成矿期与成矿阶段

根据矿脉穿插关系、矿石矿物共生组合和结构构造特征,阿斯哈矿床的形成过程可分为热液成矿期和表生期(表1),热液成矿期由早到晚可细分为3个阶段:

石英-黄铁矿-毒砂阶段(I):往往形成含金黄铁矿石英脉,呈脉状、透镜状充填于后期构造带中,厚度一般十几厘米。石英多呈乳白色,油脂光泽,他形粒状结构,粒径较粗。黄铁矿呈自形-半自形粒状结构,多为立方体晶形,颗粒较粗(粒径多为0.6~3.0 mm),呈星点状、浸染状分布于石英脉中。毒砂粗粒半自形,含金,金与毒砂关系较密切(图2a~d、f、g、i)。

石英-多金属硫化物阶段(II):常形成多金属硫化物碎裂岩和蚀变岩、多金属硫化物石英脉,脉宽多为1~30 cm。石英呈灰白-灰黑色脉状或不规则状,粒径0.03~0.30 mm,常沿构造裂隙充填于I阶段石英脉复合体或构造蚀变岩中。黄铜矿呈浸染状、脉状、团块状出现,板状辉铋铅矿或辉铋银铅矿交代黄铜矿,均交代或穿切早先形成的毒砂或黄铁矿(图2f、g、i),浸染状和细脉状方铅矿、辉银铅矿、硫锑铅

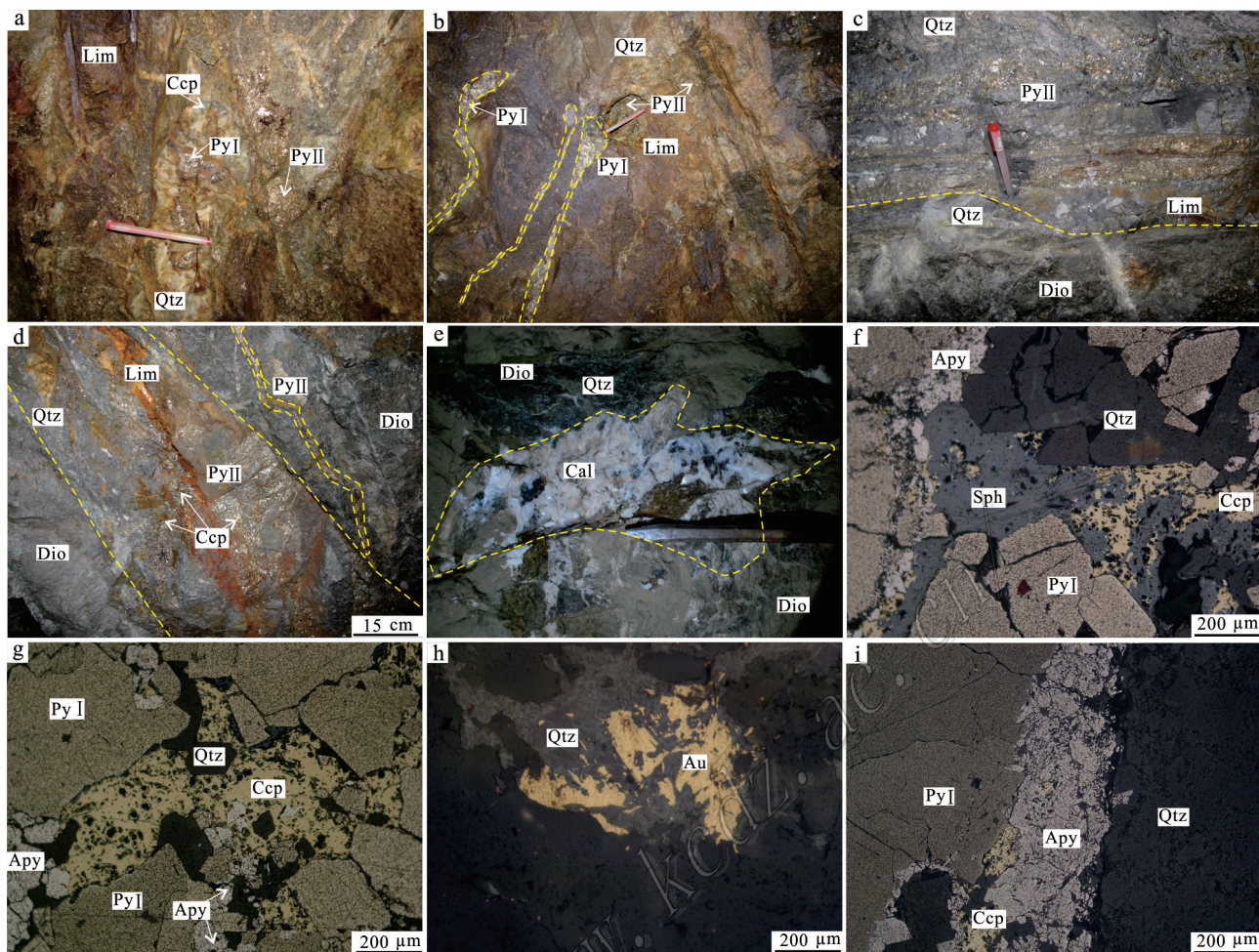


图2 阿斯哈金矿床含金黄铁矿野外(a~e)及显微照片(f~i)

a~b. 不同成矿阶段的含黄铁矿石英脉相互穿插, I 阶段黄铁矿呈自形-半自形粗粒状, 基本不含金, II 阶段黄铁矿在构造应力作用下呈碎裂状, 为金的良好载体; c~d. 多金属硫化物碎裂岩和蚀变岩, 多金属硫化物石英脉, 两侧为闪长岩。浸染状和细脉状黄铁矿发育, 金含量较高; e. III 阶段形成的石英脉和方解石脉呈透镜体状充填于闪长岩中; f. II 阶段黄铜矿及闪锌矿细脉沿 I 阶段形成的黄铁矿和毒砂裂隙穿插交代; g. II 阶段黄铜矿脉沿 I 阶段形成的正方形、矩形等切面的自形晶黄铁矿粒间充填, 并具交代现象; h. 自然金呈片状分布于石英中; i. II 阶段黄铜矿脉穿切成矿 I 阶段的毒砂和脉壁黄铁矿

PyI—石英-黄铁矿-毒砂阶段的黄铁矿; Py II—石英-多金属硫化物阶段的黄铁矿; Dio—闪长岩; Qtz—石英; Lim—褐铁矿; Ccp—黄铜矿; Cal—方解石; Apy—毒砂; Au—自然金; Sph—闪锌矿

Fig.2 Field photos (a~e) and microphotographs (f~i) of samples from the Asisha gold deposit

a~b. The pyrite-bearing veins of different mineralization stages cutting through each other, the pyrite of stage I is euhedral-semi-automatic coarse-grained, and almost contains no gold. In the second stage, the pyrite of stage II is fragmented under the action of tectonic stress, which is good carrier for gold; c~d. Polymetallic sulfide cataclastic and altered rocks, polymetallic sulfide quartz veins, hosted in diorites. Disseminated and veined pyrite are developed with high gold content; e. Quartz veins and calcite veins formed in stage III filled in the diorite as lenticular form; f. The fine veins of chalcopyrite and sphalerite in the stage II are interspersed and replaced along the cracks of pyrite and arsenopyrite formed in the stage I; g. The chalcopyrite veins of stage II are filled with euhedral pyrite grains along the square and rectangular cross-sections formed in stage I, with metasomatism; h. Native gold is distributed in the quartz in the form of flakes; i. The chalcopyrite vein of stage II cuts through the mineralization of the arsenopyrite and pyrite vein wall of the first stage

PyI—Quartz-pyrite-arsenopyrite pyrite; Py II—Quartz-polysulfide pyrite; Dio—Diorite; Qtz—Quartz; Lim—Limonite; Ccp—Chalcopyrite; Cal—Calcite; Cv—Covellite; Apy—Arsenopyrite; Au—Native gold; Sph—Sphalerite

矿和黄铁矿发育, 局部出现块状方铅矿-黄铁矿矿化(图2f), 早阶段形成的毒砂、黄铁矿和石英脉在构造应力作用下呈碎裂状, 为金的主要形成阶段; II 阶段

金属矿物又可分出3个世代, 辉铋铅矿、辉铋银铅矿形成最早, 黄铜矿随后, 较晚形成方铅矿、辉银铅矿、硫锑铅矿和细粒浸染状黄铁矿。

表 1 阿斯哈金矿床成矿阶段及矿物生成顺序

Table 1 Stages of mineralization and mineral paragenesis in the Asiha gold deposit

主要矿物	成矿期 成矿阶段	热液成矿期			表生期
		石英-黄铁矿-毒砂阶段(I)	石英-多金属硫化物阶段(II)	石英-碳酸盐阶段(III)	
金					
石英					
黄铁矿					
毒砂					
黄铜矿					
辉铋铅矿					
方铅矿					
闪锌矿					
绿泥石					
绿帘石					
绢云母					
方解石					
褐铁矿					
孔雀石					

石英-碳酸盐阶段(Ⅲ):石英-碳酸盐脉或碳酸盐脉发育,含少量硫化物,金矿化基本结束(图 2c)。

3 样品来源和分析方法

本次用于测试的含金黄铁矿样品均采自阿斯哈金矿床 I、II 号坑道。在野外和室内研究的基础上,选择代表性矿石样品,将其清洗干净,粉碎到 60~80 目,通过人工重砂法从样品中分离出黄铁矿,再在双目镜下手工挑选与金成矿关系密切的黄铁矿,挑选出的黄铁矿单矿物经过详细的镜下检查,纯度高于 99%。在双目镜下挑选黄铁矿的过程中还发现了自然金,说明所选黄铁矿与金成矿关系密切。

选好的黄铁矿样品用 Milli Q 超纯水超声清洗,除去吸附在表面的杂质,清洗干净的样品在 40℃ 下烘干,称取约 50 mg,放入干净的 Teflon 溶样罐中,加入 1 ml HNO₃ 和 1 ml HF,置于马弗炉内,约 150℃ 的条件下溶解 48 h,使硫化物完全溶解。样品溶解完全蒸干后,加入 1 ml HNO₃,反复蒸干 2 次。最后蒸干的样品用 30% 的 HNO₃ 提取,加入 500 ng 的 Rh 作为内标,将溶液定容到 50 ml,在电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)上完成测试(Qi et al., 2000)。样品处理及测试均在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室超净化实验室完成,稀土元素分析精度优于 5%,微量元素分析精度优于 10%。

4 微量及稀土元素地球化学特征

4.1 微量元素地球化学

本文所测阿斯哈金矿床含金黄铁矿和金水口群变质岩微量元素数据,以及笔者之前测定的矿区闪长岩和花岗斑岩微量元素组成列于表 2,相应的上地壳微量元素标准化蛛网图见图 3。由表 2、图 3 不难看出,与大陆上部地壳相比,阿斯哈金矿床含金黄铁矿显著富集 Cu、Pb、Sn、Co、As、Cd、Bi 元素,中等富集 Ni、Zn 等元素,其他元素富集系数 < 1 的则为贫化元素。

由表 2 可以看出,黄铁矿、闪长岩、花岗斑岩和金水口群变质岩均亏损高场强元素如 Sc、Nb、Ta、Ti 等, Hf/Sm 值分别为 0.13~1.06(平均为 0.55)、0.38~0.58(平均为 0.51)、0.94~1.17(平均为 1.09)和 0.69~0.82(平均为 0.75)。黄铁矿、闪长岩和金水口群变质岩的 Hf/Sm 值除个别外,均 < 1,花岗斑岩的 Hf/Sm 值均 > 1;黄铁矿、闪长岩、花岗斑岩和金水口群变质岩 30 件样品的 Th/La 除 1 件样品 > 1(1.15)外,其余均 < 1;多数 Nb/La 值也 < 1。黄铁矿 Co/Ni 比值(1.39~6.61,平均为 2.57)变化不大。矿床黄铁矿、闪长岩和花岗斑岩的 Y/Ho 值分别为 26.10~35.76(平均为 30.57)、26.97~29.25(平均为 28.10)和 27.05~29.02(平均为 28.14),较为接近,与球粒陨石 Y/Ho 值(28, Bau et al., 1995)基本一致,金水口群变质岩的 Y/Ho 值(23.06~25.78,平均为 24.27)较黄铁矿略低。

表2 阿斯哈金矿床含金黄铁矿、闪长岩、花岗斑岩和金水口群变质岩微量元素含量(w(B)/10⁻⁶)及特征值

样号	Li	Sc	Ti	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Rb	Sr	Zr	Nb	Cd	Sn	Cs	Ba	Hf	Ta	Pb	Bi	Th	U	Hf/Sm	Th/La	Nb/La	Zr/Hf	Nb/Ta	Y/Ho	Co/Ni
AS1	9.73	9.17	1856	91.3	27.3	338	238	62.4	14.9	17.9	597	194	60.9	65.3	8.21	0.684	24.9	3.05	116	1.88	0.529	102	49.5	5.88	1.33	0.83	0.44	0.61	34.73	15.52	29.50	1.42
AS2	39.0	0.863	2632	16.6	6.99	450	221	25.7	13.5	7.44	31062	44.1	9.75	153	2.09	0.365	10.1	2.02	47.4	0.485	0.159	49.8	13.0	4.30	1.16	0.31	0.32	0.15	315.46	13.14	29.97	2.04
AS3	11.4	1.30	2424	2.61	4.54	287	189	6440	363	1.05	19353	6.73	1.18	101	0.371	4.72	4.51	0.251	8.76	0.054	0.029	2398	1040	0.650	0.330	0.31	0.83	0.48	1870.37	12.79	30.75	1.52
AS4	6.22	3.97	2136	43.4	9.62	138	68.2	604	91.1	11.4	470	89.4	4.75	15.6	3.34	0.586	14.7	2.27	75.3	0.410	0.209	17.8	11.1	3.35	1.15	0.41	0.54	0.54	38.05	15.98	32.10	2.02
AS5	2.76	0.151	1879	12.1	6.85	153	82.1	1610	241	4.82	2629	39.1	5.65	18.5	0.956	1.20	8.10	1.23	37.1	0.130	0.062	266	304	1.73	1.82	0.13	0.30	0.16	142.31	15.42	35.76	1.86
AS6	4.84	0.197	858	11.9	6.28	203	68.6	6980	141	3.55	1935	26.5	1.84	13.8	0.883	1.22	5.87	0.677	27.0	0.174	0.072	1079	450	0.780	0.632	0.37	0.29	0.33	79.31	12.26	34.02	2.96
AS7	8.53	0.939	1457	17.6	5.56	256	87.6	590	62.0	8.55	2209	60.6	4.09	20.8	2.07	0.372	8.46	1.35	59.0	0.239	0.125	18.7	4.53	1.06	0.810	0.69	0.62	1.21	87.03	16.56	29.69	2.92
AS8	8.76	0.841	1563	17.6	5.55	350	132	598	61.6	8.62	2230	61.3	4.16	20.2	2.10	0.385	8.53	1.39	58.1	0.266	0.125	19.7	4.20	1.08	0.785	0.76	0.64	1.25	75.94	16.80	30.63	2.65
AS9	8.39	0.301	1258	12.1	6.17	338	177	175	47.5	5.50	2447	41.8	3.48	20.1	2.11	0.347	5.69	0.888	42.2	0.175	0.123	22.5	7.53	1.39	0.806	0.55	1.15	1.74	114.86	17.15	28.49	1.91
AS10	4.50	0.602	2589	8.72	6.50	246	37.2	311	83.8	3.89	1634	30.4	2.37	14.0	1.86	0.507	4.57	0.661	33.7	0.162	0.095	41.1	9.33	1.46	1.70	0.41	0.78	0.99	86.42	19.58	31.93	6.61
AS11	5.90	0.550	785	16.7	6.16	285	205	647	62.3	7.05	3779	53.2	4.65	31.1	2.58	0.555	8.65	1.21	55.1	0.304	0.146	26.1	10.0	1.68	0.698	0.57	0.55	0.84	102.30	17.67	26.10	1.39
AS12	9.89	0.458	875	15.9	5.08	333	155	1490	109	8.47	3941	59.9	4.63	26.5	1.59	0.876	8.99	1.27	63.0	0.136	0.089	58.8	9.10	0.753	0.730	0.73	0.98	2.06	194.85	17.87	31.07	2.15
AS13	9.01	0.401	2458	11.8	4.06	533	136	87.2	64.8	5.32	4361	34.0	2.73	31.8	1.03	0.319	3.99	0.772	36.2	0.256	0.064	22.1	6.44	0.666	0.900	1.06	0.73	1.14	124.22	16.09	27.35	3.92
ASH-11	18.7	13.3	7012	130	32.0	165	16.3	23.5	95.4	21.0	53.5	72.8	504	47.3	10.4	0.077	0.852	6.14	494	1.52	0.602	15.7	1.27	8.40	2.59	0.38	0.33	0.41	31.12	17.28	27.18	
ASH-12	17.2	18.8	6952	143	47.6	196	17.6	144	93.5	21.0	229	66.9	526	99.3	10.9	0.116	0.959	4.86	521	2.82	0.686	13.8	4.67	7.84	1.34	0.58	0.29	0.41	35.21	15.89	29.25	
ASH-13	19.4	13.1	6113	101	26.7	136	15.4	30.0	96.7	19.9	33.2	88.7	448	76.4	10.7	0.073	1.25	4.37	668	2.55	0.727	18.1	0.981	11.4	1.99	0.50	0.32	0.30	29.96	14.72	28.96	
ASH-14	23.4	12.4	6293	93.3	24.6	188	12.8	33.5	76.0	20.1	47.7	103	437	71.0	10.6	0.058	1.30	5.05	679	2.20	0.727	18.9	7.16	11.8	2.61	0.48	0.34	0.30	32.27	14.58	28.62	
ASH-15	20.8	15.2	7492	111	26.8	144	13.9	35.7	98.4	20.4	42.2	91.9	505	74.9	11.1	0.127	1.14	4.71	669	2.44	0.740	20.3	5.09	9.90	1.62	0.50	0.28	0.32	30.70	15.00	28.68	
ASH-16	19.7	13.6	6892	96.5	28.5	200	13.7	23.3	98.7	19.3	18.8	87.4	452	69.2	10.8	0.077	7.06	633	724	2.37	0.733	16.9	2.11	9.05	3.07	0.52	0.34	0.41	29.20	14.73	27.05	
ASH-17	17.5	16.5	6413	105	36.3	124	16.3	17.1	75.9	20.6	10.7	74.9	491	89.1	12.9	0.090	0.999	5.58	446	2.83	0.924	12.8	0.261	10.6	1.75	0.58	0.39	0.48	31.48	13.96	26.97	
ZK43-1	14.6	4.47	1978	21.9	7.20	103	1.77	38.2	63.3	17.4	11.8	189	206	141	13.1	0.067	1.16	11.6	734	3.78	0.856	20.7	0.111	12.4	2.37	0.94	0.36	0.38	37.30	15.30	29.02	
ZK43-2	35.9	3.23	1738	16.5	8.27	89.0	1.24	89.1	53.7	16.5	11.9	163	116	134	12.9	0.153	1.07	8.51	720	3.72	1.03	23.4	0.054	14.1	2.56	1.04	0.41	0.38	36.02	12.52	28.54	
ZK43-3	43.1	4.05	1858	17.7	7.48	80.4	0.923	158	51.1	17.5	11.5	195	302	150	13.8	0.081	1.43	9.05	845	4.31	1.03	23.5	0.019	13.4	2.78	1.17	0.42	0.44	34.80	13.40	27.84	
ZK51-4	22.4	4.87	1978	17.8	1.47	71.5	5.17	38.9	95.5	17.1	11.6	181	274	148	13.4	0.035	0.455	10.7	967	4.30	0.983	23.6	0.013	12.6	2.94	1.10	0.39	0.41	34.42	13.63	27.70	
ZK51-5	13.7	4.46	2038	16.1	1.27	90.0	1.57	89.4	54.0	16.7	11.0	172	303	135	12.4	0.024	0.354	10.5	785	3.99	0.962	22.1	0.021	12.2	2.61	1.09	0.43	0.44	33.83	12.89	27.93	
ZK51-6	19.1	5.08	1978	16.3	1.37	90.1	1.41	26.5	56.4	17.1	11.1	175	209	156	12.7	0.040	0.365	8.38	871	4.25	1.01	20.6	0.018	13.2	2.69	1.14	0.40	0.38	36.71	12.57	28.91	
ZK51-7	27.1	3.72	2098	19.1	39.6	81.4	133	27.3	94.3	17.1	11.5	183	252	155	13.5	0.158	0.089	14.3	250	4.32	0.926	32.3	0.103	12.5	2.50	1.15	0.39	0.42	35.88	14.58	27.05	
JSK1	27.2	23.2	3158	193	43.6	52.4	22.4	6.78	24.5	18.0	1.51	65.9	189	79.0	8.79	0.412	0.877	1.35	277	2.23	0.351	18.1	0.258	4.31	1.07	0.69	0.18	0.38	35.43	25.04	23.06	
JSK2	42.4	17.3	3561	133	122	47.8	57.9	24.5	52.8	16.8	2.16	89.2	64.6	148	9.26	0.118	4.56	3.39	653	3.78	0.649	21.3	0.523	11.6	2.39	0.82	0.44	0.35	39.15	14.27	23.98	
JSK3	18.1	16.1	2342	120	66.8	107	41.2	64.3	126	11.3	1.38	77.8	200	102	7.42	0.164	8.91	3.44	354	2.81	0.525	56.1	0.296	5.19	3.00	0.74	0.31	0.44	36.30	14.13	25.78	
上地壳*	21.0	18.0	6400	140	110	25.0	89.0	63.0	94.0	18.0	2.20	78.0	480	130	19.0	0.200	1.70	1.40	390	1.50	1.60	12.0	0.004	5.80	1.70	0.22	0.15	0.49	86.67	11.88	17.14	0.28

注: *来自黎彤, 1976。比值单位为1。ASH-11~ASH-17样品数据引自岳维好等(2019), ZK43-1~ZK51-7样品数据引自岳维好等(2017)。

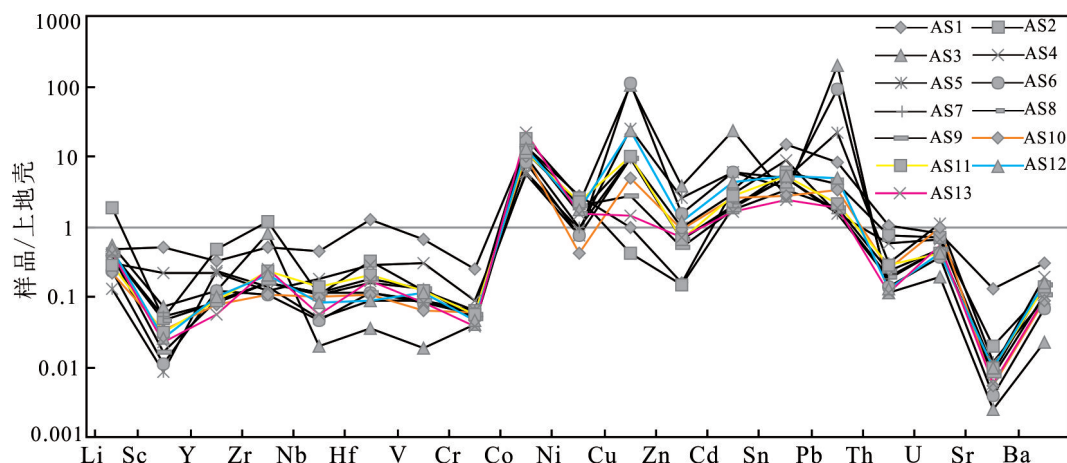


图3 阿斯哈金矿含金黄铁矿微量元素比值蛛网图(标准化值据黎彤, 1976)

Fig.3 Spider diagram of trace elements of the Asiha gold-bearing pyrite from the Asiha gold deposit (data of upper-crust after Li, 1976)

4.2 稀土元素地球化学

阿斯哈金矿含金黄铁矿、赋矿围岩闪长岩和花岗斑岩(岳维好等, 2017)及金水口群变质岩的稀土元素含量及特征值列于表3、表4, 相应的球粒陨石标准化曲线如图4所示。从表3、表4和图4可以看出, 几类样品稀土元素配分模式均为明显右倾型, 轻稀土元素富集。黄铁矿、闪长岩、花岗斑岩和金水口群变质岩的 $(La/Yb)_N$ 分别为2.39~14.32(平均为8.11)、10.12~14.60(平均为12.19)、18.06~24.00(平均为20.42)和5.16~11.04(平均为8.00), 表明轻稀土元素分异较强, 而重稀土元素分异较弱。

黄铁矿的稀土元素元素特征与赋矿围岩闪长岩和花岗斑岩较为相似, 而与金水口群变质岩略有不同。闪长岩和花岗斑岩 ΣREE 分别为 118×10^{-6} ~ 157×10^{-6} (平均为 139×10^{-6})和 118×10^{-6} ~ 139×10^{-6} (平均为 132×10^{-6}), 二者具有基本一致的稀土元素总量特征, 金水口群变质岩 ΣREE 为 91.9×10^{-6} ~ 128.0×10^{-6} (平均为 108.0×10^{-6}), 略微偏低, 而黄铁矿稀土元素总量明显偏低, ΣREE 为 4.83×10^{-6} ~ 64.30×10^{-6} (平均为 19.60×10^{-6})。黄铁矿、闪长岩和花岗斑岩的 δEu 分别为0.49~0.92(平均为0.68)、0.73~1.00(平均为0.82)和0.73~0.81(平均为0.76), 具有明显的Eu元素负异常, 而金水口群变质岩具Eu元素弱正异常(δEu 为0.92~1.17, 平均为1.04)。四者的 δCe 值分别为0.98~1.06(平均1.02)、0.99~1.01(平均为1.00)、0.97~1.00(平均为0.98)和0.99~1.01(平均为1.00), 基本无异常。

5 讨论

5.1 成矿流体性质和来源

5.1.1 微量元素约束

以往认为, 元素F和Cl对REE配合能力有差异: Cl优先配合LREE, 而F则易与HREE结合(Flynn et al., 1978; Alderton et al., 1980; Haas et al., 1995)。近年来的研究发现, 富F的热液也可以迁移大量的LREE(Oreskes et al., 1990; 毕献武等, 2004)。此外, HFSE在富Cl和富F的热液中具有明显不同的地球化学行为, 富Cl的热液富集LREE, 并具有Hf/Sm、Nb/La、Th/La比值 <1 的特征(Oreskes et al., 1990), 而富F的热液富集LREE和HFSE, 通常具有Hf/Sm、Nb/La、Th/La比值 >1 的特征(Ayers et al., 1993; Keppler, 1996)。由表2~4、图3、图4不难发现, 黄铁矿中除少数HFSE略有富集外, 其他元素均亏损, Hf/Sm、Nb/La、Th/La值普遍 <1 。因此, 黄铁矿的微量元素特征表明, 阿斯哈金矿床成矿溶液应以富Cl的热液为主, 这与流体包裹体分析结果为NaCl-H₂O体系, 金形成于中-低温、还原和中-碱性的热液环境, 金元素以硫络合物的方式作为成矿物质迁移的主要形式结论相一致(岳维好, 2013)。

金矿床含金黄铁矿所含的微量元素在一定程度上反映了金矿石的形成条件并可作为矿床成因的良好指示剂。利用黄铁矿杂质元素Co、Ni含量及比值来确定矿床成因已被证明行之有效(Brill, 1989; 毛光周等 2006)。研究表明, 不同成因黄铁矿具有不同的

表3 阿斯哈金矿床含金黄铁矿、闪长岩、花岗斑岩和金水口群变质岩稀土元素含量($w(B)/10^{-4}$)及特征值

样品名	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Σ REE	LREE	HREE	LREE/HREE	(La/Yb) _N	δ Eu	δ Ce
AS1	13.5	27.2	3.22	12.3	2.26	0.436	1.83	0.294	1.41	0.261	0.726	0.099	0.676	0.099	7.70	64.3	58.9	5.40	10.92	14.32	0.66	1.01
AS2	13.6	23.1	2.46	8.46	1.59	0.259	1.62	0.317	1.96	0.387	1.17	0.157	0.968	0.132	11.6	56.2	49.5	6.71	7.37	10.08	0.49	0.98
AS3	0.779	1.46	0.172	0.666	0.174	0.056	0.281	0.065	0.461	0.093	0.307	0.045	0.234	0.033	2.86	4.83	3.31	1.52	2.18	2.39	0.77	0.98
AS4	6.16	12.3	1.39	5.05	1.01	0.177	0.936	0.165	0.831	0.162	0.494	0.061	0.413	0.059	5.20	29.2	26.1	3.12	8.36	10.70	0.56	1.03
AS5	5.80	11.4	1.31	5.00	0.988	0.227	0.971	0.159	0.813	0.158	0.399	0.050	0.317	0.053	5.65	27.7	24.7	2.92	8.47	13.12	0.71	1.01
AS6	2.66	5.15	0.575	2.31	0.466	0.096	0.458	0.078	0.424	0.087	0.261	0.033	0.211	0.029	2.96	12.8	11.3	1.58	7.12	9.04	0.64	1.02
AS7	1.71	3.59	0.429	1.70	0.346	0.071	0.342	0.055	0.292	0.065	0.192	0.027	0.185	0.026	1.93	9.03	7.85	1.18	6.63	6.63	0.63	1.03
AS8	1.68	3.60	0.411	1.66	0.349	0.058	0.344	0.057	0.305	0.063	0.192	0.027	0.179	0.026	1.93	8.95	7.76	1.19	6.50	6.73	0.51	1.06
AS9	1.21	2.67	0.343	1.31	0.318	0.081	0.317	0.068	0.339	0.073	0.233	0.032	0.212	0.033	2.08	7.24	5.93	1.31	4.54	4.09	0.78	1.02
AS10	1.87	3.95	0.464	1.83	0.392	0.095	0.366	0.061	0.333	0.057	0.192	0.028	0.149	0.026	1.82	9.81	8.60	1.21	7.10	9.00	0.77	1.04
AS11	3.06	6.15	0.694	2.66	0.531	0.111	0.465	0.071	0.406	0.082	0.229	0.031	0.195	0.025	2.14	14.7	13.2	1.50	8.78	11.26	0.68	1.03
AS12	0.772	1.66	0.214	0.841	0.186	0.067	0.267	0.057	0.359	0.075	0.199	0.031	0.197	0.028	2.33	4.95	3.74	1.21	3.08	2.81	0.92	1.00
AS13	0.907	1.87	0.226	0.933	0.241	0.056	0.239	0.041	0.202	0.049	0.148	0.023	0.125	0.022	1.34	5.08	4.23	0.849	4.99	5.20	0.71	1.01
ASH-11	25.4	49.1	5.80	21.0	4.03	1.22	3.43	0.564	2.96	0.574	1.64	0.226	1.46	0.217	15.6	118	107	11.1	9.62	12.48	1.00	0.99
ASH-12	26.8	53.9	6.45	24.7	4.85	1.25	4.06	0.708	3.63	0.677	2.01	0.286	1.90	0.275	19.8	132	118	13.6	8.71	10.12	0.86	1.01
ASH-13	35.2	66.3	7.45	27.2	5.10	1.14	4.49	0.704	3.69	0.694	2.11	0.295	1.99	0.267	20.1	157	142	14.2	10.00	12.69	0.73	1.00
ASH-14	35.0	65.6	7.23	26.4	4.63	1.07	4.03	0.674	3.47	0.629	1.92	0.269	1.72	0.260	18.0	153	140	13.0	10.79	14.60	0.76	1.01
ASH-15	35.0	64.8	7.26	26.6	4.89	1.17	4.41	0.676	3.50	0.652	1.91	0.271	1.80	0.262	18.7	153	140	13.5	10.36	13.95	0.77	1.00
ASH-16	26.6	52.9	6.21	23.8	4.56	1.18	4.23	0.629	3.28	0.647	1.92	0.261	1.70	0.255	17.5	128	115	12.9	8.92	11.22	0.82	1.01
ASH-17	26.9	54.1	6.41	24.7	4.89	1.22	4.31	0.721	3.57	0.712	2.08	0.284	1.88	0.289	19.2	132	118	13.9	8.54	10.26	0.81	1.01
ZK43-1	34.8	61.3	6.93	23.3	4.03	0.843	2.89	0.433	2.09	0.410	1.11	0.167	1.04	0.149	11.9	139	131	8.29	15.83	24.00	0.76	0.97
ZK43-2	34.2	60.3	6.48	21.5	3.59	0.765	2.89	0.450	2.20	0.459	1.25	0.174	1.17	0.189	13.1	136	127	8.78	14.44	20.97	0.73	0.99
ZK43-3	31.6	55.2	6.15	21.0	3.69	0.809	2.89	0.452	2.28	0.467	1.18	0.180	1.23	0.167	13.0	127	118	8.85	13.39	18.43	0.76	0.97
ZK51-4	32.6	58.6	6.66	23.1	3.90	0.845	3.00	0.463	2.17	0.444	1.23	0.177	1.11	0.174	12.3	134	126	8.77	14.34	21.07	0.76	0.98
ZK51-5	28.2	51.3	5.84	19.9	3.65	0.838	2.98	0.430	2.15	0.444	1.14	0.162	1.12	0.178	12.4	118	110	8.60	12.75	18.06	0.78	0.98
ZK51-6	33.4	60.9	6.73	22.6	3.73	0.789	2.87	0.435	2.00	0.422	1.16	0.170	1.18	0.177	12.2	137	128	8.41	15.23	20.30	0.74	1.00
ZK51-7	32.0	57.5	6.52	22.1	3.77	0.892	2.98	0.456	2.08	0.451	1.17	0.174	1.14	0.162	12.2	131	123	8.61	14.26	20.13	0.81	0.98
JSK1	23.4	44.0	5.03	18.6	3.24	1.15	2.79	0.432	2.21	0.558	1.45	0.213	1.52	0.24	13.0	105	95.4	9.41	10.14	11.04	1.17	0.99
JSK2	26.4	51.1	6.11	22.9	4.63	1.33	4.20	0.691	3.88	0.983	2.46	0.356	2.43	0.36	23.5	128	112	15.4	7.32	7.79	0.92	0.99
JSK3	16.7	34.6	4.25	16.7	3.79	1.27	3.70	0.669	3.91	0.857	2.42	0.351	2.32	0.34	22.2	91.9	77.3	14.6	5.31	5.16	1.04	1.01

注:ASH-11~ASH-17样品数据引自岳维好等(2019),ZK43-1~ZK51-7样品数据引自岳维好等(2017)。 Σ REE中不包含Y。

表 4 阿斯哈金矿床含金黄铁矿、闪长岩、花岗斑岩和金水口群变质岩稀土元素特征值统计表

Table 4 REE composition and features of gold-bearing pyrite, diorite, granite-porphyry and Jinshui Kou Group metamorphic rocks from the Asiha gold deposit

REE 特征值		含金黄铁矿	闪长岩	花岗斑岩	金水口群变质岩
$\Sigma\text{REE}/10^{-6}$	含量范围	4.83~64.3	118~157	118~139	91.9~128
	平均值	19.6	139	132	108
LREE/ 10^{-6}	含量范围	3.31~58.9	107~142	110~131	77.3~112
	平均值	17.3	126	123	94.9
HREE/ 10^{-6}	含量范围	0.849~6.71	11.1~14.2	8.29~8.85	9.41~15.4
	平均值	2.28	13.2	8.62	13.1
LREE/HREE	含量范围	2.18~10.92	8.54~10.79	12.75~15.83	5.31~10.14
	平均值	6.62	9.56	14.32	7.59
$(\text{La}/\text{Yb})_N$	含量范围	2.39~14.32	10.12~14.60	18.06~24.00	5.16~11.04
	平均值	8.11	12.19	20.42	8.00
δEu	含量范围	0.49~0.92	0.73~1.00	0.73~0.81	0.92~1.17
	平均值	0.68	0.82	0.76	1.04
δCe	含量范围	0.98~1.06	0.99~1.01	0.97~1.00	0.99~1.01
	平均值	1.02	1.00	0.98	1.00

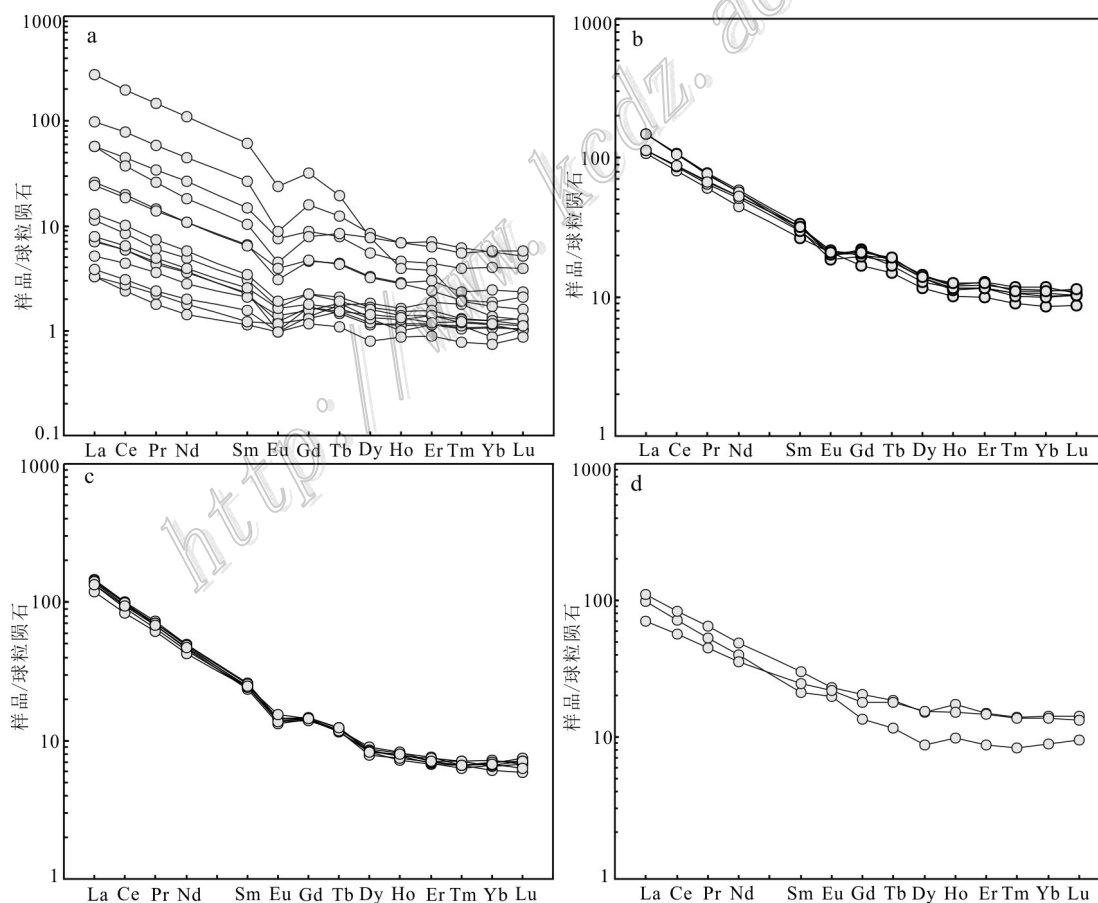
注: ΣREE 中不包含 Y。

图 4 阿斯哈金矿床含金黄铁矿(a)、闪长岩(b)、花岗斑岩(c)和金水口群变质岩(d)稀土元素球粒陨石标准化配分图(标准化值据 Boynton, 1984)

Fig.4 Diagrams of chondrite-normalized REE patterns of the Asiha gold-bearing pyrite (a), diorite (b), granite-porphyry (c) and Jinshui Kou Group metamorphic rocks (d) from the Asiha gold deposit (standardized value after Boynton, 1984)

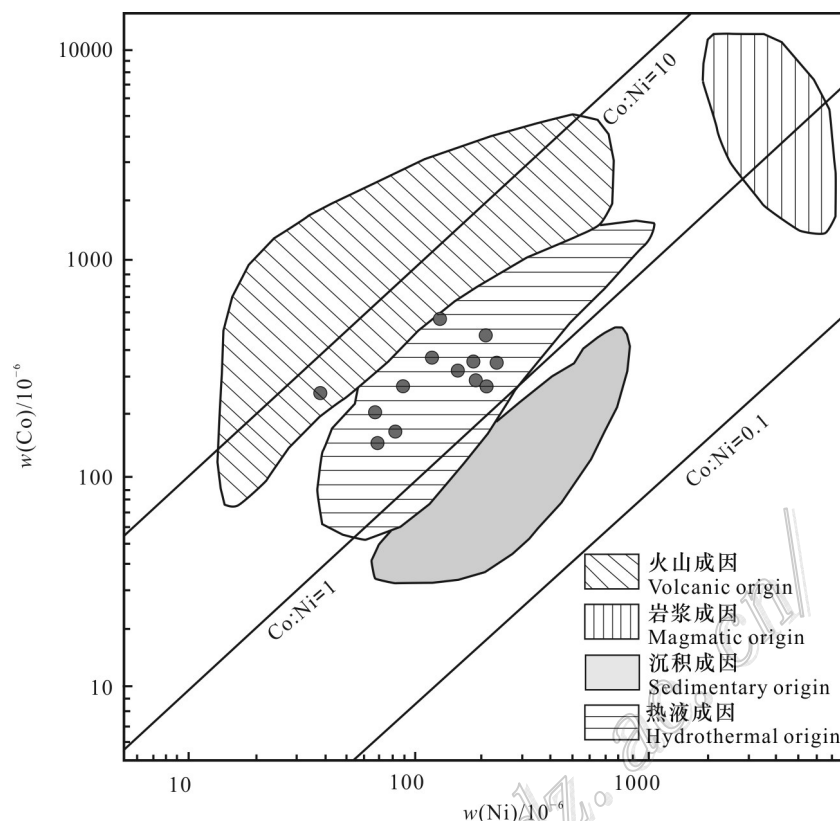


图5 阿斯哈金矿床黄铁矿 Co/Ni 分布图(不同地质环境边界的定义据 Bajwah et al., 1987; Brill, 1989)

Fig.5 Co/Ni distribution diagram of pyrites from the Asiha gold deposit (Boundaries of different geological settings are defined after Bajwah et al., 1987; Brill, 1989)

Co/Ni 值,与火山成因有关的黄铁矿其 Co/Ni 值一般 >1 (Loftus et al., 1967),多在 5~10 之间 (Bralia et al., 1979),典型的在 5~50 之间 (Price, 1972);沉积成因黄铁矿 Co/Ni 值通常 <1 (Loftus et al., 1967),平均为 0.63 (Price, 1972);热液成因(脉状)黄铁矿其 Co/Ni 平均值在 $1.7 \pm$,多 <5 (Price, 1972)。由表 2 及图 5 不难看出,阿斯哈金矿床黄铁矿 $w(\text{Co})$ 、 $w(\text{Ni})$ 分别为 138×10^{-6} ~ 533×10^{-6} (平均为 301×10^{-6})、 37.2×10^{-6} ~ 238×10^{-6} (平均为 138×10^{-6}),黄铁矿 Co/Ni 比值变化中等 ($1.39 \sim 6.61$,平均为 2.57),显示了黄铁矿的复杂成因。在黄铁矿的 Co/Ni 图上(图 5),除了 1 个样品投在火山成因黄铁矿区外,其余均落在热液成因区。

元素 Y 和 Ho 具有相同的价态和离子半径(分别为 10.19 nm 和 10.15 nm, Shannon, 1976),具有相同的地球化学性质和行为,在许多地质过程中 Y/Ho 比值一般不发生变化,常常被用来示踪成矿物质来源与演化过程。地球上大多数岩浆岩和碎屑沉积物都保持着球粒陨石的 Y/Ho 比值 ($28 \pm$, Bau et al., 1995)。此外,前人对成矿流体及现代海底热液进行了 Y、Ho

研究 (Bau et al., 1995; 1997; 1999; Douville et al., 1999),这为本次研究提供了重要参考。从表 2、图 6 可以看出,阿斯哈金矿床黄铁矿、闪长岩和花岗斑岩的 Y/Ho 值分别为 26.10~35.76 (平均 30.57)、26.97~29.25 (平均 28.10) 和 27.05~29.02 (平均 28.14),较为接近,且与球粒陨石 Y/Ho 比值 (28) 基本一致,全部黄铁矿 Y/Ho 比值与现代海水及海底热液明显不同,略较赋矿闪长岩和花岗斑岩 Y/Ho 比值范围宽,暗示与金成矿关系密切的黄铁矿热液流体来源除赋矿围岩外,可能还有其他源区。

5.1.2 稀土元素约束

稀土元素属于不活泼元素,在热液体系中,稀土元素地球化学可以有效地示踪成矿流体的来源和水岩相互作用、解释金属矿床成因 (Henderson, 1984)。由于 REE^{3+} 的离子半径 (9.97~11.6 nm) 与 Zn^{2+} (7.4 nm) 和 Fe^{2+} 的离子半径 (7.8 nm) 相差较大 (Shannon, 1976),所以 REE^{3+} 替换闪锌矿或黄铁矿晶格中的阳离子是比较困难的,推测硫化物中的稀土元素很可能主要赋存于流体包裹体中。对现代海底热液系统

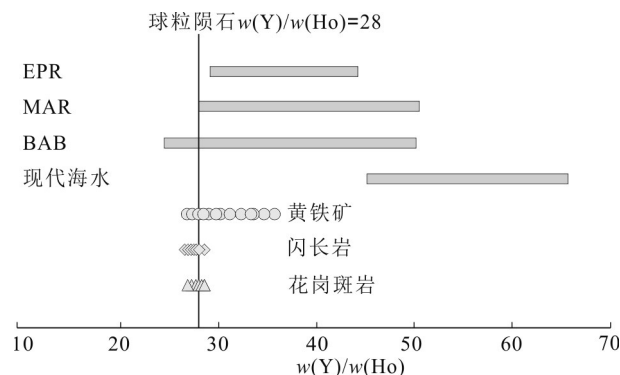


图6 阿斯哈金矿床含金黄铁矿、闪长岩、花岗斑岩、现代海底热液和海水的Y/Ho比值对比图

现代海水、BAB (弧后盆地)、MAR (中大西洋洋脊)和EPR (东太平洋洋脊)热液流体数据引自 Bau et al., 1997; 1999; Douville et al., 1999

Fig.6 Comparative diagram of Y/Ho ratios from gold-bearing pyrite, diorite and granite-porphyry from the Asisha gold deposit
Modern submarine hydrothermal fluids and seawater
Data of hydrothermal fluids and modern seawater, BAB (Back-Arc Basin), MAR (Middle-Atlantic Ridge) and EPR (East Pacific Ridge) from Bau et al., 1997; 1999; Douville et al., 1999

的稀土元素地球化学研究表明,硫化物具有与热液流体相似的稀土元素组成(Mills et al., 1995)。因此,硫化物中的稀土元素组成特征应该可以直接反应成矿流体中的稀土元素组成特征和硫化物沉淀时的温度、压力、pH值及Eh值等物理化学条件。本文研究的黄铁矿稀土元素组成可以代表成矿流体的稀土元素组成(李厚民等, 2003; 陈懋弘等, 2007),真实的反映了成矿流体稀土元素组成。

Eu在还原条件下呈 Eu^{2+} 与其他 REE^{3+} 分离,而Ce只有在氧化条件下呈 Ce^{3+} 与其他 REE^{4+} 分离,由表3、表4可见,含金黄铁矿具有明显的Eu负异常和Ce弱负异常到弱正异常,表明成矿流体具有较强的还原性,黄铁矿沉淀是在还原环境下进行的,这与矿区黄铁矿为主要载金矿物的事实相吻合,说明阿斯哈金矿床成矿流体具弱还原性。由表3、表4和图4还可以看出,黄铁矿球粒陨石标准化配分曲线与赋矿围岩闪长岩、花岗斑岩极为相似,而与金水口群变质岩略有不同,表明成矿流体中的稀土元素是在流体与围岩的水岩相互作用中萃取赋矿围岩中的稀土元素。因此,成矿流体中的稀土元素组成具有继承赋矿围岩闪长岩、花岗斑岩的特征,或三者可能来自同一源区。

5.2 矿床成因

东昆仑造山带是一个具有复杂演化历史的多旋回复合造山带,具有多岛洋、软碰撞和多旋回造山等特征(殷鸿福等, 1997; 1998)。华力西期,研究区受到南侧的巴颜喀拉-阿尼玛卿洋的俯冲及消减作用影响,进入古特提斯洋的演化阶段。从石炭纪开始陆续有洋壳俯冲作用有关的火山喷发和岩浆侵入,且一直持续到二叠纪末-三叠纪初。早印支后期,洋壳俯冲作用停止,巴颜喀拉-阿尼玛卿洋闭合,整个东昆仑地区进入陆内造山阶段。晚三叠世中期,东昆仑造山带发生构造体制转换(陆内造山由挤压构造体制向伸展构造体制转换,也与全球背景的Pangaea超大陆在印支晚期开始初始裂解时间224 Ma相一致),在此构造背景下研究区伴随着大规模成岩和成矿作用的发生(张德全等, 2005; 莫宣学等, 2007)。

通过对矿床地质、微量和稀土元素特征研究表明:阿斯哈金矿床位于青海东昆仑造山带东段的沟里地区,矿体主要赋存于闪长岩和花岗闪长岩体的构造破碎带内,受NNE向、NNW向断裂构造控制。与金矿化密切相关的蚀变类型为硅化、绢云母化、黄铁矿化、绿泥石化、黄铜矿化等。石英-多金属硫化物阶段为矿区Au的主矿期,黄铁矿为主要载金矿物,该阶段的含金黄铁矿微量元素特征表明其成矿流体可能是以富Cl的成矿热液为主;Co/Ni比值显示矿床为热液成因。黄铁矿Y/Ho比值指示除赋矿围岩外,可能还有其它源区。含金黄铁矿稀土元素特征显示,成矿与中酸性围岩具有内在成因关系。这也与C-O-S-Pb等同位素测试结果,即阿斯哈金矿床成矿流体来源于岩浆热液(幔源岩浆),晚期有大气降水的加入;成矿物质主要来源于中酸性岩浆相吻合(李碧乐等, 2012b; 岳维好等, 2022)。

目前阿斯哈金矿直接成矿年代学数据还需进一步开展研究。区域上,同一构造带的五龙沟金矿绢云母Ar-Ar年龄为 $(236.5 \pm 0.5)\text{Ma}$ (张德全等, 2005),石英流体包裹体Rb-Sr年龄为237 Ma(陈柏林等, 2019);大场金矿绢云母Ar-Ar年龄为 $(218.6 \pm 3.2)\text{Ma}$ (张德全等, 2005),含金石英脉热液锆石U-Pb年龄为 $(221 \pm 4)\text{Ma}$ (边飞, 2012)。同处沟里乡的果洛龙洼金矿床矿脉中白云母Ar-Ar年龄为201.8~229.3 Ma(平均为 $(202.7 \pm 1.5)\text{Ma}$, 肖晔等, 2014),含金黄铁矿Re-Os模式年龄为215 Ma(周家喜未发表数据)。矿区闪长岩和花岗斑岩的结晶年龄分别为 $(232.6 \pm 1.4)\text{Ma}$ (岳维好等, 2019)和 $(222.1 \pm 1.5)\text{Ma}$ (岳维好等, 2017),

特别是花岗斑岩与区域上金矿床的形成时间较为接近,推测成矿应在 220 Ma 左右。

综合本次含金黄铁矿微量元素结果,阿斯哈金矿床形成机制可概括为:以富 Cl 的幔源岩浆热液为主的成矿流体,在中-晚三叠世东昆仑强烈的俯冲及碰撞造山作用伸展构造背景下,沿区域性大断裂、大型剪切带及次一级的褶皱和断裂-裂隙控矿构造向上运移,流体在运移过程当中萃取围岩闪长岩和花岗斑岩中的成矿物质,当携带大量成矿物质的流体进入有利的成矿构造部位时,因构造环境及温度、压力等物理化学条件的急剧改变,且由于流体的不混溶性、不同性质流体的混合及水岩反应,最终促使含金成矿流体的沉淀,形成金矿床。矿床为与中酸性岩浆作用有关的浅成热液型脉状金矿床,为中-晚三叠世东昆仑造山伸展构造背景下岩浆-流体-构造耦合成矿的产物。

6 结 论

(1) 黄铁矿 Co/Ni 比值(1.39~6.61, 平均为 2.57)显示矿床为热液成因。黄铁矿 Y/Ho 比值(26.10~35.76, 平均为 30.57)与现代海水及海底热液明显不同,较赋矿围岩 Y/Ho 比值(26.97~29.25, 平均为 28.12)范围略宽,暗示除赋矿围岩外,可能还有其它源区。

(2) 阿斯哈金矿床黄铁矿成矿流体中富集 LREE、亏损 HFSE, Hf/Sm、Nb/La 和 Th/La 比值<1,推断成矿流体以富 Cl 流体为主。

(3) 黄铁矿中的 REE 组成代表了成矿溶液的 REE 组成。青海阿斯哈金矿床与金成矿关系密切的黄铁矿稀土元素组成与矿区赋矿围岩(闪长岩和花岗斑岩)相似,暗示该矿床成矿物质来自围岩。Eu 负异常明显($\delta\text{Eu}=0.49\sim0.92$, 平均为 0.68), Ce 异常不显著($\delta\text{Ce}=0.73\sim1.00$, 平均为 1.02), 与赋矿围岩相似,进一步表明该矿床与中酸性围岩的存在内在成因关系。成矿流体应以含有幔源物质、富含 CO_2 的岩浆流体为主,在成矿晚阶段有大气水混入。

(4) 阿斯哈金矿床属于与中酸性岩浆作用有关的浅成热液脉状型金矿床,并可能受到造山作用影响。

致 谢 成文过程中与昆明理工大学高建国教授/博导、贾福聚博士进行了有益探讨。此外,衷心感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见及建议!

References

- Alderton D H M, Pearce J A and Potts P J. 1980. Rare earth element mobility during granite alteration: Evidence from Southwest England[J]. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 49: 149-165.
- Ayers J C and Watson E B. 1993. Apatite/fluid partitioning of rare-earth elements and strontium: Experimental results at 1.0 GPa and 1000°C and application to models of fluid-rock interaction[J]. *Chemical Geology*, 110(1-3): 299-314.
- Bajwah Z U, Seccombe P K and Offler R. 1987. Trace element distribution, Co:Ni ratios and genesis of the Big Cadiiron copper deposit, New South Wales, Australia[J]. *Mineralium Deposita*, 22: 292-303.
- Bau M and Dulski P. 1995. Comparative study of yttrium and rare-earth element behaviours in fluorine-rich hydrothermal fluids[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119(2): 213-223.
- Bau M, Möler P and Dulski P. 1997. Yttrium and lanthanides in eastern Mediterranean seawater and their fractionation during redox-cycling[J]. *Marine Chemistry*, 56(1-2): 123-131.
- Bau M and Dulski P. 1999. Comparing yttrium and rare earths in hydrothermal fluids from the Mid-Atlantic Ridge: Implications for Y and REE behavior during near-vent mixing and for the Y/Ho ratio of Proterozoic seawater[J]. *Chemistry Geology*, 155: 77-90.
- Bian F. 2012. Chronology study and discussion on genetic type of Dachang gold deposit in Qinghai province (dissertation for master degree)[D]. Supervisor: Wu B L. Xi'an: Northwest University. 32-48(in Chinese with English abstract).
- Bi X W, Hu R Z, Peng J T and Wu K X. 2004. REE and HFSE geochemical characteristics of pyrites in Yao'an gold deposit: Tracing ore forming fluid signatures[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 23(1): 1-4(in Chinese with English abstract).
- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies[A] in Henderson P. ed. *Rare Earth Element Geochemistry*[M]. Amsterdam: Elsevier. 63-114.
- Bralia A, Sabatini G and Troja F. 1979. A revaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems[J]. *Mineralium Deposita*, 14(3): 353-374.
- Brill B A. 1989. Trace-element contents and partitioning of elements in ore minerals from the CSA Cu-Pb-Zn deposit, Australia[J]. *Canadian Mineralogist*, 27(2): 263-274.
- Chen B L, Wang Y, Han Y and Chen J L. 2019. Metallogenic age of Yanjingou gold deposit in Wulonggou gold orefield, eastern Kunlun Mountains[J]. *Mineral Deposits*, 38(3): 541-556.
- Chen M H, Wu L L, Uttley P J, Norman T, Zheng J M and Qin Y Z. 2007. REE features of arsenian pyrite and vein quartz and their fluid inclusions in the Jinfeng (Lannigou) gold deposit, Guizhou

- Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2423-2433(in Chinese with English abstract).
- Douville E, Bienvenu P and Charlou J I. 1999. Yttrium and rare earth elements in fluids from various deep-sea hydrothermal systems[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63: 627-643.
- Flynn T R and Burnham C W. 1978. An experimental determination of rare earth partition coefficients between chloride containing vapor phase and silicate melts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42: 685-701.
- Haas J R, Shock E L and Sassani D C. 1995. Rare earth elements in hydrothermal systems: Estimates of standard partial modal thermodynamic properties of aqueous complexes of the rare earth elements at high pressures and temperatures[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 4329-4350.
- Henderson P. 1984. Rare earth element geochemistry[M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers. 2: 33-61.
- Jiang C F, Yang J S, Feng B G and Chai Y C. 1992. Kunlun opening-closing structure[M]. Beijing: Geological Publishing House. 183-217(in Chinese).
- Jiang C F, Wang Z Q and Li J Y. 2000. Open-close structure of central orogenic belt[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-154(in Chinese).
- Keppler H. 1996. Constraints from partitioning experiments on the composition of subduction zone fluids[J]. *Nature*, 380: 237-240.
- Li B L, Sun F Y, Yu X F, Qian Y, Wang G and Yang Y Q. 2012a. U-Pb dating and geochemistry of diorite in the eastern section from eastern Kunlun middle uplifted basement and granitic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1163-1172(in Chinese with English abstract).
- Li B L, Shen X, Chen G J, Yang Y Q and Li Y S. 2012b. Geological features of ore-forming fluids and metallogenesis of vein I in Asiha gold ore deposit, eastern Kunlun, Qinghai Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(6): 1676-1687(in Chinese with English abstract).
- Li H M, Shen Y C, Mao J W, Liu T B and Zhu H P. 2003. REE features of quartz and pyrite and their fluid inclusions: An example of Jiaojia-type gold deposits, northwestern Jiaodong peninsula[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(2): 267-274(in Chinese with English abstract).
- Li J C, Jia Q Z, Du W, Li Y Z, Kong H L, Namkha N B and Yang B R. 2014. LA-ICP-MS zircon dating and geochemical characteristics of quartz diorite in Asiha gold deposit in East Segment of the eastern Kunlun[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(4): 1188-1199(in Chinese with English abstract).
- Li T. 1976. Chemical element abundances in the earth and its major shells[J]. *Geochimica*, (3): 167-174(in Chinese with English abstract).
- Lin J Q, Chen G, Yao Y and Shen T. 2020. Geological characteristics and metallogenic analysis of Asiha gold deposit in Dulan County, Qinghai Province[J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, (1): 10-13(in Chinese with English abstract).
- Loftus-Hills G and Solomon M. 1967. Cobalt, nickel and selenium in sulphides as indicators of ore genesis[J]. *Mineralium Deposita*, 2(3): 228-242.
- Mao G Z, Hua R M, Gao J F, Zhao K D, Long G M, Lu H J and Yao J M. 2006. REE composition and trace element features of gold-bearing pyrite in Jinshan gold deposit, Jiangxi Province[J]. *Mineral Deposits*, 25(4): 412-426(in Chinese with English abstract).
- Mills R A and Elderfield H. 1995. Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits from the active TAG Mound, 26°N Mid Atlantic Ridge [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 59(17): 3511-3524.
- Mo X X, Luo Z H, Deng J F, Yu X H, Liu C D, Chen H W, Yuan W M and Liu Y H. 2007. Granitoids and crustal growth in the East-Kunlun Orogenic Belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 403-414(in Chinese with English abstract).
- Oreskes N and Einaudi M T. 1990. Origin of rare earth element-enriched hematite breccias at the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit, Roxby Downs, South Australia[J]. *Econ. Geol.*, 85: 1-28.
- Price B J. 1972. Minor elements in pyrites from the Smithers map area, British Columbia and exploration applications of minor element studies (dissertation for master degree)[D]. Supervisor: Sinclair A J. Columbia: Columbia University. 83-91.
- Qi L, Hu J and Gregoire D C. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Talanta*, 51(3): 507-513.
- Qi Y Q and Liu R X. 2012. Analysis on geological characteristics and prospecting prospect of Asiha gold deposit in Dulan County[J]. *Western exploration project*, 24(6): 140-144+149(in Chinese).
- Qinghai provincial geological bureau. 1973. 1: 200 000 regional geological survey report of the Jialu River range[R](in Chinese).
- Shannon R D. 1976. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides[J]. *Acta Crystallogr. Sect. A Found. Crystallogr.*, 32: 751-767.
- Sheard E R, Williams-Jones A E, Heiligmann M, Pederson C and True-man D L. 2012. Controls on the concentration of zirconium, niobium and the rare earth elements in the Thor Lake rare metal deposit, Northwest Territories, Canada[J]. *Econ. Geol.*, 107: 81-104.
- Shen X. 2012. Study on geological characteristics and genesis of Asiha gold deposit, East Kunlun, Qinghai Province (dissertation for master degree)[D]. Supervisor: Li B L. Jilin: Jilin University. 1-61(in Chinese with English abstract).
- Xiao Y, Feng C Y, Li D X and Liu J N. 2014. Chronology and fluid inclusions of the guoluolongwa gold deposit in Qinghai Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(5): 895-902(in Chinese with English abstract).
- Yin H F and Zhang K X. 1997. Characteristics of the eastern Kunlun Orogenic belt[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 22(4): 339-342(in Chinese with English abstract).
- Yin H F and Zhang K X. 1998. Evolution and characteristics of the central orogenic belt[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 23(5): 437-441(in Chinese with English abstract).
- Yue W H. 2013. Research on the geology-geochemistry and metallo-

- genic mechanism of typical gold deposits in the Gouli gold metallogenic district of the East part of eastern Kunlun Orogen (dissertation for doctoral degree) [D]. Supervisor: Gao J G. Kunming: Kunming University of Science and Technology. 1-161(in Chinese with English abstract).
- Yue W H, Zhou J X, Gao J G, Huang Y H and Jia F J. 2017. Geochemistry, zircon U-Pb dating and Hf isotopic compositions of the granite-porphyry in Asiha gold ore district, Dulan County, Qinghai Province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(4): 776-789(in Chinese with English abstract).
- Yue W H and Zhou J X. 2019. Geochemistry, zircon U-Pb age and Hf isotopic characteristics of the Asiha diorite in Dulan County, Qinghai Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 8(2/3): 328-338(in Chinese with English abstract).
- Yue W H and Zhou J X. 2022. The origin of ore-forming material in the Asiha gold deposit, East Kunlun orogenic belt, Qinghai Province: Constraints from C-O-S-Pb isotopes[J]. *Geochimica*, accepted(in Chinese with English abstract).
- Zha D H, Lai J Q, Tao J J, Ju P J and Zhang C G. 2013. Characteristics of fluid inclusions and ore genesis of Asiha gold deposit, Qinghai Province[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 23(9): 2641-2648(in Chinese with English abstract).
- Zhang D Q, Dang X Y, She H Q, Li D X, Feng C Y and Li J W. 2005. Ar-Ar dating of orogenic gold deposits in northern margin of Qaidam and East Kunlun Mountains and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 24(2): 87-98(in Chinese with English abstract).
- Zhou J X, Huang Z L, Zhou G F, Li X B, Ding W and Bao G P. 2011. Trace elements and rare earth elements of sulfide minerals in the Tianqiao Pb-Zn ore deposit, Guizhou Province, China[J]. *Acta Geol Sinica (English Edition)*, 85(1): 189-199.
- ### 附中文参考文献
- 边飞. 2012. 青海省大场金矿床成矿年代学研究及矿床成因类型探讨(硕士论文)[D]. 导师: 吴柏林. 西安: 西北大学. 32-48.
- 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 吴开兴. 2004. 黄铁矿微量元素地球化学特征及其对成矿流体性质的指示[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 23(1): 1-4.
- 陈柏林, 王永, 韩玉, 陈建林. 2019. 东昆仑五龙沟矿田岩金矿床成矿时代新认识[J]. *矿床地质*, 38(3): 541-556.
- 陈懋弘, 吴六灵, Phillip J U, Tony N, 郑建民, 秦运忠. 2007. 贵州锦丰(烂泥沟)金矿床含砷黄铁矿和脉石英及其包裹体的稀土元素特征[J]. *岩石学报*, 23(10): 2423-2433.
- 姜春发, 杨经绥, 冯秉贵, 柴耀楚. 1992. 昆仑开合构造[M]. 北京: 地质出版社. 183-217.
- 姜春发, 王宗起, 李锦铁. 2000. 中央造山带开合构造[M]. 北京: 地质出版社. 1-154.
- 李碧乐, 孙丰月, 于晓飞, 钱桦, 王冠, 杨延乾. 2012a. 东昆中隆起带东段闪长岩 U-Pb 年代学和岩石地球化学研究[J]. *岩石学报*, 28(4): 1163-1172.
- 李碧乐, 沈鑫, 陈广俊, 杨延乾, 李永胜. 2012b. 青海东昆仑阿斯哈金矿 I 号脉成矿流体地球化学特征和矿床成因[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(6): 1676-1687.
- 李厚民, 沈远超, 毛景文, 刘铁兵, 朱和平. 2003. 石英、黄铁矿及其包裹体的稀土元素特征—以胶东焦家金矿为例[J]. *岩石学报*, 19(2): 267-274.
- 李金超, 贾群子, 杜玮, 栗亚芝, 孔会磊, 南卡俄吾, 杨宝荣. 2014. 东昆仑东段阿斯哈金矿床石英闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及岩石地球化学特征[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 44(4): 1188-1199.
- 黎彤. 1976. 化学元素的地球丰度[J]. *地球化学*, (3): 167-174.
- 蒯吉庆, 陈刚, 姚勇, 申滔. 2020. 青海省都兰县阿斯哈金矿床地质特征及成矿浅析[J]. *四川有色金属*, 1: 10-13.
- 毛光周, 华仁民, 高剑峰, 赵葵东, 龙光明, 陆慧娟, 姚军明. 2006. 江西金山金矿床含金黄铁矿的稀土元素和微量元素特征[J]. *矿床地质*, 25(4): 412-426.
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 喻学惠, 刘成东, 湛宏伟, 袁万明, 刘云华. 2007. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. *高校地质学报*, 13(3): 403-414.
- 祁月清, 刘瑞雪. 2012. 都兰县阿斯哈金矿地质特征及找矿远景浅析[J]. *西部探矿工程*, 24(6): 140-144+149.
- 青海省地质局. 1973. 1:20 万加鲁河幅区域地质调查报告[R].
- 沈鑫. 2012. 青海东昆仑阿斯哈金矿床地质特征及成因研究(硕士论文)[D]. 导师: 李碧乐. 吉林: 吉林大学. 1-61.
- 肖晔, 丰成友, 李大新, 刘建楠. 2014. 青海省果洛龙洼金矿区年代学研究及流体包裹体特征[J]. *地质学报*, 88(5): 895-902.
- 殷鸿福, 张克信. 1997. 东昆仑造山带的一些特点[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 22(4): 339-342.
- 殷鸿福, 张克信. 1998. 中央造山带的演化及其特点[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 23(5): 437-441.
- 岳维好. 2013. 东昆仑东段沟里金矿集区典型矿床地质地球化学及成矿机理研究(博士论文)[D]. 导师: 高建国. 昆明: 昆明理工大学. 1-161.
- 岳维好, 周家喜, 高建国, 黄艳华, 贾福聚. 2017. 青海都兰县阿斯哈金矿区花岗岩斑岩岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素研究[J]. *大地构造与成矿学*, 41(4): 776-789.
- 岳维好, 周家喜. 2019. 青海都兰县阿斯哈石英闪长岩岩石地球化学、锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素特征[J]. *地质通报*, 8(2/3): 328-338.
- 岳维好, 周家喜. 2022. 青海东昆仑阿斯哈金矿床成矿物质来源: C-O-S-Pb 同位素约束[J]. *地球化学*, 待刊.
- 查道函, 赖健清, 陶斤金, 鞠培姣, 张辰光. 2013. 青海阿斯哈金矿流体包裹体特征及矿床成因[J]. *中国有色金属学报*, 23(9): 2641-2648.
- 张德全, 党兴彦, 余宏全, 李大新, 丰成友, 李进文. 2005. 柴北缘—东昆仑地区造山型金矿床的 Ar-Ar 测年及其地质意义[J]. *矿床地质*, 24(2): 87-98.