

新疆西准噶尔包古图金矿微量元素地球化学研究

安 芳^{1,2}, 朱永峰²

(1. 大陆动力学国家重点实验室, 西北大学 地质系, 陕西 西安 710069; 2. 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘 要:包古图金矿由石英脉型和蚀变岩型矿体组成, 该矿的热液成矿期可以划分为 4 个阶段: 粗粒石英脉阶段 (I)、含金细粒硫化物-石英脉阶段 (II)、含金粗粒自然砷-辉锑矿-石英脉阶段 (III) 以及方解石脉阶段 (IV), 其中阶段 II 和 III 是主要的金矿化阶段, 形成自然金赋存于毒砂、含砷黄铁矿中, 银金矿被自然砷、辉锑矿包裹。阶段 I 石英脉的稀土元素总量 ($0.83 \times 10^{-6} \sim 3.67 \times 10^{-6}$) 明显低于阶段 II ($11.01 \times 10^{-6} \sim 30.18 \times 10^{-6}$), 轻重稀土元素分馏 [(La/Yb)_N = 8.53~21.89] 较阶段 III [(La/Yb)_N = 6.90~10.40] 明显, 但总体具有与区内中酸性侵入岩相似的稀土元素配分模式; 阶段 I 石英脉具有弱 Eu 正异常 ($\delta Eu = 1.09 \sim 1.80$), 阶段 II δEu 主要集中于 1.36~0.67 之间; 所有样品显示弱 Ce 负异常或无 Ce 异常 ($\delta Ce = 0.87 \sim 1.01$)。矿化围岩和含矿石英脉中的黄铁矿均显示右倾型稀土元素配分模式, 但石英脉中黄铁矿轻重稀土元素分馏更明显 [(La/Yb)_N = 24.0~36.1], 所有黄铁矿均具有明显 Eu 负异常 ($\delta Eu = 0.50 \sim 0.64$)。不同阶段石英脉和黄铁矿中 Ce_N、Eu 异常表明成矿流体逐渐向较还原的状态演化。黄铁矿的 Co/Ni 比值 (1.60~10.50) 指示初始成矿流体为中温。包古图金矿含矿石英脉与区内广泛发育的中酸性斑岩体、岩脉在时间和空间上密切相关, 具有相似的稀土元素配分模式, 以上特征指示包古图金矿成矿作用与区内晚石炭世中酸性岩浆活动有关。

关键词:微量元素 地球化学 包古图金矿 西准噶尔 新疆

中图分类号: P595; P618.51

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)02-0329-14

Trace elements geochemistry of the Baogutu gold deposit in Western Junggar, Xinjiang

AN Fang^{1,2} and ZHU Yong-feng²

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;

2. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The Baogutu gold deposit consists of quartz-vein type and alteration type ore bodies. The hydrothermal process can be divided into four stages: coarse-grained quartz vein stage (I), gold-bearing fine-grained sulfide-quartz vein stage (II), gold-bearing coarse-grained native arsenic-stibnite-quartz vein stage (III) and calcite vein stage (IV). Gold mineralization occurred at stage II and stage III, forming native gold and electrum enclosed by or coexisting with quartz, pyrite, native arsenic and stibnite. The total REE content of quartz veins formed at stage I and II is $0.83 \times 10^{-6} \sim 3.67 \times 10^{-6}$ and $11.01 \times 10^{-6} \sim 30.18 \times 10^{-6}$, respectively. The fractionation between LREE and HREE in stage I quartz vein [(La/Yb)_N = 8.53~21.89] is more obvious than that in stage II quartz vein [(La/Yb)_N = 6.90~10.40], although they all show LREE-enriched chon-

收稿日期: 2013-10-15; 修订日期: 2014-02-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41203032) 科技部国际科技合作项目(2010DFB23390) 大陆动力学国家重点实验室自主研究项目;

“三秦学者”学术团队资助项目

作者简介: 安 芳(1984-), 讲师, 矿床地球化学专业, E-mail: anfang_china@163.com。

drite-normalized REE patterns which are similar to patterns of porphyries in Baogutu area, with slightly positive Eu anomaly and negative Ce anomaly. The chondrite-normalized REE patterns of sulfide samples such as pyrite and pyrrhotite separated from altered host rock and quartz veins are also right-oblique and characterized by obvious Eu negative anomaly ($\delta\text{Eu} = 0.50 \sim 0.64$). According to the Eu and Ce anomalies of quartz veins and pyrite, it can be concluded that the oxygen fugacity of the ore-forming fluid decreases from stage I to II. The Co/Ni ratios (1.60~10.50) of pyrite indicate that the ore-forming fluid is mesothermal, which is consistent with the estimation based on As atomic percentage in arsenopyrite. The gold-bearing quartz veins in the Baogutu gold deposit are closely related to intermediate-acidic stocks and veins in space and time, and they also share similar chondrite-normalized REE patterns and oxidation state, which indicates that the gold mineralization in Baogutu gold deposit is genetically related to intermediate-acidic magmatism in Baogutu area.

Key words: trace elements; geochemistry, Baogutu gold deposit; Western Junggar; Xinjiang

近几年,新疆北部的地质研究和找矿勘探取得了重大进展(张锐等,2006;朱永峰等,2007a,2007b,2007c;Zhu *et al.*,2007),尤其表现在西准噶尔地区。西准噶尔地区发育石英脉型金矿化和斑岩型 Cu-Au 矿化,包古图斑岩 Cu-Au 矿是近年在西准噶尔地区新发现的一个中型铜矿(张锐等,2006),为西准噶尔地区晚石炭世斑岩型成矿作用的确立提供了依据。区内典型的石英脉型金矿床有哈图、包古图、宝贝和萨尔托海等(沈远超等,1993;王瑞等,2007;安芳等,2007;邱添等,2012)。包古图斑岩铜矿的发现带动了包古图地区的地质研究和找矿勘探工作,但主要集中于斑岩型铜矿化及与其有关的中酸性斑岩体(张锐等,2006;成勇等,2006;张连昌等,2006;宋会侠等,2007;唐功建等,2009;魏少妮等,2010,2011)。因此,包古图金矿虽然已有近 20 年的勘探开采历史,但对其矿床地质特征、成矿流体来源以及矿床地球化学特征的研究却较少(沈远超等,1993;李华芹等,2000)。本文主要在前人研究的基础上,补充开展了包古图金矿体和硫化物的微量元素分析,并根据分析结果讨论了成矿流体地球化学以及物理化学条件演化,从稀土元素地球化学角度探讨了成矿流体与包古图地区中酸性侵入岩之间的关系,为深入研究包古图金矿成矿作用过程和成矿机制提供了新的地球化学资料。

1 区域地质

西准噶尔位于准噶尔盆地西北缘,是中亚成矿带主要的金-铜成矿带(何国琦等,2006;朱永峰等,2007b),金矿床集中分布于南部的哈图-包古图地区,由两个金矿集区组成(白文吉等,1988):哈图-

萨尔托海金矿集区,包古图金-铜矿集区,分别位于 NE 走向的达拉布特断裂两侧(图 1a)。

包古图地区位于达拉布特断裂以南,区内存在一个由下石炭统希贝库拉斯组、包古图组和太勒古拉组火山-沉积建造构成的 S-N 向褶皱构造(图 1b),希贝库拉斯组中凝灰岩夹层的锆石 SHRIMP 年龄为 336 Ma(郭丽爽等,2010),包古图组凝灰岩的锆石年龄为 328~343 Ma(安芳等,2009;郭丽爽等,2010),太勒古拉组中玄武岩的年龄为 357 Ma(郭丽爽等,2010),与达拉布特断裂北侧宝贝金矿区太勒古拉组凝灰岩中获得的年龄(328 Ma,王瑞等,2007)差别较大。下石炭统火山-沉积建造中有多个(分布被编号为 I~VII 号)中酸性小岩体侵入(图 1b),岩性为闪长玢岩、石英闪长玢岩和花岗闪长玢岩,侵位时代集中在 310~320 Ma(唐功建等,2009;Liu *et al.*,2009;魏少妮等,2011;Shen *et al.*,2012),包古图中型斑岩铜-金(铜储量为 1.11 Mt)矿床产于 V 号斑岩体中,其中辉钼矿的 Re-Os 模式年龄为 310 Ma(宋会侠等,2007),黑云母 K-Ar 年龄为 296~297 Ma(Liu *et al.*,2009)。包古图地区中酸性岩脉广泛分布,侵位于下石炭统火山-沉积地层和中酸性斑岩体中,以闪长玢岩和石英闪长玢岩为主,侵位时代略晚于斑岩体(锆石年龄 314~321 Ma,Tang *et al.*,2010;Yin *et al.*,2010),在空间上与包古图地区部分 Au 矿化伴生。包古图 Au-Cu 矿集区主要出露两类金矿化:石英脉型 Au-As-Sb 矿化和石英-硫化物脉型 Au-Bi 矿化(郑波等,2009;安芳,2011)。

包古图地区发育 3 组断裂系统(图 1b、1c): NNE(F_1)和 N-S(F_2)断裂组、NE(F_3)和 NNE(F_4)断裂组、N-S(F_5)和 NW(F_6)断裂组(规模较小,图

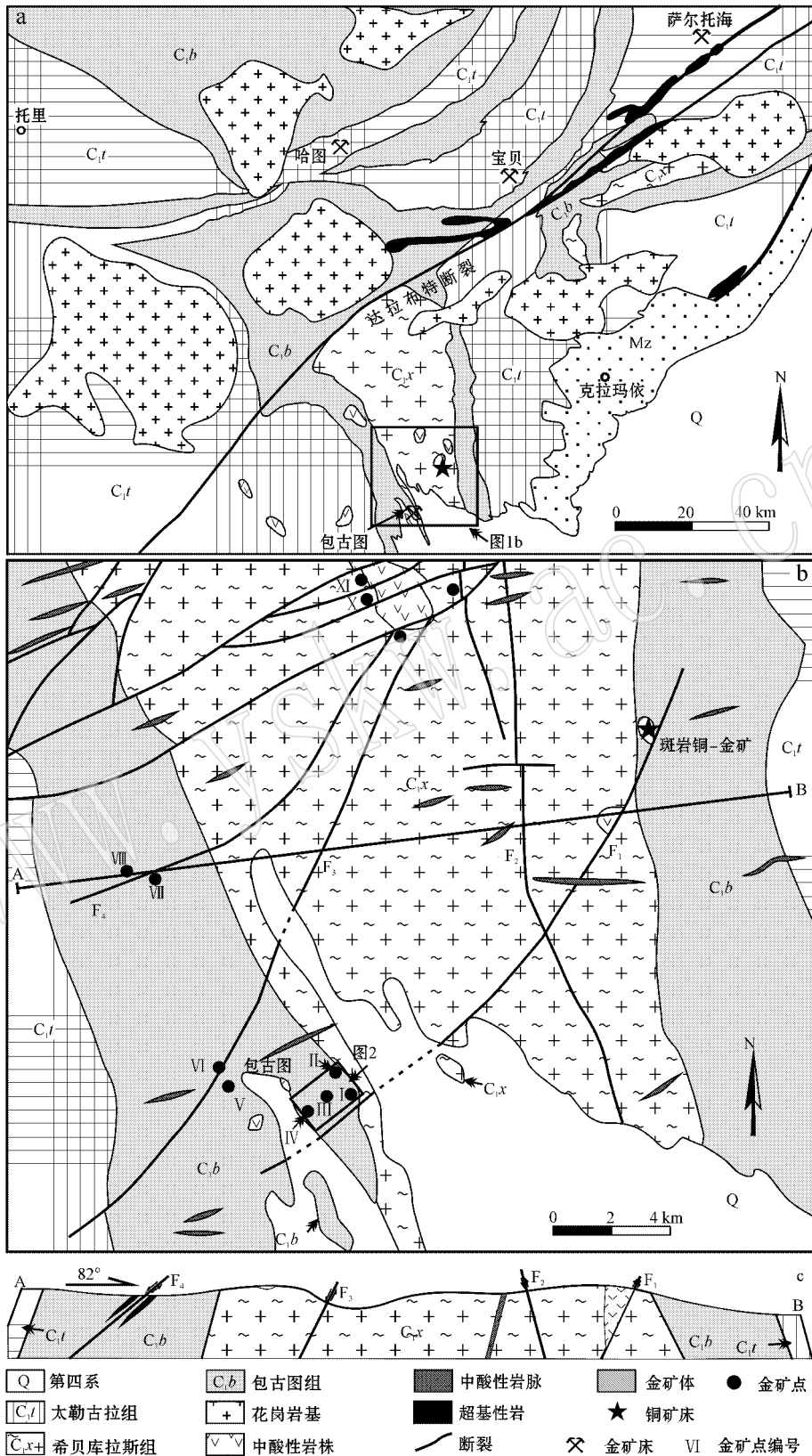


图 1 西准噶尔 (a) 包古图地区 (b) 区域地质简图及图切割剖面图 (c) (据新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993)
 Fig. 1 Simplified geological map of Western Junggar (a), Baogutu region (b) and geological section of A-B (c)
 (modified after BGMRX, 1993)

2)。F₁-F₂ 断裂组主要为挤压断裂,控制着区内酸性斑岩体的分布(F₁,图 1b),该组断裂被 F₃-F₄ 断裂组切割,F₃-F₄ 断裂组同时切割了包古图地区出露的部分中酸性斑岩体(图 1b),是包古图地区最主要的金矿控矿构造,区内大部分中酸性岩脉和含金石英脉均受 F₃-F₄ 断裂组控制(图 1b、1c)。F₅-F₆ 断裂组仅在包古图金矿周围出露,切割矿区由 F₃-F₄ 断裂组控制的中酸性岩脉和含金石英脉(图 2)。

2 矿床地质

包古图金矿(也称为阔个沙也金矿)位于包古图地区南部,包古图斑岩铜-金矿(V号斑岩体)西南约 15 km,金矿化点产于中酸性岩体(Ⅲ、Ⅳ号斑岩体)外围的火山-沉积建造中(图 1b),为典型的石英脉型 Au-As-Sb 矿化。包古图金矿由包古图 I、II、III、IV 号金矿点组成(图 2),I 号点位于矿区东南,II 号位于东北,III 号位于南部,IV 号位于西北,赋矿地层为下石炭统包古图组(图 2),其中凝灰岩和凝灰质砂岩是主要的含矿围岩。围岩蚀变有硅化、绢云母化、碳酸盐化、黄铁矿化和毒砂化,硅化主要呈脉状,形成石英-钠长石脉、细粒硫化物-石英脉、粗粒自然砷-石英脉和辉锑矿-石英脉,绢云母化主要呈浸染状分

布,蚀变矿物组合为绢云母-石英-黄铁矿,部分绢云母呈浸染状分布于石英脉中;碳酸盐化呈脉状和浸染状分布,浸染状碳酸盐化以形成浸染状分布于围岩中的铁白云石、方解石和少量黄铁矿、毒砂为特征,而脉状碳酸盐化主要形成石英-方解石脉,穿切蚀变围岩。金矿化与硅化、绢云母化、黄铁矿化和毒砂化伴生。

矿体主要受 NE 向断裂控制,呈透镜状、脉状或带状成群产出,倾向 301°~308°,倾角 70°~77°,矿脉规模变化较大,宽 0.5~3 m,平面上延伸 10~150 m(图 2),沿倾向可断续延伸至地下 400 m,最新的钻探资料显示,地下 900 m 深度仍存在高品位金矿化。不同矿脉的金品位向深部有增高的趋势。矿石品位变化较大,平均为 6~8 g/t,局部品位高达上百 g/t。包古图金矿区出露于地表的矿脉超过 20 条(图 2),但目前隐伏矿体是主要开采对象,隐伏矿体的厚度为 0.5~1 m,沿倾向断续延伸至地下 500 m。包古图金矿区中酸性岩脉广泛分布,走向 30°~60°,与金矿体近平行,脉宽 0.5~8 m,沿走向延伸几十米至上百米(图 2),倾向 NW,沿倾向延伸 50~400 m,岩脉岩性主要为石英闪长玢岩、闪长玢岩、细晶闪长岩。在 IV 号矿区,有少量辉绿岩脉分布。

矿体主要为石英脉型和蚀变岩型,石英脉型矿

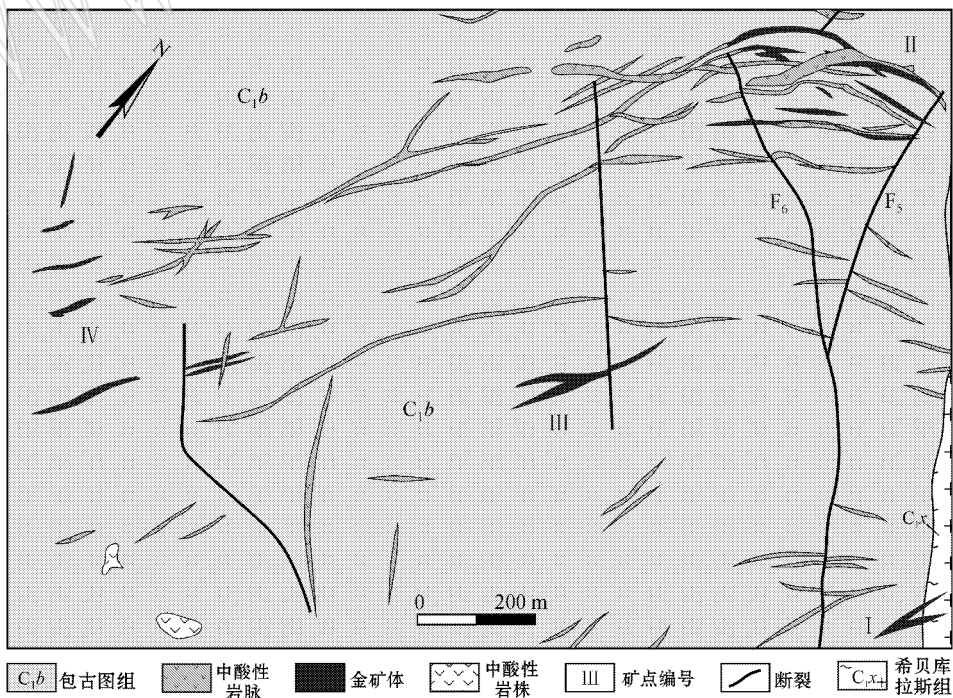


图 2 包古图金矿矿区地质图(据沈远超等,1993)

体可分为3类:黄铁矿-石英脉型(图3a)、辉锑矿-石英脉型(图3b)和自然砷-石英脉型(图3c)。黄铁矿-石英脉型矿体主要产于II号金矿点,其中矿石矿物为黄铁矿、毒砂、自然金和少量锑矿物,脉石矿物为石英和钠长石(An and Zhu, 2010);辉锑矿-石英脉型矿体主要分布于IV号金矿点,主要矿物有辉锑矿、

自然锑、自然金、银金矿、石英和方解石;自然砷-石英脉型矿体主要产于IV号金矿点部分矿脉的浅部,由梳状石英、自然砷、辉锑矿和银金矿组成,银金矿呈包体被自然砷包裹(An and Zhu, 2009)。蚀变岩型矿体主要产于石英脉两侧的围岩中,呈细脉浸染状和星散浸染状(图3a),矿物组合大多与石英脉型矿体相似,而部分辉锑矿-石英脉型矿体两侧发育富含黄铁矿细脉的蚀变岩型矿体(图3b)。

综合考虑包古图金矿不同金矿点的矿石类型及其空间关系,可将包古图金矿热液成矿作用分为4个阶段(An and Zhu, 2009, 2010):阶段I主要形成乳白色的粗粒石英脉,由粗粒石英、钠长石、自形-半自形黄铁矿和毒砂以及少量绢云母组成,基本不含矿;阶段II以形成烟灰色的含金细粒黄铁矿-石英脉为特征,主要矿物组合为石英-绢云母-毒砂-含砷黄铁矿-自然金-磁黄铁矿;阶段III早期形成粗粒辉锑矿-石英脉(III-a),由粗粒石英、自形-半自形辉锑矿、少量黝铜矿、自然锑以及碳酸盐矿物组成,晚期形成自然砷-石英脉(III-b),由粗粒石英、自然砷、银金矿、辉锑矿和碳酸盐矿物组成;阶段IV形成方解石脉,含少量辉锑矿。烟灰色含金细粒黄铁矿-石英脉常穿切、叠加或交代早期形成的乳白色粗粒石英脉,热液演化晚期形成的方解石脉在矿体中广泛发育,常见其穿切早期不同阶段形成的石英脉。

3 分析方法

在包古图金矿采集有代表性的矿石,选取其中发育的阶段I粗粒石英脉和阶段II黄铁矿-石英脉进行全岩化学分析。将野外采集的矿石样品破碎至~20目,挑选不同阶段矿脉,然后用不锈钢搥钵破碎至60~80目,再用玛瑙钵研磨至200目待溶解;黄铁矿是将富含黄铁矿的蚀变围岩、含矿石英脉样品清洗后,破碎至60~80目,在双面镜下进行挑选,用玛瑙钵研磨至200目待溶解。在含硫化物的蚀变围岩样品中挑选出了一件磁黄铁矿。

矿脉溶样方法如下:称取样品粉末40 mg放入溶样罐中,加入0.5 mL(1:1) HNO_3 和1 mL HF 恒温加热12 h后蒸干,再加入0.5 mL(1:1) HNO_3 和1.5 mL HF 加套高压罐放入160 $^\circ\text{C}$ 烘箱中保温一周,蒸干后加入2 mL(1:1) HNO_3 恒温加热12 h,再次蒸干后加入2 mL(1:1) HNO_3 溶解,冷却后将溶液转移至50 mL 比色管中,用1% HNO_3 (内含10 \times

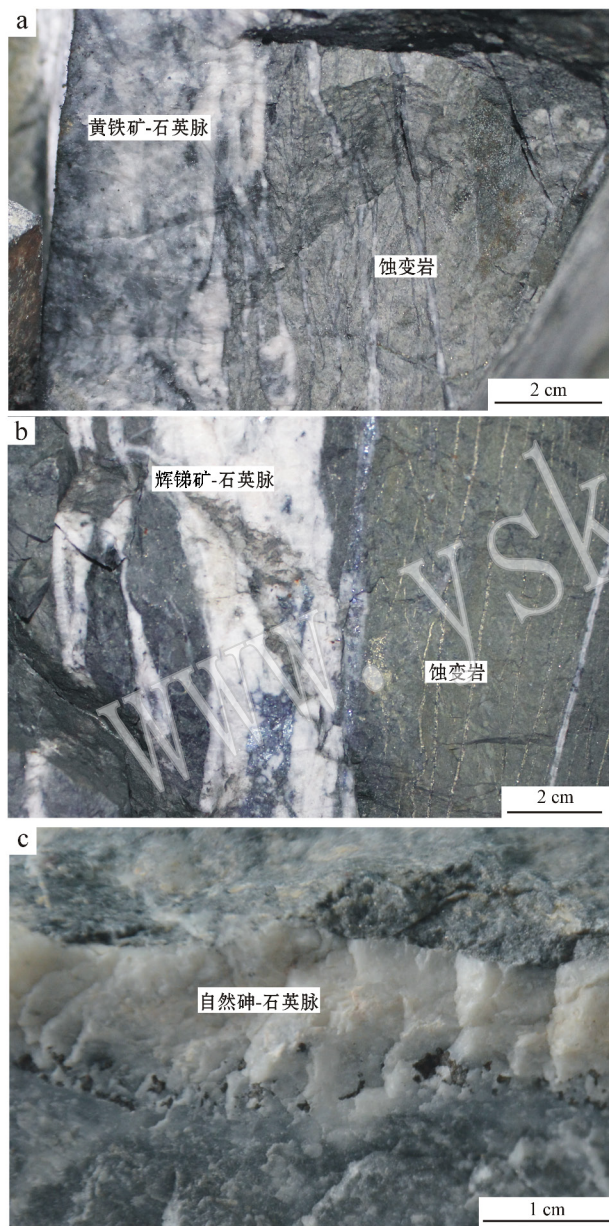


图3 包古图金矿不同类型石英脉型矿石照片

Fig. 3 Photograph showing different quartz vein types of

ores in the Baogutu gold deposit

a—黄铁矿-石英脉型矿体及其两侧的细脉浸染型蚀变岩型矿体;
b—辉锑矿-石英脉型矿体及其两侧富含黄铁矿细脉的蚀变岩型矿体;
c—粗粒自然砷-石英脉型矿体

a—pyrite-quartz veins and altered wall rock; b—stibnite-quartz veins and pyritized wall rock; c—native arsenic-quartz vein

10^{-9} In/mL) 稀释至刻度, 转移到聚乙烯塑料瓶中, 待测。

黄铁矿溶样方法如下: 称取样品 0.2 g 于干净的刚玉坩埚中, 然后将坩埚置于高温炉中, 逐渐升温至 600 °C, 烘烤 1 h 至黄铁矿全部被氧化, 从高温炉中取出坩埚置于干燥皿中, 待样品冷却。称取 25 mg 烘烤后的样品于干净的烧杯中, 加入 8 mL 王水, 轻轻摇晃至样品和王水完全混合, 盖上盖子, 在电热板上 100 °C 加热 1 h, 在 120 °C 电热板上将样品蒸至干, 加入 2 mL HNO₃ 至烧杯中, 观察样品溶解是否充分, 若溶解不充分, 可多次重复以上过程, 直至样品完全溶解。将溶解充分的样品转移至 50 mL 比色管中, 用 5% HNO₃ 稀释至 25 mL, 摇匀。溶样过程在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室进行。黄铁矿和矿脉微量元素分析在北京核工业地质研究所 ICP-MS 仪器上进行, 微量元素的测试精度随着含量变化而变化, 含量高于 100×10^{-6} 时精度范围为 2% ~ 5%, 含量在 20×10^{-6} ~ 100×10^{-6} 时精度为 2% ~ 10%, 当含量小于 20×10^{-6} 时测试精度为 5% ~ 20%。

4 分析结果

4.1 矿脉微量元素

微量元素分析结果表明(表 1), 阶段 II 石英脉中的 Sc、V、Co、Ni、Cu 和 Ga 的含量明显高于阶段 I 石

英脉(约为 3~5 倍)。阶段 I 石英脉的稀土元素和微量元素含量均很低, 其稀土元素总量仅为 0.83×10^{-6} ~ 3.66×10^{-6} 。原始地幔标准化多元素图解中(图 4a), 阶段 I 石英脉强烈富集大离子亲石元素、Ta、Nb 以及 Y 等, 而 Zr、Hf 相对亏损, 球粒陨石标准化的稀土元素配分模式呈右倾型(图 4b), 轻重稀土元素分馏明显 [$(La/Yb)_N = 5.79 \sim 14.87$], 正 Eu 异常 ($\delta Eu = 1.12 \sim 1.85$), 无 Ce 异常 ($\delta Ce = 0.98 \sim 1.01$)。阶段 II 石英脉原始地幔标准化多元素蛛网图解(图 4a) 均表现为大离子亲石元素相对富集, Ta、Nb 亏损而 Zr、Hf 和 Y 弱富集, 其稀土元素总量为 11.03×10^{-6} ~ 30.18×10^{-6} , 轻重稀土元素分馏 [$(La/Yb)_N = 4.47 \sim 7.06$] 较阶段 I 石英脉弱(图 4b), 大多样品表现为弱负 Eu 异常 (δEu 主要集中于 0.70 ~ 0.93 之间), 弱 Ce 负异常 ($\delta Ce = 0.87 \sim 0.91$)。阶段 I 和阶段 II 石英脉均具有与区内中酸性侵入岩相似的稀土元素配分模式(图 4b)。

原始地幔标准化多元素图解中(图 4a), 阶段 I 和阶段 II 石英脉均强烈富集 Pb, 而对石英脉中部分矿物的电子探针分析表明, 其中常含微量 Pb。阶段 II 石英脉中 Cu、Co、Ni 等金属元素的含量明显高于阶段 I(表 1), 通过观察发现阶段 II 石英脉中发育少量黄铜矿和大量黄铁矿、毒砂等含铁硫化物(富 Co、Ni), 部分阶段 II 石英脉(TS164, 表 1)中 Cu 含量高达 90×10^{-6} , 镜下观察发现该样品中发育黄铜矿。阶段 I 和阶段 II 石英脉中均不同程度富集 Cs、Rb、

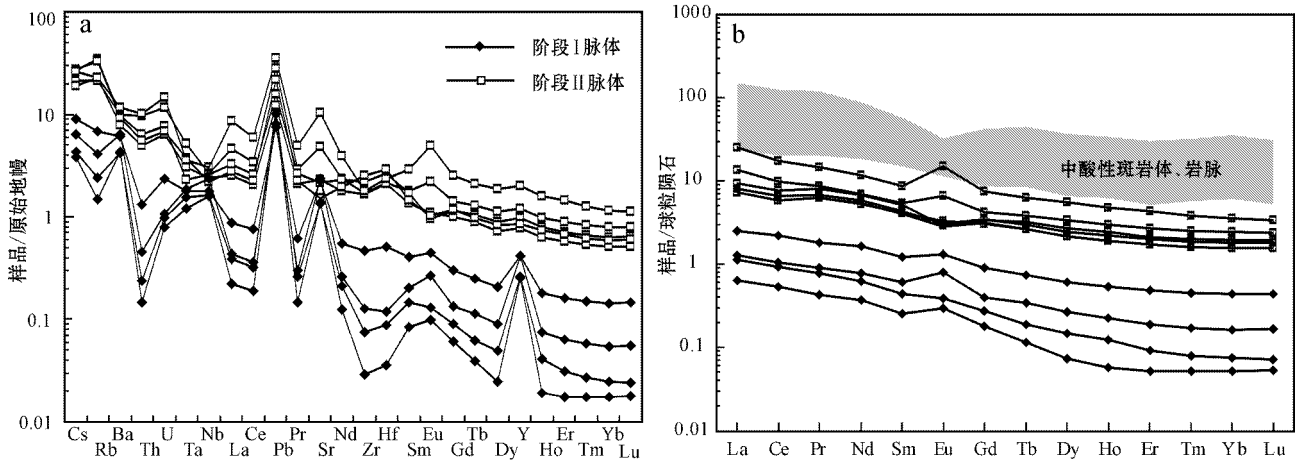


图 4 包古图金矿阶段 I 和阶段 II 石英脉原始地幔标准化的多元素图解(a)和稀土元素配分模式(b)

(中酸性斑岩引自张连昌等, 2006; 脉岩数据引自 Yin 等, 2010; 标准化值据 Sun 和 McDonough, 1989)

Fig. 4 Primitive mantle normalized multi-element patterns (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) for stage I and II quartz veins (data for porphyry after Zhang *et al.*, 2006; for vein rocks after Yin *et al.*, 2010; normalized data after Sun and McDonough, 1989)

表 1 包古图金矿阶段 I 和阶段 II 石英脉中的微量元素含量

 $w_B/10^{-6}$

Table 1 Trace element content of quartz vein samples from the Baogutu gold deposit

	HT114e 阶段 I	HT114f- I 阶段 I	TS173- I 阶段 I	TS166- I 阶段 I	TS164 阶段 II	TS166- II 阶段 II	TS173- II 阶段 II	HT114f- II 阶段 II	TS176 阶段 II
Sc	0.050	0.14	0.23	0.73	2.96	2.21	3.14	3.16	3.65
V	1.08	1.69	2.85	6.20	20.61	20.91	28.63	26.59	24.98
Co	0.69	0.79	0.84	1.24	2.93	3.73	5.18	4.95	4.51
Ni	2.52	2.49	2.58	4.08	3.55	8.07	10.10	11.19	6.31
Cu	4.82	8.46	6.18	7.00	91.42	12.55	9.32	22.37	41.03
Ga	0.75	0.85	1.03	1.67	3.50	3.35	4.85	4.22	3.94
Rb	0.94	1.53	2.57	4.34	13.57	14.53	21.37	20.83	14.46
Sr	28.99	28.30	41.41	47.44	102.8	48.74	38.36	32.08	218.1
Y	1.16	1.19	1.36	1.89	5.43	3.50	3.95	3.87	9.13
Zr	0.33	0.84	1.60	5.20	19.02	18.70	22.87	28.35	19.83
Nb	1.14	1.15	1.13	1.27	1.90	1.72	1.44	1.57	2.19
Cs	0.12	0.14	0.18	0.29	0.68	0.60	0.81	0.88	0.84
Ba	29.77	29.17	36.88	42.22	68.48	55.31	62.29	64.78	81.31
La	0.15	0.27	0.28	0.60	3.16	1.73	2.34	1.90	5.95
Ce	0.33	0.58	0.61	1.35	6.04	3.60	4.96	4.02	10.64
Pr	0.040	0.072	0.080	0.17	0.81	0.57	0.73	0.62	1.36
Nd	0.17	0.29	0.30	0.74	3.18	2.41	3.14	2.65	5.34
Sm	0.038	0.065	0.082	0.18	0.80	0.60	0.76	0.65	1.28
Eu	0.017	0.022	0.045	0.074	0.37	0.18	0.17	0.17	0.84
Gd	0.036	0.054	0.069	0.18	0.85	0.60	0.72	0.69	1.49
Tb	0.004	0.007	0.010	0.027	0.14	0.095	0.11	0.11	0.23
Dy	0.018	0.037	0.059	0.15	0.83	0.53	0.64	0.61	1.37
Ho	0.003	0.007	0.012	0.030	0.16	0.10	0.12	0.12	0.26
Er	0.008	0.015	0.032	0.078	0.43	0.28	0.33	0.32	0.69
Tm	0.001	0.002	0.005	0.011	0.062	0.039	0.047	0.046	0.094
Yb	0.009	0.012	0.028	0.070	0.39	0.25	0.30	0.29	0.57
Lu	0.001	0.002	0.004	0.011	0.059	0.038	0.046	0.044	0.082
Hf	0.011	0.027	0.049	0.16	0.66	0.65	0.77	0.89	0.73
Ta	0.049	0.064	0.048	0.073	0.21	0.12	0.078	0.15	0.15
Tl	0.050	0.050	0.052	0.062	0.11	0.091	0.11	0.11	0.16
Pb	1.87	2.08	1.52	1.37	5.24	2.27	2.09	4.01	6.49
Bi	0.026	0.031	0.025	0.027	0.12	0.051	0.070	0.087	0.12
Th	0.013	0.020	0.040	0.11	0.81	0.42	0.50	0.47	0.85
U	0.017	0.020	0.023	0.050	0.24	0.13	0.16	0.14	0.31
∑REE	0.83	1.42	1.62	3.66	17.27	11.03	14.42	12.24	30.18
δEu*	1.38	1.12	1.85	1.26	1.37	0.93	0.70	0.78	1.85
δCe*	1.01	0.99	0.98	1.01	0.89	0.87	0.91	0.90	0.87
(La/Yb) _N	12.21	14.87	6.79	5.79	5.48	4.69	4.82	4.47	7.06

Ba、Sr 等大离子亲石元素(LILE)。LILE 的活动性较强,易溶于流体,成矿流体与围岩反应会导致流体中 LILE 浓度发生变化,阶段 II 石英脉中 LILE 的富集程度明显低于阶段 I,可能是水岩反应过程中大离子亲石元素进入围岩所致。阶段 I 和阶段 II 石英脉在 Ta、Nb、Zr、Hf 和 Y 的相对富集和亏损程度上有很大区别(图 4a)。Ta、Nb、Zr、Hf 和 Y 等高场强元素(HFSE)的活动性相对较弱,蚀变作用不会改变流体中的 HFSE 含量(Chambefort *et al.*, 2007)。包古图金矿阶段 I 石英脉中发育的金红石主要对

HFSE 分异起作用, HFSE 在金红石中的相容性受流体物化条件的影响(Klemme *et al.*, 2005),成矿流体从阶段 I 演化到阶段 II 过程中 Ta、Nb 由强富集演化到弱亏损, Zr、Hf 由强亏损到弱富集, Y 由强富集到弱富集,说明阶段 I 时 Ta、Nb 和 Y 在金红石中表现为显著的相容性,而 Zr、Hf 由于不进入金红石中而表现为强不相容性,阶段 I 大量金红石沉淀必然导致阶段 II 石英脉中 Ta、Nb 和 Y 相对浓度降低,而 Zr、Hf 相对浓度升高。

4.2 黄铁矿微量元素

元素变异图解显示, 包古图金矿矿化围岩中的黄铁矿和磁黄铁矿微量元素地球化学特征非常相似(图 5~图 7), 因此, 后面的描述中磁黄铁矿未进行单独说明。矿化围岩中与含矿石英脉中的黄铁矿有一定区别, 但其中 Au 和 Ag 含量区别不大, Au、Ag 含量之间无明显相关性(图 5a), 说明其中 Ag、Au 含量并非仅受金矿物包体控制, 可能有一定量的 Ag、Au 主要以离子形式赋存于矿物晶格缺陷中, 前人已通过实验研究发现 Au^+ 通过如下反应进入黄铁矿:

$$Fe(S, As)_2 + 2 Au(HS) = Fe(S, As)_2 \cdot Au_2S + H_2S,$$

$$Fe^{2+} + 2 HAsS_2 + 2 Au(HS) + 2 H_2 = Fe(S, As)_2 \cdot Au_2S + 3 H_2S + 2 H^+ \text{ (Simon } et al., 1999 \text{)}.$$

矿化围岩中黄铁矿的 Sb 和 As 含量明显高于含矿石英脉中的黄铁矿, 但是 Sb-Au 和 As-Au 之间并无明显相关性(图 5b、5c), 同时矿化围岩中黄铁矿的稀土以及部分微量元素的含量也远远高于含矿石英脉中的黄铁矿(图 5d), 这种元素含量的区别反映了成矿流体成分的变化, 早期流体相对富 As、Sb 以及稀土元素。

矿化围岩和含矿石英脉中黄铁矿均显示轻稀土

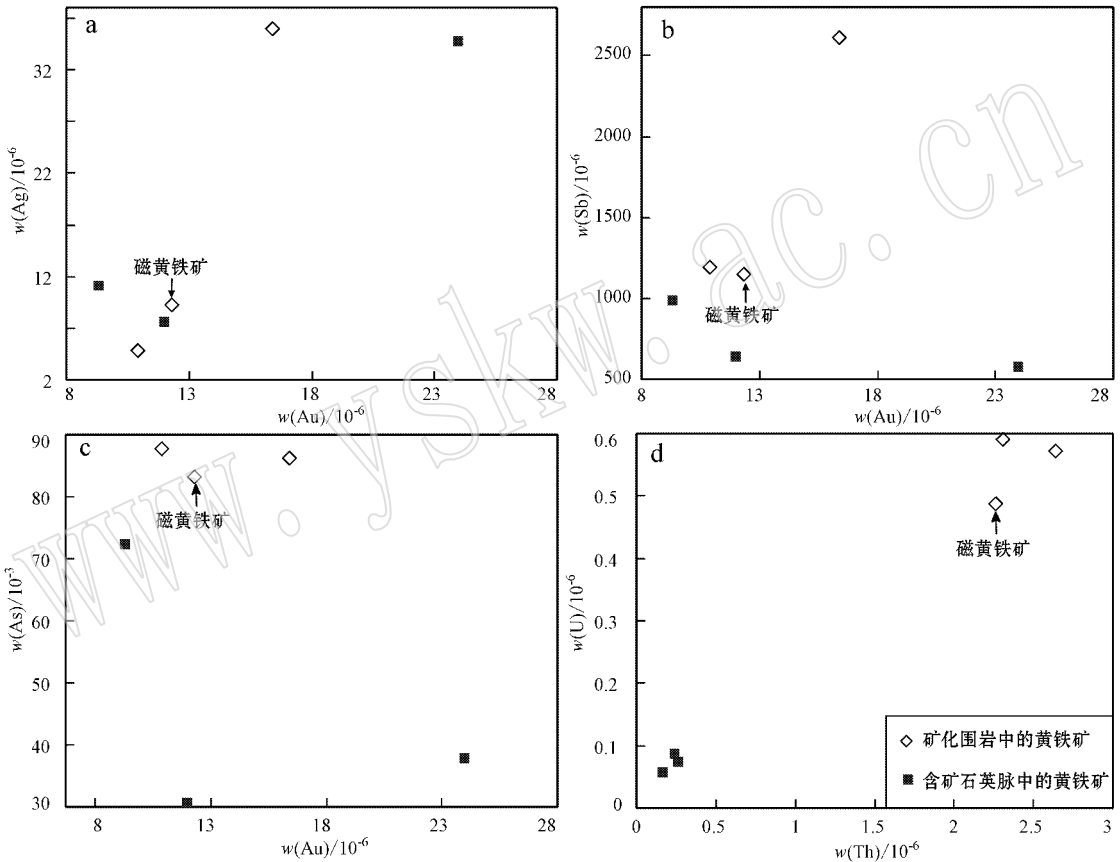


图 5 包古图金矿矿化围岩和含矿石英脉中黄铁矿的微量元素变异图解

Fig. 5 Variation diagram of trace elements content in pyrite from the Baogutu gold deposit

元素富集型稀土元素配分模式, 但有一定差异(图 6)。石英脉中黄铁矿的稀土元素配分模式为右倾型(图 6), 稀土元素总量为 $18.38 \times 10^{-6} \sim 42.54 \times 10^{-6}$ (表 2), 轻重稀土元素分异明显[(La/Yb) $_N = 23.95 \sim 36.09$]具有明显的 Eu 负异常($\delta Eu = 0.50 \sim 0.64$)和弱 Ce 异常($\delta Ce = 0.77 \sim 0.83$), 轻稀土元素弱分馏(La/Sm) $_N = 2.56 \sim 4.05$], 而重稀土元素分馏明显[(Gd/Yb) $_N = 4.64 \sim 5.70$], 矿化围岩中

黄铁矿的稀土元素总量明显高于石英脉中的黄铁矿($\Sigma REE = 42.54 \times 10^{-6} \sim 56.12 \times 10^{-6}$, 表 2), 轻重稀土元素分异明显[(La/Yb) $_N = 12.50 \sim 17.39$], 但较石英脉中的黄铁矿弱, Eu 负异常明显($\delta Eu = 0.51 \sim 0.56$), 并具有弱 Ce 负异常($\delta Ce = 0.90 \sim 0.97$), 轻稀土元素分馏明显[(La/Sm) $_N = 3.42 \sim 4.31$], 但重稀土元素分馏较石英脉中的黄铁矿弱(Gd/Yb) $_N = 2.02 \sim 2.81$]

表 2 包古图金矿矿化围岩和含矿石英脉中黄铁矿微量元素组成

 $w_B/10^{-6}$

Table 2 Representative trace element content of pyrite from altered host rock and quartz vein in the Baogutu gold deposit

	蚀变围岩中的硫化物			石英脉中的硫化物		
	07HT114a 黄铁矿	07TS166 黄铁矿	07TS176 磁黄铁矿	07TS166 黄铁矿	07HT114c 黄铁矿	07HT115 黄铁矿
Li	9.61	6.87	1.93	1.48	2.02	1.36
Be	0.19	0.17	0.15	0.078	0.055	0.089
Sc	3.45	3.62	3.14	0.79	1.56	1.30
V	16.90	17.90	12.90	6.34	10.00	5.90
Cr	6.21	9.46	8.41	4.57	12.40	10.60
Co	179.0	244.0	102.0	188.0	131.0	176.0
Ni	112.0	78.40	54.70	17.90	56.80	18.70
Cu	3123	195.0	266.0	223.0	476.0	352.0
Zn	544.0	198.0	206.0	380.0	739.0	417.0
Se	0.088	0.055	0.13	0.075	0.055	0.082
Rb	12.00	8.47	9.05	4.54	6.59	4.84
Sr	26.00	20.30	30.60	22.10	19.20	35.80
Y	4.44	5.94	4.53	0.97	1.46	1.68
Zr	40.00	59.90	46.60	6.15	9.77	6.19
Nb	0.16	0.20	0.20	0.13	0.12	0.099
Mo	12.20	1.99	1.25	8.31	2.54	24.70
Cd	5.36	2.46	3.40	2.86	3.82	3.02
Sn	120.0	78.40	72.20	77.60	63.10	69.30
Sb	2614	1191	1152	983.0	572.0	635.0
Cs	0.90	0.59	0.72	0.28	0.35	0.38
Ba	116.0	45.20	73.00	17.30	53.80	26.20
La	9.93	12.00	9.09	3.64	5.30	5.08
Ce	18.30	23.80	17.10	6.95	10.30	9.90
Pr	2.26	2.67	2.18	1.17	1.93	1.61
Nd	10.30	10.60	8.74	4.69	6.81	6.75
Sm	1.74	1.75	1.67	0.77	0.82	1.25
Eu	0.29	0.31	0.24	0.11	0.13	0.22
Gd	1.34	1.62	1.11	0.48	0.74	0.82
Tb	0.17	0.25	0.17	0.057	0.084	0.11
Dy	1.02	1.28	0.89	0.28	0.47	0.54
Ho	0.16	0.22	0.15	0.039	0.061	0.065
Er	0.55	0.78	0.61	0.10	0.15	0.18
Tm	0.056	0.11	0.072	0.014	0.016	0.025
Yb	0.39	0.65	0.44	0.068	0.11	0.14
Lu	0.08	0.094	0.072	0.014	0.011	0.018
Hf	0.87	2.06	0.95	0.16	0.30	0.19
Ta	0.006	0.012	0.006	0.006	0.018	0.012
W	6.18	72.30	5.15	0.99	1.35	1.71
Pb	575.0	263.0	291.0	170.0	308.0	219.0
Bi	4.91	2.87	2.65	1.16	2.23	1.08
Th	2.31	2.64	2.26	0.17	0.26	0.24
U	0.59	0.57	0.49	0.056	0.074	0.086
Ti	315.0	433.0	355.0	83.10	88.90	64.10
Mn	140.0	59.60	91.40	71.20	81.60	94.60
Ge	6.99	6.24	6.13	6.76	7.12	7.78
Te	1.35	0.78	0.86	0.76	0.79	0.84
Ag	36.0	4.84	9.27	11.10	34.70	7.52
Au	16.40	10.90	12.30	9.34	24.00	12.00
∑REE	46.58	56.12	42.54	18.38	26.93	42.54
δEu*	0.56	0.55	0.51	0.50	0.49	0.64
δCe*	0.90	0.97	0.90	0.81	0.77	0.83
(La/Yb)*	17.39	12.50	13.80	36.09	32.19	23.95

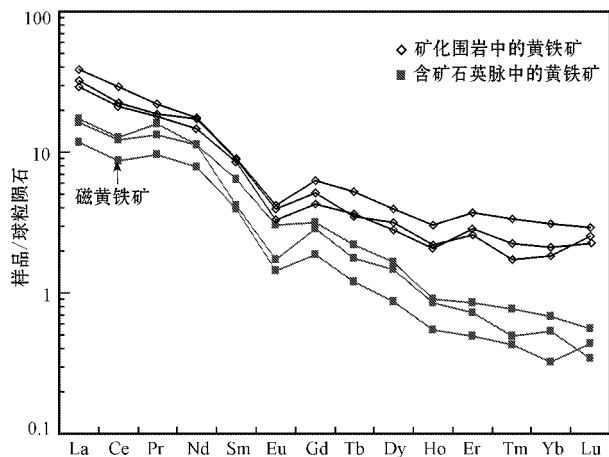


图 6 包古图金矿矿化围岩和含矿石英脉中黄铁矿球粒陨石标准化的稀土元素配分模式(标准化数据依据 Sun 和 McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of pyrite from the Baogutu gold deposit (data of chondrite after Sun and McDonough, 1989)

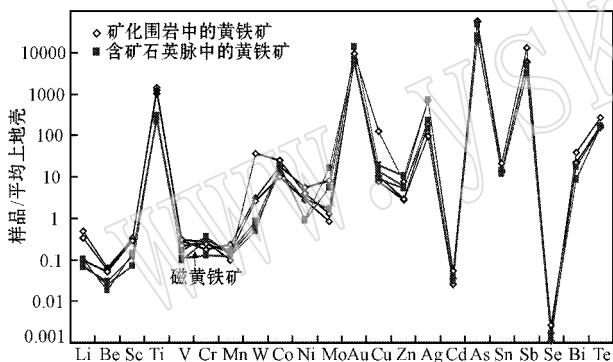


图 7 平均上地壳标准化的黄铁矿微量元素图解(平均上地壳数据据 Taylor 和 Mchleemann, 1995; Wedepohl, 1995)

Fig. 7 Average upper continental crust normalized trace elements patterns of pyrite from the Baogutu gold deposit (data of average upper continental crust after Taylor and Mchleemann, 1995; Wedepohl, 1995)

与平均上地壳相比,包古图金矿矿化围岩和含矿石英脉中黄铁矿强烈富集 Ti、Au、Ag、As、Sb 和 Te (图 7),含量为上地壳平均含量的 100 倍以上,其中 Ti 可能主要以金红石包体的形式存在,Au 和 Ag 一部分存在于黄铁矿中的金矿物包体中,一部分以离子形式存在于矿物晶格缺陷中,而 As、Sb 和 Te 可能主要以类质同像替代 S 的形式存在。

5 讨论

5.1 成矿流体物理化学特征

成矿热液流体在演化过程中与围岩反应不影响流体本身的稀土元素特征 (German *et al.*, 1999; Gu *et al.*, 2007) 因此,相对于微量元素,热液矿物的稀土元素更能反映原始流体的特征 (e. g., Wood and Williams-Jones, 1994; Kontak and Jackson, 1999)。包古图金矿阶段 I 和阶段 II 石英脉的稀土元素特征表明,成矿流体从阶段 I 到阶段 II 演化的过程中,其中稀土元素含量逐渐升高,轻重稀土元素分异程度减弱,早期(阶段 I)低稀土元素含量矿物(如石英、毒砂和黄铁矿等)的沉淀可能是导致阶段 II 成矿流体中稀土元素含量升高的主要原因。

稀土元素通常呈 REE^{3+} 价态,且离子半径较常见硫化物中阳离子 (Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 等) 大的多,因此热液硫化物中的稀土元素可能主要赋存于流体包裹体中,其稀土元素特征可以代表热液体系的稀土元素组成。研究表明,热液中 F 和 Cl 的浓度可以影响热液迁移稀土元素的能力 (e. g., Flynn and Burnham, 1978; Haas *et al.*, 1995), 富 Cl 和 F 的热液通常富集轻稀土元素,但富 Cl 热液体系的 Hf/Sm 、 Nb/La 和 Th/La 小于 1, 而富 F 热液的这些元素比值常大于 1 (Oreskes and Einaudi, 1990; 毕献武等, 2004)。包古图金矿矿化围岩和含矿石英脉中的黄铁矿均富集 LREE, 且大部分样品 Hf/Sm 、 Nb/La 和 Th/La 远小于 1 (表 2), 说明成矿流体是富 Cl 流体。

阶段 I 石英脉以具有正 Eu 异常为主要特征,而阶段 II 石英脉具有中等负到弱正 Eu 异常,表明从阶段 I 到阶段 II,成矿流体向较还原的状态演化。黄铁矿的 Eu 和 Ce 异常同样反映了成矿热液体系的氧化还原条件,如在相对较还原的体系中,Eu 主要呈 Eu^{2+} 价态,因此容易与其他稀土元素分馏,表现为明显的负 Eu 异常,而在相对较氧化的体系中,Ce 主要呈 Ce^{4+} 价态而易于与其他稀土元素发生分离,呈现负 Ce 异常。包古图金矿矿化围岩和含矿石英脉中黄铁矿主要形成于阶段 II,均具有明显负 Eu 异常,而 Ce 负异常较弱说明成矿体系主要呈还原性,与石英脉 Ce、Eu 所指示的氧化还原状态一致。

黄铁矿中的 Co 和 Ni 主要以类质同像替代 Fe 的形式进入矿物,但是相对 Ni, Co 的性质与 Fe 更接

近,因此更容易进入硫化物晶格,替代其中的Fe,因此,黄铁矿中Co/Ni比值对于矿床成矿条件具有一定得指示意义,Co/Ni比值越高,成矿温度越高(盛继福等,1999;毛光周等,2006)。包古图金矿硫化物的Co/Ni比值为1.60~10.50,说明包古图金矿成矿早期温度为中温,与我们根据毒砂成分温度计确定的成矿温度相吻合(230~365°C, An and Zhu, 2010)。

5.2 成矿物质来源

包古图地区广泛发育中酸性斑岩岩株和岩脉,包古图金矿含石英脉主要分布于岩株附近或岩脉密集分布区,矿脉常赋存于岩脉中或岩脉周围的地层中,表明包古图金矿化与区内中酸性侵入岩在空间上的相关性。区内中酸性斑岩岩株的侵位时代为310~320 Ma(唐功建等,2009;Liu *et al.*, 2009;魏少妮等,2011),中酸性岩脉的年龄为314 Ma(Tang *et al.*, 2010),321 Ma(Yin *et al.*, 2010)。包古图金矿位于包古图Ⅲ、Ⅳ号岩体外围的中酸性岩脉密集分布区,Ⅲ号斑岩体的侵位时代为313 Ma(魏少妮等,2011),前人对包古图金矿的石英进行了流体包裹体Rb-Sr同位素分析,获得Rb-Sr等时线年龄为 311 ± 9.8 Ma,代表金矿化的时代(李华芹等,2000),略晚于Ⅲ号斑岩体的侵位时代,说明它们在时间上的相关性。

包古图金矿阶段Ⅰ和阶段Ⅱ石英脉稀土配分模式与中酸性侵入岩非常相似(图4a),均为轻稀土富集的右倾型稀土元素配分模式,弱负Eu异常至弱正Eu异常,具有极弱的Ce负异常或无Ce异常。因此,包古图金矿成矿流体可能继承了区内广泛发育的中酸性侵入岩的稀土元素配分模式,显示它们之间的亲缘关系。根据阶段Ⅰ-Ⅱ形成的矿物共生组合(黄铁矿-毒砂)可以推断包古图金矿成矿早期成矿流体的氧逸度范围,温度为 $\sim 300^\circ\text{C}$ (An and Zhu, 2010),表明此时 $\log f_{\text{O}_2} \leq -25$ (Simon *et al.*, 1999),而包古图地区中酸性斑岩的 $\log f_{\text{O}_2}$ 为 $-25 \sim -30$ (魏少妮等,2010),与成矿流体的氧逸度($\log f_{\text{O}_2} \leq -25$)相似。

Y和Ho具有相似的地球化学特征(如具有相同的价态和离子半径),因此,在很多地质过程中Y和Ho通常都不会发生分异,这也是为什么目前地球上大部分岩石都保持着和球粒陨石相似的Y/Ho比值(~ 28 , Bau and Dulski, 1995)。包古图金矿含石英脉和矿化围岩中黄铁矿的Y/Ho比值为24~30,大部分集中在24~28之间,略低于球粒陨石的Y/Ho

比值。区内中酸性侵入岩的Y/Ho比值为25~30,大部分集中于25~28之间(魏少妮等,2010;张连昌等,2006;Shen *et al.*, 2009;Tang *et al.*, 2010;Yin *et al.*, 2010)。包古图金矿黄铁矿与区内中酸性侵入岩相似的Y/Ho比值,指示包古图金矿成矿作用与区内中酸性岩浆活动之间具有密切的成因联系。

6 结论

(1)包古图金矿阶段Ⅰ和阶段Ⅱ石英脉富集大离子亲石元素,显示轻稀土富集型稀土配分模式,但阶段Ⅱ石英脉稀土元素含量明显高于阶段Ⅰ。

(2)蚀变围岩和石英脉中的硫化物富含Au、Ag、As、Sb和Te,主要以矿物显微包体或类质同像的形式存在。硫化物较高的Co/Ni比值指示早期成矿流体为中高温。

(3)石英脉和硫化物的Eu含量和Eu异常,指示从阶段Ⅰ到阶段Ⅱ成矿流体的还原程度增强。

(4)包古图金矿石英脉和硫化物具有与区内中酸性斑岩体、岩脉相似的地球化学特征,它们在形成时间和空间上也具有相关性,显示包古图金矿成矿作用与区内晚石炭世中酸性岩浆活动之间具有一定的成因联系。

致谢:感谢匿名审稿专家提出的建设性修改意见。北京大学古丽冰老师协助完成了微量元素的样品前处理,中国科学院地质与地球物理研究所靳新娣老师、核工业地质研究所刘牧老师分析了样品的微量元素含量,薛云兴和谭娟娟参加了野外工作,包古图铜矿张锐和张云孝工程师、包古图金矿马学勇主任、邵鹏工程师为野外地质工作提供了诸多便利,特此表示衷心的感谢。

References

- An Fang. 2011. Study of Hydrothermal Gold Mineralization in Hatu-Baogutu Region in Western Junggar, Xinjiang (NW China) [D]. P. hD thesis of Peking University (in Chinese with English abstract).
- An Fang and Zhu Yongfeng. 2007. Studies on geology and geochemistry of alteration-type ore in Hatu gold deposit (western Junggar), Xinjiang, NW China [J]. Mineral Deposits, 26(6): 621~633 (in Chinese with English abstract).

- An Fang and Zhu Yongfeng. 2009. SHRIMP U-Pb zircon ages of tuff in Baogutu Formation and their geological significances [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25 : 1 437 ~ 1 445 (in Chinese with English abstract).
- An F and Zhu Y F. 2009. Significance of native arsenic in the Baogutu gold deposit , western Junggar , Xinjiang , NW China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54 : 1 744 ~ 1 749.
- An F and Zhu Y F. 2010. Native antimony in the Baogutu gold deposit (west Junggar , NW China) : its occurrence and origin [J]. *Ore Geology Review*, 37 : 214 ~ 223.
- Bai Wenji , Gan Yuanming and Zhou Meifu. 1988. Geological characteristics and genesis of the gold deposits in Tuoli Region [J]. *Geological Review*, 30 : 80 ~ 88 (in Chinese with English abstract).
- Bau M and Dulski P. 1995. Comparative study of yttrium and rare earth element behaviors in fluorite-rich hydrothermal fluids [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119 : 213 ~ 223.
- Bi Xianwu , Hu Ruizhong , Peng Jiantang , *et al.* 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 ~ 4 (in Chinese with English abstract).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1993. *Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region* [M]. Beijing : Geological Publishing House , 1 ~ 841 (in Chinese).
- Chambefort I , Moritz R and von Quadt A. 2007. Petrology , geochemistry and U-Pb geochronology of magmatic rocks from the high-sulfidation epithermal Au-Cu Chelopech deposit , Srednogie zone , Bulgaria [J]. *Mineralium Deposita*, 42 : 665 ~ 690.
- Cheng Yong and Zhang Rui. 2006. Mineralization regularity of Cu-Au deposits in the Baogutu area , Western Junggar , Xinjiang [J]. *Geological Exploration*, 7(4) : 11 ~ 15 (in Chinese with English abstract).
- Flynn T R and Burnham C W. 1978. An experimental determination of rare earth partition coefficients between chloride containing vapor phase and silicate melt [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42 : 685 ~ 701.
- German C R , Hergt J , Palmer M R , *et al.* 1999. Geochemistry of a hydrothermal sediment core from the OBS vent-field , 21°N East Pacific Rise [J]. *Chemical Geology*, 155 : 65 ~ 75.
- Gu X X , Schulz O , Vavtar F , *et al.* 2007. Rare earth element geochemistry of Woxi W-Sb-Au deposit , Hunan province , South China [J]. *Ore Geology Review*, 31 : 319 ~ 336.
- Guo Lishuang , Liu Yulin , Wang Zhenghua , *et al.* 2010. The zircon U-Pb LA-ICP-MS geochronology of volcanic rocks in Baogutu areas , western Junggar [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26 : 471 ~ 477 (in Chinese with English abstract).
- 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 : 4 329 ~ 4 350.
- He Guoqi and Zhu Yongfeng. 2006. Comparative study of the geology and mineral resources in Xinjiang , China , and its adjacent regions [J]. *Geology in China*, 33 : 451 ~ 460 (in Chinese with English abstract).
- Klemme S , Prowatke S , Hametner K , *et al.* 2005. Partitioning of trace elements between rutile and silicate melts : Implications for subduction zones [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(9) : 2 361 ~ 2 371.
- Kontak D J and Jackson S J. 1999. Documentation of variable trace- and rare-earth-element abundances in carbonates from auriferous quartz veins in Meguma lode-gold deposits , Nova Scotia [J]. *The Canadian Mineralogist*, 37 : 469 ~ 488.
- Li Huaqin , Chen Fuwen and Cai Hong. 2000. Study on Rb-Sr isotopic ages of gold deposits in West Junggar Area , Xinjiang [J]. *Acta Geologica Sinica*, 74(2) : 181 ~ 192 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y L , Guo L S , Song H X , *et al.* 2009. Geochronology of Baogutu porphyry copper deposit in Western Junggar area , Xinjiang of China [J]. *Science China Ser D—Earth Science*, 52(10) : 1 543 ~ 1 549.
- Mao Guangzhou , Hua Renmin , Gao Jianfeng , *et al.* 2006. REE composition and trace element features of gold-bearing pyrite in Jinshan gold deposit , Jiangxi Province [J]. *Mineral Deposits*, 412 ~ 426 (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]. *Economic Geology*, 85 : 1 ~ 28.
- Qiu Tian and Zhu Yongfeng. 2012. Identification of a ductile shear zone in quartz-magnetite and its controlling on gold deposits in the Sartuohay region , western Junggar , Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28 : 2 250 ~ 2 256 (in Chinese with English abstract).
- Shen P , Shen Y C , Liu T B , *et al.* 2009. Geochemical signature of porphyries in the Baogutu porphyry copper belt , western Junggar , NW China [J]. *Gondwana Research*, 16 : 227 ~ 242.
- Shen P , Shen Y C , Pan H D , *et al.* 2012. Geochronology and isotope geochemistry of the Baogutu porphyry copper deposit in the West Junggar region , Xinjiang , China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49 : 99 ~ 115.
- Shen Yuanchao and Jin Chengwu. 1993. *Magmatism and Gold Mineralization in Western Junggar* [M]. Beijing : Science Press , 113 ~ 117 (in Chinese).
- Sheng Jifu , Li Yan and Fan Shuyi. 1999. A study of minor elements in minerals from polymetallic deposits in the central part of the Da

- Hinggan Mountain[J]. *Mineral Deposits*, 18: 153~160 (in Chinese with English abstract).
- Simon G, Kesler S E and Chryssoulis S. 1999. Geochemistry and textures of gold-bearing arsenian pyrite, Twin Creeks, Nevada: Implications for deposition of gold in Carlin-Type Deposits[J]. *Economic Geology*, 94: 405~422.
- Song Huixia, Liu Yulin, Qu Wenjun, *et al.* 2007. Geological characters of Baogutu porphyry copper deposit in Xinjiang, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1981~1988 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic study of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society of London, Special Publication*, 42: 313~345.
- Tang Gongjian, Wang Qiang, Zhao Zhenhua, *et al.* 2009. Geochronology and geochemistry of the ore-bearing porphyries in the Baogutu Area (Western Junggar): Petrogenesis and their implications for tectonics and Cu-Au mineralization[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(1): 56~74 (in Chinese with English abstract).
- Tang G J, Wang Q, Wyman D A, *et al.* 2010. Ridge subduction and crustal growth in the Central Asian Orogenic Belt: Evidence from late Carboniferous adakites and high-Mg diorites in the western Junggar region, northern Xinjiang (west China) [J]. *Chemical Geology*, 277: 281~300.
- Taylor S R and McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Reviews of Geophysics*, 33: 241~265.
- Wang Rui and Zhu Yongfeng. 2007. Geology of the Baobei gold deposit and zircon SHRIMP age of its host-rocks, Western Junggar (Xinjiang, NW China) [J]. *Geological Journal of China University*, 13(3): 590~602 (in Chinese with English abstract).
- Wedepohl K H. 1995. The composition of the continental crust [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59: 1217~1232.
- Wei Shaoni, Cheng Junfeng, Yu Dabing, *et al.* 2011. Petrology and SHRIMP zircon ages of intrusive body III in Baogutu area, Xinjiang [J]. *Earth Science Frontiers*, 18: 212~222 (in Chinese with English abstract).
- Wei Shaoni and Zhu Yongfeng. 2010. Emplacement of the intermediate and acid magmatic rocks in Xinjiang: Constraints from the P-T-fO₂ and geochemistry[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84: 1017~1029 (in Chinese with English abstract).
- Wood S A and Williams-Jones A E. 1994. The aqueous geochemistry of the rare-earth elements and yttrium: IV. Monazite solubility and REE mobility in exhalative massive sulfide-depositing environments [J]. *Chemical Geology*, 115: 47~60.
- Yin J Y, Yuan C, Sun M, *et al.* 2010. Late Carboniferous high-Mg dioritic dikes in Western Junggar, NW China: Geochemical features, petrogenesis and tectonic implications[J]. *Gondwana Research*, 17: 145~152.
- Zhang Lianchang, Wan Bo, Jiao Xuejun, *et al.* 2006. Characteristics and geological significance of adakitic rocks in copper-bearing porphyry in Baogutu, Western Junggar [J]. *Geology in China*, 33: 626~631 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Rui, Zhang Yunxiao, Tong Gengsheng, *et al.* 2006. Major breakthrough in copper exploration in the Baogutu porphyry copper deposit, Western Junggar, Xinjiang, and its significance [J]. *Geology in China*, 33(6): 1354~1360 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Bo, An Fang and Zhu Yongfeng. 2009. Native bismuth found in Baogutu gold deposit and its geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1426~1436 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongfeng, He Guoqi and An Fang. 2007a. Geological evolution and metallogeny in the core part of the Central Asian metallogenic domain [J]. *Geological Bulletin of China*, 26: 1167~1177 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongfeng and Xu Xin. 2007b. Exsolution texture of two-pyroxenes in Iherzolite from Baojiantan ophiolitic mélange, western Junggar, China [J]. *23(5)*: 1075~1086 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongfeng, Xu Xin, Wei Shaoni, *et al.* 2007c. Geochemistry and tectonic significance of IOB-type pillow basalts in western Mts. of Karamay city (western Junggar), NW China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(7): 1739~1748 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Y F, Zhou J and Zeng Y S. 2007. The Tianger (Bingdaban) shear zone hosted gold deposit, West Tianshan, NW China: petrographic and geochemical characteristics [J]. *Ore Geology Reviews*, 32: 337~365.

附中文参考文献

- 安 芳. 2011. 新疆西准噶尔哈图-包古图地区金矿成矿作用研究 [D]. 北京大学博士学位论文.
- 安 芳, 朱永峰. 2007. 新疆哈图金矿蚀变岩型矿体地质和地球化学研究 [J]. *矿床地质*, 26(6): 621~633.
- 安 芳, 朱永峰. 2009. 新疆西准噶尔包古图组凝灰岩锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 25: 1437~1445.
- 白文吉, 甘源明, 周美付. 1988. 新疆托里地区金矿床地质特征及成因探讨 [J]. *地质论评*, 30: 80~88.
- 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 等. 2004. 黄铁矿微量元素地球化学特征及其成矿流体性质的指示 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 23: 1~

4.

- 成勇,张锐. 2006. 新疆西准包古图地区铜金矿成矿规律浅析[J]. 地质与勘探, 7(4): 11~15.
- 郭丽爽,刘玉琳,王政华,等. 2010. 西准噶尔包古图地区地层火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学研究[J]. 岩石学报, 26: 471~477.
- 何国琦,朱永峰. 2006. 中国新疆及其邻区地质矿产对比研究[J]. 中国地质, 33: 451~460.
- 李华芹,陈富文,蔡红. 2000. 新疆西准噶尔地区不同类型金矿床 Rb-Sr 同位素年代研究[J]. 地质学报, 74(2): 181~192.
- 毛光周,华仁民,高剑峰,等. 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: 412~426.
- 邱添,朱永峰. 2012. 新疆萨尔托海石英菱镁岩中发育的韧性剪切带及其对金矿的控制[J]. 岩石学报, 28: 2250~2256.
- 沈远超,金成伟. 1993. 西准噶尔地区岩浆活动与金矿化作用[M]. 北京: 科学出版社, 113~171.
- 盛继福,李岩,范书义. 1999. 大兴安岭中段铜多金属矿床矿物微量元素研究[J]. 矿床地质, 18: 153~160.
- 宋会侠,刘玉琳,屈文俊,等. 2007. 新疆包古图斑岩铜矿床地质特征[J]. 岩石学报, 23(8): 1981~1988.
- 唐功建,王强,赵振华,等. 2009. 西准噶尔包古图成矿斑岩年代学与地球化学: 岩石成因与构造、铜金成矿意义[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 34(1): 56~74.
- 王瑞,朱永峰. 2007. 西准噶尔宝贝金矿地质与容矿火山岩的锆石 SHRIMP 年龄[J]. 高校地质学报, 13(3): 590~602.
- 魏少妮,程军峰,喻达兵,等. 2011. 新疆包古图 III 号岩体岩石学和锆石 SHRIMP 年代学研究[J]. 地学前缘, 18: 212~222.
- 魏少妮,朱永峰. 2010. 新疆包古图中酸性岩浆侵位的 P-T-fO₂ 条件及岩体地球化学研究[J]. 地质学报, 84: 1017~1029.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1~841.
- 张连昌,万博,焦学军,等. 2006. 西准噶尔包古图含矿斑岩的埃达克岩特征及其地质意义[J]. 中国地质, 33: 626~631.
- 张锐,张云孝,佟更生,等. 2006. 新疆西准包古图地区斑岩铜矿找矿的重大突破及意义[J]. 中国地质, 33(6): 1354~1360.
- 郑波,安芳,朱永峰. 2009. 新疆包古图金矿中发现的自然铋及其找矿勘探意义[J]. 岩石学报, 25(6): 1426~1436.
- 朱永峰,何国琦,安芳. 2007a. 中亚成矿域核心地区地质演化与成矿规律[J]. 地质通报, 26: 1167~1177.
- 朱永峰,徐新. 2007b. 西准噶尔白碱滩二辉橄榄岩中两种辉石的出溶结构及其地质意义[J]. 岩石学报, 23(5): 1075~1086.
- 朱永峰,徐新,魏少妮,等. 2007c. 西准噶尔克拉玛依 OIB 型枕状玄武岩地球化学及其地质意义研究[J]. 岩石学报, 23(7): 1739~1748.

www.yskw.com.cn