

文章编号: 0258_7106 (2014) 04_0761_15

新疆包古图地区金矿床地质特征及成矿模型研究^{*}

安 芳¹ 朱永峰² 魏少妮³ 郑 波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; 3 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054)

摘 要 包古图地区是新疆西准噶尔重要的金矿集区之一。根据矿床地质和矿化类型, 可将区内金矿化分为 2 类: 以阔个沙也金矿床(包古图金矿 I ~ IV 号点)为代表的石英脉型金矿化, 产于部分中酸性斑岩体周边地层中, 赋矿围岩为下石炭统包古图组凝灰质砂岩、凝灰岩等。围岩蚀变以硅化、绢云母化、黄铁矿化、毒砂化和碳酸盐化为主, 矿体为黄铁矿_石英脉型、辉钨矿_石英脉型和自然砷_石英脉型或石英网脉型/蚀变岩型, 受 NE 向断裂控制, 与矿区密集分布的中酸性脉岩伴生, 主要矿物组合为黄铁矿_毒砂_自然砷_辉钨矿_自然金_银金矿。矿化元素组合为 Au、As、Sb, 是中酸性斑岩系统热液演化晚期的产物; 另一类金矿化产于中酸性斑岩与下石炭统火山_沉积地层的接触带中, 以包古图金矿 XI 号点为代表, 矿体为石英_硫化物脉型, 矿物组合为黄铁矿_毒砂_自然砷_辉钨矿_自然金_黄铜矿, 是斑岩系统热液演化较早期的产物。结合已有研究资料, 可将区内金矿床的成矿模型总结如下: 斑岩岩浆系统演化晚期分异出含 Au、Cu、Bi、As、Sb 的岩浆热液, 在岩体内部形成斑岩型铜矿化, 岩体与围岩接触带形成高温石英_硫化物脉型 Au、As、Bi 矿化, 部分含矿热液随中酸性岩脉向外围迁移, 并逐渐与大气水混合, 最终在 NE 向断裂中形成石英脉型 Au、As、Sb 矿化。基于此成矿模型, 认为包古图地区金矿找矿工作的重点应该放在中酸性斑岩体与围岩接触带和斑岩体外围 NE 向断裂(中酸性脉岩)密集分布区, 尤其是 As、Sb、As、Bi 化探异常叠加区。矿床地质和地球化学特征对比显示, 包古图金矿成矿系统与侵入岩有关的金矿成矿系统非常相似。

关键词 地质学; 地质特征; 成矿规律; 金矿; 包古图; 西准噶尔

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

Geology and metallogenic model of gold ore deposits in Baogutu area, Western Junggar, Xinjiang

AN Fang¹, ZHU YongFeng², WEI ShaoNi³ and ZHENG Bo²

(1 State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 2 Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education; School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China; 3 College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract

The Baogutu area is one of the important gold concentration areas in western Junggar, North Xinjiang. There are more than ten gold ore spots and one porphyry copper deposits with Cu reserves of 0.11 Mt in Baogutu area. Two types of gold mineralization have been recognized in Baogutu: quartz vein type ore hosted in NE-trending faults with intermediate-acidic vein rocks (type_a), sulfide vein type ore hosted in radial fracture accompanied by inter-

^{*} 本文受到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和“三秦学者”学术团队联合资助

第一作者简介 安 芳, 女, 1984 年生, 讲师, 矿床地球化学专业。Email: anfang_china@163.com

收稿日期 2014_01_06; 改回日期 2014_05_15。张绮玲编辑。

mediate_acidic porphyry (type_b). The Kuogeshaye gold deposit is a representative deposit of type_a. Wall rocks are tuffaceous sandstone and tuff in Lower Carboniferous Baogutu Formation, with silicification, sericitization, pyritization, arsenopyritization and carbonatization. The orebody is composed of pyrite_quartz vein, native arsenic_quartz vein, stibnite_quartz vein and disseminated quartz stockwork, with a major mineral assemblage of pyrite_arsenopyrite_native arsenic_stibnite_native gold_electrum. Baogutu gold ore district XI is a representative of type_b. It is located in the contact zone between porphyry and volcanic_sedimentary rocks, hosted in Lower Carboniferous Xibeikulasi Formation and controlled by a NE_trending radial fracture associated with porphyry. The orebody is mainly composed of pyrite, arsenopyrite, native bismuth, bismuthinite, native gold and chalcopyrite, with small amounts of pyrrhotite and quartz. Two types of gold mineralization in Baogutu area are closely related to intermediate_acidic magmatism in space and time. It is noted that gold mineralization in Baogutu is always associated with As_Sb or As_Bi mineralization, and hence it is worthwhile to pay special attention to the geochemical anomaly areas of As_Sb and As_Bi in further exploration. The Baogutu gold mineralization system is very similar to the intrusion_related gold system in geological and geochemical characteristics.

Key words: geology, geological characteristics, mineralization regulation, gold deposit, Baogutu, western Junggar

西准噶尔地区是中亚成矿域核心区的重要组成部分(图 1a),区内发育多个金矿床,如萨尔托海、哈图、包古图等金矿床。根据金矿床的成矿类型和成矿背景,可将西准噶尔南部的金成矿带划分为 2 个金矿集区,以达拉布特断裂为界,北侧为萨尔托海_哈图金矿集区,南侧为包古图铜_金矿集区(图 1b)。萨尔托海_哈图金矿集区的展布主要受与达拉布特大断裂伴生的 NE 向次级断裂的控制,如安齐断裂、哈图断裂控制着区内多个金矿床或矿点的分布,该矿集区的成矿作用被认为与火山晚期热液活动(沈远超等,1993)或与花岗岩演化晚期的岩浆热液有关(李华芹等,2000;安芳,2011)。包古图铜_金矿集区位于西准噶尔东南,铜矿化产于区内中酸性斑岩体内部及其接触带(张锐等,2006;Liu et al.,2009;Shen et al.,2012),金矿化产于斑岩体外接触带以及外围中酸性岩脉密集分布区,区内目前已发现十几个金矿床或金矿点,如包古图 I 号、II 号、III 号、IV 号和 XI 号等。

尽管包古图金矿集区的金矿点均分布于中酸性斑岩体外接触带,或在外围小于 3 km 的范围内,但产于不同位置的金矿床(点),其地质特征、矿化类型以及矿床成因具有一定的差异性,并在整个区域内显示出规律性变化,从岩体到岩体内外接触带到围岩,依次发育斑岩型铜矿、中高温岩浆热液型铜金矿及中温热液型金矿床(成勇等,2006),稳定同位素、流体包裹体测温(齐进英等,1992)、Rb_Sr 同位素(李华芹等,2000)和矿体硫化物地球化学(安芳等,

2014)资料显示,围岩中的金矿成矿流体为岩浆热液。在前人工作的基础上,结合近年来课题组在包古图金矿集区获得的研究成果,如在接触带的金矿床中发现自然金与自然铋密切伴生(郑波等,2009),在外围金矿中识别出了自然砷、自然锑与金矿物共生或伴生的现象(An et al.,2009;2010;魏少妮等,2014a),将区内的金矿化详细划分为 2 种类型:一种是产于中酸性斑岩体与围岩接触带的石英_硫化物脉型 Au_As_Bi 矿化;另一种为产于斑岩体外围的石英脉型 Au_As_Sb 矿化,但是关于这 2 类金矿床的成因及其所代表的成矿系统类型仍不太明确。包古图 I~IV 号金矿点开采历史悠久,勘探程度较高,是石英脉型 Au_As_Sb 矿化的代表;而包古图 XI 号金矿点是发育于接触带的石英_硫化物脉型金矿点中开采和勘探程度最高的金矿点,因此,本文选择包古图 I~IV 号和 XI 号金矿点进行详细的矿床地质研究,并在此基础上结合前人的研究成果,探讨了包古图地区金矿床的成因,总结了成矿规律,建立了成矿模式,并与类似成矿系统进行了对比。

1 区域地质

环巴尔喀什_准噶尔成矿省是中亚成矿域的核心地区,西段(巴尔喀什)位于哈萨克斯坦中部,向东延伸进入中国准噶尔地区(图 1a),该成矿省发育云英岩_石英脉型钨_锡成矿带、重晶石_多金属和稀有金属成矿带、矽卡岩多金属_斑岩铜钼带和海底喷流

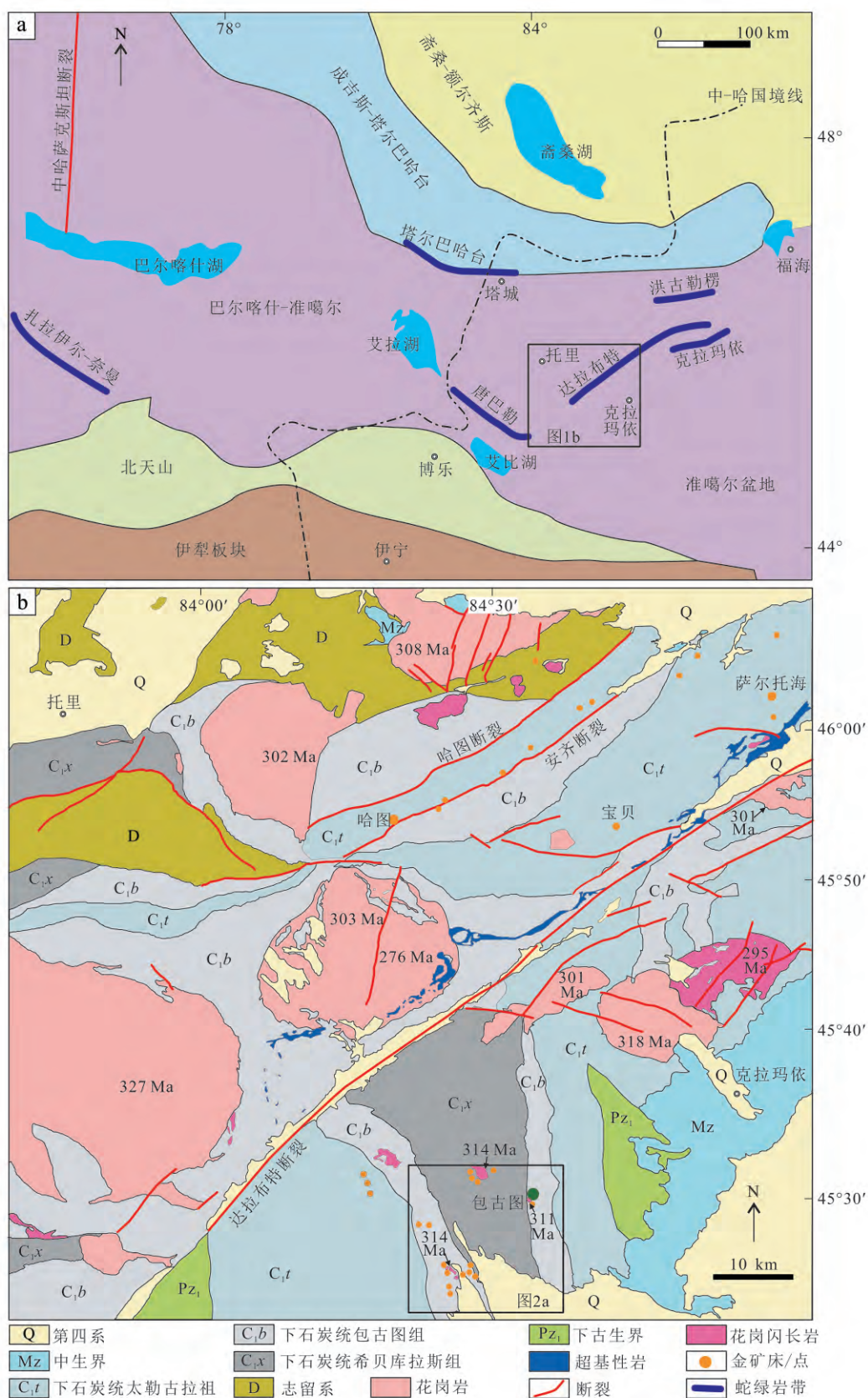


图1 中亚核心地区构造简图(a, 据朱永峰等 2007) 及西准噶尔区域地质图(b, 据新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993; 朱永峰等 2007 修改; 年龄数据据韩宝福等 2006; 魏少妮等 2011)

Fig. 1 Simplified tectonic map of central part of Central Asian orogenic belt (a, modified after Zhu et al., 2007) and geological sketch map of western Junggar (b, modified after Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang, 1993; Zhu et al., 2007; Ages after Han et al., 2006; Wei et al., 2011)

铜多金属成矿带(何国琦等, 2006; 朱永峰等, 2007; 朱永峰, 2014)。西准噶尔地区位于环巴尔喀什_准噶尔成矿省的东端, 区内发育多条走向为 NE 向、EW 向的蛇绿岩带(图 1a), 如早奥陶世塔尔巴哈台蛇绿岩(朱永峰等, 2006)、晚奥陶世洪古勒楞蛇绿岩(张弛等, 1992)、中泥盆世达拉布特蛇绿岩(辜平等, 2009; 陈石等, 2010; 陈博等, 2011)和中_晚奥陶世唐巴勒(张立飞, 1997)和克拉玛依蛇绿岩(何国琦等, 2007; 陈博等, 2010)。这些蛇绿混杂岩主要与区内广泛分布的下石炭统呈构造接触, 包括太勒古拉组、包古图组和希贝库拉斯组(图 1b), 为厚层的火山_沉积建造, 火山活动时限为 330 ~ 360 Ma(王瑞等, 2007; 安芳等, 2009; 郭丽爽等, 2010; Zhu et al., 2013)。区内侵入岩分布广泛, 花岗岩基最为常见(图 1b), 侵位时代集中于 310 ~ 295 Ma(韩宝福等, 2006), 代表了西准噶尔晚古生代后碰撞深成岩浆活动的产物(Han et al., 1999); 其次为中酸性岩株和岩脉, 主要分布于包古图地区(图 1b, 图 2a); 另有大量中基性脉岩群广泛出露, 穿切中酸性岩株、花岗岩基和下石炭统火山_沉积地层, Ar-Ar 年龄为 250 ~ 280 Ma(李辛子等, 2004; 周晶等, 2008)。

包古图地区位于西准噶尔达拉布特断裂以南, 区内存在一个由希贝库拉斯组、包古图组和太勒古拉组构成的 NS 向褶皱构造, 其中希贝库拉斯组位于褶皱的核部, 向两翼依次为包古图组和太勒古拉组(图 2a)。褶皱核部的希贝库拉斯组中有闪长玢岩、石英闪长玢岩体侵入, 这些岩体的侵位年龄集中在 310 ~ 320 Ma(唐功建等, 2009; Liu et al., 2009; 魏少妮等, 2011; Shen et al., 2013)。包古图中型斑岩铜矿床分布于 V 号斑岩体中(图 2a), 其中辉钼矿的 Re-Os 模式年龄为 310 Ma(宋会侠等, 2007; Liu et al., 2009)。包古图地区脉岩广泛分布, 以闪长玢岩和石英闪长玢岩为主, K-Ar 年龄为 240 ~ 278 Ma(刘玉琳等, 2009), 锆石 U-Pb 年龄约为 315 Ma(Tang et al., 2010; Yin et al., 2010), 它们与包古图地区部分 Au 矿化伴生。包古图地区发育 3 组断裂系统(图 2a、b 3a): NNE 向(F_1) 和 NS 向(F_2) 走滑断裂组、NE 向(F_3) 和 NNE 向(F_4) 走滑断裂组、NS 向(F_5) 和 WNW 向(F_6) 走滑断裂组(该组断裂规模较小, 切

割矿区的中酸性脉岩和含矿石英脉, 图 2、图 3)。 F_1 、 F_2 断裂组主要为挤压型断裂, 控制着区内小型斑岩体的分布(F_1 , 图 2a), 该组断裂形成时代最老, 被 F_3 、 F_4 断裂组切割, 而 F_3 、 F_4 断裂组切割了包古图地区出露的部分斑岩体(图 2a)。区内的大部分中酸性脉岩和含矿石英_硫化物脉均与 F_4 断裂组平行, F_4 断裂组是包古图地区最主要的控矿构造。 F_5 、 F_6 断裂组仅在包古图金矿周围出露, 切割矿区由 F_3 、 F_4 断裂组控制的中酸性脉岩和含矿石英脉(图 3a)。

2 矿床地质

包古图地区是西准噶尔重要的金_铜矿集区之一, 目前已发现近 20 个金矿点和 1 个铜矿床。金矿

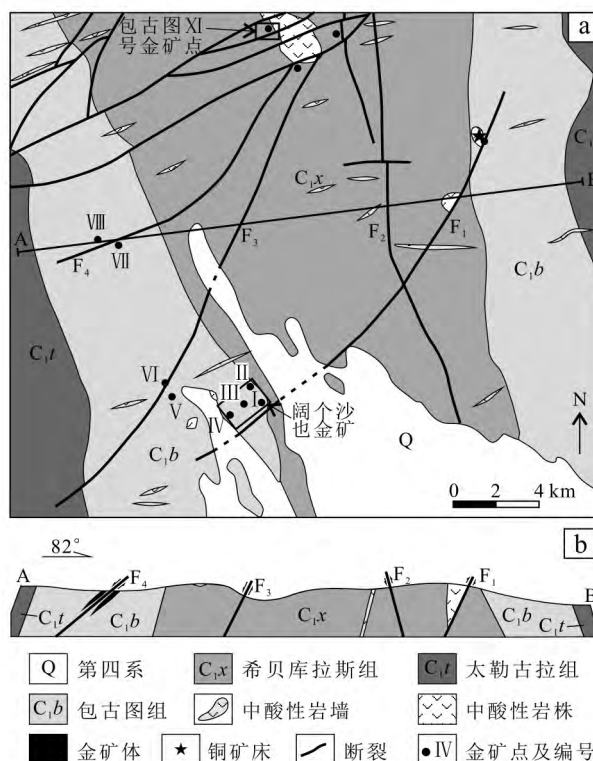


图 2 西准噶尔包古图地区区域地质简图(a, 据新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993)及包古图地区区域地质剖面图(b)

Fig. 2 Geological sketch map of Baogutu area in Western Junggar (a, modified after Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang, 1993) and geological section of Baogutu area in western Junggar(b)

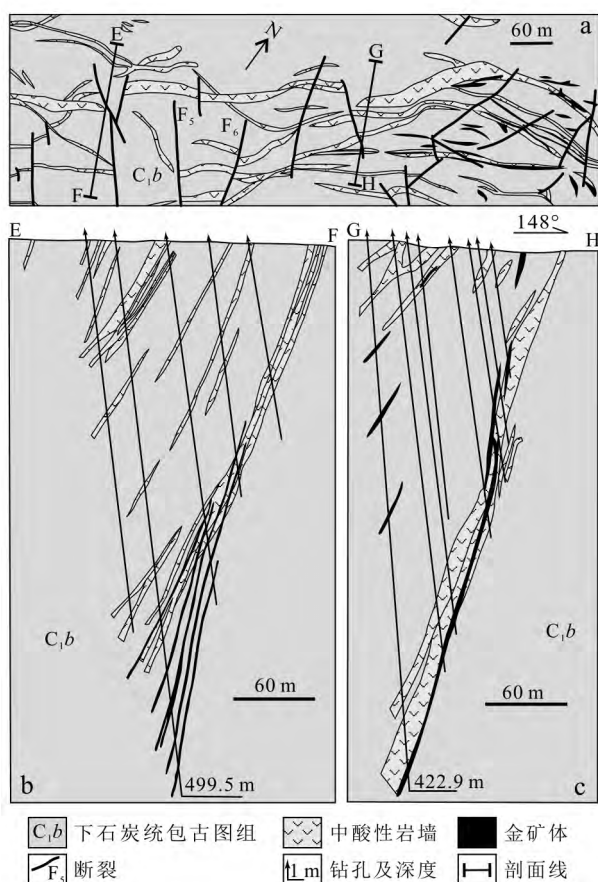


图3 a. 阔个沙也金矿Ⅱ号矿区地质图; b. Ⅱ号矿区E_F线剖面图; c. Ⅱ号矿区G_H线剖面图(据沈远超等, 1993)

Fig. 3 a. Geological sketch map of gold ore district II in Kuogeshaye; b. Geological section of E_F in gold ore district II; c. Geological section of G_H in gold ore district II (modified after Shen et al., 1993)

点中最早发现并进行开采的是包古图Ⅰ~Ⅳ号金矿点(图2a), 被称为阔个沙也金矿床, 矿体主要产于中酸性斑岩体外围1~3 km范围内, 赋存于下石炭统包古图组中, 与中酸性岩脉密切伴生, 矿石类型主要为石英脉型和石英网脉型, 主要矿物组合为黄铁矿_毒砂_自然金/银金矿_自然砷_自然铋_辉铋矿, 成矿元素组合为 Au-As-Sb。之后的地质勘探工作又在包古图地区发现了多个金矿点, 主要分布于脉岩密集分布区(如包古图Ⅴ号、Ⅵ号、Ⅶ号金矿点)或者中酸性斑岩与围岩的接触带(成勇等, 2006), 如包古图Ⅶ号、Ⅺ号、Ⅻ号金矿点位于包古图Ⅱ号岩体与下石炭统希贝库拉斯组的接触带上(图2a), 主要赋矿岩石为希贝库拉斯组安山岩和凝灰质砂岩, 矿体为单一石英_硫化物脉型, 主要矿物组合为黄铁矿_

毒砂_黄铜矿_自然金_自然铋_辉铋矿, 成矿元素组合为 Au-As-Bi, 此类金矿化在Ⅴ号岩体与围岩接触带中也有发育(图2a)。

3.1 阔个沙也金矿床

阔个沙也金矿床位于包古图地区的南部, 包古图斑岩铜矿SW向约15 km处, 分布于Ⅲ_Ⅳ号岩体东部1~3 km范围内, 该矿由包古图Ⅰ号、Ⅱ号、Ⅲ号、Ⅳ号金矿点组成(图2a), 赋矿地层为下石炭统包古图组, 其中凝灰岩和凝灰质砂岩是主要的含矿围岩, 围岩蚀变以硅化、绢云母化、碳酸盐化为主, 硅化主要呈脉状, 形成石英_钠长石脉和细粒硫化物_石英脉; 绢云母化主要呈浸染状, 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, 浸染状碳酸盐化以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, 穿切早期蚀变和矿化。金矿化与硅化和绢云母化伴生。

矿体由含金石英脉及其两侧围岩中的石英网脉状蚀变岩构成, 呈透镜状和带状成群产出, 受NE向断裂控制, 倾向301~308°, 倾角70~77°, 矿脉规模变化较大, 通常宽0.2~3 m, 平面延伸10~150 m(图3a), 沿倾向可延伸至地下400 m(图3b、c), 不同矿脉的金品位有向深部增高的趋势。矿脉与围岩之间的界线非常清楚, 围岩蚀变范围较窄, 通常小于50 cm, 局部见断裂中透镜状矿体被断层泥包裹或脉状矿体与围岩之间有厚几厘米至十几厘米的断层泥间隔(图4a)。矿体品位变化较大, μ (Au) 平均6~8 g/t, 局部高达上百 g/t。虽然阔个沙也金矿区出露于地表的矿脉超过20条, 但目前隐伏矿体是主要开采对象。隐伏矿体的厚度通常为0.5~1 m, 沿倾向延伸至地下500 m(图3b、c), 受NE向断裂的控制, 矿体为石英脉型和蚀变岩型, 局部见石英脉呈透镜状或脉状充填于断裂中, 蚀变岩型矿体主要产于石英脉两侧的围岩中。

阔个沙也金矿区中酸性脉岩广泛分布, 走向30~60°, 脉宽0.5~8 m, 沿走向延伸几十米至上百米, 倾向NW, 沿倾向延伸50~400 m, 脉岩岩性为石英闪长玢岩、闪长玢岩、细晶闪长玢岩等, 另外在Ⅳ号矿区, 有少量辉绿岩脉。含金矿脉在空间上与中酸性脉岩密切相关, 井下观察发现, 脉岩与矿脉具有如下空间关系: ① 矿体与脉岩受同一NE向断裂的控制, 矿脉位于脉岩上盘、下盘或穿切脉岩; ② 受不同

断裂的控制,矿体与脉岩在空间上平行展布,水平距离从 20 cm 到几米不等。镜下观察显示,这些与矿脉产于同一断裂或产于矿脉附近的脉岩,部分蚀变较强,主要发生绢云母化和碳酸盐化,部分新鲜无蚀变。

阔个沙也金矿区发育 3 类含金石英脉型矿石,分别为黄铁矿_石英脉型矿石(图 4a)、辉锑矿_石英脉型矿石(图 4b)和自然砷_石英脉型矿石(图 4c)。黄铁矿_石英脉型矿石主要分布于 II 号矿区,此类石英脉宽度较小,大多集中于 10 ~ 20 cm 范围内(图 4a),主要矿物有黄铁矿、毒砂、含砷黄铁矿、自然金和细粒石英,另有少量黝铜矿、辉锑矿、闪锌矿、黄铜矿和自然锑(An et al., 2010);辉锑矿_石英脉型矿石主要分布于 IV 号矿区深部,集中分布于 IV 矿区 L7 号脉中,矿脉宽度变化大(5 ~ 30 cm),辉锑矿含量变化较大(体积分数 10% ~ 80%,图 4b),主要矿物组合为辉锑矿_自然锑_银金矿_自然金_粗粒石英,其中还含有多种罕见矿物,如方锑金矿、Paakkonenite、硫锑金银矿和银锌黝铜矿(郑波等, 2013; 2014);自然砷_石英脉型矿石主要分布于 IV 号矿区的浅部,石英脉的

宽度为几厘米至几十厘米(图 4c),此类矿石中主要矿物为自然砷、银金矿、辉锑矿和粗粒或梳状石英(An et al., 2009),另有少量自然锑、黄铁矿和毒砂。

蚀变岩型矿石主要呈细脉、网脉状或细脉浸染状构造,由热液演化阶段形成的石英、黄铁矿、毒砂、方解石等矿物在围岩中的裂隙充填,呈散浸染状也较常见,主要分布于石英脉与围岩接触带上。蚀变围岩中常见呈浸染状分布的细小石英脉、石英_硫化物脉和方解石脉,并有大量浸染状金属硫化物(以黄铁矿和毒砂为主)。

通过野外地质和显微镜下观察,并结合笔者之前对包古图 II 号和 IV 号金矿点进行的成矿阶段划分(An et al., 2009; 2010),可将阔个沙也金矿床的成矿作用划分为 5 个阶段:

不含石英脉阶段(I):该阶段以形成大量粗粒石英为主要特征,脉石矿物以粒状石英为主,少量钠长石和绢云母,石英含量达 90% 以上,石英脉中可见少量粗粒自形_半自形黄铁矿和毒砂;

黄铁矿_石英脉阶段(II):该阶段矿化强,形成

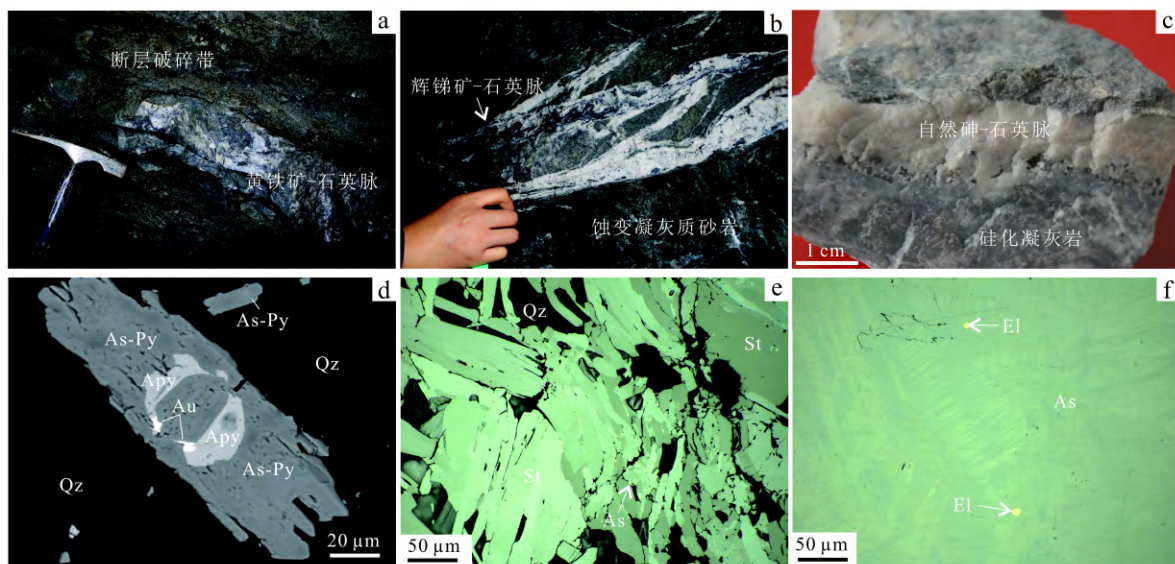


图 4 阔个沙也金矿不同类型石英脉型矿石及其中主要矿物产出形式

- a. 黄铁矿_石英脉型矿石; b. 辉锑矿_石英脉型矿石; c. 自然砷_石英脉型矿石; d. 黄铁矿_石英脉型矿石中含砷黄铁矿包裹毒砂、自然金;
e. 辉锑矿_石英脉型矿石中的长柱状辉锑矿; f. 自然砷_石英脉型矿石中,自然砷包裹银金矿; d 为 BSE 图, e、f 为反射光照片
Apy—毒砂; As—自然砷; As_{Py}—含砷黄铁矿; Au—自然金; El—银金矿; Qz—石英; St—辉锑矿

Fig. 4 Different types of gold-bearing quartz veins distributed in the Kuogeshaye gold deposit, and modes of occurrence of major hydrothermal minerals

- a. Pyrite-quartz vein type ore; b. Stibnite-quartz vein type ore; c. Native arsenic-quartz vein type ore; d. BSE image showing arsenic pyrite with arsenopyrite and native gold inclusions in pyrite-quartz vein type ore; e. Columnar stibnite in stibnite-quartz vein type ore; f. Native arsenic with electrum inclusions in native arsenic-quartz vein type ore; e, f are under reflected light

Apy—Arsenopyrite; As—Native arsenic; As_{Py}—Arsenic pyrite; Au—Native gold; El—Electrum; Qz—Quartz; St—Stibnite

脉状和细脉浸染状含金石英脉,脉石矿物主要有石英和绢云母,少量铁白云石、菱铁矿和方解石,石英与绢云母共生,结晶略早于碳酸盐矿物,矿石矿物以毒砂和含砷黄铁矿为主(图4d),少量磁黄铁矿、白铁矿、闪锌矿、黄铜矿、黝铜矿、辉锑矿和自然金;

辉锑矿_石英脉阶段(Ⅲ):为富含辉锑矿的粗粒石英脉,石英自形程度变化大,矿石矿物组合为辉锑矿_自然砷_银金矿(图4e),该阶段在形成辉锑矿_石英脉的同时,在两侧围岩中形成细脉状和网脉状毒砂化和黄铁矿化,主要矿物组合为黄铁矿_毒砂_斜方砷铁矿;

自然砷_石英脉阶段(Ⅳ):为含矿粗粒石英脉,矿石矿物为自然砷、辉锑矿、银金矿(图4f)以及少量毒砂、磁黄铁矿和黄铁矿,其中自然砷的含量最高(达80%),石英呈梳状构造沿硅化围岩团块边缘或其中的裂隙生长,梳状石英发育生长环带。

石英_方解石脉阶段(Ⅴ):穿切早期蚀变和矿化,其中基本不含矿,或含少量辉锑矿。

3.2 包古图XI号金矿点

包古图金矿XI号点位于包古图金矿集区北部,包古图II号岩体与围岩接触带,矿区主要出露下石炭统希贝库拉斯组(图2a),含矿岩石为安山岩和晶屑凝灰岩。安山岩为斑状结构,斑晶以角闪石为主,少量斜长石,角闪石经历了阳起石化、绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化和黄铁矿化;基质由细粒角闪石、斜长石和玻璃质组成,发生轻微黏土化、绿泥石化和阳起石化。晶屑凝灰岩中的晶屑为斜长石和石英,斜长石发生绢云母化、绿泥石化和碳酸盐化,基质发生弱硅化、黏土化、绢云母化、碳酸盐化、黄铁矿化和毒砂化。安山岩和晶屑凝灰岩中常见不同热液演化阶段形成的石英_硫化物脉、硫化物脉以及钠长石_石英_方解石脉。

矿体主要受岩体外围的NE向断裂的控制(图5a),呈脉状或透镜状,主要为石英_硫化物脉。与阔个沙也金矿区相似,XI号金矿点也出露多条NE走向的中酸性脉岩,不同之处在于XI号金矿点矿体与脉岩在空间上距离较远,倾向变化大,两区的控矿构造并非同一类型,可能是岩体侵入过程中伴生的次级断裂系统。XI号金矿点仅有4条矿脉(图5a),走向65°,其中L2号矿脉倾向NW,其余矿脉倾向SE,水平延伸长度0.8~250m,脉宽0.2~1m,垂向延伸范围较小,目前的勘探显示,这些矿脉只延伸至地下20~30m(图5b)。矿脉主要为石英_硫化物脉,矿

石类型可以按照石英含量不同大致分为3类:块状硫化物矿石(图6a)、石英_硫化物矿石(图6b)和硫化物_石英矿石(图6c),矿石金品位平均为4~6g/t,其中块状硫化物矿石金品位最高。矿体两侧围岩的蚀变范围很小,显示充填成矿的特征。矿石主要呈块状构造,局部见脉状构造。矿石中脉石矿物含量较低,约占矿脉体积分数的5%~10%,主要为石英、方解石、绿泥石和少量钾长石,矿石矿物有毒砂、黄铁矿、黄铜矿、辉锑矿、自然砷和自然金,少量磁铁矿、磁黄铁矿和闪锌矿。

石英、方解石和绿泥石是最常见的脉石矿物。石英主要呈他形粒状与不同类型硫化物共生,粒度和自形程度变化大;方解石主要与黄铁矿、毒砂共生或呈细脉状充填于毒砂裂隙中;绿泥石是蚀变矿物,

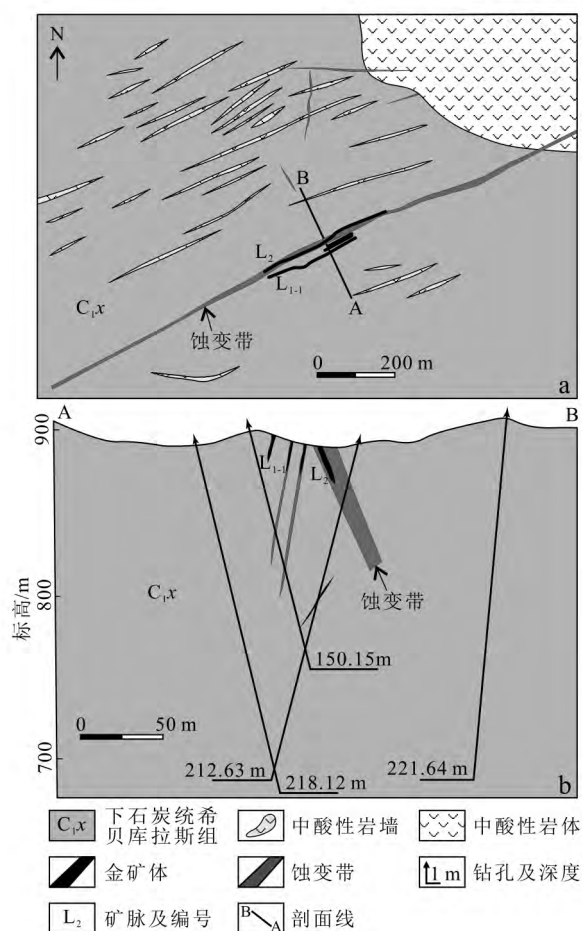


图5 a. 包古图XI号金矿点矿区地质简图; b. XI号金矿地质剖面图(据郑波等,2014)

Fig. 5 a. Schematic map for gold ore district XI in Baogutu area; b. Geological section map showing the extension of gold vein in gold ore district XI (after Zheng et al., 2014)

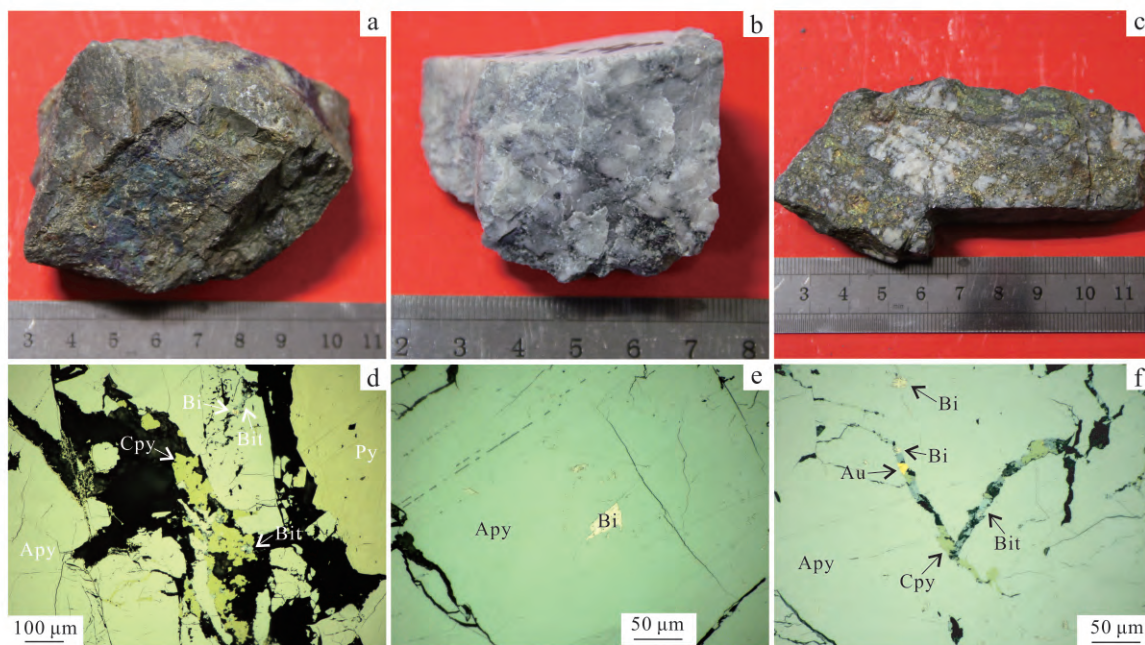


图6 包古图XI金矿矿脉中不同类型矿石及其中主要矿物产出形式

a. 块状硫化物型矿石; b. 石英_硫化物矿石; c. 硫化物_石英型矿石; d. 毒砂、黄铁矿共生,黄铜矿充填毒砂、黄铁矿粒间; e. 毒砂包裹自然铋; f. 黄铜矿、自然铋、自然金、辉铋矿呈脉状充填毒砂裂隙。d、f为反射光照片
Apy—毒砂; Au—自然金; Bi—自然铋; Bit—辉铋矿; Cpy—黄铜矿; Py—黄铁矿

Fig. 6 Different types of ores in the orebody, and the modes of occurrence of major minerals

a. Massive sulfide ore; b. Quartz_sulfide ore; c. Sulfide_quartz ore; d. Coexisting arsenopyrite and pyrite, with chalcopyrite filling between them; e. Native bismuth as inclusions in arsenopyrite; f. Veinlets native bismuth, native gold, chalcopyrite and bismuthinite filling in the arsenopyrite. d, f are under reflected light

Apy—Arsenopyrite; Au—Native gold; Bi—Native bismuth; Bit—Bismuthinite; Cpy—Chalcopyrite; Py—Pyrite

与方解石共生,产于蚀变安山岩中;矿石矿物中毒砂含量最高(约45%),与黄铁矿密切共生(图6d);黄铜矿常呈脉状充填于毒砂裂隙中(图6d);黄铁矿一般与毒砂共生(图6d),局部见其呈脉状充填于毒砂裂隙中。闪锌矿含量较少,与黄铜矿呈固溶体分离结构。自然铋与金矿化关系密切,和多种矿物伴生,在毒砂、黄铜矿、闪锌矿、黄铁矿、方解石等矿物颗粒内部或粒间都有产出(图6e、f)。辉铋矿主要以交代脉状自然铋的形式产出(图6f)。

据包古图XI号金矿点中矿物之间的关系,将该矿热液演化期划分为以下3个阶段(郑波等,2009):

石英_硫化物阶段(Ⅰ):在主矿体附近围岩中形成一系列细小的石英_硫化物脉,主要矿物为毒砂、黄铁矿、黄铜矿、石英和少量方解石,基本不含金。

硫化物_铋_金阶段(Ⅱ):主要由金属硫化物组成,少量石英、方解石和绿泥石,早期形成毒砂_黄铁矿组合,毒砂中常见自然铋包体;晚期形成黄铜矿_黝铜矿_自然铋_辉铋矿_自然金组合,呈脉状充填于早期毒砂、黄铁矿粒间或裂隙中,是主要的金成矿时

期,自然金与自然铋或辉铋矿共生。

钠长石_方解石阶段(Ⅲ):在围岩中形成钠长石_方解石细脉、石英_方解石细脉,不含金属硫化物。

4 包古图地区金矿床的成因探讨

4.1 阔个沙也金矿床

阔个沙也金矿床主要分布于包古图IV号斑岩体外围3 km范围内,集中产出在中酸性脉岩密集分布区,矿脉常赋存于脉岩中或脉岩周围的地层中,显示包古图金矿化与区内中酸性侵入岩在空间上的相关性。IV号斑岩体的侵位时代为315 Ma(魏少妮等,2011),阔个沙也矿区广泛分布的中酸性脉岩的侵位时代为314 Ma(Tang et al., 2010),前人对矿石中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 (311.0 ± 9.8) Ma,代表金矿化的时代(李华芹等,2000),略晚于IV号斑岩体的侵位时代,指示它们在时间上的相关性。

阔个沙也金矿床的成矿早期主要矿物组合为黄

铁矿_毒砂_毒砂成分温度计计算获得的矿化温度为 $300 \sim 350^{\circ}\text{C}$ (An et al., 2010), 表明此时 $\log f(\text{O}_2) \leq -25$ (Simon et al., 1999), 与区内中酸性斑岩体非常相似 ($\log f(\text{O}_2) = -25 \sim -30$, 魏少妮等, 2010); 阶段 I 和阶段 II 的石英脉具有与中酸性侵入岩非常相似的稀土元素配分模式(安芳等, 2014); 包古图斑岩铜矿床中黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-2.4\text{‰} \sim -0.8\text{‰}$, 黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化于 $-2.7\text{‰} \sim 0.7\text{‰}$ 之间(宋会侠等, 2007), 而阔个沙也金矿床中黄铁矿和辉钨矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-0.8\text{‰} \sim 3.6\text{‰}$ (齐进英等, 1992; 沈远超等, 1993), 略高于包古图斑岩铜矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 值, 但总体显示成矿体系中的硫为岩浆来源。石英流体包裹体 H_2O 同位素组成显示成矿流体有 2 种来源, 深部且较早阶段形成的石英流体包裹体 H_2O 同位素组成非常接近于岩浆水, 而较晚阶段形成于浅部的石英则具有与大气降水相似的 H_2O 同位素特征(齐进英等, 1992), 说明早期成矿流体为岩浆水, 晚期有大气水的加入并成为成矿流体的主要组分。综合以上地球化学特征以及金矿与中酸性侵入岩之间密切的时空关系, 推断阔个沙也金矿床的成矿作用与包古图地区广泛发育的中酸性侵入岩(包括斑岩体和脉岩)之间具有成因联系。

阔个沙也金矿床是包古图 IV 号斑岩体系热液演化晚期的产物, 是斑岩岩浆系统演化晚期分异出的含 Au-Bi-As-Sb 岩浆热液, 沿着岩体外围 $1 \sim 3 \text{ km}$ 范围内广泛出露的 NE 向断裂迁移、沉淀的结果, Bi 在热液体系中主要以熔体形式存在, 比重较大, 很难被热液携带迁移较远距离, 可能会在热液迁移过程中损失。成矿早阶段形成基本不含矿的石英脉和围岩蚀变, 之后逐渐有深循环大气水加入成矿系统, 而大气水的加入导致了含矿热液体系物理化学条件的变化, 并最终引起含金黄铁矿_石英脉、辉钨矿_石英脉以及自然砷_石英脉发生沉淀。矿区中酸性脉岩密集分布, 它们具有与斑岩体相似的侵位时代和地球化学特征(Tang et al., 2010; Yin et al., 2010; Shen et al., 2009; 魏少妮等, 2010), 指示它们与斑岩体可能是同源岩浆不同演化阶段的产物。脉岩与矿体空间关系密切, 均受 NE 向断裂的控制, 强蚀变或完全新鲜, 指示脉岩侵位与矿化作用近同时发生, 而脉岩对于含矿流体的迁移可能起载体作用, 或为含矿流体迁移提供了足够的热驱动力(罗照华等, 2007)。

4.2 XI号金矿点

包古图 XI 号金矿点产于包古图 II 号斑岩体与围

岩接触带, 矿体到岩体水平距离 $< 500 \text{ m}$, 受与侵入岩相关的伴生断裂的控制, 控矿断裂与岩体连通, 矿脉倾向变化大(图 5a), 矿化在空间上与 II 号岩体关系密切。XI 号金矿点主要矿石为石英_硫化物型, 早期主要形成毒砂_黄铁矿, 中晚期主要形成黄铜矿_自然铋_自然金_辉钨矿, 毒砂成分温度计显示, 成矿早期体系温度为 $420 \sim 510^{\circ}\text{C}$ (郑波等, 2009), 与包古图斑岩铜矿晚岩浆阶段中石英流体包裹体获得的温度($400 \sim 550^{\circ}\text{C}$, Shen et al., 2010) 非常相似, 黄铜矿_自然铋_自然金_辉钨矿阶段成矿温度为 $240 \sim 400^{\circ}\text{C}$ (郑波等, 2009), 与包古图斑岩铜矿东南侧发育的脉状 Cu-Au-Ag-Te-Bi 矿化特征非常相似, 成矿温度也比较接近(宋会侠等, 2007)。以上成矿地质特征指示包古图 XI 号金矿的成矿作用可能与中酸性岩体关系密切, 较高的成矿温度可能指示其成矿流体为中酸性斑岩岩浆系统演化形成的岩浆热液。

从包古图 XI 号金矿点阶段 II 形成的硫化物脉中, 挑选硫化物集合体, 进行微量元素分析, 其中的矿物包括黄铁矿、毒砂、黄铜矿、自然铋、辉钨矿和自然金, 测试工作在核工业地质研究所完成。不同样品中 $w(\text{Au})$ 变化很大 ($4.12 \times 10^{-6} \sim 11.2 \times 10^{-6}$, 表 1), $\mu(\text{Ag})$ 与 $w(\text{Au})$ 之间无明显相关性(图 7a), 说明硫化物中含有一些以离子态存在的 Au 和 Ag。 $w(\text{Bi})$ 和 $w(\text{Au})$ 呈弱正相关(图 7b), 可能指示成矿过程中 Bi 对于金矿化起着重要作用, 与矿相学观察结果一致(郑波等, 2009)。 $w(\text{Au})$ 和 $w(\text{As})$ 关系不明显, 说明 As 对 Au 富集矿化的作用微弱(图 7c)。

所有硫化物样品球粒陨石标准化的稀土元素配分模式均为 V 型(图 8), 稀土元素总量变化较大 ($\Sigma \text{REE} = 5.47 \times 10^{-6} \sim 58.89 \times 10^{-6}$, 表 1), 轻、重稀土元素分异程度不等 [$(\text{La/Yb})_{\text{N}} = 1.54 \sim 30.26$], 但所有样品均具有明显的 Eu 负异常 ($\delta \text{Eu} = 0.11 \sim 0.27$) 和 Ce 负异常 ($\delta \text{Ce} = 0.63 \sim 0.72$), 指示 XI 号金矿点的成矿流体为还原性较强的热液, 前人在包古图斑岩铜矿中发现了大量富 CH_4 的流体包裹体 (Shen et al., 2010), 说明金矿化与斑岩系统具有成因联系。Y 和 Ho 具有相同的地球化学特征(如具有相同的价态和离子半径), 在很多地质过程中通常都不会发生分异, 因此, 地球上大部分岩石、甚至很多热液成因的硫化物都保持着和球粒陨石相似的 Y/Ho 比值(约 28, Bau et al., 1995; Zhao et al., 2007)。包古图 XI 号金矿点硫化物集合体的 Y/Ho 比值为 $21 \sim 29$, 略低于球粒陨石的 Y/Ho 比值, 但与

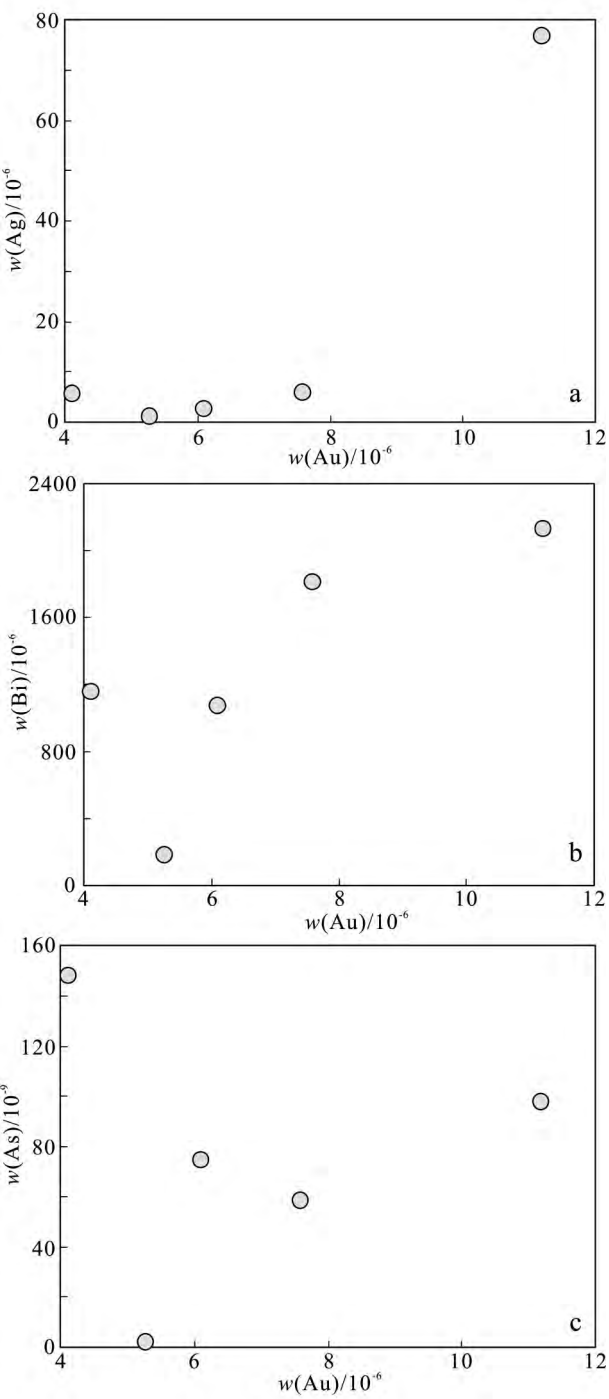


图 7 包古图XI号金矿点块状硫化物集合体
微量元素变异图解

Fig. 7 Variation diagram of trace elements in sulfide
from ore district XI in Baogutu

区内中酸性侵入岩非常相似(25 ~ 30,张连昌等, 2006; Shen et al., 2009; 魏少妮等 2010; 2014b), 由此说明包古图金矿成矿作用与区内中酸性岩浆活动之间可能具有成因联系。

表 1 包古图XI号金矿点矿脉中块状硫化物
集合体微量元素组成 ($w_B/10^{-6}$)

Table 1 Representative composition of sulfide from ore
district XI of Baogutu ($w_B/10^{-6}$)

组分	07HT104	07HT103	07HT101	07HT100	07HT99
Li	5.97	4.10	6.87	4.07	3.73
Be	0.24	0.074	0.25	0.035	0.11
Sc	1.35	0.16	1.94	0.36	0.42
V	8.31	0.57	15.70	1.10	1.21
Cr	154	147	212	82.10	178
Co	2100	4380	1110	6206	6297
Ni	118	200	780	142	184
Cu	1292	3083	284	2130	2091
Zn	2368	360	642	308	714
Ga	32.40	3.07	8.88	3.34	4.27
As	58236	147817	2011	74371	97844
Se	0.23	0.11	0.14	0.20	0.16
Rb	0.83	2.04	6.25	1.92	2.71
Sr	36.30	19.70	22.10	13.10	29.50
Y	7.41	1.35	5.41	11.20	8.03
Zr	15.60	1.91	5.78	5.45	5.49
Nb	0.19	0.28	0.15	0.30	0.23
Mo	15.70	11.10	3.53	18.20	18.50
Cd	14.30	1.81	4.56	3.20	3.57
Sn	81.80	66.50	62.30	60.70	63.80
Sb	42.30	74.50	4.55	41.50	58.90
Cs	2.35	0.40	1.09	0.57	0.98
Ba	7.30	6.70	61.50	10.40	20.10
La	20.60	1.37	16.20	1.82	2.07
Ce	22.00	1.60	21.70	3.07	2.57
Pr	2.02	0.18	2.77	0.57	0.41
Nd	7.64	0.81	9.49	2.70	3.70
Sm	1.94	0.30	1.92	1.32	0.78
Eu	0.15	0.022	0.15	0.054	0.039
Gd	1.38	0.30	1.40	1.56	1.09
Tb	0.24	0.071	0.23	0.43	0.29
Dy	1.41	0.42	1.49	2.88	1.91
Ho	0.26	0.064	0.21	0.52	0.34
Er	0.64	0.16	0.56	1.28	0.94
Tm	0.076	0.024	0.096	0.16	0.11
Yb	0.46	0.14	0.63	0.80	0.59
Lu	0.088	0.019	0.11	0.089	0.066
Hf	0.60	2.11	0.26	26.10	13.30
Ta	0.006	0.028	0.023	0.045	0.023
W	0.54	157	1.91	1829	759
Pb	130	58.20	41.30	84.30	93.30
Bi	1810	1155	178	1071	2129
Th	0.31	0.006	0.25	0.040	0.011
U	2.59	0.85	0.48	0.89	0.90
Ti	150	43.70	292	40.50	25.10
Mn	446	4.10	410	158	172
Te	0.93	0.72	0.72	0.60	0.65
Ag	5.70	.64	0.90	2.43	76.70
Au	7.59	4.12	5.28	6.10	11.20
Σ REE	58.89	5.47	56.96	17.26	14.91
(La/Yb) _N *	30.26	6.79	17.36	1.54	2.36
δEu*	0.26	0.22	0.27	0.11	0.13
δCe*	0.66	0.68	0.72	0.72	0.63

注: * 单位为 1。

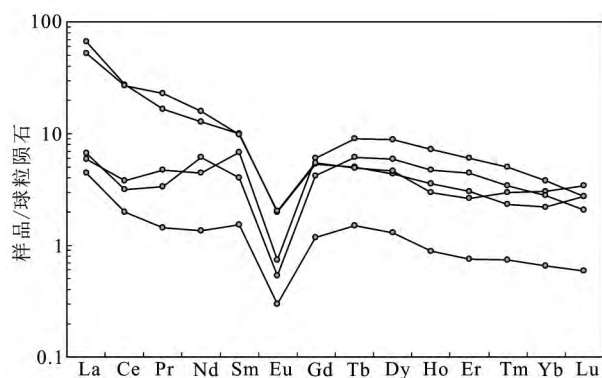


图8 包古图金矿XI号点硫化物的稀土元素配分模式
(标准化值据 Sun et al. , 1989)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns of massive sulfides from ore district XI in Baogutu (normalized data after Sun et al. , 1989)

包古图XI号金矿点可能是斑岩体系热液演化较早的产物, II号斑岩岩浆系统演化晚期分异出的含 Au-As-Bi-Sb 的岩浆热液, 在岩体热驱动作用下, 沿着岩体外围伴生断裂迁移成矿, 热液温度高、迁移距离短, 因此矿体中富含自然铋, 在热液体系中, 自然铋呈熔融态吸附金, 随着温度降低, Au-Bi 熔体沉淀并发生分解, 形成自然金-自然铋组合(郑波等, 2009)。成矿体系中的 As 在成矿早期高温条件下与 Fe-S 结合形成大量毒砂。而在高温热液体系中, Sb 的溶解度大, 只有在 < 200℃ 的低温热液体系中, Sb 矿物才能大量沉淀(Williams-Jones et al. , 1997)。XI号金矿点成矿温度较高(240 ~ 500℃), 不利于 Sb 矿化发生, 矿石中仅发育 Au-As-Bi 矿化。含矿热液在开放断裂系统迁移过程中, 温度、压力逐渐降低可能是导致 Au-As-Bi 矿化发生的主要机制。

5 包古图地区金矿成矿规律及成矿模式

5.1 成矿规律

包古图 Au-Cu 矿集区中不同类型铜矿床、金矿床在成矿时代上跨度不大, 主要集中于区内中酸性岩体、脉岩大规模侵位时期, 或略晚于中酸性岩浆侵位(李华芹等, 2000), 即 305 ~ 320 Ma 期间, 成矿流体和成矿物质部分或全部由中酸性岩浆体系提供(齐进英等, 1993; 安芳等, 2014)。但由于不同类型矿床成矿作用的差异, 导致各类矿化在空间产出位置上显示出一定的规律性。在中酸性斑岩体内部,

常发育斑岩型铜矿化, 如包古图 V 号岩体中的斑岩型 Cu-Mo-Au 矿化(图 2a, 张锐等, 2006; 申萍等, 2009)。矿化呈浸染状或细脉浸染状, 但除 V 号岩体外, 其余岩体中基本不发育斑岩型矿化或仅发育微弱蚀变, 不同岩体的矿化潜力可能受初始岩浆体系的氧逸度、含水量以及岩浆侵位过程中的磁铁矿、钛铁尖晶石、磁黄铁矿等矿物的分离结晶所控制, 而这些被认为是控制斑岩岩浆体系能否成矿的主要因素(Mungall, 2002; Simon et al. , 2003; 2008; Richards, 2011)。在斑岩体与围岩的接触带上, 主要产出石英-硫化物脉型金矿化, 主要成矿元素组合为 Au-As-Bi, 矿体受与侵入岩伴生的断裂或区内 NE 向断裂的控制, 矿化常产于斑岩体外围 500 m 范围内, 此类矿化主要发育于包古图 II 号和 V 号岩体附近, 以 II 号岩体附近的 XI 号金矿点为代表(图 2a)。在斑岩体外围 1 ~ 3 km 范围内, 发育石英脉型 Au-As-Sb 矿化, 与中酸性脉岩密切伴生, 受区内 NE 向断裂的控制, 此类金矿化在包古图地区较为普遍(图 2a), 以阔个沙也金矿床为代表。

包古图金矿集区的 2 类金矿床在空间分布上的规律性, 指示区内金矿找矿应集中于中酸性岩体内、外接触带和岩体外围中酸性脉岩密集分布区。同时 2 类金矿化元素组合分别为 Au-As-Bi 和 Au-As-Sb, 显示 As-Bi、As-Sb 化探异常叠加区可能是较有利的金矿找矿靶区。包古图地区存在一个 NS 走向的褶皱构造, 由核部的希贝库拉斯组和两翼的包古图组、太勒古拉组组成, 地表的中酸性斑岩大部分出露于希贝库拉斯组和包古图组中, 但关于该褶皱的性质仍存在争议(安芳等, 2009; 郭丽爽等, 2010)。若如笔者先前的认识, 该褶皱是一个背斜(安芳等, 2009), 且背斜构造形成的时间晚于区内中酸性斑岩的侵位, 可以在褶皱两翼的包古图组和太勒古拉组中寻找隐伏岩体及其相关的 Au-Cu 矿化。

5.2 成矿模式

早石炭世期间, 包古图地区沉积了巨厚的火山-沉积地层, 并由于构造活动, 这套火山-沉积地层中发育了一组 NE(F_1)-SN(F_2) 走向的共轭断裂系。310 ~ 320 Ma 期间, 具有岛弧地球化学特征的中酸性岩浆沿着 NE-SN 向断裂的交汇部位侵位(张连昌等, 2006; 唐功建等, 2009; 刘玉琳等, 2009; 魏少妮等, 2009; 2011; Shen et al. , 2012), 以中酸性斑岩岩株的形式产出, 略晚于斑岩岩株形成的 NNE(F_3)-NE(F_4) 向断裂组切割中酸性斑岩体(图 9)。与中

酸性岩浆有关的富含 Au-Cu-Bi-As-Sb 的热液流体在岩浆热驱动作用下迁移,在岩体内部形成斑岩型 Cu 矿化(图 9),矿化的温度为 180 ~ 500℃(宋会侠等 2007; Shen et al., 2010),矿化时代约为 310 Ma(宋会侠等 2007; Liu et al., 2009);在岩体与围岩接触带附近或者伴随岩体形成的断裂中形成以石英-硫化物脉为主的矿体(图 9),及富含 Bi 矿物的高温岩浆热液型金矿床,金矿化温度为 <240 ~ 500℃(郑波等 2009);之后与中酸性斑岩具有相同源区的中酸性脉岩侵位,穿切斑岩体和下石炭统,同时,中酸性脉岩驱动或携带热液流体向远离岩体的区域迁移,含矿热液的温度逐渐降低,并随着循环大气降水的加入,最终与中酸性脉岩一起就位于 NE 向断裂组中,形成以阔个沙也金矿为代表的金矿化,矿体主要为石英脉型或者石英网脉型,矿化温度为 170 ~ 360℃。在较高温条件下(230 ~ 360℃),形成类似于阔个沙也 II 号金矿点的矿石和矿物组合(黄铁矿_毒砂_自然金),而在较低温条件下(170 ~ 300℃),形成类似于阔个沙也 IV 号金矿点的矿石和矿物组合(自然砷_辉锑矿_自然锑_自然金_银金矿)。240 ~ 270 Ma 期间,包古图地区乃至西准噶尔和整个新疆北部

均有基性岩墙侵入(李辛子等 2004; 周晶等 2008),走向 NE,穿切 310 ~ 320 Ma 期间形成的中酸性斑岩、脉岩以及 310 Ma 左右发生的金矿化体(图 9)。二叠纪—三叠纪,区内处于抬升剥蚀阶段,导致包古图地区的 Au-Cu 矿化剥露于地表。

5.3 矿床成因类型

包古图金矿集区的 2 类金矿化在成因上均与区内中酸性岩浆活动有关,由于部分中酸性斑岩体中发育斑岩型铜矿化,金矿化可能被认为是与斑岩系统相伴生的浅成低温热液型金矿床。对比发现,包古图地区的金矿化与典型浅成低温热液型金矿存在差别(White et al., 1995; Cooke et al., 2000; Hedenquist et al., 2000),包古图地区 Au-Cu 矿化的深度约为 1 ~ 2 km(Shen et al., 2010; 2013),而典型浅成低温热液型金矿的矿化深度通常为 300 ~ 800 m;浅成低温热液金矿的矿石中常富含贱金属元素(如闪锌矿、方铅矿),尽管包古图金矿中也含少量闪锌矿,但含量明显较低;包古图金矿集区矿体两侧蚀变范围小,不发育浅成低温热液金矿中广泛存在的高级泥化(高硫型)或石英-冰长石化(低硫型);包古图石英脉型 Au-As-Sb 矿化成矿流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为

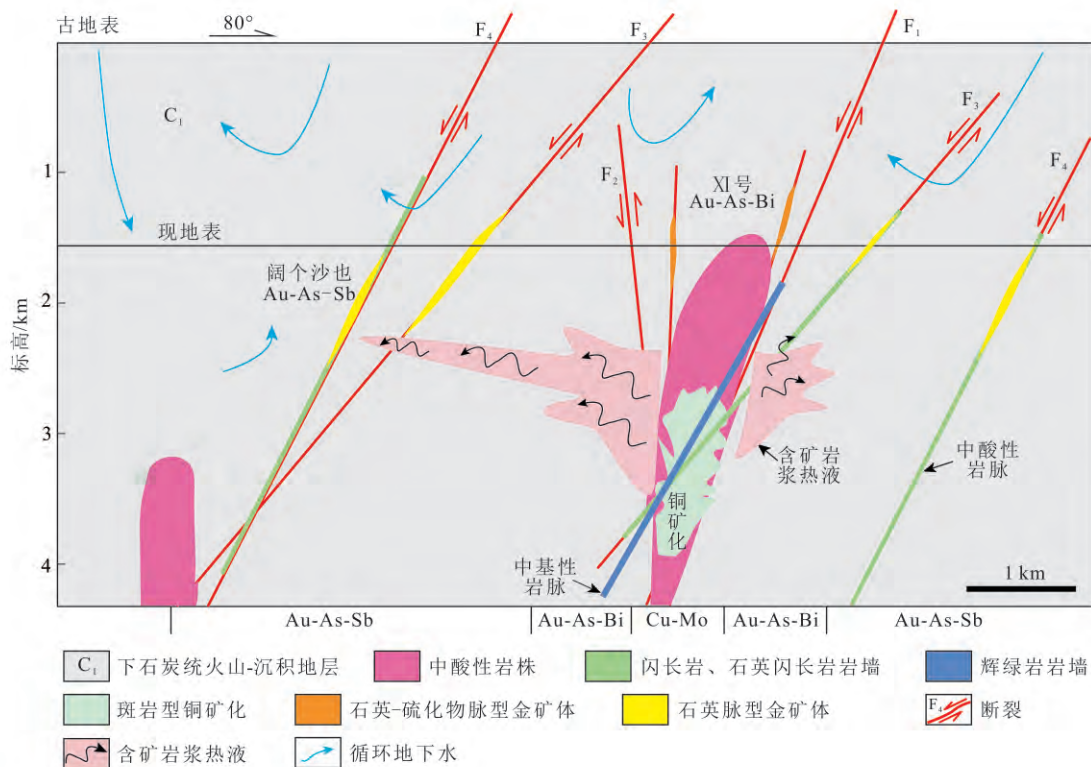


图 9 包古图地区 Cu-Au 矿化模式示意图

Fig. 9 Schematic model of Cu-Au mineralization in Baogutu area

4‰~12‰,明显高于新疆北部产于斑岩系统外围的低硫型浅成低温热液金矿床(-12‰~0‰,Yang et al.,2009)。

包古图金矿集区的金矿展布规律及不同类型金矿中主要的成矿元素组合,和与侵入岩相关的金成矿系统非常相似(Lang et al.,2000; Baker,2002)。包古图地区与金成矿有关的岩体均为中等还原性斑岩体,含钛铁矿而缺失磁铁矿(魏少妮等,2014b),与典型的与侵入岩相关的金矿中的岩体特征相似,而与斑岩系统中磁铁矿系列氧化性岩体的特征不同(Mungall,2002)。在与侵入岩有关的金矿成矿系统中,从岩体向外围,成矿元素组合和矿体结构构造具有明显的分带性,岩体内部和接触带常形成浸染状、席状、角砾状和脉状 Au-Bi-Te-As±Mo±W 矿化,而岩体外围形成脉状 Au-As-Sb-Ag-Hg 矿化,且外围矿化常与岩墙伴生(Lang et al.,2000),包古图地区2类金矿化的元素组合和产出形式与其非常相似。在与侵入岩相关的金矿成矿系统中,Au-As-Sb 矿化常形成于1~2 km 深度范围内,成矿温度为150~300℃,自然金主要与毒砂或含砷黄铁矿伴生,典型实例如美国阿拉斯加的 Donlin Creek 金矿和加拿大育空的 Brewery Creek 金矿(Baker,2002),包古图地区的 Au-As-Sb 矿化也具有以上特征。与侵入岩相关的金矿成矿系统中常见含 CO₂ 的流体包裹体,主要见于成矿深度大于2 km 的矿体,而浅部以低盐度水溶液包裹体为主,另有少量含 CO₂ 的水溶液包裹体(Baker,2002)。在包古图地区出露的矿体,其中的群体包裹体气相成分以 H₂O 为主,含少量 CO₂ 和 CH₄,未发现富 CO₂ 多相包裹体(沈远超等,1993),矿体可能代表了与侵入岩有关的金矿成矿系统中浅部矿化的产物。

6 结 论

包古图地区的金矿化作用主要与中酸性斑岩的侵位有关,含矿岩浆热液在中酸性斑岩内部形成斑岩型铜矿化,而在岩体与围岩接触带上,形成高温岩浆热液型 Au-As-Bi 矿化,矿体走向常与岩体边界一致或呈放射状垂直岩体边界,含矿断裂与岩体连通,代表性的金矿点包括包古图 X 号、XI 号、XII 号,矿体为石英-硫化物脉型,矿物组合为黄铁矿-毒砂-自然铋-辉铋矿-黄铜矿-自然金;部分含矿岩浆热液,与中酸性脉岩沿着略晚于斑岩侵位形成的 NE-NNE 向

次级断裂迁移,在岩体外围的次级断裂中沉淀成矿,形成石英脉型或石英网脉型的矿体,矿体与脉岩受同组断裂系统的控制,在空间上平行展布,由于热液迁移距离较远,温度明显低于斑岩铜矿化的温度,形成中低温矿化元素组合 Au-As-Sb,矿物组合为黄铁矿-毒砂-自然铋-辉铋矿-自然金-银金矿,代表性金矿为阔个沙也金矿。从目前已发现的包古图金矿床的分布特征来看,区内下一步找矿工作应集中于中酸性斑岩与围岩的接触带以及岩体外围的 NE-NNE 向断裂(脉岩)密集分布区内,再结合化探 As-Sb 或 As-Bi 异常,有利于寻找金矿化体。尽管包古图地区的金矿化主要产于斑岩体附近,但其地质特征和矿化类型类似于与侵入岩有关的金矿成矿系统。

志 谢 感谢匿名审稿专家提出的修改意见和建议,对于完善本文具有重要意义。野外工作过程中,招金北疆矿业公司马学勇主任、邵鹏经理提供了诸多帮助和便利,在此表示衷心的感谢。

参考文献/References

- 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.
- 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]. 北京大学博士论文.
- 安 芳,朱永峰. 2014. 新疆西准噶尔包古图金矿微量元素地球化学研究[J]. 岩石矿物学杂志,33(2): 329-342.
- 陈 博,朱永峰. 2010. 新疆克拉玛依百口泉蛇绿混杂岩中辉长岩岩石学和地球化学研究[J]. 岩石学报,26(8): 2287-2298.
- 陈 博,朱永峰. 2011. 新疆达拉布特蛇绿混杂岩中辉长岩岩石学、微量元素地球化学和锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 岩石学报,27(6): 1746-1758.
- 陈 石,郭召杰. 2010. 达拉布特蛇绿岩的时限和属性以及对西准噶尔晚古生代构造演化的讨论[J]. 岩石学报,26(8): 2336-2344.
- 成 勇,张 锐. 2006. 新疆西准包古图地区铜金成矿规律浅析[J]. 地质与勘探,7(4): 11-15.
- 辜平阳,李永军,张 兵,佟丽莉,王军年. 2009. 西准达尔布特蛇绿岩中辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测定[J]. 岩石学报,25(6): 1364-1372.
- 郭丽爽,刘玉琳,王政华,宋 达,许发军,苏 犁. 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.
- 韩宝福,季建清,宋 彪,陈立辉,张 磊. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)后碰撞深成岩浆活动的时限[J]. 岩石

- 学报, 22(5): 1077_1086.
- 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.
- 何国琦, 刘建波, 张越迁, 徐新. 2007. 准噶尔盆地西缘克拉玛依早古生代蛇绿混杂岩带的厘定[J]. 岩石学报, 23(7): 1573_1576.
- 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.
- 李辛子, 韩宝福, 季建清, 李宗怀, 刘志强, 杨斌. 2004. 新疆克拉玛依中基性岩墙群地质地球化学和 K-Ar 年代学[J]. 地球化学, 33: 574_584.
- 刘玉琳, 郭丽爽, 宋会侠, 宋彪, 张锐, 许发军, 张云孝. 2009. 新疆西准噶尔包古图斑岩铜矿年代学研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39: 1466_1472.
- 罗照华, 莫宣学, 卢欣祥, 陈必河, 柯珊, 侯增谦, 江万. 2007. 透岩浆流体成矿作用——理论分析与野外证据[J]. 地学前缘, 14(3): 165_183.
- 齐进英, 熊义大. 1992. 新疆包古图金矿床特征及其成因[J]. 矿床地质, 11(2): 154_164.
- 申萍, 沈远超, 刘铁兵, 张锐, 王京彬, 张云孝, 孟磊, 王丽娟, 汪疆. 2009. 新疆包古图斑岩型铜钼矿床容矿岩石及蚀变特征[J]. 岩石学报, 25(4): 777_792.
- 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.
- 宋会侠, 刘玉琳, 屈文俊, 宋彪, 张锐, 成勇. 2007. 包古图斑岩铜矿矿床地质特征[J]. 岩石学报, 23(8): 1981_1988.
- 唐功建, 王强, 赵振华, Wyman D A, 陈海红, 贾小辉, 姜子琦. 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, 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.
- 魏少妮, 程军峰, 喻达兵, 郑波, 朱永峰. 2011. 新疆包古图 II₁ 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, 安芳. 2014a. 新疆包古图地区斑岩型铜矿化特征和成矿元素迁移规律初探[J]. 矿床地质, 33(1): 165_180.
- 魏少妮, 朱永峰. 2014b. 新疆西准噶尔包古图地区中酸性侵入岩的岩石学、年代学和地球化学研究[J]. 岩石学报, 待刊.
- 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.
- 张立飞. 1997. 新疆西准噶尔唐巴勒蓝片岩⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄及其地质意义[J]. 科学通报, 42: 2178_2181.
- 张弛, 黄萱. 1992. 新疆西准噶尔蛇绿岩形成时代和环境的探讨[J]. 地质论评, 38(6): 509_524.
- 张连昌, 万博, 焦学军, 张锐. 2006. 西准包古图含铜斑岩的埃达克岩特征及其地质意义[J]. 中国地质, 33(3): 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.
- 郑波, 张晋国, 陈刚, 朱永峰. 2013. 新疆包古图金矿四矿区 L7 号脉中的特殊矿物组合及其成矿意义[J]. 矿床地质, 32(6): 1117_1138.
- 郑波, 朱永峰, 安芳. 2014. 新疆包古图地区金矿床矿化类型和与围岩关系研究[J]. 矿床地质, 33(3): 558_574.
- 周晶, 季建清, 韩宝福, 马芳, 龚俊峰, 徐芹芹, 郭召杰. 2008. 新疆北部基性岩脉⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学研究[J]. 岩石学报, 24: 997_1010.
- 朱永峰, 徐新. 2006. 新疆塔尔巴哈台山发现早奥陶世蛇绿混杂岩[J]. 岩石学报, 22: 2833_2842.
- 朱永峰, 何国琦, 安芳. 2007. 中亚成矿域核心地区地质演化与成矿规律[J]. 地质通报, 26(9): 1167_1177.
- 朱永峰. 2014. 中亚成矿域核心区地质演化和巨型成矿带划分[J]. 矿床地质, 33(3): 471_485.
- An F and Zhu Y F. 2009. Significance of natvie arsenic in the Baogutu gold deposit, Western Junggar, Xinjiang, NW China[J]. Chinese Science Bulletin, 54(10): 1744_1749.
- An F and Zhu Y F. 2010. Natvie antimony in the Baogutu gold deposit (west Junggar, NW China): Its occurrence and origin[J]. Ore Geology Review, 37: 214_223.
- Baker T. 2002. Emplacement depth and carbon dioxide-rich fluid inclusions in intrusion-related gold deposits[J]. Econ. Geol., 97: 1111_1117.
- Bau M and Dulski P. 1995. Comparative study of yttrium and rare earth element behaviors in fluorite-rich hydrothermal fluids[J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 119: 213_223.
- Cooke D R and Simmons S F. 2000. Characteristics and genesis of epithermal gold deposits[J]. Reviews in Economic Geology, 13: 221_244.
- Han B F, He G Q and Wang S G. 1999. Postcollisional mantle-derived magmatism, underplating and implications for basement of the Junggar Basin[J]. Science in China (Series D), 42: 113_119.
- Hedenquist J W, Arribas R A and Gonzalez-Urien E. 2000. Exploration for epithermal gold deposits[J]. Reviews in Economic Geology, 13: 245_277.
- Lang J R, Baker T, Hart C J R and Mortensen J K. 2000. An exploration model for intrusion-related gold systems[J]. Society of Economic

- Geologists Newsletter ,40: 1 ,6_15.
- Liu Y L , Guo L S , Song H X , Song B , Zhang R , Xu F J and Zhang Y X. 2009. Geochronology of Baogutu porphyry copper deposit in Western Junggar area ,Xinjiang of China[J]. Science in China: Series D_Earth Science ,52(10) : 1543_1549.
- Mungall J E. 2002. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposit[J]. Geology ,30: 915_918.
- Richards J P. 2011. High Sr/Y arc magmas and porphyry Cu \pm Mo \pm Au deposits: Just add water[J]. Econ. Geol. ,106: 1075_1081.
- Shen P , Shen Y C , Liu T B , Meng L , Dai H W and Yang Y H. 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 , Wang J B , Zhu H P , Wang L J and Meng L. 2010. Methane-rich fluid evolution of the Baogutu porphyry Cu-Mo-Au deposit , Xinjiang , NW China [J]. Chemical Geology ,275: 78_98.
- Shen P , Shen Y C , Pan H D , Li X H , Dong L H , Wang J B , Zhu H P , Dai H W and Guan W N. 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 P and Pan H D. 2013. Country-rock contamination of magmas associated with the Baogutu porphyry Cu deposit , Xinjiang , China [J]. Lithos , 177: 451_469.
- Simon G , Kesler S E and Chrysosoulis S. 1999. Geochemistry and textures of gold-bearing arsenian pyrite , Twin Creeks , Nevada: Implications for deposition of gold in Carlin-type deposits [J]. Econ. Geol. ,94: 405_422.
- Simon A C , Pettke T , Candela P A , Piccoli P M and Heinrich C A. 2003. Experimental determination of Au solubility in rhyolite melt and magnetite: Constraints on magmatic Au budgets [J]. American Mineralogist ,88: 1644_1651.
- Simon A C , Candela P A , Piccoli P M , Mengason M and Englander L. 2008. The effect of crystal-melt partitioning on the budgets of Cu , Au , and Ag [J]. American Mineralogist ,93: 1437_1448.
- 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 G J , Wang Q , Wyman D A , Li Z X , Zhao Z H , Jia X H and Jiang Z Q. 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.
- White N C and Hedenquist J W. 1995. Epithermal gold deposits: Styles , characteristics and exploration [J]. Society of Economic Geologists Newsletter ,23: 1 ,9_13.
- Williams-Jones A E and Norman C. 1997. Controls of mineral parageneses in the system Fe-Sb-S-O [J]. Econ. Geol. ,92: 308_324.
- Yang F Q , Mao J W , Bierlein F P , Pirajno F , Zhao C S , Ye H S and Liu F. 2009. A review of the geological characteristics and geodynamic mechanisms of Late Paleozoic epithermal gold deposits in North Xinjiang , China [J]. Ore Geology Reviews ,35: 217_234.
- Yin J Y , Yuan C , Sun M , Long X P , Zhao G C , Wong K P , Geng H Y and Cai K D. 2010. Late Carboniferous high-Mg dioritic dikes in Western Junggar , NW China: Geochemical features , petrogenesis and tectonic implications [J]. Gondwana Research ,17: 145_152.
- Zhao K D and Jiang S Y. 2007. Rare earth element and yttrium analyses of sulfides from the Dachang Sn-polymetallic ore field , Guangxi Province , China: Implication for ore genesis [J]. Geochemical Journal ,41: 121_134.
- Zhu Y F , Chen B , Xu X , Qiu T and An F. 2013. A new geological map of the western Junggar , north xinjiang (NW China) : Implications for Paleoenvironmental reconstruction [J]. Episodes ,36(3) : 205_220.