

文章编号: 0258-7106(2014)03-0521-20

哈萨克斯坦萨亚克铜矿田代表性矿区矽卡岩矿物的组成及其意义研究*

安芳¹, 王居里¹, 朱永峰², Eleonora Seitmuratova³

(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 Laboratory of Geological Formations, K. Satpaev Institute of Geological Sciences, Almaty 050010, Kazakhstan)

摘要 哈萨克斯坦萨亚克铜矿田产于晚石炭世闪长玢岩、石英闪长玢岩或花岗闪长玢岩与中石炭统灰岩的接触带上, 铜矿体呈透镜状、脉状产于矽卡岩中。其成矿期可以划分为4个阶段: 石榴子石矽卡岩阶段(I)、绿帘石-石榴子石矽卡岩阶段(II)、磁铁矿阶段(III)和石英-硫化物阶段(IV)。铜矿化主要发生在石英-硫化物阶段, 形成石英、黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿, 呈浸染状或脉状产于不同类型的矽卡岩或块状磁铁矿中。矽卡岩中的石榴子石有3种类型: 石榴子石矽卡岩中的钙铁榴石(Grt-a)、交代钙铁榴石的含Al钙铁榴石(Grt-b)和绿帘石-石榴子石矽卡岩中具有环带结构的石榴子石(Grt-c)。从第一类到第三类石榴子石, 平均 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 从<1%逐渐升高至~5%, 分子式中平均 Fe^{3+} 原子数从2.15逐渐降低至1.57, 显示成矿体系中Al的摩尔浓度逐渐升高、氧逸度逐渐降低。绿帘石-石榴子石矽卡岩中发育少量辉石, 属于钙铁辉石-透辉石系列, 在辉石分类图中落于普通辉石范围内。矽卡岩的地质特征、矿物组合和矿物化学特征表明, 萨亚克矽卡岩是与花岗岩类侵入岩有关的岩浆热液与灰岩通过接触交代反应形成的钙质矽卡岩, 随着矽卡岩化和成矿作用的进行, 成矿体系的温度和氧逸度逐渐降低、pH值升高, 导致磁铁矿和黄铁矿-磁黄铁矿-黄铜矿矿物组合依次发生沉淀。

关键词 地质学, 矽卡岩, 矿物组合, 矿物化学, 萨亚克, 哈萨克斯坦

中图分类号: P618.41

文献标志码: A

Skarn mineral assemblage in representative ore districts of Sayak copper orefield, Kazakhstan, and its genetic implications

AN Fang¹, WANG JuLi¹, ZHU YongFeng² and Eleonora Seitmuratova³

(1 State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shannxi, China; 2 Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3 Laboratory of Geological Formations, K. Satpaev Institute of Geological Sciences, Almaty 050010, Kazakhstan)

Abstract

The skarn copper orefield in Sayak is hosted in the contact zone of Late Carboniferous granitoid intrusions and Middle Carboniferous limestone. Orebodies occur in lenticular and veinlet forms in skarn. The hydrothermal process can be divided into four stages: garnet skarn stage (I), epidote-garnet skarn stage (II), magnetite stage (III) and quartz-sulfide stage (IV). The copper mineralization is hosted in the stage IV quartz-sulfide veins

* 本文得到“十二五”国家科技支撑计划项目(编号: 2011BAB06B01-03)、国家自然科学基金项目(编号: 41203032)和大陆动力学国家重点实验室自主研究项目的联合资助

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 2014-01-18; 改回日期 2014-04-22。秦思婷编辑。

and shows a mineral assemblage of quartz-pyrite-chalcopyrite-pyrrhotite. Three types of garnet was recognized in skarn, i. e., yellow green garnet in garnet skarn, colorless garnet replacing the first type, and colorless garnet with zonation in epidote-garnet skarn. The compositions of garnets of different types are also distinct. With the evolution of the hydrothermal system, the average $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ content in garnet increased from $<1\%$ to $\sim 5\%$, while the Fe^{3+} aufp in garnets decreased from 2.15 to 1.57, indicating the decrease of oxygen fugacity and increase of Al content in the ore-forming system. The compositions of garnet and pyroxene in skarn are very similar to those from world-class skarn Mo-Cu-Au deposits. Based on geological characteristics, mineral assemblages and chemistry of skarn minerals, the authors have reached the conclusion that the mineralization of the Sayak skarn copper ore district was generated by the reaction between magmatic water and limestone. The increase of pH, decrease of temperature and oxygen fugacity induced the deposition of magnetite, pyrite, chalcopyrite and pyrrhotite.

Key words: geology, skarn, mineral assemblage, chemistry of minerals, Sayak, Kazakhstan

中亚成矿域环巴尔喀什-准噶尔成矿省中发育多个斑岩型铜矿田(图 1a、b),如哈萨克斯坦的科翁腊德、阿克斗卡等,都是世界级的超大型斑岩铜矿床。除了斑岩型铜矿床,环巴尔喀什成矿带内还分布有矽卡岩型铜矿床,部分规模达到大型,如萨亚克大型铜矿田,发育斑岩型-矽卡岩型和石英脉型 Mo-Cu-Au 矿床组合,其中,以矽卡岩型矿床为主。环巴尔喀什成矿带主要分布于哈萨克斯坦境内,构造上与中国新疆西准噶尔地区相连(何国琦等,2006)。对环巴尔喀什成矿带内典型矿床进行了地质特征及矿床成因的详细解析,对成矿带对比研究和区域成矿模式的建立有重要参考价值。

萨亚克是环巴尔喀什成矿带内规模最大的矽卡岩型矿床,其位于哈萨克斯坦巴尔喀什市以东 200 km 处,距离巴尔喀什湖 40 km(图 1c)。陈宣华等(2012)通过磷灰石裂变径迹测年和热历史模拟,揭示了萨亚克铜矿田从深成岩浆侵入活动、成矿作用、区域冷却到剥露作用的全过程,发现萨亚克地区有 2 期矽卡岩型铜成矿作用,分别发生于 335 Ma 和 308 Ma 左右,而矽卡岩的剥露作用则主要发生在晚白垩世晚期。另外,陈宣华等(2010)还总结了萨亚克大型铜矿田的矿床地质特征与成矿模式。由于境外的野外工作难度较大,导致对该矿田矽卡岩型矿化的矿物组成、成矿阶段、成因类型以及流体演化过程的认识相对薄弱。矽卡岩型矿床中矿物组合的分带性、矿物组合及其形成顺序,乃至矽卡岩矿物的化学组成等,对于矽卡岩矿床的成因、矿化类型以及成矿机制具有指示意义(艾永富等,1981;Einaudi et al., 1981;杨富全等,2007;Xu et al., 2010;于玉帅等,2012;吕书君等,2013)。本文在前人研究的基础上,对萨亚克大型铜矿田萨亚克 I 和塔斯陶矿区矽卡岩

型矿化的分带性、阶段性及其矽卡岩矿物化学进行了研究,并探讨了矽卡岩的成因类型、矽卡岩矿物组合、成分变化对矿化元素类型的控制以及矽卡岩型矿化演化的过程。

1 矿田地质

中亚成矿域古生代地质演化的复杂性导致域内成矿物质的多次迁移和聚集,形成了多个世界级的金属矿床(涂光炽,1999;Heinhorst et al., 2000;何国琦等,2006;申萍等,2010;李光明等,2008;Zhu et al., 2013)。其核心部分由阿尔泰成矿省、环巴尔喀什-准噶尔成矿省和中-南天山成矿省构成,各成矿省内包含多个成矿带,而每个成矿带则由若干个矿集区或矿田组成(朱永峰等,2007)。环巴尔喀什-准噶尔成矿省是中亚成矿域中最主要的金属(铜-金-多金属)成矿区,由斋桑-萨吾尔成矿带、波谢库尔-成吉思-塔尔巴哈台成矿带、环巴尔喀什成矿带和巴尔喀什成矿带组成(图 1a、b)。其中,环巴尔喀什成矿带包括火山沉积型铁-锰矿带和矽卡岩-斑岩型铜-钼-金多金属成矿带,后者向东延伸进入中国的西准噶尔地区,西准噶尔地区出露哈图大型金矿床(沈远超等,1993;安芳等,2007)。包古图中型斑岩铜矿床(图 1b)(张锐等,2006;魏少妮等,2010;Shen et al., 2012)及其外围多个 Au-Bi 或 Au-As-Sb 矿化点(沈远超等,1993;An et al., 2009;2010;郑波等,2009;2013)。

萨亚克大型铜矿田是环巴尔喀什矽卡岩-斑岩型成矿带中发育的世界级大型铜矿田之一(图 1b),以矽卡岩型为主。矿田形成于巴尔喀什大陆边缘泥盆纪—石炭纪火山-岩浆弧的萨亚克 WNW 向复向

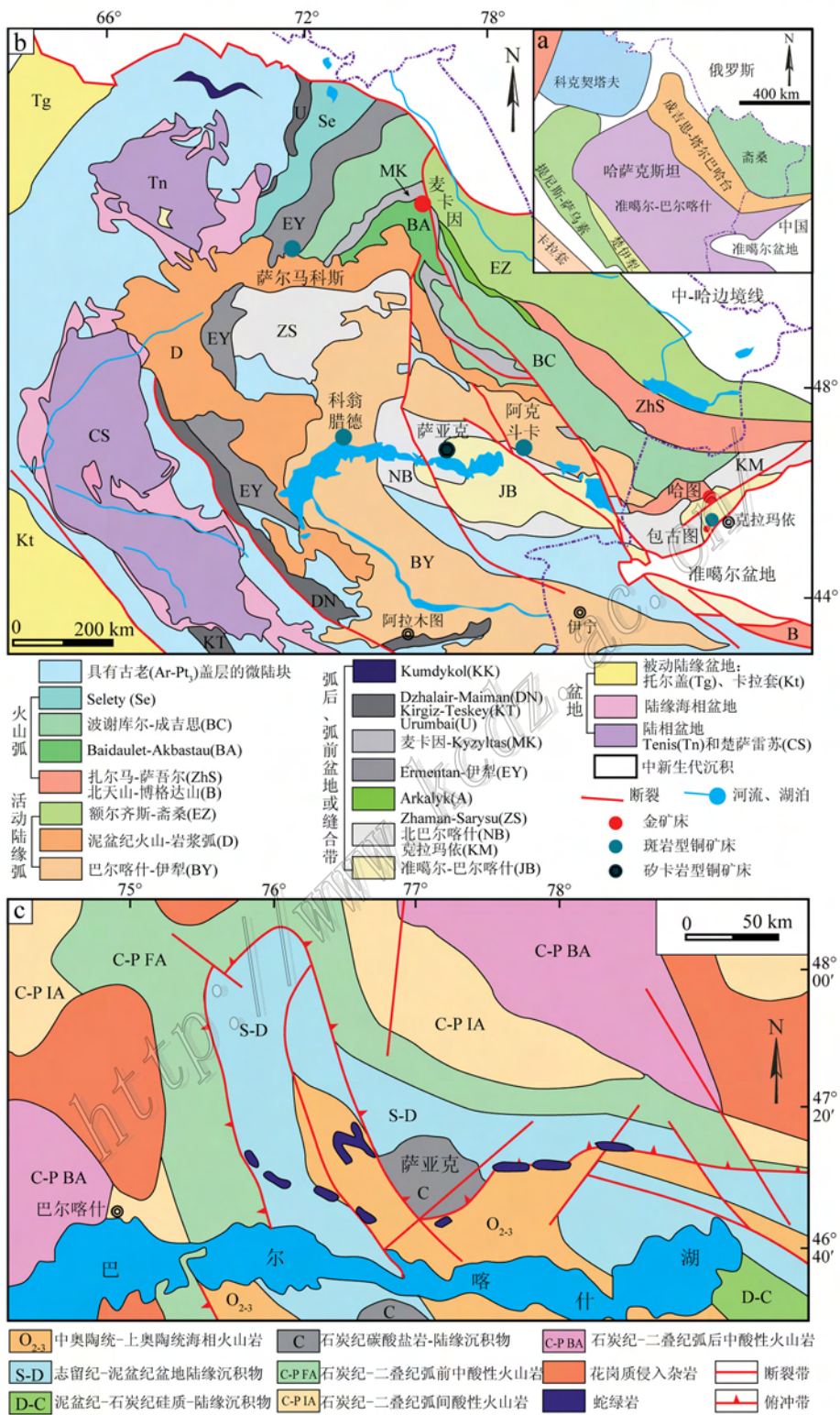


图 1 中亚成矿域核心部位主要金属成矿省分布简图(a)(据申萍等,2010)、环巴尔喀什-准噶尔成矿省地质构造及大型矿田略图(b)(据李光明等,2008; 申萍等,2010; 陈宣华等,2012)和萨亚克铜矿田大地构造位置(c)(陈宣华等,2012)

Fig. 1 The distribution of metallic mineralization provinces in central part of Central Asian metallogenic belt(a)(after Shen et al., 2010), geological sketch map of Circum Balhaskh-Junggar metallogenic province and the distribution of world-class orefields(b)(after Li et al., 2008; Shen et al., 2010; Chen et al., 2012) and tectonic location of the Sayak copper ore field(c)(after Chen et al., 2012)

斜核部(Kroner et al., 2008; 陈宣华等, 2010, 2012)(图 1c)泥盆纪—石炭纪火山-岩浆弧及赋存于其中的斑岩型、矽卡岩型矿田是晚古生代期间成吉思火山弧伸展弧后盆地(Kazyksky 盆地)洋壳向巴尔喀什大陆俯冲的产物(Bespaev et al., 2004)。萨亚克复向斜南翼和南西翼产状较陡,而北翼较缓,由石炭纪—二叠纪大陆边缘火山-沉积岩、石炭纪残留海相碳酸盐岩-陆源沉积岩、泥盆纪—石炭纪硅质岩-陆源沉积岩、志留纪—泥盆纪陆缘沉积物和中-晚奥陶世海相火山岩组成,少量蛇绿岩碎片沿 WNW 向断裂断续分布(图 1c)。由于后期地质构造复杂,导致复向斜被不同方向、规模和类型的断裂构造切割,其中以 NW 向和 NE 向断裂最为发育,其次为 SN 向和 EW 向断裂。萨亚克铜矿田不同类型的矿化产于中-下石炭统碳酸盐-陆源沉积岩中,包括中石炭统 Kungisayakskaya 组、Tastykudukskaya 组和下石炭统 Burultasskaya 组(图 2a, b),总厚度约 4000 m,主要由砂岩、砾岩、粗砂岩、灰岩以及凝灰质砂岩组成。其中, Tastykudukskaya 组由厚约 200 m 的礁灰岩、生物碎屑灰岩夹凝灰质粉砂岩和泥岩组成(图 2c),为萨亚克矽卡岩型矿化的形成提供了有利的围岩条件。

构成萨亚克复向斜的所有火山-沉积地层均被萨亚克杂岩体所侵位,该杂岩体由一系列独立岩体组成,分布于复向斜的中心和南、北边缘(图 2a),接触带陡立(图 2b)。不同成分侵入岩的侵位顺序为:早期形成边缘相的辉长岩、辉石闪长岩和闪长岩,其中,闪长岩的锆石 SHRIMP 年龄为 335 Ma;中期形成大量的石英闪长岩和花岗闪长岩,花岗闪长岩的侵位时代为 308 Ma;晚期为黑云母-角闪石花岗岩(陈宣华等, 2012)(图 2a~c)。早期的闪长岩及中期的石英闪长岩、花岗闪长岩与成矿关系密切,主要为 I 型花岗岩,具有埃达克岩的地球化学特征,岩浆源区为亏损地幔(刘刚等, 2012)。

萨亚克大型铜矿田由多个矽卡岩型铜矿床(如萨亚克 I、墨尔德拜、塔斯陶、萨亚克 III 和詹巴斯)、斑岩型 Cu-Mo 矿床(萨亚克 IV、萨亚克 V 和别尔卡拉)和石英脉型 Mo-Cu-Au 矿床(如珠巴克等)组成(图 2a)。矿田内岩墙群密集分布,穿切岩体和围岩,岩性为花岗闪长玢岩、石英闪长玢岩、闪长玢岩和辉长玢岩等(图 2a, b),主要有 2 期,早期走向 NE,含高品位的 Cu-Mo 矿化,晚期走向 NW,具有低品位的稀有金属和铜矿化(陈宣华等, 2010)。萨亚克矿田矽卡岩型矿床主要受背斜构造控制(图 3a),规模最大

的矿化产于复向斜的鞍状背斜顶部,矿化主要产于石英闪长岩、花岗闪长岩与中石炭统 Tastykudukskaya 组灰岩的接触带上(图 2b, c),接触交代作用发育,形成广泛分布的矽卡岩及相关矿化,矿化元素组合为 Cu-Au-Mo,岩体内发育不同程度的斑岩型蚀变矿化,主要有硅化、绢云母化、钾长石化、绿帘石化和赤铁矿化等(陈宣华等, 2010)。矽卡岩矿床以萨亚克 I、III 和塔斯陶为代表,本文用于研究的样品来自萨亚克 I 和塔斯陶矿区(图 2a)。

2 矽卡岩

含铜矽卡岩矿体主要受中石炭统灰岩与晚石炭世石英闪长岩、花岗闪长岩的接触带控制,在灰岩层内部,常见含铜矽卡岩矿体受灰岩控制,呈层状展布(图 3a),矽卡岩带的宽度约为 1~1.5 km,沿地层和侵入岩接触带水平延伸几百米至 4~6 km 以上。矽卡岩形态不规则,在大理岩和蚀变花岗闪长岩、石英闪长岩中,主要受其中的裂隙控制,呈不规则细脉或网脉状产出。

矿区接触蚀变矿化分带明显,从灰岩向侵入岩,依次出现灰岩、大理岩、矽卡岩和侵入岩带(图 3a),各带之间依次渐变过渡,大理岩带中常见重结晶程度较高的大理岩呈脉状产出(图 3b),大理岩与矽卡岩之间的界线有突变(图 3c)和渐变 2 种。矽卡岩带可进一步划分为石榴子石矽卡岩带和绿帘石矽卡岩带(图 3a),石榴子石矽卡岩主要由石榴子石组成,分布于靠近侵入岩的一侧,绿帘石-石榴子石±辉石±绿泥石矽卡岩(图 3d),主要分布于靠近大理岩的一侧,含绿帘石、石榴子石、辉石、绿泥石和石英。这 2 类矽卡岩空间上的叠加区域非常广泛,矿区常见绿帘石-石榴子石±辉石矽卡岩呈脉状穿切石榴子石矽卡岩(图 3e)。矽卡岩带中块状或脉状磁铁矿发育,但规模不大,无法作为独立铁矿体进行开采。矽卡岩与侵入岩之间也为逐渐过渡,常见 2 类矽卡岩呈脉状或网脉状穿切石英闪长岩、花岗闪长岩(图 3f)。岩体内常发育类似于斑岩型的蚀变矿化,如钾长石化、硅化、绿帘石-绿泥石化等(图 3a, g),局部可见斑岩型 Cu-Mo 矿化,形成含矿石英细脉、网脉或星散状蚀变岩,矿石矿物为黄铁矿、黄铜矿和辉钼矿,在萨亚克 I 矿区这类矿体较普遍, $\mu(\text{Mo})$ 平均为 0.25%,局部高达 1%,与磁铁矿、含 Cu-Mo-Au 矽卡岩型矿石伴生或共生。

- 上石炭统Ushmalinskaya组中基性火山岩
 上泥盆统火山-陆缘沉积岩
 辉绿岩
 闪长岩、辉长岩
 中石炭统Kungisayakskaya组凝灰质陆缘沉积岩
 中-下泥盆统火山-陆缘沉积岩
 花岗岩
 花岗闪长岩
 中石炭统Tastykudukskaya组凝灰质陆缘沉积岩
 志留系细粒陆缘碎屑沉积岩
 闪长玢岩
 超基性岩
 下石炭统Burultasskaya组凝灰质陆缘沉积岩
 上奥陶统Kazykskaya组细碧角闪岩
 石英闪长岩
 砂卡岩
 下石炭统
 中奥陶统Itmurundinskaya组拉斑玄武岩
 酸性-基性岩墙
 凝灰质粉砂岩
 泥岩
 断裂
 泥质灰岩
 礁灰岩, 生物碎屑灰岩
 斑岩型铜矿
 石英脉型铜矿
 采样位置

图 2 萨亚克铜矿田区域地质简图(a)(据陈宣华等,2010;Bespaev et al., 2004)、萨亚克铜矿田 A-B-C 地质剖面图(b)(据陈宣华等,2012)和萨亚克 I 矿区地质图(c)(Bespaev et al., 2004)

Fig. 2 Geological sketch map of the Sayak skarn copper orefield(a)(after Chen et al., 2010; Bespaev et al., 2004), geological section of A-B-C in the Sayak skarn copper orefield(b)(after Chen et al., 2012) and geological map of the Sayak I skarn deposit(c)(after Bespaev et al., 2004)

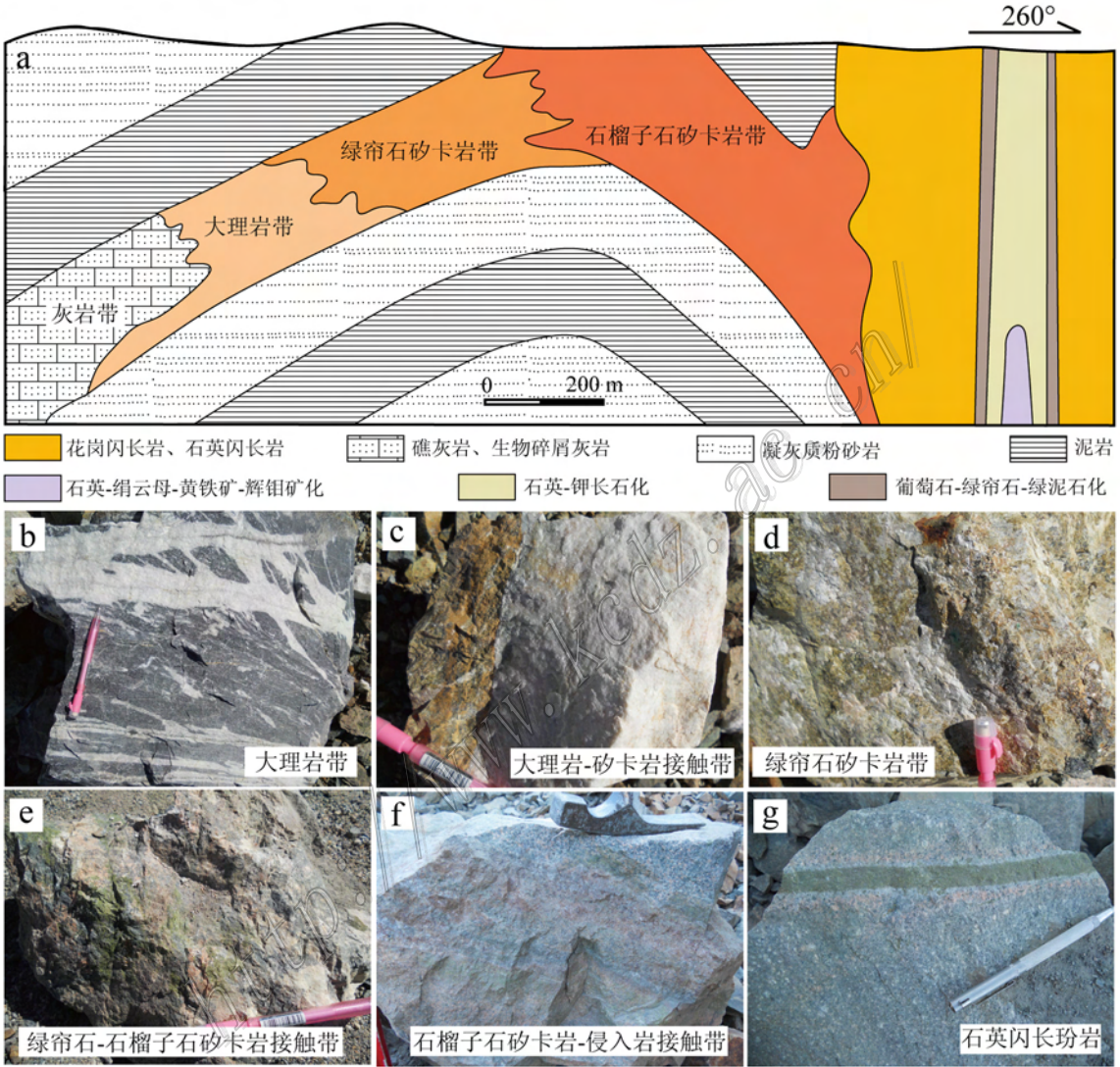


图 3 萨亚克砂卡岩矿区蚀变分带示意图及各带岩石特征

a. 砂卡岩蚀变矿化分带示意图(据 Bespaev et al., 2004 修改); b. 大理岩带; c. 大理岩与砂卡岩截然接触关系; d. 砂卡岩带中的绿帘石-石榴子石砂卡岩; e. 砂卡岩带中的石榴子石砂卡岩,其中有绿帘石砂卡岩呈脉状穿插; f. 蚀变石英闪长岩中的脉状砂卡岩; g. 石英闪长岩中类似于斑岩矿床中的蚀变,沿裂隙呈对称带状发育

Fig. 3 Alteration and mineralization zonation in the Sayak skarn ore district and rocks from various belts
a. Schematic zonation map for Sayak skarn mineralization (modified after Bespaev et al., 2004); b. Transitional zone between limestone and marble, marble crosscutting limestone as veinlet; c. Sharp contact between marble and skarn; d. Epidote-bearing skarn; e. Epidote-bearing skarn crosscutting garnet skarn; f. Skarn crosscutting porphyritic diorite as veinlet; g. Porphyritic diorite-bearing porphyry type alteration, such as K-feldspathization, silicification and epidotization

铜矿体主要产于砂卡岩带内,呈透镜状,单个矿体一般可长达1~1.5 km,宽600~700 m,厚10~15 m。矿化主要呈星散浸染状、细脉状、网脉状或不规

则透镜状,脉状和网脉状矿体主要为石英-硫化物脉或硫化物脉,透镜状矿体中的矿石呈块状,由金属硫化物集合体组成。矿石中主要矿石矿物为黄铁矿、

黄铜矿、磁黄铁矿和斑铜矿。矿石根据矿物组合的不同可分为 3 类(陈宣华等,2010): ① 斑铜矿±黄铜矿型, $w(\text{Cu})$ 平均为 2.5%~3.0%, 部分高达 10%~15%, 常含辉钼矿, $w(\text{Mo})$ 为 0.01%~0.02%; ② 黄铜矿型, 与斑铜矿±黄铜矿型矿石较相似, 常含自然金、银金矿以及 Te、Bi、Se 的硫化物或硫砷化合物, 且其中的 Au、Ag、Bi、Se、Te 和 Mo 品位与铜品位直接相关; ③ 磁黄铁矿-黄铜矿型, 含少量毒砂, 在塔斯陶矿区普遍发育。

根据野外不同类型矽卡岩与矿石间的接触关系、镜下观察矿物共生组合和矿物之间的接触关系, 将矽卡岩的成矿期次划分为 4 个阶段: 石榴子石矽卡岩阶段(Ⅰ)、绿帘石-石榴子石矽卡岩阶段(Ⅱ)、磁铁矿阶段(Ⅲ)和石英-硫化物阶段(Ⅳ)(图 4)。

石榴子石矽卡岩阶段(Ⅰ) 该阶段形成石榴子石矽卡岩(图 4a), 石榴子石主要为钙铁榴石, 手标本呈棕褐色或浅棕褐色。钙铁榴石呈粒状, 粒度变化较大(0.1~1 mm), 半自形-他形, 显微镜下为浅黄绿色(图 5a)。钙铁榴石颗粒内部成分较均匀, 裂隙非

常发育, 大多沿裂隙被后期流体交代, 成分发生变化, 被交代的部分呈无色区别于原生的钙铁榴石, 部分交代成因的石榴子石具有环带构造。

绿帘石-石榴子石矽卡岩阶段(Ⅱ) 富含绿帘石, 少量辉石、石榴子石和绿泥石的矽卡岩, 手标本样品总体呈绿色或黄绿色, 辉石、绿泥石含量较高时呈墨绿色, 常见绿帘石-石榴子石矽卡岩呈脉状穿切阶段Ⅰ形成的石榴子石矽卡岩(图 4b、c), 或石榴子石矽卡岩以交代残余的形式产于绿帘石-石榴子石矽卡岩中。石榴子石呈粒状, 半自形-自形, 无色, 环带构造非常普遍(图 5b), 成分主要为含铝钙铁榴石。绿帘石交代石榴子石(图 5b), 粒状-柱状, 黄绿色, 自形程度较高。辉石与绿帘石共生, 墨绿色, 呈柱状或针状集合体(图 5c)。矿物接触关系显示环带结构的石榴子石结晶略早于绿帘石和辉石。石英主要以包体形式产于石榴子石中或与石榴子石共生, 绿泥石与绿帘石共生。

磁铁矿阶段(Ⅲ) 主要形成致密块状磁铁矿, 矿物组合为磁铁矿、绿帘石、石英。在矽卡岩带中呈

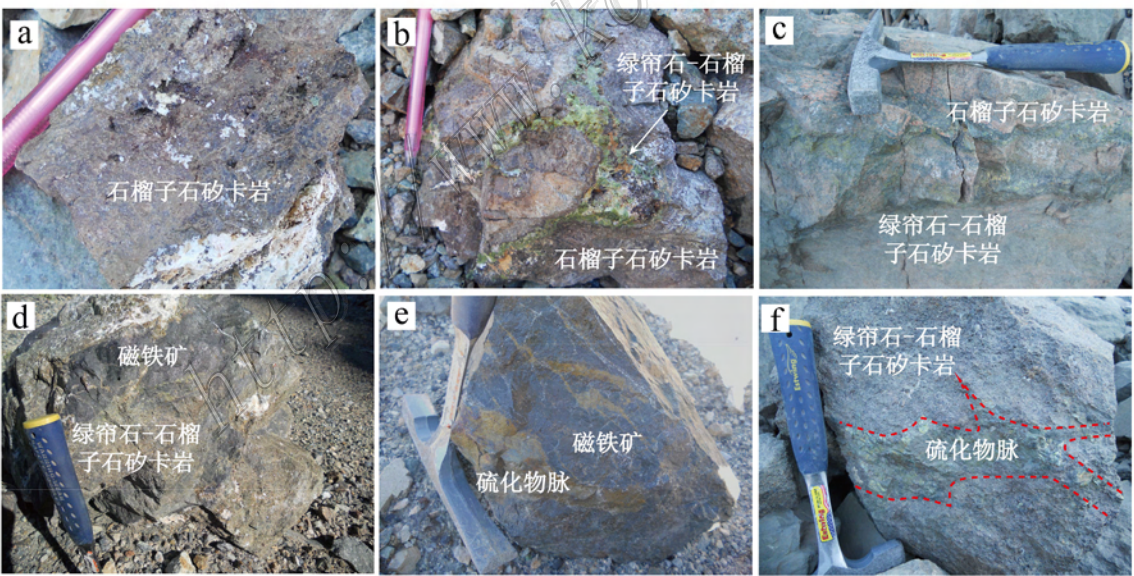


图 4 萨亚克Ⅰ和塔斯陶矿区矽卡岩和矿石照片

a. 阶段Ⅰ形成的棕褐色石榴子石矽卡岩; b. 阶段Ⅱ形成的黄绿色绿帘石-石榴子石矽卡岩呈脉状穿切阶段Ⅰ浅棕褐色石榴子石矽卡岩; c. 阶段Ⅱ形成的墨绿色绿帘石-辉石-石榴子石矽卡岩呈脉状穿切阶段Ⅰ石榴子石矽卡岩; d. 阶段Ⅲ形成的磁铁矿呈脉状穿切阶段Ⅱ黄绿色绿帘石-石榴子石矽卡岩; e. 阶段Ⅳ形成的硫化物脉穿切阶段Ⅲ磁铁矿; f. 阶段Ⅳ硫化物脉穿切阶段Ⅱ粗粒绿帘石-石榴子石矽卡岩

Fig. 4 Photographs of different kinds of skarn and ore from Sayak I and Tastao skarn deposits

a. Brown garnet skarn formed at stage I; b. Stage II yellow green epidote-garnet skarn crosscutting light brown garnet skarn formed at stage I; c. Stage II dark green epidote-hendbergite-garnet skarn crosscutting stage I garnet skarn; d. Stage III massive magnetite crosscutting stage II yellow green epidote-garnet skarn; e. Stage IV sulfide vein crosscutting stage III magnetite; f. Stage IV sulfide vein crosscutting stage II coarse-grained epidote-garnet skarn

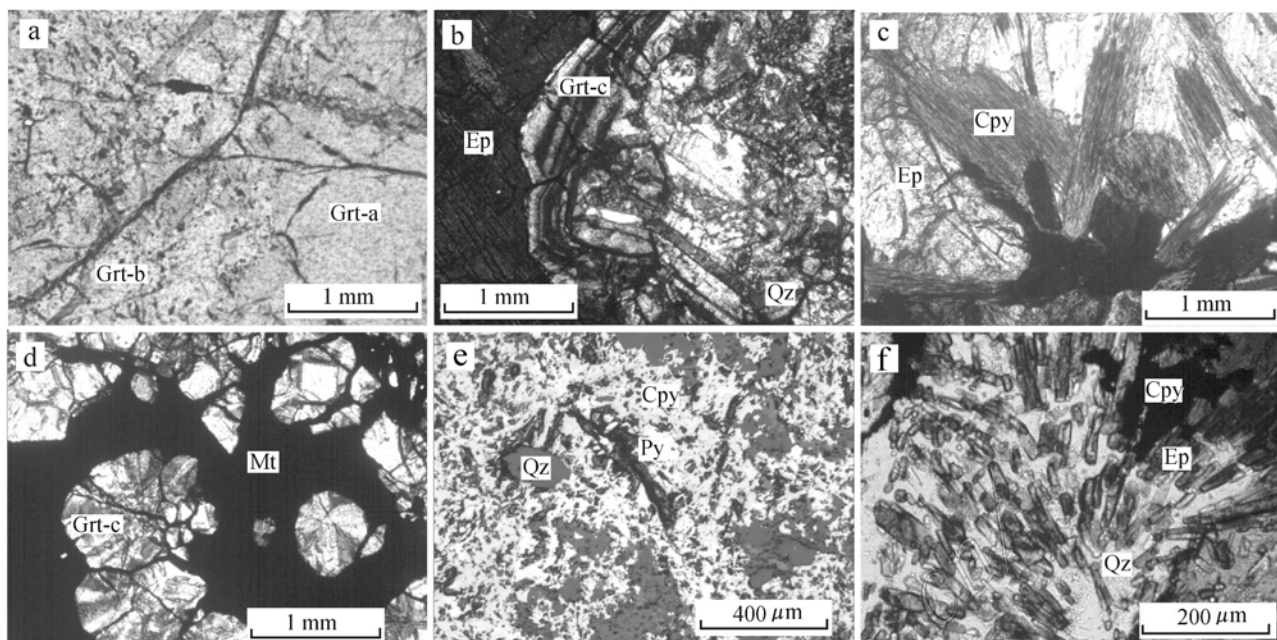


图 5 矽卡岩和铜矿石中主要矿物产出形式

a. 石榴子石矽卡岩中的石榴子石(Grt-a)沿着裂隙被交代(Grt-b); b. 绿帘石-石榴子石矽卡岩中的绿帘石(Ep)和具有环带结构的石榴子石(Grt-c); c. 绿帘石-石榴子石矽卡岩中的柱状、放射状辉石(Cpx)和绿帘石(Ep); d. 磁铁矿(Mt)沿着绿帘石-石榴子石矽卡岩中环带构造石榴子石粒间充填; e. 石英-硫化物脉中的黄铁矿(Py)和黄铜矿(Cpy); f. 石英-硫化物脉中的绿帘石,呈短-长柱状被石英包裹

Fig. 5 Modes of occurrence of major minerals in skarn and ore

a. Andradite in garnet skarn, replaced by fluid, resulting in some changes in its composition along fractures; b. Epidote and andradite with zonation in epidote-garnet skarn; c. Columnar and radiation clinopyroxene and epidote in epidote-garnet skarn; d. Magnetite filling between garnet grains as veinlet; e. Pyrite and chalcopyrite in quartz-sulfide veins; f. Epidote in quartz-sulfide veins

透镜状、脉状或浸染状产出,常见磁铁矿脉穿切绿帘石-石榴子石矽卡岩(图 4d),或磁铁矿呈浸染状、脉状产于阶段 I、阶段 II 形成的矽卡岩中(图 5d)。

石英-硫化物阶段(IV)形成脉状、浸染状或块状硫化物矿石,并含有少量石英,脉状硫化物穿切石榴子石矽卡岩、绿帘石-石榴子石矽卡岩和块状磁铁矿的现象普遍(图 4e、f)。主要硫化物组合为黄铁矿-磁黄铁矿-黄铜矿-斑铜矿(图 5e),脉石矿物为石英、方解石和少量绿帘石等,局部见绿帘石呈自形柱状被石英包裹(图 5f)。该阶段是主要的铜矿化阶段。

3 矽卡岩矿物化学

笔者对 5 件样品中的石榴子石、辉石、磁铁矿和绿帘石进行了电子探针成分分析。分析工作在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行,仪器为 JAX-8230,测试条件为:加速电压 15 kV;束流 2×10^{-8} A;束斑 5 μm ;修正方法为 PRZ;使用的标样为标准

样品美国 SPI 公司 53 种矿物,最低检出限为 $\sim 0.01\%$ 。

3.1 石榴子石

对矽卡岩中的 3 类石榴子石进行了电子探针分析,分别包括阶段 I 石榴子石矽卡岩中的浅黄绿色、多裂隙、他形石榴子石(Grt-a),沿裂隙交代第一类石榴子石的无色、他形石榴子石(Grt-b)以及阶段 II 绿帘石-石榴子石矽卡岩中的环带结构石榴子石(Grt-c),分析结果见表 1。

第一类石榴子石(Grt-a) 电子探针成分分析结果(表 1)显示,该类石榴子石主要由 SiO_2 、 FeO^{T} 和 CaO 组成,其中, $w(\text{SiO}_2)$ 为 $33.97\% \sim 36.45\%$ 、 $w(\text{FeO}^{\text{T}})$ 为 $27.00\% \sim 28.71\%$ 、 $w(\text{CaO})$ 为 $31.75\% \sim 33.10\%$,另含少量 MnO 、 MgO 和 TiO_2 , $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 均低于 1% ($w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 0 \sim 0.90\%$)。分子式计算结果显示,该类石榴子石中的 Fe 主要为 Fe^{3+} ,属于钙铁榴石($w(\text{Ad})$ 为 100%),与矽卡岩型 Cu 矿化关系密切(图 6)。

表 1 萨亚克矽卡岩型铜矿床中不同类型石榴子石电子探针分析结果
Table 1 Representative EMPA major elements compositions of garnets of different types in the Sayak skarn Cu deposit

组分	Grt-a															
	S 6-3-02	S 6-3-03	S 6-3-04	S 6-3-05	S 6-3-07	S 6-3-08	S 6-4-01	S 6-4-02	S 6-1-04	S 6-1-08	S 6-2-02	S 6-2-03	S 6-2-08	S 6-2-09	S 6-2-10	S 9-1-06
	w(B)/%															
SiO ₂	33.97	34.15	34.72	34.84	34.41	33.98	35.46	35.59	35.62	35.29	35.35	35.63	35.59	35.59	35.48	36.45
TiO ₂	0.08	0.03	0.01	0	0	0	0	0.01	0.05	0	0.03	0	0	0	0	0.03
Al ₂ O ₃	0.62	0.65	0.71	0.64	0.19	0.18	0.43	0	0.29	0.90	0.35	0.02	0	0.03	0.03	0.35
FeO ^T	27.00	27.67	28.23	27.31	28.30	28.33	27.79	28.68	27.40	27.73	28.43	28.53	28.51	28.71	28.57	27.99
MnO	0.50	0.50	0.44	0.34	0.51	0.53	0.41	0.34	0.41	0.58	0.41	0.36	0.52	0.46	0.53	0.20
MgO	0.01	0.04	0.04	0.02	0.02	0.01	0.02	0.04	0.06	0	0	0.04	0.04	0.03	0.01	0.06
CaO	32.24	32.32	32.67	32.94	32.53	32.31	31.75	32.50	33.00	32.21	32.77	32.46	32.89	33.06	32.38	33.10
Na ₂ O	0	0	0	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0	0	0.01	0.02	0.01	0	0	0
K ₂ O	0	0	0.01	0.01	0.02	0	0	0	0	0	0.02	0.02	0	0	0	0
总和	94.42	95.36	96.83	96.11	96.00	95.35	95.87	97.17	96.83	96.71	97.37	97.08	97.56	97.88	97.00	98.18
以 12 个氧为基准计算的阳离子数																
Si	3.22	3.22	3.21	3.23	3.22	3.21	3.29	3.28	3.27	3.25	3.25	3.28	3.27	3.26	3.27	3.30
Ti	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Al	0.07	0.07	0.08	0.07	0.02	0.02	0.05	0	0.03	0.10	0.04	0	0	0	0	0.04
Fe ³⁺	2.13	2.14	2.18	2.12	2.21	2.23	2.06	2.17	2.11	2.11	2.19	2.17	2.19	2.20	2.18	2.05
Fe ²⁺	0	0	0	0	0	0	0.09	0.04	0	0.03	0	0.03	0	0	0.03	0.07
Mn	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.02
Mg	0	0	0.01	0	0	0	0	0.01	0.01	0	0	0.01	0.01	0	0	0.01
Ca	3.27	3.27	3.24	3.28	3.26	3.27	3.16	3.21	3.25	3.18	3.23	3.20	3.23	3.24	3.20	3.21
Na	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
端员组分 w(B)/%																
Alm	0	0	0	0	0	0	3	1	0	1	0	1	0	0	1	2
Ad	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Gr	0	2	0	0	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	4
Sp	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1

续表 1-1
Cont. Table 1-1

组分	Grt-b																			w(B)/%	以 12 个氧为基准计算的阳离子数
	S6-3-06	S6-4-03	S6-4-04	S6-1-01	S6-1-02	S6-1-03	S6-1-05	S6-1-06	S6-1-07	S6-2-01	S6-2-04	S6-2-05	S6-2-06	S6-2-07	S6-3-09	S6-3-10	S6-4-06	S6-4-07	S6-1-07		
SiO ₂	35.58	35.85	35.83	35.56	35.87	35.68	35.54	34.87	34.49	35.26	36.23	36.04	36.22	35.67	36.12	36.40	36.37	36.30	36.31		
TiO ₂	0	0.08	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0.01	0	0.02	0.01	0.03	0.01	0.01	0.03		
Al ₂ O ₃	0.91	1.75	1.52	1.25	1.07	1.13	0.94	0.92	0.96	1.25	1.68	1.85	1.77	1.34	3.35	1.63	1.31	1.35	1.71		
FeO ^T	26.62	26.06	26.39	26.22	26.63	27.14	27.53	27.83	28.11	27.16	26.19	26.33	26.11	26.56	23.01	24.35	26.73	26.67	26.50		
MnO	0.24	0.33	0.33	0.30	0.35	0.30	0.68	0.46	0.55	0.44	0.31	0.44	0.43	0.30	0.22	0.18	0.12	0.12	0.17		
MgO	0.04	0.01	0.03	0.09	0.08	0.07	0.04	0.02	0	0.01	0.04	0.05	0.04	0.03	0.11	0.08	0.10	0.07	0.03		
CaO	33.17	33.39	32.87	32.84	33.27	33.08	32.81	32.74	32.38	32.89	33.34	32.50	33.15	33.24	32.82	31.48	33.60	33.38	33.02		
Na ₂ O	0	0	0	0.02	0.04	0	0	0.01	0	0.02	0.04	0.01	0.01	0	0	0	0.01	0.04	0.02		
K ₂ O	0.02	0	0.03	0	0	0	0	0	0.01	0	0.01	0	0.01	0	0.01	0	0.02	0.01	0.03		
总和	96.58	97.47	97.02	96.28	97.31	97.40	97.54	96.85	96.50	97.03	97.87	97.23	97.74	97.16	95.65	94.15	98.27	97.95	97.82		
Si	3.26	3.24	3.26	3.26	3.26	3.25	3.24	3.22	3.20	3.23	3.26	3.26	3.26	3.25	3.26	3.36	3.26	3.27	3.26		
Ti	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Al	0.10	0.19	0.16	0.14	0.11	0.12	0.10	0.10	0.10	0.13	0.18	0.20	0.19	0.14	0.36	0.18	0.14	0.14	0.18		
Fe ³⁺	2.05	1.97	1.99	2.01	2.02	2.07	2.10	2.16	2.18	2.08	1.97	1.92	1.94	2.02	1.68	1.66	2.01	1.99	1.94		
Fe ²⁺	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0.07	0.02	0	0.05	0.22	0	0.02	0.05		
Mn	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.05	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01		
Mg	0.01	0	0	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0	0.02	0.01	0.01	0.01	0		
Ca	3.26	3.23	3.20	3.23	3.24	3.23	3.21	3.23	3.22	3.23	3.21	3.15	3.20	3.24	3.17	3.11	3.23	3.22	3.18		
Na	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0.01	0		
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
端员组分 w(B)/%																					
Alm	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	2	7	0	1	2		
Ad	100	99	99	100	100	100	100	100	100	100	98	96	97	100	84	83	100	100	97		
Gr	5	9	7	7	5	4	1	0	0	2	9	9	9	6	22	21	7	8	9		
Pyp	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0		
Sp	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0		

续表 1-2
Cont. Table 1-2

组分	Grt-c																										
	S-20-4-01	S-20-4-02	S-20-3-01	S-20-3-09	S-20-3-02	S-20-3-03	S-20-3-04	S-20-3-05	S-20-3-06	S-20-3-07	S-20-3-08	S-20-2-01	S-20-2-02	S-20-1-01	S-20-1-02	S-20-5-01	S-20-5-02	S-27-3-01	S-27-2-01	S-27-2-02	S-27-2-03	S-27-2-04	S-27-2-05	S-27-4-01	S-27-5-01	S-27-1-07	
	w(B)/%																										
SiO ₂	36.59	37.87	37.45	38.31	39.39	36.21	38.09	38.05	35.37	38.84	35.32	37.01	37.07	37.71	35.76	37.63	35.97	37.87	38.45	37.62	35.44	36.95	34.99	37.79	35.14	41.07	35.48
TiO ₂	0.34	0	0.08	0	0.15	0.01	0	0	0	0.03	0	0	0.02	0.04	0	0.27	0	0	0	0.16	0.05	0	0	0.52	0	0.38	0
Al ₂ O ₃	2.64	4.18	6.85	5.55	7.74	1.00	7.81	6.04	3.40	8.28	3.78	4.01	6.45	2.58	3.83	3.80	4.14	14.22	1.31	6.02	0.03	4.09	1.68	9.46	0.48	11.47	0.03
FeO ^T	25.43	22.91	20.98	22.07	20.13	27.14	19.49	21.10	23.73	19.21	22.92	23.66	21.44	25.87	23.90	23.52	23.35	12.16	27.05	21.99	28.80	24.58	27.37	16.23	28.74	14.85	28.89
MnO	0.34	0.40	0.79	0.65	0.88	0.46	1.01	0.62	0.46	0.94	0.41	0.35	0.68	0.38	0.42	0.46	0.37	0.68	0.30	0.62	0.46	0.67	0.75	0.41	0.64	0.51	0.58
MgO	0.02	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0	0.03	0.01	0.03	0.05	0.05	0	0.01	0.05	0.05	0.01	0.02	0.05	0.04	0.09	0.01	0.03	0	0.01	0.05	0
CaO	33.18	33.31	32.99	32.84	33.24	32.87	33.13	32.91	32.39	33.64	32.66	33.65	33.56	33.72	33.56	33.56	33.64	34.66	31.87	33.24	32.61	32.42	32.23	34.59	32.51	33.97	32.46
Na ₂ O	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0	0	0.04	0	0.01	0	0.03	0	0.06	0	0	0	0.01	0.01	0	0.02	0	0.04	0.01
K ₂ O	0.02	0	0	0.01	0.04	0.02	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0.03	0.02	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0.03	0.04	0	0	0
总和	98.57	98.69	99.17	99.47	101.62	97.78	99.57	98.78	95.36	100.98	95.19	98.76	99.25	100.31	97.55	99.29	97.54	99.61	99.05	99.69	97.49	98.73	97.08	99.06	97.52	102.34	97.45
以 12 个氧为基准计算的阳离子数																											
Si	3.24	3.28	3.19	3.27	3.24	3.28	3.20	3.26	3.22	3.21	3.21	3.23	3.18	3.28	3.19	3.26	3.19	3.05	3.38	3.21	3.26	3.24	3.20	3.15	3.23	3.24	3.26
Ti	0.02	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0.01	0	0	0	0.03	0	0.02	0
Al	0.28	0.43	0.69	0.56	0.75	0.11	0.77	0.61	0.37	0.81	0.40	0.41	0.65	0.26	0.40	0.39	0.43	1.35	0.14	0.60	0	0.42	0.18	0.93	0.05	1.06	0
Fe ³⁺	1.80	1.51	1.38	1.36	1.14	2.02	1.24	1.33	1.78	1.16	1.75	1.68	1.50	1.77	1.78	1.58	1.73	0.81	1.65	1.44	2.21	1.66	2.09	1.08	2.21	0.64	2.21
Fe ²⁺	0.08	0.16	0.12	0.21	0.24	0.04	0.13	0.18	0.02	0.16	0	0.04	0.04	0.11	0	0.12	0	0.01	0.34	0.13	0	0.14	0	0.05	0	0.34	0.02
Mn	0.03	0.03	0.06	0.05	0.06	0.04	0.07	0.05	0.04	0.07	0.03	0.03	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.05	0.02	0.04	0.04	0.05	0.06	0.03	0.05	0.03	0.05
Mg	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0	0.01	0.01	0	0	0.01	0.01	0	0	0.01	0	0.01	0	0	0	0	0.01	0
Ca	3.15	3.10	3.01	3.00	2.93	3.19	2.99	3.02	3.16	2.98	3.18	3.15	3.08	3.14	3.20	3.12	3.20	3.00	3.01	3.04	3.21	3.04	3.16	3.09	3.20	2.87	3.20
Na	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
端员组分 w(B)/%																											
Alm	3	5	4	7	8	1	4	6	1	5	0	1	1	4	0	4	0	0	11	4	0	5	0	2	0	11	1
Ad	90	75	69	68	57	100	62	66	89	58	88	84	75	88	92	79	90	41	82	72	100	83	100	54	100	32	100
Gr	15	28	32	32	40	5	38	34	16	41	18	21	28	16	14	25	17	59	18	29	0	18	0	49	0	64	0
Pyp	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sp	1	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	2	2	1	2	1	2

注：Alm—铁铝榴石；Ad—钙铁榴石；Gr—钙榴石；Pyp—锰铝榴石；Sp—锰铝榴石。

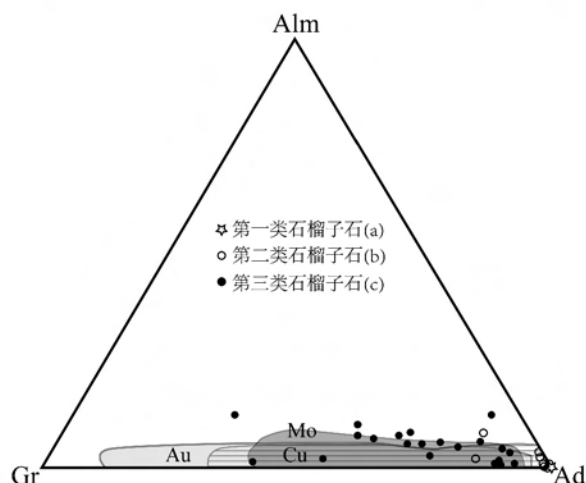


图6 萨亚克矽卡岩矿床中石榴子石端员组分与世界矽卡岩型 Cu、Mo、Au 矿床中石榴子石组分对比(世界矽卡岩矿床石榴子石成分据 Meinert et al., 2005)

Ad—钙铁榴石; Gr—钙铝榴石; Alm—铁铝榴石

Fig. 6 Comparison of end members of garnet from Sayak and those from world-famous skarn Cu, Mo, Au deposits (data of skarn Mo, Cu, Au related garnet from Meinert et al., 2005)

Ad—Andradite; Gr—Grossularite; Alm—Almandite

第二类石榴子石(Grt-b) 主要以交代第一类石榴子石的形式产出,一般无色。成分与第一类石榴子石非常相似,相比第一类石榴子石,其 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 明显升高($w(\text{Al}_2\text{O}_3)=0.91\% \sim 3.35\%$),大部分集中于 $1.07\% \sim 1.85\%$ (表1)。分子式计算结果显示,其钙铁榴石端员组分Ad为 $83\% \sim 100\%$,钙铝榴石端员组分 $w(\text{Gr})$ 介于 $0 \sim 22\%$ (表1),大部分落于全球矽卡岩型 Cu-Mo 矿床中的石榴子石成分范围内(图6)。对第一类和第二类石榴子石进行的电子探针分析剖面(图7a~d)显示,与第一类石榴子石相比,此类石榴子石 $w(\text{SiO}_2)$ 略高, $w(\text{FeO}^T)$ 较低, $w(\text{CaO})$ 相似(图7b),而 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 明显较高(图7c), Fe^{3+} 原子数明显较低(图7d)。

第三类石榴子石(Grt-c) 主要产于绿帘石-石榴子石矽卡岩中,无色,发育明显的环带结构,与磁铁矿以及铜矿化关系密切。其主要元素组分 $w(\text{SiO}_2)$ 为 $34.99\% \sim 41.07\%$ 、 $w(\text{FeO}^T)$ 为 $12.16\% \sim 28.89\%$ 、 $w(\text{CaO})$ 为 $31.87\% \sim 34.66\%$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 $0.03\% \sim 14.22\%$,大部分样品含少量 TiO_2 、 MnO 和 MgO (表1)。分子式计算结果显示,其钙铁榴石端员组分 $w(\text{Ad})$ 为 $32\% \sim 100\%$,钙铝

榴石端员组分 $w(\text{Gr})$ 为 $0 \sim 64\%$,与全球主要矽卡岩型 Mo-Au 矿床中石榴子石的变化范围相似(图6)。该类石榴子石环带构造非常发育,其环带构造主要通过 $w(\text{FeO}^T)$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 的周期性变化显示出来(图7e~g),但与第一类和第二类石榴子石相比,其石榴子石中的 $w(\text{FeO}^T)$ 明显较低、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 明显较高(图7b、c、f、g)。并且在不同环带中,其分子式中 Fe^{3+} 原子数也呈周期性变化(图7h),但总体低于第一类和第二类石榴子石(图7d、h)。

3.2 辉石

辉石主要产于绿帘石-石榴子石矽卡岩中,与绿帘石、环带结构石榴子石共生,墨绿色,呈柱状、板状或放射状(图5c)。电子探针共分析了16个点,分析结果见表2。萨亚克矽卡岩矿区辉石的主要成分为 SiO_2 ($w(\text{SiO}_2)$ 为 $47.29\% \sim 51.36\%$)、 FeO^T ($w(\text{FeO}^T)$ 为 $24.75\% \sim 28.59\%$)、 CaO ($w(\text{CaO})$ 为 $11.05\% \sim 11.95\%$),其次为 Al_2O_3 ($w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 $1.49\% \sim 4.50\%$)、 MgO ($w(\text{MgO})$ 为 $5.24\% \sim 7.50\%$),还有少量的 TiO_2 、 MnO 、 NaO 和 K_2O (表2)。分子式计算结果显示,辉石中硅灰石端员组分 $w(\text{Wo})$ 为 $24\% \sim 29\%$,顽火辉石端员组分 $w(\text{En})$ 为 $17\% \sim 23\%$,铁辉石端员组分 $w(\text{Fs})$ 为 $51\% \sim 57\%$,在辉石分类图中落于普通辉石范围内(图8a)。辉石中透辉石、钙铁辉石和锰钙辉石端员的分别为 $24\% \sim 34\%$ 、 $63\% \sim 74\%$ 和 $1\% \sim 3\%$ (表2),主要落于图中钙铁辉石端员偏向透辉石的位置,与全球矽卡岩型 Mo-Au 矿床中辉石的组成相似(图8b)。

3.3 绿帘石

绿帘石主要产于绿帘石-石榴子石矽卡岩中,呈他形-自形,粒度变化较大,部分自形绿帘石呈长柱状,与柱状、放射状辉石和环带结构石榴子石共生(图5c),或呈交代第一、第二类石榴子石的形式产出。另有少量绿帘石形成于石英-硫化物阶段,呈细粒自形晶与石英、黄铜矿共生或被石英包裹(图5f)。本文主要分析了矽卡岩中绿帘石的成分,分析结果见表3。其主要组成为 SiO_2 ($w(\text{SiO}_2)$ 为 $37.31\% \sim 39.36\%$)、 Al_2O_3 ($w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 $20.21\% \sim 23.52\%$)、 FeO^T ($w(\text{FeO}^T)$ 为 $10.71\% \sim 15.17\%$)和 CaO ($w(\text{CaO})$ 为 $21.67\% \sim 23.87\%$),少量 TiO_2 和 MnO (表3),绿帘石明显具有富Al而贫Fe的特征,与同时期形成的石榴子石类似。

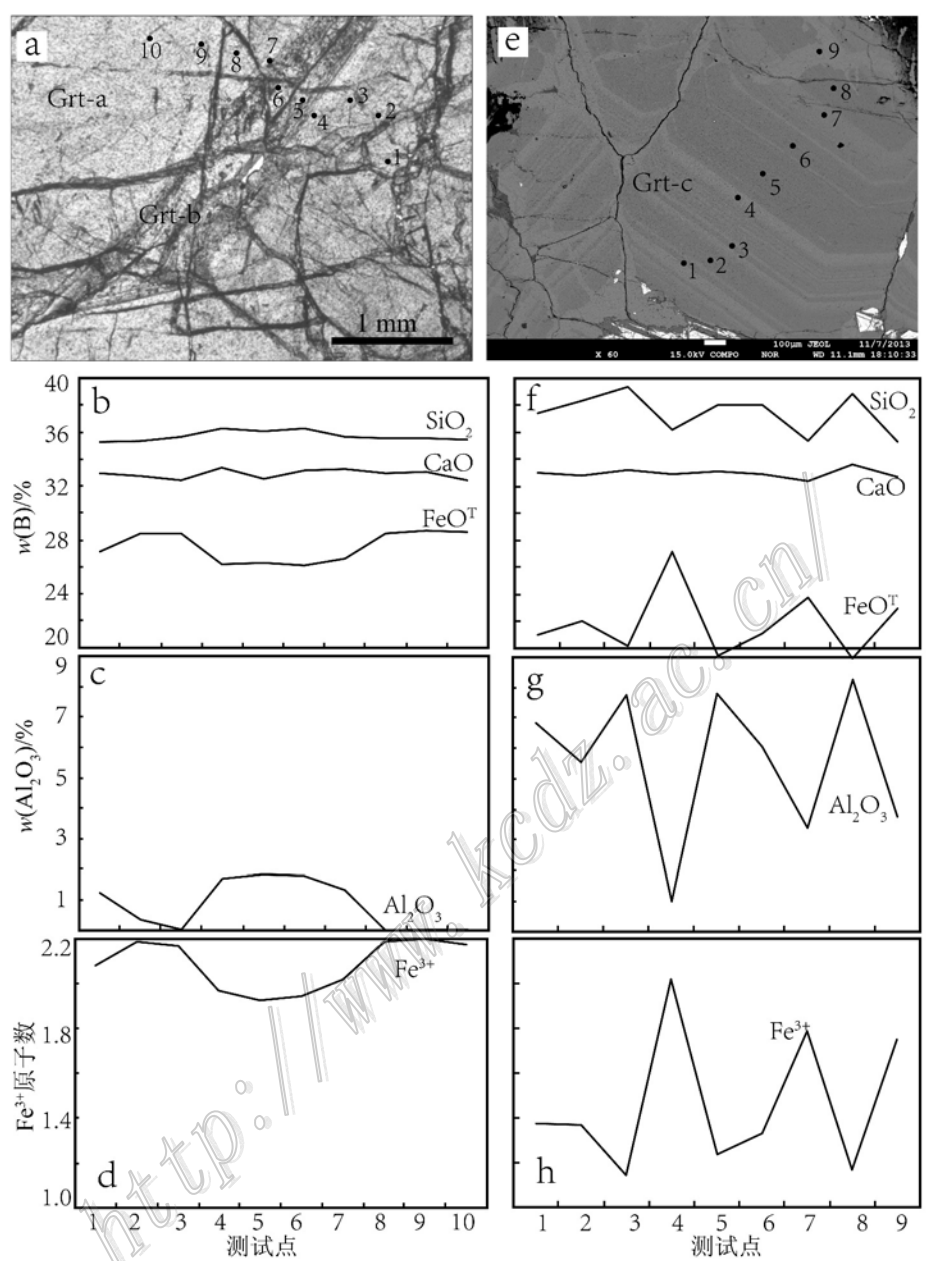


图 7 石榴子石成分特征
a~d. 石榴子石矽卡岩中两类石榴子石产出形式及成分变化；e~h. 绿帘石-石榴子石矽卡岩中环带构造石榴子石及其成分变化
Fig. 7 Composition characteristics of garnet
a~d. Modes of occurrence of type-a and type-b garnets and variations of their compositions; e~h. Garnet with zonation (type-c), and variation of its composition

3.4 磁铁矿

磁铁矿有 2 种产出形式，以网脉状充填于绿帘石-石榴子石矽卡岩中环带结构石榴子石粒间(图 5d)，或以细脉状穿切石榴子石矽卡岩、绿帘石-石榴子石矽卡岩。磁铁矿呈他形粒状，与石英共生。共分析了 20 件磁铁矿样品，探针分析结果显示，其 $w(\text{FeO}^{\text{T}})$ 为 91.92% ~ 94.61%，另含微量的 SiO_2 、

TiO_2 、 Al_2O_3 、 MnO 、 MgO 和 CaO ，总体显示较高的磁铁矿纯度(表 4)。成分相关性分析显示，磁铁矿中 $w(\text{SiO}_2)$ 与 $w(\text{FeO}^{\text{T}})$ 呈负相关关系(图 9a)， $w(\text{MnO})$ 、 $w(\text{MgO})$ 与 $w(\text{FeO}^{\text{T}})$ 之间也呈负相关关系(图 9b)，指示 SiO_2 摩尔浓度较高的成矿环境不利于高纯度磁铁矿的形成，而 Mg 和 Mn 主要以类质同象替代 Fe 的形式进入磁铁矿中。

表 2 萨亚克砂卡岩型铜矿床中辉石电子探针分析结果
Table 2 Representative EMPA major elements compositions of hedenbergite in the Sayak skarn Cu deposit

组分	S 27-2-06	S 27-2-07	S 27-2-08	S 27-2-09	S 27-4-02	S 27-4-03	S 27-4-04	S 27-4-05	S 27-6-02	S 27-6-03	S 27-6-04	S 27-6-05	S 27-1-01	S 27-1-02	S 27-1-03	S 27-1-04
	$w(B)/\%$															
SiO ₂	48.79	51.26	51.11	51.36	48.36	48.43	49.34	48.97	50.04	49.81	51.17	49.91	50.40	49.18	47.29	48.60
TiO ₂	0.12	0.02	0.09	0	0.04	0.06	0.10	0.05	0.02	0.05	0.06	0.02	0.03	0.08	0.08	0.08
Al ₂ O ₃	3.69	1.49	1.97	1.89	2.80	3.07	1.88	2.55	1.66	1.84	2.01	2.46	1.89	3.05	4.50	3.59
FeO ^T	28.27	27.40	26.72	25.62	27.66	27.77	24.90	27.16	27.30	26.86	24.75	25.71	27.46	28.59	28.12	27.98
MnO	0.48	1.19	0.38	0.88	0.47	0.50	0.56	0.55	0.89	0.89	0.92	0.76	1.16	0.46	0.56	0.50
MgO	5.28	6.12	6.67	6.78	5.84	5.69	7.29	5.89	6.09	5.83	7.50	6.98	6.16	5.25	5.24	5.75
CaO	11.81	11.64	11.82	11.93	11.84	11.89	11.95	11.71	11.15	11.41	11.10	11.05	11.30	11.79	11.95	11.84
Na ₂ O	0.35	0.16	0.24	0.13	0.32	0.27	0.15	0.26	0.23	0.20	0.22	0.29	0.19	0.27	0.32	0.31
K ₂ O	0.23	0.10	0.16	0.08	0.20	0.26	0.13	0.16	0.14	0.38	0.11	0.09	0.24	0.29	0.62	0.30
总和	99.02	99.38	99.16	98.67	97.53	97.94	96.30	97.30	97.52	97.27	97.84	97.27	98.83	98.96	98.68	98.95
以 6 个氧为基准计算的阳离子数																
Si ^T	1.98	2.07	2.06	2.08	1.98	1.98	2.03	2.01	2.06	2.05	2.07	2.04	2.05	2.00	1.92	1.96
Tr ^(M1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Al ^{IV} (T)	0.02	0	0	0	0.02	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0.08	0.04
Al ^{VI} (M1)	0.15	0.07	0.09	0.09	0.12	0.13	0.09	0.13	0.08	0.09	0.10	0.12	0.09	0.14	0.13	0.14
Fe ³⁺ (M1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe ²⁺ (M1 + M2)	0.95	0.90	0.90	0.86	0.95	0.95	0.85	0.93	0.94	0.92	0.84	0.88	0.93	0.97	0.95	0.94
Mn(M2)	0.02	0.04	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.02	0.02	0.02
Mg(M1 + M2)	0.32	0.37	0.40	0.41	0.36	0.35	0.45	0.36	0.37	0.36	0.45	0.42	0.37	0.32	0.32	0.35
Ca(M2)	0.51	0.50	0.51	0.52	0.52	0.52	0.53	0.52	0.49	0.50	0.48	0.48	0.49	0.51	0.52	0.51
Na(M2)	0.03	0.01	0.02	0.01	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
K(M2)	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0	0.01	0.01	0.03	0.02
端员组分 w(B)/%																
Wo	27	25	26	26	27	27	27	27	25	26	24	25	25	27	29	27
En	17	18	20	20	19	18	23	19	19	18	23	22	19	17	18	19
Fs	56	56	54	54	54	54	51	55	56	56	53	54	56	57	53	54
Jo	1	3	1	2	1	1	2	2	2	2	2	2	3	1	2	1
Di	25	28	31	31	27	26	34	28	28	27	34	32	30	24	25	26
Hd	74	69	69	66	72	72	65	71	70	70	63	66	69	74	74	72

注: Wo—硅灰石; En—顽火辉石; Fs—铁辉石; Di—透辉石; Hd—钙辉石; Jo—钙铁辉石。

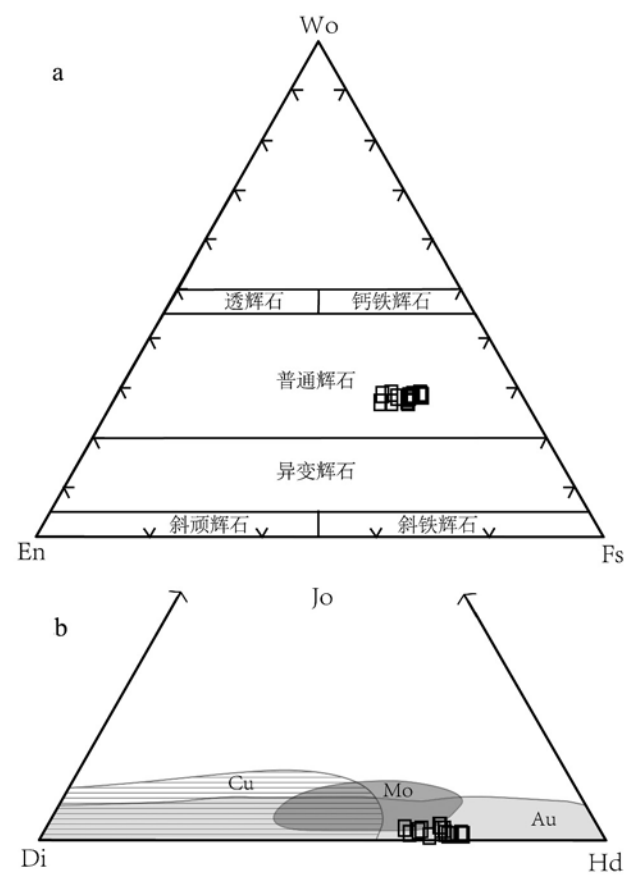


图 8 矽卡岩中辉石分类图(a)及其与世界矽卡岩型 Cu、Au、Mo 矿床中辉石成分对比(b)(世界矽卡岩矿床中辉石成分据 Meinert, 1992; Meinert et al., 2005)

Wo—硅灰石; En—顽火辉石; Fs—斜方铁辉石; Hd—钙铁辉石; Di—透辉石; Jo—锰钙辉石

Fig. 8 Classification of pyroxenes from skarn (a) in comparison with those from world-famous skarn deposits (b) (data of skarn Mo, Cu, Au related garnet from Meinert, 1992; Meinert et al., 2005)

Wo—Wollastonite; En—Enstatite; Fs—Ferrosilite; Hd—Hedenbergite; Di—Diopside; Jo—Johannsenite

4 讨论

4.1 矽卡岩成因类型

矽卡岩可以分为交代矽卡岩和变质矽卡岩 2 种 (Einaudi et al., 1981)。萨亚克铜矿田的矽卡岩主要产于石英闪长岩、花岗闪长岩与中石炭统碳酸盐岩的接触带上, 并且矿区乃至区域内地层均未发生明显的变质变形, 指示萨亚克铜矿田的矽卡岩属于交代矽卡岩。而交代矽卡岩根据其围岩以及矿物组合的差异, 可以被进一步划分为钙质矽卡岩和镁质矽卡岩 (Einaudi et al., 1981; 赵一鸣等, 1990)。钙质矽卡岩的围岩为灰岩, 主要矿物组合为钙铁榴石-

钙铝榴石、透辉石-钙铁辉石等矿物系列, 如全球 Cu-Au-Mo 矽卡岩型矿床中的石榴子石为钙铁榴石-钙铝榴石系列(图 6)、辉石为透辉石-钙铁辉石系列(图 8b); 而镁质矽卡岩的围岩为白云岩, 矿物组合中常出现镁橄榄石及其他富镁矿物(毛景文等, 1998)。萨亚克铜矿田矽卡岩的围岩为灰岩, 萨亚克 I 和塔斯陶矿区矽卡岩矿物组合为钙铁榴石-钙铁辉石(图 6, 图 8b), 显示其为钙质矽卡岩系列。

磁铁矿可在多种地质环境中出现, 如火成岩中的副矿物、岩浆 V-Ti 磁铁矿床、热液矿床、矽卡岩矿床及沉积变质矿床中。研究表明, 磁铁矿中的次要成分与形成环境有关, 如 Al_2O_3 、 TiO_2 、 MgO 和 MnO (陈光远等, 1984; 1987)。萨亚克铜矿田的磁铁矿相对于典型矽卡岩型磁铁矿, 富 Al_2O_3 而贫 MnO 、 MgO , 表明在萨亚克矽卡岩型磁铁矿形成时, 相对于大部分矽卡岩矿床, 体系中相对富 Al, 与石榴子石、绿帘石成分所指示的结果相似。萨亚克矽卡岩主要的围岩为灰岩、陆缘沉积岩互层, 成矿体系中较高的 $w(Al)$ 可能是地层中泥质陆缘沉积岩加入所致。而由于围岩对于体系 Ti 的贡献很小, 萨亚克矽卡岩中磁铁矿 $w(TiO_2)$ 与典型矽卡岩相当。

4.2 矽卡岩与 Cu-Mo-Au 矿化的关系

矽卡岩型 Cu、Mo、Au、Fe 等矿床与钙质矽卡岩具有非常密切的关系。但不同的矽卡岩矿床中, 矽卡岩的矿物组合和成分有所差异 (Meinert et al., 2005)。氧化程度相对较高的矽卡岩环境更有利于矽卡岩型 Cu 矿床的形成, 主要矿物为钙铁榴石, 少量透辉石、硅灰石、阳起石和绿帘石; 而矽卡岩型 Mo 矿床中, 钙铁辉石是最常见的钙硅酸盐矿物, 伴随少量钙铝榴石、硅灰石、角闪石和萤石, 显示其为相对较还原的矽卡岩环境, 并且以富 Fe 辉石 ($>Hd_{50}$) 为主要矽卡岩矿物的环境也非常有利于还原型矽卡岩 Au 矿床的形成 (Meinert et al., 2005)。萨亚克矽卡岩演化的早期主要形成钙铁榴石 (Grt-a), 显示成矿体系较高的氧逸度, 有利于矽卡岩型铜矿化形成, 成分与全球矽卡岩型铜矿床中石榴子石成分非常相似 (图 6), 交代 Grt-a 的 Al 钙铁榴石 (Grt-b, $>Ad_{80}$) 成分落于全球矽卡岩型 Cu 和 Mo 矿床范围内 (图 6), 然后出现环带结构钙铝榴石-钙铁榴石系列 (Grt-c), Ad 变化于 32~100 之间, 平均为 78, 说明成矿体系氧化还原状态的周期性变化, 当体系处于相对较还原的状态时, 形成的石榴子石成分落于矽卡岩型 Mo 矿床和 Au 矿床的石榴子石成分范围内 (图 6)。阶段

表 3 萨亚克砂卡岩型铜矿床中绿帘石电子探针分析结果
Table 3 Representative EMPA major elements compositions of epidote in the Sayak skarn Cu deposit

组分	S9-1-08	S9-1-09	S9-1-10	S9-1-11	S20-4-03	S20-4-04	S20-4-05	S20-4-06	S20-2-03	S20-2-04	S20-1-03	S20-1-04	S20-5-03	S27-3-02	S27-4-06	S27-4-07	S27-5-02	S27-5-03	S27-1-05	S27-1-06
	$w(B)/\%$																			
SiO ₂	37.31	37.53	38.11	37.93	38.40	38.41	37.48	38.87	38.21	37.88	38.24	38.81	39.36	37.54	38.09	37.59	37.93	37.86	37.99	37.78
TiO ₂	0.03	0	0.06	0.04	0.09	0.02	0.09	0.01	0	0.05	0.04	0.01	0.02	0.01	0	0	0.05	0.09	0.03	0.01
Al ₂ O ₃	20.21	22.93	22.28	20.22	21.17	21.96	23.52	21.61	21.98	21.43	23.12	22.09	20.98	21.29	21.12	20.76	20.94	20.21	21.80	21.12
FeO ^T	15.17	11.25	12.92	15.02	14.16	13.77	10.71	13.79	13.32	14.65	13.09	13.55	13.44	13.31	14.24	14.32	14.31	14.86	14.24	14.10
MnO	0.07	0.15	0.18	0.17	0.26	0.11	0.44	0.19	0.03	0.07	0.43	0.18	0.08	0.25	0.13	0.31	0.05	0.13	0.52	0.31
MgO	0.01	0.02	0.11	0.06	0	0	0.02	0	0	0.01	0	0.04	0.03	0.03	0	0.01	0	0.02	0.02	0
CaO	22.77	23.01	21.67	22.55	22.51	22.69	22.72	22.95	23.22	22.71	22.88	22.71	22.51	23.00	23.04	22.91	23.26	23.87	22.13	22.52
Na ₂ O	0.01	0.02	0.03	0	0.02	0.01	0.02	0	0	0.03	0	0.04	0.01	0	0.04	0.01	0.03	0	0.01	0
K ₂ O	0	0.02	0	0.03	0	0.01	0.01	0	0	0.03	0	0	0.01	0	0.01	0.01	0	0.01	0	0.01
总和	95.58	94.93	95.36	96.02	96.61	96.98	95.01	97.42	96.76	96.86	97.80	97.43	96.44	95.43	96.67	95.92	96.57	97.05	96.74	95.85
以 12 个氧为基准计算的阳离子数																				
Si	2.91	2.91	2.94	2.94	2.94	2.93	2.90	2.95	2.92	2.90	2.89	2.94	3.01	2.92	2.93	2.92	2.92	2.91	2.91	2.92
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0
Al	1.86	2.10	2.03	1.85	1.91	1.97	2.15	1.93	1.98	1.94	2.06	1.97	1.89	1.95	1.91	1.90	1.90	1.83	1.97	1.93
Fe ³⁺	0.99	0.73	0.83	0.97	0.91	0.88	0.69	0.88	0.85	0.94	0.83	0.86	0.86	0.87	0.91	0.93	0.92	0.96	0.91	0.91
Mn	0	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0	0	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0	0.01	0.03	0.02
Mg	0	0	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca	1.90	1.91	1.79	1.87	1.85	1.85	1.89	1.87	1.90	1.87	1.85	1.85	1.84	1.92	1.90	1.90	1.92	1.97	1.82	1.87
Na	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0	0.01	0	0	0	0	0
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4 萨亚克砂卡岩型铜矿床中磁铁矿电子探针分析结果
Table 4 Representative EMPA major elements compositions of magnetite in the Sayak skarn Cu deposit

组分	S9-3-01	S9-3-02	S9-3-03	S9-3-04	S9-3-05	S9-4-01	S9-4-02	S9-4-03	S9-4-04	S9-4-05	S9-2-01	S9-2-02	S9-2-03	S9-2-04	S9-2-05	S9-1-01	S9-1-02	S9-1-03	S9-1-04	S9-1-05
	$w(B)/\%$																			
SiO ₂	0	0.09	0.02	0.04	0.23	0.04	0	0	0.01	0	0.07	0.08	0	0.32	0	0.02	0.24	0.59	0.03	0.01
TiO ₂	0.01	0	0	0.02	0	0.02	0	0.04	0	0.02	0.01	0.06	0	0.02	0.04	0.02	0.06	0.05	0.01	0
Al ₂ O ₃	0	0.03	0.05	0.05	0	0.09	0.05	0.07	0.30	0.03	0.09	0.31	0.01	0.13	0.02	0.04	2.82	1.32	0.20	0.09
FeO ^T	94.53	92.90	94.32	93.95	92.77	93.63	93.73	93.25	93.32	94.29	94.19	92.80	94.61	93.44	94.26	93.96	91.92	92.09	94.34	94.36
MnO	0.05	0.02	0.08	0.02	0.08	0	0	0.06	0.10	0.07	0.07	0.09	0.05	0.07	0.05	0.09	0.11	0.04	0.08	0.08
MgO	0	0.06	0	0	0.01	0.02	0.01	0	0	0	0.04	0.01	0	0.04	0.01	0.02	0.02	0.13	0.03	0
CaO	0.08	0	0	0	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0	0	0.03	0.15	0	0
Na ₂ O	0.02	0.01	0	0.03	0.03	0.01	0.04	0.02	0.01	0.03	0.03	0	0	0	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
K ₂ O	0	0.01	0	0.02	0.02	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0	0.02	0	0.01	0.01	0	0	0
总和	94.69	93.12	94.47	94.13	93.20	93.81	93.83	93.44	93.74	94.44	94.51	93.36	94.67	94.08	94.39	94.18	95.23	94.39	94.70	94.55

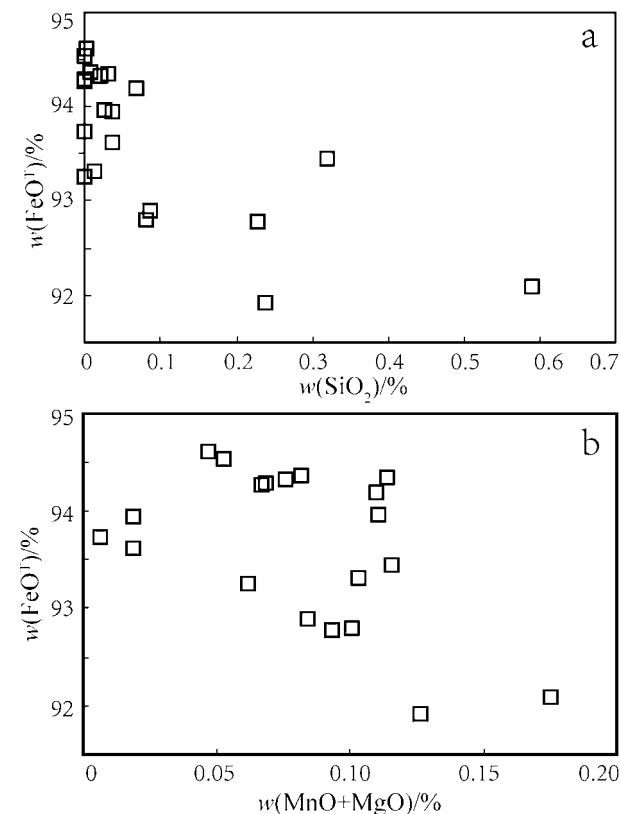


图 9 磁铁矿中主要元素相关图解
a. $\text{SiO}_2\text{-FeO}^{\text{T}}$; b. $\text{FeO}^{\text{T}}\text{-(MnO+MgO)}$

Fig. 9 Variation of major elements in magnetite
a. $\text{SiO}_2\text{-FeO}^{\text{T}}$; b. $\text{FeO}^{\text{T}}\text{-(MnO+MgO)}$

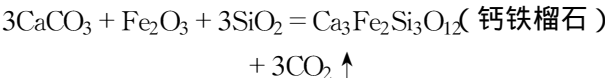
Ⅱ 晚期,形成绿帘石-富 Fe 辉石($>\text{Hd}_{60}$)组合,表明此时成矿体系处于相对较还原的状态,非常有利于矽卡岩型 Mo-Au 矿化的形成,其成分与全球矽卡岩型 Mo-Au 矿床相似(图 8b)。根据萨亚克矽卡岩矿床中矽卡岩矿物成分的变化及其与全球矽卡岩型 Cu、Mo 和 Au 矿床中相应矿物成分对比,初步推断萨亚克矽卡岩矿田中 3 类矿石的矿化顺序可能依次为磁黄铁矿-黄铜矿型、含 Mo 斑铜矿±黄铜矿型和含 Au 黄铜矿型。

与哈萨克斯坦相邻的中国新疆北部也有大量矽卡岩矿床分布,如阿勒泰南缘矽卡岩型铁矿带和准噶尔北缘的矽卡岩型铁铜金多金属矿带。前者包含多个大、中型矿床,如蒙库大型铁矿床(徐林刚等, 2007) 乌吐布拉克中型铁矿床(张志欣等, 2011)等;后者仅包含几个小型矿床,阿克巴斯套小型铁铜金矿床是其中之一(吕书君等, 2013)。阿勒泰南缘的矽卡岩铁矿床主要赋存于上志留统—下泥盆统变质火山-沉积岩系中,成矿作用与早泥盆世侵入岩有关

(杨富全等, 2008 ;2011);准噶尔北缘的矽卡岩型矿化产于中泥盆世闪长玢岩与中泥盆统基性火山岩-火山碎屑岩的接触带上,2 个成矿带中的矽卡岩均具有钙矽卡岩的特征(张志欣等, 2011 ;吕书君等, 2013)。与萨亚克矿田相比,阿勒泰南缘和准噶尔北缘的矽卡岩型矿化主要以火山岩为主要赋矿围岩,且围岩时代较老,成矿元素以 Fe 为主,伴生少量 Cu、Au ;与成矿相关的侵入岩时代为早-中泥盆世,明显老于萨亚克地区,并以岩体中缺乏斑岩型矿化而区别于萨亚克矿田。萨亚克铜矿田在环巴尔喀什斑岩型成矿带内并不具有区域代表性,因此,无法基于该矿田的成矿特征与中国新疆北部矽卡岩型矿化的对比来讨论区域成矿带延伸方面的问题,并且已有多方面的资料显示,中国新疆阿勒泰成矿带向北西延伸到哈萨克斯坦北部的矿山阿勒泰,以发育 VHMS 型矿床为特征(何国琦等, 2006 ;杨富全等, 2006)。萨亚克铜矿田所在的环巴尔喀什成矿带以发育斑岩型铜矿床为主要特征,斑岩时代为早石炭世—晚石炭世(陈宣华等, 2013)。中国新疆西准噶尔南部发育包古图中型斑岩铜矿床,成矿斑岩的侵位时代为 310~320 Ma,略晚于环巴尔喀什地区。申萍等(2010)对比了西准噶尔包古图与环巴尔喀什科翁腊德斑岩铜矿床的地质、地球化学特征及成矿动力学背景方面存在的差异,认为这 2 个地区的成矿动力学背景方面的差异,导致其成矿潜力的巨大差别。而萨亚克地区和包古图地区围岩条件的差异,可能是导致西准噶尔地区缺失矽卡岩型矿化的主要原因。

4.3 成矿流体演化

萨亚克矽卡岩型矿体主要产于石英闪长岩、花岗闪长岩与灰岩围岩的接触带上,从早期到晚期依次形成钙铁榴石、钙铁榴石-钙铝榴石系列-辉石-绿帘石、磁铁矿-石英、石英-黄铁矿-黄铜矿-磁黄铁矿-斑铜矿。矽卡岩是岩浆热液与灰岩地层相互反应的结果,不同类型的石榴子石成分(表 1)显示,早期钙铁榴石是富铁和硅的岩浆热液与灰岩相互反应的结果,其化学反应式可以总结为:



随着钙铁榴石结晶,成矿流体中 Fe 摩尔浓度逐渐降低,而 Al_2O_3 的摩尔浓度以及 CO_2 摩尔浓度逐渐升高。成矿流体交代早期结晶的钙铁榴石,形成含少量 Al 的钙铁榴石,即第二类石榴子石。随着流体中 Al 摩尔浓度的进一步升高,Fe 摩尔浓度的降

低,伴随温度的微弱下降,开始结晶出钙铁榴石-钙铝榴石端员中间系列组分(第三类石榴子石)、透辉石-钙铁辉石端员中间组分(图 8b,表 2)以及绿帘石。该阶段的矿物可能主要形成于开放的热液体系中,形成具有明显生长环带的石榴子石和含水矿物——绿帘石,显示流体中 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 和 $w(\text{FeO}^T)$ 的周期性调整 and 变化。高温热液体系中,Fe 可能主要以 Cl 络合物的形式进行迁移(王玉荣等,1981),而碱性环境有利于 Fe 从流体中发生沉淀(艾永富等,1981),随着矽卡岩发育阶段流体与围岩相互反应,体系中 CO_2 摩尔浓度逐渐升高导致体系碱性程度增强,这可能是最终引起磁铁矿发生沉淀的主要机制。之后,随着热液体系温度的进一步降低,体系中以 S、Cl 络合物形式进行迁移的 Cu 发生沉淀,形成黄铜矿-斑铜矿。

氧逸度是决定矽卡岩成矿系统矿化类型和成矿过程的关键因素之一。对不同阶段形成的石榴子石成分的研究表明,交代石榴子石矽卡岩中钙铁榴石(2.00~2.20)的含 Al 钙铁榴石(1.60~2.10)中 Fe^{3+} 的原子数明显降低,而相对于含 Al 钙铁榴石,绿帘石-矽卡岩中的环带构造石榴子石中 Fe^{3+} 原子数更低(1.30~1.80)(图 7),指示体系氧逸度逐渐降低的过程。研究表明,萨亚克矽卡岩型矿化早期石榴子石矽卡岩阶段的温度为 670~600℃(阶段 I),磁铁矿-绿帘石组合(阶段 II~III)形成于 630~530℃,而铜矿化(阶段 IV)发生在 590~350℃(陈宣华等,2010)。根据矽卡岩矿物组合及其形成温度,可以大致推测萨亚克矽卡岩的形成演化曲线,早期石榴子石阶段的氧逸度为 $\lg f(\text{O}_2) = -15 \sim -17$;绿帘石-石榴子石矽卡岩、磁铁矿阶段为 $\lg f(\text{O}_2) = -16 \sim -19$;而石英-硫化物阶段 $\lg f(\text{O}_2)$ 则低至 $-25 \sim -30$ (图 10),指示成矿体系氧逸度逐渐降低,与石榴子石成分显示的结果相似。而体系的氧逸度伴随温度的下降而逐渐降低可能也是导致磁铁矿乃至石英-硫化物阶段黄铁矿-磁黄铁矿-黄铜矿-斑铜矿组合发生沉淀的主要控制因素之一。

5 结 论

萨亚克铜矿田萨亚克 I 和塔斯陶矿区的矽卡岩主要为钙矽卡岩,是岩浆热液与灰岩接触交代的结果。矿化主要分为石榴子石矽卡岩阶段(I)、绿帘石-石榴子石矽卡岩阶段(II)、磁铁矿阶段(III)和石英-硫化物阶段(IV)4个阶段。矽卡岩中石榴子石分

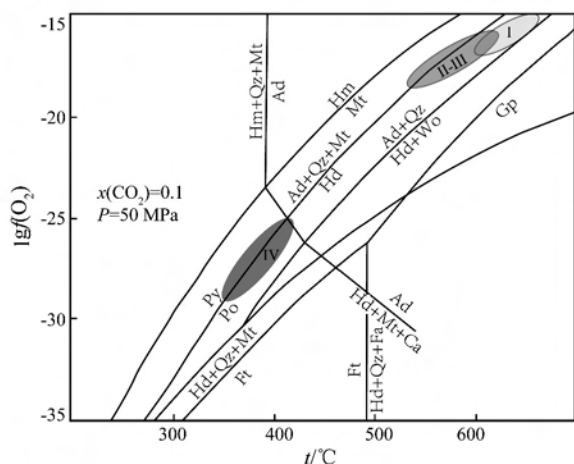


图 10 主要矽卡岩矿物、氧化物和硫化物在温度-氧逸度图中的稳定范围(Meinert et al., 2005)

I—石榴子石矽卡岩阶段; II—绿帘石-石榴子石矽卡岩阶段; III—磁铁矿阶段; IV—石英-硫化物阶段

Ad—钙铁榴石; Ca—方解石; Fa—铁橄榄石; Ft—铁阳起石; Gp—石墨; Hd—钙铁辉石; Hm—赤铁矿; Mt—磁铁矿; Po—磁黄铁矿; Py—黄铁矿; Qz—石英; Wo—硅灰石

Fig. 10 Temperature-log oxygen fugacity diagram, showing the stability field of major skarn silicate, oxide, and sulfide minerals (after Meinert et al., 2005) I—Garnet skarn stage; II—Epidote-garnet skarn stage; III—Magnetite stage; IV—Quartz-sulfide stage

Ad—Andradite; Ca—Calcite; Fa—Fayalite; Ft—Ferroactinolite; Gp—Graphite; Hd—Hedenbergite; Hm—Hematite; Mt—Magnetite; Po—Pyrrhotite; Py—Pyrite; Qz—Quartz; Wo—Wollastonite

为 3 类:石榴子石矽卡岩中的钙铁榴石和交代钙铁榴石的含 Al 钙铁榴石,绿帘石-石榴子石矽卡岩中具有环带结构的钙铁榴石-钙铝榴石系列中间组分。从第一类到第三类石榴子石,Al 含量逐渐升高、Fe 含量和分子中 Fe^{3+} 原子数逐渐降低。石榴子石、辉石成分与世界矽卡岩型 Cu-Mo-Au 矿床中相应矿物的成分相似。石榴子石、辉石成分变化指示萨亚克矿田不同类型矿石的形成顺序为:磁黄铁矿-黄铜矿型、含 Mo 斑铜矿 ± 黄铜矿型和含金黄铜矿型。从成矿早期到晚期,体系氧逸度、温度逐渐降低,碱性程度逐渐升高,这些物理化学条件的逐渐变化导致磁铁矿、黄铁矿-磁黄铁矿-黄铜矿-斑铜矿组合的沉淀。

本文通过对萨亚克矿田萨亚克 I 和塔斯陶矿区矽卡岩矿物组合、矿物成分的研究,初步确定了矽卡岩的类型及其与 Cu-Mo-Au 矿化的关系,同时探讨了矽卡岩成矿体系的物理化学条件及其对矿化的控制作用,对于萨亚克矽卡岩矿田成矿作用过程的认识具有一定的意义,同时为探讨成矿规律和区域成

矿对比提供了资料。

志 谢 感谢匿名审稿人提出的意见和建议, 对于完善本文具有重要指导意义。在野外工作期间, 得到了申萍、袁峰、潘鸿迪老师, 张林浩高工的帮助, 实验分析工作在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成, 杨文强对实验工作进行了指导, 在此谨表衷心的感谢。

参考文献/References

- 艾永富, 金玲年. 1981. 石榴子石成分与矿化关系的初步研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), (1): 83-90.
- 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.
- 陈光远, 黎美华, 汪雪芳. 1984. 弓长岭铁矿成因矿物学专辑[J]. 矿物岩石, 4: 14-42.
- 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 1987. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆: 重庆出版社.
- 陈宣华, 王志宏, 杨 农, 陈正乐, 韩淑琴. 2010. 中亚巴尔喀什成矿带萨亚克大型铜矿田矿床地质特征与成矿模式[J]. 地质力学学报, 16(2): 189-202.
- 陈宣华, 王志宏, 陈正乐, 韩淑琴, Eleonora S, 杨 屹, 叶宝莹, 陈 文. 2012. 中亚萨亚克大型铜矿田矽卡岩型铜成矿作用的年代学制约[J]. 岩石学报, 28(7): 1981-1994.
- 陈宣华, 陈正乐, 韩淑琴, 王志宏, 杨 屹, 叶宝莹, 施 炜, 李 勇. 2013. 中亚巴尔喀什成矿带晚古生代岩浆活动与斑岩铜矿成矿时代[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 43(3): 734-747.
- 何国琦, 朱永峰. 2006. 中国新疆及其临区地质矿产对比研究[J]. 中国地质, 33(3): 451-460.
- 李光明, 秦克章, 李金祥. 2008. 哈萨克斯坦环巴尔喀什斑岩铜矿地质与成矿背景研究[J]. 岩石学报, 24(12): 2679-2700.
- 刘 刚, 陈宣华, 董树文, 陈正东, 韩淑琴, 杨 屹, 叶宝莹, 施 炜. 2012. 巴尔喀什成矿带晚古生代地壳增生与构造演化[J]. 岩石学报, 28(7): 1995-2008.
- 吕书君, 杨富全, 柴凤梅, 张志欣, 李 强. 2013. 新疆准噶尔北缘托斯巴斯套铁铜金矿床矽卡岩和磁铁矿矿物学特征及其地质意义[J]. 岩矿测试, 32(3): 510-521.
- 毛景文, 李红艳, 宋学信. 1998. 湖南柿子园钨锡钼多金属矿床地质与地球化学[M]. 北京: 地质出版社. 1-215.
- 申 萍, 沈远超. 2010. 西准噶尔与环巴尔喀什斑岩型铜矿床成矿条件及成矿模式对比研究[J]. 岩石学报, 26(10): 2875-2893.
- 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.
- 涂光炽. 1999. 初议中亚成矿域[J]. 地质科学, 34(4): 397-404.
- 王玉荣, 樊文岑, 郁云妹. 1981. 碱交代与铁矿形成的地球化学机理探讨[J]. 地球化学, 1: 95-103.
- 魏少妮, 朱永峰. 2010. 新疆包古图中酸性岩浆侵位的 $P-T-f_{O_2}$ 条件及岩体地球化学研究[J]. 地质学报, 84(7): 1017-1029.
- 徐林刚, 杨富全, 李建国, 蔡永彪, 郑建民, 黄成林. 2007. 新疆富蕴县蒙库铁矿地质、地球化学特征[J]. 岩石学报, 23(10): 2653-2664.
- 杨富全, 毛景文, 郑建民, 徐林刚, 刘德权, 赵财胜, 叶会寿. 2006. 哈萨克斯坦阿尔泰巨型成矿带的地质特征和成矿模型[J]. 地质学报, 80(7): 963-983.
- 杨富全, 毛景文, 徐林刚, 张 岩, 刘 峰, 黄成林, 周 刚, 刘国仁, 代军治. 2007. 新疆蒙库铁矿床稀土元素地球化学及对铁成矿作用的指示[J]. 岩石学报, 23(10): 2443-2456.
- 杨富全, 毛景文, 闫升好, 刘 峰, 柴凤梅, 周 刚, 刘国仁, 何立新, 耿新霞, 代军治. 2008. 新疆阿尔泰蒙库同造山斜长花岗岩年代学、地球化学及其地质意义[J]. 岩石学报, 82(4): 485-499.
- 杨富全, 刘 峰, 柴凤梅, 张志欣, 耿新霞, 吕书君, 姜丽萍, 欧阳刘进. 2011. 新疆阿尔泰铁矿: 地质特征/时空分布及成矿作用[J]. 矿床地质, 30(4): 575-598.
- 于玉帅, 杨竹森, 刘英超, 田世红, 赵 灿, 高 原, 纪现华, 胡为正, 曹圣华. 2012. 西藏尼雄矿田日阿铜矿床矽卡岩矿物学特征及地质意义[J]. 矿床地质, 31(4): 775-790.
- 张 锐, 张孝孝, 佟更生, 汪 疆, 李龙乾. 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.
- 张志欣, 杨富全, 罗物仓, 刘 峰, 柴凤梅, 吕书君, 欧阳刘进, 姜丽萍. 2011. 新疆阿勒泰乌吐布拉克铁矿床矽卡岩矿物特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志(2), 30: 267-280.
- 赵一鸣, 林文蔚, 毕承思. 1990. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京: 地质出版社.
- 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.
- 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.
- 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(10): 1744-1749.
- 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.
- Bespaev K A and Miroshnichenko L A. 2004. Atlas of mineral deposit models [M]. Almaty, Kazakhstan: K. I. Satpaev Institute of Geological Sciences, 1-41.
- Einaudi M T, Meinert L D and Newberry R J. 1981. Skarn deposits [J]. Econ. Geol., 75th Anniversary Volume: 317-391.
- Heinhorst J, Lehmann B, Ermolov P, Serykh V and Zhurutin S. 2000. Paleozoic crustal growth and metallogeny of Central Asia: Evidence from magmatic-hydrothermal ore systems of Central Kazakhstan [J]. Tectonophysics, 328(1-2): 69-87.
- Kroner A, Hegner E, Lehmann B, Heinhorst J, Wingate M T D, Liu D Y and Ermolov P. 2008. Paleozoic arc magmatism in the Central Asian Orogenic Belt of Kazakhstan: SHRIMP zircon ages and whole-rock Nd isotopic systematics [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 32: 118-130.
- Meinert L D. 1992. Skarns and skarn deposits [J]. Geoscience Canada, 19: 145-162.
- Meinert L D, Dipple G M and Nicolescu S. 2005. World skarn deposits [A]. In: Hedenquist J W, Thompson J F H and Goldfarb R J, eds. Economic Geology 100th anniversary volume [C]. Society of Economic Geologists, 299-336.
- 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.
- Xu L G, Mao J W, Yang F Q, Daniel H and Zheng J M. 2010. Geology, geochemistry and age constraints on the Mengku skarn iron deposit in Xinjiang Altai, NW China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 39(5): 423-440.
- 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.

<http://www.kcdz.ac.cn/>