

东天山三岔口铜矿床类型、赋矿岩石成因与矿床矿物学特征^{*}

秦克章¹ 张连昌¹ 丁奎首¹ 许英霞^{1,2} 唐冬梅¹ 徐兴旺¹ 马天林³ 李光明¹
QIN KeZhang¹, ZHANG LianChang¹, DING KuiShou¹, XU YingXia^{1,2}, TANG DongMei¹, XU XingWang¹, MA TianLin³ and LI GuangMing¹

1. 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2. 河北理工大学资源与环境学院地质系, 唐山 063009

3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

1. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. Department of Geology, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009, China

3. Institute of Geodynamics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

2008-11-01 收稿, 2009-02-15 改回.

Qin KZ, Zhang LC, Ding KS, Xu YX, Tang DM, Xu XW, Ma TL and Li GM. 2009. Mineralization type, Petrogenesis of ore-bearing intrusions and mineralogical characteristics of Sanchakou copper deposits in eastern Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4):845–861

Abstract According to the field work and major elements, trace elements and Sr-Nd isotope data of hosted rocks of quartz diorite, granodiorite and granodioritic porphyry in Sanchakou copper deposit of porphyry type and vein type, we found that hosted rocks are of C-type adakite. Through a series of analysis of scan electron microscope (SEM), electron probe microscope (EPMA), X-ray diffraction analysis, we determine the type characters of silicate minerals (mainly Biotite), sulfide, Fe-Ti oxide and accessory minerals, those analyses provide important evidences of judging the ore genesis and forecasting metallogenetic potential. In addition, we have found carrollite infrequent in nature and the fact that pyrite in Sanchakou enriched Co, it is beneficial to integrated using metal cobalt.

Key words Sanchakou Cu deposit; C-type adakite; Biotite; Carrollite; Porphyry and vein type; Eastern Tianshan Mountains

摘 要 在野外系统考察及采样基础上, 以等离子光谱(ICP)对东天山三岔口铜(钼)矿床赋矿石英闪长玢岩、花岗闪长岩、花岗闪长斑岩的主、微量元素及 Sr-Nd 同位素组成进行测定, 揭示了该矿区容矿岩石实属 C 型埃达克岩类, 形成于二叠纪早期, 产于碰撞增厚背景。通过扫描电镜、电子探针及 X 射线衍射, 重点分析并研究了以黑云母为主的暗色硅酸盐矿物、硫化物、铁-钛氧化物以及其它有关副矿物的标型特性, 旨在对判别矿床成因类型、预测成矿远景提供依据。据多数黑云母中的 Mg/Fe 比值 > 0.52 之事实, 可推断出本地区虽具一定成矿潜力, 但因赋矿埃达克岩中 $Mg^{\#} < 40$, 且不属于俯冲洋壳成因, 找到大型规模矿床的可能性不大。磁铁矿的标型显示本矿床具有部分夕卡岩型特色, 而富锰钛铁矿与其寄主埃达克岩有同样的形成物理、化学条件, 显示二者成因密切相关。通过对辉钼矿多型的 X 射线分析, 以及硫化物中 Au/Ag 比的研究, 进一步证实本矿床属于斑岩型-叠加热液脉型矿床。对硫化物微量元素的测定, 揭示了本矿床富钴的事实, 一种罕见的硫铜钴矿的发现更加证实这一认识, 进而指出对钴综合利用的重要性。

关键词 三岔口铜矿床; C 型埃达克岩; 黑云母; 硫铜钴矿; 斑岩型和中温热液脉状矿床; 东天山

中图法分类号 P618.41

^{*} 本文受中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-107) 与国家科技支撑计划新疆 305 项目东天山铜镍矿专题 (2006BAB07B03-01, 2001BA609A-07-07) 资助。

第一作者简介: 秦克章, 男, 1964 年生, 研究员, 从事造山带成矿作用与成矿预测研究, E-mail: kzzq@mail.iggcas.ac.cn

三岔口铜矿床位于东天山东段觉洛塔格构造-岩浆带中东段北缘,行政区划隶属新疆哈密地区,始发现于1985年,1987-1988年新疆地矿局第一地质大队、第六地质大队对三岔口铜(钼)矿带进行了化探异常工程验证和初步评价。矿区出露地层为下石炭统的一套浅变质的石炭系碎屑岩系(如石英砂岩、粉砂岩、板岩等),其次尚有安山质凝灰岩及角斑岩、细碧岩等。其由带状浸染状矿化和多个Cu(Mo)脉状矿体所组成,而展布在一个复式斑岩岩体中及其边缘,斑岩体则由花岗闪长斑岩(前人多习称为斜长花岗斑岩)、花岗闪长岩及石英闪长玢岩所组成。有关著文已陆续见诸报道(郎智君等,1992;孙燕等,2002;李华芹等,2004;许英霞等,2006)。鉴于前人工作大多仅涉及一般地质特征及年代,除许英霞等(2006)对富铜红辉沸石进行了研究外,对于赋矿岩石中之组成矿物缺乏系统研究。此情之下,也影响到对矿床乃至其原岩赋以更加深刻的认识,为此,本课题组则在矿床地质特征与控矿因素研究的基础上,对矿区埃达克岩的地质地球化学特征以及主要矿物标型特性与成因给予较多的侧重。全文由六个部分组成,展开容矿岩石、硅酸盐矿物及副矿物、硫化物标型特征的系统研究,旨在为明确矿床成因、伴生组分综合利用与判断成矿远景提供依据。

1 三岔口铜矿床基本特点与成因类型、控矿因素新认识

1.1 矿体特征

三岔口矿区分东、西两个矿段(图1),以西矿段最为重要。西矿段目前已圈出工业铜矿体35个(郎智君等,1992)。矿化发育于受北东向脆韧性剪切带控制的雁列花岗闪长斑岩及石英闪长玢岩中(Qin *et al.*, 2003;李华芹等,2004),岩体中断裂构造发育,控矿作用明显。其中,I号矿体位于岩体东段,与围岩呈渐变关系,由浸染状矿石构成,矿石矿物以黄铜矿为主,其次为黄铁矿,硫化物少见,近矿围岩蚀变以绢云母化和硅化为主,并叠加有绿泥石化和绿帘石化;II号、III号矿体位于岩体中部,蚀变与矿化与I号矿体类似;IV号矿体,围岩蚀变为绿泥石化、绢云母化及硅化,矿石矿物主要为黄铜矿和辉钼矿;V号矿体位于IV号下部,规模较大,东西向延伸约1000m,主要为细脉状和浸染状,矿体埋深340~570m,厚3~34m,近矿围岩蚀变以绢云母化和绿泥石化为主,矿石矿物为黄铜矿和辉钼矿;VI号矿体,是矿区目前所发现的规模最大的地表矿体,矿体产于NW与NE向两组断裂的交汇处,在矿体中常见有后期含铜石英脉、网脉贯入,金属硫化物主要是

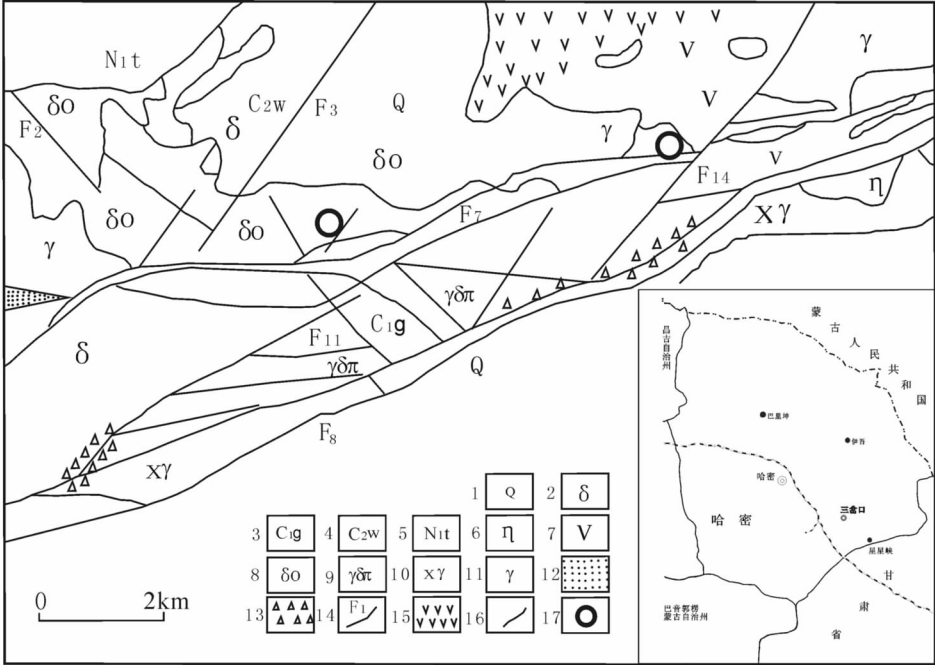


图1 哈密三岔口铜矿地质略图(据郎智君等,1992,简化)

1-第四系;2-闪长岩;3-下石炭统干墩组;4-中石炭统梧桐窝子组;5-中新统桃树村组;6-二长岩;7-角闪辉长岩;8-石英闪长岩;9-花岗闪长岩和花岗闪长斑岩;10-海西晚期碱长花岗岩;11-二云母花岗岩;12-角岩;13-角砾岩带;14-断裂及编号;15-安山岩;16-地质界线;17-铜矿

Fig.1 Sketch geological map of the Sanchakou copper deposit, eastern Xinjiang (Revised after Lang *et al.*, 1992)

1-Quaternary; 2-Diorite; 3-Gandun Formation of Lower Carboniferous; 4-Wutongwozi Formation of Middle Carboniferous; 5-Taoshucun Formation of Miocene; 6-Monzonite; 7-Hornblende gabbro; 8-Quartz diorite; 9-Granodiorite and granodioritic porphyry; 10-Alkalic granite of Late Hercynian; 11-Two-mica granite; 12-Hornstone; 13-Breccia zone; 14-Fracture and its number; 15-Andesite; 16-Geological boundary; 17-Copper deposit

辉铜矿和黄铜矿,矿体围岩蚀变以绢云母化和硅化为主,叠加有黑云母化与高岭土化及沸石化等。

1.2 蚀变矿化特征与矿床成因类型

前人认为矿床的热液蚀变分带性不明显,缺乏对斑岩型铜矿形成至关重要的钾化蚀变,以硅化、绢英岩化、绿泥石化、绿帘石化、黄铁矿化及高岭土化、沸石化等中温蚀变为主,且热液蚀变强度也不很强,只可见少量呈线状分布的弱黑云母化(郎智君等,1992;许英霞等,2006)。根据本文作者的观察,实际上黑云母化也很发育,它是钾硅酸盐化蚀变的另一种表现形式。黑云母含量约为9%~13%,多为普通角闪石被热液交代或沿裂隙分布热液蚀变形成的黑云母。与黑云母共生的常见硫化物有黄铜矿、辉钼矿、黄铁矿等。岩体中原生黑云母含量较少。蚀变岩石中石英含量约为35%~40%,硅化交代十分明显。

三岔口铜矿可分为岩浆晚期残余气液矿化期和岩浆期后热液成矿期(郎智君等,1992;孙燕等,2002;许英霞等,2006)。前者热液流体温度较高,约300~550℃,矿物共生组合为磁黄铁矿、磁铁矿、辉钼矿及黄铜矿等,该期蚀变为黑云母化及钠长石化,为稀疏浸染状矿化。一般不形成工业矿体。岩浆期后热液成矿期(100~300℃)为主要成矿期,其中主要成矿阶段温度区间为150~240℃,形成石英-绿帘石绿泥石-金属硫化物细脉浸染状矿化和石英-碳酸盐金属硫化物矿化。后者常叠加在前者之上,形成富矿体。

矿石主要为细脉或细脉浸染状以及脉状,硫化物矿物组成属黄铜矿、黄铁矿、辉钼矿和斑铜矿、辉铜矿共生组合类型。矿化受岩体边缘相的构造裂隙控制,微裂隙非常发育,分布广泛,但分布不均匀,因而矿化也极不均匀。反映岩浆期后热液作用的特点。岩体边缘相发育大量的微裂隙,这些构造空间常被含矿石英脉或金属硫化物脉所充填,矿脉两侧岩石常见有绿帘石化、绿泥石化、绢云母化增强的现象。不同方向的裂隙相互交错导致了不同时期形成的矿脉相互切割。在应力集中部位,节理裂隙发育,矿化集中常形成高品位矿石,反之矿化较贫。特别是X型共轭剪性断裂与矿体的形成和分布有密切关系,在西矿区,两组断裂复合或交切部位是最有利的成矿部位,矿体规模受断裂间距、密集程度和展布空间等综合因素控制。

前人认为三岔口铜矿床系受断裂控制的与中深成相形成的花岗闪长岩、闪长玢岩有关的中-低温(岩浆-地下水)热液交代-充填型铜矿床(郎智君等,1992)。本文作者先后进行了东、西矿段的地质-构造-矿化的数次系统观察,认为系斑岩型铜(钼)矿,后期叠加有高品位脉状矿化。X型共轭剪切断裂,两组不同方向断裂的复合交切部位,以及节理裂隙发育地段,常常形成富矿体。晚期热液作用沿构造破碎带交代充填形成脉状(1~4m宽)富铜矿体,这正是目前开采对象。

矿体产状推定及找矿前景分析:矿体主要受片理张开带控制,矿化发生于片理最强烈的糜棱岩带内,因此,单个矿体

大体与片理带“整合”,而矿体组合则为平、剖面的雁列状展布。本次野外观察分别测得了含矿斑岩体片理产状:东岩体 S_1 为 $205^\circ\angle 72^\circ$,拉伸线理 L : $260^\circ\angle 30^\circ$ 。由此判断单个矿体为走向 310° 、缓南西侧伏的($20^\circ\sim 30^\circ$)陡南倾斜的扁柱状体,矿体组合形式为平面上 295° 方向展布的多字形雁列脉带,剖面上为倾向 205° 倾角 70° 左右的多字形雁列脉带。找矿前景分析:在东、西矿段之间或延长线上有可能找到新的东西向含矿岩体;已知矿床内扩大找矿潜力较大,按矿带矿体产状规律,可望找到隐伏雁列新矿体。

1.3 成矿阶段划分与成矿演化

本文根据矿脉穿插关系及矿物组合可将矿化分为四期:

1)第一期-岩浆矿化期,黄铜矿、黄铁矿呈浸染状均匀散布于岩体中;

2)第二期-早期热液矿化期,形成顺张开片理分布的无石英的硫化物脉;

3)第三期-中期热液矿化期,形成黄铜矿+黄铁矿+石英矿物组合,硫化物呈团块状分布于石英脉中;

4)第四期-晚期热液矿化期,形成黄铜矿+辉钼矿+黄铁矿+方解石矿物组合,硫化物呈胶结物分布于片理化的花岗闪长斑岩、石英闪长玢岩角砾间。

第三、四期为主成矿期,形成脉状和角砾状矿石。

成矿过程:矿化经历了全岩矿化→片理启张迁移矿化→岩体碎裂含矿石英脉贯入矿化→岩体隐爆矿液充填四个演化阶段。

从含矿岩体的侵入到矿化完成受控于一条NEE向脆-韧性剪切带的变形演化过程:

① 康古尔大型韧性剪切带上升到浅表层次,发生左行走滑,花岗闪长斑岩、石英闪长玢岩充填于旁侧的NEE向雁列的张裂带中;形成东西向脆韧性剪切带并进一步张开,形成二个近东西向含矿岩体(东、西矿段岩体);

② 脉动式走滑剪切继续活动,岩体片理张开,硫化物构造迁移进入张开的片理面,形成似条带状硫化物细脉;

③ 脆-韧性剪切带活动加剧,初步矿化的花岗闪长斑岩、石英闪长玢岩碎裂,含硫化物石英脉贯入;

④ 脆-韧性剪切带活动达到顶峰,矿化岩体张裂并发生“隐爆”,大量矿液上涌,充填于角砾岩间隙,形成角砾状矿石。

2 三岔口铜矿床赋矿岩为C型埃达克岩

三岔口含矿斑岩其成岩年代经锆石SHRIMP法测定为 287 ± 4 Ma(李华芹等,2004),明显晚于东天山西段相似矿床类型的早石炭世土屋-延东斑岩铜矿(335~356Ma)(秦克章,2000;Qin *et al.*, 2002;芮宗瑶等,2002a;张连昌等,2006)。为取得本地区斑岩是否具有埃达克岩的重要证据,首先对其本身的主量、微量元素以及Sr-Nd同位素进行分析,结果列于下表1。从表1可看出,岩石中主量元素特征为: $SiO_2 > 56\%$ 、

表1 三岔口含矿斑岩主量元素 (wt%) 与微量元素 (×10⁻⁶) 组成

Table 1 Major (wt%) and trace (×10⁻⁶) element data for ore-bearing porphyries in Sanchakou copper deposit, eastern Tianshan

| 样号 | SCKE-196 | SCKE-179 | SCK0301 | SCK0302 |
|--------------------------------|----------|----------|---------|---------|
| SiO ₂ | 64.7 | 61.6 | 65.5 | 65.0 |
| TiO ₂ | 0.42 | 0.49 | 0.45 | 0.40 |
| Al ₂ O ₃ | 16.1 | 17.1 | 16.8 | 16.9 |
| Fe ₂ O ₃ | 1.17 | 3.58 | 1.62 | 2.29 |
| FeO | 2.12 | 3.36 | 2.92 | 2.38 |
| MnO | 0.04 | 0.11 | 0.09 | 0.10 |
| MgO | 1.83 | 2.10 | 1.70 | 1.49 |
| CaO | 2.10 | 5.87 | 4.07 | 5.06 |
| Na ₂ O | 6.01 | 3.58 | 3.62 | 3.70 |
| K ₂ O | 0.92 | 0.52 | 1.54 | 0.41 |
| P ₂ O ₅ | 0.15 | 0.23 | 0.19 | 0.19 |
| LOI | 1.50 | 0.70 | 1.29 | 1.78 |
| Total | 97.1 | 99.2 | 99.8 | 99.7 |
| Mg [#] | 40.0 | 32.5 | 31.0 | 32.6 |
| Ba | 620 | 392 | 149 | 386 |
| Cs | 0.14 | 0.13 | 0.19 | 0.07 |
| Rb | 9.83 | 8.73 | 29.97 | 7.03 |
| Sr | 760 | 389 | 595 | 758 |
| Y | 14.6 | 6.39 | 13.0 | 10.2 |
| Cr | 1.30 | 7.72 | 1.41 | 1.91 |
| Ni | 6.32 | 12.1 | 10.7 | 2.45 |
| Nb | 2.89 | 3.23 | 3.17 | 2.43 |
| Zr | 72.2 | 79.2 | 65.5 | 60.5 |
| Hf | 2.14 | 2.20 | 1.71 | 1.65 |
| Ta | 0.16 | 0.23 | 0.45 | 0.31 |
| La | 13.0 | 14.1 | 14.8 | 10.3 |
| Ce | 27.1 | 27.6 | 27.8 | 22.6 |
| Pr | 3.41 | 3.57 | 3.52 | 2.97 |
| Nd | 13.4 | 13.2 | 13.7 | 12.2 |
| Sm | 2.86 | 2.26 | 3.15 | 2.87 |
| Eu | 0.96 | 0.68 | 1.10 | 0.85 |
| Gd | 2.61 | 1.71 | 2.62 | 2.27 |
| Tb | 0.41 | 0.22 | 0.41 | 0.34 |
| Dy | 2.44 | 1.08 | 2.52 | 2.05 |
| Ho | 0.53 | 0.20 | 0.51 | 0.40 |
| Er | 1.48 | 0.56 | 1.48 | 1.14 |
| Tm | 0.25 | 0.09 | 0.22 | 0.17 |
| Yb | 1.65 | 0.63 | 1.43 | 1.14 |
| Lu | 0.26 | 0.10 | 0.24 | 0.19 |
| δEu | 1.06 | 1.02 | 1.14 | 0.98 |

测试单位为中国科学院地质与地球物理研究所,主量元素由XRF、微量元素由ICP-MS测试完成

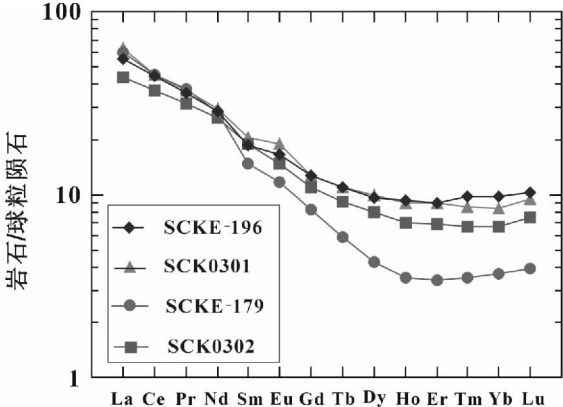


图2 三岔口含矿斑岩的稀土元素配分图解
Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns for ore-bearing porphyries in Sanchakou Cu deposit

Al₂O₃ > 15%、MgO < 3%、Sr 389 × 10⁻⁶ ~ 760 × 10⁻⁶、Yb 0.63 × 10⁻⁶ ~ 1.65 × 10⁻⁶、Y 6.39 × 10⁻⁶ ~ 14.57 × 10⁻⁶，稀土元素配分曲线属重稀土亏损型(图2)。(La/Yb)_N 介于5~15，δEu 介于0.98~1.14之间。含矿斑岩的ε_{Nd}(t)和初始⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值分别为5.3~6.4和0.7037~0.7042。这些岩石的Nd和Sr同位素组成与洋中脊玄武岩(MORB)以及新生代环太平洋起源于俯冲洋壳的埃达克岩组成(Defant and Drummond, 1990)非常接近。

三岔口斑岩以高Sr、Na₂O和Al₂O₃和低Y、HREE等特征,与Defant and Drummond(1990)和Drummond *et al.* (1996)所定义的埃达克岩的地球化学特征颇相一致,文中数据投点均落入(La/Yb)_N-Yb_N和Sr/Y-Y图解中的埃达克岩区(图3)。与土屋斑岩铜矿(张连昌等,2004)相比较,两者主量元素组成颇接近。另外,以上两矿床埃达克岩的Sr-Nd同位素组成与洋中脊玄武岩(MORB)以及起源于俯冲洋壳埃达克岩的Sr-Nd同位素组成亦更相似。据研究,土屋-延东埃达克岩的Mg[#] > 40,可能系俯冲洋壳的熔融产物(Qin *et al.*, 2002;张连昌等,2006)。与Drummond and Drummond(1990)及Defant and Kepezhinskis(2001)所持的由俯冲板片熔融产生的埃达克岩的Mg[#]值均大于40的论断几相一致。与之不同的是,三岔口斑岩的Mg[#] < 40。据Rapp and Watson(1995)实验所证实,由玄武质岩石部分熔融产生的埃达克质熔体,其Mg[#]值绝大部分小于40。三岔口铜矿成岩成矿时代为早二叠世,东天山碰撞造山阶段为晚石炭世-早二叠世(马瑞士等,1997;Qin *et al.*, 2002, 2003),因而其形成环境与消减作用无关。据此,可推测其斑岩可能与碰撞造山阶段后期由于玄武岩底侵所导致的下地壳的熔融作用密切相关。据有关研究(Defant and Drummond, 1990;王强等,2001;张旗等,2001, 2004),埃达克岩为形成斑岩铜矿的重要因素之一,因其岩浆由玄武质岩石在高温高压及含水条件下熔融而成,有利于Cu、Au、Mo等元素络合物的融入。该岩类所具有的独特成矿条件包括:

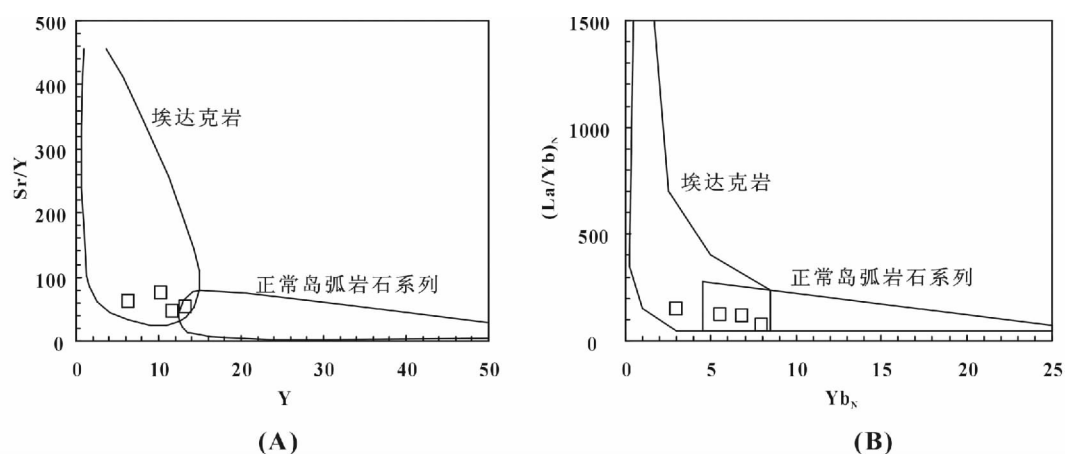


图3 三岔口铜矿区赋矿岩石 Sr/Y-Y(A)和 $(La/Yb)_N$ -Yb_N(B)图解

Fig.3 Sr/Y-Y(A) and $(La/Yb)_N$ -Yb_N(B) discrimination diagram for ore-hosting porphyries in Sanchakou Cu deposit

1) 含有高丰度成矿元素和挥发分的源区——洋壳(或古洋壳);

2) 特殊的形成条件和成岩过程——角闪岩相向榴辉岩相转变而导致洋壳熔融及富挥发分与成矿元素埃达克岩岩浆的产生,该岩浆与地幔楔的相互作用又进一步导致成矿元素的富集;

3) 在高氧逸度条件下,因埃达克岩浆与地幔楔的相互作用,促进 Cu、Au 硫化物的快速分解,并在岩浆运移当中抑制硫化物的饱和作用;

4) 压力的急剧降低与挥发分的释放,形成大规模富含 Cu、Au 的成矿流体。

据上所述,三岔口矿区虽具备一定有利成矿条件,但因其斑岩不属于洋壳熔融成因,而属于玄武岩浆底侵触发的下地壳熔融形成的 C-型埃达克岩(张旗等,2001;王强等,2001;张连昌等,2006),故成矿潜力不如土屋-延东大型斑岩铜矿的含矿岩——O-型埃达克岩(张连昌等,2004)。

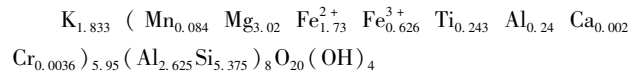
3 三岔口含矿斑岩黑云母组成特征及其地质意义

野外考察中发现本矿床矿化强度与赋矿花岗闪长斑岩、花岗闪长岩中黑云母化强烈与否直接相关,富矿石中黑云母略显定向排列,含量有明显增加之势。符合前人(Ishihara, 1977; 傅金宝,1981)早已注意到并明确指出的,黑云母是斑岩铜矿及其它热液铜矿成矿中一种重要的指示矿物,故此在本研究中对给予较多的侧重。

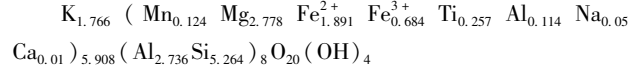
3.1 三岔口含矿斑岩黑云母成分分析

据电子探针分析结果(表2),经计算获得各黑云母的矿物化学式为:

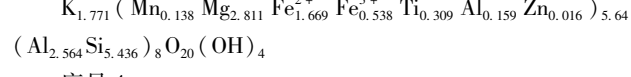
序号1:



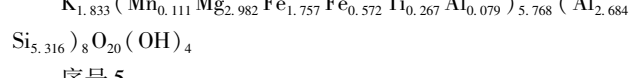
序号2:



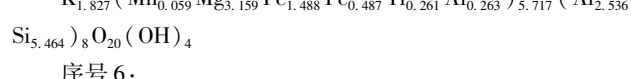
序号3:



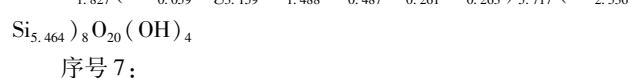
序号4:



序号5:



序号6:



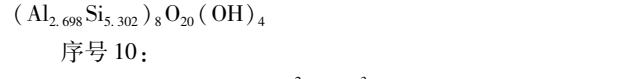
序号7:



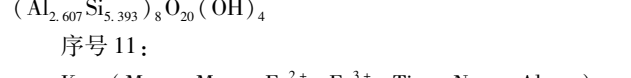
序号8:



序号9:



序号10:



序号11:



表 2 新疆东天山三岔口铜矿床中黑云母电子探针分析结果(wt%)

Table 2 Composition of biotite from intrusions in Sanchakou Cu deposit by EPMA (wt%)

| 样品号 | SCK 182-3-2 | SCK 182-3-3 | SCK 182-2-2 | SCK 182-2-3 | SCK 182-2-4 | SCK 182-12-4 | SCK 182-5-4 | SCK 182-10-3 | SCK 182-10-4 | SCK 179-7-1 | SCK 179-7-3 |
|--------------------------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|
| 岩性 | 黑云母化 花岗闪长 斑岩 | 花岗 闪长岩 | 黑云母化 花岗闪长 斑岩 | 铜矿化花 岗闪长岩 | 铜矿化花 岗闪长岩 | 黑云母 化花岗 闪长岩 | 矿化花岗 闪长斑岩 | 矿化花岗 闪长斑岩 | 铜矿化花 岗闪长岩 | 黑云母化 花岗闪长 斑岩 | 黑云母化 花岗闪长 斑岩 |
| SiO ₂ | 35.3 | 34.4 | 34.8 | 34.7 | 35.5 | 36.2 | 36.4 | 33.4 | 33.4 | 34.3 | 34.3 |
| TiO ₂ | 2.12 | 2.23 | 1.71 | 2.37 | 2.25 | 1.46 | 1.83 | 2.03 | 2.39 | 2.69 | 2.91 |
| Al ₂ O ₃ | 20.0 | 18.8 | 19.6 | 19.3 | 19.5 | 19.0 | 17.6 | 17.5 | 18.7 | 18.4 | 18.4 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.04 | 0.03 | 0.01 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | | 0.04 | | 0.04 | 0.04 |
| MgO | 10.3 | 9.67 | 12.3 | 11.0 | 11.7 | 14.8 | 14.6 | 9.60 | 9.62 | 10.3 | 9.83 |
| CaO | 0.01 | 0.07 | 0.01 | 0.01 | | | 0.01 | 0.11 | | 0.05 | 0.02 |
| MnO | 0.65 | 0.96 | 1.11 | 0.90 | 0.81 | 0.54 | 0.46 | 0.59 | 0.55 | 0.74 | 0.84 |
| FeO | 18.5 | 19.6 | 15.4 | 16.2 | 16.2 | 12.8 | 15.2 | 22.0 | 20.4 | 18.6 | 18.2 |
| Na ₂ O | 0.28 | 0.17 | 0.28 | 0.27 | 0.26 | 0.14 | 0.30 | 0.17 | 0.11 | 0.16 | 0.10 |
| K ₂ O | 9.43 | 9.04 | 9.05 | 9.37 | 9.33 | 9.50 | 7.90 | 8.71 | 8.62 | 9.54 | 9.69 |
| NiO | | | | 0.03 | 0.02 | | 0.01 | | | 0.01 | |
| ZnO | | 0.05 | 0.15 | 0.11 | 0.19 | 0.07 | 0.31 | 0.18 | 0.23 | 0.09 | |
| H ₂ O | 3.45 | 3.90 | 3.95 | 3.93 | 4.00 | 4.03 | 4.01 | 3.82 | 3.85 | 3.90 | 3.88 |
| Total | 100.0 | 98.9 | 98.3 | 98.2 | 99.8 | 98.6 | 98.6 | 98.1 | 97.9 | 98.8 | 98.2 |
| Mg/Fe | 0.489 | 0.468 | 0.587 | 0.549 | 0.562 | 0.673 | 0.631 | 0.438 | 0.456 | 0.496 | 0.491 |

表 3 三岔口及有关斑岩铜矿中不同类型黑云母的组成对比

Table 3 Correlation of biotite compositions among Sanchakou Cu deposit and other porphyry Cu deposits in China

| 矿床 规模 | 矿床 名称 | 岩 性 | 黑云母 类型 | 样品数 | 元素比值 | | | | |
|----------|----------|-------------------------|-----------|-----|-------|-------|-------|--|-------|
| | | | | | Mg/Fe | Al/Fe | K/Na | Al ₂ O ₃ /TiO ₂ | Si/Al |
| 中型 | 三岔口 | 花岗闪长斑岩、 花岗闪长岩、石英闪长玢岩 | 岩浆 | 11 | 0.55 | 0.59 | 35.7 | 6.48 | 1.99 |
| | | | 热液交代 | | | | | | |
| 小型 | 野泉店 | 辉长岩 | 岩浆 | 2 | 0.60 | 0.50 | 29.2 | 3.00 | 2.23 |
| | | | 热液 | 6 | 0.88 | 0.63 | 30.8 | 3.90 | 2.20 |
| | | | 岩浆 | 6 | 0.80 | 0.61 | 10.8 | 4.50 | 2.26 |
| 中型 | 沙溪 | 石英闪长斑岩 | 热液交代 | 4 | 0.78 | 0.67 | 7.32 | 5.20 | 2.24 |
| | | | 热液新生 | | | | | | |
| 矿化 | 横塘 | 石英闪长斑岩、 花岗闪长斑岩 | 岩浆 | 7 | 0.60 | 0.52 | 41.4 | 3.30 | 2.27 |
| | | | 热液交代 | 2 | 0.57 | 0.50 | 25.8 | 4.30 | 2.27 |
| | | | 热液新生 | 2 | 0.53 | | 30.3 | 32.7 | 1.73 |
| | | | 岩浆 | 3 | 0.59 | 0.26 | | | |
| | | | 热液新生 | 1 | 0.47 | | | | |
| 大型 | 多宝山 | 花岗闪长岩 | 岩浆 | 6 | 0.51 | 0.45 | 40.00 | 3.40 | 2.54 |
| | | | 热液交代 | 6 | 0.53 | 0.70 | | 5.00 | 1.99 |
| | | | 热液新生 | 6 | 0.51 | | | 10.00 | 2.17 |
| 中型 | 八大关 | 花岗闪长岩 | 岩浆 | 2 | 0.32 | 0.46 | 23.1 | 5.90 | 1.98 |
| | | | 热液交代 | 4 | 0.38 | 0.48 | 29.4 | 9.50 | 1.98 |
| | | | 热液新生 | 2 | 0.64 | | 25.7 | 12.00 | 1.93 |

注:除三岔口铜矿外的其它矿区资料引自傅金宝(1981),部分元素比值重新计算

3.2 地质意义

3.2.1 黑云母成分与斑岩铜矿含矿性

从上述黑云母的化学组成以及主要元素的相关比值,并参照有关矿床中同一矿物的研究资料(表3),笔者与前人均认为以下规律在判别斑岩铜矿含矿性方面将有所助益。

A. 与矿化有关的黑云母多富镁而低铁, Mg/Fe 一般多 >0.5 , 相反, 同类非矿化岩石中的黑云母则 <0.5 (傅金宝, 1981)。

B. 矿化黑云母含钛高, TiO_2 含量多 $>3\%$; 相反, 非矿化者 $<3\%$ 。

C. 矿化黑云母铝含量多数 $<15\%$, 非矿化 $>15\%$ 。

D. 矿化黑云母以高钾低钠和钙为特点, CaO 含量多 $<0.5\%$, K/Na 比值多 >10 。

E. 矿化黑云母中钼、铜及氟、氯等挥发组分含量均高于非矿化者。因条件所限, 目前尚未对本文黑云母中上述元素进行分析。

根据上述 Mg/Fe 比值, Ti 、 Al 、 K 、 Na 、 Ca 等元素含量的判断, 三岔口黑云母虽能表明该地区具备一定的成矿条件, 但又因部分黑云母中 Mg/Fe 比值小于 0.5 以及 Ti 低 Al 高等事实, 显示出其成矿条件也有不利的另一面。此足以印证前面论述的, 本地区尚缺乏形成大型斑岩铜矿的潜力。

3.2.2 三岔口黑云母的组成在区分原岩成因类型中的应用

自上世纪七八十年代, 两类花岗岩及其划分准则的提出, 一时竟招致普遍关注, 在 Chappell and White (1974) I 型和 S 型划分方案以及 Ishihara (1977) 磁铁矿型与钛铁矿型花岗岩划分方案的基础上, 徐克勤等 (1982) 又提出同熔型与改造型花岗岩的分类概念。而区分此两类岩石的原则主要根据岩石中黑云母的氧化系数 ($Fe^{3+}/(Fe^{2+} + Fe^{3+})$) 和 $Mg/(Mg + Fe^{2+} + Fe^{3+})$ 的比值, 具体如:

A. 同熔型(I型)花岗岩中黑云母具有较高的氧化系数 $Fe^{3+}/(Fe^{2+} + Fe^{3+})$ 及同样较高的 $Mg/(Mg + Fe^{2+} + Fe^{3+})$ 比值, 两者数值范围前者 0.252 ~ 0.121, 而后者为 0.384 ~ 0.626。

B. 改造型(S型)花岗岩中黑云母的 $Fe^{3+}/(Fe^{2+} + Fe^{3+})$ 比值为 0.00 ~ 0.097, 其 $Mg/(Mg + Fe^{2+} + Fe^{3+})$ 为 0.282 ~ 0.367。

按上述分类原则将本文 11 件黑云母中有关元素的比值投在黑云母的 $Fe^{3+}/(Fe^{2+} + Fe^{3+})$ 与 $Mg/(Mg + Fe^{2+} + Fe^{3+})$ 关系图解(图4)中, 结果显示, 所有投点均落在该图 A-B 线的右上方。据原图作者规定, 位于 A-B 线上方的投点均属于同熔型花岗岩中的黑云母, 线的下方则属于改造型。故此, 三岔口赋矿岩的斑岩类型应属于 I 型花岗岩类, 符合本文最初对该地区原岩属性的认识。

此处尚需补充说明的是, 黑云母中的 Fe^{3+} 与 Fe^{2+} 如何测得? 就目前而言, 除了用传统的湿法化学分析之外, 还没有一种完善的方法, 对此电子探针亦未顺利解决。此次, 借

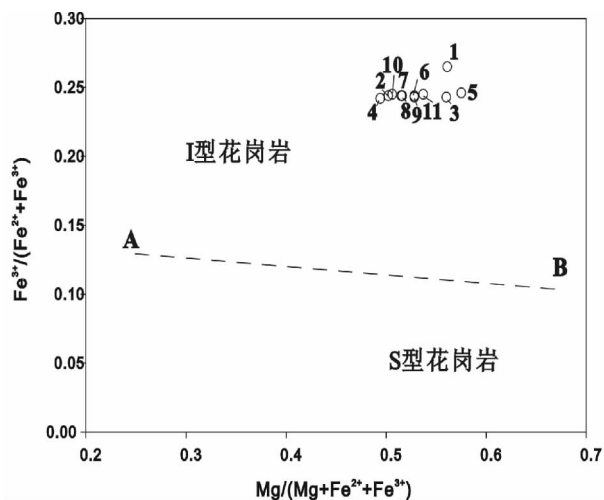


图4 东天山三岔口地区花岗闪长斑岩中黑云母的 $Fe^{3+}/(Fe^{2+} + Fe^{3+})$ 与 $Mg/(Mg + Fe^{2+} + Fe^{3+})$ 关系图 (底图据徐克勤等, 1982)

Fig. 4 Plot of $Fe^{3+}/(Fe^{2+} + Fe^{3+})$ vs. $Mg/(Mg + Fe^{2+} + Fe^{3+})$ for biotite from granodiorite porphyry in Sanchakou Cu deposit, eastern Tianshan (Original plot from Xu *et al.*, 1982)

助矿物谱学中的穆斯堡尔谱方法, 运用有关专著 (李哲和应育浦, 1996) 中黑云母谱带中 Fe^{3+} 与 Fe^{2+} 的峰值面积和其含量之间的关系, 对三岔口黑云母中全铁含量中的 Fe^{3+} 与 Fe^{2+} 做了合理的指派与计算。

4 其它硅酸盐类矿物

4.1 角闪石

角闪石与黑云母系三岔口赋矿埃达克岩中主要的暗色造岩矿物, 前者含量更大于后者, 考虑其可能在成岩或成矿过程中会起到的某些重要作用, 故对其组成做了较多的测定。

表4显示三岔口角闪石以富 Si、富 Ca 及 Ti 而成其主要化学特征。为对其准确定名, 兹将表中分项诸如 Al^{IV}/Si 、 Fe/Mg 及 $Mg/(Mg + Fe)$ 等项数据按 Leake (1978) 分类法准则进行判别。因 $(Ca + Na)_B > 1.34$, Ca_B 亦 > 1.34 , $Na_B < 0.67$, $(Na + Ca)_A > 0.5$; $Ti < 0.5$, $Fe^{3+} > Al^{IV}$, 故此, 应隶属于钙质闪石亚族中的镁绿钙闪石质角闪石。由于受后期热液成矿作用之影响有向浅闪石质角闪石过渡之势。据本角闪石含 Mn 且富 Ti, 可推测出富锰钛铁矿的生成应与之有关。进而言之, 在岩浆期后热液成矿阶段, 由于 Cu、Mo、Co 进入含矿体系, 相应之下, 会有一部分亲氧元素 Ti 和 Mn 从硅酸盐中被带出, 此一元素间的相互交换, 能导致富锰钛铁矿的生成。

表 4 三岔口铜矿赋矿岩中角闪石电子探针分析结果 (wt%)

Table 4 Compositions of hornblende from ore-hosted intrusions in Sanchakou Cu deposit by EPMA (wt%)

| 样品号 | | SCE 196-5-5 | SCE 196-2 | SCE 196-3-1 | SCE 196-3-8 | SCE 186-9-1 | SCE 196-9-2 | SCE 187-2-4 | SCE 187-2-2 |
|--------------------------------|------------------|----------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| SiO ₂ | | 44. 9 | 42. 9 | 43. 9 | 43. 9 | 47. 0 | 47. 6 | 47. 4 | 46. 2 |
| TiO ₂ | | 1. 64 | 1. 60 | 2. 12 | 1. 16 | 1. 11 | 0. 85 | 1. 03 | 1. 55 |
| Al ₂ O ₃ | | 11. 2 | 12. 8 | 12. 2 | 12. 9 | 9. 20 | 7. 68 | 7. 46 | 8. 52 |
| Cr ₂ O ₃ | | | 0. 26 | 0. 40 | 0. 22 | 0. 07 | 0. 08 | 0. 01 | 0. 02 |
| MgO | | 14. 6 | 15. 9 | 16. 1 | 15. 2 | 14. 5 | 15. 1 | 13. 3 | 13. 5 |
| CaO | | 11. 3 | 11. 7 | 11. 5 | 10. 9 | 11. 8 | 12. 1 | 11. 7 | 11. 0 |
| MnO | | 0. 19 | 0. 08 | 0. 02 | 0. 18 | 0. 20 | 0. 20 | 0. 62 | 0. 67 |
| FeO | | 11. 2 | 8. 59 | 8. 78 | 10. 23 | 11. 99 | 11. 72 | 14. 17 | 14. 53 |
| NiO | | 0. 10 | 0. 09 | 0. 12 | | 1. 14 | 0. 01 | 0. 01 | |
| ZnO | | 0. 01 | | 0. 04 | 0. 01 | 0. 08 | 0. 09 | | |
| Na ₂ O | | 1. 87 | 2. 40 | 2. 23 | 2. 32 | 1. 09 | 0. 97 | 1. 17 | 1. 28 |
| K ₂ O | | 0. 25 | 0. 36 | 0. 33 | 0. 17 | 0. 24 | 0. 24 | 0. 33 | 0. 38 |
| H ₂ O | | 2. 05 | 2. 05 | 2. 08 | 2. 06 | 2. 06 | 2. 04 | 2. 03 | 2. 03 |
| Total | | 99. 3 | 98. 8 | 99. 8 | 99. 2 | 100. 5 | 98. 7 | 99. 3 | 99. 7 |
| T | Si | 6. 49 | 6. 21 | 6. 29 | 6. 33 | 6. 77 | 6. 90 | 6. 92 | 6. 58 |
| | Al ^{IV} | 1. 51 | 1. 79 | 1. 71 | 1. 67 | 1. 23 | 1. 10 | 1. 07 | 1. 42 |
| | Al ^{VI} | 0. 39 | 0. 40 | 0. 35 | 0. 51 | 0. 33 | 0. 21 | 0. 21 | 0. 01 |
| C | Ti | 0. 18 | 0. 17 | 0. 23 | 0. 13 | 0. 12 | 0. 09 | 0. 11 | 0. 17 |
| | Mn | 0. 02 | 0. 01 | 0. 00 | 0. 02 | 0. 02 | 0. 02 | 0. 08 | 0. 08 |
| | Fe ³⁺ | 0. 50 | 0. 39 | 0. 39 | 0. 45 | 0. 53 | 0. 52 | 0. 63 | 0. 63 |
| | Fe ²⁺ | 0. 86 | 0. 67 | 0. 67 | 0. 78 | 0. 92 | 0. 90 | 1. 10 | 1. 10 |
| | Mg _c | 3. 04 | 3. 31 | 3. 31 | 3. 08 | 3. 05 | 3. 23 | 2. 87 | 3. 87 |
| B | Mg _B | 0. 11 | 0. 13 | 0. 14 | 0. 18 | 0. 06 | 0. 04 | 0. 04 | |
| | Ca | 1. 74 | 1. 82 | 1. 77 | 1. 68 | 1. 82 | 1. 88 | 1. 84 | 1. 54 |
| | Na | 0. 15 | 0. 06 | 0. 10 | 0. 13 | 0. 12 | 0. 08 | 0. 13 | 0. 32 |
| A | Na | 0. 37 | 0. 61 | 0. 53 | 0. 52 | 0. 18 | 0. 19 | 0. 20 | 0. 04 |
| | K | 0. 05 | 0. 07 | 0. 06 | 0. 04 | 0. 04 | 0. 05 | 0. 06 | 0. 37 |
| T 位 Al ^{IV} /Si | | 0. 23 | 0. 29 | 0. 27 | 0. 26 | 0. 18 | 0. 16 | 0. 16 | 0. 22 |
| C 位 Fe/Mg | | 0. 43 | 0. 31 | 0. 31 | 0. 38 | 0. 47 | 0. 43 | 0. 60 | 0. 58 |
| Ca/(Ca + Na + K) | | 0. 75 | 0. 71 | 0. 72 | 0. 71 | 0. 84 | 0. 86 | 0. 82 | 0. 68 |
| Mg/(Mg + Fe) | | 0. 70 | 0. 76 | 0. 77 | 0. 73 | 0. 68 | 0. 70 | 0. 63 | 0. 63 |
| (Ca + Na) _B | | 1. 90 | 1. 87 | 1. 86 | 1. 82 | 1. 94 | 1. 96 | 1. 96 | 1. 86 |
| (Na + K) _A | | 0. 42 | 0. 68 | 0. 59 | 0. 56 | 0. 23 | 0. 24 | 0. 26 | 0. 41 |

矿物种属: 镁绿钙闪石质角闪石 – 浅闪石质角闪石

4.2 斜长石

其组分变化平稳,牌号由 $an_{41.4}$ 可增至 $an_{53.4}$ 。 An 属于斜长石系列的中长石,该长石与镁绿钙闪石及黑云母共同组成了中性侵入岩类,从磁铁矿的 Al_2O_3 - TiO_2 - MgO 图上(图5)投点接近闪长岩区之事实亦可视为相互的印证。

4.3 蚀变矿物——石榴石、绿帘石

以往有关三岔口文献中尚未有过石榴石的提及,而实际上其确实存在。唯其粒度细微、不易选出,依据电子探针分析数据(表5)可定名为锰铝石榴石(内部尚含有一定量的钙铝石榴石组分)。与之共生者经探针分析及与近期文献对比,属于典型的绿帘石(王璞等,1987)。由此两矿物共生组合之现象再结合后面将述及的磁铁矿 Al_2O_3 - TiO_2 - MgO 图中的几个投点位置,似可认为三岔口矿床亦具有某些夕卡岩型之特点。

5 副矿物标型特征

5.1 磁铁矿

矿区斑岩中磁铁矿含量颇丰,大多以微-细粒浸染状态分布于金属硫化物和硅酸盐矿物颗粒之间。用 X-荧光光谱及 ICP 法对矿区 5 件磁铁矿的(样品由人工重砂选得)微量元素作了分析,其结果见表 6。鉴于用 Al_2O_3 - TiO_2 - MgO 图解判别含磁铁矿的矿床成因类型已多为前人所采用(张德全和雷蕴芬,1992),故将以上分析数据投入该图(图5),5 件样品中的 3 件落在图中 XI 区,尤其其中 1 件更靠近 V_2 区(闪长岩区);而 5 个中的另 2 件均投在 VII 区的虚线处,此位置恰属热液及夕卡岩区(虚线以上为深成热液,以下则为热液及钙夕卡岩)。

以上结果显示三岔口铜(钼)矿床的原始物质组成与角闪石岩-闪长岩类的岩浆密切相关,而矿床既属于热液脉状类型又兼有局部(部分)夕卡岩化之特征。

为探讨含 Co、Ni 磁铁矿的地质与成岩意义,切尔内舍娃对乌拉尔等地不同含矿建造磁铁矿中 Co、Ni 含量作过统计(张德全和雷蕴芬,1992)。结果为,夕卡岩建造中的磁铁矿 $Co > Ni$,而与基性-超基性岩有关者则 $Ni > Co$ 。

据三岔口铜矿区磁铁矿中 Co、Ni 相对含量特点,似可看出本处斑岩原始物质组成兼具二者的特点,反映其成矿物质为深源及磁铁矿系热液作用产物的特点。任启江等(1987)指出,Ⅰ型花岗岩和中性次火山岩磁铁矿中 V_2O_5 的含量还可作为判别斑岩铜矿含矿性的重要指标。本处斑岩磁铁矿 V_2O_5 含量约为 0.2% ~ 0.3%。基本符合其含矿标准,但本文样品数量较少,尚不足以依此来圈定矿体。

5.2 钛铁矿

钛铁矿含量虽不及上述磁铁矿,但亦多见于岩石或矿体

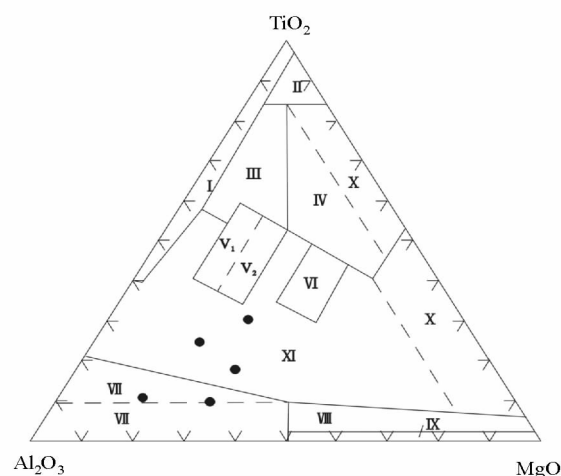


图5 磁铁矿的 Al_2O_3 - TiO_2 - MgO 图解

I-花岗岩区; II-玄武岩区; III-辉长岩区; IV-橄榄岩区; V1-角闪石岩区; V2-闪长岩区; VI-金伯利岩区; VII-热液及夕卡岩(虚线以上为深成热液,以下为热液及钙夕卡岩); VIII-热液及镁夕卡岩; IX-沉积变质及热液叠加; X-碳酸盐岩(靠上部与超基性岩有关,下部与围岩交代有关); XI-过渡区

Fig. 5 Al_2O_3 - TiO_2 - MgO diagram of magnetite

I-Granite range; II-Basalt range; III-Gabbro range; IV-Peridotite range; V1-Hornblende range; V2-Diorite range; VI-Kimberlite range; VII-Hydrothermal and skarn range (upper part hydrothermal, lower part hydrothermal and calcic skarn); VIII-Hydrothermal and magnesium skarn range; IX-Sedimentary-metamorphosed and hydrothermal overlapping range; X-Carbonatite (the upper related to ultrabasic rocks, the lower related to matasomatism and alteration); XI-Transition range

中,主要以单独的微粒状态存在,且呈星散状分布,偶而与黄铜矿相伴成连生体。经分析,其锰含量普遍甚高(MnO 多数 $>6\%$),电子探针分析值可参看表 7。

有关某些斑岩的钛铁矿中锰何以能异常地富集,前人曾有研究。如 Czamanske and Mihalik (1972) 对挪威奥斯陆 Graben 地区 Finnmarka 花岗闪长岩-二长花岗岩侵入杂岩体中的钛铁矿、金红石、榍石及磁铁矿研究过程中指出,富锰钛铁矿是在其岩体降温以及高氧逸度、低水逸度条件下所形成;另外还同岩体的岩石化学(如 Mn 的丰度、分异指数)以及 Ti-Fe-Mn 系列矿物的晶体结构构型密切相关。结合近期工作,笔者对此问题提出以下见解:

1) 本文钛铁矿中 Mn 的富集受赋矿埃达克岩中 Mn 的浓度所制约。Neumann (1974) 业已发现钛铁矿的 Mn/Fe^{2+} 与其母岩 Mn/Fe^{2+} 之比似呈正消长关系,其比例常数以 K_D 表示,在其文章中 $K_D = 2.21$,而三岔口同一钛铁矿的比例常数 K_D 为其 3 倍($K_D = 6.61$)。

2) 三岔口矿床成矿作用系处于一种较高氧逸度及降温条件下所进行,本区内埃达克岩的较高氧逸度比较符合此等条件;

表 5 三岔口铜矿区赋矿岩中石榴石、绿帘石及斜长石的电子探针分析 (wt%)

| Table 5 Compositions of garnet, epidote and plagioclase from ore-hosted intrusions in Sanchakou Cu deposit by EPMA (wt%) | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------|------------------|------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|-------------------|------------------|------|-------|
| 矿物名称 | 样品号 | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | CaO | MnO | FeO | NiO | Na ₂ O | K ₂ O | ZnO | Total |
| 石榴石 | SCES193-1-1 | 37.1 | 0.20 | 21.7 | 0.28 | 11.5 | 14.9 | 14.8 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.25 | 100.8 |
| | SCES193-1-2 | 37.2 | 0.19 | 21.9 | 0.32 | 11.7 | 15.0 | 15.1 | 0.01 | 0.05 | 0.04 | 0.19 | 101.7 |
| | SCE182-2-1 | 36.6 | 0.07 | 21.8 | 2.99 | 1.91 | 16.3 | 21.0 | 0.06 | 0.03 | 0.05 | 0.17 | 101.0 |
| | SCK182-12-2 | 36.5 | 0.09 | 21.4 | 2.32 | 3.46 | 20.6 | 16.6 | | | | | 101.0 |
| | SCK182-10-1 | 35.8 | 0.18 | 21.2 | 2.08 | 3.42 | 18.4 | 19.0 | | | | 0.07 | 100.2 |
| | SCK182-10-2 | 36.5 | 0.23 | 21.0 | 1.77 | 4.87 | 18.3 | 17.7 | | 0.01 | | 0.07 | 100.5 |
| 绿帘石 | | 36.8 | | 24.5 | | 23.4 | 0.11 | 10.8 | 0.02 | 0.03 | | | 95.7 |
| | SCK182-3-1 | 57.6 | 0.03 | 27.2 | 0.01 | 8.21 | 0.05 | 0.18 | | 6.80 | 0.04 | | 100.1 |
| | SCK182-3-4 | 55.9 | 0.03 | 27.4 | | 9.00 | 0.03 | 0.13 | | 6.49 | 0.11 | | 99.1 |
| | SCE196-9 | 59.0 | 0.01 | 25.4 | | 6.83 | | 0.07 | | 7.68 | 0.04 | | 99.0 |
| 斜长石 | SCK182-5-5 | 54.5 | 0.07 | 29.4 | 0.01 | 11.1 | | 0.01 | | 5.32 | 0.08 | | 100.5 |
| | SCK182-12-1 | 57.0 | 0.06 | 27.0 | 0.01 | 8.69 | | 0.12 | | 6.74 | 0.06 | | 99.7 |
| | SCK182-5-3 | 58.4 | | 26.1 | | 7.72 | | 0.02 | | 7.22 | 0.02 | | 99.5 |
| | SCK182-10-5 | 55.2 | | 27.9 | 0.01 | 9.70 | | 0.05 | | 5.96 | 0.09 | | 98.9 |

表 6 三岔口铜矿区磁铁矿中少量及微量元素分析结果 (Al₂O₃、MgO、TiO₂ 为 wt% ,其它元素为 ×10⁻⁶)

Table 6 Analytical result of minor and trace elements of magnetite in Sanchakou Cu deposit (wt% for Al₂O₃、MgO、TiO₂ , ×10⁻⁶ for other elements)

| 样品号 | Al ₂ O ₃ | MgO | TiO ₂ | Mn | Co | Ni | Cr | Zn | Sn | Cu | V | Mo |
|-----------|--------------------------------|------|------------------|------|------|------|-----|-----|----|------|------|------|
| SCK179-7 | 0.63 | 0.32 | 0.10 | 538 | 110 | 77.5 | 635 | 120 | 88 | 245 | 1455 | 22.5 |
| SCK179-9 | 0.26 | 0.16 | 0.09 | 365 | 118 | 97.5 | 695 | 708 | 89 | 1438 | 1427 | 40.0 |
| SCK179-12 | 0.25 | 0.16 | 0.18 | 531 | 12.5 | 70.0 | 825 | 288 | 90 | 335 | 1655 | 15.0 |
| SCK179-15 | 0.88 | 0.20 | 0.13 | 678 | 170 | 92.5 | 785 | 340 | 89 | 1355 | 1162 | 47.5 |
| SCK182-2 | 0.53 | 0.21 | 0.24 | 1061 | 10.0 | 87.5 | 645 | 220 | 87 | 253 | 1290 | 37.5 |

表 7 三岔口铜矿赋矿岩中钛铁矿、榍石、金红石电子探针分析结果 (wt%)

Table 7 EPMA result of ilmenite, sphene and rutile from ore-hosted intrusions in Sanchakou Cu deposit (wt%)

| 矿物名称 | 钛铁矿 | | | 榍石 | | 金红石 | | | |
|--------------------------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|
| 样品号 | SCK 182-1-1 | SCK 182-1-2 | SCK 179-9 | SCE 196-5-1 | SCE 196-5-2 | SCE 196-10-1 | SCE 196-10-2 | SCE 196-10-6 | SCE189-2 (金红石-榍石过渡相) |
| SiO ₂ | 0.09 | 0.09 | | 29.8 | 29.8 | 0.02 | | | 10.8 |
| TiO ₂ | 47.8 | 47.8 | 48.9 | 37.2 | 37.4 | 98.6 | 98.6 | 97.2 | 74.2 |
| Al ₂ O ₃ | | | 0.01 | 1.76 | 1.74 | 0.02 | 0.01 | | 0.88 |
| Cr ₂ O ₃ | | | 0.08 | | | 0.02 | 0.08 | 0.05 | 0.052 |
| Fe ₂ O ₃ | | 7.31 | 5.38 | | | | | | |
| MgO | 0.13 | 0.13 | 0.04 | 0.02 | | | 0.02 | 0.03 | |
| CaO | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 28.9 | 29.0 | 0.10 | 0.16 | 0.05 | 10.9 |
| MnO | 7.48 | 7.48 | 6.42 | 0.04 | 0.07 | | | 0.12 | 0.04 |
| FeO | 41.7 | 35.1 | 37.4 | 1.00 | 1.01 | 0.57 | 0.52 | 0.33 | 0.31 |
| NiO | 0.02 | 0.02 | | 0.08 | | | 0.03 | 0.06 | |
| Na ₂ O | | | 0.041 | | | | | | |
| K ₂ O | | | | | 0.02 | 0.02 | 0.04 | | |
| ZnO | 0.28 | 0.28 | | | 0.90 | 0.17 | 0.08 | | 0.13 |
| Total | 97.5 | 98.2 | 98.3 | 98.8 | 99.9 | 99.5 | 99.5 | 97.8 | 97.3 |

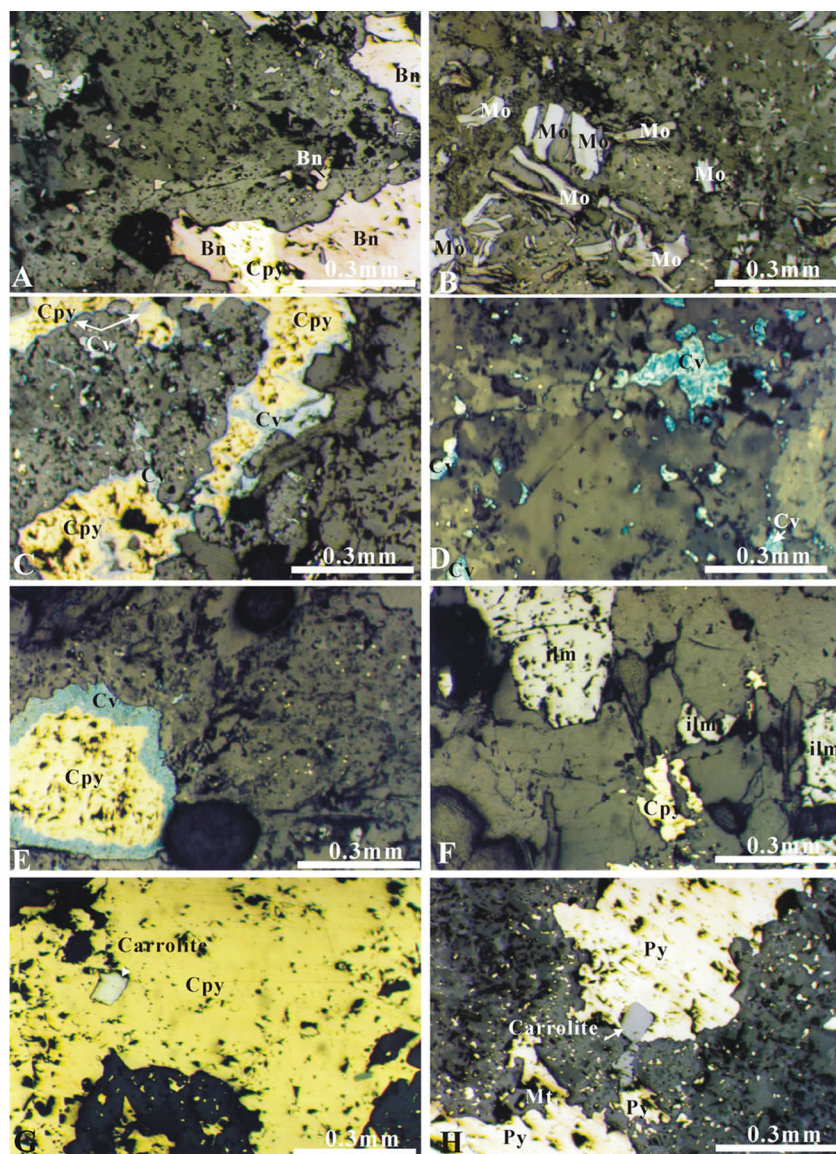


图6 三岔口铜矿床特征硫化物的反光显微镜照片

A-斑铜矿(Bn)穿切黄铜矿(Cpy);B-聚片状、板条状辉钼矿(Mo)在矿石中的分布;C-铜兰(Cv)沿黄铜矿(Cpy)的边部和微裂隙产;D-细粒浸染状次生铜兰(兰色,Cv)在矿石中的分布;E-黄铜矿(Cpy)周边之环带(兰色)为次生之铜兰(Cv);F-钛铁矿(ilm)与黄铜矿(Cpy)的共生;G-黄铜矿(Cpy)中硫铜钴矿(八面体自形晶,Carrolite)之微细包裹体;H-黄铁矿(Py)中硫铜钴矿(八面体自形晶,Carrolite)之微细包裹体

Fig.6 Microscopic images of typical sulfides in Sanchakou Cu deposit

A-Bornite cut Chalcopyrite; B-Tabular and lath-shaped Molybdenite in ore; C-Covellite occurred along the margin and in the microfissure of Chalcopyrite; D-Fine and disseminated secondary Covellite (blue colour) in ore; E-Secondary Covellite distributed in the outer ring of Chalcopyrite; F-Ilmenite coexists with Chalcopyrite; G-Fine inclusion of Carrolite (octahedron crystal) in Chalcopyrite; H-Fine inclusion of Carrolite (octahedron crystal) in pyrite

3)有利的晶体结构构型与合适的离子半径亦为 Mn^{2+} 优先进入钛铁结构中的重要内在因素;

4)三岔口埃达克岩中富锰的黑云母与角闪石无疑扮演了为矿区钛铁矿提供 Mn 的主要角色。

5.3 榴石及其蚀变矿物金红石

除钛铁矿外,三岔口矿床含矿岩及蚀变岩中榴石、金红

石亦为最常见的含钛副矿物,这三者的密切共生是否有着直接的依存关系,前人看法不一。Czamanske and Mihalik (1972)曾提出富锰钛铁矿必定与榴石相伴的观点,而任启江等(1987)则持怀疑。李金祥等(2008)在研究西藏班公湖带多不杂富金斑岩铜矿床时指出,蚀变岩金红石与磁铁矿密切共生且与铜金矿化关系有直接关系。据笔者镜下观察以及探针分析结果(表7),认为前一观点比较符合三岔口实际情

况,又如在所观察的岩石切片中经常遇到榍石和金红石可发生逐渐过渡之现象。Czamanske and Mihalik(1972)曾设想出以下两个反应过程

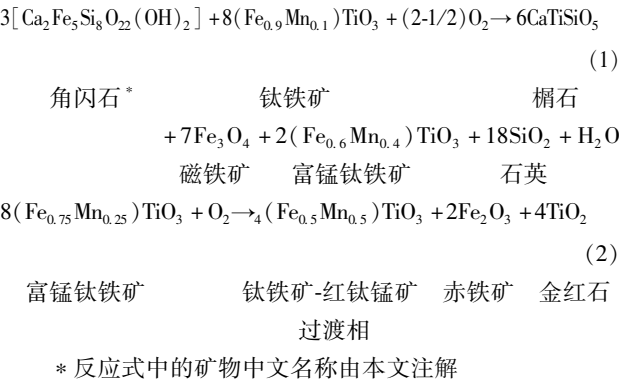


表 8 东天山三岔口铜矿床中铜的硫化物及有关对比矿物电子探针分析结果 (wt%)

Table 8 Compositions of copper-bearing sulfides in Sanchakou Cu deposit and some porphyry-skarn type Cu deposits in Gangdese, Tibet by EPMA (wt%)

| 矿物名称 | 元素产地及样品号 | Fe | Ag | Co | Ni | S | Cu | Zn | Au | Total |
|-------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 黄铜矿 | SCK182-7-2 | 29.6 | 0.07 | | 0.05 | 34.9 | 34.1 | 0.08 | | 98.8 |
| | SCK179-12-4 | 29.9 | 0.15 | 0.16 | | 34.0 | 33.8 | | | 98.0 |
| | SCK179-10-1 | 30.1 | | | | 34.4 | 34.0 | | | 98.5 |
| | 西藏冲木达 8-03-2 | 30.4 | 0.14 | | | 34.1 | 34.9 | | | 99.6 |
| | 西藏克鲁 7-02-1 | 30.6 | 0.03 | | | 34.0 | 34.9 | | | 99.6 |
| | 西藏双布吉热 26-2 | 30.5 | 0.09 | | 0.01 | 34.1 | 35.0 | 0.04 | | 99.8 |
| | 西藏双布吉热 7 | 30.6 | 0.07 | | 0.02 | 34.6 | 35.3 | | 0.02 | 100.7 |
| 斑铜矿 | SCK179-14-1 | 11.0 | | | 0.01 | 25.9 | 62.0 | 0.14 | | 99.0 |
| | SCK179-14-2 | 11.7 | 0.14 | | | 26.3 | 61.6 | | | 99.8 |
| | SCK179-14-4 | 10.7 | 0.09 | | | 26.3 | 63.1 | | | 100.2 |
| | 西藏双布吉热 10-03-1 | 11.3 | 2.19 | | 0.00 | 25.2 | 61.3 | | 0.13 | 100.1 |
| | 西藏冲木达 13-01-3 | 10.3 | 0.39 | | | 25.6 | 64.7 | | 0.13 | 101.1 |
| | 西藏双布吉热 26-1 | 11.9 | 0.34 | 0.02 | 0.02 | 26.4 | 62.4 | | 0.04 | 101.0 |
| | 西藏双布吉热 7-2 | 10.9 | 0.02 | | 0.02 | 25.9 | 63.5 | | 0.06 | 100.5 |
| 铜蓝 | SCE189-1 | 0.17 | 0.14 | | | 32.7 | 66.0 | | | 99.0 |
| | SCE189-3 | 0.46 | 0.09 | | | 30.9 | 68.7 | 0.04 | | 100.3 |
| | SCE189-4 | 0.00 | 0.05 | 0.01 | 0.01 | 31.0 | 67.8 | 0.05 | | 98.9 |
| | SCE179-14-6 | 1.17 | 0.14 | | | 28.4 | 70.0 | | | 99.7 |
| | 西藏双布吉热 26-4 | 2.71 | 1.84 | 0.01 | 0.02 | 26.3 | 68.2 | | 0.09 | 99.2 |
| | 西藏双布吉热 26-5 | 1.93 | 2.06 | | 0.00 | 26.5 | 71.2 | 0.04 | 0.07 | 101.9 |
| | 西藏双布吉热 14-2 | 2.99 | 0.51 | | | 31.0 | 67.6 | | 0.04 | 102.1 |
| 硫铜钴矿 | 西藏双布吉热 14-3 | 1.21 | 0.25 | | 0.00 | 31.2 | 69.4 | | | 102.1 |
| | SCK179-12-1 | 0.45 | 0.05 | 40.3 | 0.50 | 41.1 | 17.1 | | | 99.6 |
| | SCK179-12-2 | 0.38 | 0.08 | 40.2 | 0.49 | 41.1 | 16.8 | | | 99.1 |
| | SCK179-12-3 | 0.49 | 0.03 | 40.2 | 0.62 | 41.4 | 16.8 | | | 99.6 |
| 含铅黄铁矿 | SCK182-7-1 | 45.7 | 0.03 | 0.83 | 0.02 | 48.5 | 0.01 | 0.05 | | 95.1 |
| | SCK179-12-5 | 45.2 | 0.00 | 2.07 | | 52.8 | | | | 100.0 |

表 9 三岔口铜矿床硫化物微量元素分析结果(×10⁻⁶)

Table 9 Chemical analytical results of trace elements of sulfides from Sanchakou Cu deposit(×10⁻⁶)

| 矿物名称 | 黄铜矿 | 黄铜矿 | 黄铜矿 | 黄铁矿 | 黄铁矿 | 黄铁矿 |
|-------|-----------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| 样品号 | SCK-179-9 | SCK-179-13 | SCK-179-14 | SCK-179-11 | SCK179-12 | SCK179-10 |
| Co | 50. 6 | 31. 8 | 40. 5 | 238 | 265 | 303 |
| Cu | | | 0 | 2200 | 2500 | 2700 |
| Mo | 64. 6 | 1300 | 100 | 5. 38 | 9. 55 | 8. 65 |
| Ni | 8. 9 | <1 | 10 | 108 | 85 | 114 |
| Pb | 3. 3 | 9. 4 | 8. 6 | 1 | 0. 95 | 1. 25 |
| Zn | 388 | 498 | 386 | 82. 1 | 84. 6 | 77. 7 |
| As | 0. 94 | 2. 45 | 1. 55 | 2. 17 | 1. 21 | 2. 56 |
| Ag | 50. 6 | 26. 9 | 35. 5 | 3. 56 | 5. 08 | 2. 55 |
| Sb | | 0 | 0 | 1. 55 | 1. 21 | 1. 89 |
| Bi | 5. 31 | 2. 91 | 4. 62 | 3. 09 | 2. 89 | 3. 45 |
| Re | <0. 01 | 0. 17 | 0. 19 | <0. 01 | 0. 02 | 0. 05 |
| Se | 0. 07 | 0. 08 | 0. 06 | 27. 0 | 26. 8 | 19. 8 |
| Te | 0. 08 | 0. 03 | 0. 07 | 0. 30 | 0. 25 | 0. 31 |
| Au | 0. 11 | 0. 25 | 0. 28 | 0. 19 | 0. 15 | 0. 21 |
| Au/Ag | | 0. 01 | 0. 01 | 0. 05 | 0. 03 | 0. 08 |

表 10 三岔口铜矿床黄铁矿的电子探针分析结果(wt%)

Table 10 Compositions of pyrite from Sanchakou Cu deposit by EPMA (wt%)

| 矿物名称 | 样品号 | Fe | Ag | Co | Ni | S | Cu | Zn | Total |
|------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 黄铁矿 | SCK182-7-1 | 45. 7 | 0. 03 | 0. 83 | 0. 02 | 48. 5 | 0. 01 | 0. 05 | 95. 1 |
| 黄铁矿 | SCK179-12-5 | 45. 2 | 0. 00 | 2. 07 | | 52. 8 | | | 100. 0 |

6. 1 黄铜矿

为矿床中最主要之矿物,常以细粒或细脉浸染状及块状构造出现,矿物表征和一般黄铜矿无异,在此不予赘述。经 ICP 微量元素法测定,矿物较富含 Co、Mo、Zn、Ag 及 Bi,Co 与其后诸元素相关性亦颇佳(相关系数暂略),微量元素分析结果见表 9。

6. 2 斑铜矿

斑铜矿(Bornite)化学式:Cu₅FeS₄,为本地区除黄铜矿外另一重要铜矿物,两者多密切共生。在镜下呈浅粉红并带橙色反射色特征(王濮等,1987),与 Li *et al.* (2006)所研究之西藏冈底斯东段双布吉热夕卡岩型 Cu-Au-Mo 矿床中的斑铜矿极其相似。所不同者在三岔口矿床并未见到斑铜矿在黄铜矿中的固溶体分离现象,此主要表现为在西藏山南地区双布吉热铜金钼矿床中斑铜矿常以显微叶片(lamella)形式与黄铜矿构成一种定向连生体,由于两者反射色的差异,镜下呈现出美丽的格子状显微图象。根据三岔口斑铜矿的产出特征,可认为其应属于早期形成之次生铜的硫化物。

6. 3 铜兰

铜兰(Covellite)化学式:Cu₂¹⁺Cu₂²⁺S₂S,在矿石中含量较

少,形态以细粒浸染状为主,或沿黄铜矿晶粒间隙以及微裂隙而贯入。镜下以其鲜艳夺目的海兰色为特征,颇引以注意的是在本处黄铜矿颗粒的周边所出现的一种“镶边结构”,或可称之环带形反应边,经电子探针测定,是典型的铜兰,其组成与前人数据颇相一致(见表 8)。该环带以内仍为黄铜矿,此足以表明它和黄铜矿之间的亲缘关系;换言之,其无疑为黄铜矿在漫长的物理、化学风化过程中所形成的一种表生产物。

6. 4 黄铁矿

黄铁矿为与黄铜矿含量相当之组成矿物,呈细粒或细脉浸染状与黄铜矿共生存在。为查明其中有关微量元素含量及状态,对二者同时进行了 ICP 和 EPMA 的测定(表 9,表 10)。

以上结果表明其微量元素组成与黄铜矿颇为相似,但差别处为 Co 高 Mo 低,Co 最高含量可达 2%。

关于黄铁矿中含 Co 之现象早已为人所知,究其原因,Co 比 Ni 和 Cu 更具亲硫性,因而在较早生成之黄铁矿中 Co 大多以 Co²⁺置换 Fe²⁺的方式进入其晶格。含量大多只在几十 ×10⁻⁶之间,很少超过 1000 ×10⁻⁶。至于其含 Co >1% 者在我国并不多见,如云南易门三家厂狮山矿段黄铁矿含 Co 1.073%(黄崇轲等,2001),易门七步郎黄铁矿含 Co 2.177%;还有,陕西略阳铜厂含 Co 由 0.12% ~3.08% 等等

殊的角色,故此,其价格近年来与日俱增。

硫铜钴矿 (Carrolite) (CuCo_2S_4) 虽为如此重要的矿物,但在自然界却较不常见。据 Unrug (1988) 的研究总结,以世界级铜钴资源国著称的赞比亚,其硫铜钴矿的蕴藏量十分惊人,如在罗卡纳、奇布卢马矿区已探明钴的储量约为 1500 万吨,巴卢巴矿区竟达至 5900 万吨,而在上述矿床中,钴矿石仅由硫铜钴矿、硫钴矿及一些氧化矿物组成,以此推断,硫铜钴矿的单一储量能居多少? 此不可不谓自然界的一种奇迹。

除赞比亚外,还有其它少量产地的报道 (Brown, 1997; 芮宗瑶等, 2002b), 如

- 1) 美国 Maryland 州 Carroll 地区 Finksbury 的 Patapsco
- 2) 智利 Atacama 地区的 Carrizal Alto
- 3) 瑞典的 Gladhammar
- 4) 葡萄牙的 Meder Riddeposit

另外还有澳洲西部 Kalgoorlie 地区, 纳米比亚的 Tsumeb 及日本等。在我国除曾有其富铂变种的发现外, 还未有过硫铜钴矿的详细报道 (王璞等, 1987)。

硫铜钴矿属尖晶石结构型化合物, 至于正尖晶石和反尖晶石型尚不清楚。其晶类为等轴晶系, 具完整的八面体晶形, 现将非洲刚果所产出的美丽晶体 (标本据丁奎首) 及与之可对比的三岔口同一矿物的背散射电子扫描图像并列于下 (图 8)。

三岔口的硫铜钴矿亦具八面体自形形态, 唯粒度较细, 近乎 0.1mm, 在镜下以其高突起和强的银白反射色易于和磁铁矿等相区别。经电子探针测定, 其组成与本矿物的理论化学成分十分接近, 不同处在于文中矿物中的 Cu 被其它少量元素 Co、Ag、Fe 等置换, 含量偏低 (结果见表 11)。

据一般反光镜下及背散射电子扫描照相 (图 6、8) 特征, 该矿物应属于其寄主矿物钴黄铁矿内的一种出溶体, 系赋矿斑岩岩浆期后热液阶段产物。此阶段 Co 主要以 $[\text{Co}(\text{SH})]^{1+}$ 或 $[\text{Co}(\text{S}_2\text{O}_3)]^{2-}$ 络合物形式伴随 Fe、Cu、Mo、Zn、Ag、Au 在溶液中一起运移, 因环境及成矿物理、化学条件的骤变, 促使络合物分解并从溶液中析出, 故硫铜钴矿则得以形成, 其中富含其它微量元素也是这种原因造成的。

表 11 三岔口铜矿床中硫铜钴矿的化学组成 (wt%)
Table 11 Compositions of carrolite from Sanchakou Cu deposit by EPMA (wt%)

| 样品号 | Fe | Ag | Co | Ni | S | Cu | Total |
|-------------|------|------|------|------|------|------|-------|
| SCK179-12-1 | 0.45 | 0.05 | 40.3 | 0.50 | 41.1 | 17.1 | 99.6 |
| SCK179-12-2 | 0.38 | 0.08 | 40.2 | 0.49 | 41.1 | 16.8 | 99.1 |
| SCK179-12-3 | 0.49 | 0.03 | 40.2 | 0.62 | 41.4 | 16.8 | 99.6 |
| 理论化学组成 | | | 38.1 | | 41.4 | 20.5 | 100 |

7 结论

(1) 东天山三岔口铜 (钼) 矿床属斑岩型-中温热液脉状

矿床, 赋矿母岩花岗闪长斑岩为 C-型埃达克岩, 时代为早二叠世, 但不同于洋壳熔融成因的 O-型埃达克岩, 而属于玄武岩浆底侵触发的下地壳熔融成因。成矿潜力较好, 但不及东天山石炭纪俯冲增生背景下的土屋-延东大型斑岩型铜矿床。

(2) 含矿斑岩黑云母化学成分特征亦指示斑岩类型应属于 I 型花岗岩类, 与基于岩石地球化学特征对该地区原岩属性的认识相吻合。但部分黑云母 Mg/Fe 比值小于 0.5 以及低 Ti 高 Al, 不同于典型的斑岩铜矿床。本矿区角闪石隶属于钙质闪石亚族中的镁绿钙闪石质角闪石, 含 Mn 且富 Ti, 推测出富锰钛铁矿的生成应与之有关。三岔口铜 (钼) 矿床的原始物质组成与角闪石岩-闪长岩类的岩浆密切相关, 而矿床既属于热液脉状类型又兼有局部 (部分) 夕卡岩型矿化之特征。佐证本地区尚缺乏大型斑岩铜矿形成的潜力。

(3) 找矿前景分析: 在东、西矿段之间或延长线上有可能找到新的东西向含矿岩体; 已知矿床内扩大找矿潜力较大, 按矿带矿体产状规律, 可望找到新矿体。

(4) 除钛铁矿外, 三岔口矿床含矿岩及蚀变岩中榍石、金红石亦为最常见的含钛副矿物, 这三者的密切共生有着直接的依存关系, 常见到榍石和金红石发生逐渐过渡。黑云母及富锰钛铁矿、金红石的标型特性对在本地区进一步找矿具有重要意义。

(5) 矿石矿物主要为黄铜矿、斑铜矿、铜蓝、辉钼矿及磁铁矿, 有用成矿元素主要属 Cu, 其次为 Mo。查明辉钼矿多型属于 $2\text{H}_1 + 3\text{R}$ 混合型, 也印证本矿床属典型的斑岩型并叠加中温热液脉型。

(6) 发现在黄铁矿中 Co 含量异常偏高, 在重视这一线索之下, 发现了自然界较罕见的硫铜钴矿 (CuCo_2S_4) 矿物, 属于其寄主矿物钴黄铁矿内的一种出溶体, 表明 Co 在本地区的存在不容忽视, 宜制定全面的选矿与冶炼方案, 尽早将钴的综合利用提到议事日程。

致谢 新疆地矿局六大队杨甲全高工等同行和三岔口铜矿相关人员对我们野外工作给予了大力支持, 朱永峰教授和另一位匿名审稿专家等提出宝贵意见, 在此一并致以衷心的感谢。

References

Boyle RW. 1979. The geochemistry of gold and its deposits. Energy, Mines and Resources Canada, 202:197 – 207
Brown AC. 1997. World-class sediment-hosted stratiform copper deposits: Characteristics, genetic concepts and metallotects. Australian Journal of Earth Sciences, 144:317 – 328
Chappell BW and White AJR. 1974. Two contrasting granite types. Pacific Geology, 8:163 – 174
Czamanske GK and Mihalik P. 1972. Oxidation during magmatic differentiation, Finnmarka complex, Oslo area, Norway: Part1, The opaque oxides. Journal of Petrology, 13:493 – 509
Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc

- magmas by melting of young subduction lithosphere. *Nature*, 347: 662 – 665
- Defant MJ and Kepezhinskas P. 2001. Evidence suggests slab melting in arc magmas. *Transactions of the American Geophysical Union*, 82: 67 – 70
- Drummond MS, Defant MJ, and Kepezhinskas PK. 1996. Petrogenesis of slab-derived trondhjemite-tonalite-dacite/adakite magmas; Royal Society of Edinburgh Transactions. *Earth Sciences*, 87:205 – 215
- Fu JB. 1981. Chemical composition of biotite in porphyry copper deposits. *Geology and Prospecting*, 9(1):16 – 19 (in Chinese with English abstract)
- He BC and Wang JD. 2001. Geological features and metallogenesis of Tongchang copper deposit in Mianlue area of Shanxi. *Progress for Copper Exploration in China*, 183 – 190 (in Chinese)
- Huang CK, Bai Y, Zhu YS, Wang HZ and Shang XZ. 2001. *Copper Deposits of China*. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 371 (in Chinese)
- Ishihara S. 1977. The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. *Mining Geol.*, 27:293 – 305
- Lang ZJ, Shi B and Li TD. 1992. Discussion on the genesis of Sanchakou copper deposit in Hami, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 10(3): 244 – 252 (in Chinese)
- Leake BE. 1978. Nomenclature of amphiboles. *Mineral Magazine*, 12: 533 – 563
- Li GM, Qin KZ, Ding KS, Liu TB, Li JX, Wang SH, Jiang SY and Zhang XC. 2006. Geology, Ar-Ar age and mineral assemblage of Eocene skarn Cu-Au-Mo deposits in the southeastern Gangdese arc, southern Tibet: Implications for deep exploration. *Resource Geology*, 56(3):197 – 217
- Li HQ, Chen FW, Lu YF, Yang H, Guo J and Mei YP. 2004. Zircon SHRIMP U-Pb age and strontium isotopes of mineralized granitoids in the Sanchakou copper polymetallic depoist, East Tianshan Mountains. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(2):191 – 19 (in Chinese with English abstract)
- Li JX, Qin KZ, Li GM, Xiao B, Zhang TP and Lei XG. 2008. Characteristics of rutiles from Duobuza gold-rich porphyry copper deposit in Bangong Lake Belt of northern Tibet and their significance. *Mineral Deposits*, 27(2): 209 – 219 (in Chinese with English abstract)
- Li Z and Ying YP. 1996. *Mossbauer Spectrum of Minerals*. Beijing: Science Press, 1 – 295 (in Chinese)
- Liu YJ, Cao LM, Li ZL, Wang HN and Zhang JR. 1984. *Element Geochemistry*. Beijing: Science Press, 1 – 360 (in Chinese)
- Ma RS, Shu LS and Sun JQ. 1997. *Tectonic Evolution and Metallogenesis in Eastern Tianshan*. Beijing: Geological Publication House, 1 – 230 (in Chinese with English abstract)
- Neumann Else-Ragnhild. 1974. The distribution of Mn^{2+} and Fe^{2+} between ilmenites and magnetites in igneous rocks. *Amrican Journal of Science*, 274:1074 – 1088
- Qin KZ. 2000. Central-Asian orogenesis and metallogeny in northern Xinjiang. Post- Doctoral Research Report. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 1 – 195 (in Chinese with English abstract)
- Qin KZ, Sun S, Li JL, Fang TH, Wang SL and Liu W. 2002. Paleozoic epithermal Au and porphyry Cu deposits in North Xinjiang, China: Epochs, Features, Tectonic Linkage and Exploration Significance. *Resource Geology*, 52(4): 291 – 300
- Qin KZ, Zhang LC, Xiao WJ, Xu XW, Yan Z and Mao JW. 2003. Overview of major Au, Cu, Ni and Fe deposits and metallogenic evolution of the eastern Tianshan Mountains, Northwestern China. In: Mao, Goldfarb and Seltnann (eds.). *Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan* (London), 227 – 249
- Rapp RP and Watson EB. 1995. Drhydration melting of metabasalt at 8 – 32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36:891 – 931
- Ren QJ, Guilbert JM, Lei BS, Xu ZW and Qiu JS. 1987. Manganese content in ilmenite from intermediate-acid intrusions and its implication for petrogenesis. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 6(3):235 – 245 (in Chinese with English abstract)
- Rui ZY, Wang LS, Wang YT and Liu YL. 2002a. Discussion on metallogenic epoch of Tuwu and Yandong porphyry copper deposits in eastern Tianshan Mountains, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 21(1):16 – 22 (in Chinese with English abstract)
- Rui ZY, Dai ZX, Chen YQ, Zhao PD, Huang CK, Bai Y, Zhu YS, Shang XZ, Wang ZT and Luo TN. 2002b. Progress of sandstone and shale copper deposits in China and the rest of the World. *Geological Survey of China*, 1 – 120 (in Chinese)
- Sun Y, Tang JX and Mu JL. 2002. Geochemical characteristics and its genesis of Sanchakou copper deposit in Xinjiang. *Mineral Deposits*, (Suppl.):459 – 462 (in Chinese)
- Unrug R. 1988. Mineralization controls and source of metals in the Lufilian fold belt, Shaba (Zaire), Zambia and Angola. *Economic Geology*, 183(6):1185 – 1203
- Wang KR. 1989. *Genetic Mineralogy of the Earth and Universe*. Hefei: Publishing House of Education in Anhui, 199 – 200 (in Chinese)
- Wang P, Pan ZL and Weng LB. 1987. *Systematic Mineralogy*. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 336 (in Chinese)
- Wang Q, Zhao ZH, Xiong XL and Xu JF. 2001. Melting of the underplated basaltic lower crust: Evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorite-porphyrates, Anhui Province, China. *Geochimica*, 30(4):353 – 362 (in Chinese with English abstract)
- Xu KQ, Sun N, Wang DZ, Liu CS and Chen KR. 1982. Two genetic series of granitic rocks in southeastern China. *Rock and Mineral Analysis*, 1(2):1 – 12 (in Chinese with English abstract)
- Xu YX, Qin KZ, Ding KS, Miao Y, Zhang LC and Xu XW. 2006. Discovery and its characteristics of Cu-rich stellerite in Sanchakou copper deposit, eastern Xinjiang. *Acta Mineralogica Sinica*, 26(3): 291 – 295 (in Chinese with English abstract)
- Zhang DQ and Lei YF. 1992. Typochemical characteristics of major ore minerals from southern Da Hinggan Mountains in East Inner Mongolia. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 11(1):166 – 177 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LC, Qin KZ, Ying JF, Xia B and Shu JS. 2004. Adakite of the Tuwu-Yandong copper porphyry belt, east Tianshan, NW-China and its relationship with mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 259 – 268 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LC, Wan B, Li WQ and Tang HF. 2006. Geochemistry and tectonic setting of copper-bearing porphyries on the southern margin of Tuha basin, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1):225 – 235 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Zhao TP, Qian Q, Wang YL, Yang JH and Wang Y. 2001. The chatacteristics and tectonic- metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3): 273 – 280 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Qin KZ, Wang YL, Zhang FQ, Liu HT and Wang Y. 2004. Study on adakite broadened to challenge the Cu and Au exploration in China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1):195 – 204 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 傅金宝. 1981. 斑岩铜矿中黑云母的化学组成特征. *地质与勘探*, 9(1):16 – 19
- 何伯堉, 王京东. 2001. 陕西略阳铜厂铜矿床地质特征与成矿作用. *中国铜矿找矿新进展 (矿产地质系列丛书)*, 183 – 190
- 黄崇轲, 白治, 朱裕生, 王惠章, 尚修志. 2001. *中国铜矿床 (下册)*. 北京:地质出版社, 1 – 371
- 郎智君, 师波, 李天德. 1992. 新疆哈密三岔口铜矿成因探讨. *新疆地质*, 10(3): 244 – 252
- 李华芹, 陈富文, 路远发, 杨红梅, 郭敬, 梅玉萍. 2004. 东天山三岔口铜矿区矿化岩体 SHRIMP U-Pb 年代学及锶同位素地球化

- 学特征研究. 地球学报, 25(2): 191–195
- 李金祥, 秦克章, 李光明, 肖波, 张天平, 雷晓光. 2008. 西藏班公湖带多不杂富金斑岩铜矿床中金红石的特征及其意义. 矿床地质, 27(2): 209–219
- 李哲, 应育浦. 1996. 矿物姆斯堡尔谱学. 北京: 科学出版社, 1–295
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 1984. 元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1–360
- 马瑞士, 舒良树, 孙家齐. 1997. 东天山构造演化与成矿. 北京: 地质出版社, 1–230
- 秦克章. 2000. 新疆北部中亚型造山与成矿作用. 博士后研究报告. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 1–195
- 任启江, Guilbert JM, 雷秉舜, 徐兆文, 邱检生. 1987. 中-酸性侵入岩中钛铁矿的锰含量及其岩石成因意义. 岩石矿物学杂志, 6(3): 235–245
- 芮宗瑶, 王龙生, 王义天, 刘玉琳. 2002a. 东天山土屋和延东斑岩铜矿床时代讨论. 矿床地质, 21(1): 16–22
- 芮宗瑶, 戴自希, 陈永清, 赵鹏大, 黄崇柯, 白治, 朱裕生, 尚修志, 王志泰, 罗建宁. 2002b. 国内外砂页岩型铜矿床研究进展. 中国地质调查, 1–120
- 孙燕, 唐菊兴, 慕纪录. 2002. 新疆三岔口铜矿床地球化学特征及成因. 矿床地质, 21(增): 459–462
- 王奎仁. 1989. 地球与宇宙成因矿物学. 合肥: 安徽教育出版社, 199–200
- 王濮, 潘兆橹, 翁玲宝. 1987. 系统矿物学. 北京: 地质出版社, 1–336
- 王强, 赵振华, 熊小林, 许继锋. 2001. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自安徽沙溪 adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据. 地球化学, 30(4): 353–362
- 徐克勤, 孙鼎, 王德滋, 刘昌实, 陈克荣. 1982. 华南两类不同成因花岗岩岩石学特征. 岩石矿物及测试, 1(2): 1–12
- 许英霞, 秦克章, 丁奎首, 缪宇, 张连昌, 徐兴旺. 2006. 富铜红辉沸石在新疆哈密三岔口铜矿床的发现与矿物学特征. 矿物学报, 26(3): 291–295
- 张德全, 雷蕴芬. 1992. 大兴安岭南段主要金属矿物的成分标型特征. 岩石矿物学杂志, 11(2): 166–177
- 张连昌, 秦克章, 英基丰, 夏斌, 舒建生. 2004. 东天山土屋-延东斑岩铜矿带埃达克岩及其与成矿作用的关系. 岩石学报, 20(2): 259–268
- 张连昌, 万博, 李文铅, 唐红峰. 2006. 新疆吐哈盆地南缘铜矿带含矿斑岩的地球化学及形成环境. 岩石学报, 22(1): 225–235
- 张旗, 赵太平, 钱青, 王元龙, 杨进辉, 王焰. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义. 岩石矿物学杂志, 20(2): 273–280
- 张旗, 秦克章, 王元龙, 张福勤, 刘红涛, 王焰. 2004. 加强埃达克岩研究, 开创中国 Cu、Au 找矿工作的新局面, 岩石学报, 20(1): 195–204