

# 西藏班-怒结合带尕尔穷铜金矿床矽卡岩 矿物学特征及其地质意义

张 志<sup>1</sup>, 唐菊兴<sup>2</sup>, 陈毓川<sup>2</sup>, 李志军<sup>1</sup>, 宋俊龙<sup>1</sup>, 姚晓峰<sup>3</sup>, 杨 毅<sup>1</sup>, 胡正华<sup>4</sup>,  
陈 伟<sup>1</sup>, 王红星<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037;  
3. 中国地质大学, 北京 100083; 4. 江西省地质调查研究院, 江西 南昌 330000)

**摘 要:** 尕尔穷铜金矿床位于西藏班公湖-怒江成矿带西段, 是该带上近年来取得重大勘查突破的矽卡岩(斑岩)型铜金矿床。矿区产出的矽卡岩为典型的钙质矽卡岩, 其矽卡岩矿物主要由石榴子石、辉石、硅灰石、绿帘石、绿泥石、符山石、矽线石等组成。电子探针分析结果表明, 矿区石榴子石主要为钙铁榴石和钙铝榴石, 辉石主要为透辉石, 绿泥石可见铁绿泥石及铁镁绿泥石两种。石榴子石成分剖面显示其矿物组分随着石榴子石环带的变化而变化, 表明矿区矽卡岩不是在一个完全封闭的平衡条件下形成的, 指示矿床形成过程中热液流体具有多期多阶段性。尕尔穷矿区矽卡岩具有良好的分带性, 表现为从靠近岩体的深部到靠近围岩的浅部具有石榴子石-透辉石相→透辉石-硅灰石相→硅灰石-绿帘石-绿泥石相的分带特征, 并伴随一定的矿化组合。典型矽卡岩矿物端员组分的识别及其 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 的比值计算结果表明, 尕尔穷矿床形成于相对氧化环境。辉石组分中 $\text{Mn}/\text{Fe}$ 比值的特征表明尕尔穷矿区具有一定的寻找钼矿的潜力。

**关键词:** 尕尔穷; 矽卡岩; 矿物学特征; 西藏; 地质意义

**中图分类号:** P574.2; P618.3; P618.51

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6524(2013)03-0305-13

## Skarn mineral characteristics of the Gaerqiong Cu-Au deposit in Bangong Co-Nujiang River suture zone, Tibet

ZHANG Zhi<sup>1</sup>, TANG Ju-xing<sup>2</sup>, CHEN Yu-chuan<sup>2</sup>, LI Zhi-jun<sup>1</sup>, SONG Jun-long<sup>1</sup>, YAO Xiao-feng<sup>3</sup>,  
YANG Yi<sup>1</sup>, HU Zheng-hua<sup>4</sup>, CHEN Wei<sup>1</sup>, and WANG Hong-xing<sup>1</sup>

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China;  
3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. Jiangxi Institute of Geological Survey, Nanchang 330000, China)

**Abstract:** Located in western Bangong Co-Nujiang River metallogenic belt, the Gaerqiong Cu-Au deposit is a skarn (porphyry) deposit whose exploration has achieved significant breakthrough in recent years. The skarns in the Gaerqiong ore district are typical calcareous skarn, and the skarn minerals include mainly garnet, pyroxene, wollastonite, epidote, chlorite, idocrase, and sillimanite. Electron microprobe analyses suggest that garnet comprises mainly andradite and grossular, pyroxene is mainly composed of diopside, and chlorite includes ferrichlorite and ferromanganese chlorite. The compositional section of garnet shows that mineral components vary with

收稿日期: 2012-12-18; 修订日期: 2013-03-31

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项项目(201011013-3); 国家自然科学基金项目(41172077); 国家重点基础研究发展规划“973”项目(2011CB403103)

作者简介: 张 志(1985-), 男, 博士研究生, 现从事固体矿产勘查工作, E-mail: tancer@qq.com; 通讯作者: 唐菊兴(1964-), 男, 博士, 研究员, 主要从事矿床勘查工作, E-mail: tangjuxing@126.com.

the change of garnet ring, suggesting that the skarns in the mining area were not formed in a completely closed equilibrium environment and the hydrothermal fluids had the multi-stage feature in the formation process of the deposit. The skarns in the Gaerqiong deposit have developed good zonation, characterized by zoning of garnet-diopside phase→diopside-wollastonite phase→wollastonite-epidote-chlorite phase, accompanied by some mineralization combinations from the depth of the rock mass to the shallow part near the surrounding rocks. According to the result of  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  calculating ratios, the Gaerqiong deposit was formed in a relatively oxidizing environment, and the calculations of Mn/Fe ratios show that the Gaerqiong ore district has certain potential in search for molybdenum ore bodies.

**Key words:** Gaerqiong; skarn; mineralogical characteristics; Tibet; geological significance

尕尔穷铜金矿床是近年来藏北地区班怒缝合带上取得找矿新突破的大型铜金矿床。班公湖-怒江成矿带是目前西藏地区 5 个最重要的成矿带之一,也是其中研究程度最为薄弱的成矿带。因其伴随有班怒特提斯洋双向俯冲的成矿地质背景(王冠民等, 2002; Kapp *et al.*, 2003; 李光明等, 2007; 康志强等, 2010; 耿全如等, 2011; 杜德道等, 2011), 该成矿带成矿地质条件得天独厚, 缝合带南北两缘均有可能发生一系列从俯冲期到碰撞期的成矿作用, 成矿潜力非常大, 近年来已受到越来越多中外地质学者的关注。

尕尔穷矿区位于西藏班公湖-怒江缝合带西段(图 1), 是该构造带上第一个达到详查程度的铜金矿床, 其金资源量已达到大型以上规模。勘查项目组

对其矿床地质特征(唐菊兴等, 2009<sup>①</sup>; 李志军等, 2011a; 胡正华等, 2012)、成岩成矿时代(曲晓明等, 2006; 李志军等, 2011b; 姚晓峰等, 2012)、岩体地球化学特征(邓世林等, 2011; 张志等, 2011; 雷传扬等, 2012)、金矿物特征(姚晓峰等, 2011)、矿石矿物特征及元素空间分布规律(王友, 2010; 张志等, 2012)以及矽卡岩成因(宋俊龙等, 2012)等方面进行了较为深入的研究。截止目前为止, 矽卡岩型矿体仍然是尕尔穷矿区发现的主矿体, 但作为赋矿岩石的矽卡岩研究却较为薄弱。本文试图通过对矿区矽卡岩矿物学、矿物化学、矽卡岩矿物及矿化组合与分带特征的研究, 在丰富矽卡岩研究素材的同时, 为矿区矿床模式的建立奠定基础。

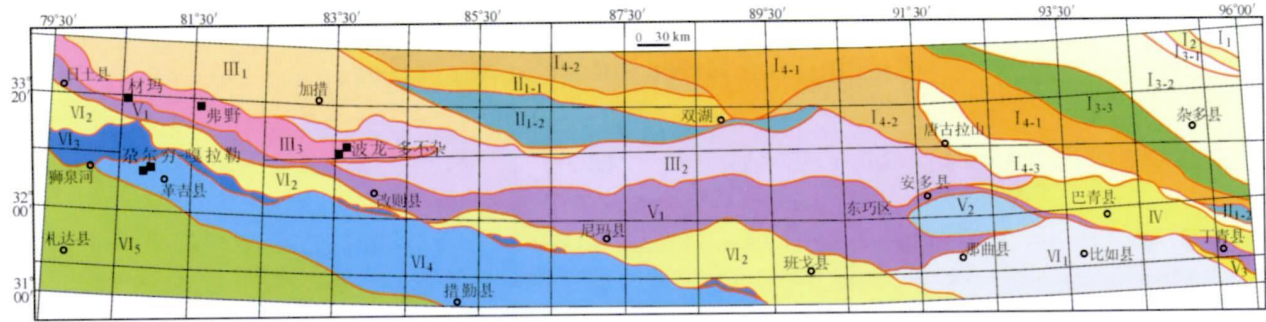


图 1 班公湖-怒江成矿带及邻区构造单元分布图(据耿全如等, 2011 修改)

Fig. 1 Tectonic units of Bangong Co-Nujiang metallogenic belt and its neighboring areas (after Geng Quanru *et al.*, 2011)

I—羌塘-三江造山系; I<sub>1</sub>—玉龙塔格-巴颜喀拉前陆盆地; I<sub>2</sub>—西金乌兰湖-金沙江-哀牢山结合带; I<sub>3</sub>—昌都-兰坪地块; I<sub>4</sub>—北羌塘甜水海陆块; II—龙木错-双湖-澜沧江缝合带; II<sub>1</sub>—龙木错-双湖-澜沧江蛇绿混杂带; III—南羌塘弧盆系; III<sub>1</sub>—多玛地块; III<sub>2</sub>—羌塘南盆地; III<sub>3</sub>—扎普-多不杂岩浆弧带; IV—左贡地块; V—班公湖-怒江缝合带; V<sub>1</sub>—聂荣地块; V<sub>2</sub>—嘉玉桥地块; VI—冈底斯岩浆弧; VI<sub>1</sub>—那曲-洛隆隆前盆地; VI<sub>2</sub>—昂龙岗日-班戈岩浆弧; VI<sub>3</sub>—狮泉河-申扎-嘉黎蛇绿混杂带; VI<sub>4</sub>—措勤-申扎岩浆弧; VI<sub>5</sub>—龙格-工布江达复合岩浆弧

I—Qiangtang-Sanjiang orogenic system; I<sub>1</sub>—Yulongtage-Bayan Har foreland basin; I<sub>2</sub>—Xijin Ulan Hu-Jinshajiang-Ailaoshan boundary belt; I<sub>3</sub>—Qam do-Lanping block; I<sub>4</sub>—Northern Qiangtang-Tianshuihai block; II—Lungmu Co-Shuanghu-Lancangjiang suture zone; II<sub>1</sub>—Lungmu Co-Shuanghu-Lancangjiang ophiolite mélangé belt; III—Southern Qiangtang arc basin system; III<sub>1</sub>—Doima block; III<sub>2</sub>—southern Qiangtang basin; III<sub>3</sub>—Zapug-Duobuza magma arc belt; IV—Zuogong block; V—Bangong Co-Nujiang suture zone; V<sub>1</sub>—Nyaimong block; V<sub>2</sub>—Jiayuqiao block; VI—Gangdise magma arc belt; VI<sub>1</sub>—Nagqu-Lhorong fore arc basin; VI<sub>2</sub>—Nganglong Kangri-Baigoin magma arc belt; VI<sub>3</sub>—Shiquanhe-Xairza-Lhan ophiolite mélangé belt; VI<sub>4</sub>—Coqen-Xainza magma arc belt; VI<sub>5</sub>—Longger-Gongbo'gyamda composite magma arc belt

<sup>①</sup>唐菊兴, 李志军, 刘文周, 等. 2009. 西藏自治区革吉县尕尔穷铜矿详查报告. 2019-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

1 矿区地质

尕尔穷矿区大地构造位置位于班公湖-怒江缝合带南缘的措勤-申扎岩浆弧内(图 1)。矿区出露地层很简单, 主要有白垩系多爱组( $K_1d$ )以及第四系(图 2)。多爱组主要是碳酸盐岩以及火山碎屑岩组成。碳酸盐岩主要是大理岩及灰岩, 具备矿床形成的有利围岩条件, 而火山碎屑岩主要由火山凝灰岩、火山角砾岩、火山集块岩等组成。尕尔穷矿区矽卡岩型矿体便产于石英闪长岩与碳酸盐岩的接触带矽

卡岩内。

矿区广泛发育燕山期中酸性侵入岩, 侵入时序从早到晚主要有闪长玢岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、花岗斑岩等。其中石英闪长岩、花岗闪长岩主要以岩株形式产出, 而闪长玢岩、花岗斑岩主要以岩脉、岩枝形式产出。姚晓峰等(2012)对石英闪长岩及花岗斑岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 测得石英闪长岩年龄为  $87.1 \pm 0.4 \text{ Ma}$ , 花岗斑岩年龄为  $83.2 \pm 0.7 \text{ Ma}$ , 表明岩体侵位于燕山晚期, 其中成矿母岩石英闪长岩的年龄代表着尕尔穷矿床成矿年龄的下限。邓世林等(2011)对矿区岩体地球化学

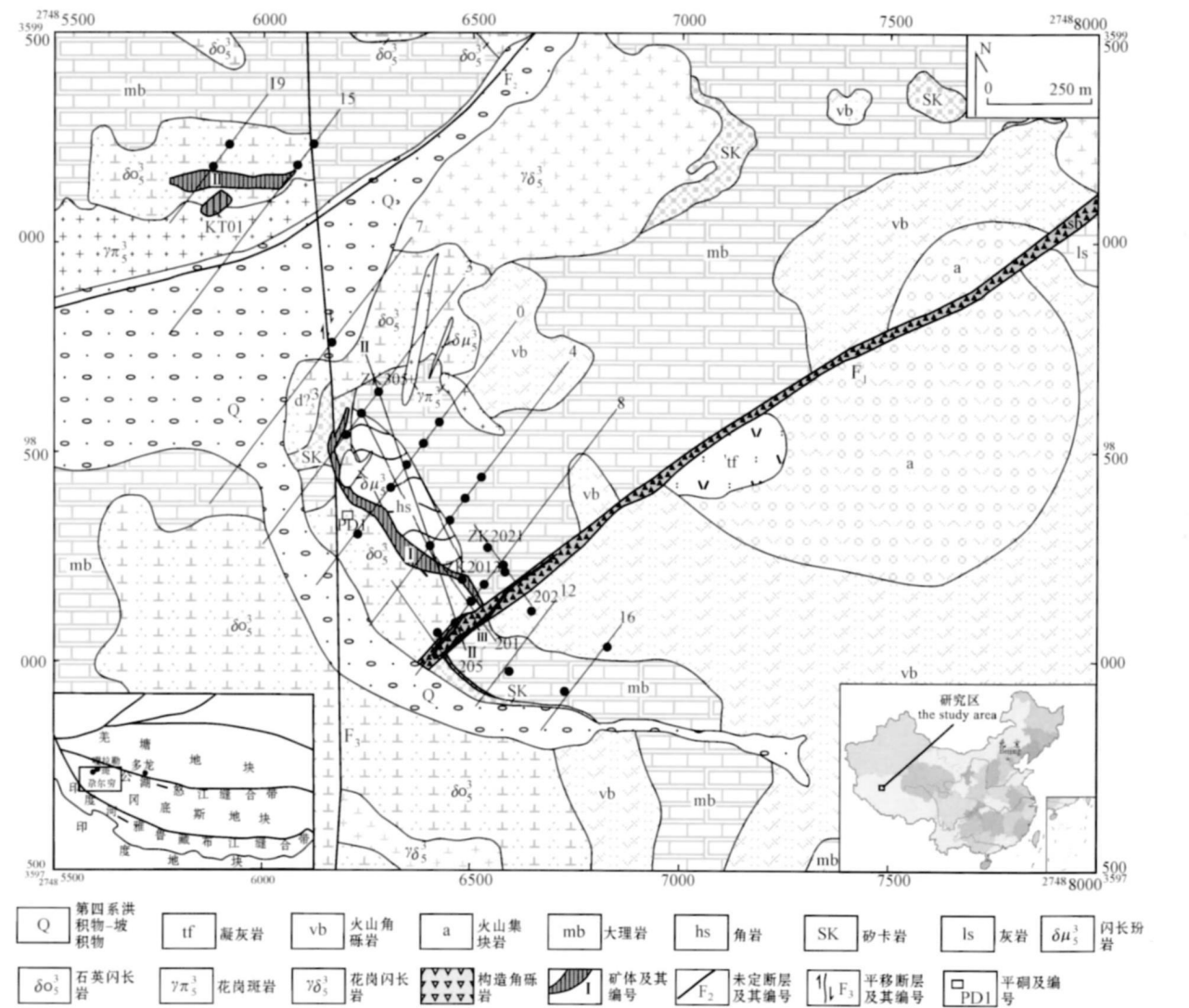


图 2 尕尔穷铜金矿区地质简图(据唐菊兴等, 2009<sup>①</sup>编辑)

Fig. 2 Geological sketch map of the Gaerqiong copper-gold deposit(after Tang Juxing *et al.*, 2009<sup>①</sup>)

① 唐菊兴, 李志军, 刘文周, 等. 2009. 西藏自治区革吉县尕尔穷铜矿详查报告. 2009. 中国地质出版社. <http://www.cnki.net>

特征进行了系统研究,结果表明石英闪长岩为具有岛弧环境性质的钙碱性同熔型中酸性岩体,花岗斑岩为陆-陆同碰撞钙碱性重熔型酸性岩体,指示矿区具有寻找铜金矿的巨大潜力。

矿区构造主要可见断裂构造,以南西-北东向( $F_1$  断层)、北东-南西向( $F_2$  断层)以及近南北向( $F_3$  断层)3组断裂构造为主(图2)。其中 $F_1$ 断层起着导矿、配矿以及容矿的作用,为对成矿有利的断层。

矿区矿体主要由I、II和III号矿体组成,I与III号为矿区主矿体,其中I号矿体为赋存于石英闪长岩与大理岩接触带内的矽卡岩型矿体,II号矿体为赋存于大理岩与花岗斑岩内接触带上的矽卡岩型矿体,而III号矿体则为赋存于 $F_1$ 断层构造破碎带内的构造蚀变岩型矿体。矿区矿石矿物主要可见黄铜矿、斑铜矿、赤铁矿、辉钼矿、磁铁矿、金矿物、银矿物等,脉石矿物主要为矽卡岩矿物(王友,2010)。

矿区蚀变主要可见矽卡岩化、大理岩化、角岩化、硅化、绿帘石化、绿泥石化及泥化等,以矽卡岩化为主。矿区矽卡岩主要产于石英闪长岩与碳酸盐岩接触带,根据其矿物组分含量的不同可以分为石榴子石透辉石矽卡岩、透辉石石榴子石硅灰石矽卡岩、硅灰石透闪石绿帘石矽卡岩以及绿帘石绿泥石矽卡岩等。通过矿区矽卡岩样品手标本观察、薄片与光片镜下鉴定统计,发现矿区矽卡岩从靠近岩体的内接触带至靠近围岩的外接触带具有良好的分带性,表现为从石榴子石透辉石矽卡岩过渡到透辉石石榴子石硅灰石矽卡岩,再过渡到透辉石硅灰石透闪石矽卡岩,最后过渡到绿帘石绿泥石透闪石矽卡岩。与此同时,伴随有 $Fe+Cu \rightarrow Cu+Fe+Au \rightarrow Cu+Au+Ag \rightarrow Au+Ag$ 的矿化分带。

## 2 矽卡岩矿物学特征

### 2.1 样品采集及特征

本次采集样品主要集中于PD1、ZK2013、ZK2021等探矿工程,采样工程位置见图2,所采集样品均为I号矽卡岩型铜金矿体中样品,未取III号构造蚀变岩型铜金矿体样品。其中PD1样品为水平方向从内接触带至外接触带按每隔5m依次采集,ZK2013、ZK2021样品为垂向上从内接触带至外接触带按每隔近5m依次采集,局部按需要进行加密

采样。样品特征见表1。

### 2.2 矽卡岩特征

尔尔穷矿区矽卡岩普遍发育于石英闪长岩与大理岩或灰岩的接触带部位,矽卡岩形态随着接触带形态的变化而变化,多呈港湾状或不规则状产出。通过对样品的详细的镜下鉴定,发现矿区矽卡岩矿物主要由石榴子石、辉石、透闪石、硅灰石、绿帘石、绿泥石、阳起石、符山石等组成,此矿物组合为典型的钙质矽卡岩矿物组合(赵一鸣,1990)。选取矽卡岩样品中典型的矽卡岩矿物石榴子石、透辉石、硅灰石、绿帘石及绿泥石进行电子探针分析,其中对环带结构较为发育的石榴子石颗粒进行了重点分析。实验于中国地质大学电子探针实验室进行,使用仪器型号为EPMA-1600,测试加速电压为15kV,电子束流约为 $2 \times 10^{-8}A$ ,束斑直径为5 $\mu m$ 。

#### 2.2.1 石榴子石

矿区石榴子石镜下呈他形粒状,单偏光下呈淡褐色至黄褐色,正极高突起,糙面明显,具不规则裂纹;正交偏光下全消光,部分颗粒可见环带结构(图3a、3b)。部分颗粒已绿帘石化及碳酸盐化,碳酸盐矿物沿石榴子石裂隙及表面发生不同程度的交代,个别颗粒仅保持了石榴子石他形粒状的外形。石榴子石在整个矽卡岩矿物中含量约占30%~35%,其电子探针分析结果及其阳离子组分见表2、表3。分析结果表明,石榴子石端员组分以钙铁榴石为主,其次为钙铝榴石(图4a),其中钙铁榴石含量变化范围为12.42%~97.72%,平均值为69.44%;钙铝榴石含量变化范围为1.27%~84.56%,平均值为28.99%,其较大的成分变化表明矿区矽卡岩不是在一个完全封闭下的平衡条件中形成的。结合不同深度或部位的石榴子石端员组分变化,发现从靠近岩体的内接触带至靠近围岩的外接触带(GEPD1-50 $\rightarrow$ GEPD1-124),石榴子石由以钙铁榴石为主逐渐过渡为以钙铝榴石为主。

矿区石榴子石环带结构多表现为靠内的宽的浅色带与靠外的窄的暗色带旋回出现。根据不同的颗粒环带特征,选取部分样品(GEPD1-50、GE2013-79.6、GE2021-146.28)的环带从内向外(浅色 $\rightarrow$ 暗色)进行电子探针分析。分析结果表明,矿区石榴子石成分从内带 $\rightarrow$ 外带具有较明显的变化特征:石榴子石浅色带相对于暗色带来说 $Al_2O_3$ 明显偏低,而 $FeO$ 、 $Na_2O$ 则相对偏高, $SiO_2$ 、 $Ti$ 、 $Mn$ 含量相当;浅

表 1 尔穷铜金矿区矽卡岩样品特征表  
Table 1 Characteristics of skarn samples in the Gaerqiong copper-gold deposit

样品编号	样品名称	采集地点	样品手标本及镜下特征
GEPD1-35 ~ GEPD1-45	矽卡岩化石英闪长岩	PD 1	灰色-灰白色, 局部黄绿色, 绿黑色, 中-细粒结构, 块状构造。可见明显矽卡岩化, 另局部可见绿帘石化及绿泥石化。手标本可见少量浸染状黄铜矿与磁铁矿。
GEPD1-45 ~ GEPD1-72	石榴子石透辉石矽卡岩	PD 1	深绿-黄绿色, 不等粒变晶结构, 块状构造, 金属矿物主要可见黄铜矿与磁铁矿。镜下鉴定主要由石榴子石、透辉石、石英及不透明金属矿物组成。局部可见极少量粒状自然金, 粒径在 0.02 μm ~ 0.03 μm 左右。手标本中石榴子石颜色往围岩延伸方向具有深绿色向黄绿色的转变。
GEPD1-75 ~ GEPD1-85	透辉石石榴子石硅灰石矽卡岩	PD 1	黄绿色, 深绿色, 局部灰白色, 不等粒变晶结构, 块状构造, 矿化主要可见黄铜矿、磁铁矿。镜下鉴定主要由透辉石、石榴子石、硅灰石及石英等组成。局部可见圆粒状自然金颗粒。
GEPD1-85 ~ GEPD1-95	透辉石硅灰石透闪石矽卡岩	PD 1	黄绿色, 淡绿色, 局部灰白色, 不等粒变晶结构, 块状构造。镜下鉴定主要由透辉石、硅灰石、透闪石及少量石榴子石等组成, 局部可见少量绿帘石交代透辉石或者石榴子石现象。手标本主要可见黄铜矿、自然金以及针铁矿等矿化。
GEPD1-95 ~ GEPD1-115	绿帘石绿泥石透辉石透闪石矽卡岩	PD 1	浅绿色, 黄绿色, 不等粒变晶结构, 块状构造。镜下鉴定主要由绿帘石、绿泥石、透辉石、透闪石及少量石榴子石组成, 可见强烈的绿帘石交代石榴子石或透辉石现象, 部分交代完全者仅可见原颗粒外形。手标本主要可见少量黄铜矿, 同点的品位分析样品显示具有 Au、Ag 矿化现象, 镜下未找到自然金颗粒。
GEPD1-115 ~ GEPD1-125	矽卡岩化大理岩	PD 1	灰白色, 乳白色, 局部浅绿色, 粒状变晶结构, 块状构造。主要由方解石组成, 局部可见绿帘石、绿帘石及透闪石等矽卡岩矿物。金属矿物主要可见针铁矿。同点样品分析显示具有一定的 Au、Ag 矿化现象, 样品于镜下未见自然金颗粒。
ZK 2013-40 ~ ZK 2013-56	矽卡岩化大理岩	ZK 2013	灰白色, 粒状变晶结构, 块状构造。主要由方解石组成, 局部可见团斑状绿泥石、绿帘石及少量透辉石等矽卡岩矿物。可见微弱黄铜矿化及赤铁矿化, 二者均呈细脉状产出, 蚀变主要可见硅化、碳酸盐化及矽卡岩化, 同点岩心分析样品具有 Au、Ag 矿化及弱 Cu 矿化。
ZK 2013-56.5 ~ ZK 2013-68	绿帘石绿泥石透闪石透辉石矽卡岩	ZK 2013	淡绿色, 黄绿色, 不等粒变晶结构, 块状构造, 可见有浸染状及细脉状黄铜矿。镜下鉴定主要由绿帘石、绿泥石、透闪石及少量透辉石组成。可见明显绿帘石交代透辉石现象。同点岩心分析样品显示具有 Cu、Au、Ag 矿化。
ZK 2013-68 ~ ZK 2013-89	透辉石透闪石硅灰石矽卡岩	ZK 2013	浅绿色, 黄绿色, 局部灰白色, 不等粒变晶结构, 块状构造, 可见有网脉状、浸染状黄铜矿, 局部可见细小条带状斑铜矿, 另可见脉状磁铁矿, 局部可见片状镜铁矿。镜下鉴定主要由透辉石、透闪石、硅灰石、石英及不透明矿物组成, 部分样品可见极少量圆粒状自然金颗粒, 粒径在 0.02 μm 左右。
ZK 2013-89 ~ ZK 2013-100	石榴子石透辉石硅灰石矽卡岩	ZK 2013	黄绿色, 不等粒变晶结构, 块状构造, 可见明显黄铜矿化, 黄铜矿主要呈网脉状、浸染状及细脉状产出, 另可见稠密浸染状磁铁矿。镜下鉴定主要由石榴子石、透辉石组成, 另可见少量硅灰石和石英。石榴子石及透辉石均具有微弱的绿帘石化现象。镜下未见有自然金颗粒。同点岩心分析样显示 Au 矿化较弱, 基本无 Ag 矿化。
ZK 2013-100 ~ ZK 2013-115	矽卡岩化石英闪长岩	ZK 2013	灰白色, 灰色, 局部黄绿色, 中-细粒结构, 块状构造, 局部可见明显团斑状石榴子石颗粒, 具有明显的矽卡岩化。矿化可见有稀疏浸染状黄铜矿及脉状磁铁矿。
ZK 2021-100 ~ ZK 2021-125	矽卡岩化大理岩	ZK 2021	乳白色, 灰白色, 粒状变晶结构, 块状构造。随着深度的增加可见矽卡岩化明显加强, 矽卡岩矿物主要可见绿帘石、绿泥石及少量透辉石等。同点岩心分析样显示具有 Au、Ag 矿化。
ZK 2021-125 ~ ZK 2021-135	绿帘石透辉石透闪石矽卡岩	ZK 2021	浅绿色, 浅黄绿色, 不等粒变晶结构, 块状构造, 可见浸染状及脉状黄铜矿化, 另可见脉状赤铁矿化。镜下鉴定主要由绿帘石、透辉石及透闪石组成, 局部可见少量硅灰石, 常见绿帘石交代透辉石现象, 局部交代完全者仅可见原颗粒外形。部分样品中可见圆粒状自然金颗粒, 粒径在 0.025 μm 左右。
ZK 2021-135 ~ ZK 2021-150	透辉石石榴子石硅灰石矽卡岩	ZK 2021	黄绿色, 局部灰白色, 不等粒变晶结构, 块状构造, 可见有网脉状黄铜矿及稠密浸染状、块状磁铁矿。镜下鉴定主要由透辉石、石榴子石、硅灰石及少量绿帘石组成, 可见透辉石具微弱绿帘石化现象。样品镜下均为见自然金颗粒。同域岩心分析样显示具弱 Au 矿化, 基本无 Ag 矿化。
ZK 2013-150 ~ ZK 2013-160	矽卡岩化石英闪长岩	ZK 2021	灰白色, 中-细粒结构, 块状构造, 可见团斑状矽卡岩化蚀变, 具稀疏浸染状黄铜矿化及脉状、浸染状磁铁矿化。



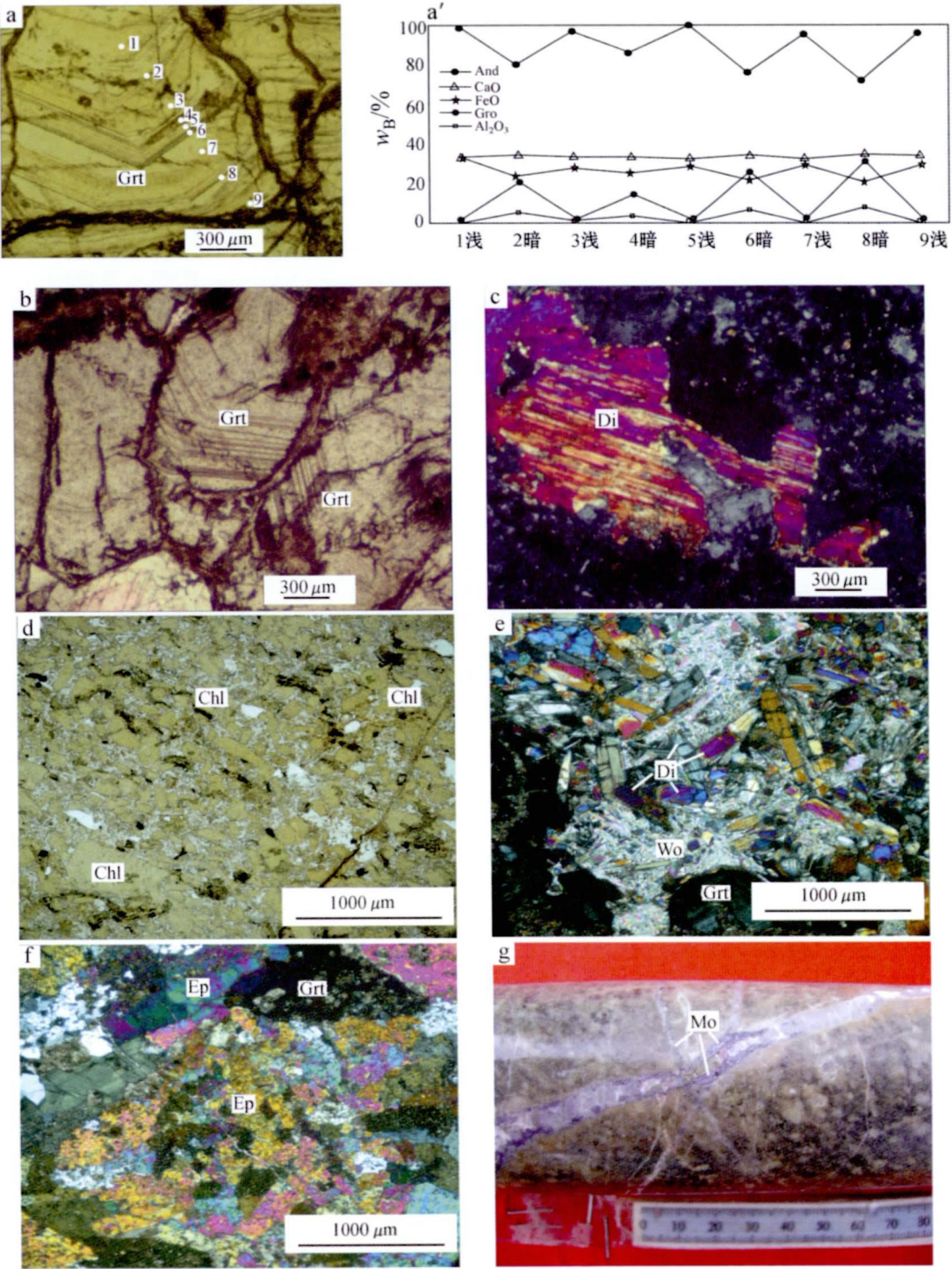


图 3 尕尔穷矿区砂卡岩矿物及矿石照片

Fig. 3 Photograph of skarn minerals and ores in the Gaerqiong deposit

a—环带状石榴子石, ZK2013-79. 6; a'—环带状石榴子石成分变化, ZK2013-79. 6; b—环带状石榴子石, ZK2013-88. 9; c—自行粒状透辉石, ZK2013-80. 7; d—自形粒状绿泥石, ZK2013-91. 35; e—透辉石、硅灰石、石榴子石共生, ZK2013-82. 6; f—绿帘石交代石榴子石, GPD1-70; g—石英闪长岩中脉状辉钼矿, ZK2021-419. 1; Grt—石榴子石; Wo—硅灰石; Di—透辉石; Ep—绿帘石; Chl—绿泥石; Mo—辉钼矿

a—zonation of garnet, ZK2013-79. 6; a'—chemical composition of zonal garnet, ZK2013-79. 6; b—zonation of garnet, ZK2013-88. 9; c—granular diopside, ZK2013-80. 7; d—granular chlorite, ZK2013-91. 35; e—association of diopside, wollastonite and garnet, ZK2013-82. 6; f—garnet replaced by epidote, GPD1-70; g—veined molybdenite in diorite, ZK2021-419. 1; Grt—garnet; Wo—wollastonite; Di—diopside; Ep—epidote; Chl—chlorite; Mo—molybdenite

表 2 尔穷矿床石榴子石电子探针分析结果

w B' /%

Table 2 Electron microprobe analyses of representative garnets from the Gaerqiong deposit

样品号	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	TFeO	Total
GEPD1-50	0.07	0.09	9.84	37.10	0.01	35.17	0.27	0.51	16.32	99.39
GEPD1-50	0.03	0.08	3.67	36.23	—	33.73	0.01	0.23	24.68	98.67
GEPD1-50	0.12	—	7.79	36.39	—	34.97	0.02	0.27	19.61	99.17
GEPD1-110	0.12	0.09	—	35.51	—	34.62	0.01	0.29	29.19	99.85
GEPD1-124	0.07	0.26	17.57	40.33	—	34.85	0.43	0.19	5.63	99.32
GEPD1-124	0.14	0.20	18.99	40.25	—	34.70	0.65	0.10	4.72	99.76
GE2013-79.6	0.41	0.11	0.13	35.25	—	33.72	—	0.36	29.15	99.13
GE2013-79.6	0.05	—	4.97	36.40	—	34.46	0.05	0.46	23.48	99.87
GE2013-79.6	0.19	0.04	0.69	35.45	0.01	34.10	—	0.34	28.37	99.19
GE2013-79.6	0.01	0.04	3.36	36.31	—	34.15	—	0.31	25.20	99.38
GE2013-79.6	0.25	0.13	0.07	35.78	0.03	33.40	—	0.30	28.91	98.88
GE2013-79.6	0.22	0.01	5.86	36.81	—	34.91	—	0.36	22.11	100.28
GE2013-79.6	0.16	0.13	0.03	35.31	0.02	33.53	—	0.53	29.81	99.52
GE2013-79.6	0.17	0.01	6.84	37.05	—	34.97	—	0.51	20.40	99.97
GE2013-79.6	0.09	0.16	0.04	35.17	—	33.94	0.00	0.44	29.32	99.16
GE2021-142.38	0.08	0.27	16.56	37.79	0.01	35.84	0.37	0.28	7.41	98.61
GE2021-146.28	0.11	0.41	0.10	39.18	0.00	34.51	—	0.25	25.29	99.86
GE2021-146.28	0.15	0.12	6.47	40.39	—	34.48	—	0.20	17.76	99.56
GE2021-146.28	0.05	0.46	1.49	39.86	—	34.38	0.05	0.43	22.61	99.34
GE2021-150.7	0.12	0.05	22.59	37.36	—	23.65	—	0.05	12.91	96.72

注: “—” 为低于检测下限。

表 3 尔穷矿床石榴子石阳离子数及端员组分

Table 3 Ion proportions and members of representative garnets from the Gaerqiong deposit

样品号	Si	Ti	Al	Fe <sup>3+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Mn	Mg	Ca	And	Pyr	Spe	Gro
GEPD1-50	2.953 7	0.016 2	0.923 3	1.086 6	0.000 0	0.034 4	0.010 7	3.000 2	53.53	0.35	1.13	44.99
GEPD1-50	2.974 2	0.000 6	0.355 1	1.661 7	0.032 6	0.016 0	0.009 8	2.966 8	82.39	0.32	0.53	15.67
GEPD1-50	2.935 8	0.001 2	0.740 7	1.301 3	0.021 8	0.018 5	0.000 0	3.022 8	63.73	0.00	0.60	34.96
GEPD1-110	2.936 2	0.000 6	0.000 0	2.018 5	0.000 0	0.020 3	0.011 1	3.067 2	97.72	0.36	0.66	1.27
GEPD1-124	3.077 2	0.024 7	1.580 0	0.352 1	0.007 2	0.012 3	0.029 6	2.849 1	18.22	1.02	0.42	80.09
GEPD1-124	3.054 1	0.037 1	1.698 3	0.240 9	0.058 6	0.006 4	0.022 6	2.821 1	12.42	0.78	0.22	84.56
GE2013-79.6	2.940 4	0.000 0	0.012 8	2.026 9	0.006 7	0.025 4	0.013 7	3.013 8	97.37	0.45	0.83	2.13
GE2013-79.6	2.946 5	0.003 0	0.474 2	1.559 5	0.030 1	0.031 5	0.000 0	2.988 8	76.68	0.00	1.03	21.3
GE2013-79.6	2.942 1	0.000 0	0.067 5	1.969 1	0.000 0	0.023 9	0.005 0	3.032 2	96.49	0.16	0.78	2.57
GE2013-79.6	2.965	0.000 0	0.323 4	1.700 0	0.020 9	0.021 4	0.004 9	2.987 8	84.02	0.16	0.71	14.43
GE2013-79.6	2.978 5	0.000 0	0.006 9	2.007 5	0.005 2	0.021 2	0.016 1	2.979 0	96.66	0.53	0.7	2.06
GE2013-79.6	2.957 3	0.000 0	0.554 9	1.473 6	0.011 9	0.024 5	0.001 2	3.005 1	72.65	0.04	0.81	26.12
GE2013-79.6	2.933 1	0.000 0	0.002 9	2.041 7	0.029 3	0.037 3	0.016 1	2.984 3	94.75	0.52	1.22	2.55
GE2013-79.6	2.970 0	0.000 0	0.646 2	1.367 6	0.000 0	0.034 6	0.001 2	3.003 5	67.5	0.04	1.14	31.33
GE2013-79.6	2.927 4	0.000 0	0.003 9	2.041 0	0.000 0	0.031 0	0.019 9	3.026 9	96.23	0.65	1.01	2.12
GE2021-142.38	2.949 5	0.021 7	1.523 3	0.483 7	0.000 0	0.018 5	0.031 4	2.997 2	23.81	1.03	0.61	74.55
GE2021-146.28	3.175 5	0.000 0	0.009 6	1.714 2	0.000 0	0.017 2	0.049 5	2.996 8	83.93	1.62	0.56	13.89
GE2021-146.28	3.193 1	0.000 0	0.602 8	1.174 2	0.000 0	0.013 4	0.014 1	2.920 7	59.74	0.48	0.45	39.32
GE2021-146.28	3.217 1	0.003 0	0.141 7	1.526 2	0.000 0	0.029 4	0.055 4	2.973 1	74.86	1.81	0.96	22.36
GE2021-150.7	2.970 8	0.000 0	2.117 1	0.000 0	0.858 5	0.003 4	0.005 9	2.015 0	36.24	0.19	0.11	63.45

色带从内到外具有 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量降低的趋势,而暗色带从内到外具有 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量升高的趋势,FeO 含量从内向外具有相对降低的趋势(图 3a)。

2.2.2 辉石和硅灰石

辉石是矿区矽卡岩中含量仅次于石榴子石的重要组成矿物,显微镜下晶形主要呈柱状、板状及他形粒状,少数呈粒状集合体,粒径多在 0.1~1 mm 之间。单偏光下略带浅绿,正高突起,可见裂纹;正交

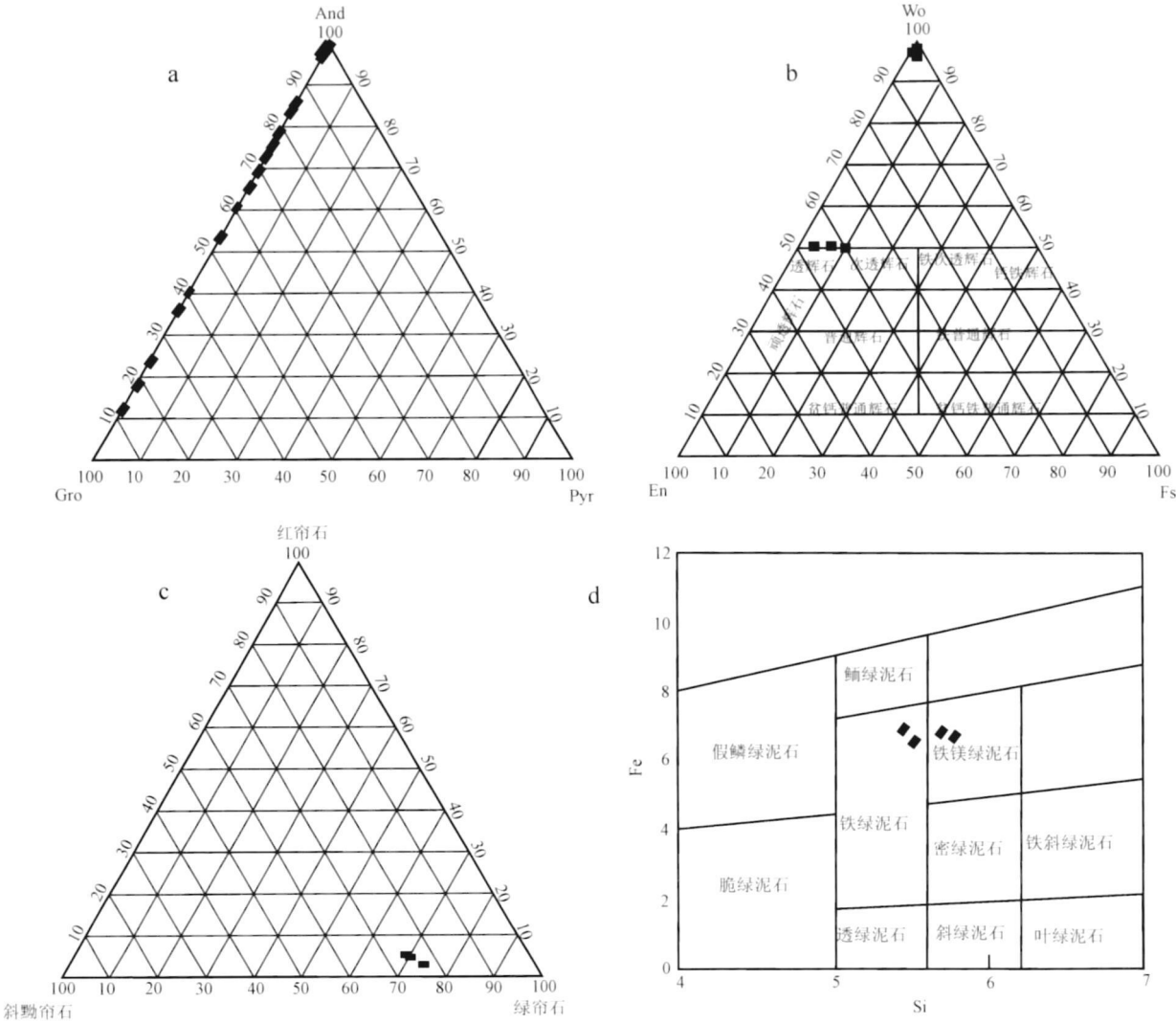


图 4 尕尔穷矿区石榴子石(a)、辉石和硅灰石(b)、绿帘石(c)、绿泥石(d)分类图解(a、b、c底图据潘兆麟, 1993; d底图据 Deer 等, 1962)

Fig. 4 Compositional plot of garnet (a), diopside and wollastonite (b), epidote(c), chlorite (d) of the Galale Cu-Au deposit (base map of a, b, c after Pan Zhaolu, 1993; base map of d after Deer *et al.*, 1962)

偏光下具一级橙黄-二级蓝绿干涉色, 斜消光, 正延性(图 3c、3e)。部分颗粒已绿帘石化, 另可见部分颗粒已被碳酸盐矿物交代, 仅保留有原颗粒的外形。辉石电子探针分析结果见表 4。其端员组分结果表明矿区矽卡岩中辉石基本全为透辉石(图 4b)。透辉石组分变化表现为: Wo 为 49.67%~50.16%, 平均值为 49.85%; En 为 35.36%~46.69%, 平均值为 40.08%; Fs 为 2.91%~13.79%, 平均值为 9.13%; 其 Mn/Fe 比值变化范围为 0.03~0.61, 平均值为 0.18, 此比值特征属于矽卡岩型铜、金矿的范畴(赵一鸣等, 1997), 与尕尔穷矿区地质事实一致。

硅灰石是矿区另一种重要的矽卡岩矿物, 晶形主要呈柱状、针状和毛发状, 粒径多在 0.1~1 mm 之间, 主要分布在透辉石周围, 少量赋存于方解石中。单偏光下无色透明, 具纵纹; 正交偏光下干涉色多为一级灰-一级橙, 最高可达一级橙黄, 近平行消光, 正延性(图 3e)。硅灰石在整个矽卡岩矿物中分布较为局限, 仅见于靠近围岩的矽卡岩中。硅灰石电子探针分析结果见表 4, 端员组分图解见图 4b, 其组分含量变化表现为: Wo 为 97.86%~98.39%, 平均值为 98.10%; En 为 0.06%~0.37%, 平均值为 0.12%; Fs 为 0.33%~0.79%, 平均值为 0.54%。



表 4 尔穷矿床辉石、硅灰石分析结果( $w_B/\%$ )及端员组分  
Table 4 Electron microprobe analyses ( $w_B/\%$ ) and members of pyroxenes and wollastonite from the Gaerqiong deposit

样品号	硅灰石			透辉石		
	GEPD1-124	GEPD1-124	GE2013-79.6	GE2013-79.6	GE2013-79.6	GE2013-79.6
Na <sub>2</sub> O	0.20	0.46	0.32	0.27	0.21	0.32
MgO	0.10	0.02	—	14.10	17.48	12.99
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.33	0.01	0.06	0.14	0.11	0.03
SiO <sub>2</sub>	51.45	52.40	50.25	52.80	53.32	52.45
K <sub>2</sub> O	—	—	0.10	—	—	0.06
CaO	44.53	46.53	49.28	25.77	25.87	25.41
TiO <sub>2</sub>	—	—	—	0.16	—	0.09
MnO	0.11	—	0.29	1.60	0.11	0.85
TFeO	0.18	0.20	0.22	.47	1.85	8.25
Total	98.89	99.61	100.51	100.30	98.95	100.46
Si	1.987 5	2.024 3	1.955 1	1.968 8	1.969 3	1.971 2
Al(IV)	0.012 5	0.000 0	0.000 0	0.004 5	0.000 0	0.002 5
Al(VI)	0.093 6	0.000 5	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
Ti	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.004 5	0.000 0	0.002 5
Fe <sup>3+</sup>	0.000 0	0.000 0	0.171 7	0.099 4	0.106 6	0.114 9
Fe <sup>2+</sup>	0.005 9	0.006 5	0.000 0	0.069 8	0.000 0	0.141 9
Mn	0.003 6	0.000 0	0.009 6	0.050 5	0.003 4	0.027 1
Mg	0.005 8	0.001 2	0.000 0	0.783 8	0.962 4	0.727 8
Ca	1.843 1	1.925 9	2.054 4	1.029 6	1.023 7	1.023 2
Na	0.015 0	0.034 5	0.024 1	0.019 5	0.015 0	0.023 3
K	0.000 0	0.000 0	0.005 0	0.000 0	0.000 0	0.002 9
Wo	98.39	97.86	98.05	50.16	49.67	49.71
En	0.31	0.06	0.00	38.19	46.69	35.36
Fs	0.51	0.33	0.79	10.70	2.91	13.79

注: - 为低于检测下限。

表 5 尔穷矿床绿帘石、绿泥石分析结果( $w_B/\%$ )及阳离子数

样品编号	绿帘石			绿泥石			
	GEPD1-70	GEPD1-75	GEPD1-80	GEPD1-93	GEPD1-95	GEPD1-100	GEPD1-110
SiO <sub>2</sub>	36.96	37.66	38.12	27.41	33.60	34.55	28.12
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.05	0.56	—	0.00	0.14	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.97	23.13	16.19	13.11	17.54	13.71	31.87
TFeO	13.15	12.40	8.94	39.67	29.65	2.55	1.66
MnO	0.15	0.62	0.15	0.09	0.24	0.14	—
MgO	—	0.08	0.16	3.52	5.46	34.72	27.25
CaO	23.56	23.19	36.20	2.20	1.72	0.06	0.24
Na <sub>2</sub> O	1.11	0.09	0.12	0.12	—	0.18	0.18
K <sub>2</sub> O	—	0.04	—	1.39	0.13	0.03	0.03
Total	96.88	97.25	100.44	87.51	88.19	86.06	89.36
Si	5.659 5	5.688 8	5.751 2	5.259 9	5.798 6	5.375 9	4.171 1
Al <sup>IV</sup>	2.340 5	2.311 2	2.248 8	2.740 1	2.201 4	2.514 2	3.828 9
Al <sup>VI</sup>	1.624 4	1.806 7	0.629 9	0.224 8	1.366 1	0.000 0	1.742 5
Ti	0.000 0	0.005 7	0.063 6	0.000 0	0.000 0	0.016 4	0.001 1
Fe <sup>3+</sup>	0.477 2	0.736 4	0.236 5	0.000 0	0.568 1	0.000 0	0.000 0
Fe <sup>2+</sup>	1.206 8	0.830 1	0.891 5	6.366 4	3.711 3	0.331 8	0.205 9
Mn	0.019 5	0.079 3	0.019 2	0.014 6	0.035 1	0.018 5	0.000 0
Mg	0.000 0	0.018 0	0.036 0	1.007 0	1.404 7	8.053 7	6.025 7
Ca	3.865 4	3.753 3	5.851 7	0.452 3	0.318 0	0.010 0	0.038 1
Na	0.329 5	0.026 4	0.035 1	0.044 6	0.000 0	0.054 3	0.051 8
K	0.000 0	0.007 7	0.000 0	0.340 3	0.028 6	0.006 0	0.005 7
Ps	0.120 353	0.178 830	0.082 169				

注: Ps = Fe<sup>3+</sup>/(Fe<sup>3+</sup>+Al<sup>VI</sup>); 表示低于检测下限。

2.2.3 绿帘石和绿泥石

作为退变质蚀变期的主要含水矽卡岩矿物,绿帘石发育较广泛,通常呈绿色或者浅绿色,常呈板状、粒状或者粒状集合体出现,单偏光下具微弱多色性,正高突起;正交偏光下干涉色鲜艳,多为二级黄-二级蓝绿(图 3f)。电子探针分析结果表明(表 5),尔穷矿区矽卡岩中绿帘石属于绿帘石族中绿帘石范畴(图 4c),其不是岩浆绿帘石(Ps 介于 0.19~0.30 之间)成因(Dawes and Evans, 1991; Ferreira *et al.*, 1998),而是因交代早期矽卡岩矿物而形成的次生绿帘石。

绿泥石是矿区另一种重要的后期含水矽卡岩矿物,浅绿色至绿黑色,主要呈纤维状、叶片状、针状集合体产出,主要分布于绿帘石、褐帘石及金属矿物颗粒间,部分赋存于方解石颗粒间,单偏光下呈微弱淡绿-黄绿色多色性,正低突起;正交偏光下干涉色多呈一级灰-一级黄白,近平行消光(图 3d)。电子探针分析结果表明(表 5),矿区矽卡岩中绿泥石有铁绿泥石及铁镁绿泥石两种(图 4d),4 个样品 Mg/(Mg+Fe)值分别为 0.14、0.25、0.96、0.97,均较低,指示绿泥石的形成环境应为含铁建造(Zang and Fyfe, 1995)。研究发现, Mg、Fe 含量变化较大,且显示出

此消彼长的特性,反映出二者在绿泥石中相互置换的普遍性特征。

### 3 讨论

#### 3.1 矽卡岩演化、空间分布与矿化

矽卡岩的演化与矿物空间分布特征一直以来是矽卡岩矿床研究中最基础也是最重要的一环,了解矽卡岩矿物成分在空间上的分布变化有利于了解流体运移方向及成矿期次的划分(Harris and Einaudi, 1982; 张德全等, 1992; Khin Zaw and Blackwell, 2000),了解了矽卡岩的演化过程便打开了矽卡岩矿床形成过程研究的大门。

尕尔穷矿床矽卡岩矿物主要有石榴子石、透辉石、透闪石、硅灰石、绿帘石、绿泥石等,由此组成的矽卡岩从靠近岩体的内接触带至靠近围岩的外接触带具有较为明显的分带性,并伴随有相应的矿化分带,表现为从石榴子石透辉石矽卡岩(黄铜矿+斑铜矿+黄铁矿)过渡到透辉石石榴子石硅灰石矽卡岩(黄铜矿+磁铁矿+金),再过渡到透辉石硅灰石透闪石矽卡岩(黄铜矿+金+银),最后过渡到绿帘石绿泥石透闪石矽卡岩(金+银)。从以上分带特征可以看出,矿区中矽卡岩从内接触带至外接触带具有石榴子石+透辉石→透辉石+硅灰石→透闪石+绿帘石的组合变化,指示随着与岩浆热源距离的增加温度具有逐渐降低的趋势,尕尔穷矿床矽卡岩分带特征与大多数典型钙质矽卡岩分带特征(Harris and Einaudi, 1982; 张德全等, 1992; Khin Zaw and Blackwell, 2000; Meinert *et al.*, 2005; 陈雷等, 2012)类似。

#### 3.2 石榴子石环带特征

矽卡岩矿床中由热液交代作用形成的石榴子石往往具有脉冲式环带结构,具有3个以上脉冲式环带可称之为振荡环带(陈能松等, 2003),不同环带具有不同的化学成分。现今对环带石榴子石的研究已比较多, Jamtveit 等(1993)与 Smith 等(2004)通过详细研究石榴子石环带成分的变化,指出环带成分的变化往往能对热液流体的演化过程提供重要的信息,并指出热液交代成因的石榴子石环带往往是由于流体流量的改变而引起生长速率的改变而形成的。王焕等(2011)、唐晓倩等(2012)通过对西藏甲玛铜多金属矿床环带石榴子石的成分研究,指出该矿床矽卡岩形成于非完全平衡条件,石榴子石环带

成分的变化直接揭示了流体的多期多阶段性特征。陈雷等(2012)通过对西藏努日铜钼钨矿床石榴子石环带的成分变化研究,提出矿区石榴子石可能是流体化学成分的自身再平衡与生长过程中流体流量的改变引起生长速率改变的共同作用完成的。上述研究表明矽卡岩矿床中石榴子石的成分变化对于矿床流体演化具有重要指示意义。尕尔穷矿区石榴子石环带结构非常明显,表现为宽的浅色带与窄的暗色带构成的脉冲式环带旋回出现,其成分剖面电子探针分析结果表明,浅色带与暗色带成分不同,各自从核部到边部成分也有较均匀的变化,表现为:石榴子石颗粒总体表现为钙铁榴石,但浅色带相对于暗色带来说  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量明显偏低,而  $\text{FeO}$  含量则相对偏高,总体成分从核部至边部  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量逐渐升高,而  $\text{FeO}$  含量则逐渐降低,表明随着流体期次的改变,钙铁榴石具有向钙铝榴石转变的趋势。上述环带特征表明矿区矽卡岩不是在完全平衡的条件下形成的,而是经历了多期次多阶段形成的,结合石榴子石环带具有流体成分自身再平衡或流体流量改变的双重可能成因,推测矿床形成过程中热液流体演化具有多期多阶段性的特征。

#### 3.3 对成矿环境与矿化的指示

矽卡岩的形成环境对于矽卡岩型矿床的形成具有十分重要的作用,而该环境在矽卡岩形成过程中被其矿物成分的变化记录下来了,即矽卡岩中矿物成分的变化可以反映矿石的形成环境(Einaudi *et al.*, 1981; Meinert, 1992)。Brown 和 Essene(1985)指出,钙质矽卡岩中石榴子石与辉石的化学成分可以指示矿床形成的氧化还原条件,另外一些学者(Meinert, 1992; Kwak, 1994; Misra, 2000; Lu *et al.*, 2003)认为以透辉石为主的辉石及以钙铁榴石为主的石榴子石形成于相对氧化的环境。此外,一个矿床形成的氧化还原环境还可以通过矽卡岩矿物中  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  比值表现出来(Sato, 1980; 赵一鸣, 1990),比值低者处于相对还原环境,而比值高者为氧化环境。梁祥济(1994)对钙铁榴石-钙铝榴石形成的物理化学条件进行了实验研究,认为钙铁榴石形成环境  $\text{pH}=4.0\sim 11.0$ ,为氧化-弱氧化环境,而钙铝榴石形成环境为弱氧化-弱还原环境。尕尔穷矿区中石榴子主要由钙铁榴石及钙铝榴石组成,以钙铁榴石(含  $\text{Fe}^{3+}$ )为主,其  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  在  $4.11\sim 386.06$  之间,比值较高,其辉石以透辉石为主( $\text{Fe}^{3+}$  偏高),表明尕尔穷矿床形成于相对氧化、弱酸性的

环境。

Nakano 等(1994)、赵一鸣等(1997)指出, 一个矿床中  $Mn/Fe$  比值以及辉石中  $Zn$  的含量可以指示矿床金属矿化的类型, 矽卡岩型铁、铜、金矿床与矽卡岩型铜、钼矿床中辉石  $Mn/Fe$  比值多  $< 0.1$ , 其中铜、钼矿床比值稍微偏高。尕尔穷矿床中  $Mn/Fe$  比值变化范围为  $0.03 \sim 0.61$ , 多数小于  $0.1$ , 指示矿区矿化类型主要为铁、铜、金矿化, 与地质事实一致, 而出现稍高的比值项表明矿区具有形成铜钼矿床的潜力, 结合新近在勘查过程中于闪长玢岩岩体中发现了石英脉型辉钼矿脉(图 3g), 说明矿区具有一定的寻找钼矿的潜力。

## 4 结论

(1) 尕尔穷矿床矽卡岩矿物主要由石榴子石、透辉石、透闪石、硅灰石、绿帘石、绿泥石等组成, 为典型的钙质矽卡岩组合。矿区矽卡岩从内接触带至外接触带具有石榴子石透辉石矽卡岩  $\rightarrow$  透辉石石榴子石硅灰石矽卡岩  $\rightarrow$  透辉石硅灰石透闪石矽卡岩  $\rightarrow$  绿帘石绿泥石透闪石矽卡岩的分带特征。

(2) 尕尔穷矿床石榴子石广泛发育脉冲式振荡环带结构, 指示矿床形成过程中热液流体具有多期多阶段性特征; 石榴子石成分主要为钙铁榴石, 辉石成为主要为透辉石, 表明其形成于相对氧化、弱酸性的环境。

(3) 尕尔穷矿床  $Mn/Fe$  比值多  $< 0.1$ , 指示其矿化类型主要为铁、铜、金矿化, 存在稍高的比值项及新发现的石英脉型辉钼矿表明矿区具有寻找钼矿的潜力。

**致谢** 野外及室内工作得到西藏卓朗矿业投资有限公司的大力支持和帮助, 在此致以衷心的感谢!

## References

Einaudi M T, Meinert L D and Newberry R J. 1981. Skarn deposits [J]. *Economic Geology* 75th Anniversary Volume: 317~391.

Brown P E and Essene J E. 1985. Activity variations attending tungstenskarn formation, Pine Creek, California [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 89: 358~369.

Chen Nengsong, Sun Min, Yang Yong, *et al.* 2003. Major and rare element zoning in metamorphic garnets and their metamorphic process

implications [J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 315~320 (in Chinese).

Chen Lei, Qin Kezhang, Li Guangming, *et al.* 2012. Geological and skarn mineral characteristics of Nuri Cu-W-Mo deposit in southeast Gangdese, Tibet [J]. *Mineral Deposit*, 31(3): 417~437 (in Chinese).

Dawes R L and Evans B W. 1991. Mineralogy and geothermobarometry of magmatic epithermal-bearing dikes, Front Range, Colorado [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 103: 1 017~1 031.

Deer W A, Howie R A and Jussman J. 1962. *Rock-forming Minerals: Sheet Silicates* [M]. London: Longman, 270.

Deng Shilin, Tang Juxing, Li Zhijun, *et al.* 2011. Geochemical characteristics of rock mass in the Gaerqiong Cu-Au deposit, Tibet [J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 38(1): 85~91 (in Chinese).

Du Dedao, Qu Xiaoming, Wang Genhou, *et al.* 2011. Bidirectional subduction of the Middle Tethys oceanic basin in the west segment of Bangonghu-Nujiang suture, Tibet: Evidence from zircon U-Pb LA-ICPMS dating and petrogeochemistry of arc granites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 1 993~2 002 (in Chinese).

Ferreira V P, Sial A N and Jardim E F. 1998. Geochemical and isotopic signatures of Proterozoic granitoids in terranes of the Borborema structural province, northeastern Brazil [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 11(5): 429~455.

Geng Quannu, Pan Guitang, Wang Liquan, *et al.* 2011. Tethyan evolution and metallogenic geological background of the Bangong Co-Nujiang belt and the Qiangtang massif in Tibet [J]. *Geological Bulletin of China*, 30(80): 1 261~1 274 (in Chinese).

Harris N B and Einaudi M T. 1982. Skarn deposit in the Yerington district, Nevada: Metasomatic skarn evolution near Ludwing [J]. *Econ. Geol.*, 95: 1 259~1 275.

Hu Zhenghua, Tang Juxing, Li Zhijun, *et al.* 2012. Geological Characteristics and Genetic Significance of Cu-Au Deposits of Gaer-qiong in Geji County, Tibet [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(4): 588~600 (in Chinese with English abstract).

Jamtveit B, Wogeluis R A and Fraser D G. 1993. Zonation pattern of skarn garnets: records of hydrothermal system evolution [J]. *Geology*, 21: 113~116.

Khin Zaw and Blackwell Singoyi. 2000. Formation of magnetite-scheelite skarn mineralization at Kara, Northwestern Tasmania: Evidence from mineral chemistry and stable isotopes [J]. *Economic Geology*, 95: 1 215~1 230.

Kwak T A P. 1994. Hydrothermal alteration in carbonate-replacement deposits [J]. *Geological Association of Canada Short Course Notes*, 11: 381~402.

Kapp P M A, Murphy A, Yin T M, *et al.* 2003. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of western Tibet [J]. *Tectonics*, 22(4): 3-1~3-3.

Kang Zhiqiang, Xu Jifeng, Wang Baodi, *et al.* 2010. Qushenla Formation volcanic rocks in north Lhasa block: Products of Bangong Co-Nujiang Tethys's southward subduction [J]. *Acta Petrologica Sinica*,

- 26(10): 3 106~3 116 (in Chinese).
- Liang Xiangji. 1994. Gamets of Grossular-Andradite series; their characteristics and metasomatic mechanism [ J ]. *Acta Petrologica et Minerologica*, 13(4): 342~352(in Chinese with English abstract).
- Li Guangming, Li Jinxiang, Qin Kezhang, *et al.* 2007. High temperature salinity and strong oxidation ore-forming fluid at Duobuza gold-rich porphyry copper deposit in the Bangonghu tectonic belt, Tibet; Evidence from fluid inclusions[ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 23( 5): 935~952 (in Chinese).
- Li Zhijun, Tang Juxing, Yao Xiaofeng, *et al.* 2011a. Geological characteristics and prospecting potential of Gaerqiong copper-gold polymetallic deposit in Ali District, northern Tibet[ J ]. *Mineral Deposit*, 30(6): 1 149~1 153 (in Chinese).
- Li Zhijun, Tang Juxing, Yao Xiaofeng, *et al.* 2011b. Re-Os isotope age and geological significance of molybdenite in the Gaerqiong Cu-Au deposit of Geji, Tibet, China[ J ]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 38(6): 678~683 (in Chinese).
- Lei Chuanyang, Li Zhijun, Zhang Zhi, *et al.* 2012. Geochemical characteristics and geodynamic significance of the granites in the Ga'erqiong Cu-Au deposit, Tibet[ J ]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 601~612(in Chinese with English abstract).
- Lu H Z, Liu Y M, Wang C L, *et al.* 2003. Mineralization and fluid inclusion study of the Shizhuoyu W-Sn-Bi-Mo-Fskarn deposit, Hunan Province, China[ J ]. *Econ. Geol.*, 98: 955~974.
- Misra K C. 2000. *Understand Mineral Deposit [ M ]*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Meinert L D. 1992. Skarns and skarn deposits[ J ]. *Geoscience Canada*, 19: 145~162.
- Minert L D, Dipple G M and Nicolescu S. 2005. World skarn deposits [ A ]. Hedenquist J W, Thompson J F H, Goldfarb R J, *et al.* *Economic Geology* 100th Anniversary Volume[ C ]. Society of Economic Geologists, 299~336.
- Nakano T, Yoshino T, Shimazaki H, *et al.* 1994. Pyroxene composition as an indicator in the classification of skarn deposit[ J ]. *Economic Geology*, 89: 1 567~1 580.
- Pan Zhaolu, Zhao Aixing and Pan Tielong. 1993. *Crystallography and Mineralogy [ M ]*. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).
- Qu Xiaoming and Xin Hongbo. 2006. Ages and tectonic environment of the Bangong Co porphyry copper belt in western Tibet, China[ J ]. *Geological Bulletin of China*, 25(7): 792~799(in Chinese).
- Song Junlong, Li Zhijun, Yao Xiaofeng, *et al.* 2012. Characteristics and the genetic significance of skarn in the Gaerqiong Cu-Au deposit, Geji County, Tibet[ J ]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 703~712 (in Chinese).
- Stato K. 1980. Tungsten skarn deposit of the Fujigatani mine Southwest Japan[ J ]. *Econ. Geol.*, 75: 1 066~1 082.
- Smith M P, Henderson P, Jeffries T E R, *et al.* 2004. The rare earth elements and uranium in gamet from the Beinn an Dubhaich aureole, Skye, Scotland, UK: Constraints on processes in a dynamic hydrothermal system[ J ]. *Journal of Petrology*, 45: 457~484.
- Tang Xiaojian, Wang Guozhi, Qin Zhipeng, *et al.* 2012. Mineralogical characteristics and genesis of garnet in the Jiamia copper-Polymetallic Deposit of Tibet[ J ]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 633~640 (in Chinese).
- Wang Guanmin and Zhong Jianhua. 2002. Tectonic-sedimentary evolution of the west segment of the Bangong Co-Nujiang structural belt in the Triassic and Jurassic[ J ]. *Geological Review*, 48(3): 297~303 (in Chinese).
- Wang You. 2010. Study on Ore Characteristic of Garjoan Copper-gold Deposit, Gejue County, Tibet(dissertation for Master degree) [ D ]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese).
- Wang Huan, Tang Juxing, Wang liqiang, *et al.* 2011. Mineralogical characteristics of skarn in the Jiamia copper polymetallic deposit of Mozhuogongka area, Tibet and its geological significance[ J ]. *Geological Bulletin of China*, 30(5): 783~797(in Chinese).
- Yao Xiaofeng, Tang Juxing, Wang You, *et al.* 2011. The study of the characteristics of gold minerals in Gaerqiong copper gold deposit, Tibet[ J ]. *Geology and Exploration*, 47(6): 1 018~1 025(in Chinese).
- Yao Xiaofeng, Tang Juxing, Li Zhijun, *et al.* 2013. The redefinition of the ore-forming porphyry's age in Gaerqiong skarn-type gold-copper deposit, western Banggong Lake-Nujiang River metallogenic belt, Xizang (Tibet)[ J ]. *Geological Review*, 59(1): 193~200 (in Chinese with English abstract).
- Zang W and Fyfe W S. 1995. Chloritization of the hydrothermally altered bedrock at the Igarape Bahia gold deposit, Carajás, Brazil[ J ]. *Mineralium Deposita*, 30: 30~38.
- Zhang Zhi, Tang Juxing, He Lin, *et al.* 2011. The comparative study of Petrochemical characteristics of Mineralization host rock in the Gerqiong and Galale copper-gold deposit[ J ]. *Acta Mineralogica Sinica* (supp.): 669~670 (in Chinese).
- Zhang Zhi, Tang Juxing, Yang Yi, *et al.* 2012. Element spatial distribution of Gaerqiong copper-gold deposit in Tibet and its geochemical exploration model[ J ]. *Chinese Academy of Geological Sciences*, 33(4): 663~672(in Chinese).
- Zhao Yiming. 1990. *The Skarn Deposit of China [ M ]*. Beijing: Geol. Pub. House(in Chinese).
- Zhao Yiming, Zhang Yinan and Lin Wenwei. 1997. Characteristics of pyroxenes and pyroxenoids in skarn deposits of China and their relationship with metallization[ J ]. *Mineral Deposits*, 16(4): 318~329 (in Chinese).
- Zhang Dequan, Lei Yunfen and Luo Taiyang. 1992. Mineralization zoning and flow direction of ore fluid in the Baiyinnuo lead-zinc deposit [ J ]. *Mineral Deposit*, 11(3): 203~212(in Chinese).

## 附中文参考文献

- 陈能松, 孙 敏, 杨 勇, 等. 2003. 变质石榴石的成分环带与变质过程[ J ]. *地学前缘*, 10(3): 315~320.
- 陈 雷, 秦克章, 李光明, 等. 2012. 西藏冈底斯南缘努日铜钨钼矿床地质特征与矽卡岩矿物学研究[ J ]. *矿床地质*, 31(3): 417~437.
- 邓世林, 唐菊兴, 李志军, 等. 2011. 西藏尔穷铜金矿床岩体地球

- 化学特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 38(1): 85~91.
- 杜德道, 曲晓明, 王根厚, 等. 2011. 西藏班公湖-怒江缝合带西段中特提斯洋盆的双向俯冲: 来自岛弧型花岗岩锆石 U-Pb 年龄和元素地球化学的证据[J]. 岩石学报, 27(7): 1994~2002.
- 胡正华, 唐菊兴, 李志军, 等. 2012. 西藏革吉县尔穷铜金矿床地质特征及其成因意义[J]. 地球学报, 33(4): 588~600.
- 耿全如, 潘桂棠, 王立全, 等. 2011. 班公湖-怒江带-羌塘地块特提斯演化与成矿地质背景[J]. 地质通报, 30(8): 1261~1274.
- 康志强, 许继峰, 王保第, 等. 2010. 拉萨地块北部去申拉组火山岩: 班公湖-怒江特提斯洋南向俯冲的产物[J]. 岩石学报, 26(10): 3106~3116.
- 梁祥济. 1994. 钙铝-钙铁系列石榴子石的特征及其交代机理[J]. 岩石矿物学杂志, 13(4): 342~352.
- 李光明, 李金祥, 秦克章, 等. 2007. 西藏班公湖带多不杂超大型富金斑岩铜矿的高温高盐高氧化成矿流体——流体包裹体证据[J]. 岩石学报, 23(5): 935~952.
- 李志军, 唐菊兴, 姚晓峰, 等. 2011a. 藏北阿里地区新发现的尔穷铜金多金属矿床地质特征及其找矿前景[J]. 矿床地质, 30(6): 1149~1153.
- 李志军, 唐菊兴, 姚晓峰, 等. 2011b. 班公湖-怒江成矿带西段尔穷铜金矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 38(6): 678~683.
- 雷传扬, 李志军, 张志, 等. 2012. 西藏尔穷铜金矿床花岗岩类的地球化学特征及其地球动力学意义[J]. 地球学报, 33(4): 601~612.
- 潘兆橧, 赵爱醒, 潘铁红. 1993. 结晶学与矿物学[M]. 北京: 地质出版社.
- 曲晓明, 辛洪波. 2006. 藏西班公湖斑岩铜矿带的形成时代与成矿构造环境[J]. 地质通报, 25(7): 792~799.
- 宋俊龙, 李志军, 姚晓峰, 等. 2012. 西藏革吉县尔穷铜金矿矽卡岩特征及成因意义[J]. 地球学报, 33(4): 703~712.
- 唐晓倩, 王国芝, 秦志鹏, 等. 2012. 西藏甲玛铜多金属矿石榴子石矿物学特征及成因意义[J]. 地球学报, 33(4): 633~640.
- 王冠民, 钟建华. 2002. 班公湖-怒江构造带西段三叠系-侏罗系构造-沉积演化[J]. 地质论评, 48(3): 297~303.
- 王友. 2010. 西藏革吉县尔穷铜金矿床矿石特征研究(硕士论文)[D]. 成都: 成都理工大学.
- 王焕, 唐菊兴, 王立强, 等. 2011. 西藏墨竹工卡地区甲玛铜多金属矿床矽卡岩矿物学特征及其地质意义[J]. 地质通报, 30(5): 783~797.
- 姚晓峰, 唐菊兴, 王友, 等. 2011. 西藏尔穷铜金矿床矿物特征研究[J]. 地质与勘探, 47(6): 1018~1025.
- 姚晓峰, 唐菊兴, 李志军, 等. 2013. 班公湖-怒江带西段尔穷矽卡岩型铜金矿含矿母岩成岩时代的重新厘定及其地质意义[J]. 地质论评, 59(1): 193~200.
- 张志, 唐菊兴, 何林, 等. 2011. 西藏班怒带尔穷、嘎拉勒铜金矿床成矿母岩岩石化学特征初步对比研究[J]. 矿物学报, 增刊: 669~670.
- 张志, 唐菊兴, 杨毅, 等. 2012. 西藏尔穷铜金矿元素空间分布规律及地球化学勘查模型[J]. 地球学报, 33(4): 663~672.
- 赵一鸣. 1990. 中国夕卡岩矿床[M]. 北京: 地质出版社.
- 赵一鸣, 张轶南, 林文蔚. 1997. 我国矽卡岩矿床中的辉石和似辉石特征及其与金属矿化的关系[J]. 矿床地质, 16(4): 318~329.
- 张德全, 雷蕴芬, 罗太阳. 1992. 白音诺铅锌矿床矿化分带及矿液流向[J]. 矿床地质, 11(3): 203~212.