

西藏浦桑果铅锌多金属矿床矽卡岩矿物学特征及其地质意义

李 壮^{1,2}, 唐菊兴¹, 王立强¹, 李海峰², 刘文元³

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 国土资源部深部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 福州大学 紫金矿业学院, 矿产资源研究中心实验室, 福建 福州 350108)

摘 要: 西藏浦桑果铅锌多金属矿床位于南冈底斯成矿带火山岩岩浆弧内, 矿区矽卡岩型铅锌矿体主要呈似层状和透镜状近东西向赋存于白垩系塔克那组第4岩性段矽卡岩化大理岩中, 矽卡岩矿物较发育。为进一步查明矽卡岩矿物种属及矽卡岩类型, 剖析矽卡岩的形成环境及其与成矿的关系, 在对矽卡岩矿物系统的显微镜下鉴定基础上, 利用电子探针针对区内主要矽卡岩矿物化学成分进行了系统分析。结果表明, 石榴子石主要为非连续的钙铁榴石-钙铝榴石类质同像系列($\text{And}_{47.39-98.17}\text{Gro}_{0.59-50.22}\text{Ura} + \text{Pyr} + \text{Spe}_{0-3.53}$), 且早期主要形成钙铁榴石, 部分钙铁榴石含锰质较高; 单斜辉石主要为钙铁辉石-锰钙辉石-透辉石类质同像系列($\text{Hd}_{37.91-74.16}\text{Jo}_{0.91-61.66}\text{Di}_{0.43-46.07}$); 似辉石主要为硅灰石, 端员组分为 $\text{Wo}_{99.09-99.26}\text{En}_{0.50-0.56}\text{Fs}_{0.13-0.24}$; 角闪石主要为镁角闪石, 具钙质角闪石属性; 绿帘石贫铁、镁而富铝、钙; 绿泥石属于密绿泥石类。矿床矽卡岩矿物组合特征表明, 浦桑果矿床矽卡岩兼具钙质矽卡岩和锰质矽卡岩的特征。早期矽卡岩形成于高温、偏碱性、强氧化的开放体系中, 成矿流体具有较高氧逸度。锰质矽卡岩矿物特征及独立银矿物的存在综合表明矿区具有银矿找矿潜力, 为下步找矿工作提供了思路 and 方向。

关键词: 铅锌矿; 钙质矽卡岩; 锰质矽卡岩; 浦桑果; 西藏

中图分类号: P611; P575

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)02-0241-18

Mineralogical characteristics of skarn in the Pusangguo Pb-Zn polymetallic deposit of Tibet and their geological significance

LI Zhuang^{1,2}, TANG Ju-xing¹, WANG Li-qiang¹, LI Hai-feng² and LIU Wen-yuan

(1. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. College of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Laboratory of Resources Research Center, Institute of Zijin Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The Pusangguo lead-zinc polymetallic deposit is located in the volcanic-magma arc of the southern Gangdise metallogenic belt, Tibet. The skarn type orebodies mainly occur in nearly bedded and lenticular shapes in nearly east-west direction and are hosted in the skarnized marble of the Cretaceous Takena Formation, with lots of skarn minerals developed in this deposit. In order to further identify the species of skarn minerals and types of the skarn and analyze the formation environment of the skarn and its relationship with mineralization types, the authors analyzed the chemical composition of the skarn minerals by using the electron microprobe technology and on the basis

收稿日期: 2017-04-27; 授受日期: 2018-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41403040); 中国地质调查局地质调查项目(12120113036200, 12120114050901)

作者简介: 李 壮(1989-), 男, 汉族, 博士研究生, 矿产普查与勘探专业, 主要从事固体矿产勘查与评价工作, E-mail: 18108092867@163.com。

of the systematic microscope observation. According to the results obtained, the garnet is mainly composed of discontinuous isomorphism of andradite and grossular ($\text{And}_{47.39 \sim 98.17} \text{Gro}_{0.59 \sim 50.22} \text{Ura} + \text{Pyr} + \text{Spe}_{0 \sim 3.53}$), the clinopyroxene is mainly composed of hedenbergite-johannsinite-diopside ($\text{Hd}_{37.91 \sim 74.16} \text{Jo}_{0.91 \sim 61.66} \text{Di}_{0.43 \sim 46.07}$), the pyroxenoid is mainly wollastonite, and the endmember compositions are $\text{Wo}_{99.09 \sim 99.26} \text{En}_{0.50 \sim 0.56} \text{Fs}_{0.13 \sim 0.24}$. In addition, the hornblendes are mainly magnesium hornblendes and have the features of calcium hornblende, the epidote is relatively enriched in aluminum and calcium but poor in iron and magnesium, and the chlorite belongs to the type of pycnochlorite. The skarn mineral assemblage characteristics indicate that the skarns in the Pusangguo deposit have the features of both calcium-skarn and manganese-skarn. At the early stage of skarn mineralization, the skarns were mainly formed under the conditions of high temperature, pH, oxygen fugacity, and the ore-forming fluid had high oxygen fugacity. Manganese skarn mineral characteristics and the single silver minerals show that this deposit has the silver ore prospecting potential, which can serve as the next step prospecting direction in the future exploration.

Key words: lead-zinc deposit; calcium skarn; manganese skarn; Pusangguo; Tibet

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41403040); Project of China Geological Survey (12120113036200, 12120114050901)

矽卡岩型矿床是 Cu、Fe、Pb、Zn、W、Ag、Au 等金属资源最重要的来源之一,一直吸引着国内外学者进行广泛深入的研究(Zhao *et al.*, 2003; Meinert *et al.*, 2005; Kamvong and Zaw, 2009; Zhang *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2017)。西藏冈底斯 Cu-Pb-Zn-Ag-Fe-Mo-W 多金属成矿带东西延伸近 400 km,带内已发现超过 20 多个 Mo-Cu-W 和 Pb-Zn-Ag 矿床,包括驱龙、甲玛、雄村、邦铺、亚贵拉、蒙亚啊、纳如松多、恰功等大型-超大型矿床(Yang *et al.*, 2009; Ying *et al.*, 2014; Tang *et al.*, 2015; Zhao *et al.*, 2015, 2016; Wang *et al.*, 2015; Zheng *et al.*, 2015)。浦桑果铅锌多金属矿床位于冈底斯成矿带内,属近年来勘查评价发现的规模可达中-大型的多金属矿床。前人主要针对矿床金属硫化物特征(杨海锐, 2013)、成矿作用(崔晓亮, 2013)、矿床成因(李小亮等, 2011)、成矿岩体(康浩然, 2016)、侵入岩地球化学特征(崔晓亮等, 2012)等方面进行了一定的研究,矿床的研究程度总体较低,而对于矿床矽卡岩矿物学方面的研究尚属空缺。本文选取矿床主要矽卡岩矿物作为研究对象,对矽卡岩矿物种属进行识别,厘定矽卡岩类型并对其形成环境进行分析,提高了该矿床的研究程度,为下一步找矿勘探提供资料线索。

1 区域成矿背景

西藏浦桑果铅锌多金属矿床大地构造位置位于南冈底斯成矿带火山岩岩浆弧内(图1)。区域内出露地层从侏罗系到第四系皆有分布,由老到新依次为昂杰组(C_2a)、下拉组(P_2x)、雄村组($\text{J}_{1-2}x$)、麻木下组(J_2K_1m)、比马组(K_1b)、楚木龙组(K_1c)、塔克那组(K_1t)、昂仁组($\text{K}_{1-2}a$)、设兴组(K_2s)、秋乌组(E_2q)、典中组(E_1d)、年波组(E_2n)、日贡拉组(E_3r)、大竹卡组($\text{E}_3\text{-N}_1d$)、芒乡组(N_1m)、嘎扎村组(N_2g)、宗当村组(N_2z)及第四系(Q)。其中,塔克那组地层呈东西向展布,零星出露,岩性主要为结晶灰岩、角砾状灰岩、钙质砂板岩等;典中组地层主要为一套中基性-中性火山熔岩,包括安山岩、英安岩、火山角砾岩、晶屑凝灰岩等。受南侧雅鲁藏布江缝合带、北侧班公湖-怒江缝合带构造影响,区域内发育一系列近东西向的断裂构造及南北向次级断裂构造、环形构造体系(郑有业等, 2006)^①。区内岩浆岩发育并广泛出露,主要包括晚三叠世-中侏罗世花岗岩(215 ~ 175 Ma)(张宏飞等, 2007; Lang *et al.*, 2014; Tang *et al.*, 2015); 晚侏罗世-白垩纪花岗岩和中酸性火山岩(160 ~ 80 Ma)(朱弟成等, 2008); 古

① 郑有业, 樊子琛, 高顺宝, 等. 2006. 西藏雅鲁藏布江成矿区东段铜多金属矿勘查报告(西藏自治区地质调查院二分院).

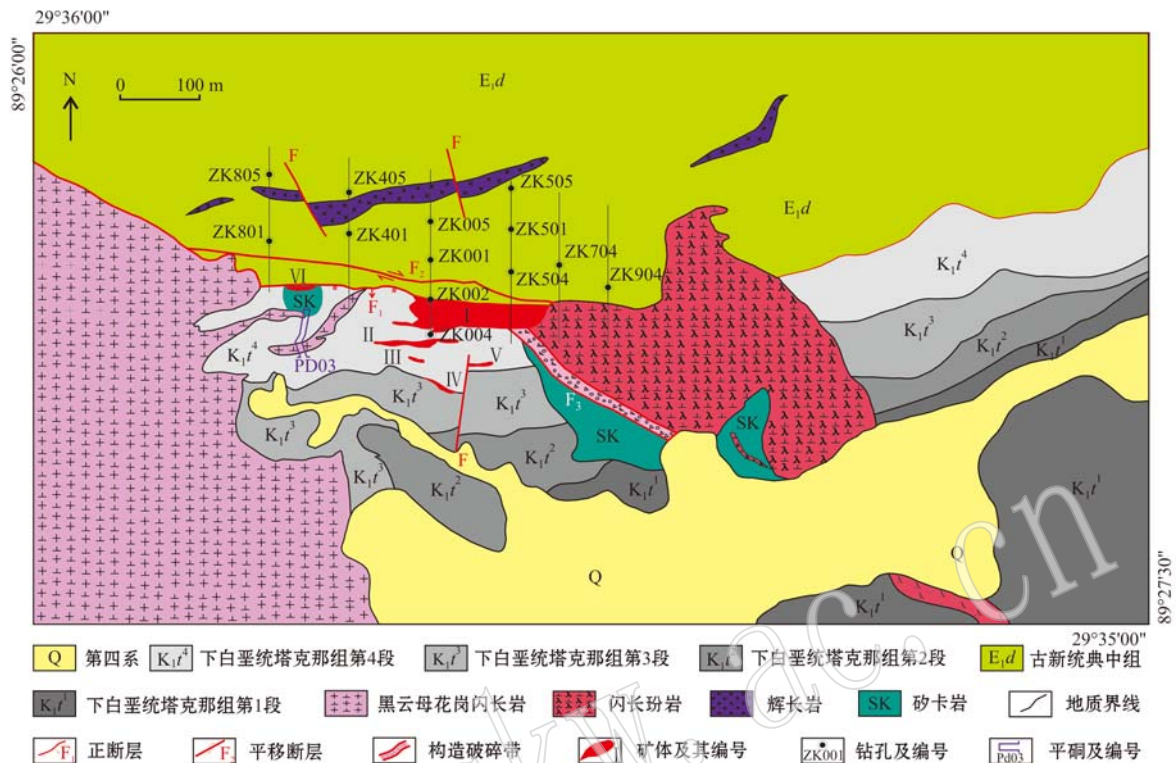


图2 浦桑果矿床矿区地质简图[据崔晓亮(2013)修改]

Fig. 2 Simplified geological map of the Pusangguo polymetallic deposit (modified after Cui Xiaoliang, 2013)

构造主要有块状构造、稠密浸染状构造、稀疏浸染状构造、条带状层纹状构造、角砾状构造及团斑状构造等。矿石结构主要包括自形晶粒状结构、它形-半自形晶粒状结构、乳滴状结构、交代残余结构、固溶体分离结构、包含结构, 次为碎裂结构、揉皱结构等。主要的矿石矿物为黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、辉钼矿、次为针硫铋铅矿、硫铋铜铅矿、蓝辉铜矿及斑铜矿等; 主要的脉石矿物为石榴子石、硅灰石、钙铁辉石、透辉石、角闪石、绿帘石、绿泥石等矽卡岩矿物, 次为石英、方解石等。

围岩蚀变类型主要为矽卡岩化、大理岩化, 次为硅化、碳酸盐化、角岩化、绿帘石化、绿泥石化等热液蚀变类型。根据矿体野外产出特征及矿物共生组合特征, 可将浦桑果矿床的成矿期次初步划分为矽卡岩成矿期、热液成矿期和表生成矿期 3 个成矿期, 矽卡岩成矿期可进一步划分为早期矽卡岩阶段和晚期矽卡岩阶段两个成矿阶段, 热液成矿期划分为铁铜硫化物阶段、铜钴镍硫化物阶段和铅锌硫化物阶段 3

个成矿阶段。

3 样品及测试分析

本次研究样品主要采自矿区钻孔 ZK501、ZK002、ZK401、ZK805 共 4 个钻孔及平硐 PD03 中的矽卡岩, 主要包括石榴子石矽卡岩、石榴子石辉石矽卡岩、石榴子石绿帘石矽卡岩、硅灰石矽卡岩、角闪石绿泥石矽卡岩等(表 1)。选择典型矽卡岩样品, 磨制成标准电子探针片, 利用莱卡 DM2500P 偏光显微镜进行镜下观察和照相圈点, 并对石榴子石、辉石、硅灰石、角闪石、绿帘石、绿泥石等 6 种矽卡岩矿物进行了电子探针成分分析。电子探针分析实验在福州大学紫金矿业学院矿产资源研究中心实验室完成, 分析仪器型号为 JXA-8230 电子探针, 测试电压 15 kV, 电流为 20 nA, 实际分析束斑直径 5 μm , 检出限及标定矿物依据电子探针定量分析方法通则 (GB/T15074-2008)。

表 1 浦桑果铅锌多金属矿床矽卡岩采样位置及样品描述

Table 1 Sampling location and description of skarn samples from the Pusangguo lead-zinc polymetallic deposit

样品编号	样品名称	采样位置	产出矿体	样品手标本及镜下特征
ZK501-244.4	石榴子石矽卡岩	ZK501 244.4 m 处	I	浅棕色、黄褐色，自形晶粒状结构，块状构造，可见粒径约 1 cm 的自形石榴子石颗粒。镜下局部可见石榴子石发育环带结构，且裂隙处发育黄铜矿化、闪锌矿化。
ZK002-58.6	绿帘石矽卡岩	ZK002 58.6 m 处	I	黄绿色，细粒变晶结构，块状构造。主要脉石矿物为绿帘石、石英、方解石等。金属矿物可见浸染状方铅矿、闪锌矿。显微镜下绿帘石呈它形晶粒状结构，具鲜艳干涉色。
ZK002-103.4	石榴子石绿帘石矽卡岩	ZK002 103.4 m 处	I	黄褐色、浅黄绿色，具粒状结构，浸染状构造。镜下鉴定主要由石榴子石、绿帘石等矽卡岩矿物组成，可见绿帘石交代石榴子石现象，颗粒间隙处发育黄铜矿、闪锌矿。
ZK002-198.5	石榴子石辉石矽卡岩	ZK002 198.5 m 处	I	棕色，粒状结构，块状构造。镜下鉴定主要由石榴子石、单斜辉石及少量角闪石等矽卡岩矿物组成，可见角闪石交代辉石现象。裂隙处发育闪锌矿化。
ZK401-55.8	角闪石绿帘石绿泥石矽卡岩	ZK401 55.8 m 处	II	浅绿色、浅灰绿色，不等粒粒状结构，块状构造。镜下鉴定主要由角闪石、绿帘石和绿泥石等矽卡岩矿物组成。角闪石多为长柱状，绿帘石、绿泥石多为它形晶集合体，角闪石被绿帘石交代，发育自形黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿化。
ZK401-105.2	绿帘石绿泥石矽卡岩	ZK401 105.2 m 处	II	呈灰绿色，不等粒变晶结构，块状构造。镜下鉴定主要由绿帘石、绿泥石、石英等矿物组成。绿帘石呈它形晶粒状结构，绿泥石呈集合体。
ZK401-206.0	石榴子石辉石硅灰石矽卡岩	ZK401- 206 m 处	II	浅黄绿色、浅棕色，块状构造。镜下鉴定主要由自形石榴子石、钙铁辉石、透辉石、硅灰石等矽卡岩矿物组成。矿物裂隙处发育黄铜矿、斑铜矿、闪锌矿化。
ZK805-49.2	角闪石绿泥石矽卡岩	ZK805- 49.2 m 处	VI	浅绿色，不等粒变晶结构，脉状构造。镜下鉴定主要由角闪石、绿泥石及少量绿帘石等矽卡岩矿物组成，可见绿泥石交代角闪石研边部发育。裂隙处发育闪锌矿化。
ZK805-150.2	辉石矽卡岩	ZK805 150.2 m 处	VI	暗绿色，块状构造。镜下鉴定主要由钙铁辉石、透辉石等矽卡岩矿物组成。辉石裂隙处发育黄铜矿、自形黄铁矿化。
PD03-4	硅灰石矽卡岩	PD03		灰白色，不等粒变晶结构，块状构造。镜下鉴定主要由硅灰石、少量角闪石等矽卡岩矿物组成。裂隙处发育方铅矿、闪锌矿化。

4 矽卡岩矿物学特征

浦桑果矿床矽卡岩矿物广泛发育，与成矿密切相关。根据主要的矽卡岩矿物组合，可将矿床矽卡岩类型划分为石榴子石矽卡岩、石榴子石-硅灰石矽卡岩、辉石-石榴子石矽卡岩、角闪石-绿帘石矽卡岩、绿帘石-绿泥石矽卡岩等，主要的矽卡岩矿物为石榴子石、辉石、硅灰石、角闪石、绿帘石、绿泥石。

4.1 石榴子石

石榴子石在浦桑果矿床中广泛发育，主要见于闪长玢岩与塔克那组第 4 岩性段的接触带部位。野外手标本中，石榴子石主要为棕色、黄棕色（图 3a），其次为浅黄色、浅翠绿色等（图 3b）。主要呈自形晶粒状结构，粒径约 0.5 ~ 2 cm 不等，次为它形细粒状及细脉状（脉宽 2 ~ 3 mm）发育。单偏光下颜色为浅黄棕色，具正极高突起，呈自形晶粒状结构，粒径约 0.5 ~ 1 mm，发育铅锌矿化和环带结构（图 3e），在正交偏光下，呈现出宽窄不一致黑白相间的光性异常

（图 3f）。

本次研究共对 18 个石榴子石点位进行了电子探针分析，其成分组成及端员组分结果见表 2。由表 2 可知，石榴子石中 SiO₂ 含量变化范围为 33.94% ~ 37.27%，平均值为 35.05%；CaO 含量为 32.51% ~ 35.00%，平均值为 33.42%；TFeO 含量为 14.51% ~ 28.34%，平均值为 25.36%；Al₂O₃ 含量为 0.29% ~ 10.86%，平均值为 2.56%；MnO、MgO、TiO₂、Cr₂O₃ 含量均较低。通过计算得到石榴子石阳离子数和端员组分，结果表明浦桑果矿床石榴子石端员主要为钙铁榴石，And 值变化范围为 47.39% ~ 98.17%，平均值为 87.34%；次为少量钙铝榴石，Gro 值变化于 0.59% ~ 50.22% 之间，平均值为 10.88%；含极少量的钙铬榴石、镁铝榴石和锰铝榴石，Ura + Pyr + Spe 值变化于 0 ~ 3.53% 之间，平均值为 1.52%，属于钙铁榴石-钙铝榴石类质同像系列（And_{47.39~98.17}Gro_{0.59~50.22}Ura + Pyr + Spe_{0~3.53}），钙铁榴石与钙铝榴石含量呈明显的线性负相关性（图 4a）。石榴子石端员组分图解（图 4b）同样显示，

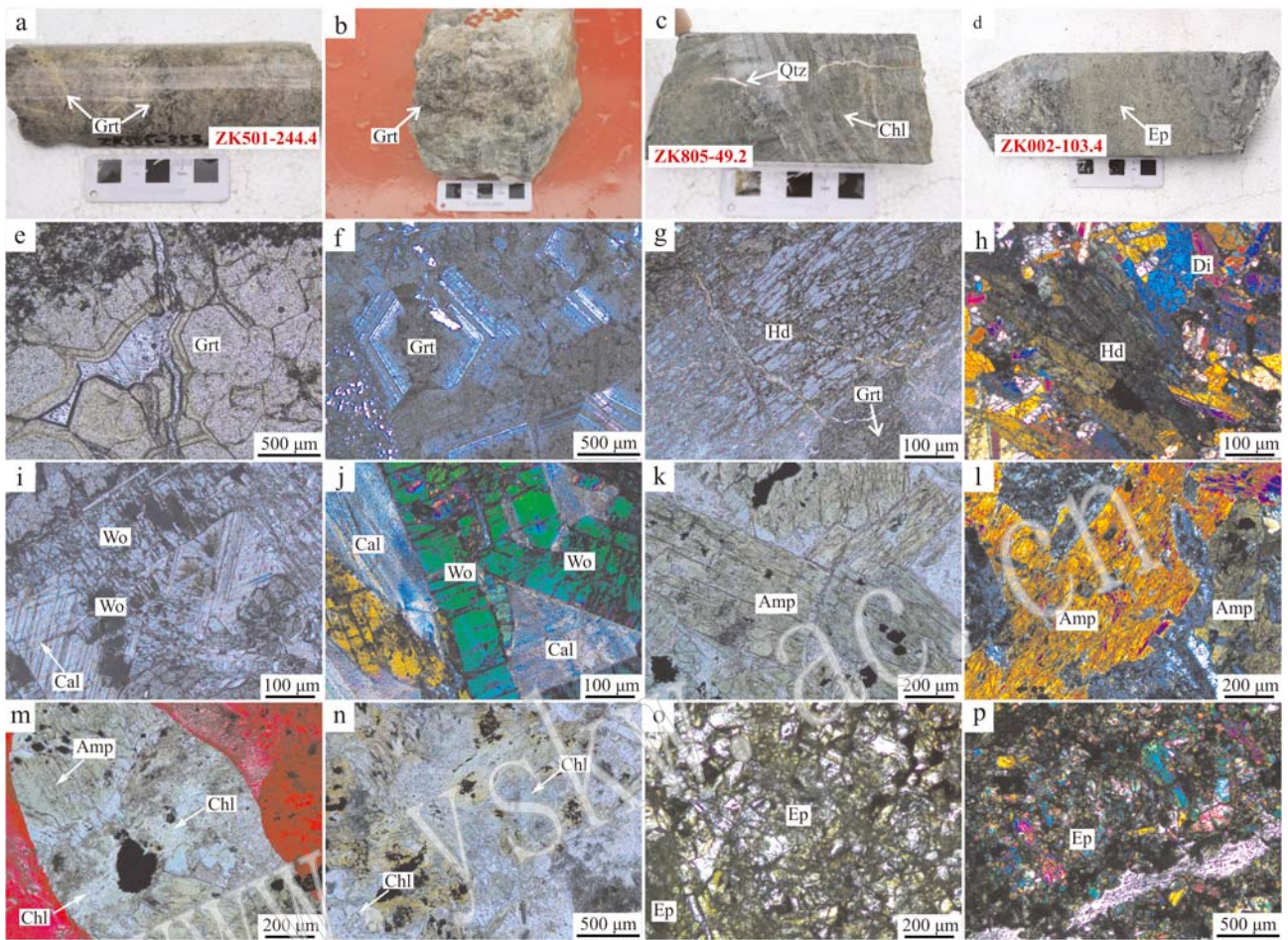


图3 浦桑果铅锌多金属矿床矽卡岩矿物特征

Fig. 3 Characteristics of skarn minerals in the Pusangguo lead-zinc polymetallic deposit

Grt—石榴子石; Ep—绿帘石; Chl—绿泥石; Hd—钙铁辉石; Di—透辉石; Wo—硅灰石; Amp—角闪石; Cal—方解石; Qtz—石英
Grt—garnet; Ep—epidote; Chl—chlorite; Hd—hedenbergite; Di—diopside; Wo—wollastonite; Amp—amphibole; Cal—calcite; Qtz—quartz

浦桑果矿床石榴子石主要为钙铁榴石,属钙铁榴石—钙铝榴石系列,且端员组分与世界绝大多数大型矽卡岩型铅锌矿床石榴子石分布区域一致。

在图5中,石榴子石 Al_2O_3 与 TFeO 含量呈明显的线性负相关性(图5a), SiO_2 与 CaO 含量呈正相关性(图5b)。石榴子石成分中随着 Fe 含量的增加, Al 含量具有明显的降低趋势,这可能反映了钙铁榴石—钙铝榴石固溶体成分的变化特征(应立娟等,2012)。浦桑果矿床石榴子石环带结构比较发育,又对部分石榴子石环带颗粒进行了电子探针成分分析(图6a),分析结果表明,正交偏光下观察发现的环带颜色深浅的变化系其组成所含 Al_2O_3 、 TFeO 含量不同所致。以样品 ZK002-198.5 为例,如图6所示,浅色环带和深色环带的成分存在差异,总体表现为浅色环带(图6中点1、3、5)中的 TFeO 含

量比深色环带(图6中点2、4、6)中 TFeO 含量偏低,而深色环带中的 Al_2O_3 含量比浅色环带中偏低(图6b)。浅色环带到深色环带, SiO_2 和 CaO 含量均相对稳定且呈现出一致的变化关系(图6a、6b)。由核部到边部,具有钙铁榴石向钙铝榴石逐渐过渡变化的趋势,这反映出随着外界成矿物理化学环境的变化,矿质逐渐析出沉淀的过程(周振华等,2011)。

4.2 辉石

辉石是浦桑果矿床矽卡岩中的组成矿物之一,常与石榴子石、角闪石、硅灰石等矽卡岩矿物共生,其含量分布不均匀,多以短柱状、粒状集合体发育,具半自形—它形晶结构。手标本中,辉石多以透辉石为主,颜色为浅绿色、墨绿色为主。单偏光下,辉石多为柱状集合体(图3g),正交偏光下干涉色可达一级橙黄—二级蓝绿色(图3h),部分辉石发育后期碳酸

表 2 浦桑果铅锌多金属矿床石榴子石电子探针分析结果和端员组分
Table 2 Electron microprobe analyses, ion proportions and end members of representative garnet from the Pusangguo Pb-Zn polymetallic deposit

组分	ZK002-103.4								ZK501-244.4								ZK401-206.0								ZK002-198.5								$u_B/\%$
	01	02	03	01	02	03	04	05	01	02	03	04	05	01	02	03	04	05	01	02	03	04	05	06	01	02	03	04	05	06	07	08	
SiO ₂	36.48	36.01	34.74	34.57	37.27	35.57	35.55	35.61	34.69	34.66	34.50	34.69	34.54	34.29	33.94	35.27	34.28	34.54	34.25														
TiO ₂	0.37	0.12	-	0.06	0.17	-	0.01	0.03	0.02	-	0.06	0.07	0.05	0.05	0.11	-	0.06	-	0.00														
Al ₂ O ₃	6.03	2.16	-	0.31	10.86	4.64	6.29	0.69	1.70	1.48	1.21	1.27	1.22	1.22	0.29	1.61	0.68	2.68	0.39														
Cr ₂ O ₃	0.02	-	0.00	-	-	-	-	-	-	0.01	-	0.05	-	-	0.00	0.02	-	-	-														
TFeO	20.70	26.15	28.18	28.03	14.51	22.35	20.20	27.37	26.29	26.90	26.49	26.82	27.14	27.69	26.55	27.36	25.35	28.34															
MnO	0.10	0.08	0.45	0.63	0.67	0.38	0.48	0.38	0.76	1.26	1.45	1.13	0.64	0.47	0.29	0.52	0.80	0.88															
MgO	0.20	0.32	0.03	0.07	0.23	0.08	0.05	0.08	0.02	0.03	0.03	0.01	0.03	0.01	0.10	-	0.01	0.01	0.00														
CaO	34.18	33.83	33.21	33.20	35.00	34.15	34.53	33.41	32.96	32.60	32.66	32.51	33.14	33.18	33.66	33.15	33.43	32.77															
Total	98.08	98.69	96.61	96.87	98.72	97.16	97.12	97.57	96.44	96.94	96.40	96.55	96.51	95.69	97.49	96.04	96.82	96.64															
Si	2.97	2.97	2.96	2.94	2.97	2.96	2.94	2.99	2.94	2.94	2.94	2.95	2.92	2.92	2.92	2.96	2.94	2.92	2.92														
Ti	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00														
Al	0.58	0.21	0.00	0.03	1.02	0.45	0.61	0.07	0.17	0.15	0.12	0.13	0.12	0.12	0.03	0.16	0.07	0.27	0.04														
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00														
Fe ³⁺	1.41	1.80	2.01	1.99	0.97	1.55	1.40	1.92	1.87	1.89	1.89	1.90	1.93	2.00	1.86	1.96	1.79	2.01															
Fe ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01														
Mn	0.01	0.01	0.03	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.05	0.09	0.10	0.08	0.05	0.03	0.02	0.02	0.04	0.06	0.06														
Mg	0.02	0.04	0.00	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00														
Ca	2.99	2.99	3.03	3.02	2.99	3.04	3.06	3.00	3.00	2.96	2.98	2.96	3.02	3.06	3.02	3.02	3.04	3.02	3.00														
Ura	0.05	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.16	0.00	0.01	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00														
And	70.15	89.15	98.17	97.15	47.39	75.73	67.62	94.75	91.64	92.73	91.61	93.59	94.01	96.56	91.35	95.45	87.03	98.08															
Pyr	0.80	1.30	0.11	0.28	0.90	0.30	0.21	0.33	0.06	0.13	0.14	0.04	0.12	0.05	0.39	0.00	0.05	0.02															
Spe	0.24	0.19	1.05	1.46	1.49	0.86	1.08	0.88	1.80	2.95	3.39	2.68	1.50	1.11	0.66	1.22	1.86	2.07															
Gro	28.76	9.36	0.65	1.11	50.22	23.11	31.09	4.03	6.49	3.78	4.87	3.39	4.24	2.28	7.54	3.33	11.03	0.59															

注: And—钙铁榴石; Gro—钙铝榴石; Pyr—镁铝榴石; Spe—锰铝榴石; - 为低于检测限; TFeO 为全铁含量; 以 12 个 O 原子为基准计算的阳离子数。

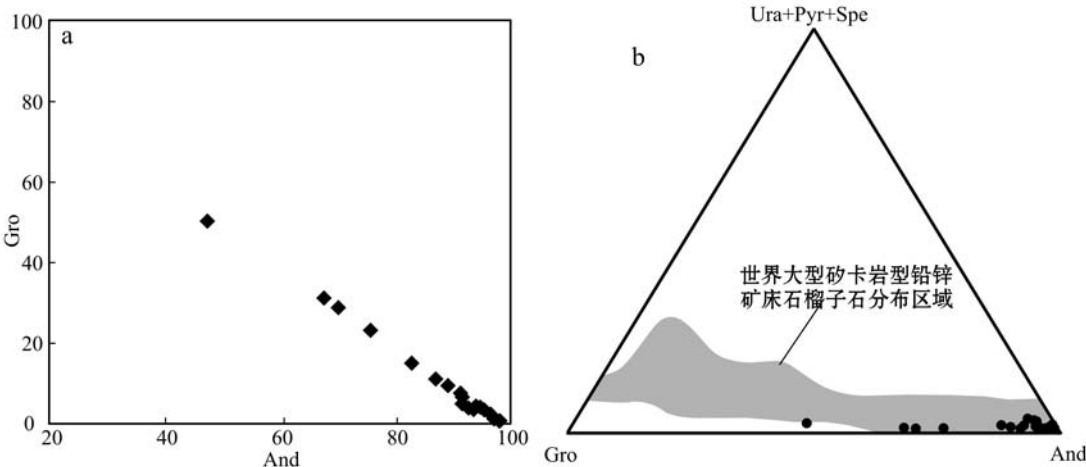


图 4 浦桑果矿床石榴子石 Gro - And 相关性图解(a)和端员组分图解(b)
Fig. 4 The And-Gro correlation diagram (a) and endmember diagram (b) of garnets from the Pusangguo deposit
And—钙铁榴石; Gro—钙铝榴石; Ura—钙铬榴石; Pyr—镁铝榴石; Spe—锰铝榴石
And—andradite; Gro—grossularite; Ura—uvarovite; Pyr—pyrope; Spe—spessartite

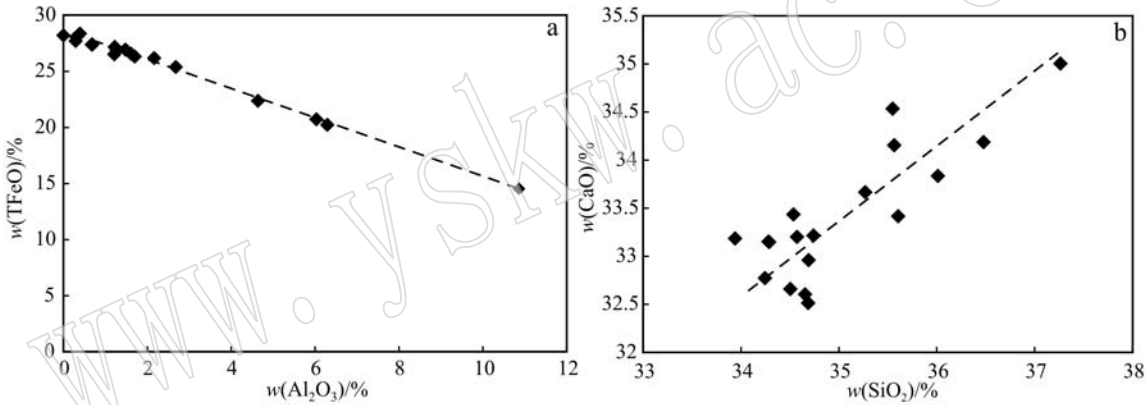


图 5 浦桑果矿床石榴子石 TFeO - Al₂O₃(a) 和 CaO - SiO₂(b) 相关性图解
Fig. 5 TFeO - Al₂O₃(a) and CaO - SiO₂(b) correlation diagrams of garnets from the Pusangguo deposit

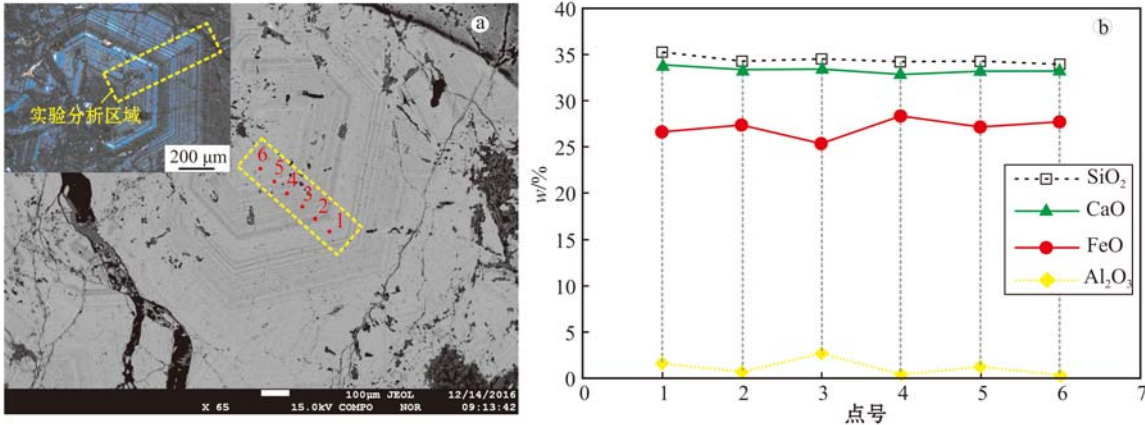


图 6 浦桑果矿床石榴子石环带结构成分剖面图
Fig. 6 Compositional section of garnets with zoning structure from the Pusangguo deposit

盐化等蚀变。
辉石电子探针分析结果和端员组分见表 3。由表 3 可知, 辉石中 SiO₂ 含量为 47.06% ~ 50.62% , 平均值为 48.59% ;CaO 含量为 22.29% ~ 23.80% ,

表3 浦桑果铅锌多金属矿床辉石电子探针分析结果和端员组分

 $w_B/\%$

Table 3 Electron microprobe analyses, ion proportions and end members of representative pyroxene from the Pusangguo Pb-Zn polymetallic deposit

组分	ZK805-150.2			ZK002-198.5					ZK401-206.0			
	01	02	03	01	02	03	04	05	01	02	03	04
SiO ₂	49.30	49.13	49.22	47.98	48.20	47.06	47.69	47.71	48.01	47.79	50.39	50.62
TiO ₂	0.00	0.10	0.16	—	0.00	—	0.05	—	—	0.00	—	0.01
Al ₂ O ₃	0.50	0.49	0.61	0.09	0.13	0.77	0.44	0.50	0.04	0.23	0.18	0.15
Cr ₂ O ₃	0.01	—	0.03	—	—	—	—	0.02	—	0.00	—	—
TFeO	21.58	22.76	21.53	17.72	18.54	15.74	18.99	18.28	11.63	15.46	13.77	13.23
MnO	0.37	0.40	0.28	10.85	10.25	12.62	8.79	9.66	18.58	14.07	3.20	3.25
MgO	5.19	4.20	5.08	0.57	0.50	0.43	0.54	0.56	0.07	0.17	7.29	7.90
CaO	22.71	22.52	22.79	22.91	22.96	22.29	22.71	22.68	22.31	22.29	23.39	23.80
Na ₂ O	0.15	0.21	0.21	0.06	0.09	0.17	0.09	0.11	0.02	0.05	0.10	0.07
K ₂ O	0.01	—	—	0.00	—	0.02	—	—	—	0.00	—	—
Total	99.82	99.81	99.91	100.17	100.66	99.08	99.30	99.53	100.65	100.06	98.32	99.03
Si	1.97	1.98	1.97	1.98	1.98	1.96	1.98	1.97	1.98	1.98	2.00	1.99
Al ^{IV}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ^{VI}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07	0.08	0.05	0.05	0.06	0.06	0.01	0.03
Fe ²⁺	0.65	0.71	0.65	0.54	0.56	0.46	0.61	0.57	0.34	0.47	0.45	0.40
Mn	0.01	0.01	0.01	0.38	0.36	0.45	0.31	0.34	0.65	0.49	0.11	0.11
Mg	0.31	0.25	0.30	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	0.01	0.43	0.46
Ca	0.97	0.97	0.98	1.01	1.01	0.99	1.01	1.01	0.99	0.99	0.99	1.00
Na	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Di	29.76	24.52	29.47	3.42	3.02	2.60	3.33	3.47	0.43	1.04	43.33	46.07
Hd	69.05	74.16	69.63	59.48	62.06	53.58	65.73	62.79	37.91	51.39	45.89	43.16
Jo	1.19	1.32	0.91	37.10	34.92	43.82	30.94	33.75	61.66	47.58	10.79	10.76

注: Di—透辉石; Hd—钙铁辉石; Jo—锰钙辉石; “—”表示低于检测限, TFeO 为全铁含量; 以 6 个氧原子和 4 个阳离子为基准。

平均值为 22.78%; TFeO 含量为 11.63% ~ 22.76%, 平均值为 17.44%; MgO 含量为 0.07% ~ 7.9%, 平均值为 2.71%; MnO 含量为 0.28% ~ 18.58%, 平均值为 7.69%; 含极少量的 Na₂O、K₂O、TiO₂、Al₂O₃ 和 Cr₂O₃。辉石主要为钙铁辉石—锰钙辉石—透辉石类质同像系列(Hd_{37.91~74.16}Jo_{0.91~61.66}Di_{0.43~46.07}), 其中, 钙铁辉石端员组分(Hd)为 37.91% ~ 74.16%, 平均值为 57.90%; 锰钙辉石端员组分(Jo)为 0.91% ~ 61.66%, 平均值为 26.23%; 透辉石端员组分(Di)为 0.43% ~ 46.07%, 平均值为 15.87%。辉石端员组分图解(图 7a)亦显示辉石主要为钙铁辉石—锰钙辉石—透辉石的类质同像系列。

4.3 硅灰石

硅灰石在手标本中呈灰白色、乳白色, 多为柱状、放射状结合体, 并与透辉石、方解石等矿物共伴

生发育, 粒径常小于 0.1 mm。单偏光下, 硅灰石具正中—高突起, 无色透明, 消光角较小(图 3i)。正交偏光下, 硅灰石具橙黄—浅绿色干涉色(图 3j)。由电子探针分析结果(表 4)和端员组分图解(图 7b)可知, 硅灰石成分较纯, 主要为 SiO₂ 和 CaO, SiO₂ 含量为 51.23% ~ 51.41%, 平均值为 51.31%; CaO 含量为 48.09% ~ 48.28%, 平均值为 48.19%; 另含极少量的 MgO、MnO、FeO 等。硅灰石端员组分(Wo)为 99.09% ~ 99.26%, 平均为 99.16%; 顽火辉石端员组分(En)为 0.50% ~ 0.56%, 平均值为 0.52%; 斜方铁辉石端员组分(Fs)为 0.13% ~ 0.24%, 平均为 0.21%。

4.4 角闪石

手标本中角闪石颜色主要为灰绿色—墨绿色, 多呈短柱状集合体, 单颗粒较小。单偏光下, 角闪石多

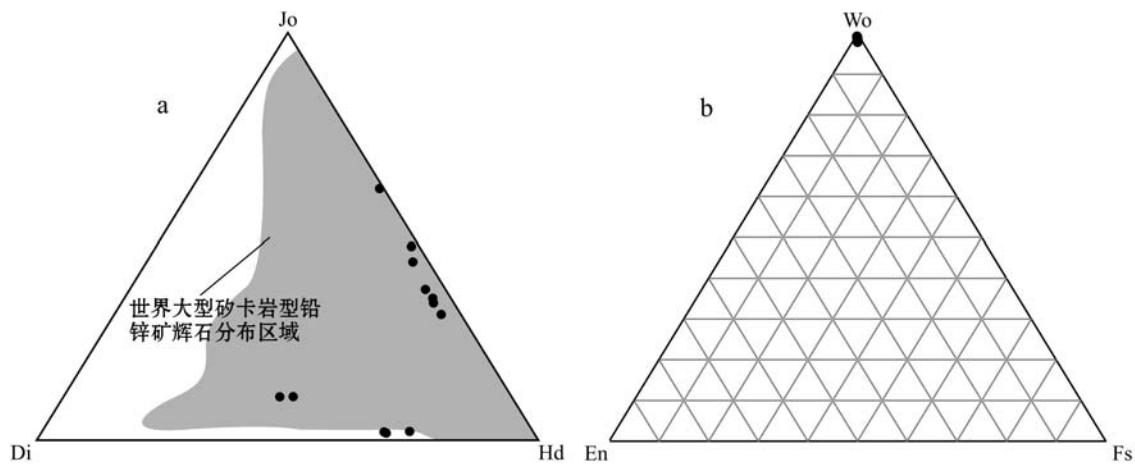


图 7 浦桑果矿床辉石和硅灰石端员组分图解

Fig. 7 The endmember diagrams of pyroxene and wollastonite from the Pusangguo deposit
Di—透辉石; Hd—钙铁辉石; Jo—锰钙辉石; Wo—硅灰石; En—顽火辉石; Fs—斜方铁辉石
Di—diopside; Hd—hedenbergite; Jo—johannsenite; Wo—wollastonite; En—enstatite; Fs—ferrosillite

表 4 浦桑果铅锌多金属矿床硅灰石电子探针分析结果和端员组分

$w_B/\%$

Table 4 Electron microprobe analyses, ion proportions and end members of representative wollastonite from the Pusangguo Pb-Zn polymetallic deposit

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	TFeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total				
PD03-4-01	51.37	—	0.05	—	0.05	0.07	0.18	48.25	0.05	0.00	100.00				
PD03-4-02	51.23	—	0.06	—	0.03	0.11	0.18	48.28	0.03	0.00	99.92				
PD03-4-03	51.32	—	0.08	—	0.07	0.08	0.18	48.12	0.04	—	99.88				
ZK401-206-01	51.23	0.04	0.06	0.03	0.02	0.07	0.20	48.09	0.01	—	99.74				
ZK401-206-02	51.41	0.01	0.07	—	0.08	0.07	0.18	48.22	0.04	0.01	100.00				
样品号	Si	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Ti	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	Wo	En	Fs
PD03-4-01	1.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	2.00	0.00	0.00	99.14	0.51	0.18
PD03-4-02	1.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.01	2.01	0.00	0.00	99.15	0.51	0.24
PD03-4-03	1.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	2.00	0.00	0.00	99.09	0.52	0.24
ZK401-206-01	1.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	2.00	0.00	0.00	99.26	0.56	0.13
ZK401-206-02	1.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	2.00	0.00	0.00	99.12	0.50	0.24

注: Wo—硅灰石; En—顽火辉石; Fs—斜方铁辉石; “—”表示低于检测限,TFeO 为全铁含量。以 6 个氧原子和 4 个阳离子为基准。

为浅绿色,呈板柱状,具高突起,常发育绿泥石化,其裂隙处发育闪锌矿化(图 3k)。正交偏光下,角闪石具黄棕色—浅蓝绿干涉色(图 3l)。电子探针分析结果(表 5)显示,角闪石中 SiO₂ 含量为 44.85% ~ 55.19%,平均值为 48.33%; CaO 含量为 11.28% ~ 13.08%,平均值为 11.67%; MgO 含量为 15.15% ~ 17.46%,平均值为 16.08%; TFeO 含量为 9.65% ~ 12.09%,平均为 11.15%; Al₂O₃ 含量为 0.65% ~ 9.65%,平均值为 6.39%。此外,含极少量的 TiO₂、K₂O、Na₂O 等。根据 Leake 等(1997)对角闪石族矿物的分类图解,对浦桑果矿床角闪石进行分类投图,结果大多数数据点落在镁角闪石区域,且具有钙质

角闪石属性(图 8)。

4.5 绿泥石

手标本中绿泥石颜色为浅绿色,呈它形粒状集合体发育,其次为细脉状,脉宽约 0.5 cm,与石榴子石、绿帘石、石英等矿物共生(图 3c)。单偏光下,绿泥石颜色为浅绿色,呈它形粒状集合体,多发育于角闪石的边缘处(图 3m、3n),发育黄铁矿、黄铜矿矿化。电子探针分析结果见表 6,由表可知,绿泥石中 SiO₂ 含量为 27.16% ~ 28.57%,平均为 28.0%; Al₂O₃ 含量为 17.58% ~ 19.10%,平均为 18.39%; TFeO 含量为 15.30% ~ 19.80%,平均为 17.04%; MgO 含量为 17.87% ~ 21.92%,平均为 20.39%;

表 5 浦桑果铅锌多金属矿床角闪石电子探针分析结果和端员组分

$w_B/\%$

Table 5 Electron microprobe analyses, ion proportions and end members of representative hornblende from the Pusangguo Pb-Zn polymetallic deposit

样品编号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total		
ZK805-49.2-01	46.64	0.97	8.24	0.11	10.96	0.24	15.56	11.43	1.58	0.29	96.03		
ZK805-49.2-02	44.85	0.82	9.65	0.12	12.00	0.25	15.19	11.39	1.90	0.49	96.67		
ZK805-49.2-03	45.34	0.85	8.73	0.07	12.09	0.29	15.15	11.34	1.61	0.43	95.89		
ZK401-55.8-01	48.78	1.21	5.48	—	11.44	0.38	16.12	11.38	1.26	0.36	96.41		
ZK401-55.8-02	47.85	1.35	5.96	—	11.40	0.43	16.09	11.28	1.38	0.37	96.11		
ZK401-55.8-03	49.66	—	6.04	0.03	9.65	0.40	17.01	11.79	1.11	0.18	95.87		
ZK401-55.8-04	55.19	—	0.65	—	10.55	0.08	17.46	13.08	0.05	0.02	97.08		
样品编号	Si	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Ti	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Cr ³⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	Mg/(Mg + Fe ²⁺)
ZK805-49.2-01	6.81	1.19	0.23	0.11	0.46	0.81	0.01	0.03	3.39	1.79	0.45	0.05	0.81
ZK805-49.2-02	6.54	1.46	0.20	0.09	0.67	0.80	0.01	0.03	3.30	1.78	0.54	0.09	0.81
ZK805-49.2-03	6.66	1.35	0.16	0.09	0.68	0.81	0.01	0.04	3.32	1.78	0.46	0.08	0.80
ZK401-55.8-01	7.10	0.90	0.04	0.13	0.42	0.98	—	0.05	3.50	1.77	0.36	0.07	0.78
ZK401-55.8-02	6.99	1.01	0.01	0.15	0.49	0.90	—	0.05	3.50	1.77	0.39	0.07	0.80
ZK401-55.8-03	7.17	0.83	0.20	—	0.46	0.70	0.00	0.05	3.66	1.83	0.31	0.03	0.84
ZK401-55.8-04	7.89	0.11	0.00	—	0.08	1.18	—	0.01	3.72	2.00	0.11	0.00	0.76

注：“—”表示低于检测限，TFeO 为全铁含量。以 23 个 O 原子为基准计算的阳离子数和端员组分。

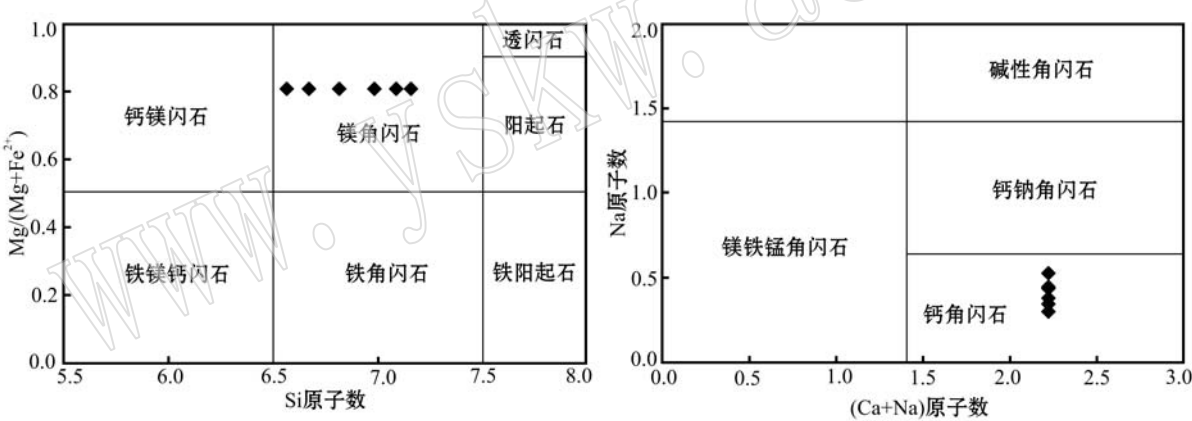


图 8 浦桑果矿床角闪石分类图解(底图据 Leake *et al.*, 1997)

Fig. 8 The classification of amphibole from the Pusangguo deposit (after Leake *et al.*, 1997)

表 6 浦桑果铅锌多金属矿床绿泥石电子探针分析结果和端员组分

$w_B/\%$

Table 6 Electron microprobe analyses, ion proportions and end members of representative chlorite from the Pusangguo Pb-Zn polymetallic deposit

样品编号	Comment	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	TFeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total			
ZK805-49.2-01	PLX1-9-4	28.57	0.03	19.10	0.07	15.30	0.09	21.37	0.07	0.02	0.04	84.65			
ZK805-49.2-02	PLX1-9-5	28.22	0.02	18.66	0.11	15.44	0.12	21.92	0.07	0.02	0.02	84.59			
ZK401-105.2-01	PLX1-9-6	28.36	—	19.03	0.11	15.40	0.13	21.92	0.08	0.01	0.03	85.06			
ZK401-55.8-01	PLX1-15-1	27.71	0.02	17.59	0.51	19.26	0.23	18.85	0.17	0.19	0.03	84.55			
ZK401-55.8-02	PLX1-15-2	27.16	0.03	17.58	0.16	19.80	0.23	17.87	0.08	0.03	0.03	82.97			
样品编号	Si	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Ti	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ni	Zn	Ca	Na	K	Fe ^T /(Fe ^T + Mg)
ZK805-49.2-01	5.87	2.13	2.51	0.00	0.00	0.21	2.42	0.01	6.54	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02	0.29
ZK805-49.2-02	5.83	2.17	2.38	0.00	0.00	0.11	2.55	0.02	6.75	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.28
ZK401-105.2-01	5.82	2.18	2.43	0.00	0.00	0.13	2.51	0.02	6.70	0.00	0.00	0.02	0.01	0.02	0.28
ZK401-55.8-01	5.89	2.11	2.31	0.00	0.00	0.08	3.35	0.04	5.97	0.00	0.00	0.04	0.16	0.02	0.36
ZK401-55.8-02	5.88	2.12	2.38	0.01	0.00	0.14	3.45	0.04	5.77	0.00	0.00	0.02	0.03	0.02	0.38

注：“—”表示低于检测限，TFeO 为全铁含量。以 14 个 O 原子为基准计算的阳离子数和端员组分。

MnO 含量为 0.09% ~ 0.23%，平均为 0.16%；此外含极少量的 TiO₂、CaO、K₂O、Cr₂O₃。在绿泥石的 Fe^T/(Fe^T + Mg²⁺) - Si 分类图解(图 9)中，浦桑果矿床 5 个绿泥石数据点均落在密绿泥石范畴内，属于密绿泥石类。

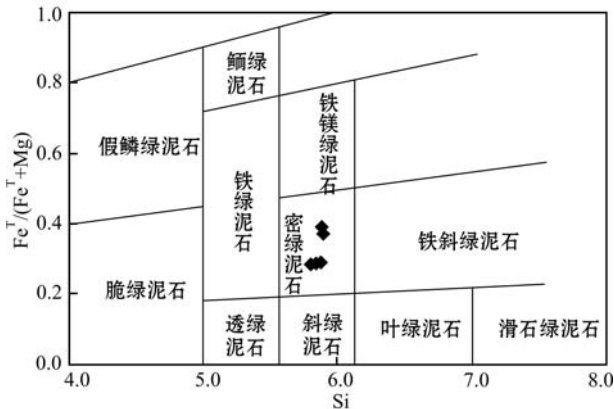


图 9 浦桑果矿床绿泥石分类图解(底图据 Hey *et al.*, 1954 和常丽华等, 2006 修改)

Fig. 9 The classification of chlorite from the Pusangguo deposit (modified after Hey *et al.*, 1954 and Chang Lihua *et al.*, 2006)

4.6 绿帘石

手标本中绿帘石颜色为翠绿色、黄绿色，主要呈它形晶粒状结构，常与绿泥石、石榴子石等矽卡岩矿物共生(图 3d)。单偏光下，绿帘石主要为翠绿色，呈它形晶粒状结构，粒径约 0.2 ~ 0.5 mm(图 3o)。正交偏光下，绿帘石呈现出颜色鲜艳的干涉色，具高突起，伴有后期碳酸盐化(图 3p)。本次共计完成 10 个点位的电子探针分析，测试数据列于表 7。结果表明浦桑果矿床绿帘石主要成分 SiO₂ 含量为 36.26% ~

37.72%，平均值为 37.14%；Al₂O₃ 含量为 20.53% ~ 24.52%，平均 22.72%；CaO 含量值为 23.05% ~ 23.59%，平均值为 23.32%；TFeO 含量为 10.43% ~ 15.50%，平均为 12.30%；MnO 含量为 0.01% ~ 0.08%，平均值 0.36%。此外含有极少量的 MgO、TiO₂、K₂O 等。绿帘石化学成分与角闪石化学成分相比具有富 Ca、Al 而贫 Mg、Fe 的特征，表明绿帘石形成时伴随有 Mg、Fe 等元素的析出(张志欣等, 2011)。绿帘石是矽卡岩阶段晚阶段产物(于淼等, 2013)，低温钙质交代作用的主要特征是绿帘石化，在钙矽卡岩中它的形成标志着矽卡岩化过程热液作用和矿化作用的开始(潘兆樽等, 1993)。

5 讨论

5.1 矽卡岩类型及其形成环境

矽卡岩矿物研究是矽卡岩矿床定义和分类的基础，其矿物组成与侵入岩成分、围岩组分、深度、氧逸度、温度和压力密切相关(Titley, 1973; Burton and Taylor, 1982; Meinert, 1997; Calagari and Hosseinzadeh, 2006)，在矽卡岩矿床研究中占有重要地位(Einaudi, 1981, 1982)。通过对矽卡岩矿床主要矽卡岩矿物成分、共生组合等方面的综合研究，可以反演矿床成岩成矿过程中其物理化学环境的变化(Meinert *et al.*, 2005; 赵苗等, 2015)。根据矿物共生组合和围岩岩性可将矽卡岩划分为交代矽卡岩和变质矽卡岩，交代成因的矽卡岩按照矿物成分的不同可分为钙质矽卡岩、镁质矽卡岩、锰质矽卡岩以及碱质矽卡岩(Einaudi, 1982; 赵一鸣等, 2012; 王立强等, 2014)。锰质矽卡岩主要由锰钙辉石和石榴

表 7 浦桑果铅锌多金属矿床绿帘石电子探针分析结果
Table 7 Electron microprobe analyses of representative epidote from the Pusangguo Pb-Zn polymetallic deposit

样品编号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	TFeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
ZK002-103.4-01	36.60	0.02	23.25	0.03	11.46	0.16	0.02	23.58	—	0.01	95.12
ZK002-103.4-02	36.26	0.07	22.67	—	12.06	0.23	0.03	23.50	0.03	0.01	94.86
ZK002-103.4-03	37.27	0.19	22.19	—	12.25	0.28	0.08	23.59	0.02	0.01	95.89
ZK002-58.6-01	37.72	0.03	23.21	—	11.82	0.21	0.02	23.49	0.04	0.01	96.56
ZK002-58.6-02	36.91	0.03	22.56	0.07	12.18	0.31	0.01	23.22	0.10	0.02	95.40
ZK002-58.6-03	37.60	0.02	24.52	—	10.43	0.84	0.03	23.05	0.02	—	96.50
ZK002-58.6-04	37.14	0.05	20.53	—	15.50	0.27	0.02	23.13	—	—	96.64
ZK401-105.2	37.50	0.07	22.99	0.03	12.32	0.39	0.01	23.42	0.01	0.00	96.74
ZK401-55.8-01	37.20	0.07	23.06	0.02	11.80	0.43	0.04	23.14	0.03	0.01	95.79
ZK401-55.8-02	37.20	—	22.24	—	13.21	0.52	0.01	23.06	0.02	—	96.26

注：“—”表示低于检测限，TFeO 为全铁含量。

子石组成,局部有锰钙辉石、锰三斜辉石以及少量钙蔷薇辉石和蔷薇辉石(赵一鸣等,2012)。浦桑果矿床石榴子石主要为非连续的钙铁榴石-钙铝榴石类质同像系列,钙铁榴石在空间上多与透辉石伴生发育;单斜辉石主要为锰钙铁辉石、含锰透辉石、透辉石、锰钙辉石;角闪石主要属钙质镁角闪石系列。从矿物组合上看,浦桑果矿床矽卡岩兼具钙质矽卡岩和锰质矽卡岩的特征。

矽卡岩的矿物成分和矿物组合能提供关于矽卡岩和成矿环境的许多重要信息(Einaudi *et al.*, 1981; Crowe *et al.*, 2001; Lu *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2006; Martin *et al.*, 2011)。艾永富等(1981)指出钙铁榴石多易形成于碱性介质中,而钙铝榴石在酸性介质中形成最佳,且钙铁榴石形成时的氧逸度比钙铝榴石形成时的氧逸度高(Zhang *et al.*, 2017)。王琦等(1995)研究提出早期富 Mg, 贫 Mn、Fe 的透辉石形成于高温、高氧逸度和碱性条件下,晚期富 Fe、Mn 的锰钙铁辉石则形成于低温、低氧逸度和酸性条件下,且后者与铅锌矿化具有密切的时空关系。浦桑果矿区早期形成钙铁榴石和透辉石,而后形成与矿化关系密切的锰钙铁辉石和钙铝榴石,该矿物组合表明浦桑果矿区早期矽卡岩形成于高温、高氧逸度、碱性的地质环境,随后逐渐转变为低温、低氧逸度和偏酸性的环境从而形成晚期矽卡岩矿物组合。这与氧化型矽卡岩主要发育钙铁榴石和透辉石,还原性矽卡岩则以钙铁辉石和钙铝榴石为主(Misra, 2000; Lu *et al.*, 2003)的观点相吻合。此外,在矽卡岩形成的早期阶段发育一定量的硅灰石(图 3i、3j),而大量硅灰石的形成需要较高的氧逸度(Greenwood, 1967; 于淼等, 2013),这进一步证实了早期矽卡岩形成于较为氧化的环境,晚期矽卡岩形成于相对还原的环境。

矽卡岩矿床中石榴子石常具有振荡环带结构,环带成分的变化特征对于示踪矽卡岩形成环境、指示热液流体演化过程具有重要的指示意义(陈能松等, 2003; Smith *et al.*, 2004; Gasper *et al.*, 2008; 陈雷等, 2012)。浦桑果矿区内的石榴子石环带结构极为发育(图 3e、3f),通过电子探针实验发现,其核部为成分均一的钙铁榴石,而边缘具有明暗相间光性异常的环带结构。环带结构出现钙铁榴石和钙铝榴石两个端员组分含量呈交替变化(图 6b), Fe^{3+} 和 Al^{3+} 含量的变化是造成环带结构的主要因素,不同环带的成分变化与石榴子石环带的明暗变化相一

致,也与石榴子石中 TFeO 和 Al_2O_3 含量具有相反的变化趋势相对应。由此可知,石榴子石晶体的生长可能存在间断,代表了溶液组分与生长晶体表层重新达到热力学平衡的过程(邱瑞龙, 1988)。浦桑果矿床石榴子石端员组分的变化和环带结构综合指示石榴子石在结晶生长过程中流体成分及物理化学环境是动态变化的(王建等, 2014),指示矿区矽卡岩均形成于一个相对开放的体系中(赵劲松等, 1996; 周振华等, 2011; 黄华等, 2014)。

5.2 矿化类型与找矿建议

我国不同类型矽卡岩矿床的石榴石、辉石成分有所差别(赵一鸣等, 1990),如矽卡岩型铜多金属矿一般发育在钙矽卡岩中,相应的矿物组合为钙铁榴石-钙铝榴石和透辉石,锰质含量极低(如甲玛铜多金属矿床,应立娟等, 2012);矽卡岩型银铅锌矿床一般产出在锰质矽卡岩中,锰质含量较高,特征矿物为锰钙铁辉石,石榴石中锰铝榴石端员含量明显偏高(如辽宁八家子铅锌矿床,赵一鸣等, 2012)。浦桑果矿区矽卡岩兼具钙质矽卡岩和锰质矽卡岩特征,其中与矿化关系密切的含锰石榴子石和锰钙铁辉石均与世界大型矽卡岩型铅锌矿床的分布近乎一致(图 4b、图 7a)。

辉石中 Mn/Fe 值变化可以指示矽卡岩金属矿化的类型(Nakano *et al.*, 1994)。赵一鸣等(1997)研究指出,矽卡岩型铁矿、铜矿床等具有辉石 $\text{Mn}/\text{Fe} < 0.1$ 的特征;矽卡岩铅锌矿床具有锰钙铁辉石 $\text{Mn}/\text{Fe} > 0.1$ 、 $\text{Mg}/\text{Fe} < 1$ 的特征;矽卡岩铜矿床辉石具有 Mn/Fe 和 Mg/Fe 值($\text{Mn}/\text{Fe} = 0.1 \sim 0.3$ 、 $\text{Mg}/\text{Fe} = 1 \sim 4$)总体偏高但比铅锌矿偏低的特征;矽卡岩矿床中的钙铁辉石具 Mn/Fe 、 Mg/Fe 值偏低的特征。浦桑果矿床单斜辉石主要包括透辉石、钙铁辉石、锰钙辉石、锰钙铁辉石等,其中透辉石 Mn/Fe 值范围为 $0.01 \sim 0.02 (< 0.1)$, Mg/Fe 值为 $0.33 \sim 0.43 (< 1)$;锰钙铁辉石中 Mn/Fe 值为 $0.24 \sim 1.63 (> 0.1)$, Mg/Fe 值为 $0.01 \sim 0.94 (< 1)$,综合指示浦桑果矿床矿化类型为铜铅锌多金属矿化类型,与地质事实一致。

锰质矽卡岩往往与铅锌银矿化有着密切关系(毛景文等, 1994; 赵一鸣等, 2012),锰质矽卡岩是评价含 Pb、Zn、Ag 矽卡岩的重要标志(赵一鸣等, 2001)。浦桑果矿床发育含锰透辉石、锰钙铁辉石、锰钙辉石以及含锰石榴子石,指示矿区可能发育 Ag 矿化。最新的电子探针资料发现矿区黄铜矿中可见

少量独立的银矿物(硫铜银矿)(未刊资料)。上述特点与前人研究锰质矽卡岩与矿化元素组合所得结果基本一致。但在浦桑果矿区开展银矿找矿工作仍未得到重视,本次研究为下一步寻找银矿提供了方向和理论基础。

6 结论

(1) 浦桑果矿床矽卡岩矿物主要由石榴子石、单斜辉石、似辉石、角闪石、绿帘石、绿泥石等组成。石榴子石端员组分主要为钙铁榴石,属于钙铁榴石-钙铝榴石类质同像系列;单斜辉石端员组分主要为钙铁辉石-锰钙辉石-透辉石类质同像系列;似辉石端员组分主要为硅灰石;角闪石主要为镁角闪石,具钙质角闪石属性;绿泥石属于密绿泥石类。矿床矽卡岩兼具钙质矽卡岩和锰质矽卡岩的特征。

(2) 矿区石榴子石普遍发育环带结构,其核部为成分均一的钙铁榴石,边缘具有明暗相间的环带结构。矽卡岩矿物组合特征及石榴子石环带特征综合表明,矿床早期矽卡岩形成于高温、高氧逸度和碱性的环境,而晚期矽卡岩则形成于相对低温、低氧逸度和偏酸性的环境。

(3) 矿区石榴子石部分含锰质较高,单斜辉石中锰钙铁辉石和含锰钙铁辉石发育,单斜辉石中Mn/Fe和Mg/Fe值特征综合显示矿区矿化类型为铜铅锌多金属矿化。锰质矽卡岩的存在及独立银矿物硫铜银矿的发现,指示浦桑果矿床存在银矿的找矿潜力,为矿区下一步找矿勘探提供了思路 and 方向。

致谢 福州大学紫金矿业学院电子探针实验室刘文元老师在实验过程中给予大力支持和耐心指导,匿名审稿人提出了宝贵意见,在此一并表示衷心的感谢。

References

- Ai Yongfu and Jin Lingnian. 1981. A preliminary study on the relationship between composition and mineralization of garnets[J]. Journal of Peking University (Natural Science Edition), 1: 83 ~ 90(in Chinese with English abstract).
- Burton J C and Taylor L A. 1982. The f_{O_2} - T and f_{S_2} - T stability relations of hedenbergite and of hedenbergite-johannsenite solid solutions[J]. Economic Geology, 77(4): 764 ~ 783.
- Calagari A A and Hosseinzadeh G. 2006. The mineralogy of copper-bearing skarn to the east of the Sungun-Chay river, East-Azarbaidjan, Iran[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 28(4): 423 ~ 438.
- Chang Lihua, Chen Manyun, Jin Wei, et al. 1954. Transparent Mineral Flake Identification Manual[M]. Beijing: Geological Publishing House, 119(in Chinese with English abstract).
- 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 Deposits, 31(3): 417 ~ 437(in Chinese with English abstract).
- Chen Nengsong, Sun Min, Yang Yong, et al. 2003. Major and trace element zoning in metamorphic garnets and their metamorphic process implications[J]. Earth Science Frontiers, 10(3): 315 ~ 320(in Chinese with English abstract).
- Crowe D E, Riciputi L R, Bezenek S, et al. 2001. Oxygen isotope and trace element zoning in hydrothermal garnets: Windows into large-scale fluid-flow behavior[J]. Geology, 29: 478 ~ 482.
- Cui Xiaoliang. 2013. Research on Metallization of Pusanguo Polymetallic Copper Deposit in Tibet, China[D]. Chengdu University of Technology, 1 ~ 107(in Chinese with English abstract).
- Cui Xiaoliang, Duo Ji, Liu Hongfei, et al. 2012. Geochemical characteristics of intrusive rocks in the Pusanguo copper polymetallic deposit, Tibet: constraints on tectonic setting[J]. Acta Geoscientia Sinica, 33(4): 537 ~ 545(in Chinese with English abstract).
- Einaudi M T, Meinert L D and Newberry R J. 1981. Skarn deposits[J]. Economic Geology, 75th Anniversary Volume: 317 ~ 391.
- Einaudi M T. 1982. General features and origin of skarns associated with porphyry copper plutons, southwestern North America[A]. Titley S R. Advances in Geology of the Porphyry Copper Deposits, southwestern North America[C]. Tucson, Arizona: Univ., Arizona.
- Fei Guangchun, Wen Chunqi, Zhou Xiong, et al. 2010. Research of mineralization fluids in the Dongzhongla lead-zinc deposit, Tibet[J]. Geology and Exploration, 46(4): 576 ~ 582(in Chinese with English abstract).
- Gao Yiming, Chen Yuchuan, Tang Juxing, et al. 2009. SHRIMP U-Pb dating of zircon from quartz porphyry in the Yaguila Pb-Zn-Mo deposit, Gongbujiangda county, Tibet and its geological implication[J]. Acta Geological Sinica, 83(10): 1436 ~ 1444(in Chinese with English abstract).
- Gaspar M, Knaack C and Meinert L D. 2008. REE in skarn systems: A LA-ICP-MS study of garnets from the Crown Jewel gold deposits[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72(1): 185 ~ 205.
- Greenwood C. 1967. The thermal degradation of starch[J]. Advances in

- Carbohydrate Chemistry & Biochemistry, 22: 483 ~ 515.
- Hey M H. 1954. A new review of the chlorites[J]. Mineral. Mag., 30: 277 ~ 292.
- Hou Zengqian and Cook N J. 2009. Metallogenesis of the Tibetan collisional orogen: A review and introduction to the special issue[J]. Ore Geology Reviews, 36: 2 ~ 24.
- Hou Zengqian, Lü Qingtian, Wang Anjian, *et al.* 2003. Continental collision and related metallogeny: A case study of mineralization on Tibetan orogeny[J]. Mineral Deposits, 22(4): 319 ~ 333(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Yang Zhiming, *et al.* 2006. Metallogenesis in the collisional orogeny of the Qinghai-Tibet plateau: Tectonic setting, tempo-spatial distribution and ore deposit types[J]. Geology in China, 33(2): 348 ~ 359(in Chinese with English abstract).
- Huang Hua, Zhang Changqing, Zhou Yunman, *et al.* 2014. Skarn mineralogy and zoning model of the Jinchanghe copper-zinc-iron polymetallic deposit in Yunnan Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 33(1): 127 ~ 148(in Chinese with English abstract).
- Kamvong T and Zaw K. 2009. The origin and evolution of skarn-forming fluids from the Phu Lon deposit, northern Loei-Fold Belt, Thailand: Evidence from fluid inclusion and sulfur isotope studies[J]. Journal of Asian Earth Science, 34(5): 624 ~ 633.
- Kang Haoran. 2016. The Study on the Relationship Between Skarn and Ore-forming Magnetite in the Pusangguo Copper Polymetallic Ore-deposit, Tibet[D]. Chinese Academy of Geological Sciences, 1 ~ 84 (in Chinese with English abstract).
- Kim H S. 2006. Deformation-induced garnet zoning[J]. Gondwana Research, 10: 379 ~ 388.
- Lang Xinghai, Tang Juxing, Li Zhijun, *et al.* 2012. Geochemical evaluation on the prospecting potential in the Xiongcu Cu-Au deposit, Xietongmen county[J]. Geology and Exploration, 48(1): 12 ~ 23(in Chinese with English abstract).
- Lang Xinghai, Tang Juxing, Li Zhijun, *et al.* 2014. U-Pb and Re-Os geochronological evidence for the Jurassic porphyry metallogenic event of the Xiongcu district in the Gangdese porphyry copper belt, southern Tibet, pre[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 79(2): 608 ~ 622.
- Leak B E, Wolley A R and Arps C E S. 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new mineral and mineral names[J]. American Mineralogist, 82: 1 019 ~ 1 037.
- Li Guangming, Liu Bo, She Hongquan, *et al.* 2006. Early Himalayan mineralization on the southern margin of the Gangdese metallogenic belt, China[J]. Geological Bulletin of China, 25(12): 1 481 ~ 1 486(in Chinese with English abstract).
- Li Xiaoliang, Li Zeqin, Zhang Chengjiang, *et al.* 2011. A preliminary study on the genesis of Pusangguo Pb-Zn deposit, Xizang[J]. Yunnan Geology, 30(1): 122 ~ 126(in Chinese with English abstract).
- Lu Huangzhang, Liu Yimao and Wang Changlie, *et al.* 2003. Mineralization and fluid inclusion study of the Shizhuyuan W-Sn-Mo-F skarn deposit, Hunan Province, China[J]. Economic Geology, 98: 955 ~ 974.
- Mao Jingwen, Li Hongyan and Wang Pingan. 1994. The Manganese skarn in the Shizhuyuan W polymetallic deposit, Hunan Province[J]. Mineral Deposits, 13: 38 ~ 47(in Chinese with English abstract).
- Martin L A J, Ballèvre M, Halfpenny A, *et al.* 2011. Garnet re-equilibration by coupled dissolution-reprecipitation: Evidence from textural, major element and oxygen isotope zoning of 'cloudy' garnet[J]. Metamorphic Geology, 29: 213 ~ 231.
- Meinert L D. 1997. Application of skarn deposit zonation models to mineral exploration[J]. Exploration and Mining Geology, 6(2): 185 ~ 208.
- Meinert L D, Dipple G M and Nicolescu S. 2005. World skarn deposits [J]. Economic Geology, 100th Anniversary Volume I: 299 ~ 336.
- Meng Xiangjin, Hou Zengqian, Gao Yongfeng, *et al.* 2003. The timing of the porphyry Cu-Mo-Pb-Zn metallogenic system in the eastern Gangdese belt, Tibet: Evidence from the molybdenite Re-Os dating in the Bangpu copper polymetallic deposit[J]. Mineral Deposits, 22: 246 ~ 252(in Chinese with English abstract).
- Misra K C. 2000. Understanding Mineral Deposit[M]. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publisher.
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan and Deng Jinfu. 2003. The volcanic response to the main India-Asia continent collision process[J]. Geological Frontiers, 10(3): 135 ~ 148(in Chinese with English abstract).
- Nakano T, Yoshino T, Shimazaki H, *et al.* 1994. Pyroxene composition as an indicator in the classification of skarn deposits[J]. Economic Geology, 89(7): 1 567 ~ 1 580.
- Pan Zhaolu, Zhao Aixing and Pan Tiehong. 1993. The Crystallography and Mineralogy (volume II)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 2 829(in Chinese with English abstract).
- Qiu Ruilong. 1988. A study of garnets and their zonal structure in the Tongshan skarn type copper ore deposit, Guichi county[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 7(3): 244 ~ 252(in Chinese with English abstract).
- Qu Xiaoming, Hou Zengqian and Li Youguo. 2004. Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore-bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibetan plateau[J]. Lithos, 74:

- 131 ~ 148.
- Smith M P, Henderson P, Jeffries T, *et al.* 2004. The rare earth elements and uranium in garnets from the Beinn an Dubhaich Aureole, Skye, Scotland, UK: constraints on processes in a dynamic hydrothermal system[J]. *Journal of Petrology*, 45(3): 457 ~ 484.
- Tang Juxing, Chen Yuchuan, Duo Ji, *et al.* 2009. The types, metallogenic regularity and prospecting evaluation in the eastern Gangdese metallogenic belt, Tibet[J]. *Journal of Mineral Resources*, 51: 476 ~ 478(in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Ding Shuai, Meng Zhan, *et al.* 2016. The first discovery of the low sulfidation epithermal deposit in Linzong volcanics, Tibet: a case study of the Sinongduo Ag polymetallic deposit[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(4): 461 ~ 470(in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Lang Xinghai, Xie Fuwei, *et al.* 2015. Geological characteristics and genesis of the Jurassic No. 1 porphyry Cu-Au deposit in the Xiongcuo district, Gangdese porphyry copper belt, Tibet[J]. *Ore Geology Reviews*, 438 ~ 456.
- Titley S R. 1973. "Pyrometasomatic": An alteration type[J]. *Economic Geology*, 68(8): 1 326 ~ 1 329.
- Wang Jian, Xie Guiqing, Yu Changfa, *et al.* 2014. Geological and skarn mineral characteristics of the Jilongshan skarn Au deposit in south-eastern Hubei Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(1): 149 ~ 162(in Chinese with English abstract).
- Wang Liqiang, Gu Xuexiang, Cheng Wenbin, *et al.* 2010. Sulfur and lead isotope composition and tracing for the sources of ore-forming materials in the Mengya'a Pb-Zn deposit, Tibet[J]. *Geoscience*, 24: 52 ~ 58(in Chinese with English abstract).
- Wang Liqiang, Tang Juxing, Chen Wei, *et al.* 2014. Mineralogical characteristics of skarn in the Bangpu Mo polymetallic deposit, Tibet, and their geological significance[J]. *Geology in China*, 41(2): 562 ~ 576(in Chinese with English abstract).
- Wang Liqiang, Tang Juxing, Deng Jun, *et al.* 2015. The Longmala and Mengya'a skarn Pb-Zn deposits, Gangdese region, Tibet: Evidence from U-Pb and Re-Os geochronology for formation during early India-Asia collision[J]. *International Geology Review*, 57(14): 1 825 ~ 1 842.
- Wang Qi and Ai Yongfu. 1995. The relationship between the manganese clinopyroxene and the mineralization in the Baiyin'nuo lead-zinc deposit[J]. *Journal of Peking University (Natural Science Edition)*, 2: 224 ~ 228(in Chinese with English abstract).
- Yang Hairui. 2013. The Mineralogical Characteristics and Its Genetic Significance of Pusangguo Copper Polymetal Ore Deposit in Tibet[D]. Chengdu University of Technology, 1 ~ 66(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhiming, Hou Zengqian, White N C, *et al.* 2009. Geology of the post-collisional porphyry copper-molybdenum deposit at Qulong, Tibet[J]. *Ore Geology Reviews*, 36: 133 ~ 159.
- Ying Lijuan, Tang Juxing, Wang Denghong, *et al.* 2012. Features of garnet in the Jiama super-large Cu polymetallic deposit and its genetic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(11): 1 735 ~ 1 747(in Chinese with English abstract).
- Ying Lijuan, Wang Chenghui, Tang Juxing, *et al.* 2014. Re-Os systematics of sulfides (chalcopyrite, bornite, pyrite and pyrrhotite) from the Jima Cu-Mo deposit of Tibet, China[J]. *Journal of Earth Sciences*, 79: 497 ~ 506.
- Yu Miao, Feng Chengyou, Bao Guanying, *et al.* 2013. Characteristics and zonation of skarn minerals in Galinge iron deposit, Qinghai Province[J]. *Mineral Deposits*, 32(1): 55 ~ 76(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongfei, Xu Wangchun, Guo Jianqiu, *et al.* 2007. The Gangdese-India orogenic event: Evidence from the zircon U-Pb chronology and petrogenesis of the granite[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 32(2): 155 ~ 166(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yu, Shao Yongjun, Wu Chengdong, *et al.* 2017. LA-ICP-MS trace element geochemistry of garnets: Constraints on hydrothermal fluid evolution and genesis of the Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit, eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 86: 426 ~ 439.
- Zhang Zhixin, Yang Fuquan, Luo Wucang, *et al.* 2011. Skarn mineral characteristics of the Wutubulake iron deposit in Altay, Xinjiang, and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 267 ~ 280(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhiyu, Du Yangsong and Zhang Jing. 2013. Alteration, mineralization, and genesis of the zoned Tongshan skarn-type copper deposit, Anhui, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 53: 489 ~ 503.
- Zhao Jinsong and Newberry R J. 1996. Novel knowledge on the origin and mineralization of skarns from Shizhuyuan[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 4: 442 ~ 449(in Chinese with English abstract).
- Zhao Junxing, Li Guangming, Evans N J, *et al.* 2016. Petrogenesis of Paleocene-Eocene porphyry deposit-related granitic rocks in the Yaguala-Sharang ore district, central Lhasa terrane, Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 8: 249 ~ 267.
- Zhao Junxing, Qin Kezhang, Li Guangming, *et al.* 2015. The exhumation history of collision-related mineralizing systems in Tibet: Insights from thermal studies of the Sharang and Yaguala deposits, central Lhasa

- [J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 1 043 ~ 1 061.
- Zhao Miao, Pan Xiaofei, Li Yan, *et al.* 2015. Mineralogical characteristics and geological significance of the Zhuxi Cu-W polymetallic ore deposit, Jiangxi Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(2/3): 548 ~ 568(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yiming, Dong Yongguan, Li Daxin, *et al.* 2003. Geology, mineralogy, geochemistry, and zonation of the Bajiazi dolostone-hosted Zn-Pb-Ag skarn deposit, Liaoning Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 23: 153 ~ 182.
- Zhao Yiming, Li Daxin and Bi Chengsi. 2001. Distribution and geological characteristics of silver skarn deposits in China[J]. *Mineral Deposits*, 20(2): 153 ~ 162(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yiming, Lin Wenwei and Bi Chengsi. 1990. The Skarn Deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 164 ~ 171 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yiming, Lin Wenwei and Bi Chengsi. 2012. Skarn Ore Deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 115 (in Chinese with English abstract).
- 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 with English abstract).
- Zheng Youye, Sun Xiang, Gao Shunbao, *et al.* 2014. Multiple mineralization events at the Jiru porphyry copper deposit, southern Tibet: Implications for Eocene and Miocene magma sources and resource potential[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 79: 842 ~ 857.
- Zheng Yuanchuan, Fu Qiang, Hou Zengqian, *et al.* 2015. Metallogeny of the northeastern Gangdese Pb-Zn-Ag-Fe-Mo-W polymetallic belt in the Lhasa terrane, southern Tibet[J]. *Ore Geology Reviews*, 4: 1 ~ 23.
- Zhou Zhenhua, Liu Hongwei, Chang Weixiong, *et al.* 2011. Mineralogical characteristics of skarns in the Huanggang Sn-Fe deposit of inner Mongolia and their metallogenic indicating significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(1): 97 ~ 112(in Chinese with English abstract).
- Zhu Dicheng, Pan Guitang, Liao Zhongli, *et al.* 2010. Shrimp zircon age and geochemical constraints on the origin of lower jurassic volcanic rocks from the yeba formation., southern gangdese south Tibet[J]. *International Geology Review*, 50(5): 442 ~ 471.
- Zhu Dicheng, Pan Guitang, Wang Liquan, *et al.* 2008. Spatial-temporal distribution and tectonic setting of Jurassic magmatism in the Gangdese belt, Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(4): 458 ~ 468(in Chinese with English abstract).
- Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Niu Yaoling, *et al.* 2011. The Lhasa Terrane: record of a microcontinent and its histories of drift and growth[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 301: 241 ~ 255.

附中文参考文献

- 艾永富, 金玲年. 1981. 石榴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.
- 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.
- 常丽华, 陈曼云, 金 薇, 等. 2006. 透明矿物薄片鉴定手册[M]. 北京: 地质出版社, 119.
- 陈 雷, 秦克章, 李光明, 等. 2012. 西藏冈底斯南缘努日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.
- 崔晓亮. 2013. 西藏南木林县浦桑果铜多金属矿床成矿作用研究[D]. 成都理工大学, 1 ~ 107.
- 崔晓亮, 多 吉, 刘鸿飞, 等. 2012. 西藏浦桑果铜多金属矿床侵入岩的地球化学特征及对构造环境的约束[J]. 地球学报, 33(4): 537 ~ 545.
- 费光春, 温春齐, 周 雄, 等. 2010. 西藏洞中拉铅锌矿床成矿流体研究[J]. 地质与勘探, 46(4): 576 ~ 582.
- 高一鸣, 陈毓川, 唐菊兴, 等. 2009. 西藏工布江达县亚贵拉铅锌钼多金属矿床石英斑岩锆石 shrimp 定年及其地质意义[J]. 地质学报, 83(10): 1 436 ~ 1 444.
- 侯增谦, 吕庆田, 王安建, 等. 2003. 初论陆-陆碰撞与成矿作用——以青藏高原造山带为例[J]. 矿床地质, 22(4): 319 ~ 333.
- 侯增谦, 莫宣学, 杨志明, 等. 2006. 青藏高原碰撞造山带成矿作用: 构造背景、时空分布和主要类型[J]. 中国地质, 33(2): 348 ~ 359.
- 黄 华, 张长青, 周云满, 等. 2014. 云南金厂河铁铜铅锌多金属矿床矽卡岩矿物学特征及蚀变分带[J]. 岩石矿物学杂志, 33(1): 127 ~ 148.
- 康浩然. 2016. 西藏浦桑果铜多金属矿床矽卡岩与成矿岩体关系研究[D]. 中国地质科学院, 1 ~ 84.
- 李光明, 刘 波, 余宏全, 等. 2006. 西藏冈底斯成矿带南缘喜马拉雅早期成矿作用——来自冲木达铜金矿床的 Re-Os 同位素年龄证据[J]. 地质通报, 25(12): 1 481 ~ 1 486.
- 李小红, 李泽琴, 张成江, 等. 2011. 西藏浦桑果铅锌矿床成因探讨[J]. 云南地质, 30(1): 122 ~ 126.
- 郎兴海, 唐菊兴, 李志军, 等. 2012. 西藏谢通门县雄村铜(金)矿区及其外围的找矿前景地球化学评价[J]. 地质与勘探, 48(1):

- 12~23.
- 毛景文, 李红艳, 王平安. 1994. 湖南柿竹园钨多金属矿床中的锰质矽卡岩[J]. 矿床地质, 1: 38~47.
- 孟祥金, 侯增谦, 高永丰, 等. 2003. 西藏冈底斯东段斑岩铜钼铅锌成矿系统的发育时限: 帮浦铜多金属矿床辉钼矿 Re-Os 年龄证据[J]. 矿床地质, 22: 246~252.
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. 地学前缘, 10(3): 135~148.
- 潘兆橹, 赵爱醒, 潘铁红. 1993. 结晶学及矿物学(下册)[M]. 北京: 地质出版社, 1~282.
- 邱瑞龙. 1988. 安徽贵池铜山矽卡岩铜矿石榴石及其环带研究[J]. 岩石矿物学杂志, 7(3): 244~252.
- 王琦, 艾永富. 1995. 内蒙古白音诺铅锌矿床富锰单斜辉石与矿化的关系[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2: 224~228.
- 王立强, 顾雪祥, 程文斌, 等. 2010. 西藏蒙亚啊铅锌矿床 S、Pb 同位素组成及对成矿物质来源的示踪[J]. 现代地质, 24: 52~58.
- 王立强, 唐菊兴, 陈伟, 等. 2014. 西藏邦铺钼多金属矿床矽卡岩矿物学特征及其地质意义[J]. 中国地质, 41(2): 562~576.
- 王建, 谢桂青, 余长发, 等. 2014. 鄂东南地区鸡笼山矽卡岩金矿床的矽卡岩矿物学特征及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 33(1): 149~162.
- 应立娟, 唐菊兴, 王登红, 等. 2012. 西藏甲玛超大型铜矿石榴子石特征及成因意义[J]. 地质学报, 86(11): 1735~1747.
- 于淼, 丰成友, 保广英, 等. 2013. 青海尕斯库勒铁矿床矽卡岩矿物学及蚀变分带[J]. 矿床地质, 32(1): 55~76.
- 杨海锐. 2013. 西藏浦桑果铜多金属矿金属硫化物矿物学特征及成因意义[D]. 成都理工大学, 1~66.
- 唐菊兴, 陈毓川, 多吉, 等. 2009. 西藏冈底斯成矿带东段主要矿床类型、成矿规律和找矿评价[J]. 矿物学报, S1: 476~478.
- 唐菊兴, 丁帅, 孟展, 等. 2016. 西藏林子宗群火山岩中首次发现低硫化型浅成低温热液型矿床[J]. 地球学报, 37(4): 461~470.
- 赵一鸣, 李大新, 毕承思. 2001. 我国含银夕卡岩矿床的分布和地质特征[J]. 矿床地质, 20(2): 153~162.
- 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, 164~171.
- 赵一鸣, 林文蔚, 毕承思. 2012. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1~115.
- 赵一鸣, 张铁男, 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.
- 赵劲松, Newberry R J. 1996. 对柿竹园矽卡岩成因及其成矿作用的新认识[J]. 矿物学报, 4: 442~449.
- 张宏飞, 徐旺春, 郭建秋, 等. 2007. 冈底斯印支期造山事件: 花岗岩类锆石 U-Pb 年代学和岩石成因证据[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 32(2): 155~166.
- 张志欣, 杨福全, 罗五仓, 等. 2011. 新疆阿尔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, 30(2): 267~280.
- 赵苗, 潘小菲, 李岩, 等. 2015. 江西朱溪铜钼多金属矿床矽卡岩矿物学特征及其地质意义[J]. 地质通报, 34(2~3): 548~568.
- 周振华, 刘宏伟, 常帼雄, 等. 2011. 内蒙古黄岗锡铁矿床矽卡岩矿物学特征及其成矿意义[J]. 岩石矿物学杂志, 30(1): 97~112.
- 朱弟成, 潘桂棠, 王立全, 等. 2008. 西藏冈底斯带侏罗纪岩浆作用的时空分布及构造环境[J]. 地质通报, 27(4): 458~468.